

西南地区煤矿酸性矿井水产生机理及低成本处理技术研究

杨 飞, 黄晶晶

中煤科工重庆设计研究院(集团)有限公司, 重庆

收稿日期: 2026年7月10日; 录用日期: 2026年8月15日; 发布日期: 2026年8月25日

摘 要

西南地区是我国高硫煤矿集中分布区, 长期采矿活动产生的酸性矿井水对区域生态环境构成严重威胁。本文系统分析了西南地区酸性矿井水的水质特征与形成机理, 梳理评价了各类低成本处理技术的适用性, 并结合典型治理案例提出了区域适配的技术方案。结果表明西南地区酸性矿井水呈现“三高一低”的典型特征, 其形成是黄铁矿化学氧化与微生物催化耦合作用的结果; 石灰石中和法、人工湿地等低成本技术在西南地区具有良好的适用性, “主动治理 + 被动治理”的组合模式可在保证处理效果的同时显著降低运行成本。研究成果可为西南地区废弃煤矿酸性矿井水污染治理提供理论依据和技术参考。

关键词

煤矿, 酸性矿井水, 产生机理, 处理技术

Generation Mechanism and Low-Cost Treatment Technology of Acidic Mine Water in Coal Mines of Southwest China

Fei Yang, Jingjing Huang

Middling Coal Technology & Industry Chongqing Design & Research Institute (Group) Co., Ltd., Chongqing

Received: July 10, 2026; accepted: August 15, 2026; published: August 25, 2026

Abstract

The southwestern region of China is home to a high concentration of high-sulfur coal mines, and the acidic mine water generated by long-term mining activities poses a serious threat to the regional ecological environment. This paper systematically analyzes the water quality characteristics and

formation mechanisms of acidic mine water in the southwestern region, reviews and evaluates the applicability of various low-cost treatment technologies, and proposes regionally tailored technical solutions based on typical remediation case studies. The results indicate that acidic mine water in the Southwest exhibits the typical characteristics of “three highs and one low,” and its formation results from the coupled effects of the chemical oxidation of pyrite and microbial catalysis. Low-cost technologies such as limestone neutralization and constructed wetlands are well-suited for the Southwest region, and a combined “active treatment + passive treatment” approach can significantly reduce operating costs while ensuring treatment effectiveness. These research findings provide a theoretical basis and technical reference for the remediation of acidic mine water pollution in abandoned coal mines in the Southwest region.

Keywords

Coal Mines, Acidic Mine Water, Formation Mechanisms, Treatment Technologies

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

煤炭开采过程中,一方面为保证采矿安全,需要对矿井排水和对地下含水层进行预先的人工疏干;另一方面采用形成的导水裂隙带会对煤系含水层产生自然疏干,这就造成水资源的浪费[1]。煤矿酸性矿井水是煤矿开采过程中的一大污染源,不仅腐蚀管道设备、破坏混凝土结构,排入水系后还会消耗水中溶解氧、降低水体自净能力、妨碍水生生物生长[2]。在我国西南地区,这一问题尤为突出。西南及周边地区煤炭储量约占全国的 11.78%,其中贵州省资源储量占区域储量的 55.1%。由于早期地方无序和不合理的开采,煤矿酸性矿井水已成为煤矿区最主要的污染源[3]。

酸性矿井水是由黄铁矿在水和氧气共同作用下产生的一种由物理、化学、生物等多因素共同影响而产生的复杂化学反应[4]。传统的处理方法存在着能耗高,占地大,操作费用高的问题。近年来,处理理念正从高能耗的“主动治理”向低能耗的“被动治理”转变[5]。因此,本文针对我国西南矿区的酸性矿山废水,通过对其水质特性及形成机理的系统剖析,对各种低成本处理技术的适应性进行梳理与评估,从而为矿区酸性矿山水体污染的治理提供理论支持。

2. 西南地区煤矿酸性矿井水污染特征与形成机理

2.1. 区域污染特征与水质特殊性

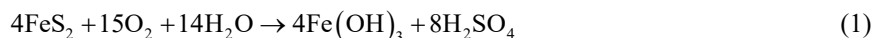
西南地区(云、贵、川、渝)是我国高硫煤的主要分布区域,川、黔、渝等地的高硫煤矿集中分布在该区的上二叠世龙潭组、吴家坪组[6]。由于早期无序开采,酸性矿井水已成为最主要的污染源。

