

《废弃矿井酸性涌水治理技术指南》

（征求意见稿）

编制说明

《废弃矿井酸性涌水治理技术指南》编制组

二〇二五年七月

目录

| | |
|----------------------------|----|
| 1 项目背景 | 1 |
| 2 标准制（修）订的必要性分析 | 1 |
| 3 国内外相关研究情况 | 2 |
| 3.1 国外相关标准制定情况 | 2 |
| 3.2 国外相关技术研究情况 | 5 |
| 3.3 国内相关技术研究情况 | 8 |
| 4 标准编制的依据、基本原则和技术路线 | 9 |
| 4.1 编制依据 | 9 |
| 4.2 制定原则 | 10 |
| 4.3 技术路线 | 10 |
| 5 主要技术内容及依据 | 11 |
| 5.1 适用范围 | 11 |
| 5.2 规范性引用文件 | 11 |
| 5.3 术语和定义 | 11 |
| 5.4 工作程序 | 14 |
| 5.5 修复与风险管控目标及范围确定 | 14 |
| 5.6 污染修复与风险管控技术筛选 | 16 |
| 5.7 编制修复与风险管控技术方案 | 17 |
| 5.8 修复与风险管控工程建设运行与监测 | 17 |
| 5.9 污染修复与风险管控效果评估 | 18 |
| 6 标准实施建议 | 19 |
| 7 参考文献 | 19 |

1 项目背景

为深入贯彻落实习近平总书记关于推动长江经济带发展的重要讲话和重要批示精神,加强四川省废弃矿井酸性涌水污染风险防控和修复治理,保护矿区周边生态环境,指导和规范废弃矿井酸性涌水治理修复工作流程、技术方法和要求,根据《中华人民共和国环境保护法》《中华人民共和国水污染防治法》《地下水管理条例》《地下水污染防治实施方案》《“十四五”嘉陵江流域生态环境保护与修复实施方案》相关要求,在四川省生态环境厅组织下,四川省生态环境科学研究院、生态环境部土壤与农业农村生态环境监管技术中心和成都理工大学等单位起草编制了《废弃矿井酸性涌水治理技术指南(征求意见稿)》(以下简称“指南”)。

2 标准制(修)订的必要性分析

四川省矿产资源丰富,采矿业发达,由于未采取有效的污染防控措施,大量废弃关闭矿山矿井产生的酸性涌水对周边土壤、地下水及地表水环境产生了严重影响,川南及川东北地区尤为突出,其矿井涌水点占全省 70% 以上。受独特的成矿背景影响,四川省废弃矿井涌水总体表现为高浓度铁、铝、硫酸盐和低 pH 值的“三高一低”特点,部分还含有重金属,治理成本较高,同时,受丰、枯水期水量波动的影响,治理效果也极其不稳定。

酸性矿井涌水防治一直都是世界各国矿区治理中最突出的问题,我国目前也还没有出台相关的技术标准或指南。因此,探索科学的治理技术方案和经济技术可行的治理技术,是废弃矿井酸性涌水治理的关键。四川省作为长江上游重要的水源涵养地和生态屏障,加强废弃矿井酸性涌水污染

风险防控，具有重要意义。《“十四五”嘉陵江流域生态环境保护与修复实施方案》（长江办〔2021〕18号）提出，要持续探索广元市废弃矿井涌水治理经验，开展废弃矿井涌水治理试点，制定工作指南和技术标准。按照国家工作部署并结合本省实际，四川省在废弃矿井酸性涌水治理方面已取得了一定成效，并形成了试点示范效应。因此，加强试点成果总结，形成可借鉴、可复制的经验技术，编制本技术指南，显得尤为必要。

