

建筑太阳能光谱调控与综合利用



个人微信

袁艳平
西南交通大学

2026年5月21日

学校定位

“**交通领域**特色鲜明的综合性研究型一流大学”

团队名称

新能源与交通人工环境团队

交通运输工程学科全国排名第 **1**

主要研究方向

新能源与交通人工环境团队

新**能源**利用与储能

- **太阳能光谱调控与利用**
- 相变储能技术
- 相变热管理技术
- 地热能利用技术

交通空间**热湿**环境

- 高效冷热源及储能技术
- 气流组织及空气品质
- 空气调节方法
- 系统运行及控制策略

车站与车辆环境**控制**

- 列车综合舒适度
- 车站及车辆热湿环境
- 站房建筑主/被动能耗
- 车辆空调系统节能控制

车辆**隧道**火灾与空气动力学

- 车辆燃烧及烟气特性
- 隧道火灾动力学及防控
- 高速列车空气动力学
- 磁浮管道列车空气动力学

方向带头人



袁艳平 教授
(国家级高层次人才)



杨洪兴 教授 (7月入职)
(国家级高层次人才)

围护结构太阳光谱调控



蒋福建 副教授
(院长助理)



蒲积宏 特聘副教授
(国自然博士生基金)



明阳 博士后
(博士后海外引才专项)

太阳能光伏光热综合利用



周锦志 副教授
(系副主任)



余敏 副教授
(省动力工程学会副秘书长)

太阳-太空辐射协同调控与利用



胡名科 教授
(国家级高层次青年人才)



但雅 博士后
(博士后海外引才专项)



目录

CONTENTS

- 01 研究背景
- 02 围护结构太阳光谱调控
- 03 太阳能光伏光热综合利用
- 04 太阳-太空辐射协同调控与利用
- 05 总结



目录

CONTENTS

01 研究背景

02 围护结构太阳光谱调控

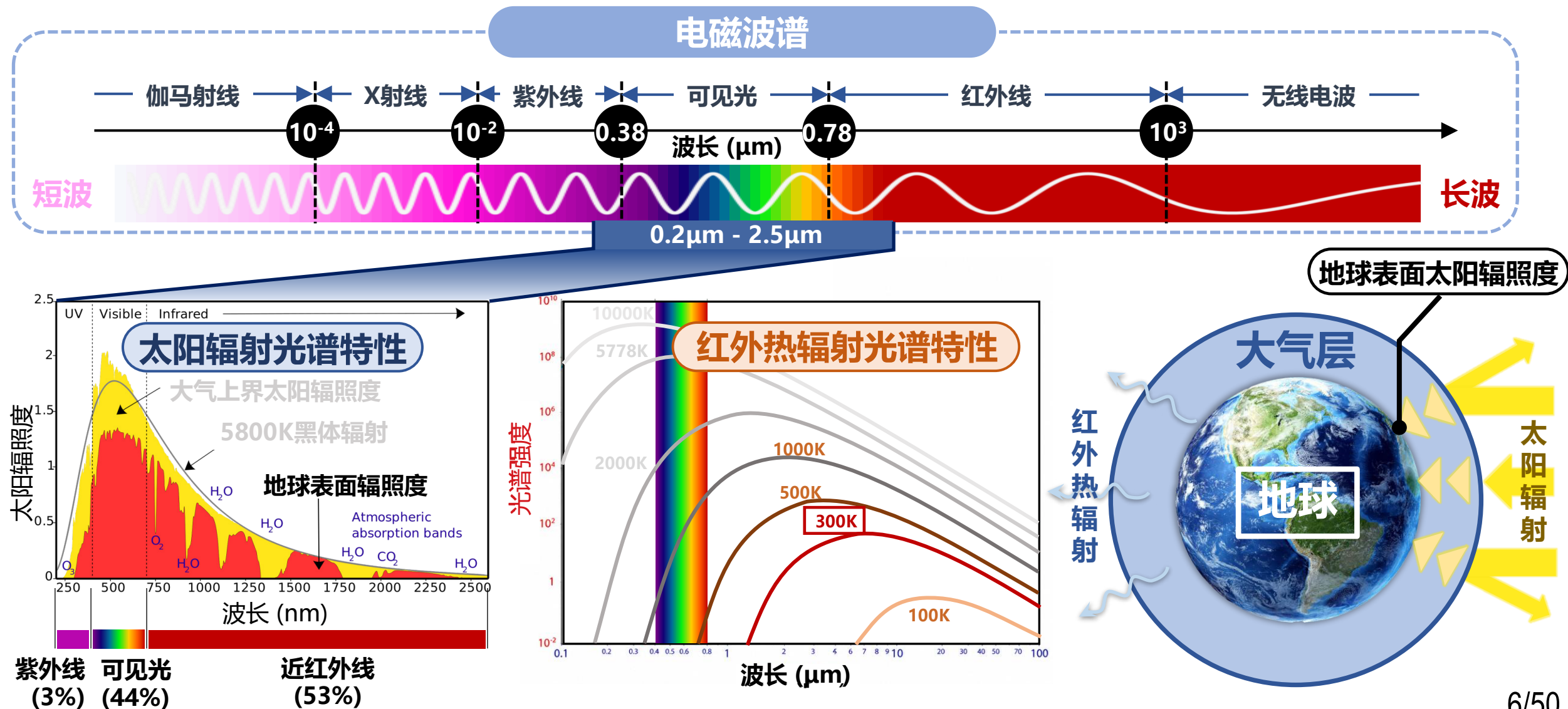
03 太阳能光伏光热综合利用

04 太阳-太空辐射协同调控与利用

05 总结

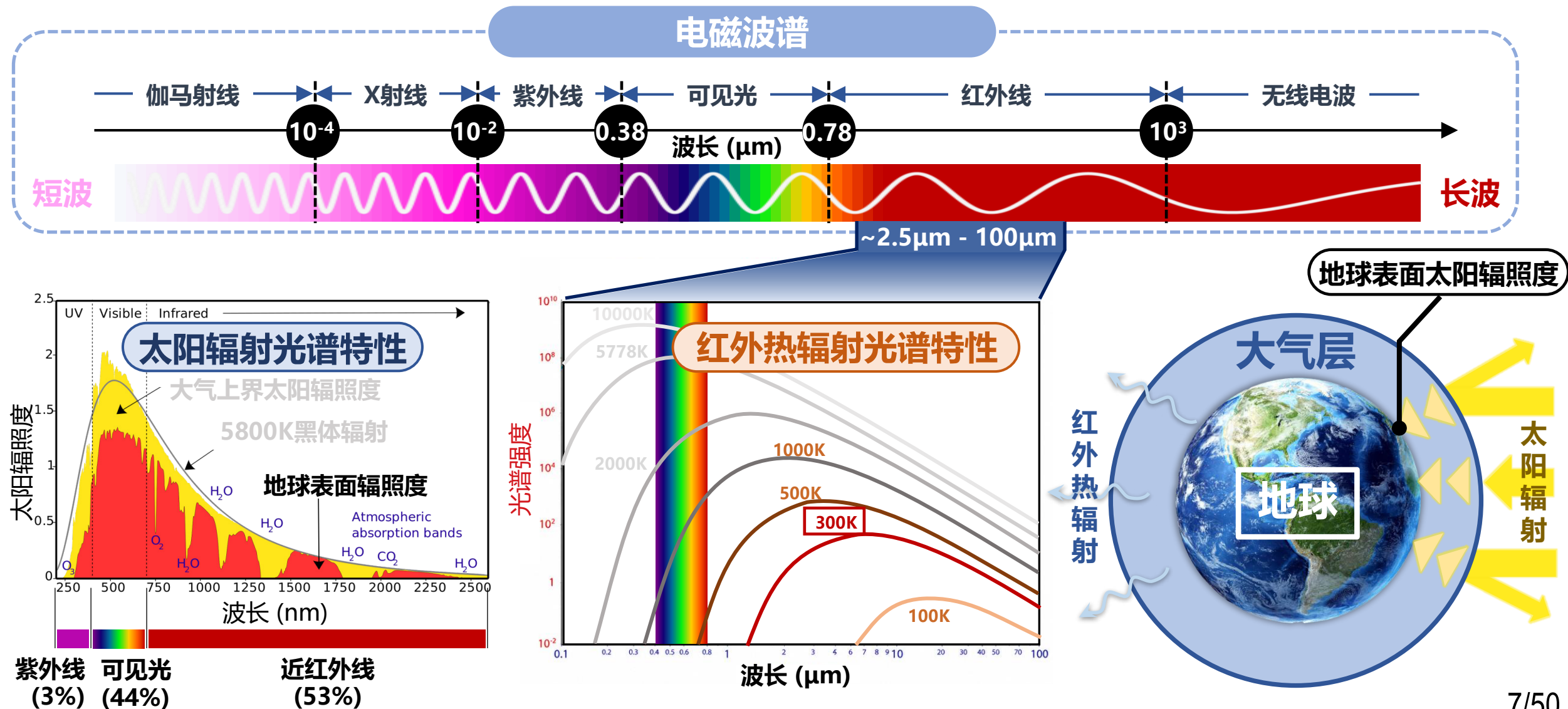
1.1 太阳辐射与中远红外热辐射

■ 太阳辐射波长范围为 $0.2\mu\text{m} - 2.5\mu\text{m}$ ，包含紫外线、可见光及红外线



1.1 太阳辐射与中远红外热辐射

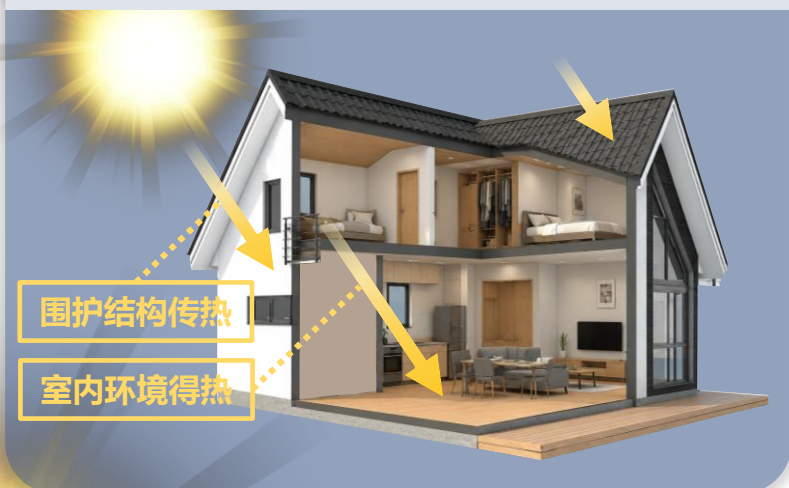
■ 中远红外热辐射波长范围约为 $2.5\mu\text{m} - 100\mu\text{m}$ ，不同温度下的波峰波长存在差异



1.2 地表建筑辐射场与光谱调控

太阳辐射得热

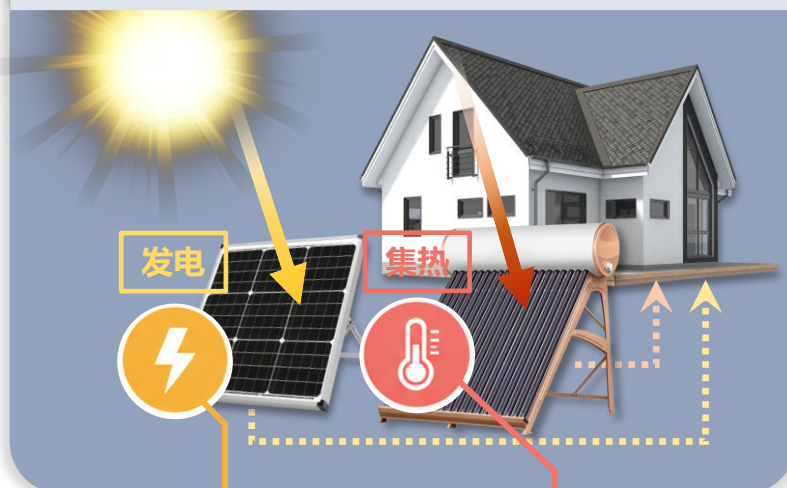
通过围护结构直接影响室内光热环境



0.2 μm 2.5 μm

太阳辐射供能

光伏与光热利用为建筑提供电与热



0.2 μm 0.2 μm 1.1 μm 2.5 μm

太空辐射降温

通过大气窗口向太空辐射散热以被动降温



~2.5 μm ~100 μm

短波 长波

10⁻² 0.38 0.78 10³
紫外线 可见光 红外线
波长 (μm)

~5800K

太阳热源



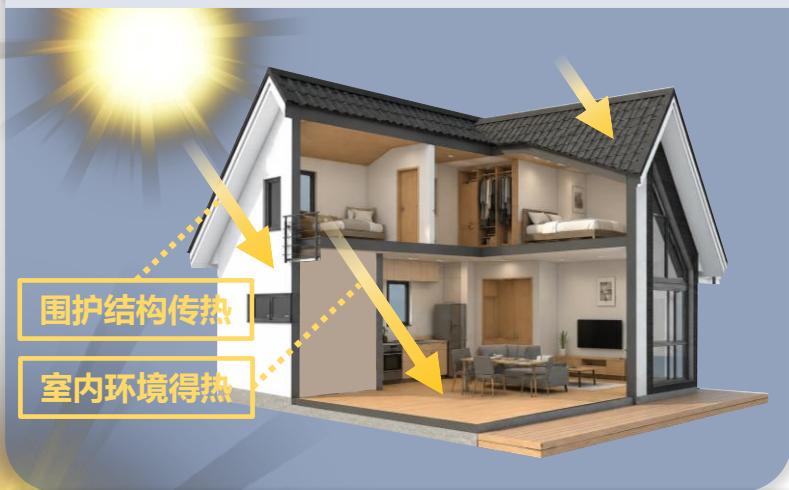
~3K

太空冷源

1.3 太阳辐射得热

太阳辐射得热

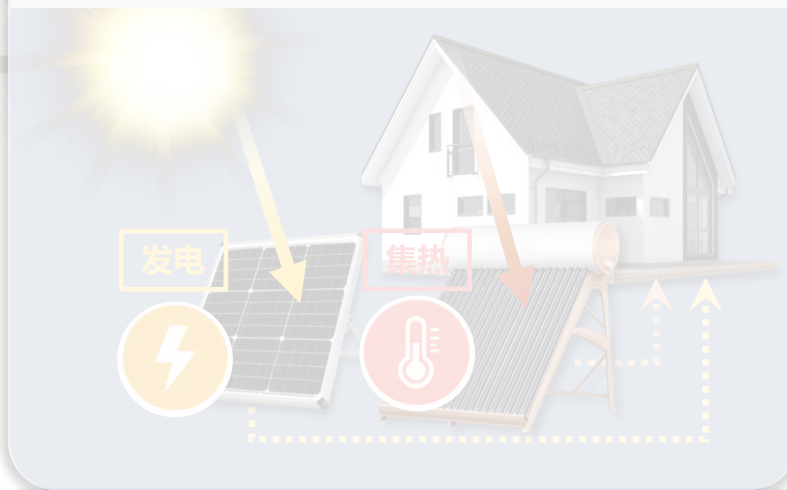
通过围护结构直接影响室内光热环境



0.2 μm 2.5 μm

太阳辐射供能

光伏与光热利用为建筑提供电与热



0.2 μm 1.1 μm
0.2 μm 2.5 μm

太空辐射降温

通过大气窗口向太空辐射散热以被动降温



~2.5 μm ~100 μm

短波 长波

10⁻² 0.38 0.78 10³
紫外线 可见光 红外线
波长 (μm)

~5800K

太阳热源

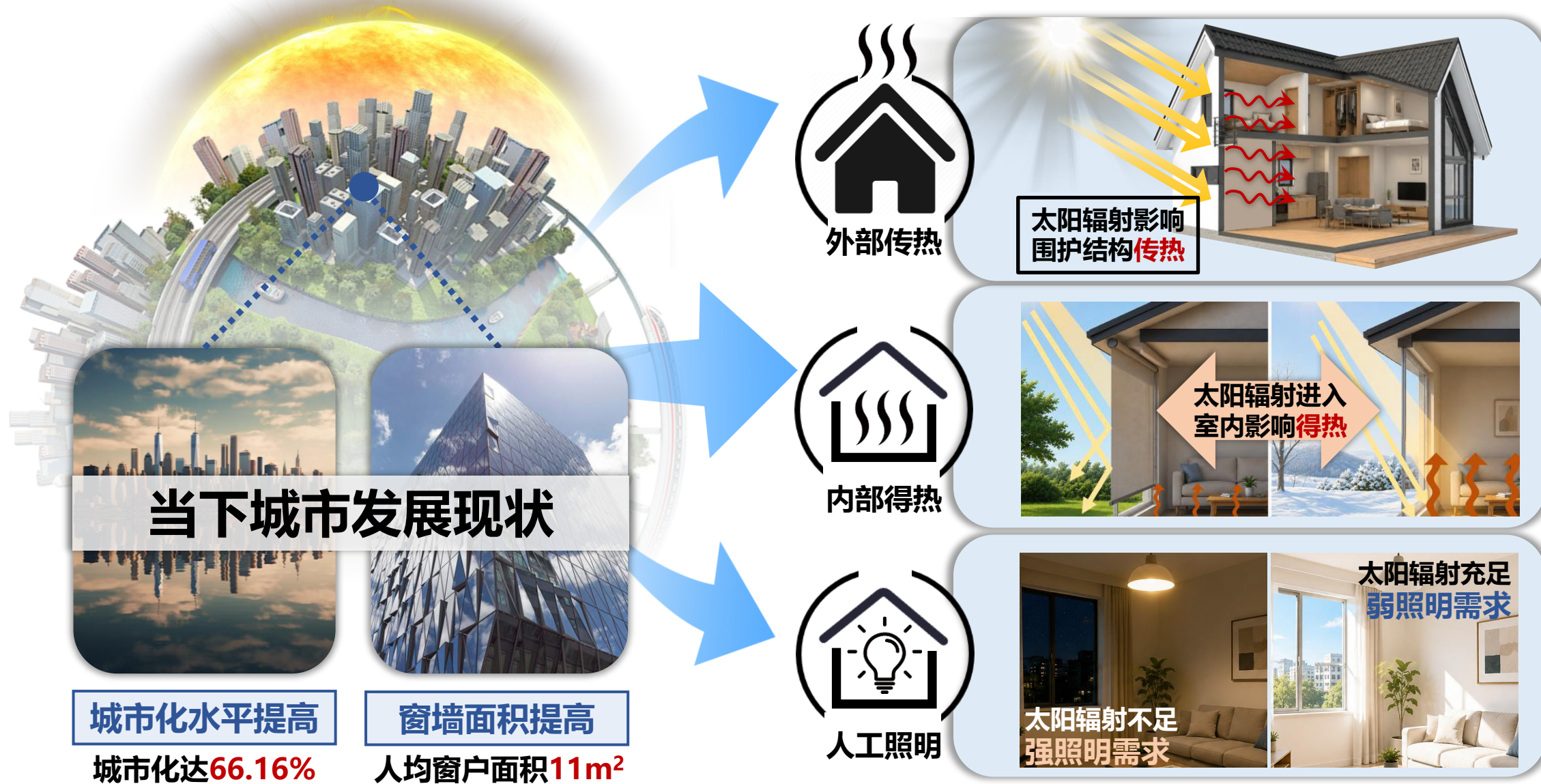


~3K

太空冷源

1.3 太阳辐射得热

■ 伴随城市化水平与透明幕墙面积的提升，**太阳辐射对建筑环境的影响**愈发受到关注



1.4 太阳辐射供能

太阳辐射得热

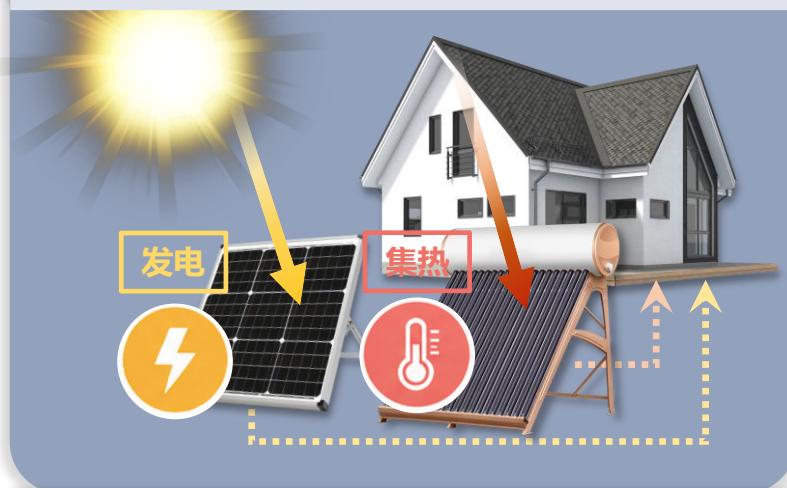
通过围护结构直接影响室内光热环境



0.2 μm 2.5 μm

太阳辐射供能

光伏与光热利用为建筑提供电与热



0.2 μm 1.1 μm
0.2 μm 2.5 μm

太空辐射降温

通过大气窗口向太空辐射散热以被动降温



~2.5 μm ~100 μm

短波 长波

10⁻² 0.38 0.78 10³
紫外线 可见光 红外线
波长 (μm)

