https://doi.org/10.3799/dqkx.2025.259

“苔-藻”生物结皮对工程弃渣的改良作用

魏人杰[1,4],裴向军[1,3],李宇航[2],苟林平[2],王冰鹤[2],沈逸凡[4],杨镒霞[4],张慧媛[2],修宇鑫[2],肖云星[2],秦欣科[2],李 琪[1,2,3*]

1. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护全国重点实验室,四川成都 610059
2. 成都理工大学生态环境学院,四川成都 610059
3. 天府永兴实验室,四川成都 610213
4. 成都理工大学环境与土木工程学院,四川成都 610059

摘 要: 为探究工程弃渣场“苔-藻”生物结皮对渣土的改良效果,选取高寒地区弃渣场生物结皮修复区,对比分析不同苔藓和藻类配置对渣土理化性质、酶活性和微生物群落的影响.结果表明:(1)生物结皮处理分别提高了土壤铵态氮(最高2.68倍)、硝态氮(最高2.85倍)、有效磷(最高7.67倍)、有机碳(最高达26.11 g/kg)含量.(2)土壤纤维素酶、β-葡萄糖苷酶、植酸酶等酶活性最高分别增加2.00、2.29和45.6倍.(3)此外,微生物多样性与均匀度提升,并引入了互养菌门(Synergistota)、达达菌门(Dadabacteria)等新的微生物门类.“苔-藻”生物结皮有效提升了土壤养分水平,优化了土壤微生物群落结构.该研究为生物结皮技术在高寒地区生态恢复中的应用提供了理论与实践依据.

关键词: 生物结皮;土壤养分;土壤微生物群落;酶活性;养分循环;生态修复.

中图分类号: P642.5 **文章编号:** 1000-2383(2026)09-3457-12 **收稿日期:** 2025-08-31

Effects of Moss-Algal Biological Crusts on Alpine Construction Spoil

Wei Renjie[1,4], Pei Xiangjun[1,3], Li Yuhang[2], Gou Linping[2], Wang Binghe[2], Shen Yifan[4], Yang Yixia[4], Zhang Huiyuan[2], Xiu Yuxin[2], Xiao Yunxing[2], Qin Xinke[2], Li Qi[1,2,3*]

1. *State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chendu University of Technology, Chengdu* 610059, *China*
2. *College of Ecology and Environment, Chengdu University of Technology, Chengdu* 610059, *China*
3. *Tianfu Yongxing Laboratory, Chengdu* 610213, *China*
4. *College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu* 610059, *China*

Abstract: To evaluate the restorative potential of moss-algal biological soil crusts (biocrusts) on alpine construction spoil, we conducted a comparative field experiment at a spoil-disposal site. We established contrasting moss-algal assemblages and quantified their effects on soil physicochemical properties, enzyme activities, and microbial communities. Biocrust colonization increased soil ammonium nitrogen up to 2.68-fold, nitrate nitrogen up to 2.85-fold, available phosphorus up to 7.67-fold, and soil organic carbon to

基金项目: 国家重点研发计划项目(No. 2023YFC3007103);地质灾害防治与地质环境保护全国重点实验室自主课题(No. SKLGP2024Z013);四川省博士后科学基金2023年度特别资助项目(No. 10900-23BZ26-05);天府永兴实验室科研项目(No. 2023KJGG05).

作者简介: 魏人杰(1997-),女,博士研究生,主要研究方向是生态微生物学和基于微生物工程的生态恢复. ORCID: 0000-0002-5366-5546. E-mail: wrj1031180887@163.com

* **通讯作者:** 李琪,E-mail:liqi21@cdut.edu.cn

引用格式: 魏人杰,裴向军,李宇航,苟林平,王冰鹤,沈逸凡,杨镒霞,张慧媛,修宇鑫,肖云星,秦欣科,李琪,2026.“苔-藻”生物结皮对工程弃渣的改良作用.地球科学,51(9):3457-3468.

Citation: Wei Renjie, Pei Xiangjun, Li Yuhang, Gou Linping, Wang Binghe, Shen Yifan, Yang Yixia, Zhang Huiyuan, Xiu Yuxin, Xiao Yunxing, Qin Xinke, Li Qi, 2026. Effects of Moss-Algal Biological Crusts on Alpine Construction Spoil. *Earth Science*, 51(9): 3457-3468.

26.11 g/kg. Cellulase, β-glucosidase, and phytase activities reached 2.00, 2.29, and 45.6 times the control levels, respectively. Additionally, biocrusts enhanced microbial α-diversity and evenness, and enabled the detection of rare phyla such as Synergistota and Dadabacteria. Overall, moss-algal biocrusts improved soil nutrient status and optimized the structure of soil microbial communities. The findings provide theoretical and practical guidance for applying biocrust technology to ecological restoration of alpine spoil sites.

Key words: biological crust; soil nutrient; soil microbial community; enzyme activity; nutrient cycling; ecological restoration.

道路工程在建设过程中由于隧道开挖会产生大量弃渣,堆积形成的大型弃渣场常对周围生态系统产生负面影响(李辉等,2024).现有渣场弃渣砾石含量高、结构松散,导致渗透性过强,水分养分保持能力弱.同时,弃渣中碳、氮、磷等关键养分储量远低于原生土壤水平,难以支撑植物定植与生长(贺莉莎等,2012;王波涛等,2025).此外,弃渣中微生物丰度较低,关键土壤酶(如碱性磷酸酶)活性低,土壤生化代谢功能严重受损(崔创义等,2025).在西部高寒地区,低温、强紫外线及季节性降水分配不均等环境胁迫进一步削弱了生态系统的自恢复能力,且常规修复技术在弃渣场修复上失效快(冀晓东等,2025).因此,亟须能够提升渣土物理结构和养分水平的渣场近自然恢复技术.

生物结皮因其多样化的生活史,能够较好适应极端环境,在退化生态系统恢复中发挥着重要作用(石静琴等,2025).研究表明,结皮生物能有效参与并促进土壤养分循环过程,提升有机质含量与氮素等养分的有效性;同时,结皮的形成可以增强土壤团聚体稳定性,减少地表径流,改善土壤表层水分保持能力,在一定程度上可缓解干旱区水资源约束(陈珲等,2024;董悦等,2025).在防风抗蚀方面,生物结皮可显著降低60%以上的风蚀量(Xiao *et al.*, 2022).此外,生物结皮还为其他植物的定居提供了微生境基础,从而促进植被恢复,在荒漠化防治方面具有显著成效(Assouline *et al.*, 2015;肖灿等,2026).因此,针对强渗透、低养分的堆积弃渣生境,生物结皮技术展现出良好的生态恢复潜力.

现有退化地区土壤结皮恢复方式主要分为自然恢复与人工培育.自然恢复依赖原位生物的自然繁殖与扩展,过程缓慢且易受环境波动影响(于雯馨等,2024).为提升结皮构建成效,人工培育生物结皮技术逐渐发展成熟,通过筛选优势藻类、菌类及苔藓物种,经扩繁后接种至受损地表,可加速结皮形成,有效克服自然结皮速度慢、保水能力差和养分循环效率低等问题(陈珲等,2024;田婧等,2024).生态修复研究中常利用蓝藻等藻类培育生物结皮,其中混合藻种策略应用较为广泛.例如,康红梅等(2025)选用具鞘微鞘藻(*Microcoleus vaginatus*)与爪哇伪枝藻(*Scytonema javanicum*)成功构建了混合藻种结皮;高双合等(2025)以蓝藻(Cyanobacteria)、绿藻(Chlorophyta)混合培养形成了人工生物结皮,均取得了良好成效.生物结皮技术在生态修复工程中已展现出显著的生态与环境效益.

