

夏热冬冷地区三类典型屋面与光伏阵列 集成的节能效益模拟研究

汇报人：何旻

东华大学

07/11/2025, 长沙



内容

1

背景

2

研究方法

3

结果与讨论

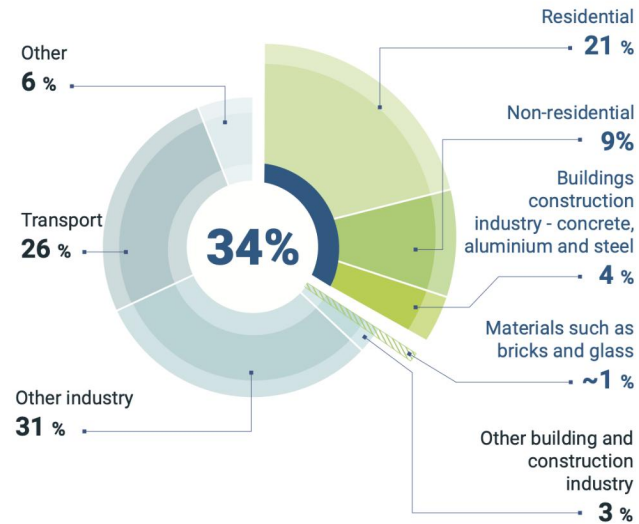
4

结论

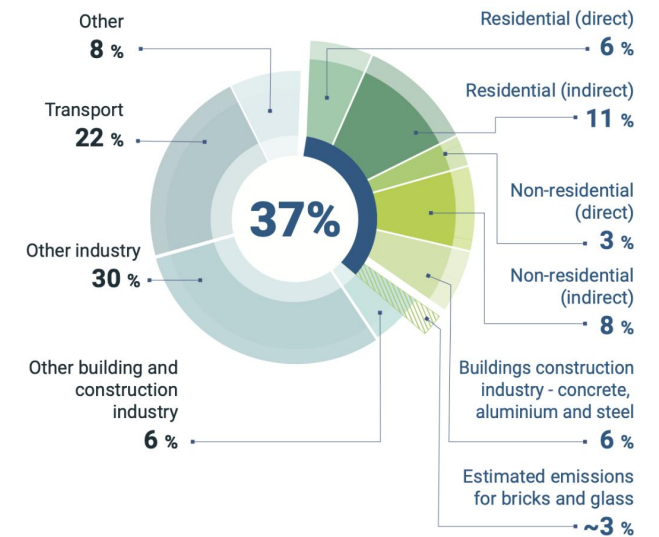
背景



Global share of buildings and construction final energy demand, 2021



Global share of buildings and construction operational and process CO2 emissions, 2021



● 全球气候变化

● 能源消耗加剧

● 碳排放增加

➤ 利用建筑屋面进行**光伏发电**，已成为国内外城市实现“双碳”目标的常见策略。



Photovoltaic-Cool Roof



Photovoltaic-Green Roof

- 受政策、空间等因素的制约，在种植屋面、高反射率屋面上铺设光伏阵列的工程案例日益增多，两者之间的热电协同效应也受到人们的关注。

植被对屋面光伏组件发电效率的影响

时间	作者	发电效率的影响
2013	Nagengast 等人	相对于黑色屋面，发电量 降低 0.5%
2014	Chemisana 等人	相对于砾石屋面，发电量 提高 1.29%
2018	Schindler 等人	相对于沥青屋面，发电效率 没有提高
2021	Kaewpraek 等人	相对于混凝土屋面，发电量 增加 5%

高反射率屋面对单面光伏组件发电效率的影响

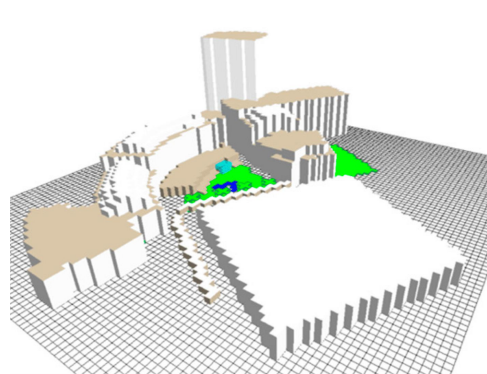
时间	作者	发电效率的影响
2021	C.G. Battista等人	比传统沥青屋面 提高 3.4%
2021	Fatemeh Rahmani 等人	比传统金属屋面 提高 1.9%
2019	Hasim Altan等人	比传统沥青屋面 提高 5-10%
2015	Yusufoglou等人	比传统混凝土屋面 提高 1.3-2.0%

- 在夏热冬冷地区，光伏与绿化或者高反射率屋面材料结合的**热性能**及其**节能效益**仍**不明确**，相关的实验研究也较为有限。



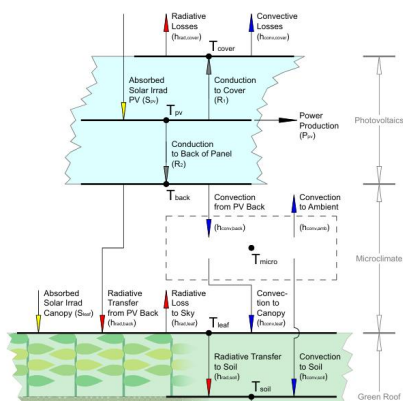
Hui, 2011

- 只能模拟某些**特定结构**的光伏屋面系统
- 忽视了光伏与屋面的一些相互作用，通用性**低**



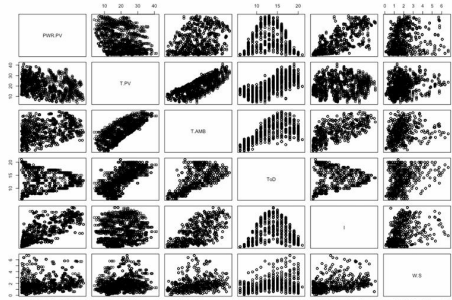
Teng, 2022

- 网格也难以描述光伏组件的**详细结构**
- 没有针对**光伏组件传热**或者**发电**过程的具体数学模型



Witmer, 2011

- 多为静态模型，**难以适用**不同光伏组件空间布局
- 缺乏光伏屋面**整体热过程**对室内环境影响的描述



Helow, 2011

- 适用性和准确性取决于所采集数据的数量和质量。
- 国内外相关实验研究**有限**，限制了模型的扩展应用

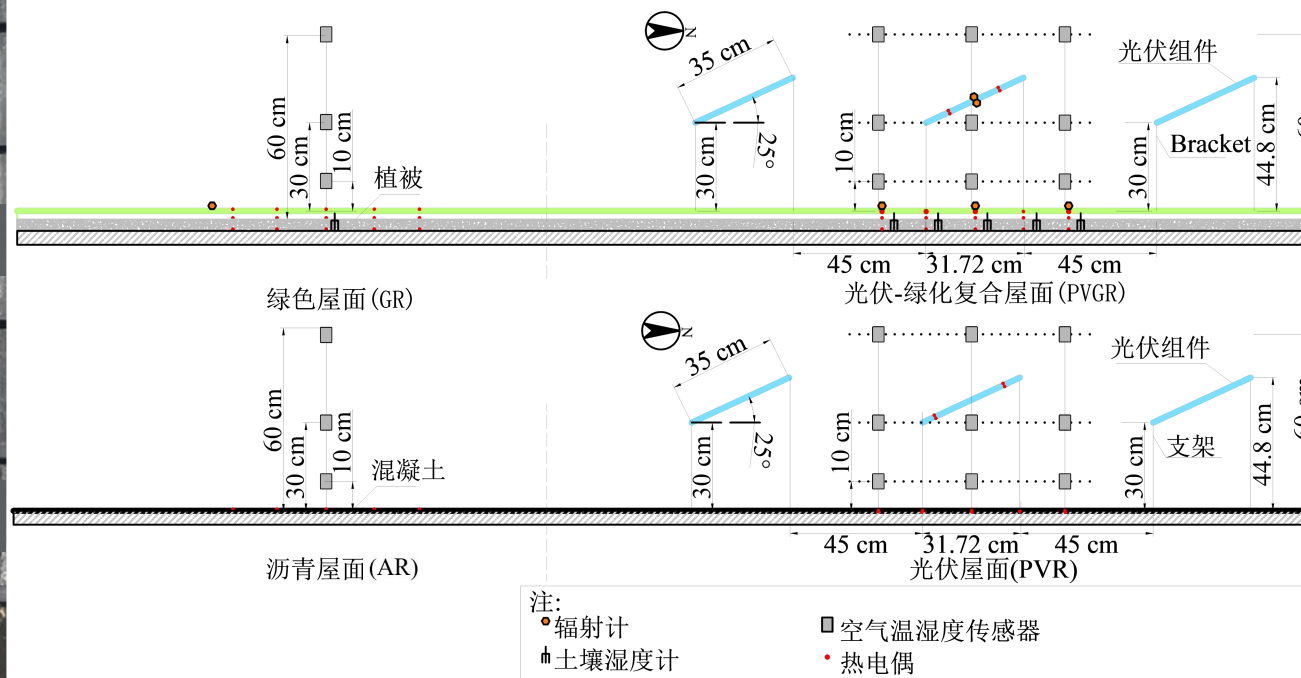
- 针对上述物理过程的简化处理使得现有光伏与植被或高反射率材料复合屋面热过程模型的**准确性和适用性下降**。

2. 研究方法

2.1 现场试验



(a) 现场试验俯视图



(b) 实验装置示意图

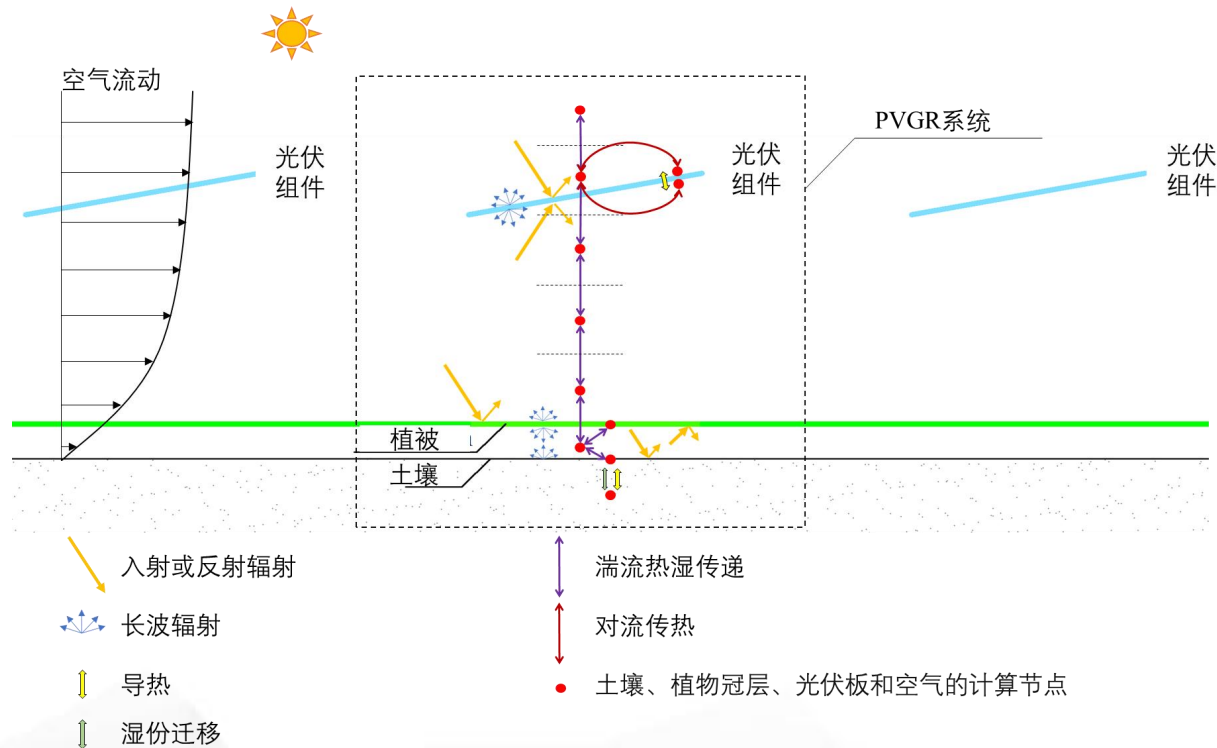
- 地点: 上海
- 气候: 夏热冬冷地区
- 测试时间: 2024/01/24-2024/12/02
- 时间间隔: 1分钟

