童永尚,陈月芳,李政升,等.新疆伊犁半干旱区光伏电站植被-土壤耦合特性[J].中国沙漠,2026,46(5):126-135.

新疆伊犁半干旱区光伏电站植被-土壤耦合特性

童永尚[1],陈月芳[1],李政升[1],张生楹[2],李玉乐[1],
牛克昌[1,3],巴雅尔塔[1],段沛琪[1]

(1.伊犁师范大学 生物科学与技术学院/新疆伊犁河谷资源植物保护与利用重点实验室,新疆 伊宁 835000;2.尼勒克县草原工作站,新疆 尼勒克 835700;3.南京大学 生命科学学院,江苏 南京 210023)

摘要:为解析半干旱区光伏开发对植被-土壤系统的影响机制,以新疆伊犁尼勒克县运行5年的光伏电站为研究对象,设置光伏板下、光伏板行间和光伏电站外3种微生境,测定植被群落特征与土壤理化指标,并结合冗余分析(RDA)、方差分解分析(VPA)及结构方程模型(SEM)探讨其耦合关系及驱动机制。结果表明:不同光伏微生境的植被与土壤指标差异显著,光伏板下土壤含水量、植被盖度及地上生物量最优,光伏板行间的植被高度和土壤速效养分更突出,光伏电站外物种丰富度最高。pH、电导率和土壤含水量是影响植被变化的关键土壤因子,土壤水分与速效养分对植被特征变异的联合解释率达52%。结构方程模型分析进一步表明,光伏环境主要通过调控土壤含水量和速效养分,间接影响植被盖度与地上生物量变化。

关键词:伊犁;半干旱区;光伏电站;光伏微生境;植被-土壤耦合

文章编号:1000-694X(2026)05-126-10 **DOI**:10.7522/j.issn.1000-694X.2026.00082

中图分类号:X144 **文献标志码**:A

0 引言

全球能源结构转型与“双碳”目标驱动下,太阳能光伏作为最具潜力的可再生能源之一,实现了爆发式增长[1]。半干旱地区因光照资源富集、土地成本较低,成为光伏电站布局的重点区域[2-3]。然而,半干旱地区草地生态系统本身具有脆弱性,降水稀缺、土壤贫瘠且植被恢复能力弱,大规模光伏设施的土地占用与微气候改变,可能引发植被退化、土壤养分失衡等生态问题,形成能源开发与生态保护的核心矛盾[4-5]。如何协调可再生能源开发与生态系统保护,实现“光伏+生态”双赢,已成为全球生态学界与能源领域的前沿议题。

光伏板的遮阴-截留双重效应可重构局地微生境,通过调控光合有效辐射、近地表温湿度及降水再分配过程,直接影响植被光合生理与生长策略,间接驱动土壤理化性质的时空演变[6-7]。例如,毛乌素沙地光伏电站观测显示,板下0~20 cm土壤含水量提升18.42%~106.77%,但植被群落趋向单一化[8];而腾格里沙漠的研究则显示,光伏设施可促进豆科植物定植,显著提升土壤速效氮含量[9]。同样,青藏高原高寒草甸的研究表明,光伏阵列的植被变化直接影响了土壤碳、氮、磷循环及其化学计量关系,并对土壤养分恢复产生了短期积极作用[10]。综上,光伏设施通过重构局地微生境显著改变植被与土壤的相互作用,但其生态响应具有明显的区域差异性。

植被与土壤作为草地生态系统中最基础、最活跃的两大组成部分,其相互作用及耦合关系是维持生态系统结构稳定、功能发挥和抗扰能力的重要基础[11-12]。植被通过凋落物分解、根系分泌等过程调控土壤理化性质,而土壤含水量、pH值、养分有效性等因子则反向制约植被生长与群落构建[13-14]。在光伏设施扰动下,这种双向反馈机制可能发生重构。光伏板的遮阴、降水再分配及地表蒸散抑制作用,可能在提升土壤水分保持能力的同时,改变地表热量平衡与光照条件,从而影响植物光合作用和群落结构[15-16]。土壤养分循环的改变(如氮磷有效性)又

收稿日期:2026-03-20;**改回日期**:2026-05-14
资助项目:国家自然科学基金项目(32560918);新疆领军人才引进计划重点高校引才项目(XJRC-2025-JY-YJ-GX-QNQZ-031)
作者简介:童永尚(1996—),男,甘肃金昌人,博士,主要从事草地生态与环境保护研究。E-mail:tongys2022@126.com

可能进一步影响植被生产力与物种竞争格局[17~18]。因此，探明半干旱地区光伏电站微环境变化对植被-土壤耦合关系的影响机制，对于揭示光伏开发的生态效应具有重要意义。

伊犁河谷作为新疆半干旱地区的生态屏障与畜牧业基地，其草地生态系统不仅维系着区域生物多样性，更承担着水土保持、碳汇储备等关键生态功能[19~20]。根据《伊犁州直国土空间总体规划（2021—2035 年）》[21]，该区域正推进绿色低碳发展，光伏电站作为清洁能源主力业态，其建设不可避免地占用低山丘陵草原区。此类区域既是生态保护重要区，也是畜牧业生产适宜区，生态敏感性与经济依赖性并存。然而，伊犁半干旱草原区光伏开发对土壤-植被系统的影响机制尚未明确，不同光伏微生境（光伏板下、光伏板行间、光伏电站外）的生态响应差异缺乏系统量化，这与区域生态保护优先的发展定位形成突出矛盾。已有研究大多集中于极端干旱荒漠、沙地或高寒生态系统，对于伊犁河谷这类半干旱偏湿润区的关注仍明显不足。与典型荒漠区相比，伊犁地区具有更高的水热匹配度和更复杂的草地利用背景，光伏建设对植被-土壤系统的影响可能并非单向增强或抑制，而是表现出更为复杂的生态反馈机制。因此，亟需在该区域开展针对不同光伏微生境生态效应的系统研究，以揭示半干旱区光伏开发的生态响应规律及其作用机制。

