

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2026.04.030

CSTR:32310.14.stbxb.2026.04.030

杨清商,王蕾,杨国瑾,等.石漠化光伏板下“药-藤”利用模式对土壤养分循环及酶活性的影响效应[J].水土保持学报,2026,40(4):56-64.

Yang Qingshang, Wang Lei, Yang Guojin, et al. Impacts of "Medicinal Herb-Liana" utilization models under photovoltaic panels on soil nutrient cycling and enzyme activity in rocky desertification areas[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(4):56-64.

石漠化光伏板下“药-藤”利用模式对土壤 养分循环及酶活性的影响效应

杨清商¹, 王蕾^{1,2,3}, 杨国瑾¹, 邵春悦¹, 刘云根^{1,2}, 张晨⁴, 王妍^{1,2,3}

(1.西南林业大学水土保持学院, 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,

昆明 650224; 3.国家林业和草原局云南沾益岩溶生态系统定位观测研究站, 昆明 650224;

4.国家林业和草原局林草调查规划院, 北京 100013)

摘要: [目的] 为实现石漠化光伏板下空间的高效利用与价值转化, 揭示不同“药-藤”利用模式改善对土壤养分与酶活性的影响效应, 选出能够高效利用板下空间且兼具社会经济价值的模式。[方法] 依托近自然室内模拟试验场, 构建何首乌与不同藤本植物的复合利用模式, 基于旱、雨两季的土壤数据, 利用单因素方差分析、非线性回归及冗余分析系统阐明不同利用模式下土壤全量与速效养分随时间的变化趋势, 进一步明确土壤理化性质与酶活性之间的关联特征。[结果] 1) 何首乌加金银花模式表现为稳定的养分积累效应; 葛根模式呈强烈的季节波动, 养分含量全年呈现净消耗状态; 紫藤模式养分先增加后减少; 对照则表现为持续的养分耗损。2) 速效养分的季节动态具有明显的物种特异性, 金银花模式实现了速效磷与钾元素在两季的积累; 紫藤模式虽在旱季使得碱解氮爆发式增长 4.02 mg/kg, 但该增量在雨季迅速流失。3) 有机碳与速效磷是驱动酶活性变异的关键因子, 解释率分别为 71.8% (旱季) 和 83.5% (雨季)。金银花模式通过积累有机碳缓解了碳磷限制, 使土壤养分与酶活性均呈稳步增加的趋势, 而紫藤模式则处于酶活性较高, 养分较低的状态。[结论] “药-藤”复合利用对光伏板下区域的土壤生化系统稳定性及养分循环效率提升具有重要作用, 何首乌与金银花的复合利用模式展现出最优的适生潜力与生态效益, 研究结果可为石漠化地区光伏电站的板下经济开发与土壤生态可持续管理提供理论依据与实践指导。

关键词: 石漠化; “光伏+”; “药-藤”复合利用模式; 土壤养分; 酶活性

中图分类号: X171.4; S157.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)04-0056-09

Impacts of "Medicinal Herb-Liana" Utilization Models under Photovoltaic Panels on Soil Nutrient Cycling and Enzyme Activity in Rocky Desertification Areas

Yang Qingshang¹, Wang Lei^{1,2,3}, Yang Guojin¹, Shao Chunyue¹, Liu Yungen^{1,2}, Zhang Chen⁴, Wang Yan^{1,2,3}

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

2.Key Laboratory of Evolution and Pollution Control of Mountain Rural Ecological Environment in Yunnan

Province, Kunming 650224, China; 3.Zhanyi Karst Ecosystem Observation and Research Station, National

Forestry and Grassland Administration, Kunming 650224, China; 4.Academy of Forest and Grassland Survey and

Planning, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100013, China)

Abstract: [Objective] This study aims to achieve efficient utilization and value transformation of the space under photovoltaic panels in rocky desertification areas, and to reveal the effects of different "medicinal herb-liana" utilization models on improving soil nutrients and enzyme activities, thereby selecting a model that can efficiently utilize the space under panels while having socioeconomic value. [Methods] Based on a near-natural indoor

收稿日期: 2026-02-13

修回日期: 2026-03-31

录用日期: 2026-04-13

网络首发日期 (www.cnki.net): 2026-04-20

资助项目: 云南省科技厅重点项目 (202401AS070014); 云南省重点研发项目 (202502AE090046); 国家自然科学基金项目 (32501744)

第一作者: 杨清商 (2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事石漠化修复治理研究。E-mail: 2602023738@qq.com

通信作者: 王妍 (1980—), 女, 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。E-mail: wycaf@126.com

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

simulation test site, composite utilization models of *Polygonum multiflorum* with various lianas were established. Drawing from soil data in both dry and rainy seasons, one-way ANOVA, nonlinear regression, and redundancy analysis were employed to systematically analyze the temporal variation trends of total soil nutrients and available nutrients under different utilization models, thereby further clarifying the correlation characteristics between soil physicochemical properties and enzyme activity. [Results] 1) The model of *P. multiflorum* with *Lonicera japonica* exhibited a stable nutrient accumulation effect; the model of *P. multiflorum* with *Pueraria lobata* showed strong seasonal fluctuations, with a net depletion of nutrient content throughout the year; the model of *P. multiflorum* with *Wisteria* showed an initial increase followed by a decrease in nutrients. In comparison, the control group exhibited continuous nutrient depletion. 2) The seasonal dynamics of available nutrients showed significant species specificity. The *L. japonica* model achieved accumulation of available phosphorus and potassium in both dry and rainy seasons. In addition, despite an explosive increase of 4.02 mg/kg in alkali-hydrolyzable nitrogen in the *Wisteria* model during the dry season, this increase was rapidly lost during the rainy season. 3) Organic carbon and available phosphorus served as key factors driving enzyme activity variation, with explanatory rates of 71.8% (dry season) and 83.5% (rainy season), respectively. The *L. japonica* model alleviated carbon and phosphorus limitations through the accumulation of organic carbon, resulting in a steady increase in both soil nutrients and enzyme activity, whereas the *Wisteria* model presented a state of high enzyme activity but low nutrient content. [Conclusion] The "medicinal herb-liana" composite utilization model plays an important role in enhancing the stability of the soil biochemical system and nutrient cycling efficiency in the area under photovoltaic panels. The composite utilization model of *P. multiflorum* with *L. japonica* exhibits the best adaptation potential and ecological benefits. The research results can provide a theoretical basis and practical guidance for under-panel economic development and sustainable soil ecological management of photovoltaic power stations in rocky desertification areas.

