

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.

# 沙漠大型光伏电站对固沙植物表型及生物量分配的影响

杨奕颖<sup>1</sup>, 苏思霖<sup>2</sup>, 曹恩志<sup>1</sup>, 李红有<sup>1</sup>, 迟洪明<sup>1</sup>,  
蔺凯<sup>3</sup>, 吴旭东<sup>4</sup>, 何文强<sup>2</sup>, 杨昊天<sup>2</sup>

(1. 龙源(北京)太阳能技术有限公司, 北京 100000; 2. 中国科学院西北生态环境资源研究院 干旱区生态安全与可持续发展重点实验室/沙坡头沙漠研究试验站, 甘肃 兰州 730000; 3. 宁夏龙源新能源有限公司, 宁夏 银川 750002; 4. 宁夏农林科学院 林业与草地生态研究所, 宁夏 银川 750002)

**摘要:** 表型可塑性是植物适应环境变化的重要机制, 此机制在沙漠大型光伏电站的表现尚不清楚。本研究通过调查腾格里沙漠东南缘大型光伏电站光伏板下和板间固沙植物形态、生物量及其分配揭示固沙植物对光伏电站的适应机制。结果表明: 生态修复实施后, 光伏阵列显著改变了固沙植物个体表型, 与板间相比, 板下植物株高、根长、地径、地上生物量和地下生物量均显著降低, 且在板间(下)空间上也存在不同程度差异。光伏板间更有利于固沙植物生长。光伏板下雨线附近的根冠比显著低于光伏板间, 这是固沙植物适应光伏电站水光资源再分配的重要机制, 符合最优分配假说。光伏阵列显著改变了植物群落特征的空间分布, 与光伏板间相比, 板下物种丰富度、多样性、植被覆盖度和密度均显著降低。光伏阵列改变了植物群落特征与生物量及其分配特征的关系, 固沙植被生物量及其分配也受植物群落特征如物种丰富度和植物密度的调控。光伏阵列通过改变光照和微气候等环境条件, 显著影响了固沙植物的生长和分布模式。

**关键词:** 沙漠大型光伏基地; 生态修复; 根冠比; 最优分配假说; 植物形态

**文章编号:** 1000-694X(2025)01-162-11

**DOI:** 10.7522/j.issn.1000-694X.2024.00103

**中图分类号:** Q948

**文献标志码:** A

## 0 引言

随着全球气候变化的加剧和沙漠化问题的加重, 沙漠生态系统正面临前所未有的挑战。生态修复作为恢复退化生态系统的关键手段, 在全球范围内得到了广泛应用。而固沙植物因其独特的适应能力和生态功能在沙漠生态修复中发挥着核心作用<sup>[1-2]</sup>。固沙植物拥有发达的根系, 不仅通过物理方式固结沙土、有效遏制风蚀和沙尘暴, 还通过改善土壤结构和促进土壤微生物群落健康<sup>[3]</sup>, 为其他植物的生长创造了有利条件, 进而提升了沙漠生态系统的多样性, 因此研究固沙植物适应性有利于维持沙漠生态系统健康<sup>[4-5]</sup>。

植物表型变化(可塑性)是植物适应非生物环境因子(光照、营养、水分和温度等)变化的重要机制<sup>[5]</sup>。植物的表型可塑性不仅受到遗传变异的影响, 还受到自然选择的作用。通过研究植物表型可塑性及其对非生物环境因子的响应, 可以深入理解植物如何通过调整其形态、生理和生化特性来适应多变的环境条件。植物生物量分配特征是指植物个体生物量在不同器官和功能单位中的分配, 这种分配特征会随着环境变化表现出明显的可塑性, 是植物表型可塑性的重要内容<sup>[6]</sup>。植物通过调节器官间的生物量分配, 增加限制性资源的获取从而适应胁迫环境, 反映了植物响应资源变化时生存与繁殖权衡的适应策略。作为植物生态学的核心问题, 植

收稿日期: 2024-09-18; 改回日期: 2024-10-29

资助项目: 宁夏回族自治区重点研发计划项目(2023BCF01019); 龙源电力集团股份有限公司科技项目(LYH-2021-04); 内蒙古自治区“揭榜挂帅”项目(2024JBGS0003-1); 黄河流域生态保护和高质量发展联合研究一期项目(2022-YRUC-01-0102)

作者简介: 杨奕颖(1999—), 女, 山东东营人, 硕士研究生, 主要从事光伏电站相关技术研究。E-mail: yiyinyang2020@163.com

通信作者: 杨昊天(E-mail: yanght@lzb.ac.cn)

物生物量分配特征还深刻影响着植物生长发育和陆地生态系统碳循环。而目前大量关于植物生物量分配的研究集中于高寒草甸、高寒草原、荒漠草原、温带草原和草甸草原等天然生态系统类型<sup>[7-11]</sup>,对于沙漠地区固沙植被生物量分配特征的研究较少。目前人类干扰对生物量分配的研究多关注增温、水氮添加、放牧、封育等措施<sup>[12-17]</sup>。近年来,随着全球能源需求的增长,太阳能作为一种清洁、高效的可再生能源,受到了广泛关注和利用<sup>[18-19]</sup>,沙漠地区凭借广袤的土地资源和高日照条件,已成为建设大型光伏电站的首选区域<sup>[20]</sup>。尽管大型光伏电站在推动可再生能源利用和缓解能源危机方面发挥了重要作用,但其对沙漠生态环境的潜在影响也引发了广泛关注<sup>[21-23]</sup>。光伏电站的建设作为一种新型的、重要的人类干扰类型,如何影响固沙植物的形态及生物量分配特征还知之甚少。

光伏电站的大规模建设可能显著改变沙漠地区的微气候条件(光照、温度和湿度等),这些变化可能深刻影响固沙植物的生长和分布,进而改变植物密度和生物量分配特征<sup>[24-27]</sup>。在光伏电站的不同区域,尤其是光伏板下和板间区域之间,这些影响可能表现出更加显著的差异<sup>[28]</sup>。一方面,光伏板的遮阴效应可能减缓地表温度变化,减少蒸发损失,为某些耐旱植物创造更有利的生长条件,使这些区域内的植被密度增加<sup>[29]</sup>。另一方面,由于光照和温度条件的变化,遮阴效应也可能降低光合作用效率,导致植被密度下降、生物量减少,在这种环境下,植物可能优先将生物量分配至地上部分,以适应光照不足的情况,提升光合作用效率<sup>[30]</sup>。但板间区域由于暴露在更强烈光照和更高的温度下,展

