第二十七届中国科协年会系列学术活动

变化环境下流域极端洪旱致灾机理与风险调控

论文集

中国水利学会

2025 年 7 月

目　录

《水科学进展》期刊

城市暴雨洪涝灾害链演变特征及减灾途径……卢兴超　徐宗学　施奇妙　唐清竹（1）

城市入河雨水管道水动力特性试验研究……郑子萱　郑飞飞　唐洪武　张汇明　汪怡然　袁赛瑜（13）

城市小流域暴雨洪水响应本构关系……魏翼飞　崔彦萍　周　昂　王　强　杨　龙（24）

管网排水能力对雨水口堵塞和管道淤积的响应规律模拟……侯精明　王梓驿　李东来　卜良河　陈光照　杨宇英　方　媛（35）

基于贝叶斯推断的长江口复合洪水潜在风险……殷成团　孙忠滨　熊梦婕　王金华　章卫胜　刘　悦　张金善（45）

降水空间信息的处理策略对径流预测的影响……高玉芳　何　川　彭　涛　高　勇（56）

耦合不确定性的城市排水系统实时控制研究进展…罗鑫燃　郑雅莲　刘　攀　王殿常　王万琼　彭寿海（68）

2013 年以来海河流域降水增多成因剖析……王庆明　张　越　邓皓东　谭伟丽　陈　康　赵　勇（81）

城市排水系统分布式控制研究进展与展望……罗鑫燃　彭寿海　王殿常　尹　炜　谢家强　陈奕林（92）

基于时空聚类的上海内涝积水时空分布规律……周正正　徐嘉言　刘曙光　万　晖　孙　丽　刘　炎（105）

基于淹水面积构建的鄱阳湖水文干旱定量表征及变化特征……叶许春　岳恩馨　李相虎　李传哲（118）

三峡水库 8 月份运行水位动态控制研究……陈桂亚（130）

未来气候变化下帕隆藏布江流域不同重现期洪水量级的预估……李辰龙　李大洋　王　强　付晓花　杨　龙　田富强（142）

《水资源保护》期刊

基于 C-Vine Copula 的城市洪涝多致灾因子遭遇风险分析……薛联青　潘　桐　刘远洪（155）

洪水预报的比例系数系统响应误差修正方法……瞿思敏　陆威村　蒋思军　陈　辉　石　朋　虞　鸿　张　锏（166）

基于多智能体系统的城市极端暴雨内涝风险动态评估……李孟泽　褚俊英　周祖昊　唐　明　原康琦　许文斌　唐佐槐（173）

水动力学模型中雨水口布设数量对城市排涝能力的影响研究……夏军强　冯基恒　徐　政　王小杰　董柏良（184）

基于复杂网络的洪涝灾害链风险评估……高玉琴　徐　诺　汪　键　王丽君　刘　彤（193）

基于多重精度降雨数据的北京市极端降雨事件研究……张　伟　王　璇　孙慧超　李俊奇（201）

城市下穿通道积涝特征及其成因分析……许岚杰　侯精明　王　添　潘鑫鑫　栾广学　王晨晓　贾　严（211）

中国年洪峰季节性的区域特征……丁晨洋　杨汉波　杨文聪　侯爱中（220）

DOI：10.14042/j.cnki.32.1309.2025.01.009

城市暴雨洪涝灾害链演变特征及减灾途径

卢兴超[1,2]，徐宗学[1,2]，施奇妙[1,2]，唐清竹[3]

（1. 北京师范大学水科学研究院，北京 100875；2. 城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室，北京 100875；
3. 水利部水资源管理中心，北京 100038）

摘要：中国城市暴雨洪涝灾害已呈现南北多线并发、洪涝与台风叠加的特征，灾害传递过程的复杂性和不确定性使得致灾结果具有严重性，灾害链是灾害传递过程中物质与能量的载体。按照“灾害链链生解析—灾害链演变特征—断链减灾途径”路线，开展城市暴雨洪涝灾害链传递、链式演变特征及减灾途径研究。城市暴雨洪涝灾害链的链生模式受外部破坏表现行为、系统结构形式和所处环境的共同作用，按灾害特征可分为串发式、并发式和复合式；灾害链传递过程呈现同源性与共发性、累积性与放大性、多变性与复杂性的演变特征；灾害链断链途径涵盖致灾因子、孕灾环境、承灾体以及应急管理措施。以郑州“7·20”暴雨灾害事件及其“地铁 5 号线亡人事件”为例，解析了实际降雨情景下灾害链的链生过程和断链减灾提升策略，采用灾前防控、灾中处置、灾后应急等策略对灾害链的断链减灾具有重要意义。

关键词：城市暴雨洪涝；灾害链；链生机制；演变特征；减灾途径
中图分类号：TV122　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1001-6791(2025)01-0097-12

在全球变暖、城市化建设背景下，极端天气频发已成为近些年来全球洪涝灾害的热点问题[1-2]，而极端气候事件增多使中国成为暴雨洪涝灾害最为频繁且多发的地区之一。从全球和区域层面，极端气候事件带来的经济损失大幅增加[3-4]，城市暴雨洪涝灾害占全球各种自然灾害损失的比重约为 40%，而中国气候灾害导致的损失位居全球第二位[5]，城市暴雨洪涝灾害已成为中国极端天气气候事件中最主要的损失之一。中国气象局发布《中国气候变化蓝皮书(2023)》指出：中国极端高温事件频发趋强，极端强降水量事件增多，气候风险指数呈升高趋势，这预示着未来暴雨洪涝灾害风险可能性和不确定性在增大。城市暴雨洪涝灾害具有链式传播特征，形成过程呈现诱发、引爆、扩散、放大的特点[6]。城市暴雨洪涝灾害链是物质和能量传递的重要载体，致灾因子在孕灾环境中对承灾体的作用过程决定了灾害链的破坏效应[7]。

灾害链是灾害之间通过因果关系使得灾害系统的复杂性大大加深、呈现多米诺式效应的现象[8-9]。研究表明，低风险洪水平原上存在明显的人口聚居模式，其暴露风险在危险区域内呈现均匀分布[10]。暴雨洪涝灾害强度影响着人口、房屋、资源以及基础服务设施的分布与配置，灾害链将承灾体经人工化系统进行关联，导致灾害发展过程具有复杂性、不确定性以及后果的严重性[11-12]。通常以洪水—房屋被淹没或倒塌—道路受损—交通拥堵或瘫痪作为城市暴雨洪涝灾害风险最高的灾害链，其中交通拥堵和瘫痪成为重要节点[13]。沿海城市的房屋受到以台风-暴雨-风暴潮-洪水为主的灾害链的重大威胁，这与城市布局、社会经济水平以及地理位置密切相关[14]。以粤港澳大湾区为代表的城市群在遭遇暴雨灾害事件时可引发多种灾害链，如山洪、河洪、泥石流、城市内涝等，其中城市内涝灾害链发生的概率最高[15]。

收稿日期：2024-08-19；**网络出版日期：**2024-12-17
网络出版地址：https://link.cnki.net/urlid/32.1309.P.20241216.1626.002
基金项目：国家自然科学基金项目(52239003)
作者简介：卢兴超(1989—)，男，安徽六安人，博士研究生，主要从事城市暴雨洪涝灾害防治研究。
E-mail：xclu@mail.bnu.edu.cn
通信作者：徐宗学，E-mail：zxxu@bnu.edu.cn

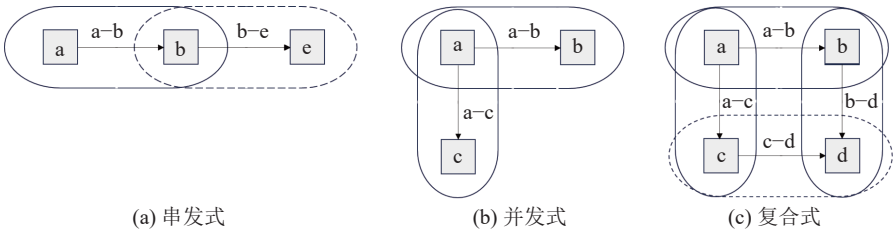
当前围绕城市暴雨洪涝灾害链的演化推理、风险评估、预测预警等方面开展了相关研究工作。在灾害链演化推理方面，基于知识图谱理论推演城市洪涝灾害链传递过程；利用复杂网络理论构建城市暴雨洪涝灾害演化网络模型，演化灾害传递过程中的关键危机事件和演化链[16]。在灾害链风险评估方面，基于数学模型法推演洪涝致灾传递过程，评估灾害风险等级[17]；通过构建城市雨洪灾害链的网络拓扑结构，建立雨洪灾害风险评价模型，计算灾害网络的节点重要度、边的脆弱度和灾害链的风险度，给出断链关键节点[18]。在灾害链预测预警方面，基于贝叶斯网络推演暴雨—地质、暴雨—洪涝等灾害链场景，实现对暴雨引发的次生灾害和基础设施损毁等级的预测；通过构建暴雨灾害链监测预警系统，实现对暴雨—山洪灾害链的精准化、智能化监测预警与防范[19]。

虽然相关学者在城市内涝灾害链、暴雨型山洪灾害链、暴雨型地质灾害链等方面取得了较为丰富的研究成果，但针对城市暴雨洪涝灾害链的内部结构、传递机理，还缺乏较为深入的系统研究，同时对灾害链演变规律和特征缺少总结与归纳。本文通过解析城市暴雨洪涝灾害链形成过程，给出了城市暴雨洪涝灾害链的结构特征和内部机制，提出了灾害链的发展演变特征，并分别从孕灾环境、致灾因子、承灾体、应急保障措施等方面分析断链减灾途径，以期为城市暴雨洪涝灾害防灾减灾工作提供技术支撑。

1 城市暴雨洪涝灾害链传递机制

1.1 城市暴雨洪涝灾害链构成

城市暴雨洪涝灾害是由致灾因子、孕灾环境、承灾体相互作用并形成具有复杂特征的地表表层灾变系统。灾害链至少由 2 种灾害环组成，前者为原始环，后者为次生环，2 种灾害环之间的链接点既是承灾体也是致灾体。城市洪涝灾害系统的复杂性决定灾害链形式具有多样性[20]，按特征可分为串发式、并发式、复合式，见图 1。串发式灾害链是指由单一致灾因子引起的一连串灾害事件，该事件中每个灾害环之间是依次相互紧扣的，由初始的原生灾害、次生灾害、再到形成的衍生灾害，形成一个串联式传递过程；并发式灾害链是指由单一致灾因子引起多个灾害环的并联式灾害事件；复合式灾害链是指灾害演变过程既有串发式灾害链，又有并发式灾害链。灾害链的长短与致灾因子的危险性、孕灾环境的敏感性、承灾体的脆弱性密切关联。由于城市设施类型繁多、下垫面地形复杂，暴雨灾害引起的次生灾害具有不确定性，使得衍生灾害的演变过程具有复杂性。因此，城市暴雨洪涝灾害链是灾害环能量的传递过程，灾害链的数量和长度决定了灾害损失的大小。



(a) 串发式 (b) 并发式 (c) 复合式

a–b 等为灾害环；a 为致灾因子；b、c 为承灾体，又称为次级致灾因子；d、e 为次级承灾体

图 1 灾害链类型

Fig. 1 Disaster chain types

城市暴雨洪涝灾害链可表示为由多个相互关联的灾害链要素所组成的系统[21]，见式(1)。

$$\boldsymbol{S}(n)=\{\boldsymbol{S}_F(n),\ R,\ E\} \tag{1}$$

式中：$\boldsymbol{S}(n)$为暴雨洪涝灾害链系统，由 n 个相互关联的灾害要素组成，$n\geqslant 2$；$\boldsymbol{S}_F(n)$为灾害链要素，指灾害

链中各类灾害事件；R 为各灾害事件之间的关联关系；E 为灾害链所处的环境。

城市暴雨洪涝灾害链系统的内部状态（$\boldsymbol{S}_{\text{in}}$）表示为式（2），外部表现行为（$H_Z$）见式（3）。

$$\boldsymbol{S}_{\text{in}}=\{S_1,\ldots,S_i,\ldots,S_n\}^{\text{T}},\ S_i\in\boldsymbol{A}_i=\{A_1^i,A_2^i,\cdots,A_i^i\} \tag{2}$$

$$H_Z=F_h(R,\ \boldsymbol{S}_{\text{in}}) \tag{3}$$

式中：S_i、$\boldsymbol{A}_i$分别为灾害链$\boldsymbol{S}(n)$中灾害要素的状态和状态空间；H_Z为灾害链外部表现行为，且是$\boldsymbol{S}_{\text{in}}$和$R$的函数。

1.2　城市暴雨洪涝灾害链链生机制

城市暴雨洪涝灾害链是由极端性暴雨因子引发的灾害动力学过程。原生灾害的主要驱动要素是自然灾害因子，次生灾害和衍生灾害的形成与人为因素息息相关，形成由自然因子和人为因素共同驱动的灾情分散与转移的复杂灾害系统[22]。不同孕灾环境下暴雨致灾具有显著差异性特征，如丘陵或山地型城市易因暴雨冲刷土壤影响，引发山体或坡体滑坡形成泥石流；平原型城市易受城市排水系统和基础设施能力不足的影响，形成城市内涝；沿江型城市易受河道涨水溃堤因素影响，造成外洪进城形成城市洪涝。灾害链形成机制是灾害机理与过程共同耦合、相互作用的一种复杂的系统动力学响应过程[23]。致灾因子引发的灾害动力学过程是灾害形成过程的一部分，致灾因子时空变化的动态演化以机理和过程展现，见图 2。

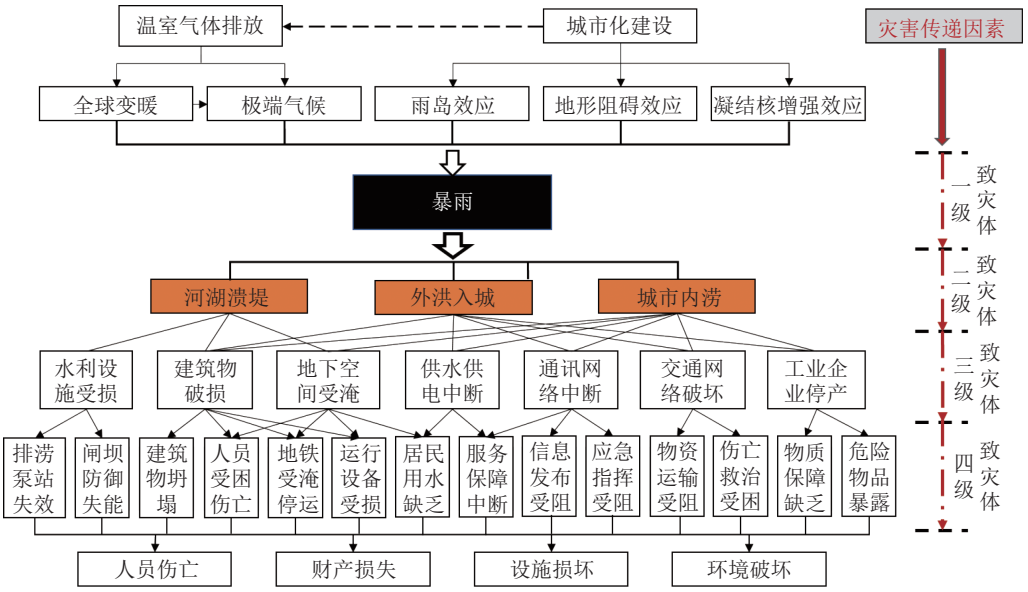


图 2　城市暴雨洪涝灾害链链生机制示意

Fig. 2　Urban flooding disaster chain generation mechanism diagram

2　城市暴雨洪涝灾害链演变特征

2.1　灾害链演变过程同源性与共发性

城市暴雨洪涝灾害链的致灾因子是暴雨事件，形成的灾害事件有城市山洪、城市内涝以及城市河湖溃堤，这些事件从成因来看属于同源，即基于同一种原因在同一地区引发的不同类型灾害事件。城市洪水、内涝、溃堤属于同源性灾害事件，通过相互作用、相互影响形成复杂的洪涝灾害系统。城市洪涝引发建筑房屋倒塌、地下空间倒灌、路桥断裂垮塌等次生灾害，每个次生灾害事件作为独自致灾因子，同时也可引发其他灾害的产生，如暴雨—地下空间倒灌—设备受淹和人员伤亡、暴雨—公共交通中断—交通瘫痪、暴

雨—生产企业进水—停工停产。串联式灾害链决定着灾害环之间前后紧密相扣，而并发式灾害链会同时引发多种灾害事件，决定了灾害链的同源性。

城市暴雨洪涝灾害链的共发性与同源性是相辅相成的，共发性是同一个灾害事件同时引起多种灾害事件。由于城市下垫面环境复杂、洪涝致灾因子类型多样，加上灾害的空间异质性特性[24]，导致城市暴雨洪涝灾害多属于并发式灾害事件。2012年7月21日10时至22日6时，北京市遭遇了罕见的暴雨灾害，全市平均降水量为170 mm，城区降水量为215 mm，最大降水量为460 mm，造成北京市主要积水道路63处，严重区域发生在下凹桥区和低洼路段；12个地铁口因雨水倒灌而临时封闭；1条110 kV变电站水淹停运，25条10 kV架空线路发生永久性故障；京原铁路线路临时停运8条。由于本次降雨总量大、短时强度高，所造成的各类灾害事件呈现共发性。

2.2　灾害链演变过程累积性与放大性

城市暴雨洪涝灾害链传递过程中前一个灾害环的承灾体成为下一个灾害环的致灾因子，从而形成致灾因子链，并向不同的孕灾环境扩展，而在同一环境中承灾体的数量也在不断增加，由此形成的灾害链呈现累积效应。例如，2020年5月22日，广州市遭遇百年一遇特大暴雨灾害事件[25]，42个雨量站点小时雨强超80 mm，最大小时降水量达到167.8 mm，3 h最大降水量为288.5 mm，本次降雨事件造成全市443处内涝积水点，形成多种灾害环的累加，如特大暴雨—增城广汽本田基地进水—设备材料受淹—生产生活停止—财产经济损失、特大暴雨—增城官湖地铁站和新沙地铁站进水—设备设施受损—供电中断—地铁13号线停运、特大暴雨—黄埔区鸣泉山庄泥石流—道路冲断(房屋冲塌)—2人员遇难。因此，灾害链传递过程造成的损失具有累积效应。

城市洪水和内涝具有同源异质性，在城市高密度建设环境中易产生“放大效应”，主要表现在多类型承灾体在雨、洪、涝、潮的作用下，将灾害破坏性进行叠加和放大[26]。例如，2023年9月7日，深圳市受台风“海葵”残余环流、弱冷空气和季风三者叠加影响，遭遇“百年一遇”特大暴雨灾害，24 h最大累计降雨量超过500 mm[27]，城区淹没面积占比达到19%，平均淹没时间超过12 h。强降雨的作用下上游洪水下泄、内河水位暴涨、地下管网溢流、滨海潮水顶托等多种威胁加持，形成以特大暴雨—洪、涝、潮、雨叠加放大—285个建筑小区受淹—101座二次供水泵房淹没为代表的灾害链，不仅对市政基础服务设施造成了破坏，也造成了居民因涝用水困难问题的出现。

2.3　灾害链演变过程多变性与复杂性

灾害系统是一个多层次、结构复杂、多要素影响的动态开放系统，使得系统演变过程呈现多变性和复杂性特征。灾害链的演变与孕灾环境中各要素的特性和自然社会活动相关，其灾害响应行为也会受环境状态和输入条件的影响。例如，2023年7月29日至8月2日，受台风“杜苏芮”残余环流与副热带高压、台风“卡努”水汽输送、地形综合作用等影响，北京市及周边遭遇特大暴雨灾害，83 h内降水量达到了全年平均降雨量的60%，门头沟区和房山区属于重灾区，虽然提前预警预报，但事件变化之大不仅引发特大山洪爆发、河道溃堤和水库溢坝造成的人员伤亡、设备财产损失，而且致使几十座供排水设施受淹受损严重。此次暴雨洪涝灾害的致灾因子具有多样性，灾害之间相互叠加，致使承灾体受灾过程具有多变性，受灾点位和路径也难以预判。

灾害链在不同阶段展现出的致灾机制与特征均有所不同，其受气候、地形、下垫面条件、空间布局等自然因素和人为因素的共同影响。城市暴雨洪涝灾害与城市区位、降水周期、地形地势等复杂环境要素具有相适应性。例如，2023年7月3—4日，重庆市万州区受强降雨影响发生了特大暴雨洪涝灾害，万州区91个雨量站中降水量超过150 mm的有15个，最大降水量为261.2 mm，灾害造成17人死亡、3.72万人受灾、

900 多处山体滑坡[28]。此次强降雨主要由西南涡旋与西南暖湿空气相互作用所致，此外重庆属于山地型城市，地形复杂、高程不均且坡度变化大，在发生强降雨后极易产生道路行洪、山体泥石流，洪涝传递过程动能与势能相互转化，大大增加了灾害事件的不确定性，让灾害链传递呈现出复杂性特征。

3　城市暴雨洪涝灾害链断链机制和减灾途径

3.1　减弱城市暴雨洪涝灾害致灾因子强度

城市暴雨洪涝灾害具有自然和社会双重属性，一方面，温室气体引起全球变暖和气候变化，直接导致全球和区域降水时空演变和分布改变；另一方面，城市化为暴雨致灾创造了有力条件。通过改善气候环境、降低城市化影响，减少城市暴雨洪涝灾害发生机率，实现灾害链的断链目标，如图 3 所示。在降低温室气体排放方面，中国已明确提出了 2030 年“碳达峰”与 2060 年“碳中和”的目标，采用绿色、环保、节能、低碳的生产方式，抵消自身产生的二氧化碳或温室气体排放量，实现正负抵消，具体通过降低化石能源燃料使用、提高清洁能源占比率、减少建筑及工业能耗量、增大城市绿植面积等措施，达到减少温室气体排放目标。在降低城市化影响方面，通过建设低碳城市、生态城市、海绵城市方式，留白增绿、减少城市硬化比例，恢复城市自然排水通道，提高下垫面渗透能力，降低城市雨岛效应、地形阻障效应以及凝结核增强效应，恢复城市的自然生态功能，提高城市的韧性水平。

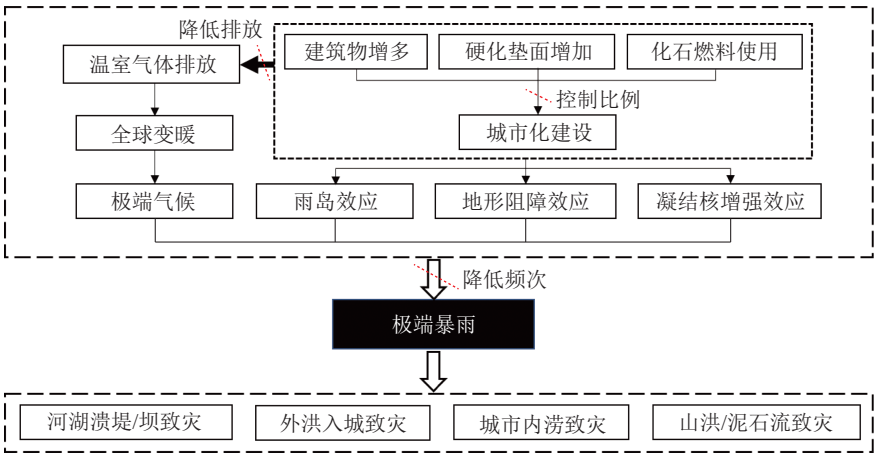


图 3　致灾因子断链机制示意

Fig. 3　Schematic diagram of chain rupture mechanism of disaster factors

3.2　改善城市暴雨洪涝灾害孕灾环境条件

改善城市环境，降低孕灾环境敏感性、提高孕灾环境韧性，是阻断灾害链的重要途径。根据城市水文效应特征，从渗、滞、蓄、排等方面，改善城市水循环通道和水生态分布，通过科学布设竖向高程、增大下垫面渗透面积、增加“蓝绿”空间、增强灾害应对能力等途径，实现孕灾环境的断链减灾，如图 4 所示。①合理规划城市整体竖向高程，避免建筑、工厂、商业及人员聚集区处于城市低洼区域，科学划定雨水径流排放路线，建设足够能力的雨水排水系统和行泄通道；②改造城市道路、广场、公园、绿地中渗、滞能力差的下垫面，增强其下渗、蓄水和保水能力，延长雨水汇流时间，降低雨水径流峰值，恢复到城市化建设前的状态；③增大城市“蓝绿”空间，恢复原有的池塘和湖泊空间，提高城市整体调蓄能力；④做好城市防洪排涝和排水防涝能力建设，重点增强城市低洼路段、下凹桥区、地下空间等易涝场所的灾害防控能力。通过提高城市韧性，改善城市环境，破坏孕灾场景，实现从孕灾环境阻断城市暴雨洪涝灾害链的目标。

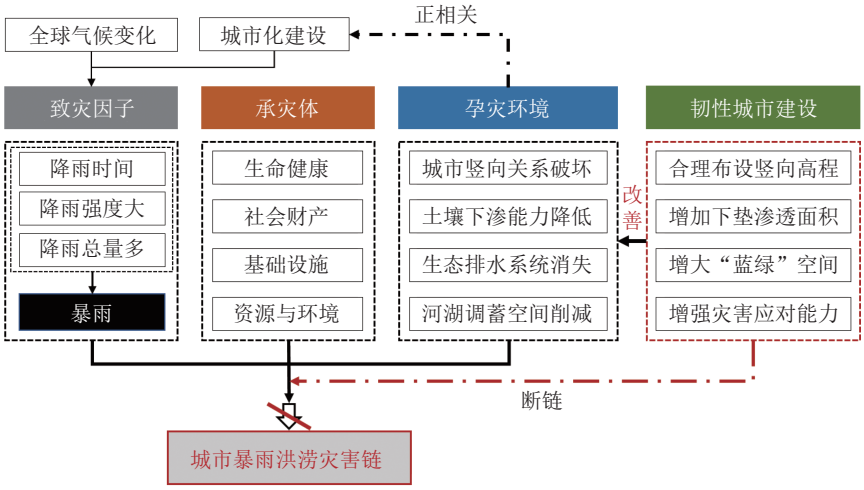


图 4 孕灾环境断链机制示意

Fig. 4 Schematic diagram of chain rupture mechanism in disaster-pregnant environment

3.3 增强城市暴雨洪涝灾害承灾体抗灾能力

减少承灾体暴露度、降低承灾体脆弱性是承灾体规避风险、灾害链断链减灾的重要措施。采用主动避险、被动应对方式，其中主动避险通过提升承灾体的避险意识、开展避险策略学习以及避险方法演练等途径，被动应对主要采用防淹没、防冲击、灾害转移、能量消纳等措施，如图 5 所示。人、车辆、其他机械化设施，在城市暴雨洪涝灾害侵袭前主动降低暴露度，对于“人”可以通过学习避险救援知识，在受灾过程中主动撤退、撤离、规避，尽快移动至安全区域；车辆移动过程中主动规避涉水风险较高和高的区域，且提高车辆自身的防水防淹性能；无法移动的机械设施加装防淹、防冲击的保护措施。对于被动型承灾体在规划设计前科学预判可能面临的灾害风险及等级，建造时按照高标准、严要求执行，增强其防御能力、降低受灾损失，如建筑物防冲刷能力、地下空间防淹能力、桥梁防冲击能力、城市基础服务场所防淹能力以及

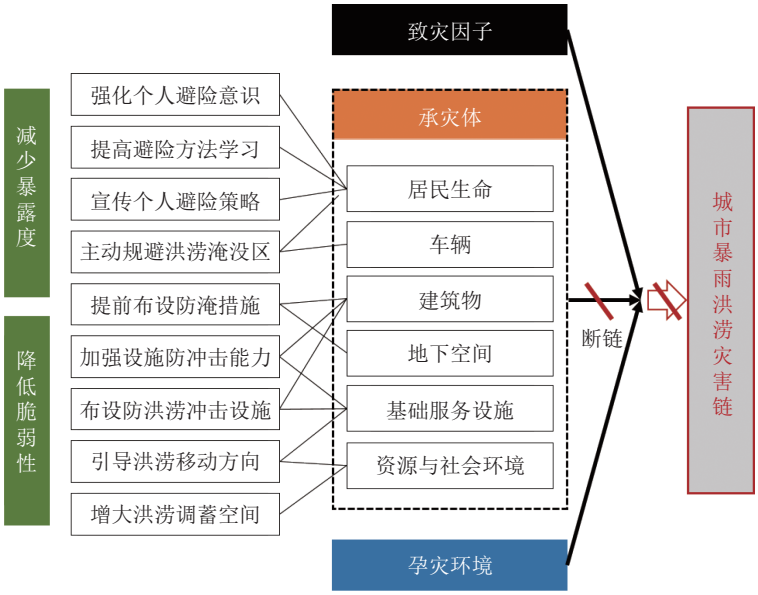


图 5 承灾体断链机制示意

Fig. 5 Schematic diagram of chain rupture mechanism of disaster bearing bodies

自然资源和环境防破坏能力，同时在灾害发生前采取预警、拦截、阻隔、防御等措施，阻止灾害对其产生的损害，以减小承灾体的受灾损失，阻断灾害链的进一步传播，实现城市暴雨洪涝灾害链的断链目标。

3.4　提高城市暴雨洪涝灾害预警预报与应急抢险能力

预报预警是提高城市暴雨洪涝灾害防御能力、降低洪涝灾害损失的重要措施之一，如图 6 所示。灾害预报预警分为暴雨预报和灾害预警，前者通过采集气象信息、气象演变计算、图谱推导分析等方式，预报暴雨中心位置、覆盖范围、雨量大小、持续时间；后者在数据驱动作用下，利用深度学习和机器学习手段，对城市洪涝灾害演进过程进行快速化、动态化评估，为灾害发展速度和方向提供精准预警，使承灾体应对暴雨洪涝灾害时由被动处置向主动防控方向转变，有效降低洪涝灾害损失。应急抢险是及时、有序、高效地开展城市洪涝灾害应急救援工作。从灾害发生的起始阶段进行抢险救灾，降低灾害能量传递给次生灾害，避免造成更大的灾害损失；当次生灾害产生时，应及时阻断衍生灾害的形成，避免灾害链的进一步传播。例如，当地下空间洪涝倒灌时，及时投放应急抢险排涝泵，正确判断灾害变化趋势，依靠机械救援措施，积极疏导人群向安全区域转移，避免人员伤亡。

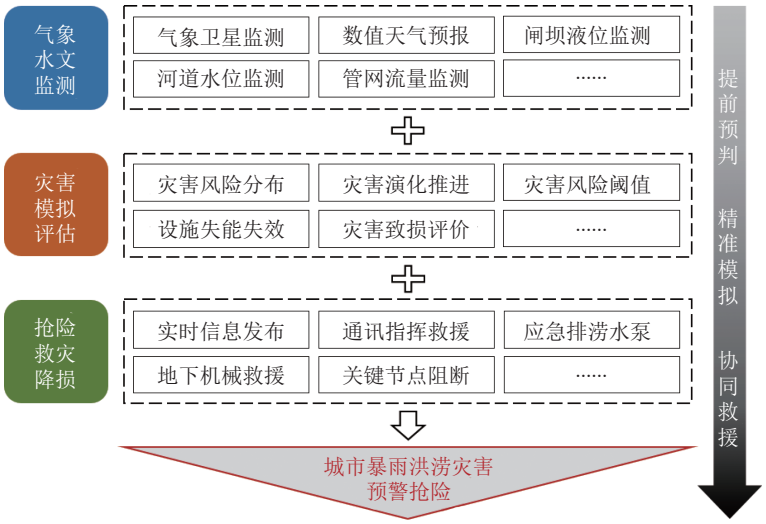


图 6　应急抢险断链机制示意

Fig. 6　Schematic diagram of chain rupture mechanism in emergency rescue

4　郑州市“7·20”特大暴雨洪涝灾害案例分析

4.1　事件总体介绍

2021 年 7 月 17—23 日，在太平洋副热带高压异常偏北、夏季风偏强的影响下，台风“烟花”、“查帕卡”共同作用将水汽西输，途中与河南上空对流系统叠加，遇伏牛山、太行山地形阻断，形成了一次极为罕见的特大暴雨事件。《河南郑州“7·20”特大暴雨灾害调查报告》指出，本次暴雨灾害事件呈现降雨持续时间长、范围广、总量大、且短历时降雨极强的特点[29]。从 7 月 17 日 8 时至 23 日 8 时，郑州市累计降水量 600 mm 以上覆盖面积达到 2 068 km^2，最大日降水量为 624.1 mm，最大小时降水量为 201.9 mm。

郑州市位于秦岭东段余脉向黄淮平原过渡的交接地带，地形西南高、东北低，且为中原地区高密度建设的核心区域，在城市外洪和内涝并发下，郑州“7·20”暴雨事件造成全市 380 人死亡失踪，其中 129 人发生在城市区域，占总人数的 34%。本次暴雨洪涝灾害事件中城区死亡和失踪人口总数，是继 2012 年北京“7·21”暴

雨灾害事件之后单个城市区域在遭遇暴雨洪涝灾害时人员伤亡和失踪人数最高的事件，在全国范围内造成的社会影响力也最大，其中郑州地铁 5 号线亡人事件、京广快速路北隧道亡人事件、超半数小区地下空间和重要公共设施受淹情况等洪涝灾害严重事件，均体现出较为清晰的灾害链传递过程，故选择郑州市“7·20”特大暴雨洪涝灾害事件作为研究案例。

4.2 灾害链演变机制

(1)灾害传递演变过程。由异常偏北的副热带高压、夏季特有气候、双台风共同作用、先天地势条件等 4 个要素共同引发本次特大暴雨事件，造成城市内涝、山洪暴发、河道溃堤、水库漫坝、泥石滑坡等多种灾害事件产生，由暴雨事件直接引发洪涝事件的过程属于Ⅰ级灾害链。郑州市市区内的城市内涝和河道溃堤形成的洪涝叠加，引发建筑物、地下空间、地铁站(5 号线)、下穿隧道(京广快速路北隧道)、城市道路、城市公共服务设施等倒塌和受淹；市区外的水库漫坝、山洪、滑坡、泥石流等，引发的工厂被淹、村落冲毁、路桥垮塌、水利设施破坏、农田和资源毁坏等，由洪涝事件直接引发的多种灾害事件过程属于Ⅱ级灾害链。由多种灾害事件引起断水、断网、断电、交通停运等基本服务中断，造成经济损失，该过程属于Ⅲ级灾害链，如图 7 所示。由于灾害事件的形成涉及多种致灾因子共同作用，在灾害链传递过程中有多条灾害链共同作用于同一种承灾体，如城市断网影响救援信息传达，延误最佳救援时机，造成人员伤亡，此过程涉及Ⅳ级和Ⅴ级灾害链，因此，郑州“7·20”暴雨洪涝灾害链具有放大性、复杂性和多变性特征。

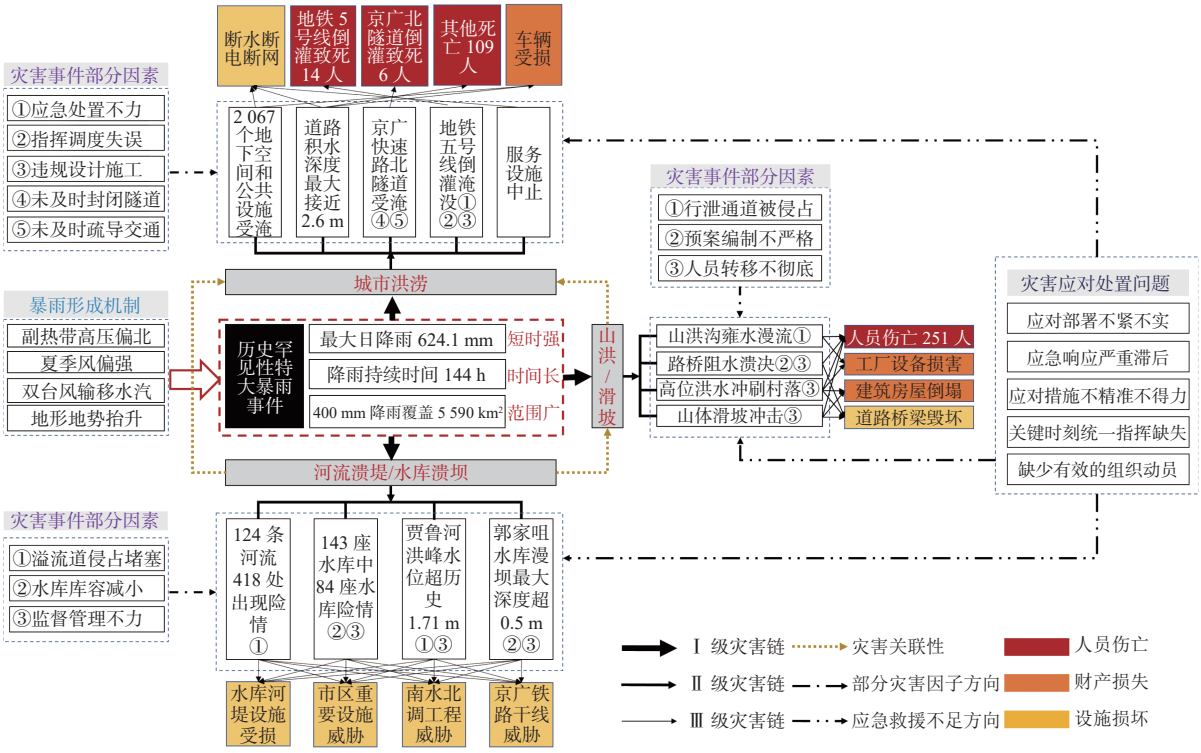


图 7 郑州“7·20”特大暴雨灾害链传递分析

Fig. 7 Analysis of disaster chain transmission of “7·20” heavy rainstorm in Zhengzhou City

(2)典型灾害事件链生机制。选择“郑州地铁 5 号线亡人事件”过程作为重点分析[29-31]，如图 8 所示。2021 年 19—20 日暴雨中心由豫北南移至郑州，20 日午后强降雨从西部山丘区移动到中心城区，暴雨造成五龙口停车场因排水不畅产生内涝积水，形成Ⅰ级灾害链；15:09 五龙口停车场四周多处临时围挡倒塌，与此同时地铁 5 号线多处进水，17:00 五龙口停车场中大量涝水倒灌，地铁 5 号线路淹没，形成Ⅱ级灾害链；涝

水造成地铁 5 号线运行保障设备故障，在 18:01 时刻 04502 次列车迫停，形成Ⅲ级灾害链；在 18:09 时刻调度指令乘客疏散—涝水大量涌进车厢—18:37 乘客疏散中断—涝水减少乘客开始互救，此过程造成人员伤亡，形成Ⅳ级灾害链。整个事件过程中有多个致灾因子和承灾体，形成的相邻灾害事件间环环相扣，衍生出从环境破坏、到设备设施故障、再到人员伤亡的灾害链过程。

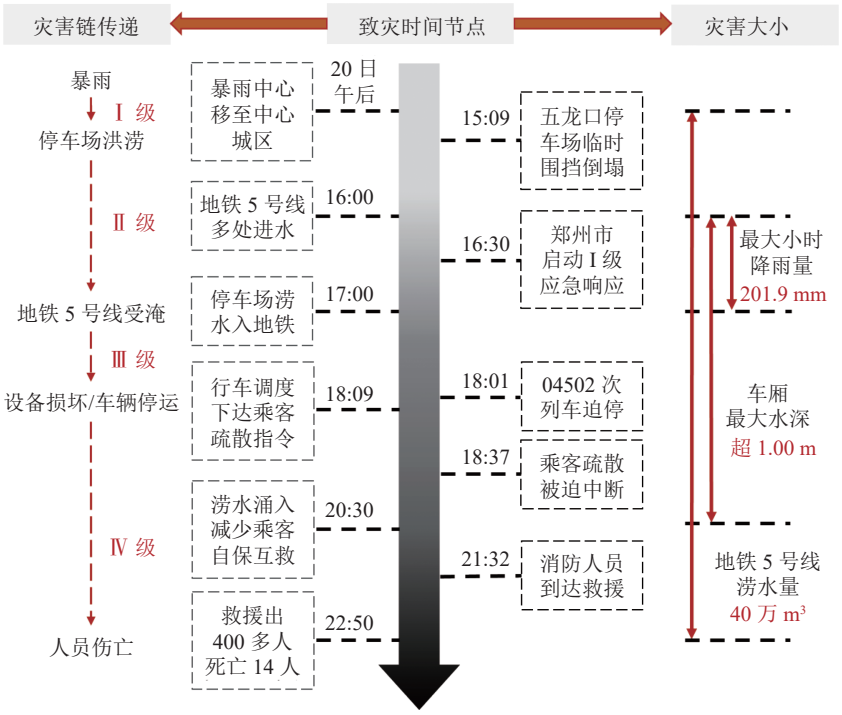


图 8　郑州地铁 5 号线灾害链传递机制示意

Fig. 8　Schematic diagram of flooding disaster chain transmission mechanism of Zhengzhou City Metro Line 5

4.3　灾害链断链机制分析

基于灾害链的传播过程分析可知，断链点分为致灾因子、孕灾环境、承灾体、抢险措施。郑州“7·20”特大暴雨灾害调查组认为，本次事件总体是“天灾”、具体有“人祸”。由于暴雨事件本身属于原生灾害，事件具有“天灾”的不可规避性，但是引发的次生灾害、衍生灾害具有“人祸”因素。从本次灾害的主要亡人事件来看，除了暴雨直接引发洪涝的淹没、倒灌、冲击外，人为致灾因子输入、场地不利环境、承灾体避险意识薄弱、抢险措施不及时等都会加重灾害链传播，加大致灾损失。在调查报告中列举的 5 个典型灾害链事件的原因中，5 个事件均涉及到应急救援不足、3 个涉及不利孕灾环境、2 个涉及人为致灾因子、1 个涉及承灾体避险意识缺乏。

地铁 5 号线因五龙口停车场违规设计与建设，蓄存的涝水冲倒围墙进入地铁线内成为致灾因子，导致 04502 次列车及地铁内设备停电停运，该致灾因子具有人为因素，完全可以通过提前排查阻断灾害链产生；同时，地铁停运后，地铁方面应急处置不力、行车调度失误，延误最佳救援时间，最后造成 14 人死亡。虽然地铁 5 号线灾害链传播单一，但有 2 次断链机会均未及时把握住。京广快速路北隧道处于低洼路段，洪涝倒灌急促，但在南隧道封闭时北隧道没有及时封闭，造成不利场地环境更加恶化，当北隧道西洞出口处发生拥堵时未及时疏导交通，造成车辆在隧道中停滞错过逃生机会，共计造成 6 人死亡，其中 1 人横穿京广快速路滑入坡段逆亡，该灾害链中孕灾环境加剧、应急抢险疏导不及时、承灾体避险意识缺乏等 3 个因素也属于 3 次断链机会，但均未把握住。

4.4 城市洪涝灾害防治及断链措施

郑州“7·20”暴雨灾害事件之后，郑州市积极开展了“郑州市排水(雨水)防涝综合规划项目及相关专题”、“郑州市城市防洪规划”等相关研究工作。2022 年 1 月 29 日，国务院批复了《河南郑州等地特大暴雨洪涝灾害灾后恢复重建总体规划》(简称《总体规划》)，该《总体规划》分为 10 章 38 小节，内容涵盖灾后重建、居民住房和基础设施、城市内涝治理、应急管理以及政策措施等方面，其中在城市内涝治理方面，强调着力构建“源头减排、管网排放、蓄排并举、超标应急”的城市排水防涝工程体系，完善城市内涝应急预案及灾害预警、应急疏散机制，排水防涝能力全面超过灾前水平；做好排水防涝系统恢复提升、易涝区域整治、城市内外河湖行蓄洪联动、排水防涝智慧平台建设等方面的工作。在应急管理方面，坚持以防为主、防抗救相结合，健全全域化应急救援体系，全面加强应急救援能力建设；做好灾害预警建设、应急救援能力建设、应急组织体系建设以及全民应急素质提升。通过对《总体规划》的解读可知，该规划从提升孕灾环境韧性水平、增强承灾体抗灾能力以及完善应急抢险体系等方面，给出了具体的灾害防治策略与方法，也指明了灾害链传递过程中的断链减灾措施与途径，这对提高郑州市城市暴雨洪涝灾害防治能力具有重要的指导意义。

5 结 论

本文通过研究城市暴雨洪涝灾害链链生结构、演变特征以及断链机制，并以郑州“7·20”特大暴雨灾害事件为例，复盘灾害链形成机制和断链途径，对解析灾害系统复杂机理、揭示灾害演变规律、进一步深入了解城市暴雨洪涝灾害特征并采取针对性的防灾减灾措施具有积极的指导作用。主要结论如下：

(1)城市暴雨洪涝灾害呈现链式传播特征，可分为串发式、并发式及复合式，灾害链内通过灾害环紧密相扣，灾害环是能量与信息传递的载体，灾害链的长度和灾害环的数量决定了灾害致损的严重程度。灾害链链生结构是由灾害事件关联性、灾害链所处环境、灾害要素状态、状态空间要素、外部表现行为等共同决定的。灾害链的演变过程是灾害形成机理与过程共同耦合、相互作用形成的一种动力学响应过程，呈现同源性和共发性、累积性和放大性、多变性和复杂性特点。

(2)郑州“7·20”特大暴雨灾害是国内近年来城市区域洪涝灾害链类型最为丰富、灾害传递最为复杂、灾害致损最为严重的事件，其造成的人员伤亡事件既有“天灾”作用，也有“人祸”为之。未来开展城市暴雨洪涝灾害链断链减灾工作，应从致灾因子、承灾体、孕灾环境三要素出发，即抑制致灾因子、减缓灾害源头，改善孕灾环境、改变孕灾条件，增强承灾能力、强化避险意识，同时，也要提升灾害预报预警能力，丰富抢险救灾途径与方法，从而实现对灾害链断链的目的，达到减灾目标。

参考文献：

[1] YIN J B，GENTINE P，ZHOU S，et al. Large increase in global storm runoff extremes driven by climate and anthropogenic changes[J]. Nature Communications，2018，9：4389.

[2] BALAIAN S K，SANDERS B F，ABDOLHOSSEINI QOMI M J. How urban form impacts flooding[J]. Nature Communications，2024，15(1)：6911.

[3] KUNDZEWICZ Z W，KANAE S，SENEVIRATNE S I，et al. Flood risk and climate change：global and regional perspectives[J]. Hydrological Sciences Journal，2014，59(1)：1-28.

[4] PAPROTNY D，SEBASTIAN A，MORALES-NáPOLES O，et al. Trends in flood losses in Europe over the past 150 years[J]. Nature Communications，2018，9(1)：1985.

[5] WALLEMACQ P，UNISDR，CRED. Economic losses，poverty & disasters 1998—2017[R]. Geneva，Switzerland：UNISDR，2018.

[6] 王浩，杜伟，刘家宏，等. 基于知识图谱的城市洪涝灾害链推演及时空特性解析 [J]. 水科学进展，2024，35(2)：185-196. (WANG H，DU W，LIU J H，et al. Derivation and transmission analysis of urban flood disaster chain based on knowledge graph[J].

Advances in Water Science，2024，35(2)：185-196.(in Chinese))
[7] 马鹏辉，彭建兵.论黄土地质灾害链(一)[J].自然灾害学报，2022，31(2)：1-11.(MA P H，PENG J B. On loess geohazards chain (1)[J]. Journal of Natural Disasters，2022，31(2)：1-11.(in Chinese))
[8] HELBING D. Globally networked risks and how to respond[J]. Nature，2013，497(7447)：51-59.
[9] AGHAKOUCHAK A，HUNING L S，CHIANG F，et al. How do natural hazards cascade to cause disasters?[J]. Nature，2018，561(7724)：458-460.
[10] DEVITT L，NEAL J，COXON G，et al. Flood hazard potential reveals global floodplain settlement patterns[J]. Nature Communications，2023，14(1)：2801.
[11] HUANG L D，CHEN T，DENG Q，et al. Reasoning disaster chains with Bayesian network estimated under expert prior knowledge[J]. International Journal of Disaster Risk Science，2023，14(6)：1011-1028.
[12] CHEN Y L，ZHANG L D，CHEN X H. A framework for using event evolutionary graphs to rapidly assess the vulnerability of urban flood cascade compound disaster event networks[J]. Journal of Hydrology，2024，642：131783.
[13] GUO H X，HE X Y，LV X B，et al. Risk analysis of rainstorm-urban lifeline system disaster chain based on the PageRank-risk matrix and complex network[J]. Natural Hazards，2024，120(12)：10583-10606.
[14] WAN J H，WANG L S，YUE Y J，et al. Quickly assess the direct loss of houses caused by a typhoon-rainstorm-storm surge-flood chain：case of Haikou City[J]. Water，2022，14(19)：3037.
[15] WANG Y J，GAO G，ZHAI J Q，et al. Evolution characteristics of the rainstorm disaster chains in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area，China[J]. Natural Hazards，2023，119(3)：2011-2032.
[16] 朱伟，陈长坤，纪道溪，等.我国北方城市暴雨灾害演化过程及风险分析[J].灾害学，2011，26(3)：88-91.(ZHU W，CHEN C K，JI D X，et al. Analysis on the risk and evolution process of rainstorm disaster in cities of North China[J]. Journal of Catastrophology，2011，26(3)：88-91.(in Chinese))
[17] 靳文波，杨继星，刘韶菲，等.特大城市暴雨灾害断链推演与应对方法研究[J].中国工程科学，2023，25(1)：20-29.(JIN W B，YANG J X，LIU S F，et al. Chain breaking simulation and countermeasures of rainstorm disasters in megacities[J]. Strategic Study of CAE，2023，25(1)：20-29.(in Chinese))
[18] 李磊，马梦格，折亚亚，等.复杂网络下雨洪灾害链风险分析及断链减灾研究[J].中国安全科学学报，2023，33(12)：192-197.(LI L，MA M G，SHE Y Y，et al. Risk analysis of rainstorm flood disaster chain and research on disaster mitigation of broken chain under complex network[J]. China Safety Science Journal，2023，33(12)：192-197.(in Chinese))
[19] 唐文坚，范仲杰，董林垚，等.暴雨型山洪灾害链监测预警研究与展望[J].长江科学院院报，2023，40(7)：73-79.(TANG W J，FAN Z J，DONG L Y，et al. Research framework and prospect for monitoring and early warning of rainstorm-induced mountain torrent disaster chain[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute，2023，40(7)：73-79.(in Chinese))
[20] 史培军.四论灾害系统研究的理论与实践[J].自然灾害学报，2005，14(6)：1-7.(SHI P J. Theory and practice on disaster system research in a fourth time[J]. Journal of Natural Disasters，2005，14(6)：1-7.(in Chinese))
[21] 刘文方，肖盛燮，隋严春，等.自然灾害链及其断链减灾模式分析[J].岩石力学与工程学报，2006，25(S1)：2675-2681.(LIU W F，XIAO S X，SUI Y C，et al. Analysis of natural disaster chain and its broken chain disaster reduction model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2006，25(S1)：2675-2681.(in Chinese))
[22] 刘传正，王建新.自然灾害的基本型式及防控对策研究[J].岩石力学与工程学报，2023，42(2)：275-291.(LIU C Z，WANG J X. Basic patterns of natural disasters and some countermeasures for risk mitigation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2023，42(2)：275-291.(in Chinese))
[23] 朱海铭，林广发，张明锋，等.基于灾害风险普查知识库的台风灾害链知识图谱构建[J].灾害学，2024，39(1)：209-215.(ZHU H M，LIN G F，ZHANG M F，et al. Construction of typhoon disaster chain knowledge graph based on disaster risk survey knowledge[J]. Journal of Catastrophology，2024，39(1)：209-215.(in Chinese))
[24] 周姝天，翟国方，施益军，等.城市自然灾害风险评估研究综述[J].灾害学，2020，35(4)：180-186.(ZHOU S T，ZHAI G F，SHI Y J，et al. A literature review of urban natural disaster risk assessment[J]. Journal of Catastrophology，2020，35(4)：180-186.(in Chinese))
[25] 陈文龙，夏军.广州“5·22”城市洪涝成因及对策[J].中国水利，2020(13)：4-7.(CHEN W L，XIA J. Analysis of causes and countermeasures of extraordinary rainstorm in 22nd，May，Guangzhou[J]. China Water Resources，2020(13)：4-7.(in Chinese))
[26] 刘家宏，梅超，刘宏伟，等.特大城市外洪内涝灾害链联防联控关键科学技术问题[J].水科学进展，2023，34(2)：172-181.(LIU J H，MEI C，LIU H W，et al. Key scientific and technological issues of joint prevention and control of river flood and urban waterlogging disaster chain in megacities[J]. Advances in Water Science，2023，34(2)：172-181.(in Chinese))

[27] 吴辉明，陈文龙，杨芳，等. 深圳龙岗区 2023 年“9·7”极端特大暴雨洪涝灾害风险评估与对策 [J]. 中国防汛抗旱，2024，34(1)：36-40.(WU H M，CHEN W L，YANG F，et al. Risk assessment and countermeasures of flood and waterlogging caused by “9·7” extreme heavy rainstorm in Longgang District of Shenzhen City in 2023[J]. China Flood & Drought Management，2024，34(1)：36-40.(in Chinese))

[28] 仉文岗，王云浩，胡庆芳，等. 超大城市洪涝灾害成因综合解析——以重庆市为例 [J]. 土木与环境工程学报(中英文)，2025，47(1)：1-10.(ZHANG W G，WANG Y H，HU Q F，et al. Comprehensive analysis on causes of flood disaster in megacities：a case study of Chongqing[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering，2025，47(1)：1-10.(in Chinese))

[29] 臧文斌，柴福鑫，刘昌军，等. 2021 年郑州“7·20”特大暴雨五龙口停车场内涝及地铁隧洞进水分析 [J]. 中国防汛抗旱，2022，32(5)：16-22.(ZANG W B，CHAI F X，LIU C J，et al. Analysis of waterlogging in Wulongkou parking lot and subway tunnel flooding of “ 7·20 ” extreme rainstorm in Zhengzhou City in 2021[J]. China Flood & Drought Management，2022，32(5)：16-22.(in Chinese))

[30] 程晓陶，刘昌军，李昌志，等. 变化环境下洪涝风险演变特征与城市韧性提升策略 [J]. 水利学报，2022，53(7)：757-768，778.(CHENG X T，LIU C J，LI C Z，et al. Evolution characteristics of flood risk under changing environment and strategy of urban resilience improvement[J]. Journal of Hydraulic Engineering，2022，53(7)：757-768，778.(in Chinese))

[31] 中华人民共和国应急管理部. 河南郑州“7·20”特大暴雨灾害调查报告 [R/OL].(2022-01-21) [2024-07-01]. https://www. mem. gov. cn/ gk/ sgcc/ tbzdsgdcbg/202201/ P020220121639049697767. pdf.(Ministry of emergency management of the People's Republic of China. Investigation report “7·20” rainstorm disaster in Zhengzhou City，Henan Province[R/OL].(2022-01-21) [2024-07-01]. https://www. mem. gov. cn/ gk/ sgcc/ tbzdsgdcbg/202201/ P020220121639049697767. pdf.(in Chinese))

Evolution characteristics of urban flood disasters chain and approaches for disaster mitigation*

LU Xingchao[1,2]，XU Zongxue[1,2]，SHI Qimiao[1,2]，TANG Qingzhu[3]

(1. *College of Water Science*，*Beijing Normal University*，*Beijing* 100875，*China*；2. *Beijing Key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Sponge City Technology*，*Beijing* 100875，*China*；3. *Water Resources Management Center*，*Ministry of Water Resources*，*Beijing* 100038，*China*)

Abstract：China's urban flood disasters have been simultaneously occurring in multiple areas in both northern and southern regions and are superimposed by floods and typhoons. The complexity and uncertainty in disaster propagation have resulted in severe consequences. Disaster chains act as carriers of matter and energy during disaster propagation. Following the process of analyzing "disaster chain generation —evolutionary characteristics of disaster chains —approaches for disaster chain mitigation", research on the propagation, chain-like evolutionary characteristics, and mitigation methods of urban rainstorm and flood disaster chains has been conducted. The method of generation of urban flood disaster chains is jointly affected by external destructive behaviors, system structural forms, and the surrounding environment. On the basis of disaster characteristics, disaster chains can be categorized into serial, concurrent, and compound types. The propagation of disaster chains is characterized by homology and co-occurrence, accumulation and amplification, and variability and complexity. The methods for rupturing disaster chains involve disaster-causing factors, disaster-prone environments, disaster-bearing bodies, and emergency management measures. Taking the "7·20" rainstorm event in Zhengzhou and the "fatal incident on Metro Line 5" as examples, the generation of the disaster chain and strategies for breaking the chain and mitigating the disaster under the actual rainfall conditions were analyzed. Adopting measures such as predisaster prevention and control, disaster handling during an event, and postdisaster emergency response are highly important for breaking disaster chains and mitigating damage in disaster chains.

Key words：urban flood；disaster chains；chain generation mechanism；evolution characteristics；disaster mitigation approaches

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52239003).

DOI： 10.14042/j.cnki.32.1309.2025.01.012

城市入河雨水管道水动力特性试验研究

郑子萱[1]，郑飞飞[1]，唐洪武[2]，张汇明[2]，汪怡然[1]，袁赛瑜[2]

（1. 浙江大学建筑工程学院，浙江 杭州 310058；2. 河海大学水利部水循环与水动力系统重点实验室，江苏 南京 210098）

摘要：管道下游高水位顶托是影响雨水管网排涝的关键因素，对城市内涝防控至关重要，但其水动力过程作用机理尚不清晰。通过上游水池-试验管道-下游渠道物理试验，研究下游河道状态对城市入河雨水管道排水能力的影响机制。结果表明：对于较大坡度管道，尽管在顶托初始阶段流速下降，但顶托作用能对非满流管道产生抽吸效应，增加管道过流面积并促进排水（增幅可达 18.7%）；过度顶托将显著抑制排水（降幅可达 20.3%）；下游河道流动可以改善受顶托管道的排水能力，降雨过程排水总量和峰值流量随河道流速增加而增大，最大分别提升 4.6% 和 8.5%。研究结果加强了下游河道高水位顶托对管道排水过程作用机理的认识，为城市河网调控及相关排水工程设计提供了科学指导。

关键词：入河雨水管道；城市内涝；顶托作用；水动力过程；管道排水能力

中图分类号：TV134　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1001-6791（2025）01-0132-11

近年来，在气候变化和城镇化快速发展的双重影响下，中国城市内涝问题突出，造成了严重的经济损失和人员伤亡[1]。城市内涝成因复杂多样，主要包括极端降雨频发、地面透水能力下降以及管道排水能力不足等因素[2-4]。发布在 *PNAS*、*Nature* 子刊上的多项权威研究表明，由极端降雨和管道排水能力不足共同作用引发的城市内涝，其严重程度往往超过单一因素[5-6]。降雨过程中河道高水位可能导致雨水管道排水受阻，排水能力下降[7-8]。因此，研究城市入河雨水管道的水动力特性对于城市河网调控和雨水管网设计及运行具有重要意义。

目前，相关研究主要针对极端降雨与河道共同作用的致涝规律展开，研究手段包括统计模型、数值模型和模型试验。统计模型主要侧重模拟极端降雨和河道高水位之间的联合致涝概率[9]；数值模型则主要模拟雨水径流和下游河流高水位共同作用引发洪水的物理过程，例如，解以扬等[10]构建城市暴雨内涝积水的数学模型并将河道水流运动纳入考虑，朱悦茹等[11]利用开源计算流体力学软件 OpenFOAM 搭建二维数值模型研究管道-河道耦合水动力的作用机制。虽然相关数值模型研究已取得大量研究成果，但这些工作缺乏对于管内水动力过程和排水能力变化的详细研究，无法揭示下游高水位对雨水管道的作用机理。茅泽育等[12]、丁法龙等[13]结合物理模型试验研究了河道交汇口的流场特性和管道水动力特性；Nédélec 等[14]针对管道与河道交汇处进行试验以研究河道的水力特性；刘同宦等[15]利用物理模型对入汇区域流速展开研究。目前的物理模型试验主要针对河道以及管河交汇处的流场分析展开，几乎没有考虑下游水位对雨水管道排水过程的影响。Zheng 等[16]考虑了下游河道水位产生的顶托作用，针对管道水动力过程开展物理模型试验和数值模拟研究，该研究基于下游高水位对雨水管道排水能力的作用机理展开，阐明了高水位对管道流量和流态的影响机制，同时揭示了数值模型在管道水力学研究中存在的精度不足、模型简化等缺陷。然而该研究中管道上

收稿日期：2024-10-16；**网络出版日期：**2025-01-22
网络出版地址：https://link.cnki.net/urlid/32.1309.P.20250121.1712.002
基金项目：国家重点研发计划项目（2022YFC3202602）；国家自然科学基金项目（52261160379）
作者简介：郑子萱（1997—），女，福建福州人，博士研究生，主要从事管道水力学方面研究。
E-mail：zixuanzheng@zju.edu.cn
通信作者：郑飞飞，E-mail：feifeizheng@zju.edu.cn

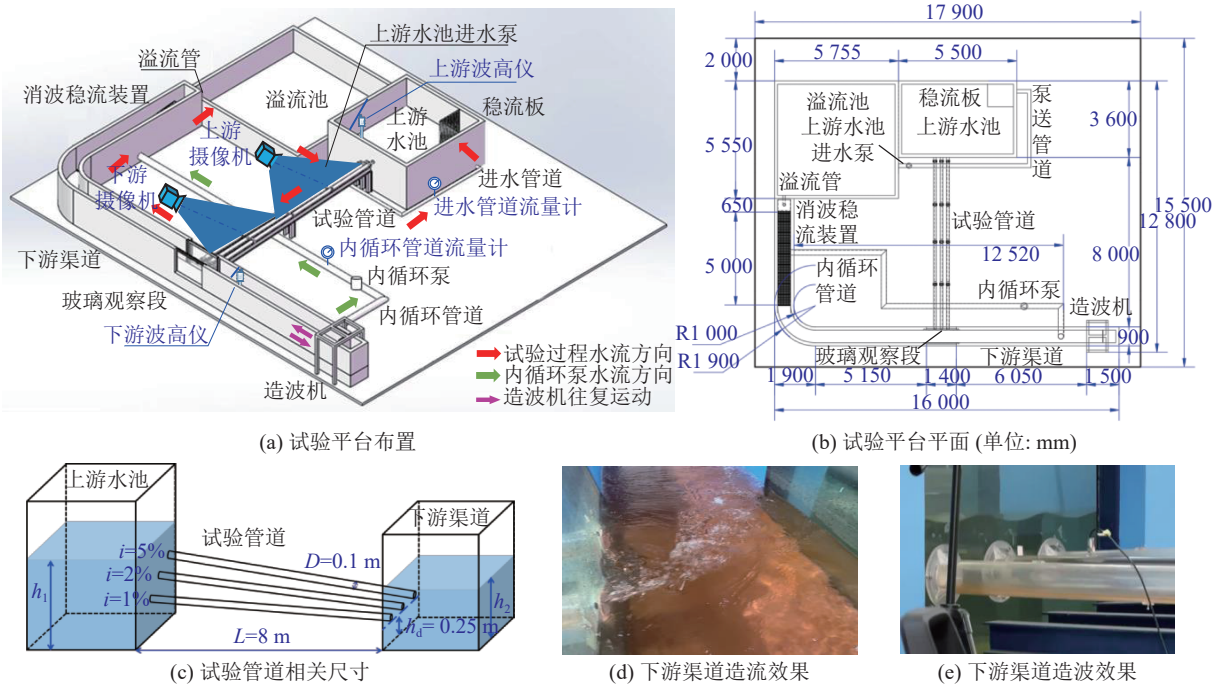
下游水位保持恒定，忽略了实际管道上游水位时序变化、河道流动和波浪等动态因素对管内流态和过流流量的影响。在真实降雨过程中，管道上下游水位随着降雨历时变化，且下游河道可能伴随着多种波流组合，共同影响雨水管道内的水动力过程。

本文搭建上游水池-试验管道-下游渠道耦合试验平台，设置动态上下游变化过程及多种下游河道动态特征，探究下游河道状态对入河雨水管道排水能力的影响机制，定量分析雨水管道对下游顶托以及下游波流动态边界等因素的响应机制，为城市河网调控及雨水管道设计及运行提供理论依据。

1　试验系统与方法

1.1　试验装置与方法

本研究参考杭州市入河雨水管道实际情况，针对管径为 DN1 000 的雨水管道展开试验研究，根据《给水排水设计手册(第 05 册)城镇排水》中的要求，检查井间距应为 80 m。基于弗劳德相似准则采用长度比尺 $L_r=D_m/D_p$ =1:10(以管径作为特征长度，D_m 和 D_p 分别代表试验和原型所对应的管径尺寸)，搭建上游水池-试验管道-下游渠道试验平台。布局如图 1(a)和图 1(b)所示，设置上游水池和下游渠道间距为 8 m，选取内径为 DN100 的有机玻璃圆管作为试验管道(图 1(c))，以便于观察。根据杨开林等[17]的研究，基于糙率系数比尺 $n_r=L_r^{1/6}$ 换算，采用有机玻璃管可满足物理试验模型与原型雨水管摩阻损失数相同的力学相似条件。在实际雨水排水系统中，城市入河雨水管道坡度以 1% 和 2% 为主，在一些山地城市和地势差较大的位置，入河雨水管道铺设坡度较大，可达 5%。基于此，设置试验管道的坡度为 i = 1%、2%、5% 以复现实际系统中常用和特殊的坡度。



(a) 试验平台布置　　(b) 试验平台平面 (单位: mm)

(c) 试验管道相关尺寸　　(d) 下游渠道造流效果　　(e) 下游渠道造波效果

图 1　试验平台概述

Fig. 1　Experimental setup overview

管道沿线布置 2 台大疆 Action 4 摄像机记录管内情况；上下游水位由数字波高仪(成都新达盛通科技有限公司 YWH200-D)监测；上游水池进水泵和下游内循环泵的流量通过管道上设置的电磁流量计(开封和信仪表

有限公司 BLD-DN100)测量得到，各设备具体布置位置见图 1(a)。以试验管道管径(D)为基准，定义量纲一形式上游水位(H/D)和下游淹没度(S)(具体尺寸见图 1(c))：

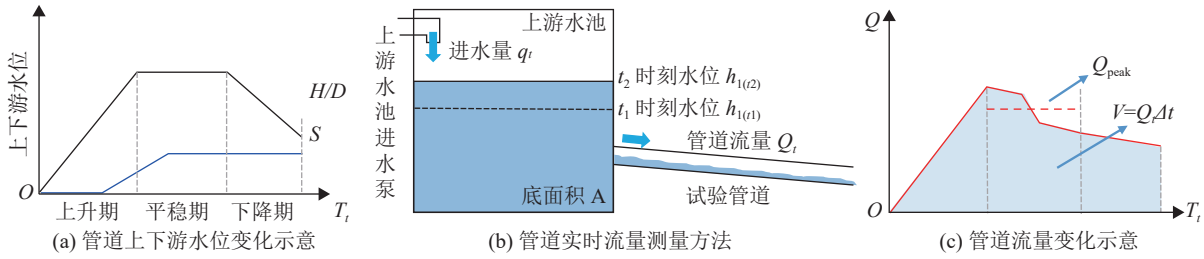
$$H/D=\frac{h_1-h_u}{D},\quad S=\frac{h_2-h_d}{D} \tag{1}$$

式中：h_1 为管道上游水池水位，m；h_2 为下游渠道水位，m；h_d 为管道出口管底高程，m；$h_u=h_d+iL$，为管道入口管底高程，m，L 为上下游水池间的距离，L=8 m。

在本研究中，每次试验对目标管道展开研究，关闭其余非试验管道的进出口。在试验开始前，将上游水池和下游渠道的水位调整到固定初始位置以控制变量。试验开始时，开启上游水池进水泵，将溢流池中的水泵送至上游水池，调节水泵频率控制上游水池的水位变化，并在进水管道出口设置稳流板以减少水位波动；下游渠道水位的控制则可以通过调节溢流管高度实现。此外，不同下游波流工况可借助内循环泵和造波机设置，具体而言，通过调节下游渠道中的内循环泵流量实现不同的河道流速(图 1(d))，借助造波机及消波稳流装置可模拟河道的动态波流效果(图 1(e))。

1.2 试验工况设计

在一场降雨中，降雨强度随时间通常呈现先增加后减少的趋势，本研究综合考虑管道排水和河道水位变化的滞后性和变化范围，设置管道上游水位的时序变化过程如图 2(a)所示，其规律为：上游水位先增后稳再减，下游水位滞后增加再维持稳定。为模拟 1 h 的真实降雨，依据弗劳德相似准则时间比尺，设置试验时长 19 min，其中上游水位上升期 8 min、水位平稳期 5 min、水位下降期 6 min。试验工况如表 1，主要分为两大类，分别是自由出流和存在下游顶托，其中后者包括下游河道无波流、下游河道存在流动以及下游河道存在波浪 3 种河流状态。为了避免试验偶然性、降低试验误差，每组工况至少重复 3 次，剔除异常值，计算有效数据平均值作为最终结果。



(a) 管道上下游水位变化示意　(b) 管道实时流量测量方法　(c) 管道流量变化示意

图 2 管道流量测量方法与定义

Fig. 2 Pipe flow measurement methods and definitions

表 1 试验工况

Table 1 Experimental condition table

管道出口情况	河道状态	i/%	$q_{in}/(gD^5)^{1/2}$	下游渠道特征
自由出流($S_{max}\leqslant 0$)	无波流	1, 2, 5	1.1, 1.4, 1.7, 2.0, 2.2	-
下游顶托(S_{max} = 0.5, 1, 1.5, 2)	无波流	1, 2, 5	1.1, 1.4, 1.7, 2.0, 2.2	-
	存在流动	1, 2, 5	1.7	$v_d/(gD)^{1/2}$ = 0.2, 0.3, 0.5
	存在波浪	1, 2, 5	1.7	$T_\lambda(g/D)^{1/2}$ = 0.1, 0.15, 0.2；h_λ/D = 0.25, 0.5, 0.75, 1

注：S_{max}为下游渠道最终稳定淹没度；q_{in}为上游水位上升期的上游水池进水泵流量，为恒定值，q_{in}的数值越大代表降雨强度越大、上游水池的水位上升速率越快；v_d、T_λ、h_λ分别为下游渠道的流速、波浪周期和波高，均参照实际河流流速和波浪特征选取并换算；g为重力加速度，g=9.8m^2/s。$q_{in}/(gD^5)^{1/2}$、$v_d/(gD)^{1/2}$、$T_\lambda(g/D)^{1/2}$、h_λ/D为各变量的量纲一形式。

1.3　流量测量方法与相关定义

为减少电磁流量计测量对管道内流态的干扰，由上游进水泵入流量以及水位变化计算得到的管道入流量作为管内流量。根据质量守恒原理，上游水池水量变化为水池进水量(上游水池进水泵流量)与水池出水量(管道流量)之差，其关系如图 2(b)所示，因此管道流量(Q_t)的计算式可表达为如下形式：

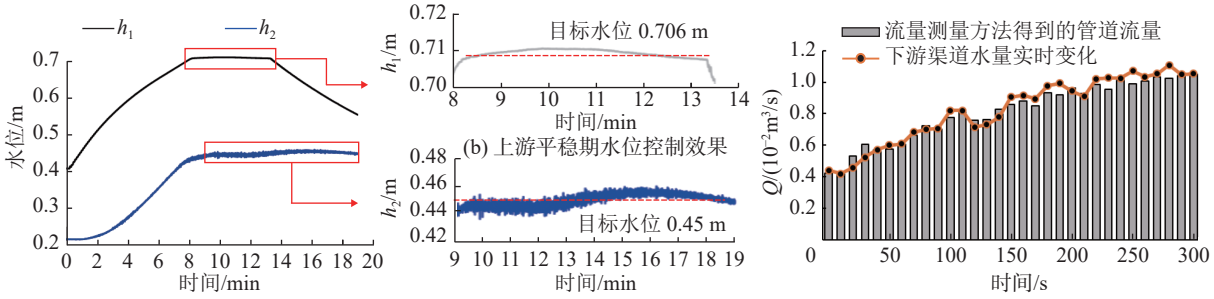
$$Q_t = q_t - \frac{h_{1(\Delta t)}A}{\Delta t} \tag{2}$$

式中：Δt 为时间间隔，s；q_t 为上游水池进水泵流量，m^3/s，通过进水泵流量计测得；$h_{1(\Delta t)}$ 为上游水池水位在 Δt 内的变化量，m，由上游波高仪测得；A 为上游水池底面积，m^2。

试验过程中下游水位上升时间会略微滞后于上游水位，呈现出先增后稳的趋势如图 2(a)所示。此时，管道内流量变化如图 2(c)所示存在多个拐点。选取上游水位平稳期的管道平均流量(Q_{peak})为一场降雨过程中的管道流量峰值，m^3/s；同时定义试验时长 T_t 内管道的排水总量为 V，m^3。

1.4　试验可行性验证

对试验过程中上下游水位的控制效果进行验证，对所有有效试验组的平稳阶段水位进行误差分析，结果显示上下游水位控制误差均在±2% 内。以管道下游无波流顶托状态下 $i=2\%$、$q_{in}/(gD^5)^{1/2}=1.7$、$S_{max}=2$ 工况为例，上游水池和下游渠道的水位变化过程如图 3(a)所示，上下游水位的变化过程符合预期，即上游水位先增加后稳定再下降，下游水位滞后一段时间后增加再稳定。对比平稳段上下游水位的设计目标值与实际监测值(图 3(b)和图 3(c))可以发现，水位波动误差分别不超过为 0.7% 和 2%，证明试验采取的水位控制方式可靠。



(a) 试验过程上下游水位控制效果验证　(c) 下游水位达 S_{max} 后的水位控制效果　(d) 管道流量测量方法验证

图 3　试验可行性验证

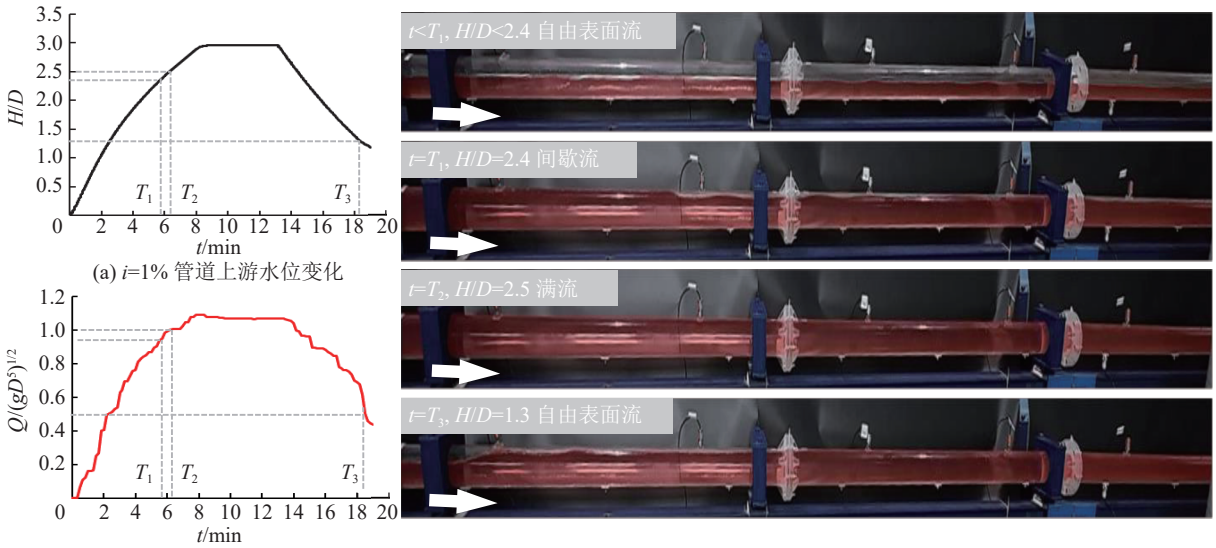
Fig. 3　Experimental feasibility verification

对试验过程中的流量测量方法可靠性进行验证，封闭试验管道与下游渠道交汇处下游部分，引导水流进入内循环管，以内循环管道流量计读数为参考进行验证。在 $i=2\%$、$q_{in}/(gD^5)^{1/2}=1.7$ 工况自由出流的状态下，监测得到的流量和计算流量如图 3(d)所示，结果表明上游流量计算结果与下游监测结果的变化规律及趋势一致，流量值相对误差为 1.4%。针对其余 i、q_{in} 的预试验结果表明，流量测量的相对误差均不超过 2%，满足试验精度要求。

2　结果分析与讨论

2.1　管道自由出流水动力特性分析

图 4 给出了 $i=1\%$、$q_{in}/(gD^5)^{1/2}=1.7$、$S_{max}=-1$ 工况下的管道水位、流量、流态变化过程，表 2 给出了管道流态及管道排水总量、峰值流量的量纲一结果，其中下标“0”代表自由出流工况与其余工况进行区分。在上游水位上升期，管内流态从自由表面流经间歇流($t=T_1$)转变为满流($t=T_2$)，此时管道流量持续增加；水



(a) i=1% 管道上游水位变化

(b) i=1% 管道流量变化

(c) i= 1% 管道流态变化(上游摄像机拍摄管道中上段)

图 4 $i=1\%$、$q_{in}/(gD^5)^{1/2}=1.7$、$S_{max}=-1$ 工况管道上游水位、流量及流态变化过程

Fig. 4 Changes in upstream water level, pipe flow rate and flow pattern of $i=1\%$, $q_{in}/(gD^5)^{1/2}=1.7$ and $S_{max}=-1$

表 2 自由出流各工况的水动力特性

Table 2 Hydrodynamic characteristics of free outflow under various conditions

i/%	$q_{in}/(gD^5)^{1/2}$	试验过程管道流态转变临界值(H/D)				上游水位平稳期特征			V_0/D^3
		间歇流	下游空腔流	满流	自由表面流	H_{max}/D	管内流态	$Q_{peak(0)}/(gD^5)^{1/2}$	
1	1.1	未出现	无	未出现	未出现	2.0	自由表面流	0.8	6 500
	1.4	2.4	无	2.5	1.3	2.5	满流	1.0	8 100
	1.7	2.4	无	2.5	1.3	3.0	满流	1.1	9 600
	2.0	2.4	无	2.5	1.3	3.6	满流	1.2	10 800
	2.2	2.4	无	2.5	1.3	4.2	满流	1.3	11 700
2	1.1	无	未出现	未出现	未出现	2.0	自由表面流	0.8	6 500
	1.4	无	2.6	3.4	1.3	2.5	下游空腔流	1.0	8 100
	1.7	无	2.6	3.4	1.3	3.0	下游空腔流	1.1	9 600
	2.0	无	2.6	3.4	1.3	3.5	满流	1.3	11 200
	2.2	无	2.6	3.4	1.3	4.1	满流	1.4	12 400
5	1.1	无	未出现	未出现	未出现	2.0	自由表面流	0.8	6 500
	1.4	无	未出现	未出现	未出现	2.4	自由表面流	1.1	8 700
	1.7	无	2.7	未出现	1.3	2.8	下游空腔流	1.3	10 600
	2.0	无	2.7	未出现	1.3	3.3	下游空腔流	1.4	12 100
	2.2	无	2.7	未出现	1.3	3.8	下游空腔流	1.5	13 500

位平稳期为恒定流状态，管内流态和流量保持恒定；在水位下降期，流态从满流变回自由表面流($t=T_3$)，流量随之逐渐下降。与 $i=1\%$ 管道不同，$i=2\%$、5% 管道的明满过渡流态是下游空腔流而非间歇流，即管道上游为满管流，下游为自由表面流。这是因为在较陡的坡度($i=2\%$、5%)下，水跃波峰难以接触管顶，大气团延伸至下游形成下游空腔流[18-19]。对比表 2 中不同坡度的流态转变临界值可知，坡度越大，气体浮力导致的阻滞效应越强，越不容易形成满流[20]。此时，由非满流转向满流的 H/D 临界值越大，如 $i=1\%$、2% 管道对

应的 H/D 分别为 2.5、3.4，而在 $i=5\%$ 管道中当 H/D 达到 3.8 时，管内仍未出现满流现象。此外，管道由满流或下游空腔流转向非满流的 H/D 临界值不受坡度影响，均为 1.3[21-22]。在这一水深下降阶段，只有当管内流量降至满管流量以下，也就是管内充满度小于 0.82 时，管道入口处转变为非满流状态。由满流或下游空腔流向非满流转变的充满度临界值仅与管道入口水位有关，与整根管道中的空气阻力和流态等无关，在给定的范围内管道坡度对其影响较小。

需要说明的是，通过对试验过程中水位的上升期、平稳期、下降期管道特征对比发现，上升期和下降期管道内为非恒定流状态，流量随时间变化，前者受到上游水位的影响，后者则受上游水位、水流惯性的影响；水位平稳期管内为恒定流状态，流量达到峰值且保持稳定，便于分析不同上下游边界的影响规律。因此，在定量分析管道过流能力时，本研究针对管道的排水总量和峰值流量进行。对于管道流量而言，在管道为自由表面流时，管道入口未形成满流，管道流量仅受 H/D 影响，与坡度无关[23]。例如 $q_{in}/(gD^5)^{1/2}=1.1$ 时，3 种不同坡度管道具有相同的峰值流量和排水总量。而在管道入口为满流状态时（包括下游空腔流和满流），管道流量受坡度和 H/D 共同影响，这是因为管道入口过流面积相同，坡度越大的管道具有更大的上下游水位差，流速越快，因此流量也越大[16,23]。以 $q_{in}/(gD^5)^{1/2}=2.0$ 的情况为例，1%、2%、5% 坡度的管道对应的上下游水位差（即上游水位与管道出口管底的距离）分别为 0.44、0.51、0.73 m，其峰值流量 $Q_{peak(0)}/(gD^5)^{1/2}$ 分别为 1.2、1.3、1.4，排水总量 V_0/D^3 分别为 10 800、11 200、12 100。

2.2　下游顶托对管道水动力特性的影响

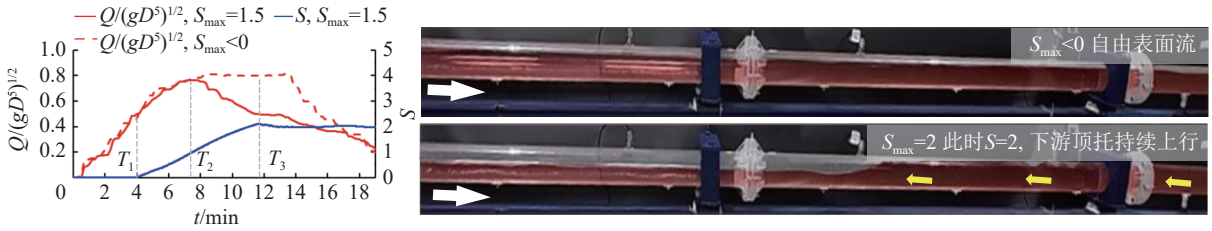
下游淹没无波流情况下各试验工况排水总量和峰值流量与自由出流情况下的比值如表 3 所示，其中正值表示促进管道排水，负值代表抑制管道排水。

表 3　下游淹没无波流情况下管道排水总量和峰值流量的变化

Table 3　Changes in V and Q_{peak} of pipes under high downstream water level without channel flow and waves

i/%	$q_{in}/(gD^5)^{1/2}$	$[(V-V_0)/V_0]$ / %					$[(Q_{peak}-Q_{peak(0)})/Q_{peak(0)}]$/%				
		$S_{max}=0$	$S_{max}=0.5$	$S_{max}=1$	$S_{max}=1.5$	$S_{max}=2$	$S_{max}=0$	$S_{max}=0.5$	$S_{max}=1$	$S_{max}=1.5$	$S_{max}=2$
1	1.1	0	−1.7	−2.2	−9.4	−20.3	0	−1.3	−2.6	−16.1	−29.2
	1.4	0	−0.8	−2.9	−10.0	−20.1	0	−1.2	−6.6	−16.0	−27.7
	1.7	0	−1.4	−3.7	−9.6	−18.0	0	−2.6	−6.0	−13.3	−23.0
	2.0	0	−1.9	−4.7	−10.0	−15.9	0	−2.6	−5.6	−11.0	−17.4
	2.2	0	−1.5	−4.3	−8.7	−13.6	0	−1.3	−4.6	−8.6	−14.7
2	1.1	0	0.8	1.4	−3.4	−11.7	0	1.4	2.8	−7.5	−18.4
	1.4	0	1.7	3.9	−3.8	−10.2	0	1.2	3.2	−10.2	−19.0
	1.7	0	0.2	2.5	−2.9	−8.9	0	0.3	0.6	−6.3	−13.9
	2.0	0	−0.4	−3.1	−7.1	−13.1	0	−1.1	−5.3	−9.6	−16.1
	2.2	0	−0.8	−3.6	−7.3	−11.0	0	−1.5	−3.8	−7.8	−11.7
5	1.1	0	1.4	12.3	18.7	17.7	0	1.5	22.9	44.9	40.6
	1.4	0	1.0	7.9	14.9	12.6	0	2.1	17.0	34.5	28.7
	1.7	0	0.6	3.8	3.2	0	0	1.3	7.0	2.7	−2.4
	2.0	0	0.9	3.0	1.1	−0.6	0	0.1	3.4	0.2	−3.6
	2.2	0	0.5	3.4	1.1	−1.2	0	0	5.3	2.2	−1.8

由表 3 看出，对于坡度较小(i = 1%)的管道，下游顶托形成后对管道排水产生阻滞。这是由于管道水力坡度较小，缺乏足够的动力克服下游顶托阻力，此时即使轻微的顶托也对管道排水产生显著影响。$q_{in}/(gD^5)^{1/2}$ 越小、下游顶托程度越高，顶托的阻滞效应越明显。如 $q_{in}/(gD^5)^{1/2}$ = 1.1、S_{max} = 2 工况，排水总量和峰值流量较自由出流分别减少了 20.3%、29.2%。图 5 给出该工况与自由出流状态的管道下游淹没度、管道流量及管道流态的对比图。在 T_1 时刻以前，2 种工况的管道下游均未形成顶托，管道流量相近(图 5(a))。当 $t > T_1$ 时，S_{max} = 2 工况管道下游水位上升开始形成顶托，管道水流压力不足以克服下游顶托阻力，顶托回流进入管道并随着淹没度增加不断上行，导致管道排水势能降低，管道流量开始低于自由出流工况。当 $t > T_2$ 时，$S \geqslant 1$，下游顶托开始超过管道出口管顶，管内流量出现明显下降。当下游水位稳定，即 T_3 时刻 S = 2 时，顶托回流上行并占据了管道大部分空间(图 5(b))，导致管内流速和过流面积显著下降，严重阻滞管道排水。

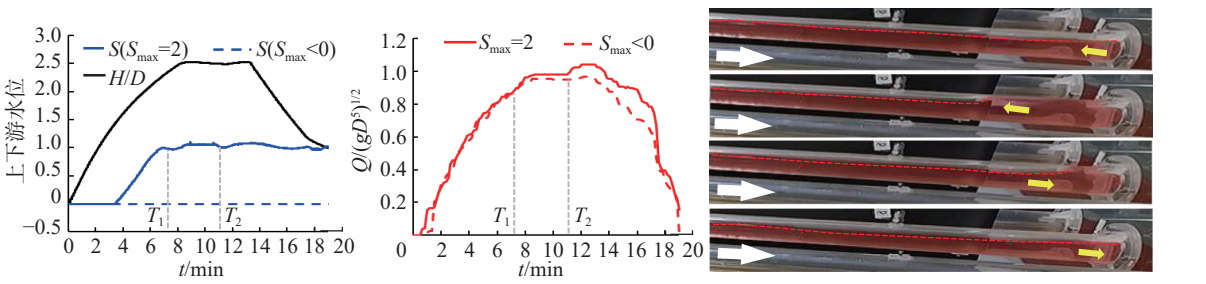


(a) 下游水位与管道流量变化过程　　(b) t=T_3 时刻 2 种工况的管道流态对比(上游摄像机拍摄管道中段)

图 5　顶托回流上行阻滞管道排水(以 i = 1%、$q_{in}/(gD^5)^{1/2}$ = 1.1、S_{max} = 2 工况为例)

Fig. 5　Pipe drainage obstruction caused by high downstream water level (i = 1%, $q_{in}/(gD^5)^{1/2}$ = 1.1, S_{max} = 2)

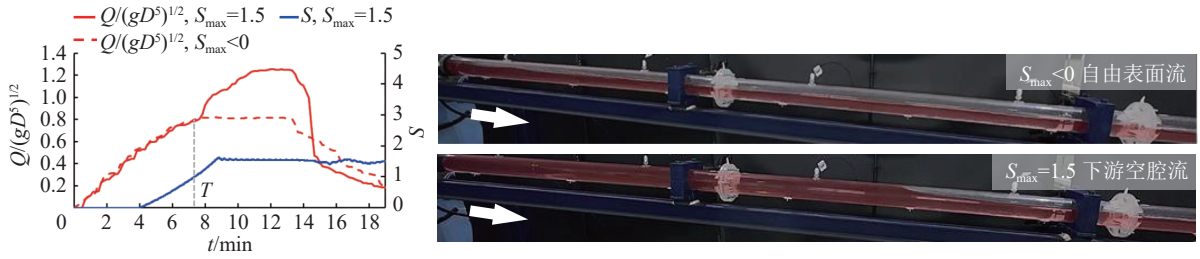
对于坡度较大(i = 2%、5%)的管道，若管内流态在自由出流状态下为满流，顶托作用会减少上下游水位差，降低排水势能，从而抑制排水。例如，2% 坡度管道 $q_{in}/(gD^5)^{1/2}$ 为 1.1 和 2.2 的 2 种工况，管道排水总量和峰值流量的最大降幅分别可达 13.1% 和 16.1%。然而对于其余非满流工况，顶托作用对管道产生了先促进后抑制的效果，对 2% 和 5% 坡度管道的排水总量和峰值流量最大提升分别可达 3.9%、3.2% 和 18.7%、44.9%。这种促进效应有 2 个主要原因，分别是顶托产生抽吸作用和顶托促进管内过流面积增加。在 i = 2%、$q_{in}/(gD^5)^{1/2}$ = 1.4、S_{max} = 1 工况下(图 6)，管内水流动压力与顶托阻力相当或略高于顶托阻力。当 $T_1 < t < T_2$ 时，管道出口处出现回流上行进入管道又被推出的往复现象，如图 6(c)所示。这一现象的作用类似拉风箱原理，使管道出口形成局部低压，对管道水体往复抽吸，从而促进管道排水。图 7 为 i = 5%、$q_{in}/(gD^5)^{1/2}$ = 1.1 时 $S_{max} < 0$ 与 S_{max} = 1.5 工况的非满流阶段对比，可以看出在 $t = T$ 时刻下游顶托工况的管道呈现下游空腔流，与自由出流工况相比管道入口处的过流面积显著增加。虽然顶托作用导致管道下游流速降低，但该工况过流面积的增长幅度较大，管道排水流量因此得以促进。



(a) 管道上下游水位变化　　(b) 管道流量　　(c) T_1<t<T_2 时 S=1 工况管道出口处变化(下游摄像机拍摄)

图 6　顶托对管道排水的抽吸作用(以 i = 2%、$q_{in}/(gD^5)^{1/2}$ = 1.4、S_{max} = 1 工况为例)

Fig. 6　Suction effect on the pipe drainage caused by high downstream water level (i = 2%, $q_{in}/(gD^5)^{1/2}$ = 1.4, S_{max} = 1)



(a) 下游水位与管道流量变化过程　　(b) t=T 时刻 2 种工况的管道流态对比(上游摄像机拍摄管道前中段)

图 7　顶托增加管道过流面积(上游摄像机拍摄管道上中段，以 i = 5%、$q_{in}/(gD^5)^{1/2}$ = 1.1、S_{max} = 1.5 工况为例)

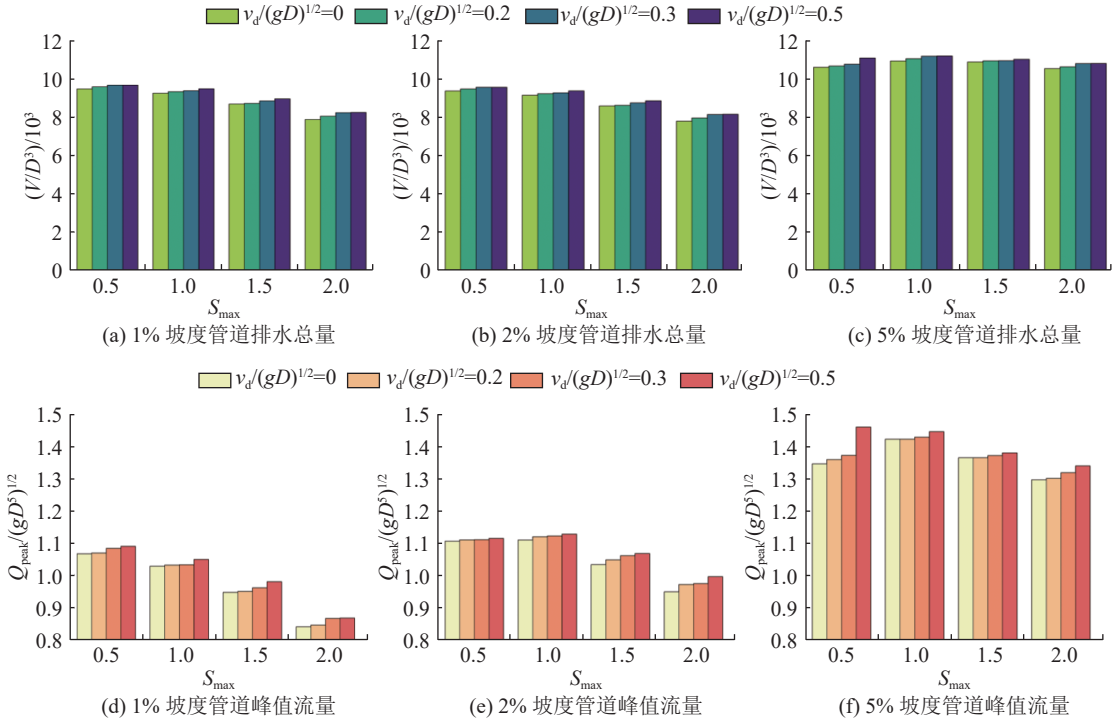
Fig. 7　Increase in pipe flow area caused by high downstream water level (i = 5%, $q_{in}/(gD^5)^{1/2}$ = 1.1, S_{max} = 1.5)

尽管非满流状态轻度顶托能够促进管道排水能力提升，但促进作用效果存在一个明显的拐点。也就是说，随着 S_{max} 的增加，顶托对管道排水促进效应将减弱甚至出现阻滞效应，这是由于当 S_{max} 较大时，管内水动力不足以抵抗顶托阻力，水体回流进入管道并不断上行阻止管内气体(与图 5 相似)，导致管道过流面积下降。结合表 2 和表 3 可知，拐点位置主要受管道流态影响，在坡度较小和流量较大的工况中管内充满度较大，顶托对管道过流面积的促进效应有限，拐点出现在 S_{max} 较小时。

本节通过试验观察和流量监测，发现水力顶托对管道排水能力的影响主要包括 2 种模式，分别是持续抑制和先促进后抑制。前者通常存在于小坡度管道或满流状态下，由于顶托上行导致过流面积和排水势能降低所致；后者通常存在于较大坡度的非满流状况中，得益于顶托形成的抽吸作用和顶托导致的管道过流面积增加。

2.3　下游波流对管道排水能力的影响

以 $q_{in}/(gD^5)^{1/2}$=1.7 的工况为例，图 8 给出了受河道流速影响的管道排水能力变化情况。结果表明，河道水



(a) 1% 坡度管道排水总量　(b) 2% 坡度管道排水总量　(c) 5% 坡度管道排水总量

(d) 1% 坡度管道峰值流量　(e) 2% 坡度管道峰值流量　(f) 5% 坡度管道峰值流量

图 8　$q_{in}/(gD^5)^{1/2}$ = 1.7 工况下河道流速对管道排水总量和排水峰值影响

Fig. 8　Effect of different $v_d/(gD)^{1/2}$ on V/D^3 and $Q_{peak}/(gD^5)^{1/2}$ of the pipes when $q_{in}/(gD^5)^{1/2}$ = 1.7

流能提升顶托状态下管道的排水能力，且提升量随流速增加而提高。在 $i=5\%$、$S_{max}=2$ 的工况下，随着管道流速 $v_d/(gD)^{1/2}$ 从 0 增加到 0.5，虽然管道流态的变化不显著，但管道排水总量和峰值流量分别提升了 4.6% 和 8.5%。这是由于根据伯努利方程，动能增加会降低静压力或势能。河道流速增加时，管道出口静压力减小，顶托阻力降低，排水量增加。因此，下游河道流速越大，顶托对管道的阻滞效应越小，排水量越大。在不同坡度和不同上游水池进水泵流量的工况（试验工况见表 1）都观察到了河道流动对管道流量的促进现象，可以推测该提升效应同时适用于不同坡度和不同流态的管道。

对下游河道存在波浪的所有工况进行对比分析，在周期 $T_\lambda(g/D)^{1/2}=0.10$、0.15、0.20，波高 $h_\lambda/D=0.25$、0.50、0.75、1.00 的工况中，虽然下游渠道中的水会以一定的周期往复进入又离开管道，对管道排水产生抑制和促进作用，但管道的排水能力无明显变化，排水总量和峰值流量与无波流情况相差不到 1%。说明河道中一般状态下的波浪在有限的周期内促进和抑制效果能够相互抵消，对管道排水整体能力影响甚微，可以忽略。

3 结　　论

利用上游水池-试验管道-下游渠道试验平台开展物理模型试验，针对不同下游河道状态下入河雨水管道的水动力特性开展研究。主要结论如下：

（1）自由出流状态下，管道由非满流向满流转换的上游水位临界值随管道坡度的增加而变大，而满流转向非满流则不受影响。管道流量与入口状态相关，明流时与上游水位和管道入口高程相关，满流时受上游水位和管道出口高程的影响。

（2）下游淹没时，水力顶托对管道排水的作用机制效应受管道坡度和流态的共同影响。在较大坡度管道中，顶托作用能够对非满流管道产生抽吸效应并增加管道过流面积，出口轻度顶托（下游最终淹没度 $S_{max}=1$、1.5 时）促进管道排水（排水总量最大增幅可达 18.7%）；但小坡度管道或过度顶托（$S_{max}=2$）状态中，管道排水将显著受到下游顶托的抑制（排水总量最大降幅可达 20.3%）。

（3）河道流动可提升下游受顶托管道的排水能力，促进作用随着河道流速增加而增大（排水总量和峰值流量最大分别可提高 4.6% 和 8.5%）；而一般状态下的河道波浪对管道排水整体能力影响甚微，可以忽略。

参考文献：

[1] 宋晓猛，徐楠涛，张建云，等. 中国城市洪涝问题：现状、成因与挑战 [J]. 水科学进展，2024，35(3)：357-373.（SONG X M，XU N T，ZHANG J Y，et al. Urban flooding in China：current status，causes and challenges[J]. Advances in Water Science，2024，35(3)：357-373.（in Chinese））

[2] 刘家宏，石虹远，梅超，等. 城市下垫面空间格局对社区尺度内涝过程的影响模拟 [J]. 水科学进展，2022，33(6)：881-893.（LIU J H，SHI H Y，MEI C，et al. Effect of urban subsurface spatial pattern on community-scale flooding processes via numerical simulation[J]. Advances in Water Science，2022，33(6)：881-893.（in Chinese））

[3] 庄琦，刘曙光，周正正. 降雨数据时空精度对城市暴雨变异性及频率分析的影响 [J]. 水科学进展，2023，34(3)：398-408.（ZHUANG Q，LIU S G，ZHOU Z Z. Impact of rainfall spatiotemporal resolutions on urban extreme rainfall variability and rainfall frequency analysis[J]. Advances in Water Science，2023，34(3)：398-408.（in Chinese））

[4] 张建云，王银堂，贺瑞敏，等. 中国城市洪涝问题及成因分析 [J]. 水科学进展，2016，27(4)：485-491.（ZHANG J Y，WANG Y T，HE R M，et al. Discussion on the urban flood and waterlogging and causes analysis in China[J]. Advances in Water Science，2016，27(4)：485-491.（in Chinese））

[5] MOFTAKHARI H R，SALVADORI G，AGHAKOUCHAK A，et al. Compounding effects of sea level rise and fluvial flooding[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America，2017，114(37)：9785-9790.

[6] ZSCHEISCHLER J，WESTRA S，van den HURK B J J M，et al. Future climate risk from compound events[J]. Nature Climate Change，2018，8(6)：469-477.

[7] XU H S，XU K，LIAN J J，et al. Compound effects of rainfall and storm tides on coastal flooding risk[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment，2019，33(7)：1249-1261.

[8] FERGUSON C R，FENNER R A. The potential for natural flood management to maintain free discharge at urban drainage outfalls[J]. Journal of Flood Risk Management，2020，13(3)：e12617.

[9] ZHENG F F，WESTRA S，SISSON S A. Quantifying the dependence between extreme rainfall and storm surge in the coastal zone[J]. Journal of Hydrology，2013，505：172-187.

[10] 解以扬，李大鸣，李培彦，等. 城市暴雨内涝数学模型的研究与应用 [J]. 水科学进展，2005，16(3)：384-390.(XIE Y Y，LI D M，LI P Y，et al. Research and application of the mathematical model for urban rainstorm water logging[J]. Advances in Water Science，2005，16(3)：384-390.(in Chinese))

[11] 朱悦茹，郑子萱，姬熠冉，等. 雨水管道末端与河道水动力相互作用模拟研究 [J]. 科技通报，2023，39(8)：19-24，32.(ZHU Y R，ZHENG Z X，JI Y R，et al. Numerical simulation study of the hydrodynamic interaction between the end of stormwater pipes and river channels[J]. Bulletin of Science and Technology，2023，39(8)：19-24，32.(in Chinese))

[12] 茅泽育，赵升伟，罗昇，等. 明渠交汇口水流分离区研究 [J]. 水科学进展，2005，16(1)：7-12.(MAO Z Y，ZHAO S W，LUO S，et al. Study on the separation zone in open-channel junction[J]. Advances in Water Science，2005，16(1)：7-12.(in Chinese))

[13] 丁法龙，茅泽育. 圆形断面管道非满流水动力特性 [J]. 水科学进展，2020，31(4)：547-555.(DING F L，MAO Z Y. Hydraulic characteristics of partially-filled flow in circular pipe[J]. Advances in Water Science，2020，31(4)：547-555.(in Chinese))

[14] NÉDÉLEC Y，GAY B. Experimental study of a right-angled end junction between a pipe and an open channel[J]. Journal of Hydraulic Engineering，2008，134(5)：616-625.

[15] 刘同宦，郭炜，詹磊. 90°支流入汇区域时均流速分布特征试验研究 [J]. 水科学进展，2009，20(4)：485-489.(LIU T H，GUO W，ZHAN L. Experimental study of the velocity profile at 90°open channel confluence[J]. Advances in Water Science，2009，20(4)：485-489.(in Chinese))

[16] ZHENG Z X，ZHENG F F，MA Y Y，et al. Exploring hydraulic impacts of downstream water levels on the drainage capacity of a stormwater pipe[J]. Journal of Hydraulic Engineering，2024，150(5)：04024028.

[17] 杨开林，郭永鑫，付辉，等. 管道充水水力瞬变模型相似律 [J]. 水利学报，2012，43(10)：1188-1193，1201.(YANG K L，GUO Y X，FU H，et al. Modeling similarity laws for pipe water-filled transients[J]. Journal of Hydraulic Engineering，2012，43(10)：1188-1193，1201.(in Chinese))

[18] HUANG B，WANG W，WU S Q，et al. Experimental study of cavity outflow and geysering in circular pipes[C]//World Environmental and Water Resources Congress 2016. West Palm Beach，Florida：American Society of Civil Engineers，2016：265-274.

[19] HAGER W H. Cavity outflow from a nearly horizontal pipe[J]. International Journal of Multiphase Flow，1999，25(2)：349-364.

[20] BARNEA D，SHOHAM O，TAITEL Y，et al. Flow pattern transition for gas-liquid flow in horizontal and inclined pipes：comparison of experimental data with theory[J]. International Journal of Multiphase Flow，1980，6(3)：217-225.

[21] CHOW G C. Effect of uncertainty on optimal control policies[J]. International Economic Review，1973，14(3)：632-645.

[22] CANTERO-CHINCHILLA F N，BELAUD G，CASTRO-ORGAZ O，et al. Steady flow through gated circular culverts：hydraulic operation and experiments[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering，2023，149(7)：04023012.

[23] CHANSON H. Hydraulics of open channel flow[M]. Amsterdam：Netherlands Elsevier，2004.

Exploring hydraulic dynamics between the urban stormwater pipe and the downstream river based on experiment tests*

ZHENG Zixuan[1] , ZHENG Feifei[1] , TANG Hongwu[2] , ZHANG Huiming[2] , WANG Yiran[1] , YUAN Saiyu[2]

(1. *College of Civil Engineering and Architecture*, *Zhejiang University*, *Hangzhou* 310058, *China*; 2. *Key Laboratory of Hydrologic-cycle and Hydrodynamic System of Ministry of Water Resources*, *Hohai University*, *Nanjing* 210098, *China*)

Abstract: High water level in the downstream can be a key factor that influences the drainage capacity of the stormwater pipe. This can form the hydraulic jacking that can substantially affect the operation and prevention of urban flooding. However, there is a lack of understanding on the hydrodynamic mechanism of such an interacting process. To this end, a set of physical experimental tests were conducted on a tank-pipe-channel laboratory system. The results obtained show that downstream jacking at the early stage (under non-full flow conditions) can enhance pipe flow capacity up to 18.7% as a result of suction effect and the increased flow area. This is followed by a significant block on the drainage capacity of the pipe due to the excessive jacking with a maximum flow reduction about 20.3%. In addition, the flow in the downstream river can facilitate the pipe drainage under the jacking conditions, and such an effect can be stronger as the river flow velocity increases. For such scenarios, experiment tests show that the maximum increase of total pipe drainage and peak flow can reach 4.6% and 8.5% respectively. These findings significantly improve the understanding on the hydrodynamic mechanism between high downstream water level and the pipe drainage process, which can offer important scientific guidance for the regulation of urban river networks and the design of drainage pipe systems.

Key words: stormwater pipe connected to the river; urban flooding risk; top support function; hydraulic dynamics; pipe drainage capacity

* The study is financially supported by the National Key R&D Program of China (No. 2022YFC3202602) and National Natural Science Foundation of China (No. 52261160379).

DOI：10.14042/j.cnki.32.1309.2025.01.014

城市小流域暴雨洪水响应本构关系

魏翼飞[1,2]，崔彦萍[3]，周 昂[2,4]，王 强[1,2]，杨 龙[1,2]

（1. 南京大学地理与海洋科学学院，江苏 南京 210023；2. 南京大学关键地球物质循环前沿中心，江苏 南京 210023；3. 江苏省水文水资源勘测局，江苏 南京 210029；4. 南京大学大气科学学院/中尺度灾害性天气教育部重点实验室，江苏 南京 210023）

摘要：降雨时空特征对洪水响应具有重要影响，为了探究城市化小流域暴雨洪水响应规律，在南京市九乡河流域建立分布式水文模型 GSSHA，通过随机暴雨移置生成多场次降雨过程，模拟不同下垫面情景下洪水响应过程；利用可解释机器学习方法识别致洪暴雨关键特征因子，以此为基础构建流域尺度暴雨洪水响应本构关系模型。研究表明：GSSHA 模型能准确模拟九乡河流域的产汇流过程；暴雨时空特征是控制流域洪水响应的关键因素，城市扩张减弱了洪水响应对暴雨时空结构特征的敏感程度；本构关系模型为城市小流域暴雨洪水响应规律提供了数学表达，对洪峰量级预测的平均相对误差约为 0.154，预测精度高，可为城市洪涝高效预警提供科学支撑。

关键词：GSSHA 水文模型；随机暴雨移置；降雨时空特征；暴雨洪水
中图分类号：P339 **文献标志码：**A **文章编号：**1001-6791(2025)01-0155-11

城市化是全世界范围内的普遍现象。快速城市扩张通过增加不透水面积、改变河网水系连通性等显著改变了流域下垫面水文水力学属性[1-2]，使城市地区极易出现“峰高、量大和历时短”的洪水过程，洪涝灾害频发，严重威胁社会经济可持续发展[3-5]。从流域尺度理解暴雨洪水响应规律，是城市水文研究的重点和难点，也是洪涝预报预警等城市防洪减灾措施实施的科学依据。

水文模拟是研究流域尺度暴雨洪水响应规律的重要方法。自 Freeze 等[6]提出的“FH69 蓝本”开始，水文模型经历了从集总式模型向分布式物理模型的发展。分布式物理模型中的数学物理方程(如 Richards 方程、Saint-Venant 方程)通常仅适用于描述微观或中观尺度的水文过程[7-8]，难以刻画流域尺度暴雨洪水响应特征[9]，流域尺度暴雨洪水响应本构关系尚未得到充分认识[10-11]。本构关系广义上可理解为“反映物质宏观性质的数学模型”[7]，最早应用在力学领域，综合反映材料或结构的力学性能。水文本构关系的研究对象是空间异质性强的流域及水文过程[7]，主要目的是描述流域尺度产汇流过程需要满足的质量、动量、能量守恒方程及对应流域的几何关系。前人对此开展了较为丰富的研究，例如，Tian 等[12]采用蒙特卡罗法分析发现土壤水分运动规律在宏观和微观尺度上有明显差异；郭伟建等[13]基于运动波方程，通过引入模拟尺度内水位、流速及地形异质性影响，在模拟空间对水文模型进行积分，实现模型尺度与模拟尺度的匹配。国内外已有研究主要集中在点尺度土壤水运动、山坡尺度降雨产流机制[7]，缺少对流域尺度暴雨洪水响应本构关系的研究。

暴雨洪水响应受到流域下垫面水文水力学属性与降雨时空特征的共同影响。已有研究主要关注下垫面水文水力学属性对洪水过程的影响[5,14]，但降雨时空特征(暴雨移动速度、方向等)对洪水的影响规律也不可忽视[15]。例如，Yang 等[16]研究发现随着降雨量级的增大，降雨空间异质性对城市小流域洪水量级的影响减弱；李冰雪等[17]通过分析多种台风降雨移动情景下的城市内涝过程，识别了降雨时空特征对城市内涝积水深度的影

收稿日期：2024-09-05；**网络出版日期：**2024-12-17
网络出版地址：https://link.cnki.net/urlid/32.1309.P.20241217.1058.002
基金项目：国家自然科学基金项目(52379012)；江苏省优秀青年基金项目(BK20231541)
作者简介：魏翼飞(2000—)，女，陕西渭南人，硕士研究生，主要从事流域水文模拟研究。
E-mail：weiyifei_1225@163.com
通信作者：杨龙，E-mail：yanglong@nju.edu.cn

响程度；Zhou 等[18]分析了降雨时空变化对城市小流域洪水频率计算结果的影响。相关研究证实了降雨时空特征对洪水响应过程的重要性，但尚未定量揭示其在流域尺度暴雨洪水响应本构关系中的贡献[19]。

本文以南京市九乡河流域为研究区，使用分布式水文模型 GSSHA（Gridded Surface/Subsurface Hydrologic Analysis）、随机暴雨移置和可解释机器学习方法，识别控制流域洪水响应的致洪暴雨关键特征，在流域尺度上构建考虑暴雨时空特征的暴雨洪水响应宏观本构关系，定量揭示长三角地区城市小流域暴雨洪水响应规律，为城市地区暴雨洪涝预报预警提供科学支撑。

1 研究区概况

九乡河发源于南京市江宁区汤山街道龙尚湖，流经江宁和栖霞 2 个行政区，在栖霞山的山脚汇入长江，流域面积为 133 km^2，平均海拔为 46 m，河道总长为 21.7 km，平均河宽为 10 m，见图 1。

本文基于 1985—2019 中国年度土地覆盖数据集（CLCD）[20]和世界土壤数据库（HWSD）[21]分析九乡河流域下垫面特征。九乡河上游面积约 39 km^2，以农田（占比 45.7%）、森林（占比 42.2%）为主，不透水面约占

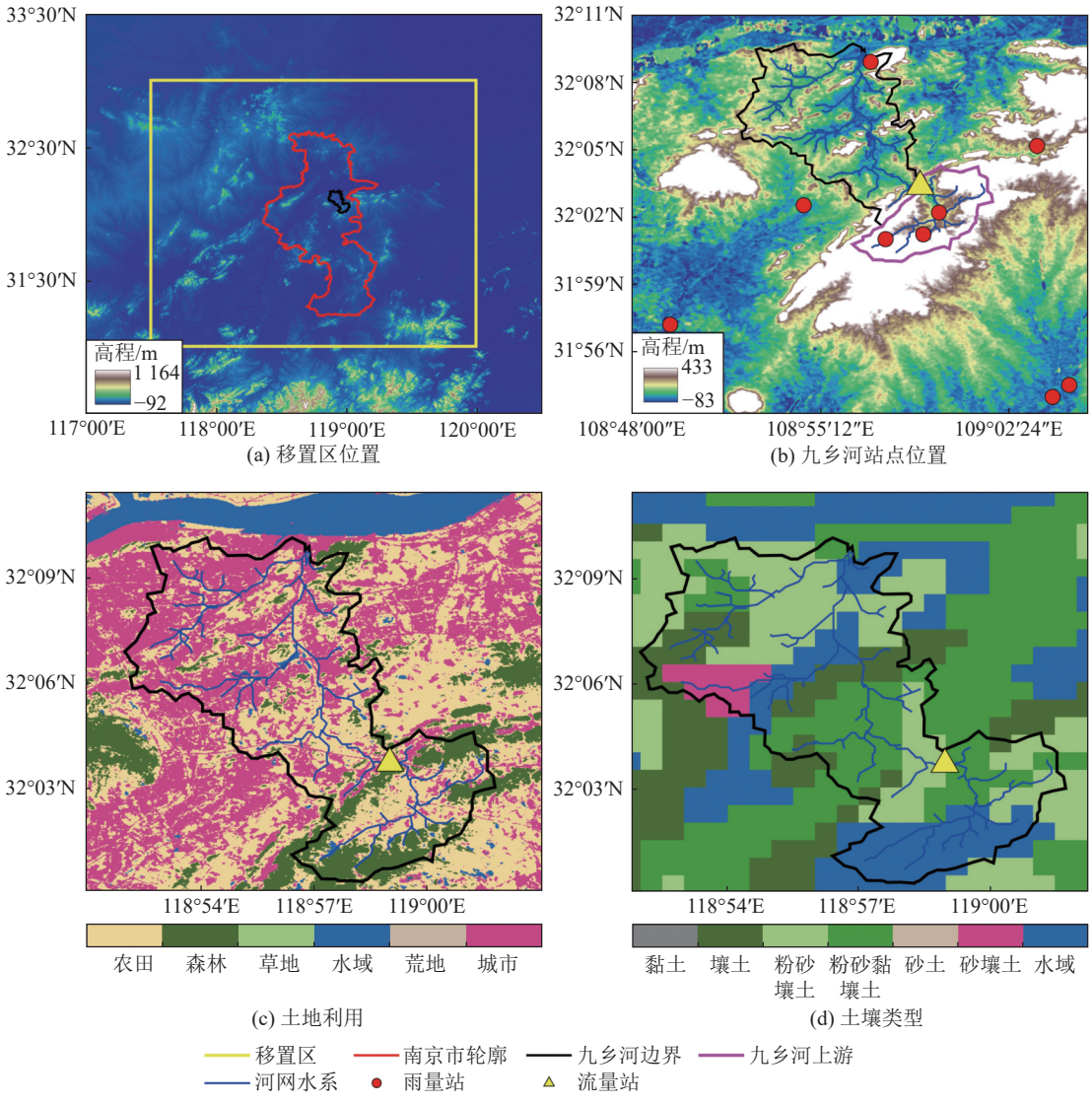


图 1 九乡河流域基本情况

Fig. 1 Overview of the Jiuxianghe River basin

10%；下游流经南京仙林大学城，河道顺直，渠化明显，不透水面约占 32 %(图 1(c))。九乡河流域具有典型亚热带季风气候，年均降水量为 1 106 mm，降水年际变化大；土壤类型以壤土和砂壤土为主，有少量黏土和砂土(图 1(d))，土层较薄，以蓄满产流机制为主。

2009 年以来，九乡河流域经历了快速城市化进程，暴雨洪涝灾害频发，是南京重点防洪区域之一[22]。2021 年起，南京大学和南京市江宁区水务局联合在九乡河流域开展综合水文试验，在上游设置控制断面，通过时差法超声波测流系统进行流量监测，并布设 3 个翻斗式雨量计进行降雨监测。此外，南京市水文局在流域周边布设有 6 个雨量站(图 1(b))。

2　研究方法

本文在九乡河流域建立分布式水文模型 GSSHA，模拟场次洪水过程；采用随机暴雨移置方法对雷达降雨资料进行分析，随机生成大量降雨事件，用于驱动 GSSHA 模型，得到对应洪水过程；借助随机森林模型和可解释机器学习方法识别控制洪水响应的致洪暴雨关键特征，分析致洪暴雨特征与洪峰量级之间的关系，建立流域尺度暴雨洪水响应本构关系模型，并对洪峰量级进行预测。

2.1　GSSHA 水文模型构建

GSSHA 模型是具有明确物理意义的分布式水文模型，由 Downer 等[23] 在 CASC2D 模型的基础上改进和开发。该模型以数字高程模型为基础将流域划分为规则的网格计算单元，使用有限差分的扩散波形式模拟二维坡面汇流[24]，采用一维运动波模拟河道汇流。该模型已在不同国家和地区得到较好应用，如沙特阿拉伯麦加流域、中国石马河流域和黄家河流域等[25-27]。

九乡河流域上游共有 10 场暴雨洪水记录，选择其中 7 场为率定期，其余 3 场为验证期；选择纳什效率系数(E_{NS})为评价指标；采用 Levenberg-Marquardt 自动率定算法[23] 对饱和水力传导度、土壤孔隙度、初始土壤含水量、河道汇流糙率和坡面汇流糙率共 5 个敏感参数进行率定，将最优参数用于全流域暴雨洪水过程模拟。

江苏省气象局提供雷达降雨资料(时间分辨率为 6 min，空间分辨率为 1 km)，用平均偏差校正法[28] 对雷达降雨误差进行校正，校正后的降雨数据用于驱动 GSSHA 模型。参数率定结果显示，场次洪水过程的 E_{NS} 介于 0.7 ~ 0.8 之间，表明 GSSHA 模型能够准确捕捉九乡河流域暴雨洪水响应特征。

本文设置 3 种模拟情景：控制情景(S1)为流域当前下垫面状况；天然情景(S2)将城市土地利用格点全部替换为农田，表示城市化之前的下垫面条件；完全城市化情景(S3)将非城市土地利用格点全部替换为城市，表示完全城市化之后的下垫面条件。通过对比不同模拟情景，分析暴雨洪水响应特征对流域下垫面水文水力学属性的敏感程度。

2.2　随机暴雨洪水事件

随机暴雨移置是降雨资料时空延展的主流方法之一[29]，采用“以空间换时间”思想，以目标区域为中心划定暴雨移置区，在移置区内选择一系列强降雨事件组成“暴雨目录”，结合概率重采样和地理位置移置的方法延长暴雨序列[18]。本文使用校正的雷达降水数据，通过随机暴雨移置生成大量暴雨过程，驱动 GSSHA 模型生成相应洪水过程。具体步骤如下：

(1) 确定移置区。结合研究区地理位置和气候条件特征，通过对历史雨量资料进行分析，选定降雨空间分布最均匀的一个区域作为本文暴雨移置区 T_0，面积约 7 200 km^2(图 1(a))。将 T_0 内与九乡河流域大小、形状和走向基本一致的任意区域称为一个“子移置区”。为简化计算，本文采用规则矩形将九乡河流域进行概化，将该矩形在移置区内遍历移动，获得子移置区集 $\boldsymbol{T}_1$。

(2) 生成暴雨目录。计算子移置区集 $\boldsymbol{T}_1$ 内滑动 X h 窗口内的累计降水量(P_{tot})，统计每个子移置区的最

大 X h 累计降水量(P_{max})，筛选 P_{tot} 超过 P_{max} 的 80% 分位数的 X h 降雨过程，组成暴雨目录 $\boldsymbol{S}$ 和对应子移置区集 $\boldsymbol{T}_2$。对不同降雨历时 P_{tot} 统计分析发现，当 X 取 6 h 时，P_{tot} 变异性最大，表明暴雨目录的代表性较强。

(3) 筛选暴雨目录。对暴雨目录和子移置区集进行筛选，剔除重复的降雨过程。具体做法为：对 P_{tot} 降序排列，得到子移置区集 $\boldsymbol{T}_2'$。从 $T_2'(1)$开始，逐一检验其与剩余子移置区 $T_2'(2)$ ~ $T_2'(n)$是否有重叠，若有重叠，保留 $T_2'(1)$，排除与之重叠的子移置区。以此类推，直至 $\boldsymbol{T}_2'$中任何 2 个子移置区都不相互重叠，得到最终暴雨目录 $\boldsymbol{S}_1$ 和子移置区集 $\boldsymbol{T}_3$。

(4) 提取降雨过程。提取 $\boldsymbol{T}_3$ 中 P_{max} 对应的 6 h 降雨过程，共得到 187 场暴雨过程，组成暴雨目录 $\boldsymbol{S}_2$。

(5) 生成洪水过程。将 $\boldsymbol{S}_2$ 平移到九乡河流域所在位置，驱动 GSSHA 模型，得到 187 场洪水过程。开展场次洪水过程模拟时，流域前期土壤含水量保持不变。

2.3 致洪暴雨特征因子

本文选择 3 组指标描述致洪暴雨特征，分别为：①降雨基本特征：降雨累积量(R_{tot})、强降雨覆盖率(A_{10})、最大降雨强度(R_{max})；②降雨相对流域空间位置特征：标准化降雨权重流距(D_{RW})、强降雨权重流距(D_{RWr})；③降雨相对流域运动特征：降雨强度梯度($\mathrm{d}R/\mathrm{d}t$)、降雨权重流距梯度($\mathrm{d}D_{RW}/\mathrm{d}t$)、强降雨权重流距梯度($\mathrm{d}D_{RWr}/\mathrm{d}t$)。

降雨累积量、强降雨覆盖率的计算公式如下：

$$R_{tot}=\int_0^T R(t)\,\mathrm{d}t \tag{1}$$

$$A_{10}(t)=\frac{1}{A}\int(x|R(x,t)>r)\,\mathrm{d}x \tag{2}$$

式中：A 为流域面积，km^2；$R(x,t)$ 为流域内雷达网格 x 在 t 时刻的平均降雨强度，mm/h；r 为强降雨阈值，设为 10 mm/h。

降雨权重流距($\widetilde{D}_i$)可以衡量降雨与流域空间位置的关系[30]，计算公式如下：

$$\widetilde{D}_i=\int_A w_i(x)\,d(x)\,\mathrm{d}x \tag{3}$$

式中：$d(x)$ 为汇流距离，即流域中任意一点 x 到流域出口的距离；$w_i(x)$ 为权重函数，对于降雨事件 i，可计算降雨权重值为

$$w_i(x)=\frac{R_i(x)}{\int_A R_i(y)\,\mathrm{d}y} \tag{4}$$

式中：$R_i(x)$为降雨事件 i 中流域任意格点 x 上的降水量；$\int_A R_i(y)\,\mathrm{d}y$为计算降雨事件 i 在流域上的平均降雨。

基于流域内最大汇流距离(d_{max})对降雨权重流距进行标准化处理，得到标准化降雨权重流距：

$$D_{RW}=\frac{\widetilde{D}_i}{d_{max}} \tag{5}$$

式中：D_{RW}取值为 0 ~ 1，数值越接近于 0，代表降雨空间分布越靠近流域出口。当使用强降雨强度作为权重时，得到标准化强降雨权重流距。本文所有与降雨权重流距有关的特征因子均由标准化降雨权重流距计算所得。通过计算所有降雨事件的平均权重，得到九乡河流域平均降雨权重流距为 0.47 km。

降雨强度梯度表示雨强随时间变化的快慢程度，降雨权重流距梯度表示暴雨相对流域的移动速度和方向，正值表示向流域上游移动，负值则表示向下游移动，绝对值越大表明移动速度越快。二者分别用降雨过程的雨强、D_{RW} 随时间的变化率表示，采用最小二乘法拟合法对斜率进行计算[18]。

2.4 暴雨洪水响应本构模型构建

SHAP(Shapley Addictive exPlanations)是一种可解释机器学习方法，由 Lundberg 等[31]基于博弈论提出，已被应用于分析城市洪水模拟、洪水预警管理等[32-33]影响因子的重要性。本文采用随机森林模型[34]和 SHAP 定量识别致洪暴雨特征对洪水响应的贡献。从暴雨目录中随机选择 60% 为训练集，剩余 40% 为验证集，建立

暴雨特征因子与洪峰量级之间的随机森林模型，剔除方差膨胀因子大于 5 的特征因子来消除自变量之间的多重共线性。设置随机森林决策数目为 100，最小叶子数为 5，以确定性系数（R^2）、平均绝对误差（E_{MA}）、均方根误差（E_{RMS}）为模型检验指标，多次循环保证 SHAP 结果可靠性。

通过分析洪峰与各特征因子之间的关系，构建本构关系模型，随机选择 80% 洪水过程进行参数率定，其余 20% 用于模型验证。采用经验频率公式对洪峰量级进行重现期计算，以 5 年一遇为阈值将事件分为低量级和高量级洪水事件，计算拟合精度 R^2、E_{MA}、E_{RMS}，验证本构关系模型对不同量级洪水预测的适用性。3 种下垫面情景的模拟采用同样流程处理。

3　结果与分析

3.1　随机致洪暴雨事件特征

结果表明，约 70% 降雨过程的强降雨覆盖整个九乡河流域，表明该地区暴雨空间尺度较大，容易发生全流域洪水响应。对最大雨强进行频率分析表明，降雨事件重现期主要集中在 5 ~ 50 a，最极端事件重现期超过 200 a。

从空间分布上看，暴雨目录与站点观测的平均降雨累积量在空间上具有高度一致性，整体呈现下游偏高的分布特征。从量级上看，暴雨目录结果高于站点观测，表明通过随机暴雨移置可以扩展目标流域历史致洪暴雨的表征（图 2）。65% 降雨过程的 D_{RW} 小于流域平均值，表明大部分过程的暴雨中心靠近流域中下游，与累积降雨量在流域下游偏多的分布特征一致。

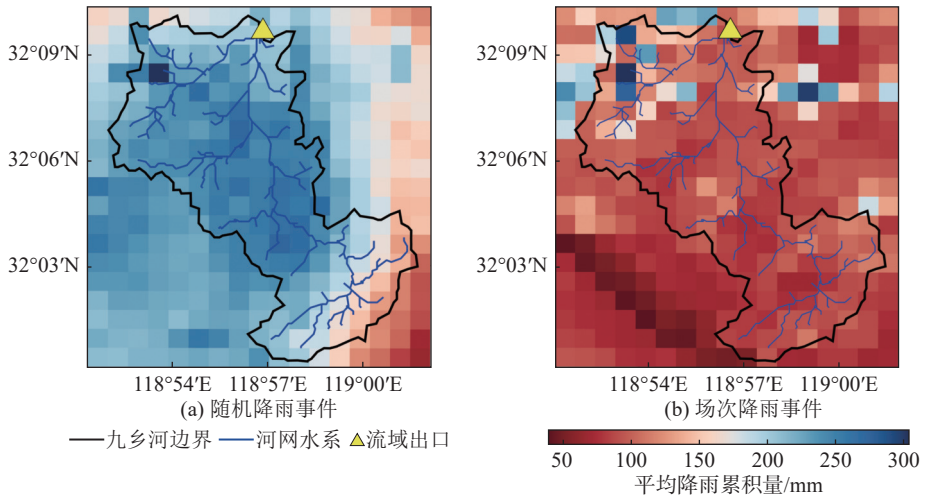


图 2　随机和场次降雨事件平均累积降雨量空间分布

Fig. 2　Spatial distribution of mean rainfall accumulation for the entire storm catalog and in-situ rainfall events

3.2　场次暴雨洪水响应特征分析

挑选 2 组典型降雨过程，分析洪水响应特征，结果如图 3 所示。A 组最大小时雨强相似，洪峰流量（Q_p）量级差异较大，其中事件 A1 的洪峰量级是事件 A2 的 2 倍，事件 A2 雨峰峰现时间比事件 A1 出现晚；B 组洪峰流量量级相似，最大小时雨强相差较大，其中事件 B2 最大小时雨强为事件 B1 的 2.5 倍，事件 B1 洪水过程线比事件 B2 更为平缓。

从降雨时程分布特征看，历时短且时程分布集中的暴雨能产生更高洪峰量级，且洪水过程线形状更加尖瘦；历时长且时程分布分散的暴雨所产生的洪水过程线相对平缓（图 3(c)—图 3(d)）。从降雨空间运动特征

看，事件 A1 和事件 A2 的最大雨强相同，但事件 A1 的 dD_{RW}/dt 为负值，表明降雨向流域下游移动，通过与洪水波演进发生“叠加效应”，放大了洪峰量级。事件 A1 和事件 B1 2 场致洪暴雨均向流域下游移动，但事件 B1 降雨时程分布更均匀，表明稳定且持续的降雨有利于土壤下渗，导致产流和洪水响应较为缓慢，因此事件 B1 的洪峰量级小于事件 A1。

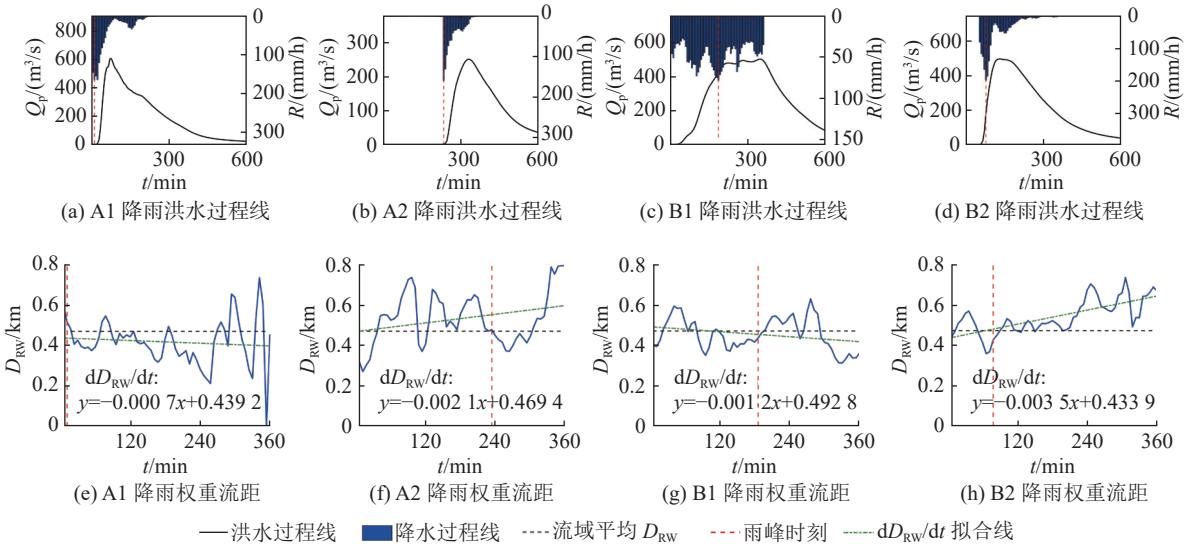


图 3 典型暴雨洪水事件流域平均降雨、洪水响应及降雨权重流距的时间序列

Fig. 3 Rainfall runoff processes and D_{RW} time series for typical storm events

表 1 显示了致洪暴雨特征因子与洪峰量级的相关系数。3 种情景中，S1 中洪峰量级与 R_{max} 相关系数最大，其次为 R_{tot}，与 D_{RWr} 和 dD_{RWr}/dt 相关性较弱；S3 与 S1 相似；S2 中洪峰量级与 R_{max}、R_{tot} 的相关性减弱，与 D_{RWr}、dD_{RWr}/dt 的相关性增强。洪峰量级与 dD_{RWr}/dt 存在明显负相关关系，表明当暴雨云团移动和洪水演进形成“叠加效应”时，容易产生更高洪峰量级，二者相关性在 S2 中最强，表明天然条件下，流域产汇流特征的空间异质性较强，洪水响应受到致洪暴雨时空结构特征影响较大。

表 1 不同情景下洪峰与降雨特征因子的相关系数

Table 1 Spearman's correlation coefficient between flood peak magnitudes and rainfall indices

变量	S1	S2	S3
R_{tot}	0.86*	0.86*	0.86*
R_{max}	0.93*	0.89*	0.93*
D_{RW}	− 0.04	0.02	− 0.03
D_{RWr}	0.16*	0.19*	0.17*
dR/dt	− 0.07	− 0.04	− 0.07
dD_{RW}/dt	− 0.12	− 0.18	− 0.11
dD_{RWr}/dt	− 0.26*	− 0.38*	− 0.25*

注：*表示显著相关，p=0.05。

随机森林模型能够较为准确地预测洪峰量级，3 种情景中训练集和验证集的平均 R^2 达 0.7 ~ 0.9，E_{MA} 为 15 ~ 30 m^3/s，E_{RMS} 为 30 ~ 60 m^3/s。使用 SHAP 法对特征因子的贡献度排序，发现 R_{tot}、R_{max}、dD_{RWr}/dt 的 SHAP 值明显高于其他特征因子，表明对随机森林模拟精度贡献较大(图 4)。

对于控制情景，高值 R_{tot} 和 R_{max} 比 D_{RWr} 的贡献度大，表明 R_{tot} 和 R_{max} 越大，洪峰量级越大；当降雨中心位于流域上游时，对洪峰量级起到增强作用，但相比于 R_{tot}、R_{max} 和 dD_{RWr}/dt 对洪峰的影响，这种影响较

小。$\mathrm{d}D_{\mathrm{RWr}}/\mathrm{d}t$ 较小时，贡献度较高，表明 D_{RWr} 随时间基本不发生变化时，洪峰量级越大。对于天然情景，$\mathrm{d}D_{\mathrm{RWr}}/\mathrm{d}t$ 对洪峰的贡献最大，表明洪水响应受降雨空间运动影响变大，可能与自然流域下垫面属性异质性较强有关，城市扩张减弱了下垫面空间异质性，导致洪水响应对降雨空间运动的敏感程度变弱。对于完全城市化情景，暴雨洪水响应关系较为简单，洪峰量级主要由 R_{tot} 和 R_{max} 决定，与降雨时空特征关系较弱(图 4(c))。

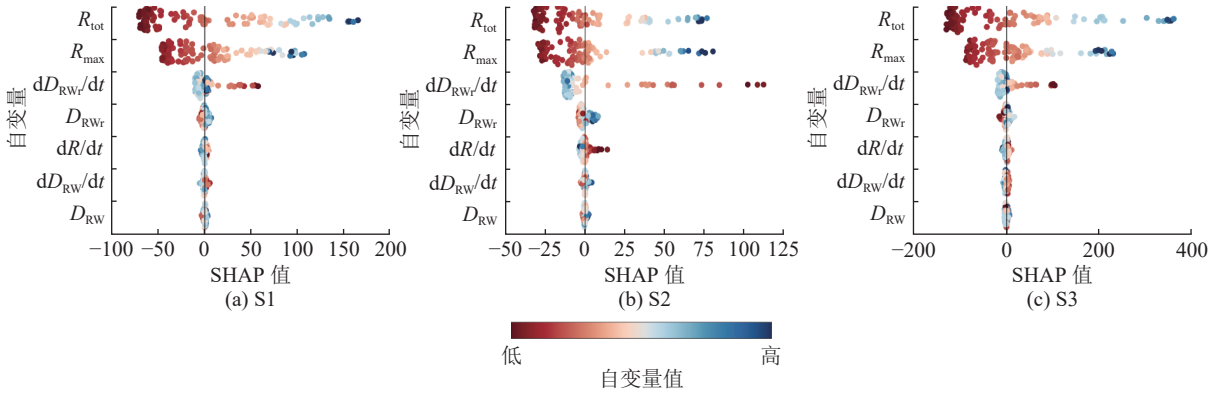


图 4　降雨特征因子贡献度排序

Fig. 4　SHAP value rank of rainfall indices for the three scenarios

3.3　暴雨洪水本构关系构建及适用性

图 5 展示了洪峰量级与单个暴雨特征因子的统计关系。R_{max} 和 R_{tot} 与洪峰量级表现为幂函数关系，

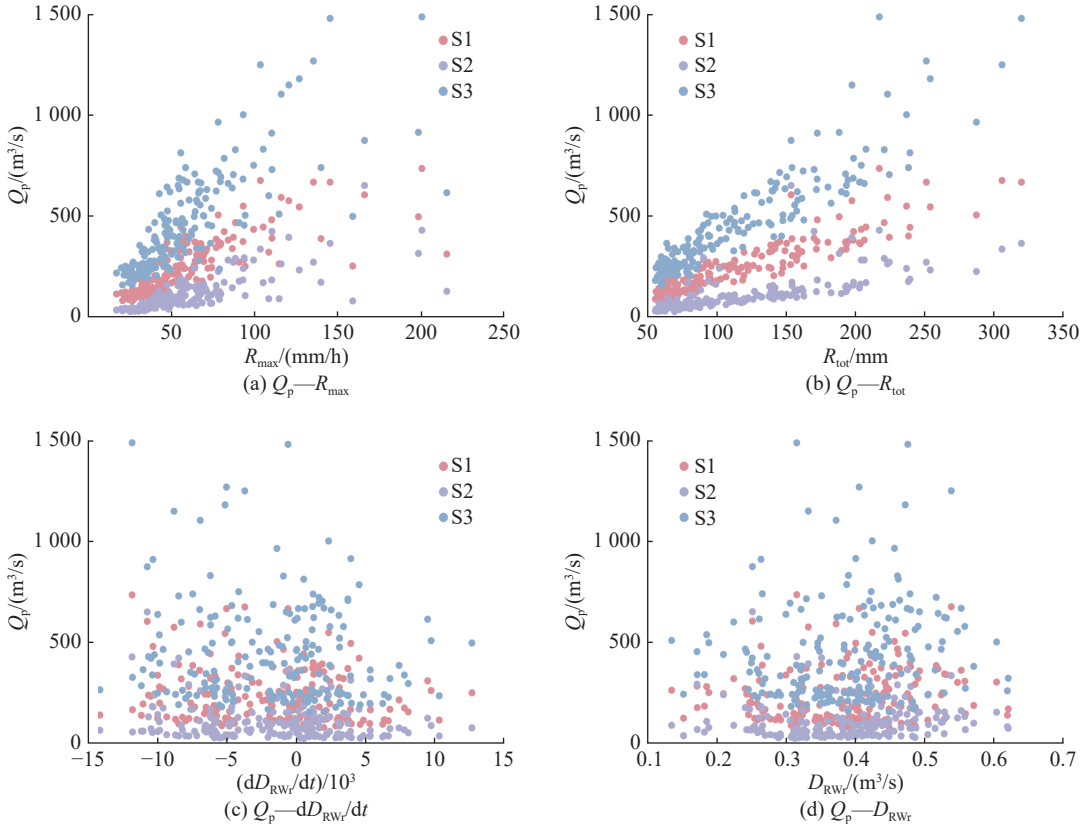


图 5　不同情景下洪峰与特征因子变化散点图

Fig. 5　Scatter plot between flood peak and rainfall indices in three simulation scenarios

dD_{RWr}/dt 与洪峰在形状上呈现非单调函数关系。基于统计关系提出的流域暴雨洪水响应本构关系模型形式为

$$Q_p = aR_{max}{}^b \times R_{tot}{}^c \times \ln D_{RWr} \times \exp[d(dD_{RWr}/dt)] \quad (6)$$

式中：a、b、c、d 为模型参数(具体取值见表 2)。

基于构建的本构关系模型，对洪峰量级进行预测，结果如图 6 所示，预测值与模型模拟值的 R^2 为 0.7 ~ 0.9，E_{MR} 为 0.154。天然情景的模拟效果略低于控制情景，完全城市化情景的模拟效果优于控制情景。同一情景下，模型对小量级洪水的预测精度低于大洪水，这可能与构建模型时小量级洪水样本较少有关。

表 2 本构关系模型参数

Table 2 Coefficients in the constitutive relationship between flood peak and rainfall indices

模拟情景	a	b	c	d
S1	0.230	0.455	0.700	− 0.041
S2	0.079	0.676	0.532	− 0.450
S3	0.432	0.470	0.688	− 0.019

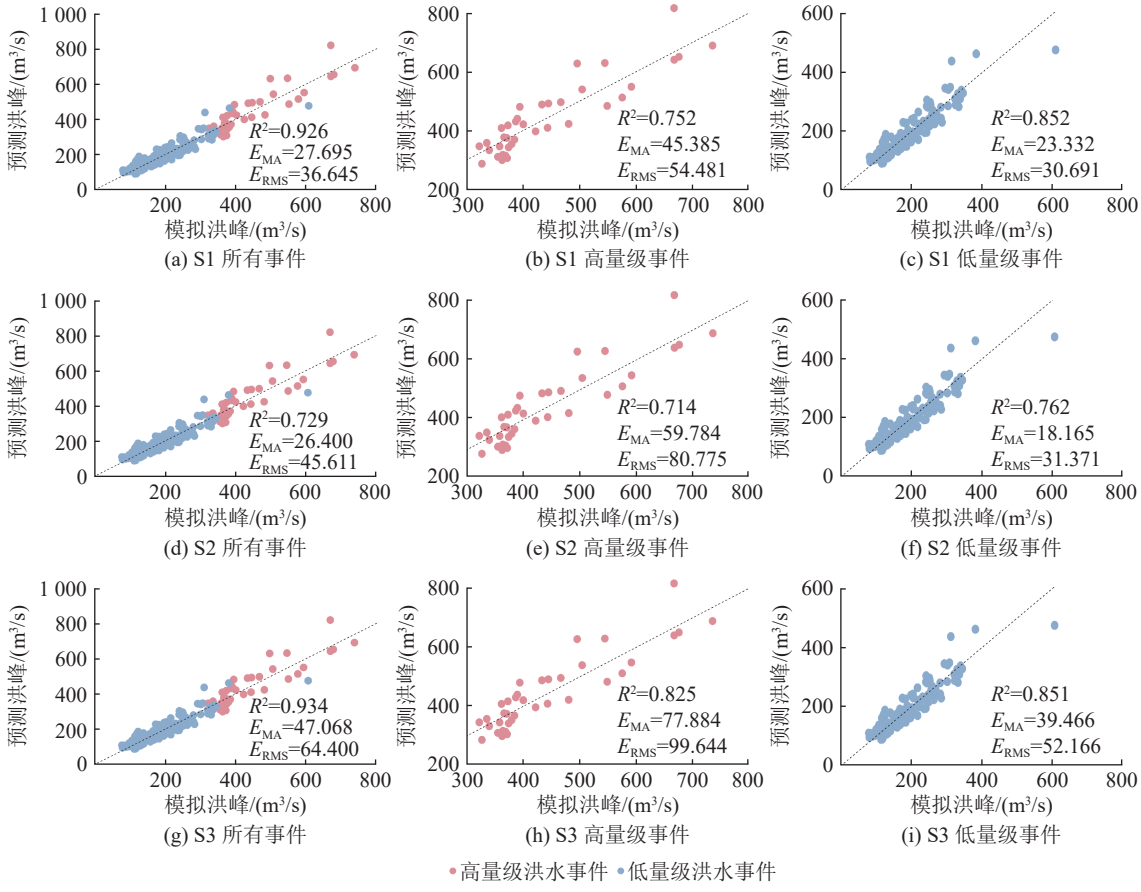


图 6 模型模拟与本构关系预测洪峰量级

Fig. 6 Comparison of simulated and predicted flood peak using established hydrological constitutive relationship

4 结 论

本研究借助随机暴雨移置和分布式水文模型 GSSHA，获得九乡河流域 187 场洪水过程，通过解析致洪暴

雨特征与洪水响应的关系，构建了流域尺度暴雨洪水响应本构关系模型。主要结论如下：

(1)分布式水文模型 GSSHA 可以准确刻画九乡河流域的暴雨洪水响应特征。基于随机暴雨移置和分布式水文模拟方法生成了致洪暴雨和流域洪水响应过程的大样本，为缺资料小流域暴雨洪水响应研究提供了新范式。

(2)致洪暴雨时空结构特征是控制流域洪水响应的关键因素，城市扩张对流域下垫面属性的改变在一定程度上弱化了洪水响应对致洪暴雨特征的敏感程度。当流域完全城市化时，暴雨洪水响应关系趋于简单，洪峰量级主要由累积降水量和雨强控制。

(3)构建了考虑致洪暴雨时空特征的暴雨洪水响应本构关系模型，可以用于预测洪峰量级，预测值与模拟值的平均相对误差约为 0.154，预测精度较高。未来需要在本构关系模型中增加对流域下垫面水文水力学属性(如不透水面分布、土壤属性等)的表征，提高本构关系模型的普适性。

参考文献：

[1] 王强，许有鹏，于志慧，等. 快速城市化地区多尺度水文观测试验与暴雨洪水响应机理分析 [J]. 水科学进展，2022，33(5)：743-753.(WANG Q，XU Y P，YU Z H，et al. Multi-scale hydrological experimental observations and responding mechanisms of storm floods in rapid urbanization areas[J]. Advances in Water Science，2022，33(5)：743-753.(in Chinese))

[2] 徐宗学，陈浩，任梅芳，等. 中国城市洪涝致灾机理与风险评估研究进展 [J]. 水科学进展，2020，31(5)：713-724.(XU Z X，CHEN H，REN M F，et al. Progress on disaster mechanism and risk assessment of urban flood/waterlogging disasters in China[J]. Advances in Water Science，2020，31(5)：713-724.(in Chinese))

[3] YANG L，SMITH J，BAECK M L，et al. Structure and evolution of flash flood producing storms in a small urban watershed[J]. Journal of Geophysical Research：Atmospheres，2016，121(7)：3139-3152.

