

光伏系统对典型草原露天煤矿排土场 生态修复效果的影响*

王逸飞¹,王鑫厅^{1,2},何瑞敏³,白雪¹,张博¹,包道日娜⁴,侯亚丽⁴,薛睿哲¹

(1. 内蒙古工业大学资源与环境工程学院/环境污染控制与修复内蒙古自治高等学校重点实验室,呼和浩特 010051; 2. 内蒙古伊泰京粤酸刺沟矿业有限责任公司,内蒙古鄂尔多斯 010300; 3. 国能神东煤炭集团有限责任公司,内蒙古鄂尔多斯 017209; 4. 内蒙古工业大学能源与动力工程学院,呼和浩特 010080)

摘要:光伏技术在清洁能源的可持续发展中发挥着重要作用。光伏系统的建立不仅占用大面积的土地资源而且会对生态系统产生影响。在我国干旱半干旱地区,太阳能资源丰富,并且存在大量的矿区废弃地,如果这些矿区废弃地在生态修复过程中耦合光伏系统,会对生态修复产生怎样的影响?这一问题的回答对于探讨干旱半干旱地区矿区废弃地生态修复耦合光伏系统新模式具有重要意义。因此,本研究选择地处于干旱半干旱地区的典型草原露天煤矿外排土场建立光伏系统,并进行生态修复,选择光伏板下区域(PV)和光伏板外的对照区域(CK),探讨光伏系统对矿区生态修复效果的影响。结果表明:(1)光伏系统的建立使得光伏板下区域的土壤含水量高于对照区域;(2)光伏板下区域群落盖度达39.5%,显著高于对照区域的22.7%($P < 0.05$);(3)光伏板下区域地上总生物量显著高于对照区域($P < 0.05$),其中,紫花苜蓿(*Medicago sativa*)的贡献最大;(4)除狗尾草(*Setaria viridis*)及灰绿藜(*Oxybasis glauca*)外,光伏板下区域主要物种的高度均高于对照区域,尤其是紫花苜蓿及米氏冰草(*Agropyron michnoi*)显著高于对照区域($P < 0.05$);(5)光伏板下区域植物含水量高于对照区域,其中,米氏冰草、狗尾草及虫实(*Corispermum huanghoense*)的差异尤为显著($P < 0.05$);(6)光伏板下区域与对照区域物种丰富度相似,但光伏板下区域的生物多样性指数高于对照区域,光伏板下区域具有更高的生物多样性。可见,干旱半干旱地区矿区生态修复耦合光伏系统,一方面拓展了太阳能资源的开发利用,另一方面显著提高了矿区生态修复效果,为干旱半干旱地区矿区生态修复提供了新范式。

关键词:光伏系统;干旱半干旱地区;矿区生态修复;植被恢复;土壤含水量

中图分类号:Q149; X171 **文献标志码:**A

全球经济的快速发展使得煤炭、石油和天然气等传统能源被大量消耗,传统能源的加速消耗引发了全球气候变暖等一系列环境问题。在此背景下,为应对全球变化、实现碳达峰碳中和的“双碳”目标,我国能源企业纷纷转向开发清洁能源,尤其是太阳能和风能等可再生能源^[1]。太阳能光伏(PV)技术作为可再生能源技术的重要组成部分,具有构建未来清洁、可靠、可扩展且经济高效电力系统的潜力^[2-4]。因此,我国在“双碳”目标和能源安全的驱动下,以光伏为主的可再生能源发展势头强劲。随着我国光伏产业的不断发展,截至2024年12月,太阳能发电装机容量达到887 GW^[5]。

* 收稿日期:2025-06-24; 修回日期:2025-07-29

基金项目:内蒙古自治区科技计划项目(2022YFHH0048);鄂尔多斯市科技重大专项(ZD20232317);自治区直属高校基本科研业务费专项(JY20250088);鄂尔多斯市重点研发计划项目(YF20240047)

作者简介:王逸飞(1997—),男,河北张家口人,2023级硕士研究生。E-mail: Wyf101897@163.com

通信作者:王鑫厅(1978—),男,内蒙古赤峰人,教授,博士。主要从事环境生态学研究。E-mail: wang_x_t2002@163.com

尽管太阳能光伏系统这样的可再生能源因其低污染和低排放的特征,被认为是清洁能源,然而,其可能引发的生态环境问题依然值得关注。研究表明光伏系统会对生态环境产生影响,归纳起来主要表现在以下四个方面。第一,对土地资源的利用有影响,光伏系统不仅占用大面积的土地资源,改变了土地利用方式,而且在建设初期会破坏大面积原生植被和土壤^[6-8]。第二,对微气候有影响,光伏系统改变了水分分配,降低了光伏系统覆盖区域的温度和风速,减少了光伏系统覆盖区域的有效辐射和蒸发量^[9]。第三,对植被的生长有影响,光伏系统能够影响微气候,从而间接影响植被的生长,导致群落生物量、盖度及物种多样性等发生改变。比如,在降雨量少、蒸发量高的干旱地区,光伏系统对群落生物量及物种多样性等产生积极影响^[10-12];而在降雨量充沛的湿润地区,光伏系统则对群落生物量和物种多样性等产生不利影响^[13-14]。第四,对动物生存活动有影响,光伏电站使得动物栖息地破碎化,进而降低栖息地质量、改变动物迁徙路线,这可能会导致敏感物种和濒危物种减少或丧失^[15-17]。

