

左强,杨昊天,杨奕颖,等.沙漠光伏建设模式通过土壤水分影响固沙草本植物生长特征[J].中国沙漠,2025,45(3):291-301.

沙漠光伏建设模式通过土壤水分影响 固沙草本植物生长特征

左强¹,杨昊天²,杨奕颖³,蔺锴⁴,李云飞⁵,王艳莉¹

(1.甘肃农业大学 林学院,甘肃 兰州 730070; 2.中国科学院西北生态环境资源研究院 沙坡头沙漠研究试验站,甘肃 兰州 730000; 3.龙源(北京)太阳能技术有限公司,北京 100000; 4.宁夏龙源新能源有限公司,宁夏 银川 750002; 5.中国科学院大学,北京 101408)

摘要:大型沙漠光伏电站的建设不仅为全球能源转型和实现碳中和目标提供了新途径,也为荒漠化治理提供了新方案。然而,其建设模式对土壤物理属性(如水分、温度和电导率)及固沙植物生长特征的影响尚缺乏在空间上的对比研究。本研究以腾格里沙漠大型新能源基地为对象,通过野外调查、定位监测,对比分析两种光伏建设模式(固定可调模式与平单轴追踪模式)下生态修复区内光伏板下方、前方和后方的土壤特性、植物生长状况及生物量特征。结果表明:光伏板前和板后土壤水分表现为固定可调生态修复区显著高于平单轴生态修复区,而板下土壤水分表现为平单轴生态修复区高于固定可调生态修复区,土壤温度和电导率表现为固定可调光伏生态修复区高于平单轴光伏生态修复区,但差异不显著。空间异质性分析表明,两种光伏建设模式对土壤属性的影响存在显著差异,光伏板前(固定可调)和板后(两种模式)区域的土壤水分显著高于光伏板下区域,而电导率表现为板下区域显著高于板前和板后区域。固定可调光伏生态修复区的物种多样性高于平单轴光伏生态修复区。固沙植物在空间分布上同样存在显著异质性,光伏板前和板后区域的植物株高、盖度、地径、根长、地上生物量和地下生物量均显著高于光伏板下区域。植物盖度、高度、地径、根长、地上生物量和地下生物量受土壤水分影响显著($P<0.05$)。光伏电站建设通过改善植物生境显著促进了固沙植被的恢复,其中固定可调模式更有利于光伏板前和板后区域的植被恢复,但不利于光伏板下区域的植被恢复。

关键词:沙漠光伏电站;植物多样性;空间分布;植被恢复;土壤水温盐

文章编号: 1000-694X(2025)03-291-11

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2025.00081

中图分类号: Q946

文献标志码: A

0 引言

沙漠的生态环境脆弱,其土壤特性及生物多样性对维持区域生态平衡具有重要意义。全球能源结构转型与生态环境治理是21世纪人类面临的重大挑战。随着可再生能源技术的快速发展,光伏发电已成为全球能源转型的重要方向^[1]。沙漠地区太阳能资源丰富、土地广阔,已成为建设大型光伏电站的理想场所^[2]。然而,沙漠生态系统脆弱,土地荒漠化问题严重,严酷的环境对光伏电站的安全运行造成了极大的威胁,如何在开发利用太阳能资源的

同时实现生态修复和生态系统可持续发展,成为当前研究的热点问题^[3]。

“光伏+生态修复”成为解决能源与环境双重问题的创新途径。沙漠地区光伏电站建成后,适宜的生态修复措施和固沙植被建设不仅有效阻止了风沙活动,固定了流沙,保证了光伏电站的安全运营^[4-5],还改善了当地生态环境,深刻影响着当地的物种多样性^[6-7]。近10年来,中国光伏产业发展迅速,集中式大型光伏电站不断兴起,关于大型沙漠光伏电站对土壤特性和植物多样性的影响及驱动

收稿日期:2025-03-13; 改回日期:2025-04-18

资助项目:宁夏回族自治区重点研发计划项目(2023BCF01019);内蒙古自治区“揭榜挂帅”项目(2024JBGS0003-1);龙源电力集团股份有限公司科技项目(LYH-2021-04);校企合作项目(GASU-JSFW-2024-116-4);甘肃农业大学公招博士科研启动项目(GAU-KY-QD-2020-5)

作者简介:左强(1998—),男,甘肃庆阳人,硕士研究生,研究方向为风景园林生态修复。E-mail: 17609349349@163.com

通信作者:王艳莉(E-mail: wangyanli126@hotmail.com)

机理还处于探索阶段,揭示沙漠大型光伏电站生态修复区土壤特性与植物生长特征的变化特征、规律及其影响因素,是科学治沙以及制定合理可行的沙漠生态修复政策的保障。

光伏板在接受太阳辐射将其转化为电能的同时,也拦截了太阳对地表的照射,降低了土壤水分的蒸发速率,近地表土壤温度略有降低,湿度略有增加^[8-9]。乌兰布和沙漠光伏电站内表层土壤温度较电站外下降1.7~3.2℃^[10]。而在腾格里沙漠光伏电站内2 m高空气温度增加0.13℃,湿度增加了0.85%^[9]。光伏板安装对站内降水分配也有着重要影响,光伏板安装均与地表呈一定的夹角,被拦截的降水通常会转移到光伏板前沿空地中。成排、成列的光伏阵列增加了电站内地表粗糙度,能够有效阻拦近地表风沙,降低风速^[11]。光伏阵列也改变了区域流场,在光伏板下植被层形成风速较低的“束缚流”,阻止风沙携带物的运移并使其沉积在地表^[8,11-12],因而改变光伏电站表层土壤的机械组成。这些小气候因子在空间上的变化可能会进一步改变土壤特性^[13],土壤特性的改善可能对植被盖度、植被生产力、植被空间分布格局等均有着显著影响^[7,14-15]。

土壤水分是干旱沙漠地区植被生长的主要限制因子,直接影响植物的生长、生理特性和生态适应性。土壤水分的变化显著影响固沙植物种子的萌发和幼苗的生长^[16],土壤水分时空异质性也会影响植被的空间分布、群落结构^[17],决定了生态系统的格局和演变^[18-19]。温度是影响固沙植物生理过程的重要因素,高温会增加植物的蒸腾速率,降低水分利用效率,抑制植物生长^[20-21]。适宜的温度和水分条件可以促进植物根系的发育和土壤团聚体的形成。电导率的变化可以通过影响植物根系的渗透功能和水分吸收能力间接影响植物的生长^[22]。实际环境中这些因子往往相互作用,研究中应加强多因子耦合分析,揭示土壤水分、温度和电导率在复杂环境条件下的综合影响。光伏电站的建设使下垫面环境更为复杂,土壤水分、温度和盐分等土壤物理特性作为沙漠生态系统的关键限制因子,在大型沙漠光伏基地内的时空分布规律,以及其对固沙植被的长期影响机制尚不明确。

