

多重增效目标下的光绿复合屋面一体化设计研究

Research on Integrated Design of Photovoltaic-Green Roofs under Multiple Efficiency Goals

董楠楠 罗雨佳 余娇

DONG Nannan, LUO Yujia, YU Jiao

基金项目: 国家自然科学基金(面上)项目“光绿组合模式下的屋面绿化夏季调温综合效能及其影响因素研究”(编号: 52378072)

摘要

为应对全球气候变暖与能源危机加剧的挑战,屋面绿化与建筑光伏技术策略被广泛运用于城市建成环境,导致有限屋面资源在绿色利用方式上出现矛盾。光绿复合屋面成为这一背景下的创新解决方案,但该技术在国内的研究与应用有限。研究整理光绿复合屋面的发展历程与技术原理,梳理选址、选型、施工和运维的一体化设计流程,提出“日照-容量-荷载”的适配化选址评估框架、“能源-生态-经济”的精准化选型评估框架、“多方联动-工序衔接-质效共管”的多维协同化施工框架和“物联感知-智能决策-人机协同”的智能化运维闭环流程。最后结合国内外技术和政策现状,提出技术有机转化、建设规范统一、政策时空兼顾等中国光绿复合屋面的推广应用建议。

Abstract

In response to the challenges posed by global warming and the escalating energy crisis, roof greening and distributed photovoltaics are widely used in urban built environments, leading to contradictions in the green utilization of limited roof resources. The Photovoltaic-Green Roof has emerged as an innovative solution in this context, yet research and application of this technology in China remain limited. This study summarizes the development history and technical principles of the Photovoltaic-Green Roof and outlines an integrated design process covering site selection, system selection, construction, and operation and maintenance, and proposes a site selection evaluation framework based on solar radiation, photovoltaic capacity, and roof load; a precise type selection assessment system integrating energy-saving, ecological, and economic benefits; a collaborative construction framework based on multi-stakeholder collaboration, process integration, and quality and efficiency management; and an intelligent operation and maintenance closed-loop process combining Internet of Things perception, algorithmic decision-making, and human-machine collaboration. Finally, based on the current state of domestic and international technologies and policies, this study proposes recommendations for promoting and applying Photovoltaic-Green Roofs in China, including the organic transformation of technologies, the unification of construction standards, and policies that account for both temporal and spatial factors.

文章亮点

1) 系统化梳理光绿复合屋面的选址、选型、施工、运维一体化设计流程,为复合型屋面的全生命周期设计提供指导。2) 基于国内的气候与政策条件提供技术的本土化转化路径。3) 从技术、规范、政策的视角梳理光绿复合屋面在国内的发展阻力,为促进光绿复合屋面在国内的推广应用提供参考。

关键词

光绿复合屋面; 屋面绿化; 屋面光伏; 技术体系; 一体化设计; 节能

Keywords

Photovoltaic-Green Roof; Roof greening; Roof photovoltaic; Technical system; Integrated design; Energy saving

收稿日期: 2025-09-11

修回日期: 2025-12-23

面对全球气候变暖与城市可持续发展的挑战, 屋面绿化和屋面光伏作为重要的建筑节能减碳技术备受关注。屋面绿化通过提升城市三维绿量高效弥补紧张的城市绿地空间, 成为实现生态城市目标下绿色绩效的重要手段。国内已推出《关于推动城乡建设绿色发展的意见》(中发〔2021〕31号)和《深圳市立体绿化实施办法》(深城管规〔2024〕1号), 以及《关于建设节约型城市园林绿化的意见》(建城〔2007〕215号)等多项政策, 大力推动屋面绿化的发展。屋面光伏则作为屋面绿色利用的另一途径, 推动建筑能源转型。近年来, 随着全球能源结构的调整和清洁能源的快速发展, 中国屋顶分布式光伏市场呈现出蓬勃发展的态势。据国家能源局统计, 截至2025年6月底我国分布式光伏累计装机容量达4.93亿千瓦。

随着城市绿色发展与能源转型, 绿化与光伏技术在有限的屋面空间资源上形成空间争夺, 光绿复合屋面成为这一背景下的创新性解决方案。光绿复合屋面(Photovoltaic-Green Roof, PV-GR), 是将屋面绿化技术与光伏发电技术结合部署在同一建筑屋面上, 从而综合提升建筑屋面绿色性能的集成技术^[1]。相比于单一的屋面光伏或屋面绿化, 其既通过植物降温提高光伏板的发电效率, 又利用光伏板为植物提供庇护, 实现光伏与植物的协同增效, 从而促进城市节能减碳与生物多样性提高。

尽管光绿复合屋面在欧洲、北美、新加坡等地已有大量实践应用, 但在国内的发展仍较为缓慢。相比于欧洲市场提出的朝南倾斜式光伏、垂直式光伏、蝴蝶式光伏、鞍山式光伏与绿色屋面结合的多种设计模式, 国内的光伏市场与绿色屋面建设尚缺乏技术集成的创新视角, 相关技术人员也缺少复合型屋面的本土化设计指导。

国内外现有研究着重分析光绿复合屋面的组件设计参数与节能效益, 缺少对系统化视角下的全流程设计和全生命周期运维管理的研究。同时, 相关研究多以欧美气候条件进行设计分析, 针对中国气候、政策、市场维度下的技术应用尚缺乏讨论。基于此, 研究通过文献分析法和案例调研法, 解析光绿复合屋面的发展历程与技术原理, 并基于国外建设经验和国内应用现状梳理该复合型屋面系统的选址、选型、施工、运维一体化设计流程, 提出各环节技术转化的关键要点, 为该技术在国内的推广应用提供指导和建议。

1 光绿复合屋面的发展历程

光绿复合屋面技术起源于德国^[2]。1982年, 为解决同一土地上能源和粮食竞争的问题, A. Goetzberger等首次提出“光伏+植物”的概念^[3]。随着这一概念的实践运用, 光伏农业和光绿复合屋面技术逐渐兴起。1999年, 德国柏林UfaFabrik工厂在4 000 m²绿色屋面上安装光伏板, 率先展开光绿复合屋面技术的应用与研究^[4]。2008年, 德国慕尼黑技术中心建设光绿复合屋面, 装机容量达75 kW^[5]。自此, 光绿复合屋面技术受到关注, 并逐步推广至全球各国。

美国、新加坡、澳大利亚等地拓展了光绿复合屋面

技术的应用范围。2009年, 宾夕法尼亚州立大学(The Pennsylvania State University)在参与太阳能十项全能竞赛时提出“光绿集成系统”(Green Roofs Integrated with Photovoltaics, GRIPV)这一术语^[6]。2010年, 宾夕法尼亚州匹兹堡(Pittsburgh)建设“Sunscape”示范项目, 改造3 160 m²的屋面空间以建设光绿复合屋面系统^[7]。新加坡聚焦于光绿复合屋面在热带地区的技术研发与应用场景拓展。2013年, Religiana Hendarti基于能量交换数学模型, 分析新加坡热带雨林条件下屋面植物对光伏板的影响^[8]。2021年, 新加坡国立大学在Ventus屋顶建设光绿复合屋面, 相比于单一屋面绿化系统, 其使平均空气温度降低0.60~1.06℃^[9]。澳大利亚将该复合型技术扩展至南半球。2023年, 悉尼Daramu大厦建设光绿复合屋面, 相比于传统光伏屋面, 该屋面可使鸟类物种数量提升4倍、节肢动物物种数量提升7倍^[10], 对区域生物多样性起到增益作用。随着光绿复合屋面在各地区的推广应用, 其技术模式从倾斜式光伏与绿化屋面结合的传统模式逐渐演变出多种应用类型^[11](图1)。