内蒙古地区地域辽阔且矿产资源丰富,矿山开采致使矿区大面积土地裸露,由于内蒙古地区大部分矿区地处干旱半干旱气候区,矿区废弃地的生态环境变得更加脆弱^[18]。矿区废弃地的生态修复已经成为该区域需要解决的重要生态环境问题,同时,土地利用方式的转变对实现此类土地资源的充分利用提出了新的挑战。

内蒙古地区的矿区废弃地大多处在太阳能资源较丰富的区域,具有很高的太阳能开发潜力^[19],而且研究表明,干旱半干旱地区原生地表建设光伏系统,由于光伏板的降温增湿作用能显著促进植物的生长发育,群落盖度、生物量及物种多样性均有不同程度的提高^[9,12]。基于此,在内蒙古矿区废弃地建设光伏系统提供了一种全新的尝试,一方面可以节约大量的自然土地资源,另一方面可能会促进矿区废弃地的植被恢复。

因此,本研究选择在内蒙古干旱半干旱地区的矿区废弃地,建设光伏系统并进行生态修复,旨在探究太阳能光伏系统对于干旱半干旱地区矿区废弃地生态修复效果的影响,为干旱半干旱地区矿区生态修复耦合太阳能光伏系统,这一新模式提供范式。

1 材料与方法

1.1 研究区域与光伏系统

本研究在内蒙古自治区锡林郭勒胜利能源分公司露天煤矿排土场展开。该煤矿位于锡林浩特市宝力根苏木,地理坐标为43°98'N、116°01'E。该区域气候类型为中温带半干旱大陆性季风气候,年均温度3.4℃,年均降水量290.5mm,年均蒸发量1241.2mm,每年7—9月为雨季。土壤类型为栗钙土,植被类型为大针茅(*Stipa grandis*) + 羊草(*Leymus chinensis*)群落,其中,大针茅与羊草是群落的建群种,其他主要物种有米氏冰草(*Agropyron michnoi*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)等。

光伏电站建立在该露天煤矿的外排土场,占地面积9hm²,电站装机容量6MW,电站于2022年12月并网发电并于次年6月验收。2023年6月对光伏电站场地进行植被恢复,选择的恢复物种为紫花苜蓿(*Medicago sativa*),播种量为375kg/hm²,播种方式为播种机播撒,播种前在排土地表覆盖30~50cm原生表土。

1.2 试验设计与数据测定

在本研究中,为了系统探讨干旱半干旱矿区光伏系统对生态恢复效果的影响,于2024年8月中旬在上述光伏电站设置了两种不同区域(图1):完全遮光的光伏板正下方区域(PV)以及无遮光的光伏板列间对照区域(CK),每个区域随机布置12个独立的1m×1m样方开展土壤含水量测定和群落调查。

1.2.1 土壤含水量的测定

在每次样方调查完,用土钻(直径7cm)在每个样方中随机取样一次,分别将0~10cm、10~20cm、20~30cm、30~40cm、40~50cm、50~60cm、60~70cm、70~80cm以及80~90cm深度的土壤样本

装入干净的铝盒(m_0)内称重(m_1),再将其带回实验室放入烘箱在 105 °C 下烘干至恒重,待铝盒冷却至室温后再次称重(m_2),计算土壤的含水量(SWC),公式如下:

$$SWC(\%) = (m_1 - m_2) / (m_2 - m_0) \times 100\%。$$

式中: m_0 为铝盒的质量(g); m_1 为烘干前铝盒与土壤的质量(g); m_2 为烘干后铝盒与土壤的质量(g)。

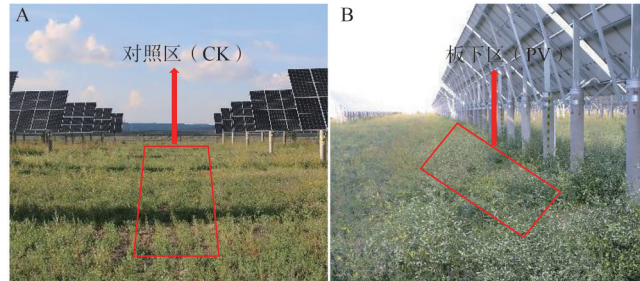


图1 光伏板下区域与对照区域的取样示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sampling in the photovoltaic panel area and control area

1.2.2 群落的调查

主要测定群落的盖度、地上总生物量、物种多样性,以及各物种的株高、地上生物量、植物含水量等,具体介绍如下:

1) 群落盖度 将每个 1 m × 1 m 的样方分割成 4 个 50 cm × 50 cm 的小样方,用数码相机按顺序对每个 50 cm × 50 cm 的小样方进行拍照,数码相机距离地面高度 1.65 m,数码相机的镜头平面与地面平行。将拍摄的数码照片在 Photoshop 软件中利用“套索”工具确定 50 cm × 50 cm 小样方的范围,通过“直方图”工具获取小样方的像素点,4 个小样方的像素点之和为 1 m × 1 m 样方的总像素点。利用“色彩范围”选项中的“添加取样”选取植物颜色,通过“直方图”选项获取小样方中植被的像素点,4 个小样方的植被像素点之和为 1 m × 1 m 样方的总植被像素点。通过总植被像素点与总像素点的比值来计算样方中的群落盖度。计算公式如下:

$$\text{群落盖度}(\%) = N_1 / N_2 \times 100\%。$$

式中: N_1 为植被所占的像素点; N_2 为样方总像素点。

2) 地上生物量 对于每个样方,记录每种植物的个体数量;将不同植物分物种齐地剪下,称量每种植物全部个体地上部分的鲜重,并分类装入纸质信封;将称完鲜重的每种植物的样品带回实验室,在烘箱中 65 °C 条件下烘干至恒重并记录其干重,从而获得每个样方中每种植物的地上生物量以及所有植物的地上总生物量。

