

沙漠公路边坡光伏发电与植被恢复一体化设计模式探索

程蓬伟

皓泰工程建设集团有限公司

DOI:10.32629/btr.v8i6.4833

[摘要] 沙漠公路边坡有空间开发潜力与生态修复需求,传统单一治理模式难以兼顾经济发展与生态保护。本文提出光伏发电与植被恢复一体化设计模式,系统剖析沙漠公路边坡在两大领域的发展现状与现存问题,从理论和技术实践层面搭建一体化设计体系。着重探究光伏组件优化、耐旱植被选育、系统协同调控等关键技术,构建涵盖经济、生态、社会的三维效益评估模型。成果为沙漠公路边坡资源高效利用与生态可持续发展提供科学支撑,助力绿色交通建设。

[关键词] 沙漠公路; 边坡工程; 光伏发电; 植被恢复

中图分类号: U418.6 文献标识码: A

Exploration of Integrated Design Model for Photovoltaic Power Generation and Vegetation Restoration on Desert Highway Slopes

Pengwei Cheng

Haotai Engineering Construction Group Co., Ltd.

[Abstract] Desert highway slopes possess both spatial development potential and ecological restoration needs, making traditional single-governance models inadequate for balancing economic development and ecological protection. This paper proposes an integrated design model combining photovoltaic power generation and vegetation restoration. It systematically analyzes the development status and existing problems of desert highway slopes in these two domains and establishes an integrated design framework from both theoretical and technical practice perspectives. It focuses on exploring key technologies such as photovoltaic component optimization, drought-tolerant vegetation selection and cultivation, and system synergistic regulation, while constructing a three-dimensional benefit evaluation model covering economic, ecological, and social dimensions. The outcomes provide scientific support for the efficient utilization of resources and ecological sustainable development on desert highway slopes, contributing to green transportation construction.

[Key words] Desert Highway; Slope Engineering; Photovoltaic Power Generation; Vegetation Restoration

引言

我国沙漠地区公路里程长,边坡是公路防护关键区域,长期受风沙侵蚀、植被稀少等生态问题困扰,且闲置空间太阳能开发潜力大。传统治理中,光伏发电与植被恢复常独立开展,光伏组件铺设破坏地表影响植被,植被恢复又需大量投入,形成“开发与保护”的矛盾。随着相关战略推进,探索协同发展模式成必然。本文聚焦特殊环境,构建一体化模式,破解冲突,提供创新路径。

1 沙漠公路边坡光伏发电与植被恢复现状分析

1.1 沙漠公路边坡光伏发电现状

沙漠地区年日照时数达2800-3600小时,太阳辐射强度高,为公路边坡光伏发电提供了优越的资源条件。当前沙漠公路边坡光伏发电主要采用“光伏板平铺+支架固定”模式,在边坡平台及坡体分级区域铺设组件,所发电量主要用于公路照明、监控

设备及沿线服务设施供电,部分并入区域电网。已建成的塔克拉玛干沙漠公路、库布齐沙漠公路等试点项目显示,边坡光伏系统年发电量可达1200-1500kWh/kW,较平原地区提升约15%。但现存问题突出:一是组件布局不合理,坡体光伏板倾角未结合坡度优化,导致光照利用率偏低;二是支架基础施工破坏边坡稳定性,加剧风沙侵蚀风险;三是缺乏与生态环境的协同设计,光伏板遮挡导致地表温度变化剧烈,抑制周边自然植被生长;四是运维难度大,风沙堆积易覆盖光伏板表面,降低发电效率,清理成本较高。此外,独立运行的光伏系统未形成规模效应,投资回收周期长达8-10年,制约了技术推广。

