

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.04.001

引用格式:帅争峰,雷咸道,汪常明,等.北方荒漠草原区光伏电站建设对植物多样性的影响机制研究[J].草地学报,2026,34(4):1137-1145

SHUAI Zheng-feng, LEI Xian-dao, WANG Chang-ming, et al. Study on the Impact Mechanism of Photovoltaic Power Plant Construction on Plant Diversity in the Northern Desert Grassland Area[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(4):1137-1145

北方荒漠草原区光伏电站建设对植物多样性的影响机制研究

帅争峰¹, 雷咸道¹, 汪常明¹, 黄晨¹, 魏学文¹, 吴睿², 林长存^{2*}

(1. 三峡滨河新能源(平罗县)有限公司, 宁夏石嘴山 753400; 2. 北京林业大学草地资源与生态研究中心, 北京 100083)

摘要:为探究荒漠草原区光伏电站对生态系统的长期影响,本研究以宁夏灵武光伏电站为对象,比较了恢复1年与5年,光伏阵列不同微生境的植物群落与土壤特征。结果表明,光伏阵列通过改变光热分布,形成了高度异质的微生境,显著影响植被恢复进程。群落演替呈现清晰的时空分异,恢复初期以刺沙蓬(*Salsola ruthenica*)等先锋种为主,5年后逐渐演替为以驼绒藜(*Ceratoides latens*)等多年生草本为主导的稳定群落。其中,板下遮阴区因强烈的环境筛选作用,耐阴、耐旱物种的竞争加剧,导致其植物多样性指数在恢复5年后显著下降,但物种丰富度依然维持在较高水平。结构方程模型揭示,恢复年限是群落演替的核心驱动力,而微生境通过调控土壤资源(如氮、钾有效性)来引导恢复方向。本研究构建了光伏场区“环境筛选-资源竞争-稳态维持”的生态恢复路径,为干旱区光伏电站的生态修复与可持续管理提供了科学依据。

关键词:光伏电站;植物多样性;群落演替;微生境异质性;荒漠草原

中图分类号:Q142.9

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)04-1137-09

Study on the Impact Mechanism of Photovoltaic Power Plant Construction on Plant Diversity in the Northern Desert Grassland Area

SHUAI Zheng-feng¹, LEI Xian-dao¹, WANG Chang-ming¹, HUANG Chen¹, WEI Xue-wen¹,
WU Rui², LIN Chang-cun^{2*}

(1. China Three Gorges Binhe New Energy (Pingluo County) Co., Ltd., Shizuishan, Ningxia 753400, China; 2. Grassland Resources and Ecology Center, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: To investigate the long-term ecological impacts of photovoltaic (PV) power stations in desert steppe ecosystems, this study was conducted at the Lingwu PV facility in Ningxia, China. We compared plant communities and soil characteristics across different microhabitats within the solar array over restoration periods of 1 and 5 years. The results indicated that the PV array created highly heterogeneous microhabitats by altering the distribution of light and heat, which significantly influenced the vegetation restoration process. A clear spatio-temporal differentiation in community succession was observed. In the initial restoration stage, pioneer species such as *Salsola ruthenica* were dominant. After five years, the community gradually transitioned to a stable state dominated by perennial herbs, including *Ceratoides latens*. Notably, in the shaded areas under the PV panels, strong environmental filtering intensified competition among shade- and drought-tolerant species. This led to a significant decrease in plant diversity indices after five years, although species richness remained high. Structural equation modeling (SEM) revealed that the restoration period is the primary driver of community suc-

收稿日期:2025-04-30;修回日期:2025-06-20

基金项目:中国三峡新能源(集团)股份有限公司(科研项目编号:NBWL202400129)资助

作者简介:帅争峰(1986-),男,汉族,湖北孝感人,博士研究生,主要从事新能源工程、生态环保研究, E-mail: shuai_zhengfeng@ctg.com.cn;

*通信作者 Author for correspondence, E-mail: linchangcun@bjfu.edu.cn

cession. Microhabitat heterogeneity guides the direction of this succession by regulating soil resources, such as the availability of nitrogen and potassium. This study proposes an ecological restoration pathway for PV sites defined by “environmental filtering-resource competition-stability maintenance”, providing a scientific basis for the ecological restoration and sustainable management of PV power stations in arid regions.

Key words: Photovoltaic power plants; Plant diversity; Community succession; Microhabitat heterogeneity; Desert grassland

近年来,全球能源结构加速向低碳化转型,光伏产业作为新能源领域的核心驱动力,是实现深度脱碳、实现“双碳”目标的必然选择。根据国际可再生能源署数据,2023年全球新增太阳能发电装机量为345.83 GW,其中中国新增装机量为216.88 GW,占全球新增装机量的63%,新增装机量居全球第一^[1]。随着国家明确提出推动沙漠、戈壁、荒漠地区大型光伏基地建设的政策支持和光伏能量转换效率提升的技术创新,集中式光伏电站作为沙漠、戈壁、荒漠地区清洁能源转型的重要手段,在减少化石能源依赖、控制温室气体排放及推进全球碳中和进程中发挥着关键作用,未来集中式光伏装机量也将爆发式增长^[2]。

大规模集中式的光伏开发也会改变局域生态和气候,影响场区内生态恢复的演替过程^[3]。目前,光伏建设与生态环境的互馈机理正受到广泛关注,除了光伏建设对原生植被群落的直接影响外^[4],还可通过对局地微气候和土壤理化成分的调节作用,对场区内植被的生长、群落特征产生间接的影响。如光伏板通过降低地表温度、减少蒸发、增加土壤含水量,并为植被提供遮荫与水分再分配,从而改善荒漠生态系统的生境条件^[5-6]。然而,现有研究多聚焦单一尺度或短期效应,对光伏场区内土壤-植被协同恢复的长期动态、区域异质性及多因子驱动机制仍缺乏系统性解析,尤其是长期生态恢复条件下植物群落对光伏设施的生态响应规律尚未明确^[7]。近年来,随着“光伏+生态”模式的深化,场区内小尺度分区(如板间、板下及边缘区)的差异化生态过程逐渐受到关注,其植被群落结构、土壤养分空间分异及恢复潜力成为优化光伏与生态协同发展的研究重点^[8]。

