

doi: 10.12097/gbc.2023.09.027

高琪, 李永利, 周文辉, 王昌宇, 李慧雯, 胡浩远, 毛磊, 杜鑫. 2025. 利用微生物菌剂修复铁矿尾矿库植被的技术方法——以内蒙古包头某铁矿为例[J]. 地质通报, 44(7): 1359–1369.

Gao Qi, Li Yongli, Zhou Wenhui, Wang Changyu, Li Huiwen, Hu Haoyuan, Mao Lei, Du Xin. 2025. Remediation technology of iron based tailings pond based on microbial enhanced urban solid waste: An example of a certain iron ore tailings pond in Baotou City, Inner Mongolia[J]. Geological Bulletin of China, 44(7): 1359–1369(in Chinese with English abstract).

利用微生物菌剂修复铁矿尾矿库植被的技术方法 ——以内蒙古包头某铁矿为例

高琪, 李永利*, 周文辉, 王昌宇, 李慧雯, 胡浩远, 毛磊, 杜鑫

(中国地质调查局呼和浩特自然资源综合调查中心, 内蒙古 呼和浩特 010010)

摘要:【研究目的】通过施用不同菌剂和基质改良土壤环境进行废弃铁尾矿修复的研究性实验。近些年, 随着矿产资源得到大力开发, 尾矿排放量逐年攀升。但是尾矿具有低利用率、难降解性、高危害性等缺点, 尾矿残渣的堆积对人体健康和环境卫生都会产生致命的危害。【研究方法】基于此, 提出了一种新型尾矿利用模式, 将尾矿进行土壤化处理, 并利用微生物强化城市固废修复技术改善尾矿的 pH、孔隙度、酶活性及含水量等性质, 从而实现尾矿固废双处理的目标。【研究结果】结果表明: 施加城市固废和菌剂对铁尾矿的修复效果较好, 土壤 pH 值降低, 有机质含量降低, 营养含量增加, 酶活性提高, 尾矿理化性质得到显著改善; 种植植物的植株高度、生物量、盖度均有显著提高, 且在施了解钾菌和固氮菌的实验组效果更明显, 植物盖度提高了 64%, 生物量提高了 2.2 倍, 尾矿中的速效成分也均有较大提高。【结论】添加城市固废对铁尾矿的修复效果较好, 功能微生物可以有效地强化修复效果, 其中添加固氮菌和解钾菌对城市固废的强化作用更好, 能低成本高效益地达到对铁尾矿的生态修复。

关键词: 铁尾矿; 微生物; 城市固废; 植物; 修复技术; 内蒙古

创新点: 通过植物、微生物共同作用, 实现铁尾矿与城市固废两种环境污染物的修复处置工作, 为未来废弃矿山与城市固废的综合修复利用提供一种新的思路。

中图分类号: P618.31; X172 文献标志码: A 文章编号: 1671-2552(2025)07-1359-11

Remediation technology of iron based tailings pond based on microbial enhanced urban solid waste: An example of a certain iron ore tailings pond in Baotou City, Inner Mongolia

GAO Qi, LI Yongli*, ZHOU Wenhui, WANG Changyu, LI Huiwen, HU Haoyuan, MAO Lei, DU Xin

(Hohhot Center, China Geological Survey, Hohhot 010010, Inner Mongolia, China)

Abstract: [Objective] This study conducted an experimental investigation on the remediation of abandoned iron tailings through the application of various microbial agents and substrate modifications to improve soil conditions. In recent years, with the extensive development of mineral resources, the discharge of tailings has been increasing annually. However, tailings are characterized by low utilization rates, poor degradability, and high hazardous potential. The accumulation of tailings residues poses significant threats to human health and environmental sanitation. [Methods] In response, a novel tailings utilization model has been proposed, which

收稿日期: 2024-11-11; 修订日期: 2025-07-02

资助项目: 中国地质调查局项目《包头市九原区-达茂旗矿集区生态修复支撑调查》(编号: ZD20220217)

作者简介: 高琪(1982-), 男, 高级工程师, 从事矿山地质环境研究工作。E-mail: gaoqi@mail.cgs.gov.cn

* 通信作者: 李永利(1989-), 男, 高级工程师, 从事矿山地质环境研究工作。E-mail: liyongli@mail.cgs.gov.cn

involves the soilification of tailings and the enhancement of urban solid waste remediation technology using microorganisms to improve properties such as pH, porosity, enzyme activity, and moisture content of tailings, thereby achieving the dual treatment of tailings and solid waste. **[Results]** The results indicate that the application of urban solid waste and microbial agents significantly improved the remediation of iron tailings, with a reduction in soil pH, a decrease in organic matter content, an increase in nutrient levels, and enhanced enzyme activity, leading to notable improvements in the physicochemical properties of the tailings. The height, biomass, and coverage of planted vegetation also showed significant increases, particularly in the experimental groups treated with potassium-solubilizing and nitrogen-fixing bacteria, where plant coverage increased by 64%, biomass increased by 2.2 times, and the available components in the tailings were substantially enhanced. **[Conclusions]** Therefore, the addition of urban solid waste is effective for the remediation of iron tailings, and functional microorganisms can significantly enhance the remediation effects, with nitrogen-fixing and potassium-solubilizing bacteria providing better reinforcement of urban solid waste, achieving cost-effective ecological restoration of iron tailings.

Key words: iron tailings; microorganisms; municipal solid waste; plants; remediation technology; Inner Mongolia

Highlights: This study achieves the remediation and disposal of two environmental pollutants, iron tailings and urban solid waste, through the combined action of plants and microorganisms, providing a new approach for the comprehensive remediation and utilization of abandoned mines and urban solid waste in the future.

About the first author: GAO Qi, male, born in 1982, senior engineer, engaged in the research work of mine geological environment. E-mail: gaoqi@mail.cgs.gov.cn

About the corresponding author: LI Yongli, male, born in 1989, senior engineer, engaged in the research work of mine geological environment. E-mail: yongli@mail.cgs.gov.cn

Fund support: Supported by the project of China Geological Survey, "Ecological restoration support survey of mining agglomeration area in Baot Jiuyuan District-Damao Banner" (No. ZD20220217)

近年来,随着中国工业迅速发展,矿山开采的规模日益增大,废弃尾矿数量也在急剧增加(邵坤, 2008; 潘宝峰, 2015)。经过 60 a 钢铁产业发展,铁尾矿的排放量和堆积量逐年攀升。从 1985 年到 2017 年铁尾矿排放量从 1×10^8 t 增长到 5×10^8 t,铁尾矿在工业固体废弃物中占比越来越高。2016 年铁尾矿占全国工业固废总量的 20.82%,而利用量仅占工业固废利用总量的 9.2%。因此,加强矿山废弃地生态恢复研究具有十分重要的意义(廖正家, 2021)。

