



我国历史遗留矿山环境污染综合整治技术与路径探索

马超, 赵康[✉], 冯印成, 田向勤, 韩伟, 胡华龙

生态环境部固体废物与化学品管理技术中心, 北京 100029

摘 要 我国历史遗留矿山生态环境问题突出, 开展以生态修复和环境污染治理为主要内容的历史遗留矿山环境污染综合整治已刻不容缓。通过分析我国历史遗留矿山主要环境问题、治理现状以及不足, 扩展了以环境污染治理和生态系统恢复为核心的历史遗留矿山环境污染综合整治概念。从生态破坏和环境污染调查评估技术、地质灾害治理技术、环境污染治理技术以及生态修复技术方面总结了环境污染综合整治技术体系。基于环境污染治理和生态系统恢复的综合整治目标, 构建了历史遗留矿山环境污染综合整治技术流程, 并指出了我国历史遗留矿山综合整治存在的问题。为提高我国历史遗留矿山环境污染综合整治效果, 从编制综合整治总体规划、建设标准规范体系、拓展综合整治模式和加强技术研发 4 个方面提出工作建议。

关键词 历史遗留矿山; 环境污染; 生态破坏; 综合整治技术; 路径

历史遗留矿山是指历史上存在采矿活动、现已关闭且由政府负责生态修复和污染治理的废弃矿山^[1]。过去一段时间内, 我国矿产资源开发利用领域存在“重资源开发、轻环境保护”的现象, 导致历史遗留矿山普遍存在生态破坏和环境污染等矿山生态环境问题; 根据中国地质调查局统计数据, 截至 2018 年底我国共有各类废弃矿山约 9.9×10^4 座^[2-3]。自 2000 年以来中央就投入专项资金开展包括历史遗留矿山在内的矿山生态环境恢复治理工作, 党的十八大以来我国更是高度重视矿山生态修复工作, 历史遗留矿山地质灾害、土地损毁、地形地貌破坏等生态破坏问题得到了明显改善, 但是存在对环境污染治理工作关注不够的问题^[4-5]。

近年来, 历史遗留矿山环境污染事件时有发生, 如白河县硫铁矿“磺水”污染、“锰三角”污染、五里川河锑污染等, 严重威胁矿区及周边生态系统安全和人类健康, 引起了党中央、国务院高度重视。2020 年 8 月和 2021 年 4 月习近平总书记分别对白石河废弃硫铁矿污染问题和“锰三角”矿业污染治理作出重要指示批示, 2023 年 7 月陕西省生态环境厅会同有关部门在安康市召开了历史遗留矿山环境污染综合整治座谈会。目前, 对历史遗留矿山开展以生态修复和矿山环境污染治理为主要内容的环境污染综合整治已经刻不容缓。

历史遗留矿山环境污染综合整治难度高、耗资大。特别是, 矿山环境污染问题具有长期性、易迁移扩散、污染面积大、不可逆转等特点, 使得历史遗留矿山环境污染治理费用高昂。如北美废弃矿山生态修复中仅酸性矿山废水 (AMD) 治理成本就高达 1×10^{10} 美元^[6], 白河县境内废弃硫铁矿山废渣和矿洞的污染治理预计投入需要超过 6×10^8 元^[7]。本研究通过分析历史遗留矿山生态环境问题类型和治理现状, 梳理了不同治理技术特点, 构建了综合整治技术流程, 提出了我国历史遗留矿山环境污染综合整治存在的问题和建议, 以期对相关工作的开展提供有效借鉴。

1 我国历史遗留矿山环境问题和治理现状

根据开采方式、矿产类型、生产规模对全国历史遗留矿山数量进行了梳理和统计 (图 1)。我国历史遗留

收稿日期: 2024-05-10 录用日期: 2024-09-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52374138); 2022 年中国科协 10 大工程技术难题资助项目; 黄河流域生态保护和高质量发展联合研究资助项目 (2022-YRUC-01-0306)

第一作者: 马超 (1993—), 男, 硕士, 助理工程师, 研究方向为矿业固废资源化利用与污染防治, machao@meescc.cn ✉通信作者: 赵康 (1980—), 男, 博士, 教授, 研究方向为矿山固废综合利用及生态环境修复、环境污染防控及政策、工程岩体监测, zhaok_666666@163.com

矿山呈现出“露天开采矿山多、非金属矿山多、小型矿山多”的现象。结合部分县(市)公布的历史遗留矿山矿种核查信息,推测认为出现这种现象的主要原因是,建筑用砂、砖用黏土、建筑石料等建材类非金属历史遗留矿山数量较多。

1.1 历史遗留矿山生态环境问题类型

矿产资源开采必然引起矿山生态环境扰动和破坏,不同开采方式历史遗留矿山生态环境问题形成过程如图 2 所示。

1) 生态破坏问题。历史遗留矿山生态破坏主要包括土地破坏、地质灾害、地形地貌破坏、土壤破坏等问题^[10]。露天开采是直接对矿区内覆岩层进行高强度剥离,挖损是露天开采矿山最直接的破坏形式,具体表现为露天采坑、取土场等。地下开采矿山土地破坏是由于采空区覆岩沉降波及地表形成了塌陷,具体呈现方式为塌陷坑、地裂缝等。同时,尾矿、废石、煤矸石等矿山固体废物堆存压占土地资源也是一种矿山土地破坏形式。露天采坑和塌陷坑的高陡边坡、固体废物堆存场等在强降雨等外界环境的激发下存在产生滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害的风险。挖损、塌陷、占压等土地破坏同时也造成了山体破损、岩石裸露、景观植被破坏等地形地貌破坏问题以及土壤破坏问题。对于黄淮海等高潜水位地区历史遗留矿山,还可能存在降雨、地表径流以及地下水汇入露天采坑、塌陷坑形成地表积水^[11]。

2) 环境污染问题。矿产资源开采过程中产生的尾矿、废石、煤矸石等固体废物,长期不规范堆存在空气中,在风力作用下易扩散产生扬尘等大气环境污染;在雨水淋溶作用下固体废物中硫化物、重金属等被浸出迁移进入矿区及周边土壤和水体,易产生矿山水土环境污染,如 AMD、重金属污染等。在空气接触作用下,裸露的露天开采矿山围岩中污染物易被地表径流、雨水等浸出,造成露天采坑环境污染问题;地下开采矿山采空区上方各岩层的沉降致使不同岩层形成裂隙并贯通,地下水穿过裂隙过程中易导致岩层中污染物浸出和迁移。

矿产资源类型是影响历史遗留矿山环境污染程度的重要因素。并不是所有的历史遗留矿山都存在环境污染,欧洲塞尔维亚(Serbia)地区约 68% 的历史遗留废弃矿山造成地下水污染的风险较低^[12]。含硫矿山、有色金属矿山存在 AMD、重金属等环境污染的可能性较高。如 1908 年就已关闭的瑞典脑塔尼(Nautanen)铜矿

