

中南林业科技大学学报

Journal of Central South University of Forestry & Technology

ISSN 1673-923X，CN 43-1470/S

《中南林业科技大学学报》2026年第5期

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923X.2026.05.013

论文标题： 不同基质改良下6种木本植物对黄金尾矿渣的耐性比较

作　　者： 谭 平，柳 俊，杨 杭，等

收稿日期： 2025-03-03

引文格式： 谭平,柳俊,杨杭,等.不同基质改良下6种木本植物对黄金尾矿渣的耐性比较[J].中南林业科技大学学报,2026,46(5):127-136.

TAN P, LIU J, YANG H, et al. Comparison of tolerance to gold tailings slag among six woody plant species under different substrate improvements[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(5):127-136.

相关论文推荐

Recommended articles

丛枝菌根真菌对不同铅锌矿渣处理模式生态拦截效果的影响

Impact of arbuscular mycorrhizal fungi on ecological interception effect of different treatment modes of lead-zinc slag

不同植物模式对铅锌矿渣修复的根际效应

Rhizosphere effect of different plant patterns on lead-zinc slag remediation

复合改良剂强化博落回修复锰矿渣的机理

Mechanism of compound modifiers strengthening *Macleaya cordata* to remediate manganese slag

4种改良剂在锰矿渣木本植物修复中的比较

Comparison of four modifiers on restoration of woody in manganese mining areas

东江湖铅锌矿渣堆场优势植物重金属富集特征

Heavy metals enrichment characteristics of the dominant plants in lead-zinc slag yard along Dongjiang lake reservoir

泥炭土改良铅锌矿渣下植物修复效果研究

Plants remediation effects of peat soil on lead-zinc tailings

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2026.05.013
http: //qks.csuft.edu.cn

不同基质改良下 6 种木本植物对黄金尾矿渣的耐性比较

谭　平[1]，柳　俊[1]，杨　杭[1]，刘志宏[2]，陈永华[1]

（1. 中南林业科技大学 生态环境学院，湖南 长沙 410004；2. 衡阳市林业局，湖南 衡阳 421000）

摘　要：【目的】研究蘑菇渣添加对黄金尾矿基质改良效果及其对植物生长状况的影响，并筛选出对黄金尾矿具有良好适应性和耐性的植物品种。【方法】针对黄金尾矿存在养分极度匮乏、保水保肥能力差、物理结构欠佳、重金属过量累积、现有修复植物以草本为主等问题，选取栾树 *Koelreuteria paniculata*、夹竹桃 *Nerium oleander*、泡桐 *Paulownia fortunei*、火炬树 *Rhus typhina*、欧洲丁香 *Syringa vulgaris*、银叶金合欢 *Acacia podalyriifolia* 为供试植物，以蘑菇渣（SMC）为改良剂，比较 100% 黄金矿渣（CK）、90% 矿渣 +10% 蘑菇渣（S1）和 80% 矿渣 +20% 蘑菇渣（S2）3 种基质的理化性质，以及植物在不同基质中的生理生化特征与重金属吸收、转运差异。【结果】1）尾矿土壤中加入蘑菇渣后，含水率提升了 4.21 ～ 16.53 个百分点，总孔隙度提高了 12.39 ～ 25.44 个百分点，有机质含量和阳离子交换量分别较对照提升了 66.55% ～ 100.35% 和 36.71% ～ 63.24%。2）与对照组比较，改良组植物在长势、生物量、株高增量、叶绿素含量、重金属吸收量及转运系数上整体表现更优；但在改良组内部，不同植物种类的表现呈现出差异性。3）总体来看，泡桐、夹竹桃与栾树展现出较强的重金属耐受能力，尤其是夹竹桃，其 S2 处理下综合表现最优，运用 TOPSIS 综合评价法对各生理生化指标进行综合评估，获得了最高的评分。【结论】蘑菇渣的添加可改良尾矿土壤孔隙结构，改善透水通气条件，有效提升土壤肥力。改良组植物的生长发育情况普遍要优于对照组。综合各生长与生理指标，夹竹桃在 S2 处理（80% 矿渣 +20% 蘑菇渣）下表现最优，可作为改良黄金尾矿的优势修复植物。

关键词：黄金尾矿；蘑菇渣；植物修复；耐性木本植物筛选

中图分类号：S718.51；X53　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1673-923X(2026)05-0127-10

Comparison of tolerance to gold tailings slag among six woody plant species under different substrate improvements

TAN Ping[1], LIU Jun[1], YANG Hang[1], LIU Zhihong[2], CHEN Yonghua[1]

(1. School of Ecology and Environment, Central South University of Forestry & Technology, Changsha 410004, Hunan, China;
2. Hengyang Forestry Bureau, Hengyang 421000, Hunan, China)

Abstract:【Objective】To investigate the effects of mushroom residue (SMC) addition on the improvement of gold tailings substrate and plant growth, and to screen plant species with good adaptability and tolerance to gold tailings.【Method】In view of the problems existing in gold tailings, such as extreme nutrient deficiency, poor water and fertilizer retention capacity, unsatisfactory physical structure, excessive accumulation of heavy metals, and the dominance of herbs in existing remediation plants, *Koelreuteria paniculata, Nerium oleander, Paulownia fortunei, Rhus typhina, Syringa vulgaris* and *Acacia podalyriifolia* were selected as test plants, and mushroom residue (SMC) was used as the amendment. The physical and chemical properties of three substrates (100% gold tailings as control (CK), 90% tailings + 10% SMC (S1), 80% tailings + 20% SMC (S2)), as well as the differences in physiological and biochemical characteristics, heavy metal uptake and translocation of plants in different substrates were compared.【Result】1) After adding SMC to tailings, the water content increased by 4.21-16.53 percentage points, total porosity increased by 12.39-25.44 percentage points, and organic matter content and cation exchange capacity increased by 66.55%-100.35% and 36.71%-63.24% respectively compared with the control.; 2) Compared with the control group, plants in the

收稿日期（Received）：2025-03-03　　**修订日期**（Revised）：2025-04-28

基金项目：国家自然科学基金项目（52000183）；湖南省生态环境厅环保科研项目（HBKT-2021029）。

第一作者：谭平（769449794@qq.com），硕士研究生。

通信作者：柳俊（1071378471@qq.com），实验师，硕士；陈永华（chenyonghua3333@163.com），教授，博士，博士研究生导师。

引文格式：谭平 , 柳俊 , 杨杭 , 等 . 不同基质改良下 6 种木本植物对黄金尾矿渣的耐性比较 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2026,46(5):127-136.

TAN P, LIU J, YANG H, et al. Comparison of tolerance to gold tailings slag among six woody plant species under different substrate improvements[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(5):127-136.

amended groups showed better overall performance in growth vigor, biomass, height increment, chlorophyll content, heavy metal uptake and translocation factor; however, there were interspecific differences among plant species within the amended groups; 3) Overall, *Paulownia fortunei, Nerium oleander* and *Koelreuteria paniculata* exhibited strong heavy metal tolerance, especially *Nerium oleander,* which had the best comprehensive performance under S2 treatment. The TOPSIS comprehensive evaluation method was used to comprehensively assess various physiological and biochemical indicators, and it obtained the highest score. 【Conclusion】The addition of SMC makes the tailings structure looser and more porous, enhances water permeability and aeration, and effectively improves soil fertility. The growth and development of plants in the amended groups are generally better than those in the control group. Based on comprehensive growth and physiological indicators, *Nerium oleander* performs the best under S2 treatment (80% tailings + 20% SMC), and can be used as a dominant remediation plant for improved gold tailings.