现有人工培育生物结皮技术已被广泛用于荒漠化土地治理与矿区生态修复,但针对西部弃渣边坡的结皮技术仍较为缺乏.为此,本文拟在实际弃渣坡面上优化"苔-藻"生物结皮技术方案,并通过监测结皮生长状况、土壤理化性质、酶活性及微生物群落结构等指标,分析不同生物材料组合与用量对弃渣养分含量及养分循环能力的提升效果,解析其作用机制.研究成果旨在为高效、稳定的生态修复技术研发与推广提供科学依据,对推进西部高寒生态脆弱区治理与可持续发展具有重要实践意义.

1 试验材料和方法

1.1 试验区概况

研究区位于四川省康定市炉城镇折多塘村的MJG弃渣场,地处贡嘎山国家级自然保护区试验区与贡嘎山国家级风景名胜区三级保护区的重叠区域,属于典型的亚高山冷湿森林生态系统.场区最高点海拔3 337 m,最低点为3 264 m,相对高差73 m.该区域属高山气候,年均气温4.9 ℃,年降水量965.89 mm.土壤类型以山地褐色黏壤为主,有效土层厚度20~40 cm,有机质含量0.8%~1.0%,pH值介于5.5~7.0.试验区布设于一弃渣堆积边坡,其物质组成以花岗岩碎屑为主,多为棱角状碎石土,含少量粗角砾土与块石土,颗粒粒径以6~20 cm为主,覆盖层厚度达25 m.

1.2 试验材料

选定朵朵藓(*Ditrichum* sp.)与星星藓(*Tortula* sp.)作为"苔-藻"生物结皮体系的核心苔藓组分.朵朵藓为小型丛生型藓类,具有密集的丛生结构,可有效减缓雨水冲刷,同时分泌酸性物质促进岩石风

化,直接参与土壤改良过程;星星藓属大型藓类,植株呈黄绿色,具有显著的耐旱特性,其独特的形态结构有助于提升结皮层表面粗糙度,增强保水能力.所选藻类包括固氮鱼腥藻(*Anabaena azotica*)、小颤藻(*Oscillatoria tenuis*)及土生绿球藻(*Chlorococcum infusionum*).固氮鱼腥藻为丝状蓝藻,其固氮酶系统可实现大气氮的生物固定,为系统提供重要氮源.该藻种还具备较强的低温适应性,可通过调整细胞内的相容性溶质缓解冰晶损伤,并在极端低温下进入休眠状态,维持生存潜力.小颤藻具有特殊的细胞结构,其丝状体可通过滑行运动主动调整空间位置,响应环境条件变化,在高寒生境具备较强的存活能力.土生绿球藻则表现出良好的耐高温与耐旱能力,通过光合作用为系统提供碳源和能量,其分泌的胞外多糖类物质有助于促进土壤团聚体的形成,增强结皮系统稳定性.

1.3　试验设计

试验以苔藓和藻的种类及用量为研究变量,共设置1个空白对照组(CK)和9个生物结皮处理组(X1~X9),具体实验设计如表1所示.在研究区同一个弃渣堆积坡面设置试验小区,每组试验区面积均为4 m^2(2 m×2 m),于同一天在试验小区弃渣表面均匀喷洒相同浓度的苔藓和藻类溶液,完成接种工作.在接种90 d后进行现场调查和土壤样本采集.通过测定土壤理化性质、土壤酶活性和土壤微生物群落结构等指标,系统研究不同生物结皮对实际工程弃渣的改良效果.

1.4　试验测定指标和方法

土壤样品按五点取样法采集,采样深度为0~2 cm.采集后的土壤样品分为两部分,一部分立即装入无菌封口袋,24 h内通过干冰低温运送回实验室,并于-20 ℃保存,用于后续土壤微生物DNA提取与测序.另一部分样品在低于4 ℃条件下保存并送回实验室,经去除植物残体、风干、过筛(2 mm)后用于理化性质及酶活性测定.其中,土壤pH值采用pH计法测定;土壤铵态氮采用水杨酸钠法比色测定;土壤硝态氮采用硫酸肼还原法测定;土壤速效钾采用乙酸铵提取-火焰原子分光光度法测定;土壤有效磷采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗分光光度法测定;土壤全氮和全磷分别采用硫酸消煮-水杨酸钠法和硫酸消煮-钼锑抗法测定(马有芳和陈式谷,1983).土壤酶活性使用索莱宝科技有限公司(北京)提供的土壤酶活性检测试剂盒测定;土壤微生物群落结构分析基于16S rRNA高通量测序,实验流程包括土壤总DNA提取、V3~V4区PCR扩增,并借助QIIME2平台完成生物信息学分析.

表1　试验方案

Table 1　Experimental design

编号	苔藓种类	苔藓用量(mL)	藻种类	藻类用量(mL)
X1	星星藓	100	固氮鱼腥藻	50
X2	星星藓	150	小颤藻	100
X3	星星藓	250	土生绿球藻	200
X4	朵朵藓	100	固氮鱼腥藻	100
X5	朵朵藓	150	小颤藻	200
X6	朵朵藓	250	土生绿球藻	50
X7	星星藓+朵朵藓	100	固氮鱼腥藻	200
X8	星星藓+朵朵藓	150	小颤藻	50
X9	星星藓+朵朵藓	250	土生绿球藻	100
CK	/	/	/	/

1.5　数据分析

为确保数据的可靠性与科学性,本研究所有实验均设置三个独立重复,结果数据以三次重复的平均值表示.土壤理化性质和土壤酶活性的数据通过Microsoft Excel 2018完成整理和初步分析,图形绘制采用Origin 2021软件完成.采用SPSS 24.0软件进行单因素方差分析(one-way ANOVA),以评估不同处理间差异的统计学显著性.土壤微生物群落相关分析及可视化由派森诺生物科技有限公司提供的在线分析平台完成.

2　研究结果

2.1　创面土壤生物结皮效果

生物结皮接种90 d后的形成情况如图1所示.各处理组在结皮覆盖度与外观形态上表现出显著差异.X2处理组生物结皮覆盖度较高,X1组覆盖较为稀疏,而X5、X6等处理组结皮分布相对均匀.X7处理组结皮覆盖度低于X8,考虑到两组苔藓组合种类相同(星星藓和朵朵藓),这可能是由于X8组较高的苔藓接种量.上述结果表明,不同苔藓与藻类组合及其用量对生物结皮形成具有显著影响.

