

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. 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; 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。本研究选取阿吾拉勒铁矿带为研究对象, 采用室内盆栽试验测定植物生长指标、土壤理化性质、土壤酶活性及土壤微生物群落特征, 并结合主成分分析计算土壤综合得分确定最优改良配比。研究表明, 改良组显著促进苜蓿生长, 株高提高 166.67%; 同时改善土壤养分循环, 土壤含水率提升 203.61%、土壤养分提升 87.92%~1935.67%; 土壤酶活性提升 186.74%~1532.24%; 土壤根际微生物群落结构改善, 且微生物功能预测结果表明, 糖酵解支路、氨基酸生物合成等基础代谢功能显著富集; 确定最优改良方案为: 渣土比 1:0、SJP 浓度 1%、孢子粉添加量 2.0 g。本研究为新疆铁尾矿生态修复提供了技术支撑, 助力矿产资源绿色开发与生态环境保护。

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

中图分类号: X753

收稿日期: 2026-1-28

Study on the Improvement Effect of Xinjiang Iron Tailings by New Water-retaining Materials Combined with *Aspergillus niger*

Li Qi¹²³, Hu Chengbo¹², Tang Jiahao¹², Yang Yixia², Duan Yiran¹, Shen Yifan², Gou Linping¹², Wang Shuangcheng⁴, Li Qiang⁴, Pei Xiangjun^{123*}

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

Abstract: To explore the effects of *Aspergillus niger* spore powder and the new water-retaining

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFC3007103); 新疆自治区重点研发计划项目, 矿山生态地质环境修复与铁尾矿渣绿色低碳综合再利用关键技术 (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 (2024ZRBSHZ094); 西藏自治区重点研发计划项目, 川藏铁路西藏段生态敏感区工程创面生态修复技术研究与应用示范 (XZ202401ZY0091);

作者简介: 李琪 (1993-), 女, 汉族, 四川成都人, 博士, 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, E-mail: liqi21@cdut.edu.cn, ORCID: 0000-0002-7103-1969。

通信作者: 裴向军 (1970-), 男, 博士, 教授, 主要从事地质灾害评价与防治研究工作, E-mail: pxj@cdut.edu.cn。

material SJP on iron tailings, this study selected the Awulale iron ore belt as the research site. An indoor pot experiment was conducted to investigate plant growth indicators, soil physical and chemical properties, soil enzyme activity and soil microbial community characteristics. The principal component analysis was combined to calculate the comprehensive soil score to determine the optimal improvement ratio. The results showed that the improvement group significantly promoted the growth of alfalfa, with the plant height increasing by 166.67%. Meanwhile, it improved the soil nutrient cycle, with the soil moisture content increasing by 203.61% and soil nutrients increasing by 87.92% to 1935.67%. Soil enzyme activity increased by 186.74% to 1532.24%. The soil rhizosphere microbial community structure was improved, and the microbial function prediction results indicated that the basic metabolic functions such as glycolysis and amino acid biosynthesis were significantly enriched following soil improvement. The optimal improvement scheme was determined as: tailings-soil ratio 1:0, SJP concentration 1%, and spore powder addition 2.0g. This study provides technical support for the ecological restoration of iron tailings in Xinjiang, and contributes to the green development of mineral resources and ecological environment protection.

Key words: Iron tailings improvement; Ecological restoration; Soil stabilization and water retention materials SJP; *Aspergillus niger*; Soil microorganisms

矿产资源是国家社会发展的重要组成部分，在新疆地区极其丰富，其中西天山阿吾拉勒铁矿带铁矿储量和开采量均占有重要地位(Mustafa et al., 2022 , Wang et al., 2024)。铁尾矿是铁矿选矿过程中产生的，存在大量矿渣等废弃物(Odumade et al., 2024 , Chen et al., 2023)，主要成分为铁氧化物和硅酸盐矿物，这些物质的排放对环境造成巨大的威胁(Chen et al., 2023 , Á et al., 2025)。铁尾矿的随意堆放加剧了土壤沙化、盐碱化(Weng et al., 2022)，更由于其自身理化性质不良，如养分匮乏、颗粒组成不均、结构稳定性差、持水能力低等，严重阻碍了区域生态系统的自然恢复，并对当地农牧业生产造成威胁(Li et al., 2025)。同时，新疆地区，其典型的干旱、半干旱气候区使得矿产开发后所面临的生态问题更加严重(Hu and Sun, 2016 , Wu et al., 2019)。铁尾矿的资源再利用不仅要解决其污染问题，还要面临新疆干旱、寒冷的极端气候条件导致的植物恢复难度大等问题。当前，新疆寒旱区露天矿的生态修复仍处于初步探索阶段，现阶段的生物修复手段，植物难以存活，维持时间短（一年青，两年黄），亟需高效、环保、经济的尾矿改良客土技术。因此开展铁尾矿的修复与资源化利用研究，是实现矿业可持续发展、减轻环境压力的迫切需求(Peng et al., 2024)。

尾矿虽具备部分土壤特征，但其结构松散、养分贫瘠，持水保肥能力远低于土壤(Melo et al., 2023)。由于尾矿粒径不规则，缺乏植物生长必需营养素（氮、磷、钾等），限制了植物生长(Hu et al., 2024)。因此，研究针对新疆铁尾矿的改良技术对于改善区域生态环境具有重要意义。现有修复技术主要可分为物理修复、化学稳定、生物修复三大类，且趋向于多技术联用以达到更全面的修复效果(Odumade et al., 2024 , Li et al., 2025)。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是最为基础且普遍应用的外源改良材料，能够补充种植基质所需的基础养分，为矿渣的资源化利用与植被重建奠定基础。进一步的，为了提高尾矿的工程力学性能，可以采用胶结材料实现松散渣土固化(Guedes et al., 2024)。已有研究证明添加 SJP（双聚）改性有机材料可以增加土壤颗粒的凝集能力、改善渣土的孔隙度、增强其持水能力与抗侵蚀能力，促进植物生长(朱利君 et al., 2020 , 鲜丽菊, 2016)。黑曲霉 (*Aspergillus niger*) 作为一种常见的丝状真菌，在有机物分解、酶制剂生产中具有独特优势(Baker, 2006)，对优化微生物环境与活化养分具有重要作用(Medina et al., 2006)。但其在不同类型矿渣中的