酸性矿井水在全国普遍存在, pH 值多在 2~5 之间, SO_4^{2-} 、Fe、Mn 等含量高[7]。就西南地区而言,废弃矿井涌水呈现“三高一低”特征,即高浓度铁、铝、硫酸盐和低 pH 值[8]。贵州煤矿排水典型特征为 pH 值低、Fe 和 SO_4^{2-} 浓度高[9]。川东华蓥山废弃煤矿群研究表明,酸性矿井水水化学类型主要为 $\text{SO}_4\text{-Ca}$ 和 $\text{SO}_4\text{-Na}$ 型,其形成主要受黄铁矿氧化还原反应控制。西南地区酸性矿井水体污染具有其独特的特征,其与喀斯特地形有着紧密的联系。岩溶裂隙-管道系统发达,地表水和地下水联系紧密,污染物在岩溶发育过程中容易扩散。酸性水污染与降水引起的地下水位变化有很大关系,在旱季时,污染物会积

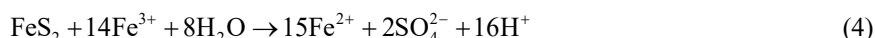
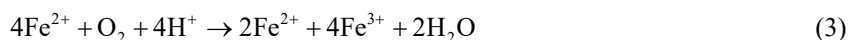
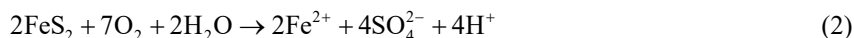
累起来, 而在雨季则会加快, 这使得污染具有长期性和突发性, 因此, 处理起来更加困难。

2.2. 酸性矿井水形成的化学机理

黄铁矿(FeS_2)的氧化是酸性矿井水生成的关键。黄铁矿产于煤层及其围岩中, 受空气、水等因素的影响, 会产生一系列的氧化作用。与其伴生的有害物质, 如重金属, 也随之被释放。总反应方程, 见式(1)。



FeS_2 的氧化过程可分为化学氧化和生物氧化, 见式(2)~(5)。



式(2)是以 O_2 作为氧化剂, 是 FeS_2 氧化的初始过程; 式(3)是 FeS_2 氧化速率的限制步骤, 因为 Fe^{2+} 在酸性条件下不易被氧气氧化成 Fe^{3+} , 但体系中若存在嗜酸性微生物例如氧化亚铁硫杆菌(*Acidithiobacillus ferrooxidans*), Fe^{2+} 的氧化速率在微生物的催化作用下可提高 6 个数量级; 式(4)是以 Fe^{3+} 作为 FeS_2 氧化的电子受体, 其反应速率高于反应(2); 式(5)是 Fe^{3+} 的水解过程。

2.3. 微生物在酸性矿井水形成中的关键催化作用

嗜酸性氧化亚铁硫杆菌(*Acidithiobacillus ferrooxidans*, A.f 菌)在黄铁矿氧化反应中具有无可替代的催化功能。它是一种以 Fe^{2+} 和还原硫化物为能源的化能自养细菌, 在 pH 小于 3 的酸性条件下仍然具有较高的代谢能力。

A.f 菌的催化作用体现为两种机制。其一为非接触间接氧化: 细菌将 Fe^{2+} 快速氧化为 Fe^{3+} , 后者再攻击黄铁矿表面, A.f 菌可将酸性条件下 Fe^{2+} 的化学氧化速率提高 5~6 个数量级。其二为接触氧化, 细菌直接附着于黄铁矿表面, 通过细胞膜电子传递系统加速矿物晶格破坏。充足营养条件下, 细菌活性增强, Fe^{2+} 生物氧化及次生铁矿物合成加快, 使溶液 pH 进一步降低[10]。西南地区气候温暖、潮湿(年平均温度 15~20℃)适宜该菌的繁衍。微生物催化是酸性矿井水由缓慢酸化到急劣转化的重要促进因素。

2.4. 西南地区酸性矿井水形成与演化的概念模型

基于化学氧化与微生物催化机理, 结合西南地区特殊的喀斯特水文地质条件, 可构建酸性矿井水“污染源识别-迁移路径-受纳水体”的全过程概念模型。

污染源有三种, 采空区、废石堆场、尾矿库。采空区是产生酸性水的主要场所, 在采矿过程中, 黄铁矿受到大气的影响而被氧化; 废石堆场和尾矿库由于长期裸露于地面, 在雨水的冲刷下, 不断地生成酸浸液。

迁移路径随地质条件的不同而变化。喀斯特发育区的酸性水, 除了通过开采的裂缝、孔隙等缓慢地渗入, 更主要的是沿着岩溶管网进行迅速地运移。已有研究发现, 旱季时, 污染物质主要在裂隙-管道网络和采空区中富集, 而雨季暴雨促进了优势通道内污染物的释放[11]。

