

光伏板高度对旱季石漠化地区不同坡度土壤性质的影响

高文娇¹, 王妍¹, 刘云根^{1,2}, 胡俊¹, 张家旭¹, 罗志锋¹, 黄彩双¹

(1. 西南林业大学 水土保持学院, 云南 昆明 650224;

2. 云南省山地农村生态环境演变与污染治理重点实验室, 云南 昆明 650224)

摘要: [目的] 分析光伏板下石漠化地区土壤水分和养分的变化特征及其关键影响因子, 评估光伏板高度及地形坡度在旱季对土壤理化性质的影响, 旨在为该地区的生态恢复与绿色产业发展提供科学依据和理论支持。[方法] 选取已建设 8 a 的云南省石林彝族自治县光伏示范基地为研究区, 在旱季对平坡和陡坡中不同高度的光伏板(高板前檐离地高度为 2.4 m, 后檐离地高度为 3.1 m, 低板前檐离地高度为 0.5 m, 后檐离地高度为 1.2 m, 夹角为 24°)下区域土壤进行取样, 通过方差分析、RDA 分析, 研究不同坡度下土壤水分及养分对光伏板高度的响应。[结果] ①在旱季石漠化地区, 光伏板高度显著影响土壤水分及养分含量($p < 0.05$)。相较非光伏遮挡区域, 光伏板遮荫显著增加土壤体积含水率、饱和持水量、毛管持水量及田间持水量水平, 且低光伏板平坡区域土壤水分均高于其他样地。②土壤全氮、全磷含量在整个旱季随光伏板高度的增加而显著减少, 在低光伏板平坡区域达到最大值, 而在旱季末期时, 光伏遮挡区域土壤有机碳含量相比对照区域显著降低 35%。③光伏板的建造主要通过改变土壤容重、孔隙度、pH 值及土壤酶活性影响土壤水分及养分含量的变化。[结论] 石漠化地区旱季低光伏板相比高光伏板更有利于起到减少水分蒸发和固定养分的作用, 在平坡地区尤为明显。

关键词: 石漠化; 光伏板高度; 地形坡度; 土壤; 旱季

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)04-0105-08

中图分类号: X171.4, S153

文献参数: 高文娇, 王妍, 刘云根, 等. 光伏板高度对旱季石漠化地区不同坡度土壤性质的影响[J]. 水土保持通报, 2025, 45(4): 105-112. Gao Wenjiao, Wang Yan, Liu Yungen, et al. Effects of photovoltaic panel height on soil physicochemical properties in rocky desertification areas with different slopes during dry season [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(4): 105-112. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.04.036; CSTR:32312.14.stbctb.2025.04.036.

Effects of photovoltaic panel height on soil physicochemical properties in rocky desertification areas with different slopes during dry season

Gao Wenjiao¹, Wang Yan¹, Liu Yungen^{1,2}, Hu Jun¹, Zhang Jiayu¹, Luo Zhifeng¹, Huang Caishuang¹

(1. College of Soil and Water Conservation, Southwest Forestry University,

Kunming, Yunnan 650224, China; 2. Key Laboratory of Evolution and Pollution Control of

Mountain Rural Ecological Environment in Yunnan Province, Kunming, Yunnan 650224, China)

Abstract: [Objective] Soil moisture characteristics, nutrient changes beneath photovoltaic (PV) panels in rocky desertification areas, and their key influencing factors were analyzed. The effects of PV panel height and terrain slope on soil physicochemical properties during the dry season were evaluated to provide a scientific basis and theoretical support for ecological restoration and green industry development in this region. [Methods] A PV demonstration base in Shilin Yi Autonomous County, Yunnan Province, which had been under construction for 8 years, was selected as the study area, and soil samples were taken from beneath PV panels of differing heights (high panel: front eave height 2.4 m, rear eave 3.1 m; low panel: front eave height 0.5 m, rear eave 1.2 m; tilt

收稿日期: 2025-02-26

修回日期: 2025-05-20

采用日期: 2025-05-21

资助项目: 国家自然科学基金“岩溶地区聚落空间格局与石漠化生态系统演变耦合关系研究”(32260420); 云南省科技计划重点项目“光伏太阳能利用模式对石漠生态系统碳汇影响效应及其调控策略”(202401AS070014, 202401BD070001-113)

第一作者: 高文娇(1999—), 女(汉族), 山东省临沂市人, 硕士研究生, 研究方向为石漠化修复治理。Email: 1938822516@qq.com。

通信作者: 王妍(1980—), 女(满族), 河北省承德市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事脆弱生态系统关键过程与修复、土地利用及景观动态演变等研究。Email: wycaf@126.com。

angle of 24°) on both flat slopes and steep slopes during drought period. The responses of soil moisture and nutrients to PV panel heights in association with different slope gradients were analyzed using analysis of variance (ANOVA) and redundancy analysis (RDA). [Results] ① In karst rocky desertification areas during the dry season, PV panel height significantly influenced soil moisture and nutrient content ($p < 0.05$). Compared with non-shaded areas, PV panel shading was associated with significantly increased soil volumetric water content, saturated water-holding capacity, capillary water-holding capacity, and field capacity. Notably, soil moisture levels beneath low PV panels on shallow terrain gradients were consistently higher than those at the other sampling sites. ② Soil total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) contents exhibited significant decreases with increasing PV panel height throughout the dry season, and displayed maximum values beneath low PV panels on flat slopes. However, soil organic carbon (SOC) content in shaded areas decreased by 35% compared with control regions by the end of the drought period. ③ Correlation analysis revealed that PV panel installation primarily altered soil bulk density, porosity, pH value, and enzyme activities, thereby driving changes in soil moisture and nutrient characteristics. [Conclusion] The construction of low-PV panels in rocky desertification areas during the dry season was more conducive to reducing water evaporation and fixing nutrients compared to high-PV panels, especially in flat slope areas.

