

酸性矿山废水的环境影响及其治理技术： 研究进展与展望

王莹

辽宁大学环境学院, 辽宁 沈阳

收稿日期: 2025年2月7日; 录用日期: 2025年3月11日; 发布日期: 2025年3月20日

摘要

酸性矿山废水是矿区及周边地区面临的重大环境问题。酸性矿山废水是含硫矿石在采矿作业中产生的, 含硫矿石或废物暴露于水、氧气中, 在微生物存在下, 经一系列生物化学反应作用而形成的废水。其中大量硫化物和重金属离子的释放造成水体酸化, 直接破坏水环境平衡, 引起水生生态系统的剧烈变动, 加剧重金属迁移, 对土壤、地下水、农业生产构成威胁, 同时也给人类健康带来潜在风险。针对这一问题, 当前治理措施主要包括吸附处理、化学中和、微生物修复以及人工湿地等多种技术。本文梳理分析酸性矿山废水的生成机理、环境影响与治理技术, 为酸性矿山废水治理和可持续发展提供理论支持和辅助作用, 未来研究应聚焦于治理技术的可操作性、无害化、投入产出比, 以期实现技术的规模应用和长期效用。

关键词

酸性矿山废水, 环境影响, 治理技术, 回收利用

Environmental Impacts of Acid Mine Drainage and Its Remediation Technologies: Research Progress and Prospects

Ying Wang

School of Environment, Liaoning University, Shenyang Liaoning

Received: Feb. 7th, 2025; accepted: Mar. 11th, 2025; published: Mar. 20th, 2025

Abstract

Acid mine drainage (AMD) is a major environmental issue affecting mining areas and their

surrounding regions. It is generated during mining operations when sulfur-bearing ores or waste materials are exposed to water and oxygen, undergoing a series of biochemical reactions in the presence of microorganisms. The release of large amounts of sulfides and heavy metal ions leads to water acidification, directly disrupting aquatic environmental balance, causing severe disturbances to aquatic ecosystems, and accelerating heavy metal migration. This poses threats to soil, groundwater, and agricultural production while also presenting potential health risks to humans. To address this issue, current remediation measures mainly include adsorption treatment, chemical neutralization, microbial remediation, and constructed wetlands, among other technologies. This paper systematically analyzes the formation mechanisms, environmental impacts, and remediation technologies of AMD, providing theoretical support and guidance for AMD treatment and sustainable development. Future research should focus on the feasibility, environmental safety, and cost-effectiveness of treatment technologies to achieve large-scale application and long-term effectiveness.

Keywords

Acid Mine Drainage (AMD), Environmental Impacts, Remediation Technologies, Recycling

Copyright © 2025 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

酸性矿山废水(AMD, Acid Mine Drainage), 是煤矿开采过程导致围岩及矸石堆中含硫矿物暴露于空气中, 在硫细菌的参与下, 氧化形成酸性物质, 随地下水涌出的水体[1]。AMD 酸性低(pH 2.0~3.5), 富含 Fe^{2+} 、 SO_4^{2-} , 并溶解大量有毒金属元素(如 Al、Mn、Cd、Cr、As、Cu、Zn、Ni 等)。AMD 对生态环境的危害在国内外引起了广泛关注[2]。我国煤炭资源丰富, 但煤中含硫量高, 其中以黄铁矿硫为主, 很多丧失矿山主体的废弃煤矿产生的 AMD 不断向外排放, 总体呈现点多且分散, 污染面广的形势, 对周边土壤和受纳水体造成严重威胁, 不仅破坏水体自净能力, 威胁水生生物和人类健康, 还引发二次污染和生态系统退化[3]。煤矿开采过程和闭矿后产生的 AMD 排放是主要的 AMD 污染来源[4], 是我国突出的环境污染问题之一。

在治理技术方面, 现有方法大致可分为主动处理与被动修复两大类, 无论是化学中和、吸附分离, 还是微生物修复与人工湿地构建, 都存在成本高昂、效果不稳定、长期维护困难等实际问题, 其推广应用仍面临环境复杂性及经济性双重考验。

深入探讨酸性矿山废水的生成机理、环境影响及其治理技术, 有助于建立高效、经济和可持续的治理体系。本文梳理矿区酸性矿山废水产生与治理的相关研究, 分析其产生机理、环境影响和治理技术, 并展望酸性矿山废水治理技术研究的未来发展方向, 以为酸性矿山废水治理与生态保护提供理论支撑。

