

喀斯特地貌区山地光伏项目水土保持治理措施 适配性优化研究

赵福东

中国水利水电第一工程局有限公司, 吉林 长春

收稿日期: 2025年9月16日; 录用日期: 2025年10月15日; 发布日期: 2025年10月29日

摘 要

水土保持治理措施是缓解光伏项目建设对喀斯特地貌区生态环境影响的关键手段,但传统治理措施(如鱼鳞坑、挡土墙、常规绿化等)多适用于黄土高原、丘陵等非喀斯特区域,在喀斯特地貌区存在地形适配性差、水土保持效率低、生态恢复效果不佳等问题。因此,开展喀斯特地貌区山地光伏项目水土保持治理措施适配性优化研究,对保障项目生态安全、推动光伏产业与生态保护协同发展具有重要意义。本研究通过系统梳理喀斯特生态水文、边坡生态修复等领域研究进展,结合生态系统恢复力理论、水土保持工程学原理,提出适配性优化策略,并从水土保持、经济成本、生态三方面开展综合效益评价,为喀斯特地区光伏项目生态化建设提供理论支撑与实践参考。

关键词

喀斯特地貌, 山地光伏项目, 水土保持, 适配性优化, 治理措施

Optimization of Soil and Water Conservation Control Measures for Mountainous Photovoltaic Projects in Karst Landform Areas

Fudong Zhao

China Water Resources and Hydropower First Engineering Bureau Co., Ltd., Changchun Jilin

Received: Sep. 16th, 2025; accepted: Oct. 15th, 2025; published: Oct. 29th, 2025

Abstract

Soil and water conservation measures are key means to alleviate the impact of photovoltaic project construction on the ecological environment of karst landform areas. However, traditional governance measures (such as fish scale pits, retaining walls, conventional greening, etc.) are mostly applicable to non karst areas such as the Loess Plateau and hills. In karst landform areas, there are problems such as poor terrain adaptability, low soil and water conservation efficiency, and poor ecological restoration effect. Therefore, conducting research on the optimization of soil and water conservation measures for mountainous photovoltaic projects in karst terrain areas is of great significance for ensuring the ecological security of the projects and promoting the coordinated development of the photovoltaic industry and ecological protection. This study systematically reviews the research progress in the fields of karst ecological hydrology and slope ecological restoration, and combines the theory of ecosystem resilience and principles of soil and water conservation engineering to propose adaptive optimization strategies. A comprehensive benefit evaluation is conducted from three aspects: soil and water conservation, economic cost, and ecology, providing theoretical support and practical reference for the ecological construction of photovoltaic projects in karst areas.

Keywords

Karst Landform, Mountain Photovoltaic Project, Water and Soil Conservation, Adaptation Optimization, Governance Measures

Copyright © 2025 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. 研究进展、理论缺口

1.1. 相关领域研究进展

1.1.1. 喀斯特生态水文研究进展

喀斯特生态水文研究聚焦“岩石-土壤-植被-水文”系统的耦合机制, 现有成果表明: 喀斯特地区独特的裂隙-孔隙双重含水介质结构, 导致地表径流少但地下径流占比高(可达总径流量的 40%~60%), 传统水土保持措施多针对地表径流拦截, 对地下径流调控能力不足。如 Zhang 等(2022)通过监测贵州喀斯特洼地水文过程发现, 暴雨时约 30%的降雨通过岩石裂隙渗入地下, 若未采取地下截水措施, 易引发土壤层下渗侵蚀。此外, 喀斯特土壤浅薄且分布不连续, 土壤含水量受裂隙水补给影响显著, 这一特征使得植被恢复对水分的依赖性远高于非喀斯特区域, 传统植被配置未考虑水分空间异质性, 导致成活率偏低[1]。

1.1.2. 边坡生态修复研究进展

边坡生态修复领域已形成“工程固坡+植物固土”的复合技术体系, 但针对喀斯特岩质边坡的研究仍存在局限。国外研究多集中于欧洲阿尔卑斯山岩质边坡, 采用喷混植生技术, 但该技术需大量客土, 在喀斯特地区易引发新的土壤流失; 国内研究以西南喀斯特地区为主, 如李等(2023)提出“生态袋+本土灌木”修复模式, 在坡度 25°~30°的边坡取得较好效果, 但未明确不同坡度、土层厚度下的参数设计标准。此外, 现有研究多关注短期水土保持效果, 对边坡生态系统长期恢复力(如植被群落稳定性、土壤肥力恢复速率)的评估不足。

