

Comparative study on analytical methods of heavy metal pollutants in environmental monitoring

Haiyin Liang

Shanxi Quanhai Ecological Testing Co., Ltd., Jinzhong, Shanxi, 032000, China

Abstract

Heavy metal pollutants, due to their strong toxicity, high bioaccumulation, and environmental persistence, have become a key focus in environmental monitoring. Accurately assessing their concentrations in water, soil, and air is crucial for pollution control and ecological protection. Current analytical methods include traditional atomic absorption spectroscopy, electrochemical analysis, and modern techniques such as inductively coupled plasma mass spectrometry and X-ray fluorescence, each with its own technical advantages and limitations. This paper compares and analyzes different heavy metal detection methods in terms of their principles, performance parameters, applicable media, and field usability, exploring their suitability for routine testing, trace identification, and emergency monitoring. It aims to provide technical support for optimizing heavy metal pollutant analysis strategies and to promote the standardization and quality control system development of related methodologies.

Keywords

heavy metal pollution; environmental monitoring; analytical methods; comparative study; technical applicability

环境检测中重金属污染物的分析方法比较研究

梁海崑

山西泉海生态检测有限公司, 中国 · 山西 晋中 032000

摘 要

重金属污染物因其毒性强、生物富集性高及环境持久性, 成为环境检测领域关注的重点对象。准确掌握其在水体、土壤与大气等环境介质中的含量, 对污染防治与生态保护具有重要意义。当前分析方法包括传统的原子吸收光谱法、电化学分析法及现代的电感耦合等离子体质谱法、X射线荧光法等, 各具技术优势与局限性。本文围绕不同重金属检测方法的原理、性能参数、适用介质及现场实用性进行比较分析, 探讨其在常规检测、痕量识别和应急监测中的适配性, 为优化重金属污染物分析策略提供技术支撑, 并推动相关方法体系的标准化发展与质量控制体系建设。

关键词

重金属污染; 环境检测; 分析方法; 比对研究; 技术适用性

1 引言

随着工业化与城市化进程的加快, 重金属污染问题日益凸显, 其对生态系统与人体健康构成长期威胁。重金属污染具有隐蔽性和累积性, 常在水体沉积物、土壤颗粒和大气颗粒物中以多种形态存在, 难以通过单一手段实现精准识别与全面控制。环境检测作为污染防治的技术前沿, 对重金属污染物的分析方法提出了更高要求。如何在不同介质、不同浓度条件下实现高灵敏、低干扰的快速检测, 成为检测体系构建的关键技术命题。本文聚焦于现行主流重金属检测方法, 深入分析其理论基础、适用条件与数据可靠性, 从而为分析手段的选择、组合与优化提供系统性研究依据。

【作者简介】梁海崑 (1997-), 女, 中国山西晋中人, 硕士, 助理工程师, 从事环境检测研究。

2 环境中常见重金属污染物的种类与分布特征

2.1 典型重金属元素的来源与环境行为特性

镉、铅、汞、铬、砷、铜、锌等为常见的环境重金属污染物, 其主要来源包括矿产开采、冶金工业、化工排放、机动车尾气、电子垃圾拆解与农业施肥活动。这些元素具有显著的毒理学特征, 在生态系统中难以降解, 易发生生物积累和食物链放大作用。铅常来源于蓄电池制造及燃油添加剂, 镉多见于电镀与塑料制品中, 砷则广泛分布于采矿与农药残留中。重金属在环境中表现出较强的迁移性, 受 pH、氧化还原电位、有机质含量及温度等因素影响, 其形态可在游离态、络合态、沉淀态等状态间转化, 不同形态对应的毒性和活性差异显著, 对环境行为及监测方法的选择提出了多元技术需求。

2.2 重金属污染在水体、土壤与空气中的富集机制

水体中重金属污染常以可溶态、悬浮态或沉积物结合

态存在,可通过工业废水排放、地表径流与大气沉降进入河流湖泊系统,在沉积物中富集并形成潜在污染源。土壤中的重金属富集与地质背景、农用化学品投入及废弃物填埋密切相关,尤其在酸性土壤中迁移性与生物有效性增强,易被植物吸收进入食物链。空气中重金属以颗粒物结合状态广泛分布,主要通过高温排放过程释放,细颗粒物携带的重金属可在大气中长距离输送,并通过干湿沉降方式回归地表。多介质之间的交互作用增强了重金属污染的空间扩散性和时间持久性,对环境监测手段的空间适应性和分辨能力提出了挑战。

3 传统重金属检测方法的原理与应用

3.1 原子吸收光谱法(AAS)在重金属测定中的适用性

原子吸收光谱法是一种基于气态原子对特定波长光吸收能力的定量分析技术,广泛用于多种重金属元素的浓度检测。该方法利用空心阴极灯发出的元素特征谱线作为光源,样品经过雾化器进入火焰或石墨炉中被加热至原子态,光束穿过原子云时部分被吸收,吸收强度与元素浓度成正比。AAS方法具有选择性好、灵敏度高、操作相对简单等优点,适用于水样、植物样及土壤提取液中的镉、铅、铜、锌等重金属测定。采用火焰原子吸收法时检测限一般在ppm级,而石墨炉原子吸收法可达ppb级。其主要局限在于单元素分析效率较低,样品前处理过程复杂,部分元素测定存在干扰风险,对操作条件控制的依赖程度较高。