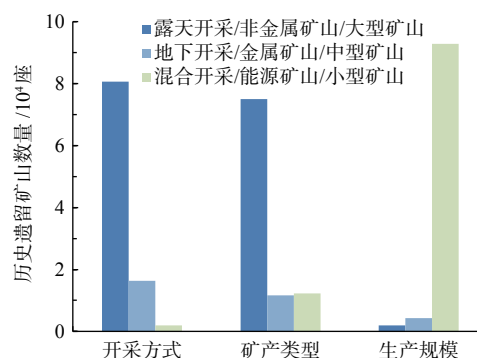
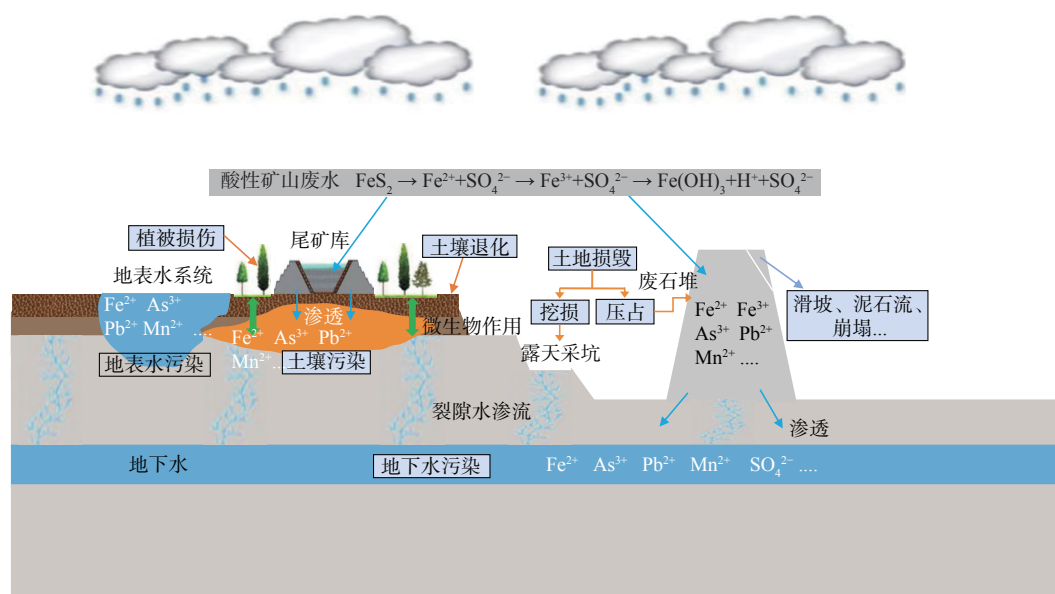


图 1 全国历史遗留矿山分类统计数量^[2]

Fig. 1 Classification and statistics of the number of historical legacy mines in China



(a) 露天开采矿山

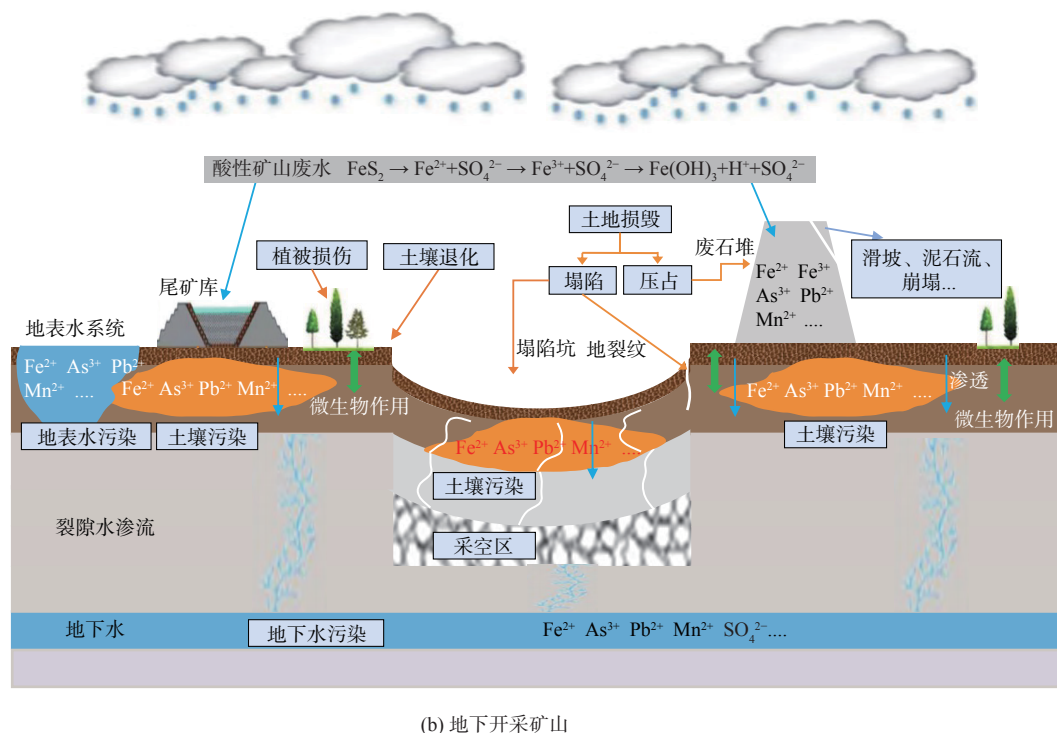
图 2 历史遗留矿山生态破坏和环境污染问题成因^[8-9]

Fig. 2 The causes of ecological destruction and environmental pollution in historical legacy mines

区, 其废弃采场区域和下游地表水中铜、锌、镉平均浓度分别为 990 、 280 、 $1.0 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 150 、 50 、 $0.2 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 显著高于区域背景值 1.6 、 11 、 $0.10 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[13]; 相关研究表明, 部分含硫矿山周边土壤和水体 pH 值呈强酸性, Cd、Cr、As、Cu、Zn、Ni 等重金属明显偏高^[14]。对于能源矿山, 高硫煤矸石中黄铁矿含量高, 易产生 AMD 等环境污染; 由于石煤矿存在多金属共生情况, 环境污染风险较高, 如湖南某石煤矿区水体和土壤存在多种重金属复合污染^[15]。对于非金属矿山, 采砂场、取土场等建材类非金属矿山一般只存在生态破坏, 环境污染相对较少; 但是部分非金属矿山也存在环境污染, 如某石灰岩矿区周边土壤 Pb 含量远超《土壤环境质量标准》(GB 15618-1995) 三级标准, 某萤石矿区土壤中 Cu、Cd、Zn 和 As 均超过了《土壤环境质量标准》(GB 15618-1995) 三级标准^[16-17]。

1.2 历史遗留矿山环境问题治理现状

1) 我国矿山环境问题治理进展。治理理念方面。1989 年 1 月 1 日生效实施的《土地复垦规定》标志着, 我国开始从国家层面推进以土地复垦为重点内容的矿山生态环境治理相关工作^[18-19]。随着对矿山生态环境问题认识的深入以及治理技术的发展, 我国矿山生态环境问题治理要求、特点和理念逐渐得到了完善(表 1)。

治理资金方面。2000 年我国就开始投入专项资金开展矿山生态环境治理和修复^[2]。2006 年我国开始建立矿山地质环境治理恢复保证金制度^[26]。2013 年《矿山地质环境恢复治理专项资金管理办法》印发, 投入专项资金对国有矿山在计划经济时期形成的或责任人已经灭失的、因矿山开采活动造成矿山地质环境破坏的恢复和治理^[27]。2017 年保证金制度升级为矿山地质环境治理恢复基金, 2019 年将采矿生产项目土地复垦费用预存纳入矿山地质环境治理恢复基金统一管理^[28-29]。2019 年《关于探索利用市场化方式推进矿山生态修复的意见》鼓励社会资本积极参与矿山生态修复工作^[30]。2021 年《国务院办公厅关于鼓励和支持社会资本参与生态保护修复的意见》进一步支持社会资本参与历史遗留矿山生态环境问题的保护修复^[31]。目前, 我国矿山生态环境问题治理资金主要包括国家专项资金、矿山地质环境治理恢复基金和社会资本 3 个来源。

我国矿山生态环境问题经过 30 多年的治理和恢复。截至 2015 年, 我国累计投入矿山地质环境治理专项资金约 3.18×10^{10} 元, 矿山环境治理与生态修复面积约 $2.0 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 治理矿山地质灾害 4 916 处, 治理修复矿山数量 1 773 个^[2]。截至 2020 年底, 我国废弃矿山修复面积已经达到 $9.0 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 修复率约 30%^[32]。截

表 1 不同时期我国矿山生态环境问题治理要求和特点			
Table 1 Requirements and characteristics for addressing mining environmental issues in different periods			
时间	政策制度	对矿山生态环境治理的具体要求	治理特点
1989年	《土地复垦规定》 ^[20]	按照“谁破坏、谁复垦”的原则对矿产资源开采过程中，挖损、塌陷、压占等造成破坏的土地，采取整治措施，使其恢复到可利用状态	
2005年	《矿山生态环境保护与污染防治技术政策》 ^[21]	将矿产资源综合利用率、废物资源化利用率、土地复垦率以及矿山次生地质灾害治理率等纳入矿山生态环境保护与污染防治考核指标体系	生态破坏治理、 环境污染治理各自开展
2009年	《矿山地质环境保护规定》 ^[22]	将矿区地面塌陷、地裂缝、崩塌、滑坡，含水层破坏，地形地貌景观破坏等的预防和治理恢复纳入矿山地质环境治理	
2013年	《矿山生态环境保护与恢复治理技术规范》(试行)(HJ 651-2013) ^[23]	矿产资源勘察和采选过程中矿区生态环境的保护与恢复治理，对环境污染问题的防治提出要求	
2016年	《关于推进山水林田湖生态保护修复工作的通知》 ^[24]	提出统筹矿山地质环境治理恢复、土地整治与污染修复、生物多样性保护等一体化推进山水林田湖生态保护修复	生态破坏治理恢复和环境 污染治理协同推进一体化 治理
2023年	《关于推动内蒙古高质量发展奋力书写中国式现代化新篇章的意见》 ^[25]	提出协同开展矿山污染治理与生态修复	