2. 酸性矿山废水研究现状

2.1. 酸性矿山废水的组成与性质

酸性矿山废水(Acid Mine Drainage, AMD)是煤或黄铁矿(FeS)以及其他硫化矿在采矿作业中产生的矿石或废物暴露于水、氧气中, 在微生物存在下, 经一系列生物化学反应作用而形成的酸性废水[5], 组成见表 1, 通常具有低 pH 值(pH: 1.5~6.0), 高盐度, 重金属(铁、铝、锰、镉、汞、铅、铜、锌、钙、镁、

锑、铀), 类金属(As)和硫酸盐含量高[6] [7]。AMD 不仅污染水质, 破坏水生生态系统, 而且侵蚀流域内土壤, 破坏土壤的结构和功能, 进一步威胁到植物生长, 造成极大的环境问题[8]。产生的 AMD, 通常在大型尾矿坝或废石蓄水池中收集和处置, 需要高成本和大面积的土地[9]。AMD 对环境具有长期影响, 且其所含有的重金属和其他毒素, 具有积聚在食物链中的可能, 对人体健康产生有害影响[10]。

Table 1. The main components of AMD
表 1. AMD 主要组成

pH	重金属	类金属	其他物质
1.5~6.0	Fe、Al、Mn、Cd、Hg、Pb、Cu、Zn、Ca、Mg、Sb、U	As	硫酸盐等

2.2. 酸性矿山废水的环境影响

酸性矿山废水通过降低水体 pH 值引发酸化作用, 直接破坏水体的化学平衡, 导致重金属等有害物质的溶出、迁移及沉淀, 从而扰动水生生态系统及其自净功能[11]。低 pH 环境不仅直接抑制敏感水生物种的生长, 且改变微生物群落的结构和功能, 削弱水域生态系统的营养循环和物质转化过程。此外, 酸性废水渗入土壤和地下水中, 会促使土壤酸化和结构退化, 影响农作物生长和农业生产, 并可能引发地下水长期污染问题。更严重的是, 此类环境变化可能通过食物链累积, 对人类健康构成潜在威胁, 如重金属中毒和相关慢性疾病的风险。酸性矿山废水的扩散和累积效应对区域生态修复、资源利用及经济发展均带来严峻影响, 已成为区域环境管理和污染治理的重要关注点[7]。

3. 酸性矿山废水的治理技术

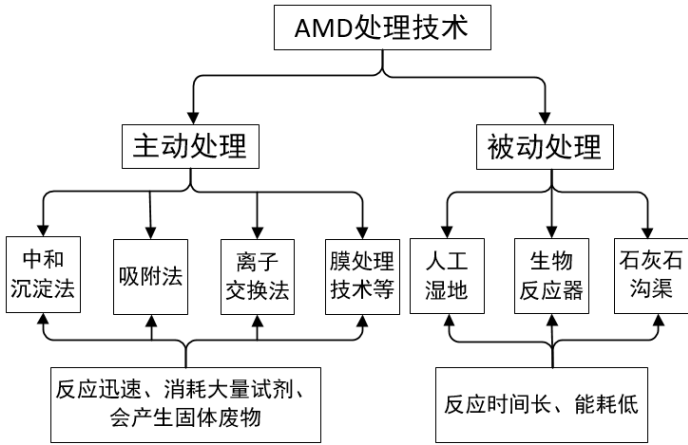


Figure 1. AMD treatment technologies
图 1. AMD 处理技术

AMD 主要分为主动处理技术和被动处理技术两大类, 见图 1。主动处理涉及使用不同的化合物, 主要包括: 中和沉淀法、吸附法、离子交换法、膜处理技术等[12]。中和沉淀法通过加入化学试剂来中和酸性矿山排水中的酸性物质, 从而提高水的 pH 值并减少其毒性; 它操作简单、反应迅速, 可以现场处理; 然而会消耗大量化学试剂, 处理后可能产生固体废物, 需要进一步处理以防止二次污染。吸附法指固体吸附剂(如活性炭、膨润土、沸石、铁基材料等)将 AMD 的污染物吸附到固体表面或孔隙中, 从而去除有害物质的方法, 它操作简单、成本低、效果较好, 但由于吸附容量有限需要定期频繁更换吸附剂。离子交换法是一种通过离子交换树脂去除水中特定离子的技术, 能够针对性去除重金属离子, 离子交换树脂

可以再生,还能与其他技术结合使用,提高整体处理效率。膜分离技术是一种通过膜的选择渗透性来分离 AMD 中悬浮物、大分子有机物和无机盐的低能耗技术,它易于操作和维护[13]。被动处理则利用自然和生物过程如微生物的生长和代谢过程,具体有人工湿地法、厌氧硫酸盐还原生物反应器、缺氧石灰石沟渠、石灰石浸出床、开放的石灰岩通道或利用其他天然材料、工业副产品等进行处理。被动处理技术反应时间较长,但能耗低、工艺流程简单、设备维护费用低,更具经济效益和环境效益[14]。