Keywords: gold tailings; mushroom residue; phytoremediation; screening of tolerant woody plants

我国是世界第一产金大国，黄金产业在国民经济中占据重要地位。根据中国黄金协会最新发布的统计数据显示：2023 年我国国内黄金原料产量达到了 375.155 t，较上一年度增长 0.84%[1]，其中包含 297.258 t 黄金矿产金与 77.897 t 有色金属副产金。此外，2023 年我国通过进口原料产金 144.134 t，同比增长 14.59%。综合国内产量与进口原料产金，2023 年全国黄金总产量达 519.289 t，同比增幅为 4.31%，彰显了我国黄金产业的强劲发展态势。然而，黄金矿产资源的长期、高强度开发引发了一系列严峻的环境问题，其中黄金尾矿的生态恶化问题尤为突出。黄金尾矿普遍存在养分极度匮乏、土壤结构不良、保水蓄肥效能低下及重金属污染严重等问题，极大地阻碍了矿区植被的生长。当有毒重金属渗透至尾矿周边水体或累积于农作物内时，将会对整个食物链造成危害[2]，进而对人类健康构成潜在风险。因此，实施有效的生态恢复策略以缓解重金属污染、重建矿区健康生态环境显得尤为重要[3]。植物修复是生态环境恢复治理的有效途径[4]，具有成本低廉、高效、环境友好及生态兼容性强等诸多优势[5]。重金属污染土壤的植物修复包括植物提取、植物降解、根际过滤和植物稳定[6]。以往对重金属污染土壤进行植物修复的研究多聚焦于超富集植物，核心目标是提升重金属的提取效率[7]。但目前已知的超累积植物，多为生物量较低的一年生草本植物，不仅植株矮小，且初生根系发育不全，限制了其在大规模修复工程中的应用潜力[8]。因此，具有高生物量、适应性较强、根系发达以及具有较高经济价值的乔木与灌木等木本植物，已经吸引了众多科研人员的关注[9-11]。兼具经济效益和生态保护双重价值的美化类木本植物，在提升土壤和环境品质、改善区域景观等方面作用突出[12]，同时其广泛种植还能增强土壤保水能力，这对于预防土壤侵蚀、稳定沙土以及防治荒漠化都具有积极意义[13]。

黄金尾矿的主要污染源包括汞、铅、镉等重金属，以及硫化物、氰化物等有害化学物质，这些物质在金矿开采和选矿过程中产生，若处置不当会对环境造成严重污染[14]。此外，尾矿颗粒微小，土壤孔隙易遭堵塞，透气性、保水力下降，进而阻碍植物根系的正常发育；同时，土壤 pH 值因重金属及各类有害化学物质而发生改变，伴随盐分与毒素含量攀升，也不利于植物的生长。为减轻黄金尾矿对植物生长的限制，可采取针对性的生态修复措施，如筛选、种植耐重金属污染的植物，同时施用堆肥或有机物以改善土壤结构和营养状况[15]。本研究采用蘑菇渣作为改良剂，已有研究表明，蘑菇渣作为一种有机改良剂，具有多方面的优势和应用效果，加入蘑菇渣可以提高土壤有机质含量、促进植物生长以及改善土壤理化性质和增强植物对重金属的累积能力[16]。木本植物不同于超富集植物，但通过优化矿渣的理化性质，可以改善木本植物的生长条件，进而提升其对重金属的抗性与耐性[17]。一般来说，植物对重金属的抗性与耐性机制，主要是通过根系对重金属的截留、螯合作用，以及改变其根系形态、优化根系解剖结构等方式，减少对重金属的吸收，从而降低重金属对自身的伤害[18]。

本研究以筛选适合在黄金尾矿生长的耐性木本植物为目的，选择栾树 *Koelreuteria paniculata*、夹竹桃 *Nerium oleander*、泡桐 *Paulownia fortunei*、火炬树 *Rhus typhina*、欧洲丁香 *Syringa vulgaris*、银叶金合欢 *Acacia podalyriifolia* 为供试植物，以蘑菇渣为改良剂，通过比较不同处理（CK，100% 矿渣；S1，90% 矿渣 +10% 蘑菇渣；S2，80% 矿渣 +20% 蘑菇渣）下的土壤理化性质、植物生长特征和对重金属的吸收与转移差异，旨在为黄金矿区生态修复树种的选择提供理论基础和技术参考。

1　材料与方法

1.1　供试材料与土壤

栾树、夹竹桃购自浏阳某苗木基地；泡桐、火炬树、欧洲丁香购自江苏宿迁某苗木场；银叶金合欢购自广州某绿化基地，夹竹桃和火炬树均为 2 年生苗，其余试验苗木均为 1 年生苗，株高 10 ～ 75 cm，供试植物的基本情况见表 1。蘑菇渣购自湖南某农业基地，是金针菇种植后留下的废弃基质，其主要成分是棉籽壳、木屑和玉米芯。黄金尾矿采自湖南省平江县某黄金尾矿库，主要为黄金选矿过程中产生的固体废弃物。蘑菇渣和黄金尾矿的基本化学特征见表 2。

表 1　供试植物的基本情况
Table 1　Basic information of the tested plants

植物 Plant name	科 Family	生活型 Life form
栾树 *Koelreuteria paniculata*	无患子科	多年生落叶乔木
泡桐 *Paulownia fortunei*	玄参科	多年生落叶乔木
夹竹桃 *Nerium oleander*	夹竹桃科	常绿灌木或小乔木
火炬树 *Rhus typhina*	漆树科	多年生灌木或小乔木
欧洲丁香 *Syringa vulgaris*	木犀科	落叶灌木或小乔木
银叶金合欢 *Acacia podalyriifolia*	豆科	常绿灌木或小乔木

表 2　蘑菇渣与黄金尾矿的基本化学特征 †
Table 2　Basic chemical characteristics of mushroom residue and tailings

基质 Matrix	pH 值 pH value	有机质含量 Organic matter content / ($g \cdot kg^{-1}$)	总氮含量 Total nitrogen content / ($g \cdot kg^{-1}$)	总磷含量 Total phosphorus content / ($g \cdot kg^{-1}$)	总钾含量 Total potassium content / ($g \cdot kg^{-1}$)	重金属含量 Heavy metal content /($mg \cdot kg^{-1}$)			
						Mn	As	Zn	Pb
蘑菇渣 Mushroom residue	7.16±0.02	53.46±0.37	6.32±0.02	3.28±0.01	8.16±0.03	513±4.02	1.95±0.13	29±2.87	17±1.61
黄金尾矿 Gold tailings	8.62±0.07	5.65±0.25	2.68±0.01	1.26±0.02	1.03±0.01	2 548±5.27	675±4.32	77±3.12	26±1.95

† 数据均为平均值 ± 标准差。The data are all presented as mean ± standard deviation.

