



翟波,党晓宏,刘湘杰,暴向平,樊才睿. 荒漠光伏电站人工植被恢复对土壤有机碳组分的影响[J]. 中国农业大学学报,2026,31(01):180-192.
ZHAI Bo,DANG Xiaohong,LIU Xiangjie,BAO Xiangping,FAN Cairui. Impact of artificial vegetation restoration on soil organic carbon component in desert photovoltaic power stations[J]. *Journal of China Agricultural University*,2026,31(01):180-192.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2026.01.15

荒漠光伏电站人工植被恢复对土壤有机碳组分的影响

翟波¹ 党晓宏^{2*} 刘湘杰³ 暴向平¹ 樊才睿¹

(1. 集宁师范学院 地理科学与规划学院,内蒙古 乌兰察布 012000;

2. 内蒙古农业大学 沙漠治理学院,呼和浩特 010018;

3. 中国林业科学研究院 沙漠林业实验中心,内蒙古 巴彦淖尔 015200)

摘 要 为厘清荒漠地区光伏电站人工植被恢复对土壤有机碳系统所产生的影响和扰动机理,以库布齐沙漠光伏电站为研究区域。采用野外观测法对光伏阵列内不同位置(光伏板前、板间、板后)的杂花苜蓿和糜子种群特征(盖度、密度、高度、生物量)进行量化,对植被调查样点及板下和对照处的不同土层土壤含水量体积浓度和有机碳组分(有机碳、易氧化有机碳、可溶性有机碳、热水溶性有机碳、水溶性有机碳、微生物量碳)进行室内测定,并通过相关性分析和通径分析得出土壤水分环境和种群特征对土壤有机碳组分再分配的贡献率。结果表明:1)光伏阵列内不同位置的杂花苜蓿和糜子的种群特征产生显著差异。板间与板前的各指标均具有显著性差异($P<0.05$),板间杂花苜蓿生物量较板前和板后分别增加了154.20%和79.77%。2)土壤有机碳组分对光伏阵列内不同位置的反馈呈现出一定规律性,各位置表层土壤有机碳组分含量整体大于深层土壤。板间0—5 cm土层有机碳含量相比板前、板后、板下和CK分别增加了24.30%、44.74%、59.15%和35.37%。深层土壤有机碳组分在板间和板后2个位置含量较高,其中板间土壤有机碳组分含量最高。3)光伏阵列内板间和板后的土壤含水量体积浓度相比其他位置优势明显。土壤含水量体积浓度的变化对土壤有机碳组分产生了促进作用,其与土壤微生物量碳的相关系数为0.928。4)土壤有机碳和人工植被种群特征的通径分析结果表明,糜子的密度和杂花苜蓿的高度是影响板前土壤有机碳的关键因素;糜子生物量是影响板间土壤有机碳的重要因子;杂花苜蓿的生物量对板后土壤有机碳含量增加的贡献率最高。综上,光伏阵列通过对杂花苜蓿+糜子人工植被生长进行调控,促进了板间和板后的种群生物量,提升了土壤含水量的同时显著增加了电站内土壤有机碳组分含量。

关键词 荒漠光伏电站;植被恢复;土壤有机碳组分;土壤含水量体积浓度;通径分析

中图分类号 S152.7

文章编号 1007-4333(2026)01-0180-13

文献标志码 A

Impact of artificial vegetation restoration on soil organic carbon component in desert photovoltaic power stations

ZHAI Bo¹, DANG Xiaohong^{2*}, LIU Xiangjie³, BAO Xiangping¹, FAN Cairui¹

(1. School of Geography and Planning, Jining Normal University, Ulanqab 012000, China;

2. Desert Science and Engineering College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China;

3. Experimental Center of Desert Forestry, Chinese Academy of Forestry, Bayannur 015200, China)

Abstract To clarify the impact and disturbance mechanisms of artificial vegetation restoration on the soil organic carbon system in photovoltaic power stations in desert areas, the Kubuqi desert photovoltaic power station was selected as the study area. Field observation methods were utilized to quantify the population characteristics,

收稿日期: 2025-04-30; 接受日期: 2025-06-13

基金项目: 内蒙古自治区高等学校加强我国北方重要生态安全屏障建设研究专项;内蒙古自然科学基金项目(2024QN04023);集宁师范学院博士创新科研基金项目(jsbsjj2412);内蒙古自然科学基金项目(2024MS05053)

第一作者: 翟波(ORCID:0000-0001-7533-410X),讲师,主要从事荒漠化防治研究,E-mail:13947442518@163.com

通讯作者: 党晓宏(ORCID:0000-0001-5203-3056),副教授,主要从事荒漠化防治研究,E-mail:dangxiaohong1986@126.com

e. g. , coverage, density, height, and biomass, of *Medicago rivularis* and *Panicum miliaceum* at various locations within the photovoltaic array (in front of, between, and behind the photovoltaic panel). Indoor measurements of soil water content volume concentration and organic carbon components (organic carbon, readily oxidizable carbon, dissolved organic carbon, hot-water extractable organic carbon, water extractable organic carbon and microbial biomass carbon) in various soil layers at vegetation survey sample points were conducted. By using correlation analysis and path analysis, the contribution rates of soil moisture environment and population characteristics to the redistribution of soil organic carbon components were then determined. The results indicate that: 1) The population characteristics of *M. rivularis* and *P. miliaceum* exhibited significant differences at various locations within the photovoltaic array. All indicators between and in front of photovoltaic panels showed significant differences ($P < 0.05$). Compared to that in front of and behind the panels, the biomass of *M. rivularis* between the panels increased by 154.20% and 79.77%, respectively. 2) The feedback of soil organic carbon components at different positions within the photovoltaic array exhibits a certain regularity. The content of organic carbon components in surface soil at various locations is generally greater than that in deep soil. Compared to that in front of the panel, behind the panel, under the panel, and CK, the organic carbon content in the 0 to 5 cm soil layer between photovoltaic panels increased by 24.30%, 44.74%, 59.15% and 35.37%, respectively. The organic carbon component content in deep soil was relatively high between and behind the photovoltaic panels, and the highest level was found between the photovoltaic panels. 3) The soil water content volume concentration between and behind the photovoltaic panels showed a significant advantage compared to that in other positions. The variation in soil water content volume concentration had a promoting effect on soil organic carbon components, with a correlation coefficient of 0.928 with soil microbial biomass carbon. 4) The results of path analysis on soil organic carbon and artificial vegetation population characteristics indicate that the density of *P. miliaceum* and the height of *M. rivularis* are the key factors affecting the soil organic carbon in front of the photovoltaic panel; The biomass of *P. miliaceum* is a significant factor influencing the soil organic carbon between photovoltaic panels; The biomass of *M. rivularis* contributes the most to the increase in soil organic carbon content behind the photovoltaic panels. In conclusion, the photovoltaic array enhances the biomass of the population both between and behind the panels by regulating the growth of the artificial vegetation of *M. rivularis* and *P. miliaceum*, while enhancing soil volumetric water content and significantly increasing the content of soil organic carbon components within the power station.

