

# 环境中常见无机污染物检测技术的优化与实践

彭红梅

(长沙轨道交通职业学院 湖南省浏阳市 410323)

摘要: 本文聚焦环境中常见无机污染物及其检测技术优化。无机污染物种类丰富, 源于多领域, 对生态和人类健康危害大, 如重金属、酸碱盐类、氮磷化合物、氰化物、氟化物及放射性物质等。检测技术优化方面, 首要任务是提升灵敏度与特异性, 可引进纳米材料和生物识别技术; 其次, 多技术联用实现高通量多污染物同时检测; 再者, 优化便携式设备与现场快速检测技术; 最后, 通过自动化与智能化分析, 实现从检测到预测的升级, 提高检测效率与防控能力。

关键词: 无机污染物; 检测技术; 优化

引言: 随着工业、农业、交通等领域的发展, 环境中无机污染物问题日益凸显。这些污染物种类繁多, 在环境中广泛存在且难以降解, 极易在生物体内富集, 通过食物链放大危害, 严重威胁生态系统和人类健康。目前, 准确、高效地检测这些无机污染物成为环境监测的关键任务。然而, 传统检测技术面临灵敏度不足、特异性差、检测效率低等诸多问题。因此, 优化环境中常见无机污染物的检测技术迫在眉睫, 具有重要的现实意义。

## 一、环境中常见无机污染物

环境中常见的无机污染物种类繁多, 其源于工业生产、农业活动、交通运输以及日常生活等多个领域, 对生态系统和人类健康构成严重的威胁。其中重金属污染是环境中较为常见的一类污染物, 由于其在环境中难以降解, 极易在生物体内聚集, 并通过食物链持续放大, 重金属中的铅、汞、铬等在生态界均具备严重的危害性, 会造成不同程度的生理性损伤; 其次, 酸碱盐类污染物在自然环境中也较为常见, 其主要源于化工生产以及汽车尾气排放, 这类污染物会严重破坏生态环境的平衡, 甚至影响一系列工程设备的正常运行; 此外, 氮磷化合物主要来自于农业污染、生活污水和工业废水, 这些物质在水体中会严重消耗溶解氧, 导致水体黑臭, 影响水生生物的生存, 而这些化合物中的硝酸盐、亚硝酸盐也尤为常见, 会通过食物链传递到人体; 无机污染中的氰化物和氟化物在生活中也较为常见, 随着电镀、金属冶炼、有机化工等行业的发展, 这些污染物含量比重持续不断提升; 最后, 放射性物质在生活环境中同样存在, 诸如核实验、核能发电、核燃料循环以及医疗放射等均会产生一些放射性污染物。

## 二、环境中常见无机污染物检测技术的优化

### (一) 提升检测灵敏度与特异性

在常见无机污染物的检测领域, 技术人员需对技术细节和指标进行进一步优化, 而最为首要的任务便是提升相关检测设备的灵敏度和特异性。具体来说, 无机污染物检测的核心矛盾在于低浓度目标物信号捕捉效率极低, 再加上复杂环境基质的干扰, 导致传统检测方法如原子光谱、电化学、放射等的应用面临灵敏度不足和特异性差等问题。为此, 相关单位需尝试在技术优化环节聚焦于分子信号放大以及识别界面精准调控等多个维度, 做好技术优化革新。

其中, 可引进纳米材料作为信号放大载体, 因其具备量子尺寸效应、高比表面积和表面可修饰性, 能够构建多层次信号放大体系, 通过迁移加速以及局域场效应增强, 均可以取得不错的信号放大效果。而基于半导体纳米颗粒的光电转换效率可提升检测精度, 通过降低背景噪音, 使目标物引发的信号强度提升 1~3 个数量级; 此外, 结合等离子纳米结构的表面等离子共振效应, 可实现电磁场强度指数级倍数的增强。

在进行无机污染物检测环节, 还可以引进生物识别技术构建特异性捕获界面以提高检测灵敏度, 比如可引进核酸适配体,

通过碱基堆积与形状互补对金属离子进行亚纳米级结合, 从而提高检测效率; 同时, 也可以引进分子印迹聚合物, 通过预组装模板分子形成特异性结合位点, 同样能够提高检测效率。

例如, 在某工业园区周边的水体环境中, 铅作为常见的无机重金属污染物, 对生态系统和人类健康构成潜在威胁, 而传统原子吸收光谱法检测低浓度铅离子时, 常因环境中其他金属离子干扰导致灵敏度不足、特异性差, 无法精准识别铅污染物, 因此对铅污染物检测技术进行优化迫在眉睫。为解决这一难题, 研究团队引进纳米材料作为信号放大载体, 采用二氧化钛纳米颗粒构建多层次信号放大体系, 由于二氧化钛具备量子尺寸效应与高比表面积的特性, 其载流子迁移加速使信号强度显著增强, 同时局域场效应的增强也极大提升了检测信号的放大效果; 基于此半导体纳米颗粒的光电转换装置应用于铅离子检测, 通过降低水体中腐殖质等物质产生的背景噪音, 成功使铅离子引发的信号强度提升了 2 个数量级, 精准检测出了低至  $0.1 \mu\text{g/L}$  的铅离子浓度, 极大提升了检测精度。

