



移动扫码阅读

费玲云, 邹伟民, 周美彦, 等. 尾矿资源化利用现状及生态化利用研究进展 [J]. 能源环境保护, 2025, 39(4): 48-60.

FEI Lingyun, ZOU Weimin, ZHOU Meiyan, et al. Current Status of Tailings Resource Utilization and Research Progress on Ecological Utilization [J]. Energy Environmental Protection, 2025, 39(4): 48-60.

尾矿资源化利用现状及生态化利用研究进展

费玲云¹, 邹伟民², 周美彦¹, 王雅情¹, 李青竹^{1,3,4,*}

(1. 中南大学 冶金与环境学院, 湖南 长沙 410083; 2. 江西永兴特钢新能源科技有限公司, 江西 宜春 336307; 3. 国家重金属污染防治工程技术研究中心, 湖南 长沙 410083; 4. 有色金属强化冶金新技术全国重点实验室, 湖南 长沙 410083)

摘要: 尾矿是我国产生量最大的大宗工业固体废物, 其产排强度高、堆存量大, 具有资源浪费及环境污染的双重风险, 因此其资源化利用及大规模消纳问题亟待解决。在“双碳”目标和“十四五”规划的背景下, 加快产废行业绿色低碳转型、减轻固废处置压力已成为首要任务, 然而, 近年来尾矿综合利用率不升反降。首先简要概述了我国尾矿资源化利用现状, 通过总结资源化利用过程中存在的主要问题, 分析当前综合利用率不高的主要原因, 并指出尾矿的生态化利用是落实国家战略规划的必然选择。进而, 基于尾矿性质, 从土壤改良应用和尾矿基土壤修复两方面, 总结了当前尾矿生态化利用研究进展, 梳理了生态化利用所面临的主要挑战及相应的技术途径。最后, 提出了尾矿资源化利用与生态化利用的协同修复策略, 将是未来尾矿综合利用的主要发展方向。

关键词: 尾矿; 资源化利用; 生态化利用; 固废处置; 协同修复; 大规模消纳

中图分类号: X75

文献标识码: A

文章编号: 2097-4183(2025)04-0048-13

Current Status of Tailings Resource Utilization and Research Progress on Ecological Utilization

FEI Lingyun¹, ZOU Weimin², ZHOU Meiyan¹, WANG Yaqing¹, LI Qingzhu^{1,3,4,*}

(1. College of Metallurgy and Environment, Central South University, Changsha 410083, China; 2. Jiangxi Yongxing Special Steel New Energy Technology Co., Ltd., Yichun 336307, China; 3. Chinese National Engineering Research Center for Control & Treatment of Heavy Metal Pollution, Changsha 410083, China; 4. State Key Laboratory of Advanced Metallurgy for Non-ferrous Metals, Changsha 410083, China)

Abstract: Tailings, byproducts generated from ore processing through processes such as crushing, screening, grinding, and flotation, constitute the largest volume of industrial solid waste in China. They pose significant challenges due to their high production and emission levels, coupled with substantial storage volumes, leading to resource waste and environmental pollution. Effective utilization and safe, large-scale disposal of tailings are crucial for the sustainable development of China's mining industry. To align with the "carbon peak and carbon neutrality" initiative and China's "14th Five-Year Plan", promoting a green and low-carbon transformation in waste-producing industries and alleviating the pressure of solid waste disposal are primary objectives. The government has enacted relevant regulations and policies to guide the treatment and disposal of tailings. In recent years, driven by these

收稿日期: 2024-12-09

修回日期: 2025-01-12

接受日期: 2025-01-15

DOI: 10.20078/j.eep.20250204

基金项目: 江西省引进培养创新创业高层次人才“千人计划”团队资助项目(jxsq2023105004); 国家自然科学基金创新研究群体资助项目(52121004)

第一作者: 费玲云(2000—), 女, 湖南株洲人, 博士研究生, 主要研究方向为资源化工。E-mail: 1162864490@qq.com

*通讯作者: 李青竹(1981—), 女, 河北滦平人, 教授, 主要研究方向为重金属调控转化与直接资源化。E-mail: qingzhu@csu.edu.cn

policies, mining enterprises have intensified their tailings management. However, there has been an annual increase in tailings discharge alongside a decline in the comprehensive utilization rate, highlighting new challenges for the comprehensive utilization and disposal of tailings. This paper briefly describes the current state of tailings resource utilization. The primary utilization methods include use as mining backfill and construction materials. Key issues in tailings resource utilization include technical barriers, ambiguous technical standards, and the low market competitiveness of products derived from tailings, contributing to the low comprehensive utilization rate. Consequently, the ecological utilization of tailings is emerging as a vital strategy for implementing national strategic plans. This paper summarizes current research on the ecological utilization of tailings, with a particular focus on soil improvement and ecological restoration. It compares the properties of tailings as substrates with those of conventional soil, identifying challenges such as adjusting pH, nutrients, and physical properties, as well as managing pollutants within the tailings. Recommended improvement techniques include physical, chemical, and biological remediation methods. Finally, this paper proposes a synergistic strategy that integrates tailings resource utilization with ecological restoration as a key future direction. Enhancing technological innovation and establishing robust standards are urgently needed to expedite the comprehensive utilization of tailings.

Keywords: Tailings; Resource utilization; Ecological utilization; Solid disposal; Synergistic remediation; Large-scale disposal

0 引 用

尾矿是矿石经过破碎、筛分、研磨、浮选等工艺流程处理后,堆积产生的大宗工业固体废弃物。随着高品位易采矿石的开采殆尽,低品位复杂矿体的高强度开采已成为人类社会发展的必然趋势,这造成尾矿体量的加速上升。据统计,2023 年我国产生尾矿 14.24 亿 t,较 2022 年增加 0.12 亿 t,我国现有尾矿堆存总量已超过 200 亿 t,其中约 82% 在铁矿、铜矿、金矿和磷矿加工过程中产生^[1-3]。尾矿堆存不仅会带来潜在的地质灾害和污染隐患,进而威胁到周围生态环境和人类生命健康,还会造成大量有色金属资源的浪费。因此,为保障矿业加工行业的可持续发展,尾矿的综合利用已受到国家高度重视,政府部门陆续出台相关法规及产业政策。2021 年 3 月,由国家发展和改革委员会等十部委联合出台《关于“十四五”大宗固体废弃物综合利用的指导意见》,其中明确推进产废行业绿色转型,实现源头减量,鼓励采矿企业利用尾矿填充采空区、治理塌陷区,推动实现尾矿就地消纳及尾矿产生过程自消纳^[4]。2021 年 12 月,生态环境部办公厅印发《尾矿库环境监管分类分级技术规程(试行)》,其中明确要求强化尾矿库分类分级环境监管。2024 年 2 月,国务院办公厅发布的《关于加快构建废弃物循环利用体系

的意见》指出,到 2025 年,初步建成覆盖各领域、各环节的废弃物循环利用体系,尾矿、粉煤灰等大宗固体废弃物年利用量达到 40 亿 t^[5]。

在相关政策引导下,矿山企业已加大尾矿治理力度。目前,尾矿资源化利用主要通过工业应用来实现,其主要涉及建材、矿山充填材料、有价金属或非金属矿等产品,但这些产品往往受技术壁垒和经济效益的限制,大规模资源化利用仍是关键难题。据统计,2023 年我国尾矿综合利用量仅为 4.29 亿 t,综合利用率仅 30.13%,较 2022 年下降 4.15%。在尾矿排出量每年不断递增的情况下,其综合利用率却呈下降趋势,因此加快尾矿的大规模消纳迫在眉睫(图 1)。尾矿生态化利用是目前消纳量最大的方式之一,近年来国家已鼓励推广。2024 年 8 月,自然资源部办公厅《关于严守土石料利用政策底线进一步完善矿山生态修复激励措施的通知》中提到,要推动尾矿等采选活动产生的一般矿业固体废弃物在生态修复工程中的生态化利用,在严格污染风险管控、符合土壤环境质量要求、确保环境安全前提下,鼓励用于土壤改良等^[6]。尾矿生态化利用主要涉及土壤改良剂和肥料等农业相关产品以及尾矿基土壤修复。然而,尾矿也存在重金属(如 Cu、Pb、Zn、Cd 和 As)和有机污染物超标等环境风险。在生态化利用前需通过物理、化学和生物等技术,对尾矿进行重金属

