

附件 1-1

ICS 编号

CCS 编号

团体标准

X/XXXXXX—XXXX

水库温室气体通量监测技术导则

Technical guide for monitoring of reservoir greenhouse gas fluxes

(征求意见稿)

20XX-XX-XX 发布

20XX-XX-XX 实施

中国水力发电工程学会发布

目次

前言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义	1
4 基本规定	2
5 监测流程	3
6 监测准备	3
6.1 一般要求.....	3
6.2 基础资料收集.....	4
6.3 系统边界、目标与任务的确定.....	4
6.4 监测点位设置.....	5
6.5 监测指标确定.....	7
6.6 监测频次与监测时间的确定.....	7
6.7 数据整理分析与质量控制方案的确定.....	8
6.8 监测方案编写.....	8
7 监测实施过程.....	8
7.1 水-气界面温室气体扩散通量监测.....	8
7.2 水体温室气体气泡释放通量的监测.....	11
7.3 水库消落带温室气体通量的监测.....	12
7.4 温室气体过坝消气释放量的监测.....	12
7.5 其他指标监测.....	13
8 监测数据整理与分析.....	13
8.1 监测数据整理.....	13
8.2 监测数据分析.....	13
9 监测报告编写.....	13
附录 A（规范性）《水库温室气体通量监测方案》编制提纲	15
附录 B（规范性）监测数据整理表格模版	16
附录 C（规范性）《水库温室气体通量监测报告》编制提纲	I
附录 D（资料性）常见温室气体浓度或通量监测方法的基本原理与计算方法	II
参考文献	VI

前言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件由中国长江三峡集团有限公司提出。

本文件由中国水力发电工程学会归口。

本文件起草单位：中国长江三峡集团有限公司环境保护部、中国科学院重庆绿色智能技术研究院。

本文件主要起草人：XXXXXXXXXX。

本文件主要审查人：XXXXXXXXXX。

本文件执行过程中的意见或建议反馈至中国水力发电工程学会。

水库温室气体通量监测技术导则

1 范围

本文件给出了水库温室气体通量监测的基本原则、监测流程、监测准备、监测实施过程、监测数据整理与分析、监测报告编写等内容及要求。

本文件适用于水库水体与水库消落带温室气体通量的监测。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 31705 气相色谱法本底大气二氧化碳和甲烷浓度在线观测方法

GB/T 32151.1 温室气体排放核算与报告要求 第1部分：发电企业

SL654 水利水电工程合理使用年限及耐久性设计规范

国际水电协会（International Hydropower Association） 淡水水库温室气体监测导则（GHG Measurement Guidelines for Freshwater Reservoirs）

国际能源署（International Energy Agency） 水库温室气体净排放量定量分析技术导则（Guidelines for Quantitative Analysis of Net GHG Emissions from Reservoirs）

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

梯级水库 cascade reservoirs

分布在一条河流的上下游有水流联系的多个（串联）水库。

3.2

温室气体 greenhouse gas

大气层中自然存在的和由于人类活动产生的能够吸收和散发由地球表面、大气层和云层所产生的波长在红外光谱内的辐射的气态成分。

注：本导则涉及的温室气体只包含二氧化碳（CO₂）、甲烷（CH₄）、一氧化二氮（N₂O）。

3.3

通量 flux

在流动环境中，单位时间内流经某单位面积的某属性量。

3.4

温室气体排放和去除 greenhouse gas emissions and removals

向大气排放温室气体、或从大气中吸收或去除温室气体的过程、活动或机制。

3.5

水-气界面温室气体扩散通量 air-water diffusive flux

温室气体（CO₂、CH₄、N₂O 等）以扩散或弥散方式在单位时间内通过单位水面面积的物质的量（或

质量)。

3.6

水体温室气体冒泡通量 ebullitive flux

温室气体(CO_2 、 CH_4 、 N_2O 等)在水面以下形成气泡,并以冒泡的方式在单位时间内通过单位水面面积的物质的量(或质量)。

3.7

水库消落带 reservoir drawdown area

受水库调度运行等因素影响,水库水位涨落而使其库周周期性地出露于水面的特殊陆地区域,是水生生态系统和陆生生态系统交替控制的过渡地带。

3.8

温室气体过坝消气释放 greenhouse gas emissions due to degassing

水体在流经水坝后,因上下游压强存在差异或因高速水流在水轮机组或泄洪构筑物中的剧烈掺混,导致温室气体从水流向大气的释放。

3.9

总排放量 gross emissions

在水库与大气间交换的各个过程或环节中温室气体排放和去除的总和,正值表示水库向大气排放温室气体的总量;负值表示水库从大气中吸收或去除温室气体的总量。

3.10

净排放量 net emissions

水库温室气体总排放量与蓄水前相同空间范围内淹没区域(陆域、水域)温室气体排放量的差值,并扣除其他人类活动(如点面源污染排放等)对水库温室气体排放量的贡献。

3.11

库龄 reservoir age

水库正常运行到计算时止的时间长度,通常以年来表示,以水库建成并且首次蓄水至正常运行水位的当年为零点。

3.12

初始年 initial year

将水库由首次蓄水至设计运行水位或正常水位的年份,作为水库温室气体通量监测评估的初始年,即库龄为零时的年份。

3.13

水库生命周期 life cycle of a reservoir

水库由首次蓄水至设计运行水位或正常水位开始,直至水库完全失去其使用功能或至拆坝的时间范围。

4 基本规定

4.1 应依据国家法律法规,贯彻执行国家经济发展、生态环境保护与应对气候变化的相关方针政策;遵循水资源可持续利用、保障流域生态安全、减缓水利水电工程对气候变化影响、支撑行业碳达峰与碳中和相关工作、有的放矢、突出重点等原则。

4.2 应充分结合水利水电工程咨询研究成果与工程设计报告,明确水库服务功能、运行目标、设计寿命、调度运行规程等工程特征或关键设计参数,掌握水库修建前后对流域水资源调配影响的程度与范围。

4.3 应充分考虑受水库影响区域陆地、水域生态系统以及碳氮生物地球化学过程发生的变化，以水库温室气体净排放量评估作为目标，确定水库温室气体通量监测评估的系统边界，确定水库修建与蓄水成库的过程与关键时间节点，并据此编制监测评估工作方案。

4.4 应能够反映水库水体及水库消落带区域温室气体与大气间各种交换途径或过程。应能够与水文监测、水环境监测与水生态监测相结合，准确反映水库关键生源要素的生物地球化学循环特征与温室气体源汇变化特点，能够满足水库温室气体净排放量模型对数据量和数据质量的要求。

4.5 应充分考虑水库自然环境与社会经济发展特点，结合当前技术经济条件和科学研究前沿，综合体现先进性、经济性、可靠性与稳定性的要求，并注重新方法、新技术的应用，提高水库温室气体通量监测评估工作的科学性、客观性与可操作性。

5 监测流程

水库温室气体通量监测工作，宜基于图 1 所示的基本流程开展。

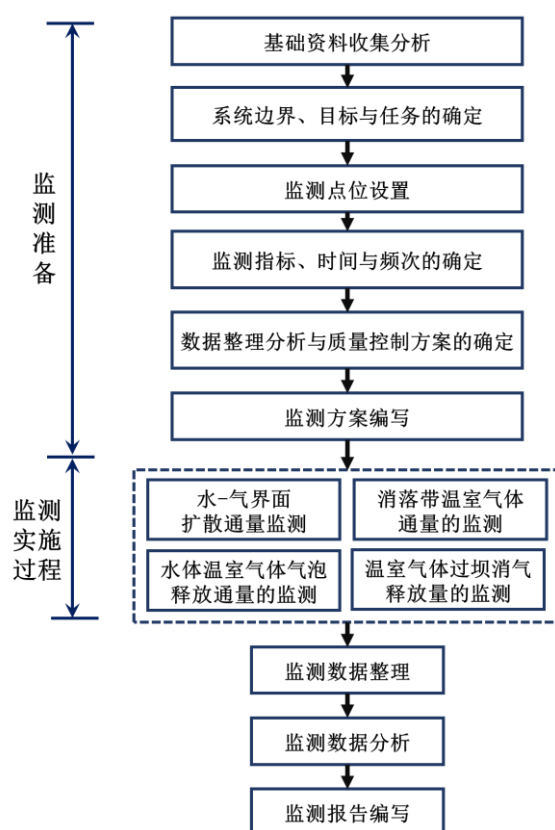


图 1 水库温室气体通量监测工作一般性流程

6 监测准备

6.1 一般要求

6.1.1 水库温室气体监测，一般应涵盖以下交换途径：

- a) 水库水-气界面温室气体扩散交换；
- b) 水库库湾浅水区域或其他局部区域温室气体气泡释放；

- c) 水库消落带土壤与大气之间的温室气体交换;
- d) 水库近岸区域(含消落带)水生或陆生植被与大气之间的温室气体交换;
- e) 水在流经水坝(引水发电系统或泄水建筑物)过程中因压力变化而产生的温室气体消气释放;
- f) 水库坝下河道水体与大气之间的温室气体交换。

6.1.2 开展水库温室气体通量监测前,应编制详尽的监测方案。

6.1.3 监测方案应以开展水库温室气体净排放量评估为目标导向进行编制,应能反映对象水库温室气体源汇变化过程,包括即将开展监测评估工作的具体内容和工作量,应具有可操作性。

6.1.4 监测方案编制,包括但不限于以下一般性流程:

- a) 基础资料收集;
- b) 系统边界、目标与任务的确定;
- c) 监测点位设置;
- d) 确定监测方法与监测频次;
- e) 确定数据整理分析与质量控制方案;
- f) 编写监测方案。

6.2 基础资料收集

6.2.1 基础资料来源,包括但不限于:

- a) 项目可行性研究报告;
- b) 项目环境影响报告;
- c) 项目工程设计报告或竣工验收报告;
- d) 水利水电工程调度运行规程等。

6.2.2 应掌握水库所在流域的自然环境条件、地形地貌特征、土壤与岩性特征、地球化学背景、人类聚居区域分布及社会经济发展情况等。

6.2.3 应根据相关技术资料,结合现场实地调查,明确水库及其影响区域的空间范围,掌握水库影响区域范围内土地利用、植被覆盖、土壤与岩性特征、人类聚居区域分布与社会发展情况,掌握点源或面源污染负荷情况。

6.2.4 应根据相关技术资料,掌握水库及其坝下河段水文水动力条件变化情况、水库泥沙输移与淤积态势现状或预测情况、水库水温分层特征等。

6.2.5 应掌握水库水体及其水库消落带区域已有的或规划建设的气候气象、水文径流、水环境与水生态等监测站网空间分布,收集已有的监测资料或数据序列。

6.2.6 应在掌握各方面资料基础上,从物理、化学、生物等方面,综合汇总并梳理出水库系统的主要特点,为后续确定系统边界、监测采样方案等提供基础。

6.3 系统边界、目标与任务的确定

6.3.1 系统边界

6.3.1.1 空间范围

6.3.1.1.1 应根据水库水体及其水库消落带区域与大气间的温室气体交换,明确水库上游、下游的控制断面,确定上游、下游控制断面之间的流域范围与水库范围。

6.3.1.1.2 蓄水前受影响区域的空间范围,应与蓄水后水库的空间范围(流域范围、水库范围)保持一致。

6.3.1.1.3 对于梯级水库而言,可将上下游若干个首尾相连的水库作为整体单元划定空间范围。

6.3.1.1.4 水库上游控制断面（入库背景断面），应设置于水库回水区末端入库河流的自然河段上。上游控制断面应不受水库蓄水与调度运行影响。

6.3.1.1.5 水库下游控制断面，原则上应设置在水坝下游河段水体与大气温室气体交换通量恢复至自然河流水平的区段。条件不具备时，可结合临近大坝下游的水文站（或水位站）所在位置设置控制断面；也可通过野外调查与实地研究，选择与成库前自然河段水文水动力特征、河道形态等相似的区段，设置下游控制断面。

6.3.1.2 时间范围

6.3.1.2.1 宜在水库生命周期的尺度下开展水库温室气体通量监测与净排放量评估。可参考《水利水电工程合理使用年限及耐久性设计规范》SL654 划定的水库使用寿命年限，确定生命周期终止年。

6.3.1.2.2 应掌握其首次蓄水至设计水位或正常蓄水水位的时间，并作为初始年。初始年之前为水库蓄水前状态；初始年之后为水库蓄水后状态。

6.3.1.2.3 宜在水库蓄水前和蓄水后分别选定反映不同状态下的典型年份，作为典型水平年。典型水平年的确定宜满足以下基本规定：

- a) 对水库蓄水前状态，应根据蓄水前受影响区域特征、水库移民搬迁与库底清理等前期工程进度安排情况，综合确定蓄水前受影响区域温室气体通量监测评估的典型水平年。
- b) 对水库蓄水后状态，应结合水库温室气体监测评估工作开展的具体年份、水库调度运行规程、库区社会经济发展与污染排放情况等，综合确定不同典型水平年。

6.3.2 目标与任务

6.3.2.1 应以水库温室气体的净排放量作为导向，或以企业碳盘查与碳管理相关工作需求作为主要的方向，确定水库温室气体通量监测工作的目标。

6.3.2.2 监测目标的描述宜包含但不限于以下内容：

- a) 监测对象；
- b) 开展监测工作缘由；
- c) 监测实体；
- d) 监测目的；
- e) 监测结果用途；
- f) 监测成果的意义。

6.3.2.3 应结合系统边界与监测工作目标，说明水库温室气体通量监测的具体要求，宜编制监测工作的任务清单。

6.3.2.4 应结合基础资料收集与水库温室气体产汇机制，阐明水库温室气体通量监测任务的重点、难点。

6.3.2.5 宜描述监测任务起止的时间节点，明确任务参与的团队与任务组织分工情况。

6.3.2.6 对长期监测任务，宜划分不同阶段，明确阶段性工作的重点、难点与任务分工组织要点。

6.4 监测点位设置

6.4.1 蓄水后水库温室气体通量监测点位设置

6.4.1.1 在划定的空间范围内，应根据水库与大气温室气体交换特征、碳氮生物地球化学过程、人类活动特点等对水库进行逐级监测分区，基本规定包括：

- a) 应首先划分为大坝上游水库范围、过坝下泄设施与大坝下游受影响河段共三个基本区域。
- b) 对有调蓄功能的水库，应结合水库调度运行规程，划分水库变动回水区与常年回水区的空间范

围，应同时划分并明确水库消落带空间范围。

c) 应根据水库形态、调度运行特点、水文水动力特征、人类活动（如污染负荷分布）等甄别大坝上游水库范围内温室气体通量基本特征和主要交换途径，并据此进行更细化的监测分区。

1) 对上游来水相对单一、水库水面形状相对顺直的河道型水库，通常可根据水体滞留时间，自上游向下游纵向沿程划分为库尾河流区（年平均水体滞留时间通常小于 20 天）、库中过渡区（年平均水体滞留时间约为 20 天~100 天）、库首湖泊区（年平均水体滞留时间通常超过 100 天）。

2) 对有不同来水方向、或水库水面形状呈树枝状类型的水库或者水库库湾水域，宜根据不同区域水体更新交换特征，结合水深变化、水库与大气温室气体交换途径（扩散释放、气泡释放），确定监测分区。

d) 在水库消落带范围内，宜根据消落带地形地貌特征（高程）、土壤性质分布、植被覆盖与土地利用的情况，划分监测分区。

e) 对于有冬季冰封期的水库，宜甄别冬季水库冰封出现范围，结合现场安全作业条件，划定能够开展冬季水库水-气界面温室气体通量监测的空间范围。

6.4.1.2 监测断面或点位设定，应满足以下基本规定：

a) 在划定的每一个监测分区内，应确定数量若干的监测断面（或点位），开展定位跟踪观测。

b) 应结合所选择的水库温室气体通量监测技术要求以及所需的其他监测指标的要求确定监测断面（或点位）。

c) 对于有水文水质监测断面（或点位）的水库区段，应首先考虑在上述断面（或点位）设置水库温室气体通量监测断面（或点位）。

d) 对于有排污口或近岸污染带的情况，宜在排污口附近或污染带范围内设置监测点位，并同时设置对照断面（或点位，如上游未受影响区域）开展水库温室气体通量监测。

e) 应充分考虑温度、溶解氧等关键理化指标在水库出现垂向分层的可能性。应结合水库垂向温度、溶解氧等分层特征对水库垂向生态环境要素、温室气体溶存浓度等开展监测。

f) 应在大坝上游和下游分别设置监测断面，监测断面应尽可能接近大坝。应对大坝上游监测断面温室气体浓度垂向分布进行监测；应根据大坝坝前不同引水孔道的垂向深度分布情况设置不同采样深度。应对大坝下游监测断面处温室气体浓度开展监测。在有条件的情况下，宜对水轮机组进口、出口蜗壳处、电站尾水排放区域、泄水建筑物下游采集水样或开展温室气体通量监测。上述工作最终可获得水在流经水坝（引水发电系统或泄水建筑物）过程中因压力差而产生的温室气体消气释放量。

g) 应对大坝至其下游控制断面处的河段开展温室气体通量的监测。监测断面设置应根据河段长度，并结合常规水文水质监测分布情况设置具体的监测断面。

h) 宜考虑水库干支流交汇区等水动力条件复杂区域对温室气体排放产生的影响，增设监测断面。

i) 对于有冬季冰封期的水库，宜根据冬季冰封情况和现场安全作业条件，结合水文水质监测断面布设情况，适当调整水库温室气体监测断面。

6.4.2 蓄水前受影响区域温室气体通量的监测断面或点位设置

6.4.2.1 应确定蓄水前受影响区域内地形地貌特征与土地利用类型，结合地形地貌条件，确定不同土地利用类型面积、所处位置等。

6.4.2.2 对蓄水前的陆地生态系统（如森林、农田、草地、城市用地等），应根据不同土地类型生态系统温室气体通量监测要求，设置监测点位。每一种土地利用类型，宜至少设置 1~2 个监测点位。