3.1. 酸性矿山废水的预防与源头控制技术

AMD 的起源于黄铁矿的氧化,是由 O_2 、水和微生物(如铁氧化细菌)共同驱动的,可通过排除这其中任何一种或多种来限制其产生,见图 2。Isabelle 等人[15]将污泥-土壤混合物作为矿山废物覆盖物(氧气屏障),防止废石和尾矿库产生 AMD,监测渗滤液 pH、电导率、金属离子和硫酸盐含量,含水率、出水流量等,结果显示能有效限制 AMD 的产生并降低流出物中的溶解金属离子浓度。Zhang 和 Wang [16]采用杀菌剂抑制参与硫化物氧化过程的主要细菌(氧化亚铁硫杆菌)的活性,以期能预防 AMD 的发生,通过对出水检测,分析发现其能避免 AMD 产生与降低金属离子浓度,证明了十二烷基硫酸钠(一种阴离子表面活性剂)是抑制氧化亚铁硫杆菌活性的有效杀菌剂。Alakangas 等人[17]提出将反应性尾矿与碱性材料(如赤泥、钢渣、粉煤灰、石膏、水泥窑粉尘等)共同处置或混合,以在源头限制 AMD 的产生;使用钝化剂,包括各种钝化涂层(无机、有机和有机硅烷)的形成和载体微胶囊化,对黄铁矿进行防腐处理,也是减少或防止 AMD 及相关污染产生的一种途径。但其实际应用仍存在不足,结合环境条件、成本和长期钝化性能,对现有钝化剂改进或新型材料的研究,是此途径未来研究的可行方向[18]。Wang 等人[19]通过微藻生物量的减少和应激反应基因的上调证实 AMD 中化能自养微生物 *Acidithiobacillus ferrooxidans* 对耐酸微藻的生长和代谢活动具有显著抑制作用,可以通过增强这些基因的表达或将引入到更健壮的微藻菌株,有望研发出能更适应 AMD 且有效去除重金属的微藻。

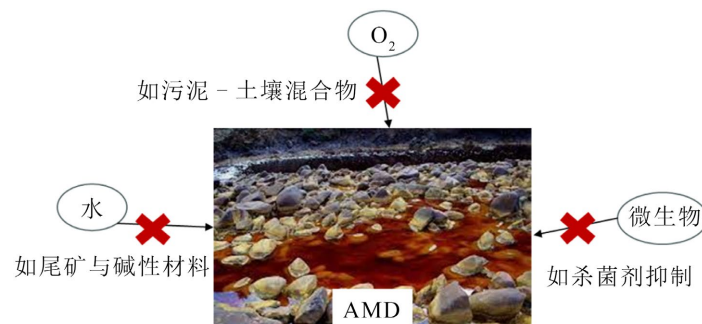


Figure 2. Schematic diagram of the control mechanisms for AMD source
图 2. AMD 源头控制机理示意图

3.2. 酸性矿山废水的主动处理

酸性矿山废水的主动处理涉及使用不同的化合物,主要包括:中和沉淀法、吸附法、离子交换法、膜处理技术等。

膜分离工艺(MSP),特别是纳滤(NF)和反渗透(RO)进行 AMD 处理特别受研究者关注,因为这些过程可以有效地保留二价离子,产生高质量的渗透液可供工业生产再利用,是最有前途的技术之一[20]。Alice 等人[21]探究膜分离工艺(MSP)处理 AMD 的运行条件,对纳滤(NF)和反渗透(RO)处理效果进行对比,同时进行前期投入成本和运营成本评估。结果表明, NF 渗透通量和溶质保留效率更高,进一步探究发现出水 pH 值能影响溶质保留效率和膜污染趋势。

Lydia 等人[22]采用泥炭作为基质处理 AMD，探究水力负荷对铁和硫酸盐的去除效率，模拟泥炭地再湿润进行渗滤计实验，以量化不同加载速率下铁和硫酸盐的去除以及 pH 值的变化。结果表明脱硫和硫化铁沉淀是主要的去除途径，泥炭地再湿润是 AMD 污染的有效措施。

