

DOI: 10.20103/j.stxb.202410092441

郝晓珍, 于航, 吴星叶, 冯天骄, 王成, 田丽慧, 谭梦迪, 彭怀午, 王平. 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. 生态学报, 2025, 45(11): 5510-5526.

Hao X Z, Yu H, Wu X Y, Feng T J, Wang C, Tian L H, Tan M D, Peng H W, Wang P. Effects of typical photovoltaic power station construction on vegetation properties and soil properties in Tibetan Plateau desert region. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(11): 5510-5526.

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

郝晓珍^{1,2}, 于航^{1,2}, 吴星叶¹, 冯天骄^{1,2,*}, 王成³, 田丽慧⁴, 谭梦迪^{1,2}, 彭怀午⁵, 王平^{1,2}

1 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083

2 山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站, 临汾 042200

3 青海省林业技术推广总站, 西宁 810000

4 青海大学省部共建三江源生态与高原农牧业国家重点实验室, 西宁 810000

5 中国电建西北勘测设计研究院有限公司, 西安 710065

摘要: 青藏高原荒漠区大规模建设的光伏电站对生态环境有扰动影响, 其对植被生长和土壤性质的影响有待研究。为了探究光伏电站建设对高寒荒漠区植被群落与土壤性质的影响, 选取位于青藏高原典型荒漠区的青海省共和县塔拉滩不同建设年份 (2013、2016、2021 年) 的光伏电站, 对比不同生境 (光伏板间、板下和场外对照) 的植被属性 (物种组成、高度、盖度、地上生物量、 α 多样性指数) 及土壤性质 (有机碳、全氮、全磷、全钾、pH 值、机械组成) 等指标, 运用 RDA 冗余分析和 Mantel test 等分析方法, 探究高寒荒漠区光伏电站的植被和土壤变化特征及其影响机制。研究发现 (1) 不同生境方面, 光伏板间植被物种数最多、植物群落多样性指数最大, 以草地早熟禾和针茅为主要植被, 场外物种数最少。同时, 板间的植被平均高度和地上生物量显著高于板下和场外, 土壤有机碳、全氮、全磷含量表现为场外 > 板间 > 板下。 (2) 不同建设年份对比, 2016 年光伏电站植物物种丰富度、植被盖度最高 (47.29%), 而 2021 年光伏电站植被平均高度最高。 (3) 从时间尺度上看, 电站植物群落多样性指数随建设年份的变化呈现先增加后降低趋势, 表明电站建设的植被管护在后期十分重要。土壤有机碳和全氮含量随建设年份增加而增加, 表明了电站建设在扰动土壤后会逐渐提升和恢复土壤质量。 (4) RDA 冗余分析和 Mantel test 分析显示, 植被属性和土壤性质在不同恢复阶段相互影响。场内生境 (板间和板下) 条件下植被属性和土壤性质的关系比场外条件更密切。场内生境对植被盖度、高度和土壤总磷影响极显著, 电站建设年份对植物多样性的影响极显著。光伏电站建设对环境的扰动, 将影响下垫面的植被群落和土壤性质。随着电站的建成和时间的推移, 植被的高度、地上生物量以及土壤中的有机碳和全氮含量均显示出明显的提升。研究为高寒荒漠地区光伏电站建设后的生态环境管理, 特别是在植被恢复和土壤修复方面, 提供了重要的理论依据和实践建议。

关键词: 光伏电板; 土壤特征; 植被特性; 荒漠生态系统; 青藏高原

Effects of typical photovoltaic power station construction on vegetation properties and soil properties in Tibetan Plateau desert region

HAO Xiaozhen^{1,2}, YU Hang^{1,2}, WU Xingye¹, FENG Tianjiao^{1,2,*}, WANG Cheng³, TIAN Lihui⁴, TAN Mengdi^{1,2}, PENG Huaiwu⁵, WANG Ping^{1,2}

1 School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFB4202103); 国家自然科学基金面上项目 (42371114)

收稿日期: 2024-10-09; **网络出版日期:** 2025-04-07

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fengtianjiaobest@sina.cn

2 Jixian National Forest Ecosystem Observation and Research Station, Linfen 042200, China

3 Qinghai Provincial Forestry Science and Technology Extension Station, Xining 810000, China

4 State Key Laboratory of Plateau Ecology and Agriculture, Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Qinghai University, Xining 810000, China

5 Northwest Engineering Corporation Limited, Power China, Xi'an 710065, China

Abstract: The extensive constructions of photovoltaic power stations in the desert region of the Qinghai-Tibet Plateau may disturb the ecological environment, and it is necessary to study their impacts on vegetation communities and soil properties. In order to explore the effects of photovoltaic power station construction on vegetation communities and soil properties in the alpine desert areas, this study selected photovoltaic power stations constructed in different years (2013, 2016 and 2021) located in Talatan, a typical desert region on the Qinghai-Tibet Plateau. The study compared vegetation attributes (species, height, coverage, above-ground biomass, plant community diversity index) and soil properties (organic carbon, total nitrogen, total phosphorus, total potassium, pH value, and size composition) across different habitats (between photovoltaic panels, under-panel and off-site controls). RDA redundancy analysis and Mantel tests were used to explore the variations in vegetation attributes and soil properties under different photovoltaic power stations in alpine deserts and their underlying mechanisms. The results showed that: (1) Regarding different habitats, the number of vegetation species and the plant community diversity index were highest between photovoltaic panels, with *Poa pratensis* and *Stipa capillata* as the predominant species, while the number of species under controls was the lowest. At the same time, the average height and aboveground biomass between photovoltaic panels were significantly higher than other habitats, and the contents of soil organic carbon, total nitrogen and total phosphorus were in the order of order of off-site > between photovoltaic panels > under-panel. (2) Compared with different construction years, the species richness and vegetation coverage in 2016 were the highest (47.29%), while the average height in 2021 was the highest. (3) From the perspective of time scale, the plant community diversity index increased first and then decreased with construction years, indicating that the vegetation management and protection of the power station construction was very important in the later stage. The content of soil organic carbon and total nitrogen increased with the increase of construction years, indicating that the soil quality would be gradually improved and restored after the construction of the power station. (4) RDA and Mantel test analysis showed that vegetation attributes and soil properties affected each other at different restoration stages. The relationship between vegetation attributes and soil properties was more closely related to habitats. The construction years of the power station had a significant impact on plant diversity. The disturbance to the environment caused by the construction of photovoltaic power station will affect the vegetation community and soil properties of the underlying surface. The height, aboveground biomass, soil organic carbon and total nitrogen showed significant improvements with construction years. This study offers a significant theoretical foundation and practical recommendations for ecological environment management following the construction of photovoltaic power stations in alpine desert areas, particularly in the areas of vegetation restoration and soil remediation.

Key Words: photovoltaic panels; soil properties; vegetation attributes; desert ecosystems; Qinghai-Tibet Plateau

应对气候变化逐渐成为人类所要解决的最棘手的环境问题之一,全球气候变化与土地退化和粮食安全问题紧密相连^[1]。青海作为清洁能源大省,为响应生态文明建设的号召,政府大力推进光伏新能源产业的发展,成为全国集中式光伏发电量最大的省份^[2]。青藏高原东南缘的塔拉滩光伏产业园位于青海省海南州共和县,是国内最大的光伏发电基地。受高原大陆性气候影响,该地区常年寒冷、干燥、光照强、降水少,致使土地荒漠化严重,生态环境面临危机^[3]。

荒漠生态系统是陆地生态系统的重要组成部分,是由超强耐旱生物及其干旱环境所组成的一类生态系统^[4]。根据以往的研究发现^[5-8],覆盖光伏电板对生态环境的影响,既有积极效益,又存在消极影响。一方面,构建起的光伏电场,降低了地表风速,减少了地表土壤的风蚀。光伏电板与地面之间的空间温度上升,为

草本、灌木的生长提供了有效的生物积温,除此,光伏组件遮阴能有效缓解夏季高温和冬季低温对植被层的影响,与全光照区相比,光伏组件遮阴后夏季植被层气温降低约 5℃,冬季气温上升约 1.7℃^[9]。光伏组件的清洗工作提高了大面积的土壤含水量^[10],并且起到遮盖作用的光伏电板有效降低了土壤蒸散量^[11]。另一方面,光伏电场建设过程中,破坏了原始土壤的结构,扰动了植物的生长^[12]。下垫面被迫发生改变,施工造成的混凝土、石砾等增多,占据了乡土物种的生长空间,生物多样性下降,生态系统稳定性下降,水土流失问题严重。光伏电站也可能在建设中和建设后对局地微气候和植物、动物与微生物的生长、活动以及生命周期产生不同程度影响,并最终导致固碳潜力等生态系统功能发生改变^[13]。