3.2 紫外-可见分光光度法的应用条件与局限

紫外-可见分光光度法利用某些重金属与显色剂反应后形成的络合物在特定波长范围内具有吸收峰,通过测定吸光度来推算金属离子的浓度。该方法常用于检测铁、铬、锰、铅等重金属,显色剂如邻菲罗啉、二苯卡巴肼等与金属离子反应形成稳定化合物,在280nm至700nm范围内产生特征吸收。仪器结构简单、分析速度快、成本低廉,适合常规批量样品初步筛查和教学实验应用。但其灵敏度相对有限,通常适用于mg/L浓度级别,分析中易受到共存离子的干扰,显色剂选择及pH控制对测定结果影响显著,复杂样品需经化学前处理去除干扰组分。测量结果受光源稳定性、比色皿清洁程度和显色反应时效性影响较大,不适用于痕量检测与自动化分析场景。

3.3 电化学分析法在现场检测中的效率表现

电化学分析法通过研究电极电位或电流随溶液中重金属离子浓度变化的规律,实现元素的定量分析。常见技术包括极谱法、阳极溶出伏安法与电位滴定法等,尤其在检测铅、镉、汞等活性金属方面表现出较高灵敏度。该方法无需复杂的光学系统,仪器便携、操作简便,适用于现场快速检测与应急监测。阳极溶出伏安法的检测限可达ng/L水平,分析过程中金属离子在电极上预富集,有效提升灵敏度。其技

术瓶颈在于多元素同时分析能力不足,电极污染与记忆效应可能导致重复性下降,电解质种类、缓冲体系及pH对信号响应稳定性具有显著影响。尽管如此,电化学方法在野外调查与低成本监测场景中仍具有不可替代的实用价值。

4 现代高灵敏度分析技术的应用现状

4.1 电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)的分析优势

电感耦合等离子体质谱法具备极高的灵敏度和宽广的线性范围,可对痕量至超痕量级别的重金属元素实现精确定量。该技术通过高温等离子体将样品中的金属元素电离后,利用质谱仪对离子按质荷比进行分离与检测,适用于多种环境样品中的金属分析。ICP-MS具有多元素同时检测的能力,能够在一次进样中获得完整的谱图信息,提升了检测效率和数据完整性。检测限通常可达ng/L或更低水平,显著优于传统光谱法,在超纯水、大气降尘及低浓度土壤浸提液中表现出色。由于其抗干扰能力较强,能够借助碰撞反应池技术减少共存离子的影响,提升结果的准确性,是当前重金属环境检测中标准化程度较高的分析手段之一,图1为电感耦合等离子体质谱法工作流程。

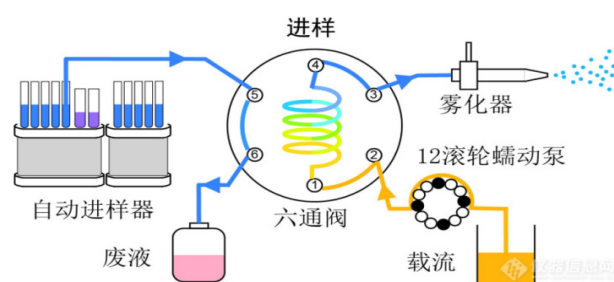


图1 电感耦合等离子体质谱法工作流程

4.2 X射线荧光光谱法(XRF)在固体样品检测中的作用

X射线荧光光谱法以其非破坏性、无需复杂前处理和快速分析的特性,在重金属污染的原位监测与固体样品定性定量分析中具有重要地位。当高能X射线照射样品时,样品原子内层电子被激发逸出,外层电子跃迁产生特征荧光X射线,不同元素的荧光能量具有独特性,便于识别与定量。XRF广泛应用于土壤、底泥、固废和建材样品中重金属的快速筛查,能够实现多元素同步检测,具有操作简便和重复性强的优势。其灵敏度受限于样品基体与元素间的相互干扰,通常适合中高浓度区间的元素测定。便携式XRF设备的普及推动了该技术在野外调查、污染源追踪及监管执法中的实用化进程,是高效、高通量固体污染物检测的可靠工具。

4.3 液相色谱-质谱联用技术在痕量分析中的适应场景

液相色谱-质谱联用技术结合了色谱分离与质谱检测

的优势,具备高选择性、高灵敏度与强适配性等特征,适用于复杂环境基体中重金属有机络合物或特定形态的痕量分析。该技术通过液相色谱将样品中不同形态的金属络合物进行高效分离,进入质谱后再按照质荷比分离检测,实现对目标组分的精确定量。适用于水中三价铬与六价铬、有机汞与无机汞等形态的识别,尤其在毒理学关联研究中展现出独特