6.4.2.3 对蓄水前的水域生态系统（如自然河道、湖泊、池塘等），应根据水域生态系统温室气体源汇

变化特点，在每一种类型的水域生态系统中，结合水文水质监测系统的断面设置方法，设置监测点位或监测断面。

6.5 监测指标确定

6.5.1 监测指标应能够用以支撑水库蓄水前后温室气体通量计算、总排放量估算与源汇特征分析。

6.5.2 可根据水库温室气体通量监测、总排放量估算与源汇特征分析的不同工作要求，将监测指标分为必要性指标和支撑性指标两大类。

6.5.3 必要性指标是指为获得水库温室气体通量必需开展的监测指标，包括：

- a) 关键界面或过程的 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 等温室气体通量：水-气界面扩散释放通量、气泡释放通量、消落带土-气界面交换通量、过坝下泄消气释放通量；
- b) 现场大气中 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 等温室气体分压；
- c) 溶存于水体中的 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 等温室气体浓度；
- d) 现场水体理化指标：水温、pH 值、溶解氧、电导率、总碱度；
- e) 现场气象条件：气温、气压、风速、湿度。

6.5.4 支撑性指标是指为支撑对水库温室气体总排放量估算、或对温室气体源汇变化主要影响因素或关键过程开展分析所需的生态环境指标。可结合监测目的与工作深度要求选择具体的支撑性指标开展同步监测。支撑性指标包括以下几类：

- a) 其他气象指标：太阳辐射强度、光合作用有效辐射强度、日照小时数、监测时期降雨量等；
- b) 水文水力指标：流量、水位、流速、水体含沙量、泥沙淤积量等；
- c) 水环境与水生态指标：水体透明度或水下辐射强度、水体化学需氧量或生化需氧量、水中碳及其主要赋存形态、氮磷等营养物及其的主要赋存形态、水体叶绿素 a 浓度、藻类细胞密度或初级生产力水平；
- d) 陆地生态系统指标：包括水库消落带或淹没区不同土地利用类型及其变化、消落带或淹没区土壤有机质、土壤氮磷等关键生源要素含量及其主要赋存形态、消落带或淹没区植被与大气间温室气体交换通量等；
- e) 水库碳沉降与埋藏相关指标：碳沉降通量、永久性碳埋藏量等。

6.6 监测频次与监测时间的确定

6.6.1 监测频次

6.6.1.1 应根据监测评估工作的具体任务要求、结合对象水库自然地理特点、调度运行规程与经费预算情况确定监测频次。

6.6.1.2 应开展至少一个完整周年的水库温室气体通量监测。宜根据全年季节变化、水库调度运行特征与现场环境条件，选择合适的监测时机。全年监测频次应不少于 4 次。

6.6.1.3 应结合泄水构筑物运行情况，对不同泄水运行条件下过坝水流开展温室气体监测，获取下泄过程中的温室气体消气释放量。

6.6.2 监测时间选择

6.6.2.1 应充分考虑不同监测分区或不同交换途径温室气体通量的昼夜变化特征，确定能够反映全天温室气体通量平均水平的时间区段。

6.6.2.2 有条件的情况下，宜对代表性的监测区段或点位开展不同交换途径（如水-气扩散释放、水-土交换等）温室气体通量的 24 小时昼夜连续监测，根据日均值水平确定采样当日的具体时间。

6.6.2.3 若没有 24 小时昼夜连续监测结果的数据予以支持，可在采样当日 9:00~11:00、15:00~17:00

开展监测。

6.7 数据整理分析与质量控制方案的确定

监测方案编制中，数据整理分析与质量控制方案，应包括但不限于以下内容：

- a) 现场监测采样的基本流程与质量控制方案（外业）、实验室样品处理、测试分析的基本流程与质量控制方案（内业）。监测工作中对每个点位的具体指标应有不少于 3 个平行样以满足数据质量控制要求；
- b) 应明确水库温室气体监测数据记录（外业、内业）、整理与管理体系，包括数据来源、数据获取时间、相关责任人等信息，实现从源头到终端的数据全程管理；
- c) 水库业主（如水电企业）温室气体核算和报告的相关规章制度，包括负责机构和人员、工作流程和内容、工作周期和时间节点等；应明确专职人员负责温室气体通量核算和报告工作；
- d) 宜结合水库业主（如水电企业等）关于水库温室气体通量报告的内部审核制度，明确水库温室气体通量数据交叉检验的方法，明确可能产生的数据误差的风险及其来源，并明确相应的解决方案。

6.8 监测方案编写

水库温室气体通量监测方案编写，宜符合附录 A 的给出的编制大纲。

7 监测实施过程

7.1 水-气界面温室气体扩散通量监测

7.1.1 一般规定

7.1.1.1 水-气界面温室气体扩散通量监测，通常包括以浮箱法为主要方式的直接测量方法和以薄边界层模型估算法（以下简称“模型估算法”）为主要方式的间接估算法。

7.1.1.2 宜参考附录 D 中两种方法的基本原理与适用条件选择合适的监测方法。一般情况下，宜首先考虑基于浮箱的直接测量方法。

7.1.2 浮箱法

7.1.2.1 浮箱设计与制作

7.1.2.1.1 为保证测量过程中浮箱处于稳态条件，浮箱设计应满足以下要求：

- a) 浮箱应具有能够在水面保持稳定姿态的能力，应具备一定的抗风浪能力，保证测量过程中的气密性。
- b) 浮箱应具有一定的保温能力，能够在测量时间范围内保证箱体内气温同环境温度相当，避免在测量过程中箱体内气温剧烈变化。应在箱体内设置气温计，获得测量过程中箱体内的气温变化。
- c) 浮箱内应内置小型风扇以促进气体混合，使采集样品均匀。
- d) 相对于底面积，浮箱尺寸不应太高。相对高度太大的浮箱，既不利于箱体内气体混合，抗风浪能力也可能不佳。
- e) 若采用间歇测量的方案，浮箱应设置大气压强平衡软管，且平衡软管应具有足够的长度，使得平衡软管的总容积宜 2 倍或 3 倍于单次抽气的气体体积。

7.1.2.1.2 一般情况下，浮箱以底面面积约为 0.2m^2 、有效容积约为 30L 为宜。浮箱置于水面上后，

箱体内部高度宜为 15cm，箱体吃水深度宜控制在 2cm~4cm（不超过 10cm 为宜）。若设置平衡软管，平衡软管直径约 5mm~8mm，长度约 2m~3m，卷盘于浮箱外部表面。

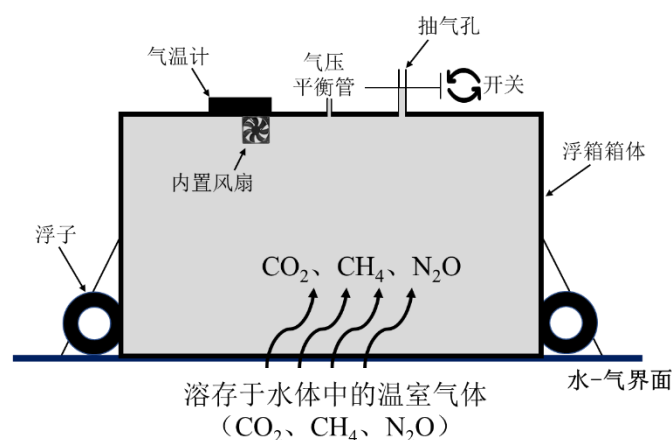


图2 浮箱的基本配置示意图

7.1.2.2 浮箱法的间歇测量方案

7.1.2.2.1 在一定的时间内，按照固定的时间间隔，抽取等量体积的气体，测量气体温室气体浓度，根据温室气体浓度随时间的变化，进行线性拟合，获得温室气体浓度随时间变化的变化率（斜率）。

7.1.2.2.2 采用间歇测量方案，应考虑以下几个方面的影响：

- 应结合箱体容积、所监测点位水-气界面温室气体扩散通量的大致估算范围，并结合现场水流及风浪条件，确定间歇测量的时间间隔长短。一般情况下，宜使整个测量过程控制在 30min 内。
- 应考虑在整个测量周期内，设置 5~7 个等间隔的采样时间节点，进行间歇性采样。
- 在采样时间节点上，每一次从箱体内抽取的气体体积，宜不超过整个浮箱有效容积的 5%，以减少抽气对箱体内稳态环境的干扰。
- 间歇测量的初始时刻，宜先开启箱内风扇，使箱体内气体混合一定时间后（通常为 20 秒~30 秒），开始抽取箱体内温室气体样品，并注入气袋中。气袋中的气体样品取回实验室后采用气相色谱法或其他仪器直接测量。
- 间歇测量的初始时刻和结束时刻，应测量环境大气中的温室气体浓度，作为初始状态或结束状态的参考；应同时记录箱体内气温变化，支撑对水-气界面温室气体扩散通量的计算。
- 间歇测量的温室气体浓度，宜结合采样时间间隔，采用线性拟合方式获得斜率。拟合度（ R^2 值）应大于 0.85。若个别点位温室气体浓度测试值出现显著异常，可在实验数据处理中按照相关规则予以剔除。

7.1.2.3 浮箱法的连续测量方案

7.1.2.3.1 可采用能够连续监测环境气体样品温室气体浓度的仪器对浮箱箱体内的气体浓度变化进行连续测量。

7.1.2.3.2 若采用连续测量方案，应结合连续测量的特点对浮箱箱体设计和测试条件进行一定优化：

- 应结合仪器使用条件，选择开环或闭环的测量方案。
 - 若为开环测量方案，连续抽取气体并测量后，残留气体并不返回浮箱箱体内部。在开环测量方案中，为避免对浮箱内稳态环境的干扰，宜使的整个测量周期的总抽气量，不超过浮箱有效容积的 10%，抽气流量不应干扰浮箱箱体内的压强。

- 2) 若为闭环测量方案,连续抽气并测量后残留气体返回浮箱箱体内部,可将间歇测量方案中的平衡管作为测量仪器残留气体的回路。应通过预实验确定压强能够保持稳定(水-气界面静置条件下箱体内压强波动不超过 3%)的抽气流量阈值范围。
- b) 在抽气进气口,应使用无水高氯酸镁等干燥剂去除浮箱中温室气体样品中所含的水气,减少对仪器测量的干扰。
 - c) 连续测量方案的测量总时长一般情况下可在 10min 之内,应截取测量过程的中段(稳态条件下)的数据进行拟合或计算温室气体浓度变化率的平均值,用于对水-气界面温室气体扩散通量的计算。
 - d) 应同步记录测量初始状态和结束状态浮箱内温度变化,宜同步记录浮箱内压强变化情况。

7.1.2.4 其他注意事项

- a) 若水-气界面温室气体扩散通量接近于 0,或水-气界面间温室气体扩散通量相对较小时,易出现测量误差放大的情况,应结合实际情况多次测量后明确其不确定性。
- b) 剧烈的风浪干扰,将破坏测量过程中浮箱箱体内部的气密性。可在浮箱底部加装配重锚以抵抗风浪产生的影响,避免漏气或跑气现象发生。
- c) 在有明显的流动情况下,宜使浮箱随流漂移,以减少因浮箱位置与水流相对运动而可能造成的测量误差。若现场环境并不具备使浮箱随流漂移的测量条件,浮箱所处位置与水流存在明显的相对运动,应首先保证气密性,并将上述情况记录,在数据分析与处理中予以注明。在条件允许的情况下,可增加现场使用的浮箱个数(例如,2~3 个浮箱),或采用与水面接触面积更大的浮箱,减少风浪或水流流动对浮箱法测量产生的干扰。
- d) 水面下存在剧烈气体翻腾现象或气泡释放现象都将导致获得的数据出现异常值。应首先避免在上述区域或上述情况下应用浮箱法开展水-气界面温室气体扩散通量监测。若无法避免时,可根据实验数据处理规范,酌情进行异常数据剔除。
- e) 应首先确定所采用的温室气体检测方法的检出限或精度。若浮箱中每秒温室气体浓度变化率值或斜率值($\mu\text{atm} \cdot \text{s}^{-1}$ 或 $\text{ppm} \cdot \text{s}^{-1}$),高于检出限或精度数值 2 倍以上,则可不考虑因水-气界面温室气体扩散通量相对较小而产生的误差。反之,应在数据分析予以标注说明该次采样中水-气界面扩散通量较小而可能存在较大测量误差。

7.1.3 模型估算法

7.1.3.1 应参考附录 D 所述的基本原理与计算公式开展基于模型估算的监测。

7.1.3.2 应在测量现场同时获得水体中温室气体浓度、大气中温室气体浓度和水-气界面气体传输速率,并根据 Fick 定律估算水-气界面温室气体扩散通量。

7.1.3.3 现场大气环境中温室气体浓度的测定,应符合以下要求:

- a) 取样点位应位于水面上方 1m~2m 处。采用抽气针筒在监测现场采样点位采集一定容积的气体(通常为 100mL~200mL),充入气袋,采用气相色谱法或其他方法进行分析测定。
- b) 可参考《气相色谱法本底大气二氧化碳和甲烷浓度在线观测方法》GB/T 31705 开展大气环境中连续在线监测。
- c) 若现场并不具备大气中温室气体浓度测定方法,可以采用测试点位附近大气中温室气体浓度的平均值或全球大气中温室气体浓度平均值。相关数据可参考公开发表的学术文献或网站。在数据分析处理中应注明其来源。

7.1.3.4 现场水体中温室气体浓度的测定,宜利用顶空处理方法,使用高纯度惰性气体(如 N_2 等)将溶于水中的温室气体置换成气体样品,并采用气相色谱法或其他气体检测方法测量分析并计算水体

中温室气体浓度。

7.1.3.5 顶空处理方法的一般性流程如下：

- a) 于采水桶中采集一定量的水体，使用顶空瓶在水面下封装，或采用注射器（针筒）在水面下缓慢抽取一定容积（ V_w ）的水样。封装过程与抽取过程应避免在顶空瓶或注射器内产生气泡。
- b) 向顶空瓶注入一定体积（ V_{HS} ）高纯度惰性气体同时抽取等体积水样，或采用注射器从气袋中抽取一定体积的惰性气体。
- c) 震荡 2min~3min 使溶存于水样中的待测温室气体与注入的惰性气体在水相与气相之间达到平衡。
- d) 抽取平衡后的气体样品，分析测试气体样品中的温室气体浓度，通过气体平衡换算获得溶存于水体中的温室气体的浓度值。计算公式见附录 D。

7.1.3.6 应根据现场风速、水流速度或其他环境参量，估算水-气界面气体传输速率，计算方法见附录 D。

7.1.3.7 其他注意事项：

- a) 在有条件的情况下，宜针对特定水域开展水-气界面气体传输速率的现场观测或参数率定实验，以获得更为精准、可靠的水-气界面气体传输速率。
- b) 在有明显流动的河流中（通常流速超过 0.3m/s），风速（ U_{10} ）并不一定是影响水-气界面气体传输的主要因素，应考虑水流流速对水-气界面传输速率的影响，选择其他反映水-气界面传输速率的经验计算公式（附录 D）。
- c) 在坝下河段（如电站尾水排放口或泄洪区段），因高速水流流动与大气之间掺混变化剧烈，压强和流速的剧烈变化，将显著改变水体中温室气体的溶解度，可能导致水体从大气中吸收温室气体，使水体出现温室气体过饱和等现象。若出现上述现象，模型估算方法并不适用。

7.2 水体温室气体气泡释放通量的监测

7.2.1 监测装置设计

7.2.1.1 采用圆锥形倒置漏斗状的气泡收集装置，垂直布设于水面下，收集装置顶端开孔，连接到充满水且固定在装置顶端的气体收集器（如气球或密封塑料瓶等）。持续一定的收集时间内，水底产生气泡进入漏斗并逐渐汇集至顶端的气体收集器中。

7.2.1.2 气泡收集装置设计、配置与使用应符合以下要求：

- a) 气泡收集装置，呈圆锥形倒置漏斗状。一般情况下，底部直径约为 0.5m~1.5m，高度约为 0.5m~1.0m。
- b) 气泡收集装置应具有一定的机械强度，具备一定的抗水压能力，可维持自身结构在水下不变形。可采用硬质骨架（铁、铝等）+尼龙布，或采用铁皮或铝皮整体焊接而成。
- c) 气泡收集装置内部应具有一定的气密性，避免跑气或漏气；内壁表面应光滑，能够使气泡在装置内部向上传输并逐渐积累。
- d) 气泡收集装置，通常宜设置在水面下 1m~2m 处，采用浮标或锚绳使其能够相对固定于水面以下。宜在气泡收集装置的底部悬挂重物以抵御水流的影响，保持其自身稳定性。
- e) 气泡收集装置顶部，应通过软管与气体收集器相连，使收集于装置顶部的气泡能够通过连接软管进入气体收集器中。应确保软管与气体收集装置、气体收集器之间的连接具有气密性。
- f) 气体收集器，应浮于水面，可设置为醒目的颜色或与浮标相连以指示水下气泡收集装置的所在位置。
- g) 气体收集器，应通过连接软管与气泡收集装置相连接，使气体收集装置中收集的气泡能够经由连接软管进入气体收集器中。

7.2.2 其他注意事项

7.2.2.1 应确保气体收集器内的压强同环境大气压强保持一致。

7.2.2.2 当采用硬质的气体收集器时，初始条件下，气体收集器内可充满水，并配置一根出水短管，使在气泡逐渐聚集的过程中气体收集器内的水能够自动排出环境水体中。收集时间结束后，测量所收集的气体体积和温室气体浓度，进行计算。

7.2.2.3 当采用材质为软性的气体收集器时，不应使用具有弹性的软性材质，避免在收集气体过程中因材质弹性变形产生额外的压强，干扰气体收集。初始条件下可抽干软性气体收集器中的气体。

7.2.2.4 应根据现场气泡释放情况，确定气体收集时间。气体收集时间宜短不宜长，最长不宜超过 5 天，但应至少收集 100mL 气泡气体且满足温室气体浓度测定的精度要求；应避免气体收集量超过所采用的气体收集器的容积。