在现有的大多数研究中,李少华等^[14]在共和塔拉滩光伏电站建设对于植被和土壤的影响以单一建设年份电站(2012 年)为研究对象,采用样地调查法选取 3 块典型样地在 2013—2015 年进行植被与土壤调查,发现随时间变化,光伏区的植被和土壤指标均有一定程度的提升,变化显著;谈昭贤等^[15]通过对比青海共和县塔拉滩光伏产业园内外的植物群落,发现光伏板内植被总盖度和植物平均高度显著增加,物种多样性指标也显著提升。尽管光伏板内植物功能离散度指数较低,但功能均匀度指数较高,总体而言,光伏板建设有助于改善荒漠地区的植被条件和多样性;鲍平安等^[16]以宁夏境内 2 个建成后植被恢复时间分别为 1 和 2 年的光伏电站为研究对象,对光伏板间、板下和场外的植被和土壤进行对比调查,发现随着恢复时间延长,光伏电站建设过程中所造成的生态破坏可在一定程度上得以恢复,且光伏电站可能对退化草地恢复起到促进作用,而这一结果仅是短时间恢复带来的影响,对于植被和土壤长期的影响则需要更长时间的研究来证实;以上多数研究集中于对单一建设年份的光伏电场内植被—土壤系统进行研究,侧重于短期效应^[15–16],缺乏多场区的数据收集和研究分析,在一定程度上影响了研究的全面性和深入性。本研究在此基础上对塔拉滩 3 个不同建设时期(2013、2016、2021 年)的光伏电站的板间、板下和场外进行植被群落和土壤属性的分析,在电站建设对植被和土壤扰动破坏停止后,自然恢复到目前的状态,进行长期、中期和短期植被和土壤恢复的对比,为光伏电站在后续的管理建设上提供一定的数据支撑,具有一定的科学创新性。在青藏高原的辐射强烈,日照多,气温低,积温少气候条件下,不同光伏电站建设年份、植被配置模式及土壤理化性质演变规律还需要进一步探索,除此,光伏电站中植被群落特征与土壤性质的关系有待深入研究。本研究以青藏高原东南缘高寒荒漠区中 3 个不同年份建成的光伏电站和光伏场外(对照组)的植被与土壤为对象,在 2023 年和 2024 年生长季(8 月),在各场区和场外进行植被调查及土壤取样,探究不同建场年份内植被特征(物种组成及重要值、群落数量特征、群落多样性)与土壤理化性质(有机碳、全氮、全磷、全钾、pH、机械组成)变化规律,阐明植被-土壤系统互动机制,以明晰青藏高原地区不同建场年份中植被-土壤系统变化特征,并为高寒荒漠背景下光伏电站建设扰动后的生态修复提供理论依据,筛选当地生境中适合进行植被修复的乡土物种,优势种、先锋种,并为提升高寒荒漠生态系统服务提供数据支撑。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究地点为青藏高原共和塔拉滩,如图 1 所示,其地理坐标在 35.5°—37.2°N,99°—101.5°E 之间,属高原大陆性干旱高山草原气候,以高寒干旱、半干旱气候为主,平均海拔 2400—3500m,具有寒长暑短,四季不分明,无霜期短(切吉乡无霜期 60d 左右),日温差大,多风少雨,蒸发量大等特点。根据共和气象站(恰卜恰气

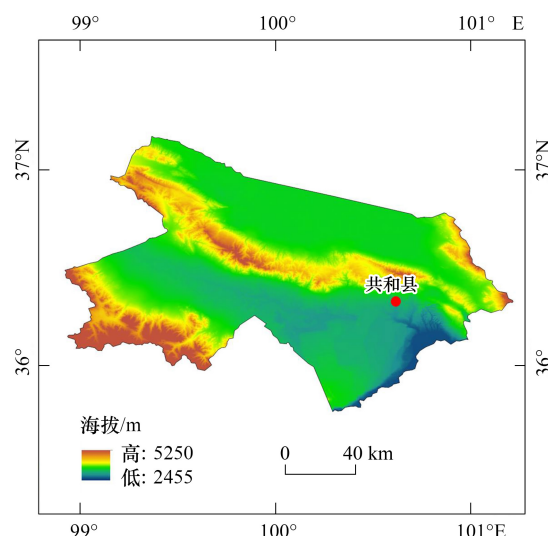


图 1 研究区概况及植被调查样地分布图

Fig.1 Overview of the study area and distribution map of vegetation survey sample plots

象站)统计资料(1970—2020年),年均气温在 $-0.7\sim 6.3^{\circ}\text{C}$ 之间,最低气温为 -14.2°C ,最高为 18.3°C 。受东南季风和地形的影响,西南部的中、高山地降水偏多,共和盆地塔拉滩年平均降水量在190—300mm之间,共和县年均降水量为390mm。多年平均蒸发量1523.6mm, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温为1513.2 $^{\circ}\text{C}$,降水集中在5—9月,占年总降水量的88%;年均风速为2.0—3.6m/s。年日照时数为2670—3036h,太阳总辐射量在583—637kJ/cm²之间,最大冻结深度为150cm。风沙活动强烈,该地生态类型为高寒荒漠,土壤类型主要为风沙土、高山草甸土,根据调查,光伏电站内优势植物为芨芨草(*Neotrinia splendens*)、线叶嵩草(*Carex capillifolia*)、草地早熟禾(*Poa pratensis*)、羊茅(*Festuca elata*)、针茅(*Stipa capillata*)等。青藏高原地区特有的高寒干旱、半干旱气候、剧烈的日温差和风沙活动等自然条件,使得这里的光伏电站建设在生态修复和土地利用方面具有独特性,本研究选择该研究区的自然环境与光伏电站建设的生态影响具有较强的典型性和普适性,能够为其他类似生态环境中的光伏电站建设提供借鉴和指导。

1.2 试验设计

为了确定不同建设年份光伏电站及不同生境对植物—土壤特性的影响,在2023年8月和2024年8月,选择2013、2016、2021年建设的光伏电站和光伏场外未受干扰、地形平坦、其他自然条件基本一致的区域为研究对象,光伏场内和光伏场外各随机设置3个间隔不小于20m的典型样地(10m×10m),在每个样地的板间和板下各随机设置5个规格为1m×1m的样方作为重复,则每个电站内各设置30个样方,光伏场外的对照区设置15个样方,共计105个样方;在2023年8月和2024年8月分别采样两次,共计四次采样。

1.3 野外调查与样品采集

经过实地调查发现光伏电站内生长的植被几乎全部为草本植物,因此本研究都设置1m×1m的样方进行植被调查,在每个1m×1m的样方中,分物种估测植被盖度,用卷尺测量各物种的自然垂直高度(即为植被高度),记录每一样方中植物种名、物种数、盖度、高度、多度和丰富度等,并紧贴地面剪取样方内的植物装入档案袋,以进行后续的实验。

在每个1m×1m的样方中,在采集植物样品的同一地点使用直径5cm的土钻采集0—10cm和10—20cm的土壤样品,每个样地各样点同层土壤混合均匀后,带回实验室内风干过筛备用,用于测定土壤理化性质,植物和土壤样品的采集均在2023年8月和2024年8月进行。

1.4 实验室分析

样方内草本植物分物种齐地面刈割,先称量鲜重,后装至档案袋内并带回实验室在80 $^{\circ}\text{C}$ 下烘干24小时至恒重,以此方法获取地上生物量^[17],称重并记录。

土壤样品处理及分析方法采用常规分析方法^[18]。土壤有机碳的测定采用TOC分析仪法(型号:vario TOC SELECT);土壤全氮测定采用凯氏定氮法;土壤全磷测定采用碱熔—钼锑抗分光光度法;土壤全钾测定采用ICP法;土壤机械组成用激光粒度分析仪(Malvern 3000)测定;土壤pH值采用酸度计测定。

1.5 数据处理

(1) 物种重要值^[19]

$$\text{重要值} = (\text{相对频度} + \text{相对密度} + \text{相对盖度}) / 3 \quad (1)$$

(2) α 多样性指数计算^[19]

物种多样性的研究以 α 多样性指数进行计算,反映了群落内物种间通过竞争资源或利用同种生境而产生的共存结果^[19]。包括物种丰富度(Species richness index, R)指数、Shannon-Wiener多样性(Shannon-Wiener index, H)指数、优势度(Simpson dominance index, D)指数、均匀度(Pielou evenness index, E)指数,其中 H 能反映植物群落在物种水平上的多样性与异质性程度, H 越大,群落的多样性程度越高,其稳定性越好; R 越大表明群落内植物种数越多; D 越大表明生物群落内不同种类生物数量分布越不均匀,优势生物的生态功能越突出; E 反映物种个体数目在群落中分配的均匀程度^[20]。计算公式如下:

$$R = S \quad (2)$$

$$H = - \sum (P_i \ln P_i) \quad (3)$$

$$D = 1 - \sum (P_i/P)^2 \quad (4)$$

$$E = H/\ln S \quad (5)$$

式中, S 为每个样方的物种总数; P_i 为第 i 个种的重要值占样方总数重要值之和的比率; P 为 S 个物种的全部重要值之和。

(3) 数据分析

利用 Excel 2021 软件对数据进行整理、利用 IBM SPSS Statistics 26 软件对数据进行单因素方差分析 (One-way ANOVA), 考虑到样方与样地之间的嵌套结构, 分析时将样地作为“Error”项进行处理, 以消除样地间的变异对结果的影响, 并确保数据分析的准确性。使用最小显著差异法 (LSD) 进行后续的多重比较, 检验不同生境、不同建设年份下光伏电站的各植被和土壤指标的显著性差异 ($P < 0.05$)。利用 Origin 2021 软件绘图完成相关制图, 使用 Canoco 5 进行冗余分析 (RDA) 与绘图, 使用 R 4.2.1 进行 Mantel test 分析 (“LinkET”包) 与绘图, 用于分析光伏电站不同生境和不同建设年份下植被和土壤因子的相关性分析。

2 结果与分析

2.1 光伏电站不同生境和不同建设年份下植被特征

2.1.1 光伏电站植物物种组成和重要值分析

表 1 为光伏电站不同生境和不同建设年份下各物种的重要值, 从不同生境来看, 调查样地的板间、板下和场外的物种数分别为 11 科 22 属 29 种、11 科 21 属 24 种、6 科 7 属 7 种 (表 2), 其中光伏板间优势种有草地早熟禾 (*Poa pratensis*) (0.697)、针茅 (*Stipa capillata*) (0.686)、冰草 (*Agropyron cristatum*) (0.557)、冷地早熟禾 (*Poa araratica Keng*) (0.538) 等; 光伏板下优势种有羊茅 (*Festuca elata*) (0.808)、针茅 (*Stipa capillata*) (0.651)、芨芨草 (*Neotrinia splendens*) (0.602)、草地早熟禾 (*Poa pratensis*) (0.536) 等; 场外优势种有冷地早熟禾 (*Poa araratica Keng*) (0.427)、狼毒 (*Stellera chamaejasme*) (0.362)、针茅 (*Stipa capillata*) (0.292) 等。由此可见, 在本研究区的不同生境中, 针茅为 3 种生境的共有优势种, 板间的优势度最高, 场外优势度最低, 通过表 2 知, 光伏板间的植物物种组成比板下和场外更丰富。从不同年份来看, 在 2013、2016、2021 年光伏电站调查样地的物种数分别为 6 科 13 属 16 种、13 科 23 属 23 种、10 科 16 属 17 种 (表 3), 其中 2013 年光伏电站的优势种有芨芨草 (*Neotrinia splendens*) (0.594)、线叶嵩草 (*Carex capillifolia*) (0.577) 和冰草 (*Agropyron cristatum*) (0.538); 2016 年光伏电站的优势种有草地早熟禾 (*Poa pratensis*) (0.629)、冰草 (*Agropyron cristatum*) (0.595) 和紫羊茅 (*Festuca rubra*) (0.430); 2021 年光伏电站的优势种有羊茅 (*Festuca elata*) (0.784)、针茅 (*Stipa capillata*) (0.667) 和芨芨草 (*Neotrinia splendens*) (0.659); 其中, 2016 年的物种组成更丰富。