不仅如此, 研究团队还结合等离子纳米结构的银纳米棒, 利用其表面等离子共振效应, 使电磁场强度呈指数级倍数增强, 对含有铅离子的水样进行检测时, 该技术能够敏锐捕捉极微量铅离子引发的电磁场变化, 进一步提高了检测的灵敏度。在特异性捕获界面构建方面, 引入核酸适配体, 其通过碱基堆积与形状互补的特性, 实现了对铅离子的亚纳米级精准结合, 在复杂的工业废水中, 能够特异性识别铅离子, 排除其他金属离子干扰; 同时采用分子印迹聚合物, 以铅离子为模板分子进行预组装, 形成特异性结合位点, 成功在含有多种重金属离子的混合溶液中, 准确分离并检测出铅离子, 显著提高了检测效率与准确性, 为铅污染物的精准检测提供了有效技术手段。

### (二) 多技术联用, 实现高通量多污染物同时检测

在针对无机污染物检测环节, 技术人员可尝试整合多技术优势, 以实现高通量多污染物的同时检测, 进而提高检测效率。在环境无机污染物中, 存在多组分共存以及浓度动态变化等情况, 以至于检测环节面临诸多挑战, 如检测通量限制、响应机制冲突以及基质干扰叠加等均会影响检测精度。为此, 相关单位可以引进多技术联用体系, 构建并行检测架构, 该技术体系实现了检测方法的优化组合。其中, 可以引进检测原理互补性设计, 将光谱和电化学联用, 将质谱与色谱联用, 实现多元化检测; 对于前者而言, 主要是通过光谱技术完成元素全扫描, 再以电化学技术对特定污染物进行高灵敏度验证, 构建起“广筛+精筛”的双层级检测模式; 而后者主要是通过色谱分离消除共流出物干扰, 利用质谱实现同位素碎片粒子的精准识别, 从而提升多组分定性准确性。

此外, 工程师还可以结合信号解耦与数据融合模式, 需要优先进行多模态信号交叉验证, 即对同一污染物采取不同技术进行独立检测, 通过数据融合算法来消除单技术误差; 同时, 建立起跨技术平台信号响应标准化模型, 确保不同模态数据的

时空一致性；但是在检测过程中，还需要同步引进动态极限补偿，由于环境基质如酸碱度、盐度波动可能引发多技术信号漂移，因此可以引进内标物、稳定同位素标记物与实时校准模块，基于多通道信号归一化算法来消除基质干扰。

例如，上述检测团队引进多技术联用体系，构建起并行检测架构。在检测原理互补性设计中，将电感耦合等离子体原子发射光谱（ICP-AES）与阳极溶出伏安法（ASV）联用，前者凭借 ICP-AES 的全元素扫描能力，快速确定水样中铅、镉、汞等重金属元素的大致存在，随后利用 ASV 对特定重金属进行高灵敏度验证，例如针对镉元素，ASV 能够检测到低至  $0.01 \mu\text{g/L}$  的浓度，相比单一 ICP-AES 检测精度提升 3 倍，构建起“广筛+精筛”的双层级检测模式；同时，将高效液相色谱（HPLC）与质谱（MS）联用，HPLC 通过色谱柱分离，有效消除氨氮、硝酸盐等共流出物的干扰，再借助 MS 对分离后的化合物进行同位素碎片粒子精准识别，在检测硝酸盐时，MS 能够精确区分其与亚硝酸盐的质谱峰，成功解决传统 HPLC 难以定性的问题，显著提升多组分定性准确性。

### （三）便携式设备与现场快速检测技术优化

在无机污染物检测环节还存在较多复杂工况，此时相关单位需要在提高检测灵敏度的同时提升检测效率。具体来说，当前检测面临检测精度与设备体积的冲突、响应速度与抗干扰能力的矛盾以及操作复杂度与人员技能的失衡等问题。相关单位需要构建“快、准”的多元化检测体系，做好对检测技术方法的优化。首先，需促进设备小型化底层技术创新，可将检测设备进行模块化以及微系统集成，做好功能结构重组，比如可将传统大型设备的进样、分离、检测、数据处理等模块拆解为独立单元，以减轻检测负荷，并且也可以结合异构技术进行设备微缩处理，比如对光谱模块可开发微型 ICP 光源、CMOS 阵列光谱仪，实现等离子体激发与多波段同步采集；除此之外，还可以在质谱模块集成低温等离子体离子源与微型四极杆质量分析器，通过真空腔室微型化降低能耗。另外，为提升现场检测精准性，还需要做好检测环节的基质预处理，可尝试在设备前端集成微萃取-分离一体化模块，通过电场流场协同效应来实现对目标物与干扰物的实时分离，以此提高基质处理效率。