~5800K

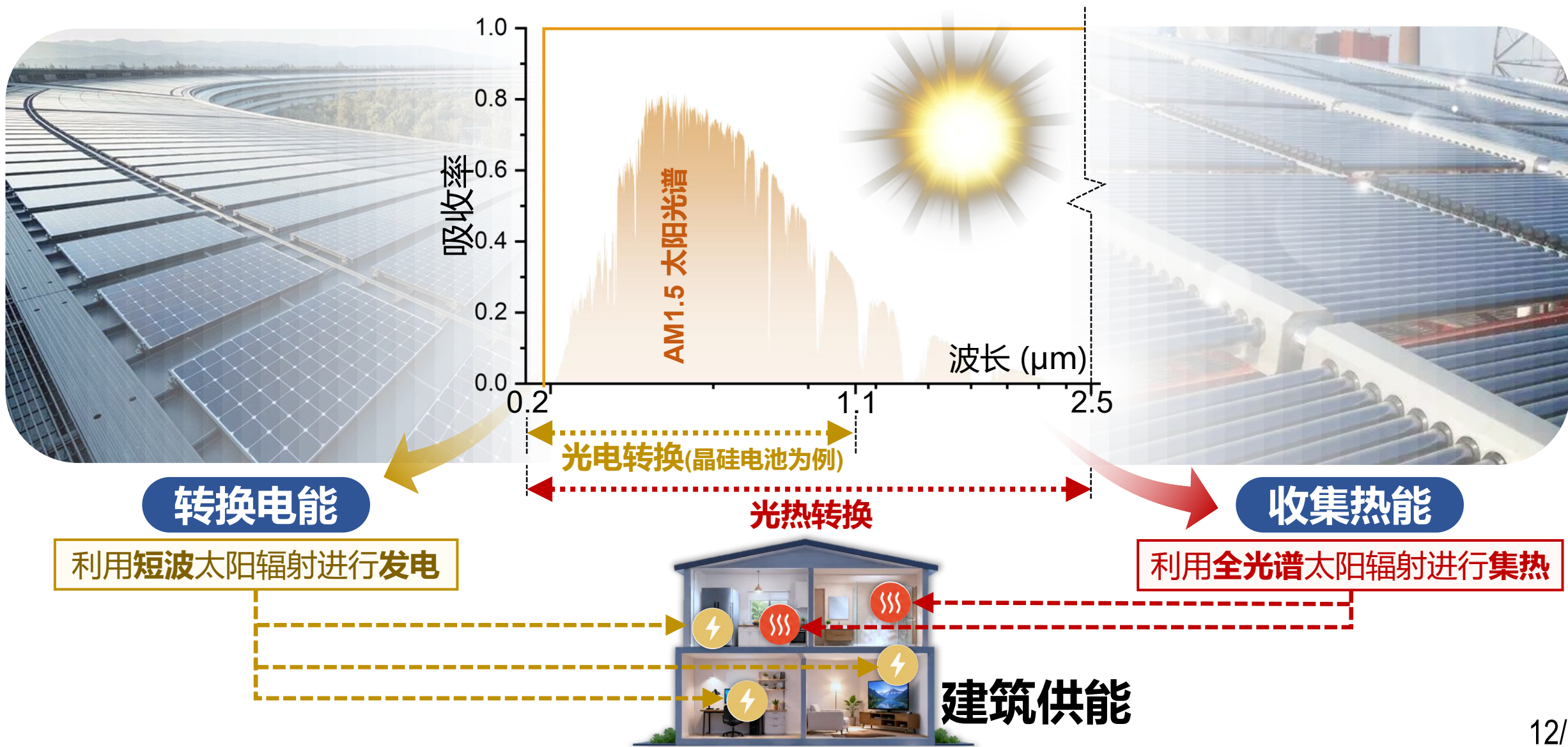
太阳热源

~3K

太空冷源

1.4 太阳辐射供能

- 吸收不同波段的太阳辐射以进行**光电**和**光热**转换，可满足建筑**用能需求**



1.5 太空辐射降温

太阳辐射得热

通过围护结构直接影响室内光热环境



0.2 μm 2.5 μm

太阳辐射供能

光伏与光热利用为建筑提供电与热



0.2 μm 1.1 μm
0.2 μm 2.5 μm

太空辐射降温

通过大气窗口向太空辐射散热以被动降温



~2.5 μm ~100 μm

短波 长波

10⁻² 0.38 0.78 10³
紫外线 可见光 红外线
波长 (μm)

~5800K

太阳热源

~3K

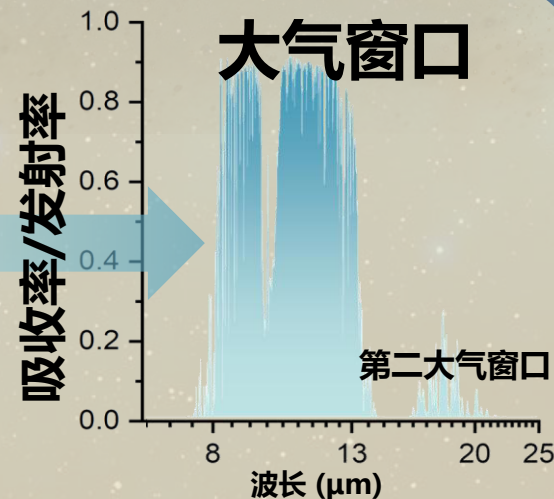
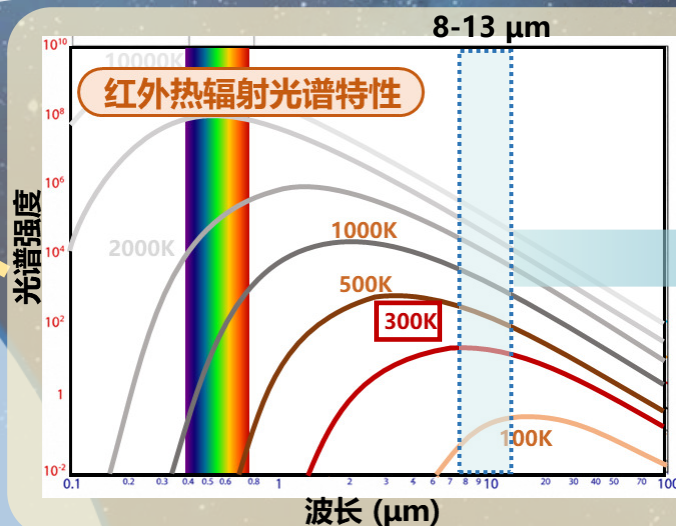
太空冷源

