

铀尾矿库污染的环境风险评估与防治对策研究

张慕雨

南华大学, 湖南衡阳, 421001;

摘要: 铀尾矿库作为铀矿资源开发过程中产生的典型放射性固体废弃物堆存设施, 其长期存在对周边生态环境构成持续的潜在风险。本文基于已有研究成果与相关监测资料, 从污染源特征、迁移扩散过程及环境风险评估方法等方面, 对铀尾矿库污染的环境行为与生态影响进行了系统分析。研究表明, 铀及其衰变产物与伴生重金属可在降雨淋溶、地表径流和地下水渗滤等作用下, 在水—土系统中发生迁移和富集, 呈现出明显的空间异质性和长期累积特征, 对水资源安全、土壤质量及生态系统稳定性产生不利影响。在综合分析污染环境效应的基础上, 本文进一步探讨了铀尾矿库污染防治与生态修复的技术路径, 认为应以污染源控制为核心, 通过工程防渗、长期环境监测及风险评估相结合, 降低污染物向外环境扩散的可能性; 同时, 以生态系统结构与功能恢复为目标, 统筹推进植被恢复与环境修复措施, 实现环境风险管控与生态质量提升的协同。研究结果可为铀尾矿库环境风险管理与矿区生态修复实践提供参考。

关键词: 铀尾矿库; 环境污染; 风险评估; 生态影响; 生态修复

DOI: 10.69979/3029-2727.26.03.090

绪论

铀矿资源作为国家重要的战略性资源, 其开发在我国资源利用体系中有着重要地位, 但伴随铀矿选冶过程中产生的铀尾矿库大量堆存, 也造成了长期的环境风险问题。在过去几十年的时间里, 我国各类矿山采选行业快速发展, 产生的尾矿已成为我国目前产生量和堆存量最大的工业固体废物^[1]。铀尾矿库是铀矿开采与选冶过程中产生的放射性尾矿集中堆存场所, 含有高浓度的放射性核素及伴生的重金属元素, 在自然降雨、淋溶及风化等作用下, 可能对周边土壤和水体造成污染。尾矿库作为贮存尾矿的场所, 一旦发生溃坝等安全事件, 极易引发次生突发环境事件, 对周边生态环境造成严重影响^[2], 这种污染一旦进入环境介质体系便具有长期性和隐蔽性特点, 难以通过短期治理完全消除。研究发现, 在铀尾矿库周边的水—土系统内, 铀及其衰变产物的浓度会随水循环而呈现空间分布上的差异, 并且部分采样点的土壤铀含量已明显高于周边背景值, 显示出铀尾矿库对周边环境尤其是水体和土壤生态系统具有潜在污染风险。这种风险不仅可能累积在环境中, 还可能通过食物链扩散, 影响生态系统功能甚至居民健康。

我国尾矿库环境风险治理正逐步强化管理力度, 国内外研究普遍认为, 有必要将铀尾矿库污染问题纳入整体环境风险管理体系, 通过量化评估污染物在介质间的

迁移转化行为和潜在危害, 构建系统性的风险评估方法, 为污染防治和环境监管提供科学依据。鉴于铀尾矿库污染可能对区域生态安全与人类健康造成的长期潜在影响, 针对其污染环境风险开展综合评估研究, 并提出有效防治对策具有重要的实践意义。

1 铀尾矿库污染源、扩散途径与环境风险评估方法

1.1 铀尾矿库主要污染源特征

铀尾矿库是铀矿选冶过程中产生尾矿集中堆存的主要设施, 具有长期堆存、含放射性核素和伴生重金属等污染特点。铀及其衰变产物、砷、铅等重金属在自然条件下的长期累积和稳定存在, 使尾矿库成为长期的污染源。研究指出, 尾矿库中的污染物质在长期风化、降雨淋溶等环境作用下可能释放并进入环境介质, 对生态和人类健康构成潜在压力。污染源特征分析是环境风险评估的基础, 有助于明确污染物的成分结构及可能释放行为。

1.2 污染扩散途径及其环境影响

铀尾矿库污染不仅局限于库区内部, 而是通过各种环境途径向周边扩散。水体介质是污染物扩散的主要通道之一, 降雨径流、地下水渗滤等过程可促使铀及伴生污染物向周边水体传播, 并在下游沉积或进入农田灌溉