Keywords desert photovoltaic power station; vegetation restoration; soil organic carbon components; soil water content volume concentration; path analysis

在全球气候变化和局部土地荒漠化扩张的背景下,干旱半干旱荒漠区生态系统愈发脆弱,土地退化,进一步加剧了生态安全问题^[1-2]。内蒙古是中国北疆重要的生态安全屏障,同时也是中国沙漠较为集中的地区,该地区不仅具备较好的太阳能光照资源,而且土地资源丰富,该特点使其成为地面式光伏规模化建设的理想场所^[3-4]。在荒漠区建设光伏电站固然有利,但因风大沙多、水资源短缺、植被稀少,土壤贫瘠的自然环境使光伏电站的建设和生态修复面临巨大挑战^[5-6]。

沙区光伏电站内多排电板由南向北等间距布设,形成了光伏阵列。电站建成后在阵列内的不同区域按照一定配置模式撒播草种,进行人工植被恢复,以实现防风固沙、水源保持和水土流失防治等

功能^[7]。但是在经历多年的植被恢复后,部分扰动区域内的生态恢复水平并未达到预期效果,不同立地条件下的最优植物配置模式仍处在探索阶段。此外,光伏电板对人工植被的扰动,使阵列内不同位置的植物种群特征产生了明显的空间异质性^[8]。郝晓珍等^[1]研究发现,青藏高原荒漠区光伏阵列内板间的植被平均高度和地上生物量显著高于板下和电站外。光照是植物进行光合作用、积累生物量的关键因素,遮阴作用对板下部分植物生长产生了抑制作用^[9]。此外,电板的遮阴也改变了光伏板下气温,植物生长受到影响,表现出个体小、数量少等特点,致使光伏板下方地上生物量相对较低^[10]。光伏板下与板间的环境差异不仅影响了植物的生长,

还会对荒漠生态系统的功能和稳定性产生影响^[11]。恢复光伏电站内的植被后,改良了下垫面土壤团粒结构和提高了土壤养分含量,但具体变化程度由于植被所处位置不同存在空间异质性^[12]。

当前关于荒漠光伏电站植被恢复对土壤环境的影响多围绕土壤机械组成、养分分布和水分运移等方面。党梦娇等^[13]研究表明,光伏阵列迎风方向沉积物呈现粗粒化特征,并建议在迎风方向建设防护措施,在降低电站内颗粒粗粒化现象的同时减弱板间沉积物堆积现象的发生程度;杜孝东等^[14]对荒漠草原地区光伏阵列内土壤含水量和养分含量进行研究发现,光伏板前和板间各土层含水量均大于阵列外的对照土壤含水量,此外,阵列内不同位置的土壤全氮含量均高于对照处;刘向等^[15]通过控制实验发现,无机肥料、微生物菌剂和微量元素复合剂的添加有利于光伏电站内荒漠草原的植被恢复。作为土壤的重要组成成分,土壤有机碳既为荒漠植物生长提供所需养分,也为贫瘠土壤的微生物活动提供能量来源,所以既是碳源,也可作碳汇,其含量和动态变化影响着全球碳循环^[16]。光伏电站建造初期会损害土壤结构,改变土壤的养分和水分动态循环及生化特征,进而可能降低电站内土壤碳形成的速度,因此土壤有机碳也被看作衡量光伏电站土壤修复程度的主要指标之一^[17]。Powers等^[18]发现,植被恢复过程中,植物种类和群落组成逐渐发生变化,会导致土壤结构和根系结构发生改变,进而影响土壤有机碳的含量和稳定性。此外,植被恢复达到一定年限后有机碳含量会和恢复年限成正比^[19]。

目前,关于光伏电站植被恢复对荒漠土壤有机碳储量,特别是对有机碳组分的影响研究尚少。近年来,库布齐沙漠光伏项目采用“板上发电、板下修复”的“草光互补”模式,在生态修复和经济发展方面取得了显著成效,为其他沙漠地区的光伏产业发展提供了成功范例^[20]。因此,本研究拟以内蒙古库布齐沙漠境内的达拉特旗光伏产业园区为研究区域,通过野外观测和室内测定对光伏阵列内不同位置人工植被盖度、密度、高度和生物量进行测定,对各位置土壤含水量体积浓度和有机碳组分含量进行室内测定和差异分析,最后分析土壤含水量体积浓度和有机碳组分的相关关系,厘清影响土壤有机碳组分的关键种群特征,以期为荒漠光伏电站植被恢复配置和土壤修复模式的设计提供理论依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

试验区位于内蒙古鄂尔多斯市达拉特旗光伏产业园区内(40°18′11″N,109°43′32″E)。该园区位于库布齐沙漠的中段,属典型温带大陆性干旱季风气候,年平均气温为7.8℃,平均降水量在250~350 mm,年平均日照时长超过3 000 h,年均太阳辐射总量达到5 965.2 MJ/m²,属于光照资源很丰富的B类地区,该地区地带性土壤以栗钙土类中的淡栗钙土亚类为主,其间同时夹杂着非地带性的风沙土、草甸土、盐土等^[21]。

光伏电站于2022年底建成投产,整个场区占地面积约30.67 hm²,被行车通道划分为西北、西南、东北和东南共4个区域。西北、西南区域每行沿东西方向布设光伏电板15组,东北、东南区域每行沿东西方向布设光伏电板21组,每组电板行间距为10 m。光伏电板长15 m,宽4 m,倾角为36°,电板前沿距地面1.5 m,后沿距地面3.85 m(图1)。电板下方布设低立式沙柳沙障,沙障规格为1.35 m(南北)×1.45 m(东西),地面障高20 cm,疏透度为50%。试验区位于电站西北部的人工植被修复区,2023年4月在试验区内的光伏板间开展了统一模式的生态修复,修复配置模式为“杂花苜蓿+糜子”。种植模式为条播,草种播种量为杂花苜蓿2.25 g/m²,糜子0.75 g/m²,灌溉方式为喷灌。

1.2 研究方法

1.2.1 试验设计

在试验区中部等间距选取3排光伏阵列作为研究区域,在每排光伏阵列远离边界区域由西向东等间距选取3块光伏电板。分别在电板的板前(板前檐正下方)、板间(2排电板中间)和板后(板后檐正下方)布设1 m×1 m的草本样方,共计27个样方。在2024年8月分别对样方内的杂花苜蓿和糜子的盖度、密度、自然垂直高度进行测定。利用收割法将植物地上部分进行刈割并采集,带回实验室采用烘干法测定其生物量。

在每个样方中采集植物样品的同一地点以及板下作为土壤采样点,以试验阵列外部的裸沙地为对照采样点(CK)。在每个样点挖取30 cm深的土壤剖面,分别采集0—5、5—10、10—20和20—30 cm土层的土壤样品,带回实验室内风干过筛以备土壤有机碳组分

的测定。同时,利用土壤湿度仪(RS485 Stevens Hydra Data Reader, 145,美国)对不同土层东、西、南3个方

向的土壤含水量体积浓度(Soil water content volume concentration)进行测定,每个方向连续测定3次。

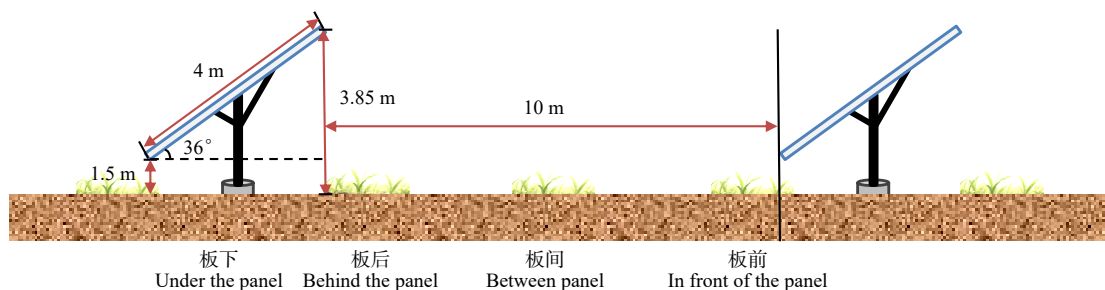


图1 光伏阵列内植被调查和土壤采样点分布

Fig. 1 Distribution of vegetation survey and soil sampling points within the photovoltaic array

1.2.2 指标测定方法

将风干过筛的土壤进行有机碳组分的测定。土壤有机碳(Soil organic carbon)采用重铬酸钾氧化外加热法;易氧化有机碳(Readily oxidizable carbon)采用333 mmol/L高锰酸钾氧化法;可溶性有机碳(Dissolved organic carbon)采用硫酸钾浸提法;热水溶性有机碳(Hot-water extractable organic carbon)采用蒸馏水浸提后水浴锅加热法;水溶性有机碳(Water extractable organic carbon)采用蒸馏水浸提法;微生物量碳(Microbial biomass carbon)采用氯仿熏蒸提取法^[22]。