光伏电站建设显著增加了站内植被盖度、植物平均高度和植物丰富度^[7],进而影响植物群落的构

建和植被演替。相关研究发现,中国西北地区光伏电站建设改变了植被的生长状态,促进了植被空间聚集程度的增加,并且使其周围地区的NDVI向极高值和极低值聚集^[14]。青海共和沙地光伏电站内植被覆盖度显著高于站外区域,光伏电站建设改善了站内局地环境条件,促使植被盖度逐年提升^[15]。在植物多样性方面,光伏电站的建设可能为固沙草本植物提供新的生态位,但其对物种组成、多样性及群落结构的影响仍缺乏系统性研究^[23],适度遮阴可促进某些耐阴植物的生长,但过度遮阴可能抑制喜光植物的定居^[24]。虽然目前沙漠地区光伏电站建设对土壤和植物空间分布格局的影响已有初步探究,但因研究对象规模有限,且各个研究区的气候条件、光伏板的架设方式各不相同,报道的研究结果也大相径庭,难以为其他地区开展大规模光伏电站建设提供依据。

腾格里沙漠中卫新能源基地600万kW光伏复合项目是全国首批、首个国家千万千瓦级“沙戈荒”(沙漠、戈壁、荒漠)新能源基地,也是“宁电入湘”工程的关键组成部分。该项目占地约1万hm²,位于黄河“几字弯”攻坚战的核心区,为开展荒漠化综合防治和科学治沙提供了契机。本研究采用对光伏基地生态修复区进行长期定位观测、野外调查以及室内分析等一系列方法,对比分析两种光伏板安装模式下,站内不同区域土壤水分、温度、电导率等物理属性以及植物生长特征、生物多样性在空间上的差异和变化规律,揭示大型沙漠光伏电站对生态修复区土壤特性和植物多样性的影响,旨在为准确评估沙漠大型光伏电站的生态效益提供科学数据,同时为沙漠地区实现大型光伏电站建设以及生态修复双赢的目标提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于腾格里沙漠东南缘中卫新能源光伏项目区(图1)。该区地处西北内陆深处,属荒漠草原生物气候带,具有明显的大陆性气候特征,气候干旱,年均降水量约为180 mm,由南向北呈递减趋势,年均潜在蒸发量达3 000 mm。年平均气温9.2℃,全年最低气温为-25.1℃,全年最高气温为38.1℃。无霜期多年平均为169 d,年均太阳总辐射

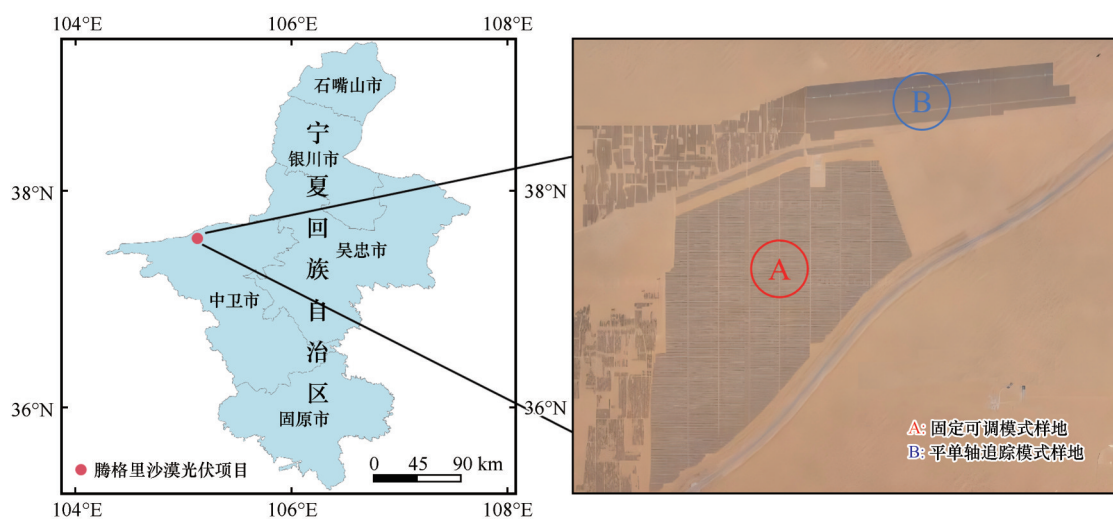


图1 腾格里沙漠新能源基地光伏一期项目区位

Fig.1 Location map of photovoltaic phase I project in Tengger Desert new energy base

量为 $6.29 \times 10^3 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$,日照时长2 776.72 h。土壤属于风沙土,透气透水性良好,但养分贫瘠^[25]。自然景观为典型流动沙丘,地貌以格状沙丘、新月形沙丘链和单个新月形沙丘为主,风沙危害严重。自然植被稀疏,盖度不足1%,沙丘间仅零星分布沙蓬(*Agriophyllum pungens*)和细枝羊柴(*Corethrodenron scoparium*)。

中卫新能源基地光伏项目一期项目于2022年11月开工建设,2023年4月下旬完工、并网发电,占地约1 866.7 hm^2 。光伏板支架采用了较为先进的固定可调模式(固定可调)和平单轴追踪模式(平单轴)。其中,固定可调模式可根据不同季节太阳辐射度,人工调整光伏板倾斜角度;平单轴追踪模式则通过单轴追踪系统,根据太阳高度角自动实时调整光伏板倾斜角度,从而产生最大发电效益。固定可调光伏板下遮阴区域宽度为4 m,板间未遮阴区宽度为8 m,光伏板倾斜角度为 $0^\circ \sim 48^\circ$ 。平单轴光伏板下遮阴区域宽度为2 m,板间未遮阴区宽度为4 m,光伏板倾斜角度为 $-45^\circ \sim 45^\circ$ (图2、3)。在光伏项目建成并网发电后,即2023年3—4月在光伏一期项目区以及周围流沙区扎设了草方格,均匀撒播了固沙先锋植物种籽,包括沙蓬、黑沙蒿(*Artemisia ordosica*)、斜茎黄芩(*Astragalus laxmannii*)、沙芦草(*Agropyron mongolicum*)和地肤(*Bassia scoparia*)等物种。撒播种籽约 $37 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,撒播后无灌溉。