1.5 太空辐射降温

■ 建筑围护结构等表面热量可通过大气窗口（ $8\mu\text{m}-13\mu\text{m}$ ）零能耗地辐射至极低温太空

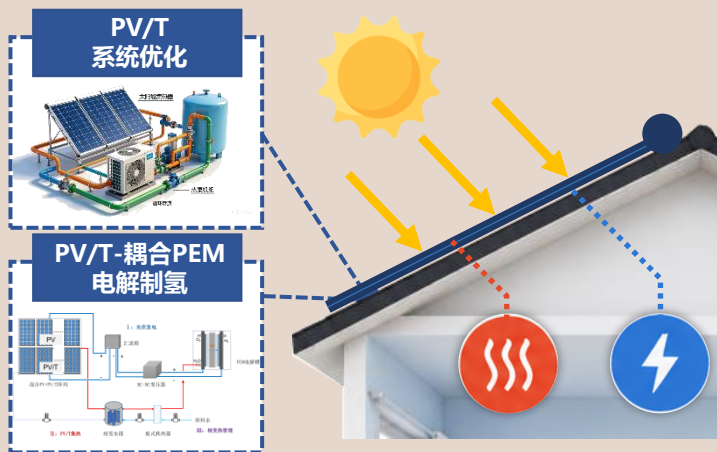


太空冷源

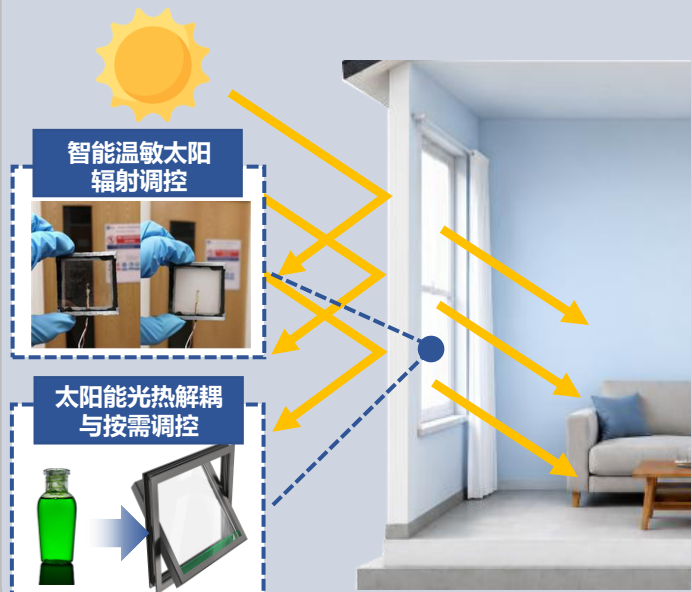


建筑太阳能光谱调控与综合利用

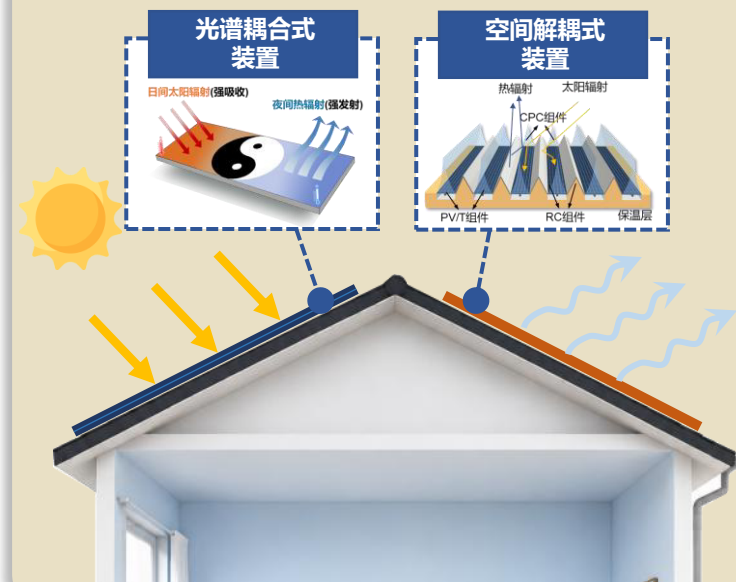
太阳能光伏光热综合利用



围护结构太阳光谱调控



太阳-太空辐射协同调控与利用





目录

CONTENTS

01 研究背景

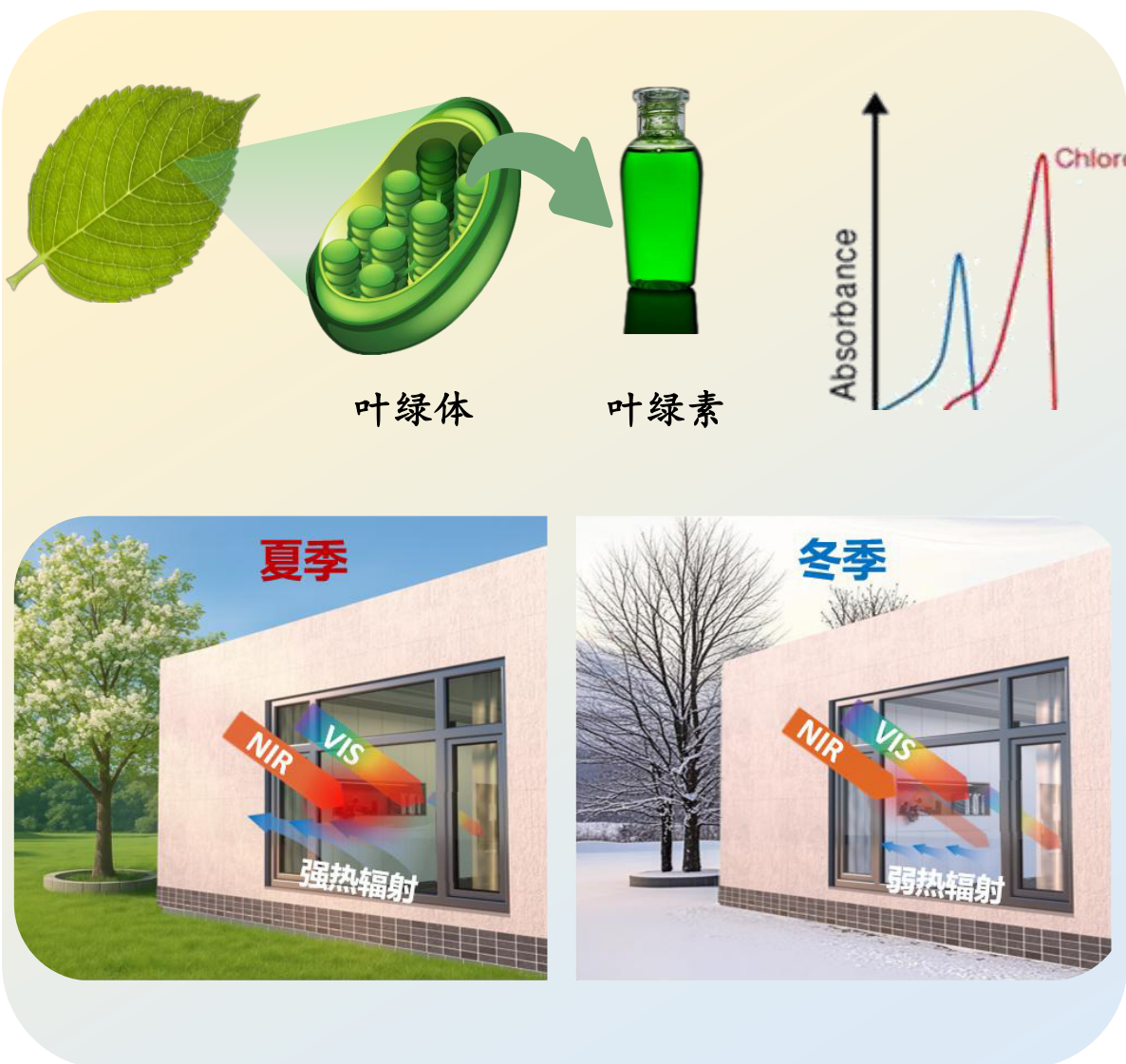
02 围护结构太阳光谱调控

03 太阳能光伏光热综合利用

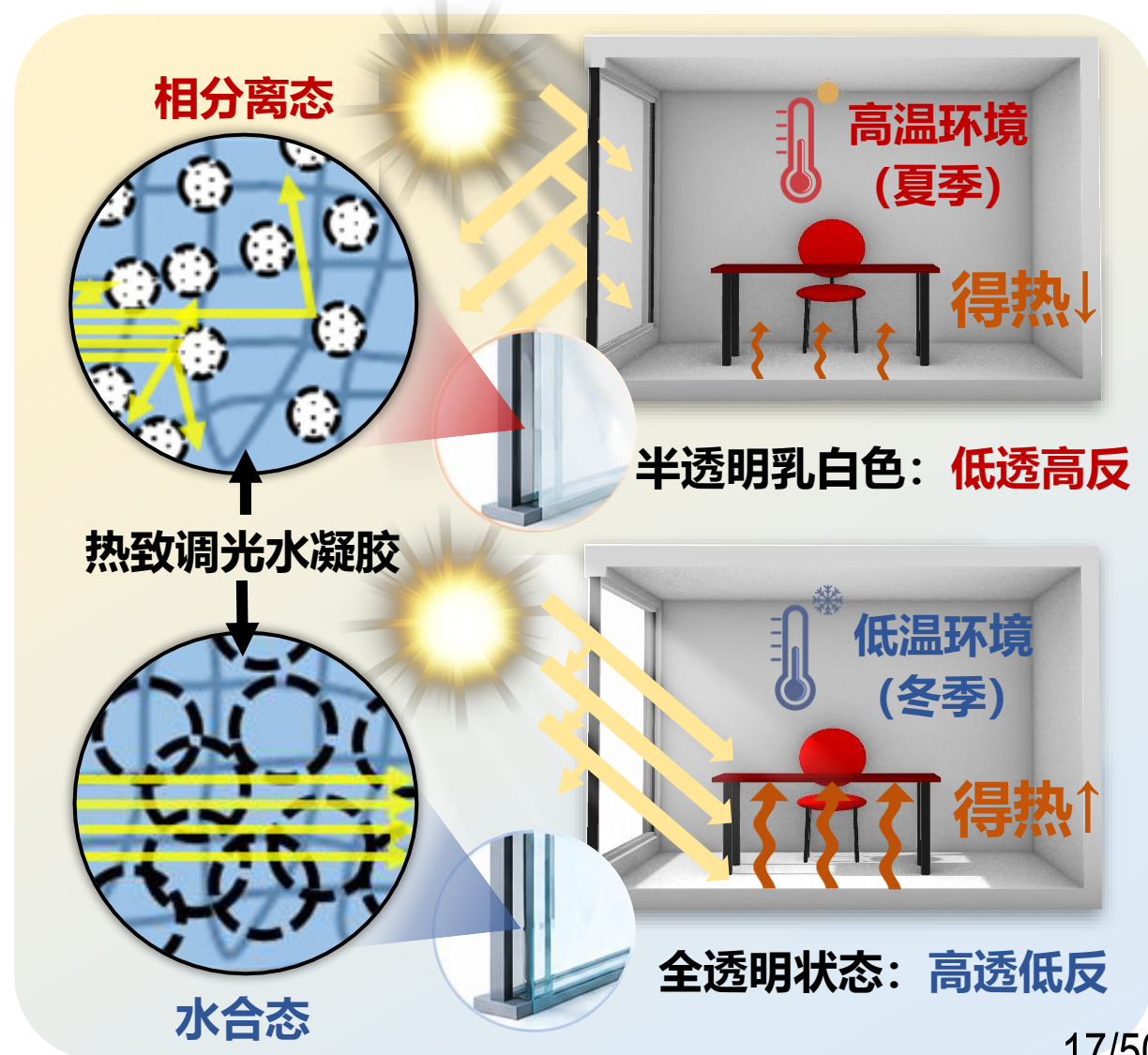
04 太阳-太空辐射协同调控与利用

05 总结

太阳能光/热分频调控

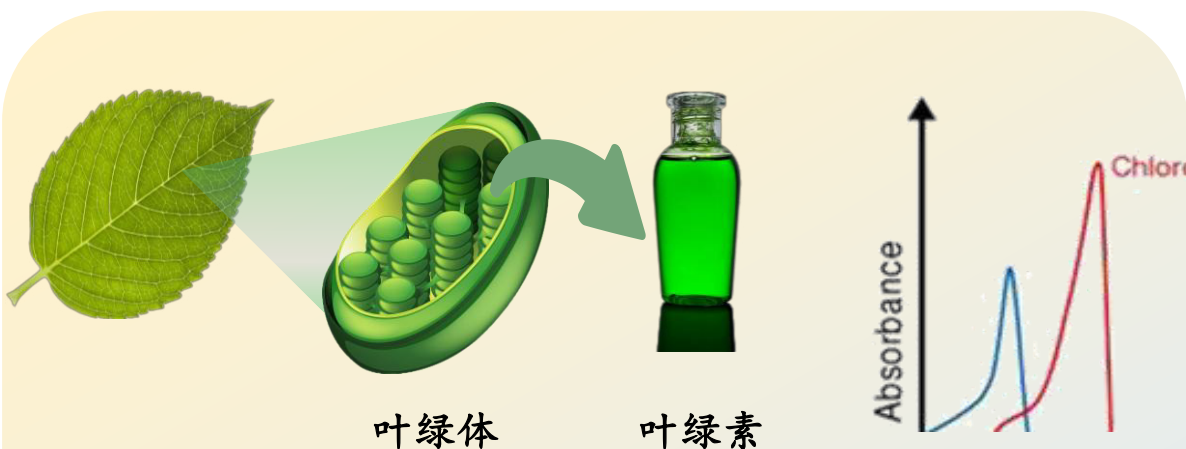


智能温敏太阳辐射调控



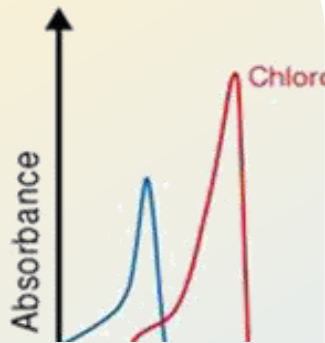
2.1 太阳辐射光热解耦与按需调控

太阳能光/热分频调控



叶绿体

叶绿素



夏季

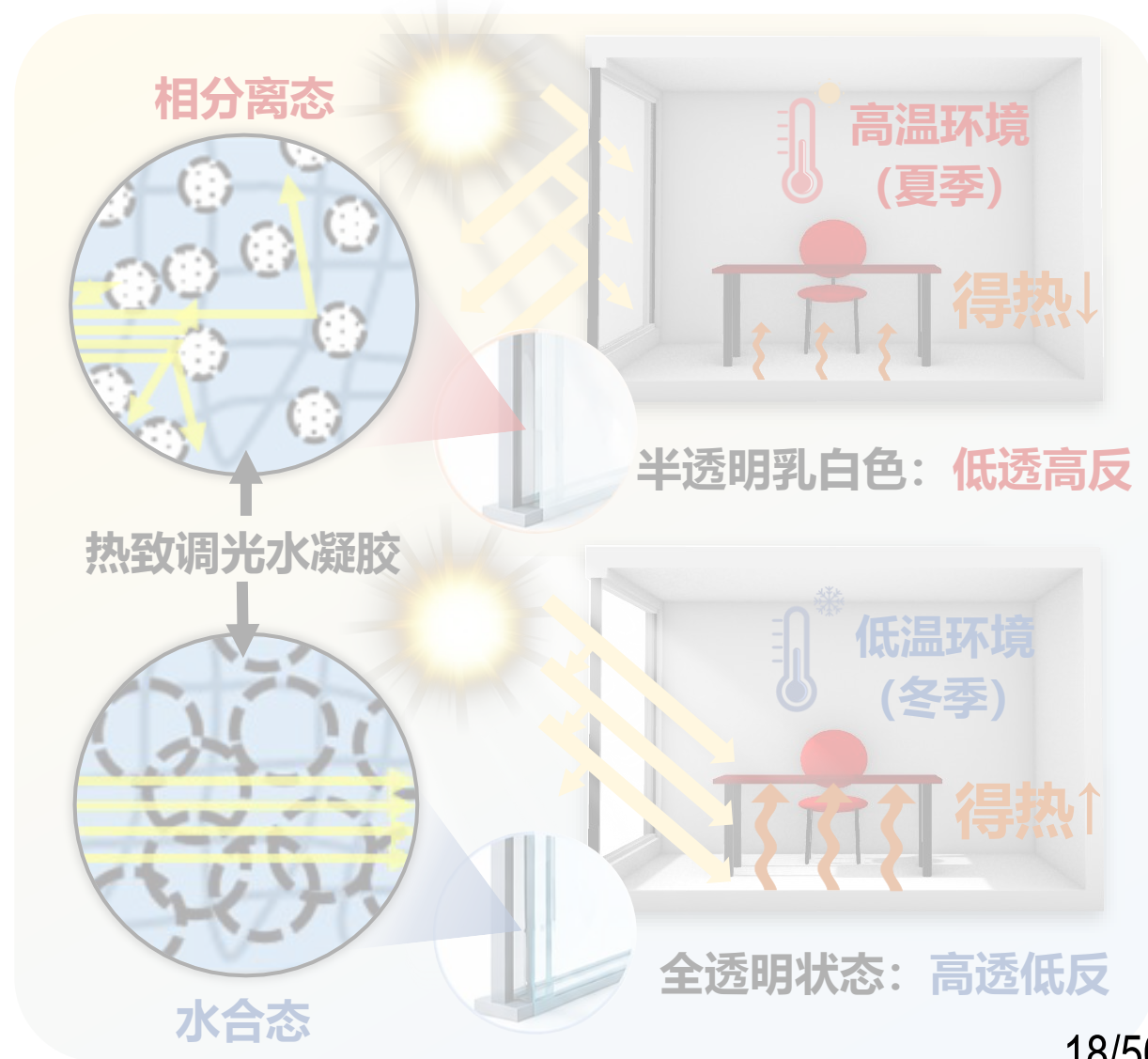
强热辐射



冬季

弱热辐射

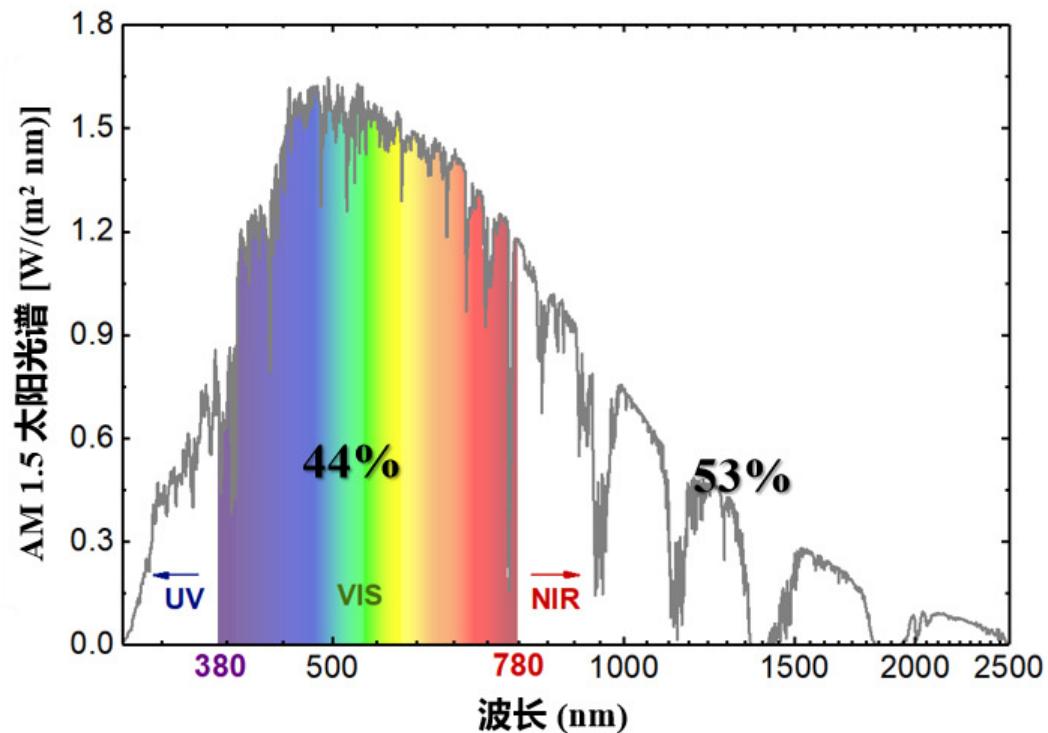
智能温敏太阳辐射调控



2.1 太阳能光-热分频调控与按需利用

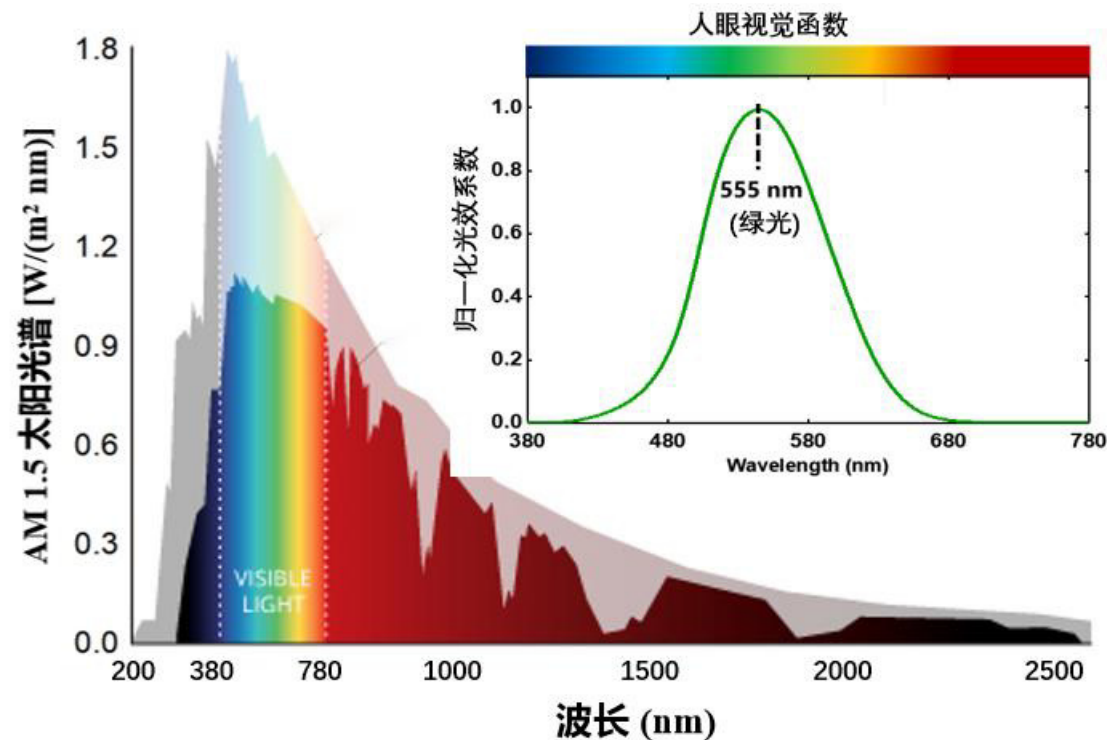
■ 技术思路：太阳能光-热分频调控

近红外完全过滤



- 太阳辐射**53%**的能量分布在**近红外线**
- 近红外线无法采光，但是会导致建筑得热

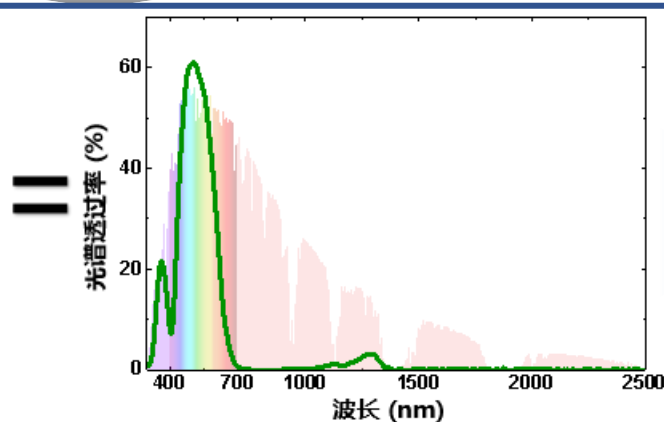
低光效系数的可见光部分过滤



- 可见光仍携带了约**44%**的太阳辐射能量
- 可见光中，绿光光效系数最高，**蓝光和红光光效系数偏低**

■ 过滤近红外，过滤可见光中的红光和蓝光，保留绿光，从而**将进入室内的阳光转变为“冷”光源**

近红外过滤—过渡金属离子



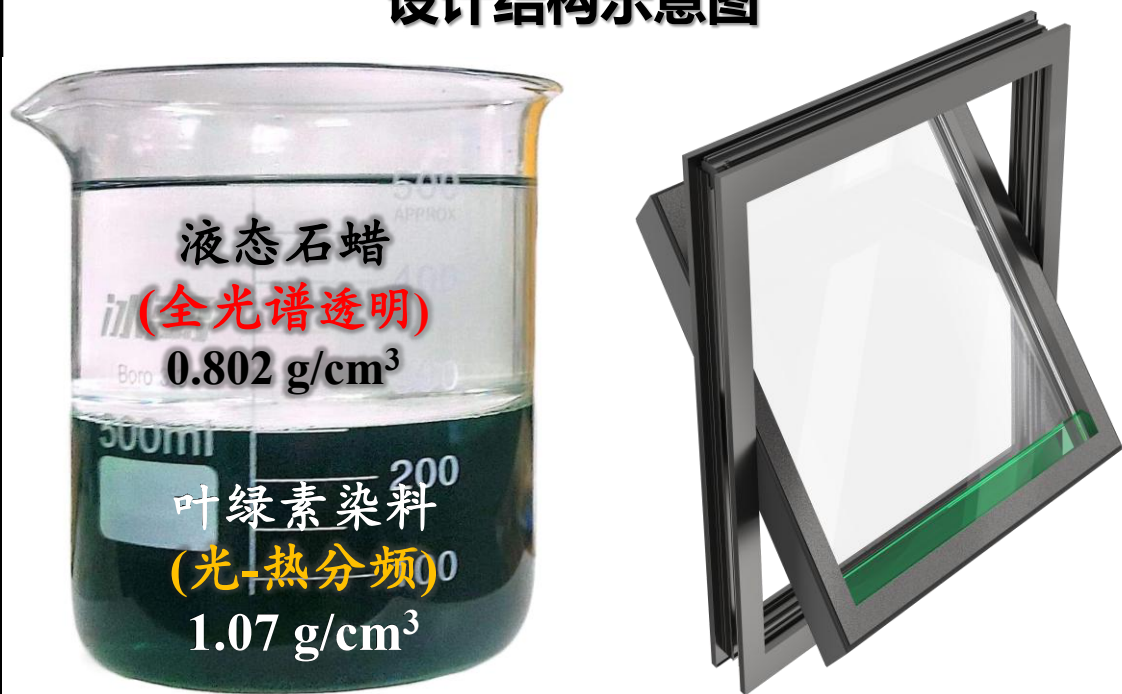
- 20/50

2.1 太阳能光-热分频调控与按需利用

■ 技术思路：太阳能光-热分频调控

翻转变色智能窗结构设计

设计结构示意图

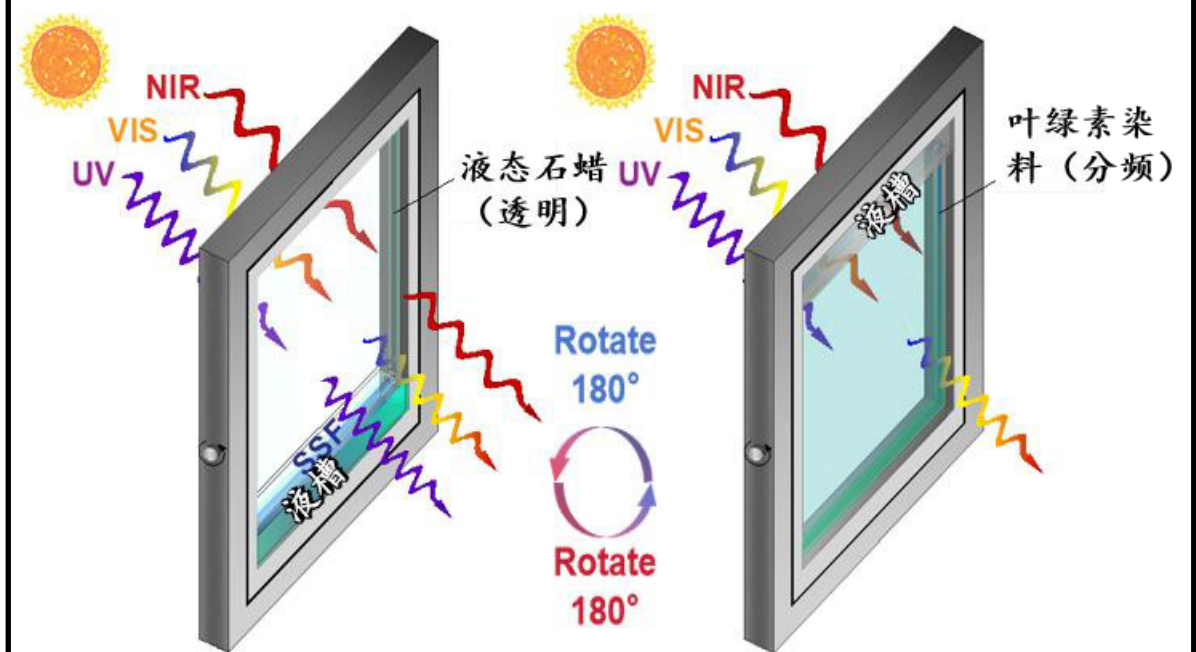


- 双层玻璃空腔连通一个液槽，**空腔容积=液槽容积**
- 空腔和液槽内封装两种**密度不同，且互不相溶**的流体

智能窗工作原理示意图

褪色态(液槽在底部)

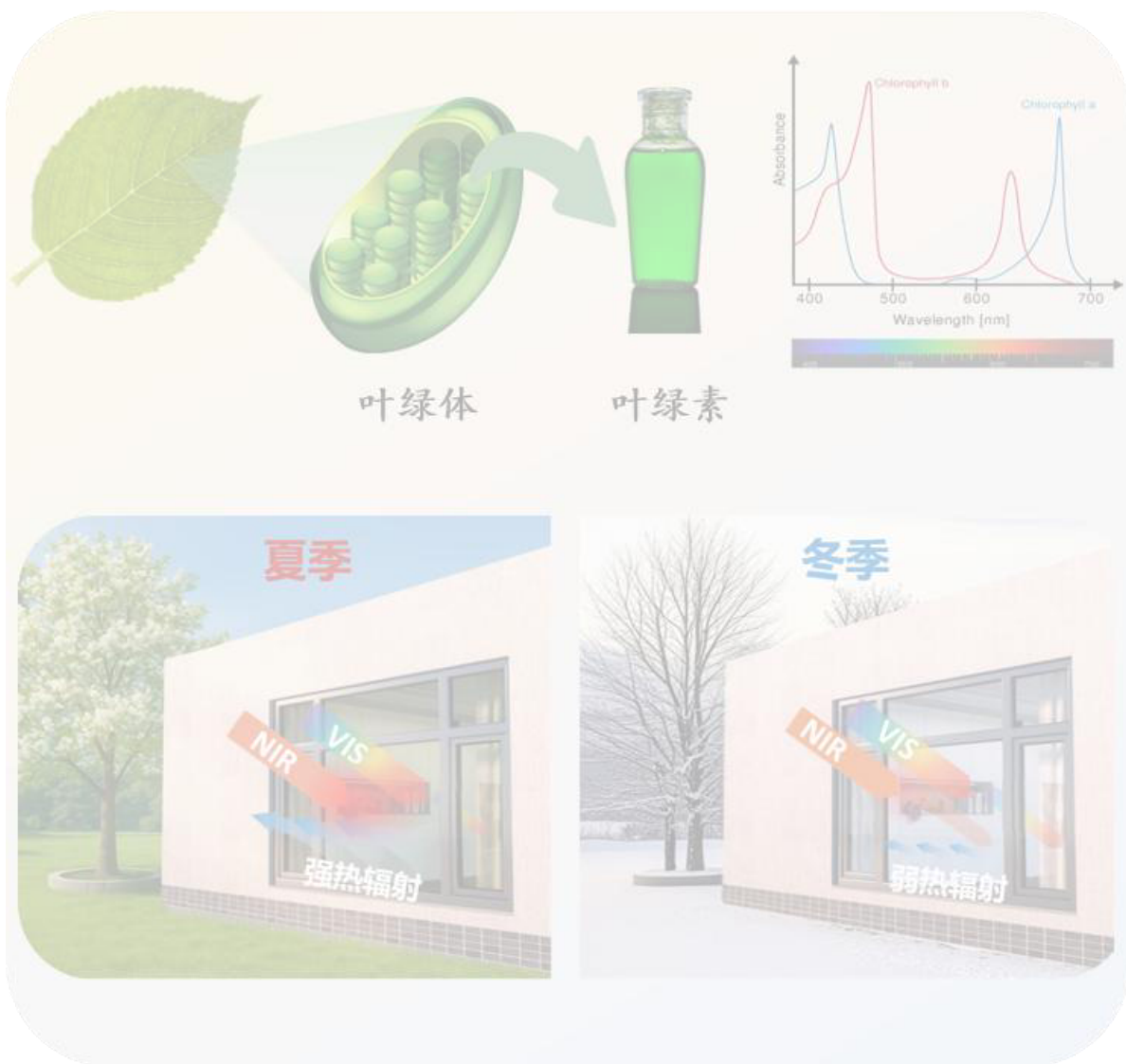
着色态(液槽在顶部)



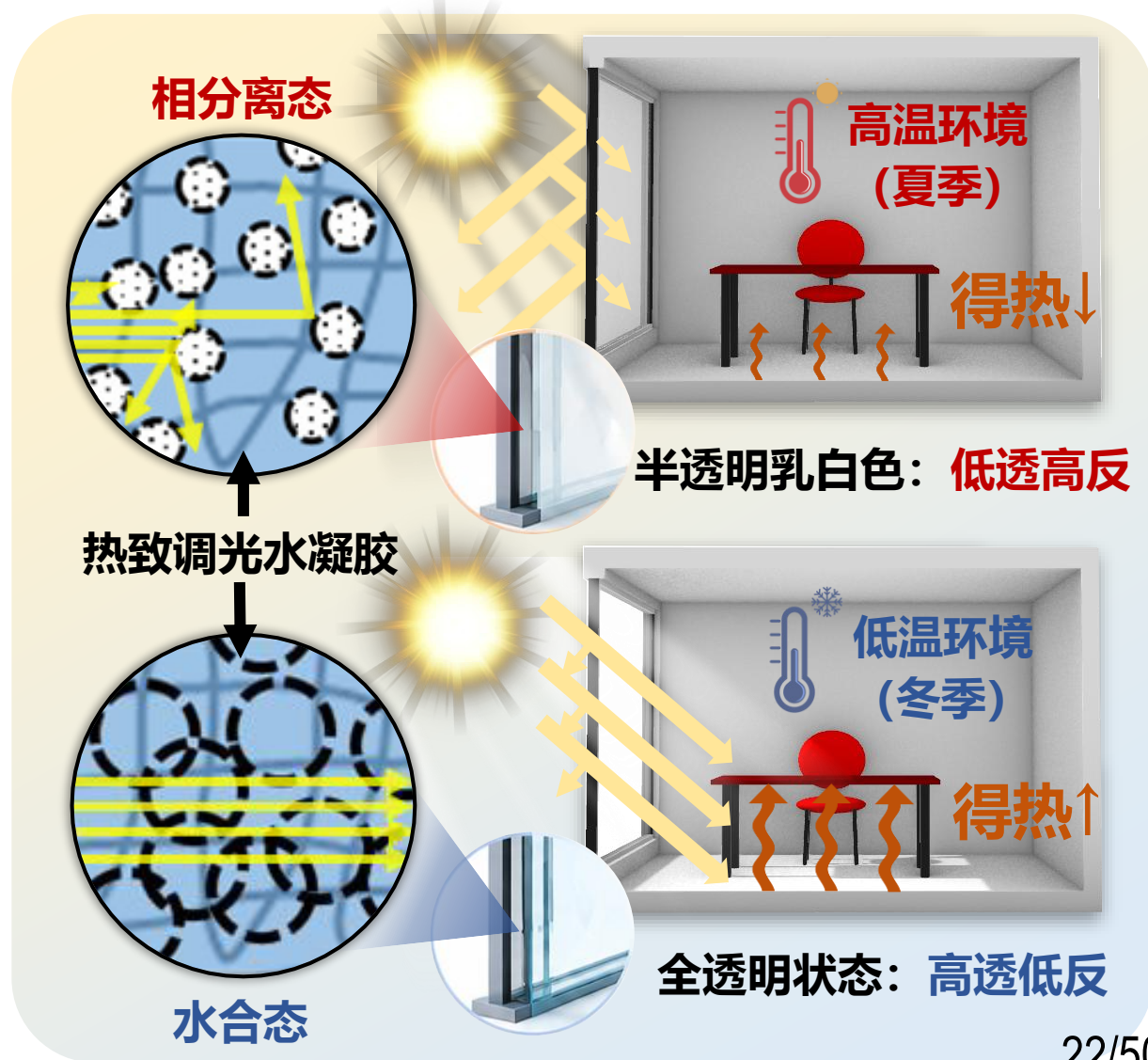
- 高可见光透过 T_{lum}
- 高太阳辐射透过 T_{sol}
- 适当可见光透过
- 低太阳辐射透过