鉴于此，本研究以伊犁半干旱地区光伏电站为研究对象，系统测定光伏板下、光伏板行间、光伏电站外 3 种微生境的植被特征及土壤理化性质，通过相关性分析、冗余分析（RDA）、方差分解分析（VPA）及结构方程模型（SEM）分析等方法，揭示不同光伏微生境下植被与土壤理化性质的差异特征，明确驱动植被特征变化的关键土壤因子及其作用路径，以期为伊犁地区光伏电站的生态修复与管理、草地资源保护提供科学依据，助力实现区域清洁能源开发与生态安全保障的协同发展。

1　材料和方法

1.1　研究区概况

研究区位于新疆伊犁尼勒克县加哈乌拉斯台乡（43°26'N，82°38'E），属温带大陆性半干旱气候，海拔 1 150~1 380 m，光能资源丰富，年均降水量 335 mm，年均气温 8.5 ℃，冬季降雪深度可达 10 cm 以上。区域地形以缓坡草地为主，土壤类型为棕漠土，地带性植被以伊犁绢蒿（*Seriphidium transiliense*）为优势种，伴生植物有灰毛木地肤（*Kochia prostrata* var. *Canescens*）和角果藜（*Ceratocarpus arenarius*）等，属于典型荒漠草原生态系统[22~23]。研究对象为该区域已运行 5 年的光伏电站（装机容量 3 200 MW，倾斜角 30°，阵列走向为南北，行距 8.5 m，板下净空高度 2.8 m，周边无大型人为干扰（如放牧、开垦等），具有良好的代表性。

1.2　试验设计

本研究于 2025 年 7 月 4 日进行植被调查和土壤样品采集，根据光伏电站的空间布局，将研究区划 3 种典型微生境（图 1），分别为光伏板下（Under photovoltaic，PV-U）、光伏板行间（Between PV，PV-B）和光伏电站外（Outside PV，PV-O）采用完全随机设计，在每种微生境中设置 5 个重复样地。光伏电站外最近取样点距离光伏板处理区水平方向 15 m，即完全未受光伏建设及阴影干扰。在每个样地内，随机布设 1 个 0.5 m×0.5 m 的植被样方，同时在每个植被样方旁对应设置 1 个土壤采样点。样方布设满足条件：（1）样方内植被分布均匀，无明显枯落物堆

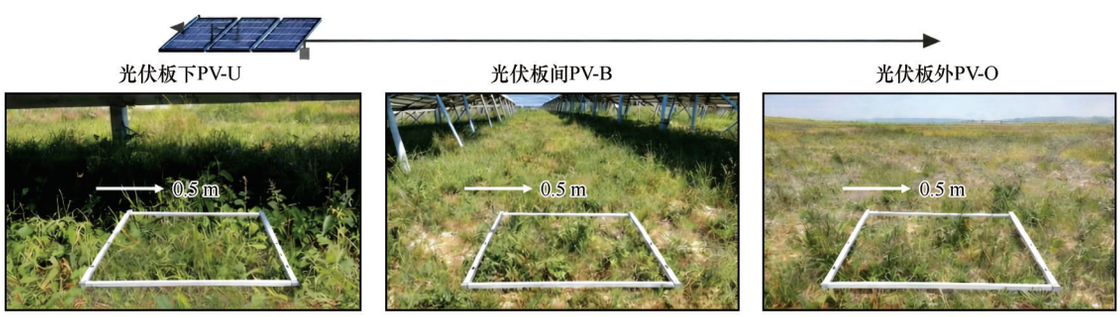


图 1　不同光伏布局采样示意图

Fig.1　Schematic diagram of sampling under different photovoltaic layouts

积或土壤侵蚀；(2)土壤采样点与植被样方中心距离小于0.5 m，确保植被与土壤的对应性。

1.3 样品采集与指标测定

1.3.1 植被样品采集与指标测定

记录每个样方内出现的所有植物物种名称及数量，经统计得到物种丰富度；植被盖度采用小样方内目测估算，在相同观测条件下由同一调查人员完成全部样方的盖度判读，以减少观察者差异带来的系统误差；每个样方内对优势种和主要伴生种进行株高测定，当某植物种类个体数≥5株时，随机选取5株测量其自然高度（基部至顶端），当个体数不足5株时，则测量该种全部个体，并取平均值，各测定值综合用于表征该样方植被平均高度（cm）；将样方内所有植物齐地面剪下，去除枯落物和杂质，装入信封，带回实验室在65 ℃烘箱中烘干至恒重，用电子天平（精度0.01 g）称重，记录为地上生物量（$g\cdot m^{-2}$）。

1.3.2 土壤样品采集与指标测定

在每个植被样方旁，采用土钻（直径5 cm）采集0~20 cm表层土壤（该层为植物根系主要分布区），使用五点混合法混匀后，去除石块和根系等杂质，装入自封袋带回实验室。土样分为两部分：一部分为新鲜土样，用于测定土壤含水量、铵态氮和硝态氮；另一部分自然风干后，分别过2 mm和0.15 mm筛，用于其余土壤理化指标测定。土壤含水量采用烘干法测定；pH采用pH计测定（土水比1∶2.5）；电导率采用电导率仪测定（土水比1∶5）；铵态氮和硝态氮采用全自动间断化学分析仪测定；有机质采用重铬酸钾氧化-外加热法测定；全磷采用碱熔-钼锑抗比色法测定；碱解氮采用碱解扩散法测定；速效磷采用碳酸氢钠浸提-分光光度法测定；全氮采用元素分析仪测定；速效钾采用乙酸铵浸提-火焰光度法测定；全钾采用NaOH熔融-火焰光度法测定。

