

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2024.04.001

矿区场地土壤防渗阻隔及生态修复研究进展

赵娅楠, 杨志辉, 司梦莹, 阳翠红

(中南大学 冶金与环境学院, 长沙 410083)

摘要: 矿业是我国重要的经济产业, 但是随着我国矿区开采活动的不断进行, 周边场地和土壤的污染日益突出, 矿区场地土壤修复越来越受到研究人员重视。总结了防渗阻隔技术和生态修复技术研究现状, 对两者进行文献计量分析, 简要概述水平/垂直阻隔技术的技术原理及材料研发现状、土壤性质改良方法、植物修复种植物选择的原则及配置原则, 为矿区场地修复提供借鉴与参考。

关键词: 矿区; 阻隔技术; 植物修复; 固化稳定化

中图分类号: X53

文献标志码: A

文章编号: 1007-7545(2024)04-0001-12

Research Progress on Soil Seepage Barrier and Ecological Restoration in Mining Sites

ZHAO Ya'nan, YANG Zhihui, SI Mengying, YANG Cuihong

(School of Metallurgy and Environment, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Mining is an important economic industry in China. With the ongoing development of mining activities in China, the pollution of surrounding sites and soil is becoming more prominent. Researchers are increasingly focusing on soil remediation at mining sites. The current research status of anti-seepage and barrier technologies and ecological restoration techniques were summarized, and a bibliometric analysis for both techniques was conducted. The technical principles and current status of material development for horizontal/vertical barrier technologies, soil property improvement methods, and the principles of selection and arrangement of plant species in phytoremediation were briefly outlined. This article serves as a source of inspiration and reference for the restoration of mining site areas.

Key words: mining district; blocking technique; phytoremediation; solidification stabilization

矿业是我国的经济基础产业, 为经济发展做出了巨大贡献。然而, 矿业在促进社会发展的同时也带来了诸多环境问题。在从事矿山开采和矿物冶炼过程中产生的废水、固体废弃物等有害物质, 通过淋溶和沉降等途径, 对矿区周边场地和土壤造成了一定程度的污染^[1]。2014年公布的《土壤污染状况调查公报》显示, 全国土壤污染类型以无机型为主, 总的超标率为 16.1%, 其中在调查的 70 个矿区土壤

点位中超标点位占了 33.4% (总点位 1 672), 土壤环境状况总体不容乐观, 矿区土壤环境问题更为突出^[2]。十八大以来, 生态环境问题备受关注, 2022 年自然资源部颁布《中国矿产资源报告 2022》, 总结了十八大以来绿色矿山建设的实践成果, 谋划布局“十四五”矿山生态修复重点工程计划, 核查全国历史遗留矿山并加强生态修复, 体现了国家治理矿区场地污染的决心。

收稿日期: 2023-12-12

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC1809203)

作者简介: 赵娅楠(1999-), 女, 硕士研究生; **通信作者:** 司梦莹(1989-), 女, 博士, 讲师

矿区污染程度较高点位一般位于尾矿库周围,主要是废石尾砂堆存导致的重金属渗流,因此,矿区治理一般在尾矿库周围进行防渗阻隔,其他点位进行基质改良,通过生态修复实现矿山复绿。对矿区土壤添加稳定化药剂或改良剂进行基质改良,种植先锋植物、重金属超富集植物或者经济作物,是矿区常用的生态修复技术。本文综合介绍了防渗阻隔技术和生态修复技术研究进展,并对矿区污染修复进行了展望,旨在为矿区场地修复提供借鉴与参考。

1 场地污染阻隔及生态修复文献计量学分析

对矿区场地土壤阻隔及生态修复进行文献计量分析,以了解矿区土壤修复技术的研究现状和发文热点。中文数据来源于CNKI的中国期刊全文数据库^[3]。在知网高级检索功能中选择时间跨度为2006—2022年,截止时间为2022年12月31日,检索库选择“学术期刊”“学位论文”^[4],以“矿区”为主题,利用“阻隔”“生态修复”等关键词检索,去掉重复、不相关内容、简讯、会议等,共获取中文相关文章

666篇。英文文章数据来源于Web of Science TM核心合集数据库。以“mine”为主题词(TS),“barrier”“ecological restoration”为关键词(AK),时间跨度为2006—2022年,选择论文(Article)和综述(Review)为文献类型,共获取英文相关文章521篇。通过Origin软件进行数据分析。

分析矿区场地治理领域发文量,能够了解研究人员对该领域的关注程度,年均发文量如图1(a)所示^[5]。在检索时间(2006—2022年)内发文量逐年上升,其中2019—2021年间更是呈现爆发式增长。2022年发文量和发展速度与前几年相比略少,可能是由于部分最新期刊暂时未录入,影响了数据统计。发文国家(地区)反映了不同国家对该领域的重视程度。如图1(b)所示,2006—2022年,中国、美国、澳大利亚位列发文量前三,分别占总发文量的24.76%、12.86%和12.28%。其中,中国的发文量领先于其他国家/地区,反映了我国矿区场地污染修复的发展需求。由于矿山开采导致周围土壤受到污染的问题日益严重,矿区场地污染的修复越来越受到我国的重视与关注,并且修复方向朝着联合修复及生态修复转向,矿区生态修复成为研究热点。

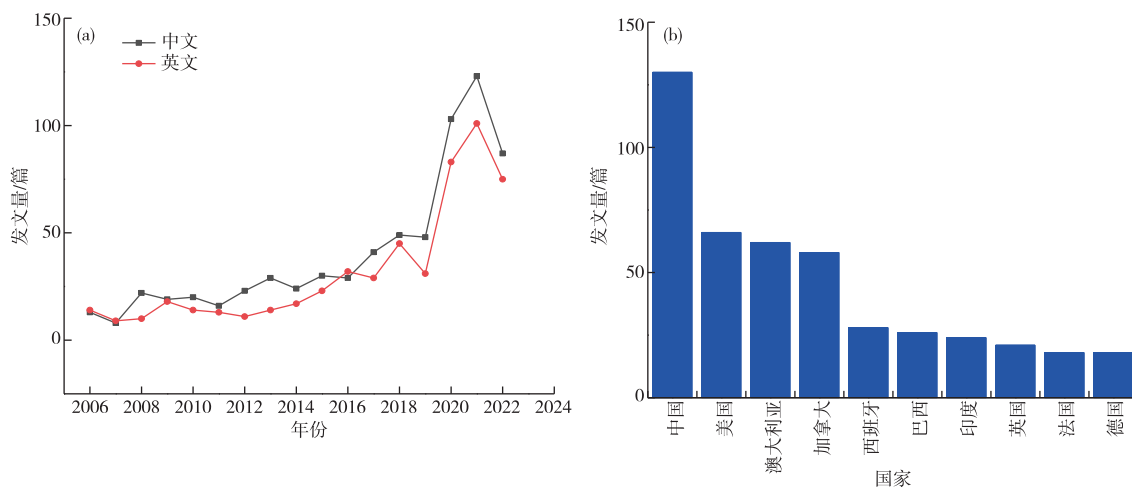


图1 2006—2022年矿区场地污染阻隔及生态修复技术领域年度发文量(a)及发文国家与地区(b)
 Fig. 1 Annual publication volume(a)and the countries and regions publishing articles(b) in the field of pollution control, barrier technologies, and ecological restoration techniques for mining area sites from 2006 to 2022

2 矿区场地污染阻隔技术

矿区尾矿库因废石、尾矿堆存导致重金属渗流^[6],且尾矿长期暴露在空气中氧化产生大量酸性矿山排水,以尾矿库为中心向四周土壤进行扩散,导致扩散范围增大,从而造成大面积土壤污染^[7]。阻隔技术