Keywords: rocky desertification; "photovoltaic+ "; "medicinal herb-liana" composite utilization model; soil nutrients; enzyme activity

Received: 2026-02-13

Revised: 2026-03-31

Accepted: 2026-04-13

Online(www.cnki.net): 2026-04-20

在全球气候变化及其应对措施所提出的“双碳”目标下,光伏发电以其清洁高效、低碳稳定的优点,成为我国向清洁能源转型的重要方式^[1]。作为全球三大碳酸盐岩集中分布区之一,中国西南喀斯特地区石漠化土地面积广,土层浅薄且养分贫瘠,属于典型的退化脆弱生态系统^[2]。石漠化问题严重制约该地区的社会经济可持续发展,已成为西南地区最严重的生态环境问题之一^[3]。随着光伏项目在西南地区大规模布设,连片光伏板覆盖大量石漠化土地的同时,也留下广阔的板下空间。集能源生产与土地可持续利用于一体的“光伏+”模式(agrivoltaics),已逐渐成为解决农业生产、植被恢复与用地矛盾的有效途径^[4-6]。当前,传统植被恢复措施虽在轻、中度石漠化治理中初见成效,但在板下极度贫瘠、光照受限且空间受约束的特殊生境中,常见先锋物种往往难以实现稳定定植,群落退化风险居高不下^[7]。

何首乌(*Polygonum multiflorum*)、金银花(*Lonicera japonica*)等本地药用藤本根系发达,具备较强的耐瘠薄与耐干旱能力,能够在喀斯特浅薄土层及岩石

缝隙中有较高的存活率^[8]。藤本植物可用光伏支架为支撑,构建光伏支架-藤本植物的立体结构,构建“板上发电、板下种植中药材”的复合产业模式^[9]。以云南省为例,中药材产业作为“高原特色农业”的重点支柱产业,其种植面积常年稳居全国首位,有很好的区域发展推广价值。现有“光伏+”模式研究多聚焦于平原的粮食作物或草地生态系统^[10-11],针对喀斯特石漠化生境下“光伏+”模式的成功案例仍相对匮乏。

在石漠化治理中,土壤养分库的动态积累与土壤酶活性的变化特征是表征生态系统功能恢复程度的重要指标^[12]。在雨、旱季分明的喀斯特地区,水分条件的波动影响着微生物活性与植物根系分泌物的输入,进而导致土壤养分与酶活性有显著的时空异质性^[13]。鉴于此,筛选具备特定资源获取策略的植物种类,对于提升受损生境的养分积累及系统抗逆性具有重要意义。本研究选取的4种植物均为本地常见藤本植物,何首乌作为耐阴耐旱植物,有极高的根定殖能力的同时有显著的经济附加值;葛根为豆科植物,有着很快的生长速度和强抗逆性,能够通过生物固氮效应直接影响土

壤氮素转化;金银花须根系密集,可固持土层,通过分泌有机酸进而活化难溶性磷元素^[14];紫藤为豆科植物,有强固氮能力的同时有强大的攀援覆盖力。

目前关于光伏生态系统的研究大多停留在对土壤养分的单一描述上^[15],缺乏对土壤全量养分积累、速效养分活化与酶活性季节动态耦合关系的系统性研究,从而限制了对最佳植被恢复利用模式的准确筛选及对土壤生态驱动机理的揭示。另外,相同利用模式下不同的水分条件即雨、旱季的变化也有可能对土壤养分循环及酶系统有影响,旱季干冷,导致酶活性降低,复湿之后则提高酶活性^[16]。经历过雨旱季变化的土壤酶对后续环境胁迫的耐受性的变化^[17]也亟待研究。

本研究选取昆明市近自然的室内模拟试验场作为研究对象,构建以何首乌、葛根、金银花及紫藤为核心物种的“光伏-药用藤本”复合利用模式,结合原位监测与实验室分析,以期将土壤养分循环与酶活性在指标体系上耦合,从酶及土壤养分在雨旱季变化的角度筛选最适宜的板下“药用-藤本”利用模式。本研究旨在实现的目标为:1)探究不同藤本植物复合利用模式下土壤有机碳、全量养分及速效养分的动态变化及季节差异;2)厘清土壤关键酶活性的季节响应特征,解析其对不同植被模式的适应性反馈;3)探讨土壤理化性质与酶活性的耦合机制,辨识关键驱动因子。研究结果预期将为野外石漠化地区光伏电站的土地高效利用、生态管理与中药材产业化利用提供理论依据与优化策略。

1 材料与方法

1.1 试验装置与样地布设

本研究选取昆明市西南林业大学近自然的室内模拟试验场作为研究对象,依托自主设计搭建的光伏太阳能管群开展。装置呈倾斜式排布,单组光伏管群投影面积为14.4 m²(4.0 m×3.6 m),架设高度呈梯度分布,最高点离地1.8 m,最低点离地1.5 m。在

光伏管群正下方布设4组127 cm×127 cm样地,每组3次重复,总计12块样地。

本次试验选取何首乌与葛根混交模式(FM&PI)、何首乌与金银花混交模式(FM&LJ)、何首乌与紫藤混交模式(FM&Wf)3种利用模式进行对比研究,并设置光伏下仅有地衣群落覆盖样地作为CK对照组。每种利用模式均设置3个重复,以确保不同处理间生境条件的一致性。样地在种植目标植物前经过自然恢复已覆盖地衣群落。每块样地分别种植2种植物20株,共40株,植物均选择苗龄1 a的幼苗进行移栽,3种利用模式植物混交模式均为带状混交。所有试验小区植物的种植均采用完全一致的种植密度(株行距均为30 cm)与株行距且均经30 d的标准养护(每日适量浇水、自然光照),待植株稳定、根系充分发育后开展试验。