[4] 孙延伟，许有鹏，高斌，等. 城镇化下流域不透水面扩张对洪峰的影响：以南京秦淮河为例 [J]. 湖泊科学，2021，33(5)：1574-1583.(SUN Y W，XU Y P，GAO B，et al. Influence of impervious surface expansion on flood peak under urbanization：a case study of Qinhuai River in Nanjing[J]. Journal of Lake Sciences，2021，33(5)：1574-1583.(in Chinese))

[5] 宋晓猛，徐楠涛，张建云，等. 中国城市洪涝问题：现状、成因与挑战 [J]. 水科学进展，2024，35(3)：357-373.(SONG X M，XU N T，ZHANG J Y，et al. Urban flooding in China：current status，causes and challenges[J]. Advances in Water Science，2024，35(3)：357-373.(in Chinese))

[6] FREEZE R A，HARLAN R L. Blueprint for a physically-based，digitally-simulated hydrologic response model[J]. Journal of Hydrology，1969，9(3)：237-258.

[7] 兰旻. 山坡尺度降雨产流过程宏观本构关系研究 [D]. 北京：清华大学，2014.(LAN M. Study on macroscopic constitutive relation of rainfall-runoff process on hillside scale[D]. Beijing：Tsinghua University，2014.(in Chinese))

[8] 梁忠民，赵建飞，段雅楠，等. 微分形式新安江模型 [J]. 水科学进展，2024，35(3)：374-386.(LIANG Z M，ZHAO J F，DUAN Y N，et al. Differential-form Xin'anjiang model[J]. Advances in Water Science，2024，35(3)：374-386.(in Chinese))

[9] 赵铜铁钢，张弛，田雨，等. 全球气象预报驱动流域水文预报研究进展与展望 [J]. 水科学进展，2024，35(1)：156-166.(ZHAO T T G，ZHANG C，TIAN Y，et al. Research progresses and prospects of catchment hydrological forecasting driven by global climate forecasts[J]. Advances in Water Science，2024，35(1)：156-166.(in Chinese))

[10] TIAN F，HU H，LEI Z，et al. Extension of the representative elementary watershed approach for cold regions via explicit treatment of energy related processes[J]. Hydrology and Earth System Sciences，2006，10(5)：619-644.

[11] KLEMEŠ V. Conceptualization and scale in hydrology[J]. Journal of Hydrology，1983，65(1/2/3)：1-23.

[12] TIAN F Q，MOU L Q，HU H P. Characteristics of soil water retention curve at macro-scale[J]. Science in China Series E：Technological Sciences，2009，52(10)：2990-2996.

[13] 郭伟建，刘强，赵建锋，等. 基于分形的运动波尺度本构关系研究 [J]. 水力发电，2021，47(8)：25-31.(GUO W J，LIU Q，ZHAO J F，et al. Research on constitutive relationship of motion wave scale based on fractal[J]. Water Power，2021，47(8)：25-31.(in Chinese))

[14] 沈烨，张晶寒，袁慧玲，等. 南京城市下垫面对夏季暴雨云团特征的影响 [J]. 水科学进展，2024，35(3)：453-462.(SHEN Y，ZHANG J H，YUAN H L，et al. Urban impacts on the structure and evolution properties of warm-season thunderstorms over Nanjing，China[J]. Advances in Water Science，2024，35(3)：453-462.(in Chinese))

[15] ZHOU Q Q，LENG G Y，HUANG M Y. Impacts of future climate change on urban flood volumes in Hohhot in Northern China：benefits of climate change mitigation and adaptations[J]. Hydrology and Earth System Sciences，2018，22(1)：305-316.

[16] YANG L，SMITH J A，BAECK M L，et al. Flash flooding in small urban watersheds：storm event hydrologic response[J]. Water Resources Research，2016，52(6)：4571-4589.

[17] 李冰雪，史超，侯精明，等. 沿海城市台风暴雨时空变化致涝特征模拟 [J]. 水科学进展，2024，35(3)：440-452.(LI B X，SHI C，HOU J M，et al. Characteristics of urban waterlogging induced by spatiotemporal variations of typhoon rainfall in a coastal city[J]. Advances in Water Science，2024，35(3)：440-452.(in Chinese))

[18] ZHOU Z Z，SMITH J A，BAECK M L，et al. The impact of the spatiotemporal structure of rainfall on flood frequency over a small urban watershed：an approach coupling stochastic storm transposition and hydrologic modeling[J]. Hydrology and Earth System Sciences，2021，25(9)：4701-4717.

[19] TEN VELDHUIS M C，ZHOU Z Z，YANG L，et al. The role of storm scale，position and movement in controlling urban flood response[J]. Hydrology and Earth System Sciences，2018，22(1)：417-436.

[20] YANG J，HUANG X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. Earth System Science Data，2021，13(8)：3907-3925.

[21] FAO Soils Portal Food and Agriculture Organization of the United Nations. Harmonized world soil database v1.2 [EB/OL].(2012-02-01)[2024-08-27]. https：//www.fao.org/soils-portal/en/.

[22] 胡和兵，刘红玉，郝敬锋，等. 南京市九乡河流域景观格局空间分异对河流水质的影响 [J]. 环境科学，2012，33(3)：794-801.(HU H B，LIU H Y，HAO J F，et al. Influence of spatial difference on water quality in Jiuxiang River watershed，Nanjing[J]. Environmental Science，2012，33(3)：794-801.(in Chinese))

[23] DOWNER C W，OGDEN F L. Gridded surface subsurface hydrologic analysis (gssha) user's manual; version 1.43 for watershed modeling system 6.1[M]. Fort Belvoir，VA：Defense Technical Information Center，2006.

[24] KIRKER A N，TORAN L. When impervious cover doesn't predict urban runoff：lessons from distributed overland flow modeling[J]. Journal of Hydrology，2023，621：129539.

[25] AL-AREEQ A M，AL-ZAHRANI M A，SHARIF H O. The performance of physically based and conceptual hydrologic models：a case study for Makkah watershed，Saudi Arabia[J]. Water，2021，13(8)：1098.

[26] 杨悦莹，朱志华，蔡宴朋，等. 城市流域径流峰值对降雨时空异质性的响应 [J]. 水资源保护，2021，37(6)：27-33，66.(YANG Y Y，ZHU Z H，CAI Y P，et al. Response of peak runoff to temporal and spatial heterogeneity of rainfall in urban watershed[J]. Water Resources Protection，2021，37(6)：27-33，66.(in Chinese))

[27] 张汉辰，蒋春源. GSSHA 模型在黄家河流域的次洪模拟研究 [J]. 中国农村水利水电，2023(2)：22-27.(ZHANG H C，JIANG C Y. Application of GSSHA model to flood simulation in Huangjiahe watershed[J]. China Rural Water and Hydropower，2023(2)：22-27.(in Chinese))

[28] YANG L，SMITH J A，WRIGHT D B，et al. Urbanization and climate change：an examination of nonstationarities in urban flooding[J]. Journal of Hydrometeorology，2013，14(6)：1791-1809.

[29] 周正正，刘曙光，WRIGHT D. 基于随机暴雨移置方法的城市设计暴雨分析 [J]. 水科学进展，2020，31(4)：583-591.(ZHOU Z Z，LIU S G，WRIGHT D. Analysis of urban design storm based on stochastic storm transposition[J]. Advances in Water Science，2020，31(4)：583-591.(in Chinese))

[30] SMITH J A，BAECK M L，MEIERDIERCKS K L，et al. Field studies of the storm event hydrologic response in an urbanizing watershed[J]. Water Resources Research，2005，41(10)：e2004wr003712.

[31] LUNDBERG S M，LEE S I. A unified approach to interpreting model predictions[C]//Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS'17). NY，USA：Curran Associates Inc.，Red Hook，2017：4768-4777.

[32] LEE J Y，ABBAS A，MCCARTY G W，et al. Estimation of base and surface flow using deep neural networks and a hydrologic model in two watersheds of the Chesapeake Bay[J]. Journal of Hydrology，2023，617：128916.

［33］ZHOU S Q，LIU Z Y，WANG M，et al. Impacts of building configurations on urban stormwater management at a block scale using XGBoost[J]. Sustainable Cities and Society，2022，87：104235.

［34］TYRALIS H，PAPACHARALAMPOUS G，LANGOUSIS A. A brief review of random forests for water scientists and practitioners and their recent history in water resources[J]. Water，2019，11(5)：910.

Constitutive relationship of basin-scale rainfall-flood response in an urbanized watershed*

WEI Yifei[1,2]，CUI Yanping[3]，ZHOU Ang[2,4]，WANG Qiang[1,2]，YANG Long[1,2]

（1. *School of Geography and Ocean Sciences*，*Nanjing University*，*Nanjing* 210023，*China*；2. *Frontiers Science Center for Critical Earth Material Cycling*，*Nanjing University*，*Nanjing* 210023，*China*；3. *Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau*，*Nanjing* 210029，*China*；4. *School of Atmospheric Sciences/Key Laboratory of Mesoscale Severe Weather*，*Ministry of Education*，*Nanjing University*，*Nanjing* 210023，*China*）

Abstract：Spatial and temporal rainfall characteristics have an important impact on flood response in urban areas. To explore the characteristics of flood response in an urbanized watershed，a distributed hydrological model (GSSHA) was constructed in the Jiuxianghe River basin，Nanjing，China. Using the stochastic storm transposition method，a large set of rainfall processes was generated and used to simulate flood responses under different underlying surface scenarios. By employing machine learning approach to identify key spatial-temporal storm characteristics，a basin-scale flood response constitutive relationship was identified. GSSHA accurately simulated the characteristics of the flood response in the Jiuxianghe River basin，with the spatiotemporal properties of flood-producing storms being crucial in the flood response. Urbanization weakened the dependence of the flood response on storm characteristics. The basin-scale constitutive relationship，with its high prediction accuracy (average relative error of approximately 0.154)，provides a mathematical expression for understanding flood response in a small urban watershed. These insights will offer scientific supports for efficient flood prediction and forecasting in urban areas.

Key words：hydrological model GSSHA；stochastic storm transposition；spatial and temporal rainfall characteristics；rainstorms and floods

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China（No.52379012）and the Excellent Youth Foundation of Jiangsu Province, China（No. BK20231541）.

DOI： 10.14042/j.cnki.32.1309.2025.01.011

管网排水能力对雨水口堵塞和管道淤积的响应规律模拟

侯精明[1]，王梓驿[1]，李东来[1]，卜良河[1]，陈光照[1]，杨宇英[2]，方 媛[3]

（1. 西安理工大学西北旱区生态水利国家重点实验室，陕西 西安 710048；2. 渭南市住房和城乡建设局，陕西 渭南 714025；
3. 陕西渭河生态科技研发有限公司，陕西 西安 710000）

摘要：雨水管网系统作为城市排涝的主要通道，其排水性能易受管道淤积和雨水口堵塞的影响，探明雨水口堵塞和管道淤积程度对管网排水能力的影响，对评估城市洪涝发展过程具有重要意义。以唐山市路北区龙王庙以西为研究区域，基于 GAST-SWMM 耦合模型，对不同雨水口堵塞和管道淤积条件下的管网排水过程和地表积水量进行模拟分析。结果表明：随着管道淤积和雨水口堵塞程度的增加，管网排水能力逐步下降，且变化趋势越发显著；管道无淤积时，雨水口由无堵塞增加至堵塞 75%，不同降雨重现期下峰值流量相较无堵塞时平均减少 5.30%～37.8%，地表积水量平均增加 2.48%～14.6%；雨水口无堵塞时，管道由无淤积到淤积 75% 时，峰值流量平均减少 20.9%～84.6%，地表积水量平均增加 4.46%～24.1%；此外，当堵塞或淤积单一因素逐渐加剧并达到显著水平时，另一因素对管网系统排水能力的影响会相对减弱。研究结果可为不同状态下雨水管网排水能力分析和水灾害防治提供依据。

关键词：排水管网；雨水口堵塞；管道淤积；峰值流量；地表积水量
中图分类号：TU992 **文献标志码：**A **文章编号：**1001-6791(2025)01-0122-10

在全球气候变化和快速城镇化的影响下，城市径流系数逐年升高，雨水径流量持续增加，城市洪涝灾害日益严重，给人民生命财产安全构成了重大威胁。雨水口作为城市内涝排水系统的重要组成部分，是下排地表径流的关键设施。但随着城市化的快速推进，地表漂浮物随径流输移堵塞排水系统的现象日益普遍[1-4]。雨水口和排水管道的淤堵不仅压缩了排水管道的输水空间，而且会增加水流阻力、降低管道过流能力，造成管道排水不畅，从而引发不同程度的城市内涝[5-7]。因此，模拟分析雨水口不同堵塞程度和管道不同淤积程度对管网系统泄流能力的影响规律至关重要。

针对雨水口和排水管道的淤堵现象，专家学者已从不同方面开展了研究并取得了一定的成果。陈倩等[8]开展了 76 组不同来流水深及流速下的泄流能力试验，发现雨水井未充满时路面雨水以堰流形式下泄，充满后则以管嘴出流形式下泄，但并未考虑雨水口堵塞的影响；夏军强等[9]通过概化水槽试验，分析了较大来流水深下进水篦和连接管堵塞对雨水口泄流能力的影响，结果表明两者均显著削弱泄流能力，且连接管堵塞影响更大；于森等[10]比较了偏沟式与联合式雨水口物理模型在堵塞情况下的泄流能力，结果显示联合式雨水口抗堵塞能力更强；鲁笑笑[11]采用 InfoWorks ICM 构建二维排水模型，发现单篦、双篦和四篦雨水口对河道出口断面流量过程线的影响较小。上述研究均未系统性分析雨水口堵塞对管网系统排水能力的影响规律。卜良河等[12]基于 GAST(GPU Accelerated Surface Water Flow and Transport Model)和 SWMM(Storm Water Management Model)构建耦合一维管网和二维地表的城市雨洪数值模型，模拟分析不同降雨重现期和雨篦子堵塞状态对排水过程的影响，但未考虑管道淤积；吴慧英等[13]利用 SWMM，提出以全局管网淤积系数

收稿日期：2024-07-15；**网络出版日期：**2024-12-24
网络出版地址：https://link.cnki.net/urlid/32.1309.P.20241224.0838.002
基金项目：国家自然科学基金项目(52409104；52079104)
作者简介：侯精明(1982—)，男，河北怀安人，教授，博士，主要从事地表水动力及其附随过程数值模型研究。E-mail：jingming.hou@xaut.edu.cn
通信作者：李东来，E-mail：lidonglai@xaut.edu.cn

(GSC)作为自变量、节点溢流数量及溢流量作为因变量，模拟并分析城市排水系统，但未分析管网排口流量过程；郭敏鹏等[14]基于SWMM，按全局管网淤积系数将清淤前工况分为7种情况，模拟分析不同设计降雨条件下的管网排口流量过程和总溢流量，以确定重点清淤方案，但未分析管道淤积对管网排水能力的影响规律；李璟冉等[15]采用相对过水能力和相对超载总时间衡量排水能力衰减，利用SWMM在不同管道淤积程度情况下模拟分析系统排水能力的变化，但只给出管网功能衰退3个阶段的分界线淤积程度；贾高峰等[16]基于SWMM，以全局管道淤积系数研究不同淤积程度下的清淤必要性，发现当GSC超过50%时，管网排水能力急剧下降。上述研究均未具体分析管道淤积对管网排水能力的影响规律。在实际中，管网系统排水能力同时受雨水口和管道的制约。当前研究多聚焦于单一的雨水口堵塞或管道淤积情况，综合考虑两者对管网系统排水能力的影响至关重要。

本文同时从雨水口堵塞和管道淤积两方面出发，分别改变雨水口堵塞程度和管道淤积程度，模拟分析管网系统排口峰值流量和地表总积水量的变化，以此来研究管网系统排水能力的变化规律。研究结果以期为优化城市洪涝模拟计算精度和相关实际工况的计算提供参考。

1　研究区域概况及降雨资料

1.1　研究区域概况

研究区域[17]位于河北省唐山市路北区龙王庙以西，总面积约13.1 km^2。研究区域地形高程数据精度为8 m×8 m，网格数量为25万个，高程范围为6.82 ~ 50 m，边界为开边界，允许自由出流。

1.2　降雨资料

设计降雨采用当地有关部门提供的设计暴雨强度(i)计算公式，如式(1)所示。

$$i=\frac{1\,983.569(1+0.685\lg p)}{(t+10.233)^{0.702}} \tag{1}$$

式中：p为降雨重现期，a；t为降雨时长，min。

选用雨峰系数(r)为0.4，雨峰位置较靠前，生成降雨历时为2 h，重现期分别为1、5、20、30 a的常规设计暴雨和50、100 a的超标设计暴雨。

唐山市2022年8月18—19日逐5 min降雨情况如图1所示，总降水量为200.4 mm，最大雨强为96 mm/h。

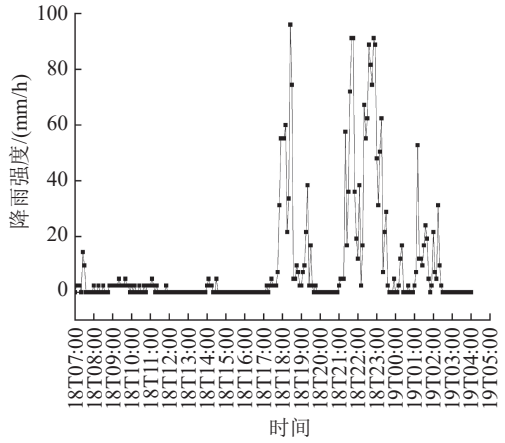


图1　唐山市2022年8月18—19日逐5 min降水量

Fig. 1　5min precipitation on August 18—19, 2022 of Tangshan City

2 模型构建

2.1 耦合模型介绍

2.1.1 SWMM

SWMM 是美国环境保护署开发的一种动态降雨径流模拟模型，用于对城市地区的径流量和径流水质进行单次事件模拟或长期连续模拟，以及与雨水径流、综合污水管和下水道及其他排水系统相关的规划、分析和设计工作[18]。SWMM 构成包括地表产流、地表汇流、管网汇流和水质模拟 4 个方面。该模型通过求解圣维南方程来模拟水流在管网中的运动，并提供了运动波、扩散波和动力波 3 种不同的计算方法[19]。由于动力波计算方法能够模拟复杂的水体流动情况，对实际情况中的管网超载、回流、明满流交替运动、进口和出口损失等复杂现象进行模拟演算，且完整求解了圣维南方程组，理论上与实际情况最为相符[20-22]。

2.1.2 GAST

GAST 是西安理工大学等开发的二维地表水动力模型，模型控制方程为平面二维圣维南方程组[23]，其对地表水动力过程能进行准确的模拟。

2.1.3 GAST-SWMM 耦合模型

耦合 GAST 和 SWMM 可将城市二维地表水动力过程与地下一维管网排水过程结合起来。其耦合依据是雨水井节点处的水量交换。当管道内水位低于或等于管道最大承载高度时，雨水顺利通过管网排入污水处理厂或受纳水体；当管道内水位高出管道最大承载高度时，多余的水量将通过雨水井外溢到地面；当管道排水能力恢复后，地表溢流又将通过雨水井进入管网最终排入污水处理厂或受纳水体。采用堰流公式和孔流公式分别计算雨水进入管道内的水量和从管道内外溢到地表的水量[22]。

GAST 采用 Godunov 有限体积法和二阶 MUSCL(守恒律单调迎风格式)算法，可以保持物质守恒，解决不连续问题；水通量和动量通量由 HLLC(Harten-Lax-van Leer-Contact)近似黎曼解算器计算，通过新的斜率通量方法处理斜率源项，以应用于任何复杂的网格，摩擦源项通过半隐式方法计算，采用两阶段显式龙格-库塔时间积分方案计算每个时间步的流动变量，同时引入了 GPU 加速技术提高模型计算效率[24]。

2.2 耦合模型率定和验证

参考文献 [21] 对模型参数取值进行率定，多次调整其稳定下渗值和管道曼宁值，最终确定如表 1。

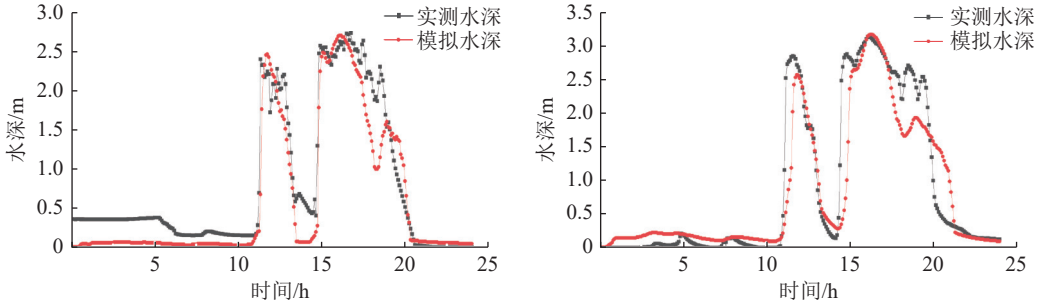
表 1 唐山市土地利用类型的下渗、曼宁值选取

Table 1 Selection of infiltration and manning values for different land use of Tangshan City

土地利用类型	曼宁取值	稳定下渗率/(mm/h)
道路	0.013	0
城镇农村住宅	0.013	0
水域	0.025	/
林地	0.060	90
不透水地面	0.013	0
草地	0.110	16.8
耕地	0.045	63
公园与绿地	0.100	115

2022 年 8 月 18 日龙富南路与龙泽北路交叉口、老唐丰路口处模拟管网液位结果与实测液位变化基本吻合，模拟结果如图 2 所示，纳什效率系数分别达到 0.821 9 和 0.863 2，液位峰值相对误差分别为 1.12% 和

1.14%，说明耦合模型模拟效果良好。



(a) 老唐丰路口　　(b) 龙富南路与龙泽北路交叉口

图 2　管道水深过程模拟效果

Fig. 2　Simulation effect of pipeline water depth process

2.3　堰流公式和孔流公式

模拟雨水口泄流时，以篦前水深为参数，当上游来流流量较小、篦前水深较浅时，采用堰流公式，计算雨水口的泄流流量(Q)如式(2)；当上游来流流量较大、篦前水深较深时，采用孔流公式，计算雨水口的泄流流量如式(3)[25]。

$$Q = C_w P \sqrt{2g} h^{3/2} \tag{2}$$

$$Q = C_o A \sqrt{2gh} \tag{3}$$

式中：C_w 和 C_o 分别为堰流系数和孔流系数；P 为湿周，m；A 为雨水口泄流面积，m^2。

2.4　研究方法

研究综合考虑雨水口堵塞和管道淤积对管网系统排水能力的协同影响，基于不同堵塞和淤积程度设立 16 组模拟方案，研究不同堵塞或淤积程度下管网系统排水能力的变化。同时，引入 1、5、20、30、50 和 100 a 重现期降雨条件。通过一、二维耦合模型进行模拟计算，提取管网排口峰值流量和地表总积水量，分析其变化规律。

管道淤积通过在 SWMM 修改管道的淤积高度实现，设立 4 种淤积程度，分别为 0、25%、50% 和 75%。管道断面形状均为圆形，经过计算将淤积高度分别设置为管道直径的 0、29.8%、50.0% 和 70.2%。

雨水口堵塞通过调整堰流系数和孔流系数实现，设立 4 种堵塞程度，分别为 0、25%、50% 和 75%。雨水口无堵塞时，C_w=0.048 27，C_o=0.577 54；雨水口堵塞 25% 时，C_w=0.053 59，C_o=0.701 78；雨水口堵塞 50% 时，C_w=0.059 00，C_o=0.908 10；雨水口堵塞 75% 时，C_w=0.066 39，C_o=1.456 60[25]。

3　模拟结果分析

3.1　雨水口堵塞对排口流量和地表积水量的影响分析

当管道无淤积时，不同降雨重现期下排口流量峰值(Q_P)和地表积水量(W_S)随雨水口堵塞程度变化的情况见表 2。

由表 2 可见，随着雨水口堵塞程度增加，排口峰值流量逐渐降低。管道无淤积时，雨水口堵塞程度从 0 增加至 25%、50% 和 75%，峰值流量在不同重现期下分别减少 3.96%～7.34%、10.91%～18.14% 和 29.89%～39.84%，平均分别减少 5.30%、13.8% 和 37.8%。雨水口堵塞越严重，峰值流量越小，且减少速率随

堵塞程度的增加而变快。当雨水口堵塞达到 75% 时，峰值流量平均比 50% 堵塞工况的衰减量增加 24.00%，表明雨水口在堵塞 50% 以上时排口的峰值流量受到的影响显著增大。

表 2 不同降雨重现期下排口流量峰值和地表积水量随雨水口堵塞程度变化

Table 2 Peak discharge of the outfall and surface water volume in different rainfall recurrence periods vary with the degree of blockage of the stormwater outfall

降雨重现期/a	堵塞0		堵塞25%		堵塞50%		堵塞75%	
	Q_P/(m^3/s)	W_S/万m^3	Q_P/(m^3/s)	W_S/万m^3	Q_P/(m^3/s)	W_S/万m^3	Q_P/(m^3/s)	W_S/万m^3
1	45.3	43.99	42.1	45.25	37.2	47.28	27.9	50.59
5	64.6	64.55	59.9	66.78	52.9	70.08	38.9	75.34
20	76.9	84.17	73.5	86.06	67.2	89.23	46.4	96.68
30	80.2	90.05	77.0	91.92	71.2	95.24	48.4	103.0
50	84.3	97.34	80.8	99.43	75.1	102.8	51.1	111.0
100	89.6	107.5	85.2	109.7	78.8	113.2	62.8	120.7

随着雨水口堵塞程度的增加，地表积水量逐渐增加。管道无淤积时，雨水口堵塞程度从 0 增加至 25%、50% 和 75%，地表积水量在不同重现期下分别增加 2.08% ~ 3.46%、5.35% ~ 8.57% 和 12.32% ~ 16.73%，平均分别增加 2.48%、6.47% 和 14.6%。雨水口堵塞越严重，地表积水量越大，且增加速度随着堵塞程度的增加变快。在雨水口堵塞程度达到 75% 时，地表积水量平均比 50% 堵塞工况的增加值高出 8.13%，表明雨水口在堵塞 50% 以上时地表积水量受到的影响显著增大。

3.2 管道淤积对排口流量和地表积水量的影响分析

当雨水口无堵塞时，不同降雨重现期下排口流量峰值和地表积水量随管道淤积程度变化的情况如表 3。

表 3 不同降雨重现期下排口流量峰值和地表积水量随管道淤积程度变化

Table 3 Peak discharge of the outfall and surface water volume in different rainfall recurrence periods vary with the degree of blockage of the pipeline siltation

降雨重现期/a	淤积0		淤积25%		淤积50%		淤积75%	
	Q_P/(m^3/s)	W_S/万m^3	Q_P/(m^3/s)	W_S/万m^3	Q_P/(m^3/s)	W_S/万m^3	Q_P/(m^3/s)	W_S/万m^3
1	45.3	43.99	38.7	44.95	30.3	47.63	8.97	53.36
5	64.6	64.55	51.7	67.59	37.6	72.41	10.3	80.98
20	76.9	84.17	60.8	88.16	41.6	94.80	11.2	105.1
30	80.2	90.05	62.9	94.24	42.7	101.4	11.5	112.2
50	84.3	97.34	64.7	102.2	43.9	109.9	12.0	121.0
100	89.6	107.5	67.1	113.3	45.9	121.3	12.4	133.2

由表 3 可见，随着管道淤积程度的增加，峰值流量逐渐降低。同时，随着降雨重现期增大，峰值流量也相应增大。雨水口无堵塞时，管道淤积程度从 0 增加至 25%、50% 和 75%，峰值流量在不同重现期下分别减少 14.57% ~ 25.18%、33.12% ~ 48.82% 和 80.21% ~ 86.22%，平均分别减少 20.9%、44.1% 和 84.6%。管道淤积越严重，峰值流量越小，且减少速率随着淤积程度的增加变快。当管道淤积达到 75% 时，峰值流量平均比 50% 淤积工况衰减 40.5%，表明管道在淤积 50% 以上时排口的峰值流量受到的影响显著增大。

随着管道淤积程度的增加，地表积水量均逐渐增加。同时，随着降雨重现期增大，地表积水量也相应增大。雨水口无堵塞时，管道淤积程度从 0 增加至 25%、50% 和 75%，地表积水量在不同重现期下分别增加 2.19% ~ 5.39%、8.29% ~ 12.90% 和 21.31% ~ 25.47%，平均分别增加 4.46%、11.9% 和 24.1%。管道淤积越严重，地表积水量越大，且增加速率随着淤积程度的增加变快。当管道淤积达到 75% 时，地表积水量平均比 50% 淤积工况高出 12.2% 以上，表明管道在淤积 50% 以上时地表积水量受到的影响显著增大。

3.3　雨水口堵塞和管道淤积对排口协同影响及显著性分析

3.3.1　不同降雨重现期下雨水口堵塞和管网淤积组合影响

在不同降雨重现期情况下，随着雨水口堵塞程度和管道淤积程度的改变，排口流量峰值的变化如表 4。

表 4　重现期 1 a 到 100 a 时排口流量峰值随堵塞和淤积的变化

Table 4　Change of peak discharge with blockage and siltation from 1 a to 100 a

重现期/a	淤积比例/%	Q_P/(m³/s)				重现期/a	淤积比例/%	Q_P/(m³/s)			
		堵塞0	堵塞25%	堵塞50%	堵塞75%			堵塞0	堵塞25%	堵塞50%	堵塞75%
1	0	45.3	42.1	37.2	27.9	5	0	64.6	59.9	52.9	38.9
	25	38.7	36.4	31.8	22.5		25	51.7	49.1	44.0	31.1
	50	30.3	28.6	24.7	18.8		50	37.6	36.2	33.3	26.4
	75	8.97	8.65	7.81	6.82		75	10.3	10.1	9.40	7.96
20	0	76.9	73.5	67.2	46.4	30	0	80.2	77.0	71.2	48.4
	25	60.8	57.8	53.2	44.2		25	62.9	59.7	55.0	46.4
	50	41.6	40.1	37.5	32.0		50	42.7	41.0	38.3	32.9
	75	11.2	10.9	10.4	9.04		75	11.5	11.1	10.6	9.4
50	0	84.3	80.8	75.1	51.1	100	0	89.6	85.2	78.8	62.8
	25	64.7	62.4	55.0	48.1		25	67.1	64.7	59.4	49.5
	50	43.9	42.3	39.4	33.9		50	45.9	43.9	41.2	35.8
	75	12.0	11.4	10.8	9.66		75	12.4	12.0	11.2	9.96

如表 4，随着管道淤积程度的增加，不同雨水口堵塞程度之间的排口峰值流量逐渐趋于接近。当管道淤积程度达到 75% 时，不同降雨重现期下雨水口堵塞程度的增加对排口峰值流量的影响明显小于管道淤积 50% 的工况。表明随着管道淤积程度的增加，不同堵塞程度下的排口峰值流量差距逐渐缩小。

随着雨水口堵塞程度的增加，不同管道淤积程度之间的排口峰值流量也逐渐趋于接近。当雨水口堵塞程度为 75% 时，不同降雨重现期下管道淤积程度的增加对排口峰值流量的影响明显小于雨水口堵塞 50% 的工况。表明随着雨水口堵塞程度的增加，不同堵塞程度下的排口峰值流量差距也逐渐缩小。

3.3.2　雨水口堵塞和管道淤积对排口流量影响的显著性分析

图 3 为雨水口堵塞程度分别为 0%、25%、50% 和 75% 时，不同管道淤积程度影响下排口流量之间的显著性分析情况。雨水口堵塞程度分别为 0%、25%、50% 和 75% 时各为 1 组，每组有管道淤积程度 0%、25%、50% 和 75% 时的排口峰值流量数据，利用 SPSS 进行显著性分析，采用字母标记法进行标记。将每组中排口峰值流量最大的数标记字母 a；并将该数与以下的数相比，凡相差不显著的都标上字母 a，直至某一个与之相差显著的数，标记字母 b，再以该标有 b 的数为标准，与各个比它大的数比较，凡不显著的也标记字母 b；再以标有 b 的最大数为标准，与小于其的未标记的数相比，凡不显著的继续标以字母 b，直至遇到某个与

其差异显著的数标记 c；如还有未标记数，再以同理标记字母 d。凡具有相同标记字母则表示工况间流量差异不显著，而具不同标记字母则表示差异显著，说明淤积程度变化对排口流量的影响显著，ab 表示和左右两边工况之间均无显著性。由图 3 可见，当雨水口无堵塞、堵塞 25% 和 50% 时，改变管道淤积程度会导致排口峰值流量显著变化，表明淤积加剧对管道排水能力有明显影响。然而，在堵塞 75% 工况下，淤积 0% 与淤积 25% 的峰值流量差异不显著，说明此时管道从无淤积到淤积 25% 时对排口峰值流量的影响较小。原因在于雨水口堵塞 75% 时入流量已远低于管道从无淤积增加至 25% 的承载能力，因此差异不显著。

图 4 为管道淤积程度分别为 0%、25%、50% 和 75% 时，不同雨水口堵塞程度影响下排口流量之间的显著性分析情况。管道淤积程度分别为 0%、25%、50% 和 75% 时各为 1 组，每组有雨水口堵塞程度 0%、25%、50% 和 75% 时的排口峰值流量数据，利用 SPSS 进行显著性分析，采用字母标记法进行标记。凡具有相同标记字母则表示工况间流量差异不显著，而具不同标记字母则表示差异显著，说明淤积程度变化对排口流量的影响显著。在 4 种淤积程度下，雨水口堵塞 50% 与堵塞 75% 的峰值流量差异均表现为显著性。然而，从无堵塞到堵塞 50% 的过程中，仅在管道淤积 25% 和 50% 时表现出较小的显著性，其他工况均无显著性。表明雨水口堵塞达到 75% 时，排口流量相较堵塞 50% 时显著减少，而在堵塞程度较小时，排口流量受到的影响较小，所以不显著或显著性不明显。

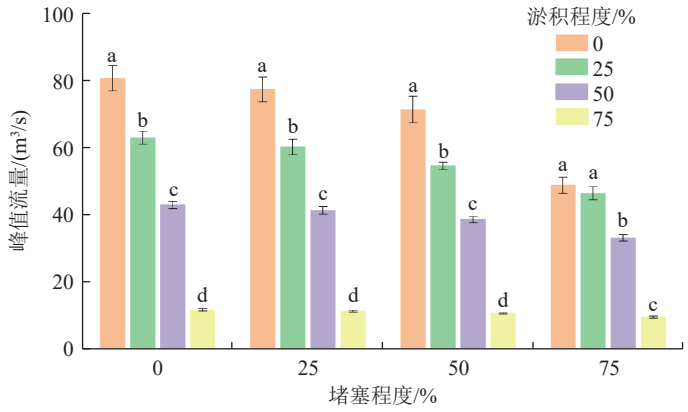


图 3 堵塞 0 到 75% 时不同淤积程度显著性

Fig. 3 Significance map of different siltation degree at 0 to 75% blockage

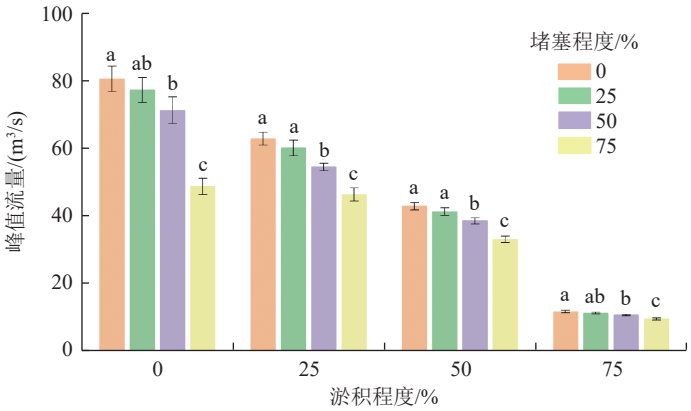


图 4 淤积 0 到 75% 时不同堵塞程度显著性

Fig. 4 Significance maps of different plugging degrees for 0 to 75% siltation

4 结　论

本文构建了耦合 GAST 和 SWMM 的水文水动力学数值模型，以管道淤积和雨水口堵塞程度为变量，并考虑降雨重现期的影响，选取河北省唐山市龙王庙河周边为研究区域，分析了管网系统排口流量峰值及地表积水量的变化响应情况。主要结论如下：

(1)随着雨水口堵塞或管道淤积程度的增加，排口峰值流量逐渐降低，地表积水量逐渐增加，且变化速率均随堵塞或淤积程度的加剧而加快。当堵塞或淤积程度达到 50% 以上时，排口峰值流量和地表积水量的变化显著增大，尤其在堵塞或淤积 75% 工况下，排口流量显著低于 50% 工况，而地表积水量显著高于 50% 工况。这表明雨水口堵塞和管道淤积在高强度条件下对管网系统排水能力的影响更为显著。

(2)雨水口堵塞和管道淤积对管网系统排水能力的影响相互制约：随着管道淤积程度增加，不同雨水口堵塞条件下的排口峰值流量差距逐渐减小；随着雨水口堵塞程度增加，不同管道淤积条件下的排口峰值流量差距也逐渐减小。在堵塞或淤积较严重的情况下，另一因素对排口峰值流量的影响减弱，说明管网系统中雨水口泄流能力和管道排水能力之间互相影响，综合考虑两者的交互作用可进一步提高模拟精度。

参考文献：

[1] 张建云，王银堂，贺瑞敏，等. 中国城市洪涝问题及成因分析 [J]. 水科学进展，2016，27(4)：485-491.(ZHANG J Y，WANG Y T，HE R M，et al. Discussion on the urban flood and waterlogging and causes analysis in China[J]. Advances in Water Science，2016，27(4)：485-491.(in Chinese))

[2] 张珂，侯精明，宁利中，等. 道路雨水口水力特性的数值分析 [J]. 水动力学研究与进展：A 辑，2020，35(6)：697-704.(ZHANG K，HOU J M，NING L Z，et al. Numerical analysis of hydraulic characteristics of rainwater inlet on road[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics，2020，35(6)：697-704.(in Chinese))

[3] 黄鑫，张乔丹，吴丹丹，等. 我国新型雨水口的发展现状与展望 [J]. 安徽建筑大学学报，2021，29(2)：47-53.(HUANG X，ZHANG Q D，WU D D，et al. Current situation and prospect of new rainwater inlet in China[J]. Journal of Anhui Jianzhu University，2021，29(2)：47-53.(in Chinese))

[4] 侯精明，郭凯华，王志力，等. 设计暴雨雨型对城市内涝影响数值模拟 [J]. 水科学进展，2017，28(6)：820-828.(HOU J M，GUO K H，WANG Z L，et al. Numerical simulation of design storm pattern effects on urban flood inundation[J]. Advances in Water Science，2017，28(6)：820-828.(in Chinese))

[5] 刘志长. 合流制排水管道沉积物的沉积状况及控制技术研究 [D]. 长沙：湖南大学，2011.(LIU Z C. Study on sedimentation status and control technology of sediment in combined drainage pipeline[D]. Changsha：Hunan University，2011.(in Chinese))

[6] 周毅，龚媛媛，汪志慧，等. 基于冲刷指数的雨水管渠冲刷淤积分析 [J]. 给水排水，2024，60(1)：129-135.(ZHOU Y，GONG Y Y，WANG Z H，et al. Analysis of scour and siltation in storm conduit based on flush index[J]. Water & Wastewater Engineering，2024，60(1)：129-135.(in Chinese))

[7] 赵红雷. 市政排水管道淤积物特性分析及清除方式探讨 [J]. 工程建设与设计，2023(7)：120-122.(ZHAO H L. Characteristic analysis of silt in municipal drainage pipeline and discussion on cleaning methods[J]. Construction & Design for Engineering，2023(7)：120-122.(in Chinese))

[8] 陈倩，夏军强，董柏良. 城市洪涝中雨水口泄流能力的试验研究 [J]. 水科学进展，2020，31(1)：10-17.(CHEN Q，XIA J Q，DONG B L. Experimental study on discharge capacity of street inlet in urban flooding[J]. Advances in Water Science，2020，31(1)：10-17.(in Chinese))

[9] 夏军强，陈倩，董柏良，等. 雨水口堵塞程度对其泄流能力影响的试验研究 [J]. 水科学进展，2020，31(6)：843-851.(XIA J Q，CHEN Q，DONG B L，et al. Experimental study on the effect of clogging on the inlet discharge capacity[J]. Advances in Water Science，2020，31(6)：843-851.(in Chinese))

[10] 于森，张书函，邸苏闯，等. 基于物理模型实验的城市道路雨水口平立结合改造对积水防涝影响研究 [J]. 水利学报，2022，

53(7)：854-861.(YU S，ZHANG S H，DI S C，et al. Effect of combined flat and vertical renovation of urban road gullies on surface water flooding prevention based on physical model experiments[J]. Journal of Hydraulic Engineering，2022，53(7)：854-861.(in Chinese))

[11] 鲁笑笑. 坡地与平原复合型城市区域雨水排水规律研究：以济南市玉绣河流域为例 [D]. 北京：北京建筑大学，2023.(LU X X. Study on rainwater drainage law in the compound city region of slope land and plain：a case study of Yuxiu River basin in Jinan City[D]. Beijing：Beijing University of Civil Engineering and Architecture，2023.(in Chinese))

[12] 卜良河，侯精明，薛树红，等. 区域排水能力对雨箅子堵塞程度响应规律模拟研究 [J]. 人民黄河，2024，46(12)：56-61.(BU L H，HOU J M，XUE S H，et al. A Simulation study on the response patterns of regional drainage capacity to the degree of rain gutter clogging[J]. Yellow River，2024，46(12)：56-61.(in Chinese))

[13] 吴慧英，江凯兵，李天兵，等. 基于 SWMM 的市政排水管道泥沙淤积对溢流积水影响的模拟分析 [J]. 给水排水，2019，55(11)：135-139.(WU H Y，JIANG K B，LI T B，et al. Simulation analysis of influence of sedimentation for municipal drainage pipeline on overflow and ponding based on SWMM[J]. Water & Wastewater Engineering，2019，55(11)：135-139.(in Chinese))

[14] 郭敏鹏，侯精明，李继成，等. 基于 SWMM 的市政管网清淤方案优化研究 [J]. 给水排水，2021，57(S1)：399-406.(GUO M P，HOU J M，LI J C，et al. Optimization of municipal pipe network dredging scheme based on SWMM[J]. Water & Wastewater Engineering，2021，57(S1)：399-406.(in Chinese))

[15] 李璟冉，周毅，李哲，等. 基于 SWMM 的管道淤积对排水能力影响的模拟分析 [J]. 中国给水排水，2022，38(3)：118-125.(LI J R，ZHOU Y，LI Z，et al. Effect of pipeline siltation on drainage capacity based on SWMM simulation[J]. China Water & Wastewater，2022，38(3)：118-125.(in Chinese))

[16] 贾高峰，杨福天，梁斌，等. 基于 SWMM 的北京市核心区合流制排水管网清淤方案研究 [J]. 给水排水，2024，60(1)：108-114，120.(JIA G F，YANG F T，LIANG B，et al. Research on desilting scheme of combined drainage network in Beijing Core Area based on SWMM[J]. Water & Wastewater Engineering，2024，60(1)：108-114，120.(in Chinese))

[17] 李东来，许钰，侯精明，等. 精细管网资料缺失城区雨洪过程近似模拟方法 [J]. 水科学进展，2024，35(6)：960-971.(LI D L，XU Y，HOU J M，et al. The approximate simulation method for stormwater process in urban areas with missing data of fine pipe network[J]. Advances in Water Science，2024，35(6)：960-971.(in Chinese))

[18] 朱伟锋. 初期雨水径流收集转输系统效能评价及优化对策研究 [D]. 南京：东南大学，2022.(ZHU W F. Study on efficiency evaluation and optimization countermeasures of initial rainwater runoff collection and transfer system[D]. Nanjing：Southeast University，2022.(in Chinese))

[19] 侯精明，李东来，王小军，等. 建筑小区尺度下 LID 措施前期条件对径流调控效果影响模拟 [J]. 水科学进展，2019，30(1)：45-55.(HOU J M，LI D L，WANG X J，et al. Effects of initial conditions of LID measures on runoff control at residential community scale[J]. Advances in Water Science，2019，30(1)：45-55.(in Chinese))

[20] 李东来，侯精明，申若竹，等. 基于地块概化和路网精细模拟理念的城市雨洪过程分区自适应模型 [J]. 水科学进展，2023，34(2)：197-208.(LI D L，HOU J M，SHEN R Z，et al. Partition adaptive model of urban rainstorm and flood process based on the simulation concept of plots generalization and road networks fine[J]. Advances in Water Science，2023，34(2)：197-208.(in Chinese))

[21] 梁鑫，侯精明，王添，等. 基于多源数据融合的城市洪涝模拟高精度地形构建方法 [J]. 水利水电科技进展，2024，44(6)：56-63.(LIANG X，HOU J M，WANG T，et al. A method for constructing high-precision terrain for urban flood simulation based on multi-source data fusion[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources，2024，44(6)：56-63.(in Chinese))

[22] 银雅伦，侯精明，李欣怡，等. GAST-SWMM 耦合数值模型在大尺度城区致涝风险评估中的应用 [J]. 环境工程，2024，42(4)：82-90.(YIN Y L，HOU J M，LI X Y，et al. Application of GAST-SWMM coupled numerical model in large-scale urban inundation risk assessment[J]. Environmental Engineering，2024，42(4)：82-90.(in Chinese))

[23] 吕佳豪，侯精明，李东来，等. 城市排水管网排口水位变化对城市洪涝过程的影响 [J]. 给水排水，2023，59(5)：140-149.(LYU J H，HOU J M，LI D L，et al. Impacts of variation of drainage pipe network outlet water level on urban flood inundation[J]. Water & Wastewater Engineering，2023，59(5)：140-149.(in Chinese))

[24] 梁鑫，侯精明，陈光照，等. 考虑降雨空间分布的城市内涝对模式雨型响应特征分析 [J]. 水利水运工程学报，2024(2)：44-54.(LIANG X，HOU J M，CHEN G Z，et al. Investigation of the response characteristics of urban waterlogging to model rainfall patterns

taking into account the spatial distribution of rainfall[J]. Hydro-Science and Engineering，2024(2)：44-54.（in Chinese））

［25］郝晓丽. 城市暴雨洪涝多尺度模拟技术研究 [D]. 北京：中国水利水电科学研究院，2022.（HAO X L. Research on multi-scale modeling technology for urban rainstorm flood[D]. Beijing：China Institute of Water Resources and Hydropower Research，2022.（in Chinese））

Simulation of the response of drainage capacity of pipe network to street inlet clogging and pipeline silting*

HOU Jingming[1]，WANG Ziyi[1]，LI Donglai[1]，BU Lianghe[1]，CHEN Guangzhao[1]，YANG Yuying[2]，FANG Yuan[3]

（1. *State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region*，*Xi'an University of Technology*，*Xi'an* 710048，*China*；2. *Weinan Bureau of Housing and Urban-Rural Development*，*Weinan* 714025，*China*；3. *Shaanxi Weihe Ecological Technology Research and Development Company Limited*，*Xi'an* 710000，*China*）

Abstract：The drainage system of rainwater pipes serves as the primary channel for urban drainage，and its capacity is significantly influenced by pipeline silting and street inlet clogging. Understanding the extent of street inlet clogging and pipeline silting on the network's drainage capacity is crucial for evaluating the development process of urban flooding. Based on the GAST-SWMM coupled model，the drainage process and surface water volume in the study area of Longwangmiao，Lubei District，Tangshan City，were simulated and analyzed under diverse conditions of street inlet clogging and pipeline silting. The results indicate that as pipeline silting and street inlet clogging worsen，the drainage capacity of the network gradually decreases，and this trend becomes increasingly evident. When there is no pipeline silting，as street inlet clogging increases from 0 to 75%，the peak flow decreases by an average of 5.30% to 37.8% compared to no blockage，while surface water volume rises by an average of 2.48% to 14.6%. Similarly，when there is no clogging at the street inlet，as pipeline silting increases from 0 to 75%，the peak flow decreases by an average of 20.9% to 84.6%，and surface water volume rises by an average of 4.46% to 24.1%. Furthermore，when one factor intensifies to a significant level，the influence of the other factor on the drainage capacity of the network will relatively weaken. These findings provide a foundation for analyzing the drainage capacity of rainwater pipes under various conditions and for preventing water-related disasters.

Key words：network of drains；street inlet clogging；pipeline silting；peak flow；surface water volume

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China（No. 52409104；No.52079104）.

DOI：10.14042/j.cnki.32.1309.2025.01.015

基于贝叶斯推断的长江口复合洪水潜在风险

殷成团[1]，孙忠滨[1]，熊梦婕[1]，王金华[1]，章卫胜[1]，刘 悦[2,3]，张金善[1]

（1. 南京水利科学研究院水灾害防御全国重点实验室，江苏 南京 210024；2. 河海大学水灾害防御全国重点实验室，江苏 南京 210098；
3. 水利部应对气候变化研究中心，江苏 南京 210029）

摘要：在全球持续变暖背景下，河口复合洪水事件频发。台风、强降雨、河道洪水和风暴潮等灾害因子的影响相互叠加，严重威胁沿海城市的防洪安全。基于观测资料和数值模拟重构了 1959—2020 年复合洪水灾害因子数据集，采用基于贝叶斯推断的 Copula 方法，分析了长江口风暴潮“二碰头”“三碰头”事件的风险性及其不确定性。结果表明：1988—2020 年长江口徐六泾站年极值高水位呈明显下降趋势，主要原因是风暴潮强度的减弱；长江口地区极端风暴潮高潮位与强降雨的遭遇风险较高，重现期为 89 a，而大通径流与台风及其伴生事件在统计上近似独立；忽视变量间的相关性会显著低估复合洪水灾害的风险，且随着灾害因子重现期的延长低估愈加明显；长江口风暴潮“二碰头”事件风险低估幅度高达 77.7%；自然变化导致的风暴潮“二碰头”重现期不确定性为 [− 12.6%, 16.3%]；相较于风暴潮和依赖性，降雨是长江口复合洪水风险不确定性的主要来源。

关键词：复合洪水；风暴潮；不确定性；贝叶斯推断；Copula 方法；长江口
中图分类号：P731　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1001-6791(2025)01-0166-11

河口三角洲是洪涝灾害最活跃的地区之一[1]。20 世纪 70 年代以来，全球海洋持续变暖，亚洲东部沿海地区登陆的强台风数量和伴随的降水量明显增加[2-3]。河口地区通常地势低洼，受径流和天文潮双相动力控制，在台风登陆时还会受风暴潮和强降雨的影响，造成复合洪水灾害。复合洪水是指 2 个以上的灾害因子同时达到阈值或相隔时间较短导致洪水灾害后果急剧放大的现象[4]。与单一驱动因子的极端事件相比，复合极端事件的潜在破坏性更大[5]。台风登陆时不仅会抬高沿海水位，还会伴随大范围、高强度的降雨，导致内河流量激增水位暴涨。外海潮位的抬升又会阻塞河道洪水下泄，雍高河道水位[6]，导致沿海城市重力排水系统无法正常工作，造成城市雨洪。在气候变化背景下，评估河口复合洪水的潜在风险，对于防范和应对河口极端洪涝事件具有重要意义[7]。

近年来，海岸复合洪水灾害的频繁发生引起政府和科学界的广泛关注[8]。多个时空尺度的研究表明，沿海洪水(或风暴增水)的频率或强度与降雨(或径流)在统计上存在着相关性[4,9-10]。河口地区复合洪水灾害一直存在被严重低估的现象[11]。Marcos 等[12] 发现在全球 55% 的海岸线极端风暴潮和台风浪会同时出现，如果忽略两者相关性，30% 海岸的极端海平面重现风险将低估 50% 以上；Kew 等[13] 发现荷兰莱茵河 20 日极端累计降雨后出现极值风暴潮的概率是将两者视为相互独立的 3 倍。在实际工程中，适当提高防洪水位设计值可有效降低复合洪水灾害频率[14]。Santos 等[15] 发现当考虑驱动因子之间(风暴潮和径流)的相关性时，美国得克萨斯州原防洪设计频率的 1% 水位比实际值低 0.35 m。台风哈维(Harvey)期间发生上游河道洪峰、天文大潮和风暴潮遭遇的“三碰头”现象，致使美国得克萨斯州东南部沿海实际风暴潮比预测值高 3 m 以上[16]。

收稿日期：2024-09-15；**网络出版日期：**2025-02-14
网络出版地址：https://link.cnki.net/urlid/32.1309.P.20250213.1801.002
基金项目：国家自然科学基金项目(U2340225)；中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(Y224001)
作者简介：殷成团(1992—)，男，江苏连云港人，工程师，博士，主要从事风暴潮和海岸复合洪水研究。
E-mail：yinchengtuan@163.com
通信作者：章卫胜，E-mail：wszhang@nhri.cn

Sebastian 等[17]、Couasnon 等[18]采用贝叶斯方法生成复合洪水事件并进行了大量数值模拟，研究结果强调了灾害因子依赖性对洪水风险评估的重要性；Naseri 等[19]采用基于贝叶斯的非平稳框架对复合洪水进行了研究，发现与海平面和依赖性相比，降水对不确定性的贡献最大。可见，随着气候变化的加剧，仅考虑单一变量超越风险的设计标准逐渐难以满足沿海地区的防洪安全需求。在中国沿海地区，70% 以上造成灾害的风暴潮均为复合洪水[20]。长江口是中国第一大河口，风暴潮“二碰头”“三碰头”屡屡发生[21-22]。然而，现有文献多基于物理过程(如数值模拟等)研究台风期间长江口潮位变化[23]，尚缺乏对长江口地区复合洪水风险的具体量化和不确定性分析等相关研究。

本文基于长周期实测数据分析长江口极值水位变化趋势及其成因，结合近岸高分辨率海洋数值模型重构长江口复合洪水灾害因子数据集，采用基于贝叶斯框架的 Copula 函数对风暴潮“二碰头”“三碰头”灾害潜在风险进行研究，并对复合洪水风险的不确定性进行分解。

1　资料和方法

1.1　数据说明

(1)数据介绍。为研究长江口复合洪水灾害，本文收集了 1959—2020 年降雨、径流、天文潮和风暴潮等 4 类水文资料。其中，降雨资料选用上海宝山气象站日累计降水量；径流资料选用大通水文站逐时流量资料；长江口内潮位资料仅收集到徐六泾水文站 1988—2020 年逐时潮位。为补全 1959—1987 年的潮位资料空缺，采用 FVCOM(Finite-Volume Community Ocean Model)构建的三维高分辨率数值模型，对长江口早期的天文潮和风暴潮进行了批量数值模拟。除此之外，还收集了 1988—2020 年长江口外海大戢山潮位站海平面变化数据。

(2)数据预处理。本文选取了 1959—2020 年发生在长江口的 148 场台风，并对该期间降雨、径流、天文高潮位、风暴潮高潮位和增水进行了计算和提取。具体方法为：①提取 148 场台风期间的最高潮位，即风暴潮高潮位；②通过调和分析和数值模拟计算台风期间对应的天文潮位，并提取风暴潮高潮位同一潮周期内的天文潮高潮位；③提取风暴增水，即风暴潮高潮位和天文潮高潮位之差；④提取风暴潮高潮位出现当日的累计降水量；⑤提取风暴潮高潮位出现前 6 日的大通流量作为上游洪水数据。通过上述方法重构了包括降雨、径流、天文潮高潮位、风暴潮高潮位和增水的长江口复合洪水 5 种灾害因子数据，其维度为 148×5。

1.2　方法简介

1.2.1　基于贝叶斯推断的 Copula 方法

采用马尔可夫链蒙特卡洛(MCMC)算法对 Copula 参数进行估计。MCMC 算法是一种基于贝叶斯框架的采样方法，其利用马尔可夫链来构建一个随机游走过程，最终收敛到参数的后验分布。在贝叶斯框架中，可以根据观测数据和先验分布计算单变量或双变量模型参数的后验分布，尤其适用于观测数据较少的情况。与传统最大似然估计相比，MCMC 算法不仅能够估计参数值，还能量化参数的不确定性。贝叶斯定理可表示为

$$P(\varphi|Y_{\text{obs}}) = \frac{P(Y_{\text{obs}}|\varphi)\times P(\varphi)}{P(Y_{\text{obs}})} \propto P(Y_{\text{obs}}|\varphi)\times P(\varphi) \tag{1}$$

式中：$P(\varphi|Y_{\text{obs}})$为后验分布，即待估计的模型参数分布；$P(\varphi)$为先验分布；$P(Y_{\text{obs}}|\varphi)$为似然函数；$P(Y_{\text{obs}})$为量纲一化常数。

对于二元 Copula 函数的参数求解，似然函数可按下式计算：

$$P(Y_{\text{obs}}|\varphi) = \prod_{i=1}^{n} C(F(x_i), G(y_i); \boldsymbol{\theta}) \tag{2}$$

式中：n为数据长度；C为参数集为$\boldsymbol{\theta}$的 Copula 函数；$F(\cdot)$和$G(\cdot)$分别为变量X和Y的边缘分布。在确定了最佳边缘分布、Copula 函数类型和先验分布后，对式(2)取对数后代入式(1)，则 Copula 函数参数的后验分布可表示为

$$P(\varphi|Y_{\text{obs}}) \propto P(\varphi) \times \sum_{i=1}^{n} \lg C(F(x_i), G(y_i); \boldsymbol{\theta}) \tag{3}$$

1.2.2 联合分布的重现期

重现期指超过某一阈值的事件连续 2 次发生的平均时间间隔[24]。在二元洪水风险研究中，同现重现期和联合重现期(又称 AND 重现期和 OR 重现期)得到广泛应用[25]。AND 重现期描述了 2 个边缘变量同时超过特定阈值事件发生的风险性，而 OR 重现期描述了至少 1 个边缘变量超过特定阈值事件发生的风险性，两者公式如下：

$$T_{\text{AND}} = \frac{E(L)}{1-u-v+C(u,v)} \tag{4}$$

$$T_{\text{OR}} = \frac{E(L)}{1-C(u,v)} \tag{5}$$

式中：$E(L)$为取样的时间间隔，假设随机事件在一定长度的时间 N 年内共发生了 n 次，则取样的时间间隔 $E(L) = N/n$；$C(u,v) = P(X \leqslant x_1, Y \leqslant y_1)$表示两边缘分布均不超过特定阈值的概率。如无额外说明，当涉及计算复合洪水极值事件具体重现期时，则取变量的 95th 百分位数作为阈值($x_1 = X_{95\%}, y_1 = Y_{95\%}$)。

1.2.3 不确定性及其分解

(1)自然变化导致的重现期变化范围。不确定性研究可以更准确地评估极端事件的风险。根据 Bevacqua 等[26]的研究，自然变化导致的重现期变化范围主要通过 Bootstrap 抽样进行计算。具体方法如下：以降雨-潮位二元变量数据为例，有放回的抽n次降雨潮位数据对(n为原始数据对长度)，组成新的序列后计算其重现期。将上述过程重复m次即可得到包含m个重现期的新数据集。该数据集的 2.5th 和 97.5th 百分位数($T_{2.5\text{th}}, T_{97.5\text{th}}$)则为 95% 置信区间。相应的重现期变化的 95% 置信区间则为原始数据计算的重现期 T 与($T_{2.5\text{th}}, T_{97.5\text{th}}$)之间的百分比差异，即($T_{2.5\text{th}} - T, T_{97.5\text{th}} - T$)/$T$。

(2)不确定性的分解。对于二维联合分布，复合洪水风险评估结果不确定性的来源有二：边缘分布的不确定性和相关性的不确定性。为了量化单个因子对不确定性的贡献，采用 MCMC 算法采样获取降雨、潮位以及 Copula 参数后验分布各 5 000 组数据。当评估降雨对不确定性的贡献时，则允许降雨边缘分布参数的变化，潮位边缘分布和 Copula 参数取各自分布的中位数。通过式(4)或式(5)可以计算出 5 000 组重现期，可得重现期的第 5、50 和 95 百分位数($T_{5\text{th}}$、$T_{50\text{th}}$和$T_{95\text{th}}$)，则降雨导致的重现期的不确定性对称范围(ΔT_{Sym})计算公式如下[19]：

$$\Delta T_{\text{Sym}} = 100 \times \left(\frac{T_{95\text{th}} - T_{50\text{th}}}{T_{50\text{th}}} + \frac{T_{50\text{th}} - T_{5\text{th}}}{T_{5\text{th}}} \right) \tag{6}$$

同样地，可以计算出潮位和 Copula 参数导致的重现期不确定性对称范围。则第i个变量对重现期不确定性的相对贡献(φ_i)可按下式计算：

$$\varphi_i = 100 \times \frac{\Delta T_{\text{sym},i}}{\sum_{i=1}^{3} \Delta T_{\text{sym},i}} \tag{7}$$

需要注意的是，重现期并非单个变量的线性叠加，因而降雨、潮位和 Copula 函数三者的ΔT_{Sym}之和并不等于总的重现期不确定性[26]。

2　结果及分析

2.1　长江口极值水位变化趋势及成因

长江口年特征水位变化趋势如图 1 所示。可以看出，通常情况下年最高水位不超过 6 m(吴淞基面)。历年最高潮位为 6.73 m，出现在 1997 年的台风温妮(No. 9711)期间。1988—2020 年长江口徐六泾站的年最高水位整体呈现出明显的下降趋势，下降速率为 11.6 mm/a。徐六泾站附近的洪水强度虽有所下降，但频繁发生的极端水位事件(如 1997 年、2000 年和 2002 年)表明长江口的洪水风险依然不容忽视。与外海相对稳定的海平面不同，徐六泾站汛期平均水位的年际变化较为剧烈，并且同样呈现出波动下降的趋势，下降速率为 1.6 mm/a，但两者相关性较弱，仅为 0.292。徐六泾站的汛期平均水位不仅受到全球海平面上升趋势的影响，还受上游径流的显著影响。从图 1 可以看出，1988—2020 年长江大通汛期平均流量呈现出年际下降趋势，下降速率为 124.4 m^3/s。相较于外海海平面，徐六泾站的汛期平均水位与同期上游流量的变化关系更为密切，即当汛期大通流量增加时，徐六泾站的平均水位较上一年有所抬升；而当大通流量减少时，平均水位则相应下降，两者的相关性(r_{tw})高达 0.886。在气候变暖背景下，大部分海域的极值潮位都呈现出上升趋势。然而，过滤掉平均海面变化后这种趋势显著减缓，表明极值水位上升主要由海平面上升驱动[27-28]。与此不同的是，徐六泾站年最高潮位的下降是上游径流减少和风暴潮强度减弱共同作用的结果，其中风暴潮变化是主导因素。

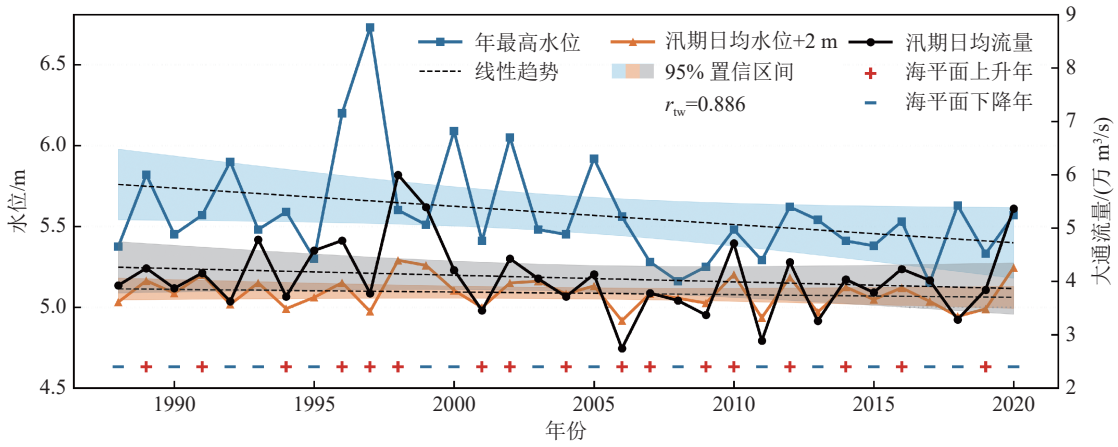


图 1　1988—2020 年长江口徐六泾水文站年最高水位、汛期平均水位和大通平均流量变化趋势(吴淞基面)

Fig. 1　Trends in annual maximum water level, average water level at Xuliujing station and Datong average flow rate during the flood season in the Yangtze Estuary in the period 1988—2020 (Wusong datum)

2.2　复合洪水边缘分布的拟合与检验

选用 6 种常见的水文变量分布，即正态分布、指数分布、Logistic 分布、伽马分布、Pearson Ⅲ型分布和广义极值分布(Generalized Extreme Value Distribution, GEV)，分别对各变量时间序列进行拟合(各分布表达式见文献 [29])，并采用 K-S 检验、经验分布和核密度估计图对拟合结果进行检验。表 1 为最佳边缘分布拟合和 K-S 检验统计表。可以看出，大通径流量分布类型为 Logistic 分布；日累计降水量分布类型均为 Gamma 分布；增水和风暴潮高潮位分布类型均为 Pearson Ⅲ分布；天文潮高潮位分布类型为 GEV 分布。各灾害因子边缘分布函数的理论分布与经验分布的均方根误差(E_{RMS})值基本都在 0.035 以内，且均通过了 K-S 检验($P>0.05$)。

图 2 为各灾害因子理论分布、经验分布与核密度估计对比图。可以看出，各灾害因子的理论分布、经验

分布和核密度估计曲线符合较好，且核密度估计曲线较为平滑，计算较为复杂时可用核密度估计值代替理论分布值。因此，所选边缘分布较为合理，可用于多元联合分布相关计算。

表 1 最佳边缘分布参数和 K-S 检验统计

Table 1 Optimal marginal distribution, parameters, and K-S test results

灾害因子	分布类型	分布参数	E_{RMS}	K-S检验	
				D统计量	P值
大通径流量	Logistic	μ = 41928.24, s = 6228.427	0.024	0.12	0.22
日累计降水量	Gamma	α = 0.018, β = 0.36	0.045	0.07	0.89
增水	Pearson Ⅲ	μ = 0.03, α = 1.34, β = 0.27	0.034	0.09	0.52
风暴潮高潮位	Pearson Ⅲ	μ = 2.02, α = 17.34, β = 0.15	0.024	0.06	0.94
天文潮高潮位	GEV	μ = 4.14, σ = 0.54, β = − 0.38	0.020	0.06	0.95

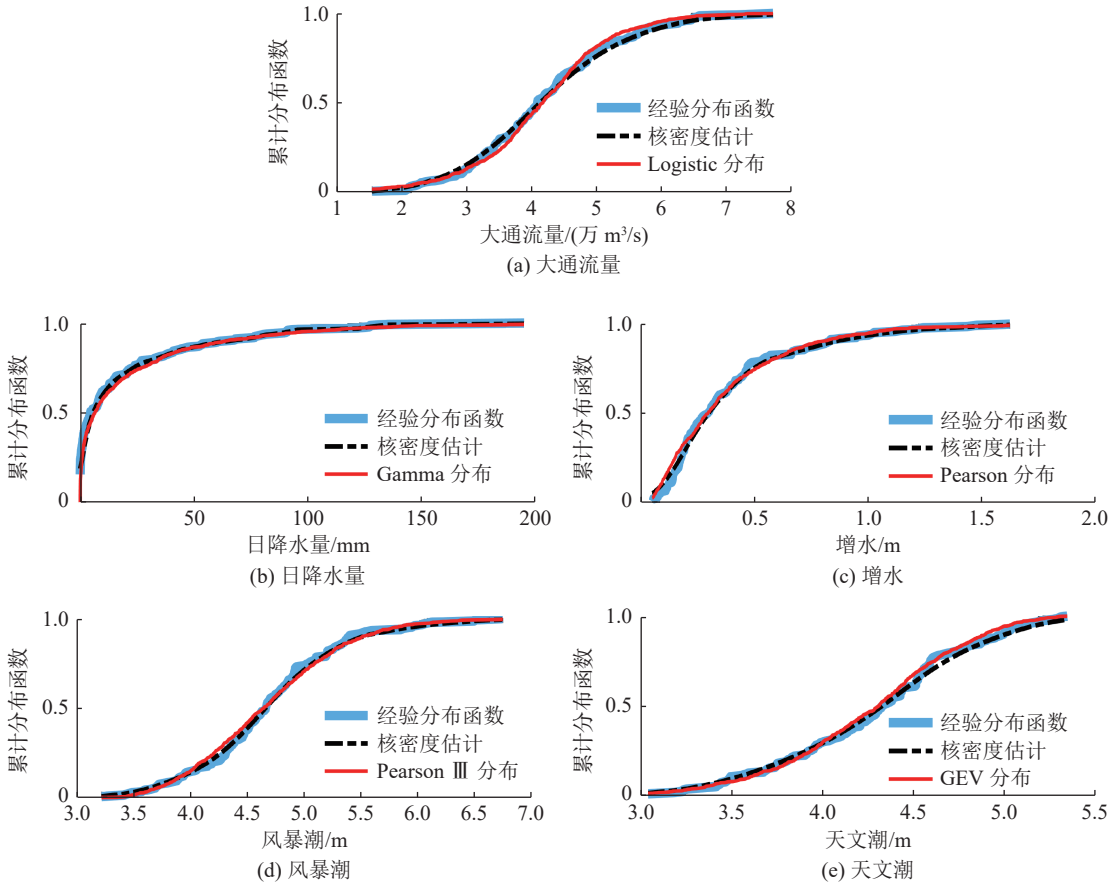


图 2 各灾害因子理论分布、经验分布与核密度估计对比

Fig. 2 Comparison of theoretical distribution, empirical distribution, and kernel density distribution for various hazard factors

2.3 风暴潮“二碰头”灾害重现期分析和不确定性分解

风暴潮“二碰头”复合洪水灾害风险性主要表现在两方面：一是台风期间风暴潮会抬升沿海潮位，威胁海堤及近海低洼地区安全；二是台风登陆前后一般会伴随大范围、高强度的暴雨，沿海水位的抬升会导致雨洪难以排出入海，增加滨海城市内涝的风险。如 2022 年 6 月 15—16 日期间，珠江流域的强降雨仅与天文

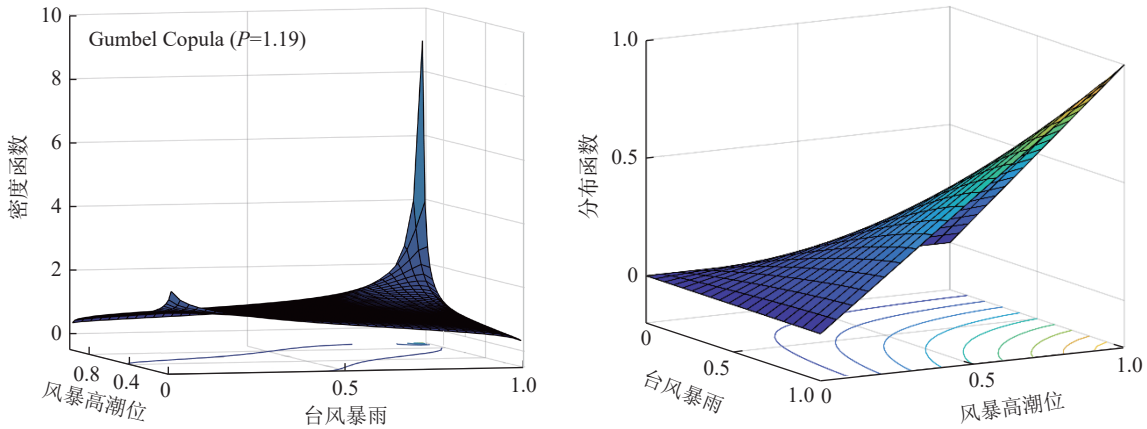
大潮高潮位遭遇，便造成流域内 100 余条河流发生超预警洪水，部分地区发生流域性大洪水。在台风暴雨期间，海面高度的抬升为洪水提供了更高的基础水位，严重削弱了河口城市的防洪排洪能力。在降雨-风暴高潮位两灾害因子的研究中选用 Gaussian、Student *t*、Clayton、Gumbel、Frank 和 Joe6 类常用 Copula 函数作为备选的 Copula 函数，其估计值和检验结果见表 2。可以看出，6 个 Copula 函数均通过了拟合优度检验，但从 AIC 统计量结果看，Gumbel Copula 更适合描述台风降雨-风暴高潮位之间的联合分布关系。Gumbel Copula 函数是极值 Copula 的一种，主要用以描述正相关的(上尾)极值关系。

表 2　Copula 函数参数估计值和检验结果统计(降雨-风暴潮高潮位)

Table 2　Copula parameter estimating and test results of rainfall and extreme storm surge

Copula类型	参数	对数似然函数值	AIC值	拟合优度检验	
				统计量	*P*值
Gaussian	0.26	4.4	− 6.82	0.014	0.66
Student *t*	0.25，30	4.3	− 4.71	3.600	0.29
Clayton	0.23	1.6	− 1.30	0.009	0.66
Gumbel	1.19	5.5	− 9.08	0.001	0.94
Frank	1.20	3.0	− 3.98	0	0.93
Joe	1.30	5.9	− 8.71	0.035	0.69

图 3 为基于 Gumbel Copula 函数的风暴高潮位和台风暴雨联合分布的密度函数与分布函数。从图 3 中可以看出，当风暴高潮位抬升时，台风降雨强度也随之增大，这表明在长江口地区台风登陆和发生极端风暴潮高潮位的同时，遭遇极端降雨的可能性非常大。



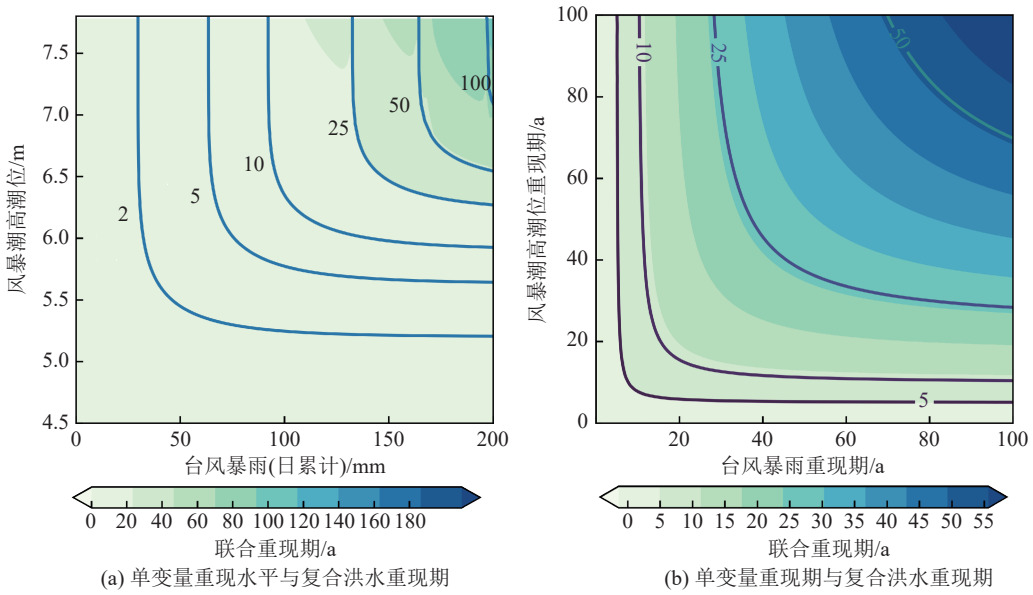
(a) 密度函数　　(b) 分布函数

图 3　风暴高潮位和台风暴雨联合分布的密度函数与分布函数(Gumbel Copula)

Fig. 3　Density and distribution functions of the joint distribution of storm tide levels and typhoon-induced heavy rainfall (Gumbel Copula)

图 4 和图 5 分别为台风暴雨与风暴潮高潮位联合重现期和同现重现期分布图。台风暴雨日累计降水量的 10 a、20 a、50 a、100 a 重现期对应的重现水平分别为 92.2、122.5、164.4 和 197.0 mm；风暴潮高潮位相应重现期的重现水平分别为 5.89、6.15、6.46 和 6.68 m。根据联合分布函数，10 年一遇的台风暴雨遭遇 10 年一遇的风暴潮高潮位的联合重现期为 6 a，同现重现期为 42 a；20 年一遇的两者联合重现期为 11 a，同现重现期为 89 a；50 年一遇的两者联合重现期为 28 a，同现重现期为 232 a；100 年一遇的两者联合重现期为 56 a，同

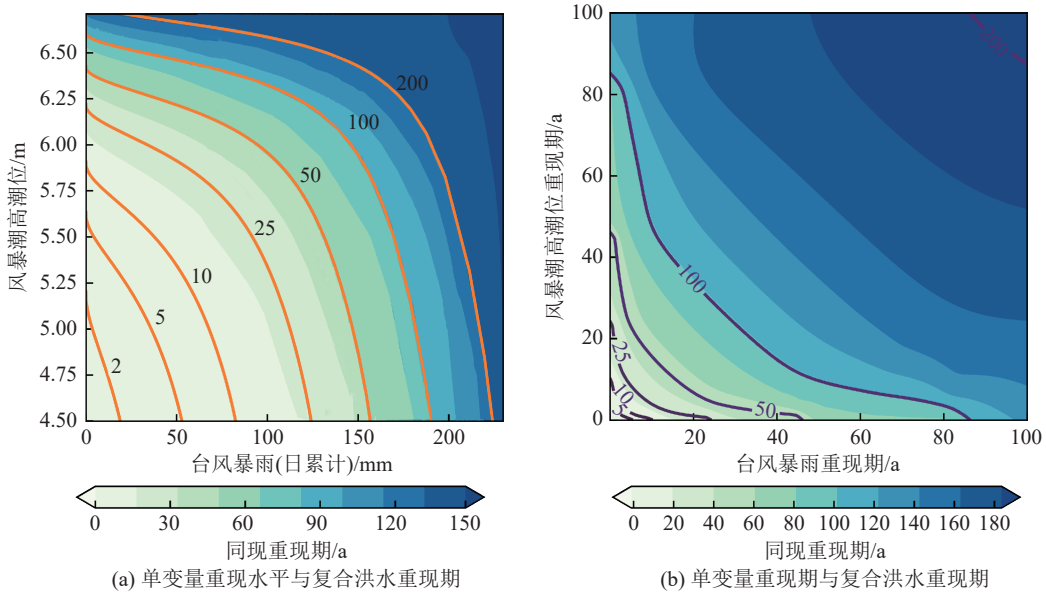
现重现期为 471 a。可以看出，联合重现期的计算值偏小，2 个 100 年一遇的变量的联合重现期约为 50 a，采用联合重现期作为设计值是偏保守的；同现重现期的计算值偏大，2 个 100 年一遇的变量的同现重现期约为 500 a，因而采用同现重现期计算的设计值是稍偏激进的。而当不考虑变量之间的相关性时，可能造成复合洪水灾害风险的低估。以同现重现期为参考(图 6)，当忽略降雨和风暴潮高潮位之间的相关性时，两者 10 年一遇重现期的复合洪水风险将低估 58.2%；20 年一遇重现期的复合洪水风险将低估 77.7%；50 年一遇重现期的复合洪水风险将低估 90.7%；100 年一遇重现期的复合洪水风险将低估 95.3%。可见，当不考虑变量之间相关性时，灾害因子的重现期越长，复合洪水灾害重现期的低估程度越高。



(a) 单变量重现水平与复合洪水重现期 (b) 单变量重现期与复合洪水重现期

图 4 台风暴雨与风暴潮高潮位联合重现期分布

Fig. 4 Joint return periods of typhoon-induced heavy rainfall and storm tide levels



(a) 单变量重现水平与复合洪水重现期 (b) 单变量重现期与复合洪水重现期

图 5 台风暴雨与风暴潮高潮位同现重现期分布

Fig. 5 Co-occurrence return periods of typhoon-induced heavy rainfall and storm tide levels

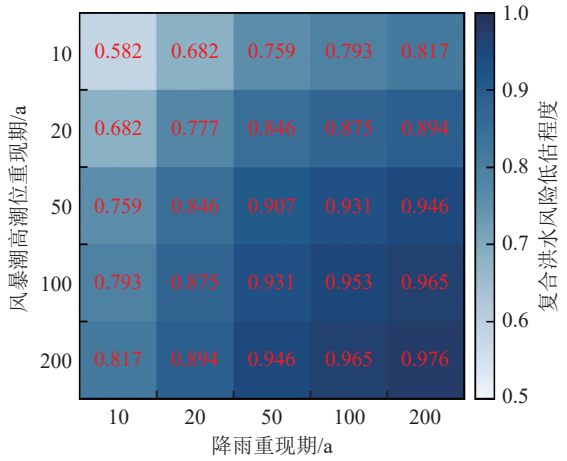


图 6　不考虑降雨和风暴潮相关性情况下的复合洪水风险低估程度(以同现重现期为参考)

Fig. 6　Underestimation of compound flood risk when ignoring the dependence between rainfall and storm tide levels (referenced to co-occurrence return periods)

长江口地区在台风登陆和发生极端风暴潮高潮位的同时，遭遇极端降雨的可能性较大。因此，河口城市在提高沿海堤防防护标准的同时，也要考虑极端潮位与强降雨遭遇的风险，增强城市雨洪的排泄能力，如合理布设城市内雨洪行进通道，增大城市的人工排涝能力，最大程度上减轻风暴潮引发的水位抬升对城市排水系统的影响，避免自然排水受阻导致的城市内涝风险。

复合灾害风险具有一定的不确定性。当不确定性较大时，复合洪水风险评估的可信度难以保证。不确定性分解是提升风险评估可信度和优化决策分析的重要步骤。通过分解不确定性，可以识别对结果影响最大的因素，从而有针对性地进行改进。以长江口风暴潮“二碰头”复合洪水事件为例，根据 Bevacqua 等[26]的研究，设定 Bootstrap 法抽样次数为 700。计算结果显示，自然变化导致的重现期变化的 95% 置信区间为 [−12.6%, 16.3%]，即自然变化导致的重现期不确定性为 [− 12.6%, 16.3%]。对于二维联合分布，复合洪水风险评估结果不确定性的主要来源是边缘分布的不确定性和相关性的不确定性。为了量化各单一因子对不确定性的贡献，采用 MCMC 方法和式(7)分别对降雨、风暴潮高潮位以及 Copula 参数进行 5 000 次抽样并计算其重现期[19]。结果显示，降雨、风暴潮高潮位和依赖性对复合洪水灾害不确定性的贡献分别为 54%、41% 和 5%。可见，长江口复合洪水风险不确定性的主要来源是降雨。

2.4　风暴潮“三碰头”灾害重现期分析

河口地区受径流和潮汐双相动力的控制。如果河口风暴潮发生在天文大潮期间，同时遭遇上游洪水，将会带来巨大的淹没风险，这种现象被称为风暴潮“三碰头”现象。单一参数的 Copula 函数可以很好地描述两变量的联合分布。但对于更高维分布(三变量及以上)，各变量之间的相互依赖关系往往呈现出非对称性，因此非对称的嵌套 Copula 更加适用。目前，非对称的嵌套 Copula 已在洪水和干旱特征等方面得到一些应用[29]，但在风暴潮“三碰头”灾害风险量化方面的研究相对较少。本节采用非对称嵌套 Copula 对风暴潮“三碰头”进行建模，其结构如图 7，将天文高潮位-风暴增水关系设置为内层 Copula(Gumbel Copula)，大通径流与内层 Copula 结果设置为外层 Copula(Survival Joe Copula，参数为 $\theta = 1.05$, Kendall $\tau = 0.03$)，且通过拟合优度检验。结果表明，大通流量和台风及其伴随事件的相关性较弱。图 8 为台风登陆(靠近)长江口期间大通流量变异系数图，图中黑色圆圈为每场台风靠近长江口期间最高风暴潮位前 7 日内大通日流量的变异系数(C_V，方差/均值)，蓝色为变异系数的小提琴图。可以看出，变异系数的范围一般在 0 ~ 0.1 之间，其中 25% 分位数为

0.016，88% 分位数为 0.050，中位数为 0.024。总体来看，台风在靠近长江口期间，大通日流量变化一般不超过 10%，且多数情况下在 5% 以内，可见台风系统对大通日流量的影响较小。因此，在台风及伴生事件与大通流量的复合洪水事件研究中，亦可将两者视为独立。根据三维联合分布函数，计算长江口徐六泾水文站径流、天文高潮位和风暴增水“三碰头”复合洪水灾害风险率。对于联合风险率：10 年一遇的径流、天文潮和风暴潮增水相遇的联合重现期为 4 a，20 年一遇的三者联合重现期为 7 a，50 年一遇的三者联合重现期为 18 a，100 年一遇的三者联合重现期为 35 a。

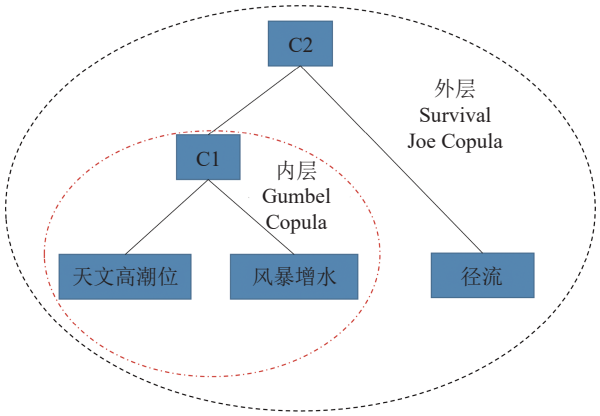


图 7 径流-天文高潮位-风暴增水三变量嵌套 Copula 结构

Fig. 7 Nested Copula structure for three variables: runoff, astronomical high tide, and storm surge

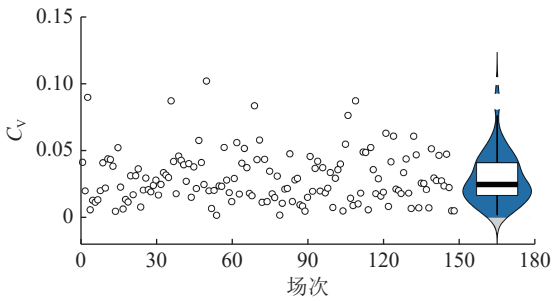


图 8 台风登陆长江口期间大通流量变异系数

Fig. 8 Coefficient of variation of Datong river flow during typhoon landfall near the Yangtze Estuary

3 结 论

本文以长江口为研究区域，结合实测资料和数值模拟构建了 1959—2020 年复合洪水灾害因子数据集，采用基于贝叶斯推断的 Copula 相关方法对长江口风暴潮“二碰头”“三碰头”复合灾害风险性进行了研究，并对不确定性进行了分析和分解。主要结论如下：

(1)1959—2020 年长江口徐六泾站年最高水位呈现出明显下降趋势，下降幅度为 11.6 mm/a，长江口风暴潮强度的减退是其主导因素。

(2)长江口地区在台风登陆和发生极端风暴高潮位的同时，遭遇极端降雨的概率较高，两者同时超越各自数阈值(取 95th 百分位)的复合洪水事件重现期为 89 a。大通径流与台风及其伴生事件在统计上近似独立。

(3)忽略变量之间的相关性会造成复合洪水灾害风险的低估，且灾害因子重现期越长，复合洪水灾害重现期低估程度越高。若不考虑相关性，风暴潮“二碰头”事件风险将被低估 77.7%。

（4）自然变化导致的风暴潮“二碰头”事件重现期不确定性为 [− 12.6%, 16.3%]，降雨、风暴潮高潮位和相关性对复合洪水灾害不确定性的贡献分别为 54%、41% 和 5%。

参考文献：

[1] 王军，谭金凯. 气候变化背景下中国沿海地区灾害风险研究与应对思考 [J]. 地理科学进展，2021，40(5)：870-882.（WANG J，TAN J K. Understanding the climate change and disaster risks in coastal areas of China to develop coping strategies[J]. Progress in Geography，2021，40(5)：870-882.（in Chinese））

[2] MEI W，XIE S P. Intensification of landfalling typhoons over the Northwest Pacific since the late 1970s[J]. Nature Geoscience，2016，9：753-757.

[3] LIU M F，VECCHI G A，SMITH J A，et al. Causes of large projected increases in hurricane precipitation rates with global warming[J]. NPJ Climate and Atmospheric Science，2019，2：38.

[4] HENDRY A，HAIGH I D，NICHOLLS R J，et al. Assessing the characteristics and drivers of compound flooding events around the UK coast[J]. Hydrology and Earth System Sciences，2019，23(7)：3117-3139.

[5] HEINRICH P，HAGEMANN S，WEISSE R，et al. Compound flood events：analysing the joint occurrence of extreme river discharge events and storm surges in Northern and Central Europe[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences，2023，23(5)：1967-1985.

[6] ZHANG Y J，YE F，YU H C，et al. Simulating compound flooding events in a hurricane[J]. Ocean Dynamics，2020，70(5)：621-640.

[7] GAO L，DU H X，HUANG H，et al. Modelling the compound floods upon combined rainfall and storm surge events in a low-lying coastal city[J]. Journal of Hydrology，2023，627：130476.

[8] ZSCHEISCHLER J，WESTRA S，van den HURK B J J M，et al. Future climate risk from compound events[J]. Nature Climate Change，2018，8：469-477.

[9] WAHL T，JAIN S，BENDER J，et al. Increasing risk of compound flooding from storm surge and rainfall for major US cities[J]. Nature Climate Change，2015，5：1093-1097.

[10] ROBINS P E，LEWIS M J，ELNAHRAWI M，et al. Compound flooding：dependence at sub-daily scales between extreme storm surge and fluvial flow[J]. Frontiers in Built Environment，2021，7：727294.

[11] EILANDER D，COUASNON A，IKEUCHI H，et al. The effect of surge on riverine flood hazard and impact in deltas globally[J]. Environmental Research Letters，2020，15(10)：104007.

[12] MARCOS M，ROHMER J，VOUSDOUKAS M I，et al. Increased extreme coastal water levels due to the combined action of storm surges and wind waves[J]. Geophysical Research Letters，2019，46(8)：4356-4364.

[13] KEW S F，SELTEN F M，LENDERINK G，et al. The simultaneous occurrence of surge and discharge extremes for the Rhine Delta[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences，2013，13(8)：2017-2029.

[14] 黄锦林，范嘉炜，唐造造. 基于最大熵-Copula 方法的降雨潮位关联性分析：以广州为例 [J]. 灾害学，2017，32(1)：65-71.（HUANG J L，FAN J W，TANG Z Z. Correlation study of rainstorm and tidal level using the maximum entropy-copula method：a case study of Guangzhou[J]. Journal of Catastrophology，2017，32(1)：65-71.（in Chinese））

[15] SANTOS V M，WAHL T，JANE R，et al. Assessing compound flooding potential with multivariate statistical models in a complex estuarine system under data constraints[J]. Journal of Flood Risk Management，2021，14(4)：e12749.

[16] VALLE-LEVINSON A，OLABARRIETA M，HEILMAN L. Compound flooding in Houston-Galveston Bay during hurricane Harvey[J]. Science of the Total Environment，2020，747：141272.

[17] SEBASTIAN A，DUPUITS E J C，MORALES-NáPOLES O. Applying a Bayesian network based on Gaussian copulas to model the hydraulic boundary conditions for hurricane flood risk analysis in a coastal watershed[J]. Coastal Engineering，2017，125：42-50.

[18] COUASNON A，SEBASTIAN A，MORALES-NáPOLES O. A Copula-based Bayesian network for modeling compound flood hazard from riverine and coastal interactions at the catchment scale：an application to the Houston ship channel，Texas[J]. Water，2018，10(9)：1190.

[19] NASERI K，HUMMEL M A. A Bayesian copula-based nonstationary framework for compound flood risk assessment along US coastlines[J]. Journal of Hydrology，2022，610：128005.

[20] FENG J L，LI D L，LI Y X，et al. Analysis of compound floods from storm surge and extreme precipitation in China[J]. Journal of Hydrology，2023，627：130402.

[21] 王璐阳，张敏，温家洪，等. 上海复合极端风暴洪水淹没模拟 [J]. 水科学进展，2019，30(4)：546-555.（WANG L Y，ZHANG M，WEN J H，et al. Simulation of extreme compound coastal flooding in Shanghai[J]. Advances in Water Science，2019，30(4)：546-

555.（in Chinese））

［22］黄祎静. 上海适应气候变化防范极端洪涝事件策略研究 [D]. 上海：上海应用技术大学，2020.（HUANG H J. Study on Shanghai's strategies for adapting to climate change and preventing extreme flood events[D]. Shanghai：Shanghai Institute of Technology，2020.（in Chinese））

［23］YIN C T，ZHANG W S，XIONG M J，et al. Storm surge responses to the representative tracks and storm timing in the Yangtze Estuary，China[J]. Ocean Engineering，2021，233：109020.

［24］SERINALDI F. Dismissing return periods![J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment，2015，29(4)：1179-1189.

［25］LI J Z，LEI Y M，TAN S M，et al. Nonstationary flood frequency analysis for annual flood peak and volume series in both univariate and bivariate domain[J]. Water Resources Management，2018，32(13)：4239-4252.

［26］BEVACQUA E，VOUSDOUKAS M I，ZAPPA G，et al. More meteorological events that drive compound coastal flooding are projected under climate change[J]. Communications Earth & Environment，2020，1(1)：47.

［27］MENéNDEZ M，WOODWORTH P L. Changes in extreme high water levels based on a quasi-global tide-gauge data set[J]. Journal of Geophysical Research：Oceans，2010，115(C10)：2009JC005997.

［28］MARCOS M，WOODWORTH P L. Spatiotemporal changes in extreme sea levels along the coasts of the North Atlantic and the Gulf of Mexico[J]. Journal of Geophysical Research：Oceans，2017，122(9)：7031-7048.

［29］陈璐. Copula 函数理论在多变量水文分析计算中的应用研究 [M]. 武汉：武汉大学出版社，2013：2-3.（CHEN L. Study on the application of Copula function theory in multivariate hydrological analysis and calculation[M]. Wuhan：Wuhan University Press，2013：2-3.（in Chinese））

Compound flooding potential in the Yangtze Estuary based on Bayesian inference*

YIN Chengtuan[1]，SUN Zhongbin[1]，XIONG Mengjie[1]，WANG Jinhua[1]，ZHANG Weisheng[1]，LIU Yue[2,3]，ZHANG Jinshan[1]

（1. *The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention*，*Nanjing Hydraulic Research Institute*，*Nanjing* 210024，*China*；
2. *The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention*，*Hohai University*，*Nanjing* 210098，*China*；
3. *Research Center for Climate Change*，*Ministry of Water Resources*，*Nanjing* 210029，*China*）

Abstract：In the context of escalating global warming，the compound effects of typhoons，intense rainfall，riverine flooding，and storm surges have led to a heightened frequency of compound flood events，posing considerable threats to the flood control security of coastal cities. Using observational data and numerical simulations，a comprehensive dataset encompassing compound flood hazard factors from 1959 to 2020 has been reconstructed. A Bayesian inference-based Copula approach is employed to evaluate the risks and uncertainties associated with double and triple compound events of storm surge in the Yangtze Estuary. The results indicate that，from 1988 to 2020，the annual extreme high water level at the Xuliujing station in the Yangtze Estuary exhibited a significant downward trend，primarily due to the weakening intensity of storm surges. The coincidence risk between extreme storm tide levels and heavy rainfall in the Yangtze Estuary is relatively high，with a return period of 89 years. Conversely，the Datong runoff is statistically independent of typhoons and their associated events. Neglecting the dependency between variables would lead to an underestimation of compound flood disaster risks，which will become more pronounced as the return period of hazard factors increases. For instance，the risk underestimation of double compound events of storm surge reaches up to 77.7%. The uncertainty in the return period of double compound events of storm surge due to natural variability ranges from − 12.6% to 16.3%. Compared to extreme storm tide levels and dependence，precipitation is the major contributor to the uncertainty of compound flooding.

Key words：compound flooding；storm surge；uncertainty；Bayesian inference；Copula；the Yangtze Estuary

* The study is financially supported by the National Natural Science of China（No. U2340225）and the Special funds for basic scientific research of central public welfare scientific research institutes（No. Y224001）.

DOI：10.14042/j.cnki.32.1309.2025.01.013

降水空间信息的处理策略对径流预测的影响

高玉芳[1,2]，何 川[1]，彭 涛[2,3]，高 勇[4]

（1. 南京信息工程大学生态与应用气象学院，江苏 南京 210044；2. 三峡国家气候观象台，湖北 宜昌 443099；3. 中国气象局武汉暴雨研究所 中国气象局流域强降水重点开放实验室，湖北 武汉 430205；4. 泰安市水利局，山东 泰安 271000）

摘要：降水空间信息的精确提取对径流预测的精度至关重要。本文以赣江流域为研究对象，基于长短期记忆网络（Long Short-Term Memory，LSTM）模型，设计原始图像、小波分解、统计特征、面平均值、区域划分 5 种降水空间信息提取方案，研究降水空间信息不同处理策略对基于 LSTM 模型的径流预测性能的影响。结果表明：相较于直接使用原始图像的方案，综合运用小波分解和统计特征提取的处理方法测试期纳什效率系数分别提升了 11.5% 和 17.9%，同时也增强了模型的稳定性和解释性；不同的区域划分方法能结合土地利用、土壤类型等下垫面因素，反映降水响应的空间差异性，展现了对各流量等级的适应能力，相较于以流域平均值作为输入的方式，能明显提高捕捉高流量和低流量特征的能力。研究表明在基于 LSTM 模型的降雨—径流预测模型中引入降水空间信息，可以有效改善预测效果。

关键词：径流预测；长短期记忆网络；卷积神经网络；小波变换
中图分类号：TV122 **文献标志码：**A **文章编号：**1001-6791（2025）01-0143-12

全球气候变化和城市化增加了洪水风险，给洪水管理带来新的挑战[1]。在此背景下，精准预测径流对洪水管理和水资源规划至关重要。降水量的空间异质性对洪峰和径流预测有显著影响[2]，随着分布式水文模型的发展[3-4]，水文气象过程的空间变异性得到了更精确的描述。但许多地区缺乏足够的水文、气象历史数据和精准的模型参数[5-7]，影响径流预测结果的准确性。随着人工智能技术的发展，特别是深度学习等神经网络模型用于复杂非线性水文过程预测，取得了一定进展[8]。此外，一些研究还将传统水文模型与神经网络结合，但这些方法通常是基于模型输出的后处理，通过提取和整合模拟结果，进一步优化预测精度[9-10]。以上基于神经网络模型的方法无法提供过程的物理解释，但它们带来了包括快速发展、较低的信息需求和相对准确的流量预测等多项优势[11]。然而基于神经网络模型的输入特征，如降水量和温度，通常被视为非空间分布的，而是以聚合值的形式输入，例如流域或某一区域的平均值，忽略了降水等气象因素的空间异质性，而这些异质性对流域水文响应，特别是对洪峰流量的影响至关重要。

为弥补上述方法在识别空间异质性方面的局限性，研究者开始尝试将空间信息直接融入模型中，以提高径流预测的精度。邓超等[12]在针对赣江流域的研究中，通过结合数据同化与机器学习，利用主成分分析（Principal Component Analysis，PCA）降低数据维度，提取关键变量，减少了冗余，提高了模型效率和预测精度；Yang 等[13]通过融合神经网络和计算机视觉（Computer Vision，CV）技术，捕获了预测因子的空间变异性，证明空间信息在提高水文模型鲁棒性中的关键作用，特别是在极端流量预测方面；Deng 等[11]、Li 等[14]、Hu 等[15]使用了结合卷积神经网络（Convolutional Neural Network，CNN）和长短期记忆网络（Long Short-Term Memory，LSTM）的 CNN-LSTM 模型，CNN 和 LSTM 的结合使模型既能捕捉空间信息，又能处理时间动态变化，从而提高径流预测的精度。以上研究表明，使用空间信息的数据相对于传统的流域平均数据可以

收稿日期：2024-10-24；**网络出版日期：**2025-02-20
网络出版地址：https://link.cnki.net/urlid/32.1309.P.20250220.1550.002
基金项目：国家自然科学基金项目（U2442601）；国家重点研发计划项目（2024YFC3013002）
作者简介：高玉芳（1979—），女，山东聊城人，副教授，博士，主要从事水文气象研究及相关应用方面的工作。E-mail：gaoyf@nuist.edu.cn
通信作者：何川，E-mail：308463830@qq.com

在一定程度上提升模型性能。然而，这些方法在直接处理高维空间数据时，主要依赖深度学习模型自动提取特征，缺乏从水文学角度对降水空间异质性的提取。

为了更好地表征降水空间异质性对水文响应的影响，一些研究者开始尝试在模型输入层面充分引入水文机理。Liu 等[16] 和刘成帅等[17] 将地形、土地利用和土壤特性与 LSTM 模型结合，量化降水的空间异质性，以优化洪水预测；吴垚等[18] 通过结合网格化 HBV 模型和 CNN-LSTM，将降水的空间异质性直接融入模型中，从而提高径流预测精度；Wang 等[19] 则通过提取集水区各水文响应单元的降水数据，替代传统的面平均降水数据，保留了降水的空间分布信息，提高了 LSTM 模型的洪水预测精度；张锦堂等[20] 发现，利用包含空间信息的测站数据能够提升通过 LSTM 模型进行降雨径流模拟的效果。尽管这些方法初步引入了水文机理，但仍缺乏足够的水文学支持，导致模型未能全面反映降水对水文响应的复杂动态影响，从而限制了预测精度和适应性。

为了有效提取和利用降水的空间信息，同时降低计算复杂度，本文以赣江流域为研究对象，基于二维降水数据，研究不同降水空间特征提取方法对基于 LSTM 模型的径流预测性能的影响，探讨寻找兼顾精度和效率的最佳径流预测方法。

1 研究方案及方法

1.1 模型与设置

本研究基于 TensorFlow 的 Keras 框架，采用 3 种神经网络模型：CNN[21]、多头注意力机制（Multi-Head Attention，MH）[22] 和 LSTM[23]，并结合全连接层（Fully Connected Layer，FC）。采用双滑动窗口方法，预测未来 1 d 的径流量。训练集和验证集的数据选取自 2018 年 5 月至 2023 年 4 月。每次训练过程中，随机选择其中 90% 数据作为训练数据，剩余 10% 作为验证数据；测试集的数据选取自 2023 年 5 月至 2024 年 4 月。模型参数参考 Khatun 等[24] 的研究方法，采用试错法确保最佳参数设置。参考邓超等[12] 的相关研究，采用纳什效率系数（E_{NS}）、Kling-Gupta 效率系数（E_{KG}）、径流对数的纳什效率系数（E_{NSlnQ}）、洪峰相对误差（D_P）和洪量相对误差（D_V）作为评估指标。

1.2 研究方案

本研究设计了 5 种不同的降水数据处理方案：原始图像方案、小波分解方案、统计学特征方案、面平均值方案及区域划分方案，图 1 展示了各方案的模型结构。

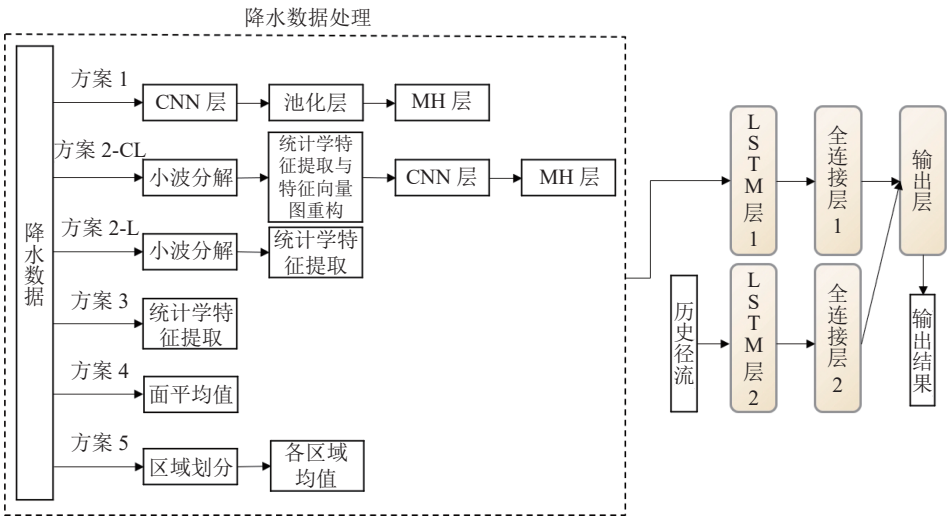


图 1 基于 LSTM 的模型结构

Fig. 1 Model architecture based on LSTM

1.2.1　方案 1(原始图像方案)

直接将时序二维图像格点降水数据作为输入，利用二维 CNN 提取空间特征后，再结合 LSTM 模型捕捉时序信息来预测径流。

1.2.2　方案 2(小波分解方案)

对降水数据应用 Daubechies 小波进行双层离散小波变换，将其分解成 16 个频段，对每个频段的数据进行均值、方差等 10 个特征提取[25]，这些特征作为时间序列输入，使用 LSTM 模型预测径流。方案 2-CL 使用 CNN-LSTM 模型，与张乙鹏等[25]的研究保持一致。作为对比，方案 2-L 使用 LSTM 模型，将未经过重塑的统计特征向量直接输入 LSTM 模型进行预测。

1.2.3　方案 3(统计学特征方案)

从原始二维降水数据中提取过去 7 d 面平均降水量、过去 30 d 面平均降水量、标准差、最大值、偏度、峰度、平均梯度[25]以及降水质心到流域出口的距离 8 个统计学特征，作为 LSTM 模型的输入。

1.2.4　方案 4(面平均值方案)

从时序降水数据中提取整个流域面平均值，得到 1 个一维的时间序列，直接输入进 LSTM 模型进行径流预测。

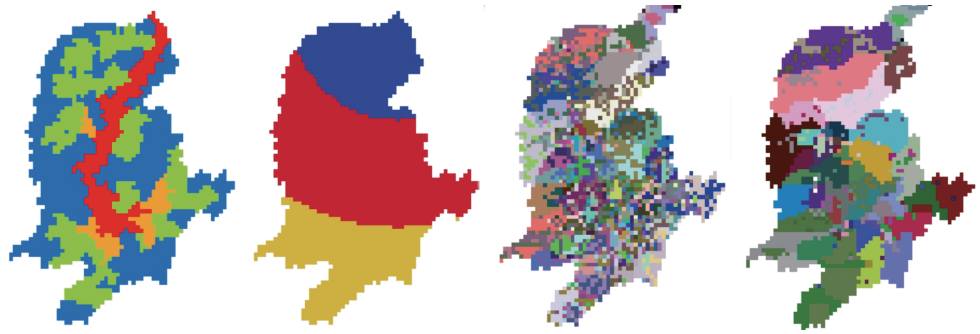
1.2.5　方案 5(区域划分方案)

方案 5 为区域划分方案，本研究采用 4 种分区方法，将二维时序格点降水数据划分为若干区域，分别计算每个区域的降水均值，进而输入到 LSTM 模型中。这种方法能够在输入数据中保留更多的空间特征，从而提高模型对降水空间异质性和洪水动力学的捕捉能力。

(1)基于等级河流划分。提取水文信息，基于 Strahler 分级法将流域划分为 6 级河流(图 2(a))。将 6 级河流(主干河流)、5 级河流、4 级河流以及 3 级及以下河流所控制的集水区划分为 4 个区域，分别计算这些区域的降水量面平均值，输入 LSTM 模型。

(2)基于距离远近划分。首先确定流域出口断面的位置和流域的范围；然后，以出口断面为圆心，划分等半径差的同心圆，将流域分为 3 个区(图 2(b))，分别计算每个区的降水面平均值，输入 LSTM 模型。

(3)基于水文响应单元(HRU)划分(包含 2 种子方式)。使用 ArcSWAT 工具对流域进行水文单元划分，创建多个 HRU。由于 HRU 是根据土地利用、土壤类型、地形和坡度等各因素的特征组合定义的，因此每个 HRU 能够代表一个在水文响应上相对均质的区域。由于不同的土地利用类型(如森林、耕地、城市区域)和土壤类型(如砂土、黏土等)对降水的渗透、径流和蒸发有显著不同，因此 HRU 能够有效反映下垫面对降水的不同响应。



(a) 基于河流等级划分　(b) 基于距离出口断面划分　(c) 精细 HRU 划分　(d) 简易 HRU 划分

图 2　不同分区方法

Fig. 2　Different zoning methods

本研究采用 2 种 HRU 划分方式，分类标准详见表 1。第 1 种精细 HRU 划分方法基于土地利用 6 类、土壤类型 3 类和坡度 2 类(以 5% 坡度百分比为阈值)，最终划分出 293 个 HRUs(图 2(c))。第 2 种简易 HRU 划分方法，仅将土地利用分为 2 类、土壤分为 2 类、坡度不分类，最终划分出 91 个 HRUs(图 2(d))。

表 1 HRU 划分结果

Table 1 HRU delineation methods

划分方法	原土地利用类型	土地利用划分	原土壤类型	土壤划分
精细HRU划分	常绿针叶林、常绿阔叶林、落叶针叶林、落叶阔叶林、混交林、有林草原	森林类(68.6%)	黏土、粉质黏土、砂质黏土、粉质黏壤土	高径流潜力(14.4%)
	密闭灌丛、开阔灌木丛、草原、稀树草原	草地类(0.2%)	黏壤土、壤土、砂黏壤土	中等径流潜力(20.3%)
	农田、农田/天然植被	农田类(23.7%)	砂壤土、壤砂土、砂土、粉壤土、粉土、有机质土壤、水、基岩、其他	低径流潜力(65.3%)
	城市和建筑	城市和建设用地类(0.6%)		
	永久湿地、水体、湖	水体和湿地类(0.2%)		
	永久雪冰、裸地或低植被覆盖地、森林苔原、混合苔原、裸露苔原	荒地和其他类(6.7%)		
简易HRU划分	常绿针叶林、常绿阔叶林、落叶针叶林、落叶阔叶林、混交林、有林草原、密闭灌丛、开阔灌木丛、草原、稀树草原、农田、农田/天然植被、永久湿地、水体、湖	蒸散发较强(92.7%)	黏土、粉质黏土、砂质黏土、粉质黏壤土、黏壤土、壤土、砂黏壤土	中、高径流潜力(34.7%)
	城市和建筑、永久雪冰、裸地或低植被覆盖地、森林苔原、混合苔原、裸露苔原	蒸散发较弱(7.3%)	砂壤土、壤砂土、砂土、粉壤土、粉土、有机质土壤、水、基岩、其他	低径流潜力(65.3%)

1.2.6 SHAP 算法

SHAP(Shapley Additive Explanations)是一种基于博弈论的模型解释方法，用于量化每个特征因子对模型预测结果的贡献[26]。本研究中基于 SHAP 算法，通过计算各输入特征对径流预测的 SHAP 值，分析输入特征包括降水和统计特征等对模型预测结果的影响，揭示特征对径流变化的具体贡献，从而增强模型的可解释性。

2 研究流域与数据

2.1 研究流域

赣江流域位于长江中下游南岸，是鄱阳湖水系的最大支流，发源于江西省赣州市石城县，流域总面积约为 8.35 万 km^2，流域地形复杂，地势由上游的崇山峻岭逐渐过渡到中游的开阔谷地和平原，再至下游的丘陵盆地，高程自然落差达 937 m。流域内山地和丘陵占比约 64.7%，低丘岗地占 31.5%，平原和水域面积仅为 3.9%；植被以森林和草地为主，主要包括常绿阔叶林和落叶阔叶林，草地多分布于高海拔山区和盆地[27]。土地利用主要为林地和农田，林地覆盖面积占比超过 65%，土壤类型涵盖红壤、黄壤等 20 余种[28]。赣江流域的水文特征具有明显的季节性变化，汛期为 4—9 月，水量约占全年总水量的 73% ~ 78%；而枯水期集中在 11 月至次年 1 月，此时水量仅占全年总量的 9% ~ 11%，径流的年内分布差异显著[29]。赣江流域范围及高程见图 3。

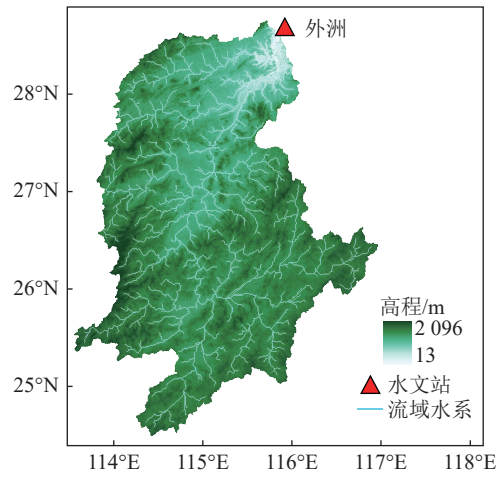


图 3　赣江流域范围及高程

Fig. 3　Extent and elevation map of the Ganjiang River basin

2.2　数据集

降水数据采用中国气象局（https://data.cma.cn）陆面数据同化系统（CLDAS-V2.0）的实时产品数据集中的降水数据，时空分辨率分别为 1 d 和 0.062 5°。径流数据采用外洲水文站 1 h 实测数据，对其进行时间上的降尺度处理，使得径流数据的时间尺度与降水数据保持一致。训练集和验证集数据选取自 2018 年 5 月至 2023 年 4 月。训练期和验证期内平均日降雨—径流过程见图 4。

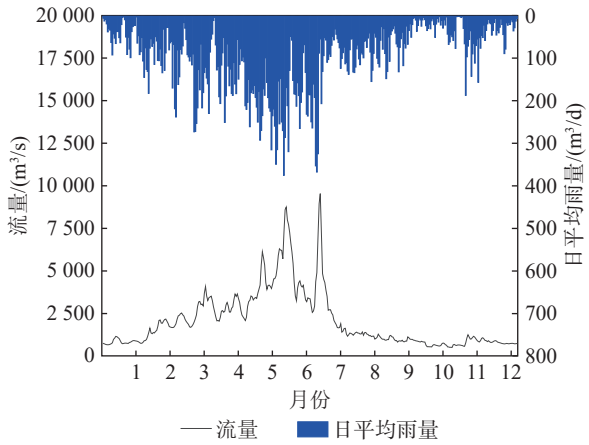


图 4　2018 年 5 月至 2023 年 4 月平均日降雨—径流过程

Fig. 4　Average daily precipitation—runoff relationship during the period from 2018 to 2023

DEM 数据采用地理空间数据云（https://www.gscloud.cn/）的 ASTER GDEMV3 数据，分辨率为 30 m。土壤类型数据采用 Food and Agriculture Organization（FAO）的全球土壤数据库。土地利用数据采用 21 类 IGBP-MODIS 土地利用分类。

2.3　时间窗口选择

利用互相关函数（CCF），根据 Khatun 等[30]的研究方法，以互相关函数值 $F_{CC}>0.5$ 的阈值作为输入时间序列选择的标准，对降水数据与历史径流数据进行统计分析，以选择最适合的时间窗口。图 5 显示了降水与历史径流对当前径流的互相关函数值曲线。根据该结果，确定了历史径流的时间窗口为 11 d，降水的时间窗口为 3 d。

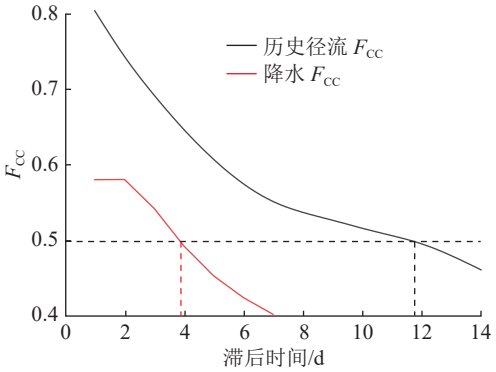


图 5 降水与历史径流对当前径流的互相关函数值曲线

Fig. 5 Cross-correlation function value curve of precipitation and historical runoff with current runoff

3 结果与分析

3.1 不同方案预测结果

各方案的径流预测结果如表 2 所示，整体上方案 3、方案 4 和方案 5 表现较优。方案 1 因特征维度过大，易造成过拟合，注意力机制的引入提高了对高流量的模拟精度，但对低流量的模拟效果较差。方案 2-L 采用的 LSTM 模型对多特征相互关系更敏感，能够有效捕捉小波分解生成的多尺度统计特征；方案 2-CL 在 CNN 与小波特征结合时，尽管也优于方案 1，但额外的卷积操作在训练中未能充分发挥其优势，导致其测试期泛化能力低于单一 LSTM 模型。方案 3 通过提取全局统计特征简化输入，降低了模型复杂度，泛化能力更强。方案 4 采用降水格点的面平均值作为输入，能较好地模拟低流量，但对高流量的捕捉仍有改进空间。方案 5 基于不同方式对降水进行空间划分，整体性能最优：按河流等级划分能更准确地模拟高流量，但对低流量的刻画略显不足；按出口断面距离划分在低流量情景下表现更好；基于 HRU 的精细划分虽在训练期和验证期表现突出，但易过拟合，适当简化后可在高流量与低流量预测中取得更平衡的效果。

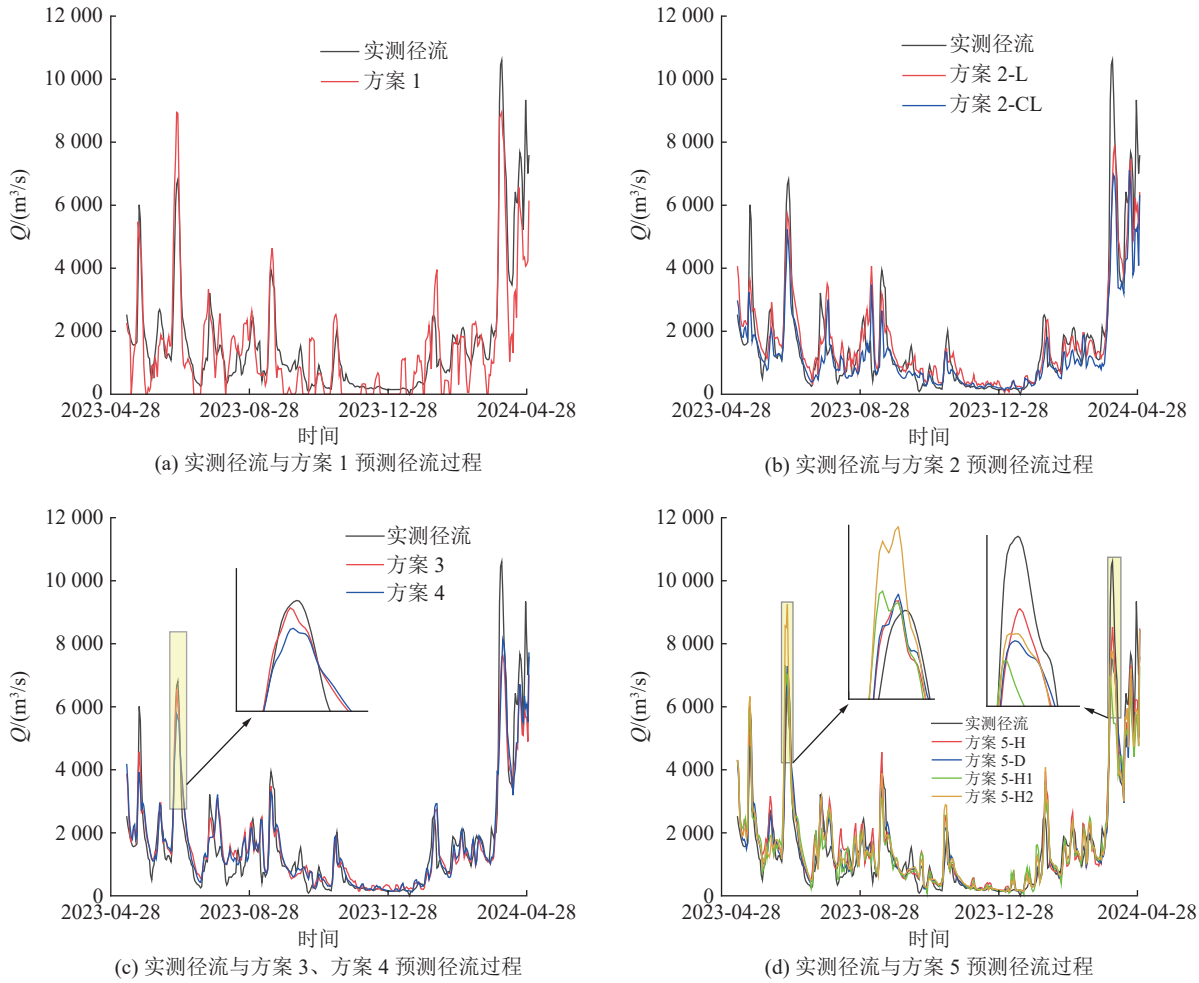
表 2 不同方案预测结果

Table 2 Comparison of simulation results from different schemes

	训练期			验证期			测试期		
	E_{NS}	E_{KG}	E_{NSlnQ}	E_{NS}	E_{KG}	E_{NSlnQ}	E_{NS}	E_{KG}	E_{NSlnQ}
方案1	0.873	0.833	−3.059	0.801	0.869	−1.630	0.739	0.780	−1.311
方案2-L	0.841	0.868	0.806	0.831	0.784	0.750	0.824	0.772	0.776
方案2-CL	0.810	0.786	0.743	0.812	0.854	0.655	0.766	0.621	0.800
方案3	0.855	0.862	0.848	0.881	0.895	0.818	0.871	0.790	0.810
方案4	0.839	0.837	0.847	0.885	0.851	0.900	0.862	0.807	0.853
方案5-H	0.852	0.848	0.802	0.859	0.890	0.809	0.880	0.850	0.797
方案5-D	0.883	0.878	0.867	0.914	0.928	0.830	0.886	0.831	0.857
方案5-H1	0.862	0.864	0.799	0.874	0.905	0.777	0.819	0.783	0.795
方案5-H2	0.907	0.915	0.866	0.910	0.910	0.871	0.860	0.871	0.828

注：方案5-H为基于河流等级划分的区域划分方案；方案5-D为基于出口断面距离划分的区域划分方案；方案5-H1为基于精细HRU划分的区域划分方案；方案5-H2为基于简易HRU划分的区域划分方案。

5 种方案测试期径流预测结果见图 6，训练期、验证期和测试期多个洪水事件的洪峰和洪量相对误差见图 7，实测径流与 5 种方案的预测径流之间的泰勒图见图 8。



(a) 实测径流与方案 1 预测径流过程　　(b) 实测径流与方案 2 预测径流过程

(c) 实测径流与方案 3、方案 4 预测径流过程　　(d) 实测径流与方案 5 预测径流过程

图 6　实测径流与 5 种方案预测径流过程

Fig. 6　Comparison of observed runoff and predicted runoff from five schemes

从图 6—图 8 可以看出，训练期、验证期的 D_P 和 D_V 表现出整体稳定的趋势，说明模型的训练过程较为稳定。在测试期，5 种方案预测径流过程与实测径流过程都吻合较好。方案 1 通过多头注意力机制能够较好地捕捉洪峰流量的时序特征，但在低流量情况下经常将径流预测为零。方案 2-CL 常出现低估，同时从图 8 可以看出，方案 2-CL 在捕捉流量过程的多样性方面有所欠缺；而方案 2-L 则有所改进，对洪峰流量的预测也更为精准。方案 3 通过统计特征提取，捕捉了降水空间分布与流域特征的关系，尤其对 2023 年 6 月 26 日降雨—径流事件的预测最为精准，事件期间的 E_{NS} 达到 0.944，表明全局统计特征兼顾了空间信息和简化输入，使模型具有较好的稳定性，既可以有效降低模型复杂性，同时保持较高的预测精度。方案 4 关注整体降水对径流的影响，忽略了空间分布细节，预测精度较方案 1 和方案 2 更好。方案 5 的 4 种方法中，2 种基于 HRU 划分的方案中，方案 5-H2 相较于方案 5-H1 标准差表现更好，表明合理简化输入特征能够提升泛化能力；但方案 5-H1 和方案 5-H2 都略逊于基于河流等级的划分方案 5-H 和距离出口的划分方案 5-D，尤其是方案 5-H，在 D_P 和 D_V 上的表现最优，在 2024 年 4 月 6 日的降水事件中，洪峰误差比基于出口距离的方案 5-D 低 9.40%，这种优势可以归因于河流等级划分能够更好地反映流域内的汇水路径和河道调节作用。

总体上看，5 种方案中方案 3 和方案 5-H、方案 5-D 表现更好。方案 3 以降水数据的不同统计学特征作为输入，为深入理解这些特征对模型预测的影响、揭示模型对降水特征的敏感性、为未来的特征选择和模型

优化提供依据，需进一步分析其优异表现背后的原因。为此，将通过 SHAP 分析方法解释方案 3 的各统计特征如何影响径流预测，特别是在丰水期和枯水期等不同水文事件中表现的差异。

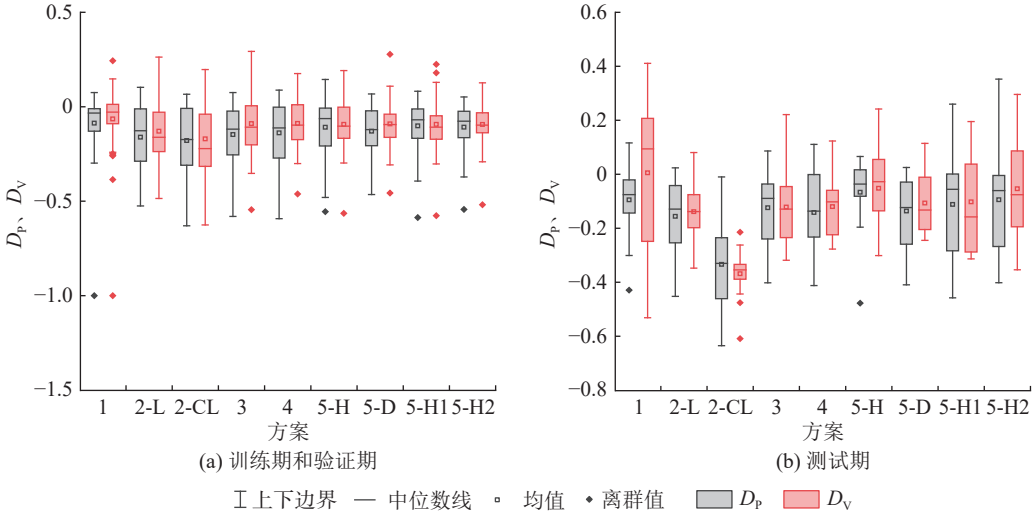


图 7 训练期、验证期和测试期多个洪水事件的洪峰相对误差和洪量相对误差

Fig. 7 Relative peak errors and relative volume errors for multiple flood events in training, validation, and testing periods

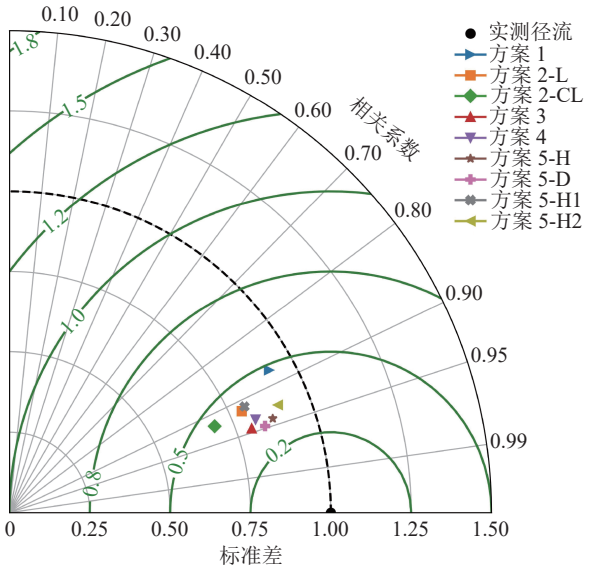


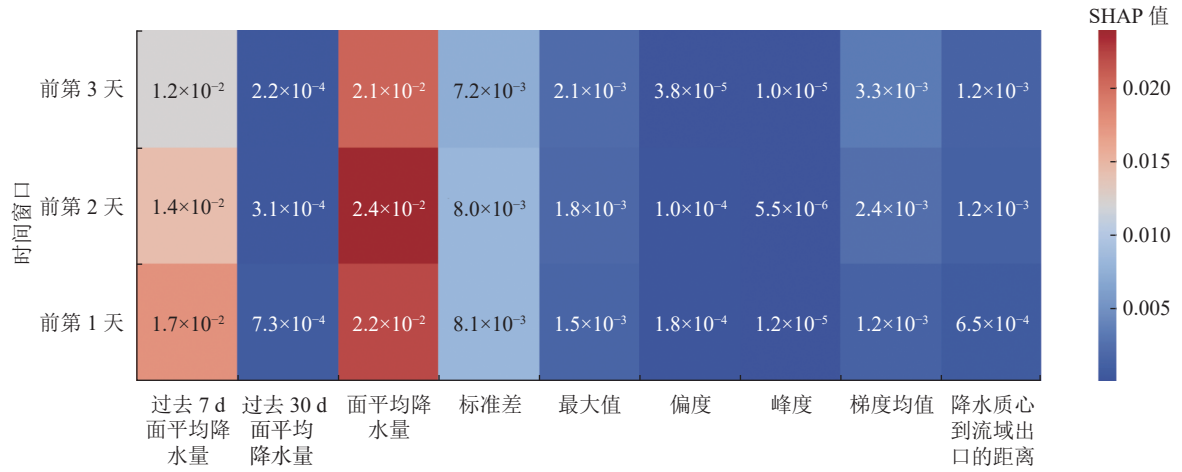
图 8 实测径流与 5 种方案的预测径流之间的泰勒图

Fig. 8 Taylor diagram between the observed runoff and the predicted runoff of the five scenarios

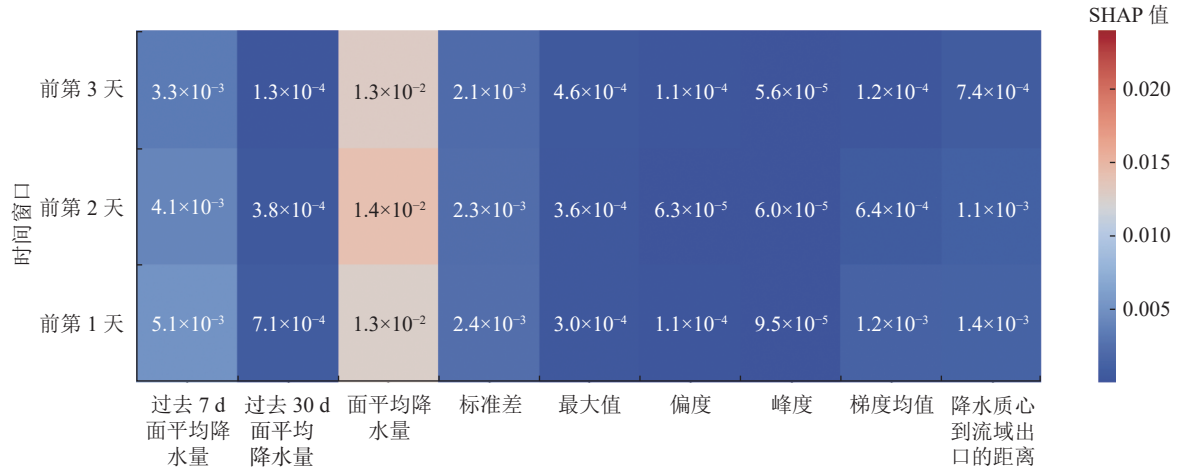
3.2 统计特征解释性分析

针对 2023 年 6 月 26 日丰水期降水事件、2024 年 2 月 6 日平水期降水事件及 2023 年 11 月至 2024 年 1 月枯水期，使用 SHAP 分析方法量化各输入特征对径流预测的贡献。3 个时间段内各统计特征及时间窗口不同天数的平均 SHAP 值见图 9。

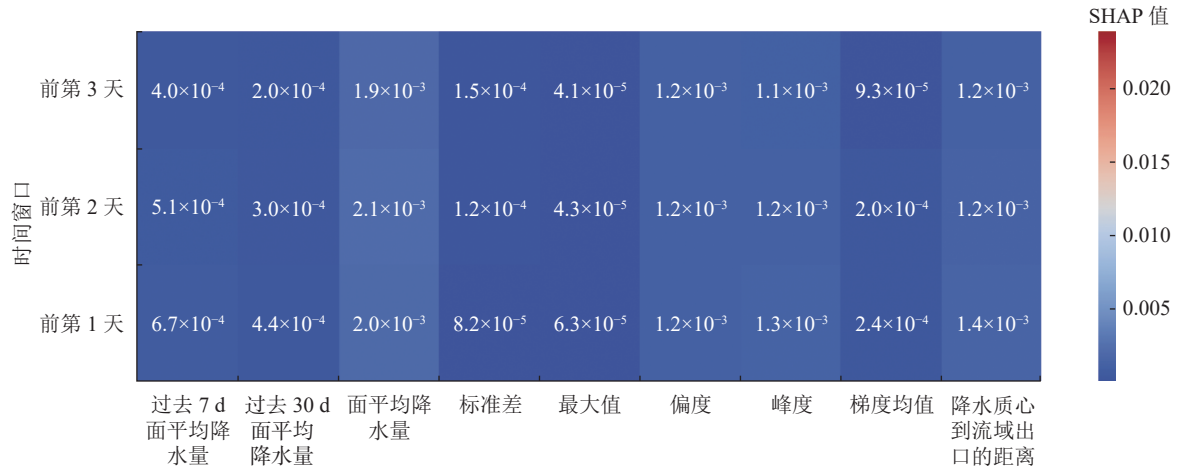
从图 9 可以看出，在 2023 年丰水期的降水事件中，“过去 7 d 的面平均降水量”特征对模型预测的贡献较大，说明前期降水为土壤提供了持续的补给，使土壤含水量增高；“面平均降水量”在所有特征中贡献最



(a) 2023 年 6 月 26 日 降水事件的平均 SHAP 值



(b) 2024 年 2 月 6 日 降水事件的平均 SHAP 值



(c) 2023 年 11 月至 2024 年 1 月枯水期的平均 SHAP 值

图 9　方案 3 各统计特征及时间窗口不同天数的平均 SHAP 值

Fig. 9　Average SHAP values for different statistical features and time windows in scheme 3

大，说明径流主要由中短期的强降水产生。在 2024 年平水期的降水事件中，“过去 7 d 的面平均降水量”的 SHAP 值显著低于 2023 年丰水期的降水事件的值，且“过去 30d 的面平均降水量”的 SHAP 值始终保持在低水平，前期降水对径流形成的贡献较小。结合 2 月份的水文气象特征，可以推断此降水事件发生前，土壤含水量较低。

在枯水期，降水量相关特征的 SHAP 值较低，说明降水总量对径流形成的贡献较小，但偏度、峰度以及降水质心到流域出口的距离的 SHAP 值相对较高，反映出降水的空间分布对径流的影响较为显著。为进一步分析降水质心到流域出口的距离对径流的影响，在枯水期选择了该特征值较低和较高 2 个时间段的数据进行 SHAP 分析。结果表明，当降水质心距离流域出口较近时，该特征的 SHAP 值更高，水流汇集路径短，使其对径流形成的贡献更大；当降水质心距离流域出口较远时，过去 7 d 面平均降水量的 SHAP 值显著增大，表明当水流需要更长的时间汇集到出口时，前期降水累积量对径流形成的影响更为突出。

4 结 论

本文基于 LSTM 模型，结合不同的降水特征提取与输入方案开展径流预测研究，主要结论如下：

(1)通过卷积层直接处理二维降水图像可较好捕捉洪峰流量及峰时特征，但高维数据导致模型复杂、易过拟合，进而影响低流量条件下的预测表现。

(2)利用小波分解提取多尺度统计特征能在一定程度上简化数据结构，并提高模型稳定性，但当结合卷积层时，效果不如单纯利用 LSTM 模型捕捉小波特征的关系；相比之下，直接提取全局统计指标(如面平均值、标准差、偏度和峰度)不仅降低了模型复杂度，而且在兼顾空间信息的同时取得了更优的综合预测效果。

(3)将流域按不同标准进行区域划分后，分别提取各区域降水均值，能更充分地反映降水空间异质性。基于河道等级或出口距离的分区方法分别在高流量和低流量情景下展现出针对性优势。结合土地利用、土壤类型和地形特征的 HRU 划分，在捕捉下垫面条件影响方面具有潜力，但过于细致的区域划分则可能导致模型过拟合，适当的简化有助于提升泛化能力。

不同的降水空间处理方式对径流预测的适用性各有侧重，合理的特征提取和区域划分策略能在降低模型复杂度的同时提升预测精度和泛化能力，为流域水文预测提供有益参考。

致谢：本论文的数值计算得到了南京信息工程大学高性能计算平台的计算支持和帮助。

参考文献：

[1] TANG Z Y，WANG P，LI Y，et al. Contributions of climate change and urbanization to urban flood hazard changes in China's 293 major cities since 1980[J]. Journal of Environmental Management，2024，353：120113.