2.2　土壤理化性质

相较于未处理对照组(CK),各生物结皮处理在土壤理化性质方面存在显著差异(图2,$P<0.05$).生物结皮处理显著提高了土壤铵态氮和硝态氮含量($P<0.05$),但不同结皮材料配置对其提升效果存在差异.与CK相比,生物结皮处理组的土壤铵态氮

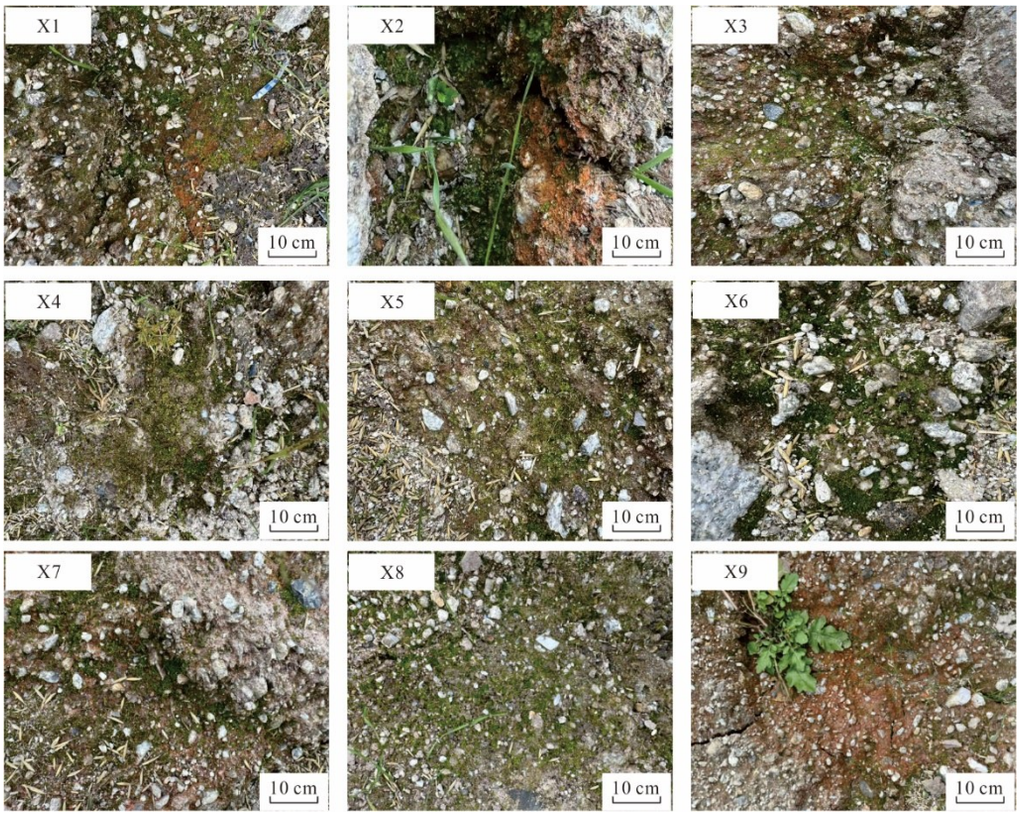


图 1 生物结皮接种 90 d 后形成情况

Fig.1 Biological crust after 90 days

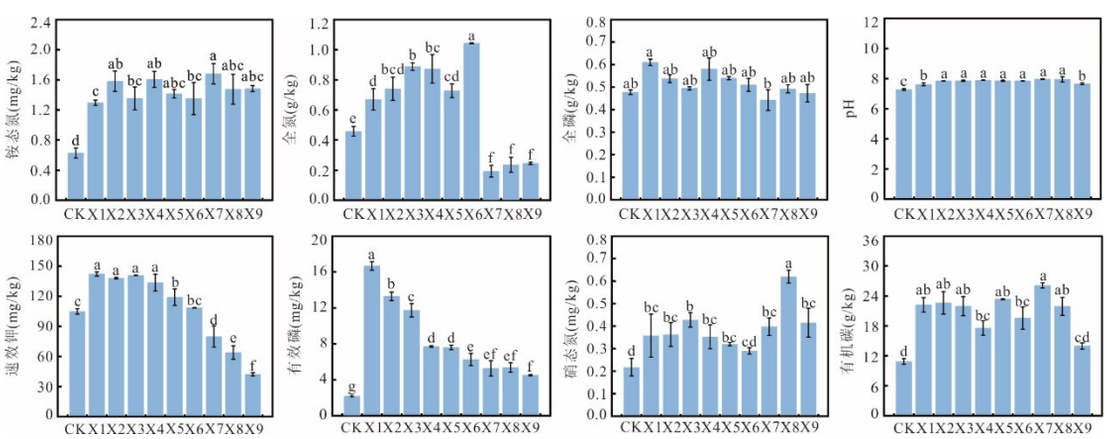


图 2 生物结皮处理组与未处理组的土壤理化性质

Fig.2 The physicochemical properties of the soil in the biological crusted and non-crusted groups

含量提升了 2.06～2.68 倍，其中 X7 处理组最高，达 1.68 mg/kg；硝态氮含量提升了 1.33～2.85 倍，X8 处理组最高，为 0.62 mg/kg. 部分生物结皮处理组的土壤全氮、全磷含量与 CK 存在显著差异（$P<0.05$）. 其中，X6 组的全氮含量最高，为 1.042 5 g/kg，显著高于其他处理组（$P<0.05$），而 X7、X8、X9 处理组的全氮含量则显著低于 CK（$P<0.05$），但其铵态氮和硝态氮含量均高于其他处理组 .X1 组的全磷含量相对较高，与部分处理组存在显著差异 .CK 的土壤 pH 显著低于各处理组（$P<0.05$）. 在磷素与碳组分方面，各处理组土壤有效磷含量显著高于 CK，提升了 2.07～7.67 倍，其中 X1～X3 组提升最明显；土壤有机碳含量也显著增加，其中 X7 组含量最高，达 26.11 g/kg. 相比之下，速效钾的提升则具有选择性，仅在 X1～X6 处理组中观察到显著增加，X7～X9 组未见显著提高 .

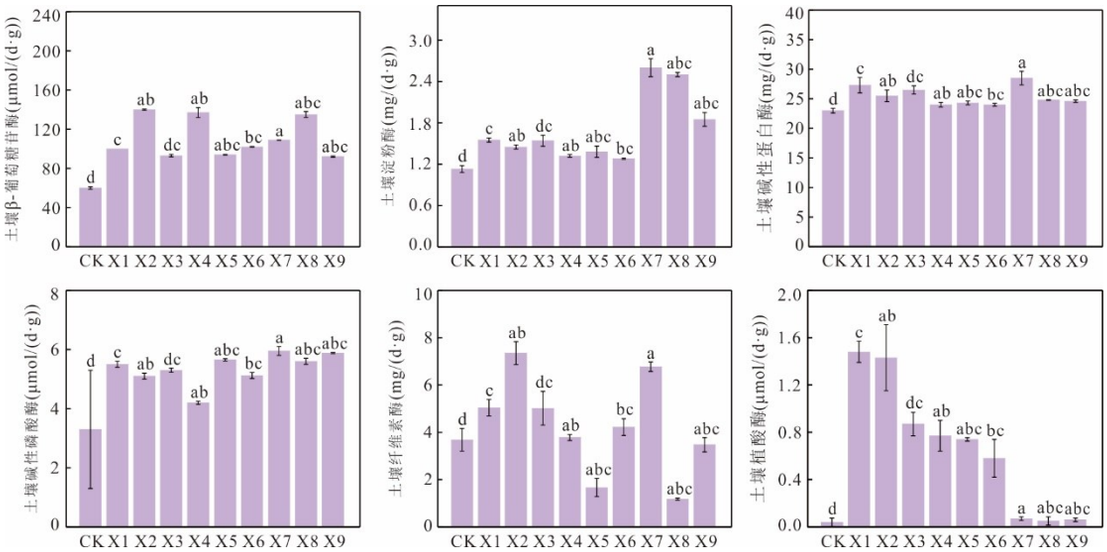


图 3　生物结皮处理组与未处理组的土壤酶活性

Fig.3　Enzyme activity of the soil in the biological crusted and non-crusted groups