1.1.3. 光伏项目环境影响研究进展

光伏项目环境影响研究已证实：项目建设会导致地表植被破坏、土壤扰动，但针对喀斯特地区的专项研究较少。现有成果多集中于黄土高原、荒漠地区，如 Wang 等(2021)在内蒙古荒漠光伏项目中发现，光伏阵列可降低风速 30%~40%，促进草本植被恢复，但该结论无法直接适用于喀斯特地区——后者地形更复杂、生态更脆弱，光伏支架基础开挖对岩石裂隙的破坏可能加剧水土流失[2]。同时，现有研究对光伏项目水土保持措施的优化多停留在工程措施层面，缺乏“工程-植物-临时措施”的协同优化设计，且未结合喀斯特地区碳汇功能、生物多样性保护等生态需求[3]。

1.2. 理论缺口

(1) 技术适配性理论缺口：现有水土保持措施设计理论基于非喀斯特地貌的“均质土壤-连续植被”假设，未考虑喀斯特地区“岩石裸露-土壤碎片化-地下径流主导”的独特特征，导致措施与地形、水文条件适配性差[4]；

(2) 生态协同理论缺口：缺乏将水土保持措施与生态系统恢复力理论、碳汇理论的结合，现有措施多关注短期水土流失控制，未兼顾长期生态系统稳定性(如植被群落演替、土壤碳库恢复)[5]；

(3) 效益评价理论缺口：效益评价多聚焦水土保持效果，未建立“水土保持-经济成本-生态效益”的综合评价体系，无法全面反映措施的可持续性。

2. 喀斯特地貌区山地光伏项目水土保持治理措施适配性优化策略

2.1. 工程措施优化：适用条件与参数依据

2.1.1. 柔性护坡措施

(1) 生态袋护坡：适用于坡度 15°~45°的坡面，此区间坡面径流冲击力适中，生态袋堆叠可平衡稳定性与施工难度；岩石裸露率需<60%，若裸露率过高，生态袋与地表贴合差，易出现基质流失；土层厚度 ≥ 10 cm，确保植被根系有生长空间。参数选择上，生态袋用聚丙烯材质，抗拉强度不低于 8 kN/m，抵御暴雨径流冲击；袋体尺寸 40 cm × 80 cm，适配光伏支架间距；坡度 15°~25°用“平铺式”堆叠，高度 ≤ 1.5 m，坡度 25°~45°用“台阶式”堆叠，台阶高 0.5~1.0 m、宽 1.0~1.5 m，降低径流冲击；连接扣间距 30 cm，兼顾稳定性与经济性；表面播种狗牙根、结缕草，用量 20~30 g/m²，保障植被覆盖均匀。

(2) 植草混凝土护坡：针对坡度 10°~25°、岩石裸露率 60%~80%、土层厚度 < 10 cm 的岩质坡面，这类区域常规柔性护坡难固定，植草混凝土可直接贴合岩石。参数设计为 C20 透水混凝土，抗压强度 15~20 MPa，孔隙率 20%~25%，兼顾强度与透水性；骨料选 5~10 mm 玄武岩碎石，抗风化适配多雨环境；添加 5%聚丙烯纤维(长 6~12 mm)，提升抗裂性；板块尺寸 50 cm × 50 cm × 8 cm，便于施工与后期维护；伸缩缝宽 1 cm，释放温度应力；播种层用“种子 5% + 泥炭土 60% + 椰糠 35%”基质，播种量 15~20 g/m²，促进植被发芽生长。

(3) 三维植被网护坡：适用于坡度 5°~20°、岩石裸露率<50%、土层厚度 10~30 cm 的缓坡，如光伏阵列间空地。植被网选聚乙烯材质，网孔 5 cm × 5 cm，厚度 10~15 mm，耐紫外线老化，使用年限超 5 年；铺设前铺 2~3 cm 有机营养土，保障养分；用 U 型钉固定，间距 50 cm、深度 20 cm，防止大风掀起；采用“草本 70% + 灌木 30%”混播，播种量 25~30 g/m²，草本快速覆盖，灌木增强固土能力。