1.3 统计分析

利用SPSS17.0进行数据处理分析。通过单因素方差分析(one-way ANOVA)对植物种群单个指标差异的显著性进行检验;利用Pearson相关系数法对土壤有机碳组分含量的相关性进行分析;应用多元回归下的通径分析计算影响土壤有机碳的关键种群特征指标的通径系数和决策系数,单一原因性状与结果性状的简单系数=该原因性状与结果性状的直接通径系数+所有该原因性状与结果性状的间接通径系数;间接通径系数=相关系数×通径系数。决策系数作为通径分析中的决策指标,通过计算决策系数可以将自变量对应变量的影响进行综合排序,确定其主要决策变量^[23]。其计算公式为:

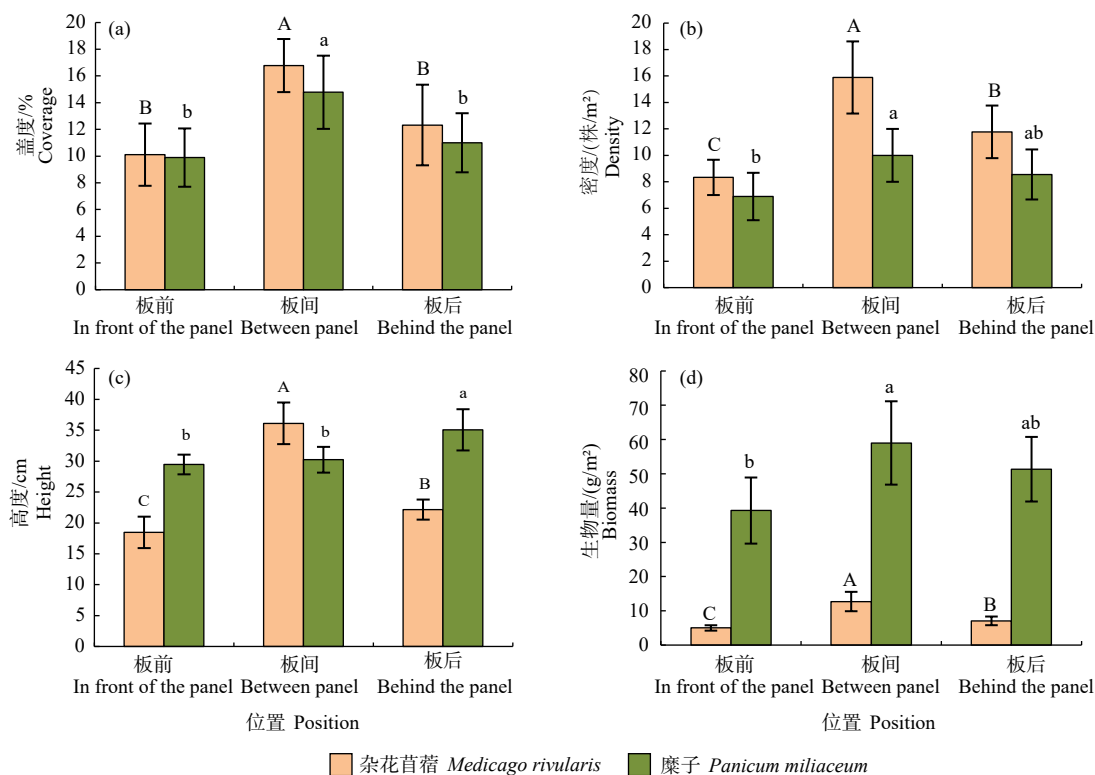
$$R^2 = 2P_i \times r_{iy} - P_i^2 \quad (1)$$

式中: R_i^2 为自变量 i 的决策系数; P_i 为自变量 i 的直接通径系数; r_{iy} 为自变量 i 与应变变量 y 的相关系数; $R^2 > 0$,说明自变量对应变变量起增强作用; $R^2 < 0$,说明自变量对应变变量起抑制作用。

2 结果与分析

2.1 光伏电站对杂花苜蓿+糜子种群特征的影响

单排光伏阵列内杂花苜蓿和糜子的种群特征变化规律如图2所示。由图2(a)可见:不同位置的杂花苜蓿和糜子的盖度均呈现板间>板后>板前的变化规律,杂花苜蓿和糜子盖度在板间区域呈现出较大的优势,样方之间差异显著($P < 0.05$)。板间杂花苜蓿盖度相比板后和板前分别增加了4.45%和6.67%;板间糜子盖度相比板后和板前分别增加了3.78%和4.89%;光伏电板的遮挡对2种植物的盖度产生明显的限制作用。由图2(b)可见:阵列内不同位置的杂花苜蓿和糜子种群密度呈现出与盖度相同的变化规律。其中:不同位置的杂花苜蓿密度之间均存在显著性差异($P < 0.05$),板间较板前和板后分别增加了90.76%和34.89%;板间糜子种群密度与板前存在显著性差异($P < 0.05$),与板后差异不显著($P > 0.05$),光伏板的特殊结构减少了板前下方糜子植株的数量。图2(c)结果表明:板间的杂花苜蓿高度显著高于板前和板后($P < 0.05$)。光伏板的遮挡抑制了杂花苜蓿的植株高度,尤其对板前位置影响较显著,糜子高度在板后最大为35.07 cm,显著高于其他位置($P < 0.05$)。由图2(d)可见:光伏电板的设立显著降低了杂花苜蓿和糜子的生物量。其中:板间杂花苜蓿生物量优势显著($P < 0.05$),板间生物量较板前和板后分别增加了154.20%和79.77%;光伏电板对板前区域的糜子生物量影响较大,其生物量显著低于板间糜子生物量($P < 0.05$)。综上所述,光伏电板的架设对杂花苜蓿和糜子的种群生长产生了明显影响,其中板前区域人工植被恢复生长受电板扰动较大。



柱状上方不同大写字母代表不同位置下杂花苜蓿种群指标差异显著 ($P < 0.05$); 柱状上方不同小写字母代表不同位置下糜子种群指标差异显著 ($P < 0.05$)。

Different uppercase letters above the columns indicate significant differences in the indicators of the *M. rivularis* population at different positions ($P < 0.05$), while different lowercase letters above the columns indicate significant differences in the indicators of the *P. miliaceum* population at different positions ($P < 0.05$).

图2 光伏阵列内不同位置杂花苜蓿和糜子种群特征差异性

Fig. 2 Differences in population characteristics of *M. rivularis* and *P. miliaceum* at various locations within a photovoltaic array

