

# 电感耦合等离子体质谱技术在地表水中微量金属元素监测中的应用分析

孙佳琦\*

(华北地勘生态资源监测中心(河北)有限公司, 承德 067000)

**摘要:** 地表水是人类生活和生产中不可或缺的重要资源, 然而, 地表水中微量金属元素的存在对水质安全构成潜在威胁。因此, 对地表水中微量金属元素进行准确、快速地监测具有重要意义。本文综述了电感耦合等离子体质谱(Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry, ICP-MS)在地表水中微量金属元素监测中的应用, 并分析了其应用过程中的挑战与对策, 进而为地表水保护工作的全面开展提供准确的数据参考。

**关键词:** 电感耦合等离子体质谱技术; 地表水; 微量金属元素

## Inductively coupled plasma mass spectrometry technique in monitoring trace metal elements in surface water application analysis

SUN Jia-Qi\*

(North China Geological Prospecting and Ecological Resources Monitoring Center (Hebei) Co., Ltd., Chengde 067000, China)

**ABSTRACT:** Surface water is an indispensable and important resource in human life and production. However, the existence of trace metal elements in surface water poses a potential threat to the safety of water quality. Therefore, it is important to perform accurate and rapid monitoring of trace metal elements in surface water. This article reviews the application of ICP-MS in monitoring trace metal elements in surface water, analyzes the challenges and countermeasures in its application process, and provides accurate data reference for the comprehensive development of surface water protection work. Reference for the comprehensive development of surface water protection work.

**KEY WORDS:** inductively coupled plasma mass spectrometry technology; surface water; trace metal elements

## 0 引言

地表水是人类生活和工业生产中不可或缺的重要资源, 然而, 随着工业化和城市化进程的加速, 地表水受到了日益严重的污染威胁, 其中微量金属元素的污染引起了广泛关注。微量金属元素如铅、镉、汞等对人体健康和生态环境造成的潜在危

害已经成了公众关注的焦点。因此, 对地表水中微量金属元素的准确监测和分析显得尤为重要<sup>[1]</sup>。

本文的研究目的在于探讨电感耦合等离子体质谱(Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry, ICP-MS)在地表水中微量金属元素监测中的应用, 通过对 ICP-MS 技术的原理、优势、具体应用方法、数据分析及挑战与对策的系统分析,

\* 通信作者: 孙佳琦, 助理工程师, 研究方向: 化验。E-mail: s18632412029@163.com

\*Corresponding author: SUN Jia-Qi, Assistant Engineer, North China Geological Prospecting and Ecological Resources Monitoring Center (Hebei) Co., Ltd., Chengde 067000, China. E-mail: s18632412029@163.com

为地表水保护工作提供科学依据。研究的意义在于通过准确、快速地监测地表水中的微量金属元素,可以及时发现污染源并采取有效措施,保护水质安全。

## 1 ICP-MS 技术概述

电感耦合等离子体质谱是一种高灵敏度、高选择性的分析技术,广泛用于元素分析和微量金属元素的检测。其原理是将样品中的元素原子通过电感耦合等离子体(ICP)产生的高温等离子体化为离子态,然后将这些离子引入质谱仪进行分析<sup>[2]</sup>。

ICP-MS 技术在地表水中微量金属元素监测中的优势主要体现在其高灵敏度、高精度、多元素同时分析和高通量四个方面。第一,ICP-MS 具有非常高的灵敏度,能够检测到极低浓度的金属元素,通常达到 ppb ( $10^{-9}$ ) 甚至 ppt ( $10^{-12}$ ) 级别。这意味着即使是微量的金属元素也能够被准确地检测到,使得对于地表水中潜在污染物的监测更加全面和细致。第二,ICP-MS 提供高精度的分析结果,这主要得益于其在质谱测量中的高分辨率和准确质量测量的能力,使得分析结果更为可信和可靠。第三,ICP-MS 技术能够同时分析多种金属元素,包括常见的和稀有的元素,通过一次性的样品处理和测量,大大提高了分析效率和节约了时间成本。第四,ICP-MS 具有高通量的特点,能够快速、高效地完成样品分析,适用于大样品量的批量分析,极大地提高了实验室的工作效率和数据产出率<sup>[3]</sup>。