现出截然不同的生物量分配模式,植物可能更多地将生物量分配给根系,以增强水分和养分的获取能力<sup>[31]</sup>。光伏板下与板间的环境差异不仅影响植物生长,还可能对沙漠生态系统的功能和稳定性产生重要影响<sup>[32]</sup>。尽管已有研究探讨了光伏电站的大规模建设对沙漠地区微气候及固沙植物生长模式的影响<sup>[33-35]</sup>,但这些研究通常将光伏电站对植被的影响视为统一的整体,忽视了不同区域间可能存在的显著差异<sup>[36-38]</sup>。

本研究通过对光伏板下与板间不同位置固沙植物的形态及群落特征开展实地调查,揭示沙漠大型光伏电站对固沙植物形态和生物量分配特征的影响。研究结果不仅为光伏电站的可持续发展提供科学依据,还将为沙漠地区的生态修复与保护策略的制定提供重要参考。

## 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中卫市境内腾格里沙漠东南缘的沙漠大型光伏基地(图1),该区属于温带大陆性气候区,具有典型的干旱气候特征,年平均气温8~10℃,全年气温变化幅度较大,昼夜温差显著;年降水量约为186 mm,集中在夏季<sup>[39]</sup>。日照资源丰富,年日照时数2 800~3 100 h,由于其独特的地理位置,已逐步发展成为中国西北地区的重要光伏发电基地<sup>[40]</sup>。研究区内优势物种为沙蓬(*Agriophyllum squarrosum*)、雾冰藜(*Grubovia dasyphylla*)和油蒿(*Artemisia ordosica*)等,土壤类型为风沙土。

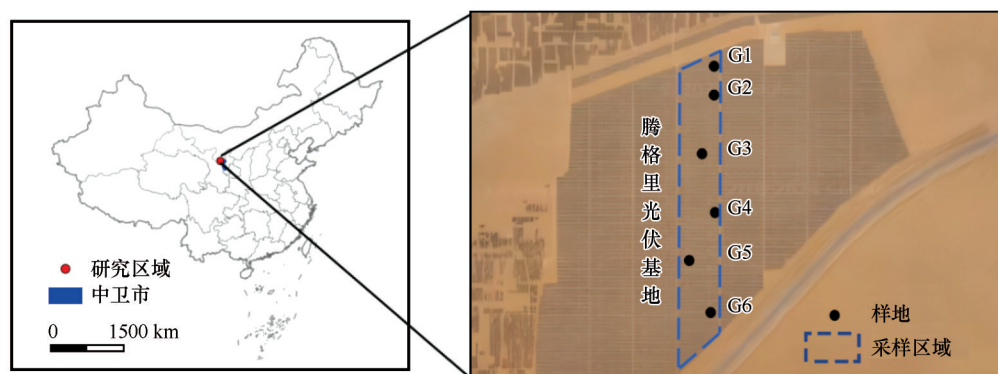


图1 研究区及样地分布

Fig.1 Study area and sample plot distribution

## 1.2 样地设置

2023年3月沙漠大型光伏基地建设完成后,2023年4月在项目区开展了统一模式的生态修复,包括光伏板下和光伏板间的全部区域,均匀布设了1 m×1 m的半隐蔽式麦草方格沙障(麦草在土壤中的埋深为20 cm,在地表的高度为20 cm),同时均匀撒播了固沙植物种子(37.5 kg·hm<sup>-2</sup>),撒播的物种主

要有油蒿、沙蓬、斜茎黄芪(*Astragalus laxmannii*)、沙芦草(*Agropyron mongolicum*)、地肤(*Bassia scoparia*)等。2024年7—8月在沙漠大型光伏基地生态修复区设置6个样地,每个样地中设置5条样线,每条样线设置12个样方,每个样方大小为1 m×1 m,样线布置在两个光伏板前沿之间,样线长12 m,其中板间8 m,板下4 m(图2)。

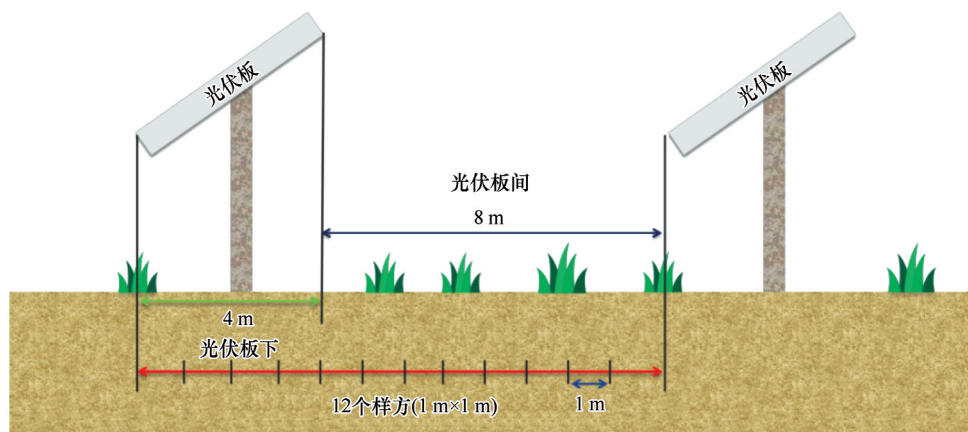


图2 样线和样方在空间上的分布

Fig.2 Spatial distribution of sample lines and quadrats

将1 m×1 m的样方框分成100个0.1 m×0.1 m的网格,使用针刺的方式记录植被覆盖情况;记录每个样方内的固沙植物种类;测量样方内每株植物的株高、根长、地径等指标;记录每个物种的个体数量,计算出每平方米的植被密度;将每个样方中固沙植被地上和地下部位分离,带回实验室进行烘干和称重,分别测量干重并计算根冠比(地下生物量/地上生物量)。

## 1.3 数据分析

采用单因素方差分析、多重比较等统计分析方法,分析物种丰富度、Shannon's Diversity Index (SHDI)指数<sup>[41-42]</sup>、植被覆盖度、植物密度、株高、根长、地径、地上生物量、地下生物量、根冠比等指标在不同样方之间、光伏板间和板下之间的差异,揭示光伏板间和板下区域以及各样方之间植物形态、生物量、植被特征及其变化规律。对光伏板间和板下区域的植被形态及群落特征进行Spearman相关性分析<sup>[43]</sup>,探索在不同环境条件下植被特征之间的关联性。使用SPSS PRO软件分析,Origin 2022绘图。

SHDI指数:

$$SHDI = -\sum_{i=1}^S \left( \frac{n_i}{N} \times \ln \frac{n_i}{N} \right) \quad (1)$$

