

尾矿库下游地下水污染风险管控及修复方案研究

汪兵兵^{1,2}

1. 中钢集团马鞍山矿山研究总院股份有限公司, 安徽 马鞍山 243000

2. 金属矿山安全与健康国家重点实验室, 安徽 马鞍山 243000

[摘要]尾矿库地下水污染存在鲜明的区域特点, 具体表现为裂隙含水层优先流扩散、重金属与硫酸盐复合污染、新旧库区污染风险差异显著, 且污染区域周边人口密集、人居环境敏感, 传统的风险评估方法和常规修复技术, 已经无法适配当前复杂的尾矿库地下水治理工作需求。系统梳理了安徽省尾矿库的空间分布特征、矿区水文地质实际条件, 深入剖析了地下水重金属-硫酸盐复合污染的形成机理, 以及污染风险的动态演变规律。在此基础上, 针对性搭建了四维定量风险评价体系, 精准排查并梳理出当前尾矿库地下水存在的核心问题, 结合矿区实际工况, 优化升级了原位钝化、分层 PRB 拦截等核心修复技术, 对守护长江安徽段水生态环境安全、推动矿山矿区生态保护与高质量协同发展具有重要现实意义。

[关键词]尾矿库; 地下水复合污染; 风险评价; 分级管控; 生态修复

DOI: 10.33142/ec.v9i9.20422

中图分类号: X523

文献标识码: A

Research on Risk Control and Restoration Plan for Groundwater Pollution Downstream of Tailings Pond

WANG Bingbing^{1,2}

1. Sinosteel Maanshan General Institute of Mining Research Co., Ltd., Maanshan, Anhui, 243000, China

2. State Key Laboratory of Safety and Health in Metal Mines, Maanshan, Anhui, 243000, China

Abstract: There are distinct regional characteristics of groundwater pollution in tailings ponds, manifested as preferential flow and diffusion of fractured aquifers, combined pollution of heavy metals and sulfates, significant differences in pollution risks between old and new reservoir areas, and densely populated and sensitive living environments around the polluted areas. Traditional risk assessment methods and conventional remediation techniques are no longer suitable for the current complex needs of tailings pond groundwater treatment. The system has sorted out the spatial distribution characteristics of tailings ponds in Anhui Province, the actual hydrogeological conditions of mining areas, and deeply analyzed the formation mechanism of heavy metal sulfate composite pollution in groundwater, as well as the dynamic evolution law of pollution risk. On this basis, a targeted four-dimensional quantitative risk assessment system was established to accurately identify and sort out the core problems of groundwater in tailings ponds. Combined with the actual working conditions of the mining area, core restoration technologies such as in-situ passivation and layered PRB interception were optimized and upgraded. This has important practical significance for safeguarding the water ecological environment safety of the Anhui section of the Yangtze River, promoting ecological protection and high-quality coordinated development in mining areas.

Keywords: tailings pond; groundwater composite pollution; risk assessment; graded control; ecological restoration

引言

金属矿产大规模开采助推区域工业发展, 但尾矿大量堆存带来突出环境风险^[1]。尾矿含硫化物、重金属, 经降雨淋溶、风化氧化产生酸性渗滤液, 入渗扩散造成地下水

污染, 其隐蔽滞后、治理周期长, 易对水资源、耕地与人居环境形成不可逆危害, 传统治理模式难以适用^[2]。开展尾矿库地下水风险管控与修复研究, 对化解历史污染隐患、保障长江水生态及饮水安全、助力矿区绿色转型具备重要

理论与工程价值。

1 尾矿库及地下水污染现状分析

1.1 尾矿库总体分布特征

目前,全省所有登记在册、合规管理的尾矿库,整体安全管控能力和环保合规水平都有了大幅提升,存在安全隐患的小型尾矿库已全部完成整改。从整体布局和运行情况来看,辖区内尾矿库呈现出明显的区域集中特征,新旧尾矿库交错分布,不同尾矿库的隐患风险等级差距较大。同时,多数尾矿库紧邻河道、水系分布,直接威胁区域水生态环境安全,存在较高的环境风险。从运行状态来看,省内尾矿库主要分为三类:正常生产运行、停用闲置、无主闭库。其中,没有责任主体、早已关停的老旧尾矿库,是当前尾矿库污染隐患的主要源头。结合隐患排查整治工作结果来看,当前尾矿库的环境问题主要集中在地下水污染方面。普遍存在防渗设施破损失效、地下水监测设备不完善、监测能力不足、渗滤液渗漏外溢、截排水系统堵塞瘫痪等突出问题。老旧闭库尾矿库建设年代久远,建设标准、工艺标准本身就偏低,再加上企业倒闭、责任主体灭失,没有专项运维资金支撑,长期处于无人管护、无人修缮的状态,造成地下水长期、持续性污染^[3]。