Keywords: rocky desertification; photovoltaic height; terrain slope; soil; dry season

光伏作为一种重要的清洁能源技术,不仅在全球范围内得到广泛应用,尤其在干旱和半干旱地区,光伏项目在优化能源结构、减少温室气体排放方面发挥了重要作用。近年来,光伏设施的建设逐渐渗透到西南及西北地区,这些区域由于干旱和沙化问题严重,亟需采取有效的生态修复措施^[1]。光伏电站的建设会显著改变土壤微环境,进而影响土壤养分循环,尤其在干旱区光伏板可降低地表温度、减少水分流失,但不当建设也可能加剧土壤压实或侵蚀^[2]。光伏电站建设对土壤环境的影响,特别是土壤水分和养分的变化,已成为生态学和环 境科学领域的重要研究课题^[3]。土壤水分和养分存在密切的相关关系,各自具有独特的功能和作用机制,相互依存、相互影响,在土壤生态系统中发挥着重要作用^[4]。

目前,光伏电站的建设对土壤环境的影响主要集中在西北沙漠及西部草原等生态系统,且大多侧重于土壤温湿度或水分变化的单一因素,缺乏对光伏板高度与土壤水分、养分之间交互作用的综合分析^[5-7]。光伏板阵列的铺设可以显著影响局地能量平衡和水分分布格局,光伏组件对太阳辐射的拦截和再分配会导致光伏板内水热资源空间异质性增强,且光伏板高度对气流的扰动作用能够使局地温湿度发生改变^[8-9]。同时光伏板对于环境的改变会直接或间接的影响周围土壤环境的改变^[10]。吴智泉等^[11]研究结果表明,石漠化光伏场区的环境因子对土壤养分的空间异质性具有重要的驱动作用。此外,在对高寒荒漠草原光伏电站区域的土壤理化性质进行分析中发现^[12],与无光伏遮挡区域相比,光伏建设区可以有效改善土壤养分平衡及植被恢复,且光伏板可

增加土壤水分、降低土壤温度、增加速效养分及增强土壤的固碳能力^[13]。然而,现有研究大多侧重于光伏板区域内与区域外土壤理化性质的变化,但关于光伏板高度差异导致的土壤性质的差异的研究仍然不足^[14-15]。在大多石漠化地区进行光伏电站的建设时,受地形坡度、光照辐射角度等综合因素影响,区内光伏板高度的建造会有所差异。罗忠新等^[16-17]研究发现,不同光伏组件形成的遮荫效应会改变其区域下的温湿度,从而直接或间接的影响土壤有机碳含量。因此,有必要对光伏板高度直接或间接影响板下区域土壤水分及养分开展进一步探究。

本研究以降水不均,旱雨季分明的典型喀斯特石漠化地区石林光伏电站为研究对象,通过分析旱季光伏区域土壤水分及养分因子的变化特征探寻光伏板高度对不同坡度土壤环境的影响机制及效应,旨在为该地区的生态恢复与绿色产业发展提供科学依据和理论支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究选取位于云南省昆明市石林彝族自治县生态农业光伏试验示范基地作为研究对象(表1)。该光伏基地于2015年建成并投入使用,主要采用晶体硅光伏组件并网发电技术以及多种太阳能光伏发电技术,地理坐标为(103°24'E, 24°50'N),属于北亚热带气候区,具有四季如春、干湿季分明的气候特点,年平均降水量为924.2 mm,降水季节分布不均,主要集中在6—10月,约占全年降水量的80%以上。年平均蒸发量为2 097.7 mm,是降水量的2.3倍,年

均气温 16~18 ℃,无霜期超过 250 d。土壤类型主要为红壤和喀斯特石灰土。主要植物有黑麦草 (*Lolium perenne*)、凤尾蕨 (*Pteris cretica* var. *nervosa*)、白茅 (*Imperata cylindrica*) 等。

表 1 研究区概况

Table 1 Overview of study area

样地	光伏板参数	地理坐标	海拔高度/m	坡度类型
低板区域(DD)	前檐离地 0.5 m,后檐离地 1.2 m,夹角为 24°	103°24'37"E,24°50'2"N	1 887	陡坡
低板区域(DP)	前檐离地 0.5 m,后檐离地 1.2 m,夹角为 24°	103°24'41"E,24°50'11"N	1 890	平坡
高板区域(GD)	前檐离地 2.4 m,后檐离地 3.1 m,夹角为 24°	103°24'39"E,24°50'16"N	1 893	陡坡
高板区域(GP)	前檐离地 2.4 m,后檐离地 3.1 m,夹角为 24°	103°24'27"E,24°50'13"N	1 892	平坡
无光伏板区域(CK ₁)	无	103°24'36"E,24°50'13"N	1 907	陡坡
无光伏板区域(CK ₂)	无	103°24'18"E,24°50'34"N	1 904	平坡