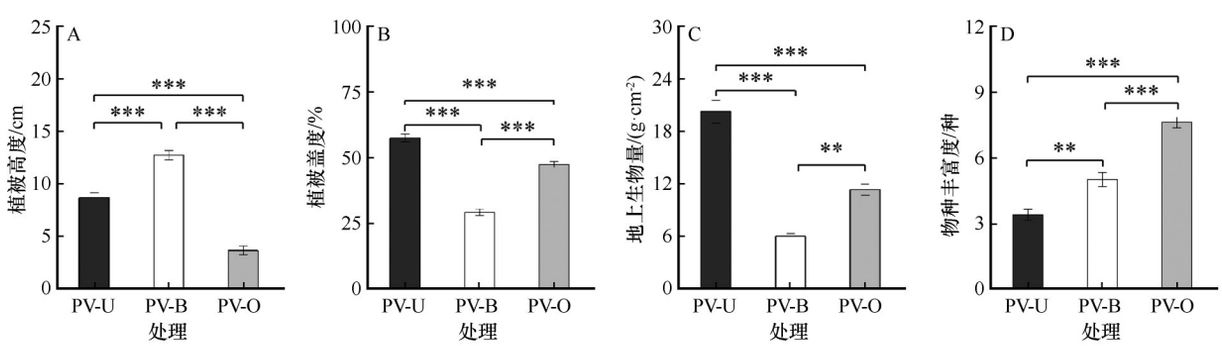
1.4 统计与分析

利用Excel 2019对所有数据进行整理，采用SPSS 26.0中的单因素方差分析（One-way ANOVA）比较3种微生境间植被特征和土壤理化指标的差异；采用Pearson相关系数分析植被指标与土壤理化指标间的相关关系；以植被特征为响应变量，土壤理化指标为解释变量进行冗余分析（Redundancy analysis，RDA）；基于RDA结果，采用方差分解分析（Variance partitioning analysis，VPA）分解不同土壤因子组（如水分因子、全效养分、速效养分）对植被特征变异的解释度；借助R 3.5.3的plspm包来构建偏最小二乘路径分析（PLS-PM）模型，以光伏干扰（微生境类型）为外源潜变量，土壤理化指标为中介变量，植被特征为内生潜变量，构建SEM模型，量化各因子间的路径关系及直接/间接效应，采用拟合度（goodness of fit，GOF）指数评估模型的适配性。图表采用Origin Pro 2025绘制。

2 结果与分析

2.1 光伏环境对植物特征的影响

由图2可知，光伏板行间的植被高度达12.72 cm，远高于光伏板下（8.68 cm）和光伏电站外（3.68 cm），光伏电站外植被高度不足光伏板行间的30%，三者呈现光伏板行间>光伏板下>光伏电站外的显著差异。物种丰富度呈现光伏电站外（7.6种）>光伏板行间（5.0种）>光伏板下（3.4种）的梯度差异，



注：*表示0.05水平上差异显著，**表示0.01水平上差异显著，***表示0.001水平上差异显著

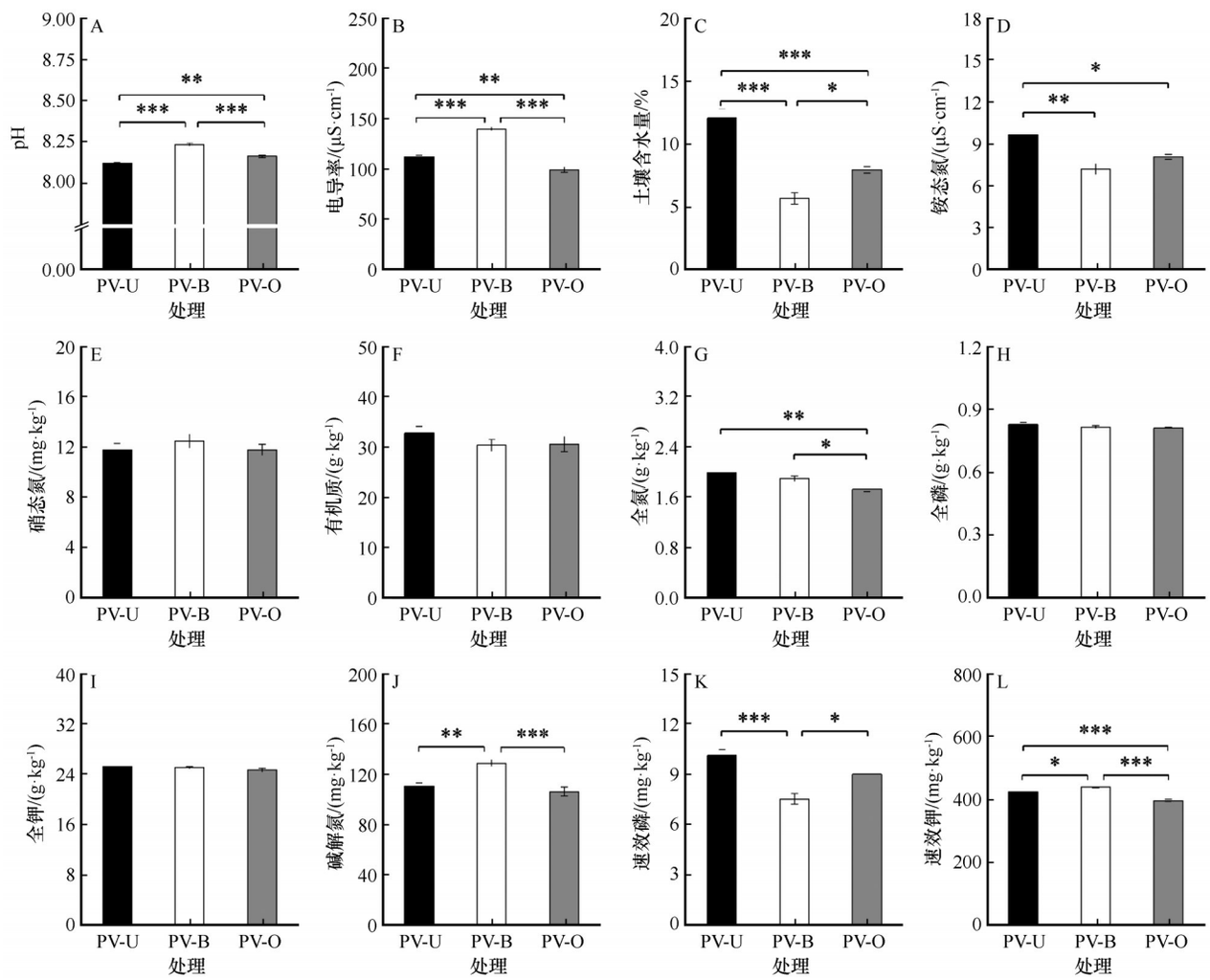
图2 不同光伏环境下植被特征变化

Fig.2 Changes in vegetation characteristics in different photovoltaic environments