酸性矿井水排出地面后流入江河, 造成地面径流的污染, 而长期饮用被污染的水源会引起土壤中的重金属富集。另外, 关闭矿井停采后, 地下水迅速反弹, 并携带有氧化产物的地下水沿着井眼等密闭差的孔道, 形成串层污染, 并向深部渗透[12]。

我国西南地区酸性矿井水污染总体呈现“开采期氧化累积-闭坑后水位反弹溶出-涌出地表扩散污

染”三阶段演变规律。建立了一套完整的酸性水发生-扩散过程的概念模型,为下一步有针对性地处理提供了理论基础。

2.5. 喀斯特地貌水文地球化学特征对酸性矿井水形成与迁移的影响

西南地区广泛发育的喀斯特地貌对酸性矿井水的形成速率、迁移路径及中和过程具有显著影响,主要体现在以下三个方面。

2.5.1. 碳酸盐岩对 AMD 的中和与缓冲作用

西南喀斯特地区碳酸盐岩广泛分布,当酸性矿井水与碳酸盐岩接触时,碳酸盐岩对酸性矿山废水(AMD)具有一定的中和与缓冲作用。周文龙等指出,重安江流域皮陇河源头区“地处碳酸盐岩发育区,岩溶作用极其发育大大增加了 AMD 治理难度”[13]。李博等研究表明,碳酸盐岩类围岩能在一定程度上中和硫化物矿床开采形成的酸性矿山废水,从而降低酸性废水及重金属的污染危害[14]。然而,这种中和作用具有两面性,一方面,碳酸盐岩的溶解可消耗部分 H^+ ,使 AMD 的 pH 有所升高;另一方面,中和反应产生的 Ca^{2+} 与 SO_4^{2-} 结合生成微溶性的 $CaSO_4$ 沉淀,容易在裂隙和管道表面形成包裹层,阻碍后续中和反应的进行。

2.5.2. 岩溶管道系统的优先流效应对污染物迁移的加速

喀斯特地区岩溶裂隙-管道系统高度发育,地表水与地下水之间水力联系紧密,酸性污染物可通过岩溶管道快速长距离迁移。李思南等人研究表明,地表径流、大气降水以及酸性矿山水多种端元水混合后通过落水洞进入岩溶管道,管道水流通顺畅、流速较快,最终排泄到地表河流中[15]。于春勇、任虎俊揭示了喀斯特岩溶地质特征导致的复杂污染机理,指出煤层开采导致底板破坏、裂隙发育导通了下部岩溶通道,进而矿井废水混入岩溶泉造成污染[16]。

2.5.3. 喀斯特地区 AMD 污染的特殊治理难点

喀斯特地区含水层具有高度的空间异质性,岩溶洼地、落水洞、地下岩溶管道等发育强烈,加之采矿活动对地层的破坏,形成了极为复杂的水力通道,给 AMD 污染治理带来特殊困难。

由于不同闭坑煤矿酸性水污染模式存在差异,治理模式往往较为宏观笼统,导致治理效果不佳、投资成本偏高。任虎俊等以贵州省鱼洞河流域闭坑煤矿为例,通过统计 25 处污染点,系统确定了喀斯特地区闭坑煤矿酸性水污染模式,为制定针对性治理方案提供了依据[17]。喀斯特地区具有降雨丰沛、地表岩溶发育等特征,单一或传统的勘查技术往往难以达到查明目的,无法科学指导治理工作。李仁启等采用资料收集、地质及水文地质测绘、物探、钻探、水质分析、地下水动态长观等综合手段,才得以深入查明岩溶大泉形成及水质污染成因[18]。研究表明,矿井水的污染迁移途径主要有两种:一是矿井水沿采空区和平硐直接排出地表,二是通过采空区和下部岩溶裂隙进入深部岩溶地下水。在岩溶管道系统中,酸性矿山水可通过落水洞进入岩溶管道,管道水流通顺畅、流速较快,污染物可迅速扩散至下游[19]。由于污染源与受纳水体之间往往缺乏明显的过滤和衰减途径,污染物质可沿岩溶通道快速长距离迁移。因此,在喀斯特发育区开展 AMD 治理,必须首先查明岩溶含水层与采空区之间的水力联系及地下水运动规律。

