

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.03.033

引用格式:王岩,裴向军,修宇鑫,等.有机改良剂对高寒矿区修复草地土壤理化性质和微生物群落结构的影响[J].草地学报,2026,34(3):1106–1117

WANG Yan, PEI Xiang-jun, XIU Yu-xin, et al. Effects of Organic Amendments on the Physicochemical Properties and Microbial Community Structure of Rehabilitated Alpine Grassland Soils in Mining Areas[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(3):1106–1117

有机改良剂对高寒矿区修复草地土壤理化性质 和微生物群落结构的影响

王岩¹, 裴向军^{1,2*}, 修宇鑫¹, 魏琦¹, 李科³, 李强⁴, 张晓超¹,
李琪¹, 周宇⁵

(1. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059; 2. 天府永兴实验室, 四川 成都 610213; 3. 四川鑫顺矿业股份有限公司, 四川 成都 610041; 4. 新疆地矿局第一水文工程地质大队, 新疆 乌鲁木齐 830091; 5. 西南石油大学地球科学与技术学院, 四川 成都 610500)

摘要:高寒矿山开采受损草地在自然恢复条件下修复进程缓慢,有机改良剂可改善土壤结构和保水性,但其对土壤养分和微生物群落的影响机制仍不明确。本文旨在探讨有机改良剂对高寒矿区草地土壤理化性质和微生物群落结构的中长期调控作用。结果表明:有机改良剂显著提高土壤水分与养分积累,修复3 a后25 cm深土壤的含水量、颗粒有机碳和总氮分别增加了17.07%, 22.86%和24.72%;表层施用的有机改良剂随时间逐渐降解,但其有益效果在深层土壤依然存在;有机改良剂促进了变形菌门(Proteobacteria)、放线菌门(Actinobacteriota)和酸杆菌门(Acidobacteriota)等关键菌群丰度提升;Mantel检验和RDA分析表明,有机改良剂的施用增强了土壤养分因子与微生物群落结构之间的正相关性,进而促进了微生物群落演替与生态功能恢复。

关键词:高寒草地退化;采矿扰动;有机改良剂;土壤养分;微生物群落

中图分类号:S812.2

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)03-1106-12

Effects of Organic Amendments on the Physicochemical Properties and Microbial Community Structure of Rehabilitated Alpine Grassland Soils in Mining Areas

WANG Yan¹, PEI Xiang-jun^{1,2*}, XIU Yu-xin¹, WEI Qi¹, LI Ke³, LI Qiang⁴,
ZHANG Xiao-chao¹, LI Qi¹, ZHOU Yu⁵

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan Province 610059, China; 2. Tianfu Yongxing Laboratory, Chengdu, Sichuan Province 610213, China; 3. Sichuan Xinshun Mining Co., LTD, Chengdu, Sichuan Province 610041, China; 4. The First Hydrogeological Engineering Geology Team, Urumqi, Xinjiang 830091, China; 5. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan Province 610500, China)

Abstract: Grasslands disturbed by mining activities in alpine regions exhibit slow recovery under natural conditions. Although organic amendments have been demonstrated to improve soil structure and water retention, their medium- to long-term effects on soil nutrient dynamics and microbial community composition remain unclear. This study investigated the regulatory effects of an organic amendment on the physicochemical properties and microbial community structure of grassland soils in high-altitude mining areas. The results showed that the organic amendment significantly enhanced soil moisture retention and nutrient accumulation. After three

收稿日期:2025-05-13;修回日期:2025-06-29

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC3007103);新疆维吾尔自治区重点研发计划项目(2023B03011-3);新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局地质勘查项目(XGMB202358)资助

作者简介:王岩(1996-),男,汉族,山东东营人,博士研究生,主要从事工程地质及生态修复技术研究, E-mail: wangyan1@stu.cdut.edu.cn;

*通信作者 Author for correspondence, E-mail: pxj@cdut.edu.cn

years of restoration, soil water content, particulate organic carbon (POC), and total nitrogen (TN) at a depth of 25 cm increased by 17.07%, 22.86%, and 24.72%, respectively. Despite the gradual decomposition of the organic amendment in surface soil over time, its beneficial effects persisted in deeper layers. Additionally, the organic amendment improved bacterial community composition by increasing the relative abundances of Proteobacteria, Actinobacteria, and Acidobacteria. Mantel tests and redundancy analysis (RDA) further revealed that the organic amendment enhanced the positive correlations between soil nutrient parameters and microbial community structure, thereby facilitating microbial succession and ecological functional recovery.

Key words: Alpine grassland degradation; Mining disturbance; Organic amendment; Soil nutrients; Microbial community

青藏高原受矿山开采活动不断扩展的影响,受损草地形成了大量裸露边坡^[1]。高寒干旱、温差剧烈等极端环境条件,严重限制了矿区受损草地的自然恢复能力^[2]。因此,亟需结合人工修复手段以改善土壤环境质量,促进生态系统恢复^[3]。土壤改良剂因其见效快、可按需调配的优势,广泛应用于退化土壤修复及土地复垦中^[4]。研究表明,土壤改良剂可通过增加孔隙度、改善渗透性来促进水分保持^[5],同时增强土壤力学性能,维持颗粒间稳定性,提升抗侵蚀能力及自稳定性,从而实现较好的修复效果^[5]。然而,高寒矿区土壤通常存在微生物多样性低、养分有效性差的问题,严重限制了植被恢复进程^[6]。青藏高原东北部等寒旱地区尤为明显,传统改良材料难以发挥预期效果。

新型复合有机改良剂(SJ)被认为在极端环境下具有较强适用性^[7]。已有研究表明,有机改良剂可优化土壤孔隙结构,提升渗透性与力学稳定性,并在寒旱条件下改善土壤结构和水文特性,同时具备良好的抗风蚀、抗降雨冲刷及抗冻融侵蚀能力,能够有效调节土壤水分迁移过程^[7-9]。其对土壤养分、酶活性和微生物功能也具有潜在促进作用,有助于构建健康土壤微环境^[8]。现有研究多聚焦于有机改良剂施用早期对土壤的改善效果,关于其在中长期尺度上对土壤含水量、养分有效性及微生物群落结构的影响仍缺乏系统认识,这限制了对其生

态功能生命周期进行评估。当前,深入解析有机改良剂对土壤-植物-微生物的协同调控机制,对于科学评估修复策略效果、提升草地修复措施的适应性和持续性具有重要意义^[3]。

本研究在青藏高原东北缘松树南矿区开展了为期3 a(2022—2024年)的土壤重构原位试验,系统评估有机改良剂施用对钙质土壤理化特性与微生物群落结构的影响,研究旨在揭示有机改良剂在高寒矿区生态恢复过程中的中长期调控机制,为高海拔矿区草地生态修复提供理论支撑与实践依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

松树南沟矿区位于青藏高原北部,平均海拔超过3445 m^[10]。从矿区气象站获取年均气温约为0.8℃,年平均降雨量为509~708 mm。该地区属高原大陆性气候,主要生态系统类型为高寒嵩草(*Kobresia meadow*)草甸和高寒金露梅(*Potentilla fruticosa shrub meadow*)灌丛草甸^[11-12]。长期采矿活动在研究区形成了以玄武安山岩碎块为主的弃渣堆积,构成坡度约35°的排土场坡面。选用剥离表土和当地农田土用于生态恢复(表1),根据世界土壤资源参考基础分类系统(IUSS Working Group WRB, 2022),该土壤归类为钙质土,其质地为粉质壤土^[13]。