国内的光绿复合屋面技术起步较晚, 但在近5年逐步受到关注。自2020年碳达峰、碳中和目标提出, 国内开始出现光绿复合屋面系统研究。马钰婵^[12]等通过软件模拟, 明确光绿复合屋面相比于单一性能屋面具有更强的减碳效益。本课题组也在上海市同济大学嘉定校区、上海市辰山植物园、上海市园林科学规划研究院搭建多组实验, 研究证明植物对于光伏屋面具有调温增效的作用^[13]。实践应用上, 该复合型屋面已在深圳、上海、香港多地进行实地建设, 光绿复合屋面已成为我国绿色生态与新能源融合的前沿发展领域。

2 光绿复合屋面的技术原理

相比于单一性能的屋面, 光绿复合屋面通过植物的降温效应降低光伏面板温度以提高其发电效率, 实现系统间的协同增益。传统的屋面光伏接收的太阳辐射一部分会转化为电能, 另一部分则转化为热量。通常情况下, 当光伏板的温度大于25℃时, 其电能转化效率逐步下降^[14]。对于晶体硅板而言, 温度每升高1℃, 光伏板的发电效率下降0.45%^[15]。而屋面绿化可利用植物的降温效应实现对光伏板的调温增效。依据课题组在上海市同济大学嘉定校区的实验, 在光伏倾角25°、光伏与绿植高度间距差30 cm、实验模块阵列间距300 mm的条件下, 晴天与雨天高温(温度不小于25℃)环境中的光绿复合屋面较单一光伏屋面的发电量分别提高2.144%和2.262%, 阴天条件下2个系统在实验期间的总输出功率相近^[13]。

光绿复合屋面的调温增效机制主要包括两方面: 一是其通过植物蒸腾作用促进潜热交换, 二是基质层的水分滞蓄与蒸散作用强化自然冷却效应。此外, 种植层在蒸腾、蒸散作用下引起水汽压差, 可促进空气对流并带走部分热量(图2)。在Fernando Alonso-Marroquin等构建的光绿复合屋面

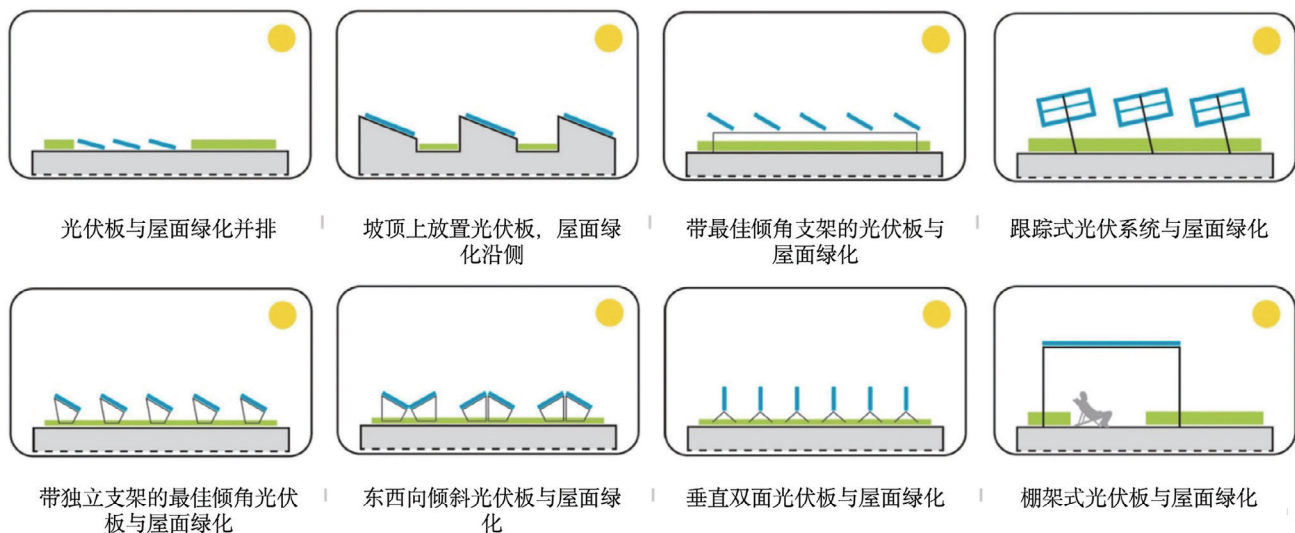


图1 光绿复合屋面示意图

Fig.1 Schematic diagram of Photovoltaic-Green Roof

系统的能量平衡模型中, 植物蒸腾和基质蒸散作用下的热量损失是光伏板温度降低的关键因素^[16], 其能量平衡表达式为:

$$T_0 = R_{11}U_0T_{out} + R_{13}U_3T_{in} + R_{11}q_h - (R_{12} + R_{13})q_{et}/2 \quad (1)$$

式中, T_0 为光伏板温度, T_{out} 和 T_{in} 分别为室外和室内温度, U_0 为光伏板和室外空气的热对流系数, U_3 为屋面的热对流系数, q_h 为光伏板产生的热量, R_{ij} 为热对流系数的逆矩阵元素, q_{et} 为蒸腾蒸散的热量。

3 光绿复合屋面的一体化设计研究

3.1 选址策略研究

目前, 光绿复合屋面的选址评估框架多从大尺度进行可用屋面的潜力评估, 缺乏从设计选址视角下“区域-单体-屋面可用面积”的多尺度衔接分析。Chen Taoyu 等构建光绿复合屋面潜力空间的评估框架, 依据屋面坡度、建筑遮挡、太阳辐射、建筑类型等参数对福州进行潜在屋面筛选^[17]。该框架充分考虑太阳辐射和建筑参数对光绿复合屋面适配性的影响, 但忽略了植被对建筑的影响, 且仅通过系数估算屋面的承重约束区域和占用空间, 精细度难以承接后期设计。Zhan Pan 等分别从光伏屋面和绿色屋面的角度来评估光绿复合

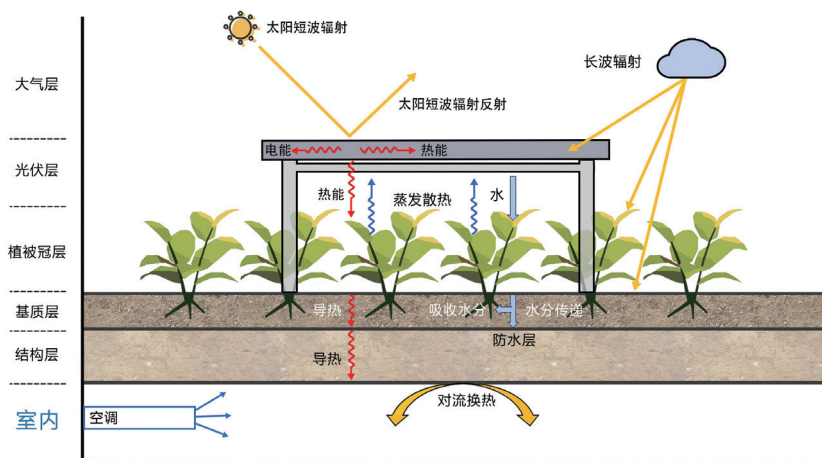


图2 光绿复合屋面的技术原理

Fig.2 Technical schematic diagram of Photovoltaic-Green Roof

屋面的改造适宜性^[18]。尽管该评估框架关注了太阳辐射和屋面坡度的影响, 但忽略了屋面荷载分析及不同屋面绿化类型下的光伏布设适宜性。

综合各研究成果, 本文构建设计导向下的光绿复合屋面选址评估框架(图3), 关注日照条件、屋面荷载、光伏容量3大核心内容, 从区域分析、单体粗筛、屋面可用面积计算、单体细筛(容量、荷载)4个环节依次递进, 实现选址评估与精准化设计的有机衔接。