式中: $S$ 是样方中物种的总数(即物种丰富度); $n_i$ 是第 $i$ 个物种的个体数; $N$ 是样方中所有物种的个体总数。

植物密度:

$$\text{植物密度} = \frac{N}{A} \quad (2)$$

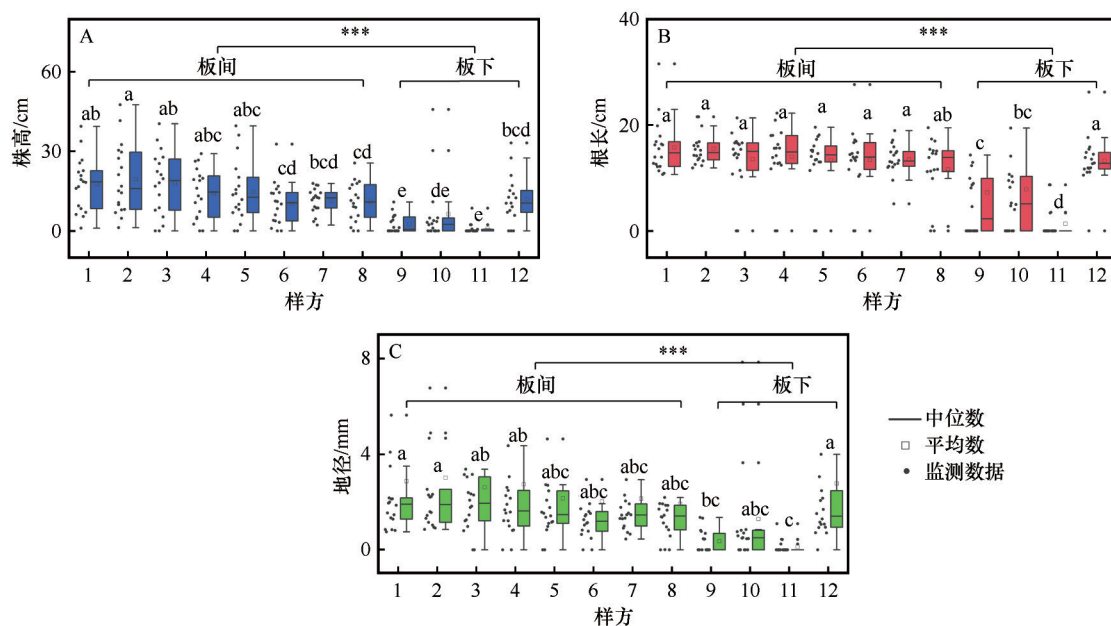
式中: $N$ 是区域内植物个体总数; $A$ 是该区域的面积。

## 2 结果与分析

### 2.1 光伏阵列对固沙植物形态特征的影响

固沙植物的株高、根长和地径在板间和板下之间均存在显著差异( $P < 0.01$ ,图3)。板间或板下株高均在空间上存在异质性,在不同样方间显示出显著差异( $P < 0.01$ ),光伏板间株高平均值约20 cm,显著高于板下区域。光伏板间的根系长度显著大于光伏板下,板间根长平均值约为15 cm,各样方间无显著差异;板下根系长度显著下降,平均值约为10 cm,表明光伏板的遮挡对植物根系生长的影响较大,且光伏板下也存在显著的空间异质性。板间固沙植





注:\*\*\*  $P < 0.01$ ,不同字母表示不同样方间差异显著( $P < 0.05$ )

图3 固沙植物形态在空间上的变化特征

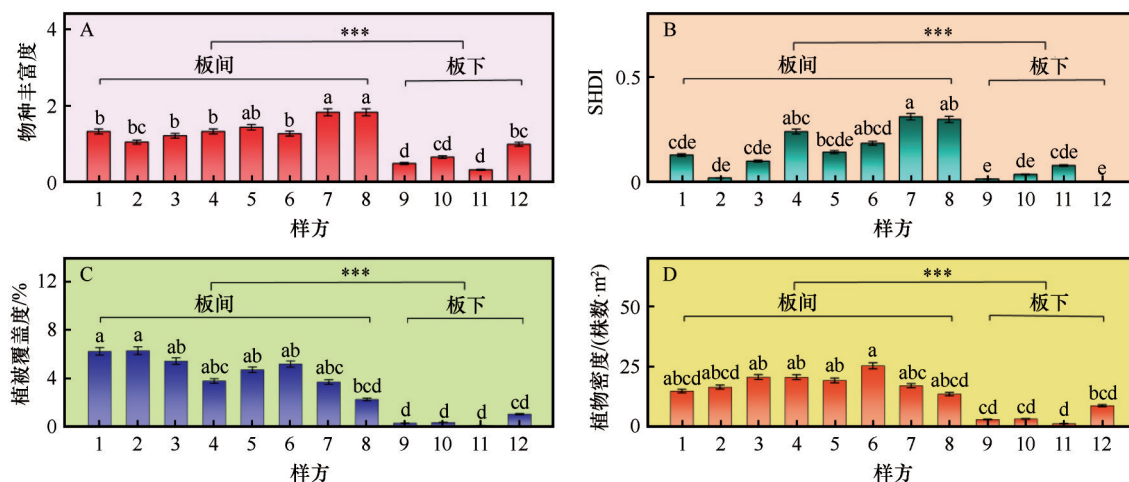
Fig.3 Spatial variation characteristics of sand-fixing plant morphology

物地径显著高于板下区域( $P < 0.01$ ),板间固沙植物地径平均值为1.5~2 mm,而板下地径平均值为1~1.5 mm。

## 2.2 光伏阵列对固沙植物群落特征的影响

物种丰富度、SHDI指数、植被覆盖度和植物密度在光伏板间与板下之间差异显著( $P < 0.01$ ,图4)。物种丰富度在不同样方间波动较大,存在显著差异( $P < 0.01$ )。光伏板间物种丰富度较高,最高值为5,最低值为2;光伏板下区域物种丰富度较低,为1~3。

SHDI指数在空间上的异质性较大,不同样方间SHDI指数存在显著差异。这表明光伏板下区域由于光照、温度和水分等环境条件的限制,固沙植被的物种多样性受到抑制。植被覆盖度在板间区域表现出较大的异质性,样方间差异显著( $P < 0.05$ ),覆盖度为2.28%~6.31%。光伏板下植被覆盖度显著低于板间,在某些样方接近为零,表明光伏板遮挡对生态修复后固沙植被覆盖度有显著的限制作用。光伏板间植物密度较高,为50~75株· $m^{-2}$ ,光伏板下区域密度显著降低,为1.28~8.72株· $m^{-2}$ 。



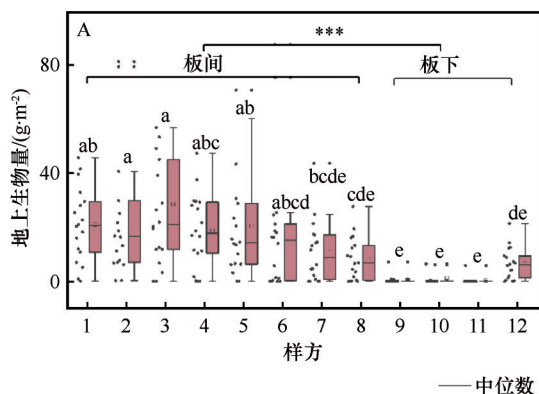
注:\*\*\*  $P < 0.01$ ,不同字母表示不同样方间差异显著( $P < 0.05$ )