Masindi 等人[23]用熟石灰处理富含磷的城市废水，以生成废水衍生的磷产品，即磷酸钙($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$)，产生去磷的碱性流出物，将其用于 AMD 的联合处理，研究磷回收系统(化学沉淀)的废水与酸性矿山排水(AMD)共处理的可行性。其结果表明能有效调节出水 pH，同时降低金属离子和硫酸盐浓度，协同处理的方法可行，处理 AMD 同时能减少贫磷废水，此方法在两种废水基质的可持续管理方面有一定的优势。

Lee 等人[24]采用无机结合法合成珠状煤矿排水污泥-Youngdong (BCMDS-YD)吸附剂，实验研究其对砷的下流式固定床柱吸附-脱附。应用 Thomas logistic 模型通过线性和非线性回归拟合突破曲线。吸附的机理是吸附和沉淀。经吸附剂再利用实验证明其可再利用，并且在循环实验中都取得良好结果。使用 BCMDS-YD 处理砷的成本为 0.14 美元/ m^3 ，同时 BCMDS-YD 可去除酸性矿涌水中的其他重金属，具有一定优势。

Antonio 等人[25]对比分析不同废料对降低 AMD 中的酸度和高浓度潜在有毒元素(PTE)的作用，废料在城市生活、采矿和农业生产中常见且容易获得，包括干污泥、沼泽泥炭、石膏采矿弃土、堆肥污泥、蚯蚓粪、农业废物堆肥等。通过对渗滤液中的 pH，电导率(EC)和 PTE 浓度的测量。发现所研究的废物的酸中和能力以及固定 PTE 的能力非常强大。各种城市生活、采矿和农工生产废物在处理 AMD 方面具有很高的潜力[26]。

3.3. 酸性矿山废水的被动处理

可渗透的反应屏障可以通过物理，化学和生物净化过程改善水质，被认为是被动管理和修复酸性矿山废水的最谨慎和务实的方法[27]。

Ayanda 等人[3]探究透水混凝土作为处理 AMD 的反应屏障的潜在用途，由含有或不含 30% 飞灰(FA)的水泥组成透水混凝土混合物，用于反应器柱中使用的立方体，使用从金矿(WZ)和煤田(TDB)收集的酸性矿山废水(AMD)，从反应器底部进水，顶部出水，取出水检测。结果发现，WZ 和 TDB 对 Al、Fe、Mn、Co、Ni 的去除效率均较高。结果表征发现透水混凝土的高酸还原率和金属去除率归因于混凝土中硅酸盐石的溶解，金属离子主要通过氢氧化物沉淀形式去除。

Liu 等人[28]探究铁粉、骨炭、泥晶及其混合物的添加对连续产碱系统(SAPSs)性能的影响，将其应用于治理含砷 AMD 的反应柱中，进行 140 天的连续实验，关注砷去除性能、砷保留能力的矿物学限制和渗透率变化。结果表明，20%铁粉和 80%骨炭/泥晶柱的组合具有更优的导水性和保磷能力，铁粉可以创造还原环境，明显改善体系的导水率，反应柱中砷的稳定部分得到提高。

Li 等人[29]通过建立反应塔，模拟垂直流湿地，在实验室大规模研究了分散碱性底物(DAS)用于处理模拟 AMD 的效果，探讨实验条件和反应机理，分析了实验条件下垂直出水水质的处理效果和变化规律。在最佳条件下，(石灰石(直径 5~7 mm): 刨花混合比例 = 20:1, HRT 大于 20 h 时)，DAS 能有效去除 AMD 中的酸度和重金属。根据 SEM、XRD 和拉曼分析得出结论，出水碱度的增加主要是由于石灰石的溶解，金属离子和硫酸盐的去除伴随着反应塔各深度的微生物作用与离子沉淀。

贾郁菲等人[30]总结了虾蟹壳修复材料治理 AMD 的研究现状，虾壳本身是碱性物质可以中和 AMD 中的酸性物质，虾壳具备的有机物质也利于微生物的代谢活动，甲壳素及其衍生物壳聚糖具有丰富的羟基、氨基等官能团，可与 AMD 中重金属离子形成配位络合物。我国具有大量的甲壳生物，其中的碳酸钙、甲壳素和蛋白质可用于处理 AMD 中重金属离子。因此，甲壳生物物质是具有应用前景的 AMD 修复材料。

