

Technologies for Heavy Metal Pollution Control and Environmental Impact Assessment in Copper Mine Mining and Beneficiation Processes

Wei Zhou

Yunnan Copper Co., Ltd., Qiubei, Yunnan, 615000, China

Abstract

Copper mining and beneficiation activities are accompanied by various heavy metal pollution issues during resource development, and their environmental impacts are characterized by strong concealment, pronounced cumulative effects, and high remediation difficulty. Focusing on the formation mechanisms and environmental manifestations of heavy metal pollution in the copper mining and beneficiation process, this study systematically reviews the release, migration, and enrichment characteristics of heavy metals during mining and beneficiation stages, with particular emphasis on the main types of heavy metal pollution in tailings and wastewater and their associated environmental risks. At the same time, changes in environmental quality and ecological risk responses before and after the implementation of control measures are analyzed. The study aims to provide a systematic reference for the scientific selection of heavy metal pollution control technologies and the comprehensive assessment of environmental effects in copper mining and beneficiation.

Keywords

Copper mining and beneficiation; Heavy metal pollution; Pollution control technologies; Environmental effects; Ecological risk assessment

铜矿采选过程中重金属污染治理技术与环境影响评估

周微

云南铜业股份有限公司，中国·云南 丘北 615000

摘要

铜矿采选活动在资源开发过程中伴随多种重金属污染问题，其环境影响具有隐蔽性强、累积效应显著和治理难度高等特点。围绕铜矿采选过程中重金属污染的形成机理与环境表现，系统梳理采矿与选矿环节中重金属的释放、迁移及富集特征，重点分析尾矿与废水中重金属污染的主要类型及其环境风险，同时分析治理措施实施前后环境质量变化及生态风险响应特征。研究旨在为铜矿采选重金属污染治理技术的科学选择与环境效应综合评估提供系统化参考。

关键词

铜矿采选；重金属污染；污染治理技术；环境影响；生态风险评估

1 引言

随着铜矿资源开发强度的持续提升，采选活动对区域环境质量的影响日益受到关注。铜矿中伴生的多种重金属在采矿、破碎、磨矿及选矿过程中易被激活并进入环境介质，形成对土壤、水体及生态系统的潜在威胁。这类污染具有迁移路径复杂、环境归趋多样的特点，一旦控制不当，易引发长期生态风险并制约矿区可持续发展。在实际治理过程中，单一技术措施往往难以兼顾污染控制效果与环境响应特征，亟需从全过程视角统筹分析污染产生机制、治理技术体系及其环境效应。因此，围绕铜矿采选重金属污染治理技术与环

境效应评估开展系统研究，对于提升治理决策的科学性、实现矿产资源开发与生态环境保护的协调具有重要现实意义。

2 铜矿采选过程中重金属污染的产生机理与特征

2.1 采矿作业环节重金属释放途径

铜矿采矿作业以露天开采和地下开采为主，在剥离、爆破、采装及运输等环节中，矿体及围岩受到强烈扰动，原本处于稳定赋存状态的铜、铅、锌、镉等重金属被暴露于空气和水体环境中。爆破过程中产生的大量裂隙显著增加了矿石与氧气、水分的接触面积，硫化矿物发生氧化反应，促进重金属向可溶态转化。露天采场在降雨条件下易形成径流和渗滤水，溶解态重金属随水体迁移进入周边土壤与地表水系统。地下采矿中，矿坑涌水与排水活动持续将含重金属的矿

【作者简介】周微（1986—），女，中国云南丘北人，本科，环境工程师，从事工业企业环保管理研究。

坑水排出。运输与堆存环节中，矿石散落和扬尘同样构成重金属释放的重要途径，细颗粒物在风力作用下扩散，增加了区域背景重金属负荷，形成多介质复合污染特征。

2.2 选矿流程中重金属迁移与富集特征

选矿流程通过破碎、磨矿、浮选等工序实现有价金属的分离与富集，在这一过程中，矿石颗粒尺度显著减小，重金属更易从晶格结构中释放并参与物理化学迁移。磨矿阶段大量细粒矿浆形成，使铜、镉、铅等元素在矿浆体系中重新分配，部分以溶解态存在，部分吸附于细颗粒表面。浮选过程中药剂投加改变了矿物表面电性和亲疏水特征，重金属在精矿与尾矿之间发生选择性富集，精矿中铜品位可由原矿的百分之零点几提升至百分之二十以上。选矿循环水系统在重复使用条件下，溶解态重金属逐步累积，增加了后续排放和外溢风险。迁移与富集过程表现出明显的工艺依赖性和水化学特征^[4]。

