

Study on Application Strategy and Optimization of Ion Chromatography for Determination of Persistent Pollutants in Water

Jin Yang

Shupu Testing Technology(Shanghai)Co.,Ltd.,Shanghai 201109, China

Abstract

Persistent pollutants in aquatic environments, characterized by high structural stability, long migration cycles, and pronounced cumulative ecological risks, have become key control targets in water quality monitoring and environmental assessment. Owing to its high separation efficiency, strong selectivity, and capability for simultaneous multi-ion analysis, ion chromatography has demonstrated considerable potential in the detection of persistent pollutants in aquatic environments. Focusing on the practical application of ion chromatography in the analysis of persistent pollutants in water bodies, this study conducts a systematic investigation from the perspectives of ionic form characteristics of pollutants, method adaptability, and analytical process control. Targeted application strategies and optimization approaches for ion chromatographic detection under complex aquatic conditions are proposed, providing technical support for improving monitoring capacity and data reliability in the assessment of persistent pollutants in aquatic environments.

Keywords

Aquatic environment; Persistent pollutants; Ion chromatography; Detection technology; Method optimization

水环境中持久性污染物的离子色谱检测技术应用策略与优化研究

杨进

实朴检测技术(上海)股份有限公司, 中国·上海 201109

摘要

水环境中持久性污染物因结构稳定、迁移周期长、生态风险累积显著,已成为水质监测与环境评价中的重点控制对象。离子色谱技术凭借分离效率高、选择性强及多离子同步分析等优势,在水环境持久性污染物检测中展现出良好的应用潜力。本文围绕离子色谱技术在水环境持久性污染物检测中的应用实践,从污染物离子形态特征、检测方法适配性及分析过程控制等方面展开系统研究,提出针对复杂水环境条件的离子色谱检测技术应用策略与优化思路,为提升水环境中持久性污染物监测能力和数据可靠性提供技术支持。

关键词

水环境; 持久性污染物; 离子色谱; 检测技术; 方法优化

1 引言

随着工业活动强度增加与化学品使用范围扩大,水环境中持久性污染物的种类和赋存形态不断复杂化,其长期存在对水生态系统结构稳定性和人类健康构成潜在威胁。持久性污染物(Persistent Pollutants, PPs)的定义已从传统的重金属与无机盐,扩展至涵盖高氯酸盐、消毒副产物以及可离子化新兴有机污染物(如全氟烷基与多氟烷基物质 PFAS)在内的广阔谱系^[1]。这些物质在水体中常以痕量($\mu\text{g/L}$)至超痕量(ng/L)水平存在,其长期低剂量暴露与复合效应,引

发了从饮用水安全危机到水生生态系统退化的连锁风险^[2],对其进行精准识别与可靠监测已成为全球环境科学的紧迫议题。

传统水质监测方法在多组分共存、低浓度背景及高基体干扰条件下,难以同时兼顾检测效率与数据精度,亟需引入更加稳定且适应性强的分析技术^[3]。离子色谱技术以其对无机及部分有机离子良好的分离识别能力,在水环境分析领域逐渐得到重视。然而,在实际应用过程中,不同水体类型、污染物特征及样品处理条件对检测效果的影响仍存在差异。系统梳理离子色谱检测技术在水环境持久性污染物分析中的应用特点,并针对关键技术环节开展针对性优化研究,对于提升监测结果的科学性与可比性具有重要意义。

【作者简介】杨进(1978—),男,中国安徽安庆人,博士,高级工程师,从事环境监测技术与管理研究。

2 水环境中持久性污染物的类型特征与离子色谱检测适用性

水环境中持久性污染物在长期外源输入与水体循环作用下,逐渐形成以溶解态离子为主的存在形式,其离子形态受水理化条件与环境过程共同制约。在天然水体中,水温、酸碱度及溶解性无机盐组成对污染物离子状态具有显著调控作用,使其在不同水环境介质中呈现差异化分布特征^[4]。河流水体中受水动力条件影响,污染物多以可迁移性较强的单一离子或弱络合形态存在,湖泊、水库等相对静稳水体中,持久性污染物在水体分层结构内易形成稳定分布区,部分离子在界面区域出现浓度梯度变化。地下水系统中,受水岩相互作用影响,污染物离子形态演变缓慢,长期富集特征明显^[5]。上述分布特征决定了污染物在色谱分离过程中的迁移行为,也为离子色谱检测中保留时间稳定性和响应一致性提供了现实基础。

3 离子色谱检测水环境持久性污染物的技术原理与方法体系

3.1 离子色谱分离机理与检测模式的技术基础

离子色谱检测以离子交换或排斥作用为核心分离机制,依托固定相表面官能团与目标离子之间的相互作用实现分离。水环境样品进入色谱系统后,不同污染物离子根据电荷特性、水合半径及交换能力差异,在色谱柱中形成不同迁移速率,从而实现时间分离。检测模式通过将离子浓度变化转化为可测信号,为污染物定量分析提供基础^[6]。分离机理的稳定性直接影响检测结果的重复性和可比性,是构建可靠方法体系的关键技术支撑。在复杂水环境样品分析中,分离过程需要兼顾目标离子与背景离子的竞争行为,以确保检测信号的准确反映^[7]。