例如，在某城市近郊突发的化工原料泄漏事故中，周边河流受到重金属污染物（如铅、镉、汞）的污染，现场环境复杂、情况紧急，传统大型检测设备难以快速抵达且操作繁琐，无法满足实时。为应对这一复杂工况，检测团队采用模块化与微系统集成技术对便携式检测设备进行创新优化，将传统大型原子吸收光谱仪的进样、分离、检测、数据处理模块拆解为独立单元，成功将设备体积缩小至原来的三分之一，重量减轻 60%，便于快速携带至现场；结合异构技术，开发微型 ICP 光源与 CMOS 阵列光谱仪组成光谱检测模块，在现场检测中，该模块实现了等离子体激发与多波段同步采集，仅需 5 分钟即可完成水样中铅、镉、汞等重金属元素的初步扫描，检测灵敏度达到  $\mu\text{g/L}$  级别；同时，在质谱模块集成低温等离子体离子源与微型四极杆质量分析器，通过真空腔室微型化设计，能耗降低 40%，却依然能够精准识别重金属离子的同位素碎片，对汞元素的检测精度可达  $0.05 \mu\text{g/L}$ ，有效解决了检测精度与设备体积的冲突。

### （四）自动化与智能化分析，从检测到预测的升级

自动化与智能化技术的应用将大幅提高无机污染物检测效率，在实践环节，可构建全流程自动化与智能决策闭环，实现从被动检测到主动干预的跨越。其中，相关单位可开发智能采

样机器人，集成自动过滤、基质消减等主动模块，基于程序控制来完成对样品的预处理，之后再引进微流控芯片实现自动化整合，通过芯片的加持完成设备对检测物分离、纯化、检测等全流程操作；而在自动化分析模块构建中，可引进时空关联模型，整合检测数据与地理信息、气象数据、人类活动数据，建立起时空立体结构，再结合时空卷积网络提取污染物迁移的时空模型，以识别污染物的来源和扩散路径；除此之外，还可建立起知识图谱驱动模式，构建环境无机物污染本体库，涵盖污染物属性如毒性、半衰期，环境行为如吸附、降解等，之后对应影响后果构建三元组关系，基于图谱的逻辑推理自动推导污染事件因果链，从而提高检测分析效率。

例如，为实现从检测到预测的升级，上述监测团队开发智能采样机器人，该机器人集成自动过滤与基质消减主动模块，在工业园区排水口采集水样时，自动过滤模块能瞬间拦截水中悬浮颗粒，基质消减模块通过化学试剂快速去除干扰物质，基于预设程序控制，仅需 3 分钟即可完成水样预处理；随后引入微流控芯片，该芯片凭借精密设计的微通道，自动完成水样中氨氮、硝酸盐、磷酸盐的分离、纯化与检测，相比传统方法检测时间缩短 80%，检测精度提升至  $0.01\text{mg/L}$ ，真正实现了检测流程的自动化整合。

在自动化分析环节，监测团队引进时空观念模型，将实时检测数据与工业园区地理信息、当地气象数据（风速、降水量）、人类活动数据（企业生产时段、排污记录）进行整合，建立起涵盖三维空间与时间维度的立体结构；结合时空卷积网络，成功提取出无机氮磷污染物随水流扩散、受降雨影响迁移的时空模型，例如在一次暴雨天气中，模型准确预测出磷酸盐污染物将在 6 小时内扩散至下游 5 公里的饮用水源地；不仅如此，团队还建立知识图谱驱动模式，构建环境无机物污染本体库，详细记录氨氮的毒性、硝酸盐的半衰期等属性，以及磷酸盐在土壤中的吸附、降解等环境行为，并对应生态破坏、水体富营养化等影响后果构建三元组关系，基于图谱强大的逻辑推理能力，自动推导出企业超标排放氨氮与周边湖泊藻类爆发之间的因果链，从被动检测污染转变为主动预测风险，极大提高了工业园区无机氮磷污染物的检测分析与防控效率。

### 结束语

总体来说，通过对环境中常见无机污染物检测技术的优化研究，我们取得了显著成果。在提升检测灵敏度与特异性上，纳米材料和生物识别技术的引入有效解决了低浓度目标物信号捕捉难题；多技术联用体系构建起并行检测架构，实现了高通量多污染物同时检测；便携式设备与现场快速检测技术的优化，满足了复杂工况下的检测需求；自动化与智能化分析的应用，实现了从被动检测到主动干预的跨越。

### 参考文献：

- [1]许海港. 重金属检测技术在水质检测分析中的应用 [J]. 清洗世界, 2025, 41 (03): 163-165.
- [2]李明, 祁学玲, 宋海东, 等. 水质测量仪在雨水中典型重金属污染物检测中的应用研究 [J]. 仪器仪表用户, 2025, 32(03): 122-124.
- [3]王红梅. 浅谈饲料中的重金属检测技术 [J]. 中国动物保健, 2025, 28 (02): 188-189.
- [4]潘晓荣. 土壤污染检测技术在环保领域的研究进展 [J]. 皮革制作与环保科技, 2025, 6(02): 117-119. DOI:10.20025/j.cnki.CN 10-1679.2025-02-41.