Chang 等人[31]建立新型人工湿地(CW)模型体系处理 AMD, 以核桃壳(WS)及其生物炭产物为填料, 使进水先后经过核桃壳(WS)顶层、生物炭中层、砂砾底层, 相继补充蔗糖和植物秸秆发酵液(PSB), 为细菌硫酸盐还原(BSR)过程提供外部碳源。结果表明系统可有效去除 AMD 中的重金属($\text{Cu} > 99\%$, $\text{Cd} > 97\%$, $\text{Zn} > 94\%$, $\text{Cr} > 93\%$, $\text{Fe} > 76\%$), pH 值从 4.0 提高到 6.5, 但硫酸盐去除效率不理想($< 40\%$)。金属迁移分析发现生物炭有出较高的金属保留能力、硫酸盐还原菌(SRB)的相对丰度最高, 填充有机固体废物及其生物炭产品的 CW 系统为 AMD 治疗提供可行的生态选择, 需要对其规模化运行与长期运行的影响因素进行研究。

Shweta 等人[32]利用富含有机物的基质(牛粪和竹片)作为填料, 实验室规模下搭建水平地下水流人工湿地(HSSF-CW), 并在表层种植香蒲, 探究其用于处理模拟 AMD 的性能。HSSF-CW 经过驯化 7 天后连续运行 6 个月。结果表明 HSSF-CW 具有潜在的应用前景, 能够将 pH 值从 2.1 提高到 6.4, 具有较好的金属离子去除效果($\text{Cr} (99.7\%) > \text{Ni} (97.8\%) > \text{Co} (93.7\%) > \text{Fe} (91.6\%) > \text{Al} (59.7\%)$), 但 Mn 和硫酸盐的去除效果不佳减少(SO_4^{2-} : 44~75%), 可能是由于基质层部分在 CW 启动(或适应期)期间锰的积累, 在随后运行时吸附的锰重新释放了。毒性特征浸出程序测试(TCLP)表明, 反应后填料可以安全的在陆地上处置, 不会对环境构成威胁。分析香蒲的 BCF 和 TF, 铁的 BCF 值最高, 积累的铁较多, 从周围环境中提取铁的能力较强, 但大部分留在根部; 锰表现出最高的 TF (> 2.5), 其他金属的 TF 较低(< 1.0), 这表明香蒲不能有效地将重金属从根部转移到茎叶。富含有机物的改良 CW 系统的运行寿命是不确定, 而且需要持续更换耗尽的填料、处理富含金属的污泥, 仍需对系统的全周期运行进一步探索。

Beauchair 等人[33]使用混合方法处理酸性矿井排水(AMD), 该方法包括以逐步和模块化的方式协同集成的纳米和生物系统。处理由不同的阶段组成, 阶段 1: 使用活性菱镁矿或 MgO 纳米颗粒(NP), 以 1:100 的比例(1 g/100 mL)、500 r/min 的混合速度和 1 小时的水力停留时间(HRT)处理真正的 AMD; 阶段 2: 使用具有不同流动模式的三个连续湿地[1) 地下垂直流(SSVF-CW), 2) 自由水面流(FWS-CW), 3) 地下水水平流(SSHF-CW)], 以分步方式处理进水。在处理过程之后, 观察到产物水的 pH 从 2.6 增加到 10.4; 污染物被显著去除: $\text{Fe} (99.8\%) \geq \text{Al} (99.5\%) \geq \text{Mn} (99.24\%) \geq \text{Zn} (98.36\%) \geq \text{Cu} (97.38\%) \geq \text{Ni} (97.7\%) \geq \text{SO}_4^{2-} (80.59\%)$, 电导率(EC)降低(86%)。阶段 1 去除部分金属和硫酸盐, 阶段 2 的生物部分有效地去除了 SO_4^{2-} 和 EC 水平, 在综合的方式下, 系统的两阶段具有出色的组合和互补性能。使用仪器分析原料、产品 MgO -NP、基质和植物中化学物质的迁移转化。出水符合规定的污水排放标准, 这证明了中和+生物修复协同处理 AMD 可以达到预期效果。这一方法有望减少与采矿活动相关的生态足迹, 促进可持续发展的进程。

采矿业不仅要尽可能地对已经产生的污染物进行治理, 而且要探究可持续的绿色技术, 如防止废物产生、最大限度地减少资源投入、优化可再生和可回收材料, 以期在未来的生产过程中降低或减少污染物产生, 迈向清洁生产的目标, 推动实施绿色技术对于自然资源的管理和行业可持续发展都至关重要, 也是行业对社会责任的积极履行[34]。

3.4. 酸性矿山废水的回收与利用

从预防与源头控制、自动处理、被动处理的结果来看, 其结果是降低 AMD 的酸性, 去除 AMD 中的重金属离子和硫酸盐等物质, 而并没有有效利用其中的“有价值资源”。这些技术大多需要持续投入化学消耗品, 不仅存在二次污染的风险, 而且费用昂贵且可持续有限。采用低成本可持续的治理技术成为矿山企业的迫切需求。考虑到 AMD 中含有许多高价值的资源, 寻找方法在生产中对其综合利用是提高 AMD 价值利用与减少 AMD 外排的重要途径。

