

沙区光伏电站不同植物恢复措施 土壤水分特征

孟芮冰¹, 孟祥东², 蔡佳乐¹, 李浩年¹, 蒙仲举¹

(1. 内蒙古农业大学, 内蒙古呼和浩特 010018;

2. 华能乌拉特中旗新能源发电有限公司, 内蒙古巴彦淖尔 015300)

摘要: [目的] 分析库布齐沙漠杭锦旗光伏电站不同空间位置4种植物恢复措施的土壤水分特征, 为光伏电站固沙植物的合理配置与管理提供科学依据。[方法] 采用环刀法测定研究区内不同位置(迎风侧、阵列腹中、背风侧)板间、板下的4种不同植被下0—100 cm深度土壤含水量, 分析土壤水分垂直分布特征、变异性、土壤贮水量及土壤贮水亏损度。[结果] ①4种植物恢复措施均提高了土壤含水率, 平均含水率表现为: 油蒿(2.09%) > 羊草(2.08%) > 甘草(2.06%) > 花棒(1.98%) > 裸沙地(1.34%); 土壤含水率的空间分布呈现: 迎风侧 < 背风侧 < 阵列腹中, 板间 < 板下。甘草与羊草样地的土壤水分变异性高于油蒿与花棒措施。②0—100 cm深度土层贮水量变化范围为16.72~51.55 mm, 土壤贮水量变化趋势与土壤含水量变化基本一致。③土壤贮水亏缺度表现为: 裸沙地(78.81%) > 花棒(69.00%) > 羊草(68.95%) > 油蒿(67.23%) > 甘草(63.11%), 且随土层深度增加而降低, 空间分布为: 板间 > 板下, 迎风侧 > 背风侧 > 阵列腹中。[结论] 研究区内4种植物恢复措施均有效提高了各部位的土壤含水率, 油蒿与花棒在0—30 cm范围内高于其他措施, 且变异系数较低, 羊草与甘草在30 cm以下深度时土壤水分含量、贮水量、贮水亏缺度表现优于其他措施。因此, 在运维期受风蚀严重的迎风侧种植油蒿与花棒, 能够有效缓解风力侵蚀; 在受风蚀不太严重的阵列腹地与其他区域种植甘草、羊草等经济作物, 能够应对严重次生灾害问题以及达到产业增收的目的。

关键词: 库布齐沙漠; 风蚀; 土壤含水量; 恢复效应

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)04-0040-10

中图分类号: S157.2, S775

文献参数: 孟芮冰, 孟祥东, 蔡佳乐, 等. 沙区光伏电站不同植物恢复措施土壤水分特征[J]. 水土保持通报, 2025, 45(4): 40-49. Meng Ruibing, Meng Xiangdong, Cai Jiale, et al. Soil moisture characteristics under different vegetation restoration measures at photovoltaic power plants in sandy areas [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(4): 40-49. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.04.016; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.04.016.

Soil moisture characteristics under different vegetation restoration measures at photovoltaic power plants in sandy areas

Meng Ruibing¹, Meng Xiangdong², Cai Jiale¹, Li Haonian¹, Meng Zhongju¹

(1. College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural

University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China; 2. China Huaneng Urad Middle

Banner New Energy Power Generation Company Limited, Bayannur, Inner Mongolia 015300)

Abstract: [Objective] Soil moisture characteristics under four vegetation restoration treatments were investigated at different locations of the Hangjinqi photovoltaic power station in the Kubuqi Desert, Inner Mongolia, China, to provide a scientific basis for the rational configuration and management of sand-fixing vegetation in areas with photovoltaic power stations. [Methods] The cutting-ring method was used to determine soil water content at 0—

收稿日期: 2025-01-09

修回日期: 2025-04-07

采用日期: 2025-04-10

资助项目: 华能集团科技项目“沙区光伏电站低成本可降解沙障流沙固定技术研究”(HNKJ24-H116)

第一作者: 孟芮冰(1999—), 女(汉族), 内蒙古自治区呼伦贝尔市人, 博士研究生, 研究方向为荒漠化防治。Email: mengruibing@163.com。

通信作者: 蒙仲举(1980—), 男(汉族), 内蒙古自治区呼和浩特市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事荒漠化防治研究。Email: mengzhongju@126.com。

100 cm depth under four vegetation types between and under the panels at different locations (windward side, array belly and leeward side) in the study area and to analyze soil moisture vertical distribution, soil moisture variability, soil water storage and soil water storage deficit. [Results] ① All four vegetation restoration measures increased soil water content, with the average water content in the order of *Artemisia ordosica* (2.09%) > *Leymus chinensis* (2.08%) > *Glycyrrhiza uralensis* (2.06%) > *Hedysarum scoparium* (1.98%) > bare sand (1.34%). Spatial distribution was in the order of windward side < leeward side < array belly and interpanel < subplate. Soil moisture was higher under *G. uralensis* and *L. chinensis* vegetation restoration than under *A. ordosica* and *H. scoparium* vegetation restoration. ② The range of change in soil water storage at 0—100 cm depth under different vegetation restoration measures was 16.72—51.55 mm, and the soil water storage trend was consistent with the soil water content trend. ③ Soil water storage deficit under the different vegetation restoration measures in the photovoltaic power station was in the following order: bare sand (78.81%) > *H. scoparium* (69.00%) > *L. chinensis* (68.95%) > *A. ordosica* (67.23%) > *G. uralensis* (63.11%), and decreased with an increase in soil depth, and the spatial distribution was in the order of inter-slab > sub-slab, windward side > leeward side > array belly. [Conclusion] The vegetation restoration measures in the present study increased soil water content in all parts of the soil, and *A. ordosica* and *H. scoparium* had greater effects than the other measures in the 0—30 cm depth range, with lower coefficients of variation. Soil water content, water storage, and water storage deficit under *L. chinensis* and *G. uralensis* were superior to those under the other species treatments at depths < 30 cm. Therefore, during the operation and maintenance period, planting *A. ordosica* and *H. scoparium* on the windward side, with severe wind erosion, could effectively alleviate wind erosion, and *L. chinensis*, *G. uralensis* and other cash crops should be planted in the hinterland and other areas of the array that are less severely affected by wind erosion to address the problem of severe secondary extinction and achieve sustainable development.