改良效果仍仍需进一步阐明。

本研究选择了新疆典型矿区的铁尾矿渣，通过调整黑曲霉孢子粉添加量和 SJP 浓度，探究其对铁尾矿渣的改良效果。基于改良后渣土的养分指标、酶活性、植物生长状况以及微生物群落分析，筛选最优矿渣改良方案，为新疆铁尾矿渣改良和生态修复提供技术支撑。

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，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，秸秆购置于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，黄腐酸购置于上海麦克林生化科技股份有限公司，黑曲霉孢子粉购置于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 实验与方法

1) 混合土样制备

将铁尾矿和营养土风干透彻，过 2mm 筛，按实验设计的比例把每份铁尾矿与营养土按比例拌匀，共 1000g；在每份铁尾矿中放入过 2mm 筛的有机肥(30g)、过 2mm 筛的秸秆烘干粉（30g）、黄腐酸（10g），混合菌剂（枯草芽孢杆菌、解淀粉芽孢杆菌、胶冻样芽孢杆菌共 10g），不同浓度 SJP（30g）、黑曲霉孢子粉。

2) 种子准备与种植

种子用 10% H_2O_2 溶液浸泡 10 分钟灭菌，用去离子水浸泡冲洗后，种植于规格为直径 15.5cm、高 10.5cm 的花盆中，每盆 25 粒。种子安置完成后覆盖一层薄土并加入去离子水，使土壤和种子完全湿润直至盆栽底部有水渗出。

盆栽试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%。为了确定改良铁尾矿种植基质的最佳配比，以渣土比（1:0、9:1、7:3）、矿渣类型（尾砂、渣土、尾渣）、SJP 浓度（0%、0.8%、1%）与孢子粉添加量

1.5g、2.0g、2.5g) 四个因素, 每个因素三个水平, 按照 L₉ (3⁴) 正交表见表 1, 安排实验, 同时设置了三个对照组为 CK1-CK3, 具体实验安排见表 2。盆栽种植接种后, 每盆三天定时浇水 100mL, 植物培养 60 天后对植物的株高进行测量并采取环刀样后。取出完整的植物保留根系并测量根长, 根部周围抖落的土壤为根周土, 用于土壤理化性质测量, 附着在根系上面的土壤用小刷子收集为根际土用于土壤酶活和土壤微生物检测。将土壤样品风干磨细过 2 mm 筛后放入负 20℃ 冰箱短暂保持用于后续实验。

表 1 正交实验表
Table 1 Orthogonal Experiment Table

渣土比	铁尾矿时期	SJP 浓度	孢子粉质量
0:1	尾砂	0%	1.5g
1:9	渣土	0.8%	2.0g
3:7	尾渣	1%	2.5g

表 2 实验分组表
Table 2 Experimental Grouping Table

分组	渣土比	渣土类型	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%	1.5g
A1B2	1:0	渣土	1%	2.0g
A1B3	1:0	尾渣	0.8%	2.5g
A2B1	9:1	尾砂	1%	2.5g
A2B2	9:1	渣土	0.8%	1.5g
A2B3	9:1	尾渣	0%	2.0g
A3B1	7:3	尾砂	0.8%	2.0g
A3B2	7:3	渣土	0%	2.5g
A3B3	7:3	尾渣	1%	1.5g

1.3 指标测定

研究主要测定了植物生长、土壤理化、土壤酶活性、土壤微生物群落等指标。

1) 土壤物理性质

含水率采用环刀法测定: 去掉表层的结皮后使用体积为 60cm³ 的环刀压入土壤压实后取出, 使用小铲子将环刀两端磨平后脱模称重得到鲜重, 在 60℃ 烘箱

中恒温放置 2-3 天到恒重后称重得到干重，计算得到含水率；电导率和 pH 采用 pH 和电导率仪测定（NY/T 1121.2-2006）：称取 10.0 g 样品于 50 mL 离心管中，加入 25 mL 的蒸馏水，用玻璃棒搅拌混匀恒温振荡器振荡 1~2 min，室温静止 30min，按仪器说明书将电导率仪或 pH 仪的复合电极插入土壤浸提液中，读数值。每份样品测定后，用蒸馏水冲洗电极，并用滤纸将水吸干。

2) 土壤化学性质

土壤全磷测定采用硫酸消煮-钼锑抗法（土壤农化分析手册第十章）；土壤有效磷测定采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗分光光度法（HJ 704-2014）；土壤速效钾测定火焰原子分光光度计测定（NY/T 889-2004）；土壤硝态氮测定采用紫外分光光度法测定（GB/T 32737-2016）；土壤铵态氮测定采用水杨酸钠-分光光度法测定（HJ 634-2012）；土壤全氮测定采用硫酸消煮-水杨酸钠法（土壤农化分析手册第九章）；土壤有机碳测定采用重铬酸钾氧化-分光光度法（HJ615-2011）。