许等人[35]提出一种“中和沉淀 - 离子交换 - 中和沉淀”组合工艺, 取用大宝山真实的 AMD, 通过中和沉淀与静态吸附实验探究回收有价金属的最佳沉淀和吸附 pH。结果表明, AMD 在 pH 为 3.00、9.80

条件下中和沉淀,在 pH 为 3.95、6.10 条件下进行吸附效果最佳。通过组合工艺,实现有价金属的高效分离回收。经估算,若采用此工艺回收大宝山的 AMD (2000 m³/d) 中的有价金属,年利润可达 119 万元,经济效益显著。此工艺为 AMD 的高效资源化利用提供一种新路径。谢等人[36]探究从 AMD 中回收溶解稀土元素(REY)的可行性,提出“分级化学沉淀-酸溶解-草酸选择性沉淀法”回收 AMD 中的 REY。以贵州某废弃煤矿井采集的 AMD 作为原料。结果表明,在去除 AMD 中的 Fe、Al 等高浓度污染离子后,获得高度富集 REY (含量约 1.0%) 的沉淀物。经预浓缩、草酸酸化,最终回收浓缩液中 95% 的 REY。最终产物经煅烧氧化后得到的稀土氧化物纯度高达 97%。Bai 等人[37]利用 AMD 活化硫化铜尾矿,回收硫化铜尾矿中的凹陷黄铁矿。进行高纯度黄铁矿的微浮选实验、溶解度测试和 Visual MINTEQ 模型分析、XPS 和 ToF-SIMS 分析。结果表明,当 AMD/HAS 体积比为 3:1 时,黄铁矿的浮选回收率提高约 64%,显著提高黄铁矿的浮选性能。

4. 总结与展望

4.1. 研究总结

酸性矿山废水(AMD)的形成源于含硫物质氧化所释放的酸性物质及重金属,其 pH 低且重金属含量高,对水、土生态系统构成较大污染风险,降低了环境自净能力并存在健康隐患。当前治理技术主要包括主动处理(化学中和/膜分离等)与被动处理(人工湿地等)体系,在提高污染物去除效率和控制运行成本方面取得阶段性进展,但存在长期运行稳定性不足、技术集成度薄弱等困难;基于资源回收的新型技术(金属提取等)体现出较高的环境效益,但酸性矿山废水的组分复杂、运行成本高和工艺适配性差是其规模应用的主要障碍。

4.2. 未来研究方向

未来需进一步揭示酸性矿山废水产生的机理,提出兼顾治理效率和可行性的技术方案,并进行生命周期评估体系以探究全过程总体环境影响,推动工程化应用。加强实验室规模与现场试验的结合,推动从小规模实验向大规模应用的转变,为矿区环境保护和可持续发展提供坚实的技术方案和理论支撑。

参考文献

- [1] Rodríguez-Galán, M., Baena-Moreno, F.M., Vázquez, S., Arroyo-Torralvo, F., Vilches, L.F. and Zhang, Z. (2019) Remediation of Acid Mine Drainage. *Environmental Chemistry Letters*, **17**, 1529-1538. <https://doi.org/10.1007/s10311-019-00894-w>
- [2] Kefeni, K.K., Msagati, T.A.M. and Mamba, B.B. (2017) Acid Mine Drainage: Prevention, Treatment Options, and Resource Recovery: A Review. *Journal of Cleaner Production*, **151**, 475-493. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.082>
- [3] Shabalala, A.N., Ekol, S.O., Diop, S. and Solomon, F. (2017) Pervious Concrete Reactive Barrier for Removal of Heavy Metals from Acid Mine Drainage—Column Study. *Journal of Hazardous Materials*, **323**, 641-653. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.10.027>
- [4] Tomiyama, S., Igarashi, T., Tabelin, C.B., Tangviroon, P. and Ii, H. (2020) Modeling of the Groundwater Flow System in Excavated Areas of an Abandoned Mine. *Journal of Contaminant Hydrology*, **230**, Article 103617. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2020.103617>
- [5] Anawar, H.M. (2015) Sustainable Rehabilitation of Mining Waste and Acid Mine Drainage Using Geochemistry, Mine Type, Mineralogy, Texture, Ore Extraction and Climate Knowledge. *Journal of Environmental Management*, **158**, 111-121. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.04.045>
- [6] Han, Y., Youm, S., Oh, C., Cho, Y. and Ahn, J.S. (2017) Geochemical and Eco-Toxicological Characteristics of Stream Water and Its Sediments Affected by Acid Mine Drainage. *CATENA*, **148**, 52-59. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.11.015>
- [7] Park, I., Tabelin, C.B., Jeon, S., Li, X., Seno, K., Ito, M., et al. (2019) A Review of Recent Strategies for Acid Mine