Keywords: Kubuqi Desert; wind erosion; soil moisture content; recovery effect

随着全球经济的快速发展,传统化石燃料(如石油、天然气和煤炭)的储量逐渐减少,同时其使用带来的环境问题日益突出,能源危机已成为全球共同面临的重大挑战^[1-2]。这一现实促使各国积极寻求可再生、低碳且环境友好的新能源解决方案。在现阶段众多新能源中,太阳能因其可再生性与绿色环保特性脱颖而出。库布齐沙漠地区具有丰富的太阳辐射资源、较长的日照时间和高比例的未利用土地,是建设光伏电站的理想场所^[3]。然而,沙漠地区的自然条件严酷,风沙活动频繁、土壤水分含量低、生态环境脆弱,且水土流失问题突出。光伏电站的建设虽为新能源开发提供了契机,但对当地原有生态环境造成了一定冲击,甚至可能加剧环境恶化。光伏电站大规模机械化建设导致地表扰动严重,如挖填、堆弃和碾压等活动对土壤结构造成破坏^[4]。此外,光伏板架设后,由于特殊的倾斜角度改变了原有气流场,造成阵列区土壤侵蚀与积沙加剧,为光伏电站的稳定运行带来隐患^[5]。

在此背景下,亟需采取生态恢复措施和植被重建手段来防治沙害。近年来兴起的“光伏+治沙”模式,通过结合光伏发电与植被恢复的复合生态治理

方法,成为沙漠地区新能源开发与生态治理的一种创新路径^[6-7]。研究^[8-9]表明,植被措施是防治土壤风蚀最有效、最持久且最经济的手段。植被通过降低地表风速、增加地表粗糙度,不仅能够减轻风沙活动、增强土壤抗侵蚀能力,还能提升土壤肥力。植被的恢复与重建对改善土壤理化特性具有重要作用,例如植物根系交织优化土壤结构,生物结皮的形成进一步增强土壤稳定性与抗侵蚀能力。此外,土壤水分作为植物生长的重要限制性因子,对于干旱荒漠区的植被恢复、土壤侵蚀防治及小气候调节等过程有着重要影响^[10]。研究^[11-13]表明,不同植被类型及生长环境(如地形、季节)会显著影响土壤水分的分布特征。例如,对晋西黄土区和腾格里沙漠的研究均发现,植被分布显著影响土壤水分的时空分布规律,且土层深度的增加会削弱降水对土壤水分的影响。

基于此,本研究选取内蒙古鄂尔多斯市杭锦旗独贵塔拉镇大型光伏电站内4种人工恢复植被措施[羊草(*Leymus chinensis*)、甘草(*Glycyrrhiza uralensis*)、油蒿(*Artemisia ordosica*)、花棒(*Hedysarum scoparium*)]为研究对象(见表1),监测光伏板间与板

下 0—100 cm 土壤水分的动态变化,并以未采取植被恢复措施的裸地作为对照(CK)。通过比较不同植被恢复措施下的土壤水分特征,结合光伏电站内部不同位置的差异,探讨不同植被类型对土壤水分的影响

规律。本研究旨在为光伏电站运维期植被恢复措施的效果评估提供数据支撑,为防治板间次生沙害及实现光伏电站与沙漠生态系统的可持续共生提供理论依据与科学参考。

表 1 库布齐沙漠杭锦旗光伏电站内 4 种植物基本特征

Table 1 Basic characteristics of 4 planted vegetation at photovoltaic power station in Hangjin Banner, Kubuqi Desert

| 植物种类 | 种植时间 | 盖度/% | 冠幅/cm | 株高/cm | 地径/cm | 土壤容重/ ($g \cdot cm^{-3}$) | 土壤孔隙度/ % |
|------|--------|------|--------|-------|---------------|--------------------------------|-------------|
| 羊草 | 2019 年 | 10 | | 67 | 2.1 ± 0.2 | 1.48 | 25 |
| 甘草 | | 42 | | 13 | 1.6 ± 0.2 | 1.59 | 23 |
| 油蒿 | | 17 | 110×95 | 77 | 1.8 ± 0.4 | 1.62 | 19 |
| 花棒 | | 79 | 81×70 | 110 | 2.4 ± 0.6 | 1.60 | 21 |

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于库布奇沙漠,为中国第七大沙漠,行政区隶属于内蒙古自治区鄂尔多斯市杭锦旗。试验样地位于独贵塔拉镇亿利 200 WP 光伏园区,占地面积 6.67 km^2 ,地理坐标为 $37^{\circ}20' - 39^{\circ}50'N$, $107^{\circ}10' - 111^{\circ}45'E$ 。气候类型为温带大陆性气候,气候干燥且少雨,年平均降水量 258.3 mm ;气温日较差、年较差大;大风天气多集中在春季,极易发生风蚀,全年大风日数 30~40 d;土壤类型以风沙土为主,极少地区有栗钙土与草甸土;部分地区长有沙米 (*Agriophyllum squarrosum*)、四翅滨藜 (*Atriplex canescens*)、梭梭 (*Haloxylon ammodendron*)、猪毛菜 (*Salsola collina*)、芦苇 (*Phragmites australis*) 等植物。

试验地 2023 年冬季至早春(1—3 月)为明显旱季,几乎无降水记录(图 1)。4 月和 5 月降水量出现少许的增长,分别为 6 mm 和 18 mm ,整体上仍然保持在一个较低水平。进入夏季,降水情况发生显著变化,6 月和 7 月降水量分别为 24 mm 和 28 mm 。8 月维持这种增长的趋势,降水量为 14 mm ,尽管相较于前两个月有所回落,但仍处于全年的一个较高点。9 月,降水量出现一个跳跃式的增长,达到 58 mm ,较前期显著增加。10 月为全年降水峰值期,降水量高达 90 mm ,这一异常高值可能与秋季锋面活动或局地气候系统密切相关。至 11 月,随着天气逐渐变冷,降水量急剧减少(9 mm)。研究区内的降水模式呈现出明显的季节性变化,主要集中在夏末到秋季,尤其是 10 月,这对当地的农业、水资源管理和生态系统有着重要影响。

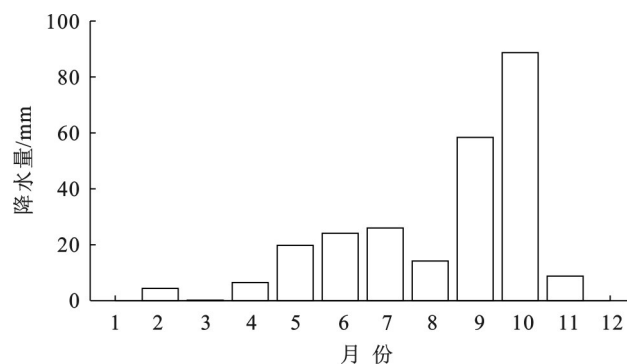


图 1 库布齐沙漠杭锦旗光伏电站 2023 年不同月份降水量
Fig.1 Rainfall in different months at photovoltaic power station in Hangjin Banner, Kubuqi Desert in 2023