3) 多样性指数 本研究采用物种丰富度、Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数、Pielou 均匀度指数来评价物种多样性。其中,物种丰富度以每个样方的物种数来计算,Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数和 Pielou 均匀度指数的计算公式如下:

$$\text{Shannon-Wiener 指数: } H = - \sum_{i=1}^s P_i \ln P_i,$$

$$\text{Simpson 指数: } D = 1 - \sum_{i=1}^s P_i^2,$$

$$\text{Pielou 均匀度指数: } J = H / \ln S。$$

式中: S 为样方内的物种数; $P_i = N_i / N$; N_i 为物种 i 的个体数; N 为样方中所有植物的总个体数。

4) 种群个体株高 在 1 m × 1 m 样方中,对于每种植物随机选取 5 株个体测量其植株高度(不足 5 株的全部测量),计算每种植物的平均高度。

5) 植物含水量 通过每种植物地上部分的鲜重及干重来计算植物体内的含水量,具体如下:

$$\text{植物含水量}(\%) = (M_1 - M_2) / M_1 \times 100\%。$$

式中: M_1 为植物地上部分的鲜重(g); M_2 为植物地上部分的干重(g)。

1.3 数据分析

在本研究中,选取具有统计学意义的紫花苜蓿、猪毛菜(*Salsola collina*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、米氏冰草、虫实(*Corispermum huanghoense*)及灰绿藜(*Oxybasis glauca*)6个物种进行植株高度、地上生物量及植物含水量的对比分析。

采用独立样本 *t* 检验(Independent-Samples T Test)分析对照区域(CK)和光伏板下区域(PV)土壤含水量、植物群落的盖度、地上生物量、植株高度、植物含水量、Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数、Pielou 均匀度指数的差异性,上述检验通过 SPSS 27.0 软件完成。本研究的柱状图通过 Origin 2025 软件完成,群落盖度借助 Photoshop 2024 软件完成,多样性指数在 Past 4.17 软件上完成。

2 结果与分析

2.1 光伏系统对土壤含水量的影响

光伏板下区域的土壤含水量在 0~90 cm 范围内随土层深度的增加呈现“降低-增加-降低-增加”的变化趋势,而对照区域的土壤含水量在 0~90 cm 范围内随土层深度的增加呈现“增加-降低-增加”的变化趋势(图 2)。

光伏板下区域的土壤含水量最小值(10.8%)出现在 10~20 cm 深度,最大值(16.5%)出现在 80~90 cm 深度;而对照区域土壤含水量最小值(9.5%)出现在 0~10 cm 土层深度,最大值(12.0%)出现在 80~90 cm 深度(图 2)。在同一深度,光伏板下区域的土壤含水量均高于对照区域(图 2),且在 0~10 cm 深度差异极显著($P < 0.001$),在 60~90 cm 深度差异显著($P < 0.05$)。

2.2 光伏系统对植物群落数量特征的影响

2.2.1 光伏系统对群落盖度的影响

群落盖度在光伏板下区域为 39.5%,在对照区域为 22.7%,光伏板下区域显著高于对照区域($P < 0.05$),光伏板下区域是对照区域的 1.7 倍(图 3)。

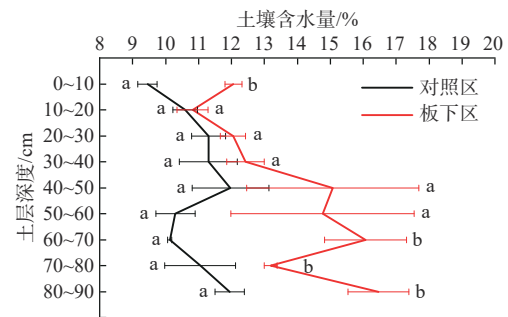
2.2.2 光伏系统对地上生物量的影响

对于群落地上总生物量,光伏板下区域为 $94.7 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,对照区域为 $61.7 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,光伏板下区域显著高于对照区域($P < 0.05$),光伏板下区域是对照区域的 1.5 倍(图 4)。

对于不同物种的地上生物量,光伏系统对其影响不尽相同(图 5)。其中,紫花苜蓿光伏板下区域为 $65.5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,对照区域为 $33.4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,光伏板下区域显著高于对照区域($P < 0.05$)。米氏冰草光伏板下区域为 $2.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,对照区域为 $2.5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,光伏板下区域低于对照区域($P > 0.05$)。狗尾草光伏板下区域为 $2.8 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,对照区域为 $10.0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,光伏板下区域显著低于对照区域($P < 0.05$)。虫实光伏板下区域为 $1.2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,对照区域为 $0.3 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,光伏板下区域高于对照区域($P > 0.05$)。猪毛菜光伏板下区域为 $4.3 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,对照区域为 $7.3 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,光伏板下区域低于对照区域($P > 0.05$)。灰绿藜光伏板下区域为 $0.09 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,对照区域为 $0.13 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,光伏板下区域低于对照区域($P > 0.05$)。