城市固废是城市产生的污染废弃物(Saxena et al., 2010; Kumari and Chandel, 2023; Naveenkumar et al., 2023),它是城市污水处理过程中必定产生的固体废物,在未处理合格和被允许的条件下进入环境,会给水体和大气造成严重污染(Yu et al., 2023; Velempini et al., 2023; Wang et al., 2023; 陈杰敏等, 2023; 刘金福等, 2023; 梁翼东等, 2023)。因此,城市固废的资源化处理也是亟需解决的问题。

目前,针对铁尾矿环境污染修复主要分为新型处置办法和传统处置办法。新型处置办法有尾矿充填(张晓铜, 2010; 荆晓东等, 2022)、尾矿再选(谢丹丹等, 2016)、制造材料、新型材料等(Liang et al., 2019; 宋月红等, 2020),但都存在回填胶体性能要求

高、劳动力需求多等缺点。传统处置办法有换土、覆土、隔离法等,但都具有一定的局限性,存在成本高、收益低、土地占用量大等缺点。内蒙古地区土层厚度较薄,可供迁移的土壤较少,铁尾矿较多,因此覆盖法与换土法在内蒙古并不适用。铁尾矿具有高盐碱性、低营养含量、生物难利用等特点,直接利用铁尾矿种植植物成活率低(陈明, 2021; 刘舒婷, 2023)。

为解决上述难题,本次研究针对性地提出微生物菌剂强化城市固废的铁尾矿植被恢复技术,通过施加城市固废和微生物菌剂对包头市某铁尾矿进行原位修复,不仅能够有效实现城市固废的再利用,减轻城市固废堆积造成的环境问题,也能够改良铁尾矿的 pH、有机质含量、酶活性等性质,形成植物-微生物共生体系,促进植被的定植和生长发育,为包头市矿山修复提供一种新的研究思路。

1 研究区概况

包头市固阳县地处内蒙古自治区中西部,总体地势呈现南高北低、东高西低。该地气候较干旱,雨水较少且蒸发强烈,年均降水量 300 mm,属于干旱半干旱大陆性季风气候,固阳县多西北风,年均气温约为 4℃。固阳县有 7 条季节性河流,其中黄河二级

支流为该地区最大的河流,矿藏丰富,有黄金、磁铁、煤、蛭石等。

研究区位于包头市固阳县金山镇四分子村,距固阳县约 17 km,在四分子村周边有很多废弃地与在生产矿区,本次试验场位于四分子村北侧一废弃已有 10 a 左右的铁尾矿库。试验场地形较平坦,光照充足,无植被覆盖。具体位置见图 1。

2 材料和方法

2.1 实验方法

2.1.1 实验材料

N、P、K 元素是植物生长发育的重要物质基础,但是土壤中的磷、钾大多数以难溶性物质存在,为了方便植物利用,本次研究通过加入辅助菌剂解决这个难题。通过筛选发现,解磷菌(J)和解钾菌(D)可以有效地分解土壤中的 P 元素和 K 元素;固氮菌

(H)在与植物共生的情况下能有效地固氮,固氮产物氨可直接为共生体提供氮源;蒙科优菌(B)是内蒙古科技大学郑春丽教授研究团队(曹丹,2023)提纯的一种新型细菌,具有极强的固碳能力,可以促进植物光合作用,这些菌剂都可以有效地促进植物的生长发育,因此,本研究通过组合这 4 种不同菌剂进行实验测试,确定最优组合方式。4 种菌剂来源于内蒙古科技大学生命科学与技术学院。

根据处理方法差异性对试验场进行划分,将实验田(30×40 m²)划分为 14 个实验区域,实验区尺寸见图 2。A~I 区为正方形区域(10×10 m²),分别施加不同的基质和菌剂。X1、Y1、Y2、CK、X2 区域为长方形区域,其中 CK 为对照组,不施加任何基质和菌剂;X1、X2 仅施加不同的菌剂,不施用城市固废和养分肥料;Y1、Y2 仅施加不同基质,不添加任何菌剂。不同实验区域的菌剂与基质施加情况见表 1。