3. 酸性矿井水低成本处理技术分析评价

3.1. 处理理念转变与西南地区的技術需求

酸性矿井水的末端治理技术可分为“主动治理”与“被动治理”两大类[20]。主动治理依赖外部能源和化学药剂的持续投加,主要包括中和法、吸附法、膜技术等。该类技术处理效率高、出水水质好,但面临着化学品和能源持续供应、维护成本高等固有局限性。被动治理则依靠自然物理、化学和生物过程

实现污染物的去除, 主要包括人工湿地、石灰石沟排水法等。该类技术运行和维护成本低, 但治理周期较长、系统需及时翻新。从国际发展趋势看, 酸性矿井水治理正从高能耗、高维护的“主动治理”向低能耗、低维护的“被动治理”转变。主动处理系统在矿山运营期间应用较多, 而进入闭坑期后, 低成本的自然过程更具优势。

尤其是在我国西南地区, 更是急需一种低成本污水处理技术。据四川省生态环境厅公告, 四川省广元市旺苍县已关闭和废弃的 87 家煤矿共有井口达 434 个这些矿井分布分散, 位置偏远, 经济基础薄弱, 很难支持高成本的主动治理设备的长期运转。根据《废弃矿井酸性涌水治理技术指南》(DB51/T 3328—2025)¹, 要形成兼具技术可行性、环境协调性与经济合理性的区域特色技术路径。为此, 针对我国西南废弃矿井点多面广, 治理资金有限的现状, 开展低成本、低维护的被动治理技术和“主动 + 被动”相结合的治理方式, 是解决酸性矿井水可持续治理的必由之路。

3.2. 低成本化学与物理处理技术

低成本化学与物理处理技术的核心思路为, 利用天然廉价材料替代外购药剂, 或利用工业废渣“以废治废”。

石灰石中和法是目前使用最多、成本低廉的一种工艺。石灰石来源广泛, 贵州的实际应用证明, 该工艺在生产过程中, 不需投加药剂, 出水 pH 值平均值为 5.99 [21]。然而, 该方法具有一定的局限性, 即在过滤过程中产生的可溶性 CaSO_4 容易被吸附在滤料表面, 造成钝化; 出水中 pH 值很难稳定(6~9); 二价铁的脱除效率不高。所以, 在对强酸水进行预处理时, 宜采用石灰石中和方法, 在 pH 升高到弱酸性时, 再与下一步过程结合。

分散碱性基质法是对传统的石灰石工艺的改进。将石灰石和锯末等有机物掺入, 利用其疏松的结构提高孔隙, 防止沉积物包覆钝化。该工艺处理铝的去除率为 98.58%, 铁的去除率为 51.51%, 设备简单, 运行可靠[22]。

“以废治废”技术是另一重要路径。粉煤灰含有 CaO 、 MgO 等碱性氧化物, 兼具中和与吸附双重功能; 经 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 助熔焙烧改性后对 Fe 、 Mn 去除率可达 99%以上。赤泥为氧化铝生产废弃物的多孔碱性废渣, 可通过物理吸附、表面络合、离子交换和絮凝沉淀去除重金属。钢渣同样具有碱度和吸附性能, 对 Fe^{2+} 去除率最高可达 98.72%。

吸附法与膜技术为可选物理方法。膨润土等天然黏土矿物可吸附重金属; 膜技术处理效果好, 但一次性投资大、膜易污染, 限制了其在西南欠发达矿区的推广。

综上, 石灰石中和法利用西南地区丰富的石灰岩资源可大幅降低成本, 分散碱性基质法有效缓解滤料钝化, 粉煤灰、赤泥、钢渣等工业废渣则实现“以废治废”的双重效益。这些技术的共同特点是材料易得、操作简便、运行费用低, 与西南地区废弃矿井分散、经济基础薄弱的现状高度契合。

3.3. 低成本生物与生态处理技术

低成本生物与生态处理技术以自然生态系统的自净能力为核心, 主要包括人工湿地和硫酸盐还原菌(SRB)生物处理两大类, 具有运行成本低、管理方便、无二次污染等优势。

人工湿地是一种利用基质过滤、植物吸收和微生物降解相结合的方法来去除水体中的污染物的方法。吴艾静等人的研究显示, 矿井开采结束后, 酸性矿井水可以持续产生数百年, 因此迫切需要一种既经济又有效的处理方法[23]。

¹<https://sthjt.sc.gov.cn/sthjt/c103963/2026/4/3/871c389d9d9d485aaebc96d890499558.shtml>

