

# 基于“双碳”战略下的光伏绿植一体化智慧系统研究综述

张 维

重庆交通大学建筑与城市规划学院, 重庆

收稿日期: 2026年3月13日; 录用日期: 2026年4月13日; 发布日期: 2026年4月22日

## 摘 要

本文以“双碳”战略为研究背景, 系统梳理光伏绿植一体化智慧系统的现有研究进展, 重点剖析光伏建筑一体化(BIPV)、光绿复合屋面及光伏智能幕墙三大核心技术的发展脉络与研究成果。在此基础上, 设计覆盖建筑立面与屋面的一体化系统优化方案, 构建由感知层、控制层、执行层与应用层组成的系统核心技术架构, 并阐释该系统在功能协同、智能自动化等方面的创新特征。同时明确系统现阶段面临的技术适配、经济成本、政策标准等核心挑战, 提出针对性发展路径, 论证该系统为建筑行业节能减碳提供了创新性解决方案, 具备广阔的应用前景。

## 关键词

绿色建筑, 光伏绿植一体化, “双碳”战略, 智慧调控, 节能减排

## A Review of the Integrated Smart System of Photovoltaic and Green Plants under the Context of the “Dual Carbon” Strategy

Wei Zhang

School of Architecture and Urban Planning, Chongqing Jiaotong University, Chongqing

Received: March 13, 2026; accepted: April 13, 2026; published: April 22, 2026

## Abstract

This paper takes the “dual carbon” strategy as the research background, systematically reviews the existing research progress of the integrated smart system of photovoltaic and green plants, and focuses on analyzing the development history and research results of the three core technologies:

building integrated photovoltaics (BIPV), green composite roof, and photovoltaic intelligent curtain wall. Based on this, an integrated system optimization plan covering the building facade and roof is designed, a system core technical architecture consisting of the perception layer, control layer, execution layer and application layer is constructed, and the innovative characteristics of this system in terms of functional coordination and intelligent automation are explained. At the same time, the core challenges faced by the system at present, such as technical adaptation, economic cost, and policy standards, are clearly identified, and targeted development paths are proposed. It is demonstrated that this system provides an innovative solution for energy conservation and carbon reduction in the construction industry and has broad application prospects.

## Keywords

Green Buildings, Integrated Photovoltaic and Green Plants, “Dual Carbon” Strategy, Intelligent Regulation, Energy Conservation and Emission Reduction

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

近年来，城市化进程快速推进，伴随着的是热岛效应日趋严重和建筑物的运行碳持续增长。众所周知，建筑业是国民经济碳排放的四大主要领域之一，其产生的碳污染制约着城市可持续发展与居民生活质量的提升[1]。同时，“双碳”目标作为我国能源与气候领域的核心宏观战略，其中建筑业作为碳排放的主要贡献行业，需要承担着重要责任[2]。数据显示，建筑运行阶段碳排放约占全球总量的36%，能源消耗量占全球总量的40%，其中空调等用电设备能耗占比突出。在未来，这两项指标预计均将持续上升[3]。在此背景下，如何通过技术创新实现建筑节能减碳，成为行业研究的核心课题。

光伏建筑一体化(Building Integrated Photovoltaics, 简称 BIPV)、垂直绿化技术以及屋面绿化技术作为绿色建筑领域的关键技术，近些年来得到广泛关注。国际上，部分国家已形成成熟的“光伏 + 建筑”技术体系，我国也在政策驱动下，近年来光伏行业取得了较大的进步，具有较为显著的减碳效果。以往的研究多聚焦于单一功能优化，缺乏光伏、绿植、建筑三者的协同调控机制。而现今，光伏行业与建筑一体化进程也较为成熟。因此，本研究针对探究梳理光伏绿植一体化系统的国内外发展历程以及在建筑中的应用成果，同时根据其研究结果提出优化方案，丰富绿色建筑技术体系内涵，从而为该技术标准制定与理论研究提供参考。