光照条件是光绿复合屋面节能减

碳的核心影响因素, 也是屋面选址的重要判断依据。在高密度城市中, 城市地形、建筑间阴影遮挡、高大乔木阴影遮挡是屋面总辐射量削减的关键原因。依据《分布式光伏发电系统工程技术规范》(NB/T 11422—2023), 光伏组件布置宜保证当地每天真太阳时 9:00—15:00 内无遮挡。在具体的测算分析中, 可通过太阳辐射变送器进行实地监测, 也可利用 ArcGIS 软件进行阴影遮挡分析, 评估地形、周边建筑、植物等遮挡因素, 以保证屋面辐射总量的充足性。

光伏容量是屋面空间资源利用效率的关键指标，也是屋面选址的重要依据。光伏容量依赖于建筑屋面的可利用面积和光伏组件的布置密度。通常情况下，建筑屋面面积越大，其可利用空间越大。Chen Taoyu 等在光绿复合屋面评估过程中排除了面积小于 50 m² 的屋面，以保证光伏模块、设备间隙、植物生长和维护通道的空间需求^[17]。相比于基于屋面面积估算的方法，光绿复合屋面采用的可利用空间估算的方法，能够合理评估消防通道、排水口、已有设施占用区域、避雷装置保护盲区、屋面边缘空间等不可利用的屋面范围，同时衡量屋面设施的遮挡影响，以精准计算可利用面积。在光伏组件的布置上，需依据组件尺寸、组件间阴影遮挡、可用范围来确定组件的排列方式和布置间隙。此外，L 形异形屋面的光伏布置需注意自身阴影遮挡。光绿复合屋面的选址应排除可利用面积为 0 的屋面资源。

屋面荷载是光绿复合屋面选址的安全约束。依据《建筑结构荷载规范》（GB 50009—2012），建筑屋面的受力可分为永久荷载、可变荷载和偶然荷载 3 种类型，其中偶然荷载为建筑设计时考虑的指标，不对复合型屋面改造类项目造成影响。永久荷载即静荷载，在光绿复合屋面中需重点关注新增加的光伏板组件、支架系统、绿化植物、基质的荷重，经估算^[19~21]（表 1），该部分新增荷载约 0.8~2.9 kN/m²。可变荷载即在结构使用期间，数值随

时间变化且不可以忽略不计的荷载，既包括屋顶参观或检修的人员、可移动花箱、临时性设施等活荷载，也涵盖气候因素影响下的风荷载、雪荷载和积灰荷载。对于复合型屋面而言，硬质区域可变荷载变化不大，但软质区域由于改造后为不上人屋面区域，其可变荷载往往变小。改造后屋面的承载力需要根据规范中的公式，计算以可变荷载和永久荷载为主导的组合值。当改造后屋面荷载组合设计值不大于原屋面荷载组合设计值时，改造满足承载力要求，反之则改造失败，存在安全隐患。此外，屋面荷载可利用 PKPM 建筑设计软件进行辅助分析。

3.2 选型策略研究

根据光绿复合屋面的结构与技术原理，本文构建光绿复合屋面选型评估框架（图 4），涉及光伏系统、绿植系统和光伏绿植组合模式 3 项关键内容，并总结综合评估框架。

3.2.1 光伏系统

在当前国际市场上，各大公司针对光绿复合屋面研发了多种光伏组件类型，如 Optigrun 国际公司研发了 4 种固定模式下的倾斜型光伏和垂直型光伏，而德国 Zinco 公司研发了倾斜型光伏、垂直型光伏、山型东西向倾斜光伏、蝶型东西向倾斜光伏 4 种与绿色屋面结合的光伏技术。在这些光伏模式中，倾斜型光伏板是国内外分布式屋面光伏的主流类型，适用于高发电量的需求场景。Zhan Qiaosheng 等在中

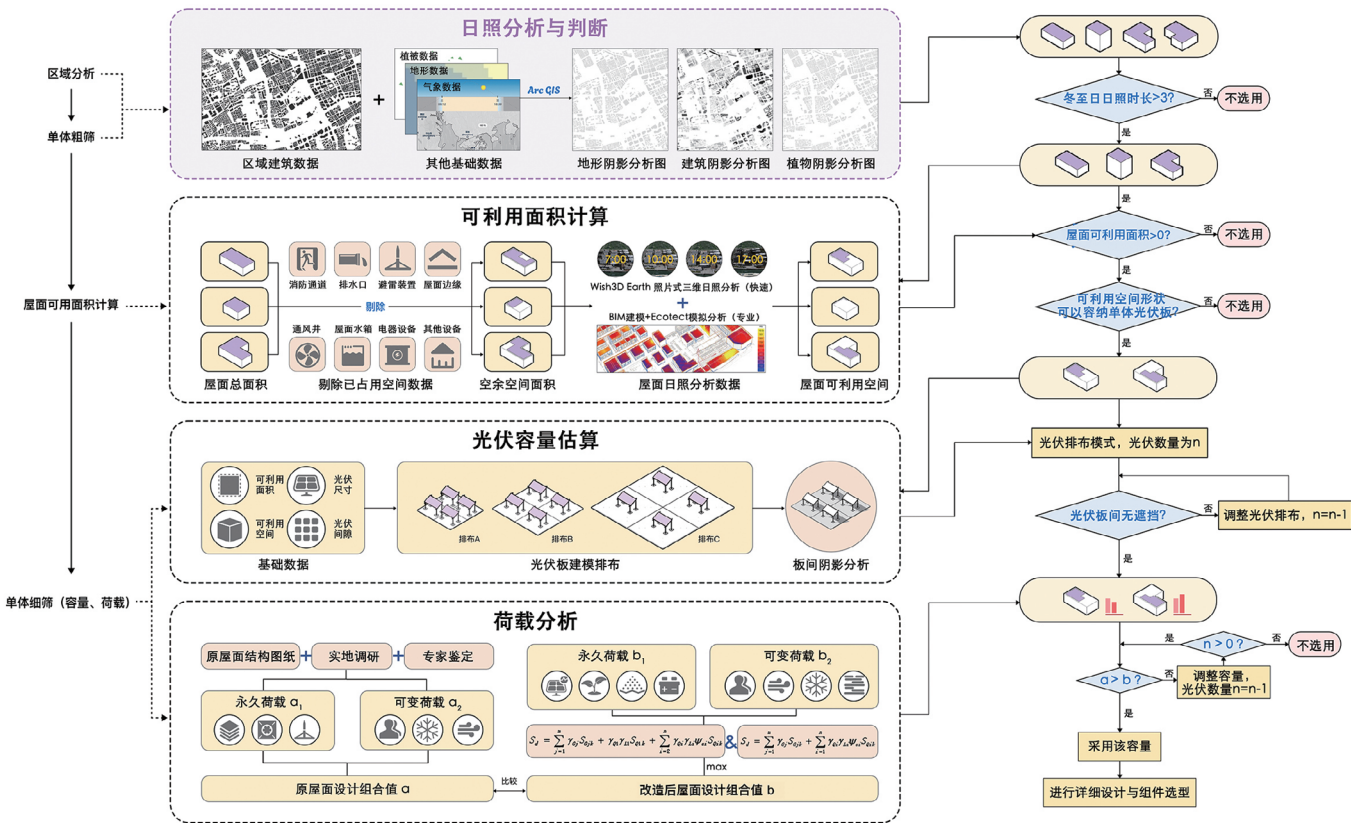


图 3 光绿复合屋面选址评估流程

Fig.3 Site selection evaluation flowchart for Photovoltaic-Green Roof

国广东选用 22°倾角、190°方位角的倾斜型光伏进行对照实验，发现光伏绿化屋面的发电量比单一光伏屋面提升 0.1%~1.0%^[22]。Wu Shujie 等在中国香港研究了光绿复合屋面在 3°、12°、22°倾角下的光伏参数，发现光伏倾角为 12°时发电效率最优^[23]。光伏板的倾角通常设置为根据当地太阳高度角计算的最佳倾角，目的是实现发电总量的最大化。在具体的倾角计算中可依据场地的经纬度，利用 PVsyst 软件进行模拟分析。以上海为例，在 PVsyst