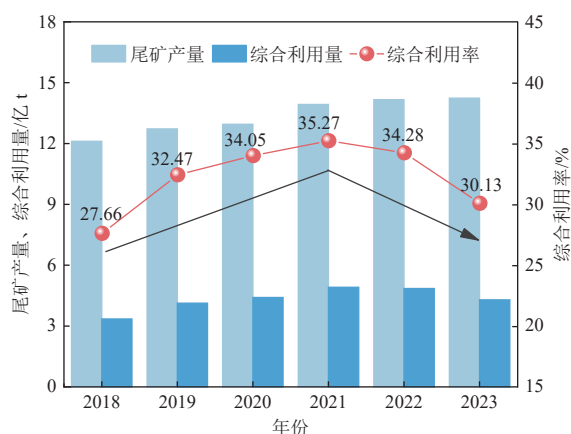


图1 2018—2023年我国尾矿产量及综合利用情况

Fig. 1 Tailings production and comprehensive utilization in China from 2018 to 2023

稳定、酸碱调控等无害化处理,以赋予和恢复其类似土壤的自然生态功能。

基于上述现状,本文首先总结了我国尾矿资源化利用现状并阐述了当前资源化利用发展中存在的主要问题。随后,基于尾矿性质,从土壤改良应用和尾矿基土壤修复两方面对目前尾矿生态化利用研究进展进行了总结,并梳理了目前尾矿生态化利用所面临的主要挑战及相应的技术途径。

1 尾矿种类及影响

我国矿物加工产生的尾矿主要包括铁、铜、黄金、钨、铅、锌等金属尾矿,其中铁尾矿和铜尾矿占比最高,分别为41.66%和25.84%^[7]。各类主要尾矿的年产量如图2所示。尾矿的化学成分主要为 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 K_2O 、 Na_2O 、 Fe_2O_3 等^[8]。根据各组分质量分数的不同,可将其

划分为高硅型、低硅型、钙镁质、硅铝质、铁硅质、碱铝质、钙铝硅质等类型^[9]。尾矿中除了残存的少量有价值金属元素矿物,主要包含非金属脉石矿物、硫化物矿物和次生矿物3种矿物组分。其中,非金属脉石矿物包括石英(SiO_2)、钾长石(KAlSi_3O_8)、钠长石($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$)、方解石(CaCO_3)和白云石($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$)等;硫化物矿物包括黄铁矿(FeS_2)、磁黄铁矿(Fe_{1-n}S , $n=0\sim0.2$)、辉钼矿(MoS_2)、砷黄铁矿(FeAsS)等;次生矿物包括针铁石($\alpha\text{-FeOOH}$)、高岭石($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$)、黄钾铁矾($\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$)等^[10-11]。

尾矿的影响主要体现在两个方面:一方面,尾矿堆存造成大量有色金属资源的浪费,制约了我国矿产资源加工行业的可持续发展。我国是全球有色金属生产和消费第一大国,大宗矿产产量占全球总量的40%~50%,但我国大宗支柱性矿产资源储量不足,对外依存度高^[12]。近年来一系列突发性重大国际事件的发生给全球政治经济环境带来了巨大的不确定性,这给我国矿产资源供应安全带来了前所未有的挑战^[13]。另一方面,尾矿的堆存不仅占用大量土地资源,还存在溃坝风险,是人为泥石流的重大危险源^[14],制约了矿区的可持续发展。此外,尾矿中含有的As、Cu等重金属、金属硫化物和选矿药剂等化学物质,可通过扬尘、渗漏等方式进入周围土壤、空气和地下水,是潜在的环境污染源^[15]。

2 尾矿资源化利用现状

受限于选矿技术水平及选矿机械设备,加工过程中大量有价值矿物流失到尾矿中,造成资源浪费。近年来,在政策引导和科技进步的推动下,尾矿再选技术不断突破,浮选设备更新升级,尾矿的再选回收和有价值元素的提取已成为研究的热点。此外,也有不少研究剖析了尾矿的物化性质和力学性质,探索了尾矿在建筑材料和矿山回填等方面的整体利用。

2.1 再选回收和有价值元素提取

尾矿中含有Mo、W、Au、Ag、Cu和Fe等有价值金属元素及长石、石英和方解石等有价值非金属矿物,部分堆存尾矿中的有价值组分含量已达到当前分选技术条件所要求的工业品位,具有再生价值。瞿广飞等^[16]调查分析并预估推算出现存的铜、铅-锌和锑尾矿中金属资源的理论存储量可分别达到7.8亿、2.0亿和635万t,二次回收可创造

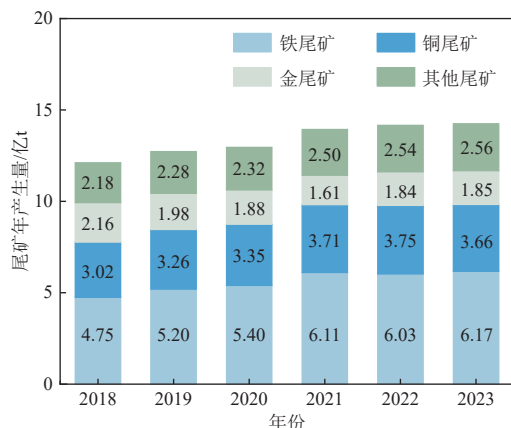


图2 2018—2023年我国各类尾矿年产量

Fig. 2 Annual production of various types of tailings in China from 2018 to 2023

的经济价值分别可达 4 814 亿、1 180 亿和 47 亿元,指出需重点关注尾矿中铁和铝金属的回收。

对于有价金属的回收,目前常采用选冶联合的处理工艺,且处理工艺的设计取决于尾矿的成分、目标元素的含量和赋存形式。针对金尾矿中金元素的回收,常富强等^[17]采用“尾矿再磨—浮选—尾矿细磨—非氰浸出”选冶联合工艺回收氧化物包裹金尾矿中的金元素。王晴^[18]采用“浮选机二段精选+浮选柱一段粗选一段扫选”浮选工艺对秦岭地区金黄铁矿尾矿中的金进行二次回收。杨伟卫等^[1]基于湖北黄石某铜尾矿的矿物学特征,对尾矿中 WO_3 、Cu、S 和 Fe 4 种有价组分进行梯次选矿富集。翟旭东^[19]利用“一粗二精二扫硫化锌浮选—重浮联合脱泥—一粗二精二扫氧化锌浮选”工艺流程对云南某铅锌尾矿中的锌进行二次回收。廖乾等^[20]基于某选铁尾矿中 TiO_2 赋存形式的分析,开发了一种“强磁选预富集—强磁精矿浮选再富集”选矿技术,获得 TiO_2 品位 45.26%、回收率 76.42% 的钛精矿产品。

相较于有价元素的提取,作为尾矿主要组成成分,非金属矿物再回收更有利于实现尾矿的减量化和资源化,因此近年来非金属矿物的再回收也逐渐成为关注的重点,主要集中于长石、石英和云母的回收。袁金明等^[21]采用“锂粗精矿再磨—脱泥—浮选”及“石英长石混合矿—重选—强磁选除铁—擦洗—浮选”联合选矿工艺对湖南某锂云母矿中的铁锂云母及石英和长石同时回收,最终获得 Li_2O 品位 1.78%、回收率 81.11% 的铁锂云母精矿,以及满足低铁光伏石英砂质量要求和平板玻璃用长石合格品要求的石英砂和长石产品。黄军等^[22]采用钨尾矿脱泥—浮选回收锂云母和选锂尾矿磁选—浮选回收石英的联合工艺获得了 Li_2O 品位 1.41%、 Rb_2O 品位 0.39% 的锂云母精矿和 SiO_2 品位 95.52% 的石英精矿,实现了钨尾矿全资源化利用。LI 等^[23]采用超导高梯度磁选联合无氟混合酸浸工艺从 SiO_2 品位 81.39%、 Fe_2O_3 品位 15.21% 的高硅型铁尾矿中提取石英并制备得到纯度为 $99.92\% \pm 0.01\%$ 的高纯石英。LI 等^[24]以 SiO_2 品位 71.79% 的赤铁矿尾矿为原料,采用超导高梯度磁选—高温混合酸浸工艺制得纯度为 99.961% 的高纯石英产品。

