

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

车光欣¹, 李艳梅¹, 胡元泽², 王妍¹, 吴雲鹏¹, 刘芳君¹

(1.西南林业大学水土保持学院,昆明 650224; 2.石林云电投新能源开发有限公司,昆明 652200)

摘要: [目的] 分析石漠化地区光伏阵列对气候-土壤的影响与机理,为石漠化地区“光伏+”及生态修复提供科学依据。[方法] 以云南石林光伏电站为研究对象,基于气象站观测与土壤性质测定,通过方差分析、Mantel test 和偏最小二乘法结构方程模型(PLS-SEM),分析光伏阵列区与非光伏阵列区的微气候与土壤理化性质的干湿季动态变化,探究光伏组件对微气候-土壤的影响过程及机制。[结果] 1) 不同季节下,光伏阵列显著影响局地微气候因子和土壤理化性质($p < 0.05$),相较非光伏阵列区,雨季,光伏阵列区显著增加空气湿度(4%)、土壤温度(7%),降低风速(77%)、土壤湿度(10%)、光照强度(59%)、体积质量(21%)、SOC(55%)、TN(14%)、HN(52%),旱季,光伏阵列区显著增加AK(32%),减少风速(89%)、体积质量(11%)、SOC(27%)、HN(37%)。2) 光伏阵列内主要通过光照强度、气温、风速、pH促进土壤水热与养分变化,光伏阵列对微气候、土壤水热、土壤养分皆具有直接积极影响,同时通过改善微气候、土壤水热条件对土壤化学性质造成间接改良作用。[结论] 滇中石漠化地区光伏板的架设,能够消风遮光,增加空气湿度,维持土壤的温度和水分,增加土壤体积质量,提高速效钾质量分数,有助于改善生态系统稳定性。

关键词: 石漠化; 光伏阵列; 微气候; 土壤水热; 土壤理化性质

中图分类号: X773

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)03-0191-11

Mechanisms and Effects of Photovoltaic Arrays on Microclimate-Soil in the Rocky Desertification Area of Central Yunnan Province

CHE Guangxin¹, LI Yanmei¹, HU Yuanze², WANG Yan¹, WU Yunpeng¹, LIU Fangjun¹

(1.College of Soil and Water Conservation, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China;

2.Shilin Yundiantou New Energy Development Co. Ltd., Kunming 652200, China)

Abstract: [Objective] To analyze the effects of photovoltaic (PV) arrays on climate and soil in rocky desertification areas and the underlying mechanisms, and to provide a scientific basis for “PV+” initiatives and ecological restoration in rocky desertification areas. [Methods] Taking Yunnan Shilin photovoltaic power station as the research object, based on meteorological station observations and soil property measurements, we analyzed the dynamic changes in microclimate and soil physicochemical properties between PV array area and non-PV array area in dry and wet seasons through analysis of variance (ANOVA), Mantel test, and Partial Least Squares Structural Equation Modeling (PLS-SEM), in order to explore the process and mechanism of the impacts of PV modules on microclimate and soil. [Results] 1) Across different seasons, PV arrays significantly affected local microclimate factors and soil physicochemical properties ($p < 0.05$). Compared with non-PV array areas, during the rainy season, PV array areas significantly increased air humidity (4%) and soil temperature (7%), and decreased wind speed (77%), soil moisture (10%), light intensity (59%), soil bulk density (21%) SOC

收稿日期: 2024-10-31

修回日期: 2024-12-24

录用日期: 2025-01-02

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-03-13

资助项目: 国家自然科学基金项目(32260420); 云南省基础研究计划重点项目(202401AS070014); 云南省水土保持与荒漠化防治学一流学科开放基金项目(SKB20240037)

第一作者: 车光欣(2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: 18709781710@163.com

通信作者: 李艳梅(1978—), 女, 博士, 副教授, 主要从事生产建设项目水土保持、城市生态环境研究。E-mail: 363889038@qq.com

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

(55%), TN (14%) and HN (52%). In the dry season, PV array areas significantly increased AK (32%) and decreased wind speed (89%), soil bulk density (11%), SOC (27%) and HN (37%). 2) Within the PV arrays, soil hydrothermal and nutrient changes were mainly promoted by light intensity, air temperature, wind speed, and pH. The PV arrays had a direct positive effect on microclimate, soil hydrothermal conditions, and soil nutrients, and at the same time, indirectly improved soil chemical properties through improving microclimate and soil hydrothermal conditions. [Conclusion] The installation of PV panels in the rocky desertification area of central Yunnan can reduce wind speed and block light, increase air humidity, maintain soil temperature and moisture, increase soil bulk density and available potassium content, thereby contributing to the improvement of ecosystem stability.

Keywords: rocky desertification; photovoltaic arrays; microclimate; soil hydrothermal conditions; soil physicochemical properties

Received: 2024-10-31

Revised: 2024-12-24

Accepted: 2025-03-13

Online(www.cnki.net): 2025-03-13

“双碳”目标下,光伏(PV)发电以其清洁高效、低碳稳定的优势,已成为我国向绿色能源转型的关键力量^[1]。石漠化作为岩溶生态环境问题之首,具有土层贫瘠、基岩裸露、土地生产力下降、生态系统的承灾阈值弹性小等特点,致使该生态系统的稳定性一旦遭遇破坏,极易形成水土流失加剧,植被恢复速率降低、土地退化的现象^[2]。但石漠化地区光热资源丰富,是建设大规模集中式光伏电站的最优场址。随着生态修复类新能源项目的推广,协调光伏产业发展与生态系统保护之间的矛盾亟待解决。因此,研究石漠化地区光伏阵列对微气候-土壤的影响,进一步探究生态系统对光伏设施运行的响应机理,可为生态脆弱区光伏产业全效发展策略给予基础支撑。

目前,光伏建设对生态环境影响的研究主要集中在沙漠、草地、农田等生态系统^[3-5]。研究^[6-7]发现,因光伏阵列导致的下垫面变化,使阵列内太阳辐射能及降水空间分布发生转移,从而改变局部地区风速、空气温湿度等微气候因子。加之光伏组件的遮阴效果,能够减小地表水分蒸发作用,增加土壤储水性能,对植物生产力、土壤物质循环^[8-9]及微生物群落造成直接或间接的影响,最终导致土壤固碳潜力等生态系统功能发生改变。可见,研究光伏阵列对微气候-土壤水热-土壤理化性质的影响机制,是探究光伏组件对生态效益影响的必要条件。但光伏电站内微生境的变异程度及各环境因素间的相互作用机制,受地理条件、生态系统和光伏建设的规模、分布等差异较大。尤其是西南石漠化地区受雨季降水集中、旱季干旱高温的影响,及土壤长期难以储水的特征^[10],使该生态系统对生境异质性响应呈现高度敏感性。蒋立哲等^[11]研究表明,石漠化光伏场区内的光照资源异质性对叶功能性状及其在种间变异具有重要的驱动作用;罗

忠新等^[12]研究发现,光伏组件遮阴引起的光照强度变化可直接或与植被协同作用间接改变土壤碳质量分数。因此,有必要对石漠化地区光伏阵列如何通过影响气候条件,直接或间接对土壤水热和土壤理化性质造成多大程度的影响开展进一步探究。