本研究聚焦于我国西北干旱区光伏电站不同恢复年限下的植被群落演替规律,重点分析光伏板前(迎风面)、光伏板下(遮阴区)、光伏板后(背风面)及对照区(场区外围)四类不同生境的植物多样性差异。本研究旨在:(1)揭示光伏设施对植物空间分布的影响规律,探讨微环境异质性对群落构建的驱动机制;(2)解析光伏场区在不同恢复阶段下,物种共存策略的时空动态演变。本研究成果可为干旱区光伏电站的生态修复规划提供理论依据,并

推动“光伏+生态”协同发展模式的优化。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于宁夏回族自治区灵武市境内典型荒漠草原区的三峡能源光伏基地(图1a),该区属于温带大陆性气候,年平均温度9~10℃,年降水量约170 mm,并主要集中在7—9月。区内日照资源丰富,年日照时数约3000 h,为我国西北部重要的光伏发电基地。研究区内优势物种为刺沙蓬(*Salsola tragus*)、沙蒿(*Artemisia desertorum*)、叉枝鸦葱(*Scorzonera divaricata*)、达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)、驼绒藜(*Krascheninnikovia ceratoides*)。

1.2 样地设置

场区内一期工程完工于2019年,二期工程完工于2023年,项目区内均在完工当年开展了统一模式的生态恢复,在场区内包括光伏设施的内外均匀撒播了生态恢复植物种子(40 kg·hm⁻²),撒播的物种主要有刺沙蓬、狗尾草(*Setaria viridis*)、斜茎黄芪(*Astragalus laxmannii*)等。光伏场区内一期和二期工程区分别设置5年恢复中期样地和1年恢复初期样地。在样地内的光伏板前(BT)、光伏板下(UT)、光伏板后(AT)和对照区(CK)分别设置调查样方,并重复3次,样方大小为1 m×1 m(图1b)。

1.3 野外调查与样品采集

在每个样方中,分物种采用针刺法测量植被相对盖度,采用计数法记录物种的相对密度,采用样圆法记录物种的相对频度,并采用收获法收集地上部分带回实验室,进行后续实验。

植被群落调查结束后,使用直径5 cm的土钻在同一样方地点采用五点法取样,采集0~10 cm、10~20 cm和20~30 cm土层的土壤样品,同一样方内相同土层的土壤样品均匀混合后,带回实验室风干过筛备用,用于测定土壤理化性质,植物和土壤样品的采集均在2024年7月进行。

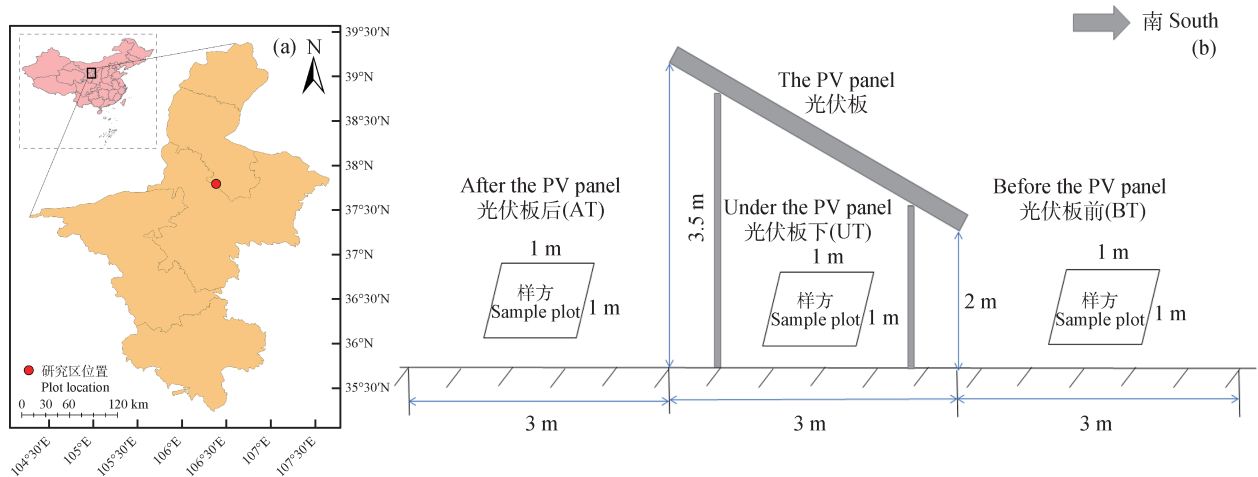


图1 研究区位置及样地设置

Fig. 1 Location of the study area and plot layout

注:图a为研究区位置,图b为样方设置示意图。审图号:GS(2024)0650号

Note: Figure panel (a) shows the location of the study area, and Figure (b) shows a schematic diagram of the sample plot setup. Map Review Number: GS (2024) 0650

微气候调查在植被群落调查时同时进行,分别在上午9:00、中午12:00和下午3:00进行场区内的微气候变化调查。采用手持气象记录仪(Kestrel 4000,美国)记录样地内光伏板前(BT)、光伏板下(UT)、光伏板后(AT)和对照区(CK)1.2 m高度的气温、相对湿度、光合辐射强度。