1.2 区域水文地质与污染迁移条件

安徽省皖江、皖南矿区整体为低山丘陵地形,地形条件复杂,整体地下水渗透能力中等偏强,各区域地下水之间水力连通性好、水体交换密切。受岩体中大量无规则分布的裂隙和孔隙影响,矿区地下水优先流现象十分发育。污染物顺着裂隙、孔隙形成的优势通道快速向下渗透、同时发生横向扩散,最终形成“浅层面状污染、深层带状污染”的复合型污染格局,隐蔽性极强,很难被及时发现。

2025 年汛期多轮强降雨天气,大幅增加了雨水下渗量,加速了尾矿库内酸性渗滤液的产生速度,带动地下污染羽不断向周边居民区、农田耕地和饮用水源地扩散蔓延。同时,枯水期地下水位下降,污染物不断聚集浓缩,污染浓度大幅升高;丰水期地下水位抬升,水流带动污染物大范围扩散迁移,让污染治理稳定性极差,提升了修复治理的难度。根据 2025 年尾矿库地下水专项监测结果,矿区地下水已形成酸性水质、重金属、高硫酸盐叠加的复合型污染。其中硫酸盐超标问题最为普遍,重金属污染则主要集中在已经关闭、废弃的老旧尾矿库下游区域。

1.3 地下水复合污染现状与成因分析

综合分析,矿区地下水污染主要有三大成因。一是老旧尾矿库建设标准低,缺少完善的防渗设施,库内尾矿中的硫化物长期接触空气和水体发生风化反应,持续产生酸性物质,进而溶出尾矿中的各类重金属污染物,源源不断污染地下水。二是矿区裂隙发育的含水层结构,叠加汛期集中降雨的自然条件,为污染物下渗、迁移、扩散提供了绝佳的通道和动力,加速了污染蔓延。三是日常管控和修复技术存在短板,以往治理多侧重地表环境管控,忽视了地下水隐蔽污染的排查与治理,同时常规的地下水修复技术和本地复杂的地质、污染条件适配性差,无法彻底根除污染,最终导致地下隐性污染不断累积,治理后极易反复反弹^[4]。

2 尾矿库地下水污染风险定量评价与核心治理短板

2.1 四维风险评价指标体系构建

构建“源-径-汇-敏”四维立体化风险评价体系,具体评价指标体系见表 1。

表 1 尾矿库地下水四维风险评价指标体系表

目标层	准则层	指标层	权重	评分标准
地下水污染综合评价	污染源风险 (42%)	尾矿库建设年限与建设标准	10%	2000 年前闭库老旧库高分, 2020 年后标准化新建库低分
		防渗与截排水设施完整性	12%	设施破损、雨污不分流、无运维高分, 合规完好低分
		污染物复合污染程度	10%	重金属+硫酸盐复合污染高分, 单一轻度污染低分
		堆体稳定性与渗漏情况	6%	堆体开裂、点状渗漏多发高分, 结构稳定无渗漏低分
		法治化管控达标情况	4%	未落实 2025 地下水条例管控要求高分, 合规达标低分
	迁移路径风险 (33%)	含水层裂隙发育与渗透性	11%	裂隙越发育、渗透性越强, 污染扩散风险越高
		年均降水入渗强度	12%	汛期降水集中、入渗量大, 风险评分显著提升
		地下水径流与优先流发育程度	10%	径流速度快、优先流发育, 污染隐蔽扩散风险更高
	受体敏感风险 (25%)	下游集中式饮用水源距离	12%	距离水源地越近, 民生安全风险等级越高
		下游耕地与居民区规模	8%	敏感受体越密集, 环境与民生风险越强
		智能化监测预警能力	5%	无自动监测、无预警体系高分, 智慧监测全覆盖低分

