

环境监测中的重金属元素分析方法研究探讨

王晶晶

邢台轩奇环保科技有限公司 河北邢台 054000

【摘要】重金属元素在水体、土壤与大气颗粒物中具有累积性与潜在毒性，是环境监测与风险管控的重点对象。受介质复杂性、目标元素形态差异及痕量水平等因素影响，重金属检测往往面临基体干扰强、前处理不确定性大与结果可比性不足等问题。本文围绕环境监测中重金属分析的关键环节，系统梳理采样与保存、样品前处理、富集分离与质量控制要点，并对原子吸收光谱、等离子体发射光谱、等离子体质谱以及现场快速筛查技术的适用性与局限进行对比分析。在此基础上，以某地区综合环境监测为案例，讨论方法组合、数据质量控制与结果解释的技术路线，旨在为不同监测目的下的方案选型、能力建设与数据可信度提升提供参考。

【关键词】环境监测；重金属元素；分析方法

Research on Analytical Methods for Heavy Metal Elements in Environmental Monitoring

Wang Jingjing

Xingtai Xuanqi Environmental Protection Technology Co., Ltd. Xingtai City, Hebei Province 054000

【Abstract】 Heavy metal elements exhibit cumulative properties and potential toxicity in water bodies, soil, and atmospheric particulate matter, making them key targets for environmental monitoring and risk management. Due to factors such as media complexity, variations in target element forms, and trace concentrations, heavy metal detection often faces challenges including strong matrix interference, high uncertainty in sample pretreatment, and insufficient result comparability. This paper systematically examines critical stages of heavy metal analysis in environmental monitoring—including sampling and preservation, sample pretreatment, enrichment and separation techniques, and quality control protocols—and compares the applicability and limitations of atomic absorption spectroscopy, plasma emission spectroscopy, plasma mass spectrometry, and rapid on-site screening technologies. Using a regional comprehensive environmental monitoring case study, the paper discusses technical approaches for method combinations, data quality control, and result interpretation, aiming to provide references for selecting appropriate methodologies, enhancing capacity building, and improving data reliability across diverse monitoring objectives.

【Key words】 Environmental monitoring; Heavy metal elements; Analytical methods

引言

重金属元素来源广泛，既包括矿山开采、冶炼加工、燃煤与交通排放等人为输入，也包括母质风化与地球化学背景等自然贡献。与一般污染物相比，重金属更容易在沉积物与土壤中富集，通过食物链传递并产生慢性健康风险，因此在常态化监测、执法监管与污染治理评估中长期占据重要位置。近年来，环境管理对监测数据提出更高要求：一方面要求更低检出限与更宽线性范围，以识别低浓度长期暴露风险；另一方面强调跨区域、跨批次数据的可比性与可追溯性，以支撑趋势研判与溯源分析。现实工作中，重金属分析并非简单的仪器读数，采样代表性、保存稳定性、消解提取效率、基体干扰消除以及质量控制体系共同决定结果可靠度。不同介质的物理化学特征差异显著，同一元素在不同形态下的迁移性与毒性也不一致，导致方法选择需要兼顾监测目的、样

品类型、实验条件与成本周期。本文从环境监测实践出发，按照技术链条逐段讨论重金属分析方法的关键点与易错点，并结合典型仪器方法对比与案例验证，力求形成可操作的选型思路与质量保障路径。

1 环境监测重金属分析的技术需求与难点

环境监测中的重金属分析通常服务于三类需求：污染现状与达标判定、风险识别与预警、治理成效与趋势评估。对应到技术指标上，既要满足法规或标准的限值判定需求，也要满足背景值附近的识别能力，还要能在多介质、多点位长期监测中保持稳定的精密度与准确度。难点主要体现在三方面：其一，环境样品基体复杂且差异大，水样中溶解性盐类、腐殖质与胶体颗粒会引入谱线或质谱干扰，土壤与沉积物中硅铝铁等主要元素含量高，容易造成物理干扰与基体效应；

其二,样品前处理对结果影响显著,消解不完全或形态转化会带来系统偏差,不同实验室的消解体系与条件差异还会降低数据可比性;其三,痕量测定对污染控制与空白管理要求严苛,试剂纯度、器皿清洁、环境背景与交叉污染都可能放大到可观的测量误差。因而,重金属分析应被视为一套从采样到数据审核的完整体系,方法优劣不仅取决于仪器性能,更取决于前端控制与质量管理的细致程度。

2 样品采集保存与前处理的关键技术

2.1 采样设计、现场控制与保存稳定性

采样阶段决定样品的代表性与可解释性,应基于监测目的确定点位布设、频次与样品类型,并在现场记录水文气象、土地利用、排放源与扰动事件等信息,避免后续解释缺乏支撑。水样采集需区分溶解态与总量监测目标,必要时进行现场过滤并采用酸化抑制吸附与沉淀,同时应控制容器材质与清洗方式,减少金属离子在瓶壁的吸附损失。土壤与沉积物采样应关注空间异质性与粒径效应,混合样与分层样的选择应与评价尺度一致,采回后应尽快风干或低温保存,避免微生物作用与氧化还原条件变化导致元素再分配。大气颗粒物采样需控制滤膜本底与采样流量稳定性,采样前后应进行恒温恒湿平衡与称量管理,防止质量波动影响浓度计算。整体而言,采样要做到流程规范化、记录可追溯、保存条件可验证。

