

流动注射分析法 (FIA) 在突发性水污染事件应急检测中的应用研究

宋志悦

四川中衡检测技术有限公司 四川 德阳 618000

摘要: 突发性水污染事件的应急处置依赖快速、准确的检测数据。流动注射分析法 (FIA) 凭借分析速度快、试剂消耗低、易于自动化集成等优势,在水环境应急检测中展现出巨大的应用潜力。本文阐述其技术原理、系统构成与适配性应急检测场景的核心优势,论述应急场景下FIA检测方法的构建原则、样品前处理简化策略及操作参数优化方案,并通过方法学验证确保检测结果的可靠性。结合重金属、无机有毒物及有机污染物等典型水污染应急场景,分析FIA方法的实际应用路径与检测效能。本文研究表明,经优化的FIA方法可在提高分析速率的同时保障数据的准确性。同时,本文展望FIA技术的未来发展方向,以期完善我国水环境应急检测技术体系提供新的技术思路与实践参考。

关键词: 流动注射分析法 (FIA); 突发性水污染; 应急检测; 方法优化; 污染物监测

引言: 突发性水污染事件具有突发性强、危害大等特点,给生态环境与公众健康带来严重威胁。在应急检验检测中,快速获取准确数据、应对现场复杂条件及污染物种类复杂等技术难题亟待解决。流动注射分析法 (FIA) 以“非平衡态下的液流分析”为核心原理,具有快速分析、经济环保、稳定抗干扰等优势,为解决这些难题提供了有效途径。本文将深入探讨FIA在突发性水污染事件应急检测中的应用研究。

1 突发性水污染事件特点、危害、检验技术难题

突发性水污染事件具有突发性强、污染范围广、影响因子复杂多样、危害程度大等特征,短时间内可造成大面积水体污染,对生态环境稳定性与公众健康安全存在严重威胁。这类危害具有多种特性: 不仅会破坏水生生态系统平衡,还可能通过饮用水摄入等途径,对人类生命健康造成风险。然而,当前在突发性水污染应急检测中面临诸多技术瓶颈: 如因应急处置的时效性,需在短时间内快速获取可靠数据; 现场检测环境受限,检测技术的便捷性和抗干扰性面临考验; 污染水体中污染物种类复杂,存在多组分共存形成干扰,增加了快速分析的难度等。在此背景下,流动注射分析法 (FIA) 凭借分析速率快、自动化集成度高、抗干扰能力强等核心技术优势,能够精准适配应急检测的核心需求,为破解上述技术难题提供了高效可行的技术路径。

2 流动注射分析法的技术基础与应急适配性

2.1 流动注射分析法的基本原理

流动注射分析法 (FIA) 以“非平衡态下的液流分

析”为核心理论基础,通过蠕动泵驱动载流液在密闭聚四氟乙烯流路中连续流动,样品经进样阀以“塞状”注入载流后,在反应盘管内借助对流扩散作用与试剂实现高效混合完成快速化学反应,最终流经检测器产生与污染物浓度相关的信号响应 (如吸光度、电极电位等),信号经处理系统解析后,最终完成目标污染物的定量分析。与传统分析方法的核心差异在于, FIA无需等待反应达到平衡状态即可进行检测流程,其连续测定定量依据为样品与试剂在流路中形成的浓度梯度。这一原理决定了FIA的快速分析特性将单个样品分析时长控制在30秒至10分钟区间内。同时封闭流路设计从根本上减少了样品与外界接触的机会,降低了样品污染风险,也有效规避了人为操作误差,为突发性水污染事件中的批量样品快速筛查、应急检测提供技术支撑与理论依据。

2.2 FIA系统的核心组成及功能

一套完整的FIA系统主要由进样系统、流路系统、反应系统、检测系统及数据处理系统五部分构成,各组件协同保障应急检测的高效运行。进样系统采用六通阀或八通阀进样,可精准控制进样体积,确保分析重复性,部分便携式系统配备自动进样装置,提升现场操作效率。流路系统以蠕动泵为动力源,通过调节泵速控制液流速率,聚四氟乙烯管路内壁光滑,可避免样品吸附与残留。反应系统核心为螺旋形反应盘管,其结构能强化样品与试剂的混合效果,盘管长度与内径可根据反应特性调整。检测系统需适配应急需求,常用电导检测器、分光光度计及电化学检测器,部分系统集成多种检测器

