https://doi.org/10.3799/dqkx.2026.152

新型保水材料联合黑曲霉对新疆铁尾矿渣的改良效果

李 琪[1,2,3],胡成博[1,2],唐佳豪[1,2],杨镒霞[2],段一然[1],沈逸凡[2],苟林平[1,2],王双成[4],李 强[4],裴向军[1,2,3*]

1. 成都理工大学生态环境学院,四川成都 610059
2. 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
3. 天府永兴实验室,四川成都 610213
4. 新疆维吾尔自治区地质局水文环境地质调查中心,新疆乌鲁木齐 830000

摘 要: 为探究黑曲霉孢子粉与新型保水材料SJP对铁尾矿渣的协同改良效应,以阿吾拉勒铁矿带铁尾矿为研究对象,设置室内盆栽实验,测定植物生长指标、改良后土壤理化性质、土壤酶活性及土壤微生物群落特征,并采用综合评价方法筛选最优改良配比.结果表明,改良处理显著促进紫花苜蓿生长,最优处理组较相应对照组提高166.67%;尾矿含水率、养分含量和酶活性分别提高203.61%、87.92%~1 935.67%和186.74%~1 532.24%.改良处理还显著改变了根际微生物群落结构,功能预测结果显示糖酵解支路和氨基酸生物合成等基础代谢途径显著富集.综合评价确定最优改良方案为:铁尾矿渣与营养土质量比1∶0、SJP浓度1%、黑曲霉孢子粉添加量2.0 g.本研究可为新疆铁尾矿生态修复提供技术支撑.

关键词: 铁尾矿改良;生态修复;固土保水材料SJP;黑曲霉;土壤微生物;可持续发展.

中图分类号: P642.5 **文章编号:** 1000-2383(2026)09-3445-12 **收稿日期:** 2026-01-28

Improvement of Xinjiang Iron Tailings Using a Novel Water-Retaining Material Combined with *Aspergillus niger*

Li Qi[1,2,3], Hu Chengbo[1,2], Tang Jiahao[1,2], Yang Yixia[2], Duan Yiran[1], Shen Yifan[2], Gou Linping[1,2], Wang Shuangcheng[4], Li Qiang[4], Pei Xiangjun[1,2,3*]

1. *College of Ecology and Environment, Chengdu University of Technology, Chengdu* 610059, *China*
2. *State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu* 610059, *China*
3. *Tianfu Yongxing Laboratory, Chengdu* 610213, *China*
4. *Xinjiang Uygur Autonomous Region Hydrogeological and Environmental Investigation Center, Urumqi* 830000, *China*

Abstract: This study investigated the synergistic effects of *Aspergillus niger* spore powder and a novel water-retaining material

基金项目: 国家重点研发计划项目(No.2023YFC3007103);新疆维吾尔自治区重点研发计划项目(No.2023B03011-3);荒漠区废弃矿山生态系统自然恢复关键技术研究与应用示范项目(No.2024ZRBSHZ094);西藏自治区重点研发计划项目(No.XZ202401ZY0091).

作者简介: 李琪(1993-),女,副教授,博士生导师,从事环境微生物学及生态修复技术研究.ORCID:0000-0002-7103-1969. E-mail:liqi21@cdut.edu.cn

* **通讯作者:** 裴向军,ORCID:0009-0007-6529-2605. E-mail:pxj@cdut.edu.cn

引用格式: 李琪,胡成博,唐佳豪,杨镒霞,段一然,沈逸凡,苟林平,王双成,李强,裴向军,2026.新型保水材料联合黑曲霉对新疆铁尾矿渣的改良效果.地球科学,51(9):3445-3456.

Citation: Li Qi, Hu Chengbo, Tang Jiahao, Yang Yixia, Duan Yiran, Shen Yifan, Gou Linping, Wang Shuangcheng, Li Qiang, Pei Xiangjun, 2026. Improvement of Xinjiang Iron Tailings Using a Novel Water-Retaining Material Combined with *Aspergillus niger*. *Earth Science*, 51(9): 3445-3456.

(SJP) on iron tailings from the Awulale iron ore belt. An indoor pot experiment was conducted to determine plant growth, tailings physicochemical properties, soil enzyme activities, and rhizosphere microbial community characteristics, and a comprehensive evaluation was performed to identify the optimal amendment combination. The treatments significantly promoted alfalfa growth, with plant height increasing by 166.67% under the optimal treatment relative to the corresponding control. Tailings moisture content, nutrient concentrations, and enzyme activities increased by 203.61%, 87.92%−1 935.67%, and 186.74%−1 532.24%, respectively. The treatments also altered the rhizosphere microbial community structure, while functional prediction indicated significant enrichment of fundamental metabolic pathways, including glycolysis and amino acid biosynthesis. The optimal combination comprised an iron tailings-to-nutrient soil mass ratio of 1∶0, an SJP concentration of 1%, and 2.0 g of A. niger spore powder. These findings provide a technical reference for the ecological restoration of iron tailings in Xinjiang.

Key words: iron tailings improvement; ecological restoration; soil stabilization and water retention materials SJP; *Aspergillus niger*; soil microorganisms; sustainable development.

0 引言

矿产资源是社会经济发展的重要物质基础.新疆矿产资源丰富,其中西天山阿吾拉勒铁矿带的铁矿储量和开采规模较大(Mustafa *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2024).铁尾矿是铁矿石选矿过程中产生的固体废弃物(Chen *et al.*, 2023; Odumade *et al.*, 2026),主要由铁氧化物和硅酸盐矿物组成,大量堆存会对区域生态环境造成显著影响(Chen *et al.*, 2023; Ódri *et al.*, 2025),可能加剧土壤沙化和盐碱化(Weng *et al.*, 2022);同时,尾矿通常存在养分匮乏、粒径组成不均、结构稳定性差和持水能力低等问题,不利于区域生态系统自然恢复,并可能影响当地农牧业生产(Li *et al.*, 2025).新疆典型的干旱、半干旱气候进一步增加了矿区植被恢复的难度(Hu and Sun, 2016; Wu *et al.*, 2019).目前,新疆寒旱区露天矿生态修复仍处于探索阶段,现有生物修复措施常面临植物成活率低和修复效果持续性不足等问题.因此,研发高效、环境友好且经济可行的尾矿基质改良技术,对促进尾矿资源化利用和矿业可持续发展具有重要意义(Peng *et al.*, 2024).

铁尾矿虽具有部分土壤属性,但其结构松散、养分贫瘠,持水和保肥能力明显低于土壤(Melo *et al.*, 2024).此外,尾矿颗粒形态不规则,氮、磷和钾等植物必需养分不足,从而限制植物生长(Hu *et al.*, 2024).现有尾矿修复技术主要包括物理修复、化学稳定和生物修复,并逐渐发展为多种技术协同应用(Li *et al.*, 2025; Odumade *et al.*, 2026).在矿渣改良的修复实践中,有机肥、作物秸秆、黄腐酸与复合功能菌剂等外源材料可补充基质养分,为矿渣资源化利用和植被重建提供条件;胶结材料则可用于改善松散尾矿的工程力学性质(Guedes *et al.*, 2024).已有研究表明,SJP(双聚)改性有机材料可增强土壤颗粒凝集作用、改善孔隙结构、提高持水能力和抗侵蚀性能,并促进植物生长(鲜丽菊, 2016;朱利君等, 2020).黑曲霉(*Aspergillus niger*)是一种常见丝状真菌,在有机质分解和酶制剂生产方面具有独特优势(Baker, 2006),并可通过活化养分和调节微生物环境促进植物生长(Medina *et al.*, 2006).然而,SJP与黑曲霉联合施用对不同类型铁尾矿的改良效应尚缺乏系统研究.