2.2 样品消解提取与基体处理方法

前处理的核心是将目标元素从复杂基体中有效转移到可测形态,同时控制转移效率的可重复性。水样测定总量常采用酸消解与加热回流,兼顾颗粒物溶出与有机物破坏;对溶解态金属则更关注过滤与酸化策略,避免因处理不一致造成形态界定混乱。土壤与沉积物常用湿法消解体系实现全量或近全量提取,酸体系选择需匹配监测目标与安全条件,过强的消解体系虽提高回收率,但也可能引入更强的基体效应并增加空白风险;相对温和的提取适用于环境有效态评价,但必须明确方法学意义与可比边界。对高盐水样或高有机样品,应关注雾化效率变化、盐分沉积与碳基干扰等问题,可通过稀释、基体匹配或采用耐盐进样系统降低影响。无论采用何种消解方案,都应通过加标回收、标准物质与平行样验证消解充分性,并把消解过程视为测量不确定度的重要来源进行控制。

2.3 富集分离、干扰控制与实验室质量保障

当目标元素处于痕量水平或基体干扰显著时,富集分离是提升方法适用性的关键环节。常见策略包括螯合萃取、固相萃取与离子交换等,通过选择性吸附或络合实现目标富集并降低共存离子影响,同时还能改善仪器长期稳定性。干扰控制应与仪器技术路线配套:光谱法要关注背景吸收与谱线

重叠,必要时采用背景校正与选择合适谱线;质谱法则需系统识别同量异位素、氧化物与多原子离子干扰,结合碰撞反应池、同位素内标与数学校正降低偏差。实验室质量保障不仅包括标准曲线与校准,还应落实空白体系管理、器皿分区与批次控制,建立从样品接收到数据出具的审核链条。建议在每批样品中配置方法空白、现场空白、平行样、加标样与标准物质,通过控制图跟踪回收率与漂移,并对异常数据进行复测与原因追溯,使结果具备审计意义与可复现性。

3 重金属分析仪器方法对比与应用选择

3.1 原子吸收光谱法在常规监测中的适用性

原子吸收光谱法作为经典的元素分析技术,历经长期应用迭代已技术成熟、运行成本相对可控,凭借稳定可靠的检测性能,广泛适用于水体、土壤、大气降尘等多类环境介质中铅、镉、铬、铜等常见重金属的定量监测,在设备配置有限、检测需求务实的基层实验室中,仍具备极高的实用价值与落地可行性。火焰原子吸收更适合较高浓度样品或消解液测定,操作直观易懂、设备稳定性佳,且抗干扰能力较强,能适配多数常规浓度检测场景;石墨炉原子吸收则拥有更低的检出限与更高灵敏度,更适合痕量金属分析与取样量有限的场景。该方法的核心关键在于基体匹配与干扰抑制,复杂环境样品中的高盐分与共存元素,易造成原子化效率波动、背景吸收增强,进而干扰检测结果,因此需合理选用基体改进剂、匹配背景校正策略,并严格把控灰化与原子化程序参数,才能保障检测的精准度与重现性。由于原子吸收多为单元素逐次测定,面对多元素同步监测任务时效率相对不足,但在方法稳定性、结果可解释性与后期运维可控性上优势显著,是环境常规达标监测、关键污染元素复核确认的优选可靠方法。

3.2 原子荧光光谱法对特征元素的高效测定

原子荧光光谱法在砷、汞、硒等元素的检测中应用广泛,尤其适用于需要较低检出限且样品数量较大的监测任务。其技术特点在于将元素通过化学反应生成易挥发物,再进入原子化器产生荧光信号,从而实现较高灵敏度与较强选择性。方法可靠性高度依赖化学反应条件与气液分离效率,酸度、还原剂浓度与反应时间的微小波动都可能造成信号漂移,因此必须进行条件优化并采用稳定的进样与气路控制。为保证批量样品的一致性,还应强化空白控制与加标回收验证,关注记忆效应和管路残留对低浓度样品的影响,并通过质控样与控制图持续跟踪稳定性。对于含有较高氧化性或还原性组分的样品,容易出现反应抑制或副反应干扰,需要通过预处理消除影响或采用标准加入法进行修正。原子荧光适合作为重点毒性元素的专项监测方法,与多元素方法形成互补,可在能力建设承担高频筛查与预警任务。