3) 土壤酶活性：蔗糖酶、碱性磷酸酶、过氧化氢酶、脱氢酶均采用苏州科铭生物科技有限公司生产的酶联免疫吸附法试剂盒进行测定。

4) 植物生长指标

植物株高根据五点取样法的原则测量 10-15 株紫花苜蓿，记录平均值；植物根长根据将选取的植物根部完整取出，测量记录平均值。

5) 渣土微生物多样性和群落结构

对采样收集的新鲜土壤进行微生物分析，每份样品称取 5.0g 土壤，放置在有干冰的泡沫箱中迅速转运至分析实验室，并于 -80℃条件下冷冻保存。待分析前，将样品置于 4℃环境解冻过夜，随后过筛（孔径 Ø 2 mm），并注意剔除动物、种子、根系及其他植物残留。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 GCT GCGTTCTTCATCGATGC。完成 PCR 扩增后，所有样本送至美吉公司，利用 Illumina MiSeq 高通量测序平台进行测序。后续数据分析在基因云在线个人平台（<https://v.majorbio.com/project-center/overview>）上完成。

1.4 数据处理与分析

使用 Microsoft Excel 2019 初步整理数据，使用 IBM SPSS Statistics 24 进行

统计学处理采用单因素方差分析 (ANOVA) Duncan' s 检验和 Origin 2022 对植物生长、土壤理化、土壤酶活酶活制图。对土壤理化和整体土壤环境因子数据, 进行标准化处理, 并使用 SPSSAU 进行主成分分析计算权重和得分, 以确定最好的处理组。

2 结果讨论

2.1 不同改良处理对植物生长的影响

植物的株高、根长是反映植物的生长状况及其环境适应性的基本指标(Miao et al., 2024 , Scaife, 1994)。如图 1a 所示, A1B2 的株高为组间最高值, 显著高于其余处理组 ($p<0.05$)。尾砂组 A3B1 组株高最高, 较对照组升高 69.47%; 尾渣组 A3B3 最高, 较对照升高 129.41%, 其中 A1B2 组的株高为组间最高, 较对照组显著提升 166.67% ($p<0.05$)。如图 1b 所示各处理组的根长均显著 ($p<0.05$) 高于 CK 组, 尾砂组中 A2B1 组根长最长, 较对照提升 281.19%, 尾渣组 A1B3 最长, 较对照提升 132.35%, 其中渣土组 A1B2 处理组的根长提升显著 ($p<0.05$), 较对照提升 253.72%。A1B2 (1:0 渣土比、1%的 SJP 浓度、2.0g 的孢子粉添加量) 组的株高与根长为组间最高值。可能是因为高添加量的 SJP 显著改善了土壤性质, 为植物根系提供更好的生长环境(de Castro Borges et al., 2023 , 朱利君 et al., 2020); 黑曲霉产生的多种物质可能会改变土壤微环境, 并减轻重金属毒性 (Medina et al., 2006); 在此比例下, 改良的协同效应更佳, 显著改善了纯铁尾矿渣土的微环境, 促进了植物生长。

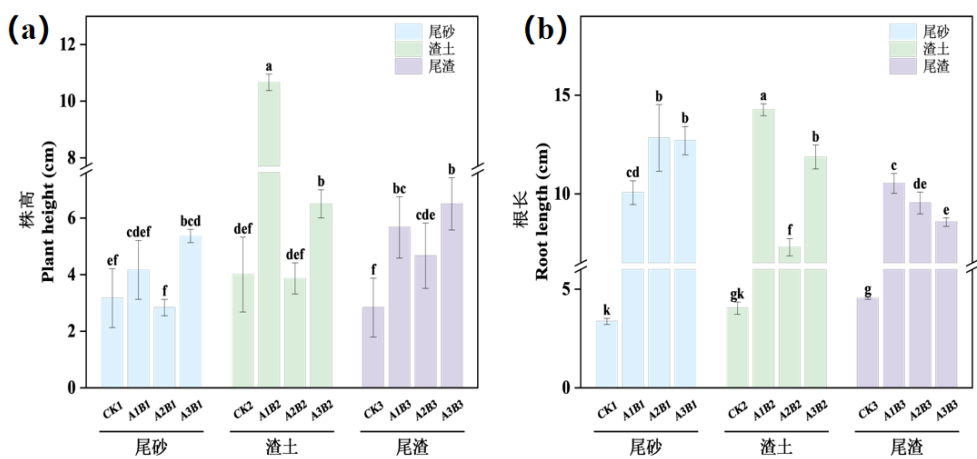


图 1 不同处理对紫花苜蓿生长的影响。

Figure 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 $\pm$ 标准差表示。

2.2 不同改良处理对土壤理化性质的影响

土壤含水率是影响植物生长最基础的物理指标(Liu et al., 2020), 直接影响植物的蒸腾作用 and 水分利用效率(Yi and Yano, 2023)。如图 2a 所示, 各铁尾矿时期试验组土壤含水率均显著高于对照组 ($p < 0.05$), 表明 SJP、黑曲霉显著改良高土壤持水能力, 提高土壤含水率。

土壤养分含量不仅反映了土壤的肥力状况, 也直接或间接影响植物的营养吸收、生长发育, 在铁尾矿改良和植物生长中起到关键作用(Zhang et al., 2024, Lei et al., 2024)。如图 2b 所示, A2B1、A1B2、A1B3 组均显著高于对照 ($p < 0.05$), 其中尾砂时期的 A2B1 的全氮含量提升显著 ($p < 0.05$), 是对照组的 20.36 倍; 如图 2c、2d 所示, A3B1 和 A1B2 组的硝态氮和氨态氮含量都显著 ($p < 0.05$) 高于其余组, 其中渣土组的 A1B2 组氨态氮含量相较于 CK2 提高了 2.78 倍, 尾砂组 A3B1 组的硝态氮含量相较于 CK1 提高了 19.85 倍; 如图 2f 所示, 尾砂组 A3B1、尾渣组 A3B2 全磷含量均有效提升; 如图 2g 所示, 大部分处理组的有效磷含量均显著提升 ($p < 0.05$), 其中尾渣时期的 A3B3 组有效磷为组间最高值, 相较于 CK3 提升 2.67 倍; 如图 2h 所示, 除 A1B3 外各处理组相比 CK 组土壤速效钾均有显著提升 ($p < 0.05$), 其中渣土时期 A3B2 速效钾含量最高显著提高 1.58 倍 ($p < 0.05$)。