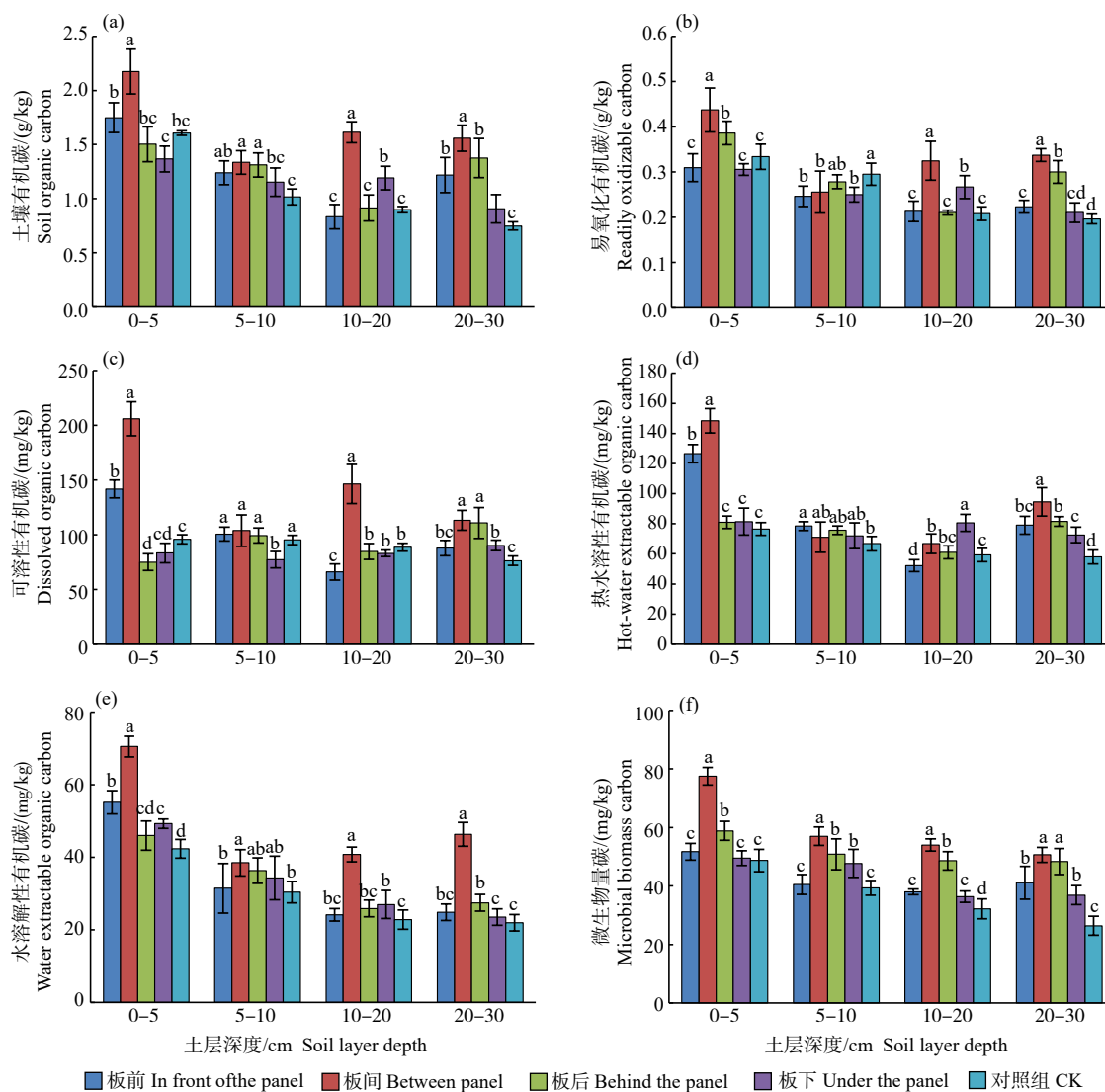
2.2 光伏阵列内不同位置土壤有机碳组分变化规律

光伏阵列内不同位置土壤有机碳组分含量分布特征见图3。可见: 光伏阵列内不同位置的表层土壤有机碳组分含量均大于其他土层; 阵列内不同位置的5—10 cm 土层有机碳组分相比其他土层深度差异最小。由图3(a)可见: 在0—5 cm 土层中, 板间土壤有机碳含量均显著高于其他位置 ($P < 0.05$), 板间0—5 cm 土层有机碳含量相比板前、板后、板下和CK 分别增加了24.30%、44.74%、59.15%和35.37%; 在10—20 cm 土层中, 板间土壤有机碳含量最高, 为1.614 g/kg, 板下有机碳含量次之, 2个位置土壤有机碳含量均显著高于其他位置 ($P < 0.05$); 在20—30 cm 土层中, 板间土壤有机碳含量显著高于其他位置 ($P < 0.05$), 板后次之, 板下和CK 处有机碳含量较低, 二者之间无显著性差异 ($P > 0.05$)。由图3(b)可见: 不同位置0—5 cm

土层易氧化有机碳含量整体表现为板间 > 板后 > CK > 板前 > 板下, 其中板间土壤易氧化有机碳含量显著高于其他位置 ($P < 0.05$), 板前、板下和CK 之间无显著差异 ($P > 0.05$); 在10—20 cm 土层中, 板间土壤易氧化有机碳含量显著高于其他位置 ($P < 0.05$), 板下次之, 其余位置之间均无显著差异 ($P > 0.05$); 在20—30 cm 中, 板间土壤易氧化有机碳同样显著高于其他位置 ($P < 0.05$), CK 处最低, 仅为0.196 g/kg。如图3(c)~(e)所示, 光伏阵列不同位置的可溶性有机碳、热水溶性有机碳和水溶性有机碳在0—5 cm 土层均表现出板间和板前显著高于其他位置的变化规律 ($P < 0.05$)。在10—20 cm 土层中, 可溶性有机碳和水溶性有机碳含量均呈现出板间显著高于其他位置的分布特征 ($P < 0.05$) (图3(c)、(e)), 其中板间10—20 cm 土层可溶性有机碳含量相比板前、板后、板下和CK 分别增加了121.81%、72.75%、76.39%和65.32% (图3(c))。

由图3(f)可见:在所有土层中,光伏板间土壤微生物量碳含量均显著高于其他位置($P<0.05$),板后次之。其中,0—5 cm和10—30 cm土层中,土壤微生物

量碳含量均表现为板间>板后>板前>板下>CK。光伏板对其板前和板下的土壤微生物量碳含量产生了明显的抑制作用。



柱状上方的不同小写字母表示相同土层不同位置之间差异显著($P<0.05$)。

Different lowercase letters above the columns indicate significant differences between different positions within the same soil layer ($P<0.05$).

图3 光伏阵列内不同位置各土层深度土壤有机碳组分含量变化

Fig. 3 Variations in soil organic carbon component content at different soil layer depths across various positions within the photovoltaic array

2.3 光伏阵列内土壤含水量体积浓度对有机碳组分的影响

光伏阵列内不同位置各层土壤含水量体积浓度变化规律如图4所示。可见:除5—20 cm土层外,其余各土层的土壤含水量体积浓度均表现为板间>板后>板前>板下>CK。土壤含水量体积浓度和有机碳组分相关性分析结果如表1所

示,土壤含水量体积浓度和有机碳组分均呈现显著性正相关($P<0.05$),其中与微生物量碳相关系数最大为0.928,与易氧化有机碳含量相关性次之,其相关系数为0.915。土壤含水量体积浓度和热水溶性有机碳含量存在显著性正相关($P<0.05$),但相关性相比其他指标较低,仅为0.398。

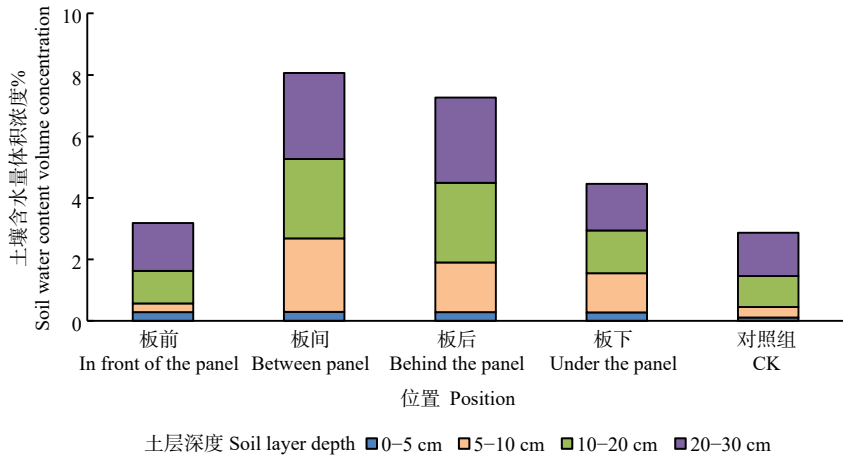


图4 光伏阵列内不同位置各土层深度土壤含水量体积浓度变化

Fig. 4 The variation in soil water content volume concentration at different soil depths and positions within the photovoltaic array