本研究以新疆典型矿区的铁尾矿为研究对象,设置铁尾矿与营养土质量比、尾矿类型、SJP浓度和黑曲霉孢子粉添加量4个变量,分析不同处理对紫花苜蓿生长、尾矿理化性质、土壤酶活性和根际微生物群落的影响,并筛选最优尾矿改良方案,为新疆铁尾矿生态修复提供理论依据和技术参考.

1 材料与方法

1.1 实验材料

铁尾矿采集于新疆维吾尔自治区西天山阿吾拉勒铁矿带,该矿带位于西天山伊犁地块的东南角,处于中亚造山带西南缘的北天山构造带中,区域地质构造复杂,发育多条断裂系统(Wang *et al.*, 2024).紫花苜蓿(*Medicago sativa L.*)种子购买自宿迁孤狼园艺有限公司,秸秆购自阳春市盈家农牧有限公司,有机肥、营养土购自潍坊蓝宝智能科技有限公司,黄腐酸购自上海麦克林生化科技股份有限公司,黑曲霉孢子粉购自济宁玉园生物科技有限公司(活菌数1.5×10^{10} CFU/g),SJP来自学院实验室前期研究.

1.2 实验设计与方法

1.2.1 混合基质制备 将铁尾矿和营养土充分风干,过2 mm筛,并按实验设计的质量比混

合,每份基质总质量为 1 000 g;随后向每份基质中加入过 2 mm 筛的有机肥 30 g、烘干秸秆粉 30 g、黄腐酸 10 g 和混合菌剂 10 g(由枯草芽孢杆菌、解淀粉芽孢杆菌、胶冻样芽孢杆菌组成),并按实验设计加入 SJP 和黑曲霉孢子粉.

1.2.2　种子处理与盆栽实验　将紫花苜蓿种子置于 10% H_2O_2 溶液中浸泡 10 min 进行表面消毒,以去离子水充分冲洗后浸泡 24 h.随后将种子播种于直径 15.5 cm、高 10.5 cm 的花盆中,每盆 25 粒.播种后覆盖薄层基质,并加入去离子水至盆底有水渗出,使基质充分湿润.

盆栽实验在成都理工大学香樟温室大棚中进行,温度为 20～30 ℃,湿度为 50%～80%.以铁尾矿与营养土质量比(1∶0、9∶1、7∶3)、铁尾矿类型(尾砂、渣土、尾渣)、SJP 浓度(0%、0.8%、1%)及黑曲霉孢子粉添加量(1.5 g、2.0 g、2.5 g)为 4 个因素,每个因素设置 3 个水平,采用 $L_9(3^4)$ 正交设计(表 1),并设置 3 个对照组(CK1～CK3,表 2).实验期间每 3 d 向每盆浇灌 100 mL 去离子水.培养 60 d 后测定植株株高和根长,并采集环刀样.轻轻抖落根系周围的土壤作为根周土,用于测定尾矿理化性质;采用无菌刷收集紧密附着于根表的土壤作为根际土,用于测定土壤酶活性和分析微生物群落.用于理化性质测定的样品经风干、研磨并过 2 mm 筛;用于酶活性和微生物分析的样品按相应测定要求保存.

1.3　指标测定

测定指标包括植物表征、改良后土壤理化性质、土壤酶活性及土壤微生物群落特征.

1.3.1　土壤物理性质　采用环刀法测定含水率:去除表层结皮后,将体积为 60 cm^3 的环刀垂直压入基质,取出并削平环刀两端,称定鲜质量;样品于 60 ℃烘干至恒质量后称定干质量,并据此计算含水率.依据 NY/T 1121.2－2006 测定 pH 和电导率:称取 10.0 g 样品置于 50 mL 离心管中,加入 25 mL 蒸馏水,充分混匀并振荡 1～2 min,室温静置 30 min 后,将 pH 计或电导率仪的复合电极插入上清液中读取数值.每次测定后使用蒸馏水清洗电极,并用滤纸吸干表面水分.

表 1　正交实验

Table 1　Orthogonal experiment

铁尾矿与营养土质量比	铁尾矿类型	SJP 浓度	孢子粉质量
1∶0	尾砂	0%	1.5 g
9∶1	渣土	0.8%	2.0 g
7∶3	尾渣	1%	2.5 g

表 2　实验分组

Table 2　Experimental grouping

分组	铁尾矿与营养土质量比	铁尾矿类型	SJP 浓度	孢子粉添加量
CK1	1∶0	尾砂	/	/
CK2	1∶0	渣土	/	/
CK3	1∶0	尾渣	/	/
A1B1	1∶0	尾砂	0%	1.5 g
A1B2	1∶0	渣土	1%	2.0 g
A1B3	1∶0	尾渣	0.8%	2.5 g
A2B1	9∶1	尾砂	1%	2.5 g
A2B2	9∶1	渣土	0.8%	1.5 g
A2B3	9∶1	尾渣	0%	2.0 g
A3B1	7∶3	尾砂	0.8%	2.0 g
A3B2	7∶3	渣土	0%	2.5 g
A3B3	7∶3	尾渣	1%	1.5 g

1.3.2　土壤化学性质　采用硫酸消煮-钼锑抗法测定全磷(土壤农化分析手册第十章),采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗分光光度法测定有效磷(HJ 704－2014),采用火焰原子分光光度法测定速效钾(NY/T 889－2004),采用紫外分光光度法测定硝态氮(GB/T 32737－2016),采用水杨酸钠-分光光度法测定铵态氮(HJ 634－2012),采用硫酸消煮-水杨酸钠法测定全氮(土壤农化分析手册第九章),采用重铬酸钾氧化-分光光度法测定有机碳(HJ615－2011).

1.3.3　土壤酶活性　土壤过氧化氢酶、脲酶、碱性蛋白酶、蔗糖酶活性均采用苏州科铭生物科技有限公司试剂盒,按照产品说明书测定.

1.3.4　植物生长指标　采用五点取样法随机选择 10～15 株紫花苜蓿,测量株高并记录平均值;完整取出植株后测定根长并计算平均值.

1.3.5　土壤微生物多样性和群落结构　称取 5.0 g 土壤,置于含干冰的泡沫箱中迅速运至实验室,并于－80 ℃保存.分析前将样品于 4 ℃解冻过夜,过 2 mm 筛并剔除可见的动物、种子、根系及其他植物残体.在扩增步骤中,细菌 16S rRNA 基因使用前引物 ACTCCTACGGGAGGCAGCA 与后引物 GCACTACHVGGGTWTCTAAT;真菌 ITS 区域则采用前引物 GGAAGTAAAAGTCGTAACAAGG 与后引物 GCTGCGTTCTTCATCGATGC.PCR 产物由上海美吉生物医药科技有限公司采用 Illumina MiSeq 平台进行高通量测序.测序数据在基因云平台(https://v.majorbio.com)进行分析.