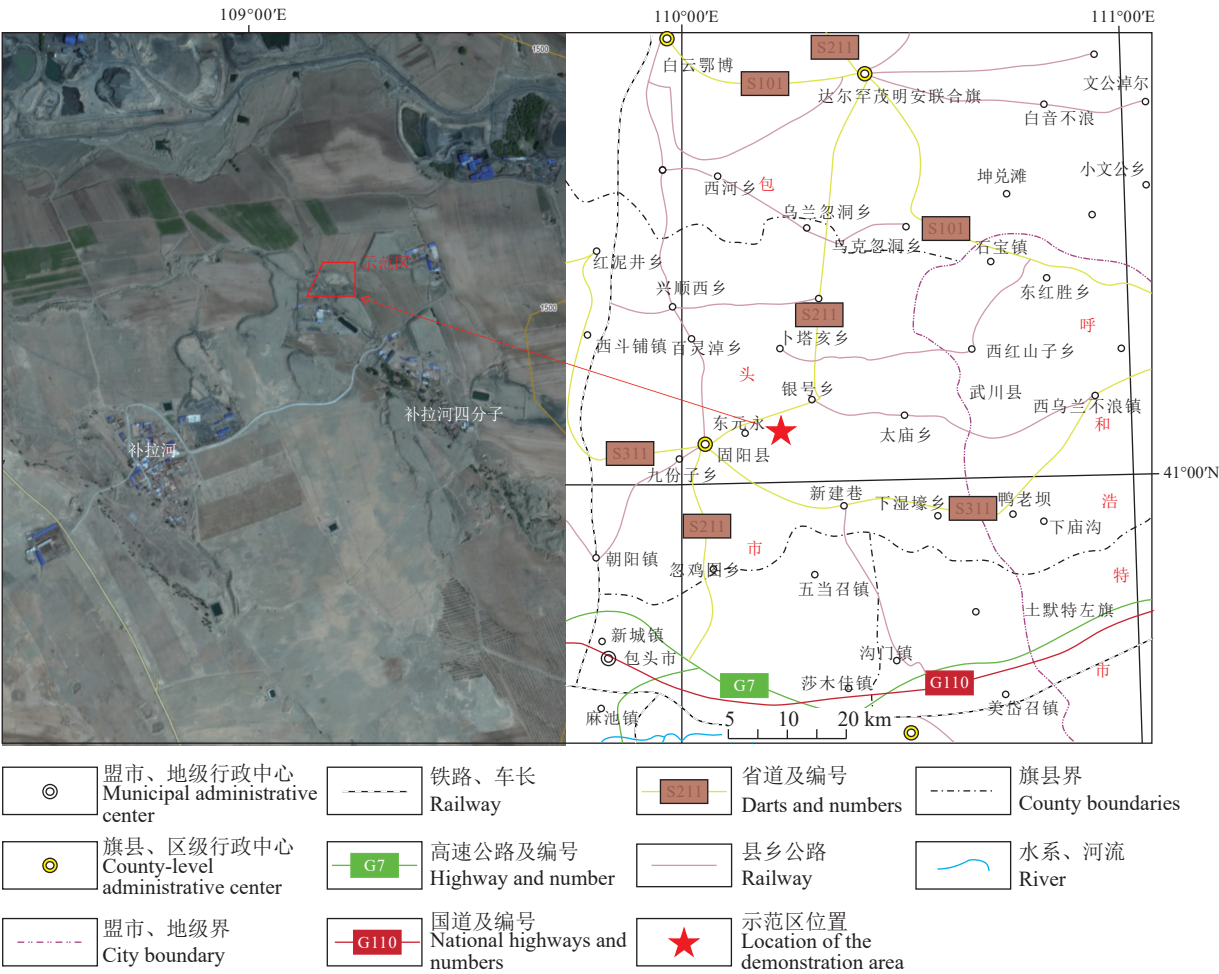


图 1 研究区位置

Fig. 1 The location of the research area

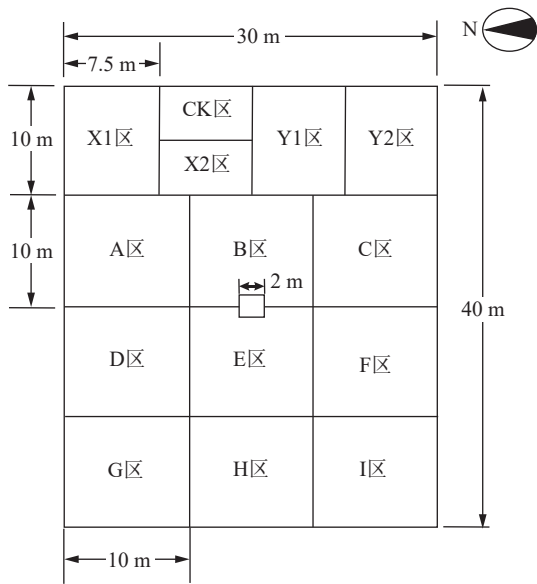


图 2 示范区尺寸图

Fig. 2 Demonstration area diagram

表 1 不同实验区基质、菌剂施用情况

Table 1 The application of different experimental field matrix and bacterial agent

组别	养分肥料	城市固废+养分肥料	城市固废	H	J	J+H	B+H	D+H
X1				+				
X2					+			
Y1			+					
Y2		+						
A	+					+		
B	+						+	
C	+							+
D		+				+		
E		+					+	
F		+						+
G			+			+		
H			+				+	
I			+					+
CK								

注：组别代号具体注释见正文；H—固氮菌；J—解磷菌；B—蒙科优菌；D—解钾菌

2.1.2 实验设计

施用的基质中，采用人工配合机械的方式将基质分撒在不同的实验区，再使用旋耕机翻地将尾矿砂与基质按 1：3 的比例进行混合。将实验室培养

的菌剂在现场进行扩培，使用电动喷雾器进行全方位菌剂喷洒，每个实验区添加的每种菌剂含量均为 32 L。使用旋耕机将菌剂、尾矿砂和基质进行均匀混合，混合深度为 20 cm。最后选取当地优势植物紫花苜蓿和披碱草为种植对象，采用混合播种的方式播撒种植。

2.1.3 实验周期及灌溉条件

本次实验时间为 2021 年 7—10 月，周期为 90 天。每个实验区域平行铺设 6 条喷灌支管，通过微喷进行场地的水量浇灌，根据研究区气候特点，为确保实验成功，将灌溉分为 3 个阶段，0~7 天为植物萌发期，采用 2 天灌溉 1 次，每个实验区灌溉时间为 15 min；8~20 天为植物初步生长阶段，采用 3 天灌溉 1 次，每个实验区灌溉时间为 15 min；21~90 天为植物稳定生长阶段，根据降雨情况，间隔 15 天补充 1 次灌溉，每个实验区灌溉时间为 15 min。

2.2 样品采集与制备

本次在实验区共采集土壤混合样品 19 件，植物样品 24 件。

植物样品采集与制备：将筛选出的植物样品进行土壤剥离，分装入聚乙烯袋标号密封保存。在实验室进行预处理(土壤剥离、清洗、阴晾、分切等)。

土壤样品采集与制备：将植物周围和植物根表层土壤混合，各样品取 2 kg 左右，置于塑封袋中标号保存，阴干用研钵粉碎后过 10 目样筛。随后送至实验室进行样品加工，并将样品充分混匀后，取 50 g (20 目)土壤样品装袋，直接用于 pH 值分析。剩下样品在小于 60℃ 恒温干燥箱内充分烘干。烘干后的样品混匀后，取 80 g 样品，粉碎至 0.074 mm (200 目)，分装 5 份用于化学分析。

2.3 样品测试

pH 值采用 pH 计测定，有机质含量采用高频红外碳硫仪法测定，电导率采用全盐量-电导法测定，含水率采用烘干法测定，碱解氮采用容量法测定，速效钾、速效磷采用电感耦合等离子光谱法(ICP-AES)测定，土壤脲酶活性采用南京建成土壤过氧化氢酶试剂盒测定，土壤过氧化氢酶活性采用南京建成土壤脲酶试剂盒(货号：A121-1-1)测定。

3 结果与分析

3.1 改良土壤基本理化性质

土壤 pH 是影响植物生长的重要指标。由图 3—

a 可见, 对照组 CK 的土壤 pH 值为 8.96, 呈强碱性, 其他实验组的 pH 值为 7.86~8.73, 说明改良后的土壤碱性有所下降。其中未施加菌剂的实验组(Y1、Y2) pH 值为 7.86~7.97, 低于施加了菌剂的实验组(A-I、X1、X2, pH 值 8.2~8.73), 主要是由于菌剂分解土壤中的结合钾, 并且将空气中的 N_2 变为 NH_3 , K^+ 、 NH_3 与土壤中的水分子结合形成碱性物质, 从而使土壤的 pH 值上升。

土壤有机质是衡量土壤养分与肥力的重要指标。由图 3-b 可见, 有机质含量在不同实验组表现出显著差异, 在所有添加了菌剂的实验组(A-I、X1、X2)含量较低, 可能是由于植物的生长发育会极大地消耗有机质的含量, 土壤中的有机物会被微生物分解并被植物进一步吸收, 导致有机物含量下降。在施加了养分肥料的实验组(A、B、C、Y2)中, 有机质含量显著高于对照组和其他实验组, 原因是添加的有机肥会给尾矿带入大量的有机质。但在施加了城市固废和菌剂