- 测试内容: 光伏板表面温度、屋顶围护结构层外表面温度、四种屋面在不同高度的温湿度

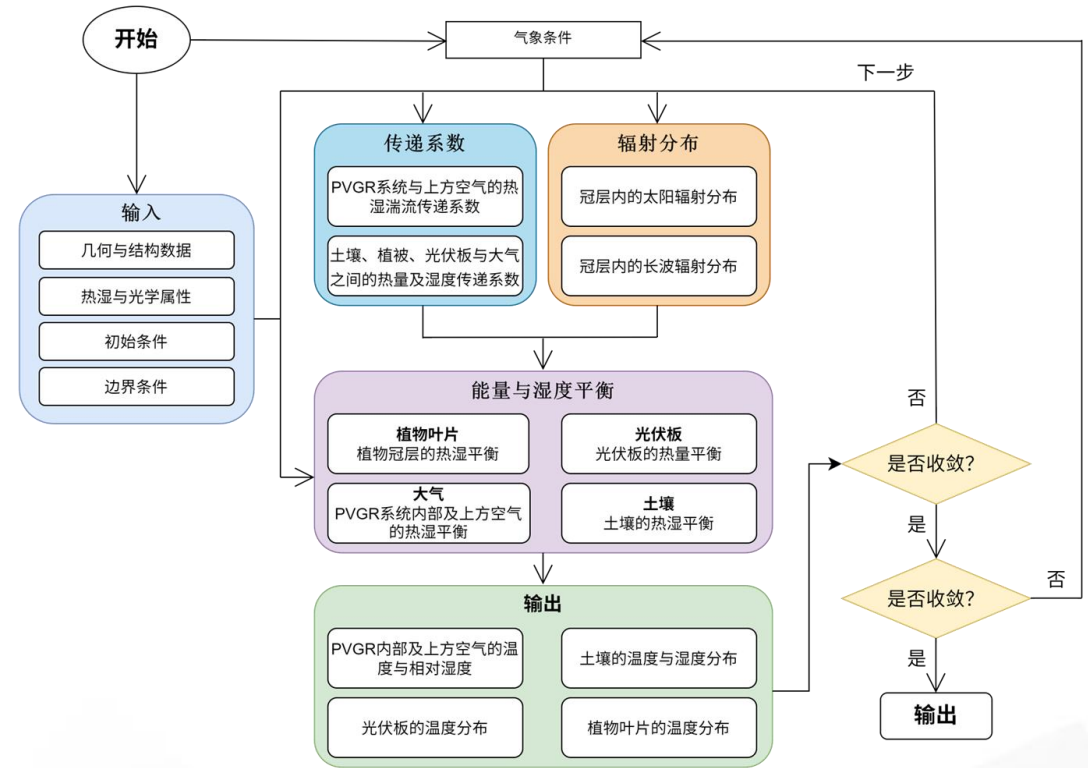
2. 方法

2.2 数值模拟

- 将He等人开发的**绿色屋顶模型**与Cavadini等人提出的**光伏屋顶模型**相结合
- 考虑在光热传递过程中**光伏组件和植被的相互作用**



PVGR模型示意图

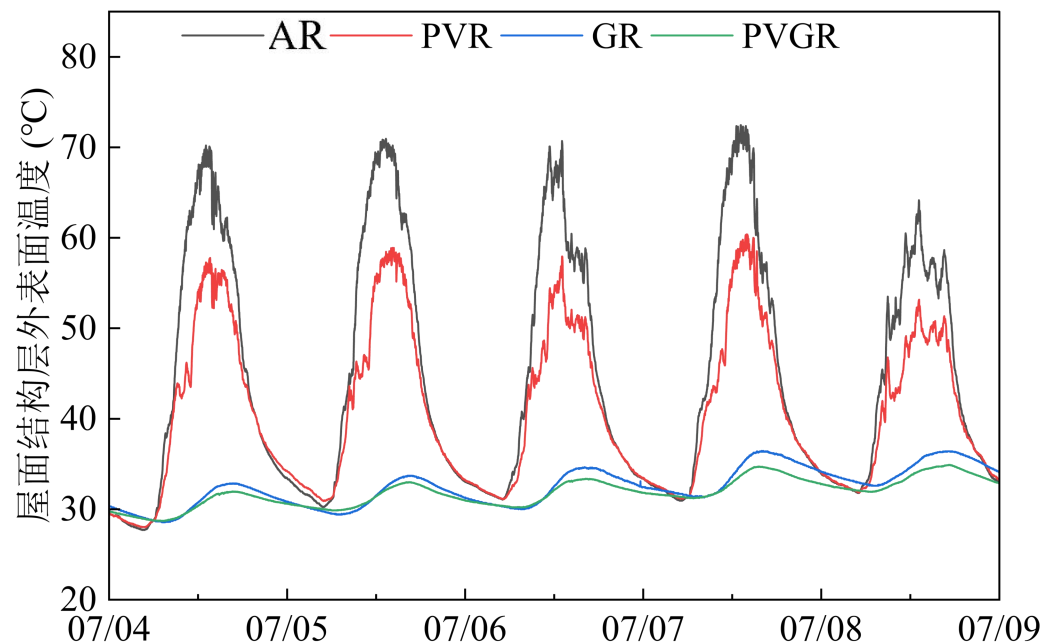


PVGR模型流程图

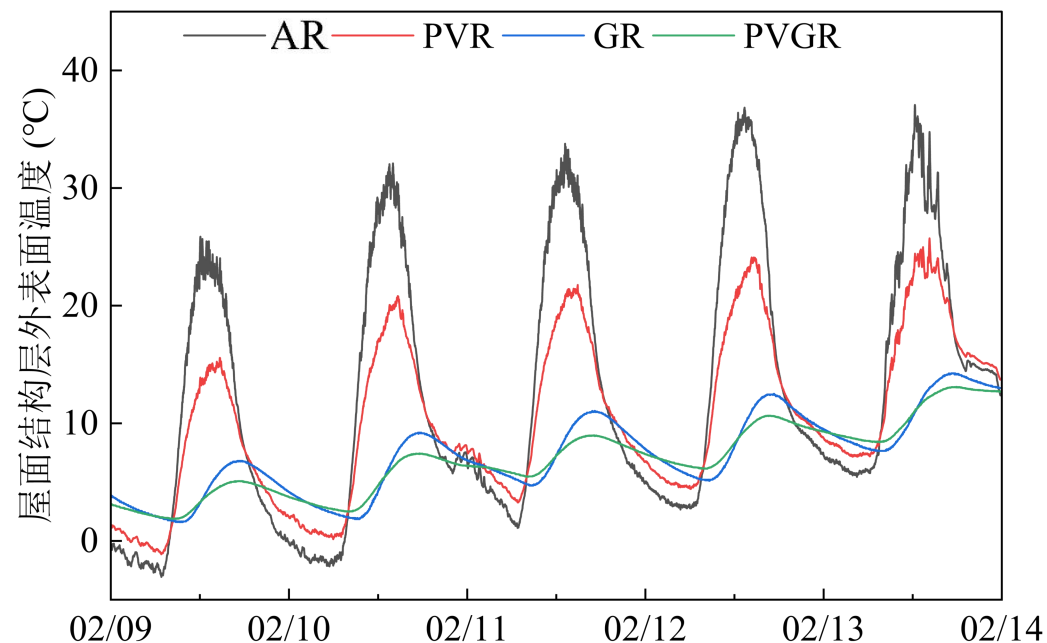
3. 测试结果

AR

◆ 3.1 PVGR与传统屋面的保温隔热性能比较



(a)



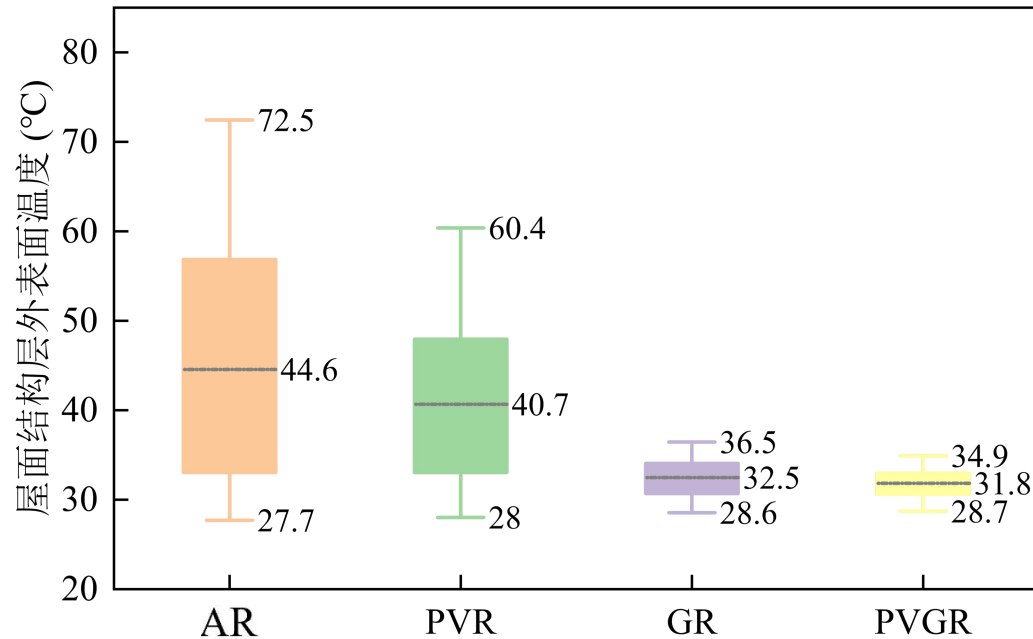
(b)