1.4 数据处理与分析

采用 Microsoft Excel 2019 整理数据，使用 IBM SPSS Statistics 24 进行统计分析. 不同处理间差异采用单因素方差分析（ANOVA）和 Duncan 多重比较检验，显著性水平设为 $p<0.05$. 采用 Origin 2022 绘制植物生长、尾矿理化性质、土壤酶活等指标图. 对尾矿理化性质及其他环境因子进行标准化处理，并使用 SPSSAU 基于熵值法计算指标权重和综合得分，以筛选最优处理方案.

2 结果讨论

2.1 不同改良处理对植物生长的影响

株高和根长是表征植物生长状况及环境适应性的重要指标（Scaife, 1994; Miao *et al.*, 2024）. 如图 1a 所示，尾砂、渣土和尾渣处理组中株高最高的分别为 A3B1、A1B2 和 A3B3，较相应对照组分别提高 69.47%、166.67% 和 129.41%；其中，A1B2 处理组的株高显著高于其他处理组（$p<0.05$）. 如图 1b 所示，各改良处理组的根长均显著高于相应对照组（$p<0.05$）. 尾砂、渣土和尾渣处理组中根长最高的分别为 A2B1、A1B2 和 A1B3，较相应对照组分别提高 281.19%、253.72% 和 132.35%. 综合株高和根长结果，A1B2 处理（铁尾矿与营养土质量比 1∶0、SJP 浓度 1%、黑曲霉孢子粉添加量 2.0 g）的促进效果最显著. 该结果可能与 SJP 改善尾矿结构和根系生长环境有关（朱利君等, 2020; de Castro Borges *et al.*, 2023）；黑曲霉产生的代谢物可能调节尾矿微环境并缓解重金属胁迫（Medina *et al.*, 2006）. 二者协同作用可能改善了纯铁尾矿基质条件，从而促进紫花苜蓿生长.

2.2 不同改良处理对尾矿理化性质的影响

含水率是反映基质水分状况的重要指标（Liu *et al.*, 2020），可直接影响植物的蒸腾作用和水分利用效率（Yi and Yano, 2023）. 如图 2a 所示，各类铁尾矿的改良处理均显著提高了含水率（$p<0.05$），表明 SJP 与黑曲霉联合施用能够增强尾矿基质的持水能力.

尾矿养分状况可直接或间接影响植物养分吸收和生长发育（Lei *et al.*, 2024; Zhang *et al.*, 2024）. 如图 2b 所示，A2B1、A1B2 和 A1B3 处理组的全氮含量均显著高于对照组（$p<0.05$），其中 A2B1 处理组为 CK1 的 20.36 倍. 如图 2c 和 2d 所示，A3B1 处理组的硝态氮含量较 CK1 提高 19.85 倍，A1B2 处理组的铵态氮含量较 CK2 提高 2.78 倍，且二者均显著高于其他处理组（$p<0.05$）. 如图 2f 所示，A3B1 和 A3B2 处理组的全磷含量显著提高；如图 2g 所示，多数改良处理组的有效磷含量显著提高组（$p<0.05$），其中 A3B3 处理组最高，较 CK3 提升 2.67 倍. 如图 2h 所示，除 A1B3 外，其余改良处理组的速效钾含量均显著高于相应对照组（$p<0.05$），其中 A3B2 处理组最高，较 CK2 提高了 1.58 倍.

综合评价结果显示，A1B2 处理（铁尾矿与营养土质量比 1∶0、SJP 浓度 1%、黑曲霉孢子粉添加量 2.0 g）的综合得分最高. SJP 可能通过改善基质结构和养分有效性促进养分循环（Jin *et al.*, 2024; 秦欣科, 2025）. 黑曲霉可分泌多种有机酸并参与养分转化（Cairns *et al.*, 2018），其产生的蛋白酶和核酸酶等胞外酶还可降解复杂有机氮化合物，促进铵态氮释放，从而提高氮素有效性（Londoño-Hernández *et al.*, 2024）. 因此，1% SJP 与 2.0 g 黑曲霉孢子粉联合施用可

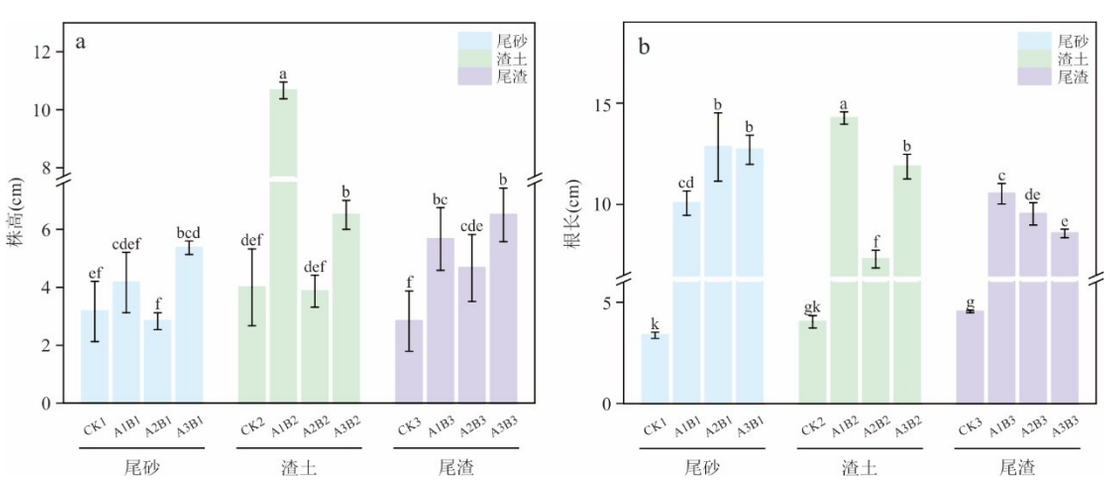


图 1 不同处理对紫花苜蓿生长的影响

Fig.1 Effects of different treatments on the growth of alfalfa (*Medicago sativa L.*)

