

太阳能光伏发电部署对城市温度的影响: 回顾与展望 评估建议

何月儿 a, 李俊熙 b, *, 黄念贤 c

深圳大学建筑与城市规划学院A亚热带建筑与城市科学国家重点实验室, 深圳, 518060

新加坡鹿岛建设技术研究所, 鹿岛建设公司, 店轮, 489690, 新加坡

新加坡国立大学设计与工程学院建筑环境系, 新加坡, 117596

文章信息

关键词:

光伏学
陆上和水上太阳能光伏热岛效应
城市气候 CFD 模型
拟光伏性能

摘要

气候变化要求广泛采用可再生能源来实现碳中和。太阳能光伏板是最可行的选择之一, 尤其是在靠近赤道的地区。由于增加了低反照率和低热容材料, 部署太阳能光伏板对现有环境和城市气候有影响。这涉及到在城市规划和建筑设计中对人体热舒适性的考虑。这项工作的动机是光伏电池板的部署对城市温度造成的相互矛盾的影响。它分析了 264 项跨气候的研究, 并检查了基于模拟和基于现场测量的方法, 以及非统一热环境评级指标, 以评估 PVs 对城市温度的影响。结果突出了城市配置、模拟设置、传感器放置和测量协议的变化, 导致了不一致的发现。因此, 确定了研究差距, 表明需要一个系统的、公平的和标准化的方法来评估光伏系统对城市温度的影响, 以及研究方向和与其实施相关的挑战。最后, 该分析提出了现场测量和模拟的初步指南。一个综合的工作流程整合了计算流体力学, 格子波尔兹曼方法, 深度学习, 以及可选的机器学习, 被进一步提出用于 PV 影响评估。这些见解有助于制定可持续建筑设计和城市规划战略的明智决策, 有效整合光伏系统以减轻城市热岛效应并实现理想的热舒适。

缩写

计算流体力学 (computational fluid dynamics)	计算流体力学语言
中央处理器	中央处理机
分升	深度学习
FVM	有限体积法
国家政治保卫局。参见 OGPU	图形处理单元
磅质量 (pound mass)	格子波尔兹曼方法
LCZ	局部气候区
《牛津小词典》	细节层次
机器语言 (Machine Language)	机器学习
产品鉴定 (Production Validation)	光电池的
UHI	城市热岛
UTCI	通用热气候指数
WRF	天气研究和预报

1. 介绍

应对气候变化和实现全球可持续发展目标需要向可再生能源的重大转变。2022 年埃及联合国气候变化大会制定了到 2030 年温室气体减排 45 % 的目标[1]。太阳能光伏 (PV) 系统在成本效益和接受度方面都有大幅提升, 成为解决能源短缺、环境影响问题和实现碳中和的必需品[2]。国际能源署报告称, 自 2009 年以来, 太阳能行业大幅增长, 年产能增长率为 41 %。预计到 2040 年, 太阳能发电能力可能达到 4240 GW, 比 2000 年记录的 385 MW 发电能力增加 10, 000 倍[3]。

随着世界各地的城市越来越多地部署光伏系统, 它成为

*通讯作者。新加坡鹿岛建设技术研究所。

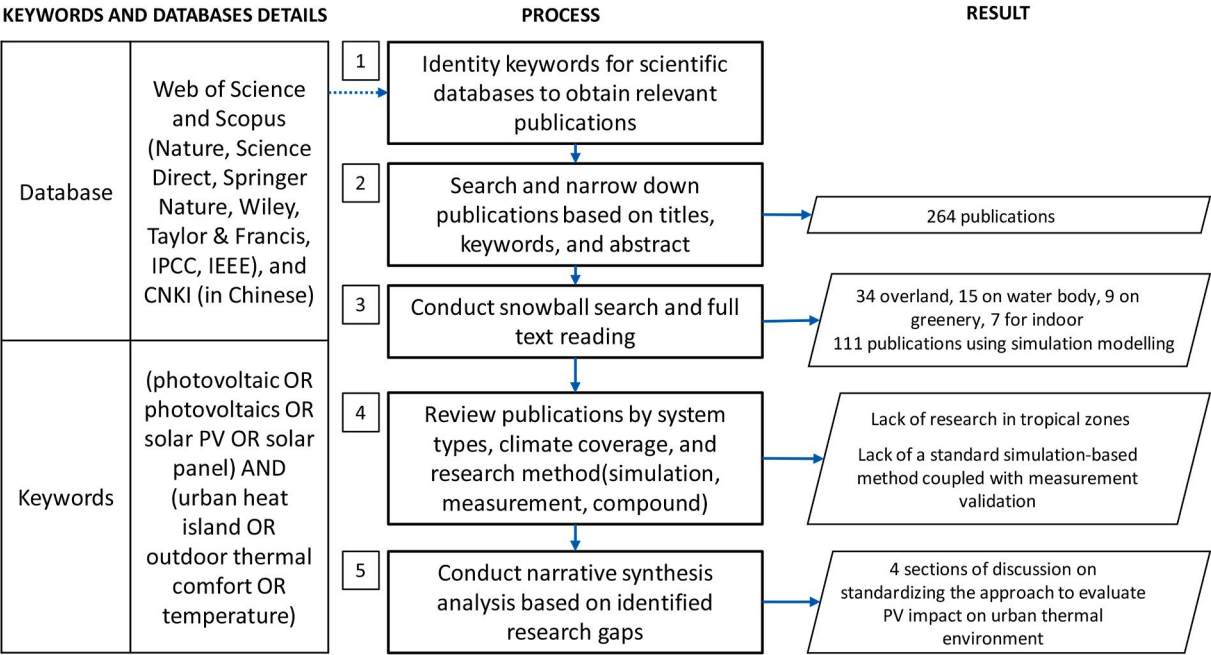
电子邮件地址: jc.hii@kajima.com.sg (D. J. C. Hii)。

<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111920>

2024 年 5 月 12 日收到; 2024 年 7 月 22 日收到修订版; 2024 年 8 月 4 日接受

2024 年 8 月 5 日在线发布

0360-1323/ 2024 Elsevier Ltd. 保留所有权利, 包括用于文本和数据挖掘、人工智能培训和类似技术的权利。



图一。研究中采用的研究过滤方法的工作流程。

有必要定量分析这种广泛的 PVs 应用对城市温度、城市热岛 (UHI) 效应的出现和人体热舒适的影响。对城市热环境的影响仍然是一个有争议的话题，其结果相互矛盾 [4]。一些研究表明，在世界范围内的城市和沙漠表面广泛部署光伏电池板可能会导致全球平均温度的下降 [5]，而其他研究则证明了相反的结论 [4]。以低反照率表面最大化太阳能吸收为特征的光电板的设计可以影响城市冠层内太阳辐射的总吸收。任何未转化为电能的余热都会释放到环境中，影响城市树冠内的气流和热传递，并导致城市温度升高。此外，城市微气候参数，如环境空气温度和风速会影响光伏系统的输出功率和转换效率。这种耦合说明了在垂直和水平表面的各种配置下，评估不同城市环境中光伏影响的复杂性。

鉴于现有的挑战和现有的研究，本综述提出了三个研究问题，以提供光伏系统影响的不同视角，并补充现有的知识。

- 1. 是什么导致 PVs 对城市温度产生矛盾的影响？
- 2. 目前的研究方法和潜在的误差来源是什么？
- 3. 研究团体如何标准化评估光伏对城市温度影响的方法？

本研究利用叙事综合方法，基于现有报告为每个研究问题构建答案。第 2 节概述了审查过程，并定义了分析的范围。第 3 节全面回顾了与研究重点相关的各种可用模拟模型，评估了它们的优势、李米和适用性。第 4 节介绍了案例研究及其研究方法，以及影响 PVs 对城市温度的冲突效应的因素。第 5 部分强调了研究差距，并形成了 4 个讨论部分，讨论了评估光伏对城市热环境影响的标准化方法。第 6 节总结了这一分析得出的主要结论和影响。通过澄清

通过分析以往研究中相互矛盾的结果，这项研究旨在丰富光伏对城市温度影响的科学知识，并为未来的研究、行业实践和政策制定提供有价值的见解。

2. 审查流程和范围

图 1 显示了本综述中应用的研究筛选方法。这项工作从各种数据库中检索光伏板出版物，包括科学网、Scopus 和 CNKI (中文)。搜索使用关键词“光伏”、“城市热岛”、“太阳能电池板”、“太阳能光伏”和“室外热舒适”。范围不直接涉及室内影响，如冷负荷和能源影响。

研究问题是对现有研究进行批判性评估的焦点。从 1997 年至 2024 年期间，总共有 264 篇相关出版物被确定用于分析。利用现有结果，采用向前和向后滚雪球搜索法。全文阅读进行了研究，特别侧重于太阳能电池板对室外环境的热影响。这项研究收集、分类和分析了 34 篇关于安装在各种类型土地上的太阳能光伏板的出版物，包括建筑物、人行道、沙漠和自然贫瘠地区。此外，15 份出版物侧重于安装在水体上的光伏板，9 份侧重于绿化，7 份侧重于室内环境。通过区分安装位置、研究目标和影响，这些研究大多与室外热环境相关。此外，本综述确定并检查了总共 111 份出版物，这些出版物利用模拟建模来调查光伏发电部署的各种环境影响。随后，基于这些出版物，对太阳能 PV 的模拟工具的生态系统进行了彻底的回顾和分析。每个研究问题的结果都来自于严格的审查，表明需要一个系统的、公平的和规范化的方法来评估光伏系统对城市温度的影响。随后，讨论部分介绍了为测量和模拟制定指导方针的初步工作，以及光伏发电部署影响评估的工作流程。



图二。光伏-环境相互作用的多尺度耦合模拟。

表 1
回顾了与光伏系统相关的工具。

模拟范围	工具、软件 and 平台
光伏规划(包括遮阳)	Archelios、BlueSol、CYPELEC PV Systems、DDScad PV、ETAP、Helios 3D、HOMER Pro、Polysun、PVcase、PVComplete、PV*SOL、PVsyst、可再生能源潜力(reV)模型、系统顾问模型(SAM)、Skelion (Sketchup)、Solar Pro、Solarius PV、Solergo、Solmetric、Virto Solar MODIS、SCALE(可扩展计算
城市气候与热舒适	高级库和环境)、biometeo、CityComfort+、CitySim、ClimateStudio、蜻蜓(犀牛)、ENVI-met、瓢虫(犀牛)、STEVE Tool、SUEWS(地表城市能源和水, 平衡方案)、UHI-DS(决策支持)工具、城市-
热传递和/或通风(光伏板物理模型)	红外线管道工, UHeat (ARUP) Butterfly(犀牛)、COMSOL、Cradle CFD、Eddy3D(犀牛)、Fluent、HELYX、NuadaCFD、OpenFOAM、PALM-4U、SimScale、STAR-CCM+
能源和室内条件	ClimateStudio、EnergyPlus、Hive(犀牛)、蜜蜂(犀牛)、Modelica、TRNSYS

3. 仿真建模工具综述

为了理解光伏板和环境之间的热相互作用, 需要一种综合的多尺度建模方法来再现光伏板在热传递和与环境的相互作用方面的影响, 以解决这个问题。图 2 示出了多尺度气候建模的耦合, 其考虑了更大尺度的气候和环境因素, 将周围环境与 PV 系统相结合。具体来说, 它研究了光伏电池板释放的热量及其对每个尺度的热通量的影响, 为各种气候模型提供反馈。这使得精确评估大规模光伏部署对气候变化的影响成为可能。光伏系统建模包括到达光伏阵列的太阳辐照量和系统从入射辐照度产生的电力的估计。本节考虑到这一点, 研究了目前市场上可用的模拟工具和软件。

3.1. 光伏相关工具

表 1 对太阳能光伏生态系统中可用的光伏模拟工具、平台和模型进行了全面回顾, 根据影响光伏设计规划和现场性能的范围将其分为四组。此外, 还有许多自行开发的代码和模型, 用于运行研究领域中感兴趣的特定模拟和任务。

光伏规划类别主要关注诸如遮光、地形影响以及光伏系统中的能量增益和损耗等因素。Archelios、BlueSol、CYPELEC PV Systems、DDScad PV、PVcase、PVComplete、Solarius PV、Solergo 和 Virto Solar 等软件工具用于设计和优化 PV 系统。这些工具提供系统布局、能源分析和性能评估等功能。ETAP、Helios 3D、PV*SOL、PVsyst、Skelion 和 Solar Pro 等应用程序为光伏系统提供了模拟和建模功能, 支持