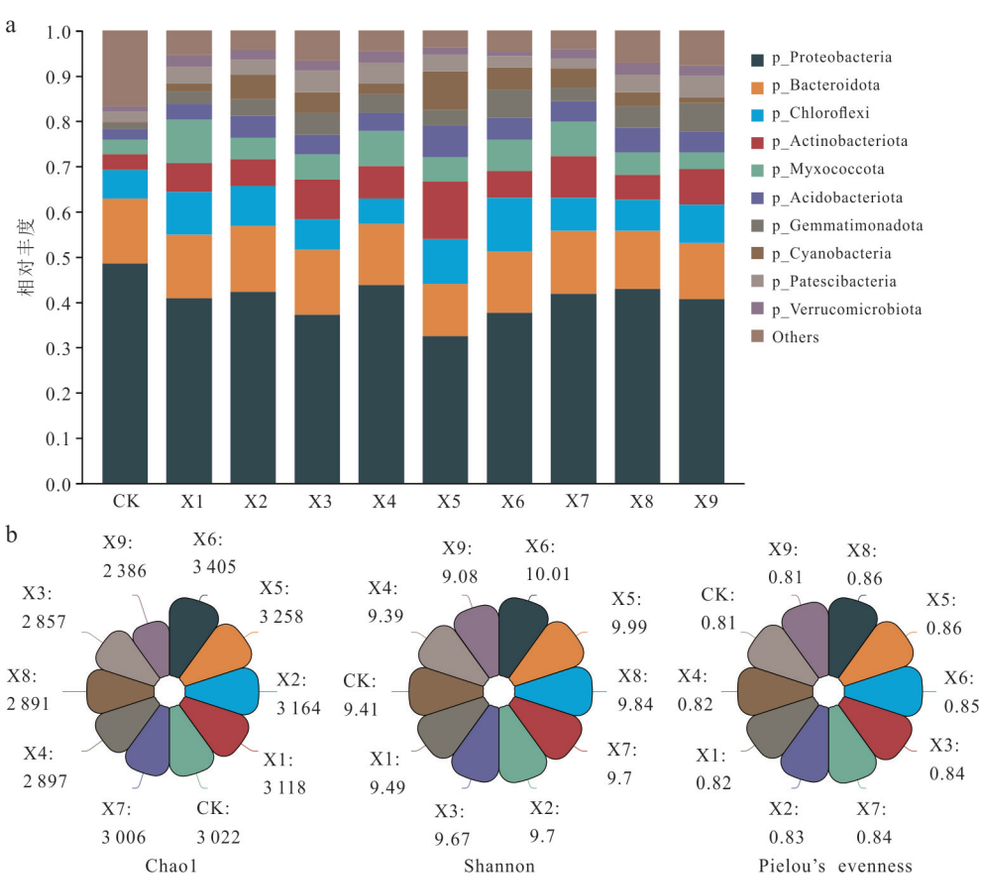


图 4　微生物群落门水平物种组成(a)及α多样性分析(b)

Fig.4　The composition of microbial communities at the phylum level (a) and the alpha diversity analyses (b)

2.3　土壤酶活性

不同生物结皮处理对土壤酶活性的影响如图 3 所示 . 与对照组相比,各处理组在多种酶活性上均表现出显著提升($P<0.05$). 具体而言,X1、X2、X3 和 X7 生物结皮处理组显著提高了土壤纤维素酶活性,其中 X2 处理组提高最多,达 CK 对照组的 2.00 倍,X8 处理组的土壤纤维素酶活性较低,为 CK 组的 31.90%;除 X6 外,其余处理组淀粉酶活

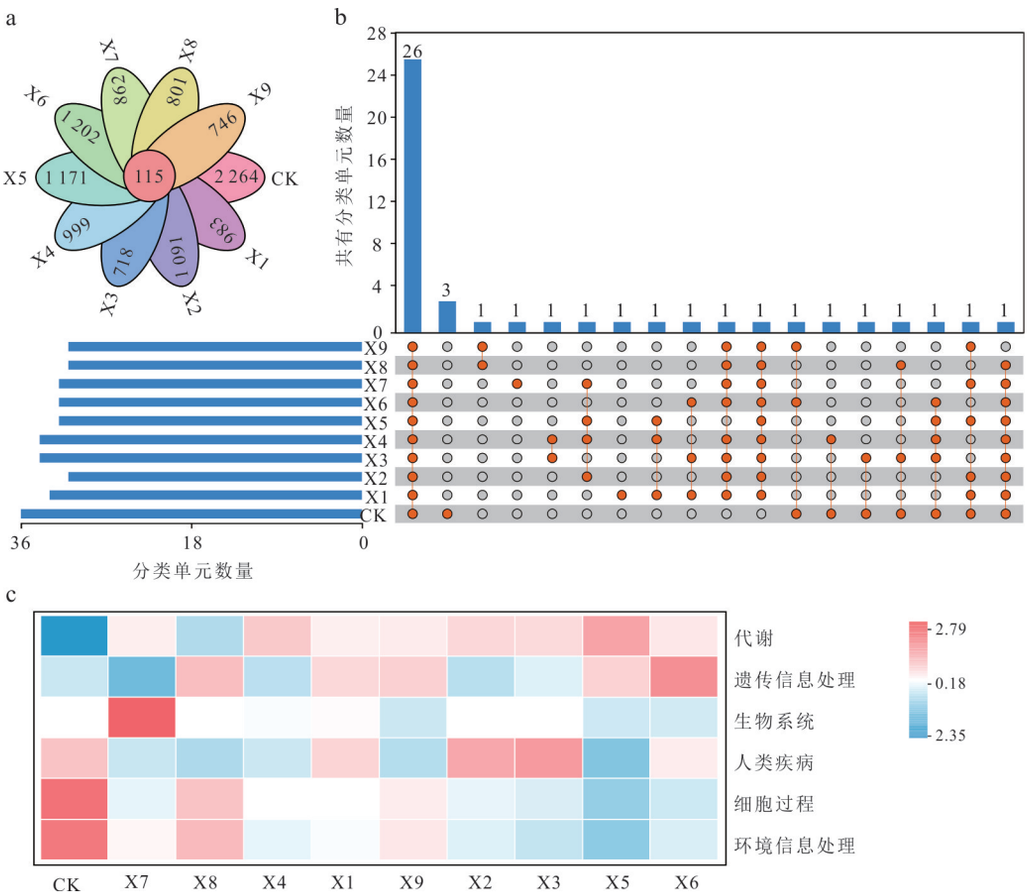


图 5 组间独有、共有微生物分类单元数量(a:属水平,b:门水平)及功能潜能预测(c)

Fig.5 The number of unique and common microbial taxonomic units between groups (a: genus level, b: phylum level) and the prediction of functional potential (c)

图 b 黄色点线表示各个分组的交集情况,橙色点代表有,灰色点代表无,上方柱状图展示对应交集的共有物种.图 c 单元格颜色表示经标准化处理后功能分类的丰度

性均显著高于 CK,X7 处理组提升效果最好,达 CK 组的 2.31 倍;所有生物结皮处理组的土壤 β-葡萄糖苷酶活性均显著高于 CK,X2 处理组最高,为 CK 组的 2.29 倍;碱性蛋白酶活性在除 X4、X6 外的处理组中显著提高,而所有处理组的土壤碱性磷酸酶活性均显著高于 CK. 此外,除 X7、X8、X9 组外,其余处理组的土壤植酸酶活性也显著提高.