## 2. 研究现状

### 2.1. 光伏建筑一体化(BIPV)研究现状

光伏技术在建筑行业发展速度较快，过去已经有较多学者对光伏建筑分体化(BAPV)到一体化(BIPV)阶段进行脉络梳理研究。本研究则主要梳理近五年来光伏建筑在 BIPV 阶段后的发展情况。秦文军和李想[4]聚焦于 BIPV 的应用形式、国家政策支持以及发展前景分析进行梳理，BIPV 技术正不断升级配备新技术、新产品、新工艺，具有较大的发展潜力。李辰琦[3]等立足实际工程项目，梳理了光伏建筑的技术原理与发展价值。阐述了光伏建筑不同阶段的发展脉络，现今已经发展到光伏建筑功能化(BFPV)的发展阶段，同时提出该技术发展价值以及面临的挑战等。陈曷昊[5]运用科学文献计量方法等方法对中外光伏

建筑发展过程中关键点进行梳理总结。阐述国内目前多聚焦在“光伏幕墙”这一领域，同时光伏建筑正向系统化、智能化方向发展。而国外则展现出光伏建筑与城市规划、城市环境的互动关系。汤洋[6]等通过调研分析欧洲 BIPV 经典案例，对欧洲光伏建筑一体化发展历史进行梳理，得出欧洲在该领域发展迅速，并且有较多学者投入技术和研究在其中。Bhattacharya 和 Sadhu [7]表明常规的光伏系统往往造成土地资源的浪费，同时分析对比多种综合性光伏设施的效益对比。提出了新型光伏系统均需要采用多学科设计方法和标准化措施，BIPV 则需要进行详细的实验模拟。焦巍峰[8]提出光伏技术在建筑行业运用面广泛，正向多功能化、智能化发展。Salvalai 和 Zhao [9]主要探究了光伏建筑一体化技术的活性预制外立面 (APF-BIPV)技术的应用，研究表明将光伏技术加入预制施工过程具有重要意义。同时，有较多学者还研究 BIPV 技术整合到多领域进行应用，这也表明 BIPV 技术正向功能多元化、智能化方向发展的趋势。其中，光绿复合屋面技术(Photovoltaic-Green Roof, 简称 PVGR)在近年来发展迅速，屋面绿化经历较长时间的发展后，光绿复合屋面是最新的屋面绿化技术，集合多项功能技术[10]。与此同时，光伏智能幕墙也是 BIPV 功能智能化的体现，充分展现出其舒适功能性与绿色可持续性。

## 2.2. 光绿复合屋面研究现状

目前，国内外对于光绿复合屋面技术的研究仍在持续进行中。一方面是提出该技术设想与发展现状，另一方面则是通过实际案例对其现有的技术进行分析。董楠楠[10]等阐述了屋面绿化的发展历程，最新的光绿复合屋面通过精准化技术设计具有较强的发展前景。贡坚[11]以光绿复合屋面发展背景入手，分析实际项目案例表明光绿复合屋面对于城市建设具有重要意义。李贝贝[12]等通过文献分析和案例研究，对光绿复合屋面的发展进程、优劣势以及面临的局限性展开分析描述。Yang He [13] [14]等结合实验对比分析常规绿色屋面与光绿复合屋面，提出光伏阵列遮蔽问题、植物选择问题等相关研究缺失。同时发现通过光线追踪法建立并验证了新的 PVGR 热传递模型，该模型与技术结合表现效果较好。同时，将其与建筑能源模拟平台相结合，以预测年度节能效益。Han Xu [15]等同样考虑到光伏阵列与绿色屋顶之间的动态相互作用，研究开发高分辨率双向反馈框架来评估技术结果，从而提供优化设计建议。可以看出，对于光绿复合屋面的探索研究涉及到技术价值、优劣势以及发展前景，同时对该技术问题上，光伏和绿植交互矛盾影响的问题解决也已经有相关研究。