表 1 光伏电站不同生境和不同建设年份下植物物种组成及其重要值

Table 1 Plant species composition and its important value in different habitats and construction years of photovoltaic power stations

植物名称 Vegetation name	重要值 Important values					
	不同生境 Different habitats			不同建设年份 Different years		
	光伏板间	光伏板下	光伏场外	2013	2016	2021
芨芨草 <i>Neotrinia splendens</i>	0.512	0.602	—	0.594	0.365	0.659
菊叶香藜 <i>Chenopodium foetidum Schrad</i>	0.050	—	—	0.062	—	0.026
垂穗披碱草 <i>Elymus nutans Griseb</i>	0.412	—	—	0.412	—	—
骆驼蓬 <i>Peganum harmala</i>	0.236	0.273	—	0.295	0.198	—
蒲公英 <i>Taraxacum mongolicum</i>	0.210	0.023	—	0.051	0.015	—
银灰旋花 <i>Convolvulus ammannii</i>	0.211	0.134	0.213	0.235	0.163	0.168
羊茅 <i>Festuca elata</i>	0.238	0.808	—	0.524	0.406	0.784
冰草 <i>Agropyron cristatum</i>	0.557	0.195	—	0.538	0.595	0.195
冷地早熟禾 <i>Poa araratica Keng</i>	0.538	—	0.427	0.069	—	—

续表

植物名称 Vegetation name	重要值 Important values					
	不同生境 Different habitats			不同建设年份 Different years		
	光伏板间	光伏板下	光伏场外	2013	2016	2021
线叶嵩草 <i>Carex capillifolia</i>	0.169	0.329	0.212	0.577	0.348	0.161
草地早熟禾 <i>Poa pratensis</i>	0.697	0.536	—	0.121	0.629	—
阿尔泰狗娃花 <i>Aster altaicus</i>	0.168	0.033	—	0.229	0.039	—
盐地风毛菊 <i>Saussurea salsa</i>	0.229	—	—	0.097	—	—
小苦荬 <i>Ixeridium dentatum</i>	0.133	0.040	—	—	0.020	—
冷蒿 <i>Artemisia frigida</i> Willd	0.222	0.187	0.250	—	0.209	0.198
米口袋 <i>Gueldenstaedtia verna</i>	0.102	—	—	—	0.102	—
蜆果芥 <i>Braya humilis</i>	0.086	—	0.079	—	0.086	—
猪毛菜 <i>Kali collinum</i>	0.033	—	—	—	0.033	—
狼毒 <i>Stellera chamaejasme</i>	0.043	0.145	0.362	—	0.024	0.117
二列委陵菜 <i>Potentilla bifurca</i>	0.016	0.028	—	—	0.012	0.031
针茅 <i>Stipa capillata</i>	0.686	0.651	0.292	—	—	0.667
紫羊茅 <i>Festuca rubra</i>	0.349	0.425	—	—	0.430	0.373
马唐 <i>Digitaria sanguinalis</i>	0.112	—	—	—	—	0.112
中华苦荬菜 <i>Ixeris chinensis</i>	0.037	—	—	—	—	0.037
西伯利亚刺柏 <i>Juniperus sibirica</i> Burstd	0.232	—	—	—	—	0.232
锦鸡儿 <i>Caragana sinica</i>	0.053	—	—	—	—	0.053
藜 <i>Chenopodium album</i>	—	0.171	—	0.171	—	—
黄花蒿 <i>Artemisia annua</i>	—	0.228	—	0.056	—	—
尖头叶藜 <i>Chenopodium acuminatum</i> Willd	—	0.426	—	0.426	—	—
防风 <i>Saposhnikovia divaricata</i>	—	0.025	—	—	0.025	—
扁蓄 <i>Polygonum aviculare</i>	—	0.019	—	—	0.019	—
点地梅 <i>Androsace umbellata</i>	—	0.023	—	—	0.023	—
虬子草 <i>Leptochloa panicea</i>	—	0.175	—	—	0.175	—
草地风毛菊 <i>Saussurea amara</i>	—	0.029	—	—	0.045	0.014
沙蓬 <i>Agriophyllum squarrosum</i>	—	0.172	—	—	—	0.172

—表示某生境下无此种植物

表 2 光伏电站不同生境的植物科属种

Table 2 Plant species in different habitats of photovoltaic power station

不同生境 Different habitats	科名 Family	属数 Genus	种数 Species	占总种百分比/% Percentage of total species
光伏板间 Between photovoltaic panel	禾本科 Gramineae	7	8	27.59
	苋科 Amaranthaceae	2	4	13.79
	白刺科 Nitrariaceae	1	1	4.17
	菊科 Compositae	6	7	24.14
	旋花科 ConvolvulaceaeJuss	1	1	4.17
	莎草科 Cyperaceae	1	1	4.17
	豆科 Leguminosae	2	2	6.90
	十字花科 Brassicaceae	1	1	4.17
	瑞香科 ThymelaeaceaeJuss	1	1	4.17
	蔷薇科 Rosaceae	1	1	4.17
	柏科 CupressaceaeGray	1	1	4.17
光伏板下 Under photovoltaic panel	禾本科 Gramineae	5	6	25.0
	白刺科 Nitrariaceae	1	1	4.17
	苋科 Amaranthaceae	2	3	12.5
	菊科 Compositae	5	6	25.0
	旋花科 ConvolvulaceaeJuss	1	1	4.17
	莎草科 Cyperaceae	1	1	4.17

续表

不同生境 Different habitats	科名 Family	属数 Genus	种数 Species	占总种百分比/% Percentage of total species
光伏场外 Photovoltaic off-site	伞形科 Umbelliferae	1	1	4.17
	藜科 Chenopodiaceae	2	2	8.33
	报春花科 Primulaceae	1	1	4.17
	蔷薇科 Rosaceae	1	1	4.17
	瑞香科 ThymelaeaceaeJuss	1	1	4.17
	禾本科 Gramineae	2	2	28.57
	旋花科 ConvolvulaceaeJuss	1	1	14.29
	菊科 Compositae	1	1	14.29
	莎草科 Cyperaceae	1	1	14.29
	十字花科 Brassicaceae	1	1	14.29
	瑞香科 ThymelaeaceaeJuss	1	1	14.29

表 3 光伏电站不同建设年份的植物科属种

Table 3 Plant species in different construction years of photovoltaic power station

不同年份 Different years	科名 Family	属数 Genus	种数 Species	占总种百分比/% Percentage of total species
2013	禾本科 Gramineae	5	6	37.50
	苋科 Amaranthaceae	1	3	18.75
	白刺科 Nitrariaceae	1	1	6.25
	菊科 Compositae	4	4	25.00
	旋花科 ConvolvulaceaeJuss	1	1	6.25
	莎草科 Cyperaceae	1	1	6.25
2016	禾本科 Gramineae	6	6	26.09
	白刺科 Nitrariaceae	1	1	4.35
	菊科 Compositae	5	5	21.74
	旋花科 ConvolvulaceaeJuss	1	1	4.35
	莎草科 Cyperaceae	1	1	4.35
	豆科 Leguminosae	1	1	4.35
	十字花科 Brassicaceae	1	1	4.35
	苋科 Amaranthaceae	1	1	4.35
	瑞香科 ThymelaeaceaeJuss	1	1	4.35
	蔷薇科 Rosaceae	1	1	4.35
	伞形科 Umbelliferae	1	1	4.17
	藜科 Chenopodiaceae	2	2	8.70
	报春花科 Primulaceae	1	1	4.35
	禾本科 Gramineae	5	6	35.29
2021	苋科 Amaranthaceae	1	1	5.88
	旋花科 ConvolvulaceaeJuss	1	1	5.88
	莎草科 Cyperaceae	1	1	5.88
	菊科 Compositae	3	3	17.65
	瑞香科 ThymelaeaceaeJuss	1	1	5.88
	蔷薇科 Rosaceae	1	1	5.88
	柏科 CupressaceaeGray	1	1	5.88
	豆科 Leguminosae	1	1	5.88
	藜科 Chenopodiaceae	1	1	5.88

2.1.2 光伏电站植物个体属性特征

研究区光伏电站不同生境和不同年份下的植被高度、盖度和生物量如图 2 所示,从不同生境来看,光伏板

间植被平均高度和地上生物量显著高于板下和场外 ($P<0.05$); 光伏板下的植被盖度显著高于板间和场外 ($P<0.05$), 其中板下的盖度达到了 52.30%, 板间为 34.95%, 场外仅为 12.60%。不同年份的植被平均高度存在显著差异, 2021 年光伏电站植被高度显著高于 2013、2016 年 ($P<0.05$); 2016 年光伏电站植被盖度 (47.29%) 高于 2013 年 (44.58%) 和 2021 年 (38.99%), 不同年份场区下的植被盖度存在显著差异 ($P<0.05$); 2013、2021 年光伏电站的地上生物量显著高于 2016 年 ($P<0.05$), 而 2013、2021 年无显著差异 ($P>0.05$)。