3 国内外相关研究情况

3.1 国外相关标准制定情况

3.1.1 国际酸性废水防控组织

国际酸性废水预防组织（INAP，International Network for Acid Prevention）是由加拿大、美国和澳大利亚的多家企业于1998年发起成立的。旨在帮助政府管理部门、矿山企业应对矿山酸性废水排放的挑战，协调、促进全球有关矿山废物管理和酸性矿山废水防治的研究成果和技术共享、转让。2009年INAP整合美国、加拿大、澳大利亚、欧盟和南非等国家或组织预防和治理矿山酸性废水相关技术和研究成果编制了《全球酸性岩石排水指南（Global Acid Rock Drainage Guide，GARD）》。GARD指南规范矿山整个生命周期（包括勘探、建设、生产、闭坑）的预测、监测、管理以及ARD（Acid Rock Drainage）管控的技术要求，阐明有关硫化物矿物氧化的问题，为矿山企业提供可持续的ARD管理方法，支撑政府管理部门在评估和规范矿山土地复垦方面的工作，并使公众对防控ARD的技术有更直观的认识。

GARD 指南可指导应对现有、遗留以及未来矿山所面临 ARD 问题。通过对矿区水文地质环境调查和表征，评估 ARD 源的潜力，进一步建立概念模型，开展 ARD 预测及风险评估，量化水质。在此基础上，筛选预防或缓解 ARD 的方法，评估治理 ARD 效果和风险；最后编制、实施与及时调整监测与管理计划。基于 ARD 管理的系统方法，通过矿山水文地质环境调查、预测、监测、制定计划，最终实施 ARD 管理计划。

3.1.2 美国

美国颁布的《清洁水法》（Clean Water Act, CWA）要求矿山废水排放需达到国家污染物排放消除系统（NPDES）标准，对重金属、pH 等指标提出严格限值要求。

美国环境保护署总结多年矿山清理项目经验制定了《废弃矿山场地表征和清理手册》（Abandoned Mine Site Characterization and Cleanup Handbook），概括废弃矿山的特征，结合已有相关废物管理实践，评估酸性矿山废水对地下水和地表水的环境风险以及人体健康风险，根据评估结果，完善废弃矿山修复和清理计划，同时做好有效监管。

美国《酸性矿山排水处理手册》（Acid Mine Drainage Treatment Manual）推荐中和法、人工湿地法和被动处理系统（如石灰石沟渠）等技术，强调因地制宜选择治理方案。

此外，美国环保署编制了《受采矿影响水体处理技术参考指南》，详细介绍了处理受采矿所影响水体的主动和被动处理技术要求、相关维护需求、技术性能、适用范围以及所需技术成本，此外还提供了根据水质特征

选择适宜技术的要点。

3.1.3 加拿大

加拿大《金属和钻石采矿废水条例》(Metal and Diamond Mining Effluent Regulations, MDMER)规定矿山运营期及闭坑后的废水管理要求,包括定期监测、污染物限值及应急措施,要求企业制定长期闭矿环境管理计划。

3.1.4 英国

英格兰和威尔士环保署、苏格兰环境保护署和煤炭管理局联合撰写关于《废弃矿山和水环境》的报告中概述了酸性矿山废水的成因、环境影响、煤矿酸性矿山废水治理现状以及未来的治理趋势。

为实现欧盟水框架指令(Water Framework Directive, WFD)的环境目标,2009年英国编制了酸性矿山废水优先治理清单,针对已造成酸性矿山废水污染的废弃矿山,依据GARD指南处理酸性矿山废水的同时,也制定了《酸性含金属矿山排水的被动修复工程导则》,该指南为被动处理酸性矿山废水系统的设计、建设和运行提供参考,以期实现被动防控酸性矿山废水中污染物(如重金属离子)的释放。

3.1.5 澳大利亚

2016年,澳大利亚制定《领导矿业可持续发展计划手册》,涵盖矿山开采、废物管理、关闭、复垦、酸性矿山废水处理以及水资源管理等方面,其中《矿业可持续发展最优方法手册—防控酸性和含金属排水》规范了预防与处理、风险管理和监测防控酸性矿山废水的关键原则和程序,为采矿

企业、社区及监管机构提供科学的采矿实践方法。通过硫化矿物的地球化学测试确定产酸潜力，结合产酸因子及产酸过程中的影响因素确定酸性矿山废水成因及范围对酸性矿山废水进行预测及评价，利用污染物-迁移转化-受体模型评估酸性矿山废水风险并划分等级。从矿山开采到关闭的全生命周期综合考虑硫化矿物氧化并通过水文控制减少酸性矿山废水产生，对于现有酸性矿山废水，通过基于风险的系统性管理办法，结合主动预防和被动处理酸性矿山废水以及科学监测综合管控酸性矿山废水。