1.2 试验设计

2024年,在腾格里沙漠中卫新能源基地光伏项

目区,经过2个完整生长季后,固定可调生态修复区和平单轴生态修复区分别布设6个样点,每个样点间距1 km以上。每个样点布设3条样线,其中固定可调生态修复区每条样线上连续布设12个 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 的草本样方,平单轴生态修复区布设6个 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 的草本样方,固定可调生态修复区共计216个样方,平单轴生态修复区共计108个样方。5—10月开展土壤水分、温度、电导率监测和植物调查。植物调查包括物种、株数、株高、地径等,同时采用整株全挖法收集地上和地下生物量,生物量带回实验室 65°C 烘干称重,获取生物量干重。在两种光伏阵列模式的板下、板前空地和板后空地上安装了水、温、盐三参数探头,探头长度20 cm,数据采集间隔设定为2 h,用以长期监测土壤温度、水分和电导率变化。土壤水、温、盐数据采用植物调查相同重复数,并选用2024年5—10月(生长季)的全部数据。

1.3 数据分析

使用Simpson指数(D ,优势度指数)、Shannon-Wiener指数(H' ,多样性指数)和Pielou指数(E ,均匀度指数)表示植物群落多样性^[26]。

$$D = 1 - \sum_{i=1}^N P_i^2 \quad (1)$$

$$H' = - \sum_{i=1}^N P_i \ln P_i \quad (2)$$

$$E = \left(- \sum_{i=1}^N P_i \ln P_i \right) / \ln S \quad (3)$$

式中: P_i 为第 i 种的个体数占群落中总个体数的比

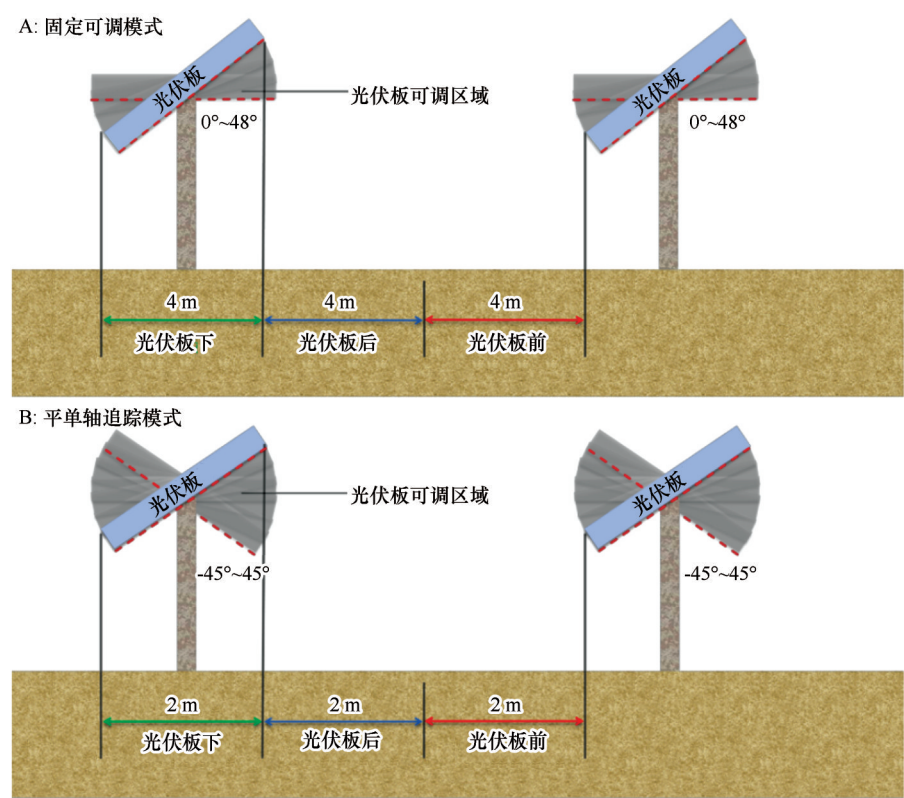


图2 腾格里沙漠新能源基地光伏项目两种建设模式示意图

Fig.2 Schematic diagram of two construction modes of photovoltaic project in Tengger Desert New Energy Base

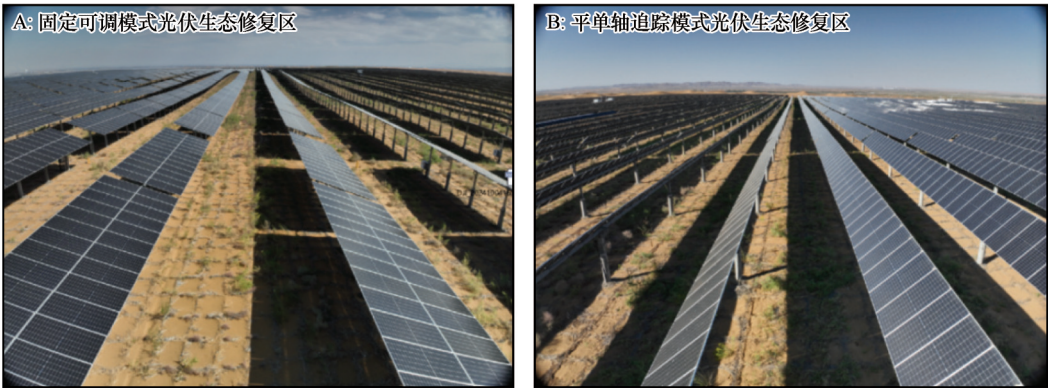


图3 腾格里沙漠新能源基地光伏项目两种建设模式实景

Fig.3 Realistic picture of two construction modes of photovoltaic project in Tengger Desert New Energy Base

例; S 为群落中的物种数; N 表示所有物种个体数总和。

还计算了每个物种的重要值以反映该物种在群落中的重要性。

重要值=(相对密度+相对高度+相对盖度)/3 (4)
式中:相对密度为某种植物的个体数占全部植物个体数的百分比;相对高度为某种植物高度与所有植物高度之和的百分比;相对盖度为某种植物的盖度占所有植物盖度之和的百分比。

采用双因素方差分析法,分析大型沙漠光伏项

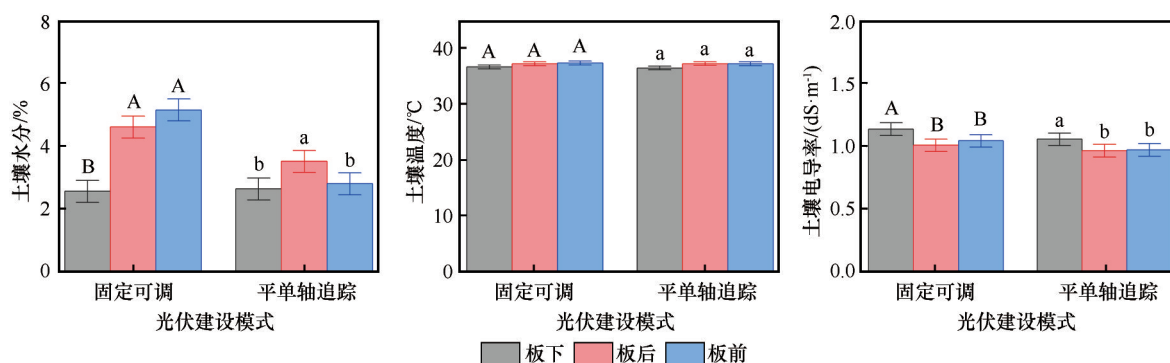
目中光伏电站建设模式和光伏电站内不同区域,对土壤水分、温度和盐分,以及固沙植物盖度、高度、根长、地径、地上生物量、地下生物量和物种多样性的影响。之后,利用Tukey法进行显著性检验,设定显著性水平($\alpha=0.05$)。用Pearson相关性分析对大型沙漠光伏基地土壤特性和植被特征之间进行了相关性分析,以探索土壤物理性质与固沙植物物种多样性之间的关系。使用SPSS进行数据统计分析,使用Origin 2024进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同建设模式对土壤物理性质的影响