7.2.2.5 可采用水下多普勒声学探测装置，对水下气泡产生过程进行连续跟踪观测，结合气泡大小和产量，估算获得气泡产生量；并结合气泡中温室气体浓度监测结果，估算气泡释放通量。

7.2.2.6 可在一水域通过增设气泡收集装置，同步开展气泡收集与释放通量监测估算，减少气泡释放随机性而产生的测量误差。

7.2.2.7 宜通过现场考察，首先甄别可能产生气泡的时间范围和空间区段，基于现场实测结果进行外推估算。

7.3 水库消落带温室气体通量的监测

7.3.1 水库消落带温室气体通量监测应包含 2 个方面：1) 露出期间土壤与大气间温室气体交换通量；2) 露出期间因消落带植被恢复产生的温室气体交换。

7.3.2 应基于陆地生态系统温室气体通量监测常见的技术开展监测。一般情况下，宜采用通量箱法对消落带（土壤与低矮植物）与大气间温室气体交换通量进行监测。通量箱法监测原理与浮箱法相似，见附录 D 中 D.1。

7.3.3 结合消落带与大气间温室气体交换通量的监测特点，应注意以下几点事项：

- a) 通量箱一般应有适配于通量箱体的硬质基座，监测过程中基座打入土壤，保证气密性，扣上箱体后进行监测。
- b) 通量箱可采用透明材质，也可采用不透明材质，但二者对 CO₂ 通量原理不完全相同。透明材质能够保证通量箱覆盖范围内植被能够持续开展光合作用，并获得监测范围内带有植被光合作用的消落带温室气体通量。不透明材质，仅能反映呼吸作用产生的温室气体通量。
- c) 在消落带开展通量箱法监测，持续时间应控制在 20min~90min。应结合通量箱尺寸大小和预实验结果确定现场监测的持续时间范围。在持续时间范围内，应确定 5~7 个取样测试的时间节点，抽取通量箱内气体样品，并同步记录下箱体内外气温、压强等环境变化参量。
- d) 若不考虑植被的影响，在监测之前应移除覆盖于消落带表面的植被，并记录下所监测区域植被样方的生物量。
- e) 应注意到消落带植被恢复后再次受淹将可能成为水体的碳源，淹水后降解将再次成为温室气体而释放入大气。宜从水库调度运行的系统性视角下考察消落带植被恢复过程中的温室气体产汇过程，并开展监测。
- f) 在缺少资料的时候，可借鉴政府间气候变化专门委员会（IPCC）国家温室气体清单湿地章节的最新成果，进行消落带温室气体通量的估算。

7.4 温室气体过坝消气释放量的监测

7.4.1 在确保水坝运行安全的前提下，应在临近水坝上游和下游设置控制断面，分别对水坝上游和下

游控制断面的温室气体浓度进行监测。过坝消气释放通量计算方法见附录 D.5。

7.4.2 对上游控制断面，应开展垂向分层采样监测，并明确水坝进水口处附近温室气体浓度值。

7.4.3 水坝下游控制断面处，可在表层水体取样，测量溶于水体中的温室气体浓度。

7.4.4 有条件的情况下，应对水轮机组蜗壳上游和下游尾水管开展温室气体连续监测，结合单台水轮机组运行工况，测量流经水轮机组的温室气体消气释放量。可在水轮机组尾水排放水域设置采样点，以此计算水轮机温室气体消气释放量。

7.4.5 可在泄洪期间对水坝上下游控制断面温室气体浓度开展连续监测，扣除同期水轮机组产生的温室气体消气释放通量，估算泄洪条件下的温室气体消气释放通量。

7.4.6 应同步测量上游、下游控制断面处水体中碳的赋存形态（有机碳、无机碳等），对水坝上下游控制断面碳的物料守恒进行计算，校核过坝下泄温室气体消气释放量的监测结果。

7.5 其他指标监测

对其他指标（必要性指标或支撑性指标）的监测，应参考相关国家标准或行业现行监测标准或技术规范执行。

8 监测数据整理与分析

8.1 监测数据整理

8.1.1 监测所获的数据应及时进行整理。数据整理宜以水库温室气体总排放量或净排放量估算为导向进行整理汇总。

8.1.2 数据整理表格，应明确样品采集的时间、监测点位及其坐标、所监测的水库温室气体交换途径、监测所采用的方法等信息。可参考附录 B 中模版表格进行数据整理。

8.1.3 数据整理中，应注意不同单位或量纲换算。

8.2 监测数据分析

8.2.1 应确定所选择监测方法或技术的精度、准确度与测量误差的评定方法；应明确数据分析中误差传递、不确定性评定的具体操作流程；阐明监测评估结果的不确定性及其可能的阈值范围。

8.2.2 应首先梳理水库温室气体通量与主要水文、环境等要素的相互关系，阐释影响水库温室气体通量的主要环境过程或环境因素。

8.2.3 应以水库温室气体总排放量为目标，确定水库温室气体通量在时间上、空间上的积分与计算方案，计算水库温室气体总排放量，阐明宏观层面上水库温室气体不同交换途径的定量收支关系。

8.2.4 应基于不同类型温室气体（CO₂、CH₄、N₂O）的增温潜势，将各温室气体总排放量统一以二氧化碳当量（以 CO_{2e} 为单位）为单位进行量化表征；评估分析不同监测分区或不同途径各种温室气体重要程度，支撑后续相关对策建议的制定。

注：根据政府间气候变化专门委员会（IPCC）的第六次评估报告，在 100 年尺度下，非化石产生的 CH₄ 增温潜势为 CO₂ 的 27.2±11 倍；N₂O 的增温潜势约为 CO₂ 的 273±130 倍。

8.2.5 应以水库温室气体净排放量为目标，说明水库温室气体净排放量的分析与评估方案。净排放量评估分析方案应在总排放量计算基础上，通过对蓄水前温室气体通量的监测评估并结合其他人类活动导致的点面源污染排放负荷等进行核算。

9 监测报告编写

9.1 水库温室气体通量监测报告，应包含以下内容：

- a) 应明确报告主体基本信息，包括报告主体名称、单位性质、报告年度、所属行业、统一社会信用代码、法定代表人、填报负责人和联系人信息等。
- b) 应包括监测方案的主要内容，明确监测点位设置、监测时间与监测频次、采用的监测方法、执行标准、精度范围。应阐明监测任务安排、监测活动获得的数据量、数据整理与分析方法等。
- c) 应描述水库温室气体不同交换途径的监测数据在时间上和空间上的分布与变化特征，应对不同交换途径温室气体通量或排放量的监测结果进行统计分析。
- d) 宜结合其他同步开展的监测指标，对影响水库温室气体通量的主要环境影响因素进行分析，甄别影响水库不同区段或不同时段温室气体通量的主要环境因素或关键生态环境过程，以支撑后续的总排放量或净排放量的估算。

9.2 水库温室气体通量监测报告编写，宜符合附录 C 的基本规定。可在《温室气体排放核算与报告要求 第 1 部分：发电企业》GB/T 32151.1 基础上进一步丰富完善。

附录 A
(规范性)
《水库温室气体通量监测方案》编制提纲

- 1 背景
- 2 水库及其所在流域概况
 - 2.1 流域概况
 - 2.1.1 流域自然环境
 - 2.1.2 流域社会与经济概况
 - 2.2 水库概况
 - 2.2.1 工程背景
 - 2.2.2 水库所在流域自然环境条件
 - 2.2.2 水库生态系统基本特征
 - 2.2.3 成库前受影响区域自然环境与社会经济条件
 - 2.2.4 成库后水库库周土地利用与社会经济发展情况
- 3 监测的系统边界
 - 3.1 监测的空间范围
 - 3.2 监测的时间范围
 - 3.3 监测的目标与任务
- 4 监测点位设置与采样频次
 - 4.1 监测点位设置
 - 4.2 监测采样频次
- 5 监测指标与方法选择
 - 5.1 监测指标设计
 - 5.2 监测方法
- 6 数据整理分析与质量控制方案
 - 6.1 数据整理分析方法
 - 6.2 数据质量管理方案
- 7 其他

附 录 B
(规范性)
监测数据整理表格模版

表 B.1 水-气界面温室气体扩散通量监测数据汇总表

监测时间 (年-月-日)	监测点位 (编号)	监测点位坐标 (经纬度)	监测方法 (浮箱法/模型估算法)	CO ₂ 通量 (mgCO ₂ • m ⁻² • d ⁻¹)	CH ₄ 通量 (μ gCH ₄ • m ⁻² • d ⁻¹)	N ₂ O 通量 (μ gN ₂ O • m ⁻² • d ⁻¹)

表 B.2 水体温室气体气泡释放通量监测数据汇总表

监测时间 (年-月-日)	监测点位 (编号)	监测点位坐标 (经纬度)	气泡收集持续时间 (d)	气泡收集总体积 (L)	CO ₂ 通量 (mgCO ₂ • m ⁻² • d ⁻¹)	CH ₄ 通量 (μ gCH ₄ • m ⁻² • d ⁻¹)	N ₂ O 通量 (μ gN ₂ O • m ⁻² • d ⁻¹)

表 B.3 消落带温室气体交换量监测数据汇总表

监测时间 (年-月-日)	监测点位 (编号)	监测点位坐标 (经纬度)	监测途径 (土-气界面交换、植被-大气交换)	CO ₂ 通量 (mgCO ₂ · m ⁻² · d ⁻¹)	CH ₄ 通量 (μ gCH ₄ · m ⁻² · d ⁻¹)	N ₂ O 通量 (μ gN ₂ O · m ⁻² · d ⁻¹)

表 B.4 温室气体过坝消气释放量监测数据汇总表

监测时间 (年-月-日)	大坝上游控制断面点位 及坐标 (点位名称、经纬度)	大坝上游控制断面 温室气体日均浓度 (CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ O; 单位: ppm、ppb)	大坝下游控制断面 点位及坐标 (点位名称、经纬度)	大坝下游控制断面 温室气体日均浓度 (CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ O; 单位: ppm、ppb)	当日过坝流量 (m ³ · s ⁻¹)	温室气体消气释放量 (CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ O; 单位: g · d ⁻¹)

附录 C
(规范性)
《水库温室气体通量监测报告》编制提纲

- 1 报告主题基本信息
- 2 监测方案说明
 - 2.1 系统边界确定
 - 2.2 监测目标与任务
 - 2.3 监测点位设置
 - 2.4 监测指标及监测方法
 - 2.5 监测频次与监测时间
 - 2.6 数据整理分析与质量控制方案
- 3 水库温室气体通量监测结果
 - 3.1 水库水-气界面温室气体扩散交换
 - 3.2 水库库湾浅水区域或其他局部区域气泡释放
 - 3.3 水库消落带温室气体交换
 - 3.4 温室气体过坝消气释放
 - 3.5 水库坝下河道与大气之间的温室气体交换
 - 3.6 其他监测指标的监测结果
- 4 数据分析与讨论
- 5 结论

附 录 D

(资料性)

常见温室气体浓度或通量监测方法的基本原理与计算方法

D.1 浮箱法

浮箱法, 具有经济灵活、简单易用、稳定可靠等特点, 适用于水流较缓且涌浪不破坏箱体与水体之间气密性的环境条件。作为直接测量方法, 在早期科学调查或定位跟踪监测中, 宜将浮箱法作为水-气界面温室气体扩散通量的首选监测方案。

浮箱法基本原理是将底面开放的箱体, 浮扣于水体表面, 假设在较短的时间范围内 (约 10min~30min) 水-气界面温室气体交换为稳态, 通过监测箱体内温室气体浓度变化, 获得监测时间范围内箱体内温室气体浓度变化率, 并根据箱体底部浮扣于水面的面积、箱体的体积等参量, 计算所测点位的水-气界面温室气体扩散通量。

浮箱法对水-气界面扩散通量 $Flux_{dif}$ (单位: $mg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$) 的计算公式为^[1]:

$$Flux_{dif} = \frac{S_c \times P_{air} \times F1 \times F2 \times V_c}{R \times (273.15 + T) \times A_c}$$

式中, S_c 为浮箱内温室气体浓度随时间关系图中的斜率 ($\mu atm \cdot s^{-1}$) 或 ($ppm \cdot s^{-1}$), 斜率为正值时反映现场测量中浮箱内温室气体浓度逐渐增加, 水体向浮箱内扩散释放温室气体; 斜率为负值时, 表示现场测量中浮箱内温室气体浓度逐渐下降, 浮箱内空气向水体扩散传输温室气体;

P_{air} 为现场测量时的大气压强 (kPa);

$F1$ 为分子摩尔质量 (CO_2 : $44 g \cdot mol^{-1}$; CH_4 : $16 g \cdot mol^{-1}$; N_2O : $44 g \cdot mol^{-1}$);

$F2$ 为秒与小时的转换系数 ($3600 s \cdot h^{-1}$);

V_c 为浮箱内扣除吃水深度后的有效容积 (m^3);

R 为理想气体方程中的常量 ($8.3144 J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$), 用以将气体体积分数换算为物质的量;

T 为现场测量时的浮箱内气温 ($^{\circ}C$);

A_c 为水面上浮箱的表面积 (m^2);

计算结果中, 交换通量为正值时表示所测量点位水体向大气排放温室气体, 为负值时表示水体从大气中吸收温室气体。

严格意义上, 因将浮箱扣于水面实施监测, 所测得的水-气界面温室气体通量即包括扩散通量, 也包括冒泡通量, 故浮箱法所获得的通量值应理解为水-气界面温室气体总通量值。但在实际操作中, 因水-气界面发生的冒泡现象, 将很可能对浮箱中的温室气体浓度梯度变化产生较大干扰, 不利于后续在等时间间隔进行回归分析以获得变化率。因此, 通常采用浮箱法获得水-气界面的扩散通量。同时, 应避免在有冒泡现象存在的水域施用浮箱法以监测水-气界面扩散通量。若在浮箱法监测过程中发现有冒泡现象, 则应提出相关数据或重新开展监测。

D.2 模型估算法

模型估算法, 具有抗干扰性强、适用面广、可实现自动监测或在线监测等突出优势, 适用于多种环境条件, 但因水-气界面传质系数核定存在较大困难, 易造成监测结果存在偏差, 宜在技术条件成熟且数据积累丰富的基础上进行推广应用, 也可用于与浮箱法监测结果相互校核。

(1) 基本公式

模型估算法的基本计算公式为^[1]:

$$Flux_{\text{dif}} = k_x(C_{\text{water}} - C_{\text{air}})$$

式中, $Flux_{\text{dif}}$ 为水-气界面温室气体 (CO_2 、 CH_4 或 N_2O) 扩散通量, 单位为 $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$; k_x 为温室气体传质系数, $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$; C_{water} 为溶存于水体中的温室气体浓度, $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$; C_{air} 为水面表层大气环境中的温室气体浓度; 一般情况下, C_{air} 经换算后为现场相同温度、压强下温室气体在水中的饱和浓度, $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

计算过程中, 应注意不同量纲之间的换算。

(2) 水体中溶存温室气体浓度 (C_{water}) 顶空平衡法计算

水体中溶存温室气体浓度顶空平衡法的计算公式如下^[1]:

$$p_{\text{Gas}} = \frac{(p_{\text{Final}} \times K_{0\text{Equilibrium}}) + \left(\left(\frac{V_{\text{HS}}}{V_{\text{W}}} \right) \times \frac{p_{\text{Final}} - p_{\text{Initial}}}{V_{\text{m}}} \right)}{K_{0\text{Sample}}}$$

式中, p_{Gas} 为溶存于水样中的待测温室气体分压 (浓度), 单位为 μatm ;

p_{Initial} , p_{Final} 分别为平衡前后顶空瓶或注射器上方空气中待测温室气体气体的分压 (浓度), 单位为 μatm ;

$\frac{V_{\text{HS}}}{V_{\text{W}}}$ 为向顶空瓶或注射器输入的惰性气体体积 (V_{HS}) 与制造顶空后水样的体积 (V_{W}) 之比;

$K_{0\text{Sample}}$ 为采集样品时所处水温条件下待测温室气体的溶解度, 单位为 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{atm}^{-1}$;

$K_{0\text{Equilibrium}}$ 为顶空瓶或注射器震荡平衡后所处水温条件下待测温室气体的溶解度, 单位为 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{atm}^{-1}$;

V_{m} 为气体的摩尔体积, 单位为 $\text{L}\cdot\text{mol}^{-1}$, 计算公式为:

$$V_{\text{m}} = 1 \times 0.082057 \times (273.15 + t) \times \left(\frac{101.325}{P} \right)$$

式中; t 为采样时的水温, 以摄氏温度表示, 单位为 $^{\circ}\text{C}$; P 为采样时的大气压, kPa 。

水体中 CH_4 、 CO_2 、 N_2O 等温室气体浓度的计算公式为:

$$C_{\text{water}} = K_0 \cdot p_{\text{Gas}}$$

式中: C_{water} 为水中温室气体的浓度, 单位为 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$;

CO_2 、 CH_4 、 N_2O 在水体中的亨利系数 K_0 是温度的函数, 计算公式如下:

$$\ln K_0(\text{CO}_2) = -58.0931 + 90.5069 \times \left(\frac{100}{T_{\text{k}}} \right) + 22.294 \times \ln \left(\frac{T_{\text{k}}}{100} \right) + s \times (0.027766 - 0.25888 \times \left(\frac{T_{\text{k}}}{100} \right) + 0.0050578) \times \left(\frac{T_{\text{k}}}{100} \right)^2$$

$$\ln K_0(\text{CH}_4) = -115.6477 + \frac{155.5756}{\left(\frac{T_{\text{k}}}{100} \right)} + 65.2553 \times \ln \left(\frac{T_{\text{k}}}{100} \right) - 6.1698 \times \left(\frac{T_{\text{k}}}{100} \right)$$

$$\ln K_0(\text{N}_2\text{O}) = -60.7467 + \frac{88.8280}{\left(\frac{T_{\text{k}}}{100} \right)} + 21.2531 \times \ln \left(\frac{T_{\text{k}}}{100} \right)$$