图4 固沙植物群落在空间上的变化特征

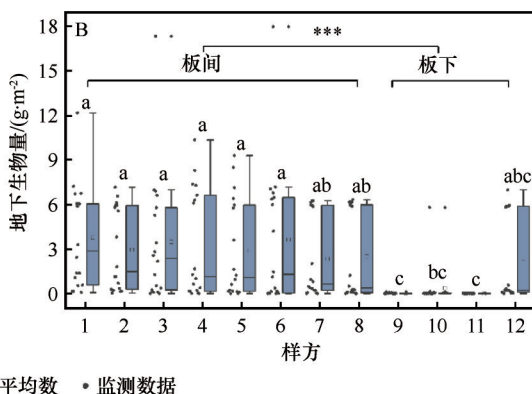
Fig.4 Spatial variation characteristics of sand-fixing plant communities

### 2.3 光伏阵列对固沙植物生物量的影响

光伏板的存在显著降低了固沙植物生物量( $P < 0.01$ , 图5)。光伏板间地上生物量显著高于板下( $P < 0.01$ ), 尤其是光伏板雨线前的1~3个样方, 地上生物量为 $20 \sim 40 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ , 地上生物量在空间上异质性较大, 各样方之间差异显著。光伏板下地上生物量平均值降至 $10 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 左右, 各样方间差异不显著。



光伏板间地下生物量为 $1.5 \sim 2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ , 最高值达到 $5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ , 空间上差异不显著; 光伏板下地下生物量显著降低, 部分样方生物量接近于0。在光照充足的板间区域, 植物能够更好地进行光合作用, 从而在茎、叶等地上部分积累更多的有机物质, 而在板下区域, 光伏板的遮阴效应极大地抑制了植物的光合作用, 限制了生物量的积累。



注: \*\*\*  $P < 0.01$ , 不同字母表示不同样方间差异显著 ( $P < 0.05$ )

图5 固沙植物生物量空间分布特征

Fig.5 Spatial distribution characteristics of sand-fixing plant biomass

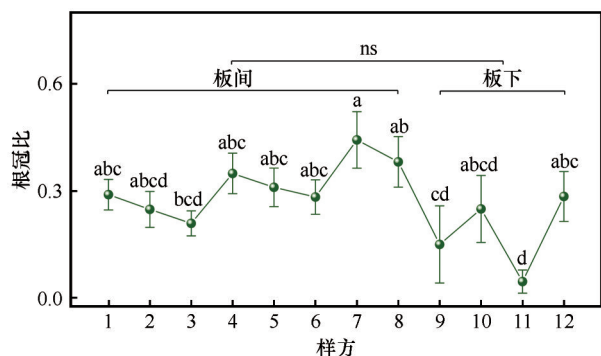
### 2.4 光伏阵列对固沙植物生物量分配特征的影响

根冠比用于评估植物地上与地下生物量的分配特征, 高根冠比意味着植物将更多资源分配给根系, 而低根冠比则表示更多资源投入到地上部分的生长。大型沙漠光伏电站显著影响了固沙植物根冠比在空间上的分布特征(图6)。光伏板间根冠比大于光伏板下, 但二者之间差异不显著, 固沙植被建设初期光伏阵列未显著影响光伏板间和板下的

生物量分配模式。光伏板间, 光照条件较好, 固沙植物根冠比为 $0.2 \sim 0.45$ , 植物将更多资源分配给地上部分; 光伏板下固沙植物根冠比降低, 为 $0.048 \sim 0.3$ , 空间上多数样方之间存在差异, 但差异不显著, 仅部分样方之间存在显著差异。

### 2.5 植被特征与生物量及根冠比的相关性

物种丰富度、功能多样性、物种特性等对植被生物量具有多方面的影响(图7)。在光伏板间, 固沙植被的物种丰富度与地上、地下生物量相关, 但不显著( $P > 0.05$ ); SHDI与地上、地下生物量均无相关性; 植被覆盖度和植物密度与地上生物量显著相关, 与地下生物量无相关性; 植物形态特征(株高、根长、地径)与地上、地下生物量均显著正相关。在光伏板下, 固沙植被的物种丰富度与地上、地下生物量显著正相关; 植被覆盖度和植物密度与地上、地下生物量显著相关; 植物形态特征(株高、根长、地径)与地上、地下生物量均显著正相关。光伏阵列的存在影响了光伏板间、板下固沙植被演替早期阶段生物多样性、群落特征、植物形态特征、植被生物量之间的关系。光伏板间, 根冠比与物种丰富度、SHDI、密度和株高无相关性( $P > 0.05$ ), 与覆盖度



注: ns表示板下和板间差异不显著 ( $P > 0.05$ ); 不同小写字母表示样方间差异显著 ( $P < 0.05$ )

图6 固沙植物根冠比在空间上的分布特征

Fig.6 Spatial distribution characteristics of root-shoot ratio of sand-fixing plants