## 2 ICP-MS 在地表水中微量金属元素监测中的应用

### 2.1 样品处理与预处理方法

#### (1) 样品采集与保存

在具有代表性的地点进行样品采集,选择采样点时应考虑地理位置、水流动情况、潜在污染源等因素,并尽量避免人为干扰。在采样过程中,使用洁净的采样器具和容器,并在采样前冲洗,以防止外部污染物的影响。采样时还应注意避免氧化、沉淀和蒸发等现象的发生,可以添加一些稳定剂(如酸)来保持样品的稳定性。采样完成后,样品的保存也至关重要。通常,样品的保存温度不宜超过 4°C,以防止微生物生长和化学反应的发生。同时,应避免阳光直射和空气接触,以减少可能的氧化和挥发。对于需要长时间保存的样品,可以考虑冷冻保存或添加保存剂来延长样品的稳定性<sup>[4]</sup>。

#### (2) 样品预处理

第一是过滤,旨在去除样品中的固体颗粒和悬浮物,以避免堵塞分析仪器并减少背景干扰。选择合适的滤纸和过滤器可以根据样品中颗粒的大小和形状来进行,通常使用 0.45 微米的孔径过滤器。第二是酸化处理,通过向样品中添加酸(如硝酸、盐酸等)可以将金属元素转化为易于测量的离子态,并提高元素的溶解度。酸的选择应根据待测元素的特性和分析方法来

确定,同时应注意避免酸的过量使用导致样品污染或影响后续分析<sup>[5]</sup>。

### 2.2 分析方法与参数优化

#### (1) ICP-MS 分析条件设置

第一,确定合适的离子途径,包括气体流速、离子逆转器的电流和离子途径的宽度等参数。通过调整这些参数,可以最大限度地提高样品离子的传输效率和消除离子逆转效应,从而提高分析的灵敏度和稳定性。第二,优化采样深度,即决定离子束与采样表面的距离。采样深度的选择影响着样品的原子化效率和离子信号的强度,因此需要根据具体样品的特性进行合理的优化。第三,还需要考虑离子逆转效应和背景干扰的影响,选择合适的采样深度以提高分析的准确性和可靠性<sup>[6]</sup>。

#### (2) 优化离子途径和采样深度

第一,对于离子途径的优化,需要调整采样锥、离子透镜和离子偏转器等部件的参数,以确保离子在质谱仪中的传输和分离效率。通过优化这些参数,可以最大程度地提高目标元素的信号强度,并降低背景信号的干扰。在优化离子途径时,还需要考虑离子源的稳定性和离子传输的效率,以确保稳定的信号响应和准确的分析结果。第二,采样深度的优化也是至关重要的。采样深度指的是样品进入等离子体的深度,它直接影响着样品中目标元素的离子信号强度和检测灵敏度。通过调整采样深度,可以最大限度地提高目标元素的信号强度,并减少背景信号的干扰。在优化采样深度时,需要综合考虑样品的性质和元素的特性,同时注意避免过深采样导致的样品消耗和分析时间的增加<sup>[7]</sup>。

#### (3) 标准曲线建立与校准

第一,建立标准曲线时需要选择代表性的标准溶液,覆盖待测元素的浓度范围,并确保标准溶液的纯度和稳定性。通过将不同浓度的标准溶液分别进样,测量其离子信号强度,并绘制出浓度与信号强度的标准曲线。在绘制标准曲线时,通常使用线性回归或其他适当的拟合方法来确定各元素的检测限、线性范围和灵敏度。第二,进行校准时需要使用标准曲线来计算样品中目标元素的浓度。校准过程中,应确保样品和标准溶液的进样条件一致,同时注意避免进样偏差和仪器漂移的影响。为了提高校准的准确性和可靠性,通常会使用内标法或多元素校准方法来消除仪器漂移和样品处理误差。第三,在校准过程中还需要进行质控样品的分析,以验证标准曲线的准确性和仪器的稳定性<sup>[8]</sup>。

