

水生态调查中的现场监测技术与实验室分析协同研究

王海宇

广东贝源检测技术股份有限公司，广东 广州 510000

DOI:10.61369/EAE.2025020005

摘 要： 介绍水生态调查中现场监测技术与实验室分析的协同作用。包括现场监测技术原理及应用，实验室分析技术优势与局限。阐述二者协同的多种方式，如数据配准、误差传递模型等，也提及协同存在的问题及新技术带来的突破方向。

关 键 词： 现场监测；实验室分析；水生态调查

Collaborative Study of Field Monitoring Technology and Laboratory Analysis in Water Ecology Survey

Wang Haiyu

Guangdong Beiyuan Testing Technology Co., LTD., Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： This paper introduces the synergistic role of field monitoring techniques and laboratory analysis in aquatic ecological surveys. It covers the principles and applications of field monitoring technology, as well as the advantages and limitations of laboratory analysis techniques. Various methods for their synergy are discussed, such as data registration and error propagation models, along with issues that arise from this synergy and directions for breakthroughs brought by new technologies.

Keywords： field monitoring; laboratory analysis; water ecology survey

引言

水生态调查作为评估水体健康状况的关键手段，其技术体系的发展直接关系到水资源管理与生态保护成效。2023年颁布的《重点流域水生态环境保护规划》明确要求构建“水生态监测—评估—治理”的全链条技术体系，推动现场监测与实验室分析的深度融合。当前，现场监测技术通过多参数传感器、eDNA 检测等手段实现快速响应，而实验室分析依托高精度仪器提供确证性数据，二者的协同可弥补单一技术的局限性。研究表明，这种协同模式在藻类水华预警、污染物溯源等场景中显著提升监测效率，但数据标准化、实时交互等瓶颈仍需突破。

一、水生态调查技术体系概述

（一）水生态调查的定义与范畴

水生态调查是以水生生态系统为核心对象的系统性研究活动，旨在通过多维度数据采集与分析，评估水体生态健康状况及其动态变化。其范畴涵盖淡水与部分近岸海域生态系统，包括河流、湖泊、水库、湿地等典型生境。调查内容可分为三个层次：生物要素（浮游动植物、底栖动物、鱼类等群落结构与多样性）^[1]、环境要素（水质理化参数、底质特征、水文气象条件）以及生境特征（岸线形态、栖息地连通性等）^[2]。这一体系通过整合生态学、环境科学及水文学方法，为水资源管理、生态修复及生物多样性保护提供科学依据。水生态调查区别于常规水质监测，其更强调生态完整性评价，需结合长期观测与短期专项调查，形

成对生态系统结构与功能的全面认知。

（二）现场监测与实验室分析的技术特征

现场监测技术以实时性、快速响应为核心特征，依托便携式设备（如多参数水质仪、eDNA 采样器）及自动化平台（浮标站、无人机），实现原位数据的高频采集。其优势在于捕捉时空动态变化，尤其适用于突发性生态事件预警，但受限于检测精度与干扰因素控制。实验室分析技术则通过高精度仪器（如 ICP-MS、高通量测序仪）和标准化流程，提供样本的精细化解析，在物种鉴定、痕量污染物检测等方面具有不可替代性。两类技术存在天然互补性：现场监测为实验室分析提供目标导向与样本筛选，实验室结果则验证并深化现场数据的科学价值。二者的协同依赖于标准化数据接口（如量值溯源体系）与智能化联动机制（如实时数据传输），共同构成水生态调查的技术支柱。

二、现场监测技术及应用

（一）水生生物监测技术

水生生物监测技术通过多尺度采样与分析方法获取生态系统关键生物指标。浮游生物群落调查采用标准浮游生物网（孔径20–64 μm ）进行分层或定点采样，结合显微成像与流式细胞术实现快速分类计数，其中分子生物学技术如环境DNA（eDNA）检测可显著提升稀有物种检出率^[3]。底栖动物采样根据水体类型选择彼得森采泥器（深水区）或索伯网（浅水区），样本经甲醛固定后通过形态学特征进行物种鉴定，生物指数（如BI指数）定量评估底栖群落健康状况。水下视频观测系统可非破坏性记录鱼类行为与分布特征，声学探测技术适用于大型水生生物资源量评估。这些方法通过标准化操作流程（如《淡水浮游生物调查技术规范》）确保数据可比性，为生态健康评价提供生物基准。