本研究以云南省石林光伏电站为研究区域,通过分析不同季节(雨季、旱季)光伏电站局部地区气候因子和土壤因子的变化特征与交互作用,从气象、土壤 2 个维度探寻光伏电站建设对地上-地下环境的影响机制及效应。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于云南石林光伏电站二期工程(24°50'32"N, 103°24'26"E),海拔 1 920 m,位于云南省石林县。石林县年平均气温 15.8℃,年平均降水量 949.5 mm^[13],年蒸发量 1 909.4 mm。年平均日照时间 2 193.1 h,年平均太阳总辐射 5 894.45 MJ/(m²·a),属太阳能辐射资源较丰富区^[14]。土壤类型以红壤为主,样地主要植被有白茅(*Imperata cylindrica*)、甘青蒿(*Artemisia tangutica*)、红花月见草(*Oenothera rosea*)和茅莓(*Rubus parvifolius*)等。石林光伏电站为建设时期中国乃至亚洲首个大型地面集中式光伏电站,于 2016 年二期工程投产使用,先后建立 2 列柱斜顶支架、平顶支架 2 种地面固定式光伏支架。

本研究选择具有代表性的“平顶支架区”(光伏阵列区)作为研究区域。该光伏阵列区总装机容量约 4 MW_p,每排光伏阵列间距约为 6.5 m,每个光伏子阵列东西向长 22.67 m,南北宽 9.40 m,支架列间距 0.70 m。每个太阳能电池板尺寸为 1 650 mm×992 mm×35 mm,倾斜角为 23°,前檐距地面垂直高度 2.9 m,后檐距地面垂直高度 3.5 m。

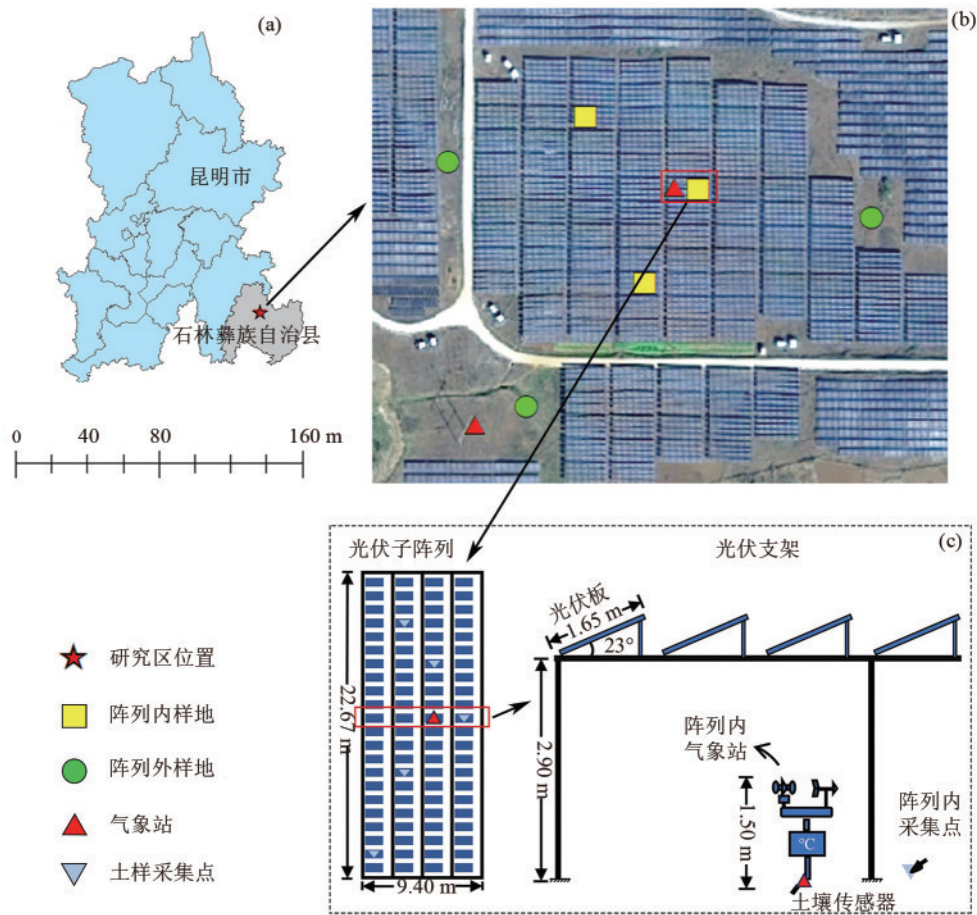
1.2 试验方法

1.2.1 试验设计与微气候测量 在光伏阵列区(下文统称阵列内)随机选取 3 个子阵列,每个子阵列周围选择 1 块与子阵列区同等大小且未受光伏阵列干扰的空地作为参考区域(光伏阵列外,下文统称阵列外),参考区域与研究区域间距 30 m。考虑到光伏板边缘有水分汇集等造成的微量土壤侵蚀,为保证与参考区下垫面性质一致,光伏阵列区仅选择光伏板正下方进行土壤样品采集与微气候测定。

2023 年 3 月,分别于阵列内和阵列外架设 2 个小型气象站和土壤传感器,对 2023 年 4 月(旱季)和 9 月

(雨季)的气象要素(1.5 m 处空气温度、相对湿度、风速、光照强度)和地下 10 cm 处的土壤水热(土壤温度、土壤湿度)进行连续观测,数据采集为 1 h/次。其中,光伏阵列区内气象站架设在位于阵列中心的光伏板正下方(图 1)。

1.2.2 土壤样品采集 于 2023 年 4 月和 9 月,在随机选择的 15 块光伏板正下方和阵列外的 3 块参照样地采集环刀土和 0~20 cm 土层土壤样品,其中阵列外每个样地采用五点取样法,共计 30 个土样。自然风干后剔除植物根系及砾石等杂物并研磨过筛,用于土壤化学指标的测定。



注:图 a 为研究区位置;图 b 为研究分布位置;图 c 为光伏子阵列、光伏支架结构及采样分布。

图 1 试验布置

Fig. 1 Overview of the experimental setup

1.2.3 土壤理化指标测定 土壤有机碳(SOC)采用油浴加热-重铬酸钾氧化法测定;土壤全氮(TN)采用半微量凯氏定氮法测定;水解氮(HN)采用碱解-扩散法测定;速效钾(AK)采用醋酸铵-火焰光度法测定;体积质量(BD)采用环刀法测定;土壤 pH 采用电位法(1:2.5 土水比)测定,均参照文献[15]。