表1 研究区土壤基本理化性质

Table 1 Provision of basic physical and chemical properties of soil

土壤类型 Soil type	pH值	有机碳 Organic carbon/(g·kg ⁻¹)	总氮 Total nitrogen/(g·kg ⁻¹)	总磷 Total phosphorus/(g·kg ⁻¹)	总钾 Total potassium/(g·kg ⁻¹)
钙质土 Calcareous soil	8.97	18.74	1.44	0.60	11.38

1.2 试验设计

本研究中应用的有机改良剂(SJ)是由两种高分子材料在共混剂和交联剂的作用下形成的,其材料性能测试结果见表2^[1,7,14]。根据前期试验和实际

工程评价,确定最佳施用量为土壤干重的0.30%。为了评估有机改良剂施用对钙质土壤性质和微生物群落结构的影响,设置两种不同处理方式,并选取自然坡面作为对比(图1):(1)对照组(CK):未改

良土壤,重建 30 cm 覆盖层;(2)施用有机改良剂的处理组(TK):用 0.30% 有机改良剂改良土壤,重构相同厚度的覆盖层;(3)自然坡面(NS):未受损的自然坡面区域。CK 和 TK 均于 2022 年 7 月以 $30\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 的用量播种混合草种。混合草种包括小叶金露梅(*Potentilla parvifolia*)、垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、青海冷地早熟禾(*Poa pratensis* var. *crymophila*)、中华羊茅(*Festuca sinensis*)、黑麦草(*Lolium perenne*)、星星草(*Puccinellia tenuiflora*)和燕麦(*Avena sativa*)。混合草种按 1:2:1:2:2:1:1

的比例进行播种,以提高植被覆盖度和群落稳定性。



图 1 研究区及样地分布,包括对照组(CK)、施用有机改良剂的处理组(TK)和自然坡面(NS)

Fig. 1 Study area and distribution of sampling plots, including the control group (CK), the organic amendment treatment group (TK), and natural slope group (NS)

表 2 有机改良剂材料性能测试结果

Table 2 Performance parameters of organic amendment material

pH 值	粘度 Viscosity/ $(\text{mPa}\cdot\text{s}^{-1})$	比重 Proportion	蒸发率 Evaporation rate/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1})$
7.0~8.0	35.0~42.5	1.01~1.02	1.44

1.3 监测与采样

在实验区域内选取 3 个采样点,采样点间距均大于 0.5 km,覆盖海拔范围为 3650~4154 m。使用 Meter TEROS 12 传感器和 ZL6 数据记录仪(METER Group Inc. Pullman WA USA)于 2022 年 9 月—2024 年 9 月连续监测土壤水分(Soil water content, SWC)和电导率(Electrical conductivity, EC)。测量间隔为 30 分钟,土壤深度分别为 5, 15, 25, 30 cm。原始数据导出后使用 ZENTRA Utility 软件进行处理^[15]。

土壤样品采集工作分别于 2022 年 9 月和 2024 年 9 月进行。在每个处理区布设 3 个 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 的固定样方,并在每个样地内重复挖掘 3 个土壤剖面,共获得 18 个剖面样品。每个剖面按土层深度分为 0~10 cm, 10~20 cm 和 20~30 cm 三个层次^[16]。将来自同一处理区相同土层的土壤样品充分混合,分别用于土壤养分含量测定与微生物群落结构分析。

1.4 土壤理化特性测试

总有机碳(Total organic carbon, TOC)采用重铬酸钾氧化-分光光度法^[17]。颗粒态有机碳(Particulate organic carbon, POC)采用颗粒分级,并用重铬酸钾氧化-分光光度法测试有机碳含量^[18]。溶解性有机碳(Dissolved organic carbon, DOC)通过水土振荡法提取溶解性有机质,并用 TOC 分析仪测定(TOC-L CPN, Shimadzu, Japan)^[19]。钙结合态有机碳(Calcium-bound organic carbon, Ca-SOC)和铁/铝氧化物结合态有机碳(Fe/Al oxide-bound

organic carbon, Fe/Al-SOC)分别用 Na_2SO_4 和 $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ 提取,然后用 TOC 分析仪测定^[20]。总氮(Total nitrogen, TN)采用凯氏定氮法^[21],总磷(Total phosphorus, TP)采用碱熔-钼锑抗分光光度法测定^[22],铵态氮(Ammonium nitrogen, AN)和速效磷(Available phosphorus, AP)采用无水硫酸钠、碳酸氢钠联合浸提剂浸提后比色计测量^[23]。此外,土壤 pH 值采用电位法测定^[24]。

1.5 土壤微生物群落测定

利用 Quant-iT PicoGreen dsDNA Assay Kit 提取土壤 DNA,细菌 16S rRNA 基因序列扩增采用前引物序列 ACTCCTACGGGAGGCAGCA 和后引物序列 GGACTACHVGGGTWTCTAAT;真菌 ITS 基因序列扩增采用前引物序列 GGAAGTA-AAAGTCGTAACAAGG 和后引物序列 GCTGC-GTTCTTCATCGATGC。对每组样品进行 PCR 扩增后交予上海派森诺生物科技有限公司,利用 Illumina MiSeq 高通量测序平台完成测序工作。采用 QIIME2 进行土壤微生物群落分析,获得细菌与真菌的群落组成及多样性指标,用以评估有机改良剂对土壤微生物群落的影响。

1.6 植物多样性计算方法

植物调查采用五点法随机布设 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 草本样方,调查过程中详细记录样方内植物的多度、盖度、高度等指标,用于植物多样性指数的计算与分析^[25]。群落多样性采用 Shannon-Wiener 指数(H),

物种均匀度采用 Pielou 指数(E),物种优势度采用 Simpson 指数(D)。物种重要性值和植物多样性指数的计算公式如下:

物种重要值:

$$P_i = \frac{(RA + RC + RH)}{3} \quad (1)$$

其中:RA 为相对多度,RC 为相对盖度,RH 为相对高度。

Shannon-Wiener 指数(H):

$$H = -\sum_{i=1}^S (P_i \ln P_i) \quad (2)$$

其中,S 为物种数。

Pielou 指数(E):

$$E = \frac{H}{\ln S} \quad (3)$$

Simpson 指数(D):

$$D = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2 \quad (4)$$

1.7 数据分析

数据统计分析采用 IBM SPSS Statistics 24 软件进行。通过单因素方差分析(ANOVA)和最小显著差异法(Least significant difference, LSD)评价有机改良剂对土壤理化性质、植物多样性与土壤微生物群落的影响,显著性水平设定为 $P < 0.05$ 。使用 Mantel 检验分析和冗余分析(RDA)确定解释变量(即 SWC, EC, TOC, POC, TN, AN, TP, AP)与响应变量(微生物群落丰度)之间的关系,Mantel 检验分析和 RDA 由 R 包“vegan”执行。

2 结果与分析

2.1 修复草地植物多样性变化

现场植被调查结果显示,不同处理间的优势种组成存在差异。CK 组以垂穗披碱草(*Elymus nutans*)和门源嵩草(*Kobresia menyuanica*)为主,而在 TK 组中门源嵩草(*Kobresia menyuanica*)、小叶金露梅(*Dasiphora parvifolia*)和香薷(*Elsholtzia ciliata*)具有一定的生长优势。植物多样性结果表明,自然坡面(NS)的 Shannon-Wiener, Pielou 和 Simpson 指数在修复第 1 a 与第 3 a 始终高于 CK 组和 TK 组,表明未经受损区域的植物群落结构较为稳定。修复第 1 a, CK 组的 Shannon-Wiener, Pielou 和 Simpson 指数均略高于 TK 组,但差异不显著;修复第 3 a, TK