硫酸盐还原菌(SRB)生物处理技术的原理为, SRB 在厌氧条件下将 SO_4^{2-} 还原为 S^{2-} , 同时产生碱度; 生成的 S^{2-} 可与重金属离子生成极难溶的硫化物沉淀, 实现硫酸盐和重金属的双重去除。李萌晓等综述指出, 以 SRB 为主导的微生物法具有成本低、效果好及环境友好的优势[24]。SRB 处理效果受碳源、温度、pH 等因素影响, 实际应用中可利用玉米秸秆等农业废弃物制备缓释碳源, 进一步降低成本。近年来, SRB 固定化技术的开发, 采用聚乙烯醇-硼酸包埋法, 以 SRB 污泥、麦饭石、铁屑、玉米芯等为主要基质材料制作 SRB 固定化颗粒, 有效提高了 SRB 的处理效率和稳定性[25]。

这两种方法在西南地区有较大的应用价值。在温暖潮湿的气候条件下, 植物生长期较长, 处理效率较高; 农业废弃物资源丰富, 能为 SRB 提供便宜的碳源; 在山地自然地形条件下, 采用重力布水, 减少能源消耗。

3.4. 低成本组合工艺设计思路

单一处理技术难以同时满足酸性矿井水对酸度、硫酸盐、重金属等多重污染物的去除要求, 且各自存在局限性。石灰石中和法无法将 pH 提升至排放标准、人工湿地处理周期长、SRB 对水质敏感。因此, 分级处理、多技术组合是低成本酸性矿井水治理的必然选择。

分级处理的核心思路是依据水质特征将处理过程划分为若干阶段, 各阶段选用最适宜的低成本技术, 逐级削减污染物负荷。基本原则为源头粗调 + 过程精处理 + 末端生态兜底。在源头阶段, 针对 $\text{pH} < 3$ 的强酸性水, 优先采用石灰石中和或分散碱性基质法将 pH 提升至 5~6, 降低后续处理负担。在主体处理阶段, 根据水质目标选择处理工艺: 若以去除 Fe、Mn 等金属离子为主, 可采用曝气氧化 + 沉淀组合; 若以去除 SO_4^{2-} 和重金属为主, 可选用 SRB 生物反应器。在末端深度净化阶段, 利用人工湿地的多重协同效应实现污染物的进一步去除和生态修复。具体处理技术路线见图 1。

典型的低成本组合模式包括, “石灰石中和 + 人工湿地”组合, 即石灰石预处理将强酸性水调至弱酸性, 人工湿地完成深度净化; “分散碱性基质 + 曝气 + 湿地”组合, 分散碱性基质中和酸度、曝气促进 Fe^{2+} 氧化、湿地实现最终净化; “主动治理 + 被动治理”组合, 源头区采用生石灰中和等主动措施快速降酸, 末端采用可渗透反应墙、沉淀池和生态湿地等被动措施逐级净化。

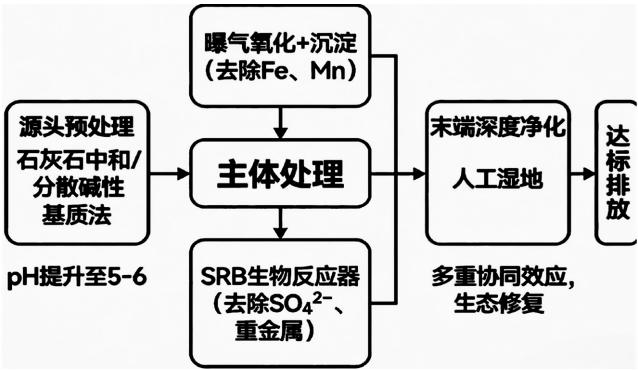


Figure 1. Roadmap for low-cost combined treatment technologies of acidic mine water

图 1. 酸性矿井水低成本组合处理技术路线图

4. 西南地区典型治理案例与低成本技术适用性分析

4.1. 贵州高硫煤矿区酸性矿井水综合治理案例

贵州省是我国西南高硫型煤矿资源富集区, 大量废弃矿井关闭后, 酸性矿井水不断向外排放, 对当

地的水环境产生了严重的影响。贵州近几年来在酸性矿井水治理上形成了几个有典型意义的治理实例。

(1) 重安江流域皮陇河源头区综合治理项目

贵州重安江皮陇河源头地区, 经过多年的露天开采, 雨水冲刷了煤矸石和矿坑中的高硫矿, 形成了大量的酸性污水。该区处于碳酸盐岩发育区, 酸性污水容易经岩溶管网迅速扩散, 处理起来十分困难。