1.2 样品采集与预处理

土壤样品的采集工作于2025年分3个阶段进行,分别为3月背景值、5月旱季及8月雨季。受限于喀斯特生境土层极薄且碎石含量高的物理基底限制,且1 a生幼苗根系作用区域主要集中于浅层,在各试验样地内,遵循多点混合原则,选用蛇形采样法采集0—10 cm表层土壤混合样及环刀原状土,共计36份土样。采集后的鲜土立即装入无菌自封袋密封并运回实验室,随后分取约200 g新鲜土样直接用于测定土壤自然含水率;剩余土样置于室内阴凉通风处自然风干,人工剔除砾石、植物根系及动植物残体等杂质,研磨过筛后备用,用于后续土壤理化性质及酶活性指标的测定。土壤类型主要为红壤与喀斯特石灰土。试验得到的平均自然含水率为背景值10.01%,旱季末尾9.67%,雨季末尾14.89%,土壤pH背景值7.34,旱季7.84,雨季7.69。喀斯特红壤容重为1.2 g/cm³,田间持水量为23%,毛管孔隙度36%,质地为黏土。石灰土体积质量0.97 g/cm³,田间持水量30%,毛管孔隙度40%,质地为黏壤土。背景值各指标见表1。

表 1 各样地背景值
Table 1 Background values of each plot

处理	pH	SOM/ (g·kg ⁻¹)	TN/ (g·kg ⁻¹)	AN/ (mg·kg ⁻¹)	TP/ (mg·kg ⁻¹)	AP/ (mg·kg ⁻¹)	TK/ (g·kg ⁻¹)	AK/ (mg·kg ⁻¹)
FM&PI	7.09±0.05b	16.62±0.20a	2.97±0.08a	2.87±0.21a	1.79±0.13a	0.93±0.02a	9.18±0.18a	248.60±0.24a
FM&LJ	7.35±0.02a	12.37±0.51b	2.90±0.05c	2.63±0.12a	1.63±0.19ab	1.05±0.05a	5.94±0.31c	227.87±1.24b
FM&Wf	7.44a±0a	12.69±0.28b	2.90±0c	2.39±0.11a	1.32±0.06bc	1.08±0.03a	5.96±0.06c	181.24±0.76d
CK	7.50±0.02a	13.42±0.77b	3.50±0.03b	3.96±0.21b	1.22±0.05c	1.18±0.12a	7.52±0.06c	206.18±0.22c

注:同列不同小写字母表示不同处理间差异显著,(*p*<0.05)。

1.3 土壤理化性质及酶活性测定方法

1.3.1 土壤理化性质测定 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》^[19]中方法测定土壤体积质量、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;土壤养

分含量测定参考《土壤农化分析》^[18], pH测定采用电位法测定, 有机碳(SOC)采用重铬酸钾外加热法测定, 土壤全氮(TN)含量的测定采用凯氏定氮法, 土壤全磷(TP)测定采用钼锑抗比色法, 土壤全钾(TK)测定采用火焰光度计法, 土壤碱解氮(AN)测定采用碱解扩散法, 土壤速效磷(AP)测定采用NaHCO₃浸提-钼锑抗比色法, 土壤速效钾(AK)测定采用中性乙酸铵浸提-火焰光度计法。

1.3.2 土壤酶活性测定 土壤酶活性方法来自《土壤农化分析》^[18]。土壤碳获取酶土壤蔗糖酶(S-SC)采用3,5-二硝基水杨酸比色法, 单位为每克土24 h生成的葡萄糖含量; 土壤氮获取酶土壤脲酶(S-UE)采用靛酚蓝比色法, 单位为每100克土24 h生成的NH₃-N含量; 土壤磷获取酶土壤酸性磷酸酶(S-ACP)采用磷酸苯二钠比色法, 单位为24 h后每克土中释放出酚的质量。

1.4 数据处理与分析

本研究使用Excel 2023软件对数据进行初步整理; 利用SPSS 20软件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。冗余分析(RDA)使用Canoco 5.0软件进行; 数据制图则采用Origin软件。

本研究2.1~2.2数据为各指标于旱季、雨季时对比背景值的变化量, 指标变化量的计算公式为:

$$\Delta = C_t - C_0 \quad (1)$$

式中: C_t 为采样时该指标的实测含量, g/kg; C_0 为植物种植前实测得到的本底值; 结果若 $\Delta > 0$, 表示养分积累, 若 $\Delta < 0$, 表示养分流失。

1.5 土壤肥力质量指数(SFI)评价

为消除单一养分指标评价的片面性, 本研究选取有机碳(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP)、全钾(TK)、碱解氮(AN)、速效磷(AP)、速效钾(AK) 7个指标构建土壤肥力指数(SFI), 通过极差标准化法处理数据, 并采用主成分分析法(或等权法)确定权重, 对光伏板下不同“药-藤”模式的土壤综合肥力进行定量评价^[20]。

1.5.1 数据标准化处理 采用极差标准化法(min-max normalization)对原始数据进行归一化处理, 采用“S”型隶属度函数进行转换, 计算公式为:

$$N_i = \frac{(X_i - X_{\min})}{(X_{\max} - X_{\min})} \quad (2)$$

式中: N_i 为第*i*个指标的标准化得分($0 \leq N_i \leq 1$); X_i 为该指标的实测值; $X_{\max}$ 和 $X_{\min}$ 分别为所有样本中该指标的最大值和最小值。

1.5.2 权重确定与SFI计算 本研究采用主成分分析法(principal component analysis, PCA)确定各评

价指标的权重。通过提取特征值 ≥ 1 的主成分, 计算各指标的公因子方差(communality), 将其作为衡量该指标对综合肥力贡献率的依据, 进而计算权重系数 W_i 。

土壤肥力质量指数(SFI)采用加权求和法计算, 公式为:

$$SFI = \sum_{i=1}^n (W_i \times N_i) \quad (3)$$

式中: SFI为土壤肥力质量指数, 其值为0~1, 值越大表明土壤综合肥力越高; W_i 为第*i*个指标的权重; n 为指标总数。

2 结果与分析

2.1 不同“药-藤”利用模式对土壤养分特征的影响

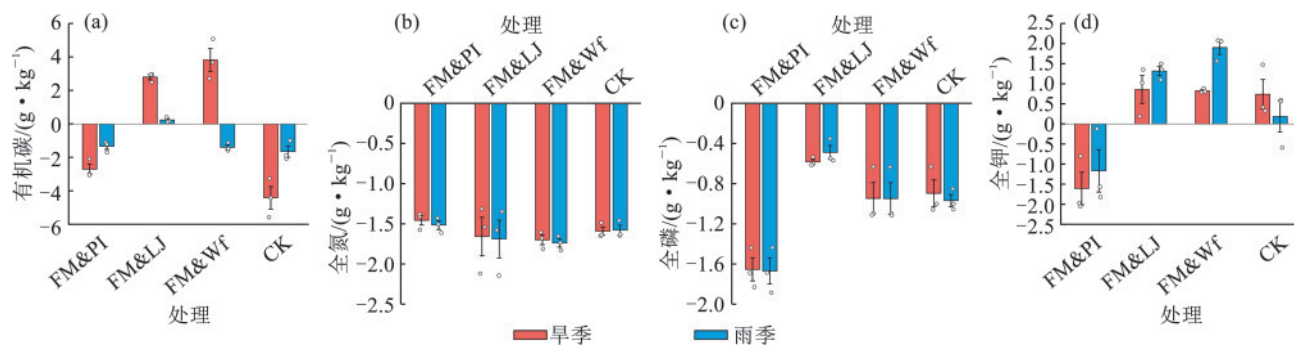
2.1.1 土壤全量养分的变化与季节动态 由图1可知, 不同“药-藤”利用模式改变土壤全量养分库的季节变化特征, 且季节与利用模式的交互作用明显。SOC方面, 3种利用模式均表现出优于CK的有机碳固持效应, 其中FM&LJ模式表现出显著的固碳效应, 其SOC含量在旱季显著高于背景值, 平均增量达2.80 g/kg($p < 0.05$), 且在雨季强淋溶环境下仍保持较高的稳定性, 较背景值有所升高(+0.1 g/kg); 相比之下, FM&Wf模式SOC含量呈强烈的季节波动性, 表现为旱季显著增加、雨季急速流失的趋势, 减少达5.21 g/kg, 表明该模式下土壤碳库抗干扰能力较差; 对照组CK在旱、雨两季SOC变化量均为负值, 平均减少3.03 g/kg, 说明该样地下土壤面临持续的土壤碳库流失问题。

针对氮、磷养分, FM&PI模式和CK总体呈亏缺状态, 表明在浅根系植物模式下石漠化土壤养分贫瘠化趋势未受抑制。其中, FM&LJ模式在雨季显著降低全磷的流失, 流失量减少0.49 g/kg, 仅为FM&PI模式的1/3。表明虽然磷元素在雨季通过淋溶损失, 但金银花对磷素的固持优于葛根。土壤全钾的变化进一步凸显模式间差异, FM&LJ模式在旱季表现出很强的钾素积累能力, 平均增量达0.86 g/kg, 而FM&PI模式全钾变化量持续下降, 该变化与该模式有机碳的变化趋势一致, 进一步印证葛根模式在雨季存在较高的养分淋溶损失风险。

2.1.2 土壤速效养分的变化与季节动态 由图2可知, 光伏板下植被利用模式显著影响土壤速效养分的有效性及其季节分配规律。对于土壤碱解氮, CK组雨旱季变化几乎为零, 表示在对比其他种植植物的利用模式土壤中的氮素在自然状态下于雨季易流失, 而FM&Wf模式在旱季表现为显著增加, 平均增长4.02 mg/kg, 变化幅度显著高于其他处理($p <$

0.05), 但该增量在雨季未能得到有效维持; 相反, FM&LJ 模式在旱、雨两季均维持相对平稳的氮素供应, 雨季碱解氮含量仍然保持在稳定水平, 避免 FM&Wf 模式含量的剧烈波动。在速效磷方面, 3 种不同模式均有一定将土壤中的磷素活化的能力, 有

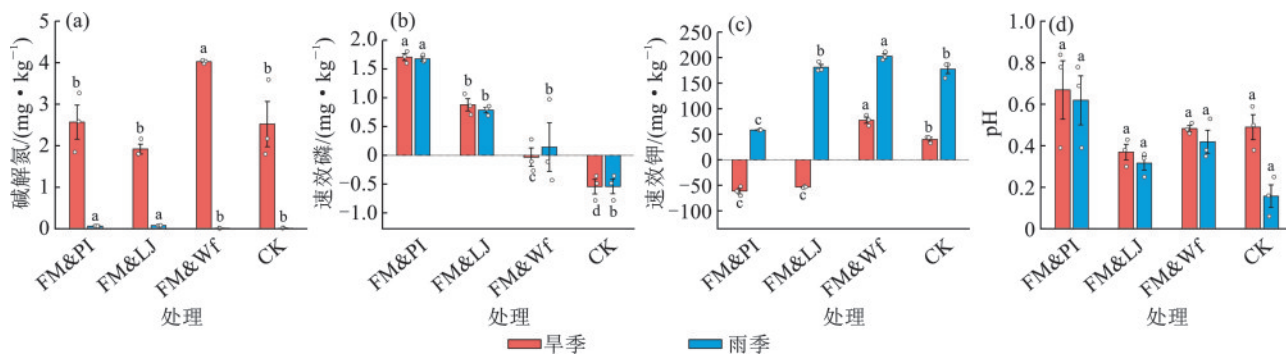
效缓解石漠化土壤对磷素的强固定作用。其中 FM&LJ 模式表现出持续且稳定的活化效应, 无论旱季还是雨季, 其土壤速效磷均稳定保持 0.84 mg/kg 的正向变化量, 显著优于 CK 及 FM&PI 模式在雨季出现的磷素被固定或流失现象。



注: FM&PI、FM&LJ、FM&Wf、CK 分别为何首乌、金银花、紫藤、对照混交模式。下同。

图 1 土壤各全量养分含量随季节的变化

Fig.1 Seasonal variations of total soil nutrient contents



注: 图柱上方不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($p < 0.05$)。

图 2 土壤各速效养分及 pH 随季节变化

Fig.2 Seasonal variations of soil available nutrients and pH values

速效钾因季节水分条件变化呈显著分异性, FM&LJ 模式在旱季吸收全钾后在雨季释放速效钾, 雨季的速效钾变化量比旱季升高 181.41 mg/kg, 两季平均差值 234.81 mg/kg, 远高于 FM&PI 模式的 56.12 mg/kg, 为后者的 4.18 倍。不同处理下土壤 pH 变化量均为正值, 3 种利用模式的 pH 波动幅度相对较小, 而 CK 在旱季的 pH 增加 0.49, 说明藤本植物的引入有效调节石漠化地区光伏板下土壤酸碱度, 维持土壤的酸碱稳定性。