1.4 实验室分析

土壤样品处理及分析方法采用常规分析方法^[9]。土壤有机碳含量的测定采用TOC分析仪(N/C3100,德国);土壤全氮含量采用凯氏定氮法测定;土壤硝态氮和铵态氮含量采用 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{KCl}$ 溶液浸提并过滤后,取上清液用连续流动分析仪(AA3)测定;土壤全磷含量采用碱熔-钼锑抗分光光度法测定;土壤有效磷含量采用 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定;土壤全钾含量测定采用ICP法;土壤有效钾含量测定采用 $1.0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 乙酸铵浸提-火焰光度法;土壤pH值和电导率采用酸度计测定。

1.5 数据处理及分析

物种多样性部分计算了 α 多样性指数,包括Shannon-Wiener多样性指数(H)、Simpson优势度指数(D)、Pielou均匀度指数(E)和Margalef丰富度指数(R),计算公式如下:

$$H = -\sum (P_i \ln P_i) \quad (1)$$

$$D = 1 - \sum (P_i)^2 \quad (2)$$

$$E = H / \ln S \quad (3)$$

$$R = (S - 1) / \ln N \quad (4)$$

式中, H 为Shannon-Wiener多样性指数; D 为Simpson优势度指数; E 为Pielou均匀度指数; R 为Margalef丰富度指数; S 为每个样方的物种的种数; P_i 为第*i*个物种数量占样方内所有物种数量之和的比率; N 为样方内所有物种的个体数量之和。以上 α 多样性指数均采用R语言的Vegan包下的diversity函数计算。

物种重要值采用以下公式计算:

$$\text{重要值} = (\text{相对盖度} + \text{相对密度} + \text{相对频度}) / 3 \quad (5)$$

所有的数据采用Excel 2019软件进行整理,利用R语言(4.4.1)的stats包进行单因素方差分析(One-Way ANOVA),采用Tukey法进行后续的多重比较,检验光伏电站内不同区位的植被和土壤植被的显著性差异。利用lavaan包进行结构方程模型(Structural Equation Model, SEM)的构建,输入的微气候和土壤理化数据采用Vegan包ordistep函数对环境变量进行剔除,剩余解释度较高的变量用于构建结构方程模型。

2 结果与分析

2.1 光伏开发对植物多样性的影响

分析光伏场区内不同生境的 α 多样性的差异变化,发现Shannon-Wiener, Simpson和Pielou指数等

α 多样性在不同恢复年限中各生境处理上表现趋同(图2)。在恢复1年的光伏场区内,光伏板前(1BT)的3个指数极显著或显著低于板下(1UT)(Shannon指数的 $P<0.01$, Simpson和Pielou指数的 $P<0.05$)和板后(1AT)处理(Shannon和Pielou指数的 $P<0.01$, Simpson指数的 $P<0.05$),但板前(1BT)的Shannon-Wiener和Simpson指数与对照(1CK)处理无差异,而板前(1BT)的Pielou均匀度指数与对照(1CK)差异也极显著($P<0.01$)。研究结果表明,光伏场区生态恢复初期,生物多样性及优势种结构在光伏阵列不同生境内变化较大,但光伏场区

内与区外天然草原相比差异较小,仅板前(1BT)的Pielou均匀度指数与光伏场区外(1CK)存在明显差异($P<0.05$)。

在恢复5年的光伏场区内,光伏板下(5UT)的Shannon-Wiener和Simpson指数显著低于其余3个区位处理, Pielou指数仅光伏板下(5UT)与对照(5CK)存在显著差异($P<0.05$)。表明生态恢复中期,光伏板下由于微环境的独特性会造成物种多样性特征异常,此外场区内其余生境的多样性、优势种结构、均匀度和丰富度与场区外天然草原均无差异,表明生态恢复效果较好。

