

一体化光伏围护结构对室外微气候和建筑能耗的影响研究

Study on the Coupling Effects Between Outdoor Microclimate and Building Energy Consumption for BIPV Buildings

黄梦怡 陈逸晨 樊一帆* 葛 坚

HUANG Mengyi CHEN Yichen FAN Yifan* GE Jian

(浙江大学建筑工程学院, 杭州 310058; 浙江大学绿色建筑与低碳城市国际研究中心, 海宁 314400)

(College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang, China, 310058; International Research Center for Green Building and Low-Carbon City, International Campus, Zhejiang University, Haining, Zhejiang, China, 314400)

文章编号: 1000-0283(2025)09-0044-10

DOI: 10.12193/j.laing.2025.09.0044.006

中图分类号: TU986

文献标志码: A

收稿日期: 2025-04-30

修回日期: 2025-07-23

摘要

在“双碳”目标下, 光伏建筑一体化(BIPV)技术成为建筑低碳化转型的关键。然而, 其性能表现高度依赖气候条件, 不同气候区BIPV对建筑围护结构热工性能和室外微气候的影响及其产能的分析仍缺乏综合量化结果。基于BIPV物理模型, 建立了考虑光伏影响的计算流体力学(CFD)和建筑能耗模拟(BES)耦合模型。以严寒(哈尔滨)、夏热冬冷(杭州)和夏热冬暖(广州)三个地区典型城市为研究对象, 在保持建筑表面反射率(0.3)与光伏等效反照率(0.3)一致的条件下, 量化评估BIPV的影响。结果表明: (1) BIPV表面温度低于表面反照率为0.3的无BIPV的建筑表面温度, 从而降低建筑室外的平均辐射温度(MRT)。冬季哈尔滨、杭州和广州峰值MRT分别降低0.62°C、0.74°C和0.74°C, 对应平均通用热气候指标(UTCI)最大降幅达0.21°C、0.47°C和0.46°C, 但对平均气温(AT)的调节较弱(降幅 \leq 0.08°C)。(2) BIPV铺设后, 日间时段UTCI降幅随太阳辐射增强而提升, 至辐射峰值时段14:00, 广州夏季UTCI最大波动达-0.70°C。(3) 不同气候区通过太阳辐射强度和气候条件分别影响光伏发电量和建筑冷热负荷。夏季哈尔滨太阳辐射强度高、制冷负荷低, 发电量为104.1 Wh/m², 建筑能耗为257.2 Wh/m², 能源自给率达40.5%, 高于杭州(30.5%)和广州(19.7%)。研究结果为在不同气候区应用BIPV技术提供理论支撑。

关键词

光伏建筑一体化; 不同气候区; 室外微气候; 发电量; 建筑能耗

Abstract

Under the objectives of the “dual carbon” initiative, building-integrated photovoltaic (BIPV) technology has emerged as a pivotal strategy for facilitating the low-carbon transformation of building infrastructure. Nevertheless, the efficacy of BIPV systems is significantly influenced by climate conditions. A comprehensive quantitative analysis quantifying the impact of BIPV on the thermal performance of building envelopes, outdoor microclimates, and energy production across diverse climate zones remains insufficient. This research develops a coupling model grounded in the physical framework of BIPV, incorporating Computational Fluid Dynamics (CFD) and Building Energy Simulation (BES) methodologies to evaluate the effects of PV. Harbin (a severe cold region), Hangzhou (a hot-summer and cold-winter region), and Guangzhou (a hot-summer and warm-winter region) are selected as representative cities. The simulation presumes a consistent surface reflectance and an equivalent albedo of 0.3 for BIPV surfaces. The findings indicate that: (1) BIPV-enabled envelopes exhibit lower temperatures compared to non-BIPV counterparts with identical albedo, resulting in a reduction of outdoor mean radiant temperatures (MRT). In winter, after BIPV installation, peak MRTs in Harbin, Hangzhou, and Guangzhou decrease by 0.62°C, 0.74°C, and 0.74°C, respectively. Correspondingly, the maximum reduction in the Universal Thermal Climate Index (UTCI) reaches 0.21°C, 0.47°C, and 0.46°C. The influence on the average air temperature (AT) is marginal, with decreases not exceeding 0.08°C. (2) After BIPV installation, the daytime UTCI reduction correlates with enhanced solar irradiation, reaching a maximum of -0.70°C during peak isolation around 14:00 in Guangzhou. (3) In different climate zones, solar irradiance and local climate conditions jointly influence PV power generation and building cooling/heating loads. In summer, Harbin experiences high solar irradiance and low cooling demand, achieving 104.1 Wh/m² of power generation and 257.2 Wh/m² of energy consumption. This results in an energy self-sufficiency rate of 40.5%, surpassing that of Hangzhou (30.5%) and Guangzhou (19.7%). These results provide foundational insights to support the deployment of BIPV technology across diverse climatic zones.

Keywords

building integrated photovoltaics; different climate zones; outdoor microclimate; power generation; building energy consumption

黄梦怡

2001年生/女/浙江温州人/在读硕士研究生/研究方向为建筑环境与绿色健康建筑

陈逸晨

1999年生/女/湖北武汉人/硕士/研究方向为建筑环境与绿色健康建筑

樊一帆

1990年生/男/河北唐山人/博士/百人计划研究员/研究方向为绿色低碳健康建筑与城市、城市气候

*通信作者 (Author for correspondence)

E-mail: yifanfan@zju.edu.cn

基金项目:

浙江省“尖兵领雁”研发攻关计划“夏热冬冷地区低碳建筑关键技术与装备研究及其示范”(编号: 2023C03152); 中央高校基本业务费(编号: 226-2024-00212)

建筑业碳排放量占全球总碳排放量的37%^[1], 亟需通过技术创新推动建筑低碳转型。另外, 城市热环境的恶化可导致室外公共空间使用受限, 迫使居民转向室内活动, 从而进一步增加建筑能耗^[2]。在“双碳”目标下, 建筑光伏一体化 (Building Integrated Photovoltaic, BIPV) 技术通过将光伏组件集成到围护结构中, 能够有效利用太阳能资源, 减少对传统能源的依赖, 成为实现建筑低碳化转型的重要路径。中国在政策层面大力推动光伏建筑的发展。例如, 国家发展和改革委员会下发的《城乡建设领域碳达峰实施方案》中表示争取新建公共建筑屋顶光伏覆盖率不低于50%, 并鼓励立面光伏系统的应用^[3]。

BIPV技术能通过光伏发电减少建筑对传统电网用能的需求, 但是其产能受地理位置 (太阳辐照度)、城市形态 (建筑遮挡) 以及光伏铺设方式等因素影响, 因此BIPV的产能在不同地区表现存在差异^[4]。此外, BIPV技术通过改变建筑围护结构热工性能 (如吸收率、反射率和导热系数) 影响建筑的冷热负荷^[5], 从而改变建筑能耗。建筑围护结构热工性能的改变还会通过改变建筑与环境的热交换量, 对城市热环境产生影响。建筑能耗变化, 导致人为热排放改变, 影响城市气候; 城市气候的改变又会影响建筑冷热负荷, 形成复杂的耦合关系, 这些耦合关系在不同气候区展现不同特征^[6]。然而, 现有研究多聚焦单一气候区光伏铺设对建筑能效和室外微气候的影响^[7-9], 缺乏不同气候区在同一研究框架下的量化对比。