2.2 尾矿库地下水污染核心治理短板

目前尾矿库地下水污染治理工作,存在多个维度的突出短板和现实问题。在源头防控方面,现有防控手段大多只针对尾矿库地表扬尘、表层淋溶污染,无法有效处置地下复合型污染问题。尤其是大量老旧尾矿库,普遍存在防渗层破损、截洪设施淤积堵塞、雨污分流不彻底等问题,每到汛期,尾矿库渗滤液向下渗漏的风险会大幅升高。同时,现有治理技术无法同步实现重金属和硫酸盐的协同阻控,难以彻底稳住治理成效。在监测体系建设上,整体建设进度滞后、短板明显,绝大多数尾矿库只能依靠人工低频次巡检监测,监测数据时效性、连续性极差。在修复治理层面,现阶段很多治理工程直接照搬北方地区的治理技术,没有落实风险分级、分类管控的治理思路,不仅治理性价比不高,工程完工后的长效运维、稳定控污能力也严重不足。除此之外,尾矿库从建设、运行到闭库的全生命周期监管工作衔接不顺畅,各环节监管存在漏洞。同时,各方主体责任划分模糊、权责不清,专项治理资金保障不足,多部门联动、全程闭环的监管工作机制尚未完全建立,整体治理监管效能难以保障。

3 差异化风险管控与场景化修复方案设计

3.1 分级分类精准风险管控方案

按照风险等级实施分级差异化管控治理。对于省级督办的高风险闭库尾矿库,实行督办整改、综合治理与应急管理协同推进。严格落实应急管理举措,实施源头污染封堵、污染过程阻断,同步开展常态化监测;关停下游水质超标的饮用水井,划定隔离警示管控区域;采用防渗注浆工艺封堵渗漏裂隙,完善截洪、雨污分流系统,布设防渗帷幕遏制污染羽向外扩散,同时建立高频次监测复盘机制,坚持每周抽样检测、每月全域全面排查监测、每季度整体复盘研判,依托省、市、区三级联动督办机制,逐项完成隐患整改、核验销号,形成完整管控闭环^[5]。

中风险尾矿库大多为正常生产或临时停用的库区,整体工况尚可,但存在部分一般性污染和安全隐患,暂无重大环境风险。针对中风险尾矿库,以隐患整治与动态风险防控为核心,修缮防渗、截排水工程设施,开展尾矿覆土固化及植被复绿作业,优化地下水监测井组配置,日常重点开展库区设施检修、库内淤泥清理、分区生态修复绿化等整治工作,补齐完善地下水监测点位,落实常态化监测任务,每年开展一次全面风险评估。同步建立月度隐患排查治理机制,严格压实在产企业的生态环保主体责任,规范日常生产和库区运维流程,从严管控新增污染问题,严防风险升级恶化。低风险尾矿库以常态化管护、预警监测

及生态养护为重点,落实设施日常巡检维护,组织开展年度水质监测与风险评估,建立完整风险档案;实施库区生态绿化与水土保持工程,防控新增污染隐患,持续维持库区低风险运行状态。

3.2 复合污染的场景化修复技术方案

结合场地污染特征、含水层结构及治理需求,实施针对性的修复技术。

改性生物炭原位协同钝化技术适配地下水浅层、污染程度轻、污染范围广的常态化治理场景。技术核心依托生物炭、改性沸石、黏土矿物构建复合型修复体系,无需抽取地下水、不大规模扰动土层,可在原位土层中同步完成多重治理效果,改善地下水水质环境。同时,这套复合修复材料可以有效填充、封堵含水层的裂隙缝隙,从根源遏制污染物随地下水流动扩散,彻底解决轻度污染治理后容易反弹的痛点。整体治理过程对场地生态和土层结构扰动极小,施工便捷、治理成本低、稳定性强,非常适合区域大面积、分散式的浅层轻度地下水污染常态化管控与修复。