PVGR系统与传统沥青屋面 (AR)、光伏屋面 (PVR)、种植屋面 (GR) 结构层外表面温度比较: (a) 夏季典型日 (b) 冬季典型日

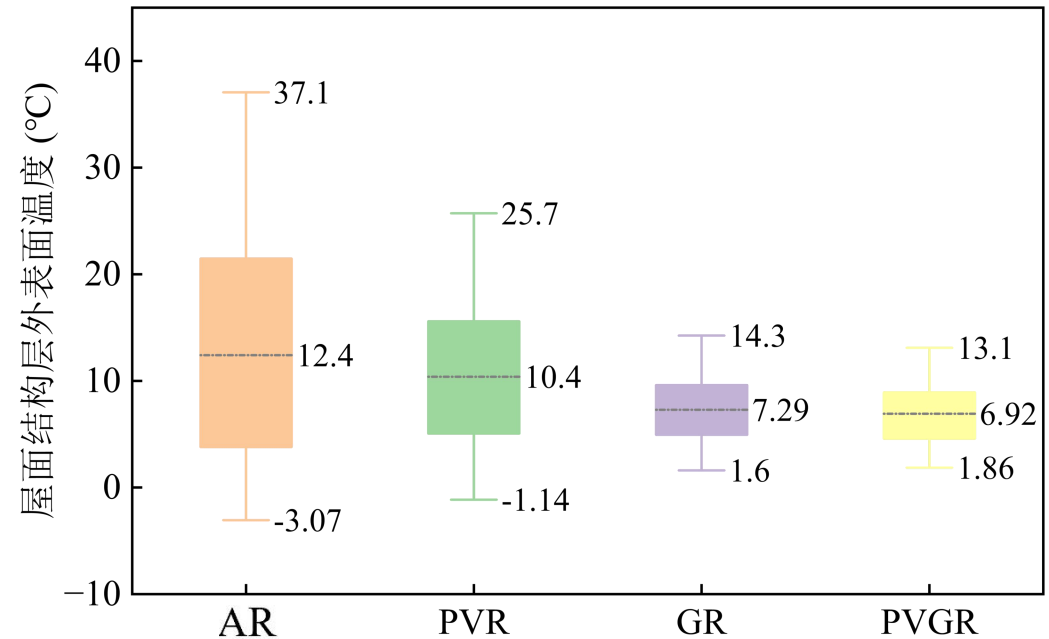
□ PVGR系统在白天表现出显著的**降温效果**, 在夜间则具有良好的**保温作用**。

3. 测试结果

◆ 3.1 PVGR与其他屋面的保温隔热性能比较



(a) 夏季

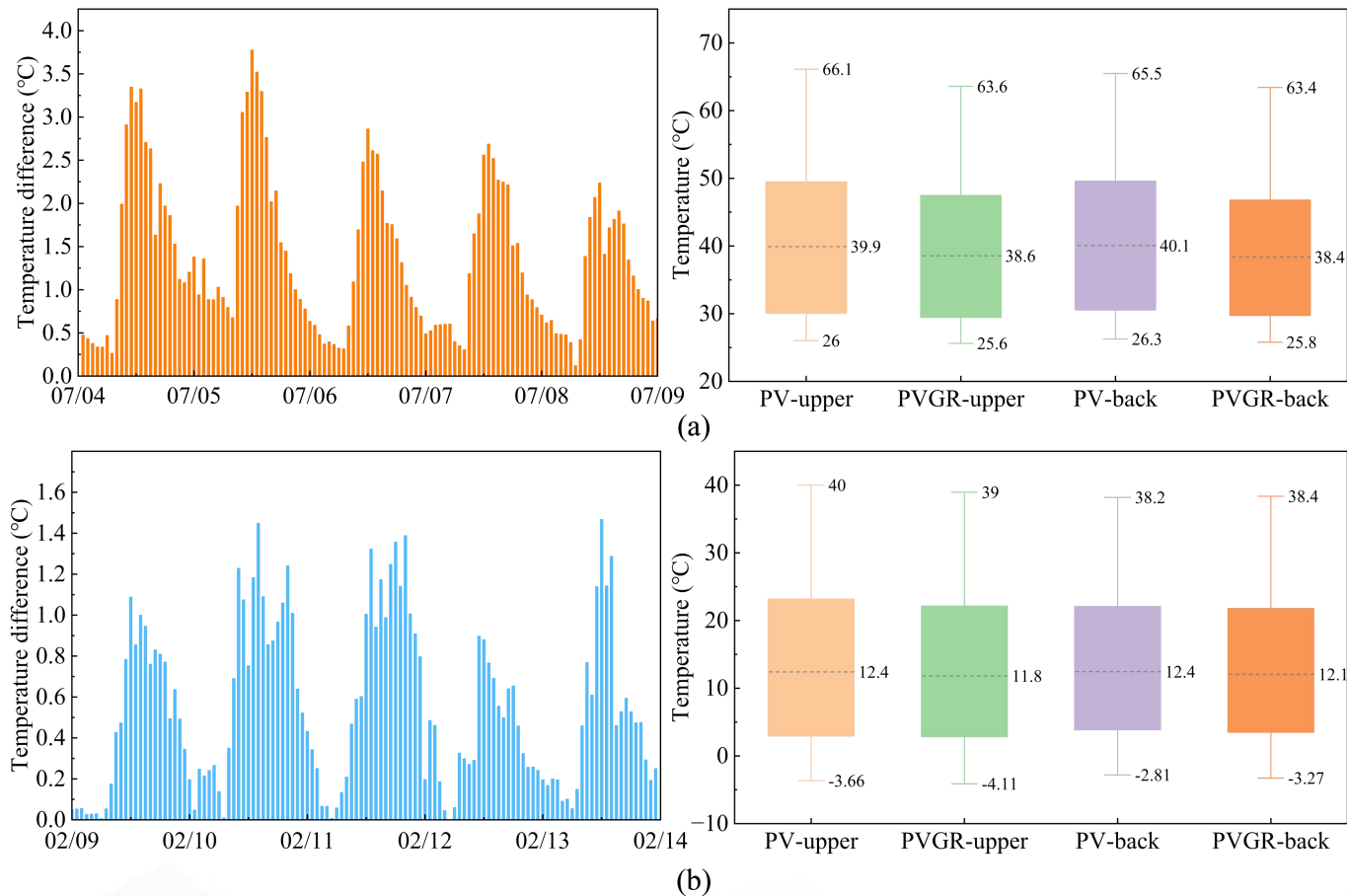


(b) 冬季

- 在夏季，PVGR系统的屋顶围护结构外表面平均温度比光伏屋面、种植屋面和传统沥青屋面分别低 **8.9° C**、**0.7° C** 和 **12.8° C**。
- 在冬季，PVGR系统的屋顶围护结构外表面平均温度比光伏屋面、种植屋面和传统沥青屋面分别低 **3.48°C**、**0.37 °C** 和 **5.48 °C**。

3. 测试结果

◆ 3.2 植被对光伏组件的冷却作用

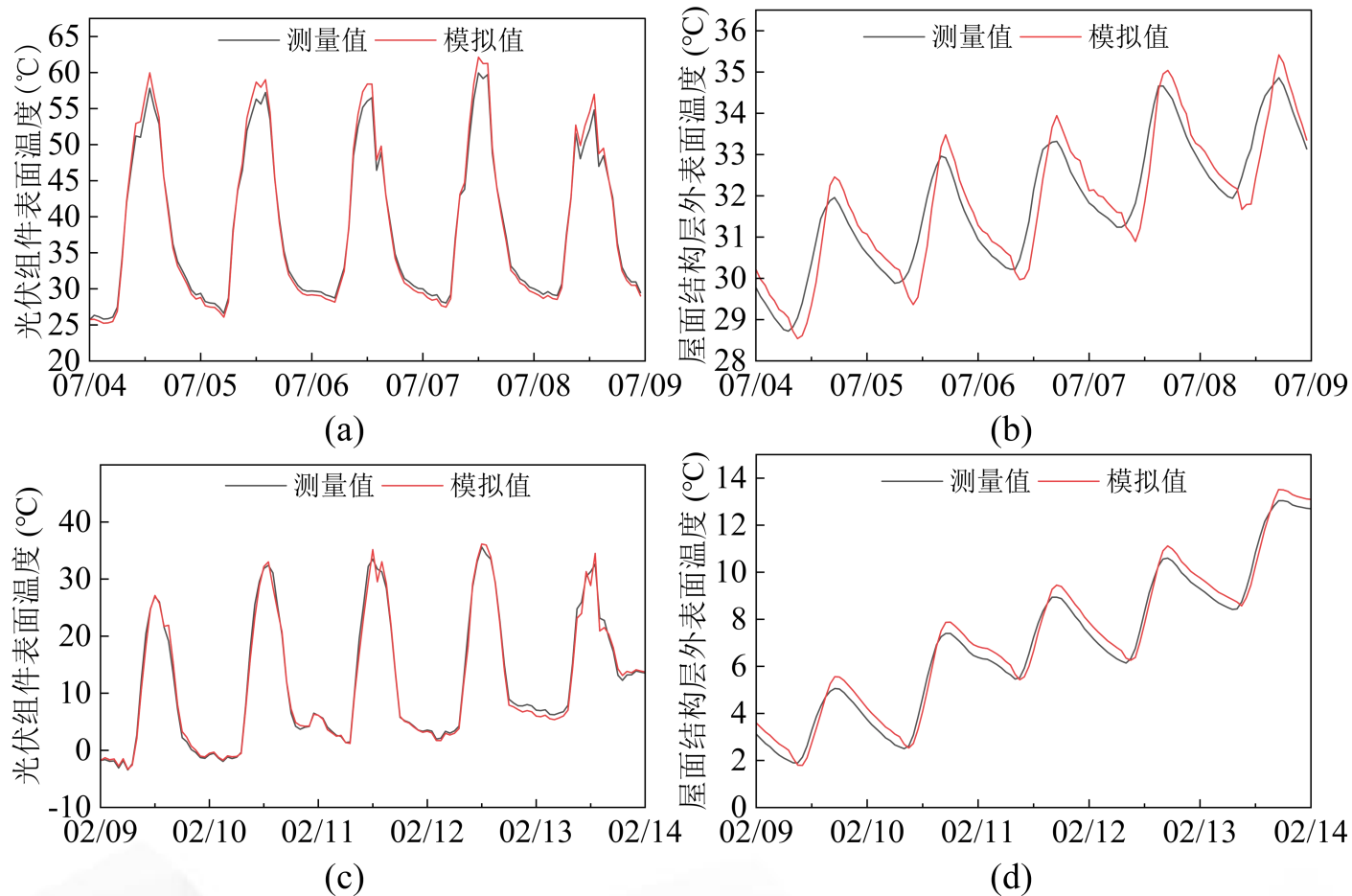


传统光伏屋面与光伏-种植复合屋面光伏组件表面温差与温度箱线图：(a) 夏季，(b) 冬季

- ❑ 植被上方光伏组件平均温度**低于**传统光伏屋面PVR的光伏组件平均温度。
- ❑ 传统光伏屋面PVR和PVGR的光伏组件**最大温差**夏季接近**4°C**，冬季约**1.5°C**。