为了研究BIPV在不同气候条件下对室外热环境与建筑能耗的动态耦合影响, 并精确评估光伏系统的综合效益, 本研究采用双向耦合方法进行模拟^[7]。本研究建立了基于计算流体力学 (Computational Fluid Dynamic, CFD) 模型与建筑能耗模拟 (Building Energy Simulation, BES) 模型的耦合模型。CFD-BES耦合模型可以同步模拟建筑表面热传递、空调废热排放与室外流场之间的交互, 从而量化分析光伏系统在不同气候区的适应性、对微气候的影响及其对建筑净能耗的降低效应^[7]。

基于此, 以严寒、夏热冬冷、夏热冬暖地区典型城市为研究对象, 建立CFD-BES双向动态耦合模型, 量化分析一体化光伏围护结构在不同气候条件下对室外微气候与建筑净能耗影响, 进而为未来一体化光伏技术应用提供理论支持。

1 研究方法

1.1 案例选取与研究工况

由于办公建筑日间用电高峰时段与光伏发电时段高度重合, 且设计参数标准化程度高, 以办公建筑为研究对象, 基于相关规范, 建立

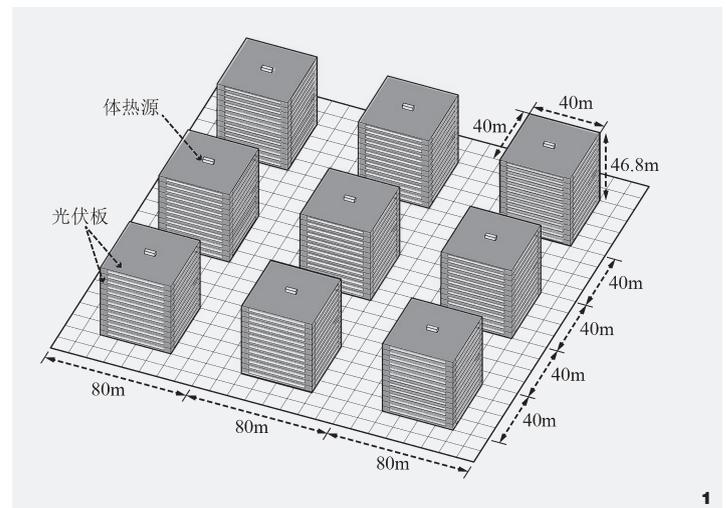


图1 建筑及地块布局示意图
Fig. 1 Building and site layout schematic diagram

3×3网格布局的点式建筑群模型来代表一个典型城市街区^[9], 单体建筑尺寸为40 m×40 m×46.8 m (13层), 地块大小为240 m×240 m (图1)。为模拟建筑空调废热排放, 本文采用更为普遍使用的集中式空调系统, 在每个建筑物顶层中心设置室外机。

基于中国气候分区的梯度覆盖特征及典型城市热工需求^[10], 研究区域选取哈尔滨市、杭州市和广州市, 分别作为严寒、夏热冬冷和夏热冬暖地区的典型城市。经前期辐射资源评估, 三地全年总辐射量均在1 050~1 400 kWh/(m²·a)^[11], 根据《太阳能资源评估方法》, 可归类为太阳能资源丰富区, 具备技术可行性。

在考虑到全年模拟的高计算成本, 每个城市在夏冬两季各选取一个典型气象日进行模拟计算和分析, 以明确其日变化和季节变化的差异性。采用中国标准气象数据 (CSWD) 中的EPW文件作为模拟的气象边界条件, 该文件包含基于多年实测数据构建的典型气象年数据。典型日的选取基于其辐射、温湿度日变化趋势与对应季节典型周平均值的接近程度, 并确保为晴天 (冬季无降雪), 以减少干扰因素。模拟时段均为0:00-24:00, 即模拟时长为24 h。综上, 研究工况共确定12种, 具体工况如表1所示。鉴于本研究的重点在于分析一体化光伏围护结构对室外微气候与建筑能耗的影响机制, 为控制变量、增强不同气候区模拟工况的可比性, 对三座城市建筑外表面反射率进行统一设定。该设定虽在一定程度上简化了现实城市在外立面材质和色彩上的差异性, 但在结果分析中主要关注相对变化趋势, 故此设定仍具有比较分析意义。

表1 基于不同气候区的工况及参数设置
Tab. 1 Climate zone-based simulation cases and parameter settings

算例 Case	城市 City	季节 Season	典型气象日 Typical weather day	BIPV 围护结构 BIPV structure	表面反射率 / 等效反照率 Surface/equivalent albedo	盛行风向 Prevailing wind direction	风速 m/s Wind speed
Case 1	哈尔滨	夏季	6月25日	无	0.3	SSW	3.9
Case 2				有	0.1/0.3		
Case 3		冬季	12月13日	无	0.3	SW	
Case 4				有	0.1/0.3		
Case 5	杭州	夏季	6月30日	无	0.3	SW	2.9
Case 6				有	0.1/0.3		
Case 7		冬季	2月11日	无	0.3	N	
Case 8				有	0.1/0.3		
Case 9	广州	夏季	9月11日	无	0.3	SSE	2.3
Case 10				有	0.1/0.3		
Case 11		冬季	3月15日	无	0.3	NNE	
Case 12				有	0.1/0.3		

1.2 CFD-BES耦合模型及参数设置

室外微气候和建筑能耗之间存在非线性的双向动态耦合关系^[7]。在建立CFD-BES耦合模型时, 采取双向动态耦合策略, 通过每个时间步长多次迭代计算确保模型收敛, 从而保证结果的准确性。

耦合模型基于Rhino+Grasshopper平台开发, 以Honeybee和Butterfly两个插件为基础, 如图2所示。Honeybee连接EnergyPlus进行能耗模拟, 将模拟得到的建筑外表面温度、地表温度和空调系统废热排放量作为边界条件和热源输入到Butterfly调用的OpenFOAM中, Butterfly再模拟输出室外温度场和风场, 分别提取1.5 m的平均温度和10 m高度处的平均风速生成新的气象文件, 再输入Honeybee。CFD-BES模型按照上述流程迭代模拟, 将最终收敛的数据用以计算得到最终的室外微气候和建筑能耗。本研究的收敛标准设置为, 在多轮迭代之间, 所有建筑外表面温度和空气温度的变化率< 1%。

1.2.1 CFD模型设置与验证

在CFD模拟中, 假定室外气流为不可压缩稳态流体, 室外气流遵循质量、动量和能量守恒定律, 其控制方程见公式(1) - (3)^[12]。

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_j u_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] + g_i(1 - \beta(T - T_0)) \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (u_j T) = \frac{\partial}{\partial x_k} \left(K_T \frac{\partial T}{\partial x_k} \right) + \dot{S}(T) \quad (3)$$

式中, ρ 为流体的密度 (kg/m^3); x_i 、 x_j 、 x_k 为空间坐标轴第*i*、*j*、*k*个方向, 表示偏导数与速度分量所在方向; u_i 、 u_j 、 u_k 为流体*i*、*j*、*k*方向的分速度 (m/s); p 为流体的静压 (Pa); μ 为动力粘度 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$); δ_{ij} 为Kronecker delta函数 (对于*i=j*, $\delta_{ij}=1$; *i≠j*, $\delta_{ij}=0$); g_i 为*i*方向的重力加速度 (m/s^2); β 为流体的体膨胀系数 (K^{-1}); T 、 T_0 为流体的温度和参考温度 (K); K_T 为热扩散率 (m^2/s); $\dot{S}(T)$ 为体热源项 (W/m^3), 即建筑空调室外机排放到环境中的废热。