7.4 仿真软件的模拟下光伏板的最佳倾角为 25°。

垂直型光伏板与屋面绿化的结合是近 5 年的创新模式，适用于兼顾绿化生态的需求场景。其既利用东西向双面辐射形成“双峰”式发电曲线以均匀各时段发电量，又通过更少的空间覆盖面积优化光伏板底部的雨水分布和太阳辐射，促进光绿复合屋面的植物生长。Thomas Baumann 等在瑞士进行实测研究，结果表明垂直型双面光伏绿化屋面系统的能效比为 942 kWh/kWp，与南向最佳倾角单面光伏绿化屋面系统（1000 kWh/kWp）的能效比相当^[24]，且垂直型光伏通过更低的占地比例降低屋面绿化的维护难度。尽管垂直型双面光伏在瑞士、德国等地的能效比已得到验证且表现可观，但在纬度更低的中国，其发电性能仍有待实验分析。此外，国内光伏厂商虽然已具备双面双玻的光伏技术，但垂直固定支架和抗风性能下的垂直型光伏面板仍有待研发。

3.2.2 绿植系统

光绿复合屋面的绿植系统主要包

表 1 光绿复合屋面新增恒荷载估算值
Tab.1 Estimated values for additional permanent loads on Photovoltaic-Green Roof

改造后屋面新增结构与组件	材料	厚度 /m	均布面荷载 / (kN/m ²)	备注
光伏板			0.15~0.2	光伏组件的每平方米质量约 15~20 kg，支撑件和固定件的自重约 0.05 kN/m ² ^[19]
光伏支架与基座	铝合金材料		0.05	
种植层	地被草本 / 地被花卉 / 观赏草	0.2~0.8	0.08~0.25	满铺，按照植物长大后计算
基质层	人工混合土壤	0.08~0.2	0.61~2.54	人工混合土壤湿容重为 7.6~12.7 kN/m ³ ^[20]
过滤层	聚酯无纺布		0.002	
排水层	凹凸排水板		0.045~0.049	计算蓄水状态荷载。材料自重为 0.005~0.009 kN/m ² ，蓄水重约 0.04 kN/m ² ^[21]
耐根穿刺防水层	SBS 改性沥青防水卷材	0.004	0.028	
合计			0.765~2.869	

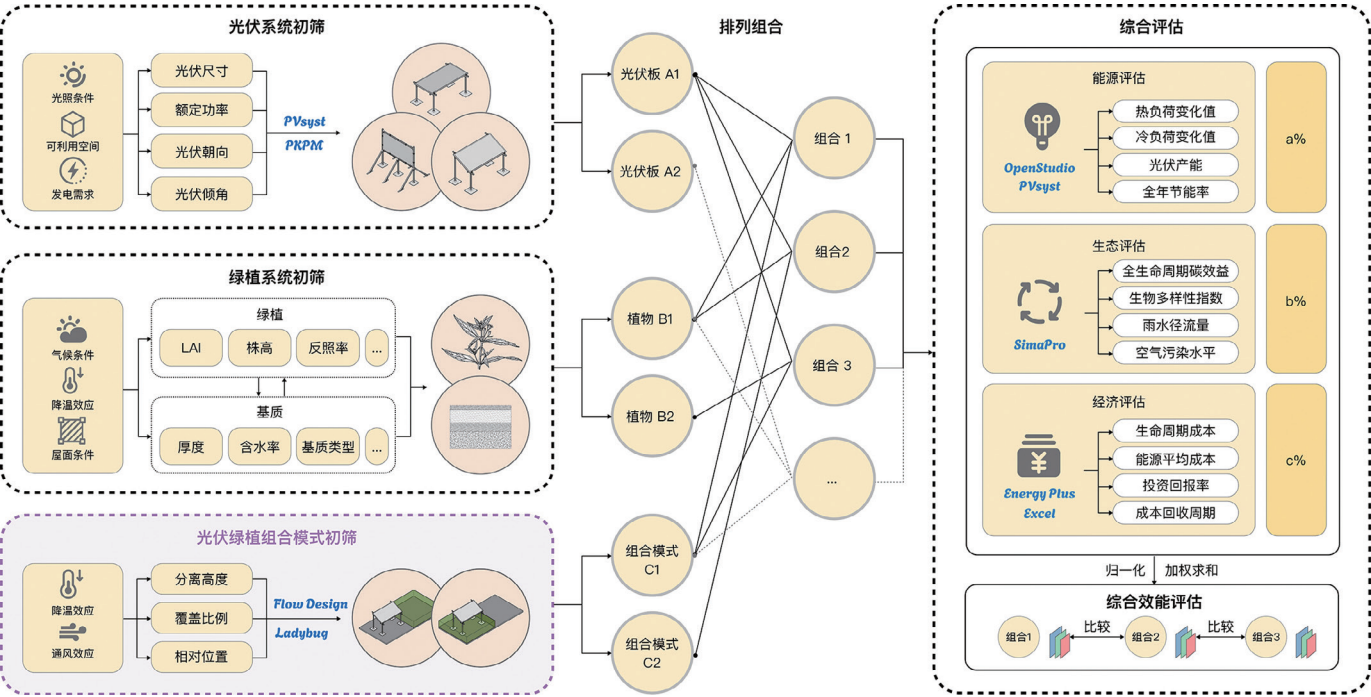


图 4 光绿复合屋面选型评估框架
Fig.4 Selection evaluation framework diagram for Photovoltaic-Green Roof

含绿化植物和基质 2 部分,在选型过程中需重点关注植物的生长适宜性和降温效应。在光绿复合屋面中,为提高植物的成活率,通常选用与地域气候适配的植物类型,或多选用耐荫耐旱性能强的植物以适应光伏板下光照遮挡和屋面基质保水差的约束条件。新加坡国立大学地处热带雨林气候(柯本气候分区 Af)^[25],Faizatu Zahrah Rahmaniah 等在其屋顶上选用蟛蜞菊 *Sphagneticola calendulacea* 构建光绿复合屋面,发现光伏板下的土壤水分含量更高,且降低光伏板的高度可提高植物的覆盖率^[9]。另一项研究在新加坡 Alexandra 小学开展,实验选用 5 种植物进行 1 年的对照分析,发现玲珑冷水花 *Pilea depressa*、泡叶冷水花 *Pilea nummulariifolia*、蔓性野牡丹 *Heterotis rotundifolia*、南美蟛蜞菊 *Sphagneticola trilobata* 4 种植物在光伏板下的覆盖率显著高于普通环境,玲珑冷水花的覆盖率差异最大,而锦竹草 *Callisia repens* 不适用于光绿复合屋面^[26]。国内华南地区与新加坡具有相似的炎热潮湿气候,可参考选用蟛蜞菊、冷水花 *Pilea* spp.、蔓性野牡丹等植物,也可选用同样具有耐荫性能的佛甲草 *Sedum lineare*、大吴风草 *Farfugium japonicum*、韩信草 *Scutellaria indica* 等本土植物。此外,国内华北地区可选用八宝 *Hylotelephium erythrostictum*、地被菊 *Chrysanthemum × morifolium* ‘Ground Cover’ 等耐荫耐寒植物;西北地区可选用野菊 *Chrysanthemum indicum*、山麦冬 *Liriope spicata* 等耐荫耐旱植物。