[2] ZHOU Z Z，SMITH J A，BAECK M L，et al. The impact of the spatiotemporal structure of rainfall on flood frequency over a small urban watershed：an approach coupling stochastic storm transposition and hydrologic modeling[J]. Hydrology and Earth System Sciences，2021，25(9)：4701-4717.

[3] 高玉芳，吴雨晴，彭涛，等. 基于不同降水产品的 WRF-Hydro 模式径流模拟：以漳河流域为例 [J]. 热带气象学报，2020，36(3)：299-306.(GAO Y F，WU Y Q，PENG T，et al. Application of WRF-hydro for runoff simulation based on different rainfall products：taking Zhanghe River basin as an example[J]. Journal of Tropical Meteorology，2020，36(3)：299-306.(in Chinese))

[4] 徐华亭，吴志勇，陈瑞方，等. 基于再分析降水资料的青藏高原典型流域径流模拟分析 [J]. 水资源保护，2024，40(4)：92-98，147.(XU H T，WU Z Y，CHEN R F，et al. Runoff simulation analysis of typical watershed in Tibetan Plateau based on reanalysis precipitation data[J]. Water Resources Protection，2024，40(4)：92-98，147.(in Chinese))

[5] 马秋梅，桂绪，熊立华，等. 气候变化对 HBV 水文模型参数敏感性和不确定性的影响 [J]. 水科学进展，2024，35(4)：556-568.(MA Q M，GUI X，XIONG L H，et al. Impact of climate change on the sensitivity and uncertainty of HBV hydrologic model

parameters[J]. Advances in Water Science，2024，35(4)：556-568.(in Chinese))

[6] 廖如婷，徐宗学，叶陈雷，等. 暴雨洪水管理模型参数敏感性分析 [J]. 水力发电学报，2022，41(6)：11-21.(LIAO R T，XU Z X，YE C L，et al. Parameter sensitivity analysis methods of storm water management model[J]. Journal of Hydroelectric Engineering，2022，41(6)：11-21.(in Chinese))

[7] 苟娇娇，缪驰远，徐宗学，等. 大尺度水文模型参数不确定性分析的挑战与综合研究框架 [J]. 水科学进展，2022，33(2)：327-335.(GOU J J，MIAO C Y，XU Z X，et al. Parameter uncertainty analysis for large-scale hydrological model：challenges and comprehensive study framework[J]. Advances in Water Science，2022，33(2)：327-335.(in Chinese))

[8] ZHANG L，QIN H P，MAO J Q，et al. High temporal resolution urban flood prediction using attention-based LSTM models[J]. Journal of Hydrology，2023，620：129499.

[9] LI J Y，DAO V，HSU K，et al. Improving cascade reservoir inflow forecasting and extracting insights by decomposing the physical process using a hybrid model[J]. Journal of Hydrology，2024，630：130623.

[10] LI J，WU G F，ZHANG Y P，et al. Optimizing flood predictions by integrating LSTM and physical-based models with mixed historical and simulated data[J]. Heliyon，2024，10(13)：e33669.

[11] DENG H Q，CHEN W J，HUANG G R. Deep insight into daily runoff forecasting based on a CNN-LSTM model[J]. Natural Hazards，2022，113(3)：1675-1696.

[12] 邓超，陈春宇，尹鑫，等. 融合数据同化与机器学习的流域径流模拟方法 [J]. 水科学进展，2023，34(6)：839-849.(DENG C，CHEN C Y，YIN X，et al. Catchment runoff simulation by coupling data assimilation and machine learning methods[J]. Advances in Water Science，2023，34(6)：839-849.(in Chinese))

[13] YANG S Y，YANG D W，CHEN J S，et al. A physical process and machine learning combined hydrological model for daily streamflow simulations of large watersheds with limited observation data[J]. Journal of Hydrology，2020，590：125206.

[14] LI B，LI R D，SUN T，et al. Improving LSTM hydrological modeling with spatiotemporal deep learning and multi-task learning：a case study of three mountainous areas on the Tibetan Plateau[J]. Journal of Hydrology，2023，620：129401.

[15] HU F C，YANG Q L，YANG J R，et al. Incorporating multiple grid-based data in CNN-LSTM hybrid model for daily runoff prediction in the source region of the Yellow River basin[J]. Journal of Hydrology：Regional Studies，2024，51：101652.

[16] LIU C S，XIE T N，LI W Z，et al. Research on machine learning hybrid framework by coupling grid-based runoff generation model and runoff process vectorization for flood forecasting[J]. Journal of Environmental Management，2024，364：121466.

[17] 刘成帅，孙悦，胡彩虹，等. 考虑产流模式空间分布的流域-城市复合系统洪水预报模型 [J]. 水科学进展，2023，34(4)：530-540.(LIU C S，SUN Y，HU C H，et al. Study on flood forecasting model of watershed- urban complex system considering the spatial distribution of runoff generation pattern[J]. Advances in Water Science，2023，34(4)：530-540.(in Chinese))

[18] 吴垚，许月萍，刘莉，等. 基于分布式产流要素和时空深度学习算法的径流后处理研究 [J]. 水利学报，2024，55(9)：1123-1134.(WU Y，XU Y P，LIU L，et al. Streamflow post-processing based on distributed hydrological fluxes and spatio-temporal deep learning algorithm[J]. Journal of Hydraulic Engineering，2024，55(9)：1123-1134.(in Chinese))

[19] WANG Y，KARIMI H A. Impact of spatial distribution information of rainfall in runoff simulation using deep learning method[J]. Hydrology and Earth System Sciences，2022，26(9)：2387-2403.

[20] 张锦堂，任明磊，李京兵，等. 基于长短时记忆网络的山区中小流域降雨径流模拟 [J]. 水电能源科学，2024，42(8)：33-37.(ZHANG J T，REN M L，LI J B，et al. Rainfall-runoff simulation in the small and medium-sized catchments using the long short-term memory network[J]. Water Resources and Power，2024，42(8)：33-37.(in Chinese))

[21] LECUN Y，BOTTOU L，BENGIO Y，et al. Gradient-based learning applied to document recognition[J]. Proceedings of the IEEE，1998，86(11)：2278-2324.

[22] VASWANI A，SHAZEER N，PARMAR N，et al. Attention is all you need [C]// In Advances in Neural Information Processing Systems. New York，USA: Curran Associates Inc，2017：5998-6008.

[23] HOCHREITER S，SCHMIDHUBER J. Long short-term memory[J]. Neural Computation，1997，9(8)：1735-1780.

[24] KHATUN A，NISHA M N，CHATTERJEE S，et al. A novel insight on input variable and time lag selection in daily streamflow forecasting using deep learning models[J]. Environmental Modelling & Software，2024，179：106126.

[25] 张乙鹏，孙文慧，陈扶明. 基于小波变换和 CNN-LSTM 的肺音分类算法 [J]. 中国医学物理学杂志，2024，41(3)：356-364.(ZHANG Y P，SUN W H，CHEN F M. Lung sound classification algorithm based on wavelet transform and CNN-LSTM[J]. Chinese

Journal of Medical Physics，2024，41(3)：356-364.(in Chinese))

[26] LUNDBERG S M，LEE S I，LUNDBERG S M，et al. A unified approach to interpreting model predictions[C]//Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems. Long Beach，USA：ACM，2017.

[27] 何昊.赣江流域土地利用变化对水文干旱的影响[D].南昌：南昌工程学院，2023.(HE H. Influence of land use change on hydrological drought in Ganjiang River basin[D]. Nanchang：Nanchang Institute of Technology，2023.(in Chinese))

[28] 李文婷，杨肖丽，任立良.赣江流域气候和土地利用变化对蓝绿水的影响[J].水资源保护，2022，38(5)：166-173，189.(LI W T，YANG X L，REN L L. Effects of climate and land use changes on blue and green water in the Ganjiang River basin[J]. Water Resources Protection，2022，38(5)：166-173，189.(in Chinese))

[29] 邴建平，邓鹏鑫，吴智，等.赣江流域生态流量与地表水资源可利用量研究[J].人民长江，2023，54(2)：127-131，170.(BING J P，DENG P X，WU Z，et al. Ecological flow and available surface water resources in Ganjiang River basin[J]. Yangtze River，2023，54(2)：127-131，170.(in Chinese))

[30] KHATUN A，SAHOO B，CHATTERJEE C. Two novel error-updating model frameworks for short-to-medium range streamflow forecasting using bias-corrected rainfall inputs：development and comparative assessment[J]. Journal of Hydrology，2023，618：129199.

Impact of precipitation spatial information processing strategies on runoff prediction*

GAO Yufang[1,2]，HE Chuan[1]，PENG Tao[2,3]，GAO Yong[4]

(1. *School of Ecological and Applied Meteorology*，*Nanjing University of Information Science & Technology*，*Nanjing* 210044，*China*；2. *Three Gorges National Climate Observatory*，*Yichang* 443099，*China*；3. *Key Open Laboratory of Basin Heavy Rainfall of China Meteorological Administration*，*Wuhan Institute of Heavy Rainfall*，*China Meteorological Administration*，*Wuhan* 430205，*China*；4. *Tai'an Water Conservancy Bureau*，*Tai'an* 271000，*China*)

Abstract：Accurate extraction of spatial information on precipi tation is crucial in improving the accuracy of runoff prediction. Taking the Ganjiang River basin as a case study，this paper develops five precipitation spatial information processing schemes (i.e.，raw images，wavelet decomposition，statistical features，mean areal precipitation，and regional partitioning) based on a long short-term memory model. The aim is to investigate how different approaches to capturing spatial variability in precipitation affect the performance of LSTM-based runoff prediction. The results show that，compared with the direct use of raw images，integrated methods employing wavelet decomposition and statistical feature extraction improve the Nash–Sutcliffe efficiency by 11.5% and 17.9%，respectively，during the testing phase，while also enhancing model stability and interpretability. Furthermore，various regional partitioning strategies incorporating land use，soil type，and other underlying surface factors capture the spatial heterogeneity of precipitation response more effectively compared to approaches that use basin-wide or regional average values as inputs，demonstrating robust performance across different flow regimes and significantly improving the ability to capture both high- and low-flow conditions. The result show that incorporating precipitation spatial information into LSTM-based rainfall—runoff models can markedly enhance predictive accuracy.

Key words：runoff prediction；long short-term memory；convolutional neural network；wavelet transform

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. U2442601) and the National Key R&D Program of China (No. 2024YFC3013002).

DOI： 10.14042/j.cnki.32.1309.2025.01.010

耦合不确定性的城市排水系统实时控制研究进展

罗鑫燃[1]，郑雅莲[2]，刘 攀[3]，王殿常[1]，王万琼[1]，彭寿海[1]

（1. 中国长江三峡集团有限 公司长江经济带生态环境国家工程研究中心，湖北 武汉 430014；2. 长江水利委员会水文局，湖北 武汉 430010；
3. 武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室，湖北 武汉 430072）

摘要：气候变化和快速城市化背景下，城市排水基础设施与城市发展需求的不匹配愈加显著，城市排水系统溢流问题日益突出。实时控制可显著提高城市排水系统的运行效率，是缓解排水系统溢流的有效途径。然而，城市排水系统的复杂水力特性及运行环境的恶劣性使其实时控制面临诸多不确定性的挑战，存在溢流控制效益不显著甚至失效的问题。本文梳理了城市排水系统实时控制的不确定性来源，从数据不确定性、实时控制方法不确定性、过程模型不确定性和排水条件变化 4 个角度分析了不确定性对实时控制效益的影响；其次，从不确定性表征、耦合不确定性因素的实时控制建模以及实时控制模型的高效稳健求解 3 个方面总结了不确定性条件下的城市排水系统实时控制研究进展；最后，针对当前研究面临的挑战，提出未来可从数据观测误差对实时控制的影响、应对突发事件的风险控制策略、耦合多维不确定性的多目标控制模型以及实时控制模型的时效性提升等方面进一步开展研究。

关键词：城市排水系统；实时控制；不确定性；排水系统溢流
中图分类号：TU992.4 **文献标志码：**A **文章编号：**1001-6791(2025)01-0109-13

气候变化背景下，极端强降水事件发生频率、年均降水量显著增加，同时城市建设使不透水面积比例增加，改变了自然水文循环过程，城市水文效应凸显。城市排水系统溢流发生频率、影响范围明显增加，引发城市洪涝和水环境污染问题[1]。因此，如何提高城市排水能力是亟需解决的问题。

城市排水系统实时控制旨在最大化利用现有设施的排水、调蓄能力来达到溢流控制的目的，是缓解城市排水基础设施与城市发展需求不匹配的有效途径[2-4]。具体而言，城市排水系统的实时控制是指在实时监测和系统运行状态分析的基础上，采取动态的控制策略优化系统运行的一种方式。实时控制技术在城市排水系统中的应用已有 50 多年的历史，但由于信息监测误差、控制设备和通信设备频繁故障、计算能力不足等诸多不确定因素带来的挑战，复杂实时控制方法的应用受到限制[5-6]。随着硬件设备的制造技术和计算机领域的发展，许多限制实时控制应用的因素在一定程度上得到解决，使模型预测控制等实时控制方法得以应用。此外，基于天气雷达和数值气象预报的城市降水短临预报技术的发展也促进了管理者对城市排水系统自动化运营的积极性[7-8]。尽管如此，模型预测控制等实时控制技术也仅限于个别案例的实践应用，更多地停留在理念设计和理论研究层面[9]。这表明，城市排水系统实时控制技术仍需进一步发展以应对从理论到实践的挑战。这些挑战包括组织问题(如缺乏运营商的信任或规划和运营部门之间缺乏合作[2])、控制设备选择问题[10]以及与实时控制相关的不确定性问题[11]。其中，与实时控制相关的不确定性问题是亟待解决的重要挑战。不确定性是指事件发生的可能性完全不可知的情形，可导致控制效果和预期目标之间的差异。例如，实时控制策略与排水系统设计的不匹配可能导致实时控制效益不明显[12]，边界条件变化可能影响实时控

收稿日期：2024-08-21；**网络出版日期：**2024-11-27
网络出版地址：https://link.cnki.net/urlid/32.1309.P.20241127.1416.007
基金项目：国家重点研发计划项目(2022YFC3202804)；中国长江三峡集团有限公司项目(NBZZ202300938)
作者简介：罗鑫燃(1997—)，男，四川资阳人，博士，主要从事智慧城市排水系统方面研究。
E-mail：luo_xinran@ctg.com.cn
通信作者：刘攀，E-mail：liupan@whu.edu.cn

制策略的有效性[13]。针对实时控制中的不确定性，当下研究主要通过建立耦合不确定性的实时控制模型，以缓解不确定性影响、提高控制策略在变化条件下的适用性。面对城市排水系统的复杂运行环境，当前方法的适用范围仍存在局限性。因此，科学认清不确定性对实时控制效益的影响、系统分析应对不确定性的方法，有助于帮助城市应对环境变化的不确定性以及提高城市排水系统的韧性和可持续性。

为此，本文梳理了城市排水系统实时控制的不确定性来源，综述了耦合不确定性的城市排水系统实时控制方法，并提出当前研究的不足和未来需进一步开展的研究方向。

1 城市排水系统实时控制的不确定性来源

城市排水系统实时控制可有效缓解城市内涝和溢流污染，但其实际效益受到多个不确定性来源的影响。本节从数据不确定性、实时控制方法不确定性、过程模型不确定性和排水条件变化 4 个方面分析不确定对实时控制的影响。

1.1 数据不确定性

城市排水系统的实时控制依赖于对降水、流量、水位等要素的实时监测与预测。实时监测信息能够让管理者准确掌握排水系统状态并为其预测提供初始条件。然而，现有的监测与预测手段存在着不可忽视的不确定性。

(1)监测不确定性。监测设备本身在设计、制造、使用过程中存在随机性[14-15]。雨量计的计量准确性易受到环境因素的影响[16]。例如，翻斗式雨量计受降雨强度大小的限制，降雨强度越大，测量误差越大[17]；风、灰尘等环境因素易引起压电式雨量计雨量板振动频率变化，导致计量误差的增加[18]。排水管网流量、水位等数据监测则可能受到流态变化、管道底部污泥或杂物累积等因素的影响。例如，沉积物、气泡等导致的流体异常状态会极大地影响流量计的测量精度[19]。具体地，表 1 列出了几类不确定性因素对实时控制效益的影响，其中实时控制效益损失表示不确定性导致的排水系统溢流削减比例下降幅度。Zhang 等[20] 评估了水位监测误差对基于深度强化学习的实时控制方法的效益损失，结果表明 25% 的水位监测误差可导致 59.0% 的实时控制效益损失。

表 1 不确定性影响下的实时控制效益损失

Table 1 Functioning of various real-time optimization procedures under uncertainty

控制方法	不确定性来源	误差类别	实时控制效益损失/%	参考文献
深度强化学习	水位监测误差	U(0.75,1.25)	59.0	文献[20]
	降水预报误差	U(0.75,1.25)	1.6	文献[21]
模型预测控制	降水预报误差	U(0.75,1.25)	1.2	文献[22]
	降水预报误差	真实误差	37.0	文献[23]
	管网入流预报误差	假拟误差(−20%)	2.8	文献[24]
	过程模型不确定性	真实误差	35.0	文献[13]
	降水预报误差	真实误差	14.4	文献[13]
	边界条件变化	真实误差	21.4	文献[13]

注：U( )表示假拟误差范围。

监测要素的时空分布不均匀性也可导致显著的测量误差。城市短历时暴雨是局地天气系统和下垫面条件共同作用的结果，然而降水监测点的分布密度和采样频率通常有限，难以准确反映降水的时空变化特征[25]。

庄琦等[26]基于不同时空分辨率的降雨产品，定量评估了降雨数据精度对暴雨事件时空变异性诊断和频率分析的影响，结果表明利用低精度降雨数据得到的年最大暴雨序列发生时间延迟、降水量低估、暴雨过程不均匀性提升、空间不均匀性降低等问题。排水管网流量监测中，由于流体的性质不一，与管道的相互作用不同，导致管道中的流速分布也不同，选取合适的安装位置对于提高流量监测的准确性至关重要[27]。此外，受成本限制，通常难以实现对排水系统所有节点的在线监测，监测点位的不合理布设可能导致资源浪费或损失关键节点信息[28]。

(2)预报不确定性。基于对系统状态的预测(如降水、管网流量预报等)，管理者能够实现对排水系统的预测控制，有效缓解溢流风险。然而，预报的不确定性可能降低预测控制的效益。由表 1 可知，降水预报误差对城市排水系统实时控制效益影响的研究较多，但因研究案例和误差表征方式不同，评估结果存在较大差异。Saliba 等[21]和 Fiorelli 等[22]为降水预报设置了 25% 的随机误差，结果显示降水预报误差导致的实时控制效益损失仅分别为 1.6% 和 1.2%。进一步地，Jafari 等[23]和 van der Werf 等[13]基于真实的降水预报、观测数据评估了降水预报误差对实时控制效益的影响，其效益损失分别为 37.0% 和 14.4%。尽管两者采用了相同的实时控制和不确定性量化方法，评估结果也因研究案例不同而存在较大差异。此外，Svensen 等[24]分析了管网入流预报误差的影响，其仅导致了 2.8% 的实时控制效益损失。总体而言，在同一个研究案例中，实时控制效益损失与预报误差大小呈正相关关系，通过提高降水预报模型的准确性可有效缓解降水预报误差带来的实时控制效益损失。例如，Löwe 等[29]在实时控制模型中嵌入了基于随机灰箱模型的降水预报模块，提高了降水预报与控制策略优化的协调性，缓解了不确定性的影响。降水预报的不确定性源自于气候系统的不可预测性，通过优化降水预报模型能够有效提高降水预报的准确性。常用的降水预报模型包括基于气象原理驱动的数值天气预报模型、基于数据驱动的人工智能模型及其混合模型。在选择适合城市排水系统实时控制的降水预报模型时，需要综合考虑降水预报的时空分辨率、计算时效性、数据可获取性及城市环境的复杂性等因素[30-31]。

1.2　实时控制方法不确定性

根据控制算法的不同，现行城市排水系统实时控制方法可概括为 2 类：启发式控制和基于优化的控制[32]。启发式控制包括规则控制和模糊逻辑控制等，其主要特征在于这些方法是基于纯粹的经验获得的。尽管启发式控制在任何情景中均无法保证调控的最优性，但其具有计算简单的优点，适用于过程模拟复杂的城市排水系统。相比之下，基于优化的控制方法则需要明确控制问题、控制目标和约束条件，通过观测(或估算)当前系统变量以模拟系统动态，并采用优化算法寻求控制时段内的最优控制策略。

在启发式控制方面，以规则控制为例进行说明。规则控制的性能取决于规则的设计质量，规则的设计通常基于专家知识和经验，但这些知识和经验可能存在主观性和不完备性[32]。不同的专家可能提出不同的规则，进而导致控制策略的差异。同时，规则的数量和覆盖范围也会影响控制的效果。此外，城市排水系统的运行条件和环境可能会发生变化[33]，例如降雨强度的变化、管道堵塞等情况的发生，在面临这些多变的情况时，规则控制的性能可能会受到影响，原因在于其预设的固定控制规则可能难以准确适应新的运行工况。

基于优化的控制的寻优算法存在不可忽视的不确定性[34]。不同的优化算法和参数设置可能导致不同的控制策略和结果。例如，在进化算法中，初始种群的选择、交叉和变异操作的策略以及迭代次数等都会对优化结果产生影响。因此，在实时控制中选择合适的优化方法和参数设置具有挑战性。此外，由于城市排水系统实时控制问题的复杂性和非线性特征，优化问题往往是非凸的，存在多个局部最优解。随着控制节点的增加，优化问题的解空间呈指数级增长，解空间的高维性使基于进化算法的优化控制难以找到最优控制轨迹，从而导致实时控制效益下降[34]。

1.3 过程模型不确定性

一方面，城市排水系统的数学模型通常是基于物理原理和经验建立的，模型不可避免地存在不确定性。模型的不确定性可能来自于模型的简化假设、参数估计的误差以及模型结构的不完备性等因素[15,35-36]。这些不确定性会影响模型预测的准确性和可靠性，从而影响实时控制的效益。Sytsma 等[37]指出当使用基于历史资料率定的 SWMM 在模拟气候和土地覆盖变化情景下的径流时，参数估计的不确定性可导致高达 60% 的模拟误差，而这一误差量级在城市排水系统实时控制策略优化中通常认为是不可接受的。

另一方面，城市排水过程的精细模拟计算极为耗时。例如，在一个仅包含 2 个子汇水区的案例中[38]，每个控制时间步(15 min)所需要的优化时间就达到 5 min。当实时控制方法，特别是优化控制应用于复杂的城市排水系统时，常遇到不满足实时控制时效性要求的问题[39-40]。针对这一问题，已有研究多采用简化过程模型进行过程模拟[5]。简化过程模型大致可分为线性的简化模型和非线性的简化模型，其中线性简化模型的应用更为广泛。在线性假设下，可采用凸规划方法求得系统的最优解，且由于求解方法的高效性通常可获得精细的控制轨迹。但当需要考虑系统的非线性动态或对不确定性进行描述时，可适当采用较为粗糙的控制时间分辨率。简化模型的不足在于会增加模型不确定性，且只有当简化模型能够基本描述所关心的系统行为时才能够取代原始模型。否则，基于简化模型的实时控制可能存在效益不明显甚至失效的问题[41]。如表 1 所示，在同一个案例中，过程模型不确定性对实时控制效益的影响可能远大于降水预报不确定性的影响。

1.4 排水条件变化

(1)突发事件影响。由于存在大量废水排放、高强度使用和不合理排放等问题，城市排水系统面临着设施老化、堵塞和故障等严峻挑战，使排水系统中的排水设施状态存在不确定性[27,42-43]。这些不确定性会导致系统行为与模型预测之间的差异，基于正常工况下系统状态预测进行优化得到的控制策略可能加剧排水设施故障的影响，使实时控制“适得其反”。区别于传统水工程系统(如水库系统)，城市排水设施因其复杂、恶劣的运行环境面临着更频繁的故障事件[33,44-45]。控制设备和系统结构故障时，即使在无雨天气合流制排水系统也存在溢流风险，甚至带来相较于暴雨事件更大的溢流风险[46-47]。例如，英国每年约有 75%(>23 000 次)的污水溢流事件是由排水管道堵塞造成的[48]。Miszta-Kruk[33] 基于排水系统实际运行数据，指出排水设备、控制设备和能源供给设备故障是排水系统最常发生的 3 类突发事件。

(2)约束或边界条件变化。城市排水系统的实时控制模型是基于静态资料建立的，受环境变化或实际条件制约，其约束或边界条件可能发生变化。例如，海平面上升可能导致地势低洼的沿海城市排水受阻[49]、流域洪水可能对城市排水产生顶托效应[50]，增加溢流风险。Sun 等[51]指出污水处理厂进水能力的动态变化可能导致基于固定进水能力约束的实时控制模型的控制效益损失。van der Werf 等[13]则报告了由排水泵站难以满负荷运行导致的小降雨事件的额外溢流，即实时控制情景下的溢流量大于静态控制情景下的溢流量，导致实时控制失效。此外，暴雨入流入渗或地下水入侵也会导致排水模拟的边界条件变化[52-53]，使过程模拟产生误差，影响实时控制决策的有效性。

(3)排水设施更新改造。绿色-灰色雨水调蓄设施建设可对城市排水系统实时控制产生显著影响。新建绿色-灰色设施将改变城市径流过程并带来更大的调控空间，实时控制规则应相应改变以充分发挥现有和新建设施的功能。实时控制策略与排水系统设计的不匹配可能导致实时控制效益不明显或对排水设施的利用不充分。例如，Bachmann-Machnik 等[12] 基于精细时间尺度的流量监测数据评估了实时控制在排水系统合流制溢流控制中的作用，结果表明由于排水过程模型与实际情形的不匹配，实时控制只显示出相较于静态控制 3% 的合流制溢流控制效益提升。van der Werf 等[54] 进一步评估了绿色设施建设和城市密集化对排水系统实时

控制效益的影响。研究结果表明，绿色设施建设和城市密集化带来的城市环境变化对排水系统实时控制的绝对效益影响较弱，但对实时控制的绝对效益与理论效益的比例有较大影响。原因在于城市环境变化赋予了排水系统更大的可调控空间，但基于历史的排水系统资料设计的实时控制策略难以最大化新建设施的运行效率。

2　不确定性条件下的城市排水系统实时控制

尽管存在着影响实时控制效益的诸多不确定性因素，现有研究仅聚焦于对输入数据不确定性的控制，包括降水预报不确定性、管网入流预报不确定性和水位监测不确定性等[6,13,24]。考虑不确定性的实时控制包括 3 个关键步骤：不确定性表征、耦合不确定性因素的实时控制建模和实时控制模型的高效稳健求解。

2.1　不确定性表征

在城市排水系统实时控制中，通常采用多场景集合对降水预报误差、过程模型误差、管网入流预报误差等不确定性因素进行表征[55-56]。其基本思想是：首先，选择特定的模型结构（如概率分布模型、时间序列模型）对不确定的因子进行拟合；然后，利用率定的模型对不确定性变量进行随机抽样，得到表征不确定性的随机情景集合。

利用概率分布模型生成多个情景首先需要利用有限的数据样本拟合出不确定性输入的概率密度分布函数（Probability Density Function）。通常，降水、流量、过程模型和水位等为输入或输出数据带来随机误差的不确定性的概率特性表征大多采用高斯分布[57-58]，也可采用均匀分布、Weibull 分布等分布类型[20,59]。此外，与排水设施状态相关的不确定性（如控制设备故障、排水管道淤积堵塞、排水泵故障等）可对其故障间隔时间进行模拟[42,60]。其基本假设在于：假设城市排水系统为可修复的系统，故障发生的间隔时间可以用概率分布来模拟，服从该假设的随机故障事件可采用泊松过程描述。Rodríguez 等[46] 基于排水系统运行的用户反馈数据集，分别采用均匀泊松过程模型和非均匀过程模型拟合排水管道淤积堵塞间隔时间的概率密度。研究结果表明，约 66% 排水管道淤积堵塞的间隔时间可采用均匀泊松过程模型进行概率密度拟合，其余（约 34%）排水管道则更宜基于非均匀过程模型拟合概率密度。

基于率定的概率分布模型，通过随机抽样方法可生成表征不确定性的多个随机情景。该方法建立在大数定理的基本理论之上，本质上是用离散的概率分布代替连续的概率分布。通过反复抽样，使得离散的概率特征能够逼近总体，但多场景输入到实时控制模型会导致问题的计算规模急剧扩大。

2.2　耦合不确定性因素的实时控制建模

不确定性会使模型的预测结果与系统实际状态之间存在偏差，基于不准确状态预测的决策可能导致控制效果和预期目标之间的差异，进而影响控制策略的可靠性和有效性。耦合不确定性因素的城市排水系统实时控制研究，可描述为通过考虑模型的不确定性、确定优化控制方案、优化控制策略使得排水系统在满足约束条件的基础上实现最大的溢流控制效果。区别于确定性控制模型，耦合不确定性因素的实时控制模型在于引入不确定性描述。

一种可行的方式是将随机优化与模型预测控制结合，建立应对不确定性的预测控制模型。根据应对不确定性因素的方式不同，耦合不确定性因素的随机预测控制模型大致可分为基于随机优化（Stochastic Optimization）的预测控制模型和基于鲁棒优化（Robust Optimization）的预测控制模型[24,61]。随机优化的基本思想是将不确定的参数看作服从某一分布函数的随机变量，可分为概率场景优化和机会约束优化（Chance-constrained Optimization）。机会约束优化又称概率优化，其特点在于决策不必完全满足约束条件，但满足约束条件的概率不小于给定的置信水平[62]。Svensen 等[24] 考虑实时控制策略在降水预报误差影响下可能不满足调

蓄池水位和出流能力限制等约束条件，建立了机会约束随机预测控制模型。结果表明，相较于传统的确定性预测控制模型，机会约束随机预测控制模型能够显著减少低估管网入流情景的合流制溢流。机会约束规划可以很好地平衡决策的效益性和可靠性，但其求解过程较为复杂，主要源于两方面的因素：其一，随机变量的概率密度函数的反函数通常难以有效确定；其二，当用连续的概率分布函数来描述不确定性时需要应用复杂的组合技术和方法，导致计算负担大。相比较而言，概率场景优化在城市排水系统实时控制中具有更为广泛的应用前景。例如，Vezzaro 等[55]通过概率描述合流制溢流风险并以合流制溢流的期望值作为目标函数建立基于风险指标的随机预测控制模型，减少了输入不确定性下的合流制溢流。

鲁棒优化是一类基于区间扰动信息的不确定性决策方法，其目标在于实现不确定参量最劣情况下的最优决策，即所谓的最大最小决策问题。与传统随机优化相比，鲁棒优化无需确定随机变量的概率分布函数，具有计算负担小的优点。但是，鲁棒优化得到的方案一般偏保守，虽然它能保证方案在不确定性集合内均满足约束条件，但同时也牺牲了方案的效益性。Farahani 等[56]基于降水预报的最坏情景建立了鲁棒预测控制模型，基于实例证明了模型的有效性。此外，通过故障诊断以考虑潜在故障也可以提高实时控制的稳健性。Puig[63]将故障诊断结果作为优化问题的约束条件，能够减轻控制设备故障带来的额外损失。

此外，预测控制模型也可与数据同化技术结合以提高控制策略的稳健性。数据同化的核心思想是利用观测数据来修正数值模型的初始条件，使模型的输出更接近实际观测结果[64-66]。数据同化能够有效地处理观测数据和模型之间的不确定性，考虑误差和数据缺失，从而生成更可靠、更稳健的预测结果，提高对系统状态和未来发展的预测能力。针对水位监测等反馈信息的不确定性，Oh 等[67]将扩展卡尔曼滤波器数据同化技术与模型预测控制结合，提高了蓄洪池闸门针对水质、水量的动态控制策略的稳健性。研究还指出了数据同化技术的缺点，数据同化过程可能需要大量计算资源和时间，特别是在涉及复杂水力计算的城市排水系统实时控制中，计算成本较高；同时，数据同化的质量和效果高度依赖于观测数据的质量、时空分辨率以及数据的可用性，如果观测数据有限或者存在缺失，可能会影响同化结果的准确性[68-69]。

2.3 耦合不确定性因素的实时控制模型求解

在实时控制模型中引入不确定性描述可使控制策略在系统状态或输入数据发生一定范围内的变化时，控制策略仍可保持一定的有效性和稳健性。然而，这可能导致实时控制模型更加复杂甚至难以求解。例如，不确定性可能导致目标函数的非凸性、约束条件的非线性等，从而增加求解的难度和计算量。基于模型预测控制框架，图 1(修改自 Lund 等[5])展示了 3 种城市排水系统实时控制问题的求解范式。耦合不确定性因素的实时控制模型求解方法选择与模型预测控制的过程模型选择和目标函数设计密切相关。因此，求解方法的选取是不确定性条件下城市排水系统实时控制的一个关键步骤。针对同一优化问题可以选择不同的求解方法，但其计算的复杂性和计算结果可能存在不同。在选取求解方法时，首先需要明确所需求解的优化问题是凸问题还是非凸问题。

表 2 列出了一些耦合不确定性因素的实时控制模型求解案例。从理论上，城市排水系统实时控制问题为一类高维、动态、非凸、非线性的复杂最优控制问题。可通过对城市排水过程的合理简化，采用线性方程描述城市排水动态，从而将城市排水系统实时控制的非线性、非凸问题简化为线性、凸问题[5]。针对线性、凸问题，可采用内点算法进行高效求解，该方法可以处理数万甚至数十万个优化变量，并且在计算上仍然可行。例如，Lund 等[72]结合模型预测控制和线性简化过程模型，保证了实时控制优化耗时与实际应用的协调性，同时减少合流制溢流。然而，过程模型的线性假设会引入额外的模型不确定性，可能使基于简化过程模型的实时控制存在效益不明显或失效的问题[73]。

对于复杂的不确定性控制问题，通常采用基于模拟-优化范式的算法求解，如遗传算法[29,55]、基于集员法

的模拟优化[63]或基于梯度的算法[67]，模拟指过程模拟，优化指决策变量优化。这些方法的应用需要对控制变量不同取值下的溢流情况进行反复评估，因而需要重复求解过程模型[74-75]。然而，具有复杂水力描述的、基于物理过程的城市排水模拟模型运行极为耗时[41,76]，从而不得不寻求过程模拟的代理模型，如线性代理模型。此外，受不确定性影响，即使使用简化的过程模型，基于模拟优化算法的实时控制模型的计算耗时也可能与实际应用不匹配[5]。只有在研究对象极为简单或对优化问题高度简化的情形下才可采用凸规划方法求解[56,70-71]。城市排水过程模拟的巨大计算负担成为阻碍耦合不确定性因素的实时控制模型求解和应用的重要因素。假设梯度连续的优化算法(如随机梯度下降法)在系统状态快速变化的情况下可能因梯度的不连续而难以适用。元启发式的优化算法(如进化算法和模拟退火)可以更好地应对这些不连续性，但会在一定程度上增加计算的复杂性。总体而言，基于进化算法的优化方法在耦合不确定性因素的城市排水系统实时控制问题求解中应用最为广泛。

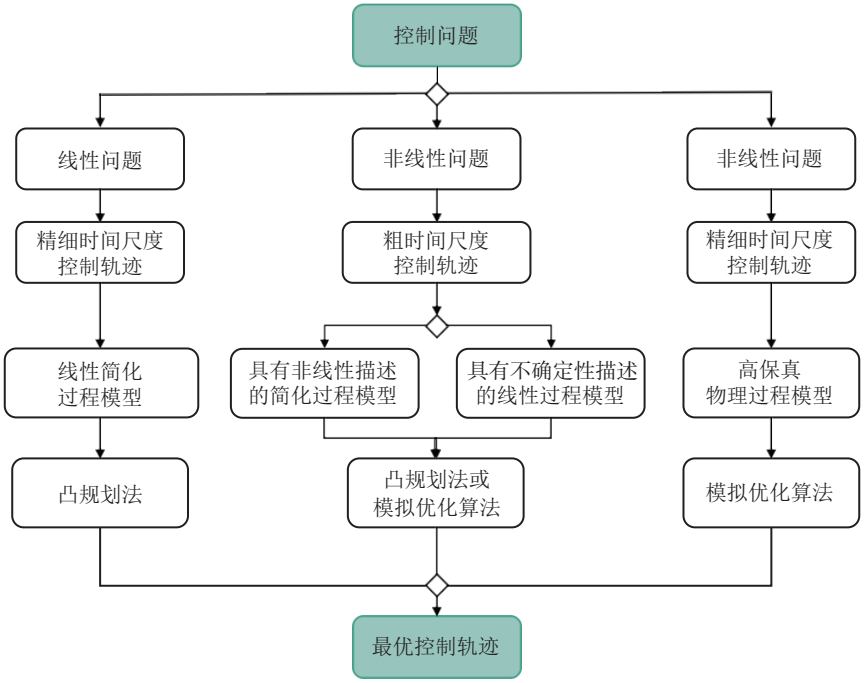


图 1　基于模型预测控制框架的实时控制问题求解范式

Fig. 1　Different routes to take from control problem to optimal control actions based on the model predictive control framework

表 2　耦合不确定性因素的实时控制模型求解

Table 2　Solving procedures for real-time control models with uncertainty

不确定性来源	不确定性描述方法	过程模型	求解方法	参考文献
控制设备故障	优化约束条件	线性过程模型	基于集员法的模拟优化	文献[63]
管网入流预报误差	管网入流量概率密度函数	线性过程模型	遗传算法	文献[55]
管网入流预报误差	管网入流量概率密度函数	线性过程模型	遗传算法	文献[29]
降水预报不确定性	优化约束条件	线性过程模型	凸规划法	文献[56]
污染负荷浓度	目标函数的惩罚项	线性过程模型	凸规划法	文献[70]
降水预报不确定性	多场景集合	线性过程模型	凸规划法	文献[71]
管网入流预报误差	将固定约束转化为概率约束	线性过程模型	凸规划法	文献[26]
水位观测误差	扩展卡尔曼滤波	非线性过程模型	基于梯度的内点算法	文献[67]

综上所述，耦合不确定性因素的实时控制问题要么为凸规划问题，要么为非线性优化问题。针对凸规划问题的求解方法具有求解速度快且能保证找到全局最优解的优点；缺点在于必须对过程模型进行线性简化才能保证优化问题的凸性。非线性优化问题的求解通常采用如进化算法、模拟退火算法等智能算法，优点在于能够考虑过程模拟的非线性，但无法保证优化结果的最优性，且智能算法随决策变量数量的增加容易陷入局部最优。因此，过程模拟的精细程度与优化问题求解的最优性之间不可避免地存在权衡。然而，在耦合不确定性因素的城市排水系统实时控制中，对于首选哪种类型的优化模型，没有唯一的答案。

3 结论及建议

实时控制可有效提高城市排水系统运行效率，是缓解城市洪涝和溢流污染问题的重要途径。受降水预报误差、控制设备故障、过程模拟误差、边界条件变化等不确定性因素的影响，城市排水系统实时控制难以达到理想效果，存在实时控制效益不显著甚至失效的问题。在实时控制模型中考虑不确定性对于提高实时控制策略的稳健性至关重要。针对上述问题，以往研究在不确定性表征、不确定性影响评估以及耦合不确定性因素的实时控制模型与求解等方面均取得了一定的成果。然而，在数据观测误差对实时控制的影响、应对突发事件的风险控制策略、耦合多维不确定性的多目标控制模型以及实时控制模型的时效性提升等方面仍可开展进一步研究：

(1)数据观测误差对实时控制的影响。以往研究通常仅考虑降水预报误差而忽视了降水、流量、水位等要素的观测误差，在数据观测误差对实时控制效益的影响方面认识不足。数据观测误差会传播至过程模型参数率定和系统状态估计中，进而影响实时控制策略的可靠性。未来可探索：①通过多源数据融合提高数据的准确性。例如，当某些传感器发生故障或丢失数据时，可以通过其他数据源进行补充或过滤单一传感器的噪声，确保输入数据的完整性和可靠性。具体而言，可行的方式包括结合气象雷达降雨数据和地面雨量站数据，通过卡尔曼滤波实时修正降雨观测误差，提供更加精准的降水预报信息。②数据观测误差对实时控制效益的影响。通过现场试验、多源数据比对及假拟测试等方式，探究数据观测误差的分布特征，定量评估数据观测误差对实时控制效益的影响。③数据观测误差控制方法。一方面，可以通过数据清洗技术提高数据质量或通过数据同化技术来降低观测误差的影响；另一方面，可以在实时控制模型中考虑数据观测误差，建立随机预测控制模型提高实时控制策略的稳健性。

(2)应对突发事件的风险控制策略。排水管网破损、堵塞、控制设备故障等突发事件可能造成极端不利的排水场景，即排水设施故障条件下，由于系统行为与模型预测之间的差异，基于正常工况进行的系统状态预测进行优化得到的控制策略可能加剧排水设施故障的影响，使实时控制“适得其反”。因此，应在流量控制阀门、排水泵站等可调控设施的运行规则中充分考虑这一不利因素影响，或为其设置紧急控制装置，尽可能降低突发事件的影响。例如，可为管道流量控制阀门设置最小开度，或为其安装紧急自动控制装置，使其长时间失联时能够自动开启，以降低阀门故障长时间完全关闭而导致的溢流风险。

(3)耦合多维不确定性的多目标控制模型。虽然实时控制效益与多种不确定性因素相关，但耦合不确定性的城市排水系统实时控制研究考虑的主要不确定性来源仍为降水预报。同时考虑多个不确定性来源的研究仅限于对输入数据(如管网入流流量)添加随机误差，从而认为降水预报、水文过程模型参数和结构等多个不确定性的影响体现为管网入流流量单一不确定性的影响。然而，管网水力模型误差、排水条件变化等不确定性对实时控制效益也存在显著影响。例如，控制设备和系统结构故障时，即使在无雨天气，合流制排水系统也存在溢流风险。此外，相较于降水预报的不确定性，排水设施故障和过程模型不确定性可能会带来更大的溢流风险。因此，亟需开发耦合降水预报误差、过程模拟不确定性、排水条件变化等多维不确

定性的多目标控制模型。

(4)实时控制模型的时效性提升。随机预测控制通过对不确定性信息的描述或允许决策在一定程度上不满足约束条件，使实时控制策略能够适应观测或认知偏差，可有效应对城市排水系统实际运行的不确定性，从而提高实时控制策略的稳健性。类似于水库调度中的风险调度，随机预测控制通常需要反复求解城市排水过程模型，以评估不同情景下的系统行为。然而，相较于河流、水库等水资源系统，城市排水系统的拓扑结构和水流动态使其过程模拟更为复杂，在城市排水系统实时控制模型中引入不确定性描述可能导致优化耗时过长而不满足实时控制策略的实际应用需求。因此，亟需研究实时控制模型的时效性提升方法。

本文对影响城市排水系统实时控制效益的不确定性因素、耦合不确定性因素的实时控制模型及其求解方法作了较为全面的梳理，然而仍存在不足之处：①耦合不确定性因素的实时控制研究更多地停留在理念设计和理论研究层面，论文缺乏详细的实际应用案例分析。对比不同城市排水系统的实时控制应用案例能够更好地验证和改进控制模型，并为未来研究提供更具体的应用场景和指导。②本文虽然指出排水条件变化对城市排水系统实时控制的影响，但对于更复杂的动态变化(如长期气候变化、极端天气频率增加等)的探讨不够深入。未来研究可就系统在长期和极端条件下如何保持灵活性和适应性展开探讨。

参考文献：

[1] 宋晓猛，徐楠涛，张建云，等. 中国城市洪涝问题：现状、成因与挑战 [J]. 水科学进展，2024，35(3)：357-373. (SONG X M，XU N T，ZHANG J Y，et al. Urban flooding in China：current status，causes and challenges[J]. Advances in Water Science，2024，35(3)：357-373. (in Chinese))

[2] BLUMENSAAT F，LEITÃO J P，ORT C，et al. How urban storm- and wastewater management prepares for emerging opportunities and threats：digital transformation，ubiquitous sensing，new data sources，and beyond：a horizon scan[J]. Environmental Science & Technology，2019，53(15)：8488-8498.

[3] MULLAPUDI A，LEWIS M J，GRUDEN C L，et al. Deep reinforcement learning for the real time control of stormwater systems[J]. Advances in Water Resources，2020，140：103600.

[4] 买伊伊，刘攀，罗鑫燃，等. 基于 SWMM 的城市闸泵群防洪排涝滚动优化控制研究 [J]. 中国农村水利水电，2023(4)：208-214，220. (MAI Y Y，LIU P，LUO X R，et al. Optimal rolling control of urban sluice pump group to decrease flood risk of a drainage system based on SWMM[J]. China Rural Water and Hydropower，2023(4)：208-214，220. (in Chinese))

[5] LUND N S V，FALK A K V，BORUP M，et al. Model predictive control of urban drainage systems：a review and perspective towards smart real-time water management[J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology，2018，48(3)：279-339.

[6] van der WERF J A，KAPELAN Z，LANGEVELD J. Towards the long term implementation of real time control of combined sewer systems：a review of performance and influencing factors[J]. Water Science and Technology，2022，85(4)：1295-1320.

[7] TALEBI A，DOLATSHAHI M，KERACHIAN R. A framework for real-time operation of urban detention reservoirs：application of the cellular automata and rainfall nowcasting[J]. Journal of Environmental Management，2024，350：119638.

[8] 原文林，杨逸凡，赵小棚，等. 降雨监测与预报技术在防洪减灾中的应用进展 [J]. 人民长江，2024，55(8)：8-14，22. (YUAN W L，YANG Y F，ZHAO X P，et al. Application progress of rainfall monitoring and forecasting techniques in flood control and disaster reduction[J]. Yangtze River，2024，55(8)：8-14，22. (in Chinese))

[9] CHEN Y，WANG C，YANG Q，et al. Model predictive control and rainfall uncertainties：performance and risk analysis for drainage systems[J]. Journal of Hydrology，2024，630：130779.

[10] CAMPISANO A，CABOT PLE J，MUSCHALLA D，et al. Potential and limitations of modern equipment for real time control of urban wastewater systems[J]. Urban Water Journal，2013，10(5)：300-311.

[11] van der WERF J A，KAPELAN Z，LANGEVELD J. Quantifying the true potential of real time control in urban drainage systems[J]. Urban Water Journal，2021，18(10)：873-884.

[12] BACHMANN-MACHNIK A，BRÜNING Y，EBRAHIM BAKHSHIPOUR A，et al. Evaluation of combined sewer system operation strategies based on highly resolved online data[J]. Water，2021，13(6)：751.

[13] van der WERF J A，KAPELAN Z，LANGEVELD J. Real-time control of combined sewer systems：risks associated with uncertainties[J]. Journal of Hydrology，2023，617：128900.

[14] COURDENT V，GRUM M，MIKKELSEN P S. Distinguishing high and low flow domains in urban drainage systems 2 days ahead using numerical weather prediction ensembles[J]. Journal of Hydrology，2018，556：1013-1025.

[15] del GIUDICE D，LÖWE R，MADSEN H，et al. Comparison of two stochastic techniques for reliable urban runoff prediction by modeling systematic errors[J]. Water Resources Research，2015，51(7)：5004-5022.

[16] 王先贺，陈华民，童仁园，等. 虹吸排水自补偿降雨量测量装置 [J]. 传感技术学报，2022，35(5)：703-710.（WANG X H，CHEN H M，TONG R Y，et al. Siphon drainage self-compensating rainfall measurement device[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators，2022，35(5)：703-710.(in Chinese)）

[17] 郑路，尤业明，李朝英，等. 林内穿透雨收集器与雨量计的选配与模拟研究 [J]. 西南林业大学学报(自然科学)，2024，44(4)：201-206.（ZHENG L，YOU Y M，LI Z Y，et al. Match analysis and simulation verification of throughfall collector and tipping bucket rain gauges[J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences)，2024，44(4)：201-206.(in Chinese)）

[18] 蔺潇. 压电式雨量传感器的自适应标定方法 [J]. 自动化与仪表，2019，34(5)：75-79.(LIN X. Adaptive calibration method for piezoelectric rainfall sensor[J]. Automation & Instrumentation，2019，34(5)：75-79.(in Chinese)）

[19] 嵇闯，张丽稳，杨喜良，等. 超声波流量计流体异常诊断与处理方法研究 [J]. 机电工程，2024，41(5)：924-932.(JI C，ZHANG L W，YANG X L，et al. Ultrasonic flowmeter fluid anomaly diagnosis and processing method research[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering，2024，41(5)：924-932.(in Chinese)）

[20] ZHANG M F，XU Z W，WANG Y M，et al. Evaluation of uncertain signals' impact on deep reinforcement learning-based real-time control strategy of urban drainage systems[J]. Journal of Environmental Management，2022，324：116448.

[21] SALIBA S M，BOWES B D，ADAMS S，et al. Deep reinforcement learning with uncertain data for real-time stormwater system control and flood mitigation[J]. Water，2020，12(11)：3222.

[22] FIORELLI D，SCHUTZ G，KLEPISZEWSKI K，et al. Optimised real time operation of a sewer network using a multi-goal objective function[J]. Urban Water Journal，2013，10(5)：342-353.

[23] JAFARI F，MOUSAVI S J，KIM J H. Investigation of rainfall forecast system characteristics in real-time optimal operation of urban drainage systems[J]. Water Resources Management，2020，34(5)：1773-1787.

[24] SVENSEN J L，SUN C C，CEMBRANO G，et al. Chance-constrained stochastic MPC of Astlingen urban drainage benchmark network[J]. Control Engineering Practice，2021，115：104900.

[25] 张裕，侯精明，王正发，等. 降雨时间分辨率与插值方法对城市内涝模拟影响研究 [J]. 水力发电学报，2024，43(11)：27-38.（ZHANG Y，HOU J M，WANG Z F，et al. Effect of rainfall temporal resolution and interpolation method on urban waterlogging simulation[J]. Journal of Hydroelectric Engineering，2024，43(11)：27-38.(in Chinese)）

[26] 庄琦，刘曙光，周正正. 降雨数据时空精度对城市暴雨变异性及频率分析的影响 [J]. 水科学进展，2023，34(3)：398-408.（ZHUANG Q，LIU S G，ZHOU Z Z. Impact of rainfall spatiotemporal resolutions on urban extreme rainfall variability and rainfall frequency analysis[J]. Advances in Water Science，2023，34(3)：398-408.(in Chinese)）

[27] TATIPARTHI S R，de COSTA Y G，WHITTAKER C N，et al. Development of radio-frequency identification (RFID) sensors suitable for smart-monitoring applications in sewer systems[J]. Water Research，2021，198：117107.

[28] WANG S Y，ZHANG X W，WANG J Y，et al. Optimal sensor placement for the routine monitoring of urban drainage systems：a re-clustering method[J]. Journal of Environmental Management，2023，335：117579.

[29] LÖWE R，VEZZARO L，MIKKELSEN P S，et al. Probabilistic runoff volume forecasting in risk-based optimization for RTC of urban drainage systems[J]. Environmental Modelling & Software，2016，80：143-158.

[30] SHEHU B，HABERLANDT U. Relevance of merging radar and rainfall gauge data for rainfall nowcasting in urban hydrology[J]. Journal of Hydrology，2021，594：125931.

[31] 李建柱，李磊菁，冯平，等. 基于深度学习的雷达降雨临近预报及洪水预报 [J]. 水科学进展，2023，34(5)：673-684.(LI J Z，LI L J，FENG P，et al. Radar rainfall nowcasting and flood forecasting based on deep learning[J]. Advances in Water Science，2023，34(5)：673-684.(in Chinese)）

[32] GARCÍA L，BARREIRO-GOMEZ J，ESCOBAR E，et al. Modeling and real-time control of urban drainage systems：a review[J]. Advances in Water Resources，2015，85：120-132.

[33] MISZTA-KRUK K. Reliability and failure rate analysis of pressure，vacuum and gravity sewer systems based on operating data[J]. Engineering Failure Analysis，2016，61：37-45.

[34] MAIER H R，RAZAVI S，KAPELAN Z，et al. Introductory overview：optimization using evolutionary algorithms and other metaheuristics[J]. Environmental Modelling & Software，2019，114：195-213.

[35] HU Y，SCAVIA D，KERKEZ B. Are all data useful? Inferring causality to predict flows across sewer and drainage systems using directed information and boosted regression trees[J]. Water Research，2018，145：697-706.

[36] 韩铭洋，胡金辉，桑梓杰，等. 基于 Morris 与正交试验的 SWMM 模型参数敏感性分析 [J]. 水利水电快报，2024，45(2)：11-18.（HAN M Y，HU J H，SANG Z J，et al. Sensitivity analysis of SWMM model parameters based on Morris and orthogonal test[J]. Express Water Resources & Hydropower Information，2024，45(2)：11-18.（in Chinese））

[37] SYTSMA A，CROMPTON O，PANOS C，et al. Quantifying the uncertainty created by non-transferable model calibrations across climate and land cover scenarios：a case study with SWMM[J]. Water Resources Research，2022，58(2)：e2021WR031603.

[38] SADLER J M，GOODALL J L，BEHL M，et al. Leveraging open source software and parallel computing for model predictive control of urban drainage systems using EPA-SWMM5[J]. Environmental Modelling & Software，2019，120：104484.

[39] TIAN W C，LIAO Z L，ZHI G Z，et al. Combined sewer overflow and flooding mitigation through a reliable real-time control based on multi-reinforcement learning and model predictive control[J]. Water Resources Research，2022，58(7)：e2021WR030703.

[40] 杨萌祺，徐智伟，王一茗，等. 面向实时控制的排水系统深度 LSTM 神经网络模型 [J]. 中国给水排水，2023，39(1)：105-110.（YANG M Q，XU Z W，WANG Y M，et al. Deep LSTM neural network model for real-time control of urban drainage system[J]. China Water & Wastewater，2023，39(1)：105-110.（in Chinese））

[41] GARZÓN A，KAPELAN Z，LANGEVELD J，et al. Machine learning-based surrogate modeling for urban water networks：review and future research directions[J]. Water Resources Research，2022，58(5)：e2021wr031808.

[42] OKWORI E，VIKLANDER M，HEDSTRÖM A. Spatial heterogeneity assessment of factors affecting sewer pipe blockages and predictions[J]. Water Research，2021，194：116934.

[43] ROSIN T R，KAPELAN Z，KEEDWELL E，et al. Near real-time detection of blockages in the proximity of combined sewer overflows using evolutionary ANNs and statistical process control[J]. Journal of Hydroinformatics，2022，24(2)：259-273.

[44] 范鹏辉，姜涛，牛超群，等. 基于液位监测及 CNN-SVM 的排水管网缺陷诊断 [J]. 中国给水排水，2023，39(23)：30-39.（FAN P H，JIANG T，NIU C Q，et al. Fault diagnosis method of drainage network based on liquid level monitoring data and CNN-SVM[J]. China Water & Wastewater，2023，39(23)：30-39.（in Chinese））

[45] 郭翔. CCTV 管道检测在扬州污水提质增效行动中的应用 [J]. 中国给水排水，2020，36(20)：67-70，76.（GUO X. Application of CCTV pipeline inspection in Yangzhou sewage quality improvement and efficiency enhancement action[J]. China Water & Wastewater，2020，36(20)：67-70，76.（in Chinese））

[46] RODRÍGUEZ J P，MCINTYRE N，DÍAZ-GRANADOS M，et al. A database and model to support proactive management of sediment-related sewer blockages[J]. Water Research，2012，46(15)：4571-4586.

[47] 庞晶津，黄棚兰，陈仪，等. 市政污水管网的外水水量估计与定位研究进展 [J]. 水利水电技术(中英文)，2023，54(2)：190-204.（PANG J J，HUANG P L，CHEN Y，et al. Study progress of estimating and locating of extraneous waters in municipal sewage pipe network[J]. Water Resources and Hydropower Engineering，2023，54(2)：190-204.（in Chinese））

[48] ARTHUR S，CROW H，PEDEZERT L，et al. The holistic prioritisation of proactive sewer maintenance[J]. Water Science and Technology，2009，59(7)：1385-1396.

[49] SADLER J M，GOODALL J L，BEHL M，et al. Exploring real-time control of stormwater systems for mitigating flood risk due to sea level rise[J]. Journal of Hydrology，2020，583：124571.

[50] 刘家宏，梅超，刘宏伟，等. 特大城市外洪内涝灾害链联防联控关键科学技术问题 [J]. 水科学进展，2023，34(2)：172-181.（LIU J H，MEI C，LIU H W，et al. Key scientific and technological issues of joint prevention and control of river flood and urban waterlogging disaster chain in megacities[J]. Advances in Water Science，2023，34(2)：172-181.（in Chinese））

[51] SUN C C，ROMERO L，JOSEPH-DURAN B，et al. Integrated pollution-based real-time control of sanitation systems[J]. Journal of Environmental Management，2020，269：110798.

[52] 郭效琛，李萌，杜鹏飞，等. 降雨入流入渗定量评价方法及指标的对比 [J]. 中国给水排水，2022，38(11)：133-138.（GUO X C，LI M，DU P F，et al. Comparison on quantitative evaluation methods and indexes of rainfall inflow and infiltration[J]. China Water &

Wastewater，2022，38(11)：133-138.(in Chinese))

[53] ZHAO Z C，YIN H L，XU Z X，et al. Pin-pointing groundwater infiltration into urban sewers using chemical tracer in conjunction with physically based optimization model[J]. Water Research，2020，175：115689.

[54] van der WERF J A，KAPELAN Z，LANGEVELD J G. The impact of blue-green infrastructure and urban area densification on the performance of real-time control of sewer networks[J]. Water Resources Research，2023，59(6)：e2022wr033591.

[55] VEZZARO L，GRUM M. A generalised dynamic overflow risk assessment（DORA）for real time control of urban drainage systems[J]. Journal of Hydrology，2014，515：292-303.

[56] FARAHANI S S，SOUDJANI S E Z，MAJUMDAR R，et al. Robust model predictive control with signal temporal logic constraints for Barcelona wastewater system[J]. IFAC-PapersOnLine，2017，50(1)：6594-6600.

[57] YANG Z K，LIU P，CHENG L，et al. The complementary management of large-scale hydro-photovoltaic hybrid power systems reinforces resilience to climate change[J]. Journal of Hydrology，2022，612：128214.

[58] ZHANG X Q，LIU P，XU C Y，et al. Real-time reservoir flood control operation for cascade reservoirs using a two-stage flood risk analysis method[J]. Journal of Hydrology，2019，577：123954.

[59] MING B，ZHONG H Y，ZHANG W，et al. Deriving operating rules for inter-basin water transfer projects incorporating a scenario reduction strategy[J]. Journal of Hydrology，2023，624：129854.

[60] FONTECHA J E，AGARWAL P，TORRES M N，et al. A two-stage data-driven spatiotemporal analysis to predict failure risk of urban sewer systems leveraging machine learning algorithms[J]. Risk Analysis，2021，41(12)：2356-2391.

[61] XU B，SUN Y，HUANG X，et al. Scenario-based multiobjective robust optimization and decision-making framework for optimal operation of a cascade hydropower system under multiple uncertainties[J]. Water Resources Research，2022，58(4)：e2021wr030965.

[62] SVENSEN J L，SUN C C，CEMBRANO G，et al. Model predictive control of urban drainage systems considering uncertainty[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology，2023，31(6)：2968-2975.

[63] PUIG V. Fault diagnosis and fault tolerant control using set-membership approaches：application to real case studies[J]. International Journal of Applied Mathematics and Computer Science，2010，20(4)：619-635.

[64] DENG C，LIU P，WANG W G，et al. Modelling time-variant parameters of a two-parameter monthly water balance model[J]. Journal of Hydrology，2019，573：918-936.

[65] FENG M Y，LIU P，GUO S L，et al. Deriving adaptive operating rules of hydropower reservoirs using time-varying parameters generated by the EnKF[J]. Water Resources Research，2017，53(8)：6885-6907.

[66] 刘哲源，刘攀，李赫. 水风光互补适应性调度的集合卡尔曼滤波方法 [J]. 水力发电学报，2022，41(8)：42-53.(LIU Z Y，LIU P，LI H. An ensemble Kalman filter method for adaptive operation of hydro-wind-solar hybrid power systems[J]. Journal of Hydroelectric Engineering，2022，41(8)：42-53.(in Chinese))

[67] OH J，BARTOS M. Model predictive control of stormwater basins coupled with real-time data assimilation enhances flood and pollution control under uncertainty[J]. Water Research，2023，235：119825.

[68] 张玮，刘攀，刘志武，等. 变化环境下水库适应性调度研究进展与展望 [J]. 水利学报，2022，53(9)：1017-1027，1038.(ZHANG W，LIU P，LIU Z W，et al. State-of-the-art review of reservoir adaptation operation in changing environment[J]. Journal of Hydraulic Engineering，2022，53(9)：1017-1027，1038.(in Chinese))

[69] 张晓菁，刘攀，周丽婷，等. 考虑水文模型参数时变的水库水位多预见期实时预报：以水布垭水库为例 [J]. 水利学报，2023，54(4)：426-438，450.(ZHANG X J，LIU P，ZHOU L T，et al. Real-time forecasting of reservoir water levels over multiple lead times considering time-varying hydrological model parameters and its application in the Shuibuya Reservoir[J]. Journal of Hydraulic Engineering，2023，54(4)：426-438，450.(in Chinese))

[70] MAHMOODIAN M，DELMONT O，SCHUTZ G. Pollution-based model predictive control of combined sewer networks，considering uncertainty propagation[J]. International Journal of Sustainable Development and Planning，2017，12(1)：98-111.

[71] BALLA K M，SCHOU C，DIMON BENDTSEN J，et al. Multi-scenario model predictive control of combined sewer overflows in urban drainage networks[C]//2020 IEEE Conference on Control Technology and Applications（CCTA）. Montreal，QC，Canada：IEEE，2020：1-6.

[72] LUND N S V，BORUP M，MADSEN H，et al. CSO reduction by integrated model predictive control of stormwater inflows：a simulated proof of concept using linear surrogate models[J]. Water Resources Research，2020，56(8)：e2019wr026272.

［73］BIEKER K，PEITZ S，BRUNTON S L，et al. Deep model predictive flow control with limited sensor data and online learning[J]. Theoretical and Computational Fluid Dynamics，2020，34(4)：577-591.

［74］GONG Y，LIU P，LIU Y N，et al. Robust operation interval of a large-scale hydro-photovoltaic power system to cope with emergencies[J]. Applied Energy，2021，290：116612.

［75］GUO Y，MING B，HUANG Q，et al. Risk-averse day-ahead generation scheduling of hydro-wind-photovoltaic complementary systems considering the steady requirement of power delivery[J]. Applied Energy，2022，309：118467.

［76］MEYER D，GRIMMOND S，DUEBEN P，et al. Machine learning emulation of urban land surface processes[J]. Journal of Advances in Modeling Earth Systems，2022，14(3)：e2021MS002744.

Research progress on real-time control of urban drainage systems considering uncertainty*

LUO Xinran[1]，ZHENG Yalian[2]，LIU Pan[3]，WANG Dianchang[1]，WANG Wanqiong[1]，PENG Shouhai[1]

（1. *National Engineering Research Center of Eco-Environment in the Yangtze River Economic Belt*，*China Three Gorges Corporation, Wuhan* 430014，*China*；2. *Bureau of Hydrology*，*Changjiang Water Resources Commission*，*Wuhan* 430010，*China*；3. *State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management*，*Wuhan University*，*Wuhan* 430072，*China*）

Abstract：Climate change and rapid urbanization pose severe risks to urban drainage systems (UDSs). In particular，the mismatch between urban drainage infrastructure and urban development needs is increasingly likely to cause UDSs overflows. Real-time control (RTC) has the potential to significantly improve the operational efficiency of UDSs，providing an effective means of alleviating these overflows. However，the uncertainties associated with the complex hydraulic characteristics and harsh operating environment of UDSs mean that RTC may be ineffective or provide only insignificant benefits. This paper reviews the causes and analyzes the influence of these uncertainties from the perspectives of data，RTC methods，process models，and drainage conditions. Research progress on the RTC of UDSs is summarized in terms of uncertainty characterization and RTC modeling，which combines uncertain variables with efficient and robust solutions. Potential research directions are proposed as a means of addressing the limitations of previous studies，including the impact of data observation errors on RTC，risk control strategies for responding to emergencies，multiobjective control models that couple multidimensional uncertainties，and improving the timeliness of RTC models.

Key words：urban drainage systems；real-time control；uncertainty；drainage system overflow

* The study is supported by the National Key R&D Program of China（No. 2022YFC3202804）and the China Three Gorges Corporation（No. NBZZ202300938）.

DOI：10.14042/j.cnki.32.1309.2025.02.011

2013 年以来海河流域降水增多成因剖析

王庆明[1,2]，张 越[3]，邓皓东[1]，谭伟丽[1]，陈 康[4]，赵 勇[1]

（1. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室，北京 100038；2. 水利部京津冀水安全保障重点实验室，北京 100048；3. 水利部水利水电规划设计总院，北京 100120；4. 山东省水利勘测设计院有限公司，山东 济南 250013）

摘要：为探究 21 世纪 10 年代以来海河流域年降水量增多的原因，基于实测降水、旱涝等级以及再分析资料等多源数据，利用小波分析、水汽平衡、WRF 模型（Weather Research and Forecast Model）数值模拟等方法，分析了海河流域降水丰枯周期特征、外来水汽收支变化以及外调水对降水的影响。结果表明：海河流域存在 33 a 的降水周期，最新一轮周期的丰水段从 2013 年开始，年降水量较上一轮周期枯水段（1997—2012 年）增多 80.0 mm；2013—2022 年较 1997—2012 年夏季西北通道、东南通道和西南通道水汽输入分别增加 0.35、0.29 和 0.26 kg/(m·s)，导致年降水量增加 76.7 mm，占降水增量的 95.9%；2015—2022 年南水北调中线一期工程输入水量导致流域年降水量增加 3.3 mm，占降水增量的 4.1%。本研究对掌握海河流域降水演变规律、保障流域长期水资源安全具有重要意义。

关键词：降水增多；水汽收支；周期性；外调水；海河流域
中图分类号：TV122 **文献标志码：**A **文章编号：**1001-6791（2025）02-0296-11

海河流域地处京畿要地，既是中国人口最密集、经济最发达的区域之一，也是水资源紧缺、水生态退化及资源环境支撑力与发展矛盾最尖锐的区域[1]。自 20 世纪 90 年代中期开始海河流域遭遇连续十几年的干旱[2-3]，爆发了严重的水资源供给危机，不得不超采地下水、挤占河湖水，引发了一系列生态问题[4-6]。21 世纪 10 年代以来海河流域降水显著增多[7]，加上南水北调中线一期工程通水，地下水位出现回升，河湖水面开始复苏，极大地缓解了流域缺水情势，但已有研究对降水增多的具体特征，如周期性、降水增多的水汽来源等还没有清晰的认识，影响了流域水资源管理决策制定和重大水利工程的规划布局。尽管降水的周期性分析方法相对成熟，但选用的时间序列长度不同，得到的周期性结果也不完全一致，通常认为海河流域降水存在 10～15 a、25～30 a、60～65 a 等不同周期[8-10]。由于中国大范围标准化的气象站网数据始于 1956 年，降水监测时间序列较短，识别出的周期是否准确还存在疑问，故有必要从更长的时间序列进行分析[11]。在特定的周期内降水来源主要有 2 类：一部分是外来水汽，受大气环流影响[12-15]，海河流域外来水汽主要来自中高纬度西风带的西北水汽（下称西北通道水汽）、孟加拉湾的西南水汽（下称西南通道水汽）以及中国南海和西太平洋的东南水汽（下称东南通道水汽），3 个通道的水汽变化是影响海河流域降水的主要因素[16-17]，究竟哪个通道水汽变化是最新周期丰水段的主导因素还不明确。另一部分是本地蒸发水汽，也称降水再循环，主要受下垫面变化影响[18-20]，2014 年底南水北调中线一期工程通水，截至 2024 年底累计为海河流域输水达到 530 亿 m^3，是影响本地蒸发水汽变化的最主要因素。目前有研究根据规划的调水量评估外调水对降水的影响，但基于实际调水量和用水区域的研究较少，外调水的真实影响缺乏准确的评估。

本文基于重构的 1477—2022 年降水序列分析海河流域的周期性规律，确定最新一轮周期丰水段的开始

收稿日期：2025-01-17；**网络出版日期：**2025-04-16
网络出版地址：https://link.cnki.net/urlid/32.1309.P.20250416.1603.007
基金项目：国家自然科学基金项目（52025093；52394231）
作者简介：王庆明（1987—），男，河北邯郸人，高级工程师，博士，主要从事水循环演变解析研究。E-mail：wangqm@iwhr.com
通信作者：赵勇，E-mail：zhaoyong@iwhr.com

时间，分析 3 个通道外来水汽变化规律和外调水对本地蒸发水汽的定量影响，探究海河流域降水增多的原因，研究结果对深入认知海河流域降水演变机制具有重要意义。

1　研究区域

海河流域东临渤海、西倚太行(图 1)，总面积为 32.06 万 km^2，其中，西部和北部为山区，面积为 18.94 万 km^2，约占 60%；东部和东南部为平原区，面积为 12.84 万 km^2，约占 40%。海河流域属于温带半湿润、半干旱大陆性季风气候区，冬季盛行北风和西北风，夏季多东南风。按 1956—2022 年降水系列，全流域多年平均降水量为 541.7 mm，降水时空分布呈明显的地带性、季节性和年际差异，其中山区多年平均降水量为 527.4 mm，平原区为 556.3 mm，汛期(6—9 月)降水占年降水总量的 70%～85%，春季(3—5 月)降水占年降水总量的 10%。夏季暴雨集中，冬春雨雪稀少，具有春旱、秋涝、晚秋又旱的特点。流域年平均气温为 1.5～14.0℃，年平均相对湿度为 50%～70%，平均日照时数为 2 500～3 000 h，平均水面蒸发量为 1 100.6 mm。

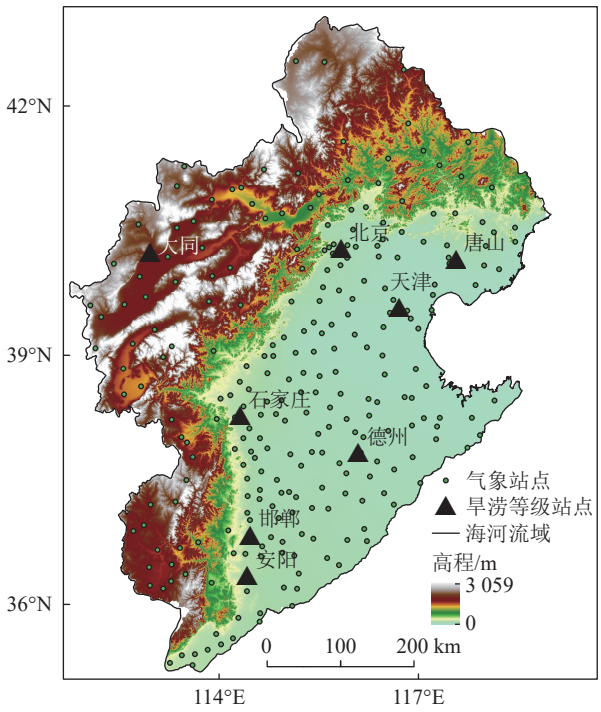


图 1　海河流域概况

Fig. 1　Haihe River basin overview

2　数据来源和研究方法

2.1　数据来源

1956—2022 年逐日降水数据来自流域内 256 个气象站，由国家气象科学数据中心提供(http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/szygb/)。用于重构 1477—2022 年降水序列的旱涝等级来自《中国近五百年旱涝分布图集》及其续补资料，包含中国 120 个代表站点 1477—2000 年共 524 a 旱涝等级序列资料[13]，其中涉及海河流域的站点有 8 个，分别为北京、天津、石家庄、唐山、邯郸、德州、安阳和大同。用于计算水汽通量的比湿、风速等气象数据来源于欧洲中期天气预报中心提供的 ERA5 再分析数据集(https://cds.climate.copernicus.eu/)，该数据集覆盖本次研究的 1997—2022 年时间段，空间分辨率为 0.25°×0.25°，包括从 300 到 1 000 hpa(300、400、500、600、700、850、925、1 000 hpa)的 8 个气压层，从地表向上延伸到大气层顶部。此外，各地市外调水量、耗水系数等数据来自于《中国水资源公报》和《中国南水北调工程建设年鉴》。

2.2　研究方法

(1)外来水汽收支。使用欧拉法[21-22]分析海河流域大气水汽输送情况(范围为 34°N—43°N，111°E—120°E)，流域东边界、西边界、南边界和北边界水汽通量分别为式(1)—式(4)：

$$Q_{\mathrm{E}}(t)=\int_{\phi_1}^{\phi_2}Q_u(\lambda_1,y_i,t) \tag{1}$$

$$Q_{\mathrm{W}}(t)=\int_{\phi_1}^{\phi_2}Q_u(\lambda_2,y_i,t) \tag{2}$$

$$Q_{\mathrm{S}}(t)=\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}Q_v(x_i,\phi_1,t) \tag{3}$$

$$Q_{\mathrm{N}}(t)=\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q_v(x_i,\phi_2,t) \tag{4}$$

式中：$Q_{\mathrm{E}}(t)$、$Q_{\mathrm{W}}(t)$、$Q_{\mathrm{S}}(t)$、$Q_{\mathrm{N}}(t)$分别为东、西、南和北边界处的水汽通量，kg/(m·s)；Q_u、Q_v分别为纬向和经向水汽输送通量，kg/(m·s)；x_i、y_i、t分别为网格点的经度、纬度和时间；λ_1、λ_2、φ_1、φ_2分别为各边界对应的经度和纬度。

流域的纬向水汽净收支定义为西边界和东边界水汽通量之和，经向水汽净收支定义为南边界和北边界水汽通量之和，水汽通量输送正方向为从西向东和从南向北。流域水汽通量净收支由经向和纬向水汽通量的总和决定，正值表示水汽的净输入，负值表示水汽的净输出。其水汽通量净收支($Q_{\mathrm{T}}(t)$)计算如下：

$$Q_{\mathrm{T}}(t)=Q_{\mathrm{W}}(t)+Q_{\mathrm{E}}(t)+Q_{\mathrm{S}}(t)+Q_{\mathrm{N}}(t) \tag{5}$$

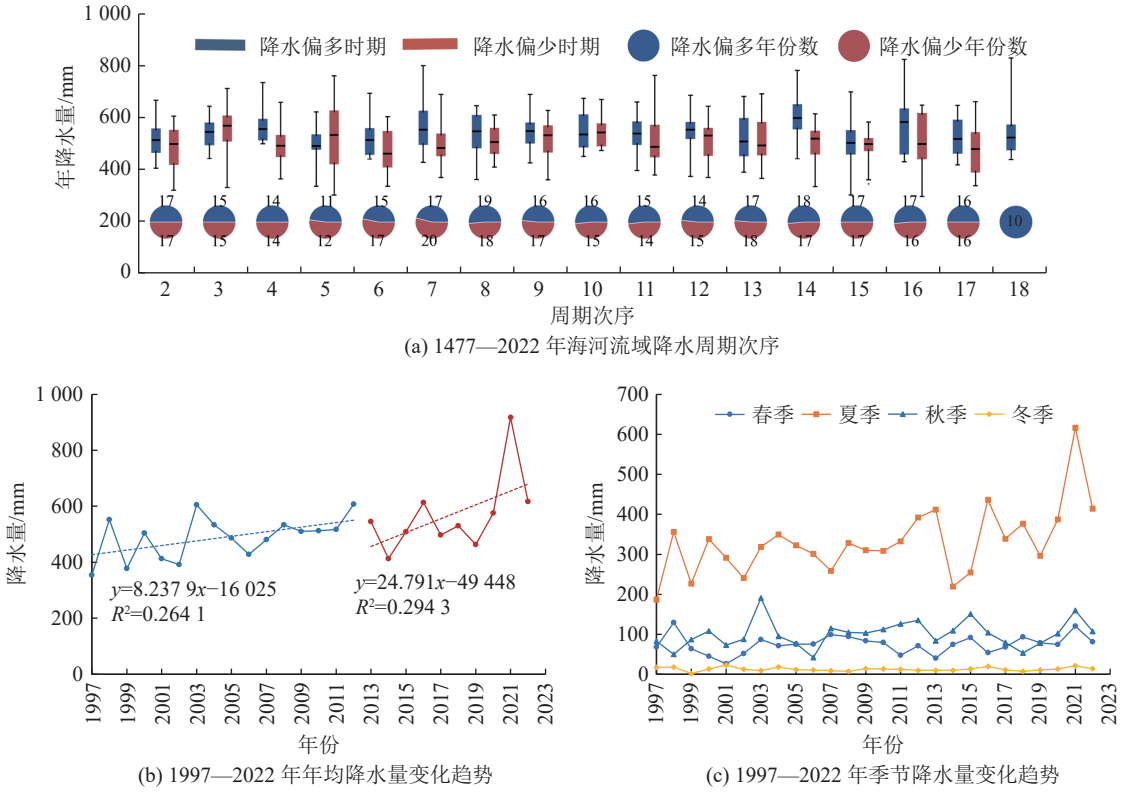
(2)外调水对流域降水影响模拟。采用 WRF 模型（Weather Research and Forecast Model）[23-24]模拟外调水对流域降水的影响，WRF 模型是由美国国家大气研究中心、美国国家海洋和大气管理局等多家科研机构开发的中尺度气候模拟系统，广泛应用于气候研究、天气预报、水文研究等多个领域。模拟区域范围包含海河流域，模拟区域中心点为(39°N，116°E)，时间步长为 90 s，水平分辨率为 30 km，模拟初始与侧边界条件使用 ERA5 再分析数据集，WRF 模型提供大量的参数化方案，主要包括云微物理过程方案、积云对流方案、辐射传输方案、边界层方案及陆面过程方案等。在参数化方案比选过程中，选择对降水和温度影响较大的参数化方案，并形成参数化方案组合，基于气象站点实测数据开展参数化方案遴选试验，最终较优的参数化方案结果为 WSM5 微物理过程方案、Grell-Devenyi 积云方案、RRTM 长波辐射方案、Dudhia 短波辐射方案、YSU 边界层方案和 Noah-MP 陆面过程方案，后续试验也选用该套组合方案。采用 2015—2022 年实际的水汽输入与下垫面条件，通过 WRF 模型模拟有无外调水对降水和降水再循环率[25]的影响。

3 结果与讨论

3.1 海河流域降水丰枯周期识别

针对海河流域降水周期性特征识别，一般认为时间序列越长，识别出的周期越稳定。根据团队前期工作，基于长短期记忆网络算法(LSTM)，结合历史旱涝等级记录、站点监测数据等，重建了海河流域 1477—2022 年(以下简称过去 546 a)的降水序列，经 Morlet 小波分析发现海河流域第 1 主周期为 33 a[26]。过去 546 a 海河流域共经历了 16 个完整周期以及最新正在发展的 1 个周期，如图 2(a)所示，周期内丰水段平均持续 15.87 a，枯水段平均持续 16.18 a，最新一轮周期以 2013 年为起点，截止到 2022 年丰水段已经持续了 10 a 时间。从流域雨量站监测数据上看，1956—2022 年海河流域多年平均降水量为 541.7 mm，大致跨越 2.5 个周期，第 1 个周期的丰水段(1956—1963 年)年平均降水量为 658.2 mm，枯水段(1964—1980 年)年平均降水量为 542.3 mm；第 2 个周期的丰水段(1981—1996 年)年平均降水量为 519.3 mm，枯水段(1997—2012 年)年平均降水量为 488.6 mm；最新一轮周期仍在持续的丰水段(2013—2022 年)海河流域年平均降水量为 568.6 mm(图 2(b))，较上一个周期枯水段增加 80.0 mm，增多 16%，其中春、夏、秋、冬 4 个季节降水量分别增加了 4.8、71.4、3.2 和 0.6 mm(图 2(c))。

基于过去 546 a 降水序列按照频率对降水进行定量划分，25% 频率对应年降水量为 577.3 mm，50% 频率对应年降水量为 519.1 mm，75% 频率对应年降水量为 460.2 mm，95% 频率对应年降水量为 373.4 mm。从历史周期性规律上看，当前海河流域确实处于丰水段，2013—2022 年的年平均降水量接近 25% 频率年降水量，在过去的 16 个周期丰水段中排列第 6；而上一个枯水段(1997—2012 年)的年平均降水量接近 75% 频率年降水量，在 16 个周期枯水段中排列第 2，两者强烈对比直观感受到当前时期降水的丰沛。后文以最新一轮周期



(a) 1477—2022 年海河流域降水周期次序

(b) 1997—2022 年年均降水量变化趋势

(c) 1997—2022 年季节降水量变化趋势

图 2　海河流域历史降水周期性及近期演变趋势

Fig. 2　Historical periodicity and recent evolution trend of precipitation in Haihe River basin

当前的丰水段(2013—2022 年)与上一周期的枯水段(1997—2012 年)对比，从外来大气水汽收支、本地降水再循环 2 个方面探讨海河流域近期降水增多的原因。

3.2　外来大气水汽收支变化

外部输送的大气水汽是形成降水的主要来源之一，如图 3 所示，西北通道水汽来源于全年盛行西风，将来自中高纬度的水汽经内陆地区输送至海洋(太平洋)，该通道流经区域内水汽通量基本在 8 kg/(m·s)左右；西南水汽通道将来自孟加拉湾的水汽经长江流域输送至海河流域，到达海河流域时水汽通量值多为 8 ~ 12 kg/(m·s)；在夏季通常会有东南水汽通道从中国南海、西太平洋地区携带水汽输送至流域内部，该通道进入海河流域的水汽通量一般会超过 12 kg/(m·s)，导致流域降水多集中在夏季(图 3(c)，U、V 分别为纬向、经向风速)。基于 ERA5 数据绘制海河流域四季的风向频率玫瑰图，如图 4 所示，海河流域各季节主导风向是西北和西南风，其中夏季出现东南风，这与四季整层水汽通量矢量场方向一致。

在海河流域的 4 个边界中，北、南、西边界为水汽流入边界，东边界为水汽流出边界，如图 5(a)(s 为趋势线斜率)和表 1 所示，2013—2022 年较 1997—2012 年，北边界水汽通量增加了 0.62 kg/(m·s)、南边界水汽通量增加了 0.44 kg/(m·s)、西边界水汽通量增加了 0.55 kg/(m·s)，合计水汽流入量增加 1.61 kg/(m·s)，东边界水汽流出通量增加 0.69 kg/(m·s)。从水汽净收支来看，1997—2012 年海河流域平均年净收支为 13.08 kg/(m·s)，2013—2022 年平均年净收支为 14.00 kg/(m·s)，后一时段较前一时段平均年净收支增加 0.92 kg/(m·s)，其中，春季水汽净收支减少 0.18 kg/(m·s)，夏季水汽净收支增加 0.90 kg/(m·s)，秋季水汽净收支增加 0.21 kg/(m·s)，冬季水汽净收支减少 0.01 kg/(m·s)(图 5(b))，因此夏季水汽净收支增加最多是导致降水增多的主要原因之一。

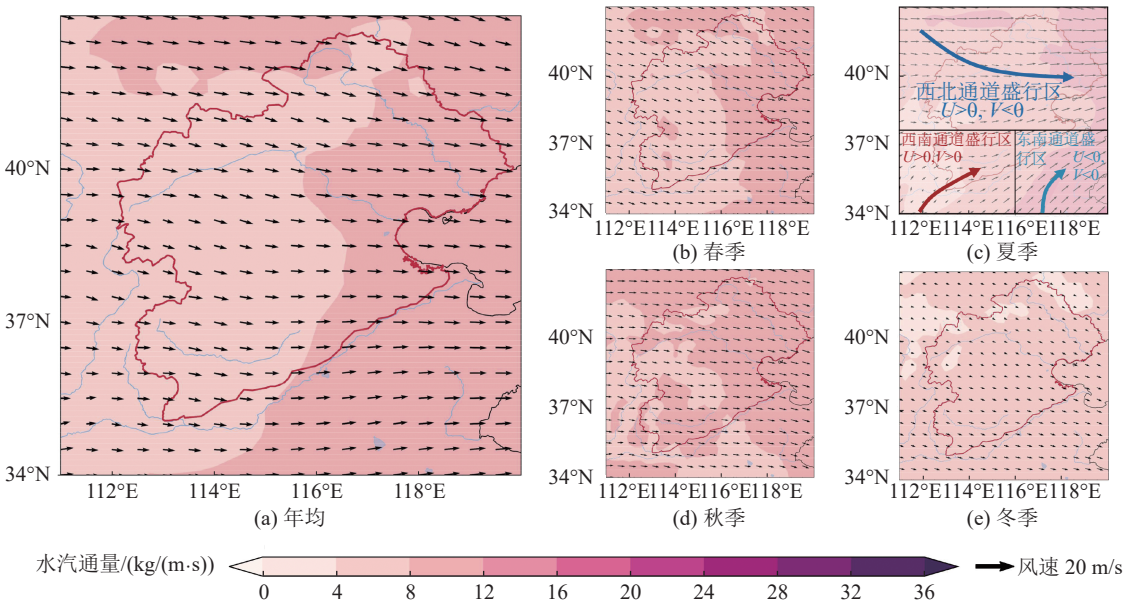


图 3 1997—2022 年平均和四季的整层水汽输送矢量场

Fig. 3 1997—2022 mean and seasonal integrated water vapor flux

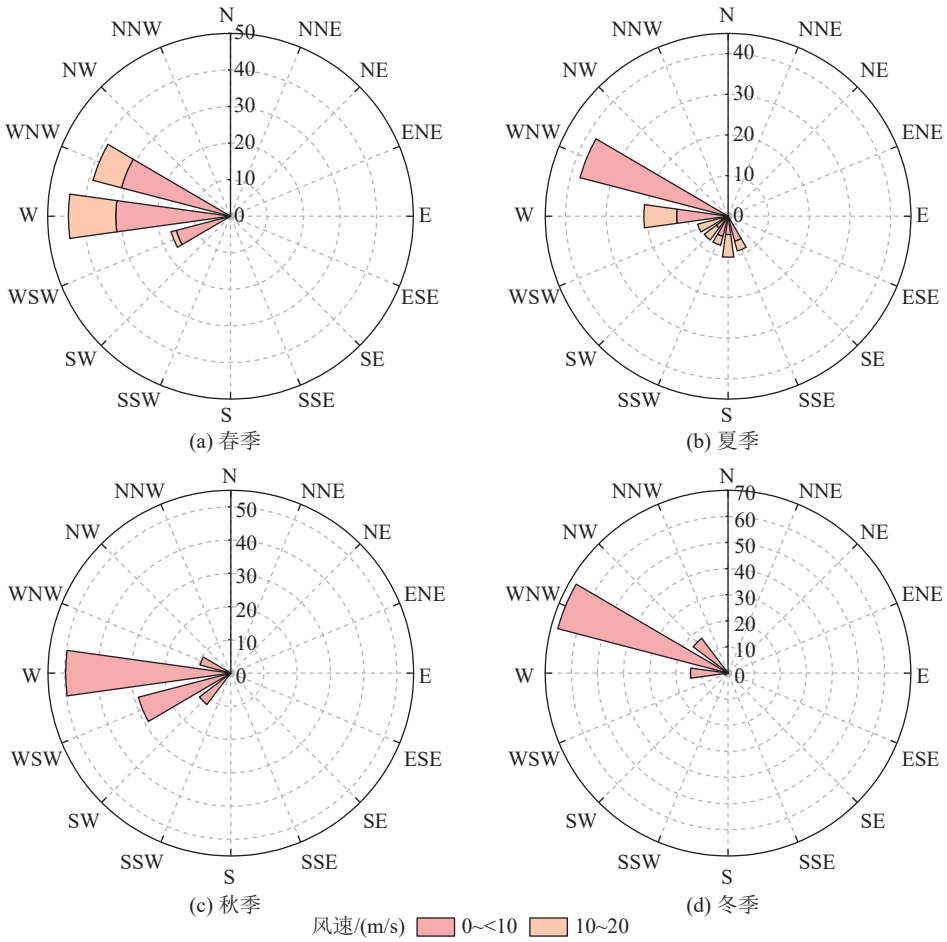


图 4 1997—2022 年海河流域四季的整层风向频率玫瑰图(单位：%)

Fig. 4 Wind frequency rose diagram of the whole layer wind direction in the four seasons of the Haihe River basin during 1997—2022

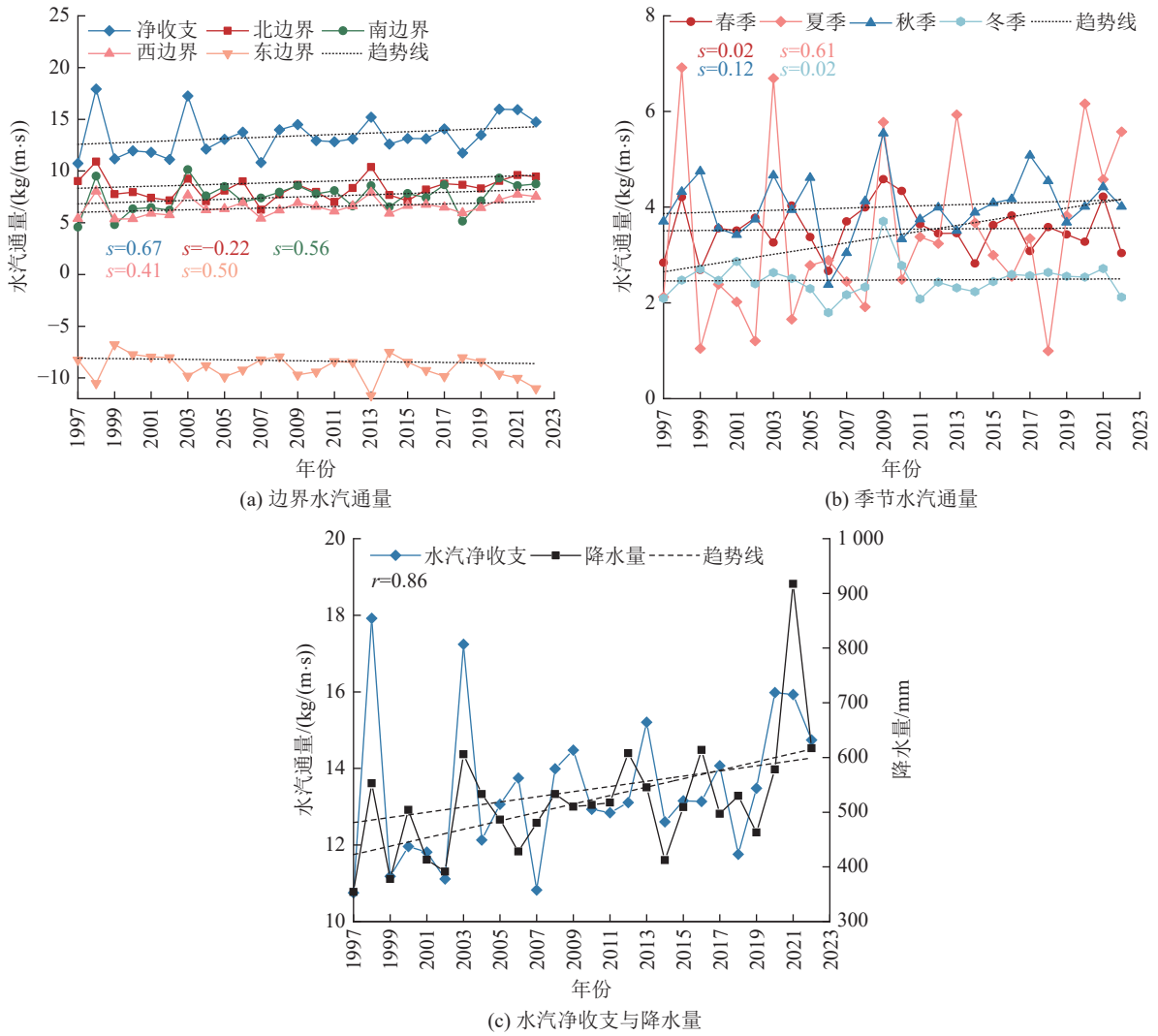


图 5　海河流域各边界通量、季节净通量以及降水量年际变化

Fig. 5　Boundary fluxes, seasonal net fluxes and their interannual changes in relation to precipitation in Haihe River basin

表 1　不同时段各边界水汽通量及净收支均值

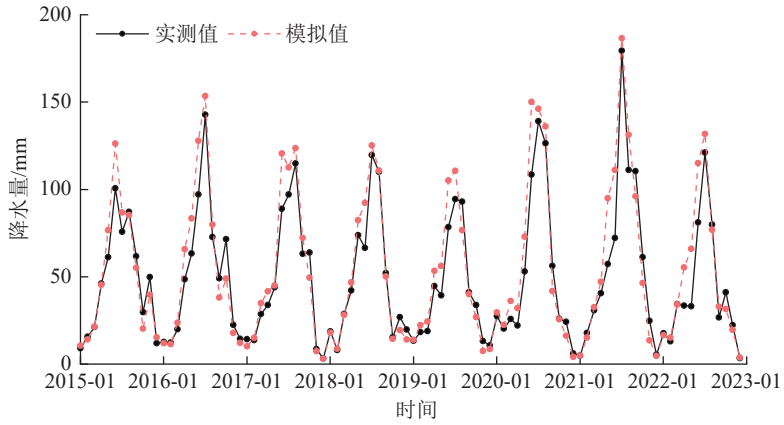
Table 1　Mean water vapor flux and net budget at each boundary during different time periods　　**单位: kg/(m·s)**

时段	北边界	南边界	西边界	东边界	净收支
1997—2012年	8.11	7.35	6.31	−8.69	13.08
2013—2022年	8.73	7.79	6.86	−9.38	14.00

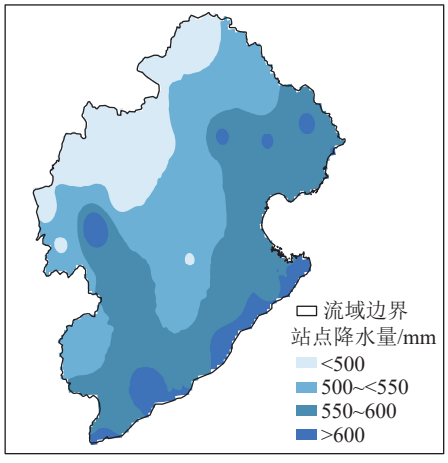
2013—2022 年较 1997—2012 年，流域夏季北、南、西 3 个边界水汽流入量分别增加了 0.42、0.44、0.51 kg/(m·s)，东边界流出量增加 0.47 kg/(m·s)。根据流域夏季多年平均风向，识别出西北水汽通道(37.5°N 以北)、西南水汽通道(116°E 以西)和东南水汽通道盛行区范围(116°E 以东)，对比 3 个通道 2013—2022 年和 1997—2012 年 2 个时段的水汽通量结果显示，西北水汽通道净收支增加 0.35 kg/(m·s)，西南水汽通道净收支增加 0.26 kg/(m·s)，东南水汽通道净收支增加 0.29 kg/(m·s)。水汽净收支是影响同期年降水量的主要因素，如图 5(c)所示，1997—2022 年水汽净收支与同期实测降水量相关性系数(r)达到 0.86，各年变化趋势基本一致，因此，3 个通道夏季水汽流入增多是导致海河流域降水增多的主要原因。

3.3 外调水对降水的影响

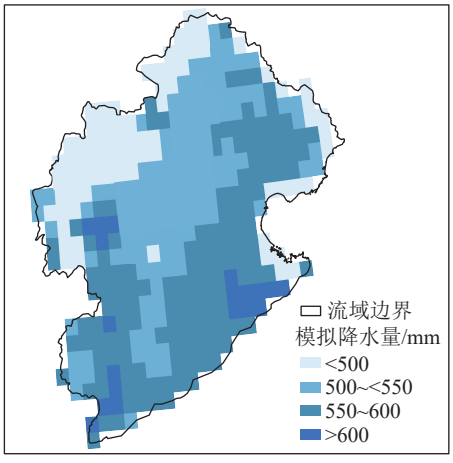
外调水的输入增加了流域蒸发量，蒸发的水汽在高空冷却凝结，一部分会再次转化为降水返回地表，也是影响海河流域降水的原因之一。自 2014 年 12 月 12 日南水北调中线一期工程正式通水，截至到 2022 年底已累计为海河流域输水 420 亿 m^3。基于 WRF 模型，按照南水北调工程实际调水量，对 2015—2022 年间有无调水情景的海河流域降水量、蒸发量等气候要素进行模拟，利用流域内气象站点数据和模拟结果进行对比验证，如图 6(a)所示，从模拟期 2015—2022 年逐月降水量站点观测值和模拟值对比来看，模型除了在 6—7 月模拟偏大外，其余月份降水量模拟效果较好，均方根误差为 18.9 mm/a，年均降水量相对误差为 8.14%。从空间分布来看，如图 6(b)和图 6(c)所示，流域降水量模拟值与站点观测值整体一致，都呈现自西北向东南递增的分布趋势，两者的空间相关系数达到 0.85。



(a) 降水模拟值与实测值



(b) 实测值空间分布



(c) 模拟值空间分布

图 6 多年平均降水的站点实测值与模拟值年际与空间对比

Fig. 6 Multi-year average precipitation: interannual and spatial comparison between observed and simulated values at stations

将 2015—2022 年有无调水情景的模拟结果，计入 2013—2022 年时段，与 1997—2012 年时段对比，调水导致流域年均蒸发量增加了 12.0 mm，年均降水量增加 3.3 mm，约占丰水段降水增量的 4.1%，调水前流域年均降水再循环率为 6.55%，调水后流域年均降水再循环率为 6.86%，增长了 0.31%。同期模拟出的 1997—2012 年大气水汽净收支均值为 13.43 kg/(m·s)，2013—2022 年大气水汽净收支为 14.03 kg/(m·s)，与 ERA5 数据计算出的水汽净收支接近，相关系数为 0.9，水汽净收支增加导致后一时段较前一时段降水量增

加 76.7 mm，约占丰水段降水增量的 95.9%。

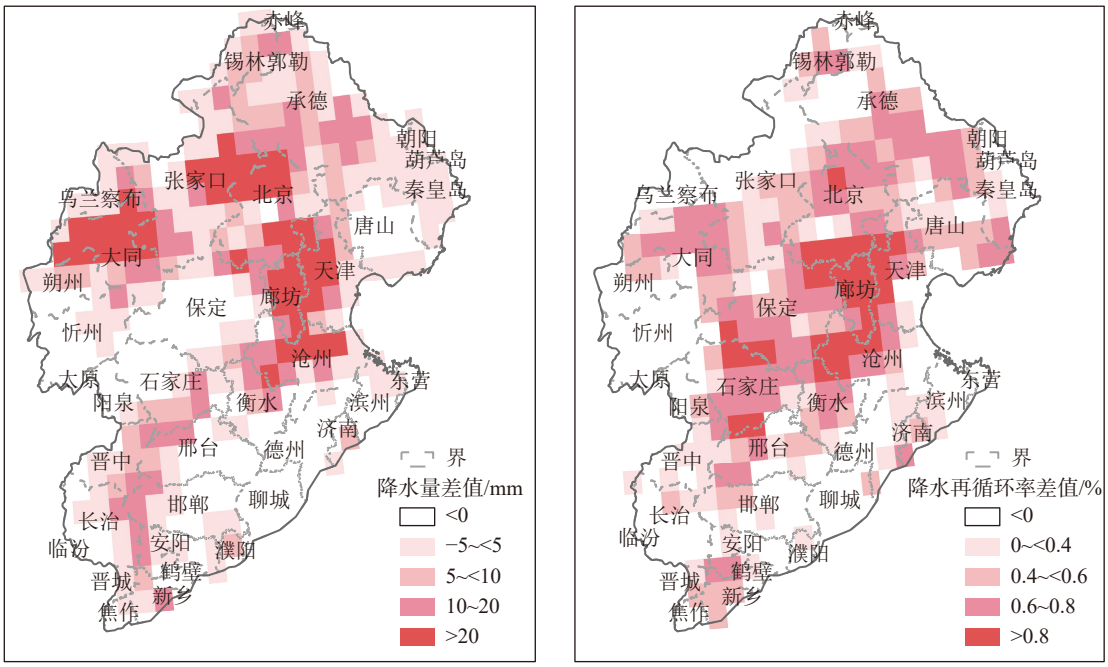
从季节上看(表 2)，调水导致海河流域春季、夏季降水量分别增加 1.10、2.06 mm，对各自季节降水增加的贡献分别为 23.0% 和 2.9%，尽管夏季降水量增加最多，但由于夏季降水量大，增加的比例相对较低；春季降水总量较小，降水量增加虽然不是最多，但增加的比例最高。秋、冬季节，调水导致降水量分别增加了 0.14 mm 和 0.01 mm，对各自季节降水增加的贡献分别为 4.33% 和 1.67%。尽管南水北调中线一期在不同季节调水量差异不大，但秋、冬季降水增加较少是因为秋、冬季节东南通道水汽输送减弱，主要是东边界水汽通量减少，高层大气相对干燥，即便调水导致低层水汽含量增多，但空气垂直对流活动受限，降水转化率较低，无法形成降水，所以降水量并未显著增加。

表 2　2015—2022 年降水量增量和降水再循环率趋势

Table 2　Precipitation increment and precipitation cycling rate trends during 2015—2022

季节	降水增加量/mm	调水导致降水量变化/mm	调水导致降水再循环率变化/%
春季	4.78	1.10	0.74
夏季	71.39	2.06	0.38
秋季	3.23	0.14	0.09
冬季	0.60	0.01	0.32

从空间上看(图 7)，调水带来的增雨效应主要表现在流域外调水量较多的北京、天津等地区，年降水量平均增加超过 10.2 mm。此外，在海河流域西北部也出现了一个降水增加的区域，主要是因为外调水产生的水汽受季风影响，从中东部平原区输送至西北山前地带被太行山-燕山阻挡，输送的水汽抬升冷却后形成地形雨。降水再循环率增加范围主要集中在流域中部地区，增加 0.4% 左右，尤其北京、天津、廊坊等地区增加范围在 0.4% ~ 0.8% 之间。



(a) 降水差值空间分布　　(b) 降水再循环率差值空间分布

图 7　调水前后海河流域受水区降水差值和降水再循环率差值的空间分布

Fig. 7　Spatial distribution of differences in precipitation and precipitation recycling rate in the water receiving areas of the Haihe River basin before and after water transfer

4 结 论

(1)根据重构的 1477—2022 年降水序列分析，发现海河流域存在 33 a 的主周期，最新一轮周期丰水段始于 2013 年，上一轮周期枯水段为 1997—2022 年，2013—2022 年降水量较 1977—2022 年增多 16%。

(2)海河流域外来水汽主要来自西北、西南和东南 3 个方向水汽通道，2013—2022 年较 1997—2012 年，夏季西北通道水汽输入增加 0.35 kg/(m·s)，东南通道水汽输入增加 0.29 kg/(m·s)，西南通道水汽输入增加 0.26 kg/(m·s)，3 个通道夏季水汽输入增加是导致流域降水增多的主要原因。

(3)南水北调中线一期工程调水导致海河流域年均蒸发量增加 12.0 mm，年均降水量增加 3.3 mm，约占最新周期丰水段降水增量的 4.1%；大气水汽收支增加导致流域年降水量增加 76.7 mm，约占最新周期丰水段降水增量的 95.9%。

本研究只考虑了外来大气水汽收支和外调水对流域降水的影响，未考虑流域内部农田灌溉、植被修复等因素导致蒸散发的变化，对结果有一定的影响，但相对外调水，这些因素的影响较小，将在未来更精细化的分析中进一步考虑。

参考文献：

[1] 赵勇，王庆明，王浩，等. 京津冀地区水安全挑战与应对战略研究 [J]. 中国工程科学，2022，24(5)：8-18. (ZHAO Y，WANG Q M，WANG H，et al. Water security in Beijing-Tianjin-Hebei region：challenges and strategies[J]. Strategic Study of CAE，2022，24(5)：8-18. (in Chinese))

[2] 周根富，解文静. 海河流域近 20 年气象干旱和水资源形势研究 [J]. 自然资源情报，2022(2)：28-32. (ZHOU G F，XIE W J. Study on meteorological drought and water resource situation in Haihe River basin in the last 20 years[J]. Natural Resources Information，2022(2)：28-32. (in Chinese))

[3] 关不了，姜珊，赵勇，等. 海河流域干旱时空演变及其与气候因子的关系 [J]. 水资源保护，2023，39(4)：59-68. (GUAN B L，JIANG S，ZHAO Y，et al. Spatial and temporal evolution of drought and its relationship with climate factors in the Haihe River basin[J]. Water Resources Protection，2023，39(4)：59-68. (in Chinese))

[4] 王庆明，赵勇，王浩，等. 海河流域地表水资源衰减归因与规律 [J]. 中国科学：地球科学，2024，54(5)：1573-1587. (WANG Q M，ZHAO Y，WANG H，et al. Surface water resource attenuation attribution and patterns in Hai River basin[J]. Science China Earth Sciences，2024，54(5)：1573-1587. (in Chinese))

[5] 朱婷婷，侯立安，童银栋，等. 面向 2035 年的海河流域水安全保障战略研究 [J]. 中国工程科学，2022，24(5)：26-33. (ZHU T T，HOU L A，TONG Y D，et al. Strategy for assuring water security in the Haihe River basin by 2035[J]. Strategic Study of CAE，2022，24(5)：26-33. (in Chinese))

[6] 赵勇，陆垂裕，何鑫，等. 华北地区地下水超采治理十问：地下水，河湖复苏下的涌动 [J]. 中国水利，2023(4)：19-25. (ZHAO Y，LU C Y，HE X，et al. Ten questions regarding groundwater overexploitation in North China：how can groundwater boost recovery of rivers and lakes[J]. China Water Resources，2023(4)：19-25. (in Chinese))

[7] 陈宏，杨洋，张楠，等. 2010—2019 年海河流域暖季极端小时降水特征分析 [J]. 气象与环境科学，2024，47(4)：23-31. (CHEN H，YANG Y，ZHANG N，et al. Analysis on characteristics of extreme hourly precipitation in warm season in the Haihe River basin from 2010 to 2019[J]. Meteorological and Environmental Sciences，2024，47(4)：23-31. (in Chinese))

[8] WANG Z G，LUO Y Z，LIU C M，et al. Spatial and temporal variations of precipitation in Haihe River basin，China：six decades of measurements[J]. Hydrological Processes，2011，25(18)：2916-2923.

[9] 苏万磊. 基于小波分析的海河流域降水周期及趋势分析 [J]. 水利科学与寒区工程，2020，3(6)：73-75. (SU W L. Analysis on precipitation cycle and trend in Haihe River basin based on wavelet analysis[J]. Hydro Science and Cold Zone Engineering，2020，3(6)：73-75. (in Chinese))

[10] 任国玉，王涛，郭军，等. 海河流域近现代降水量变化若干特征 [J]. 水利水电科技进展，2015，35(5)：103-111. (REN G Y，WANG T，GUO J，et al. Characteristics of precipitation variations in Haihe River basin in modern times[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources，2015，35(5)：103-111. (in Chinese))

[11] 陈宏，张庆，孙密娜，等. 多尺度模式对海河流域地区副高系统影响性降水预报的性能评估 [J]. 气象科学，2024，44(4)：783-792.(CHEN H，ZHANG Q，SUN M N，et al. Evaluation of multi-scale model forecasts for subtropical high edge-type precipitation in the Haihe River basin[J]. Journal of the Meteorological Sciences，2024，44(4)：783-792.(in Chinese))

[12] 丁一汇，柳艳菊，宋亚芳. 东亚夏季风水汽输送带及其对中国大暴雨与洪涝灾害的影响 [J]. 水科学进展，2020，31(5)：629-643.(DING Y H，LIU Y J，SONG Y F. East Asian summer monsoon moisture transport belt and its impact on heavy rainfalls and floods in China[J]. Advances in Water Science，2020，31(5)：629-643.(in Chinese))

[13] 刘艳丽，华悦，周惠成，等. 1470 年以来中国东部季风区降水变化规律及趋势预估 [J]. 水科学进展，2022，33(1)：1-14.(LIU Y L，HUA Y，ZHOU H C，et al. Precipitation variation and trend projection in the eastern monsoon region of China since 1470[J]. Advances in Water Science，2022，33(1)：1-14.(in Chinese))

[14] 吴高鹏，赵强，王璇，等. 海河流域 1961—2020 年极端气候变化及其与大气环流关系 [J]. 水资源与水工程学报，2024，35(3)：100-110.(WU G P，ZHAO Q，WANG X，et al. Extreme climate change and its relationship with atmospheric circulation in the Haihe River basin from 1961 to 2020[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering，2024，35(3)：100-110.(in Chinese))

[15] 王婷，李双双，延军平，等. 基于 ENSO 发展过程的中国夏季降水时空变化特征 [J]. 自然资源学报，2022，37(3)：803-815.(WANG T，LI S S，YAN J P，et al. Spatio-temporal variation of summer precipitation in China based on ENSO development process[J]. Journal of Natural Resources，2022，37(3)：803-815.(in Chinese))

[16] 朱玲，柳艳香，左洪超，等. 海河流域水汽输送及其变化特征分析 [J]. 气候变化研究进展，2011，7(3)：184-188.(ZHU L，LIU Y X，ZUO H C，et al. Water vapor transport characteristics over the Haihe River basin[J]. Advances in Climate Change Research，2011，7(3)：184-188.(in Chinese))

[17] 何丽烨，程善俊，马宁，等. 海河流域夏季降水关键区季内演变及其环流配置的定量化分析 [J]. 地理学报，2020，75(1)：41-52.(HE L Y，CHENG S J，MA N，et al. Intraseasonal evolution of the key areas of precipitation in the Haihe River basin and quantitative analysis of its associated atmospheric circulation during summer[J]. Acta Geographica Sinica，2020，75(1)：41-52.(in Chinese))

[18] DENG H D，WANG Q M，ZHAO Y，et al. Effect of water vapor transport and budget on precipitation in the Yangtze-Huang-Huai-Hai River basin[J]. Journal of Hydrology：Regional Studies，2024，53：101787.

[19] WANG X X，CHENG Y M，LIU L，et al. Improved understanding of how irrigated area expansion enhances precipitation recycling by land-atmosphere coupling[J]. Agricultural Water Management，2024，299：108904.

[20] 桂云鹏，赵勇，杨明祥，等. 大规模灌溉对海河流域气候影响模拟研究 [J]. 农业工程学报，2024，40(3)：138-146.(GUI Y P，ZHAO Y，YANG M X，et al. Simulation of climate effect of large-scale irrigation in Haihe River basin[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2024，40(3)：138-146.(in Chinese))

[21] 姚秀萍，黄逸飞，包晓红，等. “23·7”华北极端强降水特征和水汽条件研究 [J]. 气象学报，2024，82(5)：585-599.(YAO X P，HUANG Y F，BAO X H，et al. Characteristics of the July 2023 extreme rainfall in North China and its water vapor supply[J]. Acta Meteorologica Sinica，2024，82(5)：585-599.(in Chinese))

[22] 孙博，王会军，周波涛，等. 中国水汽输送年际和年代际变化研究进展 [J]. 水科学进展，2020，31(5)：644-653.(SUN B，WANG H J，ZHOU B T，et al. A review on the interannual and interdecadal variations of water vapor transport over China during past decades[J]. Advances in Water Science，2020，31(5)：644-653.(in Chinese))

[23] 孙明坤，刘志雨，姚成，等. WRF/Grid-XAJ 双向耦合系统构建及其暴雨洪水模拟应用 [J]. 水科学进展，2024，35(5)：752-762.(SUN M K，LIU Z Y，YAO C，et al. Building of WRF/Grid-XAJ two-way coupling system and its application in rainstorm and flood simulation[J]. Advances in Water Science，2024，35(5)：752-762.(in Chinese))

[24] LI X Y，ZOU L，XIA J，et al. Response of blue-green water to climate and vegetation changes in the water source region of China's South-North water Diversion Project[J]. Journal of Hydrology，2024，634：131061.

[25] 叶立娟，王文，胡彦君，等. 青藏高原水汽来源及其对降水变化的贡献 [J]. 水科学进展，2024，35(6)：890-899.(YE L J，WANG W，HU Y J，et al. Water vapor sources and their contributions to precipitation change in the Tibetan Plateau[J]. Advances in Water Science，2024，35(6)：890-899.(in Chinese))

[26] 谭伟丽，赵勇，王庆明，等. 海河流域 500 年尺度降水周期性分析与预测 [J/OL]. 水利学报，2025(Online)(TAN W L，ZHAO Y，WANG Q M，et al. Analysis of 500-year precipitation periodicity and prediction in Haihe River basin [J/OL]. Journal of Hydraulic Engineering，2025 (Online).(in Chinese))

Analysis of the causes behind increased precipitation in the Haihe River basin since 2013*

WANG Qingming[1,2], ZHANG Yue[3], DENG Haodong[1], TAN Weili[1], CHEN Kang[4], ZHAO Yong[1]

(1. *State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing* 100038, *China*; 2. *Key Laboratory of Water Safety for Beijing-Tianjin-Hebei Region of Ministry of Water Resources, Beijing* 100048, *China*; 3. *General Institute of Water Conservancy and Hydropower Planning and Design, Ministry of Water Resources, Beijing* 100120, *China*; 4. *Shandong Water Conservancy Survey and Design Institute Co., LTD., Jinan* 250013, *China*)

Abstract: To explore the reasons for the increase in annual precipitation in the Haihe River basin since the 2010s, this study uses multi-source data including measured precipitation, drought/flood severity levels, and reanalysis datasets. Through methods such as wavelet analysis, water vapor balance calculations, and WRF numerical simulations, the study examines the periodic characteristics of precipitation, changes in external water vapor transport, and the impact of diverted water on precipitation. Results show that the Haihe River basin has a 33-year period of precipitation, with the most recent wet phase beginning in 2013. During this phase, annual precipitation increased by 80.0 mm compared to the previous dry phase (1997—2012). From 2013 to 2022, summer water vapor transport through the northwest, southeast, and southwest channels increased by 0.35, 0.29, and 0.26 kg/(m·s) respectively, leading to a total annual precipitation increase of 76.7 mm, accounting for 95.9% of the total increase. Additionally, from 2015 to 2022, the first phase of the South-to-North Water Diversion Project's Middle Route added an estimated 3.3 mm to the annual precipitation, accounting for 4.1% of the increase. This research is of significant importance for understanding the evolution of precipitation in the Haihe River basin and ensuring the long-term security of regional water resources.

Key words: precipitation increases; water vapor budget; periodicity; water transfer from external basins; Haihe River basin

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52025093; No. 52394231).