- Drainage Prevention and Mine Tailings Recycling. *Chemosphere*, **219**, 588-606. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.11.053>
- [8] RoyChowdhury, A., Sarkar, D. and Datta, R. (2015) Remediation of Acid Mine Drainage-Impacted Water. *Current Pollution Reports*, **1**, 131-141. <https://doi.org/10.1007/s40726-015-0011-3>
 - [9] Zhang, L., Ahmari, S. and Zhang, J. (2011) Synthesis and Characterization of Fly Ash Modified Mine Tailings-Based Geopolymers. *Construction and Building Materials*, **25**, 3773-3781. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.005>
 - [10] Hajihashemi, S., Rajabpoor, S. and Schat, H. (2023) Acid Mine Drainage (AMD) Endangers Pomegranate Trees Nearby a Copper Mine. *Science of The Total Environment*, **889**, Article 164269. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164269>
 - [11] 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.
 - [12] Viadero, R.C., Zhang, S., Hu, X. and Wei, X. (2020) Mine Drainage: Remediation Technology and Resource Recovery. *Water Environment Research*, **92**, 1533-1540. <https://doi.org/10.1002/wer.1401>
 - [13] Daraz, U., Li, Y., Ahmad, I., Iqbal, R. and Ditta, A. (2023) Remediation Technologies for Acid Mine Drainage: Recent Trends and Future Perspectives. *Chemosphere*, **311**, Article 137089. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137089>
 - [14] 杨磊, 曹端宁, 王叶雷, 等. 转炉钢渣处理酸性矿山废水的研究进展[J]. 工业水处理, 2022, 42(3): 41-46.
 - [15] Demers, I., Mbonimpa, M., Benzaazoua, M., Bouda, M., Awoh, S., Lortie, S., *et al.* (2017) Use of Acid Mine Drainage Treatment Sludge by Combination with a Natural Soil as an Oxygen Barrier Cover for Mine Waste Reclamation: Laboratory Column Tests and Intermediate Scale Field Tests. *Minerals Engineering*, **107**, 43-52. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.11.017>
 - [16] Zhang, M. and Wang, H. (2017) Utilization of Bactericide Technology for Pollution Control of Acidic Coal Mine Waste. *Proceedings of the 2017 6th International Conference on Energy, Environment and Sustainable Development (ICEESD 2017)*, Zhuhai, 11-12 March 2017, 667-670. <https://doi.org/10.2991/iceesd-17.2017.120>
 - [17] Alakangas, L., Andersson, E. and Mueller, S. (2013) Neutralization/Prevention of Acid Rock Drainage Using Mixtures of Alkaline By-Products and Sulfidic Mine Wastes. *Environmental Science and Pollution Research*, **20**, 7907-7916. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-1838-z>
 - [18] Tu, Z., Wu, Q., He, H., Zhou, S., Liu, J., He, H., *et al.* (2022) Reduction of Acid Mine Drainage by Passivation of Pyrite Surfaces: A Review. *Science of The Total Environment*, **832**, Article 155116. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155116>
 - [19] Wang, M., Yue, Z., Deng, R., She, Z., Zhang, L., Yang, F., *et al.* (2025) Molecular Disruptions in Microalgae Caused by *Acidithiobacillus ferrooxidans*: Photosynthesis, Oxidative Stress, and Energy Metabolism in Acid Mine Drainage. *Water Research*, **272**, Article 122974. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.122974>
 - [20] Sierra, C., Álvarez Saiz, J.R. and Gallego, J.L.R. (2013) Nanofiltration of Acid Mine Drainage in an Abandoned Mercury Mining Area. *Water, Air, & Soil Pollution*, **224**, Article No. 1734. <https://doi.org/10.1007/s11270-013-1734-7>
 - [21] Aguiar, A.O., Andrade, L.H., Ricci, B.C., Pires, W.L., Miranda, G.A. and Amaral, M.C.S. (2016) Gold Acid Mine Drainage Treatment by Membrane Separation Processes: An Evaluation of the Main Operational Conditions. *Separation and Purification Technology*, **170**, 360-369. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.07.003>
 - [22] Roesel, L.K. and Zak, D.H. (2022) Treating Acid Mine Drainage with Decomposed Organic Soil: Implications for Peatland Rewetting. *Journal of Environmental Management*, **311**, Article 114808. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114808>
 - [23] Masindi, V., Shabalala, A. and Foteinis, S. (2022) Passive Co-Treatment of Phosphorus-Depleted Municipal Wastewater with Acid Mine Drainage: Towards Sustainable Wastewater Management Systems. *Journal of Environmental Management*, **324**, Article 116399. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116399>
 - [24] Lee, Y., Ren, Y., Cui, M., Zhou, Y., Kwon, O., Ko, J., *et al.* (2022) Arsenic Adsorption Study in Acid Mine Drainage Using Fixed Bed Column by Novel Beaded Adsorbent. *Chemosphere*, **291**, Article 132894. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132894>
 - [25] Aguilar-Garrido, A., Paniagua-López, M., Sierra-Aragón, M., Martínez Garzón, F.J. and Martín-Peinado, F.J. (2023) Remediation Potential of Mining, Agro-Industrial, and Urban Wastes against Acid Mine Drainage. *Scientific Reports*, **13**, Article No. 12120. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-39266-4>
 - [26] Carrillo-González, R., Gatica García, B.G., González-Chávez, M.D.C.A. and Solís Domínguez, F.A. (2021) Trace Elements Adsorption from Solutions and Acid Mine Drainage Using Agricultural By-Products. *Soil and Sediment Contamination*, **31**, 348-366. <https://doi.org/10.1080/15320383.2021.1942430>
 - [27] Shabalala, A. and Masindi, V. (2022) Insights into Mechanisms Governing the Passive Removal of Inorganic Contaminants from Acid Mine Drainage Using Permeable Reactive Barrier. *Journal of Environmental Management*, **321**, Article 115866. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115866>