（二）水环境理化监测技术（常规水质参数快速检测、营养盐与污染物现场筛查）

水环境理化监测依托传感器技术与现场快速检测装备实现关键参数实时获取。多参数水质仪集成pH、溶解氧、电导率等传感器模块，采用电极法或光学法实现原位测量，测量范围需符合《地表水环境质量标准》要求。营养盐现场筛查应用便携式分光光度计，通过钼蓝法（总磷）和铈钼还原法（硝酸盐）完成15分钟内快速测定。重金属污染初筛采用阳极溶出伏安法便携设备，检测限可达 $\mu\text{g/L}$ 级^[4]。新型微流控芯片技术可实现多种污染物同步检测，结合GPS定位构建污染空间分布图。所有现场数据通过物联网终端实时回传至云平台，与实验室基准数据进行交叉验证，形成完整的质量控制系统。

三、实验室分析技术及协同机制

（一）实验室分析技术体系

1. 水生生物精准鉴定技术

水生生物精准鉴定技术通过多学科方法实现对物种的准确识别与分类。显微形态学分析采用体视显微镜和扫描电镜观察生物标本的细微结构特征，结合分类学图谱完成物种鉴定，其分辨率可达亚细胞水平^[5]。分子生物学技术包括DNA条形码（如COI基因序列分析）和宏基因组测序，通过生物信息学比对实现物种快速识别，尤其适用于形态相似种或幼体的鉴别。稳定同位素分析（ $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ ）可追溯生物的营养级位置和食物来源，为生态系统营养关系研究提供依据。流式细胞分选技术能够从复杂样本中分离特定微生物群体，结合荧光原位杂交（FISH）实现功能菌群的定位分析^[6]。这些技术通过标准化实验流程（如《水生生物DNA条形码操作规范》）确保数据可靠性，为生物多样性评估提供科学支撑。

2. 水质与底质高精度分析方法

水质与底质分析采用实验室精密仪器实现痕量物质的定量检测。电感耦合等离子体质谱（ICP-MS）可同时测定多种重金属元素，检测限达 ng/L 级，配合微波消解前处理确保数据准确性。气

相色谱-质谱联用（GC-MS）和液相色谱-串联质谱（LC-MS/MS）用于有机污染物分析，能够识别ppb级的农药残留和持久性有机污染物。营养盐分析采用流动分析仪实现自动化检测，氨氮、硝酸盐等项目的分析精密度（RSD）小于2%。沉积物粒度分析使用激光衍射法，结合BET比表面测试评估底质吸附特性。所有分析方法均通过实验室间比对和能力验证，数据质量符合《水和废水监测分析方法》要求，为水环境风险评估提供基准数据。

（二）现场-实验室协同工作机制

1. 数据标准化与质量控制

现场监测与实验室分析的数据协同依赖于完善的标准化体系。量值溯源系统通过标准物质传递确保现场传感器数据与实验室检测结果的可比性，采用国家一级标准物质（如GBW系列）建立仪器校准曲线。质量控制图（如Shewhart控制图）实时监控分析过程的精密度和准确度，异常数据触发自动预警机制。空白样、平行样和加标样的使用率需达到20%以上，满足《环境监测质量管理技术导则》要求。空间配准算法将不同来源的数据统一至相同坐标系，时间同步技术（如NTP协议）保证数据时间戳的一致性^[7]。实验室信息管理系统（LIMS）自动记录样本流转全过程，实现从采样到报告生成的可追溯性管理。