1.2 研究方法

1.2.1 样地布设与样品采集

研究区内光伏板的安装方式分为高光伏板和低光伏板 2 种,高板前檐离地高度 2.4 m,后檐离地高度 3.1 m,低板前檐离地高度 0.5 m,后檐离地高度 1.2 m,夹角均为 24°。考虑到降雨入渗及雨水聚集对土壤的影响程度不同,因此选取光伏板正下方采集土壤样品。

样品采集时间定为 2023 年 11 月和 2024 年 5 月,因昆明市的降雨主要集中在 6—10 月,具有干湿分明的特点,因此将采样期分为干旱初期和干旱末期。研究区域选择 2 种不同坡度和高度的光伏板区域以及无光伏板遮挡的对照区域作为研究对象(表 1),每个区域设置 3 块 25 m×25 m 的重复样地,共设 18 块样地。在每个样地的光伏板正下方随机选取 3 个 1 m×1 m 的样方。选用蛇形采样法进行采样及植被调查,采集环刀土和 0—10 cm 土层土壤样品,共计 54 份样本。将样本装进无菌土壤袋中带回实验室,取出约 200 g 新鲜土壤用于测定土壤自然含水率,剩余土样放在室内,自然风干后去除砾石、植物根系及杂物,进行土壤理化性质的测定。

1.2.2 样品处理与分析

土壤水土保持指标测定参考《土壤农化分析》^[18],采用 LY/T 1215—1999《森林土壤水分—物理性质的测定》中方法测定土壤容重、最大持水量(饱和持水量)、毛管持水量、最小持水量(田间持水量)、毛管孔隙度等指标^[19];土壤养分含量测定参考《土壤农化分析》,土壤有机碳(SOC)含量采用 LY/T 1237—1999《森林土壤有机质的测定》中重铬酸钾容量法测定,土壤全氮(TN)含量采用 LY/T 1228—1999《森林土壤全氮的测定》中凯氏定氮法测定(全自动凯氏定氮仪 Kjeltac™ 8400,FOSS,丹麦),土壤全磷(TP)含量采用 LY/T 1232—1999《森林土壤全磷的测定》中碱熔—钼锑抗比色法测定,土壤 pH 值

采用 LY/T 1239—1999《森林土壤 pH 的测定》中电位法测定(雷磁 pHS-25 pH 计,上海仪电科学仪器股份有限公司),其水土比为 2.5:1。

1.3 数据处理与分析

本研究使用 Excel 2023 对数据进行初步整理;利用 IBM SPSS Statistics 20 进行单因素方差分析(one-way ANOVA),并采用描述性统计、方差分析和 Pearson 相关性分析等方法进行数据处理。相关数据以平均值±标准差表示;冗余分析(RDA)使用 Canoco 5.0 软件进行;数据制图则采用 Origin 软件。

2 结果与分析

2.1 光伏板高度对石漠化地区不同坡度土壤水分的影响

不同光伏板高度下旱季石漠化地区各样地之间土壤水分存在明显的差异(表 2—3)。表 2 表明,干旱初期时,土壤体积含水率为 20.56%~35.23%,变化特征为:DP>DD>GP>GD>CK₂>CK₁。6 种不同样地下的土壤体积含水率差异显著($p<0.05$)。土壤饱和持水量为 383.07~559.50 g/kg,变化特征与土壤体积含水率一致。毛管持水量为 345.15~416.89 g/kg,变化特征为:DP>DD>CK₂>GP>GD>CK₁。DP 与 GD,GP,CK₁,CK₂ 差异显著($p<0.05$)。田间持水量为 261.93~345.10 g/kg,其变化特征为:DD>DP>GP>CK₂>GD>CK₁,其中 DD 与其他样地土壤田间持水量含量差异显著($p<0.05$)。干旱末期时(表 3),土壤体积含水率和饱和持水量的变化特征均与干旱初期时一致,DP 区域体积含水率显著高于其他区域。毛管持水量的变化范围为 114.08~193.83 g/kg,其变化特征为:GP>DP>GP>DD>CK₂>CK₁,且 CK₁ 与 GD,DP,GP 含量差异显著。田间持水量的范围为 45.72~97.3 g/kg,变化特征为:DP>DD>GP>GD>CK₂>CK₁,其中,DD,DP 和 GP 之间具有显著差异。

表 2 干旱初期各样地土壤水分特征

Table 2 Soil moisture characteristics of each sample plot at beginning of drought.

样地	体积含水率/%	饱和持水量/(g·kg ⁻¹)	毛管持水量/(g·kg ⁻¹)	田间持水量/(g·kg ⁻¹)
DD	31.96±0.96 ^b	464.11±21.88 ^b	409.02±22.95 ^{ab}	345.10±17.46 ^a
GD	24.21±0.80 ^{cd}	419.52±32.92 ^{bc}	356.49±20.95 ^{cd}	283.23±14.46 ^{cd}
DP	35.23±0.55 ^a	559.50±51.34 ^a	416.89±11.29 ^a	325.08±12.16 ^{bc}
GP	25.21±0.94 ^c	424.42±23.04 ^{bc}	376.80±15.55 ^{bcd}	311.30±26.97 ^{bc}
CK ₁	20.56±0.89 ^e	383.07±11.36 ^c	345.15±18.45 ^d	261.93±6.45 ^d
CK ₂	23.13±1.28 ^d	415.90±70.78 ^{bc}	380.22±16.07 ^{bc}	301.52±3.10 ^{bc}