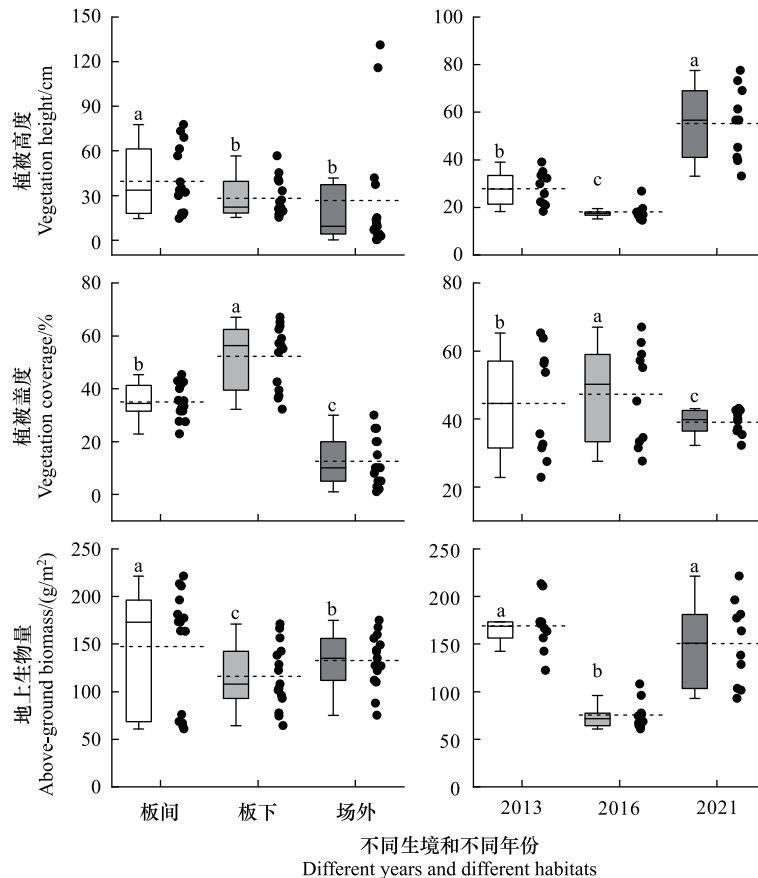


图2 光伏电站不同生境和不同建设年份下的植被高度、盖度和生物量

Fig.2 Vegetation height, coverage and biomass in different habitats and construction years of photovoltaic power plants

不同小写字母表示各生境和年份之间具有显著差异 ($P<0.05$)

2.1.3 光伏电站不同生境下的植物群落多样性指数变化

通过对 4 种群落多样性指数进行分析 (图 3), 光伏板对植物的物种丰富度 (R)、Shannon-Wiener 指数 (H)、Simpson 优势度指数 (D) 和均匀度指数 (E) 有显著影响。光伏板间的 R 平均为 3.34, 略低于光伏板下 (3.37), 场外的 R 最高, 为 3.71, 三者间无显著差异 ($P>0.05$); 光伏场外的 D 显著高于光伏板间和板下 ($P<0.05$), 光伏场外的 H 显著高于板间和板下 ($P<0.05$)。

2.1.4 光伏电站不同建设年份下植物群落多样性指数变化

从图 4 可以看出, 不同建设年份下的光伏电站之间的 α 多样性之间存在显著差异, 2016 年光伏电站的 R (3.81) 大于 2013 年 (2.93), 差异较显著 ($P<0.05$); 2013、2021 年光伏电站的 D 显著低于 2016 年光伏电站 ($P<0.05$), 而 2013、2021 年之间的 D 无显著差异 ($P>0.05$); 同样, 对于 H , 2016 年光伏电站显著高于 2013、2021 年, 而 2013、2021 年之间无显著差异 ($P>0.05$); 2016 年光伏电站的 D (0.84) 显著高于 2021 年 (0.73) ($P<0.05$), 整体来看, 2016 年光伏电站的 α 多样性指数均高于其它两个年份的场区, 这与实地调查结果相一致, 光伏电站不同年份下的植被科属种记录中 (表 3), 2016 年光伏电站有 13 科 23 属 23 种, 2021 年有 10 科

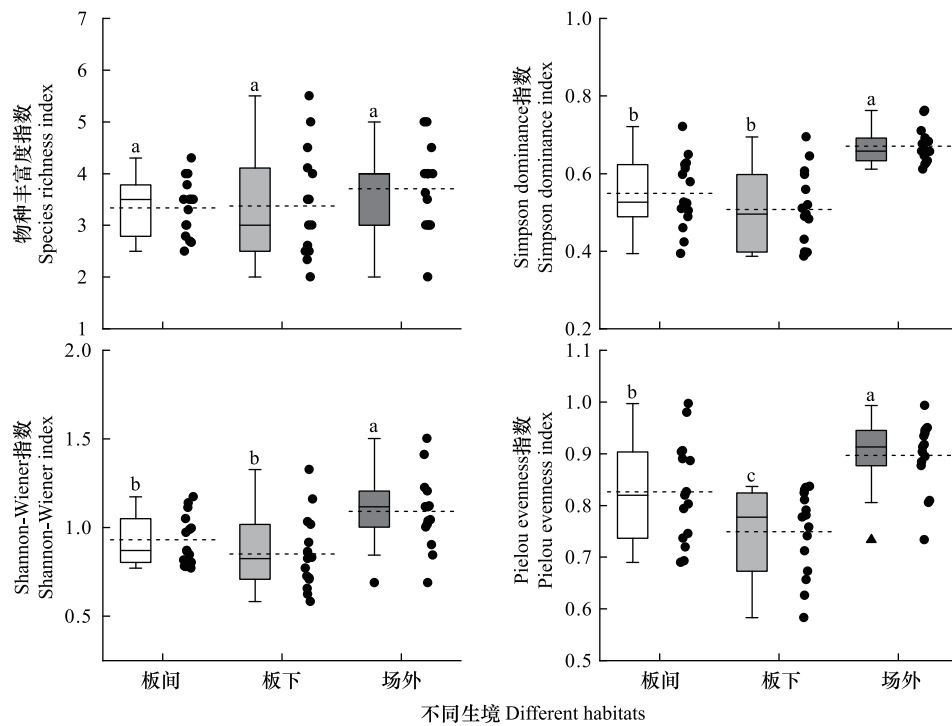


图3 光伏电站不同生境下植被群落多样性变化

Fig.3 Changes of vegetation community diversity in different habitats of photovoltaic power stations

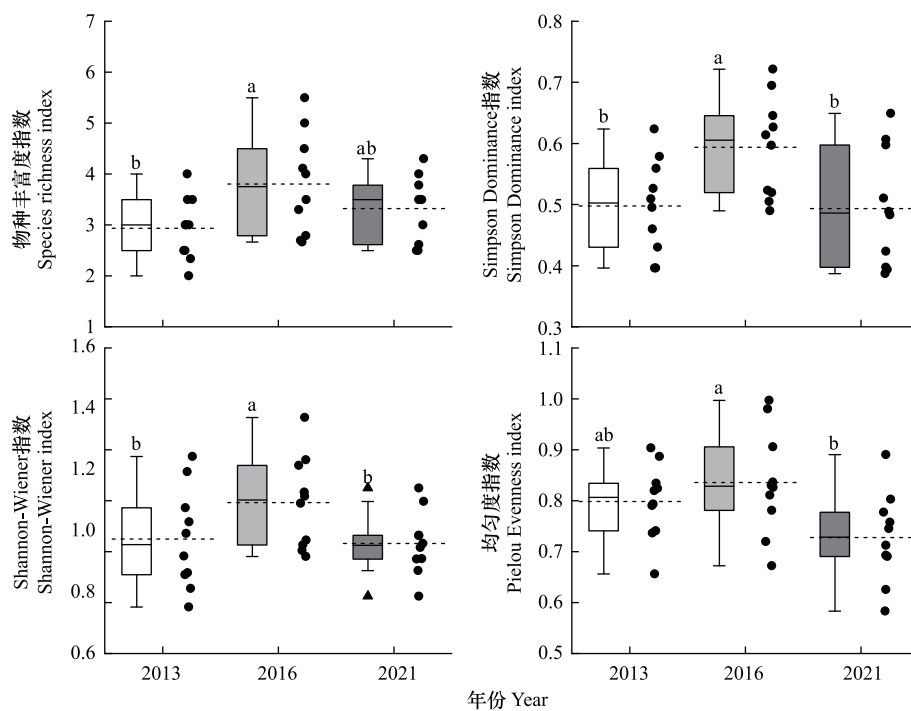
不同小写字母表示不同生境之间具有显著差异 ($P < 0.05$)

图4 光伏电站不同建设年份下植被群落多样性变化

Fig.4 Changes in vegetation community diversity in different construction years of photovoltaic power stations

不同小写字母表示不同年份之间具有显著差异 ($P < 0.05$)

17 属 17 种,而 2013 年只有 6 科 14 属 16 种。

2.2 光伏电站建设的土壤理化特征

2.2.1 光伏电站不同生境下土壤理化性质

光伏电站不同生境 0—20cm 土壤理化性质变化如图 5 所示,土壤有机碳含量在 0—10cm 土层表现为光伏板间>场外>光伏板下,光伏板间和场外生境显著高于板下生境($P<0.05$),而在 10—20cm 土层则是场外>光伏板下>光伏板间,且各生境之间具有显著差异性($P<0.05$);0—10cm 土层的土壤全氮含量表现为光伏板间(0.99g/kg)>场外(0.93g/kg)>光伏板下(0.88g/kg),差异显著($P<0.05$);在 10—20cm 土层中,场外的土壤全氮含量显著高于光伏板下和板间($P<0.05$),光伏板间和光伏板下无显著差异($P>0.05$);0—10cm 土层场外的土壤全磷含量最高,为 0.55g/kg,依次为光伏板间,为 0.54g/kg,光伏板下含量最低,为 0.53g/kg,在 10—20cm 土层中,则是光伏板间土壤全磷含量(0.57g/kg)略高于场外(0.56g/kg),光伏板下含量最低(0.51g/kg),各生境之间差异显著($P<0.05$);0—10cm 的光伏板下土壤砂砾的含量显著高于板间和场外($P<0.05$),光伏板间的土壤粉粒和土壤黏粒含量最高。综上,在 0—10cm 土层,板间的土壤有机碳和全氮含量最高,场外的土壤全磷含量最高;在 10—20cm 土层,板间的土壤全磷含量最高,场外的土壤有机碳和全氮含量最高。