不同处理组对土壤酶活性的提升效果存在差异.X1 和 X2 处理组的土壤植酸酶活性分别达到对照组的 45.6 倍和 44.5 倍,而 X2、X7 处理组则显著提升了土壤纤维素酶活性,X7、X8 处理组对土壤淀粉酶的提升效果显著.X7、X8 和 X9 处理组显著提升了土壤碱性蛋白酶、碱性磷酸酶及淀粉酶活性,但未能显著提升土壤植酸酶活性.以上结果表明,生物结皮的引入可显著提高土壤酶活性,但不同处理组合的提升效果存在差异.

2.4 土壤微生物群落

在门水平上,土壤优势微生物门主要为变形菌门(Proteobacteria)、拟杆菌门(Bacteroidota)、放线菌门(Actinobacteriota)和酸杆菌门(Acidobacteriota)(图 4a).α 多样性分析表明,生物结皮处理显著提高了土壤微生物群落的物种多样性和均匀度(图 4b).具体而言,X6、X5 等多个生物结皮处理提高了土壤微生物 Chao1 指数、Shannon 指数和 Pielou's evenness 指数,反映了结皮处理组微生物物种丰富度、多样性的增加以及物种分布的均匀化,表明生物结皮的引入对土壤微生物群落结构产生了积极影响.

基于土壤微生物 OTU 数量分析结果(图 5a),CK 土壤 OTU 总数最高(均值 2 264),而 X3 组土壤 OTU 总数最低(均值 718),表明不同生物结皮处理显著改变了土壤微生物的物种数量.各处理组及 CK 共有 OTU 为 115 个,进一步说明结皮处理后弃

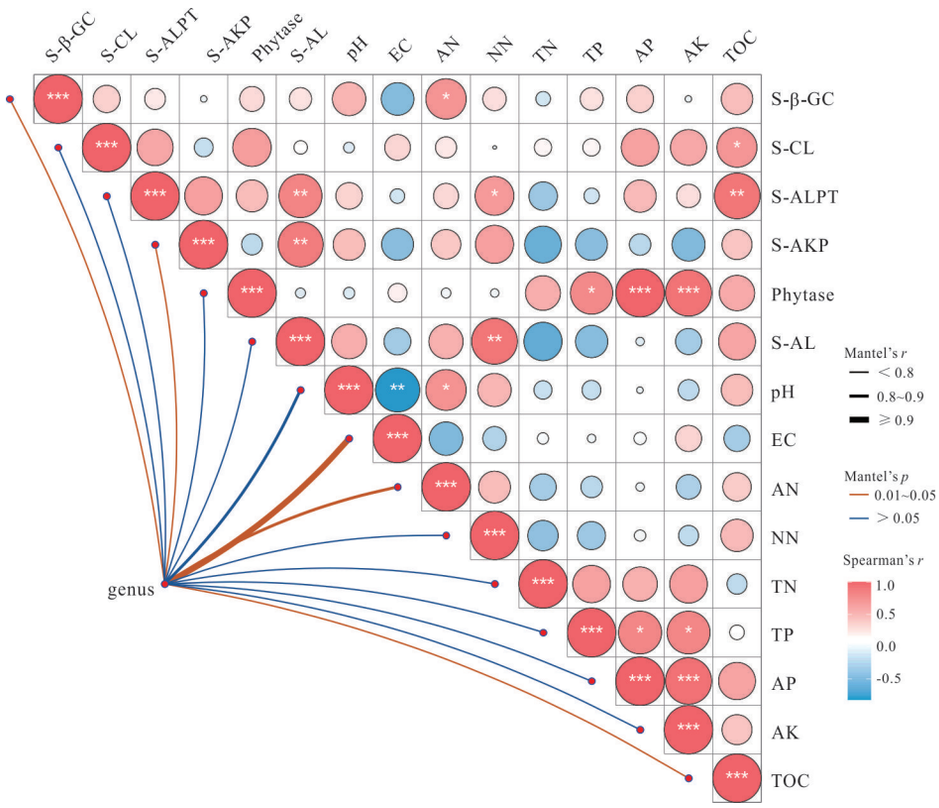


图 6　土壤理化指标、酶活性与微生物群落结构的相关性分析

Fig.6　Correlation analysis of soil physicochemical indicators, enzyme activities and microbial composition

S-β-GC. 土壤 β-葡萄糖苷酶;S-CL. 土壤纤维素酶;S-ALPT. 土壤碱性蛋白酶;S-AKP. 土壤碱性磷酸酶;Phytase. 植酸酶;S-AL. 土壤淀粉酶;pH. 土壤酸碱度;EC. 土壤电导率;AN. 铵态氮;NN. 硝态氮;TN. 全氮;TP. 全磷;AP. 有效磷;AK. 速效钾;TOC. 有机碳

渣微生物群落组成发生显著变化.图 5b 显示,对照组中存在 3 个独有微生物门,而 X1、X7 结皮处理组中则出现新的门类,X1 独有门类为互养菌门(Synergistota),X7 独有门类为达达菌门(Dadabacteria),表明结皮处理不仅引入了新的微生物类群,也导致了部分原有物种的消失.该结果与物种组成分析所呈现的结果一致(图 4),结皮处理组与对照组在部分优势微生物门的相对丰度上存在明显差异,说明结皮可能促进了特定微生物类群的增殖,并对其他类群产生了一定的抑制作用.KEGG 功能预测分析表明,结皮处理显著改变了土壤微生物的代谢功能(图 5c).结皮处理组中“代谢”相关功能的相对丰度显著上升,而“细胞过程”和“环境信息处理”功能则相对较低,表明在结皮环境中,微生物可能将更多能量和资源分配给代谢活动,以增强对环境的适应能力并提升养分转化利用效率.

2.5　生物结皮各指标相关性

如图 6 所示,土壤 pH 与铵态氮含量呈显著正相关关系,暗示较高 pH 条件可能促进了铵态氮组分的积累($P<0.05$);土壤有机碳与纤维素酶和碱性蛋白酶活性均呈显著正相关($P<0.05$),说明有机碳的增加促进了参与有机质分解和氮转化相关酶的活性;土壤植酸酶活性与总磷、速效磷及速效钾含量呈显著正相关($P<0.05$),表明植酸酶对土壤磷库和可用性磷组分的积累存在积极作用.

微生物群落与土壤理化因子之间的相关性揭示了复杂的互作机制.土壤有机碳和铵态氮作为微生物生长的基础营养底物,与微生物群落组成呈显著相关关系($P<0.05$),表明碳、氮含量对微生物群落组成存在重要影响.此外,碱性磷酸酶和 β-葡萄糖苷酶活性与微生物群落显著相关($P<0.05$),说明微生物可能通过调控这些关键酶活性参与养分循环过程.电导率与微生物群落组成同样呈显著相关关系,指示环境盐含量对微生物生长存在重要作用,可能导致群落结构发生适应性变化,并影响土壤生化过程(张颖等,2024).综上,土壤理化性质不仅直接塑造微生物群落结构,还可通过调节微生物酶活性,间接影响土壤生态系统进程.

3 讨论

3.1 生物结皮对创面土壤的应用效果分析

不同“苔-藻”组合对生物结皮形成效果具有显著影响.星星藓与小颤藻组合(X2)在结皮组织形成方面表现较优,原因可能是二者在营养利用与微环境适应方面存在互补性,增强了其在弃渣场贫瘠生境中的协同定植发育能力(李骏盈等,2011).在朵朵藓参与的组合中,其与不同藻类搭配后结皮效果各异,这表明决定结皮效果优劣的关键在于组合内物种的功能属性,如固氮能力、分泌物成分等,结皮效果并非单纯依赖参与构建的物种数量.此外,在星星藓与朵朵藓混配组合里,X8表现出优于X7处理组的结皮覆盖情况,说明相同苔藓组合下,接种量显著影响结皮效果.整体而言,“苔-藻”生物结皮的形成效果取决于苔藓种类、藻类功能及接种量三者的精准匹配,其本质是物种功能互补与协同效应的体现;针对不同的土壤生境应通过优化技术组合提升生态修复的整体效果.

