

环境水样中重金属离子的实验室检测方法优化与应用

裴培*

(河北环境工程学院, 秦皇岛 066102)

摘要: 为了评估环境生态安全状况和确保人类健康, 本文在介绍重金属污染现状及危害的基础上, 重点分析几种常用的重金属离子的实验室检测方法, 包括原子吸收光谱法、电感耦合等离子体质谱法、紫外-可见分光光度法和电化学分析法, 分析各自的优缺点及应用。还提出了实验室检测优化策略, 涉及样品前处理优化、检测参数优化, 以及纳米材料应用, 旨在提高检测灵敏度和降低误差。

关键词: 环境水样; 重金属离子; 实验室检测方法; 优化策略

0 引言

重金属污染已成为主要的环境问题, 尤其在水体中, 重金属易于累积并通过食物链进入人体, 严重威胁生态系统稳定和人类健康。因而, 水样中重金属离子的高精度检测是污染控制的核心环节。目前实验室常用的检测方法各具特色, 但在灵敏度、成本和操作便捷性上仍存在优化空间。随着科学技术的发展, 为了进一步提升重金属离子检测的准确性和效率, 需要研究有关的优化方法策略, 这对于提高检测水平和保护环境具有重要意义。本文旨在研究金属离子的实验室检测方法, 探讨有关技术的优化应用, 为环境水样检测工作提供支持。

1 环境水样中重金属离子检测的重要性

近年来, 工业化和城市化的迅速发展, 导致了大量重金属元素, 如铅、汞、镉等进入自然环境。由于重金属具有难降解、易积累、毒性强的特性, 一旦进入生态系统, 便会通过食物链富集和扩散, 最终对生态系统和人类健康构成长期威胁。例如, 遭受重金属污染的水体不仅直接影响水生生物的生存, 还会通过食物链影响鸟类、哺乳动物乃至人类。特别是水体中重金属离子的富集会引发水生生物中毒现象, 导致生物群体数量减少, 影响生物多样性。此外, 重金属会在土壤和空气中扩散, 污染土壤、空气, 导致土地贫瘠、空气质量下降等问题。检测水体中的重金属离子, 不仅是评估污染程度的基础步骤, 也是判断污染来源、追踪扩散途径的有效方法。通过检测, 相关人员能够及时掌握污染现状, 为制订污染控制和修复措施提供数据支持^[1]。

2 重金属离子实验室检测的方法及应用

2.1 原子吸收光谱法

原子吸收光谱法(AAS)是一种广泛应用于重金属离子检测的分析方法, 因其高灵敏度和良好的选择性而被广泛认可。其基本原理基于原子对特定波长光的吸收特性, 当样品中的重金属离子被火焰或石墨炉加热至高温状态时, 离子会释放出自由原子, 这些原子可以吸收与其电子能级变化相对应的特定波长光, 通过测定这种光的吸收强度, 就可以确定重金属离子的浓度^[2]。

AAS方法的优点在于其极高的灵敏度, 适用于检测痕量级别的重金属离子, 特别是在饮用水和天然水样中常见的低浓度重金属元素分析中具有明显优势。并且, 该方法操作简便且成本相对较低, 因此成为环境分析领域中一种常见的标准检测方法。然而, 该方法也存在一些不足, 其对样品的前处理要求较高, 例如水样中存在的悬浮颗粒、离子态污染物等容易对检测结果造成干扰。因此, 需对样品进行预处理, 如过滤和稀释, 以消除潜在的干扰因素。检测速度较慢, 因为通常只能一次分析一种元素, 不能满足多种元素同时检测的需求。检测时, 要注意使用高纯试剂以减少污染, 同时注重实验室废液的处理, 防止二次污染。尽管存在一定局限性, AAS依然是环境检测实验室中的重要工具。近年来随着技术的改进, 例如引入更为先进的石墨炉、优化光源和背景校正技术等, AAS检测准确性和可靠性不断提升。

2.2 电感耦合等离子体质谱法

电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)是一种高灵敏度的分析技术, 广泛应用于痕量重金属元素检测。其基本原理是将样品通过高温等离子体离子化, 形成具有特定质荷比的离子流, 随后运用质谱仪对这些离子进行分离, 并检测特征质谱信号, 最终实现对样品中重金属离子的精确定量分析^[3]。由于具有独特的离子