1.2 研究方法

1.2.1 样品的采集

试验样地设在 2016 年投入运营的亿利生态光伏区三期(100 MW)固定式光伏电站内。光伏电板呈东西向排列(图 2),朝南倾斜,每列由 12 块电板组成,每块电板包含 34 块电池,板面尺寸为 $400 \text{ cm} \times 800 \text{ cm}$,倾斜面与地面的水平夹角为 36° ,光伏电板前沿距地面 50 cm ,板后沿边缘距地面的垂直距离为 300 cm ,南北方向相邻电板间距为 900 cm ,东西方向相邻电板的行道宽度为 110 cm 。

试验于 2023 年生长季(7 月 6 日)进行,选择杭锦旗采取植被恢复措施的光伏电站内进行土样采集工作。采样前后一周无降雨,分别在光伏电板阵列的迎风侧、背风侧与阵列腹地选取 3 排平行的光伏电板作为研究区域。选取研究区内无光伏电板遮挡无植被措施区作为对照(CK),分别在板后沿、板下呈东西方向布设 3 条 50 m 长的样线(样线 1, 2, 3),在每条样线上以 10 m 为间隔打 3 个 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 的样方。在每个样方内,分别选取板间、板下、对照 9 株形态相似,生

长均一的同一种植物,并在植物样方内0—100 cm范围进行土壤的取样工作,土壤取样在样方内采用五点法进行,分别对0—10,10—20,20—30,30—60,60—

100 cm分5层取样,每层采用规格为60 mm×60 mm的铝盒与100 cm³的环刀各取3次混合土样,土壤取样完成后在野外立即用0.01 g电子天平称取土样鲜重。

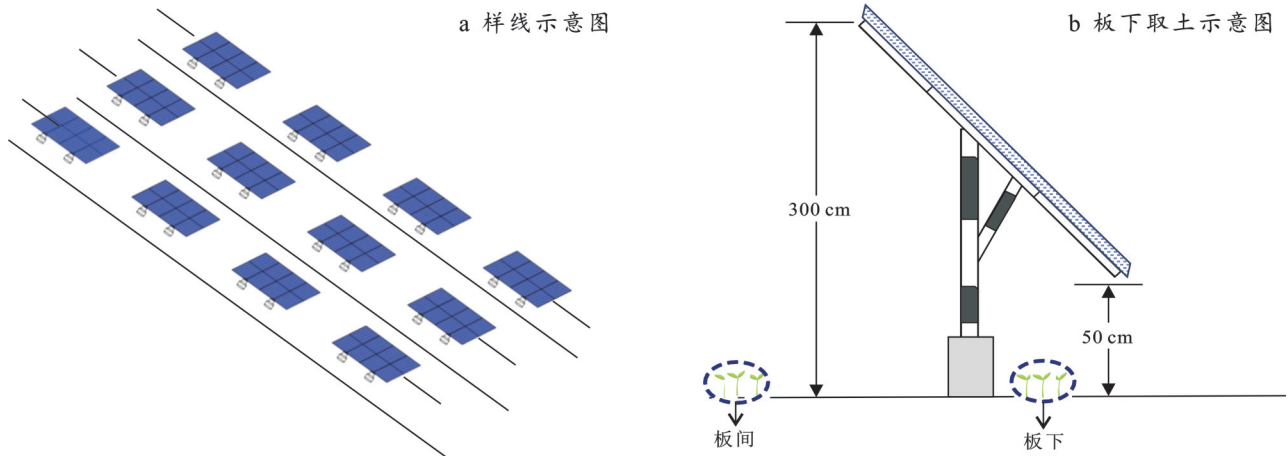


图2 土样取样示意图

Fig.2 Schematic diagram of soil sampling

1.2.2 样品的测定

土壤含水率和容重采用烘干法进行测定^[14],在土壤0—100 cm各个土层用环刀(m_0)进行采集,并用胶带密封好,进行称重记为 m_1 ,再带回实验室用烘箱烘干至恒重,记为 m_2 ,计算公式如下

$$\text{土壤含水率}(\%) = \frac{m_2 - m_0}{V} \quad (1)$$

$$\text{土壤容重}(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}) = \frac{m^1 - m^2}{m^2} \quad (2)$$

变异系数计算公式为^[15]

$$C_v = \frac{S}{V} \quad (3)$$

式中: C_v 为变异系数; S 为标准差; X 为平均土壤含水量; V 为环刀的体积(cm^3)。

土壤贮水量^[16]公式为:

$$D_i = \theta \times H \times \frac{\rho_b}{\rho_s} \times 0.1 \quad (4)$$

式中: D_i 为土壤贮水量(mm); θ 为某一厚度土层内的土壤含水量(%); H 为土层厚度(cm); ρ_b 为土壤容重(g/cm^3); ρ_s 为土壤水分密度(g/cm^3)。

田间持水量采用环刀法测定,即将取回的土样在水中浸泡24 h,称取饱和土质量,将饱和土样置于沙盘静置12 h,使重力水完全排除,放入烘箱中在105 °C下烘至恒重,待冷却后称取烘干土质量。田间持水量^[17]计算公式为:

$$F = \frac{W_1 - W_2}{W_2} \times 100\% \quad (5)$$

式中: F 为田间持水量(%); W_1 为饱和土质量(g);

W_2 为烘干土质量(g)。

土壤贮水亏度^[18]计算公式为:

$$\text{DSW}_i = \frac{F_i - D_i}{F_i} \times 100\% \quad (6)$$

式中: DSW_i 为土壤贮水亏度; F_i 为田间持水量(mm); D_i 为土壤实际贮水量(mm)。

1.2.3 统计分析

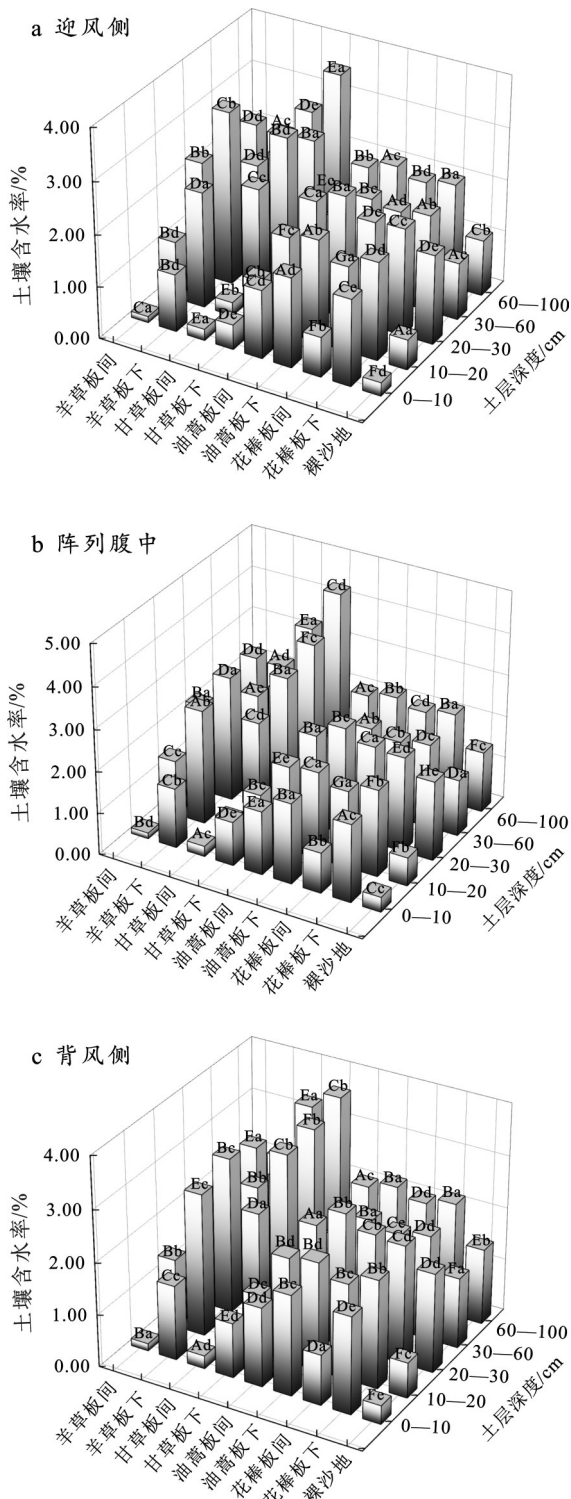
采用Excel 2021和Origin 2024软件对数据进行整理、分析以及图表的绘制工作,使用SPSS 25软件对数据进行计算与验算。

2 结果与分析

2.1 不同植物措施下的土壤水分特征

由图3可知,土壤含水率受土层深度、植物恢复措施及覆盖方式(板间与板下),以及风向位置影响显著,不同植物恢复措施不同部位也表现出差异性($p < 0.05$)。研究区内4种植物恢复措施相较于裸沙地(CK)均显著提高土壤含水量($p < 0.05$),各部位不同土层之间差异明显($p < 0.05$)。不同植物恢复措施中,土壤含水率在表层(0—10 cm)最低(0.12%~1.87%),在深层(60—100 cm)最高(1.88%~4.52%)。在0—100 cm土层范围内,不同风向位置的平均土壤含水率分别为阵列腹中1.97%~3.30%,迎风侧1.43%~2.12%,背风侧1.49%~2.26%。平均土壤含水率表现为油蒿(2.09%)>羊草(2.08%)>甘草(2.06%)>花棒(1.98%)。不同植物土壤含水率的垂直分布特征表现出均一性,均呈现随土层深度增加而波动上升的趋势。板下的土壤含水率显

著高于板间区域($p < 0.05$)。这种空间异质性主要归因于3个方面。



注:图中大写字母表示不同植物种不同部位在同一高度差异显著($p < 0.05$);小写字母表示同一植物种同一部位在不同高度差异显著($p < 0.05$)。下同。

图3 不同植物恢复措施不同部位土壤水分特征

Fig.3 Characteristics of soil moisture in different parts with different vegetation restoration measures

①植被冠层的遮荫效应有效降低地表太阳辐射强度,从而减少土壤水分的蒸发损失;②植物凋落物形成的覆盖层进一步抑制土壤水分的散失;③植物根系分布及其分泌物可能改善土壤结构,增强了土壤的持水能力。

由表2可知,不同植物恢复措施土壤含水量垂直变异系数处于0.21~0.65之间。具体来看,板间甘草措施在0—100 cm深度范围内土壤含水率垂直变化幅度最大,其含水率为0.22%~4.52%,变异系数0.65,板下羊草措施土壤含水率为0.12%~4.81%,其变异系数为0.49,仅次于板间甘草措施。相比之下,油蒿与花棒不同部位的土壤含水率变化相对较小,变异系数分别为0.21和0.22。

表2 不同植物土壤水分垂直水分特征
Table 2 Vertical water characteristics of soil moisture under different vegetation

| 植物种 | 最小值/ % | 最大值/ % | 平均值/ % | 标准差 | 垂直变异系数(C_v) |
|-----|-----------|-----------|-----------|------|-----------------|
| 羊草 | 0.12 | 4.81 | 2.089 | 1.03 | 0.49 |
| 甘草 | 0.22 | 4.52 | 2.06 | 1.35 | 0.65 |
| 油蒿 | 1.32 | 3.22 | 2.09 | 0.45 | 0.22 |
| 花棒 | 0.77 | 2.66 | 1.99 | 0.42 | 0.21 |

2.2 不同植物措施下土壤贮水量分布特征

光伏电站内不同植物恢复措施土壤贮水量分布如图4所示。光伏电站内不同植物恢复措施对土壤贮水量空间分布具有明显影响。研究表明,4种植物措施下的土壤贮水量(16.72~51.55 mm)均显著高于对照裸沙地(CK)($p < 0.05$),且表现出明显的空间异质性。具体表现为:阵列腹中>背风侧>迎风侧、光伏板下部位>光伏板间部位,垂直剖面上,各处理土壤贮水量均随土层加深呈递增趋势。在0—10 cm范围内,油蒿样地的总体贮水量显著高于其他4种样地($p < 0.05$),光伏电站内各观测点的土壤贮水量均高于2 mm;10—20 cm范围内,羊草样地的贮水量提升效果最显著($p < 0.05$),各样地平均提升了2.27 mm,甘草、油蒿、花棒样地提升效果不显著($p > 0.05$);20—30 cm土层甘草样地的土壤贮水量提升最为显著,平均增加3.08 mm;整个研究区内提升量最高的出现在30—60 cm土层,其中甘草样地提升最显著,板下部位提升最为明显,其他样地也相较于上一土层均有显著提升($p < 0.05$),研究区甘草样地的贮水量在60—100 cm达到最大值(27.12 mm)。不同植物措施下土壤贮水量的变异性也存在差异,随土层深度变化土壤贮水量变异性最大的为甘草,其变异