组的 Shannon-Wiener 和 Simpson 指数反而显著高于 CK 组($P < 0.05$),表明有机改良剂在修复初期对植物多样性的影响有限,随着修复时间延长,施用有机改良剂对植物多样性和丰富度均产生了正向影响,有效促进了植物生长和群落多样性恢复。

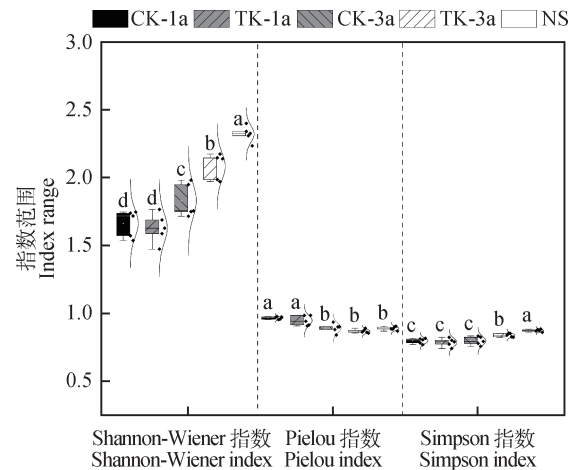


图2 2022年和2024年NS、CK和TK组植物多样性指数的变化

Fig. 2 Changes in plant diversity indices under NS, CK, and TK scenarios in 2022 and 2024

注:不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$),下同

Note: Different lowercase letters wean significant difference at the 0.05 level, the same as below

2.2 修复草地土壤含水量及电导率的变化

修复第 1 a, TK 组在 5, 15 和 25 cm 深度的 SWC 显著高于 CK 组($P < 0.05$), 分别增加了 10.99%, 12.97% 和 10.58%, 表明有机改良剂的施用显著提高了修复边坡钙质土壤的持水能力(图 3A, 3B)。第 2 a, TK 组的土壤含水量在 5 cm 和 15 cm 深度处显著高于 CK 组, 分别增加了 3.75% 和 2.37%。而在 25 cm 深度, TK 组的土壤含水量低于 CK 组, 表明有机改良剂对表层土壤水分的保持作用在一定程度上限制了水分向下迁移(图 3A, 3B)。第 3 a, TK 组 5 cm 和 15 cm 深度的土壤含水量未能与 CK 组表现出显著差异, 但在 25 cm 深度, TK 组的含水量显著提升 17.07%, 表明表层有机改良剂可能已发生劣化, 但在较深层土壤中有有机改良剂依然能够有效保持水分。三年监测期间, TK 组 30 cm 深度的土壤含水量显著低于 CK 组, 降低幅度为 5.19%~7.87%(图 3A, 3B)。此外, 有机改良剂的施用显著提高了修复第 1 a 深度 5 cm 和第 3 a 深度 25 cm 的土壤电导率, 分别增加了 $0.726 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ 和 $0.116 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$, 表明有机改良剂对土壤离子浓度和盐分积累具有积极影响(图 3C, 3D)。

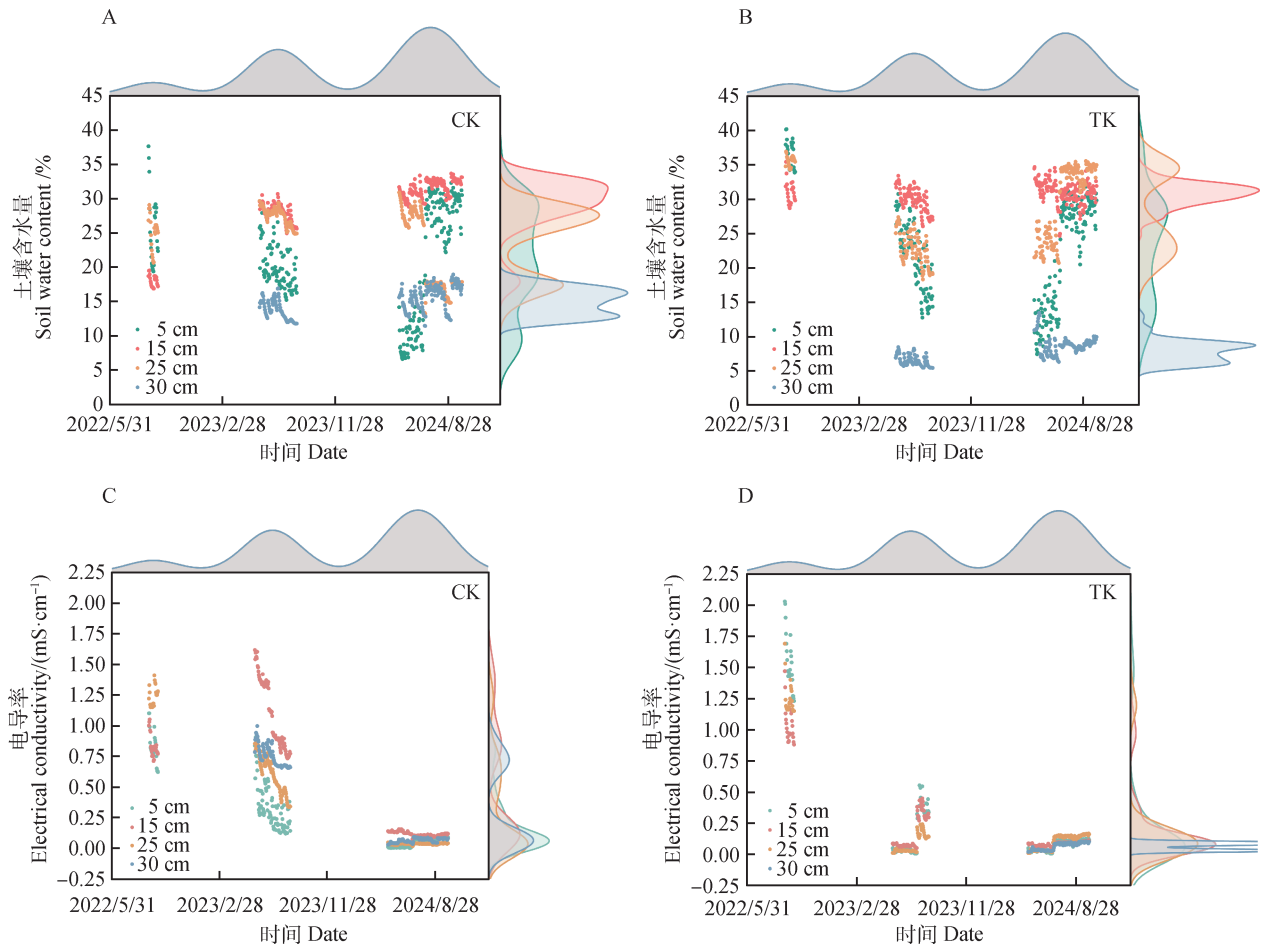


图3 2022年9月—2024年9月,CK和TK组土壤剖面的土壤水分含量(A,B)和土壤电导率(C,D)

Fig. 3 Soil water content (A, B) and soil electrical conductivity (C, D) of the studied soil profile under CK and TK scenarios from September 2022 to September 2024

2.3 修复草地土壤有机碳组分变化

与自然坡面(NS)相比,尽管TK组和CK组在有机碳积累方面存在较大差距,但施用有机改良剂显著促进了钙质土壤中有机碳的积累。在修复的第1 a,TK组在0~10 cm,10~20 cm和20~30 cm深度的总有机碳(TOC)含量分别较CK组增加了6.86%,3.01%和16.00%。第3 a,TK组在这些深度的TOC含量分别较CK组增加了6.89%,13.86%和18.87%(图4A)。这些结果表明,施用有机改良剂显著促进了钙质土壤中有机碳的积累($P<0.05$)。在有机碳组分变化方面(图4B),不同修复年份(1 a和3 a)中,TK组在0~10 cm土层的颗粒有机碳(POC)含量分别较CK组增加了26.32%和22.86%,表明有机改良剂施用有效促进了颗粒有机碳的积累,并可能增强了其稳定性。此外,有机改良剂施用还改变了钙质土壤有机碳的矿物结