体系,造成水—土系统的累积污染。污染物在土壤中的迁移特征还与地形、土壤类型、气候等多种因素相关,表现出明显的空间异质性。对扩散路径的识别和分析有助于理解污染物在环境介质中的迁移机制,从而为后续的评估和防治提供依据。

1.3 环境风险评估方法及泛指分析

针对铀尾矿库的复杂污染特性,国内研究提出了多种风险评估方法,常见的包括污染因子评价法、综合污染指数及潜在生态风险指数等。这些方法通过分析污染物在土壤、水体等介质中的浓度水平及其生态影响潜力,实现对污染风险的定量评估。例如,污染指数法可以反映单一指标的污染状况,潜在生态风险指数则在综合考虑污染物毒性和污染水平的基础上,更全面地反映环境风险程度。环境风险评估的过程通常结合现场监测数据和统计分析,为污染防治策略提供科学支撑。

2 铀尾矿库污染对生态环境的影响

2.1 铀尾矿库污染对水资源环境的影响

铀尾矿库中的放射性物质和伴生重金属在自然降雨、渗滤及地表径流作用下可能通过水体介质迁移并扩散至周边环境,导致水质恶化和生态损害。城市生活污水中重金属含量很少,但由于我国工业发展迅速,工矿企业污水未经分流处理而排入下水道与生活污水混合排放^[3],铀及其伴生污染物在不同介质间迁移过程呈现明显空间异质性分布。研究表明,在某些铀尾矿区的地下水和表层土壤中,铀浓度随渗滤水流动显著降低,但在库体附近的水体和渗滤区域仍呈现超标趋势,显示尾矿渗滤水对水环境构成持续性影响。这种迁移机制不仅威胁水体生态健康,同时也为农业灌溉和饮用水安全带来潜在风险,因此在对尾矿库环境影响进行评估时,必须充分考虑水—土耦合影响与水循环过程中的污染扩散特征。

2.2 铀尾矿库污染对土壤环境的影响

铀尾矿库和相关矿区土壤常处于污染物累积、高生态风险状态。土壤重金属污染具有污染物在土壤中移动性差、滞留时间长、不能被微生物降解的特点,并可经水、植物等介质最终影响人类健康。^[4]这说明尾矿库周边农田和自然生态土壤受到了污染压力。这一累积效应不仅影响土壤质量,还可能通过农作物吸收进入食物链,进一步放大对生态系统和人类健康的潜在威胁。因此,在

评价尾矿库污染影响时,必须将土壤污染分析纳入整体环境风险评估体系,从而全面揭示尾矿库对土壤生态环境的损害程度。

2.3 铀尾矿库污染对生态系统的综合影响

生态系统是一个多层级、复杂相互作用的环境网络,尾矿库污染对生态系统的影响具有系统性和累积性。铀及伴生重金属进入土壤和水体后,可通过食物链累积效应影响植物、微生物、无脊椎动物等不同生物群体,从而破坏生态平衡。例如,尾矿库周边土壤重金属的累积,会抑制植物生长,降低植物群落多样性和生产力;重金属在食物链中的富集还可能导致动物摄入量增加,进而引发生理毒性反应。这种生态影响不仅表现为个体生长受损,还可能通过生态系统服务功能的下降(如净化水体、保持土壤结构、支持食物网等)反映出来,使整个生态系统功能退化。因此,铀尾矿库污染的生态影响评价应着眼于多层级生态结构,从水、土到生物群落层面综合分析其对生态系统的长期累积性破坏,以便为区域生态安全管理提供更全面的科学依据。

3 铀尾矿库污染的防治对策

3.1 铀尾矿库污染源控制

铀尾矿库污染防治的核心在于对污染源进行系统、全过程的控制,其根本目标是最大限度降低放射性核素及伴生重金属向外环境迁移和扩散的可能性。由于铀尾矿库具有堆存规模大、服役周期长以及潜在放射性危害持续时间长等特点,其污染源控制措施需从工程安全性与环境长期稳定性两个层面协同推进。相关研究和技术规范指出,通过强化尾矿库底部及坝体的防渗结构、提高防渗材料的完整性与耐久性,是降低污染物渗漏风险的关键技术手段之一。同时,针对尾矿堆体表层,应通过科学设计覆盖系统,减少降水入渗和风蚀作用,从源头削弱污染物活化与迁移条件。