1.3 偏最小二乘法结构方程模型

偏最小二乘法结构方程模型(PLS-SEM)是一种多变量统计分析方法,可用于量化显变量和潜变

量之间的相互关系和路径系数。该模型对样本量和数据正态性的限制性要求和假设较少,采用一种迭代求解策略,可更有效解决因子之间存在共线性的问题^[16]。其描述公式为:

$$x_{pq} = \lambda_{pq} \xi_q + \epsilon_{pq} \tag{1}$$

式中: λ_{pq} 为与第 q 个块中第 p 个显变量相关的载荷和误差项; ϵ_{pq} 为测量模型中的不精确度。

结构模型估计潜在变量之间的关系,该关系可以描述的方程为:

$$\xi_j = \sum_{i \neq j} \beta_{ij} \xi_i + \zeta_j \quad (2)$$

式中: β_{ij} 为第 i 个外生变量与第 j 个内生变量相关的路径系数; ζ_j 为内在关系的误差。

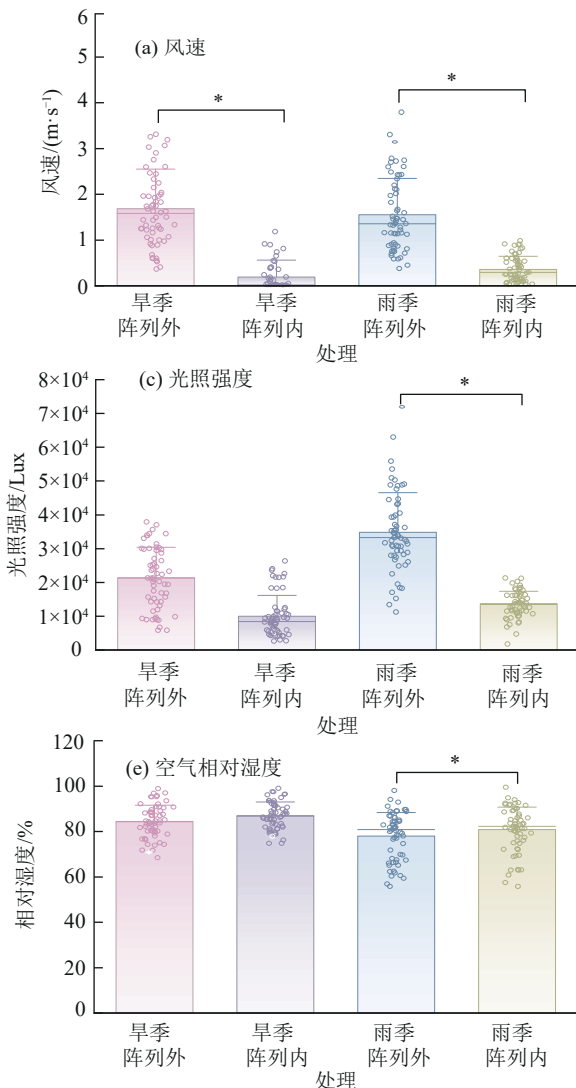
1.4 数据分析

采用 Excel 2013 软件对数据进行基础分析, SPSS 26.0 软件对不同季节下光伏阵列内外的微气候和土壤各因子进行差异性和相关性分析, Origin 2024 软件作图, RStudio 4.2.1 软件构建偏最小二乘路径模型 (PLS-SEM), 分析光伏阵列对气象-土壤水热-土壤养分的影响路径。

2 结果与分析

2.1 光伏阵列对微气候因子的季节变化影响

光伏阵列的架设明显改变局地微气候因子的季



注: *表示 $p < 0.05$; **表示 $p < 0.01$; ***表示 $p < 0.001$ 。下同。

图 2 不同处理下气象因子季节动态

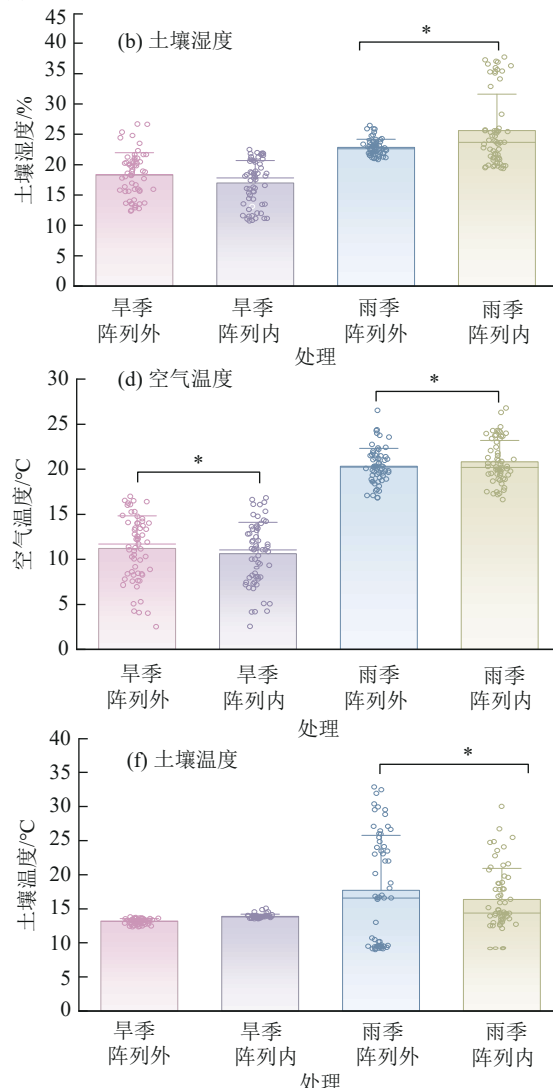
Fig. 2 Seasonal dynamics of meteorological factors under different treatments

2.2 光伏阵列对微气候因子的日变化影响

光伏阵列内风速和光照强度的日变化曲线振幅相对阵列外大幅降低(图 3)。其中雨季和旱季阵列

节动态特征(图 2、表 1)。其中光伏阵列对风速具有显著的消减效应($p < 0.05$),且消减率旱季(88.7%)大于雨季(76.8%);光伏阵列显著减弱光照强度($p < 0.05$),雨季减弱程度(69.8%)大于旱季(61.3%)。光伏阵列对空气相对湿度具有升高效应,雨季增加 4.1%,旱季增加 2.9%,但阵列内外的相对湿度差异性不显著($p < 0.05$)。

光伏阵列的架设也改变微区域的空气温度,阵列内外气温的差异性不显著($p < 0.05$)。其中,雨季,光伏阵列内日平均气温(20.76°C)较阵列外气温(20.22°C)升高 3%。旱季,阵列内气温(10.63°C)较对照区气温(11.20°C)降低 5%,表现为雨季增温,旱季降温的特点。



内最大风速分别仅占阵列外的 19.7% 和 17.1%。阵列内光照强度相比对照区日变化曲线总体大幅降低,但变化波动性增强,且在旱季强于雨季。

表 1 不同处理和季节对环境因子的双因素方差分析(*F* 值)
Table 1 Two-way ANOVA (*F*-values) of environmental factors in different treatments and seasons

项目	季节	处理	季节×处理
空气温度	648.40***	0.001	2.22
空气相对湿度	31.89***	7.10*	0.14
风速	0.05	274.88***	3.51
光照强度	86.27***	290.71***	12.51**
土壤温度	160.92***	0.12	9.47*
土壤湿度	32.30***	0.85	4.32*
BD	32.50***	5.95*	41.50***
pH	25.23**	14.57**	0.62
SOC	152.29***	221.38***	12.10**
TN	1 781.48***	23.25***	10.55**
HN	4 676.27***	4 696.22**	17.16**
AK	45 723.06***	8.30**	28 786.04***

注:*表示 $p<0.05$; **表示 $p<0.01$; ***表示 $p<0.001$; BD 为土壤体积质量; SOC 为土壤有机碳; TN 为全氮; HN 为水解性氮; AK 为速效钾。下同。