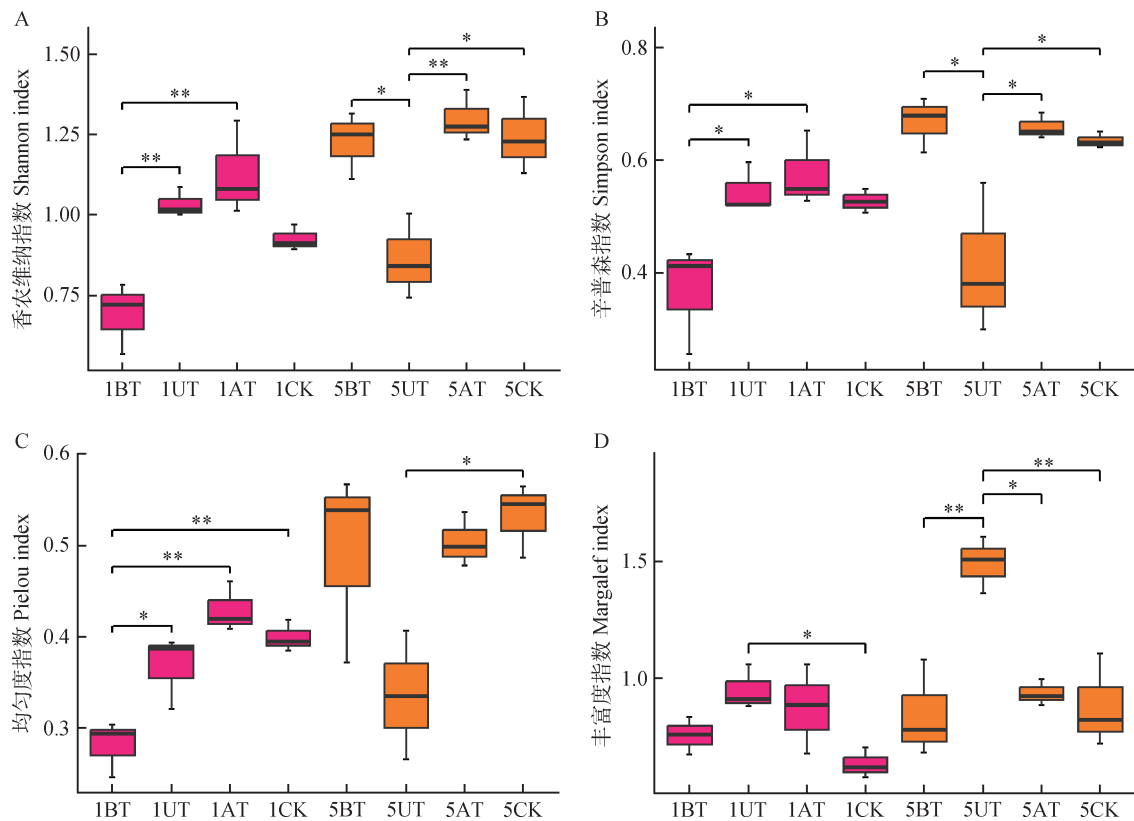


图2 光伏组件对植物群落 α 多样性的影响

Fig. 2 Effects of photovoltaic modules on the alpha diversity of species

注:图中1BT, 1UT, 1AT和1CK分别为生态恢复1年后的光伏板前、光伏板下、光伏板后和对照区;5BT, 5UT, 5AT和5CK分别为生态恢复5年后的光伏板前、光伏板下、光伏板后和对照区。*和**分别表示不同生境之间具有显著差异($P<0.05$)和极显著差异($P<0.01$)

Note: In the figure, 1BT, 1UT, 1AT and 1CK are the before-PV panels, under-PV panels, after-PV panels and control area after 1 year of ecological restoration, respectively; 5BT, 5UT, 5AT and 5CK are the before-PV panels, under-PV panels, after-PV panels and control area after 5 years of ecological restoration, respectively. * and ** indicate significant ($P<0.05$) and highly significant ($P<0.01$) differences between different habitats, respectively

光伏场区内 Margalef 丰富度指数表现的规律与前面3个指数存在较大差异。在恢复1年的光伏场区内,光伏板下物种丰富度显著高于对照,表明短期恢复后,光伏板遮阴创造的小环境促进先锋种短时占领生态位,但物种个体总量维持原状;

在恢复5年的场区,光伏板下(5UT)的丰富度显著或极显著高于板前(5BT)、板后(5AT)和对照(5CK),表明中长期恢复下,板下形成的稳定微气候提供了耐阴物种的适生环境,促进了更多物种的共存。

2.2 光伏场区植物优势种的时空分异

光伏场区内的植物群落空间分布表现出微生境特异性和时间动态性。恢复初期(1年)时,不同区位的物种组成差异明显(表1):光伏板前(1BT)以刺沙蓬和狗尾草双优势种为主(总重要值达76.26%),反映了强风干扰环境下的先锋植物优势;光伏板下(1UT)区域则形成了以刺沙蓬、狗尾草与雾冰藜(*Grubovia dasyphylla*)为优势种的植物群落,表现出遮阴环境对先锋植物的筛选作用;而板后(1AT)区域刺沙蓬单优占比高达48.67%,优势种又增加了驼绒藜,表明光伏板背面微气候具有特殊性。在生态恢复中期(5年),各区域均呈现物种丰富度和优势种数量的提升,以及群落结构的

复杂化:对比恢复初期光伏场区内各区位的优势种数5种,恢复中期优势种数量达到11种,伴生种从7种提升到15种,稀有种也从7种提升到9种;光伏板前(5BT)从风媒先锋种向多年生草本[如白草(*Penisetum flaccidum*)、火绒草(*Leontopodium leontopodioides*)]过渡,板下(5UT)区域由于遮雨形成了局部干旱微生境,形成白草与沙生针茅(*Stipa caucasica*)的耐旱禾草以及鹅绒藤耐阴植物构成优势种组合,板后(5AT)形成以多年生草本植物为主体的群落特征。对比不同生态恢复期共有的物种发现,随着恢复年限增加,刺沙蓬和狗尾草的重要值下降,驼绒藜和沙蒿的重要值上升(表1),表明不同微环境对演替速率的差异化影响。

表1 光伏场区植物重要值空间分异特征
Table 1 Spatial differentiation of plant importance values in photovoltaic sites