由主成分分析结果可得, A1B2 组 (1:0 渣土比、1%的 SJP 浓度、2.0g 的孢子粉) 的综合得分最高排名第一。这可能是因为 SJP 的加入改善了土壤结构, 促进了土壤养分的循环, 并且提高了养分有效性(Qin et al., 2025, Jin et al., 2024)。黑曲霉也是常见的土壤微生物, 能够分泌多种有机酸, 参与土壤养分的循环(Cairns et al., 2018), 其分泌的蛋白酶、核酸酶等多种胞外酶, 可以有效降解复杂的有机氮化合物, 将这些有机氮化合物矿化为植物可直接吸收利用的铵态氮以提高土壤养分的利用率(Londoño-Hernández et al., 2024)。综上, 添加 1%浓度的 SJP 溶液可能为黑曲霉提供了更好的生长环境和微生态, 结合 2.0g 的孢子粉添加量, 协同提升土壤养分促进植物生长。

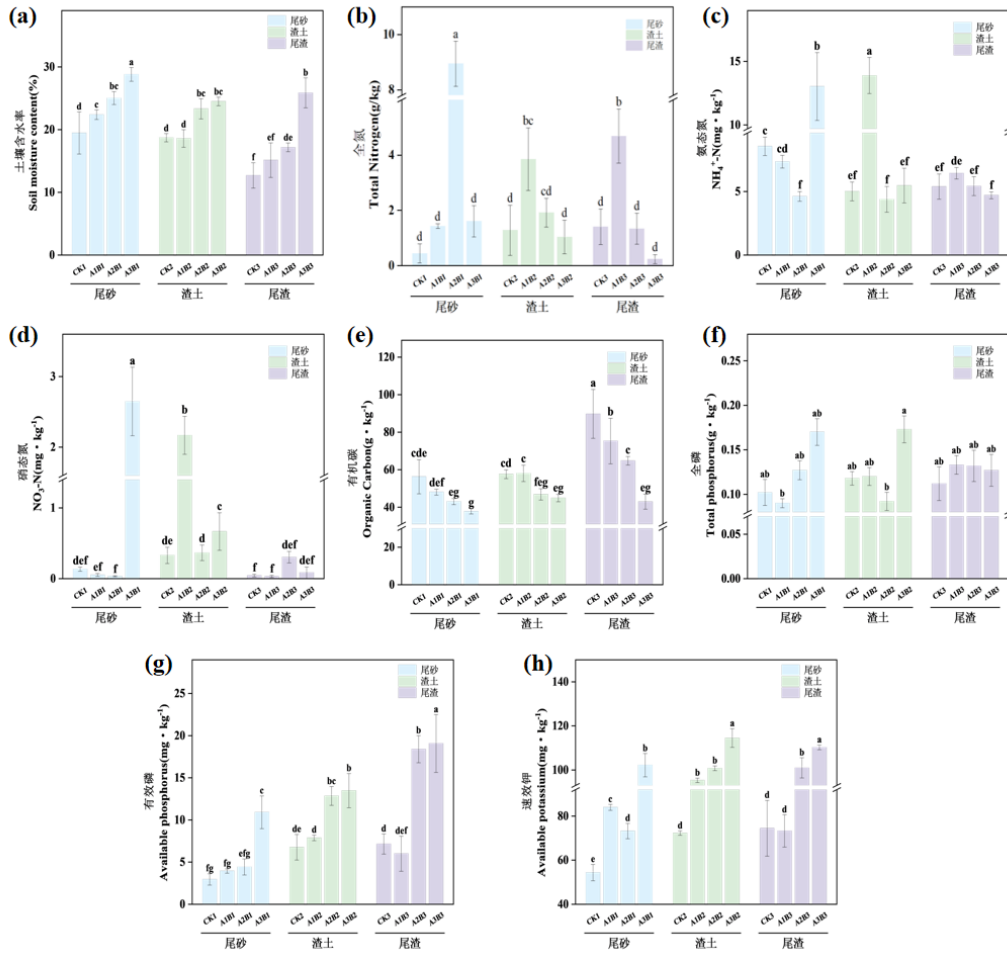


图 2 不同处理对尾矿理化性质的影响。Fig 2. Effects of different treatments on the physicochemical properties of tailings.

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 $\pm$ 标准差表示。

2.3 不同改良处理对土壤酶活性的影响

土壤酶能够参与土壤中各元素的生物地球化学循环,对植物的生长具有重要作用。如图 3a 所示,其中尾渣组整体的过氧化氢酶活性相对更高, A3B1 和 A3B3 都显著高于 ($p < 0.05$) 其对照组,其中 A3B3 组过氧化氢酶活性是对照组的 1.21 倍;如图 3b 所示,大部分处理组相较于对照组脲酶活性均有显著提升($p < 0.05$),且以 A2B1、A2B2、A1B3 提升最为显著;如图 3c 所示, A1B1、A2B1 的碱性蛋白酶活性相较于 CK1 有显著提升 ($p < 0.05$);如图 3d 所示,渣土组与尾渣组相较于对照组均有所提升。酶活性的提升可能是因为黑曲霉自身就能够分泌多种胞外酶,如淀粉酶、蛋白酶等(Bellaouchi et al., 2021 , Ekedegba et al., 2022)。并且由于不同渣土比和 SJP、黑曲霉的加入,能够促进土壤微环境的养分循环,提