注:表中数据为平均值±标准差。同列不同小写字母表示差异显著($p<0.05$)。下同。

表 3 干旱末期各样地土壤水分特征

Table 3 Soil moisture characteristics of each sample plot at end of drought period

样地	体积含水率/%	饱和持水量/(g·kg ⁻¹)	毛管持水量/(g·kg ⁻¹)	田间持水量/(g·kg ⁻¹)
DD	12.53±1.09 ^a	194.37±48.40 ^{bc}	147.48±19.14 ^{bc}	85.95±6.57 ^b
GD	8.74±1.74 ^c	182.99±48.70 ^a	123.17±22.29 ^{ab}	55.20±10.88 ^d
DP	13.63±0.84 ^a	276.12±79.32 ^{ab}	179.17±14.12 ^{ab}	97.30±4.18 ^a
GP	10.76±1.44 ^b	268.77±68.26 ^{ab}	193.83±51.52 ^a	73.50±7.68 ^c
CK ₁	6.86±0.09 ^d	176.14±8.39 ^c	114.08±1.91 ^c	45.72±2.80 ^d
CK ₂	7.57±0.51 ^{cd}	192.33±8.89 ^{bc}	140.01±5.14 ^{bc}	53.61±2.75 ^d

2.2 光伏板高度对石漠化地区不同坡度土壤养分的影响

图 1 表明,各研究区内养分因子的变化特征因光伏板高度及坡度的不同在干旱初、末期呈现出明显差异。在干旱初期,土壤有机碳含量的平均质量分数为 8.8~15.48 g/kg,变化特征为:DP>DD>GP>CK₂>CK₁>GD,其中,DP 含量与其他样地之间存在显著性差异($p<0.05$)。全氮的平均质量分数为 1.19~3.17 g/kg,变化特征为:DP>DD>GP>CK₂>GD>CK₁,全磷含量为 0.43~0.79 g/kg,且 GD, GP, CK₁, CK₂ 之间差异不显著($p>0.05$)。在干旱末期时,土壤有机碳含量的平均质量分数为 14.87~30.49 g/kg,变化特征为:CK₂>CK₁>DP>DD>GP>GD,无光伏遮挡样地土壤有机碳含量显著高于光伏遮挡样地。土壤全氮的平均质量分数为 0.98~2.20 g/kg,变化特征为:DP>GP>DD>CK₂>GD>CK₁,且 DP 与其他样地全氮含量差异显著($p<0.05$)。土壤全磷的平均质量分数为 0.27~0.53 g/kg,变化特征为:DP>DD=GP>CK₂>GD>CK₁。

综上所述,不同光伏板高度和坡度下,土壤养分含量不同,低光伏板平坡的土壤养分含量最高。

2.3 光伏板下土壤水分特征

对土壤容重、pH 值及孔隙度与土壤水分特征间的相关性进行深入分析(图 2),根据冗余结果(图 2a)

可以看出,干旱初期土壤容重与土壤含水量、饱和持水量、毛管持水量、田间持水量的夹角较小($<90^\circ$),呈显著正相关($p<0.05$),而与孔隙度和 pH 值呈负相关。其中土壤容重与饱和持水量的夹角最小,表明土壤容重对其具有极显著的正向效应($p<0.01$)。

由图 2b 可得,容重和 pH 值与含水量、饱和持水量、毛管持水量、田间持水量的夹角均小于 90° ,表明在干旱末期时 pH 值对土壤水分差异性的解释力更强,呈显著正相关($p<0.05$)。孔隙度与饱和持水量、毛管持水量呈正相关,与含水量和田间持水量呈负相关。因此,土壤容重、pH 值和孔隙度是影响土壤水分的关键因素。

2.4 光伏板下土壤养分特征

冗余分析(RDA)结果表明(图 3),酶活性在干旱初、末期对土壤碳、氮、磷的前两轴分别解释了 86.9% 和 44.386% 的变异,表明酶活性与土壤养分关系密切。从图 3a 可以看出,在干旱初期有机碳、全氮、全磷与碱性磷酸酶、脲酶之间的夹角小于 90° ,为显著正相关关系,而与过氧化氢酶的夹角较大($>90^\circ$),则呈显著负相关。在干旱末期(图 3b),土壤有机碳、全氮、全磷与脲酶之间呈正相关关系,与碱性磷酸酶和过氧化氢酶之间呈正相关关系。其中,相较于干旱初期,干旱末期时酶活性对土壤养分的影响作用有所减弱。