处理 Treatments	优势种(重要值 %) Dominant species (importance value %)	伴生种(重要值 %) Companion species (importance value %)	稀有种(重要值 %) Rare species (importance value %)
1BT	刺沙蓬(42.06)、狗尾草(34.20)	蒙古韭(<i>Allium mongolicum</i>)(6.61)、乌拉特黄芪(<i>Astragalus hoantchy</i>)(5.06)、雾冰藜(4.89)	二裂委陵菜(<i>Sibbaldianthe bifurca</i>)(1.82)、驼绒藜(1.69)、沙蒿(1.68)、叉枝鸦葱(0.45)
1UT	刺沙蓬(37.29)、狗尾草(34.20)、雾冰藜(9.13)	蒙古韭(5.82)、驼绒藜(5.81)、乌拉特黄芪(4.72)	冰草(<i>Agropyron cristatum</i>)(1.96)、二裂委陵菜(0.59)、砂蓝刺头(<i>Echinops gmelinii</i>)(0.48)
1AT	刺沙蓬(48.67)、狗尾草(22.32)、驼绒藜(10.92)、雾冰藜(9.78)	乌拉特黄芪(3.88)、蒙古韭(2.42)	二裂委陵菜(0.80)
1CK	刺沙蓬(43.12)、狗尾草(24.82)、达乌里胡枝子(14.83)	冠芒草(<i>Enneapogon borealis</i>)(5.26)、雾冰藜(3.45)、乌拉特黄芪(2.80)、沙生针茅(2.56)、糙隐子草(<i>Cleistogenes squarrosa</i>)(2.50)	驼绒藜(0.66)
5BT	白草(28.43)、狗尾草(13.45)、火绒草(11.44)、驼绒藜(9.41)、砂蓝刺头(8.53)、刺沙蓬(7.60)	糙隐子草(5.58)、叉枝鸦葱(4.68)、沙蒿(4.53)、鹅绒藤(2.53)	苦豆子(<i>Sophora alopecuroides</i>)(1.25)
5UT	白草(44.88)、沙生针茅(15.50)、鹅绒藤(7.20)	叉枝鸦葱(5.81)、苦豆子(4.91)、蒲公英(<i>Taraxacum mongolicum</i>)(4.84)、落草(<i>Koeleria macrantha</i>)(4.02)、砂蓝刺头(3.50)、宿根亚麻(<i>Linum perenne</i>)(2.38)、阿尔泰狗娃花(<i>Aster altaicus</i>)(2.35)	毛茛(<i>Ranunculus japonicus</i>)(1.64)、刺沙蓬(1.18)、糙隐子草(0.59)、沙蒿(0.59)
5AT	火绒草(24.61)、阿尔泰狗娃花(14.01)、沙蒿(12.43)、砂蓝刺头(10.83)、白草(9.11)	刺沙蓬(6.52)、叉枝鸦葱(6.33)、冷蒿(4.94)、糙隐子草(4.44)、驼绒藜(4.10)	苦豆子(1.66)、沙生针茅(1.03)
5CK	沙蒿(35.38)、叉枝鸦葱(21.10)、驼绒藜(14.14)、刺沙蓬(12.57)	砂蓝刺头(6.20)、荒漠石头花(<i>Gypsophila desertorum</i>)(2.49)	狗尾草(1.90)、阿尔泰狗娃花(1.50)、牻牛儿苗(<i>Erodium stephanianum</i>)(0.51)

2.3 光伏场区生物多样性影响机制的结构方程模型分析

本研究通过构建结构方程模型(SEM)发现,光伏场区植物多样性与环境因子之间存在定量关系,同时恢复年限和微环境空间异质性共同塑造了植物群落恢复演替格局(图3)。结构方程模型拟合指标良好(CFI/TLI=4.19, RMSEA=0.05, SRMR=0.03),模型对观测数据具有有效解释力。模型

结果显示,恢复年限对生物多样性呈现极显著正向影响($\beta=0.60^{**}$),这一结果符合生态恢复相关理论,即随着恢复时间的推移,植物群落会经历从先锋物种到稳定群落的进展演替。光伏场区的微环境异质性对植物多样性的影响较为显著($\beta=-0.28^{*}$)。不同区位的植物群落表现出明显的分化特征,这种分异主要源于光热资源的梯度分布。

环境因子中,恢复年限对相对湿度(Relative

Humidity, RH)、土壤有效磷(Available phosphorus, AP)和全钾(Total potassium, TK)存在显著影响,但解释度均低于 30%;不同区位对相对湿度(RH)、土壤铵态氮(Ammonium nitrogen, AN)、有效磷(AP)和全钾(TK)均存在显著影响,且除土壤有机

磷以外,对其余观测指标的解释度均大于 70%。环境因子中土壤铵态氮与生物多样性呈显著负相关(-0.49^{**}),而土壤全钾(TK)与生物多样性呈显著正相关(0.23^{*}),其余环境因子对生物多样性的解释度均较低。

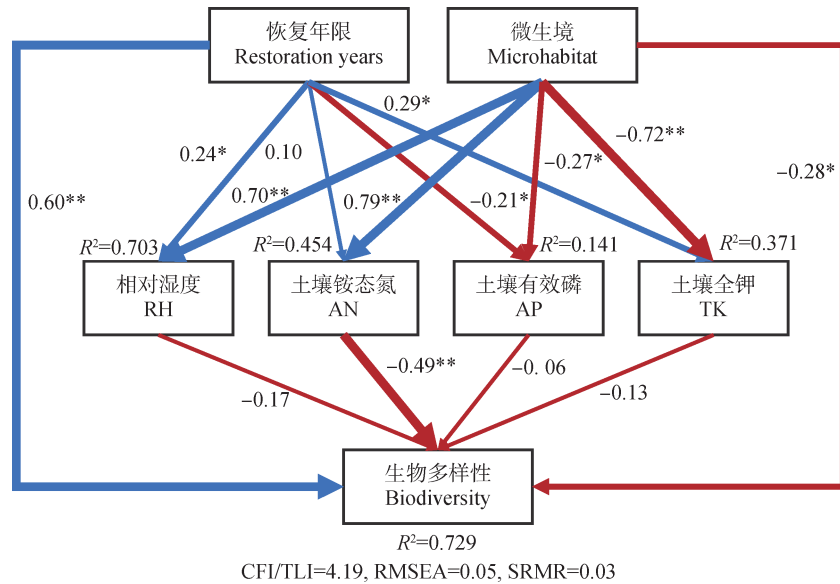


图 3 光伏场区生物多样性影响机制的结构方程模型

Fig. 3 Structural equation modeling of biodiversity impact mechanisms in photovoltaic sites

注:图中 RH 为相对湿度, AN 为土壤铵态氮, AP 为土壤有效磷, TK 为土壤全钾

Note: RH is relative humidity, AN is soil ammonium nitrogen, AP is soil available phosphorus, and TK is soil total potassium

3 讨论

3.1 光伏开发对植物多样性的空间格局与恢复时间差异的影响

本研究中 Shannon-Wiener, Simpson 和 Pielou 指数在空间格局上表现出趋同响应,这表明这 3 个指数在一定程度上反映了光伏开发对植物群落结构相似的影响路径,但 Margalef 丰富度指数呈现出显著分化,表明不同多样性指数对光伏开发响应的敏感性存在差异。结合已有研究,这种差异可能与光伏阵列不同区位微环境异质性、生态恢复阶段及物种竞争机制密切相关^[10-12]。