4. 模拟分析

◆4.1 模型验证和节能效益评估



□ PVGR 模型能够复现光伏-绿化复合屋面光伏组件和围护结构外表面的温度变化

□ $RMSE < 2^{\circ}C$, $R^2 > 0.96$

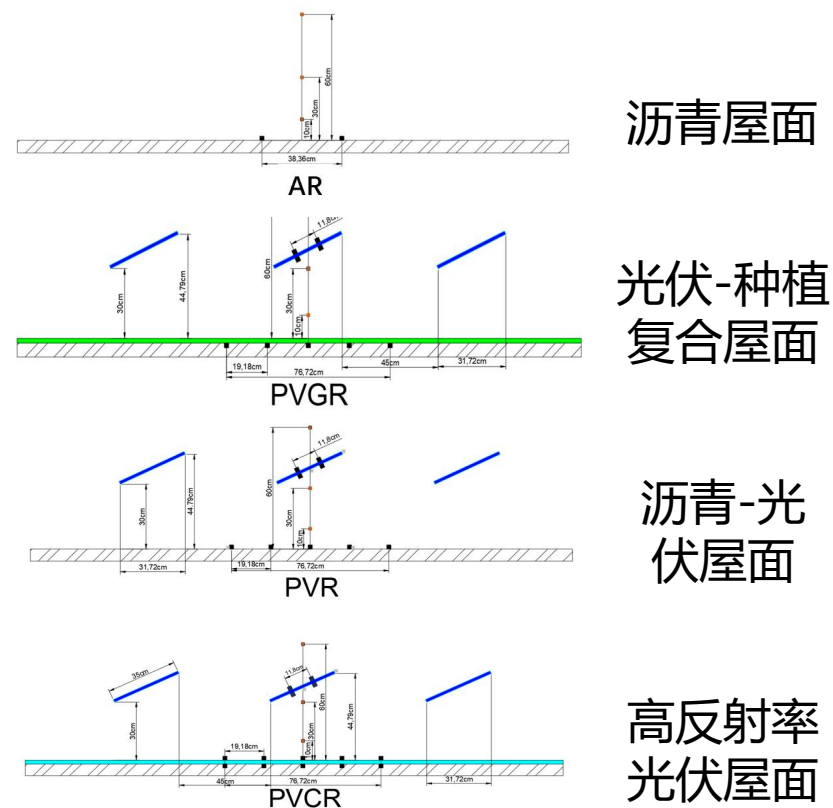
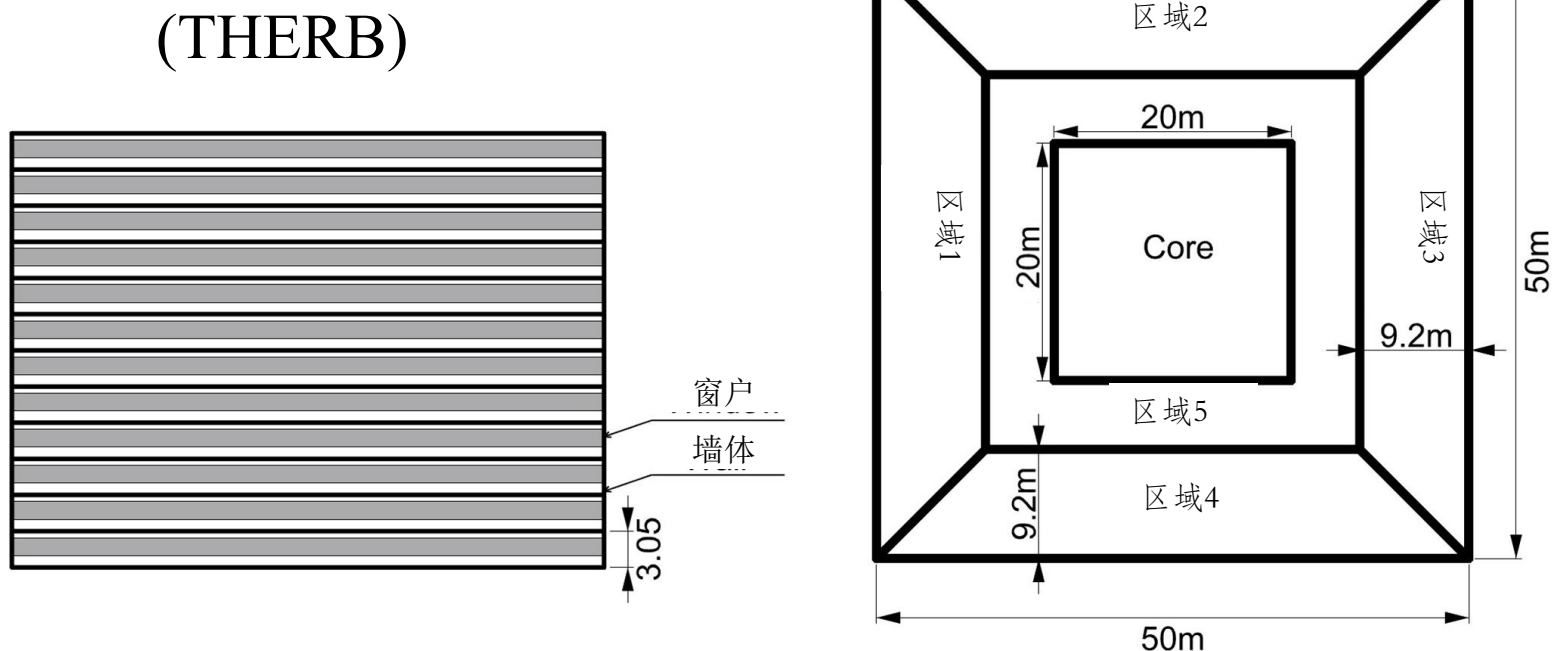
模型验证: (a)(c) 光伏组件表面温度; (b)(d) 屋顶结构层外表面温度

RMSE (PV surface temperature in winter): $1.42^{\circ}C$; $R^2=0.992$; RMSE (Roof deck temperature in winter): $0.73^{\circ}C$; $R^2=0.980$

RMSE (PV surface temperature in summer): $1.66^{\circ}C$; $R^2=0.986$; RMSE (Roof deck temperature in summer): $0.87^{\circ}C$; $R^2=0.963$

4. 模拟分析

◆4.2 模型建立——以典型商业办公建筑为例

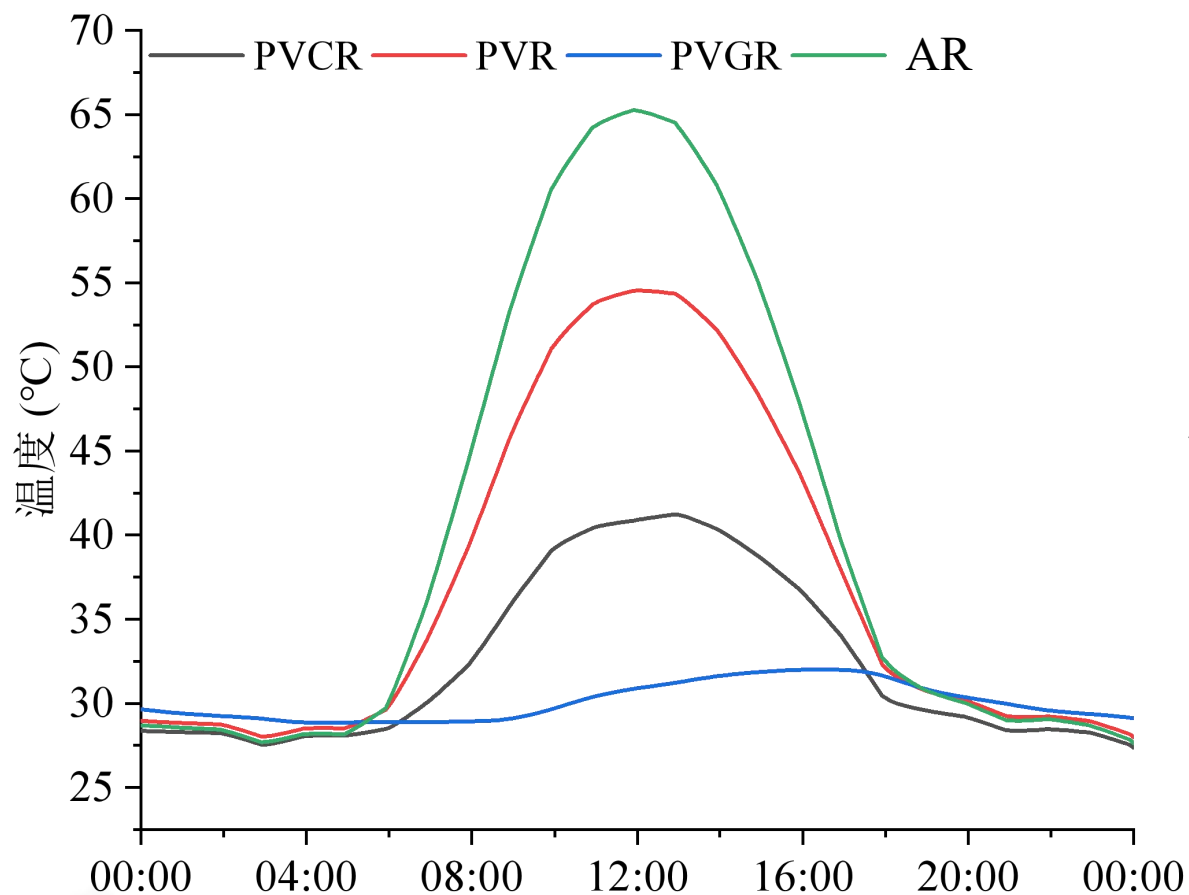


冷屋面: 反照率: 0.87; 长波发射率: 0.9

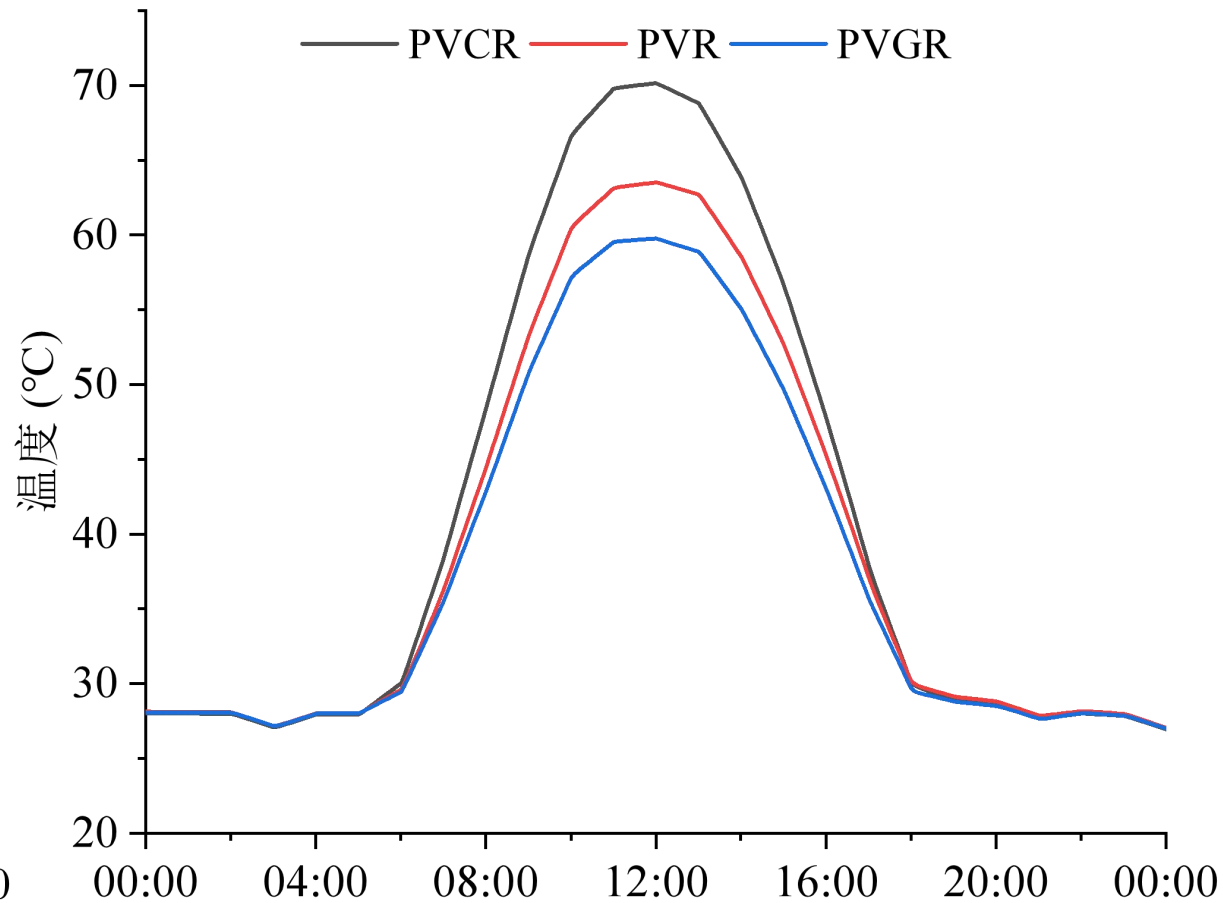
- ◆ 将 PVGR 热过程模型和建筑能耗软件 THERB 进行了耦合, 并进行了全年模拟。
- ◆ 建立一座典型的商业办公建筑的模型, 建筑的热工性能和相关建筑服务数据按照中国《公共建筑节能设计标准》(GB50189-2015) 设定。