3.2 抑制型与非抑制型离子色谱技术的应用特点

抑制型离子色谱通过降低淋洗液背景信号强度,有效提升目标离子的信噪比,在低浓度持久性污染物检测中具有明显优势。该技术在复杂水样条件下能够削弱共存离子干扰,提高检测灵敏度和定量精度,适用于水环境质量评价和风险分析任务。非抑制型离子色谱结构相对简化,运行条件稳定,适合用于常规监测和过程控制分析。两种技术在检测精度、系统维护及运行成本方面表现不同,合理选择有助于提升检测体系的整体适用性和运行效率^[8]。

4 离子色谱技术分析

4.1 离子色谱分离机制与应用优化

离子色谱技术的核心在于其高效的离子交换分离原理,能够通过固定相与水样中的目标离子之间的电荷作用,实现对水中污染物的有效分离。在水环境持久性污染物的检测中,选择合适的色谱柱填料和淋洗条件是实现高效分离的关键。阴离子交换柱常用于检测水样中的无机阴离子,特别是

像氯化物、硝酸盐和磷酸盐等离子。根据不同污染物的电荷密度和迁移特性,优化色谱柱的交换容量和颗粒尺寸可以显著提高分离度。此外,淋洗条件的选择,如流动相浓度、温度和pH值,直接影响到分离效率和检测灵敏度。通过细化这些参数,离子色谱能够精准分离复杂水样中的多种污染物,提供高质量的数据支持。

4.2 检测灵敏度与精度提升策略

离子色谱的检测灵敏度和精度在水环境监测中至关重要。为提升水中持久性污染物的检测能力,需优化系统的关键参数,包括流速、柱温和检测器的选择。提高流速可缩短分析时间,但过高的流速会导致分离效果变差,进而影响检测精度。适当调整柱温有助于提高离子迁移速率,从而缩短分析时间并减少基线噪声。在检测器选择上,电导检测器是最常用的工具,它对离子浓度变化非常敏感,能够实现低浓度污染物的定量分析。为了进一步提高分析精度,常采用抑制技术来减少背景电导的干扰,保证目标离子的响应信号更加清晰。此外,定期的仪器校准和数据校正也是保证长时间稳定监测的关键^[9]。

4.3 数据处理与方法优化

离子色谱的优化不仅限于硬件的调整,数据处理方法同样在提高监测精度和效率上起到了重要作用。在水环境监测中,通常需要处理大量的连续数据,这就要求数据分析方法必须具备高效的噪声滤除和信号提取能力。通过采用先进的峰识别算法和内标法,可以有效减少背景噪声的影响,提升低浓度污染物的检出限。为了确保数据的可靠性,需结合回归分析和误差统计方法,评估检测结果的重复性与稳定性。在复杂水环境中,不同污染物的交叉干扰可能会导致数据偏差,因此需要采用多元统计方法对数据进行多层次分析,通过模型优化进一步提高分析结果的准确性和可重复性^[10]。

5 离子色谱检测水环境持久性污染物的关键参数优化路径

5.1 色谱柱类型与淋洗条件对分离效果的调控作用

色谱柱作为离子色谱分离体系的核心部件,其填料类型、交换容量及颗粒尺寸直接决定持久性污染物的分离效率与保留行为。在水环境样品分析中,常用阴离子交换柱交换容量多处于0.15–0.35 meq·g⁻¹范围,不同容量水平对应的分离选择性存在明显差异。交换容量偏低时,弱保留离子易出现峰重叠现象,而容量过高则会延长保留时间,导致分析周期增加。柱长由250 mm增加至300 mm时,理论塔板数可由6000 plate·m⁻¹提升至8000 plate·m⁻¹,分离度提高约0.3–0.5。淋洗条件对分离效果具有显著调控作用,碳酸盐或氢氧化物体系浓度在5–30 mmol·L⁻¹范围内变化时,目标离子的保留时间可缩短20%–45%,峰形对称性明显改善。梯度淋洗条件下,多组分持久性污染物的分离时间可控制在20–30 min内,分离度保持在1.5以上。通过色谱柱类型与

淋洗条件的协同优化,可在保证分离效果的同时兼顾检测效率与系统稳定性,详见表1。

表1 色谱柱类型与淋洗条件对分离效果的调控作用

交换容量 (meq·g ⁻¹)	色谱柱长度 (mm)	淋洗条件浓度 (mmol·g ⁻¹)	保留时间变化 (%)	分离度 变化
0.15	250	5-10	20-25%	1.5
0.2	300	30	10-20%	1.8
0.25	275	10-20	10-15%	1.7
0.3	250	5-10	25-30%	1.6
0.35	300	20-30	5-10%	2