尾矿中有价组分的再回收可有效避免资源浪费,同时减缓对原生矿产资源的供应压力,然而目前尾矿的综合回收仍面临以下几个难题:一是尾

矿的梯级回收方面仍需加大科技攻关力度,尾矿中各矿物共生关系复杂,嵌布粒度较细,有价矿物品位低,通常经过充分细磨后再进行选别,然而这必然导致矿泥及微细粒含量增加,进而降低选矿效率;二是选矿工艺条件的非普适性,尾矿的工艺矿物学特征具有地域性差异,不同地区、不同种类的尾矿组分及含量不尽相同,这对后续工艺流程的设计具有重要的影响;三是投资成本较高,其中包括研发成本、生产成本及建设成本。因此,有价组分回收往往仅能作为尾矿综合利用过程的第一步,并不能实现尾矿的大规模消纳。

2.2 建筑材料

尾矿中含有大量 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 等有用组分,可作为生产建筑材料的原料或辅料,是实现尾矿大宗消纳的主要途径。尾矿中含有大量的铝硅氧化物,与黏土成分相近,可作为黏土的替代物用于制备烧结砖和建筑陶瓷,也可替代部分硅质材料用于混凝土和水泥的生产^[25-28]。黄宝音^[25]利用不同铁尾矿砂替代石英砂作为细骨料,制备了新型纤维铁尾矿混凝土,其立方体抗压强度、劈裂抗拉强度和抗弯强度较普通混凝土分别提升了 23.22%、54.87% 和 29.01%,具有高度应用可行性。BARZEGAR GHAZI 等^[26]利用铜尾矿作为部分水泥的替代品制备混凝土,发现含有尾矿的混凝土样品对氯离子渗透的抗性强于未掺尾矿样品,且掺加了 70% 尾矿的混凝土试样具有更强的抗开裂能力。宿佩君等^[27]通过对黄金尾矿黏土混合材料塑性指数与烧结砖强度进行回归分析,得到了可用于关联混合材料的掺配比例与烧结砖强度的 6 阶回归方程。ZHANG 等^[28]以硅砂尾矿和其他工业废料为原料,制备了 2 种不添加助剂的全废基陶瓷材料,并对制备样品的晶相、结构、物理性能及内部结构的相关形成机理进行了分析和探讨,指明在多组分化学成分的协同互补作用下,所制备陶瓷材料的内部结构由所形成的液相决定。

目前尾矿建材化的相关研究主要关注尾矿作为掺料制备建材的可行性,却忽略了尾矿库地域分布与建材市场需求之间的矛盾,这必然需要考虑运输所产生的高昂成本。此外,尾矿粒度通常较细,成分复杂,限制了其在建材领域的应用范围,且大多产品尚无明确的技术指标,这给尾矿建材化技术的大规模推广和工业化生产带来了极大的挑战。

2.3 矿山回填

通过将尾矿与水、胶凝材料及其他添加剂混合制成充填材料用于支撑围岩^[29-32],可有效减少尾矿地表堆存量的同时降低防采矿区塌陷沉降的风险,是尾矿大规模消纳的有效途径之一。陈贤树等^[29]基于贵州水银洞黄金尾矿的特性,开发了一种以矿渣、钢渣、磷石膏和水泥熟料为主要原材料的固废基胶凝材料。结果表明,应用这种新型的固废基胶凝材料制备充填材料可节约成本 30 元/m³,且尾矿的利用量增加了 0.6 万 t。BEHERA 等^[30]综述了尾矿、粉煤灰和矿渣作为膏体充填材料在采矿区回填中的应用,并对影响膏体充填性能的充填材料特性、地质力学、微观结构特性、强度预测、浸出和经济等方面的研究进展进行了科学评述,提出可利用统计强度预测模型和人工智能技术来预测膏体充填体的强度和流动性。WANG 等^[31]以石灰石尾矿、脱硫石膏、矿渣、水泥熟料和氢氧化钠为原料,制备了石灰石尾矿基胶凝材料,并用于制备岩溶地区的回填材料。

目前,尾矿在矿山回填领域的研究主要集中在充填材料研发、制备工艺优化、充填流变力学及充填体支撑机制等方面,推动了尾矿填充技术的创新突破和工业推广,但其工业化应用仍受填充成本高、运输难度大及尾矿充填体脱水效率低等问题的限制。

尾矿填料化、原料化和基料化是尾矿资源化利用的主要方式,也是近年来重点研究方向,不仅可减少上游原生矿产资源的开采,还可有效降低作业过程中带来的能源消耗和碳排放。研究表明,利用尾矿和废石生产混凝土、砂浆等建筑材料,可降低碳排放 132.62~321.30 kg/m³^[33]。然而,这类资源化方式普遍面临一定技术壁垒、工艺稳定性差、尾矿基产品附加值低、产品质量标准不明确和市场竞争力差等问题,难以实现产品的工业化推广。尾矿的大规模消纳仍是我国绿色矿山建设和可持续发展的当务之急和长远之需。因此,尾矿的生态化利用作为大宗固废消纳新方向势在必行,是落实国家“十四五”规划的必然选择。

3 尾矿生态化利用研究进展

尾矿生态化利用不仅可以有效解决尾矿综合利用率低的问题,还可缓解土源压力。一方面,可基于各类尾矿的特性,搭配合适的辅料制备具有特定效能的土壤改良剂和肥料,以防治土壤退化,

改善其物化及生物特性,恢复污染土壤的自然生态功能。另一方面,含低浓度重金属的尾矿也是一种潜在的土壤源,可通过添加外源物质或生物改良尾矿基质的性质,赋予其土壤的自然生态功能,以满足国家和地方规定的土壤环境质量标准。尾矿复垦工程标准可参考自然资源部发布的《采挖废弃土地复垦技术指标》,相关土壤标准可参考《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)。

3.1 土壤改良应用

尾矿中常含有 Fe、S、Mn、Ca、Mo 和 P 等植物生长必备微量元素,可用于制备肥料,以改善土壤肥力和性质,促进微生物繁殖,从而提高作物产量^[34-38]。如钼尾矿中长石和石英含量较高,能够组配出利于农作物生长的富含 K、P、Ca 等微量元素的优质硅肥^[35-36]。LI 等^[35]基于钼尾矿中钾长石含量丰富的特点,以硫酸钙和碳酸钙为添加剂,通过煅烧工艺制备得到优质的 Si-Ca-K-Mg 肥料,其能提高出苗率,对植物和土壤无污染,还能调节土壤的酸碱度,适用于改善酸性土壤。涂全平等^[36]以河北某钼尾矿为原料,以石灰石、白云石和石膏为辅料,联合浮选、煅烧、沉淀和蒸发结晶工艺,制备得到满足国标《硅钙钾镁肥》(GB/T 36207—2018)中 I 型标准要求的高品质硅钙钾镁肥。磷尾矿中含有大量的 P、Ca、S 和 Mg 等微量元素,可通过多养分元素综合利用生产磷镁肥、钙镁磷肥、含磷有机肥等化学肥料^[37-38],也可与微生物菌剂混合制备成微生物肥料,通过微生物活化,将难溶性磷转化为有效磷,或通过微生物解离释放养分^[39]。郑建国等^[38]采用高温分子间脱水聚合的方法,利用磷尾矿合成了聚合态钙镁磷肥,克服了钙镁磷肥含枸溶性磷的缺点,且其养分具有缓释性,可减少钙、镁的淋溶损失,提高养分的利用效率,促进作物增产提质。

部分尾矿具备磁性,可通过磁化处理制成磁性土壤改良剂或缓释磁化肥料,诱导土壤颗粒团聚,提高土壤渗透性和保水保肥能力,优化土壤性质,有效改良盐碱地^[40-42]。李丁^[41]筛选铁尾矿、废钢渣、粉煤灰作为磁化材料制备缓释磁化肥料并研究了其肥效,结果表明肥料经过磁化处理后,可有效提高土壤中有机质含量及阳离子交换量,强化了肥料对农作物品质增产增效的效果。杨孝勇^[42]以铁尾矿为主要改良材料,以脱硫石膏、秸秆、生物炭和有机肥为添加剂,开发了一种新型复

