工程与管理科学
Engineering and Management Science
第 8 卷◆第 10 期◆版本 1.0◆2026 年
文章类型：论文|刊号（ISSN）：2705-0637(P) / 2705-0645(O)

ICP-MS 检测微量重金属元素的实验方法优化研究

李斌
深圳市赛德检测技术有限公司四川分公司　610200

DOI：10.32629/ems.v8i10.22582

［摘　要］本文主要研究 ICP-MS 检测微量重金属元素的实验方法优化。以创新思维对现有的方法进行全面的分析，提出新的技术理念以及优化策略，提高检测的准确性、灵敏度和效率，减少干扰因素的影响，给相关的领域提供更加可靠的、高效的微量重金属检测方法支持。

［关键词］ICP-MS；微量重金属元素；实验方法优化

随着环境监测、材料分析等各个领域对于微量重金属元素检测的要求越来越高，ICP-MS 作为常用的检测方法，其方法的改进有重大的现实意义。目前的方法还存在一些不足，本文试图找到更好的检测实验方法。

1 研究背景与现状

1.1 微量重金属检测需求

国内生态环境监测、食品药品检验、工业材料检测、水质土壤治理等各个领域对于微量重金属元素检测的精度、效率和稳定性有很高的标准化要求。伴随着国内环境治理体系不断完善以及工业生产质量控制水平不断提高，各类基质中痕量、超痕量重金属的溯源检测和定量分析已经成为行业的迫切需求，传统的检测方法已经不能满足现行国标中微量限值的管控要求。水质、土壤、农产品等民生样本中的微量重金属具有累积性、隐蔽性毒害的特点，低浓度的重金属很难用常规检测技术准确检测出来，会对生态安全和人体健康造成长期的危害。工业高纯材料、化工试剂、生物医药原料等产品中含有的微量重金属杂质，会直接影响到产品质量等级和能否获得市场准入资质，准确检测是工业产品提质升级的技术保证。目前各个行业的检测样本量越来越大，检测指标越来越细，合格限值越来越严，促使高精度重金属检测技术的标准化、精细化优化升级成为行业发展的必然趋势。

1.2 ICP-MS 技术概述

电感耦合等离子体质谱检测技术是目前我国微量、痕量重金属元素定量分析的主要精密检测技术，具有很高的灵敏度、多元素同时检测、低检出限等特点，在各种复杂的基质样本中进行重金属检测时被广泛应用。该技术依靠等离子体高温电离环境来完成样本中金属元素的离子化处理，用质谱系统来分离和计数不同的质荷比离子，从而得到元素含量的精确定量检测结果。与原子吸收光谱、原子荧光光谱等传统检测技术相比，该检测技术可以实现多种重金属元素的同步快速检测，大大缩短了批量样品检测的时间，并且适用于水体、土壤、固体材料、生物样本等多种基质的检测。国内各级检测机构、科研院所、第三方检测平台已经逐渐普及使用了该技术设备，成为国标微量重金属检测的主要技术手段，是支撑国内生态监测、食品安全检测、工业质检体系规范化运行的主要技术载体。

2 创新理论基础

2.1 相关化学原理创新

根据等离子体电离平衡和基质化学反应机理来创建新的微量重金属检测化学理论支持体系，冲破传统检测化学原理应用的束缚。根据不同的基质样本酸碱反应、络合反应、消解反应的特点，对高温消解和杂质去除的化学反应平衡条件进行优化，精确控制消解温度、试剂配比、反应时间等主要化学参数，使重金属元素完全解离、杂质成分充分分解。依靠离子络合纯化原理改进预处理化学反应体系，用特异性络合反应剥离样本里的干扰杂质离子，保存目标重金属离子体系，从化学反应层面缩减基质干扰对检测结果的影响。根据电离化学平衡理论来改善等离子体电离环境的化学稳定性，防止电离时出现非目标离子的副反应，提高目标重金属离子的电离效率和离子纯度，给精准质谱检测赋予干净的离子反应根基，达成化学原理同实验流程的深层契合革新。

2.2 物理检测理论新应用

依靠等离子体物理、质谱分离物理、信号传感物理的新型理论应用，提高微量重金属检测的物理检测体系。把等离子体热场均匀调控理论应用到仪器运行过程中，依靠稳定的等离子体温度场、电场分布来消除局部电离不均造成的离子

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.

