

# 基于生态风险评估的矿山地下水污染治理策略研究

陈晓辉

矿冶科技集团有限公司, 中国·北京 100071

**摘要:** 矿山地下水污染主要源于开采、加工和废物堆存等活动, 这些活动释放的污染物通过各种路径进入地下水系统, 引发污染。这些污染物包括重金属、酸性矿山排水、有机污染物及放射性物质等, 它们的存在严重威胁地下水质量。污染物在地下水中的迁移和扩散受到多种因素影响, 使得污染具有不确定性和长期性, 对周边环境和生态系统产生多方面的影响。本研究旨在通过科学方法和技术, 揭示矿山活动中污染物的行为和路径, 评估其对地下水系统的影响程度, 并在此基础上提出一套有效的治理策略。这些策略旨在减少或消除污染源对地下水系统的负面影响, 保护生态系统完整性和人类健康安全。

**关键词:** 地下水污染; 生态风险评估; 水污染治理策略

## Research on Strategies for Controlling Groundwater Pollution in Mines Based on Ecological Risk Assessment

Xiaohui Chen

Bgrimm Technology Group, Beijing, 100071, China

**Abstract:** Groundwater pollution in mines mainly comes from activities such as mining, processing, and waste storage. The pollutants released from these activities enter the groundwater system through various pathways, causing pollution. These pollutants include heavy metals, acidic mine drainage, organic pollutants, and radioactive substances, which pose a serious threat to groundwater quality. The migration and diffusion of pollutants in groundwater are influenced by various factors, making pollution uncertain and long-term, and having multiple impacts on the surrounding environment and ecosystem. This study aims to reveal the behavior and pathways of pollutants in mining activities through scientific methods and technologies, evaluate their impact on groundwater systems, and propose an effective governance strategy based on this. These strategies aim to reduce or eliminate the negative impact of pollution sources on groundwater systems, protect ecosystem integrity and human health and safety.

**Keywords:** groundwater pollution; ecological risk assessment; water pollution control strategy

### 1 引言

矿山活动, 作为人类对自然资源开发利用的重要方式, 历来对地下水系统产生了深远的影响。这种影响不仅局限于水质的直接变化, 还包括地下水位的动态调整、水文地质条件的改变, 以至于整个生态系统的平衡被打破。地下水, 作为生态系统的重要组成部分, 一旦受到污染, 不仅会直接威胁到水下生物的生存环境, 还会通过食物链等途径间接影响到地表生态系统, 甚至人类健康。例如, 含重金属和有毒化学物质的地下水如果被人类直接或间接摄入, 可能会导致各种慢性疾病甚至致命风险。鉴于矿山地下水污染问题的复杂性和严峻性, 本研究旨在深入评估这一问题带来的生态风险, 探究其对生态系统及人类健康的潜在威胁。通过科学的方法和技术, 本研究力图揭示矿山活动中各种污染物的行为和路径, 评估其对地下水系统的影响程度。

### 2 矿山地下水污染现状分析

在当今世界, 矿山活动作为资源开发的重要组成部分,

对经济发展贡献巨大, 但同时也带来了不容忽视的环境问题, 尤其是地下水污染问题。矿山地下水污染主要来源于矿山开采过程中的各种活动, 包括开挖作业、矿石加工和废物堆存等, 这些活动产生的污染物通过各种途径进入地下水系统, 造成污染。具体来说, 这些污染物物质主要包括重金属(如铅、汞、砷)、酸性矿山排水(AMD)、有机污染物以及放射性物质等, 它们对地下水质量构成严重威胁。

污染物一旦进入地下水系统, 其扩散机制主要依赖于地下水流动的特性以及污染物自身的物理化学性质。例如, 重金属等无机污染物往往通过地下水的流动被带到远处的水体中, 而酸性矿山排水则可能引起地下水 pH 值的显著下降, 从而影响到更广泛区域的水质。污染物在地下水中的迁移和扩散过程复杂, 受到地质结构、水文地质条件以及人类活动等多种因素的影响, 导致污染具有极强的不确定性和长期性。矿山地下水污染对周边环境和生态系统产生的影响是多方面的<sup>[1]</sup>。一方面, 地下水污染会直接影响地表水体的水质, 因为地下水与地表水在许多情况下是相互连接的。这意味

着,地下水的污染物可以通过地下水流动进入河流、湖泊和湿地,影响这些生态系统的水质和生物多样性。另一方面,地下水污染还会影响土壤质量,因为污染的地下水可以通过植物吸收或土壤渗透影响土壤中的重金属含量和酸碱度,进而影响土壤的肥力和生态功能。