的实验组(D-I)中, 有机质含量低于对照组, 可能是因为随着植物生物量的快速增加, 微生物会促进植物对有机质的吸收和利用, 使尾矿中的有机质含量降低。

土壤电导率可以反映土壤的盐分状况, 电导率结果显示(图 3-c), 仅施用了城市固废的实验组 Y1 的电导率与对照组 CK 的电导率相差不大, 而同时又施用养分肥料的实验组 Y2 的电导率较对照组提高了 148.3%, 说明添加养分肥料会提高土壤的盐分, 因此, 添加有机肥不利于植物在改良土壤的长时间定植。

3.2 营养含量

土壤速效性养分指可被植物直接吸收利用的土壤养分, 可以较直观地反映出土壤对植物的肥力供应能力。由图 4 可知, 对照组(CK)3 种营养含量均最低(碱解氮为 3.0 mg/kg, 速效钾为 81.9 mg/kg, 速效磷为 1.15 mg/kg), 仅施加了城市固废的实验组 Y1 中营养含量最高, 分别达到 90 mg/kg、356 mg/kg 和 53.7 mg/kg。在混合施加了城市固废和菌

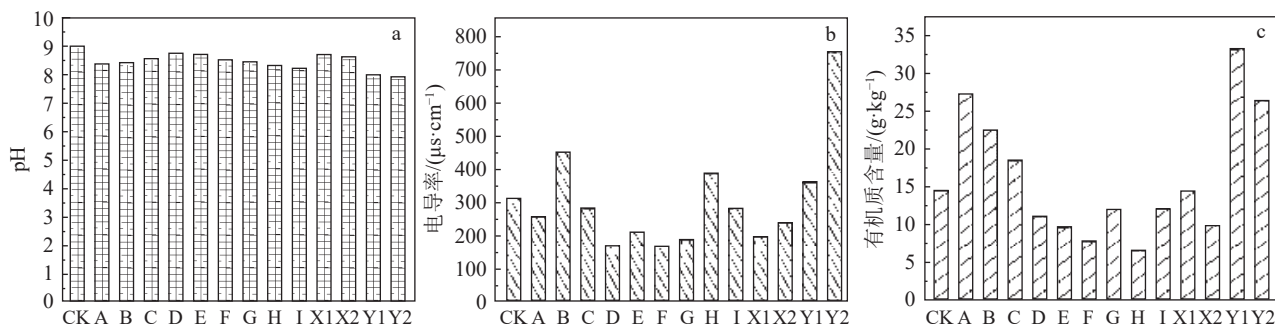


图 3 尾矿基本理化性质

Fig. 3 Basic physical and chemical nature of tailings

a—土壤 pH 值; b—土壤有机质含量; c—土壤电导率

a—Soil pH value; b—Soil organic matter content; c—Soil electrical conductivity

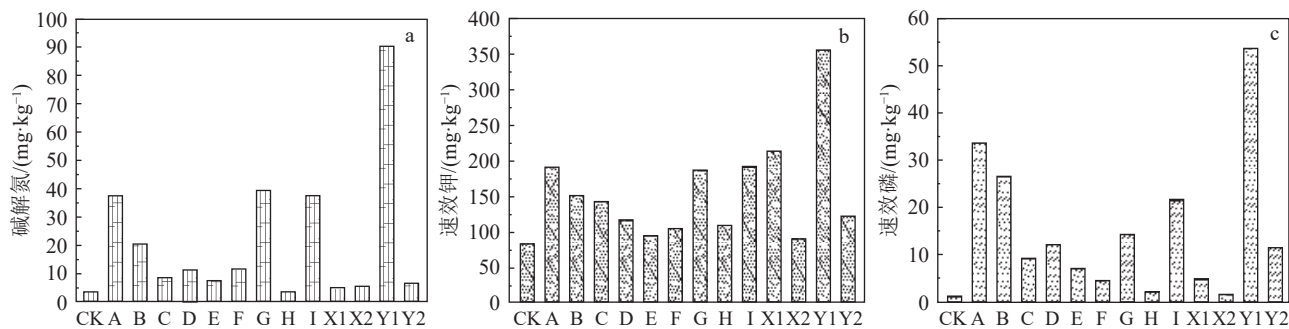


图 4 尾矿中营养含量

Fig. 4 Nutritional content in the tailings

a—碱解氮; b—速效钾; c—速效磷

a—Alkaline nitrogen; b—Ast-acting potassium; c—Fast-acting phosphorus

剂后,施加固氮菌和解钾菌的实验组 I 的营养含量具有明显优势(碱解氮 7.0 mg/kg,速效钾 191 mg/kg,速效磷 21.7 mg/kg),但也均低于仅施加城市固废实验组 Y1,这是由于添加微生物会促进植物对营养成分的吸收。由此说明,施加城市固废的效果强于施加养分肥料和混合施加养分肥料与城市固废的实验组。

3.3 酶活性

土壤酶活性是土壤代谢的重要因素,其中脲酶活性与微生物量有较密切的关系;过氧化氢酶活性能够表示出土壤环境中微生物的生化活性、有机质积累程度和土壤腐质化强度。由图 5 可见,在实验组 G、H、I 和 Y1 中脲酶活性相对较高,这 4 组均施加了城市污泥固废,说明添加城市固废会提高土壤中的脲酶活性,其微生物量提高效果好,起到了对土壤的修复效果。同时这 4 组实验中的过氧化氢酶活性含量也相对较高,说明城市固废可分解较多的过

氧化氢,减少过氧化氢在尾矿中的积累,从而较好地降低过氧化氢的毒害作用。在添加城市固废的同时施加菌剂,也会显著提高土壤中的脲酶和过氧化氢酶活性。

3.4 植物指标

检测修复实验结束前后植物的生长状况,并对每个实验区进行对比,从植物高度看(图 6-a),对照组紫花苜蓿平均高度为 2.5 cm,而实验组平均高度为 8.0 cm,提高了 220%,所有实验组紫花苜蓿的植株高度均高于对照组,且在混合施加实验组中效果更明显;对照组披碱草平均高度为 4.5 cm,实验组平均高度为 9.0 cm,提高了 100%,根系非常密集,大大增加了尾矿砂的保水能力和尾矿的抗风蚀能力。