信号偏差，提高整个电离的稳定性。根据质谱质量筛选和离子运动轨迹物理理论来优化离子偏转、筛选、收集的物理参数，细化不同质荷比微量重金属离子的分离精度，防止相近质荷比离子重叠干扰。根据微弱信号放大物理理论来改进传感检测体系，对超低浓度重金属离子的微弱信号实施准确放大和降噪处理，克服传统检测技术对于超痕量元素信号捕捉能力欠缺的缺陷。

3 实验方法优化

3.1 样品预处理优化

针对传统样品预处理流程中杂质去除不彻底、元素损耗率高、稳定性差的不足，创建出精细化、标准化、低损耗的新式预处理实验流程。优化样本消解体系，根据水质、土壤、固体材料等不同的基质样品特性选择不同的微波消解参数，取代传统的高温干法消解方式，采用低温高效消解的方式进行消解，减少微量重金属元素的挥发损失。细化预处理提纯工序，在原有基础上增加梯度离心、膜过滤、杂质络合去除等专项工序，将样本中的盐分、有机物、悬浮杂质全部去除，清除基质干扰的源头。对规范定容、稀释、静置等操作的标准化标准进行规定，统一封口试剂配比、环境温度、操作时间等，消除人为因素造成的样本间差异。建立预处理质量核验机制，用空白对照、平行样本校验的方式控制预处理样本的纯度和稳定性，保证进入仪器的样本体系纯净均一，为后续精准检测打下样本基础。

3.2 仪器参数调整

根据不同的微量重金属元素电离特点以及样本基质差别，对仪器主要参数进行动态、精细的调节，抛弃传统的固定参数工作模式。调节等离子体功率参数，对于容易电离和难电离的重金属元素分别设置不同的功率阈值，在保证各个目标元素全部电离的同时，尽量减少由于等离子体过载导致信号混乱的问题。根据低浓度微量样本的进样要求来调节进样流速、雾化温度、采样深度等主要运行参数，提高微量离子的雾化效率和稳定性。优化质谱检测器的分辨率和采集频率，对超痕量元素提高信号采集的频次，加强微弱信号的捕捉能力，改善检测器阈值，剔除无效杂讯信号。根据批量检测工况改变仪器稳态运行参数，减小长时间检测时仪器漂移的程度，保证批次内所有样本检测参数一致、状态稳定，提高仪器对微量重金属的检测适应性。

3.3 干扰消除新策略

创建起多维度、分层次的干扰消除新方法，对质谱干扰、基体干扰、多原子离子干扰等各种检测干扰展开全方位的解决工作。对多原子离子质谱干扰进行处理，用动态反应池差异化调节的方法，根据目标元素的特性选择合适的反应气体，准确地消除同质异位素和多原子离子的重叠干扰，提高质谱筛选纯度。根据复杂基质的残留干扰来创建基质匹配的标准曲线校正体系，抵消残余基质对离子信号的抑制和加强作用，从而达到干扰效应的定量消除。全过程空白干扰控制，对实验试剂纯度、实验器材洁净度、实验环境温度湿度进行规范，防止外来杂质造成的背景干扰。采用实时信号监测技术对检测过程中出现的突发干扰信号进行识别，并根据识别结果及时调整仪器的工作状态以及检测参数，从而达到对干扰问题进行实时防控、精准消除的目的，保证微量重金属检测数据的真实性、稳定性。

4 优化效果评估

4.1 准确性评估

准确性评价依靠国家标准参考物质和加标回收实验体系，全方位检验优化之后的实验方法检测的精确程度以及误差控制水平。选择国内标准定值的各类基质参考样品，用优化的方法进行多批次平行检测，比较检测均值和标准定值的偏差范围，定量分析方法的系统误差水平。用不同浓度梯度的加标回收实验来测定微量重金属元素的加标回收率，核对低浓度、超痕量浓度区间检测的准确性，检验优化方法对微量目标物的识别和定量能力。计算出多组平行样品检测的相对误差，比较优化的方法和传统的误差变化，评价检测结果是否符合要求、可靠。大量的实验数据可以证明，优化后的实验方法大大降低了基质干扰和仪器误差造成的检测偏差，检测结果符合国标标准限值的要求，可以满足高精度微量重金属检测的准确性控制标准。

4.2 灵敏度评估

灵敏度评价主要从方法的检出限、定量限和信号响应度三个方面来判断优化的方法对于微量和超痕量重金属元素的捕捉能力。利用空白样品连续检测实验来测定优化方法的仪器检出限和方法检出限，确定超低浓度重金属元素的最低识别浓度，比较传统方法的检出限优化幅度。对不同的低浓度梯度标准溶液进行信号响应线性关系的分析，核验微量浓度区间内线性拟合度，判断仪器信号的灵敏响应能力。统计微弱信号的稳定采集率来评价优化后的降噪、放大、捕捉体系

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.