3.1.6 南非

南非水务和林业部（Department of Water and Forestry, DWAF）发布了一系列矿山水资源管理最佳实践指南。这些指南规范了采矿活动中污染防治和环境影响最小化的方法，以及直接用于酸性矿山废水的最佳管理实践策略。

此外，南非水务及卫生署编制的《矿井水管理》手册以及南非地球科学理事会协调部际委员会专家组撰写的《以酸性排水为重点的威特沃特斯兰德金矿区矿井水管理》报告中描述了治理废弃矿山废水的基本方法与程序，包括编制废弃矿山清单、刻画矿区特征、确定修复工作的优先顺序以及选定酸性矿山废水最佳修复方案。矿山停止开采后，矿井地下水位迅速上升的优先区域中酸性矿山废水所导致的风险应从源头预防和过程控制减少酸性矿山废水的产生量，同时建立矿井水管理框架处理酸性矿山废水，使其最大限度地降低对环境的影响，保障水环境质量安全。

3.2 国外相关技术研究情况

废弃矿山酸性废水污染风险管控与修复技术多采用被动处理技术，所谓被动处理技术，即根据区域矿山排水特征及其水文地质条件构建涉及物理化学、地球化学和生物化学过程的长效反应系统。主要包括工程覆盖与引流、钝化/微胶囊技术、缺氧/有氧石灰石沟渠、渗透反应格栅、连续产碱系统、人工湿地系统等。

国外废弃矿山酸性废水地下水污染风险管控与修复相关研究萌芽于1972年，美国联邦法律首次要求废弃矿山的酸性排水必须进行处理后排放。1978年，美国学者 Huntsman 等首先注意到酸性矿山废水流经天然泥炭藓沼泽地后水质得到改善。Kleinmann^[1]、Sencindiver^[2]和 Bhumbra^[3]等对香蒲湿地开展了相关研究，发现一些可长期适应低 pH 值和高金属浓度环境的湿地植物，并提出设计和建造低成本、低维护处理酸性矿山废水的自然湿地系统的可行性。1982-1994年，美国学者开展了大量的技术研发和实际工程运用，提出了人工湿地、石灰石沟渠等低成本、低维护的酸性矿山废水被动处理系统，并设计出多组被动处理单元联用的模块化系统，显著提升了系统的有效性及灵活性，减少季节性流量变化的影响，延长了整个系统的寿命，探究了酸性矿山废水的水质特征与不同被动处理单元降低金属浓度的关系，在一定程度上确定了影响处理效果的因素。20世纪90年代早期，Kepler 和 McCleary^[4]发明了连续碱度生产系统（SAPS）技术。1994年，Hedin^[5]在其编著的《煤矿废水的被动处理》中总结了选择适当被动系统类型的策略，根据水化学、流速、局部地形和现场特征选择适当的被动系统。1998年，由 Skousen^[6]牵头组织编制完成《矿山酸性排

水的预防与修复技术手册》。1996-1999 年，研究人员还提出“生物固锰除锰”、“钢渣浸出床”等理论，利用锰氧化细菌去除地下水中 Mn^{2+} 的研究得以大量开展，提出除石灰石以外的廉价中和反应介质，用于降低酸负荷。(Sikora 等^[7]，Robbins and Brant^[8])