高生物代谢活动也会有益于酶的生成。反过来土壤酶活性的增强，也会促进生物代谢活动，促进土壤养分循环、植物生长(张华东 et al., 2024)。

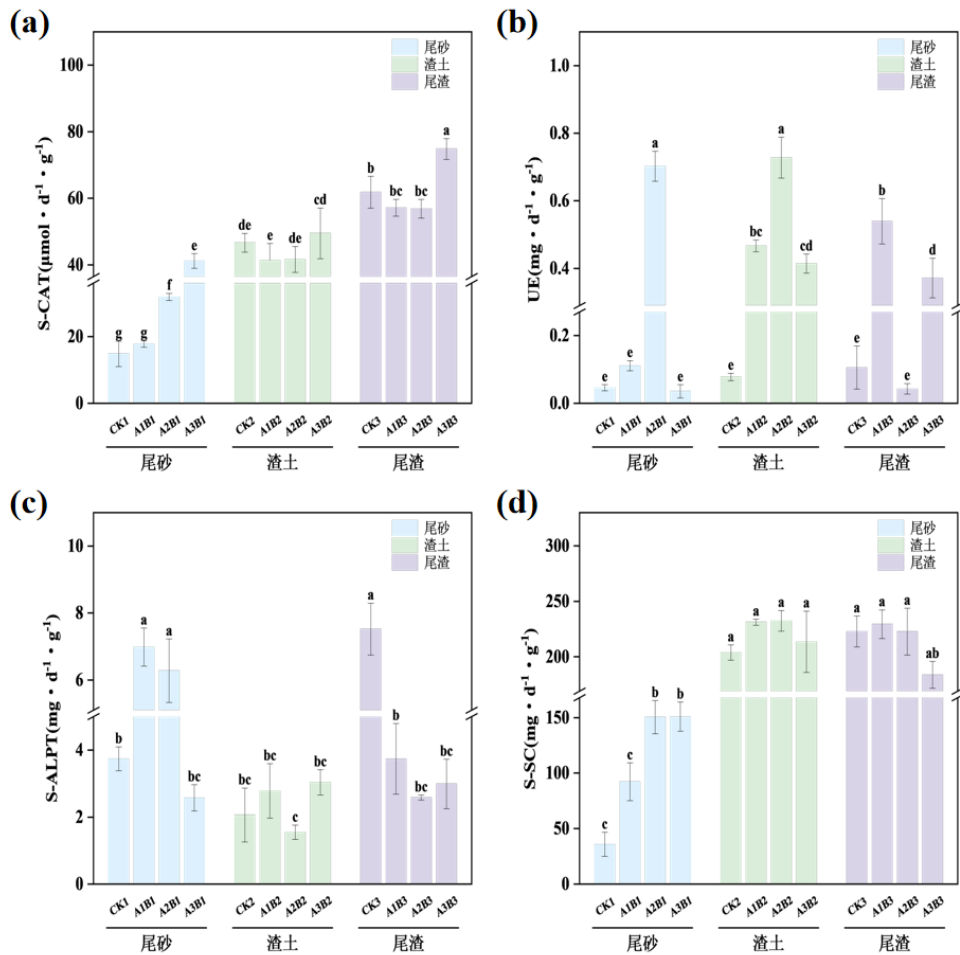


图 3 不同处理对尾矿酶活性的影响。

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。

2.4 不同处理改良铁尾矿对土壤微生物的影响

土壤微生物是土壤和植物的链接或者说是中介物质，土壤微生物通过多种机制影响植物健康、土壤养分循环及生态系统的稳定(Guo et al., 2024 , Xu et al., 2024)。土壤改良剂的添加会引起土壤微生物的变化(Song et al., 2022)。如图 4 所示，虽然各处理组微生物群落组成和结构不完全相同，但主要构成却是相似的。细菌主要的优势菌门包括假单胞菌门(*Pseudomonadota*)、芽胞杆菌门(*Bacillota*)、拟杆菌门(*Bacteroidota*)等；真菌主要的优势菌门包括子囊菌门(*Ascomycota*)、

以及担子菌门 (*Basidiomycota*) 等。它们共同作为这个微环境的优势菌门, 通过多种机制影响土壤养分循环和植物生长(Compant et al., 2024)。加入 SJP 和黑曲霉孢子粉后, 土壤微生物群落可以对外界环境变化做出快速响应, 并通过微生物的同化或者异化过程来调控土壤养分(Hu et al., 2025)。如假单胞菌门和芽胞杆菌门可通过分泌有机酸和酶, 将土壤中难溶的磷、钾化合物转化为可溶性形式(Sun et al., 2017); 子囊菌门和担子菌门产生的菌丝体以及细菌分泌的胞外多糖, 有助于形成稳定的土壤团聚体, 改善土壤孔隙结构, 增加土壤持水能力和通气性, 为植物根系提供更好的生长环境(Manici et al., 2025)。