式中, T_{k} 为水体绝对温度, 单位为 K , 取顶空平衡后的样品水温换算; s 为盐度, 单位为 ppt , 在淡水系统中该值可为 0。

(3) 水-气界面气体传输速率 (k_x) 的估算

水-气界面气体传输过程, 易受到水-气交界面 (水体、气体) 紊动混合程度的干扰。水-气界面气

体传输速率，一般可表示为以下函数关系^[1]：

$$k_x = k_{600} \left(\frac{S_c}{600} \right)^{-x}$$

式中， k_x 为水-气界面气体传输速率，单位为 $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。 x 为调整系数，当风速小于 $3.6 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时，取 $2/3$ 当风速大于 $3.6 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时取 0.5 ^[2]。

S_c 为施密特（Schmidt）常数，对 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 的计算公式如下^[1]：

$$S_c(\text{CO}_2) = 1911.1 - 118.11t + 3.4527t^2 - 0.04132t^3$$

$$S_c(\text{CH}_4) = 1897.8 - 114.28t + 3.2902t^2 - 0.039061t^3$$

$$S_c(\text{N}_2\text{O}) = 2055.6 - 137.11t + 4.3173t^2 - 0.054350t^3$$

式中， t 为水-气界面的摄氏温度，通常取气温，单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。

k_{600} 是 20°C 标准条件下施密特常数等于 600 时的气体交换系数，单位为 $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。不同类型水域、水-气界面不同掺混条件的气体交换系数各不相同。目前，已有许多公开报道的学术文献列出了 k_{600} 的计算公式，以下列出较为常见的几种计算公式，供在使用中酌情选取使用^[1]：

$$k_{600} = 2.07 + (0.215 \times U_{10}^{1.7}) \quad (\text{适用于 } U_{10} \leq 3 \text{m} \cdot \text{s}^{-1})$$

$$k_{600} = 1.68 + (0.228 \times U_{10}^{2.2}) \quad (\text{适用于 } U_{10} \leq 3 \text{m} \cdot \text{s}^{-1})$$

$$k_{600} = 0.45 \times U_{10}^{1.64} \quad (\text{适用于 } U_{10} > 3 \text{m} \cdot \text{s}^{-1})$$

式中， U_{10} 为水面上方 10 m 风速， $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ；经验上，可以从水面上方 1m 的风速进行推算，推算公式为 $U_{10} = 1.22U_1$ ^[1]。

考虑其他参数（流速、水面宽度等）的 k_{600} 计算公式如下^[3]：

$$k_{600} = 1.0 + 1.719 \left(\frac{v}{h} \right)^{0.5} + 2.58 \cdot U_{10}$$

式中， v 为水流速度，单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ； h 为采样点处水深，单位为 m。

D.3 浮箱法和模型估算法的适用性

浮箱法与模型估算法均适用于水坝上游水库水面和水坝下游河段水-气界面温室气体通量监测。模型估算法，是一种经验性的方法，能够在一定程度上反映水-气界面温室气体交换的潜势。在静止水面或缓流水体中，模型估算法将可能高估水-气界面温室气体扩散通量；在流动性较强的水体中，模型估算法可能低估水-气界面温室气体扩散通量。因基本原理存在差别，两种监测方法所获的水-气界面扩散通量监测结果通常并不相同。

有条件的情况下，宜在现场同步开展两种方法的监测，以不同方法所获得的结果作为水-气界面温室气体扩散通量可能的阈值范围。在模型估算法中，可采用采样断面临近气象站的月平均风速进行水-气界面温室气体扩散通量估算。

D.4 气泡释放通量监测方法

温室气体以气泡形式释放入大气，通常易出现在流速较缓、混合程度较差（流速小于 0.1m/s ）、水层较浅（水深小于 10m）且底部有机质较为丰富的水库库周或库湾浅水水域。气泡易在水温较高的春夏季集中大量形成，在水库底部积累甚至过饱和，并释放入大气。因温室气体以气泡形式产生、传输并释放过程，易受到各种环境因素（水流、压强、水深变化等）干扰，故气泡释放通量具有随机性。

应根据野外现场考察结果并结合经验，判别易出现气泡释放的水域，并确定其气泡形成的高发时

期,开展气泡释放通量监测。一般情况下,宜在整个高温季节针对气泡释放的敏感水域开展持续跟踪观测。

不同温室气体的溶解度存在差别。 CO_2 、 N_2O 可溶于水, CH_4 难溶于水,故一般情况下在水面收集到的气泡中 CH_4 所占比重将高于 CO_2 、 N_2O 。

气泡释放通量监测,其原理是在水面以下设置圆锥形倒置漏斗状且底部开口的收集装置,在一定的时间范围内(通常为3天~7天)连续收集产生的气泡,测量所收集气泡的体积和其所含温室气体浓度,根据倒置漏斗底部开口面积,计算气泡收集期间的释放通量。计算公式如下:

$$F_b = \frac{1000 \times C \times V}{S \times T}$$

式中: F_b 为气泡释放通量,单位为 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$; C 为气泡中所含温室气体的浓度,单位为 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$; V 为气泡收集的体积,单位为 m^3 ; S 为倒置漏斗底面积,单位为 m^2 ; T 为采样间隔时间,单位为 d ; $1000\text{L}/\text{m}^3$ 为单位转化系数。

气泡通常在水体底部产生。气泡在水柱中向上传输过程中,易受到水体紊动、混合或剪切的影响,易出现气泡合并、破碎或消失等情况。在表层水体布置的气泡收集装置,能够反映气泡到达表层水体并最终气泡形式向大气释放的通量。但不能够反映所监测区域底部气泡的产生量。为反映所在水域底部气泡产生的情况,可沿水柱至底部不同水深处设置气泡收集装置,通过连接软管在水面收集,获得气泡在水体底部以及水柱不同深度处的产生通量。

D.5 温室气体过坝消气释放监测方法

温室气体过坝消气释放,主要受到水坝结构设计、调度运行规程、坝前温度与溶解氧分层等因素的影响。一般情况下,流经水轮机组产生的温室气体消气释放较为普遍,而泄洪过程产生的温室气体消气释放,通常仅出现在洪水季节的泄洪期间。应计算水坝上游和下游之间温室气体浓度差值,结合过坝流量,估算温室气体过坝消气释放量。计算公式如下:

$$F_d = (C_U - C_D) \cdot f_D$$

式中, F_d 为温室气体过坝消气释放通量,单位为 $\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$; C_U 为水坝上游控制断面的温室气体浓度,单位为 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; C_D 为水坝下游控制断面处的温室气体浓度,单位为 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; f_D 为流经水坝的流量,单位为 $\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 。

参 考 文 献

- [1] UNESCO/IHA, GHG measurement guidelines for freshwater reservoirs [M]. UNESCO, The International Hydropower Association (IHA), 2010. 138.
- [2] Zhang, L., X. Xia, S. Liu, S. Zhang, S. Li, J. Wang, G. Wang, H. Gao, Z. Zhang, and Q. Wang, Significant methane ebullition from alpine permafrost rivers on the East Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Nature Geoscience*, 2020. 13(5) : 349-354.
- [3] Borges, A.V., J.-P. Vanderborght, L.-S. Schiettecatte, F. Gazeau, S. Ferrón-Smith, B. Delille, and M. Frankignoulle, Variability of the gas transfer velocity of CO₂ in a macrotidal estuary (the Scheldt) [J]. *Estuaries*, 2004. 27(4) : 593-603.

附件 1-2

ICS 编号

CCS 编号

团 体 标 准

X/XXXXXX—XXXX

水库温室气体净排放量评估技术导则

Technical guide for evaluation of reservoir
net greenhouse gas emissions

（征求意见稿）

20XX—XX—XX 发布

20XX—XX—XX 实施

中国水力发电工程学会发布

目次

前言	II
1 范围	I
2 规范性引用文件	I
3 术语和定义	I
4 基本规定	II
5 水库温室气体净排放量评估流程	II
6 基础资料分析	III
7 空间范围与典型年确定	IV
8 技术路径分析	IV
9 评估目标、任务确定	V
10 评估方法构建	V
11 评估结果分析	VII
12 评估报告编制	VII
附录 A（资料性）水库温室气体净排放量评估的概念性框架与评估技术路径	IX
附录 B（资料性）水库蓄水前土地利用与土地覆盖清单与反演方法	XII
附录 C（资料性）基于定位观测结果在时间上积分与空间上外推的方案	XIV
附录 D（资料性）水库温室气体排放量的不确定性分析	XV

前言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件由中国长江三峡集团有限公司提出。

本文件由中国水力发电工程学会归口。

本文件起草单位：中国长江三峡集团有限公司环境保护部、中国科学院重庆绿色智能技术研究院。

本文件主要起草人：XXXXXXXXXX。

本文件主要审查人：XXXXXXXXXX。

本文件执行过程中的意见或建议反馈至中国水力发电工程学会。

水库温室气体净排放量评估技术导则

1 范围

本文件给出了水库温室气体净排放量的评估流程、基础资料分析、空间边界与典型年确定、技术路径分析、评估目标与任务、评估方法构建、评估结果分析、评估报告编制等内容及要求。

本文件适用于水库温室气体净排放量的评估。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 32151.1 温室气体排放核算与报告要求 第1部分：发电企业

SL 654 水利水电工程合理使用年限及耐久性设计规范

Q/CTG 389 水库温室气体通量监测技术导则

国际水电协会（International Hydropower Association） 淡水水库温室气体监测导则（GHG Measurement Guidelines for Freshwater Reservoirs）

国际能源署（International Energy Agency） 水库温室气体净排放量定量分析技术导则（Guidelines for Quantitative Analysis of Net GHG Emissions from Reservoirs）

政府间气候变化专门委员会（Intergovernmental Panel on Climate Change） 2006 国家温室气体清单编制导则 2019 年精细化修编版（第四卷 第7章 湿地）（2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Vol 4, Chapter 7 Wetlands）

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

温室气体 greenhouse gas

大气层中自然存在的和由于人类活动产生的能够吸收和散发由地球表面、大气层和云层所产生的波长在红外光谱内的辐射的气态成分。

注：本部分涉及的温室气体只包含二氧化碳（CO₂）、甲烷（CH₄）、一氧化二氮（N₂O）。

3.2

温室气体排放和去除 emissions and removals

向大气排放温室气体、或从大气中吸收或去除温室气体的过程、活动或机制。

3.3

总排放量 gross emissions

在水库与大气间交换的各个过程或环节中温室气体排放量的总和，正值表示水库向大气排放温室气体的总量；负值表示水库从大气中吸收或去除温室气体的总量。

3.4

净排放量 net emissions

水库温室气体总排放量与蓄水前相同空间范围内淹没区域（陆域、水域）温室气体排放量的差值，并扣除其他人类活动（如点面源污染排放等）对水库温室气体排放量的贡献。

3.5

库龄 reservoir age

水库正常运行到计算时止的时间长度，通常以年来表示，以水库建成并且首次蓄水至正常运行水位的当年为零点。

3.6

水库生命周期 life cycle of a reservoir

水库由首次蓄水至设计运行水位或正常水位开始，直至水库完全失去其使用功能或至拆坝的时间范围。

3.7

二氧化碳当量 carbon dioxide equivalent (CO_2e)

用于比较温室气体辐射强迫的度量单位。

注：不同温室效应气体对地球温室效应的贡献度（辐射强迫）有所不同。为了统一度量整体温室效应的结果，又因为二氧化碳是人类活动产生温室效应的主要气体，故以二氧化碳当量为度量温室效应的基本单位。一种气体的二氧化碳当量是通过把这一气体的吨数乘以其全球增温潜势（globalwarmingpotential）后得出的，通过上述方法可对不同温室气体的效应标准化。

[来源：ISO14067—2018，3.1.2.2]

3.8

全球增温潜势 global warming potential (GWP)

某一给定温室气体在一定时间积分范围内与二氧化碳相比而得到的相对辐射影响值。

注：根据政府间气候变化专门委员会（IPCC）的第六次评估报告，在 100 年尺度下，非化石产生的 CH_4 增温潜势为 CO_2 的 27.2 ± 11 倍； N_2O 的增温潜势约为 CO_2 的 273 ± 130 倍。

4 基本规定

4.1 水库温室气体净排放量评估，应以水库蓄水前后碳、氮等关键生源要素的生物地球化学过程的变化为基础，充分结合水利水电工程设计参数、服务功能、调度运行规程等特征，有的放矢、突出重点，服务于水利水电行业应对气候变化相关工作要求。

4.2 水库温室气体净排放量评估，应建立在对水库蓄水前或蓄水后温室气体排放量变化的全面调查或监测分析基础上；水库温室气体净排放量评估模型，应与水库温室气体通量监测方案编制中划定的系统边界保持一致；应明确水库蓄水前与蓄水后的初始年和典型水平年。

4.3 应充分调查蓄水前后水库及所在流域自然环境与社会经济发展情况，掌握蓄水前后水库及其所在流域人类活动强度变化，评估人类活动变化对水库温室气体排放量的贡献。

4.4 应在水库温室气体净排放量的概念性框架基础上，综合运用水文水动力、生态系统碳氮循环等数学模型或数值分析方法，估算或预测水库蓄水前后的温室气体净排放量；应通过模型的敏感性分析与不确定性分析，明确水库温室气体净排放量的阈值范围及其主要影响因素。

4.5 应结合当前科学研究前沿，运用新理论、新技术、新方法，注重调查研究与资料收集分析，提高水库温室气体净排放量评估的科学性与客观性。

5 水库温室气体净排放量评估流程

水库温室气体净排放量评估，应包括以下流程：

- a) 基础资料分析；
- b) 空间边界与典型年确定；
- c) 技术路径分析；
- d) 评估目标、任务的确定；
- e) 评估方法构建；
- f) 评估结果分析；
- g) 评估报告编制。

6 基础资料分析

6.1 水库蓄水前的基础资料分析

6.1.1 应整理分析工程设计资料，如可行性研究报告、环境影响评价报告、工程设计报告或图纸等，汇总并梳理形成蓄水前基础资料分析成果。

6.1.2 蓄水前基础资料分析，宜包含以下内容：

- a) 大坝工程特性参数、蓄水前的工程建设情况，包括但不限于库底清理的工程量、施工区域场地平整工程量等。
- b) 工程影响区域的空间范围，包括但不限于征地拆迁范围、淹没区域空间范围等。
- c) 工程影响区域的自然地理背景，包括但不限于地形地貌特征、气候气象条件及历史数据序列、水文径流条件及历史数据序列等。
- d) 工程影响区域内不同土地利用与土地覆盖变化，包括但不限于林地、草地、耕地（旱地、水稻田、经果林等）、城镇建设用地、河滩地、水域（河流、湖泊、堰塘等）的面积、分布等。
- e) 工程影响区域内生态系统（陆地与水域）与温室气体产汇过程有关的重要参量，包括但不限于土壤与岩性特征、土壤有机碳以及氮、磷等生源要素含量、植被覆盖程度、植被与农作物的有机碳、氮、磷等生源要素含量、陆地生态系统初级生产水平、水生生态系统营养状态与初级生产水平、水生生态系统碳埋藏速率、生态系统与大气间温室气体交换通量等。
- f) 水库上游及工程影响区域内人类活动强度情况，包括但不限于人类聚居区域（城镇、村落）的分布情况，人口密度、工矿企业分布、点源与面源污染负荷等。

6.1.3 应对基础资料序列的完整性与丰富程度进行梳理与甄别，编制形成蓄水前工程影响区域土地利用与土地覆盖的清单。蓄水前工程影响区域土地利用与土地覆盖清单可参考附录B中表B.1进行编制。

6.1.4 宜参考政府间气候变化专门委员会（IPCC）国家温室气体清单编制方法学中土地利用的一致性表达方式编制蓄水前工程影响区域土地利用与土地覆盖清单，可参见附录B。

6.1.5 宜尽可能地以年为基本单位形成蓄水前工程影响区域土地利用与土地覆盖变化的历史序列，反映蓄水前工程影响区域生态环境变化情况。

6.1.6 对尚未蓄水的水库，应结合前述资料收集情况，对工程影响区域开展生态环境调查与监测分析，进一步核实资料的准确性，并形成更丰富、完善的基础数据序列。

6.2 水库蓄水后的基础资料分析

6.2.1 除工程设计资料外，宜结合水库调度运行规程等基础资料的分析，获得水库蓄水后的以下信息：

- a) 水库空间范围，应明确大坝上游空间范围（包括回水区、消落带等）、大坝下游受影响河段的空间范围；
- b) 水库及其坝下河段水文水动力条件变化情况、水库泥沙输运与淤积态势、水库水温、溶解氧分

层特征等；

- c) 水库毗邻区域及其所在流域土地利用与土地覆盖变化，包括但不限于林地、草地、耕地（旱地、水稻田、经果林等）、城镇建设用地、河滩地、水域（河流、湖泊、堰塘等）的面积、分布等；
- d) 水库上游及工程影响区域内人类活动强度情况，包括但不限于人类聚居区域（城镇、村落）的分布情况、人口密度、工矿企业分布、点源与面源污染负荷等；
- e) 水库温室气体通量监测数据序列或监测报告。

6.2.2 应与水库蓄水前基础资料分析相结合，比较并分析水库蓄水前后在地形地貌、生态环境、水文水资源、人类活动与社会经济发展等方面产生的区别，定性描述导致水库蓄水前后温室气体排放量变化的原因。

6.2.3 宜结合水库所在气候气象条件、水文水动力特征与调度运行规程，对水库温室气体产汇过程与水文生态机制进行初步分析，甄别并梳理影响水库温室气体通量变化的关键生物地球化学过程，支撑后续模型构建。

7 空间范围与典型年确定

7.1 空间范围确定

水库温室气体净排放量评估中划定的空间范围，应与《水库温室气体通量监测技术导则》Q/CTG 389的规定保持一致。应确保评估中水库蓄水前与蓄水后划定的空间范围保持一致，以保证对水库蓄水前后温室气体排放量评估具有可比性。