光伏阵列对不同季节下空气温湿度日变化影响不同。雨季,阵列内外气温日变化趋势基本一致,曲线

均呈“单峰”型,但在 10:00—18:00,光伏阵列内具有增温作用,其余时段均表现为降温作用,且最高温出现有明显滞后现象。旱季,光伏阵列内外气温日变化也呈“单峰”曲线变化趋势,阵列内气温基本稳定低于阵列外。与雨季相比,旱季阵列内仅在峰值前后 1 h 表现出增温作用,最高温滞后时间也缩短 1 h。旱季阵列内外空气相对湿度均呈先减后增的“单峰”型,阵列内相对湿度一直稳定高于阵列外。雨季,阵列内 10:00—17:00 表现为降湿,其余时间为增湿。可见,在该时间段光伏阵列具有“增温降湿”、其余时间段则具有“降温增湿”效应,且该效应雨季强于旱季。

2.3 不同季节光伏阵列对土壤理化因子的影响

由图 2 可知,雨季,光伏阵列显著升高土壤温度 1.6℃(7%),降低土壤湿度(10%)($p<0.05$),旱季则相反,光伏阵列降低土壤温度 1.28℃(7%),升高土壤湿度(5%),但影响不显著,说明光伏阵列对土壤具有雨季“增温降湿”、旱季“降温增湿”的作用。

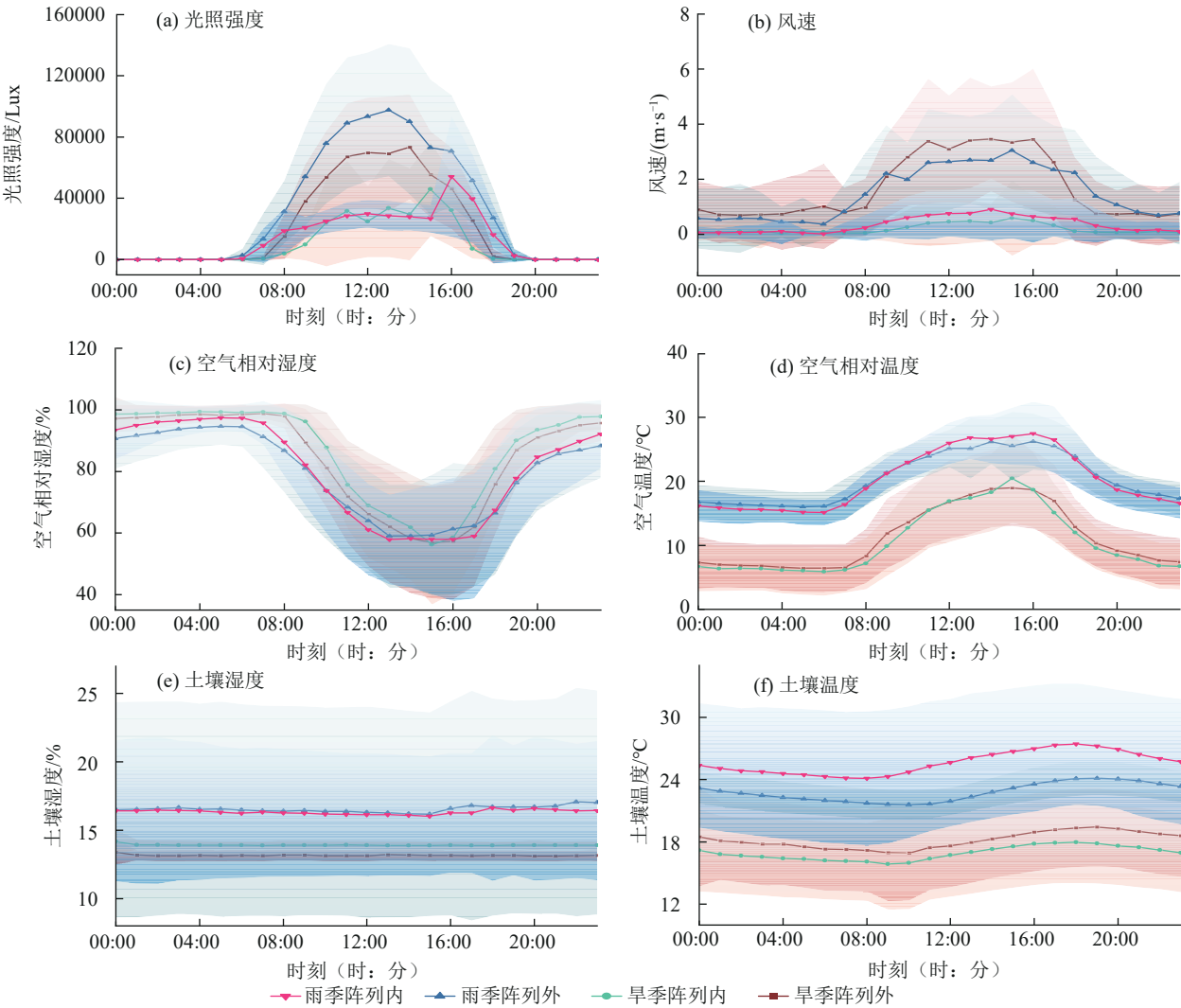
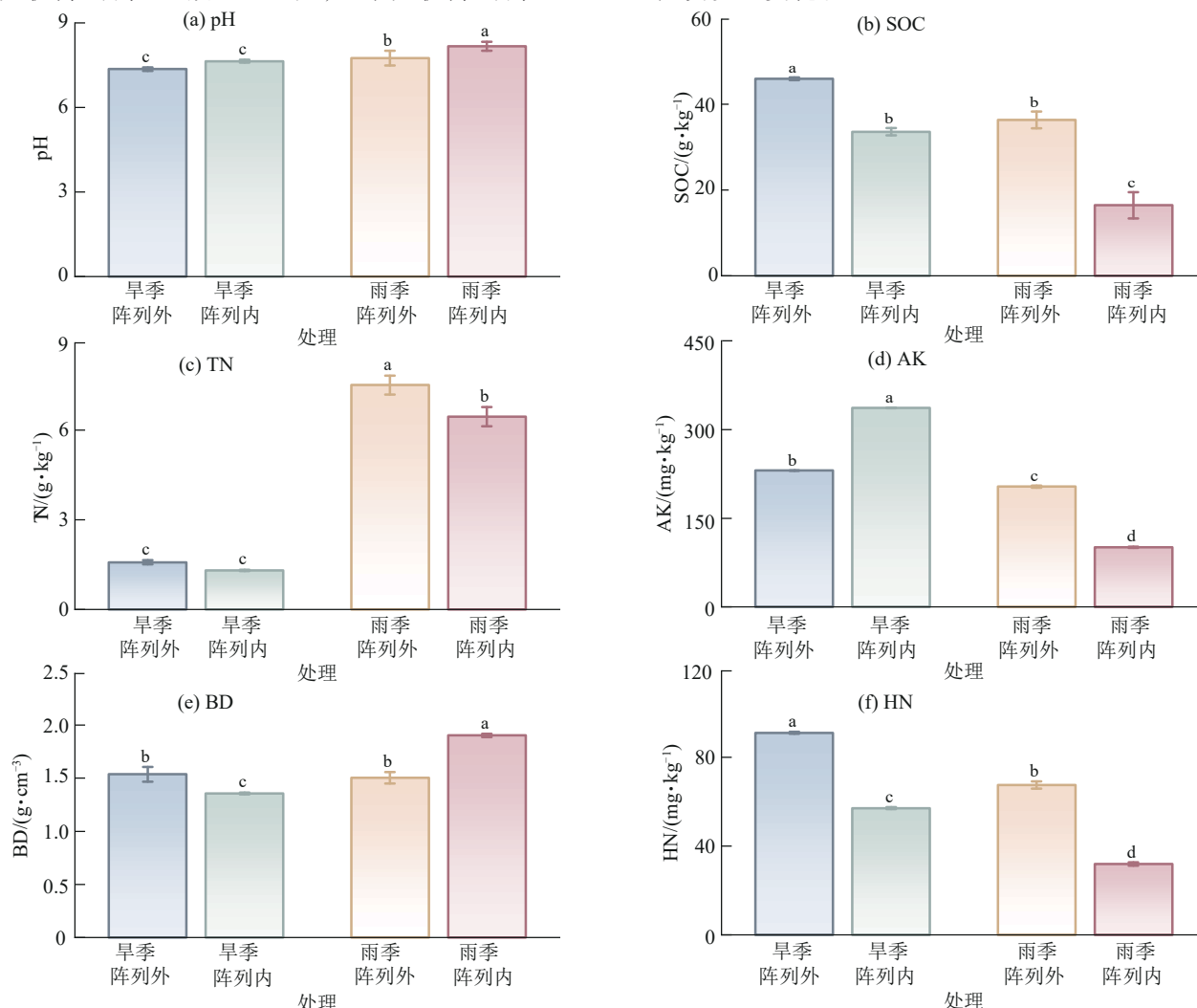