## 2.3. 光伏智能幕墙研究现状

对 BIPV 研究中发现关注度较高的便是“光伏幕墙”。当前，光伏幕墙已进入智能化发展阶段，有相关研究提出了光伏智能幕墙的技术。周建新[16]等对智能幕墙的控制技术原理与设计进行了详细的阐述，是在传统幕墙集合建筑配套技术的适度控制，是功能上的一大进步。姜清海[17]主要聚焦于建筑热工性能，在此基础上优化幕墙的控制系统，结合了双层玻璃幕墙热通道气流隔热和光伏电池发电的功能优势。对于该技术方面，现有研究多聚焦于光伏幕墙的控制系统上，技术上有较为成熟的系统。从功能化、智能化以及综合性角度出发提出构想，该系统还可与绿植结合形成立面绿植智能幕墙系统，集光伏发电、绿植美观、智慧控制等为一体的新“被动式”建筑构建。

# 3. BIPV 智能化系统优化方案

## 3.1. 系统核心技术架构

对于光绿复合屋面与光伏智能幕墙两大技术，涉及建筑屋面与立面，可形成涵盖建筑立面与屋面的完整技术体系，核心架构包括四层，为感知层、控制层、执行层和应用层。其中感知层由光照、温度、湿度、土壤等传感器组成，实时采集环境参数与系统运行数据，为智能调控提供依据。而控制层是基于物

联网与大数据分析技术，构建协同调控模型，根据感知数据优化光伏板角度、灌溉策略与遮阳模式。执行层则包括步进电机、自动化灌溉设备、可移动机械装置等，精准执行控制指令。最后是应用层，其中涵盖节能减排、智能感控、绿植疗愈与景观美化功能，满足建筑全生命周期绿色需求。

### 3.2. 系统优化方案原理

#### 3.2.1. 建筑立面：光伏绿植一体化智能遮阳帘

该系统针对传统立面绿化遮阳装置空间占用大、光伏效率低、维护难等问题，采用自动化可移动机械装置与模块化设计通过光照传感器与人体感应传感器采集数据。控制层根据太阳高度角与室内需求，驱动光伏绿植模块移动，实现遮阳与发电动态平衡。有人状态下优先保证采光与舒适度，无人状态下以发电效率最大化为目标。同时，在已有光伏智能幕墙技术的基础上，结合设计绿植模块在其中，形成光伏绿植一体化智能遮阳帘。工作示意图详见图 1，产品电路示意图详见图 2，手工模型图见图 3。

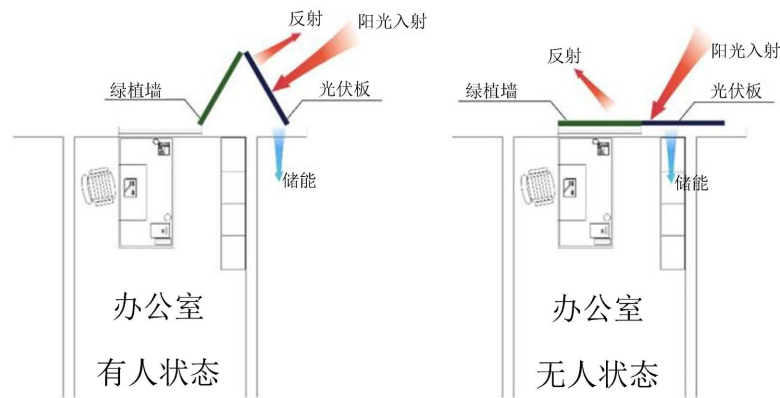


Figure 1. Working schematic diagram of the integrated photovoltaic and green plant intelligent shading curtain