2.4 土壤有机碳与种群特征的通径分析

根据表1相关性分析结果发现,土壤有机碳组分中,有机碳含量和其他组分之间均具有极显著正相关关系($P<0.01$),基于此,本研究利用基于多元逐步回归的通径分析揭示了光伏阵列扰动下人工植被恢复对土壤有机碳的影响。由图5可见:光伏电板前对土壤有机碳产生直接影响的分别是糜子密度和杂花苜蓿高度,其直接通径系数分别为0.605和0.500,决策系数计算结果表明,糜子密度和杂花苜蓿高度的决策系数为0.691和0.576,糜子密度和杂花苜蓿高度对有机碳的增加起到促进作用;光伏电板间对土壤有机碳具有直接影响的是糜子生物量,其直接通径系数为0.939,决策系数为0.386,糜子生物量的增加是促进土壤有机碳富集的关键因子;光伏板后对土壤有机碳产生促进作用的关键因子是杂花苜蓿生物量,其直接通径系数为0.965,决策系数为0.931。板间和板后植物种群地上生物量的增加有效促进了土壤有机碳含量的富集。

3 讨论

3.1 光伏阵列内不同区域环境对人工植被种群特征的影响

光伏电板由于其特殊的结构特性对阵列内不同位置的杂花苜蓿和糜子的生长影响巨大。其中,光伏板间的杂花苜蓿和糜子的盖度、密度、和生物量均高于板前和板后,这与杨奕颖等^[24]研究结果一致。光伏电板的遮阴作用使电板后方植物在很长

时间内无法有效接受光照,导致其光合作用受限,进而减弱了板后杂花苜蓿和糜子生物量的积累^[9]。此外,随着光伏电板倾斜角随季节的变化,在降水过程中,电板会对板后降水量产生不同程度的影响,进而影响板后土壤水分蓄积,板后各层土壤含水量体积浓度均小于板间,水分的减少不利于固沙植被早期的生长,也进一步对植被种群产生了抑制作用,然而电板的遮阴作用也使地表土壤水分蒸发量减少,空气湿度增加,这些因素对板后土壤水分产生重要影响,其深层土壤体含水量均大于板前,土壤含水量体积浓度作为重要因子促使板后相比板前植被种群生长特征仍呈现较高水平^[25-26]。

如图2所示,板前的杂花苜蓿和糜子种群的盖度、密度、高度和生物量均小于板间和板后,这是由于光伏电板对过境气流产生了阻挡,使得电板前檐和地面之间产生“汇流加速”现象,形成了风速的加速通道,加速的气流会使板前的植物受到较强的机械冲击,植物产生倒伏,并且影响其正常发育^[27]。此外,强风会导致水分蒸发加快,抵消掉补充的降水,加剧浅层土壤干燥,水分是植物生长的关键限制因素,土壤含水量的降低对板前2种植被的生长产生了明显的负面影响^[28]。

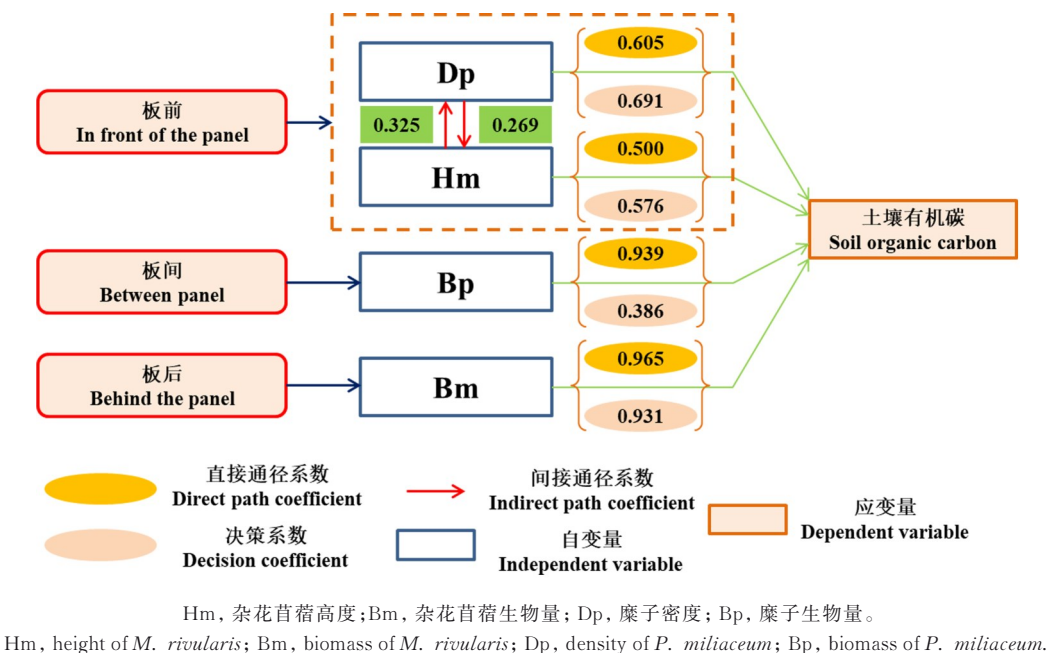
3.2 光伏阵列内土壤含水量体积浓度对土壤有机碳组分的影响

光伏电板通过对降水再分配和对土壤蒸发进行调控从而使阵列内不同位置的土壤体含水量空间异质性加强^[26]。本研究结果表明,板间土壤有机碳各组分含量均呈现出显著优势,而0—30 cm土

表 1 土壤含水量体积浓度和有机碳组分之间的皮尔逊相关性
Table 1 The Pearson correlation coefficient between soil water content volume concentration and soil organic carbon components

指标 Index	土壤有机碳 Soil organic carbon	易氧化有机碳 Readily oxidizable carbon	可溶性有机碳 Dissolved organic carbon	热水溶性有机碳 Hot-water extractable organic carbon	水溶性有机碳 Water extractable organic carbon	微生物量碳 Microbial biomass carbon	土壤含水量体积 浓度 Soil water content volume concentration
土壤有机碳 Soil organic carbon	1						
易氧化有机碳 Readily oxidizable carbon	0.872**	1					
可溶性有机碳 Dissolved organic carbon	0.976**	0.825**	1				
热水溶性有机碳 Hot-water extractable organic carbon	0.875**	0.686**	0.914**	1			
水溶性有机碳 Water extractable organic carbon	0.967**	0.868**	0.967**	0.886**	1		
微生物量碳 Microbial biomass carbon	0.907**	0.947**	0.834**	0.644**	0.867**	1	
土壤含水量体积 浓度 Soil water content volume concentration	0.725**	0.915**	0.626**	0.398*	0.689**	0.928**	1

注：*, $P < 0.05$; **, $P < 0.01$ 。
Note: * indicates $P < 0.05$ and ** indicates $P < 0.01$.



Hm, height of *M. rivularis*; Bm, biomass of *M. rivularis*; Dp, density of *P. miliaceum*; Bp, biomass of *P. miliaceum*.
图5 光伏阵列不同位置土壤有机碳组分与人工植被种群的通径分析

Fig. 5 Path analysis of soil organic carbon components and artificial vegetation populations at different locations in photovoltaic arrays

层的含水量体积浓度也表现出相同的趋势,二者呈现出显著正相关关系。其中,表1结果表明,土壤含水量体积浓度与微生物量有机碳相关系数最高,呈极显著正相关($P<0.01$)。板间和板后各土层土壤微生物量碳均大于其他位置(图3(f)),土壤含水量是影响土壤微生物活性的关键因素,沙漠土壤含水量的增加可以显著提高土壤微生物的代谢活动。光伏阵列板间土壤含水量体积浓度较高(图4),板后的遮阴作用使其具备更加湿润的土壤环境,这2个区域的好氧条件使土壤微生物分解能力加强,部分碳通过与土壤矿物结合而稳定化,从而实现了碳的长期储存^[29]。土壤微生物主要以真菌为主,在光伏阵列内土壤含水量高的样点,土壤真菌快速增长,促进了对地表凋落物的快速分解,因此加速了真菌对碳源的分解转化速率,有利于土壤易氧化有机碳的积累^[30]。可溶性有机碳由土壤与水体中一系列具有不同分子量和化学结构的大小分子组成,是光伏电站内土壤生物和人工植被可以直接利用的有机碳源,在土壤固碳过程中扮演重要角色。作为有机碳组分中易溶于水的部分,可溶性有机碳更易受土壤水分的影响,随着土壤含水量的增加,促进了有机质的溶解和迁移,可溶性有机碳含量通常会增加,因此二者呈现极显著的正相关关系($P<$