植物系统的降温效应是光绿复合屋面技术的性能保证,其主要受绿化覆盖率、植物种类、叶面积指数、植物高度、反照率、叶片颜色等因素的影响。D. Chemisana 等基于西班牙(半干旱草原气候 Bsk)的屋面实验发现,劳尔 *Sedum clavatum* 和勋章菊 *Gazania rigens* 分别使光伏板的平均发电功率提升 3.33% 和 1.29%,景天科植物更利于光伏的发电性能^[27]。Hodo-Abalo 等则基于物理模型研究发现,更高的叶面积指数有助于提高植物的蒸散量并促进冷却效应^[28]。Liu T C 等发现绿叶植物比紫叶植物和红叶植物具有更好的降温效果^[29]。基于此,以广东为例,在适宜性植物的基础上可进一步筛选高叶面积指数、冷色叶片的植物作为复合型屋面的优选材料,如南美蟛蜞菊、大吴风草、蔓性野牡丹等。此外,更高的基质厚度^[30]和基质含水量^[31]有利于降低屋面的温度。目前有关光绿复合屋面的基质研究尚且不足,针对基质类型、基质厚度、基质含水量等设计参数下的复合系统性能研究有待进一步开展。

3.2.3 光伏绿植组合模式

作为屋面光伏与屋面绿化的复合系统,光伏板与绿植系统之间的组合模式对于屋面的降温效能与光伏板的发电增益具有显著影响,是精准化设计的重要考量因素。

光伏板的安装高度通过影响植物的蒸腾速率与通风条件,调节植被的自然冷却效应。当光伏板安装过高时,植被虽能接收更多的太阳辐射与水分以促进生长,但其对光伏板的降温效应减弱。当光伏板安装过低时,狭窄的间隙阻

碍空气流动,导致板下滞留大量热空气,影响发电效益。German Osma-Pinto 等人在哥伦比亚(热带雨林气候 Af)的研究发现,当光伏与绿植的分离高度为 0.5 m 时,光伏发电量较 0.75 m 时提升 2%^[32]。Vanisha Arenandan 等在马来西亚(热带雨林气候 Af)实验发现,0.7 m 分离高度的光伏发电性能较 0.4 m 和 0.1 m 分别提高 3% 和 11%^[33]。German Osma-Pinto 则分析指出,相比于 0.25 m 和 1 m,0.5 m 和 0.75 m 的分离高度可为光伏面板提供更大的发电量^[2]。综合来看,光伏板与植物的分离高度宜控制在 0.25~0.75 m,但不同气候类型下的最佳分离高度存在差异,各地区应结合当地气候进行短期实验测算。在中国广州(亚热带湿润气候 Cfa)的一项实验中,0.3 m 的分离高度下的光绿复合屋面发电量优于 0.6 m 和 0.9 m^[22],中国西南部的炎热潮湿地区可参考该研究结论展开复合型屋面的设计。此外,现有分离高度研究多选用景天科植物,不同植物类型下的最佳分离高度尚缺乏实验验证。

光伏板下的植物覆盖比例通过屋面绿化大小影响降温效应。在巴西(温带海洋型气候 Cfb)的一项实验发现,将光绿复合屋面的植被覆盖率从 29% 提高到 58%,光伏面板背面温度降低了 2.2°C^[34]。为了保证屋面植物对光伏板的冷却效应,通常需要在光伏板外扩大植被缓冲区^[35]。

3.2.4 综合效能评估

在光绿复合屋面的选型决策过程中,能源效益往往是最核心的考量因素,不同研究基于分析视角的差异扩展评估体系。Faizatu Zahrah Rahmaniah 等基于光绿复合屋面效益的文献分析,构建由太阳辐射评估、单一系统评估、多功能评估、经济效益评估 4 个主要类别组成的评估框架^[36]。该评估框架虽然涵盖全面的二级指标,但指标间呈现较强的因果和从属关系,并非同一层级下的指标体系,适用于阶段性设计分析,对于选型的决策评估需进行设计过程指标的筛选。Bettina Maurer 等基于 MCDA 模型,构建低能耗、低碳排放、低环境影响、低成本的评估框架^[37]。该评估框架虽层级清晰,但在能源层面缺少光伏产能的关键评估指标,在经济层面则缺乏投资回报的动态化视角。

综合各评估体系,本文总结适用于系统选型决策评估的“能源-生态-经济”三维评估框架(图 4),设计师在评估过程中可结合设计侧重调节各维度权重。该评估框架强调复合型屋面的多功能性和系统协同性。其中能源侧涵盖建筑热负荷、建筑冷负荷、光伏产能、全年节能率 4 项指标。其具体评估可利用 OpenStudio 和 Ladybug-Renewables 进行建筑模拟和全年能耗趋势分析。生态侧涵盖全生命周期碳效益、生物多样性指数、雨水径流量、空气污染水平 4 项指标。全生命周期碳效益需综合计算材料生产、材料运输、施工建造、使用维护、拆除回收 5 个环节在全生命周期的碳成本与碳收益,可利用 SimaPro 进行辅助分析,生物多样性指数则可基于文献调研和小体量实验预估。经济侧涵盖生命周期成本(Life Cycle Cost, LCC)、能源平均成本(Levelized Cost of Energy, LCOE)、投资回报率(Return

On Investment, ROI) 和成本回收周期 4 项指标。其计算依赖于能源指标的经济换算, 以及建造、运维、回收的成本核算, 通常是建筑业主决策的最大考量因素。

3.3 施工策略研究

光绿复合屋面的施工遵循安全优先、系统协同的原则, 为保障施工流程的清晰性和施工质量的可靠性(图 5), 构建“多方联动-工序衔接-质效共管”的多维协同施工框架。施工前期, 工程师可利用 BIM 建模预演施工流程和光伏、绿植、管网的布局方式, 以此优化施工方案。光伏系统的施工主要涉及屋面预处理、支架与组件安装、电器接电与调试等工序; 绿植系统的施工主要涉及基质铺设、苗木定植、灌溉系统安装等工序。由于国内缺乏光绿复合屋面系统的专业施工团队, 其建造施工通常为屋面绿化团队和屋面光伏团队分开进行。这类涉及多团队的合作项目需合理安排各团队的进场时间、工程进度、交付节点, 并提前沟通明确关键衔接节点的施工方案, 以此规避团队施工间的矛盾争议。此外, 由于屋面空间存在材料运输难、施工危险系数高的问题, 低空经济推广下的无人机技术可辅助复合型屋面的施工建造。施工竣工后, 需组织隐蔽性工程、光伏系统和绿植系统的工程验收, 以保障施工质量符合预期; 组织联合调试则可进一步防范风险。

3.4 运维策略研究

光绿复合屋面可围绕监控、巡检、养护、维修、防灾等场景构建科学监测网络和动态管理机制, 并通过“物联感知-智能决策-人机协同”的智能化运维闭环流程实现高效、精准、动态的问题监测和运维管理(图 6)。

系统问题的及时监测依赖于远程监控和实地巡检。光伏板需重点关注光照遮挡、电路短路、接线松动等问题, 可利用电流电压采集模块连接物联网进行远程实时监控。绿植系统则需结合不同植物的生长节律, 利用土壤湿度监测仪、光合仪、自动拍照设备等有效监测植物灌溉与生长状况。为避免远程监控下非数据问题的排查缺失, 每年宜至少进行 1 次实地的组件检查。

灾害和故障的主动响应依赖于数据驱动下的高效决策。管理人员可利用卷积神经网络(Convolutional Neural Networks, CNN)和长短期记忆网络(Long Short Term Memory, LSTM), 针对历史故障和灾害记录数据、气象环境参数数据、系统运行数据和运维管理数据等进行深度学习与模型训练, 以支持数据驱动下的问题预警。最后依据算法模拟评估和专家经验分析, 判断最优化策略。