#### (4) 选择最适合的内标元素

内标元素通常是与待测元素具有类似化学性质和质谱性能的稳定同位素,用于消除样品制备和分析过程中的波动和误差。第一,选择内标元素时需要考虑其与待测元素的化学相似性,以确保内标元素在样品制备和分析过程中与待测元素具有相似

的反应性和转化率。第二，内标元素的质谱性能也需要符合分析要求，包括质谱信号的稳定性、灵敏度和无干扰性。通常选择质谱信号稳定且不受干扰的同位素作为内标元素。同时，内标元素的加入量应该足够少影响待测元素的分析结果，但又能够提高分析的准确性和可靠性。第三，在选择内标元素时还需要考虑其在样品中的存在量和检测限，以保证内标元素的添加不会引入额外的误差或影响待测元素的分析结果<sup>[9]</sup>。

### 2.3 检测结果解读与数据分析

#### (1) 数据处理与统计分析方法

第一，数据处理包括对原始数据的整理、清洗和校正，以去除异常值、漂移和干扰，并确保数据的完整性和一致性。这可以通过数据过滤、平滑和插值等方法实现，以获得可靠的数据集合。第二，统计分析方法包括描述性统计、相关性分析、因子分析等，旨在对数据进行全面分析和解释。描述性统计可以用来计算数据的均值、标准差、变异系数等统计指标，以描述数据的分布和趋势。相关性分析可以用来研究不同变量之间的相关关系，了解各因素对微量金属元素浓度的影响程度。因子分析则可以用来识别影响微量金属元素浓度的主要因素和来源，为后续的污染控制和管理提供参考依据<sup>[6]</sup>。第三，还可以使用地理信息系统(Geographic Information System, GIS)等空间分析方法，将监测数据与地理位置信息结合起来，分析微量金属元素的空间分布规律和污染来源<sup>[10]</sup>。

#### (2) 结果的精确度和准确度评估

精确度指的是数据的重复性和一致性，即在多次测量中结果的一致程度。为评估精确度，可以进行重复测量和数据重复性分析，计算测量值的标准偏差和变异系数等指标。同时，还可以进行质控样品的分析和比对，验证不同批次和不同操作者之间的一致性。准确度则指的是数据与真实值之间的接近程度，即分析结果的真实性和可信度。为评估准确度，可以使用标准参考物质进行外部校准，比对实验结果与标准值之间的差异<sup>[11-12]</sup>。

### 2.4 应用案例

在某工业化城市的水质监测项目中，选择了城市内流经多个工业区的主要河流作为研究对象，设立了上游、中游、下游共计30个采样点，重点监测河水中的Pb、Cd、Hg、Cr以及As等五种对环境和健康具有重大影响的微量金属元素。具体检测结果显示，铅的浓度范围在0.4~2.5 ppb，镉在0.05~0.8 ppb，汞在0.01~0.12 ppb，铬在0.2~1.5 ppb，砷在0.3~2.0 ppb。值得注意的是，在下游某个工业排放集中的区域，ICP-MS检测出铅和砷的浓度明显超出上游和中游的平均值，达到2.5 ppb和2.0 ppb，表明该区域受到了显著的金属污染。

通过ICP-MS技术，研究人员能够在短时间内完成大规模的样品分析，涵盖多种金属污染物的全面监测，极大地提高了

水质监测的效率和精确度。同时，通过对不同采样点的数据进行横向和纵向的对比分析，研究人员能够明确污染源头和污染物扩散的规律，为环保部门提供了翔实的数据支持，帮助制定有针对性的治理措施和污染控制策略。ICP-MS技术在此次监测项目中的应用，不仅为及时识别和评估水质污染程度提供了科学依据，还通过快速、准确的数据反馈，有效防止了污染的进一步扩散和加剧。