光伏电站外的物种丰富度是光伏板下的2.24倍，差异极为显著；光伏板行间虽无遮阴，但物种丰富度仍低于光伏电站外，仅为光伏电站外的65.8%。植被盖度呈现光伏板下（57.4%）>光伏电站外（47.4%）>光伏板行间（29.2%）的显著差异，光伏板下盖度比光伏板行间高出近1倍，是覆盖度最高的生境。光伏板下的地上生物量达20.24 g·m^{-2}，为三者中最高，分别是光伏电站外的1.78倍、光伏板行间的3.35倍；光伏电站外处于中等水平，是光伏板行间的1.88倍；光伏板行间的地上生物量仅6.04 g·m^{-2}，为三者中最低。

2.2　光伏环境对土壤特性的影响

光伏板下、光伏板行间与光伏电站外3类生境的土壤理化性质呈现不同程度的差异，部分指标存在显著差异且生境间增幅特征突出（图3）。土壤整体呈弱碱性，其中光伏板行间的土壤pH值显著高于光伏板下与光伏电站外。电导率生境差异明显，光伏板行间显著高于光伏板下（增幅24.5%）和光伏电站外（增幅40.7%），光伏板下较光伏电站外增幅13.0%。土壤含水量差异显著，光伏板下的土壤含水量最高，较光伏电站外增幅51.7%、较光伏板行间增幅111.4%，光伏板行间土壤含水量最低。氮素指标表现分化，光伏板下的铵态氮含量显著高于光伏板行间与光伏电站外，光伏板行间的碱解氮含量显著高于光伏板下和光伏电站外，硝态氮在3类生境间无显著差异。磷素方面，全磷含量无显著生境差异，光伏板下的速效磷含量显著高于光伏板行间（增幅34.4%），与光伏电站外无显著差异。钾素相关指标中，全钾无显著生境差异，光伏板行间的速



注：*表示0.05水平上差异显著，**表示0.01水平上差异显著，***表示0.001水平上差异显著

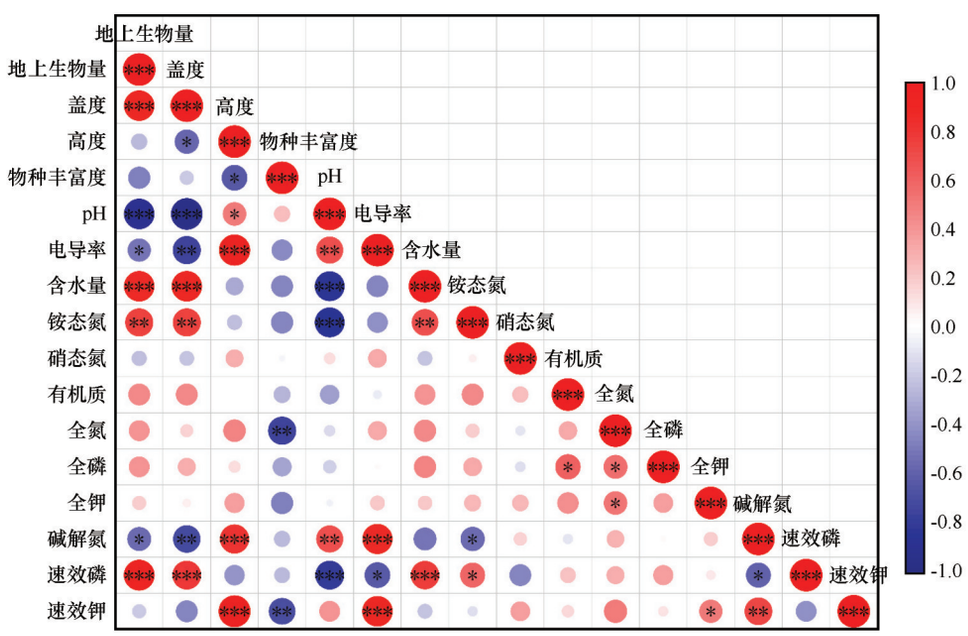
图3　不同光伏环境下土壤理化性质比较

Fig.3　Comparison of soil physical and chemical properties in different photovoltaic environments

效钾含量显著高于光伏板下(增幅3.6%)和光伏电站外(增幅 10.7%)。有机质含量在3类生境间无显著差异,光伏板下略高于光伏板行间与光伏电站外。整体来看,光伏建设形成的不同生境对土壤理化性质产生差异化影响,光伏板行间在pH、电导率、碱解氮和速效钾上更具优势,光伏板下在土壤含水量、铵态氮和有效磷上更突出,光伏电站外各项指标整体处于中等水平。

2.3 植被和土壤的耦合关系及驱动因素

相关性分析结果显示,植物群落特征与土壤理化指标间存在广泛的显著相关性(图4)。群落地上生物量与植被盖度、土壤含水量、速效磷呈极显著正相关,与土壤pH呈极显著负相关(P<0.001)。群落高度与土壤电导率、碱解氮和速效钾含量呈极显著正相关(P<0.001),物种丰富度与土壤全氮和速效钾含量呈显著负相关(P<0.01)。



