

DOI: 10.13500/j.dlkcsj.issn1671-9913.2026.01.003

# 沙漠光伏发电项目治沙模式探讨

高捷<sup>1</sup>, 黄建国<sup>1</sup>, 殷文香<sup>1</sup>, 陈浩<sup>2</sup>

(1. 内蒙古电力勘测设计院有限责任公司, 内蒙古 呼和浩特 010020;

2. 内蒙古尚清环保科技有限公司, 内蒙古 呼和浩特 010020)

**摘要:** 荒漠化地区光伏发电开发与沙地生态修复的协同治理已成为社会广泛关注的焦点。目前, 光伏治沙技术和措施仍处于发展阶段, 部分方法沿用传统沙区治理经验, 尚未充分考虑光伏电站的结构特性与区域生态环境承载力。本文对目前常见的固沙措施以及沙障规格进行分析, 结合光伏项目的工程组成及布局特点, 考虑沙地地形地貌特征及主害风向, 选用适生、耐旱灌木, 构建出一套适用于沙漠光伏项目的治沙模式。治沙模式的实施能够有效提高光伏区植被覆盖率, 提升沙地土壤稳固能力, 减轻风沙对光伏板及其基础的侵蚀作用。

**关键词:** 荒漠化; 光伏电站; 防沙治沙

中图分类号: TM615 文献标志码: A 文章编号: 1671-9913(2026)01-20-05

## Discussion on the Desertification Control Model of Desert Photovoltaic Power Generation Projects

GAO Jie<sup>1</sup>, HUANG Jianguo<sup>1</sup>, YIN Wenxiang<sup>1</sup>, CHEN Hao<sup>2</sup>

(1. Inner Mongolia Electric Power Survey & Design Institute Co., Ltd., Hohhot 010020, China;

2. Inner Mongolia Shangqing Environmental Protection Technology Co., Ltd., Hohhot 010020, China)

**Abstract:** Synergistic governance of photovoltaic power development and sandy land ecological restoration in desertified areas has become a focus of widespread social concern. At present, photovoltaic desertification control technologies and measures are still in the development stage. Some methods continue to use traditional desert area governance experience, failing to fully consider the structural characteristics of photovoltaic power stations and the carrying capacity of the regional ecological environment. This paper analyzes common sand-fixation measures and sand barrier specifications currently in use. Combined with the engineering composition and layout characteristics of photovoltaic projects, and taking into account the topographical features of sandy land and the main harmful wind directions, drought-tolerant and locally adaptable shrubs are selected to construct a set of desertification control models suitable for desert photovoltaic projects. The implementation of this desertification control model can effectively increase the vegetation coverage in photovoltaic areas, enhance the soil stability of sandy land, and reduce the erosion of photovoltaic panels and their foundations by wind and sand.

**Keywords:** desertification; photovoltaic power stations; desertification control

\* 收稿日期: 2025-03-13

**第一作者简介:** 高捷(1989-), 女, 硕士, 高级工程师, 从事电力工程环境保护与沙漠化防治工作。

**基金项目:** 内蒙古电力勘测设计院有限责任公司科研项目“荒漠化区域生态光伏治沙技术研究及应用”(KJGCSJY025018)

## 0 引言

内蒙古自治区开展光伏治沙资源优势明显,全区陆上太阳能资源量约 94.6 亿 kW,位居全国第二,主要集中在沙漠、沙地和戈壁。近年来,自治区依托沙区优势加速布局光伏产业集群,形成了自治区特有的“光伏+”生态治理体系。为规范推进光伏治沙一体化建设,2023 年 10 月内蒙古自治区印发了《内蒙古自治区光伏治沙行动实施方案》。方案明确指出配合“三北”六期工程空间布局,助力库布其沙漠等三大沙区得到生态治理。国家“十四五”和“十五五”期间,重点以库布其、乌兰布和、腾格里、巴丹吉林四大沙漠边缘及周边地区,布局建设大型风电光伏基地,配套建设电力外送通道,为自治区在沙漠、荒漠地区发展光伏拓展了新的空间。自治区全区上下正在着力优化经济布局,深入调整产业结构,扎实推进乡村振兴,转变能源开发利用方式,为创新机制调动农牧民、企业等各方参与光伏治沙提供了新契机。同时,自治区水资源相对匮乏,水资源承载能力不足已经成为光伏治沙的刚性约束。沙漠荒漠地区远离负荷中心,自身消纳空间不足,送出通道建设难度大,光伏发电收益低,人工灌溉成本增加,导致项目整体投资增大、施工时间增加。