■ 开发翻转变色的窗体结构，**在冬季可以全光谱地透过太阳光，夏季选择性地频闭太阳辐射热量**

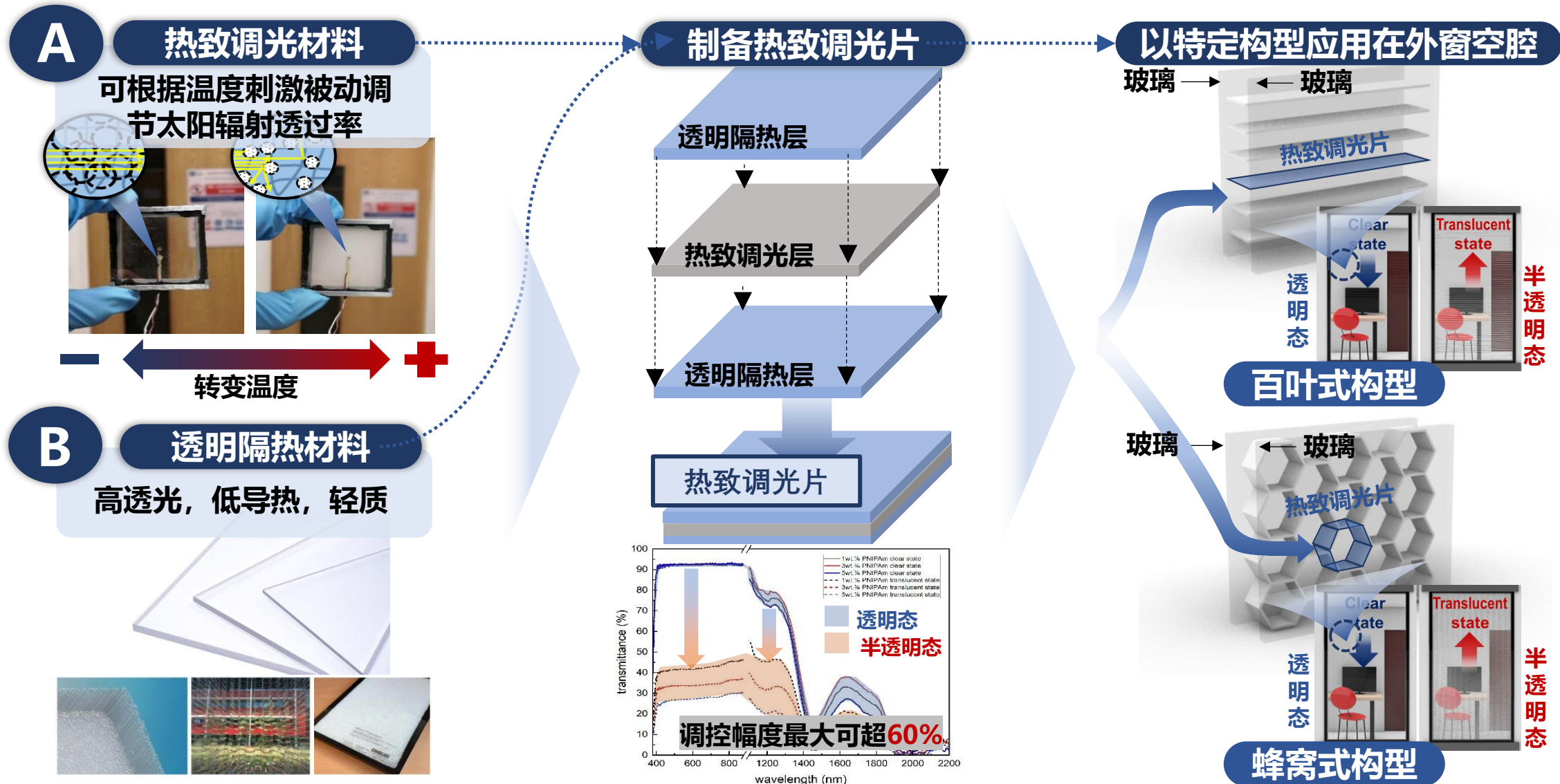
太阳能光/热分频调控



智能温敏太阳辐射调控

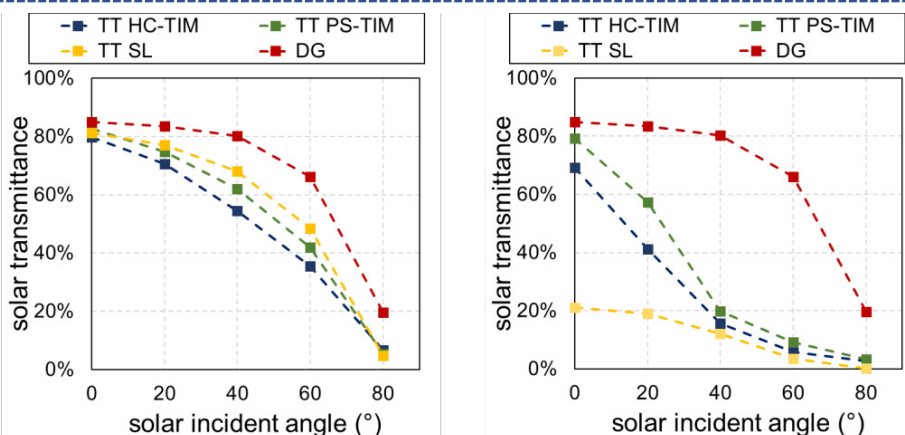


■ 将热致调光材料与透明隔热材料结合，优化外窗空腔构型实现太阳辐射高效调控

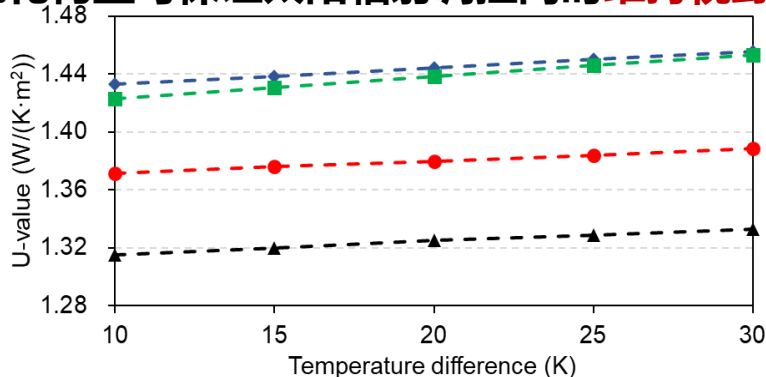


■ 优化构型可在变色状态保持视野通透，保证太阳辐射调控效力，同时可降低U值近10%

热致调光智能透明围护结构光热性能模拟



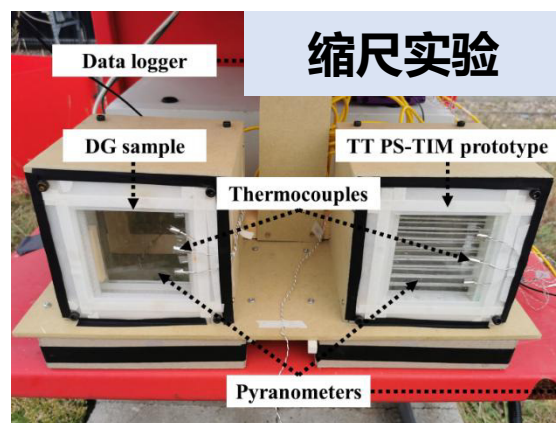
- 不同构型均可有效调控太阳辐射，最大约60%
- 优化构型可保证太阳辐射调控同时维持视野



- 优化构型可降低智能窗U值近10%

热致调光智能透明围护结构性能实测

户外测试

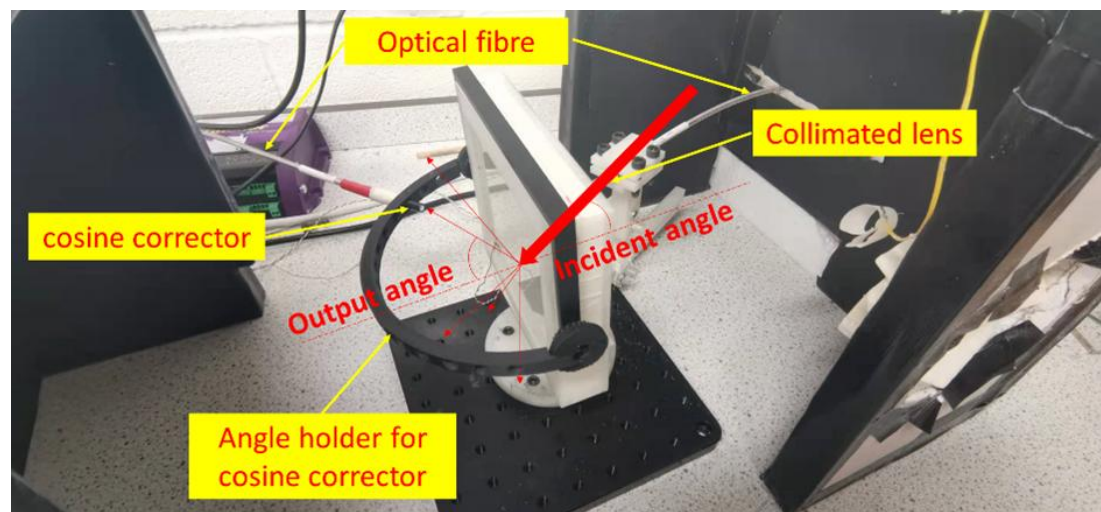


全尺寸实验



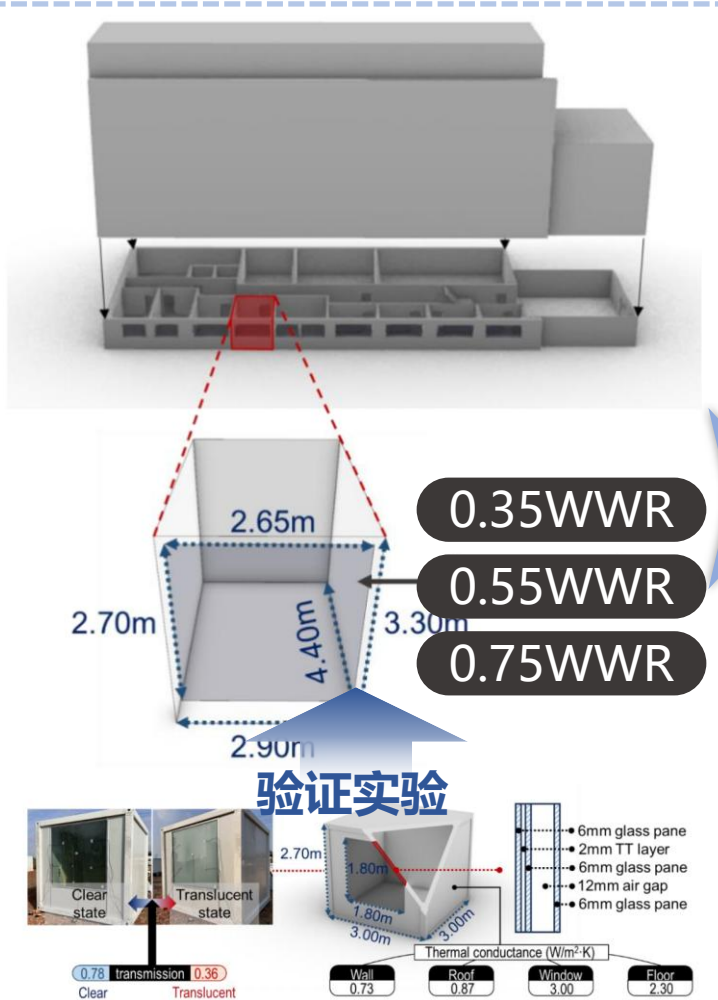
验证

实验室测试

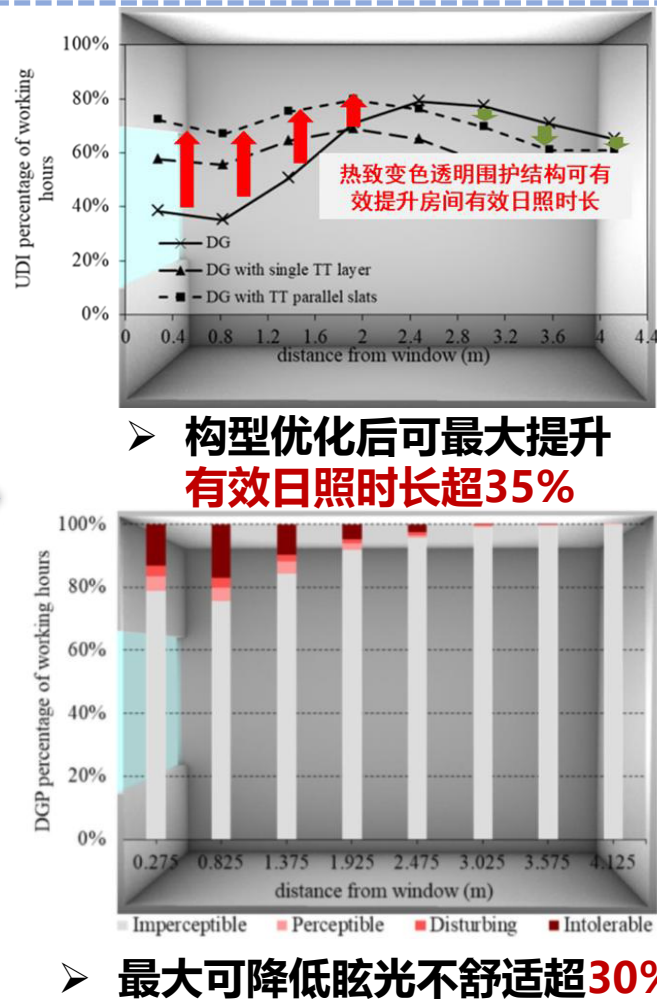


■ 模拟显示热致调光智能窗最高可提升有效日照时长超35%，降低能耗需求超40%

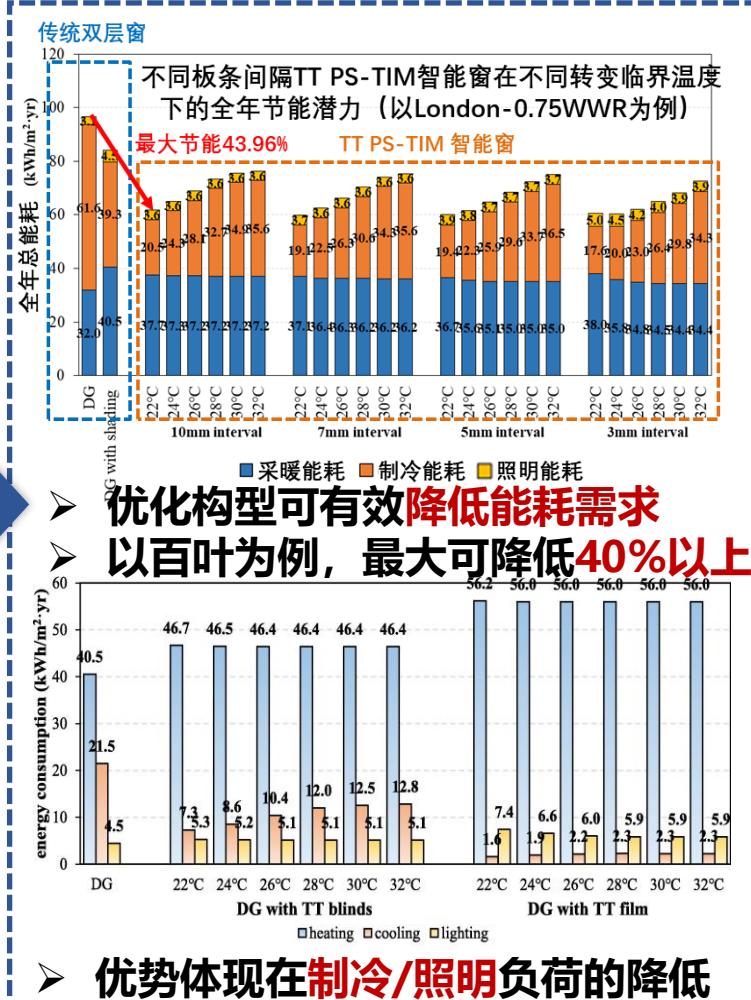
热致调光智能窗系统模型构建



热致调光智能窗系统光环境模拟



热致调光智能窗系统能耗模拟





目录

CONTENTS

01

研究背景

02

建筑围护结构太阳光谱调控

03

太阳能光伏光热综合利用

04

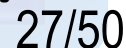
太阳-太空辐射协同调控与利用

05

总结

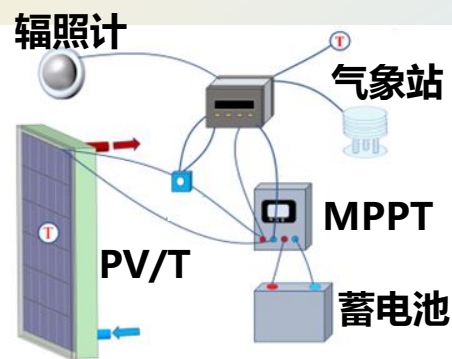
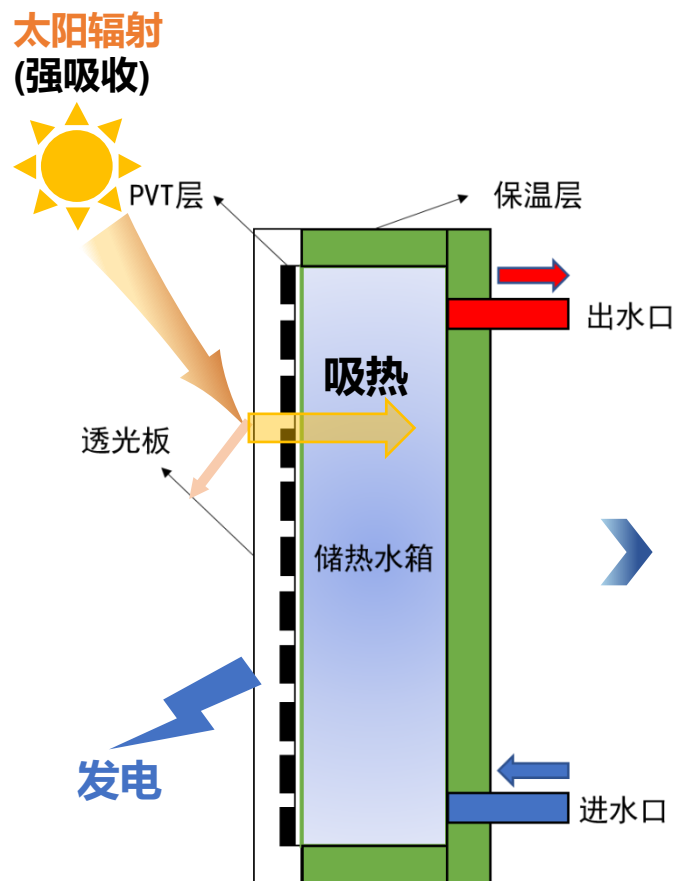
西南交通大学
Southwest Jiaotong University

闷晒式PV/T系统

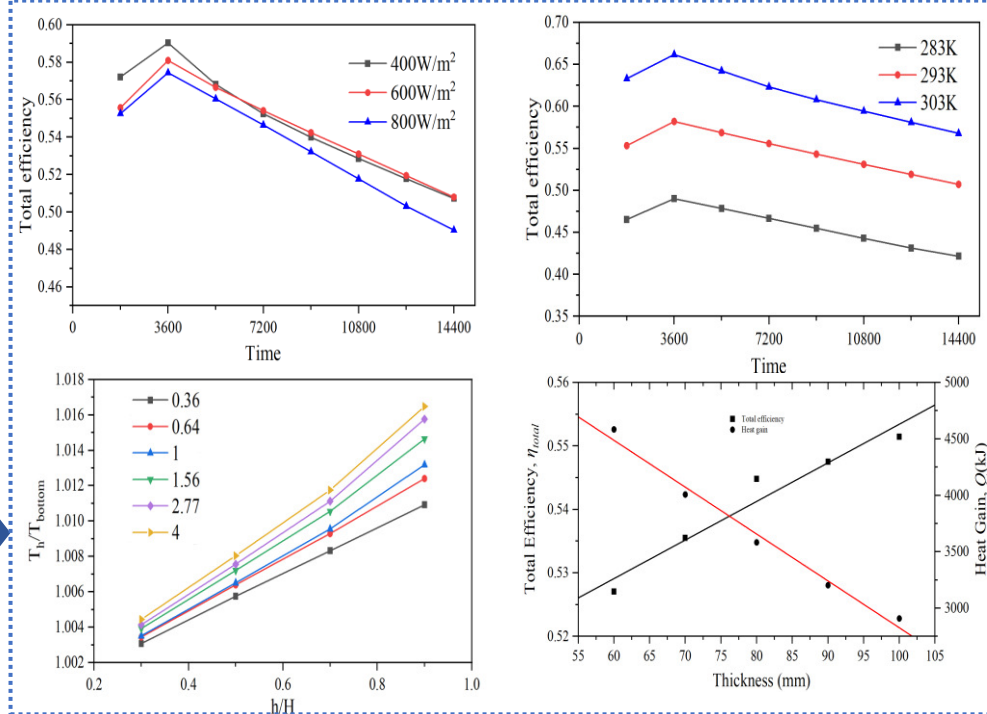


- 将PV集热部件直接与水箱壁面结合，通过壁面导热达到加热生活热水的目的。

工作原理与实验装置



影响因素模拟分析



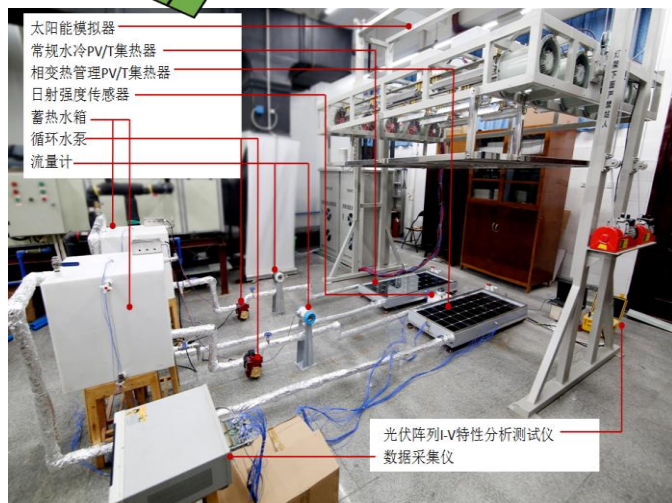
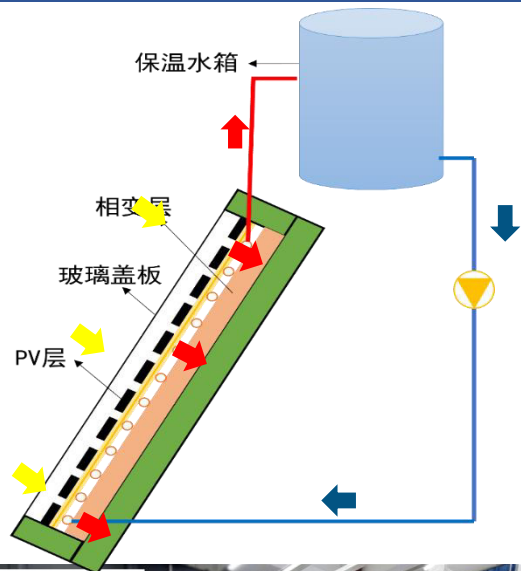
- 水箱厚度与容量的增长，水温增速放缓，系统对外热损率减少，系统综合效率递增；
- 水箱高宽比增加，水箱内自然对流换热加强，系统光电光热综合效率递增。