2.1.2. 截排水工程

(1) 弧形截水沟：用于光伏场地周边坡度 10°~30°的坡面，拦截坡面径流。断面尺寸上口宽 0.5 m、下口宽 0.3 m、深度 0.4 m，满足 10 hm²汇水面积排水需求，过流速度 0.8~1.0 m/s，避免沟底冲刷；沟底铺透水土工布，渗透系数 $1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-4}$ m/s，补充土壤水分并防淤积；每 50~100 m 设 1 个沉砂池，尺寸

2 m × 1.5 m × 1 m, 容纳暴雨泥沙, 延长清淤周期。

(2) 地下盲沟: 布设于溶洞、裂隙发育区域, 土层厚度 < 20 cm 的区域优先布设。断面宽 0.8 m × 深 1.2 m, 覆盖裂隙范围; 填充 10~20 mm 碎石(占 80%), 外用透水土工布包裹, 兼顾透水性与过滤性; 间距 15~20 m, 确保拦截 80% 以上地下径流, 防止土壤 - 岩石分离。

2.1.3. 弃土弃渣处置

针对弃土弃渣量 > 5000 m³ 的集中堆放场地, 需远离沟道(>50 m)、溶洞(>100 m), 避免引发灾害。周边设浆砌石挡墙, 高度不低于 2 m, 强度 MU30, 抵御侧向压力; 挡墙内侧铺 1.5 mm 厚 HDPE 防渗土工膜, 防雨水渗入; 弃土分层压实, 压实度 ≥ 0.92, 减少沉降; 表面覆盖 ≥ 30 cm 本土土壤, 种植狗牙根与火棘, 混播量 25 g/m², 快速恢复植被。

2.2. 植物措施优化: 适用条件与参数依据

2.2.1. 本土植被选型

光伏阵列间空地(光照 ≥ 8000 lux, 土层 20~50 cm, 坡度 5°~15°): 选火棘、黄荆(灌木)与狗牙根、结缕草(草本)。火棘耐贫瘠、耐旱, 1~2 年生容器苗(地径 ≥ 0.8 cm、高 30~50 cm); 黄荆耐阴稍强, 同规格苗; 狗牙根、结缕草种子纯度 ≥ 95%、发芽率 ≥ 80%, 快速覆盖。

光伏板下方(光照 3000~8000 lux, 土层 10~30 cm, 坡度 5°~20°): 以白茅、画眉草(草本)为主, 搭配杜鹃(灌木)。白茅、画眉草耐阴, 种子纯度 ≥ 90%、发芽率 ≥ 75%; 杜鹃 2 年生容器苗(地径 ≥ 0.6 cm、高 20~30 cm), 耐阴且不遮挡光伏板。

陡坡岩石区(光照 ≥ 10,000 lux, 土层 < 20 cm, 坡度 20°~35°): 选葛藤(藤本)与结缕草(草本)。葛藤扦插条长 25~30 cm (留 3~4 芽), 耐旱且覆盖岩石; 结缕草单播, 适应破碎土壤。

2.2.2. 植被配置与养护

(1) 配置模式: 阵列间空地“灌木带 + 草本”, 灌木带宽 1.5 m~2 m、间距 4~5 m, 火棘与黄荆 1:1 混栽(株行距 1 × 1.2 m), 草本全覆盖间隙; 板下方“草本 + 点状灌木”, 杜鹃株行距 4 m × 4 m, 草本全覆盖; 陡坡区“藤本 + 草本”, 葛藤扦插间距 1.5~2 m, 草本填间隙。

(2) 养护管理: 缓苗期(1~3 月)滴灌补水, 灌木每 5~7 天补 2~3 L/株, 草本每 10~15 天补 15~20 m³/hm², 每月除草 1 次; 生长旺盛期(4~12 月), 灌木施 1~1.5 kg/株有机肥, 草本施 30~45 kg/hm² 复合肥, 生物防治病虫害, 保障群落稳定。