用户分析能源产量, 遮阳效果, 并评估系统性能。ReVModel 和 SAM 是专门为评估可再生能源资源、评估系统性能和进行光伏项目财务分析而设计的。

城市气候和热舒适, 涉及影响 PV 和人体热舒适方面的太阳、天空和天气条件的贡献。各种软件工具可用于模拟城市气候, 如 SUEWS、Urban-PLUMBER、STE- VETool、瓢虫工具、ClimateStudio 和 ENVI-met。这些工具还可以考虑人体热舒适。常见的热舒适指数

包括 MRT、PET、mPET、PMV、SET*以及通用热气候指数(UTCI)。对于全面的人类生物气象学计算, 最新版本的雷曼模型, 称为生物气象学, 是可用的。当要模拟 UHI 的影响时, 可以使用像 UHeat、UHI-DS 和蜻蜓这样的软件工具。此外, 红外线。city 提供了一个基于机器学习(ML)的预测模型, 用于行人高度风速、风舒适度、太阳辐射和阳光

小时, 在 500 米乘 500 米的有限场地范围内为初始概念阶段设计提供快速有效的探索。全球尺度的数据可以从 2004-2005 年的 MODIS 红外卫星图像中获得

Terra 和 Aqua 卫星上的仪器进行中尺度模拟, 如天气研究和预报模型(WRF)和尺度。从区域到建筑尺度, 如果需要, 有气象站和 CFD 模拟方法来处理光伏板层的细节。

建筑物的热传递和通风达到 PV 等级。所列工具基于 CFD, 利用数值模拟来分析光伏板内不同层之间的热传递, 或将光伏板视为单层结构来分析其与周围局部环境的热传递。这允许计算特定条件下 PV 板的温度分布。OpenFOAM 和 Fluent 是广泛使用的开源商业软件

CFD 软件。此外, STAR-CCM+、SimScale、COMSOL 和 Cradle CFD 通过其可用的解算器提供了类似的功能。Butterfly, 在 Rhinoceros 中运行 OpenFOAM 解算器

- Grasshopper 生态系统, 允许对 PV 层进行详细模拟。在这个生态系统中, Eddy3D 和 NuadaCFD 也是可用的选项。对于更大规模的风流模拟, PALM-4U 是 ENVI-met 的开源简化版。

能源和室内条件预测受光伏装置和室外气候影响的能源产生和消耗以及室内条件, 包括天气条件、能源损耗、占用率和建筑物中的电器。光伏电池板功率输出的模拟可以是简单的模型, 也可以是考虑温度、辐照度和模块结构的详细模型[6]。每种光伏技术都有一个最佳温度范围, 温度系数会影响电压、电流和功率输出。光伏系统损耗的准确估计在光伏系统性能建模中至关重要。这些损耗包含各种因素, 包括直流损耗、交流损耗和其他因素, 如污染、阴影、逆变器低效、退化、系统可用性、太阳跟踪和初始光诱导退化[7]。通常, 光伏性能损失通常由降额系数表示, 该系数会降低光伏阵列的功率输出, 以考虑对光伏系统发电量的负面影响。降额系数通常通过现场测量或估算获得。然而, 在复杂的城市环境中, 城市微气候的动态和不断变化的性质带来了挑战。因此, 仅仅依靠

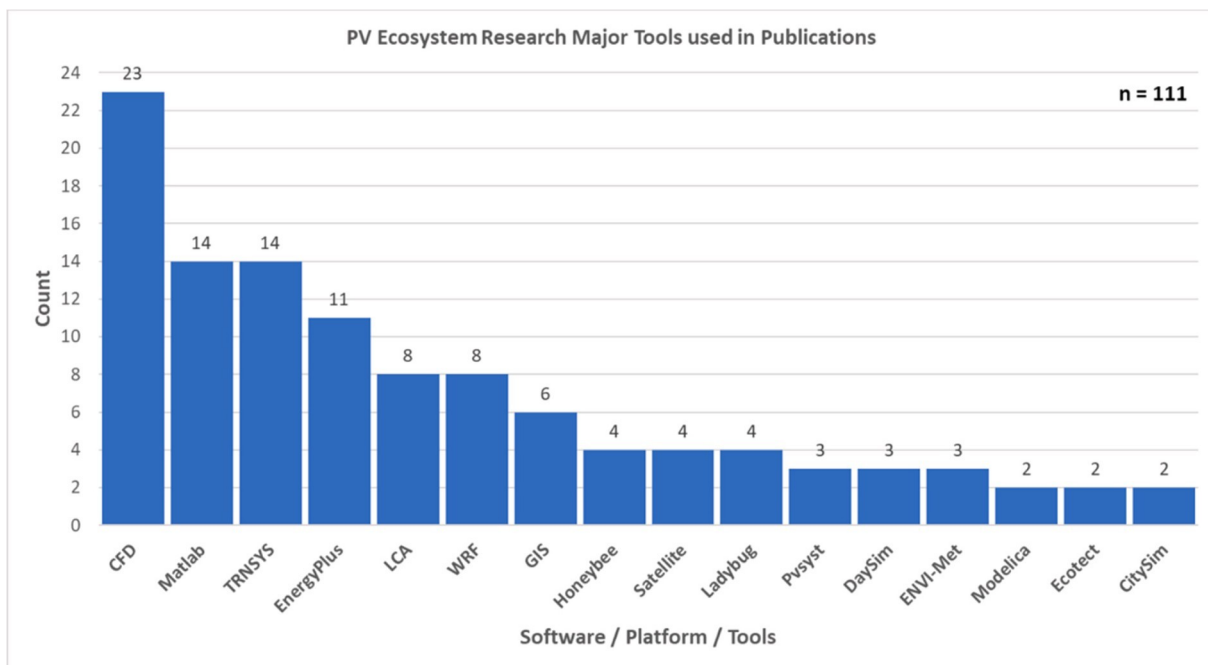


图3。光伏生态系统研究领域中使用最多的软件或工具。

经验系数往往无法准确捕捉现场因素(如温度和风速)对光伏发电效率的影响。这突出了结合其周围的动态环境微气候条件来分析PV板的发电性能的需要。

由于太阳能在整个系统中被转化为电能,光伏板的发电导致大量的热量产生。这种热量改变了建筑围护结构的热属性,并随后通过建筑及其周围环境传递,最终影响室内空气温度、冷负荷和居住者的热舒适性。考虑到气候变化和UHI效应对热舒适性和增加的建筑冷负荷的影响,仔细平衡光伏系统设计的成本和收益变得至关重要。设计决策,特别是在城市范围内,应该考虑光伏系统对UHI效应的影响。然而,现有的软件工具还没有解决这方面的问题。因此,如果设计工具能够提供对所提出的设计将如何影响所选位置的UHI效应的洞察,这将是有益的。为了全面了解不同环境条件下的影响,有必要进行一项涵盖整个昼夜循环的综合研究。

总之,有许多设计和管理工具针对太阳能光伏板价值链中的各种利益相关者,涵盖了地球物理、技术、经济和环境方面,但没有一个工具能够完全解决与整个项目设计和管理相关的所有因素。虽然正在努力弥补这些差距并开发更全面的工具,但城市环境的复杂性和所涉及的各种考虑因素使得有必要将不同的工具和工作流程结合起来,以评估光伏系统设计的各个方面及其对城市环境的影响。

3.2. CFD应用

计算流体力学,特别是有限体积法(FVM)类型,是一种有效的模拟平台,可以实现城市气候的最高精度预测,特别是在光伏板的规模上。图3显示了光伏生态系统的已公布研究领域中常用的工具,其中CFD占据了首要位置。建筑和城市环境中使用最多的软件是CFX、COMSOL、

Fluent, OpenFOAM, Phoenix, STAR-CCM+和ENVI-met给别人喜欢PALM[8]。这些模拟可以单独进行,也可以与其他模拟软件一起进行,如大规模的WRF

TRNSYS、EnergyPlus、LadyBug、bee、MATLAB建立建筑规模的光学、电气模型和热传递模型。CFD模拟的准确性取决于几个因素,包括详细程度、场地和数据假设以及建模过程中采用的简化。耦合考虑风

和热传递机制,如传导(一维到三维)、对流[9]和辐射(包括像P1[11]这样的太阳能负荷模型[10]),CFD模拟可以达到所需的精度。它可以考虑太阳辐射的直接和散射成分以及长波天空辐射。这需要输入参数,例如表面反射率/反照率、吸收率/发射率、透射率以及包括密度、比热容和热导率在内的材料属性。它通常用于验证与影响热舒适性[12]的UHI效应[11]、光伏板和建筑物之间的空气间隙[13]、电池效率影响以及光伏系统的热量释放有关的测量温度。表2总结了在审查出版物中用于评估PVs对城市温度影响的软件、工具和方法。这些包括使用气候模型如WRF模型进行的全球和区域范围的模拟。在全球范围内,地理信息系统和卫星图像通常与气候模型结合使用,以分析和显示太阳能潜力、资源可用性和系统性能的空间方

面。MATLAB, TRNSYS, EnergyPlus, Modelica和Rhinoceros以及Grasshopper工具套件通常用于能源系统建模、效率以及建筑物到城市规模的优化。还有其他用于特定分析的自行编写的代码、开源和商业软件,例如碳排放、生命周期分析、基准测试、概率分析、统计学习算法、ML优化方法和零能耗设计分析。这些工具有助于提高太阳能