DOI： 10.14042/j.cnki.32.1309.2025.02.015

城市排水系统分布式控制研究进展与展望

罗鑫燃，彭寿海，王殿常，尹 炜，谢家强，陈奕林

（中国长江三峡集团有限公司长江经济带生态环境国家工程研究中心，湖北 武汉 430014）

摘要：随着城市快速发展和对水环境质量要求的不断提高，城市排水系统的组成、功能和运行目标日趋复杂，传统集中式控制系统在安全性和可靠性方面面临挑战，开展分布式控制研究对于提高排水系统的运行韧性具有重要意义。目前分布式控制的适用范围及关键实施步骤尚不明晰，制约了其在城市排水系统运行管理中的实践应用。本研究调研了分布式控制在城市排水系统中的研究进展；总结了城市排水系统分布式控制系统构建的关键步骤及相应方法，重点阐述了主体层控制策略及控制主体间的协调机制，分析了不同方法的优势及局限性；针对城市排水系统分布式控制实践应用面临的挑战，建议加强实时监测及数据共享、提升控制时效性、建设风险管理机制、探索混合控制模式及规模化应用等方面的研究，以提高城市排水系统的运行韧性和智能化水平，增强城市水安全风险防控能力。

关键词：城市排水系统；分布式控制；城市内涝；溢流污染；系统韧性

中图分类号：TU992.4 **文献标志码：**A **文章编号：**1001-6791(2025)02-0345-13

实时控制是提高城市排水系统运行效率、缓解城市洪涝及溢流污染等问题的重要手段[1-3]。从广义上，城市排水系统实时控制属广地域分布、多变量耦合、多目标控制的高维、动态、非凸、非线性的复杂大系统最优控制问题。集中式控制可以实现信息综合与统一决策，是当前最常用的方法结构[4-5]。然而，随着城市发展和对水环境要求的提高，城市排水系统的组成、功能和运行目标日趋复杂[6-8]，集中式控制在复杂城市排水系统的应用中存在易受网络信号中断、数据丢失、局部控制器故障及模拟耗时长等因素影响的局限性[9-10]。单点故障也可能导致整个控制系统的不可用。例如，受信号丢失或控制器故障影响，泵站未按预期执行排水任务时，雨(污)水在节点累积导致局部溢流[11]；恶意网络攻击可能使中央控制系统混乱，导致未经处理的污水直接排入受纳水体等[12]。

安全性和可靠性是实时控制系统的重要属性。针对上述问题，分布式控制理论方法被引入排水系统运行控制领域。区别于集中式控制，分布式控制强调信息感知的本地化、决策机制的自主化以及通信架构的扁平化。分布式控制通过在管网节点或子区域部署独立的传感器和控制器，实现对环境变量的本地化实时感知，其决策过程由各个控制单元基于本地信息和预设程序自主生成指令，并通过与邻近单元的有限信息交互实现动态协调。在通信架构中，分布式控制采用多节点对等或分层通信使得数据交互范围仅限于功能关联区域。虽然分布式控制使其子系统只能获取有限的局部信息进行决策，难以确保排水系统的整体效能最优，但在提高系统响应速度、鲁棒性、可扩展性和适应局部优化需求等方面具有显著优势[13-15]。具体而言，Garofalo 等[16] 建立了基于流言协议的城市排水系统分布式控制方法，指出所提方法在控制器故障、管道堵塞及节点故障情景下均具有一定的适用性；Zhang 等[17] 建立了基于多代理深度强化学习的分布式控制模型，结果表明所提方法相较于传统集中式控制能够有效降低网络故障情景下的实时控制效益损失。因此，分布式

收稿日期：2025-01-07；**网络出版日期：**2025-04-28
网络出版地址：https://link.cnki.net/urlid/32.1309.P.20250428.1537.004
基金项目：国家重点研发计划项目(2022YFC3203200)；中国长江三峡集团有限公司项目(NBZZ202300938)
作者简介：罗鑫燃(1997—)，男，四川资阳人，博士，主要从事城市排水系统调度方面研究。
E-mail：luo_xinran@ctg.com.cn
通信作者：王殿常，E-mail：wang_dianchang@ctg.com.cn

控制是提高城市排水系统实时运行安全性和可靠性的有效途径。然而，当前分布式控制的适用范围及关键实施步骤尚不明晰，制约了其在城市排水系统运行管理中的实践应用[18-19]。

面对城市排水系统复杂与充满不确定性的运行环境，深入阐述分布式控制概念及方法步骤，系统认识如何通过去中心化的运行模式提高城市排水系统韧性，有助于突破传统集中式控制的局限性，为构建具备自适应能力的韧性城市排水系统提供方法支撑。

1 排水系统分布式控制基本概念

分布式控制与集中式控制、分层控制、分散式控制、混合控制等概念密切相关，图 1 展示了不同控制结构的区别与联系[20]，图中 A_i、u_i 和 X_j 分别表示控制主体、控制策略和系统状态。不同控制结构的特点为：①集中式控制的所有决策由中央控制器制定和执行；②分布式控制将控制任务分配给多个控制主体，每个控制主体通过与邻近控制主体的信息交互优化并执行局部决策；③分散式控制同样将控制任务分配给多个控制主体，但每个控制主体独立完成局部决策优化与策略执行；④分层控制是一种将控制系统划分为多个层次的架构，上层的监控系统接收全局范围的信息，通过约束或下达特定控制目标实现全局决策和协调，下层分布式控制单元负责数据采集、传输及执行局部的控制任务；⑤混合控制结合了集中式控制和分布式控制的优点，在一些部分采取集中控制，而在另一些部分采用分布式或分散控制。例如，Ramirez-Jaime 等[21]将调蓄设施及其控制阀门组成的动态系统视为博弈者，其动态行为对应于调蓄设施的闸门控制。每个博弈者通过获取相邻区域调蓄设施的蓄水量信息来动态调整控制策略，既不涉及中央控制器又不涉及分层控制，属于单层分布式控制。相对应的，Cembellín 等[22]采用基于分层架构的分布式控制方法，上层基于模糊谈判方法优化并下达每个控制主体的目标水位，下层采用比例积分微分（Proportional-Integral-Derivative，PID）控制将水位调整至目标水位。

本研究所指分布式控制方法为具有分布式控制单元且控制单元间通过信息交互机制实现协调的控制方

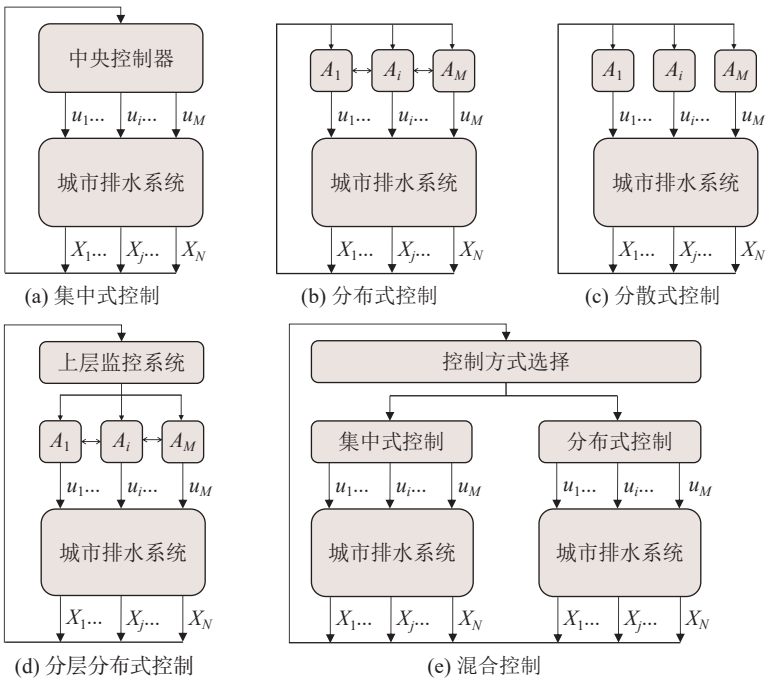


图 1 不同控制结构示意

Fig. 1 Illustration of various control structures

式，其既可为单层分布式控制，也可为分层分布式控制。按照控制主体的协调机制区分控制算法，将当下城市排水系统分布式控制研究分为 3 类：基于最优化求解、启发式协调及参数协同优化的分布式控制。最优化求解方法强调通过解析的方法求解使系统协调的最优控制量；启发式协调指通过基于经验的准则指导排水单元间的策略协同；参数协同优化指通过调整控制模型中的关键参数来实现主体行为协调。从时间线看，早期研究主要针对分布式控制问题构建基于最优控制理论的解析模型，通过数学规划方法求解系统级协调策略。随后，随着对城市排水系统优化控制问题复杂性认识的加深，研究焦点逐步转向更具实时性的协调机制设计，发展了模糊逻辑、一致性控制、博弈论等基于启发式协调的分布式控制方法，以及规则控制、多代理深度强化学习等基于参数协同优化的分布式控制方法。

2　排水系统分布式控制系统构建

表 1 给出了城市排水系统分布式控制关键步骤及相应方法总结。由表 1 可知，城市排水系统分布式控制的实现可描述总结为以下几个步骤：①确定研究区域，明确可调控单元，划分分布式控制子系统；②对分布式控制的最优化问题进行数学表达，包括选择决策变量、设置目标函数及确定约束条件；③根据问题的复杂程度和控制目标选择分布式控制主体层控制策略；④基于主体层控制策略，明确控制主体间的协调方式；⑤选择过程模型，确定分布式控制模型参数，验证所提出分布式控制方法的有效性；⑥设计分布式智能控制系统。本节总结了城市排水系统分布式控制系统构建的关键步骤及相应方法，对比分析了不同方法的优势及不足。

2.1　子系统划分

(1)划分目的。根据表 1 中子系统划分的统计，除基于参数协同优化的分布式控制外(包括规则控制和多代理深度强化学习)，其余控制方法均涉及子系统划分步骤。其主要区别在于，基于最优化求解和启发式协调的分布式控制方法主体间的协调多依赖于均匀填充策略。均匀填充是指使雨(污)水均匀分布于排水管道和调蓄设施中，以实现对排水系统所有调蓄空间的充分利用，达到城市内涝和溢流污染削减的目的。为此，需要按照调控单元位置划分子系统，计算每个子系统的空间利用程度。基于参数协同优化的分布式控制中，主体间的协调隐含于实时控制方法应用前的模型参数优化或训练过程之中。在实时控制过程中无需额外的协调机制，从而省略了子系统划分步骤。

划分控制子系统的目标一般是为了减小系统的控制复杂度、提高系统的实时响应效率以及优化控制效果。因此，需要根据划分目标和优化准则确定子系统划分原则。子系统划分时需要考虑控制区域的独立性、每个子系统的规模满足实时控制计算失效要求、子系统之间的划分有助于在出现故障时快速隔离等因素。

(2)划分方法。主要分为图论法和线性水库法。图论法是基于图论的排水子系统划分，是最常用的方法，主要步骤包括将排水系统抽象为图矩阵及确定子系统划分原则。排水系统中的每个排水节点(如污水处理厂、雨水井、排水泵站等)可以视为图中的顶点，连接这些节点的排水管道为图的边。排水流量、流向等物理特性可以通过边上的权值(如流量、管道容量、时间延迟等)来表示。以 Garofalo 等[16] 的研究为例，为满足子系统的独立性要求，作者将初始排水网络划分为若干度为 1 的子系统，通过制定每个子系统的协调控制策略实现对初始排水网络的整体控制。线性水库法(亦称线性水箱法)是划分控制子系统是另外一种可行方式，其将排水系统视为一系列具有一定蓄水能力和控制设施的水库(水箱)。每个水库对应一个控制子系统，其蓄水能力为子系统范围内所有排水管网、调蓄池等具有存储能力单元的蓄水能力总和。水库的入流与出流通过水量平衡公式计算，同时根据距离设置水流在不同水库间的传播时间，简化水动力过程计算。

例如，Alex 等[23]将初始排水网络简化为仅包含调蓄单元及其控制阀门的分布式控制系统，有效降低了分布式控制问题的复杂程度。

表 1 城市排水系统分布式控制关键步骤及相应方法

Table 1 Key steps and methods for distributed control of urban drainage system

控制主体协调机制	子系统划分	决策变量	目标函数	分层控制	主体层控制策略	线性/非线性过程模型	实际/假拟案例	参考文献
最优化求解	线性水库	子系统出流量	调蓄空间的利用率相同；管道流量与最大过流能力的比例相同	是	非线性比例控制	线性	假拟案例	文献[23]
	—	泵站出流量	溢流量最小；能耗最低	是	模型预测控制	非线性	实际案例	文献[24]
	线性水库	子系统出流量	溢流量最小；控制量变化最小	是	模型预测控制	线性	假拟案例+实际案例	文献[25]
	图论	子系统出流量	与邻近子系统水位差值最小；能耗最小	否	微分博弈	线性	假拟案例	文献[21]
	图论	阀门开度	与邻近子系统水位差值最小	是	PID控制	非线性	实际案例	文献[16]
启发式协调	线性水库	子系统出流量	调蓄空间的利用率相同	是	深度确定性策略梯度	线性	假拟案例	文献[26]
	图论	阀门开度	与邻近子系统水位差值最小	是	PID控制	非线性	实际案例	文献[27]
	图论	子系统出流量	水量、污染物均匀分布；最大化污水处理厂进水流量；	是	PID控制	线性	假拟案例	文献[22]
	图论	阀门开度	溢流量最小	否	复制动态	线性	假拟案例	文献[28]
	图论	子系统出流量	水量、污染物均匀分布；最大化污水处理厂进水流量；	是	PID控制	线性	假拟案例	文献[29]
参数协同优化	—	排水泵启停	—	否	规则控制	非线性	*	文献[30]
	—	阀门开度	子系统出流量接近预定义阈值	否	模型预测控制	非线性	实际案例	文献[31]
	—	排水泵启停	—	否	规则控制	非线性	实际案例	文献[32]
	—	阀门开度	溢流量最小；能耗最小	否	价值分解网络	非线性	假拟案例+实际案例	文献[17]

注：—表示不涉及相关步骤；*表示文献中未提及相关内容。

2.2 最优化控制要素

城市排水系统分布式控制最优化问题包含了 3 个关键要素，即决策变量、目标函数和约束条件。

(1)决策变量。在分布式控制中，决策变量是局部子系统的控制量。这些变量的调整不必考虑整个系统的全局信息，但会根据邻近子系统的状况和交互信息进行调整。根据表 1，城市排水系统分布式控制的决策变量多为控制节点的流量、阀门开度和排水泵启停状态。例如，Ramirez-Jaime 等[21]通过调整每个排水子系统的出流量，使当前子系统的水位与邻近子系统水位尽可能相近，从而实现对不同子系统调蓄空间的均匀利用；Zhao 等[32]则通过排水泵站的启停配合来实现对排水系统空间和排放能力的最大程度利用。分布式控制的决策变量类型与集中式控制基本一致，区别在于集中式控制中的决策变量是基于全局信息优化的。

(2)目标函数。除规则控制外，分布式控制中每个控制主体均设置独立的目标函数。具体包括：①局部的内涝或水质控制目标；②确保与邻近区域的协调，例如避免因局部过度排水而导致下游溢流；③在不影

响邻近区域控制效果的前提下，使当前控制设施能耗最小等。除了满足局部优化目标，分布式控制需要考虑控制主体间的协调机制，设置相应的目标函数，具体包括：①系统总体的内涝或水质控制目标；②所有控制设施的能耗最小；③雨水、污水或污染物在所有子系统中均匀分布；④最大化污水处理厂进水流量等。分布式控制与集中式控制的基本目标一致，但其通过分而治之的思想将总体的控制目标分解到若干个互相连结又互相制约的子系统，通过局部优化和全局协调相结合达到对系统的有效调控。

(3)约束条件。约束条件限制了决策变量的取值范围，确保解决方案在实际应用中的可行性。具体而言，约束条件包括：①容量约束，如管道容量约束、调蓄池容量约束等；②质量和动量平衡约束，即水流在管道的流动遵循水的质量和动量守恒定律；③能力约束，如泵站排水能力约束、污水处理厂最大进水能力约束等。

2.3　主体层控制策略

主体层指分布式控制系统的子单元。分布式控制强调系统中的各个子单元能独立地根据局部信息进行决策控制。由表 1 可知主体层控制策略主要包括规则控制、PID 控制、模型预测控制、博弈论和深度强化学习。表 2 进一步对比了几类主体层控制策略的优缺点及适用场景。

表 2　主体层控制策略的优缺点及适用场景

Table 2　Advantages and disadvantages of agent-level control strategies and their suitable scenarios

控制策略	核心原理	主要优势	主要缺点	适用场景
规则控制	基于预设逻辑规则	简单易实现；实时性强	灵活性差，无法应对复杂动态变化	简单、稳定的局部环境
PID控制	误差反馈调节	实时性强	参数误差影响大， 非线性/时变系统适应性差	线性、低时滞的局部调节
模型预测控制	滚动优化结合 动态模型预测	前瞻性优化；适应多约束、多变量系统； 策略鲁棒性强	依赖高精度过程模型，计算负担大	动态耦合强、需多步 优化的子系统
博弈论	多主体纳什均衡 或合作博弈策略	结构天然适配；策略协同性强	均衡求解复杂；通信要求高； 收敛性依赖假设	多主体竞争/协作场景
深度强化学习	数据驱动策略优化	无需过程模型；适应高维、非线性问题； 实时性强	训练数据量大，泛化性依赖训练环境； 可解释性差	复杂或未知环境

(1)规则控制。规则控制无需过程模拟与优化，而是基于系统状态监测和预设的规则集实现实时控制。这些规则是由专家经验、系统历史数据或仿真结果总结而来。规则控制适用于难以建立准确过程模型的系统(如复杂的非线性或过程未知系统)或对实时性要求高的系统[33]。控制规则可以根据实际需求灵活调整和添加，适应不同的排水场景需求。例如，Zhao 等[32]将泵站的启停与进水池水位建立联系，实现了基于规则的泵站分布式控制。规则控制将控制目标隐含于规则集中，能够适用于不同控制目标的排水系统。然而，规则设计的效果严重依赖于设计者的经验和知识，通常难以达到最优控制效果，且当系统复杂度增加时，规则管理和维护十分困难[34]。

(2)PID 控制。PID 控制是一种经典的反馈控制策略，通过调节控制变量使系统达到预定的目标值。在城市排水系统的分布式控制中常用于控制子系统的出流量或流量控制阀门开度。例如，Garofalo 等[16]和 Maiolo 等[27]基于流言协议优化每个排水子系统的目标水位，采用 PID 控制将各子系统的水位调节至目标值，实现对整个系统存储空间的均匀利用。PID 控制算法简单、计算量小，能够有效满足城市排水系统实时控制的高时效性要求。PID 控制的不足在于其性能依赖于参数的精确调节，参数选择不当可能导致系统不稳定或响应不佳[35]。

(3)模型预测控制。模型预测控制通过预测未来一段时间的系统输入，求解在线优化问题来获得最优控制策略。当前城市排水系统分布式控制研究中，模型预测控制通常用于调节子系统控制策略使水位达到目标值或减少溢流。区别于反馈控制，模型预测控制能够根据系统状态预测提前调整控制策略，具有前瞻性，且模型预测控制的性能通常优于反馈控制。同时，模型预测控制可以处理多输入多输出系统，能有效处理大规模、复杂的控制问题。模型预测控制的不足在于每次控制需要求解复杂的优化问题，存在不满足实时控制时效性需求的问题[36]。此外，模型预测控制需要准确的过程模拟模型，过程模拟的不确定性会影响实时控制效益[11,37]。

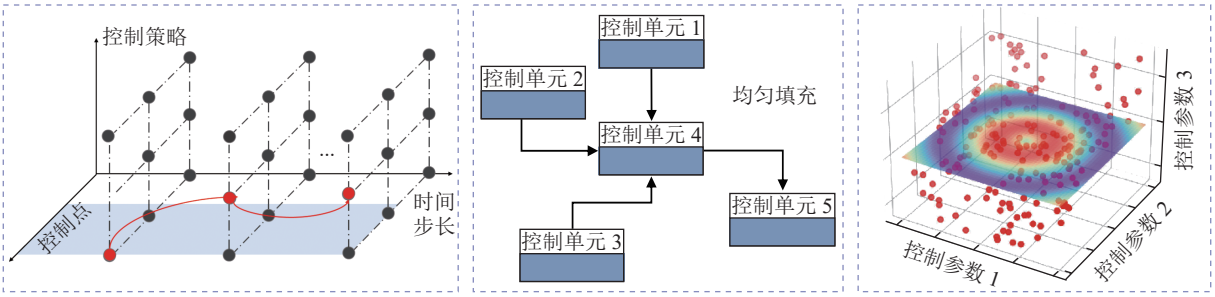
(4)博弈论。基于博弈论的主体层控制策略主要通过控制主体的持续博弈，力图最优化各自独立、冲突的目标，最终获得各控制主体随时间演变的均衡策略。当前应用于城市排水系统分布式控制的博弈论方法包括微分博弈和复制动态。Ramirez-Jaime 等[21]基于微分博弈使各子系统在其存储空间利用程度上达成一致以实现对排水系统空间的充分利用，其博弈的动态演化过程采用一组一阶微分方程描述。Obando 等[28]基于复制动态模拟了城市排水系统分布式控制单元的策略(各子系统的出流量)演化过程，即不同策略的控制主体如何根据各自的收益表现逐渐扩展或消亡。类似的，该研究中的均衡状态为各子系统通过策略演化既保障了局部的控制目标又实现各子系统存储空间的均衡利用。微分博弈和复制动态都涉及到系统随时间演化的过程，属于动态博弈的范畴。区别在于，复制动态关注群体策略的演化过程，通过模拟策略在群体中的自然选择和演变来描述长期策略选择的动态过程；微分博弈关注多个独立参与者在连续时间下对系统状态进行控制和优化，不涉及自然选择和演变过程[38]。虽然博弈论方法能够有效解决分布式系统中的多主体协调问题且适用于不同的控制目标，但其需要精确的收益函数和博弈规则设计。不当设计会导致次优解甚至系统崩溃，且当参与者数量增多时，博弈的计算复杂度迅速增加[39]。

(5)深度强化学习。深度强化学习通过智能体的交互与学习实现对复杂系统的自适应控制。多代理深度强化学习是应用于城市排水系统分布式控制的一种较为新颖的技术。Zhang 等[17]针对集中式强化学习方法应用到实际排水系统中可能会产生的传感器、响应器失效和各组成部分交互失效等问题，基于多代理强化学习开发了集成训练-分散控制的排水系统分布式控制方法，以应对监测信号获取的不确定性。在多代理深度强化学习中，智能体在环境中进行试错探索，基于环境的反馈(奖励信号)来优化策略，使智能体学习到能够最大化长期累计回报的行为策略。每个智能体的行为会影响到其他智能体和整个系统的状态。因此，智能体不仅需要学习如何优化自己的策略，还要考虑其他智能体的行为和对环境的影响。在实时控制中，多代理深度强化学习不依赖物理过程模型，因此能够有效满足复杂排水系统实时控制的时效性要求[40]。然而，训练多个智能体的深度神经网络需要大量的交互数据、计算资源和时间，训练样本的代表性不足可能导致训练得到的模型外延性较差[41]。

2.4 控制主体间协调机制

控制主体间的协调机制是实现分布式控制的关键，分布式控制多采用分层控制结构。在分层分布式控制中，上层的控制器接收全局范围的信息，通过约束或下达特定控制目标实现全局决策和协调；下层分布式控制单元负责数据采集、传输及执行局部的控制任务。对于单层的分布式控制，分布式控制单元完成信息采集与交互的同时，考虑与其他控制单元协调，优化并执行局部的控制策略。因此，单层结构分布式控制的主体层控制策略与协调方法为同一种方法。本节针对分层分布式控制，总结其上层控制器实现控制主体协调的方法，主要包括最优化求解、启发式协调及参数协同优化 3 种方式，不同方法的示意如图 2 所示。

(1)最优化求解。最优化求解通过建立数学模型并定义目标函数，对系统的状态变量进行求解，得到全局最优的控制量。例如，何中杰[24]针对分布式泵站排水系统上层协调优化控制问题，采用解析的方法求解



(a) 最优化求解　　(b) 启发式协调　　(c) 参数协同优化

图 2　控制主体间协调机制示意

Fig. 2　Illustration of the coordination mechanism among control agents.

了使系统综合性能指标最优的分布式泵站状态轨迹和排出水量的全局最优解。通过最优化求解能够找到满足整体最优条件的控制策略，实现系统的全局最优控制。对于线性系统，最优化求解通常可以采用解析方法(如线性规划、二次规划等)，效率较高、求解精度好[42]。在非线性系统中，通常需要引入非线性规划或近似方法(如混合整数规划、动态规划等)，或对非线性系统进行线性化处理[1]。非线性系统最优控制量的求解复杂度显著增加，主要表现为求解算法的稳定性和收敛速度下降，存在因优化耗时过长而不满足时效性需求或因不满足约束条件而无法求得可行解的问题[43]。

(2)启发式协调。启发式协调指通过基于经验的准则指导排水单元间的策略协同。所谓基于经验的准则主要指均匀填充策略，具体体现为调蓄空间的利用率相同、与邻近子系统水位差值最小及水量与污染物均匀分布等目标函数设置。因此，由表 1 对目标函数的统计可知基于均匀填充的启发式思想协调控制主体的控制策略是最常用的一种方式。在均匀填充的目标导向下，各控制主体达成一致(或均衡)的条件是各子系统的存储空间利用程度基本相同。在这一情形下，所有子系统的溢流在同一时间发生，且不会限制可用存储空间较多区域的水流进入。Einfalt 等[44]证明了均匀填充是实现排水系统溢流量最小这一目标的最优运行方式。尽管随着排水系统的复杂化和控制目标的多样化，基于均匀填充的控制策略可能无法保证调控的最优性，但其仍然能够有效指导控制单元的协调控制，达到城市内涝控制、合流制溢流污染削减、能耗优化等目标。

(3)参数协同优化。控制模型参数协同优化是一种通过调整控制模型中的关键参数来实现主体行为协调的方法。其核心思想是将系统的协调需求隐含在模型的参数中，通过调整这些参数(如排水系统中的闸门控制参数、泵站启停阈值等)来间接实现协调控制。可以利用历史数据和系统特征对这些参数进行优化，提高控制策略的可靠性。基于控制模型参数优化实现控制主体协调的方法主要包括基于规则控制和多代理深度强化学习的分布式控制。在基于规则控制的分布式控制中，通常采用智能优化算法优化控制规则的关键参数[30,32]。多代理深度强化学习则基于集中训练-分散控制的方式实现多控制主体协调，即训练时通过输入整个系统全局的监测信息，输出系统全局的控制策略，以考虑系统全局状态和控制动作[17]。此外，Kändler 等[31]针对街道临时蓄水单元的分布式控制问题，优化了进入排水管道的峰值流量参数，提高了分布式街道蓄水单元的协同性。参数优化依赖于大量的历史数据，从中提取普适性的规律。然而，在未知情景下，固定的参数设置可能难以充分发挥整体排水效能。

2.5　过程模型选择及控制参数优化

(1)过程模型选择。根据不同的主体层控制策略选择合适的过程模拟模型。其中，过程模型的线性与非线性是至关重要的因素[45]。城市排水过程的精细模拟计算极为耗时，常遇到不满足时效性要求的问题[34,46-47]。

针对这一问题，已有研究多采用线性简化过程模型进行过程模拟。在线性假设下，可避免对动量方程的求解，有效提高计算效率。线性简化模型的不足在于会引入额外的模型不确定性，基于线性简化模型的实时控制可能存在效益不显著甚至失效的问题[48]。

根据表 1 对过程模型的总结，基于规则的分布式控制可适用于复杂非线性系统；基于博弈论的分布式控制仅应用于采用线性过程模型的排水系统中；PID 控制、模型预测控制和深度强化学习则同时涉及在线性和非线性分布式系统中的应用。其中，基于规则的分布式控制本质上是模型无关的方法(即实时控制中无需过程模拟)，但基于历史数据对其参数进行优化时仍需建立过程模拟模型，所采用的过程模型既可以是线性的也可以是非线性的。基于博弈论的分布式控制虽然仅采用了线性过程模型，但其方法本身不要求过程模型必须为线性的。博弈论主要依赖于各参与方的策略选择和收益函数的设置，可以是线性或非线性模型，其应用于线性系统时，博弈论的求解和均衡分析相对简单[49]。类似地，PID 控制、模型预测控制和深度强化学习同时适用于线性和非线性系统，其过程模型的选择主要取决于案例复杂程度、控制算法求解效率及数据传输耗时等因素。

(2)控制模型参数优化。分布式控制模型的参数确定方法包括经验参数设置、试错法及参数自动率定。参数确定方法与控制方法本身密切相关。基于经验参数设置的方法主要为模糊逻辑控制。试错法及参数自动率定方法通常采用模拟-优化的范式：首先，建立城市排水过程模拟模型；其次，基于历史的降水、水位、流量、水质等状态要素监测数据，优化分布式控制模型参数。试错法主要适用于调整控制模型超参数，超参数是指控制模型应用过程中固定的参数，必须在应用前确定，如强化学习模型训练的学习率与网络层数、遗传算法的交叉和变异概率等。相较于控制模型本身参数，超参数的敏感性相对较低，因此可根据少数几次模拟结果手动调整。此外，Garofalo 等[16] 优化 PID 控制参数的 Ziegler–Nichols 方法也属于试错法，其无需过程模拟模型，通过调节系统响应曲线、观察系统响应行为来确定参数。针对分布式控制模型本身参数，通常采用自动率定方法得到，具体包括智能优化算法和基于梯度的算法等。例如，采用粒子群算法[30]、遗传算法[32] 优化规则控制参数，采用梯度下降方法训练深度强化学习网络参数[17]。

2.6 分布式智能控制系统设计

随着城市排水系统的组成、功能和运行目标日趋复杂，传统基于人工操作的控制方法已无法满足现代城市排水系统的控制需求。计算机技术可以有效提高系统控制的自动化水平，将基于计算机技术的智能控制系统应用到城市排水系统实时控制中是必然趋势。面向城市排水系统分布式智能控制的系统应包括实时数据采集与传输、数据分析与预处理、数据存储与管理、决策支持与智能控制、应急管理等关键模块。

当前城市排水系统智能控制系统主要为数据采集及监视控制(Supervisory Control And Data Acquisition，SCADA)系统[30]。SCADA 系统是一种以计算机为基础的自动监测与分布式控制系统，是工业自动化中重要的技术之一。针对城市排水系统分布式控制，目前 SCADA 系统可根据现场监控进行控制，实现简单的调度策略，但其对大数据的决策能力有限，通常需要耦合第三方决策支持程序来实现智能化控制。制定好新的调度策略时，通过修改排水控制设施的控制程序实现设备的自动化运行。

基于物联网的智能控制系统是一种依赖于分布式传感器网络和云计算平台的现代控制系统，通过采集和分析大规模、多源数据，实现对物理设备的智能决策和自动化管理，在智慧城市、工业自动化、交通管理等众多领域得到广泛应用[50-52]。物联网技术可以实现大规模、分布式的传感器数据采集，允许大量、异构的传感器接入，数据种类更丰富。同时，基于物联网的智能控制系统通过云计算平台集中管理和分析数据，可有效简化局部控制系统部署流程、降低成本，是区别于传统 SCADA 系统的显著优势[53]。

然而，尽管研究人员和运营者都认识到物联网技术在城市排水系统智能管理中的积极作用，但其仍局限

于概念验证及小范围试点应用，在大范围、分布式排水设施的智能管理中未能得到充分利用[18]。主要原因在于城市排水系统的管理部门之间缺乏合作、高昂的初始投入成本、缺乏标准规范及对安全和隐私问题的担忧等[19,43]。

3　思考及展望

分布式控制是提高城市排水系统运行效能与韧性的重要技术手段。当前城市排水系统分布式控制研究取得了系列创新成果，然而，由于城市排水系统运行环境错综复杂且充满不确定性，分布式控制从理论到实践仍面临诸多挑战。未来可针对以下 3 个方面存在的关键问题开展进一步研究。

3.1　实时监测及数据共享

城市排水系统中的数据采集往往受限于传感器的分布、监测精度和传输速率。不完整或延迟的数据会导致局部控制决策失误。此外，城市排水系统分布式控制涉及气象、水文、地表、地下等多维信息，数据在不同部门之间共享存在困难，造成信息孤岛，难以实现全局优化[54]。然而，当前研究对于如何构建适用于分布式控制的数据收集和信息共享机制研究较少。因此，需要研究提升监测精准度，优化城市排水系统监测方案，构建多维空间信息监测网络系统，实现降水、排水、洪涝、溢流污染等全过程、全要素、全方位的动态监测，为城市排水系统分布式控制提供完备的数据支撑。同时，集成气象雷达、物联网传感器、社交媒体舆情等多源异构数据，开发时空特征融合算法，提升数据质量；健全数据共享机制，打破信息壁垒，确保所有控制节点能实时获取所需监测数据。最后，引入数字孪生技术构建虚实映射的排水系统仿真平台实现排水场景动态推演。

3.2　控制模型优化

(1)提升控制实时性。分布式控制对信息传递和决策的实时性均具有高要求。一方面，数据传输延迟或网络可靠性不足会影响控制主体的信息交互过程，进而导致分布式控制的时效性难以保障。另一方面，精细化排水过程模型通常难以满足实时决策需求，过程模型的准确性与时效性间存在权衡。可能的解决方案包括：①结合边缘计算架构，在监测节点嵌入轻量化计算模型，实现数据本地处理与实时控制决策，降低通信延迟并提升系统响应敏捷性；②引入预测控制，基于气象水文要素的预报信息，提前进行控制策略优化，减轻实时响应的压力；③设计自适应优化机制，根据实时工况动态调整控制模型的复杂度，在准确性与响应速度间实现自主平衡，增强系统对复杂环境的适应能力。

(2)建立风险管理机制。虽然分布式控制因其分散的架构具有一定的风险抵御能力，但在面对极端天气或突发事件时仍存在挑战。排水系统在发挥调蓄功能的同时，不可避免地带来溢流及结构与功能故障风险的增加。构建专门的风险管理机制可以更好地发挥分布式控制的韧性优势，提高城市排水系统实时运行的安全性。①在灾害事件发生前，可结合大数据分析和风险预测模型，建立耦合灾害风险的控制策略，或对系统的薄弱环节进行提前预警和预防性维护。例如，通过人工智能算法和多源数据融合，开发设施故障风险的实时评估方法，建立管网动态脆弱性图谱，对高风险节点实施分级管理，并联动控制设备预置泄流路径与蓄滞空间调度方案，实现风险管控。②灾害事件发生后，通过实时监测和风险管理机制及时采取故障隔离策略，防止风险扩散，减少对整个系统的影响。例如，当某个排水泵站发生故障时，可通过上游控制设施将雨污水尽可能就地存储，以减少故障节点的溢流。同时通过应急响应预案，快速采取关键节点的修复措施等，确保系统在最短时间内恢复正常。

(3)探索混合控制模式。当前研究针对不同暴雨事件下的分布式控制效果进行评估，然而城市排水系统

在日常运行、暴雨应对和雨后恢复的不同阶段需求不同。因此可以研究建立集中式控制与分布式控制的混合控制模式，以兼顾系统的全局优化能力与局部快速响应能力，提高排水效率和风险抵御能力。例如，在全局优化需求较高的日常运行及雨后恢复阶段采用“集中式控制主导-分布式控制补充”模式；在快速响应需求较高的暴雨应对阶段采用“分布式控制主导-集中式控制补充”模式。在集中式控制主导模式中，通过中央控制系统制定控制策略，分布式单元负责执行，分布式单元仅在局部异常情况(如通信故障)时自行制定和执行控制策略。在分布式控制主导模式中，中央系统根据全局数据调整资源优先级为局部控制设置约束或权重条件，各区域根据局部监测数据快速响应。

3.3 应用研究

(1)强化系统调控能力。当前研究主要针对分布式控制算法的开发，分析单一类型分布式控制单元的协调控制。针对不同体制的排水系统，实时控制的控制目标存在差异，如污水系统以减少污染物排放为主要目标、雨水系统以内涝防控为主要目标、合流制系统兼顾污染控制与内涝防治。同时，城市排水系统的调控单元复杂多样，包括泵站、闸门、堰等。这些调控单元具有不同的结构特征和操作要求，且在暴雨等极端事件中表现出非线性、动态耦合等复杂行为。因此，一方面需针对不同排水体制与控制目标，构建控制主体的协调机制；另一方面需从系统协同的角度分析分布式控制单元如何协作，充分发挥系统效能合力。

(2)推动规模化应用验证。分布式控制系统的实施涉及跨部门合作、成本投入、系统集成等实际问题，在推广应用中可能面临技术和管理上的双重瓶颈。当前针对城市排水系统分布式控制的研究主要针对控制方法的开发，缺乏有力的实践应用案例支撑。尽管分布式控制在模拟环境中效果显著，但受限于实际环境的复杂性，实际部署效果可能达不到预期。因此，可选择代表性城市区域，综合考虑多部门协同、成本及安全等因素，结合云计算与物联网技术，分阶段进行分布式控制系统的试点，逐步验证和优化分布式控制系统的实际应用效果，推动分布式控制在城市排水系统运行管理中广泛应用，提高城市排水系统的运行韧性和智能化水平，增强城市水安全风险防控能力。

4 结 语

实时控制是提高城市排水系统运行效率的重要手段。然而，受网络信号中断、数据丢失、局部控制器故障及模拟耗时长等因素影响，传统集中式控制在安全性、可靠性及适应性等方面面临挑战。分布式控制凭借其去中心化的信息感知、通信与决策机制，成为提升城市排水系统运行韧性的重要技术手段。为此，本研究系统梳理了分布式控制在城市排水系统中的研究进展，总结了分布式控制系统构建的关键步骤与方法，重点探讨了主体层控制策略及其协调机制。针对当前研究中存在的不足和挑战，提出未来可从监测数据共享、控制模型优化及应用实践探索等方面进一步开展研究。本研究可为提升城市水安全风险防控能力、构建自适应的韧性城市排水系统提供方法参考。

参考文献：

[1] LUO X R，LIU P，CHENG L，et al. Optimization of in-pipe storage capacity use in urban drainage systems with improved DP considering the time lag of flow routing[J]. Water Research，2022，227：119350.

[2] PEI S W，HOANG L，FU G T，et al. Real-time control of urban drainage systems using neuro-evolution[J]. Journal of Environmental Management，2024，360：121133.

[3] 罗鑫燃，郑雅莲，刘攀，等. 耦合不确定性的城市排水系统实时控制研究进展 [J]. 水科学进展，2025，36(1)：109-121.(LUO X R，ZHENG Y L，LIU P，et al. Research progress on real-time control of urban drainage systems considering uncertainty[J]. Advances in Water Science，2025，36(1)：109-121.(in Chinese))

[4] 买伊伊，刘攀，罗鑫燃，等. 基于 SWMM 的城市闸泵群防洪排涝滚动优化控制研究 [J]. 中国农村水利水电，2023(4)：208-214，220.（MAI Y Y，LIU P，LUO X R，et al. Optimal rolling control of urban sluice pump group to decrease flood risk of a drainage system based on SWMM[J]. China Rural Water and Hydropower，2023(4)：208-214，220.（in Chinese））

[5] SADLER J M，GOODALL J L，BEHL M，et al. Leveraging open source software and parallel computing for model predictive control of urban drainage systems using EPA-SWMM5[J]. Environmental Modelling & Software，2019，120：104484.

[6] 韩冠宇，王殿常，王浩正，等. 源-网-厂-河排水系统多目标实时优化控制方法与实践 [J]. 中国给水排水，2023，39(24)：21-29.（HAN G Y，WANG D C，WANG H Z，et al. Method and practice of multi-objective and real-time optimal control in urban drainage system[J]. China Water & Wastewater，2023，39(24)：21-29.（in Chinese））

[7] 刘军，高徐军，焦永宝，等. 基于 SWMM 与 NSGA-Ⅲ的城市排水系统多目标优化 [J]. 中国农村水利水电，2022(9)：90-94.（LIU J，GAO X J，JIAO Y B，et al. Multi-objective optimization of the urban drainage system based on SWMM and NSGA-Ⅲ algorithm[J]. China Rural Water and Hydropower，2022(9)：90-94.（in Chinese））

[8] 宋晓猛，徐楠涛，张建云，等. 中国城市洪涝问题：现状、成因与挑战 [J]. 水科学进展，2024，35(3)：357-373.（SONG X M，XU N T，ZHANG J Y，et al. Urban flooding in China：current status，causes and challenges[J]. Advances in Water Science，2024，35(3)：357-373.（in Chinese））

[9] 马苗苗，崔婧，李钰梅，等. 风电介入下的多区域互联电力系统分布式经济模型预测负荷频率控制 [J]. 控制与决策，2024，39(5)：1557-1565.（MA M M，CUI J，LI Y M，et al. Distributed economic model predictive load frequency control for the multi-area interconnected power system with wind power integration[J]. Control and Decision，2024，39(5)：1557-1565.（in Chinese））

[10] HU Y G，LI S L，XIAO Y Y，et al. Optimal consensus control of dynamically interconnected multi-agent systems：a SDRE approach for efficient and stable operation[J]. Applied Mathematical Modelling，2025，138：115727.

[11] van der WERF J A，KAPELAN Z，LANGEVELD J. Real-time control of combined sewer systems：risks associated with uncertainties[J]. Journal of Hydrology，2023，617：128900.

[12] HASSANZADEH A，RASEKH A，GALELLI S，et al. A review of cybersecurity incidents in the water sector[J]. Journal of Environmental Engineering，2020，146(5)：03120003.

[13] VELARDE P，TIAN X，SADOWSKA A D，et al. Scenario-based hierarchical and distributed MPC for water resources management with dynamical uncertainty[J]. Water Resources Management，2019，33(2)：677-696.

[14] GARG K，ZHANG S Y，SO O，et al. Learning safe control for multi-robot systems：methods，verification，and open challenges[J]. Annual Reviews in Control，2024，57：100948.

[15] SARVI M，ZOHDI H Z. A comprehensive overview of DC-DC converters control methods and topologies in DC microgrids[J]. Energy Science & Engineering，2024，12(5)：2017-2036.

[16] GAROFALO G，GIORDANO A，PIRO P，et al. A distributed real-time approach for mitigating CSO and flooding in urban drainage systems[J]. Journal of Network and Computer Applications，2017，78：30-42.

[17] ZHANG Z Y，TIAN W C，LIAO Z L. Towards coordinated and robust real-time control：a decentralized approach for combined sewer overflow and urban flooding reduction based on multi-agent reinforcement learning[J]. Water Research，2023，229：119498.

[18] WEBBER J L，FLETCHER T，FARMANI R，et al. Moving to a future of smart stormwater management：a review and framework for terminology，research，and future perspectives[J]. Water Research，2022，218：118409.

[19] BLUMENSAAT F，LEITÃO J P，ORT C，et al. How urban storm- and wastewater management prepares for emerging opportunities and threats：digital transformation，ubiquitous sensing，new data sources，and beyond - a horizon scan[J]. Environmental Science & Technology，2019，53(15)：8488-8498.

[20] NEGENBORN R R，MAESTRE J M. Distributed model predictive control：an overview and roadmap of future research opportunities[J]. IEEE Control Systems Magazine，2014，34(4)：87-97.

[21] RAMIREZ-JAIME A，QUIJANO N，OCAMPO-MARTINEZ C. A differential game approach to urban drainage systems control[C]//2016 American Control Conference（ACC）. Boston，USA：IEEE，2016：3796-3801.

[22] CEMBELLÍN A，FRANCISCO M，VEGA P. Distributed model predictive control applied to a sewer system[J]. Processes，2020，8(12)：1595.

[23] ALEX J，SCHÜTZE M，OGUREK M，et al. Systematic design of distributed controllers for sewer networks[J]. IFAC Proceedings Volumes，2008，41(2)：556-561.

[24] 何中杰. 城市分布式泵站排水系统综合节能与协调优化控制研究 [D]. 杭州：浙江大学，2009.（HE Z J. Study on comprehensive energy saving and coordinated optimal control of urban distributed pumping station drainage system [D]. Hangzhou：Zhejiang University，2009.（in Chinese））

[25] 崔轶群. 迭代学习预测控制方法在城市排水系统中的应用研究 [D]. 上海：上海交通大学，2017.（CUI Y Q. Application of iterative learning predictive control method in urban drainage system[D]. Shanghai：Shanghai Jiao Tong University，2017.（in Chinese））

[26] OCHOA D，RIAÑO-BRICEÑO G，QUIJANO N，et al. Control of urban drainage systems：optimal flow control and deep learning in action[C]//2019 American Control Conference（ACC）. Philadelphia，PA，USA：IEEE，2019：4826-4831.

[27] MAIOLO M，PALERMO S A，BRUSCO A C，et al. On the use of a real-time control approach for urban stormwater management[J]. Water，2020，12(10)：2842.

[28] OBANDO G，QUIJANO N，OCAMPO-MARTINEZ C. Decentralized control for urban drainage systems using replicator dynamics[J]. IEEE Access，2022，10：56740-56762.

[29] CEMBELLÍN A，FRANCISCO M，VEGA P. Optimal operation of a benchmark simulation model for sewer networks using a qualitative distributed model predictive control algorithm[J]. Processes，2023，11(5)：1528.

[30] 施璇. 城市排水泵站水泵群的调度优化与智能控制系统的设计与实现 [D]. 合肥：安徽建筑大学，2021.（SHI X. Design and implementation of scheduling optimization and intelligent control system for water pump groups in urban drainage pumping stations[D]. Hefei：Anhui Jianzhu University，2021.（in Chinese））

[31] KÄNDLER N，ANNUS I，VASSILJEV A. Controlling peak runoff from plots by coupling street storage with distributed real time control[J]. Urban Water Journal，2022，19(1)：97-108.

[32] ZHAO Z C，ZHANG H J，YU Z W，et al. Abatement of sewer overflow pollution based on distributed optimal control approach[J]. ACS ES& T Water，2024，4(3)：859-868.

[33] GARCÍA L，BARREIRO-GOMEZ J，ESCOBAR E，et al. Modeling and real-time control of urban drainage systems：a review[J]. Advances in Water Resources，2015，85：120-132.

[34] van der WERF J A，KAPELAN Z，LANGEVELD J G. HAPPy to control：a heuristic and predictive policy to control large urban drainage systems[J]. Water Resources Research，2023，59(8)：e2022WR033854.

[35] CAMPISANO A，MODICA C. PID and PLC units for the real-time control of sewer systems[J]. Water Science and Technology，2002，45(7)：95-104.

[36] LUO X R，LIU P，XIA Q，et al. Machine learning-based surrogate model assisting stochastic model predictive control of urban drainage systems[J]. Journal of Environmental Management，2023，346：118974.

[37] SYTSMA A，CROMPTON O，PANOS C，et al. Quantifying the uncertainty created by non-transferable model calibrations across climate and land cover scenarios：a case study with SWMM[J]. Water Resources Research，2022，58(2)：e2021WR031603.

[38] AHMAD F，SHAH Z，AL-FAGIH L. Applications of evolutionary game theory in urban road transport network：a state of the art review[J]. Sustainable Cities and Society，2023，98：104791.

[39] FAN J T，LIU P，AN R H，et al. Trade-driven model of “Hydropower for Rice” cooperation in the Lancang-Mekong River basin[J]. Journal of Hydrology，2024，637：131417.

[40] MULLAPUDI A，LEWIS M J，GRUDEN C L，et al. Deep reinforcement learning for the real time control of stormwater systems[J]. Advances in Water Resources，2020，140：103600.

[41] TIAN W C，LIAO Z L，ZHANG Z Y，et al. Flooding and overflow mitigation using deep reinforcement learning based on koopman operator of urban drainage systems[J]. Water Resources Research，2022，58(7)：e2021WR030939.

[42] DONG X，HUANG S C，ZENG S Y. Design and evaluation of control strategies in urban drainage systems in Kunming City[J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering，2017，11(4)：13.

[43] LUND N S V，FALK A K V，BORUP M，et al. Model predictive control of urban drainage systems：a review and perspective towards smart real-time water management[J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology，2018，48(3)：279-339.

[44] EINFALT T，STÖLTING B. Real-time control for two communities-technical and administrational aspects[C]//Global Solutions for Urban Drainage. Portland，USA：American Society of Civil Engineers，2002：1-11.

[45] 杨萌祺，徐智伟，王一茗，等. 面向实时控制的排水系统深度 LSTM 神经网络模型 [J]. 中国给水排水，2023，39(1)：105-110.（YANG M Q，XU Z W，WANG Y M，et al. Deep LSTM neural network model for real-time control of urban drainage system[J].

China Water & Wastewater，2023，39(1)：105-110.(in Chinese))

[46] 李东来，侯精明，申若竹，等.基于地块概化和路网精细模拟理念的城市雨洪过程分区自适应模型[J].水科学进展，2023，34(2)：197-208.(LI D L，HOU J M，SHEN R Z，et al. Partition adaptive model of urban rainstorm and flood process based on the simulation concept of plots generalization and road networks fine[J]. Advances in Water Science，2023，34(2)：197-208.(in Chinese))

[47] 张红萍，郝晓丽，胡昌伟，等.城市暴雨洪涝多尺度分层嵌套模拟技术[J].水科学进展，2023，34(4)：510-519.(ZHANG H P，HAO X L，HU C W，et al. A hierarchically nested multi- scale modeling technique for urban pluvial floods[J]. Advances in Water Science，2023，34(4)：510-519.(in Chinese))

[48] BACHMANN-MACHNIK A，BRÜNING Y，EBRAHIM BAKHSHIPOUR A，et al. Evaluation of combined sewer system operation strategies based on highly resolved online data[J]. Water，2021，13(6)：751.

[49] YANG Y E，CAI X M，STIPANOVIĆ D M. A decentralized optimization algorithm for multiagent system-based watershed management[J]. Water Resources Research，2009，45(8)：W08430.

[50] DUI H Y，ZHU Y W，TAO J Y. Multi-phased resilience methodology of urban sewage treatment network based on the phase and node recovery importance inIoT[J]. Reliability Engineering & System Safety，2024，247：110130.

[51] ROOSIPUU P，ANNUS I，KUUSIK A，et al. Monitoring and control of smart urban drainage systems using NB-IoT cellular sensor networks[J]. Water Science and Technology，2023，88(2)：339-354.

[52] SWEETAPPLE C，WEBBER J，HASTINGS A，et al. Realising smarter stormwater management：a review of the barriers and a roadmap for real world application[J]. Water Research，2023，244：120505.

[53] ZHANG Y J，WANG Z F，HU J X，et al. Intelligent management of carbon emissions of urban domestic sewage based on the Internet of Things[J]. Environmental Research，2024，251：118594.

[54] LIN J Y，BRYAN B A，ZHOU X D，et al. Making China's water data accessible，usable and shareable[J]. Nature Water，2023，1(4)：328-335.

Research advances and prospects for distributed control of urban drainage systems*

LUO Xinran，PENG Shouhai，WANG Dianchang，YIN Wei，XIE Jiaqiang，CHEN Yilin

(*National Engineering Research Center of Eco-environment in the Yangtze River Economic Belt*，*China Three Gorges Corporation*，*Wuhan* 430014，*China*)

Abstract：With urban expansion and growing demands on water environments，urban drainage systems（UDSs）have become increasingly complex in terms of composition，function，and operational objectives. Traditional centralized control systems face challenges regarding safety and reliability，underscoring the importance of distributed control for enhancing the operational resilience of UDSs. However，the applicability and key implementation steps of distributed control remain unclear，limiting its practical application to UDSs. This paper presents a comprehensive review of research on distributed control in UDSs，summarizing key development steps and methodologies，with particular focus on agent-level control strategies and coordination mechanisms. The strengths and weaknesses of different approaches are discussed. In response to practical implementation challenges，recommendations are made regarding strengthening real-time monitoring and data sharing，improving control timeliness，establishing risk management mechanisms，exploring hybrid control models，and advancing large-scale applications. The findings of this study contribute to the improvement of the operational resilience and intelligence level of UDSs，and the reduction of water-related risks.

Key words：urban drainage systems；distributed control；urban flooding；overflow pollution；system resilience

* The study is financially supported by the National Key R&D Program of China（No. 2022YFC3203200）and China Three Gorges Corporation Project（No. NBZZ202300938）.

DOI：10.14042/j.cnki.32.1309.2025.02.012

基于时空聚类的上海内涝积水时空分布规律

周正正[1,2]，徐嘉言[1]，刘曙光[1,3]，万 晖[4]，孙 丽[4]，刘 炎[4]

（1. 同济大学土木工程学院，上海 200092；2. 中国气象局上海城市气候变化应对重点开放实验室，上海 200030；
3. 同济大学土木工程防灾减灾全国重点实验室，上海 200092；4. 上海市水旱灾害防御技术中心，上海 200050）

摘要：极端暴雨频发和快速城市化背景下，内涝积水是当前城市发展面临的重要挑战。研究基于 2013—2023 年上海市积水数据，采用 K-means 聚类和概率密度分析方法，探讨了内涝积水的季节性、空间分布及典型暴雨积水过程特征。结果表明：①内涝积水季节性显著，夏季高发，与台风暴雨同期性强；②道路积水是最主要的积水类型，空间异质性突出，中心城区为高频发生区，主要受限于排水系统的局限性和调蓄空间不足；③K-means 聚类识别的 3 类积水事件中，高风险区域集中在嘉定与市区的交界处，水深较大；④典型暴雨积水过程呈现“快积快消”特征，且持续时间小于等于 10 h，建议风险预警时间控制在 40 min 以内。研究成果可为提升城市内涝治理的精细化管理和应急响应能力提供关键支撑。

关键词：城市内涝；K-means 聚类；概率密度分析；时空分布；上海
中图分类号：TV8 **文献标志码：**A **文章编号：**1001-6791(2025)02-0307-13

气候变化和快速城市化背景下，极端暴雨事件增多趋强[1-2]，城市内涝积水问题变得尤为复杂和紧迫[3]。全球气候变化加剧了极端降水事件的发生频率和强度，给城市防洪系统带来了前所未有的压力[4]。同时，城市化导致地面硬化、水域面积缩减，显著加速了城市降雨-径流响应[5-6]，导致地表径流量和汇流速度大幅增加，然而城市排水系统的更新和扩容未能同步跟上水文响应的快速变化，排水能力不足的问题日益凸显，进一步加剧了内涝问题[3]。因此，深入掌握当前城市暴雨内涝积水时空分布规律已成为提升内涝防治与城市韧性的首要关键[7]。

当前，城市内涝积水分布规律的研究主要依赖于观测数据分析和数值模拟 2 种手段。基于观测数据的研究一般通过分析历史数据来研究城市内涝积水的时空分布及风险等级等。例如，上海、广州等城市内涝风险等级划分标准中，通常依据典型内涝事件的积水监测数据，结合积水水深、积水时间、积水面积等关键特征进行内涝风险等级划分，也有学者利用类似的手段，基于场次积水监测数据，采用百分位数法[8-9]、专家调查[10]等开展了城市内涝风险等级划分标准的研究；此外，李学峰等[11]在上海市中心城区开展了基于指标体系法的内涝风险评估，并识别出内涝高风险区域；张乾柱等[12]采用聚类分析方法开展了重庆市山洪灾害风险区划研究，验证了聚类分析技术在多维度数据处理和内涝风险区划中的有效性。这些研究基于观测数据分析了内涝的时空分布特征，但大多存在时间或空间尺度的局限性。在数值模拟方面，研究者通过构建水文水动力模型探讨了内涝积水的形成机理和风险分布[13]。例如，薛丰昌等[14]模拟了郑州市 27 场典型暴雨积水过程，评估了区域积水风险并绘制了区域内涝预报图；王建明[15]基于 SWMM 模型模拟了西安市暴雨排水过程，并提出了暴雨内涝灾害风险评估模型；Gigović等[16]结合 GIS 和多准则决策分析方法，对城市洪涝易发区进行风险评估。可见，数值模拟技术在内涝风险评估中展现出优势，但其适用性往

收稿日期：2024-12-16；**网络出版日期：**2025-04-08
网络出版地址：https://link.cnki.net/urlid/32.1309.P.20250408.1033.002
基金项目：国家自然科学基金项目(42371030；42271031)
作者简介：周正正(1988—)，女，浙江舟山人，副教授，主要从事城市水文方面研究。E-mail：19058@tongji.edu.cn
通信作者：刘曙光，E-mail：liusgliu@tongji.edu.cn

往依赖于特定情景假设且受制于高精度输入数据的可获取性，难以有效反映复杂城市环境下内涝的长期演化规律。

尽管现有研究在内涝积水的时空分布分析和风险评估方面取得了一定成果，但大多数研究仍局限于较短时间范围或有限场次的积水深度数据的分析，无法全面描述包括范围、时间、类型等高度化城市地区内涝关键特征的时空分布规律[17]，亟待采用长序列、多时空尺度的观测数据，结合聚类分析等数据挖掘方法，增强对内涝积水深度变化、季节性、积水点分布等问题的认识，掌握区域性内涝积水的时空分布规律[18-19]，从而为制定多要素、多场景的城市内涝积水风险等级划分标准提供科学依据，也为提升城市内涝治理的精细化管理和应急响应能力提供关键支撑。上海作为中国的经济和人口中心，其独特的地理位置使其极易受到台风、暴雨、天文大潮、洪水等多种灾害的叠加影响[20-21]，导致内涝积水风险持续加剧[22]。

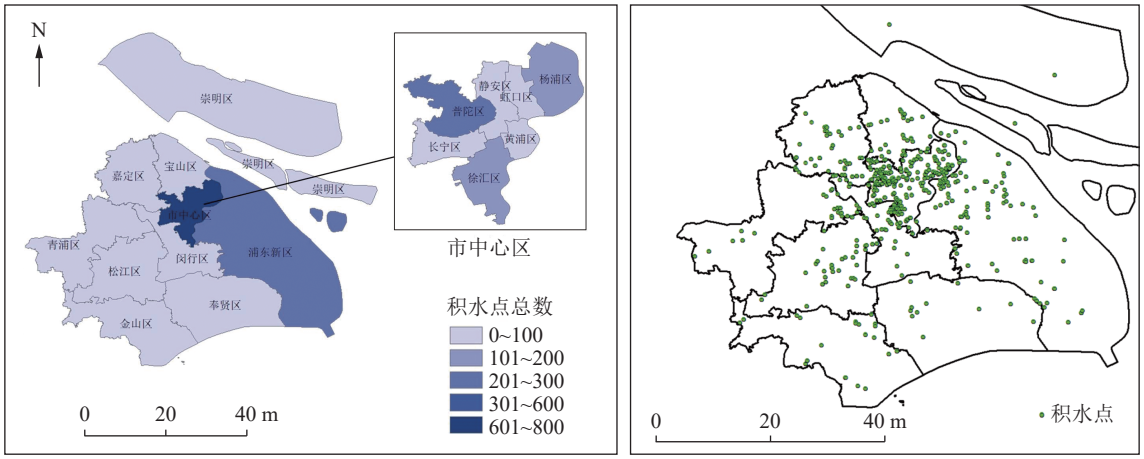
本文以上海市为研究对象，基于 2013—2023 年长时间序列的内涝积水观测数据，采用 K-means 聚类算法和概率密度分布分析法，从长期趋势与典型场次相结合的角度，探讨不同类型（道路、下立交和小区等）内涝积水的关键特征，分析上海市内涝积水的季节性变化、时效性特征和空间聚集性。旨在揭示高密度城市环境下不同类型内涝积水的时空分布规律，为优化内涝风险预警机制、提升城市应急响应和精准防御能力提供科学依据。

1 研究区域及数据资料

上海市位于亚热带南缘和东亚季风区，地处长江流域和太湖流域最下游，滨江临海，地势低平，属于典型的平原感潮河网地区。全市年平均气温为 16.9 ℃，年均降水量约 1 244.0 mm，其中超过 53% 的降水集中在 6—9 月的汛期。受东亚季风和西太平洋副热带高压等影响，上海夏季降水多呈现突发性和高强度特征[20-21]。尤其是近年来，极端暴雨事件在上海的发生频率和强度不断上升[23]，同时，城市建设用地面积显著增长，绿地和水面减少[22]，上海水患呈现出复杂、多变、突发的态势[24]，其影响在城市中心区和低洼地带尤为显著[25-26]。例如，2022 年“梅花”台风、2021 年“烟花”台风期间[27]上海均面临多处路段严重积水问题，给城市防洪、排水等基础设施运行与应急管理提出了更高要求[28]。当前上海全市 608 处下立交与密集的主次干道网络构成内涝敏感空间载体，其中市中心区域道路网最为密集，但中心城区河湖水面率仅 5.72%，显著低于郊区 10% ~ 15% 的水平。

本文所采用的积水数据是由上海市水务局提供的 2013—2023 年期间按暴雨日收集的 2 228 条积水条记录，涉及 701 个积水点（图 1(b)），积水数据信息包含积水点类型、积水点位置（经纬度）、积水水深和积水日期等。数据的质量控制确保了其准确性和代表性，包括统一数据格式、去除重复记录、剔除异常值及处理缺失数据等。积水点类型分为 3 类：道路、下立交和居民区（在本研究中，下立交积水和道路积水分别为单独的类型），其中，道路积水次数最多，为 1 317 次，占比 59%；下立交积水次之，为 852 次；居民区积水最少，为 59 次。

从积水点位置上看（图 1(b)），市区积水点 315 个，其中普陀区积水点最多，共 116 个；郊区积水点 329 个，其中浦东新区积水点最多，共 128 个（图 1）。从积水次数上看，上海市中心区域（包含静安区、虹口区、杨浦区、普陀区、黄浦区、长宁区、徐汇区）积水点数总上报次数接近 800 次，远多于其他行政区，其中普陀区的积水点位数量明显多于市中心其他区域；市中心以外，各个行政区中浦东新区积水次数最多（521 次），其次为嘉定区（268 次），崇明区最少（14 次）。同时，为分析内涝积水的动态演化过程，本研究选取了 2013—2023 年间的 57 场典型暴雨积水事件，并利用全市 200 个自动积水监测点提取分钟级水位数据。



(a) 积水频次　　(b) 积水点位

图 1　2013—2023 年上海市积水频次和积水点位分布

Fig. 1　Distribution of waterlogging frequency and waterlogging points across Shanghai from 2013 to 2023

2　研究方法

2.1　内涝积水特征指标

为定量化描述内涝积水过程的关键特征，包括积水的持续性、积水深度的动态变化及积水过程的快速性，构建了以下积水特征指标。

(1)积水持续时间(T_{total})，定义为从积水开始到完全退去的时长：

$$T_{\text{total}} = T_{\text{st}} - T_{\text{end}} \tag{1}$$

式中：T_{st}和T_{end}分别为积水开始和完全退去的时间点；定义$D(t)$为 t 时刻的积水深度，满足$D(T_{\text{st}}) = 0$且$D(T_{\text{end}}) = 0$。

(2)积水上升时间(T_{rise})，用于衡量积水过程的上升速度，定义为积水深度从 0 达到峰值的时长：

$$T_{\text{rise}} = T_{\max} - T_{\text{st}} \tag{2}$$

式中：$T_{\max}$为积水深度达到峰值的时间，满足$D(T_{\max}) = \max(D(t)), t \in [T_{\text{st}}, T_{\text{end}}]$。

(3)积水影响持续时间，用于衡量对日常交通和居民生活产生影响的一定深度积水的持续时间。参考国内现有城市内涝等级划分标准和《上海市防汛工作手册》[29]，本研究定义了 2 种影响持续时间：积水深度持续在全过程水深 25% 分位数以上的时间($T_{25\%}$)和积水深度持续在 10 cm 以上的时间($T_{10\text{cm}}$)。

$T_{25\%}$用于衡量积水深度维持在较深程度的持续时间，反映水深超过此分位数的持续时间对防汛的影响较为显著：

$$T_{25\%} = \int_{T_{\text{st}}}^{T_{\text{end}}} I_{D(t)\geqslant D_{25\%}} \mathrm{d}t \tag{3}$$

式中：$D_{25\%}$为积水全过程中积水深度的 25% 分位数；$I_{D(t)\geqslant D_{25\%}}$为指示函数，当$D(t) \geqslant D_{25\%}$时取值为 1，否则取值为 0。

$T_{10\text{cm}}$侧重考虑居民区积水的类型(《上海市防汛工作手册》中定义街坊积水阈值为 10 cm)：

$$T_{10\text{cm}} = \int_{T_{\text{st}}}^{T_{\text{end}}} I_{D(t)\geqslant 10} \mathrm{d}t \tag{4}$$

式中：$I_{D(t)\geqslant 10}$为指示函数，当$D(t) \geqslant 10$ cm时取值为 1，否则取值为 0。

(4)积水过程的峰值系数(R_{peak})，用于衡量积水过程的快速性，定义为积水深度达到最大值所需时间与积水持续时间的比值。该值越小，表示积水在短时间内迅速达到峰值，积水速率快；反之，值越大，表明

积水上升过程较为缓慢。

$$R_{\text{peak}} = T_{\text{rise}} / T_{\text{total}} \tag{5}$$

2.2 概率密度分布分析

概率密度估计(Kernel Density Estimation，KDE)是一种非参数统计方法，可用于分析空间数据的聚集特征及其分布趋势，适用于本研究中非均匀分布的内涝积水数据。KDE 通过对每个数据点赋予一个核函数，将其空间分布映射为一个平滑的概率密度函数，从而能够描述数据在空间上的连续分布。设定第 i 个积水点的坐标为 (x_i, y_i)，在本研究中由积水点的经纬度坐标代入，$f(x,y)$是其在位置(x,y)处的空间分布密度函数：

$$f(x,y) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} K\left(\frac{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}{h^2}\right) \tag{6}$$

式中：K 为核函数，本研究选用二维高斯核函数(2D Gaussian Kernel)；h 为带宽，决定了核密度估计的平滑程度；n 为积水点总数。

带宽对估计结果影响显著，如果 h 过小或过大，会造成曲线过拟合或欠拟合。本文采用交叉验证(Cross-Validation，CV)方法优化带宽，选取误差最小的带宽作为最优值，以使估计密度函数 $f(x,y)$准确地逼近真实分布。

2.3 K-means 聚类分析

K-means 聚类是一种基于迭代优化的非监督学习算法，适用于大规模数据的分类。本研究采用 K-means 聚类对积水事件的空间分布(距离市中心的距离)、日期特征和积水深度等多维特征进行分组，以识别不同类型积水的时空分布特征。

K-means 算法通过将积水数据点分为 k 个簇(Cluster)，使得每个簇内的样本之间的相似度最大，而不同簇之间的相似度最小。具体步骤如下：

(1)初始化：随机选择 k 个簇中心。

(2)分配：将每个数据点分配到离其最近的簇中心。

(3)更新：重新计算每个簇的中心，即该簇内所有点的均值。

(4)迭代：重复步骤(2)和(3)，直到簇中心不再发生变化或达到最大迭代次数。本研究通过设置最大迭代系数，防止收敛速度过慢。

K-means 算法的目标是最小化簇内样本点的平方误差总和(Within-Cluster Sum of Squares，S_{WCS})，即

$$S_{\text{WCS}} = \sum_{i=1}^{k}\sum_{x_j \in C_i} \left\| x_j - \mu_i \right\|^2 \tag{7}$$

式中：C_i为第i个簇；μ_i为簇C_i的中心；x_j为簇C_i中的数据点。通过迭代优化，最终确定最佳的簇分配。

聚类效果受簇数(k)影响较大，选择合理的 k 值至关重要。本研究采用轮廓系数(Silhouette Score)和肘部法(Elbow Method)[30-31]来选择最佳 k 值。轮廓系数衡量簇间距离和簇内紧密度，数值越高表示聚类效果越好；肘部法的目标是找到使得误差平方和(Sum of Squares due to Error，SSE)明显下降的拐点，即“肘部”位置来确定最优 k。

3 结果与分析

3.1 内涝积水时空分布分析

3.1.1 内涝积水发生频次分析

根据 2013—2023 年上海市内涝积水频次的年际变化(图 2)，可见上海市内涝积水频次的年际变化趋势

不显著。尽管总体积水次数略有下降，但不同类型的积水事件呈现出不同的变化趋势。道路积水仍然是最主要的积水类型，频次虽有波动但呈下降趋势；相比之下，下立交积水和居民区积水事件则呈略微增加的趋势，这一变化表明，未来应关注下立交和居民区的排水能力和内涝风险管理。

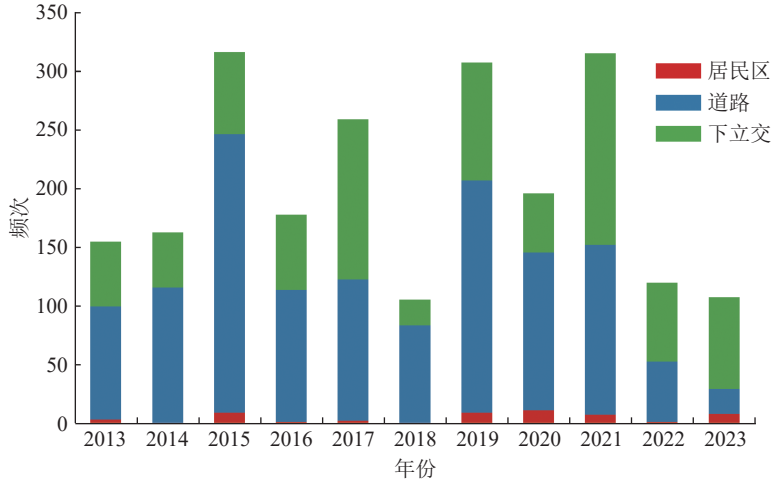
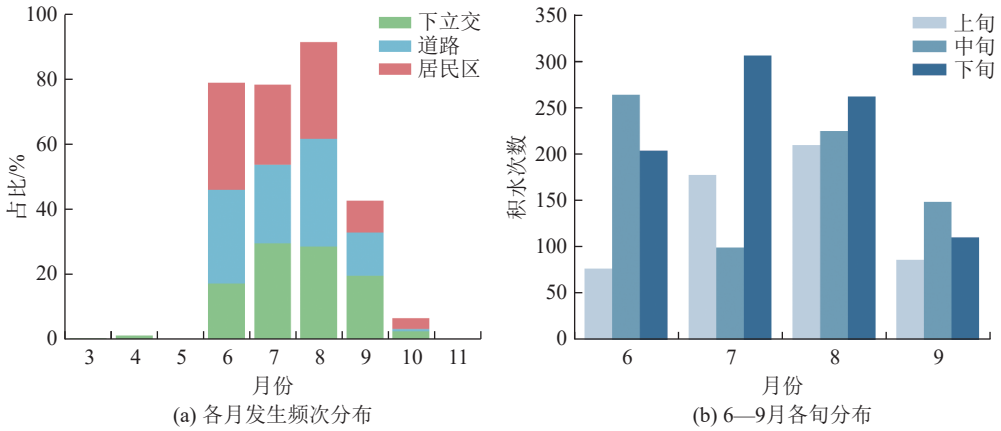


图 2　2013—2023 年上海市内涝积水频次的年际变化

Fig. 2　Inter-annual variation of waterlogging frequency in Shanghai from 2013 to 2023

从年内分布来看(图 3(a))，内涝积水表现出显著的季节性特征。高频发生的月份为 6—8 月，其中 8 月的频次最高，而春季和冬季积水发生频次相对较低，11 月至次年 2 月几乎为零。进一步分析不同类型的积水发现，道路积水在 8 月的发生频次最高，6 月次之；下立交积水在 7 月最为频繁，8 月次之，3 月、4 月和 10 月偶有发生；居民区积水在 8 月最为集中，6 月和 7 月次之，10 月偶发。



(a) 各月发生频次分布　　(b) 6—9月各旬分布

图 3　上海市内涝积水事件发生的年内分布情况

Fig. 3　Intra-annual distribution of waterlogging events in Shanghai

汛期(6—9 月)内涝事件的旬际分布(图 3(b))显示，6 月和 9 月的积水事件通常在当月中旬高发，下旬次之，上旬积水频次较低；而 7 月和 8 月的积水事件则普遍集中在下旬。从各旬频次的比较来看，7 月下旬的积水事件频次最高，且显著高于其他旬，6 月中旬和 8 月下旬次之。可见，7 月下旬和 8 月下旬是内涝积水的高发期，这与上海暴雨的季节性分布密切相关：6 月积水多半是梅雨期间暴雨引发，而 7 月和 8 月的高频内涝积水与台风暴雨或强对流暴雨过程高度相关。由此可见，分析防汛重点时期的气候特征和天气影响对

提升内涝防控能力至关重要。未来研究将进一步探讨降水特征与内涝之间的关系，本文在此不作详细讨论。

总体而言，尽管 2013—2023 年间上海市内涝积水的年际变化较小，但积水发生仍表现出强烈的季节性分布特征，其中 7 月下旬和 8 月下旬最为显著。此外，2015 年 6 月 17 日的极端降水事件导致单日上报积水次数超过 100 次，为研究期内积水上报频次最多的一次。

3.1.2 内涝积水深度分析

积水深度的分析结果(图 4)表明，大多数积水事件的水深集中在 16 ~ 80 cm 之间(10% ~ 90% 分位数区间)，平均水深为 37.3 cm，瞬时最大水深可达 165.0 cm，出现在下立交积水事件中。不同积水类型在频率和分布范围上存在明显差异(图 5)。道路积水的发生频次最多，水深分布较广，均值略高而中位数略低，与居民区中位数一致，表明道路积水在某些区域发生频率较高，且其影响范围较广；与道路积水相比，下立交积水的分布范围相对较窄，且分布形态更为集中，但均值显著高于中位数，接近 75% 分位数，说明水深波动比道路小，整体水深较大；居民区积水则更窄且更集中，中位数和均值都较低，分布较为平稳，说明该类积水空间差异性较低。

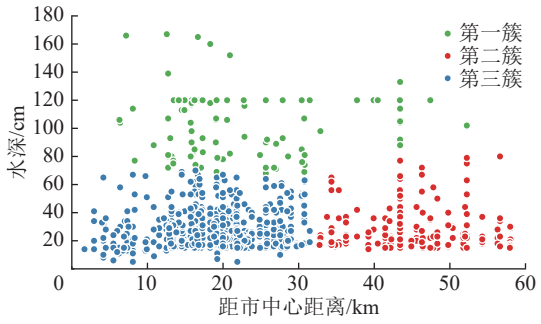


图 4 2013—2023 年上海市内涝积水深度散点图

Fig. 4 Scatter plot of waterlogging depth in Shanghai from 2013 to 2023

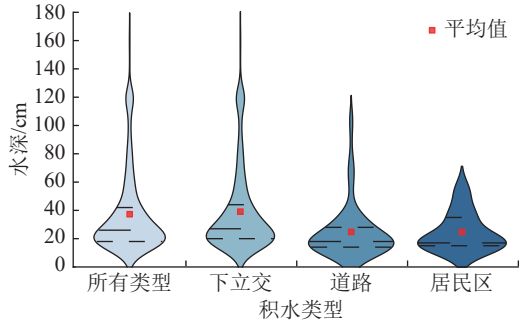


图 5 上海市不同类型内涝积水深度小提琴图

Fig. 5 Violin plots of waterlogging depth for different types in Shanghai

3.1.3 积水点位置分析

基于 KDE 对积水点的空间分布特征进行分析(图 6)，上海市内涝积水概率的空间分布呈现出由市中心向周边递减的趋势，积水事件在市中心区域(外环内)尤为高发，尤其在普陀区及其附近，积水概率最高，表明市中心区域的内涝问题更为集中。不同类型的积水事件在空间分布上的特征也存在差异(表 1)：道路积水的空间聚集性更强，市中心区域发生概率显著高于其他区域；下立交积水集中发生在郊区，如嘉定区南部、闵行区及浦东新区等；居民区积水事件尽管总体概率较低，但也呈现出市中心向周边逐渐递减的分布趋势，反映了局部居民区在内涝问题中的潜在脆弱性。这一现象与以下几个因素密切相关：①市中心排水系统的局限性，上海市中心城区以强排为主，其他地区以自排为主[27]。根据《上海市城镇雨水排水规划(2020—2035 年)》要求，中心城区排水标准需从 1 年一遇提高到 5 年一遇，表明市中心现有排水系统面临较大压力，亟待排水提标。②中心城区调蓄空间不足，上海的城镇排涝设施主要由“河湖水网+泵闸”组成，但河道分布不均，中心城区河湖水面率仅 5.72%，河道密度低且水系不完善，调蓄空间有限；而郊区河湖水面率基本维持在 10% ~ 15%，排水能力较强。③人口密度与基础设施压力，根据《2023 年上海统计年鉴》显示，上海市中心人口密度远超郊区，市中心各行政区的人口密度均在 1.7 万人/km^2 以上，远超郊区的 0.9 万人/km^2。人口与基础设施的高度集聚进一步增加了市中心排水设施的承载压力。④地理因素影响，上海地势低平，受潮汐影响显著，当遭受台风、暴雨、天文大潮、洪水等多碰头情景下，市中心、黄浦江沿岸面临的排水压力更大。综上所述，上海市中心的内涝问题源于多重因素的叠加，因此，提升排水系统标准、增

加调蓄空间、优化城市基础设施建设是解决内涝问题的关键措施[24, 29]。

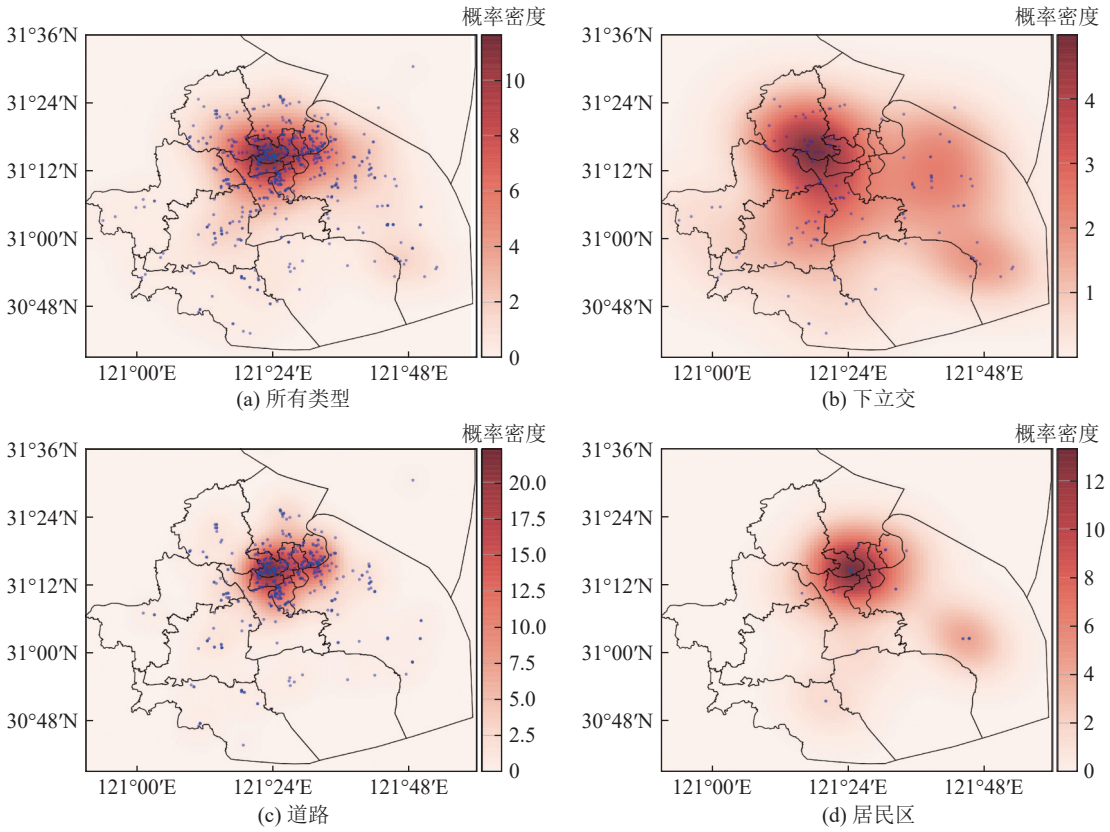


图 6　上海市积水概率空间分布

Fig. 6　Spatial distribution of waterlogging probability in Shanghai

表 1　上海市不同类型积水事件的时空分布特征

Table 1　Spatiotemporal characteristics of different types of waterlogging events in Shanghai

积水类型	积水频次	年内分布特征	空间分布特征	平均水深/cm
道路	1 317(59%)	8月发生频次最高，6月次之	空间聚集性强，市中心区域发生概率最高	24.8
下立交	852(38%)	7月发生频次最高，8月次之，3—4月和10月偶发	郊区，如嘉定区南部、闵行区及浦东新区等	39.1
居民区	59(3%)	8月发生频次最高，6月和7月持平，10月偶发	分布较分散	22.5

3.2　K-means 聚类分析

为了进一步分析上海市内涝积水的空间特征，选取了积水点到市中心(人民广场)的距离、积水深度和发生日期(年月日)作为分类特征，采用 K-means 聚类方法对积水事件进行分类。轮廓系数和肘部法的评估结果表明(表 2)，当聚类数 k 为 2 ~ 4 时，SSE 显著下降，随后趋于平缓，说明增加更多聚类数量对误差的降低效果逐渐减弱。同时，轮廓系数在 k=2 和 k=4 时表现最佳，k=3 时略差。综合考虑聚类效果和实际意义，最终选择 k=3 作为最优聚类数。

采用 SHAP(Shapley Additive Explanations)量化分析 3 个特征对聚类结果的影响(图 7)，SHAP 值的大小表示该特征对分类结果的贡献程度。结果显示，距市中心的距离对聚类结果的影响最大，是影响积水类型的最主要因素，表明市中心区域是积水事件的高发区；其次，积水深度的 SHAP 贡献值较大，且分布较为分散，表明积水深度较大的点在分类中具有较高的影响权重；相比之下，发生日期(季节性)的 SHAP 贡献值分

布居中且接近零，表明季节性因素对聚类结果的影响较弱。因此，积水点位的空间位置(距离市中心的远近)是影响聚类的主要因素，积水深度影响次之，而季节性的影响较为有限。

表 2 K-means 算法的聚类数分析

Table 2 Analysis of the number of clusters using the K-means algorithm

聚类数	2	3	4	5	6	7	8	9
SSE	2 099.9	1 472.8	995.8	885.4	791.7	702.8	640.4	585.8
轮廓系数	0.387	0.383	0.386	0.369	0.374	0.330	0.336	0.317

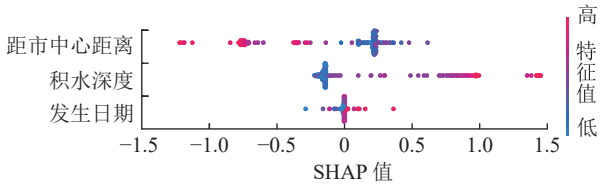


图 7 SHAP 总结图

Fig. 7 SHAP summary diagram

综合聚类分析结果和 SHAP 结果(图 8 和表 3)，上海市内涝积水事件可划分为以下 3 类：第 1 类积水事件集中在上海西南部，距市区较远，平均水深中等(28.7 cm)，但积水点数量相对较少；第 2 类积水主要集中于市中心区域，积水点数量最多，但平均水深较小(平均 28.0 cm，最大 70 cm)；第 3 类积水则主要出现在市区与郊区交界处，尽管积水事件数量较少，但平均水深(107.5 cm)和最大水深(167 cm)均远高于前 2 类，如果以积水平均水深和最大水深作为风险衡量标准，则第 3 类积水属于典型的高风险积水事件。进一步分析发现，高风险区域呈现出 3 个集中区，分别为嘉定区南部与普陀区交界处、松江区东部靠近闵行区以及浦东新区与奉贤区交界处。

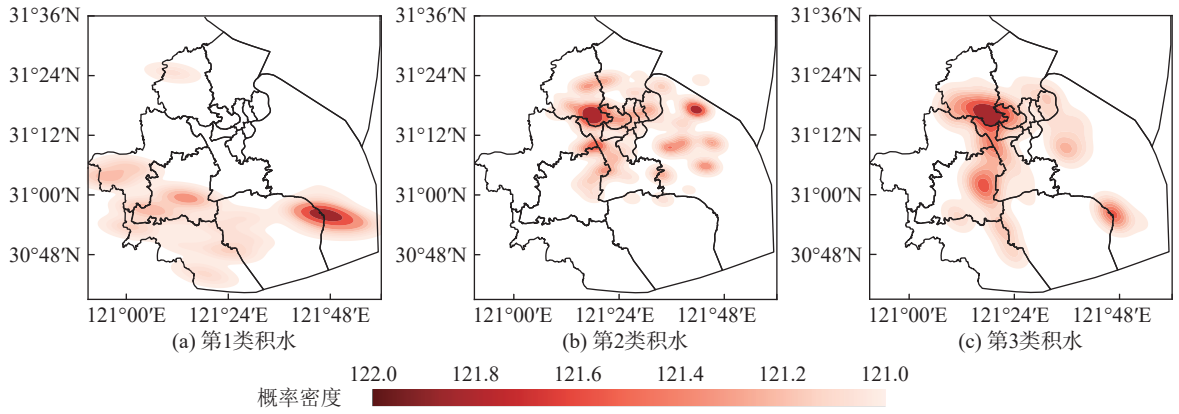


图 8 基于 K-means 的内涝积水聚类空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of waterlogging clusters based on K-means

表 3 基于 K-means 的内涝积水聚类分析结果

Table 3 Results of K-means-based clustering analysis of waterlogging events

分类	频次	距市中心的平均距离/km	距市中心的最大距离/km	平均积水深度/cm	最大积水深度/cm
1	191	45.5	58.0	28.7	80.0
2	624	18.5	32.8	28.0	70.0
3	120	23.9	52.2	107.5	167.0

3.3　典型暴雨内涝积水过程分析

为进一步探讨上海暴雨内涝积水过程的时空变化特征，选取了 2013—2023 年间 57 场典型暴雨积水事件（723 次积水过程）进行分析，重点分析积水持续时间、涨水速度以及积水深度的动态变化过程等，以揭示不同类型内涝事件的演化规律。

从内涝积水过程的统计指标来看（图 9），积水持续时间的中位数为 1.58 h，90% 分位数为 10 h，表明 90% 的积水事件可在 10 h 内（半天内）完全排涝，显示出大多数内涝事件具有较短的持续时间。T_{rise} 中位数为 0.68 h，且 75% 事件在 3 h 以内达到最大深度，表明暴雨引发的积水过程通常在短时间内迅速发展，因此，为确保及时应对积水风险，建议积水风险预警时间宜控制在 40 min 以内。此外，积水深度维持较高水平的持续时间也具有显著规律，积水深度持续在 25% 分位数以上的时间和持续在 10 cm 以上的时间均在 1 ~ 6 h 之间，中位数约为 2 h，说明多数积水事件在发生后通常会维持 2 h 以上的较深积水状态。从峰值系数上看，75% 事件的峰值系数在 0.51 以内，说明大部分积水事件呈现“快积”的特征。

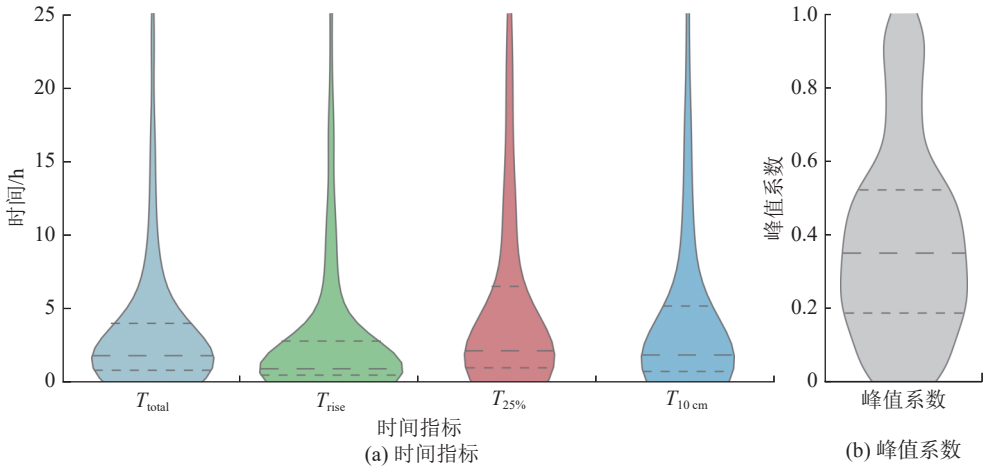


图 9　典型内涝积水过程时间特征的小提琴图

Fig. 9　Violin plots of temporal characteristics for typical waterlogging processes

基于最大水深、总持续时间、涨水时间、显著积水持续时间和峰值系数等特征，采用 K-means 算法对积水过程进行时空聚类分析（过程略）。结果表明，上海市的暴雨积水过程可划分为 3 种典型模式：第 1 类，占比最多，积水水深相对较小且持续时间短、涨水速度快（如图 10（b）中的蓝色实线，积水时间为 1 h，积水深度不超过 10 cm）；第 2 类，积水点数量最少，水深略高于第 1 类，持续时间长且涨水速度较慢（如图 10（b）中

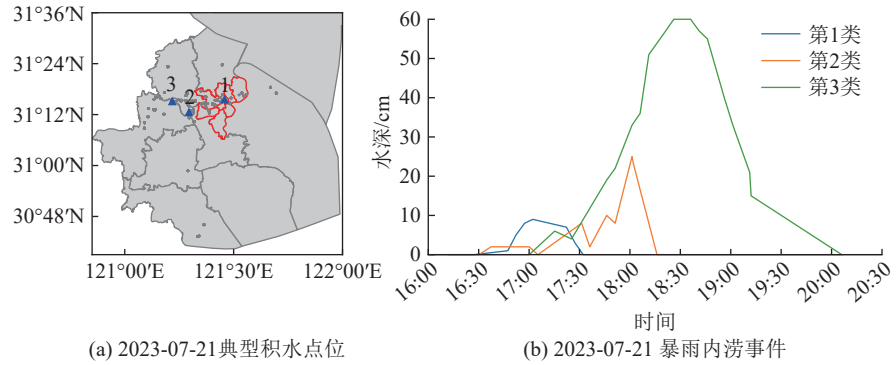


图 10　“2023-07-21”积水事件中典型积水点位置及其水深变化过程

Fig. 10　Locations of typical waterlogging points and their water depth variation processes during the "2023-07-21" event

的黄色实线，积水时间约为 2.25 h，最大水深为 25 cm)；第 3 类，水深最大且涨水速度快，但持续时间略高于第 1 类(如图 10(b)中的绿色实线，积水时间约为 3 h，最大水深为 60 cm)，3 种典型模式见图 11。

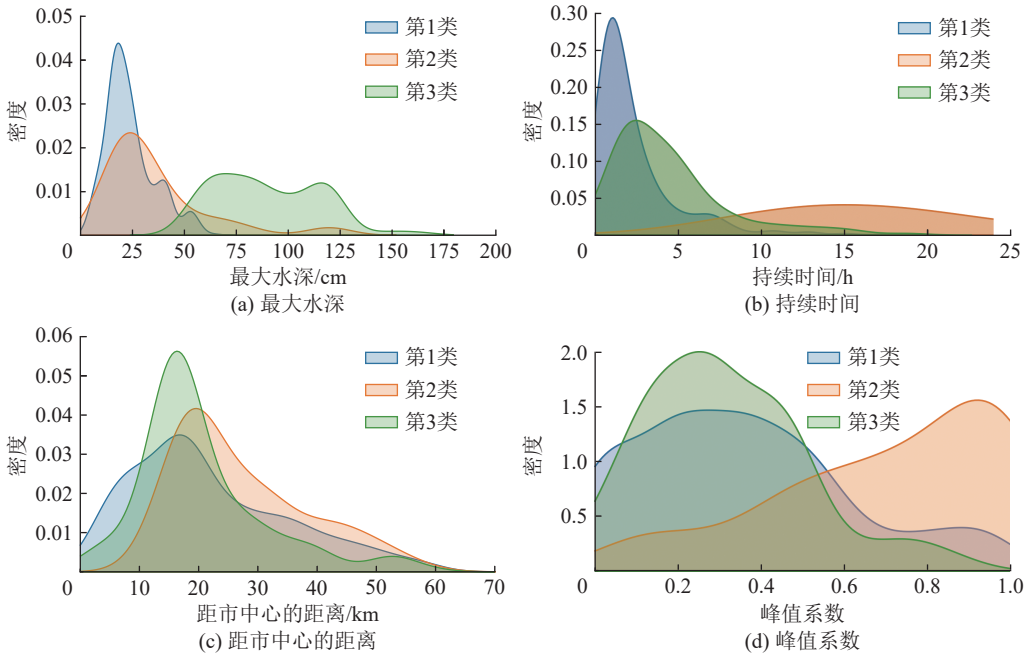


图 11 基于 K-means 聚类的典型暴雨内涝积水过程特征

Fig. 11 Characteristics of typical rainstorm waterlogging processes based on K-means clustering

结合 3.2 节聚类结果，可以进一步揭示不同类型积水事件的空间分布特征(图 12)。不同类型的积水事件在水深、持续时间和空间分布上存在显著差异。第 1 类典型事件主要与总体分类中的第二簇相对应，即市区范围内的高频次、低水深积水事件，表明市区积水的主要特点为水深小、积水速度快且持续时间短，该类积水事件在上海市中心占主导地位；第 3 类典型事件主要对应于总体分类中的第三簇，分布于郊区，表明郊区部分积水事件的主要特点为水深大、持续时间长，风险较高。



图 12 典型暴雨事件分类桑基图

Fig. 12 Sankey diagram of typical storm event classification

基于不同类型积水事件的时空分布特征，可为上海市分区施策开展内涝防治工作提供针对性建议：对于市中心区域，由于积水频发但水深较浅，应提升排水标准、优化管网排水能力，并增加雨水调蓄设施，以降低高频积水对城市交通和居民生活的影响；对于高风险区域(如嘉定区南部等)，应加强低洼区域的排水

能力建设，提高防洪排涝基础设施，特别是对下立交等易积水区域进行重点治理；此外，针对道路积水频发区域，建议优化雨水收集与排放管网，提高路面排水效率，减少积水风险。本研究的聚类结果可为上海市制定更精准的内涝预警阈值、更加精细化的内涝防控措施、应急管理策略及城市防洪规划提供科学依据，同时也可为其他快速城市化地区的洪涝治理与应急管理提供参考。

4 结　　论

本研究基于 2013—2023 年上海市内涝积水观测数据，采用 K-means 聚类算法和概率密度分析方法，探讨了内涝积水的季节性、空间分布及典型暴雨积水过程的特征。主要结论如下：

（1）上海市的内涝积水事件具有明显的季节性，主要集中在每年汛期的 6—8 月，其中 7 月下旬和 8 月下旬为积水高发期，与暴雨和台风活跃期高度吻合。大多数积水事件的水深在 16 ~ 80 cm 之间，平均水深为 37.3 cm，最大水深可达 165 cm。上海市内涝积水的空间分布具有明显的异质性，积水概率呈现由市中心向周边递减的趋势，中心城区积水问题尤为突出。

（2）道路积水是上海最主要的内涝类型，其发生频次最高，空间聚集性更强，市中心区域发生概率显著高于其他区域；相比之下，下立交和居民区的积水事件数量相对较少，下立交积水多发于市中心与郊区的交接处，居民区积水事件尽管总体概率较低，但也呈现市中心向周边逐渐递减的分布趋势。

（3）K-means 聚类分析揭示了上海市内涝积水的空间分布模式，可分为 3 类：第 1 类主要发生在市中心区域，水深较小、积水持续时间短、涨水速度快，在上海市内涝积水事件中占主导地位；第 2 类集中在市中心与郊区的交界处，水深和持续时间适中；第 3 类积水风险最高，发生频次最少，但积水深度较大，持续时间较长，主要集中在嘉定区南部等郊区。

（4）典型暴雨内涝事件分析表明上海市内涝过程呈现出“快积快消”的特点。强降雨驱动的积水过程通常在 3 h 内达到最大水深，且多数事件在 2 h 内维持较深积水状态，也反映出短历时强降雨对城市排水系统的巨大压力；为确保及时应对积水风险，建议积水风险预警时间控制在 40 min 以内。

参考文献：

[1] 孔锋，史培军，方建，等. 全球变化背景下极端降水时空格局变化及其影响因素研究进展和展望 [J]. 灾害学，2017，32(2)：165-174.（KONG F，SHI P J，FANG J，et al. Advances and prospects of spatiotemporal pattern variation of extreme precipitation and its affecting factors under the background of global climate change[J]. Journal of Catastrophology，2017，32(2)：165-174.（in Chinese））

[2] TORELLÓ-SENTELLES H，MARRA F，KOUKOULA M，et al. Intensification and changing spatial extent of heavy rainfall in urban areas[J]. Earth's Future，2024，12(9)：e2024EF004505.

[3] 宋晓猛，徐楠涛，张建云，等. 中国城市洪涝问题：现状、成因与挑战 [J]. 水科学进展，2024，35(3)：357-373.（SONG X M，XU N T，ZHANG Z Y，et al. Urban flooding in China：current status，causes and challenges[J]. Advances in Water Science，2024，35(3)：357-373.（in Chinese））

[4] 徐宗学，陈浩，任梅芳，等. 中国城市洪涝致灾机理与风险评估研究进展 [J]. 水科学进展，2020，31(5)：713-724.（XU Z X，CHEN H，REN M F，et al. Progress on disaster mechanism and risk assessment of urban flood/waterlogging disasters in China[J]. Advances in Water Science，2020，31(5)：713-724.（in Chinese））

[5] 张永勇，侯进进，夏军，等. 中国典型城市小区尺度下垫面对径流过程的调控特征与空间差异 [J]. 中国科学：地球科学，2022，52(8)：1427-1442.（ZHANG Y Y，HOU J J，XIA J，et al. Regulation characteristics of underlying surface on runoff regime metrics and their spatial differences in typical urban communities across China[J]. SCIENTIA SINICA Terrae，2022，52(8)：1427-1442.（in Chinese））

[6] 傅春，黄金燕，付耀宗，等. 不同城市化程度对内涝弹性的影响研究 [J]. 长江流域资源与环境，2022，31(6)：1402-1412.（FU C，HUANG J Y，FU Y Z，et al. Research on the influence of different urbanization degrees on waterlogging elasticity[J]. Resources

and Environment in the Yangtze Basin，2022，31(6)：1402-1412.(in Chinese))
[7] 姜波，陈涛，袁宏永，等.基于情景时空演化的暴雨灾害应急决策方法 [J].清华大学学报(自然科学版)，2022，62(1)：52-59.(JIANG B，CHEN T，YUAN H Y，et al. Emergency decision-making method for rainstorm disasters based on spatiotemporal scenario analyses[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology)，2022，62(1)：52-59.(in Chinese))
[8] 郝莹，陈靖，王元，等.基于高时空分辨率降水预报产品的城市内涝预警研究 [J].暴雨灾害，2019，38(3)：229-237.(HAO Y，CHEN J，WANG Y，et al. Research on urban waterlogging risk early warning based on high spatial-temporal resolution precipitation forecast products[J]. Torrential Rain and Disasters，2019，38(3)：229-237.(in Chinese))
[9] 李京梅，常有奎，张婷华，等.西宁市暴雨内涝灾害特征和等级分析研究 [J].农业灾害研究，2024，14(10)：183-185.(LI J M，CHANG Y K，ZHANG T H，et al. Characteristics and grading analysis of rainstorm-induced waterlogging disasters in Xining City[J]. Journal of Agricultural Catastrophology，2024，14(10)：183-185.(in Chinese))
[10] 张书函，肖志明，王振昌，等.北京市城市内涝判定标准量化研究 [J].中国防汛抗旱，2019，29(9)：1-5.(ZHANG S H，XIAO Z M，WANG Z C，et al. Quantitative study on the criteria for determining urban flood in Beijing[J]. China Flood & Drought Management，2019，29(9)：1-5.(in Chinese))
[11] 李学峰，谭琼，钱真.上海市城市内涝风险分析与评估 [J].中国防汛抗旱，2024，34(6)：26-32.(LI X F，TAN Q，QIAN Z. Risk analysis and assessment of urban flooding in Shanghai[J]. China Flood & Drought Management，2024，34(6)：26-32.(in Chinese))
[12] 张乾柱，王彤彤，卢阳，等.基于AHP-GIS的重庆市山洪灾害风险区划研究 [J].长江流域资源与环境，2019，28(1)：91-102.(ZHANG Q Z，WANG T T，LU Y，et al. Regionalization of torrential flood disasters in chongqing based on AHP-GIS[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin，2019，28(1)：91-102.(in Chinese))
[13] 王静，李娜.上海城区动态洪水风险图应用系统及典型暴雨内涝分析 [J].水利水电技术(中英文)，2024，55(3)：61-76.(WANG J，LI N. The dynamic flood hazard map application system of urban area in Shanghai and typical rainstorm waterlogging analysis[J]. Water Resources and Hydropower Engineering，2024，55(3)：61-76.(in Chinese))
[14] 薛丰昌，杨盟，陈剑飞，等.网格化城市内涝风险积水深度CID计算模型 [J].安全与环境学报，2024，24(11)：4383-4390.(XUE F C，YANG M，CHEN J F，et al. CID calculation model for grid urban waterlogging risk depth[J]. Journal of Safety and Environment，2024，24(11)：4383-4390.(in Chinese))
[15] 王建明.西安市暴雨内涝灾害风险评估及韧性策略研究 [D].西安：西北大学，2021.(WANG J M. Study on risk assessment and toughness strategy of heavy rain and flood disaster in Xi'an [D]. Xi'an：Northwest University，2021.(in Chinese))
[16] GIGOVIĆ L，PAMUČAR D，BAJIĆ Z，et al. Application of GIS-interval rough AHP methodology for flood hazard mapping in urban areas[J]. Water，2017，9(6)：360.
[17] 庄琦，刘曙光，周正正.降雨数据时空精度对城市暴雨变异性及频率分析的影响 [J].水科学进展，2023，34(3)：398-408.(ZHUANG Q，LIU S G，ZHOU Z Z. Impact of rainfall spatiotemporal resolutions on urban extreme rainfall variability and rainfall frequency analysis[J]. Advances in Water Science，2023，34(3)：398-408.(in Chinese))
[18] 乔贤玲，侯精明，刘园，等.降雨空间分辨率对城市内涝模拟敏感性研究 [J].水资源与水工程学报，2024，35(3)：81-89.(QIAO X L，HOU J M，LIU Y，et al. Sensitivity of rainfall data spatial resolution to urban inundation simulation[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering，2024，35(3)：81-89.(in Chinese))
[19] 李双双，杨赛霓，刘焱序，等.1960—2013年京津冀地区干旱-暴雨-热浪灾害时空聚类特征 [J].地理科学，2016，36(1)：149-156.(LI S S，YANG S N，LIU Y X，et al. Spatio-temporal clustering characteristics of drought，heavy rain and hot waves in the Beijing-Tianjin-Hebei region during 1960—2013[J]. Scientia Geographica Sinica，2016，36(1)：149-156.(in Chinese))
[20] ZHUANG Q，ZHOU Z Z，LIU S G，et al. Bivariate rainfall frequency analysis in an urban watershed：combining copula theory with stochastic storm transposition[J]. Journal of Hydrology，2022，615：128648.
[21] 易文林，顾圣华，俞汇，等.上海市暴雨特征变化趋势分析 [J].中国水利，2024(18)：32-37.(YI W L，GU S H，YU H，et al. An evaluation on changes of rainstorm characteristics in Shanghai Municipality[J]. China Water Resources，2024(18)：32-37.(in Chinese))
[22] 万晖.上海市防御风暴潮洪“四碰头”极端灾害对策思考 [J].中国防汛抗旱，2024，34(1)：78-82.(WAN H. Reflection on the prevention countermeasures for the extreme disasters caused by winds，storms，tides，and floods in Shanghai[J]. China Flood & Drought Management，2024，34(1)：78-82.(in Chinese))
[23] 庄琦，刘曙光，周正正.上海城区降雨时空分布变化与暴雨频率分析 [J].水文，2021，41(4)：74-80.(ZHUANG Q，LIU S G，ZHOU Z Z. The change of spatio-temporal precipitation and rainfall frequency analysis in Shanghai[J]. Journal of China Hydrology，2021，41(4)：74-80.(in Chinese))
[24] 刘晓涛.中国式现代化视角下超大城市水安全战略思考：以上海市为例 [J].中国水利，2023(1)：15-17，31.(LIU X T.

Strategic thinking on water security of megacities from the perspective of Chinese path to modernization：taking Shanghai as an example[J]. China Water Resources，2023(1)：15-17，31.(in Chinese))

[25] 丁一汇. 气候变化与城市化效应对中国超大城市极端暴雨的影响 [J]. 中国防汛抗旱，2018，28(2)：1-2.(DING Y H. Effects of climate change and urbanization on extreme rainstorm in megacities of China J]. China Flood & Drought Management，2018，28(2)：1-2.(in Chinese))

[26] 胡恒智，董强，辛辰，等. 上海汛期极端降雨阈值时空分布与内涝影响评估 [J]. 自然灾害学报，2024，33(3)：28-38.(HU H Z，DONG Q，XIN C，et al. Spatial-temporal distribution of extreme rainfall thresholds and assessment of urban waterlogging impact during flood seasons in Shanghai[J]. Journal of Natural Disasters，2024，33(3)：28-38.(in Chinese))

[27] 沙治银. 上海市防御 202106 号台风“烟花”的过程及思考 [J]. 中国防汛抗旱，2022，32(4)：52-54.(SHA Z Y. The process and thinking of Shanghai's defense against typhoon “In-Fa” No. 202106[J]. China Flood & Drought Management，2022，32(4)：52-54.(in Chinese))

[28] 李学峰，赵敏华，林发永. 上海市排水防涝“蓝-绿-灰”海绵空间融合探索 [J]. 中国防汛抗旱，2023，33(5)：14-18.(LI X F，ZHAO M H，LIN F Y. Exploration of the integration of “Blue-Green-Grey” sponge space for drainage and flood management in Shanghai[J]. China Flood & Drought Management，2023，33(5)：14-18.(in Chinese))

[29] 王梦江. 上海市防汛工作手册 [M]. 上海：复旦大学出版社，2018.(WANG M J. Shanghai flood control work manual[M]. Shanghai：Fudan University Press，2018.(in Chinese))

[30] RICHES N O，GOURIPEDDI R，PAYAN-MEDINA A，et al. K-means cluster analysis of cooperative effects of CO，NO_2，O_3，PM2.5，PM10，and SO_2 on incidence of type 2 diabetes mellitus in the US[J]. Environmental Research，2022，212：113259.

[31] MEHEDI HASSAN M，MOLLICK S，YASMIN F. An unsupervised cluster-based feature grouping model for early diabetes detection[J]. Healthcare Analytics，2022，2：100112.

Spatiotemporal distribution patterns of urban waterlogging in Shanghai based on spatiotemporal clustering analysis*

ZHOU Zhengzheng[1,2]，XU Jiayan[1]，LIU Shuguang[1,3]，WAN Hui[4]，SUN Li[4]，LIU Yan[4]

(1. *College of Civil Engineering*，*Tongji University*，*Shanghai* 200092，*China*；2. *Key Laboratory of Cities' Mitigation and Adaptation to Climate Change in Shanghai*，*China Meteorological Administration*，*Shanghai* 200030，*China*；3. *State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering*，*Tongji University*，*Shanghai* 200092，*China*；4. *Shanghai Flood and Drought Disaster Prevention Technology Center*，*Shanghai* 200050，*China*)

Abstract：Under the combined influence of frequent rainstorm events and rapid urbanization，urban waterlogging has emerged as a critical challenge in contemporary urban development. Based on Shanghai waterlogging data from 2013 to 2023，this study investigates the seasonal variations，spatial distribution，and characteristics of typical rainstorm-induced waterlogging utilizing K-means clustering and probability density analysis. Results indicate significant seasonality，with peak occurrence in summer strongly synchronized with typhoon-related rainstorms. Road inundation constitutes the primary waterlogging type，exhibiting prominent spatial heterogeneity；notably，the central urban areas experience frequent inundation primarily due to limited drainage capacities and insufficient water retention spaces. Among the three waterlogging categories identified via K-means clustering，high-risk zones with deeper water depths are concentrated at the interface between Jiading Distract and central urban areas. Typical storm-related inundation events are characterized by rapid accumulation and recession ("fast in and fast out")，with durations typically not exceeding 10 hours. It is recommended that the risk early-warning lead time be controlled within 40 minutes. These findings provide critical insights to support the refinement of urban waterlogging management and enhance emergency response capabilities.

Key words：urban waterlogging；K-means clustering；probability density analysis；spatiotemporal distribution；Shanghai

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 42371030；No. 42271031).

DOI： 10.14042/j.cnki.32.1309.2025.02.013

基于淹水面积构建的鄱阳湖水文干旱定量表征及变化特征

叶许春[1]，岳思馨[1]，李相虎[2]，李传哲[3]

（1. 西南大学地理科学学院，重庆 400715；2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所中国科学院流域地理学重点实验室，江苏 南京 210008；
3. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室，北京 100038）

摘要：研究探讨洪泛湖泊淹水动态的时空异质性特征及其影响下的水文干旱定量表征，对提高洪泛湖泊生态系统管理实践和洪旱灾害防御能力具有重要意义。采用多源遥感数据和图像融合技术构建了鄱阳湖区 2000—2023 年间连续的高时空分辨率淹水面积数据，揭示了鄱阳湖淹水动态的时空异质性特征；借助标准化降水指数（SPI）原理提出了基于淹水面积的标准化水文干旱指数，并据此分析了鄱阳湖水文干旱的变化特征。结果表明：①鄱阳湖淹水动态时空异质性特征明显，主湖区和碟形湖区淹水面积的年内波动存在差异，在年际变化上呈现出相反趋势；②在定量反映鄱阳湖整体水文干旱时，基于站点的标准化水位指数存在较大的不确定性，相对而言，标准化淹水面积指数具有更好的科学性；③鄱阳湖水文干旱在时空分布上具有一定的复杂性，极端干旱主要发生在年内的 4—10 月，且更容易发生在主湖区。遥感大数据和图像融合技术结合可实现对大型洪泛湖泊水文干旱的精细定量研究，促进湖泊资源保护利用和洪旱灾害防治等工作的开展。

关键词：水文干旱；淹水面积；洪泛湖泊；数据融合；遥感
中图分类号：TV213 **文献标志码：**A **文章编号：**1001-6791（2025）02-0320-12

干旱是近地表在一定时期内、一定自然条件下区域水分收支不平衡或者供需不平衡所形成的水分短缺现象[1]。干旱的发生不仅威胁到区域水资源和农业生产，还可能改变下垫面特征，导致一系列生态和环境问题[2-3]。水文干旱是干旱的一种类型，表现为河川径流、湖泊蓄水量、地下水水位等低于常年水平，其主要特征是在特定时段内区域水量的减少[4]。为了定量研究水文干旱，过去 50 a 中，广大学者提出了众多水文干旱指标。其中，代表性的水文干旱指标有帕默尔水文干旱指数（Palmer Hydrological Drought Index，PHDI）[5]、地表水供给指数（Surface Water Supply Index，SWSI）[6] 和标准化径流指数（Standardized Runoff Index，SRI）[7] 等。特别是，SRI 采用和描述气象干旱的标准化降水指数（Standardized Precipitation Index，SPI）相同的原理，在定量表征径流量或河、湖水位异常引起的水文干旱研究中得到了广泛应用[8]。

鄱阳湖是中国面积最大的淡水湖泊，也是长江中下游极具代表性的洪泛湖泊系统，在维护区域水资源和水生态安全上意义重大。近年来，以干旱为主要特征的长江中下游极端气候水文事件频发，鄱阳湖洪泛湿地面临着水域面积萎缩、生态功能退化等问题[9]。定量表征鄱阳湖水文干旱程度是研究湖区水文干旱形成演变的基础，也是科学制定干旱防范措施、规范流域水资源利用和减缓区域生态问题的关键。有关鄱阳湖水文干旱的传统研究中，大多基于站点观测数据通过计算标准化水位指数（Standardized Water Level Index，SWLI）来定量反映水文干旱程度[10-11]。然而，鄱阳湖区水位变化时空差异巨大，不同时期、不同站点的水位数据在反映湖泊淹水动态时的代表性很不一样[12-13]。此外，鄱阳湖洪泛系统水文水动力过程复杂，导致湖泊

收稿日期：2024-10-31；**网络出版日期：**2025-04-02
网络出版地址：https://link.cnki.net/urlid/32.1309.P.20250402.1135.002
基金项目：国家自然科学基金项目 (42071028；U23A2001)
作者简介：叶许春（1982—），男，安徽潜山人，教授，博士，主要从事水文水资源演变及生态效应方面研究。
E-mail：yxch2500@163.com

水位和淹水面积、蓄水体积之间存在明显的水文迟滞现象，使得同水位条件下的湖泊水域面积和蓄水体积在涨、退水期间相差很大[14]。这些研究表明，基于特定站点的水位数据不足以客观反映整个湖泊的淹水动态，科学表征鄱阳湖水文干旱还需借助其他水文指标。

在诸多反映湖泊水文状况的水文变量中(如水位、流量、淹水面积和蓄水量)，水体淹水面积是客观反映洪泛湖泊水域覆盖和干旱状况的重要指标。然而，当前基于淹水面积的湖泊水文干旱定量研究鲜有报道，其中一个重要原因在于大型洪泛湖泊水域动态具有高度时空异质性，如何获取连续长时间的高时空分辨率淹水数据具有很大的挑战性[15]。现有水动力模型虽能模拟不同时空尺度的水文过程，但其模拟精度常受限于参数不确定性和边界条件简化。Tan 等[16] 基于鄱阳湖的研究表明，水动力模型估算的水域面积与遥感监测值之间存在高达 36% 的系统性偏差，这一差异主要来自于模型对洪泛滩地中碟形子湖的估算误差。遥感技术虽具有大范围动态监测的能力，但其监测数据存在时空分辨率难以兼得的矛盾，导致大多数研究所用遥感数据量少或数据空间分辨率低，很难精细捕捉洪泛湖泊水文动态变化过程及空间格局。近年来，遥感图像融合技术的快速发展为解决这一难题提供了新路径。该技术通过时空融合算法可有效整合高空间分辨率影像的细节信息与高时间分辨率影像的频次优势，生成兼具高时空分辨率的合成影像，为定量精细研究洪泛湖泊淹水动态提供技术保障[17]。

本研究以鄱阳湖为研究对象，基于遥感大数据和图像融合技术构建长时间连续的高时空分辨率湖泊淹水面积数据，揭示鄱阳湖洪泛系统淹水动态的时空异质性特征，探讨鄱阳湖水文干旱的变化特征。研究结果以期为提高洪泛湖泊生态系统管理实践和洪旱灾害防御能力提供借鉴。

1　数据与方法

1.1　研究区概况

鄱阳湖承接流域内赣江、抚河、信江、饶河、修水等五大江河来水，经调蓄后由湖口注入长江(图 1)。鄱阳湖是典型的洪泛湖泊，具有 2 个重要的水文、生态特征：其一是年内水位落差可达 10 m，湖泊水域面积

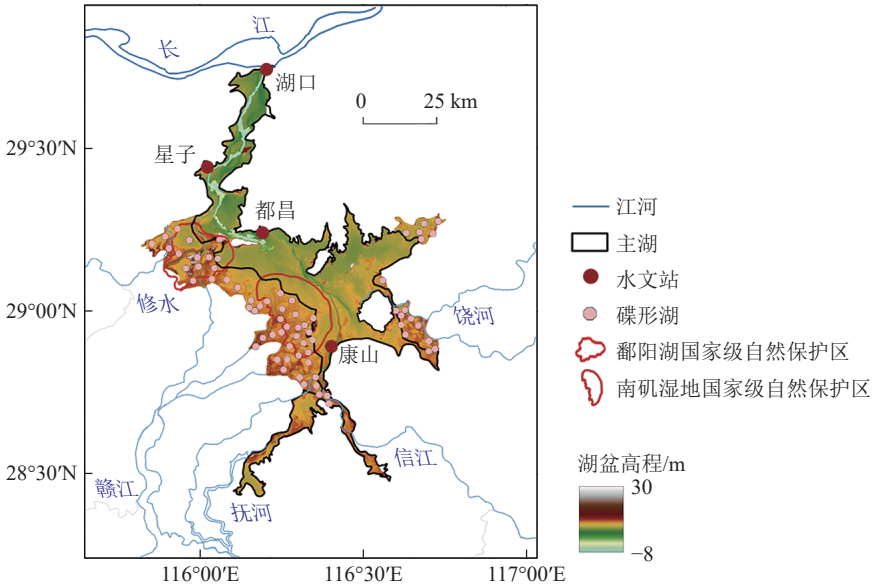


图 1　鄱阳湖洪泛系统湖盆地形、碟形湖分布与水系构成

Fig. 1　Basin topography, sub-lakes distribution and water system composition of the Poyang Lake floodplain system

在洪水期可超过 3 000 km^2，在枯水期常萎缩到不足 500 km^2，呈现出“洪水一片，枯水一线”的独特自然景观；其二是剧烈的水位波动形成鄱阳湖区约 3 000 km^2 的季节性洪泛湿地生态系统，发育了众多大小不一的碟形洼地(碟形湖)。这些碟形湖的面积从 1 km^2 到 71 km^2 不等，总地表水面积可达 767 km^2，在枯水期对缓解鄱阳湖干旱有重要作用[18]。本研究中基于不同湖区生态水文特性和湖盆地形差异，将整个鄱阳湖区分成两部分：一部分是集中分布在赣江及其支流入湖三角洲上的碟形湖区，其他部分则统一归于狭长、承载主流的主湖区(图 1)。

1.2 研究数据

本研究所使用的遥感数据包括 2000—2023 年 Landsat(包括 TM、ETM+、OLI)系列卫星遥感影像(http://glovis.usgs.gov)和美国航空航天局(NASA)Terra 平台上 MODIS 地表反射率数据集(MOD09A1)(https://search.earthdata.nasa.gov)。其中，Landsat 数据空间分辨率为 30 m，时间分辨率为 16 d，每年共 23 景影像。由于云覆盖的影响，共获得 333 幅可用的 Landsat 影像。MOD09A1 数据集是 MODIS 数据 500 m 地表反射率每 8 d 的合成产品，共有 13 个数据层，1 a 共 46 景影像，研究时段内，共获得 MOD09A1 影像 1 058 幅，使用数据中的波段 2 和 4。获取使用的所有遥感影像数据质量较好，在使用之前，所有 Landsat 数据在使用前均在 ENVI(The Environment for Visualizing Images)平台进行标准化的数据预处理，包括辐射定标、大气校正以及 Landsat7 ETM SLC-OFF 数据产品的条带处理等，MODIS 数据均利用 MRT(MODIS Reprojection Tool)工具进行投影变换、格式转换和重采样等。图 2 显示了本研究中使用的所有 Landsat 和 MODIS 数据的时间分布。

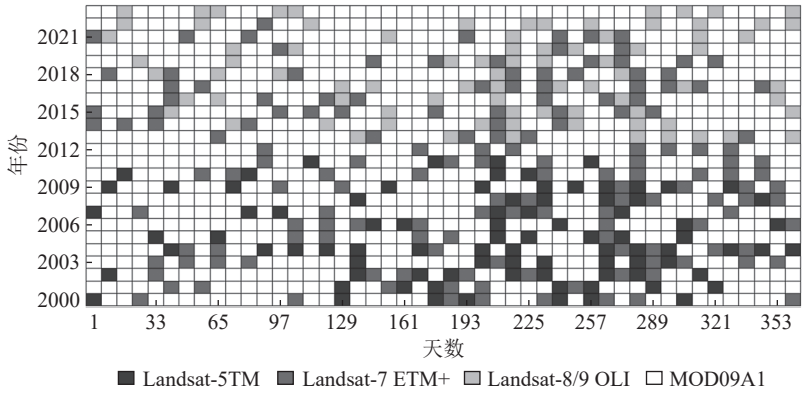


图 2 研究所用 Landsat 和 MODIS 系列遥感数据时间分布

Fig. 2 Temporal distribution of Landsat and MODIS datasets acquired in this study

除遥感数据外，研究获取了 2000—2023 年鄱阳湖湖口、星子、都昌和康山 4 个水文站的实测逐日水位数据，用于鄱阳湖水位空间差异以及水文干旱的对比分析。

1.3 研究方法

1.3.1 水体提取方法

本研究采用归一化差分水体指数(Normalized Difference Water Index，NDWI)进行水体指数计算与提取工作[19]。基于 NDWI 提取水体时，综合考虑已有研究结果以及研究区年均 NDWI 分布直方图，以 0 为阈值，将水体指数大于 0 的栅格定义为水体，否则为非水体。

在提取淹水面积的基础上，进一步通过对水体和非水体的二值影像进行空间叠加运算，从而获得每一年像元尺度上的淹水频率：

$$F_i = \frac{\sum_{i=1}^{n} W_i}{n} \times 100\% \quad (1)$$

式中：F_i 为像元点 i 的淹水频率；W_i 为像元点 i 的水体二值化影像，像元点为水体时，W_i=1，非水体时 W_i=0；n 为 1 a 中的遥感影像数目。

1.3.2 遥感数据图像融合技术

由于研究时段内可用的 Landsat 数据较少，基于已有高空间分辨率 Landsat 数据计算的 NDWI 数量有限。因此，对于缺失的数据，需要借助图像融合模型来构建。本研究在前期工作基础上，采用 ESTARFM 模型[20]开展高时空分辨率遥感数据的重构工作。ESTARFM 模型是在 STARFM 模型的基础上，通过加入额外 2 幅基准期影像，以提高不同影像之间的关联性，从而增加异质性区域的融合精度[21]，具体原理可见文献 [20]。研究中，重构了共计 1 058 景缺失的高空间分辨率（30 m）NDWI 数据。最终，利用融合后的 NDWI 数据对原始的 Landsat 系列 NDWI 进行插补，构建了鄱阳湖区 2000—2023 年间连续的高时空分辨率（8 d，30 m）NDWI 数据集。融合过程中，对融合的 NDWI 与 Landsat NDWI 进行精度验证，结果表明，这两者的线性拟合优度介于 0.629 ~ 0.910 之间，平均相对误差为 6.3%。

1.3.3 水文干旱指数计算

标准化水文干旱指数被广泛用于识别和表征水文干旱，本研究采用 SPI 原理[22]进行湖泊水文干旱的标准化指数计算。需要指出的是，应用 SPI 原理，采用其他指标定量分析区域水文干旱时，应选择最适宜的概率密度函数进行标准化计算。研究中，选择 Gamma、Normal、Weibull、Lognormal 以及 Logistic 等 5 种概率密度函数，分别对湖区各站点月平均水位数据和鄱阳湖月平均淹水面积数据的概率密度进行拟合和检验，并采用柯尔莫哥洛夫法（Kolmogorov-Smirnov，K-S）进行拟合优度检验[23]，结果如表 1 所示。总体上，5 种分布函数对星子和都昌站水位数据均有较好拟合，Normal 分布函数在拟合湖泊水位时相对较好，Gamma 分布函数在拟合淹水面积时表现更佳，Weibull 函数对康山站水位的拟合未达到检验统计量的临界值标准。

表 1　鄱阳湖区不同站点水位和淹水面积的 5 种概率分布的 K-S *D* 统计量

Table 1　Calculated K-S *D* statistics for the 5 probability distributions of lake water level at different stations and lake inundation area of the Poyang Lake

概率分布函数	湖口	星子	都昌	康山	总淹水面积
Gamma	0.080	0.074	0.065	0.062	**0.068**
Normal	0.079	**0.067**	**0.062**	0.078	0.080
Weibull	**0.078**	0.068	0.068	0.104	0.073
Lognormal	0.084	0.077	0.065	0.054	0.074
Logistic	0.086	0.078	0.072	**0.049**	0.073

注：以上各站点及淹水面积的K-S D的临界值均为0.080 1（n=288，1-α=95%），K-S统计值D越小表示概率分布函数越适合；对应加粗数字的概率分布函数为不同水文站湖泊水位和淹水面积的最适分布函数。

综合考虑以上分布函数的定量检测结果，本研究最终统一采用 Gamma 分布函数计算 SWLI 和标准化淹水面积指数（Standardized Inundation Area Index，SIAI）用以定量表征湖泊水文干旱，具体计算步骤可参考 SPI。基于湖泊水位或淹水面积计算的标准化指数 SWLI 和 SIAI，具有和 SPI 相同的干旱分级（表 2）。

表 2 SWLI 和 SIAI 水文干旱分级说明

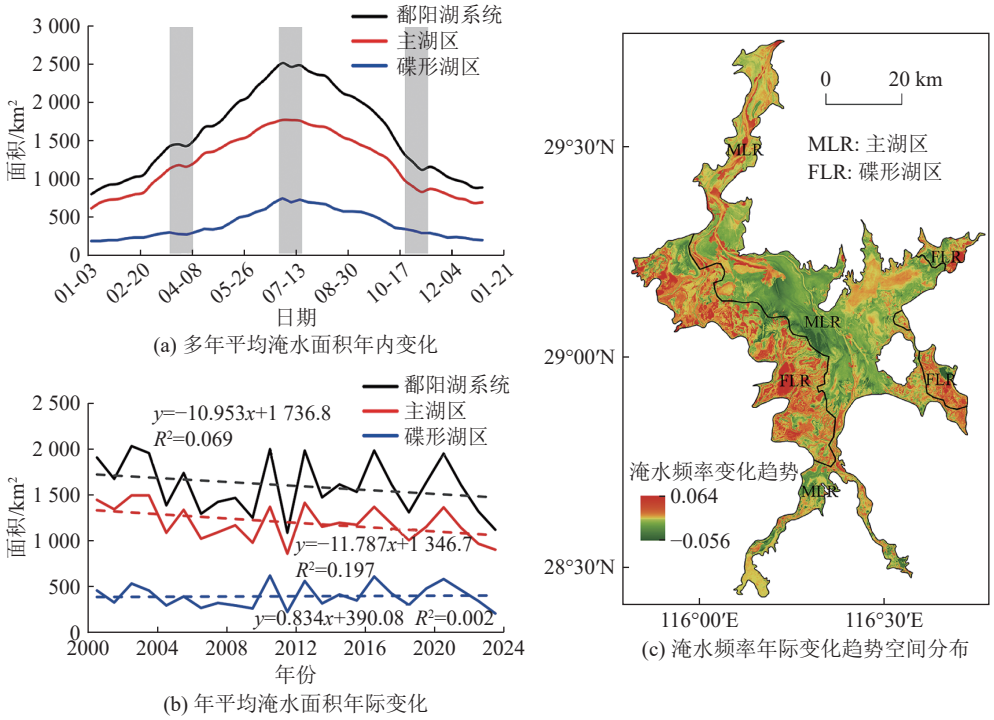
Table 2 Classification of SWLI / SIAI of hydrological drought

序号	分级	SWLI/SIAI值	出现频率/%
1	无旱	≥－0.5	68
2	轻旱	－1～＜－0.5	15
3	中旱	－1.5～＜－1	10
4	重旱	－2.0～＜－1.5	5
5	极旱	＜－2.0	2

2 结果及分析

2.1 鄱阳湖淹水动态时空异质性特征

鄱阳湖淹水动态表现出明显的时空异质性特征。在年内变化上，尽管主湖区和碟形湖区淹水面积具有相似的季节波动特征，但在某些月份两者的淹水过程细节特征并不一致。如图 3(a)的灰色区域所示，在 3 月底，当主湖区水域面积呈增加趋势的时候，碟形湖区的水域面积却呈现出减小趋势；7 月上旬，当主湖区的淹水面积持续增加并达到一年中峰值的时候，碟形湖区的淹水面积出现了明显下降过程；10 月底至 11 月初，鄱阳湖退水过程中碟形湖区水域面保持稳定缓慢下降趋势，而主湖区则呈现出开始快速下降而后略有增加的特点。



(a) 多年平均淹水面积年内变化

(b) 年平均淹水面积年际变化

(c) 淹水频率年际变化趋势空间分布

图 3 鄱阳湖淹水动态时空异质性特征

Fig. 3 Spatiotemporal heterogeneity of inundation dynamics of the Poyang Lake

在年际变化上，主湖区和碟形湖区淹水面积呈现出相反的趋势变化特点：主湖区的淹水面积呈不显著下降趋势，碟形湖区的淹水面积呈不显著上升趋势(图 3(b))。这一结果进一步体现在淹水频率变化趋势的空

间分布特征上(图 3(c))，鄱阳湖区淹水频率呈显著增加趋势的区域占湖区总面积的 16.5% 左右，主要分布在鄱阳湖东南、西南的碟形湖区以及北部入江水道；淹水频率呈显著减少趋势的区域约占湖区总面积的 35.2%，主要分布在鄱阳湖中部主湖区以及通江水域。总体上，碟形湖区的淹水频率有增大趋势，而鄱阳湖整体及主湖区的淹水频率呈减小趋势。

2.2　基于湖泊水位和淹水面积的水文干旱指数对比和相关分析

图 4 显示了研究时段内基于站点水位和淹水面积数据计算的月、年尺度鄱阳湖水文干旱指数变化过程。由图可知，在不同时间尺度上，尽管不同站点的 SWLI 呈现出高度一致的波动特征，但也存在一定差异，表明站点水位数据在定量表征湖泊水文干旱上具有不确定性。如 2001 年 9 月至 2002 年 4 月间，湖口站 SWLI 明显小于其他站点 SWLI，而在 2016 年以来的多年中湖口站 SWLI 峰值明显高于其他站点 SWLI 峰值。在年尺度，各站点计算的 SWLI 差异更加明显。

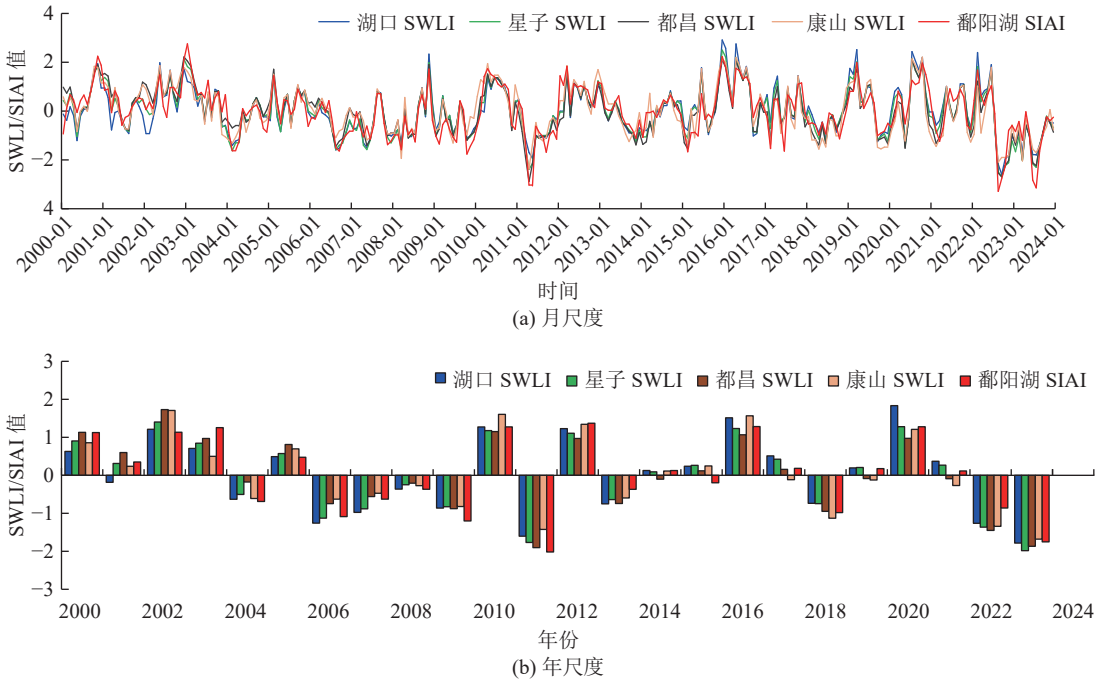


图 4　基于站点水位和淹水面积数据计算的月、年尺度鄱阳湖水文干旱指数变化过程

Fig. 4　Monthly and annual variations of hydrological drought indices of the Poyang Lake calculated based on hydro-stations water level observations and lake inundation area

进一步对比可知，基于淹水面积计算的 SIAI 与不同站点 SWLI 变化过程也是高度一致，两者具有较好的可比性，表明该指标在表征湖泊月、年尺度上的水文干旱状况是可行的。然而，相比于 SWLI，SIAI 在反映特定时间水文干旱程度上差异较为突出。例如，在月尺度上，2014 年 4 月 4 个水文站的 SWLI 值均在 − 0.57 ~ − 1.07 之间，反映了湖泊处于轻度到中度干旱，而同期计算的 SIAI 为 0，表明该湖总体处于正常状态；2022 年鄱阳湖极端干旱期间，一度导致通江水体面积缩小近 90%，计算的 8 月、9 月、10 月 SIAI 低于各水文站点的 SWLI，较好地表征了鄱阳湖的实际干旱情况。在年际尺度上，2 种指数均表明鄱阳湖水文干旱在 2011 年达到极值，但其在反映具体年份的水文干旱程度上也很不一样，如 2002 年 SWLI 相比于 SIAI 偏大，相反 2003 年各站点计算的 SWLI 偏小。

图 5 显示了不同湖区 SIAI 与 4 个水文站 SWLI 在月、季节和年时间尺度上的相关分析结果。结果表明，

不同湖区 SIAI 和 4 个站点 SWLI 的相关性时空差异非常明显。就全湖而言，SIAI 与不同水文站 SWLI 在 8—10 月(夏季和秋季)的相关系数较大，其余月份较小；但在空间上，星子和都昌站 SWLI 与全湖 SIAI 的相关系数高于湖口和康山站。主湖区与全湖的相关系数基本格局大致相同，但在 3—8 月(春季和夏季)的相关系数相对要小。碟形湖区相关系数的基本格局与主湖明显不同，主要表现在 11—12 月(冬季)相关系数偏低，而 4—8 月相对偏高。鄱阳湖保护区和南矶保护区与碟形湖区的相关系数基本格局较为一致，但相对而言，南矶保护区的相关系数整体偏小，尤其在 4—7 月。空间上，SIAI 与 4 个水文站 SWLI 的相关性都较强，但是在年内不同时段，不同湖区 SIAI 与 SWLI 之间的最大相关系数在不同水文站点间存在一定变动，特别是在蝶形湖区以及 2 个保护区。综合比较可知，全湖 SIAI 与星子站 SWLI 的相关性最强，主湖区和南矶保护区 SIAI 与都昌站 SWLI 的相关性最强，碟形湖区和鄱阳湖保护区 SIAI 与湖口站 SWLI 的相关性最强。

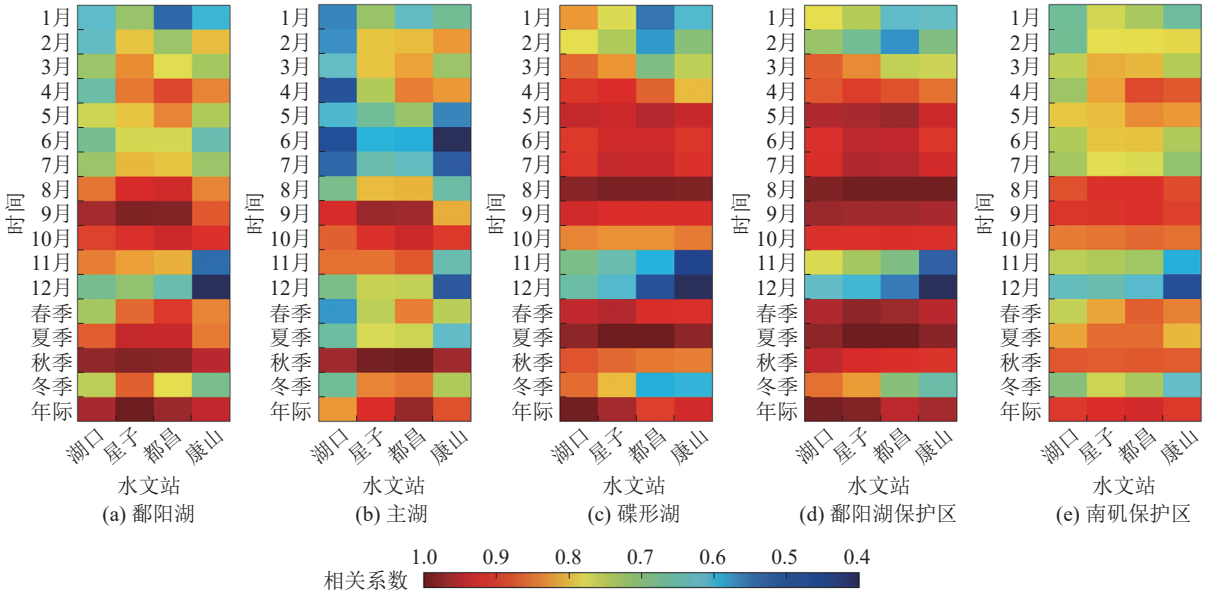


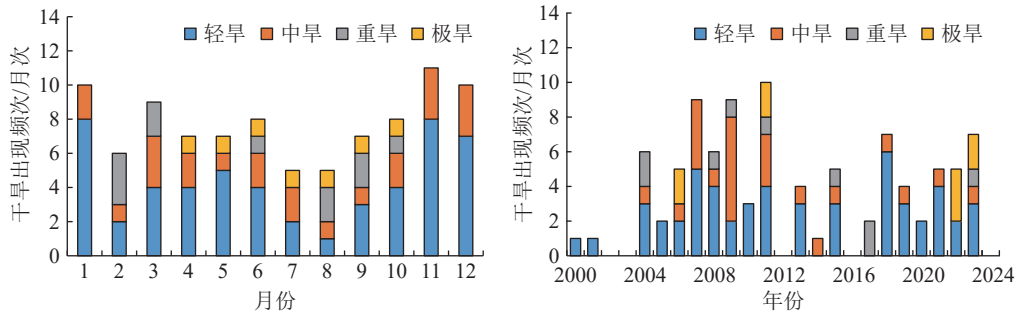
图 5 鄱阳湖标准化水位指数与标准化淹水面积指数的相关系数

Fig. 5 Correlation coefficients between SIAIs and SWLIs in the Poyang Lake

2.3 基于淹水面积的鄱阳湖水文干旱变化特征

基于鄱阳湖月尺度 SIAI，图 6 显示了湖泊水文干旱累计次数的月度和年际分布特征。结果表明，2000—2023 年鄱阳湖区共发生了 93 个月次的水文干旱，年均发生干旱 3.88 月次。鄱阳湖水文干旱在年内分配具有较大的复杂性，任何月份都可能发生级别不同的水文干旱(图 7(a))。水文干旱发生次数最多的是 1 月、3 月、11 月和 12 月，发生次数最少的是 7 月、8 月。轻旱每月均有发生，且以 1 月、5 月、11 月、12 月最多；中旱主要发生在 3 月、11 月和 12 月；重旱主要发生在 2 月、3 月、8 月和 9 月；极旱主要发生在 4—10 月间，各月均记录到 1 次极端干旱事件。

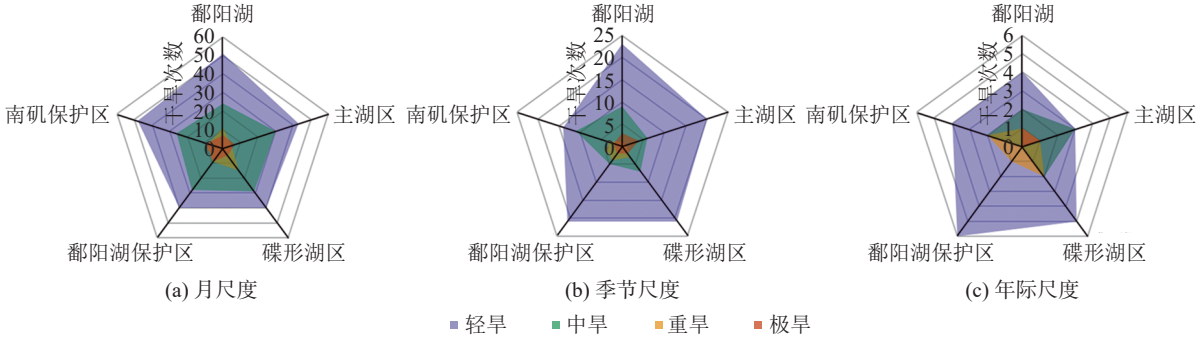
2000—2023 年间，鄱阳湖绝大多数年份都经历了不同程度的水文干旱，仅 2002 年、2003 年、2012 年和 2016 年没有出现。历年中，鄱阳湖共经历中度及以上水文干旱 42 个月，包括重旱 11 个月和极旱 7 个月。2011 年湖区水文干旱最为严重，全年有 10 个月出现不同程度的干旱，其中极旱 2 个月、重旱 1 个月、中旱 3 个月。2007 年和 2009 年的旱情也较为严重，全年共有 9 个月出现不同程度的水文干旱，但以轻、中度干旱为主，未发生极端干旱。此外，2018 年和 2023 年水文干旱的发生时间也高达 7 个月之多，而且 2023 年还发生了 2 个月的极端干旱。2022 年长江流域遭遇了严重的特大干旱事件，鄱阳湖也经历了 3 个月的极端干旱。



(a) 年内分布　(b) 年际分布

图 6　2000—2023 年鄱阳湖水文干旱变化特征

Fig. 6　Monthly and annual variations of hydrological drought in the Poyang Lake from 2000 to 2023



(a) 月尺度　(b) 季节尺度　(c) 年际尺度

图 7　鄱阳湖不同区域不同时间尺度水文干旱事件(次数)统计分布

Fig. 7　Statistics of hydrological drought events across the Poyang Lake at different time scales

鄱阳湖洪泛系统不同级别水文干旱的发生频率在不同区域之间呈现一定差异(图 7)。月度统计结果显示，碟形湖区相对主湖区经历了更多的重旱事件，南矶保护区比鄱阳湖保护区经历了更多的轻旱事件。然而，在季节尺度上，主湖区经历极旱的频次要高于碟形湖区，南矶保护区相对于鄱阳湖保护区经历轻旱事件明显偏少，但发生中旱事件明显偏多。就年际尺度来看，主湖区比碟形湖经历了更多的中旱和极旱事件，但轻旱和重旱事件主要发生在碟形湖区内；鄱阳湖保护区发生轻旱的频次明显高于南矶保护区，但中旱和重旱主要发生南矶保护区。

3　讨　　论

鄱阳湖洪泛系统淹水动态在年内和年际变化上呈现出明显的时空异质性特征。对于主湖区与碟形湖区的淹水动态在涨水期(3 月底)和退水期(10 月底)不一致的现象，其背后原因与碟形湖的人为干扰有很大关系。鄱阳湖鱼类资源丰富，形成了独特的堑秋湖渔业活动模式[24]。通常情况下，在湖泊秋季退水期，一些封闭或半封闭式的碟形湖被当地渔民筑堤修闸用于水产养殖，从而导致碟形湖区水域面积消减过程相对主湖区平缓的多。与此相对，大量碟形湖在春季涨水前被渔民放水，加固堤坝，引起碟形湖区水域面积异常减小。此外，鄱阳湖洪泛滩地地形较高，淹水频率低，一年中大部分时间均以滩地形式裸露，其淹水动态受流域入湖水量及其变化的影响突出；主湖区湖盆地形相对较低，与长江的联通性好，其淹水动态与湖泊本身的泄流能力密切相关。这也很大程度上解释了主湖区与碟形湖区的淹水动态在 7 月上旬的差异。因为这一时期流域来水急剧减小，而长江下泄流量及湖泊水位达到一年中的峰值，必然导致高位洪泛滩地淹水面积下降而主湖区淹水面积达到最大。近年来，鄱阳湖流域入湖流量的不显著增加趋势可能是导致碟形湖区淹水面

积和淹水频率增加的主要原因[25]。三峡工程的运行引起长江中下游河道侵蚀下切严重[26]、鄱阳湖区大规模采砂活动引起入江水道下切侵蚀[27]，在很大程度上增强了湖泊泄流能力，加剧了主湖区淹水面积萎缩和淹水频率降低。

对比分析可知，基于站点的标准化水位指数在表征不同时间尺度湖泊水文干旱状况时，可能会放大或缩小干旱程度，其在反映洪泛湖泊整体干旱状况时存在较大的不确定性。基于淹水面积的水文干旱指数在定量表征洪泛湖泊水文干旱程度上更加科学，2022 年鄱阳湖区发生了历史罕见的“汛期反枯”事件，计算的月度 SIAI 很好地展现了这一事件的变化发展过程。该年鄱阳湖星子站水位自 6 月 23 日达到最高值 19.41 m(吴淞高程)后开始迅速降低，至 7 月 31 日水位下降至 13.50 m，此后水位持续下降，并于 9 月 23 日降至 7.10 m，为 1951 年有记录以来历史新低；与此同时，鄱阳湖水域面积萎缩至不足 400 km^2，全湖近乎完全干涸(图 8(a)—图 8(c))。计算的 SIAI 变化显示，自 7 月份开始鄱阳湖已进入偏枯状态，8 月、9 月、10 月 SIAI 分别为− 3.29、− 2.77 和− 2.27，均达到极端水文干旱状态(图 8(d))，呈现出典型的“汛期反枯”现象。此次极端干旱事件的成因，在大气环流背景上主要归因于该年长江中下游夏季偏强的西太副高，受此影响，长江中下游出现极端高温干旱现象，鄱阳湖流域“五河”和长江上游来水异常减少[28]。

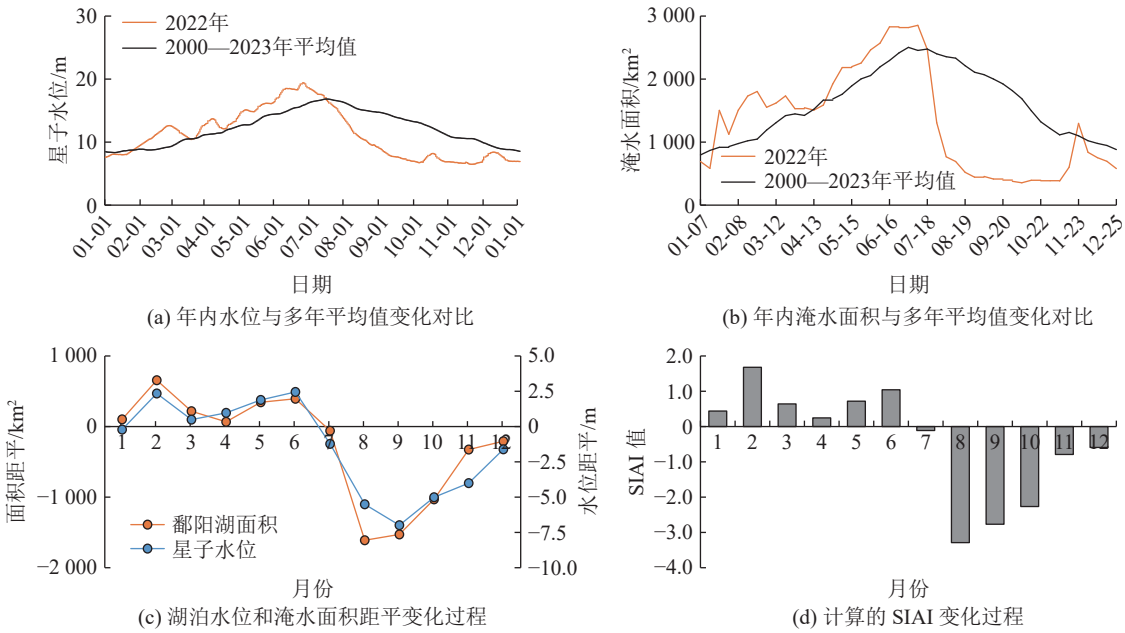


图 8 2022 年鄱阳湖水位、淹水面积以及 SIAI 的年内变化过程

Fig. 8 Annual variation process of water level, inundation area, and calculated SIAI in Poyang Lake in 2022

鄱阳湖水文干旱变化特征显示，极端水文干旱主要出现在年内相对丰水的 4—10 月，而在枯水期极旱现象较少发生。这一结果可能与鄱阳湖地处长江中下游、受东亚季风影响夏季区域性降水年际变率较大有关[29]。近年来，在全球气候变化的背景下，长江、黄河和淮河流域年内“旱涝急转、旱涝并存”现象表现明显，薛联青等[30]的最新研究表明，长江流域更容易发生涝转旱事件，降水、湿度、气温等气象因素对旱涝急转的贡献度更大，大气环流的影响相对较小。2020 年夏季长江流域发生大洪水，鄱阳湖区洪涝严重；与此相反，2022 年鄱阳湖夏秋季节出现“汛期反枯”以及 2023 年枯水提前事件，均表明鄱阳湖年内水文情势的极端变化，干旱和洪涝以及旱涝急转等极端水文事件日益频繁。

洪泛湖泊具有高度动态的水文特征，采用遥感大数据和图像融合技术可实现对大型洪泛湖泊水文动态变化的精细定量研究。在当前遥感技术和大数据应用快速发展的背景下，此类方法具有较好的应用前景，能

够有效弥补传统监测和模型模拟方法的不足。然而，水位数据相对于其他水文变量(如流量、淹水面积、水深等)易于监测获取，是湖泊水文研究中的最常用参数。对鄱阳湖来说，传统研究大多基于湖口或星子站水位来研究湖泊水文状态和干旱程度。李鹏等[12]基于水位—面积关系模拟，认为鄱阳湖汛期的代表性水位站为星子、都昌和吴城站，而非汛期代表性水位站为棠荫站；Zhang 等[14]研究表明，都昌站水位—面积迟滞关系在鄱阳湖主要站点中最小，因此在反映鄱阳湖整体淹水动态时，都昌站水位最具代表性。本研究结果也表明不同站点的监测水位在反映湖泊淹水动态上的代表性不一样，就整个鄱阳湖而言，星子站的水位代表性最好；对主湖区和南矶保护区而言，都昌站的水位代表性最好；对碟形湖区和鄱阳湖保护区来说，则是湖口站的水位代表性最好。

本文的研究方法也存在一定的不确定性和计算误差，主要是基于遥感数据的水体精确分类和面积提取以及 ESTARFM 模型的数据融合，这些需要在今后的研究中不断完善和提高。此外，本文所用研究数据存在时间序列长度不足的缺陷，可能对部分研究结果产生影响。通常情况下，基于 SPI 原理的标准化干旱指数计算至少需要 30 a 的数据序列才能获得较为可靠的结果，然而受客观上遥感数据年限的限制，本研究构建的鄱阳湖淹水面积数据仅有 24 a。尽管如此，本研究所用的淹水数据时间序列总体上具有较好的代表性，期间包括了典型平水年(如 2014 年、2021 年)、丰水年(如 2012 年、2020 年)和枯水年(如 2011 年、2023 年)等，这对基于概率分析的标准化干旱指数计算至关重要。

4　结　　论

本文采用遥感大数据和图像融合技术构建了鄱阳湖区 2000—2023 年连续的高时空分辨率淹水面积数据，提出了基于淹水面积的标准化水文干旱指数，分析了鄱阳湖水文干旱的演变特征。主要结论如下：

(1)鄱阳湖洪泛系统淹水动态具有高度的时空异质性特征，主湖区和碟形湖区的淹水动态在涨水期(3 月底)、洪水期(7 月上旬)以及退水期(10 月底)均存在明显的不一致现象，在年际变化上两者更是呈现出相反的变化趋势。

(2)在不同时间尺度上，尽管湖区不同站点的标准化水位干旱指数呈现出高度一致的波动特征，但也存在明显的差异，表明不同站点水位数据的代表性不一样，基于站点的标准化水位指数在定量反映湖泊水文干旱时存在较大的不确定性。相对而言，基于淹水面积的标准化水文干旱指数在定量表征洪泛湖泊水文干旱程度上更具科学性。

(3)基于计算的标准化淹水面积指数可知，2000—2023 年，鄱阳湖共经历了中度及以上水文干旱 42 个月，包括重旱 11 个月和极旱 7 个月，其中 2011 年湖区水文干旱最为严重。鄱阳湖区水文干旱在季节分配和空间分布上具有一定的复杂性，极端干旱主要发生在年内的 4—10 月，且更容易发生在主湖区。

参考文献：

[1] REDMOND K T. The depiction of drought：a commentary[J]. Bulletin of the American Meteorological Society，2002，83(8)：1143-1147.