合改良剂,用于改良吉林省某盐碱土,结果表明施加该改良剂能显著改善土壤的团聚体结构,增强土壤的保水性能、渗透能力,并降低土壤含盐量。

富含 Si、Fe 和 PO_4^{3-} 的尾矿可通过沉淀、吸附和离子交换等机制来固化或钝化污染土壤中的重金属^[43-45]。吴珊珊等^[43]基于磷尾矿废弃物制备了羟基磷灰石材料,用于 Zn-Cd-Pb 污染土壤中重金属的钝化。结果表明,酸性条件下该材料释放的 PO_4^{3-} 可与 Pb 形成矿物沉淀,土壤 pH 升高可促进金属碳酸盐和氢氧化物沉淀的生成。MU 等^[44]以酸提取铜尾矿的残渣作为原料, CaO 、 Na_2CO_3 和 NaOH 作为添加剂,通过热活化制得硅铁基改良剂,联合香根草用于稳定土壤中 Cr、Cd 和 Pb,指出 pH 变化诱导的固定化、铁诱导的化学吸附、硅诱导的共沉淀和钙诱导的离子交换是降低污染土壤中重金属可利用率的主要机制。LEI 等^[45]利用铁尾矿和锰尾矿分别制备得到 2 种土壤改良剂用于砷污染土壤的修复,结果表明,施用这 2 种改良剂后的土壤 pH 升高,水稻籽粒中的砷含量降低,且富锰尾矿基改良剂对于砷从土壤向水稻植株的转移控制更有效。对于富含磷尾矿基改良剂的施用需注意磷淋溶可能造成的二次污染,其中缓释材料的应用可有效降低因磷过量释放导致的资源浪费和环境污染风险^[46]。

含金属的尾矿引入土壤生态体系可诱导微生物菌群衍生出金属抗性,强化土壤中微生物菌群的活性和多样性,从而提高植株和微生物在恶劣环境中的存活率^[47-48]。张怡悦^[48]借助高通量测序和宏基因组学等技术,研究了猪毛菜在铁尾矿库中的生存策略,指出 Cu、Fe、Zn 等重金属使得土壤-猪毛菜体系中的 *Pantoea* 等核心功能菌群普遍具有重金属抗性,显著影响了微生物的群落结构和多样性,增强了菌群繁殖后代对恶劣矿山环境的适应性。

尾矿的物化性质由矿石的矿物组成及选矿工艺等多种因素主导,且各类污染土壤的形成机制、重金属污染物迁移转化规律及其治理目标也不同,因此尾矿在土壤改良方面的应用仍存在以下难点:(1)改良技术不具备普适性,需根据实际情况设计并采取相应的尾矿改性工艺及治理措施。(2)土壤组成复杂,尾矿基肥料或改良剂的施用对土壤环境的影响机制还需进一步深入研究。(3)需注意尾矿基土壤改良剂或肥料的施用过程中对土壤造成的重金属污染等潜在影响,修复后的土壤

需密切监测其基质环境健康,包括微生物群落结构及重金属含量等,定期维护和管理,以免造成二次污染。目前,这种应用于土壤改良的尾矿资源化方式虽能实现部分尾矿回归生态,但因产品标准不明确、制备工艺复杂和投入成本高等问题,暂时无法实现大规模应用。

3.2 尾矿基土壤修复

受限于资源化产品市场竞争力弱、工艺技术不成熟等因素,尾矿综合利用率长期偏低,且堆存过程存在环境污染风险。尾矿基土壤修复技术,或能从根源上解决尾矿大规模消纳难题。尾矿基质与常规熟土性质差异较大,为创造植物定植和生长的良好基质环境,尾矿复垦需从以下几个方面突破:(1)尾矿中常含有 Cu、Pb、Zn、Ni、Cr 和 As 等重金属及残留选矿药剂、氟化物等化学污染物,会干扰植物的正常生理代谢并抑制植物生长,同时也会削弱土壤中微生物活性,需通过吸附、沉淀、转化、离子交换等技术固化或钝化金属,降低基质中重金属迁移性和生物有效性。(2)尾矿的酸碱度不适宜,会削减养分有效性和微生物活性,不利于植物对养分的吸收,需添加改良剂以调节基质 pH。(3)尾矿基质养分含量低,不足以满足植物生长需求,需添加有机质,以满足生物的生命活动所需。(4)尾矿砂粒间孔隙分布差,保水保肥能力较差,需增大颗粒粒度、降低容重以改善基质物理结构。

3.2.1 尾矿基质中污染物去除/固化技术

针对去除选矿工艺中引入的化学污染物,常采用物理修复技术改变基质中污染物的物理状态,包括热脱附和蒸汽浸提等热处理方式及淋洗、酸洗等物理分离过程^[49-50]。REN 等^[49]利用电阻加热的热处理技术在保留土壤功能的同时,去除污染土壤中的多环芳烃,并指出挥发性污染物与水共沸是主要机制。卢加程等^[50]以稀土开采产生的沉渣作为淋洗剂,淋洗离子型稀土尾矿去除残留的水溶态和可交换态的浸矿剂,随后用石灰水处理尾矿以固定铝离子。

针对尾矿基质中的重金属污染,常采用化学修复技术和生物修复技术,其中化学修复技术主要是利用化学试剂与污染物发生化学反应,或采用化学试剂调节 pH,以沉淀、吸附等方式对基质中重金属进行钝化。生物修复技术是利用植物及微生物自身生命活动,以转化和吸收积累等方式钝化或去除基质中重金属。

化学修复技术中常用的化学改良剂包括有机改良剂(如生物炭^[51]、秸秆^[52]、聚丙烯酰胺^[53])、无机改良剂(如黏土矿物^[54]、含磷物质^[55])和复合改良剂^[56]。ZHAO 等^[51]通过镁负载和热活化制备了一种新型的镁改性稻壳生物炭,用于固化锰尾矿中的锰,为尾矿的进一步植被复垦创造合适的环境条件。同时提出其稳定机制为 Mn 可能与活性 MgO 直接作用或间接碱性沉淀形成稳定的 MgMn_2O_4 、 $\text{Mn}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ 和 $\text{MnO}(\text{OH})_2$ 等锰物种。

生物修复技术包括植物修复和微生物修复。基于作用机制的不同,植物修复技术可分为植物提取修复、植物固化修复和植物挥发修复^[57]。植物提取修复是指利用植物的吸收积累功能从污染土壤中富集重金属元素,并储存于植物茎叶中^[58-61],是目前植物修复方面研究最多、应用最广泛的一种方法,其主要的发展方向是金属超积累植物的挖掘和研究。SYTAR 等^[60]讨论了超积累植物金属积累的生理和分子机制,指出相较于金属非超积累植物,金属超积累植物具有适应性的内在调节机制,可以将过量的重金属超富集或隔离到地上组织中,而不是在根系中积累,这种独特能力归因于金属转运蛋白的结构性过度表达和该植物从根到茎的快速转运能力。该种修复技术往往需要协同使用螯合剂,使重金属的赋存形式由难以被植物吸收的存在形态转变为易被吸收态,但该过程需要注意避免金属离子活化速率过快造成的二次污染风险,其中缓释螯合诱导技术可有效规避上述风险。薛雨等^[61]总结了近年来螯合诱导植物修复污染土壤的相关研究进展,并分析和梳理了缓释螯合诱导技术的修复效果及发展趋势。植物固化修复是指通过植物根系分泌物来积累、沉淀或转化重金属污染物,降低其毒性风险和迁移率。罗有发^[62]以土法炼锌废渣为对象,研究了构树(*Broussonetia papyrifera* L.)、刺槐(*Robinia pseudoacacia* L.)、柳杉(*Cryptomeria fortunei* L.)和芦竹(*Arundo donax* L.)4 种修复植物对废渣中重金属的生物地球化学过程的影响。结果表明植物可改善其根际废渣中养分、微生物群落丰度和多样性等微环境,并促进重金属的赋存形式由酸溶态向可还原态、可氧化态、残渣态转变,进而显著降低了 Cu、Pb、Zn、Cd 金属的生物有效性,并改变其迁移转化特性。植物挥发修复是利用植物自身的生物反应将挥发性污染物转化为气态物质释放到大气中,目前在汞和硒污染土壤修复方面应

用较多^[63-64]。BATTKE 等^[64]研究并对比了阿拉伯芥(*Arabidopsis thaliana*)、欧洲山毛榉(*European beech*)和挪威云杉(*Norway spruce*)3 种植物中抗坏血酸对汞的还原和挥发能力。结果表明,抗坏血酸对汞的还原和汽化是重要机制,该过程的效率与汞离子和汞蒸气的转移及生化转化有关。