4. 模拟分析

◆4.3 夏季和冬季典型日温度分布比较



夏季典型日屋面外表面温度比较

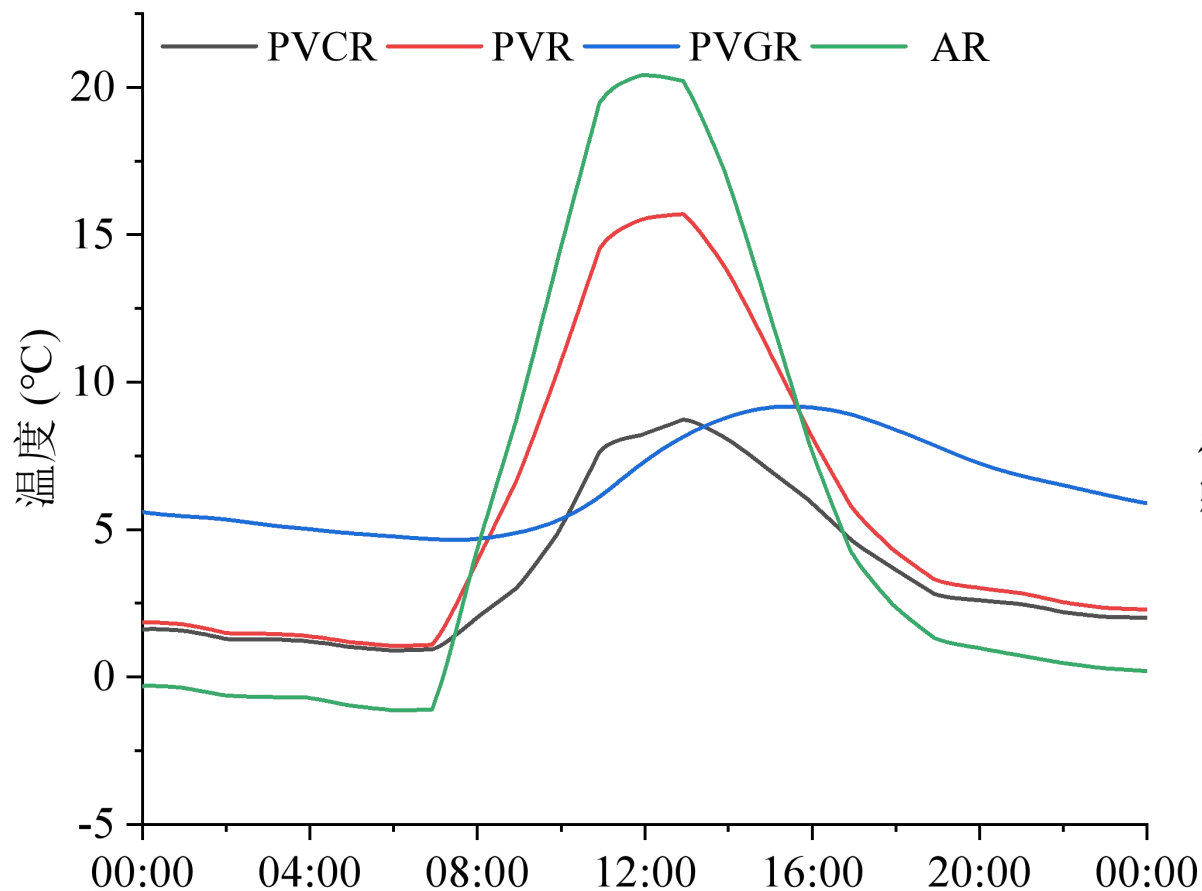


夏季典型日光伏组件平均温度比较

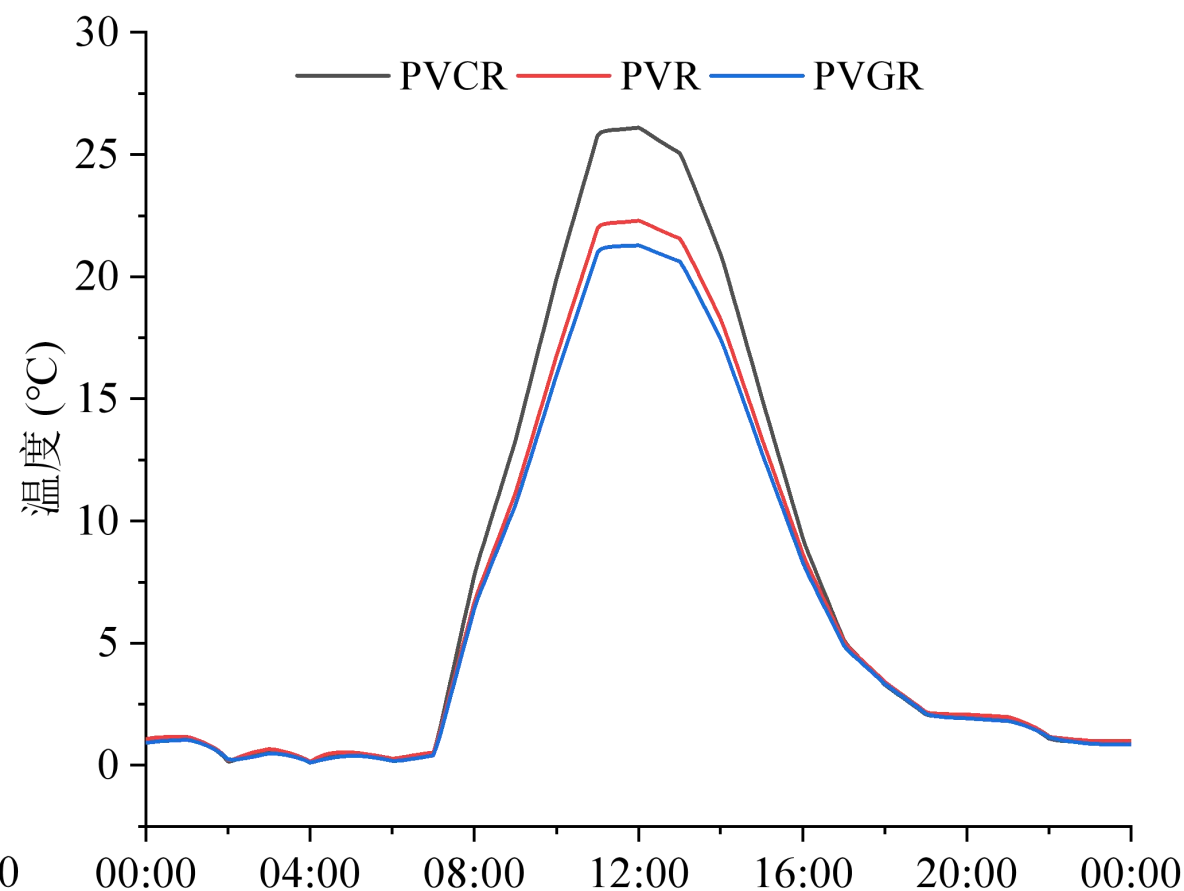
- 夏季PVGR对屋面结构层的降温效果优于PVCr，温度波的延迟时间也最长；
- 夏季PVGR植被对光伏组件的冷却作用在午间较为显著，同时PVCr则表现出升温作用；