光伏建设显著改变了土壤物理性质的空间分布特征。土壤水分、温度和电导率在同一建设模式不同位置之间(光伏板下、光伏板前、光伏板后)差

异显著($P<0.05$,图4)。固定可调生态修复区板前和板后区域的土壤水分显著高于板下区域,平单轴生态修复区板后区域的土壤水分显著高于板前和板下区域。固定可调生态修复区和平单轴生态修复区的土壤温度差异不显著。固定可调和平单轴生态修复区的板下区域电导率均高于板后和板前区域。



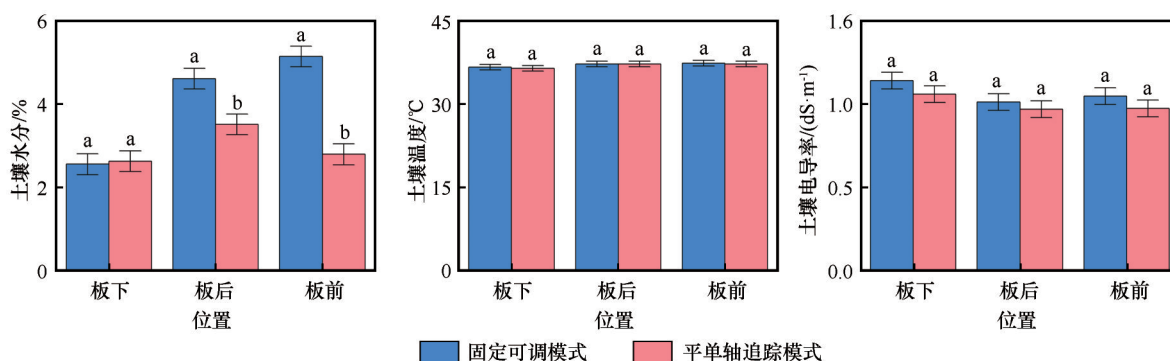
注:不同大写字母表示固定可调模式固沙植被区不同位置之间(板下、板后、板前)土壤水分(温度、电导率)之间差异显著($P<0.05$),不同小写字母表示平单轴模式固沙植被区不同位置之间(板下、板后、板前)土壤水分(温度、电导率)之间差异显著($P<0.05$)

图4 不同建设模式光伏生态修复区土壤水分、温度和电导率的空间差异

Fig.4 Spatial differences of soil moisture, temperature and conductivity in photovoltaic ecological restoration areas under different construction modes

土壤水分在固定可调和平单轴光伏生态修复区之间差异显著($P<0.05$,图5)。平单轴生态修复区的板下土壤水分高于固定可调生态修复区,而板后和板前土壤水分表现为固定可调生态修复区显

著高于平单轴生态修复区($P<0.05$)。除板后位置外,固定可调生态修复区的土壤温度高于平单轴生态修复区。土壤电导率表现为固定可调生态修复区高于平单轴生态修复区,但不显著($P>0.05$)。



注:不同小写字母表示不同位置(板下、板后、板前)土壤水分(温度、电导率)在两种模式(固定可调、平单轴)之间差异显著($P<0.05$)

图5 光伏板不同位置土壤水分、温度和电导率

Fig.5 Soil moisture, temperature and conductivity at different positions of photovoltaic panels

2.2 光伏电站对固沙植物生长特征的影响

两种光伏建设模式对植物株高、盖度、根长、地径、地上生物量和地下生物量均有显著影响,且这种影响在光伏板下区域表现得更加显著。固定可调生态修复区光伏板下植物株高、盖度、根长、地径

和地上生物量均显著高于平单轴生态修复区($P<0.05$),而地下生物量则显著低于平单轴生态修复区($P<0.05$,表1)。

光伏建设区不同位置之间植物株高、盖度、根长、地径、地上生物量和地下生物量也存在显著差

表 1 不同建设模式光伏区植物生长特性双因素方差对比分析

Table 1 Comparative analysis of plant growth characteristics in photovoltaic areas under different construction modes using one-way ANOVA

植物特性	固定可调模式			平单轴追踪模式		
	板前	板后	板下	板前	板后	板下
株高/cm	6.54±0.01 ^{Aa}	5.20±0.02 ^{Ab}	2.57±0.01 ^{Ac}	6.46±0.01 ^{Aa}	5.55±0.02 ^{Ab}	1.27±0.02 ^{Bc}
盖度/%	1.43±0.02 ^{Ba}	1.36±0.01 ^{Aa}	0.25±0.02 ^{Ab}	1.79±0.01 ^{Aa}	1.48±0.02 ^{Ab}	0.10±0.02 ^{Bc}
根长/cm	6.49±0.01 ^{Aa}	4.70±0.02 ^{Ab}	2.91±0.01 ^{Ac}	5.60±0.02 ^{Ba}	5.34±0.01 ^{Aa}	1.54±0.03 ^{Bb}
地径/mm	0.79±0.01 ^{Aa}	0.64±0.02 ^{Ab}	0.33±0.01 ^{Ac}	0.70±0.01 ^{Aa}	0.68±0.01 ^{Aa}	0.49±0.03 ^{Bb}
地上生物量/(g·m ⁻²)	24.13±0.01 ^{Aa}	17.08±0.02 ^{Ab}	3.44±0.01 ^{Ac}	14.64±0.02 ^{Ba}	12.55±0.02 ^{Ba}	0.89±0.03 ^{Bb}
地下生物量/(g·m ⁻²)	2.61±0.01 ^{Aa}	2.21±0.03 ^{Bb}	0.45±0.02 ^{Bc}	2.66±0.01 ^{Aa}	2.60±0.01 ^{Aa}	1.28±0.02 ^{Ab}