图 1. 光伏绿植一体化智能遮阳帘工作示意图

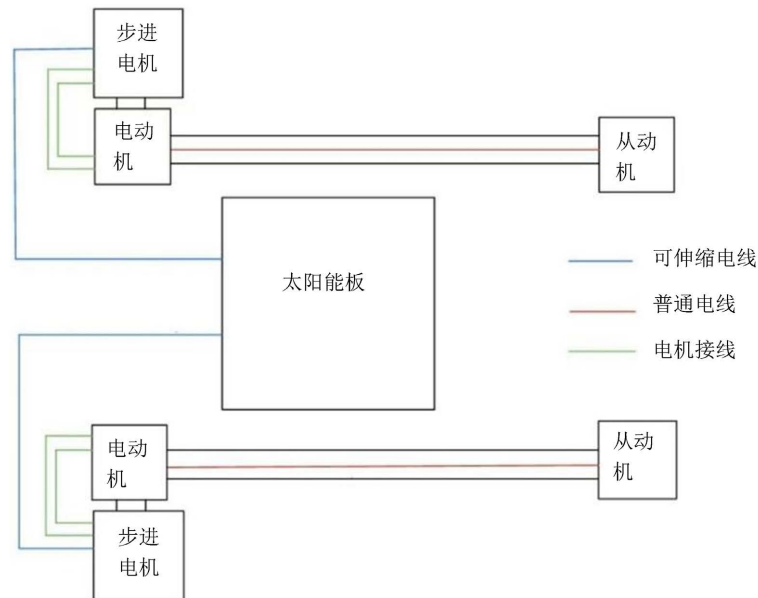
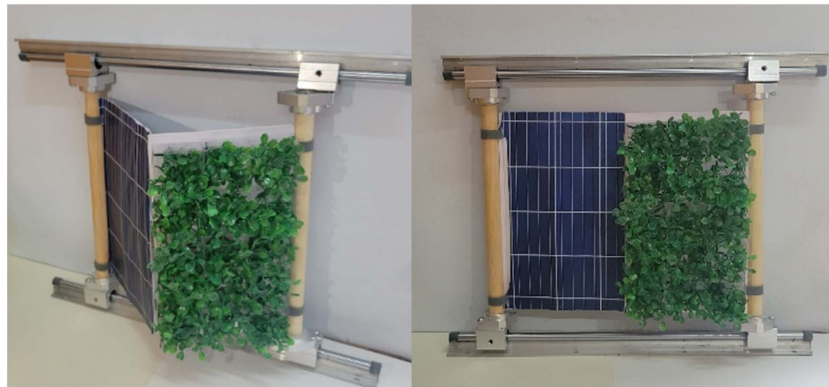


Figure 2. Circuit diagram of the product

图 2. 产品电路示意图

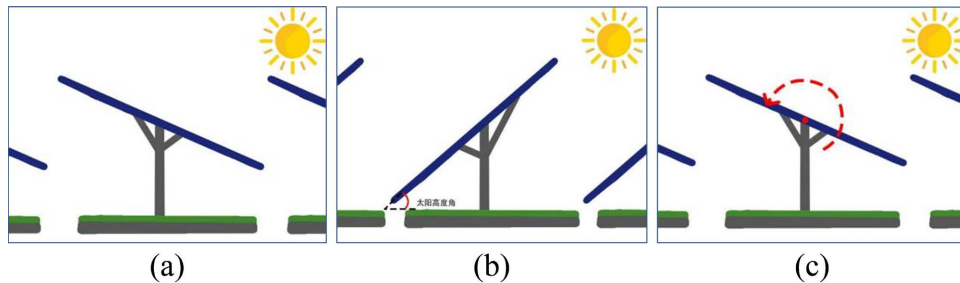


**Figure 3.** Handmade model of the integrated photovoltaic and green plant intelligent shading curtain

**图 3.** 光伏绿植一体化智能遮阳帘手工模型

### 3.2.2. 建筑屋面：光绿复合智慧屋面系统

在光绿复合屋面技术的背景下，考虑光伏板与植物遮挡的功能效益问题，选择采用自动化感应系统与可旋转光伏板设计。可植入感官控制模型，光照传感器实时监测光照强度与角度，控制层驱动光伏板旋转，光照充足时调整至最佳发电角度，光照减弱时旋转至不遮挡绿植位置，工作原理图详见图 4。系统集成智能灌溉与排水系统，根据环境数据精准调控，避免屋面积水，为绿植提供适宜生长条件，系统模型示意图详见图 5。