不同小写字母代表处理间差异显著（$p<0.05$）. 图中数据以平均值±标准差表示

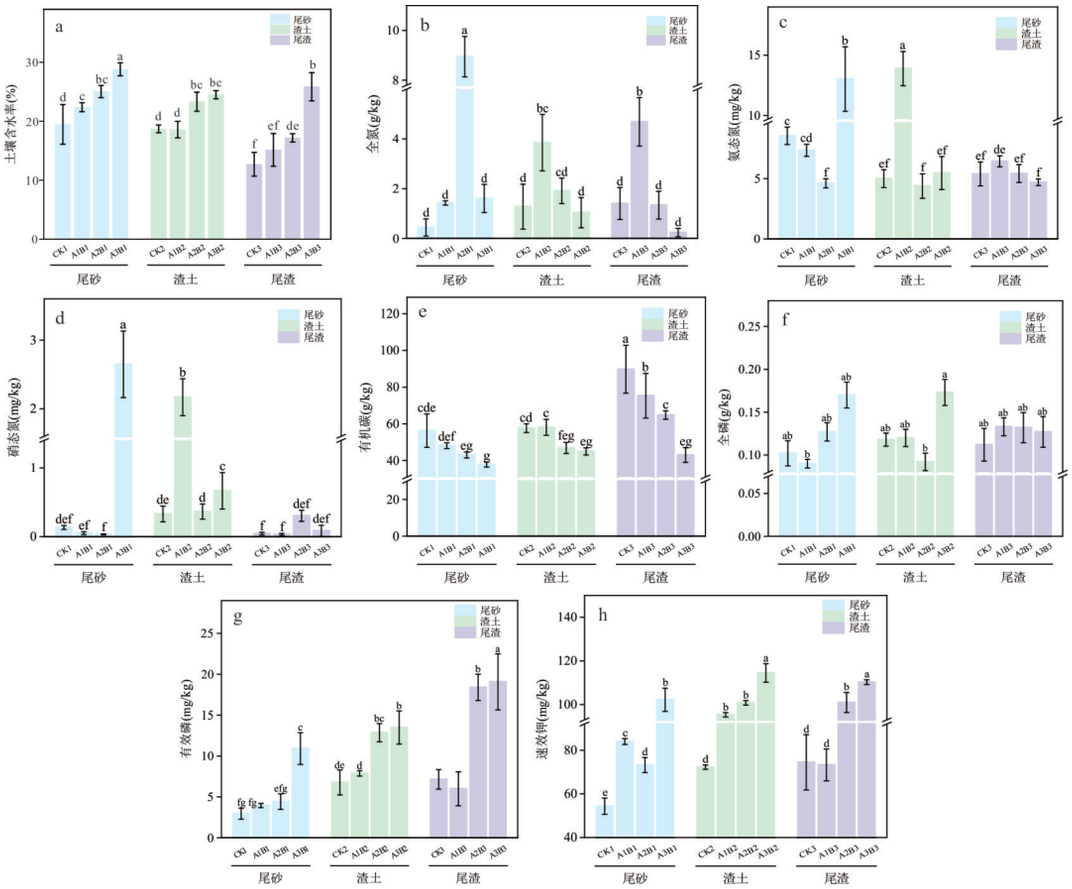


图 2　不同处理对尾矿理化性质的影响

Fig.2　Effects of different treatments on the physicochemical properties of tailings

不同小写字母代表处理间差异显著($p<0.05$).图中数据以平均值±标准差表示

能形成了较适宜的微环境,并协同改善尾矿养分状况.

2.3　不同改良处理对土壤酶活性的影响

土壤酶参与碳、氮和磷等元素的生物地球化学循环,是反映土壤生物活性的重要指标.如图 3a 所示,A3B1 和 A3B3 处理组的过氧化氢酶活性均显著高于响应对照组($p<0.05$),其中 A3B3 处理组为 CK3 的 1.21 倍.如图 3b 所示,多数改良处理组的脲酶活性显著提高($p<0.05$),其中 A2B1、A2B2、A1B3 处理组的增幅较大.如图 3c 所示,A1B1 和 A2B1 处理组的碱性蛋白酶活性显著高于 CK1($p<0.05$).如图 3d 所示,渣土与尾渣改良处理组的蔗糖酶活性总体高于相应对照组.黑曲霉可分泌淀粉酶和蛋白酶等多种胞外酶(Bellaouchi *et al.*, 2021; Ekedegba *et al.*, 2022),其定殖和与 SJP 的协同作用可能增强尾矿中的生物代谢活动,进而促进养分循环和植物生长(张华东 *et al.*, 2024).

2.4　不同改良处理对土壤微生物群落的影响

土壤微生物在植物生长、养分循环和生态系统稳定性维持中发挥重要作用(Guo *et al.*, 2024; Xu *et al.*, 2024),改良材料的施用可显著改变土壤微生物群落(Song *et al.*, 2022).如图 4 所示,各处理组的微生物群落组成存在差异,但优势类群总体相似.优势细菌门主要包括假单胞菌门(Pseudomonadota)、芽孢杆菌门(Bacillota)、拟杆菌门(Bacteroidota);真菌优势菌门主要包括子囊菌门(Ascomycota)和担子菌门(Basidiomycota).上述类群可通过不同代谢过程参与养分循环并影响植物生长(Compant *et al.*, 2025).SJP 和黑曲霉孢子粉施用后,土壤微生物群落可能通过同化或者异化过程响应环境变化并调节养分转化(Hu *et al.*, 2025).例如,假单胞菌门和芽孢杆菌门中的部分微生物可分泌有机酸和酶,促进难溶性磷、钾化合物的活化(Sun *et al.*, 2017);子囊菌门和担子菌门的菌丝以及细菌胞外多糖有助于形成稳定团聚体,改善孔隙结构、持水能力和通气性(Manici *et al.*, 2025).