注:不同大写字母表示两种模式之间差异显著($P<0.05$),不同小写字母表示不同位置之间差异显著($P<0.05$)。

异($P<0.05$,表 1)。不同位置之间的植物株高、盖度、根长、地径、地上生物量和地下生物量均表现为板前>板后>板下,板前植物株高、盖度、根长、地径、地上生物量和地下生物量分别比板后高 16.51%~25.73%、4.86%~21.18%、5.06%~22.39%、3.20%~24.23%、16.67%~41.31% 和 2.37%~18.18%, 分别比板下高 1.54~4.11、4.81~16.17、1.11~2.64、1.38~2.74、6.01~15.42 倍和 1.07~4.86 倍(表 1)。

2.3 光伏电站对物种多样性的影响

光伏建设模式以及光伏板位置,对植物总物种

数和多样性均产生显著影响($P<0.05$,表 2)。具体而言,固定可调生态修复区植物总物种数、Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数和 Pielou 指数显著高于平单轴生态修复区($P<0.05$)。光伏板前和板后物种总数显著高于板下($P<0.05$),而板下 Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数和 Pielou 指数则显著高于板前和板后($P<0.05$)。

2.4 光伏电站改变了固沙植物物种组成和数量特征

不同光伏建设模式对草本植物的空间分布存在显著影响(表 3)。固定可调模式光伏建设区,在

表 2 光伏项目建设区不同位置植物的总物种数和 α 多样性

Table 2 Total species and α diversity of plants at different locations in photovoltaic project construction area

指数	固定可调生态修复区			平单轴生态修复区		
	板前	板后	板下	板前	板后	板下
总物种数	4.65±0.55 ^{Aa}	4.85±0.45 ^{Aa}	3.12±0.13 ^{Ab}	3.65±0.25 ^{Ba}	2.85±0.15 ^{Bb}	1.89±0.06 ^{Bc}
Simpson 指数	0.18±0.01 ^{Ab}	0.13±0.01 ^{Ab}	0.33±0.01 ^a	0.10±0.01 ^{Bb}	0.10±0.01 ^{Ab}	0.16±0.02 ^{Ba}
Shannon-Wiener 指数	0.39±0.02 ^{Ab}	0.29±0.01 ^{Ac}	0.50±0.0 ^{Aa}	0.20±0.01 ^{Bb}	0.15±0.01 ^{Bc}	0.25±0.01 ^{Ba}
Pielou 指数	0.22±0.01 ^{Ab}	0.18±0.01 ^{Ab}	0.36±0.01 ^{Aa}	0.11±0.01 ^{Bb}	0.09±0.01 ^{Bb}	0.18±0.01 ^{Ba}

注:不同大写字母表示两种模式之间差异显著($P<0.05$),不同小写字母表示不同位置之间差异显著($P<0.05$)。

表 3 光伏板阵列常见物种重要值

Table 3 Important values of common species of photovoltaic panel array

科	种	固定可调模式			平单轴追踪模式		
		板前	板后	板下	板前	板后	板下
藜科	沙蓬	83.01	91.13	82.38	92.21	93.73	85.78
	虫实	5.12	2.72	—	6.38	4.18	14.22
	刺沙蓬	—	1.01	1.56	0.99	—	—
苋科	雾冰藜	12.04	5.54	16.58	0.32	1.60	—
禾本科	沙芦草	—	9.70	—	—	—	—
紫草科	鹤虱	0.27	—	—	—	—	—

植被恢复两年后,草本植物共有 6 种,隶属 4 科,以沙蓬和雾冰藜(*Bassia dasyphylla*)为主要物种,沙芦草和鹤虱(*Lappula myosotis*)为稀有物种;平单轴追踪模式光伏建设区,植被恢复两年后,草本植物共有 4 种,隶属 2 科,以沙蓬和虫实(*Corispermum declinatum*)为主要物种。两种模式光伏建设区不同位置的草本植物空间分布格局也存在较大差异。固定可调模式光伏建设区,板前、板后、板下分别有草本植物 4、5、3 种,板前和板下以沙蓬和雾冰藜为优势种,板后以沙蓬为优势种;平单轴追踪模式光伏建设区,板前、板后、板下分别有草本植物 4、3、2 种,板前和板下以沙蓬和虫实为优势种,板后以沙蓬为优势物种。

草本植物各物种的比例和频率,在不同光伏建设模式及不同位置的光伏建设区内存在较大差异(表 4)。按照物种的数量和频率比例综合评价排序,光伏建设区优势草本植物沙蓬,在固定可调模式光伏建设区的比例为 78.1%~92.8%,低于平单轴追踪模式光伏建设区的 80.8%~97.0%。在不同位置光伏建设区,优势物种沙蓬的数量在板前约为 92.8%~97.0%,高于板后和板下的 78.1%~94.1%。雾冰藜、虫实和刺沙蓬等优势草本物种,在板下、板前和板后的数量和频率也存在显著差异,其中雾冰藜在两种模式的板后区域数量相对较多,而虫实在固定可调模式的板前和平单轴追踪模式的板前和板后区域频率更高。

表 4 光伏项目建设区不同位置植物的数量比例(*P*)和频率(*F*)
Table 4 The characteristics of individual proportion (*P*) and frequency (*F*) of herbaceous and shrubs species at different site from the photovoltaic project construction area

植物种	固定可调模式/%						平单轴追踪模式/%					
	板前		板后		板下		板前		板后		板下	
	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>
沙蓬	92.8	33.3	78.1	33.3	88.1	31.5	97.0	100	94.1	100	80.8	33.3
虫实	3.7	11.1	1.0	0.9	—	—	2.2	33.3	4.9	33.3	19.2	5.6
刺沙蓬	3.2	2.3	1.3	1.4	2.5	0.5	0.5	11.1	—	—	—	—
雾冰藜	—	—	8.4	24.1	9.4	2.3	0.2	5.6	1.0	16.7	—	—
沙芦草	—	—	11.1	20.4	—	—	—	—	—	—	—	—
鹤虱	0.3	1.9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

2.5 土壤水分对草本植物生长特征的影响

不同建设模式样地的植物生长特征、生物多样性与土壤水分、温度、电导率的相关性结果表明,固定可调模式和平单轴追踪模式光伏阵列建设区植物株高、盖度、根长、地径、地上生物量、地下生物量、总物种数、Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数和 Pielou 指数与土壤水分、温度和电导率密切相关。固定可调模式和平单轴追踪模式光伏建设区,土壤水分与植物株高、盖度、根长、地径、地上生物量、地下生物量和总物种数呈显著正相关关系($P<0.05$,图 6),而土壤水分与 Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数和 Pielou 指数则呈显著负相关关系($P<0.05$)。