分层式 PRB(渗透反应墙)修复技术适配裂隙含水层发育、污染物已形成扩散趋势的中度地下水污染,尤其适配矿区形成的稳定污染羽治理。技术充分贴合本地裂隙含水层的结构特点,采用分层分区的修复思路,解决传统修复介质易堵塞、治理时效短的行业难题。上层为填充专用复合材料,主要发挥还原与吸附作用,对水体中重金属污染物进行处置,快速削减水体重金属浓度。下层布设专用反应介质,侧重对矿区酸性地下水开展中和处理,同步去除水中超标硫酸盐。通过分层分工模式,各层功能明确、各司其职,实现对矿区地下水的靶向精准治理,高效同步解决重金属污染、水体酸化、硫酸盐超标多重水环境问题。分层结构设计可以有效规避单一介质易堵塞、失效快的问题,大幅提升修复系统的稳定性和使用寿命^[6]。整套设备施工完成后后期运维简单、无需频繁管控,治理效果长效稳定,是矿区中度扩散性地下水污染的优选长效治理技术。

分层抽提-异位深度净化技术适配聚焦高浓度、集中聚集、高风险的重度地下水污染,主要用于污染库区的攻坚治理,可快速控险、降污、阻断污染蔓延。依托地下水分层分布特征,采用精准分层抽提工艺,针对性收集地下水中高浓度污染水体,避免无效抽水、提升污染治理效率。收集后的高污染水体输送至地面,先通过预处理工艺去除水体中悬浮物、杂质等干扰物质,再利用树脂深度净化工艺对水体重金属、硫酸盐等核心污染物进行深度处理,最终实现出水达标排放。该技术最大优势是见效快,可在短时间内快速削减地下水污染峰值浓度,及时阻断污染物向

下游、深层扩散,快速化解场地环境风险,完美适配高风险库区重度集中污染的应急攻坚与彻底治理需求。

4 长效保障对策与机制优化

完善多维度管控机制,切实做好尾矿库地下水污染防治和生态修复工作。建立尾矿库地下水风险动态登记台账,实行“一库一策”分类管理。针对高、中、低不同风险等级的尾矿库,采取不一样的监管措施,高风险库实行挂牌督办、每月开展核查;中风险库每季度开展风险排查;低风险库做好年度常规评估。

针对尾矿库智能化监测能力不足的问题,加快补齐硬件短板,按规范布设地下水监测井,做到监测范围不留死角。搭建省级智慧监管平台,归集各方面业务数据,打破不同部门之间的数据不通的问题,及时识别潜在风险,提高突发状况下的应急处置水平。进一步压紧压实企业自身的环保责任,把尾矿库合规管理情况纳入企业环保信用评价。同步开展矿区土壤治理、水系整治、植被复绿等综合生态修复工作,把污染治理和尾矿资源回收再利用结合起来,用尾矿资源化产生的收益补贴生态治理投入,推动生态保护、社会效益、经济收益同步向好。

5 结论

当前尾矿库地下水污染防控工作,主要存在四个突出现实难题:污染源阻断措施和现场实际工况匹配度不高,智能化监测能力不足,污染修复手段缺少针对性,同时还

缺少依法管控的长效运行制度。针对上述问题,结合不同风险等级、不同污染现场实际情况制定分级管控方案,配套适配的修复改良技术,能够较好处理当地多种污染物叠加污染、裂隙含水层污染物易扩散的治理难点,形成一套实操性强、便于推广的成套治理模式,可为安徽省尾矿库地下水的精细化污染治理提供切实可行的技术参考。

[参考文献]

- [1]常宝孟.金矿尾矿库重金属释放规律及污染风险研究[D].北京:北京科技大学,2023.
- [2]万芯瑞.尾矿库环境安全的监管制度研究[D].云南:昆明理工大学,2021.
- [3]郭占强,胡克.关于加强长江经济带尾矿库污染风险防治的建议[J].环境保护,2020,48(22):67-70.
- [4]马健钦.尾矿库污染防治与应急管理能力评估体系研究[D].四川:西南科技大学,2018.
- [5]梁雅雅,易筱筠,党志,等.铅锌尾矿库对周围环境重金属污染风险评价指标的建立及方法[J].生态学杂志,2018,37(6):1772-1780.
- [6]何仔颖,吴超.尾矿库地下水污染风险评价体系研究[J].安全与环境学报,2011,11(4):121-125.

作者简介:汪兵兵(1988—),男,汉族,安徽省马鞍山市人,硕士研究生,高级市政工程师,就职于中钢集团马鞍山矿山研究总院股份有限公司,从事环境影响评价工作。