生物量能直观地反映植物的生长发育情况,由图 6-b 可知,实验组生物量远高于对照组,植物地上、地下生物量表现一致,地上生物量提高了 82.1%~

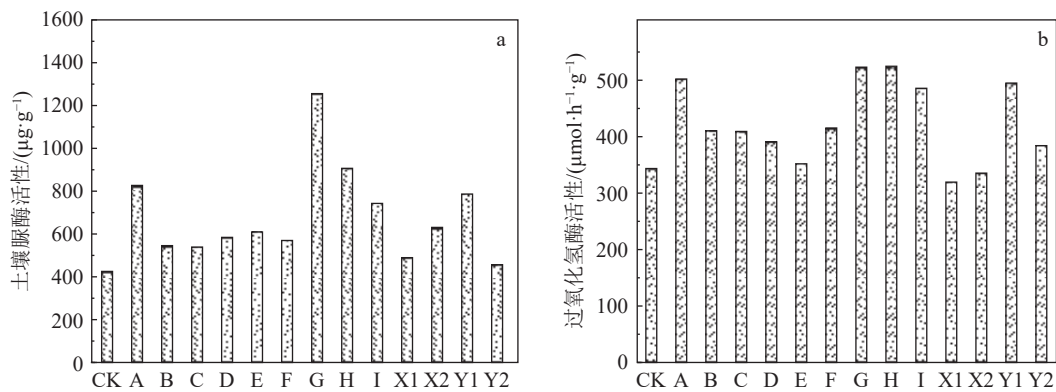


图 5 土壤酶活性

Fig. 5 Soil enzyme activity

a—脲酶活性; b—过氧化氢酶活性

a—Urease activity; b—Catalase activity

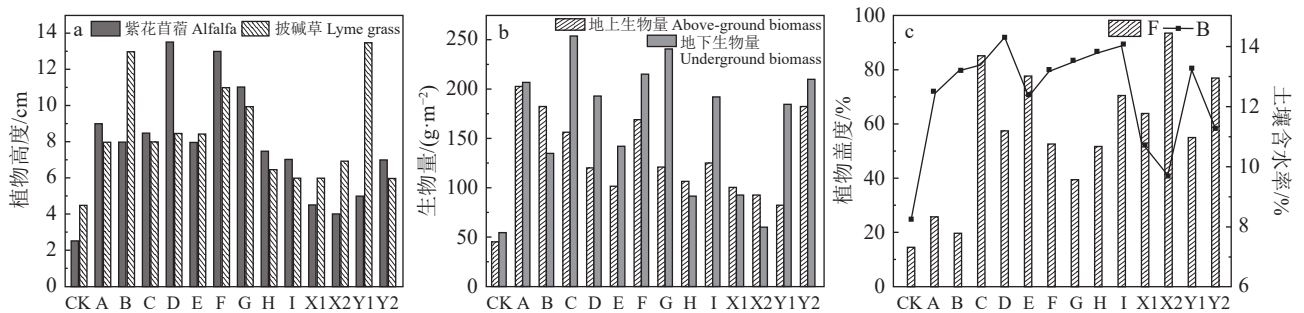


图 6 植物指标图

Fig. 6 Plant indicator diagrams

a—植物高度; b—生物量; c—植物盖度(F)与土壤含水率(B)

a—Plant height; b—Biomass; c—Plant cover (F) and soil moisture content (B)

348.89%, 地下生物量提高了 9.24%~358.16%。其中, 添加了解钾菌和固氮菌的 C、F、I 组中地上和地下生物量均有显著提高。

植物盖度能反映植物的茂密程度, 由图 6-c 可见, 对照组的植物盖度只有 25%, 植物覆盖率低, 而实验组盖度可以达到 80% 左右。在 D 组中植物盖度最高为 92%, 较对照组提高了 67%, 其次为 I 组, 盖度为 89%, 较对照组提高了 64%。

原尾矿含水率为 3.68%, 由图 6-c 可以看出, 种植植物在提高尾矿含水率方面有非常显著的效果, 其中 C、F、I、X2 组含水率均较高, 可能是因为这 3 组均添加了解钾菌, 解钾菌对提高尾矿的保水性有一定促进效果。

由以上结果可知, 与对照组相比, 实验组的植物植株高度、生物量、盖度均有显著提高, 且在施加了解钾菌和固氮菌的实验组中效果更明显。

4 讨论与展望

4.1 植株生长情况及修复效果

将植物(紫花苜蓿、披碱草)完整地取出后进行对比, 发现对照组植株矮小、根系纤细, 对尾矿砂的固定能力较差; 实验组植株生长茂盛, 根系发达, 在尾矿中定植较深, 能起到很好的保水固砂能力(图 7)。由此可以看出, 对尾矿进行处理之后, 可以明显改善植物的生长发育情况, 提高植物的定植率, 对铁尾矿的修复起到非常好的作用。

铁尾矿主要含大量的氧化铁矿物、少量的硅酸盐矿物及一定量的氧化铝矿物, 这些氧化物使得铁尾矿具有贫瘠无营养且难吸收利用的特点, 对植物的生长发育极其不利。由图 8 可以看出, 在种植 3 个月后, 未添加菌剂与基质的对照组, 植物发芽率与定植率非常低, 植物的生长效果很差, 说明直接在尾矿上种植植被不可取。植物生长情况及修复效果为: I 组>Y1 组>X1 组>CK 组, 同时根据土壤和植被的各项检测指标结果, 施加城市固废和菌剂可以促进植被对有机质、营养成分的吸收, 提高土壤中的酶活性, 有助于植物生长并提高植物定植率。由此说明, 混合施加城市固废和菌剂对铁尾矿修复效果更佳。微生物强化固废技术对尾矿的修复效果非常理想, 可实现对尾矿的修复和尾矿砂的成土利用。