合态。不同修复年份(1 a和3 a)中,TK组的钙结合态有机碳(Ca-SOC)分别较CK组减少了1.45%和0.04%,铁铝结合态有机碳(Fe(Al)-SOC)则分别减少了18.24%和6.81%。

通过三维荧光光谱分析(图4C),进一步分析了有机改良剂施用对溶解有机碳的影响。在区域V(类腐殖酸,激发波长Ex/发射波长Em=250~450 nm/380~550 nm),TK组的荧光强度显著高于CK和NS组,表明有机改良剂促进了类腐殖酸的积累和稳定化,有助于提高土壤中有机碳的长期稳定性。相比之下,在区域I(芳香蛋白I:酪氨酸类,Ex/Em=200~250 nm/280~330 nm)、区域II(芳香蛋白II:色氨酸类,Ex/Em=200~250 nm/330~380 nm)和区域III(富里酸,Ex/Em=200~250 nm/380~550 nm),TK组的荧光强度显著低于CK和NS组。

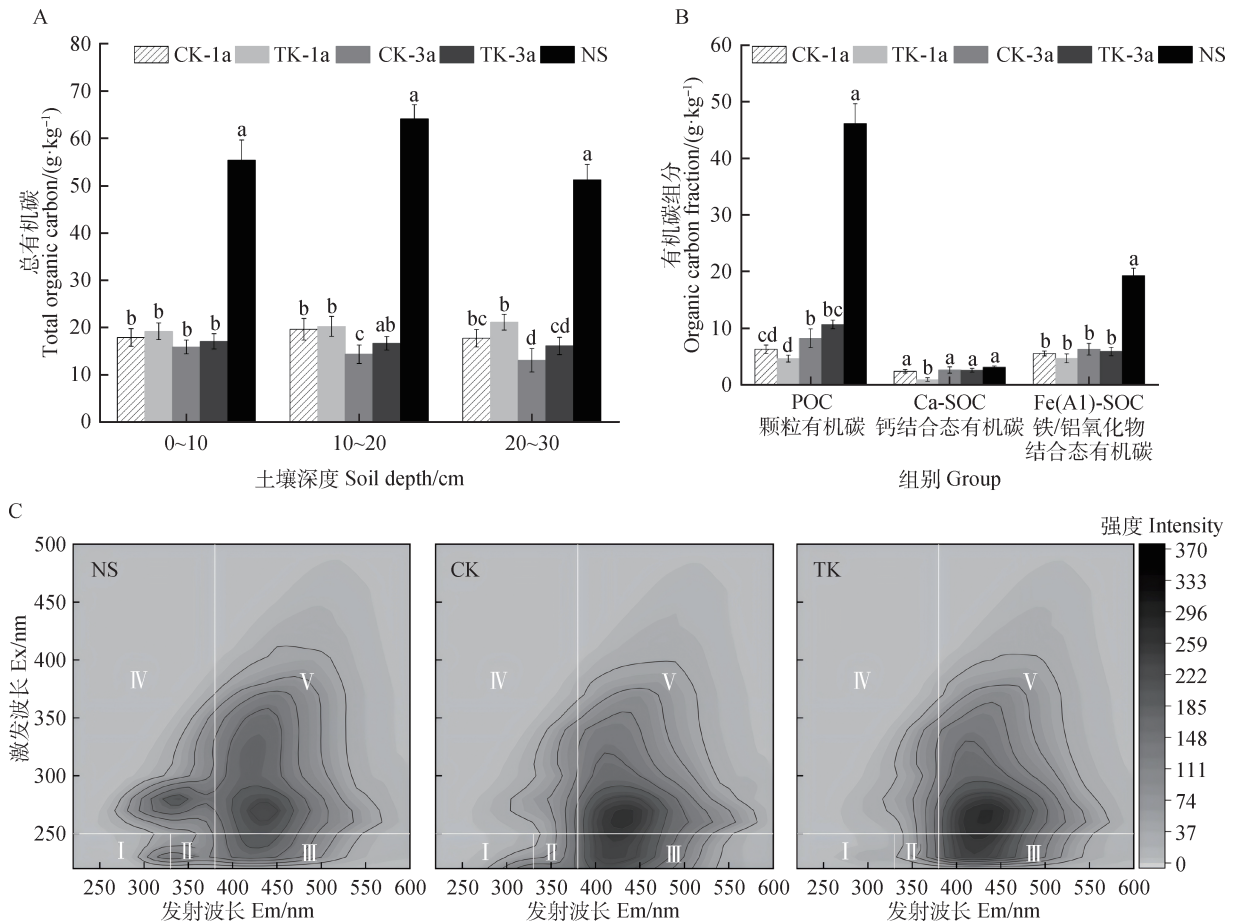


图4 不同处理下土壤总有机碳(A)、有机碳组分(B)和溶解有机碳荧光光谱分析(C)

Fig. 4 Total soil organic carbon (A), organic carbon fractions (B), and fluorescence spectra of dissolved organic carbon (C) in the NS, CK, and TK groups

注: NS, 指自然边坡; CK-1a, 为CK组(对照组)草地修复第1年; CK-3a, 为CK组第3年; TK-1a, 为TK组(施用有机改良剂)第1年; TK-3a, 为TK组第3年。不同字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。下同

Note: NS, natural slope; CK-1a, control group at restoration year 1; CK-3a, control group at year 3; TK-1a, organic amendment treatment group at year 1; TK-3a, treatment group at year 3. Different letters indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$). The same as below

2.4 修复草地土壤养分变化

对于总氮(TN),在修复第1a和第3a,TK组0~10 cm土层TN含量分别比CK组增加了11.03%和24.72%(图5A),表明有机改良剂显著促进了表层土壤氮素的积累($P < 0.05$)。在铵态氮(AN)变化方面,修复第3a的TK组各土层AN含量较CK组显著降低了41.22%~52.80%(图5B)($P < 0.05$)。对于总磷(TP),在修复第1a和第3a,CK和TK组的TP含量均显著高于NS组($P < 0.05$)。但在0~10 cm和10~20 cm土层中,TK组TP含量低于CK组,而在20~30 cm土层中,TK组TP含量显著高于CK组(图5C)($P < 0.05$)。在AP的变化过程中,恢复第1a,TK组所有土层的AP含量比CK组低10.47%~51.01%(图5D)。综上所述,施用有机改

良剂对土壤氮的积累产生了显著影响,但对磷的积累影响相对有限,但其可能通过改变磷的吸附行为和增强磷的稳定性,为土壤的长期肥力提供支持。

2.5 修复草地土壤微生物群落变化

细菌16S rRNA和真菌ITS基因高通量测序结果显示,TK、CK和NS组的微生物群落组成相似,但不同样品间的微生物丰度存在显著差异。在门水平上,变形菌门(Proteobacteria)、放线菌门(Actinobacteriota)和酸杆菌门(Acidobacteriota)为主要优势菌群(图6A),而真菌群落以子囊菌门(Ascomycota)为主(图6D)。修复第1a,TK-1a样品中变形菌门的相对丰度达到46.00%,与CK-1a相比增加了8.20%(图6A,C)。第3a,TK-3a样品中子囊菌