* 通信作者: 裴培, 硕士, 实验师, 研究方向为环境监测。E-mail: peipei_hebuee@126.com

化效率和分离能力,该方法特别适合检测浓度极低的重金属元素,这使得其在水质监测、食品安全和医学研究等领域表现尤为出色。

ICP-MS的最大优势,在于其极低的检测限和高灵敏度,能够同时检测多种重金属元素。在环境水样的检测中,ICP-MS不仅能够精确识别各类金属离子的含量,还可以提供丰富的同位素信息,有助于追溯污染源的地理和工业背景^[4]。该方法具有良好的分析速度和准确度,在保证精密度的同时,适合大规模的批量样品分析。该技术对实验环境要求较为苛刻,需避免样品中的基质干扰,确保离子化过程的稳定性,因而对样品的前处理和操作人员的专业技能要求也较高。在检测实践中发现,选择ICP-MS时,应考虑样品中目标元素的浓度范围、基体成分及检测限需求。尽管存在成本高昂的问题,ICP-MS仍然因其卓越的检测性能而备受重视,随着近年来对仪器小型化的研究,以及运行成本逐步下降,其在环境监测中的应用范围有望进一步扩大。

2.3 紫外-可见分光光度法

紫外-可见分光光度法(UV-Vis)是一种基于显色反应的检测方法,广泛应用于水体中重金属离子的快速分析。其原理是重金属离子与特定显色试剂发生化学反应,生成一种能够吸收紫外或可见光的有色化合物,通过测量该化合物在特定波长下的吸光度,确定重金属离子的浓度。该方法的显色反应灵敏度和选择性相对较高,尤其适用于环境水样的初步检测和现场分析^[5]。

UV-Vis方法的主要优点在于成本低、操作便捷且设备简单。仪器价格较为低廉,且操作无须复杂的样品前处理,因而适合在常规实验室和现场条件下开展检测^[6]。该方法的分析速度较快,只需往水样中加入适当试剂,即可实现对重金属离子的快速测定。因此,被广泛用于重金属污染的初步筛查,尤其在资源有限的场合或对快速筛查有需求的情境中非常实用。然而,UV-Vis法的灵敏度相对较低,难以满足痕量检测的需求,通常只能测定较高浓度的重金属离子。水样中的共存物质,会与显色试剂发生干扰反应,从而影响测定的准确性^[7]。尽管UV-Vis在灵敏度和选择性上存在一定局限,但其便捷性和经济性使其成为一种有效的筛查工具。在实际应用中,UV-Vis经常与其他检测方法配合使用,用于初步筛查或高浓度样品的定量检测。通过优化显色试剂的选择和反应条件,该方法在重金属检测中的应用潜力仍然较大^[8]。建议选择该方法时,应确保待测物质具有显著的特征吸收峰并避免干扰。当前,UV-Vis与其他分析技术(如HPLC、LC-MS)的联用技术不断发展,提升多组分复杂体系的分析精度与灵敏度^[9]。

2.4 电化学分析法

电化学分析法是一类基于重金属离子的电化学特性进行检测的方法,其中阳极溶出伏安法(ASV)是常用技术之一。其原理是利用重金属离子在特定电极上富集并溶出的过程,通过调节电位,使重金属离子在电极表面还原或氧化,随后在阳极溶出过程中产生电流信号,分析这一电流信号的强度,就可精确

测定水样中重金属离子的浓度^[10]。ASV的灵敏度较高,特别适用于检测镉、铅、铜等重金属的痕量浓度^[11]。

ASV在重金属检测中的一大优势是其检测速度快,适合现场快速分析。仪器设备较为便携,成本较低、维护方便。电化学方法对样品前处理要求不高,通常无须复杂的化学处理,且可直接对原水样进行分析^[12]。然而,ASV的准确性易受环境因素的影响。例如,水样的酸碱度、共存离子及温度等变化,都会对电极的电化学反应过程产生影响,从而干扰信号,影响检测结果。此外,需要严格控制实验条件,若电极表面被污染或电极材料选择不当,会导致信号减弱或失真^[13]。对于多种重金属离子共存的样品,难以区分彼此的电化学信号,会导致分析结果的误差。尽管存在环境因素的限制,电化学分析法仍以其便捷性和高灵敏度,在重金属离子快速检测中具有独特优势,当前随着对电极材料和优化实验条件的持续研究,其在环境监测和现场分析中的应用前景广阔。将电化学方法与色谱、质谱、光谱等技术联用,可增强复杂体系中多组分分析的能力,拓宽应用范围^[14]。