主要是通过阻隔或封存污染物的形式,限制污染物的地表迁移和地下迁移,切断污染源与受体之间的暴露途径^[8-9],具有节约成本、降低污染风险、减少过度施工的优势^[10],近年来在国内外矿区污染场地风险控制中得到了越来越广泛的应用。英国环保局统计数据显示,2000—2013年开展的511个场地土壤污

染治理项目中,68%的污染场地采用了阻隔技术^[11]。国内研究人员已对阻隔技术实施的可行性、成本、时间、风险控制的有效性等方面进行了初步探索^[12],但污染场地的实际工程应用较少,缺少成熟的案例经验。

以往我国对阻隔技术的研究局限于控制污染转移的技术手段,但近年来,研发化学兼容性好、可同时保持低渗透性和强阻滞性、微生物矿化和有机矿物改性等的复合材料用于横向和竖向阻隔屏障,是近年来面向矿区多种重金属复合污染状况的研究重点^[13]。

2.1 水平阻隔技术

水平阻隔技术的阻隔层采用水平敷设形式,在污染场地底部及四周铺设阻隔材料,阻断污染介质的迁移。典型的覆盖系统通常由六个基本层组成,自上而下分别为表层、保护层、排水层、阻隔层、气体收集层和基础层^[14],包括混凝土水平阻隔、黏土水平阻隔、土工衬垫柔性水平阻隔等技术^[15]。例如娄振东等^[16]将混凝土水平阻隔技术用于贵州铜仁市万山汞矿,减少汞、镉、铅等重金属渗入周边环境和对周边水源的污染。湖南冶炼化工遗留场地采用顶部覆盖+GCL膨润土垫、HDPE防渗膜等水平阻隔技术,限制了重金属垂向迁移速度,实现对场地锌、镉、铅等污染物的长期阻控,且成本低^[17]。郑中华等^[18]使用柔性水平阻隔+HDPE膜-膨润土复合垂直阻隔技术应用于福建某紫金铜矿厂,在水平和垂直方向上进行复合阻隔,不仅降低土壤中铜、铅等重金属的迁移扩散,使下游铜离子浓度降低至1 mg/L以下,同时节约了运行成本。多种材料和技术的相互配合应用降低了重金属向周边环境迁移的可能性,增强了重金属污染阻控。

2.2 垂直阻隔技术

垂直阻隔技术通过建设地下阻隔墙来封存污染物或改变地下水流向^[19]。根据墙体建筑材料和施工方式可分为泥浆墙、灌浆墙、板桩墙、土壤原位搅拌、土工膜和衬层等^[9,18,20]。泥浆墙渗透性低,成本低,短时间内限制重金属的迁移距离效果显著;灌浆墙场地暴露风险小,处理重金属污染物灵活多样,适应多种类型场地;板桩墙耐腐蚀效果显著,不易造成二次污染等。

龚亚龙等^[21]在郴州市王仙岭尾砂库重金属污染治理工程中,通过构筑混凝土泥浆墙,并在堆填物和混凝土阻隔墙之间填充黏土墙,将尾砂、底泥、废渣固定在区域内,有效隔离污染土壤,阻止了砷、镉、铅、锌等重金属向周边扩散迁移,且具有长效性,该技术经济成本低,对治理大范围土壤污染的矿区项目具有重要借鉴意义。

2.3 立体阻隔技术

单一的阻隔技术通常具有局限性,水平阻隔技术易受边坡稳定性的影响,垂直阻隔技术存在墙体连续性难以维持的问题,在实际工程案例中往往采用联合修复技术。首先采用稳定化处置污染土壤,使其降低在修复目标以下。

曾宪坤等^[22]采用HDPE膜或者混凝土防渗墙、膨润土防渗墙等,防渗墙底部嵌入不透水层,顶部与水平隔离层连接,形成封闭区域,将污染源有效控制后,顶部可以进行绿化建成生态公园。朱俊民等^[23]结合甘肃某废弃矿区污染场地实际案例,垂直阻隔采用“地下高压旋喷+地上挡土墙”组合技术,水平阻隔采用“HDPE膜+GCL”防渗结构,构建“垂直防渗+水平封场+生态修复”技术体系。该工程消除治理区域污染土壤及废渣威胁,环境监测达标,未出现二次污染,同时通过生态修复重构矿区环境。

3 矿区场地污染生态修复技术

生态修复技术的关键是筛选出重金属耐受且适宜生长的优势植物修复受污染的场地土壤,而根据具体环境条件与需要选择适宜的树种是其关键技术之一。由于矿区土地受重金属污染严重,土壤理化性质差,肥力低,为植物生长带来巨大挑战。因此,需要添加稳定化药剂降低重金属活性,添加土壤改良剂改良土壤理化性质,以提高矿山复绿效率。

3.1 土壤性质改良

生态修复是改良矿区场地生态环境的最优途径。由于植物生长周期长,且土壤养分需经过较长时间的恢复才能与矿山开采前相似,因此,在植物修复过程中常通过施加土壤改良剂或稳定化药剂的方式改善土壤性质,增强植物根系微生物生长繁殖能力和新陈代谢活跃度,从而提高植物修复污染土壤的能力^[24]。目前,矿区生态修复中土壤性质改良主要包含固化/稳定化、基质改良。

3.1.1 固化/稳定化

随着场地修复目标从降低污染物总量向降低其浸出率或生物可利用率的方向发展,固化/稳定化技术在2011年后备受关注,尤其是2016年以后成为场地修复的热点^[25]。现有重金属稳定剂的研究集中在石灰性物质、金属氧化物、生物炭材料、黏土矿物、含磷材料和有机物质等^[26],如表1所示。李倩^[27]研发TMT-15-FeCl₃-熟石膏复配型铁基材料重金属稳定化剂,使土壤中有效态Cd、Pb、As的稳定化率达50%以上。ZHENG等^[28]以天然沸石和稻壳生

物炭为生物碳基复合改良剂,在 Cd、Pb、As 和 W 共污染土壤中进行金属固定,结果表明,沸石、生物炭和组合处理分别将金属总生物利用度毒性从 335.5 降低到 182.9、250.5 和 143.4。罗维叶等^[29]采用 3 种不同来源的生物炭(动物粪便炭、混合炭(秸秆-木材)、稻壳炭)对水溶态 Zn 进行试验,结果表明,3 种生物炭对水溶态 Zn 去除率均大于 90%。除此之外,国内学者研究了新型基体材料。ZHOU 等^[30]采用碱熔和铁浸渍法合成了一系列不同 pH 的铁改性煤气化渣(IGS)复合材料 IGS3/5/7/9/11,IGS7 表现出最佳的吸附容量,最大 Cd 和 As 吸附容量分别为 42.72、35.29 mg/g,并且 Cd、As 生物利用度分别降到 10.59、1.7 mg/kg。

微生物稳定化技术作为固化/稳定化的一种,具有广阔的应用前景。微生物根据不同功能,包括氧化、还原及成矿等作用降低土壤中重金属的有效性。硫酸盐还原菌能够将硫酸盐还原为硫离子,与土壤

中的金属阳离子形成难溶、稳定的金属硫化物,从而降低重金属的生物有效性^[31]。邓敏等^[32]以攀西矿区典型重金属污染土壤为研究对象,选择硫酸盐还原菌和低分子有机酸开展化学-微生物联合修复技术探索,研究结果显示,硫酸盐还原菌对 Cd²⁺、Pb²⁺ 的去除率分别达到 94.8%、93.9%。砷氧化微生物能够将毒性更大的亚砷酸盐转化为毒性较低且流动性较低的砷酸盐。微生物能够分泌一种或多种代谢产物,这些代谢产物与环境中的离子或化合物发生反应导致矿物颗粒沉积^[33]。VARENYAM 等^[33]分离出耐砷细菌 *Sporosarcina ginsengisoli* CR5,将该细菌应用于 As 污染土壤治理时,处理后的土壤中可交换态砷含量降低了 96.6%,XRD 结果显示,形成了方解石生物矿化产物,证实了微生物诱导方解石沉淀(MICP)过程。杨宇等^[34]从矿区土壤中筛选出砷氧化菌 *Pseudomonas* sp. AO-1,其对 As(III) 的抗性达 2 000 mg/L,氧化率达 72.5%。