至 2021 年底，我国废弃露天矿山采矿损毁土地生态修复率达到 38.68%^[33]。

2) 历史遗留矿山环境污染综合整治概念。结合我国矿山生态修复实践，目前我国矿山生态修复主要包括了矿山地质环境恢复治理和土地复垦这 2 个方面工作^[18]，其中虽然涉及了部分环境污染治理工作，但是主要集中在降低矿区“三废”排放浓度和固体废物贮存环境风险防治方面，并未将污染治理与生态修复并重作为矿山生态环境问题治理的重点工作内容^[34]。对于存在环境污染问题的历史遗留矿山，只是通过土地平整、削坡降坡、种植复绿等技术完成生态修复，不重视环境污染治理可能会导致生态修复失败。如矿山酸性废水排入河流、湖泊等水域中，不仅会危害鱼类、藻类、微生物等水体生物的生命，还会破坏水系统的净化能力；矿山酸性废水渗透扩散至土壤中将危害陆地生物、植被的生命；对人体健康和生态系统存在潜在危害^[35-36]。为与我国已开展的矿山生态修复明显区分，突出环境污染治理在历史遗留矿山综合整治中的重要性，将环境污染治理和生态系统恢复耦合一体的历史遗留矿山系统化综合整治称为历史遗留矿山环境污染综合整治。

2 历史遗留矿山环境污染综合整治技术体系

2.1 生态破坏和环境污染调查评估技术与方法

历史遗留矿山生态破坏和环境污染问题类型、分布及危害等是开展综合整治的重要基础。我国公益服务性质矿山地质环境调查体系已经建立^[37]。自 2002 年以来，中国地质调查局对全国矿山开展了以地质灾害、含水层破坏、地形地貌景观、土地资源破坏以及水土环境污染为主要内容的地质环境摸底调查评估，为我国历史遗留矿山生态破坏和环境污染调查评估奠定了坚实基础^[2]。中国地质调查局地质调查技术标准《矿山地质环境调查评价规范》(DD 2014-05)、我国建设用地土壤污染风险管控和修复系列环境保护标准、以及黄河流域历史遗留矿山生态破坏与污染状况调查评价技术方案等，为我国历史遗留矿山生态破坏和环境污染调查评估提供了技术与方法依据。

2.2 地质灾害治理技术

地质灾害治理一直都是矿山生态修复的重要组成部分，常用的治理技术如表 2 所示。历史遗留矿山地质灾害多样，在具体的治理工程中需根据实际情况对不同技术进行灵活选择和组合，以提高防治效果。

2.3 环境污染治理技术

1) AMD 治理技术。目前，AMD 治理主要有 2 种技术思路。一是源头控制技术，通过阻止(减少)硫化矿物与水、空气的接触或降低微生物活性，达到抑制 AMD 产生、降低 AMD 酸度及其重金属含量的效果；基于此形成了矿硐封堵、覆盖阻隔、表面钝化、杀菌法、中和法等技术；该类技术虽然从源头阻止或减少了

表 2 矿山地质灾害治理技术
Table 2 Treatment technology for geological hazards in mines

治理技术	具体内容与特点	适用性
危岩清理	使用挖掘机等对露天开采形成的高陡边坡表面存在的碎石块、危岩体、松散土层、软弱夹层、楔形体以及突出的独立岩石进行清理	高陡危险边坡问题
场地平整 ^[37-38]	使用推土机等对采矿平台、固体废物堆场通过推高填低的方式进行削坡降坡平整，消除或减少区域内较大的坡度和沟坎	矿山边坡、固体废物堆场边坡稳定性问题
边坡防护 ^[39]	削坡和修整后的边坡，常还使用挡墙加固、锚杆锚索加固、抗滑桩加固、削坡减载和坡脚加载、安全网柔性防护系统等技术方法增强边坡稳定性	矿山泥石流、滑坡等问题
裂隙注浆 ^[37-38]	通过向边坡的岩体裂隙或软弱夹层中注入水泥、膨润土浆等固化材料，提高抗水性，降低透水性	边坡稳定性问题
截排水工程 ^[39-40]	在采矿平台、固体废物堆场的坡顶设置截排水沟，预防地表径流、雨水冲刷导致边坡失稳	矿山边坡、固体废物堆场边坡稳定性问题

AMD 的产生，但实际工程项目中 AMD 源头控制效果的长效性和稳定性不明确；需要进行长期环境监测和环境风险管控，以保证 AMD 源头控制效果；此外部分钝化剂和杀菌剂存在二次环境污染风险^[41-42]。二是末端治理技术，通过调节 AMD 的 pH 值形成沉淀，生成金属硫化物沉淀，以及采用多孔材料吸附、离子交换等方法，实现 AMD 中污染物的分离和净化，常用技术有中和法、硫化沉淀法、微生物法、吸附法、离子交换法、人工湿地法等；该类技术作为 AMD 达标排放的最终手段，存在治理时间长、副产物多、易产生二次污染等不足^[43-44]。不同 AMD 治理技术的原理以及优缺点，如表 3 所示。

AMD 治理技术多样，但各有优缺点。在实际工程实践中应该做到“一矿一策”，综合应用源头控制和末端治理技术。同时，对于 AMD 中的水、硫酸、有价(用)金属元素和稀土元素，应进行综合回收利用研究，提高资源综合利用率^[45]。贵州省福泉市采用“源头控制+末端治理”组合技术进行了皮陇河源头区煤矿 AMD 治理工程，使用“采坑 AMD 生石灰中和+隔水层修复+煤矸石封存填埋+黏土层覆盖”工艺源头减少 AMD 产生，使用“石灰石可渗透反应墙+沉淀反应池+可渗透反应岸+生态湿地”工艺开展 AMD 末端治理，治理后水体 pH 值由 2.54~3.90 升高至 7.10~8.19，水体中 Hg、Zn、As 等重金属离子浓度低于检出限^[46]。龙中等^[47]采用“多级复氧反应-垂直流人工湿地”系统对贵阳市某废弃煤矿酸性废水进行治理，治理后水体 pH 值由 5.60~6.58 升高至 6.37~7.45，同时对 Fe、Mn、Cu、Pb、Zn 等金属离子也具有一定的去除效果，但是对 SO₄²⁻去除效果不佳。福建省某金铜矿山采用“液碱中和除铁+硫化沉铜+石灰中和处理”工艺，对来源于硐坑涌水、废石场及露采场淋溶水的含铜酸性废水进行了综合利用，废水中铁、铜平均回收率分别达到 98.96%、97.21%，处理后水体 pH 值由 2.58 升高至 7.26，可直接回用选矿生产工艺^[48]。

2) 土壤重金属污染修复技术。目前，土壤重金属污染修复主要有物理、化学、生物三大类技术；物理修复包括阻隔封存、电动修复、热处理等技术；化学修复包括化学淋洗、固化/稳定化、玻璃化等技术；生物修复包括动物修复、微生物修复、植物修复等技术^[49]。其中，电动修复、热处理、玻璃化等技术多处于试验研究阶段，实际修复工程中应用较少^[50]。