治理团队采用“主动治理 + 被动治理”相结合的生态修复综合技术体系。在源头区采用主动治理技术: 使用生石灰对酸性水进行中和处理, 同时对煤矸石等尾矿进行无害化封存填埋, 修复相对隔水层以杜绝源头酸性水持续产生。在末端采用被动治理技术: 使用石灰石修筑可渗透反应墙、沉淀反应池、可渗透反应岸和人工生态湿地等工程, 对酸性水进行系统收集和逐级净化。治理效果显著, 关键水质指标变化见表 1。

Table 1. Comparison of water quality before and after remediation in the Pilog River headwater area of the Chong'an River Basin

表 1. 重安江流域皮陇河源头区治理前后水质对比

水质指标	治理前	治理后	净化率/%
pH 值	2.54~3.90	7.10~8.19	—
Fe/(mg·L ⁻¹)	137.51	0.24	97.76
Hg	超标	达标	—
Zn	超标	达标	—
As	超标	达标	—

数据来源: 根据资料整理。

治理后水体 pH 值由 2.54~3.90 提升至 7.10~8.19, 呈弱碱性; Fe 离子浓度由 137.51 mg/L 下降至 0.24 mg/L, 净化率达 97.76%; 重金属离子 Hg、Zn、As 等均得到有效净化。该治理项目无害化处理了废弃煤矸石堆 6 万方, 建成了日净化酸性废水 4000 吨的水体净化系统。

(2) 道真县平模山闭坑煤矿治理项目

道真县平模山闭坑煤矿是贵州省岩溶山区闭坑煤矿酸性废水治理的典型案列。该矿闭坑后酸性废水持续外排, 对下游水体和生态环境造成严重污染[26]。通过对矿区地表水与地下水的补、径、排关系及酸性废液的水质状况的综合分析, 采取主、被动两种方式, 建立“清污分流工程 + 酸性污水净化提升工程 + 人工湿地净化工程 + 复垦工程 + 附属工程”五位一体的综合治理体系。

工程竣工后末端水质监测结果见表 2。

Table 2. Water quality of effluent from Daozhen County's Pingmoshan Closed Mine after remediation

表 2. 道真县平模山闭坑煤矿治理后出水水质

监测指标	治理后浓度/(mg·L ⁻¹)	GB 20426-2006 排放限值/(mg·L ⁻¹)	达标情况
pH 值	6.42	6~9	达标
SO ₄ ²⁻	248	—	—
Fe	5.42	—	—
Mn	3.28	—	—
悬浮物	46.64	70	达标

数据来源: 根据资料整理。

上述 5 项关键指标均低于《煤炭工业污染物排放标准》(GB 20426—2006)²排放限值。在生态效益方面, 项目新增耕地面积 4800 m², 新增植被恢复面积 918 m², 流域保护长度达 9.8 km。

4.2. 四川硫铁矿综合治理案例

四川省叙永县落卜镇大树硫铁矿曾是全国五大硫铁矿生产基地之一。2001 年关停后, 该镇零散分布着 22 个大型矿渣堆场, 累计堆存量 637.8 万立方米; 废弃矿井持续涌出强酸性黄砷水, 水体 pH 极值约 2.5, 重金属严重超标, 常年直排入长江上游永宁河支流东门河³。

2012 年, 落卜片区硫铁矿矿山地质环境治理示范工程获批立项, 成为当年四川省唯一获财政部、原国土资源部批复落地的特大型矿山治理示范项目, 治理全域面积 15.068 平方公里, 分三期实施, 项目主体投资 18581.05 万元。2021 年起, 九三学社中央将落卜酸性涌水治理纳入长江生态环保民主监督重点, 推动总投资约 1.3 亿元的长江流域大树矿区复合污染生态系统整治项目落地。2024 年 9 月一期工程完工。治理后水质达标、荒山复绿, 整改于 2023 年 5 月通过省级验收。该项目在废渣资源化利用方面进行了积极探索, 利用矿渣进行土壤改良和工矿废弃地复垦, 以废治废, 既消除了污染源又盘活了闲置土地。