光伏发电的效率、有效性和环境友好性可持续性和弹性的前景。

表2
光伏板对温度的影响。

规模	类型	Ko ppen 气候区	方法	系统模型化	结果
宏观-中观尺度 (全球- 区域-城市 秤)	建筑屋顶	Bwh, Csb, Cfa	提出太阳能光伏板的有效反照率为反 射率之和 和太阳能转换效率， 在辐射模型中应用于 替换地表反照率	气候模型，例如 WRF、MM5	↓ 地表温度 0.04-0.13 ℃(公元 2100 年) [14] ↓ 5 米空气温度 0.2 ℃(下午 3 点开 2013 年 7 月 14 日， 夏天) [15] ↓ 气温 0.9 ℃(白天)， 0.5 ℃(夜间居住建筑)， 0.4 ℃(夜间工业建筑)， 0.1 ℃(夜间商业建筑) [16] ↓ 2 米空气温度 0.5 - 1 摄氏度(一月 2007 年至 2009 年， 夏季) [17] ↓ 气温 0.2 ℃(白天)和 2003 年 8 月期间 0.3 摄氏度(夜间) [18] 7 月 29 日气温 0.1 - 0.2 摄氏度 和 2002 年 8 月 10 日 [19] ↓ 气温 0.2 - 0.4 摄氏度(白天) 10-19 时为 0.4-0.8 摄氏度(夜间) 2009 年 7 月 [20] 2 米空气温度 1.5 摄氏度(白天) 和 ↓ 2 米空气温度 0.5 ℃ (夜间) [21] ↓ 2 米空气温度 0.23 - 0.29 摄氏度 (白天)， 0 - 0.6 摄氏度(夜间) 2017 年 7 月 21 日至 27 日 ↓ 2m 空气温度 ~ 0.5 ℃(热 2018 年夏季) [23] ↓ 白天:屋顶 (2.1 ℃) 墙 (0.8 ℃) ↓
	中-局部尺度 (市区 秤)	Cfa, Cfb	嵌入式光伏板传热 城市冠层能量模型 平衡模型	气候模型嵌套能源 基于平衡的城市树冠 模型，如 WRF + BEP/BEM，CM- 不列颠帝国勋章	7 月 29 日气温 0.1 - 0.2 摄氏度 和 2002 年 8 月 10 日 [19] ↓ 气温 0.2 - 0.4 摄氏度(白天) 10-19 时为 0.4-0.8 摄氏度(夜间) 2009 年 7 月 [20] 2 米空气温度 1.5 摄氏度(白天) 和 ↓ 2 米空气温度 0.5 ℃ (夜间) [21] ↓ 2 米空气温度 0.23 - 0.29 摄氏度 (白天)， 0 - 0.6 摄氏度(夜间) 2017 年 7 月 21 日至 27 日 ↓ 2m 空气温度 ~ 0.5 ℃(热 2018 年夏季) [23] ↓ 白天:屋顶 (2.1 ℃) 墙 (0.8 ℃) ↓
	建筑屋顶 和立面	特许金融分析 师		基于嵌套 CFD 的气候模型 城市冠层模型，例如 WRF + CFD +一维稳定- 光伏发电的状态传热模型 嵌板	离屋顶和地面 1.5m 高:空气 最高 0.1 摄氏度 ↓ 夜间:墙壁 (4.3 ℃) 屋顶 (1.4 ℃) ↓ 屋顶和地面以上 1.5m 高度:空气 最高 0.4 摄氏度 [24] ↑ 表面温度 0.4 ℃(夏季 下午) [25] 年平均气温 1.9 摄氏度 [11] ↑ 2.5 米年平均气温 3 - 4 ℃ [26] ↑ 2 米年平均空气
	太阳能发电厂 在自然沙漠中	Bsk, Bwh	系统模型化	WRF, CFD 计算流体动力学和现场测量	↑ 表面温度 0.4 ℃(夏季 下午) [25] 年平均气温 1.9 摄氏度 [11] ↑ 2.5 米年平均气温 3 - 4 ℃ [26] ↑ 2 米年平均空气
		Bsk, Bwh, 总载重吨位 (deadweight capacity)	现场测量	进行受控实验	温度 9.7 摄氏度(白天)和 3.8 摄氏度 (夜间) [27] ↑ 1.5 米最高气温 1.3 摄氏度 (白天)无显著差异 (夜间) [28] ↓ 0.53 ℃ 日平均地表温度 白天 0.81 摄氏度， 夜间 0.24 ℃ [29] ↓ 夏季室内不适程度 小时在马赛 (4.3 %)， 巴黎 (9.7 %) 斯特拉斯堡 (7.9 %) [30] ↓ 2 米空气温度 1 ℃ [31] ↓ 1.5 米 UTCI 0.07 ℃ 平均 0.2 ℃ 最大 [32] UHI 效应利用 BIPV 依赖后 原始建筑的表面吸收率。 需要更少的冷却负荷 与传统屋顶相比， 因为 遮光和 0.2 米空气间隙 [33]。 ⊗urban 峡谷气温， 9.4 摄氏度 屋顶和带 BIPV 的立面温度 ↓ 4.6 摄氏度 因为空气间隙 [34]。 ↑ 最高日显热通量和 ↓ 11% - 50 %总显热通量 [35] 平均屋顶表面温度
	微尺度 (街道- 建筑物 秤)	哦，天哪， BSk, BWh, BWk, DWc Cfa, Cfb Csa, Csb Dfa, Dfb	遥感 已建立的光伏板热传递 模型	MODIS 热波段， ArcGIS TRNSYS, EnergyPlus, ENVI-met， 一维稳态热 转移模型	↓ 夏季室内不适程度 小时在马赛 (4.3 %)， 巴黎 (9.7 %) 斯特拉斯堡 (7.9 %) [30] ↓ 2 米空气温度 1 ℃ [31] ↓ 1.5 米 UTCI 0.07 ℃ 平均 0.2 ℃ 最大 [32] UHI 效应利用 BIPV 依赖后 原始建筑的表面吸收率。 需要更少的冷却负荷 与传统屋顶相比， 因为 遮光和 0.2 米空气间隙 [33]。 ⊗urban 峡谷气温， 9.4 摄氏度 屋顶和带 BIPV 的立面温度 ↓ 4.6 摄氏度 因为空气间隙 [34]。 ↑ 最高日显热通量和 ↓ 11% - 50 %总显热通量 [35] 平均屋顶表面温度
		视频 (同 audio frequency) 视频 (同 audio frequency)	现场测量	进行受控实验	4.12 摄氏度(白天) [36] 气温
		Csa		实验和 TRNSYS	大约 PV 根据屋顶和 光伏安装类型 [37] 屋顶表面温度 ↑ (白天)和 ↑ (夜间) [38] ↓ 4 - 5 ℃ 最高温度和
	建筑屋顶	美	现场测量和模拟	STAR CCM + EnergyPlus, CFD	

和正面

~ 2 ~ 3 °C 最低温度 PV
模块和常规窗口。

(下一页继续)

规模	类型	Ko ppen 气候区	方法	系统模型化	结果
室内建筑	室内建筑	哦	模拟	BIPV 屋顶和 立面整合	↑ ↓ 86 % 7 9 4 0 m m a a d i t h e a m a t e l m c o p e r f a c t u r e PV 模块和之间的区别 传统窗户 最高温度 ↓ 10 9 C 水平方向的差异和 垂直方向上的 4. 5 9 C [39] ↓ 4 9 C 整体气温 集成, ↑ 3. 15 9 C 最大空气 温度建筑立面 积分, ↑ 2. 7 9 C 最高气温 -建筑屋顶一体化[40] ↑ ~ 5 9 C 室内空气温度-BIPV 屋顶, 室内空气温度 ↓ 2. 5 9 C- 假天花板隔热材料[41] ↓ 2. 5 9 C 最高上限温度 差异-倾斜光伏和暴露屋顶。 光伏温度介于两者之间。在 夜间, 平坦光伏>倾斜光伏>暴露屋顶 ↑ 温度[42] ↓ 5 9 C 最高室内空气温度 (夏季)-薄膜非晶硅 太阳能电池[43]
					MATLAB R2016b
					进行受控实验 和一维瞬态加热 曲柄的磁通传导模型 尼科尔森方法。
					进行受控实验 和一维瞬态加热 曲柄的磁通传导模型 尼科尔森方法。
					进行受控实验
	地面	中心纤维体	模拟	TRNSYS	↓ 1 9 C 室内表面温度 白天窗户比普通窗户大 时间(夏季), ↑ 2 9 C 室内表面温度 期间窗口比正常窗口大 夜晚时间(冬季) (44) ↓ ~ 8 9 C 独立式光伏比 BIPV 温度(夏季)[45] ↓ 13 - 18 9 C 表面温度
					土壤和 11 - 15 摄氏度之间的差异 沥青(实验) ↓ 表面温度 2 - 5 摄氏度和 1. 8 米 期间环境温度为 0. 5 - 1 摄氏度 2013 年 7 月[46] ↓ 表面温度 27. 11 % [10] ↓ 表面温度 3 - 5 摄氏度(夏季) [47] ↓ 最大路面 温度下降 8. 23 摄氏度(春季), 7. 30 摄氏 度 (夏季)、9. 37 9 C(秋季)和 4. 48 9 C (冬天)[48] ↓ 11 9 C 平均覆盖路面 表面温度(光伏树冠层 与普通天篷相比)[49] ↑ 80 % 显热通量(白天), ↓ 20° C(白天)和 ↑ 4° C(夜间) 阴影表面温度和 ↓ 40° C 平均辐射温度(中午)(PV 结构与无阴影的 沥青表面) (50) 站点: ↓ 0. 23 9 C 和(晴天)0. 18 9 C
					计算流体动力学, 环境气 象, MATLAB, 热 转移模型
					进行受控实验
					进行对照实验 和 ENVI-met 模拟
					(多云)平均气温, 模拟: ↓ 2. 83 9 C 光伏温度 (晴天), ↓ 0. 71 9 C 光伏温度 (多云)[51] ↓ 0. 29 9 C(1. 2 米)和 ↓ 0. 06 9 C(2 米) 平均气温[52]
	中心纤维体	Bwh, Csa	现场测量	进行受控实验	↓ 1. 47 - 1. 66 9 C 年平均土壤 温度[53]
					进行受控实验 (草:看麦娘, 大麦, 苜蓿、大蓟和 手指)
					进行受控实验 &天气生成模型, WeaGet 和 AVrainmodel 到 检测土壤温度和 湿度动态
					进行受控实验
					(冬小麦, 土豆和草- 三叶草)
	神户	现场测量	现场测量	进行受控实验	每日 ↓ 1. 2 9 C(2017 年)和 ↓ 1. 4 9 C(2018 年) 日平均土壤温度 ↓ 1. 1 9 C 日平均气温 尤其是夏天[54] ↓ 2. 46 9 C 平均气温和 ↓

(番茄)

5.31 摄氏度平均土壤温度(赤字灌溉案例)

(下一页继续)

规模	类型	高朋气候区	方法	系统模型化	结果
水		特许金融分析师	现场测量	进行受控实验	↓ 0.84 °C 平均气温和 ↓ 4.72 °C 平均土壤温度 (全温度灌溉案例) [55] ↓ 1.1 °C 平均土壤温度 [56]
			现场测量和模拟	(西兰花) 进行受控实验 (玉米作物) 和 GECROS 辐射和阴影模型 作物生长模拟器 进行受控实验 (大米)	↓ 1 °C 平均土壤温度-太阳跟踪静态光伏部署的光伏 [57]
			现场测量		↓ 0.2 °C (强阴影) 和 ↓ 0.1 °C (弱阴影) ↓ 2 ~ 4 °C 为表面温度 树荫 [58]
	水	Csa	现场测量	进行受控实验 在 FD (全密度光伏阵列) 和 HD (半密度光伏阵列) 以上 小麦、莠苣、黄瓜	一日平均气温介于 全日照处理与阴影处理 土壤温度: ↓ 1.9 °C (FD) ↓ 1.8 °C (HD) 0.05 米深度-小麦 ↓ 2.1 °C (FD) & ↓ 2.3 °C (高清) 25 厘米深 (小麦) ↓ 2.1 °C FD & ↓ 2.3 °C (HD) (生菜) ↓ 0.5 °C (高清) & ↓ 0.6 °C (FD) (生菜) [59]
					边缘表面温度约为 14 °C 与不接触水相比 (< 0.1 - 0.8 摄氏度) 水温, 工厂 增长减少了三倍 缺氧条件下发生较少 氧气浓度 [60]
					↓ 3.2 °C 表面温度对比 至陆地 (荷兰) 和 14.5 °C
		中心纤维体 视频 (同 audio frequency)	计算流体动力学 (双面)	银铅焊料	与屋顶相比的表面温度 (新加坡) 浮动光伏热损失系数 高达 22 瓦/平方米的面板, 相比之下 土地和屋顶 ↑ 荷兰 3 % 的能源产量和 新加坡高达 6% [61]
				土地和屋顶部署 对于能量产出预测	



图 4。102 个地点在已审查研究来源中的分布 (Tableau Public)。

4. PVs 对城市热环境的影响综述

图 4 示出了来自所审查的研究来源的 102 个位置的分布。它们主要在美国进行，占出版物的三分之一。此外，欧洲的一些城市，包括希腊、法国、意大利、葡萄牙，非洲大陆的喀麦隆，以及大洋洲的澳大利亚

像中国、日本和新加坡这样的亚洲国家。基于 Ko ppen 气候分类系统以及南半球的热带气候研究非常有限。这表明有很多机会进行进一步的研究，以探索热带和亚热带地区光伏发电部署的影响。该地区太阳能利用率最高，许多发展中城市目前人口增长迅速