阻隔封存是利用防渗材料将污染土壤与四周末污染土壤进行物理阻隔，限制污染物的迁移、扩散，具体有水平阻隔、垂直阻隔、立体阻隔等技术，常用于污染严重且面积较小的土壤环境污染风险管控^[51]。甘肃省某废弃矿区对氰渣和污染土壤开展了原位风险管控，采用“地下高压旋喷桩阻隔+地上混凝土挡土墙”垂直阻隔、“土工合成材料黏土垫(GCL 层)+高密度聚乙烯(HDPE)膜+土工布+黏土层+植被层”水平覆盖、以及修建截排水系统等措施，构建了“垂直阻隔+水平封场+雨水截排+生态修复”风险管控体系，项目实施后废弃矿区地表水、地下水、土壤、空气监测均达标，未出现二次污染^[52]。历史遗留矿山大多位于人烟稀少地区，相比于化学淋洗等技术，阻隔封存等风险管控治理技术具有更高性价比。

化学淋洗是利用化学淋洗液将土壤中重金属转移至淋洗液中并提取出来，可用于砂质土、污染较为严重的土壤治理修复^[53]。常用的化学淋洗液有盐酸、硝酸等无机酸，硝酸铁、氯化钙等无机盐，乙酸、柠檬酸等有机酸，乙二胺四乙酸(EDTA)、二乙烯三胺五乙酸(DTPA)等螯合剂^[14]。杨周白露等^[54]进行了化学淋洗修

表 3 主要的 AMD 源头控制和末端治理技术

Table 3 Source control technologies and end treatment technologies of AMD

类型	技术名称	技术特点及其适用性	优缺点分析
源头控制	矿洞封堵 ^[44]	弱化矿洞内氧化环境或将其改变为还原环境，或通过阻隔水体，阻止AMD的产生；适用于不涌水或涌水量较少的矿洞	优点是短期内实现阻止污染物的外排；但影响封堵效果因素较多，实际工程效果差异性较大
	覆盖阻隔 ^[41-42]	在尾矿或废石表面铺设一个阻隔层，阻隔(减少)水、空气和硫化矿物接触；适用于人类活动较少、地质环境易探查且稳定的区域	优点材料种类广泛、施工简单；但雨水冲刷和冰雪天气、植物根系生长等破坏覆盖层，材料干化降低阻隔效果，对底部AMD抑制较差；特别的，水覆盖阻隔不适用干旱区，自然灾害易导致废水泄漏
	表面钝化 ^[41-42]	添加钝化剂促使硫化矿物表面生成惰性保护膜，减少或阻止水、氧气以及微生物与金属硫化物接触；适用于硫化物含量较少的尾矿等	优点是钝化剂种类多、效果好，部分钝化剂具有特异性识别能力；但是部分钝化剂对环境要求严格，具有毒性，存在二次污染风险
	杀菌法 ^[41-42]	添加杀菌剂，抑制或杀死微生物，减缓(阻止)金属硫化矿物氧化过程；适用于尾矿、废石等异地搬迁处理工程	优点是快速杀死微生物，实现抑制AMD产生的效果；但雨水冲刷易导致杀菌剂流失，多次大量使用杀菌剂，破坏有益菌群且诱发微生物抗药性
	掺碱中和法 ^[41-42]	将碱性物质与含硫化物的尾矿、废石混合，提高系统的酸缓冲容量和pH值；适用于尾矿、废石等异地搬迁处理工程	优点是碱性中和剂来源广，工艺简单，无需管理；但碱性物质中和剂与尾矿、废石等掺混困难，用量需严格控制，中和剂过量使用易产生二次污染
末端治理	中和法 ^[43-44]	向AMD中添加碱性药剂提高pH值，并且使金属离子生成化学沉淀，实现污染物去除；适用于处理量大且浓度值宽泛的废水	优点是工艺简单，碱性药剂来源广泛；但产生大量含水高的污泥易造成二次污染，硫酸钙废渣处理成本高，金属资源难回收利用且易重新溶出和迁移
	硫化沉淀法 ^[43-44]	通过调节pH值，利用硫化剂与AMD中的金属离子反应生成金属硫化物沉淀；适用于出水量大、有回收重金属需求的情况	优点是硫化物沉淀更稳定，去除效率高，易实现重金属回收；但是硫化物价格高，处理成本高，易产生H ₂ S气体造成二次污染
	微生物法 ^[43-44]	酸性、厌氧条件下，通过硫酸盐还原菌作用将SO ₄ ²⁻ 还原成S ²⁻ ，S ²⁻ 与AMD中金属离子反应形成溶解度较低金属硫化物，实现金属离子和硫酸盐的有效去除；适用于较宽的pH值范围	优点是不仅能去除金属离子，而且还可以去除N、P等营养物质，无二次污染；但不适用于高酸度、低温度条件，微生物生长缓慢且对金属离子耐受性差
	吸附法 ^[43-44]	利用多孔吸附材料的物理和化学吸附能力，使得AMD中污染物在吸附材料上富集，达到污染物去除分离的效果；适用于低浓度废水、高浓度废水中回收有价值组分	优点是吸附材料类较多、工艺简单，但处理成本高、处理效率慢，吸附具有选择性、未安全处置废吸附材料需易造成二次污染
	离子交换法 ^[43-44]	利用离子交换剂上离子与AMD中离子交换，实现重金属在离子在交换剂上富集，达到AMD中重金属去除目的；适用于低浓度废水、处理后水质要求高的情况	优点是处理容量大、出水水质好，可实现重金属的二次回收；但是运行费用高，有机物会影响离子交换性能，离子交换树脂使用一段时间需要再生
	人工湿地 ^[43-44]	综合物理、化学以及生物方法，通过沉降、过滤、吸附、沉淀、离子交换、植物吸收和微生物分解等途径实现AMD的净化处理；适用于大面积矿山废水末端治理	优点是运行成本低，具有强的缓冲性能；但是占地面积大，处理时间长，强酸性废水适应性差，SO ₄ ²⁻ 去除效果不佳

复某废弃石煤矿山放射性-重金属复合污染土壤的研究，组合淋洗液 (1 mol·L⁻¹ 草酸+1 mol·L⁻¹ 盐酸) 对污染土壤中的铀、镉、锌淋洗率分别达到了 99.2%、97.8% 和 43.7%。该技术具有实现土壤中重金属去除分离的优点，但是淋洗液成本高，淋洗废液产生量大且需二次处理，易淋洗出土壤中其他营养元素；同时土壤中黏土含量过高时，修复效果较差。

固化/稳定化是通过向污染土壤中添加化学试剂，对重金属进行物理包裹或促使重金属转化为化学性质不活泼的形态，降低重金属在土壤中的可迁移性、浸出性和有效性，适用于土壤为碱性且自然环境较为稳定的污染土壤，常与阻隔封存等修复技术联合使用^[55-56]。常见的固化/稳定化剂有粉煤灰、脱硫石膏、赤泥、畜禽粪便等固废基材料，膨润土、蒙脱石、沸石、海泡石等黏土矿物材料，磷灰石、羟基磷灰石等磷酸盐，硫酸盐还原菌、砷氧化菌、耐砷细菌等微生物^[57]。李驰等^[58]进行了微生物诱导碳酸钙 (MICP) 技术联合吸附材料

固化/稳定化修复内蒙古银都矿区铅锌污染土试验研究, MICP 技术+10% 多孔硅联合处理后污染土中铅、锌浸出浓度分别由 7.61 、 $8.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降低为 2.45 、 $2.93 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。甘肃省白银市使用羟基磷灰石对某铅、锌、镉重金属污染场地进行了异位固化/稳定化修复; 相同深度处污染土修复前后, 铅、锌、镉三种重金属的残渣态含量分别由 7.11% 、 6.30% 、 4.09% 增长至 41.88% 、 40.45% 、 37.62% , 降低了污染土中重金属污染物的浸出毒性^[59]。固化/稳定化施工灵活、性价比高、二次污染少, 具有很好的推广应用前景。该技术只是改变了重金属在土壤中的赋存形态, 土壤中重金属总量并未发生变化; 外界环境发生变化, 固化/稳定化的重金属依然有可能转化为可移动的游离态。