Alpha 多样性可用于表征微生物群落的物种

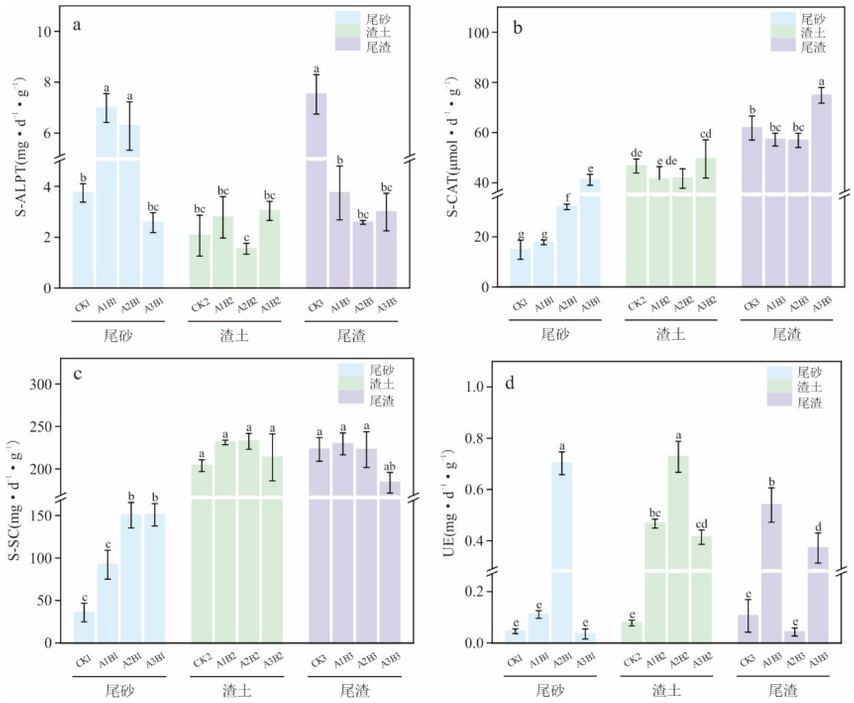


图 3 不同处理对尾矿酶活性的影响

Fig.3 Effects of different treatments on enzyme activities in tailings

不同小写字母代表处理间差异显著($p<0.05$).图中数据以平均值±标准差表示

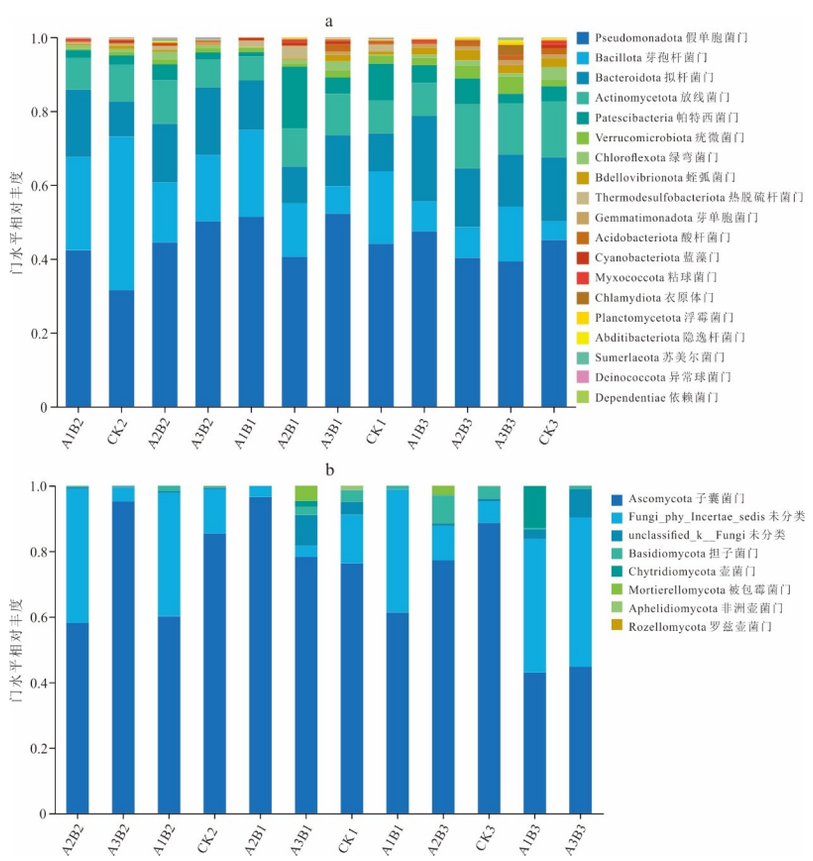


图 4 微生物群落组成分析

Fig.4 Analysis of microbial community composition

a.门水平上的细菌物种分布堆叠图;b.门水平上的真菌物种分布堆叠图

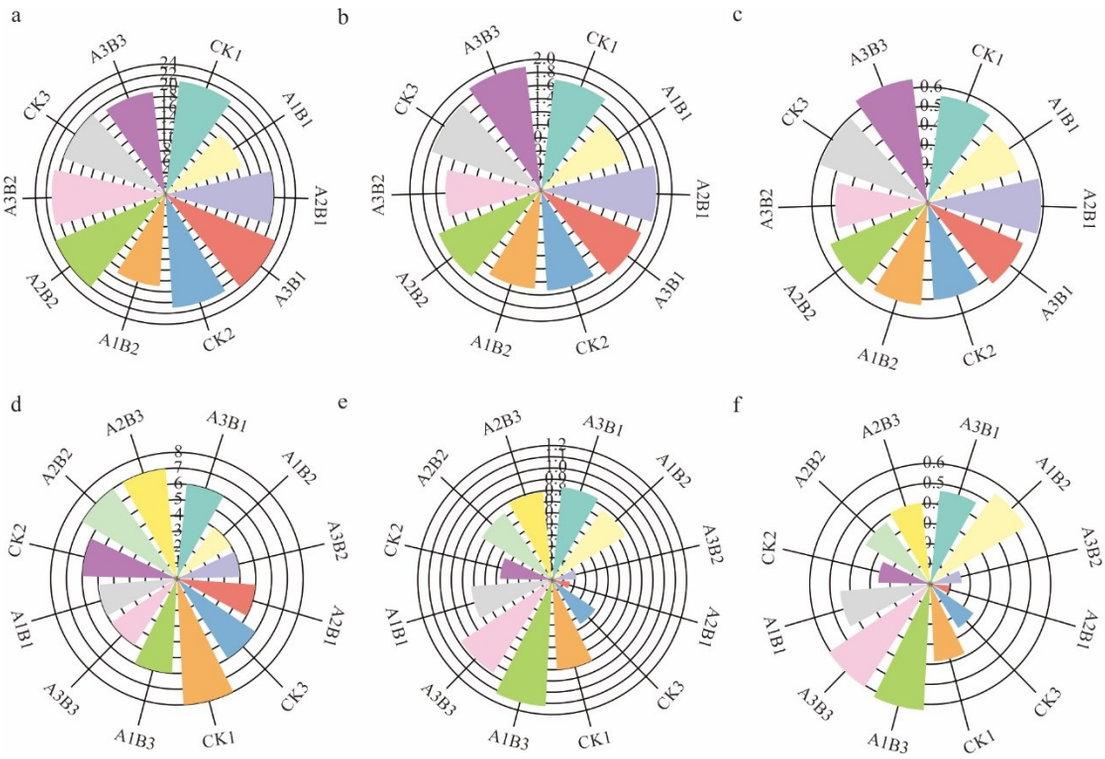


图 5　微生物 Alpha 多样性分析

Fig.5　Analysis of microbial Alpha diversity

a. 细菌 Chao1 指数;b. 细菌 Shannon 指数;c. 细菌 Pielou_e 指数;d. 真菌 Chao1 指数;e. 真菌 Shannon 指数;f. 真菌 Pielou_e 指数

丰富度、多样性和均匀度(Tang *et al.*, 2024). 如图 5a～5c 所示,各改良处理组的细菌丰富度较相应对照组均有不同程度降低,而 A2 系列处理组和 A3B3 处理组的细菌多样性有所提高. 如图 5d～5f 所示,A2B2 和 A2B3 处理组的真菌丰富度高于相应对照组,多数改良处理组的真菌多样性有所提高. 上述结果表明,不同改良组合对细菌和真菌 Alpha 多样性的影响并不一致,可能与优势类群对改良后基质环境的差异化响应有关(Compant *et al.*, 2025).

PICRUSt2_MetaCyc 功能预测常被用于评估不同改良处理下微生物群落的潜在代谢功能. 如图 6a 所示,细菌预测功能主要涉及氨基酸和辅酶生物合成,其中 L-赖氨酸和 UMP 生物合成相关途径的相对丰度较高. 如图 6b 所示,真菌预测功能主要涉及氨酰-tRNA 合成、蛋白质合成、糖酵解和氨基酸生物合成等基础代谢过程. 氨基酸代谢相关途径的变化可能影响根际氮循环(Czaban *et al.*, 2018);糖酵解和三羧酸循环相关途径的富集则可能增强碳代谢,并通过磷酸烯醇式丙酮酸等中间产物连接碳、氮代谢(Shang *et al.*, 2023). 此外,黑曲霉分泌的草酸等有机酸可能促进矿物风化并影响金属形态转化;部分芽孢杆菌可通过产生吲哚乙酸(IAA)和 ACC 脱氨酶等物质促进植物生长(Vasques *et al.*, 2024).

2.5　环境因子及其综合评价

对不同处理下尾矿环境因子(土壤酶活和养分指标)及其相关性进行分析. 如图 7a 所示,TN 与 TP 呈强正相关,TN 与 S-CAT 和 UE 的关联显著($p<0.05$),表明氮、磷养分与土壤酶活性之间存在耦合关系. AK 与 TOC 呈负相关,提示速效钾与有机碳之间可能存在相互作用. 如图 7b 所示,AP 与 S-ALPT 呈现显著负相关($p<0.05$),可能反映有效磷对相关酶活性的反馈调节.

采用熵值法计算各处理环境因子的权重和综合得分,结果见表 3. 在植物生长相关正向指标中,A1B2 处理(铁尾矿与营养土质量比 1∶0、SJP 浓度 1%、黑曲霉孢子粉 2.0 g)的综合得分最高,与植物生长结果一致. 相关性分析表明,改良处理改变了环境因子之间的关联,但其对养分循环效率和生物功能稳定性的影响机制仍需进一步验证.