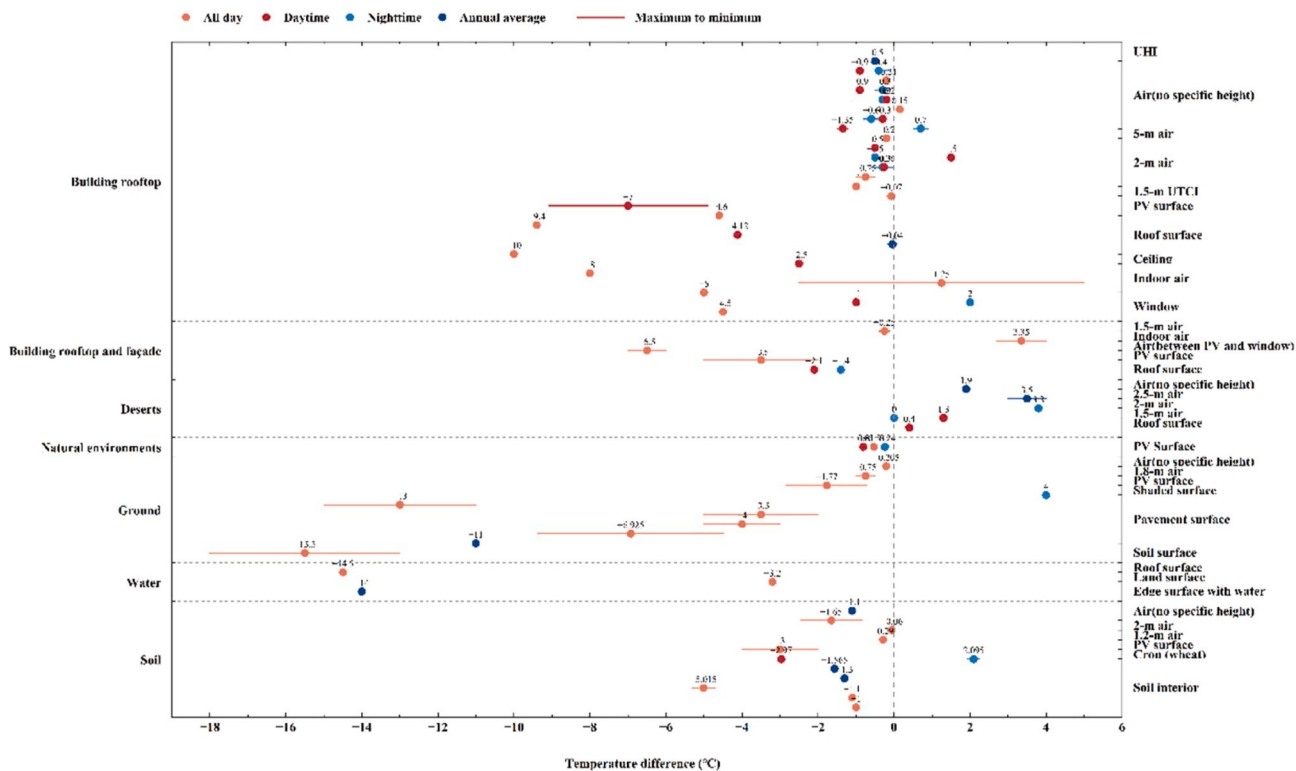


图 5. 光伏板对城市环境温度变化影响的荟萃分析。

在不久的将来。UHI 效应和热舒适之间的潜在相互作用使得理解在该地区的部署的影响变得很重要。

4.1. 影响 PVs 对温度影响的因素:城市、沙漠和水环境

本节根据部署类型、气候覆盖范围,

以及采用的研究方法,包括模拟、测量和复合方法。目的是对现有的关于光伏应用对城市热环境的影响的文献进行全面综述。

图 5 示出了与不存在 PV 板的相同环境相比, PV 板对城市环境中的温度变化的影响的元分析的总体概况。这些环境包括建筑屋顶到平地和水体的立面。表 2 是为了便于

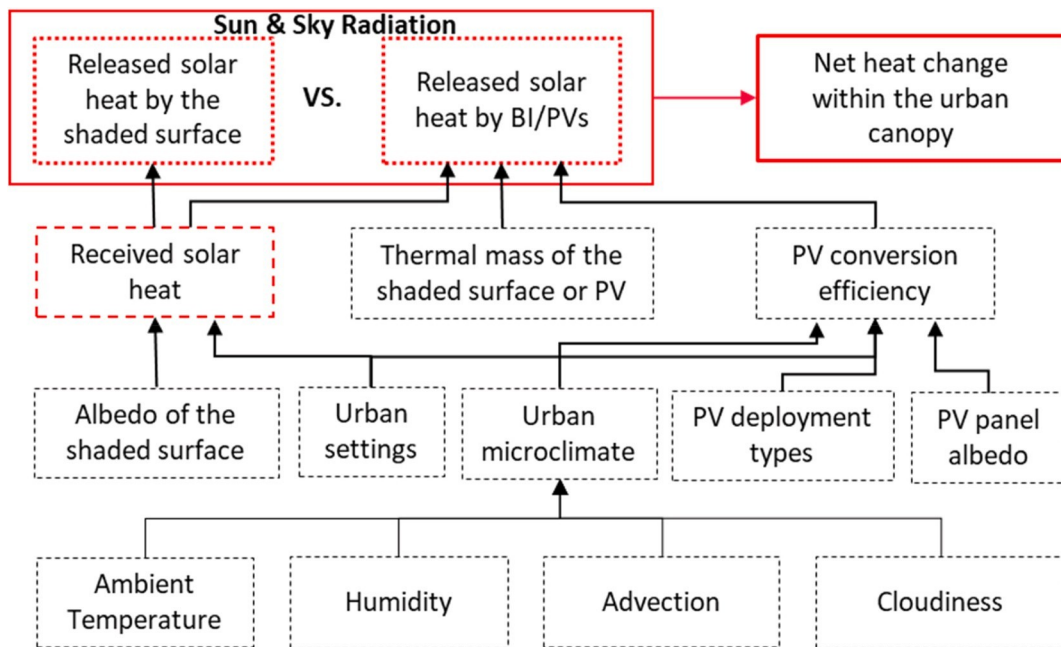


图 6. 影响 PVs 对城市环境温度影响的因素。

更详细地理解并提供关键发现的简明摘要，突出从审查的研究中得出的主要结果和见解。

如表 2 所示，各种光伏安装方法对城市温度有明显的影响。现有的一些研究表明，太阳能发电厂可能具有提高城市温度的潜力。这可归因于与周围环境相比，太阳能发电厂的反照率较低。PVs 作为遮荫物或铺设在路面上可能会降低环境空气温度。当谈到建筑应用的光伏系统对城市温度的影响时，即使是在相同的气候带、相同的安装形式和规模下，结果也更加矛盾。在专门关注安装在水体上的光伏板的 15 种出版物中，只有两篇论文讨论了对水温 and 光伏性能的影响。由于这与陆上装置相比相对较新，所以这种趋势是可以预料的。

研究认为，光伏发电的部署可以降低城市温度。支持这一观点的一个论点是，光伏电池板可以减少大约 50 % 的总显热通量，特别是在取代沥青、薄膜和石渣屋顶等深色表面时 [62]。这是因为光伏电池板可以将吸收的太阳热量转化为电能，而不是在城市树冠层积累热量。具有低热质量的 PV 板在夜间也快速冷却，尤其是在高天空视野系数的环境中，可能达到低于环境空气温度的温度。

相反，许多研究表明，光伏板可以提高周围空气的温度。这通常归因于它们的低能量转换效率。与城市中典型的反照率值（平均范围为 0.15 至 0.22）相比，面板的反照率约为 0.1，以最大限度地吸收太阳能 [63]。这种低反照率导致城市冠层对太阳辐射的吸收增加。然而，大多数现有的光伏电池板由晶体硅制成，在整个太阳光谱范围内，太阳反照率通常低于 0.11，转换效率低于 20 % [4]。因此，这些光伏板吸收的约 80 % 的入射太阳能被转换回热能。研究还表明，光伏转换效率可以受气温和地面风速的影响 [64]。在某些太阳强度条件下，气温升高 1 ° C 会导致输出功率和转换效率下降分别约为 0.65 % 和 0.08% [65, 66]。

通过对光伏建筑应用案例的深入比较分析，得出相互矛盾结果的主要原因之一是异质的城市环境，其光伏应用的场景和背景各不相同。当安装光伏板时，这将导致城市树冠内的净热变化。图 6 总结并指出了在城市环境中光伏应用对气温影响的复杂性和多面性。

在城市环境中，尤其是高层高密度城市，建筑物和植被之间的阴影机会很高，动态城市小气候很复杂 [67]。具体情况，如光伏系统的类型，安装位置和周围的表面属性，影响城市温度的整体效果。PV 对室内环境的影响取决于它是附着在表面上还是集成在表面上。作为附件，它在白天提供遮阳，但由于散热有限，可能会导致表面温度升高。作为 BIPV 系统，它直接将辐射和传导转移到室内，导致白天室内温度较高。但是，它在夜间可以比附着方法更快地释放热量。要获得良好的室内热环境，需要太阳热膜过滤器或更厚的隔热层，以达到一定的深度，包括在内部增加空气间隙，以防止热量直接传递到室内。Skandalos 等人 [68] 提出了一个 BIPV 气候设计框架，该框架考虑了四个气候区的全球水平辐射值，以在设计建筑整合时最大化能源利用潜力。

4.2. 当前研究中采用的热环境方法和评级标准

表 2 显示，大多数研究利用模拟方法来评估 PVs 对城市温度的影响，而少数研究依赖于现场测量。因此，出现了一个假设，表明不一致的研究方法可能导致对 PVs 热环境影响的不准确评估。本节批判性地考察了当前研究中采用的研究方法和评级标准。

4.2.1. 建模技术和现场测量

为了更好地理解光伏系统应用对城市温度的影响，准确再现热通量需要适当的建模技术。这包括大气、城市天篷、建筑表面和面板本身之间的热传递。对于城市分布式光伏电池板的大规模应用，现有研究通常使用气候模型，如 WRF，来探索电池板转换效率、反照率和城市地表平均反照率对城市热环境的影响 [15 - 17]。这些模型允许在更大范围内探索影响城市气候的因素。然而，值得注意的是，用于气象预测的气候模型通常会简化地表特征，如建筑物体积和城市树冠层的布局，以获得整体的整体影响。在这些模型中，光伏板通常被表示为具有有效反照率的单面热大尺度表面。通过调整辐射模型中的地表反照率参数，可以捕捉到光伏电池板对地表-大气界面辐射平衡的影响，从而能够对城市气候进行宏观模拟。这导致空间分辨率较低（通常网格分辨率大于 1 km），从而阻碍了对各种安装配置中光伏板和建筑物之间的气流和热传递的考虑。

在一些研究 [18, 20] 中，城市冠层能量平衡模型或计算流体力学

模拟嵌套在气候模型中，以再现城市冠层中的气流和热传递过程。然而，这些研究假设光伏板水平安装，忽略了光伏板与安装表面之间气流的影响，简化了上下光伏表面与周围环境之间对流和辐射过程的分析。这些简化可能导致计算结果的不准确性和局限性，因为它们没有完全捕捉到所涉及的复杂相互作用和热传递机制。与 WRF 模型等大型和中尺度 (1-1000km) 数值模拟不同，CFD 模拟通常不包括气象特征，如云、降水和大气辐射。与城镇能量平衡等城市冠层模型中城市形态的 2D 表示法不同，CFD 以更高的空间和时间分辨率模拟了城市空间中热量和质量的三维传递。CFD 模拟的典型计算域范围为 0.1 至 5 km，空间分辨率范围为 0.1 至 100 m。然而，在非稳态条件下模拟局部城市规模的耦合温度场和速度场需要大量的计算资源和高质量的实验数据进行验证。应用计算流体动力学模拟来评估城市树冠内按比例增加的光伏应用对城市风和热环境的影响，需要在多个尺度上建模，从单个光伏板（米尺度）和建筑物（10 米尺度）到城市街区（100-1000 米尺度）。模拟单块光伏板可能需要数百万毫米级的网格，而解决光伏板大规模安装后城市树冠内的湍流和传热往往需要数十亿或数百亿个网格。

在微观尺度上，一维传热模型和计算流体力学

模拟通常用于改进模型或进行现场测量，以研究光伏系统热电性能参数、安装类型和其他参数对光伏发电系统的影响

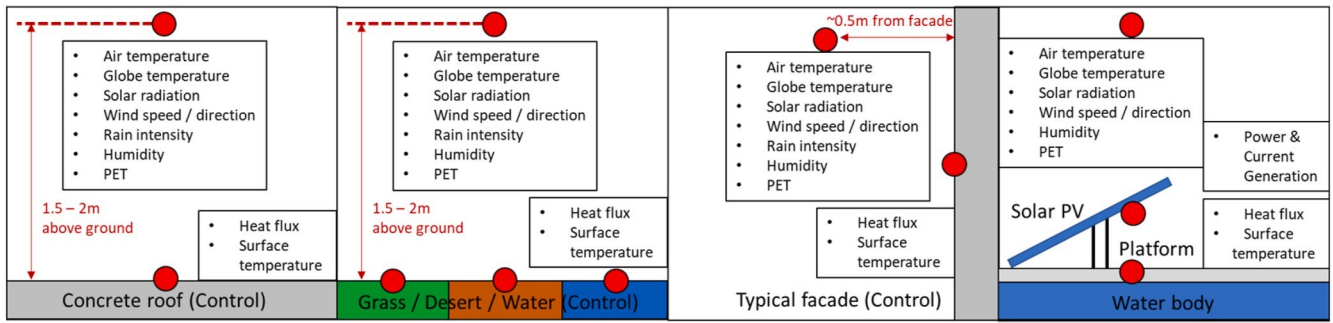


图7. 建议在屋顶、草地、沙漠、水体、立面以及水体上的太阳能光伏(从左至右)上设置控制环境测量装置(PET =生理等效温度)。

局部热环境[25-27, 37, 50, 69]。微尺度研究侧重于光伏电池板内部的能量流动过程, 允许精确分析电池板的散热如何影响局部气流。然而, 这些研究往往没有考虑城市冠层特征(如建筑高度和密度)的影响, 这使得评估热环境的局部变化对整体城市热环境的影响程度具有挑战性。