表 1 固化/稳定化材料
Table 1 Solidification/stabilization materials

材料类型	材料名称	材料效果
固废基材料	铁改性煤气化渣复合材料(IGS7) ^[30]	添加 1% IGS7 时,Cd 生物利用度从 0.69 mg/kg 降到 10.59 mg/kg,As 生物利用度从 6.86 mg/kg 降到 1.7 mg/kg
	工业固废钢渣、脱硫石膏,农业固废甘蔗渣、鸡粪 ^[35]	废矿渣中 As、Pb、Zn 的 360 d 浸出毒性分别降低了 99.8%、100%(未检出)和 86.5%
矿物基材料	三乙烯四胺-蒙脱土纳米复合材料 ^[36]	对 Zn、Mn、As 和 Pb 离子的固定率分别为 96.3%、66.4%、86.4% 和 54.2%
	天然海泡石 ^[37]	糙米、稻壳、秸和水稻植株根中 Cd 的含量分别为 54.7%~73.7%、44.0%~62.5%、26.5%~67.2%和 36.7%~46.7%
	腐殖质改性蒙脱石 ^[38]	Cd 和 Hg 浸出浓度分别降低 94.1%和 93.0%
	海泡石+石灰石 ^[39]	可交换态 Pb、Cd 分别降低 98.9%和 89.9%
生物炭基材料	磁性多孔生物炭球 ^[40]	Cd(II)从(2.81±0.02)mg/kg 降到(1.39±0.06)mg/kg;As(V)从(60.23±0.39)mg/kg 降到(27.34±0.94)mg/kg
	混合细菌负载生物炭 ^[41]	As、Cd、Pb 去除率分别为 74.77%、74.80%、64.74%
	餐厨垃圾、玉米秸秆和花生壳热解生物炭 ^[42]	降低土壤中可提取 Pb 和 Cd 22.61%~71.01%(餐厨垃圾)、18.54%~64.35%(玉米秸秆)、3.28%~60.25%(花生壳)
	氨基功能化氢炭 ^[43]	污染土壤 Cu、Pb、Cd 生物有效性最高分别降低 96.2%、52.2%和 15.5%,Cu、Pb、Cd 的淋溶毒性分别显著降低 98.1%、31.3%和 30.4%
	油菜秸秆和正磷酸盐 ^[44]	使 TCLP 的提取浓度下降 5.9%~81.7%
	天然沸石和稻壳生物炭 ^[28]	沸石、生物炭组合处理将 Cd、Pb、As 总生物利用度毒性从 335.5 降低到 143.4
铁基材料	稻壳、秸秆-木材和动物粪便 ^[29]	3 种生物炭对水溶态 Zn 去除率均大于 90%
	羟基氧化铁 ^[45]	Sb 与 Pb 可提取去除率分别为 89%~90%和 89%~99%
	磷改性铁基材料(PFM) ^[46]	Pb 和 As 的修复率分别达到 57%~82%和 62%~76%
金属氧化物	TMT-15-FeCl ₃ -熟石膏复配 ^[27]	土壤中有有效态 Cd、Pb、As 稳定化率达 50%以上
	非晶态锰氧化物(AMO) ^[47]	Cu、Pb 和 Sb 的浸出分别下降到对照的 35%、7%和 11%
还原微生物	壳聚糖复合材料 ^[48]	壳聚糖-锰氧化物;DTPA-可提取态下降了 54.8%
	硫酸盐还原菌 ^[32]	对 Cd ²⁺ 、Pb ²⁺ 的去除率分别可达 94.8%、93.9%
氧化微生物	砷氧化菌 <i>Pseudomonas</i> sp. AO-1 ^[34]	pH=7 时 As(III)氧化率到达最大 72.5%
	锑氧化菌 <i>Pseudomonas</i> sp. ZLX16 ^[49]	3 d 内可以将 100 mmol/m ³ 的 Sb(III)完全氧化,且该菌株能够显著减少 Sb 从固相土壤到液相中的释放量达 63.5%
成矿微生物	耐砷细菌 <i>Sporosarcina ginsengisoli</i> CR5 ^[33]	交换态砷含量降低了 96.6%,形成方解石-砷共沉淀物

3.1.2 基质改良

受重金属污染的矿区土壤普遍存在肥力低、酸性强等问题,通常施用土壤改良剂以增加土壤肥力,改善排水性能,减轻土壤侵蚀,从而提高植物生长环境^[50]。常用的土壤改良剂包括矿物质类、有机质类和促生微生物。NONG等^[51]研究了海泡石(SE)、腐殖酸钠(HS)、微生物肥(JF)以SE:JF/HS=2:1(质量比)的比例在田间试验中对Cd、Pb、As生物利用度的影响,结果显著降低了土壤有效态Cd和有效态Pb含量,且所有改良剂均能有效降低糙米中As的含量。肥料能够用于改良污染土壤的理化性质,有机肥料离子交换能力较强,是理想的改良吸附剂^[25],生物炭基肥、污泥等作为保水保肥型土壤基质改良材料改良土壤性质。针对当前废弃稀土矿区尾砂土存在的土壤结构性差、肥力低下和种植植物生产力低等问题,贺燕子等^[52]选择有机肥、保水剂、硅钙钾镁肥和尿素制成保水保肥材料对尾砂土基质进行改良,通过改善废弃离子型稀土矿区尾砂土土壤理化性质促进了皇竹草的生长,使皇竹草增产58.13%~182.63%。黄玲等^[53]采用硅酸钠与生物腐殖肥,使土壤中弱酸提取态Cd降低14.95%,油菜菜根系Cd降低51.35%,儿童和成人的健康风险分别降低40.82%和30.21%。

微生物通过促生微生物促进植物生长从而提高重金属修复效率。毕银丽等^[54]针对西部矿区极端环境,研究了接种丛枝菌根真菌(AMF)对促进植物生长、抗氧化物的活性和含量、光合效率等系统的影响,结果表明,利用丛枝菌根真菌能够增强植物对环境的抗逆性,同时增强土壤微生物活性,改善矿区生态环境。因此,结合温室接种筛选出显著促进植被修复的AM真菌,开展野外试验,筛选亲和力强、抗逆性强的AM真菌强化植被恢复技术,是完善生态系统结构,构建可持续的地下-地上协同的立体生态治理技术体系,提高矿区生态修复效率的重要技术。

3.2 植物修复

传统的治理土壤重金属污染的物理和化学方法虽处理效果显著^[55],但其存在成本高、破坏土层结构、二次污染等问题,不宜大面积使用,在矿区场地污染修复存在局限性^[56]。植物修复技术作为环保领域发展起来的一项新兴的环境友好型修复技术,具有成本低、对土层破坏小、无二次污染和适宜大面积推广等优点,同时增加了矿区植被覆盖,有效减少水土流失和丰富生物多样性,对于矿区重金属污染土壤的修复具有较强的操作性^[57]。植物修复技术

利用重金属超富集植物去除土壤中的重金属污染物,改善土壤养分状况的同时优化局部环境^[58]。但是,由于矿区土壤成分复杂,污染源众多,在实地修复过程中,通常利用不同植物的特性,采用多种植物混合的方式,合理搭配植物,形成稳定的植物配置模式,从而实现长期的自然演替与景观恢复。除此之外,在修复场地种植增值利用型经济作物,实现生态修复与经济效益协同发展也是目前的研究热点。