微生物修复技术是基于微生物在尾矿中的生命活动和新陈代谢,通过酶促反应将基质中有机污染物转化为无害的无机物,也可通过吸附、吸收和氧化等方式固化重金属并降低其毒性。MAHABUB 等^[65]总结了生物胶结技术(即利用微生物分泌的类似水泥物质,将废渣或土壤颗粒黏合并增加其强度)在尾矿修复中的应用,并指出未来应在确定能承受和处理矿山尾矿的微生物及其合适的基因、处理配置和微环境等方面加大研究力度。江昭明等^[66]采用巴氏芽孢杆菌诱导的碳酸钙沉淀对镉污染尾矿进行固化修复,结果表明,该项技术可通过生物吸附、沉淀、碳酸钙吸附以及晶格掺杂等作用,实现重金属的有效钝化。植物修复技术和微生物修复技术往往联合起来,共培养形成植物-微生物联合共生系统,植物根系吸收和微生物的生长代谢相互促进,进而协同改善尾矿基质环境^[67-68]。毛青^[68]采用微藻-细菌耦合修复矿区砷污染土壤,指出植物生长促生菌对微藻的砷生物转化、富集及解毒具有增效作用,植物生长促生菌和微藻共接种能够快速促成生物土壤结皮,强化砷富集。此外,微藻-细菌耦合可提高作物根际土壤的酶活性,还可附着在植株根部区域形成一层保护膜,降低有效态砷的含量以及植株体内砷的毒性作用,对植物根系起到保护作用。

然而,一般情况下,未修复的尾矿基质物化性质与常规熟土的性质差别较大,不适于生物生存。因此,在实施生物修复技术前,往往需先通过物理化学修复技术改善尾矿基质的理化性质,以满足生物的生命活动所需^[69-71]。SU 等^[71]研究并比较了蘑菇渣+碳酸钙(M+C)和泥炭土+碳酸钙(N+C)2 种混合改良剂与木本植物夹竹桃(*Nerium oleander* L.)对铅锌尾矿的联合修复效果。结果表明,改良剂的引入可改善尾矿酸碱度并显著提高磷酸酶和过氧化氢酶的活性,促进夹竹桃的生长并强化铅和锌在夹竹桃根茎叶中的富集,降低了尾矿基质中重金属的迁移性和生物有效性,其中 M+C 的修复效果优于 N+C。

3.2.2 尾矿基质理化性质改良技术

尾矿基质理化性质改良技术主要包括以下3种: 基质酸碱度改良技术、基质养分改良技术和基质物理性质改良技术。

尾矿基质酸碱度与其化学组成及采用的选矿工艺有关。当尾矿中氯化钠、硫酸钠等可溶性盐及碳酸钠、碳酸氢钠等碱性盐含量较高时,会造成基质盐碱化;当尾矿中硫、磷及交换态铝离子含量较高时,尾矿基质易酸化。针对酸性基质,可加入生石灰等碱性化学改良剂或天然石膏等矿物以提高基质 pH。邓琪等^[72]利用生石灰作为化学改良剂调节酸性锡尾矿的 pH,并协同引入丛枝菌根真菌(*Arbuscular mycorrhizal fungi*, AMF)和草本植物以加快基质强化改良过程,并有效降低尾矿中有效态重金属的含量,结果表明生石灰处理下尾矿 pH 提高了 0.92。针对盐碱性基质,可加入柠檬酸等低分子有机酸、磷酸二氢铵等酸性盐及磷石膏等工业副产品以降低基质 pH。孟凡伟等^[73]发现加入柠檬酸可快速中和钼尾矿的碱性,柠檬酸的添加量为 10 g/t 时,钼尾矿的 pH 即可从 8.50 下降至 7.92(土壤最佳 pH 为 5.20~8.00)。

尾矿基质中缺乏氮、氨基酸和有机质等养分含量,难以满足植物的生长所需,通常需要添加具有改善基质肥力效果的化学改良剂,如沼液、蚯蚓粪等有机肥、秸秆等有机质物料和煤矸石等工业固废。朱丽瑶等^[74]对比研究了生物炭、有机肥及秸秆 3 种改良剂对铁尾矿各营养指标含量及植物生长状况的影响,结果表明尾矿中有机质、碱解氮、速效钾以及速效磷的含量均提高,且有机肥效果最佳。SAMSURI 等^[75]研究了稻壳灰和无机肥施用对香根草修复金矿尾矿的影响,结果表明稻壳灰和无机肥的联合施用改善了尾矿 pH、溶解有机碳和必需养分含量,提高了香根草对尾矿中重金属的吸收。

尾矿因有机质含量低、黏粒多等问题,易出现板结现象,造成基质孔隙度小,通透性差,呈现出较弱的保肥保水能力,可通过添加聚丙烯酰胺等高分子化合物、生物炭等有机改良剂^[76]来改善基质结构。康健等^[77]研究了聚丙烯酰胺的添加对石墨尾矿颗粒团聚行为的影响,结果表明聚丙烯酰胺可与尾矿颗粒胶结,有效提高粒径大于 0.25 mm 的团聚体的含量及其稳定性,改善其孔隙结构,促进水分的渗透。CHÁVEZ GARCÍA 等^[78]总结了生物炭在改善干旱和半干旱环境中矿山尾矿物化

性质的应用,指出大多数生物炭都能普遍提高尾矿的体积密度、水分、有机碳和阳离子交换容量,其中木质(松树)生物炭的效果最好。

尾矿生态化利用不仅能实现尾矿的大规模消纳,还能推动矿区生态环境修复以巩固和发展碳汇。有研究以张家口尚义县废弃矿山为例,估算了矿山修复可带来的碳增汇效益,结果表明矿区的植被固碳量和释氧量每年可分别增加 116.36 t 和 71.12 t,产生的年效益可达 20.17 万元^[79]。因此,在当前时代背景下,应以尾矿资源化利用-生态化利用协同修复模式作为提高尾矿综合利用率的有效途径,在大规模消纳尾矿以缓解环境污染风险的同时,促进矿区植被重建和土壤重构,提高矿区碳汇量,助力可持续发展战略和“双碳”目标的实现(图 3)。

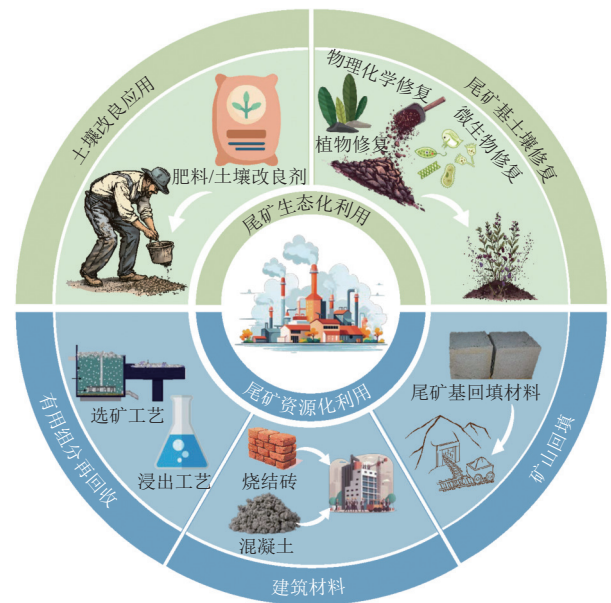


图3 尾矿资源化利用-生态化协同修复模式示意图

Fig. 3 Schematic diagram of synergistic remediation model for tailings resource utilization and ecological restoration

4 结 论

我国矿业加工每年产生的尾矿已超过 14 亿 t, 体量巨大, 给我国生态环境和矿产资源供应安全带来了严峻的挑战, 亟须加快消纳存量大宗固废。然而, 近年来尾矿综合利用率不升反降, 对尾矿的综合利用及处理处置提出了新的要求。

(1) 当前我国尾矿的资源化利用难以满足尾矿大规模消纳的要求。在国家相关政策的激励

下,尾矿的资源化利用技术不断创新突破,呈现出多途径、多方向的特点,发展方向主要集中在尾矿填料化、原料化和基料化,不仅减少了上游原生矿产资源的开采,还有效降低了作业过程中带来的能源消耗和碳排放。然而,尾矿基衍生产品的工业化推广仍受限于生产技术壁垒、生产工艺稳定性差、产品质量标准不明确和市场竞争力差等问题,尾矿的大规模消纳任重而道远。

(2)尾矿生态化利用是落实国家“十四五”规划和实现“双碳”目标的必然选择。通过将尾矿制备成土壤改良剂和肥料以修复污染土壤,或修复尾矿基质以赋予其土壤功能,使尾矿最大限度地回归地球生态系统,以达成废物“从哪里来,到哪里去”的生态回归目标。在实现尾矿大规模消纳的同时,推动矿区生态环境修复以巩固和发展碳汇。在当前时代背景下,尾矿资源化利用-生态化利用协同修复模式是提高尾矿综合利用率的有效途径。