生物修复是利用动物、微生物、植物等特有的吸收、分解、转化重金属的能力, 实现土壤中重金属污染的治理修复。相比于物理和化学修复, 生物修复具有成本低、二次污染小、能促进矿山环境自我调节等优点, 备受研究者关注^[60]。动物修复是利用动物对重金属进行吸收和转化, 如蚯蚓、蜘蛛等动物对 Pb、Cd 等重金属具有吸附作用, 但动物吸收重金属量过高可能限制其生长并导致死亡, 使得重金属重新释放至土壤中^[61]。微生物修复是利用微生物的代谢活动对重金属进行溶解、转化与固定实现修复, 微生物培养时间长、修复过程复杂且对重金属具有选择性等限制了该技术的应用, 常作为辅助手段参与修复治理^[61-62]。种植超富集植物是一种常见的土壤重金属污染植物修复技术。目前, 已有超富集植物 700 多种, 如蜈蚣草、大叶井口边草是常见的砷超富集植物, 伴矿景天、宝山堇菜对镉具有较好的超富集作用^[57,63]。超富集植物生长缓慢且矿山土壤肥力不足导致植物修复周期长, 植物对重金属富集具有特异性且深度有限性, 这些共同影响了植物修复技术的推广应用^[57,64-65]。近年来, 植物-微生物协同修复技术也被广泛关注, YANG 等^[66]对某历史遗留稀土矿山进行了植物微生物联合生态修复实验研究结果表明, 黑麦草接种丛枝菌根真菌形成了共生菌根, 可显著提高植物的生长性和抗性。

2.4 生态修复技术

1) 露天采坑、塌陷坑回填修复。为恢复露天采坑、塌陷坑地形地貌, 以煤矸石、尾矿等工业固体废物为原料开展回填修复。内蒙古自治区包头市利用围岩、砂石等工业固体废物回填治理废弃砂坑 9 个, 截至 2020 年底治理面积已经达到 546 hm^2 ^[67]。

2020 年修订的《一般工业固体废物贮存和填埋污染控制标准》(GB 18599-2020) 专门新增加了“充填、回填利用污染控制要求”相关内容^[68]; 内蒙古自治区制定的《一般工业固体废物用于矿山采坑回填和生态恢复技术规范》(DB15/T 2763-2022)^[69], 安徽省制定的《废弃露天采坑一般工业固废处置与生态修复技术规范》(DB34/T 4541-2023)^[70], 2023 年吕梁市印发的《吕梁市利用煤矸石实施采煤沉陷区综合治理工作方案》等更是为矿山固体废物进行露天采坑、塌陷坑的回填和生态恢复提供了基本依据^[71]。为提高露天采坑、塌陷坑回填修复的效果, 胡振琪等^[72]以采煤塌陷坑为修复对象, 进行了矿山复垦土壤重构的理论与方法研究, 将土层生态位、土壤关键层等应用于矿山生态修复中, 提出了构建多层结构土壤剖面的原理, 形成了间隔条带式回填和夹层式回填等方法, 建立了塌陷坑回填修复的基本理论。为了预防固体废物回填造成二次环境污染, 在回填修复工程实践中, 常通过铺设防渗层、建设截排水工程、以及废水单独处理等方法措施降低环境污染风险。几种可能的露天采坑、塌陷坑回填修复剖面示意如图 3 所示, 在具体的回填修复工程中, 应根据矿区地质条件、本底调查数据、固体废物基本属性以及修复目标等确定回填方案。

2) 土壤改良。矿山土壤一般都比较贫瘠, 提高土壤质量是实现矿山植被成活和生长的必要手段, 常用客

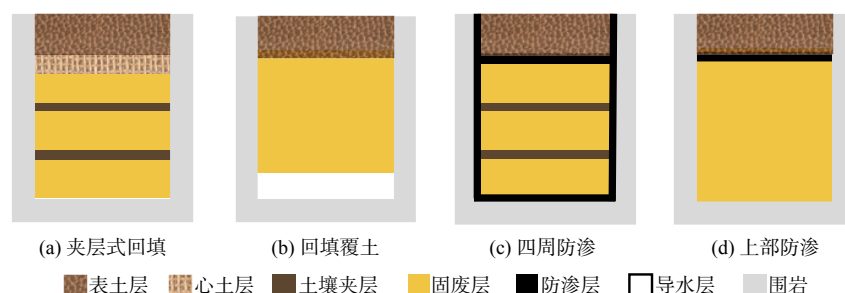


图3 回填修复原理剖面示意图

Fig. 3 Schematic diagram of backfill repair principle

土覆盖和土壤肥力提升改善矿山土壤质量。

客土覆盖是使用外来优质土壤对矿区表层土壤进行覆盖代替,是最为简单和直接恢复矿山土壤质量的方法,为后续生态系统恢复提供了良好的土壤结构、养分、水溶性、微生物群落以及物种来源^[14]。不论是露天采坑、塌陷坑还是固体废物堆存场,完成治理后一般都需要在其表面构建新的表土层。寻找新的表土替代材料,缓解客土短缺压力,已经成为矿山生态修复的热点问题。毕银丽^[73]针对我国北方草原露天煤矿生态修复过程中土壤缺乏现状,研究发现矿区地质黏土层具有替代表土的潜力,并通过物理改良和生物化学改良提升了其土壤质量。陈思思等^[14]基于市政污泥稳定化产物有机物含量高、养分含量丰富,提出了在生物学指标和污染物指标可控的前提下,市政污泥稳定化产物可作为客土原料。近年来,煤矸石等矿山固废人工造土也得到广大研究者的重视,夏举佩等^[74]公布了一项以煤矸石为主要原料采用“筛选-破碎-添加硅藻土-热处理-骤冷-熟化”工艺人造土壤技术。胡振琪等^[75]提出了矿山地质成土的概念和方法,并进行了露天矿新表土、煤基材料、黄河泥沙基的矿山地质成土研究。

土壤肥力提升常用的手段有添加土壤改良剂(结构调理剂)、肥料(农家肥、有机肥、微生物肥料),以及种植豆科、禾本科等绿肥植物。岳薇等^[76]以负载纳米 CaO_2 的粉煤灰化学吸附污水中磷形成的沉淀物为土壤改良剂,使土壤中有效磷的含量增加 102.9%。吕春娟等^[77]通过研究聚丙烯酰胺(PAM)对复垦尾矿砂的性能影响,认为合理使用 PAM 能为无土区植被恢复创造适宜条件。研究表明,丛枝菌根真菌等微生物具有改善土壤性质、改良土壤质量、促进植物对营养元素吸收的效果;生物腐殖酸结合了腐殖酸和微生物的性能,对土壤具有突出的改良性能^[73]。绿肥植物是天然的土壤改良剂,如豆科植物通过根瘤固氮,增加土壤中氮含量,改善土壤肥力^[14]。

3) 植被恢复。植被恢复是防止地表水土流失、改善矿区及其周边生态环境、增加生物多样性、提高土地利用价值的重要手段。结合当地优势植物构建“乔-灌-草”立体配置模式,有利于提高矿区植被恢复效果。贵州某铅锌冶炼场地在黏土阻隔修复土壤污染的基础上,选用当地物种(狗牙根、火棘、华山松)构建了完整的“乔-灌-草”群落系统,快速实现了植被恢复和生态重建^[78]。种植生长快、扩散能力高、适应性强的先锋植物也是矿山植被恢复常用方法。研究表明,先锋植物不仅能在贫瘠的矿山土壤中生长,而且还能保水、保肥,提高土壤质量。在种植方式上,喷播是矿山生态修复中最经济和常用的种植造林技术方法;此外,还可以利用边坡的特殊地形进行挖鱼鳞坑、围堰造坑种植;为了弥补喷播种植不足,容器苗栽植技术也得到了发展和应用^[61]。

2.5 历史遗留矿山环境污染综合整治技术流程

历史遗留矿山环境污染综合整治的主要目标是消除地质灾害、阻隔和治理环境污染、恢复生态系统^[4,34,37]。一是进行地质灾害排查和治理,消除矿山突发地质灾害;二是解决 AMD 造成的水土污染、土壤重金属污染等环境污染问题,为后续土地、植被、生态系统的恢复提供一个良好的环境基础;三是通过地形地貌修复、土壤质量改善、植被复绿、生物多样性恢复等工作,实现矿山生态系统重建。矿山生态破坏和环境污染问题在产生上具有同根同源,在治理过程也是相互依存不能割裂^[34],否则便会出现无效治理。结合区域自然地理和生态环境、综合整治目标(最终土地用途)、生态破坏和环境污染问题、经济性和时间性等构建的历史遗留矿山综合整治技术流程如图 4 所示。对于无污染或污染较轻的历史遗留矿山应首先开展环境污染预防和风险管控,对于存在环境污染的历史遗留矿山则是首先开展环境污染治理,在预防或治理环境污染问题后再进行矿山生态修复。