2.2.3 光伏系统对物种高度的影响

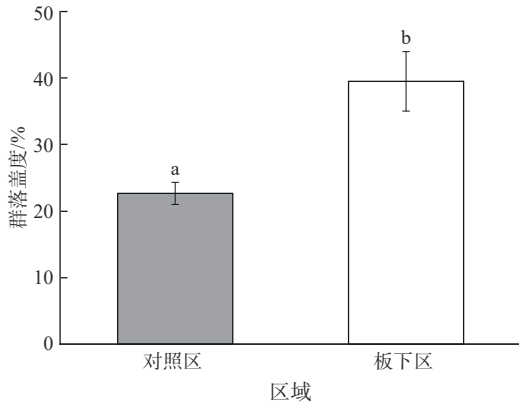
光伏系统对不同物种植株高度的影响存在一定差异(图 6)。紫花苜蓿光伏板下区域为 28.4 cm,对照区域为 19.0 cm,光伏板下区域显著高于对照区域($P < 0.05$)。米氏冰草光伏板下区域为 20.0 cm,而对照区域为 14.9 cm,光伏板下区域显著高于对照区域($P < 0.05$)。狗尾草光伏板下区域为 7.9 cm,



不同字母表示在 0.05 水平差异显著($P < 0.05$)。

图 2 光伏板下区域与对照区域土壤含水量的变化
Fig. 2 Changes in soil moisture content in the area under photovoltaic panels and the control area

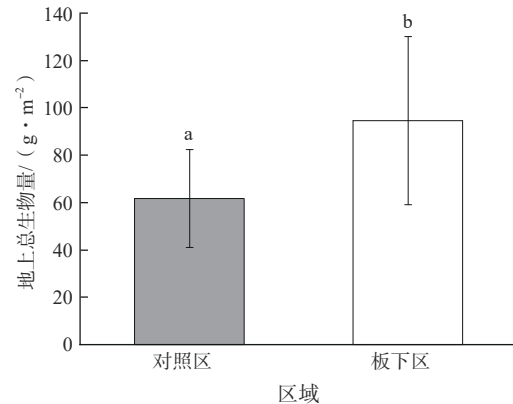
对照区域为 10.1 cm, 光伏板下区域低于对照区域($P>0.05$)。虫实光伏板下区域为 11.1 cm, 对照区域为 8.7 cm, 光伏板下区域高于对照区域($P>0.05$)。猪毛菜光伏板下区域为 7.0 cm, 对照区域为 5.7 cm, 光伏板下区域高于对照区域($P>0.05$)。灰绿藜光伏板下区域为 3.3 cm, 对照区域为 4.1 cm, 光伏板下区域低于对照区域($P>0.05$)。



不同字母表示在 0.05 水平差异显著($P<0.05$)。

图 3 光伏板下区域与对照区域的群落盖度

Fig. 3 Community coverage in the area under photovoltaic panels and the control area



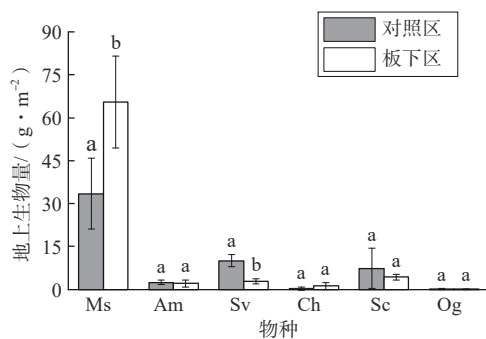
不同字母表示在 0.05 水平差异显著($P<0.05$)。

图 4 光伏板下区域与对照区域群落的地上总生物量

Fig. 4 Aboveground total biomass of communities in the area under photovoltaic panels and the control area

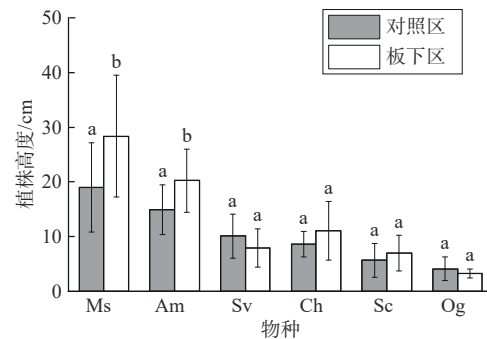
2.2.4 光伏系统对植物含水量的影响

光伏系统不同程度地提高了光伏板下区域的植物含水量(图 7)。其中,紫花苜蓿的含水量板下区域为 72.9%, 对照区域为 70.2%, 光伏板下区域略高于对照区域($P>0.05$)。米氏冰草的含水量板下区域为 55.5%, 对照区域为 37.0%, 光伏板下区域显著高于对照区域($P<0.05$)。狗尾草的含水量板下区域为 66.0%, 对照区域为 49.8%, 光伏板下区域显著高于对照区域($P<0.05$)。虫实的含水量板下区域为 75.3%, 而对照区域为 56.3%, 光伏板下区域显著高于对照区域($P<0.05$)。猪毛菜的含水量板下区域为 70.2%, 对照区域为 66.6%, 光伏板下区域略高于对照区域($P>0.05$)。灰绿藜的含水量板下区域为 78.6%, 对照区域为 66.5%, 光伏板下区域高于对照区域($P>0.05$)。



Ms: 紫花苜蓿 *Medicago sativa*; Am: 米氏冰草 *Agropyron michnoi*; Sv: 狗尾草 *Setaria viridis*; Ch: 虫实 *Corispermum huanghoense*; Sc: 猪毛菜 *Salsola collina*; Og: 灰绿藜 *Oxybasis glauca*。不同字母表示在 0.05 水平差异显著($P<0.05$)。

图 5 光伏板下区域与对照区域不同物种的地上生物量
Fig. 5 Aboveground biomass of different species in the area under photovoltaic panels and the control area



Ms: 紫花苜蓿 *Medicago sativa*; Am: 米氏冰草 *Agropyron michnoi*; Sv: 狗尾草 *Setaria viridis*; Ch: 虫实 *Corispermum huanghoense*; Sc: 猪毛菜 *Salsola collina*; Og: 灰绿藜 *Oxybasis glauca*。不同字母表示在 0.05 水平差异显著($P<0.05$)。