将光伏板下种植经济物种的做法,统称为“农光互补”“林光互补”和“牧光互补”,这是一种尝试在同一片土地上同时进行经济生产和太阳能电力生成的可持续发展模式,然而这种模式在荒漠地区面临严峻挑战。传统的光伏板下经济种植种类多,结构复杂,没有综合考虑荒漠化区域生态植被的适应性、水资源消耗问题以及光伏企业对于种植植被管护问题。

本文结合光伏项目工程组成及布局特点,铺设对流动性沙漠固沙效果较好的沙障,选用适生、耐旱灌木,构建了一套适用于沙漠光伏项目的治沙模式,可为后续光伏治沙项目的建设提供参考。

## 1 沙漠光伏电站功能区划

光伏电站光伏板的架设会与地面形成一定

的夹角,光伏电站如果建设在沙区中,光伏基础会对流动沙丘起到一定的固定作用,但是安装光伏板后,光伏板对光伏板下方的风向和风速会产生影响,板下会形成明显的狭管效应。例如,杨帆<sup>[1]</sup>等研究表明,光伏板与地面通常会有夹角,形成一个楔形流道,最大风速出现在流道最窄处,即光伏板最低处,风速的增加增强了输沙强度,持续性的掏蚀作用能够形成线性风蚀沟。而在光伏阵列间随着风速减小,输沙强度减弱,沙粒逐渐开始沉积,形成板间积沙带。

荒漠区的光伏阵列对植被生境有一定的正向作用。鲍平安<sup>[2]</sup>等人研究表明光伏电站植被恢复两年,植物群落物种多样性指数、土壤全钾、碱解氮和速效钾含量显著高于光伏场外,光伏电站建设对植被群落及土壤理化特征产生影响,电站建设过程中对生态的破坏可在一定程度上得以恢复。王祯怡<sup>[3]</sup>等在光伏电站建设对沙区生态环境的影响中得出,由于光伏阵列的阻风固沙与遮阴增湿作用和人工管护,有利于站内植被恢复、土壤改良,沙区局地小气候的改善,可以间接影响植物的生长发育。

根据光伏电站内挟沙气流运动特点,以及光伏阵列对植被生长的正向作用,构建适合沙漠光伏电站的防沙治沙模式,能够确保沙漠光伏电站安全运行,治沙效果事半功倍,也能为改善当地荒漠化环境、建设国家“绿色北疆”做出积极贡献。

根据光伏电站选址、沙丘(地)立地特征、气候条件以及光伏电站总平面布置<sup>[5]</sup>等,将沙漠光伏电站功能区划分为光伏阵列固沙区、作业路护路林建设区、外围镶边防风固沙林带区、升压站区、生态修复建设与示范区,并分别采取相应的技术措施。

## 2 沙漠光伏电站固沙措施选择

### 2.1 固沙措施的类型与特性分析

目前沙区常见的固沙措施主要有工程固沙、生物固沙和化学固沙,光伏治沙主要采用工程固沙和生物固沙相结合的方式。1) 工程固沙作为一种有效的防沙治沙手段,通过科学合理地

设置各类沙障直接干预地表风沙运动。这些沙障能够有效减缓风速,拦截风沙,减少沙粒的飞扬和堆积,从而在一定程度上遏制沙漠化的蔓延<sup>[4]</sup>,但是沙障易被沙埋,需定期清理、沙障防护期短、需定期更换,进而增加了大量的运行维护费用,因此,它只能作为一种临时性固沙措施<sup>[6]</sup>。2)生物固沙是通过封育和栽种耐旱植物或培育固沙微生物等方式,提高沙区环境质量和生产潜力的一种应用最为普遍的技术措施,但是需水量较大,试验证明该措施可作为根本性固沙措施<sup>[7]</sup>。3)化学固沙措施是一种利用特定的化学黏结材料,通过将这些材料均匀地施加到松散的沙土表面,使其与沙粒紧密结合,进而形成一层坚固的固结层。这一固结层能够有效地抵御风力的侵袭,防止沙粒被风吹扬和搬运,从而达到控制和减少沙漠化的目的,化学固沙应用与发展受到材料的严格约束,在治沙技术发展过程中出现低谷期。近年来,随着材料学科的发展,无机类、有机类及无机-有机复合类化学新材料被广泛应用于治沙领域,化学固沙措施又上升为研究热点<sup>[8]</sup>。