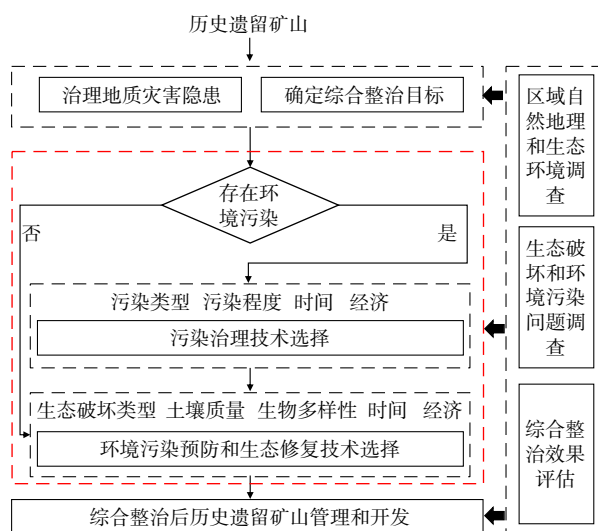


图 4 历史遗留矿山环境污染综合整治技术流程

Fig. 4 Technical process for comprehensive remediation of environmental pollution in historical legacy mines

3 历史遗留矿山环境污染综合整治存在的问题与路径

目前,我国在历史遗留矿山治理方面做了大量工作。国家层面,财政部和自然资源部设立了历史遗留废弃矿山生态修复示范工程补助资金;财政部和生态环境部设立的土壤污染防治专项资金支撑涉重金属历史遗留矿山土壤污染治理;自然资源部、生态环境部、国家林草局联合开展了黄河流域历史遗留矿山生态破坏与污染状况调查评价。白河县硫铁矿区“磺水”污染问题、“锰三角”污染问题、五里川河梯污染等历史遗留矿山环境污染治理取得了显著成果。

3.1 存在的问题

结合美丽中国建设要求和历史遗留矿山环境污染综合整治目标,还存在综合整治“合力”缺乏、检查和验收标准不健全、整治工作系统性不够、自身“造血”不足、综合整治技术水平不高等问题。

1) 缺乏综合整治“合力”。自然资源、生态环境、林草等职能部门对历史遗留矿山治理关注重点不同,自然资源部门重视矿山地质环境治理、生态环境部门关注污染治理、林草部门则是以植被恢复为重点。具体治理实践中各职能部门多是结合自身监管业务范围开展工作,导致历史遗留矿山生态修复和污染治理综合整治在规划、设计和施工上各自独立,未能形成综合整治“合力”。

2) 整治工作系统性关注不够。目前,开展或完成治理的历史遗留矿山存在“头痛医头、脚疼医脚”的现象,如存在“撒胡椒面式”的治理模式,通过简单覆土复绿完成表面治理,常出现复绿植被 2~3 年以后便会干枯。由于对区域(流域)生态环境系统特点、环境污染源头防控和治理、“山水林田湖草沙”一体化治理、生态系统持续恢复等考虑不足,导致部分治理工程未达到预期效果。

3) 检查和验收标准不健全。我国关于历史遗留矿山的生态环境问题调查与评价、综合整治效果评价与监测等没有专门的标准规范,实际工作中主要是参考矿山地质环境治理、矿山生态修复、固体废物和土壤调查等标准规范,但这些标准规范与历史遗留矿山生态环境问题的调查、评价、治理以及监测等并不完全适应。

4) 自身“造血”能力不足。目前,历史遗留矿山整治资金主要是来源于中央资金和当地政府投入,环保公益性显著。由于资金收益路径不明等原因,同时部分历史遗留矿山处于偏远地区,整治修复后的土地利用途径不清晰或未制定长远的利用规划模式,导致社会资本参与度不高。

5) 综合整治技术水平还需提升。精准地调查矿区自然地理、生态环境问题现状,是制定目标、选择技术、实施工程等工作的重要前提;大尺度区域层面上的历史遗留矿山调查与评估技术,特别是环境污染问题的调查与评估技术还需要提高。综合整治技术虽然多样化,但是如何选择与组合,如何从理论研究应用到工程实践中,如何有效提高工程项目的整治效果,如何保障整治修复后历史遗留矿山的自我持续修复能力,都是综合整治过程需要面对的现实问题。

3.2 综合整治路径

1) 系统规划,做好顶层设计。以黄河流域历史遗留矿山生态破坏与污染状况调查评价为契机,建立各职能部门间协调沟通工作机制,明确各自职责与任务,一体化推进历史遗留矿山环境污染治理和生态修复工作。以流域(区域)为研究对象,多部门联合开展全国历史遗留矿山基本情况、生态环境现状、生态破坏和环境污染状况详细调查,为确定综合整治目标和选择整治技术提供支撑。学习陕西省白河县硫铁矿区“磺水”污染问题综合整治经验,综合考虑历史遗留矿山的自然地理和生态环境等条件,从流域(区域)层面制定切合实际的综合整治总体规划,避免出现“东一榔头西一棒槌”的表面治理^[79]。

2) 分类施策,健全标准体系。坚持因地制宜的综合整治理念,在充分调查评估的基础上,依据当地情况合理确定综合整治模式(农林用地模式、建设用地模式、生态景观模式、自然封育模式等),设定综合整治标准,避免过度整治。有机结合“生态破坏和环境污染状况调查-污染治理-生态修复-效果评估-长期监测和管理”全过程各职能部门职责,多部门联合制定综合整治相关标准规范,特别是加强水、土、气环境污染方面的调查、治理评估以及后期监管,提高综合整治质量。

3) 产业导入,拓宽整治模式。通过生态环境导向的开发模式(EOD模式)、土地置换、固体废物再利用、产业开发等模式吸引社会资本参与,拓展综合整治资金来源。通过对整治场地的再开发利用,提高经济效益。中央以及各级地方政府完善政策法规建设,在风险可控条件下,支持历史遗留矿山废弃石料和尾矿合理出售,社会资本优先使用整治后土地,历史遗留矿区连片发展农业、畜牧业、旅游业和康养等。

4) 技术研发,提升整治水平。结合不同矿区、矿种、水文和地质条件等特点,综合应用遥感技术、水文地质学、采矿学、生态学和环境学等建立历史遗留矿山生态破坏和环境污染调查评估模型,精准刻画历史遗留矿山现状。立足生态破坏和环境污染形成机制,重点研发环境污染源头管控技术。应用基因技术提高植物抗逆性和污染物吸收能力,提高整治后矿山自我修复能力。以生态环境安全和人体健康为目标,结合固体废物回填修复露天采坑、塌陷坑实践,从固体废物种类、回填空间本底现状、回填工艺以及环境监测等方面,完善固体废物回填生态修复环境污染风险评估模型和参数,构建全生命周期污染防治体系。引入人工智能与大数据、生物修复、生态工程等新技术和生态设计、自然本底重构等新方法,推动历史遗留矿山环境污染综合整治技术快速高质量发展。

4 结语

1) 历史遗留矿山主要存在 3 大类生态环境问题:挖损、塌陷、压占等土地破坏问题,地质灾害(滑坡、崩塌、泥石流)、地形地貌破坏、含水层破坏等地质环境问题,以及水土气环境污染问题。开展以生态修复和环境污染治理为主要内容的历史遗留矿山环境污染综合整治,是矿产资源开发利用领域推进生态文明建设的必然选择。

2) 历史遗留矿山环境污染综合整治技术体系主要由生态破坏和环境污染调查评估、地质灾害治理、环境污染治理、以及生态修复 4 大类技术组成;基于各类治理技术,以实现环境污染治理和生态系统恢复综合整治目标为核心构建历史遗留矿山环境污染综合整治技术流程。