图 6 光伏板下区域与对照区域不同物种的植株高度
Fig. 6 Plant heights of different species in the area under photovoltaic panels and the control area

2.3 光伏系统对物种多样性的影响

光伏板下区域植物物种共计5科12属13种,对照区域共计5科12属15种(表1),均以豆科(Leguminosae)为主,其次为禾本科(Gramineae)和藜科(Chenopodiaceae)。对比发现,光伏板下区域出现的西伯利亚羽茅(*Achnatherum sibiricum*)、蒺藜(*Polygonum aviculare*)及芸薹属植物等物种未在对照区域出现,类似地,在对照区域出现的黄花蒿(*Artemisia annua*)、大籽蒿(*Artemisia sieversiana*)、猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)、并头黄芩(*Scutellaria scordifolia*)及画眉草(*Eragrostis pilosa*)等物种也未在光伏板下区域出现(表1)。

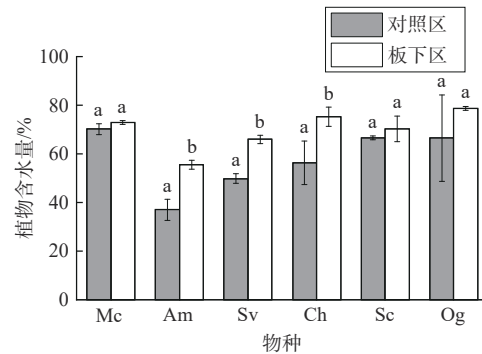
光伏系统对群落生物多样性指数存在一定影响(表2)。其中,物种丰富度光伏板下区域为13,对照区域为15,光伏板下区域略低于对照区域。Shannon-Wiener指数光伏板下区域为1.64,对照区域为1.23,光伏板下区域显著高于对照区域($P < 0.05$)。Simpson指数光伏板下区域为0.75,对照区域为0.60,光伏板下区域高于对照区域($P > 0.05$)。Pielou均匀度指数光伏板下区域为0.44,对照区域为0.38,光伏板下区域高于对照区域($P > 0.05$)。

3 讨论

水分是重要的生态因子,对于植物的生长繁殖至关重要,尤其是在干旱半干旱地区^[20]。在自然生态系统中,光伏系统通过光伏板的遮阴及雨水收集再分配的作用,改变光伏板下土壤的水分及分布^[21],对提高土壤的保水性有积极影响^[12]。类似地,本研究发现在干旱半干旱地区露天煤矿外排土场建立的光伏系统中,光伏板下区域(PV)同一深度的土壤含水量高于对照区域(CK)。该现象的发生一方面受光伏板雨水收集再分配的影响^[21],另一方面,光伏板的遮阴作用减少了土壤水分向大气的逸散。本研究表明在干旱半干旱地区露天煤矿外排土场建立光伏系统显著提高了光伏板下区域土壤的含水量,这表明干旱半干旱地区矿区生态修复耦合太阳能光伏系统有利于土壤水分的保持,对于干旱半干旱地区矿区的生态恢复具有重要意义。

群落盖度作为植物生长状态的一个重要衡量指标,能准确反映环境变化对植物群落的影响^[22]。在自然生态系统中,光伏系统对群落盖度的影响,多表现为光伏系统内群落盖度显著高于光伏系统外的对照区域^[9,23]。本研究结果表明光伏板下区域群落盖度明显高于对照区,与之相一致。在干旱半干旱地区的矿区,群落盖度的提高主要源于光伏系统的建立改变了微环境:其一,光伏系统的建立提高了板下区域的土壤含水量;其二,干旱半干旱地区生长季节强烈的光照可能会限制植物的生长,而光伏板降低了光伏板下区域的光照强度,避免了强光照对植物生长的负面影响^[24];其三,干旱半干旱地区生长季节每日的高温时段对植物的生长可能构成热胁迫,而光伏板有效地减少了热胁迫的影响^[9]。可见,干旱半干旱地区矿区光伏系统的建设改变了局域微生境,创造了适宜植物生长的水分、光照和温度条件,从而提高了群落盖度。

群落生物量是衡量群落生产力的关键指标^[25]。已有研究表明,在较湿润的自然生态系统中建立光伏系统,光伏板外未遮阴区域的生物量高于光伏板下遮阴区域^[13-14];而在干旱半干旱地区的自然生态系统中,光伏板外未遮阴区域的生物量却低于光伏板下的遮阴区域^[9,26]。本研究表明,在干旱半



Ms: 紫花苜蓿 *Medicago sativa*; Am: 米氏冰草 *Agropyron michnoi*; Sv: 狗尾草 *Setaria viridis*; Ch: 虫实 *Corispermum huanghoense*; Sc: 猪毛菜 *Salsola collina*; Og: 灰绿藜 *Oxybasis glauca*。不同字母表示在0.05水平差异显著 ($P < 0.05$)。

图7 光伏板下区域与对照区域的植物含水量

Fig. 7 Plant water content in the area under photovoltaic panels and the control area