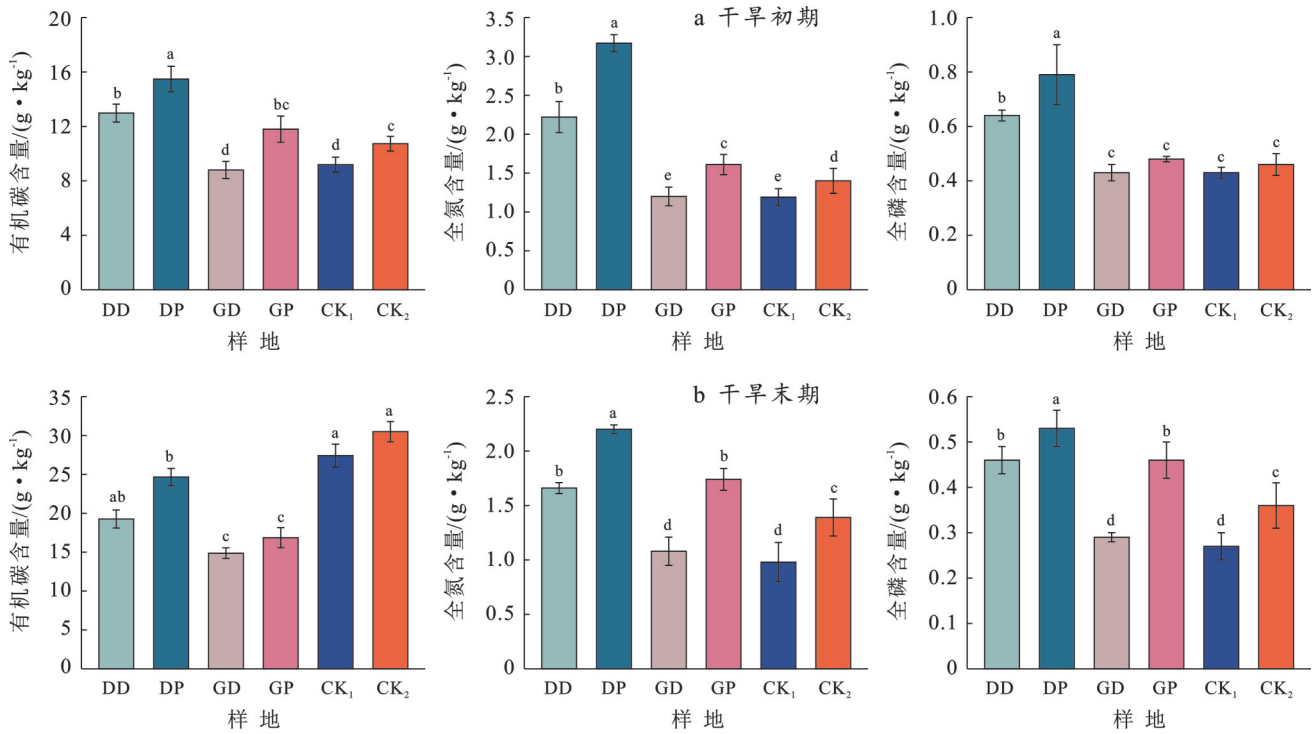
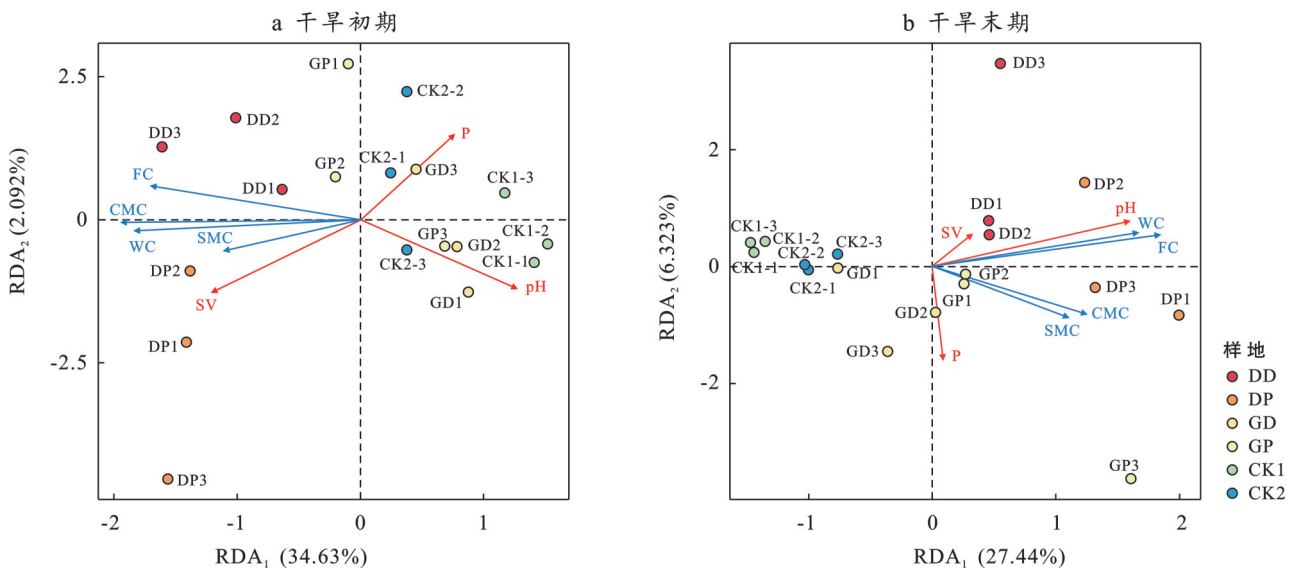


图1 不同类型样地在干旱初、末期的养分含量

Fig.1 Nutrient content of different sample plots at beginning and end of drought period



注:SV为土壤容重;P为孔隙度;WC为含水量;SMC为饱和持水量;CMC为毛管持水量;FC为田间持水量。不同颜色代表的不同类别变量。蓝色代表代表土壤水分的一些指标,红色代表的影响土壤水分的一些指标。下同。

图2 不同类型样地影响因子与土壤水分的冗余分析

Fig.2 Redundancy analysis of impact factors with soil moisture of different sample plots

3 讨论

3.1 光伏板高度下石漠化地区不同坡度土壤水分及养分的差异

光伏板对土壤具有遮阴作用,能够提高空气湿度,减少土壤水分的蒸发,从而影响土壤的物理性质和养分含量^[20]。本研究结果表明,在不同光伏板高度条件下,土壤的水分特性和养分含量均表现出显