3) 我国历史遗留矿山环境污染综合整治还存在综合整治“合力”缺乏、检查和验收标准不健全、整治工作系统性不够、自身“造血”能力不足、综合整治技术水平不高等方面问题。建议从 4 个方面开展历史遗留矿山环境污染综合整治工作:明确各职能部门职责与任务,编制流域(区域)综合整治总体规划;因地制宜确定综合整治模式,制定“生态破坏和环境污染调查-污染治理-生态修复-效果评估-长期监测和管理”相关标准规范;通过综合整治导入产业发展的方式,拓展综合整治资金来源,提高经济效益;加强技术研发,提升综合整治技术水平。

参 考 文 献

- [1] 自然资源部办公厅,生态环境部办公厅,国家林业和草原局办公室.关于组织开展黄河流域历史遗留矿山生态破坏与污染状况调查评价的通知[Z]. 2022-3-2.
- [2] 张进德,郝富瑞.我国废弃矿山生态修复研究[J].生态学报,2020,40(21):7921-7930.
- [3] KINCEY M, WARBURTON J, BREWER P. Contaminated sediment flux from eroding abandoned historical metal mines: spatial and temporal variability in geomorphological drivers[J]. Geomorphology, 2018, 319(15): 199-215.
- [4] 邹天远,乔雄彪,张宗文,等.涉金属历史遗留矿山污染防治全过程技术规范体系构建研究[J].环境工程技术学报,2024,14(2):520-527.
- [5] 王世虎.生态文明建设背景下历史遗留矿山环境问题与对策[J].矿业安全与环保,2018,45(6):88-91.
- [6] NAIDU G, RYU S, THIRUVENKATACHARI R, et al. A critical review on remediation, reuse, and resource recovery from acid mine drainage[J]. Environmental Pollution, 2019, 247: 1110-1124.
- [7] 央视新闻.秦巴山区硫铁矿污染调查后续:全部治理完成预计需 6 亿元以上[EB/OL].生活报,[2023-12-22].<https://baijiahao.baidu.com/s?id=1674800749073250928&wfr=spider&for=pc> 2020.
- [8] 张军伟,刘顺,文雯,等.矿山酸性废水治理与综合利用研究进展[J].资源环境与工程,2023,37(6):734-740.
- [9] 李全生,李淋,方杰,等.北方防沙带大型露天煤矿区生态保护与修复技术[J].煤炭科学技术,2024,52(1):323-333.
- [10] 杜银山,王雅宁,李磊,等.湖北省十堰市历史遗留废弃矿山现状及生态修复工程研究[J].有色金属(矿山部分),2024,76(4):174-181.
- [11] 陈浮,朱燕峰,马静,等.东部平原采煤沉陷区降污固碳协同修复机制与关键技术[J].煤炭学报,2023,48(7):2836-2849.
- [12] NEBOJŠA A, VESELIN D, VLADIMIR Ž, et al. Regional-scale screening of groundwater pollution risk induced by historical mining activities in Serbia[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(16): 1152.
- [13] FISCHER S, ROSQVIST G, CHALOV S R, et al. Disproportionate water quality impacts from the century-old Nautanen copper mines, Northern Sweden[J]. Sustainability, 2020, 12: 1394.
- [14] 陈思思,董滨,徐祖信.矿山生态修复及市政污泥稳定化产物应用潜力[J].中国环境科学,2022,42(12):5734-5747.
- [15] 陈三喜,苏佳,曾兴.湖南某石煤矿区重金属污染现状及生态风险评估[J].矿冶工程,2023,43(5):103-108.
- [16] 李冰,钟凤.梅州市五华县石灰岩矿区土壤铅污染现状研究及改良对策[J].安徽农业科学,2009,37(2):805-806.
- [17] 司万童,李海东,林乃峰,等.内蒙古达茂旗萤石矿区土壤重金属分布特征与复合污染评价[J].生态与农村环境学报,2016,32(3):404-409.
- [18] 胡振琪,赵艳玲.矿山生态修复面临的主要问题及解决策略[J].中国煤炭,2021,47(9):2-7.
- [19] 姜丽丽,李少飞,徐洪伟.历史遗留废弃矿山生态修复现状及治理对策研究[J].自然资源情报,2023(1):22-27.
- [20] 中华人民共和国自然资源部.土地复垦规定[EB/OL].[2024-8-14].https://f.mnr.gov.cn/201702/t20170206_1435815.html, 1988.