除了在每个尺度上不同研究方法的缺点之外, 研究提供的测量和边界条件也有很大不同。评估的环境高度通常从地面或屋顶的1.5米到1.8米到2米到5米不等。由于各种因素会影响不同高度的水平光伏板安装, 因此比较不同项目和地点的结果具有很大的挑战性。这些因素包括建筑高度限制、维护要求、植被整合和土壤考虑。标准化和更公平的比较是使用面板下方和上方的高度比, 低至水平面上方0.3米至2米。许多研究没有报告面板下方的环境温度以及从面板下方到上方的温度和风剖面。Cortes A等人【24】进行的研究是一个很好的参考, 该研究不仅分享了WRF模拟提供的至少气温和风剖面的边界条件, 可用作CFD模拟的输入。还报告了光伏装置影响环境的重要位置的空气和表面温度结果。如果有完整的数据来定义、运行和比较模拟结果, 观众可以很容易地复制模拟。此外, 实验观察的范围往往是有限的。光伏系统在实验观察中的工作状态, 如开路、闭路、最大功率或固定电压模式, 在不同的研究中会有所不同。缺乏一致性使得直接比较研究结果并得出明确的结论具有挑战性。

4.2.2. 评级指标

值得注意的是, 热环境表现出时空特征。应当明确规定评估热环境的具体热指标、比较矩和高度水平。然而, 目前还没有评估光伏系统对热环境影响的标准化评级标准, 这主要是由于研究兴趣和目标的差异。

对建筑用光伏系统和光伏路面的研究通常集中在白天和/或夜间气温的变化。这通常是通过在安装PV板前后模拟或测量地面以上一定高度(通常在1.5至5 m之间)的空气温度来实现的。一些研究评估了安装现场的日平均或基于瞬间的表面温度, 而另一些研究量化了光伏板或安装现场表面的显热通量。

对于太阳能发电厂, 光伏热岛的概念是普遍的

用于评估UHI效应。研究人员对各种温度值感兴趣, 包括光伏板正面和背面的温度、光伏板下方的空气温度以及光伏板下方的地面温度。PV热岛通常通过比较PV板安装地点的环境温度与周围区域(例如, 300米半径内)的温度或者通过比较附近城市空间的UHI强度来量化。

从检查的文献来看, 只有三项研究考虑了对热舒适的潜在影响, 使用了常见的指数, 如UTCI。Berardi和Graham [32]利用UTCI度量标准和微气候分析工具ENVI-met来模拟行人高度的UTCI。然而, 计算域的边界条件没有规定, 光伏板的材料属性, 包括转换效率, 过于简化, 忽略了对其光电热特性的考虑。因此, 对放热影响的分析是不准确的。Kabor e等人通过耦合热模型(TRNSYS)和气流模型(CONTAM)进行了模拟, 以评估光伏板对室内热舒适性的影响[30]。他们将热不适指标确定为相对降低室内不适度小时的制冷效率。然而, 对室外热舒适的影响没有进行调查。Pham等人研究了PV遮阳结构对下方行人的热舒适益处。他们利用有效平均辐射温度作为室外热舒适的衡量标准, 这是使用经验公式计算的。光伏部署对室外热舒适的潜在影响, 特别是与太阳能板遮阳相关的温度变化的影响, 还没有得到很好的理解。

5. 研究差距和未来方向

审查的研究表明, 光伏板和周围环境之间存在热传递, 对城市温度的影响因具体部署类型和现场环境而异。但是, 即使在相同的部署类型和站点上下文中, 也会观察到相互冲突的结果。这些差异归因于低分辨率、不适当的假设和模拟中设定的边界条件, 以及不一致的现场测量协议。

总之, 有必要将评估光伏发电对城市热环境影响的方法标准化。这将有助于现场或测量数据的潜在再现性, 以便进行比较。如果测量环境温度、风速、接收到的太阳辐射(如果可能, 理想情况下包括直射和散射成分)以及面板周围的(垂直和水平)表面温度(如果可能, 包括热通量), 则可以很好地捕捉环境对PV温度的影响。如果有植被或水体, 应获取土壤和水的温度(如果可能, 包括热通量)。这种全面的数据收集有助于全面了解

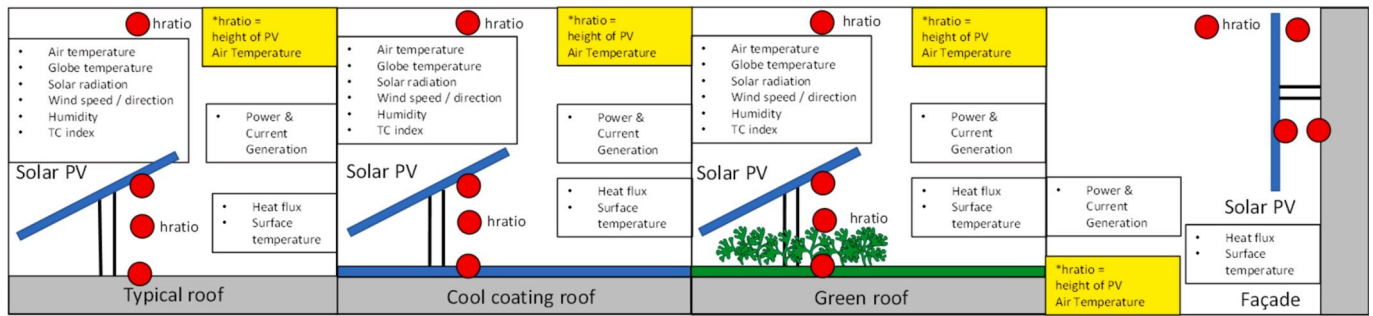


图8. 屋顶太阳能光伏的拟议环境测量设置，包括冷涂层屋顶、绿色屋顶和立面(从左至右)的缓解策略(TC = 热舒适)。(关于本图例中颜色的解释，读者可参考本文的网络版本。)

对光伏板的环境影响，然后可以输入到模拟中进行分析。提出 hratio 的概念是为了说明不同的 PV 安装高度或离表面的距离。图 7 和图 8 示出了在所有上述情况下捕捉关键点的建议，便于公平和直接比较。在现场测量的支持下，进一步提出了一个集成 CFD、格子 Boltzmann 方法、深度学习和可选 ML 的综合工作流程用于 PV 影响评估。

5.1. 制定测量和模拟指南

在现场测量的支持下，一个经过验证的数值模拟方法对于评估光伏部署对城市温度、城市热岛效应和热舒适性的影响至关重要。这就需要为太阳能光伏环境中的小气候开发一个标准化的模拟过程和一个一致的、可比较的测量框架。目前，缺乏这方面的指导方针，阻碍了在不同情况下进行一致比较的能力，包括当前、未来和过去的情况。

5.1.1. 推荐的传感器测量一致性协议

测量小气候的基本设置应包括现场气象站，如图 7 所示。该气象站将在控制设置中捕捉环境条件，代表现场的自然状态，没有任何可能干扰环境条件的人工结构或表面。当光伏板和缓解策略存在时，这作为比较的参考点。当光伏板安装在水体顶部时，需要一个特定的装置来测量关键表面温度和热通量。重点测量光伏板背面和位于水体上的平台(包括使用冷却涂层的情况)的温度和热通量是至关重要的。这些测量为光伏-水界面的热行为和能量转移提供了见解。

图 8 展示了屋顶和立面上的太阳能光伏板的设置，以及冷涂层和绿化等缓解策略。应测量光伏板的背面，以及屋顶和立面的表面温度和热通量，如图 6 中针对水体环境所述的设置。这些参数以及空气温度、地球温度、太阳辐射、风速/风向、湿度和预测的热舒适指数(例如，PET、SET、UTCI)可以在相同或不同地区的情况下进行比较。

比较这些参数可以评估微气候对光伏板热性能的影响以及周围环境的整体舒适度。此外，监测电池板的功率和电流产生提供了对微气候对能量产生的影响的洞察，特别是在以过高或过低的温度为特征的极端情况下。在美国有许多声誉好、可靠的品牌

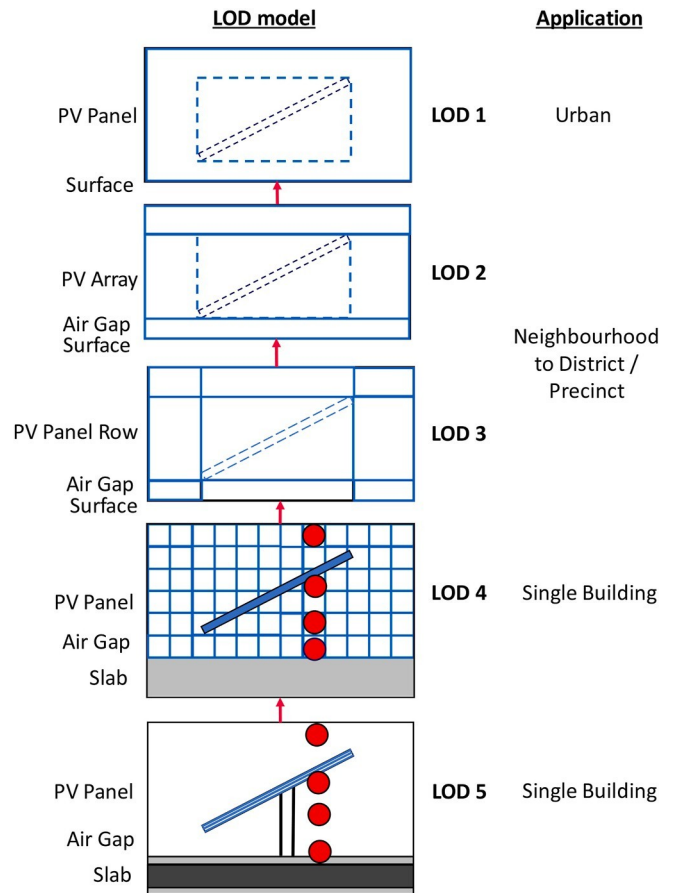


图9. CFD 模拟中的简化处理方法: 从 LOD5 (建筑和局部尺度) 到 LOD1 (全球尺度)。

提供符合或严格遵守世界气象组织(WMO)标准和要求的鲁棒传感器的市场，如 R. M. Young、LSI、Met One Instruments、Delta OHM、Delta-T Devices、Campbell Scientific、Gill Instruments、Apogee Instruments、Hukseflux、Kipp & Zonen 和 greenTEG [70]。

5.1.2. 大规模 CFD 模拟的推荐简化过程

至于大规模 CFD 模拟，本研究初步提出使用细节层次(LOD)方法来标准化建模简化过程。第一步是建立一个经过验证的模型来代表带有光伏板的表面，然后可以集成到更大规模的气候模型中。这需要研究和验证模拟光伏板的模拟方法，考虑不同的