目前,新建光伏项目占地面积较大,光伏电站内同时存在有不同风蚀沙区,可采用复合沙障技术。光伏电站外围,沙丘迎风面风沙活动剧烈处应选择高立式机械沙障和生物固沙相结合模式,光伏电站内部,沙丘背风面风沙活动较弱区域选择草方格沙障、聚乳酸纤维沙障和化学固沙措施配合生物固沙模式等<sup>[9]</sup>。

## 2.2 沙障配置模式及规格

沙障的配置模式主要有行列式和棋盘式两种,行列式通常是平行排列,适用于风向稳定的区域;而棋盘式是网格状,适用于多风向或变化较大的区域。闫德仁<sup>[10]</sup>团队通过实验对比发现,在相同风沙作用条件下,格状布局的纱网沙障较行列式结构表现出更显著的风沙控制效能。沙障的规格也是影响沙障防护效益的关键因素。高永<sup>[11]</sup>等人指出当障体出露高度保持恒定时,防风固沙效能与网格尺寸呈显著负相关,随着网格规格逐渐增大,孔隙率逐渐增大,防护效果会逐渐减弱。

然而,较小规格的沙障虽然防护效果较好,但其经济成本效益较低。综合考虑防护效益和经济成本效益,通常选择规格为 $2\text{ m}\times 2\text{ m}$ 的沙柳沙障作为最佳方案。然而,小规格沙障虽具备最优防护性能,但是又不能忽视其经济成本效益,结合防护效益和经济成本效益,沙柳沙障一般选用规格为 $2\text{ m}\times 2\text{ m}$ 。目前高立式机械沙障材料主要有沙柳沙障和纱网沙障,根据高永<sup>[12]</sup>等人的研究,沙柳沙障和纱网沙障均具有较好的防风固沙效果,在适宜的施工季节设置沙柳沙障时,部分插植的枝条可自然成活并逐步演替为灌木丛。这种施工方式不仅实现了工程固沙的即时效果,还可同步推进生物固沙的长效修复,从而通过单次作业达成物理阻沙与生态恢复的双重固沙效益。内蒙古农业大学高永团队<sup>[13-15]</sup>研究表明采用聚乳酸(polyactic acid, PLA)可因地制宜制成不同形状的沙袋沙障,该沙障能够用于沙地固沙<sup>[16]</sup>,目前PLA纤维材料的推广受制于生产成本的限制,尚未推广使用。草方格沙障应用广泛,取材方便,目前公路及铁路的防护都有草方格沙障的应用,而且草方格沙障可采用机械铺设,省时省力。传统柴草沙障(如麦草、秸秆)地下部分易发生生物降解,导致障体强度下降,引起障体破损,固沙效果降低。为维持沙障固沙功能,需实施高频次补设作业,致使全生命周期内单位面积综合成本增加。

## 2.3 固沙植被的选择及种植密度

植物固沙是一种通过种植耐旱植物来固定沙丘、改善生态环境的固沙技术,沙漠可选择灌木种类主要有沙柳、梭梭、柠条锦鸡儿、沙地柏、花棒和驼绒藜等,可选择草本主要有沙生冰草、披碱草、狗尾草、紫花苜蓿、沙打旺、沙米、苦豆子等。植物地上部分能够重塑近地表风场格局,能够显著抑制风沙流输移强度;其根系网络能够固结沙粒,提升土壤团聚体稳定性;凋落的枝叶分解,促进沙地土壤有机质的积累,加速沙地生草层向地带性土壤的生态演替进程<sup>[17]</sup>。生物固沙应遵循“以水定绿,量水而行”,传统光伏板下经济种植种类多、结构

复杂、需水量大,导致地下水加速消耗,土壤湿度逐渐降低接近植物萎蔫阈值,沙区水分供给与植被需水量出现显著失衡,固沙植物将逐渐缺水死亡,导致固沙失败<sup>[18]</sup>。因此,固沙植被的选择应当考虑适应性和需水量<sup>[19]</sup>。杨文斌<sup>[20]</sup>等人提出的“低覆盖度治沙”理论,传统的高覆盖度治沙没有考虑到沙区的植被覆盖度主要以低覆盖度为主,高密度种植乔灌木使得沙区地下水位下降,并系统性引发成熟林衰退、“小老树”等逆向演替现象。该理论创新性重构植被覆盖度与固沙效益的关系,能够实现沙区水-植被动态平衡,开创了符合荒漠生态系统水分承载机制的新型治沙模式<sup>[20]</sup>。根据 GB/T 15776《造林技术规程》水资源短缺、承载能力差的干旱半干旱地区,提倡低密度造林,可适当稀植,种植密度参考造林密度表。