3.2 生物结皮对创面土壤养分恢复的影响

土壤理化性质是衡量土壤肥力和生产力的关键指标,对退化生境的恢复进程具有重要影响(李佳秀等,2022).本研究结果显示,生物结皮显著改良了弃渣的养分水平.在氮素方面,生物结皮处理能显著提升土壤铵态氮、硝态氮含量,表明在氮组分贫瘠的弃渣环境中,结皮体系有效参与了生物固氮与氮转化过程(Delgado-Baquerizo *et al.*, 2017).X7、X8和X9组均采用了星星藓和朵朵藓的混合配置,与其他处理组相比,其土壤全氮含量较低,铵态氮和硝态氮含量较高,说明此类苔藓组合能提升土壤无机氮浓度.在磷素方面,生物结皮促进了磷的活化,提升了磷组分的有效性,这可能是由于结皮系统提供的丰富磷酸酶和植酸酶,以及大量有机酸分泌环境下的结皮生物-矿物相互作用(Coxson,2002).生物结皮对土壤环境因子的调控作用同样显著.各处理组pH普遍高于对照组,这与结皮生物分泌碱性物质及促进矿物风化过程密切相关(赵哈林等,2009).结皮处理组土壤有机碳含量与土壤β-葡萄糖苷酶、碱性磷酸酶活性显著提高,且有机碳含量与上述酶活性呈显著相关性,揭示了其通过促进微生物代谢来驱动碳循环的内在机制(Elbert *et al.*, 2012).综上所述,生物结皮通过固氮作用、养分活化、pH调节及碳积累等多种途径,显著改善了渣土养分水平,结皮生物材料配置显著影响弃渣养分改良效果,需针对特定土壤恢复目标适配材料组合.

3.3 生物结皮对创面土壤酶活性的影响

土壤酶在养分循环和其他生态过程中存在关键作用(Chen *et al.*, 2019).生物结皮通过调控多种土壤酶活性,对土壤碳、氮、磷等养分循环产生了积极影响,从而有效改善了弃渣土壤生态功能.本研究结果显示,所有生物结皮处理组均显著提高了土壤β-葡萄糖苷酶活性,且大部分处理同时提高了土壤淀粉酶活性和纤维素酶活性,表明生物结皮促进了微生物对有机质的分解和代谢,驱动了纤维素、淀粉等碳源的分解以及单糖的释放,加速了土壤碳循环进程(孙文颖等,2019;曾婷等,2024).在氮循环方面,除X4、X6外,各生物结皮处理组均显著提高了土壤碱性蛋白酶活性,这一变化解释了土壤硝态氮与铵态氮含量的增加,说明生物结皮能够促进有机氮向无机氮的转化,为植物和微生物提供了有效氮源(张景普等,2016).磷酸酶和植酸酶是土壤磷素循环的关键作用酶(丁锐等,2019).本研究中,生物结皮处理均显著提高了土壤碱性磷酸酶活性,表明生物结皮通过增强微生物的有机磷矿化能力,改善了磷养分的生物有效性(陈荣枢等,2023).X7、X8和X9三个处理组表现出相似的酶活性变化趋势,这可能源于相同的苔藓组合所塑造的特定代谢特征,表明不同的生物结皮组成能够形成独特的土壤酶活性特征,进而调控养分的循环路径与效率.综上所述,生物结皮通过定向调控土壤酶活性,优化了养分循环过程,为渣土改良和弃渣场生态修复提供了有效的生物学途径.

3.4 生物结皮对创面土壤微生物群落的影响

微生物是土壤生态系统的重要组成部分,在物质循环与能量流动中发挥着核心作用(高志香等,2021).本研究结果表明,生物结皮的引入显著改变了土壤微生物群落结构,这一过程可能是由结皮改良的土壤养分条件及微环境特征共同驱动的(蒋宏忱和王北辰,2025).尽管对照组的土壤OTU总数较高,但其微生物多样性、丰富度、均匀度指数均低于结皮处理组,表明原生渣土中微生物群落虽物种数量多,但结构松散、功能效率较低.生物结皮通过提供丰富的碳氮资源,引发了剧烈的竞争性演替,促使部分微生物类群占据优势,其他类群则因竞争或环境适应能力较弱而减少,导致群落向由少数高效功能类群主导的结构转变,这与生物结皮在沙地

生态系统中引发生物群落重组的现象相符(Guo *et al.*, 2008; Elbert *et al.*, 2012; Li *et al.*, 2024; Shi *et al.*, 2024).KEGG 分析进一步揭示,结皮处理组微生物代谢功能显著增强,而细胞过程和环境信息处理功能相对较弱,说明在养分改善的条件下,微生物将更多能量投入到合成代谢与物质转化,而非用于维持基本生存与应激响应(Finn *et al.*, 2017; Yoon and Lee, 2020).

总体而言,生物结皮处理在渣土改良过程中提升了土壤关键酶活性,提高了养分水平,并增强了代谢功能,形成了正向反馈.其具体机制如下:结皮组织提高了土壤β-葡萄糖苷酶、碱性磷酸酶等关键酶活性,加速了有机质分解与其他养分转化,显著提升了土壤中有效氮、磷及有机碳等关键养分的含量;丰富的养分条件进而为微生物生长提供了良好的基质环境,促使其生命策略由“维持生存”转向“快速生长”,表现为KEGG分析中代谢功能的显著增强;高效代谢的微生物群落又通过分泌更多酶类维持较高的代谢活性,进一步推动养分循环进程(李承义等,2022; Yang *et al.*, 2023).这一自我维持的良性循环机制,不仅显著提升了土壤养分周转效率,还为植被定殖提供了养分基础,对受损生态系统的恢复具有重要意义.

4　结论

本研究系统探究了“苔-藻”生物结皮对高寒地区弃渣场土壤的改良效果及关键机制.通过设置多组对比实验,分析了不同苔藓与藻类组合对土壤理化性质、关键酶活性及微生物群落结构与功能的影响.结果表明,生物结皮处理能显著提升土壤有机碳、铵态氮、硝态氮、有效磷等养分含量并提高土壤碳、氮、磷循环相关酶活性,提升养分水平,改善养分循环效率;结皮处理显著影响了微生物群落结构和功能特征,有效提高了微生物群落的多样性与均匀度,增强了微生物的代谢功能,驱动微生物由生存维持策略转向快速生长模式,形成养分、酶活性、代谢功能之间的良性循环.此外,不同的生物结皮材料配置能够形成独特的土壤酶活性特征,因此需针对不同的土壤恢复目标匹配最优的生物结皮组合.综上所述,“苔-藻”复合生物结皮技术是一种适用于高寒地区弃渣改良与生态修复的有效途径,可以实现土壤养分的快速积累,增强微生物代谢功能,研究为类似受损生境的生态修复工作提供了重要的理论与实践依据.

References

Assouline, S., Thompson, S. E., Chen, L., et al., 2015. The Dual Role of Soil Crusts in Desertification. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 120(10): 2108−2119. https://doi.org/10.1002/2015JG003185

Chen, H., Cui, Y. H., Wang, H. M., et al., 2024. Advances in Mines Ecological Restoration and Carbon Sequestration Potential. *Earth Science*, 49(12): 4594−4607 (in Chinese with English abstract).