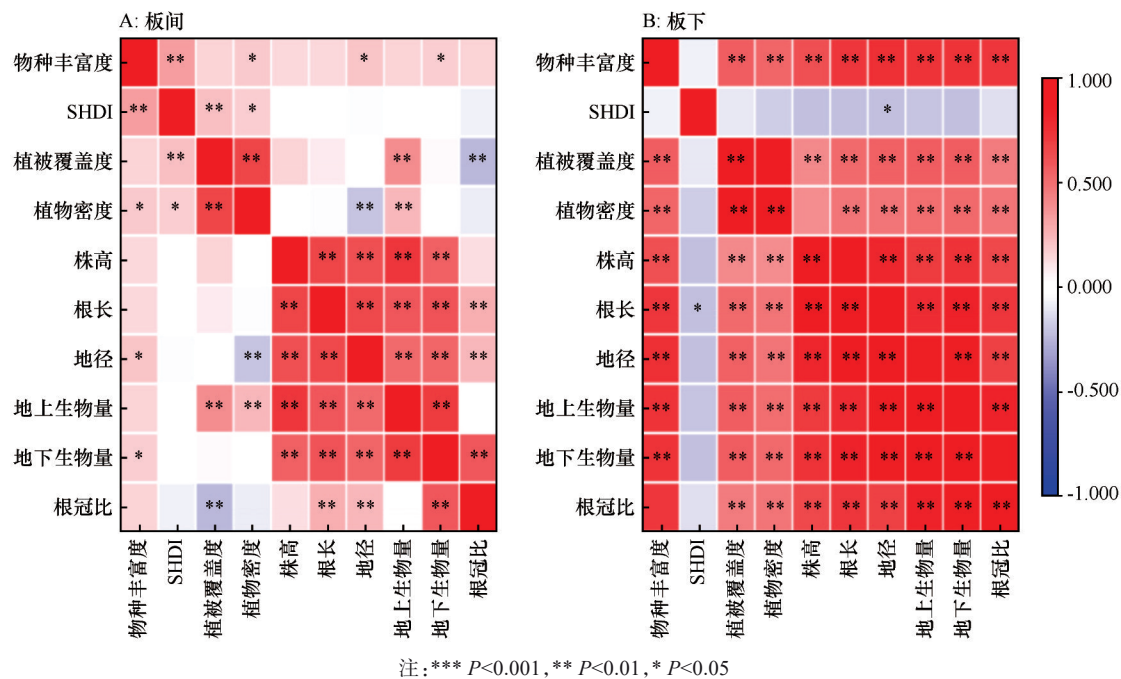


图7 植被形态和群落特征与生物量的相关性分析

Fig.7 Correlation analysis of vegetation morphology and community characteristics with biomass

显著负相关( $P<0.05$ ),与根长、地径显著正相关( $P<0.05$ )。光伏板下,根冠比与物种丰富度正相关,但不显著( $P>0.05$ ),与密度、株高、覆盖度、根长和地径呈显著的正相关关系( $P<0.05$ )。

3 讨论

3.1 沙漠大型光伏电站对固沙植物形态特征的影响

本研究中,光伏板间区域的植株高度、根长和地径等指标显著高于板下区域,这与光伏板的遮挡作用密切相关。光照是植物进行光合作用、积累生物量的关键因素<sup>[44]</sup>。光伏板通过遮挡阳光,减少了下方区域的光照强度,从而直接影响了植物的光合作用效率,导致植株高度和地径的显著下降<sup>[45]</sup>。光伏板降低了降水在光伏板下的分配和土壤表面的蒸发量,使得土壤中的水分含量较低<sup>[46-47]</sup>,不利于固沙植被演替早期植物的生长。光伏板间和板下物种多样性差异显著,这主要是因为光伏板对光照的遮挡效应可能影响植物种子萌发率,直接导致光伏板下植物种类的减少,同时光合作用效率的降低使得板下区域部分物种的生长、发育受到抑制作用<sup>[48]</sup>,导致物种丰富度和多样性指数显著下降<sup>[18]</sup>。但在光伏板下雨线附近区域,由于光伏板减少了水分蒸发,有利于保持植物生长所需的水分<sup>[49]</sup>,土壤

湿度的增加能够在一定程度上维持板下部分区域的生物多样性。相比之下,光伏板间区域的植物能够进行有效的光合作用,促进了物种的生长和繁殖,有利于维持更高的植物多样性<sup>[50]</sup>。此外,光伏板的排列方式也会对板间区域的微气候产生影响。光伏板的存在可能改变板间区域的风速、降水、土壤温度的空间分布,进一步影响植物的生长模式和群落结构<sup>[39,51]</sup>。虽然光伏板间区域的光照条件较好,但由于阳光直射强烈和土壤蒸发增加,在干旱或极端干旱年份,会导致土壤水分迅速流失,从而限制一些耐旱性差,尤其是浅根系的植物生长。

3.2 沙漠大型光伏电站对固沙植物生物量及其分配特征的影响

生物量是植物积累能量的最终载体,是生态系统功能的重要表现形式。根冠比反映了植物的生长策略,被广泛应用于生物量分配特征及碳循环研究。最优分配假说认为,植物会优先将更多的生物量分配到能更有效获取光照、水分、养分等受限资源的器官中,从而维持其最大化的生长速率<sup>[52]</sup>。本研究中,板间区域光照充裕,植物能够充分利用光能进行光合作用,积累更多的有机物质,这些有机物质主要积累在植物的茎、叶等地上器官,显著提升了地上生物量<sup>[53]</sup>。特别是固沙植被建设初期,植



物个体间竞争压力较小,植物可以充分利用光照资源,扩大叶面积指数并增加株高,从而最大化光合作用效率,进一步促进地上生物量的增加,导致光伏板间植被生物量显著高于板下。光伏板间根冠比高于光伏板下,反映了在光照充足、干旱和养分贫瘠的条件下,植物将较多的生物量分配给根系,根系得到充分发育以增强对水分和养分的吸收能力。相比之下,光伏板下区域长期受到光伏板遮荫效应的影响,光照时间极为有限,光合作用效率显著降低,为了获取有限的光照资源,植物将更多的生物量分配给可以获取光照资源的地上器官,以提高其在不利环境下的生存能力<sup>[54]</sup>,弥补光合作用不足对地上生长的限制<sup>[55]</sup>。在水分和养分资源都极为匮乏的沙漠地区,沙漠光伏电站固沙植物的生物量分配可能受多重因素的影响,光伏板的遮荫和遮雨效应改变了资源在空间上的分配模式,光伏板下植物主要分布在具有较为充足水分的雨线附近,在光照受限的背景下,植物不需要给根系分配较多的资源,进而影响了根系的发育,致使根冠比降低,最低值不足0.05。通过二者的比较,本研究验证了固沙植物通过调整根冠比以适应光伏阵列造成的生境改变,符合最优分配假说。

从生态功能角度分析,板间区域光照充足,植物积累更多的生物量,促进了植物根系的发育。发达的根系有助于固定土壤,减少侵蚀,增强土壤有机质含量和水分保持能力,有助于提高生态系统的稳定性和抗干扰能力。相反,光伏板下植物生长受到抑制,地上生物量减少,根系发育受限,物种多样性和群落稳定性也随之降低,植物群落对资源的竞争加剧,生态功能降低。

### 3.3 植物群落特征对生物量及其分配特征影响

现有研究表明,光伏板间区域和板下区域的环境条件存在显著差异,这些差异深刻影响了植物的生长模式及其特征之间的相关性<sup>[56]</sup>。植物的生物量及其分配不仅受光照、土壤湿度、养分供应和温度的影响<sup>[57-58]</sup>,也受生物多样性、植物密度、植被覆盖度等植被特征的影响。生产力与物种丰富度关系的研究是生物多样性保护和生态系统功能维持的重要理论依据,二者的关系较为复杂,存在多种关系<sup>[59]</sup>,具有尺度依赖性<sup>[60]</sup>,且受生态系统类型、环境因子的影响<sup>[61]</sup>。植被生产力与物种多样性之间

的关系是一个复杂且多变的生态学问题,不同研究结果存在一定的差异,主要有正相关关系<sup>[62]</sup>、负相关关系<sup>[63]</sup>、单峰关系<sup>[64]</sup>、复杂关系<sup>[65]</sup>。如有研究表明,随着沙地生态修复区植被的演替,物种多样性和生物量之间存在显著的动态单峰曲线关系<sup>[66]</sup>。