**Figure 4.** Working principle diagram of the light green composite smart roofing system. (a) When there is sufficient natural light during the day; (b) The light begins to dim; (c) Final state

**图 4.** 光绿复合智慧屋面系统工作原理图。(a) 日常光照充足时；(b) 光照开始减弱；(c) 最终状态；(c) 最终状态



**Figure 5.** Schematic diagram of the green and light green composite smart roof system model

**图 5.** 光绿复合智慧屋面系统模型示意图

### 3.3. 系统创新特色

该系统主要创新点在于功能协同创新，将绿化与光伏发电两种碳中和关键路径相结合，通过协同调控实现效益最大化。光伏发电提供清洁能源，绿植固碳降低碳排放，遮阳功能减少空调能耗，三者形成良性循环，实现节能减排协同增效。其次是自动化与智能化创新，采用全自动工作机制，通过智能感知与自动化控制技术，实现光伏板调节、绿植灌溉、遮阳模式切换等功能自主运行，减少人力投入，可动态优化运行参数，提升适应性与智能化水平。在现有研究基础上，优化平面和立面 BIPV 技术功能化升级，可生成具有模块化与装配式的产品模块。全流程采用装配式模块化设计，单个模块可独立组装、拆卸与更换，不影响其他模块运行，显著降低施工周期与维护成本，可根据建筑需求灵活组合，提高通用性与推广价值。

## 4. 系统挑战与未来发展

光伏绿植一体化智慧系统作为绿色建筑领域的跨技术融合创新产物，虽在技术架构、功能协同上展现出显著优势，但在实际落地推广、跨场景适配、市场商业化及行业规范化等方面，仍面临技术、经济、政策等多维度的现实挑战。未来需从多维度突破瓶颈，推动其规模化、标准化、智能化发展。

### 4.1. 系统发展面临的核心挑战

#### 4.1.1. 技术层面

不同气候区对系统适配性要求差异大，热带高温高湿易致光伏效率衰减、绿植病虫害，夏热冬冷地区绿植越冬难，北方干旱区考验灌溉与光伏抗寒能力，目前缺乏分区域标准化设计方案。

#### 4.1.2. 经济层面

该系统需要配备高精度传感、自动化控制等设备，初始建设成本远高于传统绿化和单一光伏应用。同时，尚未建立完善的生命周期成本评估(LCCA)体系，未将全周期运维、碳汇收益等纳入分析，投资方难以判断长期可行性。

#### 4.1.3. 政策层面

行业缺乏统一的设计、施工、验收标准，技术参数与调控指标不统一，项目质量参差不齐。同时，缺乏对光伏行业的专项补贴，系统双重碳汇效应的核算标准未明确，无法纳入碳交易市场，碳汇收益难以转化为实际价值。

### 4.2. 未来发展路径

未来该系统也将从该三方面推进发展，技术上，打造气候区差异化设计体系，匹配本土光伏友好型绿植，依托物联网构建多因子协同调控模型，研发适配新材料，搭建智能运维平台并培育专业人才。经济上，建立全生命周期成本评估体系，通过设备规模化生产、工艺优化降本，明确碳汇计量标准并纳入碳交易，叠加补贴与评价加分丰富收益渠道。政策上，制定全流程行业标准并纳入绿色建筑评价，出台专项扶持政策并强化跨领域政策协同，完善碳汇交易与政策监督机制。同时推动跨领域产学研融合，拓展多元应用场景，结合数字孪生实现全生命周期数字化管控。