Chen, J., Ai, S. H., Liu, J., et al., 2019. The Life Span and Influencing Factors of Metal Mesh in Artificial Soil on Railway Rock-Cut Slopes in Humid Areas. *Science of the Total Environment*, 671: 41−51. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.284

Chen, R. S., Wang, R. R., Sun, J. H., et al., 2023. Effects of Altitude, Soil and Vegetation of the Lijiang River Basin on Soil Nutrient Contents and Enzyme Stoichiometric Ratios. *Guihaia*, 43(2): 242−252 (in Chinese with English abstract).

Coxson, D. S., 2002. Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management. *The Bryologist*, 105(3): 500−501. https://doi.org/10.1639/0007‐2745(2002)105[0500:]2.0.co;2

Cui, C. Y., Chen, Q. J., Wang, J. B., et al., 2025. Soil Carbon and Nitrogen Characteristics and Influencing Factors in Different Vegetation Restoration Patterns in Abandoned Quarries. *Journal of Ecology and Rural Environment*, Online. https://doi.org/10.19741/j.issn.1673−4831.2025.0414 (in Chinese with English abstract).

Delgado-Baquerizo, M., Eldridge, D. J., Ochoa, V., et al., 2017. Soil Microbial Communities Drive the Resistance of Ecosystem Multifunctionality to Global Change in Drylands across the Globe. *Ecology Letters*, 20(10): 1295−1305. https://doi.org/10.1111/ele.12826

Ding, R., Chen, X. H., Li, B. X., 2019. Research Advances on Phytase and Prospect of Applying Soil Phytase. *Biotechnology Bulletin*, 35(7): 190−195 (in Chinese with English abstract).

Dong, Y., Xia, D., Yan, S. X., et al., 2025. Effects of Biological Soil Crusts on Soil Aggregate Distribution and Stability in Vegetation Concrete Slopes. *Journal of Soil and Water Conservation*, Online. https://doi.org/10.13870/j.cnki.stbcxb.2025.06.003 (in Chinese with English abstract).

Elbert, W., Weber, B., Burrows, S., et al., 2012. Contribu-

tion of Cryptogamic Covers to the Global Cycles of Carbon and Nitrogen. *Nature Geoscience*, 5(7): 459－462. https://doi.org/10.1038/ngeo1486

Finn, D., Kopittke, P. M., Dennis, P. G., et al., 2017. Microbial Energy and Matter Transformation in Agricultural Soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 111: 176－192. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.04.010

Gao, S. H., Du, L., Xu, J., et al., 2025. Spatiotemporal Distribution Characteristics of Cyanobacteria and Green Algae in Biological Soil Crusts of Kubuqi Desert. *Journal of Inner Mongolia Normal University* (*Natural Science Edition*), 54(3): 278－285 (in Chinese with English abstract).

Gao, Z. X., Li, X. L., Zhang, J., et al., 2021. Effects of Replacing Topsoil Treatment on Vegetation and Soil Characteristics of Open-Pit Coal Mine Dump in Alpine Mining Area. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 41(1): 82－87, 96 (in Chinese with English abstract).

Guo, Y. R., Zhao, H. L., Zuo, X. A., et al., 2008. Biological Soil Crust Development and Its Topsoil Properties in the Process of Dune Stabilization, Inner Mongolia, China. *Environmental Geology*, 54(3): 653－662. https://doi.org/10.1007/s00254-007-1130-y

He, L. S., Chen, Q. B., Jiang, W. D., et al., 2012. Soil Nutrient Conditions for Vegetation Restoration of Slag Field in Hydropower Station Project. *Soil and Water Conservation in China*, (11): 43－46 (in Chinese).

Ji, X. D., Wang, F., Li, J. J., et al., 2025. Integrated Slope Stabilization and Ecological Rehabilitation Technologies for Disturbance Zones of Mega Hydropower Developments in Headwater Regions of Southwestern River Systems. *Science of Soil and Water Conservation (Chinese & English)*, 23(6): 1－8 (in Chinese with English abstract).

Jiang, H. C., Wang, B. C., 2025. Microbial Role in Carbon and Nitrogen Cycling in Lakes on the Qinghai-Xizang Plateau. *Earth Science*, 50(3): 877－886 (in Chinese with English abstract).

Kang, H. M., Zhang, J., Li, X., et al., 2025. Effects of Artificially Inoculated Composite Algal Solutions on Biological Soil Crusts and Soil Properties in Engineering-Disturbed Areas of the Hexi Corridor. *Journal of Desert Research*, 45(6): 37－46 (in Chinese).

Li, C. Y., He, M. Z., Tang, L., 2022. Advances on Phosphorus Cycle and Their Driving Mechanisms in Desert Ecosystems: A Review. *Acta Ecologica Sinica*, 42(12): 5115－5124 (in Chinese with English abstract).

Li, H., Li, G. L., Lu, Y. J., et al., 2024. Study on the Soil Improvement of Waste Dump in Open-Pit Mining Areas Using Plant Waste Fermentation Substrates. *China Mining Magazine*, 33(11): 130－138 (in Chinese with English abstract).

Li, J. J., Fan, M. C., Wei, Z. H., et al., 2024. Broad Environmental Adaptation of Abundant Microbial Taxa in Robinia Pseudoacacia Forests during Long-Term Vegetation Restoration. *Environmental Research*, 242: 117720. https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117720

Li, J. X., Zhang, Q. S., Du, Z. Y., 2022. Research Progress on the Effects of Livestock Reduction on Grassland Vegetation Growth and Soil Characteristics. *Acta Agrestia Sinica*, 30(9): 2280－2290 (in Chinese with English abstract).

Li, J. Y., Chen, L., Li, Y. Z., et al., 2011. Tissue Culture of Several Bryophytes. *Journal of Yunnan University* (*Natural Sciences*), 33(S1): 324－329 (in Chinese with English abstract).

Ma, Y. F., Chen, S. G., 1983. A Combined Rapid Digestion Method for Total Nitrogen and Total Phosphorus in Soil: Potassium Sulfate-Perchloric Acid-Sulfuric Acid Digestion Method. *Soils*, (6): 240－242 (in Chinese).

Shi, J. Q., Zhang, S. Q., Xu, J. B., et al., 2025. Influence of Moss Crust on the Stability of Soil Aggregates Developed in Different Lithologies in Karst Area. *Science of Soil and Water Conservation (Chinese & English)*, 23(6): 156－166 (in Chinese with English abstract).

Shi, X. X., Yang, J. H., Cui, H. J., et al., 2024. Effects of Long-Term Drainage and Afforestation on Carbon Utilization Function of Soil Microbial Communities Vary between the Types of Subtropical Moss Peatlands. *Global Ecology and Conservation*, 49: e02803. https://doi.org/10.1016/j.gecco.2024.e02803

Sun, W. Y., Ma, W. W., Li, G., et al., 2019. Dynamic Characteristics of Soil Sucrase and Amylase Activities during Vegetation Degradation in Gahai Wetland. *Acta Agrestia Sinica*, 27(1): 88－96 (in Chinese with English abstract).

Tian, J., Wang, B., Ma, J. L., et al., 2024. Effects of Biological Soil Crusts Development on Soil Erosion Resistance on Loessial Soil. *Journal of Soil and Water Conservation*, 38(3): 73－81 (in Chinese with English abstract).