3　结论

本研究通过室内盆栽实验,分析了铁尾矿与营

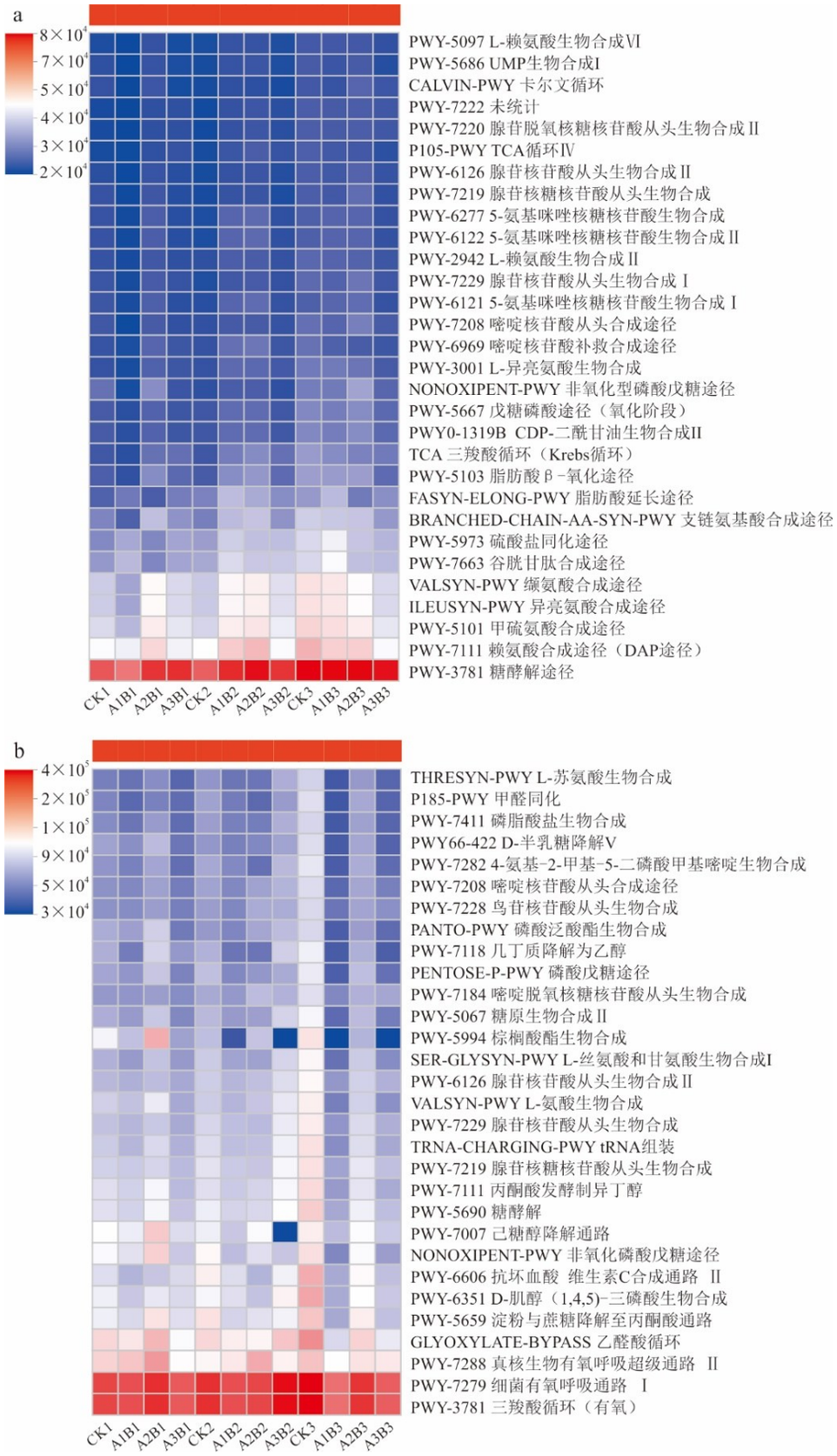


图 6 基于MetaCyc数据库的不同处理下的差异代谢途径

Fig.6 Differential metabolic pathways under different treatments based on the MetaCyc database

a. 不同处理下细菌差异代谢途径热图；b. 不同处理下真菌差异代谢途径热图．红色表示预测相对丰度较高，蓝色表示预测相对丰度较低，颜色深浅与相对丰度变化程度一致

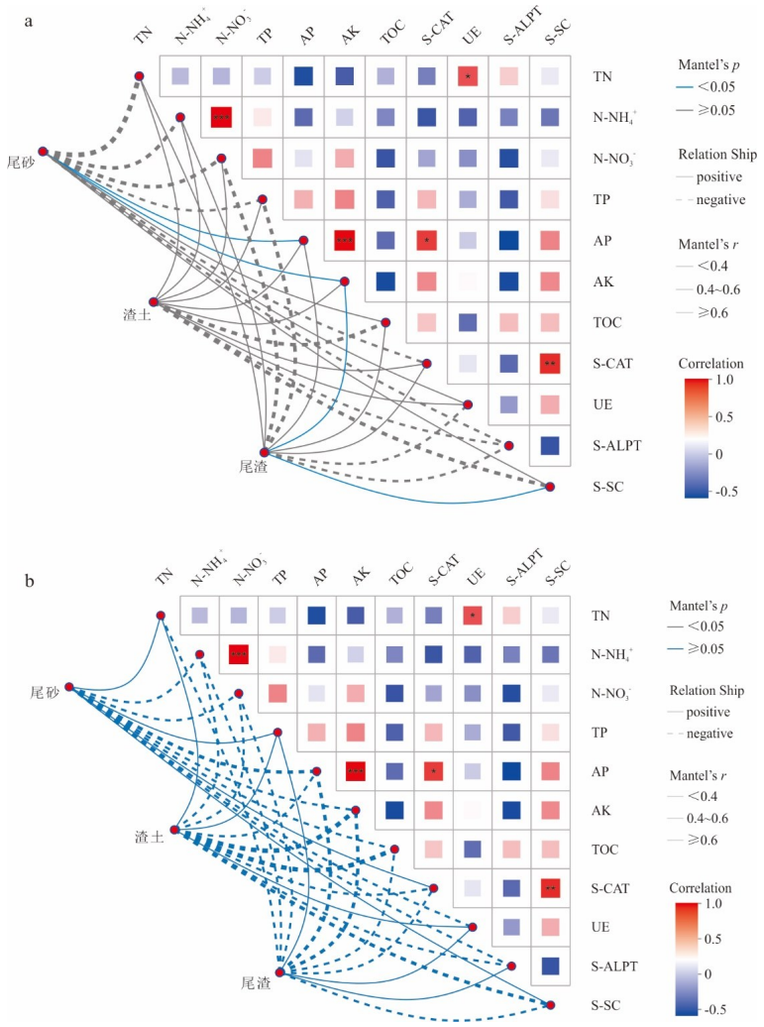


图 7　微生物群落与土壤环境因子的相关性

Fig.7　Correlation between microbial communities and soil environmental factors

a.细菌群落与土壤环境因子的相关性;b.真菌群落与土壤环境因子的相关性.$N\text{-}NO^{3-}$:硝态氮;$N\text{-}NH^{4+}$:铵态氮;AP:有效磷;TOC:有机碳;TN:全氮;TP:全磷;AK:速效钾;pH:土壤酸碱度;S-UE:土壤脲酶活性;S-ALPT:土壤碱性蛋白酶活性;S-SC:土壤蔗糖酶活性;S-CAT:土壤过氧化氢酶活性.星号代表显著性:*表示 $0.01<p\leqslant0.05$,**表示 $0.001<p\leqslant0.01$,***表示 $p\leqslant0.001$