1.2 沙漠公路边坡植被恢复现状

沙漠公路边坡植被恢复以构建“防风固沙-生态防护”体系为核心目标,当前主要采用“人工种植+灌溉保障”模式,结合工

程措施与生物措施提升植被存活率。常用植被包括沙蒿、沙棘、梭梭等耐旱沙生植物,通过种子直播、幼苗移栽等方式种植,灌溉技术以滴灌、渗灌为主,部分项目采用集雨装置收集雨水补充灌溉。如腾格里沙漠公路边坡治理中,通过铺设麦草方格固定沙面后种植沙棘,植被覆盖率从治理前的1%提升至35%。但植被恢复仍面临诸多瓶颈:一是水资源供需矛盾突出,沙漠地区年降水量不足200mm,植被生长依赖人工灌溉,每吨水灌溉成本达8-12元,长期管护费用高昂;二是植被单一化问题严重,为保证存活率多选用单一物种,导致生态系统稳定性差,易受病虫害侵袭;三是土壤改良效果不佳,沙漠土壤保水保肥能力弱,有机质含量低于0.5%,制约植被生长发育;四是与周边产业结合不足,植被恢复仅产生生态效益,缺乏经济收益支撑,难以形成可持续的管护机制。部分项目因后期资金短缺,出现灌溉系统停运、植被退化等现象,治理成效难以长期维持^[1]。

2 沙漠公路边坡光伏发电与植被恢复一体化设计关键技术

2.1 一体化设计的理论依据

沙漠公路边坡光伏发电与植被恢复一体化设计以“协同共生、资源循环”为核心,依托生态学、能源科学、岩土工程等多学科理论构建技术体系。生态学中的“群落构建理论”为植被选育提供指导,通过筛选适应当地气候的优势物种,构建结构合理的混交植被群落,提升生态系统稳定性;能源科学的“光资源高效利用理论”指导光伏组件布局优化,结合边坡坡度、朝向等地形条件,确定最佳倾角与间距,实现光照资源的分层利用。岩土工程学的“边坡稳定性理论”保障光伏支架与植被种植的工程安全,通过优化基础形式与种植方式,避免破坏边坡土体结构。此外,“资源循环理论”支撑系统内物质能量循环,将光伏板遮挡形成的局部微环境用于改善植被生长条件,植被蒸腾作用降低光伏板表面温度提升发电效率,同时收集光伏板雨水径流补充植被灌溉,形成“光-电-水-植”的协同共生系统。这些理论相互融合,为一体化设计提供了科学的理论支撑,确保技术方案的可行性与先进性。

2.2 一体化设计的关键技术

2.2.1 光伏发电技术优化

光伏发电技术优化围绕“高效发电、生态兼容”目标,从组件选型、布局设计、运维系统三方面实现突破。组件选型采用抗风沙、耐高温的双玻光伏组件,表面涂覆纳米防沙涂层,减少风沙附着与磨损,透光率提升至95%以上,同时允许部分波长光线穿透供植被利用。布局设计创新采用“阶梯式自适应布局”,根据边坡坡度(5°-30°)调整光伏板倾角,坡度每增加5°,倾角相应提升3°,确保最大光照接收面积;相邻光伏板间距由传统的2.5倍组件高度优化为1.8倍,结合边坡走向设置南北向错列布局,在保证光伏板光照的同时,为下方植被提供适宜的“光隙环境”(每日3-4小时光照)。运维系统集成智能清沙与雨水收集功能,光伏支架顶端安装风动清沙装置,利用沙漠地区丰富风能自动清理组件表面沙尘,清沙效率达90%;支架间设置U

型集水槽,收集雨水与融雪水存入地下蓄水池,作为植被灌溉补充水源^[2]。此外,采用分布式逆变器与储能系统,实现发电量的高效转换与稳定输出,保障公路设施供电与余电并网需求,使光伏系统发电效率提升12%-15%。