干旱地区露天煤矿外排土场建立的光伏系统,光伏板下区域的群落地上生物量明显高于对照区,与后者研究一致。在较湿润地区的自然生态系统中,水分不是限制群落生产力的决定因子,温度和光照是群落生产力的限制因子,在这些区域建立光伏系统,光伏板的遮阴效应减少了板下区域的光照强度,降低了光伏板下区域的温度,限制了植物生长从而导致群落的生产力低于光伏板外的非遮阴区。而在干旱半干旱地区,水分是决定群落生产力的关键因子,在该区域建立光伏系统,无论是自然系统还是植被重建的矿区修复系统,光伏板下区域的土壤水分均得到了显著提高,同时降低了光伏板下区域的光照强度和温度,为植物生长提供了适宜条件,从而提高了群落生产力。作为矿区废弃地植被重建的复垦物种,紫花苜蓿在固氮、改善土壤结构等方面具有重要作用^[27-28]。本研究发现在干旱半干旱煤矿区的外排土场建立光伏系统,光伏板下区域具有较高的土壤含水量,更有利于紫花苜蓿的生长繁殖,对于矿山生态恢复具有重要的意义。同时也发现米氏冰草、狗尾草和虫实3个物种的地上生物量,光伏板下区域低于对照区,这可能是光伏板下区的遮阴环境不利于米氏冰草、狗尾草和虫实的生长,也可能是紫花苜蓿的生长限制了米氏冰草、狗尾草和虫实的生长。

表1 光伏板下区域与对照区域的种属特征

Table 1 Species in the area under photovoltaic panels and the control area

处理	科	属	种(中文名)	种(学名)	
对照区域	豆科 Leguminosae	苜蓿属 <i>Medicago</i>	紫花苜蓿	<i>Medicago sativa</i>	
		草木樨属 <i>Melilotus</i>	黄花草木樨	<i>Melilotus officinalis</i>	
		黄芪属 <i>Astragalus</i>	草木樨状黄芪	<i>Astragalus melilotoides</i>	
	禾本科 Gramineae	冰草属 <i>Agropyron</i>	斜茎黄芪	<i>Astragalus laxmannii</i>	
			米氏冰草	<i>Agropyron michnoi</i>	
		狗尾草属 <i>Setaria</i>	狗尾草	<i>Setaria viridis</i>	
		针茅属 <i>Stipa</i>	大针茅	<i>Stipa grandis</i>	
		画眉草属 <i>Eragrostis</i>	画眉草	<i>Eragrostis pilosa</i>	
		藜科 Chenopodiaceae	猪毛菜属 <i>Salsola</i>	猪毛菜	<i>Salsola collina</i>
			藜属 <i>Chenopodium</i>	灰绿藜	<i>Oxybasis glauca</i>
	菊科 Compositae	蒿属 <i>Artemisia</i>	虫实	<i>Corispermum huanghoense</i>	
			黄花蒿	<i>Artemisia annua</i>	
			大籽蒿	<i>Artemisia sieversiana</i>	
	唇形科 Labiatae	猪毛蒿	猪毛蒿	<i>Artemisia scoparia</i>	
			并头黄芩	<i>Scutellaria scordifolia</i>	
—			—		
光伏板下区域	豆科 Leguminosae	苜蓿属 <i>Medicago</i>	紫花苜蓿	<i>Medicago sativa</i>	
		草木樨属 <i>Melilotus</i>	黄花草木樨	<i>Melilotus officinalis</i>	
		黄芪属 <i>Astragalus</i>	草木樨状黄芪	<i>Astragalus melilotoides</i>	
	禾本科 Gramineae	冰草属 <i>Agropyron</i>	斜茎黄芪	<i>Astragalus laxmannii</i>	
			米氏冰草	<i>Agropyron michnoi</i>	
		狗尾草属 <i>Setaria</i>	狗尾草	<i>Setaria viridis</i>	
		针茅属 <i>Stipa</i>	大针茅	<i>Stipa grandis</i>	
		芨芨草属 <i>Achnatherum</i>	西伯利亚羽茅	<i>Achnatherum sibiricum</i>	
		藜科 Chenopodiaceae	猪毛菜属 <i>Salsola</i>	猪毛菜	<i>Salsola collina</i>
			藜属 <i>Chenopodium</i>	灰绿藜	<i>Oxybasis glauca</i>
	十字花科 Cruciferae	虫实属 <i>Corispermum</i>	虫实	<i>Corispermum huanghoense</i>	
			芸薹属 <i>Brassica</i>	—	—
			—	—	—
	蓼科 Polygonaceae	蓼属 <i>Polygonum</i>	篇蓄	<i>Polygonum aviculare</i>	

注:—表示不能确定具体物种。

表2 光伏板下区域与对照区域物种多样性指数

Table 2 Species diversity indices in the area under photovoltaic panels and the control area

处理	物种丰富度(物种数)	Shannon-Wiener指数	Simpson指数	Pielou均匀度指数
对照区域	15	1.23±0.22a	0.60±0.14a	0.38±0.14a
光伏板下区域	13	1.64±0.08b	0.75±0.01a	0.44±0.05a

注:不同字母表示在0.05水平差异显著($P<0.05$)。

株高是衡量植物生长发育状况的重要指标^[29]。已有研究表明,在高海拔的自然生态系统中建立光伏电站,光伏板覆盖区域的植株高度高于光伏电站外的非覆盖区域^[30];在沙漠自然生态系统中,光伏板间区域的植株高度则高于光伏板下区域^[31]。而本研究表明,在干旱半干旱地区的矿区废弃地,光伏系统对植物高度的影响存在物种差异性:紫花苜蓿、米氏冰草、虫实及猪毛菜的植株高度,光伏板下区域高于对照区域;而狗尾草和灰绿藜则反之。出现这一现象的原因,一方面可能是光伏系统改变的微环境不利于狗尾草和灰绿藜的生长,另一方面可能是光伏板下生长旺盛的紫花苜蓿限制了狗尾草和灰绿藜高度的增加。