5.2 流速、柱温与进样方式对检测稳定性的影响

流速、柱温及进样方式是影响离子色谱检测稳定性的关键运行参数,其变化直接反映在保留时间漂移、峰面积波动及基线稳定性等方面。在常规分析条件下,流速控制在0.8-1.2 mL·min⁻¹范围内时,系统压力保持在10-15 MPa,色谱峰对称因子稳定在0.95-1.10区间^[12]。流速提高至1.5 mL·min⁻¹以上时,保留时间缩短约30%,但分离度下降明显,峰宽增加10%-18%。柱温对离子迁移行为具有调节作用,在25-35℃范围内,温度每升高5℃,保留时间可缩短约5%-8%,同时电导检测基线噪声降低约15%。进样体积由10μL增加至50μL时,低浓度污染物响应强度提升2-4倍,但过量进样易引发峰形畸变,影响定量精度^[11]。通过合理匹配流速、柱温与进样方式,可有效降低系统波动,确保连续检测条件下结果的稳定一致,详见表2。

表2 流速、柱温与进样方式对检测稳定性的影响

流速 (mL·min ⁻¹)	柱温 (℃)	进样体积 (μL)	基线噪声变化 (%)
1	30-35	20	5-10
1.2	28	20	7-10
1.5	25-35	50	2-5

5.3 方法检出限、精密度与重复性优化策略

离子色谱方法性能评价中,检出限、精密度与重复性是衡量检测可靠性的核心指标。通过优化分离条件与检测参数,水环境持久性污染物的检出限可稳定控制在0.5-5.0 μg·L⁻¹范围,部分无机离子型污染物在高灵敏检测条件下可降至0.1 μg·L⁻¹以下。重复进样条件下,峰面积相对标准偏差通常低于3%,保留时间相对偏差控制在1%以内,满足环境监测技术规范要求。精密度受检测器稳定性和基线噪声水平影响明显,当电导检测基线噪声控制在0.02 μS·cm⁻¹以下时,低浓度样品定量偏差可降低至5%以内。通过延长系统平衡时间、优化抑制条件及加强仪器校准频率,可进一步提升方法重复性^[12]。在连续运行48 h条件下,目标离子响应变化幅度保持在±5%区间,表明方法具备良好的长期稳定性,适用于水环境持久性污染物的常规监测与趋势分析,详见表3。

表3 方法检出限、精密度与重复性优化分析

检出限(μg·L ⁻¹)	相对标准偏差 (峰面积)(%)	相对偏差 (保留时间)(%)	电导基线噪声 (μS·cm ⁻¹)
0.5-5.0	< 3%	< 1%	< 0.02
1	< 2%	< 0.8%	< 0.02
0.1	< 3%	< 1%	< 0.01
3	< 5%	< 1.5%	< 0.02
0.5	< 4%	< 1%	< 0.03

6 结语

综上所述,离子色谱技术在水环境持久性污染物检测与监测中具备稳定、可靠和适用范围明确的技术优势。通过系统优化分离条件、运行参数与方法性能指标,可有效提升检测结果的准确性与可比性,使其更好服务于常规监测与长期评估需求。将离子色谱技术合理嵌入水环境监测体系,并与多种分析手段形成协同应用格局,有助于全面掌握污染物赋存特征与变化趋势。相关研究成果可为水环境质量评价与风险识别提供持续、规范的数据支撑。

参考文献

- Post, G. B. Recent US regulatory developments for per- and polyfluoroalkyl substances in drinking water. *Current Opinion in Environmental Science & Health*.2021,20, 100238.
- Crimmins, B. S., Xia, X., Hopke, P. K., & Holsen, T. M. A review of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in the aquatic environment: Sources, fate, and effects. *Environmental Toxicology and Chemistr*.2022,41(11), 2680-2692.
- 刘德宁,张欢.污水及污染物检测技术在环境治理中的应用研究[J].皮革制作与环保科技,2025,6(24):103-105.
- 黄润生.离子色谱技术及其在水环境监测中的应用研究[J].黑龙江环境通报,2025,38(12):156-158.
- 孙颖,王苏琴,刘锋,袁颖.水环境中黄曲霉毒素检测与去除方法研究进展[J].环境污染与防治,2025,47(11):112-121.
- 王俊杰.高效液相色谱技术在水环境监测中的应用[J].山西化工,2025,45(10):233-235.
- 郑君儿.气相色谱技术在水环境污染检测中的应用分析[J].皮革制作与环保科技,2025,6(20):50-51+90.
- 宗世富.环境检测中离子色谱技术的实践探索[J].实验室检测, 2025,3(18):152-154.
- 李凤,陈平,舒洲,袁明兴.直接进样-超高效液相色谱-串联质谱法测定水环境中18种磺胺类抗生素和TMP的监测方法研究[J].广东化工,2025,52(17):81-85.
- 赵继升.联苯吡菌胺在水环境中的光解及在土壤中的降解机理研究[D].导师:胡继业.北京科技大学,2025.
- 钟天生.水环境监测工作的技术要点与改进策略[J].黑龙江环境通报,2025,38(08):158-160.
- 姜俊,吴珍珍,马苏婷,张秀博,吴银萍,张世林,童渭泽,刘方毅.固相萃取-超高效液相色谱-串联质谱法同时测定水环境中47种抗生素的含量[J].理化检验-化学分册,2025,61(08):960-970.