0.01)^[31-32]。土壤水溶解性和热水溶性有机碳中不仅含有可溶性有机碳,还包括大量可提取的根系分泌物,与微生物量有机碳呈正相关^[33]。因此,土壤含水量通过提高微生物的活性增加了土壤有机碳组分的富集。各有机碳组分与土壤有机碳均表现为极显著正相关关系,这与段北星等^[34]研究结果一致,也再次证明了各有机碳组分含量很大程度上依赖于土壤有机碳总量。

3.3 光伏阵列内植被恢复对土壤有机碳组分的影响

人工植被的恢复方式在很大程度上决定了土壤有机碳的输入量。糜子作为禾本科一年生草本谷类作物,其根系发达且生长速度极快。糜子通过竞争刺激杂花苜蓿使其增加根际共生固氮和氮利用,有效地发挥了作物之间的互补和促进作用,提高牧草年总产量,因此,选择糜子和杂花苜蓿进行保护播种是弥补糜子生产初期生产效益低的有效措施^[35]。其中,豆科草地植物杂花苜蓿在防治水土流失、促进土壤结构改良以及提升土壤有机碳库方面发挥了重要作用^[36]。

通径分析结果表明,光伏电板前的糜子密度和杂花苜蓿的高度对土壤有机碳含量产生了直接影响,糜子受风速增加影响使其部分产生倒伏,覆盖

度增加,杂花苜蓿茎秆机械强度较大,其高度的变化直接影响其防风强度,覆盖度和高度两因素的变化起到固沙和阻沙的作用,可减少板前檐下方风沙流的输移,拦蓄更多的细粒沉积物,细沙和黏粒使土壤具有较大的比表面积,从而暴露出更多的表面电荷,可提供更多的吸附点位,因此使土壤吸附更多可溶性有机碳,进而为土壤有机碳组分在表层的富集产生了促进作用^[37-40]。

本研究发现,板间糜子的生物量对该区域土壤有机碳产生直接影响,且决策系数较高。土壤有机碳及碳组分大多来源于土壤表层的植物残体和微生物,且这些物质主要分布在上层土壤,土壤表层的通气条件较好,因此,板间表层土壤有机碳组分与其他位置表层土壤有机碳组分差异较大^[41]。

光伏电板板后杂花苜蓿的生物量是直接影响该区域土壤有机碳的重要因素。地上生物量增加,意味着更多的植物残体归还到土壤中,这些残体通过微生物分解转化为土壤有机碳,增加了土壤中的有机碳含量^[42]。由于杂花苜蓿根系进入深层土壤后加快了土壤微生物量有机碳的周转速度,不仅增加了微生物量碳,同时也促进碳的分解,增加了土壤有机碳其他组分的含量^[36]。此外,本次研究只集中于杂花苜蓿和糜子地上部分生物量对土壤有机碳的影响,由于植被恢复年限较短,并未对地下根系分布规律及生物量分布特征进行定量分析,今后将重点研究多年人工植被恢复下的根系发育及地下生物量分配对深层土壤有机碳组分的影响机理。

4 结 论

为了揭示沙区光伏电站人工植被种群恢复对土壤有机碳组分空间分布的调控机制,本文采用野外植被调查结合室内指标测定的研究方法,分析了光伏阵列扰动下不同位置杂花苜蓿和糜子种群特征的空间异质性,明晰了土壤含水量体积浓度和有机碳组分的相关关系,最终阐明了2个种群的特征对土壤有机碳组分的影响路径。主要结论如下:

1)库布齐沙漠光伏阵列的布设抑制了板前杂花苜蓿和糜子种群的数量、高度和地上生物量,2个植物种群在板间恢复效果较好。

2)光伏阵列内杂花苜蓿和糜子种群恢复有效增加了其下垫面土壤有机碳组分含量。其中,表层土壤有机碳组分均大于深层土壤;光伏电板的特殊

结构通过对土壤含水量体积浓度进行再分配进而对板前和板下土壤有机碳组分的蓄积产生了较大的负面影响。

3)光伏电板通过影响板前糜子盖度和杂花苜蓿的高度进而对板前土壤有机碳产生了直接影响;板间糜子种群的地上生物量恢复促进了下垫面土壤有机碳的富集;电板通过调控其板后的杂花苜蓿生物量进而影响其下方土壤有机碳的积累。

本研究围绕人工植被地上部分对土壤有机碳组分再分配的影响进行了分析。下一步将重点针对多年恢复后的人工植被地下根系分布特征及其对土壤有机碳组分的影响进行长时序的系统研究,以期揭示多年人工植被恢复过程对荒漠土壤有机碳组分富集的调控机制。

参考文献 References

- [1] 郝晓珍,于航,吴星叶,冯天骄,王成,田丽慧,谭梦迪,彭怀午,王平.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/OL].生态学报, 2025: 1-17 (2025-04-07). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=STXB2025040300U&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>
- [2] Hao X Z, Yu H, Wu X Y, Feng T J, Wang C, Tian L H, Tan M D, Peng H W, Wang P. Effects of typical photovoltaic power saturation construction on vegetation properties and soil properties in Tibetan Plateau desert region [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025: 1-17 (2025-04-07). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=STXB2025040300U&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ> (in Chinese)
- [3] 陈睿山,郭晓娜,熊波,王尧,陈琼.气候变化、土地退化和粮食安全问题: 关联机制与解决途径[J].生态学报, 2021, 41(7): 2918-2929
- [4] Chen R S, Guo X N, Xiong B, Wang Y, Chen Q. Climate change, land degradation and food insecurity: Linkages and potential solutions[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(7): 2918-2929 (in Chinese)
- [5] 李昌隆.推进科尔沁沙地治理筑牢祖国北疆生态安全屏障[J].内蒙古林业, 2021(6): 17-19
- [6] Li C L. Promoting the control of Horqin sandy land and building an ecological security barrier in northern Xinjiang of the motherland [J]. *Inner Mongolia Forestry*, 2021 (6): 17-19 (in Chinese)
- [7] 唐国栋,蒙仲举,高永,党晓宏,郭建英,邢恩德.基于风洞试验的风沙区光伏阵列近地表面形态变化规律研究[J].水土保持通报, 2022, 42(4): 1-8
- [8] Tang G D, Meng Z J, Gao Y, Dang X H, Guo J Y, Xing E D. A study on solar photovoltaic array surface morphology variation in sandy area based on wind tunnel test [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(4): 1-8 (in Chinese)
- [9] 陈曦,高永,翟波,刘湘杰,程波.沙区光伏电场的风沙流输移特征[J].干旱区研究, 2019, 36(3): 684-690
- [10] Chen X, Gao Y, Zhai B, Liu X J, Cheng B. Transport of wind-drift sand in photovoltaic electric field in sand area [J]. *Arid Zone Research*, 2019, 36

