

Monitoring Technology and Optimization Strategies for Heavy Metal Pollution in Environmental Engineering

Haiyang Liu Yuhong Tang Yonghong He

Sichuan Zhonghuan Lianshu Environmental Consulting Services Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 610100, China

Abstract

With the acceleration of industrialization and urbanization, heavy metal pollution has become a major problem in environmental pollution, posing a serious threat to ecosystems and human health. The sources of heavy metals are complex, and the continuous development of monitoring methods and technologies has gradually led to the technological and systematic treatment of heavy metal pollution in environmental engineering. This article starts with the current situation of heavy metal pollution, explores common monitoring technologies for heavy metal pollution, analyzes the advantages and disadvantages of existing monitoring technologies, and proposes strategies for optimizing monitoring technologies. By comparing and analyzing various monitoring methods, combined with practical application cases, some optimization paths and technical strategies are proposed in order to provide theoretical reference for the precise monitoring and treatment of heavy metal pollution.

Keywords

heavy metal pollution; Monitoring technology; Optimization strategy; Environmental engineering; Pollution control

环境工程中重金属污染监测技术及其优化策略

刘海洋 唐玉红* 何永洪

四川中环联蜀环境咨询服务有限公司, 中国·四川成都 610100

摘要

随着工业化和城市化进程的加速, 重金属污染成为环境污染中的一大问题, 对生态系统和人类健康造成严重威胁。重金属的来源复杂, 监测手段和技术的不断发展使得环境工程中的重金属污染治理逐步进入技术化、系统化阶段。本文从重金属污染的现状入手, 探讨了常见的重金属污染监测技术, 并对现有监测技术的优缺点进行了分析, 同时提出了优化监测技术的策略。通过对比分析多种监测方法, 结合实际应用案例, 提出了一些优化路径和技术策略, 以期为重金属污染的精准监控与治理提供理论参考。

关键词

重金属污染; 监测技术; 优化策略; 环境工程; 污染治理

1 引言

重金属污染是全球范围内的一大环境问题, 尤其在工业化和农业化高度发展的地区尤为突出。由于重金属具有强毒性、积累性和难以降解的特性, 传统的环境监测技术往往无法满足精确、实时、长期的监测需求。重金属的污染监测技术涉及从样品采集、预处理、分析检测到结果报告的全过程, 涵盖了物理、化学、光谱等多学科知识。尽管现有技术在某些方面取得了较好的监测效果, 但随着重金属污染源多样化及其变化性增大, 传统监测技术难以满足实时性、灵敏

度和精准度的要求。因此优化现有监测技术, 提高重金属污染监测的效率和准确性, 成为当务之急。

2 重金属污染的现状与危害

2.1 重金属污染的来源与分布特征

重金属污染的形成往往具有多源性和区域性, 其主要来源可划分为自然源和人为源两大类。自然源包括地壳风化、火山喷发和金属矿床释放等, 但相较于人为源, 其影响范围和污染强度较小^[1]。人为源则是当前重金属污染的主要推动因素, 尤其是工业排放、采矿冶炼、金属加工、电镀行业、造纸及染料制造、农业施肥和城市垃圾填埋等活动, 释放出大量的铅(Pb)、镉(Cd)、汞(Hg)、铬(Cr)、砷(As)等高毒性重金属元素。在空间分布上, 重金属污染通常呈现出“点源污染与面源扩散并存”的特征。点源污染主要集中在工业园区、矿区周边或污水排放口附近, 而面源扩散则通过雨水径流、灌溉渗透等路径, 将重金属逐步输送至土壤深

【作者简介】刘海洋(1990-), 男, 中国四川遂宁人, 本科, 工程师, 从事环境监测、环境损害司法鉴定研究。

【通讯作者】唐玉红(1993-), 女, 中国四川遂宁人, 本科, 工程师, 从事环境监测研究。

层、水体和地下水系统。中国在快速工业化进程中，也面临严重的重金属污染问题。据生态环境部发布的《全国土壤污染状况调查公报》，调查结果显示，镉、汞、砷、铅4种无机污染物含量分布呈现从西北到东南、从东北到西南方向逐渐升高的态势。在华南、华东和西南一些有色金属矿产资源密集区，土壤和地表水中重金属超标问题确实较为突出，也在一定程度上影响了农产品质量和居民饮水安全。