2000 年以后，废弃矿山酸性废水地下水污染风险管控与修复相关研究进入提升与系统化阶段。全球越来越重视废弃矿山酸性废水治理，各国科学家对酸性矿山废水治理开展了不同程度的研究，快速推动了被动处理技术的发展，被动处理系统因其施工简单、运营维护成本低廉备受青睐。2001 年，美国国家环保署编制《废弃矿场特征和清理手册》，提出了废弃矿山污染场地调查与修复技术要点。2002 年，Younger 等^[9]出版专著了《矿井水：水文、污染、治理》，详细阐述了矿井水形成的水文地质背景和矿井水污染的复杂性，并记载了矿山废物的物化性质、修复技术和工艺流程。2003 年，美国国家环保署资助国家环境管理研究网络（NNEMS）对矿井排水或受污染土壤的废弃矿场及各种处理技术进行调查，建立了一个集案例研究和技术使用的数据库，并对外公开。随后，国外研究者们对被动处理技术进行了大量探索和研究，并随着被动处理技术的不断发展，技术方案也由单一的技术发展到多种形式的被动治理方法，并逐渐从实验室模型发展到大规模的工程应用，开始进行长时间系统稳定性的观测和研究。2017 年，Skousen 等^[10]针对矿山酸性废水处理的被动系统发表文献综述，提供了不同的被动处理方法、设计因素以及与硫酸盐去除相关有机基质的建议参数，并给出了基于水化学和流量来选择酸性矿山废水被动处理系统

的简易流程。2018 年, Skousen 等^[11]对矿山酸性废水预防控制技术也有了全面和系统的总结, 给出了酸性矿山废水常用的预防技术方法、原理以及其优、缺点; Park 等^[12]从预防技术和矿山废弃物回收利用角度综述了酸性矿山废水防护技术的最新进展, 如氧气屏障、杀菌剂的应用、共处置和混合、硫化物矿物的钝化等。Banea-Moreno 等^[13]提出在预防酸性矿山废水不可行的情况下, 还要使用主动处理, 并指出膜法是最有前景的方法, 吸附法是最具商业价值的方法, 并提倡实施多种技术的组合。2020 年, Acharya 和 Kharel^[14]概述了酸性矿山废水的形成和影响、预测和防治方法, 识别了关键的研究空白, 并探讨了酸性矿山废水给环境科学家和研究人员带来的相关挑战和机遇。

3.3 国内相关技术研究情况

目前, 我国还没有出台专门针对废弃矿井酸性涌水治理的技术指南。

我国现有《污染地块地下水修复和风险管控技术导则》(HJ 25.6-2019) 规定了污染地块地下水修复和风险管控的技术方案制定、工程设计和施工、工程运行及监测、效果评估和后期环境监管等内容;《废弃井封井回填技术指南(试行)》(环办土壤〔2020〕72 号) 规定了废弃矿井的判定、环境风险评估、封井回填与验收等内容;《地下水污染源防渗技术指南(试行)》(环办土壤〔2020〕72 号) 对废弃矿井等地下水污染源的防渗工作提出了相关技术要求。

国家安全生产监督管理总局发布《废弃矿井地下水污染监测布网技术规范》(MT/T1022-2006), 规定了废弃矿井地下水污染监测布网的基本原

则、方法和相关技术要求；中国地质环境监测院发布《矿山地质环境监测技术规程》（DZ/T 0287-2015），规定了矿山地质环境监测工作流程、监测方案编写、监测点布设、主要监测方法、监测数据采集、监测数量分析、监测成果编制等要求；生态环境部发布《地下水环境监测技术规范》（HJ 164-2020），规定了包括矿山开采区在内的地下水监测布点方法；《酸性矿井水处理与回用技术导则》规定了酸性矿井水回用标准与监测管理要求。以上技术规范与导则等可为废弃矿井所在矿区地下水监测布点提供参考。

4 标准编制的依据、基本原则和技术路线

4.1 编制依据

- （1）《中华人民共和国环境保护法》（2015 年）
- （2）《中华人民共和国水污染防治法》（2017 年）
- （3）《中华人民共和国土壤污染防治法》（2018 年）
- （4）《地下水管理条例》（国令第 748 号）
- （5）《地表水环境质量标准》（GB 3838）
- （6）《供水水文地质勘察标准》（GB 50027）
- （7）《地下水质量标准》（GB/T 14848）
- （8）《矿区水文地质工程地质勘查规范》（GB/T 12719）
- （9）《水文地质术语》（GB/T14157-2023）
- （10）《污染地块风险管控与土壤修复效果评估技术导则》（HJ 25.5）
- （11）《污染地块地下水修复和风险管控技术导则》（HJ 25.6）
- （12）《地下水环境监测技术规范》（HJ 164）