4. 模拟分析

◆4.3 夏季和冬季典型日温度分布比较



冬季典型日屋面外表面温度比较

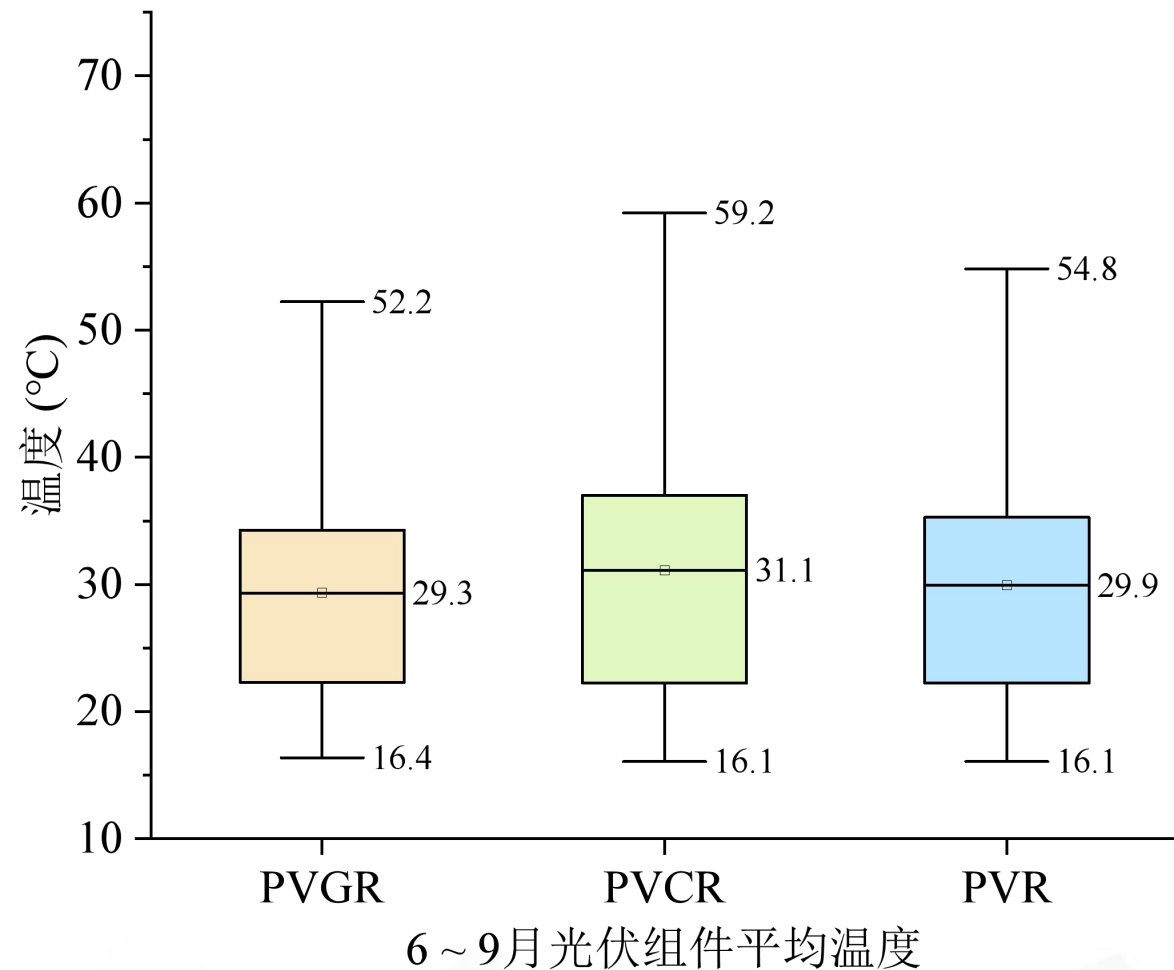
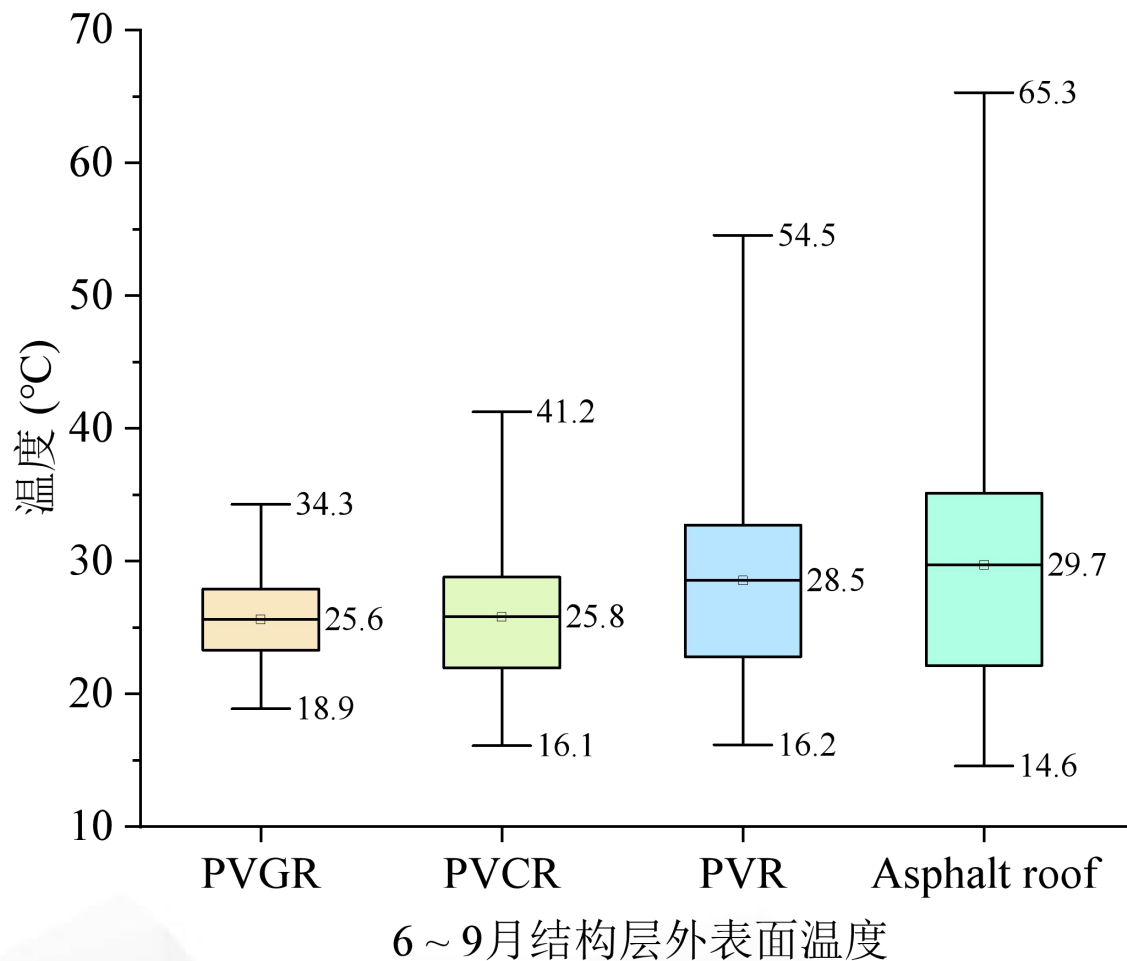


冬季典型日光伏组件平均温度比较

- ❑ 冬季PVGR和PVCR日间表现出冷却作用，但夜间PVGR对屋面的保温效果远优于PVCR；
- ❑ 冬季PVGR对光伏组件的冷却作用较小，PVCR对光伏组件具有一定的升温作用；

4. 模拟分析

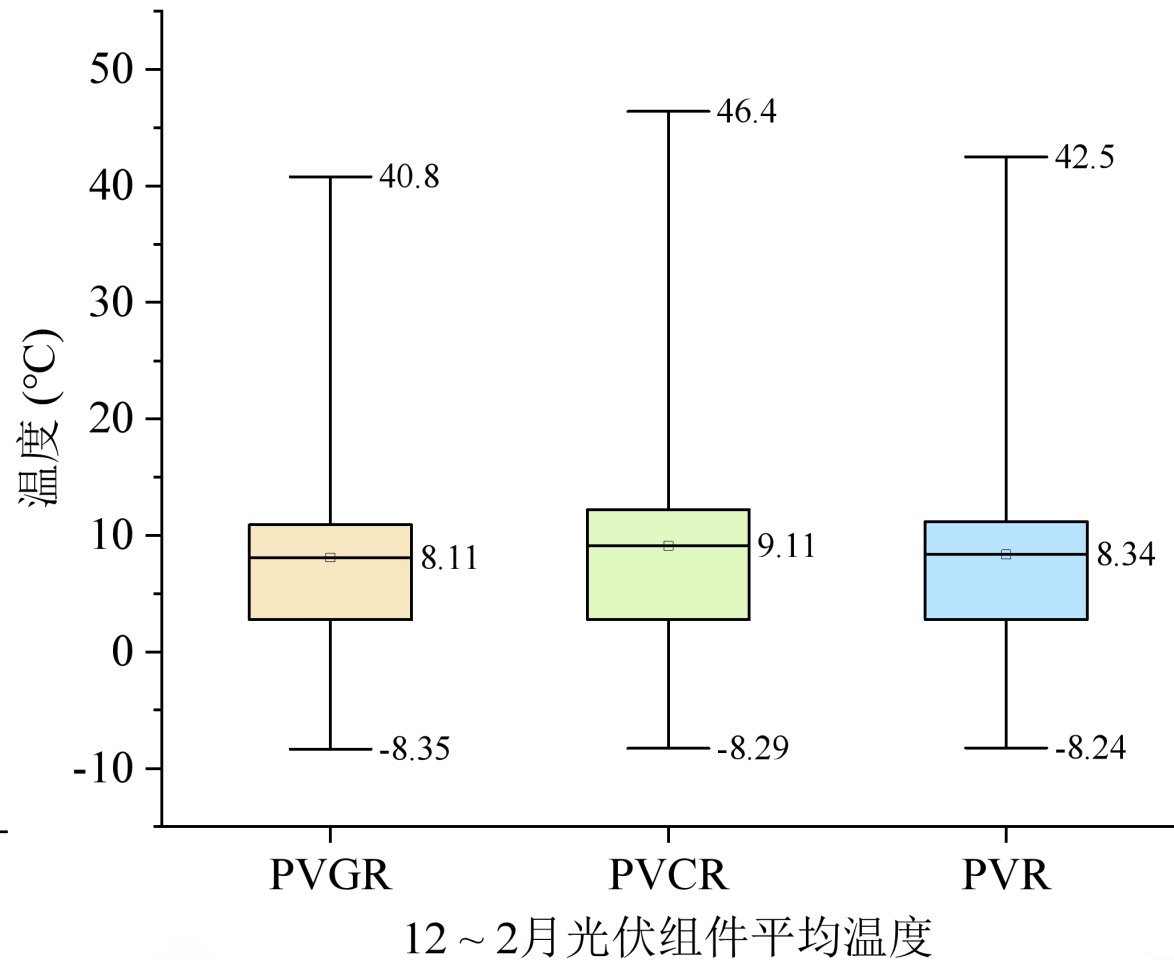
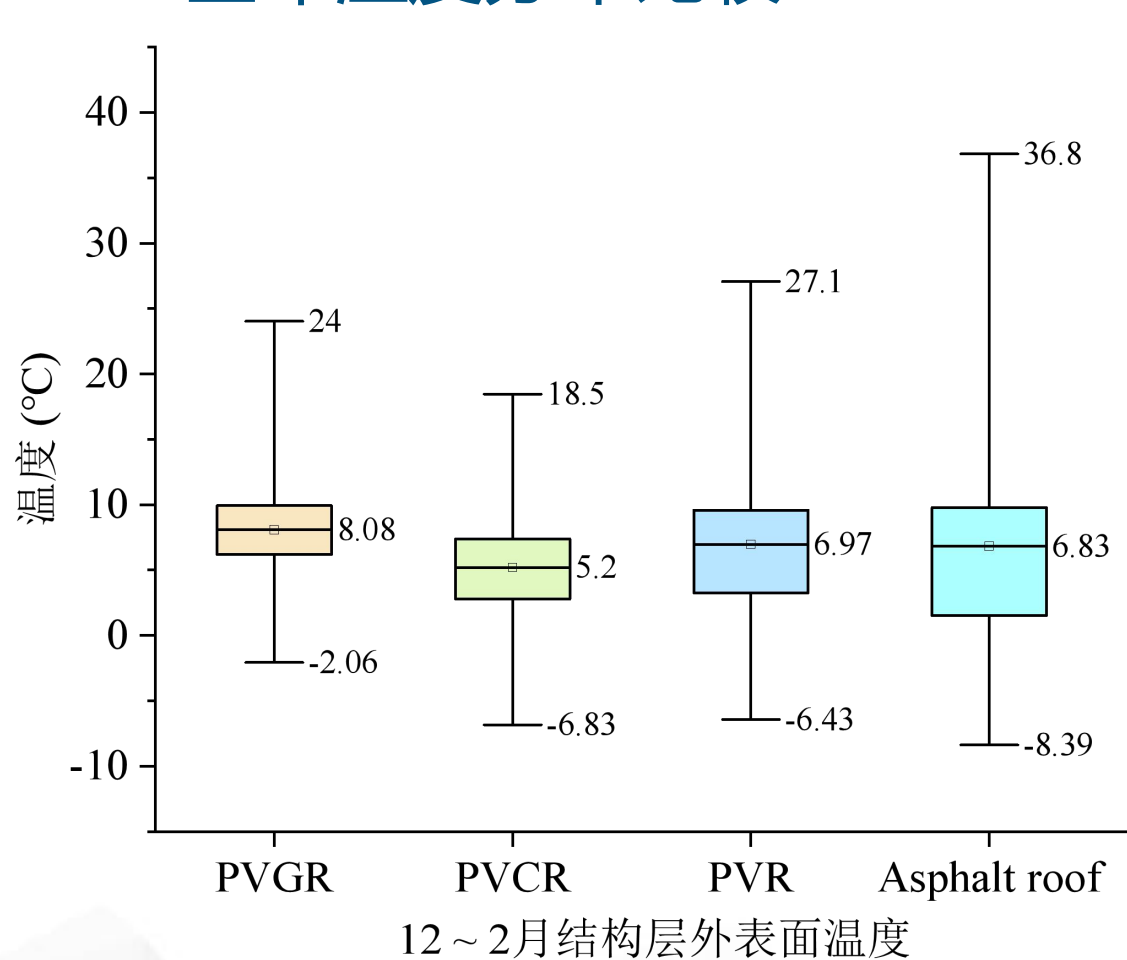
◆4.4 全年温度分布比较