2.2 重金属污染的环境与健康危害

重金属在环境中的存在及其累积效应，对生态系统结构与功能、人类健康以及社会经济发展造成深远影响。生态层面，重金属进入水体后不仅能直接毒害浮游生物和水生植物，还会通过食物链向上传递，造成鱼类、鸟类和哺乳动物的慢性中毒甚至种群衰退。在土壤系统中，重金属能够抑制有益微生物的活性，破坏土壤酶系统与养分循环，造成土壤板结、耕作层硬化，进而降低作物产量与农产品安全。从人体健康角度来看，重金属对神经系统、血液系统、肾功能及骨骼系统均有不可逆的损伤。重金属的环境风险具有时间滞后性和累积性，其在环境介质中的存在周期往往长达数十年甚至更久。一旦污染发生，治理难度大、成本高，需通过工程技术手段进行长期修复，如土壤淋洗、稳定化处理、植物修复等，均存在周期长、效率低、二次风险等问题。不仅如此，当前全球气候变化趋势亦加剧了重金属污染的动态复杂性^[2]。因此，在当前生态环境日趋脆弱的大背景下，重金属污染问题已经从单一的环境问题上升为系统性的生态安全与公共健康挑战。

3 重金属污染监测技术分析

3.1 传统监测技术

在环境工程实践中，传统的重金属污染监测技术仍占据主导地位，尤其是在实验室分析领域具有不可替代的权威性。这些方法主要依赖于精密仪器，具备良好的检测灵敏度和准确性，广泛应用于水体、土壤和生物样品中的重金属元素定量分析。代表性技术包括原子吸收光谱法（AAS）、原子荧光光谱法（AFS）、电感耦合等离子体发射光谱法（ICP-OES）及电感耦合等离子体质谱法（ICP-MS）等。

原子吸收光谱法（AAS）是目前最为常见的分析手段之一，尤其适用于检测铅、镉、锌等常见金属元素，具有操作简便、灵敏度高的特点。但其最大缺点在于只能单元素分析，效率相对较低。相比之下，ICP-OES和ICP-MS属于多元素同时分析技术，尤其是ICP-MS，具备极高的检测灵敏度（可达ng/L级），适合微量、超痕量重金属元素的监测，近年来在水质和食品检测中应用广泛。然而，这类仪器购置成本高、维护费用大、操作复杂，且对样品前处理要求严格，限制了其在现场快速监测中的应用。而传统方法通常需要采样、储存和运输等流程，存在样品污染、成分变化等潜在问题，可能影响分析结果的准确性。同时，样品处理周期长、

无法实现即时反馈，也不适用于重金属污染事件的快速响应与应急监测。尽管如此，传统分析技术因其成熟度高、标准方法体系完善、国际认可度强，仍是现阶段各类重金属污染风险评估和政府监管所依赖的基础手段。

3.2 新兴监测技术

为弥补传统方法在实时性、灵活性及现场适用性方面的不足，近年来新兴监测技术快速发展，成为重金属污染监测领域的重要补充。这些新技术在提升检测效率、降低成本、实现在线监控等方面具有明显优势，特别适用于污染源排查、现场应急监测和动态趋势分析等场景。主要包括电化学传感器技术、纳米材料传感技术、生物传感技术以及遥感与无线网络监测技术等。电化学传感器技术通过构建敏感电极材料，能实现对特定重金属离子的选择性识别和快速响应。例如，基于修饰玻碳电极的阳极溶出伏安法（ASV）可对铅、镉等离子进行痕量检测，检测限可低至ppb级，具有响应时间短、操作简便、便携性强的优势，适用于现场监测与在线分析^[3]。

纳米材料的引入进一步提升了传感器的灵敏度和选择性。金属纳米颗粒、碳纳米管、石墨烯等材料因其比表面积大、电导率高，可作为传感界面的增强载体，显著提高电极反应性能。如使用纳米金修饰电极可显著提高对 Hg^{2+} 的检测灵敏度，使其在复杂环境介质中依然保持良好的检测稳定性。生物传感技术则通过利用微生物、酶或DNA等生物活性材料对重金属的特异性反应，间接判断污染物的存在与浓度。这类技术以其生态友好、响应直观、适应性强等优点，广泛应用于河流生态监测和地下水污染跟踪等领域。以微生物发光抑制为原理的毒性传感器，已被用于评估污染物的综合生物毒性，具备较高的实用价值。遥感与无线传感网络（WSN）技术的结合则为区域性大范围重金属污染监测提供了新路径。通过部署无线传感终端节点与无人机或卫星影像数据集成，可实现远程连续监测、数据实时传输与污染溯源分析，特别适合大型流域和复杂地质区的动态监控。

3.3 监测方法的优缺点分析

在当前环境工程领域的实际应用中，重金属污染监测方法种类繁多，不同技术体系各有优势与不足。从整体来看，传统监测技术以其高精度、高稳定性及成熟的标准体系，成为国家及地方环保部门制定环境质量评价的重要依据；而新兴技术则凭借灵活性、实时性和现场适应能力，为动态监测和污染溯源提供了有力补充。为更清晰地认知二者的适用边界及优化方向，有必要对其性能参数、应用场景及制约因素进行系统分析。

