

# 西南岩溶矿区地下水重金属污染风险评价与修复技术探讨

覃纯

广西壮族自治区地质环境监测站

DOI:10.32629/eep.v9i2.3077

**[摘要]** 西南岩溶地区是我国重要的矿产资源基地,长期矿业活动导致地下水重金属污染问题日益严重,对区域水安全和生态环境构成严重威胁。本文系统分析了西南岩溶矿区的地质环境特征,探讨了重金属污染来源与迁移转化机制,总结了当前风险评价方法的适用性和局限性,评述了各类修复技术的原理与应用效果。研究表明,岩溶含水系统的复杂性使得传统评价方法与修复技术在应用上面临挑战。未来需发展适应岩溶特殊水文地质条件的风险评价体系,研发经济高效的复合修复技术,并构建“源头控制-过程阻断-末端治理”的综合防控体系。

**[关键词]** 岩溶矿区; 地下水; 重金属污染; 风险评价; 修复技术; 西南地区

中图分类号: P641.2 文献标识码: A

## Risk Assessment and Remediation Technologies for Heavy Metal Contamination in Groundwater in Southwest Karst Mining Areas

Chun Qin

Geological Environment Monitoring Station of Guangxi Zhuang Autonomous Region

**[Abstract]** The southwestern karst region is an important mineral resource base in China. Long term mining activities have led to increasingly serious heavy metal pollution in groundwater, posing a serious threat to regional water security and ecological environment. This article systematically analyzes the geological environmental characteristics of karst mining areas in Southwest China, explores the sources and migration mechanisms of heavy metal pollution, summarizes the applicability and limitations of current risk assessment methods, and evaluates the principles and application effects of various remediation technologies. Research has shown that the complexity of karst aquifer systems poses challenges to the application of traditional evaluation methods and restoration techniques. In the future, it is necessary to develop a risk assessment system that adapts to the special hydrogeological conditions of karst, develop economically efficient composite restoration technologies, and establish a comprehensive prevention and control system of "source control process blockage end treatment".

**[Key words]** karst mining area; Groundwater; Heavy metal pollution; Risk assessment; Repair technology; Southwest China

### 引言

中国西南岩溶地区主要集中在云南、贵州、广西、四川东部等地,是全球三大连片喀斯特分布区之一,也是我国最重要的矿产资源富集区之一。该区域蕴藏着丰富的铅、锌、汞、镉、砷、镉等矿产资源,矿业开发历史悠久,为我国经济社会发展作出了重要贡献。然而,长期的矿产资源开采、选矿和冶炼活动导致了严重的环境问题,尤其是地下水重金属污染问题日益凸显。岩溶地下水系统具有高度复杂性、脆弱性和敏感性等特点,污染物一旦进入地下水系统,往往迅速扩散,影响范围广,治理难度大。重金属污染物通过饮用水和食物链进入人体,可引发育儿神经损

伤、肝肾损害、癌症等多种健康问题,已成为威胁区域居民健康的重要环境问题。

开展西南岩溶矿区地下水重金属污染风险评价与修复技术研究,不仅对保护区域水资源安全、维护生态系统健康具有重要意义,也为我国类似地质条件下的矿区环境治理提供理论依据和技术支撑,具有重要的科学价值和现实意义。

### 1 重金属污染来源与迁移转化机制

#### 1.1 污染来源分析

西南岩溶矿区地下水重金属污染主要来源于:

采矿活动: 露天采场、井下巷道形成的采空区成为污染物

聚集场所,采矿过程中产生的酸性矿坑水是重金属的重要来源。

选矿与冶炼:选矿废水、尾矿库渗滤液含有大量重金属,冶炼过程中产生的废渣、烟尘通过大气沉降和雨水淋滤进入地下水系统。

尾矿库与废石场:历史遗留和正在使用的尾矿库、废石场缺乏有效防渗措施,在雨水淋滤作用下,重金属持续释放。

矿区运输与储存:矿石运输过程中的散落、选矿药剂储存不当等也是潜在的污染源。

自然释放:高背景值地层在氧化条件下可释放重金属,如高砷煤系地层、高汞碳酸盐岩地层等。

### 1.2 重金属迁移转化机制

重金属在岩溶地下水系统中的迁移转化受多种因素控制:

1.2.1 物理迁移。对流迁移:随地下水流动而迁移,迁移速度取决于地下水流速。岩溶管道中流速可达每天数十至数百米,裂隙中流速较慢。

机械弥散:由于含水介质非均质性导致流速差异引起的扩散作用。

分子扩散:浓度梯度驱动分子运动,在低渗透介质中起重要作用。

1.2.2 化学转化。溶解-沉淀作用:重金属的溶解度受pH、Eh、配体浓度等因素影响。岩溶地下水pH值一般为6.5-8.5,多数重金属氢氧化物在此pH范围内溶解度较低,但碳酸盐、硫酸盐络合物的形成可增加溶解度。