图 3 不同季节下光伏阵列内外各气象因子及土壤温湿度日变化

Fig. 3 Daily variations of meteorological factors and soil temperature and humidity under different treatments in different seasons
<http://stbcbx.alljournal.com.cn>

从土壤温、湿度日变化特征(图3)来看,光伏阵列内外不同季节下土壤温湿度的日变化趋势基本一致,但阵列内日变化曲线较阵列外相对平缓。光伏阵列对BD也表现出明显的季节性差异(图4),旱季光伏阵列内BD减少10.5%,雨季光伏阵列内BD

增加21%,且各季节下光伏板对BD影响均显著($p<0.05$)。光伏阵列与季节的交互作用对土壤温、湿度差异显著($p<0.05$),对BD差异极显著($p<0.01$)(表1),说明光伏阵列的运行引起土壤物理性质发生变化。



注:图注上方不同小写字母表示不同处理间差异显著($p<0.05$)。

图4 不同处理土壤化学性质的季节动态

Fig. 4 Seasonal dynamics of soil chemical properties under different treatments

光伏阵列的建设显著改变土壤化学性质(图4、表1),相较于阵列外,光伏阵列内显著升高pH(4.41%)、AK(0.81%),降低SOC(39.18%)、TN(14.61%)、HN(44.83%)($p<0.01$)。光伏阵列对土壤化学性质的季节动态变化规律具有一定影响。其中,光伏阵列对AK的季节性差异影响最明显,表现为旱季阵列内AK增加,雨季则减少,且旱雨季都为影响显著。其次,光伏阵列仅在雨季下显著升高pH和降低TN,旱季则影响不显著。光伏阵列内土壤化学性质的季节性变化幅度略高于光伏阵列外。由表1可知,光伏阵列与季节变化的交互作用显著影响SOC、TN、HN($p<0.01$),对AK表现为影响极显著

($p<0.001$)。

2.4 光伏阵列局地微气候与土壤因子之间的相互关系

采用 Pearson 相关性分析光伏阵列内外微气候(空气温湿度、风速、光照强度)、土壤水热(土壤温湿度)、土壤养分(SOC、TN、HN、AK)及pH、BD之间的相关性(图5)。结果表明,光伏阵列能够改变各环境因子之间的相关程度,甚至改变因子间的影响方向。光伏阵列内微气候因子之间,仅风速与气温呈显著负相关($p<0.01$),而阵列外各微气候因子之间相关性则更明显,表现为气温与光照强度呈极显著正相关($p<0.01$),相对湿度