[2] 虞美秀，董昊欣，张建云，等. 基于大范围地面墒情监测的鄱阳湖流域农业干旱 [J]. 水科学进展，2022，33(2)：185-195.(YU M X，DONG W X，ZHANG J Y，et al. Agricultural drought of the Poyang Lake basin based on large-scale ground monitoring of soil water content[J]. Advances in Water Science，2022，33(2)：185-195.(in Chinese))

[3] LIANG M Q，CAO R C，DI K，et al. Vegetation resistance and resilience to a decade-long dry period in the temperate grasslands in China[J]. Ecology and Evolution，2021，11(15)：10582-10589.

[4] BONACCI O. Hydrological identification of drought[J]. Hydrological Processes，1993，7(3)：249-262.

[5] ALLEY W M. The palmer drought severity index as a measure of hydrologic drought[J]. JAWRA Journal of the American Water Resources Association，1985，21(1)：105-114.

[6] SHAFER B A，DEZMAN L E. Development of a Surface Water Supply Index（SWSI）to assess the severity of drought conditions in snowpack runoff areas[C]// In：Preprints，Western Snow Conference. Reno NV：Colorado State University，1982：164-175.

[7] SHUKAL S，WOOD A W. Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought[J]. Geophysical Research Letters，2008，35(2)：226-236.

[8] 顾磊，陈杰，尹家波，等. 气候变化下中国主要流域气象水文干旱潜在风险传播 [J]. 水科学进展，2021，32(3)：321-333.（GU L，CHEN J，YIN J B，et al. Risk propagation from meteorological to hydrological droughts in a changing climate for main catchments in China[J]. Advances in Water Science，2021，32(3)：321-333.（in Chinese））

[9] 李云良，张奇，谭志强，等. 鄱阳湖洪泛系统地表-地下水文水动力过程与模拟 [M]. 北京：科学出版社，2022.（LI Y L，ZHANG Q，TAN Z Q，et al. Hydrodynamic process and simulation of surface-groundwater in Poyang Lake flooding system[M]. Beijing：Science Press，2022.（in Chinese））

[10] LIU Y B，WU G P. Hydroclimatological influences on recently increased droughts in China's largest freshwater lake[J]. Hydrology and Earth System Sciences，2016，20(1)：93-107.

[11] LI X H，LIN Y L，YE X C，et al. The impacts of drought on the ecological niches of typical wetland plants in Poyang Lake，China[J]. Hydrology Research，2024，55(9)：890-904.

[12] 李鹏，封志明，姜鲁光，等. 鄱阳湖天然湖面遥感监测及其与水位关系研究 [J]. 自然资源学报，2013，28(9)：1556-1568.（LI P，FENG Z M，JIANG L G，et al. Natural water surface of Poyang Lake monitoring based on remote sensing and the relationship with water level[J]. Journal of Natural Resources，2013，28(9)：1556-1568.（in Chinese））

[13] YE X C，WU J，LI X H，et al. Multi-source remote sensing data and image fusion technology reveal significant spatiotemporal heterogeneity of inundation dynamics in a typical large floodplain lake system[J]. Journal of Hydrology：Regional Studies，2023，50：101541.

[14] ZHANG Q，WERNER A D. Hysteretic relationships in inundation dynamics for a large lake-floodplain system[J]. Journal of Hydrology，2015，527：160-171.

[15] CHEN B，CHEN L F，HUANG B，et al. Dynamic monitoring of the Poyang Lake wetland by integrating Landsat and MODIS observations[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing，2018，139：75-87.

[16] TAN Z Q，LI Y L，XU X L，et al. Mapping inundation dynamics in a heterogeneous floodplain：insights from integrating observations and modeling approach[J]. Journal of Hydrology，2019，572：148-159.

[17] YE X C，MENG Y K，XU L G，et al. Net primary productivity dynamics and associated hydrological driving factors in the floodplain wetland of China's largest freshwater lake[J]. Science of the Total Environment，2019，659：302-313.

[18] TAN Z Q，MELACK J，LI Y L，et al. Estimation of water volume in ungauged，dynamic floodplain lakes[J]. Environmental Research Letters，2020，15(5)：054021.

[19] MCFEETERS S K. The use of the Normalized Difference Water Index（NDWI）in the delineation of open water features[J]. International Journal of Remote Sensing，1996，17(7)：1425-1432.

[20] ZHU X L，CHEN J，GAO F，et al. An enhanced spatial and temporal adaptive reflectance fusion model for complex heterogeneous regions[J]. Remote Sensing of Environment，2010，114(11)：2610-2623.

[21] WU J，ZHANG Q，LI Y L，et al. Spatial-temporal variations of stage-area hysteretic relationships in large heterogeneous lake-floodplain systems[J]. Journal of Hydrology，2023，620：129507.

[22] MCKEE T B，DOESKEN N J，KLEIST J. The relationship of drought frequency and duration to time scales[C]//Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology. Boston，MA：American Meteorological Society，1993，17(22)：179-183.

[23] SIEGEL S，CASTELAN N J. Nonparametric statistics for the behavioral sciences [M]. New York：McGraw–Hill，1988.

[24] 郭恢财，胡斌华，李琴. 堑秋湖渔业模式对鄱阳湖南矶湿地越冬候鸟种群数量的影响和保育对策 [J]. 长江流域资源与环境，2014，23(1)：46-52.（GUO H C，HU B H，LI Q. Effects of autumn fishery by enclosing plate-shaped lake on the winter migratory birds and conservation strategies in Nanji wetland national natural reserve of the Poyang Lake，Jiangxi[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin，2014，23(1)：46-52.（in Chinese））

[25] 章广越，谈广鸣，张为，等. 三峡水库运行后汉口—九江河段水位变化特征及成因 [J]. 水科学进展，2024，35(1)：85-97.（ZHANG G Y，TAN G M，ZHANG W，et al. Characteristics and causes of the water level variations following the operation of the Three Gorges Dam with special reference to the Hankou—Jiujiang reach of the Middle Yangtze River[J]. Advances in Water Science，2024，35(1)：85-97.（in Chinese））

［26］LAI X J，SHANKMAN D，HUBER C，et al. Sand mining and increasing Poyang Lake's discharge ability：a reassessment of causes for lake decline in China[J]. Journal of Hydrology，2014，519：1698-1706.

［27］张奇，薛晨阳，夏军. 鄱阳湖极端干旱的影响、成因与对策 [J]. 中国科学院院刊，2023，38(12)：1894-1902.(ZHANG Q，XUE C Y，XIA J. Impacts，contributing factors and countermeasures of extreme droughts in Poyang Lake[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences，2023，38(12)：1894-1902.(in Chinese))

［28］WU R C，HUANG A N，HUANG D Q，et al. Characteristics of the summer regional precipitation events in the middle and lower Yangtze River basin and associated mechanisms[J]. Journal of Geophysical Research：Atmospheres，2025，130(3)：e2024JD042622.

［29］郑帅，翁白莎，严登华，等. 基于水循环全过程的旱涝级联效应研究框架 [J]. 水资源保护，2024，40(1)：60-70.(ZHENG S，WENG B S，YAN D H，et al. Research framework of drought-food cascade effect based on water cycle processes[J]. Water Resources Protection，2024，40(1)：60-70.(in Chinese))

［30］薛联青，章郁涵，刘远洪. 干旱区与湿润区旱涝急转演变特征对比分析 [J]. 水资源保护，2024，40(4)：1-8.(XUE L Q，ZHANG Y H，LIU Y H. Comparative study on change characteristics of drought-flood abrupt alternation in the arid and humid zones [J]. Water Resources Protection，2024，40(4)：1-8.(in Chinese))

Quantification and variation of hydrological drought in the Poyang Lake based on the constructed inundation area dataset*

YE Xuchun[1]，YUE Enxin[1]，LI Xianghu[2]，LI Chuanzhe[3]

(1. *School of Geographical Science*，*Southwest University*，*Chongqing* 400715，*China*；2. *Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences*，*Nanjing Institute of Geography and Limnology*，*Chinese Academy of Sciences*，*Nanjing* 210008，*China*；3. *State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin*，*China Institute of Water Resources and Hydropower Research*，*Beijing* 100038，*China*)

Abstract：Investigating the spatiotemporal heterogeneity of inundation dynamics in floodplain lakes and its impact on hydrological drought quantification is of great significance for enhancing the management practices of floodplain lake ecosystems and the ability to defend against flood and drought disasters. In this study，multi-source remote sensing data and image fusion technology were employed to construct continuous high-spatiotemporal-resolution inundation data in the Poyang Lake from 2000 to 2023，thereby revealing the spatiotemporal heterogeneity characteristics of the lake inundation dynamics. Subsequently，drawing on the principle of the Standardized Precipitation Index (SPI)，a standardized hydrological drought index based on the lake inundation area was proposed，and based on this，the change characteristics of hydrological drought in Poyang Lake were analyzed. The results show that: ① The spatiotemporal heterogeneity of inundation dynamics in the Poyang Lake is prominent. The inundation area in the main lake region and the peripheral dished lake region exhibits not only asynchronous intra-annual fluctuations，but also opposite inter-annual change trend. ② Hydrological drought index calculated from water level observations at specific hydro-stations has substantial uncertainties when quantifying the overall hydrological drought of the Poyang Lake，whereas the calculated hydrological drought index based on lake inundation area is more deterministic and scientific validity. ③ The hydrological drought in Poyang Lake displays complexity in both seasonal distribution and spatial pattern. Extreme droughts mainly occur from April to October within a year，and are more likely to occur in the main lake region. The combination of remote-sensing big data and image fusion technology can achieve a refined quantitative analysis of hydrological drought in large floodplain lakes，and promote the protection and utilization of lake resources as well as the prevention and control of flood and drought disasters.

Key words：hydrological drought；inundation area；floodplain lake；data fusion；remote sensing

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 42071028；No. U23A2001).

DOI： 10.14042/j.cnki.32.1309.2025.02.010

三峡水库 8 月份运行水位动态控制研究

陈桂亚 [1, 2, 3]

（1. 水利部长江水利委员会，湖北 武汉 430010；2. 水利部长江水利委员会水旱灾害防御创新团队，湖北 武汉 430010；
3. 长江水利委员会水文局，湖北 武汉 430010）

摘要：三峡水库运行水位动态控制已有一定基础，8 月份动态控制条件仍需进一步深入研究。实施三峡水库 8 月份运行水位动态控制，能够减轻三峡水库蓄水期对湖区水生态、水环境的影响，也可提升三峡水库的综合效益。本文从城陵矶地区防洪需求及洪水组合效应的角度出发，通过构建不同水情边界条件下的莲花塘水位水动力模拟模型，分析了三峡水库 8 月份运行水位动态控制幅度及条件。结果表明：①当三峡水库和四水合成来水合计小于 51 000 m^3/s 时，城陵矶地区不会超过警戒水位；②8 月 1 日以后，当实时四水合成来水流量小于 15 000 m^3/s，且莲花塘站水位低于 29.5m、预报洞庭湖水系未来一周无中等强度以上降雨过程时，三峡水库动态运行水位可控制在 145 ~ 155 m 之间。研究成果可为三峡水库的水资源综合利用提供技术支撑，尤其是可为 8 月份及之后出现涝旱急转不利条件时贮备抗旱水资源，实现旱涝同防同治。

关键词：水位动态控制；8 月份；城陵矶防洪；三峡水库
中图分类号：TV122.3 **文献标志码：**A **文章编号：**1001-6791(2025)02-0284-12

三峡工程是治理和开发长江的关键性骨干工程，具有防洪、发电、航运等综合效益[1-2]。三峡优化调度方案中规定三峡水库汛期 6 月 10 日至 9 月 9 日预留 221.5 亿 m^3 的防洪库容用以承担荆江河段及城陵矶附近地区的防洪任务，其中库水位 145 ~ 155 m 之间的 56.5 亿 m^3 库容兼顾对城陵矶地区防洪补偿调度[3-4]。洞庭湖水系汛期(5—7 月)早于长江干流，其较大洪水通常发生在 6 月到 7 月上中旬，7 月中旬以后来水量一般迅速消退，洞庭湖区水位也随之降低。如遇长江来水和洞庭湖水系来水偏枯的年份，将会影响湖区供水安全，同时也会放大三峡水库汛末蓄水对湖区水生态、水环境的影响[5-6]。因此，当 8 月份以后长江上游来水和洞庭湖水系来水较小、城陵矶地区防洪压力不大时，三峡水库可以进一步考虑在 150 ~ 155 m 之间动态控制。在确保防洪安全的前提下，实施三峡水库运行水位动态控制能够减轻三峡等梯级水库蓄水期对湖区水生态、水环境的影响，保障湖区水资源安全，尤其是可为 8 月份及之后出现涝旱急转不利条件时贮备抗旱水资源，实现旱涝同防同治[7]，进一步充分发挥三峡工程的综合效益。

目前三峡水库 145 ~ 155 m 之间库容的运用方式研究着重于城陵矶防洪优化调度。例如，陈桂亚等[3]综述了三峡工程防洪调度的研究进程，研判了三峡水库在 2016 年、2017 年、2020 年及 2024 年典型年洪水中的防洪作用；冯宝飞等[8]模拟了不同典型洪水、调度方式下三峡水库对城陵矶地区的调度效果，提出了三峡水库对城陵矶地区的实时补偿调度方式；文小浩等[9]研究了溪洛渡、向家坝水库配合三峡水库对城陵矶防洪补偿控制水位优化方法，提出了不同调度目标转换临界水位的防洪调度优化方式；龚文婷等[10]分析了新调度规程下三峡工程对城陵矶地区的防洪补偿效益。另一方面，三峡水库 145 ~ 155 m 之间库容的释放着重于蓄水时机优化，郭生练等[11]研究了华西秋雨与梅雨对三峡水库蓄水时机的影响，结果表明：长江中下游梅雨发

收稿日期：2025-01-03；**网络出版日期：**2025-04-16
网络出版地址：https://link.cnki.net/urlid/32.1309.P.20250416.1210.005
基金项目：国家重点研发计划项目(2023YFC3206000)
作者简介：陈桂亚(1968—)，男，江苏涟水人，正高级工程师，主要从事流域防洪调度与水文水资源分析计算研究。
E-mail：1051393268@qq.com

生在三峡水库主汛期前，长江上游华西秋雨最早于 8 月 21 日开始；梅雨最晚于 8 月 8 日结束，出梅后，长江中下游防洪压力减轻，三峡水库可相机提前蓄水。王俊等[12]研究表明，预判不发生流域性大洪水时，三峡水库 6 月初至梅雨期结束前汛限水位按 145 m 设置，从梅雨期结束后逐渐提高水位，8 月 20 日后过渡到 155 m。上述研究从不同的角度论证了三峡水库 8 月份为城陵矶预留防洪库容释放的可行性和时机，但 8 月份的运行水位动态控制条件仍需深入研究。城陵矶地区洪水承接长江干流、清江和洞庭湖水系的来水，导致洪水的发生时间、来源和组成异常复杂[13-14]。

本文从城陵矶地区防洪需求及洪水特性的角度出发，基于水动力学模型模拟分析了三峡水库 8 月份运行水位动态控制条件，在确保荆江河段和城陵矶地区防洪安全的前提下，提出三峡水库 8 月份运行水位动态控制的综合建议方案。研究成果可为三峡水库的综合利用提供技术支撑，具有重大的社会和经济效益。

1　研究区域及数据

宜昌水文站以上为长江上游，河道全长为 4 500 km，控制流域面积约 100 万 km^2，约占全流域面积的 55% 以上。在宜昌至枝江区间有清江入汇，荆江河段干流有三口分流入洞庭湖，与洞庭四水汇合后，再在城陵矶汇入长江干流。洞庭湖位于 111°53'E—113°10'E、28°44'N—29°35'N 之间，为中国第二大淡水湖。洞庭湖水系主要由湘江、资水、沅江、澧水四大水系和长江松滋口、太平口、藕池口三口分流水系组成，另有汨罗江、新墙河等入汇[15]。天然湖泊面积约 2 625 km^2，分成东洞庭湖、南洞庭湖和西洞庭湖（由目平湖、七里湖组成），自西向东形成一个倾斜的水面。本文的研究区域、水系及水文站网见图 1。

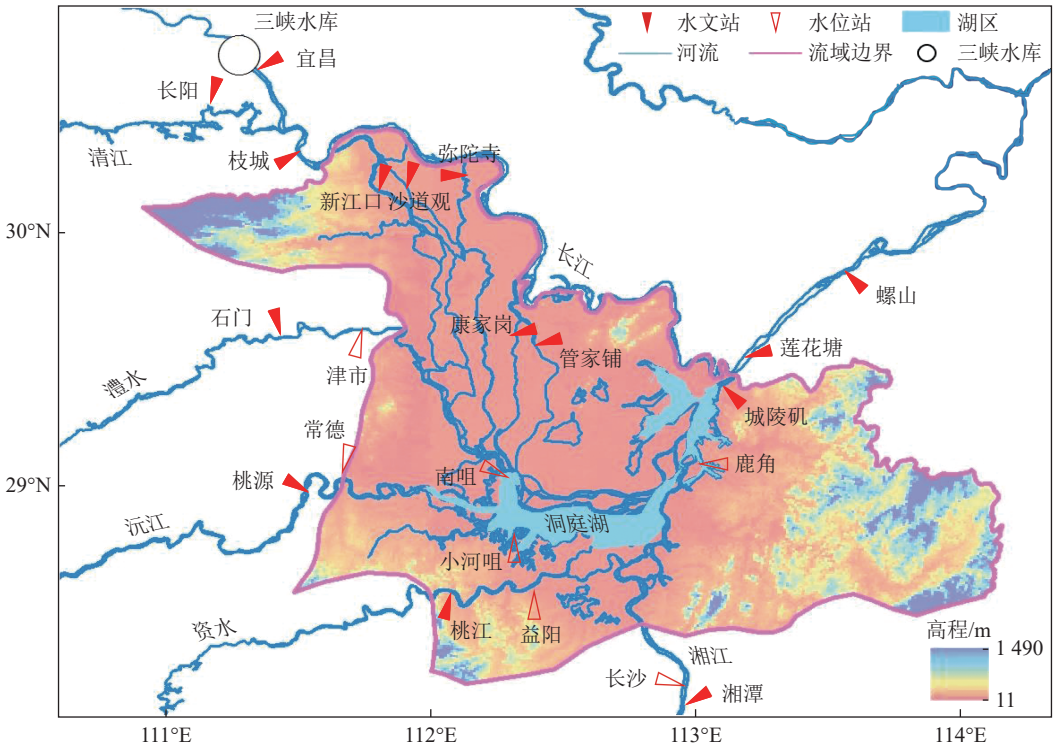


图 1　研究区域水系及水文站网

Fig. 1　Research area and hydrological station network diagram

本研究收集采用的基本资料包括各主要依据站建站至 2020 年的水位、流量数据，主要包括：长江干流宜昌站、枝城站以及洞庭湖水系湘江湘潭站、资水桃江站、沅江桃源站和澧水石门站等控制性水文站建站

以来至 2020 年的逐日流量资料；莲花塘站、七里山站等建站至 2020 年的逐日水位资料等，见表 1。

表 1 研究依据水文(位)站基本情况

Table 1 Research basis hydrological (position) station basic situation table

水系	站 名	集水面积/万km^2	主要观测资料年份	
			水 位	流 量
长江干流	宜昌	100.55	1877—1941年，1946—2020年	1946—2020年
	枝城	102.41	1936—2020年	1936—2020年
	莲花塘	/	1991—2020年(其中1992年和1995年缺测)	1946—1948年，1950—1954年
	螺 山	129	1953—2020年	1953—2020年
清 江	高坝洲(长阳)	1.51(1.53)	1950—1954年 1970—2020年	1950—1954年，1954—2020年
湘 江	湘 潭	8.16	1936—1937年，1943—1944年， 1946—1949年，1950—2020年	1950—2020年
沅 水	桃 源	8.52	1948—2020年	1948年至今
资 水	桃 江	2.67	1941—1944年，1947—1949年，1951—2020年	1941—1944年，1947—1949年，1951—2020年
澧 水	石 门(三江口)	1.53(1.52)	1950—1979年(三江口) 1980—2020年	1950—1979年(三江口) 1980—2020年
洞庭湖口	城陵矶(七里山)	/	1930—1938年，1946—1949年，1950—2020年	1930—1938年，1946—1949年，1950—2020年

2 研究方法

三峡水库现行汛期动态控制原则如下：考虑未来 1 ~ 3 d 水文气象预报，在保证防洪安全的前提下，在 6 月 11 日至 8 月 20 日期间，当实时三峡水库入库流量小于 28 000 m^3/s、预报未来 3 d 三峡水库入库流量均不大于 30 000 m^3/s、且沙市站和莲花塘站水位分别在 41.0 和 30.5 m 以下、预报洞庭湖水系未来 3 d 无中等强度以上降雨过程时，库水位的变动上限可在 146.5 ~ 148.0 m 浮动；8 月 21 日至 8 月 31 日，库水位一般不超过 150 m；结合防洪抗旱形势需要，9 月 1 号可逐渐抬升水位，9 月 10 号可控制在 150 ~ 155 m。

本研究重点关注三峡水库 8 月 145 ~ 155 m 之间的库容动态运用的启用条件。三峡水库 145 ~ 155 m 之间的 56.5 亿 m^3 库容既为荆江河段预留，也兼顾对城陵矶地区防洪补偿调度(图 2)。长江上游宜昌站和洞庭四水合成长系列年最大日均流量的散点图如图 3 所示，宜昌站实测年最大洪峰量级一般为 30 000 ~ 75 000 m^3/s，发生频次以 7 月份最多，8 月次之；5—7 月为四水合成年最大洪峰出现集中时段，7 月以后洪峰量级和频次显著减小。因此，8 月在满足条件后，不需要三峡水库对城陵矶地区实施防洪补偿调度，如长江上游发生洪水，三峡水库 155m 以上库容满足对荆江防洪调度的要求。

当 8 月以后长江上游来水和洞庭湖水系来水较小、城陵矶地区防洪压力不大时，三峡水库可以考虑在 145 ~ 155 m 之间动态控制。出于防洪安全考虑，在不同来水情景下莲花塘水位情势的研究过程中，不考虑三峡水库的调蓄影响，即认为在三峡水库入库、四水合成来水、莲花塘初始水位满足特定的边界条件时，三峡水库就不需为城陵矶实施防洪补偿调度，因此，为城陵矶地区预留的防洪库容可以相机释放，即在 145 ~ 155 m 之间动态控制。

城陵矶地区防洪情势主要受三峡水库来水、四水合成来水及莲花塘初始水位的影响[16]。由于影响因素的复杂性，本文设置多种模拟情景开展三峡水库 8 月份运行水位动态控制及条件研究。首先构建长江与洞庭湖一-二维耦合水动力模型，以 MIKE21 FM 模块为基础，其中长江干流、荆江三口汇流河道、四水尾闾及洞庭

湖湖区均采用一-二维耦合水动力学模型计算[17]。模型地形采用 2012 年长江干流河道和洞庭湖区地形资料，可以反映三峡水库建库后的荆江河道特征。模型上边界为宜昌站实测流量，下边界为螺山站水位—流量关系，洞庭四水、清江等主要控制水文站流量作为边界条件汇入模型。

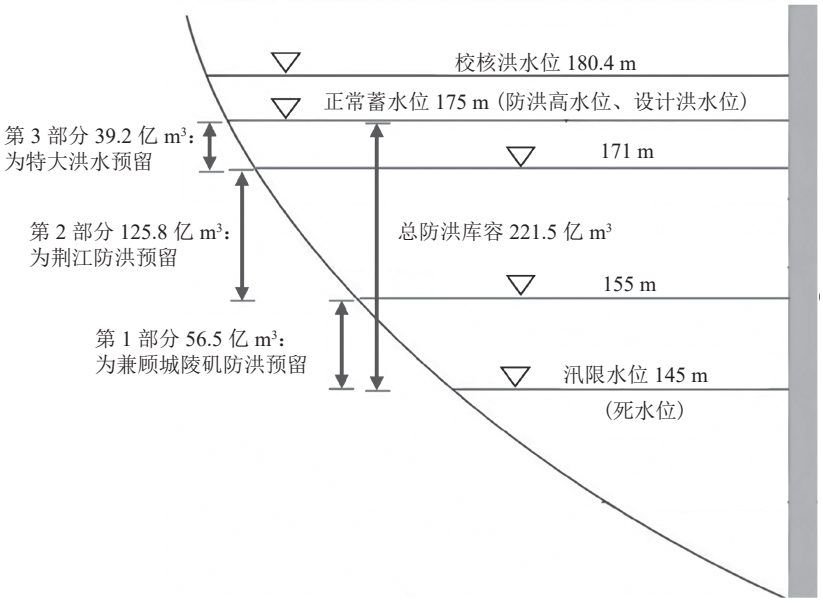


图 2　三峡水库特征水位及库容示意

Fig. 2　Schematic diagram of the characteristic water level and storage of the Three Gorges Reservoir

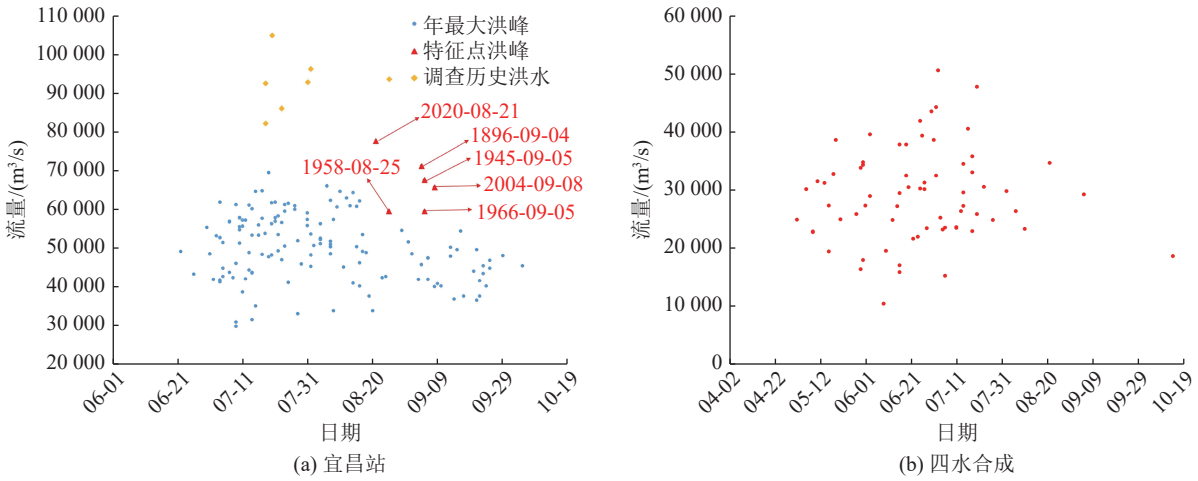


图 3　宜昌站和洞庭四水合成年最大洪峰散点图

Fig. 3　Scatter plot of the maximum flood peak of Yichang station and the Dongting four-river

由于无法采用穷举洪水过程的方式开展不同水位级三峡、四水来水条件对城陵矶防洪形势影响的模拟研究，因此需要对洪水过程有所选择和假定，采用 3 种典型洪水情景进行分析研究（表 2）：情景 1，通过城陵矶地区来水偏不利的典型年洪水形成洪水过程库，将三峡、四水来水均采用典型年过程按设定流量级同倍比缩放来进行研究；情景 2，洪水过程的不确定性较大，在实际调度中采用何种典型年来水成果亦难以判别，因此研究恒定流（流量大小不随时间变化）情景作为最不利的水情边界条件，将三峡和四水来水其中的一个变量采用恒定流过程，另一个采用典型年过程进行研究；情景 3，取最不利洪水过程的外包，即将三峡

和四水来水都采用恒定流过程。在模拟时三峡和四水来水以 1 000 m^3/s 为分级考虑了各种可能的洪水量级情况，限于篇幅，文中仅展示其中和研究结论相关的流量级。

表 2 洪水情景假定

Table 2 Assumption of flood scenarios

来水假定	典型年选择	洪水过程	各量级洪水过程缩放方式
典型年来水	1952，1969，1988，2002	三峡、四水来水均为典型年过程	同倍比缩放
典型年与恒定流组合	1952，1969，1988，2002	三峡和四水来水其中之一采用恒定流过程，另一个采用典型年过程进行研究	同倍比缩放
恒定流来水	/	三峡和四水来水都采用恒定流过程	同倍比缩放

根据上述原则，选择四水合成流量 8 月份以后洪峰流量最大的 1952 年、1969 年、1988 年和 2002 年 4 场非流域性洪水形成典型洪水过程库(图 4)。4 场典型年过程中宜昌日平均最大流量分别为 49 700、41 900、47 400 和 48 600 m^3/s；四水合成日平均最大流量分别为 30 900、24 000、29 300 和 34 700 m^3/s。洞庭湖湘江、资水、沅江、澧水在 1952 年典型年占比分别为 29.7%、15.3%、44.8% 和 10.2%；在 1969 年典型年占比分别为 26.9%、15.8%、47.4% 和 9.9%；在 1988 年典型年占比分别为 20.6%、19.1%、48% 和 12.3%；在 2002 年典型年占比分别为 46.6%、14.9%、34.1% 和 4.3%。洪水地区组成方面具有一定的代表性。

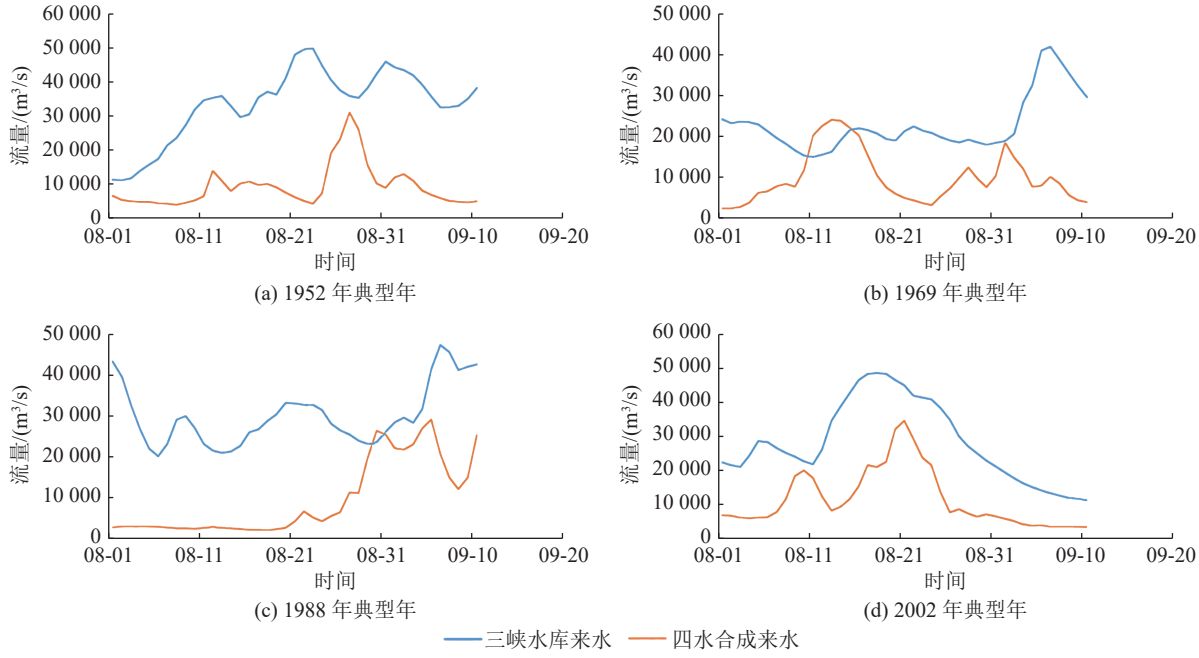


图 4 典型洪水过程库

Fig. 4 Typical flood process library

3 结果与分析

3.1 模型率定与检验

模型参数的率定主要是河道和湖泊糙率的率定，以合理反映河道和湖泊的阻力。河道阻力不但与河道自身的物理特性有关，还与其上下游的水位、流量、水面坡降等因素有关。就长江中游荆江和洞庭湖区而言，不同的洪水组成、量级及水位涨落率均会对水流阻力产生影响，因此进行糙率率定时必须选择具有一

定代表性的典型洪水过程。

考虑到模型中地形数据大部分为 2011—2013 年测量，选择 2011 年枯水期、2012 年平水期和 2012 年丰水期作为率定依据。2011 年属于该区域典型的枯水年份，三峡入库年最大流量仅有 28 100 m^3/s，三口分流量急剧降低，同时四水来流量也比同期偏少，洪水过程具有历时短、洪量小、水位低的特点。2012 年洪水为长江中游区域性较大洪水，长江干流洪水与洞庭湖四水来水多次遭遇致使螺山水位持续走高。莲花塘站 2016—2020 年检验结果如图 5 所示。由图 5 可以看出，莲花塘站水位模拟值与实测值拟合程度较好，纳什效率系数（E_{NS}）为 0.97。因此该模型可以用来开展不同洪水组合情景下的城陵矶地区洪水情势研究。

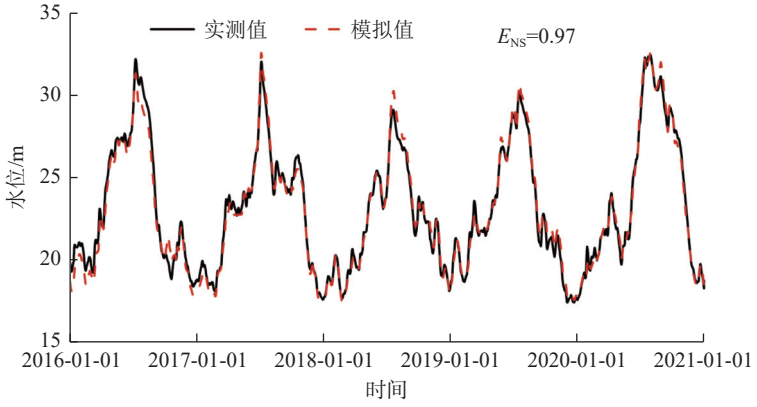


图 5　莲花塘站水位验证结果

Fig. 5　Verification results of Lianhuatang water level

3.2　典型年不同水情条件与莲花塘最高水位的响应关系

应用已建的水动力学模型，基于典型洪水过程库，分析三峡水库、四水来水不同流量级和莲花塘不同初始水位情况下对应的莲花塘水位变化过程。综合对比分析，2002 年典型年过程是洞庭四水和三峡来水量级均较大且发生遭遇的过程，在长系列过程中对城陵矶地区防洪最不利。基于 2002 年典型年 8 月 1 日至 9 月 10 日洪水过程进行模拟分析，出于防洪安全考虑，将三峡来水洪峰和四水合成来水的洪峰进行错时处理使其发生遭遇。三峡来水和四水合成来水流量按照拟定流量级对典型年过程进行同倍比缩放。计算莲花塘初始水位分别为 29.0、29.5、30.0、30.5 m 时不同入流条件下莲花塘最高水位。限于篇幅，仅展示莲花塘初始水位为 29.5 m 的计算结果（表 3，基准面为冻结基面），可以看出：当三峡来水小于 30 000 m^3/s 且四水合成来水小于 35 000 m^3/s 时，莲花塘最高水位为 32.31 m，均未超过警戒水位；当三峡来水小于 45 000 m^3/s 且四水合成来水小于 35 000 m^3/s 时，莲花塘最高水位为 34.20 m，均未超过保证水位；当四水来水小于 21 000 m^3/s 且三峡合成来水小于 56 700 m^3/s 时，莲花塘最高水位为 34.29 m，均未超过保证水位。因此，考虑三峡水库对荆江地区的防洪调度前提下，当四水合成流量小于 21 000 m^3/s 时，莲花塘水位未超过保证水位。

3.3　典型年与恒定流组合的不同水情条件与莲花塘最高水位的响应关系

将三峡水库来水过程设定为不同量级的恒定流过程，四水来水和莲花塘起始水位均采用典型洪水过程库过程，分析三峡水库来水与莲花塘最高水位的响应关系。三峡水库来水流量级分别为 25 000、30 000、35 000、40 000 m^3/s 情景下对应的莲花塘水位变化过程如图 6 所示。从图 6 可以看出，当三峡水库来水流量级为 25 000 m^3/s 时，4 种典型年来水情景下莲花塘均未超过警戒水位；当三峡水库来水流量级为 30 000 m^3/s 时，2002 年典型年来水情景下莲花塘超过了警戒水位，4 种典型年来水情景下莲花塘均未超过保证水位；当三峡水库来水流量级为 35 000 m^3/s 时，1988 年和 2002 年典型年来水情景过程中莲花塘超过了警戒水位，4 种典型

年来水情景下莲花塘均未超过保证水位；当三峡水库来水流量级为 40 000 m^3/s 时，4 种典型年来水情景下，莲花塘均超过了警戒水位，但均未超过保证水位。

表 3 莲花塘初始水位为 29.5 m 时不同入流条件下莲花塘站最高水位

Table 3 Maximum water level of Lianhuatang station under different inflow conditions when the initial water level of Lianhuatang is 29.5 m

单位: m

四水合成流量/(m^3/s)	三峡来水流量/(m^3/s)							
	25 000	30 000	35 000	40 000	45 000	50 000	55 000	56 700
11 000	/	/	30.25	30.95	31.64	32.33	33.02	33.25
13 000	/	29.79	30.48	31.16	31.85	32.54	33.22	33.47
15 000	/	30.02	30.70	31.38	32.06	32.75	33.43	33.67
17 000	29.57	30.25	30.93	31.60	32.28	32.95	33.63	33.88
19 000	29.81	30.48	31.15	31.82	32.49	33.16	33.83	34.08
21 000	30.04	30.71	31.37	32.04	32.70	33.37	34.04	34.29
23 000	30.28	30.94	31.60	32.26	32.92	33.58	34.24	34.49
25 000	30.51	31.16	31.82	32.48	33.13	33.79	34.44	34.69
27 000	30.74	31.39	32.04	32.70	33.35	34.00	34.65	34.90
29 000	30.98	31.62	32.27	32.91	33.56	34.20	34.85	35.10
31 000	31.21	31.85	32.49	33.13	33.77	34.41	35.05	35.30
33 000	31.45	32.08	32.72	33.35	33.99	34.62	35.26	35.51
35 000	31.68	32.31	32.94	33.57	34.20	34.83	35.46	35.71

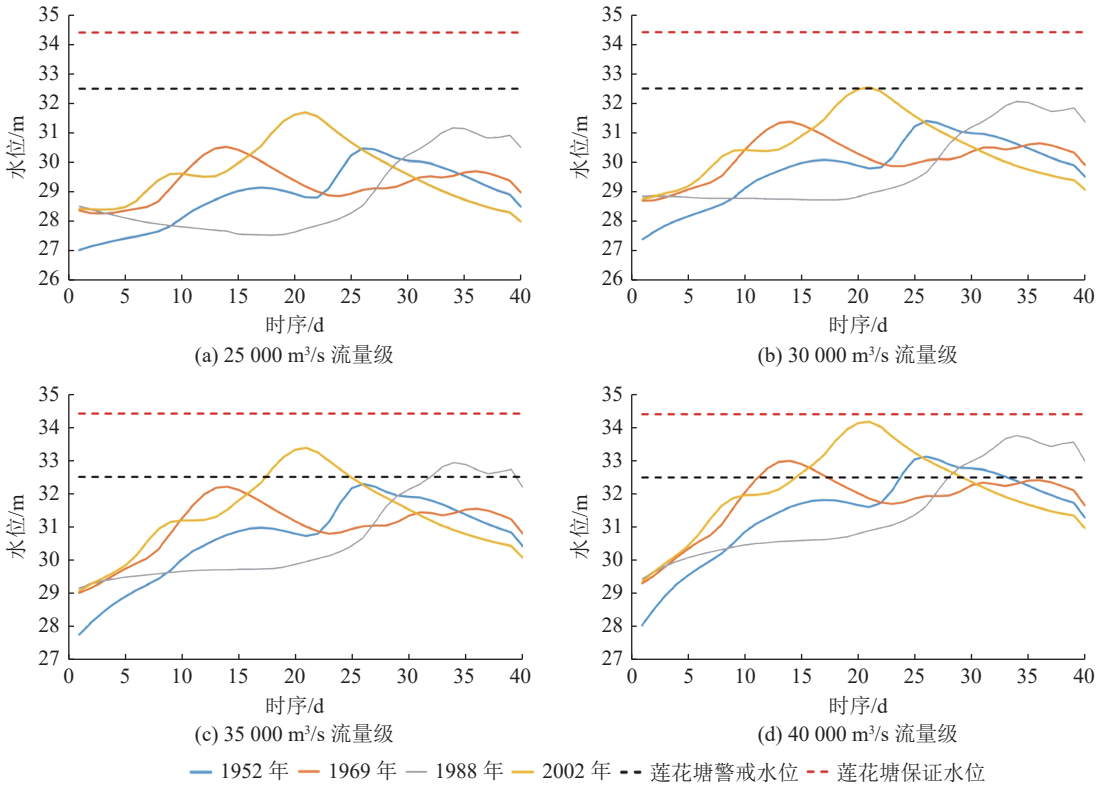


图 6 三峡水库来水不同流量级条件下莲花塘水位变化

Fig. 6 Variation of water level in Lianhuatang under different flow levels of the Three Gorges Reservoir's inflow

将四水来水过程设定为不同量级的恒定流过程，三峡水库来水和莲花塘起始水位均采用典型洪水过程库过程，分析四水合成来水与莲花塘最高水位的响应关系。四水合成来水流量级分别为 10 000、15 000、20 000、25 000 m^3/s 情景下对应的莲花塘水位变化过程如图 7 所示。从图 7 可以看出，当四水合成来水流量级为 10 000 m^3/s 时，4 种典型年来水情景下莲花塘均未超过警戒水位；当四水合成来水流量级为 15 000 m^3/s 时，1952 年和 2002 年典型年来水情景下莲花塘超过了警戒水位，4 种典型年来水情景下莲花塘均未超过保证水位；当四水合成来水流量级为 20 000 m^3/s 时，4 种典型年来水情景下，莲花塘均超过了警戒水位，但均未超过保证水位；当四水合成来水流量级为 25 000 m^3/s 时，4 种典型年来水情景下莲花塘均超过了警戒水位，1952 年和 2002 年典型年来水情景下莲花塘超过了保证水位。

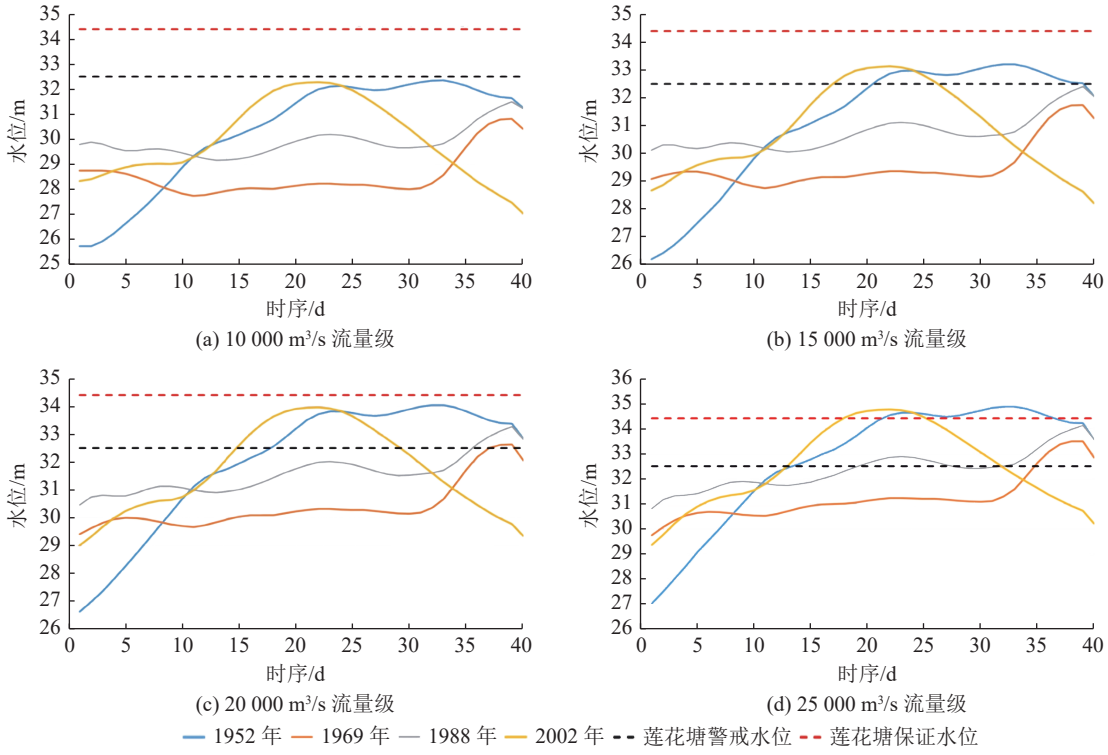


图 7　四水来水不同流量级条件下莲花塘水位变化

Fig. 7　Variation of water level in Lianhuatang under different flow levels of Dongting four-river

综上所述，当三峡水库来水流量级小于 25 000 m^3/s 时，上述模拟的大水典型年过程中莲花塘未超过警戒水位；当三峡水库来水流量级小于 40 000 m^3/s 时，莲花塘未超过保证水位。当四水合成来水流量级小于 10 000 m^3/s 时，上述模拟的大水年典型过程中莲花塘未超过警戒水位；当四水合成来水流量级小于 20 000 m^3/s 时，莲花塘未超过保证水位。

3.4　恒定流组合的不同水情条件与莲花塘最高水位的响应关系

不同典型年来水情景对莲花塘水位变化过程和最高水位影响显著，在实际调度中采用何种典型年来水成果具有较大的不确定性。从偏安全的角度出发，将三峡水库来水和四水来水均设定为恒定流(视为场次洪水过程的洪峰值)，基于水动力学模型模拟结果研究三峡水库、四水不同来水流量级和莲花塘不同初始水位情况下莲花塘水位的变化。研究时段为 8 月 1 日至 9 月 10 日，并分析研究不同时间节点，即未来 10、20、30 和 40 d 内莲花塘的最高水位，为三峡水库防洪库容在不同时间节点和来水情景下的释放进程提供依据。

限于篇幅，文中仅展示莲花塘未来 40 d 内最高水位计算结果(图 8，基准面为冻结基面)，结果表明：

(1)当莲花塘初始水位为 29 ~ 30 m、三峡和四水合成来水合计不超过 55 000 m^3/s 时，以及当莲花塘初始水位为 30.5 m、三峡和四水合成来水合计不超过 53 000 m^3/s 时，莲花塘未来 10 d 内不会超过警戒水位；当三峡和四水合成来水合计不超过 65 000 m^3/s 时，莲花塘未来 10 d 内不会超过保证水位。

(2)当莲花塘初始水位为 29 ~ 29.5 m、三峡和四水合成来水合计不超过 53 000 m^3/s 时，以及当莲花塘初始水位为 30 ~ 30.5 m、三峡和四水合成来水合计不超过 51 000 m^3/s 时，莲花塘未来 20 d 内不会超过警戒水位；当三峡和四水合成来水合计不超过 63 000 m^3/s 时，莲花塘未来 20 d 内不会超过保证水位。

(3)当莲花塘初始水位为 29 ~ 30.5 m、三峡和四水合成来水合计不超过 51 000 m^3/s 时，莲花塘未来 30、40 d 内不会超过警戒水位；当三峡和四水合成来水合计不超过 63 000 m^3/s 时，莲花塘未来 30、40 d 内不会超过保证水位。

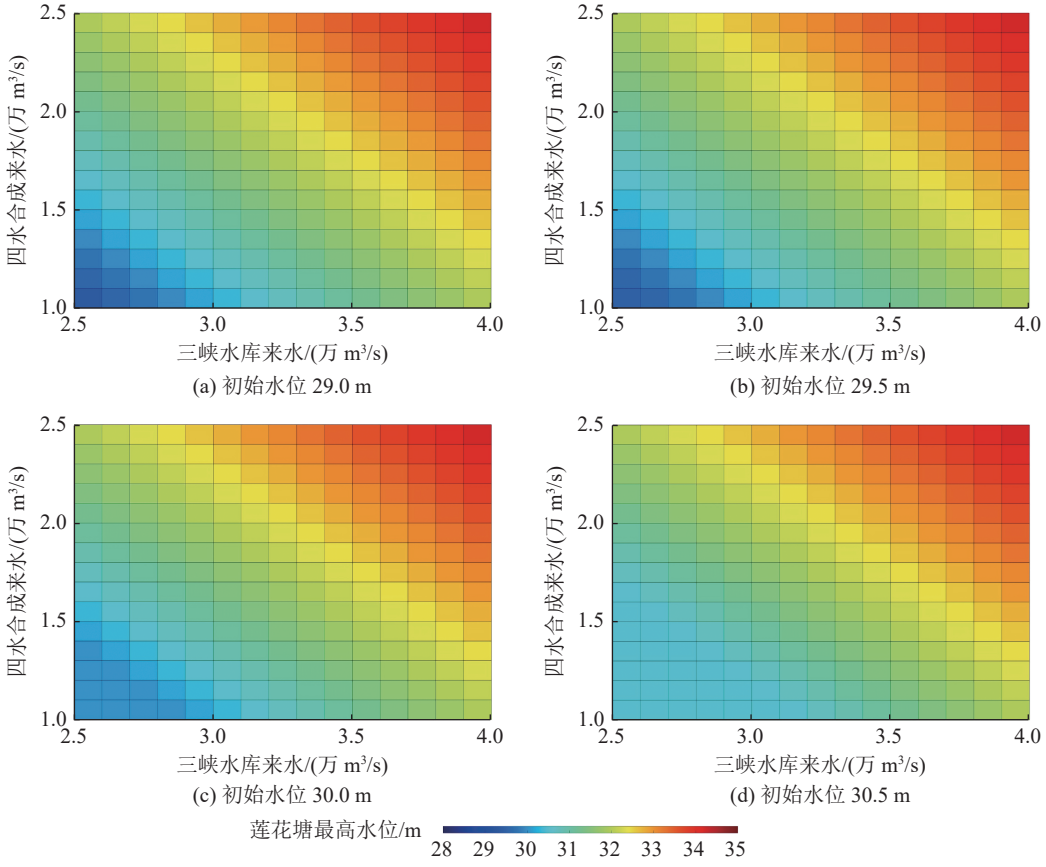


图 8 不同来水情景下莲花塘未来 40 d 内最高水位

Fig. 8 Highest water level of Lianhuatang in the next 40 days under different inflow conditions

3.5 三峡水库 8 月份运行水位动态控制方案及合理性分析

根据前述多种模拟结果的外包值，当莲花塘初始水位为 29.5 m、三峡水库和四水合成来水合计小于 51 000 m^3/s 时，城陵矶地区未来 40 d 内不会超过警戒水位，三峡水库水位可以逐步抬升到 155 m 运行；当三峡水库和四水合成来水合计大于 51 000 m^3/s 时，三峡水库可提前加大发电流量进行预泄，必要时与洞庭湖洪水错峰调度。经统计分析，三峡来水和四水合成来水在 1951—2020 年 8 月超过 51 000 m^3/s 的频率为 6.3%，表明大多数情形下三峡水库具备抬升运行水位的条件。由于三峡水库满发流量为 30 000 m^3/s 左右，为便于实际调度

过程中使用，建议三峡水库 8 月份运行水位动态控制方案如下：

8 月 1 日以后，当实时四水合成来水流量小于 15 000 m^3/s，且莲花塘站水位低于 29.5 m、预报洞庭湖水系未来一周无中等强度以上降雨过程时，三峡水库水位可以逐步抬升到 155 m 运行。实时调度中，建议当预报上游或者长江中游河段涨水，三峡水库可提前加大发电流量，必要时与洞庭湖洪水错峰调度。

对除流域性大洪水（1954 年、1998 年、2020 年）外的所有莲花塘 8 月份超警戒水位的典型年，即 1988 年、1996 年、2002 年、2010 年、2012 年这 5 个沙市未超警戒水位的年份和 1980 年、1993 年和 1999 年这 3 个沙市超警戒水位的年份，按照不考虑预报预泄及川渝河段防洪库容联合运用的原则，依据上述三峡水库运行水位动态控制方案进行分析。结果表明，1980 年、1993 年、1996 年、1999 年和 2002 年典型年在 8 月 1 日至 9 月 10 日均不满足动态控制运用条件，采用防洪调度方式运行。对于 1988 年典型年，8 月 1 日莲花塘水位、三峡水库来水和四水合成来水均满足动态运行条件，三峡水库逐步抬升水位运行，8 月 29 日后洞庭湖水系来水开始增大，四水合成流量最大增加至 29 300 m^3/s。三峡水库按照加大发电流量的原则下泄，并与四水合成来水错峰。在此过程中莲花塘水位最高为 33.1 m，未超过保证水位，考虑金沙江下游梯级水库、洞庭湖水系水库与三峡水库联合调度，可控制莲花塘水位不超过警戒水位 32.5 m，防洪风险可控。对于 2010 年和 2012 年典型年，洞庭湖水系来水在 8 月 1 日后不断减小，莲花塘水位也不断降低，三峡水库在动态运行的过程中莲花塘最高水位均未超过警戒水位。

综上所述，采用莲花塘超警戒水位的大水典型年对所提三峡水库动态运行条件进行检验，结果表明三峡水库遭遇各类型洪水均不会增加防洪风险。

4　结　　论

本文从城陵矶地区防洪需求及洪水特性的角度出发，基于洞庭湖地形及水文资料构建了不同水情边界条件下的莲花塘水位水动力模拟模型，分析了三峡水库 8 月运行水位动态控制幅度及条件，主要结论如下：

（1）当三峡水库和四水合成来水合计均小于 51 000 m^3/s 时，三峡水库不进行防洪补偿调度城陵矶地区也不会超过警戒水位。

（2）为便于实际调度过程中使用，建议三峡水库运行水位动态控制方案如下：8 月 1 日以后，当实时四水合成来水流量小于 15 000 m^3/s，且莲花塘站水位低于 29.5 m、预报洞庭湖水系未来一周无中等强度以上降雨过程时，三峡水库水位可以逐步抬升到 155 m 运行；实时调度中，当预报上游或者长江中游河段涨水，三峡水库可提前加大发电流量，必要时与洞庭湖洪水错峰调度。

（3）8 月条件允许时，三峡水库实施运行水位动态控制，提升水资源综合利用效益，尤其是可为 8 月及之后出现涝旱急转不利条件时贮备抗旱水资源，实现旱涝同防同治。

参考文献：

[1] 陈桂亚. 长江流域水库群联合调度关键技术研究 [J]. 中国水利，2017(14)：11-13.（CHEN G Y. Research on key technologies of joint operation of reservoir group in the Yangtze River basin[J]. China Water Resources，2017(14)：11-13.（in Chinese））

[2] 赵汗青，任实，袁赛瑜，等. 三峡库区洪峰的来水组成及传播特征 [J]. 水科学进展，2022，33(6)：924-933.（ZHAO H Q，REN S，YUAN S Y，et al. Inflow composition and transport of Three Gorges Reservoir flood peaks[J]. Advances in Water Science，2022，33(6)：924-933.（in Chinese））

[3] 陈桂亚，张俊，邹强. 三峡工程防洪调度研究及作用分析 [J]. 中国水利，2024(22)：41-47.（CHEN G Y，ZHANG J，ZOU Q. Studies on flood control operation of the Three Gorges Project and its functions[J]. China Water Resources，2024(22)：41-47.（in Chinese））

[4] 周新春，许银山，冯宝飞. 长江上游干流梯级水库群防洪库容互用性初探 [J]. 水科学进展，2017，28(3)：421-428.（ZHOU X C，XU Y S，FENG B F. An exploration on the interoperability of the flood control capacities of cascade reservoir groups in the upper reaches of Yangtze River[J]. Advances in Water Science，2017，28(3)：421-428.（in Chinese））

[5] 张超，彭杨，纪昌明，等. 长江上游与洞庭湖洪水遭遇风险分析 [J]. 水力发电学报，2020，39(8)：55-68.（ZHANG C，PENG Y，JI C M，et al. Floods encountering risk analysis for Upper Yangtze River and Dongting Lake[J]. Journal of Hydroelectric Engineering，2020，39(8)：55-68.（in Chinese））

[6] 章广越，谈广鸣，张为，等. 三峡水库运行后汉口—九江河段水位变化特征及成因 [J]. 水科学进展，2024，35(1)：85-97.（ZHANG G Y，TAN G M，ZHANG W，et al. Characteristics and causes of the water level variations following the operation of the Three Gorges Dam with special reference to the Hankou—Jiujiang reach of the Middle Yangtze River[J]. Advances in Water Science，2024，35(1)：85-97.（in Chinese））

[7] 陈桂亚，张俊，张虎. 2022 年长江流域枯水应对与思考 [J]. 长江技术经济，2023，7(3)：1-5.（CHEN G Y，ZHANG J，ZHANG H. Responses to and reflections on low water level in Yangtze River basin in 2022[J]. Yangtze River Technology and Economy，2023，7(3)：1-5.（in Chinese））

[8] 冯宝飞，许银山，李洁. 三峡水库对城陵矶地区防洪补偿调度方式探讨 [J]. 人民长江，2021，52(12)：27-33.（FENG B F，XU Y S，LI J. Discussion on flood control compensation operation mode of Three Gorges Reservoir to Chenglingji reach[J]. Yangtze River，2021，52(12)：27-33.（in Chinese））

[9] 文小浩，张勇传，钮新强，等. 溪洛渡、向家坝水库配合三峡水库对城陵矶防洪调度优化研究 [J]. 水电能源科学，2022，40(6)：71-74.（WEN X H，ZHANG Y C，NIU X Q，et al. Research on optimization of flood control operation of Three Gorges Reservoir for Chenglingji under cooperation of Xiluodu and Xiangjiaba reservoirs[J]. Hydroelectric Energy Science，2022，40(6)：71-74.（in Chinese））

[10] 龚文婷，邢龙，胡挺，等. 新调度规程下三峡工程防洪综合效益分析 [J]. 水电能源科学，2021，39(10)：89-92.（GONG W T，XING L，HU T，et al. Comprehensive benefit analysis of flood control for Three Gorges Project under new operating regulations[J]. Water Resources and Power，2021，39(10)：89-92.（in Chinese））

[11] 郭生练，李娜，王俊，等. 华西秋雨与梅雨对三峡水库蓄水调度影响分析 [J]. 人民长江，2023，54(7)：69-74.（GUO S L，LI N，WANG J，et al. Influence of autumn rain of West China and Meiyu on impoundment operation of Three Gorges Reservoir[J]. Yangtze River，2023，54(7)：69-74.（in Chinese））

[12] 王俊，郭生练. 三峡水库汛期控制水位及运用条件 [J]. 水科学进展，2020，31(4)：473-480.（WANG J，GUO S L. On Three Gorges Reservoir control water level and operating conditions in flood season[J]. Advances in Water Science，2020，31(4)：473-480.（in Chinese））

[13] 尚海鑫，胡春宏，夏军强，等. 洞庭湖入汇对荆江河段水位的顶托程度与范围 [J]. 水科学进展，2023，34(3)：431-441.（SHANG H X，HU C H，XIA J Q，et al. Influence of Dongting Lake inflow on the degree and range of backwater effect in the Jingjiang reach[J]. Advances in Water Science，2023，34(3)：431-441.（in Chinese））

[14] 邹强，胡挺，饶光辉，等. 三峡水库对城陵矶防洪补偿控制水位研究Ⅱ：风险分析与运用方案 [J]. 人民长江，2024，55(2)：1-8.（ZOU Q，HU T，RAO G H，et al. Controlled of water level of Three Gorges Reservoir carrying out compensation dispatch to area II：risk analysis and operation scheme[J]. Yangtze River，2024，55(2)：1-8.（in Chinese））

[15] 申幸志，黄峰，韩帅，等. 洞庭湖中枯水期水情变化及其驱动因素 [J]. 水文，2024，44(1)：70-76.（SHEN X Z，HUANG F，HAN S，et al. Water regime changes and the driving factors of Dongting Lake in the normal and dry seasons[J]. China Hydrology，2024，44(1)：70-76.（in Chinese））

[16] 陈桂亚. 三峡水库对城陵矶防洪补偿库容释放条件分析 [J]. 人民长江，2020，51(3)：1-5，30.（CHEN G Y. Reservoir capacity release conditions for Chenglingji-oriented flood control regulation of Three Gorges Reservoir[J]. Yangtze River，2020，51(3)：1-5，30.（in Chinese））

[17] 徐卫红，张双虎，李娜，等. 长江全流域大洪水下三峡水库对洞庭湖区防洪贡献分析 [J]. 湖泊科学，2022，34(3)：935-944.（XU W H，ZHANG S H，LI N，et al. Analysis on flood control contribution of the Three Georges Reservoir for the Lake Dongting area

under basin-wide severe floods of Yangtze River[J]. Journal of Lake Sciences，2022，34(3)：935-944.(in Chinese))

Investigation on the dynamic control of operating water level at the Three Gorges Reservoir in August*

CHEN Guiya[1,2,3]

(1. *Changjiang Water Resources Commission of the Ministry of Water Resources*，*Wuhan* 430010，*China*；2. *Innovation Team for Flood and Drought Disaster Prevention of Changjiang Water Resources Commission of the Ministry of Water Resources*，*Wuhan* 430010，*China*；3. *Bureau of Hydrology*，*Changjiang Water Resources Commission*，*Wuhan* 430010，*China*)

Abstract：The dynamic control of operating water levels at the Three Gorges Reservoir has established a preliminary basis，yet the specific control conditions for August require thorough investigation. Implementing dynamic water level control during August can reduce ecological and environmental impacts during reservoir impoundment while enhancing comprehensive reservoir benefits. This study develops a hydrodynamic simulation model for Lianhuatang water levels under varying hydrological conditions，and analyzes dynamic control range and conditions for August operations，considering flood control requirements and compound flood dynamics in the Chenglingji area. The results show that: ① The Chenglingji area remains below warning levels when the combined inflows from the Three Gorges Reservoir and the Dongting four-river system are less than 51 000 m^3/s. ② After August 1，when the real-time Dongting four-river inflows are less than 15 000 m^3/s with Lianhuatang station levels under 29.5 m，and no medium-intensity or heavier rainfall is forecasted in the Dongting Lake basin in the next week，the operating water levels of the Three Gorges Reservoir can be dynamically controlled between 145 m and 155 m. These findings provide technical support for comprehensive utilization of water resources in the Three Gorges Reservoir，particularly for storing drought-relief water resources during potential abrupt transitions from flood to drought after August，enabling integrated flood-drought mitigation.

Key words：dynamic control of water level；August；flood control of Chenglingji；Three Gorges Reservoir

* The study is financially supported by the National Key R&D Program of China (No.2023YFC3206000).

DOI：10.14042/j.cnki.32.1309.2025.02.014

未来气候变化下帕隆藏布江流域不同重现期洪水量级的预估

李辰龙[1,2]，李大洋[1,2]，王 强[1,2]，付晓花[1,3]，杨 龙[1,2]，田富强[4]

（1. 南京大学地理与海洋科学学院，江苏 南京 210023；2. 南京大学关键地球物质循环前沿科学中心，江苏 南京 210023；3. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司，陕西 西安 710065；4. 清华大学水圈科学与水利工程全国重点实验室，北京 100084）

摘要：青藏高原地区水能资源丰富，开展气候变化背景下不同重现期洪水量级计算可为当地水利工程建设提供科学支撑。以帕隆藏布江流域为研究区，将分布式水文模型 VIC-Glacier 与可解释机器学习方法相结合，基于第六次国际耦合模式比较计划（CMIP6）以及冰川未来变化预估结果，推求未来近期（2027—2040 年）、中期（2047—2060 年）、远期（2087—2100 年）在中等强迫（SSP2-4.5）和高强迫（SSP5-8.5）情景下不同重现期的洪水量级。结果表明：帕隆藏布江流域洪水量级及其变化具有显著的空间异质特征；未来气候情景下，冰川覆盖面积减少、降水量增加导致径流组分发生改变；对于有冰川覆盖流域，不同重现期洪水量级未来整体呈现减少趋势，减少幅度为 6.46%～32.27%；对于无冰川覆盖流域，不同重现期洪水量级未来整体呈现增加趋势，增加幅度为 2.87%～15.52%。

关键词：洪水量级；VIC-Glacier 模型；随机森林；CMIP6；帕隆藏布江流域

中图分类号：P339　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1001-6791（2025）02-0332-13

青藏高原是亚洲水塔，水资源总量超过 9 万亿 m^3，水电蕴藏量为 4.5 亿 kW，占全国的 60% 以上[1-2]。同时，青藏高原具有地球上的第三大冰川群，冰川面积高达 5 万余 km^2，冰川融水是青藏高原河流的主要径流补给方式，贡献了 6%～45% 年径流总量，在夏季这一比例可高达 70%[3-4]。帕隆藏布江位于念青唐古拉山脉冰川覆盖区，流域内冰川面积占比大，径流机制以融冰径流为主[5]，气候变暖会通过影响冰川消融量对该区域的径流和洪水量级产生较大影响；且流域内降雨充沛，自然资源丰富，具有独特的自然和人文景观，自然灾害频繁，其下游河段是帕隆藏布江流域重要的水系通道，也是水电规划的重点开发河段，此河段规划通灯、新玉、帕隆三级大坝，规划水电梯级具有装机规模大、建坝高等特点。预估未来气候变化以及冰川融化背景下不同重现期洪水量级的变化，能够为该地区水资源开发利用以及水利工程设计提供关键科学支撑。

针对青藏高原地区径流和洪水的预测，国内外许多学者进行过相关研究。到 21 世纪末，全球变暖导致青藏高原地区气温较工业化前水平升高 1.5～4 ℃，7 条主要河流径流量增加 1.0%～7.2%[6]，其中，黄河、长江、雅鲁藏布江和恒河年径流量受降雨增加影响主要呈现增加趋势，湄公河、萨尔温江和印度河受降雨、融雪和冰川融化相对变化主要呈现先减小后增加的趋势[7]。Try 等[8] 使用分布式降雨-径流-淹没模型发现湄公河流域未来洪水呈现显著增加趋势；Zhang 等[9] 利用 SWAT 模型发现长江上游源区未来洪水量级在春夏季呈现增加趋势，在秋冬季呈现减少趋势；Long 等[10] 使用长短时记忆模型（LSTM）制作了人工智能化的水文模型，发现青藏高原 7 条主要河流径流均呈现增加趋势。但青藏高原地区的主要研究大多关注于径流或者洪峰

收稿日期：2024-12-06；**网络出版日期：**2025-03-19
网络出版地址：https://link.cnki.net/urlid/32.1309.P.20250318.1652.002
基金项目：国家自然科学基金项目（92047301；52379012）
作者简介：李辰龙（2000—），男，四川成都人，硕士研究生，主要从事流域洪水模拟及变化预测研究。E-mail：lichenlong0213@qq.com
通信作者：杨龙，E-mail：yanglong@nju.edu.cn

量级本身的变化，缺少对不同重现期下洪水量级的相关性研究，对于水利工程防洪标准的设计缺少实际的指导意义。直接采用水文模型进行长系列模拟计算存在计算时间长以及洪水量级对气候变化的响应特征及机制不明确等问题。机器学习如随机森林[11-13]、支持向量机[14-15]、长短时记忆网络[16]等可以建立不同重现期洪水量级与流域下垫面属性和气象驱动因子的联系和数据关系，突破传统水文模型的计算瓶颈，具有计算效率高、复杂度低等优势[17]，但该方法对样本需求量较大。以往研究主要单一采用机器学习模拟径流，本文将 VIC-Glacier 模型和机器学习方法相耦合，可以通过有限的站点资料得到更多子流域的水文资料，能够扩充机器学习的样本数量，使得机器学习结果具有更高的可信度。

本文以帕隆藏布江流域为研究区，通过构建分布式水文模型 VIC-Glacier，获取不同子流域的洪水量级信息；通过构建流域下垫面属性和气象驱动因子与不同重现期洪水量级的随机森林模型，结合可解释机器学习方法 SHAP 识别洪水量级变化的关键要素；考虑未来气象驱动因子的变化，推求不同气候情景下不同重现期流域洪水量级的变化程度。

1　研究区概况

帕隆藏布江流域(29°18'N—31°06'N，92°48'E—96°36'E)位于青藏高原东南部昌都和林芝地区的念青唐古拉山脉冰川地区(图 1(a)，图 1(b))，平均海拔 4 500 m 左右，地势起伏大，干流长度为 266 km，主要流经林芝市波密县，流域面积约为 2.6 万 km^2。流域内土地利用类型以林地(占比 25%)和草地(占比 52%)为主(图 1(c))，其余为裸地，裸地几乎被冰川覆盖。冰川覆盖面积占比高达 20.3%(图 1(d))，远高于青藏高原地区平均值 3.67%[18]，融冰径流占该地区总径流的 60% 以上[19]。流域气候温暖湿润，降水充沛，季节性差异较

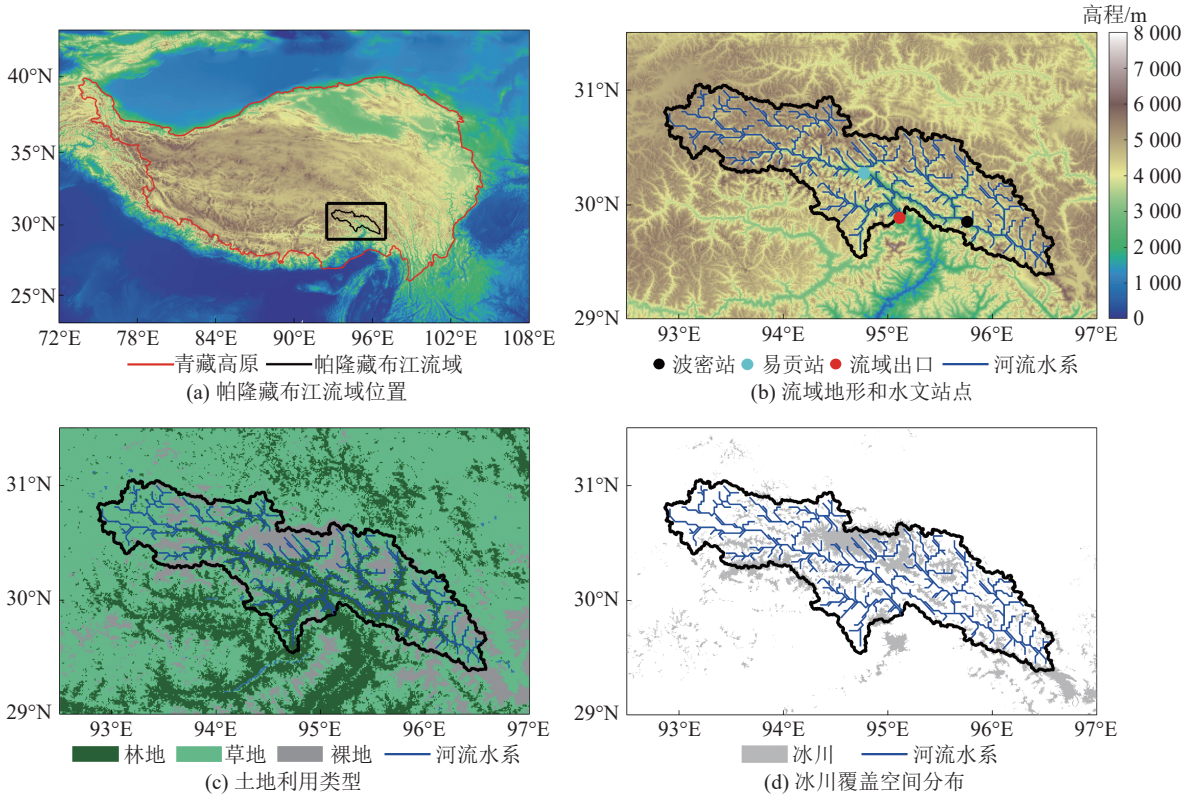


图 1　帕隆藏布江流域地形、土地利用及冰川覆盖空间分布

Fig. 1　Spatial distribution of topography, land use, and glacier coverage in the Parlung Zangbo River basin

大，多年平均降水量为 825 mm，暖季降水量占全年降水量的 67.5%[20-21]。

2 研究数据与方法

2.1 研究数据

本研究所采用的降水、气温、风速数据来自 CN05.1 数据集，空间分辨率为 0.25°×0.25°，时间分辨率为 1 d[20-21]；降雪数据来自于 WFDEI(WATCH Forcing Data methodology applied to ERA-Interim reanalysis data)数据，空间分辨率为 0.5°[22]；冰川覆盖数据来自《中国第二次冰川编目》[18]。波密和易贡水文站逐日流量观测数据由西藏自治区水文水资源勘测局提供，汇水面积分别为 4 465 和 10 540 km^2，时间范围分别是 2003—2017 年和 2013—2017 年。高程数据为美国地质调查局 SRTM 数据(空间分辨率为 90 m)，用于提取流向、流域边界以及河网等信息；土壤数据采用世界土壤数据库土壤数据集 HWSD v1.2[23]；土地利用数据为美国马里兰大学地理系土地覆盖数据(UMD Land Cover Classification 1998)，来自于 AVHRR 卫星获得的 1981—1994 年影像，共分为 14 个不同土地覆盖类型，空间分辨率为 1 km [24-25]。

2.2 研究方法

本文研究的技术路线为：首先构建帕隆藏布江流域考虑冰川水文过程的分布式水文模型 VIC-Glacier，利用波密站实测日径流资料进行模型参数率定和调试，得到帕隆藏布江各子流域逐日流量过程；根据逐日流量过程计算不同重现期的洪水量级，采用随机森林模型，建立不同重现期洪水量级与各子流域下垫面属性(包括流域面积、平均坡度、河网密度、冰川覆盖率)和气象驱动(包括年均降水量、降水天数、年均最大 1 日降水量、最大 1 日降水量年际变化、年均气温)之间的预测模型，结合机器学习可解释性算法 SHAP 识别洪水量级的影响因素；最后，结合 CMIP6 降水和气温数据计算不同气候变化情景下气象驱动因子的变化，代入预测模型，预估未来不同子流域不同重现期的洪水量级。

2.2.1 VIC-Glacier 模型

帕隆藏布江流域冰川覆盖比例较高，径流组分受冰川融水影响较大。本文采用耦合冰川度日因子算法的分布式水文模型 VIC-Glacier 模拟[26-27] 流域逐日流量过程。前人研究表明，该模型在青藏高原地区的径流模拟中有较好的效果，纳什效率系数基本位于 0.6 ~ 0.9 之间，能准确刻画青藏高原东南部等冰川密集区的冰川径流过程[19,27-29]，适用于模拟洪水过程。

模型计算总径流和各径流成分公式如下：

$$R_{t,i} = f_i R_{g,i} + (1 - f_i) R_{v,i} \tag{1}$$

$$R_{p,i} = R_{v,i} - R_{s,i} \tag{2}$$

式中：下标 i 表示第 i 个网格；$R_{t,i}$为总径流深，mm；f_i为冰川覆盖比例；$R_{v,i}$为原始 VIC 模型计算的径流深，mm；$R_{p,i}$和$R_{s,i}$分别为降雨径流深和原始 VIC 模型计算的融雪径流深，mm；$R_{g,i}$为融冰径流深，mm；计算公式如下：

$$R_{g,i} = P_i + G_i \tag{3}$$

$$G_i = \begin{cases} F_{DD}(T_i - T_a), & T_i > T_a \\ 0, & T_i \leqslant T_a \end{cases} \tag{4}$$

式中：P_i为降水量，mm；G_i为冰川融化量，mm；F_{DD}为冰川度日因子，mm/(℃·d)，F_{DD}取 8mm/(℃·d)；T_i为冰川表面的日平均气温，℃；T_a为冰川消融的临界温度，T_a取 0.5℃。

本文将流域划分为空间分辨率为 0.25°×0.25°的网格，共 4 006 个网格。利用波密站 2003—2017 年逐日流

量数据对 VIC-Glacier 模型进行率定和验证，选择 2003 年为预热期，2004—2010 年为率定期，2011—2017 年为验证期。对于参数率定采用 SCE-UA 参数自动率定算法[30]通过最小化目标函数（O_{BJ}）得到 VIC-Glacier 模型的最优参数，其表达式如下：

$$O_{BJ} = (1 - E_{NS}) + 5|\ln(1 + E_{MAX})|^{2.5} \quad (5)$$

式中：E_{NS}为纳什效率系数；E_{MAX}为年最大洪峰的相对误差。

2.2.2 *流域特征指标和洪水量级关系的建立*

以河流所在栅格点为子流域出口，将帕隆藏布江流域划分为 948 个相互嵌套的子流域。从面积分布上看，超过 90% 的流域面积小于 5 000 km^2。VIC-Glacier 模型提供了全部 948 个子流域 2004—2017 年的日流量过程。利用超阈值（Peaks-over-threshold，POT）方法挑选出洪峰量级排名前 100 的洪水事件，保证相邻洪峰出现的时间间隔超过 7 d。与年最大值法相比，超阈值法能较好地挖掘洪水样本中有价值的洪水信息，提高样本容量，提升频率统计分析的计算精度[31]。将得到的洪水序列样本进行 P-Ⅲ频率曲线适线，使纵向离差绝对值之和最小，基于拟合曲线推求不同重现期（100、50、10 a）洪水量级。但受限于水文资料的时间分辨率，本文所关心的洪水过程为日尺度的极端径流过程。

计算流域下垫面属性以及气象驱动因子等各指标，采用随机森林模型[32-33]和 SHAP 方法[34-35]识别和解释各单一变量对洪水响应特征的重要性。从各子流域中选择 80% 为训练集，剩余 20% 为测试集，建立指标与不同重现期洪水量级的随机森林模型，计算其方差膨胀因子，剔除方差膨胀因子大于 10 的特征因子，以消除自变量之间的多重共线性。考虑到洪水量级不仅与降水量和降雨强度有关，还受地形、区域土地利用、流域土壤类型等影响[36-39]，最终选取流域面积（A）、平均坡度（S）、河网密度（D）、冰川覆盖率（C_G）、年均降水量（P_{avg}）、降水天数（D_p）、年均最大 1 日降水量（P_{max}）、最大 1 日降水量年际变化（P_{cv}）和年均气温（T_{Air}）共 9 个指标。采用 SHAP 值对预测模型进行评估，并识别影响洪水量级的主要因素。

2.2.3 *未来洪水量级预估*

未来情景气象数据为 CMIP6 下 11 个国家的 22 个气候模式的降水和气温数据[7,40-42]，数据通过双线性插值法将网格空间分辨率统一为 0.25°，采用 Delta 分位数映射法[43]对其进行偏差矫正。所选择指标中，年均降水量、降水天数、年均最大 1 日降水量、最大 1 日降水量年际变化和年均气温可以根据 CMIP6 模式输出结果。CMIP6 预测时段设置为近期（2027—2040 年）、中期（2047—2060 年）、远期（2 087—2100 年），并考虑 2 种不同的共享社会经济路径，即 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5[40]。

对于冰川覆盖率未来预估，本文参考 Zhang 等[44]以及施雅风等[45]提出的 ELA（Equilibrium line altitude）冰川平衡线理论。ELA 为多年平均的冰川平衡线高度，为冰川消融和凝结的平衡点，与气温和降水呈现线性关系。施雅风等[45]通过计算小冰期盛时以来升温和冰川面积减小的经验关系，可以得出相较于现代时期，气温每升高 1℃，该区域冰川大约减少 35%，且对降水变化敏感性差。

3　结果与分析

3.1　VIC-Glacier 模拟结果

图 2（a）显示了波密站率定期（2004—2010 年）和验证期（2011—2017 年）实测流量和 VIC-Glacier 模型模拟流量的日流量过程线。模拟结果较好捕捉到了流量的涨落变化过程和峰值等信息。从评价指标上来看，波密站率定期和验证期的最小化目标函数分别为 0.18 和 0.20，纳什效率系数分别为 0.84 和 0.82，模拟效果较好。模型对于枯季流量存在一定程度的低估，可能和 VIC-Glacier 模型对融雪径流过程表征不足有关。利用易贡站进行检验的最小化目标函数和纳什效率系数分别为 0.21 和 0.78。本文模型日尺度的模拟精度与前人研

究相当，可以用于后续分析洪水特征[5,19]。

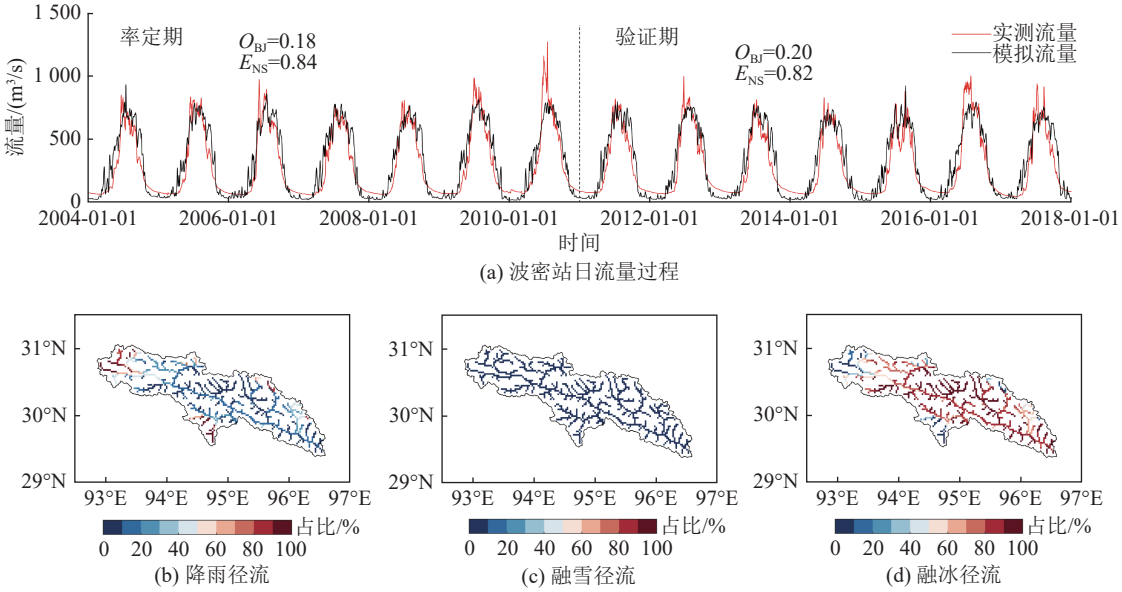


图 2 VIC-Glacier 模型模拟效果以及子流域各径流成分占比

Fig. 2 Simulation effectiveness of VIC-Glacier model and the proportion of each runoff component in sub-basins

图 2(b)—图 2(d)展示了各子流域降雨径流、融雪径流、融冰径流的占比情况。从整体上看，帕隆藏布江流域以冰川径流为主，流域出口各径流组分占比为降雨径流 12.5%、融雪径流 0.9%、融冰径流 86.6%。降雨径流为主的流域主要分布在西部和南部等面积较小流域；冰川径流为主的流域主要分布在中部和东南部等区域，且在中部区域冰川径流占比更大，且流域面积大小不一。对于所有子流域，融冰径流平均占比高达 73.9%，其次是降雨径流(24.6%)，最后是融雪径流(1.5%)。

3.2 流域特征指标和洪水量级关系

通过 VIC-Glacier 模型可以模拟得出 948 个子流域的逐日流量过程，根据有无冰川覆盖(即冰川覆盖面积占比是否为 0)将流域分为 2 类，其中有冰川覆盖子流域为 897 个，无冰川覆盖子流域为 51 个。随机森林模型的结果如图 3 所示。

对于所有子流域，训练集和测试集相关系数(R^2)均在 0.98 以上，相对误差(E_R)均在±1.5% 以内，均方根误差(E_{RMS})均在 0.04 $m^3/(s\cdot km^2)$以内，各重现期洪水量级径流模数的真实值和预测值均位于 1∶1 线附近，表明模型有较好的预测效果；对于有冰川覆盖子流域，其模拟效果与所有子流域大致相当；对于无冰川覆盖的子流域，训练集和测试集的相关系数均在 0.7 以上，均方根误差均在 0.004 $m^3/(s\cdot km^2)$以内，相对误差均在±1% 以内。由于无冰川覆盖流域数量相对较少，随机森林模型效果相较于所有子流域和有冰川覆盖子流域模型略差。

基于机器学习可解释性算法 SHAP 对影响因素进行定量分析，结果如图 4 所示。对于有冰川覆盖子流域，冰川覆盖率、年均气温和坡度为主要影响因素(图 4(b))。冰川占比面积较大，冰川径流为主要径流组分，年均气温也会影响到冰川消融量。这类流域主要位于河流源头区域，地形较为陡峭，坡度对产汇流过程影响较大。当洪水量级较大时(100 年一遇和 50 年一遇)，流域平均坡度对洪水量级的影响高于气温，当洪水量级较小时，气温影响较大。影响因素有差异的原因是汇流过程是控制极端洪水量级的主要因素，坡度较陡影响汇流速度，当洪水量级较小时，气温通过影响冰川消融而对流域平均年径流量产生影响，后者与

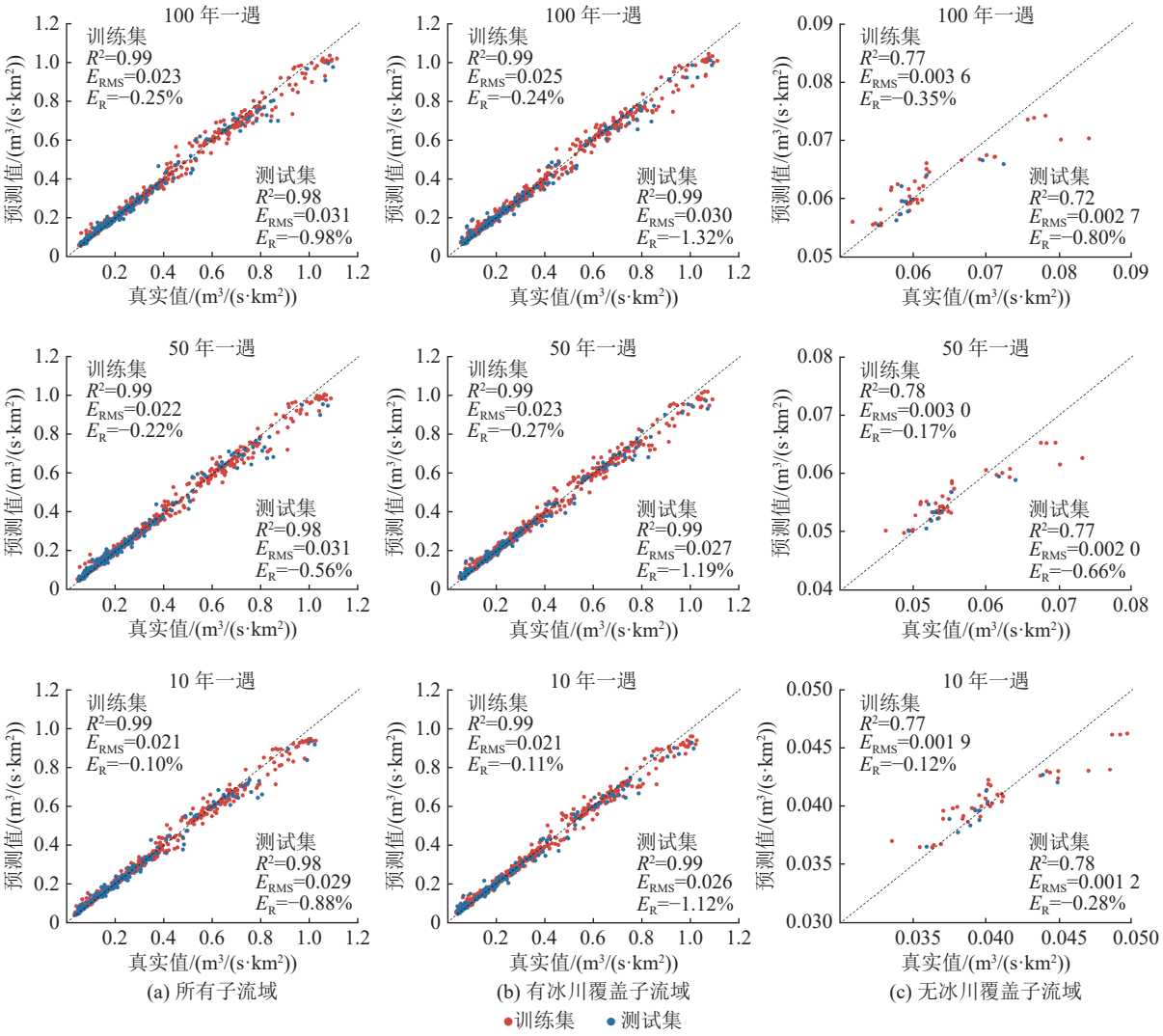


图 3　基于随机森林模型的洪水预测模型评估

Fig. 3　Evaluation of flood prediction models based on random forest model

小量级洪水相关性较高。

对于无冰川覆盖子流域，主要影响因素为年均最大 1 日降水量、降水天数和年均气温(图 4(c))。这类流域的径流组分主要是降雨径流，降水相关指标对洪水量级变化起主导作用，年均气温通过影响雨雪比例和潜在蒸发，也会对洪水量级产生影响。对于 100 年一遇和 50 年一遇洪水，影响因素的重要性表现为年均最大 1 日降水量、降水天数和年均气温依次递减；对于 10 年一遇洪水，年平均气温差异的影响更为显著，位列第 2 位，与冰川覆盖子流域的洪水量级特征一致，表明气温变化对小量级洪水的重要性。

由于冰川覆盖子流域样本占比较大，对于所有子流域而言洪水量级的主要影响因素依然是冰川覆盖率、年均气温和坡度(图 4(a))。但对于不同重现期，气温对洪水量级的影响均大于坡度，主要原因是所有子流域中也包含无冰川覆盖的子流域，无冰川覆盖的子流域中气温也是洪水量级的一个重要影响因素，导致气温对所有子流域洪水量级的贡献度相比于仅有冰川覆盖的子流域更高。

3.3　未来洪水量级变化特征

基于 CMIP6 对不同 SSP 情景下各指标变化进行预测，结果如表 1 所示。对于 SSP2-4.5 情景，冰川覆盖率

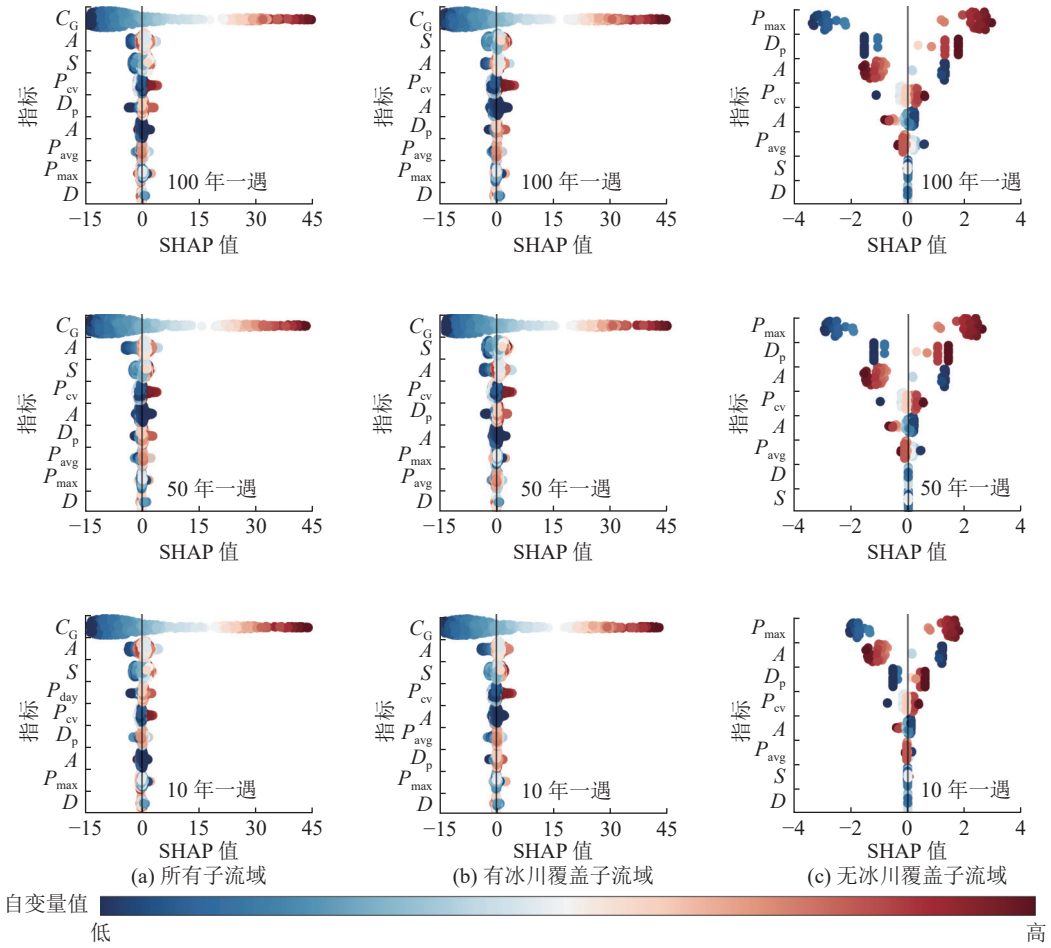


图 4 各特征指标贡献程度排序

Fig. 4 Ranking of contribution of each characteristic indicators

呈现逐渐减小趋势，年均降水量和年均气温呈逐渐增大趋势，年均最大 1 日降水量近期增加，但中期基本保持不变在远期又呈现增加趋势，而最大 1 日降水量年际变化则呈现先减小后增加的趋势，降水天数几乎不变。相较于 SSP2-4.5 情景，SSP5-8.5 情景下冰川覆盖率减小趋势更为明显，年均降水量和年均气温增大趋势也更为显著。然而，年均最大 1 日降水量呈现出逐渐增长的趋势且变化幅度更大，而最大 1 日降水量年际变化趋势仍然为先减小后增加，但转折点出现的时间更早，降水天数同样无明显变化。

在 SSP5-8.5 情景下，远期冰川覆盖率减少 100%，整个流域冰川将全部融化。段克勤等[46]对青藏高原东部冰川变化进行了预测，结果也显示在 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景下，青藏高原东部冰川都将在 2050 年前完全融化，表明本文预测结果与前人结果一致，具有较高可信度。

图 5 显示了在 2 种情景（SSP2-4.5 和 SSP5-8.5）下所有子流域不同未来时期重现期为 100 a 的洪水量级相对历史时期变化率的空间分布。从空间分布上看，洪水量级呈现增大趋势区域均主要分布在帕隆藏布下游一些流域面积较小的子流域，洪水量级呈现减小趋势的区域主要分布在帕隆藏布上中游以及下游流域面积较大的子流域。这些区域洪水量级变化差异主要由是否有冰川覆盖导致。受气候变化的持续影响，洪水量级的变化加剧，并且 SSP5-8.5 情景变化趋势显著大于 SSP2-4.5 情景。同时地形特征、冰川分布与各气象驱动因子也会对洪水量级有一定影响，坡度较大的子流域由于汇流时间短，表现出较大的洪水量级增幅，而冰川覆盖比例高的子流域则受冰川融化减少的影响更为显著，降雨强度的增加则会通过影响降雨径流进而影响

无冰川覆盖子流域的洪水量级。SSP2-4.5 情景下，2087—2100 年 100 年一遇洪水量级在子流域间的变化范围为－63.54～13.95 $m^3/(s\cdot km^2)$，其中有冰川覆盖子流域减幅最大为 71.29%，无冰川覆盖子流域增幅最大为 145.52%；SSP585 情景下，2087—2100 年 100 年一遇洪水量级在子流域间的变化范围为－63.78～14.35 $m^3/(s\cdot km^2)$，其中有冰川覆盖子流域减幅最大为 75.53%，无冰川覆盖子流域增幅最大为 153.65%。50 年一遇和 10 年一遇的洪水量级变化具有与 100 年一遇洪水较为相似的空间分布特征，不再赘述。

表 1　未来各流域特征指标变化

Table 1　Future changes in various characteristic indicators

情景	百分位	冰川覆盖率/%			年均降水量/%			降水天数/%		
		近期	中期	远期	近期	中期	远期	近期	中期	远期
SSP2-4.5	25th	－35.6	－55.7	－79.8	－0.33	3.17	7.11	1.00	0.91	0.84
	50th	－34.7	－55.3	－78.8	0.56	4.20	8.22	1.42	1.24	1.23
	75th	－33.3	－53.9	－77.3	1.22	4.72	8.87	2.02	1.78	1.82
SSP5-8.5	25th	－50.8	－80.7	－100	－0.82	5.29	19.90	0.81	0.87	0.77
	50th	－49.3	－79.8	－100	－0.27	6.11	21.30	1.20	1.23	1.13
	75th	－47.3	－78.9	－100	0.28	6.68	22.40	1.82	1.83	1.74

情景	百分位	年均最大1日降水量/%			最大1日降水量年际变化/%			年均气温/℃		
		近期	中期	远期	近期	中期	远期	近期	中期	远期
SSP2-4.5	25th	10.2	9.6	19.8	－33.0	－37.6	－31.3	0.93	1.53	2.26
	50th	16.5	15.3	24.7	－30.6	－34.4	－22.5	0.97	1.57	2.31
	75th	35.3	35.4	47.5	－22.8	－29.2	－9.54	1.00	1.58	2.35
SSP5-8.5	25th	6.3	15.4	40.6	－43.8	－41.0	－16.9	1.36	2.32	4.70
	50th	9.4	22.3	48.8	－42.0	－37.1	－12.9	1.42	2.38	4.79
	75th	26.0	44.5	74.0	－35.8	－31.7	－2.9	1.46	2.40	4.88

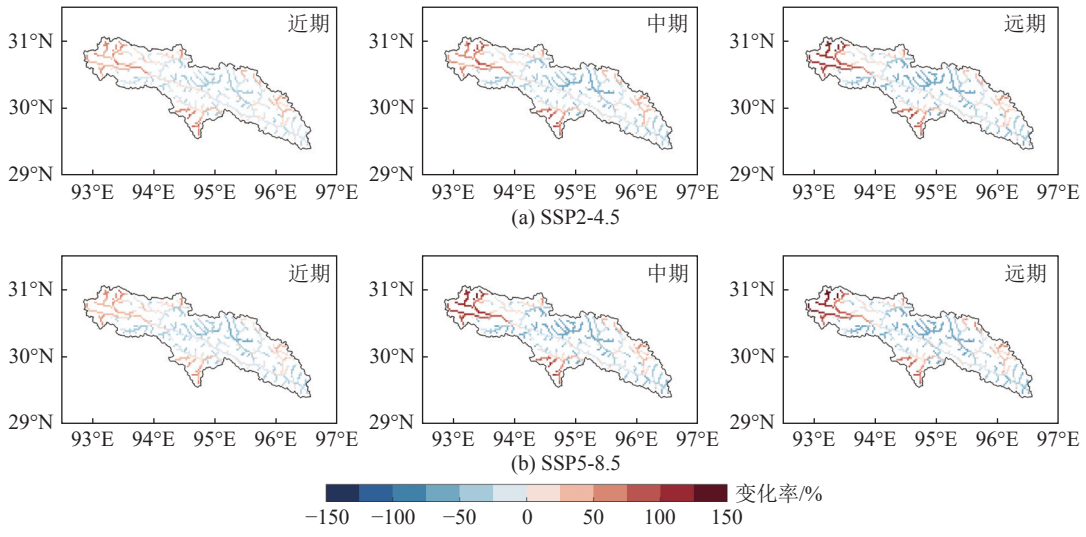


图 5　100 年一遇的洪水量级在未来不同时期和不同 SSP 情景下变化情况空间分布

Fig. 5　Spatial distribution of the changes in the 100-year design flood under different future periods and different SSP scenarios

图 6 显示了未来气候条件下不同重现期洪水量级相对历史时期的变化率。对于有冰川覆盖子流域，不同重现期洪水量级呈减小趋势(6.46%～32.27%)，且洪水量级越小，减少幅度越大。主要因为融冰径流作为主要径流成分，未来温度升高冰川面积降低，融冰径流减少导致整体径流减少，小量级洪水对融冰径流减少更为敏感，因而减少幅度更大。对于 SSP5-8.5 情景，洪水量级整体减小幅度更大，主要受到更高气温的影响。对于无冰川覆盖子流域，不同重现期洪水量级呈增加趋势(2.87%～15.52%)，且洪水量级越大，增加幅度越大。年均最大 1 日降水量是洪水量级最重要的影响因素(图 4)，降雨径流作为主要径流成分，未来降水增加导致洪水量级增加。对于小量级洪水，降雨径流受流域下垫面影响较大，而当发生极端降水时，流域下垫面对洪水量级影响较小。相较于近期气候情景，SSP5-8.5 情景下中远期气候情景下年均最大 1 日降水量增幅更快，因而导致洪峰量级增幅更大。

从整体上看，对于所有子流域，由于冰川覆盖子流域样本占比较大，不同情景下洪水量级变化趋势和有冰川覆盖子流域一致，依然呈现不断减小的趋势(5.45%～29.69%)。在 SSP2-4.5 情景下，2087—2100 年有冰川覆盖子流域和无冰川覆盖子流域的 100 年一遇洪水量级较基准期分别减少 13.15% 和增加 12.35%，50 年一遇洪水量级分别减少 11.51% 和增加 9.99%，10 年一遇洪水量级分别减少 25.77% 和增加 7.35%；在 SSP5-8.5 情景下，2087—2100 年有冰川覆盖子流域和无冰川覆盖子流域的 100 年一遇洪水量级较基准期分别减少 17.18% 和增加 15.52%，50 年一遇洪水量级分别减少 16.32% 和增加 11.63%，10 年一遇洪水量级分别减少 32.27% 和增加 8.32%。气温升高导致冰川面积减小是影响帕隆藏布江流域洪水量级变化的主要因素，降水变化主要在无冰川覆盖流域起主要调控作用。在 SSP2-4.5 情景下，由于冰川消融速度减缓，融冰径流的减少对有冰川覆盖子流域洪水量级产生主导性影响，而无冰川覆盖子流域的降雨强度增加则使洪水量级有所增加；在 SSP5-8.5 情景下，由于冰川消融速度更快，融冰径流的减少会使得洪水量级在有冰川覆盖子流域减少更快，而更大的降雨强度变化则使无冰川覆盖子流域洪水量级增加更快。

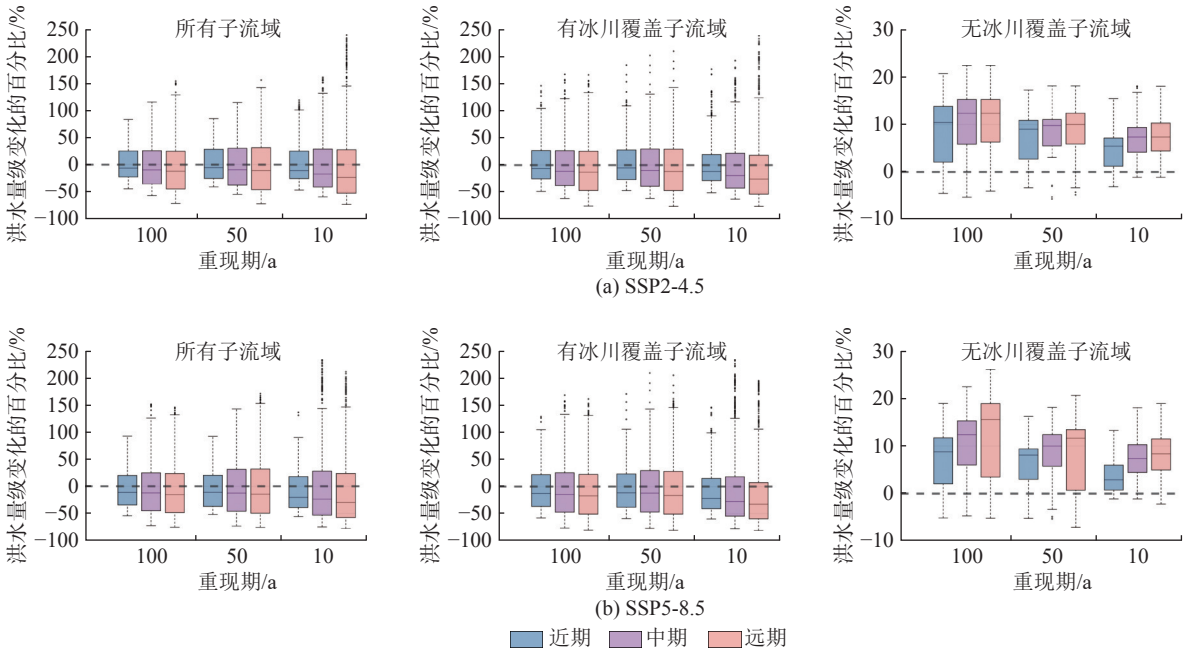


图 6 不同重现期洪水量级在不同时期和不同 SSP 情景下的变幅(相对于历史时期)

Fig. 6 Range of variance in the magnitude of floods with different recurrence intervals during various time periods and under different SSP scenarios (relative to the historical period)

对于气候变化背景下青藏高原冰川变化对径流和洪水影响的研究，以往研究指出在本世纪末融冰径流呈现减少趋势且降雨径流呈现增加趋势。Nie 等[47]认为喜马拉雅-喀喇昆仑山脉受冰川消融的影响，导致融冰径流在 21 世纪末呈现减少趋势，但在夏季融冰径流的减少和降雨径流的增加可能使径流量变化趋于平稳，对于融水主导的塔里木和印度河流域，径流主要受融水的影响呈现减少趋势，而对于降雨主导的恒河和雅鲁藏布江流域，径流则主要呈现增加趋势。Zhao 等[48]认为降雨引起的径流增加能补偿青藏高原 5 条主要河流上游冰川径流的减少量，使径流整体呈现增加趋势，在 SSP2-4.5 情景下增速为 11.9% ~ 32.4%，且暖季径流增速更低。因此对于径流主导机制不同的流域，其径流或洪水变化会存在显著差异。本文所研究的帕隆藏布江流域融冰径流占比高达 73.9%，洪水量级整体变化趋势主要是由冰川面积减少导致，且本文所针对的洪水事件大多位于暖季，融冰径流占比更大，对于洪水量级的减小具有更大的贡献。

4 结　　论

利用 VIC-Glacier 模型以及随机森林算法和可解释机器学习方法，对帕隆藏布江流域未来时期不同重现期洪水量级进行预估，识别了不同重现期洪水量级的影响因素，分析并量化了有冰川和无冰川覆盖子流域不同气候情景下不同重现期洪水量级的变化。主要结论如下：

（1）构建了帕隆藏布江流域 VIC-Glacier 模型，纳什效率系数在 0.78 ~ 0.84 之间，模拟结果较好地捕捉到了流量的涨落变化过程和峰值等信息，模型精度较高。在此基础上，量化了各子流域降雨径流、融雪径流、融冰径流的组成情况，表明各子流域融冰径流平均占比高达 73.9%，是主要产流机制。

（2）构建了随机森林模型和可解释机器学习方法，识别了流域下垫面属性和气象驱动等对洪水量级的影响规律。对于有冰川覆盖流域，冰川径流作为主要径流组分，冰川覆盖率、年均气温和坡度为主要影响因素；对于无冰川覆盖流域，由于降雨径流作为主要径流组分，年均最大 1 日降水量、降水天数和年均气温为主要影响因素。

（3）预估了帕隆藏布江流域未来气候变化情景下洪水量级变化程度及空间差异。洪水量级整体呈现减小趋势（5.45% ~ 29.69%），对于有冰川覆盖流域洪水量级整体呈现减少趋势（6.46% ~ 32.27%），对于无冰川覆盖流域洪水量级整体呈现增加趋势（2.87% ~ 15.52%）。洪水增加区域主要分布在帕隆藏布下游一些流域面积较小的子流域，洪水减小区域主要分布在帕隆藏布上中游以及下游流域面积较大的子流域。从物理机制层面来看，气温升高背景下冰川面积减小导致的融冰径流减少是影响有冰川覆盖子流域洪水量级减少的主要原因，而降水的增加是无冰川覆盖子流域洪水量级增加的关键影响因素。

参考文献：

[1] 田富强，李琨彪，韩松俊，等. 青藏高原东部流域径流偶极子时空变化规律 [J]. 水科学进展，2023，34(4)：481-489.（TIAN F Q，LI K B，HAN S J，et al. Spatio-temporal variation patterns of runoff dipole in the eastern basins of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Advances in Water Science，2023，34(4)：481-489.（in Chinese））

[2] 李志斐. 气候变化对青藏高原水资源安全的影响 [J]. 国际安全研究，2018，36(3)：42-63，157.（LI Z F. Analysis of the effects of climate change on water resources security in Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of International Security Studies，2018，36(3)：42-63，157.（in Chinese））

[3] ARMSTRONG R L. The glaciers of the Hindu Kush-Himalayan region：a summary of the science regarding glacier melt/retreat in the Himalayan，Hindu Kush，Karakoram，Pamir，and Tien Shan mountain ranges[M]. Kathmandu: International Center for Integrated Mountain Development, 2010.

[4] 张建云, 刘九夫, 金君良, 等. 青藏高原水资源演变与趋势分析 [J]. 中国科学院院刊，2019，34(11)：1264-1273.（ZHANG J Y, LIU J F, JIN J L, et al. Evolution and trend of water resources in Qinghai-Tibet Plateau[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences，2019，

34(11)：1264-1273.(in Chinese))

[5] 班春广，徐宗学，左德鹏，等.高寒流域水文模拟与径流水源解析：以雅鲁藏布江帕隆藏布上游流域为例[J].北京师范大学学报(自然科学版)，2023，59(1)：85-93.(BAN C G，XU Z X，ZUO D P，et al. Hydrological simulation and runoff components analysis in the high cold alpine region：case study in the upper reaches of the Parlung Zangbo watershed of the Yarlung Zangbo River basin[J]. Journal of Beijing Normal University(Natural Science)，2023，59(1)：85-93.(in Chinese))

[6] WANG T，ZHAO Y T，XU C Y，et al. Atmospheric dynamic constraints on Tibetan Plateau freshwater under Paris climate targets[J]. Nature Climate Change，2021，11(3)：219-225.

[7] CUI T，LI Y K，YANG L，et al. Non-monotonic changes in Asian Water Towers' streamflow at increasing warming levels[J]. Nature Communications，2023，14(1)：1176.

[8] TRY S，TANAKA S，TANAKA K，et al. Comparison of CMIP5 and CMIP6 GCM performance for flood projections in the Mekong River basin[J]. Journal of Hydrology：Regional Studies，2022，40：101035.

[9] ZHANG C，SUN F Y，SHARMA S，et al. Projecting multi-attribute flood regime changes for the Yangtze River basin[J]. Journal of Hydrology，2023，617：128846.

[10] LONG J S，WANG L，CHEN D L，et al. Hydrological projections in the Third Pole using artificial intelligence and an observation-constrained cryosphere-hydrology model[J]. Earth's Future，2024，12(4)：e2023EF004222.

[11] MANGUKIYA N K，SHARMA A. Alternate pathway for regional flood frequency analysis in data-sparse region[J]. Journal of Hydrology，2024，629：130635.

[12] 陈娟，徐琦，曹端祥，等.基于多因子多模式集成的中长期径流预测模型[J].水科学进展，2024，35(3)：408-419.(CHEN J，XU Q，CAO D X，et al. Medium and long-term runoff prediction model based on multi-factor and multi-model integration[J]. Advances in Water Science，2024，35(3)：408-419.(in Chinese))

[13] 尚海鑫，胡春宏，夏军强，等.洞庭湖入汇对荆江河段水位的顶托程度与范围[J].水科学进展，2023，34(3)：431-441.(SHANG H X，HU C H，XIA J Q，et al. Influence of Dongting Lake inflow on the degree and range of backwater effect in the Jingjiang reach[J]. Advances in Water Science，2023，34(3)：431-441.(in Chinese))

[14] 黄昌硕，耿雷华，颜冰，等.水资源承载力动态预测与调控：以黄河流域为例[J].水科学进展，2021，32(1)：59-67.(HUANG C S，GENG L H，YAN B，et al. Dynamic prediction and regulation of water resource carrying capacity：a case study on the Yellow River basin[J]. Advances in Water Science，2021，32(1)：59-67.(in Chinese))

[15] 王婕，张建云，鲍振鑫，等.粮食产量对气候变化驱动水资源变化的响应[J].水科学进展，2021，32(6)：855-866.(WANG J，ZHANG J Y，BAO Z X，et al. Response of grain yield to climate change driving water resources change[J]. Advances in Water Science，2021，32(6)：855-866.(in Chinese))

[16] 李大洋，姚轶，梁忠民，等.基于变分贝叶斯深度学习的水文概率预报方法[J].水科学进展，2023，34(1)：33-41.(LI D Y，YAO Y，LIANG Z M，et al. Probabilistic hydrological forecasting based on variational Bayesian deep learning[J]. Advances in Water Science，2023，34(1)：33-41.(in Chinese))

[17] MEKANIK F，IMTEAZ M A，GATO-TRINIDAD S，et al. Multiple regression and Artificial Neural Network for long-term rainfall forecasting using large scale climate modes[J]. Journal of Hydrology，2013，503：11-21.

[18] 刘时银，姚晓军，郭万钦，等.基于第二次冰川编目的中国冰川现状[J].地理学报，2015，70(1)：3-16.(LIU S Y，YAO X J，GUO W Q，et al. The contemporary glaciers in China based on the second Chinese glacier inventory[J]. Acta Geographica Sinica，2015，70(1)：3-16.(in Chinese))

[19] 王一冰，谢先红，施建成，等.多源降水数据驱动下青藏高原径流集合模拟[J].科学通报，2021，66(32)：4169-4186.(WANG Y B，XIE X H，SHI J C，et al. Ensemble runoff modeling driven by multi-source precipitation products over the Tibetan Plateau[J]. Chinese Science Bulletin，2021，66(32)：4169-4186.(in Chinese))

[20] XU Y，GAO X J，SHEN Y，et al. A daily temperature dataset over China and its application in validating a RCM simulation[J]. Advances in Atmospheric Sciences，2009，26(4)：763-772.

[21] 吴佳，高学杰.一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其它资料的对比[J].地球物理学报，2013，56(4)：1102-1111.(WU J，GAO X J. A gridded daily observation dataset over China region and comparison with the other datasets[J]. Chinese Journal of Geophysics，2013，56(4)：1102-1111.(in Chinese))

[22] WEEDON G P，BALSAMO G，BELLOUIN N，et al. The WFDEI meteorological forcing data set：WATCH Forcing Data methodology

applied to ERA-Interim reanalysis data[J]. Water Resources Research，2014，50(9)：7505-7514.

[23] FAO Soils Portal Food and Agriculture Organization of the United Nations. Harmonized world soil database v1.2 [EB/OL]. (2012-02-01)[2024-11-30]. https://www.fao.org/soils-portal/en/.

[24] DEFRIES R S, HANSEN M C, TOWNSHEND J R G, et al. A new global 1-km dataset of percentage of tree cover derived from remote sensing[J]. Global Change Biology，2000，6(2)：247-254.