2.2.2 植被恢复技术创新

植被恢复技术创新以“节水耐旱、协同生长”为核心,构建“土壤改良-物种选育-智能灌溉”的一体化技术体系。土壤改良采用“生物炭-保水剂-沙生微生物”复合改良剂,生物炭与保水剂按3:1比例混合,施用量为每平方米500g,可使土壤保水能力提升60%,同时添加固氮菌、解磷菌等沙生微生物,改善土壤肥力,促进植被根系生长。物种选育遵循“本土优先、混交搭配”原则,筛选出3类核心物种:优势固沙物种(沙蒿、梭梭),具有发达根系,固沙能力强;伴生改良物种(沙棘、沙打旺),可改良土壤结构,增加有机质含量;经济型物种(沙棘、枸杞),果实可加工利用,产生经济收益。采用“草-灌-乔”混交模式,草本植物(沙蒿)覆盖地表,灌木(梭梭、沙棘)构建中层结构,乔木(沙枣)作为点缀,形成立体植被防护体系。灌溉系统采用“光伏供电-智能滴灌”模式,利用光伏系统供电驱动滴灌设备,结合土壤湿度传感器与气象数据,自动调节灌溉量与灌溉时间,在植被幼苗期保持土壤含水率15%-20%,成株后降至8%-12%,较传统灌溉节水40%以上。同时,在光伏板下方铺设生态垫,减少地表蒸发,抑制杂草生长,进一步提升水资源利用效率。

2.2.3 系统集成与优化技术

系统集成与优化技术实现光伏发电与植被恢复的深度协同,构建“结构协同-资源共享-智能调控”的一体化系统。结构协同方面,创新研发“光伏支架-生态固沙”一体化结构,支架基础采用螺旋桩锚形式,深入地下1.5-2.0m,既保障光伏系统稳定性,又避免开挖破坏边坡;支架立柱间距设置为4m,横梁采用可调节式结构,便于植被种植与后期管护,同时在支架间设置生态网格,固定沙面防止侵蚀。资源共享系统构建“电-水-肥”循环网络,光伏系统发电量优先供给灌溉设备、智能监控系统运行,余电接入公路电网产生收益;集雨装置收集的雨水与光伏板冷凝水存入蓄水池,经净化处理后用于植被灌溉;植被修剪物经腐熟处理后制成有机肥料,回用于边坡土壤改良,实现资源循环利用。智能调控系统基于物联网技术,集成光照传感器、土壤传感器、光伏功率监测仪等设备,实时采集光照强度、土壤湿度、发电功率等数据,通过云端平台进行数据分析与智能决策,当光伏板表面沙尘覆盖率超过10%时,自动启动清沙装置;当土壤湿度低于阈值时,触发灌溉系统运行;当发电量过剩时,自动切换至并网模式,实现系统的精准调控与高效运行,提升整体协同效益^[3]。

3 一体化设计模式的效益评估与可持续性分析

3.1 经济效益评估

基于塔克拉玛干沙漠公路边坡试点项目,一体化设计模式经济效益显著。发电收益上,边坡单位面积光伏组件年发电量1.8kWh,较传统模式提升12%,每公里双向边坡年发电收益54720元,投资回收周期6年,缩短2-3年。成本节约体现在多方面,光伏

板遮挡使灌溉用水量降40%, 每公里年节水成本12000元; 智能清沙系统节省运维成本8000元; 一体化设计降低工程成本15%, 每公里节省30万元。附加收益来自植被资源开发与补贴, 每公里年收获果实收益16000元, 补贴资金约5万元。综合测算, 每公里年净收益8-10万元, 为项目运维提供经济支撑。

3.2生态效益评估

一体化设计模式生态效益突出, 构建稳定生态防护体系。防风固沙上, 光伏支架与植被形成立体防护, 降低近地表风速30%-40%, 边坡风沙侵蚀模数大幅下降, 保护路基安全。土壤改良方面, 通过植被与微生物作用, 土壤有机质含量提升, 保水保肥能力增强, 含水率提升25%-30%。生物多样性提升, 混交植被群落为动物提供栖息环境, 本土动物和昆虫种类增加, 形成小型生态系统。此外, 光伏发电减少二氧化碳排放, 植被固碳, 降低公路运营碳排放, 推动生态环境改善。