针对城市室外微气候的复杂物理条件, 采用RANS方法中的Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型, 该模型已通过城市区域CFD模拟验证^[13]。对于边界条件, 入流边界处的地面法向流速(u)、湍流动能(k)和湍流耗散率(ϵ), 计算见公式(4) - (6)^[14]。

$$u = \frac{u^*}{\kappa} \ln \left(\frac{z-d+z_0}{z_0} \right) \quad (4)$$

$$k = \frac{(u^*)^2}{\sqrt{C_\mu}} \quad (5)$$

$$\epsilon = \frac{(u^*)^3}{\kappa(z-d+z_0)} \quad (6)$$

式中, u^* 为摩擦速度 (m/s); κ 为卡门常数, 通常取值为0.41; C_μ 为模型经验常数, 通常取值为0.09; z 为地面法线坐标分量 (m); z_0 为粗糙度长度 (m); d 为位移高度 (m)。

出流边界采用出流 (Outflow) 边界条件; 计算域顶部及侧边设置为对称 (Symmetry) 边界; 建筑表面和地面设置无滑移 (No-slip) 边界条件, 其温度值由BES模拟结果提供。对于计算域内风场的设定, 各个Case的背景风速和风向根据《民用建筑绿色性能计算标准》设置, 具体如表1所示。

根据城市CFD模拟最佳实践指南^[9,15], 建筑群迎风面、侧面和顶面到计算域边界的距离均为5H, 建筑群背风面与计算域出流边界的距离为15H, 其中单位H为建筑高度46.8 m, 如图3-a所示。计算域采用六面体网格划分。由于行人高度区域是研究重点, 该区域网格进行了加密处理, 图3-b和3-c展示了基准网格与加密后的网格对比, 网格总数为410万。

为保证后续数值模拟结果的准确性, 选取日本建筑师协会行人风环境风洞试验中的Case C进行模型验证^[9]。该案例由9个尺寸相同的立方体 (边长0.2 m) 组成, 排列方式同本研究, 各街谷高宽比为1:1, 已被多篇文献^[16-17]证实其在行人风环境CFD验证的的可靠性。风速比 (V_R) 满足计算公式 (7):

$$V_R = U_i / U_{inlet} \quad (7)$$

式中, U_i 为高度0.02 m处各测点的风速值, U_{inlet} 为高度0.02 m处的入流风速值。

将距离地面0.02 m高度处120个测点的风速比模拟结果与风洞试验数据进行比对, 如图4所示。结果显示, V_R 在大于0.6的测点位置, 模拟值与测量值拟合得较好; 而在 V_R 小于0.5的测点位置, 模拟结果与实测值存在一定偏差, 这些测点主要分布在气流不稳定的建筑尾流区域。整体模拟结果均方根误差 (RMSE) 为0.19, 与其他使用相同实验数据的结果一致^[9], 验证了本数值模拟的可靠性。

考虑到本文核心分析指标与温度场高

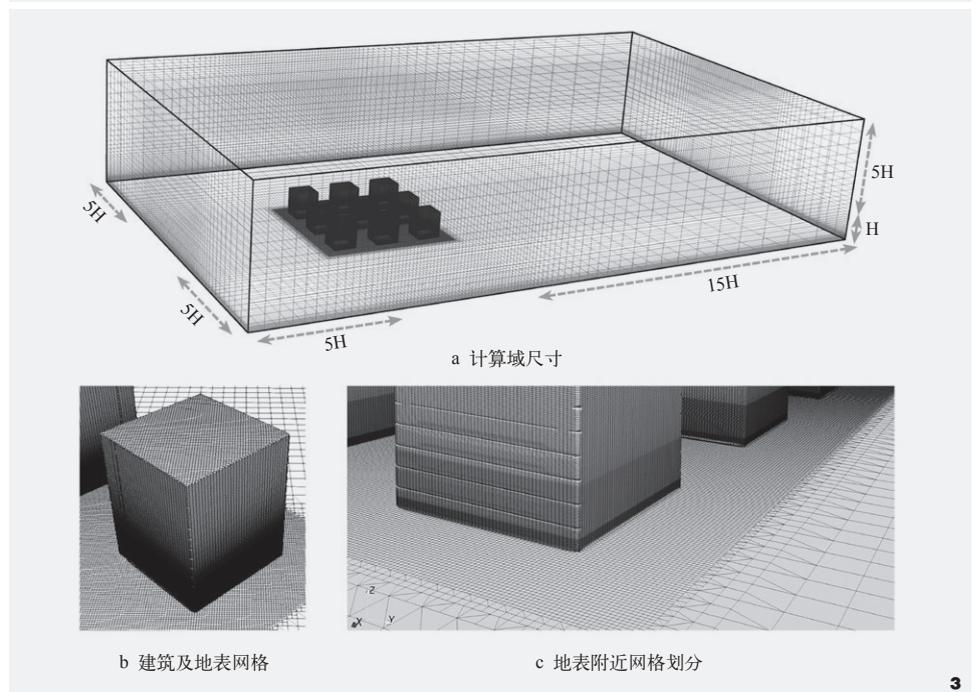
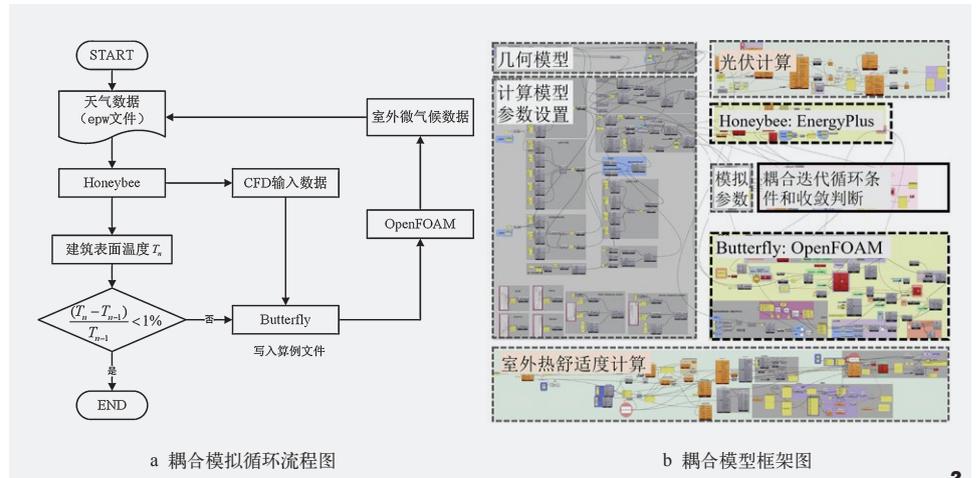


图2 CFD-BES动态耦合模型流程及框架图
Fig. 2 CFD-BES dynamic coupling model flowchart and framework
图3 CFD计算域与网格划分
Fig. 3 Computational domain and grid for CFD simulation