复合系统的可持续性依赖于精细化的组件养护与维修。屋面作业的智能机器人和无人机在该领域具有广泛的应用前景, 可支持自动化的面板灰尘清洁和光伏零件更换以保障光伏板的运行性能, 支持植物修剪、补种、灌溉与施肥以实现植物降温效应的最大化。

4 国内光绿复合屋面的挑战与推广建议

目前, 国内光绿复合屋面中光伏系统与绿植系统的耦合仍存在以下技术挑战: 1) 随着植物生长, 光伏底部的空气流通空间变窄导致光伏温度升高, 而光伏间隙中过高植物的阴影则导致光伏发电性能减弱; 2) 光伏面板的遮挡导致地表雨水的分布不均, 形成极端差异化的生境条件; 3) 大面

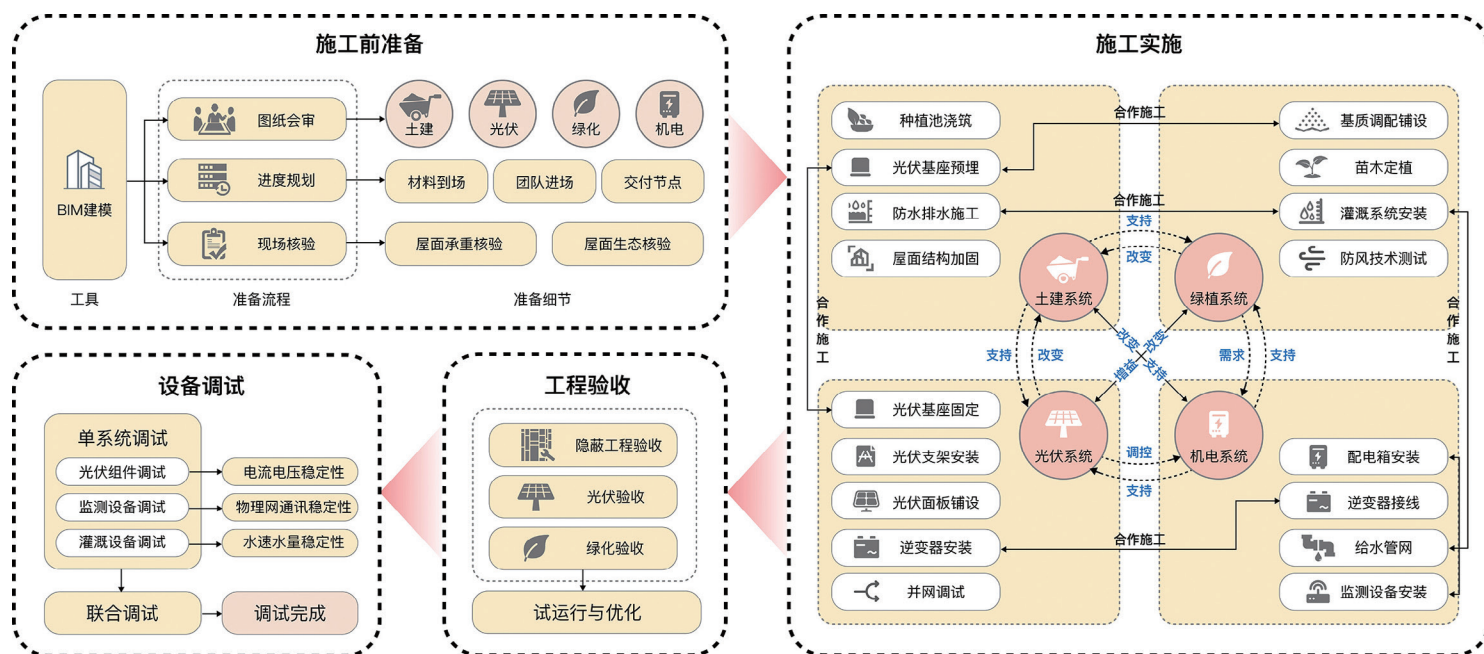


图 5 光绿复合屋面施工流程

Fig.5 Construction flowchart for Photovoltaic-Green Roof

积的光伏分布导致植物运维空间有限，屋面养护成本提升。针对上述技术挑战，需积极参考国外先进技术与研究结论进行本土化方案的改造。Antonio García-Chica 等通过 35° 光伏倾斜角度和地面精细化排水网络，构建用于雨水收集和可持续灌溉的综合光伏系统^[38]。国内多雨地区可参考该系统，测算发电和集水双重效益下的最佳光伏倾角，并改造屋面排水网络以避免光伏板下局部区域雨水积滞。Thomas Baumann 等利用垂直型光伏保障充足的绿植养护空间，并种植高反射率的植物优化光伏面板的发电效率^[24]。国内各地可结合太阳辐射与发电性能测算，应用垂直型光伏技术以降低运维成本，并促进绿植系统与光伏系统兼容。

由于光绿复合屋面横跨建筑、光伏、植物多个领域，统一的技术规范变得尤为重要。现行的各地区立体绿化规范和《分布式光伏发电系统工程技术规范》仅从单一型屋面技术出发，忽略了光伏组件与绿植系统之间的相互影响，如不同基质条件下的光伏基座固定模式、不同绿植与光伏组合下的荷载计算方式等，都是单一型技术规范缺乏考虑的内容。此外，在专项设计中，由于屋面绿化、建筑光伏、建筑结构等多方团队仅依据各自的技术规范制定方案，往往存在技术要求不匹配的问题。德国园林发展与景观研究协会（Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V., FLL）出台的《绿色屋面指南》明确提出，光伏系统的固定安装可采用不穿透屋面表皮的安装模式，此时需着重考虑风荷载相关的结构要求，并且在植物的影响下光伏的安装高度应大于 0.2 m^[39]。为促进复

合型屋面技术的标准化实施，国内各地区可参考国际相关规范与指南，建立光绿复合屋面的技术规范，依据地域气候条件、植物类型和建筑结构的差异性，明确复合型屋面的荷载计算、排水防水、电气安全、植物选型等技术要求和实施流程。

此外，光绿复合屋面的推广需要精准长效的政策引导与奖励推动。国内对于屋面光伏与屋面绿化的单一系统已出台大量的补贴政策，如《深圳市立体绿化实施办法》（深城管规〔2024〕1号）^[40]针对花园式屋面绿化提供最高 300 元/m²的建设补贴；《上海市建筑节能和绿色建筑示范项目专项扶持办法》（沪住建规范联〔2020〕2号）^[41]针对草坪式、组合式、花园式屋面绿化分别提供 50 元/m²、100 元/m²、200 元/m²的建设补贴。但不同地域间仍存在政策失衡的问题，财税收入高的地区往往政策补贴奖励更充足。此外，补贴机制普遍集中于前期建设，对后期管理运维的成本考虑不足。与此同时，国外普遍将光绿复合屋面纳入专项支持范围的政策形势，如 2021 年维也纳出台光绿复合屋面的补贴政策，最高补贴额为每千瓦 400 欧元^[42]，而国内尚未形成该复合型屋面的政策体系。基于此，国内需完善光绿复合屋面的强制性政策和激励性政策，可参考欧盟提出的可再生能源社区计划^[43]，兼顾时空，出台“城区-街区-社区”分尺度专项发展计划，并明确国内不同地域的推广重点，通过因地制宜地构建多气候分区和建设、运营、维护多阶段的奖励、补贴、税收减免制度，激励市场主体的参与积极性。