7.2 典型水平年确定

7.2.1 水库温室气体净排放量评估，涉及水库蓄水前与蓄水后两个时间状态，应明确其首次蓄水至设计水位或正常蓄水水位的时间，并作为初始年。

7.2.2 应首先考虑在水库生命周期的时间尺度下进行。因资料缺失，或因对未来预测的不确定性，可针对水库蓄水前和蓄水后分别设定典型水平年，通过蓄水前后典型水平年的评估与对比分析，获得水库温室气体净排放量。

7.2.3 典型水平年的选取，宜综合考虑水库蓄水前、蓄水后的气候气象条件、水文径流过程、人类活动强度与方式等情况。

7.2.4 若水库蓄水前有开展库底清理工作，宜在水库库底清理工作完成以后确定水库蓄水前的典型水平年。若无法掌握水库库底清理相关信息，包括库底清理完成后的土地利用与土地覆盖情况、库底清理完成的具体时间节点等，宜选择在库底清理工作开展前的时间节点作为典型水平年。若不确定水库是否开展了库底清理工作或水库并未开展库底清理工作，宜选用临近水库蓄水的时间节点作为典型水平年。应在水库温室气体净排放量评估报告中予以补充分析库底清理工作对蓄水前温室气体排放量的影响。

7.2.5 对水库蓄水后的状态，应考虑水库初期蓄水、竣工验收、投产发电、库龄等关键时间节点，结合水库蓄水后温室气体监测工作开展情况、水库库周及其所在流域土地利用与土地覆盖的变化、温室气体监测数据的完整性等综合分析并确定典型水平年。

8 技术路径分析

8.1 在完成基础资料收集、空间范围与典型年确定之后，应结合水库蓄水前后温室气体（CO₂、CH₄）产汇过程情况，综合分析并制定实施水库温室气体净排放量评估的技术路径，制定水库净排放量评估的

具体目标与重点任务。

8.2 技术路径分析，包括三个方面内容：

- a) 选择合适的概念性框架，可参见附录 A；
- b) 预判其他人类活动对水库温室气体净排放量的贡献是否显著，论证开展该部分评估的必要性；
- c) 预判 CO₂、CH₄ 等温室气体在水库温室气体净排放量中的贡献程度，明确评估重点。

8.3 宜按照附录 A 中图 A.2 和图 A.3 的分析流程确定对蓄水前、蓄水后温室气体净排放量评估的技术路径。

8.4 对已建成的水库，若成库时间已超过 20 年，可仅考虑对 CH₄ 进行蓄水前与蓄水后的比较分析，以获得水库温室气体净排放量。

8.5 若成库时间不足 20 年，或者对未建或待建水库，需考虑 CO₂、CH₄ 在蓄水前与蓄水后的差异并据此获得水库温室气体净排放量。

8.6 因水库 N 循环和 N₂O 排放具有复杂性，可参考政府间气候变化专门委员会（Intergovernmental Panel on Climate Change）《2006 国家温室气体清单编制导则 2019 年精细化修编版》（第四卷 第 7 章 湿地），暂不考虑对水库 N₂O 净排放量实施评估。宜在更细致的机理研究和监测分析工作基础上，对水库蓄水前、蓄水后的 N₂O 排放及其来源进行评估分析，以确定水库 N₂O 净排放量。

9 评估目标、任务确定

9.1 评估目标的确定

评估目标确定，宜包含以下内容：

- a) 评估获得水库蓄水前受工程影响区域陆生与水生生态系统温室气体总排放量；
- b) 评估获得水库蓄水后温室气体总排放量；
- c) 评估预测获得未来不同情景下温室气体总排放量长期趋势；
- d) 评估获得水库温室气体净排放量及其在不同情景下的变化特征或趋势。

9.2 评估任务的确定

应结合评估技术路径明确评估任务。评估任务应包括但不限于以下内容：

- a) 评估工作主体；
- b) 评估工作任务清单描述；
- c) 评估工作的时间进度安排；
- d) 评估所关注的重点区域或关键过程；
- e) 模型构建或数据分析的内容；
- f) 模型敏感性分析与不确定性分析内容；
- g) 情景设定与情景分析的内容。

10 评估方法构建

10.1 水库蓄水前温室气体排放量的估算方法

10.1.1 应以年为基本时间单元开展蓄水前温室气体排放量估算。

10.1.2 应以工程影响区域（含淹没区域）土地利用与土地覆盖特征为基础。若工程影响区域（含淹没区域）土地利用与土地覆盖特征具有监测数据、或部分具有监测数据，宜针对不同土地利用与土地覆

盖分别开展温室气体排放量评估。

10.1.3 宜结合基础资料分析所形成的土地利用与土地覆盖清单，可参见附录 B.1 中表 B.1，明确蓄水前不同土地利用或土地覆盖类型的温室气体排放因子，结合不同土地利用或土地覆盖的面积进行年度的排放量估算。

10.1.4 若工程影响区域（含淹没区域）土地利用与土地覆盖特征因水库已建成而未有监测数据，可结合蓄水后水库毗邻区域的土地利用现状，可参考附录 B.2，设置缓冲带进行估算；亦可结合库底清理前调查结果进行估算，但应补充分析库底清理工作对蓄水前温室气体排放量的影响。

10.2 水库蓄水后温室气体排放量的估算方法

10.2.1 应以年为基本时间单元开展蓄水后水库温室气体排放量的估算。

10.2.2 应首先甄别并掌握已有监测数据的完整性、监测频次、监测点位分布与所采用的监测技术，制定在时间上积分与空间上外推的方案，估算基于一个完整周年的水库温室气体排放量。

10.2.3 在水库水域范围内和坝下河段，应结合所采用的监测技术与监测频次，结合数据获取时间及其在日变化中所占比重，估算采样当日的日通量，并逐步在月、年等时间尺度上进行积分计算；应结合水库调度运行下水域范围的变化，明确每个点位所能代表的水库水域空间面积，结合在时间上积分计算的结果，估算水库水域范围内温室气体排放量，估算方法可参见附录 C。

10.2.4 在水库消落带，应结合水库调度运行规程，明确消落带水位波动特征及其露出的陆域范围和时间长度；应掌握消落带在露出期间的植被自然恢复、土地利用变化和监测点位的设置；宜以消落带植被自然恢复和土地利用变化的角度为基础，考虑露出的时间长度与陆域范围，开展时间上积分与空间上的外推。

10.2.5 对水库过坝消气释放，应掌握水库水流过坝的形式（水轮机、泄洪等），明确不同过坝形式下的流量、压强与水中温室气体浓度变化情况。应明确不同过坝形式下紧邻大坝的上下游控制断面水体温室气体浓度差，结合流量变化，计算过坝消气释放量。在有条件的情形下，宜进一步构建水力学模型和水-气界面传质模型，综合分析水体与空气掺混过程等复杂条件下温室气体浓度变化过程，更精细地模拟水库过坝的温室气体消气释放量。

10.2.6 对水库气泡释放，宜结合水库水下地形地貌、水库调度运行规程情况，甄别易于形成气泡区域的水下地形条件、水文水动力条件与水体理化性质特征，划定水库易于形成气泡的区域，如近岸浅水区域、库湾水体缓流或滞留区域，结合监测结果，进行时间上积分与空间上外推。

10.3 水库蓄水前后温室气体排放量估算模型构建与分析

10.3.1 水库蓄水前后温室气体排放量估算模型，应能实现对水库蓄水前或蓄水后温室气体排放量的反演或趋势预测。

10.3.2 应通过对不同情景或条件下水库蓄水前或蓄水后温室气体排放量的模拟分析，比较评估其他人类活动对水库温室气体排放量的贡献，或者可参考附录 A 中图 A.1，获得未建库情境下温室气体排放量的基线变化，支撑水库温室气体净排放量评估。

10.3.3 水库蓄水前后温室气体排放量估算模型，可根据对水库蓄水前后温室气体产汇过程的科学认识构建机理模型，也可基于观测变量的统计关系和数据序列构建经验模型。应结合数据资料收集与积累的情况，结合建模对象特征，确定估算模型的构建方案。

10.3.4 为确保蓄水前和蓄水后水库温室气体排放量模型估算结果具有可比性、降低不确定性，水库蓄水前后温室气体排放量估算模型构建宜参考以下一般规定：

- a) 模型系统边界一致性：应以蓄水后水库温室气体排放量评估划定的时间和空间范围，确定模型构建的系统边界。蓄水前模型的系统边界，应确保与蓄水后模型保持一致。

- b) 模型概化与假设可比性：应比较蓄水前与蓄水后在水文水动力条件、温室气体产汇过程、输移与界面过程等方面存在的区别，阐明针对蓄水前、蓄水后温室气体产汇过程模型构建应进行的概化与假设内容，使模型概化与假设能够反映蓄水前后水库温室气体排放量的差别。
- c) 模型结构统一性：对蓄水前、蓄水后宜采用相同的模型类型（机理模型、经验模型）、模型描述（过程、状态变量、参数等）建立数学模型，减少因模型结构差异而产生的不确定性。
- d) 模型参数率定与校正方法相似性：宜采用相近或相同方案进行模型参数率定与校正，以避免因模型参数校正方案的差异而放大蓄水前、蓄水后的模拟结果误差。
- e) 模型验证：有条件的情况下，宜尽可能采用有监测资料的相近工况进行模型验证，提高模型预测的可靠性和适用性

10.3.5 水库蓄水前后温室气体排放量估算模型的情景分析应符合以下要求：

- a) 应对水库蓄水前后温室气体排放量估算模型设置不同的情景或条件，实现对水库蓄水前后温室气体排放量的反演或趋势预测。
- b) 宜以水库蓄水前后气候气象条件、水文水动力条件、水库库周或其所在流域人类活动（污染负荷输入、土地利用变化）等外部变量的监测资料为基础，结合蓄水前、蓄水后典型水平年的实测数据或资料，确定模型外部变量的历史序列或未来变化趋势，并据此实现对水库蓄水前后温室气体排放量的反演或长期趋势预测。
- c) 宜在水库蓄水前后温室气体排放量估算模型中通过设置水库库周或其所在流域人类活动产生的污染负荷输入为零，或蓄水前后土地利用没有发生变化等情景，通过模型结果比较获得其他人类活动对水库温室气体净排放量的贡献（附图 A.1）。
- d) 宜以水库蓄水前工程影响区域（含淹没区域）生态系统（水生、陆生）温室气体排放估算模型为基础，以外部变量的长期趋势为输入条件，获得未建库情境下温室气体排放量的基线变化。

11 评估结果分析

11.1 水库温室气体净排放量，应在对蓄水前与蓄水后水库温室气体排放量的计算或估算基础上，结合概念性框架进行结算，概念性框架可参见附录 A。

11.2 可对蓄水前、蓄水后典型水平年的温室气体排放量估算结果，采用差减法获得水库温室气体净排放量。

11.3 宜进一步结合评估模型与情景分析，确定蓄水前与蓄水后其他人类活动对水库温室气体排放量的贡献。

11.4 宜在生命周期视角下进行水库温室气体净排放量估算，基本规定如下：

- a) 应结合《水利水电工程合理使用年限及耐久性设计规范》SL654 确定评估对象的服务年限。
- b) 宜以附录 A 中概念性框架为基础进行生命周期下的净排放量估算。
- c) 应在对模型外部输入变量长期趋势进行充分论证基础上，分别模拟分析水库已修建和未修建条件下的温室气体排放量，通过差值比较获得生命周期水库温室气体净排放量。

11.5 应分别对蓄水前、蓄水后温室气体排放量的估算结果进行不确定性分析。不确定性分析方法可参见附录 D。应结合不同案例实际情况建立数据的质量控制方案，支撑模型推算与推演。

12 评估报告编制

水库温室气体净排放量评估报告，宜单独编制。评估报告可参考《温室气体排放核算与报告要求 第 1 部分：发电企业》GB/T 32151.1 相关要求编制，报告应包含但不限于以下内容：

- a) 水库基本概况：水库所在位置、水库所在流域及其毗邻区域自然环境、人口与社会经济发展概况、水文泥沙条件、气候气象条件、水库工程建设情况等；
- b) 水库蓄水前温室气体排放量估算；
- c) 水库蓄水后温室气体总排放量估算；
- d) 水库温室气体净排放量估算方法说明；
- e) 水库温室气体净排放量估算的不确定性分析；
- f) 水库温室气体净排放量的估算分析与讨论。

附录 A

(资料性)

水库温室气体净排放量评估的概念性框架与评估技术路径

水库温室气体净排放量的评估，通常包括三个部分：蓄水后水库温室气体总排放量、蓄水前受影响区域温室气体排放量、其他人类活动对水库温室气体排放量的贡献。在不同情形下，它们组成了水库温室气体净排放量的两种概念性框架（附图 A.1）：

- a) 概念性框架 1：水库温室气体净排放量，应等于蓄水后水库温室气体总排放量与蓄水前受影响区域温室气体排放量的差值，并扣除其他人类活动对水库温室气体排放量的贡献。

其中，其他人类活动对水库温室气体排放量的贡献，表征了水库蓄水前后因其所在流域（含水库毗邻区域）人类活动变化导致碳、氮、磷等生源要素入河（或入库）负荷改变而产生温室气体变化量。该部分通常不能通过直接监测获得，可通过蓄水前后不同人类活动情景的模拟分析与比较进行推算。

由于水库蓄水前与蓄水后，其流域（含水库毗邻区域）人类活动均已存在，因人类活动产生的碳、氮、磷等生源要素入库（入河）负荷对温室气体排放量的贡献，既体现在蓄水后水库温室气体总排放量中，也体现在蓄水前受影响区域温室气体排放量中。因此，水库温室气体净排放量的概念性框架，可以调整为两个部分：蓄水后水库温室气体总排放量、未建水库情景下温室气体排放量的基线变化。

- b) 概念性框架 2：水库温室气体净排放量，应等于蓄水后水库温室气体总排放量与未建水库情景下温室气体排放量的基线变化的差值。

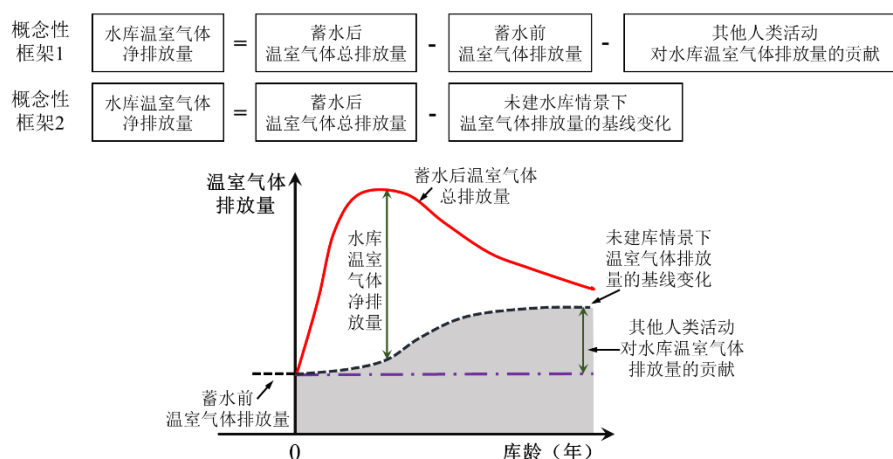


图 A.1 水库温室气体净排放量的概念性框架

上述两个概念性框架均可用于指导开展水库温室气体净排放量评估。

一般情况下，若蓄水前水库所在流域或其影响区域范围内人类活动强度低或可忽略不计，宜采用概念性框架 1 指导水库温室气体净排放量评估。此时，蓄水前温室气体排放量可视为定常值。人类活动影响（点面源污染负荷）仅考虑在蓄水后的状态下对水库温室气体排放量产生影响。

若蓄水前水库所在流域或其影响区域范围内已有显著的人类活动，如水库将淹没城镇、村落等人类聚居区域等，宜采用概念性框架 2 作为指导开展水库温室气体净排放评估。此时，人类活动对河流（蓄水前）或水库（蓄水后）温室气体排放量均不可忽略，可通过不同人类活动强度情景（碳、氮、磷等生源要素的输入负荷）的模拟分析以确定水库温室气体净排放量。