(3)为加快尾矿综合利用进程,仍需从科研方面加大尾矿资源化利用和生态化利用相关科技创新力度,包括尾矿基衍生产品的创新突破以及尾矿基质修复、再回收工艺和衍生产品生产工艺等方面的技术瓶颈突破,构建相应的技术方法体系;从技术政策方面,需加快完善尾矿综合利用标准体系,包括尾矿基衍生产品质量标准、尾矿基土壤修复相关标准以及上下游产业间标准衔接,构建相关技术评估体系。

参考文献 (References):

- [1] 杨伟卫,蔡恒安,尚世超,等.湖北某铜尾矿资源化利用研究[J].金属矿山,2022(5):135-141.
YANG Weiwei, CAI Heng'an, SHANG Shichao, et al. Research on resource utilization of a copper tailing in Hubei[J]. Metal Mine, 2022(5): 135-141.
- [2] 张鸽,张弛,林星杰,等.双碳背景下铜尾矿综合利用方向探讨[J].矿冶,2024,33(4):600-606.
ZHANG Ge, ZHANG Chi, LIN Xingjie, et al. Discussion on the comprehensive utilization of copper tailings under the background of dual carbon[J]. Mining and Metallurgy, 2024, 33(4): 600-606.
- [3] 施灿海,刘明生,程立家,等.尾矿综合利用研究进展及工程实践[J].中国矿业,2024,33(2):107-114.
SHI Canhai, LIU Mingsheng, CHENG Lijia, et al. Research progress and engineering practice on comprehensive utilization of tailings[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(2): 107-114.
- [4] 关于“十四五”大宗固体废弃物综合利用的指导意见[J].再生资源与循环经济,2021,14(4):1-3.
Guidance on the comprehensive utilization of bulk solid waste in the 14th Five-Year Plan [J]. Renewable Resources and Circular Economy, 2021, 14 (4) : 1-3.
- [5] 国务院办公厅关于加快构建废弃物循环利用体系的意见[J].再生资源与循环经济,2024,17(3):2-4.
Opinions of the General Office of the State Council on accelerating the construction of waste recycling system [J]. Renewable Resources and Circular Economy, 2024, 17 (3) : 2-4.
- [6] 李天一.激励与约束并举规范矿山生态修复[N].中国自然资源报,2024-08-15(006).
LI Tianyi. Encouragement and restraint simultaneously regulate mine ecological restoration [N]. China Natural Resources News, 2024-08-15 (006).
- [7] 黄启飞,赵彤,周奇,等.“无废城市”建设中大宗工业固体废物资源化技术路径研究[J].环境保护,2024,52(14):23-29.
HUANG Qifei, ZHAO Tong, ZHOU Qi, et al. Research on the technological path of bulk industrial solid waste resource utilization in the construction of "zero-waste city"[J]. Environmental Protection, 2024, 52(14): 23-29.
- [8] 高莲凤,田释梦,张振国,等.钼尾矿资源综合利用研究进展[J].吉林大学学报(地球科学版),2024,54(5):1544-1557.
GAO Lianfeng, TIAN Shimeng, ZHANG Zhenguo, et al. Research progress on comprehensive utilization of molybdenum tailings resources[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(5): 1544-1557.
- [9] 戴塔根,张术根,任荣恩,等.国内外尾矿开发利用调查研究[M].北京:北京矿产地质研究所,1996.
DAI Tagen, ZHANG Shugen, REN Rongen, et al. Investigation and study on the development and utilization of tailings at home and abroad [M]. Beijing: Beijing Institute of Mineral Geology, 1996.
- [10] 王昆,张峥,HUDSON EDWARDS K A,等.尾矿的特性、灾害及其资源潜力[J].金属矿山,2024(8):216-227.
WANG Kun, ZHANG Zheng, HUDSON EDWARDS K A, et al. Properties, disasters, and resource potential of mine waste tailings[J]. Metal Mine, 2024(8): 216-227.
- [11] LIU Yunjia, WU Songlin, SOUTHAM G, et al. Bioaugmentation with *Acidithiobacillus* species accelerates mineral weathering and formation of secondary mineral cements for hardpan development in sulfidic Pb-Zn tailings[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 411: 124988.
- [12] 黄建华.“一带一路”背景下矿产企业国际化发展探究[J].中国市场,2020(35):72-73.
HUANG Jianhua. Exploration on the international development of mineral enterprises under the background of "The Belt and Road"[J]. China Market, 2020(35): 72-73.
- [13] 柴立元,颜旭,王云燕,等.有色冶金清洁生产技术发展

- 态势[J]. 有色金属工程, 2024, 14(7): 1-12.
- CHAI Liyuan, YAN Xu, WANG Yunyan, et al. Development trend of cleaner production technology in nonferrous metallurgical industry[J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2024, 14(7): 1-12.
- [14] 梁冰, 曾勇, 易富, 等. 尾矿坝渗流稳定性研究进展[J]. 长江科学院院报, 2025, 42(3): 107-117.
- LIANG Bing, ZENG Yong, YI Fu, et al. Research progress on seepage stability of tailings dam[J]. *Journal of Yangtze River Academy of Sciences*, 2025, 42(3): 107-117.
- [15] 黄龙, 张刘柱, 张鹏生. 矿山尾矿库地质稳定性分析及风险防控措施[J]. 世界有色金属, 2024(14): 232-234.
- HUANG Long, ZHANG Liuzhu, ZHANG Pengsheng. Geological stability analysis and risk prevention measures for mine tailings pond[J]. *World Nonferrous Metals*, 2024(14): 232-234.
- [16] 瞿广飞, 冯涛, 刘亮亮, 等. 典型重金属尾矿中资源储量及二次开发经济价值分析[C]//2020 中国环境科学学会科学技术年会论文集(第三卷). 南京: 中国环境科学学会, 2020: 1013-1020.
- QU Guangfei, FENG Tao, LIU Liangliang, et al. Analysis of resource reserves and economic value of secondary development in typical heavy metal tailings[C]//*Proceedings of Science and Technology Annual Conference of Chinese Society of Environmental Sciences in 2020 (Vol. 3)*. Nanjing: Chinese Society of Environmental Sciences, 2020: 1013-1020.
- [17] 常富强, 梁献振, 李杰. 河南某金尾矿回收金试验研究[J]. 现代矿业, 2021, 37(9): 9-11+40.
- CHANG Fuqiang, LIANG Xianzhen, LI Jie. Experimental study on gold recovery from a gold tailings in Henan[J]. *Modern Mining*, 2021, 37(9): 9-11+40.
- [18] 王晴. 某金尾矿二次回收试验研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017: 24-63.
- WANG Qing. Experimental study on secondary recovery of gold tailings[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017: 24-63.
- [19] 翟旭东. 某铅锌尾矿回收氧化锌选矿试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2023(3): 110-115.
- ZHAI Xudong. Experimental research on recovery of zinc oxide from a lead-zinc tailings[J]. *Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)*, 2023(3): 110-115.
- [20] 廖乾, 易峦, 程建国, 等. 某铁尾矿回收钛选矿工艺研究[J]. 湖南有色金属, 2024, 40(5): 13-16.
- LIAO Qian, YI Luan, CHENG Jianguo, et al. Study on beneficiation technology of titanium recovery from iron tailings[J]. *Hunan Nonferrous Metals*, 2024, 40(5): 13-16.
- [21] 袁金明, 刘磊, 周立波, 等. 某含锂花岗岩中铁锂云母、石英及长石综合回收试验研究[J]. 化工矿物与加工, 2025, 54(6): 1-10.
- YUAN Jinming, LIU Lei, ZHOU Libo, et al. Experimental study on comprehensive recovery of iron-lithium mica, quartz and feldspar from a lithium-bearing granite[J]. *Chemical Minerals and Industry*, 2025, 54(6): 1-10.
- [22] 黄军, 陈军, 黄成伟, 等. 江西赣州某钨尾矿综合回收利用工艺研究[J/OL]. 矿产综合利用: 1-13 [2023-10-17]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1251.td.20231012.1513.006.html>.
- HUANG Jun, CHEN Jun, HUANG Chenwei, et al. Research on the comprehensive recovery and utilization technology of a tungsten tailings in ganzhou, jiangxi province [J/OL]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*: 1-13 [2023-10-17]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1251.td.20231012.1513.006.html>.
- [23] LI Yongkui, LI Suqin, ZHAO Xin, et al. Separation and purification of high-purity quartz from high-silicon iron ore tailing: An innovative strategy for comprehensive utilization of tailings resources[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2023, 169: 142-148.
- [24] LI Cong, YANG Xiaofeng, LI Yongkui, et al. Preparation of high-purity SiO₂ by S-HGMS coupled with mixed-acid leaching: A case study on hematite tailings from Ansteel, China[J]. *Waste Management*, 2024, 174: 240-250.
- [25] 黄宝音. 铁尾矿与纤维改良的混凝土楼板力学性能及强度研究[J]. 粘接, 2024, 51(10): 90-92.
- HUANG Baoyin. Study on the mechanical properties and strength of concrete floor slabs improved by iron tailings and fibers[J]. *Adhesion*, 2024, 51(10): 90-92.
- [26] BARZEGAR GHAZI A, JAMSHIDI ZANJANI A, NEJATI H. Utilization of copper mine tailings as a partial substitute for cement in concrete construction[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 317: 125921.
- [27] 宿佩君, 王书云, 王凡, 等. 大掺量黄金尾矿烧结黏土砖组分比例研究[J]. 市政技术, 2024, 42(11): 47-52.
- SU Peijun, WANG Shuyun, WANG Fan, et al. Determining proportion of sintered bricks made from large dosage of gold mine tailings[J]. *Journal of Municipal Technology*, 2024, 42(11): 47-52.
- [28] ZHANG Jiashuo, LIU Taoyong, HUANG Qianxing, et al. Preparation, properties characterization and structure formation mechanism of silica sand tailings-based ceramic materials[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2020, 255: 123611.
- [29] 陈贤树, 李桦, 陈原望, 等. 固废基胶凝材料在黄金尾矿胶结充填中的研究与应用[J]. 新型建筑材料, 2024, 51(6): 105-109.
- CHEN Xianshu, LI Hua, CHEN Yuanwang, et al. Research and application of solid waste based cementitious materials in gold tailings cemented filling[J]. *New Building Materials*, 2024, 51(6): 105-109.
- [30] BEHERA S K, MISHRA D P, SINGH P, et al. Utilization of mill tailings, fly ash and slag as mine paste backfill material: Review and future perspective[J]. *Construction and*