闷晒式PV/T系统光电光热综合效率处于**50%-60%**之间

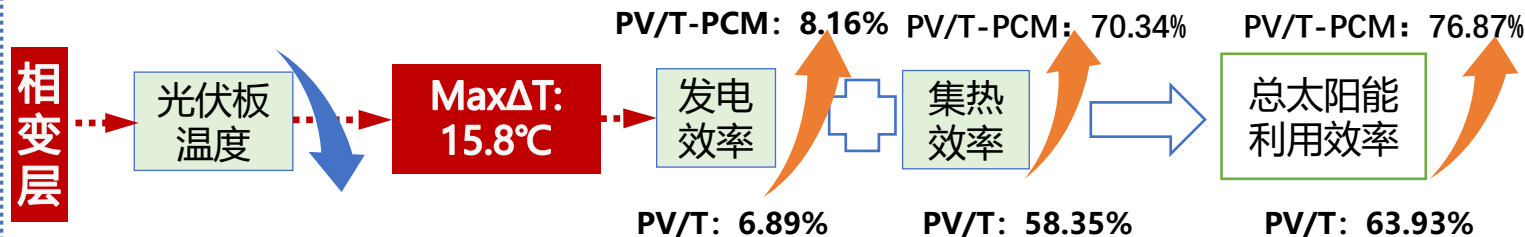
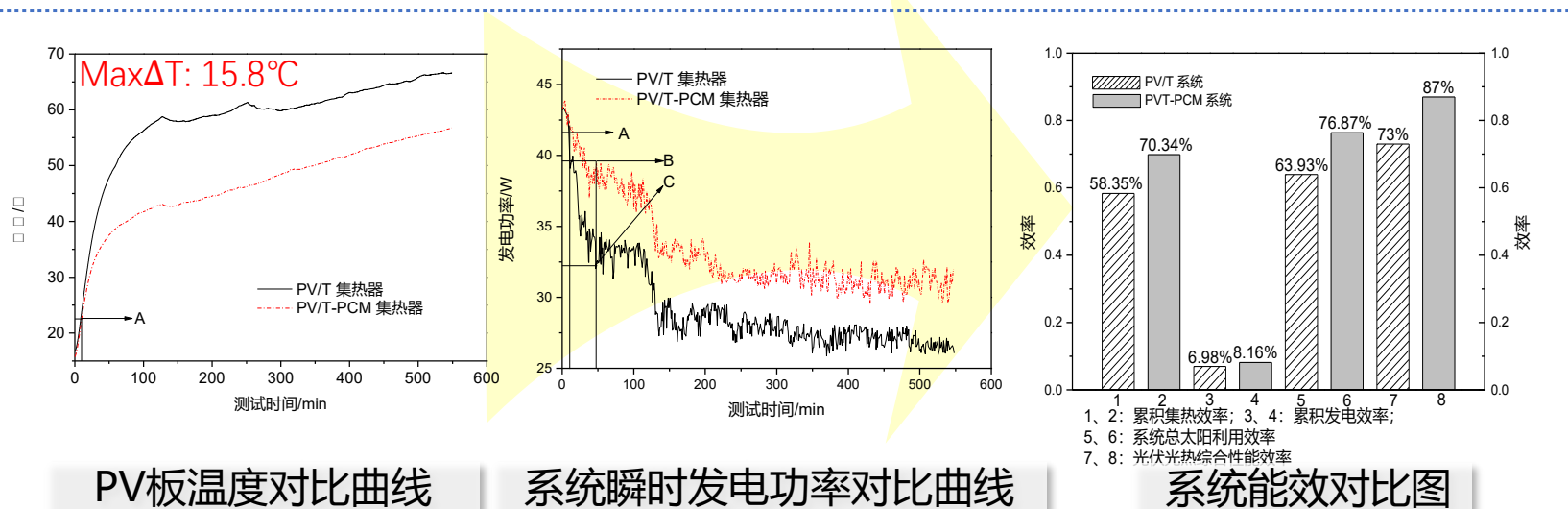
3.3 太阳能PV/T-PCM系统

■ 将相变材料与液冷管路同时铺设于PV组件底部形成协同冷却，实现控温增效与热量分时利用。

工作原理与实验装置



PV/T-PCM与水冷PV/T系统对比实验研究

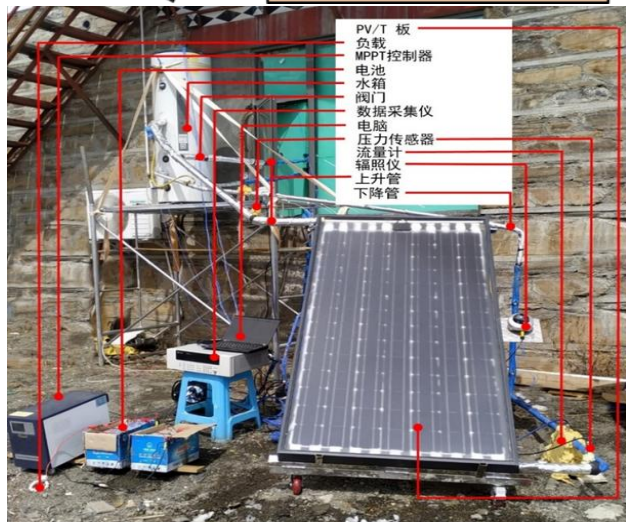
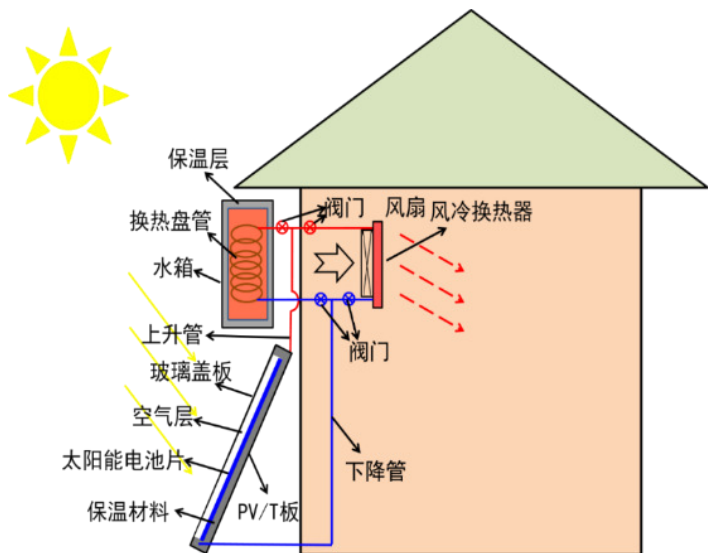


光伏板最大温降为15.8°C，太阳能综合效率可达76.9%

3.4 双冷凝段热管式PV/T系统

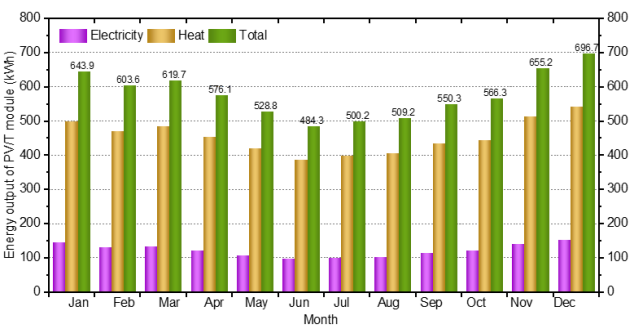
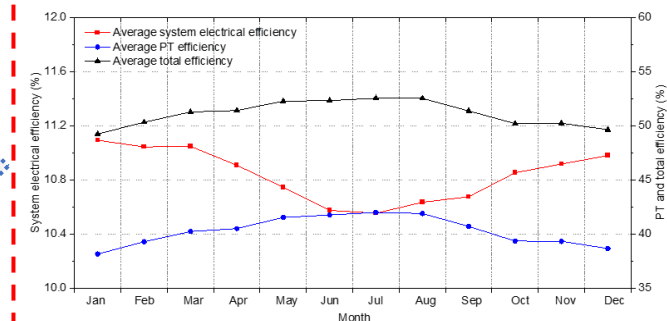
同时设置水冷型和空冷型冷凝换热器，以空气强迫对流换热和水自然对流换热实现建筑采暖与供热水。

工作原理与实验装置

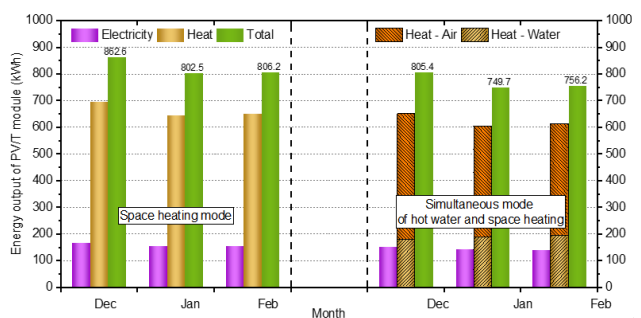
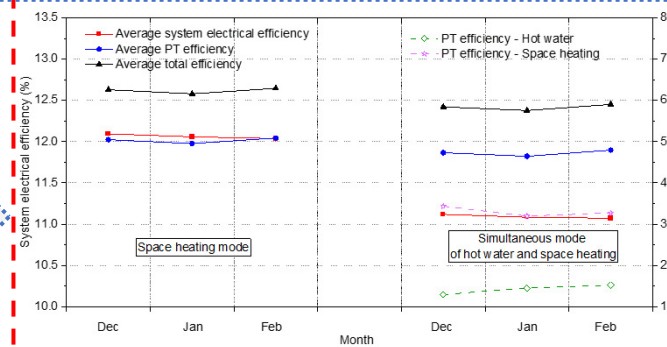


系统在高寒地区应用分析

热水模式



供运热行及模式同时



电效率、热效率、总效率

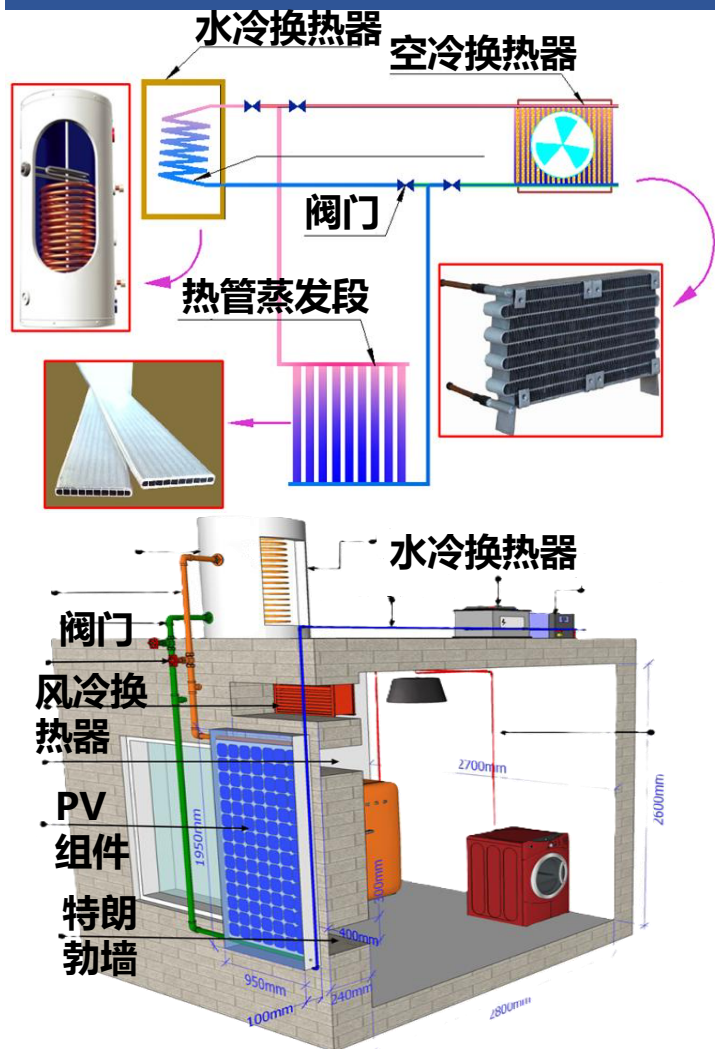
输出电能、热能、总能

- 全年热水模式运行：年平均电效率10.7%，热效率39.4%，总效率50.1%；
- 冬季同时运行：年平均电效率10.9%，热效率39.4%，总效率50.3%。

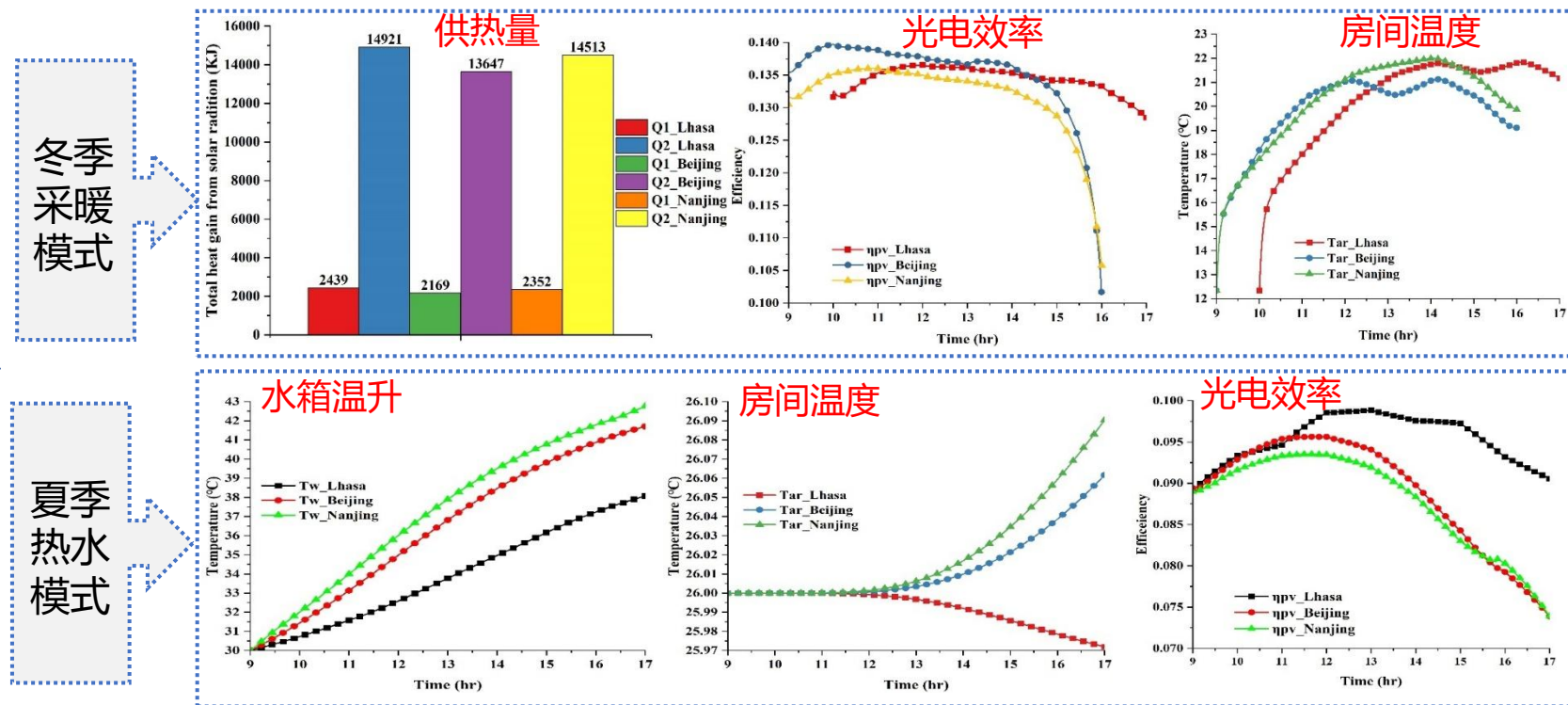
3.5 热管式PV/T-Trombe墙系统

- 将热管式PV/T与Trombe墙结合，采用强制风冷热管与自然风冷Trombe墙叠加冷却PV组件。

工作原理与实验装置



系统模拟结果分析

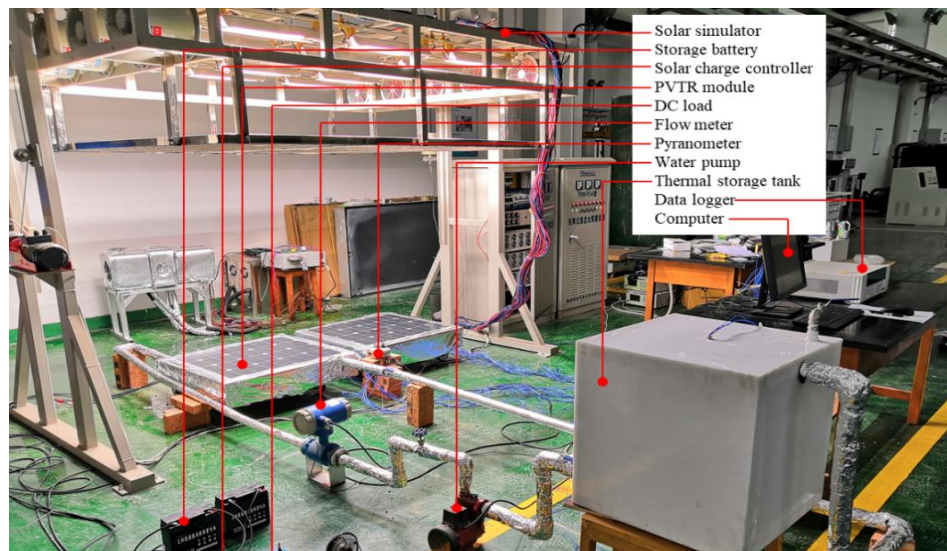
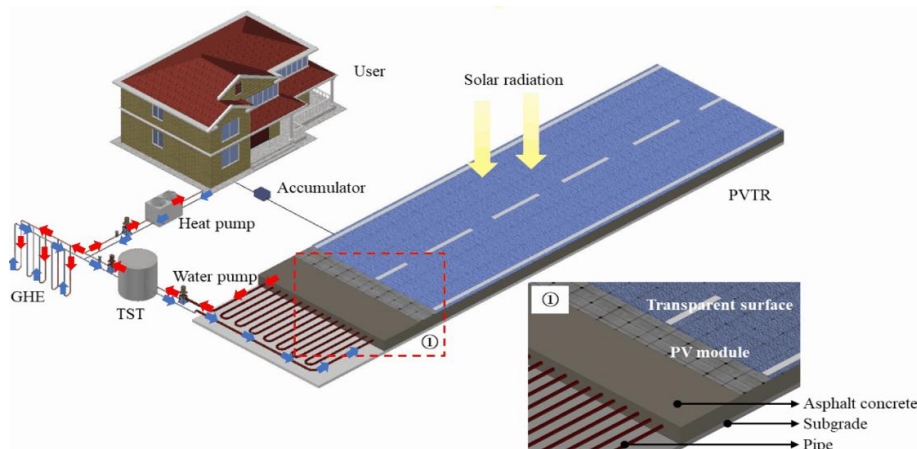


- 冬季采暖模式：拉萨地区的系统供热量最大且房间温度较高，北京地区光电效率较高；
- 夏季热水模式：南京地区水箱温升最高，而拉萨地区室温受特朗勃墙影响较小且光电效率较高。

3.6 太阳能PV/T道路-地源热泵系统

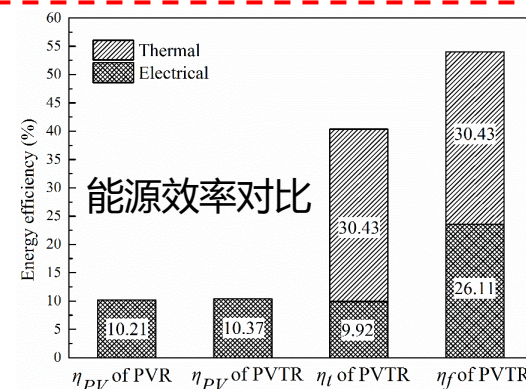
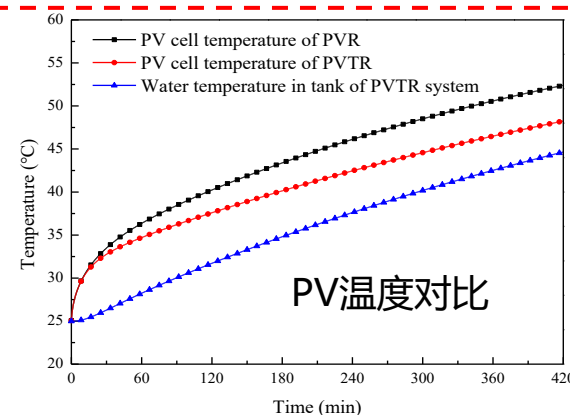
- 将PV/T模块铺设于公路表面，结合热泵系统实现跨季蓄热、建筑供能与路面融雪化冰。

