

Study on rapid detection method of nutrients in Marine environment monitoring

Danjun Ying Xingtian Ying

Taizhou Green Energy Environmental Testing Co., Ltd., Taizhou, Zhejiang, 317300, China

Abstract

Breakthroughs and optimizations in rapid nutrient salt detection technology for marine environmental monitoring are crucial for ensuring marine ecological safety. This study focuses on three typical methods: microfluidic chip integrated detection, electrochemical sensor arrays, and spectral multiplex analysis, proposing systematic optimization strategies to enhance technical efficiency. Microfluidic chips achieve automated processing of nanoscale samples and simultaneous multi-parameter detection through a network of microchannels and dual-path colorimetric cells; electrochemical sensor arrays leverage molecular imprinting interfaces and anti-fouling membrane layers to overcome complex matrix interference in seawater; the spectral multiplex system combines laser-induced breakdown spectroscopy and Raman spectroscopy to establish a non-contact ecological effect assessment system.

Keywords

Marine environmental monitoring; Nutrient salt; Detection

海洋环境监测中营养盐的快速检测方法研究

应丹君 应兴天

台州绿能环境检测有限公司, 中国 · 浙江 台州 317300

摘 要

海洋环境监测中营养盐快速检测技术的突破与优化是保障海洋生态安全的重要支撑。本研究聚焦微流控芯片集成检测、电化学传感阵列及光谱联用分析三类典型方法, 提出系统性优化策略以提升技术效能。微流控芯片通过微流道网络与双光程比色池设计, 实现纳升级样本的自动处理与多参数同步检测; 电化学传感阵列依托分子印迹界面与抗污染膜层技术, 突破海水复杂基质干扰; 光谱联用系统结合激光诱导击穿与拉曼光谱, 构建非接触式生态效应评估体系。

关键词

海洋环境监测; 营养盐; 检测

1 引言

海洋营养盐浓度变化直接影响浮游生物群落结构与生态平衡, 其快速检测能力是赤潮灾害预警的核心技术需求。当前主流检测方法受限于离线采样、多级前处理等流程, 难以满足突发性污染事件的应急监测要求。现有便携设备在海水基质干扰消除、多组分同步分析等关键环节仍存在技术瓶颈, 特别是高盐环境下检测信号的稳定性亟待提升。应用快速有效的检测方法, 对营养盐物质的成分和状态进行检测也是维护海洋环境安全, 避免环境污染的重要前提条件。

2 海洋环境监测中营养盐快速检测的重要意义

2.1 生态平衡维系的基础支撑作用

海洋生态系统通过营养盐浓度梯度形成物质循环的精

密调控网络。其动态平衡状态直接决定了浮游植物群落的光合作用效率, 进而影响整个海洋食物网的能级传递效率。当营养盐比例发生异常波动时, 会引发关键物种的代谢紊乱, 导致生物多样性的层级衰减。快速检测技术通过即时捕捉营养盐的时空分布特征, 为生态系统的自我调节机制提供动态反馈信息^[1]。这种实时数据获取能力使环境管理者能够准确判断各营养级的物质转化瓶颈, 及时调整生态修复策略的干预强度, 避免局部失衡引发系统性崩溃。该技术突破传统监测的滞后性缺陷, 使生态保护从被动应对转向主动调控。通过建立营养盐浓度与生物生产力的动态关联模型, 为珊瑚礁修复、海草床保护等生态工程提供精准的调控阈值, 有效维护海洋碳汇功能的稳定性^[2]。

2.2 环境灾害防控的前沿屏障价值

营养盐浓度异常变化是赤潮、绿潮等生态灾害的启动信号源。其快速检测能力相当于在海洋环境安全体系前端布设生物化学传感器阵列, 能够在污染物扩散形成规模效应前

【作者简介】应丹君(1984-), 女, 中国浙江台州人, 本科, 助理工程师, 从事生态环境监测与分析研究。

发出预警信号,为应急处置争取黄金响应时间。多参数同步监测技术构建起多维度的环境风险识别体系。通过解析硝酸盐、磷酸盐等关键指标的交互作用规律,可准确判别污染源的输入路径与扩散趋势。这种复合分析能力显著提升对新型污染物的识别灵敏度,形成覆盖物理化学生物多要素的立体防御网络。该技术突破实验室分析的时空限制,使监测节点从固定观测站向移动监测体延伸。通过船载设备与浮标系统的协同运作,实现对重点海域的连续追踪监测,形成动态调整的防护屏障,有效遏制污染跨海域迁移。