- Building Materials*, 2021, 309: 125120.
- [31] WANG Yansheng, LI Zhaofeng, JIN Qing, et al. High-efficiency utilization of limestone tailings: Used as cementitious materials and fine aggregate to prepare karst structure filling material[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 316: 125841.
- [32] WANG Shi, SONG Xuepeng, CHEN Qiusong, et al. Mechanical properties of cemented tailings backfill containing alkalinized rice straw of various lengths[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 276: 111124.
- [33] 尹岩, 郝凤明, 王娇月, 等. “碳中和”背景下我国矿山生态环境修复研究现状及发展趋势[J]. *化工矿物与加工*, 2022, 51(11): 7-12.
- YIN Yan, XI Fengming, WANG Jiaoyue, et al. The research status and developing trend of mine ecological environment rehabilitation with carbon neutrality in China[J]. *Industrial Minerals & Processing*, 2022, 51(11): 7-12.
- [34] DE CASTRO E SILVA H L, SILVA A M L, BARROS R M, et al. Addition of iron ore tailings to increase the efficiency of anaerobic digestion of pig manure: A technical and economic analysis[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2021, 148: 106013.
- [35] LI Yifan, HU Tuanliu, XIANG Aihua, et al. Molybdenum tailings calcination for phase composition of Si-Ca-K-Mg fertilizers: Modification of phase transformation and its effects on plant growth[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 493: 152726.
- [36] 涂全平, 魏宏飞, 胡团柳, 等. 钼尾矿制备高品质硅钙钾镁肥工艺研究[J/OL]. *矿产综合利用*: 1-10 [2024-11-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1251.TD.20241115.1535.002.html>.
- TU Quanping, WEI Hongfei, HU Tuanliu, et al. Study on the preparation of high quality silicon calcium potassium magnesium fertilizer from molybdenum tailings [J/OL]. *Comprehensive utilization of mineral resources*: 1-10 [2024-11-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1251.TD.20241115.1535.002.html>.
- [37] 杨效家, 漆增连, 李志兵, 等. 磷尾矿资源肥料化利用途径研究进展[J]. *应用化工*, 2024, 53(8): 1932-1936.
- YANG Xiaojia, QI Zenglian, LI Zhibing, et al. Research progress on fertilizer utilization of phosphorus tailings resources[J]. *Applied Chemical Industry*, 2024, 53(8): 1932-1936.
- [38] 郑建国, 于南树, 刘永秀, 等. 磷酸活化磷尾矿制取聚合态钙镁磷肥的工艺条件研究[J]. *无机盐工业*, 2020, 52(2): 43-46.
- ZHENG Jianguo, YU Nanshu, LIU Yongxiu, et al. Study on technological conditions of polymeric calcium magnesium phosphate fertilizer from phosphoric acid activated phosphate tailings[J]. *Inorganic Chemicals Industry*, 2020, 52(2): 43-46.
- [39] 张锐. 基于磷尾矿和沼渣综合利用的生物有机肥制备及应用[D]. 武汉: 华中农业大学, 2023: 42-46.
- ZHANG Rui. Preparation and application of bio-organic fertilizer based on comprehensive utilization of phosphate tailings and biogas residue[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023: 42-46.
- [40] HAN Xiaoyu, WANG Fei, ZHAO Yan, et al. Recycling of iron ore tailings into magnetic nanoparticles and nanoporous materials for the remediation of water, air and soil: A review[J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2023, 21(2): 1005-1028.
- [41] 李丁. 缓释磁化复混肥料研制及肥效研究与应用[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2013: 35-36.
- LI Ding. Development and application of slow-release magnetized compound fertilizer[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2013: 35-36.
- [42] 杨孝勇. 基于铁尾矿的新型盐碱地复合改良剂的研制及应用[D]. 济南: 山东大学, 2020: 63-65.
- YANG Xiaoyong. Development and application of a new saline-alkali soil amendment based on iron tailings[D]. Jinan: Shandong University, 2020: 63-65.
- [43] 吴珊珊, 刘意章, 周旺旺, 等. 磷尾矿钝化材料研制及其对土壤重金属的修复机制[J]. *矿物学报*, 2024, 44(3): 326-334.
- WU Shanshan, LIU Yizhang, ZHOU Wangwang, et al. The remediation mechanism of heavy metals contaminated soils by the passivator prepared from phosphate tailing[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2024, 44(3): 326-334.
- [44] MU Jing, HU Zhengyi, HUANG Lijuan, et al. Preparation of a silicon-iron amendment from acid-extracted copper tailings for remediating multi-metal-contaminated soils[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 257: 113565.
- [45] LEI Ming, TANG Lin, DU Huihui, et al. Safety assessment and application of iron and manganese ore tailings for the remediation of As-contaminated soil[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2019, 125: 334-341.
- [46] ZHANG Jiaxing, DAI Luming, LI Jiahao, et al. Phosphate tailings-based slow-release heavy metal passivation materials: Mechanism, environmental risk, and microbial community evolution[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 434: 139931.
- [47] SUN Weimin, XIAO Enzong, HÄGGBLÖM M, et al. Bacterial survival strategies in an alkaline tailing site and the physiological mechanisms of dominant phylotypes As revealed by metagenomic analyses[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(22): 13370-13380.
- [48] 张怡悦. 金/铁矿区土壤-植物体系铅锌同位素特征及微生物演化机制[D]. 北京: 北京科技大学, 2021: 76-102.
- ZHANG Yiyue. Pb-Zn isotopic characteristics and microbial evolution mechanisms of soil-plant system in gold/iron mining area[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2021: 76-102.
- [49] REN Jiaqiang, SONG Xin, DING Da. Sustainable remedia-