系数达0.65,其次是羊草,油蒿与花棒样地变异性较小,表现较为稳定。

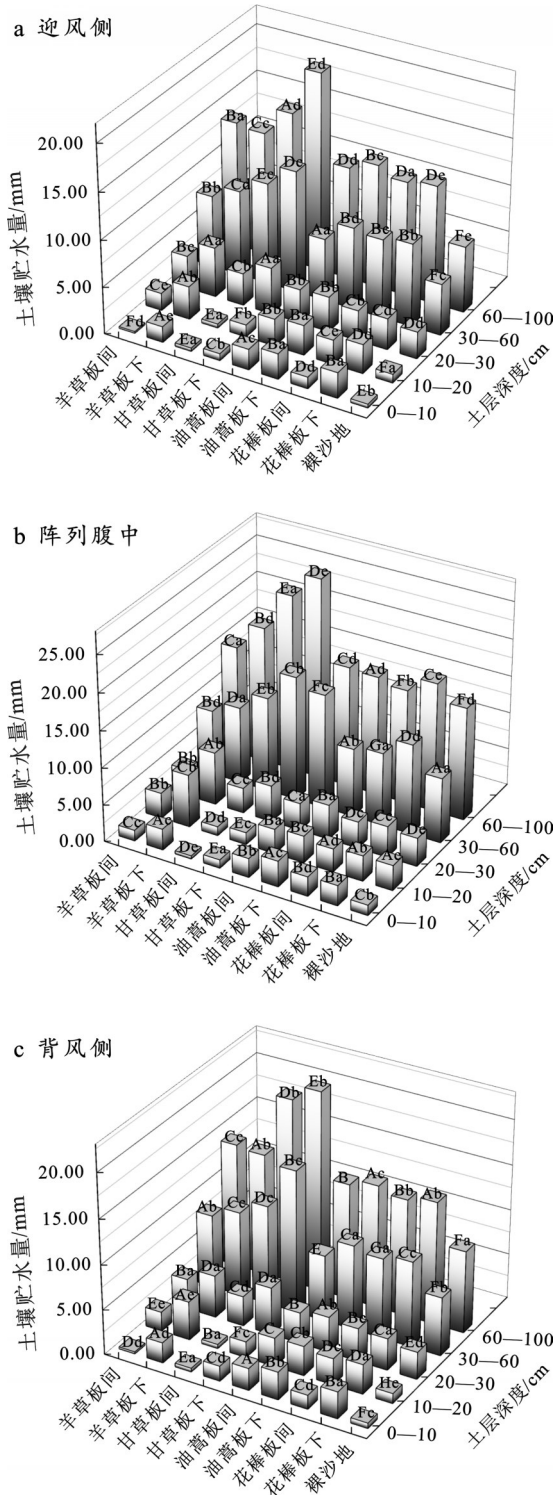


图4 不同植被恢复措施土壤贮水分布

Fig.4 Distribution of soil water storage for different vegetation restoration measures

从光伏电站不同部位土壤贮水特征的空间分异来看,研究区土壤贮水量受风蚀程度和微环境差异的显著影响,在土壤贮水量方面也表现出差异性,遭

受较强的风蚀作用,加之光伏板遮荫效果相对较弱,导致该区域土壤贮水量低于其他部位,在迎风侧4种植物措施相较于裸沙地贮水量分别提高12.95,19.25,12.61,12.38 mm,阵列腹中部位的土壤贮水量为研究区最高,在30 cm及以下土层表现得更为明显,其中阵列腹中部位的甘草贮水量为整个研究区内最高。背风侧部位的土壤整体贮水量介于迎风侧与背风侧之间,背风侧部位的油蒿样地在0—30 cm范围内土壤贮水量表现最为稳定。

2.3 不同植物措施土壤贮水亏缺特征

光伏电站内不同植物恢复措施土壤贮水亏缺度如图5所示。总体呈现:裸沙地(78.81%)>花棒(69.00%)>羊草(68.95%)>油蒿(67.23%)>甘草(63.11%)。研究区土壤贮水亏缺度随土层深度增加呈递减趋势,变化范围为3.14%~99.03%。其中,迎风侧羊草样地在0—10 cm土层的亏缺度达到最大值(99.03%),而甘草样地在阵列腹中板下部位60—100 cm土层的亏缺度最小,为3.14%。从空间分布来看,土壤贮水亏缺度呈现阵列腹中<背风侧<迎风侧,其中甘草样地在3个部位整体土壤贮水亏缺度均要小于其他3种措施与CK,60—100 cm范围内也均最小;羊草样地在0—10 cm范围内土壤贮水亏缺度最大。板间部位的土壤贮水亏缺度整体要高于板下部位,CK在3个部位均要高于其他几种植物恢复措施,这种差异在20 cm以下土层尤为显著。

3 讨论

土壤水分是生态系统中的重要组成部分,在干旱的沙漠中,土壤水分是重要的生态因子,对于植物的生长过程起着至关重要的作用,本研究结果显示,光伏电站内的4种植物恢复措施相较于站内裸沙地均有效提高土壤水分,这与李昂等^[19]的研究结果表现出差异性,其研究结果显示植被能够显著降低表层土壤的土壤含水率。造成与本研究结果相斥的原因是研究区内建设环境的差异,光伏板的特殊倾斜形态特征、光伏板的遮荫作用与特殊倾斜角度会有效降低植被的蒸腾作用,能够提高土壤水分含量。翟波等^[20-21]通过对内蒙古中部草原区光伏电站内土壤水分研究发现,光伏电站的建设会显著提高土壤贮水量,其中板前沿增幅最为明显,光伏板架设会对当地的大气温湿度与露点温度产生影响,并且光伏板的架设会显著降低土壤的蒸散量,在0—20 cm土层的作用更为明显。此外,植被盖度也是影响土壤水分的重要因素,张铁军^[22]的研究结果表明,腾格里沙漠东北缘飞播植物群落土壤水分与植被的盖度

呈显著正相关关系。本研究区内的土壤水分含量均表现出随土层的增加而增加的趋势,与李军等^[23]的研究结果一致,其研究结果表明同尺度下,植被措施下土壤水分含量均值随土层深度增加呈显著升高趋势。在垂直方向上,土壤水分含量随土层深度增加呈升高趋势;在水平方向上,随距树干基部距离增加,坡顶土壤水分含量呈升高趋势。研究区内0—30 cm范围内土壤水分含量相对较低,这对于植被的初期恢复建设带来很大的影响,这与刘源等^[24]的研究结果表现出一致性,其研究表明库布齐东段典型人工固沙林(油蒿林、沙柳林和柠条林)土壤含水量平均为6.39%~8.29%,雨季前在5%左右。