注:*表示0.05水平上差异显著,**表示0.01水平上差异显著,***表示0.001水平上差异显著

图4 植被特征和土壤性质的相关性

Fig.4 Correlation analysis of vegetation characteristics and soil properties

冗余分析结果显示,两个排序轴共解释了95.96%的群落变异。pH(r^2=0.9083,P=0.001)、电导率(r^2=0.9374,P=0.001)、土壤含水量(r^2=0.8493,P=0.001)、铵态氮(r^2=0.6435,P=0.001)、速效磷(r^2=0.7534,P=0.001)、速效钾(r^2=0.9065,P=0.001)、碱解氮(r^2=0.7411,P=0.002)和全氮(r^2=0.5726,P=0.011)是影响光伏区植被群落变化的关键土壤理化因子(图5A)。

采用方差分解分析(VPA)进一步量化了土壤水分、土壤速效养分和土壤全效养分对植被特征变异的相对贡献(图5B)。结果表明,土壤速效养分对植被特征变异的独立解释率最高,为33%;土壤水分的独立解释率为5%;土壤全效养分的独立解释率为-1%。其中,负值通常是由于基于调整后决定系数进行方差分解时产生的统计结果,说明全效养分对植被特征变异的独立解释作用极弱,实际可视为接近于0。相比之下,土壤水分与速效养分的联合解释率达到52%,表明植被特征变化主要受水分条件与速效养分可利用性的协同驱动,而非单一土壤因子单独作用。

结构方程模型(SEM)分析结果显示,模型拟合优度指数(GOF)为0.66,整体拟合效果良好(图6)。模型对土壤含水量、速效养分、植被盖度及地上生物量的变异解释度(R^2)分别为0.47、0.86、0.94和0.88,体现出较强的解释能力。路径分析表明,光伏环境对土壤含水量具有显著正向驱动效应(P<0.01),对速效养分表现为极显著负向抑制效应(P<0.001),对植被盖度存在显著正向促进效应(P<0.05)。土壤含水量对植被盖度呈极显著正向效应(P<0.001),对土壤速效养分和地上生物量的效应未达显著水平。整体来看,光伏环境主要通过调控土壤含水量和速效养分进一步驱动地上生物量和植被盖度的变化。

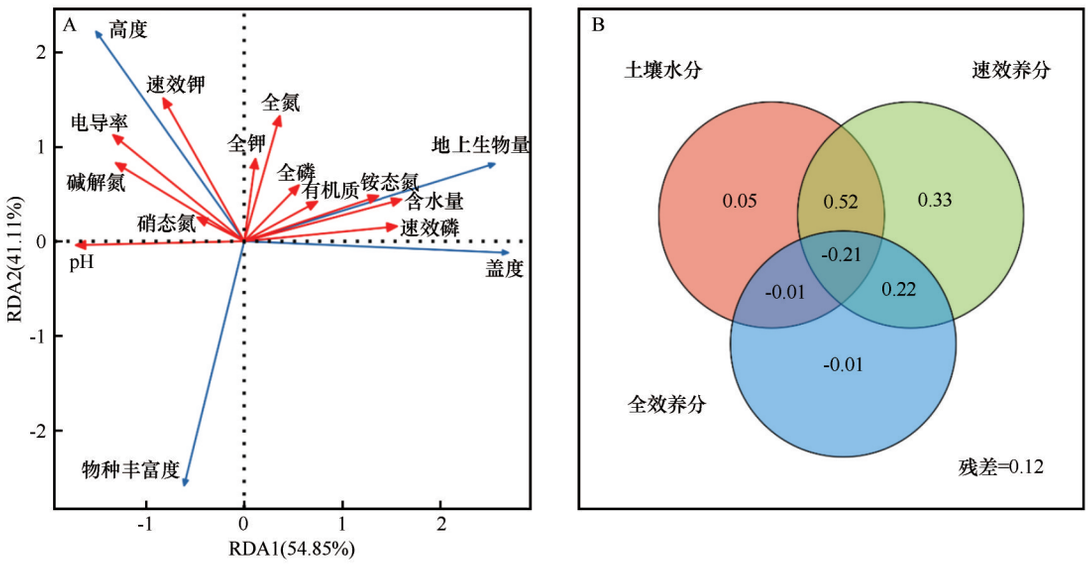
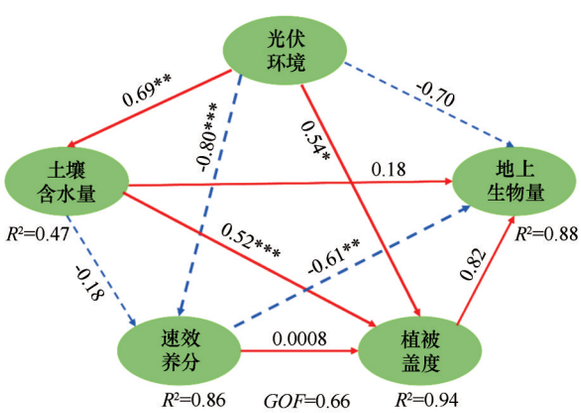


图 5　基于冗余分析（A）和方差分解分析（B）的土壤理化性质对植被特征的影响

Fig.5　Influences of soil physical and chemical properties on vegetation characteristics based on redundancy analysis (A) and variance decomposition analysis (B)



注：箭头上的数值代表路径系数，实线、虚线分别表示正效应和负效应，R^2表示模型对相应变量的解释度，*、**和 ***分别表示 $P<0.05$、$P<0.01$ 和 $P<0.001$，GOF 表示模型拟合优度。

图 6　光伏环境介导植物特征和土壤性质变化的结构方程模型分析

Fig.6　Structural equation model analysis of the changes in plant traits and soil properties mediated by the photovoltaic environment