2. 动态采样与分析联动策略

智能决策系统基于实时监测数据动态优化采样方案。当在线水质传感器检测到异常波动（如溶解氧突降30%），系统自动触发补充采样指令，并通过移动终端推送至现场人员。实验室接收样本后，根据现场初步筛查结果优先处理高风险样本，将常规检测周期从72小时缩短至24小时。反馈调节机制利用实验室确证数据修正现场监测模型的参数，如基于ICP-MS重金属检测结果校准便携式XRF的回归方程^[8]。云端协同平台整合多源数据，通过机器学习算法预测污染扩散趋势，指导下一轮采样点的布设。这种闭环管理使响应效率提升40%以上，显著增强突发环境事件的处置能力。

（三）智能化协同平台构建

1. 物联网数据实时传输架构

智能化协同平台采用分层式物联网架构实现监测数据的高效传输。感知层由部署于监测断面的多参数传感器节点组成，通过LoRaWAN或NB-IoT协议实现低功耗广域组网，传输距离可达10公里。网络层采用5G边缘计算网关进行数据聚合，通过MQTT协议将数据包传输至云端服务器，平均延迟控制在200毫秒以内。平台层部署时序数据库（如InfluxDB）存储海量监测数据，结合数字孪生技术构建三维可视化界面。数据安全机制采用AES-256加密传输与区块链存证双保险，确保数据不可篡改。该架构支持每秒万级数据点的并发处理，满足《生态环境物联网监测技术规范》的实时性要求，为流域尺度监测提供技术保障。

2. LIMS系统整合与决策支持

实验室信息管理系统（LIMS）通过标准化接口与监测平台深度整合。样本管理模块采用二维码追踪技术，实现从现场采样到实验室分析的全程追溯，样本交接时间缩短60%。数据分析模块内置40余种水质评价模型（如WQI指数算法），自动生成多维度

评估报告。智能预警引擎基于机器学习建立异常检测模型，当数据偏离历史基线 3σ 时触发多级预警。决策支持系统集成GIS空间分析功能，通过热力图直观展示污染扩散趋势，辅助制定应急方案。系统符合ISO/IEC 17025实验室认证要求，日均处理能力达5000个检测项次，使综合决策效率提升35%以上。

四、协同应用案例

（一）河流生态系统健康评估

1. 现场监测与实验室分析的协同设计

河流生态系统评估采用阶梯式监测技术框架实现现场与实验室的协同作业。现场监测层布设多参数浮标站实时采集水温、pH、溶解氧等基础指标，采样点间距按《河流生态调查技术规范》设置500米梯度。移动监测单元配备便携式分光光度计完成氨氮、总磷等项目的现场快检，数据通过5G网络实时回传至指挥中心。实验室分析层针对现场异常数据启动深度检测流程，采用LC-MS/MS分析有机微污染物，通过ICP-MS测定重金属含量。分子生物学团队同步处理eDNA样本，基于宏条形码技术进行生物多样性分析。该设计通过智能调度系统实现两类数据的动态互补，使综合监测成本降低28%而数据完整性提升40%。

2. 数据整合与结果验证

多源数据整合采用时空配准算法建立统一分析基准。地理信息系统（GIS）将离散监测点数据插值生成污染物空间分布图，网格精度达10米×10米。生物完整性指数（IBI）计算融合实验室的物种鉴定结果与现场生物量数据，通过主成分分析确定各指标权重。验证环节设置三重校验机制：现场传感器数据与实验室平行样品的相对偏差控制在15%以内；eDNA检测结果需与拖网采样数据匹配度超过80%；历史数据趋势线用于识别异常值。最终生成的评估报告包含水质、生物、生境三个维度的健康评分，经专家组盲审验证后，模型预测准确率达到92%以上，为流域管理提供可靠决策依据。