植物含水量是衡量植物生长状况的又一重要指标,不仅反映植物光合作用的能力,也反映植物对于干旱及热胁迫的适应能力^[32-33]。本研究表明,光伏板下区域植物含水量均不同程度地高于对照区域,其中米氏冰草、狗尾草及虫实的植物含水量明显提高。光伏板下区域植物含水量高于对照区的原因:一方面,光伏板下区域较高的土壤含水量能够保证植物从土壤中获取更多的水分;另一方面,光伏板的遮阴作用有效降低了植物的蒸腾作用,从而减少了植物体内水分的散失。

物种多样性是生态系统稳定性的重要表征,高的多样性有利于维持高的生态系统功能^[34-35]。在本研究中,对照区域物种数量较光伏板下区域多出2个物种,但光伏板下区域的Shannon-Wiener指数、Simpson指数及Pielou均匀度指数均高于对照区域。虽然光伏板下物种丰富度稍低,但是其生物多样性指数更高,这可能与光伏系统的存在改善了局域的水热条件有关,从而使得光伏板下区域的生态系统较对照区更稳定。在本研究中,露天煤矿外排土场在植被恢复的第2年就出现了大针茅、米氏冰草、西伯利亚羽茅等原生群落中的主要物种,这是因为外排土场上覆盖了剥离的原生群落表土,而原生群落表土中携带着大量原生植物的种子及繁殖体。本研究案例表明,利用剥离的表土进行矿区植被恢复,具有非常重要的生态学意义。剥离的表土中携带原生群落的种子库和大量的繁殖体,这为矿区废弃地向原生群落恢复提供了基础,加速了矿区植被向原生群落恢复的进程。如果矿区废弃地复垦不覆盖原生群落的表土,矿区废弃地植物群落向原生群落恢复会更加困难和漫长,需要投入更多的人力和财力。

4 结论

典型草原露天煤矿外排土场在生态修复过程中耦合太阳能光伏系统,一方面使得光伏板下区域不同深度的土壤含水量高于对照区域,另一方面使得光伏板下区域的群落盖度、生物多样性指数、生物量、植株高度、植物含水量等指标不同程度地高于对照区域。研究结果表明干旱半干旱地区矿区废弃地生态修复耦合太阳能光伏系统,不但改变了矿区土地利用方式,充分利用了太阳能资源,而且显著提高了生态修复效果,为干旱半干旱地区矿区废弃地的生态学修复提供了新范式。

参考文献:

- [1] WANG R J, GONG J R, ZHANG S Q, et al. Comprehensive potential assessment of agrophotovoltaic systems: A case study of Hebei province[J]. Renewable Energy, 2025, 240: 122178.
- [2] HOSENUZZAMAN M, RAHIM N A, SELVARAJ J, et al. Global prospects, progress, policies, and environmental impact of solar photovoltaic power generation[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 41: 284-297.
- [3] QERIMI D, DIMITRIESKA C, VASILLEVSKA S, et al. Modeling of the solar thermal energy use in urban areas

- [J]. *Civil Engineering Journal*, 2020, 6(7): 1349-1367.
- [4] PHUANGPORNPIITAK N, KUMAR S. PV hybrid systems for rural electrification in Thailand[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2007, 11(7): 1530-1543.
- [5] 国家能源局. 国家能源局发布2024年全国电力工业统计数据[EB/OL]. [2025-01-21]. <https://www.nea.gov.cn/20250121/097bfd7c1cd3498897639857d86d5dac/c.html>.
- [6] 朱少康, 王珊, 张军涛, 等. 光伏阵列的微气候特征及其对站区植物生长特性的影响[J]. *生态学杂志*, 2021, 40(10): 3078-3087.
- [7] GAMBOA G, MUNDA G. The problem of windfarm location: A social multi-criteria evaluation framework[J]. *Energy Policy*, 2007, 35(3): 1564-1583.
- [8] HERNANDEZ R R, HOFFACKER M K, MURPHY-MARISCAL M L, et al. Solar energy development impacts on land cover change and protected areas[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(44): 13579-13584.
- [9] LIU Y, ZHANG R Q, HUANG Z, et al. Solar photovoltaic panels significantly promote vegetation recovery by modifying the soil surface microhabitats in an arid sandy ecosystem[J]. *Land Degradation & Development*, 2019, 30(18): 2177-2186.
- [10] 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.
- [11] LIU Y J, ZHANG J B, MU R, et al. Effects of two ecological governance measures for photovoltaic power stations on plant growth and soil nutrients[J]. *Plants*, 2025, 14(5): 797.
- [12] YUE S J, WU W, YUAN B, et al. Large-scale photovoltaic farms significantly change the vegetation diversity and biomass through influencing soil moisture and physiochemical properties[J]. *Vadose Zone Journal*, 2025, 24(2): e70002.
- [13] 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.
- [14] 王涛, 王得祥, 郭廷栋, 等. 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.
- [15] NAZIR M S, ALI N, BILAL M, et al. Potential environmental impacts of wind energy development: A global perspective[J]. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 2020, 13: 85-90.
- [16] TURNEY D, FTHENAKIS V. Environmental impacts from the installation and operation of large-scale solar power plants[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15(6): 3261-3270.
- [17] FAHRIG L. Effects of habitat fragmentation on biodiversity[J]. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2003, 34(1): 487-515.
- [18] HASSANPOUR ADEH E, SELKER J S, HIGGINS C W. Remarkable agrivoltaic influence on soil moisture, microclimate and water-use efficiency[J]. *PLoS One*, 2018, 13(11): e0203256.
- [19] ADEH E H, GOOD S P, CALAF M, et al. Solar PV power potential is greatest over croplands[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 11442.
- [20] PITT M D, HEADY H F. Responses of annual vegetation to temperature and rainfall patterns in Northern California[J]. *Ecology*, 1978, 59(2): 336-350.
- [21] 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.
- [22] WANG S P, DUAN J C, XU G P, et al. Effects of warming and grazing on soil N availability, species composition, and ANPP in an alpine meadow[J]. *Ecology*, 2012, 93(11): 2365-2376.
- [23] 张深林, 吴田军, 刘正国, 等. 高寒高海拔地区光伏电站建设的草地生态效益评估[J/OL]. *草原与草坪*, 2025: 1-14(2025-03-17)[2025-04-07]. <https://link.cnki.net/urlid/62.1156.S.20250314.1827.002>.
- [24] ZHOU L M, TIAN Y H, BAIDYA ROY S, et al. Impacts of wind farms on land surface temperature[J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2(7): 539-543.
- [25] 朱杰, 吴安驰, 邹顺, 等. 南亚热带常绿阔叶林树木多样性与生物量和生产力的关联及其影响因素[J]. *生物多样性*, 2021, 29(11): 1435-1446.
- [26] LIU Z Y, PENG T, MA S L, et al. Potential benefits and risks of solar photovoltaic power plants on arid and semi-arid ecosystems: An assessment of soil microbial and plant communities[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2023, 14: 1190650.
- [27] 王东丽, 张子倩, 刘阳, 等. 矿区排土场首蓿地土壤生态化学计量特征[J]. *草业科学*, 2022, 39(7): 1323-1332.
- [28] 杨吉华, 张光灿, 刘霞, 等. 紫花苜蓿保持水土效益的研究[J]. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1997(2): 91-96.
- [29] MIAO L, WANG X Y, YU C, et al. What factors control plant height?[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2024, 23(6): 1803-1824.
- [30] 郝晓珍, 于航, 吴星叶, 等. 青藏高原荒漠区典型光伏电站建设对植被属性和土壤性质的影响[J]. *生态学报*, 2025, 45(11): 5510-5526.
- [31] 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.
- [32] 赵雅静, 翁伯琦, 王义祥, 等. 植物对干旱胁迫的生理生态响应及其研究进展[J]. *福建稻麦科技*, 2009, 27(2): 45-50.
- [33] 陈慧颖, 马石霞, 郭鹏辉. 热胁迫对植物生理影响的研究进展[J]. *安徽农学通报*, 2021, 27(5): 11-13.