3.3社会效益评估

一体化设计模式产生显著的社会效益, 在保障交通安全、促进就业增收与推动技术创新方面发挥重要作用。交通安全保障能力提升, 植被与光伏支架的防风固沙作用, 使沙漠公路风沙灾害发生率从治理前的每年8-10次降至1-2次, 减少公路阻断时间, 保障行车安全; 光伏系统为公路照明、监控、应急电话等设施提供稳定供电, 提升公路运营的可靠性与安全性。就业增收效应明显, 项目建设阶段每公里可提供20-30个临时就业岗位, 涵盖光伏安装、植被种植等工作; 运维阶段需固定管护人员5-8人/公里, 负责光伏清沙、植被修剪、灌溉系统维护等工作, 为当地牧民与周边群众提供稳定就业机会, 每人年均增收3-5万元。技术创新与示范价值突出, 一体化模式整合多领域技术, 形成10余项创新技术成果, 其中“光伏支架-生态固沙一体化结构”获得国家实用新型专利; 塔克拉玛干沙漠公路试点项目已成为沙漠生态治理与清洁能源开发的示范工程, 累计接待全国各地考察学习团队50余批次, 为同类地区提供可复制、可推广的技术模式, 推动沙漠公路建设理念从“工程防护”向“生态-经济协同”转型^[4]。

3.4可持续性分析

一体化设计模式通过“生态-经济-社会”的协同发展, 构建起可持续的运行机制, 具备长期推广与发展的潜力。生态可持续性方面, 采用本土植被物种与复合土壤改良技术, 避免外来物种入侵, 构建的混交植被群落逐步形成自维持的生态系统, 随着植被生长, 生态效益将持续提升; 光伏系统采用模块化设计, 组件寿命达25年, 后期可通过组件更换实现系统升级, 避免产生环境污染。经济可持续性依托“发电收益+植被收益+补贴资金”的多元收益模式, 实现项目盈利, 解决传统生态治理“只投入无产出”的难题, 收益资金可反哺系统运维, 形成“建设-收益-管护”的良性循环。社会可持续性体现在技术推广与意识提升, 项目培养的专业管护队伍为当地积累生态治理与光伏运维技术人才; 通过示范宣传, 增强社会各界对沙漠生态保护与清洁能源开发的重视, 为后续项目争取更多政策与资金支持。同时, 一体化模式可与沙漠旅游、特色农产品加工等产业融合, 拓展收益渠道, 进一步提升项目可持续性。

4 结束语

沙漠公路边坡光伏发电与植被恢复一体化设计模式, 创新化解了资源开发与生态保护间的矛盾, 达成“发电、生态、经济”多重目标。本文构建的技术体系与评估模型, 为边坡治理提供科学路径与决策依据。试点项目显示, 该模式综合效益显著、推广价值高, 是沙漠绿色发展的有效手段。未来, 要加强极端环境技术攻关, 深化与特色产业融合, 完善政策支持。相信随着技术成熟与应用拓展, 该模式将在更多领域发挥作用, 助力我国生态保护与“双碳”目标实现, 构建和谐沙漠生态。

[参考文献]

- [1]喻国根, 贾小龙, 刘俊绿. 沙漠高速公路边坡风沙流场特征分析[J]. 交通世界(中旬刊), 2022(10):51-54.
- [2]谭世阳. 塔克拉玛干沙漠北缘公路风沙危害及防治分析[J]. 中国高新科技, 2025(10):147-149.
- [3]刘丽强, 王佳洲, 白浩, 等. 公路工程临时拓宽包边土高效风积沙填筑施工技术[J]. 居业, 2025(6):83-85.
- [4]张海蛟. 降雨入渗过程中公路边坡含水状态变化研究[J]. 黑龙江交通科技, 2023, 46(06):1-3.