此外,铀尾矿库污染源控制并非一次性工程措施,而是一项贯穿运行期、封库期及后期管理全过程的系统性工作。通过建立以地下水、地表水和周边土壤为重点的环境监测体系,持续掌握污染物浓度变化趋势,可为风险预警和管理决策提供科学依据。在此基础上,将监测结果与环境风险评估相结合,动态调整运行管理与防护措施,有助于在污染尚未扩散之前采取针对性干预手段,从而实现铀尾矿库环境风险的前端防控和长期安全

管理。

3.2 生态修复与环境恢复技术

在污染源得到有效控制的前提下,对铀尾矿库及其周边受影响区域实施生态修复与环境恢复,是缓解历史污染影响、改善区域生态环境质量的重要途径。相关研究认为,尾矿库生态修复应以恢复生态系统结构与功能为核心目标,遵循“工程措施与生态过程相结合”的基本原则,通过多技术协同逐步提升受损区域的生态稳定性。在具体实践中,可结合尾矿库地形条件与污染特征,采取地表整形、覆土改良等措施,为植被恢复创造基础条件。

在植被恢复方面,应优先选择耐贫瘠、耐污染且生态适应性较强的植物物种,以增强地表覆盖度、减少水土流失,并在一定程度上抑制污染物迁移活性。同时,植被生长过程有助于改善土壤理化性质,促进土壤结构和微生物系统的逐步恢复。需要强调的是,铀尾矿库生态修复具有显著的长期性特征,应避免单纯追求短期景观效果,而忽视生态系统自然演替规律。通过将污染治理措施与生态修复技术有机结合,可在降低铀尾矿库环境风险的同时,逐步提升区域生态安全水平与环境承载能力,为矿区环境治理的可持续实施奠定基础。

4 结论

铀尾矿库作为铀矿资源开发过程中不可避免的产物,其长期堆存所带来的环境风险具有复杂性、隐蔽性和持续性特征。本文围绕铀尾矿库污染问题,从污染源构成、扩散途径、生态环境影响以及防治对策等方面进行了系统梳理与综合分析,认为铀尾矿库污染风险不仅表现为放射性物质和重金属对水体、土壤等环境介质的直接影响,还通过长期累积和多途径扩散,对区域生态系统稳定性和人类健康构成潜在威胁。在资源型地区转型和生态环境保护要求不断提升的背景下,铀尾矿库污染问题已由单一工程安全问题转变为涉及生态安全、公共健康与区域可持续发展的综合性环境议题。

研究认为,铀尾矿库污染防治应以风险预防和源头控制为核心,通过加强污染源管控、降低污染物迁移扩散可能性,从根本上减少环境风险的发生。同时,在污染已对周边环境产生影响的区域,应以恢复生态系统功能为目标,统筹推进污染治理与生态修复,逐步改善受损环境质量。污染防治措施的实施不仅有助于降低铀尾矿库对自然环境的负面影响,也在一定程度上提升了区域生态服务功能,为资源型地区的可持续发展创造有利条件。

面向未来,铀尾矿库污染防治仍需在实践中不断完善和优化。一方面,应结合不同区域自然条件和尾矿库现状,因地制宜推进防治策略的实施,避免单一模式的简单套用;另一方面,有必要在长期监测和风险评估的基础上,持续优化管理和治理措施,使防治策略更加科学、系统和可持续。通过不断强化风险意识、完善防治体系,铀尾矿库污染防治工作有望在保障生态安全与促进社会发展的双重目标下取得更为积极的成效。

参考文献

- [1] 魏清伟, 邢永鑫, 陈思莉, 等. 我国突发环境事件演变态势、应对经验及防控建议[J]. 环境工程学报, 2021, 15(07): 2223-2232.
- [2] 贾倩, 刘彬彬, 於方, 等. 我国尾矿库突发环境事件统计分析对策建议[J]. 安全与环境工程, 2015, 22(02): 92-96+101. DOI:10.13578/j.cnki.issn.1671-1556.2015.02.018.
- [3] 陈兴兰, 杨成波. 土壤重金属污染、生态效应及植物修复技术[J]. 农业环境与发展, 2010, 27(03): 58-62.
- [4] 崔德杰, 张玉龙. 土壤重金属污染现状与修复技术研究进展[J]. 土壤通报, 2004, (03): 366-370. DOI:10.19336/j.cnki.trtb.2004.03.029.

作者简介: 张慕雨(1998.08-), 女, 汉族, 湖南衡阳人, 硕士在读, 研究方向: 环境设计。