## 3 ICP-MS在地表水中微量金属元素监测中应用的挑战与对策

### 3.1 样品准备中的干扰因素

第一，样品中可能存在的大量有机物和无机盐等成分可能会干扰金属元素的测定，导致分析结果的准确性受到影响。第二，地表水中的微生物和悬浮颗粒等可能会与目标金属元素发生复杂的交互作用，造成信号的混叠和背景噪声的增加，进而影响测量的灵敏度和准确性。第三，采样过程中可能受到大气沉降、水体流动性等外界因素的影响，导致样品的污染和失真<sup>[13]</sup>。

针对上述挑战，可以采取以下对策。第一，可以通过适当的样品预处理方法，如过滤、沉淀、酸化等，去除或降低有机物和无机盐等干扰因素的影响，以提高目标金属元素的提取效率和测定精度。第二，可以采用精细的样品提取和预处理方法，如固相萃取、溶剂萃取等，以提高目标金属元素的测量信号和减少背景干扰<sup>[14-15]</sup>。

### 3.2 数据分析中的误差与不确定性

第一，数据分析过程中可能存在着样品制备、仪器分析和数据处理等环节引入的误差。这些误差可能来自样品准备过程中的不均匀性、仪器分析时的背景信号干扰以及数据处理算法的选择等因素，导致分析结果偏离真实值。第二，数据分析过程中的不确定性也是一个挑战，主要包括来自样品变异、测量精度和方法限度等方面的不确定性。这些不确定性会影响结果的可信度和解释性，增加了数据分析的复杂度<sup>[16]</sup>。

针对上述挑战，可以采取以下对策。第一，建立严格的质量控制体系，包括采样、样品准备、仪器分析和数据处理等环节，确保各个环节的操作准确、稳定和可重复。第二，进行适当的数据验证和校核，包括重复测量、样品重制和实验室间比对等，以评估结果的一致性和准确性<sup>[17]</sup>。第三，采用合适的数据处理和统计分析方法，如均值比较、方差分析、线性回归等，可以减少数据分析过程中的误差和不确定性，提高结果的可靠性和科学性<sup>[18]</sup>。

### 3.3 质量控制与质量保证

第一，样品制备和分析过程中可能存在着多种误差和变异，包括样品采集不均匀、实验操作不规范以及仪器参数设置不准确等，可能导致分析结果的不稳定性和不可靠性，从而影响监

测数据的准确性和可信度。第二,实验室条件和仪器性能的波动也会对监测结果造成影响,如温度、湿度、仪器校准等因素的变化可能引起数据的偏差和误差<sup>[19]</sup>。

针对上述挑战,可以采取以下对策。第一,定期进行实验室间比对和质量评估是确保实验室分析方法准确性和可靠性的重要手段。通过参与实验室间比对项目,可以与其他实验室的数据进行比对,验证自身分析结果的准确性,并发现可能存在的偏差和误差。同时,还可以建立实验室内部的质量评估体系,包括定期进行盲样品测试、质控样品测试等,以监测和评估实验室分析方法的稳定性和可靠性。第二,定期进行人员培训和技术交流,通过组织各类培训课程和讲座,操作者可以学习最新的分析技术和方法,了解实验操作规程和质量控制要求,从而提高实验操作的标准化和规范化水平<sup>[20]</sup>。

#### 4 结束语

本文系统探讨了 ICP-MS 技术在地表水中微量金属元素监测中的应用,详细分析了其原理、技术优势、具体应用方法以及在数据处理和结果分析中的重要性。通过实际案例的分析,证明了 ICP-MS 技术在提高监测灵敏度、准确性和效率方面的显著作用,尤其是在应对复杂环境中的多元素同时分析时,表现出无可替代的优势。针对监测过程中可能遇到的样品干扰、数据误差和质量控制等挑战,提出了相应的对策,如优化样品预处理方法、严格数据质量控制,以及多元素校准等,以提高分析的可靠性和科学性。基于以上研究成果,建议在未来的地表水监测工作中,广泛应用 ICP-MS 技术,并与其他先进的分离、富集技术联用,以进一步提升检测灵敏度和数据精度。同时,建议相关环保部门加强人员培训,提升操作规范性和数据分析能力,以确保监测数据的准确性和可靠性,从而为环境保护和公共健康提供坚实的数据支持和科学依据。通过持续的技术创新和应用推广,ICP-MS 技术将在水质监测领域发挥更为广泛和深入的作用。