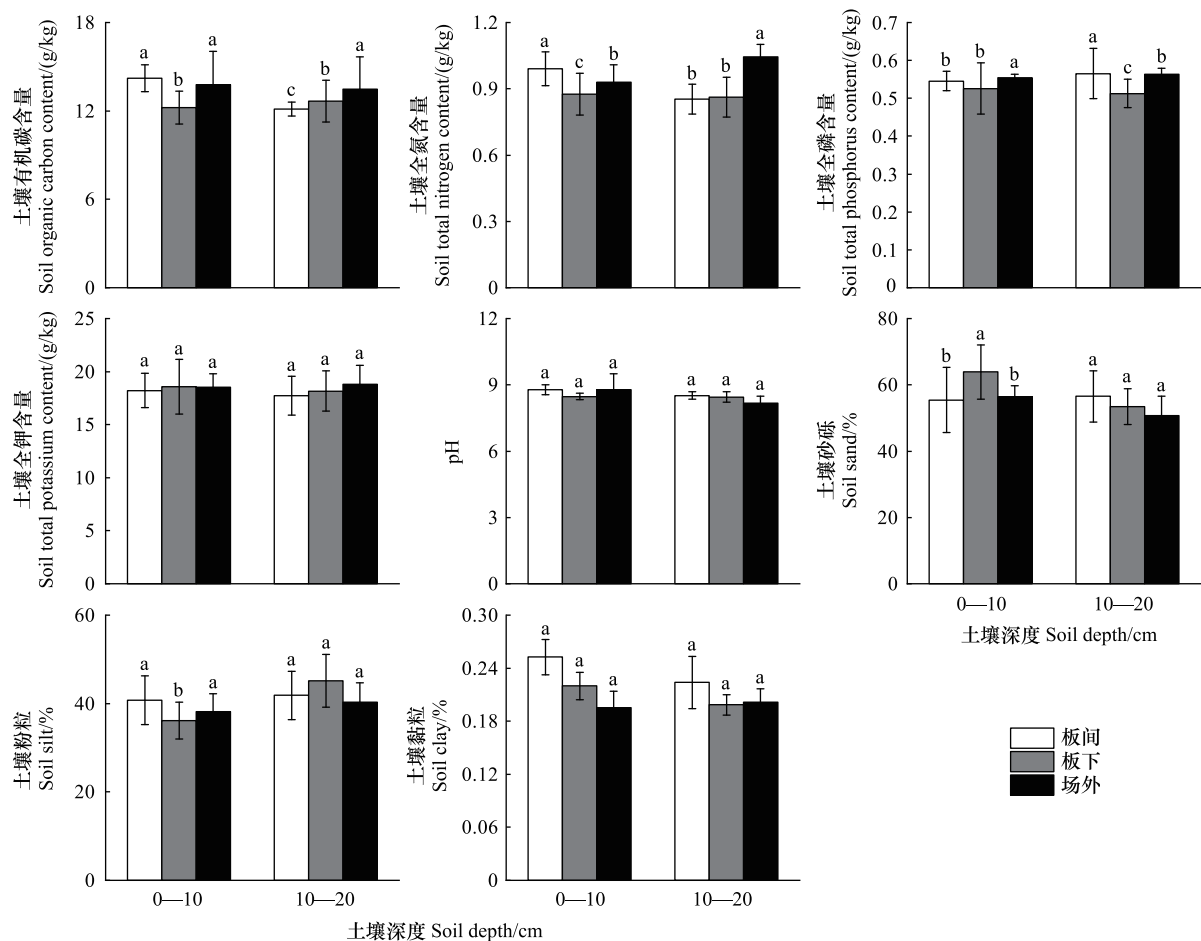


图 5 光伏电站不同生境下 0—20cm 土壤理化性质

Fig.5 Physical and chemical properties of 0—20cm soil in different habitats of photovoltaic power station

不同小写字母表示同一土层不同生境之间的差异显著 ($P<0.05$)

2.2.2 光伏电站不同建设年份下土壤理化性质

不同建设年份下光伏电站 0—20cm 土壤理化性质变化如图 6 所示,在 0—20cm 土层中,2013 年土壤有机

碳含量最高;在 0—10cm 土层中,2013、2016 年的土壤全氮含量显著高于 2021 年光伏电场($P<0.05$),在 10—20cm 土层中,则是 2013 年土壤全氮含量显著高于 2016、2021 年($P<0.05$),整体呈现出光伏电场建设时间越短,其含量越低的趋势;0—10cm 土层土壤全磷含量变化趋势和土壤有机碳相似,其中 2021 年光伏电站土壤全磷含量显著低于 2013、2016 年($P<0.05$),0—20cm 土层的土壤全磷含量则是 2016 年最高,为 0.61g/kg,显著高于 2021 年($P<0.05$),和 2013 年无显著差异($P>0.05$);0—20cm 土层的土壤全钾含量表现为 2016 年最高,其中,在 0—10cm 土层中 2013、2016 年土壤全钾含量高于 2021 年,具有显著差异性($P<0.05$),10—20cm 土层均无显著差异($P>0.05$);本研究区各场区的土壤均呈弱碱性,0—20cm 土层内各场区之间土壤 pH 值无显著差异($P>0.05$);从图 6 可以明显发现 2021 光伏电场在 0—10cm 土层中土壤砂砾含量显著高于其它两个场区,在 10—20cm 土层中,无显著差异($P>0.05$);而土壤粉粒含量则是 2016 年最高,其中在 10—20cm 土层显著高于 2013、2021 年($P<0.05$);土壤黏粒则是 2013 年光伏电场最高,在 0—10cm 土层中 2013 年显著高于其它两个场区,在 10—20cm 土层无显著差异($P>0.05$)。

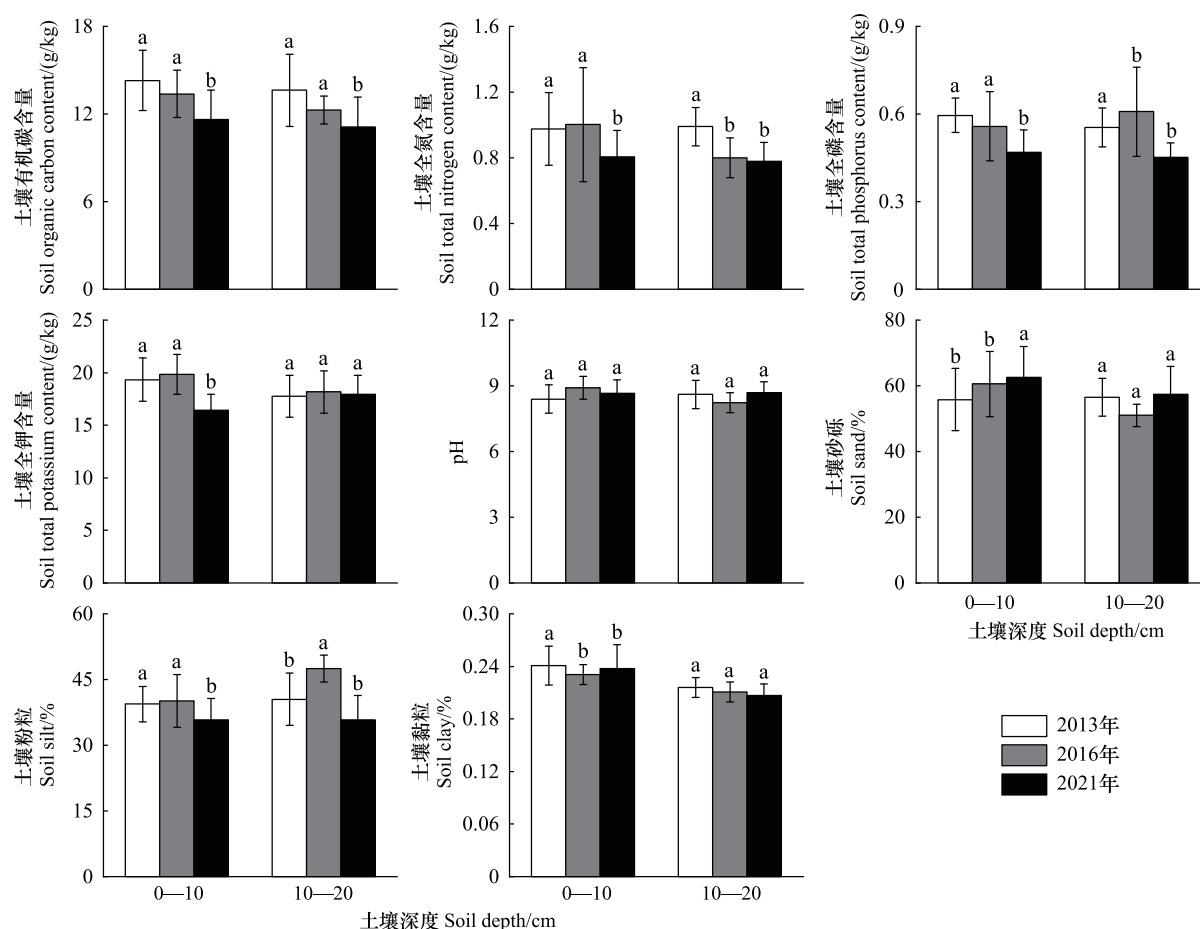


图 6 光伏电站不同建设年份下 0—20cm 土壤理化性质

Fig.6 Physical and chemical properties of 0—20 cm soil in different construction years of photovoltaic power station

不同小写字母表示同一土层不同年份之间的差异 ($P<0.05$)

2.3 光伏电站植物群落特征与土壤性质的关系

对光伏电站不同生境和不同建设年份光伏电站植被群落特征—土壤理化性质数据进行 RDA 分析(图 7),光伏电站不同生境植被和土壤在恢复过程中板间、板下和场外的 2 个排序轴分别解释了 82.85%、86.41% 和 88.96% 的植被群落特征-土壤性质的关系,板间生境的植被高度、盖度和物种丰富度指数与土壤有机碳、全氮、全钾、全磷呈负相关,与土壤 pH 值和砂砾呈正相关;板下生境的土壤有机碳、全氮、全钾、全磷与植被盖度