实现多参数测定。数据处理系统具备实时信号采集、峰值识别与浓度计算功能,可快速输出检测结果^[1]。

2.3 FIA在应急检测中的核心优势

较于传统应急检测技术,FIA在突发性水污染事件中有三大核心技术优势。其一,分析效率高,实现“即时响应、快速筛查”。依托连续流路设计与非平衡态检测,FIA大幅缩短了单个样品分析周期,约为传统方法的1/5~1/10。例如,在水中氰化物检测中,传统特定分光光度法等技术需15~30分钟以上,而FIA法仅需1分钟。其二,经济环保。FIA的试剂消耗量仅为传统方法的1/50~1/10,单样品试剂成本可控制在0.5元以内,大幅降低应急检测的经济成本。同时,试剂用量的减少同步减少了废液产生量,削减二次污染风险,契合绿色应急检测的技术发展趋势。其三,稳定抗干扰且能多组分测定。封闭流路减少了环境干扰,流路优化可应对复杂现场,实现多组分同时检测,满足突发性水污染中污染物组分复杂的检测需求。此外,FIA通过对监测条件的严格管控,具备优异的精密度与重现性,如水中氰化物检测的相对标准偏差为1.9%~3.9%,显著低于传统检测方法的误差水平,保障应急监测数据的可靠性。

3 流动注射分析法应急检测方法的构建与优化

3.1 应急检测方法构建的核心原则

FIA应急检测方法的构建需紧密契合突发性水污染事件的应急处置需求,遵循“针对性、实用性、快速性、可靠性”四大核心原则。针对性原则聚焦突发性水污染中的高频污染物类型,如河流营养指标、氰化物、重金属等,优先构建这类污染物的检测方法。实用性原则强调适配现场操作条件的适配,简化全流程操作步骤,避免依赖实验室条件。如采用免试剂或固体试剂包,减少现场试剂配置等环节。快速性原则体现在前处理与检测全流程的时间压缩,将单样品总分析时间控制在十分钟以内。可靠性原则要求方法在追求快速性的同时,保证检测结果的准确性。其检出限、精密度等关键指标要达到检测标准中的要求。只有可靠性的检测方法,所提供的检测数据才能为决策提供坚实支撑,避免因数据不准确而导致处置措施失误,从而确保整个应急处置工作能够科学、有效地进行。

3.2 样品前处理技术的简化与优化

突发性水污染应急检测中,样品前处理的核心需求是“快速除扰、保留目标”,需在简化流程的同时保障检测准确性。结合不同水体基质特性,优化出适配FIA的前处理方案:地表地下水基质简单,主要干扰为悬浮物。采用0.45 μm 滤膜在线过滤,实现过滤与检测一体

化设计;工业废水含高浓度有机物与悬浮物,采用固相萃取小柱(如C18柱)进行快速吸附,5分钟内可完成有机物干扰去除;高盐废水则通过在线稀释模块实现样品浓度调节,避免因盐度过高导致流路堵塞与检测信号漂移。对于易挥发污染物(如氰化物),采用在线蒸馏-吸收装置,将前处理与FIA流路直接对接,整个过程无需人工干预,既缩短了处理时间,又减少了易挥发污染物损失,确保检测结果准确性。

3.3 FIA关键参数的优化策略

FIA关键参数的优化需围绕“提升分离效率、缩短分析时间、增强信号响应”展开,核心优化对象包括流路参数、反应参数与检测参数。流路参数优化中,蠕动泵速需结合反应特性调整,如测定氨氮时泵速设为1.5mL/min,确保反应充分;进样体积以100-200 μL 为宜,体积过小信号微弱,过大则延长分析周期。反应参数优化聚焦试剂浓度与反应温度,如采用FIA-分光光度法测氰化物时,氢氧化钠浓度为0.025mol/L、氯胺T浓度为2.0g/L时反应灵敏度最高,现场可通过恒温模块将反应温度控制在25 $^{\circ}\text{C}$,提升结果稳定性。检测参数需与目标污染物匹配,如电导检测器测定阴离子时,调节检测池温度至30 $^{\circ}\text{C}$ 减少温度波动影响;电化学检测器测定重金属时,优化工作电极电位消除共存离子干扰,通过多参数协同优化实现检测效能最大化^[2]。

3.4 方法学验证核心指标

满足应急检测技术需求,FIA应急检测方法需开展系统性方法学验证,各项核心验证指标均依据HJ 168-2020确定。线性范围需覆盖应急检测场景下目标污染物的常见浓度区间,且线性拟合相关性系数应大于等于0.999。采用多次测定的相对偏差结合置信区间法进行检出限计算,所得各目标污染物检出限需满足对应污染物的标准限值要求,以实现痕量污染物的精准筛查。通过连续多次测定平行样品结果的相对标准偏差来保障方法在实验过程中的精密度。采用加标回收试验与标准物质测定双重方式验证:加标回收率需控制在方法对应的合理区间内;标准物质测定值在标准值的不确定范围内,确保检测结果的准确性与可靠性。