1.2　试验设计

本研究试验地点设置在中南林业科技大学生科楼苗圃，该区属亚热带季风气候，冬短少寒，夏长炎热，春秋季节气候温和，季节过渡明显。全年平均气温 17 ～ 18 ℃，夏季气温较高，7 月、8 月平均气温可达 28 ℃以上；年降水量 1 300 ～ 1 600 mm，降水集中在春夏季节，这种雨热同期的特点为土壤重金属污染的植物修复提供了有利的气候条件。试验采用盆栽的方式进行，先将 6 种供试植物幼苗置于装填了红壤的塑料花盆（上、下口径分别为 26、14 cm，高 20 cm）中栽培，同时，将蘑菇渣以 0%、10%、20% 的比例添加于黄金尾矿中，分别记作 CK（100% 黄金矿渣）、S1（10% 蘑菇渣 +90% 矿渣）、S2（20% 蘑菇渣 +80% 矿渣），充分混匀，装入与栽培植物幼苗相同规格的塑料花盆中，每盆约 5 kg 土壤，每组设置 3 个重复，共计 54 盆。在苗圃中，将改良后的矿渣放置一个月以进行活化处理。随后，于 2023 年 4 月上旬，挑选出生长状况优良且长势均匀的幼苗进行定植操作，定植前先用自来水将根系表面的泥土冲洗干净，剪除损伤的烂叶、烂茎、烂根，再将洗净后的植物种植于活化后的改良尾矿中。从移栽种植之日起，每天对植物进行基础养护，根据天气情况适当浇水，同时定期进行除草、松土。植物在生长 8 个月后采集叶片并测定叶绿素含量，同时用卷尺测量各植物的株高，最后收获整株植物，用去离子水冲洗干净，将植物分为地上部分和地下部分，并进行烘干、研磨，用于植物其他指标的测定。

1.3　测定指标与方法

1.3.1　土壤理化性质及重金属含量

土壤样品先置于室内自然风干，土壤 pH 值的测定采用 pH 计（pHS-3C，中国）；土壤含水率的测定采用烘干法 [19]；土壤容重的测定采用环刀法 [20]；土壤有机质含量（SOM）的测定采用重铬酸钾氧化 - 稀释热法 [20]；土壤阳离子交换量（CEC）的测定采用三氯化六氨合钴浸提 - 分光光度法；总氮（TN）含量的测定采用硫酸消煮 - 半微量凯氏定氮法；总磷（TP）含量的测定采用钼锑抗分光光度法；总钾（TK）含量的测定采用 H_2SO_4-H_2O_2 消煮 - 火焰光度计法 [21]。土壤重金属含量的测定：采用王水 - 高氯酸消解法消解，消解后使用火焰原子吸收分光光度计（FAAS, AA-7002，Thermo Fisher Scientific，美国）进行测定 [16]。

1.3.2　植物生长指标及重金属含量

用卷尺测量株高，然后将植物分为地上和地下

两个部分并于 105 ℃下干燥约 30 min，再于 75 ℃下干燥至恒质量，粉碎，密封保存，用于生物量干质量和重金属含量的测定。植物样品采用硝酸 - 高氯酸消解 [22]，得到消解液后使用火焰原子吸收分光光度计测定溶液中 Mn、As、Zn、Pb 的含量。植物根系生长状况用根系扫描仪（Win RHIZO PRO 2013，加拿大）进行测定 [23]。

1.4 数据处理方法

采用 Excel 2021 软件和 SPSS 27.0 软件对数据进行统计分析，各处理组间差异使用单因素方差分析（ANOVA）及 Duncan 多重比较检验进行统计（$P < 0.05$）。绘图使用 Origin 2018 软件完成。

2 结果与分析

2.1 不同处理下基质的理化性质

由表 3 可知，与改良矿渣（S1 和 S2）相比，矿渣（CK）的 pH 值为 8.62，偏碱性，整体养分水平较低，有机质含量仅为 5.65 g·kg^{-1}；含水量也偏低，仅 0.15%。同时，该基质土壤容重最高，孔隙度较小，阳离子交换量最低。总体来看，矿渣基质的理化性质较差，不利于植物生长。

表 3 蘑菇渣的添加对基质理化性质的影响 †

Table 3 Effects of the addition of mushroom residue on the physical and chemical properties of the substrate

处理组 Treatment group	pH 值 pH value	有机质 Organic matter /(g·kg^{-1})	含水率 Water content /%	容重 Bulk density /(g·cm^{-3})	孔隙度 Porosity /%	阳离子交换量 Cation exchange amount /(cmol·kg^{-1})
CK	8.62±0.07 a	5.65±0.25 c	0.15±0.05 c	1.49±0.03 a	43.88±1.29 c	19.15±2.48 c
S1	8.27±0.20 ab	9.41±0.83 b	4.36±0.65 b	1.16±0.02 b	56.27±0.71 b	26.18±3.65 b
S2	8.09±0.20 b	11.32±0.79 a	16.68±1.01 a	0.81±0.02 c	69.32±0.78 a	31.26±2.73 a

† 数据均为平均值 ± 标准差，不同小写字母表示不同处理间差异显著（$P < 0.05$）。
The data are all presented as mean ± standard deviation. Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments ($P < 0.05$).

随着改良剂添加比例的增加，pH 值逐渐降低，在添加量达到 20% 后，与对照相比差异显著（$P < 0.05$）。有机质、含水率、孔隙度、阳离子交换量均随着改良剂添加量的增加而增加，其中含水率提升幅度为 4.21 ～ 16.53 个百分点，孔隙度提升幅度为 12.39 ～ 25.44 个百分点，有机质含量和阳离子交换量也分别提升了 66.55% ～ 100.35% 和 36.71% ～ 63.24%，各处理间差异均达到了显著水平（$P < 0.05$）。但是土壤容重随着改良剂添加量的增加而显著降低（$P < 0.05$），由此表明改良剂的添加有效提升了土壤肥力，改善了土壤结构，增强了土壤保肥能力。

2.2 不同处理下植物的生理生化特征

2.2.1 植物成活与生长情况分析

试验结果表明，供试的 6 种植物对矿渣基质环境的适应能力存在明显差异。其中，火炬树、欧洲丁香及银叶金合欢表现出典型的生理胁迫反应，其营养器官（叶片与茎部）相继出现褐变、干枯乃至坏死现象，推测其在代谢过程中遭受了毒性物质的影响。与之相反，其余 3 种植物在经历短期轻微胁迫后，可通过生理调节机制逐步适应矿渣基质环境，最终恢复至正常的生理状态。