4.2 铁尾矿修复研究

在废弃矿山的生态恢复过程中, 微生物的作用

不容忽视, 微生物菌剂修复是一种新兴的生态修复技术, 主要利用根际微生物的作用, 改善土壤的微环境, 提高植被的养分状况, 促进植被的生长, 从而达到恢复废弃矿山生态的目的(张金池等, 2022)。Grandlic et al.(2008)利用植物促生菌加强尾矿的植被恢复, 有针对性地选择植物促生菌, 提高植物成活率, 减少堆肥添加量; Mendoza-Hernández et al.(2019)利用芥菜接种植物促生菌的方式修复尾矿, 结果显示, 雷氏菌和肠杆菌能够促进芥菜的生长和尾矿中金属的植物稳定化; 夏雄等(2024)复合施用微生物菌剂和玉米秸秆对凹土尾矿进行壤质化改良, 显著降低了尾矿的 pH 值、电导率和体积质量, 增加了孔隙度与保水性。铁尾矿土壤结构差、理化性质极端、养分含量较低, 并且具有高盐、贫瘠、碱性、无营养等特点, 对植物的定植和生长发育极其不利, 阻碍植物在尾矿中的正常发育。废弃矿山的植物-微生物修复方法可以实现尾矿原位修复, 同时具有操作简单、成本较低等优点, 因此受到研究者的广泛关注(田佳榕等, 2020)。近年来, 也有不少学者采用此方法对铁尾矿进行修复研究。宋凤敏等(2016)将铁尾矿和剩余污泥按不同质量比例混合后的混合物作为培育基底, 对 4 种短期生长叶类植物进行 35 天盆栽试验, 结果表明, 当铁尾矿和剩余污泥质量按照 6:4 进行添加时, 茼蒿的发芽率最高, 达到 57.33%; 崔照豪(2018)利用植物改良技术和植物-微生物联合改良技术对尾矿进行改良, 更加高效地改善了尾矿的理化性质, 提高了植物的生命活性; 李雯(2014)从不同植被恢复模式的铁尾矿中筛选出高效土著固氮微生物, 在紫花苜蓿上进行接种试验, 接种试验后植株的株高比未接种的平均增加了 73%; 张宝娟等(2015)以铁尾矿为基质, 通过盆栽试验研究不同改良措施对苜蓿和紫穗槐生长的影响, 认为尾矿中添加土壤比补充肥料更有利于苜蓿、紫穗槐生长。

本次研究将城市固废、铁尾矿及 4 种菌剂混合配比, 再通过试验场分区试验进行植物定植修复, 发现每个试验区实验组的植物植株高度、生物量、盖度较对照组显著提高。植物紫花苜蓿和披碱草的平均生物量分别提高了 220% 和 240%, 植株平均高度分别提高了 220% 和 100%。实验数据表明, 铁尾矿施加城市固废能够显著提高尾矿中的有机质、速效养分含量, 菌剂的施加进一步促进了植物对养分的吸收, 提高了尾矿中的酶活性, 进而促进植物生长。该



图 7 植株对比图

Fig. 7 Comparison of plant specimens

a—紫花苜蓿对照组; c—紫花苜蓿实验组; b—披碱草对照组; d—披碱草实验组

a—Control group of alfalfa; c—Experimental group of alfalfa; b—Control group of Elymus nutans; d—Experimental group of Elymus nutans

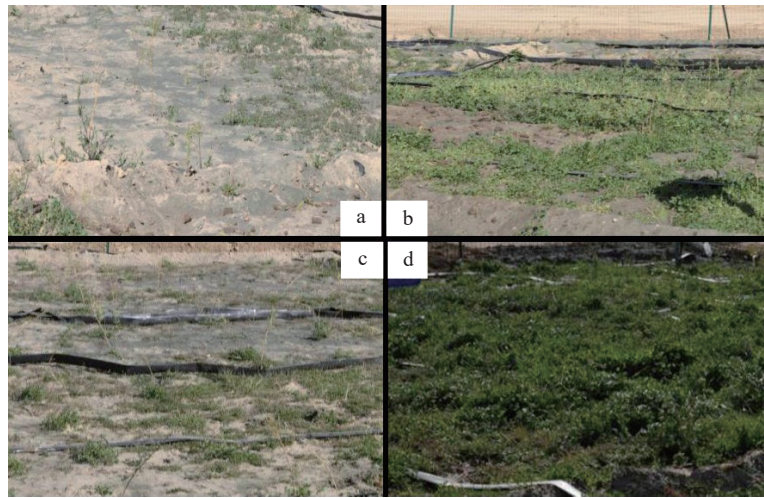


图 8 现场效果图

Fig. 8 On-site effect diagrams

a—对照组 CK; b—固废组 Y1; c—菌剂组 X1; d—固废+菌剂组 I

a—Control group CK; b—Solid waste group Y1; c—Fungus group X1; d—Solid waste + bacterial agent group I

研究不仅可以促进城市污泥固废的再利用,也能够改善铁尾矿的理化性质,重构植物根际微生态系统,提高植物定植率和生长发育,进一步实现铁尾矿与城市固废 2 种环境污染物的共同修复处置工作,为未来废弃矿山与城市固废的综合修复利用提供一种新的思路。

4.3 尾矿废弃地修复技术适用性分析

铁矿尾矿库具有典型的重金属含量高、营养元

素匮乏、土壤结构不良等尾矿特性,这些特性限制了植被的自然恢复(杨辉等, 2022)。通过接种微生物菌剂,可以有效降低重金属的活性,减少其对植物的毒害作用(李韵诗等, 2015)。同时,微生物菌剂还能提供植物所需的营养元素,促进植物的生长和发育(沈仁芳等, 2015)。城市固废中含有丰富的有机质和营养元素,可以作为尾矿库土壤改良的有机物料(Li et al., 2020)。通过合理利用城市固废,不仅可以

减少固废对环境的污染,还能实现资源的循环利用。在尾矿库中掺入适量的城市固废,可以改善土壤结构,提高土壤肥力,为植被恢复提供物质基础。本次研究采用的微生物菌剂强化城市固废的尾矿库植被恢复技术,不仅能够有效实现尾矿砂的改良,确保植物的高存活率,还能够显著促进植物的生长,使植物的覆盖率达到 90% 以上,土壤肥力得到显著提升。与传统的植被恢复技术相比,该技术具有更高的效率和更好的生态效果。

将微生物菌剂强化城市固废的技术应用于尾矿库的植被恢复中,一方面,微生物菌剂可以降解尾矿库中的难降解物质,如解钾菌能够分解尾矿砂中的难溶性 K 元素,将其转化为植物可直接吸收的可溶性钾,从而增加土壤中的钾含量,提高土壤的肥力(韩苗等, 2022);另一方面,通过接种提供营养物质的微生物和城市固废,可以增加植物对营养元素的吸收和利用,促进植物的生长和发育(阎佩云, 2019)。同时,结合科学合理的植物选择,可进一步提高植被恢复的效果。根据本次研究结果,固氮菌与解钾菌结合城市污泥在尾矿修复中表现出最优效果,在促进植物生物量积累、提升植株高度、增加植物盖度等方面均展现出显著的修复作用,从而有效改善了尾矿的生态状况。

因此,基于微生物菌剂强化城市固废的尾矿库植被恢复技术具有显著的适用性和优势,不仅提高了尾矿库的土壤肥力和植物生长状况,还为尾矿库的生态恢复提供了一种新的、高效的方法。同时,该技术还具有环保和可持续性的优点,符合当前生态文明建设的要求。