4.3. 西南地区低成本处理技术的适用性总结

综合上述机理分析与治理实践, 西南地区酸性矿井水低成本处理技术的选择应遵循以下原则。

(1) 因地制宜、分类施策

我国西南地区的地质情况存在着明显的差异。贵州中西部和云南东缘的碳酸盐岩发育区, 岩溶管道系统发达, 酸性水迁移速度快, 因此, 选择可渗透性反应墙、人工湿地等被动式治理方法具有重要意义。在喀斯特地区开展 AMD 治理, 必须首先查明岩溶含水层与采空区之间的水力联系, 并建立水动力场、水化学场自动化监测系统。在四川盆地周边碎屑岩区, 可以将石灰石中和技术与人工湿地相结合进行处理。对于涌水量较大、污染较重的集中矿区, 采取“主动治理 + 被动治理”相结合的方式; 对零散的废弃矿山, 应优先选择矿山封闭等源头防治技术。

(2) 充分利用本地材料与工业废渣

西南地区石灰岩资源丰富, 石灰石中和法可就地取材、大幅降低成本。火电厂粉煤灰、炼钢钢渣、铝厂赤泥等工业废渣来源充足, 用作中和剂或吸附剂可实现“以废治废”的双重效益。农业废弃物(秸秆、玉米芯等)可作为 SRB 处理的缓释碳源, 进一步降低运行成本。

(3) 强化源头控制与全过程管理

西南地区应坚持“源头减量 + 过程控制 + 末端治理”的系统思路: 优先采用清污分流减少酸性水生成量, 通过矿井封堵创造缺氧环境抑制黄铁矿氧化, 末端辅以低成本被动处理技术实现深度净化。对于新近闭坑以及尚未溢出 AMD 的废弃矿山, 亟需建立基于长期监测预警的地下水污染防控体系。

(4) 组合工艺是低成本治理的有效路径

单一技术难以同时满足多重污染物去除要求。推荐的低成本组合模式包括: “源头减量 + 过程控制 + 末端净化”, 清污分流减少补给量, 矿井封隔创造缺氧环境, 氧化沉淀提升 pH; “主动中和 + 被动生态净化”, 源头石灰中和快速降酸, 人工湿地深度处理。值得注意的是, 现有技术对酸性矿坑水高浓度硫酸盐、铁锰原位削减效率的稳定性与长效性仍然有限。未来应加强长期监测评估和技术长效性验证。上述治理实践表明, 因地制宜的组合工艺设计可在保证处理效果的同时实现低成本运行, 是西南地区酸

²https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/shjbh/swrwpfbz/200609/t20060908_92561.shtml

³四川在线. 世界环境日专题: 叙永县落卜镇矿山综合治理绘就长江上游生态答卷[EB/OL]. <https://luzhou.scol.com.cn/yqkt/202606/83266431.html>, 2026-06-05.

性矿井水可持续治理的有效路径。

5. 结语

西南地区煤矿酸性矿井水污染量大面广, 严重影响了当地的生态环境。本文通过对西南酸性矿山水体污染特征、形成机理、处理技术和处理方法的系统剖析, 建立西南地区酸性矿井水“三阶段演化”的概念性模式, 阐明化学氧化与微生物催化耦合作用下的酸生成机理, 评估石灰石中和法、人工湿地、SRB生物处理等低成本技术的适用性。在此基础上, 增加专门论述了喀斯特地貌水文地球化学特征对 AMD 形成速率、迁移路径及中和过程的影响, 指出碳酸盐岩溶蚀在 AMD 驱动的水文地球化学过程中起主导作用, 岩溶管道优先流效应显著加速了污染物的迁移与释放。通过对贵州重安江流域、道真县平模山、四川叙永县落卜镇等典型案例的分析, 提出“主动 + 被动”相结合的综合整治方式是目前我国西南地区酸性矿井水治理的有效路径。但目前该技术在工程中还存在着处理效率不稳定和长期运行稳定性差等问题。研究成果将促进我国西南地区酸性矿井水由“末端治理”转向“源头防控”, 达到矿山绿色、可持续恢复的目的。