- (3): 684-690 (in Chinese)
- [6] 刘强, 马鸿元, 拉本, 叶得力, 张嘉宸, 张旭萍. 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, 112
- Liu Q, Ma H Y, La B, Ye D L, Zhang J C, Zhang X P. Impact of large-scale photovoltaic arrays on microclimate in the northwest alpine desert region under the dualcarbon backgroud[J]. *Journal of Qinghai Normal University : Natural Science Edition*, 2025, 41(1): 74-83, 112 (in Chinese)
- [7] Liu Y J, Zhang J B, Mu R, Wang D Y, Wang Z M, An J Y, Li X L. Effects of two ecological governance measures for photovoltaic power stations on plant growth and soil nutrients[J]. *Plants*, 2025, 14(5): 797
- [8] Yue S J, Guo M J, Zou P H, Wu W, Zhou X D. Effects of photovoltaic panels on soil temperature and moisture in desert areas[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2021, 28(14): 17506-17518
- [9] Weraduwege S M, Chen J, Anozie F C, Morales A, Weise S E, Sharkey T D. The relationship between leaf area growth and biomass accumulation in *Arabidopsis thaliana*[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2015, 6: 167
- [10] 张芝萍, 尚雯, 王祺, 付贵全, 张卫星, 万翔. 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, Fu G Q, Zhang W X, Wan X. 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 (in Chinese)
- [11] Lafitte A, Sordello R, Ouédraogo D Y, Thierry C, Marx G, Froidevaux J, Schatz B, Kerbirou C, Gourdain P, Reyjol Y. 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
- [12] 王涛, 王得祥, 郭廷栋, 张岗岗, 赵世雄, 牛怀诚, 卢舜瑜, 林虎. 光伏电站建设对土壤和植被的影响[J]. 水土保持研究, 2016, 23(3): 90-94
- Wang T, Wang D X, Guo T D, Zhang G G, Zhao S X, Niu H C, Lu S Y, Lin H. The impact of photovoltaic power station construction on soil and vegetation[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(3): 90-94 (in Chinese)
- [13] 党梦娇, 蒙仲举, 斯庆毕力格, 杨世荣. 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
- Dang M J, Meng Z J, Si Q B L G, Yang S R. Particle characteristics of surface sediment in the photovoltaic power station in the south margin of the Kubuqi Desert[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2019, 50(2): 260-266 (in Chinese)
- [14] 杜孝东, 李伟, 齐向阳, 孙智宇, 石国庆, 杨静, 王鑫尧, 隋晓青. 光伏区异质环境下土壤理化特性及化学计量特征分析[J]. 草地学报, 2025, 33(1): 181-188
- Du X D, Li W, Qi X Y, Sun Z Y, Shi G Q, Yang J, Wang X Y, Sui X Q. Physicochemical properties and stoichiometric characterisation of soils in heterogeneous environment in photovoltaic area[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2025, 33(1): 181-188 (in Chinese)
- [15] 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
- Liu X, Zhang P, Liu J Q. Inorganic fertilizers are limiting factors of vegetation restoration of Qinghai Tala shoal photovoltaic power station[J]. *Biodiversity Science*, 2022, 30(5): 29-36 (in Chinese)
- [16] 刘学东, 陈林, 杨新国, 张义凡, 赵伟, 李学斌. 荒漠草原典型植物群落土壤活性有机碳组分特征及其与酶活性的关系[J]. 西北植物学报, 2016, 36(9): 1882-1890
- Liu X D, Chen L, Yang X G, Zhang Y F, Zhao W, Li X B. Characteristics of soil labile organic carbon fractions and their relationship with soil enzyme activities in four typical communities in desert steppe[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2016, 36(9): 1882-1890 (in Chinese)
- [17] 赵晶, 郝孟婕, 王清宇, 刘美英. 不同植被恢复模式下光伏电站土壤有机碳储量分布特征[J]. 浙江农林大学学报, 2021, 38(5): 1033-1039
- Zhao J, Hao M J, Wang Q Y, Liu M Y. Distribution characteristics of soil organic carbon storage in photovoltaic power station under different vegetation restoration modes[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2021, 38(5): 1033-1039 (in Chinese)
- [18] Powers J S, Marin-Spiotta E. Ecosystem processes and biogeochemical cycles in secondary tropical forest succession[J]. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2017, 48: 497-519
- [19] 程彩芳, 陆爱云, 李正才, 周君刚, 吴亚丛, 赵志霞, 孙娇娇. 不同林龄木荷-青冈栎混交林幼林碳储量[J]. 生态学杂志, 2015, 34(10): 2705-2710
- Cheng C F, Lu A Y, Li Z C, Zhou J G, Wu Y C, Zhao Z X, Sun J J. Carbon storage in mixed *Schima superba* Gardn et Champ. -*Cyclobalanopsis glauca* (Thunb.) Oerst. young plantations at different stand ages[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(10): 2705-2710 (in Chinese)
- [20] 符超. “光”耀“三北”: “光伏治沙”助力筑牢“三北”工程生态屏障[J]. 绿色中国, 2024(10): 57-61
- Fu C. Brilliance achieves the “Three North” region: “Photovoltaic Sand Control” contributes to strengthening the ecological barrier of the “Three North” project[J]. *Green China*, 2024(10): 57-61 (in Chinese)
- [21] 杨宏伟, 李泽东, 赵京东, 刘永青, 白建华, 杨晓晖. 沙戈荒地区光伏电站对地表温度的影响: 以骏马电站为例[J/OL]. 中国水土保持科学: 中英文, 2025: 1-9 (2025-03-27). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=STBC2025050700F&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>
- Yang H W, Li Z D, Zhao J D, Liu Y Q, Bai J H, Yang X H. Impact of photovoltaic power field construction on surface temperature in desert and gobi regions: A case study of Junma power field[J/OL]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2025: 1-9(2025-03-27). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=STBC2025050700F&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ> (in Chinese)
- [22] 庞丹波. 断陷盆地地区典型林分土壤有机碳组分特征研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2019
- Pang D B. The characteristics of soil organic carbon fractions of typical forests in karst faulted basin[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019 (in Chinese)
- [23] 王丽波, 孙洪昱, 刘璐, 郭满才, 袁志发. 约束选择指数的通径分析及决策分析[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2006, 34(3): 33-36
- Wang L B, Sun H G, Liu L, Guo M C, Yuan Z F. Path analysis and decision analysis of restricted selection index[J]. *Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry: Natural Science Edition*, 2006, 34(3): 33-36 (in Chinese)
- [24] 杨奕颖, 苏思霖, 曹恩志, 李红有, 迟洪明, 蔺凯, 吴旭东, 何文强, 杨昊天. 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, Li H Y, Chi H M, Lin K, Wu X D, He W Q, Yang H T. 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 (in Chinese)
- [25] Wu C D, Liu H, Yu Y, Zhao W Z, Liu J T, Yu H L, Yetemen O. 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
- [26] 翟波, 党晓宏, 陈曦, 刘湘杰, 杨世荣. 内蒙古典型草原区光伏电板降水再分配与土壤水分蒸散分异规律[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(9): 144-155
- Zhai B, Dang X H, Chen X, Liu X J, Yang S R. Difference regularity of precipitation redistribution and soil water evapotranspiration in photovoltaic panels in typical steppe areas of Inner Mongolia[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2020, 25(9): 144-155 (in Chinese)
- [27] 杨世荣, 凌侠, 蒙仲举, 党晓宏, 党梦娇, 石涛, 刘湘杰. 库布齐沙漠生态光伏电站风速脉动特征[J]. 干旱区研究, 2019, 36(5): 1309-1317
- Yang S R, Ling X, Meng Z J, Dang X H, Dang M J, Shi T, Liu X J. Wind speed fluctuation at Kubuqi desert ecological photovoltaic power station[J]. *Arid Zone Research*, 2019, 36(5): 1309-1317 (in Chinese)
- [28] 翟波, 高永, 党晓宏, 蒙仲举, 徐立杰, 刘子剑. 内蒙古中部草原区光伏电站对土壤水分及其脉冲响应的作用机制[J]. 太阳能学报, 2022, 43(6): 49-56
- Zhai B, Gao Y, Dang X H, Meng Z J, Xu L J, Liu Z J. Mechanism of photovoltaic power station on soil moisture and its impulse response in grassland region of central Inner Mongolia[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2022, 43(6): 49-56 (in Chinese)
- [29] Hao Y F, Mao J F, Bachmann C M, Hoffman F M, Koren G, Chen H S, Tian H Q, Liu J G, Tao J, Tang J Y, Li L C, Liu L B, Apple M, Shi M J, Jin M Z, Zhu Q, Kannenberg S, Shi X Y, Zhang X, Wang Y P, Fang Y L, Dai Y J. Soil moisture controls over carbon sequestration and greenhouse gas emissions: A review[J]. *NPJ Climate and Atmospheric Science*, 2025, 8: 16
- [30] 张哲, 王邵军, 陈闽昆, 曹润, 李少辉. 蚂蚁筑巢对不同恢复阶段热带森林土壤易氧化有机碳时空动态的影响[J]. 生物多样性, 2019, 27(6): 658-666
- Zhang Z, Wang S J, Chen M K, Cao R, Li S H. Effect of ant colonization on spatiotemporal dynamics of readily oxidizable soil carbon across different restoration stages of tropical forests[J]. *Biodiversity Science*, 2019, 27(6): 658-666 (in Chinese)
- [31] 赵彤彤, 谷晓博, 谭川东, 延廷霖, 李晓雁, 常甜, 杜娅丹. 水氮耦合对西北旱区覆膜农田土壤有机碳、氮矿化的影响[J]. 中国农业科学, 2025, 58(5): 929-942
- Zhao T T, Gu X B, Tan C D, Yan T L, Li X Y, Chang T, Du Y D. Effects of water-nitrogen coupling on the mineralization of organic carbon and nitrogen for mulched farmland soils in the arid regions of northwest China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2025, 58(5): 929-942 (in Chinese)
- [32] Ma W M, Li Z W, Ding K Y, Huang J Q, Nie X D, Zeng G M, Wang S G, Liu G P. Effect of soil erosion on dissolved organic carbon redistribution in subtropical red soil under rainfall simulation[J]. *Geomorphology*, 2014, 226: 217-225
- [33] Ghani A, Dexter M, Perrott K W. Hot-water extractable carbon in soils: A sensitive measurement for determining impacts of fertilisation, grazing and cultivation[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35(9): 1231-1243
- [34] 段北星, 满秀玲, 宋浩, 刘家霖. 大兴安岭北部不同类型兴安落叶松林土壤呼吸及其组分特征[J]. 北京林业大学学报, 2018, 40(2): 40-50
- Duan B X, Man X L, Song H, Liu J L. Soil respiration and its component characteristics under different types of *Larix gmelinii* forests in the north of Daxing'an Mountains of northeastern China[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2018, 40(2): 40-50 (in Chinese)
- [35] 李沛, 张浩, 郭童天, 徐恒康, 韦斌, 张英俊, 刘楠. 保护播种对呼伦贝尔混播草地建植初期杂草抑制和牧草生长的影响[J]. 草地学报, 2022, 30(12): 3423-3432
- Li P, Zhang H, Guo T T, Xu H K, Wei B, Zhang Y J, Liu N. Effects of companion crop on weed suppression and forage growth in the early establishment stage of legume-grass mixture in Hulunbuir area[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(12): 3423-3432 (in Chinese)
- [36] 李婷婷, 姜文婷, 田野, 陈国梁, 孟永斌, 王秀康, 孙志明. 黄土高原典型豆科草地植物群落土壤有机碳组分及微生物群落特征[J/OL]. 西北农业学报, 2025: 1-11(2025-03-20). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=XBNX20250319001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>
- Li T T, Jiang W T, Tian Y, Chen G L, Meng Y B, Wang X K, Sun Z M. Characteristics of soil organic carbon fractions and microbial community structure in typical legume plant communities on Loess Plateau[J/OL]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2025: 1-11 (2025-03-20). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=XBNX20250319001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ> (in Chinese)
- [37] Wu J R, Wang X Y, Bian L, Li Z Y, Jiang X H, Shi F L, Tang F, Zhang Z Q. Starch and sucrose metabolism plays an important role in the stem development in *Medicago sativa*[J]. *Functional Plant Biology*, 2024, 51: FP24073
- [38] 张文浩, 侯龙鱼, 杨杰, 宋世环, 毛小涛, 张强强, 白文明, 潘庆民, 周青平. 高寒地区苜蓿人工草地建植技术[J]. 科学通报, 2018, 63(17): 1651-1663
- Zhang W H, Hou L Y, Yang J, Song S H, Mao X T, Zhang Q Q, Bai W M, Pan Q M, Zhou Q P. Establishment and management of alfalfa pasture in cold regions of China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2018, 63(17): 1651-1663 (in Chinese)
- [39] 罗玉红, 黄予姝, 珠娜, 李乐, 程延彬, 刘嘉慧, 张敬敏, 包雨凡, 徐诺, 闫玉春. 锡林郭勒盟典型草原区草地开垦及退耕造林对土壤粒径分布和养分的影响[J]. 中国农业科学, 2024, 57(24): 4919-4932
- Luo Y H, Huang Y S, Zhu N, Li L, Cheng Y B, Liu J H, Zhang J M, Bao Y F, Xu N, Yan Y C. Effects of cultivation and cropland afforestation on soil particle size distribution and soil nutrients in the typical steppe of Xilingol league[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2024, 57(24): 4919-4932 (in Chinese)
- [40] Borken W, Ahrens B, Schulz C, Zimmermann L. Site-to-site variability and temporal trends of DOC concentrations and fluxes in temperate forest soils[J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(7): 2428-2443
- [41] 肖好燕, 刘宝, 余再鹏, 万晓华, 桑昌鹏, 周富伟, 黄志群. 亚热带典型林分对表层和深层土壤可溶性有机碳、氮的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(4): 1031-1038
- Xiao H Y, Liu B, Yu Z P, Wan X H, Sang C P, Zhou F W, Huang Z Q. Effects of forest types on soil dissolved organic carbon and nitrogen in surface and deep layers in subtropical region, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(4): 1031-1038 (in Chinese)