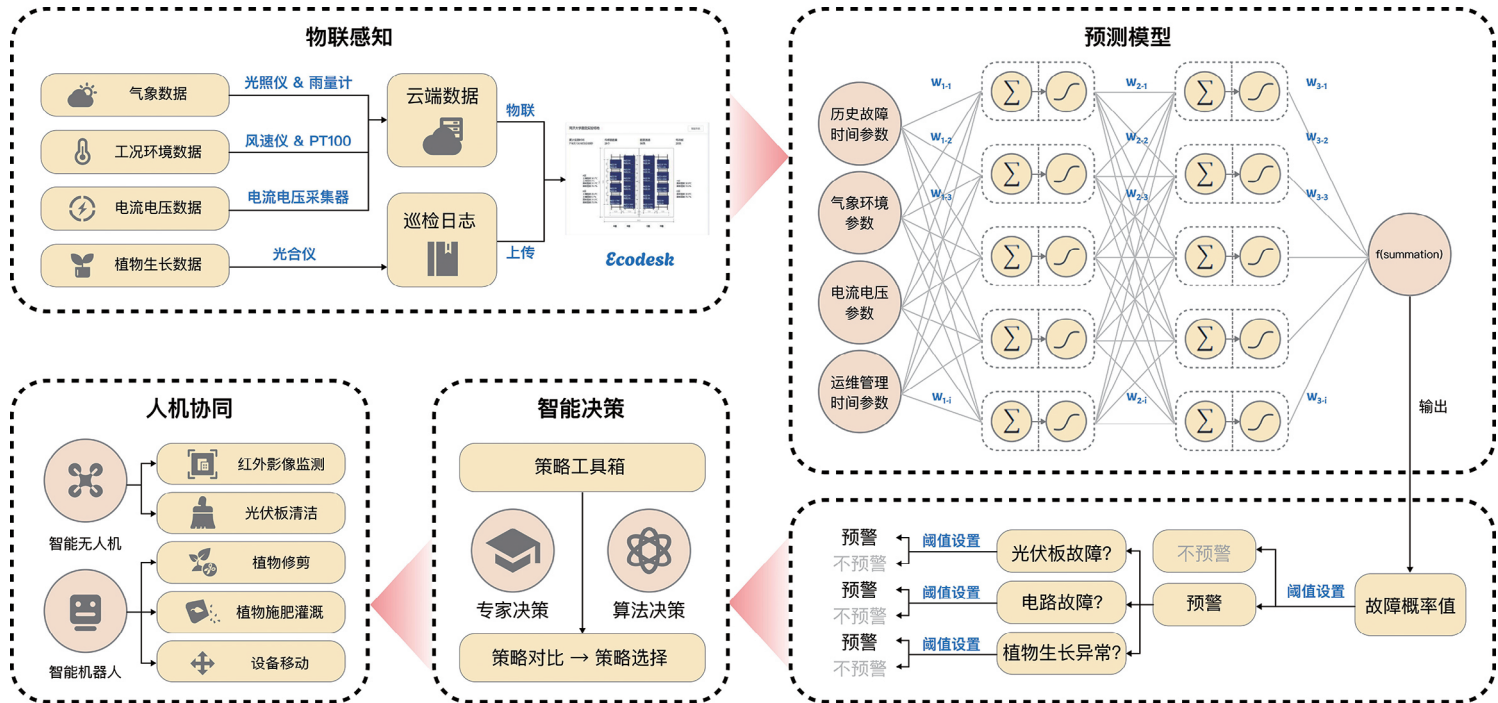


图 6 光绿复合屋面运维流程

Fig.6 Operation and maintenance flowchart for Photovoltaic-Green Roof

5 结论

研究深入解析了光绿复合屋面的发展历程、技术原理和设计流程,发现相比于德国、美国、新加坡等地,中国的光绿复合屋面技术起步较晚,但深圳、上海、香港等地区的初步实践推动了该复合型屋面在国内的应用。光绿复合屋面的一体化设计主要包含选址、选型、施工、运维4个阶段。选址层面,现有的选址评估多从大尺度进行可用屋面的潜力评估,缺乏设计视角下的多尺度衔接;选型层面,光伏、绿植、组合模式3个维度下的参数设计均已有了可参考的实验结论,可依据气候条件进行本土化转化,但现有的效能评估存在指标层级不一、光伏发电关键指标缺失的问题;施工层面,多团队协作与进场工序是复合型屋面的施工重点;运维层面,相比于传统的光伏屋面或绿植屋面,光绿复合屋面的植物养护和光伏清洁空间受限,且系统间的相互影响也提高了系统故障的概率。综上,研究提出“日照-容量-荷载”的适配化选址评估流程、“能源-生态-经济”的精准化选型评估框架、“多方联动-工序衔接-质效共管”的多维协同化施工框架和“物联感知-智能决策-人机协同”的智能化运维闭环流程,以辅助本土化项目的建设开展。最后,基于国内外技术与政策现状,针对系统难兼容、设计与施工衔接不畅、补贴与管控政策缺失的光绿复合屋面发展阻力,提出技术有机转化、建设规范统一、政策时空兼顾3个方面建议,以期促进光绿复合屋面在国内的推广应用。

研究在传统的光绿复合屋面综述分析的基础上,系统化梳理该复合屋面的选址、选型、施工、运维一体化设计流程,并针对国内的气候与政策条件进行了技术本土化转化应用分析,为国内示范性项目的建设和规模化应用提供技术和策略参考。但本文提出的技术转化方案,是基于柯本气候分区和国家政策等粗颗粒度研究展开,针对不同地域的建筑类型,仍需开展更精细化的应用研究。此外,光绿复合屋面研究也需进一步加强与生态学、电气学、能源学、建筑学等多学科的交叉合作,提升设计的规范性,增强效益潜力,扩大应用范围。

注:图1来源于参考文献[10],其余均为作者自绘。

参考文献:

- [1] 董楠楠,刘恒君,符思熠.从功能复合到能绿一体气候应对策略下的屋面绿化发展[J].时代建筑,2023(1):88-91.
- [2] OSMA-PINTO G, ORDÓÑEZ-PLATA G. Measuring factors influencing performance of rooftop PV panels in warm tropical climates[J]. Solar Energy, 2019, 185: 112-123.
- [3] GOETZBERGER A, ZASTROW A. On the coexistence of solar-energy conversion and plant cultivation[J]. International Journal of Solar Energy, 1982, 1(1): 55-69.
- [4] KOHLER M, FEIGE R, WIARTALLA W. Interaction between PV-systems and extensive green roofs[C]//Green Roofs for Healthy Cities. In Proceedings of the fifth annual greening rooftops for sustainable communities conference. Toronto: Green Roofs for Healthy Cities, 2007.
- [5] KÖHLER M, SCHMIDT M, LAAR M, et al. Photovoltaic panels on greened roofs[J]. Rio, 2002, 2: 151-158.
- [6] WITMER L T, BROWNSON J R S. System integrative design in the 2009 Penn State Solar Decathlon net-zero energy home[C]//American Solar Energy Society. Conference. SOLAR 2010 Conference Proceedings. Houston: American Solar Energy Society, 2010.
- [7] NAGENGAST A, HENDRICKSON C, MATTHEWS H S. Variations in photovoltaic performance due to climate and low slope roof choice[J]. Energy and Buildings, 2013, 64: 493-502.
- [8] HENDARTI R. The influence of the evapotranspiration process of green roof tops on PV modules in the tropics[D]. Singapore: National University of Singapore, 2013.
- [9] RAHMANIAH F, ZHANG W, HUI D J C, et al. Effect of module elevation height on incident solar irradiance and plant growth in a Tropical Photovoltaic-Green Roof (PV-GR) system[C]//IEEE. 2021 IEEE 48th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC). Fort Lauderdale, USA: IEEE, 2021.
- [10] WOOSTER E I F, FLECK R, TORPY F, et al. Urban green roofs promote metropolitan biodiversity: A comparative case study[J]. Building and Environment, 2022, 207: 108458.
- [11] ZLUWA I, PITHA U. The Combination of Building Greenery and Photovoltaic Energy Production - A Discussion of Challenges and Opportunities in Design[J]. Sustainability, 2021, 13(3): 1537.
- [12] 马钰婵,詹桥圣,肖毅强.湿热地区光伏绿化复合屋面系统减碳效益评估方法研究[C]//全国高等学校建筑类专业教学指导委员会,建筑学专业教学指导分委员会,建筑数字技术教学工作委员会.兴数育人 引智筑建:2023全国建筑院系建筑数字技术教学与研究学术研讨会论文集,2023.
- [13] 余娇,罗雨佳,董楠楠,等.典型夏季高温环境中绿色屋面对光伏组件发电性能的影响研究[J].建筑节能(中英文),2025,53(10):37-43.
- [14] COOK L M, LARSEN T A. Towards a performance-based approach for multifunctional green roofs: An interdisciplinary review[J]. Building and Environment, 2021, 188: 107489.
- [15] MAKRIDES G, ZINSSER B, GEORGHIOU G E, et al. Temperature behaviour of different photovoltaic systems installed in Cyprus and Germany[J]. Solar energy materials and solar cells, 2009, 93(6-7): 1095-1099.
- [16] ALONSO-MARROQUIN F, QADIR G. Synergy between photovoltaic panels and green roofs[J]. Energies, 2023, 16(13): 5184.
- [17] CHEN T, LI Y, ZHANG Y, et al. Coupling Renewable Energy with Urban Greening: Quantifying the Sustainable Development Potential of Photovoltaic-Green Roofs[J]. Sustainable Cities and Society, 2025, 133: 106866.
- [18] PAN Z, WANG C, YU B, et al. Assessing multifunctional retrofit potential of urban roof areas and evaluating the power and carbon benefits under efficient retrofit scenarios[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 444: 141270.
- [19] 姜楠,邢玉,于为磊.工业屋顶光伏结构荷载分析与施工设计[J].建筑节能,2014,42(11):109-111.
- [20] 屋顶绿化规范:DB11/T 281—2015[S].北京:北京市质量技术监督局,2015.
- [21] 和晓艳.屋顶绿化的相关技术研究[D].南京:南京林业大学,2013.
- [22] ZHAN Q, MA Y, LIN Z, et al. Comparative experimental study on the thermal and energy performance of photovoltaic and