度相关, 为进一步验证CFD模型对温度变化的模拟可靠性, 本研究进行了浮力主导下的温度场验证。选用Blay等^[9]在自然对流条件下的实验数据作为验证案例。该实验模拟了一个底部加热、顶部散热的密闭空腔, 其几何尺寸为0.7 m×1.04 m×1.04 m, 其中地面温度

恒定为35℃, 其余壁面及流体初始温度均为15℃。本研究在z = 0.35 m处分别取x和y方向上的中线温度值与模拟结果进行比较, 如图5所示。结果显示, 模拟所得温度分布曲线与实验数据吻合良好, 验证本数值模拟在浮力主导的流场和温度场方面的可靠性。

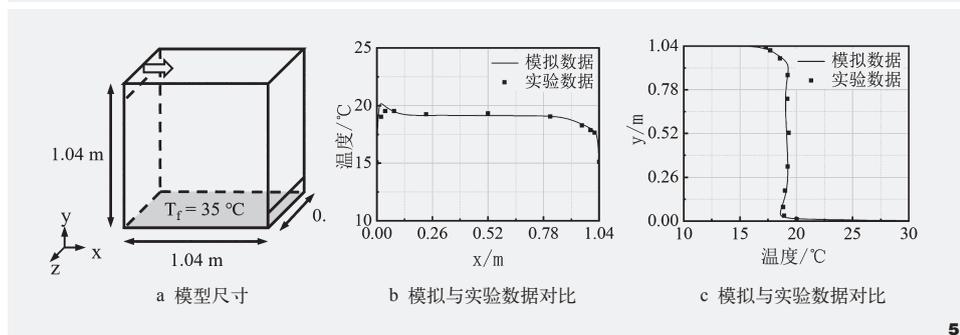
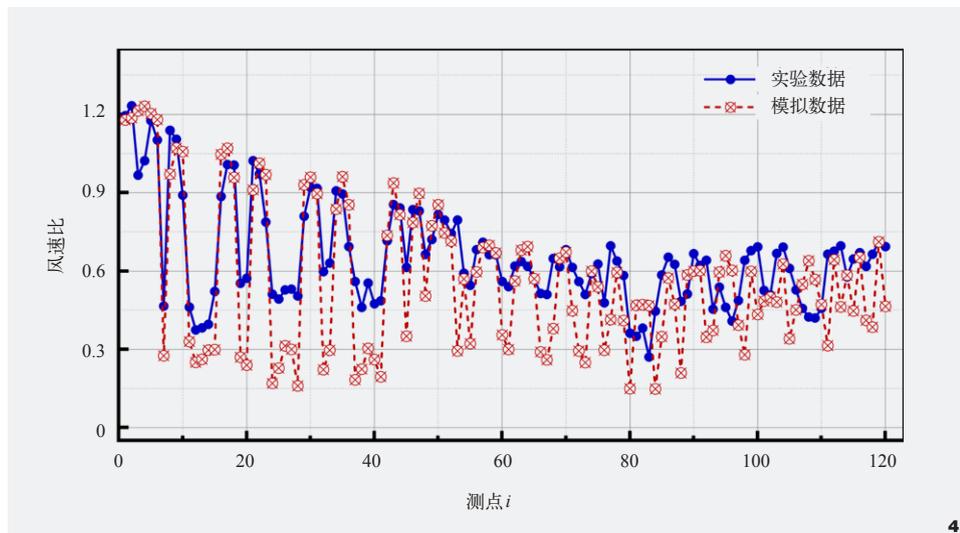


图4 建筑群风环境验证
Fig. 4 Wind environment validation for building clusters

图5 浮力主导下的温度场验证
Fig. 5 Buoyancy-driven temperature field validation

1.2.2 BES模型设置

EnergyPlus采用动态能耗计算方法来求解建筑表面温度及冷热负荷,并运用传导传递函数(CTFs)模拟围护结构动态传热响应。建筑围护结构热工性能和能耗计算参数参照相关规范^[20,23]进行设置,所有围护结构保温性能良好,具体情况如表2和表3所示。街区内部的路面材料选择混凝土材料,表面反射率为0.3^[23]。

光伏组件是BIPV围护结构的关键部件。本文设定在建筑所有立面(窗户除外)和屋顶均铺设与建筑围护结构表面齐平安装的光伏组件。尽管当前实际工程中屋顶通常更倾向于使

用单晶硅组件,本文为控制模型复杂度并保持一致性,选用铜铟镓硒(CIGS)薄膜电池作为光伏组件,与传统晶硅光伏组件相比,其中低辐射通量和较小辐射入射角条件下具有良好的发电性能^[24]。常规的CIGS薄膜光伏组件各层材料特性如表4所示。值得注意的是,虽然本文统一假设所有表面都安装光伏组件,在实际应用中经济性和技术适配性可能导致某些立面不适合安装光伏组件,特别是当某些区域辐射量可能低于经济回报阈值时。未来研究可以进一步结合构件安装部位差异进行选择

性安装,以增强模型技术经济适应性。

考虑光伏板本身的能量平衡,采用等效反照率^[25]的方法来描述光伏组件的光伏转换特性,将其等效反照率和光伏组件各层材料特性(表4)一起输入到EnergyPlus中进行计算。光伏板的等效反照率^[25]如公式(8)所示。

$$A_f = \rho + \varepsilon \quad (8)$$

式中, A_f 为等效反照率, ρ 为实际表面反射率, ε 为光电转换效率。本文选择0.1的实际反射率^[26]和0.2的光电转换效率^[27],则 A_f 为0.3。

1.3 数据处理

本研究在街区室外所有区域1.5 m和10 m高度处设置测点,以1 m^[12]间隔采集温度与风速数据,用于CFD-BES耦合模型中的交互传输及室外微气候分析。室外热舒适度是微气候评估的核心指标值之一,采用通用热气候指数(UTCI)模型来全面评估。本文每个Case均计算1.5 m处高度所有测点的UTCI值,并计算其算术平均值,作为该工况的代表性UTCI值。该处理方法可有效反映街区尺度热舒适水平,亦有利于不同工况间的对比分析。未来研究可进一步结合空间加权或行为特征分布进行优化。在CFD-BES耦合模型中计算UTCI和建筑能耗时,光伏反射率分别取实际值0.1和等效值0.3。此外,在发电量计算中,光伏板工作面积设置为总铺设面积的90%^[28],以更贴近实际运行工况。通过比较能源自给率^[29](光伏发电量/建筑能耗)分析不同气候区光伏铺设对建筑净能耗的影响。