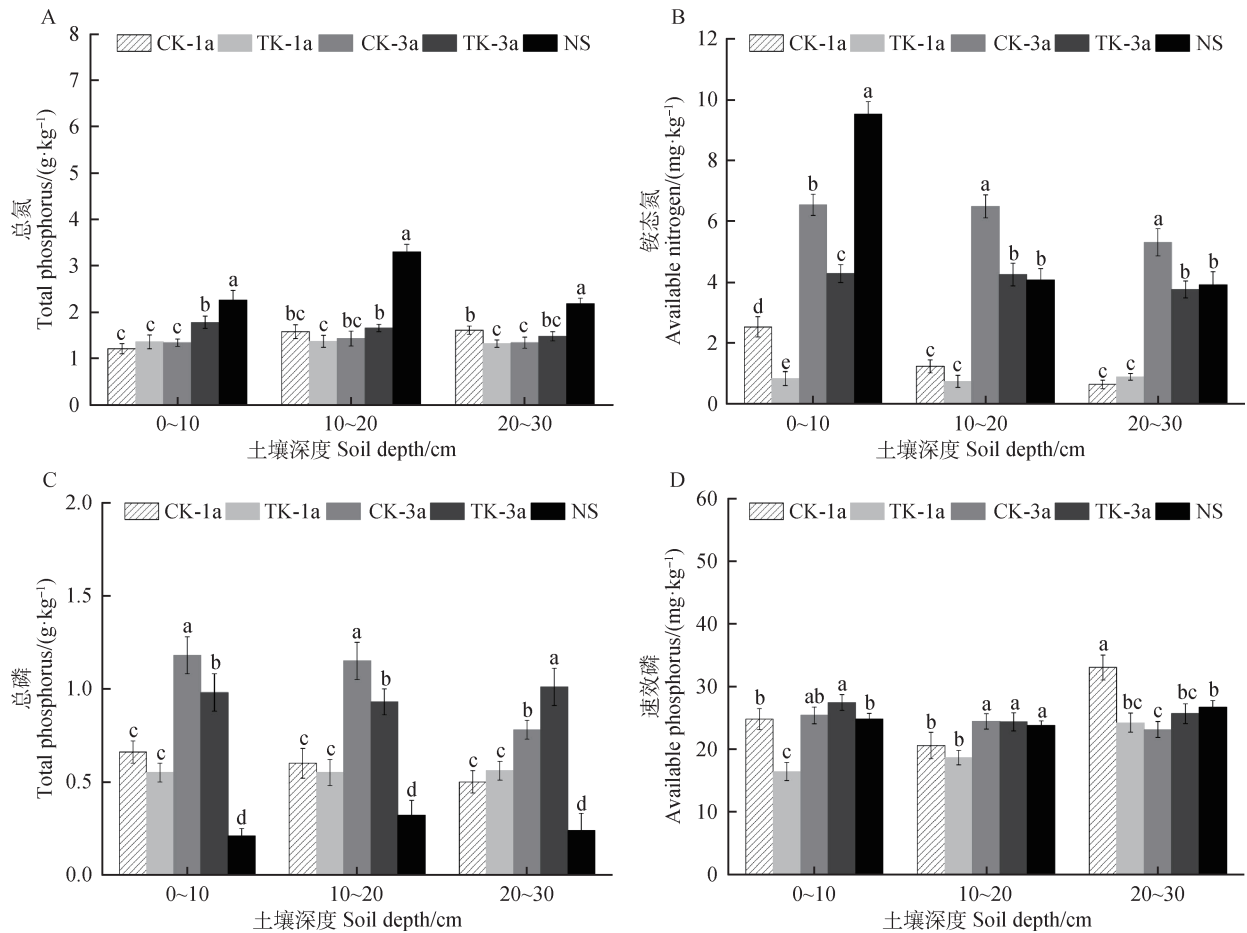


图 5 NS、CK 和 TK 组,不同土层深度(0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm)中土壤养分组分的变化:总氮(A)、铵态氮(B)、总磷(C)和速效磷(D)

Fig. 5 Changes in soil nutrient components under NS, CK, and TK scenarios: Total Nitrogen (A), Available Nitrogen (B), Total Phosphorus (C), and Available Phosphorus (D) across different soil depths (0~10 cm, 10~20 cm, 20~30 cm)

门的相对丰度与 TK-1a 样品相比进一步增加了 24.91%(图 6D,F),表明有机改良剂在长期施用下改变了土壤微生物群落的结构。

Venn 花瓣图分析揭示了不同样本间细菌和真菌 OTU 的重叠情况。共有的细菌 OTU 为 147,真菌 OTU 为 16。细菌和真菌 OTU 的数量随着恢复年限的增加而逐渐增加,NS 组独有的细菌 OTU 数量(10 394)和真菌 OTU 数量(824)均为最高,表明未扰动土壤的物种丰富度更高(图 6B,6E)。在不同修复年份(1 a 和 3 a)中,TK 组独有的细菌 OTU 数量显著高于 CK 组,分别增加了 1761 和 2028 个(图 6B),表明有机改良剂的施用促进了不同细菌类群的富集,并加速了微生物群落的演替过程。

细菌群落和真菌群落的 Goods_coverage 值分别高于 0.9684 和 0.9997,表明测序结果具有较高的覆盖度。通过对不同修复年份(1 a 和 3 a)样品进行比较发现,有机改良剂施用对土壤细菌群落的物种丰

度和多样性具有显著影响。在细菌群落方面(图 7A),TK 组在不同修复年份(1 a 和 3 a)中的细菌群落丰富度(Chao1 和 Observed species 指数)显著高于 CK 组($P < 0.05$)。其中,TK-3a 样品的丰富度显著高于 CK-3a 样品,并接近 NS 组,这表明随着修复年限的延长,有机改良剂施用显著促进了土壤细菌群落的物种丰富度。在多样性方面,TK-3a 的 Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数显著高于 TK-1a 和 CK-1a($P < 0.05$),表明群落的多样性和优势度随时间推移而增强。此外,TK-3a 组的 Pielou 指数显著高于 CK-1a 组,进一步证实了有机改良剂对细菌群落均匀性的正向作用。在恢复年限内真菌群落 TK 组的丰富度显著高于 CK 组(图 7B)。TK-3a 组的 Chao1 和 Observed 物种指数显著高于 CK-3a($P < 0.05$),表明有机改良剂随着时间的推移提高了真菌物种丰富度。然而,随着恢复年限的增加,CK 和 TK 组的 Shannon-Wiener, Simpson 和 Pielou 指数均呈不

显著的下降趋势,这一趋势反映了有机改良剂在修复过程中对真菌群落演替的调控作用,随着时间的推移,土壤真菌群落逐步趋向新的生态平衡状态。

采用主坐标分析(PCOA)评估不同样品间微生物群落组成的变化。结果表明,有机改良剂的施用在不同修复年限下显著改变了细菌和真菌群落的结构。土壤细菌群落的PC1和PC2贡献率分别为26.00%和21.00%,土壤真菌群落的PC1和PC2贡献率分别为26.90%和18.60%(图7C,D)。在细菌群落中,TK-1a与CK-1a之间差异较大,而TK-3a与CK-3a的分布差异较小,表明有机改良剂在修复初期显著影响了细菌群落结构,随着修复年限的延长,群落差异逐渐减少,趋向稳定。在真菌群落方面,TK-1a,CK-1a和CK-3a样本的分布较为集中,而TK-3a表现出较大差异,表明有机改良剂对真菌群落的影响在修复初期较弱,修复年限延长后,群落逐渐趋向新的生态平衡。NS组与修复组之间的群落结构差异,进一步证实了修复处理对土壤微生物群落结构的调控作用。