Wang, B. T., He, W., Xiong, X., 2025. Analysis of Soil Erosion and Soil Conservation Measures in Road Engineering Construction. *Water Safety*, (3): 167－169 (in Chinese).

Xiao, B., Bowker, M. A., Zhao, Y. G., et al., 2022. Bio-

crusts: Engineers and Architects of Surface Soil Properties, Functions, and Processes in Dryland Ecosystems. *Geoderma*, 424: 116015. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116015

Xiao, C., Xiao, D., Sun, M. M., et al., 2026. Research Progress on Diazotroph and Arbuscular Mycorrhizal Fungi During Vegetation Restoration in the Karst Region. *Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences)*, 44(2): 31－43 (in Chinese with English abstract).

Yang, Y., Dou, Y. X., Wang, B. R., et al., 2023. Deciphering Factors Driving Soil Microbial Life‐History Strategies in Restored Grasslands. *iMeta*, 2(1): e66. https://doi.org/10.1002/imt2.66

Yoon, J. H., Lee, S. Y., 2020. Characteristics of Viable-but-Nonculturable Vibrio Parahaemolyticus Induced by Nutrient-Deficiency at Cold Temperature. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(8): 1302－1320. https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1570076

Yu, W. X., He, X., Lei, S. G., et al., 2024. Effects of Different Substrate Compositions and Concentrations on the Growth of Didymodon Tectorus. *Journal of Nanjing Forestry University* (*Natural Sciences Edition*), 48(4): 184－190 (in Chinese with English abstract).

Zeng, T., Hou, M., Wang, Y., et al., 2024. Effects of Different Land Use Types on Soil Cellulase Activity and Fertility Factors. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 26(1): 193－200 (in Chinese with English abstract).

Zhang, J. P., Yu, L. Z., Liu, L. F., et al., 2016. Effects of Different Silvicultural Ways on Soil Nutrients and Enzyme Activity in Larch Plantation. *Chinese Journal of Ecology*, 35(6): 1403－1410 (in Chinese with English abstract).

Zhang, Y., Li, H., Zhang, Z. Q., et al., 2024. Effect of Salinity on Ferrous Oxidation and Nitrate Reduction by Nitrate-Reducing Fe(II)-Oxidizing Bacteria. *Ecology and Environmental Sciences*, 33(10): 1590－1599 (in Chinese with English abstract).

Zhao, H. L., Guo, Y. R., Zhou, R. L., et al., 2009. Effects of Vegetation Cover on Physical and Chemical Properties of Bio-Crust and Under-Layer Soil in Horqin Sand Land. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 20(7): 1657－1663 (in Chinese with English abstract).

中文参考文献

陈珲, 崔一涵, 汪海明, 等, 2024. 矿山生态修复及其固碳潜力研究进展. 地球科学, 49(12): 4594－4607.

陈荣枢, 王汝儒, 孙佳豪, 等, 2023. 漓江流域海拔、土壤及植被对土壤养分和酶化学计量比的影响. 广西植物, 43(2): 242－252.

崔创义, 陈秋计, 王建彬, 等, 2025. 废弃采石场不同植被恢复模式的土壤碳、氮特征及其影响因素. 生态与农村环境学报, 知网首发. https://doi.org/10.19741/j.issn.1673－4831.2025.0414

丁锐, 陈旭辉, 李炳学, 2019. 植酸酶研究进展及土壤植酸酶应用展望. 生物技术通报, 35(7): 190－195.

董悦, 夏栋, 闫书星, 等, 2025. 生物结皮对植被混凝土边坡土壤团聚体分布及稳定性的影响. 水土保持学报, 知网首发. https://doi.org/10.13870/j.cnki.stbcxb.2025.06.003

高双合, 杜玲, 徐杰, 等, 2025. 库布齐沙漠生物结皮蓝藻和绿藻的时空分布特征. 内蒙古师范大学学报(自然科学版), 54(3): 278－285.

高志香, 李希来, 张静, 等, 2021. 覆土处理对高寒矿区露天煤矿排土场植被和土壤特征的影响. 水土保持通报, 41(1): 82－87, 96.

贺莉莎, 陈奇伯, 姜文达, 等, 2012. 水电站工程弃渣场植被恢复的土壤养分条件研究. 中国水土保持, (11): 43－46.

冀晓东, 汪飞, 李景吉, 等, 2025. 西南诸河上游重大水电工程扰动区一体化边坡防护与生态修复技术研究. 中国水土保持科学(中英文), 23(6): 1－8.

蒋宏忱, 王北辰, 2025. 青藏高原湖泊碳氮循环微生物作用. 地球科学, 50(3): 877－886.

康红梅, 张军, 李鑫, 等, 2025. 接种复合藻液对河西走廊工程扰动面生物结皮及土壤性质的影响. 中国沙漠, 45(6): 37－46.

李承义, 何明珠, 唐亮, 2022. 荒漠生态系统磷循环及其驱动机制研究进展. 生态学报, 42(12): 5115－5124.

李辉, 李高亮, 鲁叶江, 等, 2024. 植物废弃物发酵基质对露天矿区排土场土壤改良研究. 中国矿业, 33(11): 130－138.

李佳秀, 张青松, 杜子银, 2022. 减畜对草地植被生长和土壤特性的影响研究进展. 草地学报, 30(9): 2280－2290.

李骏盈, 陈林, 李育中, 等, 2011. 几种苔藓植物的组织培养. 云南大学学报(自然科学版), 33(S1): 324－329.

马有芳, 陈式谷, 1983. 土壤中全氮、全磷联合快速消化法——硫酸钾-高氯酸-硫酸消化法. 土壤, (6): 240－242.

石静琴, 张诗琴, 许静本, 等, 2025. 喀斯特区苔藓结皮对不同岩性发育土壤团聚体稳定性的影响. 中国水土保持科学(中英文), 23(6): 156－166.

孙文颖, 马维伟, 李广, 等, 2019. 尕海湿地植被退化过程中土壤蔗糖酶和淀粉酶活性的动态特征. 草地学报, 27(1): 88－96.

田婧, 王兵, 马金龙, 等, 2024. 生物结皮生长发育对黄绵土抗侵蚀性能的影响. 水土保持学报, 38(3): 73－81.

王波涛, 何伟, 熊旭, 2025. 道路工程施工中的水土流失与水土保持措施分析. 水上安全, (3): 167－169.

肖灿, 肖丹, 孙明明, 等, 2026. 喀斯特植被恢复土壤固氮菌和丛枝菌根真菌的研究进展. 贵州师范大学学报(自然科学版), 44(2): 31－43.

于雯馨, 贺晓, 雷少刚, 等, 2024. 不同基质配比对短叶对齿蕨植物生长的影响. 南京林业大学学报(自然科学版), 48(4): 184－190.

曾婷, 侯萌, 王耀, 等, 2024. 不同土地利用类型对土壤纤维素酶活性及肥力因子的影响. 中国农业科技导报, 26(1): 193－200.

张景普, 于立忠, 刘利芳, 等, 2016. 不同作业方式对落叶松人工林土壤养分及酶活性的影响. 生态学杂志, 35(6): 1403－1410.

张颖, 李涵, 张泽权, 等, 2024. 盐度对硝酸盐还原型铁氧化菌亚铁氧化与硝酸盐还原的影响研究. 生态环境学报, 33(10): 1590－1599.

赵哈林, 郭轶瑞, 周瑞莲, 等, 2009. 植被覆盖对科尔沁沙地土壤生物结皮及其下层土壤理化特性的影响. 应用生态学报, 20(7): 1657－1663.