在短期恢复阶段(1 年), Shannon-Wiener 和 Simpson 指数在板前(1BT)显著低于板下(1UT)和板后(1AT),但相较于对照区(1CK)无显著差异,而 Pielou 指数在板前与对照区存在极显著差异。这些都表明,尽管物种多样性和优势种结构在光伏阵列内发生了改变,但整体物种多样性水平在初期可能尚未发生显著改变,而物种分布的均匀程度可能更早地受到了光伏设施的影响。这种现象产生的原

因可能有以下两个方面,首先是与先锋物种的定殖有关,它们能够迅速占据扰动后的生境,使得物种多样性在数量上与对照区相似,但物种的相对多度分布尚未恢复到自然状态^[8];其次可能归因于光伏板对光照和降水的再分配效应^[10,13]。光伏板下区域因遮荫作用形成较高土壤湿度,促进了先锋物种的生长,但板前区域因太阳辐射和风蚀作用较强,导致植物群落结构单一化,降低了均匀度。张斌在松嫩草地的光伏场区生物多样性的研究发现^[14],光伏板下植被均匀度低于板间区域,并认为不同生境下微气候差异可能是造成植物群落结构差异的原因之一。Margalef 丰富度指数的增加表明了物种多样性不同维度对光伏开发的响应差异(如一年生草本刺沙蓬在板下成为优势种),丰富度可能对微环境的改善更为敏感,而均匀性和优势度结构的变化可能相对滞后。

恢复中期阶段(5 年), Shannon-Wiener 和 Simpson 指数显著降低仅出现在板下区域,而板前、板后与对照区无显著差异。这些都说明随着恢复的进行,光伏板下的植物多样性,尤其是物种多样性和

优势种结构,相较于其他区位和场区外天然草原,恢复进程可能相对缓慢,这与在其他荒漠区光伏基地的研究结果一致,即光伏板外区位由于太阳辐射和水分条件的均衡化,植被恢复速度较快,而光伏板下区位由于优势物种的竞争优势明显,抑制了其他竞争力较弱物种的生长,甚至导致一些物种消失,从而降低物种多样性^[10]。然而,Margalef丰富度指数在板下始终较高,说明长期恢复后,耐阴物种(如部分禾本科和杂类草植物)的竞争适应性增强^[12,15],容易形成局部高丰富度但低均匀度的群落结构。

短期恢复阶段的物种丰富度在板下显著高于对照区,可能源于遮荫条件下的先锋物种爆发。研究也发现,恢复初期先锋植物的短时优势并未转化为长期稳定性,随着恢复时间延长,板下区域的Shannon-Wiener和Simpson指数显著下降,表明竞争排斥效应逐渐凸显^[14]。这与光伏场区微环境植物群落相关的研究结论类似^[16-18],即光伏板下遮阴湿润环境可能导致少数优势种(如耐阴禾草)占据生态位,抑制其他物种生长。板前和板后区域由于光照和风蚀的扰动作用形成的微环境,促使恢复演替中期物种(如多年生草本白草和火绒草等)逐渐占据主导,使多样性指数趋近自然状态^[8,10,19]。这一动态符合“中度干扰假说”,即适度环境异质性有利于维持较高多样性^[20]。

3.2 光伏开发对植物群落构建的影响

本研究通过对光伏场区不同恢复阶段的植物优势种分析,发现光伏板建设造成的微生境对植物群落构建存在差异化调控作用。光伏阵列通过改变光照、降水和风场等因子,形成了高度异质化的微生境,直接驱动了植物群落的差异。具体表现为:在光伏板前区域,风蚀主导下的强干扰环境,筛选出抗风沙的先锋物种(如刺沙蓬、狗尾草),其单优或双优结构反映了r-选择策略的高适应性,这与河西走廊光伏电场的相关研究相同,也发现板前风蚀区一年生草本占比超过60%^[21];在光伏板下区域,遮阴导致的光热资源再分配形成了特殊微环境,初期促进雾冰藜等耐阴先锋种入侵,而中期因遮雨作用反而形成局部干旱,演替为耐旱禾草(白草、沙生针茅)与耐阴藤本(鹅绒藤)的混合群落,这与其他学者在毛乌素沙地的发现一致,即光伏板下禾本科植物因光合效率适应弱光环境而成为优势

种^[3];在板后区域,背风面减少风蚀并拦截降水,促进多年生草本(如驼绒藜、沙蒿)定居。此外,罗久富等^[13]在喀斯特地区也观察到类似现象,光伏板后檐的物种均匀度显著高于板前。

从恢复1年到5年,光伏场区植物群落表现出明显的演替序列。首先,恢复演替表现为物种组成的复杂化,优势种从5种增至11种,伴生种从7种增至15种,表明群落生态位分异增强,这一过程与荒漠地区光伏场的观察结果吻合^[10,22]。同时,本研究也发现了不同区位的恢复速率的差异,如板前区域表现为风媒先锋种向多年生草本的快速更替(如火绒草替代刺沙蓬),符合干旱区次生演替的一般规律,板下区域则因遮阴-干旱的复合效应,形成耐旱与耐阴物种的稳定共存,演替速率较慢^[14]。此外,恢复演替表现为功能群的变化,刺沙蓬和狗尾草(一年生杂类草)重要值随时间推移而下降,而驼绒藜(小灌木)和沙蒿(多年生草本)优势度上升,反映群落从短命型向持久型过渡^[7],这种过渡与光伏场区土壤水分条件改善直接相关^[5,23-24]。这些也都验证了Tilman提出的“资源比率假说”^[20],即不同微生境中光、水资源的比率变化决定了优势种的更替方向。例如,板前因风蚀导致水分限制,演替受水分利用效率驱动;而板下因遮阴导致光限制,演替受光捕获能力主导。