2.1.3 不同利用模式中土壤养分损耗值的变化 综合全量与速效养分与背景值的相对变化特征, 3 种不同利用模式在土壤养分“源-汇”转换中表现出显著的分异特征 (图 1、图 2)。FM&LJ 模式在全年均未出现明显的养分负值, 且在旱季实现有机碳和全钾的高效积累, 有机碳与全钾分别增加 2.80、0.86 g/kg, 在雨季维持磷、钾等关键限制因子的盈余, 养分表现为持续的净积累, 为稳定的养分“汇”。FM&Wf 模式在旱季末期虽然碱解氮、速效钾含量显著提升, 但在雨季却

伴随着严重的养分净流失, 呈高投入、高损耗的特征, 如旱季 SOC 积累量高达 3.82 g/kg, 但至雨季迅速转变为平均 1.39 g/kg 的净流失, 是面临较高养分流失风险的模式。FM&PI 模式损耗值则相对平稳, 处于前 2 种模式之间, 土壤养分处于弱亏缺状态。CK 在多数指标上表现为负向变化 (变化量 < 0), 土壤有机碳、全氮在雨季的损耗值分别达到 3.03、1.58 g/kg, 表示土壤养分的自然损耗大于积累, 处于养分持续流失状态。

2.2 土壤酶活性的时空响应特征

不同“药-藤”利用模式影响土壤酶活性的时空分异特征见图 3。FM&LJ 模式中蔗糖酶活性在旱季有明显提升, 在雨季增幅变缓, 但季节波动幅度显著小于其他处理。其季节差值仅 5.2 mg/(g·24 h), 而 FM&Wf 模式高达 10.8 mg/(g·24 h)。FM&Wf 模式蔗糖酶活性旱季活跃, 雨季活性显著降低, 已低于 CK 水平。

参与氮、磷循环的酶活性对季节与植被类型的响应差异极大。3 种模式均在不同方面优于 CK。紫藤为豆科植物, 该模式在旱季表现出爆发式的脲酶

活性峰值,其变化量显著高于其他处理($p<0.05$),最高达到背景值的3倍,但该高活性状态不具备持续性,进入雨季迅速回落;与之相比,FM&LJ模式脲酶活性在两季均维持中等且稳定的水平,尽管最高峰不及豆科植物紫藤,但比起MF&Wf模式脲酶活性保持率有85%,优于FM&Wf模式的42%。在磷循环

方面,FM&PI模式旱季磷酸酶活性出现断崖式负向变化,表明其应对干旱胁迫能力较弱;FM&LJ模式酶活性变化量虽未达到FM&Wf模式旱季峰值,但结合其极高的速效磷含量,FM&LJ模式每单位磷酸酶活性所对应的速效磷增量是FM&PI模式的2.5倍,说明该模式下的酶促反应具有更高的单位效率。

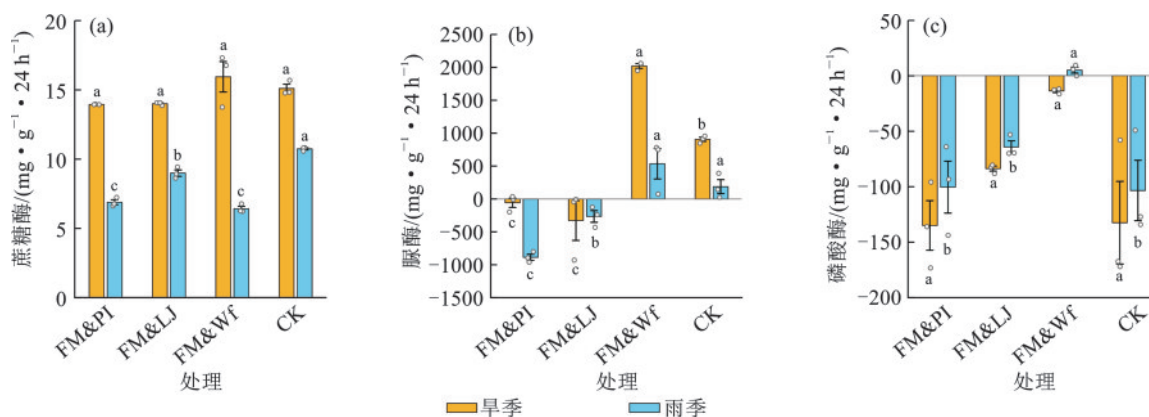


图3 不同“药-藤”利用模式下土壤酶活性的季节动态响应特征

Fig.3 Seasonal dynamic response characteristics of soil enzyme activities under different “medicinal herb-liana” utilization models

2.3 土壤养分与关键酶活性的耦合关系

为揭示光伏板下不同“药-藤”混交模式中养分“固持-转化”的生物学机制,对关键土壤养分与其对应的水解酶活性进行非线性回归分析(图4)。FM&LJ模式拟合曲线陡直呈显著正相关,斜率较大(6.455)。当SOC含量达到15 g/kg时,蔗糖酶活性可达45 mg/(g·24 h),比同等SOC水平下的FM&Wf模式高出约20%。表明随着有机碳积累,微生物分泌蔗糖酶的能力呈指数级增强。FM&Wf模式的本底值

虽高,但随SOC增加,酶活性提升速率趋于平缓。

全氮与脲酶活性方面,FM&Wf模式氮素含量少但酶活性高,呈负相关。FM&LJ模式全氮含量高但氮获取酶活性低,表明2种植物不同的氮素获取策略。磷素方面,FM&LJ模式全磷与磷酸酶活性的关系,数据点主要集中在全磷含量较高且酶活性适中的区间,拟合曲线较为平缓,与氮素趋势相近;而FM&PI模式和FM&Wf模式表现为负相关特征,全磷消耗后磷酸酶活性被迫升高维持磷元素供给。