PV/T道路 (PV/TR) - 地源热泵系统示意图

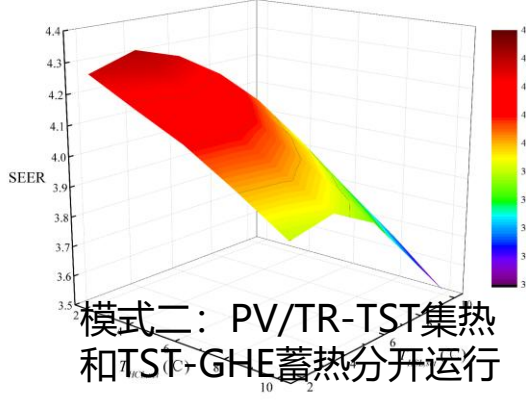
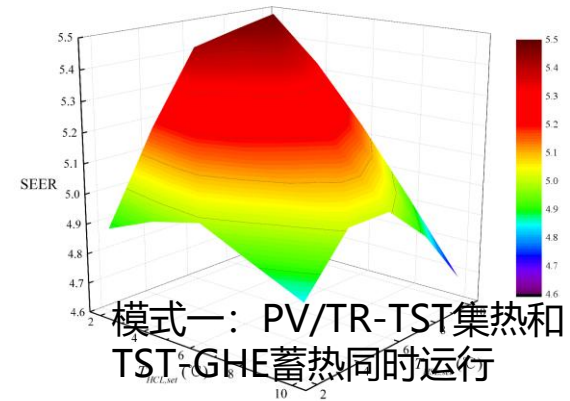


PV/TR与传统的PVR相比

性能对比



系统
季节
性能
效比

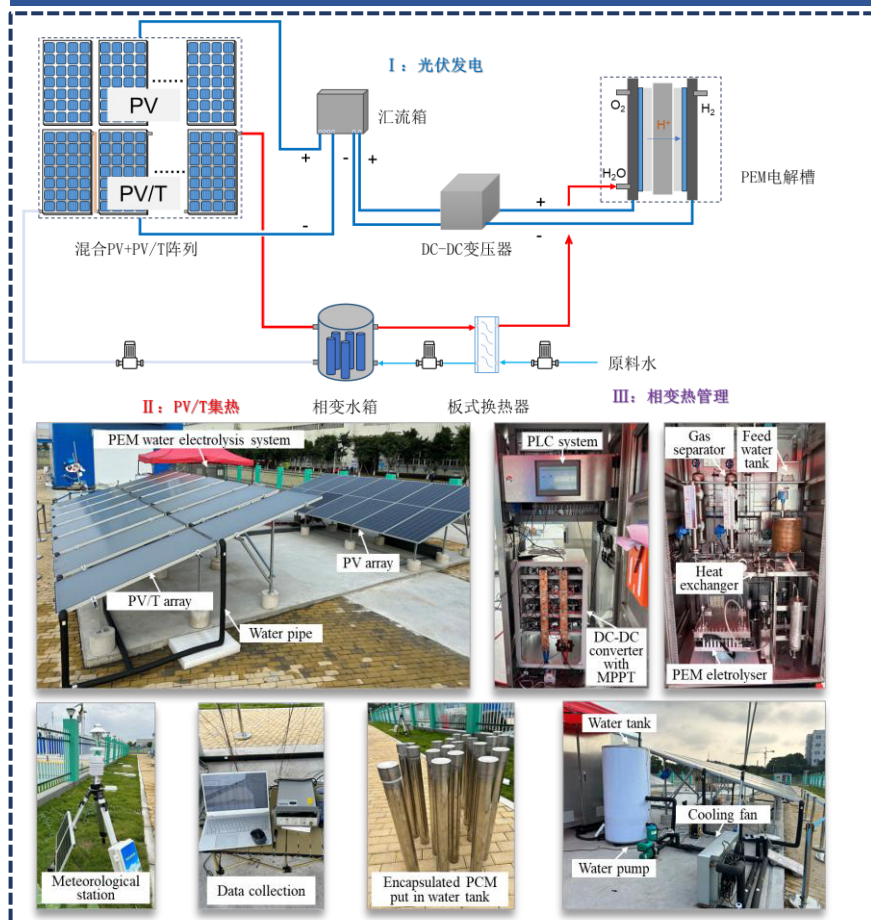


- PV/TR的综合效率(40.35%)与一次能源节约率(56.54%)分别是PVR的3.95倍与2.1倍
- 运行模式一和模式二的太阳能综合效率分别在27.12%~36.96%和18.78%~26.36%之间

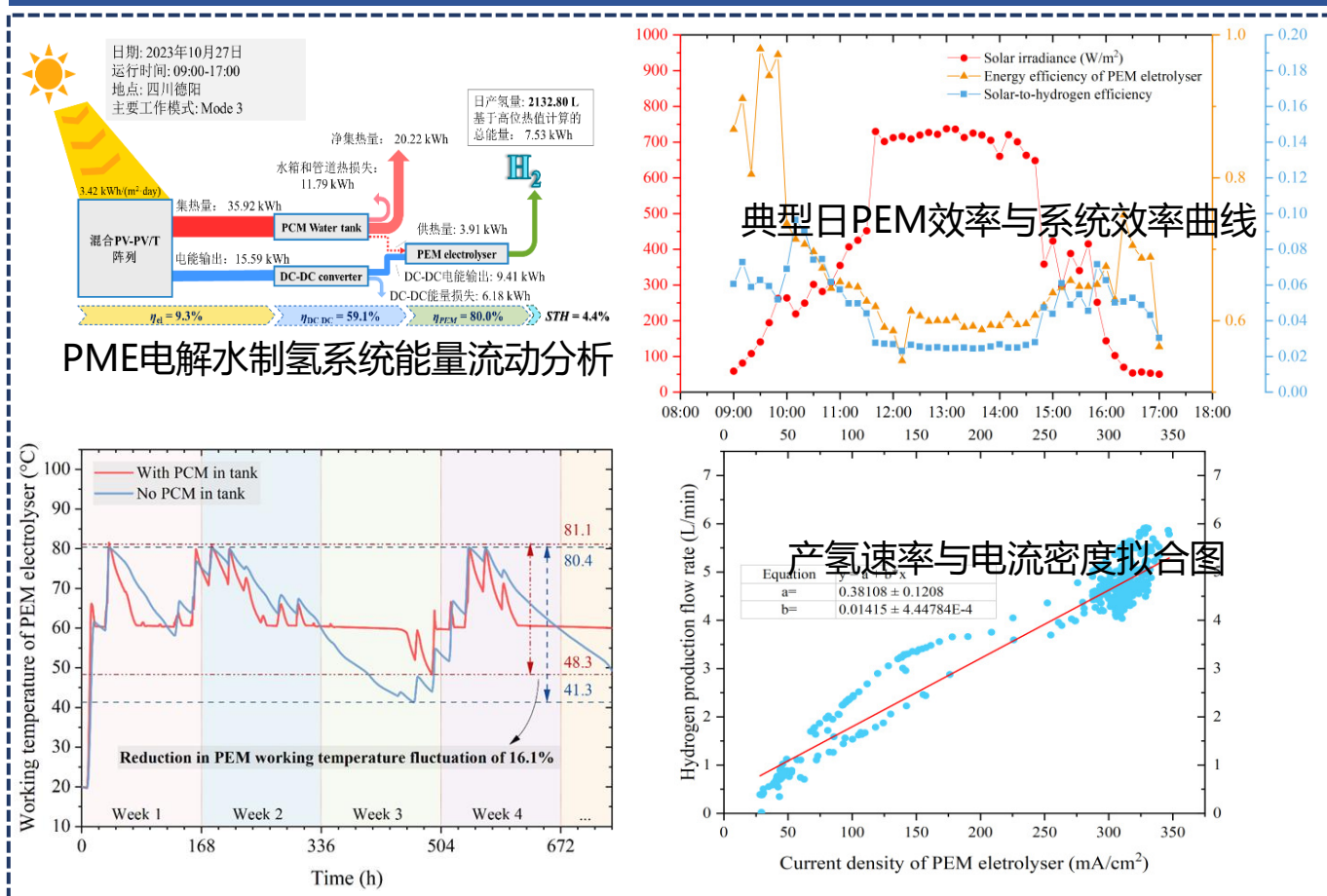
3.7 太阳能PV/T耦合PEM水电解制氢系统

- 对PV组件与PEM电解槽进行梯级冷却控温，使二者均处于最佳工作温区。

工作原理与实验装置



系统性能实验测试结果与分析



PV/T驱动PEM水电解制氢系统典型日测试结果：产电量**15.6kwh**，产热量**35.9kwh**，产氢量**2132.8L**



目录

CONTENTS

01 研究背景

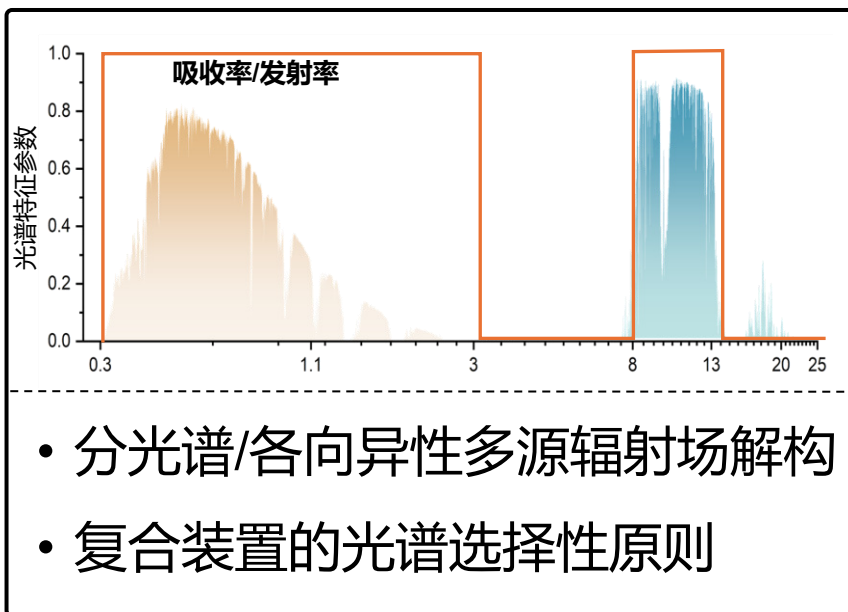
02 围护结构太阳光谱调控

03 太阳能光伏光热综合利用

04 太阳-太空辐射协同调控与利用

05 总结

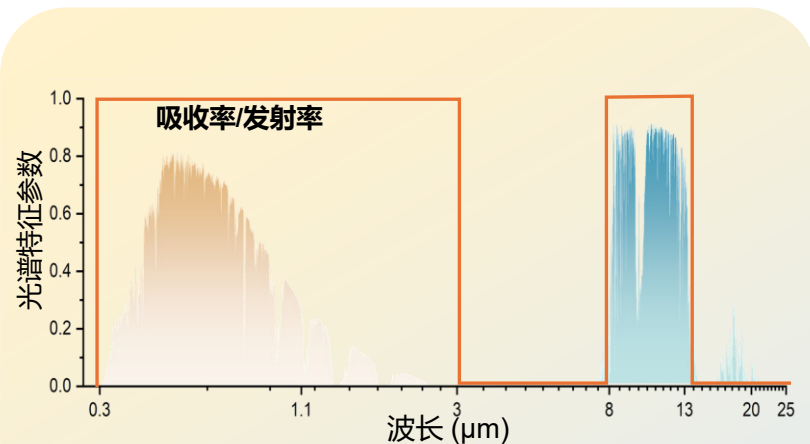
① 光谱选择机理



② 多能联供装置

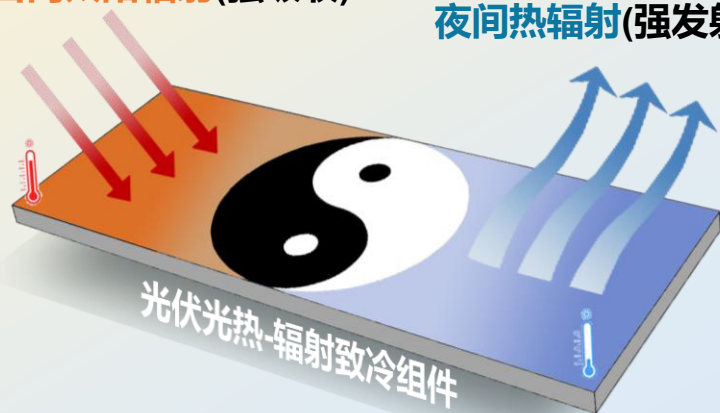


光谱耦合型装置

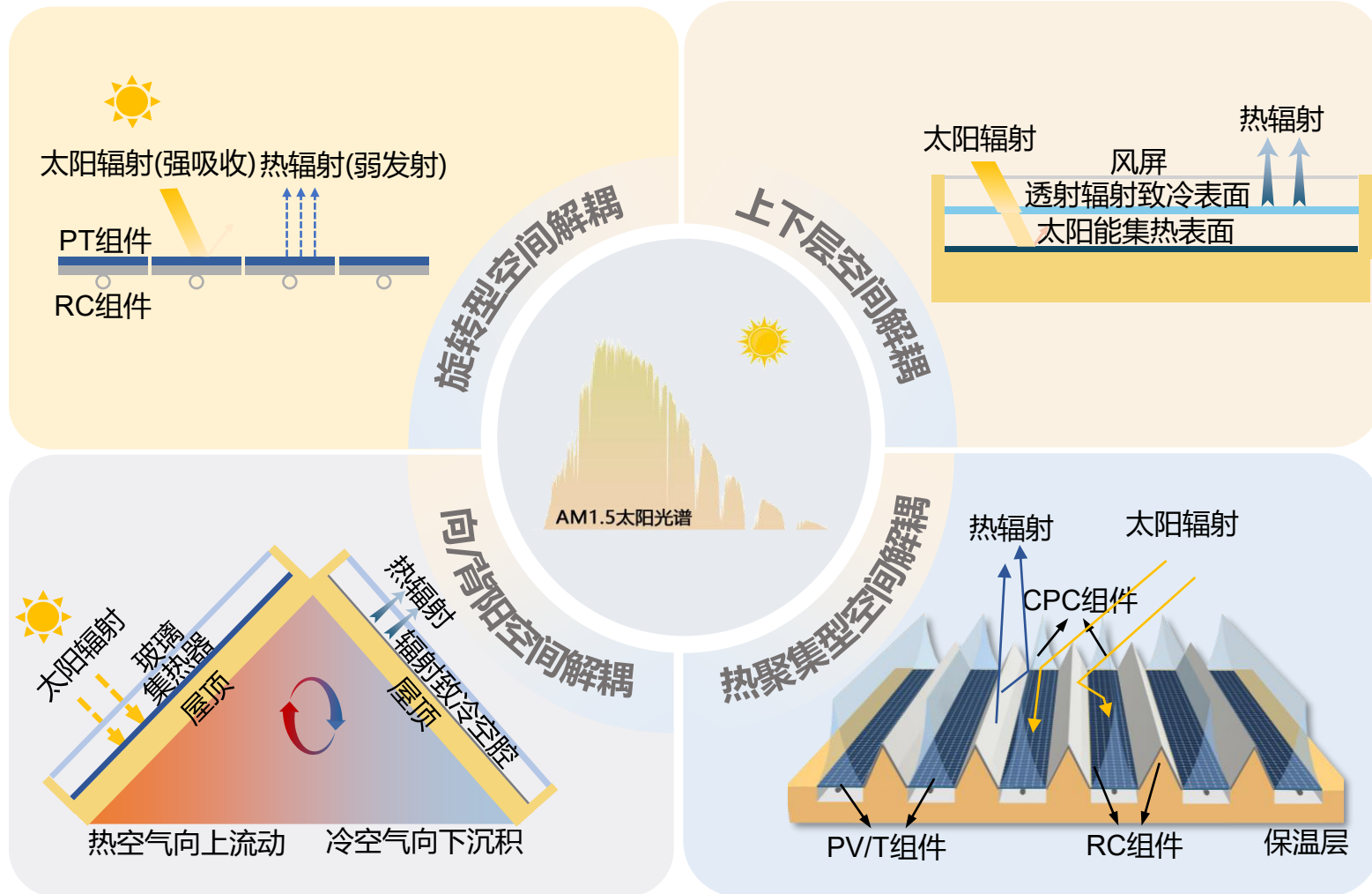


日间太阳辐射(强吸收)

夜间热辐射(强发射)

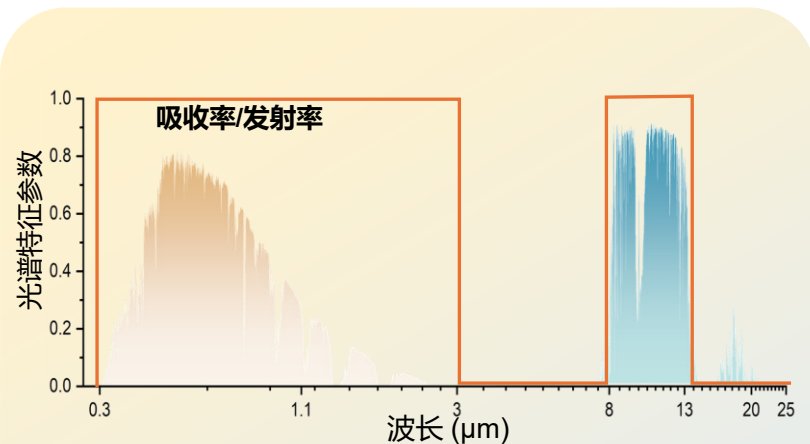


空间解耦型装置



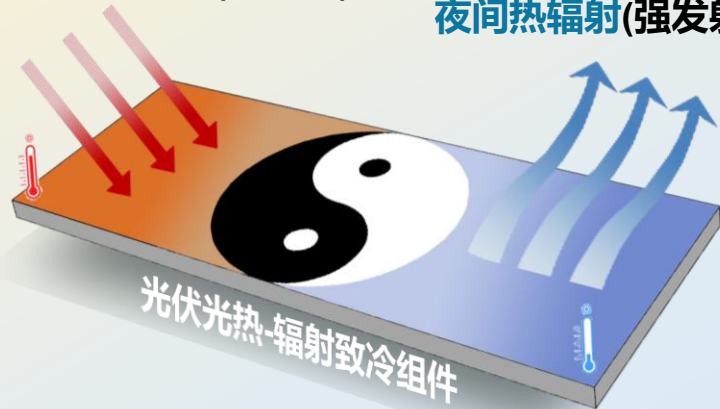
4.1 光谱耦合型 光伏-光热-辐射致冷综合利用

光谱耦合型装置

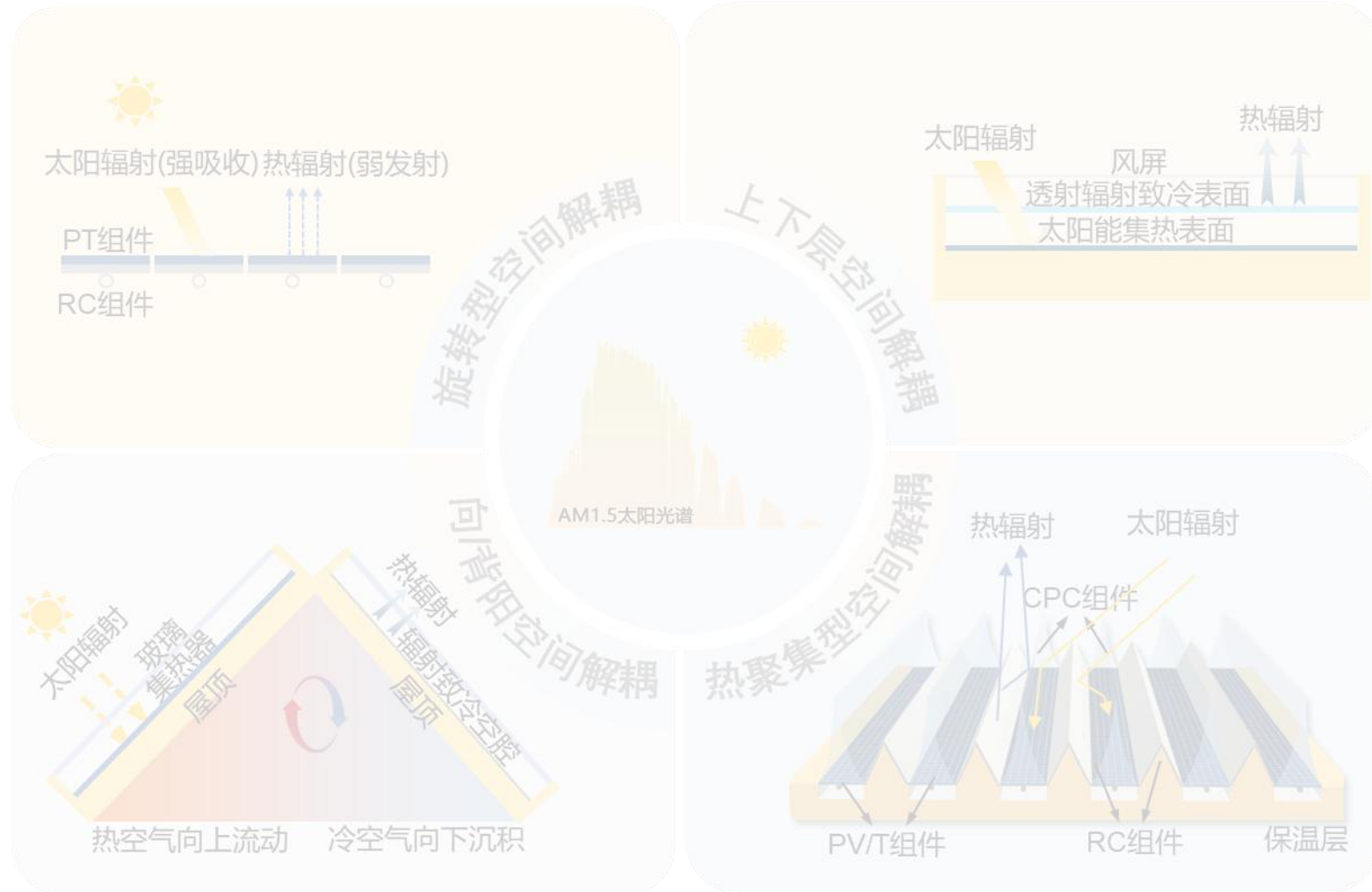


日间太阳辐射(强吸收)

夜间热辐射(强发射)