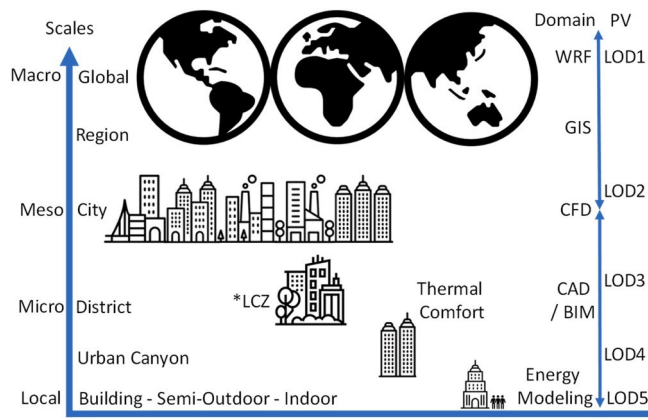


图 10. 不同规模和领域的光伏组件在模拟碳中和减缓气候变化方面的详细应用。

每一层的材料属性，以及支撑地面（例如，混凝土、冷漆混凝土或植被）。这也将有助于研究现场材料特性（尤其是混凝土）的热质量的影响。然后包括敏感性分析，以测试这种简化和组合的单层 PV 模块相对于原始多层模块的热特性将如何影响结果。简化和组合的太阳能光伏板可以进一步合并用于目标表面。表面上的所有面板可以简化为一个巨大的“面板”。然后可以在这一尺度上进行灵敏度分析，从而能够在更大的尺度上应用，从地区/微观尺度到更大的尺度。图 9 示出了 LOD 方法在 CFD 模拟的简化过程中的应用。这种方法正在进行中，并将在我们未来的工作中进行校准。

开源 CFD 软件 OpenFOAM 及其各个分支可用于该工作流程。这包括 OpenFOAM.org 分公司（如 UrbanMicroclimateFoam），OpenFOAM.com

（包括商业图形用户界面（GUI）如 BIM- VACTool）和修改版本（如商业 HELYX GUI）。支持工作流的网格生成包包括 snappyHexMesh 和 cfMesh。网格设置和质量应符合 Blocken 最新 CFD 最佳实践指南的要求

[71] 同时应增加新的提案以考虑光电板。另一种方法是使用最流行的商业 CFD 代码，即 ANSYS Fluent。建筑环境领域的其他流行商业代码包括 Simcenter STAR-CCM + CFD 和软件摇篮有限公司的 scSTREAM。云上还有软件即服务（SaaS）

按需计算，如 SimScale。基本 CFD 模拟包括剪切应力传输（SST）湍流动能-比湍流耗散率（Omega）或可实现湍流动能-湍流耗散率（Epsilon）的稳态流动湍流模型，有限体积离散坐标法（fvDOM）、P1 或地面对地（S2S）的太阳辐射模型，以及植被模型，如大气植物冠层模型（开放泡沫）和植被源（HELYX）。

图 10 描绘了所提出的用于评估能量、热性能和舒适度的 PV 板模拟的应用，重点在于减轻碳排放以及气候变化影响。该图展示了一个全面的尺度范围，从局部建筑尺度到微观尺度，其中局部气候区（LCZ）的概念是适用的，直到宏观的全球尺度。在 LOD5，通常使用 CAD 或 BIM 进行能量建模，以构建物理 3D 模型，直到 LOD2，在 LOD 2，应用 CFD 模拟。LOD1 将位于 WRF 境内，在此使用 GIS 构建物理 2D 至 2.5D 模型。

5.2. 基于模拟的光伏影响评估面临的挑战和可能的解决方案

传统的计算流体动力学方法在准确性方面是优选的，然而，当投入更多的计算图形处理单元（CPU）时，它仍然计算昂贵并且不能很好地线性缩放

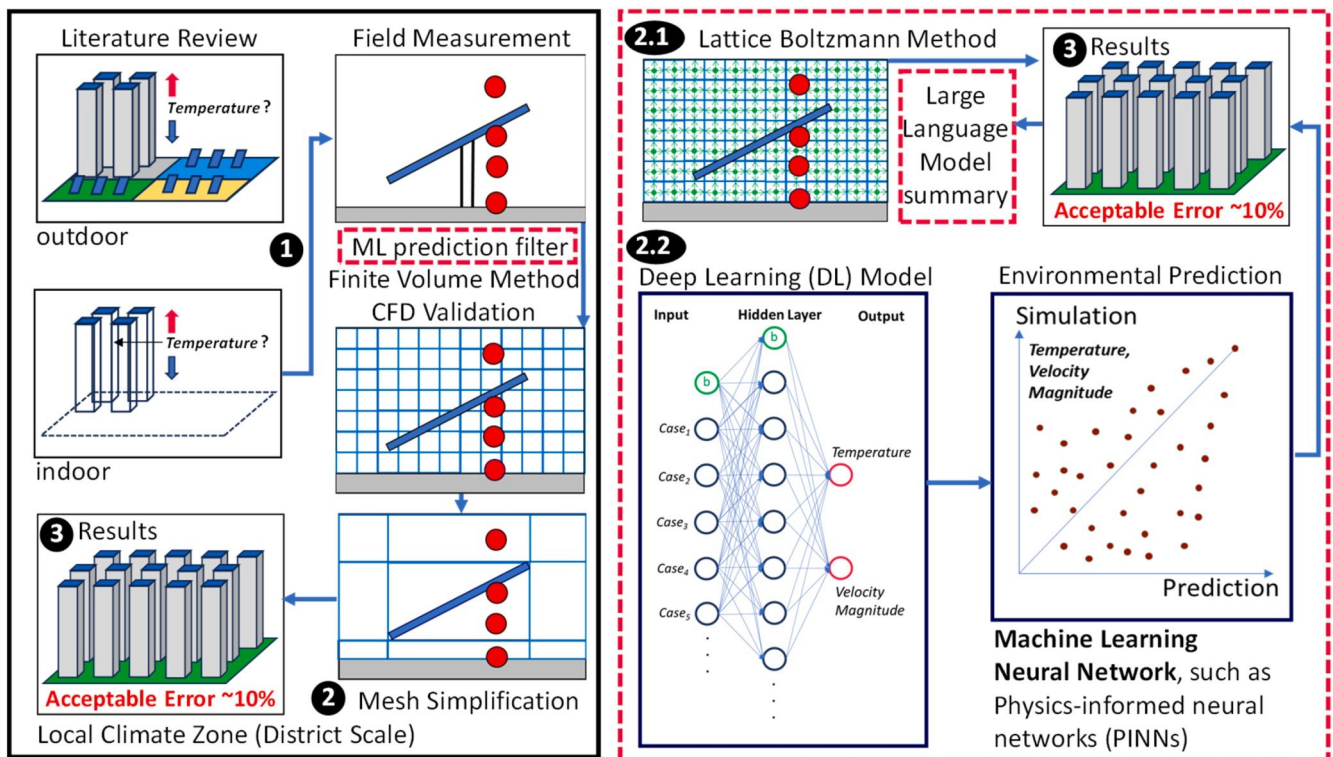


图 11. 基于模拟的光伏影响评估的 CFD - LBM -深度学习和可选 ML 工作流程。

表 3
CFD - LBM -深度学习和可选 ML 工作流的说明。

步伐	方法和目的	可选择的
1 有限体积法	FVM 是一种广泛使用的计算流体动力学方法，能够在精细层尺度上验证光伏板，允许与光伏下方的植被和土壤层整合，使其成为模拟特定场地细节和促进综合分析的最合适方法。 现场测量将为模拟验证提供性能评估点和边界条件的关键值。 考虑到光伏部署的真实环境，网格简化对于将分析从详细的屋顶、立面或地面扩展到更大的范围(如地区、区域或全球)是必要的。该过程包括集成 PV 层，在可接受的误差范围内(通常低于 10 %)最小化精度损失，简化 PV 和周围空气体积，并最终简化整个现场阵列，如图 9 所示 (LOD 5 至 LOD 1)。 LBM 是传统 FVM 计算流体力学的替代方法，用于模拟建筑环境中的风流。虽然 LBM 需要进一步验证以确保准确性，但它可以用于概念设计探索的早期阶段，如果其准确性提高，可能会成为主流方法。 ML 神经网络方法，尤其是深度学习，需要针对不同风力场景和光伏板变化的 CFD 模拟训练数据集，与传统 CFD 方法相比，提供更快模拟时间。	当在建筑物、BIPVs 或地面(路面、水、沙漠和绿地)上进行设计时，ML 预测性能有助于缩小要探索的变化范围。Infrared.city 就是这样一个现有的基于 ML 方法的平台，它可以在这个过程中提供帮助。
2 网格简化		-
2.1 格子波尔兹曼方法		-
2.2 深度学习模型		-
3. 结果	为了实现 10 %或更少的误差而不是真实的情况。这是构建环境中设计和实施性能的可接受精度。	和 ChatGPT 一样，LLM 擅长总结大量模拟结果，通过不同高度和位置的轮廓切割有效识别有问题和有利的区域，与传统工作流程相比，能够更快地进行设计修正和改进。

高性能计算领域的图形处理单元 (GPU) 内核。基于仿真数据的后处理分析方法对于促进工程实践中的实际应用是必要的。因此，引入后 CFD 解决方案，如格子波尔兹曼方法 (LBM) [72] 和 ML [73]，可以帮助克服这种模拟耗时的限制。高效准确评估光伏发电对城市影响的工作流程

温度如图 11 和表 3 所示。2.1 和的选项与传统的 FVM CFD 过程相比，图 11 中描述的 2.2 被提出以加速模拟过程。这些新的改变-当地人需要进一步的研究，以确保他们的无缝和可靠

集成到传统工作流程中。他们严重依赖 GPU 而不是 CPU，提供明显更快的模拟。设施的可用性将为顾问和研究人员提供这种选择。

LBM 的使用是基于粒子碰撞过程的 CFD 方法的离散网格版本。商业领域常见的 LBM 平台包括 Altair、SimScale 和 Xflow，而开源领域包括 OpenLB 和 Sailfish。SimScale 和 Thorton Tomasetti 的核心工作室 Nuada 有合作关系。CFD [74] 在犀牛蚱蜢生态系统中运行。它使用运行在 GPU 上的 pacefish [75] 进行比多核 CPU 更快的模拟。这些选项提供了将 LBM 集成到风流模拟中的替代工作流程。LBM 可用于验证传统的 FVM 计算流体动力学，因此行业有信心广泛应用它。

同时，深度学习方法的 ML 神经网络方法需要不同场景的 CFD 模拟的训练数据集，例如在建筑或城市环境中通常暴露的风速范围内的两个、四个或八个风向 [72]。在 PV 比例中，从 0.5 米到 2 米的各种高度以及 PV 面方向的角度也可以在训练中考虑。人工神经网络替代物可以代替昂贵的计算流体动力学分析来预测建筑物周围的风速和温度。这两种方法都应达到约 10 % 的精度，以取代传统的 CFD 方法。更详细的非定常湍流模型，例如大涡模拟，可用于训练以获得更好的精度。最后，应建立使用 LBM 和 ML 后 CFD 解决方案的最佳实践指南，以供现场采用。

5. 3. 对城市规划和设计实践的启示

由光伏板集成引起的温度和热舒适变化的评级结果可以作为指导光伏在城市环境中部署的参考。例如，考虑不同 LCZ 等级和子类中的屋顶、立面和地面覆盖。图 12 以 LCZ 为例，展示了太阳能光伏系统在不同城市形态中的部署形式。潜在的范围和可能性可以根据物理属性来确定，如 Stewart 和 Oke 在 2012 年发表的文章 [76] 中描述的几何和地表覆盖属性的表 3 所示，这些 LCZ 类和子类的物理属性包括天空视野系数、峡谷纵横比、平均建筑高度、树木纵横比和平均植物高度。通过考虑光伏板的角度、类型以及与以下因素的集成，可以扩大范围

绿化和冷涂层缓解策略，可根据潜在气温或表面温度降低进行量化。通过结合光伏发电潜力，可以使用如图 13 所示的工作流程来探索每个 LCZ 的光伏设计。可以在犀牛-蚱蜢生态系统进行系统的 LCZ 参数建模，以确定每个类别的发电性能范围。这包括不同场景的最小到最大潜力，如单独部署屋顶、立面和地面。可以基于每个类别的几何参数来模拟不同的迭代。ClimateStudio 是一个

这是确定光伏性能和净零可行性的最佳选择。使用算法的优化的后评估和使用深度学习的 ML 神经网络可以进一步确定具有 PV 组合的最佳类型以获得最佳性能。该工作流程同样重要，因为除了我们在全中国范围内大规模部署光伏电池板的主要目标(管理热量和人体热舒适问题)之外，潜在发电量也同样重要。