3.2.1 超富集植物

筛选出重金属超富集植物,是植物修复技术的关键。BROOKS等^[59]在1977年首先提出超富集植物这一概念,根据植物地上部的重金属浓度来定义,植物积累Cr、Co、Ni、Cu、Pb含量达到1000 mg/kg以上,积累Mn、Zn含量达到10000 mg/kg以上,积累Au含量达到1 mg/kg以上时,这些植物称为相应重金属的超富集植物。目前普遍认为超富集植物对重金属的吸收量超过一般植物100倍以上,并将其存储在体内,而植物并不显现出明显的中毒特征^[60]。CHANEY等^[61]于1977年首次提出利用超富集植物富集土壤中的重金属,从而消除土壤污染。矿区场地污染修复的重金属超积累植物应符合以下条件:第一,植物体内重金属富集含量与土壤中重金属含量的比值大于1,即富集系数大于1;第二,抗逆性和抗虫抗病能力强,能够在恶劣的矿区环境中良好生长,生长快,生物量大;第三,能同时富集多种重金属^[62]。在生态环境恶劣的矿区环境中,筛选具有土壤修复能力且能够在逆境中生存的超富集植物,对矿区场地污染具有重要意义。

目前,已有721种植物被判定为超富集植物,富集Ni有532种,Cu有53种,Mn有42种,Co有42种,Se有41种,Zn有20种,Pb有8种,Cr有1种,Ti有2种,Cd有7种,As有5种,稀土元素有2种,其中,有些植物同时富集多种元素^[63]。例如,宝山堇菜、伴矿景天等是常见的Cd超富集植物^[64-65];狗牙根、大叶井口边草等对砷的富集作用良好;铅锌超富集植物有羽叶鬼针草、五节芒、香根草、龙葵、东南景天、芒萁等。代表性富集植物及富集量如表2所示。陈同斌等^[66]在湖南省某古老雄黄矿周围发现蕨类植物蜈蚣草可超富集土壤中的砷。广西环江有色金属“采选冶”影响区大力推广蜈蚣草主导的植物修复技术,利用蜈蚣草对As的富集能力,较好解决了土壤As污染问题,示范面积853334 m²(1280亩)^[67]。VAN等^[68]利用伴矿景天修复Cd和Zn污染的土壤,通过农艺管理措施,将土壤Cd含量由0.49~

0.71 mg/kg 降至 0.30 mg/kg 以下。

表 2 超富集植物及富集量

类别	代表超富集植物及富集量/(mg · kg ⁻¹)
As	蜈蚣草(586) ^[69] 、大叶井口边草(326) ^[70]
Cd	伴矿景天(9 609) ^[71] 、宝山堇菜(387) ^[72]
Pb	小鳞藜草(1 834) ^[73] 、圆锥南芥(2 484) ^[74] 、羽叶鬼针草(928) ^[75]
Mn	商陆(19 299) ^[76]
Ni	李氏禾(1 349) ^[77]
Zn	天蓝遏蓝菜(39 600) ^[78] 、东南景天(4 134) ^[79] 、十字花科遏蓝菜属(43 710) ^[80]
Cu	天竺葵(2 299) ^[81] 、高山甘薯(12 300) ^[82] 、鸭拓草(1 000) ^[83]

3.2.2 植物配置模式

矿区土壤酸化严重,伴随大量重金属元素溶出,导致单一植物难以生存。草本植物生长快、存活易^[25],能够在短时间内大量覆盖地面,防止水土流失^[24];但草本植物根系单一,稳定性较差。灌木植物易产生表土侵蚀,但根系发达、生态系统稳定性强,适用于坡面修复。因此,在矿区污染土壤的实际修复中,将草本、灌木和乔木植物相互搭配,有利于群落稳定性的形成与维持,以及生态系统的长期正向演替^[25]。

邹旭等^[84]研究湖南娄底市冷水江锑煤矿生态修复中植物种选择及配置模式,通过对矿区的实地勘查及资料分析,选用了 8 种乔木、5 种灌木、9 种草本和 3 种藤本共 25 种植物,根据露采开挖面、堆积体坡面、整理后的空旷平地、景观节点等不同的地形特点和修复目标,提出了针对性的植物配置模式,为今后矿山生态修复的植物配置方式提供了借鉴。贵州某铅锌冶炼场地^[67],采用黏土阻隔联合植物修复技术,选用一些当地物种(狗牙根、火棘、华山松等)构建“乔-灌-草”完整的群落系统,在解决低污染土壤问题的同时,实现了生态重建。乔灌草搭配或结合当地优势植物的种植模式能很好地实现矿区(尾矿库)生态景观重建,有效降低矿区重金属向周边土壤扩散。这些研究为我国矿山生态修复治理提供了借鉴和技术支撑,带动相关环境修复行业全面提质、增效,更好地为生态文明建设服务。

3.2.3 经济作物

超富集植物能够与农作物或经济作物搭配种植,在修复重金属污染土壤的同时带来经济效益,实现边生产边修复。筛选当地低积累经济作物,在经过改良和修复的矿区土壤中种植,是获取经济效益的关键。常见的经济作物有马铃薯、沙糖桔、柑橘、脐

橙、蓝莓等。张妍等^[85]研究南方某矿区当地土壤及作物 Cd 污染水平以及种植不同作物对防控当地人群健康风险的可行性,自产大米 Cd 含量均存在超标,而所产脐橙果肉中 Cd 含量很低,远低于 0.05 mg/kg,同时脐橙相比蔬菜、谷物等,也能够产生一定的经济效益,是一种适合在 Cd 污染严重地区种植的作物。曹越等^[86]以蜈蚣草为超富集植物,与低吸收作物砂糖桔间套种,在广东省某县修复中轻度砷污染农田,使土壤砷的质量分数下降 66.9%,3 至 6 年即可使轻度砷污染土壤达标,同时种植经济作物砂糖桔,收获了具有一定经济效益且符合食品污染限量标准的农产品。“超富集植物+低积累经济作物+活化剂/土壤改良剂”联合修复模式是重金属污染土壤安全利用的新技术体系,种植经济作物带来经济效益的同时,添加活化剂提高超富集植物的提取效率,进一步提高了边生产边修复的效率。曹越等^[86]以蜈蚣草为超富集植物,柑橘为经济作物,添加活化剂强化修复湖南石门县砷污染农田土壤,使土壤中砷平均去除率达到 10%以上,修复中重度污染土壤 666 666.67 m²(1 000 多亩),同时收获了符合国家标准的农产品柑橘。因此,筛选重金属低累积品种和超富集植物,搭配效果较好、成本低、原料易得的活化材料,一方面持续进行土壤修复活动,另一方面产出优质农作物,对矿区生态修复具有重要借鉴意义。

4 展望

随着我国矿区开采活动的不断进行,对周边场地和土壤的污染日益突出,矿区场地土壤修复越来越受到研究人员重视,矿区的修复不仅仅局限于单一修复方式,采取多种方法联合修复是未来研究人员的研究热点。基于此,针对矿区场地污染修复现状提出以下展望:

1)合理搭配植物配置模式。在矿区场地污染土壤修复过程中既要考虑修复效果和效率,又要考虑与社会发展相匹配,还要考虑是否产生经济效益。因此,利用不同植物的特性,合理搭配植物,形成稳定的植物配置模式,筛选当地低积累经济作物是生态修复未来发展方向。

2)根据矿区地形建立隔离带。例如四川,地势海拔错落显著,形成了极具特色的高山河谷地形地貌(矿山-周边土壤-河沟溪流),长期的大规模开采遗留的高位废土石、尾矿场,随地表及地下水径流扩散,严重污染周边土壤,导致矿区及周边的重金属污染严重超标。基于此地势环境、水文气候、土壤质地