价值。其前处理过程需结合萃取、衍生或络合等手段以保证分析物稳定性与检出率,技术路径复杂但结果数据具备较高的可信度与重现性。在高端科研、环境风险评估和痕量污染监测中,该联用技术因其高分辨率与定性能力被广泛采用,推动重金属分析精细化方向发展,图2为环境检测中液相色谱的检测流程。

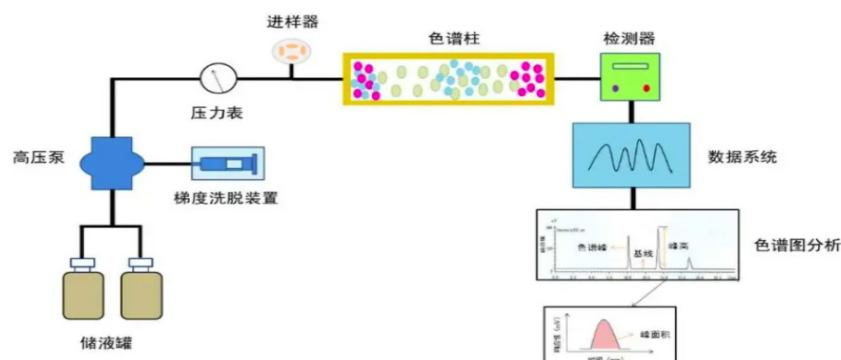


图2 环境检测中液相色谱的检测流程

5 不同分析方法的技术比较与适用场景评估

5.1 检测限、准确度与重复性的对比分析

不同重金属检测方法在技术参数方面存在显著差异,传统分光光度法检测限普遍在 mg/L 级,适合高浓度样品的粗略估算,原子吸收光谱法以火焰方式检测限在 $\mu\text{g/L}$,石墨炉模式可达到 ppb 级别。ICP-MS 的检测限最低可达 ng/L 水平,具备超痕量级别分析能力。重复性方面,分光法受试剂波动与人为操作影响较大,AAS 与 ICP-MS 仪器稳定性较强,可实现相对标准偏差小于 5%。准确度受干扰因素控制能力影响,ICP-MS 可通过内标校准与质谱选择性显著提升分析精度。XRF 在浓度大于 mg/kg 水平的固体样品中表现优良,但在低浓度情况下容易受到基体效应影响。电化学法在特定金属分析中具备低检测限与良好重现性,是便携与低成本检测方案的代表。

5.2 样品前处理复杂性与实验效率的技术评价

样品前处理过程直接影响分析效率与检测数据的可比性。分光光度法需进行显色反应,步骤较为繁琐且需严格控制反应条件;AAS 常需消解样品以形成均匀溶液,酸分解过程可能导致挥发损失或交叉污染;ICP-MS 对前处理纯度要求高,酸溶过程中需避免共存离子的干扰,并常搭配微波消解提高效率;XRF 多用于固体样品,预处理以粉碎、压片为主,过程快速且保持样品原貌,但对非均质样品结果稳定性不足;液相色谱-质谱联用分析需进行复杂的提取与衍生处理,实验耗时较长,但可实现目标形态的高效识别。电化学分析方法样品预处理要求较低,便于现场快速获取数

据,是应急环境监测中重要手段之一。

5.3 在应急监测、常规监管与科研分析中的应用差异

不同检测方法在实际应用场景中具备差异化优势。应急监测场景中需依赖快速、简便、成本低的手段,便携式 XRF 与电化学分析设备可实现野外实时响应,适合初步筛查与污染趋势判断。常规环境监管更侧重数据稳定性与标准化能力,AAS 与 ICP-OES 因其仪器成熟、方法标准明确被广泛应用于日常排放监测与环境质量评价。科研分析则对灵敏度、形态识别能力与数据完整性提出更高要求,ICP-MS 与液质联用技术具备精密定量与复杂样品解析能力,是研究毒性机制、元素形态转化与生物有效性评估的关键工具。根据监测目的、样品类型与检测要求合理选择检测手段,是提升监测效率与保障结果质量的核心策略。

参考文献

- [1] 于靖靖,李俊杰,韩瑞冰,杨宾,陈娟,张云慧,李发生,杜平.金属矿区土壤重金属健康风险评估与影响因素分析[J].环境科学,2025,45(04):253-254+269.
- [2] 裴培.改性HC对水体重金属污染的修复效果分析[J].山西化工,2025,45(04):267-269.
- [3] 李光启.氨基煤矸石对重金属污染土壤的修复影响分析[J].山西化工,2025,45(04):267-269.
- [4] 薛加祥,马世杰,陈兆浩,孔召玉.基于CiteSpace的植物促生菌强化植物修复重金属污染现状的知识图谱分析[J].南昌大学学报(理科版),2025,49(02):165-171+183.
- [5] 韩焱,曹磊,刘茜.某城市地下水中重金属含量分析及锰污染修复治理措施[J].化学工程师,2025,39(04):100-103+18.