与气温和光照强度呈显著负相关($p<0.05$)。土壤水热与微气候因子之间仅阵列内土壤温度与光照

强度、阵列外土壤湿度与空气湿度间为显著负相关($p<0.05$)。

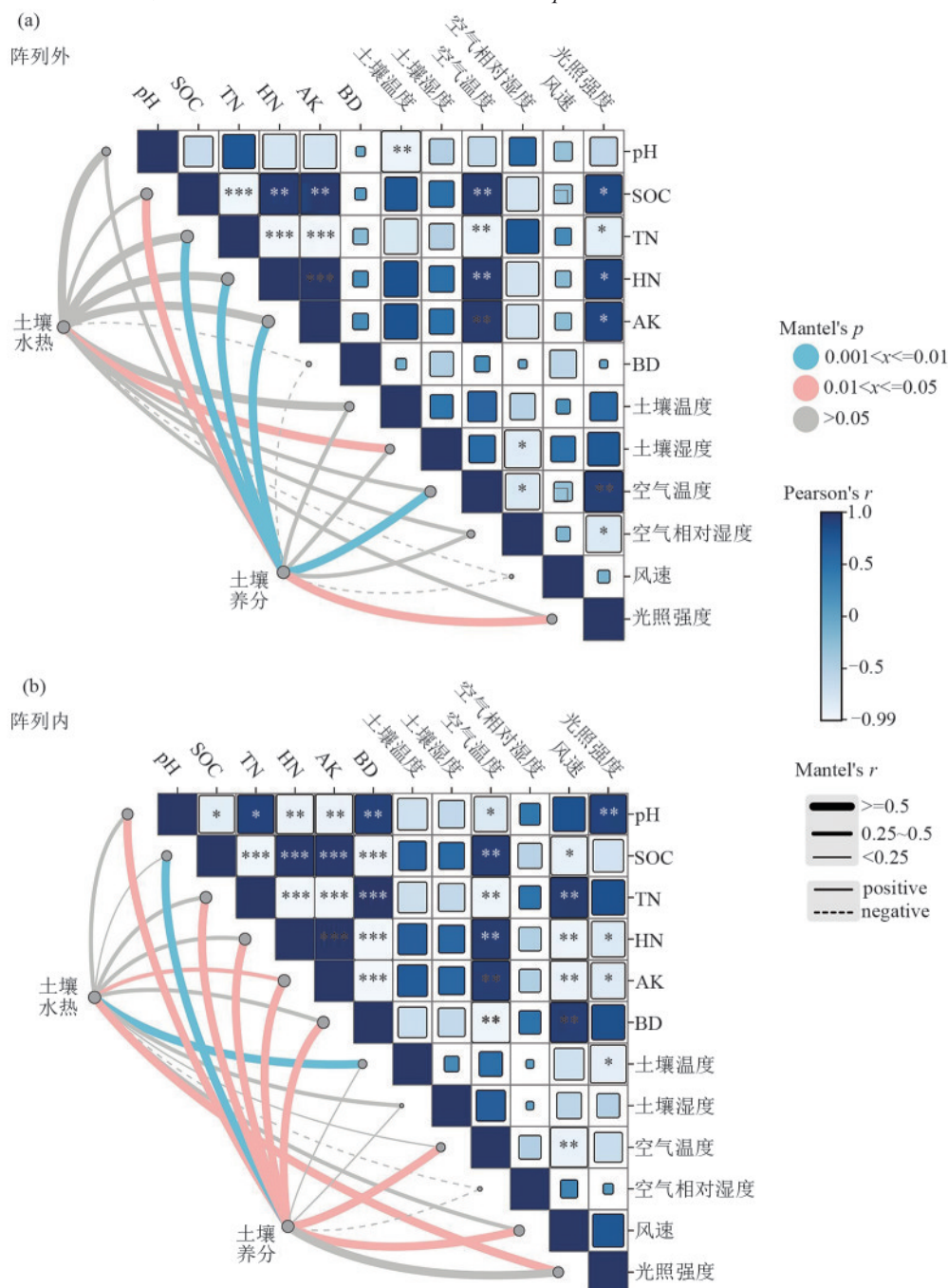


图5 光伏阵列内外气候与土壤因子的Mantel分析

Fig. 5 Mantel analysis of climate and soil factors under different treatments

土壤养分与微气候因子之间,光伏阵列内外SOC、HN、AK均与气温呈极显著正相关,TN与气温均呈极显著负相关($p<0.01$),与空气湿度的相关性均不显著。但光伏阵列使土壤养分与光照强度和风速之间的相关性发生改变。阵列外光照强度与SOC、HN、AK均呈显著负相关,与TN呈显著正相关,但阵列内仅与HN、AK相关性显著($p<0.05$),且光照强度对土壤养分的影响方向与阵列外完全相反。其次,阵列内风速、BD、pH与土壤养分因子间相

关性均达显著,但阵列外相关性不显著($p<0.05$)。

采用Mantel分析光伏阵列内外土壤水热、养分与气候因子间的关系。阵列内土壤水热与光照强度的曼特尔显著值最小(Mantel's $p=0.013$),土壤养分与BD、pH、气温、风速的曼特尔显著值最小,(Mantel's $p=0.013<0.048$),且均呈正相关。说明阵列内pH、气温、风速分别为促进土壤水热、养分的主控因素,光照强度也可作为影响阵列内土壤水热及养分变化的敏感性指标。阵列外仅光照强度

与土壤养分的曼特尔显著值 <0.05 ,表明阵列外气候因子中仅光照强度对土壤养分起主要促进作用。

采用偏最小二乘法结构方程模型进一步探究光伏阵列对微气候、土壤水热、土壤养分之间的相互影响机制,量化三者之间的因果关系。

路径系数(图6)表明,光伏阵列直接影响微气

候、土壤理化和水热,且为正效应,分别解释0.25、0.54、0.10的变化通量,其中光伏阵列仅与土壤理化呈极显著正相关($p<0.001$)。其次,光伏阵列对微气候促进作用,对土壤水热与理化性质间接产生负效应,而光伏板对土壤水热的正效应可间接促进土壤养分改良。

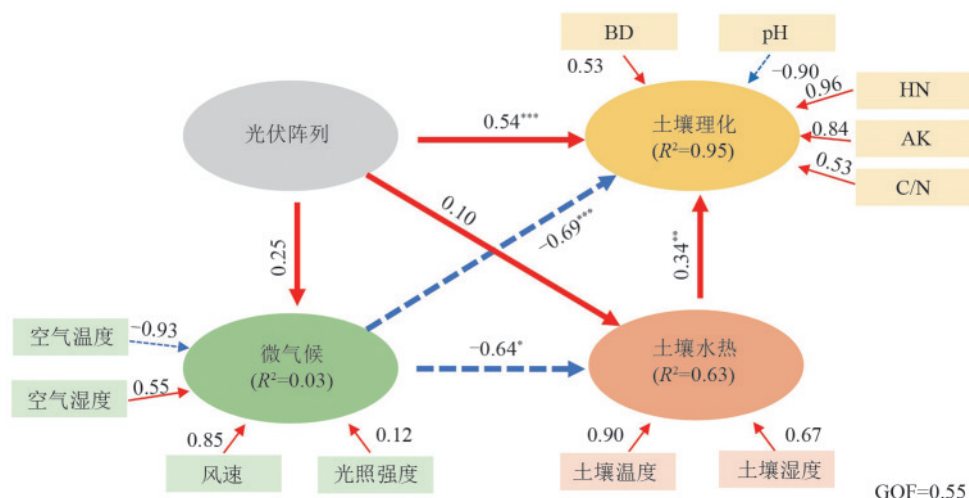


图6 光伏阵列对微气候、土壤水热、土壤理化的PLS-SEM分析

Fig. 6 PLS-SEM analysis for the effects of PV arrays on microclimate, soil hydrothermal conditions and physicochemical properties

3 讨论

3.1 云南石漠化地区光伏阵列对微气候的影响

光伏电站的运行虽基本不会产生碳排放,但光伏阵列的布设通过对区域进行空间性分割,能够有效减少地表反照率和辐射通量,改变下垫面陆面参数特征,导致微气候因子发生变化,通过局部气象要素或环境变量来对整体气候条件造成潜在的影响^[17]。

光伏组件对太阳辐射能量的再分配作用,显著减少光伏板下地表接受的短波辐射,进而降低光伏板下光照强度^[18]。同时,光伏阵列的布设,不仅增加地表粗糙度,还改变当地原有的风速廓线特点^[19],进而降低阵列内风速。光伏阵列内因温度改变形成的气压差,一定程度上也影响风速。与多数研究^[7,12]结论基本一致,本研究中光伏阵列对光照强度和风速削弱作用明显。但由于光伏电站的规模及光伏组件的结构和排列方式等不同,对光照和风向的直接阻碍程度具有差异,也有学者^[7]研究发现,光伏电站对太阳辐射影响较小。光伏阵列内季节性热通量和土壤水热调节机制的变化,对光伏板下空气温湿度也具有直接影响。本研究发现,光伏阵列有旱季降温增湿、雨季增温增湿的作用,且光伏阵列对空气温湿度的日变化影响在不同时间段表现不同。目前大多数研究^[20-21]表明,光伏组件在不同气候条件下对空气展现出与之相似的“热岛效应”与“冷岛效应”,此2种

效应随太阳辐射的变化表现出季节性和昼夜差异:旱季和正午时分,随着太阳高度角变大,导致地表所受太阳辐射的强迫效应也变强^[22],区域内地表和光伏组件对空气散热保湿性能达到的最大累计值,使光伏板形成“热源”;而雨季及日出前和日落后,随着光伏电场对太阳辐射吸收,阵列内下垫面获得的能量低于周围,以及土壤水热环境变化,导致光伏阵列对空气产生冷却效应。总之,由于光伏电站所处气候带、下垫面的不同,以及光伏规模、光伏组件等差异,可能导致光伏阵列内微气候变化效应的程度、时长有所不同。

3.2 云南石漠化地区光伏阵列对土壤水热的影响

BROADBENT等^[20]通过观测红石光伏电站发现,光伏电站内吸收的净短波辐射的增加及光伏组件散热的综合效应,能够明显提高站内的热通量,从而改变光伏板下的总体水热状况。本研究中,光伏阵列内土壤水热表现出雨季增温降湿、旱季降温增湿的特点,与LI等^[23]在沙漠湖泊的研究结果相似。但ARMSTRONG等^[21]在英国光伏公园研究发现,从春季到秋季,光伏阵列下土壤日均温始终低于阵列外,其中最高温降低达 7.6°C ,可能是因为一方面光伏板对短波辐射的阻拦直接造成板下土壤温度降低的结果,且这种遮阴影响在辐射强度越大时越显著^[22];另一方面,由于反照率降低及光伏组件自身结构特征对光伏板下空气具有增温作用,