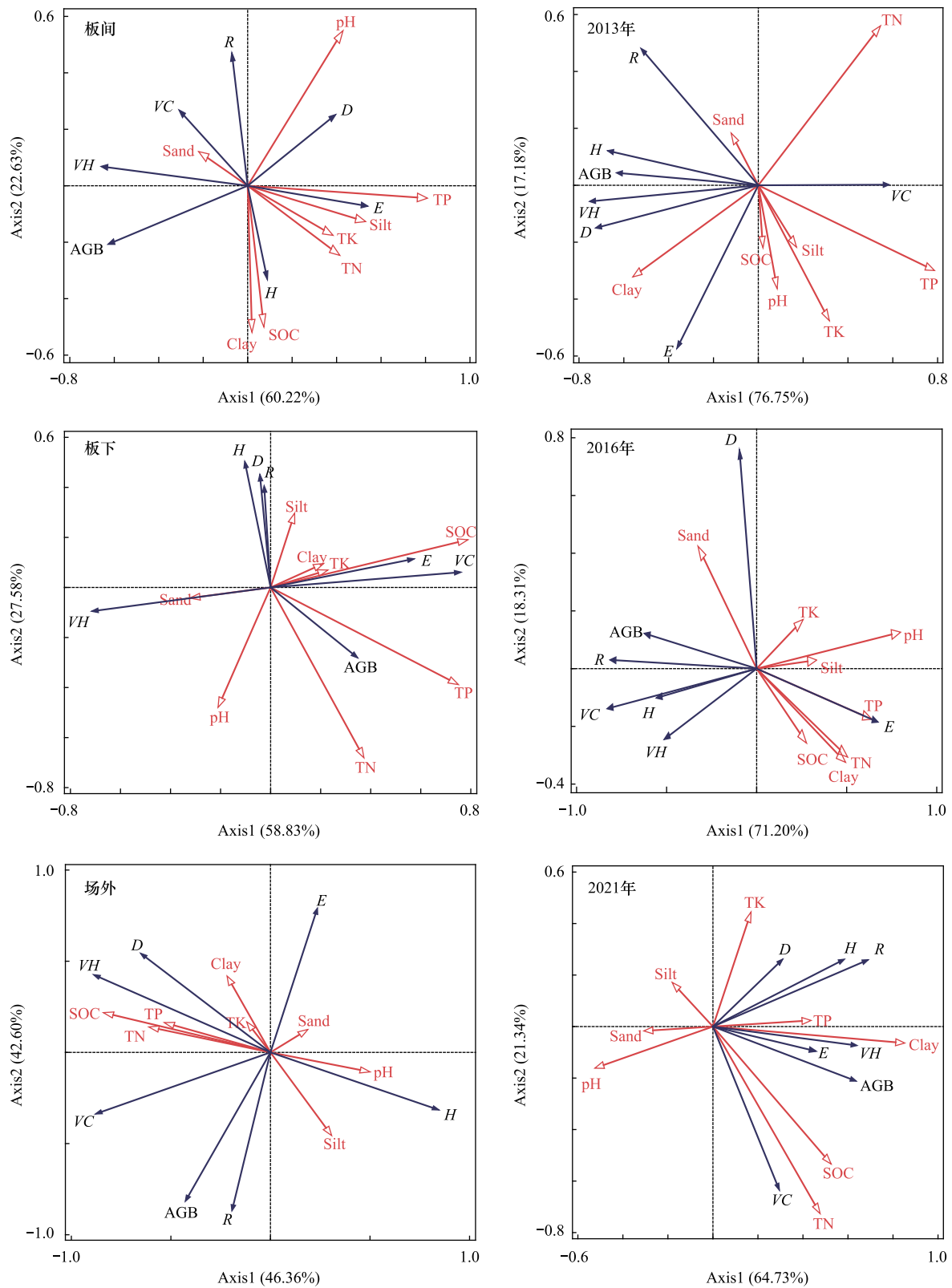


图7 光伏电站不同生境和建设年份下植被群落特征与土壤性质 RDA 二维排序

Fig.7 RDA two-dimensional ordination of vegetation community characteristics and soil properties under different habitats and construction years of photovoltaic power station

VC: 植被盖度 Vegetation coverage; VH: 植被高度 Vegetation height; AGB: 地上生物量 Aboveground biomass; R: 物种丰富度 Species richness index; H: Shannon-Wiener 指数 Shannon-wiener index; D: Simpson 优势度指数 Simpson dominance index; E: 均匀度指数 Pielou evenness index; Clay: 黏粒; Silt: 粉粒; Sand: 砂粒; SOC: 土壤有机碳 Soil organic carbon; TN: 全氮 Total nitrogen; TP: 全磷 Total phosphorus; TK: 全钾 Total potassium; pH: pH value; 图中红色箭头代表土壤理化性质, 蓝色箭头代表植物群落特征, 线段长短表示植物群落特征与土壤性质关系的大小

和地上生物量呈正相关,与植被高度呈负相关。从图 7 可以看出,从不同年份来看,光伏电站不同生境植被和土壤在恢复过程中 2013、2016、2021 年的排序轴分别解释了 93.93%、89.51%和 86.07%的植被群落-土壤性质的关系。其中 2013 年电站的土壤全磷、全氮和植被盖度呈正相关,土壤黏粒和全钾与植被均匀度指数呈正相关;2016 年电站土壤 pH、全磷、全氮和黏粒与植被均匀度指数呈正相关,土壤全钾和砂砾与植被 Simpson 优势度指数呈正相关;2021 年电站则是土壤全氮、黏粒、有机碳与植被盖度、地上生物量和高度呈正相关,土壤全钾、全磷和黏粒与植被物种丰富度指数、Shannon-Wiener 指数和 Simpson 优势度指数呈正相关。综合以上数据表明,在本研究区 2013、2016 年建设下光伏电站的植被高度、地上生物量、物种丰富度、Shannon-Wiener 指数和 Simpson 优势度指数与土壤有机碳、全氮、全磷、全钾和粉粒呈负相关,而 2021 年光伏电站的各植被特性与土壤有机碳、全氮、全磷、全钾和黏粒呈正相关。

如图 8 示,为不同生境与植被和土壤因子的 Mantel test 分析,能够明显看出植被地上生物量与高度和物种多样性显著正相关,植被盖度与土壤黏粒显著正相关,与砂砾显著负相关;场外生境对植被和土壤无显著影响,而板间和板下生境对植被地上生物量有极显著影响($P<0.05$),整体来看,板间和板下生境对植被和土壤的影响远大于场外,由此可见,光伏电站的建设会在一定程度上影响当地植被和土壤的恢复。从图 8 可以看出,光伏电站建设年份(2013、2016、2021 年)对植被属性的影响极显著,主要表现在地上生物量、物种多样性指数、Shannon-Wiener 指数,而对土壤因子的影响明显低于植被因子。结果表明,时间效应主要作用在植被的多样性变化过程中,而对土壤影响较小。因此,无论是从不同生境还是不同建设年份来看,光伏电站的建设对植被的影响显著大于土壤。

3 讨论

3.1 光伏电站不同生境和不同建设年份对植被属性的影响

土壤水热条件和风速是影响荒漠地区植物生长和草原生态系统功能的重要因素^[21]。高寒荒漠草原区生态环境非常恶劣,植被群落结构简单,物种数相对较少,物种丰富度和多样性指数均较小,种间重要值差异较大,最终导致该类型区域的植被群落稳定性差,草地生态系统脆弱^[22]。植物的生长发育及其分布格局受到温度、水分及养分等环境因子的限制,使得不同研究区域植物组成不同,进而导致植被群落特征在塔拉滩不同样地中具有明显异质性^[23]。本研究结果表明:光伏板间的植物物种组成、植被平均高度和地上生物量是最高的,且针茅为这三个位置的共有优势种,而光伏板下的地上生物量最低,但光伏面板的遮阴也改变了光伏板下气温,植物生长受到影响,表现出个体小、数量少等特点,致使光伏板下方地上生物量相对较低^[24];2016 年建设的光伏电站植物物种组成更丰富且植被盖度最高,以草地早熟禾为主要优势种,同时,从图 2 可以明显看出 2016 年光伏电站的 R 、 H 、 D 和 E 最高,这与本次植被调查结果相一致。

本研究的场外生境下植被群落特征与场内生境(板间和板下)存在显著差异(图 3)。有研究表明了不同生境和恢复年限因其对环境条件的改变,进而影响了植被生长特征。光伏板间植物群落的 R 、 H 、 D 和 E 均比光伏板下高(图 3),这是因为板间植被受光照面积比板下大,会使植物群落接收到的总光照强度更高,光合作用更强,从而增加了物种的多样^[25],这种生境下,土壤湿度较低,但光照充足,适合一些耐旱、喜阳的植物生长,这些区域的植物多样性较高,但竞争也较激烈^[26]。本研究中,板间区域植物种类丰富多样,种属数均大于板下和场外区域,物种数目较高,优势物种较少,因此群落结构较为稳定,此结果与张芝萍等^[24]对河西走廊荒漠区光伏电站不同位置植物群落物种多样性分析结果不同,可能是因为光伏电板的遮阴作用与降水截留作用限制了当地草场不耐荫耐涝植物的生长,从而降低了物种多样性、丰富度和优势度。然而对于板下生境,该区域由于受到遮挡,光照减少,温度相对较低,湿度较高。这种生境下,植物的生长主要依赖于散射光,适合耐阴、耐湿的植物生长。由于光照不足,植物的生长速度可能较慢,多样性较低^[24],但植物种群的稳定性较高。

植物群落演替伴随着物种多样性变化。一种观点认为,随着群落演替,多样性不断增大^[27];另一种观点认为,在演替初期到中期多样性增大,达到峰值后在演替后期呈降低趋势^[28]。本研究中,2016 年(建设后恢