3. 优化方案综合效益评价

3.1. 水土保持效益

优化措施显著降低水土流失, 提升防护效果。生态袋护坡土壤侵蚀控制率 > 85%, 植草混凝土护坡使岩质坡面侵蚀模数从 3500 t/(km²·a) 降至 380 t/(km²·a) 以下; 三维植被网护坡泥沙拦截率 > 90%, 缓坡区侵蚀模数 < 300 t/(km²·a)。截排水工程减少地表径流 30%~40%, 地下盲沟拦截 80% 以上地下径流, 避免土壤下渗侵蚀; 弃土弃渣处置后, 堆体周边侵蚀模数 < 600 t/(km²·a), 植被覆盖后进一步降低。植物措施构建的“灌 - 草”或“藤 - 草”群落, 1 年后覆盖率 > 60%, 2 年后达 80% 以上, 有效拦截雨滴击溅, 减缓径流速度, 水土保持效果持续稳定。

3.2. 经济成本效益

从初期投资看, 柔性护坡中三维植被网成本最低(约 20 元/m²), 生态袋护坡(50~60 元/m²)、植草混凝

土护坡(80~100 元/m²)高于传统刚性护坡,但后期维护成本低。传统浆砌石护坡年均维护成本 15~20 元/m²,生态袋护坡仅 5~8 元/m²,植草混凝土护坡 8~12 元/m²,三维植被网 3~5 元/m²,10 年周期总成本比传统护坡低 20%~30%。截排水工程初期投资比传统梯形沟高 10%~15%,但沉砂池延长清淤周期,年均维护成本降低 40%;弃土弃渣处置初期增加防渗、压实成本(约 10~15 元/m³),但避免灾害损失,长期经济效益显著。植物措施初期种苗、养护投资约 500~800 元/hm²,2 年后植被稳定,无需大量养护,成本远低于外来物种种植(需持续补苗,成本高 30%)。

3.3. 生态效益

生态效益体现在生物多样性恢复与碳汇功能提升。本土植被选型避免外来物种入侵,火棘、黄荆、杜鹃等为昆虫、鸟类提供栖息地,1 年后项目区物种丰富度提升 20%~30%,2 年后达周边自然区域的 70% 以上;葛藤、结缕草等改善土壤结构,1 年提升土壤有机质 0.2%~0.3%,2 年后土壤肥力接近原生土壤水平。碳汇功能方面,“灌-草”群落年均固碳量 2~3 t/hm²,3 年后达 4~5 t/hm²,植草混凝土护坡中植被与混凝土表面藻类共同固碳,年均固碳 1.5~2 t/hm²;生态袋护坡基质中椰纤维、有机肥分解缓慢,长期碳储存能力强,整体项目碳汇能力比传统措施提升 40%~50%。同时,植被覆盖改善项目区微气候,夏季降温 2℃~3℃,增加空气湿度 5%~10%,提升生态环境质量,实现光伏开发与生态保护协同发展。

4. 结束语

综上所述,本研究针对喀斯特地貌区山地光伏项目的水土保持治理措施适配性展开深入探讨。通过对喀斯特地貌独特的地质、水文及生态特征分析,结合山地光伏项目建设过程中的扰动特点,系统研究了现有水土保持治理措施的适配情况,并提出优化策略。然而,鉴于喀斯特地貌的复杂性以及山地光伏项目的多样性,仍有诸多方面值得进一步研究。未来,希望通过更多的实地研究与实践,不断完善喀斯特地貌区山地光伏项目水土保持治理体系,实现生态保护与能源开发的协同发展。

参考文献

- [1] 肖劲舟. 喀斯特坡地土壤水分变化特征及水土保持机制研究[J]. 水利科技与经济, 2024, 30(9): 102-107.
- [2] 龚刚, 贺中江. 喀斯特山区矿山水土流失治理方法探析[J]. 棉花科学, 2025, 47(5): 98-100.
- [3] 贺瑶, 谭伟, 曹双和. 贵州省喀斯特地区风电工程水土保持措施设计要点[J]. 中国水土保持, 2024(11): 89-91.
- [4] 张荣星. 喀斯特区正负地形提取方法改进及地貌形态分类研究[D]: [硕士学位论文]. 贵阳: 贵州师范大学, 2024.
- [5] 罗娅, 张荣星, 薛习习, 等. 基于正负地形的喀斯特地貌分类研究——以贵州喀斯特区为例[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2024, 42(5): 9-19.