3 实验室检测的优化策略

在环境水样实验室检测中,一些采样人员的操作不当,会导致水样的污染或失真,特别是在采样点选择和深度控制不当时。不同水质指标的检测方法具有不同的精度和适用范围,若选择不合适的方法,也会导致结果偏差。所以,需要进行实验室检测的优化策略探讨。

3.1 样品前处理的优化

样品前处理,是确保水样中重金属离子检测准确性的重要环节,直接影响分析的灵敏度和可靠性。针对复杂水样中的多种基质干扰,优化前处理方法,有助于提高重金属检测的精确度。微波消解法和固相萃取法是目前常用的前处理技术,通过不同的原理对样品进行净化和消解。详细分析如下:(1)微波消解法。微波消解法是利用微波辐射,将样品在密闭系统中加热至高温高压,从而快速、完全地分解样品中的有机物^[15]。与传统的湿法消解(比如加热板和酸消解)相比,微波消解具有时间短、试剂用量少、污染少的优点。传统方法通常需要数小时完成样品消解,且在过程中易发生重金属的挥发损失,特别是对于痕量重金属的分析,会导致结果偏差。而微波消解可在短时间内完成消解,且在密闭环境中可有效避免重金属损失,确保检测结果的稳定性和重现性。微波消解在处理复杂基质样品(比如含有大量有机物或悬浮颗粒的水样)时的效率更高,因而被广泛应用于环境样品的重金属前处理。(2)固相萃取法。固相萃取是一种利用吸附和洗脱技术,对水样中干扰物质进行选择性去除的净化方法。其基本原理是通过选择适当的固相材料,将重金属离子从基质中分离出来,有效去除共存有机物和悬浮颗粒等干扰物,显著提高样品的纯度。相比传统的液液萃取,该方法操作简便,且能减少有机溶剂的使用,因而更环保和经济。

固相萃取法还适用于多种复杂水样的处理,对多种重金属离子的分离效果良好,特别在多种离子共存的情况下表现出高效的净化能力。在实际操作中,固相萃取法常与微波消解法相结合,能实现样品的完全消解与净化,提高检测的灵敏度和准确性,这种组合方式在水质分析中应用广泛,尤其适用于高精度和低浓度重金属离子检测^[16]。

3.2 检测方法参数的优化

优化检测方法的参数,是提升检测精度的关键。具体需要关注以下几点:(1)AAS、ICP-MS和电化学检测参数的优化。对于AAS,反应条件如酸度、检测波长的选择,对灵敏度和信噪比影响显著,调整酸度能减轻共存物质的干扰,确保检测结果的准确性^[17]。ICP-MS中的干扰消除技术,如反应池技术,有助于减轻背景干扰。在电化学检测中,优化工作电极的预处理、反应时间和电解液的酸度,可提高检测信号的稳定性,提升重金属离子的检测灵敏度^[18]。(2)提升灵敏度与降低检测误差。为了在复杂样品中获得更精确的检测结果,主要优化方法包括背景校正、信号平均化及重复检测。针对AAS和ICP-MS,可引入背景校正技术,降低共存离子和基体效应的影响。使用多次采样和信号平均技术,可提升结果的准确性。对于ASV等电化学方法,采用纳米材料修饰电极表面,能够提高富集能力,从而提升灵敏度^[19]。例如,对于一次的自来水样品检测,通过AAS方法检测,我们发现水样中铅的浓度为2.5 μg/L,而通过ICP-MS方法测量,得到的铅的浓度为2.8 μg/L。两种方法的结果非常接近,实践证明,AAS方法在这种情况下是可靠和准确的。