(13)《地下水环境状况调查评价工作指南》(环办土壤函〔2019〕770号)

(14)《地下水环境状况调查评价工作指南》(环办土壤函〔2019〕770号)

(15)《地下水污染模拟预测评估工作指南》(环办土壤函〔2019〕770号)

(16)《地下水污染健康风险评估工作指南》(环办土壤函〔2019〕770号)

(17)《废弃井封井回填技术指南(试行)》(环办土壤函〔2020〕72号)

(18)《地下水污染源防渗技术指南(试行)》(环办土壤函〔2020〕72号)

4.2 制定原则

(1) 科学性原则：综合考虑矿区的水文地质条件、污染物类型、污染特征、技术适用条件等，通过科学合理的技术筛选与设计，规范废弃矿山酸性涌水污染修复与风险管控工作的开展。

(2) 可行性原则：制定废弃矿山酸性涌水污染修复与风险管控技术方案应优选成熟、可靠的技术。

(3) 经济性原则：在保障废弃矿山酸性涌水污染修复与风险管控效果的前提下，优先选择成本低的工艺。

4.3 技术路线

废弃矿井酸性涌水治理工作程序启动后，首先通过前期调查与风险评估结果确定修复或风险管控目标污染物，根据废弃矿井所处区域周边敏感目标类型确定修复目标值。然后开展修复与风险管控技术适用性与经济可行性分析，筛选适宜的修复与风险管控技术。依据技术筛选结果，编制备选技术方案，制定技术路线、确定工艺参数、设计工程内容、估算费用和周期，比选确定合适的技术方案。工程实施期间，开展工程建设运行维护、运行监测、运行状况分析等。工程结束后，开展修复与风险管控效果评估。

5 主要技术内容及依据

指南共 9 章，包括范围、规范性引用文件、术语和定义、工作程序、修复与风险管控目标及范围确定、污染修复与风险管控技术筛选、编制修复与风险管控技术方案、修复与风险管控工程建设运行与监测、污染修复与风险管控效果评估。

5.1 适用范围

本章明确了指南的适用范围。

5.2 规范性引用文件

本章列出了规范性引用的标准、技术规范和工作指南等。

5.3 术语和定义

本指南包括下列术语和定义

(1) 矿井 mine

由于矿产资源地下开采而形成的竖井、斜井、平硐等矿山井筒的统称。

说明：该术语引用《废弃井封井回填技术指南（试行）》（环办土壤函

〔2020〕72号)的定义,并有修改。

(2) 矿井涌水 mine inflow water

在矿山开采过程中,从岩层、裂隙、老空区等进入矿井的地下水、地表水及大气降水等的总称。

说明: 该术语根据矿井排水来源特征进行描述。

(3) 废弃矿井 abandoned mine

因资源枯竭、政策调整、非法开采被取缔、采矿权到期未续等各种原因,不再进行生产经营活动,被放弃使用的矿井。

说明: 该术语根据废弃矿井特征进行描述。

(4) 地下水污染羽 groundwater contaminant plume

污染物随地下水移动从污染源向周边移动和扩散时所形成的污染区域。

说明: 该术语来源于《污染地块地下水修复和风险管控技术导则》(HJ 25.6-2019)的定义。

(5) 酸性矿山排水 acid mine drainage (AMD)