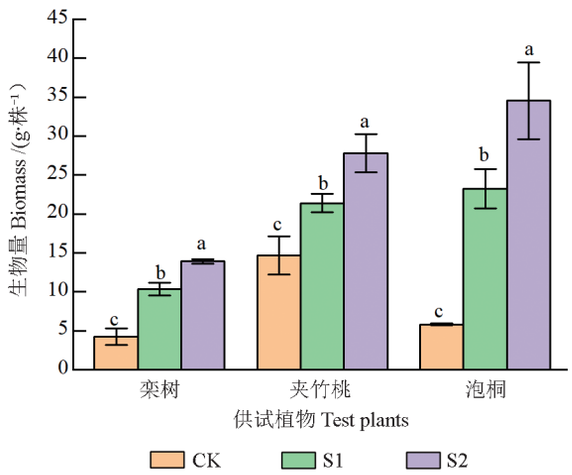
对于同一植物品种而言，在不同改良剂添加量处理下，其生长状况总体上遵循 S2 ＞ S1 ＞ CK 的规律。在种植后 1 个月，各处理植物开始恢复生长，展现出返青现象。相较于对照组，改良组中的植物更早长出新芽，特别是夹竹桃与泡桐表现尤为突出。到收获期时，改良组植物的生长发育状况明显优于对照组。

2.2.2 植物生物量与株高增量分析

由不同植物在蘑菇渣改良剂处理下的生物量变化（图 1）可知，与对照组（CK）相比，添加了蘑菇渣改良剂后，3 种植物的生物量均显著增加（$P < 0.05$）。其中，栾树生物量由 4.3 g/ 株增加到 10.4 g/ 株（S1）和 13.9 g/ 株（S2）；夹竹桃生物量由 14.7 g/ 株增加到 21.4 g/ 株（S1）和 27.8 g/ 株（S2）；泡桐的生物量变化最为明显，S1 处理组（10% 蘑菇渣）生物量达 23.2 g/ 株，是 CK 组的 18.9 倍，S2 处理组（20% 蘑菇渣）生物量为 34.5 g/ 株，是 CK 组的 28.6 倍。3 种供试植物的生物量呈现出 S2 ＞ S1 ＞ CK 的趋势，均随着改良剂添加比例的增加而显著增加（$P < 0.05$），说明改良剂施用量的变化对植物生物量积累具有显著调控作用。

由图 2 可知，蘑菇渣的加入可显著提高植物株高增长量，3 种供试植物的改良处理组株高净增量均显著高于对照组（$P < 0.05$）。其中，夹竹桃的增长幅度最为突出，S1 处理（10% 蘑菇渣）株高净增量为 22.1 cm，是对照组的 1.8 倍；S2 处理（20% 蘑菇渣）株高净增量为 30.2 cm，是对照组

的 2.5 倍。不同比例的蘑菇渣对各植物的株高增量影响存在种间差异，夹竹桃在 10% 蘑菇渣（S1）与 20% 蘑菇渣（S2）处理间株高增量有显著差异（$P < 0.05$），泡桐的 S2 处理组与 S1 处理组之间无显著差异，栾树在不同处理间株高净增量差异较小，整体稳定在 7 cm 左右。



不同小写字母表示不同处理间差异显著（$P < 0.05$）。下同。
Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments ($P < 0.05$). The same below.

图 1　不同处理下植物的生物量
Fig. 1　Plant biomass under different treatments

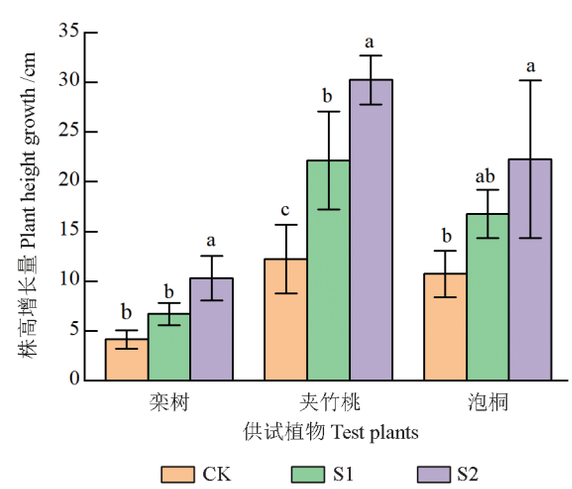


图 2　不同处理下植物的株高增长量
Fig. 2　Increment of plant height under different treatments

2.2.3　植物叶绿素的变化

叶绿素是植物生长发育的重要物质基础[24]。图 3 为不同比例蘑菇渣处理下栾树、夹竹桃和泡桐的叶绿素含量。由图 3 可以看出，在添加了蘑菇渣改良剂后，栾树和泡桐的叶绿素含量较对照组均有显著提升（$P < 0.05$）。其中，泡桐的叶绿素含量随蘑菇渣改良剂比例升高增幅最为明显，S1、S2 和 CK 处理组之间均有显著差异（$P < 0.05$），且 S2 处理组的叶绿素含量最高，是对照组的 2.5 倍；栾树 S2 处理组的叶绿素含量达 3.38 mg/g，是对照的 2.08 倍，而 S1 与 S2 处理组间无显著差异。夹竹桃在添加 10% 蘑菇渣（S1）的条件下与对照组相比无显著差异，但 S2 处理组的叶绿素含量与对照组相比有了显著升高（$P < 0.05$），增幅达最大值，是对照组的 1.28 倍。各处理组的叶绿素含量与对照组相比均有不同程度提升，表明改良剂的添加能够增强植物的抗逆性，促进植物生理代谢活动。

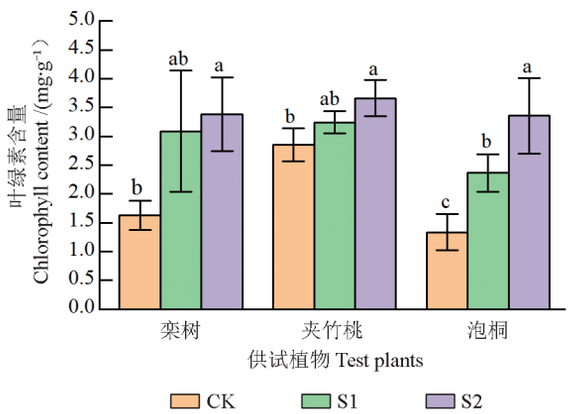


图 3　不同处理下植物的叶绿素含量
Fig. 3　Chlorophyll content of plants under different treatments

2.2.4　植物根系结构分析

由不同处理条件下植物的根系情况（表 4）可知，3 种供试植物的根系生长状况均以 S2 处理表现最优。在 S2 处理条件下，栾树总根长为 404.8 cm，根表面积为 80.8 cm^2，总根尖数为 1 636 个；夹竹桃总根长为 513.3 cm，根表面积为 180.6 cm^2，总根尖数为 1 983 个；泡桐总根长为 377.3 cm，根表面积为 112.3 cm^2，总根尖数为 1 261 个。栾树和泡桐的总根长、根表面积、总根尖数均呈现 S2 ＞ S1 ＞ CK 的变化规律；夹竹桃的根表面积在 S1 处理下为 173.3 cm^2，略低于 CK 组（175.8 cm^2），但总根长和总根尖数仍是改良组大于对照组。综上所述，改良剂的添加可有效促进栾树、夹竹桃和泡桐根系的生长发育。