2.3 尾矿与废水中重金属污染的主要类型

尾矿和选矿废水是铜矿采选过程中重金属污染的集中载体。尾矿中除残留铜外，常伴生铅、锌、镍、镉等元素。部分尾矿库渗滤液中铜浓度可达到每升五至二十毫克，镉浓度超过环境背景值数十倍。选矿废水则以溶解态和络合态重金属为主，来源于浮选尾水、设备冲洗水和矿浆脱水过程。尾矿与废水共同构成固液复合污染源，其污染类型呈现长期性、累积性和区域扩散特征，对矿区周边生态系统构成潜在威胁。

3 铜矿采选重金属污染治理的技术体系构成

3.1 源头减排与清洁采选技术路径

源头减排侧重于在采选初期降低重金属进入环境的总量，通过优化工艺和设备实现污染控制前移。在采矿环节，精准爆破与分采分运技术可减少围岩混入率，部分矿区应用后废石量降低百分之十五以上，从源头减少重金属暴露规模。选矿环节中，高效磨矿分级系统可将目标粒径控制在七十微米左右，提高有价矿物解离度，减少过磨产生的细粒重金属释放。浮选药剂方面，采用低毒、低用量药剂替代传统配方，可使循环水中重金属浓度下降。清洁采选还包括闭路循环用水系统建设，通过提高回水利用率至百分之九十五以上，显著降低外排废水量。相关数据表明，综合实施源头减排措施后，单位吨矿产生的重金属排放负荷可下降百分之二十五以上。

3.2 过程控制与重金属阻控技术

过程控制强调在采选系统运行过程中对重金属迁移路径进行调控，通过物理、化学与生物手段实现阻控。矿浆调控技术通过调节酸碱度和氧化还原条件，抑制硫化矿氧化反应，使溶解态铜和锌比例下降。部分选矿厂将矿浆pH稳定在九左右，可使铜离子溶出率降低至百分之五以下。循环水处理系统中设置沉淀与过滤单元，结合石灰或硫化物投加，

可去除百分之八十以上的溶解态重金属。针对尾矿输送过程，密闭管道与防渗设施的应用有效减少泄漏风险。过程阻控还包括在线监测与自动调控技术，通过实时监测水质参数，动态调整处理强度，使重金属浓度保持在设计控制范围内，从而降低异常排放概率。

3.3 末端治理与污染物稳定化处理技术

末端治理侧重于对尾矿、废水等集中污染介质进行处理，以降低其环境释放风险。尾矿库表层覆盖与植被重建能够减少风蚀和雨淋作用，长期监测显示渗滤液中铜浓度呈持续下降趋势。废水治理方面，化学沉淀、膜分离和吸附技术协同使用，可使出水中铜、锌浓度控制在每升一毫克以下。部分矿区采用多级处理工艺，废水回用率提升至百分之九十五。末端稳定化处理通过削减污染物活性和迁移能力，为矿区环境风险控制提供了重要保障^[2]。

4 铜矿采选重金属污染的环境影响评估方法

4.1 重金属对土壤与地表水环境的影响评估

环境影响评估以土壤和地表水为主要对象，通过监测重金属含量变化刻画污染效应。土壤评价侧重表层0—20厘米范围内铜、锌、铅、镉等元素的累积水平，并结合背景值进行对比分析，当铜含量达到80毫克每千克以上时，植物根系吸收强度明显增强。垂向分布分析显示，在50厘米以下土层中重金属含量下降幅度约30%，反映迁移受限特征。地表水评估关注溶解态与悬浮态重金属浓度变化，河段中铜浓度由0.02毫克每升升至0.3毫克每升时，对浮游生物产生抑制效应。通过季节尺度监测发现，丰水期浓度较枯水期降低约40%，表明径流稀释对污染水平具有调节作用。

4.2 重金属迁移扩散的生态风险判定

生态风险判定以重金属在多介质中的迁移扩散行为为核心，通过风险指数与暴露分析揭示潜在影响。尾矿周边土壤中镉含量达到1.2毫克每千克时，风险指数超过100，生态敏感度显著上升。水体中溶解态铜占总量比例约60%，更易沿水流扩散，对下游5公里范围内生态单元形成持续压力。生物富集分析表明，底栖生物体内铜含量可达到环境浓度的20倍，食物链放大效应明显。模型模拟结果显示，在连续排放条件下，重金属迁移半径在3年内可扩大至2倍以上，生态风险呈现时间累积特征，需要通过综合判定方法识别高风险区域^[3]。