光伏板对土壤的直接降温效应可能与空气对土壤的热传导效应相互抵消。本研究通过土壤温湿度与微气候因子进行相关性分析表明,光伏阵列内的土壤温度与光照强度显著负相关,而与空气温度的相关性不显著,且空气温度的季节变化特征与土壤温度变化特征相反。说明光伏板对土壤温度的影响远大于空气-土壤间的热传导效应。同时,雨季阴雨天气下,除空气-土壤间的热传导效应外,光伏阵列可能对土壤还起到保温作用,在二者交互作用下,雨季阵列内土壤表现出增温的结果。光伏阵列内的土壤水分体积分数除降水影响外,还受土温调控的蒸发过程控制。本研究中,光伏阵列对土壤水分体积分数与土壤温度的季节变化影响相反,与YUE等^[9]的研究结果一致。雨季土壤湿度因光伏板对降水的再分配导致阵列内土壤湿度较小,旱季由于阵列内减小太阳辐射降低潜在蒸散量,从而保持光伏板下土壤水分。

3.3 云南石漠化地区光伏阵列对土壤养分的影响

土壤养分直接影响植物群落的种类组成与生活型特征,对生态系统的结构和功能起决定性作用。蒋立哲等^[11]研究发现,光伏阵列造成的空间异质性能形成更多生态位,以此增加植物多样性;其次,植物群落能够通过改变微环境和凋落物分解而改变土壤pH。本研究发现,光伏阵列内旱雨季pH均有所提高,且雨季光伏组件对pH影响更强烈。可能是西南石漠化地区因降雨集中,易造成土壤侵蚀及石灰岩溶解,增加土壤溶液中OH⁻浓度^[24]。而光伏组件的架设通过降水再分配,使光伏板下方岩石裸露率、降水量及水动力降低,所以相比光伏阵列外,土壤发生的水化学及冲蚀作用减小,造成土壤pH升高,此对比在雨季强降水时更加明显。罗忠新等^[12]研究表明,土壤可浸提有机碳质量分数与光照强度呈正相关,本研究也得出光伏板下SOC显著降低。是因为SOC主要来源于植物群落,通过产生地上凋落物和根系活动等方式将光合作用固定的碳输入到土壤中。光伏板对光照的直接遮蔽效应,减缓板下植物内有机物质和氧气的生成速率,降低土壤中SOC。同时微生物的分解和代谢过程为SOC固存起重要作用^[25],光伏板对光照和pH的影响可能抑制酶活性、微生物活动等,降低对SOC碳固存作用,对土壤养分造成负面影响。钾离子作为最主要的渗透物质移动性强,易受淋溶作用等流失,受土壤水热影响较大。吴智泉等^[26]对石漠化光伏场区土壤肥力调查发现,光伏板下土壤养分具有表聚特性。因此,雨季光伏板下土壤温度的

减小使含钾矿物风化速度减缓,土壤中AK的自然补充缺乏。土壤湿度较大时,钾离子在水分运动下,从土壤表层向下渗透,导致表土AK减少。蒋立哲等^[11]于旱季研究植物叶功能性状对石漠化光伏阵列异质性生境的响应发现,光伏组件下方生境植物虽具有较高的光资源获取能力,但对叶干植物积累效率降低,因此,旱季植物对AK的吸收量降低,所以土壤中累积的AK质量分数增加。吴丽芳等^[27]研究发现,石漠化地区氮、碳质量分数受植被类型影响较大。土壤干热状况下,仅能使部分浅根植物利用土壤中的TN和HN维持自身生长活动,同时微生物生存受限,体内含氮物质在分解过程中以气态形式消散,因此土壤TN和HN减少。其次,土壤中的矿物质元素绝大部分来自地上枯落物的分解归还,但光伏阵列在建设过程中对表层土的扰动,在石漠化地区恢复更为困难。CHOI等^[4]研究表明,光伏场区对土壤全氮、全碳的损失,在电站运行7a后仍未完全恢复。且光伏电站由于定期对光伏组件维护,可能对部分地上植被进行清除,从而降低光伏板下土壤养分。

3.4 石漠化地区光伏阵列对微气候-土壤的调节机制

光伏电站建设通过切割区域空间结构,形成新的微生境,迫使新生境的生态系统中生物-非生物间能量循环过程、水文状况、营养物质流动等产生较大影响,从而改变生态系统的结构和功能^[28]。本研究结果表明,光伏阵列主要通过pH、气温、风速影响土壤养分,可能是石漠化地区植物对小气候的变化非常敏感,光伏板对光照的遮蔽效应,直接影响植物内的有机物质生成速率减缓,还影响其微生物分解等过程,因此,土壤-植被-大气的元素流通被阻碍,表现出土壤养分下降^[25];另一方面,石漠化地区的土壤界面因岩石裸露和光伏阵列造成的降水分配,在岩石裸露率较小与水动力增加的双重作用下,使光伏板下土壤发生强烈的水化学及冲蚀作用,造成土壤pH升高,土壤侵蚀加剧^[24],由此通过抑制酶活性、微生物活动及植被生长等路径对土壤养分造成负面影响^[29]。

本研究还表明,光伏阵列内通过微气候调节水热,间接对土壤养分表现为促进作用。是因为光伏板的遮蔽效应虽使光合有效辐射减少,抑制植物的光合作用,但同时光伏阵列也能够通过对微气候的影响改善空气和土壤的水热条件,对土壤呼吸、植被蒸腾等具有积极效应,能够提高土壤和植被的固碳能力^[4]。由于石漠化地区本身特殊的成土母质,

使其在风化作用后仅能保留少量不溶或难溶物质,可提供的矿物质有限,但光伏板下方土壤湿度的增加,以促进石灰岩释放 OH 改良原生酸性土壤,为增加土壤微生物群落多样性提供友好条件。同时,随着光伏电站的运行,组件下方植被通过采取积极的生态策略,可能驱使植物功能性状向适宜光伏板下生长的方向进化^[11],由此增加生态系统的碳汇等生态效益。因此,石漠化地区光伏阵列内微气候和土壤水热之间相互反馈的结果最终对植被的繁育生长表现出积极作用。

综上,虽然光伏阵列建设对石漠化这种脆弱的生态系统造成严重破坏,但在后期运行中可能通过改变微气候-土壤水热的非生物环境,调节植被和微生物群落,最终对土壤微环境进行优化。需要指出的是,由于石漠化地区的脆弱性,对生境变化高度敏感,及其光伏阵列内的微气候-土壤变化机制,除气候、土壤因子外还受到植被、微生物与其之间复杂的交互作用,未来可增加与之相关的其他生物因子纳入分析,以便更深入探究光伏阵列对微气候-土壤的影响效应及机制。

4 结 论

1) 滇中石漠化地区,光伏阵列对风速、光照强度消减显著,光伏阵列内空气、土壤水热表现为旱季土壤干热、空气凉湿,雨季土壤湿冷、空气湿热。对气候因子日变化具有时段性差异。

2) 雨季光伏阵列内增加 BD,降低 AK,旱季相反。SOC、TN、HN 旱雨季皆显著降低,pH 升高。

3) Mantel 分析表明,石漠化地区光伏阵列内,促进土壤水热与养分的关键因子为光照强度、气温、风速、pH;结构方程则表明,石漠化地区光伏阵列对局部地区微气候、土壤水热、土壤养分皆表现为直接正向调节作用,通过对微气候、土壤水热的积极影响,最终间接改良土壤的化学性质。