2.3　不同处理下植物对重金属的吸收与转移差异

2.3.1　植物不同部位 Mn、As、Zn、Pb 吸收量

由图 4 可知，在添加不同比例改良剂处理下，植物地上及地下部分对 Mn、As、Zn、Pb 重金属元素的吸收量存在明显差异，其中 Mn 吸收量最高，As 与 Zn 次之，而 Pb 的吸收量相对较低。值得注意的是，除了栾树和夹竹桃的特定部位外，各植物不同部位对重金属的吸收量普遍遵循 S2 ＞ S1 ＞ CK 的规律。这说明改良剂的添加对矿渣起到了

稀释作用，可缓解矿渣对植物的胁迫，促进植物生物量的积累，进而提高植物对重金属的吸收能力。除此之外，不同植物的不同部位对重金属的吸收也存在差异，植物地上部分对 Mn、As、Zn、Pb 吸收量最高的植物（处理）分别为：夹竹桃（S2，174.34 mg）、泡桐（S2，34.94 mg）、夹竹桃（S2，4.43 mg）、栾树（S2，1.13 mg），地下部分对 Mn、As、Zn、Pb 吸收量最高的植物（处理）分别为：夹竹桃（S2，112.65 mg）、夹竹桃（S2，43.87 mg）、泡桐（S2，8.78 mg）、泡桐（S2，1.08 mg）。

表 4　不同处理下植物的根系生长情况 †

Table 4　Plant root system growth under different treatments

序号 No.	植物 Plant	总根长 Total root length /cm			根表面积 Root surface area /cm^2			总根尖数 Total number of root tips / 个		
		CK	S1	S2	CK	S1	S2	CK	S1	S2
1	栾树	206.9±47.6 b	291.7±5.4 b	404.8±43.6 a	71.61±33.1 b	74.4±27.3 b	80.8±26.3 a	600±38 c	1 180±81 b	1 636±55 a
2	夹竹桃	307.7±29.8 b	368.7±6.5 b	513.3±45.6 a	175.8±43.6 b	173.3±26.5 b	180.6±33.4 a	800±29 c	1 600±77 b	1 983 ±50 a
3	泡桐	267.1±38.6 b	270.3±9.8 b	377.3±36.8 a	109.7±36.8 b	110.1±19.8 b	112.3±38.6 a	823±45 b	923±65 b	1 261±60 a

† 数据均为平均值 ± 标准差，不同小写字母表示不同处理间差异显著（$P < 0.05$）。
The data are all presented as mean ± standard deviation. Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments ($P < 0.05$).

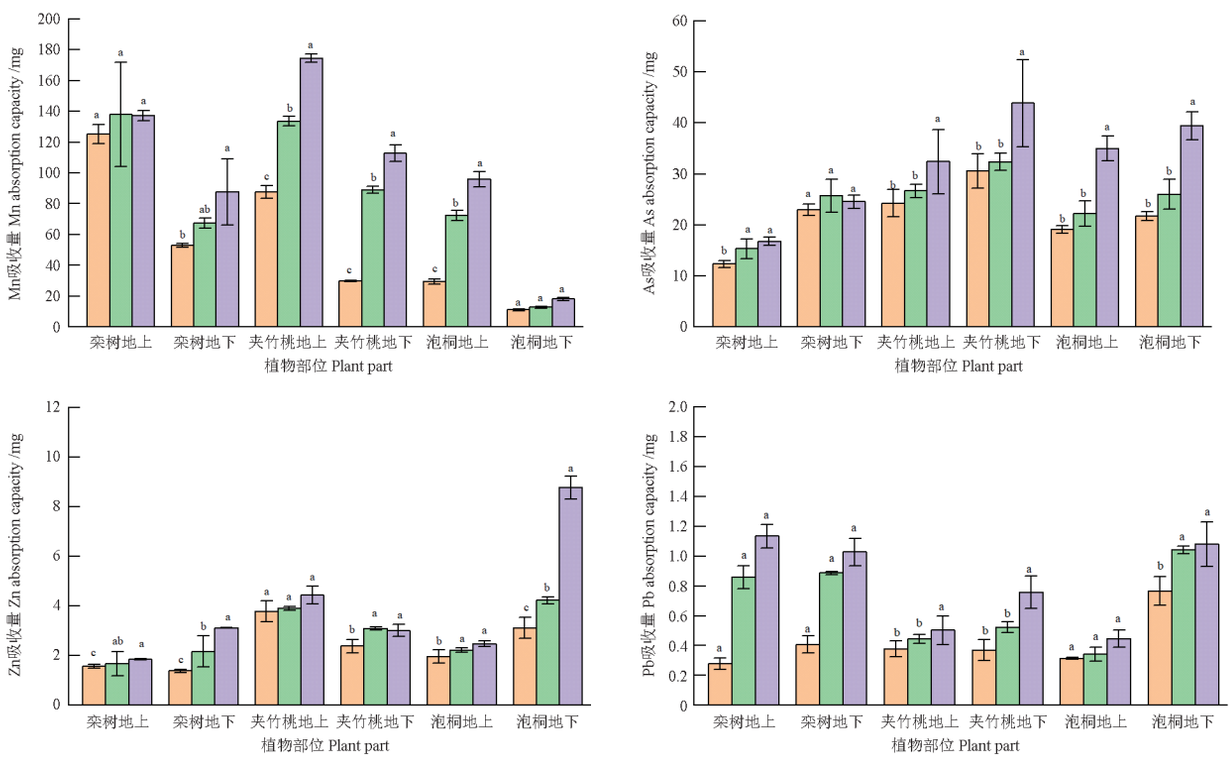


图 4　不同处理下植物地上、地下部分重金属吸收量

Fig. 4　Heavy metal absorption amounts in the aboveground and underground parts of plants under different treatments

2.3.2　植物的转移量系数

转移量系数（TAC）为单位时间、单位面积下植物地上部分所吸收的重金属含量占其总吸收量的比例，可用于表征植物对土壤重金属污染的修复能力 [17]。由表 5 可知，不同处理条件下各供试植物对重金属的转移量系数存在差异，总体呈现出改良处理组高于对照组的特征。这说明添加改良剂可促进植物地上部分的生长发育，地上部分生物量的增加促进了植物地上部分对重金属的吸收。具体而言，对于 Mn、As、Zn、Pb 重金属元素，转移量系数最高的植物（处理）依次为泡桐（S1 处理，85%）、泡桐（S2，46.97%）、夹竹桃（S2，64.34%）、栾树（S2，52.44%）。

2.4　不同处理下试验植物筛选及综合评价

本研究对 3 种试验植物的生物量、株高增长量、叶绿素含量、总根长、根系表面积、根尖总数，以及 Mn、As、Zn、Pb 元素的吸收量和转移量系数进行综合评估。首先，采用熵值法确定各评估指标的权重分配（表 6）。根据熵值法的计