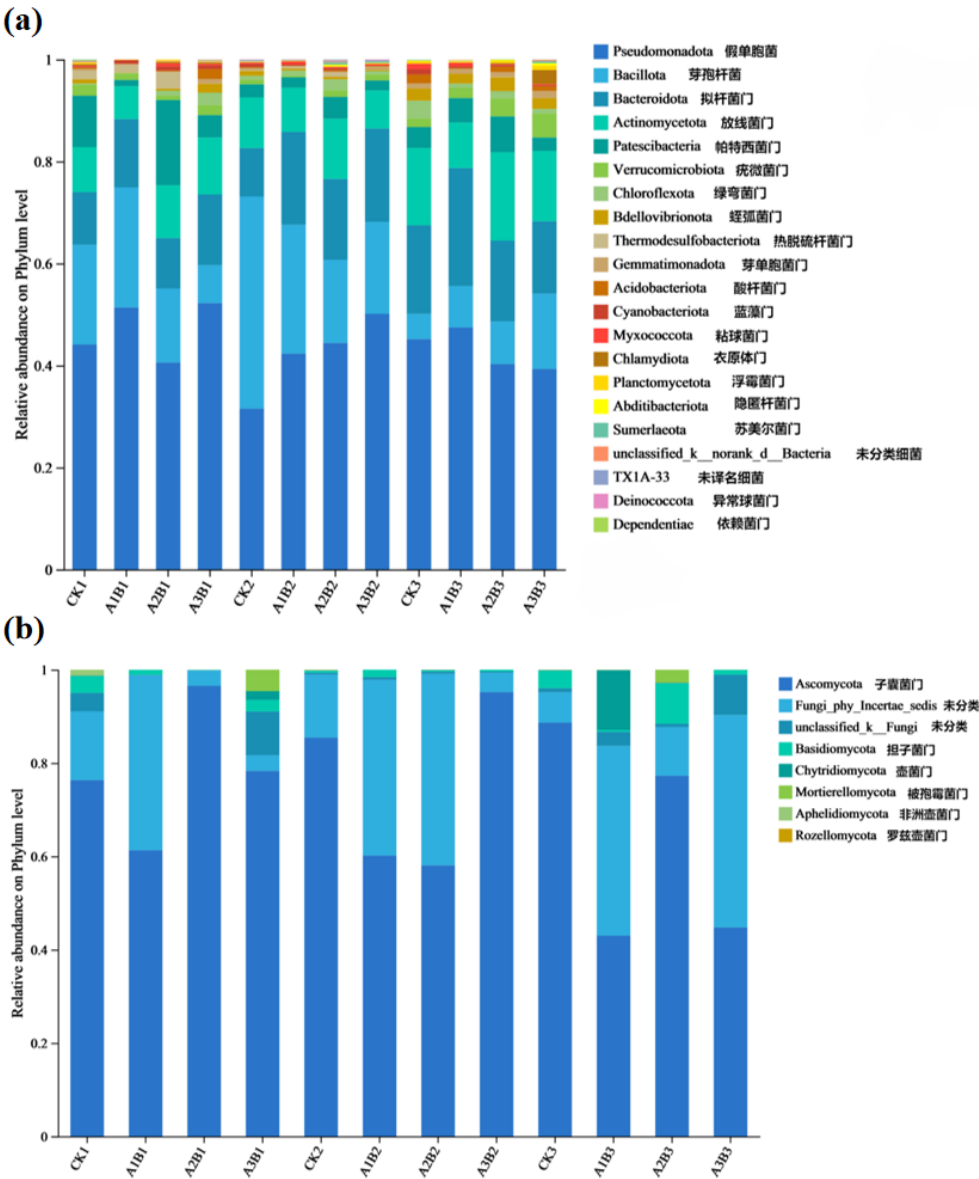


图 4 微生物群落组成分析。

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。

Alpha 多样性是用于评价物种丰富度、多样性和均匀度的指标(Tang et al., 2024)。如图 5a-c 所示，处理组细菌的物种丰富度相较于对照组均在不同程度降低，整个 A2 组和 A3B3 组的处理相较于对照组细菌的多样性有所提高。如图 5d-f 所示，A2B2、A2B3 组的真菌丰富度相较于 CK 组有所上升，大部分处理组真菌的多样性水平均有提升。改良后的土壤吸引假单胞菌、芽胞杆菌、子囊菌这些优势菌生存定殖，在以它们为中心吸引别的菌种定殖提高微生物多样性(Compant et al., 2024)，最终有效促进土壤养分循环。

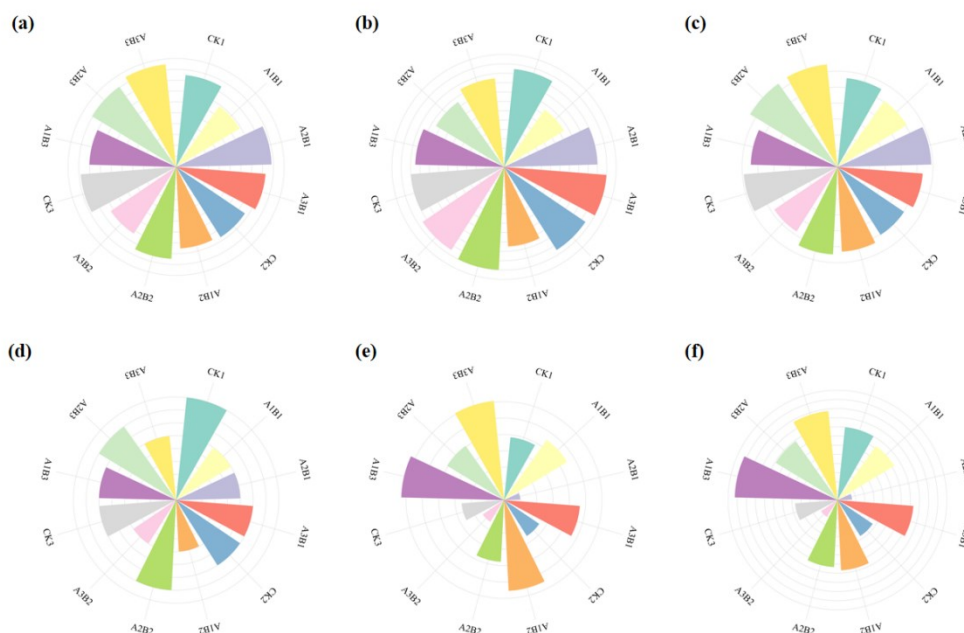


图 5 微生物 Alpha 多样性分析。

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。

此外，通过对 PICRUSt2_MetaCyc 功能预测分析可以知道在不同的改良方法下，微生物在功能性进化的潜力。如图 6a 所示细菌的功能性预测主要是聚焦在氨基酸生物合成和辅酶合成等过程，整体通路的丰度均较低，部分过程如 L - 赖氨酸生物合成、UMP 生物合成活性更高；如图 6b 所示真菌主要涉及 tRNA 与氨基酸结合，蛋白质合成、糖酵解支路、氨基酸生物合成等基础代谢过程。这些功