由此可见,该研究区土壤含水率呈现出较低的状态,尤其是在表层(0—30 cm)范围内,土壤含水率不足5%。而土壤含水量作为影响植物生长的关键

要素之一。如此低的含水量状况对区域植被的恢复进程以及其稳定维持均产生了极大的限制作用,进而在一定程度上影响了整个区域生态系统的健康发展与平衡。同时,地形因素对土壤水分的分布也有较大影响,研究区内迎风侧部位的土壤水分各项指标均要小于其他部位,张晓玉等^[25]对古尔班通古特沙漠半固定沙丘上不同微地貌类型和不同深度土壤水分以及土壤水分和地形—植被因子之间的分布特征进行研究发现,与植被因子相比,地形因子对不同深度土壤水分的影响更为显著,其中坡度和高差与土壤水分含量呈负相关关系,而坡向与土壤水分含量呈正相关关系。

基于本研究结果并结合已有研究结论,光伏电站不同植物措施下土壤水分的差异性主要受多因素综合作用的影响。

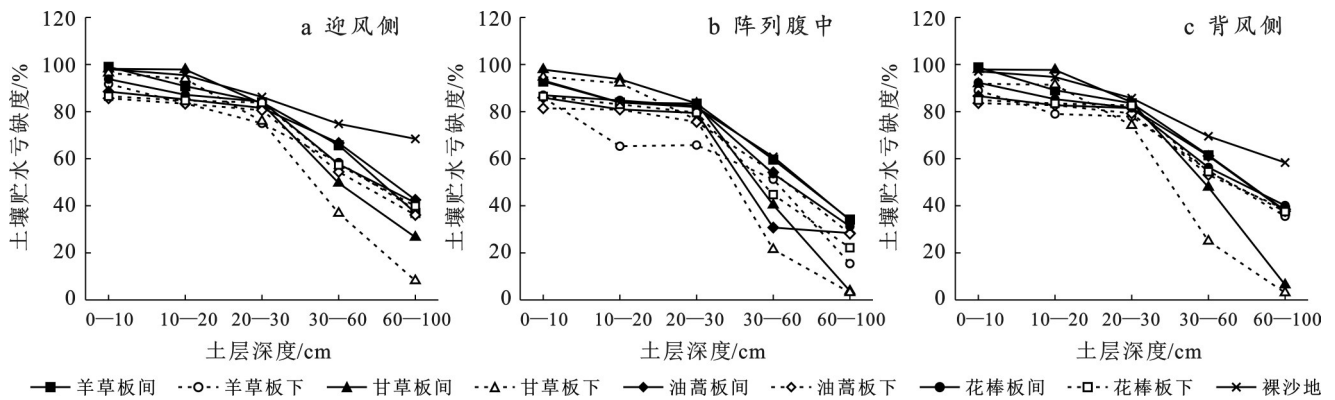


图5 光伏电站不同植物措施下土壤贮水亏缺度

Fig.5 Soil water storage deficit under different vegetation measures in photovoltaic power plants

土壤贮水能力的大小对生态群落的恢复与重建工作有着深远且关键的影响。适宜的土壤贮水能力能够为植物种子萌发、幼苗生长等提供必要的水分条件,保障群落演替进程的顺利推进。土壤贮水能力更是决定了引入物种能否成功定殖、群落结构能否逐步趋于合理的关键要素。本研究的4种植物恢复土壤的贮水能力有所提升,贮水亏损度有大幅度下降。臧凯旋等^[26]研究结果表明,植被会显著改变土壤的贮水量,并且不同植被类型会导致贮水量之间存在差异性。张日升等^[27]的研究也验证这一结果,对樟子松人工林、灌木林、半固定沙地、草地、农田0—150 cm土层水分进行监测发现,不同土地利用类型之间的土壤储水能力表现出明显的差异性,其中降雨量为各土地利用类型土壤储水量的主要影响因素,但由于不同土地利用类型的植被类型存在较大的差异,导致土壤储水量季节变化特征出现较大的差异。植物的种类也是影响这一因子的主要因素,本研究区内的4种植物在不同土层之间表现出多

样的贮水能力,其中油蒿在0—30 cm范围内的表现强于其他3种植物。本研究结论与于晓娜等^[28]研究结果存在一定的差异性,其研究结果显示在毛乌素沙地,与流动沙地相比,半固定沙地和具生物结皮油蒿群落0—80 cm土层的土壤储水能力没有明显改变,但油蒿+本氏针茅群落的土壤储水能力增加近30 mm,在夏季和秋季得到持续补给。本研究中,由于光伏的遮荫作用结合油蒿本身的枝叶茂密与0—20 cm范围内根系发达等特点,造成土壤含水率高于其他几种植物措施。甘草因其独特的生理结构^[29],对于30 cm及以下的土壤含水量、土壤贮水能力、土壤贮水亏损度影响较大,表现出良好的持水性与增加土壤肥力的潜能。贾瑞庭^[30]的研究结果证实了这一结论。他通过对光伏电站的几种植物恢复措施下的土壤理化性质进行研究发现,甘草措施可以有效提高土壤的持水能力,并且在提高土壤肥力方面展现出潜力。因此研究区内应该结合各植物的优点,采取多植物综合治理恢复模式。

近几年来沙漠地区大力发展光伏,大面积的建设光伏为当地原有的生态环境带来了不小的冲击,作为典型的干旱地带,伴随着全球气温的升高、降水量降低,蒸腾作用加强等多方面因素的影响,导致光伏电站内出现更严重的二次沙害问题^[31]。在光伏电站内种植植物作为一种有效的抗风蚀手段,不仅可以有效提高地表的粗糙度,还能提高土壤含水率、土壤养分,使土壤向着细粒化的趋势发展^[32-33]。研究区内种植的几种植物均为当地筛选的适生植物种,油蒿与甘草是药材,花棒可以嫁接肉苁蓉,羊草可作为家畜的饲料,在提高土地利用的同时,还可以提高当地的收入并提高就业率。基于本研究结论,在干旱荒漠区构建人工固沙植物系统过程中,应充分考虑物种水分消耗策略以及植物与土壤水分分布特征之间的相互关系,选择适宜的物种以及合理的林分搭配模式,以促进干旱荒漠区人工固沙系统水—植被协调可持续发展,建议库布齐沙漠采取植被的光伏电站在迎风侧选择油蒿+花棒的植物配置模式,在受风蚀较严重的基座与板下部位种植羊草+甘草的综合配置模式,背风侧与板间种植茎叶较为粗大且耐掩埋的花棒。以此来应对严重的次生沙害问题,为沙区光伏电站的稳定运行提供理论依据与技术支撑。