综上，蓄水前与蓄水后温室气体排放量评估，宜分别参考图 A.2、图 A.3 的技术路径展开。

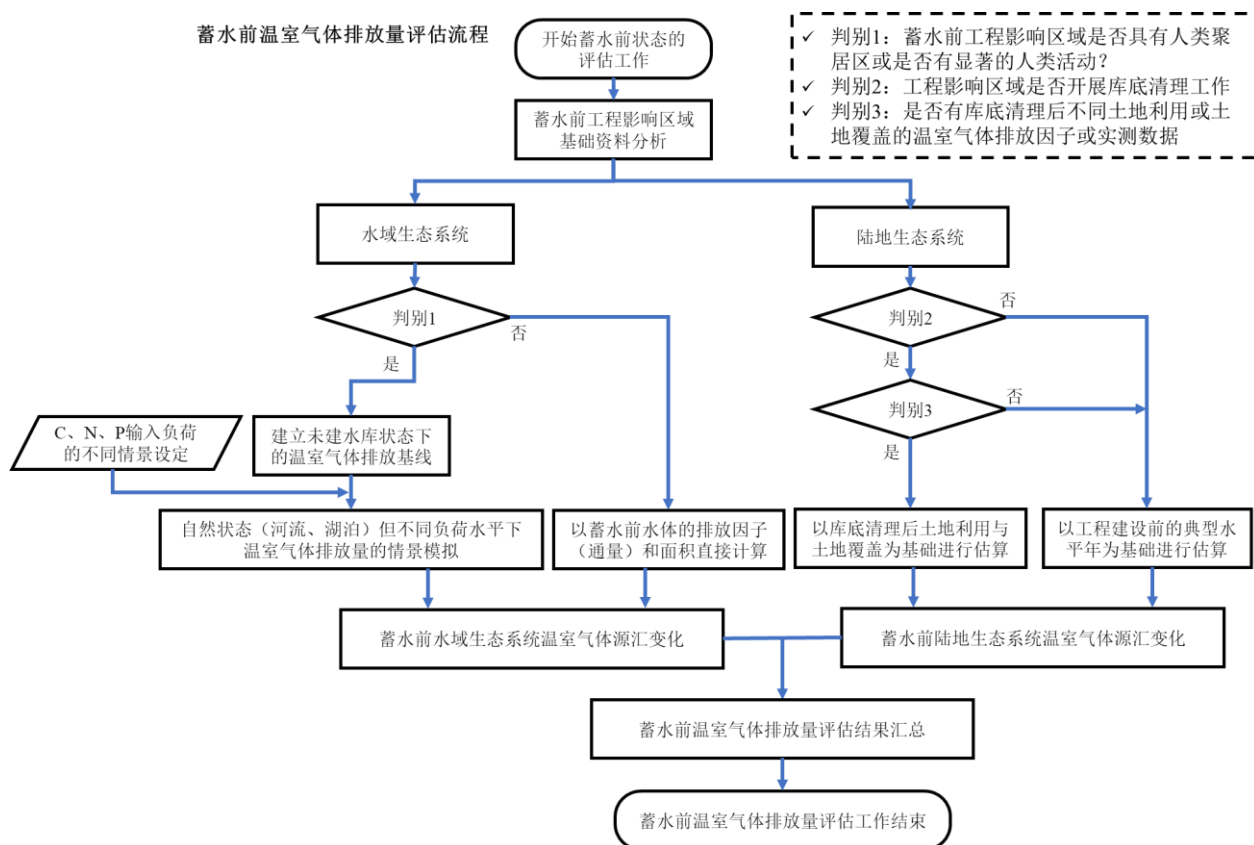


图 A.2 蓄水前温室气体排放量评估的技术路径

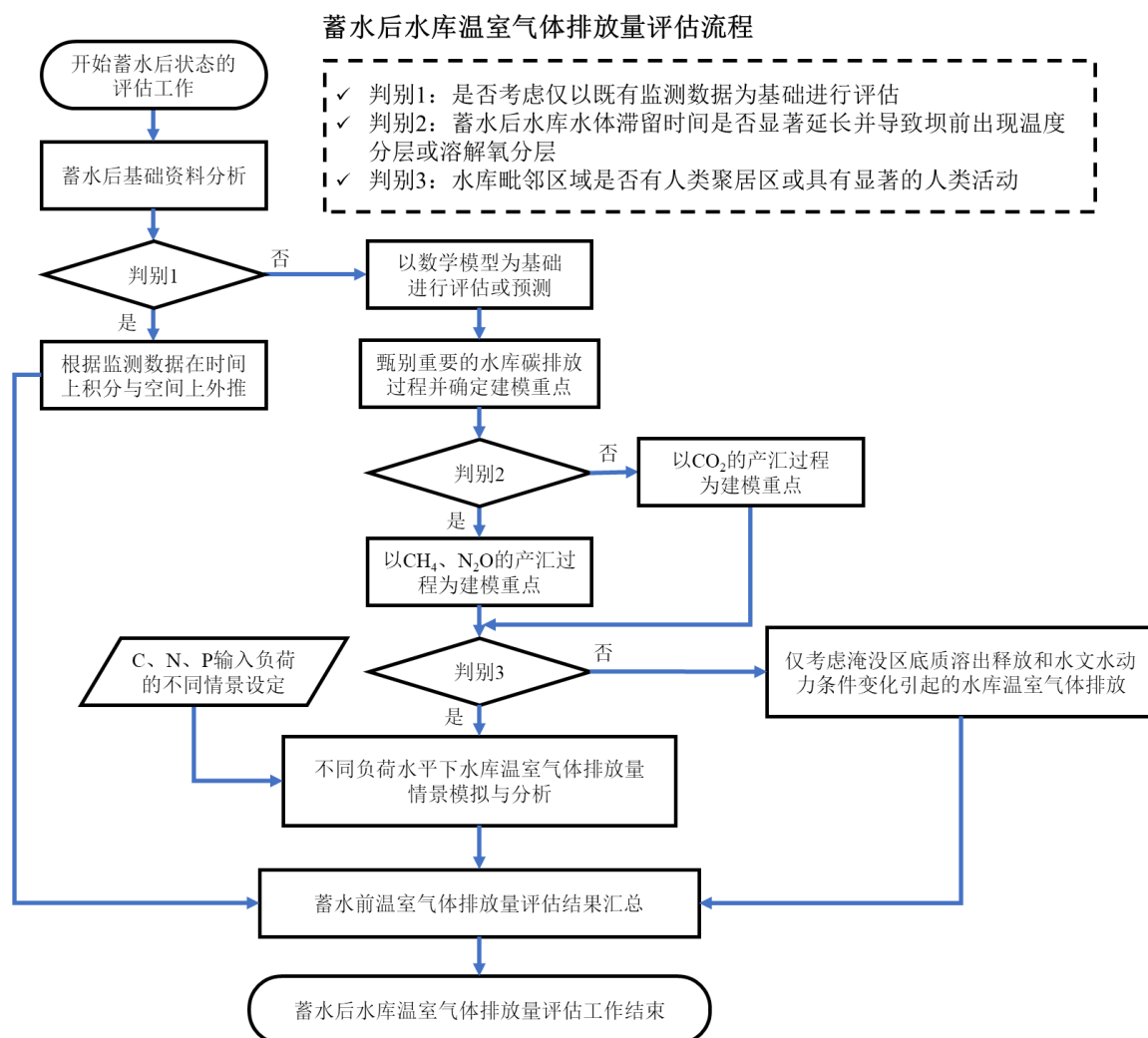


图 A.3 蓄水后温室气体排放量评估的技术路径

附 录 B

(资料性)

水库蓄水前土地利用与土地覆盖清单与反演方法

B.1 水库蓄水前土地利用与土地覆盖清单

水库蓄水前土地利用与土地覆盖，包括：水库工程影响区域范围内的水域、陆域等。

可参考 IPCC 国家温室气体清单土地利用与土地覆盖一致性表述方法（2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 4 Agriculture, Forestry and Other Land Use, Chapter 3, Consistent Representation of Lands），或者国家标准《土地利用现状分类》（GB/T21010-2017）的分类体系设计土地利用与土地覆盖清单。

水库蓄水前土地利用与土地覆盖清单可参考表 B.1。

表 B.1 水库蓄水前土地利用与土地覆盖清单

大类	子类	面积 (km^2)	温室气体排放因子 ($\text{mgCO}_{2e}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)	年温室气体排放量 ($\text{kgCO}_{2e}\cdot\text{yr}^{-1}$)	备注
1. 水体	1.1 河流				
	1.2 湖泊				
	1.3				
2. 耕地	2.1 水田				
	2.2 旱地				
	2.3				
3.					

B.2 水库蓄水前土地利用与土地覆盖情况的“缓冲带”反演方法

对已蓄水且没有任何历史资料的情况，可采用“缓冲带”方法（Buffer method），在已建水库库周设置一定缓冲带（数百米至数公里），认为其同水库蓄水前土地利用与土地覆盖等背景信息具有高度相似性，在此基础上结合淹没区域范围的情况进行反演。

所建立的“缓冲带”取决于卫星遥感影像资料像元的精确性。在技术上，当像元精度较低时（例如一个像元涵盖多个土地覆盖条件），或受到水库地形限制（如陡峭峡谷），“缓冲带”法将产生较大误差。

“缓冲带”法

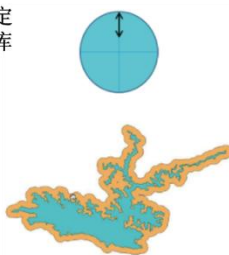
- 基本原理：已建成水库水域近岸一定范围内的土地覆盖现状可以反映水库蓄水前淹没区域的土地覆盖特征

1) 定义缓冲带：

缓冲带的宽度等于同水库水域面积相等的圆形的直径的25%

2) 提取缓冲带：

根据水库现状的卫星图片，提取缓冲带的土地覆盖情况，确定不同土地覆盖相对比例



3) 确定不同土地覆盖的温室气体排放因子：

- 清单法（IPCC 国家温室气体清单）
- 在缓冲带现场实地监测

4) 确定蓄水前淹没区域温室气体排放：

缓冲带内土地覆盖相对比例、淹没区域面积、温室气体排放因子，直接计算

缓冲带法验证（278水库案例）

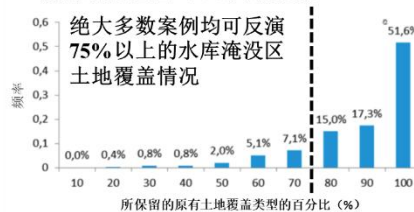


图 B.1 “缓冲带”法使用步骤与验证

附录 C

(资料性)

基于定位观测结果在时间上积分与空间上外推的方案

对单个采样点位瞬时监测数据在时间上积分是将采样时的瞬时监测结果外延并推算全天的总排放量，并以全天的总排放量为代表反映采样当月总排放量进而求取全年总排放量。对不同采样点位进行空间上外推，通常需确定采样点所能代表的水库水面面积（或消落带面积），并赋予其权重以加权计算整个水库水面（或消落带）的总排放量。

时间上积分和空间上外推的基本方程见公式 C.1。

$$\begin{cases} F_{di} = \frac{F_{ti}}{\alpha_{tj}} \\ F_a = \sum_{k=1}^{12} \sum_{i=1}^n F_{di} \cdot \beta_{ik} \cdot D_k \end{cases} \quad (\text{C.1})$$

式中：

i 表示第 i 个采样点，采样点数量从 1 至 n ； j 表示在水库中开展 24 小时昼夜连续跟踪观测的点位 j ；通常宜在水库中选择若干具有代表性（干流、支流、消落带等）的定位观测点，开展 24 小时温室气体通量的连续昼夜跟踪观测； k 是月份，从 1 至 12。

F_{ti} ——表示采样点 i 在采样当日 t 时刻监测所获得的瞬时通量值；

α_{tj} ——在 t 时刻监测获得的温室气体通量值在该点位全天 24 小时总通量中所占比重；理论上， α 为采样时刻通量对日通量的贡献率，需根据采样日温室气体通量昼夜变化特征获取。但限于人力物力条件，在逐月采样中对每个采样点开展昼夜观测并不现实。假定全年中某一典型时段的生态系统具有相似性，并使温室气体通量昼夜变化过程相近，故可通过在不同时段内开展全天 24 小时昼夜跟踪观测以获取温室气体通量昼夜变化过程，用以对全天日总排放量的估算。

F_{di} 表示采样点 i 采样当日的全天总排放量情况；

β_{ik} 表示在 k 月采样点 i 所能够代表的水库水面面积（或消落带面积）比例，且 $\beta_{ik} \leq 1$ ；

D_k 表示第 k 月的当月天数。

附录 D

(资料性)

水库温室气体净排放量的不确定性分析

水库温室气体净排放量的不确定度，应考虑蓄水后水库温室气体排放量和蓄水前温室气体排放量的不确定度。应提供反映温室气体净排放量真实值最大可能存在的双侧置信区间。宜选择 95% 作为置信水平。

双侧 95% 置信区间可以描述为 (LB, UB)，其中，LB 是下界，UB 是上界。

对称的双侧 95% 置信区间可以表示为：

$$\hat{x} \pm 1.96 \cdot \mu \cdot (\hat{x}) \quad (\text{D.1})$$

式 (1) 中，

$\hat{x}$ 是温室气体排放量真实值 x 的预测结果； μ 是预测结果 $\hat{x}$ 的标准不确定度。

为获得水库温室气体净排放量的不确定度，可首先假设蓄水后水库温室气体排放量与蓄水前温室气体排放量相互独立，故可参考式 (2) 进行水库温室气体排放量的不确定度 μ ：

$$\mu(\widehat{NET}) = \sqrt{\mu(\widehat{POS})^2 + \mu(\widehat{PRE})^2} \quad (\text{D.2})$$

其中：

$\mu(\widehat{NET})$ 是水库温室气体净排放量的不确定度。

$\mu(\widehat{POS})$ 是蓄水后水库温室气体排放量的不确定度。

$\mu(\widehat{PRE})$ 是蓄水前温室气体排放量的不确定度。

通常，可通过改变模型的输入变量或模型参数值，并多次运行模型可获得一系列温室气体排放量模拟预测值，在此基础上，结合预测值与数据之间的偏差，估计置信区间。

敏感性分析将辨识对模型结果影响最大的参数或参数组合，宜在敏感性分析基础上设置参数或参数组合以进一步获得模型模拟结果的下界和上界。

附件 1-3

ICS 编号

CCS 编号

团 体 标 准

X/XXXXXX—XXXX

水电工程项目碳足迹核算技术指南

Technical guidelines for accounting of carbon footprints
of hydropower project

XXXX—XX—XX 发布

XXXX—XX—XX 实施

中国水力发电工程学会发布

目次

前言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义	1
4 基本规定	2
5 水电工程项目碳足迹的核算流程.....	3
6 碳足迹核算的准备.....	4
6.1 目标和范围的确定	4
6.2 功能单位选择	4
6.3 系统边界划定	4
7 生命周期清单分析.....	7
7.1 一般规定	7
7.2 数据收集与审定	7
7.3 将数据与单元过程和功能单位相关联	8
7.4 调整系统边界	8
7.5 分配	9
7.6 其他情况的处理	9
7.7 完成生命周期清单	11
8 碳足迹影响的分析.....	11
9 碳足迹核算结果的解释.....	11
10 碳足迹核算报告编写与评审.....	12
10.1 概述	12
10.2 核算报告包含的基本内容	12
10.3 碳足迹核算报告评审	12
附录 A（资料性）碳足迹核算的局限性	14
附录 B（资料性）水电工程项目生命周期清单分析结果汇总样表示意	15
附录 C（资料性）对不同水电工程项目碳足迹进行横向比较	16

前言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件由中国长江三峡集团有限公司提出。

本文件由中国水力发电工程学会归口。

本文件起草单位：中国长江三峡集团有限公司环境保护部、中国科学院重庆绿色智能技术研究院。

本文件主要起草人：XXXXXXXXXX。

本文件主要审查人：XXXXXXXXXX。

本文件执行过程中的意见或建议反馈至中国水力发电工程学会。

水电工程项目碳足迹核算技术指南

1 范围

本文件给出了水电工程项目**碳足迹**核算准备、生命周期清单分析、碳足迹影响分析、碳足迹核算结果的解释、报告编写与评审的基本原则、技术流程与技术要求。

本文件适用于以开发河川水能资源为主的水电工程项目，其他水利工程，如灌渠、闸坝、塘坝等可参考使用。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 24044 环境管理 生命周期评价 要求与指南

SL 654 水利水电工程合理使用年限及耐久性设计规范

ISO 14067 温室气体 产品碳足迹 量化的要求与指南 (Greenhouse gases — Carbon footprint of products — Requirements and guidelines for quantification)

ISO/TS 14071 环境管理 生命周期评估 关键评审过程和评审员能力：ISO 14044-2006 的附加要求和指南 (Environmental management — Life cycle assessment — Critical review processes and reviewer competencies: Additional requirements and guidelines to ISO 14044:2006)

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

水电工程 hydropower project

开发河川或海洋的水能资源，采取集中水头和调节径流等工程技术措施，将天然水流中蕴藏的势能和动能转换为水轮机的动能，并推动发电机产生电能的工程项目。

注：除特殊注明外，本部分默认指以开发河川水能资源为主的水电工程项目。当前大部分水电工程项目并不单纯以水力发电作为唯一的服务功能，一般还具备防洪、航运、灌溉等兴利除弊功能。

3.2

水电工程项目碳足迹 carbon footprint of hydropower project

水电工程项目生命周期中产生或去除温室气体的总和，以二氧化碳当量 (CO_{2e}) 表示。

3.3

温室气体排放和去除 greenhouse gas emissions and removals

向大气排放温室气体、或从大气中吸收或去除温室气体的活动、过程或机制。

3.4

水电工程项目生命周期 life cycle of hydropower project

水电工程项目中前后衔接的一系列阶段，包括从自然界或从自然资源中获取原材料，直至最终处置、恢复河川径流条件等阶段。

3.5

生命周期清单分析 life cycle inventory analysis (LCI)

生命周期评价中对所研究产品系统整个生命周期中物质和能量输入、输出进行汇编和量化的阶段。

[来源: GB/T 24044—2008, 3.3]

3.6

二氧化碳当量 carbon dioxide equivalent (CO_{2e})

用于比较温室气体辐射强迫的度量单位。

注: 不同温室效应气体对地球温室效应的贡献度(辐射强迫)有所不同。为了统一度量整体温室效应的结果, 又因为二氧化碳是人类活动产生温室效应的主要气体, 故以二氧化碳当量为度量温室效应的基本单位。一种气体的二氧化碳当量是通过把这一气体的吨数乘以其全球增温潜势(global warming potential)后得出的, 通过上述方法可对不同温室气体的效应标准化。

[来源: ISO14067—2018, 3.1.2.2]

3.7

全球增温潜势 global warming potential (GWP)

某一给定温室气体在一定时间积分范围内与二氧化碳相比而得到的相对辐射影响值。

注: 根据政府间气候变化专门委员会(IPCC)的第六次评估报告, 在100年尺度下, 非化石产生的CH₄全球增温潜势为CO₂的27.2±11倍; N₂O的全球增温潜势约为CO₂的273±130倍。

3.8

共生产品 co-product

同一单元过程或产品系统中产出的两种或两种以上的产品。

[来源: GB/T 24044—2008, 3.10]

3.9

分配 allocation

将过程或产品系统中输入和输出的流划分到所研究的产品系统以及一个或更多的其他产品系统中。

[来源: GB/T 24044—2008, 3.17]