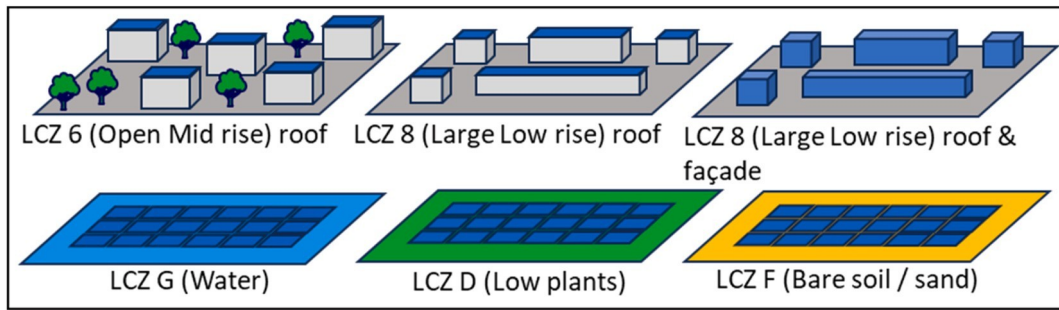


图 12。lcz 示例中的太阳能光伏集成选项。

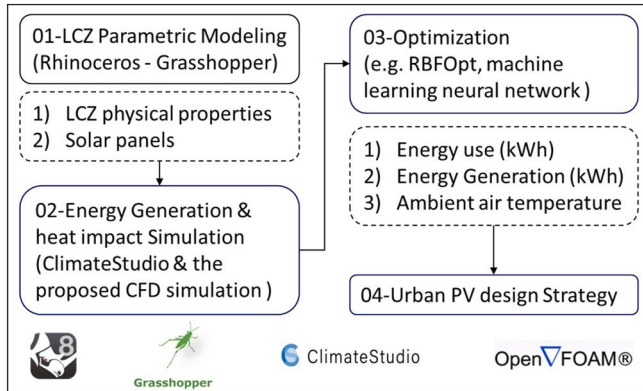


图 13。LCZ 优化和性能预测工作流程。

通过屋顶和立面的内部空间考虑能耗和冷却需求。这项工作没有考虑与风荷载、消防安全以及与立面光伏和绿化相关的潜在风险相关的结构设计方面。这些由地区法规和安全问题决定的考虑可能会在某些国家和地区对面板的放置施加李米限制。

这些研究领域对于推进高效光伏布局策略的理解和实施至关重要。从整体上考虑，一个高效光伏电站的整体工作流程通常包括三个步骤：物理评估、模拟优化和环境性能预测。物理评估通常考虑光伏布局的规划、建筑和消防规范、辐射暴露、生命周期分析以及现场场景建模。模拟优化包括基于现场和场景条件反复优化设计解决方案，重点关注环境性能。

这项分析对现有的研究进行了全面的回顾，确定了研究差距和研究方向。新加坡（一个热带城市）和中国亚热带城市深圳（一个亚热带城市）的实验装置已经开始收集至少一年的数据，用于校准模拟框架，如图 14 所示。后续研究旨在论证和增强模拟指南，并进一步探索在高密度环境中考虑多种环境性能因素的光伏电池板的最佳部署类型

5. 4. 局限性和未来工作

这项工作的范围并不直接涉及冷负荷和能源影响的室内影响，但如果室内空气温度升高，通常会产生负面影响。需要更全面的研究来分析太阳能光伏板的热传递效应



图 14。屋顶上的光伏场测量(深圳大学(左)和新加坡 GEAR(右))。



图 15。在新加坡的屋顶上对 9 种不同植物进行实地测量。

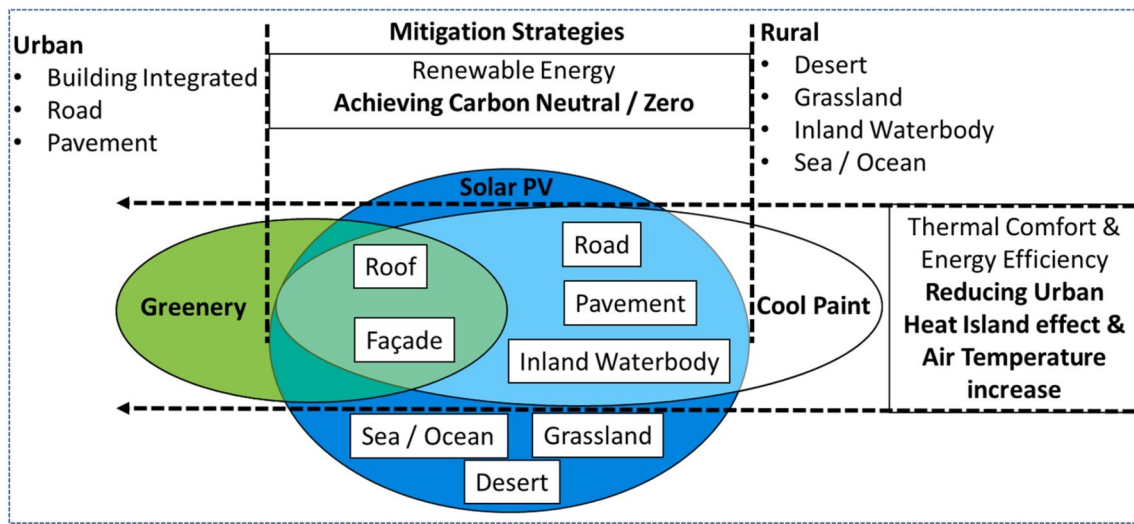


图 16。大规模光伏并网的缓解策略。

位于热带和亚热带的城市。部署类型包括调查共同定位的 PVs 和绿化、凉爽涂层和其他潜在措施。图 15 示出了新加坡 GEAR 的太阳能光伏-屋顶绿化协同定位系统，该系统具有更高的发电量和更好的热舒适性的共同益处，同时由植物提供更低的周围空气温度。此外，在风速较高的地方，随着发电量的增加，潜在的热效应会降低。因此，当前的考虑反映了这两个区域的最坏情况。最后，如图 16 所示，未来的工作将发展到将光伏板部署与绿化和冷涂层的热缓解策略相结合。

6. 结论

这篇综述讨论了是什么因素导致了光伏板对城市温度的相互矛盾的影响，并指出了未来的研究方向。结果突出了城市配置、模拟设置、传感器放置和测量协议的变化，导致了不一致的发现。因此，迫切需要将评估光伏板对城市热环境影响的方法标准化。

该审查初步制定了测量和模拟指南，确定了挑战，并为基于模拟的光伏影响评估提出了可能的解决方案。全面的工作流程

进一步建议将计算流体动力学、LBM、深度学习和可选的最大似然法整合用于 PV 影响评估。该工作流程包括两个阶段。第一阶段涉及基于 LOD 概念的经过验证的 CFD 模拟程序，以解决跨尺度建模问题。在第二阶段，提出了利用第一阶段数据的先进技术，如 LBM 和最大似然神经网络模型，以促进在工程实践中的实际应用。此外，还建议使用犀牛-蚱蜢生态系统，通过实现更好的能源生产来优化建筑和城市形态。这些被确定为未来的研究方向。

总之，该分析通过考虑面板之间的相互作用和热岛效应为城市光伏系统设计提供了见解。在处理大规模裁员时，这一点尤为重要。通过优化城市地区光伏板的放置和配置，有可能最大限度地发挥其发电潜力，同时减轻其对当地热环境的影响。最终目标是通过在全国范围内部署这些大规模光伏电池板来实现净零碳化，而不会恶化当前的 UHI 效应，也不会忽视对人体热舒适的关注。

著作权贡献声明

月儿和：写作-原始草案，监督，资源，资金获取，概念化。Daniel Jun Chung Hii：写作

原始草稿，可视化，软体，方法论，概念化。
黄念贤: 写作-评论和编辑。

竞争利益声明

作者声明以下财务利益/个人关系可能被视为潜在的竞争利益：
何月儿报道，中国国家自然科学基金提供了资金支持。如果有其他作者，他们声明他们没有已知的竞争财务利益或个人关系，可能会影响本文报道的工作。

数据可用性

已经使用的数据是保密的。

确认

本工作得到了国家自然科学基金(批准号 52308105)的资助。作者还要特别感谢深圳市科技计划 (20220809120650001) 对本研究的支持。

参考

[1] 联合国气候变化大会第 27 次会议达成突破性协议
弱势国家“损失和损害”基金。 https://unfccc.int/news/COP_27-reaches-breakthrough-agreement-on-new-loss-damage-fund-for-vulnerable-countries/, 2022. (2022 年 7 月 13 日访问)。

[2] G.A. Barron-Gafford, R.L. Minor, N.A. Allen, A.D. Cronin, A.E. Brooks, M.A. Pavao-Zuckerman, 《光电热岛效应: 更大的太阳能发电厂增加当地温度》, Sci. 众议员 6 (2016)。

[3] 国际能源机构, 《2022 年世界能源展望》。 <https://iea.blob.core.windows.net/assets/c282400e-00b0-04EDF-9a8e-6f2ca6536EC8/worldenergyoutlook2022.pdf>, 2022. (2022 年 12 月 1 日访问)。

[4] D.J. Sailor, J. Anand, R.R. King, 《建筑环境中的光伏: 评论》, 能源建设. 253 (2021) 111479.

[5] 胡, 李维思, 梅尔, 韩文庆, 华盛顿, 欧立森, 等, 太阳能电池板对全球气候的影响。 Clim. 更改 6 (2016) 290–294.

[6] 国际能源署, 国际能源署 SHC 任务 41: 太阳能和建筑, 建筑师建筑物的太阳能设计: 太阳能设计工具回顾: 子任务 b: 太阳能设计的方法和工具。 <https://task41.iea-shc.org/data/sites/1/publications/t41B3批准-2012年7月12日.pdf>。 (2022 年 7 月 13 日访问)。

[7] J.J. Roberts, A.A.M. Zevallos, A.M. Cassula, 用于系统模拟的光伏性能模型评估, Renew. 反对有效. 能源修订版 72 (2017) 1104–1123。

[8] B. 马隆加、s. 班扎夫、c. 布尔迈斯特、t. 埃施、r. 福克尔、d. 弗罗利希等人, 《棕榈模型系统 6.0 概述》, Geosci. 模型开发. (GMD) 13 (2020) 1335–1372

[9] J.E. 冈萨尔维斯, h. 蒙塔泽里, t. 范胡夫, d. 萨伦斯, 建筑集成光伏立面的性能: 外部对流传热的影响, 应用能源 287 (2021)。

[10] D. Nasir, B. Hughes, J.K. Calautit, 用于城市应用的道路路面太阳能集热器 (RPSC) 的几个设计参数的 CFD 分析, 应用能源 186 (2017) 436–449。

[11] 动词 (verb 的缩写) 大型太阳能发电厂热岛效应的潜力分析。 2014 年光伏专家会议。

[12] 赵耀峰, 张文伟, 谢立忠, 王文伟, 陈明民, 李志宏, 等, 太阳能光伏建筑室内环境及热舒适性研究, 可持续发展. 城市足球. 76 (2022)。

[13] 布林克沃特斯, 克罗斯, 马歇尔, 杨, 光伏包层的热调节, Sol. 能源 61 (1997) 169–178。

[14] 胡, 李维思, 梅尔, 韩文庆, 华盛顿, 欧立森, 等, 太阳能电池板对全球气候的影响。 Clim. 更改 6 (2016) 290–294。

[15] H. 城市地区大规模部署太阳能光伏阵列对气温影响的潜力。 能源 91 (2013) 358–367。

[16] 页 (page 的缩写) Vahmani, F. Sun, A. Hall, G. Ban-Weiss, 《调查城市化对气候的影响以及凉爽屋顶应对南加州环境未来气候变化的潜力》。 列特的决议. 11 (2016)。

[17] S.X. Ma, A. Pitman, J.C. Yang, C. Carouge, J. Evans, 评估澳大利亚悉尼热应力缓解方案的有效性, J. Appl. Meteorol. Climatol. 57 (2018) 209–220。

[18] 动词 (verb 的缩写) Masson, M. Bonhomme, J.L. Salagnac, X. Brittet, A. Lemonsu, 太阳能电池板减少全球变暖和城市热岛, Front Env Sci-Switz 2 (2014) 1–9。