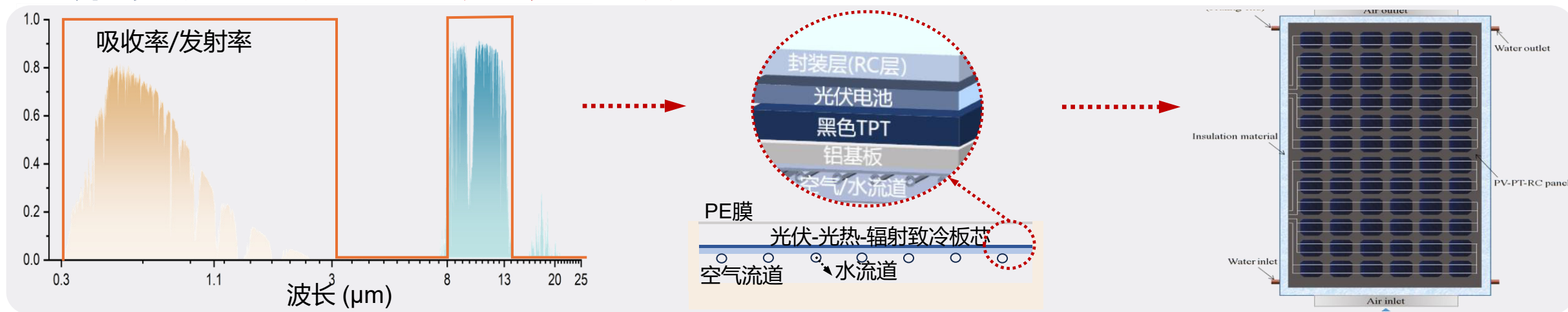


空间解耦式装置

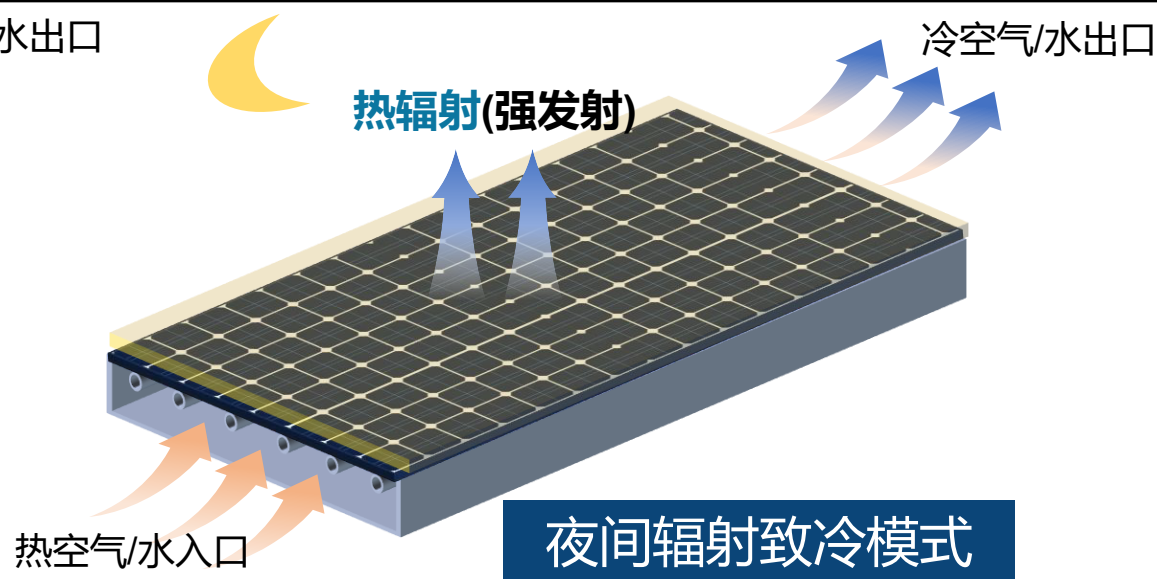
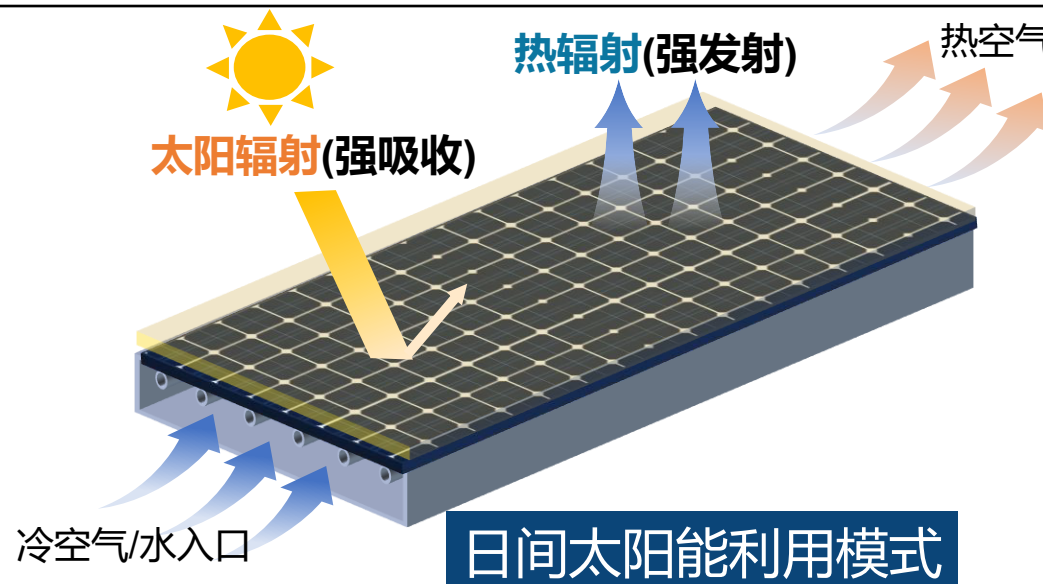


4.1 光谱耦合型 光伏-光热-辐射致冷综合利用

- 利用同一复合表面的光谱耦合，在日间进行光伏转换和光热转换，夜间进行辐射致冷，实现**同一装置**的电热冷清洁联产。

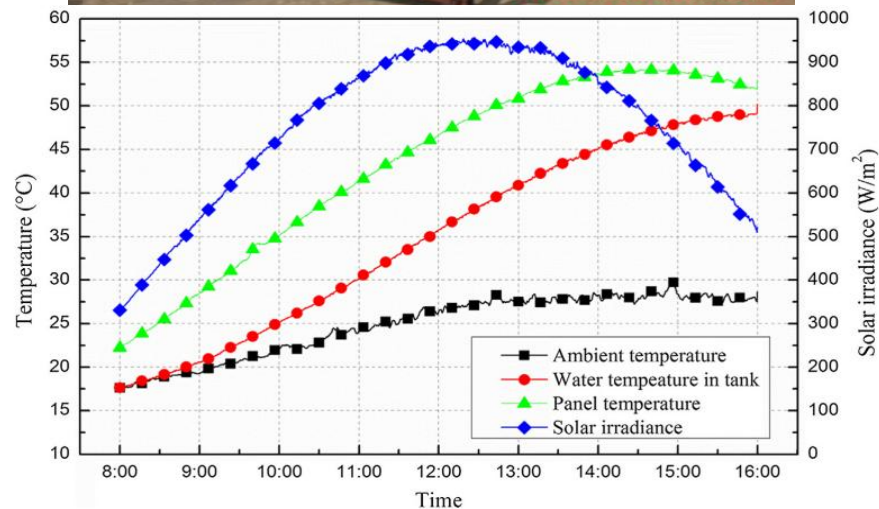


综合利用装置运行模式

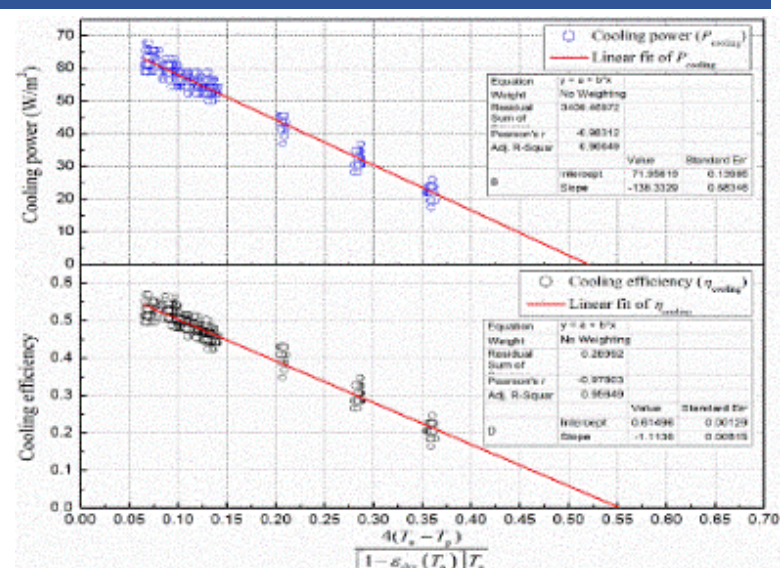
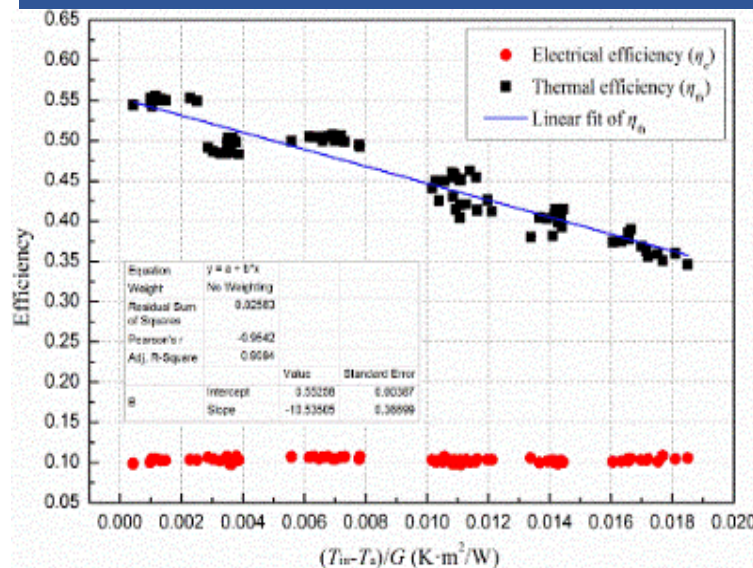


4.1 光谱耦合型 光伏-光热-辐射致冷综合利用

实验装置与天气数据



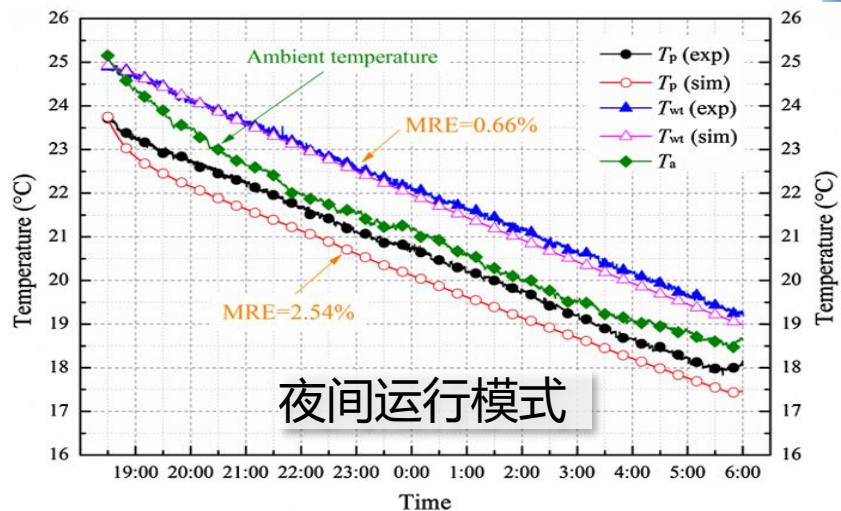
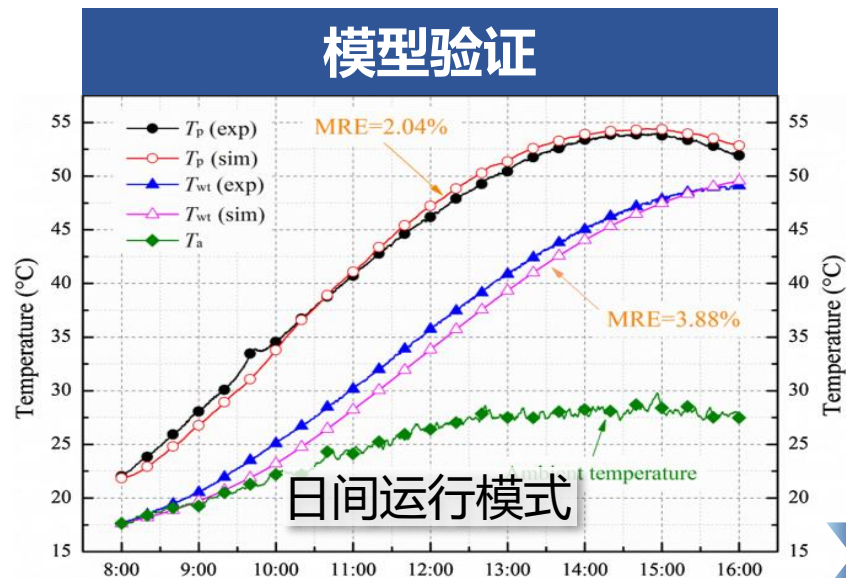
日间与夜间不同模式下性能



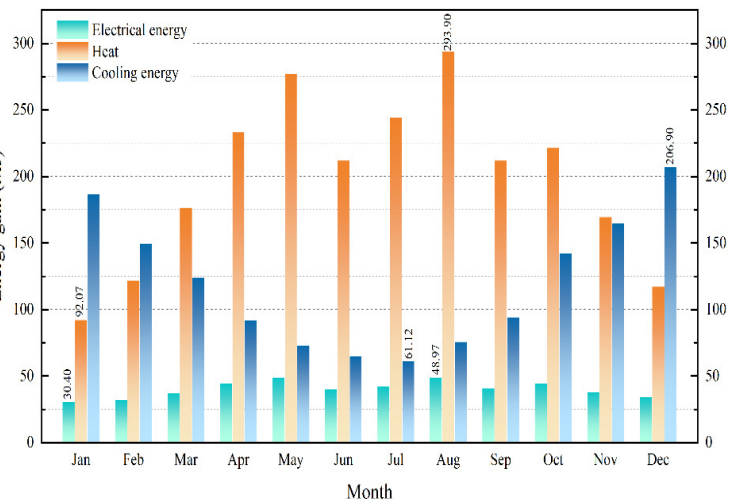
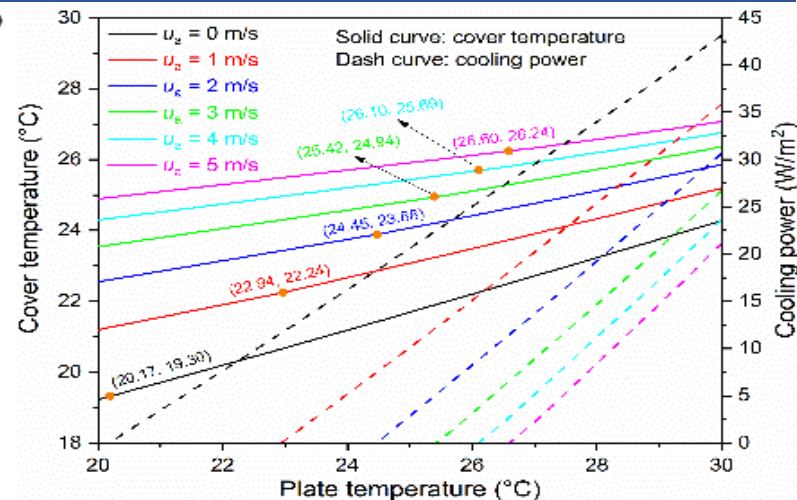
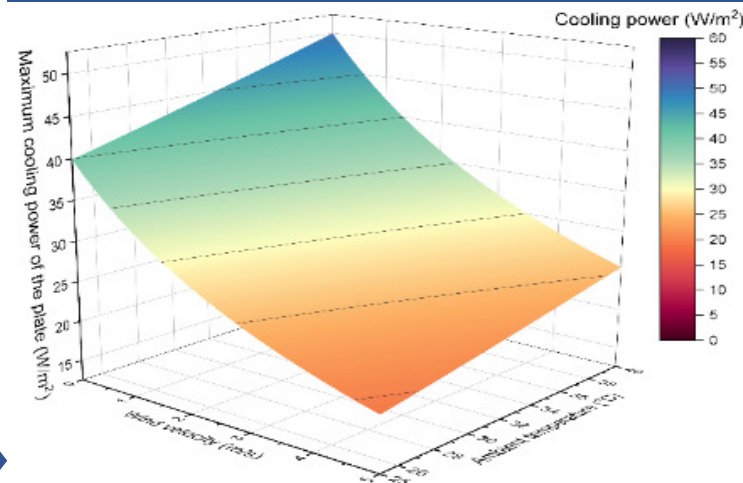
- 日间集热模式，电效率为10.3%，截断热效率为55.3%
- 夜间致冷模式，晴天净辐射致冷功率密度为72.0 W/m²
- 夜间致冷模式，阴天净辐射致冷功率密度为30.8 W/m²

4.1 光谱耦合型 光伏-光热-辐射致冷综合利用

模型验证



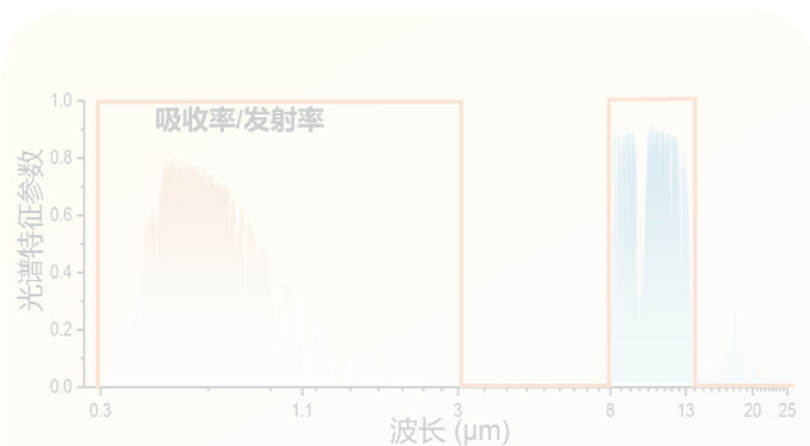
不同参数对装置输出性能的影响



- 模拟与实验值平均误差<4%
- 保温层加厚对电/热效率有利
- 年发电/热量约480/2369 MJ
- 清洁能源贡献率提升超29%

4.2 空间解耦型 聚光光伏-光热-辐射致冷综合利用

光谱耦合式装置

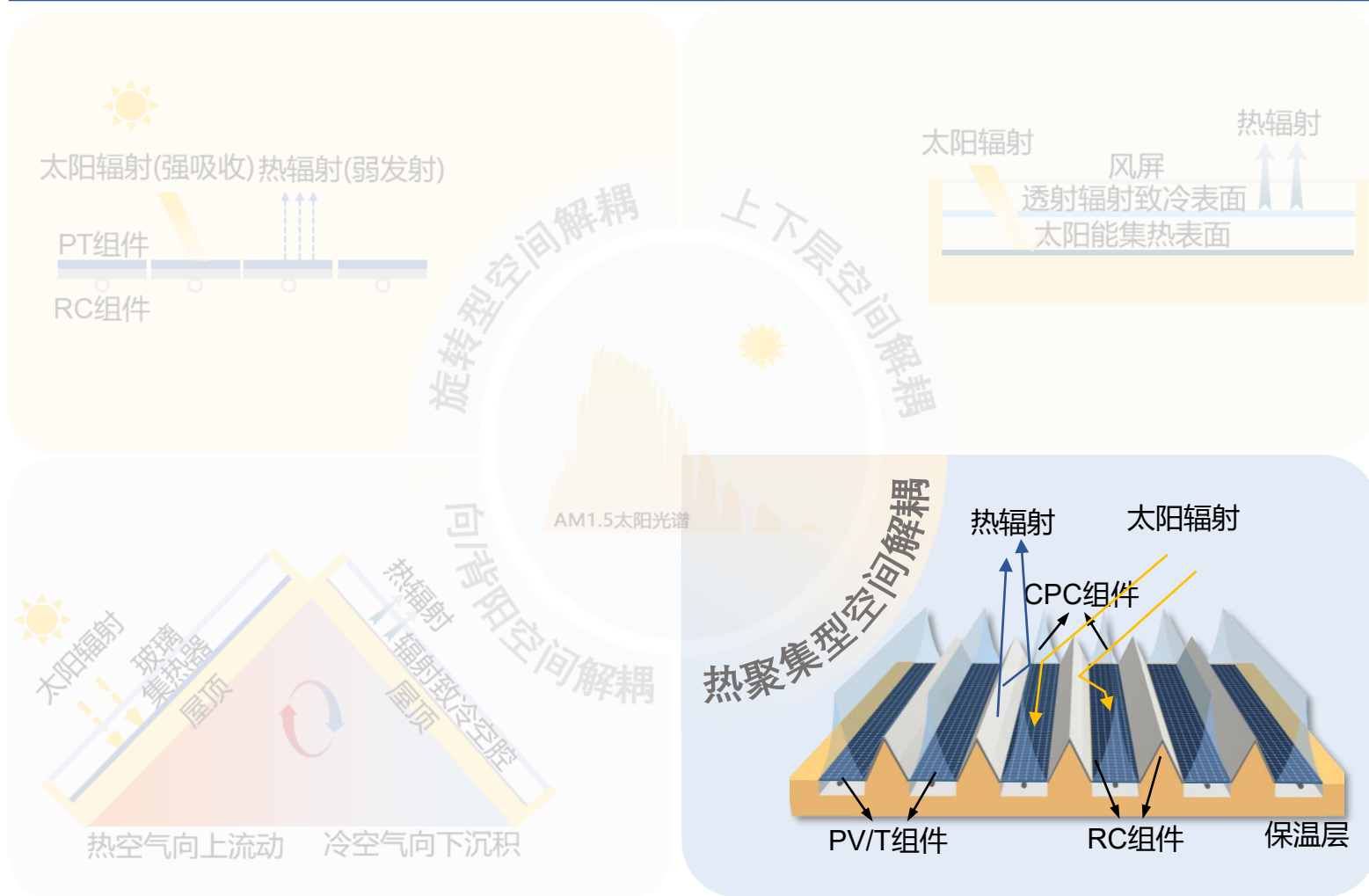


日间太阳辐射(强吸收)