3　讨论

3.1　光伏环境对植物和土壤特性的影响

本研究发现伊犁半干旱区光伏电站光伏板下、光伏板行间、光伏电站外 3 种微生境的植被特征呈现显著异质性，植被高度、物种丰富度、植被盖度及地上生物量在不同微生境中表现出差异化优势特征。光伏板行间植被高度最优、光伏电站外物种丰富度最高、光伏板下植被盖度与地上生物量显著高于其他生境（$P<0.05$）。这一结果直观反映出光伏设施的空间布局通过重构局地微生境，改变了光照、土壤水热、养分等关键环境因子的组合特征，进而对植被生长表型与群落结构产生定向调控作用[24-25]，契合半干旱区草地植被生长受非生物因子主导驱动的核心生态特征，也与干旱区光伏电站微生境对植被特征的调控规律具有共性，但因伊犁半干旱偏湿润区的水热匹配度优势，其植被响应特征呈现出区域特殊性。光伏板行间植被高度显著高于光伏板下与光伏电站外，这与青藏高原荒漠区典型光伏电站的研究结论一致[25]，伊犁半干旱区光伏板行间无遮阴干扰且土壤速效养分占优，为植物株高生长提供了充足的养分支撑[26]。光伏电站外物种丰富度最高，光伏板下则降至最低，该规律与腾格里沙漠东南缘大型光伏板下植被群落趋向单一化的观测结果相符[18]，因光伏板下遮阴改变了光资源分配格局，喜阳优势物种的生存空间被压缩，进而导致群落物种多样性降低[27]。光伏板下植被盖度与地上生物量为 3 类生境最优，这与甘肃民勤红沙岗光伏区土壤养分提升促进植被生产力的研究结论一致[28]。伊犁半干旱区光伏板的遮阴效应显著降低土壤蒸发量、提升土壤含水量，水分条件的改善抵消了光资源不足的负面影响，成为植被生产力提升的核心驱动[29]。而光伏板行间虽养分充足，但土壤含水量最低，水分限制成为盖度与生物量的

主要制约因素，这一特征凸显了半干旱区水分对植被生长的主导性限制作用，与Yu等[30]全球干旱地区植被生产力对大气水分胁迫的研究观点相契合。整体而言，伊犁半干旱区光伏微生境的植被特征分异，是光、水、养分耦合作用的综合结果，体现了半干旱区区别于极端干旱区的光伏生态效应特征。

光伏建设形成的异质微生境对伊犁半干旱区土壤理化性质呈现显著的差异化调控效应，各生境土壤指标的分异特征与极端干旱区光伏研究结论既有共性，也因区域水热本底差异呈现独特性。光伏板下土壤含水量显著高于光伏板行间与光伏电站外，增幅达51.7%~111.4%，这与谢赟[31]在毛乌素沙地发现的光伏板下土壤水分提升规律一致，均源于光伏板的遮阴减蒸与降水截留效应[32]，但本研究中水分增幅显著低于极端干旱区，因伊犁半干旱偏湿润区水热匹配度更高，土壤本底含水量较好，光伏的水分调控效应相对温和。光伏板行间在pH、电导率及碱解氮、速效钾等速效养分指标上表现突出，这与屈准等[33]青藏高原共和盆地光伏区的研究结果相符，板间无遮阴的高光照环境促进了植被根系分泌与土壤微生物活动，加速了土壤养分的活化与有效化，而光伏板的遮阴效应则一定程度上抑制了微生物代谢过程[34-35]，速效养分供给相对较弱。土壤全氮、全磷、全钾等全量养分及有机质在3类生境间无显著差异，表明5年光伏开发仅影响土壤养分的速效形态，未改变土壤基础养分库，这与丁成翔等[36]一项全球光伏区Meta分析的结论相似，反映光伏干扰对土壤养分的影响具有短期性、表聚性特征。而有机质无显著分异，则与研究区荒漠草原植被生产力本底低、凋落物输入有限相关，这与杜孝东等[23]光伏区土壤有机质短期无显著变化的研究结果相契合。本研究主要从植被高度、盖度、物种丰富度和生物量等群落数量特征出发，揭示了不同光伏微生境下植被-土壤耦合差异；未来可进一步结合植物生活型组成及关键功能性状（如株高、叶性状、根系性状和繁殖策略）在光伏板下、板间和站外微生境中的空间分异，阐明光伏设施引起的光照、水分和养分再分配如何影响物种小尺度空间占据与群落组配过程，从而更深入揭示光伏电站对植被-土壤互馈过程的生态意义。

3.2 植被和土壤的耦合关系及驱动因素

本研究中植被群落特征与土壤理化指标呈现显著的关联性，地上生物量、植被盖度与土壤含水量、速效磷极显著正相关而与土壤pH极显著负相关，植被高度与电导率、碱解氮等速效养分正相关。这一结果表明，在伊犁半干旱区光伏微生境中，植被生长并非受单一因子控制，而是受到水分条件和养分有效性等环境因子的共同影响，其中水分与速效养分对群落结构和生产力形成具有更加直接的调节作用，而较高的pH则可能通过抑制养分有效性和植物吸收能力，对植被生长产生约束[37]。冗余分析进一步证实，pH、电导率和土壤含水量等均为驱动光伏区植被群落变化的关键土壤因子，其中前两轴累计解释了95.96%的群落变异，说明土壤环境变化能够较充分地表征不同光伏微生境下植被响应的总体格局。尤其是pH、电导率、土壤含水量和速效钾等指标的解释力较高，表明光伏设施通过改变近地表水热条件、土壤盐分和养分状态，进而重塑植被群落的生长表现和组成特征，该结果与杜华栋等[27]和鲍平安等[38]对半干旱生态系统光伏微生境的研究结论一致。

方差分解结果显示，土壤水分、土壤速效养分和土壤全效养分对植被特征变异的解释率分别为5%、33%和-1%，其中土壤水分与速效养分的联合解释度高达52%。这一结果说明，半干旱区光伏生态效应的核心并不在于单一养分库或单一环境因子的变化，而在于水分改善与速效养分供给之间的协同作用。即光伏设施所形成的异质微生境，一方面通过遮阴和降水再分配提高局地土壤保水能力，另一方面又通过改变土壤养分活化过程影响植物可利用资源水平，二者共同决定了植被盖度、生物量和群落结构的变化方向与幅度。内蒙古荒漠生态系统的研究仅阐明土壤含水量提升对植被的促进作用[39]，青藏高原共和盆地的研究侧重速效氮对植物群落的调控效应[33]，而本研究在半干旱偏湿润区证实了水分与速效养分的协同驱动作用，这与伊犁河谷水热匹配度较高的区域特征相关，也揭示了不同干旱梯度下光伏生态效应的驱动差异。