[25] HANSEN M C，DEFRIES R S，TOWNSHEND J R G，et al. Global land cover classification at 1 km spatial resolution using a classification tree approach[J]. International Journal of Remote Sensing，2000，21(6/7)：1331-1364.

[26] ZHANG L L，SU F G，YANG D Q，et al. Discharge regime and simulation for the upstream of major rivers over Tibetan Plateau[J]. Journal of Geophysical Research：Atmospheres，2013，118(15)：8500-8518.

[27] SU F，ZHANG L，OU T，et al. Hydrological response to future climate changes for the major upstream river basins in the Tibetan Plateau[J]. Global and Planetary Change，2016，136：82-95.

[28] WANG Y B，XIE X H，SHI J C，et al. Accelerated hydrological cycle on the Tibetan Plateau evidenced by ensemble modeling of Long-term water budgets[J]. Journal of Hydrology，2022，615：128710.

[29] SU T，MIAO C Y，DUAN Q Y，et al. Hydrological response to climate change and human activities in the Three-River Source Region[J]. Hydrology and Earth System Sciences，2023，27(7)：1477-1492.

[30] DUAN Q Y，SOROOSHIAN S，GUPTA V K. Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models[J]. Journal of Hydrology，1994，158(3/4)：265-284.

[31] 纪忠华，王璐，路雨. 考虑不确定度的 POT 模型在洪水重现期分析中的应用研究 [J]. 水文，2017，37(4)：6-11.（JI Z H，WANG L，LU Y. Floods return peritd calculation with uncertainty analysis via POT model[J]. Journal of China Hydrology，2017，37(4)：6-11.（in Chinese））

[32] 李欣海. 随机森林模型在分类与回归分析中的应用 [J]. 应用昆虫学报，2013，50(4)：1190-1197.（LI X H. Using “random forest” for classification and regression[J]. Chinese Journal of Applied Entomology，2013，50(4)：1190-1197.（in Chinese））

[33] BREIMAN L. Random forests[J]. Machine Learning，2001，45：5-32.

[34] ŠTRUMBELJ E，KONONENKO I. Explaining prediction models and individual predictions with feature contributions[J]. Knowledge and Information Systems，2014，41(3)：647-665.

[35] 王强，林芷欣，贺瑞敏，等. 太湖流域典型下垫面土壤水响应规律及影响因素 [J]. 水科学进展，2024，35(5)：700-710.（WANG Q，LIN Z X，HE R M，et al. Responding patterns and influencing factors of soil moisture under different underlying surfaces over the Taihu Lake basin[J]. Advances in Water Science，2024，35(5)：700-710.（in Chinese））

[36] FUNK T. Heavy convective rainfall forecasting：a look at elevated convection，propagation，and precipitation efficiency[C]//Proc. 10th Severe Storm and Doppler Radar Conf. Des Moines, IA: National Weather Association, 2006.

[37] IOSUB M，MINEA I，CHELARIU O E，et al. Assessment of flash flood susceptibility potential in Moldavian Plain（Romania）[J]. Journal of Flood Risk Management，2020，13(4)：e12588.

[38] YOUSEFI S，POURGHASEMI H R，EMAMI S N，et al. Assessing the susceptibility of schools to flood events in Iran[J]. Scientific Reports，2020，10：18114.

[39] GHOLAMI F，NEMATI A，LI Y，et al. Calculation of runoff computation cost and sensitivity analysis of topological attributes[J]. Remote Sensing Applications：Society and Environment，2022，26：100714.

[40] EYRING V，BONY S，MEEHL G A，et al. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6（CMIP6）experimental design and organization[J]. Geoscientific Model Development，2016，9(5)：1937-1958.

[41] ALAMINIE A A，AMARNATH G，PADHEE S K，et al. Nested hydrological modeling for flood prediction using CMIP6 inputs around Lake Tana，Ethiopia[J]. Journal of Hydrology：Regional Studies，2023，46：101343.

[42] ARYAL A，ACHARYA A，KALRA A. Assessing the implication of climate change to forecast future flood using CMIP6 climate projections and HEC-RAS modeling[J]. Forecasting，2022，4(3)：582-603.

[43] CANNON A J，SOBIE S R，MURDOCK T Q. Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping：how well do methods preserve changes in quantiles and extremes?[J]. Journal of Climate，2015，28(17)：6938-6959.

[44] ZHANG Y S，FUJITA K，AGETA Y，et al. The response of glacier ELA to climate fluctuations on High-Asia[J]. Bulletin of glacier Research，1998，16：1-11.

[45] 施雅风，刘时银. 中国冰川对 21 世纪全球变暖响应的预估 [J]. 科学通报，2000，45(4)：434-438.（SHI Y F，LIU S Y. Estimation of the responses of glaciers in China to the global warming in the 21st century[J]. Chinese Science Bulletin，2000，45(4)：434-438.（in Chinese））

[46] 段克勤，姚檀栋，石培宏，等. 青藏高原东部冰川平衡线高度的模拟及预测 [J]. 中国科学：地球科学，2017，47(1)：104-113.（DUAN K Q，YAO T D，SHI P H，et al. Simulation and prediction of equilibrium line altitude of glaciers in the Eastern Tibetan Plateau[J]. SCIENTIA SINICA Terrae，2017，47(1)：104-113.（in Chinese））

[47] NIE Y，PRITCHARD H D，LIU Q，et al. Glacial change and hydrological implications in the Himalaya and Karakoram[J]. Nature Reviews Earth & Environment，2021，2(2)：91-106.

[48] ZHAO Q D，DING Y J，WANG J，et al. Projecting climate change impacts on hydrological processes on the Tibetan Plateau with model calibration against the glacier inventory data and observed streamflow[J]. Journal of Hydrology，2019，573：60-81.

Future design flood projections in the Parlung Zangbo River basin under climate change*

LI Chenlong[1,2]，LI Dayang[1,2]，WANG Qiang[1,2]，FU Xiaohua[1,3]，YANG Long[1,2]，TIAN Fuqiang[4]

（1. *School of Geography and Ocean Science*，*Nanjing University*，*Nanjing* 210023，*China*；2. *Frontiers Science Center for Critical Earth Material Cycling*，*Nanjing University*，*Nanjing* 210023，*China*；3. *Power China Northwest Engineering Corporation Limited*，*Xi'an* 710065，*China*；4. *National Key Laboratory of Hydrosphere Science and Hydraulic Engineering*，*Tsinghua University*，*Beijing* 100084，*China*）

Abstract：The Qinghai-Tibet Plateau region is rich in water resources. Flood magnitude analysis for different recurrence periods in the context of climate change can provide scientific support for the construction of local water conservancy projects; however，related research remains limited. This study uses the Parlung Zangbo River basin as a case study，integrating the distributed hydrological model VIC-Glacier with interpretable machine-learning methods. Data from the sixth phase of the Coupled Model Intercomparison Project（CMIP6）and projected glacier change results revealed the future flood magnitudes for near-term（2027—2040），mid-term（2047—2060），and long-term（2087—2100）periods under both moderate（SSP2-4.5）and high（SSP5-8.5）forcing scenarios for different recurrence periods. The results discovered major spatial heterogeneity in flood magnitudes and their change characteristics within the Parlung Zangbo River basin. Under future climate scenarios，decline in glacier coverage and increased precipitation will alter runoff components. In glacier-covered basins，future flood magnitudes for different recurrence periods decreased by 6.46%—32.27%. Conversely，in non-glacier basins，flood magnitudes for different recurrence periods showed a rising trend，with increases of 2.87%—15.52%.

Key words：flood magnitude；VIC-Glacier model；random forest；CMIP6；Parlung Zangbo River basin

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China（No. 92047301；No. 52379012）.

DOI:10. 3880/j. issn. 1004 - 6933. 2025. 02. 009

基于 C-Vine Copula 的城市洪涝多致灾因子遭遇风险分析

薛联青[1,2],潘 桐[1],刘远洪[3]

(1. 河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098; 2. 皖江工学院水利工程学院,安徽 马鞍山 243031;
3. 河海大学农业科学与工程学院,江苏 南京 210098)

摘要:基于 C-Vine Copula 构建了无锡市主城区历时分别为 1、3、7 d 的降水量、水位及上游流量 3 种致灾因子的高维联合分布模型,采用相关性系数和尾部依赖系数验证变量组合间复杂的非线性结构和依赖性,计算不同遭遇情景下变量组合的联合遭遇风险率和联合遭遇重现期,探讨了多致灾因子遭遇对城市洪涝灾害的协同影响和动态反馈。结果表明:无锡市主城区 7 d 三变量组合相关性最高,尤其在高极值风险上表现较强的依赖性,其上尾依赖系数高达 0.671 8;三变量组合的联合遭遇风险率最大,双变量组合次之,单变量最小,当降水量、水位、流量重现期均为 10 a 时,7 d 三变量组合的联合遭遇风险率为 21.26%,双变量组合的联合遭遇风险率分别为 18.39%、18.37%、13.27%;对于三变量组合的联合重现期缩减率,1 d 三变量组合主要受上游流量的影响,最大联合重现期缩减率为 29.2%,3、7 d 三变量组合主要受降水量的影响,最大联合重现期缩减率分别为 29.4%、32.7%。

关键词:城市洪涝;致灾因子;C-Vine Copula;尾部依赖性;联合遭遇风险率;联合遭遇重现期;无锡市

中图分类号:P339 **文献标志码**:A **文章编号**:1004 - 6933(2025)02 - 0077 - 11

Encounter risk analysis of multi-hazard factors of urban flood based on C-Vine Copula//XUE Lianqing[1,2], PAN Tong[1], LIU Yuanhong[3](1. *College of Hydrology and Water Resources*, *Hohai University*, *Nanjing* 210098, *China*; 2. *School of Hydraulic Engineering*, *Wanjiang University of Technology*, *Maanshan* 243031, *China*; 3. *College of Agriculture Science and Engineering*, *Hohai University*, *Nanjing* 210098, *China*)

Abstract: Based on the C-Vine Copula, a high-dimensional joint distribution model was constructed for three hazard factors in the main urban area of Wuxi City, including precipitation, water level, and upstream flow, with durations of 1, 3, and 7 d. The complex nonlinear structures and dependencies between variable combinations were verified using correlation coefficients and tail dependence coefficients. The joint encounter risk rates and joint encounter return periods of variable combinations under different scenarios were calculated to explore the synergistic effects and dynamic feedback of multi-disaster-causing factors on urban flood disasters. The results show that the 7d three-variable combination in the main urban area of Wuxi City has the highest correlation, particularly demonstrating strong dependence in high extreme-value risks, with an upper tail dependence coefficient as high as 0.671 8. The joint encounter risk rate is the highest for the three-variable combination, followed by the two-variable combination, and the lowest for the single-variable combination. When the return periods of precipitation, water level, and flow are all 10 a, the joint encounter risk rate for the 7d three-variable combination is 21.26%, while those for the two-variable combinations are 18.39%, 18.37%, and 13.27%, respectively. For the joint return period reduction rate of the three-variable combination, the 1 d combination is mainly influenced by upstream flow, with a maximum joint return period reduction rate of 29.2%, while the 3d and 7d combinations are primarily influenced by precipitation, with maximum joint return period reduction rates of 29.4% and 32.7%, respectively.

Key words: urban flood; hazard factor; C-Vine Copula; tail dependency; joint encounter risk rate; joint encounter recurrence period; Wuxi City

基金项目:江苏省水利科技项目(2024045);国家重点研发计划项目(2023YFC3206804);新疆生产建设兵团科技合作项目(2022BC001)

作者简介:薛联青(1973—),女,教授,博士,主要从事生态水文与环境水文研究。E-mail:lqxue@ hhu. edu. cn

通信作者:刘远洪(1991—),男,助理研究员,博士,主要从事生态水文研究。E-mail:lyh910926@ 163. com

洪涝灾害是世界范围内高频发生的自然灾害。自 1998 年特大洪水后,我国持续投入水利工程建设,有效提升了流域防洪标准,减小了流域性洪涝灾害的威胁[1]。但 21 世纪以来,受城市化进程加快和全球极端气候变化影响,城市区域的洪涝灾害事件频发,严重干扰了社会经济可持续发展,对人民生命财产造成严重威胁。因此,城市洪涝灾害已成为现代全球广泛关注的重大挑战之一[2]。城市洪涝灾害作为一种受多变量影响的随机水文事件,具有显著的不确定性和随机性[3]。灾害的形成受多种致灾因子的影响[4],如城市历经短历时强降雨或长历时降雨、水利工程建设导致城市内部水位增高、上游客水来袭时城市外排能力不足等[5]。因此,明确各致灾因子之间的遭遇关系,通过概率量化分析不同程度的城市灾害事件发生的可能性,有助于城市管理者清晰地了解灾害的风险,对保障城市水安全具有重要意义[6]。

在描述复杂的城市洪涝事件时,单因素无法对其进行准确描述,需选取存在相关关系的多个变量对其进行描述[7]。Copula 函数可以将具有依赖关系且符合不同边缘分布的多个随机变量连接起来建立联合分布函数,并在此基础上研究该联合分布函数在不同重现期下的条件概率。目前,对复杂水文事件的多变量联合分析取得了一定的研究成果,国内大部分研究集中在基于 Copula 函数的雨潮分析或暴雨、外江水位等双变量对沿海、滨江城市洪涝的影响[8]。例如,武传号等[9]基于 Archimedean Copula 建立了广州市短历时强降雨和高潮位联合概率模型,得到了雨潮组合风险概率及其重现期;李晓英等[10]依据区间暴雨和外江高水位的不同步性,采用非对称 Copula 探究以暴雨为主、以洪水为主的两组合中沿江城市雨洪遭遇风险规律;许翰卿等[11]采用 Copula 函数构建了中国沿海城市因极端降雨和高潮位引发的复合灾害联合分布模型,揭示了中国沿海地区雨潮复合灾害的时空变化规律,为沿海地区复合灾害预警提供了定量化评估;周子滢等[12]基于 C-Vine Copula 对沿海城市台风灾害链事件进行了联合概率分布研究,构建了舟山市台风灾害事件中“风-雨-潮”3 种致灾因子间的复杂依赖关系和动态变化机制;Xiao 等[13]利用 Copula 函数构建了总降水量和峰值降水量的联合概率分布模型,并结合马尔可夫链得到城市短时暴雨的联合风险概率和状态演化特征;Sharma 等[14]基于藤 Copula 建立了极端降雨特征量的多元分布,探究雨量、雨强等特征量之间相互作用关系,并提供了可用于构建随机降雨模型 Bayesian 工具。由此可见,Copula 函数是构建多变量水文分析计算模型的有效工具,具有良好的适用性。

近年来,将 Copula 函数应用于复合洪涝灾害事件的分析较多,但基于高维 Copula 函数考虑多致灾因子组合对我国平原城市洪涝事件影响的研究仍较少。因此,本文利用 C-Vine Copula 构建多变量联合分布,考虑历时分别为 1、3、7 d 的降水量、水位及上游流量 3 种城市洪涝致灾因子的相关关系,利用尾部依赖系数验证致灾因子间的复杂相依性,量化多致灾因子遭遇风险,以期为城市防洪排涝规划的制定和洪涝灾害的评估提供参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

无锡市位于长江中下游的太湖流域,北依长江、南濒太湖、西接常州、东临苏州,是典型的平原城市。无锡市梅雨期经常发生长历时降雨,与上游洪水压力、城市水位壅高等多因素叠加,导致主城区面临暴雨致灾的风险。因此,选取无锡市主城区为研究区,包括梁溪区、锡山区、滨湖区等,研究区概况见图 1。研究区境内水系发达,河网密布,降水充沛,受海洋季风影响,春夏之交多梅雨,夏末初秋有台风,强台风、长历时梅雨、短历时强降雨是造成研究区洪涝灾害的主要原因[15]。例如,2016 年无锡市进入超长梅雨季,长达 32 d;2020 年恰逢长江大洪水,上游支流来水猛增,无锡市内部河湖水位迅速上涨;2021 年受台风及 7 次强降雨影响,无锡市河湖库水位全面超警超限,无锡站汛期最高水位达 4.81 m。此外,研究区人口密集,城市用地和不透水区快速扩张,当短时间内降水量超过城市外排能力,城区内部河流水位迅速雍高,就有发生洪涝灾害的危险[16]。

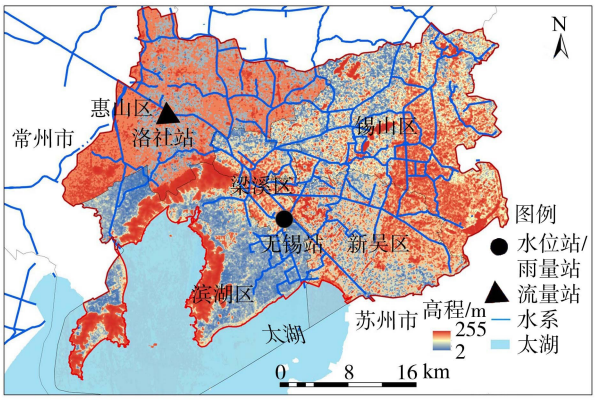


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

1.2 数据来源

降雨资料和水位资料来源于无锡站,无锡站位于江苏省无锡市仙蠡桥南水利枢纽,地处无锡市主

要行洪通道——京杭大运河河段,是能够反映研究区内部水位变化的主要控制点。流量资料来源于洛社站,洛社站位于无锡市惠山区洛社镇,地处大运河河段无锡市上游,常年为西北向东南流向,能够反映研究区受上游来水压力。两个站点均位于研究区内部,能够较好地表征城市内部水文特征的变化,其水文数据均已通过一致性检验。

降雨资料采用2000—2021年逐日数据,定义降水量不小于1 mm为湿日,设研究期内湿日95%分位降水量平均值为阈值,基于该阈值选取1、3、7 d降水量构成3组降水量时间序列 U_{1d}、U_{3d}、U_{7d},用于表征不同历时的降雨情况;基于逐日水位资料选取1、3、7 d降水量对应的水位构成3组水位时间序列 V_{1d}、V_{3d}、V_{7d},用于表征不同历时的城市内水位情况;基于逐日流量资料选取1、3、7 d降水量对应流量构成3组流量时间序列 W_{1d}、W_{3d}、W_{7d},用于表征不同历时的上游来水情况。

2 研究方法

2.1 C-Vine Copula

Copula函数是用于描述多随机变量之间的依赖结构的数学工具[17]。常见的Copula函数如表1所示。二维Copula函数能够描述两个随机变量之间的相依性,但在非线性关系上缺乏灵活性[18],因此Joe[19]提出Vine Copula概念,Vine Copula能够更加全面地捕捉两个以上随机变量之间依赖关系,其通过构建多层级藤结构来分解多变量联合分布,将 n 维多元概率分布分解为 $n(n-1)/2$ 个二维双变量概率分布,且可以在考虑核心变量的情况下量化遭遇风险,更加精准地计算不同遭遇情景下的联合概率。

C-Vine Copula使用树状结构来表示变量之间的依赖关系,其中最重要的变量位于树的根节点,其他变量依次连接到根节点和中间节点[19]。本文选取降水量 U 为中心变量,第一层树1以 U 为根节点,分别与水位 V、上游流量 W 配对形成边 (U,V)、(U,W),构建Copula函数 $C(U,V)$、$C(U,W)$ 描述其二维依赖关系;第二层树2中在给定 U 的条件下,形成 V 和 W 之间的边 $(V,W|U)$,构建 $C(V,W|U)$ 函数描述三维依赖关系。具体结构如图2所示。

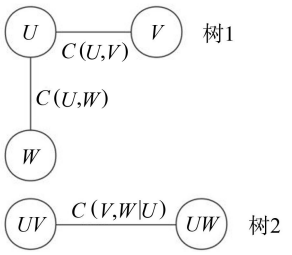


图2 C-Vine藤结构

Fig. 2 C-Vine vine structure

对于 n 维C-Vine结构,其联合概率密度函数可以表示为

$$f(x_1,x_2,\cdots,x_n)=\prod_{k=1}^{n}f_k(x_k)\prod_{i=1}^{n-1}\prod_{j=1}^{n-i}C_{j,i+j|1:(j-1)}[F(x_j|x_1,x_2\cdots,x_{j-1}),F(x_{i+j}|x_1,x_2\cdots,x_{j-1})] \quad (1)$$

式中:$f(\cdot)$ 为联合概率密度函数;$f_k(x_k)$ 为随机变量 x_k 的边缘函数;$C_{i,i+j|1:(i-1)}(\cdot)$ 为每个节点的Copula概率密度函数;i 为树的序列;j 为边的序列;$F(\cdot|\cdot)$ 为条件分布函数。

采用Kolmogorov-Smirnov(K-S)检验、赤池信息准则(Akaike information criterion,AIC)、修正赤池信息准则(Akaike information criteria corrected,AICc)、贝叶斯信息准则(Bayesian information criterion,BIC)和对数似然函数(loglikelihood,LogL)等进行Copula函数的拟合精度检验,从而优选出变量的最优拟合函数。其中,AIC、BIC和AICc均遵循值越小模型越优的判定原则,LogL则为绝对值越大模型越优。

2.2 尾部依赖性

Kendall、Pearson、Spearman相关系数是描述线性分布或椭圆分布的最佳选择,但对于多变量非椭圆分布的描述,这类相关系数具有一定的误导性[20]。因此,本文在这3种相关系数的基础上,采用尾部依赖性来描述多变量在其分布尾部的相关程度[21],即变量在出现极值的情况下的相关性。尾部依赖性用上尾依赖系数 λ_U 和下尾依赖系数 λ_L 来表征,其计算公式为

$$\lambda_U=\lim_{q\to1^-}P[X>f_X^{-1}(q)\mid Y>f_Y^{-1}(q)] \quad (2)$$

表1 常见的Copula函数

Table 1 Common Copula functions

Copula函数	表达式	说明
Frank Copula	$C(u,v;\theta)=-\frac{1}{\theta}\left[1+\frac{(e^{-\theta u}-1)(e^{-\theta v}-1)}{(e^{-\theta}-1)}\right]$	$\theta\in R$
Gaussian Copula	$C(u,v)=\varphi[\varphi^{-1}(u)\varphi^{-1}(v)]$	φ 为标准正态分布
Joe Copula	$C(u,v;\theta)=1-[(1-u)^{\theta}+(1-v)^{\theta}+(1-u)^{\theta}(1-v)^{\theta}]^{1/\theta}$	$\theta\in[1,\infty)$
BB1 Copula	$C(u,v;\theta,\delta)=\{1+[(u^{-\theta}-1)^{\delta}+(v^{-\theta}-1)^{\delta}]^{1/\delta}\}^{-1/\theta}$	$\theta>0;\delta\geq1$

注:$C(\cdot)$ 为Copula函数;u、v 为边缘分布概率;θ 为相关性参数,描述变量间相关性;δ 为形态参数,决定变量间尾部依赖性及非线性关系。

$$\lambda_L = \lim_{q\to 0^+} P[X \leqslant f_X^{-1}(q) \mid Y \leqslant f_Y^{-1}(q)] \quad (3)$$

式中：X、Y 为随机变量；q 为 0~1 的随机概率值；f_X、f_Y 为 X、Y 边缘分布函数；$f_X^{-1}(q)$、$f_Y^{-1}(q)$ 为 X、Y 的分位数函数；$P(\cdot)$ 为概率函数。$\lambda_U=0$ 或 $\lambda_L=0$ 说明在出现高极值或低极值的情况下两变量相互独立；$\lambda_U=1$ 或 $\lambda_L=1$ 说明在出现高极值或低极值的情况下两变量同时发生；$0<\lambda_U<1$ 或 $0<\lambda_L<1$ 则说明在出现高极值或低极值的情况下两变量具有相关性，参数值越大相关性越强。

2.3 多变量联合遭遇风险率及联合遭遇重现期

假定 X_1、X_2、…、X_n 为具有相关关系的变量序列，本文中指降水量、水位、流量序列；x_1、x_2、…、x_n 为变量对应的设计值序列，本文中指特定重现期下降水量、水位、流量的设计值序列。联合遭遇风险率为降水量、水位、流量序列超过设计值的概率，表达式见式(4)。在得到联合遭遇风险率的基础上，计算降水量、水位、流量序列的联合遭遇重现期，计算公式见式(5)。

$$P_L(X_1 > x_1, X_2 > x_2, \cdots, X_n > x_n) = 1 - C[f_1(x_1), f_2(x_2), \cdots, f_n(x_n)] \quad (4)$$

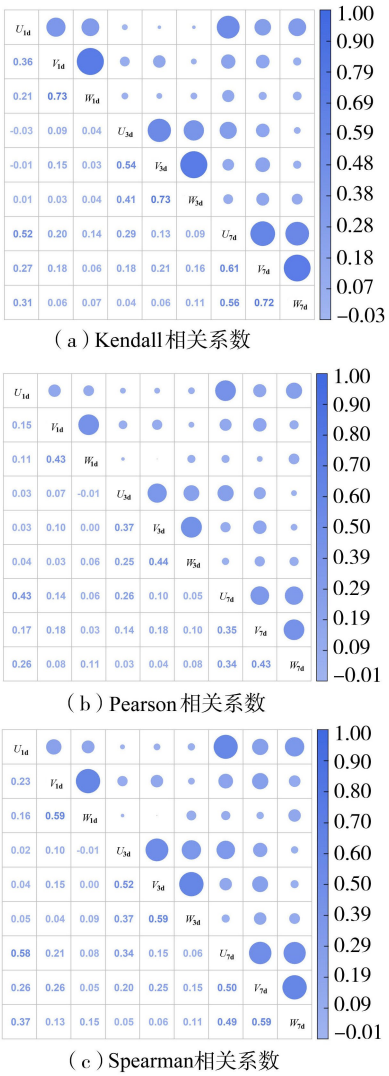
$$T(X_1, X_2, \cdots, X_n) = 1/\{1 - C[f_1(x_1), f_2(x_2), \cdots, f_n(x_n)]\} \quad (5)$$

式中：$P_L(\cdot)$ 为联合遭遇风险率函数；$T(\cdot)$ 为联合遭遇重现期函数。

3 结果与分析

3.1 相关性检验

选取研究区不同历时 1、3、7 d 的降水量、水位及上游流量作为 3 种城市洪涝致灾因子，计算 3 种致灾因子的 Kendall 系数 τ、Pearson 系数 γ 和 Spearman 系数 ρ，结果见图 3。由图 3 可见，对角线上表现出较高的相关性，且同历时条件下的三变量组合呈明显的正相关关系，其中 (U_{7d}, V_{7d}, W_{7d}) 组合表现出的相关性最强，而 (U_{1d}, V_{1d}, W_{1d}) 组合表现出的相关性最弱；$\gamma(U_{1d}, V_{1d})$ 为 0.36，$\gamma(U_{3d}, V_{3d})$ 为 0.54，$\gamma(U_{7d}, V_{7d})$ 为 0.61，可见降水量与水位的相关性随着历时的增加逐渐增强；$\gamma(V_{1d}, W_{1d})$ 为 0.73，$\gamma(V_{3d}, W_{3d})$ 为 0.73，$\gamma(V_{7d}, W_{7d})$ 为 0.72，可见研究区上游来水与城市河流水位之间具有较高的相关性。一旦汛期降水量增加，大运河上游流量显著增加，导致研究区内水量迅速汇集到河流，下游的研究区河道内的水位将会随之上升。因此降水量、水位、上游流量作为研究区暴雨内涝灾害事件的重要致灾因子，之间存在复杂的依赖关系。



(a) Kendall 相关系数

(b) Pearson 相关系数

(c) Spearman 相关系数

图 3 致灾因子的相关系数

Fig. 3 Correlation coefficient of hazard factors

3.2 边缘分布函数优选

Copula 函数能够灵活地连接不同的边缘分布，摆脱了联合多变量时边缘函数必须相同的限制[22]。选取 Lognormal、Inverse Gaussian、Birnbaum Saunders、Gamma、GEV(generalized extreme value)、Loglogistic、Nakagami、Logistic、Rician、Normal、t、Weibull、Extreme value、GPD(generalized Pareto distribution)、Rayleigh、Exponential 等 16 种边缘分布函数，对研究区 2000—2021 年历时分别为 1、3、7 d 的降水量、水位及上游流量的单变量进行拟合。采用 K-S 非参数检验法对所有边缘分布函数进行初步检验，并对通过 K-S 检验的边缘分布函数计算其 LogL、BIC、AIC、AICc 检验统计量，结果如表 2 所示。根据检验统计量的判定原则，优选出 9 个单变量的边缘分布函数。

利用经验分布函数对优选出的边缘函数进行验证，如图 4 所示，图中散点表示经验分布频率，曲线表示优选出的边缘函数。由图 4 可见，对于所有单

表 2　单变量边缘分布函数的检验统计量

Table 2　Marginal distribution function test statistic for univariate sequences

单变量	Copula 函数	LogL	BIC	AIC	AICc
U_{1d}	GEV	1 204.5	2 405.8	2 394.9	2 395.0
	GPD	1 195.9	2 408.6	2 397.7	2 397.8
	Inverse Gaussian	1 201.9	2 415.0	2 407.7	2 407.8
V_{1d}	GEV	63.5	124.0	113.1	113.1
	Loglogistic	60.6	132.4	125.2	125.2
	t	62.6	142.1	131.2	131.3
W_{1d}	Nakagami	1 187.0	2 365.3	2 358.0	2 358.1
	GPD	1 179.5	2 375.8	2 364.9	2 365.0
	Weibull	1 183.5	2 378.2	2 371.0	2 371.0
U_{3d}	Inverse Gaussian	1 394.7	2 799.4	2 792.1	2 792.1
	GEV	1 391.3	2 799.5	2 788.6	2 788.7
	Birnbaum Saunders	1 394.0	2 800.6	2 793.3	2 793.4
V_{3d}	GEV	107.9	192.7	181.7	181.8
	Loglogistic	96.2	203.7	196.4	196.4
	Lognormal	100.4	212.0	204.7	204.8
W_{3d}	GEV	1 316.6	2 610.1	2 599.2	2 599.2
	t	1 301.0	2 618.9	2 608.0	2 608.1
	Logistic	1 307.6	2 626.4	2 619.1	2 619.2
U_{7d}	Inverse Gaussian	1 583.4	3 172.3	3 164.9	3 164.9
	Birnbaum Saunders	1 580.6	3 172.6	3 165.2	3 165.2
	Lognormal	1 581.5	3 174.4	3 167.0	3 167.0
V_{7d}	GEV	64.5	86.2	75.1	75.1
	Loglogistic	61.7	134.8	127.4	127.4
	t	65.5	148.1	137.0	137.1
W_{7d}	GEV	1 393.0	2 803.2	2 792.0	2 792.1
	t	1 393.2	2 803.6	2 792.4	2 792.5
	Logistic	1 409.0	2 829.5	2 822.1	2 822.1

变量，经验分布频率散点均匀散落在边缘函数曲线周围，表明选取的边缘分布函数均具有良好的拟合效果。因此，确定 U_{1d}、V_{1d}、V_{3d}、W_{3d}、V_{7d}、W_{7d} 的最优拟合边缘分布函数为 GEV，W_{1d} 的最优拟合边缘分布函数为 Nakagami，U_{3d}、U_{7d} 的最优拟合边缘分布函数为 Inverse Gaussian。

3.3　二维 Copula 函数优选

要建立三维 C-Vine Copula，需先针对双变量组合建立二维 Copula 函数联合分布，完成藤结构第一层树 1 和双边 $C(U,V)$、$C(U,W)$ 的构建[23]。首先，创建双变量 Copula 家族，本文 Copula 家族包括 Frank Copula、joe Copula、BB1、rotated BB1 0°（90°、180°、270°）等 20 种多元 Copula 函数。其次，基于该家族，利用 AIC、BIC、LogL 准则选取不同双变量组合的最优 Copula 函数，并计算其尾部依赖系数，结果如表 3 所示。由表 3 可见，（U_{1d}，V_{1d}）和（U_{1d}，W_{1d}）的最优 Copula 函数为 Frank Copula 和 Gaussian Copula，这两种函数本身对称且不具备尾部依赖性[24]，因此其上、下尾依赖系数为 0。（V_{1d}，W_{1d}）、（U_{3d}，V_{3d}）、（U_{3d}，W_{3d}）的最优 Copula 函数均为 BB8 Copula 函数，其为典型的双参数函数，两个参数分别控制依赖性的强度和方向，从而可以更加灵活地捕捉变量间的复杂依赖性[25]。其中，（V_{1d}，W_{1d}）的上、

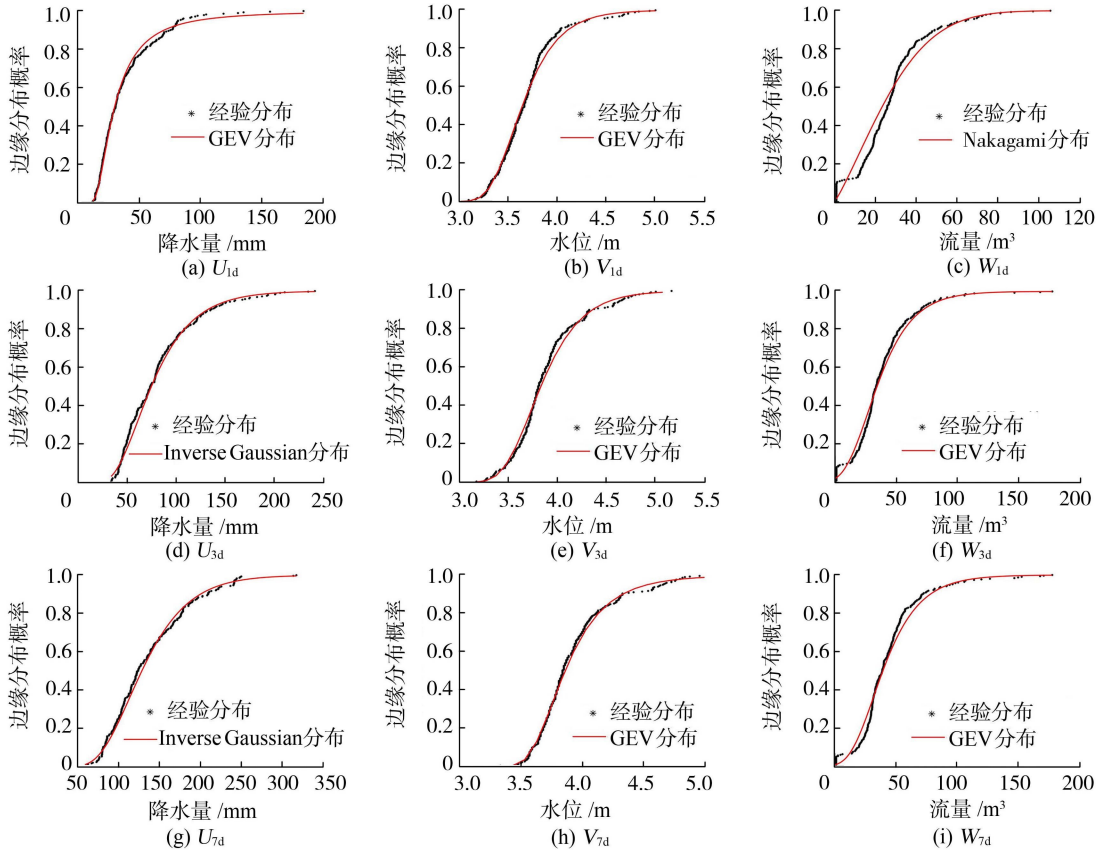


图 4　单变量优选边缘分布函数验证结果

Fig. 4　Verification results of univariate optimal marginal distribution function

表 3　双变量组合二维 Copula 函数检验统计量及尾部依赖系数

Table 3　Test statisticsand tail dependence coefficients of bivariate combinations two-dimensional Copula function

双变量组合	Copula 函数	AIC	BIC	LogL	λ_L	λ_U
(U_{1d},V_{1d})	Frank	-12.29	-8.66	7.14	0	0
(U_{1d},W_{1d})	Gaussian	-7.91	-4.28	4.95	0	0
(V_{1d},W_{1d})	BB8	-193.14	-185.89	98.57	0	0
(U_{3d},V_{3d})	BB8	-91.07	-83.77	47.53	0	0.263 8
(U_{3d},W_{3d})	BB8	-46.28	-38.98	25.14	0	0.102 5
(V_{3d},W_{3d})	Joe	-259.02	-253.37	130.50	0	0.688 8
(U_{7d},V_{7d})	Survival Clayton	-153.70	-149.99	77.85	0	0.480 7
(U_{7d},W_{7d})	Survival BB1	-139.15	-131.73	71.58	0.1978	0.342 5
(V_{7d},W_{7d})	Joe	-256.13	-252.41	129.10	0	0.671 8

下尾依赖系数均为 0,说明历时为 1 d 的情况下水位与流量在出现极值的情况下关联性不强;(U_{3d},V_{3d}) 的上尾依赖系数为 0.263 8,说明历时为 3 d 的情况下降水量与水位在出现高极值时表现出一定的相关性;(U_{3d},W_{3d}) 的上尾依赖系数为 0.102 5,说明历时为 3 d 的情况下降水量与流量在出现高极值时也存在一定的相关性。(V_{3d},W_{3d}) 的最优 Copula 函数为 Joe Copula 函数,其本身特别适用于具有非对称依赖性结构的数据,尤其在捕捉上尾依赖性方面非常敏感,上尾依赖系数达到 0.688 8,表明历时为 3 d 的情况下水位与流量在出现高极值时有较高的相关性。历时为 1 d 的情况下,变量组合的下尾依赖系数均为 0,这表明研究区内低水位事件和低流量事件并不一定因降水量低而发生,同理低水位事件的发生也并一定由上游低流量导致。历时为 7 d 的情况下,(U_{7d},V_{7d}) 的最优 Copula 函数为 Survival Clayton Copula 函数,其上尾依赖系数达 0.480 7;(U_{7d},W_{7d}) 的最优 Copula 函数为 Survival BB1 Copula 函数,其上尾依赖系数达 0.342 5、下尾依赖系数达 0.197 8;(V_{7d},W_{7d}) 的最优 Copula 函数为 Joe Copula 函数,其上尾依赖系数达 0.671 8,说明降水量、水位、流量 3 个变量在出现高极值情况下的关联性较高。

利用经验 Copula 函数对双变量组合选取的最优 Copula 函数进行验证,如图 5 所示,图中横轴表示利用经验 Copula 函数计算的双变量组合联合分布概率,纵轴表示利用优选出的 Copula 函数计算的双变量组合联合分布概率。由图 5 可见,所有双变量组合的散点均匀沿对角线分布,可见选取的二维 Copula 函数均可以很好地构建双变量组合的联合分布。

3.4　三维 C-Vine Copula 建立

在建立双变量组合的二维 Copula 函数的基础上,针对 C-Vine Copula 的第二层树 2 结构,计算以降水量为中心节点的条件概率密度[26],同理,基于 AIC、BIC、LogL 检验的统计量优选出树 2 结构的最优 Copula 函数,最终构建完整的 C-Vine Copula 藤结构,如表 4 所示。由表 4 可见,对于树 2,边 $(V_{1d},W_{1d}|U_{1d})$ 选取 BB8 Copula 函数进行拟合,其上尾依赖系数为 0.109 6,与 (V_{1d},W_{1d}) 的双变量组合的尾部依赖性不同,在考虑降水量的条件下 BB8 Copula 函数捕捉到变量 V_{1d} 和 W_{1d} 在出现高极值时存在一定的相关性;边 $(V_{3d},W_{3d}|U_{3d})$ 选取 Joe Copula 函数进行拟合,其上尾依赖系数为 0.607 3,说明在考虑降水量的条件下 Joe Copula 能够捕捉到变量 V_{3d} 和 W_{3d} 之间在出现高极值时存在依赖性,且依赖性表现较强,与 (V_{3d},W_{3d}) 双变量组合的依赖系数相差不大;边 $(V_{7d},W_{7d}|U_{7d})$ 选取 BB8 Copula 函数进行拟合,其上尾依赖系数为 0.357 7,与 (V_{7d},W_{7d}) 双变量组合相比依赖系数降低,这实际上与选取的 Copula 函数有关,不同的 Copula 函数对尾部依赖性的敏感程度也不尽相同。

3.5　联合遭遇风险率与联合遭遇重现期

3.5.1　二维联合遭遇风险率与联合遭遇重现期

图 6 为双变量组合联合遭遇风险率。由图 6 可见,随着变量边缘分布函数值的增加,其联合遭遇风险随之增大。图 6(a)(b)(c)散点分布较为均匀,图 6(g)(h)(i)的散点沿对角线更加集中,表明历时为 7 d 的双变量组合相关性较为显著,即在历时为 7 d 的情况下,降水量、水位、流量 3 种致灾因子中两两联合遭遇的风险较大。

极端情形发生时仅考虑单变量的重现期存在高估重现期的风险。根据研究区防洪排涝规划标准,对降水量、水位、流量 3 种致灾因子的设计重现期分别设置为 10、20、50 a,计算不同设计重现期组合下 3 种致灾因子的双变量组合联合遭遇重现期,结果如表 5 所示,其中设计重现期为(10 a,10 a,10 a)表示降水量、水位、流量的设计重现期均取 10 a 的情况,以此类推。由表 5 可见,对于不同历时而言,双变量组合的联合遭遇重现期从大到小的顺序依次

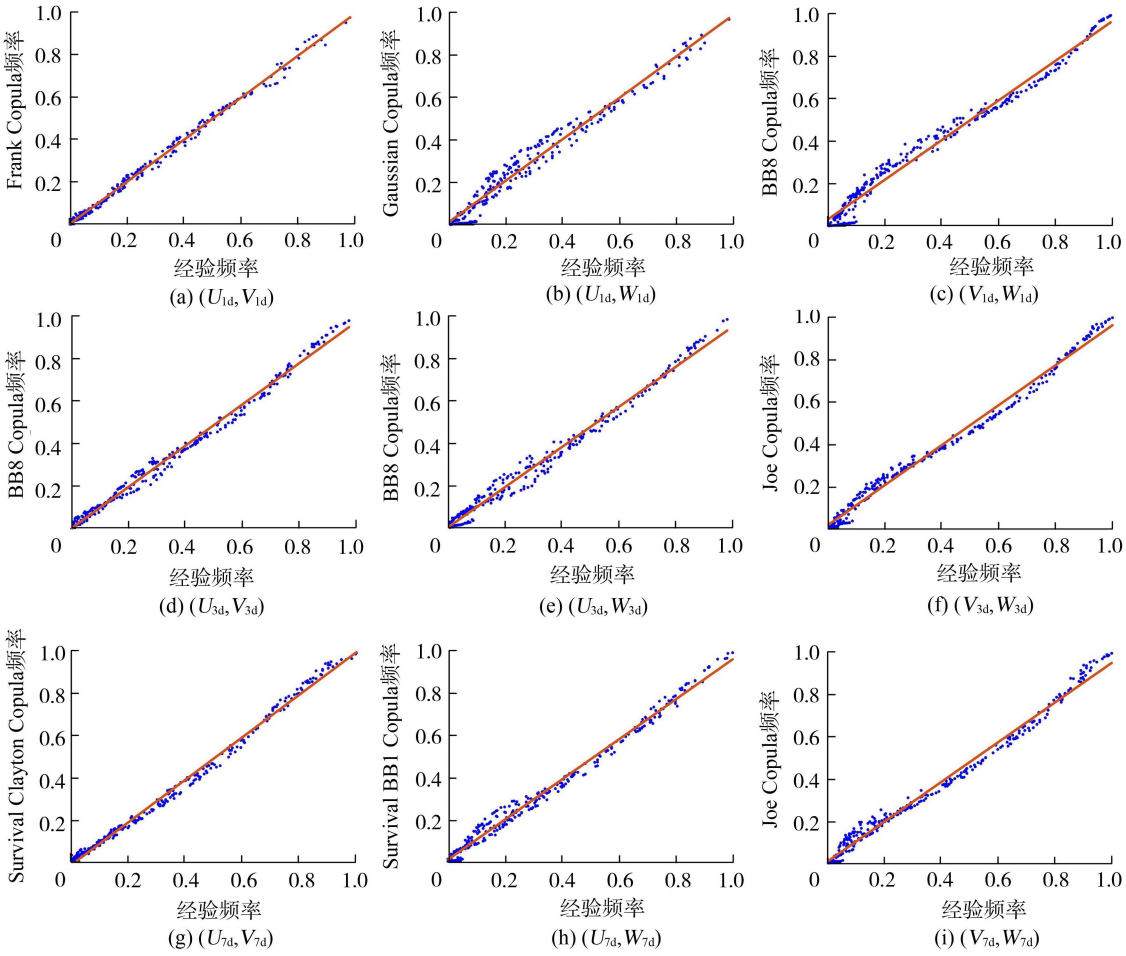


图 5　双变量组合优选二维 Copula 函数验证结果

Fig. 5　Verification results of two-dimensional Copula function for bivariate combinations

表 4　三变量组合 C-Vine Copula 藤结构及尾部依赖系数

Table 4　Three variable combination C-Vine Copula vine structure and tail dependence coefficients

三变量组合	树 1		树 2		λ_L	λ_U
	边 1	Copula 函数	边 2	Copula 函数		
(U_{1d}, V_{1d}, W_{1d})	(U_{1d}, V_{1d}) (U_{1d}, W_{1d})	Frank Gaussian	(V_{1d}, W_{1d}|U_{1d})	BB8	0	0.1096
(U_{3d}, V_{3d}, W_{3d})	(U_{3d}, V_{3d}) (U_{3d}, W_{3d})	BB8 BB8	(V_{3d}, W_{3d}|U_{3d})	Joe	0	0.6073
(U_{7d}, V_{7d}, W_{7d})	(U_{7d}, V_{7d}) (U_{7d}, W_{7d})	Survival Clayton Survival BB1	(V_{7d}, W_{7d}|U_{7d})	BB8	0.1458	0.3577

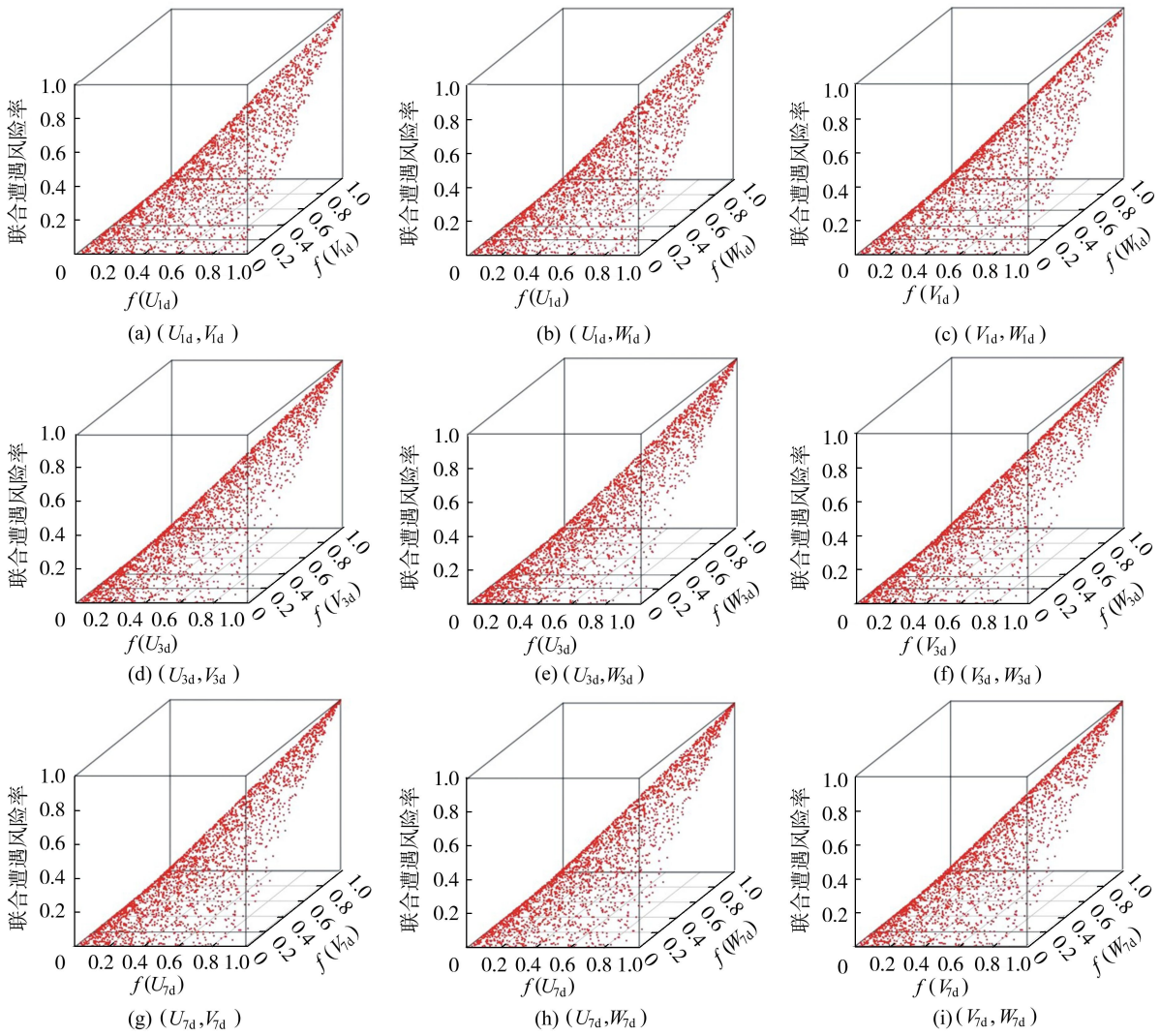
为：1 d 双变量组合、3 d 双变量组合、7 d 双变量组合。

结合图 6 与表 5 进行分析，历时为 7 d 的情况下，10 年一遇降水量与 10 年一遇水位的联合遭遇风险率最大，为 18.39%，对应的联合遭遇重现期为 5.4 a，相比于只考虑单变量重现期缩减了 46%；20 年一遇降水量与 20 年一遇水位的联合遭遇风险率为 9.57%，对应的联合遭遇重现期为 10.5 a，相比于单变量重现期缩减了 47.5%；50 年一遇降水量与 50 年一遇水位的联合遭遇重现期为 25.5 a，相比于单变量重现期缩减了 49%。因此，历时为 7 d 的情况下，降水量与水位的联合遭遇重现期最小，因此两者的联合遭遇风险率最高。历时为 3 d 和 1 d 的情况下，则是降水量与流量的联合遭遇风险率最高。由此可见，双变量组合联合重现期明显低于单变量重现期，对于较长历时的城市洪涝过程，需注意防范强降雨与城市内部高水位叠加影响下的洪涝灾害效应。

3.5.2　三维联合遭遇风险率与联合遭遇重现期

C-Vine Copula 的联合分布概率计算需要考虑条件概率以及对概率密度函数多元积分，本文采用蒙特卡洛法生成 100 万个样本数据点，运用循环结构绘制三维 C-Vine Copula 的联合遭遇风险率切片图，如图 7 所示。

同样对降水量、水位、流量 3 种致灾因子的设计



(a) (U_{1d},V_{1d}) (b) (U_{1d},W_{1d}) (c) (V_{1d},W_{1d})

(d) (U_{3d},V_{3d}) (e) (U_{3d},W_{3d}) (f) (V_{3d},W_{3d})

(g) (U_{7d},V_{7d}) (h) (U_{7d},W_{7d}) (i) (V_{7d},W_{7d})

图 6　双变量组合联合遭遇风险率

Fig. 6　Joint encounter risk of bivariate combinations

表 5　双变量组合联合遭遇重现期　　单位：a

Table 5　Bivariate combination joint encounter recurrence period　　unit：a

设计重现期	(U_{1d},V_{1d})	(U_{1d},W_{1d})	(V_{1d},W_{1d})	(U_{3d},V_{3d})	(U_{3d},W_{3d})	(V_{3d},W_{3d})	(U_{7d},V_{7d})	(U_{7d},W_{7d})	(V_{7d},W_{7d})
(10 a,10 a,10 a)	6.7	6.4	7.5	6.2	6.0	7.6	5.4	5.4	7.5
(20 a,10 a,10 a)	8.6	8.2	7.5	7.8	7.6	7.6	7.1	7.1	7.5
(20 a,20 a,10 a)	13.3	8.2	9.3	11.5	7.6	9.4	10.4	7.1	9.3
(20 a,20 a,20 a)	13.3	12.5	15.1	11.5	11.2	15.3	10.4	10.5	14.9
(50 a,50 a,20 a)	33.0	17.1	19.2	26.7	15.3	19.3	25.5	14.7	19.0
(50 a,50 a,50 a)	33.0	30.8	37.6	26.7	26.4	38.1	25.5	25.6	36.4

重现期分别设置为 10、20、50 a，计算不同设计重现期组合下 3 种致灾因子三变量组合联合遭遇重现期，结果如表 6 所示。由表 6 可见，对于不同历时而言，三变量组合的联合遭遇重现期从大到小的顺序依次为：1 d 三变量组合、3 d 三变量组合、7 d 三变量组合，这与双变量二维联合遭遇重现期的规律相同，说明(U_{7d},V_{7d},W_{7d})组合的联合遭遇风险率较高，研究区尤其需要注意长历时梅雨天气的累积效应存在引发城市洪涝灾害的风险。

表 6　三变量组合联合遭遇重现期　　单位：a

Table 6　Three variable combination joint encounter recurrence period　　unit：a

设计重现期	(U_{1d},V_{1d},W_{1d})	(U_{3d},V_{3d},W_{3d})	(U_{7d},V_{7d},W_{7d})
(10 a,10 a,10 a)	5.5	5.2	4.7
(20 a,10 a,10 a)	6.5	6.2	5.8
(20 a,20 a,10 a)	7.7	7.2	6.7
(20 a,20 a,20 a)	10.7	9.6	8.9
(50 a,50 a,20 a)	16.2	14.6	14.1
(50 a,50 a,50 a)	25.9	22.2	21.3

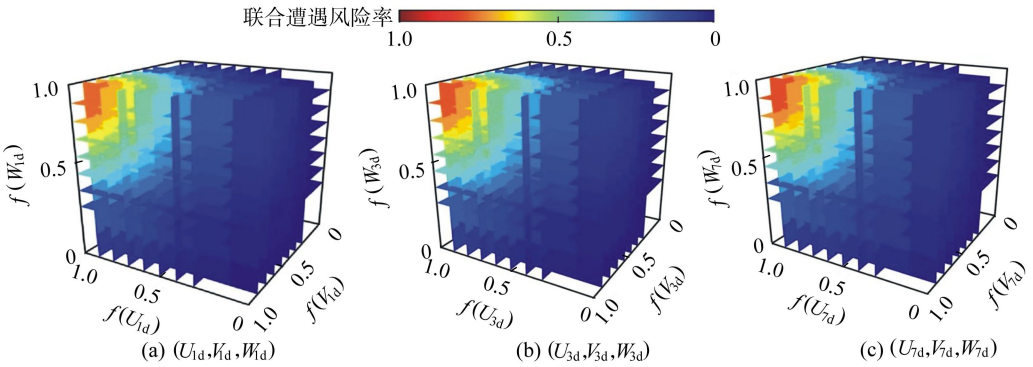


图 7　三维 C-Vine Copula 联合遭遇风险切片图

Fig. 7　3D C-Vine Copula joint encounter risk slice diagram

结合图 7 与表 6 进行分析，相比于单变量和双变量组合，三变量组合的联合遭遇重现期更低，对应的联合遭遇风险率更高，且各致灾因子对不同历时组合的影响也不尽相同。计算三维联合遭遇重现期相对于二维联合遭遇重现期及单变量重现期的缩减率，当降水量、水位、流量的设计重现期均为 10 a 时，(U_{7d},V_{7d},W_{7d}) 的联合遭遇风险率为 21.3%，对应联合遭遇重现期为 4.7 a，相比只单变量的重现期缩减了 53%，相比于不考虑上游流量的 (U_{7d},V_{7d}) 的重现期缩减了 13.5%，相比于不考虑水位的 (U_{7d},W_{7d}) 重现期缩减了 13.6%，相比于不考虑降水量的 (V_{7d},W_{7d}) 重现期缩减了 37.6%。就不同设计重现期组合下重现期缩减率的平均值而言，对于 (U_{1d},V_{1d},W_{1d}) 组合，相比于不考虑上游流量的 (U_{1d},V_{1d}) 平均缩减率最大，为 29.2%，相比于不考虑水位的 (U_{1d},W_{1d}) 平均缩减率最小，为 12.6%，可见上游流量是影响 (U_{1d},V_{1d},W_{1d}) 的关键因素。对于 (U_{3d},V_{3d},W_{3d}) 组合，相比于不考虑降水量的 (V_{3d},W_{3d}) 平均缩减率最大，为 29.4%，相比与不考虑水位的 (U_{3d},W_{3d}) 平均缩减率最小，为 11.8%，可见降水量是影响 (U_{3d},V_{3d},W_{3d}) 的关键因素。对于 (U_{7d},V_{7d},W_{7d}) 组合，相比于不考虑降水量的 (V_{7d},W_{7d}) 平均缩减率最大，为 32.7%，相比于不考虑水位的 (U_{7d},W_{7d}) 平均缩减率最小，为 12.2%，可见降水量是影响 (U_{7d},V_{7d},W_{7d}) 的关键因素。另外，随着设计重现期的增加，多致灾因子极端事件联合遭遇风险率逐渐减小，但当单个致灾因子极值越高，引发复合灾害的风险则越大。综上，当无锡市遭逢极端洪涝事件时，需要注意多致灾因子的协同作用，必要时应采取多种工程或非工程措施减少极端事件遭遇给城市带来的更大的风险。

4　结　论

a. 针对无锡市主城区历时分别为 1、3、7 d 的降水量、水位和上游流量 3 种致灾因子，采用相关性系数和尾部依赖系数验证变量组合间复杂的非线性结构和依赖性。同历时条件下的三变量组合呈明显的正相关关系，(U_{7d},V_{7d},W_{7d}) 组合相关性最强，(U_{3d},V_{3d},W_{3d}) 组合次之，(U_{1d},V_{1d},W_{1d}) 相关性最弱。尾部依赖系数分析表明，(U_{7d},V_{7d},W_{7d}) 的上尾依赖系数高达 0.671 8，3 种致灾因子在历时为 7 d 出现高极值情况下具有较强相关性。

b. 基于 LogL、BIC、AIC、AICc 等检验统计量进行 Copula 函数优选。双变量组合 (U_{1d},V_{1d}) 和 (U_{1d},W_{1d}) 分别优选 Frank Copula 和 Gaussian Copula；(V_{1d},W_{1d})、(U_{3d},V_{3d})、(U_{3d},W_{3d}) 均优选 BB8 Copula；(V_{3d},W_{3d}) 和 (V_{7d},W_{7d}) 优选 Joe Copula；(U_{7d},V_{7d}) 优选 Survival Clayton Copula；(U_{7d},W_{7d}) 优选 Survival BB1 Copula。三维 C-Vine Copula 优选 BB8 Copula 描述边 $(V_{1d},W_{1d}|U_{1d})$ 和边 $(V_{7d},W_{7d}|U_{7d})$，优选 Joe Copula 描述边 $(V_{3d},W_{3d}|U_{3d})$，从而构建了三变量高维联合分布模型。

c. 联合遭遇风险率及联合遭遇重现期计算结果表明，(U_{7d},V_{7d},W_{7d}) 组合的联合遭遇重现期最小，对应联合遭遇风险率最高，需要注意无锡市长历时降雨的累积效应存在增加城市洪涝灾害的风险。联合遭遇重现期缩减率计算结果表明，(U_{1d},V_{1d},W_{1d}) 组合主要受上游流量的影响，最大联合遭遇重现期缩减率为 29.2%，(U_{3d},V_{3d},W_{3d}) 和 (U_{7d},V_{7d},W_{7d}) 组合主要受降水量的影响，最大联合遭遇重现期缩减率分别为 29.4%和 32.7%。

参考文献：

[1] 黄华兵，王先伟，柳林. 城市暴雨内涝综述：特征、机理、数据与方法[J]. 地理科学进展，2021，40(6)：1048-1059.（HUANG Huabing，WANG Xianwei，LIU Lin. Areview on urban pluvial floods：characteristics，mechanisms，data，and research methods[J]. Progress in Geography，2021，40(6)：1048-1059.（in Chinese））

[2] 徐宗学,卢兴超,施奇妙. 城市暴雨洪涝灾害特征与风险评估研究进展[J]. 水利水电科技进展,2025,45(1):1-9. (XU Zongxue, LU Xingchao, SHI Qimiao. Research progress on urban flooding disaster characteristics and risk assessment [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(1):1-9. (in Chinese))

[3] 郭生练,刘章君,熊立华. 设计洪水计算方法研究进展与评价[J]. 水利学报,2016,47(3):302-314. (GUO Shenglian, LIU Zhangjun, XIONG Lihua. Advances and assessment on design flood estimation methods[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(3): 302-314. (in Chinese))

[4] 徐宗学,陈浩,任梅芳,等. 中国城市洪涝致灾机理与风险评估研究进展[J]. 水科学进展,2020,31(5):713-724. (XU Zongxue, CHEN Hao, REN Meifang, et al. Progress on disaster mechanism and risk assessment of urban flood/waterlogging disasters in China[J]. Advances in Water Science,2020,31(5):713-724. (in Chinese))

[5] 宋晓猛,徐楠涛,张建云,等. 中国城市洪涝问题:现状、成因与挑战[J]. 水科学进展,2024,35(3):357-373. (SONG Xiaomeng, XU Nantao, ZHANG Jianyun, et al. Urban flooding in China: currentstatus, causes and challenges[J]. Advances in Water Science,2024,35(3): 357-373. (in Chinese))

[6] 张建云,王银堂,贺瑞敏,等. 中国城市洪涝问题及成因分析[J]. 水科学进展,2016,27(4):485-491. (ZHANG Jianyun,WANG Yintang,HE Ruimin,et al. Discussion on the urban flood and waterlogging and causes analysis in China[J]. Advances in Water Science,2016,27(4):485-491. (in Chinese))

[7] 隆院男,黄春福,莫军成,等. 非一致性条件下松澧地区洪水遭遇规律分析[J]. 水利水电科技进展,2024,44(4): 14-22. (LONG Yuannan, HUANG Chunfu, MO Juncheng, et al. Analysis of flood coincidence law in Song-Li Region under non-consistency conditions [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024,44(4):14-22. (in Chinese))

[8] 刘章君,郭生练,许新发,等. Copula 函数在水文水资源中的研究进展与述评[J]. 水科学进展,2021,32(1): 148-159. (LIU Zhangjun, GUO Shenglian, XU Xinfa, et al. Application of Copula functions in hydrology and water resources:a state-of-the-art review[J]. Advances in Water Science,2021,32(1):148-159. (in Chinese))

[9] 武传号,黄国如,吴思远. 基于 Copula 函数的广州市短历时暴雨与潮位组合风险分析[J]. 水力发电学报,2014,33(2):33-40. (WU Chuanhao,HUANG Guoru,WU Siyuan. Risk analysis of combination of short duration rainstorm and tidal level based on Copula function in Guangzhou [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014,33(2):33-40. (in Chinese))

[10] 李晓英,姜紫萍,樊红霞,等. 基于非对称乘积 Copula 函数的城市雨洪遭遇风险分析[J]. 水资源保护,2024,40(6): 78-84. (LI Xiaoying, JIANG Ziping, FAN Hongxia,et al. Risk analysis of urban rain-floodencounter based on asymmetric product Copulafunction[J]. Water Resources Protection,2024,40(6):78-84. (in Chinese))

[11] 许瀚卿,谭金凯,李梦雅,等. 中国沿海地区雨潮复合灾害联合分布及危险性研究[J]. 地理科学进展,2022,41(10):1859-1867. (XU Hanqing,TAN Jinkai,LI Mengya, et al. Joint distribution and risk of the compound disaster caused by rainfall and storm surge across Chinese coastal region[J]. Progress in Geography,2022,41(10):1859-1867. (in Chinese))

[12] 周子滢,杨赛霓,刘晓燕,等. 基于 C-Vine Copula 函数的台风灾害链“风-雨-潮”联合概率分布研究[J]. 热带地理,2024,44(6): 1036-1046. (ZHOU Ziying, YANG Saini,LIU Xiaoyan, et al. Joint probability distribution of typhoon disaster chain “strong wind-rainstorm-storm surge” based on C-Vine Copula function [J]. Tropical Geography,2024,44(6):1036-1046. (in Chinese))

[13] XIAO Honglin, ZHANG Jinping, FANG Hongyuan. A Copula-based framework for joint encounter and state evolution analysis of urban short-duration rainstorm characteristics [J]. Journal of Hydrology, 2024, 631: 130823.

[14] SHARMA A, WANG Huaan, ZHANG Jie, et al. Constructing multivariate distribution of rainfall characteristics:a Bayesian vine algorithm[J]. Journal of Hydrology,2024,637:131392.

[15] 张耀华,孙雯,朱喜,等. 太湖流域平原城市洪涝防治思路[J]. 江苏水利,2016(1):56-60. (ZHANG Yaohua, SUN Wen, ZHU Xi, et al. Thoughts on flood control in plain cities of the Taihu Lake Basin[J]. Jiangsu Water Resources,2016(1):56-60. (in Chinese))

[16] 王强,许有鹏,杨龙,等. 太湖平原地区洪水特征变化及驱动机理[J]. 地理学报,2023,78(5):1088-1103. (WANG Qiang,XU Youpeng,YANG Long,et al. Changes in flood characteristics and their driving mechanisms in the Taihu Plain region [J]. Acta Geographica Sinica, 2023,78(5):1088-1103. (in Chinese))

[17] GENEST C, OKHRIN O, BODNAR T. Copula modeling from Abe Sklar to the present day [J]. Journal of Multivariate Analysis,2024,201:105278.

[18] GENEST C, FAVRE A C, BÉLIVEAU J, et al. Metaelliptical copulas and their use in frequency analysis of multivariate hydrological data [J]. Water Resources Research,2007,43(9):W09401.

[19] JOE H. Multivariate models and multivariate dependence concepts[M]. New York:Chapman and Hall/CRC,1997.

[20] HAFF I H, FRIGESSI A, MARAUN D. How well do regional climate models simulate the spatial dependence of

precipitation?: an application of pair-copula constructions [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2015,120(7):2624-2646.
[21] JI Liuyan,TAN Kenseng,YANG Fan. Tail dependence and heavy tailedness in extreme risks [J]. Insurance: Mathematics and Economics,2021,99:282-293.
[22] 刘章君,郭生练,何绍坤,等. 基于 Copula 函数的多变量水文不确定性处理器[J]. 水利学报,2018,49(3):332-342. (LIU Zhangjun,GUO Shenglian,HE Shaokun,et al. Multivariate hydrologic uncertainty processor based on Copula function [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018,49(3):332-342. (in Chinese))
[23] CZADO C,NAGLER T. Vine copula based modeling[J]. Annual Review of Statistics and Its Application,2022,9: 453-477.
[24] KAO S C, GOVINDARAJU R S. Trivariate statistical analysis of extreme rainfall events via the Plackett family of copulas[J]. Water Resources Research,2008,44(2): W02415.
[25] OAKES D. Multivariate survival distributions[J]. Journal of Nonparametric Statistics,1994,3(3/4):343-354.
[26] BEDFORD T, COOKE R M. Probability density decomposition for conditionally dependent random variables modeled by vines[J]. Annals of Mathematics and Artificial Intelligence,2001,32(1/2/3/4):245-268.
(收稿日期:2024-07-20 编辑:王芳)

(上接第 64 页)
[9] 赵勇,黄可静,高学睿,等. 黄河流域粮食生产水足迹及虚拟水流动影响评价[J]. 水资源保护,2022,38(4):39-47. (ZHAO Yong,HUANG Kejing,GAO Xuerui,et al. Evaluation of grain production water footprint and influence of grain virtual water flow in the Yellow River Basin[J]. Water Resources Protection,2022,38(4):39-47. (in Chinese))
[10] 宋晓娜,经小川,张峰. 水生态文明建设质量的时空演化评估[J]. 水资源保护,2023,39(3):246-252. (SONG Xiaona, JING Xiaochuan, ZHANG Feng. Evaluation on spatiotemporal evolution of water ecological civilization construction quality [J]. Water Resources Protection, 2023,39(3):246-252. (in Chinese))
[11] 陈梅,刘泽星,王若男,等. 建立健全地方节水制度政策的措施与建议[J]. 中国水利,2024(7):17-21. (CHEN Mei, LIU Zexing, WANG Ruonan, et al. Measures and suggestions for establishing and enhancing local water conservation system and policy [J]. China Water Resources,2024(7):17-21. (in Chinese))
[12] 左其亭,邱曦,马军霞,等. 黄河治水思想演变及现代治水方略[J]. 水资源与水工程学报,2023,34(3):1-9. (ZUO Qiting,QIU Xi,MA Junxia,et al. Evolution of flood control thought and modern flood control strategy in the Yellow River Basin[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering,2023,34(3):1-9. (in Chinese))
[13] 王若禹,赵志轩,黄昌硕,等. "四水四定"水资源管控理论研究进展[J]. 水资源保护,2023,39(4):111-117. (WANG Ruoyu, ZHAO Zhixuan, HUANG Changshuo, et al. Research progress on water resources management theory of "basing four aspects on water resources"[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(4): 111-117. (in Chinese))
[14] 吴凤平,宋妍,黄蕊. 新发展理念下水利新质生产力评价指标体系构建[J]. 水资源保护,2025,41(1):85-91. (WU Fengping,SONG Yan,HUANG Rui. Construction of evaluation index system of new quality productive forces of water conservancy under new development concept[J]. Water Resources Protection, 2025, 41(1): 85-91. (in Chinese))
[15] 田贵良,盛雨,吴继云,等. 最严格水资源管理制度对长江经济带水资源利用效率的影响研究[J]. 南京工业大学学报(社会科学版),2020,19(5):90-103. (TIAN Guiliang, SHENG Yu, WU Jiyun, et al. Impact of the strictest water resource management system ever on the water resource use efficiency in Yangtze River Economic Zone[J]. Journal of Nanjing Tech University (Social Science Edition),2020,19(5):90-103. (in Chinese))
[16] 王浩,许新发,成静清,等. 水资源保护利用"四水四定":基本认知与关键技术体系[J]. 水资源保护,2023,39(1):1-7. (WANG Hao,XU Xinfa,CHENG Jingqing,et al. "Basing four aspects on water resources" in water resources protection and utilization: basic cognition and key technology system[J]. Water Resources Protection, 2023,39(1):1-7. (in Chinese))
[17] 景晓栋,田贵良. 面向未来的水利新质生产力:内涵解读、研究框架与关键路径[J]. 水资源保护,2024,40(6):113-120. (JING Xiaodong, TIAN Guiliang. Future oriented new quality productivity forces of water conservancy: connotation interpretation, research framework and key paths[J]. Water Resources Protection, 2024,40(6):113-120. (in Chinese))
[18] 景晓栋,田贵良,程飞. 耐心资本推动水利新质生产力发展的逻辑机理与协同路径[J]. 水资源保护,2025,41(1):99-106. (JING Xiaodong, TIAN Guiliang, CHENG Fei. Logical mechanism and collaborative path of patient capital promoting development of new quality productive forces of water conservancy [J]. Water Resources Protection,2025,41(1):99-106. (in Chinese))
(收稿日期:2024-09-20 编辑:王芳)

DOI:10. 3880/j. issn. 1004 - 6933. 2025. 02. 010

洪水预报的比例系数系统响应误差修正方法

瞿思敏[1],陆威村[1],蒋思军[2],陈 辉[3],石 朋[1],虞 鸿[4],张 铜[4]

(1. 河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098; 2. 长潭水库事务中心,浙江 台州 318020;
3. 绍兴市汤浦水库有限公司,浙江 绍兴 312000; 4. 浙江省水利水电勘测设计院有限责任公司, 浙江 杭州 310002)

摘要:针对系统微分响应误差修正方法在水文预报中同时修正多个变量出现的信息不足的问题,考虑各变量误差在不同时段对洪水预报精度的影响,提出了比例系数系统响应误差修正方法。以同时修正新安江模型各雨量单元降水量为例,分别采用湿润区(长诏水库流域)的理想模型和半干旱半湿润区(日照水库流域)的实际流域进行了检验。结果表明:经过误差修正,湿润区理想模型和半干旱半湿润区实际流域在次洪流量模拟中的平均纳什效率系数分别从 0. 906 和 0. 573 提升至 0. 994 和 0. 809,比例系数系统响应误差修正方法修正效果明显,具有跨气候区的强适应性。

关键词:洪水预报;系统微分响应;误差修正;比例系数;长诏水库流域;日照水库流域

中图分类号:TV124 **文献标志码**:A **文章编号**:1004 - 6933(2025)02 - 0088 - 07

Proportional coefficient system response error correction method for flood forecasting//QU Simin[1], LU Weicun[1], JIANG Sijun[2], CHEN Hui[3], SHI Peng[1], YU Hong[4], ZHANG Jian[4](1. *College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing* 210098, *China*; 2. *Changtan Reservoir Affairs Center, Taizhou* 318020, *China*; 3. *Shaoxing Tangpu Reservoir Co., Ltd., Shaoxing* 312000, *China*; 4. *Zhejiang Design Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hangzhou* 310002, *China*)

Abstract: In response to the problem of insufficient information when using the system differential response error correction method to correct multiple variables simultaneously, a proportional coefficient system response error correction method was proposed based on considering the influences of each variable error on the accuracy of flood forecasting in different durations. Taking the simultaneous correction of the rainfall across rainfall units in the Xin'anjiang model as an example, an ideal model in a humid region (the Changzhao Reservoir Basin) and an actual basin in a semi-arid/semi-humid region (the Rizhao Reservoir Basin) were used to verify the method. Results showed that after correction, the average Nash-Sutcliffe efficiency coefficients for flood simulation in the humid-region ideal model and the semi-arid/semi-humid actual basin were improved significantly from 0. 906 to 0. 994 and from 0. 573 to 0. 809, respectively, indicating that the proportional coefficient system response error correction method has a remarkable correction effect and strong adaptability across diverse climatic zones.

Key words: flood forecasting; system differential response; error correction; proportional coefficient; the Changzhao Reservoir Basin; the Rizhao Reservoir Basin

洪水灾害历来是我国最严重的自然灾害之一,给人民群众生命财产带来了严重的威胁[1]。随着经济的快速发展,实时洪水预报作为流域防洪重要的非工程措施日益受到重视[2]。但在预报的各个环节都可能存在误差,如模型输入[3-4]、模型结构及参数[5-6]、状态变量初值[7-8]等,这些误差因素使得洪水预报精度常难以满足要求。因此,采用误差修正技术[9]保障和提升洪水预报精度一直是水文学研究的热点。

洪水预报误差修正技术较多[10],如自回归模型(autoregressive model, AR)[11]、卡尔曼滤波技术[12-13]、机器学习技术[14]、综合修正方法[15]等。但现有的误差修正方法基本上都存在物理概念基础不强、损失预见期和修正条件有限制等缺陷。传统 AR 模型认为误差前后时段相关[16],但是当预报量发生突变时就破坏了相关关系,该模型就不再适用。如在洪峰附近流量会有突变,前后时段误差并不相关,此时仍然采用 AR 模型进行修正,效果并不理

基金项目:国家重点研发计划项目(2024YFC3211400);国家自然科学基金项目(52179011,U2243229)

作者简介:瞿思敏(1977—),女,教授,博士,主要从事水文物理规律模拟及水文预报研究。E-mail:wanily@ hhu. edu. cn

通信作者:石朋(1976—),男,教授,博士,主要从事水文物理规律模拟及水文预报研究。E-mail:ship@ hhu. edu. cn

想。卡尔曼滤波技术虽然在修正过程中明确考虑了模型和资料的不确定性,理论基础与设计思路都比较科学[17-19],但用在水文预报中,由于有效信息获取困难,可利用的实时信息量有限,效果往往与 AR 模型相近。Bao 等[20]提出了系统微分响应(system differential response, SDR)误差修正方法,该方法物理意义明确,既不损失预见期,也不增加模型参数[21],目前在很多流域的水文模拟中得到验证,且应用广泛[22-24],如对面平均雨量[25]、面平均产流[26]、自由水蓄量[27]的误差修正等,结果表明,该误差修正方法对洪水预报精度有明显提升。

SDR 误差修正方法在应用中也遇到了一些问题,如出现修正量偏大、流量过程线呈锯齿状的现象[28],以及修正多个变量时会遇到信息不足[29]等问题。本文针对修正过程中信息不足的问题,在 SDR 误差修正方法中引入比例系数,提出比例系数系统响应误差修正方法,利用提出的方法同时修正新安江模型中各雨量单元的降水量,并采用理想模型和实际流域验证该方法的修正效果。

1 误差修正方法

1.1 SDR 误差修正方法

将流域水文模型概化为一个系统,模型内任一变量的改变都会引起流域出口断面流量的变化,该系统的响应函数可表示为

$$Q = f(X,\theta) \tag{1}$$

式中:Q 为模型因变量;X 为模型输入变量;θ 为模型参数,一般不随时间变化。

当只考虑模型输入的影响时(以降水量 P 为例),函数可简化为

$$Q = f(P) \tag{2}$$

对式(2)两边同时求微分:

$$\mathrm{d}Q = \left.\frac{\partial Q}{\partial P}\right|_{P=P_c} \mathrm{d}P \tag{3}$$

式中 P_c 为修正前的降水量。

若样本系列长度为 L,其中,待修正的样本系列长度为 $n(n \leqslant L)$,实测流量系列 $\boldsymbol{Q} = (Q_1, Q_2, \cdots, Q_L)^{\mathrm{T}}$,计算流量系列 $\boldsymbol{Q}_c = (Q_{c1}, Q_{c2}, \cdots, Q_{cL})^{\mathrm{T}}$,修正前的降水量系列 $\boldsymbol{P}_c = (P_{c1}, P_{c2}, \cdots, P_{cL})^{\mathrm{T}}$,式(3)的全微分表达式矩阵形式为

$$\Delta\boldsymbol{Q} = \boldsymbol{U}\Delta\boldsymbol{P} + \boldsymbol{\tau} \tag{4}$$

其中

$$\boldsymbol{U} = \begin{bmatrix} \dfrac{\partial Q(P_{c1})}{\partial P_{c1}} & \cdots & \dfrac{\partial Q(P_{c1})}{\partial P_{cn}} \\ \vdots & & \vdots \\ \dfrac{\partial Q(P_{cL})}{\partial P_{c1}} & \cdots & \dfrac{\partial Q(P_{cL})}{\partial P_{cn}} \end{bmatrix}$$

$$\Delta\boldsymbol{Q} = (Q_1 - Q_{c1}, Q_2 - Q_{c2}, \cdots, Q_L - Q_{cL})^{\mathrm{T}}$$

$$\Delta\boldsymbol{P} = (\Delta P_{c1}, \Delta P_{c2}, \cdots, \Delta P_{cn})^{\mathrm{T}}$$

式中:$\boldsymbol{U}$ 为系统响应矩阵;$\Delta\boldsymbol{Q}$ 为实测值与计算值的差值;$\Delta\boldsymbol{P}$ 为降水量修正量;$\boldsymbol{\tau}$ 为随机误差项,是符合零均值分布特点的白噪声向量。

采用最小二乘法求解式(4),则降水量修正量 $\Delta\boldsymbol{P}$ 为

$$\Delta\boldsymbol{P} = (\boldsymbol{U}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{U})^{-1}\boldsymbol{U}^{\mathrm{T}}\Delta\boldsymbol{Q} \tag{5}$$

修正后的降水量 $\boldsymbol{P}'$ 为

$$\boldsymbol{P}' = \boldsymbol{P}_c + \Delta\boldsymbol{P} \tag{6}$$

1.2 比例系数系统响应误差修正方法

应用 SDR 误差修正方法校正水文模型中的变量,主要是利用流量的误差信息回溯反演来修正模型变量。该方法通过计算变量的系统响应曲线建立变量与出口流量之间的关系,利用最小二乘法计算变量修正值,理论上该方法可以对模型中的任一变量进行修正。利用该方法对水文模型中单个变量进行修正时,通过计算 T 个时段的流量误差,可以反演 $t(t \leqslant T)$ 个时段的变量误差,但对 M $(M>1)$ 个变量同时进行修正时,仅依据 T 个时段流量反演 Mt $(Mt>T)$ 个时段的变量误差,无法求解。如同时修正新安江模型中各雨量单元的降水量、上下层和深层的初始土壤含水量、地面径流壤中流和地下径流等,往往会出现信息不足的问题,难以进行误差反演。本文以同时修正新安江模型中各雨量单元降水量为例,引入比例系数,提出比例系数系统响应误差修正方法。

设流域内有 N 个雨量单元,则修正后雨量单元降水量 $\boldsymbol{P}'$ 为

$$\boldsymbol{P}' = \begin{bmatrix} P_{1,1} + \Delta P_{1,1} & \cdots & P_{N,1} + \Delta P_{N,1} \\ \vdots & & \vdots \\ P_{1,T} + \Delta P_{1,T} & \cdots & P_{N,T} + \Delta P_{N,T} \end{bmatrix} \tag{7}$$

式中 $P_{j,i}$、$\Delta P_{j,i}(j=1,2,\cdots,N;i=1,2,\cdots,T)$ 分别为第 j 个雨量单元在第 i 个时段的降水量和降水量误差。

每个时段各雨量单元采用同一个比例系数,设 α_i、$\Delta\alpha_i$ 分别为第 i 个时段的比例系数和比例系数误差,比例系数初始值均设为 1,将式(7)近似概化为

$$\boldsymbol{P}' = \begin{bmatrix} P_{1,1}(\alpha_1 + \Delta\alpha_1) & \cdots & P_{N,1}(\alpha_1 + \Delta\alpha_1) \\ \vdots & & \vdots \\ P_{1,T}(\alpha_T + \Delta\alpha_T) & \cdots & P_{N,T}(\alpha_T + \Delta\alpha_T) \end{bmatrix} \tag{8}$$

因此,求解 $\Delta\boldsymbol{P}$ 可转换为求解 $\Delta\boldsymbol{\alpha} = (\Delta\alpha_1, \Delta\alpha_2, \cdots, \Delta\alpha_T)^{\mathrm{T}}$。

水文模型可概化为

$$\boldsymbol{Q} = f(\boldsymbol{\alpha}) \tag{9}$$

其中 $\boldsymbol{\alpha} = (\alpha_1, \alpha_2, \cdots, \alpha_T)^{\mathrm{T}}$

根据 SDR 误差修正方法原理，其中 $n(n \leqslant T)$ 个比例系数的修正量为

$$\Delta\boldsymbol{\alpha} = (\boldsymbol{U}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{U})^{-1}\boldsymbol{U}^{\mathrm{T}}\Delta\boldsymbol{Q} \tag{10}$$

其中 $$\boldsymbol{U} = \begin{bmatrix} \dfrac{\partial Q(\alpha_1)}{\partial \alpha_1} & \cdots & \dfrac{\partial Q(\alpha_1)}{\partial \alpha_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \dfrac{\partial Q(\alpha_T)}{\partial \alpha_1} & \cdots & \dfrac{\partial Q(\alpha_T)}{\partial \alpha_n} \end{bmatrix}$$

比例系数系统响应误差修正方法的步骤为：①将实测降水量系列代入新安江模型，得到初始的计算流量系列；②对第 k 个时段的比例系数 $\alpha_k(k = 1,2,\cdots,n)$ 增加一个很小的常数，保持其他时段的比例系数不变，得到新的比例系数系列，将新的比例系数系列与实测降水量系列相乘即可得到新的降水量系列；③将新的降水量系列代入新安江模型计算得到新的流量系列；④计算新的流量过程与初始计算流量的差值，得到矩阵 $\boldsymbol{U}$；⑤根据式(10)，得到比例系数的修正量，并进一步得到修正后的降水量系列，最后输入水文模型，得到修正后的流量系列。在实际流域的实时预报中，采用定时滚动预报机制，以整点时刻为预报周期节点。每次预报时，基于数据的时效性与完整性原则，选取该整点时刻之前特定时长的历史数据。这些数据涵盖流域内各类关键水文信息，包括但不限于不同时段的流量数据、降水量数据、水位数据等。利用这些历史数据，进行模型中相关变量的误差反演计算，对模型变量进行调整，进而得到修正后的计算流量。完成上述计算后，以修正后的计算流量为基础，重复执行之前的数据采集、误差反演计算、模型变量调整等流程，实现不间断的滚动预报。

1.3 评价指标

分别采用洪量相对误差(E_{RR})、洪峰相对误差(E_{RQ})、纳什效率系数(Nash-Sutcliffe efficiency coefficient，NSE)评价该方法的修正效果。洪量和洪峰相对误差分别反映洪量、洪峰计算值与实测值之间的偏离程度；NSE 越接近 1，表示吻合程度越好。

2 实例验证

本文聚焦于降水量输入的系统误差修正。湿润区因高频次、高强度降水的时空异质性，雨量站观测易漏测局地暴雨细节(如短时强对流降雨)；半干旱半湿润区因降水时空分布不均且雨量站密度低，插值后的面平均降水量代表性不足。二者均需通过合适的误差修正来提升模型输入的可靠性。

选取两类流域开展差异化验证：①选择浙江省东部湿润地区的长诏水库流域进行理想模型检验，利用新安江模型生成无误差的基准流量作为“理论真值”，在原始降水量数据中人为添加可控幅度的随机误差，通过误差修正方法对含误差的降水量进行修正后，再次驱动模型生成修正流量。将修正流量与基准真值进行对比，验证方法对含误差降水量的修正能力。②选择山东省南部半干旱半湿润地区的日照水库流域进行实际流域检验，直接采用水文站实测流量作为物理真值，将实测降水量输入模型生成初始模拟流量。采用比例系数系统响应误差修正方法对实测降水量进行修正，并将修正后的降水量输入模型进行计算，最后对比修正流量与实测流量，检验该方法在真实流域实时洪水预报中的修正效果。

2.1 研究区概况

长诏水库位于曹娥江支流新昌江上，水库总库容 1.8 亿 m^3。长诏水库流域处于 29°20′N～29°40′N、120°50′E～121°20′E，集水面积 276 km^2，常年日照约 1 900 h，多年平均降水量 1626.6 mm，多年平均蒸发量 825 mm，多年平均气温 16.6℃。该流域属亚热带气候，温和湿润，四季分明，在季风影响下，降水量年际变化较大，且年内分配不均，主要集中于汛期。流域内有 8 个雨量站，长诏水库流域水系及站点分布见图 1。

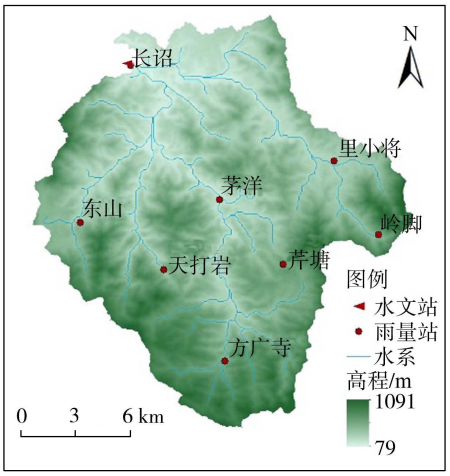


图 1 长诏水库流域水系及站点分布

Fig. 1 Water system and station distributions in the Changzhao Reservoir Basin

日照水库位于傅疃河中游，水库总库容 3.21 亿 m^3。日照水库流域处于 35°N～35°30′N、118°25′E～119°30′E，集水面积 548 km^2，常年日照约 2 500 h，多年平均降水量 870 mm，多年平均蒸发量 1 400 mm，多年平均气温 12.7℃。该流域气候受温带季风影响，四季分明，降水量年际变化较大，且年

内分配不均,降水主要集中在夏季汛期。流域内分布着 7 个雨量站,日照水库流域水系及站点分布见图 2。

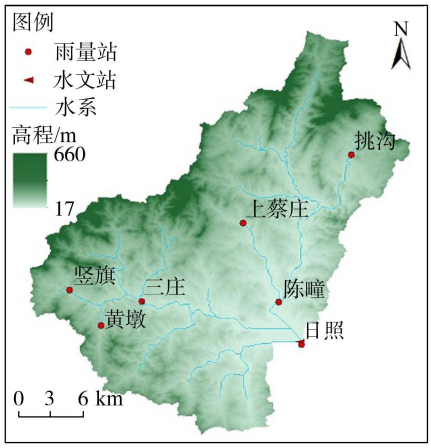


图 2　日照水库流域水系及站点分布

Fig. 2　Water system and station distributions in the Rizhao Reservoir Basin

2.2　理想模型检验

理想模型指模型的输入、输出、结构、参数、误差均为已知的模型,常用于分析误差的特性,检验方法的应用效果。为了确保使用的降水量数据与实际暴雨情况相一致,本文选择湿润区的长诏水库流域建立理想模型,并选取长诏水库流域 1988—2017 年共 37 场洪水资料进行研究。时段降水量、蒸发和流量数据来源于长诏水库运行管理中心的水文监测数据库,时段长均为 1 h,采用新安江模型进行流量模拟计算,利用人机交互参数率定方法得到模型参数,结果见表 1。

表 1　长诏水库流域新安江模型参数

Table 1　Xin'anjiang model parameters of the Changzhao Reservoir Basin

参数	率定值
流域蒸散发折算系数	0.8
上层张力水容量	20 mm
下层张力水容量	80 mm
深层蒸散发折算系数	0.16
流域平均张力水容量	190 mm
张力水蓄水容量曲线指数	0.3
不透水面积占全流域面积的比例	0.01
自由水蓄水容量	7 mm
自由水蓄水容量曲线指数	1.1
自由水水箱对壤中流的出流系数	0.35
自由水水箱对地下水的出流系数	0.35
地面径流消退系数	0.5
壤中流消退系数	0.8
地下水消退系数	0.995
水流平均传播时间	0.9 h
流量比重系数	0.38

将原始降水量 P_0 代入新安江模型计算得到流量 Q_0,作为该流域的实测流量。根据随机误差值 ΔP_0 不超过原始降水量的 20%,且满足原始降水量与随机误差值之和非负的约束条件,将原始降水量 P_0 增加随机误差值,得到新的降水量 P_1,将 P_1 代入新安江模型得到计算流量 Q_1。应用比例系数系统响应误差修正方法对 P_1 进行误差反演,得到 P_1 的修正量 ΔP_1,将 P_1 与该修正量相加得到降水量 P_2 后,代入新安江模型得到修正流量 Q_2。采用 E_{RR}、E_{RQ}、NSE 分析修正后模型的模拟精度。

表 2 为长诏水库流域 37 场洪水修正前后理想模型模拟结果对比。从表 2 可以看出,在湿润区长诏水库流域的理想模型检验中,经比例系数系统响应误差修正方法修正后,所有次洪流量模拟的 NSE 均有明显提升,平均 NSE 从 0.906 提升到 0.994,提高了 0.088。修正前 24 场次洪 NSE 大于 0.900;修正后 37 场次洪 NSE 均大于 0.900,其中有 31 场次洪 NSE 大于 0.990,说明模拟精度有所提高。含误差的总降水量平均值由 214.4 mm 修正为 230.3 mm,与原始总降水量平均值很接近;洪量平均相对误差由修正前 8.9%降低到 1.3%,下降了 7.6%;洪峰平均相对误差从 26.0%降低到 3.1%,下降了 22.9%,修正效果显著。说明比例系数系统响应误差修正方法可以有效地提高模拟精度。

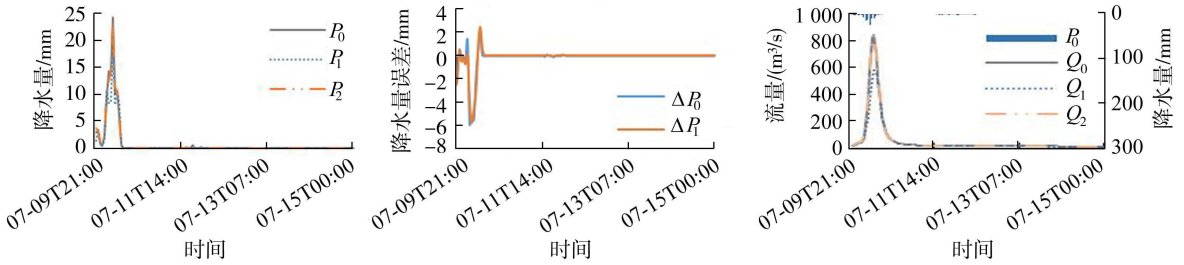
为了进一步说明比例系数系统响应误差修正方法的修正效果,选取 000709 号洪水(2000-07-09T21:00 至 2000-07-15T00:00)进行分析,结果如图 3 所示,为方便比较,ΔP_1 取其相反数,使降水量的随机误差值 ΔP_0 与修正量 ΔP_1 同号。

从图 3(a)(b)可以看出,由于设置了随机误差值,P_1 与 P_0 在 07-10T02:00 至 07-10T08:00 时段相差较大,修正后 P_2 与 P_0 的吻合度明显提升;降水量的随机误差值和修正量也具有较高的一致性。从图 3(c)可以看出,修正前计算流量过程与实测流量过程在洪峰处和涨洪段拟合效果一般,修正后的流量过程中洪峰与实测洪峰更加接近,涨洪段的拟合效果也变好,模拟过程得到改善。说明比例系数系统响应误差修正方法能够修正流域降水量误差,提高模拟精度。洪量相对误差从修正前的-16.4%变化为 1.1%,洪峰相对误差从 -31.3% 变化为 -1.2%,NSE 从 0.896 提升到 0.999,修正效果较好。比例系数系统响应误差修正方法的修正效果表明,修正方法同时修正新安江模型各雨量单元的降水量可以在一定程度上提高模拟精度。

表 2　误差修正前后理想模型模拟结果对比

Table 2　Comparison of simulation results of ideal model before and after error correction

洪号	原始总降水量/mm	含误差的总降水量/mm	修正后的总降水量/mm	E_{RR}/%		E_{RQ}/%		NSE	
				修正前	修正后	修正前	修正后	修正前	修正后
880729	472.2	451.1	471.3	−8.1	0.8	−12.1	−0.9	0.927	0.998
890628	221.5	205.3	221.5	−6.1	0.1	23.9	2.2	0.944	0.999
890911	251.6	220.0	249.8	−14.6	0.5	−14.2	0.3	0.944	0.999
900818	117.1	111.6	115.3	−1.4	3.7	27.2	9.7	0.937	0.993
900830	546.8	507.3	548.5	−7.6	1.1	−10.8	−1.0	0.935	0.999
910415	64.0	69.3	63.6	9.8	0.2	47.6	8.4	0.786	0.993
920701	163.0	152.7	162.4	−6.2	0.4	−5.0	−1.6	0.915	0.997
920827	508.1	483.1	508.8	−5.4	0.5	10.7	0.6	0.956	0.999
920922	187.5	159.8	187.0	−15.0	0.1	−28.7	−2.4	0.934	1.000
930501	143.0	126.8	143.9	−16.6	1.7	−38.1	4.9	0.861	0.988
930629	199.4	203.2	199.8	3.3	0.5	31.2	1.8	0.926	0.998
940608	381.2	368.0	378.6	−3.1	−0.2	−17.9	1.4	0.954	0.999
940820	204.5	184.3	206.0	−13.3	1.3	−19.2	1.2	0.954	1.000
941008	138.2	134.0	138.0	−3.6	0.3	15.9	0.9	0.916	0.998
950422	230.2	227.6	231.6	0.1	1.1	49.4	8.3	0.845	0.995
970707	240.6	216.0	251.6	−9.8	2.2	17.4	0.5	0.886	0.971
970817	305.0	273.3	303.0	−11.3	−0.1	−26.2	−1.6	0.940	1.000
980616	185.8	161.6	189.1	−15.0	2.8	−31.6	16.8	0.837	0.966
980919	130.8	114.1	130.6	−17.9	0.5	−29.4	0.5	0.913	0.999
990616	93.0	84.5	92.2	−9.7	0.1	−30.2	−1.1	0.920	0.999
990830	154.0	146.1	159.0	−6.3	3.9	−41.2	−1.8	0.861	0.995
000709	102.0	84.5	101.4	−16.4	1.1	−31.3	−1.2	0.896	0.999
010620	188.5	167.5	190.7	−10.9	1.8	−32.7	−2.0	0.898	0.996
040811	284.3	253.2	286.2	−25.9	2.6	−19.4	−1.0	0.892	0.993
050717	223.4	229.7	223.8	11.9	4.1	56.3	12.7	0.742	0.982
050804	254.3	239.1	253.9	−4.6	0.5	11.7	0.8	0.930	1.000
050910	324.6	288.3	323.9	−13.0	−0.1	−20.8	−1.9	0.954	1.000
060713	122.8	110.6	111.8	0.3	0.1	36.2	1.4	0.894	0.999
080729	176.5	154.5	180.9	−19.7	3.0	−34.5	1.9	0.853	0.990
090810	264.1	247.0	263.1	−7.4	0.1	−30.1	−1.6	0.929	0.999
150710	189.3	191.2	187.7	3.2	0.3	32.9	4.3	0.903	0.999
150810	300.5	285.5	299.8	−5.3	0.4	−17.1	0.2	0.938	0.999
150814	80.1	76.0	82.3	−3.3	5.4	21.7	4.6	0.850	0.984
160611	278.1	255.3	279.2	−7.4	0.7	−27.8	1.1	0.926	0.998
160625	162.6	150.5	161.5	−8.0	−0.2	−15.8	0.6	0.947	0.998
160913	226.6	220.6	231.9	−2.3	3.6	27.9	6.4	0.943	0.997
170609	402.5	380.5	392.3	−6.4	−2.8	−16.9	6.9	0.937	0.950
平均值	230.2	214.4	230.3	8.9	1.3	26.0	3.1	0.906	0.994



（a）修正前后面平均降水量　（b）降水量随机误差值及修正量　（c）修正前后流量过程

图 3　000709 号洪水修正效果

Fig. 3　Correction effect of flood No. 000709

2.3　实际流域检验

选取半干旱半湿润区的日照水库流域 1988—1998 年共 21 场洪水资料进行实际流域检验。时段水量、蒸发和流量数据来源于日照水库管理运行中心的水文监测数据库，时段长均为 1 h。采用新安江模型进行流量模拟计算，利用人机交互参数率定方

法得到模型参数,结果见表 3。采用比例系数系统响应误差修正方法对各雨量单元降水量进行修正,误差修正前后预报结果评价指标对比见表 4。

表 3　日照水库流域新安江模型参数

Table 3　Xin'anjiang model parameters of the Rizhao Reservoir Basin

参数	率定值
流域蒸散发折算系数	0.75
上层张力水容量	20 mm
下层张力水容量	80 mm
深层蒸散发折算系数	0.16
流域平均张力水容量	155 mm
张力水蓄水容量曲线指数	0.3
不透水面积占全流域面积的比例	0.01
自由水蓄水容量	15 mm
自由水蓄水容量曲线指数	1.1
自由水水箱对壤中流的出流系数	0.45
自由水水箱对地下水的出流系数	0.25
地面径流消退系数	0.3
壤中流消退系数	0.88
地下水消退系数	0.995
水流平均传播时间	0.68 h
流量比重系数	0.38

表 4　误差修正前后日照水库流域预报结果评价指标对比

Table 4　Comparison of evaluation indexes of forecast results before and after error correction in the Rizhao Reservoir Basin

洪号	E_{RR}/%		E_{RQ}/%		NSE	
	修正前	修正后	修正前	修正后	修正前	修正后
880713	25.9	3.0	8.0	−30.0	0.419	0.824
900618	−7.7	−5.8	−5.9	1.1	0.316	0.658
900713	0.3	30.1	−58.5	−29.8	0.652	0.768
900715	−4.1	12.4	−39.2	−6.5	0.631	0.848
900801	−7.6	10.1	−28.5	−8.7	0.717	0.845
900908	−3.3	10.6	−6.1	1.6	0.826	0.941
910611	−23.9	−4.5	−28.7	10.7	0.797	0.943
910621	12.1	52.2	−62.4	−0.3	0.652	0.869
910721	75.8	77.3	−32.0	−12.7	0.703	0.763
920720	−3.6	18.2	−52.7	6.0	0.557	0.797
940823	0.3	−4.5	−14.4	3.7	0.413	0.702
950711	−27.6	30.2	−53.1	35.4	0.577	0.812
950816	−13.3	−4.7	−40.9	−10.8	0.490	0.851
950821	14.6	14.7	−48.7	−23.1	0.453	0.713
960628	124.2	86.6	−1.6	−28.9	0.157	0.574
970819	13.7	22.7	−15.0	6.5	0.695	0.954
980702	31.7	5.4	−16.1	−24.7	0.465	0.775
980715	17.6	21.8	−46.0	9.9	0.472	0.737
980804	3.4	7.5	−42.9	−8.4	0.575	0.754
990813	−11.5	−0.9	16.4	5.2	0.817	0.925
980724	−11.9	0.1	−42.5	−12.5	0.640	0.933
平均值	20.7	20.1	31.4	13.2	0.573	0.809

从表 4 可以看出,对日照水库流域的各雨量单元降水量修正后,洪量平均相对误差从 20.7%降低到 20.1%,下降了 0.6%;洪峰平均相对误差从 31.4%降低到 13.2%,下降了 18.2%;平均 NSE 从 0.573 提升到 0.809,提高了 0.236。修正效果明显,说明比例系数系统响应误差修正方法能有效提升洪水预报精度。

图 4 为修正前后 950816 号洪水(1995-08-16T00:00 至 1995-08-21T10:00)流量过程对比。从图 4 可以看出,比例系数系统响应误差修正方法的修正效果显著,经误差修正后,模拟结果的 NSE 从修正前的 0.490 提升到 0.851,提高了 0.361;洪量相对误差从−13.3%变化为−4.7%,误差绝对值下降了 8.6%;洪峰相对误差从−40.9%变化为 −10.8%,误差绝对值下降了 30.1%。

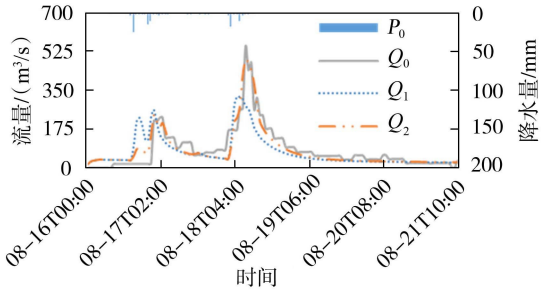


图 4　误差修正前后 950816 号洪水流量过程对比

Fig. 4　Comparison of flow processes of flood No. 950816 before and after error correction

3　结　论

a. 理想模型检验结果表明,利用比例系数系统响应误差修正方法对新安江模型各雨量单元的降水量进行修正在理论上是可行的。修正后长诏水库流域流量模拟结果的平均 NSE 从修正前的 0.906 提升到 0.994,提高了 0.088;洪量平均相对误差从 8.9%降低到 1.3%,下降了 7.6%;洪峰平均相对误差从 26.0%降低到 3.1%,下降了 22.9%,修正效果显著。

b. 实际流域计算结果表明,进行误差修正后,日照水库流域流量模拟结果的平均 NSE 从误差修正前的 0.573 提升到 0.809,提高了 0.236;洪量平均相对误差从 20.7%降低到 20.1%,下降了 0.6%;洪峰平均相对误差从 31.4%降低到 13.2%,下降了 18.2%,说明比例系数系统响应误差修正方法有效,能提升洪水预报精度。

c. 比例系数系统响应误差修正方法在湿润区(长诏水库流域)与半干旱半湿润区(日照水库流域)均显著提升了洪水预报精度,体现了其跨气候区的强适应性。

参考文献:

[1] 万新宇,王光谦. 近 60 年中国典型洪水灾害与防洪减灾对策[J]. 人民黄河,2011,33(8):1-4. (WAN Xinyu,

WANG Guangqian. Typical flood disasters during last sixty years and strategies of flood control and disaster mitigation in China [J]. Yellow River, 2011, 33 (8): 1-4. (in Chinese))

[2] 刘国纬. 水文科学的基本问题及当代前沿[J]. 水科学进展, 2020, 31 (5): 685-689. (LIU Guowei. Basic problems and frontier of hydrology[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(5): 685-689. (in Chinese))

[3] 张琳, 王国利. 洪水预报模型输入与输出的误差分布及相关性分析[J]. 水文, 2022, 42(1): 23-28. (ZHANG Lin, WANG Guoli. Analysis on error distributions of input data and output data of flood forecasting model and its correlation[J]. Journal of China Hydrology, 2022, 42(1): 23-28. (in Chinese))

[4] YAN Xueman, SONG Jinxi, AN Yongkai, et al. Uncertainty quantization of meteorological input and model parameters for hydrological modelling using a Bayesian-based integrated approach[J]. Hydrological Processes, 2024, 38(1): e15040.

[5] XIE Xianhong, ZHANG Dongxiao. A partitioned update scheme for state-parameter estimation of distributed hydrologic models based on the ensemble Kalman filter [J]. Water Resources Research, 2013, 49(11): 7350-7365.

[6] SUN Xiaozhuo, ZENG Xiankui, WU Jichun, et al. A two-stage Bayesian data-driven method to improve model prediction[J]. Water Resources Research, 2021, 57(12): e2021WR030436.

[7] SABZIPOUR B, ARSENAULT R, TROIN M, et al. Sensitivity analysis of the hyper parameters of an ensemble Kalman filter application on a semi-distributed hydrological model for streamflow forecasting[J]. Journal of Hydrology, 2023, 626: 130251.

[8] 梁忠民, 赵建飞, 段雅楠, 等. 微分形式新安江模型[J]. 水科学进展, 2024, 35(3): 374-386. (LIANG Zhongmin, ZHAO Jianfei, DUAN Yanan, et al. Differential-form Xin'anjiang model[J]. Advances in Water Science, 2024, 35(3): 374-386. (in Chinese))

[9] 杨姗姗, 曾明, 田锐. 洪水预报误差修正技术研究进展[J]. 中国防汛抗旱, 2022, 32(12): 35-40. (YANG Shanshan, ZENG Ming, TIAN Rui. Research progress of error correction techniques for flood forecasting[J]. China Flood & Drought Management, 2022, 32(12): 35-40. (in Chinese))

[10] 黄一昕, 王钦钊, 梁忠民, 等. 洪水预报实时校正技术研究进展[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021, 19(1): 12-35. (HUANG Yixin, WANG Qinzhao, LIANG Zhongmin, et al. Research advances on real-time correction methods for flood forecasting [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(1): 12-35. (in Chinese))

[11] 张娟, 钟平安, 徐斌, 等. 洪水预报自回归实时校正多步外延方法研究[J]. 水文, 2019, 39(6): 41-45. (ZHANG Juan, ZHONG Ping'an, XU Bin, et al. Research on multi-step epitaxy method for auto-regressive real-time correction of flood forecasting[J]. Journal of China Hydrology, 2019, 39(6): 41-45. (in Chinese))

[12] 王莉莉, 包红军, 李致家. 基于 Kalman 滤波的实时校正模型研究[J]. 水力发电, 2020, 46(8): 24-26. (WANG Lili, BAO Hongjun, LI Zhijia. Study on the real-time correction model based Kalman filter[J]. Water Power, 2020, 46(8): 24-26. (in Chinese))

[13] SUN Y, TIAN X, BAO W, et al. Improving the forecast performance of hydrological models using the cubature Kalman filter and unscented Kalman filter [J]. Water Resources Research, 2023, 59(3): e2022WR033580.

[14] 衣学军, 汤岭, 李致家, 等. 基于机器学习的洪水预报实时校正[J]. 水电能源科学, 2023, 41(12): 78-81. (YI Xuejun, TANG Ling, LI Zhijia, et al. Real-time correction of flood forecasting based on machine learning[J]. Water Resources and Power, 2023, 41 (12): 78-81. (in Chinese))

[15] 周梦, 陈华, 郭富强, 等. 洪水预报实时校正技术比较及应用研究[J]. 中国农村水利水电, 2018(7): 90-95. (ZHOU Meng, CHEN Hua, GUO Fuqiang, et al. The application of real-time correction techniques for flood forecasting[J]. China Rural Water and Hydropower, 2018(7): 90-95. (in Chinese))

[16] 刘可新, 徐海卿, 庞丽丽, 等. 实时洪水预报中基于岭估计的 AR 修正模型研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文), 2023, 21(3): 212-221. (LIU Kexin, XU Haiqing, PANG Lili, et al. Research on ridge-estimation based autoregressive model in real-time flood forecasting [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2023, 21 (3): 212-221. (in Chinese))

[17] SUN Y, BAO W, QU S, et al. Development of the consider cubature Kalman filter for state estimation of hydrological models with parameter uncertainty [J]. Journal of Hydrology, 2023, 625: 130080.

[18] SUN Y, TIAN X, BAO W, et al. Improving treatment of noise specification of Kalman filtering for state updating of hydrological models: combining the strengths of the interacting multiple model method and Cubature Kalman filter [J]. Water Resources Research, 2023, 59 (7): e2022WR033635.

[19] SUN Y, BAO W, VALK K, et al. Improving forecast skill of lowland hydrological models using ensemble Kalman filter and unscented Kalman filter [J]. Water Resources Research, 2020, 56(8): e2020WR027468.

(下转第 105 页)

DOI:10. 3880/j. issn. 1004 - 6933. 2025. 02. 011

基于多智能体系统的城市极端暴雨内涝风险动态评估

李孟泽[1],褚俊英[1],周祖昊[1],唐 明[2],原康琦[1],许文斌[3],唐佐槐[1,4]

(1. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室,北京 100038;
2. 南昌工程学院水利工程学院,江西 南昌 330099; 3. 南昌市城市规划设计研究总院集团有限公司,江西 南昌 330038;
4. 兰州交通大学环境与市政工程学院,甘肃 兰州 730070)

摘要:为有效识别和评估城市内涝风险,提出了针对人类、车辆、普通建筑物、基础设施等不同个体的风险计算与评级方法,构建了基于危险性、暴露性与脆弱性的多层次动态评估模型,该模型集成了包括风险、人类、车辆、建筑和政府的五大智能体系统,并应用于南昌市乌沙河流域。结果表明:南昌市乌沙河流域的地形条件和排水系统特征是影响内涝风险的主要因素;人员和车辆的时空分布进一步影响了内涝风险等级,其中凤凰洲排水区和新建区排水区的风险等级较高;内涝风险的时间分布呈现明显的双峰特征,风险值的峰值在工作日主要集中在早、晚高峰期,节假日则在午间达到峰值,政府预警可有效调节研究区内涝风险水平。

关键词:城市内涝;极端暴雨;多智能体系统;内涝风险值;动态评估;乌沙河流域

中图分类号:TU992 **文献标志码**:A **文章编号**:1004 - 6933(2025)02 - 0095 - 11

Dynamic assessment of urban extreme rainstorm waterlogging risk based on multi-agent system//LI Mengze[1], CHU Junying[1], ZHOU Zuhao[1], TANG Ming[2], YUAN Kangqi[1], XU Wenbin[3], TANG Zuohuai[1,4] (1. *State Key Laboratory of Basin Water Cycle Simulation and Regulation, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing* 100038, *China*; 2. *The School of Hydraulic Engineering, Nanchang Institute of Technology, Nanchang* 330099, *China*; 3. *Nanchang Urban Planning & Design Institute Group Co., Ltd., Nanchang* 330038, *China*; 4. *School of Environment and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou* 730070, *China*)

Abstract: To effectively identify and assess urban waterlogging risks, a risk calculation and rating method targeting different units such as humans, vehicles, ordinary buildings, and infrastructure was proposed. A multi-level dynamic assessment model based on hazard, exposure, and vulnerability was constructed. This model integrated a multi-agent system comprising risk, humans, vehicles, buildings, and government, which was used in the Wusha River Basin in Nanchang City. The results indicate that the topographic conditions and drainage system characteristics of the Wusha River Basin are the primary factors influencing urban waterlogging risks. The spatiotemporal distribution of people and vehicles further affects the risk levels, with higher risk levels observed in the Fenghuangzhou drainage zone and the Xinjian District drainage zone. The temporal distribution of waterlogging risks exhibits a distinct bimodal pattern, with peak risk values concentrated during the morning and evening rush hours on weekdays and reaching a peak at noon on holidays. Government warnings can effectively regulate the urban waterlogging risk levels in the study area.

Key words: urban waterlogging; extreme rainstorm; multi-agent system; waterlogging risk value; dynamic assessment; the Wusha River Basin

在全球气候变化与城市化加速的双重压力下,极端暴雨引发的城市内涝灾害已成为全球共同面临的紧迫挑战。这些极端天气事件对城市基础设施、生态系统、居民安全与生活质量构成了显著威胁。近年来极端暴雨事件频发,例如:2021 年,河南郑州“7·20”特大暴雨造成的重大人员伤亡和财产损失[1];2023 年,受台风“杜苏芮”等多重因素影响京津冀地区遭遇了严重的暴雨灾害[2-3]。这些灾害不仅造成了重大的人员伤亡和经济损失,而且凸显了准确评估城市内涝风险的迫切性。

自 20 世纪 70 年代以来,极端暴雨下城市内涝风险评估模型得到了快速发展,其主要框架包括危

基金项目:江西省“科技+水利”联合计划重大专项项目(2022KSG01007)

作者简介:李孟泽(2000—),男,硕士研究生,主要从事水资源综合调控研究。E-mail:lmz1. thaa@ vip. 163. com

通信作者:褚俊英(1976—),女,正高级工程师,博士,主要从事水资源规划与管理研究。E-mail:jchu@ iwhr. com

险性-暴露性-脆弱性(hazard-exposure-vulnerability, H-E-V)、危险性-脆弱性(hazard-vulnerability, H-V)[4]、危险性-暴露性-脆弱性-防灾减灾能力(hazard-exposure-vulnerability-disaster prevention and reduction, H-E-V-R)。虽然 H-E-V-R 框架在评估中加入了防灾减灾能力,具有更强的全面性,但 H-E-V 框架简洁且评估内容明确,操作性更为突出,广泛应用于学术研究和实际操作。目前,面向宏观尺度的极端暴雨下城市内涝风险主要评估方法包括指标体系评估法[5]、历史灾情评估法[6]、基于 GIS 的评估方法[7]和基于情景的模拟分析法[8-10]。Shi 等[11]利用上海市洪水风险信息中心的暴雨模拟模型,对上海市的旧式住宅区进行了降雨重现期分别为 20 a 和 50 a 条件下的内涝风险模拟,揭示了该地区的总风险特征,并对不同地区的灾害状况进行了比较。Mei 等[12]在厦门市建立了数值模型,使用 12 种设计降雨模拟了不同降雨重现期、降雨雨型和持续时间条件下的内涝风险,发现在相同降水量条件下,降雨强度是影响淹没面积、深度和损失的关键因素,降雨雨型对内涝影响显著。田子阳等[13-14]以西宁市为例开展了多尺度城市内涝风险评价研究,采用熵权法进行宏观尺度评价,采用水文水动力模型进行中观尺度评价,采用灾损曲线方法进行微观尺度评价。陈前虎等[15]集成了元胞自动机系统,结合水文水力学原理定义元胞及其规则,建立了城市内涝风险识别模型,为缺乏资料的区域提供了风险评估的工具。尽管近年来评估方法逐渐从单一尺度转向多尺度,现有研究仍主要聚焦于宏观尺度的静态评估,较少涉及灾害过程中的动态性和复杂环境下的多维度风险演化问题。

多智能体系统(multi-agent system, MAS)可以有效模拟微观个体的具体位置,从而分析该个体的综合风险。MAS 是由多个互相协作或竞争的自治智能体组成的系统,旨在通过集体行为解决复杂问题。在 MAS 中,每个智能体都具有一定程度的自主性,能够感知环境、做出决策,并与其他智能体交互。许多学者对 MAS 开展了研究,例如:黄河等[16]采用了 MAS 建模技术,对内涝灾害中的人口风险进行了动态评估,区分了 5 种受灾状态:安全状态、轻度受灾状态、中度受灾状态、重度受灾状态以及完全受灾状态;朱净萱等[17]以丽水市莲都区为研究区,开展了基于 MAS 的城市洪涝灾害脆弱性计算;徐俊杰[18]基于人口承灾智能体的洪涝灾害损失评估方法,对荆江分洪区的埠河镇开展了多情景研究;卢兴超等[19]以北京市海淀区城区为例,构建了基于 MAS 的城市洪涝灾害动态风险评估模型,实现了城市洪涝灾害过程人口动态风险定量评估。这些研究将所有智能体均视为同一种类型,且研究中认为整个降雨过程中全部人类为随机运动,尚未综合考虑人类、建筑物、车辆等风险,也未能与区域风险相结合。

鉴于此,本文基于 H-E-V 框架,分析城市居民、交通、建筑物及基础设施的属性、风险计算及风险扩散机制,给出极端暴雨下城市内涝动态风险计算方法,并建立基于 MAS 的城市极端暴雨内涝风险动态评估模型,引入人类智能体、车辆智能体、建筑智能体、政府智能体和风险智能体并定义其属性、行为以及交互规则,以期动态评估极端暴雨对个体的影响以及宏观汇总的效果。

1 极端暴雨下城市内涝风险值计算方法

1.1 城市内涝风险基本概念与 H-E-V 框架

城市内涝风险指由于极端降雨或其他水文事件超出城市排水系统的容量,导致对人类、财产、基础设施等潜在损害的可能性。基于此,提出了一种结合微观与宏观视角的风险动态评估方法,强调宏观与微观指标的相互依赖性。在宏观层面,通过对气候变化、城市基础设施等因素进行量化分析,作为微观风险值计算的输入条件,为微观评估提供必要的环境和背景信息。在微观层面,运用 H-E-V 框架对每个个体(包括人类、车辆、建筑物等)的风险进行精确评估,包括识别可能导致城市内涝的降雨事件(危险性)、分析位于高风险区的资产和人群分布(暴露性)以及评估城市在面临内涝灾害时可能遭受损害的程度(脆弱性)。为了全面掌握区域内的风险情况,在宏观层面进行综合统计分析,确定高、中、低风险区域;将单个个体的风险分析与区域整体的风险评估相结合,从而提供更全面的风险评估视角,有效支持更精细化的风险分析。

1.2 内涝风险值计算方法

基于相关研究[19-21],提出自下而上的综合城市内涝风险值计算方法,涉及人类、车辆、普通建筑物、基础设施等关键个体。针对不同个体的特点,从 3 个维度进行风险评估:危险性主要体现为积水深度和水流速度对各要素的威胁,对人类而言主要威胁其人身安全,对车辆而言主要影响其发动机系统和通行能力,对普通建筑物而言主要损害其结构稳定性,对基础设施而言则可能导致功能失效并产生连锁影响;暴露性关注不同个体在城市空间的分布特征,人类和车辆具有动态分布特点,其暴露程度随时间和空间变化,普通建筑物和基础设施则具有固定位置,其暴露性主要取决于所处位置的地形特征和排水条件;脆弱性反映不同个体自身的抗风险能力,

人类的脆弱性受年龄、健康状况等个体特征影响，车辆的脆弱性与其类型和防水能力相关，普通建筑物的脆弱性取决于其结构特征和使用功能，基础设施的脆弱性则与其服务功能和系统冗余度有关。城市极端暴雨内涝风险计算框架见图 1，其中建筑物包括普通建筑物和基础设施。

1.2.1 人类和建筑物风险

参考 2006 年英国关于洪水对人类和建筑物的风险评价研究[22]中的划分原则，将城市极端暴雨内涝中人类和建筑物（普通建筑物和基础设施）的暴露度定义为流速和水深的函数，计算公式为

$$P = (v + C)D + F \tag{1}$$

式中：P 为暴露度；D 为所在格网的积水深度；v 为所在格网的径流流速；C 为流速因子，本文取 0.5；F 为地表因子，与所在网格的积水深度和径流流速有关，草地、林地、城市建筑等不同土地利用类型的地表因子见表 1。

表 1 不同土地利用类型的地表因子

Table 1 Surface factors of different land use types

条件	草地	林地	城市建筑
$D \leqslant 0.25$ m	0	0	0
0.25 m$<D\leqslant$0.75 m	0	0.5	1.0
$D>0.75$ m 或 $v>2$ m/s	0.5	1.0	1.0

考虑到不同性别、年龄人类的脆弱性存在显著差异，采用脆弱性系数量化人类在城市内涝风险下的脆弱程度。将成年人的脆弱性系数定为 1 作为基准，其他人的脆弱性系数进行一定调整，确定成年女性、老人、儿童的脆弱性系数分别为 1、0.5、0.5。基于澳大利亚相关规范[23]确定儿童与成人涉水避难参数的比例，儿童的极限深度为成人的 0.5 倍、极限流速为成人的 0.6 倍，设定所有建筑物脆弱性系数为 1。基于此，人类和建筑物的内涝风险值计算公式为

$$S_p = \begin{cases} 0 & H_p < 0.75 \\ 1 & 0.75 \leqslant H_p < 2.5 \\ 2 & H_p \geqslant 2.5 \end{cases} \tag{2}$$

$$S_b = \begin{cases} 0 & H_b < 1.5 \\ 1 & 1.5 \leqslant H_b < 3.5 \\ 2 & H_b \geqslant 3.5 \end{cases} \tag{3}$$

其中 $H_p = PV_p \qquad H_b = PV_b$

式中：H_p 为人类的危险度；V_p 为人类的脆弱度；H_b 为建筑物的危险度；V_b 为建筑物的脆弱度；S_p 为人类的内涝风险值；S_b 为建筑物的内涝风险值。0 代表低风险，1 代表中风险，2 代表高风险。

基础设施主要包括地铁站、水厂、电厂、污水处理厂等，其内涝风险值的计算方法与普通建筑相同，但不同种类的基础设施会对作用范围内个体产生不同影响。当各类基础设施处于超标准积水情况下，会对其他个体造成不同程度的影响。具体而言，当地铁站处于高风险状态时，地铁站内的人将面临生命威胁，也处于高风险状态，即地铁站内涝风险值 $S_s=2$，则其服区内的 $S_p=2$；当水厂、电厂、污水处理厂处于高风险状态时，其服务区内的居民虽然不会面临生命威胁，但生活中会遭遇较大的不便。设正常情况下服务区内居民生活便利程度 $C_p=1$，当水厂、电厂、污水处理厂处于高风险状态，不会影响服务区内人风险的等级，但会影响其生活便利程度，即水厂、电厂、污水处理厂内涝风险值 $S_i=2$，则 $C_p=0$。

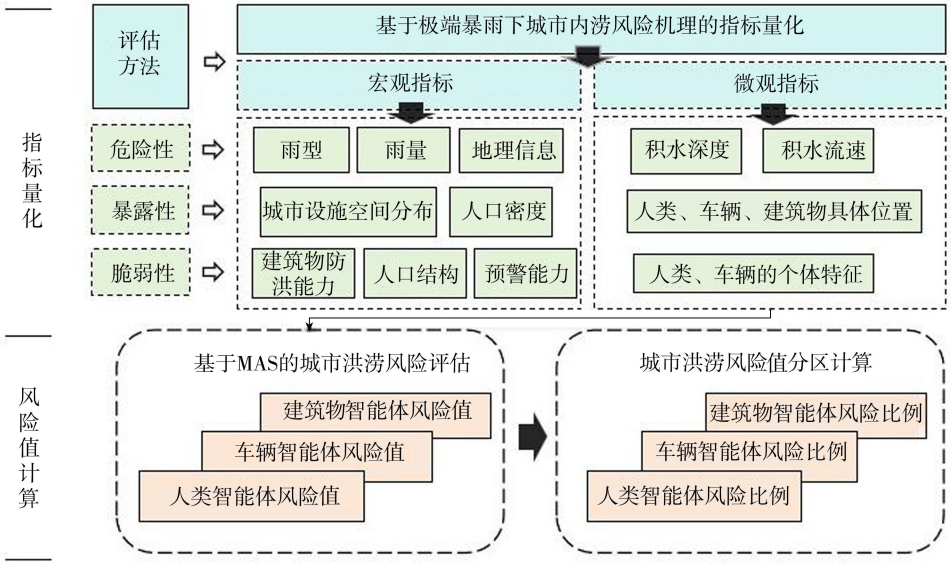


图 1 城市极端暴雨内涝风险计算框架

Fig. 1 Calculation framework of urban extreme rainstorm waterlogging risk

1.2.2 车辆风险

城市极端暴雨对车辆的影响比较复杂，主要威胁包括降低驾驶视野清晰度、削弱轮胎与地面的摩擦力以及增加水面打滑等危险。此外，极端暴雨的高水流可能导致较小车型受困或被卷走，极大地威胁乘客的生命安全。为了精确评估这些风险，将车辆的排气管高度和淹没深度作为关键参数，考虑到汽车排气管通常距离地面 25～35 cm[24]，本文设定 30 cm 作为中、低风险的阈值，根据车辆淹没深度来设定高风险阈值，并假设同一车型的脆弱度相同。基于此，车辆内涝风险值的计算公式为

$$S_{cc}=\begin{cases}0 & d<0.3\,m\\ 1 & 0.3\,m\leqslant d<1\,m\\ 2 & d\geqslant 1\,m\end{cases} \tag{4}$$

$$S_{cb}=\begin{cases}0 & d<0.3\,m\\ 1 & 0.3\,m\leqslant d<1.5\,m\\ 2 & d\geqslant 1.5\,m\end{cases} \tag{5}$$

式中：S_{cc} 为私家车的内涝风险值；S_{cb} 为公交车的内涝风险值；d 为车辆所在位置的积水深度。

1.2.3 宏观尺度动态风险

宏观层面的动态风险评估通过统计不同区域内中、高风险个体的比例，加权计算得到各区域的内涝风险值，从而绘制研究区的风险区划图。区域内涝风险值的计算公式

$$H=w_1R_p+w_2R_c+w_3R_b \tag{6}$$

其中 $R_p=(w_4h_p+w_5m_p)/t_p$

$R_c=(w_4h_c+w_5m_c)/t_c$ $R_b=(w_4h_b+w_5m_b)/t_b$

式中：H 为区域综合风险值；w_1 为人类风险的权重；w_2 为车辆风险的权重；w_3 为建筑物风险的权重；w_4 为高风险权重；w_5 为中风险权重；R_p 为区域人类风险值；h_p 为区域高风险人数；m_p 为区域中风险人数；t_p 为区域总人数；R_c 为区域车辆风险值；h_c 为区域高风险车辆数量；m_c 为区域中风险车辆数量；t_c 为区域车辆总数量；R_b 为区域建筑物风险值；h_b 为区域高风险建筑物数量；m_b 为区域中风险建筑物数量；t_b 为区域建筑物总数量。根据综合风险值将区域进行划分，$H\geqslant 0.15$ 表示区域为高风险区，$0.1\leqslant H<0.15$ 表示区域为中风险区，$H<0.1$ 表示区域为低风险区。

2 基于 MAS 的城市极端暴雨内涝风险动态评估模型

2.1 模型结构

图 2 为城市极端暴雨内涝风险动态评估模型结构。由图 2 可见，模型整合了危险性、脆弱性与暴露性的综合分析，旨在提供全面评估城市内涝灾害整体风险水平的方法。模型包括量化模拟子模型和风险评价子模型两部分。量化模拟子模型通过多智能体模型中的风险、政府、人类、车辆、建筑五大智能体进行构建。其中人类、车辆和建筑物智能体是反应类的智能体，是可行动的智能体，有行为轨迹；风险

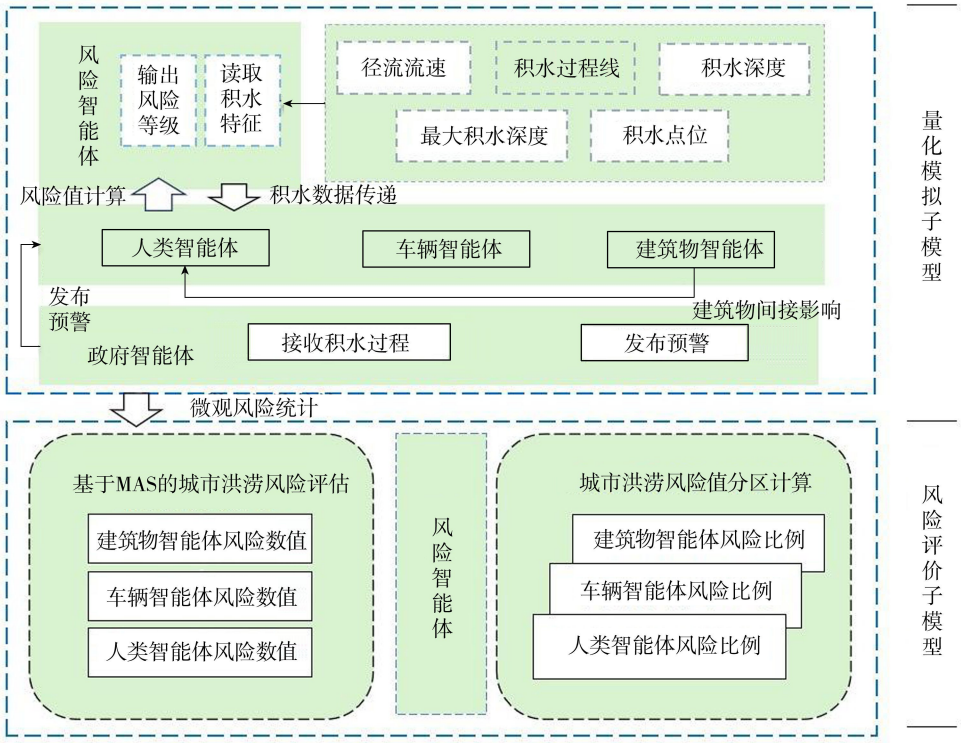


图 2 城市极端暴雨内涝风险动态评估模型结构

Fig. 2 Dynamic assessment model of urban extreme rainstorm waterlogging risk

智能体属于计算类智能体,提供积水信息;政府智能体属于条件类智能体,发布预警信息。风险评价子模型基于风险智能体,通过模拟智能体的交互行为和内涝演进动态计算预测城市内涝风险,在个体层面分析智能体数量变化,在区域层面计算风险比例,并设置多种情景以覆盖不同事件。

2.2 MAS 构建

2.2.1 运行环境

智能体运行环境构成了智能体存在及活动的场景,不仅限定了智能体的移动范围,也是智能体行为发生的物理基础。在构建城市极端暴雨内涝风险动态评估模型时,通过融合路网、地形等数据信息来打造智能体的运行环境,确保其与真实世界的相似度。为准确计量模型模拟过程中智能体移动的距离,将运行环境划分为均匀分布的节点和节点之间的连接线,以此模拟现实世界的空间结构。

2.2.2 智能体定义

a. 人类智能体。人类智能体按照性别(男、女)、性格(理性、非理性)、年龄(儿童、成年人、老年人)的社会属性进行划分,共分为 12 种类别。基于对城市居民出行行为的分析,将人类智能体的行为模式归纳为工作、学习、休闲娱乐以及返回住所等。其中,工作、学习、休闲娱乐等空间的分离意味着人类智能体需要在不同的空间之间进行日常通勤,导致其时空动态变化。因此,模拟人类智能体的日常行为是捕捉城市内涝风险动态的关键环节。人类智能体的初始化位置随机分布于居住地点位,日常行为规则以概率的形式描述,具体的行为发生时间和概率设置基于问卷调查。本文根据年龄分为 4 种不同的行为模式,如图 3 所示,图中休息代表一天行程结束。人类智能体是否为理性行为者,影响着其在接收到政府的预警信息及周遭人群的避险行动时是否能够做出恰当的反应决策,一般来说,在日常行为中,接收到政府预警的情况下,理性性格的人会进行动态响应,非理性性格的人行为保持不变。在极端暴雨事件发生时,人类智能体根据自身状态或政府指示采取避险策略。首先,风险智能体实时向人体智能体传达周围的信息,包括地形、降水量、淹没面积、径流流速、积水深度等,这些信息是人体智能体做出响应决策的基础;其次,人体智能体根据自身所处的位置、周围的环境状态、积水深度和径流流速对人可能造成的影响了解自身的暴露风险,这是人体智能体识别危险程度和确定应对策略的前提;再次,人体智能体依据收集到的环境信息和自身的知识库,利用预设的反应规则来制定行动计划,包括选择保持原地不动或确定向安全地区移动的最佳路径,这一决策过程涉及对各种可能行动的效果评估,选择最能确保安全的策略;最后,人体智能体实施其行动决策,执行移动以规避内涝风险,包括寻找和移动到安全建筑物或向地势较高或积水较浅的区域转移。

b. 车辆智能体。将车辆分为大型公交车和小型私家车两个类别。公交车的行动轨迹遵循固定的交通路线和时间往返于公交车站之间;私家车的行驶路径则与成年人的日常行为模式保持一致。车辆智能体的活动受道路网络状况的直接影响。

c. 建筑物智能体。建筑物智能体在 MAS 中用于模拟城市中不动资产在极端降雨内涝事件中的状态变化。通过模拟建筑物对内涝事件的响应,可以更好地理解内涝事件对城市基础设施和居民住宅的潜在影响,从而为城市规划和风险管理提供重要信息。建筑物智能体不仅包括住宅、商业建筑等城市普通建筑物,也包括对城市运行至关重要的基础设施,包括地铁站、污水处理厂、电力设施、供水系统等。当基础设施处于高风险状态时,会对其服务范围内的智能体产生级联影响,这种交互规则反映了