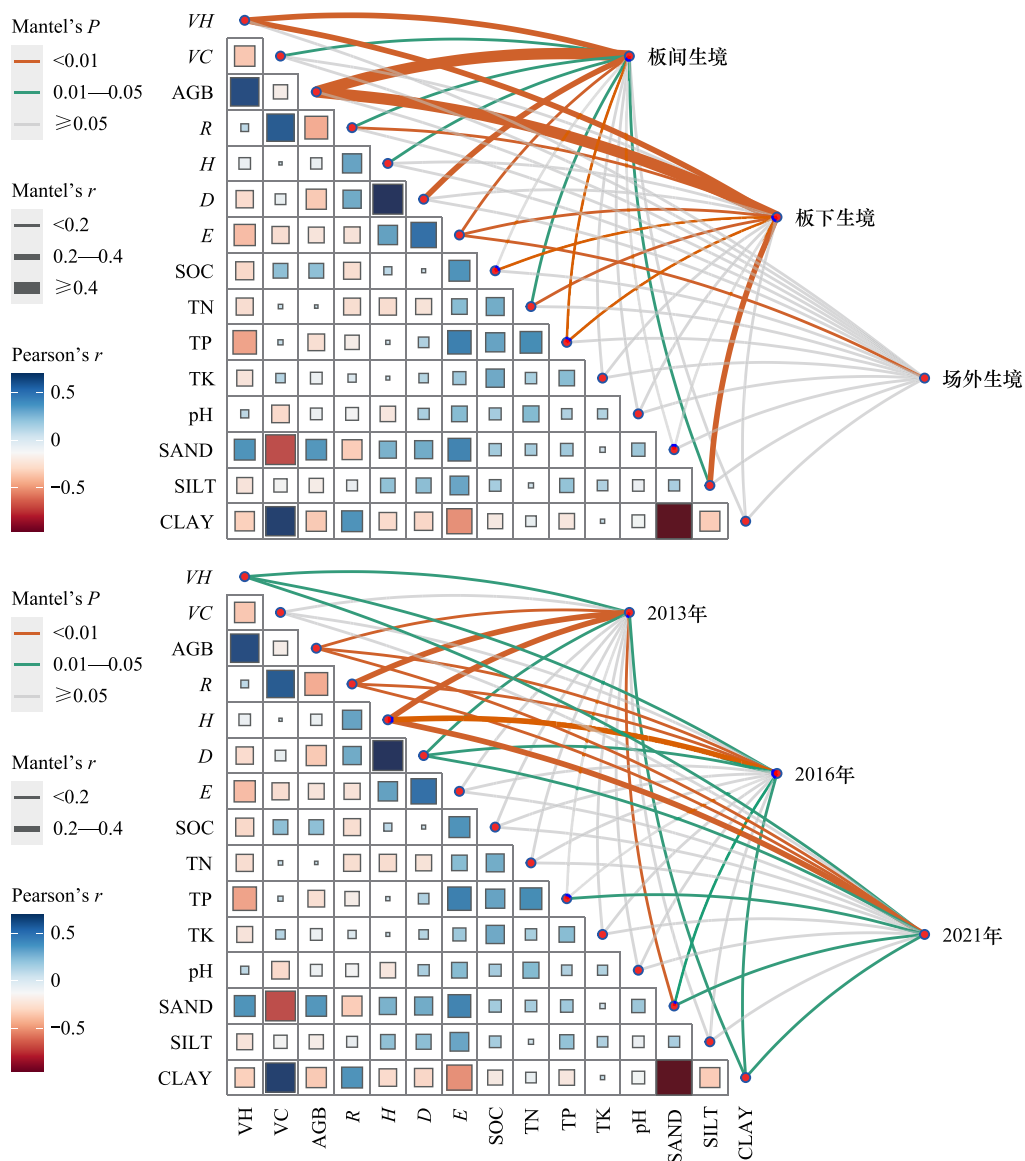


图 8 光伏电站不同生境和建设年份对植被和土壤因子的影响分析

Fig.8 Analysis of the influence of different habitats and constructio years on vegetation and soil factors of photovoltaic power station

复中期)个体属性和群落属性都更好,说明建设造成植被群落个体和群落属性的降低将会有所提升,同时再经过长期恢复后,因为环境条件的限制和改变,植被(个体和群落)属性依然降低,所以应注意电站长期的环境管理和维护。在植被恢复过程中,地表有机物的分解导致土壤肥力增加,进而提高了草本植物的竞争能力^[29],为草本植物的种子萌发、存活、生长和繁殖创造了条件,植物多样性会再次升高。由此可见,从时间尺度来看,本研究中光伏电站的建设对植被恢复的影响主要在恢复中期达到峰值,无论是植被高度、盖度、生物量还是物种丰富度和群落组成都得到显著提升,可能是由于光伏电站建成初期,受到破坏的植被尚未完全恢复;而在建设一定年限后,随着扰动区的逐渐稳定,植被长势良好。

3.2 光伏电站不同生境和不同建设年份对土壤理化性质的影响

土壤中各个养分因子之间存在相互影响和制约关系,且受到气候因子和植被群落的影响,即气候、土壤等环境因子和植被是相互作用的^[30]。本研究的场外生境下土壤养分与场内生境(板间和板下)存在显著差异,其中光伏板间的土壤有机碳含量大于板下,原因是板间的地上生物量较高,枯落物和死亡根系经微生物分解

后,导致其土壤有机质含量高于板下^[7]。而整体来看,光伏场外地上生物量小于板间,但其土壤有机碳含量却是最高,出现这一现象是由于场外生境相对于场内来说,未受到光伏板的干扰,光伏场外天然草地生长年限较长,地上生物量大,腐烂的残根落叶形成了一定水平的土壤碳含量,土壤中有有机质主要来源于植被产生的枯枝落叶以及腐烂根系分解,这与植被恢复年限密切相关^[31-32]。从图 6 可以看出,场外生境的土壤有机碳、全氮、全磷、全钾含量比板间和板下生境的更高,是受光伏电站小气候的影响,由于板间和板下生境的植物生长更快,需要更多的土壤养分来维持自生的营养需求,这也和本研究的结果是一致的。板间的粉粒和黏粒含量最高,板下的砂砾含量最高,通过在现场调查发现,在光伏电站建设初期,需要对光伏架进行打桩同时回填,较多粒径很大的石块在板下堆积,这也造成板下的砂砾含量是最高的一部分原因;同时,由于前后电板对风的双重阻碍,导致光伏板间生境的土壤呈现出一种特性,即粉粒和黏粒相对较多,而砂砾含量较少,整体上,土壤的粒度特征偏向于较为细小,这与党梦娇等^[33]研究结果相似。而板间生境由于光照充足,土壤温度较高,水分蒸发快,适应强光和干旱条件的植物占优势。这些植物通常有深根系,有助于土壤结构的改良和有机质的积累^[25],有利于促进土质向粉粒和黏粒的转化,这种转化过程可以提高土壤的稳定性和吸水能力,从而有助于减少光伏板间生境中的土壤侵蚀。

土壤理化特征会随着光伏电站建设年份的增加而发生显著变化,本研究结果发现,在 0—20cm 土层中,土壤有机碳、全氮和全磷含量呈现出光伏电站植被恢复时间越久,其含量越高的趋势,而土壤机械组成则是随着恢复时间的增加,土壤黏粒含量越高,可能是由于在早期的土壤恢复过程中,有一定的困难,土壤结构不稳定,有机质和养分含量低,土壤环境不适宜植物生长。而在中后期土壤恢复过程中,土壤结构逐步稳定,有机质和养分含量增加,适宜植物生长的环境逐步形成,也是由于光伏电站建设初期,需要对破坏的环境进行生态恢复,在进行植被恢复时,需对光伏电站进行人为施肥,这就增加了土壤外源养分的输入,提高了土壤有机碳、全氮、全磷含量^[34]。

综上所述,光伏电站不同生境和恢复年限对土壤理化特征有显著影响,不同生境和恢复年限的组合将导致土壤理化特征的多样性。这些差异需要在光伏电站的建设和管理过程中加以考虑,以实现土壤环境的可持续改善和优化。

3.3 光伏电站不同生境和不同建设年份对植被和土壤性质的影响

本研究冗余分析结果发现,光伏板间的植被群落特征与土壤有机碳、全磷、全氮、全钾含量呈显著负相关,而与土壤的 pH 值和砂质含量呈显著正相关。光伏板下的植被盖度和生物量也与土壤的有机碳、全磷、全氮、全钾及黏粒含量呈负相关(图 7),表明在干旱地区的光伏电站中,板间和板下生境的植被生长需要更多的土壤养分来满足其生长需求^[26],而较大粒径的土壤则有助于该生境下的植被生长。光伏场外则表现出相反的趋势,是由于没有光伏电站影响的条件下,场外植被生长需要较少的土壤养分,且较小粒径的土壤更有利于场外生境的植被生长,反映了自然状态下植被与土壤之间的良性互动关系^[35]。研究表明,在光伏电站不同生境下,土壤粒径对植被生长的影响存在显著差异。光伏板间和板下生境中,较大粒径的土壤有利于植被的生长,因为其有助于土壤的通气性和排水性^[36]。这些结果强调了不同生境下土壤管理的必要性,以优化光伏电站内外的生态系统功能。不同建设年份的光伏电站中的植被—土壤关系表明,刚建设的光伏电站由于土壤的及时维护和施肥,土壤肥力较高,有利于植被快速生长^[7],而在建设中后期(2013、2016 年)的光伏电站中(图 7),由于植被生长消耗了大量的土壤养分,导致土壤变得贫瘠,植被恢复缓慢,因此需要加强后期的土壤维护和施肥,来提高土壤肥力,促进植被恢复,维护光伏电站的生态平衡。

光伏电站不同生境和不同建设年份对植被和土壤有显著影响(图 8),板间和板下生境对植被和土壤因子有极显著的影响,而场外的影响并不显著,由此可见光伏电站的建设会在一定程度上对当地的生态恢复造成影响^[13]。图 8 表明光伏电站建设年份(2013、2016、2021 年)对植被属性的影响极显著,主要表现在地上生物量、物种丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数,而对土壤因子的影响明显低于植被因子,本研究中的时间效应主要作用在植被的多样性变化过程中,而对土壤并没有很强的影响。因此,无论是从不同生境还是不同