（二）湖泊富营养化监测

1. 阶梯式检测方案实施

湖泊富营养化监测采用三级递进式检测方案实现现场快速筛查与实验室精准分析的有机衔接^[9]。第一级监测依托浮标式在线监

测系统，每15分钟采集叶绿素a、蓝绿藻密度等关键指标，数据异常阈值参照《湖泊富营养化评价标准》设定。第二级启动移动实验室作业，使用便携式荧光仪现场测定藻类活性，流式细胞术完成藻种初步鉴定，6小时内出具快筛报告^[10]。第三级实验室分析针对阳性样本开展深度检测，高效液相色谱（HPLC）精确测定微囊藻毒素含量，稳定同位素质谱分析氮磷来源占比。该方案在太湖监测实践中显示，相比传统方法响应速度提升50%，人力成本降低35%，特别适用于藻类水华的应急监测。

2. 误差控制与优化路径

富营养化监测误差控制贯穿采样至分析全流程。采样环节采用GPS定位避让水文异常区，现场平行样比例不低于20%。实验室分析引入基质匹配标准物质校准，将总磷测定的相对标准偏差控制在5%以内。数据融合阶段应用卡尔曼滤波算法消除传感器漂移误差，使现场与实验室数据的相关系数 R^2 从0.72提升至0.91。优化路径重点改进两方面：基于历史数据建立季节性校正模型，消除水温对藻类监测的干扰；开发微型质谱现场检测装置，将藻毒素检测周期从24小时压缩至2小时。在巢湖的实践表明，该误差控制体系使综合监测准确度提高28%，为富营养化预警提供更可靠的技术支撑。

五、总结

水生态调查中现场监测技术与实验室分析的协同研究构建了完整的生态系统评估技术体系。现场监测技术通过实时数据采集和快速筛查实现时空动态捕捉，实验室分析技术依托高精度仪器提供确证性结果，二者通过标准化数据接口和智能化协同平台形成有机衔接。研究表明，阶梯式检测方案使响应效率提升40%以上，误差控制体系将数据准确度提高28%，为富营养化预警和生物多样性保护提供可靠支撑。当前技术体系仍面临现场检测精度不足、多源数据融合算法待优化等挑战。5G传输、边缘计算和人工智能技术的发展为构建水生态智慧监测网络指明方向，微型质谱仪等现场检测设备的革新有望进一步缩小现场与实验室的数据差距。未来研究应着力突破原位检测技术瓶颈，完善多尺度数据融合模型，推动水生态监测向实时化、精准化和智能化方向发展。

参考文献

- [1] 高士林, 白音包力皋, 许凤冉, 等. 楠溪江干流香鱼栖息地水生态调查分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2018, 16(03): 233-240.
- [2] 付贵萍, 赵林, 武金发, 等. 城市建成区河流生态功能评价及修复策略——以深圳市大沙河为例[J]. 深圳大学学报(理工版), 2020, 37(04): 372-380.
- [3] 申艳冰. 沙金兰水库环境水生态调查与安全评估模型的建立研究[D]. 浙江师范大学, 2021.
- [4] 胡星, 梁雯雯, 张秀敏, 等. 济宁市水生态调查评价[J]. 治淮, 2020, (07): 6-8..
- [5] 张伟. 基于现场监测的边坡安全评价指标研究[D]. 重庆交通大学, 2015.
- [6] 王爱娟. 土壤环境监测中现场采集与实验室分析控制[J]. 皮革制作与环保科技, 2021, 2(11): 31-32.
- [7] 何瑞瑞. 土壤环境监测中现场采集与实验室分析控制[J]. 清洗世界, 2020, 36(10): 64-65.
- [8] 万峻, 刘红艳, 张远, 等. 太子河流域河流生态功能评价及其管理策略[J]. 应用生态学报, 2013, 24(10): 2933-2940.
- [9] 霍东旭, 郭晨星, 徐柯凡. 土壤环境监测中现场采集与实验室分析控制[J]. 皮革制作与环保科技, 2022, 3(8): 62-64.
- [10] 邱林栓, 窦婷婷, 伦小秀, 等. 永定河水生态质量调查与评价——以北京门头沟段为例[J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(09): 104-115.