等,考虑建立隔离带,包括坡面防护和乔灌木生态隔离等,以实现高山河谷区矿石尾渣跟随地表径流、扬尘迁移等的高效阻断,减少重金属生物可利用态含量,降低重金属迁移扩散能力,以此形成周边污染土壤与沟渠界面间生态隔离。

3)完善矿区场地土壤修复技术模式建立。现阶段对矿区修复研究多集中在固化稳定化、微生物和植物修复等技术研发阶段,对于矿区修复与管控的治理模式及系统解决方案尚不成熟。例如构建“制度控制+工程治理+长期监测”为主的过程风险管控模式等。修复技术模式的建立,需要系统化和规范性的制度体系及大量的试验验证,是一项具有挑战性的工作,是符合我国的国情与未来发展的途径,具有现实意义。

参考文献

- [1] 杨金燕,杨锴,田丽燕,等.我国矿山生态环境现状及治理措施[J].环境科学与技术,2012,35(增刊2):182-188.
YANG J Y, YANG K, TIAN L Y, et al. Environmental impacts of mining activities in China and the corresponding management and remediation strategies: an overview[J]. Environmental Science and Technology, 2012, 35(Suppl. 2): 182-188.
- [2] 全国土壤污染状况调查公报[EB/OL]. [2023-11-17]. https://www.gov.cn/xinwen/2014-04/17/content_2661765.htm.
Report on the national general survey of soil contamination [EB/OL]. [2014-11-17]. https://www.gov.cn/xinwen/2014-04/17/content_2661765.htm.
- [3] 张红侠,高利峰,李睿康.基于文献计量的国内土壤重金属污染研究[J].现代农业科技,2013(16):346-347,349.
ZHANG H X, GAO L F, LI R K. Domestic soil heavy metal pollution research based on bibliometrics [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2013(16): 346-347, 349.
- [4] 闫淑兰,赵秀红,罗启仕.基于文献计量的重金属固化稳定化修复技术发展动态研究[J].农业环境科学学报,2020,39(2):229-238.
YAN S L, ZHAO X H, LUO Q S. Research on the development trend of heavy metal solidification and stabilization remediation technology based on bibliometrics[J]. Journal of Agricultural Environmental Sciences, 2020, 39(2): 229-238.
- [5] 张彩丽,张志转,陈娟,等.中国土壤重金属污染植物修复研究的文献计量分析[J].世界农业,2016(1):136-140,228.
ZHANG C L, ZHANG Z Z, CHEN J, et al. Bibliometric analysis of phytoremediation of heavy metal contaminated soils in China[J]. World Agriculture, 2016(1): 136-140, 228.
- [6] 张晨.矿区重金属污染土壤的修复技术[J].世界有色金属,2020(13):217-218.
ZHANG C. Remediation technology of heavy metal contaminated soil in mining area[J]. World Nonferrous Metals, 2020(13): 217-218.
- [7] 刘焕,张昆.矿山重金属污染研究现状及修复技术展望[J].云南地质,2018,37(1):117-121.
LIU H, ZHANG K. Research status of heavy metal pollution in mines and prospect of remediation technology[J]. Yunnan Geology, 2018, 37(1): 117-121.
- [8] 李笑诺,陈卫平,吕斯丹.国内外污染场地风险管控技术体系与模式研究进展[J].土壤学报,2022,59(1):38-53.
LI X N, CHEN W P, LYU S D. Research progress on the technical system and model of risk management and control of contaminated sites at home and abroad[J]. Soil Science, 2022, 59(1): 38-53.
- [9] 阳翠红,杨志辉,司梦莹,等.基于风险管控的矿区污染修复技术与模式综述[J].有色金属(冶炼部分),2023(12):59-68.
YANG C H, YANG Z H, SI M Y, et al. Review of pollution remediation technologies and models in mining areas based on risk management[J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy), 2023(12): 59-68.
- [10] 陈素云,王峰,王文峰,等.污染场地工程控制技术应用研究[J].环境工程,2014,32(5):146-149,137.
CHEN S Y, WANG F, WANG W F, et al. Application of engineering control technology in contaminated sites[J]. Environmental Engineering, 2014, 32(5): 146-149, 137.
- [11] UK E A. Dealing with contaminated land in England: progress from April 2000 to December 2013 with Part 2A of the Environmental Protection Act 1990 [R]. Bristol: The Environment Agency in England and Wales, 2016.
- [12] 郑阳,余湛,胡佳晨,等.浙江省某退役工业场地修复治理及风险管控工程实例[J].广东化工,2019,46(10):115-117,135.
ZHENG Y, YU Z, HU J C, et al. An example of restoration and risk control project of a retired industrial site in Zhejiang province [J]. Guangdong Chemical Industry, 2019, 46(10): 115-117, 135.
- [13] 王劲楠,吴玉锋,李良忠,等.场地重金属复合污染阻隔技术研究进展[J].环境工程,2022,40(4):244-253.

- WANG J N, WU Y F, LI L Z, et al. Research progress of heavy metal combined pollution barrier technology[J]. *Environmental Engineering*, 2022, 40(4): 244-253.
- [14] 吴亮亮, 王琼, 周连碧. 污染场地阻隔技术应用现状概述[C]//中国环境科学学会. 2017 中国环境科学学会科学与技术年会论文集: 第二卷. 北京, 2017: 5.
- WU L L, WANG Q, ZHOU L B. Overview of the application status of barrier technology in contaminated sites[C]//Chinese Society of Environmental Sciences. Proceedings of the 2017 Annual Scientific and Technical Meeting of the Chinese Society of Environmental Sciences: Vol. 2. Beijing, 2017: 5.
- [15] 环境保护部办公厅. 关于征求《污染地块风险管控技术指南: 阻隔技术(试行)(征求意见稿)》等 3 个技术文件意见的函[EB/OL]. [2023-11-17]. http://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/qt/201404/t20140417_270670.htm, 2014-04-17.
- Office of the Ministry of Environmental Protection. Letter on soliciting opinions from three technical documents such as “Technical Guidelines for Risk Management and Control of Contaminated Plots: Barrier Technology (Trial) (Draft for Comments)” [EB/OL]. [2023-11-17]. http://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/qt/201404/t20140417_270670.htm, 2014-04-17.
- [16] 娄振东, 段红英. 贵州万山汞矿废渣特征及治理方法探讨[J]. *环境与发展*, 2020, 32(11): 33-35.
- LOU Z D, DUAN H Y. Discussion on the characteristics and treatment methods of waste slag from Wanshan mercury mine in Guizhou[J]. *Environment and Development*, 2020, 32(11): 33-35.
- [17] 孙红松. 湖南某冶炼企业遗留场地综合治理工程实例及总结[J]. *工程技术研究*, 2020, 5(7): 1-3, 23.
- SUN H S. An example and summary of the comprehensive treatment project of the leftover site of a smelting enterprise in Hunan [J]. *Engineering Technology Research*, 2020, 5(7): 1-3, 23.
- [18] 郑中华, 朱天戈, 罗彬, 等. 垂直生态屏障系统在矿山水污染防治中的应用[C]//中国环境科学学会, 四川大学. 2014 中国环境科学学会学术年会论文集: 第五章. 北京: 北京高能时代环境技术股份有限公司, 国家化学建筑材料测试中心. 2014: 8.
- ZHENG Z H, ZHU T G, LUO B, et al. Application of vertical ecological barrier system in prevention and control of mine groundwater pollution[C]//Chinese Society of Environmental Sciences, Sichuan University. 2014 Chinese Society of Environmental Sciences Annual Meeting Proceedings; Chapter 5. Beijing: Beijing High Energy Era Environmental Technology Co., Ltd., National Chemical Building Materials Testing Center, 2014: 8.
- [19] 李志涛, 王夏晖, 高彦鑫, 等. 污染地块环境风险管控对策研究[J]. *环境保护科学*, 2016, 42(4): 40-42.
- LI Z T, WANG X H, GAO Y X, et al. Study on environmental risk management and control countermeasures of contaminated plots [J]. *Environmental Protection Science*, 2016, 42(4): 40-42.
- [20] 马宝军, 李晓彤, 杨明学, 等. 我国砒霜厂场地污染现状及其治理研究进展[J]. *矿冶*, 2023, 32(2): 125-131.
- MA B J, LI X T, YANG M X, et al. The pollution status and research progress of remediation for arsenic factory sites in China [J]. *Mining and Metallurgy*, 2023, 32(2): 125-131.
- [21] 龚亚龙, 李红艳, 李喜青, 等. 郴州市王仙岭尾砂库重金属污染治理工程实例[J]. *环境工程*, 2016, 34(2): 170-174.
- GONG Y L, LI H Y, LI X Q, et al. An example of heavy metal pollution control project of Wangxianling tailings reservoir in Chenzhou [J]. *Environmental Engineering*, 2016, 34(2): 170-174.
- [22] 曾宪坤. 联合修复技术在工业遗留污染场地治理中的应用[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2019(12): 92-95.
- ZENG X K. Application of joint restoration technology in treatment of industrial remaining polluted sites[J]. *Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy)*, 2019(12): 92-95.
- [23] 朱俊民, 王云丽, 周虹, 等. 甘肃省某废弃矿区污染场地原位风险管控工程实例[J]. *湖南有色金属*, 2022, 38(6): 59-62, 76.
- ZHU J M, WANG Y L, ZHOU H, et al. An in-situ risk management and control project example of a contaminated site in an abandoned mining area in Gansu province [J]. *Hunan Nonferrous Metals*, 2022, 38(6): 59-62, 76.
- [24] 李春, 刘晶静, 张迎宾. 稀土矿区植物修复研究进展[J]. *生态科学*, 2022, 41(3): 264-272.
- LI C, LIU J J, ZHANG Y B. Research progress of phytoremediation in rare earth mining area [J]. *Ecological Science*, 2022, 41(3): 264-272.
- [25] 周连碧, 王琼, 杨越晴. 典型金属矿区污染土壤生态修复研究与实践进展[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2021(3): 10-18.
- ZHOU L B, WANG Q, YANG Y Q. Progress in research and practice of ecological restoration of contaminated soil in typical metal mining areas [J]. *Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy)*, 2021(3): 10-18.