-
- [28] Liu, J., Cheng, H., Zhao, F., Dong, F. and Frost, R.L. (2013) Effect of Reactive Bed Mineralogy on Arsenic Retention and Permeability of Synthetic Arsenic-Containing Acid Mine Drainage. *Journal of Colloid and Interface Science*, **394**, 530-538. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2012.12.014>
- [29] Wenbo, L., Qian, F., Haoqian, L., Di, C. and Xiangdong, L. (2021) Passive Treatment Test of Acid Mine Drainage from an Abandoned Coal Mine in Kaili Guizhou, China. *Water Science and Technology*, **84**, 1981-1996. <https://doi.org/10.2166/wst.2021.405>
- [30] 贾郁菲, 陈宏坪, 张文影, 等. 甲壳生物质修复废弃煤矿酸性矿坑水研究进展[J]. 环境保护科学, 2024, 50(2): 1-7.
- [31] Chang, J., Deng, S., Li, X., Li, Y., Chen, J. and Duan, C. (2022) Effective Treatment of Acid Mine Drainage by Constructed Wetland Column: Coupling Walnut Shell and Its Biochar Product as the Substrates. *Journal of Water Process Engineering*, **49**, Article 103116. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.103116>
- [32] Singh, S. and Chakraborty, S. (2020) Performance of Organic Substrate Amended Constructed Wetland Treating Acid Mine Drainage (AMD) of North-Eastern India. *Journal of Hazardous Materials*, **397**, Article 122719. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122719>
- [33] Nguengang, B., Masindi, V., Msagati Makudali, T.A. and Tekere, M. (2022) Effective Treatment of Acid Mine Drainage Using a Combination of MgO-Nanoparticles and a Series of Constructed Wetlands Planted with *Vetiveria zizanioides*: A Hybrid and Stepwise Approach. *Journal of Environmental Management*, **310**, Article 114751. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114751>
- [34] Velenturf, A.P.M. and Purnell, P. (2021) Principles for a Sustainable Circular Economy. *Sustainable Production and Consumption*, **27**, 1437-1457. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.02.018>
- [35] 许昊洋, 宁寻安, 陈涛, 等. 酸性矿山废水中多种有价金属的高效分离[J]. 环境保护科学, 2024, 50(3): 119-127.
- [36] 谢义曦, 吴攀, 李学先, 等. 分级化学沉淀法从酸性矿山废水中回收稀土元素试验研究[J]. 中国稀土学报, 2024, 42(2): 360-370.
- [37] Bai, S., Bi, Y., Li, J., Yu, P., Ding, Z., Lv, C., *et al.* (2021) Innovative Utilization of Acid Mine Drainage (AMD): A Promising Activator for Pyrite Flotation Once Depressed in a High Alkali Solution (HAS)—Gearing Towards a Cleaner Production Concept of Copper Sulfide Ore. *Minerals Engineering*, **170**, Article 106997. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.106997>