4 结论

(1) 库布齐沙漠光伏电站内4种植物种植措施土壤含水率相较于裸沙地均有所提升。0—100 cm深度土壤含水率为0.12%~4.52%,平均含水率表现为:油蒿(2.09%)>羊草(2.08%)>甘草(2.06%)>花棒(1.98%),光伏站内不同部位含水率呈现:阵列腹中>背风侧>迎风侧,油蒿与花棒的变异系数较小,较稳定;甘草在30 cm深度以下时土壤含水率表现较好。

(2) 不同植物恢复措施的土壤总贮水量在16.72~51.55 mm之间,土壤贮水量垂直变化趋势与土壤含水量相近,均随土层深度的增加而增加,站内不同部位土壤贮水量也与土壤含水量变化趋势表现出一致性。整体上各位置板下部位高于板间部位;油蒿与花棒在0~30 cm范围内贮水能力更好,甘草与羊草在30 cm以下时相对更好。

(3) 研究结果表明,土壤贮水亏缺度与土壤贮水量之间表现出逆向相关性。具体表现为:裸沙地(78.81%)>花棒(69.00%)>羊草(68.95%)>油蒿(67.23%)>甘草(63.11%)。土壤贮水亏损度表层最为严重,板下<板间,阵列腹中<背风侧<迎风侧。

参考文献(References)

- [1] 刘永杰,杨琴,苏军虎,等.光伏发电与“三北”工程建设协同发展分析[J].中国草地学报,2024,46(12):122-129.
Liu Yongjie, Yang Qin, Su Junhu, et al. Analysis of coordinated development of photovoltaic power generation and “three-north” project construction [J]. Chinese Journal of Grassland, 2024, 46(12): 122-129.
- [2] 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 Xiaowei, Wang Yunzheng, Huo Yi, 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.
- [3] 乔慧.光伏电站风沙运动特征及植被恢复对土壤的影响[D].内蒙古呼和浩特:内蒙古农业大学,2023.
Qiao Hui. Characteristics of wind-sand movement in photovoltaic power station and effects of vegetation restoration on soil [D]. Hohhot, Inner Mongolia: Inner Mongolia Agricultural University, 2023.
- [4] 杨世荣.库布齐沙漠光伏电站风沙运动及蚀积特征研究[D].内蒙古呼和浩特:内蒙古农业大学,2019.
Yang Shirong. Study on wind-blown movement and erosion characteristics of Kubuqi Desert photovoltaic power station [D]. Hohhot, Inner Mongolia: Inner Mongolia Agricultural University, 2019.
- [5] Meng Ruibing, Meng Zhongju, Cai Jiale, et al. The role of typical low vertical lattice sand barriers in regulating the airflow field on wind-eroded surfaces of photovoltaic power plants [J]. Frontiers in Environmental Science, 2024, 12: 1521144.
- [6] 永海.防沙治沙和风电光伏一体化工程的成效、挑战及对策:以阿拉善盟黄河“几字弯”攻坚战区为例[J].新西部,2024(11):72-75.
Yong Hai. Achievements, challenges and countermeasures of sand control and wind power photovoltaic integration project: Taking the “Jiziwan” tough battle area of the Yellow River in Alxa League as an example [J]. New West, 2024(11): 72-75.
- [7] 张宏伟,李发祥.立足“沙、戈、荒”大型风光电基地建设新能源供给消纳生态圈[J].农电管理,2024(8):18-20.
Zhang Hongwei, Li Faxiang. Building a new energy supply and consumption ecological circle based on the large-scale scenery and electricity base of “sand, Gobi and drought” [J]. Rural Power Management, 2024(8): 18-20.
- [8] 曹昱轩,李锦荣,杨旭,等.乌兰布和沙漠植被因子对风

- 沙活动特征的影响[J]. 中国沙漠, 2025, 45(2): 37-46.
- Cao Yuxuan, Li Jinrong, Yang Xu, et al. The impact of vegetation factors of three vegetation communities on aeolian sand factors in the Ulan Buh Desert [J]. Journal of Desert Research, 2025, 45(2): 37-46.
- [9] 周鑫, 田丽慧, 张登山, 等. 青海湖沙区不同植被防风固沙效益研究[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(8): 180-185.
- Zhou Xin, Tian Lihui, Zhang Dengshan, et al. Study on wind-prevention and sand-fixing benefits of different vegetation on the east coast dune of Qinghai Lake [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018, 32(8): 180-185.
- [10] 顾梦鹤, 谢泽慧, 王春晖, 等. 库布其沙漠8种防护林的土壤水分特征[J]. 草业科学, 2017, 34(12): 2437-2444.
- Gu Menghe, Xie Zehui, Wang Chunhui, et al. Soil moisture characteristics of eight types of shelter forest in the Kubuqi Desert [J]. Pratacultural Science, 2017, 34(12): 2437-2444.
- [11] 单燕, 索立柱, 王洁, 等. 黄土高原样带典型地貌类型坡面土壤水分分布特征及其差异[J]. 土壤, 2024, 56(3): 593-600.
- Shan Yan, Suo Lizhu, Wang Jie, et al. Distribution characteristics of soil water on slopes in typical landform types on Loess Plateau [J]. Soils, 2024, 56(3): 593-600.
- [12] 任鸿武, 汪星, 吕雯, 等. 宁南黄土丘陵区人工柠条林与苜蓿地土壤水分特征[J]. 水土保持研究, 2025, 32(2): 158-166.
- Ren Hongwu, Wang Xing, Lü Wen, et al. Soil moisture characteristics of artificial *Caragana korshinskii* Kom. woodland and *Medicago sativa* L. field in loess hilly area of southern Ningxia [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(2): 158-166.
- [13] 赵丹阳, 毕华兴, 侯贵荣, 等. 晋西黄土区典型林地土壤水分变化特征[J]. 水土保持学报, 2021, 35(1): 181-187.
- Zhao Danyang, Bi Huaxing, Hou Guirong, et al. Soil moisture dynamics of typical plantation in loess region of west Shanxi [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(1): 181-187.
- [14] 郑必昭. 土壤分析技术指南[M]. 北京: 中国农业出版社, 2013.
- Zheng Bizhao. Technical guide to soil analysis [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2013.
- [15] 图娜拉, 巴音青克乐, 莫日根, 等. 毛乌素沙地不同植被类型土壤水分特征研究[J]. 人民黄河, 2020, 42(增刊1): 63-64.
- Tu Nala, Bayin Qingkele, Mo Rigen, et al. Study on soil moisture characteristics of different vegetation types in mu us sandy land [J]. Yellow River, 2020, 42(Suppl. 1): 63-64.
- [16] 王彬, 于澎涛, 王顺利, 等. 祁连山区林地的土壤贮水量坡位响应[J]. 中国水土保持科学, 2016, 14(3): 101-108.
- Wang Bin, Yu Pengtao, Wang Shunli, et al. Response of soil water storage to slope position of forestland in Qilian Mountains [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2016, 14(3): 101-108.
- [17] 马博. 沙箱法测定土壤田间持水量实验研究与应用分析[J]. 陕西水利, 2023(8): 68-70.
- Ma Bo. Experimental study and application analysis on determination of soil field water capacity by sandbox method [J]. Shaanxi Water Resources, 2023(8): 68-70.
- [18] 王宁, 毕华兴, 孔凌霄, 等. 晋西黄土区不同密度刺槐林地土壤水分补偿特征[J]. 水土保持学报, 2019, 33(4): 255-262.
- Wang Ning, Bi Huaxing, Kong Lingxiao, et al. Soil water compensation characteristics of *Robinia pseudo-acacia* forestlands with different densities in the loess region of western Shanxi Province [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(4): 255-262.
- [19] 李昂, 张鸣, 张建, 等. 西北干旱灌溉区种植春小麦和牧草对耕地盐渍化的影响[J]. 水土保持通报, 2018, 38(3): 32-37.
- Li Ang, Zhang Ming, Zhang Jian, et al. Effects of growing spring wheat and forage grass on salinization of cultivated land in irrigated region of northwest China [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(3): 32-37.
- [20] 翟波, 高永, 党晓宏, 等. 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 Bo, Gao Yong, Dang Xiaohong, et al. Mechanism of photovoltaic power station on soil moisture and its impulse response in grassland region of central Inner Mongolia [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2022, 43(6): 49-56.
- [21] 翟波, 党晓宏, 陈曦, 等. 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 Bo, Dang Xiaohong, Chen Xi, et al. 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.
- [22] 张铁军. 腾格里沙漠东北缘飞播植物群落土壤水分特征研究[D]. 内蒙古呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023.
- Zhang Tiejun. Study on soil moisture characteristics of aerial seeding plant community in the northeast margin