- [42] 蔡雪梅, 潘占东, 罗珠珠, 李玲玲, 牛伊宁, 蔡立群, 刘家鹤. 黄土高原雨养区苜蓿种植年限对土壤固碳细菌丰度和活性有机碳组分的影响[J]. 草业科学, 2021, 38(6): 1024-1034

Cai X M, Pan Z D, Luo Z Z, Li L L, Niu Y N, Cai L Q, Liu J H. Effects of alfalfa planting with different cultivating ages on abundance of soil

carbonsequestration bacteria and labile organic carbon fractions in rainfed Loess Plateau[J]. *Pratacultural Science*, 2021, 38(6): 1024-1034 (in Chinese)

责任编辑: 杨爱东



第一作者简介: 翟波, 博士, 集宁师范学院地理科学与规划学院讲师, 内蒙古自治区“英才兴蒙”工程高层次人才。主要从事荒漠草原生态修复与风蚀荒漠化防治的相关研究。主持内蒙古自然科学基金项目1项, 省部级项目2项; 参与国家自然科学基金项目2项。以第一作者和参与作者身份发表论文20余篇; 以副主编身份出版专著2部, 参编教材1部; 获批实用新型专利6项, 国际专利2项。



通讯作者简介: 党晓宏, 博士, 内蒙古农业大学沙漠治理学院副教授, 博士生导师, 主要从事荒漠化防治与矿区生态修复的相关研究。入选国家林业和草原科技创新青年拔尖人才、第十批“草原英才”、内蒙古自治区“新世纪321人才工程”。先后主持国家重点研发计划课题、国家自然科学基金、自治区科技重大专项、优秀青年培养项目等19项科研项目。以第一作者或通讯作者发表论文100余篇, 出版专著24部, 发布行业、地方、团体标准8项; 获批科技成果1项, 授予植物新品种1种, 授权发明专利9项、实用新型专利46项、软件著作权11项; 并荣获中国知网高被引学者TOP1%。曾获第十三届梁希林业科学技术奖科技进步奖二等奖、第十三届中国水土保持学会青年科技奖、内蒙古自治区科技进步奖一等奖、内蒙古自治区第七届哲学社会科学优秀成果政府三等奖、中国林学会第九届梁希科普活动奖、中国质量评价协会科技创新一等奖、内蒙古自治区农牧业丰收一等奖。