著差异,低光伏板区域的土壤在整个干旱季节中保持较高的水分含量,明显高于高光伏板遮挡区域。这可能是由于低光伏板对太阳辐射的遮挡作用更强,可以有效减少地表水分的蒸发,从而提高土壤的持水能力,这一结果与Elnaz Hassanpour Adeh等^[21]的研究相一致。此外,地形坡度对土壤水分也有显著影响^[22]。本研究发现,平坡区域的水分含量及持水能力在整个干旱期均高于其他区域,且在干旱初

时期效果相对更优。这一结果与陈凤等^[23]研究相一致,这可能是因为平缓坡度区域的土壤排水性差,水分易于积聚,且在干旱初期时,土壤经历干旱的时间相比干旱末期短,程度浅^[24],因此能够保持相对较高的水分含量。在土壤养分方面,不同光伏板高度和坡度对干旱期的土壤有机碳、全氮和全磷含量均有显著影响。蔡晓布等^[25]研究发现,土壤含水量与土壤有机碳含量呈显著正相关,而在本研究中,干旱末期土壤有机碳含量明显高于干旱初期,这可能是由于植物凋落物对表层土壤养分的影响^[26],干旱末期时地表凋落物及枯落物增加,植物凋落物的增加可提高土壤有机碳含量^[27]。其原因在于凋落物在微生物

及酶的作用下进行分解,增加土壤中的有机碳,进而增加土壤碳库,表明光伏遮挡对干旱及半干旱生态系统的碳汇具有显著的积极作用^[7]。其次,全氮和全磷的含量随着干旱期程度的加重和坡度的增大而显著降低,这与赵文东等^[28]的研究一致,这可能是由于干旱程度的加重导致土壤水分减少,进而影响土壤养分的溶解与运输。同时,坡度较大的区域涵养水源能力较差,水土流失也更为严重。值得注意的是,在相同坡度下,低光伏板遮挡区域的土壤氮磷含量高于高光伏板遮挡区域^[22]。这可能是因为随着光伏板高度的增加,遮阴效果减弱,导致土壤水分蒸发增加,从而降低了土壤的氮磷含量^[9]。

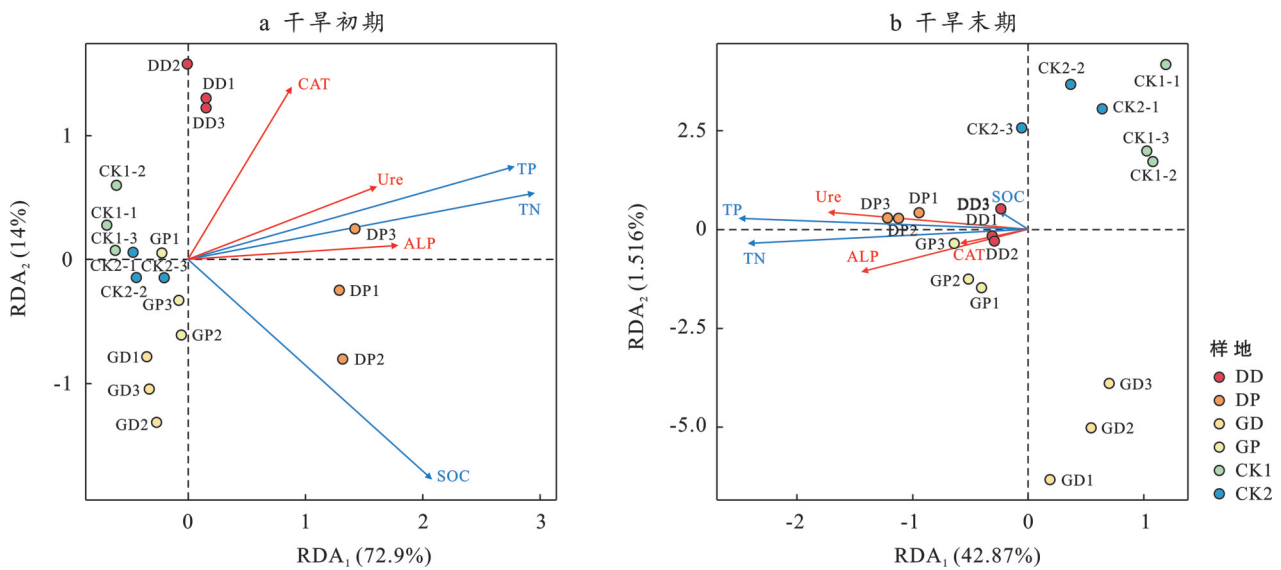


图3 不同类型样地影响因子与土壤养分的冗余分析

Fig.3 Redundancy analysis of impact factors and soil nutrients of different sample plots

3.2 光伏板高度下影响石漠化地区不同坡度土壤水分及养分的成因分析

土壤水分和养分状况受多种因素共同影响^[29]。作为土壤系统中元素迁移与循环的媒介,土壤水分对土壤的理化性质及酶活性具有显著的影响。土壤含水量主要受容重、孔隙度、pH值等影响,而光伏板则能够通过改变遮光程度间接影响土壤质地及水分蒸发^[30]。本研究对影响土壤水分及养分的成因进行深入分析,结果表明,土壤容重、pH值及孔隙度与土壤水分存在一定的相关性。土壤容重和孔隙度是反映土壤水文物理性质的重要指标,与土壤的通气性和透水性紧密相关^[10]。在本研究中,光伏板高度不同,所遮挡区域的土壤容重、孔隙度与持水量差异显著,且光伏遮挡区域的土壤pH值随光伏板高度的增加呈上升趋势。土壤pH值的变化可能与低光伏板遮挡更有效降低区域内的风速、增加空气湿度以及减少水分蒸发有关,从而使盐分不易流失,导致低光