含硫或硫化物的矿石和矿山废料暴露在空气中氧化产生的排水,通常呈酸性,含高浓度硫酸盐和重(类)金属。

说明: 术语来源于美国环境保护署发布的《矿山废物管理》(1991)的定义。

(6) 地下水治理修复 groundwater remediation

采用物理、化学或生物的方法,降解、吸附、转移或阻隔地下水中的

污染物，将有毒有害的污染物转化为无害物质，或使其浓度降低到可接受水平，或阻断其暴露途径，满足相应的地下水环境功能或使用功能的过程。

说明：该术语来源于《污染地块地下水修复和风险管控技术导则》（HJ 25.6-2019）的定义。

（7）地下水风险管控 groundwater risk control

采取修复技术、工程控制和制度控制措施等，阻断地下水污染物暴露途径，阻止地下水污染扩散，防止对周边人体健康和生态受体产生影响的过程。

说明：该术语来源于《污染地块地下水修复和风险管控技术导则》（HJ 25.6-2019）的定义。

（8）制度控制 institutional control

通过制定和实施条例、准则、规章或制度，减少或阻止人群对污染物的暴露，防范和杜绝地下水污染可能带来的风险和危害，利用管理手段控制污染潜在风险。

说明：该术语来源于《污染地块地下水修复和风险管控技术导则》（HJ 25.6-2019）的定义。

（9）工程控制 engineering control

采用阻隔、堵截、覆盖等工程措施，控制污染物迁移或阻断污染物暴露途径，降低和消除地下水污染对人体健康和生态受体的风险。

说明：该术语来源于《污染地块地下水修复和风险管控技术导则》（HJ 25.6-2019）的定义。

(10) 修复极限 remediation asymptotic condition

修复工程进入拖尾期后，在现有的技术水平、合理的时间和资金投入条件下，继续进行修复仍难以达到修复目标的情况。

说明：该术语来源于《污染地块地下水修复和风险管控技术导则》(HJ 25.6-2019) 的定义。

5.4 工作程序

废弃矿井酸性涌水治理工作程序共 5 个阶段，包括修复与风险管控目标确定阶段、污染修复与风险管控技术筛选阶段、修复与风险管控技术方案编制阶段、污染修复与风险管控工程建设与运行监测阶段、污染修复与风险管控效果评估阶段。

5.5 修复与风险管控目标及范围确定

5.5.1 目标污染物及范围确定

主要根据废弃矿井所处区域前期地下水环境状况调查和风险评估结果，分析污染特征和风险特征，当污染物已经对周边环境或人体健康构成风险或具有潜在风险时，确定其为修复或风险管控的目标污染物。将地下水中目标污染物浓度超出修复目标值的空间范围作为地下水修复与风险管控的范围。

5.5.2 确定修复目标值

(1) 地下水型饮用水水源保护区和补给区

当废弃矿井地下水污染羽包括地下水型饮用水水源保护区和补给区，包括在用、备用和应急水源以及在建或规划的地下水型饮用水源，选择

GB/T 14848 中Ⅲ类限值作为修复目标值。对于 GB/T 14848 未涉及的目标污染物，按照饮用地下水的暴露途径计算地下水健康风险评估风险控制值，风险控制值按照《地下水污染健康风险评估工作指南》（环办土壤函〔2019〕770 号）计算。采用风险评估计算修复目标值时，单种污染物可接受的非致癌危害商为 1，可接受的致癌风险水平为 10^{-6} 。当上述方法确定的修复目标值低于地下水环境背景值时，可选择背景值作为修复目标值。

（2）地表水体等敏感目标

当废弃矿井地下水污染羽包括地表水体等敏感目标补给区，根据地表水体等敏感目标的水质要求，确定修复目标值。水质目标参照 GB3838 或其他标准确定，对于国内标准未涉及的污染物，可参考欧盟、世界卫生组织及美国环境保护署发布的相关标准确定。矿井涌水处理后的排水水质可参考 GB 20426 或其他相关排放标准。

（3）其他区域

当废弃矿井地下水污染羽包括具有工业或农业用水等使用功能的区域，根据其水质功能要求（参考 GB/T 14848、GB 3838 或 GB 5084），确定修复目标值。对于已有标准未涉及的目标污染物，根据《地下水污染健康风险评估工作指南》（环办土壤函〔2019〕770 号），采用地下水健康风险评估方法计算地下水风险评估风险控制值。对于地下水无使用功能的区域，可选择地下水环境背景值作为修复目标值。