本研究显示,在人为干扰条件下,光伏阵列的存在改变了光伏板间和光伏板下植被生物量与生物多样性之间的关系,如光伏板间物种丰富度与地上、地下生物量呈不显著相关性( $P>0.05$ ),而光伏板下物种丰富度与地上、地下生物量显著相关。物种丰富度间接包含了功能多样性、系统发育多样性和基因组多样性,探索物种丰富度-生物量的关系,有助于发现影响植被生产力的其他多样性因素<sup>[60]</sup>。合理的人类活动可以提升植被覆盖度,进而促使植被碳吸收和生产力的增加<sup>[67-69]</sup>。本研究中,沙漠大型光伏基地固沙植被建设促进了光伏板间和板下植被覆盖度的显著增加,进而显著增加了光伏板间和板下的地上、地下生物量,植被覆盖度与地上生物量显著正相关,这与多数研究结果相同。

植物群落特征的变化对植物生物量分配有着重要的调控作用<sup>[52,62]</sup>。本研究中,光伏阵列显著改变了根冠比与植被覆盖度的关系,光伏板间植被覆盖度较高,根冠比与覆盖度显著负相关,光伏板下植被覆盖度较低,植物零星生长,根冠比与覆盖度显著正相关。密度是自然界的重要选择压力,是影响生物量分配的重要因素,密度制约通过改变种群内每株植物可获得性资源的数量,造成邻体间对于光照、水分和养分的竞争<sup>[70-71]</sup>。本研究中,光伏阵列显著改变了密度与植物生物量分配的关系,光伏板间地下生物量及根冠比与密度不相关,但光伏板下地上生物量及根冠比与密度显著正相关,主要是因为光伏板间植物密度较大而板下植物密度较小的缘故。此外,株高、根长和地径也是影响植物生物量分配的关键指标<sup>[70-71]</sup>,光伏阵列的存在未改变二者之间的关系,表明植物形态和生物量之间关系密切,可以构建分区生物量估算模型,通过测量简易的形态指标在更大尺度上精确估算大型沙漠光伏电站的不同区域生产力。

## 4 结论

沙漠大型光伏电站建设完成后在同一生态修复模式条件下,光伏阵列在空间上显著改变了固沙

植物的表型特征。植物的株高、根长、地径、地上生物量、地下生物量及根冠比均在空间上存在较强的异质性,光伏板间固沙植物表现出更强的生长发育能力,其株高、根长、地径、地上和地下生物量均显著大于光伏板下。与光伏板间相比,光伏板下植物根冠比更低,将更多的资源投入到地上部分以获取有限的光照资源,反映了固沙植物通过形态特征和生物量分配对光伏新生境水、光、热等资源再分配结果的适应。固沙植物群落特征也发生了显著的变化,光伏板间的物种丰度、SHDI指数、植被覆盖度和植物密度均显著高于光伏板下,且物种丰度、SHDI指数、植被覆盖度在光伏板间的不同位置间也存在显著差异。光伏阵列在空间上显著改变了物种丰富度、SHDI指数、植被覆盖度、植物密度与生物量及其分配特征之间的关系。物种丰富度与光伏板间生物量无显著相关性,但与光伏板下生物量显著正相关,植物覆盖度与光伏板间植物根冠比显著负相关,但与光伏板下植物根冠比显著正相关。结果表明现有的生态修复模式更有利于光伏板间生态系统恢复,需进一步优化光伏板下的生态修复模式。

#### 参考文献:

- [1] Li X, Li Y, Xie T, et al. Recovery of soil carbon and nitrogen stocks following afforestation with xerophytic shrubs in the Tengger Desert, North China[J]. *Catena*, 2022, 214: 106277.
- [2] Xiang Y, Liu Y, Yue X, et al. Factors controlling soil organic carbon and total nitrogen stocks following afforestation with *Robinia pseudoacacia* on cropland across China [J]. *Forest Ecology and Management*, 2021, 494: 119274.
- [3] Yu S, Yang J L, Norgauer J M, et al. Soil carbon and nitrogen stocks and their influencing factors in different-aged stands of sand-fixing *Caragana korshinskii* in the Mu Us Desert of Northwest China[J]. *Forests*, 2024, 15(6): 1018.
- [4] Li Y F, Wang B Y, Wang Z, et al. The response of rhizosphere microbial C and N-cycling gene abundance of sand-fixing Shrub to stand age following desert restoration[J]. *Microorganisms*, 2024, 12(9): 1752.
- [5] 牛雪婧, 聂靖, 赵雪利, 等. 河北木蓝的叶表型可塑性研究[J]. *植物科学学报*, 2020, 38(1): 97-104.
- [6] Sun J, Ma B, Lu X. Grazing enhances soil nutrient effects: trade-offs between aboveground and belowground biomass in alpine grasslands of the Tibetan Plateau[J]. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(2): 337-348.
- [7] Kou D, Yang G, Li F, et al. Progressive nitrogen limitation across the Tibetan alpine permafrost region[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 3331.
- [8] 李佳成, 陈炜昊, 侯钢, 等. 旅游干扰对芦芽山亚高山草甸植物生物量分配的影响[J]. *草地学报*, 2023, 31(11): 3492-3502.
- [9] 李永康, 刘金龙, 许冬梅, 等. 宁夏荒漠草原蒙古冰草资源分配特征[J]. *草地学报*, 2023, 31(4): 1125-1133.
- [10] 王敏, 苏永中, 杨荣, 等. 黑河中游荒漠草地地上和地下生物量的分配格局[J]. *植物生态学报*, 2013, 37(3): 209-219.
- [11] 武帅楷, 郝杰, 刁华杰, 等. 晋北农牧交错带草地生物量对短期放牧强度的响应[J]. *草地学报*, 2023, 31(8): 2446-2454.
- [12] 庞晓瑜. 增温对岷江冷杉及亚高山草甸生长和营养分配的影响[D]. 北京: 中国林业科学院, 2017.
- [13] 王晓光, 乌云娜, 霍光伟, 等. 放牧对呼伦贝尔典型草原植物生物量分配及土壤养分含量的影响[J]. *中国沙漠*, 2018, 38(6): 1230-1236.
- [14] 王晓辉, 石兆勇, 张梦歌, 等. 不同菌根类型植物生物量分配对干旱的响应[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2023, 49(4): 412-420.
- [15] 王晓悦, 许艺馨, 李春环, 等. 长期降水量变化下荒漠草原植物生物量、多样性的变化及其影响因素[J]. *植物生态学报*, 2023, 47(4): 479-490.
- [16] 王一静, 王长庭, 刘丹, 等. 降水变化对高寒草甸两种植物不同器官生物量和养分分配的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2024, 30(1): 65-74.
- [17] 杨春勤, 谢勇, 初晓辉, 等. 不同干扰方式对滇西北亚高山草甸生物量和碳储量的影响[J]. *中国草地学报*, 2018, 40(3): 62-67.
- [18] Tang W, Xu S, Zhou X, et al. Meeting China's electricity demand with renewable energy over Tibetan Plateau [J]. *Science Bulletin*, 2023, 68(1): 39-42.
- [19] Jha N, Prashar D, Rashid M, et al. Energy-efficient hybrid power system model based on solar and wind energy for integrated grids [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2022, 2022(1): 4877422.
- [20] Suuronen A, Muñoz-Escobar C, Lensu A, et al. The influence of solar power plants on microclimatic conditions and the biotic community in Chilean desert environments [J]. *Environmental Management*, 2017, 60(4): 630-642.
- [21] Li C, Liu J, Bao J, et al. Effect of light heterogeneity caused by photovoltaic panels on the plant-soil-microbial system in solar park [J]. *Land*, 2023, 12(2): 367.
- [22] Devitt D A, Apodaca L, Bird B, et al. Assessing the impact of a utility scale solar photovoltaic facility on a down gradient Mojave Desert ecosystem [J]. *Land*, 2022, 11(8): 1315.
- [23] Ghasemi-Mobtaker H, Mostashari-Rad F, Saber Z, et al. Application of photovoltaic system to modify energy use, environmental damages and cumulative exergy demand of two irrigation systems-a case study: barley production of Iran [J]. *Renew Energy*, 2020, 160: 1316-1334.
- [24] Karban C C, Lovich J E, Grodsky S M, et al. Predicting the ef-