- [26] 娄燕宏, 诸葛玉平, 顾继光, 等. 粘土矿物修复土壤重金属污染的研究进展[J]. 山东农业科学, 2008(2): 68-72.
LOU Y H, ZHUGE Y P, GU J G, et al. Research progress on remediation of soil heavy metal pollution by clay minerals[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2008(2):68-72.
- [27] 李倩. 典型有色金属矿区 Cd、Pb、As 复合污染土壤稳定化修复试验研究[J]. 湖南有色金属, 2020, 36(1): 55-60.
LI Q. Experimental study on stabilization and remediation of Cd, Pb and As co-contaminated soil in typical non-ferrous metal mining areas [J]. Hunan Nonferrous Metals, 2020, 36(1):55-60.
- [28] ZHENG X J, CHEN M, WANG J F, et al. Assessment of zeolite, biochar, and their combination for stabilization of multimetal-contaminated soil [J]. ACS Omega, 2020, 5(42):27374-27382.
- [29] 罗唯叶, 徐伟健, 张志鹏, 等. 铅锌矿区土壤中有效态重金属的稳定化研究[J]. 环境工程, 2020, 38(12): 157-162.
LUO W Y, XU W J, ZHANG Z P, et al. Stabilization of available heavy metals in soil of lead-zinc mining area[J]. Environmental Engineering, 2020, 38(12): 157-162.
- [30] ZHOU C Z, WANG J H, WANG Q, et al. Simultaneous adsorption of Cd and As by a novel coal gasification slag based composite; characterization and application in soil remediation[J]. The Science of the Total Environment, 2023, 882. DOI: 10. 1016/j. scitotenv. 2023. 163374.
- [31] ZHOU L Y, LI Z L, LIU W, et al. Restoration of rare earth mine areas; organic amendments and phytoremediation [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, 22(21):17151-17160.
- [32] 邓敏, 程蓉, 舒荣波, 等. 攀西矿区典型重金属污染土壤化学-微生物联合修复技术探索[J]. 矿产综合利用, 2021(4):1-9.
DENG M, CHENG R, SHU R B, et al. Exploration of chemical-microbial combined remediation technology for typical heavy metal contaminated soil in Panxi mining area [J]. Mineral Comprehensive Utilization, 2021(4):1-9.
- [33] VARENYAM A, PAN X L, FU Q L, et al. Biomineralization based remediation of As(III) contaminated soil by *Sporosarcina ginsengisoli* [J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, 201:178-184.
- [34] 杨宇, 邓仁健, 隆佩, 等. 砷氧化菌 *Pseudomonas* sp. AO-1 的分离鉴定及其对 As(III) 的氧化性能研究[J]. 生态环境学报, 2023, 32(3):619-626.
YANG Y, DENG R J, LONG P, et al. Isolation and identification of arsenic-oxidizing bacteria *Pseudomonas* sp. AO-1 and its oxidation performance for As(III) [J]. Journal of Ecological Environment, 2023, 32(3): 619-626.
- [35] 苏建, 李小明, 华绍广, 等. 工农固废协同稳定化多重重金属废矿渣研究[J]. 现代矿业, 2022, 38(8):223-226.
SU J, LI X M, HUA S G, et al. Research on the synergistic stabilization of multi-heavy metal waste slag by industrial and agricultural solid waste [J]. Modern Mining, 2022, 38(8):223-226.
- [36] WANG G F, LIANG G C, XIAO H Z, et al. Immobilization mechanism of As, Mn, Pb and Zn ions in sulfide tailings by the addition of triethylenetetramine-montmorillonite nanocomposite [J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 435:134817. DOI: 10. 1016/j. cej. 2022. 134817.
- [37] YIN X L, XU Y M, HUANG R, et al. Remediation mechanisms for Cd-contaminated soil using natural sepiolite at the field scale [J]. Environmental Science: Processes & Impacts, 2017, 19. DOI:10. 1039/C7EM00262A.
- [38] WANG L W, LI X R, DANIEL C W, et al. Green remediation of Cd and Hg contaminated soil using humic acid modified montmorillonite; immobilization performance under accelerated ageing conditions [J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 387:122005. DOI:10. 1016/j. jhazmat. 2019. 122005.
- [39] WU Y J, ZHOU H, ZOU Z J, et al. A three-year in-situ study on the persistence of a combined amendment (limestone + sepiolite) for remedying paddy soil polluted with heavy metals [J]. Ecotoxicology & Environmental Safety, 2016, 130:163-170.
- [40] LIU Y L, HUANG J F, XU H J, et al. A magnetic macro-porous biochar sphere as vehicle for the activation and removal of heavy metals from contaminated agricultural soil [J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 390: 124638. DOI:10. 1016/j. cej. 2020. 124638.
- [41] JI X W, WAN J, WANG X D, et al. Mixed bacteria-loaded biochar for the immobilization of arsenic, lead, and cadmium in a polluted soil system; effects and mechanisms [J]. Science of the Total Environment, 2022, 811. DOI:10. 1016/j. scitotenv. 2021. 152112.
- [42] XU C B, ZHAO J W, YANG W J, et al. Evaluation of biochar pyrolyzed from kitchen waste, corn straw, and peanut hulls on immobilization of Pb and Cd in contaminated soil [J]. Environmental Pollution, 2020:

114133. DOI:10.1016/j.envpol.2020.114133.
- [43] XIA Y, LUO H N, LI D, et al. Efficient immobilization of toxic heavy metals in multi-contaminated agricultural soils by amino-functionalized hydrochar: performance, plant responses and immobilization mechanisms [J]. *Environmental Pollution*, 2020, 261: 114217. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.114217.
- [44] GAO R L, HU H Q, FU Q L, et al. Remediation of Pb, Cd, and Cu contaminated soil by co-pyrolysis biochar derived from rape straw and orthophosphate: speciation transformation, risk evaluation and mechanism inquiry [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 730:139119. DOI:10.1016/j.scitotenv.2020.139119.
- [45] OKKENHAUG G, GEBHARDT G K, AMSTAETTER K, et al. Antimony (Sb) and lead (Pb) in contaminated shooting range soils; Sb and Pb mobility and immobilization by iron based sorbents, a field study [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, 307:336-343.
- [46] YUAN Y N, LU M, TU N M, et al. Phosphate-modified ferric-based material remediates lead and arsenic co-contaminated soil and enhances maize seedling growth [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(7):7234-7243.
- [47] ETTLER V, TOMÁOVÁ Z, KOMÁREK M, et al. The pH-dependent long-term stability of an amorphous manganese oxide in smelter-polluted soils: implication for chemical stabilization of metals and metalloids [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, 286:386-394.
- [48] NAJAFI Z, GOLCHIN A, ALAMDARI P. Comparison of the efficiency of different chitosan composites in immobilisation of chromium in contaminated soils [J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2021:1501-1514. DOI:10.1080/03650340.2021.1909720.
- [49] 李姗姗, 张立鑫, 李梅. 高效铈氧化菌的筛选鉴定及其对土壤中铈迁移转化的影响 [J]. *环境工程学报*, 2022, 16(5):1602-1609.
- LI S Y, ZHANG L X, LI M. Screening and identification of efficient antimony-oxidizing bacteria and its effect on the migration and transformation of antimony in soil [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2022, 16(5):1602-1609.
- [50] 杨越晴, 王琼, 孙伟, 等. 铜尾矿资源化技术研究现状 [C]// 中国环境科学学会. 2020 中国环境科学学会科学技术年会论文集: 第三卷. 北京, 2020:9.
- YANG Y Q, WANG Q, SUN W, et al. Research status of copper tailings resource utilization technology [C]// Chinese Society of Environmental Sciences. Proceedings of Science and Technology Annual Conference of Chinese Society of Environmental Sciences in 2020: Vol. 3. Beijing, 2020:9.
- [51] NONG X Y, ZHANG C L, CHEEN H X, et al. Remediation of Cd, Pb and as co-contaminated paddy soil by applying different amendments [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2020, 105(2):283-290.
- [52] 贺燕子, 田芷源, 马瑞, 等. 保水保肥材料对废弃离子型稀土矿区尾砂土壤理化性质及皇竹草生长的影响 [J]. *水土保持学报*, 2023, 37(2):267-274.
- HE Y Z, TIAN Z Y, MA R, et al. Effects of water and fertilizer conservation materials on the physical and chemical properties of tailings soil and the growth of *Pennisetum hybridum* in abandoned ionic rare earth mining area [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(2):267-274.
- [53] 黄玲, 周存宇, 张建强, 等. 硅酸钠与腐殖肥对土壤 Cd 形态及油麦菜生物可给性的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2022, 41(9):1926-1935.
- HUANG L, ZHOU C Y, ZHANG J Q, et al. Effects of sodium silicate and humic fertilizer on soil Cd form and bioaccessibility of lettuce [J]. *Journal of Agricultural Environmental Sciences*, 2022, 41(9):1926-1935.
- [54] 毕银丽, 薛子可. 丛枝菌根真菌提高植物高温胁迫抗逆性及在矿区生态修复应用展望 [J]. *中国科学基金*, 2021, 35(6):933-939.
- BI Y L, XUE Z K. *Arbuscular mycorrhizal* fungi improve the resistance of plants to high temperature stress and its application prospect in ecological restoration of mining areas [J]. *China Science Foundation*, 2021, 35(6):933-939.
- [55] 廖长君, 刘杰, 曹斐妹, 等. 调理剂-植物栽培协同降低矿区农田土壤中重金属有效态含量 [J]. *环境工程学报*, 2022, 16(12):4067-4073.
- LIAO C J, LIU J, CAO F S, et al. Conditioner-plant cultivation synergistically reduced the available content of heavy metals in farmland soil of mining area [J]. *Environmental Engineering Journal*, 2022, 16(12):4067-4073.
- [56] 庄茂强, 赵金山, 李素云, 等. 山东省某轻稀土矿区水果和鸡蛋中稀土元素含量及健康风险 [J]. *现代预防医学*, 2016, 43(23):4255-4259.
- ZHUANG M Q, ZHAO J S, LI S Y, et al. Rare earth element content and health risk in fruits and eggs in a light rare earth mining area in Shandong province [J]. *Modern Preventive Medicine*, 2016, 43(23):4255-4259.
- [57] 付雄略, 陈永华, 刘文胜, 等. 湖南省衡阳市某铅锌尾矿