5.5.3 确定风险管控目标

当废弃矿井地下水污染羽包括集中式地下水型饮用水源（包括已建成

的在用、备用和应急水源，在建或规划的地下水型饮用水源）保护区及补给区时，要同步制定风险管控目标，目标至少包括阻断地下水污染物暴露途径、阻止污染扩散的内容。

经评估认为按当前所有可行的技术方案实施后均无法达到修复目标值时，允许制定地下水风险管控指标作为地下水修复的阶段目标。

根据《地下水污染健康风险评估工作指南》（环办土壤函〔2019〕770号），采用地下水健康风险评估方法计算地下水风险评估风险控制值时，需同步制定风险管控目标。

5.6 污染修复与风险管控技术筛选

污染修复与风险管控技术筛选在废弃矿井酸性涌水治理中尤为关键，影响修复与风险管控目标的实现。在此阶段，主要根据技术适用性和经济可行性分析、筛选、确定修复与风险管控技术。

常用的修复与风险管控技术包括3类，源头预防技术、过程阻断技术和末端治理技术，可采用一种或多种技术联用。源头预防技术通过对酸性矿井涌水的地表集中补给通道、地层裂隙和溶隙等优势导水通道的注浆封堵、矿井补给水的清污分流，有效减少涌水量。过程阻断技术通过在矿井中对污染矿井水中污染物的阻截，或对污染矿井水的封闭、抽出，减少矿井水中的污染物总量。末端处理技术通过对矿井涌水的处理，使其达到相应的水质标准。

需要对现有的源头防控技术、过程阻断技术，以及末端治理技术进行深入的研究，掌握各种技术的主要技术原理、适用范围以及优缺点，结合

区域实际情况，开展技术适用性和经济可行性分析。

（1）技术适用性分析

根据废弃矿井所在区域地质条件、水文地质条件、污染特征、施工条件等，开展技术适用性分析。

（2）经济可行性分析

根据技术投入使用所需前期费用、材料费用、施工费用、监测和运行维护费用等，开展经济可行性分析。

根据技术适用性分析和经济可行性分析结果，筛选确定适宜的修复与风险管控技术。

5.7 编制修复与风险管控技术方案

根据所确定的修复与风险管控技术，编制备选技术方案，方案包括制定技术路线、确定工艺参数、设计工程内容、估算费用和工程周期，通过对备选技术方案进行比选，包括主要技术指标、工程费用、环境及健康安全等，确定技术方案。同时，制定环境管理计划，包括二次污染防治措施、环境监测计划、环境应急安全计划等。

5.8 修复与风险管控工程建设运行与监测

污染修复与风险管控工程建设与运行监测阶段，包括工程建设运行维护、运行监测和运行状况分析等。根据矿井所处区域地质与水文地质条件、矿井涌水情况、地下水污染特征和采用的修复与风险管控技术，布设监测井，对地下水水位、水质、工程性能指标、二次污染物及其他监测指标等开展监测，以掌握工程运行状况。获取工程运行监测数据后，开展趋势预

测和运行状况分析，用以分析修复与风险管控措施的技术有效性、目标可达性和经济可行性等。

5.9 污染修复与风险管控效果评估

通过开展资料回顾、现场踏勘和人员访谈等工作，更新污染修复与风险管控工程实施后的概念模型。参照 HJ 25.5、HJ 25.6、GB/T 14848、GB 3838 和 GB 20426 等相关标准内容，对废弃矿井涌水污染修复与风险管控工作开展效果评估。通过判断工程性能指标和污染物指标是否达到评估标准，判断风险管控是否达到预期效果；根据地下水与地表水检测指标是否持续稳定达标，判断是否达到修复效果。对于地下水修复，若目标污染物浓度未达到评估标准，但判断地下水已达到修复极限，可在实施风险管控措施的前提下，对残留污染物进行风险评估。实施风险管控的区域，同时开展后期环境监管。

（1）采样持续时间和频次

采样时间和频次参照《污染地块地下水修复和风险管控技术导则》（HJ 25.6）。

（2）布点数量及位置

布点位置及数量参照《污染地块地下水修复和风险管控技术导则》（HJ 25.6）。

（3）检测指标

检测指标包括地下水指标和地表水指标，地下水检测指标为修复技术方案中确定的目标污染物，在测定地表水目标污染物的同时，要准确测定

采样时段的地表水流量。

(4) 现场采样与实验室检测

地下水样品采集、保存与流转参照 HJ 164 执行。地表水样品采集、保存与流转参照 HJ/T 91、HJ 493 执行。

检测分析方法优先选用国家或行业标准方法，尚无国家或行业标准分析测试方法时，可选用行业推荐分析测试方法或等效分析测试方法，并参照 HJ 168 进行方法确认和验证。