传统分析技术（如AAS、ICP-OES、ICP-MS）优点在于检出限低、定量能力强、分析误差小，适用于对精确度要求较高的实验室分析与法规执行场景，尤其在法定排放监测、环境影响评价及污染物总量核算中发挥核心作用。但其存在显著局限：第一，设备昂贵且依赖专业实验人员操作；

其次,样品采集与处理过程繁琐,难以实现快速响应;第二,不适合大范围、多点位的连续监测。总体而言,传统方法更偏向于“离线分析”,难以满足现代环境管理中“在线监测+动态控制”的综合需求。新兴监测技术则体现出高度的场景适应性与系统集成潜力。电化学与纳米传感技术可嵌入便携设备,实现现场即时检测。生物传感技术在评估污染毒性和生物有效性方面具有不可替代的生态意义;遥感与无线网络监测技术则适合构建区域级甚至城市级的智能感知系统。这些技术在实际操作中具有响应快、维护简单、部署灵活等优势,能有效提升数据采集频率与空间覆盖度。

4 重金属污染监测技术的优化策略

4.1 多元技术融合构建综合监测体系

鉴于现有单一技术难以覆盖重金属污染的多样化表现与复杂迁移行为,优化重金属污染监测的首要策略应是推进多元监测技术的集成融合。通过将传统高精度分析方法与新型快速检测手段相结合,可兼顾定量准确性与现场适应性。例如,在流域或工业园区监测中,可布设电化学传感器进行实时动态监控,同时定期采样使用 ICP-MS 进行实验室精确分析,以构建“点—线—面”三维互补的监测格局。此外,多元融合不仅限于技术层面,还应包括数据源的协同整合。可通过传感器、遥感影像、无人机监测等多种来源采集数据,并借助 GIS 地理信息系统进行空间可视化,提升污染分布、迁移路径及风险区域的直观识别能力。通过构建基于多源数据融合的污染图谱模型,有助于开展污染预警、趋势预测及应急响应策略部署,为环境管理提供科学依据。

4.2 推动监测设备智能化与自动化升级

传统重金属监测设备通常依赖人工采样与离线操作,不仅效率低下,且数据时效性不足。为适应现代环境治理“全过程、全天候”监管需求,亟需推动监测设备的智能化与自动化升级。通过集成嵌入式系统、微处理器与无线通信模块,可实现无人值守、自动采样、自动检测与数据远程传输。以自动水质监测站为例,其已在部分流域实现对铅、镉、汞等重点金属元素的在线实时监控。结合工业物联网(IoT)与5G通信技术,监测终端能够实现故障自检、数据加密传输及远程参数调控,大大提升监测系统的响应速度与稳定性。

同时,AI算法的引入亦可推动监测设备实现智能识别异常、误差自校准、数据趋势分析等高阶功能,进一步提高监测的准确性与前瞻性。

4.3 完善监测标准体系与协同监管机制

技术优化的根本落脚点在于制度建设与标准规范的支撑。当前,不少新兴重金属监测技术尚未纳入国家或行业标准体系,缺乏统一的采样方法、数据处理规范与质量控制指标,导致其在政策执行与环境执法中应用受限。因此,优化策略应包括推动多层次标准体系建设,明确各类监测技术的适用范围、操作规程与质量保障要求。同时应构建多部门协同监管机制,推动环保、水利、农业、卫生等多部门间的信息共享与联动响应。通过建设统一的数据平台和污染数据库,实现跨区域、跨行业的重金属污染监测与治理协同,提升环境治理合力。特别是在跨流域、跨界域的污染治理中,协同监测机制不仅能提高污染追踪效率,也能增强区域间责任分担与数据互信,为生态环境保护提供制度保障。

5 结语

重金属污染问题复杂而严峻,对生态环境与人类健康构成持续威胁。针对现有监测技术在实时性与适应性方面的不足,本文结合传统与新兴技术特点,提出了多元融合、智能升级、标准完善的优化策略。实践中应强化技术集成、推进设备智能化,并构建统一的监管体系,以提升监测效率与治理水平。相信随着信息技术的持续发展,重金属污染监测将更加精准高效,为环境工程提供有力支撑。

参考文献

- [1] 朱海鹏,刘元元,杨超,等.基于机器学习和PLS-SEM的农田土壤重金属污染驱动机制——以湖南省湘潭县为例[J/OL].农业环境科学学报,1-28[2025-03-30].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1347.S.20250328.1546.004.html>.
- [2] 谭晓辉,黄灏,胡荣光,等.东莞市水乡地区农业土壤重金属污染特征及风险评价[J/OL].吉林大学学报(地球科学版),1-14[2025-03-30].<https://doi.org/10.13278/j.cnki.jjuese.20230259>.
- [3] 孙欣源,赵九江,郭莹莹.自然环境中铬的形态和生物有效性研究及分析技术进展[J/OL].岩矿测试,1-14[2025-03-30].<https://doi.org/10.15898/j.ykcs.202410280226>.