2 结果与分析

2.1 不同气候区一体化光伏围护结构的室外微气候调节特征

根据先前研究,CFD-BES耦合模拟考虑了

表2 基于不同气候区的建筑围护结构构造
Tab. 2 Climate zone-based building envelope construction

算例 Case	围护结构 Building envelope	构造做法 Detailed structure	热工参数 Thermal parameters
Case 1-Case 4	屋面	20 mm 1 : 3 水泥砂浆 +30 mm 轻集料混凝土 +170 mm XPS 板 +100 mm 厚钢筋混凝土板	K=0.20, D=4.36
	外墙	5 mm 厚抗裂砂浆复合耐碱玻纤网格布 +105 mm 厚 XPS 板 +200 mm 厚加气混凝土 (B06) 砌块 +10 mm 厚粉刷石膏	K=0.25, D=4.44
	外窗	6 mm 高透光 Low-E+12 mm 空气+ 6 mm 透明玻璃	K=1.80, SCHG=0.49
	地面	20 mm 1 : 3 水泥砂浆 +40 mm C20 细石混凝土 +115 mm XPS 板 +60 mm C20 细石混凝土	K=0.30, D=4.22
Case 5-Case 8	屋面	20 mm 1 : 3 水泥砂浆 +30 mm 轻集料混凝土 +130 mm XPS 板 +100 mm 厚钢筋混凝土板	K=0.25, D=3.94
	外墙	5 mm 厚抗裂砂浆复合耐碱玻纤网格布 +85 mm 厚 XPS 板 +200 mm 厚加气混凝土 (B06) 砌块 +10 mm 厚粉刷石膏	K=0.30, D=4.22
	外窗	6 mm 中透光 Low-E+12 mm 空气+ 6 mm 透明玻璃	K=1.80, SCHG=0.435
Case 9-Case 12	屋面	20 mm 1 : 3 水泥砂浆 +30 mm 轻集料混凝土 +80 mm XPS 板 +100 mm 厚钢筋混凝土板	K=0.38, D=3.41
	外墙	5 mm 厚抗裂砂浆复合耐碱玻纤网格布 +20 mm 厚 XPS 板 +200 mm 厚加气混凝土 (B06) 砌块 +10 mm 厚粉刷石膏	K=0.63, D=3.54
	外窗	6 mm 较低透光 Low-E+12 mm 空气+ 6 mm 透明玻璃	K=2.30, SCHG=0.33

注：K为传热系数，单位为W/(m²·K)；D为热惰性指标；SHGC为太阳得热系数。

表3 能耗计算参数
Tab. 3 Energy performance calculation parameters

模拟参数 Simulation parameter	单位 Unit	值 Value
窗墙比	—	0.4
空调运行时间	—	7:00-18:00
制冷温度设定	℃	26
制热温度设定	℃	20
制冷系统 COP	—	3.4
制热系统 COP	—	4.4
燃煤锅炉综合性能系数	—	2.2
照明功率密度	W/m ²	8.0
人均占有建筑面积	m ² /人	10
电器设备功率密度	W/m ²	15

注：COP为供冷/供暖系统综合性能系数。

表4 CIGS薄膜光伏材料特性
Tab. 4 CIGS thin film PV panel material properties

参数 Parameter	材料名称 Material name			
	ZnO	CIGS	Mo	钙钠玻璃
厚度 /mm	0.5	0.002	0.001	1.1
导热系数 / (W / (m·K))	23	3.7	138	1
密度 / (kg/m ³)	5 680	5 770	10 200	2 500
比热容 / (J / (kg·K))	490	300	250	720

建筑外表面温度和建筑空调室外机废热排放对室外环境的影响。相较于传统气象数据，耦合后的数据能够更准确地反映建筑群对环境的影响，特别是在空气温度上升和风速下降增加等方面^[7]。

图6显示了冬夏两季不同城市的建筑周围1.5 m高度处全天逐时平均气温(AT)、平均辐射温度(MRT)和平均UTCI值。对于所有Case来说，这三种指标的变化趋势相似，日出前达到最小值，随着太阳辐射增强，温度逐渐上升，下午达到峰值后开始下降。夏季和冬季，光伏铺设对室外平均气温的影响较小。如图6-a和6-b所示，哈尔滨光伏板铺设前后平均气温差不足0.01℃。而杭州(Case6和Case5)和广州(Case10和Case9)，夏季白天光伏铺设前后的室外平均气温最大差值分别为0.05℃和0.01℃；冬季最大差值有所增加，分别为0.08℃和0.02℃。

上述室外AT变化的现象，与光伏铺设带来的建筑表面温度改变有关。当建筑原表面反射率(0.3)和光伏板等效反照率(0.3)

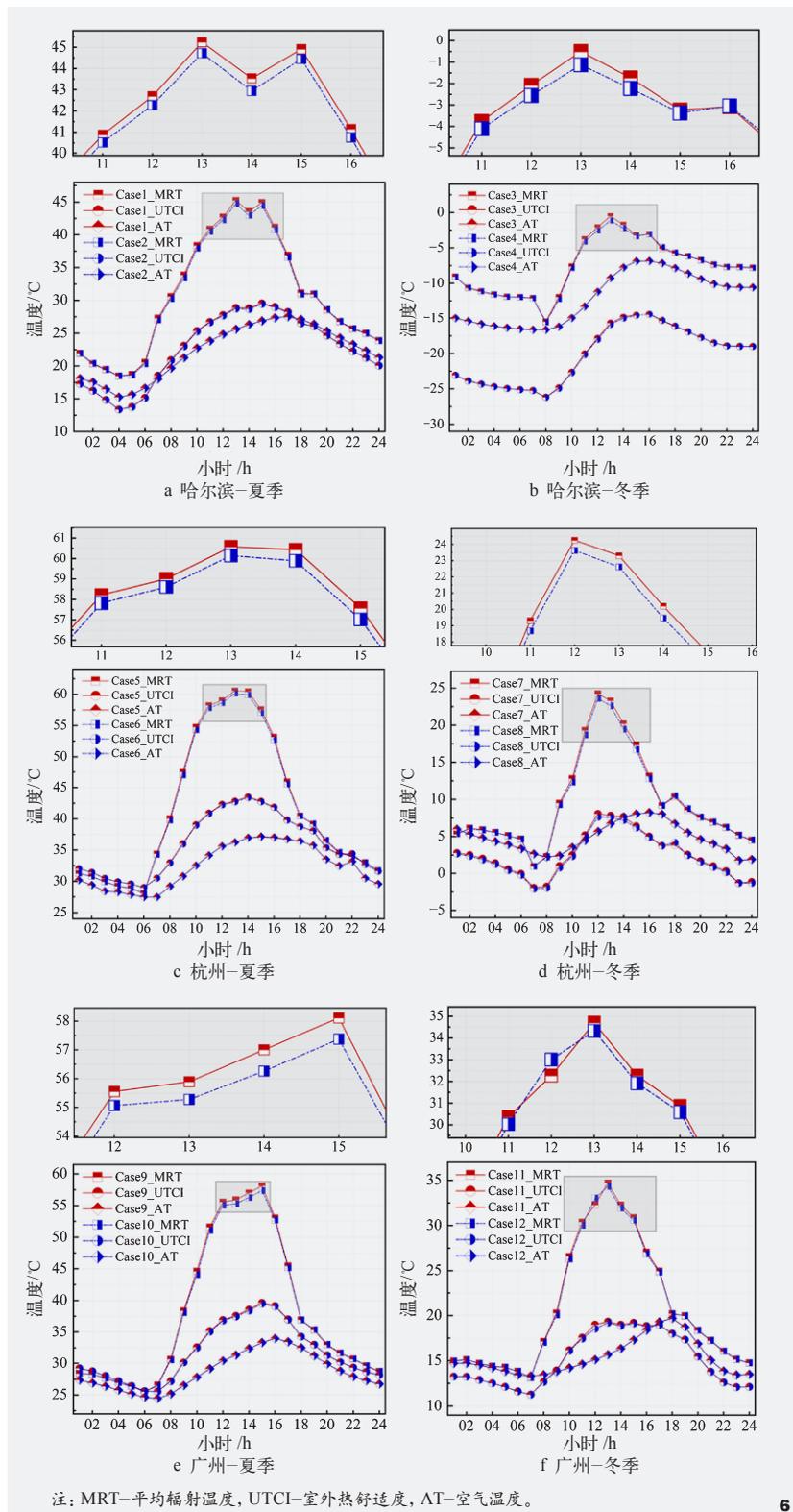


图6 不同Case的室外热环境关键指标随时间演变图
Fig. 6 Hourly evolution of key outdoor thermal environment indicators for different cases