3 讨论

腾格里沙漠地区属于典型干旱区,气候条件恶劣,极端高温、低温等气候事件频发,降水稀少,植

被覆盖度低^[27],但它有着丰富的光照资源和广阔的可利用土地,成为发展大规模光伏发电的理想区域^[27-28]。随着全球能源结构转型大力推进与可再生能源需求持续增长,大型沙漠光伏电站的建设已成为国际能源开发的重要方向^[28]。沙漠生态系统虽然脆弱,但仍分布着适应极端环境的沙生植物资源,这些物种在维持区域生物多样性及生态系统稳定性方面具有重要作用。大型光伏项目建设后风沙环境依然恶劣,潜在威胁光伏基地基础设施和周边区域,因此开展科学的生态恢复至关重要,而沙漠光伏建设模式如何影响固沙植被建设初期先锋草本植物的生长特征事关光伏治沙的成效,是科学开展防沙治沙的理论依据。

由于光伏阵列设计、光伏板高度、光伏板面积、光伏板角度等都会影响太阳辐射和降水的空间再分配特征,不同时期光伏建设模式千差万别,多数

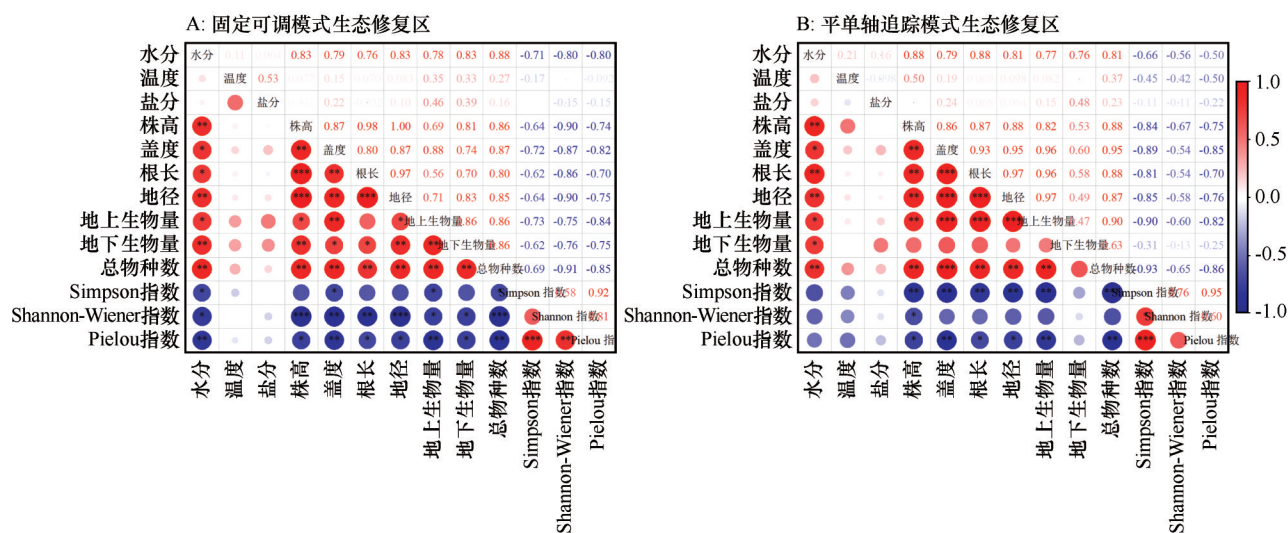


图6 不同建设模式光伏区土壤水温盐与植被特征相关性

Fig.6 Correlation of soil moisture, temperature and conductivity with vegetation characteristics in photovoltaic areas with different construction modes

研究之间的可比性差。本研究中选择两种光伏建设模式,是基于大型沙漠戈壁荒漠光伏基地建设的相关生态系统保护和恢复要求而最新设计的,是未来大型沙漠光伏基地建设的主流模式,两种建设模式选用完全相同的材料、施工方案和生态修复模式,光伏板前沿(最低处)离地高度为2 m,有利于生态修复的开展。因此,本研究可以更好地揭示沙漠光伏建设模式对固沙草本植物生长特征的影响机制。

光伏板将太阳辐射转化为电能的过程中,减少了地表的辐射量,影响地表能量平衡过程,进而影响土壤理化属性。之前的研究较少考虑光伏电站内土壤水分、温度和电导率的空间异质性,多以光伏区和非光伏区进行整体对比研究。如青海省海南州共和县塔拉滩光伏阵列内与阵列外太阳净辐射的均值分别为 $62.75 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $74.31 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,阵列内较阵列外降低了 $11.56 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,下降比为15.56%^[29]。这种辐射能量的再分配进一步影响了近地表微气候环境参数。遥感反演结果显示,敦煌大型沙漠光伏电站气温、地表温度和地表反照率均低于光伏电站外^[30]。在仅仅考虑光伏板间的情况下,大型光伏电站降低了共和盆地荒漠区0~20 cm土层平均土壤温度,提升了0~10 cm土层的平均土壤水分^[31]。这可能由于辐射减少导致的蒸发抑制效应,地表土壤水分呈现增加趋势。光伏阵列也引起了大气和土壤小气候的季节变化,光伏板下生长季的温度降低更多^[32]。这种能量-水分耦合作用机制可能通过改

变土壤水热传输过程,最终形成独特的沙漠光伏电站微环境系统。

本研究中,两种光伏建设模式在空间上(光伏阵列不同位置)改变了土壤水分、温度和电导率分布特征(图4~5)。土壤水分、温度和电导率主要表现为固定可调生态修复区高于平单轴生态修复区,但在不同位置之间的表现不同,二者之间仅光伏板后水分、板前水分差异显著,光伏板下水分差异不显著。由于固定可调模式光伏板安装角度是相对固定的,不同于平单轴追踪模式光伏板每天随太阳角度变化实时调整,每组固定可调光伏板面积是平单轴的2倍,因此,固定可调模式对短波辐射和降水的拦截作用更强^[33],导致固定可调光伏板下土壤水分降低幅度更大。同时,由于固定可调光伏板对光伏板下和板后的遮阴效果以及光伏板前的集雨作用,固定可调区光伏板前和板后土壤水分较高,且板前土壤水分最高。而平单轴光伏板每天随太阳角度变化实时转动,对降水的拦截和再分配具有不确定性,叠加更多区域接收了太阳辐射,导致平单轴固沙植被区的土壤水分低于固定可调区,且空间分布不同于固定可调区。

土壤水分、温度和电导率在同一模式不同位置之间存在差异,这主要与光伏板对降水和太阳辐射的再分配有关。光伏板下区域长期处于遮阴状态,难以获得降水和太阳辐射^[34],因此其温度和水分相较于板前和板后更低。板前因光伏板对降水的再分配,汇集了光伏板上的雨水,同时,水分增加使土