3.10

取舍准则 cut-off criteria

对与单元过程或产品系统相关的物质和能量流的数量或环境影响重要性程度是否被排除在研究范围之外所做出的规定。

[来源: GB/T 24044—2008, 3.18]

3.11

功能单位 functional unit

用来作为基准单位的量化的产品系统性能。

[来源: GB/T 24044—2008, 3.20]

3.12

敏感性分析 sensitivity analysis

用来估计所选用方法和数据对研究结果影响的系统化程序。

[来源: GB/T 24044—2008, 3.31]

4 基本规定

4.1 水电工程项目碳足迹核算, 是指核算水电工程项目准备、建设、运营、拆除恢复等生命周期各环

节所产生的温室气体排放和去除情况的过程。评价结果将服务水电行业开展温室气体管理、支撑水电工程项目参与温室气体排放权及碳信用额度交易等工作。

4.2 应在生命周期的视角下对水电工程项目进行温室气体核算，应辨识水电工程项目生命周期内各阶段的温室气体排放和去除情况，并避免温室气体排放和去除在某些阶段或环节被潜在地忽略或转移。

4.3 水电工程碳足迹核算，应充分考虑工程项目的复杂性和长期性，设计合理可信的评价目标与范围，构建清晰明确的生命周期温室气体排放清单，并对评价结果进行解释。

4.4 碳足迹核算过程是一个反复的过程，应充分解析每个阶段（或每个单元过程）同其他阶段（或单元过程）之间的关系，使核算结果具有全面性和一致性。

4.5 应结合当前科学研究前沿，运用新理论、新技术、新方法，注重调查研究与资料收集分析，提高水电工程项目核算结果的科学性与客观性。

5 水电工程项目碳足迹的核算流程

5.1 水电工程项目碳足迹的核算过程一般包括 5 个阶段：

- a) 碳足迹核算的准备；
- b) 生命周期清单分析；
- c) 碳足迹影响的分析；
- d) 碳足迹核算结果的解释；
- e) 碳足迹核算报告编写与评审。

5.2 水电工程项目碳足迹核算宜参考图 1 所示的流程开展。

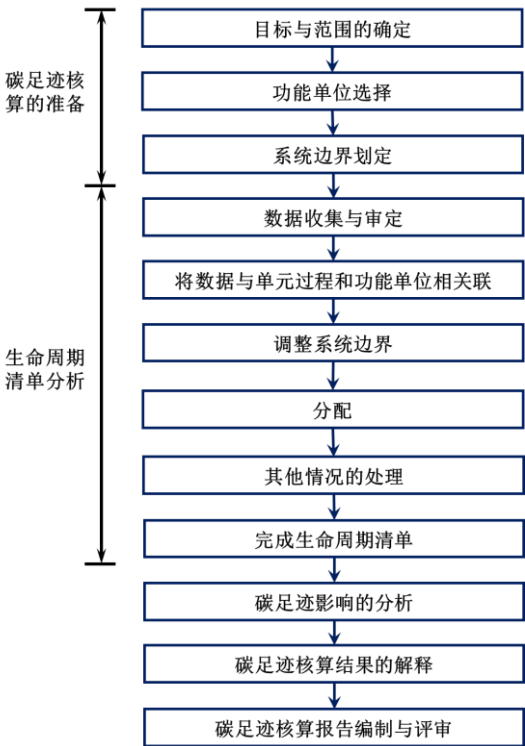


图 1 水电工程项目碳足迹核算的基本流程

6 碳足迹核算的准备

6.1 目标和范围的确定

6.1.1 应通过对水电工程项目生命周期全过程或部分阶段温室气体排放和去除进行定量计算，以二氧化碳当量（CO_{2e}）为表达形式，掌握水电工程项目对气候变化的潜在影响。

6.1.2 定义水电工程项目碳足迹核算的目标，以下内容应清晰无误地予以陈述：

- a) 碳足迹核算的意图；
- b) 开展碳足迹核算的理由；
- c) 碳足迹核算成果的应用对象；
- d) 碳足迹核算结果的沟通交流形式。

6.1.3 水电工程项目碳足迹核算应能够满足水电工程项目温室气体管理工作的基本要求，碳足迹核算范围应服务于碳足迹核算的目标。

6.1.4 水电工程项目碳足迹核算范围，一般应包括：

- a) 描述水电工程项目的基本特征及其主要服务功能；
- b) 明确碳足迹核算中采用的功能单位；
- c) 明确系统边界，包括空间范围、时间边界等信息；
- d) 说明数据量和数据质量的要求；
- e) 说明数据获取的时间范围；
- f) 说明碳足迹核算的概化与假设，特别是在项目运营维护阶段、拆除与河道恢复阶段等；
- g) 说明对特定单元过程进行分配的原则；
- h) 描述特定环节或阶段的温室气体排放和去除；
- i) 解析特定环节或阶段问题的方法；
- j) 编制水电工程项目碳足迹核算报告；
- k) 审查碳足迹核算报告；
- l) 解释碳足迹核算的局限性。

6.1.5 应在确定评价范围的基础上，梳理形成评价任务工作清单与碳足迹核算工作执行时间表。

6.1.6 当水电工程项目碳足迹核算目标有修改或调整时，应补充描述评价的范围，阐释范围调整的具体内容。

6.2 功能单位选择

6.2.1 功能单位的选择应能够反映所确定的目标和范围，应能够量化水电工程项目绩效特征，具有可测性。

6.2.2 结合水电工程项目的主要功能，宜以水力发电量（如“kW·h”或“度”）作为功能单位。

6.2.3 对具有发电、防洪、航运、灌溉等多种服务功能的水利水电工程，应准确陈述各种服务功能的设计、施工、运营管理信息、效能发挥情况，应明确各种服务的物质、能量投入等。

6.2.4 宜结合碳足迹核算的目标和范围，论证并选择具有可比性的功能单位；或在完成碳足迹核算后对不同服务功能可能产生的温室气体排放和去除进行分类评估。

6.3 系统边界划定

6.3.1 一般规定

6.3.1.1 确定系统边界，即确定要纳入碳足迹核算系统的单元过程。

6.3.1.2 应包含水电工程项目生命周期中可能产生温室气体排放和去除的所有单元过程，且应符合已确定的目标和范围。

6.3.1.3 宜结合水电工程项目特征且符合生命周期的观点，将水电工程项目划分为前期准备、施工建设、运营维护、拆除恢复等阶段，见图 2。

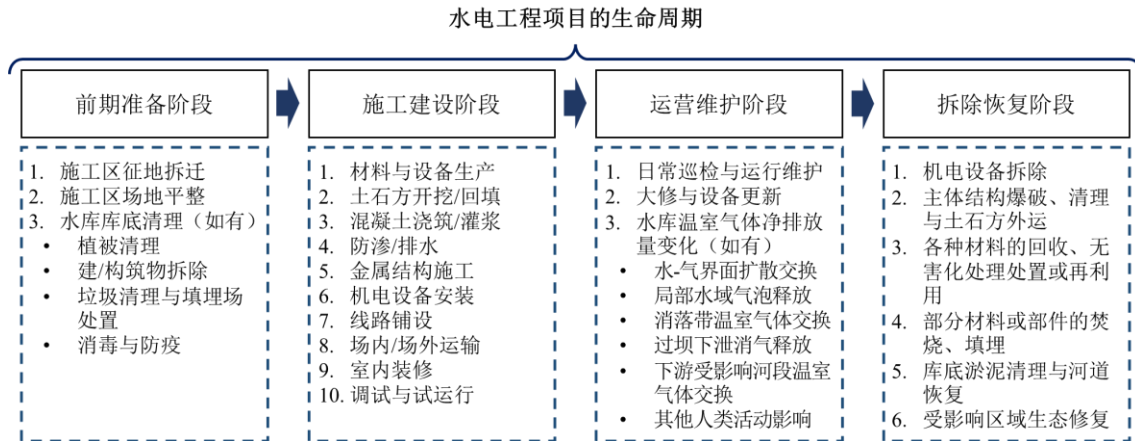


图 2 水电工程项目碳足迹核算的系统边界与主要活动内容

6.3.1.4 应准确识别并阐释确定系统边界的基本原则。

6.3.1.5 应通过对各阶段温室气体排放和去除的计算分析，统计汇总形成水电工程项目碳足迹。

6.3.1.6 宜结合可能获取的数据和数据质量，并根据单元过程温室气体排放和去除计算的方法要求，统筹划分系统内各阶段的单元过程，明确单元过程取舍准则，阐释哪些重要的单元过程需要细化分析、哪些单元过程可以概化处理、哪些单元过程在核算中可被合并。

6.3.1.7 单元过程划分应全面、细致、可测、可计量，要求能够完全覆盖水电工程项目生命周期。宜参考附录 A 中方法学方面的局限性并结合已掌握的数据情况划分单元过程。

6.3.1.8 一些活动过程（物质和能量流动）对特定单元过程的温室气体排放和去除并无显著的贡献，则可以概化处理或不予考虑。上述取舍对水电工程项目碳足迹核算结果的影响应予以分析和说明。

6.3.1.9 为避免重复计算，允许将生命周期的部分阶段、部分单元过程、输入或输出项排除于系统边界之外；但应在核算报告中予以准确说明，阐明原因并解释其对碳足迹核算结果潜在的影响。

6.3.2 前期准备阶段

6.3.2.1 项目前期准备阶段的单元过程，一般宜包括：

- a) 施工区征地拆迁；
- b) 施工区场地平整；
- c) 水库库底清理。

6.3.2.2 若开展水库库底清理，所涉及的单元过程一般宜包括：

- a) 植被清理；
- b) 建/构筑物拆除；
- c) 垃圾清理与填埋场处置；
- d) 消毒与防疫。

6.3.2.3 宜结合水电工程项目初步设计报告或前期调查，充分掌握工程未开工建设前期的土地利用与土地覆盖、以及工程影响区域温室气体排放和去除情况。

6.3.2.4 宜对工程建设场地平整、水库淹没区库底清理及其处理处置方案进行分析，评估场地平整或库底清理移除的有机质（来自于灌木、乔木等）的总量，并分析区域因土地利用变化而产生的温室气体排放和去除情况。

6.3.3 施工建设阶段

6.3.3.1 应分析不同水电工程建设施工的特点，包括其所采用的施工技术、施工方案设计、施工组织与进度安排等要素，掌握不同施工阶段的活动与单元过程。

6.3.3.2 施工建设阶段所涵盖的单元过程，一般宜包括：

- a) 材料与设备生产；
- b) 土石方开挖/回填；
- c) 混凝土浇筑/灌浆；
- d) 防渗/排水工程；
- e) 金属结构施工；
- f) 机电设备安装；
- g) 线路铺设；
- h) 场内/场外运输；
- i) 室内装修；
- j) 调试与试运行。

6.3.3.3 应结合资料收集情况，在上述单元过程基础上进一步细化以减少核算过程可能产生的误差。

6.3.3.4 对施工建设阶段较长的水电工程项目，应考虑水电工程项目建设施工期间社会经济发展与技术经济水平的变化，分析评估上述变化对原材料生产、设备生产等重要环节温室气体排放和去除的影响。

6.3.4 运营维护阶段

6.3.4.1 运营维护阶段的单元过程，一般宜包括：

- a) 运行维护检修；
- b) 设备更新改造；
- c) 水库温室气体净排放过程。

6.3.4.2 应将水库温室气体净排放量作为项目运营维护阶段不可忽视的碳足迹。应对水电工程项目生命周期内水库温室气体净排放量进行估算，并将此作为碳足迹核算结果的一部分。

6.3.4.3 宜根据水电工程项目运营管理要求，考虑设置不同的运营维护情景以更全面、系统地进行运营维护阶段的碳足迹核算。

6.3.5 拆除恢复阶段

6.3.5.1 该阶段产生温室气体排放和去除的主要过程包括：

- a) 机电设备拆除；
- b) 主体结构拆除（爆破、现场施工等）与外运；
- c) 各种材料（金属、油料等）的回收、无害化处理处置或再利用；
- d) 部分材料或部件的焚烧、填埋；
- e) 库底淤泥清理与河道恢复；
- f) 受影响区域生态修复。

6.3.5.2 应基于可使用的信息、当前的技术和经验等条件进行拆除恢复阶段的情景描绘与假设。可设

置多个可能的未来情景进行分析，使用户能够对结果进行横向比较以评估未来真实情况。

6.3.5.3 若现阶段不具备对拆除恢复阶段的单元过程进行碳排放核算，可将拆除恢复阶段排除出系统边界之外，但应在核算报告中予以详细说明，并阐释对碳足迹核算结果可能产生的影响。

7 生命周期清单分析

7.1 一般规定

7.1.1 在完成目标和范围确定阶段后，应开展生命周期清单分析，用以量化生命周期中物质、能量输入和输出。

7.1.2 生命周期清单分析，应包括数据的收集、汇编与计算，一般包括以下步骤：

- a) 数据收集与审定；
- b) 将数据与单元过程、功能单位相关联；
- c) 系统边界调整；
- d) 分配；
- e) 其他情况处理。

7.2 数据收集与审定

7.2.1 数据收集

7.2.1.1 一般规定

7.2.1.1.1 应针对水电工程项目具体特征开展数据收集工作。数据应具有代表性，能够反映系统边界内所考虑的各种单元过程。

7.2.1.1.2 数据主要来源于业主单位或管理部门，包括：项目可行性研究报告、环境影响报告、工程初步设计或施工图设计、工程竣工验收资料、工程调度运行规程、运行维护管理相关技术文件等。

7.2.1.1.3 应针对上述材料梳理出的单元过程的活动内容和强度信息（如工程量、原材料消耗总量、移民迁建等），以作为生命周期清单分析的首要数据。

7.2.1.1.4 若对部分单元过程或生命周期的特定阶段，没有针对具体工程项目的数据来源，则可以采用经过第三方评估、审查或公开的数据作为支撑。

7.2.1.1.5 对具体活动或特定单元过程使用的温室气体排放因子，宜采用各种已被广泛采用或认可的生命周期数据库，如政府间气候变化专门委员会（IPCC）国家温室气体清单、国家主管部门颁布的相关行业企业温室气体排放核算方法与报告指南等。

7.2.1.1.6 一些温室气体排放因子数据并非以生命周期评价为基础，如水库温室气体通量的监测数据或净排放量的估算结果等，应对这些数据进行修订或进行特别说明。

7.2.1.2 数据质量要求

7.2.1.2.1 应通过使用最高质量的数据，尽可能减少碳足迹核算结果的偏差或不确定性。应对数据质量在定性和定量等多方面进行评估。

7.2.1.2.2 数据质量要求宜注意以下问题：

- a) 时间跨度：数据的年份以及所收集数据的最小时间跨度；
- b) 地理范围：单元过程数据的地域；
- c) 技术覆盖面：具体的技术或技术组合；
- d) 精确度：对每一个数据值的变动的测度（如方差、标准差等）；

- e) 完整性：在全部物质流或能量流中，可被测量或被估计的百分比；
- f) 代表性：数据能够真实反映关注点（如时间跨度、地理范围、技术覆盖面等）；
- g) 一致性：基于数据信息所采用的方法学能否统一应用于不同的分析内容；
- h) 重现性：对第三方独立人员采用同一方法学和数据信息能获取相同碳足迹核算结果的可能性；
- i) 数据来源；
- j) 数据信息的不确定性。

7.2.1.2.3 将碳足迹核算结果用于公开发布时，应对上述提到的数据质量要求进行说明。

7.2.1.2.4 应说明缺失数据的处理方案。每个数据缺失的单元过程和报告位置应予以识别，并宜对缺失数据及其断档进行处理，主要方案包括：

- a) 以“非零”数据表示；
- b) 以“零”表示；
- c) 以从采用类似技术的单元过程报送的数据计算得出的数值表示。

7.2.1.3 数据的时间边界

7.2.1.3.1 数据的时间边界应能够代表碳足迹核算结果的时间范围。应对数据时间边界的合理性进行论证和说明。

7.2.1.3.2 应梳理甄别水电工程项目的时间跨度和生命周期内各个阶段或各主要活动的时间范围或关键时间节点，明确各单元过程的时间范围以及其在年内或不同年份之间的变化性特征。宜选择能够代表各单元过程时间范围内的全部数据或对数据取用均值进行温室气体排放和去除计算。

7.2.2 数据的审定

7.2.2.1 应通过测量、计算或估算等方式收集每一个单元过程的数据，并用此量化单元过程的输入、输出。

7.2.2.2 宜绘制流程简图，描绘所有被模拟单元过程和它们之间的关系，详细描述每个单元过程中影响输入和输出的因子。

7.2.2.3 当数据是通过公开的来源收集到的，应注明出处。对影响碳足迹核算结论有显著影响的数据，应说明相关的数据收集过程、收集时间以及关于数据质量指标的详细信息。如果这些数据不符合数据质量要求，对此也应予以说明。

7.2.2.4 应对每个单元过程进行书面描述，减少数据收集中产生的误解或重复计算问题。由于数据收集可能源于多个报告地点和发表文献，应在核算中使用具有代表性和一致性的数据集。

7.2.2.5 应根据每个单元过程物料或能量守恒原则，在数据收集过程中同步对数据有效性进行检查，提供证据以确认数据质量达到要求。

7.3 将数据与单元过程和功能单位相关联

7.3.1 对每一个单元过程，都应确定一个合适的物质流或能量流。

7.3.2 单元过程中定量的输入和输出数据应以和物质流或能量流的关系为依据进行计算。以流程图和各单元过程间的物质流或能量流为基础。宜以功能单位为基础计算得出系统中所有的输入和输出数据。

7.3.3 在合并系统的输入、输出数据时应慎重。合并的程度应与核算目的保持一致。如还有更详细的合并原则，宜在核算目的和范围确定阶段加以解释，或在此后的影响分析阶段予以解释。

7.4 调整系统边界

7.4.1 碳足迹核算采用反复的方法，在核算过程中应通过调整系统边界来实现。

7.4.2 应开展敏感性分析以辨识单元过程的重要性，决定数据取舍，从而对前述分析加以验证。敏感性分析将有助于将数据处理限制在被判定为对碳足迹核算目的具有重要性的输入和输出数据范围内。