相同时, 光伏铺设通过光电转换减少建筑表面吸收的热量, 从而降低建筑表面温度, 杭州夏季光伏铺设可使得建筑表面温度平均下降 0.06°C , 这种微弱的变化导致AT变化有限^[7]。

而室外MRT作为综合反映周围表面与人体辐射交换的指标, 直接受到周围所有表面温度的影响, 其变化幅度显著高于AT。如图6所示, 在哈尔滨、杭州和广州的模拟中, 光伏铺设导致峰值MRT出现较大下降, 各个Case之间的最大降幅达 $0.38 \sim 0.74^{\circ}\text{C}$ 。其中夏季哈尔滨、杭州和广州光伏铺设导致的MRT最大下降值分别为 0.59°C 、 0.56°C 和 0.74°C 。由于MRT是UTCI计算的核心参数, 其变化直接影响到人体的热舒适度, 下文将结合UTCI变化进一步量化分析。

图6-a、6-c和6-e所示, 夏季哈尔滨和广州光伏铺设 (Case2和Case1、Case10和Case9) 导致平均UTCI最大降幅分别为 0.15°C 和 0.18°C , 高于杭州 (Case6和Case5) 的 0.13°C , 与光伏铺设对MRT影响程度一致。冬季杭州光伏铺设 (Case8和Case7) 导致MRT最大下降 0.74°C , 平均UTCI最大下降 0.47°C ; 广州光伏铺设 (Case12和Case11) 导致最大分别下降 0.74°C 和 0.46°C 。而哈尔滨光伏铺设 (Case4和Case3) 使得MRT降幅达 0.62°C , 而平均UTCI最大仅下降 0.21°C 。这表明严寒地区冬季风速、湿度等非辐射因子对热舒适性的影响权重上升, UTCI变化与MRT的关联性下降。

综上所述, 光伏围护结构通过改变MRT影响室外热舒适度, 但在冬季严寒地区 (哈尔滨), 由于非辐射因素 (风速、湿度) 的影响权重增加, 导致其对热舒适度影响受限。为进一步分析BIPV技术对热环境的昼夜影响, 选取热累积初期 (8:00)、辐射峰值期 (14:00) 和热滞后期 (20:00) 三个典型时段, 研究1.5 m高度处光伏铺设前后UTCI差值的时空分布规律。如图7所示, 哈尔滨、杭州和广州光伏铺设后的UTCI差值对比表明, 光伏系统对室外热舒适度的影响具有显著时空异质性。

从时间维度分析, 光伏系统对室外热舒适度的影响呈现明显的日变化规律和季节差异。日间时段 (8:00和14:00), 光伏铺设使UTCI普遍降低, 其中8:00时段BIPV影响较弱, UTCI差值波动范围较小。以广州夏季 (Case10和Case9) 为

例, 该时段差值波动为 $-0.05^{\circ}\text{C} \pm 0.01^{\circ}\text{C}$, 且夏季波动幅度较冬季更为显著, 这与夏季日出时间提前, 太阳辐射增强时段前移相关。至太阳辐射峰值时段 14:00, 光伏铺设对 MRT 的调节作用和光电转换效益充分显现, UTCI 差值分布范围显著扩大至 $-0.18^{\circ}\text{C} \pm 0.53^{\circ}\text{C}$ 。日落 (20:00) 太阳辐射影响迅速减弱, UTCI 差值波动收窄至 $0.03^{\circ}\text{C} \pm 0.01^{\circ}\text{C}$, 表明光伏系统带来的热滞后效应短暂。

空间异质性分析显示, 光伏系统对不同气候区的影响存在显著差异。哈尔滨夏季 8:00 时段 UTCI 差值波动范围达 $-0.09^{\circ}\text{C} \pm 0.28^{\circ}\text{C}$, 大于杭州 ($-0.07^{\circ}\text{C} \pm 0.16^{\circ}\text{C}$) 和广州 ($-0.05^{\circ}\text{C} \pm 0.01^{\circ}\text{C}$); 冬季同时间段趋势类似。在夏季午后高温时段 14:00, 哈尔滨光伏铺设后 UTCI 差值波动幅度达 $\pm 0.33^{\circ}\text{C}$, 小于杭州 ($\pm 0.57^{\circ}\text{C}$) 和广州 ($\pm 0.53^{\circ}\text{C}$)。这一现象说明, 在高温条件下, 光伏系统会通过改变局部 MRT 和风速等环境参数, 对室外热环境产生更复杂的影响。

综合时空分析结果, 光伏系统在不同气候条件下均表现出热缓冲效应。具体表现为: 早晨 (8:00) UTCI 上升过程延迟, 午后 (14:00) 峰值温度降低, 以及晚间 (20:00) UTCI 降温过程滞后。

2.2 不同气候区一体化光伏围护结构的建筑净能耗特征

图8展示了不同气候区夏季和冬季模拟日的建筑单位面积全天建筑能耗和光伏发电量。结合表3空调运行时段 (7:00-18:00) 可知, 这一运行时间内建筑冷热负荷对建筑能耗的影响显著, 尤其在气温极端季节。当建筑原表面反射率和光伏板等效反照率均为 0.3 时, 光伏铺设对室外空气温度和建筑表面温度的影响有限, 因此建筑本体能耗值差值