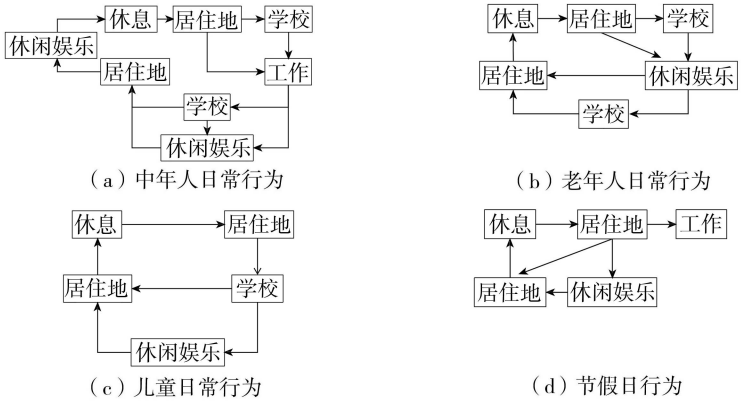


图 3 不同类型人体智能体的行为模式

Fig. 3 Behavior mode of different types of human intelligent agents

基础设施在城市系统中的关键作用及其对城市韧性的影响。

d. 政府智能体。政府智能体是城市内涝风险管理中的关键角色,综合承担着行政决策、预警发布职能。政府智能体不仅能对城市内涝过程进行感知和预测,还能精准掌握城市居民受灾状况,依据各区域的具体受灾情况及时发布预警。具体功能包括:①与风险智能体交互,感知积水信息并分析、综合考察城市整体环境;②通过分析地面径流速度和积水深度对人类、建筑智能体的潜在影响,实时评估城市风险程度,决定是否发布内涝预警;③通过输出预警系统将决策信息传达给各类智能体。

e. 风险智能体。风险智能体在城市极端降雨内涝风险动态评估模型中负责桥接物理环境与智能体之间的互动,兼具数据处理和风险评估的职能。在模型的设计中,风险智能体作为环境块部分,具体工作流程和功能包括:①数据整合与处理,将积水过程线数据整合到系统中,包括积水深度、流速等;②智能体数量读取,读取模型中不同风险等级区域内智能体数量,分析各类智能体空间分布情况和风险敞口;③风险汇总与输出,实时计算和汇总各类智能体风险等级并输出整体结果;④基于不同情景的多智能体城市内涝风险评估,分析不同极端暴雨降雨情景、发生时间和政府响应情境下的城市内涝风险。风险智能体与其他智能体的交互遵循“信息共享-风险评估-状态更新”的闭环机制。

3 实例应用

3.1 研究区概况与数据来源

3.1.1 研究区概况

南昌市乌沙河流域位于昌北,地理坐标范围为北纬 28°36′~28°46′、东经 115°42′~115°53′,由中堡水、前湖水、龙潭水、青岚水等支流汇合而成,流域面积 263.3 km^2,涉及红谷滩区、新建区以及经济开发区的主城区。乌沙河流域地形较为平坦,但局部地势起伏,河道蜿蜒曲折。流域内水系网络发达,支流众多,河网密度较高,为流域的水资源调配和洪水排泄提供了良好的条件。作为南昌市的重要水源,乌沙河流域为南昌市提供了农业、生活、工业等多方面用水,同时构成了南昌市部分河流沿岸的重要景观带。依据水文地理特征和城市排水设施布局,将研究区划分为 9 个排水区:红角洲排水区、凤凰洲排水区、红谷滩排水区、乌沙河上游排水区、望城排水区、西客站排水区、前湖上游排水区、经开区排水区和新建区排水区,排水区位置如图 4 所示。

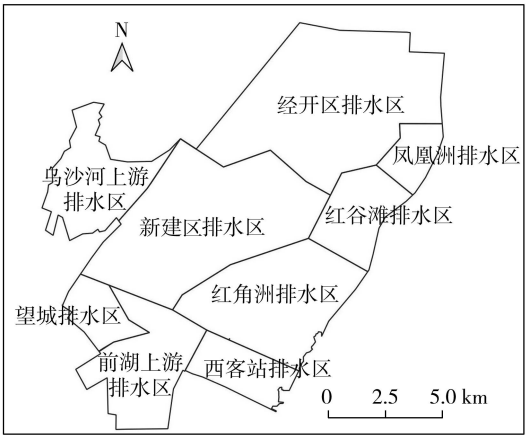


图 4 排水区位置

Fig. 4 Location of drainage area

3.1.2 数据来源

城市极端暴雨内涝风险动态评估模型所需数据包括基础地理信息数据、社会经济数据、气象数据、历史灾情数据、社会学调查数据,具体情况如表 2 所示。

3.2 模型参数设置与验证

进行模型初始化时,需将居民社区、办公场所、学校、娱乐场所、关键基础设施的地理位置导入模型,基于这些地点,设定人类和车辆智能体的初始位置及目的地。利用问卷调查结果确定不同情景下人

表 2 数据信息

Table 2 Data information

数据类型	数据名称	数据来源
基础地理信息数据	DEM	天地图
气象数据	极端暴雨雨型和降水量	《极端暴雨条件下城市内涝风险预警与防范技术研究》
历史灾情数据	南昌市极端暴雨积水点	《极端暴雨条件下城市内涝风险预警与防范技术研究》
社会学调查数据	南昌市民城市内涝情况下的行为和决策	实地问卷调查
社会经济数据	人口及人口结构特征	《2023 年江西省年鉴》《2022 年南昌市常住人口年报》
	城市路网	高德地图
	城市兴趣点	高德地图
	城市交通概况	江西南昌公共交通运输集团有限责任公司、南昌市公安局交通管理局
	城市建筑物分布	高德地图
	南昌市排水分区划分	南昌市城市规划设计研究总院
	城市基础设施分布	南昌市城市规划设计研究总院
	主干道交通流量	实地测量

类和车辆智能体的行为选择概率,以反映研究区居民的日常行为和生活状态。问卷调查以南昌市为目标区域,共收集了 1 230 份有效问卷。研究区总人口为 134.02 万人,男性比例为 52%,老年人比例为 11%,儿童比例为 16%,理性人比例为 90%,每个人类智能体代表 2000 实际人口。公交车数量为 770 辆,私家车数量为 26.98 万辆,每个私家车智能体代表 1000 辆实际车辆。人类智能体出行时间及比例分别为:34.9%于 7:00 出行、53.6%于 8:00 出行、11.5%于 9:00 出行;回家时间及比例分别为:24.7%于 17:00 回家、50.4%于 18:00 回家、24.9%于 19:00 回家。工作日晚外出、节假日外出及需接送儿童的概率分别为 34.4%、63.3%和 20.5%。

模型初始时间设为 00:00,此时人和车辆均处于初始化位置(家),没有室外活动。早上 8:00,人和车开始按照行为轨迹活动,如儿童上学、成年人送儿童上学或上班、老年人送儿童上学或休闲娱乐,室外活动人数显著增加。这些活动导致个体从居住空间流向工作、学习、休闲娱乐区域,形成明显的人口流动模式。下午 17:00,随着一天活动结束,个体智能体开始陆续返回居住区,室外活动人数再次急剧上升,展现出从公共空间流向居住和休闲区域的流动模式。下午 18:00,室外活动人数达到峰值。晚上 22:00,智能体基本回到居住空间,结束一天活动。研究区智能体在不同时间 T 的位置模拟结果如图 5 所示。

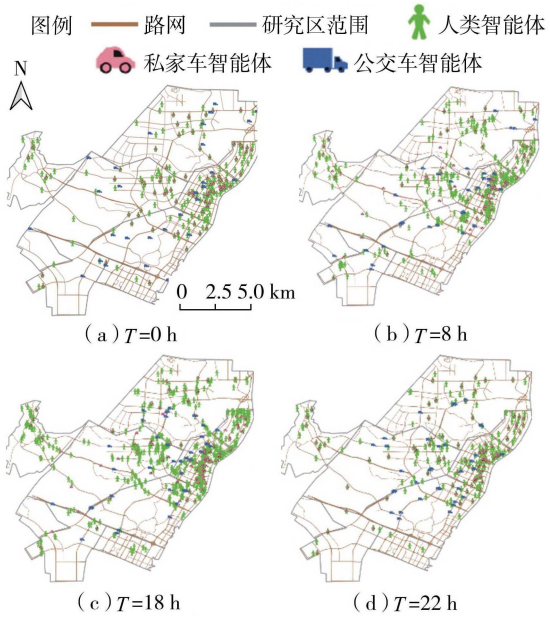


图 5　研究区智能体在不同时间的位置模拟结果

Fig. 5　Simulation results of intelligent agent positions in study area at different times

利用南昌市中心城区的实际交通流量数据对模型车辆智能体的模拟进行验证。选择丰和中大道与庐山南大道交界处及会展路与丰和中大道交界处作为监测点,在 60 min 的车流高峰期,这两个监测点的交通流量分别达到 3210 辆和 4680 辆;模型模拟结果显示这两个监测点高峰期的车辆智能体均值为 3.5 和 4.1,与实测值基本一致,表明构建的模型能准确模拟研究区主要道路的交通状态。图 6 为百度地图引擎提供的研究区 18:00 人口活动热力图。将图 6 与图 5(c)进行对比,可见模型模拟结果的人口流动情况与实际情况基本一致,表明构建的模型能准确模拟研究区人口流动情况。

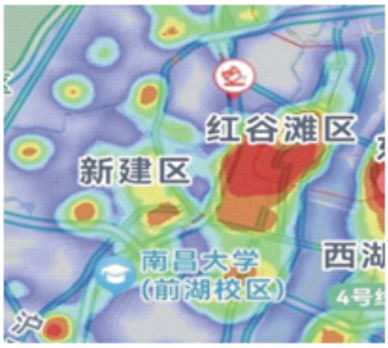


图 6　研究区 18:00 人口活动热力图

Fig. 6　Population activity heat map at 18:00 of study area

基于政府响应及工作日与非工作日的差异,开展多情景研究。设置的 3 种情景均采用 100 年一遇的降雨强度,降水量为 311.05 mm,降雨雨型采用 Wu 等[25]在南昌市极端暴雨研究中的常见雨型,情景 A 为工作日且无政府响应的情况,情景 B 为节假日且无政府响应的情况,情景 C 为工作日且有政府响应的情况。

3.3　结果与分析

3.3.1　情景 A

图 7 为情景 A 不同时间智能体的空间分布。由图 7 可见,在情景 A 中,积水开始形成的时间为早上 6:00,主要集中在乌沙河上游、红角洲、凤凰洲、新建区排水区。早上 7:00—9:00,智能体开始了一天的活动,暴露性显著增大。早上 8:00 时,高风险人类智能体数量为 2,中风险人类智能体数量为 140。中午 12:30 时,随着降水量减少,积水深度和流速下降,风险指数降低,大部分高风险智能体转为中风险。然而,新建区排水区的积水未有效排除,相关智能体风险等级未明显变化。傍晚 18:00 时,外部智能体数量达到峰值,中、高风险智能体显著增多。晚上 22:00 时,大部分智能体已返回住所,但乌沙河上游和新建区排水区仍有中、高风险智能体,特别是在新建区排水区,由于积水未排干,该区域持续存在风险。情景 A 中,整个研究区基础设施未受损。图 8 为情景 A 不同排水区的动态风险值。由

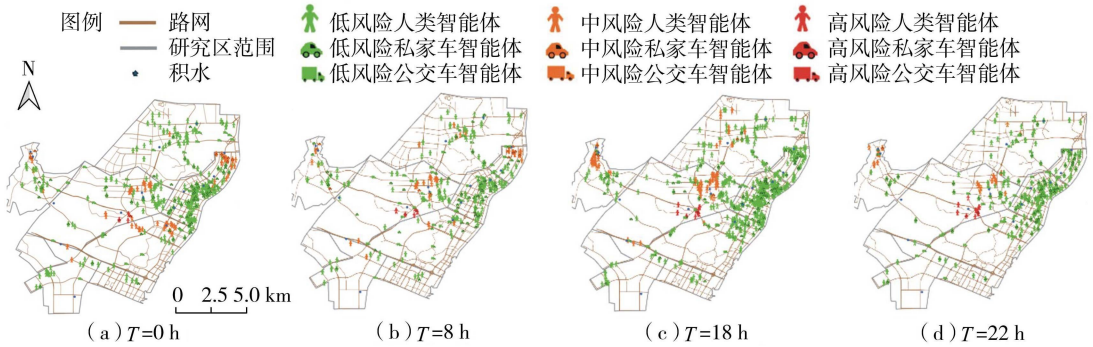


图 7　情景 A 不同时间智能体的空间分布

Fig. 7　Spatial distribution of intelligent agents at different times in scenario A

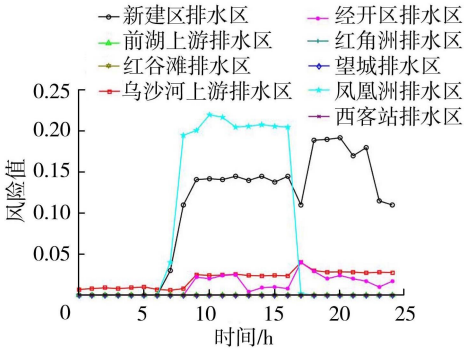


图 8　情景 A 不同排水区的动态风险值

Fig. 8　Dynamic risk values of different drainage areas in scenario A

图 8 可见，新建区排水区在整个降雨过程中都处于中风险状态，凤凰洲排水区在 9:00—17:00 处于中风险状态，西客站排水区在 10:00—11:00 处于中风险状态，其他区域均为低风险。

3.3.2　情景 B

图 9 为情景 B 不同时间智能体的空间分布。与图 7 相比，显示出工作日与节假日活动差异对风险分布的显著影响。由图 9 可见，在情景 B 中，积水于早上 6:00 开始形成，智能体在活动前状态与情景 A 相同，只有少数建筑智能体处于中风险。早上 8:00 时，随着节假日活动开始，部分人类和车辆智能体移动至积水区附近，处于中、高风险状态，出行量低于工作日，中、高风险智能体数量比情景 A 减少。中午 12:30 时，流量较大导致风险智能体数量达到峰值，乌沙河上游、凤凰洲、新建区排水区为中、高风险区域。红角洲排水区因娱乐场所的存在，也有一些中风险智能体，中风险人类智能体数量为 21，但无高风险人类智能体。傍晚 18:00 时，智能体再次出行，主要前往娱乐场所，与情景 A 相比，这一变化显著降低了乌沙河上游和凤凰洲排水区的风险，而红角洲和新建区排水区的风险有所上升。晚上 22:00 时，人类智能体陆续返回居住地，各排水区的风险均有所减少。图 10 为情景 B 不同排水区的动态风险值。由图 10 可见，各排水区风险值高低有明显变化，其中新建区、凤凰洲、经开区排水区风险值明显随时间上升，在中、高风险阈值附近波动，红谷滩排水区风险值下降，全程为低风险。

3.3.3　情景 C

图 11 为情景 C 不同时间智能体的空间分布。由图 11 可见，在情景 C 中，模型运行开始时研究区内各智能体相对稳定，仅有少数建筑智能体处于中风险状态。早上 6:00 时，研究区产生积水，政府发布预警。早上 8:00 时，随着智能体开始日常活动，部分人类智能体与车辆智能体出现在较危险的位置，主要集中在乌沙河流域上游和凤凰洲排水区。中午 12:30 时，中、高风险智能体数量变化不大。傍

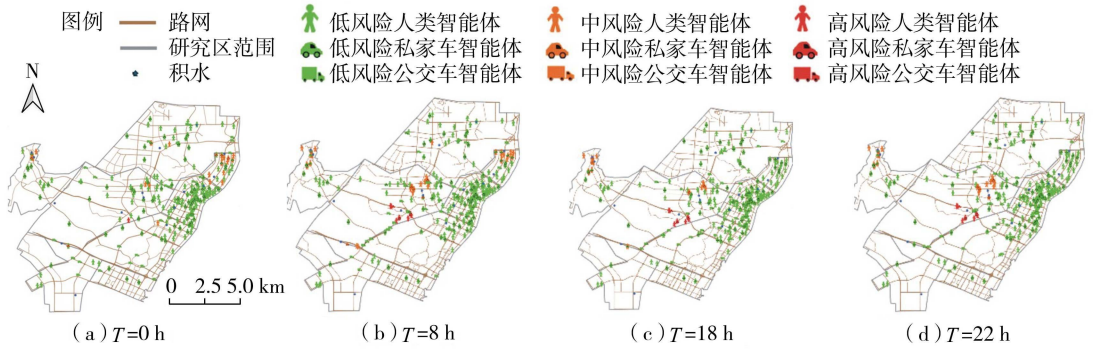


图 9　情景 B 不同时间智能体的空间分布

Fig. 9　Spatial distribution of intelligent agents at different times in scenario B

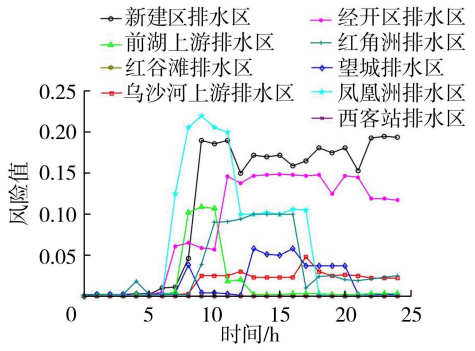


图 10　情景 B 不同排水区的动态风险值

Fig. 10　Dynamic risk values of different drainage areas in scenario B

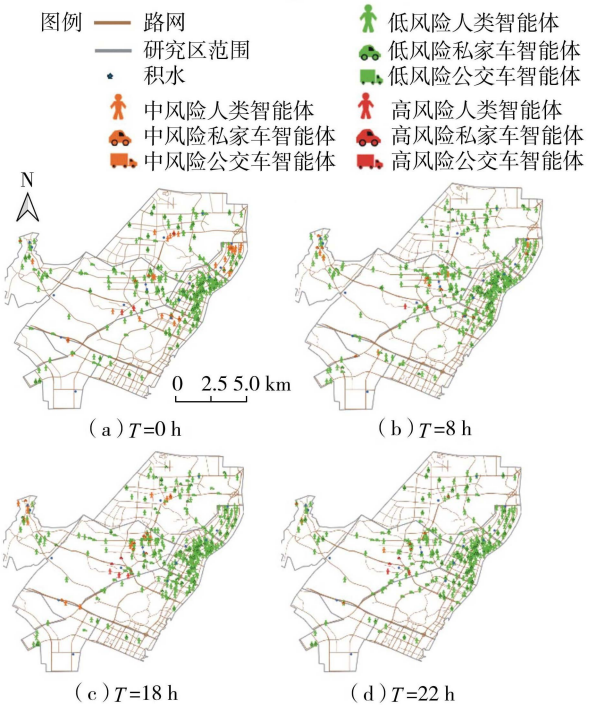


图 11　情景 C 不同时间智能体的空间分布

Fig. 11　Spatial distribution of intelligent agents at different times in scenario C

晚 18:00 时,风险的空间分布与无预警时相似,但受影响的智能体数量和风险等级有所降低。与情景 A 相比,在政府及时预警的情况下,中、高风险智能体数量大幅减少,其中高风险人类智能体数量平均减少 6.1,中风险人类智能体数量平均减少 64.9。可见在情景 C 下,研究区内中、高风险的人类智能体和车辆智能体数量有明显降低,峰值较情景 A 降低了 79.6%。尽管如此,情景 C 中仍存在少量高风险人类智能体和车辆智能体,政府需进一步发起救援行为。图 12 为情景 C 不同排水区的动态风险值。由图 12 可见,与情景 A 相比,情景 C 下各排水区风险值均有降低,凤凰洲、经开区排水区分别在 9:00 和 17:00 达到中风险状态。在情景 B 下,由于智能体的活动轨迹与积水点不重合,因此中、高风险的人智能体和车辆智能体分布峰值不同,风险值也有较大差异,节假日的风险峰值出现在 11:00—13:00,而工作日的风险值峰值出现在早高峰和晚高峰。

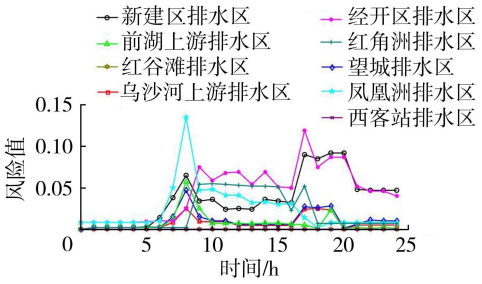


图 12　情景 C 不同排水区的动态风险值

Fig. 12　Dynamic risk values of different drainage areas in scenario C

4　结　论

a. 基于 H-E-V 框架,提出了一种针对不同个体(人类、车辆、普通建筑物和基础设施)的城市内涝风险值计算与评级方法。通过将微观个体风险评估与宏观区域风险分析相结合,实现了风险评估的多维度集成。与传统评估方法相比,该方法既考虑了淹没水深和流速等水文因素,也融入了个体脆弱性差异和时空分布特征,能够更精准地量化和表征内涝风险的时空动态变化。

b. 构建了基于 MAS 的城市极端暴雨内涝风险动态评估模型,集成了风险、人类、车辆、建筑和政府五大智能体系统,通过定义各智能体的属性、行为规则和交互机制,模拟了极端暴雨过程中城市系统的动态响应。模型突破了传统静态评估方法的局限,能够捕捉人口流动、交通变化和政府干预等动态因素对风险分布的影响,实现了从单一尺度向多尺度、从静态分析向动态评估的方法论转变。

c. 将构建的模型应用于南昌市乌沙河流域,利用交通流量数据和人口热力图对模型进行了验证,并设置了工作日无政府响应、节假日无政府响应、工作日有政府响应 3 种情景对研究区极端暴雨的内涝风险进行了评估。结果表明,南昌市乌沙河流域的地形条件和排水系统特征是影响内涝风险的主要因素;人口和车辆的时空分布进一步影响了内涝风险等级,其中凤凰洲排水分区和新建区排水分区的风险等级较高;内涝风险的时间分布呈现明显的双峰特征,风险值的峰值在工作日主要集中在早、晚高峰期,在节假日则在午间达到峰值;政府预警可有效调节研究区内涝风险水平,最大可使中高风险智能体数量减少 79.6%。

参考文献:

[1] 张金良,罗秋实,王冰洁,等. 城市极端暴雨洪涝灾害成

因及对策研究进展[J]. 水资源保护,2024,40(1):6-15. (ZHANG Jinliang,LUO Qiushi,WANG Bingjie,et al. Research progress on causes and countermeasures for extreme rainstorm-induced urban flood disasters [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(1): 6-15. (in Chinese))

[2] 王振亚,姚成,董俊玲,等. 郑州"7·20"特大暴雨降水特征及其内涝影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(3):17-22. (WANG Zhenya, YAO Cheng, DONG Junling,et al. Precipitation characteristic and urban flooding influence of "7·20" extreme rainstorm in Zhengzhou [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(3):17-22. (in Chinese))

[3] 应急管理部. 应急管理部发布2023年全国自然灾害基本情况[EB/OL]. [2024-03-12]. https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202401/content_6927328.htm.

[4] 张会,李铖,程炯,等. 基于"H-E-V"框架的城市内涝风险评估研究进展[J]. 地理科学进展,2019,38(2):175-190. (ZHANG Hui, LI Cheng, CHENG Jiong, et al. A review of urban flood risk assessment based on the framework of hazard-exposure-vulnerability [J]. Progress in Geography,2019,38(2):175-190. (in Chinese))

[5] 徐宗学,卢兴超,施奇妙. 城市暴雨洪涝灾害特征与风险评估研究进展[J]. 水利水电科技进展,2025,45(1):1-9. (XU Zongxue, LU Xingchao, SHI Qimiao. Research progress on urban flooding disaster characteristics and risk assessment [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(1):1-9. (in Chinese))

[6] 徐宗学,陈浩,任梅芳,等. 中国城市洪涝致灾机理与风险评估研究进展[J]. 水科学进展,2020,31(5):713-724. (XU Zongxue, CHEN Hao, REN Meifang, et al. Progress on disaster mechanism and risk assessment of urban flood/waterlogging disasters in China[J]. Advances in Water Science,2020,31(5):713-724. (in Chinese))

[7] 王德运,冀承泽,张露丹,等. 城市洪涝风险的多方法组合评估与应用[J]. 灾害学, 2024, 39(1): 96-103. (WANG Deyun, JI Chengze, ZHANG Ludan, et al. Risk assessment of urban flood disasters in Hubei Province based on composite weight evaluation method[J]. Journal of Catastrophology,2024,39(1):96-103. (in Chinese))

[8] 黄国如,罗海婉,卢鑫祥,等. 城市洪涝灾害风险分析与区划方法综述[J]. 水资源保护, 2020, 36(6): 1-6. (HUANG Guoru, LUO Haiwan, LU Xinxiang, et al. Study on risk analysis and zoning method of urban flood disaster [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(6): 1-6. (in Chinese))

[9] 郑德凤,高敏,李钰,等. 基于GIS的大连市暴雨洪涝灾害综合风险评估[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022,50(3): 1-8. (ZHENG Defeng, GAO Min, LI Yu, et al. Comprehensive risk assessment of rainstorm-flood disaster in Dalian City based on GIS[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(3): 1-8. (in Chinese))

[10] 高玉琴,王慧,刘钺,等. 基于空间信息格网的南京市洪水风险评估[J]. 水利水电科技进展,2024,44(6):6-12. (GAO Yuqin, WANG Hui, LIU Yue, et al. Flood disaster risk assessment in Nanjing City based on spatial information grids [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(6): 6-12. (in Chinese))

[11] SHI Y, SHI C, XU S Y, et al. Exposure assessment of rainstorm waterlogging on old-style residences in Shanghai based on scenario simulation[J]. Natural Hazards, 2010, 53(2): 259-272.

[12] MEI C, LIU J H, WANG H, et al. Urban flood inundation and damage assessment based on numerical simulations of design rainstorms with different characteristics [J]. Science China-Technological Sciences, 2020, 63(11): 2292-2304.

[13] 田子阳,褚俊英,林永寿,等. 西宁市多尺度城市内涝风险评价方法[J]. 水资源保护, 2022, 38(5): 72-79. (TIAN Ziyang, CHU Junying, LIN Yongshou, et al. Multi-scale urban waterlogging risk assessment method in Xining City[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(5): 72-79. (in Chinese))

[14] 田子阳,褚俊英,周祖昊,等. 基于GIS和SWMM模型的城市内涝水文规律分析[J]. 人民黄河, 2022, 44(10):18-24. (TIAN Ziyang, CHU Junying, ZHOU Zuhao, et al. Hydrologic Analysis of urban waterlogging based on GIS and SWMM model[J]. Yellow River, 2022, 44(10): 18-24. (in Chinese))

[15] 陈前虎,沈铷桑,陈甜甜,等. 基于元胞自动机的城市内涝风险识别模型研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2024, 55(8): 1-12. (CHEN Qianhu, SHEN Yusang, CHEN Tiantian, et al. Study on urban waterlogging risk identification model based on cellular automata[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024, 55(8): 1-12. (in Chinese))

[16] 黄河,范一大,杨思全,等. 基于多智能体的洪涝风险动态评估理论模型[J]. 地理研究, 2015, 34(10): 1875-1886. (HUANG He, FAN Yida, YANG Siquan, et al. A multi-agent based theoretical model for dynamic flood disaster risk assessment [J]. Geographical Research, 2015, 34(10): 1875-1886. (in Chinese))

[17] 朱净萱,戴强,蔡俊逸,等. 基于多智能体的城市洪涝灾害动态脆弱性计算模型构建[J]. 地球信息科学学报, 2021, 23(10): 1787-1797. (ZHU Jingxuan, DAI Qiang, CAI Junyi, et al. An agent-based computing model of urban vulnerability to flood hazard [J]. Journal of Geo-information Science, 2021, 23(10): 1787-1797. (in Chinese))

[18] 徐俊杰. 基于智能体的洪涝灾害损失评估研究[D]. 北京:中国水利水电科学研究院, 2023.
[19] 卢兴超,徐宗学,李永坤,等. 基于多智能体模型的城市洪涝灾害动态风险评估[J]. 水资源保护,2024,40(4):36-47. (LU Xingchao, XU Zongxue, LI Yongkun, et al. Assessment on dynamic risk of urban flooding/waterlogging disaster based on multi-agents models[J]. Water Resources Protection, 2024, 40(4): 36-47. (in Chinese))
[20] 张伟,庄子孟,孙慧超,等. 我国城市内涝风险图编制关键问题及研究展望[J]. 水资源保护,2023,39(5):58-68. (ZHANG Wei, ZHUANG Zimeng, SUN Huichao, et al. Key issues and study prospect of urban waterlogging risk map in China[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(5):58-68. (in Chinese))
[21] 李宛谕,黄显峰,金国裕,等. 基于 ANP-PP-SPA 的区域洪灾风险评价模型研究[J]. 水利经济,2020,38(4):45-50. (LI Wanyu, HUANG Xianfeng, JIN Guoyu, et al. Assessment model for regional flood risks based on ANP-PP-SPA[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2020,38(4):45-50. (in Chinese))
[22] Department for Communities and Local Government. Planning policy statement 25: development and flood risk[R]. London: Department for Communities and Local Government, 2006.
[23] Standing Committee on Agriculture and Resource Management. Floodplain management in Australia: best practice principles and guidelines[R]. Zealand: Standing Committee on Agriculture and Resource Management, 2000.
[24] 施加福,王昊,周晋军,等. 城市内涝灾害对应急救援服务可达性的影响评估[J]. 水利水电技术(中英文),2024,55(2):27-33. (SHI Jiafu, WANG Hao, ZHOU Jinjun, et al. Assessment of the impact of urban waterlogging disasters on the accessibility of emergency rescue services[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024, 55(2): 27-33. (in Chinese))
[25] WU Y, TANG M, ZHOU Z, et al. Rainfall pattern construction method based on DTW-HCA and urban flood simulation: a case study of Nanchang City, China[J]. Water, 2024, 16: 65.

(收稿日期:2024-07-11 编辑:王芳)

(上接第 94 页)

[20] BAO Weimin, SI Wei, QU Simin. Flow updating in real-time flood forecasting based on runoff correction by dynamic system response curve[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2014, 19(4): 747-756.
[21] WANG Jian, BAO Weimin, XIAO Zhangling, et al. Objectivity verification experiment of the dynamic system response curve method for streamflow simulation[J]. Journal of Hydrology, 2023, 617: 128969.
[22] WANG Jian, BAO Weimin, XIAO Zhangling, et al. Multi-model integrated error correction for streamflow simulation based on Bayesian model averaging and dynamic system response curve[J]. Journal of Hydrology, 2022, 607: 127518.
[23] 蒋语珣,瞿思敏,蒋思军,等. 系统微分响应误差修正方法在 VIC 模型中的应用与研究[J]. 中国农村水利水电,2023(10):96-103. (JIANG Yuxun, QU Simin, JIANG Sijun, et al. Application of and research on system differential response error correction method in VIC model[J]. China Rural Water and Hydropower, 2023(10): 96-103. (in Chinese))
[24] ZHANG Xiaoqin, BAO Weimin, SUN Yiqun. Enhancing the hydrologic system differential response method for flood forecasting correction[J]. Journal of Hydrology, 2021, 592: 125793.
[25] SI Wei, GUPTA V H, BAO Weimin, et al. Improved dynamic system response curve method for real-time flood forecast updating[J]. Water Resources Research, 2019, 55(9): 7493-7519.
[26] 张小琴,吴成城,佘亮亮,等. 基于微分响应的流域产流分单元修正方法[J]. 湖泊科学,2021,33(6):1906-1913. (ZHANG Xiaoqin, WU Chengcheng, SHE Liangliang, et al. A spatial distributed runoff correction approach based on differential response[J]. Journal of Lake Sciences, 2021, 33(6): 1906-1913. (in Chinese))
[27] 包为民,阙家骏,赖善证,等. 洪水预报自由水蓄量动态系统响应修正方法[J]. 水科学进展,2015,26(3):365-371. (BAO Weimin, QUE Jiajun, LAI Shanzheng, et al. Free-water storage error correction based on dynamic system response in flood forecasting[J]. Advances in Water Science, 2015, 26(3): 365-371. (in Chinese))
[28] 刘可新,李匡,梁犁丽,等. 产流误差平稳矩阵的系统响应修正方法参数分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2018,16(1):53-61. (LIU Kexin, LI Kuang, LIANG Lili, et al. Parameters analysis on the error correction method with runoff error smooth matrix based on system response[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2018, 16(1): 53-61. (in Chinese))
[29] SUN Y, BAO W, JIANG P, et al. Development of multivariable dynamic system response curve method for real-time flood forecasting correction[J]. Water Resources Research, 2018, 54(7): 4730-4749.

(收稿日期:2024-05-10 编辑:施业)

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2025.02.012

水动力学模型中雨水口布设数量对城市排涝能力的影响研究

夏军强[1],冯基恒[1],徐 政[1],王小杰[1],董柏良[2]

(1.武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室,湖北 武汉 430072; 2.广东省水利水电科学研究院,广东 广州 510635)

摘要:为研究城市地表径流与地下管流双向耦合的水动力学模型中雨水口布设数量对城市排涝能力的影响,构建了地表径流与地下管流双向耦合的水动力模型。通过街区概化模型试验对水动力学模型进行了验证,并应用于英国 Glasgow 市某一典型街区。结果表明:构建的水动力学模型具有较高的精度,各测点模拟结果的纳什效率系数均大于 0.89,模型能够准确模拟城市地表径流与地下管流过程;增加雨水口数量可有效减小淹没水深,缩小最大淹没范围,对重度积水地区的作用最为显著,雨水口数量从 124 增至 244 时,重度积水区域的淹没面积减小了 55%~81%;增加雨水口数量也能缩短淹没历时,随着雨水口数量增加,研究区内测点的淹没历时缩短了 43%~51%;雨水口均匀布置时,排水效率与雨水口数量呈正相关关系,但提高的速率会随雨水口数量的增加逐渐减小;不同区域的洪涝过程对雨水口数量变化的响应有所差异,在布设雨水口时应重点关注局部易淹区域。

关键词:城市洪涝;水动力学模型;雨水口;淹没水深;排水效率;Glasgow

中图分类号:TV131.4;TU992 **文献标志码**:A **文章编号**:1004-6933(2025)02-0106-09

Study on influence of rainwater outlet number arranged in hydrodynamic model on urban drainage capacity// XIA Junqiang[1], FENG Jiheng[1], XU Zheng[1], WANG Xiaojie[1], DONG Boliang[2] (1. *State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan* 430072, *China*; 2. *Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou* 510635, *China*)

Abstract: To investigate the impact of the number of rainwater outlets on urban drainage capacity in a hydrodynamic model that couples urban surface runoff and underground pipe flow in both directions, a hydrodynamic model for bidirectional coupling of surface runoff and underground pipe flow was constructed. A block generalized model experiment was conducted to validate the hydrodynamic model, which was applied in a typical block in Glasgow, UK. The results show that the constructed hydrodynamic model has high accuracy, and the Nash efficiency coefficients of the simulation results at each measuring point are all greater than 0.89. The model can accurately simulate the processes of urban surface runoff and underground pipe flow. Increasing the number of rainwater outlets can effectively reduce the submergence depth and the maximum submergence range, with the most significant effect on areas with severe waterlogging. When the total number of rainwater outlets increased from 124 to 244, the submerged area in areas with severe waterlogging decreased by 55% to 81%. Increasing the number of rainwater outlets can also shorten the inundation duration. As the total number of rainwater outlets increases, the inundation duration of measuring points in the study area is shortened by 43% to 51%. When the rainwater outlets are evenly arranged, the drainage efficiency is positively correlated with the number of rainwater outlets, but the rate of improvement gradually decreases with the increase of the number of rainwater outlets. The response of flood processes in different regions to changes in the number of rainwater outlets varies, and when setting up rainwater outlets, special attention should be paid to locally flooded areas.

Key words: urban flooding; hydrodynamic model; rainwater outlet; inundation depth; drainage efficiency; Glasgow

在全球气候变化的背景下,台风、暴雨等极端气候事件频发[1-2]。近年来,随着城市化进程加快,城市下垫面的不透水面积增大,发生强降雨时地表水难以下渗,形成更多的地表径流,增加城市洪涝风险[3-5]。雨水口作为城市地表与地下排水系统进行水流交换的关键节点,直接影响城市洪涝程度的时

基金项目:国家自然科学基金项目(51725902)

作者简介:夏军强(1974—),男,教授,博士,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail:xiajq@whu.edu.cn

空分布。研究表明,雨水口的类型、工作状态、规划布置均会影响其排水效率[6-8]。当雨水口的排水能力不足时,即使降雨强度未达到城市管网系统的设计暴雨标准,仍会发生局部内涝[9]。因此,探究雨水口布设因素对城市洪水淹没过程的影响可为城市洪涝研究提供重要参考价值。

目前,国内外已有设计规范描述了不同类型雨水口的过流能力,如美国联邦公路管理局发布的《城市排水设计手册》和我国发行的标准图集GJBT—1404《雨水口》。部分学者通过开展物理模型试验,发现随着算前水深增大,雨水口的泄流模式会从堰流转变为管嘴出流[10-12]。由于泄流模式开始发生转变的临界水深难以确定,Xia 等[13]提出了一种统一的泄流量计算公式,与实测数据吻合较好。考虑到现实生活中雨水口堵塞现象十分常见,影响雨水口的工作状态,Xia 等[14-15]进一步提出了不同堵塞程度下雨水口的泄流量计算公式。上述研究主要关注不同雨水口设计类型及工作状态对过流能力的影响,然而在实际的洪水演进过程中还应考虑城市地物特征、雨水口布设数量等城市规划方面的影响。Dong 等[16]利用地表径流与地下管流耦合的物理试验平台,研究了不同城市地物(绿化带、建筑物等)对洪水淹没过程的影响。段园煜等[17]搭建物理试验平台,研究了道路横纵坡及径流量对雨水口泄流效率的影响。在进行排水设计规划时,雨水口布设数量的合理性同样影响城市排涝能力,较少的雨水口布设数量能节约成本,但在高强度降雨条件下容易形成内涝;增加雨水口数量能增强城市排涝能力,同时也增加施工成本,影响道路美观[18]。已有学者针做了相关研究,张迪等[19]采用二维水动力学模型计算了雨水口在不同的道路纵坡、布设数量下的排水效率;王纪军等[20-21]的研究结果表明雨水口布设应优先保证地势低洼处的雨水口数量,适当增加雨水口支管数量,同时沿途增设雨水口以减轻汇流量。

以往研究较多聚焦于雨水口的类型和工作状态对其过流能力的影响,尚未充分考虑雨水口数量对城市排涝过程的影响。本文采用城市洪涝一二维双向耦合模型,开展街区模型概化试验,利用实测数据对模型进行率定和验证,并将模型应用于英国 Glasgow 市某一典型街区,探究雨水口布设数量对城市排涝能力的影响。

1 模型构建

1.1 二维地表径流模型

地表水动力学模型采用沿水深积分的不可压缩流体的二维浅水方程[22]。忽略风应力、科氏力和紊动项的影响,控制方程中连续性方程见式(1),动量方程见式(2)。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t}+\frac{\partial q_x}{\partial x}+\frac{\partial q_y}{\partial y}=q_d \tag{1}$$

$$\begin{cases}\dfrac{\partial q_x}{\partial t}+\dfrac{\partial(\beta q_x^2/h)}{\partial x}+\dfrac{\partial(\beta q_x q_y/h)}{\partial y}=-gh\dfrac{\partial \eta}{\partial x}-\dfrac{gq_x\sqrt{q_x^2+q_y^2}}{h^2C^2}\\ \dfrac{\partial q_y}{\partial t}+\dfrac{\partial(\beta q_x q_y/h)}{\partial x}+\dfrac{\partial(\beta q_y^2/h)}{\partial y}=-gh\dfrac{\partial \eta}{\partial y}-\dfrac{gq_y\sqrt{q_x^2+q_y^2}}{h^2C^2}\end{cases} \tag{2}$$

式中:t 为时间;η 为水位;q_x、q_y 分别为水流在 x、y 方向的单宽流量;q_d 为排水强度,包括单位面积的泄流量和溢流量;h 为水深;β 为动量修正系数;g 为重力加速度;C 为谢才系数。

采用 TVD-MacCormack 格式有限差分方法求解二维浅水方程。MacCormack 格式具有时空二阶精度[23],通过在其校正步中添加 TVD 限制函数实现激波捕捉,抑制陡坡附近可能产生的数值振荡,适用于急流、缓流并存的地表复杂水流流态[24]。由于 TVD-MacCormack 格式为显格式,在 x、y 方向需同时满足 CFL 限制条件,模型采用自适应时间步长,保证数值计算的收敛性[23]。

1.2 一维地下管流模型

基于 SWMM 的管网水动力模块模拟地下管流。SWMM 是美国环保署开发的动态降雨-径流模型,具有操作简单快捷、计算高效稳定、源代码开放等优点,在城市暴雨洪涝研究及排水系统规划设计等领域得到广泛应用[25-26]。SWMM 提供了恒定流、运动波、动力波 3 种模拟方法,其中动力波方法通过求解完整的一维圣维南方程组计算管道蓄水、回水、有压满管流、检查井溢流等,适用于短时间步长的管网流动模拟,因此本文采用动力波方法模拟地下管流。一维地下管流模型将复杂的排水系统概化为管道与节点的集合,在管道上满足连续性方程和动量方程,在节点上满足连续性方程。管道控制方程表达式见式(3)(4)。节点控制体包含节点本身和与其相连的所有管道长度的一半,控制体内的水体体积随时间的变化等于进入控制体的净流量,节点控制方程表达式见式(5)。

$$\frac{\partial A}{\partial t}+\frac{\partial Q}{\partial s}=0 \tag{3}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t}+\frac{\partial(Q^2/A)}{\partial s}+gA\frac{\partial H}{\partial s}+gAS_f=0 \tag{4}$$

$$\frac{\partial H}{\partial t}=\frac{\Delta Q}{A_s} \tag{5}$$

式中：s 为沿管道方向；A 为过水断面面积；Q 为管道流量；H 为管道水头；S_f 为摩阻坡度；A_s 为控制体的表面积，包括节点的蓄水表面积和管道在控制体内贡献的表面积；ΔQ 为进入控制体的净流量。

基于有限差分法离散一维渐变非恒定流方程，采用隐式欧拉法迭代求解，得到节点水位、管道流量和水深的时间序列。计算前需要设置初始条件和边界条件，初始条件包括节点和管道的初始水深、管道初始流量等；边界条件包括节点的外来流量、管网出口处的水头等。

1.3 地表径流与地下管流交互

地表径流与地下管流模型之间的水流交互包括节点处的泄流和溢流。当地表水位大于管网节点水位时，进行泄流计算，地表水通过多个雨水口泄流至单个检查井后进入排水管网；当地表水位小于管网节点水位时，进行溢流计算，管网水流直接通过检查井溢流到地表；当地表水位等于管网节点水位时，不发生水流交互[22,27]。采用 Xia 等[13]提出的雨水口综合泄流公式计算泄流量（式(6)）；采用孔口流量公式[22]计算溢流量（式(7)）；为保证模型计算的稳定性，对节点处的交互流量添加限制条件[28]（式(8)）。

$$Q_i=auA_nF_r^b \tag{6}$$

$$Q_o=C_oA_n\sqrt{2g(h_n-h_s)} \tag{7}$$

$$Q_n=\min(Q_e,V_e/\Delta t) \tag{8}$$

其中

$$F_r=u/\sqrt{gh}$$

式中：Q_i 为泄流量；a、b 为无量纲参数；A_n 为节点过水面积；u 为算前流速；F_r 为算前弗汝德数；Q_o 为溢流量；C_o 为孔流系数；h_n 为节点水位；h_s 为地表水位；Q_n 为节点泄/溢流量；Q_e 为交互流量；Δt 为时间步长；V_e 为节点所占网格的地表水量/溢流水量。

2 模型验证

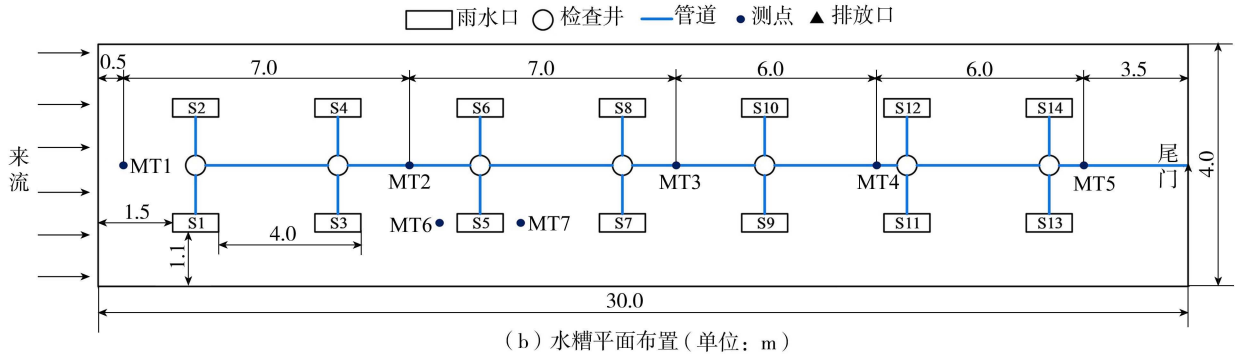
依托武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室的城市洪涝全过程模拟平台开展物理试验，并利用实测结果对城市地表径流与地下管流的耦合模型进行验证。

2.1 水槽模型

图 1 为水槽模型示意图。由图 1(a)可见，城市洪涝全过程模拟平台由地表和地下两部分组成，地表部分包含前池、水槽、尾门等，地下部分包含地下管网、泄水池、回水渠等。平台的前池与地下水库通过泵站相连，试验开始时，由泵站从地下水库抽水至



（a）城市洪涝平台



（b）水槽平面布置（单位：m）

图 1 水槽模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sink model

前池,通过调节泵站的功率控制进口流量;水流经地表尾门和地下管网排放口进入泄水池,通过回水渠重新回到地下水库,实现水流循环。由图 1(b)可见,水槽长 30 m,宽 4 m,高 0.8 m,底坡为 0。水槽纵向中轴线两侧对称布置 7 对平箅式雨水口,雨水口的平面尺寸为 0.25 m×0.15 m,开孔率为 40%,雨水口下接尺寸为 0.25 m×0.15 m×0.5 m 的长方体雨水井。每对雨水井的横向中间位置设有 1 个底部直径 0.4 m,高 0.8 m 的圆柱体检修井,井盖不透水,不参与地表、地下的水流交互。雨水井与检查井之间由一根管径 0.05 m 的侧支管连接,支管长度为 0.5 m。所有检查井通过 6 根管径为 0.2 m 的干管相连,每根干管长度为 3.6 m,第 7 个检查井另有一根同尺寸的干管连接至下游的泄水池,构成完整的排水系统。

2.2 试验工况

试验设有 7 个超声波液位仪,记为 MT1~MT7。其中 MT1~MT5 用于监测沿程水位随时间的变化情况;MT6、MT7 分别位于某一雨水口前、后 0.4 m 处,以监测雨水口附近的水位过程,液位仪的具体位置见图 1(b)。每根侧支管及排放口处的干管各配备一电磁流量计,可采集整个排水系统管道流量的变化过程。

设计 3 组试验工况,采用不透水的有机玻璃板替换雨箅以减少排水系统中参与工作的雨水口数量;通过设置泵站的抽水频率控制进口流量,分别测量 0.14 m^3/s 恒定来流条件下,7 对、5 对、3 对雨水口参与泄流时,沿程水深、雨水口前后水深、侧支管流量、排放口泄流量的变化过程。3 组工况记为 E-1、E-2、E-3,从上游至下游将雨水口标记为 S1~S14,E-1 工况中 14 个雨水口均参与排水,E-2 工况中封堵 S11~S14,E-3 工况中封堵 S7~S14。

2.3 模型模拟结果与试验结果对比

将每组工况中 MT1 和 MT5 的水位随时间变化过程作为上、下游的水位边界条件输入模型。排水系统下游出口边界为自由出流,其余边界为固壁边界。模拟时长为 300 s,正方形网格尺寸为 0.025 m×0.025 m。地表的曼宁系数取 0.012 $s/m^{1/3}$,排水管道的曼宁系数取 0.011 $s/m^{1/3}$。经率定,确定 $a=0.291$,$b=-0.796$,$C_0=0.2$。图 2 为 E-1 工况下 4 个测点水位过程模拟值与实测值对比。由图 2 可见,不同测点的水位过程模拟值与实测值变化过程基本一致,纳什效率系数(NSE)均大于 0.950。

图 3 为连接 S9 的侧支管及排放口干管流量过程模拟值与实测值对比。由图 3 可见,支管与干管流量模拟值的纳什效率系数均大于 0.940,流量稳定时的模拟值与实测值吻合较好。图 3(a)中的支

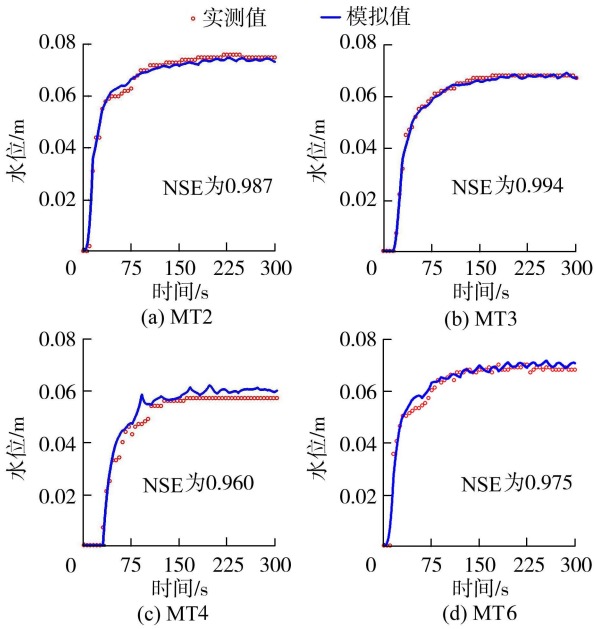


图 2 4 个测点水位过程模拟值与实测值对比

Fig. 2 Comparison between simulated and measured values of water level process at 4 measuring points

管流量的模拟值与实测值在 30~90 s 内存在较明显的差异,原因可能是支管达到满管状态前,电磁流量计无法测得管道流量,因此流量的实测值在前期存在较大的系统误差;而当支管达到满管且流量稳定时,模拟值与实测值基本吻合。当连接排放口的干管流量开始上涨时,大部分支管的流量已达到稳态,因此干管流量的模拟值与实测值误差较小。

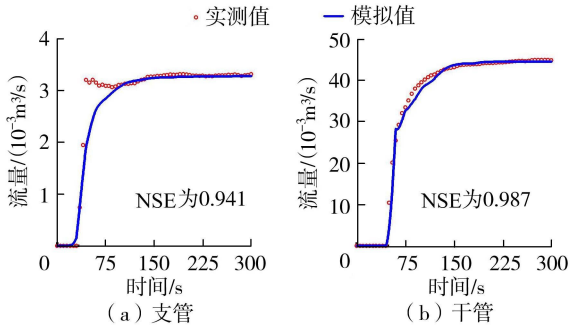


图 3 支管与干管流量过程模拟值与实测值对比

Fig. 3 Comparison between simulated and measured flow process values of branch and main pipes

使用率定后的参数模拟 E-2、E-3 工况,部分测点的纳什效率系数见表 1。由表 1 可见,率定后的耦合模型计算精度较高,能够准确模拟包含地表径流与地下管流的城市洪涝演进过程。当 3 组工况的沿程各测点的水位均达到稳定状态后,E-1 工况的沿程水面线最低;随着参与泄流的雨水口数量减少,E-2、E-3 工况的沿程水面线均有不同程度的抬升;当排放口流量逐渐趋于稳定时,雨水口数量越多,排水系统的泄流量越大。总的来说,雨水口数量变化

会影响淹没水深和泄流量,前者与雨水口数量呈负相关关系,后者与之呈正相关关系。

表 1　不同工况下模型模拟值的纳什效率系数

Table 1　NSEs of simulation results in different scenarios

工况	MT2	MT3	MT4	MT6	干管
E-1	0.987	0.994	0.960	0.975	0.987
E-2	0.986	0.993	0.927	0.956	0.943
E-3	0.982	0.990	0.953	0.940	0.893

3　模型应用

3.1　研究区概况

选取英国 Glasgow 市某一面积为 1.0 km×0.4 km 典型集水区作为研究区,采用构建的耦合模型模拟 2002 年 7 月 30 日发生在研究区的洪水事件。在该事件中,涵洞 P0 发生溢流,最大流量为 10 m^3/s,总溢流量约 8 554 m^3,持续时间约 40 min,P0 的溢流量过程[29]见图 4。由于缺少实际的排水系统设计资料,本文参考 GB 50014—2021《室外排水设计标准》概化地下管网。沿街区主要道路的中轴线每隔约 100 m 布设 1 个检查井,相邻检查井之间由直径为 1.0 m 的圆管相连,南侧边界上设有 2 个排放口。在主要行洪街道和可能的渍水点布置测点,分别记作 P1~P4。为研究雨水口布设数量对城市排涝过程的影响,通过调整雨水口的间距改变雨水口总数。GB 50014—2021《室外排水设计标准》规定雨水口的布设间距宜为 25~50 m,本文设计了 4 组有排水系统的计算工况,其中 3 组为均匀布置,分别沿该街区的主要道路两侧每隔 50、35、25 m 添加 1 对 0.75 m×0.45 m 的平箅式雨水口,对应的雨水口总数分别为 124、172、244,记为 M-1、M-2、M-3;另一组在 M-1 工况基础上,于 P3 所在街道以 25 m 为间距布设雨水口,记为 M-4,该工况下雨水口总数为 142。将上述 4 组工况与无排水系统工况 M-0 进行对比。研究区的地形(分辨率为 2 m)及 M-1 工况的排水系统布置如图 4 所示。建筑物采用真实地形法表示,研究区四周为固壁边界。模拟时长为 2 h,正方形网格尺寸为 2 m×2 m。地表的曼宁系数取 0.02 $s/m^{1/3}$,排水管道的曼宁系数取 0.013 $s/m^{1/3}$。经参数率定,得到 a = 0.302,b = −0.816,C_o = 0.67。

3.2　结果与分析

图 5 为不同工况下各测点的水深对比。由图 5(a)可见,P1 距离洪水源头较近,来流量大,在 4 种工况下,洪水均在 22 min 时抵达 P1,4 min 内水深几乎以相同的趋势急剧增加,30 min 时增至峰值。在无雨水口的 M-0 工况下,P1 的最大水深为 0.67 m,30 min 后水深开始减小,120 min 后形成约 0.40 m 的积水。布设雨水口后,随着雨水口数量增加,M-1、M-2、M-3 工况与 M-0 工况相比,P1 的最大水深分别减小 4.62%、6.11%、8.35%;在 30~120 min 内,M-1~M-3 工况的水深有不同程度的减小,其中 M-1、M-2 工况的水深变化没有明显差异,M-3 工况的地表积水发生更大的幅度减少。由图 5(b)可见,在无雨水口的 M-0 工况下,洪水在 21 min 时到达 P2,最大水深为 0.20 m。由于 P2 位于研究区北侧的一条东西向道路,为主要的行洪通道,且道路纵坡约为 1%,随着时间推进,水流会继续流向下游地势更低处,因此在洪水事件结束后,P2 未出现明显积水。雨水口的数量增加后,M-1、M-2、M-3 工况中洪水抵达 P2 时刻略有推迟,水深在 6 min 内增至峰值,最大水深与 M-0 工况相比分别减小了 9.36%、12.32%、24.14%。与 P1 类似,整个时间轴上 M-1 工况与 M-2 工况的水深变化趋势近似,M-2 工况的水深略小于 M-1 工况;而 M-3 工况的水深与 M-1、M-2 工况相比呈现更明显的差异。增加雨水口数量使该点的淹没历时明显缩减,与无雨水口时 M-0 工况的 56 min 相比,M-1、M-2、M-3 工况分别缩减 43.14%、46.68%、55.13%。P3 位于研究区南侧的

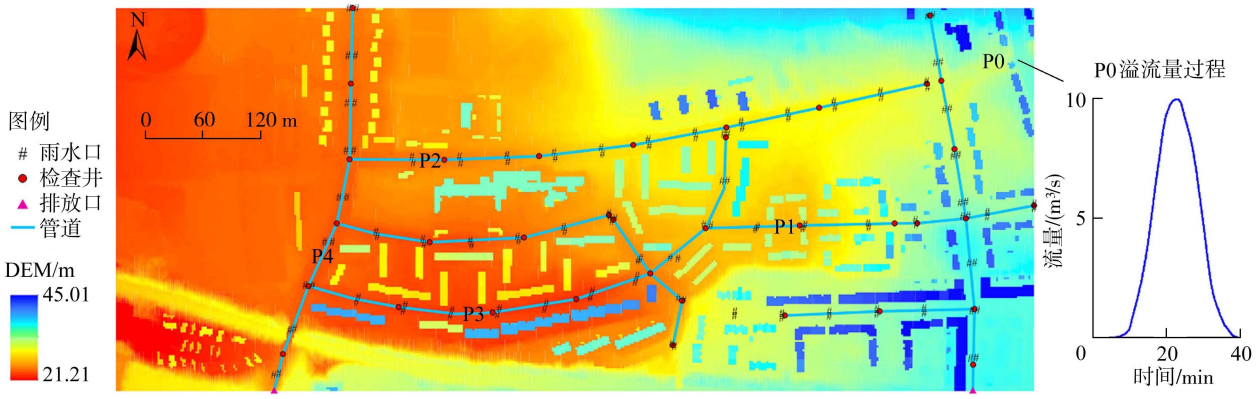


图 4　研究区地形及排水系统布置

Fig. 4　Layout of drainage system and terrain in research area

东西向道路上，该点地势低洼，上游的水流到达后逐渐向此处汇集，无雨水口时，水流难以排出，形成严重内涝，最大淹没水深为 0.76 m。由图 5(c)可见，随着雨水口数量增加，洪水抵达时刻明显延后，M-1、M-2、M-3 工况与 M-0 工况相比，P3 的最大水深分别减小 31.93%、42.71%、56.50%，这说明增加雨水口数量能大幅度减小渍水点的淹没水深，减轻内涝。在 M-3 工况下，100 min 时 P3 水深降至 0.04 m，随后保持不变；同一时刻 M-1、M-2 工况的水深仍在以较缓的趋势减小。由图 5(d)可见，P4 在无雨水口时的最大水深为 0.25 m，由于 P4 所在道路纵坡较小，当 P0 停止溢流后，来流减小，一部分水流继续向南流动，另一部分水流停滞于 P4 附近，形成约 0.12 m 深的积水。布设雨水口后，M-1、M-2、M-3 工况与 M-0 工况相比，P4 的最大水深分别减小 13.83%、21.34%、33.99%；在 75 min 时刻之前，M-1~M-3 工况的水深变化过程呈递减趋势，75 min 后 3 种工况的水深均维持在 0.08 m 左右，增加雨水口数量并不能进一步减小该区域的水深。

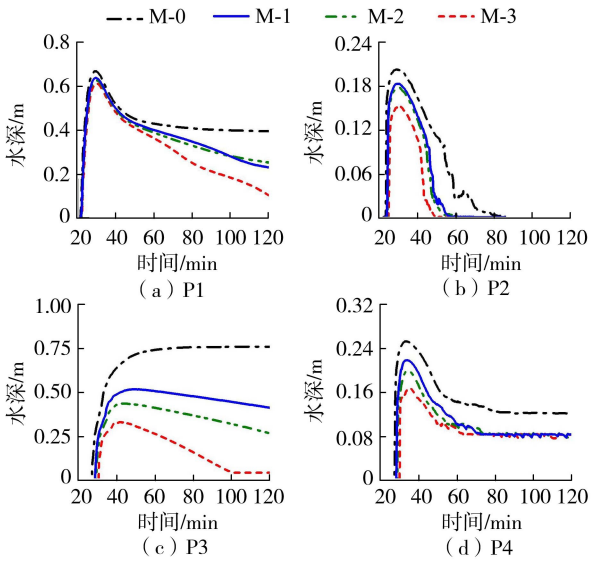


图 5　不同工况下各测点的水深对比

Fig. 5　Comparison of water depth at various measuring points under different operating conditions

由图 5 可见，各测点的水深变化并未呈现统一的规律，不同区域的洪涝过程对雨水口数量变化的响应有所差异。P1、P2 位于洪水演进的上游，径流量大，洪水到来前途经的雨水口数量较少。与 M-1 工况相比，M-2 工况雨水口数量增加较少，而 M-3 工况雨水口数量增加更多，因此 M-1、M-2 工况的差异较小且变化趋势相近，M-3 工况相对于 M-1 工况水深减小更明显。P3、P4 位于洪水演进的下游，洪水行进路程更远，M-1~M-3 工况的雨水口数量有明显增长，水深随时间变化的过程差异也更明显。由此可见，为了提升城市排涝能力而增加雨水口数量时，还应考虑雨水口的布设位置。上游 P1 处的径流量大，且四周被建筑物围阻，往往容易形成较深的积水，因此在上游布置更密的雨水口才能显著减轻内涝。P2 位于主要行洪通道，且道路纵坡较大，即使不布置雨水口，水流也会随时间推移继续向下游流动，最终不会形成明显积水；布置雨水口后，该区域的淹没历时有明显缩短，对于此类区域，可参考室外排水规范适当布置雨水口加快排水。P3 处地势低，极易出现严重的内涝，此类区域应增加雨水口布置数量，既能显著降低积水深度，还能大大缩短淹没历时。P4 所处道路的纵坡较小，地势平坦，当上游不再有来流时水流容易停滞于此形成积水[30]，布设雨水口虽能减小该类区域的积水深度，但当水深降至某一范围时，增加雨水口数量无法进一步排水，可能原因在于此处的排水管网易发生超载而发生溢流，随时间推进，泄流与溢流逐渐达到平衡状态，因此针对此类区域应首要考虑建设成本，不宜布设较密的雨水口。

图 6 为不同工况下研究区的最大淹没范围及水深。由图 6 可见，M-1、M-2、M-3 工况与 M-0 工况相比，最大淹没面积分别减小了 16.64%、22.33%、28.60%。将渍水程度划分为 3 个等级：水深 $h \leqslant 0.15$ m 为轻度积水，0.15 m$<h\leqslant$0.40 m 为中度积水，$h>0.40$ m 为重度积水[31]。M-1、M-2、M-3 工况与 M-0 工况相比，轻度积水面积分别减少了 10.14%、12.19%、13.75%，中度积水面积分别减少了 8.90%、18.04%、28.77%，重度积水面积分别减少了 55.56%、69.25%、81.02%。由此可见，增加雨水口数量显著减少了研究区的受淹面积，且对中度积水和重度积水面积的影响更突出。

由图 6(a)可见，P3 所在的街道为主要的中、重度积水地区。M-4 工况在 M-1 工况的基础上，以 25 m 间距在该区域加密布置雨水口，其余地区雨水口间距不变。图 7 为 M-4 工况下研究区的最大淹没范围及水深。由图 7 可见，M-4 工况下 P3 附近的内涝较 M-1 工况有所缓解，整体淹没情况与 M-2 工况近似。将 M-1、M-2、M-4 工况进行对比，表 2 为 3 组工况下最大淹没范围及不同渍水程度积水面积的减小幅度。由表 2 可见，M-4 工况相比于 M-1 工况，仅在 P3 附近增设了 18 个雨水口便有效缓解了中、重度积水地区的内涝；而 M-2 工况相比于 M-4 工况，虽然在总数上增设了 30 个雨水口，但是研究区内的最大淹没范围，尤其是重度积水面积的减小幅度没有明显增加，这进一步说明雨水口总数和布设位置

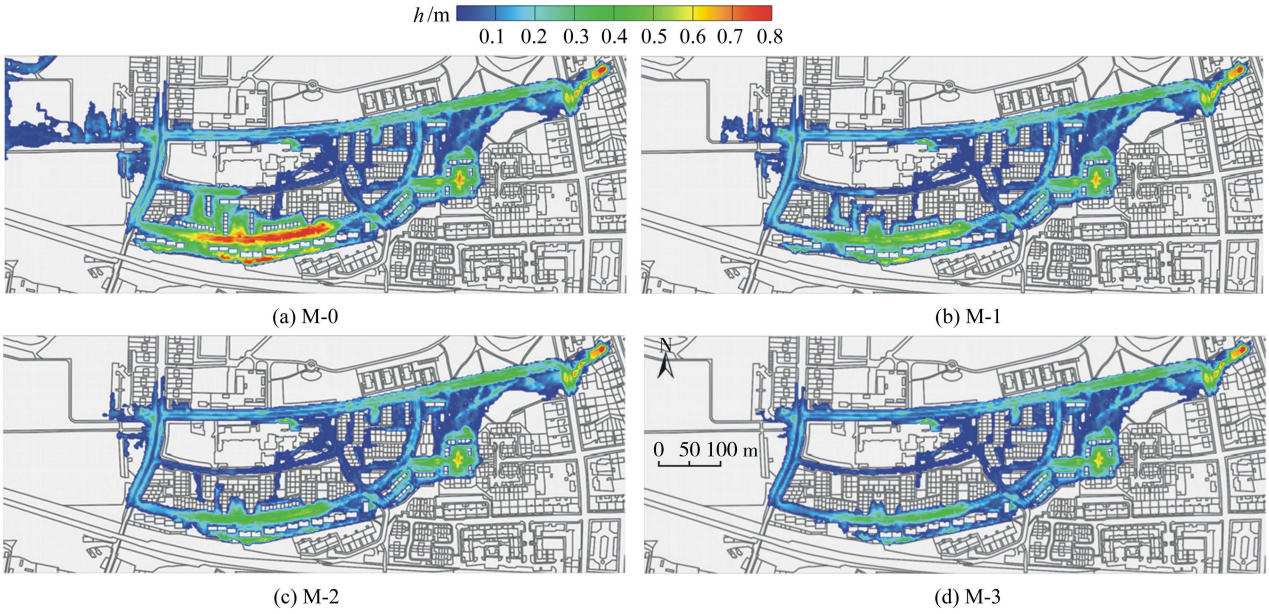


图 6　不同工况下研究区的最大淹没范围及水深

Fig. 6　Maximum submergence range and water depth of the study area under different operating conditions

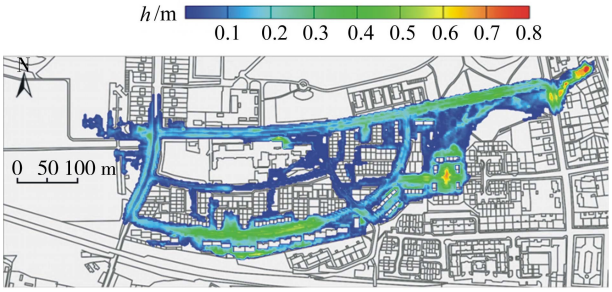


图 7　M-4 工况的最大淹没范围及水深

Fig. 7　Maximum submergence range and water depth of M-4 operating condition

表 2　3 组工况下最大淹没范围及不同等级积水面积的减小幅度

Table 2　Reduce amplitude of maximum submergence range and water accumulation area with different levels under 3 operating conditions

工况	相对于 M-0 的减小幅度/%			
	最大淹没范围	轻度积水面积	中度积水面积	重度积水面积
M-1	16.64	10.14	8.90	55.56
M-2	22.33	12.19	18.04	69.25
M-4	19.91	10.27	13.38	67.53

综合影响街区的排涝能力，布置雨水口时应重点关注有严重内涝的局部地区。

为了更直观地反映雨水口布设数量对城市排涝能力的影响，采用排水效率 E 反映不同工况的优劣，计算公式为

$$E = V_{di}/V_{in} \times 100\% \tag{9}$$

式中：V_{di} 为排水总量；V_{in} 为来流总量，本研究中 $V_{in} = 8\,554\ m^3$。

图 8 为不同工况下的排水总量。由图 8 可见，均匀布置雨水口时，M-3 工况的排水总量始终大于 M-2 和 M-1 工况，排水系统的排水总量随着雨水口数量的增加而增加。M-4 工况的排水总量在洪水过程初期介于 M-1、M-2 工况之间；洪水过程后期，M-4 工况的排水总量较 M-1 工况有明显增加，且逐渐逼近 M-2 工况。4 组工况下排水总量随时间的增长均呈现先急后缓的变化趋势，M-3 工况的排水总量在洪水发生 120 min 时已无明显增长，但同一时刻其余 3 组工况的排水总量仍呈现上升趋势，说明 M-3 工况更早到达排水总量的上限。计算 4 组工况的排水效率，洪水事件发生 2 h 后 M-1～M-4 工况的排水效率分别为 63.72%、77.54%、88.81%、76.93%。由此可见，对于 M-1～M-3 工况，在研究区按照固定距离均匀布设雨水口时，随着雨水口间距减小，雨水口数量增加，排水效率提升，但提高的速率却有所下降，说明通过增加雨水口数量虽能提高排水效率，但该作用会随着雨水口数量的增加而受限；M-4 工况

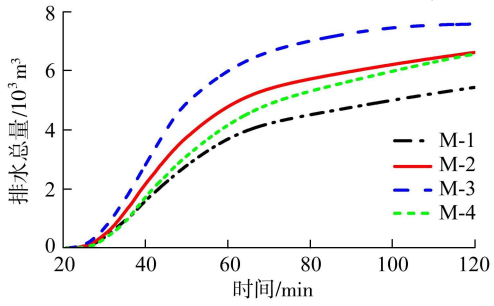


图 8　不同工况下的排水总量

Fig. 8　Total drainage volume under different operating conditions

在 M-1 工况的基础上,在积水严重区域增设了 18 个雨水口,排水效率已有了显著提高,达到了 M-2 工况的排水效率,说明在合适的位置布设雨水口能够在低成本条件下更大地提升街区排涝能力。

4 结 论

a. 构建了地表径流与地下管流双向耦合的水动力学模型,开展了物理试验对耦合模型进行验证,地表径流水位模拟值的纳什效率系数均超过 0.90,管道流量模拟值的纳什效率系数均超过 0.89,耦合模型的模拟值与实测值基本吻合,模型具有较高的精度。

b. 增加雨水口的数量能有效降低研究区的淹没水深、减小淹没面积,尤其是对重度积水地区有更显著的削减作用,增加雨水口数量后,重度积水区域的面积减少了 55.56%~81.02%。同时,增加雨水口数量可以缩短淹没历时,随着雨水口数量增加,P2 测点的淹没历时缩短 43.14%~55.13%。

c. 均匀布设雨水口时,雨水口数量增加,排水效率也随之提升,当雨水口数量从 124 增至 244 时,排水效率从 63.72%提高至 88.81%,但提高的速率会随雨水口数量增加而减小;仅在局部地区合理增设雨水口可节约成本,达到更良好的排水效果。

d. 雨水口数量及其布设位置会共同影响城市排涝过程。在 P1、P3 这类极易形成较深积水的区域附近应布置更密的雨水口以减轻局部内涝;针对 P2 这类在洪水事件结束后未出现明显积水的区域应参考相关规范布置适当数量的雨水口以缩短淹没历时;对于 P4 区域,增加雨水口数量并不能进一步减少局部积水,应综合考虑建设成本,合理布设雨水口。

参考文献:

[1] HAMMOND M J, CHEN A S, DJORDJEVIĆS, et al. Urban flood impact assessment: a state-of-the-art review [J]. Urban Water Journal, 2015, 12(1): 14-29.

[2] 张建云,王银堂,贺瑞敏,等. 中国城市洪涝问题及成因分析[J]. 水科学进展,2016,27(4):485-491. (ZHANG Jianyun, WANG Yintang, HE Ruimin, et al. Discussion on the urban flood and waterlogging and causes analysis in China[J]. Advances in Water Science, 2016, 27(4): 485-491. (in Chinese))

[3] BERTILSSON L, WIKLUND K, DE MOURA TEBALDI I, et al. Urban flood resilience-a multi-criteria index to integrate flood resilience into urban planning[J]. Journal of Hydrology, 2019, 573: 970-982.

[4] 黄国如,罗海婉,卢鑫祥,等. 城市洪涝灾害风险分析与区划方法综述[J]. 水资源保护, 2020, 36(6): 1-6. (HUANG Guoru, LUO Haiwan, LU Xinxiang, et al. Study on risk analysis and zoning method of urban flood disaster [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(6): 1-6. (in Chinese))

[5] 张金良,罗秋实,王冰洁,等. 城市极端暴雨洪涝灾害成因及对策研究进展[J]. 水资源保护, 2024, 40(1): 6-15. (ZHANG Jinliang, LUO Qiushi, WANG Bingjie, et al. Research progress on causes and countermeasures for extreme rainstorm-induced urban flood disasters [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(1): 6-15. (in Chinese))

[6] 姚飞骏. 雨水口的流量计算方法探讨[J]. 中国给水排水, 2013, 29(14): 45-48. (YAO Feijun. Discussion on calculation method of flow rate at rainwater inlet [J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(14): 45-48. (in Chinese))

[7] PALLA A, COLLI M, CANDELA A, et al. Pluvial flooding in urban areas: the role of surface drainage efficiency[J]. Journal of Flood Risk Management, 2018, 11: S663-S676.

[8] 高帅领,夏军强,董柏良,等. 雨水口泄流对城市洪涝影响的数学模型[J]. 浙江大学学报(工学版), 2022, 56(3): 590-597. (GAO Shuailing, XIA Junqiang, DONG Boliang, et al. Mathematical model for urban flooding with effect of drainage of street inlets[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2022, 56(3): 590-597. (in Chinese))

[9] TEN VELDHUIS J A E, CLEMENS F H L R, VAN GELDER P H A J M. Quantitative fault tree analysis for urban water infrastructure flooding [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2011, 7(11): 809-821.

[10] GÓMEZ M, RUSSO B. Methodology to estimate hydraulic efficiency of drain inlets[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management, 2011, 164(2): 81-90.

[11] 李鹏,李曦淳,宋启元,等. 雨水篦子水力特性研究[J]. 城市道桥与防洪, 2014(3): 85-86. (LI Peng, LI Xichun, SONG Qiyuan, et al. Study on hydraulic characteristic of rain oliveri[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2014(3): 85-86. (in Chinese))

[12] 吴鹏,杨敏,何京莲,等. 雨水口箅子的孔口流量系数试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2014, 12(6): 65-68. (WU Peng, YANG Min, HE Jinglian, et al. Experiment on discharge coefficients for orifices of gutter grates [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2014, 12(6): 65-68. (in Chinese))

[13] XIA Junqiang, DONG Boliang, ZHOU Meirong, et al. A unified formula for discharge capacity of street inlets for urban flood management[J]. Journal of Hydrology, 2022, 609: 127667.

[14] XIA Junqiang, DONG Boling, ZHOU Meirong, et al. A

unified discharge capacity formula of clogged grate inlets [J]. Urban Water Journal,2023,20(5):564-574.

[15] HAO Xiaoli,MU Jie,SHI Hongjian. Experimental study on the inlet discharge capacity under different clogging conditions[J]. Water,2021,13(6):826.

[16] DONG Boliang, XIA Junqiang, ZHOU Meirong, et al. Experimental and numerical model studies on flash flood inundation processes over a typical urban street [J]. Advances in Water Resources,2021,147:103824.

[17] 段园煜,郭帅,王秋萍,等. 道路雨水口泄流效率关键影响因素研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,50(1):7-12. (DUAN Yuanyu, GUO Shuai, WANG Qiuping,et al. Study on key influencing factors of drainage efficiency of street inlets[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(1):7-12. (in Chinese))

[18] 宋弘飞. 考虑雨水径流路径的市政道路雨水口设计研究[J]. 现代交通技术,2022,19(5):17-21. (SONG Hongfei. Study on the design of municipal road rainwater inlet considering rainwater runoff path [J]. Modern Transportation Technology, 2022, 19(5): 17-21. (in Chinese))

[19] 张迪,侯精明,宁利中,等. 道路雨水口布设方案对泄流能力影响的模拟研究[J]. 中国给水排水,2023,39(9):97-102. (ZHANG Di, HOU Jingming, NING Lizhong,et al. Simulation of effect of road rainwater inlet layout scheme on drainage capacity[J]. China Water & Wastewater,2023,39(9):97-102. (in Chinese))

[20] 王纪军. 关于城镇道路雨水口布置间距、数量设计计算的探讨[J]. 城市道桥与防洪,2019(11):81-85. (WANG Jijun. Discussion on layout distance,quantity and design calculation of rainwater inlet in town road [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control,2019(11):81-85. (in Chinese))

[21] 郭磊,刘森彦,刘雷斌,等. 城市道路雨水口设置研究[J]. 给水排水,2017,53(5):44-47. (GUO Lei, LIU Senyan,LIU Leibin, et al. Study on the setting of urban road gullies[J]. Water & Wastewater Engineering,2017,53(5):44-47. (in Chinese))

[22] 王小杰,夏军强,李启杰,等. 考虑不同水流交换模式的城市洪涝一维二维双向耦合模型[J]. 水科学进展,2024,35(2):244-255. (WANG Xiaojie,XIA Junqiang,LI Qijie,et al. Study on the bidirectional coupling 1-D and 2-D model of urban flood based on different flow exchange modes[J]. Advances in Water Science,2024,35(2):244-255. (in Chinese))

[23] LIANG Dongfang, LIN Binliang, FALCONER R A. Simulation of rapidly varying flow using an efficient TVD-MacCormack scheme [J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids,2007,53(5):811-826.

[24] 刘璐,孙健,袁冰,等. 城市暴雨地表积水过程研究:以清华大学校园为例[J]. 水力发电学报,2019,38(8):98-109. (LIU Lu, SUN Jian, YUAN Bing, et al. Surface flooding in urban areas under heavy downpours:case study of Tsinghua University campus [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019, 38(8): 98-109. (in Chinese))

[25] 卢兴超,徐宗学,李永坤,等. 基于多智能体模型的城市洪涝灾害动态风险评估[J]. 水资源保护,2024,40(4):36-47. (LU Xingchao,XU Zongxue,LI Yongkun,et al. Assessment on dynamic risk of urban flooding and waterlogging disaster based on multi-agent models [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(4): 36-47. (in Chinese))

[26] 叶陈雷,徐宗学,雷晓辉,等. 基于 SWMM 和 InfoWorks ICM 的城市街区洪涝模拟与分析[J]. 水资源保护,2023,39(2):87-94. (YE Chenlei, XU Zongxue, LEI Xiaohui,et al. Flood simulation and risk analysis on urban block scale based on SWMM and InfoWorks ICM [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(2): 87-94. (in Chinese))

[27] JANG J H, CHANG T H, CHEN W B. Effect of inlet modelling on surface drainage in coupled urban flood simulation[J]. Journal of Hydrology,2018,562:168-180.

[28] 黄国如,陈文杰,喻海军. 城市洪涝水文水动力耦合模型构建与评估[J]. 水科学进展,2021,32(3):334-344. (HUANG Guoru,CHEN Wenjie,YU Haijun. Construction and evaluation of an integrated hydrological and hydrodynamics urban flood model[J]. Advances in Water Science,2021,32(3):334-344. (in Chinese))

[29] HUNTER N M, BATES P D, NEELZ S, et al. Benchmarking 2D hydraulic models for urban flooding [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management,2008,161(1):13-30.

[30] LIANG Dongfang, FALCONER R A, LIN Binliang. Coupling surface and subsurface flows in a depth averaged flood wave model[J]. Journal of Hydrology,2007,337(1-2):147-158.

[31] 王小杰,夏军强,董柏良,等. 基于汇水区分级划分的城市洪涝模拟[J]. 水科学进展,2022,33(2):196-207. (WANG Xiaojie, XIA Junqiang, DONG Boliang, et al. Simulation of urban flood using the SWMM with the hierarchical catchment partition method[J]. Advances in Water Science,2022,33(2):196-207. (in Chinese))

(收稿日期:2024-06-24 编辑:王芳)

DOI:10. 3880/j. issn. 1004 - 6933. 2025. 02. 013

基于复杂网络的洪涝灾害链风险评估

高玉琴,徐 诺,汪 键,王丽君,刘 彤

(河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098)

摘要:为研究洪涝灾害演化过程对流域居民生活和社会经济的影响,从灾害链和复杂网络视角对洪涝灾害链演化风险开展评估。通过收集洪涝灾害典型案例,结合事件树分析法,搭建了洪涝灾害链演化网络。基于贝叶斯网络和网络传播模型,构建了洪涝灾害链风险评估模型,并应用于秦淮河流域。结果表明:洪涝灾害链综合风险由节点风险累积或叠加构成;秦淮河流域"2016·7"洪涝灾害链综合风险水平在洪涝灾害发生后约 103 h 达极大值,约 173 h 达第二峰值,综合风险水平约为原生洪涝风险的 7 倍;公路事故、供排水事故、生态环境破坏事故、水污染事故为关键节点,洪涝灾害→水土流失灾害→水污染事故→生态环境破坏事故为关键传播边,通过对关键节点加强监测应对,对关键链条进行阻截断链,可有效减灾降损。

关键词:洪涝灾害;灾害链;复杂网络;事件树分析法;贝叶斯网络;秦淮河流域

中图分类号:TV213. 4 **文献标志码**:A **文章编号**:1004 - 6933(2025)02 - 0115 - 08

Risk assessment of flood disaster chain based on complex network//GAO Yuqin, XU Nuo, WANG Jian, WANG Lijun, LIU Tong(*College of Water Conservancy and Hydropower Engineering*, *Hohai University*, *Nanjing* 210098, *China*)

Abstract: To study the impact of the evolution process of flood disaster on the resident lives and socio-economic development in the watershed, the evolution risk of flood disaster chain was evaluated from the perspective of disaster chain and complex network. By collecting typical cases of flood disaster and combining event tree analysis, the evolution network of flood disaster chain was constructed. Based on the Bayesian network and network propagation model, a flood disaster chain risk assessment model was built, and a case study was conducted in the Qinhuai River Basin. The results show that the comprehensive risk of flood disaster chain is composed of the accumulation or superposition of node risks. The comprehensive risk level of the "2016·7" flood disaster chain in the Qinhuai River Basin reaches the maximum value about 103 h after the occurrence of the flood disaster and the second peak value about 173 h, which is about 7 times the risk of primary flood disaster. Road accident, water supply and drainage accident, ecological environment damage accident, and water pollution accident are key nodes. Flood disaster→soil erosion disaster→water pollution accident→ecological environment destruction is the key transmission edge. By strengthening monitoring and response to key nodes and intercepting critical chains, effective disaster reduction and damage reduction can be achieved.

Key words: flood disaster; disaster chain; complex network; event tree analysis; Bayesian network; the Qinhuai River Basin

全球气候变暖背景下,极端天气导致的洪涝灾害显著增加,且随着城市化进程不断深入,洪涝灾害复杂的形成机理常导致多灾并发[1]、次生灾害频发,进而形成链式效应[2]。例如,2021 年河南省发生严重洪涝并引发大量次生灾害,造成重大人员伤亡和财产损失[3]。单一灾害的爆发为其他次生灾害创造发生条件,是一种灾害传播和放大的现象,被称为灾害链[4]。结合对灾害链理论的认识和洪涝灾害演变规律的深入了解,针对洪涝灾害演变中的关键环节采取预防措施对于提高灾害预警能力、减少灾害损失有重要意义。

国内外众多学者已从灾害链视角分析洪涝灾害并探讨减灾策略,例如:Metin 等[5]构建了区域气象、降雨径流、区域洪水、损失估算等一系列模型来系统描述洪涝灾害链的过程;王婷等[6]构建了台风-洪涝-地质灾害链减灾能力评估指标体系,应用多级模糊综合评估模型定量评价了该灾害链的减灾能力。随着复杂网络理论的发展,有学者将复杂网络

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFC3000104);国家自然科学基金项目(52079039);江苏省水利科技项目(2023009)

作者简介:高玉琴(1978—)女,教授,博士,主要从事水资源规划与洪灾风险控制研究。E-mail:yqgao@ hhu. edu. cn

引入到洪涝灾害链演化过程研究和风险评估中,揭示洪涝灾害等复杂系统的内在特性[7]。例如:李磊等[8]在复杂网络视角下建立了雨洪灾害链风险评估模型,基于节点重要度和边脆弱度对灾害链风险进行评估;刘颖颖等[9]分析了郑州"7·20"特大洪涝灾害链,结合复杂网络理论量化了灾害链脆弱性并确定了关键节点路径。当前,多数灾害链风险评估研究从复杂网络角度分析灾害链演化的拓扑结构,对风险的评估主要通过网络进行分析推理[8-9]。也有学者通过构建基于网络的风险动态演化模型[10]、引入动力学变量[11]、知识图谱灾害链推演[12]等方式探索灾害链演化过程中风险的时变特征,其中部分研究结合了数学模型[13]量化灾害链风险水平。目前,洪涝灾害链的研究成果主要集中于理论分析和定性描述层面,尚未形成系统的研究框架,在如何利用数学和物理建模深入分析洪涝灾害链的形成机制以及如何量化评估洪涝灾害链的风险方面仍缺乏有效的研究方法。因此,本文基于复杂网络理论搭建洪涝灾害链演化网络,结合贝叶斯网络和网络传播模型,构建洪涝灾害链风险评估模型,分析风险评估结果,提取洪涝灾害链关键节点和关键传播边,以期为区域防灾减灾提供参考。

1 洪涝灾害风险传递关系分析

通过网络大数据和事件树分析法,对国内外洪涝灾害案例进行归纳梳理,提取洪涝灾害链的节点单元,确定洪涝发生后可能的灾害事件并分析事件间相互作用与演化关系,基于复杂网络搭建洪涝灾害链演化网络,用于后续风险评估。

1.1 洪涝灾害链节点提取

洪涝灾害链是由致灾因子、孕灾环境以及承灾体三要素[14]构成的复杂系统。其中,致灾因子为引发或加剧灾害并造成损失的因素,包括极端气候变化、人类活动等,具有不可预测性和突发性;孕灾环境为地区可能孕育灾害的所有环境条件的总和;承灾体为直接遭受严重损失的个体,包括居民、基础设施等,是致灾因子的作用对象[15-16]。洪涝灾害链系统的表达式为

$$D = \{E, H, S, R\} \tag{1}$$

式中:D 为洪涝灾害链系统;E 为致灾因子;H 为孕灾环境;S 为承灾体;R 为三者复杂耦合作用所形成的灾情反馈。

案例检索是理解灾害事件的关键手段,可为分析洪涝灾害链提供基础。本文利用网络大数据技术,通过网络、报纸、自媒体等多种信息传播渠道,设置"洪涝灾害""洪水""流域洪涝""历史超大洪水"等主题关键词,获取具有广泛影响的特定洪涝灾害案例。经过数据采集、重复数据删除、噪音数据删除及案例核验,最终收集到 2 438 条数据用于后续分析。例如,2020 年长江流域特大洪水,梅雨期持续强降雨,鄱阳湖水位突破历史极值,圩堤出现决口,导致周边多个城市内涝,交通动脉中断,影响了抗洪物资的运输;2021 年河南省发生洪涝灾害,引发河流泛滥和山体滑坡,生态景区不同程度受损,城市内涝积水导致超 50% 的小区地下空间和重要公共设施被淹,多区域出现断电、断水、断网,高速封路,高铁和航班停运。经分析,洪涝灾害防御的对象主要包括基础设施、公共安全、生态环境和社会经济 4 个方面;洪涝灾害链的节点事件存在相继出现或同时出现的现象,各节点单元存在关联;随着洪涝灾害的发生,孕灾环境变化,致灾因子增强,基础设施失效致使承灾体进一步暴露,进而导致次生灾害以及各因素跨系统的耦合灾害,加剧了洪涝灾害所带来的影响。在收集全国范围内历史洪涝灾害案例数据基础上,运用事件树分析法研究洪涝灾害引发的次生灾害[17],得到涵盖自然灾害、事故灾难、公共卫生和社会安全等 4 个方面突发事件的洪涝灾害链节点单元,如表 1 所示。

表 1 洪涝灾害链节点单元

Table 1 Node unite of flood disaster chain

节点编号	节点名称	节点编号	节点名称
V_1	洪涝灾害	V_{15}	矿山事故
V_2	公路事故	V_{16}	地铁事故
V_3	地面塌陷灾害	V_{17}	通信事故
V_4	铁路事故	V_{18}	生态环境破坏事故
V_5	泥石流灾害	V_{19}	水污染事故
V_6	电力事故	V_{20}	植物病虫害
V_7	滑坡灾害	V_{21}	生活必需品市场混乱
V_8	供气事故	V_{22}	爆炸/火灾
V_9	崩塌灾害	V_{23}	传染病疫情
V_{10}	水土流失灾害	V_{24}	动物疫情
V_{11}	供排水事故	V_{25}	土壤污染
V_{12}	建筑安全事故	V_{26}	饮用水安全事件
V_{13}	盐渍化灾害	V_{27}	食物中毒
V_{14}	航运事故	V_{28}	社会治安事件

1.2 洪涝灾害链演化网络搭建

复杂网络是一种由多节点和多条边组成的网络拓扑结构,将真实系统高度抽象化得到具有复杂结构特性的网络,为预防灾害进一步演化提供基础[18]。通过洪涝灾害案例分析,在外界刺激与新危险因素相互作用下,风险事件的链式效应不断被触发,灾害释放的物质、能量和信息以灾变形式传播和演变,形成连续的破坏性事件,如图 1 所示。根据洪涝灾害案例数据分析,选用 Jaccard 指数法量化各节点单元共现频率,节点间共现频率越大,其相互关

联性越密切,计算公式为

$$\alpha_{j\to i}=\frac{C_{ij}}{C_i+C_j-C_{ij}} \tag{2}$$

式中:$\alpha_{j\to i}$ 为节点 i、j 之间的共现频率,当 $\alpha_{j\to i}\geqslant 0.5$ 时,认为两节点间存在邻接关系;C_{ij} 为洪涝灾害案例中节点 i、j 同时发生灾害的频次;C_i 为节点 i 发生灾害的总频次;C_j 为节点 j 发生灾害的总频次。

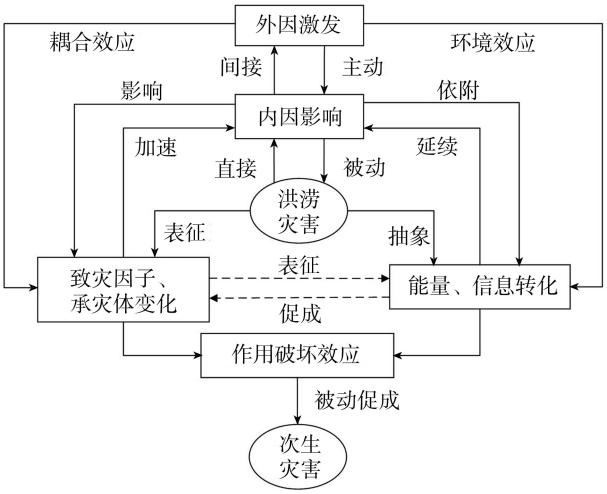


图 1　洪涝灾害链形成机理

Fig. 1　Formation mechanism of flood disaster chain

Cytoscape 软件是一款开源的复杂网络分析工具,可提供网络显示、布局、查询等方面的功能。本文借助 Cytoscape 软件,以洪涝灾害为输入变量、灾害后续时间为输出变量,结合节点有序传递关系,构建洪涝灾害链演化网络拓扑图,如图 2 所示,该图将洪涝灾害链中各节点单元之间的关系用拓扑图谱结构的方式展现,可更直观地了解各节点间的诱发关系。

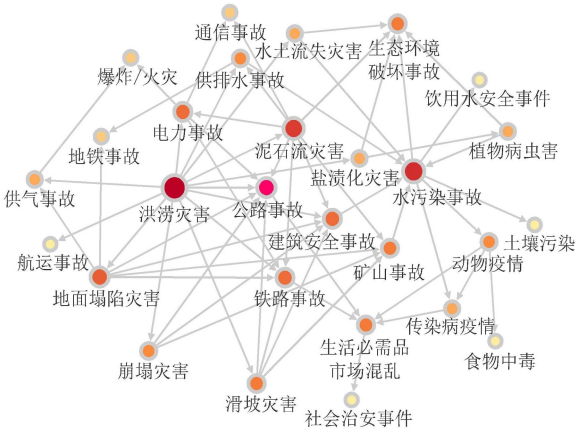


图 2　洪涝灾害链演化网络拓扑图

Fig. 2　Topology diagram of flood disaster chain evolution network

2　洪涝灾害链风险评估模型构建

洪涝灾害风险通常包括致灾因子和孕灾环境的危险性、承灾体的暴露性和脆弱性以及防灾减灾能力[19],其损失是多种因素相互作用的结果[20]。而灾害链视角下各节点单元的发生具有不确定性,加剧了洪涝灾害风险的复杂性,放大了洪涝灾害所造成的社会和经济影响[21]。因此,基于链式风险的概念,将洪涝灾害链风险定义为:在洪涝灾害发生后,灾害链事件在一定概率条件下造成灾害损失并诱发相关连锁反应所导致的系统链式风险。参考 Zhu 等[10]研究中的灾害演化风险组成框架,将灾害链中每个关键节点视作特定灾害事件的风险。节点风险由节点所代表事件的发生可能性与事件造成的后果严重性共同组成,各节点风险以叠加或累积的方式构成整个洪涝灾害链的综合风险。不同流域在不同年份的洪涝特征可能存在差异,因此利用灾害链中的“发生可能性”这一因素对不同区域洪涝特征进行区分,利用“后果严重性”这一因素对不同年份洪涝特征进行区分,确保模型能够对于不同情境进行合理的解释。

2.1　基于贝叶斯网络的节点发生可能性模型

贝叶斯网络常被用于模仿人类在推断因果关系时处理不确定性的方式[22]。贝叶斯网络模型数学表达的核心公式见式(3)。贝叶斯网络中每个节点象征具体的风险事件,所有可以引出指向其他节点的风险节点称为父节点,被引出指向的节点则对应为其子节点;有向边则揭示事件间的相互作用,作用关系通过父节点到子节点的方向性表示,通过条件概率量化变量之间的依存关系,需确定每个父节点与其所有子节点之间可能组合的状态概率值。

$$P(A\mid B)=\frac{P(AB)}{P(B)}=\frac{P(B\mid A)P(A)}{P(B)} \tag{3}$$

式中:$P(A\mid B)$ 为后验概率,即 B 事件发生时 A 事件发生的概率;$P(AB)$ 为 A、B 两个事件共同发生的概率,也称为联合概率;$P(A)$、$P(B)$ 为 A、B 两个事件发生的先验概率;$P(B\mid A)$ 为条件概率,即 A 事件发生时 B 事件发生的概率。

节点先验概率计算基于网络大数据获取历史灾害案例统计资料进行,计算公式见式(4)。根据各节点先验概率,对由单一父节点事件引发单一子节点事件的发生可能性进行计算,计算公式见式(5)。对所有节点发生可能性进行汇总,逐步计算该灾害链中各父节点引发各子节点的概率,以此完成该灾害链发生可能性的计算,计算公式见式(6)。

$$P(x_i\mid x_{pi})=N_i/N_{pi}\quad(i=1,2,\cdots,n) \tag{4}$$

$$P(x_i)=P(x_{pi})P(x_i\mid x_{pi}) \tag{5}$$

$$P(x_1,x_2,\cdots,x_n)=\prod_{i=1}^{n}P(x_i\mid x_{pi}) \tag{6}$$

式中:x_{pi} 为节点 x_i 的父节点;N_{pi} 为父节点事件发

生数量；N_i 为由其父节点导致的节点 x_i 的事件发生数量；n 为洪涝灾害链节点数。

2.2 节点后果严重性网络传播模型

参考邵月洋等[23-24]的研究，将后果严重性定义为：洪涝灾害链网络演化进程中，每单位时间事件所造成的生命财产和经济活动的期望损失值。因此，基于空间信息格网计算洪涝灾害损失，并对其在时间上求导，获得每个计算步长下的后果严重性量化值，计算公式为

$$W_t = \mathrm{d}Q_t/\mathrm{d}t \tag{7}$$

式中：W_t 为节点事件 t 时刻的后果严重性；Q_t 为 t 时刻洪涝灾害经济损失。

灾害链节点事件的后果严重性会随着灾害演化的推进而变化，因此对其进行量化时，父节点与子节点事件间的相互作用关系不可忽略。此外，演化过程中各节点的后果严重性会因链式效应在时间上呈放大效应，其影响和危害逐步被扩大[11]。基于此，借鉴 Chen 等[25]提出的灾害演化系统动力学模型，构建洪涝灾害链节点后果严重性网络传播模型，表达式为

$$W_{tj} = \alpha_{i\to j}\left[\left(\frac{1}{r_{i\to j}} - 1\right)\varepsilon_{i\to j} + 1\right]P_j\beta_{i\to j}W_{ti}(t - t^*_{i\to j}) \tag{8}$$

其中

$$\beta_{i\to j} = \begin{cases} 0 & t - t^*_{i\to j} < 0 \\ 1 & t - t^*_{i\to j} \geqslant 0 \end{cases}$$

$$\varepsilon_{i\to j} = \begin{cases} 0 & \text{无干预力量} \\ 1 & \text{存在干预力量} \end{cases}$$

式中：W_{tj} 为 t 时刻子节点 x_j 的后果严重性；W_{ti} 为 t 时刻父节点 x_i 的后果严重性；$r_{i\to j}$ 为灾害干预能力；$\varepsilon_{i\to j}$ 为判别系数；P_j 为子节点 x_j 处于发生状态的后验概率；$\beta_{i\to j}$ 为时序系数，是一种判断函数，避免当 $t-t^*_{i\to j}<0$ 时洪涝灾害链节点后果严重性无输出结果的情况出现；$t^*_{i\to j}$ 为延时时间，是由父节点 x_i 导致子节点 x_j 演化行为的延时时间。$\alpha_{i\to j}$ 反映了父节点 x_i 对子节点 x_j 的影响度。$r_{i\to j}$ 用于判别父节点 x_i 与子节点 x_j 之间是否存在干预力量，参照赵冬月等[26]的研究，对灾害干预等级进行划分，结果如表 2 所示。为进一步评估洪涝灾害链风险，对后果严重性的计算结果进行标准化处理，将数值标准化至 0~10，计算公式为

$$W^* = \frac{W - W_{\min}}{W_{\max} - W_{\min}} \times 10 \tag{9}$$

式中：W 为洪涝灾害链后果严重性量化值；W^* 为后果严重性标准化值；$W_{\min}$、$W_{\max}$ 分别为后果严重性量化的最小值和最大值。

表 2 干预等级划分结果

Table 2 Result of intervention level classification

干预等级	干预形式	干预能力
无干预	责任部门未做出应对措施，各部门间无协同工作	1.0
弱干预	节点事件即将发生或已经发生，责任部门做出应对措施，但各部门间沟通协作差，管理混乱，未形成有效的救援力量	1.5
强干预	节点事件即将发生，责任部门及时做出应对，各部门间沟通协作良好，可以迅速定位、进行干预并形成有效的救援力量	3.0

2.3 洪涝灾害链风险评估模型

将发生可能性和后果严重性划分为 5 个等级，如表 3 所示。图 3 为洪涝灾害风险矩阵，基于其进行洪涝灾害链节点风险和综合风险的评估。

表 3 发生可能性和后果严重性等级划分

Table 3 Classification of probability and severity of consequences

等级	发生可能性		后果严重性	
	取值范围/%	含义	取值范围	含义
极高	80~00	极有可能发生	8~<10	破坏性大，会造成重大损失，短时间不可控
较高	60~<80	较大可能发生	6~<8	破坏力较大，会造成较大损失且可控性低
中等	30~<60	可能发生	4~<6	破坏性中等，可控性中等，会造成损失
较低	10~<30	较小可能发生	2~<4	破坏性较小，可控性较高，损失较小
极低	0~<10	不太可能发生	0~<2	破坏性极小，完全可控，几乎不造成损失

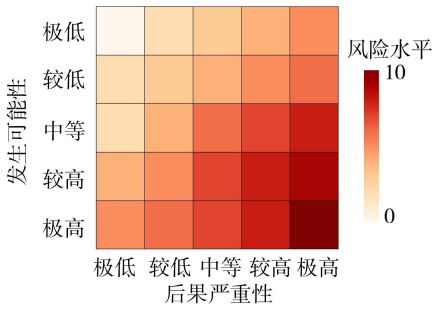


图 3 洪涝灾害链风险矩阵

Fig. 3 Risk matrix of flood disaster chain

根据节点事件某时刻对应发生可能性和后果严重性的等级确定节点风险水平，进而计算各节点风险水平量化值，计算公式为

$$R = R_{\min} + \frac{(W' - W'_{\min})(P - P_{\min})}{(W'_{\max} - W'_{\min})(P_{\max} - P_{\min})}(R_{\max} - R_{\min}) \tag{10}$$

式中：R 为节点风险水平量化值；$R_{\min}$、$R_{\max}$ 分别为某一风险等级区间的最小值和最大值；W'为节点后果

严重性量化值；W'_{min}、W'_{max} 分别为某一后果严重程度等级区间的最小值和最大值；P 为节点发生可能性量化值；P_{min}、P_{max} 分别为某一发生可能性等级区间的最小值和最大值。

洪涝灾害链综合风险是指由洪涝灾害作为原生灾害引发灾害链演化网络的系统综合风险，由多个子风险累积构成。基于计算所得每个步长下的节点风险水平，计算洪涝灾害链综合风险，计算公式为

$$R_t^* = \sum_{i=1}^{n} R_{ti} \tag{11}$$

式中：R_t^* 为 t 时刻洪涝灾害链综合风险水平；R_{ti} 为 t 时刻 x_i 节点的风险水平。

3 实例应用

3.1 研究区概况

秦淮河流域属长江干流水系，位于江苏省西南部，流经镇江市、句容市和南京市的大部分地区。秦淮河流域四季分明，温和湿润，属亚热带季风气候区，地貌以丘陵、岗地为主，中间地势低平，呈蒲扇形，流域性洪涝时常发生。根据水文年鉴资料，秦淮河流域 2016 年发生的洪水是由持续强降雨与长江潮水位共同作用下产生，年降水量较多年平均降水量偏多 75%，秦淮河水倒灌，流域内涝严重，导致流域内发生道路积水封闭、水污染、居民区断电，流域内省道发生泥石流等一系列次生灾害，全流域受灾情况严重。因此选取秦淮河流域 2016 年洪水作为洪涝灾害链风险评估实例。

3.2 洪涝灾害链节点发生可能性评估

根据构建的基于贝叶斯网络的节点发生可能性模型，以洪涝灾害链演化子网络为例，说明贝叶斯网络节点条件概率的计算过程。图 4 为洪涝灾害链演化子网络条件概率分布示意图，其中节点 A、B、C、D、E 分别代表洪涝灾害、公路事故、建筑安全事故、生活必需品市场混乱以及水污染事故。对贝叶斯网络中的节点取值变量进行离散化处理，其中节点被建模为二元变量，即处于节点发生状态（是）或未发生状态（否），贝叶斯网络中各个节点与其父节点间的依赖关系，反映各节点在其父节点不同状态时对应的条件概率分布情况。由图 4 可见，节点 A、B 无父节点，发生概率不依赖于其他节点的状态，而节点 C、D、E 的概率则取决于其他节点。节点 C 的父节点为节点 A、B，当 A、B 分别处于不同状态时，节点 C 处于发生状态的概率可分为 4 种情形 C1、C2、C3、C4，节点 D、E 的概率情况同理可得。

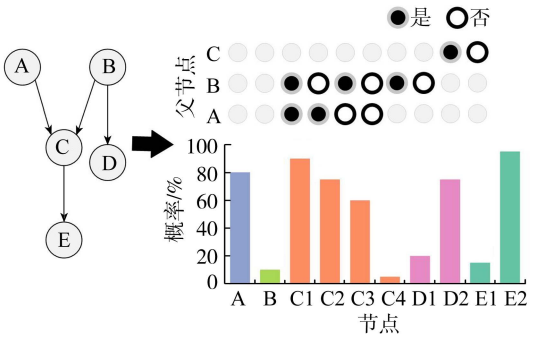


图 4 洪涝灾害链演化子网络条件概率分布示意图

Fig. 4 Schematic diagram of conditional probability distribution of sub network of flood disaster chain evolution

基于网络大数据获取秦淮河流域历史灾害案例统计资料，并结合《中国气象灾害大典》（江苏卷）中暴雨洪涝部分内容，统计历年强降雨作用下各类典型次生灾害事件的发生次数，计算“洪涝灾害”节点 V_1 完全处于发生状态（是）时，每个节点在贝叶斯网络中的发生可能性，结果如图 5 所示，图中数字代表各灾害事件发生状态为是或否的概率。

3.3 洪涝灾害链节点后果严重性评估

基于 Gao 等[27]的研究，收集秦淮河流域农业产值、固定资产等社会经济数据，建立洪涝灾害损失评估模型，基于空间信息格网计算洪涝灾害动态损失，结果如图 6 所示。根据计算得到的秦淮河流域洪涝灾害总损失在每个时间步长下的变化值，求得每个时刻的后果严重性值并开展分析。图 7 为秦淮河流域洪涝灾害后果严重性变化过程，可见在洪涝淹没模拟过程中，洪涝灾害后果严重性呈先升高后降低，再升高再降低的趋势。通过后果严重性网络传播模型，求得各节点后果严重性量化值。将灾情设定为发现并确认洪涝灾害已发生情况下，即父灾害节点对子灾害节点之间不存在干预力量，灾害干预能力 r 的判别系数为 0。

3.4 洪涝灾害链风险评估

根据节点发生可能性和后果严重性的等级划分，通过风险矩阵找到节点风险对应的数值区间，量化风险水平，进而求得实例洪涝灾害链综合风险水平，结果如图 8 所示。由图 8 可见，实例洪涝模拟开始后综合风险水平不断增大，直到 103 h 左右达到综合风险的极大值，之后呈下降趋势，约 173 h 达第二峰值，随后下降速率显著变缓。对比洪涝原生灾害风险随时间的变化情况，考虑洪涝灾害链的系统综合风险峰值约为原生洪涝灾害的 7 倍，达到峰值的时刻有所滞后，而高风险时段的持续时间更长，这是由于灾害链系统风险由多个节点风险累积叠加构成，且节点间存在风险传递关系。同时，多数节点的风险水平在洪涝灾害的演化过程中呈现先升高后降低的趋势，部分节点甚至出现多个风险峰值。例如：

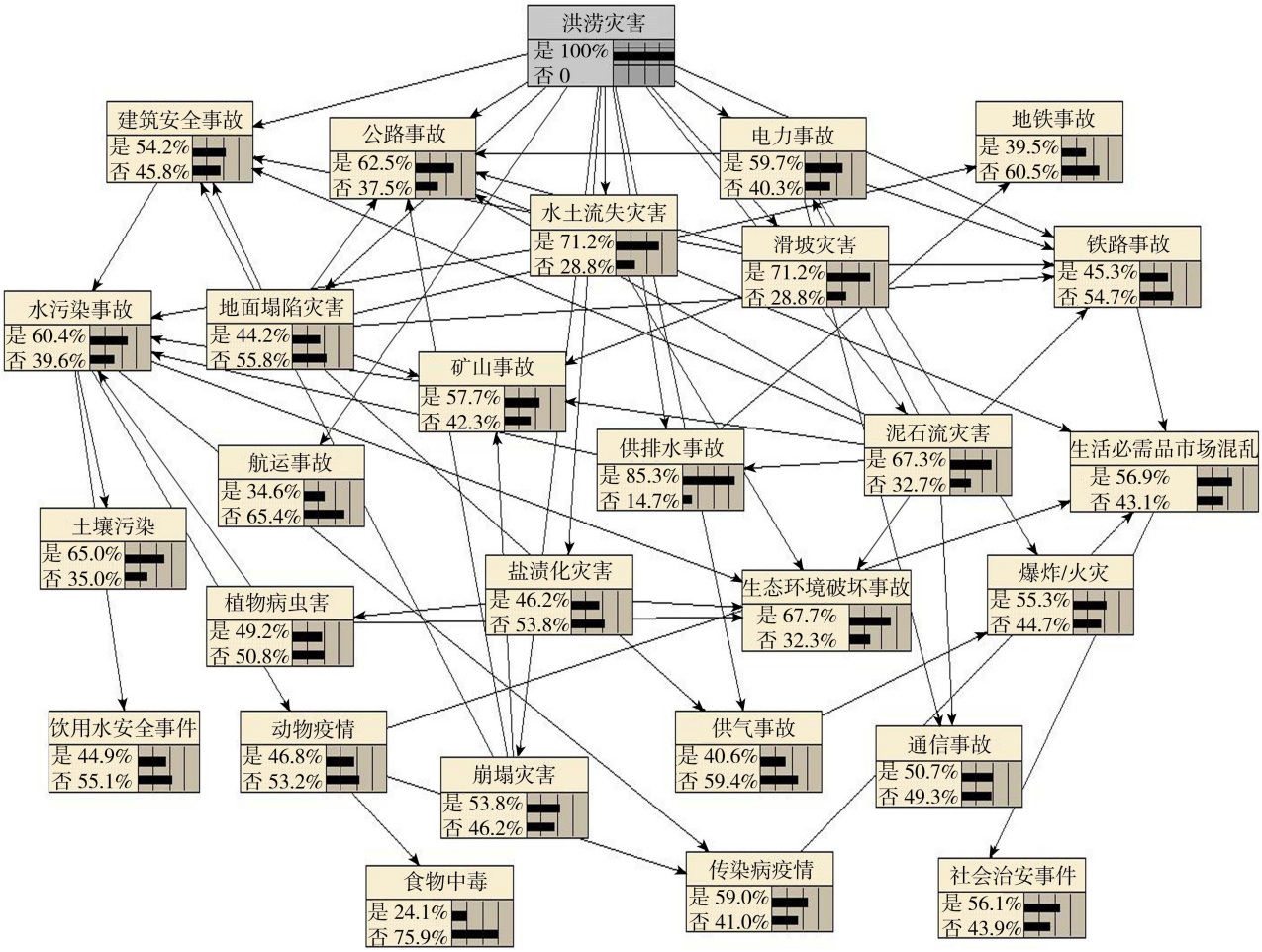


图 5　秦淮河流域洪涝灾害链贝叶斯网络图

Fig. 5　Bayesian network diagram of example flood disaster chain in the Qinhuai River Basin

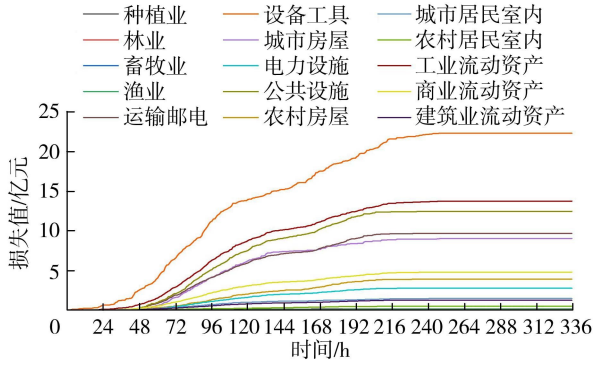


图 6　秦淮河流域洪涝损失动态变化曲线

Fig. 6　Dynamic change curves of example flood loss in the Qinhuai River Basin

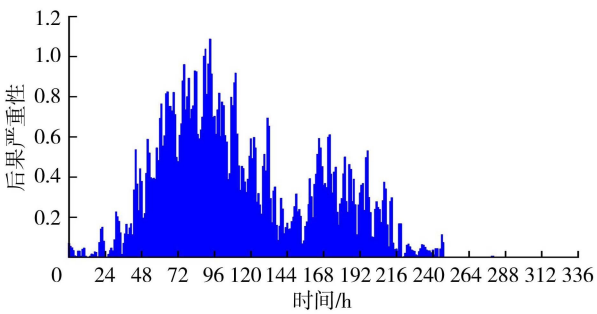


图 7　秦淮河流域洪涝灾害后果严重性变化过程

Fig. 7　Change process of consequence severity of example flood disaster in the Qinhuai River Basin

节点 V_2 在洪涝模拟开始后风险水平呈上升趋势，约 99 h 达第一峰值 8.125，随即风险水平呈下降趋势，约 149 h 再次出现上升，约 178 h 达第二峰值 4.087。除节点 V_2 外，V_{11}、V_{18}、V_{19} 等节点风险水平也出现反复升降的情况，一方面由于这些节点受到多个父节点的影响，另一方面则由于不同父节点对子节点造成的影响存在延迟效应。

根据洪涝灾害节点风险量化值对洪涝灾害链节点风险水平进行等级划分，包括极低（<2）、较低（2~<4）、中等（4~<6）、较高（6~<8）、极高（8~10）5 个等级。统计各节点风险处于中、高风险等级的时长分布情况，即节点风险 $R_i \geqslant 4$ 的持续时间。洪涝灾害链节点 V_2、V_5、V_7、V_{10}、V_{11}、V_{12}、V_{18}、V_{19} 都存在处于中等及以上风险等级的时段，说明这些节点在洪涝灾害链演化网络中起到了相对重要的作用，其中节点 V_2、V_{11}、V_{18}、V_{19} 部分时段处于较高、极高风险状态，说明这些节点单元在洪涝灾害链演化网

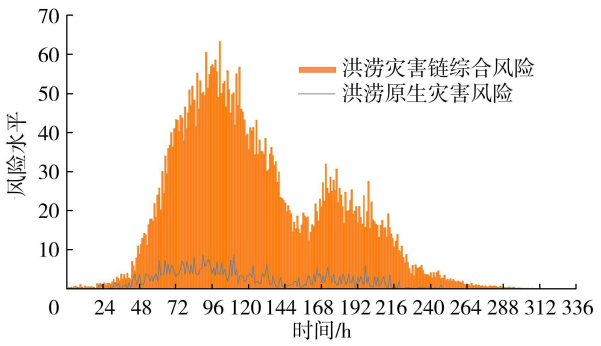


图 8　秦淮河流域洪涝灾害链综合风险

Fig. 8　Comprehensive risk of example flood disaster chain in the Qinhuai River Basin

络中风险表现较明显,在洪涝灾害中应作为重点防治节点。将存在较高、极高风险状态的节点单元作为关键节点,寻找与其关的连接边,进行洪涝灾害链演化网络的关键传播边提取,结果如表 4 所示,相关政府部门应重点关注,加强其灾害干预能力,通过降低或阻断链式效应减灾降损。

表 4　关键灾害传播链条

Table 4　Key chains of disaster transmission

灾害链条	中等、较高及极高风险状态总时长/h
洪涝灾害→水土流失灾害→水污染事故→生态环境破坏事故	183
洪涝灾害→泥石流灾害→供排水事故→水污染事故→土壤污染	139
洪涝灾害→电力事故→公路事故→生活必需品市场混乱	127
洪涝灾害→滑坡灾害→建筑安全事故→水污染事故→土壤污染	109

4　结　论

a. 基于灾害风险和链式风险的视角,将洪涝灾害链风险定义为:在洪涝灾害发生后,灾害链事件在一定概率条件下造成灾害损失并诱发相关连锁反应所导致的系统综合风险。将灾害链中的每个关键节点视作特定灾害事件的风险,节点风险由所代表事件的发生可能性与该事件后果严重性组成,洪涝灾害链综合风险由节点风险累积或叠加构成。

b. 秦淮河流域“2016 · 7”洪涝灾害链的综合风险水平在模拟开始后不断增大,约 103 h 达到峰值,之后风险呈下降趋势,约 173 h 达第二峰值;洪涝灾害链综合风险峰值约为原生洪涝风险峰值的 7 倍,达峰时刻略有滞后,高风险时段持续时间更长。多数节点的风险水平在洪涝灾害的演化过程中呈现先升高后降低的趋势;部分节点出现多个风险峰值,与父节点数量和延时效应有关。

c. 根据各节点风险处于中、高等级风险状态的时长分布情况,提取出秦淮河流域“2016 · 7”洪涝灾害链 4 条关键传播边:①洪涝灾害→水土流失灾害→水污染事故→生态环境破坏事故;②洪涝灾害→泥石流灾害→供排水事故→水污染事故→土壤污染;③洪涝灾害→电力事故→公路事故→生活必需品市场混乱;④洪涝灾害→滑坡灾害→建筑安全事故→水污染事故→土壤污染。通过对关键节点加强监测应对,对关键链条进行阻截断链,可有效减灾降损。

参考文献:

[1] 张金良,罗秋实,王冰洁,等. 城市极端暴雨洪涝灾害成因及对策研究进展[J]. 水资源保护,2024,40(1):6-15. (ZHANG Jinliang,LUO Qiushi,WANG Bingjie,et al. Research progress on causes and countermeasures for extreme rainstorm-induced urban flood disasters [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(1): 6-15. (in Chinese))

[2] 刘永志,唐雯雯,张文婷,等. 基于灾害链的洪涝灾害风险分析综述[J]. 水资源保护,2021,37(1):20-27. (LIU Yongzhi,TANG Wenwen,ZHANG Wenting,et al. Review of flood disaster risk analysis based on disaster chain[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1): 20-27. (in Chinese))

[3] 张楚汉,王光谦,李铁键. 变化环境下城市暴雨致灾防御对策与建议[J]. 中国科学院院刊,2022,37(8):1126-1131. (ZHANG Chuhan, WANG Guangqian, LI Tiejian. Prevention countermeasures and suggestions for urban rainstorm disasters under changing environment [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(8):1126-1131. (in Chinese))

[4] WANG Qiyuan, HOU Jundong. Hazard assessment of rainstorm-geohazard disaster chain based on multiple scenarios[J]. Natural Hazards,2023,118(1):589-610.

[5] METIN A D, DUNG N V, SCHRÖTER K, et al. How do changes along the risk chain affect flood risk? [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2018, 18(11):3089-3108.

[6] 王婷,吴绍洪,高江波,等. 区域台风-洪涝-地质灾害链减灾能力评估[J]. 灾害学, 2022, 37(4): 193-200. (WANG Ting,WU Shaohong,GAO Jiangbo,et al. Coping capacity assessment of regional typhoon-flood-geological disaster chain [J]. Journal of Catastrophology, 2022, 37(4):193-200. (in Chinese))

[7] 周建林,樊瑛,狄增如. 复杂网络进展[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2023,59(5):691-704. (ZHOU Jianlin, FAN Ying, DI Zengru. Progress in complex networks [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science),2023,59(5):691-704. (in Chinese))

[8] 李磊,马梦格,折亚亚,等. 复杂网络下雨洪灾害链风险分析及断链减灾研究[J]. 中国安全科学学报,2023,33(12):192-197. (LI Lei, MA Mengge, SHE Yaya, et al.

Risk analysis of rainstorm flood disaster chain and research on disaster mitigation of broken chain under complex network[J]. China Safety Science Journal,2023,33(12):192-197. (in Chinese))

[9] 刘颖颖,李经纬,陈睿山,等. 基于复杂网络的郑州市特大暴雨洪涝灾害链研究[J]. 灾害学,2024,39(2):227-234. (LIU Yingying, LI Jingwei, CHEN Ruishan, et al. Analyzing the flood disaster chain in Zhengzhou City based on complex network[J]. Journal of Catastrophology,2024,39(2):227-234. (in Chinese))

[10] ZHU Guangyu, SUN Ranran, FAN Jiaxin, et al. Coupling effect and chain evolution of urban rail transit emergencies [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems,2024,25(1):1044-1053.

[11] 赵冬月,陈长坤,易亮. 灾害演化网络时序性风险评估模型[J]. 中国安全科学学报,2021,31(3):171-177. (ZHAO Dongyue,CHEN Changkun,YI Liang. Time-series risk assessment model for disaster evolution network[J]. China Safety Science Journal,2021,31(3):171-177. (in Chinese))

[12] 王浩,杜伟,刘家宏,等. 基于知识图谱的城市洪涝灾害链推演及时空特性解析[J]. 水科学进展,2024,35(2):185-196. (WANG Hao,DU Wei,LIU Jiahong,et al. Derivation and transmission analysis of urban flood disaster chain based on knowledge graph[J]. Advances in Water Science,2024,35(2):185-196. (in Chinese))

[13] 陈长坤,谢明峰,赵冬月. 基于风险矩阵的灾害演化网络定量分析方法[J]. 灾害学,2022,37(1):13-17. (CHEN Changkun, XIE Mingfeng, ZHAO Dongyue. Research on quantitative analysis method of disaster evolution network based on risk matrix[J]. Journal of Catastrophology,2022,37(1):13-17. (in Chinese))

[14] 刘家宏,梅超,刘宏伟,等. 特大城市外洪内涝灾害链联防联控关键科学技术问题[J]. 水科学进展,2023,34(2):172-181. (LIU Jiahong,MEI Chao,LIU Hongwei,et al. Key scientific and technological issues of joint prevention and control of river flood and urban waterlogging disaster chain in megacities[J]. Advances in Water Science,2023,34(2):172-181. (in Chinese))

[15] 姚蕊,杨群涛,张书亮. 城市暴雨内涝灾害脆弱性研究综述[J]. 水资源保护,2023,39(1):93-100. (YAO Rui, YANG Quntao, ZHANG Shuliang. Review on vulnerability of urban rainstorm waterlogging disaster[J]. Water Resources Protection,2023,39(1):93-100. (in Chinese))

[16] 季孔阳,李学明,高见,等. 城市暴雨洪涝灾害脆弱性评价[J]. 水利水电科技进展,2024,44(3):13-20. (JI Kongyang, LI Xueming, GAO Jian, et al. Assessment of urban vulnerability to heavy rain and flood disasters[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2024,44(3):13-20. (in Chinese))

[17] 吴双阳. 基于复杂网络的暴雨灾害链时序性风险评估研究[D]. 北京:北方工业大学,2022.

[18] 汪小帆,李翔,陈关荣. 复杂网络理论及其应用[M]. 北京:清华大学出版社,2006.

[19] 郑德凤,高敏,李钰,等. 基于 GIS 的大连市暴雨洪涝灾害综合风险评估[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(3):1-8. (ZHENG Defeng,GAO Min,LI Yu,et al. Comprehensive risk assessment of rainstorm-flood disaster in Dalian City based on GIS[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(3): 1-8. (in Chinese))

[20] 王小杰,夏军强,李启杰,等. 长江中下游地区洪灾损失率函数构建及洪涝灾害损失评估[J]. 水资源保护,2023,39(5):88-98. (WANG Xiaojie, XIA Junqiang, LI Qijie, et al. Construction of flood loss rate function and flood loss assessment in middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. Water Resources Protection,2023,39(5):88-98. (in Chinese))

[21] 刘高峰,王慧敏,黄晶,等. 洪涝灾害诱发的城市系统性风险管理[J]. 复杂科学管理,2023(1):65-74. (LIU Gaofeng, WANG Huimin, HUANG Jing, et al. Systemic risk management of urban areas induced by flood disasters [J]. Complex Scientific Management, 2023(1): 65-74. (in Chinese))

[22] 张超,翁文国,陈勇,等. 基于贝叶斯网络的地铁暴雨内涝风险预警模型及协同响应机制研究[J]. 中国安全生产科学技术,2023,19(12):179-186. (ZHANG Chao, WENG Wenguo, CHEN Yong, et al. Research on risk warning model and collaborative response mechanism of subway rainstorm waterlogging based on Bayesian network [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2023, 19(12):179-186. (in Chinese))

[23] 邵月洋. 天津生态城城市生产安全风险评估及动态管控研究[D]. 天津:天津大学,2019.

[24] 马聪. 基于变形的高土石坝地震易损性分析及抗震安全风险评估研究[D]. 郑州:华北水利水电大学,2023.

[25] CHEN Changkun, LI Zhi, SUN Yunfeng. A new model for describing evolution and control of disaster system including instantaneous and continuous actions [J]. International Journal of Modern Physics C, 2010, 21(3): 307-332.

[26] 赵冬月,施波,陈以琴,等. 协同管理对城市韧性增强机制的影响[J]. 管理评论,2016,28(8):207-214. (ZHAO Dongyue, SHI Bo, CHEN Yiqin, et al. Effect of collaborative management on enhancement mechanism of urban resilience[J]. Management Review, 2016, 28(8): 207-214. (in Chinese))

[27] GAO Yuqin, LIU Yunping, GAO Li, et al. Change of stream network connectivity under polder-type flood control measure [J]. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 2023, 59(4): 701-725.

(收稿日期:2024-07-10　编辑:王芳)

DOI:10. 3880/j. issn. 1004 - 6933. 2025. 02. 014

基于多重精度降雨数据的北京市极端降雨事件研究

张 伟[1,2,3],王 璇[1],孙慧超[1],李俊奇[1,2,3]

(1. 北京建筑大学北京市可持续城市排水系统构建与风险控制工程技术研究中心,北京 100044;
2. 北京建筑大学城市雨水系统与水环境教育部重点实验室,北京 100044;
3. 北京建筑大学北京节能减排与城乡可持续发展省部共建协同创新中心,北京 100044)

摘要:基于北京基本站 1987—2016 年逐分钟精度降雨数据,利用 Kruskal-Wallis 检验对 1 min、1 h、3 h、6 h 等不同精度数据获取的极端降雨事件样本进行统计分析,比较短历时极端降雨(SEP)、长历时极端降雨(LEP)、持续性极端降雨(PEP)3 类极端降雨事件降雨特征指标的差异,并利用 Sen's 斜率、Mann-Kendall 检验、有序聚类等方法探究了极端降雨事件的时间变化规律。结果表明:北京市极端降雨以 LEP 事件为主,降雨数据精度会显著影响降水量和降雨历时的统计结果,1 h 精度降雨数据可基本反映极端降雨事件的主要时间特征;数据精度差异会造成极端降雨事件的降雨集中度和降雨集中期识别出现偏差,北京市极端降雨多分布于 6—10 月,并主要集中在 7—8 月,但 9—10 月仍存在 PEP 事件出现的可能;SEP 和 LEP 事件多出现在夜间,而 PEP 事件在 7—12 时更易形成降雨峰值,对居民紧急避险和内涝应急响应造成更高潜在风险;在统计年限内,数据精度差异对降水量和降雨频率趋势预测结果的影响并不显著,但会使得降雨历时预测不确定性增加,降雨特征指标突变年份产生"跳跃";PEP 事件的降水量、降雨频率、降雨历时和降雨集中度受数据精度影响较小。

关键词:极端降雨事件;多重精度降雨数据;Kruskal-Wallis 检验;Sen's 斜率法;Mann-Kendall 检验;有序聚类法;北京市

中图分类号:TV213. 4 **文献标志码**:A **文章编号**:1004 - 6933(2025)02 - 0123 - 10

Research on extreme precipitation events in Beijing based on multi-resolution rainfall data//ZHANG Wei[1,2,3], WANG Xuan[1], SUN Huichao[1], LI Junqi[1,2,3](1. *Beijing Engineering Research Center of Sustainable Urban Sewage System Construction and Risk Control, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing* 100044, *China*; 2. *Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment, Ministry of Education, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing* 100044, *China*; 3. *Beijing Energy Conservation & Sustainable Urban and Rural Development Provincial and Ministry Co-construction Collaboration Innovation Center, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing* 100044, *China*)

Abstract: Based on the minute resolution rainfall data of Beijing basic station from 1987 to 2016, Kruskal-Wallis test was used to statistically analyze extreme precipitation event samples obtained from multi-resolution data such as 1 min, 1 h, 3 h, and 6 h. The differences in rainfall characteristic indicators of three types of extreme precipitation events, including short extreme precipitation (SEP), long extreme precipitation (LEP), and persistent extreme precipitation (PEP) were compared, and the temporal variation patterns of extreme precipitation events using methods such as Sen's slope, Mann-Kendall test, and ordered clustering were explored. The results show that extreme precipitation in Beijing is mainly caused by LEP events, and the resolution of rainfall data significantly affects the statistical results of precipitation amount and duration. The rainfall data of 1 h resolution can basically reflect the main time characteristics of extreme precipitation events. Differences in data resolution can cause deviations in the identification of rainfall concentration and rainfall concentration periods for extreme precipitation events. Extreme precipitation in Beijing is mostly distributed from June to October, and mainly concentrated in July and August, but there is still a possibility of PEP events occurring in September and October. SEP and LEP events often occur at night, while PEP events are more likely to form rainfall peaks from 7:00 to 12:00, posing higher potential risks to residents' emergency shelter and waterlogging emergency response. Within the statistical period, the difference in data resolution does not have a significant impact on the prediction results of

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC3800500);泸州市海绵城市科研课题项目(N5105012022000106);北京市属高等学校高水平科研创新团队建设支持计划项目(BPHR20220108);北京建筑大学培育项目专项资金项目(X23047)

作者简介:张伟(1984—),男,副教授,博士,主要从事海绵城市与内涝治理研究。E-mail:zhangwei@ bucea. edu. cn

precipitation amount and frequency trends, but it will increase the uncertainty of rainfall duration prediction and cause a "jump" in the year of sudden changes in rainfall characteristic indicators. The precipitation amount, frequency, duration, and concentration of PEP events are less affected by data resolution.