- fects of solar energy development on plants and wildlife in the Desert Southwest, United States[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2024, 205: 114823.
- [25] Broadbent A M, Krayenhoff E S, Georgescu M, et al. The observed effects of utility-scale photovoltaics on near-surface air temperature and energy balance[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2019, 58(5): 989–1006.
- [26] Hernandez R R, Easter S, Murphy-Mariscal M L, et al. Environmental impacts of utility-scale solar energy[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 29: 766–779.
- [27] 田政卿, 张勇, 刘向, 等. 光伏电站建设对陆地生态环境的影响: 研究进展与展望[J]. *环境科学*, 2024, 45(1): 239–247.
- [28] Lambert Q, Bischoff A, Enea M, et al. Photovoltaic power stations: an opportunity to promote European semi-natural grasslands[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2023, 11: 1137845.
- [29] Shang W, Zhang Z P, Fu G Q, et al. Spatial heterogeneity of vegetation communities and soil properties in a desert solar photovoltaic power station of the Hexi Corridor, northwestern China[J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2023, 32(3): 2795–2807.
- [30] Luo Z, Luo J, Wu S, et al. Soil bacterial community in a photovoltaic system adopted different survival strategies to cope with small-scale light stress under different vegetation restoration modes[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2024, 15: 1365234.
- [31] Yang F, Huang M, Li C, et al. Vegetation restoration increases the diversity of bacterial communities in deep soils[J]. *Applied Soil Ecology*, 2022, 180: 104631.
- [32] Lafitte A, Sordello R, Ouédraogo D Y, et al. Existing evidence on the effects of photovoltaic panels on biodiversity: a systematic map with critical appraisal of study validity[J]. *Environmental Evidence*, 2023, 12(1): 25.
- [33] Chang Z F, Liu S Z, Zhu S J, et al. Ecological functions of PV power plants in the desert and gobi[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2016, 7(2): 130–136.
- [34] Xia Z, Li Y, Zhang W, et al. Solar photovoltaic program helps turn deserts green in China: evidence from satellite monitoring[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 324: 116338.
- [35] Yue S, Guo M, Zou P, et al. Effects of photovoltaic panels on soil temperature and moisture in desert areas[J]. *Environment Science and Pollution Research*, 2021, 28: 17506–17518.
- [36] Lambert Q, Gros R, Bischoff A. Ecological restoration of solar park plant communities and the effect of solar panels[J]. *Ecological Engineering*, 2022, 182: 106722.
- [37] 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.
- [38] Zhang B, Zhang R, Li Y, et al. Deploying photovoltaic arrays in degraded grasslands is a promising win-win strategy for promoting grassland restoration and resolving land use conflicts[J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 349: 119495.
- [39] 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*, 2023, doi: 62.1055.S.20230920.1715.010.
- [40] 彭生江, 薛远天, 孙亚璐, 等. 腾格里沙漠风光热基地对区域生态环境的效应分析[J]. *高原气象*, 2023, 42(6): 1615–1624.
- [41] 叶鹏程, 陈慧, 张光富, 等. 江苏东台野生草本植物多样性及其与环境因子的关系[J]. *生态科学*, 2022, 41(3): 133–141.
- [42] 高珂晓, 李飞飞, 柳晓燕, 等. 广西九万山国家级自然保护区外来入侵和本地草本植物多样性垂直分布格局[J]. *生物多样性*, 2019, 27(10): 1047–1055.
- [43] Yu H, Hutson A D. A robust Spearman correlation coefficient permutation test[J]. *Communications in Statistics-Theory and Methods*, 2024, 53(6): 2141–2153.
- [44] Weraduwege S M, Jin C, Anozie F C, et al. The relationship between leaf area growth and biomass accumulation in *Arabidopsis thaliana*[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2015, 6: 167.
- [45] Barron-Gafford G A, Pavao-Zuckerman M A, Minor R L, et al. Agrivoltaics provide mutual benefits across the food-energy-water nexus in drylands[J]. *Nature Sustainability*, 2019, 2(9): 848–855.
- [46] Moscatelli M C, Marabottini R, Massaccesi L, et al. Soil properties changes after seven years of ground mounted photovoltaic panels in Central Italy coastal area[J]. *Geoderma Reg*, 2022, 29: e00500.
- [47] Wu C, Liu H, Yu Y, et al. Ecohydrological effects of photovoltaic solar farms on soil microclimates and moisture regimes in arid Northwest China: a modeling study[J]. *Science of The Total Environment*, 2022, 802: 149946.
- [48] Guoqing L, Hernandez R R, Blackburn G A, et al. Ground-mounted photovoltaic solar parks promote land surface cool islands in arid ecosystems[J]. *Renewable and Sustainable Energy Transition*, 2021, 1: 100008.
- [49] Virguez E, Wang X, Patio-Echeverri D. Utility-scale photovoltaics and storage: decarbonizing and reducing greenhouse gases abatement costs[J]. *Applied Energy*, 2021, 282(A): 116120.
- [50] Uldrijan D, Černý M, Winkler J. Solar park: opportunity or threat for vegetation and ecosystem[J]. *Journal of Ecological Engineering*, 2022, 23(11): 1–10.
- [51] Tanner K E, Moore-O'Leary K A, Parker I M, et al. Simulated solar panels create altered microhabitats in desert landforms[J]. *Ecosphere*, 2020, 11(4): 21.
- [52] 杨昊天, 李新荣, 刘立超, 等. 荒漠草地4种灌木生物量分配特征[J]. *中国沙漠*, 2013, 33(5): 1340–1348.
- [53] Suzuki T, Sakamoto M, Kubo H, et al. Effects of solar radiation on leaf development and yield of tuberous roots in multilayered sweet potato cultivation[J]. *Plants*, 2023, 12(2): 287.
- [54] Thompson E P, Bombelli E L, Shubham S, et al. Tinted semi-