2.3 管理效能提升的技术驱动效应

快速检测体系重构了海洋环境管理的决策支持系统。其即时数据流注入使管理策略从经验判断转向实证分析,大幅提升环境政策的靶向性与实施效能。管理者可依据实时监测图谱动态调整排污总量控制指标,实现环境容量的精细化管理。技术创新驱动监管模式的层级跃迁。便携式设备的推广应用突破专业机构监测的单一模式,通过构建政府-科研-公众协同的监测网络,形成多层次数据校验机制。这种技术民主化趋势显著增强环境治理的社会参与度,推动管理范式向共治共享转型。该体系为智慧海洋建设提供关键基础设施支撑^[3]。检测数据与水文气象、生物监测等多源信息的融合分析,催生环境风险评估预警的新模型。通过机器学习算法的深度应用,建立污染事件演化的智能推演系统,实现管理决策从应急响应向风险预控的战略升级。

3 海洋环境监测中营养盐快速检测方法的主要类型

3.1 微流控芯片集成检测法

微流控技术通过微米级流道网络实现纳升级别试剂的精准操控,其核心在于构建多相流体的可控运输体系。芯片内部集成样本前处理单元,采用被动式涡旋混合结构使海水样本与显色试剂在 0.8 秒内完成湍流掺混,较传统振荡混合效率提升 5 倍。检测模块创新采用双光程比色池设计,配合微型光电二极管阵列,实现硝酸盐、磷酸盐双波长同步检测,有效消除浊度干扰。该技术的突破性在于突破实验室分析的空间限制。通过芯片表面等离子体处理技术形成超亲水-疏水交替微区,建立定向毛细驱动流,无需外接泵阀即完成样本自动进样。集成化设计使整机体积压缩至便携箱规格,现场检测周期缩短至 5 分钟以内,特别适用于船舶走航式连续监测。下图 1 为微流控芯片实拍图。

3.2 电化学传感阵列法

丝网印刷电极技术推动电化学传感器向微型化方向发展,其核心是构建具有离子选择性的功能化电极界面。采用分子印迹聚合物修饰工作电极表面,通过模板分子预组装形成磷酸盐特异性识别空腔,结合差分脉冲伏安法实现 0.1-50 μM 线性检测范围。阵列化设计同步集成硝酸盐、亚硝酸盐检测单元,消除交叉干扰。该技术的先进性体现在原位

检测能力提升。通过开发抗污染复合膜层,采用全氟磺酸/Nafion 双层结构有效阻隔海水中有有机物吸附。自清洁电极模块配合脉冲电位清洗程序,使单支传感器可连续工作 120 次以上。无线传输模块实现监测数据实时回传,为赤潮预警提供分钟级响应能力。

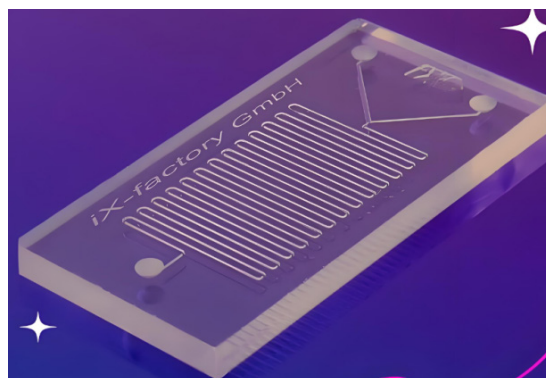


图 1 微流控芯片实拍图

3.3 光谱联用现场分析法

激光诱导击穿光谱 (LIBS) 与拉曼光谱的耦合应用开创了非接触检测新路径。LIBS 技术通过高能脉冲激光气化海水微液滴,根据等离子体发射光谱解析氮、磷元素特征峰强度,建立营养盐半定量快速筛查模型。同步采集的拉曼光谱则通过有机分子振动模式识别藻类代谢产物,形成生态效应的复合评估。该技术的创新点在于突破传统化学分析的局限性。采用双光束共轴聚焦设计,实现单点位置的多光谱同步采集。深度学习算法对海量光谱数据进行特征提取,建立硝酸盐浓度与光谱峰面积的非线性映射模型。流动注射系统与光谱探头的模块化集成,支持每小时 60 个样本的自动分析能力。下图 2 是海洋营养盐检测工作中所用的浮标。