能途径的提升正是土壤养分含量提升的原因,比如氨基酸生物合成促进氮的固定与保存(Czaban et al., 2018)。此外,糖酵解、三羧酸等循环通路途径显著性富集,微生物可通过辅酶合成增强糖酵解支路活性,糖酵解中间产物(如磷酸烯醇式丙酮酸)可作为前体物质促进氨基酸合成,加强“碳-氮协同循环”(Shang et al., 2023)。黑曲霉加入代谢通路中,草酸等有机酸初期可促进矿物风化和金属释放,从而推动重金属由活性态向稳定态转化。芽孢杆菌等还能直接通过合成生长素(IAA)、ACC 脱氨酶等来促进植物生长(Vasques et al., 2024)。

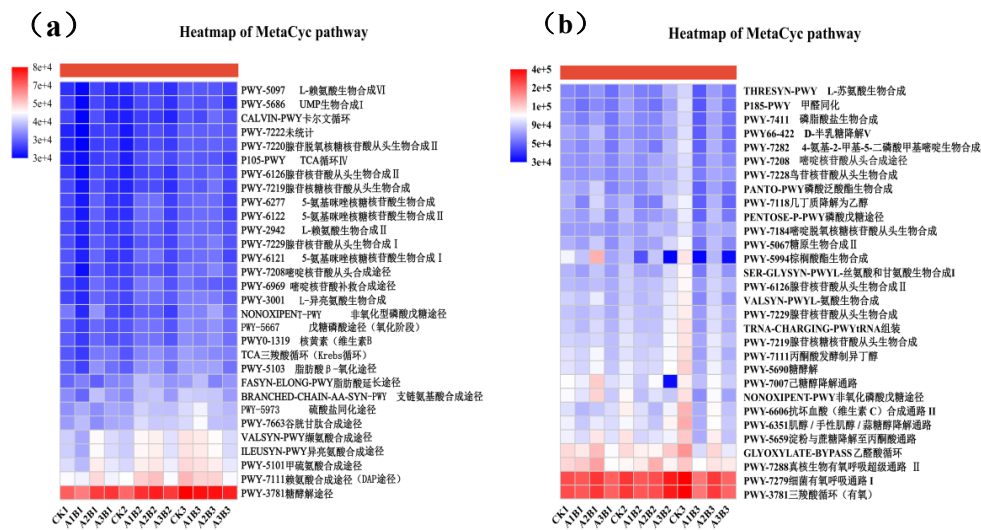


图 6 基于 MetaCyc 数据库的不同处理下的差异代谢途径。

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。红色表示表达高丰度、蓝色表示表达低丰度, 颜色深浅与丰度高低程度呈正相关。

2.5 不同处理改良铁尾矿环境因子综合影响

结合各环境因子(土壤酶活和土壤养分)对不同处理下不同铁尾矿时期微生物群落变化的相关性进行分析。结果发现,如图 7a 所示, TN 与 TP 强正相关, TN 与 S-CAT、UE 的关联显著 ($p<0.05$), 体现了氮磷循环与微生物代谢的协同作用, 这可能是 N、P 养分的变化会影响土壤酶活性来调控微生物群落变化。而 AK 与 TOC 的负相关表示钾元素的含量可能对碳代谢具有独特调控作用。如图 7b 所示, AP 与 S-ALPT 呈现显著负相关 ($p<0.05$), 反映有效磷对磷酸酶在环境变化下可能存在一些抑制作用, 各种酶之间的相关性也反映了微生物群落

在面对环境因子的变化下会有所响应。

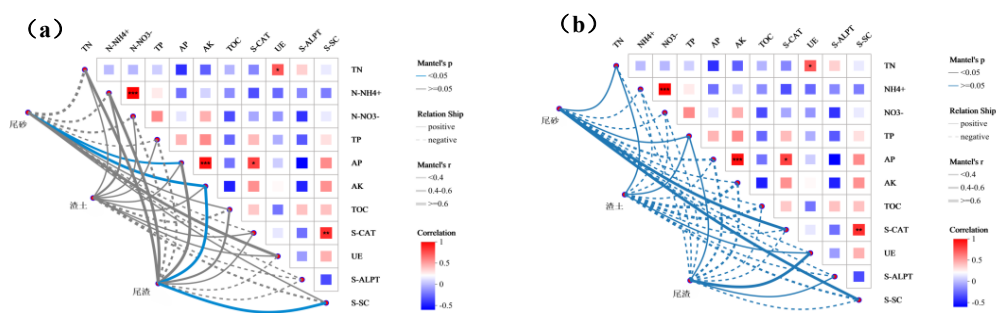


图 7 微生物群落与土壤环境因子的相关性。

Figure 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-NO₃⁻：硝态氮；N-NH₄⁺：氨态氮；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 ≤ 0.05，**表示 0.001 < p ≤ 0.01，***表示 p ≤ 0.001。