综上所述,施用有机改良剂显著提高了钙质土壤中细菌和真菌群落的物种丰富度。特别是在细菌群落中,增强了细菌群落的生态稳定性和均匀性。对于真菌群落,随着修复时间的增加,由于优势物种的增殖,群落的多样性和均匀性有所下降。

2.6 修复草地土壤理化-植物-微生物群落特性的关系

本研究采用Mantel检验和RDA分析方法,揭示了施用有机改良剂对土壤理化性质、植物和微生物群落结构的影响。Mantel检验结果表明,有机改良剂显著提高了颗粒有机碳(POC)与主要土壤养分(TN, AN, TP和AP)以及植物多样性指数(Shannon-Wiener和Simpson)之间的正相关性(图8A,B)。这表明有机改良剂通过改善土壤结构、保水能力和养分有效性,促进了植物和微生物群落的功能性恢复。RDA进一步阐明了土壤养分因子对微生物群落组成的影响。细菌群落的RDA1和RDA2轴分别解释了62.72%和10.59%的总变异,表明SWC, POC, TN, AN, TP和AP均与第一排序轴呈正相关,且CK-3a和TK-3a组的细菌群落主要受这6个因子的影响(图8C)。真菌群落的RDA1和RDA2轴分别解释了42.39%和20.74%的总变异,其中POC和TN与TK-3a组的真菌群落丰度显著正相关,而SWC, TP和AN主要影响CK-3a和TK-1a组的真菌群落(图8D)。这些结果表明,有机改良剂在修复过程中发挥了关键作用,

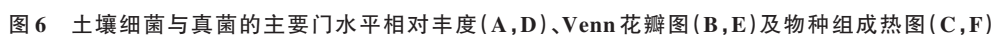
通过优化土壤水分和养分含量,促进了微生物群落的增殖与演替,从而加速了修复土壤的生态恢复进程。

3 讨论

3.1 施用有机改良剂对修复草地土壤理化性质的调控作用

有机改良剂对土壤结构改良、水分保持和抗侵蚀性等物理性质具有显著调控作用^[26-27]。本研究结果表明,有机改良剂的添加显著提高了土壤的持水能力(图2A,B)。Yang等^[5]研究表明有机改良剂通过电荷中和、吸附架桥和疏水作用等机制促进了土壤团聚体结构的优化,增强了土壤的连通孔隙度,进而提升了土壤对水分的保持能力和盐分溶解能力^[2]。随着修复年限的延长,虽然表层有机改良剂可能因紫外线辐射、冻融和微生物降解等因素发生降解^[28-29],但在深层土壤中,有机改良剂仍能维持较好的水分保持效果(图2A)。Xiong等^[30]发现有机改良剂的持水能力在18个月内急剧下降,主要是由于材料在自然环境中的降解。这些降解过程可能包括紫外线辐射、冻融过程以及微生物作用等,导致材料的自由基链断裂,从而使其物理性能降低^[31]。尽管如此,本研究发现有有机改良剂在深层土壤中的持水效能依然表现出一定的持久性,为高寒矿区修复草地的水分保持和盐分管理提供了重要支持。

在土壤养分积累方面,施用有机改良剂显著影响了土壤中碳、氮和磷的含量,增强了土壤养分之间的正相关性(图8A,B)。特别是POC, TN显著增加,而Ca-SOC, Fe(Al)-SOC和AN显著降低(图4B,图5B)。有机改良剂通过促进大粒径团聚体的形成,将土壤养分物理隔离,从而减少了养分的流失^[32]。有机改良剂通过氢键和静电吸附作用选择性地吸附DOC,减少了DOC与土壤矿物(如钙矿物和铁铝氧化物)结合的机会,从而抑制了Ca-SOC和Fe(Al)-SOC的形成,这一机制有助于提高土壤中有机碳的长期稳定性^[33]。此外,有机改良剂在改善氮磷养分固定和促进养分形态转化方面具有双重作用,增强土壤中氮磷的吸附或固定作用,有效减少了AN, AP的流失^[34]。以上结果进一步支持了有机改良剂作为土壤改良剂在草地生态修复中的应用潜力,为高寒矿区草地土壤生态修复提供理论支撑。



and species composition heat map (C, F)

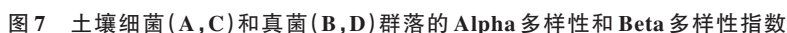


Fig. 7 Alpha diversity and Beta diversity indices of soil bacterial (A,C) and fungal (B,D) communities

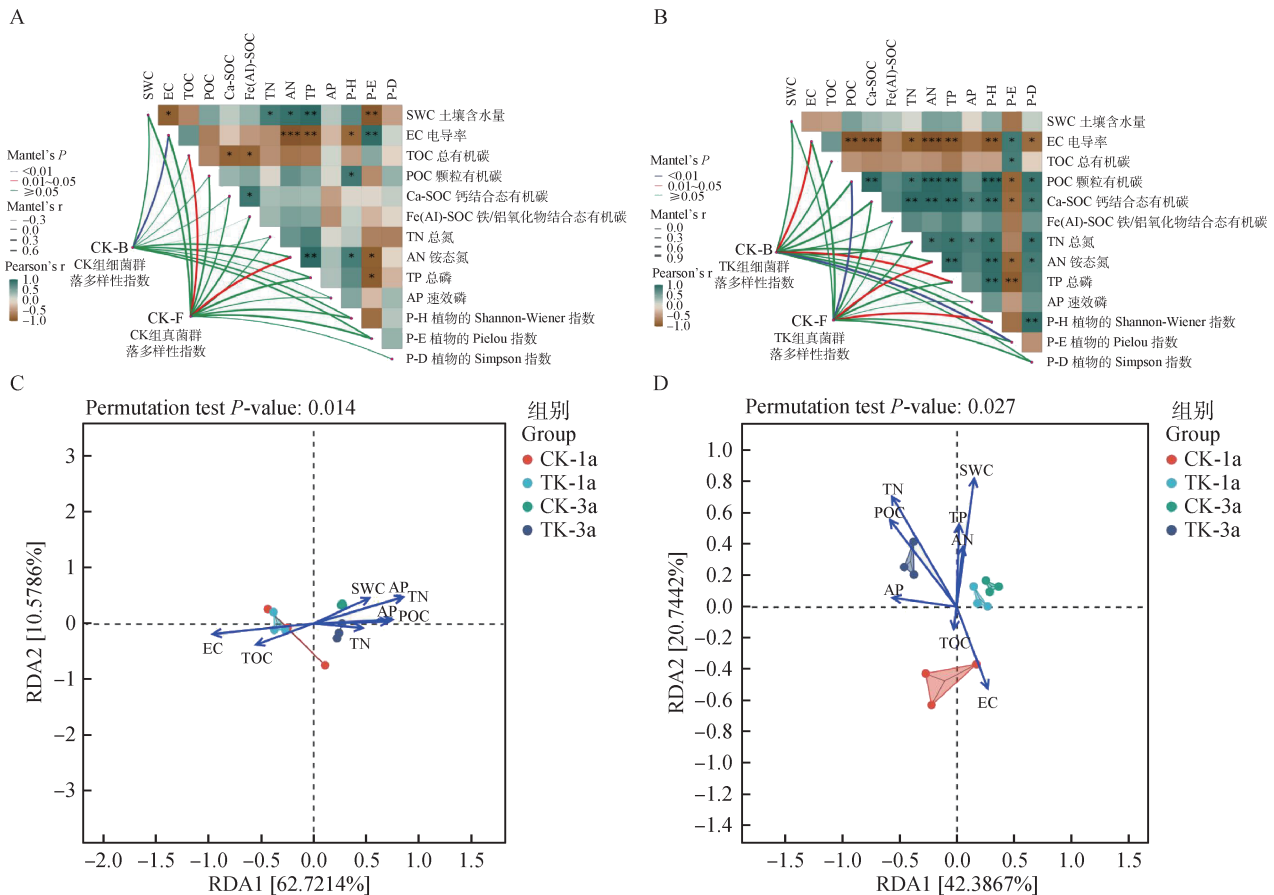


图8 不同年份CK和TK组土壤理化性质、植物多样性与微生物群落的Mantel检验分析(A,B)和冗余分析(C,D)