- 夏季总体上PVGR的平均降温效果略优于PVCr, PVGR和PVCr显著优于传统光伏屋面;
- 夏季PVGR对光伏组件平均降温达**0.6°C**, PVCr对光伏组件平均升温达**1.2°C**;

4. 模拟分析

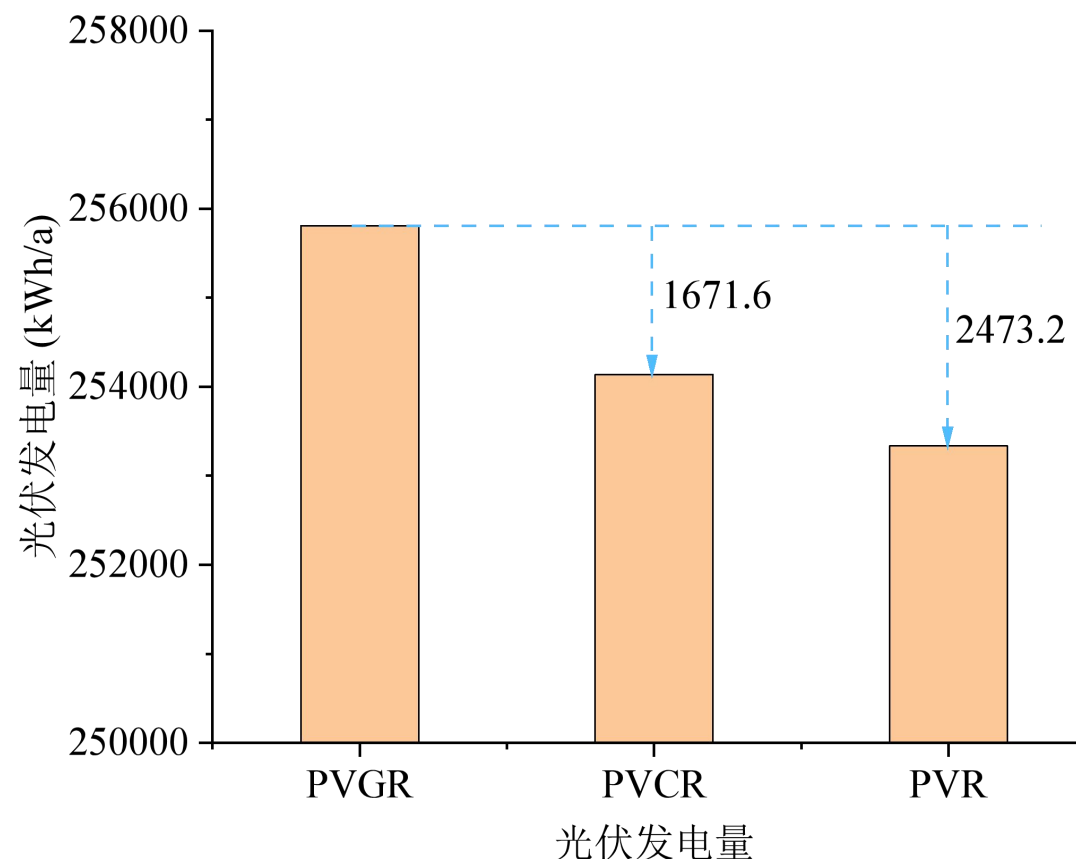
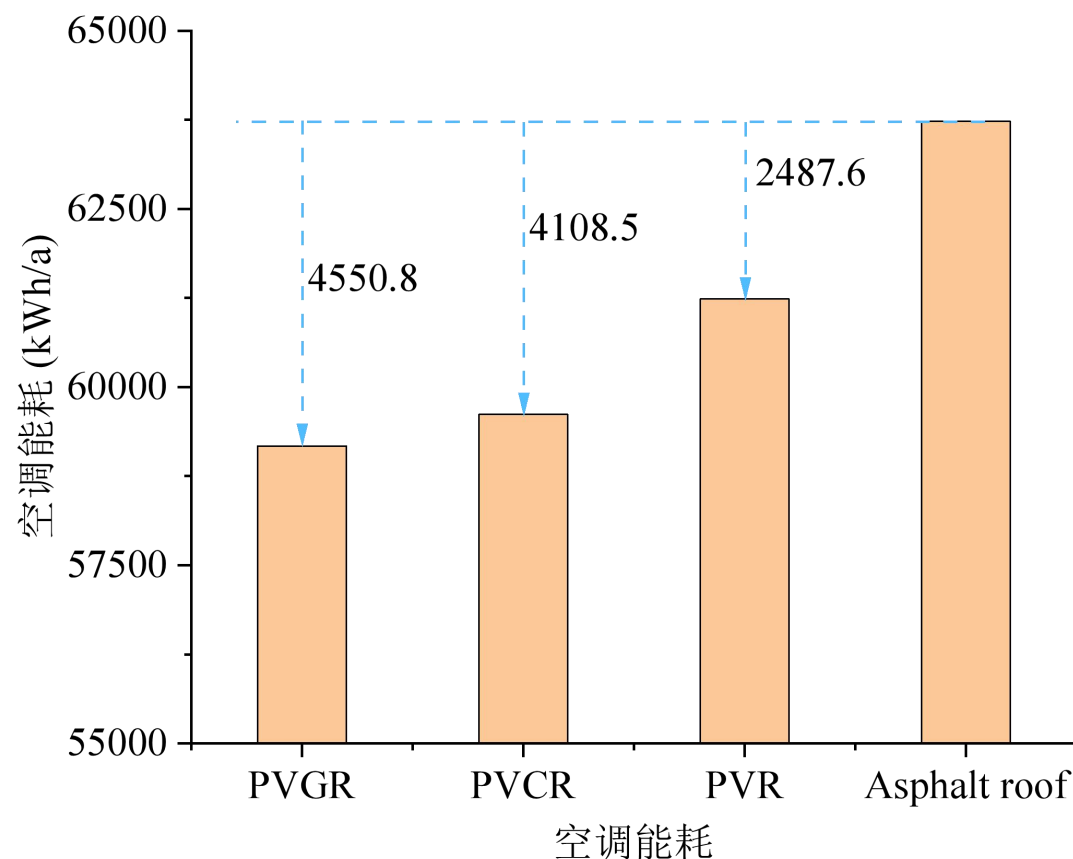
◆4.4 全年温度分布比较



- ❑ 冬季PVGR相对沥青屋面的平均保温效果达**1.25°C**，而PVCr的平均降温作用达到**1.6°C**；
- ❑ 冬季PVCr对光伏组件的平均升温效应达到**0.77°C**，而PVGR的平均降温效应为**0.23°C**；

4. 模拟分析

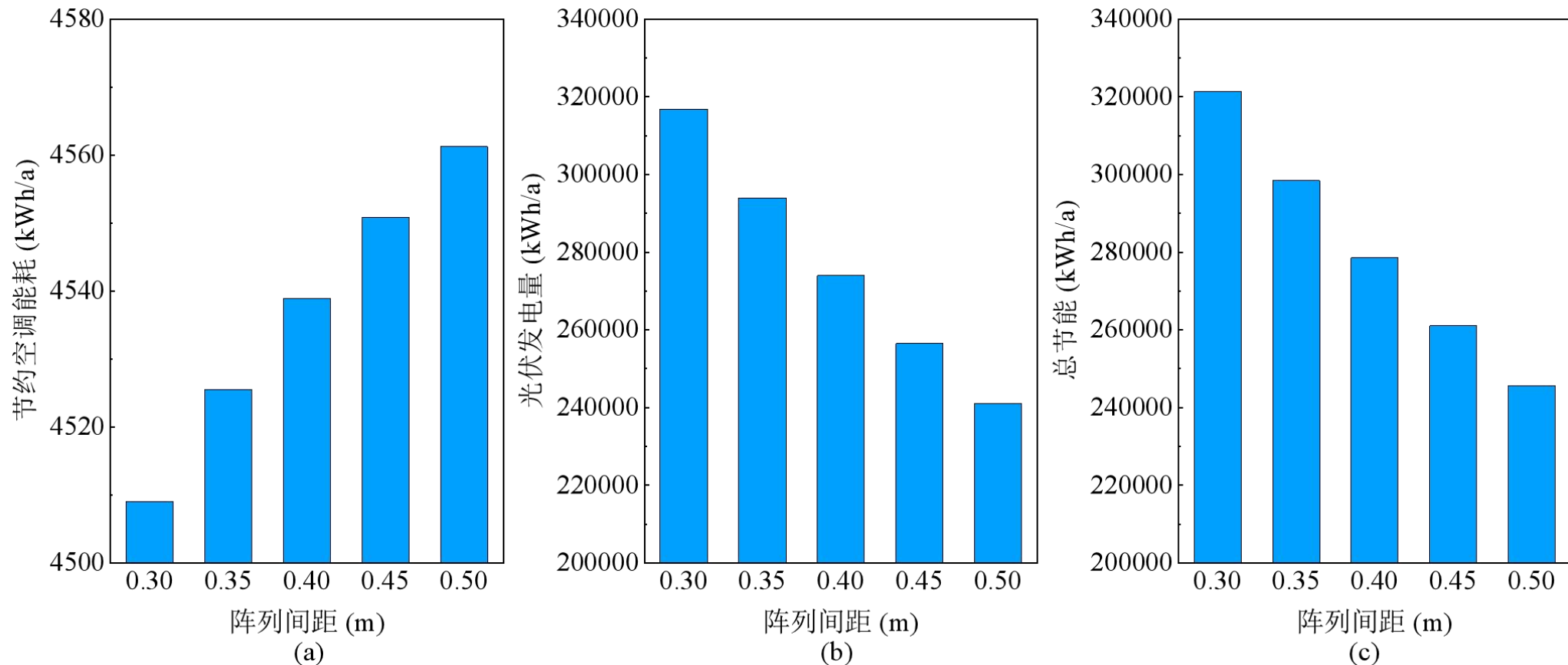
◆4.5 节能效益评估



- 与沥青屋面相比，PVCR屋面每年可节省**4108.5（约1.6度电/m²）**的空调能耗，而PVGR屋顶每年可节省**4550.8kWh（约1.8度电/m²）**的空调能耗。
- PVGR每年光伏发电量比PVR屋顶高**2473.2 kWh**，PVCR则高**1671.6kWh**。