- [21] 中华人民共和国生态环境部. 矿山生态环境保护与污染防治技术政策[EB/OL]. [2024-8-14]. https://www.mee.gov.cn/ywggz/fgbz/bz/bzwb/wrfzjszc/200611/t20061120_96229.shtml, 2005.
- [22] 中华人民共和国中央人民政府. 矿山地质环境保护规定[EB/OL]. [2024-8-14]. https://www.gov.cn/zhengce/2019-08/14/content_5711395.htm, 2009.
- [23] 环境保护部. 矿山生态环境保护与恢复治理技术规范(试行): HJ 651-2013[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2013.
- [24] 中华人民共和国财政部. 关于推进山水林田湖生态保护修复工作的通知[EB/OL]. [2024-8-14]. https://www.mof.gov.cn/gp/xxgkml/jjjss/201610/t20161008_2512223.htm, 2016.
- [25] 中华人民共和国中央人民政府. 国务院关于推动内蒙古高质量发展奋力书写中国式现代化新篇章的意见[EB/OL]. [2024-8-14]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202310/content_6909412.htm, 2023.
- [26] 中央政府门户网站. 十年成绩斐然——十六大以来矿产资源管理工作综述[EB/OL]. [2024-6-30]. https://www.gov.cn/gzdt/2012-10/10/content_2240688.htm, 2012.
- [27] 中华人民共和国中央人民政府. 财政部国土资源部关于印发《矿山地质环境恢复治理专项资金管理办法》的通知[EB/OL]. [2024-6-30]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2013/content_2441020.htm, 2013.
- [28] 刘向敏, 侯冰, 余振国. 矿山地质环境恢复治理基金现状及管理改革探讨[J]. 中国国土资源经济, 2022, 35(9): 69-75.
- [29] 中华人民共和国中央人民政府. 土地复垦条例实施办法[EB/OL]. [2024-6-30]. https://www.gov.cn/zhengce/2019-08/14/content_5711403.htm, 2012.
- [30] 中华人民共和国中央人民政府. 自然资源部关于探索利用市场化方式推进矿山生态修复的意见[EB/OL]. [2024-6-30]. https://www.gov.cn/xinwen/2019-12/25/content_5463827.htm, 2019.
- [31] 中华人民共和国中央人民政府. 国务院办公厅关于鼓励和支持社会资本参与生态保护修复的意见[EB/OL]. [2024-6-30]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-11/10/content_5650075.htm, 2021.
- [32] 胡丹丹. 废弃矿山生态修复实证分析[J]. 中国资源综合利用, 2023, 41(7): 149-151.
- [33] 邢宇, 王静雅, 杨金中, 等. 全国废弃露天矿山采用地分布状况与存在问题[J]. 自然资源遥感, 2024, 36(2): 21-26.
- [34] 孙宁, 张宗文, 乔雄彪. 加快推动矿山(区)污染防治与生态修复协同增效的对策建议[J]. 中华环境, 2023(3): 57-59.
- [35] 付善明, 周永章, 赵宇鹤, 等. 广东大宝山铁多金属矿废水对河流沿岸土壤的重金属污染[J]. 环境科学, 2007(4): 4805-4812.
- [36] LEI K, PAN H Y, LIN C Y. A landscape approach towards ecological restoration and sustainable development of mining areas[J]. Ecological Engineering, 2016, 90: 320-325.
- [37] 武强, 刘宏磊, 赵海卿, 等. 解决矿山环境问题的“九节鞭”[J]. 煤炭学报, 2019, 44(1): 10-22.
- [38] YANG Y Y, XU Y S, SHEN S L, et al. Mining-induced geo-hazards with environmental protection measures in Yunnan, China: an overview[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2015, 74: 141-150.
- [39] 袁颖, 曹思源, 刘建兵, 等. 石灰岩山地地质与资源问题与恢复治理研究[J/OL]. 矿业研究与开发, 1-13. [2024-04-10]. <https://doi.org/10.13827/j.cnki.kyyk.20240321.002>.
- [40] MENG F Q. Comprehensive treatment and ecological restoration of mine geological hazards for Yanchi mountain in Jinan City[C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2020, 474(4): 042009.
- [41] CHEN G, YE Y C, YAO N, et al. A critical review of prevention, treatment, reuse, and resource recovery from acid mine drainage[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 329: 129666.
- [42] 曾威鸿, 董颖博, 林海. 酸性矿山废水源头控制技术研究进展[J]. 安全与环境工程, 2020, 27(1): 104-110.
- [43] TONG L, Fan R G, YANG S C, et al. Development and status of the treatment technology for acid mine drainage[J]. Mining, Metallurgy & Exploration, 2021, 38: 315-327.
- [44] 王亚萍, 田涛, 徐晶. 废弃矿山酸性废水的成因、危害及治理技术研究进展[J]. 应用化工, 2023, 52(4): 1201-1205.
- [45] YUAN J, DING Z, BI Y, et al. Resource utilization of acid mine drainage (AMD): a review[J]. Water, 2022, 14(15): 2385.
- [46] 周文龙, 杨胜兴, 李汝红, 等. 喀斯特地区煤矿酸性废水 (AMD) 综合治理研究[J]. 中国煤炭地质, 2023, 35(2): 33-40+52.
- [47] 龙中, 吴攀, 黄家琰, 等. 多级复氧反应-垂直流人工湿地深度处理煤矿酸性废水[J]. 环境工程学报, 2019, 13(6): 1391-1399.
- [48] 邱伟军. 某矿山含铜酸性废水处理工业实践[J]. 有色金属工程, 2017, 7(3): 97-100.
- [49] 任宇, 曹文虎, 肖舜禹, 等. 重金属在土壤中的分布、危害与治理技术研究进展[J]. 中国地质, 2024, 51(1): 118-142.
- [50] 赵鑫娜, 杨忠芳, 余涛. 矿区土壤重金属污染及修复技术研究进展[J]. 中国地质, 2023, 50(1): 84-101.
- [51] 侯德义, 沈征涛. 污染场地风险管控技术及国外典型案例[M]. 北京: 化学工业出版社, 2021.
- [52] 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.
- [53] 曹坤坤, 张沙沙, 胡学玉, 等. 复合淋洗条件下农用地耕作层土壤去镉效率及其功能调节[J]. 环境科学, 2022, 43(2): 1023-1030.
- [54] 杨周白露, 张望, 吴闻东, 等. 化学淋洗法对石煤矿山放射性-重金属复合污染土壤的修复研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(9): 261-266.
- [55] MOON D H, DERMATAS D. Arsenic and lead release from fly ash stabilized/solidified soils under modified semi-dynamic leaching conditions[J]. Journal of hazardous materials, 2007, 141(2): 388-394.
- [56] 郭军康, 赵隼隼, 李怡凡, 等. 矿区土壤重金属污染修复技术研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(2): 249-260.
- [57] 赵娅楠, 杨志辉, 司梦莹, 等. 矿区场地土壤防渗阻隔及生态修复研究进展[J]. 有色金属(冶炼部分), 2024(4): 1-12.
- [58] 李驰, 田蕾, 董彩环, 等. MICP 技术联合多孔硅吸附材料对锌铅复合污染土固化/稳定化修复的试验研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(2): 307-316.
- [59] 夏威夷, 冯亚松, 杜延军, 等. 羟基磷灰石基固化剂异位固化稳定化修复重金属污染场地试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2018, 48(3): 549-556.
- [60] 姜杉钰, 谭丽萍, 冯聪, 等. 系统观下的矿山生态修复关键技术体系构建[J/OL]. 环境科学, 1-13. [2024-06-30]. <https://doi.org/10.13227/j.hjxx.202402068>.
- [61] 晏闻博, 柳丹, 彭丹莉, 等. 重金属矿山生态治理与环境修复技术进展[J]. 浙江农林大学学报, 2015, 32(3): 467-477.
- [62] 张益硕, 周仲魁, 杨顺景, 等. 重金属污染土壤修复原理与技术[J]. 有色金属(冶炼部分), 2022(10): 124-134.
- [63] 黄占斌, 孙朋成. 矿区重金属污染土壤的修复[J]. 科学, 2013, 65(6): 38-42+64.
- [64] REEVES R D, BAKER A J M, JAFFRÉ T, et al. A global database for plants that hyperaccumulate metal and metalloid trace elements[J]. New Phytologist,

- 2018, 218: 407-411.
- [65] 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.
- [66] YANG Q, ZHAO Z, HOU H, et al. The effect of combined ecological remediation (plant microorganism modifier) on rare earth mine wasteland[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27: 13679-13691.
- [67] 李金惠, 梁扬扬, 刘丽丽, 等. 以技术创新提高固体废物资源化利用水平助力“无废城市”建设[J]. 环境保护, 2023, 51(24): 21-26.
- [68] 生态环境部, 国家市场监督管理总局. 一般工业固体废物贮存和填埋污染控制标准: GB 18599-2020[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2020.
- [69] 内蒙古自治区市场监督管理局. 一般工业固体废物用于矿山采坑回填和生态恢复技术规范: DB15/T 2763-2022[S]. 内蒙古: 内蒙古自治区市场监督管理局, 2022.
- [70] 安徽省市场监督管理局. 废弃露天采坑一般工业固废处置与生态修复技术规范: DB34/T 4541-2023[S]. 安徽: 安徽省市场监督管理局, 2023.
- [71] 中阳县人民政府. 关于印发吕梁市利用煤矸石实施采煤沉陷区综合治理项目工作方案的通知[EB/OL]. [2024-8-14]. http://www.sxzhongyang.gov.cn/szfyw/wj_29958/202309/t20230915_1793414.shtml, 2023.
- [72] 胡振琪. 矿山复垦土壤重构的理论与方法[J]. 煤炭学报, 2022, 47(7): 2499-2515.
- [73] 毕银丽. 草原露天煤矿区生态修复[M]. 北京: 科学出版社, 2023, 9-10+88.
- [74] 夏举凤, 李艳欢. 一种以煤矸石为主的人造土壤制备方法: ZL202311187218[P]. 2024-08-14.
- [75] 胡振琪, 张子璇, 孙煌. 试论矿山生态修复的地质成土[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(12): 21-29.
- [76] 岳薇, 李大鹏, 吴玲予, 等. CaO_2/FA 复合材料富集磷效能及其回收物对土壤改良作用[J]. 环境科学, 2022, 43(10): 4697-4705.
- [77] 吕春娟, 毕如田, 陈卫国, 等. 土壤结构调理剂 PAM 对复垦铁尾矿砂物理性状的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(6): 240-245.
- [78] 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]. 中国有色金属学报, 2023, 33(10): 3440-3461.
- [79] 杨金中, 许文佳, 姚维岭, 等. 全国采矿损毁土地分布与治理状况及存在问题[J]. 地学前缘, 2021, 28(4): 83-89.

(责任编辑: 金曙光)

Exploration of comprehensive remediation technologies and paths for environmental pollution from historical legacy mines in China

MA Chao, ZHAO Kang*, FENG Yincheng, TIAN Xiangqin, HAN Wei, HU Hualong

Solids Waste and Chemicals Management Center, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100029, China

*Corresponding author, E-mail: zhaok_666666@163.com

Abstract The ecological and environmental problems associated with historical legacy mines is prominent in China. It is urgent to implement comprehensive remediation for environmental pollution in historical legacy mines, focusing primarily on ecological restoration and environmental pollution. By analyzing major environmental problems, current status and shortcomings of historical legacy mines in China, this study proposed the comprehensive remediation concept of environmental pollution remediation in historical legacy mines, focusing on environmental pollution control and ecosystem restoration. This study summarized the technical system for comprehensive remediation of environmental pollution from multiple perspectives, including ecological destruction and environmental pollution, treatment of geological hazards, control of environmental pollution, and ecological restoration. Considering the comprehensive remediation goals of environmental pollution and ecosystem restoration, the technical process of comprehensive remediation for historical legacy mines was constructed. In order to improve the effectiveness of comprehensive remediation of historically abandoned mines in China, it is necessary to combine the overall plan of comprehensive remediation, the construction of specification system, the extension of the comprehensive remediation model and the strengthening of the technological research.

Keywords historical legacy mines; environmental pollution; ecological destruction; comprehensive remediation technology; paths