- tion of diesel-contaminated soil by low temperature thermal treatment: Improved energy efficiency and soil reusability[J]. *Chemosphere*, 2020, 241: 124952.
- [50] 卢加程, 龙平, 王观石, 等. 沉渣溶液淋洗离子型稀土尾矿残留浸矿剂的研究[J]. *稀土*, 2024, 45(5): 80–89.
LU Jiacheng, LONG Ping, WANG Guanshi, et al. Study on removal of residual leaching agent from ion-absorbed type rare earth tailings using sediment solution[J]. *Chinese Rare Earths*, 2024, 45(5): 80–89.
- [51] ZHAO Bin, PENG Tianyue, HOU Renjie, et al. Manganese stabilization in mine tailings by MgO-loaded rice husk biochar: Performance and mechanisms[J]. *Chemosphere*, 2022, 308: 136292.
- [52] LI Jiahao, XIA Chenggong, CHENG Rong, et al. Passivation of multiple heavy metals in lead–zinc tailings facilitated by straw biochar-loaded N-doped carbon aerogel nanoparticles: Mechanisms and microbial community evolution[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 803: 149866.
- [53] SUN Bo, LYU Chunjuan, BI Rutian, et al. Effects of polyacrylamide molecular weight and mass concentration on water transport characteristics of iron tailings[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11: 6252.
- [54] ZHANG Chao, PAN Zhenkai, YIN Hongwu, et al. Influence of clay mineral content on mechanical properties and microfabric of tailings[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12: 10700.
- [55] 杨胜香, 李凤梅, 彭禧柱, 等. 不同碳氮磷源改良剂对铅锌尾矿废弃地土壤微生物群落结构的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(6): 1256–1264.
YANG Shengxiang, LI Fengmei, PENG Xizhu, et al. Effects of amendments with different C/N/P ratios on the microbial community structure in Pb-Zn mine tailings[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(6): 1256–1264.
- [56] BENIDIRE L, PEREIRA S, ABOUDRAR W, et al. Remediation of metal-contaminated mine tailings by the application of organic and mineral amendments[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2022, 22(2): 482–495.
- [57] WANG Li, JI Bin, HU Yuehua, et al. A review on in situ phytoremediation of mine tailings[J]. *Chemosphere*, 2017, 184: 594–600.
- [58] BAKER A J M, MCGRATH S P, REEVES R D, et al. Metal hyperaccumulator plants: A review of the ecology and physiology of a biological resource for phytoremediation of metal-polluted soils[M]//*Phytoremediation of Contaminated Soil and Water*. Boca Raton: CRC Press, 2020: 85–107.
- [59] ASARE M O, SZÁKOVÁ J, TLUSTOŠ P. Mechanisms of As, Cd, Pb, and Zn hyperaccumulation by plants and their effects on soil microbiome in the rhizosphere[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2023, 11: 1157415.
- [60] SYTAR O, GHOSH S, MALINSKA H, et al. Physiological and molecular mechanisms of metal accumulation in hyperaccumulator plants[J]. *Physiologia Plantarum*, 2021, 173(1): 148–166.
- [61] 薛雨, 范润川, 丁爱中, 等. 螯合诱导植物修复铀污染土壤的研究进展[J]. *环境科学研究*, 2024, 37(8): 1798–1809.
XUE Yu, FAN Runchuan, DING Aizhong, et al. Research progress on chelating agent induced phytoremediation of uranium-contaminated soils[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2024, 37(8): 1798–1809.
- [62] 罗有发. 植物修复对土法炼锌废渣中重金属的生物地球化学过程的影响[D]. 贵阳: 贵州大学, 2018: 125–127.
LUO Youfa. Phytoremediation on biogeochemical processes of heavy metals in indigenous zinc smelting waste slag[D]. Guiyang: Guizhou University, 2018: 125–127.
- [63] 刘忠闯. 几种草本植物体内汞富集转移及汞污染土壤修复应用[D]. 重庆: 重庆大学, 2016: 117–121.
LIU Zhongchuang. Mercury enrichment and transfer several herbs and application of mercury-contaminated soil remediation[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016: 117–121.
- [64] BATTKE F, ERNST D, FLEISCHMANN F, et al. Phytoreduction and volatilization of mercury by ascorbate in *Arabidopsis thaliana*, European beech and Norway spruce[J]. *Applied Geochemistry*, 2008, 23(3): 494–502.
- [65] MAHABUB M S, ALAHI F, AL IMRAN M. Unlocking the potential of microbes: Biocementation technology for mine tailings restoration—A comprehensive review[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(40): 91676–91709.
- [66] 江昭明, 陈永贵, 付俊, 等. 微生物诱导碳酸盐沉淀修复镉污染尾矿试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2025, 47(6): 1308–1317.
JIANG Zhaoming, CHEN Yonggui, FU Jun, et al. Experimental study on the remediation of cadmium-contaminated tailings using microbial-induced carbonate precipitation(MICP) [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2025, 47(6): 1308–1317.
- [67] LI Hong, WANG Tao, DU Hongxia, et al. Research progress in the joint remediation of plants-microbes-soil for heavy metal-contaminated soil in mining areas: A review[J]. *Sustainability*, 2024, 16(19): 8464.
- [68] 毛青. 微藻—细菌耦合对矿区砷污染土壤的修复机理研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2023: 98–99.
MAO Qing. Study on the remediation mechanism of arsenic contaminated soil in the mining area by microalgae-bacteria coupling[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2023: 98–99.
- [69] 李敏. 铁尾矿土壤化利用过程中重金属污染的植物修复和土壤改良技术[D]. 济南: 山东大学, 2017: 14–31.
LI Min. Phytoremediation technology on pollution control of heavy metals and soil improvement in utilization of iron tailings[D]. Jinan: Shandong University, 2017: 14–31.

- [70] FANG Qing, HUANG Tao, WANG Ning, et al. Effects of *Herbaspirillum* sp. p5-19 assisted with alien soil improvement on the phytoremediation of copper tailings by *Vetiveria zizanioides* L.[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(45): 64757–64768.
- [71] SU Rongkui, OU Qiqi, WANG Hanqing, et al. Organic–inorganic composite modifiers enhance restoration potential of Nerium oleander L. to lead-zinc tailing: Application of phytoremediation[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(19): 56569–56579.
- [72] 邓琪, 包立, 秦芙蓉, 等. 生石灰—丛枝菌根真菌对酸性锡尾矿化学性质及 6 种草本植物生长的影响 [J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2024, 39(1): 168–174.
- DENG Qi, BAO Li, QIN Furong, et al. Effects of the quicklime-arbuscular mycorrhizal fungi on main chemical properties of acid tin tailings and plant growth for six kinds of herbs[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science)*, 2024, 39(1): 168–174.
- [73] 孟凡伟, 涂全平, 向艾华, 等. 河北省某钨尾矿土壤化改良及种植实验研究 [J]. 矿产保护与利用, 2024, 44(2): 106–114.
- MENG Fanwei, TU Quanping, XIANG Aihua, et al. Soilization improvement and cultivation experiment of molybdenum tailings in Hebei Province[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2024, 44(2): 106–114.
- [74] 朱丽瑶, 许永利, 张俊英, 等. 不同改良剂修复铁尾矿的研究 [J]. 广东化工, 2023, 50(15): 126–130.
- ZHU Liyao, XU Yongli, ZHANG Junying, et al. Study on repairing iron tailings with different amendments[J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2023, 50(15): 126–130.
- [75] SAMSURI A W, TARIQ F S, KARAM D S, et al. The effects of rice husk ashes and inorganic fertilizers application rates on the phytoremediation of gold mine tailings by vetiver grass[J]. *Applied Geochemistry*, 2019, 108: 104366.
- [76] HUSSAIN R, BORDOLOI S, GUPTA P, et al. Effect of biochar type on infiltration, water retention and desiccation crack potential of a silty sand[J]. *Biochar*, 2020, 2(4): 465–478.
- [77] 康健, 郝永生. 不同浓度聚丙烯酰胺对石墨尾矿颗粒团聚体微观结构的影响 [J]. 黑龙江科技大学学报, 2024, 34(3): 355–359+366.
- KANG Jian, HAO Yongsheng. Effect of different concentrations of polyacrylamide on micro-structure of graphite tailings particle aggregates[J]. *Journal of Heilongjiang University of Science and Technology*, 2024, 34(3): 355–359+366.
- [78] CHÁVEZ GARCÍA E, GONZÁLEZ MÉNDEZ B, MOLINA FREANER F. Biochar application on mine tailings from arid zones: Prospects for mine reclamation[J]. *Journal of Arid Environments*, 2023, 217: 105040.
- [79] 杨丛铭, 袁颖, 侯明华, 等. 张家口尚义县废弃矿山修复生态效益评估研究 [J]. 河北地质大学学报, 2022, 45(6): 116–121.
- YANG Congming, YUAN Ying, HOU Minghua, et al. Ecological benefit evaluation of abandoned mine rehabilitation in Shangyi County of Zhangjiakou[J]. *Journal of Hebei GEO University*, 2022, 45(6): 116–121.