4. 模拟分析

◆4.6 敏感性分析

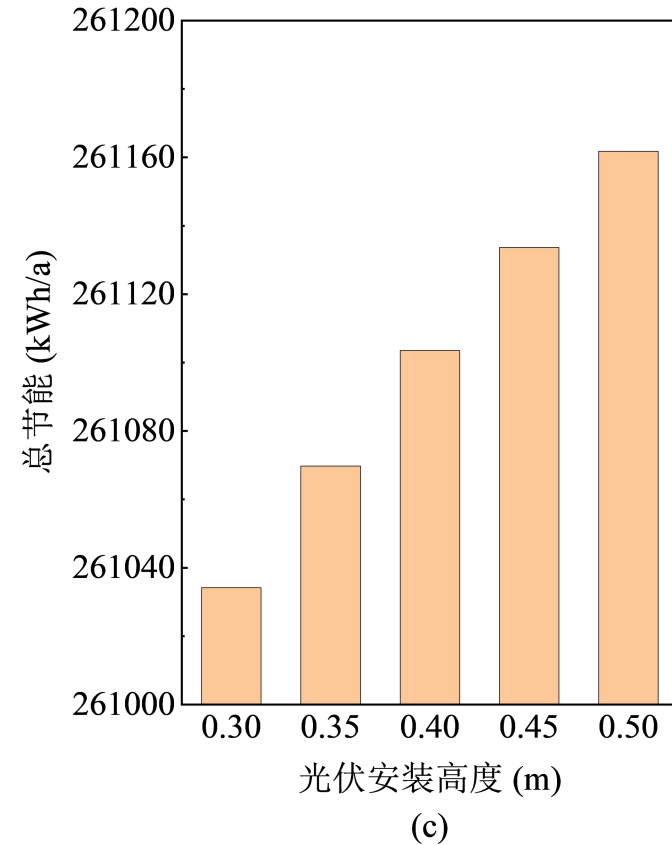
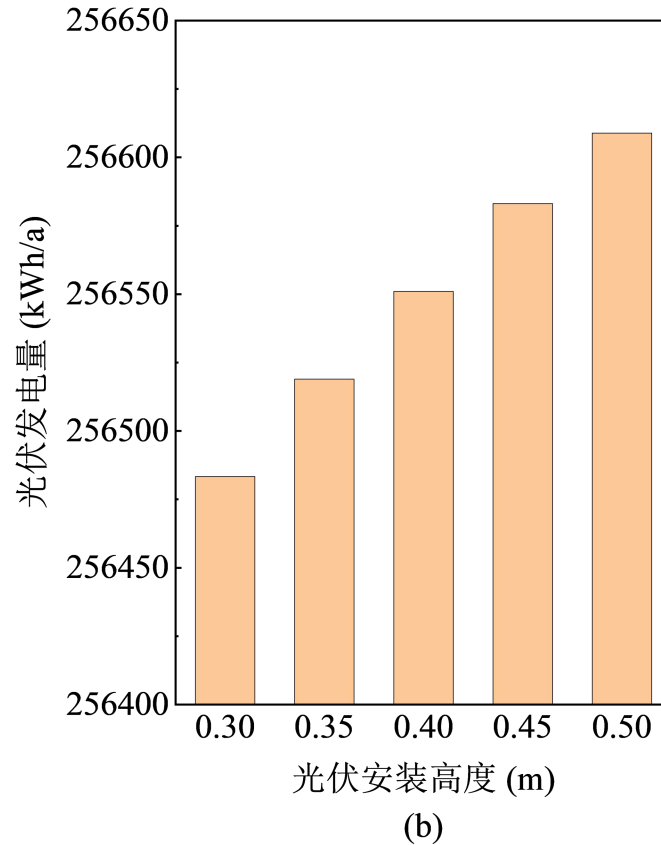
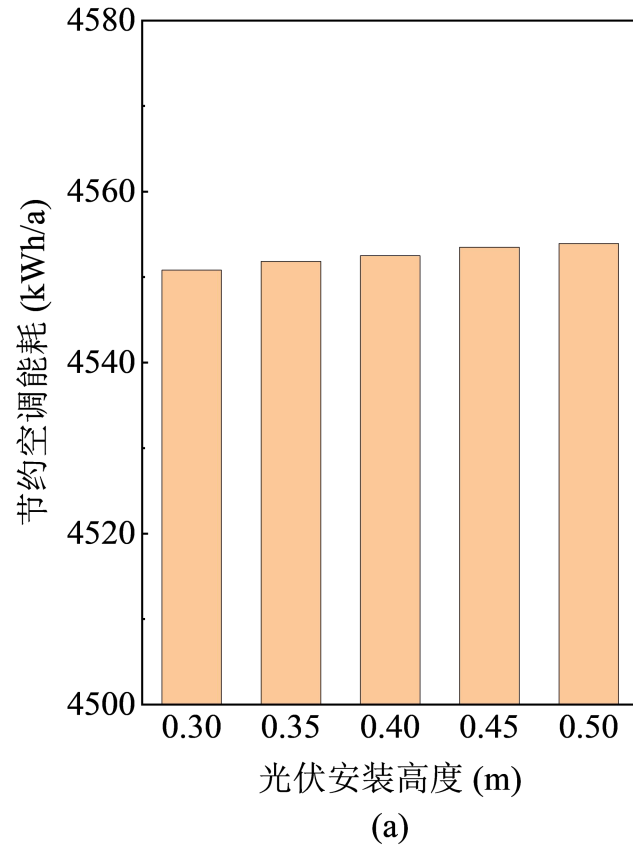


光伏阵列间距对系统的影响：(a) 节约空调能耗，(b) 光伏发电量，(c) 总节能

□ 间距在**0.3m至0.50m**范围内，随着**光伏阵列间距**的增加，仅**节约了少许**的空调能耗，但光伏发电量和总节能量逐渐**减少**。

4. 模拟分析

◆4.6 敏感性分析

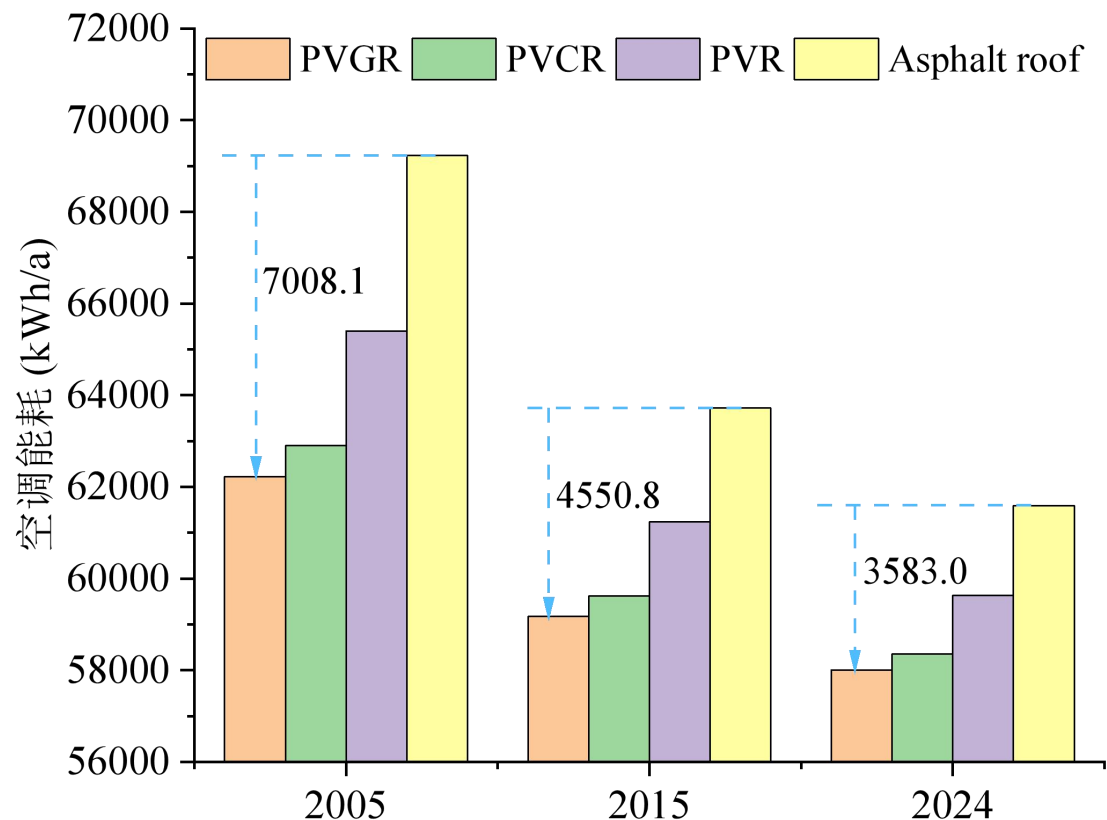


光伏组件安装高度对系统的影响：(a) 节约空调能耗，(b) 光伏发电量，(c) 总节能

□ 在0.3m至0.50m范围内，随着**安装高度**的增加，空调能耗节约量**略微上升**，光伏发电量和总节能量**增加更为显著**。

4. 模拟分析

◆4.7 讨论



不同保温性能条件下三类光伏屋面空调能耗比较

GB50189-**2005**,屋面传热系数 (K值)
为 $0.7 \text{ W/m}^2\text{K}$

GB50189-**2015**,屋面传热系数 (K值)
为 $0.4 \text{ W/m}^2\text{K}$

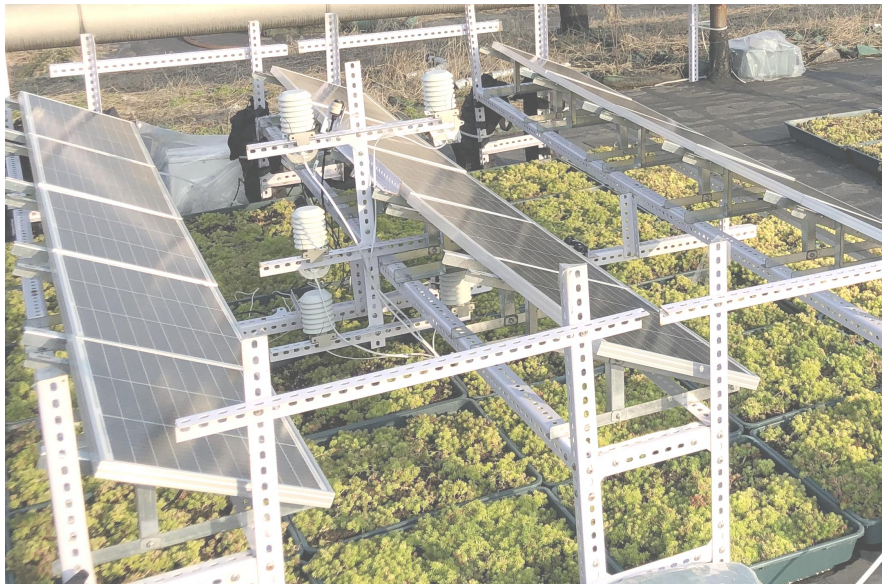
《上海市办公建筑节能限值设计标准》DG/TJ08-2444-2024 规定屋面传热系数 (K值) **为 $0.3 \text{ W/m}^2\text{K}$** 。

□ 随着屋面保温性能的提升, PVGR、PVCR相较于传统屋面的节能优势逐渐减弱。

4. 结论



- ❑ PVGR通过遮阳和蒸散作用降低了建筑屋面温度，同时降低了光伏组件温度；而PVCR虽然降低了建筑屋面温度，但却增加了光伏组件温度；
- ❑ 夏热冬冷地区PVGR在三种屋面中的总节能效果最佳，PVCR的节能效果总体优于传统光伏屋面；
- ❑ 敏感性分析表明，优化光伏组件的间距和安装高度可以进一步提升系统效率；PVGR、PVCR对既有建筑的节能效果随建筑屋面保温效果的提高而降低；



欢迎各位专家批评指正!