综上所述,光伏电站可根据场区风蚀情况,布设不同沙障,风沙活动强度剧烈区域,根据施工难易程度、项目投资等情况可布设规格为 2 m×2 m 沙柳沙障或纱网沙障,风沙活动强度较低区域可选择布设规格为 2 m×2 m 草方格沙障,选择部分区域布设规格为 2 m×2 m 的 PLA 沙障以及喷洒化学材料作为新型材料实验区。沙障间搭配植物措施,根据光伏电站不同区域设置不同植物措施。

### 3 沙漠光伏电站措施布设

#### 1) 光伏阵列区

在光伏板间及板下,根据项目区立地条件、防风固沙主体目标,以及树种的生物生态学特性,采取工程与生物(主要植物)措施相结合,以工程措施(沙障)为先导,跟进植物栽植,设定造林密度及空间配置方式,建植植被。

目前沙漠地区光伏板主要采用双面光伏组件,考虑到下垫面类型对光伏组件的发电效果影响<sup>[21]</sup>,在不同下垫面上安装双面光伏组件时,其发电特性也会有所不同。例如,在白色沙地上安装时,由于高反射率,组件背面的发电增益较高;而在深色土壤上安装时,反射率较低,发电增益相对较低。因此,光伏阵列区采用两

种治理技术模式,光伏板下仅铺设沙障,防止风沙流对立柱及基桩的掏蚀危害,同时能减少光伏组件的发电效果的影响;在光伏板间,铺设平铺式沙障,沙障网格内种植适宜的灌木,不同灌木行间混交,能最大限度发挥沙障和植被的固沙能力。

#### 2) 作业路护路林建设区

在作业道路两侧至光伏板外缘处的流动沙地平缓区域铺设沙柳沙障,沙障网格内种植适宜的灌木,能够有效防止检修道路被风沙掩埋,保证道路畅通。

#### 3) 外围治理区镶边防风阻沙林带

项目区外围做镶边防风阻沙林带,根据内蒙古沙漠地区主风向(西北风、西风),迎风坡面向西侧、北侧,背风坡面向东侧、南侧。背风坡不做固沙措施,迎风坡种植时注意高大沙丘栽植到三分之二,坡顶自然削峰。

在厂区外围的西侧、北侧构建宽度 50 m~100 m 的阻沙带,在厂区外围的东侧、南侧构建宽度 30 m~50 m 的阻沙带。阻沙带铺设沙柳沙障,不同灌木行间混交。为更好保障生态修复项目区建设成果,需对所有项目区进行围栏围封,使项目区与周边隔离,防止周边牲畜进入采食牧草,破坏项目区建设。

#### 4) 升压站区

升压站周边 5 m~10 m 及升压站内空地,充分利用厂区内生活区水分条件较好的优势,采用沙障+植物措施进行绿化美化,能够有效保护升压站免受沙害,同时为员工创建适宜的工作、生活环境。植物措施采用乔灌草相结合。

#### 5) 生态修复建设与示范区

光伏电站可结合所在区域的气象特征、社会经济情况、当地主导产业发展情况以及光伏治沙科研情况,设置一块生态修复建设与示范区,结合当地产业模式种植有经济价值的植物,同时可以设置治沙新型材料实验区,使用 PLA 沙障以及喷洒化学材料等新型固沙材料,联合当地高校及科研机构对治沙新模式进行研究,对当地经济以及治沙产业技术发展起到一定的引领作用。

## 4 结语

沙地光伏本身建设于气候干旱、风大沙多、水资源短缺、植被稀少、生态环境非常恶劣和脆弱的地区，光伏板的建设对地表造成扰动，打破了维持地表平衡状态的动力分布，风蚀与堆积过程剧烈发展，严重风蚀区光伏组件有倒塌风险，严重威胁光伏电站的安全，通过一系列生态环境工程的实施，达到可持续的生态治理效果。

采用“沙障、灌草结合、水资源收集与节水利用”等组合式的治理模式，可以提高光伏板下和板间植被覆盖度，生物防治可以增强对沙地土壤的固定，减弱风沙对光伏板和基底的侵蚀，降低光伏板损毁的风险，不仅可以提高水资源和土地资源的利用效率，还可以减小地表风速，降低土壤水分蒸发，提高土壤涵养水源，调节小气候等生态服务功能，改善项目区生态环境和人居环境，实现新能源与生态融合发展、友好发展。