建设年份来看,光伏电站的建设对植被属性的影响显著大于土壤因子。

综上所述,光伏电站中植物群落特征与土壤性质的关系是一个复杂的相互作用过程。植物群落通过影响有机质积累、土壤结构和养分循环等方面改良土壤性质,而土壤性质通过影响植物生长、物种组成和群落结构等方面调控植物群落的特征。在光伏电站的特殊环境下,这种关系还会受到光伏板布局和恢复年限等因素的影响。

4 结论

(1)从不同生境来看,光伏板间的植被物种数最多,草地早熟禾和针茅为主要优势种,光伏板下则是羊茅和针茅为主要优势种,场外生境的物种数最少,植被以冷地早熟禾和狼毒为主。光伏板间植被平均高度和地上生物量显著高于板下和场外,而光伏板下的植被盖度最高,达到了 52.30%。光伏电站不同生境下的植物群落多样性表现为光伏场外>光伏板间>光伏板下,光伏场外显著高于光伏场内。不同生境的土壤环境存在一定的差异,综合来讲,土壤有机碳、全氮、全磷含量表现为场外>光伏板间>光伏板下。

(2)从电站建设时间来看,2016 年建设的光伏电站植物物种组成更丰富,有 23 种,以草地早熟禾为主要优势种,而 2013、2021 年建设的光伏电站植物物种数分别为 16 种和 17 种,分别以芨芨草和羊茅为主要植被。2021 年建设的光伏电站内植被平均高度显著高于 2016、2013 年建设的光伏电站,而 2016 年建设的光伏电站植被盖度是最高的,达到了 47.29%,2013 年建设的光伏电站则是地上生物量最高。2016 年建设的光伏电站植物群落多样性显著高于其他两个建设年份,随着建设时间的增加,整体呈现出先增加后下降的趋势。

(3)2013 年建设的光伏电站内土壤有机碳和全氮含量在 0—20cm 土层中含量最高,分别为 13.97 和 0.98g/kg,2016、2021 年光伏电站的土壤有机碳和全氮含量依次减少,表现出其含量随建设时间增加而增加的趋势;土壤全磷和全钾含量则是 2016 年光伏电站最高,分别为 0.58、19.0g/kg,各电站内的土壤 pH 值均呈微碱性,土壤机械组成在 2021 年光伏电站的土壤砂砾含量最高(60.04%),其他场区表现不明显。

(4)RDA 冗余分析和 Mantel test 分析显示,植被属性和土壤性质在不同生境和不同年份下相互影响。场内生境对植被盖度、高度和土壤全磷影响极显著,不同建设年份的电站对植被盖度、物种丰富度指数和 Shannon-Wiener 指数均有极显著影响,本研究以青藏高原高寒荒漠区光伏电站为研究对象,选取植被和土壤各指标,通过分析光伏电站不同生境和不同建设年份下植被属性与土壤特征,揭示了时间效应对该地区植被恢复过程中的重要影响,以期高寒荒漠地区光伏电站建设下的植被-土壤恢复和生态环境管理提供一定的理论参考与建议。

参考文献(References):

- [1] 陈睿山,郭晓娜,熊波,王尧. 气候变化、土地退化和粮食安全问题: 关联机制与解决途径. 生态学报, 2021, 41(7): 2918-2929.
- [2] Sinkko H, Lukkari K, Sihvonen L M, Sivonen K, Leivuori M, Rantanen M, Paulin L, Lyra C. Bacteria contribute to sediment nutrient release and reflect progressed eutrophication-driven hypoxia in an organic-rich continental sea. PLoS One, 2013, 8(6): e67061.
- [3] Bai Z Y, Jia A M, Bai Z J, Qu S M, Zhang M, Kong L H, Sun R H, Wang M J. Photovoltaic panels have altered grassland plant biodiversity and soil microbial diversity. Frontiers in Microbiology, 2022, 13: 1065899.
- [4] 张志山,杨贵森,吕星宇,虎瑞,黄磊. 荒漠生态系统 C、N、P 生态化学计量研究进展. 中国沙漠, 2022, 42(1): 48-56.
- [5] 王健铭,曲梦君,王寅,冯益明,吴波,卢琦,何念鹏,李景文. 青藏高原北部戈壁植物群落物种、功能与系统发育 β 多样性分布格局及其影响因素. 生物多样性, 2022, 30(6): 58-71.
- [6] 蒋俊霞,高晓清. 光伏系统气候效应及影响机理研究进展. 高原气象, 2022, 41(4): 953-962.
- [7] 王涛,王得祥,郭廷栋,张岗岗,赵世雄,牛怀诚,卢舜瑜,林虎. 光伏电站建设对土壤和植被的影响. 水土保持研究, 2016, 23(3): 90-94.
- [8] 高晓清,杨丽薇,吕芳,马丽云,惠小英,侯旭宏,李海玲. 光伏电站对格尔木荒漠地区土壤温度的影响研究. 太阳能学报, 2016, 37(6): 1439-1445.
- [9] 高广生. 减缓全球气候变化的本质和中国应对策略. 中国能源, 2002, 24(7): 4-8, 12.

- [10] 赵春江, 杨金焕, 陈中华, 邹乾林. 太阳能光伏发电应用的现状及发展. 节能技术, 2007, 25(5): 461-465.
- [11] Armstrong A, Ostle N J, Whitaker J. Solar park microclimate and vegetation management effects on grassland carbon cycling. *Environmental Research Letters*, 2016, 11(7): 074016.
- [12] 吴智泉, 罗久富, 罗忠新, 李培铨, 隋欣. 云南干热河谷光伏遮阴对花生产量和品质的影响. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2024, 52(12): 1-8.
- [13] 田政卿, 张勇, 刘向, 陈生云, 柳本立, 吴纪华. 光伏电站建设对陆地生态环境的影响: 研究进展与展望. 环境科学, 2024, 45(1): 239-247.
- [14] 李少华, 高琪, 王学全, 兰岚, 杨占武. 光伏电站干扰下高寒荒漠草原区植被和土壤变化特征. 水土保持学报, 2016, 30(6): 325-329.
- [15] 谈昭贤, 陈晓澄, 肖洒, 周华坤, 曲家鹏. 青海省塔拉滩光伏电站对植被多样性的影响. 青海科技, 2023, 30(6): 10-18.
- [16] 鲍平安, 季波, 孙果, 张娜, 吴旭东, 何建龙, 王占军, 田英. 光伏电站建设对植物群落与土壤特征的影响. 草业学报, 2024, 33(12): 23-33.
- [17] 岳生娟. 青海荒漠区大规模光伏开发生态环境效应研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2022.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [19] 李冰, 董树斌, 朱宝光. 黑龙江省同江市维管植物的植物群落 α 多样性及分布模式. 黑龙江科学, 2019, 10(12): 1-5.
- [20] Thukral A K. A review on measurement of Alpha diversity in biology. *Agricultural Research Journal*, 2017, 54(1): 1.
- [21] Li W H, Li X, Zhao Y J, Zheng S X, Bai Y F. Ecosystem structure, functioning and stability under climate change and grazing in grasslands: current status and future prospects. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2018, 33: 124-135.
- [22] Shen R C, Xu M, Li R Q, Zhao F X, Sheng Q K. Spatial variability of soil microbial biomass and its relationships with edaphic, vegetational and climatic factors in the Three-River Headwaters region on Qinghai-Tibetan Plateau. *Applied Soil Ecology*, 2015, 95: 191-203.
- [23] 周华坤, 赵新全, 温军, 陈哲, 姚步青, 杨元武, 徐维新, 段吉闯. 黄河源区高寒草原的植被退化与土壤退化特征. 草业学报, 2012, 21(5): 1-11.
- [24] 张芝萍, 尚雯, 王祺, 付贵全, 张卫星, 万翔. 河西走廊荒漠区光伏电站植物群落物种多样性研究. 西北林学院学报, 2020, 35(2): 190-196, 212.
- [25] 刘津铭, 刘盛, 刘庆忠, 杨学秋. 长白落叶松人工林下草本植物对光环境变化的响应. 北华大学学报: 自然科学版, 2018, 19(4): 446-452.
- [26] 任乃芑, 李一坤, 朱柏全, 王一帆, 梁文超, 刘香萍. 光伏板对草甸草原植物群落特征及物种多样性的影响. 生态学杂志, 2024, 43(3): 766-772.
- [27] 吴彦, 刘庆, 何海, 林波. 亚高山针叶林人工恢复过程中物种多样性变化. 应用生态学报, 2004, 15(8): 1301-1306.
- [28] Odum E P. The strategy of ecosystem development. *Science*, 1969, 164(3877): 262-270.
- [29] 郭柯. 毛乌素沙地油蒿群落的循环演替. 植物生态学报, 2000, 24(2): 243.
- [30] 顾振宽, 杜国祯, 朱炜歆, 索南吉, 张世虎. 青藏高原东部不同草地类型土壤养分的分布规律. 草业科学, 2012, 29(4): 507-512.
- [31] 贺启坤, 陈大岭, 李邵宇, 张峰, 孙宇, 郑佳华, 乔芳璐, 张彬, 赵萌萌. 阴山北麓不同恢复年限弃耕地植物群落生物量与土壤养分变化. 中国草地学报, 2022, 44(10): 30-37.
- [32] 王敬哲, 陈志强, 陈志彪, 潘宗涛. 南方红壤侵蚀区不同植被恢复年限下芒萁叶功能性状对土壤因子的响应. 生态学报, 2020, 40(3): 900-909.
- [33] 党梦娇, 蒙仲举, 斯庆毕力格, 杨世荣. 库布齐沙漠南缘光伏电站内表层沉积物粒度特征. 土壤通报, 2019, 50(2): 260-266.
- [34] 鲁艳红, 廖育林, 聂军, 周兴, 谢坚, 杨曾平. 连续施肥对不同肥力稻田土壤基础地力和土壤养分变化的影响. 中国农业科学, 2016, 49(21): 4169-4178.
- [35] 赵晶, 张有新, 李文龙, 刘美英. 光伏电站内不同植被下土壤 C、N、P 化学计量特征. 中国土壤与肥料, 2021(5): 21-26.
- [36] 王德富, 董凌勃, 李澳, 于志静, 邓蕾. 毛乌素沙地不同植被恢复类型的土壤碳水效应. 水土保持学报, 2024, 38(3): 101-110.