- 区植物多样性及其重金属富集性研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2017, 37(7): 130-135.
- FU X L, CHEN Y H, LIU W S, et al. Study on plant diversity and heavy metal enrichment in a lead-zinc tailings area in Hengyang city, Hunan province [J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology, 2017, 37(7): 130-135.
- [58] 王立. 重金属污染土壤修复治理技术研究现状[J]. 广东化工, 2019, 46(10): 140-141.
- WANG L. Research status of remediation technology for heavy metal contaminated soil [J]. Guangdong Chemical Industry, 2019, 46(10): 140-141.
- [59] BROOKS R R, LEE J, REEVES R D, et al. Detection of nickeliferous rocks by analysis of herbarium specimens of indicator plants[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1977, 7: 49-57.
- [60] BAKER A J M. Accumulators and excluders: strategies in the response of plants to heavy metals[J]. Journal of Plant Nutrition, 1981, 3(1/2/3/4): 643-654.
- [61] CHANEY R L, MALIK M, LI Y M, et al. Phytoremediation of soil metals[J]. Current Opinion in Biotechnology, 1997, 8(3): 279-284.
- [62] 赵云峰, 张涛, 田志君, 等. 矿区周边重金属污染土壤植物修复技术研究进展[J]. 城市地质, 2020, 15(1): 22-33.
- ZHAO Y F, ZHANG T, TIAN Z J, et al. Research progress on phytoremediation technology of heavy metal contaminated soil around mining area[J]. Urban Geology, 2020, 15(1): 22-33.
- [63] REEVES R D, BAKER A J M, TANGUY J, et al. A global database for plants that hyperaccumulate metal and metalloid trace elements [J]. New Phytologist, 2018, 218: 407-411.
- [64] 宁瑞艳, 刘娜, 程红艳, 等. 微塑料和 Cd 及其复合对超富集植物生长和富集 Cd 的影响[J]. 环境科学学报, 2022, 42(6): 1-11.
- NING R Y, LIU N, CHENG H Y, et al. Effects of microplastics and cadmium and their combinations on the growth and cadmium accumulation of hyperaccumulators[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, 42(6): 1-11.
- [65] 赵敏娟, 李雨季, 高天鹏, 等. 湿地超富集植物对重金属矿山生态修复的比较分析[J]. 分子植物育种, 2022, 17: 37-49.
- ZHAO M J, LI Y J, GAO T P, et al. Comparative analysis of wetland hyperaccumulators on ecological restoration of heavy metal mines[J]. Molecular Plant Breeding, 2022, 17: 37-49.
- [66] 陈同斌, 韦朝阳, 黄泽春, 等. 砷超富集植物蜈蚣草及其对砷的富集特征[J]. 科学通报, 2002, 47(3): 207-210.
- CHEN T B, WEI C Y, HUANG Z H, et al. Arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata* and its enrichment characteristics of arsenic[J]. Scientific Bulletin, 2002, 47(3): 207-210.
- [67] 曾嘉庆, 高文艳, 李雪, 等. 有色冶炼场地重金属污染特征与修复研究进展[J/OL]. 中国有色金属学报: 1-38 [2023-11-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1238.TG.20221208.1931.001.html>.
- ZENG J Q, GAO W Y, LI X, et al. Research progress on heavy metal pollution characteristics and remediation of non-ferrous smelting sites [J/OL]. Chinese Journal of Non-ferrous Metals, 1-38 [2023-11-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1238.TG.20221208.1931.001.html>.
- [68] VAN DER ENT A, ECHEVARRIA G, BAKER A J M, et al. Agromining: farming for metals: extracting unconventional resources using plants [M]//Mineral Resource Reviews. John Slack, Reston, VA, USA, 2017. DOI: 10.1007/978-3-319-61899-9.
- [69] 蒋丽君, 方圣琼, 潘文斌. 砷、铅复合污染土壤中自然生长植物的富集效果研究[J]. 能源与环境, 2020(4): 52-53, 65.
- JIANG L J, FANG S Q, PAN W B. Enrichment effect of naturally growing plants in arsenic and lead co-contaminated soil[J]. Energy and Environment, 2020(4): 52-53, 65.
- [70] 熊国焕, 何艳明, 栾景丽, 等. 龙葵、大叶井口边草和短萼灰叶对 Pb、Cd 和 As 污染农田的修复研究[J]. 生态与农村环境学报, 2013, 29(4): 512-518.
- XIONG G H, HE Y M, LUAN J L, et al. Remediation of Pb, Cd and As contaminated farmland by *Solanum nigrum*, *Pteris multifida* and *Griifolia frondosa* [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2013, 29(4): 512-518.
- [71] WU L H, LI Z, AKAHANE I, et al. Effects of organic amendments on Cd, Zn and Cu bioavailability in soil with repeated phytoremediation by *Sedum plumbizincicola* [J]. International Journal of Phytoremediation, 2012, 14(10): 1024-1038.
- [72] 张军, 陈功锡, 杨兵, 等. 宝山堇菜多金属吸收特征和耐受策略[J]. 生态环境学报, 2011, 20(专辑1): 1133-1137.
- ZHANG J, CHEN G X, YANG B, et al. Polymetallic absorption characteristics and tolerance strategy of *Viola baoshanensis* [J]. Journal of Ecological Environment, 2011, 20(Z1): 1133-1137.
- [73] 胡宗达, 杨远祥, 朱雪梅, 等. Pb、Zn 对超富集植物(小

- 鳞藎草)抗氧化酶活性的影响[J].水土保持学报, 2007,21(6):86-91.
- HU Z D, YANG Y X, ZHU X M, et al. Effects of Pb and Zn on antioxidant enzyme activities of hyperaccumulators (*Carex parviflora*) [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 21(6):86-91.
- [74] 汤叶涛, 仇荣亮, 曾晓雯, 等. 一种新的多金属超富集植物: 圆锥南芥 [J]. 中山大学学报, 2005, 44(4): 135-136.
- TANG Y T, QIU R L, ZENG X W, et al. A new multi-metal hyperaccumulator: *A. alpina* [J]. Journal of Sun Yat-sen University, 2005, 44(4):135-136.
- [75] 王素娟, 李正文, 王彦祥. 羽叶鬼针草对 Cd、Pb 的吸附特性研究 [J]. 河南农业科学, 2009(6):77-81.
- WANG S J, LI W W, WANG Y X. Adsorption characteristics of *Bidens pilosa* on Cd and Pb [J]. Henan Agricultural Sciences, 2009(6):77-81.
- [76] 薛生国, 陈英旭, 林琦, 等. 中国首次发现的锰超积累植物: 商陆 [J]. 生态学报, 2003, 23(5):935-937.
- XUE S G, CHEN Y X, LIN Q, et al. *Phytolacca acinosa Roxb.* (*Phytolaccaceae*): a new manganese hyperaccumulator plant from Southern China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(5):935-937.
- [77] 张学洪, 陈俊, 王敦球, 等. 李氏禾对镍的富集特征 [J]. 桂林工学院学报. 2008, 28(1):99-101.
- ZHANG X H, CHEN J, WANG D Q, et al. The enrichment characteristics of nickel in *Li's grass* [J]. Journal of Guilin Institute of Technology, 2008, 28(1): 99-101.
- [78] 汪伟. 植物修复土壤重金属污染及其强化措施 [J]. 安徽农学通报, 2018, 24(16):79-81.
- WANG W. Phytoremediation of soil heavy metal pollution and its strengthening measures [J]. Anhui Agricultural Bulletin, 2018, 24(16):79-81.
- [79] 杨肖娥, 龙新宪, 倪吾钟, 等. 古老铅锌矿山生态型东南景天对锌耐性及超积累特性的研究 [J]. 植物生态学报, 2001, 25(6):665-672.
- YANG X E, LONG X X, NI W Z, et al. Zinc tolerance and hyperaccumulation in a new ecotype of *Sedum alfredii Hance* [J]. Acta Phytocologica Sinica, 2001, 25(6):665-672.
- [80] 杨肖娥, 李廷强. 一种重金属中轻度污染菜地土壤的边生产边修复方法: CN200710070622.1 [P]. 2007-08-31.
- YANG X E, LI T Q. A method of producing and repairing lightly polluted vegetable soil in heavy metals; CN200710070622.1 [P]. 2007-08-31.
- [81] RAJAKARUNA N, BOHM B A. Serpentine and its vegetation: a preliminary study from Sri Lanka [J]. Journal of Applied Botany, 2002, 76(2):20-28.
- [82] 唐世荣, 黄昌勇. 利用植物修复污染土壤研究进展 [J]. 环境科学进展, 1996(6):10-16.
- TANG S R, HUANG C Y. Advances in phytoremediation of contaminated soils [J]. Progress in Environmental Science, 1996(6):10-16.
- [83] 廖斌, 邓冬梅, 杨兵, 等. 鸭跖草 (*Commelina communis*) 对铜的耐性和积累研究 [J]. 环境科学学报, 2003, 23(6):797-801.
- LIAO B, DENG D M, YANG B, et al. Cu tolerance and accumulation in *Commelina communis* [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2003, 23(6):797-801.
- [84] 邹旭, 邓穆坤, 李丹雄, 等. 浅谈矿山生态修复中的植物选择与配置: 以湖南娄底市冷水江锑煤矿生态修复为例 [J]. 中国水土保持, 2021(7):39-42.
- ZOU X, DENG M K, LI D X, et al. Plant selection and arrangement in mine ecological restoration: taking the ecological restoration of Lengshuijiang Antimony Coal Mine in Loudi city, Hunan province as an example [J]. Soil and Water Conservation in China, 2021(7):39-42.
- [85] 张妍, 张磊, 程红光, 等. 南方某矿区土壤 Cd 污染及作物健康风险研究 [J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(12):2752-2761.
- ZHANG Y, ZHANG L, CHENG H G, et al. Study on soil cadmium pollution and crop health risk in a mining area in southern China [J]. Journal of Agricultural Environmental Sciences, 2020, 39(12):2752-2761.
- [86] 曹越, 赵逸涵, 张祥, 等. 砷污染农田的植物提取修复技术研究进展 [J]. 环境工程学报, 2022, 16(12):4037-4048.
- CAO Y, ZHAO Y H, ZHANG X, et al. Research progress on phytoextraction technology of arsenic contaminated soil in farmland [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(12):4037-4048.