(5) 达标判断

通过判断工程性能指标和污染物指标是否达到评估标准，判断风险管控是否达到预期效果；根据地下水与地表水检测指标是否持续稳定达标，判断是否达到修复效果。

(6) 残留污染物风险评估

残留污染物风险评估参照《污染地块地下水修复和风险管控技术导则》（HJ 25.6）。

6 标准实施建议

本指南实施后，建议做好培训和宣传解读，推进指南的运用，服务好四川省废弃矿井酸性涌水治理工作。并根据指南实施情况，适时对指南进行修订和更新。

7 参考文献

- [1] Kleinmann B. Special Issue: Mine Water and Innovative Thinking-Invited Articles based on the best papers at the 2010 IMWA Sympos

- ium Introduction[J]. *Mine Water and the Environment*, 2011, 30(2): 81-81.
- [2] Stephens K, et al. Characteristics of Wetland Soils Impacted by Acid Mine Drainage[J]. *Southeastern Naturalist*, 2015, 14: 40-57.
- [3] Sencindiver J C, Bhumbla D K. Effects of cattails (*Typha*) on metal removal from mine drainage[J]. *Mine drainage and surface mine reclamation*, 1988: 359-366.
- [4] Kepler D A, McCleary E C. Successive alkalinity-producing systems (SAPS) for the treatment of acidic mine drainage[J]. *US bureau of mines special paper SP 06A-94*, Pittsburgh, PA, 1994: 195-204.
- [5] Hedin R S, Narin R W, Kleinmann R. Passive treatment of coal mine drainage. Information circular[J]. *us bureau of mines ic washington*, 1994: 9389.
- [6] Skousen J, Rose A, Geidel G, Foreman J, Evans R, Hellier W et al. Handbook of technologies for avoidance and remediation of acid mine drainage[M]. Morgantown: National Mine Land Reclamation Center, 1998: 131.
- [7] Sikora F J, Behrends L, Brodie G A, Bulls M J. Manganese and trace metal removal in successive anaerobic and aerobic wetlands[J]. *Proceedings of the American society for surface mining and reclamation*, Knoxville, TN, 1996: 560-579.

- [8] Robbins E I, Brant D L, Ziemkiewicz P F. Microbial, algal and fungal strategies for manganese oxidation at a Shade Township coal mine, Somerset County, PA[J]. Proceedings of the 16th ASMR, Scottsdale, AZ, 1999: 634-640.
- [9] Younger P L, Banwart S A, Hedin R S. Mine water: hydrology, pollution, remediation[M]. Boston: Kluwer Academic Publication, 2002: 464.
- [10] Skousen J, Zipper C E, Rose A, et al. Review of Passive Systems for Acid Mine Drainage Treatment[J]. Mine Water and the Environment, 2017,36(1):133-153.
- [11] Skousen J G, Ziemkiewicz P F, McDonald L M. Acid mine drainage formation, control and treatment: Approaches and strategies[J]. The Extractive Industries and Society, 2018:241-249.
- [12] Park I, Tabelin C B, Jeon S, et al. A review of recent strategies for acid mine drainage prevention and mine tailings recycling[J]. Chemosphere, 2019, (MAR219):588-606.
- [13] Baena-Moreno F M, Rodriguez-Galan M, Arroyo-Torralvo F, et al. Low-Energy Method for Water-Mineral Recovery from Acid Mine Drainage Based on Membrane Technology: Evaluation of Inorganic Salts as Draw Solutions[J]. Environmental Science And Technology, 2020, 54(17):10936-10943.

- [14] Acharya B S, Kharel G. Acid Mine Drainage from Coal Mining in the United States -An Overview[J]. Journal of Hydrology, 2020:125061.