green roofs in hot-humid climates[J]. Building and Environment, 2025, 271: 112587.

[23]WU S, WANG W, HUANG C, et al. Long-term Performance Assessment of Green Roof Photovoltaic Systems Based on Improved SAM Model[C]//IEEE. 2024 3rd Asian Conference on Frontiers of Power and Energy (ACFPE). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2024.

[24]BAUMANN T, NUSSBAUMER H, KLENK M, et al. Photovoltaic systems with vertically mounted bifacial PV modules in combination with green roofs[J]. Solar Energy, 2019, 190: 139-146.

[25]KÖPPEN W. Versuch einer Klassifikation der Klimate, vorzugsweise nach ihren Beziehungen zur Pflanzenwelt[J]. Geographische Zeitschr, 1900, 6: 593-611, 657-679.

[26]RAHMANIAH F, LIM J H M, POH C H, et al. Holistic assessment of co-located solar photovoltaics and greenery in the tropics: Results on solar photovoltaic output, greenery growth, and roof surface temperature[J]. Applied Energy, 2025, 395: 126133.

[27]CHEMISANA D, LAMNATOU C. Photovoltaic-green roofs: An experimental evaluation of system performance[J]. Applied Energy, 2014, 119: 246-256.

[28]HODO-ABALO S, BANNA M, ZEGHMATI B. Performance analysis of a planted roof as a passive cooling technique in hot-humid tropics[J]. Renewable Energy, 2012, 39 (1) : 140-148.

[29]LIU T C, SHYU G S, FANG W T, et al. Drought tolerance and thermal effect measurements for plants suitable for extensive green roof planting in humid subtropical climates[J]. Energy and buildings, 2012, 47: 180-188.

[30]KOURA J, MANNEH R, BELARBI R, et al. Seasonal variability of temperature profiles of vegetative and traditional gravel-ballasted roofs: A case study for Lebanon[J]. Energy and Buildings, 2017, 151: 358-364.

[31]BEVILACQUA P, MAZZEO D, BRUNO R, et al. Surface temperature analysis of an extensive green roof for the mitigation of urban heat island in southern mediterranean climate[J]. Energy and Buildings, 2017, 150: 318-327.

[32]OSMA G, ORDONEZ G, HERNÁNDEZ E, et al. The impact of height installation on the performance of PV panels integrated into a green roof in tropical conditions[C]// WIT Transactions on Ecology and the Environment. Southampton, UK: WIT Press, 2016.

[33]ARENANDAN V, WONG J K, AHMED A N, et al. Efficiency enhancement in energy production of photovoltaic modules through green roof installation under tropical climates[J]. Ain Shams Engineering Journal, 2022, 13 (5) : 101741.

[34]DISCONZI F P, MELO A, BORGHI F T. Green roof integrated photovoltaics system: mathematical modeling, simulation, and experimental validation[J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 279 (PC) : 127700.

[35]STATLER N E, ADAMS A M, ECKMANN T C. Optimizing angles of rooftop photovoltaics, ratios of solar to vegetated roof systems, and economic benefits, in Portland, Oregon, USA[J]. Environment Systems and Decisions, 2017, 37 (3) : 320-331.

[36]RAHMANIAH F, TAY S E R. Environmental benefits of co-located photovoltaic and greenery systems: A review on the operational performance and assessment framework across climate zones[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2023, 58: 103301.

[37]MAURER B, LIENERT J, COOK L M. Comparing PV-green and PV-cool roofs to diverse rooftop options using decision analysis[J]. Building and Environment, 2023, 245: 110922.

[38]GARCÍA-CHICA A, RODRIGUEZ-PEREZ A M, CAPARROSMANCERA J J, et al. Integrated photovoltaic system for rainwater collection and sustainable irrigation[J]. Irrigation Science, 2025, 43: 1385-1395.

[39]FORSCHUNGSGESELLSCHAFT LANDSCHAFTSENTWICKLUNG LANDSCHAFTSBAU. Guideline for the Planning, Construction and Maintenance of Green Roofing[M]. Berlin: Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau, 2008: 57-58.

[40] 深圳市城市管理和综合执法局关于印发《深圳市立体绿化实施办法》的通知[EB/OL]. (2024-04-11) [2024-12-09]. https://cgj.sz.gov.cn/zwgk/zcfg/lylh/content/post_11238299.html.

[41] 关于印发《上海市建筑节能和绿色建筑示范项目专项扶持办法》的通知[EB/OL]. (2020-03-12) [2024-11-19]. <https://zjw.sh.gov.cn/gfxwj/20201029/de75328ff70549a69e729a6132e1b8ad.html>.

[42]MÖSLINGER L, STREIT E, KORJENIC A, et al. Microclimatic Effects of Retrofitting a Green Roof Beneath an East-West PV Array: A Two-Year Field Study in Austria[J]. Sustainability, 2025, 17 (16) : 7495.

[43]HOLSTENKAMP L. Financing consumer (co-) ownership of renewable energy sources[M]//LOWITZSCH J. Energy Transition: Financing Consumer Co-Ownership in Renewables. Cham: Springer International Publishing, 2019: 115-138.

作者简介:

董楠楠/1975年生/男/安徽合肥人/博士/同济大学建筑与城市规划学院(上海200092)/副教授/研究方向为绿色景观创新与数字化景观工程技术

罗雨佳/1999年生/女/湖南株洲人/同济大学建筑与城市规划学院(上海200092)/在读硕士研究生/专业方向为风景园林学数字景观与工程技术

余娇/1999年生/女/河南信阳人/同济大学建筑与城市规划学院(上海200092)/在读博士研究生/专业方向为风景园林学数字景观与工程技术