### 3 生态风险评估

#### 3.1 风险识别

矿山地下水污染,一个由于矿物开采、加工和废物堆放不当导致的环境问题,不仅影响水质,还对周边的生态系统构成严重威胁。这种污染主要由矿区排水、化学品泄漏、重金属和其他有毒物质的渗透引起,这些污染物随地下水流动,影响广泛,其负面效应可能持续数十年之久。

例如,某有色金属矿排土场有大量酸性废水,严重影响下游地下水水质,故采取“化学灌浆+水泥粘土灌浆”垂直防渗工程技术,评估防渗工程建设前后下游地下水健康风险,暴露途径包括经口摄入地下水、皮肤接触地下水、吸入室外空气中来自地下水的气态污染物、吸入室内空气中来自地下水的气态污染物。

由于水中的重金属主要通过口服直接摄入,其他暴露途径的影响相对较小,因此在两种用地情景下的评估中,主要考虑经口摄入的风险。

第一类用地情景,矿区部分潜在污染源离居民点较近,儿童和成人均可能会长时间暴露污染下而产生健康危害。

对于单一污染物的致癌效应,考虑人群在儿童期和成人期暴露的终生危害。饮用场地及周边受影响地下水对应的地下水暴露量,采用以下公式计算:

$$CGWER_{ca} = \frac{GWCR_c \times EF_c \times ED_c}{BW_c \times AT_{ca}} + \frac{GWCR_a \times EF_a \times ED_a}{BW_a \times AT_{ca}}$$

对于单一污染物的非致癌效应,考虑人群在儿童期的暴露危害。饮用场地及周边受影响地下水对应的地下水暴露

量,采用以下公式计算:

$$CGWER_{nc} = \frac{GWCR_c \times EF_c \times ED_c}{BW_c \times AT_{nc}}$$

第二类用地情景风险评估,在工业用地上,成人的暴露期长、暴露频率高,一般根据成人期的暴露来评估污染物的致癌风险和非致癌效应。

对于单一污染物的致癌效应,考虑人群在成人期暴露的终生危害。饮用场地及周边受影响地下水对应的地下水暴露量,采用以下公式计算:

$$CGWER_{ca} = \frac{GWCR_a \times EF_a \times ED_a}{BW_a \times AT_{ca}}$$

对于单一污染物的非致癌效应,考虑人群在成人期的暴露危害。饮用场地及周边受影响地下水对应的地下水暴露量,采用以下公式计算:

$$CGWER_{nc} = \frac{GWCR_a \times EF_a \times ED_a}{BW_a \times AT_{nc}}$$

其中,EF是暴露频率(day/year),ED是暴露期(year),BW是暴露个体的平均体重(kg),是危害效应平均时间(day)。

非致癌效应的危害商(HQ),以及表示致癌效应的致癌风险(CR),分别使用参考剂量(RfD)和致癌斜率因子(SF)计算得到。

经口摄入地下水中单一污染物的致癌风险,采用以下公式计算:

$$CR_{cgw} = CGWER_{ca} \times C_{gw} \times SF_0$$

经口摄入污染地下水中单一污染物的非致癌危害商,采用以下公式计算:

$$HQ_{cgw} = \frac{CGWER_{nc} \times C_{gw}}{RfD_0 \times WAF}$$

具体结果比较见表1。

表1 地下水重点关注污染物健康风险评估

|         | 取样时间      | 致癌风险      |           |                |         | 非致癌风险          |         |                 |         |                |
|---------|-----------|-----------|-----------|----------------|---------|----------------|---------|-----------------|---------|----------------|
|         |           | 镉         | 铅         | 镉              | 铅       | 铜              | 铁       | 锰               | 锌       | 镍              |
| 防渗工程建设前 | 第一期       | 1.154E-09 | 5.193E-08 | 0.01753        | 0.26561 | 0.00877        | 0.00950 | 0.00783         | 0.00175 | 0.02630        |
|         | 第二期       | 4.051E-09 | 6.024E-08 | 0.06153        | 0.30810 | <b>2.38846</b> | 0.17822 | 0.60729         | 0.09495 | 0.66614        |
|         | 第三期       | 6.497E-08 | 1.257E-07 | 0.98694        | 0.64277 | <b>5.45621</b> | 0.01072 | <b>11.77014</b> | 0.19634 | <b>1.09563</b> |
|         | 第四期       | 8.828E-08 | 1.241E-07 | <b>1.34105</b> | 0.63480 | <b>8.54588</b> | 0.01543 | <b>16.02743</b> | 0.25331 | <b>1.54264</b> |
|         | 第五期       | 2.066E-08 | 3.220E-08 | 0.31379        | 0.16468 | <b>1.50977</b> | 0.01376 | <b>2.51681</b>  | 0.06136 | 0.34841        |
| 防渗工程建设后 | 第一期       | 1.154E-09 | 5.193E-08 | 0.01753        | 0.26561 | 0.00219        | 0.02425 | 0.01252         | 0.00555 | 0.02630        |
|         | 第二期       | 6.924E-10 | 8.309E-09 | 0.01052        | 0.04250 | 0.02176        | 0.00877 | 0.23165         | 0.00599 | <b>1.11754</b> |
|         | 第三期       | 2.077E-09 | 1.091E-08 | 0.03155        | 0.05578 | 0.00975        | 0.00134 | 0.32869         | 0.01513 | 0.62232        |
|         | 第四期       | 8.078E-10 | 1.298E-08 | 0.01227        | 0.06640 | 0.00666        | 0.00877 | 0.02886         | 0.00637 | 0.34271        |
|         | 第五期       | 1.039E-09 | 9.347E-09 | 0.01578        | 0.04781 | 0.00320        | 0.00179 | 0.04721         | 0.00467 | 0.24849        |
|         | 12月份      | --        | --        | --             | --      | --             | --      | --              | 0.00653 | --             |
|         | 1月份       | 1.323E-08 | 2.552E-08 | 0.22025        | 0.14302 | 0.00891        | --      | 0.00338         | 0.00498 | 0.00857        |
|         | 2月份       | 1.470E-08 | 3.402E-08 | 0.24472        | 0.19069 | 0.00350        | 0.00139 | 0.02197         | 0.00530 | 0.00848        |
|         | 3月份       | 1.512E-08 | 2.930E-08 | 0.25171        | 0.16421 | 0.00664        | 0.00389 | 0.00599         | 0.00641 | 0.00874        |
|         | 4月份       | 1.743E-08 | 3.591E-08 | 0.29017        | 0.20128 | 0.01259        | 0.00178 | 0.00320         | 0.01515 | 0.00542        |
| 5月份     | 1.512E-08 | 1.418E-08 | 0.25171   | 0.07945        | 0.01805 | 0.00606        | 0.00343 | 0.00903         | 0.00717 |                |

随着时间的推移,这可能导致物种多样性的减少,甚至是某些物种的灭绝<sup>[1]</sup>。而且人类社区也不可避免地会受到影响。地下水是许多地区的主要饮用水源,其污染不仅影响人类的健康,还可能导致饮用水供应的经济成本增加。长期暴露于被污染的水源中的人群可能会经历从皮肤疾病到更严重的健康问题。

### 3.2 风险量化

在进行矿山地下水污染的生态风险评估时,风险量化环节起着核心作用。它涉及将抽象的风险概念转换为可以量度的指标,从而提供一个明确的视角来理解和管理这些风险。通过使用生态风险评估模型,研究人员能够详细地量化地下水污染对生态系统的潜在危害,包括污染物对生物群落的直接影响,以及这些影响对生态系统功能和服务的间接影响。

在量化风险的过程中,首先要确定哪些污染物是关键的危害因子,这通常依赖于前期的污染物识别和污染现状分析。其次,研究人员需要收集有关这些污染物的环境浓度数据,以及它们在生态系统中的行为和影响。这些数据可能来自现场采样、历史记录或者相关文献。最后,选择或开发适当的生态风险评估模型。这些模型通常基于某种形式的数学框架,可以模拟污染物在环境中的传输和命运,以及它们对生态系统组成部分的潜在影响。例如,一种常见的方法是使用暴露-效应模型,该模型通过比较生物接触污染物的浓度(暴露水平)与已知导致不良效应的浓度阈值(效应水平),来评估风险<sup>[2]</sup>。

为了量化风险水平,研究人员将根据模型输出,计算特定污染物对特定生态受体(如水生生物、植物或微生物)的风险比例。这通常涉及计算风险指数或风险比率,如暴露浓度与效应浓度的比值。通过这种方式,风险量化为一个具体的数值,反映了在当前污染水平下,生态系统或其组成部分遭受不良影响的可能性大小。此外,风险量化过程还包括不确定性分析,这是评估中不可或缺的一部分。由于数据缺乏、模型假设或其他因素,任何风险评估都存在一定程度的不确定性。通过使用敏感性分析、不确定性分析和/或蒙特卡洛模拟等技术,研究人员可以识别和量化这些不确定性,从而更准确地理解风险评估结果的可靠性和限制。

## 4 治理策略与措施

### 4.1 污染预防措施

在处理矿山地下水污染问题时,采取有效的预防措施是避免环境损害的关键。预防策略的核心在于识别和管理矿山活动中可能释放的有害物质,以及保护地下水资源免受这些污染物的影响。实施这些策略需要综合运用环境科学、工程技术和政策等多方面的知识。