壤比热容增大,吸收相同热量时温度升高幅度减小^[35],故而温度略低。

土壤物理性质的差异进一步影响了草本植物的生长。两种光伏建设模式对草本植物的株高、盖度、根长、地径、地上生物量、地下生物量以及物种多样性均有显著影响(表1~2)。电站建成后的遮阴效果和土壤水分空间分布的改变,重塑了固沙植物的生长环境^[6,36-37]。相关性分析表明,土壤水分与植物株高、盖度、地径、根长、地上生物量和地下生物量均显著正相关(图5)。本研究结果支持已有的部分研究结论,即光伏电站内的植被覆盖率明显高于周边对照区域,植物生长环境也得到了显著改善^[6,38]。这主要得益于光伏组件的遮阴作用,减少了地表温度的波动和土壤水分的蒸发,为植物提供了更为适宜的生长环境^[39-41]。光伏电站的建设对固沙植物也会产生一些负面影响。降水输入减少会导致光伏板下局部区域土壤水分的恶化,进而导致土壤养分有效性降低,最终显著影响植被生长,这也是导致植被生产力空间异质性增大的主要因素^[42]。光伏组件的遮挡会减少植物接收光合有效辐射的面积和时长,从而影响植物光合作用,光合作用的减弱又会间接影响植物对营养物质的合成与吸收,限制植物生长^[6,43]。

光伏电站的建设促进了生物多样性的增加,且生物多样性在光伏建设区不同位置之间存在较大差异(表2)。植被覆盖率的提高和土壤环境的改善,为更多的植物繁殖和生长提供了条件^[34-44]。同时,吸引了更多的昆虫、鸟类等生物栖息和繁衍,为植物种子的扩散提供了媒介^[45]。这不仅有利于沙漠地区的生物多样性,也为生态系统的稳定和恢复提供了有利条件。

在光伏电站固沙植被建成2年后,光伏区固沙植被的生物量、植被覆盖度、物种多样性等都呈现显著增加的趋势,参考本区包兰铁路固沙植被生态系统近60年来的长期演变特征^[46],随着大型沙漠光伏基地固沙植被的演替,生态系统功能将逐步提升,防风固沙、水土保持、固碳增汇、生物多样性等生态效益有望逐步增加。

4 结论

大型沙漠光伏电站的建设显著影响土壤物理特性和固沙草本植物。两种光伏建设模式对土壤

水分、温度、电导率及固沙草本植物多样性的影响存在较大差异,其中固定可调模式的影响更为显著。固定可调生态修复区植物物种数增多、生物量增大、多样性显著提升,固沙植被前期恢复效果更好。土壤水分以及植物多样性在空间上也存在较大差异,光伏板前和板后物种数、生物量和多样性均显著高于板下。这种差异主要受土壤水分空间变异驱动,土壤水分相对充足的固定可调生态修复区板前和板后区域,更有利于固沙草本植物生长与繁殖,从而使得物种数、生物量和多样性均显著高于板下,并且两种光伏建设模式相较于流沙区均产生了良好的生态效应,固定可调生态修复区板前和板后区域更优。因此,建议今后在相同地区开展类似的生态恢复措施时,重点考虑土壤属性的空间分布特征,合理利用降水的集中再分配作用,以提高生态恢复效率和节约成本。

参考文献:

- [1] Smith J A, Brown T J, Taylor R L. Global energy transition and the role of solar power in desert regions[J]. *Renewable Energy Reviews*, 2020, 45(3): 123-135.
- [2] Hernandez R R, Hoffacker M K, Field C B. Solar energy development impacts on land cover change and protected areas[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2014, 111(41): 13579-13584.
- [3] Wang X M, Zhang C X, Hasi E. Desertification and its mitigation strategies in China[J]. *Journal of Arid Environments*, 2019, 163: 1-10.
- [4] 王怡雯, 马瑶瑶, 史培军, 等. 干旱区光伏电站运营对局地生态环境的影响[J]. *干旱区研究*, 2024, 41(8): 1423-1433.
- [5] 朱艳秋, 唐亮, 刘琪, 等. 库布齐沙漠光伏电站气象特征观测及降水微量元素分布规律[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2024, 60(5): 586-592.
- [6] 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.
- [7] 谈昭贤, 陈晓澄, 肖洒, 等. 青海省塔拉滩光伏电站对植被多样性的影响[J]. *青海科技*, 2023, 30(6): 10-18.
- [8] 贾瑞庭. 沙区光伏电站不同植被恢复措施对土壤理化性质的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021.
- [9] 张呈春, 张维福, 董智今, 等. 碳中和背景下光伏阵列对沙漠地区微气候的影响[J]. *甘肃农业大学学报*, 2024(5): 228-236.
- [10] 赵鹏宇. 光伏电板对地表土壤颗粒及小气候的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2016.
- [11] 曾春江, 李龙, 胡鹏, 等. 不同措施对光伏电站风沙环境及土壤的影响[J]. *内蒙古林业科技*, 2024, 50(3): 1-6.
- [12] 马高生, 付宁, 李德顺, 等. 沙漠光伏电站地表固沙效应数值研究[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2025, 53(1):