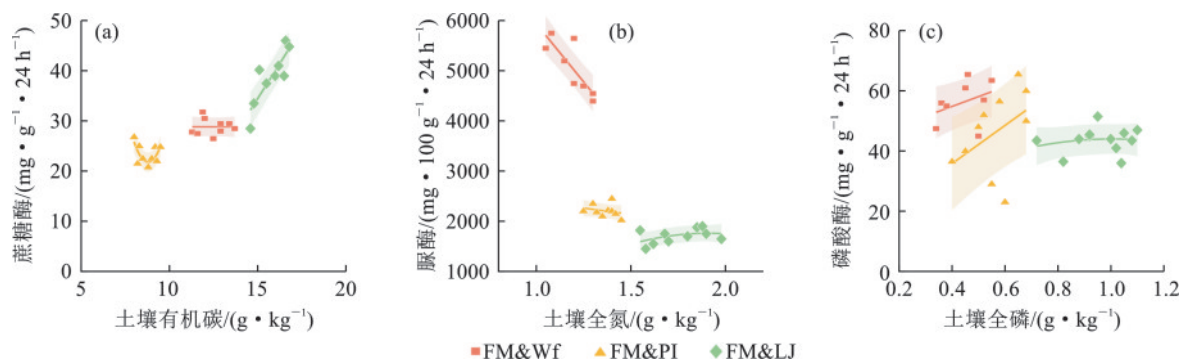


图4 土壤关键养分与其获取酶活性的非线性耦合及生态化学计量学特征

Fig.4 Nonlinear coupling and ecological stoichiometric characteristics of key soil nutrients and their corresponding enzyme activities

2.4 土壤养分-酶活性系统的关键驱动因子

冗余分析(RDA)结果表明,前两轴在旱季和雨季分别解释土壤酶活性变异的71.8%和83.5%,表明选取的环境因子能有效解释酶活性的时空分异(图5)。从生物与环境因子的几何关系来看,土壤有机碳和速效磷的矢量长度最长,且在2个季节均与主要酶活性指标保持较小的夹角,蒙特卡罗置换检验表明,其对酶活性变异的解释量达到显著水平

(SOC: $F=14.2$, $p<0.01$; AP: $F=11.5$, $p<0.01$),表示土壤有机碳和速效磷是驱动系统变化的关键因子,对土壤酶活性的影响最为显著。有机碳与蔗糖酶、磷酸酶在雨旱季的矢量夹角均 $<30^\circ$,呈极显著的正相关,表明有机碳作为酶促反应底物,即碳源的有效供给直接激发碳、磷获取酶的活性。不同利用模式在排序图中的空间分异特征显著,FM&LJ模式在旱季样点集中分布在第一象限,与SOC、TN、TP

及 AP 等土壤重要养分的矢量方向一致,表明 FM&LJ 模式通过维持较高的土壤碳氮库容,构建紧密的“高养分-稳酶活”聚类簇;紫藤复合利用模式主要分布在与脲酶同向、但与 TN 反向的区域,表明土壤氮素亏缺能刺激豆科植物根部的微生物过量分泌

脲酶以加速有机氮矿化。而 FM&PI 模式和 CK 则大多分布在环境因子的反向延长线区域,表示该样地不仅养分贫瘠且酶活性低下。此外,pH 在旱季与碱解氮呈负相关,而在雨季则与酶活性表现出一定的正相关性。

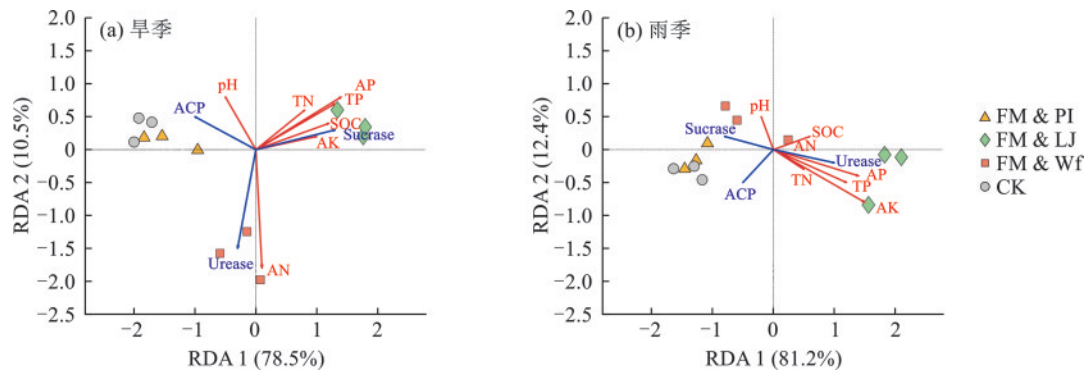


图 5 旱雨两季土壤酶活性时空分异的环境驱动因子冗余分析(RDA)

Fig.5 RDA of environmental driving factors for spatiotemporal differentiation of soil enzyme activities in dry and rainy seasons

3 讨论

3.1 光伏遮阴下不同植被模式的养分“源-汇”转化机制

在土层浅薄、岩溶发育程度深的石漠化地区,养分的物理流失与化学固定构成生态恢复的双重屏障。本研究发现,在光伏板遮荫下,不同的水分条件下结果有较大差异,主要原因推测有:1)中国西南喀斯特地区属于典型的亚热带季风气候。雨季的降水量往往占全年的80%以上,且多为暴雨。光伏板只能起到物理拦截和重新分配的作用,无法改变进入生态系统的总水量。2)中国西南地区旱季的降水在降雨总量较少的前提下还未进入土地便在光伏板上快速蒸发,加剧干旱程度。加之雨季时降雨在光伏板边形成集流,更加加剧板下土地受到的淋溶。3)喀斯特地区土层浅薄且持水能力差、岩溶裂隙多,土壤养分极易随板下集流向渗透。4)不同植物不同生长期也对各养分需求量不同,与Fiantis等^[21]的研究结果一致;加之旱季通常温度偏低,雨季通常温度偏高,导致旱季的酶活性会天然低于雨季。

处于无干预状态的CK对照组在光伏板下的土壤作为持续的养分“源”,该种养分流失并未因为光伏板的物理遮挡而有所缓解,反而是在雨季因缺乏根系固持、表层土体结构松散等因素导致表层颗粒有机碳发生严重的淋溶与侵蚀,与种国双等^[22]、黎建强等^[23]关于喀斯特退化生境养分流失的研究结果相吻合。雨旱两季时何首乌与葛根复合模式中有有机碳持续流失,在相同植物生长期缺少类似金银花与紫藤枯落物对碳库的补充,只能持续利用原有碳库中的碳源导致有机碳含量持续减少,表明相比其他2种模式何首乌加葛根的组合更加难以渡过种植“阵痛期”。而形成鲜明对比的何首乌与金