- of tengger desert [D]. Hohhot, Inner Mongolia: Inner Mongolia Agricultural University, 2023.
- [23] 李军,王新军,贾宏涛,等. 古尔班通古特沙漠南缘干季土壤水分含量空间异质性[J]. 中国沙漠, 2016, 36(6): 1628-1636.
- Li Jun, Wang Xinjun, Jia Hongtao, et al. Multi-scale spatial heterogeneity of soil moisture in the south Gurbantunggut Desert during dry period [J]. Journal of Desert Research, 2016, 36(6): 1628-1636.
- [24] 刘源,段玉玺,王博,等. 库布齐东段典型人工固沙林土壤水分时空变化特征[J]. 西北林学院学报, 2021, 36(1): 1-8.
- Liu Yuan, Duan Yuxi, Wang Bo, et al. Spatial and temporal characteristics of soil moisture in typical sand fixation plantations in the eastern Hobq [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(1): 1-8.
- [25] 张晓玉,张定海,宁婷,等. 古尔班通古特沙漠土壤水分—地形—植被关系研究[J]. 草地学报, 2024, 32(5): 1548-1557.
- Zhang Xiaoyu, Zhang Dinghai, Ning Ting, et al. Study on the relationship between soil moisture, topography and vegetation in the Gurbantunggut Desert [J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(5): 1548-1557.
- [26] 臧凯旋,刘登强,刘广全,等. 陕北黄土区典型植被土壤水分亏缺特征[J]. 中国水土保持, 2024(5): 63-68.
- Zang Kaixuan, Liu Dengqiang, Liu Guangquan, et al. Characteristics of soil moisture deficit of typical vegetation in the loess region in northern Shaanxi [J]. Soil and Water Conservation in China, 2024(5): 63-68.
- [27] 张日升,凡胜豪,姜涛,等. 辽西北风沙区典型利用类型下的土壤水分变化特征[J]. 安徽农业科学, 2024, 52(23): 62-64.
- Zhang Risheng, Fan Shenghao, Jiang Tao, et al. Characteristics of soil moisture changes under typical utilization types in the windy and sandy areas of northwest Liaoning [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2024, 52(23): 62-64.
- [28] 于晓娜,李恩贵,黄永梅,等. 毛乌素沙地油蒿(*Artemisia ordosica*)群落土壤水分动态特征[J]. 中国沙漠, 2015, 35(3): 674-682.
- Yu Xiaona, Li Engui, Huang Yongmei, et al. Soil moisture dynamics of *Artemisia ordosica* communities in the Mu Us sandy land [J]. Journal of Desert Research, 2015, 35(3): 674-682.
- [29] 苗新生,马骥. 甘草及其近缘种种子微形态特征的研究[J]. 中药材, 2005, 28(4): 274-277.
- Miao Xinsheng, Ma Ji. Study on micromorphological characteristics of *Glycyrrhiza uralensis* Fisch and its related seeds [J]. Journal of Chinese Medicinal Materials, 2005, 28(4): 274-277.
- [30] 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]. 内蒙古呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021.
- Jia Ruiting. Influence of different vegetation restoration measures of PV power station in sandy area on soil physical and chemical properties [D]. Hohhot, Inner Mongolia: Inner Mongolia Agricultural University, 2021.
- [31] 唐国栋. 沙区光伏阵列地表形变规律及其动力学机制[D]. 内蒙古呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021.
- Tang Guodong. Study on the solar photovoltaic array surface geomorphology development characteristics and dynamic mechanism in desert area [D]. Hohhot, Inner Mongolia: Inner Mongolia Agricultural University, 2021.
- [32] 白永会,查轩,吴伟成,等. 植被恢复花岗岩红壤土壤颗粒组成及土壤养分储量特征[J]. 水土保持研究, 2024, 31(3): 179-186.
- Bai Yonghui, Zha Xuan, Wu Weicheng, et al. Characteristics of soil particle composition and soil nutrient storage in vegetated granite red soil [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(3): 179-186.
- [33] 何强强,毛东雷,朱文煜,等. 新疆策勒绿洲-沙漠过渡带不同植被下的沙丘形态特征及沉积物粒度分析[J]. 水土保持学报, 2022, 36(6): 70-81.
- He Qiangqiang, Mao Donglei, Zhu Wenyu, et al. Morphological characteristics and sediment particle size analysis of sand dunes with different vegetations in the Cele oasis-desert ecotone, Xinjiang [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(6): 70-81.