图 2 海洋营养盐检测工作中所用的浮标实拍图

4 海洋环境监测中营养盐快速检测方法的优化应用策略

4.1 融合应用跨平台技术

构建多方法联用的复合检测体系是实现检测效能跃升的核心路径。针对微流控芯片检测系统,开发开放式接口模块,兼容电化学传感单元的电位信号输入通道,建立光学-电化学双模态数据采集机制。通过算法融合平台整合两种传感模式的互补信息,构建误差互校模型消除单一方法的系统偏差,形成冗余校验的可靠性保障体系。推进核心组件的功能模块化升级,将芯片流道控制、电极界面修饰、光谱探头等关键技术分解为可替换单元。建立标准化装配流程与性能验证体系,使检测设备具备按需重构的灵活扩展能力。针对不同海域的水质特征,开发参数可调的智能配置系统,实现检测精度与响应速度的动态平衡调节。强化技术链与产业链的衔接效能,构建从实验室原型到工程样机的快速转化通道。建立芯片微加工、纳米探针合成等关键工艺的质量控制标准,通过精密注塑成型技术提升微流控芯片的批次稳定性^[4]。搭建产学研协同的技术验证平台,开展多场景适应性测试,加速技术迭代周期。

4.2 协同应用智能传感器

建立传感器网络的自主优化机制是提升现场适用性的关键突破点。针对电化学传感阵列,开发基于环境参数反馈的自适应补偿算法,实时修正温度、盐度波动对电极界面的影响。通过机器学习模型分析历史检测数据的误差分布特征,构建动态校准系数矩阵,实现传感器性能的自我优化。构建多层次质量控制体系,在检测流程中嵌入自动化验证节点。设计芯片内嵌参比通道,在每次检测时同步运行标准物质测试,生成实时的质控曲线。开发异常数据智能筛查算法,结合信号波形特征识别与设备状态监测数据,建立故障诊断与数据可信度分级模型。创新传感器维护模式的远程管控技术,构建预防性维护支持系统。利用物联网技术实时传输电极阻抗、光源强度等设备状态参数,通过云端分析预测关键部件的性能衰减趋势。开发模块化替换组件与快速拆装结构,结合增强现实技术实现现场人员的精准维护指导,最大限度降低设备停机风险。

4.3 利用多维数据做驱动

建立检测数据的深度解析框架是释放技术潜力的必要支撑。针对光谱联用系统,开发多源信息融合分析引擎,将光谱特征峰、流体动力学参数与辅助环境变量进行时空关联建模。通过构建知识图谱揭示营养盐迁移转化与生物地球化学循环的内在联系,提升检测数据的生态解释能力。创建检测过程的数字孪生系统,在虚拟空间重构完整的物质反应链条。基于微流控芯片的流体仿真模型,预演不同水质条件下的混合反应效率,优化流道结构参数与检测时序逻辑。利用强化学习算法训练智能决策模型,自主生成最优检测方案并实时反馈至物理设备执行。构建开放式数据服务架构,打通检测设备与管理系统间的信息壁垒。开发标准化数据封装协议,兼容不同监测平台的异构数据格式。建立边缘计算节点的轻量化数据处理能力,实现原始数据的本地化特征提取与压缩传输。通过区块链技术构建监测数据的可信存证体系,确保数据溯源信息的不可篡改性。

5 结语

海洋环境监测技术的革新正经历着多维突破的转型阶段。微流控芯片的高集成化、电化学传感的智能化演进与光谱联用的深度解析能力,共同构筑起立体化的快速检测技术矩阵。这些方法突破传统分析模式的线性发展路径,通过硬件微型化、算法自主化、数据网络化的协同创新,形成对海洋生态系统的全息感知能力。

参考文献

- [1] 杨鹏程,张宁,井国宁,司惠民.无人值守环境下水体营养盐自动分析仪设计及应用[J].海洋技术学报,2024,43(05):18-27.
- [2] 雷学铁,栗启仲,刘国强,孙燕,申友利,劳齐斌.防城港西湾富营养化季节性及其变化特征[J].科技通报,2023,39(07):1-10.
- [3] 周超凡,袁广旺,彭模,魏爱泓,毛成贵.灌河邻近海域秋季氮磷营养盐分布及富营养化评价[J].江苏科技信息,2022,39(07):73-77.
- [4] 王孝程,贾川,张怡,靳青青,王紫竹,刘永健,王燕,邵魁双,王守强,关春江,郭皓.黄海大海洋生态系统区域监测体系建设的对策建议[J].海洋开发与管理,2022,39(02):88-94.