算结果，各指标的权重具体分配如下：生物量占比 14.565%，株高增长量占比 13.326%，叶绿素含量占比 9.660%，总根长占比 11.824%，根表面积占比 19.149%，总根尖数占比 13.716%。对于重金属元素，Mn 的吸收量占比 9.968%，其转移量系数权重占比最高，达到 31.879%；As 的吸收量占比 16.663%，但其转移量系数权重占比最低，为 8.899%；Zn 的吸收量占比 20.284%，转移量系数权重占比 9.459%；Pb 的吸收量占比 15.164%，转移量系数权重占比 11.582%。在获取各指标权重后，进一步计算不同处理条件下植物的生长状况综合得分（表 7）。由表 7 可以看出，夹竹桃、泡桐、栾树在 S2 处理下的综合得分较 CK 处理下分别提升约 80.57%、82.14% 和 146.01%，说明改良剂的

表 5　不同处理下植物对重金属的转移量系数 †

Table 5　Transfer coefficient of heavy metals in plants under different treatments　%

植物 Plant	Mn			As		
	CK	S1	S2	CK	S1	S2
栾树 *Koelreuteria paniculata*	65.66±0.90	67.15±4.15	65.97±5.59	34.87±1.72	37.29±1.23	40.51±1.84
夹竹桃 *Nerium oleander*	63.82±0.78	63.92±0.54	64.91±0.97	44.23±2.93	45.15±2.91	42.47±1.82
泡桐 *Paulownia fortunei*	72.66±1.39	85.00±1.28	84.12±0.93	46.84±1.13	46.02±0.82	46.97±0.54
植物 Plant	Zn			Pb		
	CK	S1	S2	CK	S1	S2
栾树 *Koelreuteria paniculata*	41.15±0.97	40.65±1.23	44.70±1.56	40.48±1.93	49.22±5.28	52.44±5.24
夹竹桃 *Nerium oleander*	61.45±2.13	61.38±1.65	64.34±1.28	45.13±4.13	45.95±2.21	49.65±5.94
泡桐 *Paulownia fortunei*	38.60±0.87	34.35±0.23	21.96±1.32	29.09±1.26	24.67±0.98	29.24±2.23

† 数据均为平均值 ± 标准差。The data are all presented as mean±standard deviation.

表 6　各评价指标的权重

Table 6　index weight calculation

评价指标 Evaluation index	信息熵值 Information entropy value	信息效用值 Information utility value	权重 Weight /%
植物生物量 Plant biomass	0.854	0.146	14.565
植物株高增量 Increment of plant height	0.867	0.133	13.326
植物叶绿 Plant chlorophyll	0.903	0.097	9.660
总根长 Total root length	0.882	0.118	11.824
根表面积 Root surface area	0.809	0.191	19.149
总根尖数 Total number of root tips	0.863	0.137	13.716
Mn 吸收量 Mn absorption amount	0.900	0.100	9.968
Mn 转移量系数 Mn transfer coefficient	0.681	0.319	31.879
As 吸收量 As absorption amount	0.833	0.167	16.663
As 转移量系数 As transfer coefficient	0.911	0.089	8.899
Zn 吸收量 Zn absorption amount	0.797	0.203	20.284
Zn 转移量系数 Zn transfer coefficient	0.905	0.095	9.459
Pb 吸收量 Pb absorption amount	0.848	0.152	15.164
Pb 转移量系数 Pb transfer coefficient	0.884	0.116	11.582

表 7　基于 TOPSIS 综合评价法的计算结果

Table 7　TOPSIS evaluation method calculation results

植物处理组 Plant treatment group	正理想距离 Distance to the positive ideal solution/（D+）	负理想距离 Distance to the negative ideal solution/（D-）	综合得分指数 Comprehensive score index	排序 Rank
栾树（CK）*Koelreuteria paniculata* CK	0.268 768 370	0.049 738 745	0.156 162 115	9
栾树（S1）*Koelreuteria paniculata* S1	0.211 811 994	0.097 837 471	0.315 962 021	7
栾树（S2）*Koelreuteria paniculata* S2	0.213 679 141	0.133 298 697	0.384 170 637	5
夹竹桃（CK）*Nerium oleander* CK	0.215 892 811	0.131 934 058	0.379 309 563	6
夹竹桃（S1）*Nerium oleander* S1	0.157 038 599	0.186 280 292	0.542 586 780	3
夹竹桃（S2）*Nerium oleander* S2	0.108 496 488	0.235 834 315	0.684 906 237	1
泡桐（CK）*Paulownia fortunei* CK	0.227 059 640	0.100 364 993	0.306 528 534	8
泡桐（S1）*Paulownia fortunei* S1	0.184 597 945	0.162 351 506	0.467 939 943	4
泡桐（S2）*Paulownia fortunei* S2	0.161 719 016	0.204 418 079	0.558 310 212	2

施用有效提升了植物对重金属污染土壤的修复效率。依据综合得分进行排序，最终的排序结果为：夹竹桃（S2）＞泡桐（S2）＞夹竹桃（S1）＞泡桐（S1）＞栾树（S2）＞夹竹桃（CK）＞栾树（S1）＞泡桐（CK）＞栾树（CK）。综合得分最高的是 S2 处理下的夹竹桃，得分为 0.68；综合得分最低的是 CK 处理下的栾树，得分为 0.16。结果表明，夹竹桃在黄金尾矿污染下的环境适应性和修复潜力方面表现最优，适合作为改良后黄金尾矿的优势修复植物。

3 讨 论

3.1 施加改良剂对土壤肥力的影响

土壤基质的物理性质是决定其肥力状况的关键因素。适宜的自然含水率、合理的容重和良好的孔隙度，是植物正常生长的基础条件 [25]。与正常土壤 [26] 相比，黄金尾矿渣的含水率极低，且基质保水性较差，易产生板结现象，这也是导致大生物量乔木、灌木难以存活，且植物生物量生长受限的核心原因。添加改良剂后，黄金尾矿的土壤结构得到了优化，变得疏松且抗板结性增强。改良剂的加入还能有效降低黄金尾矿的碱度，为植物在尾矿中的生长创造了更为有利的土壤条件。有研究指出，当土壤容重为 1.1 ～ 1.4 g·cm^{-3} 且孔隙度接近 50% 时，土壤通常展现出更佳的通气性能、渗透性能和水分保持能力，这样的土壤条件更利于植物的生长 [27]。本研究所采用的黄金尾矿容重约为 1.49 g·cm^{-3}，孔隙度约为 43.88%，土壤特性紧实、含水量低。此外，该尾矿中有机质、总氮、总磷及总钾的含量均偏低，这样的土壤环境严重制约植物生长。施用蘑菇渣改良剂可有效优化尾矿基质结构，改善这一不利状况。基质改良处理后，黄金尾矿（S1、S2）的质地变得疏松多孔，其容重降至约 1.16 g·cm^{-3}，孔隙度提升至约 56%，这一改良效果与 Chen 等 [28] 的研究结论一致。另外，添加改良剂不但能有效降低尾矿中 Mn、As、Zn、Pb 等重金属的生物有效性，还能显著提高土壤的养分含量。蘑菇渣作为食用菌菇栽培后的有机固体废弃物，经过微生物降解，富含微生物、有机质以及氮、磷、钾等多种营养成分，既是优质的栽培基质 [29-30]，也具备修复重金属污染土壤的潜力 [31-32]。将蘑菇渣添加到土壤中，可向土壤中引入大量有机质、总磷及总氮，这一发现与前人的研究成果相契合：蘑菇渣在增强土壤养分累积与促进养分循环机制中发挥着重要作用，显著提升了土壤对碳（C）和氮（N）的固持能力，同时有效增加土壤中细菌和真菌群落的多样性 [33-34]。