伏板遮挡区域土壤pH值较低^[17]。此外,作为土壤中的生物催化剂,土壤酶对土壤养分有显著影响,能够催化一系列生化反应,促进有机物的分解和矿化,释放出植物可利用的营养元素,如氮、磷等。在本研究中,不同高度光伏板遮挡区域的土壤养分与酶活性在干旱初、末期表现出显著差异。相较于干旱初期,干旱末期低光伏板遮挡区域的土壤脲酶和磷酸酶活性较高,这可能是因为土壤母质中碳、氮、磷元素的含量有限,另一方面,土壤水分也在此方面也起到重要作用,光伏板可以有效减少水分的蒸发,而土壤酶活性的提升通常与土壤水分的增加呈正相关,即土壤水分越高,越能促进土壤酶活性的增强。

4 结论

(1) 光伏板遮挡区域土壤含水量、饱和持水量、毛管持水量及田间持水量显著高于无遮挡区域,且随光伏板高度的增加而降低。

(2) 光伏板高度的降低可以显著提高土壤全氮、全磷的养分固定能力,但土壤有机碳含量在干旱末期相较于无光伏遮挡区域降低了35%。

(3) 石漠化地区光伏板遮挡影响土壤水分及养分的关键因子为土壤容重、pH值、孔隙度及相关酶的活性水平,且光伏遮挡区域可通过对土壤水分及养分的正向调节作用改良土壤性质。

参考文献(References)

- [1] 丁成翔,刘禹.光伏园区建设对青藏高原高寒荒漠草地土壤原核微生物群落的影响[J].草地学报,2021,29(5):1061-1069.
Ding Chengxiang, Liu Yu. Effects of solar photovoltaic park construction on soil microbial community in alpine desert of Qinghai-Tibet Plateau [J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(5): 1061-1069.
- [2] 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.
Tian Zhengqing, Zhang Yong, Liu Xiang, et al. Effects of photovoltaic power station construction on terrestrial environment: Retrospect and prospect [J]. Environmental Science, 2024, 45(1): 239-247.
- [3] Li Cui, Liu Jinxian, Bao Jiabing, 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.
- [4] Chen Xiaoxin, Chen Bojian, Wang Yongdong, et al. Response of vegetation and soil property changes by photovoltaic established stations based on a comprehensive META-analysis [J]. Land, 2024, 13(4):478.
- [5] 屈准,杨肃昌,赵鹏,等.青藏高原东北缘大规模光伏电站对高寒沙地植被-土壤的影响研究:以青海共和盆地为例[J].干旱区资源与环境,2024,38(12):92-106.
Qu Zhun, Yang Suchang, Zhao Peng, et al. Effects of large-scale photovoltaic power stations on vegetation and soil in alpine sandy land in the northeastern margin of Qinghai-Tibet Plateau: A case study of Gonghe basin in Qinghai Province [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2024, 38(12): 92-106.
- [6] 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.
- [7] Yue Shengjuan, Wu Wei, Zhou Xiaode, et al. The influence of photovoltaic panels on soil temperature in the Gonghe Desert area [J]. Environmental Engineering Science, 2021, 38(9): 910-920.
- [8] Zhang Jia, Li Zaixin, Tao Junyu, et al. Observed impacts of ground-mounted photovoltaic systems on the microclimate and soil in an arid area of Gansu, China [J]. Atmosphere, 2024, 15(8): 936.
- [9] 车光欣,李艳梅,胡元泽,等.滇中石漠化地区光伏阵列对微气候-土壤的影响机制及效应[J].水土保持学报,2025,39(3)
Che Guangxin, Li Yanmei, Hu Yuanze, et al. Mechanisms and effects of photovoltaic arrays on microclimate-soil in the rocky desertification area of central Yunnan Province [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(3)
- [10] 王颖,李国庆,周洁,等.光伏阵列对土壤水分的影响研究[J].太阳能,2021(7):53-58.
Wang Ying, Li Guoqing, Zhou Jie, et al. Research on influence of PV array on soil moisture [J]. Solar Energy, 2021(7): 53-58.
- [11] 吴智泉,罗忠新,罗久富,等.石漠化光伏场区土壤肥力质量空间分异特征[J].生态学杂志,2023,42(11):2597-2603.
Wu Zhiquan, Luo Zhongxin, Luo Jiufu, et al. Spatial differentiation of soil fertility in a photovoltaic power station in rocky desertification zone [J]. Chinese Journal of Ecology, 2023, 42(11): 2597-2603.
- [12] 李少华,高琪,王学全,等.光伏电站干扰下高寒荒漠草原区植被和土壤变化特征[J].水土保持学报,2016,30(6):325-329.
Li Shaohua, Gao Qi, Wang Xuequan, et al. Characteristics of vegetation and soil property changes by photovoltaic plant interference in alpine desert steppe [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(6): 325-329.
- [13] 屈文娟.大型光伏电站区域环境要素时空变化特征及其影响研究[D].陕西西安:西安理工大学,2023.
Qu Wenjuan. Study on the temporal and spatial variation characteristics of regional environmental elements of large-scale photovoltaic power plants and their impacts [D]. Xi'an, Shaanxi: Xi'an University of Technology, 2023.
- [14] Cai Jiale, Meng Zhongju, Meng Ruibing, et al. Exploring a path of vegetation restoration best suited for a photovoltaic plant in the Hobq Desert [J]. Frontiers in Environmental Science, 2024, 12: 1380421.
- [15] Choi C S, Cagle A E, Macknick J, et al. Effects of revegetation on soil physical and chemical properties in solar photovoltaic infrastructure [J]. Frontiers in Environmental Science, 2020, 8: 140.
- [16] 罗忠新,黎慤,王涛,等.不同植被恢复类型下土壤碳含