- [34] 罗顺华,刘新宇,孟宝平,等. 祁连山国家公园高寒草地功能群多样性与生产力研究[J]. 草业学报,2025,34(6):14-26.
- [35] TILMAN D, WEDIN D, KNOPS J. Productivity and sustainability influenced by biodiversity in grassland ecosystems[J]. Nature, 1996, 379(6567): 718-720.

(责任编辑 张 庆)

Influence of Photovoltaic Systems of Ecological Restoration at a Typical Grassland Open-Pit Coal Mine Dumping Site

WANG Yifei¹, WANG Xinting^{1,2}, HE Ruimin³, BAI Xue¹, ZHANG Bo¹, BAO Daorina⁴,
HOU Yali⁴, XUE Ruizhe¹

- (1. School of Resources and Environmental Engineering, Inner Mongolia University of Technology/Key Laboratory of Environmental Pollution Control and Remediation at Universities of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010051, China;
2. Inner Mongolia Yitai Jingyue Suancangou Mining Co., Ltd., Ordos 010300, China;
3. National Energy Shendong Coal Group Co., Ltd., Ordos 017209, China;
4. School of Energy and Power Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010080, China)

Abstract: Photovoltaic (PV) technology plays a vital role in the sustainable development of clean energy. However, the establishment of PV systems not only occupies large areas of land resources but also affects local ecosystems. There are large areas of mining wastelands located in arid and semi-arid regions of China, which have abundant solar energy resources. Therefore, we sought to explore the potential ecological impacts of coupling PV systems with ecological restoration efforts in these degraded lands. Addressing this issue is of great significance for exploring new approaches of ecological restoration that incorporate PV system in mining wastelands. Therefore, this study selected a typical grassland open-pit coal mine dump site in an arid and semi-arid region, established a PV system, and carried out ecological restoration. We selected the area beneath the PV panels (PV) and a control area outside the panels (CK) to examine the effects of PV systems on ecological restoration in the mining area. The results showed as follows: (1) Soil moisture content was significantly higher under the PV panels compared to the CK area; (2) Total coverage of the community under the PV panels reached 39.5%, significantly higher than the 22.7% observed in the CK area ($P < 0.05$); (3) Total aboveground biomass was significantly greater in the PV area ($P < 0.05$), with *Medicago sativa* contributing the largest proportion; (4) With the exception of *Setaria viridis* and *Oxybasis glauca*, the height of dominant species was greater under the PV panels. Notably, *Medicago sativa* and *Agropyron michnoi* were significantly taller than in the CK area ($P < 0.05$); (5) Plant water content was greater under PV panels than in the CK area, with significant differences observed for *Agropyron michnoi*, *Setaria viridis*, and *Corispermum huanghoense* ($P < 0.05$); (6) While species richness was comparable between the two areas, the biodiversity index was higher under the PV panels, indicating enhanced biodiversity. These findings indicate that coupling PV systems with ecological restoration in mining areas of arid and semi-arid regions, on the one hand, expands the utilization of solar energy resources, and on the other hand, significantly improves ecological restoration outcomes, providing a new paradigm for ecological restoration in such regions.

Key words: photovoltaic system; arid and semi-arid regions; ecological restoration of mining areas; vegetation restoration; soil moisture content