对于超痕量元素信号的适应性。优化后的实验方法可以有效地降低检出限数值，扩大微量重金属的准确定量范围，微弱信号识别能力明显提高，能够精准地捕捉到传统方法不能识别的超低浓度重金属残留，满足超痕量检测的高灵敏度行业需求。

4.3 效率评估

效率评价从样本预处理时长、仪器检测周期、数据处理时效、重复检测率四个方面来评价优化方法的检测运行效率。优化后的标准化预处理流程去除了不必要的操作环节，统一了工序的操作标准，大大缩短了单批次样本的前处理时间，提高了样本预处理的通量。仪器动态参数适配模式减少仪器调试、参数校准的重复工作，批量检测时不需要经常停下来校正仪器，从而提高仪器连续检测的速度。配套的智能数据分析模型可以对检测数据进行自动校正、拟合、出图，省去了人工数据修正的繁琐过程，大大缩短了数据处理时间。同时干扰消除体系大大降低了检测异常和数据失效的概率，减少了不合格样品重复检测的次数，减少了无效实验能耗和时间损耗。对整个检测流程进行全方位的改进，达到提高微量重金属检测质量、提高检测效率的目的。

5 对策与展望

5.1 方法推广策略

依据国内检测行业标准化体系建设的要求，创建多场景、多层次的优化实验方法推广落地体系。推动优化方法进入地方和行业的检测标准体系中，根据水质监测、土壤检测、食品检测、工业材料质检等细分领域国标的要求，细化各个场景的标准化操作细则，使方法能够规范化地落地应用。创建行业技术交流与培训平台，对各级环境监测机构、第三方检测机构、科研实验室等开展技术推广及操作培训，推广普及优化预处理流程、仪器参数调节、干扰消除、数据处理等关键技术要点。创建示范应用基地，依靠优质的检测机构开展试点应用，总结出成熟的实操经验，向全行业推广。配套编制标准化的操作手册和技术指引，统一各种应用场景的技术标准和技术操作规范，保证优化方法在全行业推广时的一致性、标准化。

5.2 后续研究方向

后续研究可针对极端复杂的基质、超痕量元素、多元素同时高精度检测开展实验方法更新工作。对高盐、高有机物、高杂质的极端复杂样本基质，研发出更加有针对性的预处理纯化技术和干扰消除技术，解决特殊基质微量重金属检测的技术难题。开展超痕量重金属元素检测技术研究，不断改善仪器微弱信号的捕获以及数据校正模型，使方法检出限不断降低，满足极致精细化检测的要求。对多元素同步检测参数的精细化适配进行研究，解决多元素检测过程中参数冲突、信号干扰等问题，提高多指标同步检测的准确性。还可以对实验方法智能化升级展开研究，探寻仪器参数自匹配、干扰智能辨识、数据自动修正的全面智能检测体系，促使检测技术朝自动化、智能化方向前进。

5.3 应用拓展建议

经过优化的微量重金属检测方法可以凭借核心优势向各个领域、各种场合推广使用，从而充分发挥出技术的应用价值。可以应用于矿山环境治理、工业废水溯源、土壤污染修复评价等各个方面，给重金属污染溯源、风险评价、治理效果验收提供准确的数据支持。也可以应用到生物医药、高纯试剂、新能源材料等高端制造业的质量控制中，能对高端材料超低重金属杂质的品质进行控制。可以同农产品安全、饮用水安全、食品加工检测等领域形成联系，加大微量重金属残留的常规监测力度，构筑起民生安全防线。

结束语：

本文通过优化 ICP-MS 检测微量重金属元素实验方法来获得一些新的成果。所提出的方法和对策有实际的应用价值，可以促进该领域检测技术的发展，还需要在更多的方面进行研究来完善检测体系。

[参考文献]

[1]陈文霞.化工生产中痕量金属元素的光谱分析方法探讨[J].山西化工,2025,45(12):98-100+103.

[2]李健,杨健,李松儒,等.全自动消解 ICP-MS 法测定某焦化厂土壤中 5 种重金属[J].环境与发展,2025,37(6):28-34.

[3]李映桦,霍景锋,邱洁琪,等.电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)法测定凉茶中的微量元素[J].现代食品,2025,(24):177-179.

[4]廖雨晴.集成氢气反应模式与氮气模块的 ICP-MS 方法在环境土壤中重金属元素测定应用[J].当代化工研究,2025,(21):59-62.

[5]徐国中.农产品多元素同时检测中 ICP-MS 检测效能的影响因素[J].中国食品工业,2025,(24):105-107.

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.