第一,合理的矿区规划和环境影响评估是预防地下水污染的基础。通过在矿山设计初期就考虑环境保护,可以避

免很多潜在的污染问题。这包括选择较少影响地下水的开采方法和技术,以及制定紧急应对措施来应对可能的事故泄露。

第二,采用现代化的矿业技术来减少对环境的影响也是一种重要的预防措施。例如,使用封闭循环水系统可以减少水资源的消耗和污染,而固体废物的稳定化处理和安埋可以防止有害物质渗入地下水。此外,采用无害化处理技术处理矿石和废水,可以直接减少排放到环境中的污染物质量<sup>[3]</sup>。

第三,监测和管理矿区周边的水文地质环境是另一个关键环节。通过建立和维护一套全面的地下水监测网络,可以实时监控地下水质量的变化,及时发现污染迹象并采取措施。这种监控还可以帮助研究人员和管理者了解地下水流动模式和污染物传播途径,为制定更有效的预防和应对策略提供科学依据。

而且矿业企业和政府应该投资于研发更先进的污染预防和控制技术。通过技术创新,可以开发出更高效、更环保的矿产资源开发利用方法。同时,支持跨学科研究可以促进环境科学、地质学、水资源管理等领域的知识融合,为解决地下水污染问题提供新思路和方法。

### 4.2 污染治理技术

污染的治理不仅是一个技术问题,也是一个系统工程,它涉及多种技术的综合应用和环境管理策略的有效执行。当前,针对矿山地下水污染的治理技术主要包括物理、化学和生物方法,以及这些方法的组合应用。这些技术旨在直接处理污染源,减少污染物的排放,或在污染物进入环境系统之前进行拦截和处理。

物理方法主要包括泵抽技术和渗透阻隔技术。泵抽技术通过设置泵井,利用泵的作用抽取污染的地下水,然后对其进行净化处理后再排放或回灌。这种方法适用于已经发生污染的地区,可以有效降低地下水中污染物的浓度。渗透阻隔技术则通过建造物理屏障,如防渗膜或者固化墙,阻止污染物向未污染区域的扩散,这种方法多用于预防性控制,尤其是在矿山周边建立防护带,减少由于地表水和降雨引起的污染物渗透。

化学方法包括化学沉淀、离子交换和吸附等技术,这些方法通过化学反应改变污染物的化学性质,使其从地下水中去除。例如,化学沉淀可以通过加入特定的化学试剂,使溶解在水中的有害金属离子发生沉淀,从而被有效移除。离子交换技术利用树脂或其他介质与水中的污染物进行离子交换,达到净化水质的目的。吸附技术则通过活性炭或其他吸附材料捕捉水中的有机污染物和重金属离子,这些技术通常用于处理特定类型的污染物质,具有较高的针对性<sup>[4]</sup>。

生物治理技术是近年来发展较快的一种污染治理方法,它利用微生物或植物的自然净化能力,通过生物降解或生物吸收作用去除地下水中的污染物。例如,通过培养对特定

污染物有高降解效率的微生物,将其注入污染的地下水中,微生物可以将有机污染物分解为无机物质。此外,某些植物具有很强的吸收重金属的能力,通过植物根系吸收污染物并在地上部分积累,然后通过收割植物来去除地下水中的污染物,这种方法被称为植物修复技术。

## 5 结语

在矿山地下水污染治理的实践中,通过科学的分析和综合应用各种治理技术,我们已经能够对污染源进行有效的控制和管理。从预防到治理,从物理方法到生物技术的应用,展示了环境工程和科技进步在应对环境问题方面的强大力量。这些努力不仅有助于直接改善受污染的地下水环境,还能够在更广泛的范围内促进生态系统的恢复和平衡,为人类社会的健康和可持续发展提供坚实的保障。然而,治理矿山地下水污染的挑战并非一蹴而就,它要求我们持续地投入

科研和技术创新,不断完善治理策略。同时,这一过程也强调了多学科合作的重要性,涉及环境科学、工程技术、法律政策、社会经济等多个领域的知识和技能。通过这种跨学科的协作,可以更全面地理解和应对地下水污染问题,从而制定出更加有效和可持续的解决方案。

## 参考文献:

- [1] 王崢.基于地下水污染修复的生态风险评价与优化控制研究[D].北京:华北电力大学(北京),2017.
- [2] 李奇伟.污染场地治理法律制度研究[D].重庆:重庆大学,2015.
- [3] 马兴冠,简文浩,王志毅,等.基于Aquatox模型的水环境治理和水生态修复模拟与决策辅助研究[J].三峡生态环境监测,2022,7(4):48-55.
- [4] 覃荣高,邱仁敏,黎明,等.包气带一含水层地下水污染风险评估研究进展[J].地球科学进展,2020,35(2):13.