参考文献:

- [1] 张宏伟,朱海波,吴欣茹,等.“双碳”目标下绿色清洁能源技术现状与发展趋势[J].石油科学通报,2023,8(5):555-576.
ZHANG H W, ZHU H B, WU X R, et al. Status quo and future trends of green and clean energy technology toward "dual carbon" goal[J].Petroleum Science Bulletin, 2023,8(5):555-576.
- [2] 袁道先.岩溶石漠化问题的全球视野和我国的治理对策与经验[J].草业科学,2008,25(9):19-25.
YUAN D X. Global view on karst rock desertification and integrating control measures and experiences of China [J].Pratacultural Science,2008,25(9):19-25.
- [3] 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.
WANG T, WANG D X, GUO T D, et al. The impact of photovoltaic power construction on soil and vegetation [J].Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23 (3):90-94.
- [4] 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:e140.
- [5] MOSCATELLI M C, MARABOTTINI R, MASSACESI L, et al. Soil properties changes after seven years of ground mounted photovoltaic panels in central Italy coastal area[J].Geoderma Regional,2022,29:e00500.
- [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 B, DANG X H, CHEN X, 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] 赵延岩,李振朝,高晓清,等.戈壁大型光伏电站夏季晴天地表通量特征[J].太阳能学报,2021,42(5):138-144.
ZHAO Y Y, LI Z C, GAO X Q, et al. Surface flux characteristics of large-scale photovoltaic power station in gobi on sunny days in summer[J].Acta Energiae Solaris Sinica,2021,42(5):138-144.
- [8] POTTER C. Landsat time series analysis of vegetation changes in solar energy development areas of the lower Colorado Desert, southern California [J].Journal of Geoscience and Environment Protection,2016,4(2):1-6.
- [9] YUE S J, GUO M J, ZOU P H, et al. Effects of photovoltaic panels on soil temperature and moisture in desert areas [J].Environmental Science and Pollution Research International,2021,28(14):17506-17518.
- [10] 戴全厚,严友进.西南喀斯特石漠化与水土流失研究进展[J].水土保持学报,2018,32(2):1-10.
DAI Q H, YAN Y J. Research progress of karst rocky desertification and soil erosion in southwest China[J].Journal of Soil and Water Conservation,2018,32(2):1-10.
- [11] 蒋立哲,罗久富,吴赛男,等.石漠化脆弱区光伏阵列生境异质性对植物叶功能性状的影响[J].太阳能学报,2023,44(6):252-259.
JIANG L Z, LUO J F, WU S N, et al. Impacts of habitat heterogeneity caused by photovoltaic arrays in rocky desertification area on functional traits of plant leaves[J].Acta Energiae Solaris Sinica,2023,44(6):252-259.
- [12] 罗忠新,黎慙,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 Z X, LI M, WANG T, 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.
- [13] 王锐.石林并网光伏发电科研示范项目评估研究[D].昆明:云南大学,2017.
- WANG R. Study on pre-evaluation of Shilin grid-connected photovoltaic power generation research demonstration project[D].Kunming: Yunnan University, 2017.
- [14] 云南省自然资源厅.云南省重要生态系统保护和修复重大工程总体规划(2021—2035年)[EB/OL].(2021-12-07) [2024-10-31]. https://dnr.yn.gov.cn/html/2021/tongzhigonggao_1207/33668.html.
- Yunnan Provincial Department of Natural Resources. Overall plan for major projects of important ecosystem protection and restoration in Yunnan Province[M]. [EB/OL]. (2021-12-07) [2024-10-31]. https://dnr.yn.gov.cn/html/2021/tongzhigonggao_1207/33668.html.
- [15] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
- BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [16] XU B, LI J, PEI X, et al. Decoupling the response of vegetation dynamics to asymmetric warming over the Qinghai-Xizang Plateau from 2001 to 2020[J].Journal of Environmental Management, 2023, 347: e119131.
- [17] LI B, LEI C, ZHANG W P, et al. Numerical model study on influences of photovoltaic plants on local microclimate[J].Renewable Energy, 2024, 221: e119551.
- [18] CHANG R, SHEN Y B, LUO Y, et al. Observed surface radiation and temperature impacts from the large-scale deployment of photovoltaics in the barren area of Gonghe, China[J].Renewable Energy, 2018, 118: 131-137.
- [19] 唐国栋, 蒙仲举, 高永, 等.沙区光伏设施干扰下近地表输沙通量分析[J].干旱区研究, 2020, 37(3): 739-748.
- TANG G D, MENG Z J, GAO Y, et al. Near-surface sand-dust flux under the interference of photovoltaic facilities in sandy areas[J].Arid Zone Research, 2020, 37(3): 739-748.
- [20] BROADBENT A M, KRAYENHOFF E S, GEORGESCU M, et al. The observed effects of utility-scale photovoltaics on near-surface air temperature and energy balance[J].Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2019, 58(5): 989-1006.
- [21] ARMSTRONG A, OSTLE N J, WHITAKER J. Solar Park microclimate and vegetation management effects on grassland carbon cycling[J].Environmental Research Letters, 2016, 11(7): e074016.
- [22] 常兆丰, 刘世增, 詹科杰, 等.沙漠光伏电场的光伏转换及能量传递效应:以甘肃古浪振发光伏电场为例[J].生态经济, 2020, 36(11): 188-194.
- CHANG Z F, LIU S Z, ZHAN K J, et al. Photovoltaic conversion and energy transfer effect of desert photovoltaic field: A case study of Gulang Zhenfa photovoltaic field of Gansu[J].Ecological Economy, 2020, 36(11): 188-194.
- [23] LI P D, LUO Y, HE Z, et al. A comparative study of the effects of photovoltaic power plants in desert and lake on the microclimate[J].Energy Reports, 2023, 10: 2128-2137.
- [24] 何茂林, 李瑞, 吴盼盼, 等.裸露岩石对喀斯特坡地水土流失及水动力特征的影响[J].水土保持学报, 2024, 38(4): 103-113.
- HE M L, LI R, WU P P, et al. Effects of exposed rock on soil and water loss and hydrodynamic characteristics of karst slope land[J].Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(4): 103-113.
- [25] 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: e1190650.
- [26] 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 Z Q, LUO Z X, LUO J F, 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.
- [27] 吴丽芳, 王妍, 刘云根, 等.岩溶石漠化区人工植被类型对土壤团聚体生态化学计量特征的影响[J].东北林业大学学报, 2021, 49(6): 63-69.
- WU L F, WANG Y, LIU Y G, et al. Effects of artificial vegetation type on the ecological stoichiometric characteristics of soil aggregates in karst rocky desertification areas[J].Journal of Northeast Forestry University, 2021, 49(6): 63-69.
- [28] XIA Z L, LI Y J, ZHANG W, et al. Quantitatively distinguishing the impact of solar photovoltaics programs on vegetation in dryland using satellite imagery [J]. Land Degradation and Development, 2023, 34(14): 4373-4385.
- [29] BAI Z Y, JIA A M, BAI Z J, et al. Photovoltaic panels have altered grassland plant biodiversity and soil microbial diversity[J].Frontiers in Microbiology, 2022, 13: e1065899.