#### 参考文献

- [1] 王宾,刘毅,左芳,等. ICP-MS在工业领域金属元素检测中的应用研究进展[J]. 化工与医药工程, 2024, 45(01): 76-81.
- [2] 钟红梅. ICP-MS分析在矿产中金属元素的定量检测[J]. 世界有色金属, 2024, (03): 38-40.
- [3] 朱乾华,刘宏伟,聂西度. 基于破乳诱导萃取和ICP-MS/MS分析渣油中的微量金属元素[J]. 石油学报(石油加工), 2024, 40(01): 229-238.
- [4] 王华,任小娜,叶静,等. ICP-MS法测定锁阳药材与饮片中的5种金属元素[J]. 当代化工研究, 2024, (01): 59-61.
- [5] 张丹丹,李勇竞,郑妹凤,等. ICP-MS测定大气细颗粒物中多种金属元素方法的研究与应用[J]. 安徽预防医学杂志, 2023, 29(06): 463-467.
- [6] 谢博航,吴石头,杨岳衡,等. LA-MC-ICP-MS方解石U-Pb定年技术[J]. 岩石学报, 2023, 39(01): 236-248.
- [7] 余晓艳,龙政宇,张艺,等. 基于LA-(MC)-ICP-MS的宝石原位微区分析技术及其应用[J]. 宝石和宝石学杂志(中英文), 2022, 24(05): 134-145.
- [8] 罗琼. 基于ICP-MS技术同时测定大米中几种元素的检测方法研究[J]. 现代食品, 2022, 28(08): 183-186.
- [9] 张建伟,李沛镡,金红. HPLC-ICP-MS联用技术检测饮用水中铬形态的方法研究[J]. 城镇供水, 2021, (05): 69-72.
- [10] 张建伟,李沛镡,金红. HPLC-ICP-MS联用技术应用于饮用水中砷形态分析的方法研究[J]. 给水排水, 2021, 57(S2): 37-42, 47.
- [11] 赵飞燕. ICP-MS法同时测定地表水中10种痕量金属元素[J]. 化学工程师, 2024, 38(07): 38-40.
- [12] 朱乾华,刘宏伟,聂西度. 基于破乳诱导萃取和ICP-MS/MS分析渣油中的微量金属元素[J]. 石油学报(石油加工), 2024, 40(01): 229-238.
- [13] 修明明,章文文,许长丽,等. ICP-MS同时测定安徽省地表水、地下水、出厂水中的13种金属元素[J]. 安徽化工, 2023, 49(03): 181-184.
- [14] 蒋杰. ICP-MS法同时测定地表水中6种金属元素[J]. 化工管理, 2021, (29): 98-99.
- [15] 罗安秀. ICP-MS同时测定生活饮用水地表水源地水质15种金属项目[J]. 化工管理, 2019, (31): 196-197.
- [16] 章文文. ICP-MS测定地表水中痕量金属元素[J]. 广州化工, 2019, 47(09): 143-145, 178.
- [17] 陈会明,罗小龙. ICP-MS法测定水和废水中微量金属元素方法验收[J]. 江西科学, 2017, 35(05): 682-685, 755.
- [18] 崔云涛,张磊,罗兆亮. 磷酸特地唑胺中5种微量金属元素的微波消解-ICP-MS法测定[J]. 中国医药工业杂志, 2017, 48(04): 549-552.
- [19] 程铁轵,夏于林,张莹,等. ICP-MS测定保健酒中7种微量金属元素的含量[J]. 食品研究与开发, 2015, 36(12): 106-109.
- [20] 代秀梅,于风平,张启明,等. 微波消解-ICP/MS法测定替曲朵辛中的13种微量金属元素[J]. 药物分析杂志, 2013, 33(08): 1382-1384.

#### 作者简介

孙佳琦, 助理工程师, 研究方向: 化验。