- 量对光伏组件遮阴的响应[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2024,52(9):147-154.
- Luo Zhongxin, Li Min, Wang Tao, et al. Response of soil carbon contents to photovoltaic modules shading under different vegetation restoration types [J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2024,52(9):147-154.
- [17] 吴雲鹏,李艳梅,胡元泽,等.不同光伏阵列处理对滇中石漠化地区环境因子及细菌群落组成和多样性的影响[J].生态环境学报,2024,33(10):1570-1579.
- Wu Yunpeng, Li Yanmei, Hu Yuanze, et al. The impact of different photovoltaic array treatments on the physicochemical properties, bacterial community composition, and diversity of soils in rocky desertification areas of central Yunnan [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2024,33(10):1570-1579.
- [18] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
- Bao Shidan. Soil and agricultural chemistry analysis [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [19] 卢华兴,段旭,赵洋毅,等.滇中磨盘山典型林分土壤优先流特征及其归因分析[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2022,50(7):48-62.
- Lu Huaxing, Duan Xu, Zhao Yangyi, et al. Characteristics and attribution analysis of soil preferential flow in typical stand of Mopan Mountain in central Yunnan [J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2022,50(7):48-62.
- [20] 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.
- Zhou Maorong, Wang Xijun. Influence of photovoltaic power station engineering on soil and vegetation: Taking the Gobi Desert area in the Hexi Corridor of Gansu as an example [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2019,17(2):132-138.
- [21] Hassanpour Akeh E, Selker J S, Higgins C W. Remarkable agrivoltaic influence on soil moisture, micrometeorology and water-use efficiency [J]. PLoS One, 2018,13(11):e0203256.
- [22] 方乾,赵龙山,樊春华,等.石漠化区薄土层坡地雨水转化及土壤侵蚀影响因素分析[J].农业工程学报,2022,38(8):88-97.
- Fang Qian, Zhao Longshan, Fan Chunhua, et al. Influencing factors of rainwater transformation and soil erosion in thin soil hillslope of rock desertification regions [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022,38(8):88-97.
- [23] 陈凤,潘政,翟亚明,等.不同坡度下侵蚀性降水对土壤理化性质的影响[J].中国水土保持,2024(3):55-60.
- Chen Feng, Pan Zheng, Zhai Yaming, et al. The effect of erosive precipitation on physical and chemical properties of soil in different slopes [J]. Soil and Water Conservation in China, 2024(3):55-60.
- [24] 俞筱押,李玉辉,黄金,等.2010年春季干旱对石林喀斯特植物群落的影响[J].生态学杂志,2011,30(7):1441-1448.
- Yu Xiaoya, Li Yuhui, Huang Jin, et al. Impacts of extreme drought in spring 2010 on karst vegetations in Shilin of Yunnan Province, China [J]. Chinese Journal of Ecology, 2011,30(7):1441-1448.
- [25] 蔡晓布,周进.退化高寒草原土壤有机碳时空变化及其与土壤物理性质的关系[J].应用生态学报,2009,20(11):2639-2645.
- Cai Xiaobu, Zhou Jin. Spatial-temporal variation of soil organic carbon and its relations to soil physical properties in degraded alpine grasslands [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009,20(11):2639-2645.
- [26] Liu Ziyu, Peng Tong, Ma Shaolan, 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] Portela E, Monteiro F, Fonseca M, et al. Effect of soil mineralogy on potassium fixation in soils developed on different parent material [J]. Geoderma, 2019, 343: 226-234.
- [28] 赵文东,李凯,沈健,等.坡位和坡度对黑木相思人工林土壤养分空间分布的影响[J].东北林业大学学报,2022,50(9):78-84.
- Zhao Wendong, Li Kai, Shen Jian, et al. Effects of slope position and gradient on spatial distribution of soil nutrients in *Acacia melanoxylon* plantation [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2022,50(9):78-84.
- [29] 张水琳,马丽娜,王妍,等.断陷盆地不同石漠化生态修复类型下土壤碳氮磷化学计量及酶活性特征[J].水土保持研究,2023,30(4):69-74.
- Zhang Shuilin, Ma Lina, Wang Yan, et al. Characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry and enzyme activity under different ecological restoration types of rocky desertification in fault basin [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023,30(4):69-74.
- [30] 王思砚,苏维词,范新瑞,等.喀斯特石漠化地区土壤含水量变化影响因素分析:以贵州省普定县为例[J].水土保持研究,2010,17(3):171-175.
- Wang Siyan, Su Weici, Fan Xinrui, et al. Influence factors of soil moisture in karst rocky desertification region: A case study of Puding County, Guizhou Province [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2010,17(3):171-175.