3.3 ICP-OES 的多元素能力与复杂基体适配

电感耦合等离子体发射光谱法具备多元素同步测定能力、线性范围宽,适用于水样、土壤消解液与工业污染源样品的批量分析。其优势在于通量高、稳定性好,能够在较短周期内获得多元素谱线数据,便于综合评价污染特征。方法应用中需要重点解决谱线干扰与基体效应两类问题,元素谱线选择应避免重叠并结合背景校正策略,必要时通过高分辨率或选择替代谱线提升准确度;对于高盐样品或高总溶解固体样品,应关注雾化效率下降与进样系统结盐问题,可采用适度稀释、内标校正与耐盐雾化系统降低影响。ICP-OES 在多数常规监测指标上能达到可靠检出能力,但对超痕量水平与极低限值场景可能存在不足,因此更适合承担常规多元素监测主力任务,并与更高灵敏度方法协同使用。

3.4 ICP-MS 的痕量优势、干扰机理与质量控制体系

电感耦合等离子体质谱法以高灵敏度与多元素快速测定见长,在背景值附近识别、长期趋势监测与源解析研究中具有明显优势,尤其适用于镉、铅、汞等限值较严或环境水平较低的元素测定。其技术挑战主要来自质谱干扰与基体效应:同量异位素干扰会导致某些元素无法直接以单一同位素定量,多原子离子与氧化物离子会在特定条件下显著抬升背景,从而引入正偏差;高盐基体会改变离子化效率并引起信号抑制,还会加速接口锥污染影响稳定性。为保证数据可信度,应建立系统化控制策略,包括选用合适同位素与校正模型、配置内标元素监控漂移、使用碰撞反应技术削弱多原子干扰、实施基体匹配或标准加入法评估基体效应,并通过标准物质、加标回收与批次控制图持续验证方法处于受控状态。对于需要更深入风险判断的任务,还可在总量测定基础上扩展形态分析思路,通过温和提取或分级提取反映迁移性差异,但必须明确方法学定义并避免将不同体系结果简单等同。总体而言,ICP-MS 适合承担高要求监测与研究型监测任务,但其质量控制工作量更大,应在人员培训、维护制度与不确定度评估方面同步加强。

4 案例分析:某地区多介质重金属监测方法组合与数据应用

以某地区为例,监测目标为识别水体与沉积物中重金属

污染水平并评估潜在风险,同时为治理措施优化提供依据。监测设计选取入河排口下游、城乡结合部与上游背景区等点位,采集地表水、沉积物及邻近表层土壤样品,并同步记录流量、浊度与土地利用信息以支撑解释。水样按溶解态与总量两类目的分别处理,溶解态样品现场过滤后酸化保存,总量样品采用酸消解;沉积物与土壤经风干研磨后进行湿法消解,并对高有机样品增加氧化步骤以保证消解一致性。分析方法上,多元素以 ICP-MS 为主完成镉、铅、镍、铬等痕量元素测定,并采用内标监控与碰撞反应技术降低多原子干扰;砷与汞采用原子荧光进行专项测定,以提高检出能力并降低基体影响。质量控制方面,每批样品设置方法空白、平行样与加标样,回收率控制在合理区间,关键点样品进行重复消解复测以评估前处理不确定度,同时使用标准物质对消解效率与仪器准确度进行验证。结果表明,下游部分点位在丰水期出现总量升高现象,沉积物中部分元素富集程度更为明显,提示颗粒物携带与沉积过程可能是重要迁移路径;上游背景区水平稳定,可作为长期对照。基于监测结果,建议对重点排口加强源头过程控制与雨季面源拦截,同时在沉积物扰动敏感区开展分期复测,以判断富集是否具有持续性并评估治理后变化趋势。该案例显示,多方法组合与严格质量控制能够显著提升数据解释力,使监测结果从单纯达标判定拓展到污染过程识别与治理决策支持。

结束语

环境监测中的重金属分析是一项贯穿采样、前处理、仪器测定与质量控制的数据工程。面对多介质与复杂基体,仅依赖单一仪器难以覆盖所有目标与场景,应根据监测目的构建方法组合,并把采样代表性、消解提取一致性与干扰控制作为核心抓手。原子吸收与原子荧光具备成本可控与针对性强的特点,适合常规与专项监测;ICP-OES 在多元素通量方面优势突出,适用于批量监测;ICP-MS 在痕量测定与趋势识别方面能力更强,但对质量体系与运维管理要求更高。未来工作应进一步强化标准化操作、数据可追溯与不确定度评估,推动监测从结果输出走向风险解释与治理评估的综合支撑,为环境质量改善与公众健康保障提供更可靠的数据基础。

参考文献

- [1]谢文琪.环境监测中的重金属元素分析方法[J].化工设计通讯, 2024, 45(9): 130+132.
- [2]王帅.环境监测中的重金属元素分析方法研究探讨[J].化工管理, 2023(20): 40-41.
- [3]李飞飞,翁文静,张睿.原子吸收光谱法在土壤环境监测中的应用[J].科学技术创新, 2025(29): 46-47.
- [4]李淑梅.关于环境监测中的重金属元素分析[J].民营科技, 2024(08): 83.