- 63-71.
- [13] 党梦娇,蒙仲举,斯庆毕力格,等.库布齐沙漠南缘光伏电站内表层沉积物粒度特征[J].土壤通报,2019,50(2):260-266.
- [14] 杨凯迪,李国庆,卢潇楠.中国西北地区光伏电站对植被空间聚集的影响[J].光伏,2023(10):38-44.
- [15] 秦一凡.大型荒漠光伏开发对局地微气候-土壤-植被的影响研究[D].西安:西安理工大学,2021.
- [16] 山建安,朱睿,尹振良,等.基于CMIP6模式的中国西北地区干旱时空变化[J].干旱区研究,2024,41(5):717-729.
- [17] 郭艳菊,马晓静,许爱云,等.宁夏东部风沙区沙化草地土壤水分和植被的空间特征[J].生态学报,2022,42(4):1571-1581.
- [18] 付鹏程,胡广录,巩炜,等.河西走廊沙漠-绿洲过渡带固沙植物根区土壤物理性质及持水特性[J].土壤通报,2021,52(4):811-820.
- [19] 张定海,李新荣,陈永乐.腾格里沙漠人工植被区固沙灌木影响深层土壤水分的动态模拟研究[J].生态学报,2016,36(11):3273-3279.
- [20] Tariq A, Graciano C, Sardans J, et al. Plant root mechanisms and their effects on carbon and nutrient accumulation in desert ecosystems under changes in land use and climate[J]. New Phytologist, 2024, 242(3): 19.
- [21] 丁亮,谌文武,韩文峰.化学固沙新材料对沙丘内部温度、湿度影响的现场试验研究[C]//中国地质学会.第七届全国工程地质大会论文集.2004:4.
- [22] 陈德朝,邹玉和,鄢武先,等.干旱胁迫对治沙植物形态结构和生理特征的影响[J].四川林业科技,2018,39(6):81-85.
- [23] Zhang J H, Liu S M, Wang T. Plant diversity and community structure under photovoltaic arrays in a desert ecosystem[J]. Journal of Plant Ecology, 2020, 13(5): 567-576.
- [24] Liu Y Q, Wang X Y, Chen L D. Shade effects of photovoltaic panels on plant growth and species composition in a desert steppe[J]. Ecological Indicators, 2021, 121: 107123.
- [25] 杨昊天,李新荣,闫培洁,等.腾格里沙漠土壤类型空间分布特征[J].中国沙漠,2020,40(4):154-162.
- [26] 马克平,黄建辉,于顺利,等.北京东灵山地区植物群落多样性的研究II丰富度、均匀度和物种多样性指数[J].生态学报,1995(3):268-277.
- [27] 冯丽,李新荣,郭群,等.腾格里沙漠东南缘公路对路域植被物种组成的影响[J].应用生态学报,2011,22(5):1114-1120.
- [28] 王涛,赵哈林.中国沙漠科学的五十年[J].中国沙漠,2005(2):3-23.
- [29] 刘强,马鸿元,拉本,等.双碳背景下西北高寒荒漠区大规模光伏阵列对微气候的影响[J].青海师范大学学报(自然科学版),2025,41(1):74-83.
- [30] Hua Y, Chai J, Chen L, et al. The influences of the desert photovoltaic power station on local climate and environment: a case study in dunhuang photovoltaic industrial park, dunhuang city, china in 2019[J]. Atmosphere, 2022, 13(8): 1-13.
- [31] 殷代英,马鹿,屈建军,等.大型光伏电站对共和盆地荒漠区微气候的影响[J].水土保持通报,2017,37(3):15-21.
- [32] Armstrong A, Ostle N J, Whitaker J. Solar park microclimate and vegetation management effects on grassland carbon cycling[J]. Environmental Research Letters, 2016, 11(7): 074016.
- [33] 王祎婷,邹蕊,王欣悦,等.塔拉滩地区光伏电站建设对植被净初级生产力的影响[J].农业工程学报,2022,38(24):153-161.
- [34] 翟波.光伏电站内羊草群落特征及其影响机制[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2019.
- [35] 袁孟.喀斯特地区土壤温度和水分特征研究[D].昆明:云南师范大学,2015.
- [36] Elnaz A H. Remarkable agrivoltaic influence on soil moisture, micrometeorology and water-use efficiency [J]. PloS One, 2018, 13(11): e0203256.
- [37] 吴雪鹏,李艳梅,胡元泽,等.不同光伏阵列处理对漠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.
- [38] 刘向,张鹏,刘建全.无机肥料是青海塔拉滩光伏电站植被恢复过程中的限制性因子[J].生物多样性,2022,30(5):29-36.
- [39] 周茂荣,王喜君.光伏电站工程对土壤与植被的影响:以甘肃河西走廊荒漠戈壁区为例[J].中国水土保持科学,2019,17(2):132-138.
- [40] 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.
- [41] 王颖,李国庆,周洁,等.光伏阵列对土壤水分的影响研究[J].太阳能,2021(7):53-58.
- [42] 赵中秋,后立胜,蔡运龙.西南喀斯特地区土壤退化过程与机理探讨[J].地质前缘,2006(3):185-189.
- [43] 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] 李善家,王兴敏,刘海锋,等.河西走廊荒漠植物多样性及其对环境因子的响应[J].生态环境学报,2023,32(3):429-438.
- [45] 彭昀月,罗永梅,徐泽楠,等.集中式大型光伏及风电电场生态影响:进展与展望[J].生物多样性,2024,32(2):102-117.
- [46] 李新荣,张志山,刘玉冰,等.中国沙区生态重建与恢复的生态水文学基础[M].北京:科学出版社,2016.

The construction mode of desert photovoltaic facilities influences the growth characteristics of sand-fixing herbaceous plants through soil moisture

Zuo Qiang¹, Yang Haotian², Yang Yiyang³, Lin Kai⁴, Li Yunfei⁵, Wang Yanli¹

(1.College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2.Shapotou Desert Research and Experiment Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 3.Longyuan (Beijing) Solar Energy Technology Co., Ltd., Beijing 100000, China; 4.Ningxia Longyuan New Energy Co., LTD, Yinchuan 750002, China; 5.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China)

Abstract: The construction of large-scale desert photovoltaic power stations not only provides a new way for global energy transformation and carbon neutrality, but also opens up a new scheme for desertification control. However, the impact of its construction mode on soil physical properties (such as moisture, temperature and electrical conductivity) and the growth characteristics of sand fixation plants is still lack of comparative research in space. This study takes the large-scale new energy base in Tengger Desert as the research object, through field investigation, positioning monitoring and comparative analysis of the soil characteristics, plant growth status and biomass characteristics under, in front of and behind the photovoltaic panels in the ecological restoration area under the two photovoltaic construction modes (fixed adjustable mode and horizontal uniaxial tracking mode). The results showed that the soil moisture in the fixed and adjustable ecological restoration area was significantly higher than that in the flat uniaxial ecological restoration area, while the soil moisture in the flat uniaxial ecological restoration area was higher than that in the fixed and adjustable ecological restoration area, and the soil temperature and conductivity in the fixed and adjustable photovoltaic ecological restoration area were higher than that in the flat uniaxial photovoltaic ecological restoration area, but the difference was not significant. The spatial heterogeneity analysis showed that there were significant differences in the effects of the two photovoltaic construction modes on soil properties. The soil moisture in the front (fixed and adjustable) and back (two modes) of the photovoltaic panel was significantly higher than that under the photovoltaic panel, while the conductivity in the under panel area was significantly higher than that in the front and back of the photovoltaic panel. The species diversity of the fixed and adjustable photovoltaic ecological restoration area is higher than that of the flat single axis photovoltaic ecological restoration area. The plant height, coverage, ground diameter, root length, aboveground biomass and underground biomass in the area before and after the photovoltaic panel were significantly higher than those in the area under the photovoltaic panel. Plant coverage, height, ground diameter, root length, aboveground biomass and underground biomass were significantly affected by soil moisture ($P < 0.05$). The construction of photovoltaic power station has significantly promoted the restoration of sand fixation vegetation by improving plant habitat. The fixed and adjustable mode is more conducive to the vegetation restoration in the area before and after the photovoltaic panel, but is not conducive to the vegetation restoration in the area under the photovoltaic panel. This study reveals the potential of desert photovoltaic power station in improving soil environment and promoting sand fixation plant diversity, and provides a theoretical basis for the scientific implementation of the "photovoltaic+sand control" mode.

Key words: desert photovoltaic power station; plant diversity; spatial distribution; vegetation restoration; soil moisture, temperature, and salinity