3.3 光伏场区植物群落演替的微生境驱动机制

本研究发现了光伏场区内生态恢复年限对群落恢复效应的主导作用,这与经典生态恢复理论一致,即随时间推移,群落通过生态位分异和种间互作逐步形成稳定结构^[25]。鲍平安等^[7]在宁夏光伏场的研究也发现,恢复2年后Shannon指数显著提升,但本研究的效应强度更大,可能源于光伏场区建设期间存在更高初始干扰强度。此外,本研究还发现了微环境异质性的调控效应,光伏阵列创造的光热梯度通过资源再分配促进物种共存,这也与杨奕颖等^[26]的发现相同,即光伏板间与板下植物的生长策略差异反映资源获取的权衡。本研究通过结构方程模型(SEM)量化了光伏场区植物多样性与环境因子的关系,揭示了恢复年限和微环境异质性协同驱动场区内植物群落恢复的关键过程。

微环境异质性对植物多样性存在显著负影响。光伏板的遮阴和改变地表径流等效应,导致板下、板前和板后等区域形成不同的微气候和土壤水分

条件,从而筛选出适应特定微环境的植物种类,并最终导致物种组成和多样性的空间分异。这种微环境的异质性在光伏场区表现得尤为突出,不同于自然植被群落的均匀生境,光伏阵列创造了多种生境类型,对植物多样性产生了复杂的影响^[4]。

本研究发现了环境因子对生态恢复效应的特异性影响,其中土壤铵态氮对生态恢复表现抑制性,可能的原因是高铵态氮通过促进少数先锋植物(如狗尾草)爆发性增长抑制多样性,这一结论也能获得鲍平安等^[7]提出的“高氮诱导单优群落”结论的支持。此外,全钾对生态恢复的促进作用,主要通过增强植物抗逆性(如干旱胁迫耐受)支持多物种共存^[27],尤其在板下干旱微生境中作用显著。然而,相对湿度、有效磷等因子解释度低于30%,说明在光伏场区微环境(遮阴和风蚀)的直接筛选可能比土壤化学性质对多样性更具决定作用^[3]。

4 结论

本研究揭示了荒漠草原光伏开发对植物群落的影响机制。研究发现:

(1)光伏开发通过改变微生境,显著重塑了植物多样性的空间格局。恢复中期,光伏板下方形成独特的多样性较低的耐阴耐旱植物群落,而板间区域多样性趋近自然状态,验证了“中度干扰假说”。

(2)群落演替受恢复年限与微生境异质性共同驱动,且恢复年限是主导驱动力。

(3)场区内的群落演替遵循“环境筛选-资源竞争-稳态维持”的路径,为干旱区光伏电站的差异化生态修复提供了理论依据。

参考文献

- [1] International Renewable Energy Agency. Renewable capacity statistics 2024 [EB/OL]. <https://www.irena.org/Publications/2024/Mar/Renewable-capacity-statistics-2024>, 2024-03-01/2025-02-01
- [2] 赵春黎,马文勇,张雅京,等. 不同尺度光伏电站的生态效应[J]. 生态学报, 2024, 44(23): 10964-10973
ZHAO C L, MA W Y, ZHANG Y J, et al. Exploration of ecological effects of photovoltaic power stations at different scales[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(23): 10964-10973
- [3] 郑隽卿,罗勇,常蕊,等. 大规模光伏开发对局地气候生态影响研究[J]. 太阳能学报, 2023, 44(8): 253-265
ZHENG J Q, LUO Y, CHANG R, et al. Study on impact of large-scaled photovoltaic development on local climate and eco-system[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2023, 44(8): 253-265
- [4] 吴彤,段媛媛,李捷,等. 不同光伏阵列建设对荒漠草地植物群落自然恢复和土壤理化性质的影响[J]. 草业科学, 2025, 42(9): 2178-2189
WU T, DUAN Y Y, LI J, et al. Effects of different photovoltaic array construction on natural restoration of plant community [J]. *Pratacultural Science*, 2025, 42(9): 2178-2189
- [5] 刘冰,陈安新,刘银珠,等. 光伏电站建设对荒漠土壤环境影响的研究进展[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2024, 60(6): 844-852
LIU B, CHEN A X, LIU Y Z, et al. Advances in research on the effects of photovoltaic power station construction in desert soil environment [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2024, 60(6): 844-852
- [6] 尚小伟,王云正,霍毅,等. 荒漠集中式光伏电站的气候生态影响机制与植被恢复模式[J]. 中国水土保持科学(中英文), 2025, 23(1): 10-20
SHANG X W, WANG Y Z, HUO Y, et al. Climate ecological impact mechanism and vegetation restoration modes of desert centralized photovoltaic power stations[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2025, 23(1): 10-20
- [7] 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
BAO P A, JI B, SUN G, et al. Effects of photovoltaic power station construction on plant community and soil characteristics[J]. *Acta Pratacultural Sinica*, 2024, 33(12): 23-33
- [8] 刘强,马鸿元,崔颖颖,等. 光伏建设后植被群落恢复过程分析——以青海共和光伏园区为例[J]. 中国野生植物资源, 2024, 43(12): 124-130
LIU Q, MA H Y, CUI Y Y, et al. Vegetation community restoration post-photovoltaic installation: a case study of the Qinghai Gonghe solar energy park [J]. *Chinese Wild Plant Resources*, 2024, 43(12): 124-130
- [9] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社, 2000: 157-170
BAO S D. *Agrochemical analysis of soil* [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 157-170
- [10] 岳生娟. 青海荒漠区大规模光伏开发生态环境效应研究[D]. 西安:西安理工大学, 2022: 20-38
YUE S J. Research on eco-environmental effects of large-scale photovoltaic development in Qinghai Desert area [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2022: 20-38
- [11] 吴雲鹏,李艳梅,胡元泽,等. 不同光伏阵列处理对滇中石漠化地区环境因子及细菌群落组成和多样性的影响[J]. 生态环境学报, 2024, 33(10): 1570-1579
WU Y P, LI Y M, HU Y Z, et al. The impact of different photovoltaic array treatments on the physicochemical properties, bacterial community composition, and diversity of soils in rocky desertification areas of central Yunnan [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2024, 33(10): 1570-1579
- [12] 郭婧. 光伏板阵列对松嫩退化草地植物群落和土壤特征的影响[D]. 长春:东北师范大学, 2022: 44-54
GUO Q. Effects of photovoltaic panel array on plant community and soil characteristics in Songnen degraded grassland [D].