4.4 不足与建议

虽然目前针对铁尾矿植被恢复的实验已初步达到了预期的修复效果,但本次研究仍存在一些不容忽视的局限性。植被恢复是一个漫长而复杂的过程,其成效需经受时间的考验。因此,当前实验虽达到预期效果,但缺乏长时间序列的系统监测数据,难以全面评估恢复效果的持久性与稳定性。针对这一不足,未来应加强对铁尾矿植被恢复项目的长期跟踪与监测,建立全面的生态评估体系,以科学数据支撑修复效果的长期验证。

此外,鉴于城市污泥固废与菌剂在土壤改良中的潜力,建议后续研究深入探讨不同配比下这两者对铁尾矿植被恢复的优化作用。通过精细调控配

比,探索实现最高效、最经济、最环保的修复方案,为铁尾矿废弃地的生态重建提供更坚实的科学依据。

5 结 论

(1)针对铁基尾矿养分含量较低、高盐、贫瘠、碱性、无营养的特点,且难以有效利用的问题,本研究针对性地选择菌剂,分别为解磷菌(J)和解钾菌(D)、固氮菌(H)和蒙科优菌(B)。实验结果表明,铁尾矿混合施加城市固废和菌剂后,pH 值降低,有机质含量降低,营养含量增加,酶活性提高,尾矿理化性质得到显著改善。而施用养分肥料会提高土壤的盐分,不利于植物在改良土壤中长时间定植。

(2)选取当地优势植物紫花苜蓿和披碱草为种植对象,经过 2 个月的种植,结果表明,施加了城市污泥固废和菌剂的实验组修复效果最显著,植物植株高度、生物量、盖度均有显著提高,且在施了解钾菌和固氮菌的实验组效果更明显,盖度提高了 64%,生物量提高了 220%,尾矿中的速效成分也均有较大提高。

(3)添加城市固废对铁尾矿的修复效果较好,且功能微生物(固氮菌和解钾菌)可以有效地强化修复效果,基于微生物菌剂强化城市固废的尾矿植被恢复技术,不仅可以促进城市污泥固废的再利用,同时也能够解决植物成活率低、定植率低的问题,使植物生长情况明显提升,实现低成本高效益对铁尾矿的生态修复。

References

- Cao D. 2023. Study of microbial-induced carbon fixation technology in soils and its carbon sequestration pathways and molecular mechanisms[D]. Master's Thesis of Inner Mongolia University of Science & Technology (in Chinese with English abstract).
- Chen J M, Yan Z L, Zheng Y M. 2023. The relationship between water quality of eutrophic lakes and aquatic plants[J]. Journal of Shaoxing University, 43(1): 41-47 (in Chinese with English abstract).
- Chen M. 2021. Analysis and research on key technologies of geotechnical engineering for restoration and utilization of abandoned mines[D]. Master's Thesis of Southeast University (in Chinese with English abstract).
- Cui Z H. 2018. Thesis Title: Combined remediation and improvement techniques of plant-microorganism in utilization of iron tailings[D]. Master's Thesis of Shandong University (in Chinese with English abstract).
- Grandlic C J, Mendez M O, Chorover J, et al. 2008. Plant growth-promoting bacteria for phytostabilization of mine tailings[J].

- Environmental Science & Technology, 42(6): 2079–2084.
- Jing X D, Wang Z J, Li G B. 2022. Application prospect of tailings disposal technology based on mining filling[J]. Mining engineering, (11): 40–42 (in Chinese with English abstract).
- Kumari M, Chandel M K. 2023. Anaerobic Co-digestion of sewage sludge and organic fraction of municipal solid waste: Focus on mix ratio optimization and synergistic effects[J]. *Journal of Environmental Management*, 345: 118821.
- Li H, Li Y, Xu Y, et al. 2020. Biochar phosphorus fertilizer effects on soil phosphorus availability[J]. *Chemosphere*, 244(C): 125471.
- Li W. 2014. The screening and identification of efficient azotobacter in iron tailings vegetation restoration areas and analysis of nitrogen fixation effect[D]. Master's Thesis of Hebei Agricultural University (in Chinese with English abstract).
- Li Y S, Feng C L, Wu X F, et al. 2015. A review on the functions of microorganisms in the phytoremediation of heavy metal-contaminated soils[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 35(20): 6881–6890(in Chinese with English abstract).
- Liang Y D, Kuang Z, Sun N Z, et al. 2023. Effects of different ecological floating bed plant assemblages on water purification and zooplankton community structure in shallow eutrophic lakes[J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 38(2): 302–310(in Chinese with English abstract).
- Liang Z, Yi L, Huang Z, et al. 2019. A novel and green metallurgical technique of highly efficient iron recovery from refractory low-grade iron ores[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 7(22): 18726–18737.
- Liao Z J. 2021. Research on ecological restoration and sustainable development of mine abandonment[J]. *Journal of Green Science and Technology*, 23(12): 40–42 (in Chinese).
- Liu J F, Dai T T, Li W, et al. 2023. Simulation study on ferric chloride modified zeolite combined with submerged plant for the restoration of eutrophication[J]. *Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition)*, 51(2): 121–127(in Chinese with English abstract).
- Liu S T. 2023. Analysis for the current situation of soil pollution and its remediation measures in China[J]. *Leather Manufacture and Environmental Technology*, 4(11): 194–196 (in Chinese with English abstract).
- Mendoza-Hernández C J, Vázquez-Delgado R O, Castillo-Morales M, et al. 2019. Phytoremediation of mine tailings by *Brassica juncea* inoculated with plant growth-promoting bacteria[J]. *Microbiological Research*, 228(C): 126308.
- Pan B F, Shi Y N. 2015. Research status of comprehensive utilization of iron tailings[J]. *West-China Exploration Engineering*, 27(5): 153–155, 159 (in Chinese).
- Naveenkumar R, Iyyappan J, Pravin R, et al. 2023. A strategic review on sustainable approaches in municipal solid waste management and energy recovery: Role of artificial intelligence, economic stability and life cycle assessment[J]. *Bioresource Technology*, 379: 129044.
- Saxena S, Srivastava R K, Samaddar A B. 2010. Towards sustainable municipal solid waste management in Allahabad City[J]. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 21(3): 308–323.
- Shao K. 2008. Mineral railings affect on environment[J]. *Non-Ferrous Mining and Metallurgy*, (2): 43–45 (in Chinese with English abstract).
- Sheng R F, Zhao X Q. 2015. Role of soil microbes in the acquisition of nutrients by plants[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 35(20): 6584–6591 (in Chinese with English abstract).
- Song F M, Zhang X C, Li C, et al. 2016. The trial of urban residual sludge in the ecological restoration of iron ore tailings reservoir[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 44(11): 453–456 (in Chinese).
- Song Y H, Dai W L, Zhao J Z. 2020. Preparation and photocatalytic properties of Ag/Bi₂O₃/Cl₂ nanocomposites[J]. *Journal of Functional Materials*, 51(12): 12101–12106 (in Chinese with English abstract).
- Tian J R, Ma W B, Qi X D, et al. 2020. Effectiveness of vegetation recovery in an ecological restoration area around an iron tailings pond in Inner Mongolia[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 37(4): 601–608 (in Chinese with English abstract).
- Velempini T, Ahamed M E H, Pillay K. 2023. Heavy-metal spent adsorbents reuse in catalytic, energy and forensic applications- a new approach in reducing secondary pollution associated with adsorption[J]. *Results in Chemistry*, 5: 100901.
- Xia X, Guo K, Pan Z Q, et al. 2024. Experimental study on soil amelioration of attapulgite clay tailings using microbial agents and maize straw[J]. *Journal of Safety and Environment*, 24(10): 4107–4114 (in Chinese with English abstract).
- Wang X X, Hu Z Z, Ma J R, et al. 2023. Effect of semi-continuous water washing on the combustion behaviors of agricultural organic solid waste[J]. *Carbon Resources Conversion*, 6(1): 58–64.
- Xie D D, Tong X, Xie X, et al. 2016. Application Research of Dressing Equipment Used in Tailings Re-concentration[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, (2): 75–78(in Chinese with English abstract).
- Yan P Y. 2019. The improvement of soil microorganisms in the promotion of plant nutrition[J]. *Agriculture of Jilin*, (9): 73(in Chinese).
- Yang H, Hou Y L, Hao Z, et al. 2022. Research progress and prospect of phytoremediation technology for iron tailings waste land[J]. *China Mining Magazine*, 31(12): 43–49(in Chinese with English abstract).
- Yu F, Pei Y Z, Zhang X C, et al. 2023. Occurrence and distribution characteristics of aged microplastics in the surface water, sediment, and crabs of the aquaculture pond in the Yangtze River Delta of China[J]. *Science of the Total Environment*, 871: 162039.
- Zhang B J, Chen Y, Guo S S, et al. 2015. Effects of different improvement measures on plant growth of *Medicago sativa* and *Amorpha fruticosa* in iron tailings[J]. *Hebei Journal of Forestry and Orchard Research*, 30(2): 129–135(in Chinese with English abstract).
- Zhang J C, Li C, Jia Z H, et al. 2022. Application of functional microorganisms in ecological restoration of abandoned mines[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 46(6): 146–156(in Chinese with English abstract).
- Zhang X T. 2010. Summarization of the tailings filling technology[J]. *Steel Industry Project*, (3): 16–18(in Chinese).