夜间热辐射(强发射)

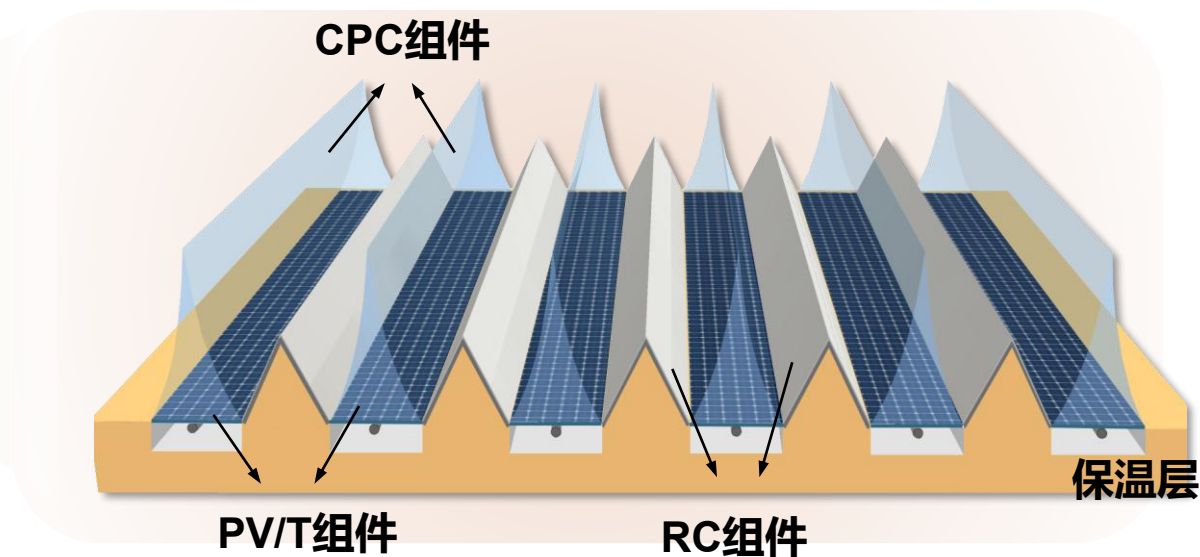
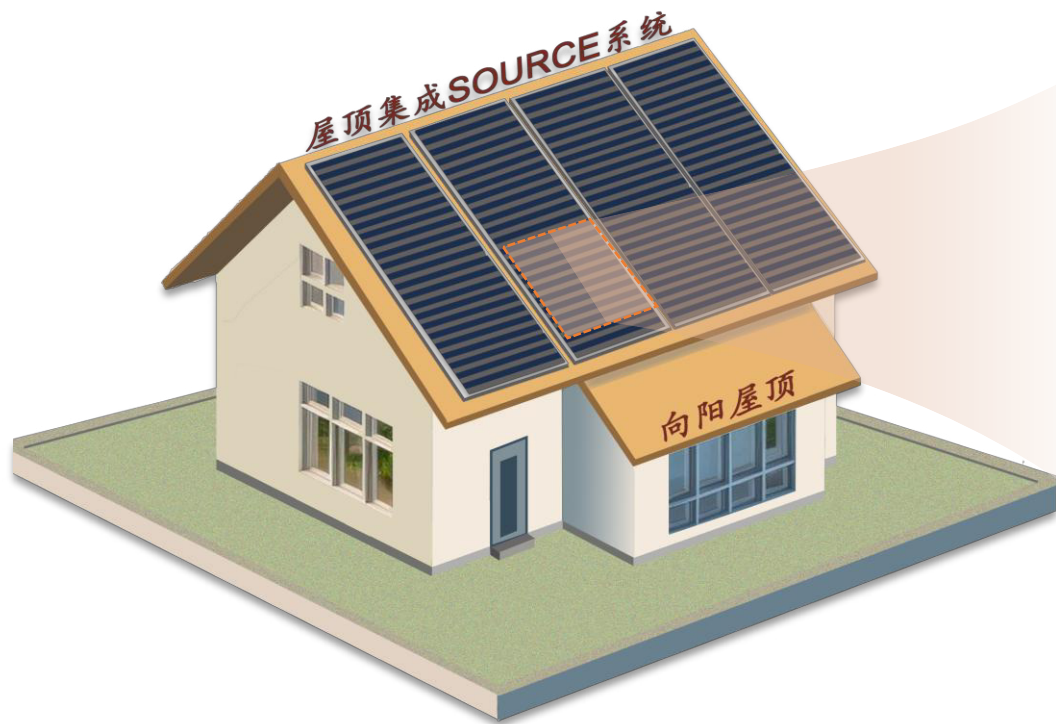


空间解耦型装置



4.2 空间解耦型 聚光光伏-光热-辐射致冷综合利用

- 将太阳辐射与中远红外热辐射通过**光谱与空间的协同约束**，在不增大装置整体占地面积的基础上实现了**电、热、冷高效同步输出**。

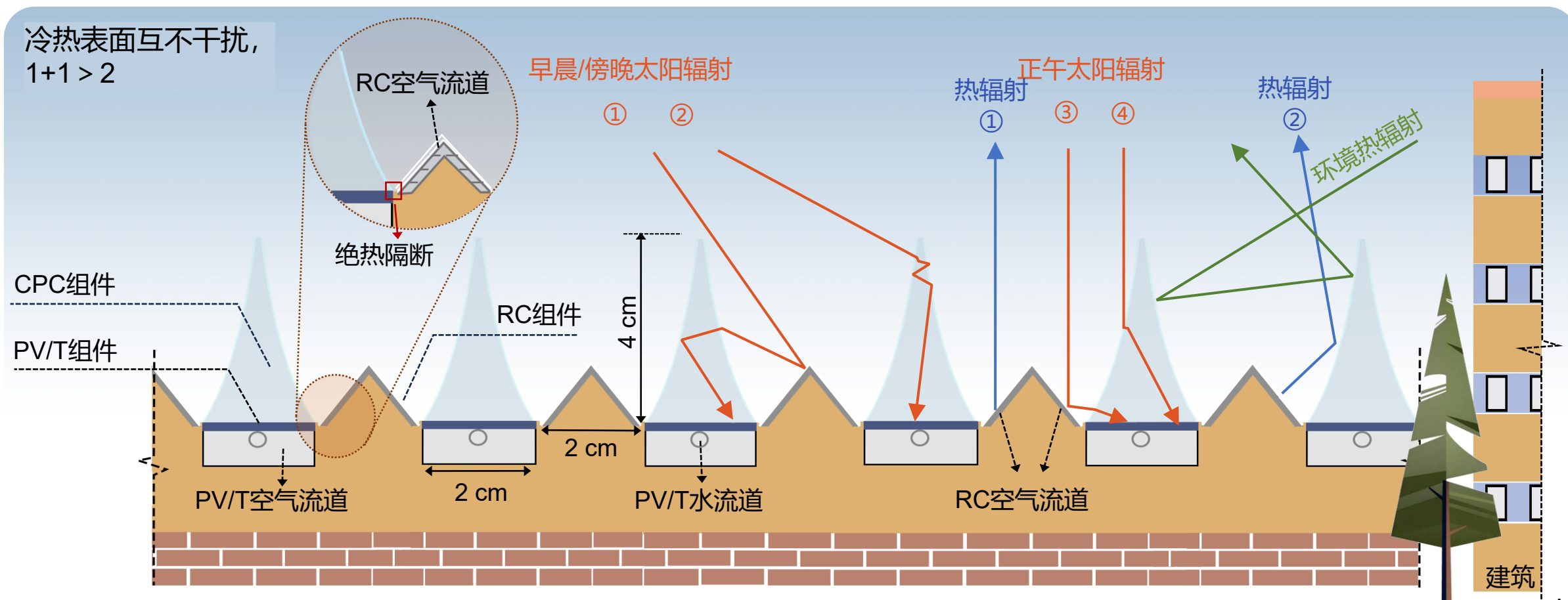


解决了太阳能利用与辐射致冷间**冷热互扰及竞争**建筑围护结构**部署面积**的难题

4.2 空间解耦型 聚光光伏-光热-辐射致冷综合利用

SOURCE装置三大组件：具有光谱分频功能的复合抛物面辐射聚集(CPC)组件、PV/T组件与RC组件

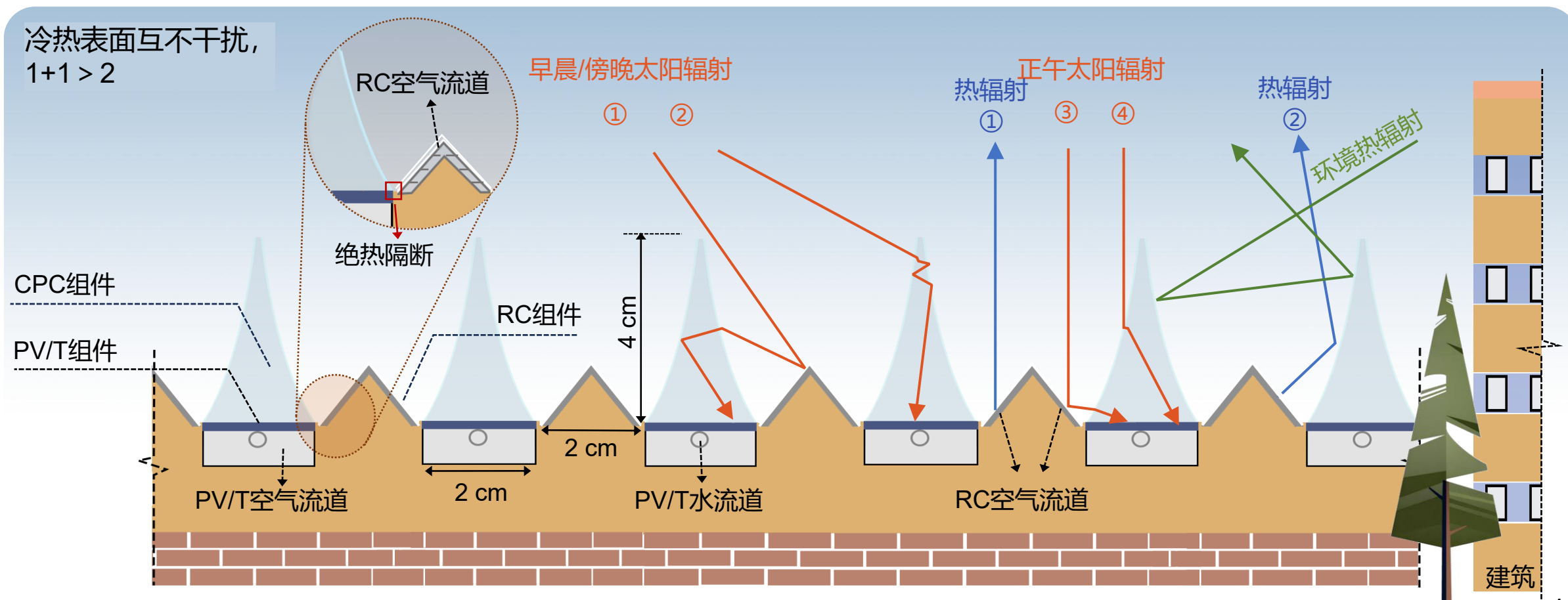
- **CPC组件**(太阳波段高透，中远红外波段高反)通过光谱分频与辐射定向传输实现太阳辐射聚集、热辐射聚集与环境辐射阻隔功能，使太阳辐射经折射/全反射后传输至 PV/T组件以输出电能与热能。



4.2 空间解耦型 聚光光伏-光热-辐射致冷综合利用

SOURCE装置三大组件：具有光谱分频功能的复合抛物面辐射聚集(CPC)组件、PV/T组件与RC组件

- **PV/T组件**布置在CPC组件底部，板芯背面为水-空气双介质换热结构，可灵活匹配建筑对热水/热空气的动态需求，实现热电联供，且有效采光面积未减小。

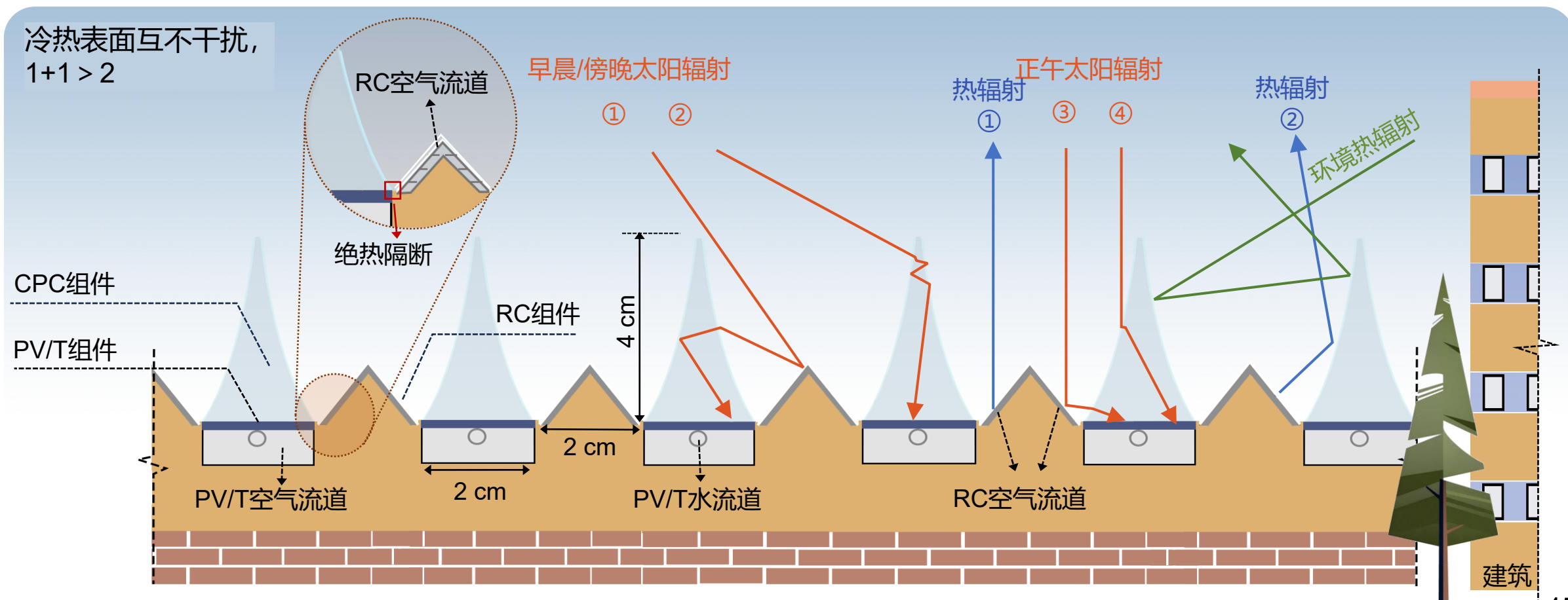


4.2 空间解耦型 聚光光伏-光热-辐射致冷综合利用

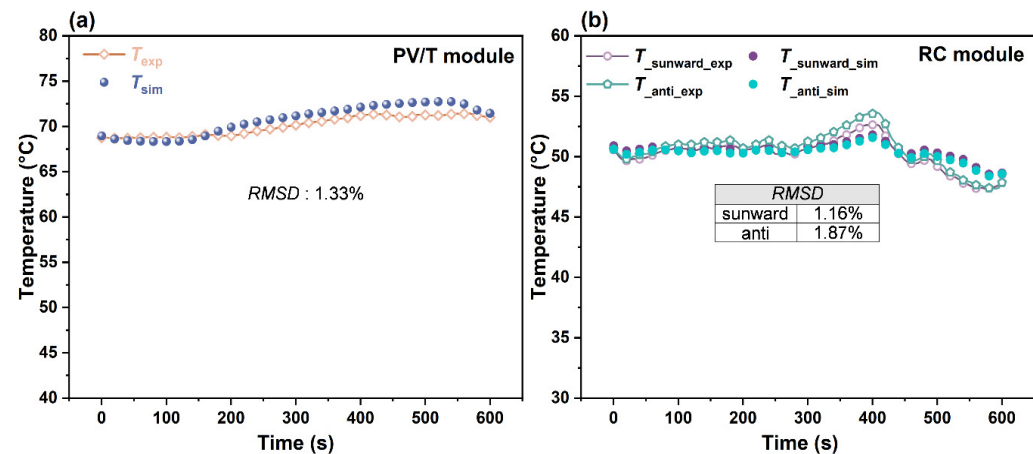
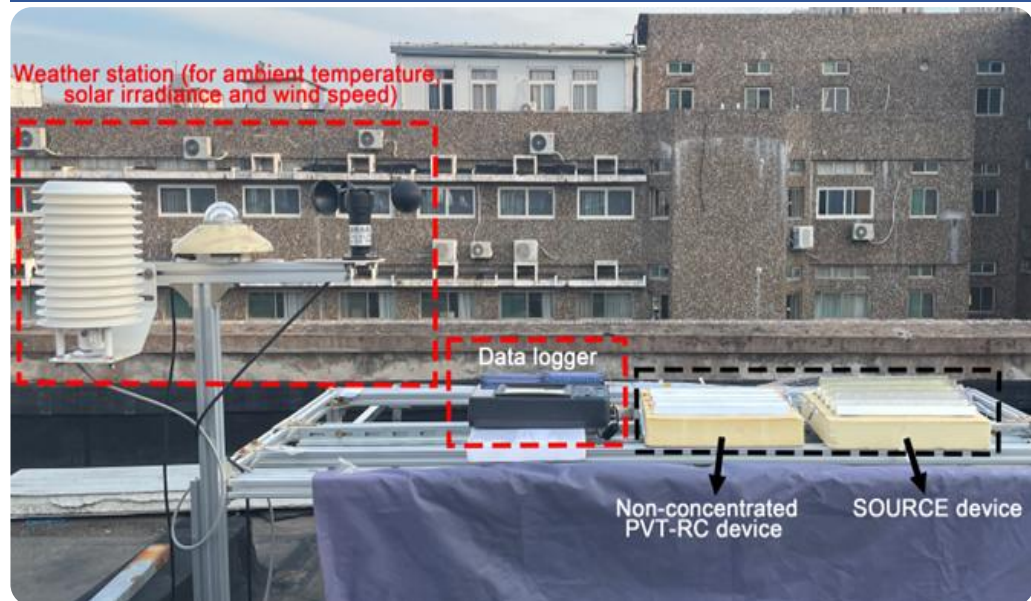


SOURCE装置三大组件：具有光谱分频功能的复合抛物面辐射聚集(CPC)组件、PV/T组件与RC组件

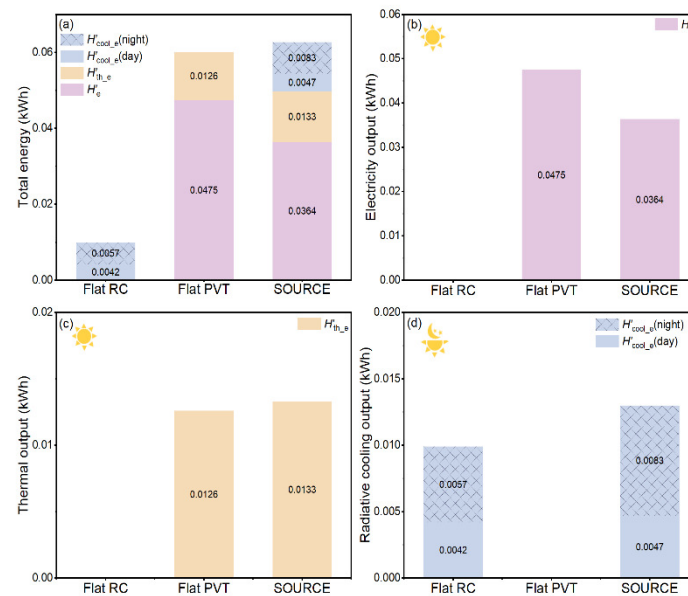
- **RC组件**布置在相邻CPC组件形成的空腔底部，对太阳辐射具有高镜面反射率。倒V形结构可增大有效致冷面积，并将入射的太阳辐射传输至PV/T组件。



户外实验测试



SOURCE与传统PV/T及RC装置对比



- 实验与模拟值平均误差 $< 2\%$
- SOURCE 全天综合能效较PVT高 12.6%
- SOURCE 全天综合能效较RC高 5 倍

装置类型	电	热	冷	集成特性	建筑适配性
PV/T装置	√(中)	√(中)	×	-	低
RC装置	×	×	√(中)	-	低
SOURCE装置	√(高)	√(高)	√(高)	互促	高



目录

CONTENTS

01

研究背景

02

建筑围护结构太阳光谱调控

03

太阳能光伏光热综合利用

04

太阳-太空辐射协同调控与利用

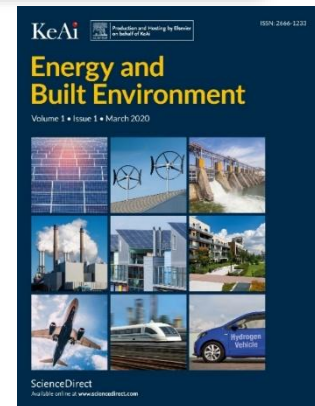
05

总结

- ❖ **建筑-太阳-太空**的辐射能交互，应根据建筑负荷特征对太阳辐射进行**光谱调控与综合利用**。
- ❖ 通过透明围护结构对太阳辐射进行光谱调控可**改善室内光热环境**。
- ❖ 太阳能**分光谱梯级利用**可高效、同步为建筑提供电与热。
- ❖ 太阳-太空辐射协同调控与利用可最大限度利用地外空间辐射能，为建筑提供**电、热、冷**。

创办能源与人工环境领域国际学术期刊 *Energy and Built Environment*

- 创办于2019年，**双月刊**，2026年载文量**102篇**
- 致力于打造**能源与人工环境**领域的国际一流的国产英文期刊



CiteScore 2024: **17.3**

CiteScoreTracker: **19.9** (2026年4月)

在4个学科领域均位列Scopus数据库**Q1区**

建筑太阳能光谱调控与综合利用



个人微信

袁艳平
西南交通大学

2026年5月21日