基金项目

课题名称: 中煤科工重庆设计研究院(集团)有限公司自立科技重点项目: 低碳矿区建设关键技术及方法研究, 项目编码: 2025-04-07。

参考文献

- [1] 田华, 杨嘉懿, 韩强强, 等. 煤炭开采对地下水的影响预测[J]. 煤炭技术, 2021, 40(12): 110-114.
- [2] 任佳佳. 酸性矿井水形成及处理研究[J]. 环境保护前沿, 2021, 11(3): 492-496.
- [3] 李曦滨. 华南高硫煤分布区酸性矿井水形成的地质环境特征研究[J]. 中国煤炭地质, 2022, 34(S1): 7-11.
- [4] 陈宏坪, 韩占涛, 沈仁芳, 等. 废弃矿山酸性矿井水产生过程与生态治理技术[J]. 环境保护科学, 2021, 47(6): 73-80.
- [5] 李国东. 煤矿酸性矿井水达地表水准Ⅲ类标准处理工艺设计[J]. 中国给水排水, 2025, 41(16): 90-95.
- [6] 廖禄云, 杨在文, 杨放, 等. 西南地区硫铁矿和高硫煤矿 AMD 的环境问题及其治理对策[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2021, 48(6): 754-761.
- [7] 肖伟. 煤矿矿井水处理技术及资源化利用研究现状[J]. 煤化工, 2024, 52(2): 107-112.
- [8] 李青山, 杨广焱, 康小兵, 等. 川东华蓥山废弃矿井水化学特征及影响因素分析[J]. 四川环境, 2023, 42(3): 130-139.
- [9] Zhang, R., Wu, P., Ye, H. and Li, X. (2021) Hydrogeochemical Characteristics and Quality Assessment of Mine Water in Coalfield Area, Guizhou Province, Southwest China. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, **107**, 1087-1094. <https://doi.org/10.1007/s00128-021-03322-4>
- [10] 王鹤茹, 杨琳琳, 王蕊, 吴怡谦, 宋永伟. 基于不同能源底物和营养水平的酸性矿山废水产生机制研究[J]. 环境科学学报, 2021, 41(10): 4056-4063.
- [11] Hao, H., Hao, X., Chen, M., Li, X., Cao, X., Zha, X., *et al.* (2025) Towards Better Understanding of Intermittent Pollution Mechanism of Seasonal Karst Spring by Combining Hydrogeology, Hydrogeochemistry, and Rees Indication. *Journal of Hydrology*, **662**, Article 133873. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.133873>
- [12] 吴攀, 黄江浔, 李清光, 等. 废弃矿井水质演化生物地球化学机制及有价元素资源化利用综述[J]. 煤田地质与勘探, 2026, 54(5): 206-220.
- [13] 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.
- [14] 李博, 杨忠芳, 季文兵, 等. 典型岩溶区硫化物矿床——广西贵港锡基坑铅锌矿开采的生态效应[J]. 现代地质, 2020, 34(5): 957-969.
- [15] 李思南, 吴攀, 张翊鹏, 等. 贵州猴子沟煤矿区典型岩溶管道地球化学分析[J]. 地下水, 2017, 39(3): 1-3.

-
- [16] 于春勇, 任虎俊. 贵州省鱼洞河流域桃子冲岩溶泉污染现状及机理[J]. 中国煤炭地质, 2021, 33(11): 51-55+72.
- [17] 任虎俊, 陈亚洲, 王锋利. 喀斯特地区闭坑煤矿酸性水污染及治理模式研究[C]//中国环境科学学会环境工程分会. 中国环境科学学会 2019 年科学技术年会——环境工程技术创新与应用分论坛论文集(一). 北京: 《工业建筑》杂志社有限公司, 2019: 10-14.
- [18] 李仁启, 罗康生, 陆治斌, 等. 贵州省凯里市鱼洞岩溶大泉成因与水质污染研究[J]. 四川环境, 2023, 42(5): 118-127.
- [19] 胡德勇, 余浪, 牟远望, 等. 贵州龙里猴子沟岩溶山区废弃煤矿矿井水质特征及迁移途径分析[J]. 四川地质学报, 2025, 45(2): 274-278.
- [20] 车巧慧, 杜松, 张德高, 等. 煤矿酸性矿井水末端治理方法及应用研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(12): 339-351.
- [21] 康媿, 胡文, 陈守应. 煤矿酸性废水处理技术的应用研究[J]. 环境工程, 2012, 30(4): 46-47+69.
- [22] 李向东, 蔡洁莹, 冯启言, 等. 分散碱性基质法处理闭坑煤矿酸性矿井水试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(9): 160-165.
- [23] 吴艾静. 生物强化不同基质潜流人工湿地治理酸性老窑水的机理研究[D]: [博士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2023.
- [24] 李萌晓, 赵林, 陈达颖, 等. 硫酸盐还原菌处理酸性矿山废水的研究进展[J]. 应用化工, 2023, 52(12): 3439-3443+3448.
- [25] 狄军贞, 董艳荣, 安文博. 矿山酸性废水生物处理技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2024.
- [26] 陈鸿申, 赵爽, 田合利, 等. 闭坑煤矿酸性废水治理方法: 以贵州省道真县平模山闭坑煤矿为例[J]. 中国矿业, 2024, 33(11): 167-174.