附中文参考文献

- 曹丹. 2023. 土壤中微生物诱导碳固定技术的应用及其固碳途径与分子机制研究[D]. 内蒙古科技大学硕士学位论文.
- 陈杰敏, 颜泽林, 郑雅铭. 2023. 富营养化水体水质与水生植物关系的实验研究[J]. 绍兴文理学院学报, 43(2): 41–47.
- 陈明. 2021. 废弃矿山修复利用岩土工程关键技术分析研究[D]. 东南大学硕士学位论文.
- 崔照豪. 2018. 铁尾矿土壤化利用植物—微生物联合修复与改良技术研究[D]. 山东大学硕士学位论文.
- 韩苗, 朱晓艳, 陈国炜, 等. 2022. 解钾菌及其释钾微观机制的研究进展[J]. 土壤学报, 59(2): 334–348.
- 荆晓东, 王增加, 李广波. 2022. 基于采矿充填的尾矿处置技术应用前景[J]. 采矿工程, (11): 40–42.
- 李雯. 2014. 铁尾矿植被恢复区高效固氮菌的筛选鉴定及效果分析[D]. 河北农业大学硕士学位论文.
- 李韵诗, 冯冲凌, 吴晓芙, 等. 2015. 重金属污染土壤植物修复中的微生物功能研究进展[J]. 生态学报, 35(20): 6881–6890.
- 梁翼东, 匡箴, 孙宁泽, 等. 2023. 不同植物组合的生态浮床对浅水富营养化湖泊水质净化效果及浮游动物群落结构的影响[J]. 大连海洋大学学报, 38(2): 302–310.
- 廖正家. 2021. 矿山废弃地生态恢复与可持续发展研究[J]. 绿色科技, 23(12): 40–42.
- 刘金福, 代涛涛, 李威, 等. 2023. 氯化铁改性沸石联合沉水植物修复富营养化水体模拟研究[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 51(2): 121–127.
- 刘舒婷. 2023. 我国土壤污染现状及治理修复措施分析[J]. 皮革制作与环保科技, 4(11): 194–196.
- 潘宝峰, 时彦宁. 2015. 铁尾矿综合利用研究现状[J]. 西部探矿工程, 27(5): 153–155, 159.
- 邵坤. 2008. 浅析尾矿对环境的影响[J]. 有色矿冶, (2): 43–45.
- 沈仁芳, 赵学强. 2015. 土壤微生物在植物获得养分中的作用[J]. 生态学报, 35(20): 6584–6591.
- 宋凤敏, 张兴昌, 李琛, 等. 2016. 城市剩余污泥在铁矿尾矿库生态修复中的试验[J]. 江苏农业科学, 44(11): 453–456.
- 宋月红, 代卫丽, 赵敬哲. 2020. Ag/Bi₂O₃/Cl₂ 纳米复合材料的制备及光催化性能研究[J]. 功能材料, 51(12): 12101–12106.
- 田佳榕, 马伟波, 戚旭东, 等. 2020. 内蒙古某铁矿尾矿库生态修复区的植被恢复效果[J]. 农业资源与环境学报, 37(4): 601–608.
- 夏雄, 郭凯, 潘子晴, 等. 2024. 微生物菌剂与秸秆对凹土尾矿壤质化改良试验研究[J]. 安全与环境学报, 24(10): 4107–4114.
- 谢丹丹, 童雄, 谢贤, 等. 2016. 尾矿再选设备应用进展[J]. 矿产保护与利用, (2): 75–78.
- 阎佩云. 2019. 土壤微生物在植物营养促进作用中的改善作用[J]. 吉林农业, (9): 73.
- 杨辉, 侯永莉, 郝喆, 等. 2022. 铁尾矿废弃地植物修复技术研究进展及展望[J]. 中国矿业, 31(12): 43–49.
- 张宝娟, 陈颖, 郭尊松, 等. 2015. 铁尾矿不同改良措施对苜蓿和紫穗槐生长的影响[J]. 河北林果研究, 30(2): 129–135.
- 张金池, 李翀, 贾赵辉, 等. 2022. 功能性微生物在废弃矿山生态修复中的应用[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 46(6): 146–156.
- 张晓铜. 2010. 尾矿充填技术综述[J]. 钢铁工程, (3): 16–18.