3.2 施加改良剂对植物生长的影响

植物对重金属的吸收能力受其体内重金属含量与生物量的双重调控。矿渣中残留的重金属总量会因植物的大量吸收而显著减少，这不仅有效降低了因雨水冲刷、水土流失所引起的土壤及水体重金属污染风险，还能减少重金属因扩散和迁移而造成的空气污染问题 [16]。本研究认为，蘑菇渣能够有效提升植物对 Mn、As、Zn、Pb 多种重金属的累积水平，其作用机制在于蘑菇渣通过提高矿渣中的有机质比例，促进植物的生长发育，使植物生物量增加，同时通过调节矿渣的 pH 值，将土壤由碱性环境转变为更有利于植物生长的环境，从而间接地增强了植物对重金属的吸收能力。已有研究 [35] 表明，植物根系形态结构的变化同样会影响其对重金属的吸收能力。根长较长时，不仅能增加根系与重金属的接触面积，还可深入不同土层，吸收不同土壤深度的重金属，从而扩大重金属的吸收范围；较大的根表面积能提供更多的重金属吸收位点，促进根离子交换，促使更多重金属转化为可吸收形态，进而提升吸收效率；而较多的根尖既增强对重金属的吸收能力，又因能分泌更多黏液，影响重金属在根际环境中的迁移、转化等过程，进而调控植物对重金属的吸收过程。本研究中，添加蘑菇渣处理的改良组植物根系结构生长状况要优于未添加蘑菇渣处理的对照组，这也说明蘑菇渣的添加可有效促进植物地下部分根系的生长，有利于提高植物对重金属的吸收能力。此外，本研究所用盆栽基质中 Mn、As 含量分别高达 2 548、675 mg/kg，这一水平显著超出了普通植物所能承受的正常阈值。在植物筛选试验中，6 种供试植物中有 3 种成功存活。尽管这些存活的植物对 Mn、As、Zn、Pb 重金属元素的转移量系数尚未达到超富集植物的界定阈值，但通过基质条件的优化改良，可显著促进植物生物量的增长，提高其体内重金属的富集总量，进而提升土壤重金属污染的修复效果。

4 结 论

1）在黄金尾矿土壤中加入蘑菇渣作为改良剂，不仅促使土壤结构变得更加疏松多孔，优化了其渗透性能，还提升了土壤中有机质和氮、磷、钾的含量，进一步提升了土壤肥力水平。此外，蘑菇渣的加入起到了稀释重金属有效态含量的作用，

有效缓解了植物生长环境中由重金属引起的毒害效应。

2）基于株高增长量、叶绿素含量、生物量、重金属吸收量及转移量系数等生理指标的测定与分析，可有效评估植物在重金属胁迫条件下的抗逆能力。研究结果表明，栾树、泡桐与夹竹桃均对重金属污染表现出较强的耐受特性，其中夹竹桃在 S2（80% 矿渣 +20% 蘑菇渣）处理条件下，经 TOPSIS 综合评价法对各指标进行综合考量后，取得了最高的综合评价得分，适合作为改良黄金尾矿的优势修复植物。

3）在几种存活植物的生长表现中，存在改良组优于对照组的趋势，然而，不同植物种类对于改良剂配比的需求呈现出一定的差异性。

参考文献：

[1] 中国黄金协会 .2023 年我国黄金产量 375.155 t，黄金消费量 1089.69 t[J]. 黄金科学技术 ,2024,32(1):90.
China Gold Association. In 2023, China’s gold output was 375.155 t, and its gold consumption was 1089.69 t[J]. Gold Science and Technology,2024,32(1):90.

[2] 徐友宁 , 张江华 , 谢娟 , 等 . 小秦岭金矿带某污染区村民头发中重金属元素含量的比照分析 [J]. 地质通报 ,2008,27(8):1279-1285.
XU Y N, ZHANG J H, XIE J, et al. Contrast analysis on heavy metals contents in villagers’ hair in contaminated areas of the Xiaoqinling gold belt, China[J]. Geological Bulletin of China, 2008,27(8):1279-1285.

[3] 郭可欢 , 艾艳君 , 常晓囡 , 等 . 堆肥污泥辅助金矿尾矿适生植物筛选的初步研究 [J]. 生态与农村环境学报 ,2018,34(2):184-192.
GUO K H, AI Y J, CHANG X N, et al. Screening of pioneer plants for gold tailings amended with composted sewage sludge[J]. Journal of Ecology and Rural Environment,2018,34(2):184-192.

[4] ROZMAN U, KALČÍKOVÁ G. The response of duckweed *Lemna minor* to microplastics and its potential use as a bioindicator of microplastic pollution[J]. Plants,2022,11:2953.

[5] CIARAMELLA B R, CORINZIA S A, COSENTINO S L, et al. Phytoremediation of heavy metal contaminated soils using safflower[J]. Agronomy,2022,12:2302.

[6] RIGOLETTO M, CALZA P, GAGGERO E, et al. Bioremediation methods for the recovery of lead-contaminated soils: a review[J]. Applied Sciences,2020,10:3528.

[7] SU R K, OU Q Q, WANG H Q, et al. Comparison of phytoremediation potential of *Nerium indicum* with inorganic modifier calcium carbonate and organic modifier mushroom residue to lead-zinc tailings[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health,2022,19:10353.

[8] 任文 , 李嗣艺 , 李中阳 , 等 . 生物特征及物种组合对重金属污染修复的影响 [J]. 环境科学与技术 ,2024,47(增刊 1):59-69.
REN W, LI S Y, LI Z Y, et al. Impacts of biological characteristics and species combinations of organisms on the remediation of heavy metal pollution[J]. Environmental Science & Technology, 2024,47(Suppl. 1):59-69.

[9] 陈永华 , 张富运 , 吴晓芙 , 等 . 改良剂对 4 种木本植物的铅锌耐性、亚细胞分布和化学形态的影响 [J]. 环境科学 ,2015,36(10):3852-3859.
CHEN Y H, ZHANG F Y, WU X F, et al. Effects of different modifier concentrations on lead-zinc tolerance, subcellular distribution and chemical forms for four kinds of woody plants[J]. Environmental Science,2015,36(10):3852-3859.

[10] 张富运 , 陈永华 , 吴晓芙 , 等 .8 种木本植物对矿渣中重金属的吸收与富集研究 [J]. 环境科学与管理 ,2014,39(3):168-170.
ZHANG F Y, CHEN Y H, WU X F, et al. Uptake and accumulation characteristics of 8 species of woody plants for heavy metals in lead/zinc mine tailing slag[J]. Environmental Science and Management,2014,39(3):168-170.