银花的复合利用模式则是成功成为稳定的养分“汇”,在雨季对各养分都有固持效果且以全磷最为突出。此现象的生物学机制可能在于金银花发达的根系能够分泌出柠檬酸、苹果酸等有机酸,通过根际酸化作用活化喀斯特土壤中被钙素固定的难溶性磷,从而有效缓解生境中普遍存在的磷限制,该推断与Dakora等^[14]、Pan等^[8]关于根系分泌物介导机制的研究中也有提及。何首乌与紫藤的复合利用模式中的紫藤作为豆科植物,虽然在旱季通过根瘤菌共生固氮作用在提升氮素有效性方面的优势造成碱解氮含量的快速增长,但在进入雨季后,该模式下有机碳与全钾却呈净流失趋势,形成“旱季固氮、雨季失碳”的矛盾现象,揭示何首乌与豆科藤本因根系网络结构比起金银花等根系发达植物相对松散,能够保证自身存活却难以抵抗喀斯特地区强降雨引发的淋溶效应。表明若单一追求固氮效应而忽视土壤物理结构的稳定性,极易导致“高投入、高损耗”的结果。

Pan等^[24]研究发现,小幅度温度波动能够提升酶活性,超出一定范围的大幅度温度波动影响到酶活性并抑制微生物活性;Tan等^[17]的研究也发现,经历过雨旱季变化后的土壤酶活性升高的同时也增强土壤酶对后续环境胁迫的耐受性。证明酶系统对不同的水分条件非常敏感,且因旱季锻炼微生物的耐受性,雨季时酶活性升高变快。刘凯等^[25]研究也指出,混交林在改善土壤团粒结构及抗侵蚀能力方面显著优于纯林,佐证了本研究中根系浅薄植物模式在水土保持功能上的局限性,也证明了构建复合群落的必要性。

3.2 土壤酶活性对资源限制的响应策略

土壤酶作为微生物获取限制性资源的代谢产物,

其活性强弱往往是地下生态系统资源供需矛盾的直观反映。本研究中,何首乌与紫藤的复合利用模式在旱季表现出典型的“低全氮-高脲酶”特征,该种负相关性揭示,在氮素相对贫瘠或有效氮素含量受限的环境中,微生物必须被迫投入更多代谢能量合成获取氮素的胞外酶以获取匮乏的氮素,属于典型的生物学应激反应机制^[26],也与石漠化地区土层浅、岩石裸露、养分贫瘠的特点相同^[27]。相反,FM&LJ模式的数据点主要分布于“高全氮-低酶活”及“高全磷-适中磷酸酶”区域,说明在有机酸活化及枯落物回流后养分充裕的条件下,微生物无需分泌过量氮获取酶即可满足代谢需求,体现“低酶耗、高效率”的系统运行机制。

有机碳和速效磷是驱动酶活性系统变化的决定性因子,土壤中有有机碳与磷素的供应量决定土壤中生物化学过程的速率。FM&LJ模式增加土壤有机碳的同时提升蔗糖酶活性,是先底物诱导后酶活性提升反馈的正反馈调节机制。增加碳输入可调节光伏板下土壤酶促反应方向、提升养分循环效率。

3.3 适宜石漠化光伏生境的生态利用模式评价

综合土壤理化性质与酶活性特征来看,光伏板遮阴虽然在一定程度上通过减少太阳光直射改善水分条件,但CK样地在旱季pH上升,易发生次生土地盐碱化,对本就生境脆弱的石漠化地区反而有引起土地退化的负向作用^[11]。植被覆盖,尤其是何首乌与金银花的复合利用模式的引入,有效缓冲pH的波动,维持土壤酸碱环境的相对稳定。

土壤肥力指数(SFI)评价结果量化不同利用模式的生态修复能力($p < 0.05$)。FM&LJ得分0.78最高,约为CK的2.8倍,FM&Wf得分0.55,FM&PI得分0.42,CK得分0.28最低。FM&LJ模式提升土壤养分含量与生物活性,增加养分的流动性,实现土壤肥力的提升。CK得分最低,生境处于持续退化状态。

何首乌与金银花复合利用模式不仅实现旱季养分积累与雨季活化释放,还构建稳态的酶促反应体系,有最强的环境适应性,面对胁迫有较强的抵抗力。何首乌与紫藤复合利用模式因氮素激发效应让氮素含量暂时升高,但生态系统脆弱,易因雨季降雨多而发生淋溶损失,对土壤养分的固持能力较差。在推进“光伏+”模式治理石漠化的工程实践中,选用何首乌与金银花等根系发达且具有强根际活化能力的药用藤本进行板下种植,可降低土壤养分损耗、提升生态系统服务功能,提升土地附加经济价值。该结论为在喀斯特地区筛选具有经济价值的药用植物进行生态修复提供参考^[28]。

虽然本研究选出适合石漠化光伏地区的推荐模式,但未设置单作处理确实是本研究的局限性。导

致在数据分析时,无法精确分析出土壤理化性质的改变究竟有多大比例是纯粹由何首乌贡献的。在未来的机理研究中应增设单作对照,以进一步量化各物种的独立生态贡献。

4 结论

1) 研究区中3种复合模式均表现出优于空白对照组对养分的固持作用,其中何首乌与金银花复合模式展现出最优的碳固持能力,在雨季强淋溶环境下维持全磷、全钾库容的稳定性,构建高效的土壤养分“汇”,平衡土壤酸碱度,养分库容与酸碱环境实现双重平衡,拥有最好的时空稳定性;

2) 拟合分析显示,何首乌-金银花模式有机质和蔗糖酶正向调节与磷和磷酸酶负反馈调节并存,SFI得分高达0.78,大幅提升土壤肥力,显著缓解喀斯特生境的养分限制胁迫,是光伏板下生态恢复的最优配置。

3) 土壤有机碳与速效磷是驱动板下土壤生化过程演变的关键环境因子,对旱、雨季酶活性系统变异的解释度分别达71.8%和83.5%。何首乌与金银花复合模式提升有机碳水平解除碳磷瓶颈,形成高底物高酶活的协同提升机制,有更优的养分循环效率与适生潜力,是石漠化区光伏板下土地生态管理的优先推荐模式。