表 3　土壤环境因子变化综合得分

Table 3　Comprehensive scores of soil environmental factors

不同处理	综合得分	排名
CK1	0.137 836 247	12
CK2	0.194 170 449	11
CK3	0.311 870 260	6
A1B1	0.194 428 595	10
A1B2	0.604 385 644	1
A1B3	0.383 302 433	5
A2B1	0.386 293 789	3
A2B2	0.310 485 374	7
A2B3	0.305 804 640	8
A3B1	0.542 829 368	2
A3B2	0.383 536 520	4
A3B3	0.304 658 778	9

养土质量比、尾矿类型、SJP浓度和黑曲霉孢子粉添加量对紫花苜蓿生长及尾矿环境质量的影响.结果表明:(1)改良处理总体促进了紫花苜蓿生长,最优处理组的株高较相应对照组提高 166.67%;(2)改良处理提高了尾矿含水率和养分含量,并增强了过氧化氢酶、脲酶和碱性蛋白酶等酶活性,同时改变了根际微生物群落结构及其潜在代谢功能;(3)A1B2 处理(铁尾矿与营养土质量比 1∶0、SJP浓度 1%、黑曲霉孢子粉 2.0 g)的植物生长表现和环境因子综合得分最高,可作为本实验条件下的优选组合.研究结果表明,SJP与黑曲霉联合施用具有改善铁尾矿基质和促进植物生长的潜力,对实现新疆乃至西北干旱矿区生态修复与矿区土地资源化发展具有重要参考价值.

References

Baker, S. E., 2006. *Aspergillus niger* Genomics: Past, Present and into the Future. *Medical Mycology*, 44(Sup1.): 17—21. https://doi.org/10.1080/13693780600921037

Bellaouchi, R., Abouloifa, H., Rokni, Y., et al., 2021. Characterization and Optimization of Extracellular Enzymes Production by *Aspergillus niger* Strains Isolated from Date By-Products. *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology*, 19(1): 50. https://doi.org/10.1186/s43141-021-00145-y

Cairns, T. C., Nai, C., Meyer, V., 2018. How a Fungus Shapes Biotechnology: 100 Years of *Aspergillus niger* Research. *Fungal Biology and Biotechnology*, 5(1): 13. https://doi.org/10.1186/s40694-018-0054-5

Chen, W., Yin, S. H., Chen, X., et al., 2023. Study on Comprehensive Utilization of Tailings by Using Bioleaching and Microbial-Cementation. *Case Studies in Construction Materials*, 18: e02190. https://doi. org/10.1016/j.cscm.2023.e02190

Compant, S., Cassan, F., Kostić, T., et al., 2025. Harnessing the Plant Microbiome for Sustainable Crop Production. *Nature Reviews Microbiology*, 23(1): 9—23. https://doi.org/10.1038/s41579-024-01079-1

Czaban, W., Rasmussen, J., Laursen, B. B., et al., 2018. Multiple Effects of Secondary Metabolites on Amino Acid Cycling in White Clover Rhizosphere. *Soil Biology and Biochemistry*, 123: 54—63. https://doi. org/10.1016/j.soilbio.2018.04.012

de Castro Borges, P. H., Silva, A. O., Benevenute, P. A. N., et al., 2023. Pelletization and Fertilization Improve the Root Environment in Soil Affected by Iron Mining Tailings. *Water, Air, & Soil Pollution*, 234(8): 538. https://doi.org/10.1007/s11270-023-06563-7

Ekedegba, F. E., Ogbonna, A. I., Okoye, C. T., et al., 2022. Optimization Studies on Extracellular Protease Production by *Aspergillus niger* and Aspergillus Terreus Using Skim Milk Casein as Substrate. *Journal of Advances in Biology & Biotechnology*: 11—19. https://doi.org/10.9734/jabb/2022/v25i730291

Guedes, J. P. C., Silvani, C., de Azambuja Carvalho, J. V., et al., 2024. Mechanical Behaviour of Fibre-Reinforced Cemented Iron Ore Tailings across the Compaction Curve. *Geotechnical and Geological Engineering*, 42(5): 3421—3432. https://doi. org/10.1007/s10706-023-02736-7

Guo, C. Q., Yang, C., Fu, J. S., et al., 2024. Effects of Crop Rotation on Sugar Beet Growth through Improving Soil Physicochemical Properties and Microbiome. *Industrial Crops and Products*, 212: 118331. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118331

Hu, S. T., Xiong, X. H., Li, X., et al., 2024. Characterization and Utilization Potential of Typical Molybdenum Tailings in Shaanxi Province, China. *Environmental Geochemistry and Health*, 46(8): 265. https://doi.org/10.1007/s10653-024-02049-5

Hu, X. J., Liu, J. J., Liang, A. Z., et al., 2025. Soil Metagenomics Reveals Reduced Tillage Improves Soil Functional Profiles of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus Cycling in Bulk and Rhizosphere Soils. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 379: 109371. https://doi.org/10.1016/j.agee.2024.109371

Hu, Z. F., Sun, C. Y., 2016. An Study on Preparation and Utilization of Tourmaline from Tailings of an Iron-Ore Processing Plant. *Procedia Environmental Sciences*, 31: 153—161. https://doi. org/10.1016/j.proenv.2016.02.021

Jin, Y. T., Yang, D., Wu, Y. H., et al., 2024. Preparation of Biofertilizer with Phosphogypsum and Straw: Microbial Community Changes and Plant Growth Effects. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 24(2): 3873—3888. https://doi.org/10.1007/s42729-024-01806-w

Lei, S., Zhao, M. Z., Zhu, H., et al., 2024. Fates and Controlling Factors of Nitrogen Fertilizers in Relation to Grain Yield after the Application Season in Wheat Cropping Systems: A Meta-Analysis of 15N Field Trials. *Field Crops Research*, 310: 109364. https://doi. org/10.1016/j.fcr.2024.109364

Li, C. F., Cai, H. X., Liu, Y. Q., 2025. Sustainable Approaches to Tailings Remediation: Role of Organic Fertilizers. *Environmental Research*, 276: 121454. https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.121454

Liu, M. S., Huang, C., Wang, L., et al., 2020. Short-Term Soil Moisture Forecasting Via Gaussian Process Regression with Sample Selection. *Water*, 12(11): 3085. https://doi.org/10.3390/w12113085

Londoño-Hernández, L., García-Gómez, M. D. J., Huerta-Ochoa, S., et al., 2024. Effect of Glucose Concentration on the Production of Proteolytic Extract by Different Strains of *Aspergillus* under Solid-State Fermentation. *Fermentation*, 10(2): 97. https://doi. org/10.3390/fermentation10020097