Key words: extreme precipitation event; multi-resolution rainfall data; Kruskal-Wallis test; Sen's slope method; Mann-Kendall test; ordered clustering method; Beijing

气候变化和城市快速发展可能导致城市降雨结构显著改变[1-2],极端降雨的影响更为显著[3]。政府间气候变化专门委员会第六次评估报告重点阐述了极端气候及相关问题,并首次全面对极端气候事件变化特征进行系统评估[4]。极端降雨引发的洪涝灾害给居民生命健康和财产安全带来巨大威胁[5]。对极端降雨特征及其规律的掌握是城市排水防涝工作的首要条件,已成为国内外学者重点关注的热点方向。极端降雨通常指大幅超过历史平均降雨强度或预期降雨强度的降雨过程,不同专业领域对其概念存在不同理解,其定义方法也尚未形成统一标准。极端降雨特征研究大多采用单日[6]或多日[7]等固定持续时间内降水量级定义极端降雨事件,而降雨事件的历时并非以 24 h 为单位[8],日尺度研究很难准确描述实际降雨过程,如两场短历时降雨事件可能在日尺度分析时被人为合并为一场极端降雨事件[9]。降雨数据具有较高的时间变异性,在时间上呈现不稳定波动[10]。因此,作为极端降雨的重要特征,时间分布受到广泛关注。Han 等[11]研究发现降雨的时间分布总体呈现中等不均匀性,并推测极端降雨事件分布可能呈现更高的不均匀性。汪成博等[12]利用极端降雨集中度和极端降雨集中期分析了汉江流域极端降雨变化特征,发现其在旬、月、季等不同时间尺度下均呈现显著的变异性。此外,不同持续时间降雨事件在场次内的昼夜分布同样存在明显差异。Deng 等[13]研究发现京津冀地区长历时强降雨事件(持续时间大于 6 h)主要出现在 0—6 时,而短历时强降雨事件(持续时间为 1~<6 h)主要出现在 18—24 时,且峰值时间更加集中。

通常情况下,降水量并非呈现正态分布,而广义帕累托分布、P-Ⅲ型分布、Gumbel 分布、广义极值分布等形式能更好地体现降水量的实际分布特征[14-17],但传统的参数检验方法不能真实地反映极端降雨变化规律,非参数检验方法在降雨特征统计分析中体现出更好的适用性。Santos 等[18]利用 Mann-Kendal(M-K)检验和 Sen's 斜率法分析发现,葡萄牙马德拉岛降水量呈显著减少趋势。Jiang 等[19]通过 M-K 检验识别出新疆维吾尔自治区年极端降水量的突变年份。然而 M-K 检验识别的突变结果在置信区间内的杂点会干扰突变点识别,相比而言,有序聚类分析结果通常更易辨识,其离差平方和最小点对突变年份识别具有较高参考意义。降雨存在时序分布不均匀、高变异性特征,但特征描述与数据精度密切相关。高精度降雨数据有助于准确反映降雨过程,但限于数据获取条件,目前多数研究通常是以 1 h[20]、6 h[21]等亚日精度降雨数据开展,鲜有降雨数据精度对极端降雨特征影响的研究报道。

因此,本文选取北京基本站 1987—2016 年逐分钟精度降雨数据,比较数据精度对极端降水事件识别的影响,分析提出极端降雨定义和特征分析的适宜数据精度,明晰城市极端降雨的时间特征、变化趋势和变异特征,以期为城市有效应对极端降雨事件带来的内涝积水问题提供参考。

1 研究方法

1.1 极端降雨事件划分

北京市地处华北平原北部,中心位于北纬 39°56′、东经 116°20′,行政区域内包含 20 个国家级地面气象观测站(图 1)。本文基于经过质量控制的典型气象站北京基本站(区站号 54511)1987—2016 年逐分钟精度降雨数据开展研究。

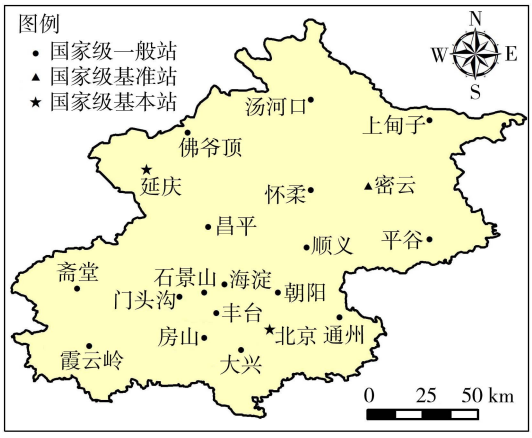


图 1 北京市国家级气象观测站分布

Fig. 1 Spatial distribution of national meteorological observation stations in Beijing

对 1 min 精度降雨数据进行升尺度处理得到 1 h、3 h、6 h、1 d 4 种精度的降雨数据,以降雨强度大于 0.1 mm/min 作为降雨事件开始的标准,以连续 2 h 内降雨强度均小于 0.1 mm/min 作为降雨事件结束标准,进行独立降水事件划分[22],获得不同精度降雨时间序列下的常规降雨事件,分别用 P_{1m}、P_{1h}、P_{3h}、P_{6h}、P_{1d} 表示(图 2)。采用第 95% 百分位阈值

方法[23]划分极端降雨(extreme precipitation,EP)事件,不同精度数据划分的极端降雨事件分别用 EP_{1m}、EP_{1h}、EP_{3h}、EP_{6h}、EP_{1d} 表示。进而基于极端降雨事件的历时,将其进一步划分,降雨历时>0~6 h 的为短历时极端降雨(short extreme precipitation,SEP)、降雨历时>6~24 h 的为长历时极端降雨(long extreme precipitation,LEP)、降雨历时大于 24 h 的为持续性极端降雨(persistent extreme precipitation,PEP)。以 1 min 精度的 P_{1m} 和 EP_{1m} 作为实际值参考,进行后续不同精度下降雨事件和极端降雨特征差异比较。

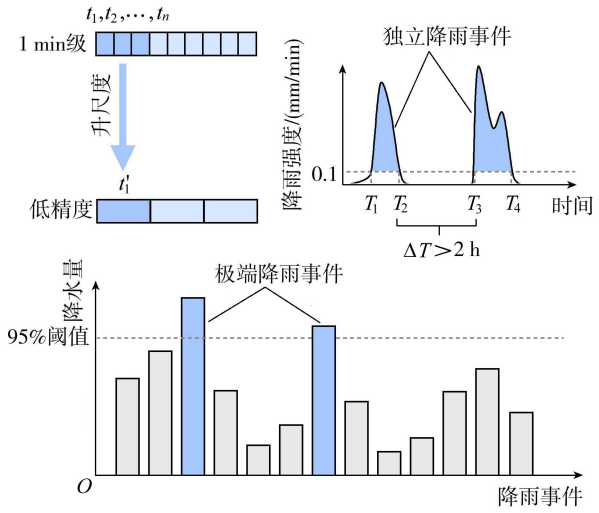


图 2　极端降雨事件划分示意图

Fig. 2　Schematic diagram of division of extreme precipitation events

1.2　极端降雨特征指标

采用降水量 P_A、降雨频率 P_F、降雨历时 P_D、峰值时间 P_T、降雨集中度 P_{CD}、降雨集中期 P_{CP} 6 项指标研究极端降雨事件特征。其中,P_A 指单场降雨事件的降水量;P_F 指降雨事件按降水量从小到大顺序排列,所在序列中对应的经验频率;P_D 指一场降雨从开始到结束的持续时间;P_T 指一场降雨强度达到最大值时对应的时间;P_{CD} 和 P_{CP} 利用向量原理定量描述降雨的时间分配特征,可以反映降雨序列在年内分布的不均匀程度,其中 P_{CD} 可将降雨在年内的集中程度量化呈现,P_{CP} 则可反映降雨的集中时期。对于长度为 n 年的降雨序列,其计算公式为

$$P_{CD}=\sqrt{(R_{xt}^2+R_{yt}^2)}/R_t \quad (t=1,2,\cdots,n) \tag{1}$$

$$P_{CP}=\arctan(R_{yt}/R_{xt}) \tag{2}$$

其中　$R_{yt}=\sum_{i=1}^{12} r_{ti}\sin\theta_i$　$R_{xt}=\sum_{i=1}^{12} r_{ti}\cos\theta_i$

式中:R_{xt}、R_{yt} 分别为第 t 年 x 方向和 y 方向的降水量;R_t 为第 t 年总降水量;r_{ti} 为第 t 年第 i 月的降水量;θ_i 为第 i 月的方位角,即将一年分为 360°时每个月所代表的角度,1 月对应 0°,其他各月逐月递增 30°。P_{CD} 的取值范围为 0~1,无量纲。数值越接近 0 则分布越均匀,越接近 1 则分布越集中。P_{CP} 为 R_{xt} 和 R_{yt} 合成向量的方位角,取值范围为 0°~360°。

1.3　降雨样本差异检验

利用非参数检验方法 Kruskal-Wallis(K-W)检验[24]评价极端降雨场次划分结果的差异,其原理是将多组样本的所有观测值合并成 1 个组合样本,将观测值从小到大排序,给每个观测值赋予秩序,分别计算各组秩和,从而计算统计量 H 值,计算公式为

$$H=12/[N(N+1)]\sum_{i=1}^{k}(C_i^2/n_i)-3(N+1) \tag{3}$$

式中:k 为样本组数;N 为各组样本数之和;n_i 为第 i 组的样本量;C_i 为第 i 组的秩和。

根据样本量和显著性水平 α(一般为 0.05)确定临界值 H_0。若 $H\geqslant H_0$,则拒绝原假设,即说明各组分布不完全相同,各组样本间在置信水平 α 下存在显著性差异;若 $H<H_0$,则不拒绝原假设。

1.4　时间序列变化趋势检验

a. Sen's 斜率法。其原理基于 Kendall 秩相关检验,定量估计变量线性变化趋势[25],常与 M-K 检验联用[26]。该方法不易受异常点影响,对变量分布形态不敏感。Sen's 斜率值按序列任意两点斜率中位数的估计值计算,结果为正时,序列呈上升趋势,结果为负时,序列则呈下降趋势。

b. M-K 检验。其为基于秩的非参数检验方法,广泛应用于水文时间序列趋势分析,适合非正态数据分析,且不易受序列异常值影响[27]。对统计量进行标准化得到检验统计量 Z 值,采用双侧检验,对于置信水平 α,若 $|Z|>Z_{1-\alpha/2}$,则拒绝原假设,即序列在 α 的置信水平上具有显著变化趋势。

c. 有序聚类法。其是水文气象序列突变性诊断的一种非参数检验方法[28],通过计算最优分割点,使同类间离差平方和最小化,不同类间离差平方和最大化。当总离差平方和最小时,对应的分割点为最可能的突变点。

2　结果与分析

2.1　数据精度对极端降雨事件样本统计的影响

降雨数据是降雨规律研究的基础,数据精度可能会对降雨事件样本统计结果造成影响。图 3 为 1987—2016 年北京市不同精度的降雨数据统计出的常规降雨事件与极端降雨事件样本分布。由图 3 可见,各精度降雨事件样本年际变化均表现出不规则波动,高精度降雨事件样本在年内分布中表现得更为集中,而低精度样本在年内呈现更显著的分散

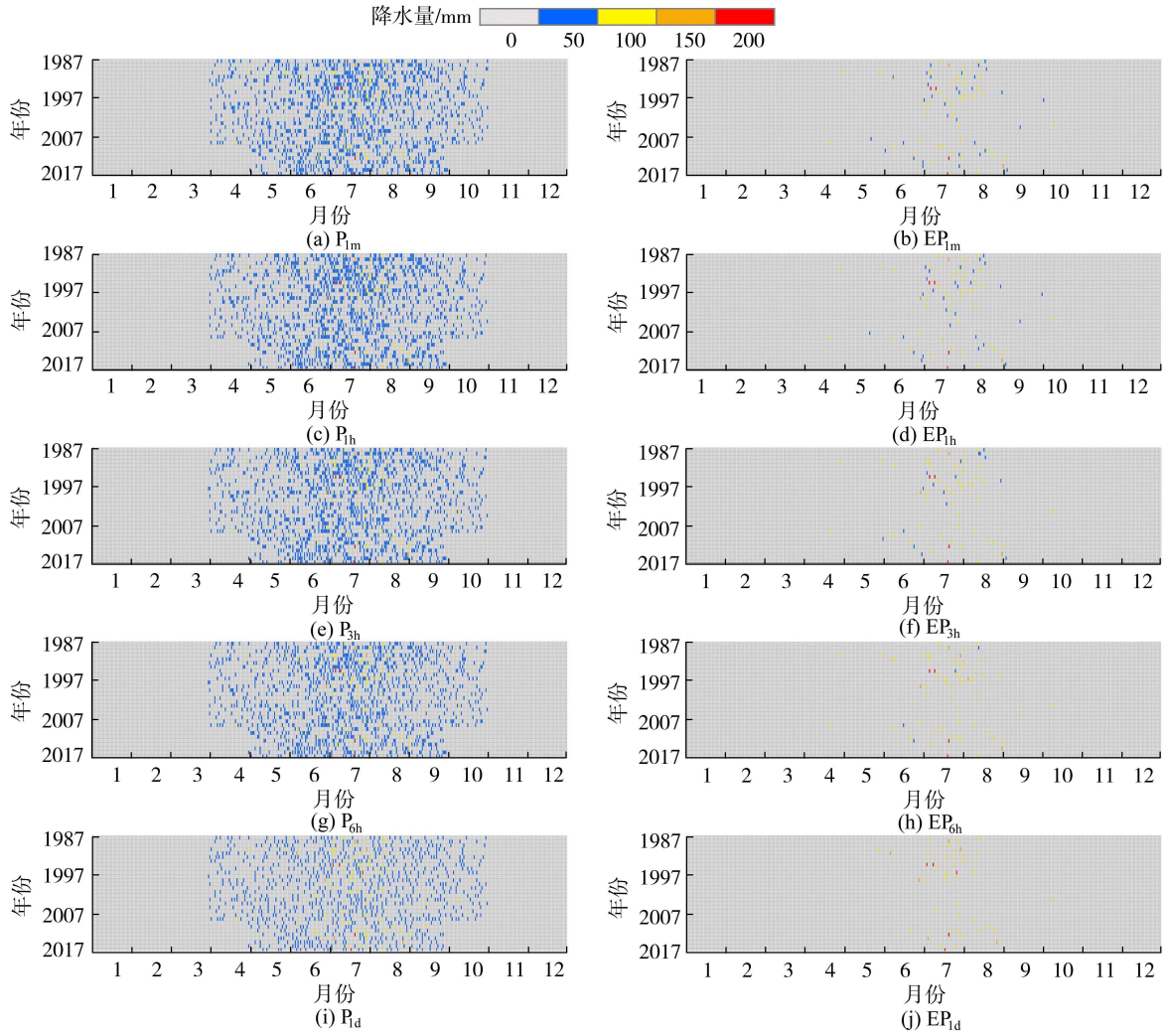


图 3　1987—2016 年北京市不同精度降雨数据统计的常规降雨事件与极端降雨事件样本分布

Fig. 3　Sample distribution of conventional and extreme precipitation events based on rainfall data with different resolutios in Beijing from 1987 to 2016

特征。在样本数量上,随着降雨数据精度降低,获取的降雨事件样本数量逐渐减少,常规降雨事件从 1 min 的 1 633 场减少到 1 d 的 883 场,极端降雨事件从 1 min 的 82 场减少到 1 d 的 45 场,这主要由于在较低的降雨数据精度下,部分时间相邻且间隔较短的降雨事件被人为合并为同一场次。在发生时间上,降雨事件的人为合并也导致了极端降雨事件的起止时间发生变化。以 EP_{1m} 的实际降雨过程作为参考,EP_{1h}、EP_{3h}、EP_{6h} 和 EP_{1d} 的降雨终止时间分别平均后移了 2.43、7.99、16.58、65.72 h。由此可见,低精度的降雨数据会造成极端降雨事件在时间尺度上的滞后,这与庄琦等[29]的研究结论一致。

按照降雨持续时间对极端降雨事件进一步划分,得到 SEP、LEP、PEP 3 类事件的占比情况。在 1 min 精度降雨数据的分析中,LEP 事件占比高达 64.63%,可见实际情况中长历时极端降雨占据主导地位。随着降雨数据精度降低,SEP 事件和 LEP 事件样本数量呈现减少趋势,而 PEP 事件样本数量逐步增加。甚至在 6 h 精度降雨数据中,PEP 事件样本数量占比高达 58.06%。这说明数据精度会对极端降雨事件统计结果造成影响,且不同类型极端降雨事件所受影响程度存在差异。而对极端降雨演变规律分析常用的各项特征指标而言,可以采用 K-W 检验对这种影响带来的统计偏差的显著性进行评估。将 1 min 精度数据看作可反映实际降雨过程的对照组,将其他精度降雨数据样本统计结果与之进行对比分析,其检验统计量的概率 P 值大小反映其他精度降雨数据分析结果与实际情况间偏差的显著程度,结果如图 4 所示,图中若检验结果落入红色六边形范围内,即表明特征指标与真值的差异达到了 $P=0.05$ 的显著性水平。

由图 4 可见,随着数据精度降低,降水量、降雨频率、降雨历时、降雨集中度、降雨集中期、峰值时间与真值的差异显著性呈现总体增强的趋势。而对于不同精度精据统计获得的极端降雨事件,1 h 与 1 min 精度数据的样本统计结果在 6 项指标均未呈

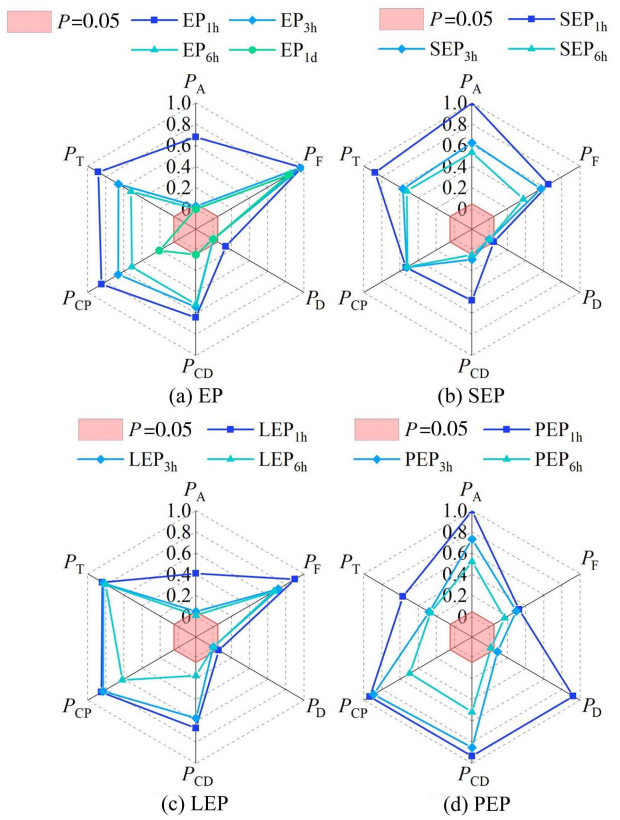


图 4　K-W 检验结果

Fig. 4　K-W test results

现显著差异(P>0.05),可见 1 h 精度降雨数据可基本反映极端降雨事件的主要特征。由图 4(a)可见,对于常规降雨事件,1 d 精度数据的样本统计结果在降水量、降雨历时和降雨集中度呈现出显著差异,相应 P 值分别为 0.001、0.001 和 0.049,其余指标未呈现显著差异。EP_{1h}、EP_{3h} 和 EP_{6h} 3 种亚日精度的样本统计结果的降雨频率、降雨集中度、降雨集中期和峰值时间与真值的差异并不显著,但对于在海绵城市建设和排水防涝工程设计中更为关注的降水量和降雨历时,3 种亚日精度的样本统计结果与真值产生显著偏差(P<0.05)。由图 4(b)(c)(d)可见,对于 SEP、LEP 和 PEP 3 类极端降雨事件而言,数据精度变化对样本统计结果的降雨特征指标的影响程度有所不同。对于 SEP 事件,样本差异主要体现在降雨历时上,随着数据精度降低,同一场次的降雨历时可能会被拉长;对于 LEP 事件,降水量和降雨历时受到影响较为显著,3 h 和 6 h 精度下的差异均达到了 0.05 置信水平;对于 PEP 事件,降雨历时所受影响最明显,但仅在 6 h 精度下达到显著水平,其 P 值为 0.018。总体而言,数据精度对极端降雨事件统计结果的显著影响集中体现在降水量和降雨历时这两项降雨特征,对于 SEP 事件这一影响还会延伸至其他特征指标。

2.2　不同数据精度下极端降雨事件的特征指标

图 5 为不同数据精度下极端降雨事件 3 项指标的箱线图。由图 5(a)可见,随着数据精度降低,降水量均值从 64.72 mm 升至 75.93 mm,可见基于低精度数据的分析可能高估极端降雨事件的单场总降水量,这是由于较低精度使本应统计为不同场次的降雨被人为合并所致。由图 5(b)可见,从降雨频率的角度,数据精度对极端降雨事件的整体影响较小,但在 3 种不同类型的极端降雨事件分析中体现显著差异。SEP 事件的降雨频率较高,数据分布集中;PEP 事件的降雨频率较低,数据分布分散;LEP 事件则介于二者之间。由图 5(c)可见,从降雨历时的

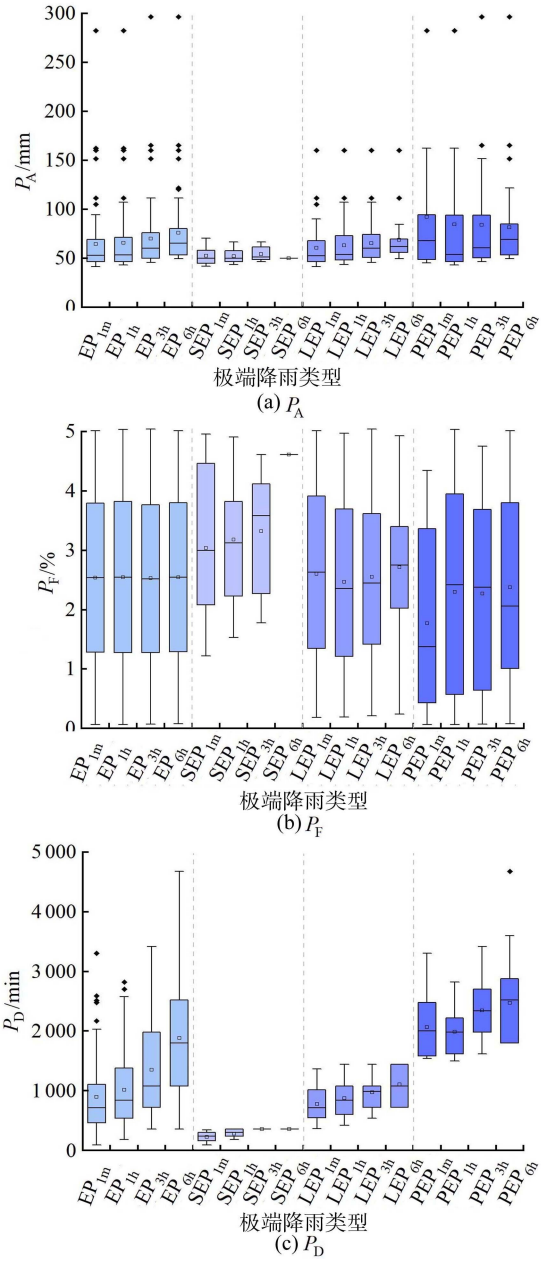


图 5　不同精度数据极端降雨事件 3 项指标的箱线图

Fig. 5　Box plots of three indicators of extreme precipitation events with different resolution data

角度，极端降雨事件整体随数据精度降低，其均值呈现上升趋势，对于 SEP、LEP 和 PEP 3 类极端降雨事件也基本呈现上升趋势，且数据分布呈现随降雨数据精度降低而分散的趋势。

图 6 为不同精度数据下各类极端降雨事件的降雨集中度年际分布。由图 6 可见，不同精度数据下极端降雨事件的降雨集中度在年际呈现出不均匀的特点，EP 事件整体降雨集中度较高，但 3 h 和 6 h 精度下个别年份出现了降雨集中度降低的情况。对于 3 种不同类型的极端降雨事件而言，高精度数据下 SEP 事件降雨集中度年际分布更加分散，低精度数据下 SEP 事件降雨集中度在统计年限内更多呈现出低值状态。高精度数据下 LEP 事件降雨集中度年际分布更加集中，但在 6 h 精度下降雨集中度在个别年份中有所下降。PEP 事件中降雨集中度高值年份和降雨集中度低值年份的占比情况较为一致，在 6 h 精度下降雨集中度低值年份出现了一定的减少和偏移。上述结果表明，低精度降雨数据会造成极端降雨集中度分布情况判断出现偏差，SEP 事件和 LEP 事件的降雨集中度易被低估，而 PEP 事件的降雨集中度则可能会被高估。

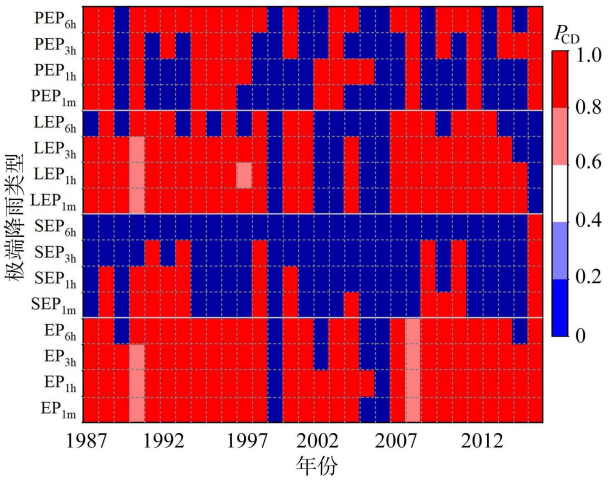


图 6　不同精度数据各类极端降雨事件降雨集中度年际分布

Fig. 6　Annual distribution of rainfall concentration for various extreme precipitation events under different resolution data

图 7 为不同精度数据下各类极端降雨事件的降雨集中期分布。由图 7 可见，从 EP 事件整体情况来看，降雨集中期分布于 6—10 月，并主要集中在 7—8 月，这与北京市 7 月 20 日至 8 月 10 日的主汛期[30]时间分布较为一致。对 3 种不同类型极端降

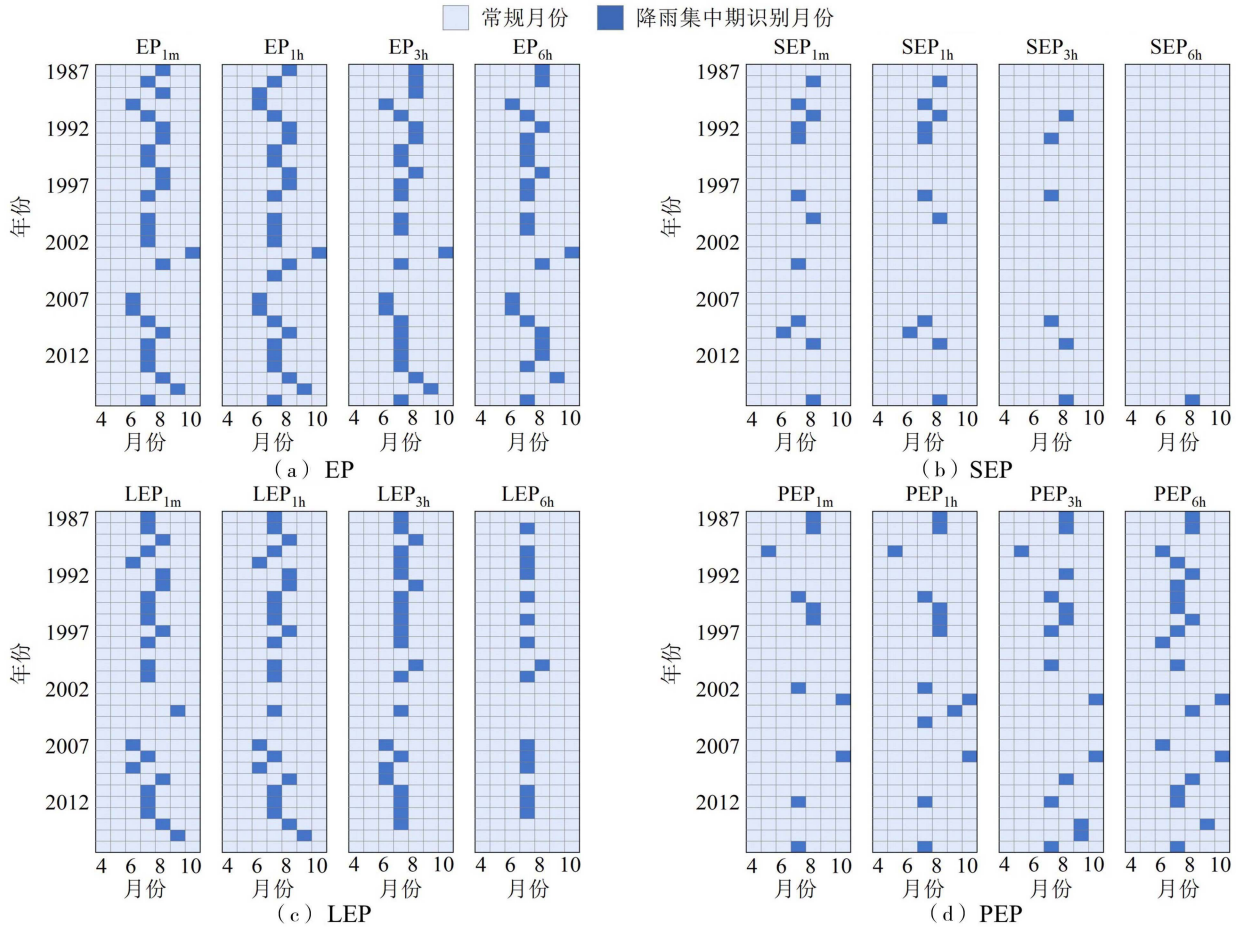


图 7　不同精度数据各类极端降雨事件降雨集中期分布

Fig. 7　Distribution of rainfall concentration periods for various extreme precipitation events under different resolution data

雨事件分别讨论,SEP 事件和 LEP 事件的降雨集中期分布时间与上述规律更为相符,然而 9—10 月仍然存在极端降雨事件集中出现的可能(占总体样本的 10.64%),且在这一时期中,PEP 事件最有可能发生(在同期的 3 种极端降雨事件中占比达到 80%),这无疑会对现有城市排水防涝和汛期运维管理安排造成影响[31],未来可加强针对 9—10 月 PEP 事件的预警防控,避免城市洪涝灾害防控预警应急响应不及时等情况发生。此外,降雨数据精度的差异也对降雨集中期识别结果造成了影响。随着降雨数据精度的降低,降雨集中期识别结果与 1 min 精度数据的结果误差逐渐增大,这种误差的呈现形式对于 EP 事件主要体现在同年中降雨集中期识别月份出现偏移,对于 SEP 事件和 PEP 事件主要体现在识别结果数量差异,而对于 LEP 事件,同年降雨集中期识别月份的偏移和有效识别年份数的差异均有呈现。

极端降雨事件昼夜分布也存在差异。按照 0—6 时、7—12 时、13—18 时、19—24 时 4 个时段,探究不同精度数据下各类极端降雨事件的峰值时刻的昼夜分布,结果如表 1 所示。EP 事件峰值时间在 0—6 时最高,占比为 30%~35%,不同数据精度对 EP 事件的峰值时间的昼夜分布差异影响较小,4 个时段的正负偏差均不超过 5%。而不同类型的极端降雨事件的昼夜分布却呈现出不同特点,SEP 事件和 LEP 事件更可能在夜间出现,而 PEP 事件更可能出现在上午 7—12 时,与居民出行高峰时段相重叠。因此,城市排水防涝工作应当加强对 PEP 事件的关注,加强应对极端降雨应急调度方案中对这一类型降雨可能造成潜在威胁的预判,尽量减少因内涝积水导致的交通瘫痪和居民紧急避险难度[32-33]。

表 1　不同精度数据各类极端降雨事件峰值时间分布

Table 1　Peak time distribution of various extreme precipitation events under different resolution data

极端降雨类型	占比/%			
	0—6 时	7—12 时	13—18 时	19—24 时
EP_{1d}	34.15	18.29	17.07	30.49
EP_{1m}	30.38	18.99	22.78	27.85
EP_{1h}	31.43	20.00	18.57	30.00
EP_{3h}	35.48	17.74	17.74	29.03
EP_{6h}	46.67	13.33	20.00	20.00
SEP_{1m}	30.77	15.38	30.77	23.08
SEP_{1h}	16.67	16.67	33.33	33.33
SEP_{3h}	0	0	100	0
SEP_{6h}	35.85	15.09	15.09	33.96
LEP_{1m}	34.69	14.29	20.41	30.61
LEP_{1h}	33.33	19.05	11.90	35.71
LEP_{3h}	36.00	16.00	12.00	36.00
LEP_{6h}	14.29	35.71	21.43	28.57
PEP_{1m}	17.65	35.29	23.53	23.53
PEP_{1h}	31.82	22.73	27.27	18.18
PEP_{3h}	36.11	19.44	19.44	25.00
PEP_{6h}	34.15	18.29	17.07	30.49

2.3　不同数据精度下极端降雨事件的时间变化规律

利用 Sen's 斜率法和 M-K 检验分析各类极端降雨事件时间变化的趋势及其显著性,结果见表 2。从 EP_{1m} 和 EP_{1h} 两种精度的极端降雨事件整体情况来看,降水量、降雨历时和峰值时间 3 项指标的变化呈现上升趋势,降雨频率、降雨集中度和降雨集中期 3 项指标的变化呈现下降趋势,但两种趋势都不显著。随着数据精度降低至 3 h 和 6 h,降雨历时的变化趋势出现逆转,可见低精度数据无法准确反映降雨历时变化趋势,甚至可能得出与实际情况完全相反的结果。

针对不同精度数据下各类型极端降雨事件,对于降水量指标,PEP 事件上升程度更大,但变化趋势仍不显著,数据精度的改变对降水量变化趋势的影响不明显。对于降雨频率指标,SEP 事件和 LEP 事件均呈不显著的下降趋势,而 PEP 事件呈不显著的上升趋势,数据精度差异同样不会造成降雨频率变化趋势的显著改变。对于降雨历时指标,SEP 事件和 LEP 事件均呈上升趋势,而 PEP 事件呈下降趋势,这种趋势在高精度样本中不显著,而在低精度样本中显著。EP_{1m} 和 EP_{1h} 的上升趋势与 EP_{3h} 和 EP_{6h} 的下降趋势表明,低精度数据样本对降雨历时趋势预测的不准确性,进一步印证了前述 1 h 及以上的高精度数据更适合作为极端降雨事件规律分析样本的判断。总的来说,PEP 事件历时可能缩短,而持续时长 24 h 以下的极端降雨事件历时可能会增大,这也将进一步引起城市雨水系统受极端降雨干扰后的系统内涝弹性,即抵御城市内涝灾害和恢复灾前排水能力的减小[34]。对于降雨集中度指标,各种类型极端降雨事件变化趋势以显著性下降为主,而 3 h 和 6 h 精度的 SEP 事件呈现出显著上升趋势,这表明极端降雨事件的年内分布可能会更加分散,进一步印证了前述非主汛期月份同样需要关注极端降雨风险的结论。对于降雨集中期指标,除 3 h 和 6 h 精度的 SEP 事件和 PEP 事件呈现上升趋势外,其余类型极端降雨事件均呈现下降趋势。对于峰值时间指标,数据精度降低造成的趋势预测偏差较大,对于 1 min 和 1 h 的高精度样本而言,SEP 事件呈现不显著的下降趋势,而 LEP 事件和 PEP 事件均呈现不显著的上升趋势。

除了降雨特征的变化趋势分析之外,降雨特征的突变年份作为划分极端降雨变化阶段的重要依据,也是极端降雨变化规律研究中不可忽视的关注点,然而数据精度和极端降雨类型的差异同样可能得出完全不同的降雨突变年份识别结果。利用有序

表 2　各类极端降雨时间特征指标变化趋势检验值

Table 2　Test values of temporal variation trends of various extreme precipitation characteristic indexes

极端降雨类型	P_A	P_F	P_D	P_{CD}	P_{CP}	P_T
EP_{1d}	0.003 0	0.000 0	0.360 0	−0.002 9	−0.284 4	0.004 5
EP_{1m}	0.002 2	0.000 0	0.306 7	−0.000 9	−0.276 7	0.008 1
EP_{1h}	0.009 1	0.000 0	−3.237 5	−0.003 3	−0.466 6	−0.027 3
EP_{3h}	0.011 1	0.000 0	−13.426 0	−0.003 2	−0.356 1	−0.043 4*
EP_{6h}	0.088 9	−0.000 1	3.496 4*	−0.007 0	−1.372 5	−0.646 4*
SEP_{1m}	0.023 0	−0.000 1	1.318 7	−0.011 9*	−2.140 1*	−0.445 1
SEP_{1h}	0.443 3	−0.001 2	0.000 0	0.004 0*	0.901 0*	−0.857 1
SEP_{3h}	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.006 5*	1.354 8*	0.000 0
SEP_{6h}	0.038 6	−0.000 1	2.810 4	−0.009 5*	−0.276 3*	0.047 3
LEP_{1m}	0.014 1	−0.000 1	2.467 3	−0.009 3*	−0.400 5	0.022 2
LEP_{1h}	0.055 0	−0.000 1	0.189 6	−0.015 3*	−1.123 9	0.068 0
LEP_{3h}	0.191 7	−0.000 2	7.753 8	−0.006 3*	−1.030 6*	−0.106 2
LEP_{6h}	2.665 4	0.000 5	−14.530 0	−0.011 2*	−1.944 8*	0.433 0*
PEP_{1m}	1.002 4	0.001 1	−23.529 0	−0.010 5*	−1.818 3*	0.328 4
PEP_{1h}	1.193 1	0.000 2	−26.324 0	−0.002 9*	0.246 9*	−0.094 9
PEP_{3h}	0.865 8	0.000 1	−4.308 9*	−0.009 9*	0.166 9*	−0.151 4
PEP_{6h}	0.003 0	0.000 0	0.360 0*	−0.002 9*	−0.284 4	0.004 5*

注：* 表示该指标的变化趋势在 0.05 的置信水平上显著。

聚类法识别各类极端降雨的时间突变年份，结果如图 8 所示。由图 8 可见，对于降水量指标，1 min 与 1 h 精度的突变年份识别结果一致，但除 PEP 事件外，3 h 和 6 h 两种低精度结果均与高精度结果存在偏差，低精度的 EP 事件和 SEP 事件降水量突变年份前移 2～3 a；对于降雨频率指标，低精度的 EP 事件突变年份前移，而低精度的 SEP 事件和 PEP 事件突变年份则后移 1 a；对于降雨历时指标，低精度的 EP 事件、SEP 事件和 PEP 事件突变年份后移。上述 3 项指标中，高精度的 LEP 事件均未检测出突变年份。对于降雨集中度指标，数据精度降低造成 EP 事件突变年份后移，而 SEP 事件和 LEP 事件突变年

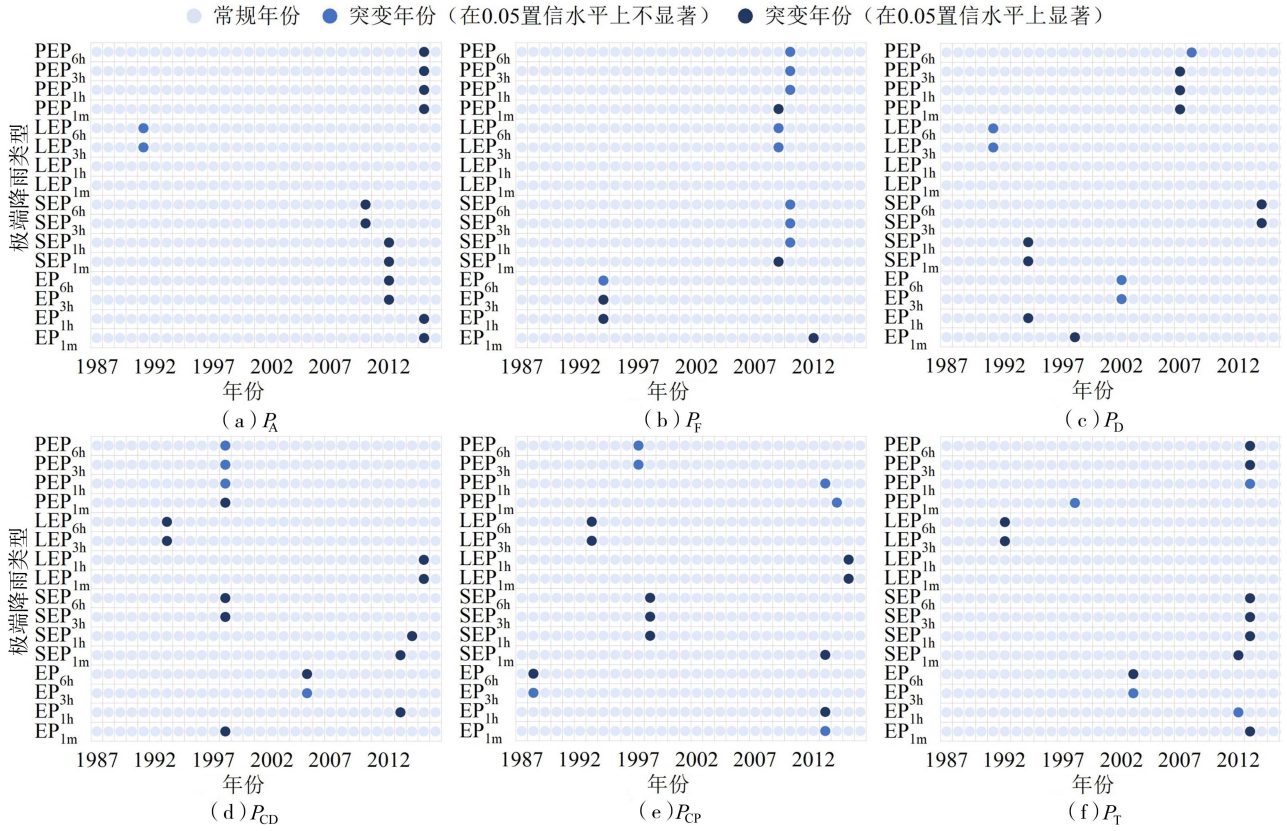


图 8　各类极端降雨事件不同指标突变年份识别结果

Fig. 8　Identification results of abrupt changes in various indicators of extreme precipitation events in different years

份则出现前移;对于降雨集中期指标,与 1 min 精度相比,各类极端降雨事件突变年份出现了 16~24 a 的前移;对于峰值时间指标,低精度 EP 事件突变年份前移,而低精度 SEP 事件和 PEP 事件突变年份后移。总的来说,数据精度的变化会使得极端降雨事件的特征指标突变情况产生“跳跃”,但精度差异对于 PEP 事件的降水量、降雨频率、降雨历时和降雨集中期的识别影响较小,获得高精度降雨数据支撑是确保极端降雨时间突变年份识别结果具备更高准确性的关键。

3 结 论

a. 北京市不同类型的极端降雨事件中,LEP 事件占主导地位。降雨数据精度降低会使得部分时间相邻且间隔较短的降雨事件被人为合并,并影响降雨特征指标变化规律的统计分析结果,其中集中体现在对降水量和降雨历时的显著影响。1 h 精度降雨数据可基本反映极端降雨事件的主要时间特征。

b. 降雨数据精度差异会造成对极端降雨事件的降雨集中度分布判断出现偏差,且使得降雨集中期出现的识别月份偏移和有效识别结果数量偏差。北京市极端降雨事件分布于 6—10 月,并集中在 7—8 月,这与北京市主汛期时间相近,但 9—10 月仍存在极端降雨事件出现的可能,且此时段多表现为 PEP 事件,这可能对北京市排水防涝应急管理带来挑战。SEP 事件和 LEP 事件更可能在夜间出现,而 PEP 事件更可能在上午 7—12 时形成降雨峰值,对居民紧急避险和内涝预警响应造成影响。

c. 对于各类极端降雨事件,数据精度的改变对降水量和降雨频率在统计年限内的变化趋势影响不显著,而低精度降雨数据会增加降雨历时变化趋势预测的不准确性,SEP 事件和 LEP 事件的降雨历时可能缩短,PEP 事件的降雨历时可能增大,这可能造成城市内涝灾害潜在风险增加。低精度降雨数据会造成趋势预测出现较大偏差,降雨特征指标的突变年份产生“跳跃”,但对 PEP 事件的降水量、降雨频率、降雨历时和降雨集中度影响较小。

参考文献:

[1] KOTZ M, LEVERMANN A, WENZ L. The effect of rainfall changes on economic production[J]. Nature, 2022, 601(7892): 223-227.

[2] 徐宗学,李鹏. 城市化水文效应研究进展:机理、方法与应对措施[J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 7-17. (XU Zongxue, LI Peng. Progress on hydrological response to urbanization: mechanisms, methods and solutions[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 7-17. (in Chinese))

[3] 于超,贺靓,张恒德,等. 北京市 2018 年“7·16”极端暴雨特征及成因分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(4): 42-49. (YU Chao, HE Liang, ZHANG Hengde, et al. Analysis on characteristics and causes of the extreme rainstorm on 16 July 2018 in Beijing City[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(4): 42-49. (in Chinese))

[4] IPCC. Climate Change 2021: the physical science basis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

[5] 刘家宏,骆卓然,张永祥,等. 城市化对河南省极端降水空间分布的影响[J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 100-105. (LIU Jiahong, LUO Zhuoran, ZHANG Yongxiang, et al. Influence of urbanization on spatial distribution of extreme precipitation in Henan Province[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 100-105. (in Chinese))

[6] 商守卫,王磊之,王银堂,等. 1960—2019 年成都地区极端降水时空演变特征分析[J]. 水资源保护, 2023, 39(3): 195-204. (SHANG Shouwei, WANG Leizhi, WANG Yintang, et al. Analysis of spatial and temporal evolution characteristics of extreme precipitation in Chengdu area from 1960 to 2019[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(3): 195-204. (in Chinese))

[7] ZHANG Yixin, LI Peng, XU Guoce, et al. Temporal and spatial variation characteristics of extreme precipitation on the Loess Plateau of China facing the precipitation process[J]. Journal of Arid Land, 2023, 15(4): 439-459.

[8] YIN Changyan, WANG Jiayi, YU Xin, et al. Definition of extreme rainfall events and design of rainfall based on the copula function[J]. Water Resources Management, 2022, 36(10): 3759-3778.

[9] ZHANG Yihui, LIANG Kang, LIU Changming. Time distribution pattern and spatial heterogeneity of hourly scale event-based extreme precipitation in China[J]. Journal of Hydrology, 2023, 622: 129712.

[10] WU Guocan, LI Yun, MA Zhanshan, et al. The unevenness in observed daily precipitation in mainland China[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2021, 146(3): 1031-1041.

[11] HAN Jingya, MIAO Chiyuan, DUAN Qingyun, et al. Changes in unevenness of wet-day precipitation over China during 1961-2020[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2021, 126(19): e2020JD034483.

[12] 汪成博,李双双,延军平,等. 1970—2015 年汉江流域多尺度极端降水时空变化特征[J]. 自然资源学报, 2019, 34(6): 1209-1222. (WANG Chengbo, LI Shuangshuang, YAN Junping, et al. Spatiotemporal variation of extreme precipitation regimes in the Hanjiang River Basin during 1970-2015[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(6): 1209-1222. (in Chinese))

[13] DENG Yue, CAO Guangzhen, JIANG Weiguo, et al. Spatiotemporal changes in heavy precipitation events in the Beijing-Tianjin-Hebei region revealed by hourly meteorological station observations[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2020, 141(1/2): 483-494.

[14] PARCHURE A S, GEDAM S K. Probability distribution analysis of extreme rainfall events in a flood-prone region of Mumbai, India[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2019, 12(11): 369.

[15] CHAUDHURI R R, SHARMA P. Addressing uncertainty in extreme rainfall intensity for semi-arid urban regions: case study of Delhi, India[J]. Natural Hazards, 2020, 104(3): 2307-2324.

[16] LIMA A O, LYRA G B, ABREU M C, et al. Extreme rainfall events over Rio de Janeiro State, Brazil: characterization using probability distribution functions and clustering analysis[J]. Atmospheric Research, 2021, 247: 105221.

[17] DU Mingcheng, ZHANG Jianyun, YANG Qinli. Spatial and temporal variation of rainfall extremes for the North Anhui Province Plain of China over 1976-2018[J]. Natural Hazards, 2021, 105(3): 2777-2797.

[18] SANTOS J A, CORTE-REAL J, LEITE S M. Rainfall trends over a small island teleconnected to the North Atlantic Oscillation: the case of Madeira Island, Portugal[J]. Internaxional Journal of Climatology, 2014, 34(3): 606-613.

[19] JIANG Xuechen, ZHANG Jing, LEI Xiaohui. Spatial-temporal variations of extreme precipitation indices in the Xinjiang Cold Area over the past 60 years[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2023, 28(4): 04023005.

[20] 朱凯莉,赖成光,王兆礼,等. 城市化背景下长三角核心城市群汛期降水时空演变特征分析[J]. 水资源保护, 2023, 39(6): 95-103. (ZHU Kaili, LAI Chengguang, WANG Zhaoli, et al. Temporal and spatial evolution characteristics analysis of flood season precipitation in core city group of the Yangtze River Delta under background of urbanization[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(6): 95-103. (in Chinese))

[21] KAŠPAR M, BLIŽŇÁK V, HULEC F, et al. High-resolution spatial analysis of the variability in the subdaily rainfall time structure[J]. Atmospheric Research, 2021, 248: 105202.

[22] WANG Peng, WANG Jianlong, YANG Zitong, et al. Effect of different MIT rainfall event division methods on volume capture ratio of annual rainfall based on bioretention assessment[J]. Water Science & Technology, 2023, 87(6): 1423-1437.

[23] PENDERGRASS A G. What precipitation is extreme?[J]. Science, 2018, 360(6393): 1072-1073.

[24] 张志俊,王盼盼. 基于 Kruskal-Wallis 检验的公路货运车辆实载率差异分析[J]. 交通运输系统工程与信息, 2014, 14(5): 216-220. (ZHANG Zhijun, WANG Panpan. Loading rate variance analysis for road freight vehicles based on Kruskal-Wallis test[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2014, 14(5): 216-220. (in Chinese))

[25] SEN P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau[J]. Journal of the American Statistical Association, 1968, 63(324): 1379-1389.

[26] 王雨潇,孙营营,张天宇,等. 1998—2020 年三峡库区最大 1h 降水的时空变化特征[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(1): 10-18. (WANG Yuxiao, SUN Yingying, ZHANG Tianyu, et al. Temporal and spatial variations of maximum one-hour precipitation in the Three Gorges Reservoir Region from 1998 to 2020[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(1): 10-18. (in Chinese))

[27] 姜瑶,徐宗学,王静. 基于年径流序列的五种趋势检测方法性能对比[J]. 水利学报, 2020, 51(7): 845-857. (JIANG Yao, XU Zongxue, WANG Jing. Comparison among five methods of trend detection for annual runoff series[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(7): 845-857. (in Chinese))

[28] 张献志,汪向兰,王春青,等. 黄河源区气象水文序列突变点诊断[J]. 人民黄河, 2020, 42(11): 22-26. (ZHANG Xianzhi, WANG Xianglan, WANG Chunqing, et al. Diagnosis of abrupt change point of the meteorological and hydrological series in the source area of the Yellow River[J]. Yellow River, 2020, 42(11): 22-26. (in Chinese))

[29] 庄琦,刘曙光,周正正. 降雨数据时空精度对城市暴雨变异性及频率分析的影响[J]. 水科学进展, 2023, 34(3): 398-408. (ZHUANG Qi, LIU Shuguang, ZHOU Zhengzheng. Impact of rainfall spatiotemporal resolutions on urban extreme rainfall variability and rainfall frequency analysis[J]. Advances in Water Science, 2023, 34(3): 398-408. (in Chinese))

[30] 刘璐,张琨佳,苏筠. 北京 2012、2013 年汛期暴雨响应行为的对比研究[J]. 自然灾害学报, 2016, 25(1): 26-34. (LIU Lu, ZHANG Kunjia, SU Yun. Comparative study of response behavior to the rainstorm during the flood season of 2012 and 2013 in Beijing[J]. Journal of Natural Disasters, 2016, 25(1): 26-34. (in Chinese))

[31] 刘星. 预警响应缘何失灵:基于应急管理过程论的一个解释框架:德国洪灾与河南暴雨的启示[J]. 云南民族大学学报(哲学社会科学版), 2022, 39(6): 85-95. (LIU Xing. A study of the causes of failure in early warning responses based on an explanatory framework in the theoretical perspective of emergency management process: enlightenment from the flood in Germany and the rainstorm in Henan[J]. Journal of Yunnan Minzu University (Philosophy and Social Sciences Edition), 2022, 39(6): 85-95. (in Chinese))

(下转第 157 页)

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2025.02.015

城市下穿通道积涝特征及其成因分析

许岚杰[1],侯精明[1],王 添[1],潘鑫鑫[1],栾广学[1],王晨晓[2],贾 严[1]

(1.西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室,陕西 西安 710048;
2.长治市城市建设开发有限公司,山西 长治 047500)

摘要:利用 SWMM 与 GAST 模型耦合的水文水动力学模型,对长治市主城区进行数值模拟,分析易涝点积涝特征并探究其成因。结果表明:研究区下穿通道易涝点的积水量峰值和积水水深峰值受降雨重现期影响大于普通路面易涝点,降雨重现期由 5 a 增大到 100 a 时,易涝点 A、B、C、D 的积水量峰值分别增加了 292.8%、265.5%、1 281.3%、59.7%,积水水深峰值分别增加了 83.3%、92.1%、581.0%、31.3%;不同降雨重现期对不同类型易涝点的积水水深峰现时间影响不同,降雨重现期由 5 a 增大到 100 a 时,D 点积水水深峰现时间提前了 11 min,A、B、C 点积水水深峰现时间分别滞后了 20、84、40 min。

关键词:城市内涝;易涝点;下穿通道;积水量;积水水深;长治市

中图分类号:TU992;TV122.1 **文献标志码**:A **文章编号**:1004-6933(2025)02-0133-09

Characteristics and causes of waterlogging in urban underpass channels//XU Lanjie[1], HOU Jingming[1], WANG Tian[1], PAN Xinxin[1], LUAN Guangxue[1], WANG Chenxiao[2] JIA Yan[1] (1. *State Key Laboratory of Eco-Hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an* 710048, *China*; 2. *Changzhi City Construction and Development Co., Ltd., Changzhi* 047500, *China*)

Abstract: Using a hydrological and hydrodynamic model coupled with SWMM and GAST models, numerical simulations were conducted on the main urban area of Changzhi City to analyze the characteristics of waterlogging in flood prone points and the causes were explored. The results show that the peak values of accumulated water volume and accumulated water depth at the flood prone points of the underpass in the study area are more affected by the rainfall recurrence period than those at the flood prone points of ordinary road surfaces. When the rainfall recurrence period increases from 5 a to 100 a, the peak value of accumulated water volume at flood prone points A, B, C, and D increases by 292.8%, 265.5%, 1 281.3%, and 59.7%, respectively, and the peak value of accumulated water depth increases by 83.3%, 92.1%, 581.0%, and 31.3%, respectively. The impact of different rainfall recurrence periods on the peak time of accumulated water depth in different types of flood prone points varies. When the rainfall recurrence period increases from 5 a to 100 a, the peak value of accumulated water depth at point D appears 11 min earlier, while the peak value of accumulated water depth at points A, B, and C appears 20, 84, and 40 min later, respectively.

Key words: urban waterlogging; flood prone point; underpass; accumulated water volume; accumulated water depth; Changzhi City

随着我国城镇化进程的不断推进,城区热岛效应和雨岛效应日益凸显,导致城市暴雨洪涝灾害频发[1-2]。郑州市 2021 年 7 月 20 日发生特大暴雨,累积平均降水量 449 mm,最大 1 h 降水量 201.9 mm,导致全市死亡、失踪 380 人,直接经济损失 409 亿元[3]。《中国水旱灾害防御公报 2022》显示,2022 年全国因洪涝共有 3 385.26 万人次受灾,171 人死亡失踪,直接经济损失 1 288.99 亿元,占当年 GDP 的 0.11%[4]。《2023 年全国十大灾害》显示,2023 年的十大灾害中有 5 场与洪涝相关:6 月底到 7 月初,重庆地区遭遇强降雨袭击,造成 25 人死亡失踪,直接经济损失达 13.1 亿元;7 月底到 8 月初,京津冀等地遭受极端强降雨,造成北京、河北、天津 551.2 万人不同程度受灾,因灾死亡失踪 107 人,

基金项目:国家自然科学基金项目(52009104);中国电力建设股份有限公司重点科技项目(DJ-ZDXM-2022-41);中德合作交流项目(M-0427);陕西省联合基金重点项目(2022JC-LHJJ-09);陕西省重点研发计划项目(2023GXLH-042)

作者简介:许岚杰(1999—),男,硕士研究生,主要从事城市水利研究。E-mail:1176052459@qq.com

通信作者:王添(1989—),男,副教授,博士,主要从事地表水及其伴生过程数值模拟研究。E-mail:t.wang@xaut.edu.cn

直接经济损失 1657.9 亿元[5]。可见,城市内涝灾害已经威胁到人们的生命财产安全和社会经济的发展,如何利用新技术发现内涝灾害规律及成因并提出解决办法,已经成为迫在眉睫的科学问题。

随着计算机硬件的迭代进步和城市水利理论的发展,城市洪涝模型应运而生。目前常见的水力模型有 InfoWorks、SWMM(storm water management model)、GAST(GPU accelerated surface water flow and transport)、MIKE 模型等[6]。张静等[7]以广州市某地块为例,建立 SWMM 进行内涝安全评估,并综合分析地块及周边的洪涝风险,确定了地块洪涝风险等级;丁青云等[8]采用 SWMM 对杭州西湖区之江新城进行模拟,得出排水系统能力不足会提高城市内涝风险的结论;李国一等[9]基于 TELEMAC-2D 模型构建深圳市深圳河流域洪涝风险评估模型,得到了深圳河流域洪涝风险区面积的变化规律。以上研究没有综合考虑城市复杂的下垫面和地下管网等水利工程设施,SWMM 与 GAST 模型耦合构建的水文水动力模型具有地表地下水流交换过程合理、地表径流过程计算准确、管网排水过程精度高、运行速度快等优点[10],为研究暴雨导致的城市内涝问题提供了新思路。马鑫等[11]应用其对固原市主城区在极端暴雨条件下进行积水模拟,得出道路积水面积与积水量峰值随降水量的变化规律;侯精明等[12]应用其对陕西省西咸新区进行数值模拟,得出设计降雨重现期和峰值比例对城市内涝总积水量的影响规律;李冰雪等[13]应用其对宁波市中心商贸区进行了数值模拟,得出多种移动台风和静止台风对内涝监测点积水时间的影响规律。以上研究均采用数值模型进行城市内涝模拟并得出相关积涝特征的变化规律,但对下穿通道的积涝特征考虑较少。铁路穿过城市不可避免地与公路交叉,形成多个公路下穿通道。由于下穿通道的最低点一般低于普通路面 3 m 左右,形成封闭洼地,周围雨水易于汇入,极易形成严重内涝,如果积水无法及时排除,便会严重影响交通甚至造成事故。本文利用 SWMM 与 GAST 模型的耦合模型对长治市的典型下穿通道进行模拟,总结下穿通道的积涝特征变化规律,并探究其成因,以期为城市内涝研究和治理提供借鉴。

1 研究区概况

长治市地处山西省东南部,为太行山、太岳山所环绕。从地貌来看,全市山峦起伏,地形复杂,总体呈盆地状。长治市年降水量为 550~700 mm,其多年平均降水量为 573.3 mm,降水日数多集中在夏季,尤以 7 月为多,月平均降水日数为 14.8 d[14]。选取的研究区为长治市主城区,北靠北环西街,南连石子河,东邻东环路,西接西二环路,总面积为 17.7 km^2。研究区概况如图 1 所示。

2 研究方法

本文数值模拟基于 SWMM 与 GAST 模型耦合构建的一二维水动力模型,模型的输入文件主要包括研究区的地形、土地利用类型、排水管网、降水量等数据。研究选取 4 个易涝点,其中 3 个为下穿通道,另外 1 个为普通路面易涝点,作为比较对象。对 4 个易涝点处的积水水量、积水面积、积水水深峰值出现时间等指标进行模拟,结合不同降雨场次各易涝点附近的管道水深变化过程,综合分析易涝点积水变化规律。

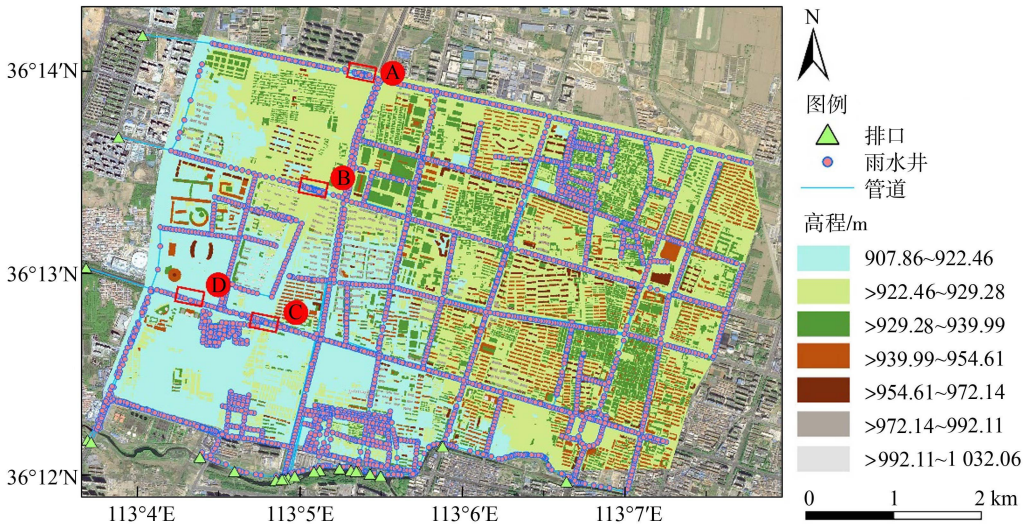


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

2.1 水动力模型

2.1.1 控制方程

模型控制方程为二维浅水方程[15]，忽略其运动黏性项、温流黏性项、风应力和科氏力，则其非线性守恒格式矢量式为

$$\frac{\partial \boldsymbol{q}}{\partial t}+\frac{\partial \boldsymbol{f}}{\partial x}+\frac{\partial \boldsymbol{g}}{\partial y}=\boldsymbol{S} \tag{1}$$

其中 $\boldsymbol{q}=\begin{bmatrix} h \\ q_x \\ q_y \end{bmatrix}$ $\boldsymbol{f}=\begin{bmatrix} uh \\ uq_x+gh^2/2 \\ uq_y \end{bmatrix}$

$\boldsymbol{g}=\begin{bmatrix} vh \\ vq_x \\ vq_y+gh^2/2 \end{bmatrix}$ $\boldsymbol{S}=\begin{bmatrix} i \\ -\dfrac{gh\partial z_b}{\partial x}-C_f u\sqrt{u^2+v^2} \\ -\dfrac{gh\partial z_b}{\partial y}-C_f v\sqrt{u^2+v^2} \end{bmatrix}$

式中：$\boldsymbol{q}$ 为流量变化矢量；t 为时间；h 为水深；q_x、q_y 分别为 x、y 方向的单宽流量；u 和 v 分别为 x、y 方向的流速；$\boldsymbol{f}$、$\boldsymbol{g}$ 分别为 x、y 方向的通量矢量；$\boldsymbol{S}$ 为源项矢量，包含底坡源项、下渗源项及摩阻力源项；i 为净雨率；z_b 为河底高程；g 为重力加速度；C_f 为床面摩阻系数。

应用堰流公式或孔流公式计算地表汇入雨水井的水量[16]，计算公式见式(2)。当雨水井中水位高程超过地表水位高程时，产生地表溢流，其溢流量采用孔流公式计算，计算公式见式(3)。地表与排水管道积水交换过程如图 2 所示。

$$Q_{in}=\begin{cases} c_w C_i\sqrt{2g}(Z_{2D}-Z_{1D})^{2/3} & Z_{1D}\leqslant Z_{b2D}\leqslant Z_{2D} \\ c_o A_i\sqrt{2g(Z_{2D}-Z_{1D})} & Z_{b2D}\leqslant Z_{1D}\leqslant Z_{2D} \end{cases} \tag{2}$$

$$Q_{out}=c_o A_i\sqrt{2g(Z_{1D}-Z_{2D})} \tag{3}$$

式中：Q_{in} 为地表水通过雨水井汇入管道的流量；Q_{out} 为从雨水井溢流至地表的流量；c_w 为堰流系数；c_o 为孔流系数；C_i 为雨水井入口的周长；A_i 为雨水井入口截面面积；Z_{b2D} 为地表高程；Z_{2D} 为地表水位；Z_{1D} 为雨水井内水位。

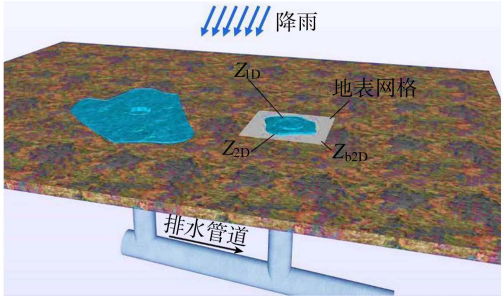


图 2 一二维积水交换过程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of one-dimensional and two-dimensional accumulated water exchange process

2.1.2 求解方法

模型的地表产汇流模拟过程中，利用动力波方法求解二维浅水方程，计算区域采用 Godunov 格式有限体积法进行空间离散[17]。利用底坡通量法求解水深的变化，摩阻源项使用改进的分裂点隐式法提高计算稳定性，并利用二阶显式 Runge Kutta 法保证时间积分的二阶精度[18-19]，质量通量和动量通量通过 HLLC 近似黎曼求解器计算。本文主要对研究区的雨洪过程进行研究，对于一维管网和二维地表的水流交换问题，采用垂向连接的方式进行耦合计算[20]，通过 Visual Studio 平台调用 SWMM 动态链接库的方式进行耦合交互计算[21]。

2.2 数据资料与模型验证

2.2.1 数据资料

a. 地形数据。采用激光雷达与倾斜摄影技术扫描得到研究区的 DEM 和影像数据，综合考虑计算精度和计算效率，将 DEM 处理成 3m 分辨率，共计 2 016×1 342 个结构网格，如图 1 所示。

b. 土地利用类型数据。土地利用类型根据机载激光雷达扫描得到的高清影像数据利用 ArcGIS 软件进行划分，参考第三次全国国土调查数据中长治市城区的土地利用类型划分结果，利用最大似然法将研究区划分为公路、绿地、湖泊、屋顶等 8 种土地利用类型，其中 30%、50%、70%不透水区分别指不透水面积占比为 30%、50%、70%的区域。如图 3 所示。土地利用类型的曼宁系数及下渗率参照城市排涝相关标准及文献[22-23]确定，具体如表 1 所示。

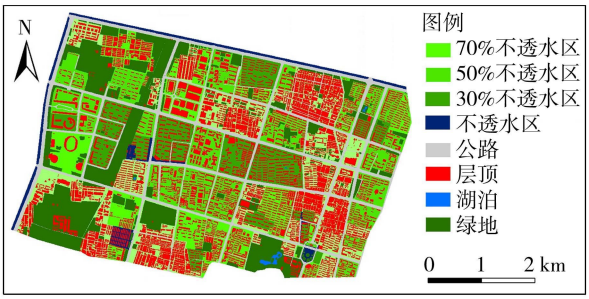


图 3 研究区土地利用类型

Fig. 3 Land use type of study area

c. 排水管网数据。管网模型建立所需的基础数据主要包括雨水口位置、井底高程、管道走向、管径与形状等，本文所用到的管网资料由长治市住房和城乡建设局提供。对研究区的管道、节点、排口进行概化处理，概化后的管道为 2 984 根，节点为 2 955 个，排口为 24 个。研究区内雨水管道均为圆形管道，模型中管道直径参数根据管道实际直径设定。研究区管网分布如图 1 所示。

表 1　不同土地利用类型参数

Table 1　Parameters of different land use types

土地利用类型	下渗率/(mm/h)	曼宁系数	面积/km²	占比/%
公路	0	0.014	2.077 0	11.77
不透水区	0	0.014	0.438 1	2.48
湖泊	0	0.025	0.026 3	0.15
屋顶	0	0.014	4.768 3	27.02
70%不透水区	5.5	0.023	1.955 2	11.08
50%不透水区	16.5	0.040	1.580 2	8.95
30%不透水区	27.5	0.057	2.3932	13.56
绿地	55.0	0.100	4.409 8	24.99

d. 设计降雨。根据《长治市城区暴雨强度公式编修规划》,研究区短历时降雨雨型采用芝加哥雨型,暴雨强度公式见式(4)。根据长治市 1981—2016 年降水量资料,逐年选定各短历时降雨过程的雨峰位置系数,确定长治市综合雨峰系数 $r=0.375$,可见研究区降雨集中且雨峰位置较为靠前。利用芝加哥雨型生成器生成的降雨重现期分别为 5、10、20、30、50、100 a 的短历时(2 h)设计降雨过程如图 4 所示。

$$q=\frac{3\,450.721(1+0.873\lg P)}{(t+21.176)^{0.847}} \tag{4}$$

式中:q 为设计暴雨强度;P 为降雨重现期;t 为降雨历时。

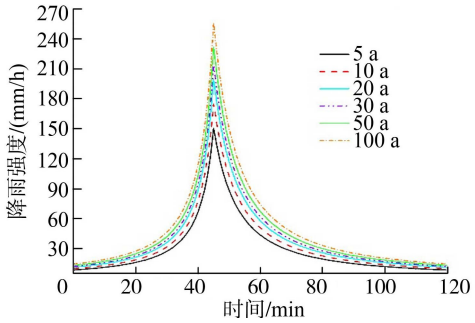


图 4　不同降雨重现期下的短历时设计降雨过程

Fig. 4　Short duration design rainfall processes under different rainfall recurrence periods

e. 易涝点选取。选取的 4 个易涝点分别为:A 点北外环铁路立交、B 点捉马西大街铁路立交、C 点太行西街铁路立交、D 点政务中心及体育路。其中 A、B、C 点为下穿通道,D 点为普通路面易涝点,位置如图 1 所示。

2.2.2　模型验证

选取长治市 2021 年 7 月 2 日的实测降雨及积水数据进行验证,该场降雨历时 2 h,累积降水量为 49 mm,降雨过程如图 5 所示。利用耦合模型分别对 A、B、C 点的积水过程进行模拟,将得到的结果与实测积水深度进行对比,结果表明 A、B、C 点的模拟最大积水水深分别为 0.38、0.42、0.49 m,与实测最大积水水深(0.40、0.45、0.50 m)的相对误差分别为 8.6%、5.0%、3.2%,纳什效率系数为 0.77。可见耦合模型模拟结果与实测数据吻合良好,模型有良好的精度,可用于研究区易涝点积涝特征的研究。

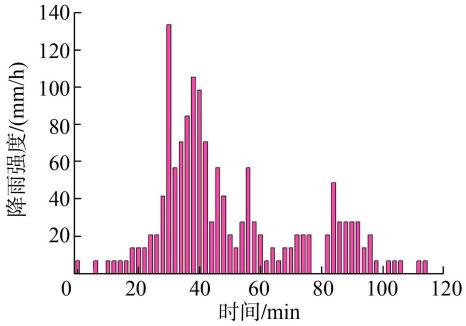


图 5　2021 年 7 月 2 日降雨过程

Fig. 5　Rainfall process in July 2, 2021

3　结果与分析

3.1　易涝点的积涝特征

针对降雨重现期分别为 5、10、20、30、50、100 a 条件下的 6 场短历时设计降雨,对 A、B、C、D 4 个易涝点的积涝特征进行模拟,结果如表 2 所示。

3.2　积水量分析

易涝点的积水量变化过程在一定程度上体现了内涝严重程度。图 6 为不同降雨重现期条件下易涝点积水量变化过程。由图 6 可见,降雨重现期对不同类型的易涝点积水量峰值影响程度不同,并且由于排水条件的差异,对不同下穿通道的影响程度也不同。下穿通道 C 点的积水量增加相对明显,降雨重现期从 5 a 增大到 100 a,C 点积水量峰值由

表 2　不同降雨重现期条件下易涝点的积涝特征

Table 2　Waterlogging characteristics of flood prone points under different rainfall recurrence periods

重现期/a	A 点			B 点			C 点			D 点		
	积水深度峰值/m	积水量峰值/m³	积水面积峰值/m²	积水深度峰值/m	积水量峰值/m³	积水面积峰值/m²	积水深度峰值/m	积水量峰值/m³	积水面积峰值/m²	积水深度峰值/m	积水量峰值/m³	积水面积峰值/m²
5	0.66	2 443	3 717	0.76	4 049	5 364	0.33	512	1 611	0.16	3 223	19 593
10	0.76	4 192	5 544	1.09	7 420	6 840	0.78	2 041	2 637	0.18	3 760	21 609
20	0.86	5 984	6 939	1.25	10 006	8 109	1.11	3 532	3 195	0.18	4 236	23 157
30	0.94	6 935	7 344	1.27	11 362	8 964	1.22	4 387	3 618	0.19	4 483	23 643
50	1.06	8 074	7 614	1.35	12 901	9 585	1.34	5 505	4 131	0.20	4 780	24 354
100	1.21	9 600	7 974	1.46	14 798	10 179	1.55	7 082	4 599	0.21	5 149	25 083

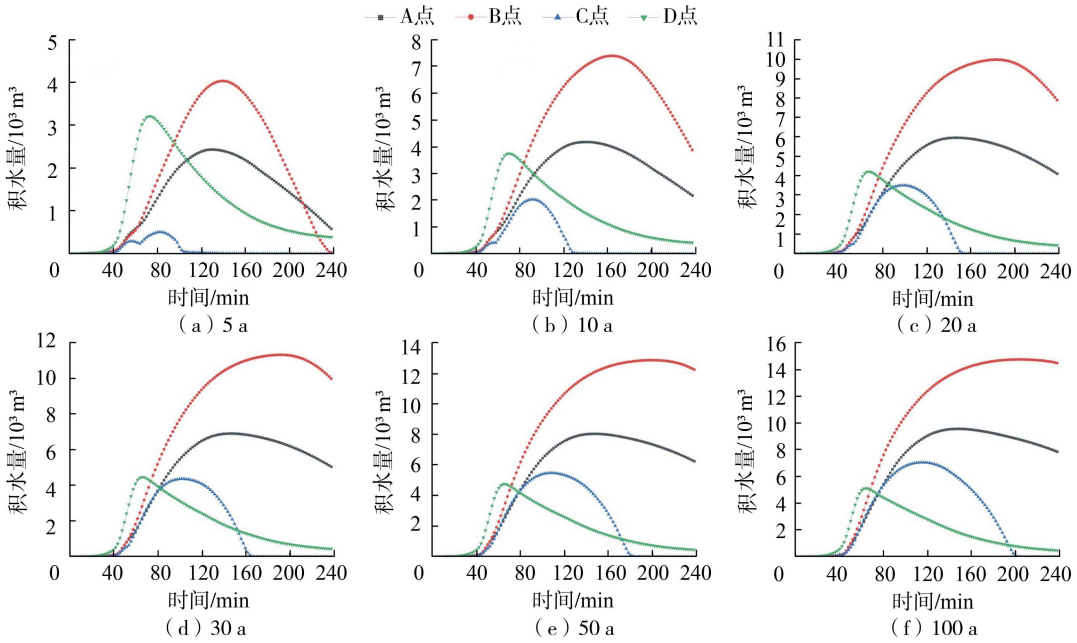


图 6　不同降雨重现期条件下易涝点积水量变化过程

Fig. 6　Process of water accumulation in flood prone points under different rainfall recurrence periods

512.8 m^3 增大到 7 082.9 m^3，增加率为 1 281.3%，而 A 点和 B 点积水量峰值分别增加 292.8% 和 265.5%。降雨重现期对 D 点积水量峰值影响较小，降雨重现期从 5 a 增大到 100 a，D 点积水量峰值由 3 223.7 m^3 增大到 5 149.4 m^3，增加率为 59.7%，远小于下穿通道易涝点。D 点在不同降雨重现期条件下积水量变化曲线形状几乎相同，除积水量随降雨重现期增加而轻微增大外，积水持续时间、积水消退时间都几乎不变。另外，随着降雨重现期的增加，下穿通道积水持续时间变长、积水消退时间滞后，其中 C 点总能在降雨结束后 2 h 内将积水全部排出。

3.3　积水水深分析

积水到达一定深度后会对人民生命财产安全造成严重威胁，故常将积水水深作为判断内涝风险的重要指标。图 7 为不同降雨重现期条件下易涝点积水水深变化过程，图中 t = 45 min 为雨强峰值时刻。由图 7 可见，在 45 mim 之前，4 个易涝点积水水深都很小，且降雨重现期对不同类型易涝点的积水水深影响较小，D 点积水水深稍大于 A、B、C 点；45 min 之后，积水水深迅速增加，积水水深增长速率逐渐加快，

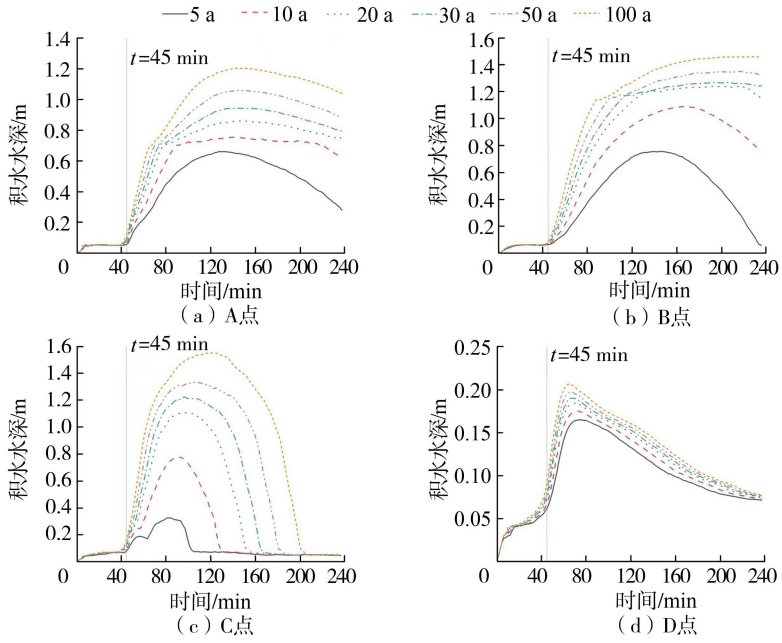


图 7　不同降雨重现期条件下易涝点积水水深变化过程

Fig. 7　Process of water depth variation in flood prone points under different rainfall recurrence periods

直到达到峰值。下穿通道积水水深变化受降雨重现期影响程度远大于普通路面,降雨重现期从 5 a 增加到 100 a,A、B、C 点积水水深峰值分别增加了 0.55、0.70、1.22 m,而 D 点积水水深峰值仅增加了 0.05 m。

表 3 为不同降雨重现期条件下易涝点积水水深最大增长速率。由表 3 可见,下穿通道易涝点积水水深最大增长速率在不同降雨重现期条件下均远大于普通路面易涝点。其中,降雨重现期为 100 a 时,A、B、C 点积水水深最大增长速率分别为 D 点的 340%、350%、670%。降雨重现期对不同类型的易涝点积水水深最大增长速率的影响也不同,降雨重现期从 5 a 增大到 100 a,D 点积水水深最大增长速率为 31.3%,而 A、B、C 点的积水水深度最大增长速率分别为 83.3%、92.1%、581.0%,为 D 点的 266%、294%、1 856%。

表 3　不同降雨重现期条件下易涝点积水水深最大增长速率

Table 3　Max increase rate of water depth in flood prone points under different rainfall recurrence periods

降雨重现期/a	最大增长速率/(m/min)			
	A 点	B 点	C 点	D 点
5	0.017	0.014	0.018	0.007
10	0.022	0.020	0.030	0.008
20	0.027	0.024	0.042	0.009
30	0.031	0.029	0.047	0.009
50	0.030	0.031	0.059	0.010
100	0.034	0.035	0.067	0.010

为更直观地反映易涝点积水状况随时间的变化过程,选取降雨重现期为 30 a 的情况为例,时间节点分别选取 30 min(雨强峰值时刻前)、45 min(雨强峰值时刻)、100 min(雨强峰值时刻后)、180 min(退水期)模拟研究区的积水水深,结果如图 8 所示。由图 8 可见,t = 45 min 时地表开始出现积水;t = 100 min 时地表积水先后达到峰值;t = 180 min 时,下穿通道 A、B 积水未消退,C 点几乎全部消退,地表积水大幅减少。

3.4　峰现时间分析

城市内涝过程中,路面由于相对平滑且下渗率小而成为内涝的易发区,路面易涝点积涝特征峰现时间受地形条件和排水条件的影响较大。图 9 为不同降雨重现期条件下易涝点积涝特征峰现时间。由图 9 可见,降雨重现期越大,A、B、C 点积水量峰值滞后时间越长。其中,A 点积水量峰现时间受降雨重现期影响较小,降雨重现期为 5 a 时积水量峰现时间为 130 min,降雨重现期为 100 a 时积水量峰现时间为 147 min,100 a 相对于 5 a 仅滞后 17 min;B 点积水量峰现时间受降雨重现期影响较大,降雨重现期为 5 a 时积水量峰现时间为 139 min,降雨重现期为 100 a 时积水量峰现时间为 204 min,100 a 相对于 5 a 滞后 65 min。而对于 D 点,降雨重现期为 5 a 时积水量峰现时间为 73 min,降雨重现期为 100 a 时积水量峰现时间为 65 min,100 a 相对于 5 a 提前 8 min。可见,下穿通道与普通路面的易涝点积涝特征峰现时间差别较大,随着降雨重现期的增大,下穿通道易涝点的积水量峰现时间滞后而普通路面易涝点的积水量峰现时间提前;不同易涝点的积涝特征峰现时间变化幅度不同,普通路面易涝点积涝特征

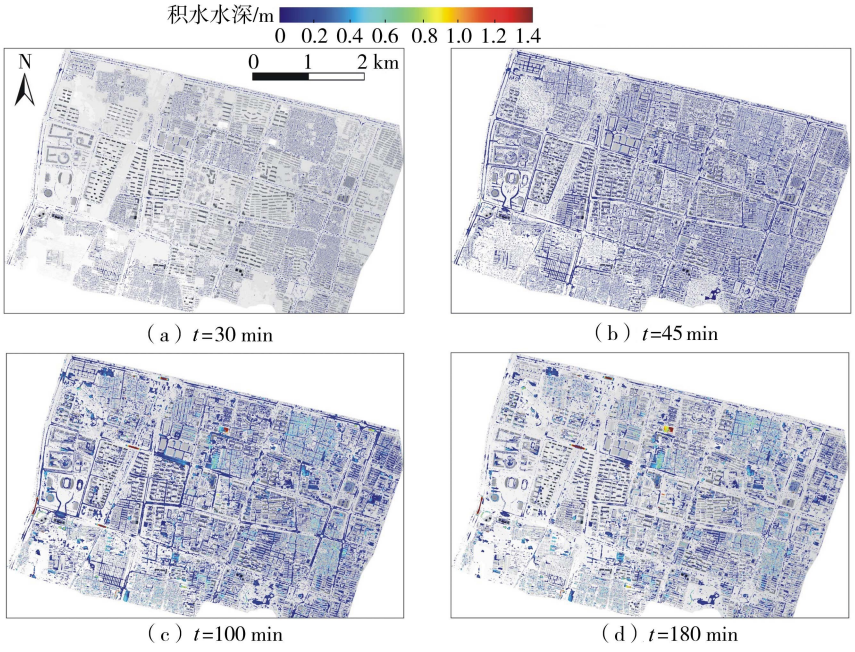


图 8　降雨重现期为 30 a 条件下研究区积水水深模拟结果

Fig. 8　Simulation results of accumulated water depth in study area under condition of rainfall recurrence period of 30 a

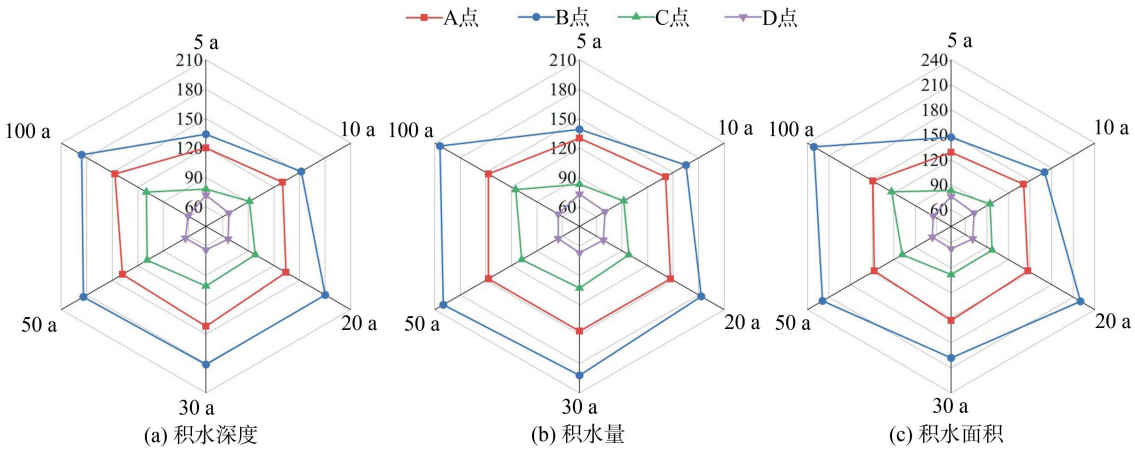


图 9　不同降雨重现期条件下易涝点积涝特征峰现时间(单位:min)

Fig. 9　Time of peak occurrence of waterlogging characteristics in flood prone points under different rainfall recurrence periods (unit: min)

峰现时间变化幅度比下穿通道小,下穿通道中 B 点积涝特征峰现时间变化幅度最大。

由图 9 可见,同一降雨重现期条件下,不同易涝点积水水深峰现时间由先至后依次为 D 点、C 点、A 点、B 点。随着降雨重现期的增加,D 点积水水深峰现时间与 A、B、C 点差值增大。降雨重现期为 5 a 时,A、B、C、D 点积水水深峰现时间依次为 129、147、83、76 min,D 点积水水深峰现时间相对于 B 点提前 71 min,相对于 C 点提前 7 min;降雨重现期为 100 a 时,D 点积水水深峰现时间相对于 B 点提前 166 min,相对于 C 点提前 58 min。下穿通道易涝点之间积水水深峰现时间的差异也随降雨重现期的变化而变化,C 点与 A 点积水水深峰现时间之差在降雨重现期为 100 a 时最小,为 26 min;在降雨重现期为 30 a 时最大,为 55 min。C 点与 B 点积水水深峰现时间之差在降雨重现期为 100 a 时最小,为 64 min;在降雨重现期为 20 a 时最大,为 123 min。

3.5　成因分析

不同降雨重现期下易涝点积水水深和管道水深变化曲线形状相似,为探究下穿通道易涝点的内涝成因,以降雨重现期为 30 a 为例,将易涝点积水水深与管道水深的变化过程进行对比,如图 10 所示。

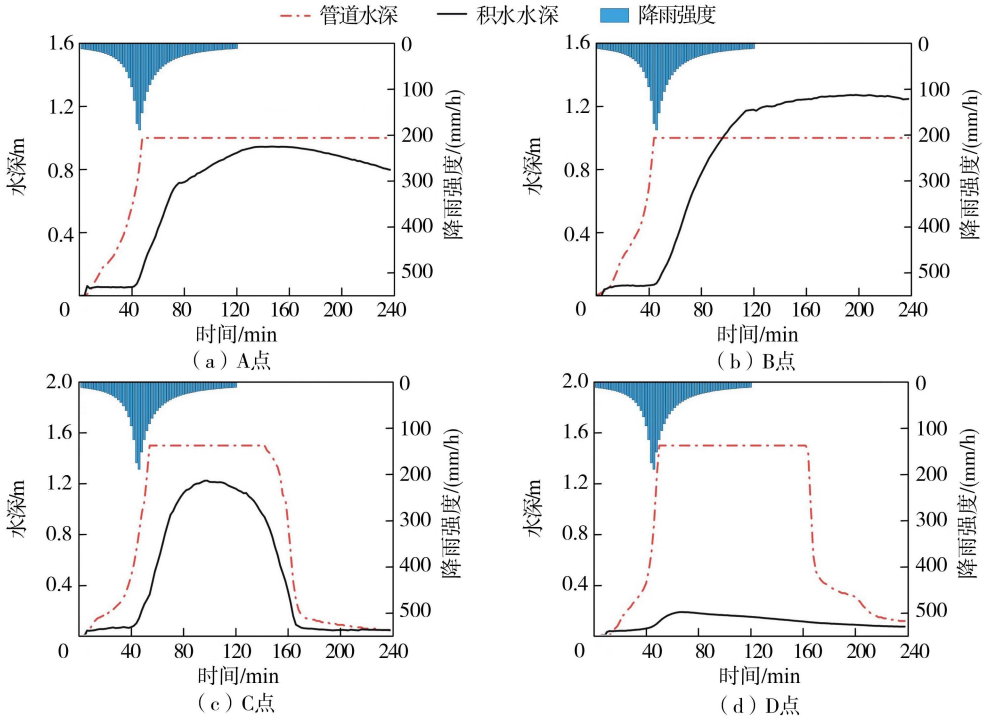


图 10　降雨重现期为 30 a 条件下易涝点积水水深与管道水深变化过程对比

Fig. 10　Comparison of changes in water depth of flooding prone points and pipeline water depth under condition of rainfall recurrence period of 30 a

由图 10 可见,4 个易涝点在雨强峰值时刻之前,管网由空管到满管,排水与蓄水结合使得管网能将地表积水大部分排出或暂时储存;在雨强峰值时刻前后,排水管网作为地下空间被充满,排水速率达到最大值,但由于管网排水能力有限,降雨汇流在易涝点产生积水。在 A、B、C 点,下穿通道由于地势低且汇流面积大,汇流区雨水汇入下穿通道,积水迅速累积。在 D 点,地面易涝点水头高于下穿通道,可以优先将积水通过管网排出。当地面积水几乎排净,管道水头低于下穿通道积水水头时,下穿通道积水开始排出,积水量减少

针对 4 个易涝点进行具体分析,A 点处管道直径为 1 m,在雨强峰值到来前,由于管网蓄排结合,A 点几乎没有产生内涝,但管道水深迅速增加,管网作为地下空间逐渐被充满;在雨强峰值时刻,管道被充满,同时 A 点积水水深迅速增加;直到降雨完全停止,管网依然处于满管状态,但水头有所降低,A 点积水得以排出,积水水深减小;但由于之后管道持续处于满管状态,排水能力有限,A 点积水无法全部排出。B 点处管道直径为 1 m,在雨强峰值到来前,管网和积水水深变化与 A 点相似;但 B 点由于底高程较小,只有当水头更小时才能将积水排出,故 B 点在降雨过程后期积水水深增加速率较 A 点快,峰现时间较 A 点晚;B 点与 A 点管道水深变化曲线形状相似,且几乎不受降雨重现期的影响,故两个易涝点积涝特征受降雨重现期影响相近。C 点的下穿通道底高程低于 A、B 点,但管道直径为 1.5 m,排水和储存积水的能力都较强,因此其管道充满时间晚于 A、B 点,脱离满管状态时间早于 A、B 两点,所以内涝持续时间较短,积水量、积水水深峰现时间较早;随着降雨重现期增大,C 点处管道满管时间增长,积涝时间增长,故其积涝特征受重现期的影响程度远大于 A、B 两点。相比于 3 处下穿通道易涝点,普通路面低洼程度较小,积水水深上限较小,积水累积时积水量很快达到峰值,积涝特征峰现时间较早,在降雨重现期较小时积水量和积水水深峰值就接近上限,故 D 点积涝特征受降雨重现期变化影响较小。

4 结 论

a. SWMM 与 GAST 耦合模型的计算精度高,物理机制明确,其模拟结果的纳什效率系数为 0.77,模拟结果可靠,可用于长治市易涝点积涝特征研究。

b. 研究区下穿通道易涝点积水水深变化受降雨重现期影响程度远大于普通路面易涝点。当降雨重现期由 5 a 增大到 100 a,A、B、C 点积水水深峰值分别增加了 0.55、0.70、1.22 m,而 D 点积水水深峰值仅增加了 0.05 m。同一降雨重现期条件下,下穿通道易涝点积水水深增长速率大,当降雨重现期为 100 a 时,A、B、C 点积水水深最大增长速率分别为 D 点的 340%、350%、670%。

c. 随着降雨重现期的增大,下穿通道易涝点积水量峰现时间滞后而普通路面易涝点时间提前。降雨重现期由 5 a 增大到 100 a,D 点积水量峰现时间提前 8 min,A、B、C 点积水量峰现时间分别滞后 17、65、32 min。同一降雨重现期条件下,易涝点积涝特征峰值出现的顺序依次为:D 点、C 点、A 点、B 点。当降雨重现期为 5 a 时,A、B、C、D 点积水水深峰现时间依次为 129、147、83、76 min, A、B、C 点积水水深峰现时间相对于 D 点分别滞后 53、71、7 min。

d. 降雨雨强达到峰值前,由于排水管网能容纳和排出大部分积水,易涝点仅有少量积水。在降雨雨强达到峰值时,管网被充满,排水能力受限;同时,由于下穿通道汇水面积大,周围雨水汇入,积水量迅速增加。降雨结束后,由于下穿通道底高程较小,而管网水头高于下穿通道积水水头,导致下穿通道积水难以排出,积涝时间长。

参考文献:

[1] 赵彦军,夏军,徐宗学,等. 深圳市雨岛效应分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2021,57(6):768-775. (ZHAO Yanjun,XIA Jun,XU Zongxue,et al. Rain island effect in Shenzhen City[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science),2021,57(6):768-775. (in Chinese))

[2] 白杨,王晓云,姜海梅,等. 城市热岛效应研究进展[J]. 气象与环境学报,2013,29(2):101-106. (BAI Yang, WANG Xiaoyun, JIANG Haimei, et al. Progress of urban heat island effect [J]. Journal of Meteorology and Environment,2013,29(2):101-106. (in Chinese))

[3] 张建云,舒章康,王鸿杰,等. 郑州"7·20"暴雨洪涝几个水文问题的讨论[J]. 地理学报,2023,78(7):1618-1626. (ZHANG Jianyun, SHU Zhangkang, WANG Hongjie, et al. A discussion on several hydrological issues of "7·20" rainstorm and flood in Zhengzhou[J]. Acta Geographica Sinica, 2023, 78 (7): 1618-1626. (in Chinese))

[4] 《中国水旱灾害防御公报》编写组.《中国水旱灾害防御公报 2022》概要[J]. 中国防汛抗旱,2023,33(10):78-82. (Compilation Group of China Flood and Drought Disaster Prevention Bulletin. Summary of China flood and drought disaster prevention bulletin 2022[J]. China Flood & Drought Manageme, 2023, 33 (10): 78-82. (in Chinese))

[5] 国家防范减灾救灾委员会办公室. 2023 年全国十大自然灾害报告[J]. 中国减灾,2024(3):7. (The Office of

the National Disaster Prevention, Mitigation and Relief Commission. The top ten natural disasters in the country in 2023[J]. China Disaster Reduction, 2024(3): 7. (in Chinese))

[6] 李欣怡,侯精明,潘占鹏,等. 城市更新的雨洪过程动态响应模拟研究:以银川市为例[J]. 水利学报,2023,54(11): 1347-1358. (LI Xinyi, HOU Jingming, PAN Zhanpeng, et al. Simulation study on dynamic response of rain and flood process in urban renewal: a case study of Yinchuan City [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2023,54(11):1347-1358. (in Chinese))

[7] 张静,张翔宇,白芝兵. SWMM 模型在城市规划阶段洪涝安全评估中的应用[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(增刊 1): 380-385. (ZHANG Jing, ZHANG Xiangyu, BAI Zhibing. Application of SWMM model in flood safety assessment in urban planning stage[J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2023,54(Sup1): 380-385. (in Chinese))

[8] 丁青云,习雪飞. 基于 SWMM 模型的城市内涝成因分析[J]. 水利水电快报, 2024, 45(4): 31-34. (DING Qingyun, XI Xuefei. Cause analysis of urban waterlogging based on SWMM model[J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 2024, 45(4): 31-34. (in Chinese))

[9] 李国一,刘家宏. 基于 TELEMAC-2D 模型的深圳洪涝风险评估[J]. 水资源保护, 2022, 38(5): 58-64. (LI Guoyi, LIU Jiahong. Flood risk assessment of Shenzhen City based on TELEMAC-2D model[J]. Water Resources Protection,2022,38(5):58-64. (in Chinese))

[10] LI Xinyi, HOU Jingming, PAN Zhanpeng, et al. Responses of urban flood processes to local land use using a high-resolution numeric model[J]. Urban Climate, 2022, 45: 101244.

[11] 马鑫,侯精明,李丙尧. 城市极端暴雨涝情变化特征模拟分析:以宁夏固原市为例[J]. 人民长江, 2023, 54(7): 1-7. (MA Xin, HOU Jingming, LI Bingyao. Simulation on variation characteristics of urban extreme rainstorm and waterlogging: case of Guyuan City, Ningxia Autonomous Region[J]. Yangtze River, 2023, 54(7): 1-7. (in Chinese))

[12] 侯精明,郭凯华,王志力,等. 设计暴雨雨型对城市内涝影响数值模拟[J]. 水科学进展,2017,28(6):820-828. (HOU Jingming, GUO Kaihua, WANG Zhili, et al. Numerical simulation of design storm pattern effects on urban flood inundation[J]. Advances in Water Science, 2017,28(6):820-828. (in Chinese))

[13] 李冰雪,史超,侯精明,等. 沿海城市台风暴雨时空变化致涝特征模拟研究[J]. 水科学进展,2024,35(3):440-452. (LI Bingxue, SHI Chao, HOU Jingming, et al. Characteristics of urban waterlogging induced by spatiotemporal variations of typhoon rainfall in a coastal city[J]. Advances in Water Science, 2024, 35(3): 440-452. (in Chinese))

[14] 马鑫. 极端暴雨致涝特征变化规律研究:以山西省长治市为例[D]. 西安:西安理工大学,2023.

[15] SIMONS F, BUSSE T, HOU J M, et al. A model for overland flow and associated processes within the hydroinformatics modelling system [J]. Journal of Hydroinformatics, 2014, 16(2): 375-391.

[16] 杨东,侯精明,李东来,等. 基于扩散波方法的管网排水过程数值模拟[J]. 中国给水排水,2020,36(15):113-120. (YANG Dong, HOU Jingming, LI Donglai, et al. Numerical simulation of pipe network drainage process based on diffusion wave method [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(15): 113-120. (in Chinese))

[17] 侯精明,王润,李国栋,等. 基于动力波法的高效高分辨率城市雨洪过程数值模型[J]. 水力发电学报,2018,37(3):40-49. (HOU Jingming, WANG Run, LI Guodong, et al. High-performance numerical model for high-resolution urban rainfall-runoff process based on dynamic wave method[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37(3): 40-49. (in Chinese))

[18] HOU J M, SIMONS F, MAHGOUB M, et al. A robust well-balanced model on unstructured grids for shallow water flows with wetting and drying over complex topography [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2013, 257: 126-149.

[19] HOU Jingming, LIANG Qiuhua, ZHANG Hongbin, et al. An efficient unstructured MUSCL scheme for solving the 2D shallow water equations[J]. Environmental Modelling & Software, 2015, 66: 131-152.

[20] LI Donglai, HOU Jingming, ZHANG Yangwei, et al. Influence of time step synchronization on urban rainfall-runoff simulation in a hybrid CPU/GPU 1D-2D coupled model[J]. Water Resources Management, 2022, 36(10): 3417-3433.

[21] 李东来,侯精明,申若竹,等. 基于地块概化和路网精细模拟理念的城市雨洪过程分区自适应模型[J]. 水科学进展, 2023, 34(2): 197-208. (LI Donglai, HOU Jingming, SHEN Ruozhu, et al. Partition adaptive model of urban rainstorm and flood process based on the simulation concept of plots generalization and road networks fine[J]. Advances in Water Science, 2023, 34(2): 197-208. (in Chinese))

[22] 高二鹏. 不同植被边坡糙率研究[D]. 北京:北京林业大学,2014.

[23] 郭雨华,赵廷宁,孙保平,等. 草地坡面水动力学特性及其阻延地表径流机制研究[J]. 水土保持研究,2006,13(4): 264-267. (GUO Yuhua, ZHAO Tingning, SUN Baoping, et al. Study on the dynamic characteristics of overland flow and resistance to overland flow of grass slope [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2006, 13(4): 264-267. (in Chinese))

(收稿日期:2024-05-22 编辑:王芳)

DOI:10. 3880/j. issn. 1004 - 6933. 2025. 02. 016

中国年洪峰季节性的区域特征

丁晨洋[1],杨汉波[1],杨文聪[1],侯爱中[2]

(1. 清华大学土木工程学院,北京 100084; 2. 水利部信息中心,北京 100053)

摘要:为分析中国各地区易受洪水影响的季节,揭示气候变化对洪水季节性的影响,收集了中国 2719 个水文站 1960—2020 年的年最大洪峰数据,采用循环统计方法和聚类分析方法,分析了最大洪峰出现时间的季节规律、空间聚集特征、年际变化规律。结果表明:年最大洪峰发生时间的集中度很高,一般在 6—9 月,由东南向西北逐渐推迟;根据洪水季节性可以聚类为贵州省和重庆市地区(集群 1)、华南地区(集群 2)、云南省等地区(集群 3)、秦岭淮河以北地区(集群 4)4 个集群,其中集群 2 在空间上分布最集中;集群 2 和集群 4 的年最大洪峰发生时间分别呈显著推迟和提前趋势,集群 1 的发生时间基本不变。

关键词:年最大洪峰;洪水季节性;循环统计;聚类分析;区域特征;中国

中图分类号:TV122 **文献标志码**:A **文章编号**:1004 - 6933(2025)02 - 0142 - 07

Regional characteristics of annual flood peak seasonality in China//DING Chenyang[1], YANG Hanbo[1], YANG Wencong[1], HOU Aizhong[2](1. *School of of Civil Engineering*, *Tsinghua University*, *Beijing* 100084, *China*; 2. *Information Center*, *Ministry of Water Resources*, *Beijing* 100053, *China*)

Abstract: In order to determine the flood-prone seasons in various regions of China, and reveal the impact of climate change on flood seasonality, the annual maximum flood peak data of 2719 hydrological stations in China from 1960 to 2020 were collected. The seasonal rules, spatial clustering characteristics, and interannual variation rules of the maximum flood peak occurrence time were analyzed by using cyclic statistical method and cluster analysis method. The results show that the occurrence time of the annual maximum flood peak is highly concentrated, generally from June to September, and gradually delayed from southeast to northwest. According to the flood seasonality, four clusters can be grouped into Guizhou Province and Chongqing (cluster 1), South China (cluster 2), Yunnan Province and other regions (cluster 3), and Qinling Mountains and Huaihe River north (Cluster 4), among which cluster 2 has the most concentrated spatial distribution. The occurrence time of the annual maximum flood peak in cluster 2 and cluster 4 shows a significantly delayed and advanced trend, respectively, while the occurrence time of cluster 1 is basically unchanged.

Key words: annual maximum flood peak; flood seasonality; cyclic statistics; cluster analysis; regional characteristics; China

洪水的季节性可以反映洪水事件在年内发生的规律,揭示洪水发生的季节,为采取洪水应对措施提供依据,对栖息地保护、洪泛平原基础设施和人类社区建设具有重要意义[1]。目前,洪水季节性的研究重点主要是其与气候变化之间的关系[2],因为气候变化会影响洪水频率的增减[3-4]。

关于中国洪水季节性变化及其影响因素的研究较多:Zhang 等[5]分析了我国西北干旱区塔里木河流域洪水的量级、频率和时间变化;Zhang 等[6]利用循环统计方法和修正的 Mann-Kendall 趋势检测方法,分析了广东地区洪水季节性及其影响因素。但这些研究仅限于特定区域,只反映了部分区域洪水季节性的变化特征。Yang 等[7]开展了全国范围的研究,揭示了洪水季节性随纬度的变化规律。但区域特征除了纬度,还包括地形等多种因素。Guo 等[8]研究发现,鄱阳湖流域地形对洪水季节性有重要影响;胡畔等[9-10]研究表明,极端降水和下垫面条件对洪水发生时间具有重要影响。中国气候、地貌等因素多变,洪水成因复杂,不同区域洪水的季节性特征及其影响因素也不尽相同。因此,关于中国洪

基金项目:国家自然科学基金项目(51979140);国家洪水预报平台关键技术研究及应用项目(SKS-2022136)

作者简介:丁晨洋(2000—),男,博士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail:dcy22@ mails. tsinghua. edu. cn

通信作者:杨汉波(1979—),男,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:yanghanbo@ tsinghua. edu. cn

水季节性的区域特征与变化规律及其影响因素，尚有待进一步系统深入研究。

本文基于覆盖中国大部分地区将近 3 000 个水文站的长系列年最大洪峰观测数据，采用循环统计方法和聚类分析方法，开展中国洪水季节性的时空特征以及不同区域的变化趋势研究。

1 研究数据

本文采用年最大洪峰分析洪水的季节性。采用的数据包括各水文站的年最大洪峰及其发生时间，水文站分布如图 1 所示，来自水利部网站（http://www.mwr.gov.cn/english/，last access：7 May 2020）。图 1（本文地图均基于审图号为 GS(2019)1822 号的标准地图制作）中部分水文站位于俄罗斯境内，但控制的流域位于中国境内，因此也加以采用。部分水文站的水文观测值明显受到人为因素的影响，如上游水库的存在使河段的洪水事件频率发生变化[11]，在分析时将这部分流域排除，具体方法是将年最大洪峰流量小于 10 m^3/s 的数据全部剔除；同时，去掉数据长度不超过 10 a 的站点，最后留下 2 719 个水文站。各水文站集水区范围为 1～1 800 000 km^2，数据长度为 11～61 a。

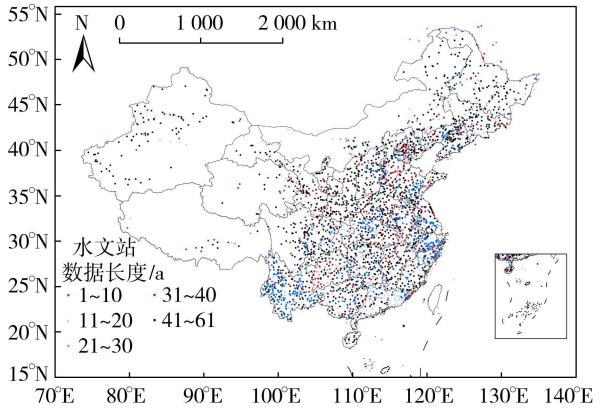


图 1 水文站数据长度空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of data length of hydrographic stations

2 研究方法

2.1 洪水季节性

首先采用圆形均匀性检验[12]去掉洪水不具季节性变化的水文站。取显著性水平 $\alpha=0.10$，对应的阈值为 1.620，当某水文站的检验统计量小于 1.620 时认为数据具有圆形均匀性（即不具季节性变化）。然后，对余下的水文站数据采用循环统计方法计算年最大洪峰的平均季节性[13]。

a. 将第 g 年年最大洪峰发生的日期顺序数 D_g（$D_g=1$ 表示该水文站年最大洪峰发生的日期为 1 月 1 日，$D_g=m_g$ 表示该水文站年最大洪峰发生的日期为 12 月 31 日，m_g 为第 g 年的天数（闰年为 366 d，其他为 365 d）），转化为平均日的余弦分量 $\bar{x}$ 和正弦分量 $\bar{y}$：

$$\bar{x}=\frac{1}{n}\sum_{g=1}^{n}\cos\left(D_g\frac{2\pi}{m_g}\right) \tag{1}$$

$$\bar{y}=\frac{1}{n}\sum_{g=1}^{n}\sin\left(D_g\frac{2\pi}{m_g}\right) \tag{2}$$

式中 n 为研究期间该水文站记录洪峰的年数。

b. 由式(1)和式(2)可以进一步推导出该水文站所有有效年份下年最大洪峰平均发生时间($\bar{D}$)：

$$\bar{D}=\begin{cases}[\tan^{-1}(\bar{y}/\bar{x})]\bar{m}/2\pi & \bar{x}>0,\bar{y}\geqslant 0\\ [\tan^{-1}(\bar{y}/\bar{x})+\pi]\bar{m}/2\pi & \bar{x}<0\\ [\tan^{-1}(\bar{y}/\bar{x})+2\pi]\bar{m}/2\pi & \bar{x}>0,\bar{y}<0\\ \bar{m}/4 & \bar{x}=0,\bar{y}>0\\ 3\bar{m}/4 & \bar{x}=0,\bar{y}<0\\ \text{无法定义} & \bar{x}=0,\bar{y}=0\end{cases} \tag{3}$$

式中 $\bar{m}$ 为每年平均天数，即 m_g 的均值，取为 365.25 d。

采用最大洪峰发生时间集中度（R）表示最大洪峰发生时间的集中程度：

$$R=\sqrt{\bar{x}^2+\bar{y}^2} \tag{4}$$

R 的取值范围为 0～1，$R=0$ 表示各个日期洪水发生的概率相当，$R=1$ 表示每年的年最大洪峰均发生于同一天。

2.2 聚类分析

因为 k 均值聚类方法受离群值的影响比较小，适用于大型数据集[14]，因此洪水季节性的相似区域划分采用 k 均值聚类方法。该方法以 Z-score 标准化[15]后得到的年最大洪峰各月的相对月频率作为 12 个聚类变量。

根据轮廓系数（s_i）[16]与聚类内平方和总和（T_S）两个指标，比较不同聚类数量下的聚类效果，选取最优聚类效果对应的聚类数量。s_i 表示将某个对象与自己集群的相似程度和与其他集群的相似程度做比较，对于 k 个集群（$k>1$），s_i 为

$$s_i=\frac{b_i-a_i}{\max\{a_i,b_i\}} \tag{5}$$

式中：s_i 为水文站 i 的轮廓系数；a_i 为水文站 i 到其所在集群中其他水文站的平均距离；b_i 为水文站 i 到其所不在的其他集群内的所有站点的平均距离的最小值。s_i 的取值范围为[-1, 1]，取值越大表示聚类效果越好。最后求所有水文站轮廓系数的平均值

$\bar{s}$,以表示所有站点的聚类效果之和。

聚类内平方和度量每个聚类内观测值的变异性,为表示聚类的整体效果,计算聚类内平方和总和 T_S 为

$$T_S = \sum_{j=1}^{k} \sum_{i=1}^{n_j} (Y_{ij} - \bar{y}_j)^2 \tag{6}$$

式中:n_j 为集群 j 的水文站数量;Y_{ij} 为集群 j 中的水文站 i 的观测值;$\bar{y}_j$ 为集群 j 中所有水文站观测值的均值。

随着 k 的增加,T_S 减小。综合考虑 $\bar{s}$ 和 T_S,选取 $\bar{s}$ 尽可能大以及 T_S 的减少幅度尽可能小的 k 值作为聚类数量。

2.3 各聚类季节性的年际变化趋势分析

为揭示洪水季节性年际变化的区域特征,对聚类后的各集群进行季节性的年际变化趋势分析。某一集群的第 g 年第 l 月发生年最大洪峰的频率(p_{gl})为

$$p_{gl} = o_{gl}/o_g \tag{7}$$

式中:o_{gl} 为第 g 年第 l 月时该集群内出现年最大洪峰的水文站数量;o_g 为第 g 年该集群内出现年最大洪峰的水文站数量。

对于某一集群的第 l 月,可通过序列 $p_{gl}(g=1,2,\cdots,61)$ 的趋势分析反映该月的年际变化。考虑到大多数集群的部分月年最大洪峰发生的次数较少,在进行分析时结果并不显著,因而仅采用每个聚类出现洪峰次数较多的 5 个月进行趋势分析。此外,计算各聚类每年的平均洪峰发生月,并采用 t 检验判断某集群特定月下的年际变化趋势是否显著。

3 结果与分析

3.1 中国洪水的季节性特征

圆形均匀性检验结果显示,2 719 个水文站中有 28 个不具有洪水季节性。余下的 2 691 个水文站年最大洪峰平均发生时间和年最大洪峰发生时间集中度如图 2 所示。

$\bar{D}$ 具有明显的空间格局。大部分水文站的年最大洪峰发生在 6—9 月,发生时间大致呈现由东南向西北逐渐推迟的格局。在长江中下游流域以南的区域,年最大洪峰通常发生于 6 月。长江中下游地区年最大洪峰通常发生于 7 月。云南省和黄河流域附近年最大洪峰通常发生于 8—9 月。新疆和东北地区年最大洪峰发生时间以 7 月为主。此外,海南省年最大洪峰发生时间通常为 9 月或 10 月。

年最大洪峰平均发生时间集中度普遍较高,R 均值为 0.787,标准差为 0.139。仅沿海地区、长江中下游平原等相对较低。

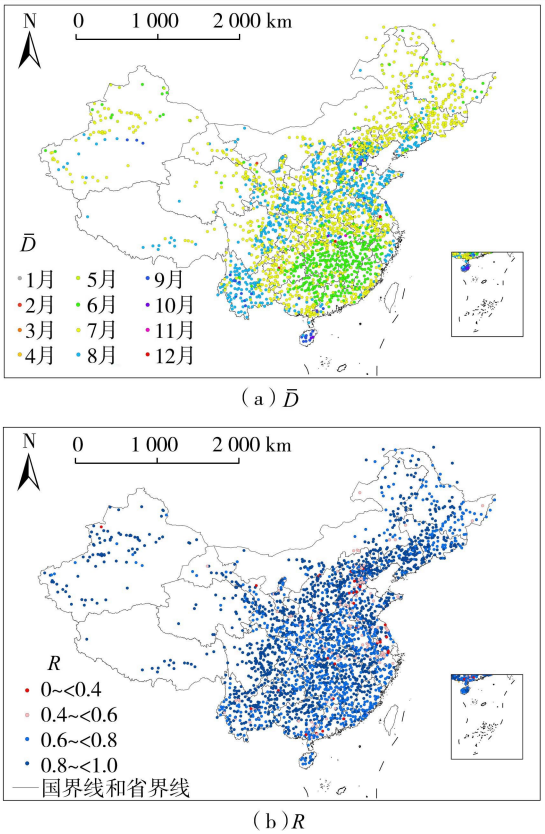


图 2 各水文站年最大洪峰平均发生时间和集中度分布

Fig. 2 Average occurrence time and concentration distribution of annual maximum flood peaks at each hydrological station

3.2 洪水季节性的区域特征

图 3 为 k 为 2~8 时的轮廓系数均值和聚类内平方和总和,k 取 4 或 7 的时候折线下降趋势变缓,结合考虑较大的轮廓系数,选择 $k=4$ 进行聚类,结果如图 4 所示。

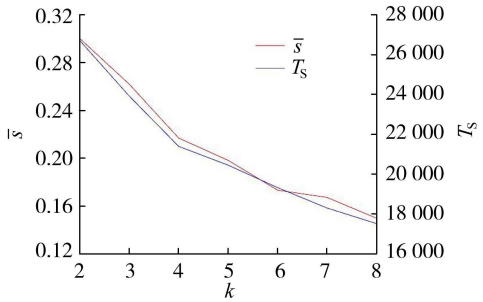


图 3 聚类的数量与 $\bar{s}$、T_S 的关系曲线

Fig. 3 Relation curves of number of clusters withs $\bar{s}$ and T_S

由图 4 可知,集群 1(529 个水文站)主要位于贵州省和重庆市,年最大洪峰平均发生时间为 6 月中旬,洪峰在 5—9 月发生的频率较高(占 93.9%)。集群 2(391 个水文站)主要位于华南地区,年最大洪峰平均发生时间为 5 月底,洪峰在 4—8 月发生的

频率较高(占 89.1%)。集群 3(517 个水文站)位于云南省等地区,在空间尺度上比较分散,年最大洪峰平均发生时间为 7 月中旬,洪峰在 6—10 月发生的频率较高(占 85.8%)。集群 4 位于秦岭淮河以北地区,包含了最多数量的水文站(1 254 个水文站),年最大洪峰平均发生时间为 7 月中旬,洪峰在 5—9 月发生频率最高(占 95.8%),尤其是 7 月和 8 月洪峰发生的频率高达 74.8%。与图 2(a)相比,聚类后集群的空间一致性更好,尤其是集群 2 多数为最大洪峰平均发生时间为 6 月的水文站。这也表明相较平均发生时间这一时间信息,使用更多的时间信息能使聚类更合理,同一集群里的水文站的相似程度更高。

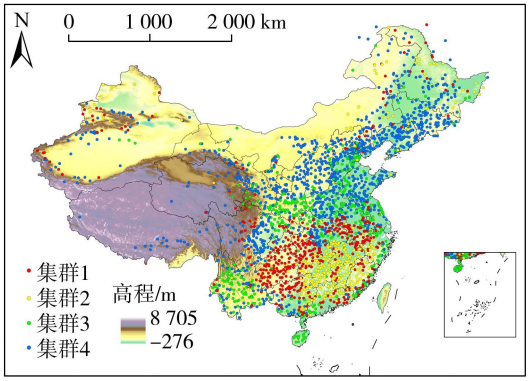


图 4　年最大洪峰的集群空间分布

Fig. 4　Spatial distribution of clusters of annual maximum flood peaks

虽然地理位置信息没有被作为聚类变量,但从聚类结果看,除集群 3 在空间上呈现为几个分散的聚集群落,其余集群基本符合空间聚集的集群模式(西北地区的站点由于数量关系暂时忽略),而且相较最大洪峰平均发生时间的分布,聚类后集群的集聚性更强。

图 5 中到中心的距离代表 R,线圈从里向外分别对应 R 从 0 到 1,以 0.2 的间隔表示。由图 5 可知,集群 3 的集中度最低,集群 4 中大多数水文站的平均季节性有较强的时间集中度(高 R 值),且基本在 7 月、8 月的汛期附近。集群 1 和 2 分布较为分散,与其他集群的平均季节性区别明显。

3.3　年最大洪峰的年际变化趋势

各集群年最大洪峰平均发生时间的年际变化表明,集群 1 和集群 2 的年最大洪峰发生时间呈现推迟的趋势,集群 3 和集群 4 年的最大洪峰发生时间呈现提前趋势,且只有集群 2($p=0.030$)和集群 4($p=0.042$)的趋势显著。

由表 1 可知,集群 1 中 6 月和 7 月发生洪峰的概率呈不显著上升趋势;集群 2 中 4 月发生洪峰的概率呈显著下降趋势($p=0.002$),7 月发生洪峰的概率呈显著上升趋势($p=0.021$);集群 3 中,8 月发生洪峰的概率呈显著下降趋势($p=0.042$);集群 4 中 5 月发生洪峰的概率呈显著上升趋势($p=0.008$),8 月发生洪峰的概率呈显著下降趋势($p=0.047$)。

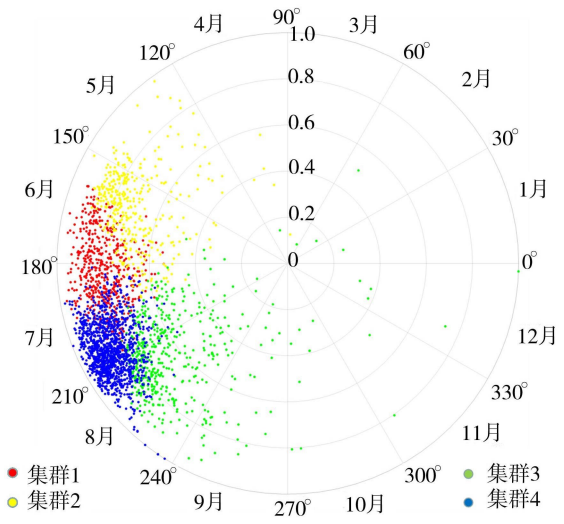


图 5　各水文站洪峰的平均季节性和时间集中度

Fig. 5　Average seasonality and time concentration of flood peaks at each hydrographic station

表 1　各集群特定月下发生年最大洪峰概率年际变化特征

Table 1　Characteristics of the annual maximum flood peak probability of each cluster in a specific month

集群	月份	一元线性回归模型 $y=a+bx$		决定系数	p
		a	b		
1	5	1.542 41	−0.000 71	0.027 59	0.107
	6	−1.513 89	0.000 93	0.008 45	0.225
	7	−0.749 66	0.000 53	0.000 00	0.598
	8	1.299 11	−0.000 59	0.009 64	0.215
	9	−0.418 25	0.000 24	0	0.496
2	4	3.218 16	−0.001 56	0.137 90	0.002
	5	1.820 01	−0.000 80	0.000 00	0.325
	6	0.383 40	−0.000 04	0.000 00	0.962
	7	−3.092 35	0.001 63	0.073 34	0.021
	8	0.373 53	−0.000 14	0	0.770
3	6	−1.469 87	0.000 79	0.035 39	0.081
	7	0.344 40	−0.000 04	0.000 00	0.951
	8	2.610 83	−0.001 20	0.053 66	0.042
	9	0.689 30	−0.000 25	0.000 00	0.702
	10	0.164 20	−0.000 04	0	0.937
4	5	−0.578 48	0.000 31	0.099 40	0.008
	6	−0.916 17	0.000 51	0.021 49	0.135
	7	1.161 69	−0.000 39	0.000 00	0.506
	8	2.504 07	−0.001 08	0.050 05	0.047
	9	−0.344 46	0.000 21	0	0.465

4　讨　论

4.1　洪水季节性的区域特征及影响因素

本文主要分析了中国年最大洪峰平均发生时间

的特征,识别出具有相似洪水季节性特征的 4 个集群。这与小范围尺度上的研究[6]有所不同,流域数量较少的洪水信息不能反映相邻缺失资料流域季节性的特征,而本文采用更多的流域可以了解不同地区甚至是缺失资料流域季节性的特征,发现各地区季节性之间的差异和相似之处。

4 个集群具有显著的空间格局,尤其是东部季风区的洪水发生季节大多为特定月,洪水季节性和地理信息有很大的关联性。由图 6 可知,随着流域面积的变化,流域面积适中的流域(流域面积介于 $10^2 \sim 10^5$ km^2 之间)年最大洪峰平均发生时间以 6 月居多,流域面积较大的流域(流域面积大于 10^5 km^2)年最大洪峰平均发生时间大多集中于 7 月、8 月。此外流域面积与时间集中度的关系并不明显,这与 Hall 等[17]的结论一致,即流域面积等因素对洪水季节性的解释程度较低。发生这种现象的原因一方面可能与大型集水区的空间分布不均匀有关(大型集水区分布在不同地区,地形地貌等因素造成的不确定性较大),另一方面大型集水区的调蓄能力强,雨季时期土壤水饱和时间的延迟等因素可能导致大型流域的洪水滞后。由图 4 可知,集群 1 多数分布于云贵高原,和与其相邻的位于四川盆地的集群 4、位于东南丘陵地带的集群 2 有着明显的分界,由此判断出聚类后的站点对相同地形流域划分的效果较好。

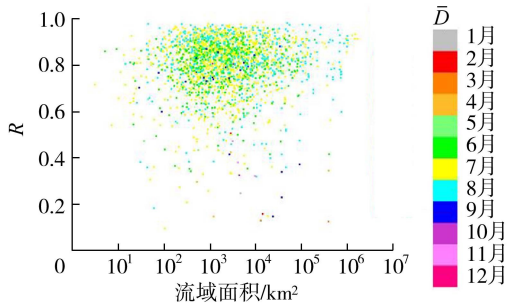


图 6　水文站所在流域面积与 *R* 的关系

Fig. 6　Relationship between the catchment area where the hydrographic station is located and *R*

洪水季节性与降水的季节特征有较大的关联。在聚类分析中,发现在空间分布图上出现了大尺度的统一现象,而且检测到该聚类的分布与一些全国性降水研究的边界相似。如,本文中的聚类边界与降水数据的聚类边界相似[18],尤其降水数据的聚类 6 与本文集群 2 有着相似的区域。另外季风在中国呈现西南至东北的区域走向,不仅包括常年季风区,还包括了季风边缘区,季风的降水趋势在空间上呈现由东南向西北递减的趋势[19]。而洪水发生时间大致是由东南向西北逐渐推迟,大概率是受到东南季风和西南季风的共同影响。此外,东南沿海部分地区,在 9 月或 10 月发生洪水的概率更高,可能是受到当地台风天气的影响。综上所述,洪水季节性受到季风和台风等因素的影响。

土壤水也是影响洪水季节性的重要因素之一。图 7 由 ESA CCI 土壤水分数据集计算得到,可以看出年内土壤湿度最大的时间具有一定的空间集聚性,并且与各水文站洪水发生时间有着类似的分布。年最大土壤湿度的发生月略微提前一些,大部分区域的年最大土壤湿度发生在 6—9 月,这也与流域产流的机制相符合。年最大土壤湿度的发生时间大致呈现由东南向西北逐渐推迟的格局,在长江中下游流域以南的区域,年最大土壤湿度通常发生于 6 月。该区域附近,尤其是该区域以北位于长江流域附近,年最大土壤湿度通常发生于 7 月。再往西北方向,在云南省和黄河流域附近,年最大土壤湿度通常发生于 8 月和 9 月。热带地区的洪水发生时间正在向年初转移[2],而大陆西南部的洪水发生时间则向年末转移,这与平均降水量和极端降水量的变化以及热带扩张导致的最大土壤湿度发生时间的变化相一致。与极端降水相比,高土壤湿度和降水的联合作用是更广泛的洪水驱动因素[20]。这些都可以看出年最大土壤湿度发生时间与洪水发生时间具有较强关联性。

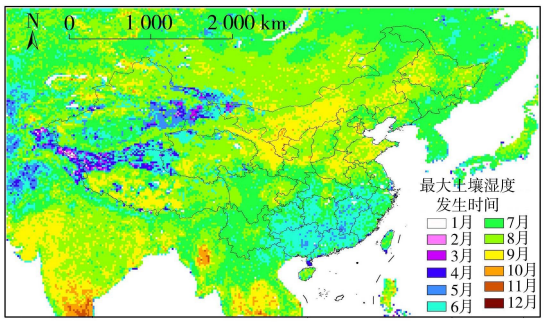


图 7　最大土壤湿度发生时间的空间分布

Fig. 7　Spatial distribution of maximum soil moisture occurrence time

除了降水和土壤水等因素的影响外,还有许多因素也影响着洪水季节性特征。地形地貌就是洪水季节性的影响因素之一[21]。此外,洪水季节性还与融雪等因素相关,降水、融雪和冰川融冰对河流流量的贡献随洪涝类型变化较大,且具有明显的季节性特征[22-23]。除了这些自然因素外,人为活动也对洪水季节性影响较大,大坝和土地覆盖等人为因素对洪水变化起到重要的影响[24],另外城市化等人为活动也可能影响洪水的季节性强度,但影响机制尚未明确[6]。

从研究方法看,本文对研究数据进行了标准化

处理,这有可能会减小各月之间的差异性。从总体来看,本文的区域分布更为零散,误差除了与水文站分布不均、数据缺失有关外,还可能与洪水成因的多样性有关。但是这些因素的影响机制缺乏详细的研究,导致带来的差异可能影响了区域的划分。

4.2 洪水季节性的变化趋势

集群 4 的整体洪水季节性提前,可能与气候变化有关,因为随着全球气温的持续升高,融雪的时间将提前,进而导致融雪引发洪水的时间也提前[25],并且在小流域地区,气候的变化对冰塞洪水的发生时间和规模具有显著影响[26],因此洪水季节性与融雪有关联。另外,年极端降水事件在集群 4 附近区域夏季为减少趋势[27],可能直接影响了洪水季节性的变化[5]。

由图 8 可知,中国洪水季节性变化趋势在空间上的分布联系较弱,并且呈现显著趋势的水文站分布分散,数量较少,可能是因为各水文站时间序列较短,易受到离群值的影响。秦岭淮河以南大部分地区呈现晚发洪水的趋势,可能与 8 月下旬和 9 月登陆的热带气旋有关。秦岭淮河以北大部分地区开始呈现早发洪水的趋势,不仅与热带气旋被秦岭淮河阻隔相关,还与其他因素相关,如更偏北地区的早期洪水、温带天气系统和融雪。另外,华北雨季的降水主要出现在西太平洋副热带高压的西北侧,近年西太平洋副热带高压向北移动时间偏早、位置偏北,造成雨带直接北移至华北黄淮一带。综上,气候变化会导致整个中国的洪水发生时间渐渐趋于一致。

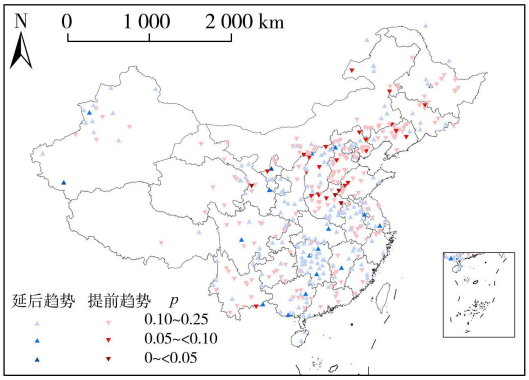


图 8 各水文站的季节性趋势

Fig. 8 Seasonal trends of each hydrographic station

由图 4、图 8 可知,集群 1 和集群 3 水文站的年际变化趋势大多不明显,集群 2 水文站多数为晚发洪水,集群 4 中早发洪水的水文站较多,这与表 1 里的平均趋势吻合较好,验证了聚类后的集群能一定程度上综合反映季节性的年际变化趋势,而不仅仅只是反映其地理特征。因此可以使用具有显著季节性趋势特征的集群判断该集群内无资料流域的洪水季节性趋势。

5 结 论

a. 中国各流域的洪水发生时间集中程度较高,即各流域每年发生洪峰的时间较为接近,可以用年最大洪峰发生时间将中国的流域聚类为 4 个集群,按地理位置大致为贵州省和重庆市地区、华南地区、云南省等地区、秦岭淮河以北地区。

b. 中国的年最大洪峰发生时间具有明显的区域年际变化特征。在秦岭淮河以北地区,年最大洪峰发生时间提前,特别是在 8 月发生的频率呈下降趋势。在云南省等地区,年最大洪峰在 8 月发生的频率呈下降趋势,在 6 月发生的频率呈上升趋势。在华南地区,年最大洪峰发生时间推迟,特别是在 4 月发生的频率呈下降趋势,在 7 月发生的频率呈上升趋势($p<0.05$)。

c. 洪水季节性主要受到降水、土壤水等因素的影响,洪水季节性的变化趋势也与极端降水事件的变化规律和土壤水变化规律相似。另外,融雪、大气环流、土地覆盖等因素也是洪水季节性的重要影响因素。

参考文献:

[1] COLLINS M J. River flood seasonality in the Northeast United States: characterization and trends [J]. Hydrological Processes, 2019, 33(5): 687-698.

[2] WASKO C, NATHAN R, PEEL M C. Trends in global flood and streamflow timing based on local water year [J]. Water Resource Research, 2020, 56(8): e2020WR027233.

[3] 吴娟,林荷娟,姜桂花,等. 太湖流域超标特大洪水风险预警系统建设及应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(2): 164-170. (WU Juan, LIN Hejuan, JIANG Guihua, et al. Risk warning system construction and application under excessive extreme flood[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(2): 164-170. (in Chinese))

[4] HODGKINS G A, WHITFIELD P H, BURN D H, et al. Climate-driven variability in the occurrence of major floods across North America and Europe [J]. Journal of Hydrology, 2017, 552: 704-717.

[5] ZHANG Qiang, GU Xihui, SINGH V P, et al. Magnitude, frequency and timing of floods in the Tarim River basin, China: changes, causes and implications [J]. Global and Planetary Change, 2016, 139: 44-55.

[6] ZHANG Qiang, GU Xihui, SINGH V P, et al. Timing of floods in southeastern China: seasonal properties and potential causes [J]. Journal of Hydrology, 2017, 552:

732-744.

[7] YANG Yixin, YANG Long, CHEN Xiaodong, et al. Climate leads to reversed latitudinal changes in Chinese flood peak timing [J]. Earth's Future, 2022, 10(6): e2022EF002726.

[8] GUO Hua, HU Qi, JIANG Tong. Annual and seasonal streamflow responses to climate and land-cover changes in the Poyang Lake basin, China [J]. Journal of Hydrology, 2008, 355(1/2/3/4): 106-122.

[9] 胡畔,陈波,史培军. 中国暴雨洪涝灾情时空格局及影响因素 [J]. 地理学报,2021,76(5):1148-1162. (HU Pan, CHEN Bo, SHI Peijun. Spatiotemporal patterns and influencing factors of rainstorm induced flood disasters in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(5): 1148-1162. (in Chinese))

[10] 谢志高,贾文豪,王霞雨,等. 西江流域极端降水演变规律及其对洪水径流的影响[J]. 水利水电科技进展,2023,43(6):128-136. (XIE Zhigao, JIA Wenhao, WANG Xiayu, et al. Evolution characteristics of extreme rainfall and influence on flood runoff in Xijiang River Basin[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(6): 128-136. (in Chinese))

[11] CIPOLLINI S, FIORI A, VOLPI E. A new physically based index to quantify the impact of multiple reservoirs on flood frequency at the catchment scale based on the concept of equivalent reservoir [J]. Water Resource Research, 2022, 58(2): e2021WR031470.

[12] MARDIA K V, JUPP P E. Directional Statistics [M]. New York: Wiley, 1999.

[13] BAYLISS A C, JONES R C. Peaks-over-threshold flood database: summary statistics and seasonality [M]. Wallingford: Natural Environment Resenrch Council, 1993.

[14] EVERITT B S, LANDAU S, DANIEL M, et al. Cluster Analysis[M]. New York: John Wiley & Sons, 2011.

[15] ESANTO J. Importance of individual variables in the *k*-means algorithm[C]//Proceedings of the 5th Pacific-Asia Conference on Advances in Knowledge Discovery and Data Mining. Hong Kong: Springer, 2001: 513-518.

[16] ROUSSEEUW P J. Silhouettes: a graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis [J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 1987, 20: 53-65.

[17] HALL J, BLÖSCHL G. Spatial patterns and characteristics of flood seasonality in Europe [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2018, 22(7): 3883-3901.

[18] 李良伟,邹斌,石立坚,等. 基于机器学习的海表温度对中国降水的预测研究[J]. 海洋预报,2021,38(3):29-37. (LI Liangwei, ZOU Bin, SHI Lijian, et al. Prediction of the influence of SST on precipitation in China based on machine learning[J]. Marine Forecasts, 2021, 38(3): 29-37. (in Chinese))

[19] 姜江,姜大膀,林一骅. 1961—2009 年中国季风区范围和季风降水变化[J]. 大气科学,2015,39(4):722-730. (JIANG Jiang, JIANG Dabang, LIN Yihua. Monsoon area and precipitation over China for 1961-2009[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2015, 39(4): 722-730. (in Chinese))

[20] BERGHUIJS W R, HARRIGAN S, MOLNAR P, et al. The relative importance of different flood-generating mechanisms across Europe [J]. Water Resource Research, 2019, 55(6): 4582-4593.

[21] TANG Yihan, CHEN Xiaohong. Seasonality in a tidal reach: existence, impact and a possible approach for design flood level estimation [J]. Science of the Total Environment, 2020, 714: 136478.

[22] LIU Yan, LU Xinyu, ZHANG Liancheng, et al. Quantifying rain, snow and glacier meltwater in river discharge during flood events in the Manas River Basin, China [J]. Natural Hazards, 2021, 108(1): 1137-1158.

[23] 何朝飞,王晓云,陈伏龙,等. 玛纳斯河不同峰量组合下的融雪洪水风险分析[J]. 水利水电科技进展,2023,43(1): 15-21. (HE Chaofei, WANG Xiaoyun, CHEN Fulong, et al. Risk analysis of snowmelt flood under different combination of flood peaks and flood volumes in Manas River[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(1): 15-21. (in Chinese))

[24] YANG Wencong, YANG Hanbo, YANG Dawen, et al. Causal effects of dams and land cover changes on flood changes in mainland China [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2021, 25(5): 2705-2720.

[25] TEUTSCHBEIN C, GRABS T, KARLSEN R H, et al. Hydrological response to changing climate conditions: Spatial streamflow variability in the boreal region [J]. Water Resource Research, 2015, 51(12): 9425-9446.

[26] CUNDERLIK J M, OUARDA T B M J, BOBÉE B. On the objective identification of flood seasons [J]. Water Resource Research, 2004, 40(1): W01520.

[27] 陈海山,范苏丹,张新华. 中国近 50a 极端降水事件变化特征的季节性差异[J]. 大气科学学报,2009,32(6): 744-751. (CHEN Haishan, FAN Sudan, ZHANG Xinhua. Seasonal differences of variation characteristics of extreme precipitation events over China in the last 50 years[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2009, 32(6): 744-751. (in Chinese))

(收稿日期:2024-04-17 编辑:王芳)