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 Hongwei, Zhu Haibo, Wu Xinru, 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] 熊康宁,陈永毕,陈浒,等.点石成金:贵州石漠化治理技术与模式[M].贵阳:贵州科技出版社,2011:125-139.
Xiong Kangning, Chen Yongbi, Chen Hu, et al. Turning stone into gold: The technology and model of rocky desertification control in Guizhou[M]. Guiyang: Guizhou Science and Technology Publishing House,2011:125-139.
- [3] 张叶飞,李伞剑,王克勤,等.典型石漠化植被恢复区土壤理化特征及多指标聚类研究[J].水土保持学报,2023,37(2):287-293.
Zhang Yefei, Li Sanjian, Wang Keqin, et al. Physicochemical properties and multi-indicator clustering of soils in typical rocky desertification vegetation restoration area[J].Journal of Soil and Water Conservation,2023,37(2):287-293.
- [4] Hernandez R R, Easter S B, Murphy-Mariscal M L, et al. Environmental impacts of utility-scale solar energy [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 29: 766-779.
- [5] Barron-Gafford G A, Pavao-Zuckerman M A, Minor R L, et al. Agrivoltaics provide mutual benefits across the food-energy-water nexus in drylands[J].Nature Sustain-

- ability, 2019, 2(9):848-855.
- [6] Hassanpour A, Selker J S, Higgins C W. Remarkable agrivoltaic influence on soil moisture, micrometeorology and water-use efficiency[J]. PLoS One, 2018, 13(11):e0203256.
- [7] Wang Qiang, Zhang Kailai, Li Rongrong. Advancing sustainable development through desertification control: Evaluating the African Great Green Wall initiative using the RAGA-PP model[J]. Journal of Environmental Management, 2026, 398:e128552.
- [8] Pan Longhui, Li Rui, Yu Benjin, et al. Multidimensional assessment and precision restoration strategies for soil erosion in karst areas: Based on multi-scenario simulation[J]. International Journal of Sediment Research, 2025, 40(6): 972-989.
- [9] Disciglio G, Frabboni L, Tarantino A, et al. Association between dynamic agrivoltaic system and cultivation: Viability, yields and qualitative assessment of medical plants[J]. Sustainability, 2023, 15(23):e16252.
- [10] 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.
- [11] Ravi S, Macknick J, Lobell D, et al. Colocation opportunities for large solar infrastructures and agriculture in drylands[J]. Applied Energy, 2016, 165:383-392.
- [12] Nannipieri P, Greco S, Ceccanti B, et al. Ecological significance of the biological activity in soil[M]//Soil Biochemistry. London: Routledge, 2017:293-356.
- [13] Hu Linan, Li Qiang, Yan Jiahui, et al. Vegetation restoration facilitates belowground microbial network complexity and recalcitrant soil organic carbon storage in Southwest China karst region[J]. Science of the Total Environment, 2022, 820:e153137.
- [14] Dakora F D, Phillips D A. Root exudates as mediators of mineral acquisition in low-nutrient environments[J]. Plant and Soil, 2002, 245(1):35-47.
- [15] 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.
- [16] Wang Shang, Hoang D T T, Luu A T, et al. Environmental memory of microbes regulates the response of soil enzyme kinetics to extreme water events: Drought-rewetting-flooding[J]. Geoderma, 2023, 437:e116593.
- [17] Tan Xiangping, He Jinhong, Nie Yanxia, et al. Climate and edaphic factors drive soil enzyme activity dynamics and tolerance to Cd toxicity after rewetting of dry soil[J]. Science of the Total Environment, 2023, 855:e158926.
- [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. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [19] 国家林业局. 森林土壤水分-物理性质的测定: LY/T 1215—1999[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- State Forestry Administration. Determination of forest soil water-physical properties: LY/T 1215—1999[S]. Beijing: Standards Press of China, 1999.
- [20] Yu Pujia, Liu Jinlian, Tang Hanya, et al. Establishing a soil quality index to evaluate soil quality after afforestation in a karst region of Southwest China[J]. Catena, 2023, 230:e107237.
- [21] Fiantis D, Ginting F I, Chahyahusna A, et al. Impacts of agrivoltaic systems on soil properties and pedogenesis: A review[M]//Advances in Agronomy. Amsterdam: Elsevier, 2026:1-33.
- [22] 种国双, 海月, 郑华, 等. 中国西南喀斯特石漠化治理现状及对策[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(11):38-43.
- Chong Guoshuang, Hai Yue, Zheng Hua, et al. Current situation and measures of karst rocky desertification control in Southwest China[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, 38(11):38-43.
- [23] 黎建强, 张洪江, 陈奇伯, 等. 三峡库区植物篱系统土壤颗粒分形特征及其与土壤理化性质的关系[J]. 水土保持研究, 2014, 21(6):129-133.
- Li Jianqiang, Zhang Hongjiang, Chen Qibo, et al. Soil particle-size fractal characteristics and the relationship with physicochemical properties of soil in hedgerow systems in the Three Gorges Reservoir area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014, 21(6):129-133.
- [24] Pan Jiachen, Zheng Xuejia, Liao Dongxi, et al. Temperature fluctuation affects soil organic carbon accumulation through soil enzyme activity and nutrient limitation[J]. Environmental Technology and Innovation, 2025, 40:e104458.
- [25] 刘凯, 陈乾, 王希贤, 等. 不同林龄福建柏混交林与纯林土壤养分的动态变化[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2022, 51(2):185-194.
- Liu Kai, Chen Qian, Wang Xixian, et al. Dynamics of soil nutrients in *Fokienia hodginsii*-*Pinus massoniana* mixed forest and *Fokienia hodginsii* pure forest at different ages[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University: Natural Science Edition, 2022, 51(2):185-194.
- [26] Sinsabaugh R L, Lauber C L, Weintraub M N, et al. Stoichiometry of soil enzyme activity at global scale[J]. Ecology Letters, 2008, 11(11):1252-1264.
- [27] 王世杰, 李阳兵, 李瑞玲. 喀斯特石漠化的形成背景、演化与治理[J]. 第四纪研究, 2003, 23(6):657-666.
- Wang Shijie, Li Yangbing, Li Ruiling. Karst rocky desertification: Formation background, evolution and comprehensive taming[J]. Quaternary Sciences, 2003, 23(6):657-666.
- [28] Zheng Wei, Guo Xiaobin, Zhou Ping, et al. Vegetation restoration enhancing soil carbon sequestration in karst rocky desertification ecosystems: A meta-analysis[J]. Journal of Environmental Management, 2024, 370:e122530.