4.3 污染治理前后环境质量变化评价

环境质量变化评价通过对比治理实施前后的指标差异反映治理成效。治理前尾矿库周边土壤铜含量为120毫克每千克，治理后下降至65毫克每千克，降幅接近45%。地表水中铜浓度由0.25毫克每升降低至0.08毫克每升，水体功能等级明显改善。生态监测结果显示，治理后植被覆盖率由30提升至55%，生物多样性指数提高0.4。长期跟踪表明，重金属年均迁移通量减少约50%，环境质量改善趋势稳定。通

过多指标综合评价，可定量反映治理措施对区域环境效应的修复水平，为后续管理提供依据^[4]。

5 铜矿采选重金属污染治理的综合效应与优化方向

5.1 治理技术对区域生态系统的综合影响

铜矿采选重金属污染治理技术的持续实施，对区域生态系统结构与功能产生系统性影响。通过削减尾矿和废水中重金属活性形态，土壤和水体中污染负荷得到有效控制，生态系统胁迫水平随之下降。治理措施实施后，受影响区域内植物群落的耐污物种比例逐步降低，原有受抑制的中性和弱耐性物种开始恢复生长，群落结构趋于稳定。土壤理化条件改善使微生物活性增强，有机质分解速率提高，营养元素循环效率得到恢复。水生生态系统中，重金属浓度下降促使浮游生物和底栖生物数量回升，食物网结构由简化状态向多层次方向演变。长期监测结果表明，治理区域内生态系统自我调节能力明显增强，外源扰动引发的生态波动幅度逐年缩小，区域生态安全水平呈现持续改善趋势。

5.2 环境影响评估结果在治理决策中的应用

环境影响评估结果在铜矿采选重金属污染治理决策中发挥着关键支撑作用。通过对土壤、水体和生物等多维指标的系统分析，可识别污染影响的重点介质和敏感区域，为治理重点排序提供依据。评估结果揭示不同治理措施在污染削减和生态修复方面的实际效果，有助于筛选适配性较高的技术组合，避免资源投入与环境收益不匹配的问题。在动态管理过程中，评估数据能够反映环境质量变化趋势，为调整治理强度和运行参数提供量化参考。基于评估结果建立的反馈机制，使治理方案由经验判断转向数据支撑，提高决策的科学性和可操作性。同时，评估结论还可用于论证治理目标的合理性，为矿区环境管理和后续修复规划提供可靠依据，推动治理工作向精细化和长期化方向发展。

5.3 铜矿采选重金属污染治理技术的优化路径

铜矿采选重金属污染治理技术的优化应立足全过程控

制与系统协同理念，通过技术集成提升综合治理效能。在源头和过程控制基础上，加强不同治理单元之间的衔接，减少污染在系统内部的二次转移。针对矿区差异化条件，优化技术组合配置，使治理措施与矿石性质、工艺流程和环境承载能力相匹配。强化稳定化和资源化协同思路，在降低环境风险的同时提升尾矿和废水中价元素的回收潜力。通过引入长期监测与评估结果，不断修正技术参数和运行模式，形成动态优化机制。技术优化还需兼顾经济成本与环境效益，推动治理措施由单一污染削减向生态功能恢复延伸，实现铜矿采选活动与区域生态系统之间的协调发展。

6 结语

铜矿采选过程中重金属污染问题具有成因复杂、影响范围广和环境效应长期累积等特征，对矿区生态安全与区域环境质量构成持续压力。围绕污染产生机理、治理技术体系及环境效应评估方法的系统分析，有助于全面认识重金属在采选过程中的迁移转化规律及其生态影响。研究表明，通过源头减排、过程控制与末端治理相结合的技术路径，能够有效降低重金属环境风险，并促进受损生态系统的逐步恢复。环境效应评估在治理决策中的应用，为技术选择与优化提供了科学依据，有利于提升治理措施的针对性和稳定性。综合推进污染治理与生态修复，对实现铜矿资源开发与环境保护的协同发展具有重要现实意义。

参考文献

- [1] 庄圆月,李凤麟,吴卓慧,梁洁良,贾璞,李金天.我国主要有色金属矿区尾矿库重金属污染及土壤酶活性研究[J].地球环境学报,2025,16(05):629-641.
- [2] 朱海东.铜矿尾砂制备免烧砖重金属浸出规律及其风险评价[D].导师:张治国.安徽理工大学,2025.
- [3] 底明晓,翁晓东,周博,严思明,姜颖,陆远鸿,卢萍.铜矿复垦区土壤重金属污染特征及风险评价[J].环境科学与技术,2024,47(S2):261-270.
- [4] 冷琪.矿区农用土壤重金属的污染评估及EK修复研究[D].导师:任大军.武汉科技大学,2024.