传统防沙治沙的技术中目前还存在不少不足之处，普遍的问题是由于区域限制和气候因素，很难有任何一种防沙治沙技术手段可以广泛应用于所有的干旱、半干旱区，同时光伏电站面积大，所需要材料数量大，因此，易施工，价格低，环境友好的新型固沙材料将会是以后的发展方向，同时，从降低劳动成本和提高生产效率的角度出发，开发研制一批与固沙新材料相应的机械化、智能化的设备和装置也是当今防沙治沙领域中亟须解决的问题。

## 参考文献

- [1] 杨帆, 牛天祥, 张振师, 等. 沙漠地区光伏电站风沙活动规律及其影响因素[J]. 西北水电, 2022(5): 79-84.
- [2] 鲍平安, 季波, 孙果, 等. 光伏电站建设对植物群落与土壤特征的影响[J]. 草业学报, 2024, 33(12): 23-33.
- [3] 王祯仪, 汪季, 高永, 等. 光伏电站建设对沙区生态环境的影响[J]. 水土保持通报, 2019, 39(1): 191-196.
- [4] 陈清香. 共和盆地荒漠化防治机械固沙技术[J]. 内蒙古林业调查设计, 2018, 41(4): 32-35.
- [5] 宋潇逸, 杨依然, 李煜然. 大型沙漠区域槽式光热电站的场平设计优化[J]. 电力勘测设计, 2021(7): 50-57.
- [6] WANG T, XUE X, ZHOU L, et al. Combating Aeolian Desertification in Northern China[J]. Land Degradation and Development, 2015, 26(2): 118-132.
- [7] 潘霞, 王祯仪, 王敬安, 等. 固沙材料研究现状与前景展望[J]. 内蒙古大学学报(自然科学版), 2025(1): 100-112.
- [8] 任廷婕, 袁立敏, 高永, 等. 环保型固沙材料的研究进展[J]. 中国沙漠, 2023(5): 160-167.
- [9] 郭彩贇, 韩致文, 李爱敏, 等. 库布齐沙漠生态治理与开发利用的典型模式[J]. 西北师范大学学报(自然科学版), 2017, 53(1): 112-118.
- [10] 闫德仁, 袁立敏, 黄海广, 等. 直压立式纱网沙障对近地表输沙量及风速的影响[J]. 中国沙漠, 2020, 40(2): 79-85.
- [11] 高永. 沙柳沙障防沙治沙技术研究综述[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2022, 43(5): 56-60.
- [12] 高永, 邱国玉, 丁国栋, 等. 沙柳沙障的防风固沙效益研究[J]. 中国沙漠, 2004(3): 111-116.
- [13] 丁延龙, 高永, 汪季, 等. 生物基可降解聚乳酸(PLA)沙障对沙丘表层沉积物粒度特征的影响[J]. 中国沙漠, 2018, 38(2): 262-269.
- [14] 成聪聪, 闫德仁, 海春兴. PLA 沙障对沙丘迎风坡土壤水分的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(3): 176-181.
- [15] 党晓宏, 高永, 虞毅, 等. 新型生物可降解 PLA 沙障与传统草方格沙障防风效益[J]. 北京林业大学学报, 2015, 37(3): 118-125.
- [16] 袁立敏, 高永, 李谦, 等. 沙袋沙障对沙丘植被特征的影响[J]. 水土保持通报, 2011, 31(5): 80-84.
- [17] 卫秀成, 赵正华, 谏文武, 等. LZU 固沙新材料及固沙综合技术研究[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2007, 43(1): 37-40.
- [18] 郭柯, 董学军, 刘志茂. 毛乌素沙地沙丘土壤含水量特点: 兼论老固定沙地上油蒿衰退原因[J]. 植物生态学报, 2000, 24(3): 275-279.
- [19] 阿拉木萨, 蒋德明, 李雪华, 等. 科尔沁沙地典型人工植被区土壤水分动态研究[J]. 干旱区研究, 2007, 24(5): 604-609.
- [20] 杨文斌, 王涛, 熊伟, 等. 低覆盖度治沙理论的核心水文原理概述[J]. 中国沙漠, 2021, 41(3): 75-80.
- [21] 钟浩. 双面光伏组件的发电特性研究[J]. 光源与照明, 2022(2): 77-79.

(编辑 魏俊)