吸附-解吸作用:重金属在固相表面的吸附是控制其迁移的重要过程。岩溶介质中,方解石、粘土矿物、铁锰氧化物等对重金属有较强吸附能力。

氧化-还原反应:氧化还原条件直接影响重金属价态和迁移性。如Cr(VI)迁移性强、毒性大,而Cr(III)迁移性弱、毒性小;As(III)比As(V)毒性更强、迁移性更好。

络合作用:天然有机质、无机配体可与重金属形成络合物,改变其迁移性。

1.2.3 生物作用:微生物可通过氧化还原、甲基化、细胞吸附等作用影响重金属的形态和迁移。硫酸盐还原菌可将 $\text{SO}_4^{2-}$ 还原为 $\text{S}^{2-}$ ,与重金属形成硫化物沉淀。

### 1.3 岩溶环境特殊性对迁移转化的影响

快速通道效应:岩溶管道、裂隙网络构成污染物的快速迁移通道,可使污染物在短时间内扩散至远处。

双重介质效应:管道-裂隙-基质多重介质导致污染物迁移的多速性,增加了模拟预测的难度。

水动力条件剧变:暴雨期间地下水流速剧增,可能重新悬浮沉积的重金属,造成污染脉冲。

水化学条件变化:地下水在不同季节、不同区域水化学特征变化大,直接影响重金属的形态和迁移性。

## 2 地下水重金属污染风险评价

### 2.1 风险评价概念框架

地下水重金属污染风险评价包括危害识别、暴露评价、毒

性评价和风险表征四个步骤。针对岩溶矿区的特殊性,评价框架需考虑:

(1)地质与水文地质条件:岩溶发育程度、含水层结构、地下水流动特征;(2)污染源特征:污染物种类、浓度、释放方式、释放强度;(3)污染物迁移转化:在岩溶介质中的迁移转化规律;(4)暴露途径:饮用水、灌溉用水、生态用水等;(5)受体脆弱性:人口分布、土地利用、生态系统敏感性。

### 2.2 常用评价方法

2.2.1 指数评价法。单因子指数法:简单直观,但未考虑多种污染物的复合效应。

内梅罗综合指数法:考虑了最大污染因子和平均污染水平,但权重确定存在主观性。

地累积指数法:考虑了背景值影响,适用于地质背景值高的地区。

潜在生态风险指数法:引入毒性响应系数,可评价生态风险。

2.2.2 过程模型法。污染物迁移转化模型:如MODFLOW-MT3D、FEFLOW等,模拟污染物在含水层中的迁移过程。但岩溶介质的强非均质性给模型参数确定带来挑战。

多相流模型:考虑非水相液体迁移,适用于有机污染物与重金属复合污染。

地球化学模型:如PHREEQC、Geochemist's Workbench等,模拟水岩相互作用、污染物形态转化。

### 2.3 统计与地统计方法

主成分分析/因子分析:识别污染来源,区分自然来源和人为来源。

聚类分析:划分污染区域,识别空间分布规律。

地统计方法:如克里金插值、条件模拟等,预测污染物空间分布。

### 2.4 健康风险评价模型

(1)美国EPA模型:基于剂量-反应关系,评价致癌风险和非致癌风险。(2)蒙特卡洛模拟:考虑参数不确定性,进行概率风险评价。(3)岩溶环境适应性评价方法。

针对岩溶环境特殊性,需发展适应性评价方法:

岩溶含水层脆弱性评价:基于COP、EPIK、PI等方法,但需针对中国西南岩溶特点进行修正。应考虑管道网络发育程度、上覆土层特性、补给条件等因素。

双重介质迁移模型:发展能够同时模拟管道流和扩散流的耦合模型。离散管道模型与连续介质模型结合是重要发展方向。

示踪试验辅助评价:通过人工示踪试验确定岩溶管道连通性、流速等关键参数,为风险评价提供依据。

动态风险评价:考虑地下水动态变化对风险的影响,特别是暴雨期间的风险变化。

不确定性分析:岩溶介质参数不确定性大,需采用不确定性分析方法,如模糊数学、随机理论等。

评价指标体系构建:

构建适用于西南岩溶矿区的评价指标体系应包括:

污染源指标: 污染物浓度、毒性、释放量、释放方式等;  
迁移性指标: 含水介质渗透性、地下水流速、污染物分配系数等;

环境脆弱性指标: 岩溶发育程度、上覆土层厚度与渗透性、地下水埋深、补给条件等;

受体暴露指标: 取水点位置、用水量、暴露途径等;