[11] 张轩 , 赵俊程 , 吴子剑 , 等 . 六种木本植物对铅锌尾矿库重金属富集力的研究 [J]. 湖南林业科技 ,2016,43(6):64-68.
ZHANG X, ZHAO J C, WU Z J, et al. Heavy metal transfer capability of six woody plants in lead-zinc mine area[J]. Hunan Forestry Science & Technology,2016,43(6):64-68.

[12] FAN J X, ZOU L, ZHAO G L. Microplastic abundance, distribution, and composition in the surface water and sediments of the Yangtze River along Chongqing City, China[J]. Journal of Soils and Sediments,2021,21:1840-1851.

[13] 刘永贵 , 梁伟伟 , 蒋慧儿 , 等 . 构树根萌条水培生根发育及解剖观察 [J]. 山东农业大学学报 (自然科学版),2025,56(1):1-10.
LIU Y G, LIANG W W, JIANG H E, et al. Hydroponic rooting development and anatomical observation of the root sprout of *Broussonetia papyrifera*[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition),2025,56(1):1-10.

[14] ANNING C, WANG J X, CHEN P, et al. Determination and detoxification of cyanide in gold mine tailings: a review[J]. Waste Management & Research,2019,37(11):1117-1126.

[15] LIN H, JIANG X Y, LI B, et al. Soilless revegetation: an efficient means of improving physicochemical properties and reshaping microbial communities of high-salty gold mine tailings[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety,2021,207:111246.

[16] 吴瑾 , 陈永华 , 杜露 , 等 .4 种改良剂在锰矿渣木本植物修复中的比较 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2020,40(1):150-159.
WU J, CHEN Y H, DU L, et al. Comparison of four modifiers on restoration of woody in manganese mining areas[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2020,40(1):150-159.

[17] 何蔚 , 陈永华 , 梁希 , 等 . 改良锰矿渣中木本植物筛选及锰的

亚细胞分布和化学形态 [J]. 环境工程 ,2018,36(9):154-160.
HE W, CHEN Y H, LIANG X, et al. Screening for tolerant woody plants for improved manganese slag and research on subcellular distribution and chemical form of manganese[J]. Environmental Engineering,2018,36(9):154-160.

[18] 仲灿 , 葛晓敏 , 倪云 , 等 . 植物对土壤 Cd、Pb 污染的修复与抗性机理研究进展 [J]. 世界林业研究 ,2017,30(1):37-43.
ZHONG C, GE X M, NI Y, et al. Research progress of phytoremediation technology and resistance mechanism of plant in soil polluted by Cd or Pb[J]. World Forestry Research,2017,30(1):37-43.

[19] NONG H J, LIU J, CHEN J Z, et al. Woody plants have the advantages in the phytoremediation process of manganese ore with the help of microorganisms[J]. Science of the Total Environment,2023,863:160995.

[20] LU M, REN Y L, WANG S J, et al. Contribution of soil variables to bacterial community composition following land use change in Napahai plateau wetlands[J]. Journal of Environmental Management,2019,246:77-84.

[21] 鲍士旦 . 土壤农化分析 [M].3 版 . 北京 : 中国农业出版社 , 2000.
BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press,2000.

[22] 张秉璇 . 蔬菜中常见重金属的测定方法探究及应用 [D]. 兰州 : 兰州大学 ,2017.
ZHANG B X. Research and application of the method for determination of heavy metals in vegetables[D]. Lanzhou: Lanzhou University,2017.

[23] 刘慧 , 王浩 , 陈永华 . 改良锰矿渣中真菌群落对栾树生长及植物修复过程的影响 [J]. 环境科学学报 ,2024,44(11):345-358.
LIU H, WANG H, CHEN Y H. Fungal community dynamics in phytoremediation of manganese slag amended with *Koelreuteria paniculata*[J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2024,44(11):345-358.

[24] 李常亮 , 张富仓 , 雒天峰 . 保水剂与氮肥互作对玉米生理特性和水氮利用的影响 [J]. 干旱地区农业研究 ,2025,43(2):226-232,271.
LI C L, ZHANG F C, LUO T F. Effects of water retention and nitrogen fertilizer interactions on physiological characteristics and water and nitrogen use in maize[J]. Agricultural Research in the Arid Areas,2025,43(2):226-232,271.

[25] 方晰 , 田大伦 , 谢荣秀 . 湘潭锰矿矿渣废弃地植被修复前的土壤诊断 [J]. 生态学报 ,2006,26(5):1494-1501.
FANG X, TIAN D L, XIE R X. Soil physical and chemical properties of the wasteland in Xiangtan manganese mine[J]. Acta Ecologica Sinica,2006,26(5):1494-1501.

[26] 鲍文 , 赖奕卡 . 湘中红壤丘陵区不同土地利用类型对土壤特性的影响 [J]. 中国水土保持 ,2011(10):47-50,66.
BAO W, LAI Y K. Influence of different land uses to soil properties in red soil hilly region of central Hunan Province[J]. Soil and Water Conservation in China,2011(10):47-50,66.

[27] 邵明安 , 王全九 , 黄明斌 . 土壤物理学 [M]. 北京 : 高等教育出版社 ,2006.
SHAO M A, WANG Q J, HUANG M B. Soil physics[M]. Beijing: Higher Education Press,2006.

[28] CHEN L D, ZHOU W, LUO L, et al. Short-term responses of soil nutrients, heavy metals and microbial community to partial substitution of chemical fertilizer with spent mushroom substrates (SMS)[J]. Science of the Total Environment,2022,844:157064.

[29] 刁清清 , 毛碧增 . 蘑菇渣处理现状及在农业生产上的应用 [J]. 浙江农业科学 ,2012(12):1710-1712.
DIAO Q Q, MAO B Z. The present situation of mushroom residue treatment and its application in agricultural production[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences,2012(12):1710-1712.

[30] 范佳林 . 蘑菇渣基质配比对栓皮栎苗木生长与养分状况的影响 [D]. 北京 : 北京林业大学 ,2016.
FAN J L. Effect of the ratio of mushroom compost on seedlings growth and nutrient status for *Quercus variabilis*[D]. Beijing: Beijing Forestry University,2016.

[31] ZHANG Y F, ZHU J H, ZOU Y, et al. Insoluble dietary fiber from five commercially cultivated edible mushrooms: structural, physiochemical and functional properties[J]. Food Bioscience, 2024,57:103514.

[32] QIN K, LI J L, YANG W C, et al. Role of minerals in mushroom residue on its adsorption capability to Cd(II) from aqueous solution[J]. Chemosphere,2023,324:138290.

[33] BARRA P J, PONTIGO S, DELGADO M, et al. Phosphobacteria inoculation enhances the benefit of P-fertilization on *Lolium perenne* in soils contrasting in P-availability[J]. Soil Biology and Biochemistry,2019,136:107516.

[34] WANG C N, WANG Y X, RU H, et al. Study on microbial community succession and functional analysis during biodegradation of mushroom residue[J]. BioMed Research International, 2021:6620574.

[35] RIAZ M, KAMRAN M, FANG Y Z, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi-induced mitigation of heavy metal phytotoxicity in metal contaminated soils: a critical review[J]. Journal of Hazardous Materials,2021,402:123919.

[本文编校：谢荣秀]