4 FIA在突发性水污染应急检测中的典型应用

4.1 重金属污染物的应急检测

重金属是突发性水污染事件中最常见的污染物类型之一。在化工园区发生物料泄漏事故时,往往会释放出铅、镉等重金属污染物,而冶炼厂若出现事故性排放,则易造成汞、砷等重金属进入水体。对于汞、砷等易产生氢化物的重金属,可采用FIA-氢化物发生-原子荧光联

用技术展开检测，该技术通过在线生成氯化物的方式，能够提升检测灵敏度，有效降低汞等目标重金属的检出限，可精准捕获地下水中的痕量汞，为污染扩散趋势研判与预警提供关键的数据支撑。

4.2 无机有毒污染物的应急检测

无机有毒污染物如氰化物、总磷、亚硝酸盐等，具有毒性强、扩散快的特点。FIA技术能够实现对此类污染物的快速定性准确定量，运用也是最广的。例如：对于总磷的应急检测，运用FIA-钼酸铵分光光度法，通过在线反应生成蓝色络合物，在680nm波长下进行检测，相比传统方法，灵敏度提高，检出限降低至0.005mg/L，样品的做样时间缩短为2min/个，提高检测效率，快速辨别水质是否富营养化；对于氰化物的应急检测，采用FIA-异烟酸-巴比妥酸分光光度法，通过在线蒸馏与试剂生成蓝紫色化合物，在600nm波长下进行检测，方法检出限为0.001mg/L。利用该方法在1小时内能完成了污染河段8个监测点的检测，及时划定了禁饮区域。硫化物检测则采用FIA-亚甲蓝分光光度法，通过在线酸化生成硫化氢气体，与亚甲蓝反应后进行检测，分析时间仅需30秒。在硫化物泄漏事件中，该方法可以快速追踪到污染羽流的扩散路径。亚硝酸盐检测则采用FIA-重氮偶合分光光度法，适用于饮用水源地突发污染的筛查，检出限为0.002mg/L，能够满足饮用水安全应急监测的需求^[3]。

4.3 有机污染物的应急检测

突发性水污染事件中，有机污染物种类繁多，包括农药、苯胺类等。FIA通过与荧光、化学发光等检测器联用，拓展了其在有机污染物检测中的应用范围。在农药污染应急检测中，针对有机磷农药，采用FIA-酶抑制法，利用有机磷对胆碱酯酶的抑制作用，通过检测酶活性变化来实现定量。苯胺类污染物则采用FIA-偶氮分光光度法，通过在线偶合反应生成有色化合物，适用于染料厂突发污染的应急检测。

4.4 复合污染场景的多参数同步检测

突发性水污染事件往往呈现多污染物复合污染的特

征，例如工业园区混合废水泄漏可能同时含有重金属和无机类污染。多通道FIA系统能够实现多参数同步检测，通过设计并行流路，将样品分为多个分支，每个分支配备专属反应模块与检测单元，从而实现不同污染物的同时测定。

5 FIA技术在应急检测中的发展趋势

FIA技术正顺应突发性水污染事件处置需求与技术革新，加速向微型化、智能化、多技术融合及高灵敏度方向发展。微型化方面，基于微流控芯片的FIA系统成为研发重点，反应体积大幅压缩，设备便携性提升，可实现野外长时间应急监测。智能化上，新型系统能自动识别样品、调节参数并无线传输数据至应急指挥平台。多技术融合提升了检测效能，FIA与纳米材料、生物传感技术结合，如利用金纳米颗粒降低重金属检出限，还能与智能手机联用降低成本；高通量系统可同时测定多种污染物，结合机器学习算法判定风险等级。

结束语

综上所述，本研究充分表明，流动注射分析法（FIA）凭借其快速高效、低耗及易于自动化等突出优势，在突发性水污染事件的应急检测中展现出重要的应用价值。通过系统的方法构建、流程优化与验证，FIA技术能够为重金属、无机有毒物及有机污染物等多种典型污染场景提供可靠及时的检测数据支撑。未来，若能进一步深化FIA技术的集成化、便携化与标准化研究，将有力推动水环境应急检测技术体系的完善与提升，为保障水环境安全与应急处置决策提供坚实的技术保障。

参考文献

- [1]常开奎,黄生平.农村地区突发性水污染事件应急监测体系建设与作用[J].资源节约与环保,2025(4):107-111.
- [2]杨喻茗.突发性水污染事件责任构成与举证研究[J].四川环境,2022,41(3):223-227.
- [3]申邵洪,姜莹,陈希焱,等.面向突发性水污染事件的多传感器动态组网立体监测[J].长江科学院院报,2024,41(3):160-165.