3.3 基于纳米材料的改进

纳米颗粒因其高比表面积和优异的表面活性,已被广泛应用于重金属离子检测。作为吸附剂,纳米颗粒如氧化铁、碳纳米管等,能够高效富集重金属离子,使其在低浓度下也能被精确检测。纳米颗粒还可以作为催化剂,加速重金属离子与显色试剂的反应过程,从而提高检测的灵敏度^[20]。与传统材料相比,纳米颗粒不仅增加了吸附容量,还增强了选择性,特别适用于痕量检测和复杂样品的分析。另外,纳米传感器利用纳米材料的独特性质,实现了对重金属离子的快速、高灵敏度检测。基于纳米材料的传感器,如石墨烯基电极、金纳米颗粒修饰电极等,具有优异的电子传输能力和信号放大效果,能够在现场检测中提供即时响应。另外,结合智能手机和物联网技术,基于纳米材料的检测设备可实现数据实时传输和远程监控。

4 结束语

环境水样中重金属离子的精确检测,对于污染控制和生态保护至关重要。文章从实验室检测方法的优化入手,通过微波消解法、固相萃取法进行样品前处理,优化参数提升灵敏度与降低检测误差,以及纳米材料的应用,提出了提高检测灵敏度与降低误差的有效策略。随着技术的发展,检测方法将逐步趋于高效、便

捷,为水质监测和污染防治提供更有力的支持。

参考文献

- [1] 张恒超.水环境重金属检测系统设计与试验[D].郑州:河南农业大学,2023.
- [2] 刘晶,马汉文,申艳华,等.原子吸收法在水中重金属含量检测中的应用[J].山西化工,2023,43(07):37-38.
- [3] 黄依凡.ICP-OES法和ICP-MS法测定不同环境水体中重金属铅的方法比较[J].安徽地质,2023,33(02):175-179.
- [4] 禹海清,张璐,许玉坤.基于电感耦合等离子体质谱的地下水重金属含量检测[J].化学与粘合,2023,45(06):576-580.
- [5] 杨义维.离子色谱法测定矿井水中金属阳离子方法研究[J].技术与市场,2023,30(09):68-71.
- [6] 李剑.基于紫外-可见光谱的水质特征提取和检测方法研究[D].绵阳:西南科技大学,2022.
- [7] 白帆.便携式原子荧光光谱仪快速检测环境水样中的砷含量分析[J].低碳世界,2020,10(11):25-26.
- [8] 王莉莉.城市污水处理系统中重金属污染物的检测及治理技术研究[J].当代化工,2023,52(06):1303-1306,1336.
- [9] 罗超,石国臣,杨志军.化学废水中重金属离子浓度软测量方法研究[J].能源与环保,2022,44(06):78-82.
- [10] 胡关燕.环境检测实验室设计探讨[J].广东化工,2022,49(23):170-171,154.
- [11] 刘早耀.水环境有毒有机物分析监测质量控制[J].皮革制作与环保科技,2022,3(18):14-16.
- [12] 郭风巧,桂萍,郭晶晶,等.LLE/GC-MS/MS法同时检测饮用水中4种塑化剂[J].中国给水排水,2022,38(12):22-27.
- [13] 刘燕,陈庆.对水质环境检测分析实验室质量控制的探讨[J].皮革制作与环保科技,2022,3(12):152-154.
- [14] 刘宏,席红菊,曹米娜.有效控制和确保环境检测实验室分析工作的质量探讨[J].科技创新与应用,2022,12(05):130-132.
- [15] 张悦悦,段慧灵,郭千轶.如何提升检验检测实验室的质量管理[J].时代汽车,2021,(19):163-164.
- [16] 孙晓巍.谈检验检测实验室标准物质管理[J].吉林畜牧兽医,2021,42(05):92-92,94.
- [17] 卿云光,罗在粉.浅析食品检测实验室管理过程中存在的问题及优化措施[J].现代食品,2023,29(20):43-45.
- [18] 常洲.质量管理体系在检测实验室管理中的应用[J].产品可靠性报告,2023,(12):39-41.
- [19] 万文胜.检验检测实验室管理技术提升要点[J].前卫,2022,(19):147-149.
- [20] 李开元.基于镍基纳米材料电化学检测水中重金属离子的研究[D].芜湖:安徽工程大学,2023.