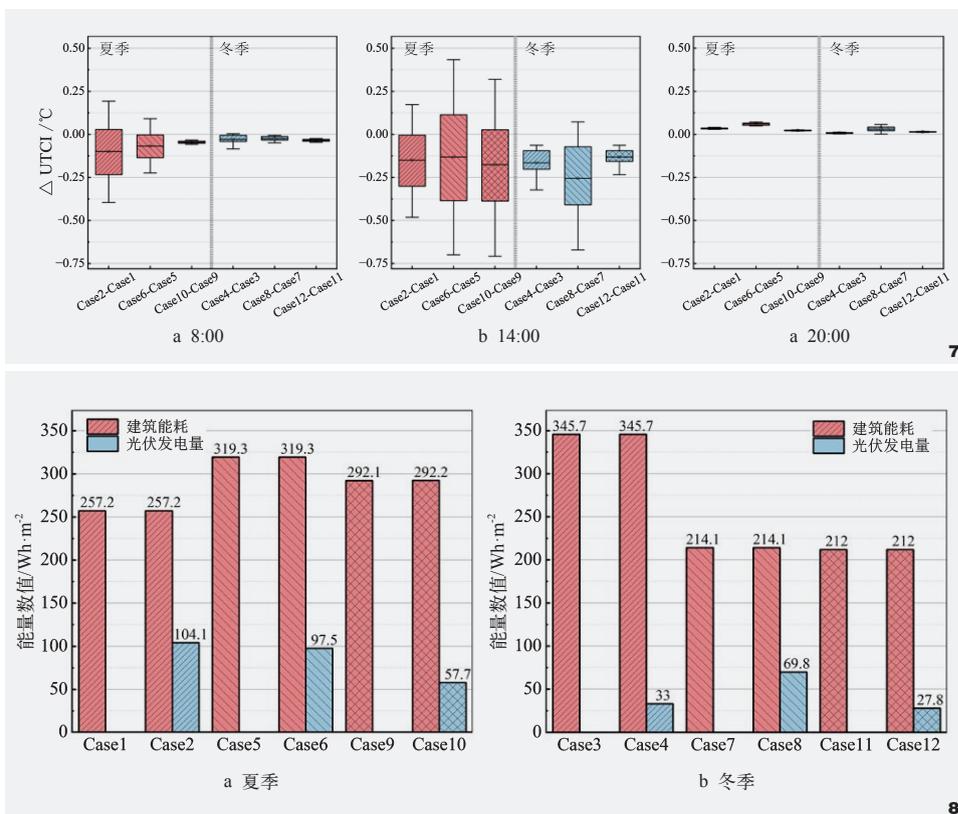


图7 不同Case的室外热舒适度差值
Fig. 7 Thermal comfort differential across cases

图8 不同Case的模拟日建筑能耗值与光伏发电量
Fig. 8 Daily building energy consumption and PV generation across cases

几乎为零; 但其发电功能可有效降低建筑净能耗, 减少外部能源依赖。

夏季, 哈尔滨与杭州太阳辐射度相近, 光伏发电量分别为 104.1 Wh/m^2 和 97.5 Wh/m^2 。但杭州因极端高温导致空调负荷显著增加, 建筑能耗达 319.3 Wh/m^2 , 能源自给率仅 30.5%, 低于哈尔滨的 40.5%。而广州受光照限制, 光伏发电量仅为 57.7 Wh/m^2 , 能源自给率降至 19.7%。这一差异说明太阳辐射对建筑净能耗的影响显著高于对室外微气候的影响。冬季, 由于太阳高度角小, 太阳辐射度弱且日照时间短, 光伏发电量较夏季下降 28% ~ 68%。其中, 哈尔滨受极端低温影响, 其制热负荷高, 因此建筑能耗为 345.7 Wh/m^2 , 较杭州和

广州分别高出 38% 和 39%。杭州光伏发电量为 69.8 Wh/m^2 , 建筑能耗为 214.1 Wh/m^2 , 能源自给率为 32.6%, 其单位面积能耗仅比广州高出 2.1 Wh/m^2 , 但发电量高出 42 Wh/m^2 , 能源自给率高出 19.5%。这一结果说明夏热冬冷地区光伏系统的综合效益优势。

3 结论与讨论

本研究基于 CFD-BES 耦合模型, 探讨了不同气候区一体化光伏围护结构对室外微气候和建筑净能耗的影响, 旨在分析光伏围护结构在不同环境下的适应性和产能表现。在建筑原表面反射率 (0.3) 与光伏等效反照率 (0.3) 相同的前提条件下, 结果表明:

(1) 在不同气候区, 一体化光伏围护结构的铺设对室外微气候的关键指标均有一定的影响。光伏结构通过影响建筑表面温度显著降低峰值MRT, 其降幅呈现气候区异质性。哈尔滨、杭州和广州冬季MRT峰值分别下降0.61℃、0.74℃和0.74℃, 对应UTCI最大降幅达0.21℃、0.47℃和0.46℃。冬季因非辐射因子(风速、湿度等)影响权重上升, UTCI的变化与MRT的关联性下降。哈尔滨UTCI降幅仅为MRT降幅的33.9%, 而杭州与广州UTCI降幅可达MRT降幅的62.2%~63.5%。

(2) 在室外热舒适度方面, 不同气候条件下光伏铺设后日间时段UTCI降幅均随太阳辐射增强显著提升, 上午8:00, 三地区UTCI差值波动 $\leq \pm 0.05^\circ\text{C}$; 至辐射峰值14:00时段, UTCI差值范围扩大, 以广州为例, 其波动范围扩大至 $-0.18^\circ\text{C} \pm 0.53^\circ\text{C}$ 。日落后(20:00)各Case的UTCI差值波动范围收窄至 $0.03^\circ\text{C} \pm 0.01^\circ\text{C}$, 表明BIPV技术带来的热滞后效应持续时间较短。值得注意的是, 夏季14:00杭州与广州UTCI差值波动分别达 $\pm 0.57^\circ\text{C}$ 和 $\pm 0.53^\circ\text{C}$, 说明高温条件下BIPV技术可能引发室外热环境的非线性突变。

(3) 在不同气候区, 一体化光伏围护结构对建筑净能耗的影响主要通过产能差异间接体现, 该影响受区域太阳辐射度条件制约。夏季时, 哈尔滨、杭州和广州单位面积日均发电量分别为 104.1 Wh/m^2 、 97.5 Wh/m^2 和 57.7 Wh/m^2 , 对应能源自给率达40.5%、30.5%和19.7%; 冬季则因辐照下降, 发电量减少28.0%~68.0%。

本文基于建立的CFD-BES双向耦合模型, 在建筑原表面反射率(0.3)与光伏等效反射率(0.3)相同的前提条件下, 量化了一体化光伏围护结构在不同气候条件下影响室外微气候(特别是MRT和UTCI)规律和特征。

研究结果具有一定局限性。首先, 时空尺度的局限。受计算成本限制, 仅选取三座代表性城市典型街区进行夏冬两季典型日模拟, 尚未评估光伏系统长期累积效应及探讨长期能源自给率, 亦未延展至城市尺度。其次, 实验设定存在简化假设。本研究采用规则排列的点式建筑群模型, 建筑布局紧凑、街谷尺度统一; 同时, 三地建筑表面反射率采用统一设置; 此外, 假设建筑外表面100%铺设光伏组件, 但未考虑实际应用中的结构适配性、经济效益阈值等限制因素。以上因素均可能导致分析结果中不同气候区应用BIPV技术前后微气候差异较小。再者, 模型计算的物理精度存在局限。本研究直接采用了等效反照率和EnergyPlus中的光伏组件模型, 并基于经验公式简化了光伏发电量的计算。该简化方法未考虑温度对光伏板发电效率的影响。此外, 虽不同气候区因光伏产能存在建筑净能耗差异, 但该差异更多体现为太阳辐照资源的区域性差异。未来的研究需拓展至城市尺度模拟, 延长模拟时长, 引入更具异质性的建筑布局与表面参数, 并提高光伏模型物理精度以评估不同气候条件下一体化光伏围护结构的长期影响, 尤其是在实际应用中的可行性和优化策略。 

注: 文中图表均由作者绘制。

参考文献

[1] 联合国环境规划署. 2022 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector[R/OL]. 内罗毕: 联合国环境规划署, 2022[2025-04-07]. <https://www.unep.org/resources/publication/2022-global-status-report-buildings-and-construction>

[2] JO H, KIM H. The Influence of Urban Spatial Structure on Building Carbon Emissions at the Neighborhood Scale Considering Spatial Effect[J]. *Building and Environment*, 2025, 276: 112888.

[3] 住房和城乡建设部, 国家发展和改革委员会. 城乡建设领域碳达峰实施方案[Z]. 2022.

[4] CUCE E. Thermal Regulation Impact of Green Walls: An Experimental and Numerical Investigation[J]. *Applied Energy*, 2017, 194: 247-254.