[19] Y. 评估二氧化碳减排策略对城市热岛的影响。 城市足球. 26 (2016) 383–392。

[20] F. Salamanca, M. Georgescu, A. Mahalov, M. Moustauoui, A. Martilli, 《凉爽屋顶和屋顶太阳能光伏发电部署对近地表气温和冷却能源需求的城市影响》, Bound-Lay meteor ol 161 (2016) 1–19。

[21] A. Zonato, A. Martilli, E. Gutierrez, F. Chen, L. Giovannini, 探索屋顶缓解策略对城市温度和能源消耗的影响, J. 地球物理学. 关于大气. 126 (2021)。

[22] X. 郝, 王, 胡, 陈, 太阳能光伏屋顶对城市热环境和能源供需影响的模拟, 气象学报. 罪恶. 78 (2) (2020) 301–316。

[23] O. Brousse, C. Simpson, A. Zonato, A. Martilli, J. Taylor, M. Davies, C. Heaviside, 与其他屋顶和植被干预措施相比, 冷屋顶在降低伦敦 (英国) 室外城市温度方面最为有效: 一项中尺度城市气候模拟研究, Geophys. 列特的决议. 51 (2024) e2024GL109634。

[24] A. Cortes, Y. Murashita, T. Matsuo, A. Kondo, H. Shinadera, Y. Inoue, 光伏电池安装对城市热环境影响的数值评估, Sustain. 城市足球. 19 (2015) 250–258。

[25] D. Millstein, S. Menon, 《大规模冷却屋顶和光电阵列部署的区域气候后果》, Environ. 列特的决议. 49123 (2011) 98–204。

[26] G.A. Barron-Gafford, R.L. Minor, N.A. Allen, A.D. Cronin, A.E. Brooks, M.A. Pavao-Zuckerman, 《光电热岛效应: 更大的太阳能发电厂增加当地温度》, Sci. 众议员 6 (2016)。

[27] R. 常, 沈永波, 罗永波, 王, 杨志波, 郭平, 在中国共和县贫瘠地区大规模部署光伏发电对地表辐射和温度的影响。 能源 118 (2018) 131–137。

[28] A.M. 布罗德本特, E.S. Krayenhoff, M. Georgescu, D.J. 塞勒, 公用事业规模光电效应对近地表空气温度和能量平衡的观测结果, J. 应用气象工具. Climatol. 58 (2019) 989–1006。

[29] X. 张, 徐, 利用遥感技术评估光伏电站对地表温度的影响。 sens 12 (2020) 1825。

[30] 米 (meter 的缩写)) 卡波雷, e. 博祖内特, p. 萨拉格纳克, m. 阿巴迪, 城市环境中被动式建筑设计的指标-室内和室外冷却潜力, 能源建设. 173 (2018) 315–325。

[31] 南 Freitas, R. Ferreira, M.C. Brito, 《使用 ENVI-met 的立面 PV 街道峡谷中的城市微气候》。 2019 年第 36 届欧洲光伏太阳能大会暨展览会, 第 1771–1774 页。

[32] 单位小气候对光伏能源效率和室外热舒适影响的调查。 城市足球. 62 (2020)。

[33] Y. 王, 田文伟, 朱, 任军, 刘, 张军, 等, 光伏建筑一体化与城市环境小气候的相互作用。 2006 年 ASME 国际太阳能会议。

[34] T. 魏, 王, 谢, 吴, 李, 任军, 光伏建筑对城市冠层小气候的影响, 建筑. 环境. 42 (2007) 1891–1901。

[35] A. Scherba, D.J. Sailor, T.N. Rosenstiel, C.C. Wamser, 《模拟屋顶反射率、集成光伏板和绿色屋顶系统对城市环境中显热通量的影响》, Build. 环境. 46 (2011) 2542–2551。

[36] W. 张, 光伏建筑环境应用研究, 天津大学博士论文, 2018。

[37] G. Osma-Pinto, g. Ordoñez-Plata, 影响性能的测量因素
温暖热带气候下的屋顶光伏板。 能源 185 (2019) 112–123。

[38] V.C. Kapsalis, E. Vardoulakis, D. Karamanis, 屋顶附加光电板冷却效果的模拟, Adv. Build. 能源第 8 (2014) 号决议第 41 至 54 段。

[39] O. 赵, 张伟, 谢, 王伟, 陈, 李, 李, 吴, 曾, 杜, 双面光伏建筑室内环境及热舒适性研究。 城市足球. 76 (2022) 103463。

[40] M.A. Ekoe a Akata, D. Njomo, B. Mempoou, 喀麦隆热带地区建筑集成光伏系统 (BIPVs) 对室内空气温度和湿度 (IATH) 的影响, 未来城市与环境 1 (2015) 1。

[41] Ekoe AA. Aloys, 屋顶集成光伏 (RIPV) 对非洲热带气候下建筑室内空气的影响, 《可再生能源与环境杂志》 9 (2022) 53–62。

[42] A. Dominguez, J. Kleissl, J.C. Luvall, 太阳能光伏板对屋顶热传递的影响, Sol. 能源 85 (2011) 2244–2255。

[43] J. 韩, 陆, 彭, 杨, 通风型双面光伏建筑与传统透明玻璃建筑的性能比较, 节能建筑. 56 (2013) 204–209。

[44] J. 尹绍辉, 沈顺瑞, 安永善, 李广辉, 非晶硅 BIPV 窗全年表面温度特性的实验研究, 能源建筑. 62 (2013) 166–175。

[45] 名词 (noun 的缩写) Skandalos, D. Karamanis, 不同气候区低能耗建筑光伏建筑集成的优化方法, 应用能源 295 (2021) 117017。

[46] C. Efthymiou, M. Santamouris, D. Kolokotsa, A. Koras, 缓解热岛效应的光电路面的开发和测试, Sol. 能源 130 (2016) 148–160。

[47] 谢佩英, 王宏, 光伏路面对缓解城市热岛效应的潜在效益, 应用热学报. 英语. 191 (2021)。

[48] T. 马, 李世杰, 顾文波, 翁世杰, 彭建庆, 肖国光, 太阳能路面的比较研究与性能评估, 可持续发展. 城市足球. 81 (2022)。

[49] J.S. Golden, J. Carlson, K.E. Kaloush, P. Phelan, 光电天篷对路面温度的热和辐射影响的比较研究, Sol. 能源 81 (2007) 872–883。

- [50] J.V. Pham, A. Baniassadi, K.E. Brown, J. 豪辛格, D.J. Sailor, 比较城市环境中的光伏和反射遮阳表面:对表面显热通量和行人热舒适的影响, 城市气候. 29 (2019).
- [51] Teng, C.B. Soh, S.C. Devihosur, R.H. Tay, S.K. Jusuf, 农业光伏系统对周围屋顶小气候的影响, 可持续性-巴塞尔 14 (2022) 7089.
- [52] E.Hassanpour Adeh, J.S. Selker, C.W. Higgins, 农业对土壤水分、微气象学 and 用水效率的显著影响, PLoS One 13 (2018) 0203256.
- [53] C.吴, 刘, 于, 赵, 刘, 于, 等, 中国西北干旱区太阳能光伏发电场对土壤小气候和水分状况的生态水文效应:模拟研究, 科学. 总环境. 802 (2022) 149946.
- [54] A.韦塞莱克, A. Bauerle, J. Hartung, S. Zikeli, I. Lewandowski, P. Hoyer, Agrivoltaic 温带气候下有机作物轮作中系统对小气候和不同作物产量的影响. 反对有效. 戴夫. 41 (2021) 59.
- [55] H.A. Al-agele, K. Proctor, G. Murthy, C. Higgins, 番茄案例研究 legend) 农业光伏系统中的生产和水生产率, 可持续性-巴塞尔 13 (2021) 2850.
- [56] 南-H. Chae, H.J. Kim, H.-W. Moon, Y.H. Kim, K.-M. Ku, 农业光伏系统通过西兰花的视觉质量和电力生产增加农民的利润, 而产量、抗氧化能力和芥子油苷没有显著变化, 农学-巴塞尔 12 (2022) 1415.
- [57] 南 Amaducci, X. Yin, M. Colauzzi, 优化电能生产用地的农业光伏系统, 应用能源 220 (2018) 545 - 561.
- [58] R.A. Gonocruz, R. Nakamura, K. 吉野, M. Homma, T. Doi, Y. Yoshida 等人, 《农业伏打系统下的水稻产量分析:日本的案例研究》, 环境 8 (2021) 65.
- [59] H.Marro, L. Guillioni, L. 杜福尔, C. 杜普拉斯, J. Wery, 《农业光伏系统下的小气候:太阳能电池板部分遮荫会影响作物生长速率吗?》?阿格里克. 因为. 迈泰罗尔. 177 (2013) 117 - 132.
- [60] H. Ziar, B. Prudon, F.Y. Lin, B. Roeffen, D. Heijkoop, T. Stark 等, 内陆水域的创新浮动双面光伏解决方案, Prog. 光伏研究应用 29 (2021) 725 - 743.
- [61] 米 (meter 的缩写) Dorenkamper, A. Wahed, A. Kumar, M. de Jong, J. Kroon, T. Reindl, 浮动光伏在两个不同气候带的冷却效果:荷兰和新加坡现场试验数据的比较, Sol. 能源 214 (2021) 239 - 247.
- [62] R.R. 埃尔南德斯, A. 阿姆斯特朗, J. 伯尼, G. 瑞安, K. 摩尔-奥里, I. 迪德希奥等人, 《太阳能促进全球可持续性的技术-生态协同作用》, 国家自然资源研究所. 反对有效. 2 (2019) 560 - 568.
- [63] H. 城市地区大规模部署太阳能光伏阵列对气温影响的潜力. 能源 91 (2013) 358 - 367.
- [64] 南费龙, R.R. 科德罗, A. Damiani, R.B. 杰克森, 极端气候变化和光伏发电输出, 国家. 反对有效. 4 (2021) 270 - 276.
- [65] C. 肖, 于, 杨, 阙, 太阳辐射强度和温度对补偿晶体硅太阳能电池性能的影响. 能量物质. 索尔. 细胞. 128 (2014) 427 - 434.
- [66] E.Radziemska, 温度对晶体硅太阳能电池功率下降的影响, 更新. 能源 28 (2014) 1 - 12.
- [67] 感知城市实验室, 城市形态如何影响城市的太阳能潜力?。 <https://senseable.mit.edu/solar-cities/>, 2023. (11月13日访问 2023).
- [68] 名词 (noun 的缩写) Skandalos, M. Wang, V. Kapsalis, D. D'Agostino, D. Parker, S.S. Bhuvad, 等, 《根据区域气候条件建设光伏一体化:针对城市和气候相关温度上升扩展 Koppen-Geiger 气候分类的 BIPV 区域适应性》, Renew. 反对有效. 能源版本 169 (2022) 112950.
- [69] A.Boccalatte, M. Fossa, L. Gaillard, C. Menezo, 《欧洲不同城市的小气候和城市形态对建筑能源需求的影响》, 能源建筑. 224 (2020) 110129.
- [70] 世界气象组织, 《观测仪器和方法指南》(WMO-No. 8)。 <https://community.wmo.int/en/activity-areas/imop/气象组织-2021年第8期>. (2024年7月19日访问)。
- [71] B. 城市物理学的计算流体力学:重要性, 规模, 可能性, 局限性和十个技巧和窍门, 实现精确和可靠的模拟. 环境. 91 (2015) 219 - 245.
- [72] G. 深度学习取代、改进或辅助 CFD 分析在建筑环境中的应用:综述, 建筑. 环境. 206 (2021).
- [73] R.Vinuesa, S.L. Brunton, 用机器学习增强计算流体力学, 自然计算科学 (2022) 358 - 366.
- [74] 犀牛和蚱蜢的应用程序. 2023. [https://www . food 4 Rino . com/en/app/nuadacfd? lang=en](https://www.food4rino.com/en/app/nuadacfd?lang=en). (2023年12月1日访问)。
- [75] 数字系统, 欢迎来到 pacefish 的新 CFD 性能维度. [https://www . numeric . systems/pacefish? 语言=en](https://www.numeric-systems/pacefish?语言=en), 2024. (2023年4月20日访问)。
- [76] I.D. Stewart, T.R. Oke, 城市温度研究的地方气候区, Bull. 我是. 迈泰罗尔. 社会主义者 93 (2012) 1879 - 1900.