## 5. 结论

光伏绿植一体化智慧系统方案整合多重技术优势，实现了光伏发电、绿植固碳与建筑节能的协同增效，有效解决了传统技术的单一化、低效能问题。该系统通过自动化与智能化设计，降低了施工与维护成本，兼具经济、生态与社会价值，为建筑行业绿色转型提供了创新解决方案。

当前, 系统虽面临植物选择、环境模拟、成本控制等挑战, 但随着技术升级、标准化建设与政策支持的不完善, 其应用前景仍较为广阔。未来, 通过持续的技术创新与产业协同以及相关政策支持下, 该系统具有较好的发展前景, 为“双碳”战略提供强大的绿色动力。

## 参考文献

- [1] 白大勇. 探究城市化进程中生态环境污染的防控与治理[J]. 皮革制作与环保科技, 2025, 6(21): 36-38.
- [2] 罗奥, 陈有才, 冯湛文. 浅论建筑业在双碳背景下的机遇与挑战[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2023(33): 211-213.
- [3] 李辰琦, 曹也, 李想, 等. 城市光伏建筑产业化发展研究[J]. 中国工程科学, 2025, 27(6): 273-285.
- [4] 秦文军, 李想. 中国光伏建筑一体化行业概况与发展前景[J]. 建筑学报, 2019(S2): 6-9.
- [5] 陈昊昊. 技术创新与政策驱动下的光伏建筑发展: 中外研究对比与未来路径[J]. 城市建筑, 2026, 23(6): 173-176.
- [6] 汤洋, 秦文军, 王璐. 欧洲光伏建筑一体化发展研究[J]. 建筑学报, 2019(S2): 10-14.
- [7] Bhattacharya, S. and Sadhu, P.K. (2025) A Comparative Review of Sustainable Solar Photovoltaic Applications under Limited Land Availability. *WIREs Energy and Environment*, **14**, e70016. <https://doi.org/10.1002/wene.70016>
- [8] 焦巍峰. 光伏技术在建筑行业中的应用[J]. 太阳能学报, 2024, 45(7): 751.
- [9] Salvalai, G. and Zhao, F. (2025) Active Prefabricated Façade with Building-Integrated Photovoltaic (APF-BIPV) Technologies for High Energy Efficient Building Renovation: A Systematic Review of Recent Research Advancements. *Energy and Buildings*, **348**, Article ID: 116440. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.116440>
- [10] 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.
- [11] 贡坚. 双碳战略下的光绿复合屋面应用研究——以海南比勒费尔德应用科学大学欢迎中心项目为例[J]. 城市建筑, 2024, 21(6): 209-212.
- [12] 李贝贝, 郑丽莉, 董楠楠, 等. 城市可持续发展中光绿复合屋面技术的优势和局限性[J]. 建筑与文化, 2024(12): 127-130.
- [13] He, Y., Duan, Z., Song, M., Dai, M., Zhang, X., Chen, Y., *et al.* (2026) Thermal and Energy Saving Performance of Photovoltaic-Green Roof: An Experimental and Modeling Study in Hot Summer and Cold Winter Area. *Energy and Buildings*, **359**, Article ID: 117307. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2026.117307>
- [14] He, Y., Tan, C.L., Lu, Y., Qu, Y. and Liu, J. (2024) Solar Radiation and Daily Light Integral Characteristics of Photovoltaic-Green Roof System in Tropical Area: A Case Study in Singapore. *Solar Energy*, **279**, Article ID: 112807. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112807>
- [15] Xu, H., Xi, C., Min, R., Li, W. and Cao, S. (2026) Synergistic Cooling and Energy Gains of Photovoltaic Green Roofs for Sustainable Cities. *Renewable Energy*, **258**, Article ID: 124920. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.124920>
- [16] 周建新, 李玉香, 王鹏飞, 等. 智能幕墙的控制系统与设计研究[J]. 现代商贸工业, 2009, 21(18): 296-297.
- [17] 姜清海. 节能型热通道智能光伏幕墙控制系统设计及应用[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2010, 49(S1): 15-17.