- transparent solar panels allow concurrent production of crops and electricity on the same cropland[J]. *Advanced Energy Materials*, 2020, 10(35):2001189.
- [55] Potenza E, Croci M, Colauzzi M, et al. Agrivoltaic system and modelling simulation: a case study of soybean (*Glycine max* L.) in Italy[J]. *Horticulturae*, 2022, 8(12):1160.
- [56] Barron-Gafford G A, Minor R L, Allen N A, et al. The photovoltaic heat island effect: larger solar power plants increase local temperatures[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1):35070.
- [57] Tang W, Guo H, Baskin C C, et al. Effect of light intensity on morphology, photosynthesis and carbon metabolism of alfalfa (*Medicago sativa*) seedlings[J]. *Plants*, 2022, 11(13):1688.
- [58] Rahman M N, Hangs R, Schoenau J. Influence of soil temperature and moisture on micronutrient supply, plant uptake, and biomass yield of wheat, pea, and canola[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2020, 43(6):823–833.
- [59] 马文红, 方精云. 中国北方典型草地物种丰富度与生产力的关系[J]. *生物多样性*, 2006, 14(1):21–28.
- [60] 彭潔莹, 谢缘铭, 刘文帧, 等. 小陇山锐齿栎林木本植物物种丰富度与生产力关系研究[J]. *北京林业大学学报*, 2021, 43(11):11–19.
- [61] 吴初平, 韩文娟, 江波, 等. 浙江定海次生林内物种丰富度与生物量和生产力关系的环境依赖性[J]. *生物多样性*, 2018, 26(6):545.
- [62] Tilman D, Wedin D, Knops J. Productivity and sustainability influenced by biodiversity in grassland ecosystems[J]. *Nature*, 1996, 379(6567):718–720.
- [63] Silvertown J, Dodd M E, McConway K, et al. Rainfall, biomass variation, and community composition in the park grass experiment[J]. *Ecology*, 1994, 75(8):2430–2437.
- [64] Grime J P. Competitive exclusion in herbaceous vegetation[J]. *Nature*, 1973, 242:344–347.
- [65] 范秀华, 张宝权, 范春雨. 长白山典型天然林不同演替阶段物种多样性和结构多样性对生产力影响[J]. *北京林业大学学报*, 2021, 43(12):1–8.
- [66] 赵丽娅, 高丹丹, 熊炳桥, 等. 科尔沁沙地恢复演替进程中群落物种多样性与地上生物量的关系[J]. *生态学报*, 2017, 37(12):4108–4117.
- [67] Piao S, Fang J, Ciais P, et al. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China[J]. *Nature*, 2009, 458:1009–1013.
- [68] Piao S, Yin G, Tan J, et al. Detection and attribution of vegetation greening trend in China over the last 30 years[J]. *Global Change Biology*, 2015, 21:1601–1609.
- [69] 原媛, 母艳梅, 邓钰洁, 等. 植被覆盖度和物候变化对典型黑沙蒿灌丛生态系统总初级生产力的影响[J]. *植物生态学报*, 2022, 46:162–175.
- [70] 黎磊, 周道玮, 盛连喜. 密度制约决定的植物生物量分配格局[J]. *生态学杂志*, 2011, 30(8):1579–1589.
- [71] 冯银平, 沈海花, 罗永开, 等. 种植密度对苜蓿生长及生物量的影响[J]. *植物生态学报*, 2020, 44:248–256.

## Impacts of large-scale desert photovoltaic power stations on the phenotype and biomass distribution characteristics of sand-fixing plants

Yang Yiying<sup>1</sup>, Su Silin<sup>2</sup>, Cao Enzhi<sup>1</sup>, Li Hongyou<sup>1</sup>, Chi Hongming<sup>1</sup>, Lin Kai<sup>3</sup>,

Wu Xudong<sup>4</sup>, He Wenqiang<sup>2</sup>, Yang Haotian<sup>2</sup>

(1. Longyuan (Beijing) Solar Technology Co., LTD, Beijing 100000, China; 2. Key Laboratory of Ecological Safety and Sustainable Development in Arid Lands / Shapotou Desert Research and Experiment Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 3. Ningxia Longyuan New Energy Co., LTD, Yinchuan 750002, China; 4. Institute of Forestry and Grassland Ecology, Ningxia Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Yinchuan 750002, China)

**Abstract:** Phenotypic plasticity is a crucial mechanism for plants to adapt to environmental changes. However, its spatial adaptation to large-scale desert photovoltaic power stations remains poorly understood. This study investigated the sand-fixing plants at different positions under and between the photovoltaic panels of large-scale photovoltaic power stations in the southeastern edge of Tengger Desert. It revealed the adaptation mechanisms of sand-fixing plants to photovoltaic power stations from the perspectives of morphology, biomass, and distribution. After implementing ecological restoration, the photovoltaic array significantly altered the individual phenotypes of sand-fixing plants. Plant height, root length, ground diameter, above-ground and below-ground biomass were significantly reduced under panel compared with inter-panel spaces. There were also varying degrees of differences in inter-panel (lower) spaces. Photovoltaic panels are more conducive to the growth of sand-fixing plants. The root-shoot ratio (R/S) near the rain line of photovoltaic panels is significantly lower than that between them; this serves as an important mechanism for sand fixation plants to adapt to water and light resource redistribution within photovoltaic power stations while conforming to optimal allocation hypothesis. Photovoltaic arrays significantly changed the spatial distribution characteristics of plant communities; species richness, diversity, vegetation coverage, and density were all significantly reduced under PV panels compared with those between them. Photovoltaic arrays also influenced relationships between plant community characteristics and biomass as well as R/S; species richness and plant density regulated both biomass and distribution patterns in sand-fixing vegetation. By modifying environmental conditions such as light and microclimate, photovoltaic arrays exert a significant influence on the growth and R/S of sand-fixing plants. These research findings can serve as a crucial theoretical foundation for promoting sustainable development in large-scale desert photovoltaic power stations and facilitating scientific ecological restoration.

**Key words:** large-scale desert photovoltaic base; ecological restoration; root-shoot ratio; optimal allocation hypothesis; plant morphology