7.4.3 应根据在目标和范围界定中所规定的取舍准则对初始系统边界进行调整。这个调整过程和敏感性分析应予以书面说明。根据敏感性分析结果，系统边界调整可以：

- a) 排除经敏感性分析判定为不重要的生命周期阶段或单元过程；
- b) 排除对核算结果不重要的输入和输出；
- c) 纳入经敏感性分析认为重要的新的单元过程、输入和输出。

7.5 分配

7.5.1 一般规定

7.5.1.1 应根据明确规定的操作流程将物质、能量的输入、输出分配到不同的单元过程中，且应对上述操作流程进行说明。针对单元过程分配的输入、输出的总和应与其分配前输入、输出的总和相等。

7.5.1.2 当同时有几种备选的分配程序时，应通过敏感性分析来阐明偏离所选方法所产生的结果。

7.5.2 分配程序

7.5.2.1 水电工程项目碳足迹核算应确定和其他产品系统共享的过程，并根据以下程序逐步处理：

- a) 只要存在可能，宜通过以下方式避免进行分配：
 - 1) 将拟分配的单元过程进一步划分为两个或更多的子过程，并收集与这些子过程相关的输入和输出数据；
 - 2) 把产品系统加以扩展，将与共生产品相关的功能包括进来。
- b) 如果分配不可避免，则宜将系统的输入输出以能够反映出它们潜在物理关系的方式划分到不同功能中。
- c) 当物理关系无法建立或无法单独用来作为分配基础时，则宜以能反映它们之间其他关系的方式将输入输出在产品或功能间进行分配。例如，可根据产品的经济价值按比例将输入输出数据分配到共生产品。

7.5.2.2 有些输出可能同时包括共生产品和废物两种成分（如施工过程的废弃物等），此时需要确定两者的比例，因为输入输出只对其中共生产品部分进行分配。

7.5.2.3 对系统中相似的输入和输出，应采用同样的分配程序。例如，离开系统的可用产品（如中间产品或丢弃的产品）的分配程序和进入系统的同类产品的分配程序应当相同。

7.5.2.4 生命周期清单是基于输入和输出之间的物料平衡为基础的。因此，分配程序应尽可能接近这些输入输出关系和特征。

7.5.3 再使用和再生利用的分配程序

7.5.3.1 原材料获取和加工或产品最终处置的单元过程的输入、输出可能为多个产品系统所共有，故可能存在再使用和再生利用的现象，并可能在后续使用中改变材料的固有特性。因此，应甄别水电工程项目中再使用和再生利用（以及可归入再使用和再生利用的物质、能量等回收过程）情况。

7.5.3.2 再使用和再生利用的分配程序，应遵循 7.5.1、7.5.2 规定的分配原则和流程。特别地，若存在初始和后续的单元过程之间回收利用的情况，系统边界应重新调整并进行解释。

7.6 其他情况的处理

7.6.1 用于碳足迹绩效跟踪时的额外要求

当碳足迹核算的结果被用于各活动碳足迹绩效的跟踪时，应额外满足以下要求：

- a) 碳足迹核算应在生命周期的不同时间节点展开；
- b) 碳足迹随时间的变化应以相同的功能单位为基础进行计算；
- c) 碳足迹随时间的变化，应采用相同的方法进行计算；
- d) 碳足迹核算的时间范围，应不短于 7.2.1.3 所确定的时间边界；
- e) 应在碳足迹核算的目标和范围界定中予以阐明。

7.6.2 温室气体排放和去除时间延迟效应的处理

7.6.2.1 因水电工程项目从前期准备阶段开始便存在温室气体排放和去除的情形，一般情况下可不考虑温室气体排放和去除的延迟效应。

7.6.2.2 在特殊情况下，如终止水力发电功能但却未进行拆坝恢复，则在项目终止期后的 10 年及以上时间仍可能产生温室气体排放和去除。对此情形，应在生命周期清单中予以专门说明，也应在碳足迹核算报告中对该部分核算所采用的方法和计算结果等予以单独描述。

7.6.3 对一些特殊的温室气体排放和去除情形的处理

7.6.3.1 运用化石作为原料或燃料而产生的温室气体排放和去除应包含在碳足迹核算中，宜在报告中单独罗列陈述。

7.6.3.2 生命周期所有的单元过程中，生物量变化产生的产品（例如，水库初级生产力升高、区域绿化与植被恢复等）均应纳入碳足迹核算中。该部分应与土地利用变化相结合进行碳足迹核算。

7.6.3.3 电力消耗应满足以下要求：

- a) 与电力消耗相关的温室气体排放和去除应包括但不限于：
 - 1) 电力供应系统生命周期温室气体排放的增加（诸如矿山开采、选冶、运输等上游活动温室气体排放和去除的变化）。
 - 2) 电力生产过程中产生的温室气体排放，包括因传输或配电产生的损耗。
- b) 为避免出现重复计算，水电工程项目碳足迹核算应考虑以下几种情况：
 - 1) 内部生产的电力：水电工程项目生产的部分电力用于自身运营维护。
 - 2) 外部直接供给的电力：需经由外部发电机组直接供给的电力（如项目前期准备、施工建设阶段或拆除恢复阶段等），应结合外部发电机组运行的温室气体排放因子进行计算。
 - 3) 从电网获取的电力：若某些单元过程需通过电网获取电力资源（如配套设施的电力消耗），应在电网温室气体排放因子的基础上进行计算。

7.6.3.4 土地利用变化应满足以下要求：

- a) 水电工程项目所产生的土地利用变化包括：直接土地利用变化和间接土地利用变化两个部分。
 - 1) 直接土地利用变化，指因水电工程项目施工建设、运行维护与拆除恢复等各阶段产生的土地利用变化，包括大坝工程建设区域、上游的水库淹没影响区域及其下游受影响区域。
 - 2) 间接土地利用变化，指因水电工程项目建设运营，导致其工程影响区域内其他人类活动产生的土地利用变化。如移民迁建与安置、水电工程项目毗邻区域人口与社会经济发展产生的土地利用变化等。
- b) 应在碳足迹核算中考虑全生命周期下水电工程项目产生的直接土地利用变化。
 - 1) 应充分考虑水电工程项目影响区域（大坝工程建设区域、上游水库淹没影响区域等）在工程项目建设前期的土地利用情况，并评估工程项目建设前温室气体排放和去除情况。
 - 2) 若存在数据缺失的情况，宜根据政府间气候变化专门委员会（IPCC）国家温室气体清单的相关要求，对直接土地利用变化产生的温室气体排放和去除进行核算。

- c) 应对全生命周期下水电工程项目间接土地利用变化情况进行描述。但因其为水电工程项目本身的外溢效应，其产生的温室气体排放和去除情况可不予考虑。

7.7 完成生命周期清单

- 7.7.1 应结合水电工程项目特点，设计合适的生命周期清单表列或数据库，完成生命周期清单分析。
- 7.7.2 水电工程项目碳足迹影响的分析、碳足迹核算结果的解释，均应建立在生命周期清单汇总表列基础之上。水电工程项目生命周期清单分析结果汇总样表示意参见附录 B。
- 7.7.3 生命周期清单表列或数据库设计，应同系统边界划定、生命周期各阶段与单元过程划分相互匹配。
- 7.7.4 宜在生命周期清单中明确系统边界内各单元过程物质流或能量流的输入、输出情况。有条件的情况下，可直接在生命周期清单中明确系统边界内各单元过程温室气体排放和去除的信息。
- 7.7.5 对存在物质流或能量流分配的情形或存在其他情况处理，宜单独设计表列或数据库，并说明单独设计的原则和处理的方法。

8 碳足迹影响的分析

- 8.1 应结合政府间气候变化专门委员会（IPCC）提供不同温室气体（CO₂、CH₄、N₂O 等）在 100 年尺度下的全球增温潜势，计算不同温室气体在水电工程项目全生命周期下的二氧化碳当量（CO_{2e}）排放量，并以此衡量水电工程项目的碳足迹。
- 8.2 应根据政府间气候变化专门委员会（IPCC）最新的全球增温潜势结果，对不同温室气体（CO₂、CH₄、N₂O 等）的二氧化碳当量排放量进行换算。
- 8.3 在水电工程项目的全生命周期各个阶段，对向大气产生温室气体排放的阶段或单元过程，应采用正值进行描述；对从大气中吸收或去除温室气体的阶段或单元过程，应采用负值进行描述。
- 8.4 将全生命周期各个阶段的温室气体排放和去除量进行加和后，可获得水电工程项目全生命周期二氧化碳当量排放量。
- 8.5 将水电工程项目全生命周期二氧化碳当量排放量除以水电工程生命周期预计可产生的发电总量，可获得该工程项目单位发电量下的二氧化碳当量排放量。可应用该值同其他水电工程项目或其他能源形式进行横向比较，以表征项目水电生产的低碳清洁程度、支撑项目开展温室气体管理与交易。对不同水电工程项目碳足迹进行横向比较可参见附录 C。
- 8.6 应充分注意到水电工程项目除水力发电外，还存在其他衍生服务功能（如防洪、灌溉、航运、旅游等），应建立客观、科学的方法将水电工程项目全生命周期的二氧化碳当量排放量分配至上述不同服务功能之间。
- 8.7 针对特定阶段（如工程施工阶段、运营维护阶段等）的温室气体排放和去除量，可进行单独核算，以获得该阶段的碳足迹，但应在核算报告中予以特别描述和说明。

9 碳足迹核算结果的解释

应根据碳足迹核算的目标和范围，对生命周期或特定阶段的温室气体排放和去除进行解释。碳足迹核算结果的解释，应包含以下内容：

- a) 基于生命周期或特定阶段的碳足迹核算结果，辨识重要的环节或单元；
- b) 对碳足迹核算过程的完整性、一致性的评估；
- c) 对重要的输入、输出、方法选择（包括分配方案等）等关键参数或过程的敏感性进行分析，

及其对水电工程项目碳足迹核算结果产生的不确定性分析；

- d) 不同情景、替代性方案或建议性对策对水电工程项目碳足迹核算结果产生的影响；
- e) 阐述碳足迹核算结论、尚存在的问题与未来的建议。

10 碳足迹核算报告编写与评审

10.1 概述

10.1.1 编制水电工程项目碳足迹核算报告的目的是描述水电工程碳足迹过程、展示成果。

10.1.2 碳足迹核算的结果和结论应无偏地在核算报告中予以陈述。结果、数据、方法、假设与生命周期影响解释均应透明、且应足够细致以满足读者理解问题的复杂性和分析核算过程。

10.1.3 核算报告的形式和格式应在目标和范围的确定阶段予以明确。核算报告应在陈述形式上使核算结果和生命周期影响解释与所设置的核算目标相呼应。

10.2 核算报告包含的基本内容

水电工程项目碳足迹核算报告应包含以下内容：

- a) 核算背景、目的与意义；
- b) 核算技术路线、采用的方法学；
- c) 功能单位（或申报单位）；
- d) 系统边界，包括：
 - 1) 输入和输出系统物质流的类型；
 - 2) 处理单元过程的决策准则（基于它们对核算结果影响的重要性）。
- e) 重要单元过程的清单；
- f) 数据收集信息（包括数据来源）；
- g) 所考虑的温室气体的类别；
- h) 所选择的表征因素；
- i) 所选择的取舍准则和取舍内容；
- j) 温室气体排放和去除的时间（如有）；
- k) 数据描述，包括：数据选取理由、数据质量评估；
 - 1) 敏感性分析和不确定性核算的结果；
- m) 电力使用方面的处理，包括电网排放因子信息和与此相关的特殊约束条件；
- n) 生命周期解释的结果，包括结论和局限性；
- o) 审核；
- p) 在碳足迹核算中价值选择的信息披露和理由；
- q) 与理由和排除条款有关的范围与修正的范围（如有）；
- r) 生命周期不同阶段的描述，包括项目运营阶段概况、项目终止阶段情景（如有）；
- s) 对项目运营阶段、项目终止阶段等所设置的不同情景对碳足迹最终核算结果的评估分析；
- t) 碳足迹核算结果所代表的时间范围；
- u) 产品分类规则的参考信息或碳足迹核算中的其他补充性材料；
- v) 对项目运营情况跟踪的描述（如有）；
- w) 附录 B 中相关内容（如有）。

10.3 碳足迹核算报告评审

10.3.1 碳足迹核算报告评审，应包括以下内容：

- a) 确保方法上符合相关标准；
- b) 碳足迹核算过程的科学上和技术上是有效的；
- c) 所使用的数据是恰当合理的；
- d) 能够反映碳足迹核算的局限性和核算目的；
- e) 核算报告应具有透明性和一致性。

10.3.2 宜根据 ISO/TS14071 的要求进行鉴定性评审过程。

10.3.3 评审与鉴定的范围和类型应在核算范围中予以确定。应说明评审与鉴定的原因、内容、详细程度及其参与者。

10.3.4 可由内部或外部专家进行评审与鉴定。评审专家组成应独立于碳足迹核算过程。评审结果、主要意见以及对评审结果的答复应纳入碳足迹核算报告中。

附录 A
(资料性)
碳足迹核算的局限性

A.1 概述

碳足迹的局限性影响了对它的定量评价。两个最重要的内在局限性：

- a) 仅关注于气候变化效应；
- b) 方法学上的局限性。

上述局限性应在报告中予以反映。

A.2 仅关注于气候变化效应

水电工程项目碳足迹，以工程项目全生命周期所产生的二氧化碳当量(CO_{2e})排放量作为最终目标，反映了水电工程项目在全生命周期内对全球大气辐射平衡（或“气候变化”）产生的影响。

但是，水电工程项目产生的生态环境影响，并不单纯局限于温室气体排放和去除；且在生命周期中不同阶段，其他生态环境影响的重要性，将可能超过温室气体排放和去除。因此，应客观认识水电工程项目碳足迹核算结果对水电生态环境管理政策方面的影响。

A.3 方法学上的局限性

本文件中碳足迹核算方法是一种基于清单分析的过程生命周期评价（process-based life cycle assessment），它是一种“自下而上”（bottom up）的分析方法，具有针对性强、精度高的优势。但也可能存在“截断误差”（即清单核算不完整性）的问题。

水电工程项目复杂、系统庞大、周期长。在开展水电工程项目碳足迹核算中，数据来源与收集、物质能量的输入输出、各阶段或各单元过程的温室气体排放和去除情况等，并不易完全满足构建生命周期清单的各项要求。另一方面，生命周期的部分阶段、部分单元过程、输入项或输出项所产生的温室气体排放，可能在其他行业或部门进行计算。故基于清单分析的方法学仍具有自身的局限性。

投入产出法，是一种“自上而下”（top down）的分析方法，它通常以货币形式反映各经济活动的物质与能量流动，利用投入产出表计算出各经济活动的能耗及排放水平，再通过评价对象与经济活动的对应关系评价具体产品或服务的环境影响。

混合生命周期评价方法是清单分析法与投入产出法相结合的方法，包括分层混合生命周期评价（tiered hybrid life cycle assessment）、基于投入产出的混合生命周期评价（I-O based hybrid life cycle assessment）以及集成混合生命周期评价（integrated hybrid life cycle assessment）等不同形式。

目前，常在清单分析法基础上，结合投入产出法，形成混合生命周期评价方法（hybrid life cycle assessment）对水电工程项目开展碳足迹核算。但是，在数据收集、生命周期各阶段或各单元过程的层次分解方面，在方法学上仍需进一步完善。

附 录 B
(资料性)

水电工程项目生命周期清单分析结果汇总样表示意

表 B.1 提供了水电工程项目生命周期清单分析的汇总样表。

表 B.1 水电工程项目生命周期清单分析结果汇总样表

内容	工程量	排放因子	温室气体排放和去除量		
			CO ₂	CH ₄	N ₂ O
1. 前期准备阶段					
1.1 施工区征地拆迁					
1.2 施工区场地平整					
1.3 水库库底清理					
小计					
所占比重					
2. 施工建设阶段					
2.1 材料与设备生产					
2.2 土石方开挖/回填					
2.3 混凝土浇筑/灌浆					
2.4 防渗/排水工程					
2.5 金属结构施工					
2.6 机电设备安装					
2.7 线路铺设					
2.8 场内/场外运输					
2.9 室内装修					
2.10 调试与试运行					
小计					
所占比重					
3. 运营维护阶段					
3.1 运行维护检修					
3.2 设备更新改造					
3.3 水库温室气体净排放过程					
小计					
所占比重					
4. 拆除恢复阶段					
4.1 机电设备拆除					
4.2 主体结构拆除（爆破、现场施工等）与外运					
4.3 各种材料的回收、无害化处理处置或再利用					
4.4 部分材料或部件的焚烧、填埋					
4.5 库底淤泥清理与河道恢复					
小计					
所占比重					
总计					
生命周期温室气体总排放量（CO _{2e} ）	——	——			

附 录 C
(资料性)
对不同水电工程项目碳足迹进行横向比较

宜将水电工程项目的碳足迹核算结果同其他水电工程项目碳足迹进行横向比较,以促进信息沟通并服务决策。

若开展横向比较,应遵循以下原则:

- a) 水电工程项目的功能性描述应是一致的;
- b) 选用的功能单位应一致;
- c) 系统边界、对数据的描述应是相同的;
- d) 输入和输出的取舍标准应一致;
- e) 数据质量的要求(例如,覆盖范围、精度、完整性、代表性、一致性和重现性)应一致;
- f) 对工程项目全生命周期各阶段碳足迹计算的基本假设应相同;
- g) 对特定过程的处理,如土地利用变化等应相同;
- h) 碳足迹核算阶段所采用的单位应一致。

此外,在生命周期清单分析阶段,还应遵循以下原则:

- a) 数据收集的方法与数据质量要求应相同;
- b) 计算过程应一致;
- c) 物质流的分配方式应相同;
- d) 所使用的全球增温潜势值应一致。