- Changchun: Northeast Normal University, 2022: 44-54
- [13] 罗久富, 梁松, 袁涛, 等. 光伏组件遮阴对喀斯特地区植物群落结构的影响[J]. 草业科学, 2023, 40(12): 2982-2990
LUO J F, LIANG S, YUAN T, et al. Effects of partial shading by photovoltaic panels on grassland community structure in Karst area[J]. Pratacultural Science, 2023, 40(12): 2982-2990
- [14] 张斌. 光伏阵列对松嫩草地温室气体排放的影响及其与小气候-土壤-植被的关联机制[D]. 长春: 东北师范大学, 2024: 111-117
ZHANG B. Effects of photovoltaic arrays on greenhouse gas emissions and their mechanisms correlated with microclimate-soil-vegetation in Songnen grassland [D]. Changchun: Northeast Normal University, 2024: 111-117
- [15] 张深林, 吴田军, 刘正国, 等. 高寒高海拔地区光伏电站建设的草地生态效益评估[J]. 草原与草坪, 2025, 45(5): 129-136
ZHANG S L, WU T J, LIU Z G, et al. Grassland ecological benefit assessment of photovoltaic power plant construction in alpine and high altitude areas[J]. Grassland and Turf, 2025, 45(5): 129-136
- [16] VERVLOESEM J, MARCHEGGIANI E, CHOUDHURY M A M, et al. Effects of photovoltaic solar farms on microclimate and vegetation diversity[J]. Sustainability, 2022, 14(12): 7493
- [17] YUE S J, WU W, YUAN B, et al. Large-scale photovoltaic farms significantly change the vegetation diversity and biomass through influencing soil moisture and physiochemical properties [J]. Vadose Zone Journal, 2025, 24(2): e70002
- [18] 罗久富, 罗忠新, 赵世麒, 等. 植物叶功能性状对光伏组件遮阴的响应与生态策略[J]. 西部林业科学, 2022, 51(4): 48-53, 67
LUO J F, LUO Z X, ZHAO S Q, et al. Responses of leaf functional traits to partial shading of a photovoltaic array and their different ecological strategies[J]. Journal of West China Forestry Science, 2022, 51(4): 48-53, 67
- [19] 苑森朋, 张振师, 党廷辉, 等. 毛乌素沙地光伏电站3种植物措施生长发育状况及其生态功能比较[J]. 水土保持研究, 2018, 25(2): 235-239
YUAN S P, ZHANG Z S, DANG T H, et al. Comparative study of growth status of three plant measures and its ecological functions in photovoltaic power station of mu us sandy land[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(2): 235-239
- [20] 于文波, 黎绍鹏. 基于现代物种共存理论的入侵生态学概念框架[J]. 生物多样性, 2020, 28(11): 1362-1375
YU W B, LI S P. Modern coexistence theory as a framework for invasion ecology[J]. Biodiversity Science, 2020, 28(11): 1362-1375
- [21] 张芝萍, 尚雯, 王祺, 等. 河西走廊荒漠区光伏电站植物群落物种多样性研究[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(2): 190-196, 212
ZHANG Z P, SHANG W, WANG Q, et al. Biodiversity of herbaceous species under large photovoltaic (PV) power stations in desert region of Hexi Corridor[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(2): 190-196, 212
- [22] 郝晓珍, 于航, 吴星叶, 等. 青藏高原荒漠区典型光伏电站建设对植被属性和土壤性质的影响[J]. 生态学报, 2025, 45(11): 5510-5526
HAO X Z, YU H, WU X Y, et al. Effects of typical photovoltaic power station construction on vegetation properties and soil properties in Tibetan Plateau desert region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(11): 5510-5526
- [23] 李少华, 高琪, 王学全, 等. 光伏电站干扰下高寒荒漠草原区植被和土壤变化特征[J]. 水土保持学报, 2016, 30(6): 325-329
LI S H, GAO Q, WANG X Q, et al. Characteristics of vegetation and soil property changes by photovoltaic plant interference in alpine desert steppe[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(6): 325-329
- [24] 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
WANG Z Y, WANG J, GAO Y, et al. Impacts of photovoltaic power station construction on ecology environment in sandy area[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(1): 191-196
- [25] CONNELL J H. Diversity in tropical rain forests and coral reefs: high diversity of trees and corals is maintained only in a nonequilibrium state[J]. Science, 1978, 199(4335): 1302-1310
- [26] 杨奕颖, 苏思霖, 曹恩志, 等. 沙漠大型光伏电站对固沙植物表型及生物量分配的影响[J]. 中国沙漠, 2025, 45(1): 162-172
YANG Y Y, SU S L, CAO E Z, et al. Impacts of large-scale desert photovoltaic power stations on the phenotype and biomass distribution characteristics of sand-fixing plants[J]. Journal of Desert Research, 2025, 45(1): 162-172
- [27] ZHANG Y, TIAN Z Q, LIU B L, et al. Effects of photovoltaic power station construction on terrestrial ecosystems: A meta-analysis [J]. Frontiers in Ecology and Evolution, 2023, 11: 1151182

(责任编辑 闵芝智)