风险综合指标: 健康风险值、生态风险值、经济损失估计等。

### 3 地下水重金属污染修复技术

#### 3.1 修复技术分类与原理

地下水修复技术可分为原位修复和异位修复两大类。原位修复是在不抽取地下水的情况下,在地下环境中进行修复;异位修复是将污染地下水抽出地表进行处理。

##### 3.1.1 原位修复技术: 渗透性反应墙:

原理: 在地下水流路径上设置渗透性反应介质,当地下水通过时,污染物被吸附、沉淀或转化。

反应介质: 零价铁、活性炭、沸石、磷酸盐材料、生物炭等。

岩溶区适用性: 适用于污染物羽较集中的区域,但岩溶管道可能绕过反应墙,需与帷幕灌浆等技术结合使用。

##### 3.1.2 原位化学处理:

原理: 向含水层注入化学试剂,使重金属沉淀或固定。

常用试剂: 磷酸盐、石灰、硫化钠等,可使重金属形成磷酸盐、氢氧化物或硫化物沉淀。

岩溶区适用性: 试剂在岩溶介质中分布不均匀,可能难以到达管道系统深部。

##### 3.1.3 生物修复:

原理: 利用微生物或植物去除、转化重金属。

微生物修复: 硫酸盐还原菌产生 $S^{2-}$ ,与重金属形成硫化物沉淀;铁还原菌改变铁氧化物吸附能力。

植物修复: 利用重金属超富集植物吸收重金属,适用于包气带和浅层地下水。

岩溶区适用性: 微生物修复受地下水流速快、营养物质缺乏等限制;植物修复受土层厚度限制。

3.1.4 电动修复: 原理: 施加直流电场,驱动重金属离子向电极迁移并富集处理。

岩溶区适用性: 适用于低渗透性裂隙和基质,但对高渗透性管道效果有限。

#### 3.2 异位修复技术

3.2.1 抽出处理技术: 原理: 通过抽水井将污染地下水抽出,地表处理后回灌或排放。

处理方法: 化学沉淀、离子交换、吸附、膜分离等。

岩溶区适用性: 岩溶地下水抽取可能导致远处污染水体快速流入,修复周期长、成本高。

3.2.2 空气扰动技术: 原理: 向含水层注入空气,促进污染物挥发和生物降解。

岩溶区适用性: 主要适用于挥发性有机物,对重金属修复效果有限。

#### 3.3 修复材料研究进展

3.3.1 纳米材料: 纳米零价铁、纳米羟基磷灰石等具有高比表面积和反应活性,但成本高,环境风险需评估。

3.3.2 改性天然材料: 改性沸石、改性凹凸棒石、改性生物炭等,成本较低,环境友好。

3.3.3 复合功能材料: 多种材料复合,兼具吸附、催化、生物载体等功能。

3.3.4 缓释材料: 可控制试剂释放速度,延长修复有效期。

### 4 结论

西南岩溶矿区地下水重金属污染问题严重,受复杂水文地质条件控制,具有污染源多、迁移速度快、影响范围广、治理难度大等特点。重金属在岩溶地下水系统中的迁移转化受物理、化学和生物过程共同控制,管道-裂隙双重介质导致迁移过程复杂多变。

传统地下水污染风险评价方法在岩溶区应用存在局限性,需发展考虑岩溶特殊性的评价方法和指标体系。现有修复技术中,渗透性反应墙、原位化学处理和生物修复有一定应用潜力,但需针对岩溶环境进行改进和优化。解决岩溶矿区地下水重金属污染问题需要采取“源头控制-过程阻断-末端治理”的综合策略,并加强监测预警和能力建设。

西南岩溶矿区地下水重金属污染防治是一项长期而艰巨的任务,需要政府、企业、科研机构 and 公众的共同努力。通过科技进步和管理创新,我们有望实现矿产资源开发与环境保护的协调发展,保障区域水安全和生态安全,促进经济社会可持续发展。

### [参考文献]

[1]张兆吉,费宇红,李亚松,等.中国地下水污染风险评价方法研究[J].地学前缘,2021,28(5):1-12.

[2]李华,王强,张磊.西南岩溶矿区地下水重金属污染特征及来源解析[J].中国环境科学,2022,42(5):2265-2273.

[3]孙波,高雪.改性生物炭渗透性反应墙修复岩溶地下水重金属污染的试验研究[J].环境工程学报,2024,18(2):567-575.

[4]赵阳,徐涛,刘杰.西南岩溶地区矿产资源开发与地下水环境保护协同发展模式研究[J].中国矿业,2023,32(8):123-129.

[5]蒋忠诚,裴建国,罗为群,等.岩溶地区地下水污染风险评价的思考[J].中国岩溶,2020,39(1):1-8.

### 作者简介:

覃纯(1985—),男,壮族,广西柳州市人,大学本科,工程师,研究方向:水文地质,工程地质和环境地质。