Fig. 8 Mantel test analysis (A, B) and redundancy analysis (RDA) (C, D) of soil physicochemical properties and microbial communities under CK and TK treatments in 2022 (1a) and 2024 (3a)

3.2 微生物群落结构对有机改良剂施用及土壤理化性质变化的响应

本研究表明,有机改良剂的施用通过增强土壤持水能力和养分供给水平,有效促进了微生物群落的演替与功能重建。施用有机改良剂后,细菌群落的物种丰富度和结构稳定性显著增强,变形菌门、放线菌门和酸杆菌门等优势功能菌群的相对丰度显著增加(图5A)。其中,变形菌门能够有效参与有机质分解、固氮和养分循环^[35],放线菌门丰度的增加有助于促进碳氮循环^[36],酸杆菌门在养分匮乏条件下具备较强资源获取能力,在有机质分解和养分循环中的作用至关重要^[37]。与细菌相比,真菌群落响应相对滞后(图6A,B)。这可能与真菌更依赖植物建群及有机质累积等生态因子有关,其恢复通常需更长时间尺度^[38]。本研究结果与已有研究相符。Shen等^[8]发现有机改良剂通过提升土壤水分与促进土壤有机碳(SOC)分解,增强植物生长和养分循环,从而改善微生物生境。Li等^[1]进一步发现有机改良剂的施用可通过调节微生物群体感应系统,显著提高土

壤信号分子浓度,激发微生物代谢潜力。这些机制表明,有机改良剂不仅通过改善土壤理化环境增强其生态功能,还通过激发优势功能菌群响应,提升了微生物群落的结构稳定性与养分转化功能。

冗余分析(RDA)进一步揭示,有机改良剂通过调节土壤SWC,POC,TN,AN,TP和AP,促进了微生物群落的生长与繁殖,并增强了土壤养分与细菌、真菌丰度之间的正相关性(图8C,D)。其中,POC和TN含量显著上升(图4B,图5A),说明有机改良剂的施用在促进碳、氮积累方面具有显著调控作用。土壤碳氮是微生物生长和代谢的重要限制因子,其含量的变化能够显著影响微生物的生理活动、代谢途径及群落结构^[39]。高红等^[39]研究表明土壤养分的有效性制约着微生物呼吸和代谢,当微生物生长和代谢所需的碳及养分需求均得到满足时,微生物生长和代谢活性最大化。此外,有机改良剂施用通过改善团聚体结构、提升孔隙度和通气性,为微生物营造出更适宜的生境,有利于功能菌群的定植与扩增^[7-8]。Hejazi等^[40]指出土壤孔隙度与通气性

是限制微生物呼吸与代谢活动的重要物理因子,改善土壤孔隙度有助于微生物活性提升与功能菌群定植。本研究中,有机改良剂施用显著改善了修复草地的植被建群状况,植物多样性指标与微生物群落之间存在显著正相关关系(图8A,B),修复草地植物生长为土壤微生物提供更多营养物质,如植物根系分泌物与凋落物输入增加土壤碳源供给,进而提升微生物群落的丰度与活性^[32]。综上,有机改良剂的施用通过增强土壤水分与养分保持能力,优化植物生长环境,促进微生物群落结构的恢复,从而提高了高寒矿区修复草地生态系统的稳定性与恢复力。

4 结论

本文研究了有机改良剂对高寒矿区修复草地土壤理化性质及微生物群落结构的影响,揭示了有机改良剂在土壤改良与微生物群落恢复中的中长期调控作用。(1)有机改良剂的施用显著提高了土壤的水分保持能力和碳氮养分积累。在修复第3 a,25 cm深度土壤含水量、颗粒有机碳和总氮含量分别增加了17.07%,22.86%和24.72%。(2)Mantel检验和冗余分析表明,有机改良剂通过调节土壤水分和碳氮养分因子,为微生物群落提供了有利的生境,促进了变形菌门、放线菌门和酸杆菌门等优势功能类群的丰度提升,增强了群落多样性与稳定性。(3)有机改良剂的施用促进了“土壤-植被-微生物群落”协同调控作用,显著提升了修复草地生态系统的恢复效果,为高海拔矿区草地生态修复提供了理论支持与实践参考。

参考文献

- [1] LI Q, KANG Y X, PEI X J, et al. Effects of modified organic material addition on soil and microbial communities in ecologically restored engineering slopes of the Qinghai-Tibetan Plateau: A mesocosm study [J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2024, 34: 103612
- [2] ZHANG H B, JING G L, LUO J, et al. Assessment of transportation processes of polyacrylamide in chernozem and saline soil by numerical model [J]. *Environmental Technology*, 2021, 42(15): 2350-2360
- [3] 胡振琪. 矿山复垦土壤重构的理论与方法 [J]. *煤炭学报*, 2022, 47(7): 2499-2515
HU Z Q. Theory and method of soil reconstruction of reclaimed mined land [J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(7): 2499-2515
- [4] WANG J, LIU M J, HAN K F, et al. Feasibility of agricultural utilization of river sludge as a planting substrate following treatment with polyacrylamide [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 367: 132964
- [5] YANG J L, LI S Y, DI H G, et al. Experimental investigations on the physico-mechanical and microstructural properties of loess reinforced with anionic polyacrylamide [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 409: 134124
- [6] MA D K, HE Z B, WANG L S, et al. Soil water and salt migration in oasis farmland during crop growing season [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2023, 23(1): 355-367
- [7] 杨晴雯. 改性有机材料-植物根系固土功能演替过程及坡面生态修复机理研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2020: 25-29
YANG Q W. Research on the mechanisms of soil stabilization and slope ecological restoration during the succession process from modified organic stabilizer to plant root [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020: 25-29
- [8] SHEN Y F, LI Q, PEI X J, et al. Facilitating the restoration of disturbed meadow soils using modified organic materials in the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Land Degradation & Development*, 2025, 36(9): 3105-3117
- [9] 李霜, 黄娟娟, 裴向军, 等. 双聚材料对于干旱条件下多年生黑麦草幼苗生长的影响 [J]. *草地学报*, 2024, 32(3): 793-803
LI S, HUANG J J, PEI X J, et al. Effects of double polymer materials on growth of *Lolium perenne* seedling under different water stress [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(3): 793-803
- [10] LANG X H, XIANG Z P, WANG X H, et al. Unveiling an Early Paleozoic porphyry-epithermal gold system in Songshunangou district, North Qilian, northwest China: geological and geochronological constraints [J]. *Ore Geology Reviews*, 2024, 164: 105816
- [11] 林丽, 李杰霞, 李本措, 等. 祁连山东段南麓高寒嵩草草甸群落特征变化及其与家庭牧场管理的关系 [J]. *生态学报*, 2024, 44(22): 10106-10118
LIN L, LI J X, LI B C, et al. Changes in plant community characteristics of alpine *Kobresia* meadow at the south-east Qilian Mountains and the relationship with their family pasture management [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(22): 10106-10118
- [12] 贺翔, 白梅梅, 徐长林, 等. 东祁连山小叶金露梅+杯腺柳灌丛草地植被和土壤对其自然恢复演替的响应 [J]. *草业学报*, 2021, 30(8): 12-24
HE X, BAI M M, XU C L, et al. Soil and vegetation successional responses in natural restoration of mixed *Potentilla parvifolia*-*Salix cupularis* shrubland in the Eastern Qilian Mountains [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, 30(8): 12-24
- [13] MANTEL S, DONDEYNE S, DECKERS S. World reference base for soil resources (WRB) [M]. *Encyclopedia of Soils in the Environment*, Amsterdam: Elsevier, 2023: 206-217
- [14] 朱利君, 裴向军, 张晓超, 等. 双聚材料改良黄土持水性及生态效应研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(4): 158-166
ZHU L J, PEI X J, ZHANG X C, et al. A study of water retention and ecological effects of loess improved by double polymers [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(4): 158-166
- [15] ZARAI B, KHASKHOUSY K, ZOUARI M, et al. Smart control of soil water and salt content for improving irrigation management of tomato crop field: Kairouan area [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2023, 195(12): 1408
- [16] WANG R Z, HU X. Chestnut soil organic carbon is regulated through pore morphology and micropores during the seasonal freeze-thaw process [J]. *Catena*, 2024, 246: 108357
- [17] 李琪, 李宇航, 金博, 等. 高寒地区工程创面草皮回铺技术改良及其土壤生态恢复效果 [J]. *草地学报*, 2025, 33(2): 644-653