此外，结构方程模型分析进一步强化了上述结论，模型拟合优度指数GOF为0.66，表明模型整体拟合良好。路径分析表明，光伏环境对土壤含水量具有显著正向驱动效应，而对速效养分表现为极显著负向影响，同时对植被盖度具有显著正向促进作用；土壤含水量则对植被盖度产生极显著正向效应。由此可见，光伏环境对植被的影响既包含直接

作用，也包含通过土壤因子传递的间接作用，但从模型解释结果来看，土壤含水量和速效养分是连接光伏环境变化与植被响应之间的核心中介变量，该路径与Liu等[10]青藏高原高寒草甸光伏研究的调控逻辑相似，但本研究表明光伏遮阴对速效养分呈显著负向效应，与高寒草甸的养分提升效应形成差异，这可能主要源于伊犁荒漠草原土壤本底肥力较低，光伏板遮阴虽提升水分，但一定程度抑制了土壤微生物活动与养分矿化过程[35]。

本研究明确了伊犁半干旱区光伏微生境下植被-土壤的耦合驱动路径，为量化光伏生态调控效应提供了半干旱偏湿润区的典型案例。值得注意的是，本研究中土壤水分仅在单一时间点进行测定，而土壤水分是高度动态的环境变量，受降水、蒸发以及植被根系吸水等因素影响显著。在半干旱区或荒漠环境中，夏季植被较为茂密的区域，土壤水分反而可能低于稀疏植被区，因为更密集的根系吸水会加速表层土壤水分损失。这种水分格局不仅在水平空间上存在差异，也可能随土壤剖面深度呈现分异。因此，本研究基于单次土壤水分数据对植被群落特征的解释具有一定局限性，未来研究应结合长期或多时段监测，以更准确地捕捉土壤水分动态及其对植被-土壤耦合关系的影响。

4　结论

光伏异质微生境对植被、土壤指标影响差异显著，光伏板遮阴效应提升土壤含水量，显著促进植被盖度与地上生物量积累；光伏板行间土壤速效养分与植被高度表现突出；光伏电站外物种丰富度最高，但植被生长与土壤肥力指标偏低，反映出荒漠草原生态系统的自然脆弱性。pH、电导率、土壤含水量为驱动植被群落变异的关键土壤因子，土壤水分与速效养分的交互作用对植被特征变异的解释度达52%。结构方程模型验证，光伏环境通过调控土壤含水量与速效养分，间接驱动植被盖度和地上生物量变化。本研究剖析伊犁半干旱区光伏电站3类微生境的植被-土壤耦合机制，为区域光伏生态管理及“光伏+生态”模式落地提供理论依据，后续需开展长期生态监测，探究光伏配置的生态调控阈值。

参考文献：

[1] Wang Q R, Wang K, Shao L T, et al. Increased terrestrial ecosystem carbon storage associated with global utility-scale photovoltaic installation [J]. Nature Geoscience, 2025, 18 (7): 607-614.

[2] Chen Y Y, Zhang L, Yan M, et al. Identification and land-Environment analysis of centralized photovoltaic stations in the arid northwest region of China [J]. International Journal of Digital Earth, 2025, 18(1): 2468419.

[3] Luo Y Z, Cheng H G, Wang J, et al. Exploring the potential impacts of photovoltaic arrays on ecosystem conditions in arid and semi-arid regions [J]. Environmental Development, 2026, 57: 101372.

[4] Wang H L, Wang F, Lv H, et al. Analysis of spatiotemporal variations and driving forces of NDVI based on random forest and Geodetector: a case study of the Heihe river basin in China [J]. Ecological Indicators, 2026, 184: 114710.

[5] 李同昇，陈谢扬，芮旸，等. 西北地区生态保护与高质量发展协同推进的策略和路径 [J]. 经济地理，2021，41 (10)：154-164.

[6] 张景波，李新乐，刘雅婧，等. “光伏+生态治理”模式的实践挑战与策略建议 [J]. 中国沙漠，2025，45(5)：92-101.

[7] Wang Z, Chen H, Li Q, et al. Photovoltaic alters microhabitats and soil-vegetation feedbacks in a fragile semi-arid ecosystem [J]. Land Degradation & Development, 2026, 37 (9): 4108-4120.

[8] Huang F, Wang B, Yang Y, et al. Tilting-tracking photovoltaic systems mitigate soil degradation risks while maintaining native vegetation productivity across all reshaped micro-zones in a desert steppe [J]. Land Degradation & Development, 2026, 37 (3): 974-984.

[9] Yang Y Y, Su S L, Cao E Z, et al. Impacts of large-scale desert photovoltaic power stations on the phenotype and biomass distribution characteristics of sand-fixing plants [J]. Journal of Desert Research, 2025, 45(1): 162-172.

[10] Liu M Y, Wang W B, Cao Y H, et al. Photovoltaic power station construction alters soil C, N, and P stoichiometric characteristics in alpine meadows [J]. Land Degradation & Development, 2026, 37(8): 3501-3516.

[11] 于子棋，杨森，杨雅晴，等. 毛乌素沙漠地区土地利用强度与生态系统稳定性的时空演变及其耦合协调特征 [J]. 上海国土资源，2025，46(4)：59-67.

[12] 于泽航，俞旸，曹铨，等. 不同放牧管理下祁连山区冬季牧场植被-土壤协同耦合效应评价 [J]. 草业学报，2024，33(12)：1-12.

[13] 兰慧琴，刘建康，王益涛，等. 土壤养分异质性对荒漠草原微斑块植物群落特征的影响 [J]. 水土保持研究，2025，32(6)：141-150.

[14] 杨红玲，姚博，苏永中，等. 北方农牧交错带人工林土壤理化性质分布格局 [J]. 中国沙漠，2024，44(2)：283-294.