Manici, L. M., Caputo, F., Morello, B., et al., 2025. Ascomycota and Basidiomycota as Key Drivers of Soil Microbial Stability under Extreme Soil Moisture and Temperature Fluctuations. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 71(1): 1—13. https://doi. org/

10.1080/03650340.2025.2550629

Medina, A., Vassileva, M., Barea, J. M., et al., 2006. The Growth-Enhancement of Clover by Aspergillus-Treated Sugar Beet Waste and *Glomus Mosseae* Inoculation in Zn Contaminated Soil. *Applied Soil Ecology*, 33(1): 87－98. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2005.08.003

Melo, V. F., Lipski, B., Motta, A. C. V., et al., 2024. Integrated Environmental Assessment of Iron Ore Tailings in Floodplain Soils and Plants after the Fundão Dam Disaster in Brazil. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 20(1): 117－132. https://doi. org/10.1002/ieam.4780

Miao, L., Wang, X. Y., Yu, C., et al., 2024. What Factors Control Plant Height? *Journal of Integrative Agriculture*, 23(6): 1803－1824. https://doi. org/10.1016/j.jia.2024.03.058

Mustafa, S., Luo, L. Q., Zheng, B. T., et al., 2022. Mineralogical and Chemical Changes after Reduction Roasting of Xinjiang Iron Ore, China. *Metals*, 12(2): 182. https://doi.org/10.3390/met12020182

Ódri, Á., Cseresznyés, D., Török, K., et al., 2025. Solid-Phase Distribution and Mobilization of Iron and Manganese from Sulfidic Mine Waste under Neutral Drainage Conditions at Rudabánya Mine, Hungary. *Journal of Hazardous Materials*, 489: 137519. https://doi. org/10.1016/j.jhazmat.2025.137519

Odumade, A. O., Ikeagwuani, C. C., Alexander, T. C., 2026. Strength Evaluation of Expansive Soil Stabilized with Lead-Zinc Mine Tailings and Cement: An Artificial Intelligence Approach. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 19(2): 316－335. https://doi.org/10.1007/s42947-024-00450-y

Peng, Y. S., Chen, Z. P., Sun, X. H., et al., 2024. Properties, Treatment and Resource Utilization of Bauxite Tailings: A Review. *Sustainability*, 16(16): 6948. https://doi.org/10.3390/su16166948

Qin, X. K., Li, Q., Li, Y. H., et al., 2025. Impact Of "Moss－Algae－SJP" on Restoration of Biological Soil Crusts in Sandy Land. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 41(11): 64－73 (in Chinese with English abstract).

Scaife, A., 1994. Fall in Nutrient Demand Per Unit Root Length during the Linear Phase of Plant Growth. *Plant and Soil*, 164(2): 315－317. https://doi. org/10.1007/BF00010083

Shang, W. H., Razavi, B. S., Yao, S. H., et al., 2023. Contrasting Mechanisms of Nutrient Mobilization in Rhizosphere Hotspots Driven by Straw and Biochar Amendment. *Soil Biology and Biochemistry*, 187: 109212. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2023.109212

Song, D. L., Dai, X. L., Guo, T. F., et al., 2022. Organic Amendment Regulates Soil Microbial Biomass and Activity in Wheat-Maize and Wheat-Soybean Rotation Systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 333: 107974. https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.107974

Sun, W. L., Zhao, Y. G., Yang, M., 2017. Microbial Fertilizer Improving the Soil Nutrients and Growth of Reed in Degraded Wetland. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 69(1): 012062. https://doi.org/10.1088/1755-1315/69/1/012062

Tang, M., Hou, W. P., Gong, J. Y., et al., 2024. Changes in Bacterial Community Structure and Root Metabolites in *Themeda Japonica* Habitat under Slight and Strong Karst Rocky Desertification. *Applied Soil Ecology*, 195: 105227. https://doi. org/10.1016/j.apsoil.2023.105227

Vasques, N. C., Nogueira, M. A., Hungria, M., 2024. Increasing Application of Multifunctional *Bacillus* for Biocontrol of Pests and Diseases and Plant Growth Promotion: Lessons from Brazil. *Agronomy*, 14(8): 1654. https://doi.org/10.3390/agronomy14081654

Wang, W., Wang, G. C., Zhang, M., et al., 2024. Structural Anatomy of the Newly Recognized Paleozoic Dacaotan Composite Mélange Belt: Implications for the Subduction－Accretion Processes in the North Tianshan Ocean, Southwestern Central Asian Orogenic Belt. *Gondwana Research*, 133: 170－198. https://doi. org/10.1016/j.gr.2024.06.005

Weng, R. G., Chen, G. H., Huang, X., et al., 2022. Geochemical Characteristics of Tailings from Typical Metal Mining Areas in Tibet Autonomous Region. *Minerals*, 12(6): 697. https://doi.org/10.3390/min12060697

Wu, P., Li, J., Zhuang, X. G., et al., 2019. Mineralogical and Environmental Geochemistry of Coal Combustion Products from Shenhuo and Yihua Power Plants in Xinjiang Autonomous Region, Northwest China. *Minerals*, 9(8): 496. https://doi.org/10.3390/min9080496

Xian, L. J., 2016. Research on Curing Mechanism of Dimeric Material. *Qinghai Transportation Science & Technology*, (4): 6－8 (in Chinese with English abstract).

Xu, X. L., Wang, J. Y., Niu, Y. M., et al., 2024. 44-Years of Fertilization Altered Soil Microbial Community Structure by Changing Soil Physical, Chemical Properties and Enzyme Activity. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 24(2): 3150－3161. https://doi. org/10.1007/s42729-024-01740-x

Yi, Y., Yano, K., 2023. Nocturnal versus Diurnal Transpira-

tion in Rice Plants: Analysis of Five Genotypes Grown under Different Atmospheric CO_2 and Soil Moisture Conditions. *Agricultural Water Management*, 286: 108397. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108397

Zhang, H. D., Li, Q., Zhou, S. L., et al., 2024. Effects of Sand Tube Irrigation and Organic Fertilizer on Soil Sucrase Activity and Jujube Quality. *Water Saving Irrigation*, (10): 60－67 (in Chinese with English abstract).

Zhang, K., Wei, H. Y., Chai, Q., et al., 2024. Biological Soil Conditioner with Reduced Rates of Chemical Fertilization Improves Soil Functionality and Enhances Rice Production in Vegetable‐Rice Rotation. *Applied Soil Ecology*, 195: 105242. https://doi. org/10.1016/j. apsoil.2023.105242

Zhu, L. J., Pei, X. J., Zhang, X. C., et al., 2020. A Study of Water Retention and Ecological Effects of Loess Improved by Double Polymers. Hydrogeology & Engineering Geology, 47(4): 158－166 (in Chinese with English abstract).

中文参考文献

秦欣科, 李琪, 李宇航, 等, 2025. “苔-藻-SJP”对沙化土地生物结皮恢复的影响. 中国农学通报, 41(11): 64－73.

鲜丽菊. 2016. 双聚材料固化机理研究. 青海交通科技, (4): 6－8.

张华东, 李侨, 周少梁, 等, 2024. 砂管灌与有机肥对土壤蔗糖酶活性及骏枣品质的影响. 节水灌溉, (10): 60－67.

朱利君, 裴向军, 张晓超, 等, 2020. 双聚材料改良黄土持水性及生态效应研究. 水文地质工程地质, 47(4): 158－166.