我们对不同处理后的上述土壤环境因子变化，进行熵值法权重的计算综合得分如下表 3 所示，得到在这些植物生长所需的全部正向指标中 A1B2（1:0 渣土比、1%的 SJP 浓度、2.0g 的孢子粉）的得分最高，完美的解释了该处理组下植物生长最优的现象，Mantel 检验结果的差异进一步证实，环境条件的改变重塑了土壤因子间的相关性网络，这种网络结构的变化直接影响土壤养分循环效率与生物功能稳定性。

表 3 土壤环境因子变化综合得分

Table 3 Comprehensive Score of Changes in Soil Environmental Factors

综合得分	土壤环境因子	排名
CK1	0.137836247	12
CK2	0.194170449	11
CK3	0.31187026	6
A1B1	0.194428595	10
A1B2	0.604385644	1
A1B3	0.383302433	5

A2B1	0.386293789	3
A2B2	0.310485374	7
A2B3	0.30580464	8
A3B1	0.542829368	2
A3B2	0.38353652	4
A3B3	0.304658778	9

3 结论

本研究通过室内盆栽试验，系统探究了不同渣土比、SJP 浓度及黑曲霉孢子粉添加量对新疆铁尾矿植生性能的影响。结果表明：（1）改良处理显著改善了不同类型尾矿渣中的植物生长情况，各处理组生长指标较对照普遍提升，最优组植物株高相较于对照组提升了 166.67%；（2）改善了不同类型铁尾矿渣理化性质（最优组土壤含水率提升 203.61%、全氮含量提升 1935.67%、氨态氮含量提升 177.67%、硝态氮含量提升 1885.00%、全磷含量提升 67.20%、有效磷含量 166.79%、速效钾含量提升 87.92%）、土壤酶活性（最优组过氧化氢酶活性提升 277.00%、脲酶活性提升 1532.24%、碱性蛋白酶活性提升 186.74%）与微生物群落结构（微生物多样性提升、优势菌种的相对丰度提升、养分循环相关功能基因也存在富集趋势）；（3）所有处理组中，A1B2 处理组（渣土比为 1:0，SJP 浓度为 1%，孢子粉添加量为 2.0g）在植物生长和各土壤环境因子正向指标的综合得分均最优，微生物分析进一步揭示，该配比显著影响了根际微生物群落结构，增强了养分循环功能基因丰度，从而协同促进植物生长，为最优改良配比。本研究提供了微生物-材料联用改良铁尾矿的技术范式，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。

作者贡献度说明：李琪牵头完成本研究的整体构思；包括研究科学问题凝练、技术路线制定；李琪、胡成博共同完成完成图表的设计、全部论文初稿撰写，胡成博对土壤植物样本，理化性质、酶活性进行测试；唐佳豪数据整理，协助画图；杨镒霞、沈逸凡调研分析，协助修改文章；苟林平协助后续理化、酶活等测试；段一然完成盆栽实验的实施，具体包括供试改良材料（有机肥、秸秆、黄腐酸、复合菌剂等）与供试矿渣土的制备；王双成，李强资金获取；裴向军实验指导。

References

- Baker S E. 2006. *Aspergillus niger* Genomics: Past, Present and into the Future. *Med Mycol*, 44 Suppl 1: S17-21. <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. 2024. 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, Benevenuto 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): 487. <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*, 25(730291): 11-19. <https://doi.org/10.9734/jabb/2022/v25i730291>
- Guedes J P C, Silvani C, Carvalho J V D A 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. A 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://www.mdpi.com/2073-4441/12/11/3085>
- 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://www.mdpi.com/2311-5637/10/2/97>
- 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, Azcón R. 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. 2023. 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. 2024. Strength Evaluation of Expansive Soil Stabilized with Lead–Zinc Mine Tailings and Cement: An Artificial Intelligence Approach. *International Journal of Pavement Research and Technology*. <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://www.mdpi.com/2071-050/16/16/6948>
- Qin X K, Li Q, Li Y H et al. 2025. Effects of “Moss-Algae-SJP” on the Restoration of Biological Soil Crusts in Desertified Land. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 41(11): 64-73. <https://doi.org/10.11924/j.issn.1000-6850.casb2024-0577> (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: 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 Dacotan 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 Shenhua and Yihua Power Plants in Xinjiang Autonomous Region, Northwest China. *Minerals*, 9(8): 496. <https://doi.org/10.3390/min9080496>
- Xian L J. 2016. Study on Solidification Mechanism of Double Polymer Materials. *Qinghai Transportation Science & Technology*, (04): 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 Transpiration in Rice Plants: Analysis of Five Genotypes Grown under Different Atmospheric CO₂ 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, Sun S M. 2024. Effects of Sand Pipe Irrigation and Organic Fertilizer on Soil Sucrase Activity and Junzao 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. Study on Water Holding Capacity Improvement and Ecological Effect of Loess Soil Modified by Double Polymer Materials. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 47(4): 158-166. <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.201911003> (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. <https://doi.org/10.11924/j.issn.1000-6850.casb2024-0577>
- 鲜丽菊. 2016. 双聚材料固化机理研究. *青海交通科技*, (04): 6-8. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=29aDaWKg40GVDcC2rBmMXVb117UuKXIBKsVnE1biwIM-46tQnQU9Us5S195muHpA3E7CYgf2IAMFOhEcXaoCS9BoqxyOWrLG2irzGcfrZPj2Afj7lWwnVqcyc59iQD8PuaeVWe4qKV_KZYlhOzMAMGp5l6PVGd0KgXmsW0la4wVv176mGM5vs6jK6iTV_06C&uniplatform=NZKPT&language=CHS
- 张华东, 李侨, 周少梁, 孙三民. 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. <https://link.cnki.net/urlid/42.1420.TV.20240723.1053.004>
- 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. <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.201911003>