[15] 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.

[16] Maddalena C, Nikolas G, Giampaolo M, et al. Global land-wa-

ter competition and synergy between solar energy and agriculture[J].Earth's Future,13(2):e2024EF005291.

[17] Biro A, Wong M Y, Zhou Y, et al. Nitrogen and phosphorus availability alters tree-grass competition intensity in savannas [J].Journal of Ecology,2024,112(5):1026-1038.

[18] 张晶,左小安,吕朋.降雨量和土壤氮含量对半干旱沙质草地生产力的影响[J].中国沙漠,2025,45(4):96-108.

[19] 孙慧兰,陈亚宁,李卫红,等.新疆伊犁河流域草地类型特征及其生态服务价值研究[J].中国沙漠,2011,31(5):1273-1277.

[20] 刘伟,赵越,杨龙,等.补播优良牧草对新疆昭苏退化草地生产性能和牧草品质的影响[J].草地学报,2025,33(1):231-240.

[21] 虞江浩,刘晓煌,祝萍,等.新疆伊犁河流域国土空间"三生"功能评价及优化路径[J].生态环境学报,2026,35(5):805-818.

[22] 张丽萍,阿斯娅·曼力克,张生楹,等.不同修复措施对退化伊犁绢蒿荒漠草地修复效果的影响[J].草原与草坪,2025,45(4):36-43.

[23] 杜孝东,李伟,齐向阳,等.光伏区异质环境下土壤理化特性及化学计量特征分析[J].草地学报,2025,33(1):181-188.

[24] 韩鹏,解育才,叶林,等.光伏工程对荒漠生态系统影响的研究综述[J].应用生态学报,2025,36(12):3871-3878.

[25] 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.

[26] 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.

[27] 杜华栋,王梦雨,聂文杰,等.半干旱矿区塌陷地光伏电站建设对植物群落特征的影响[J].植物生态学报,2025,49(11):1778-1790.

[28] 于耀鑫,纪童,何国兴,等.光伏电站建设对温带荒漠植被和土壤的影响[J].草地学报,2025,33(12):4129-4138.

[29] Jia M Q,Peng B,Guan K Y,et al.Climate-driven divergence in biophysical and economic impacts of agrivoltaics[J].Proceedings of the National Academy of Sciences,2026,123(10):e2514380123.

[30] Yu J H, Wang W G, Chen Z F, et al. Disentangling the dominance of atmospheric and soil water stress on vegetation productivity in global drylands[J]. Journal of Hydrology, 2025, 657:133043.

[31] 谢赟.榆林毛乌素沙地光伏+治沙生态恢复效应与功能评价[D].咸阳:西北农林科技大学,2025:29-30.

[32] 刘雅婧,王丹阳,常旭,等.光伏电站建设对西北荒漠区生态环境的影响研究进展[J].中国水土保持科学(中英文),2025,23(2):9-17.

[33] 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.

[34] 王思瑶,季波,鲍平安,等.光伏电站牧草混播模式对土壤活性有机碳组分的影响[J].干旱区研究,2025,42(12):2207-2219.

[35] 孙文倩,楚彬,叶国辉,等.光伏发电站对高寒草甸土壤细菌群落组成及多样性的影响研究[J].草地学报,2025,33(2):440-450.

[36] 丁成翔,李兴福,苏德荣,等.光伏电站对区域小气候-植被-土壤特征影响的Meta分析[J].草地学报,2025,33(8):2641-2651.

[37] Li T T, Zhang R Y, Chen X L, et al. Divergent resource limitations of belowground versus aboveground productivity across grasslands[J].Nature Communications,2025,17(1):335.

[38] 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.

[39] 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.

Vegetation-soil coupling characteristics of photovoltaic power stations in the semi-arid region of Yili, Xinjiang, China

Tong Yongshang[1], Chen Yuefang[1], Li Zhengsheng[1], Zhang Shengying[2],
Li Yule[1], Niu Kechang[1,3], Bayarta[1], Duan Peiqi[1]

(1. *College of Biological Science and Technology/ Key Laboratory of Plant Resources Protection and Utilization in Xinjiang Yili Valley, Yili Normal University, Yining* 835000, *Xinjiang, China*; 2. *Grassland Workstation of Nilka County, Nilka* 835700, *Xinjiang, China*; 3. *School of Life Sciences, Nanjing University, Nanjing* 210023, *China*)

Abstract: To elucidate the mechanisms by which photovoltaic development affects the vegetation-soil system in the semi-arid Yili region of Xinjiang, a photovoltaic power station in Nilka County, Yili, Xinjiang, that has been in operation for five years was selected as the study site. Three microhabitats, namely beneath the photovoltaic panels, between the panel rows, and outside the photovoltaic station, were established for comparison. Vegetation community characteristics and soil physicochemical properties were measured, and their coupling relationships and driving mechanisms were further explored using redundancy analysis (RDA), variance partitioning analysis (VPA), and structural equation modeling (SEM). The results showed that vegetation and soil attributes differed significantly among the three photovoltaic microhabitats. Soil moisture content, vegetation cover, and aboveground biomass were highest beneath the photovoltaic panels, whereas vegetation height and soil available nutrients were more prominent between the panel rows. Species richness was highest outside the photovoltaic station. Soil pH, electrical conductivity, and soil moisture content were identified as the key soil factors affecting vegetation variation, and the joint explanatory power of soil moisture and available nutrients for vegetation characteristic variation reached 52%. Furthermore, the SEM results demonstrated that the photovoltaic environment indirectly influenced changes in vegetation cover and aboveground biomass primarily by regulating soil moisture and available nutrients. This study reveals the regulatory effects of photovoltaic microhabitats on the vegetation-soil system in the semi-arid Yili region and provides a scientific basis for ecological management and the coordinated development of energy production and ecosystem functions in photovoltaic power stations in this region.

Key words: Yili; semi-arid region; photovoltaic power plant; photovoltaic microhabitat; vegetation-soil coupling