- LI Q, LI Y H, JIN B, et al. Improvement of grass re-turfing technology for engineering wounds in high-altitude regions and its effect on soil ecological restoration[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2025, 33(2):644-653
- [18] LI C J, RAN M, SONG L Y, et al. Temperature effects on cropland soil particulate and mineral-associated organic carbon are governed by agricultural land-use types [J]. *Geoderma*, 2024, 448:116942
- [19] YANG G, PAN H W, LEI H J, et al. Dissolved organic matter evolution and straw decomposition rate characterization under different water and fertilizer conditions based on three-dimensional fluorescence spectrum and deep learning[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 344:118537
- [20] ZHOU P, SONG G H, PAN G X, et al. Role of chemical protection by binding to oxyhydrates in SOC sequestration in three typical paddy soils under long-term agro-ecosystem experiments from South China[J]. *Geoderma*, 2009, 153(1/2):52-60
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第三版. 北京:中国农业出版社, 2000:30-34
- Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000:30-34
- [22] 关伟涛, 郑志荣, 刁兆岩, 等. 不同干扰方式下温性草甸草原土壤碳氮磷化学计量特征及其储量研究[J]. *草地学报*, 2022, 30(11):2959-2966
- GUAN W T, ZHENG Z R, DIAO Z Y, et al. Stoichiometric characteristics and their storage of soil carbon, nitrogen and phosphorus in the temperate meadow steppe under different disturbances[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(11):2959-2966
- [23] 中华人民共和国农业部. 中性、石灰性土壤铵态氮、有效磷、速效钾的测定 联合浸提-比色法: NY/T 1848—2010[S]. 北京:中国农业出版社, 2010:1-5
- Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Method for determination of ammonium nitrogen, available phosphorus and rapidly-available potassium in neutrality or calcareous soil-Universal extract-colorimetric method: NY/T 1848-2010 (In Chinese). Beijing: Ministry of Agriculture of the People's Republic of China, 2010:1-5
- [24] 中华人民共和国农业部. 土壤检测 第2部分: 土壤pH的测定: NY/T 1121. 2—2006[S]. 北京:中国农业出版社, 2006:1-2
- Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Soil testing-Part 2: Method for determination of soil pH: NY/T 1121. 2-2006 (In Chinese). Beijing: Ministry of Agriculture of the People's Republic of China, 2006:1-2
- [25] 姜成栋, 李国荣, 童生春, 等. 黄河源高寒草甸鼠丘斑块土壤特性对植被多样性的影响[J]. *草地学报*, 2025, 33(8):2652-2665
- JIANG C D, LI G R, TONG S C, et al. Effects of soil characteristics on vegetation diversity in alpine meadow rat mound patches in the Yellow River source [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2025, 33(8):2652-2665
- [26] ALBALASMEH A A, HAMDAN E H, GHARAIBEH M A, et al. Improving aggregate stability and hydraulic properties of Sandy loam soil by applying polyacrylamide polymer[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 206:104821
- [27] KEBEDE B, TSUNEKAWA A, HAREGEWEYN N, et al. Effect of Polyacrylamide integrated with other soil amendments on runoff and soil loss: case study from northwest Ethiopia[J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2022, 10(3):487-496
- [28] HOLLIMAN P J, CLARK J A, WILLIAMSON J C, et al. Model and field studies of the degradation of cross-linked polyacrylamide gels used during the revegetation of slate waste[J]. *Science of the Total Environment*, 2005, 336(1/2/3):13-24
- [29] CHENG Y C, WANG C P, LIU K Y, et al. Towards sustainable management of polyacrylamide in soil-water environment: occurrence, degradation, and risk[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 926:171587
- [30] XIONG B Y, LOSS R D, SHIELDS D, et al. Polyacrylamide degradation and its implications in environmental systems[J]. *NPJ Clean Water*, 2018(1):17
- [31] KACZMAREK H, OLDAK D, MALANOWSKI P, et al. Effect of short wavelength UV-irradiation on ageing of polypropylene/cellulose compositions [J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2005, 88(2):189-198
- [32] ZHANG Y, E S Z, WANG Y N, et al. Long-term manure application enhances the stability of aggregates and aggregate-associated carbon by regulating soil physicochemical characteristics[J]. *Catena*, 2021, 203:105342
- [33] SHABTAI I A, WILHELM R C, SCHWEIZER S A, et al. Calcium promotes persistent soil organic matter by altering microbial transformation of plant litter[J]. *Nature Communications*, 2023, 14:6609
- [34] MULUALEM T, ADGO E, MESHESHA D T, et al. Dual benefits of polyacrylamide and other soil amendments: mitigation of soil nutrient depletion and improvement of use-efficiency in midland agro-ecology, Ethiopia [J]. *Land Degradation & Development*, 2022, 33(16):2998-3009
- [35] 张杰雪, 王占青, 全小龙, 等. 高寒地区人工草地土壤微生物群落对不同种植方式和年限的响应[J]. *草地学报*, 2021, 29(2):270-280
- ZHANG J X, WANG Z Q, QUAN X L, et al. Responses of soil microbial communities of sown perennial grassland in alpine region to different sowing ways and growth years [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(2):270-280
- [36] LIANG X L, WEN X L, YANG H M, et al. Incorporating microbial inoculants to reduce nitrogen loss during sludge composting by suppressing denitrification and promoting ammonia assimilation[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 915:170000
- [37] FANG D X, ZHAO G, XU X Y, et al. Microbial community structures and functions of wastewater treatment systems in plateau and cold regions[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 249:684-693
- [38] JIN J Y, ZHAO D Y, WANG J P, et al. Fungal community determines soil multifunctionality during vegetation restoration in metallic tailing reservoir[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2024, 478:135438
- [39] 高红, 王小红, 吴东梅, 等. 碳氮有效性对亚热带人工林土壤微生物呼吸及其代谢响应的影响[J]. *应用生态学报*, 2024, 35(8):2025-2034
- GAO H, WANG X H, WU D M, et al. Effects of carbon and nitrogen availability on soil microbial respiration and its metabolic response in subtropical plantations[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35(8):2025-2034
- [40] HEJAZI MAHABADI S, SHORAFI M, MOTESHAREZA-DEH B, et al. Mitigating soil compaction and enhancing corn (*Zea mays* L.) growth through biological and non-biological amendments[J]. *BMC Plant Biology*, 2025, 25(1):74