[5] KAPSALIS V, KARAMANIS D. On the Effect of Roof Added Photovoltaics on Building's Energy Demand[J]. *Energy and Buildings*, 2015, 108: 195-204.

[6] YANG S L, CANNAVALE A, DI CARLO A, et al. Performance Assessment of BIPV/T Double-skin Façade for Various Climate Zones in Australia: Effects on Energy Consumption[J]. *Solar Energy*, 2020, 199: 377-399.

[7] 陈逸晨, 俞布, 樊一帆, 等. 一体化光伏围护结构对建筑能耗和室外微气候的耦合影响研究[J]. *建筑科学*, 2024, 40(12): 48-57.

[8] HOSSEI H, KIM K H. Comprehensive Analysis of Energy and Visual Performance of Building-integrated Photovoltaics in all ASHRAE Climate Zones[J]. *Energy and Buildings*, 2024, 317: 114369.

[9] TOMINAGA Y, MOCHIDA A, YOSHIE R, et al. AIJ Guidelines for Practical Applications of CFD to Pedestrian Wind Environment Around Buildings[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2008, 96(10-11): 1749-1761.

[10] LUO Y Q, SHEN J H, CUI D E, et al. An Energy-environment Coupled Simulation Framework for Multi-scale and Multi-facet Evaluation of Data Center[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2025, 258: 124637.

[11] Global Solar Atlas. Global Solar Atlas (Version 2.12) [DB/OL]. (2025-04)[2024-07-25]. <https://globalsolar-atlas.info>

[12] GRACIK S, HEIDARINEJAD M, LIU J Y, et al. Effect of Urban Neighborhoods on the Performance of Building Cooling Systems[J]. *Building and Environment*, 2015, 90: 15-29.

[13] MONTAZERI H, MONTAZERI F. CFD Simulation of Cross-ventilation in Buildings Using Rooftop Windcatchers: Impact of Outlet Openings[J]. *Renewable Energy*, 2018, 118: 502-520.

[14] HARGREAVES D M, WRIGHT N G. On the Use of the k-Model in Commercial CFD Software to Model the Neutral Atmospheric Boundary Layer[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2007, 95(5): 355-369.

[15] FRANKE J, HELLSTEN A, SCHLUNZEN K H, et

- al. The COST 732 Best Practice Guideline for CFD Simulation of Flows in the Urban Environment: A Summary[J]. International Journal of Environment and Pollution, 2011, 44(1/2/3/4): 419.
- [16] ZHANG R J, MIRZAEI P A, JONES B. Development of a Dynamic External CFD and BES Coupling Framework for Application of Urban Neighbourhoods Energy Modelling[J]. Building and Environment, 2018, 146: 37-49.
- [17] LIU J L, NIU J L. Delayed Detached Eddy Simulation of Pedestrian-level Wind Around a Building Array – the Potential to Save Computing Resources[J]. Building and Environment, 2019, 152: 28-38.
- [18] MIRZAEI P A, CARMELIET J. Dynamical Computational Fluid Dynamics Modeling of the Stochastic Wind for Application of Urban Studies[J]. Building and Environment, 2013, 70: 161-170.
- [19] BLAY D, MERGUI S, NICULAE C. Confined Turbulent Mixed Convection in the Presence of Horizontal Buoyant Wall Jet[J]. Fundamentals of Mixed Convection, 1992: 213.
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑节能与可再生能源利用通用规范: GB 55015-2021[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.
- [21] 住房和城乡建设部. 近零能耗建筑技术标准: GB/T 51350-2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 公共建筑节能设计标准: GB 50189-2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [23] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑围护结构节能工程做法及数据: 09J908-3[S]. 北京: 中国计划出版社, 2009.
- [24] 张传升. 北京地区多种光伏组件发电性能对比实验研究[J]. 可再生能源, 2016, 34(08): 1117-1123.
- [25] TAHA H. The Potential for Air-temperature Impact From Large-scale Deployment of Solar Photovoltaic Arrays in Urban Areas[J]. Solar Energy, 2013, 91: 358-367.
- [26] 李庆党, 和学泰, 李子良, 等. 光伏建筑发展与经典案例[J]. 建筑技术开发, 2022, 49(04): 1-6.
- [27] FEURER T, REINHARD P, AVANCINI E, et al. Progress in Thin Film CIGS Photovoltaics – Research and Development, Manufacturing, and Applications[J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2017, 25(07): 645-667.
- [28] KING D L, KRATOCHVIL J A, BOYSON W E. Photovoltaic Array Performance Model[M]. New Jersey: Citeseer, 2004.
- [29] KIM D, JANG Y, CHOI Y. Comparative Analysis of Estimated and Actual Power Self-sufficiency Rates in Energy-sharing Communities with Solar Power Systems[J]. Energies, 2023, 16(24): 7941.

专题学术主持人——王 一 徐 燊



王 一

同济大学建筑与城市规划学院副教授、博士生导师, 建筑系主任、建筑学学科委员副主任, 建筑专业学位教育指导委员会主任、城乡规划学学科委员会委员, 中美生态城市设计联合实验室执行主任, 中国建筑学会城市设计分会理事、中国建筑学会韧性城市与建筑专委会委员专委会委员、上海市住房和城乡建设管理委员会片区有机更新工程技术创新中心专家委员会委员、同济大学超大城市精细化治理研究院特聘研究员。

长期从事城市设计研究和实践, 主要研究方向为城市设计理论、生态城市设计方法、城市公共空间品质评价和预测数值模拟技术等。主持国家自然科学基金面上项目、国家重点研发计划课题等一系列科研项目。近年来在国内外发表学术论文40余篇, 出版《城市设计概论》《生态城市设计——崇明生态岛的策略与思考》《城市地下公共空间设计》《城市形态组织论》等一系列专著。主持和参加了大量城市设计和建筑设计实践项目, 包括上海北外滩地区、苏州太湖新城、杭州亚运村、开封历史街区、上海奉贤新城等重要项目。获中国建筑学会、中国城市规划学会、上海市等颁发的省部级以上设计奖项10余项。



徐 燊

华中科技大学建筑与城市规划学院教授、博士生导师, 建筑技术教研室主任, 国家一级注册建筑师, 注册城乡规划师。国际建协工作组成员、中国建筑学会建筑策划与后评估专业委员会理事, 中国建筑学会城市设计分会理事, 中国建筑学会对外交流工作委员会委员, 中国光伏行业协会光电建筑专委会核心专家组, 中国光电建筑50人。

长期从事绿色建筑技术、低碳城市设计研究, 主要研究方向为健康建筑、绿色建筑、低碳技术。先后主持绿色建筑相关的国家自然科学基金5项, 亚热带建筑与城市科学全国重点实验室重点基金一项, 华中科技大学青年前沿团队“健康建筑与健康城市”负责人, 主编《太阳能建筑设计》获全国建筑学“十二五”“十三五”“十四五”规划教材, 作为首席专家获教育部研究生主题案例, 近年来在国内外发表学术论文70多篇, 其中SCI中科院一区论文10篇, 主编和参编标准5部。主持绿色建筑咨询与低碳城市设计项目20余项, 获华夏建设科学技术奖二等奖、湖北省科技进步三等奖及湖北省住建厅设计竞赛一等奖。