便携式快速检测技术在水利工程野外水质监测中的应用研究

李 媛 王文姬 马尚贤 赵 萌
宁夏回族自治区水文水资源监测预警中心 宁夏 银川 750000

摘 要：本文系统梳理了当前主流便携式快速检测技术的基本原理与分类，包括电化学传感、光谱分析、微流控芯片及生物快速检测等方向；在此基础上，重点探讨了该类技术在水利工程野外场景中的适用性，涉及高浊度水体干扰消除、多参数协同检测策略、数据实时传输与质量控制等关键问题。研究表明，便携式快速检测技术并非替代实验室标准方法，而是构建“现场筛查—风险预警—精准复测”分层监测模式的核心环节。针对当前技术应用中存在的灵敏度不足、环境适应性差异及标准化缺失等瓶颈，提出了涵盖硬件改进、智能算法补偿和全流程质控体系的对策框架，以期为水利工程野外水质动态监管提供技术参考。

关键词：便携式检测；快速检测技术；野外水质监测；水利工程；现场监测

引言：水利工程中，水质安全关乎生态流量、饮用水源及下游环境。传统实验室监测虽精度高，但流程冗长，难以捕捉瞬时变化与空间异质性，在汛期或突发污染等复杂工况下时效性不足。随着微电子、新材料等技术发展，便携式快速检测设备凭借体积小、能耗低、周期短等优势，为野外原位监测提供了新路径。然而，该技术在水利领域的应用尚处探索阶段，面临检测原理选择、数据有效性保证及融入现有网络等挑战。本文立足工程实际需求，不局限于特定案例，而是从技术原理、适用条件、关键瓶颈及应用策略四个维度进行系统论述，旨在解决野外复杂工况下的应用难题，为规范化和有效开展水质快速检测提供理论支撑。

1 便携式快速检测技术的主要类型与原理

1.1 电化学传感技术

原理基于待测物在电极表面的氧化还原反应，将浓度转换为电流、电位或阻抗等电信号，常见类型包括离子选择电极和伏安型传感器。优势在于响应快（数秒至数分钟）、功耗低、易于集成多电极阵列，适用于pH、溶解氧、氨氮和硝酸盐等检测。近年聚焦于石墨烯、碳纳米管等纳米材料修饰电极以提升灵敏度。野外应用时，传感器对温度和离子强度敏感，需配备内置温度补偿，并用基体匹配的标准溶液校准。

1.2 光谱分析技术

利用物质对特定波长光的吸收、散射或荧光发射进行定量分析。紫外-可见分光法可估测COD、总磷、总氮，荧光光谱对叶绿素a和石油类有高选择性，近红外与拉曼光谱的小型化已实现非接触探测。其优势为无需样品前处理、不耗试剂[1]。但水利工程中高浓度泥沙和有色物质会引发光散射干扰，需结合多元散射校正或差分光谱策略剥离背景影响。

1.3 微流控与芯片实验室技术

将样品制备、反应与检测集成于数平方厘米的芯片上，通过微流体操控实现快速分析，特别适合六价铬、挥发酚等多步化学反应的指标。单次检测耗时压缩至5分钟内，试剂消耗仅为传统方法的1%~5%，显著减轻野外物资负担。当前挑战在于芯片一致性、长期储存稳定性及微气泡干扰。针对高含沙水体，进样口需集成过滤微柱，避免颗粒物堵塞通道。

1.4 生物快速检测技术

利用酶、抗体或核酸适配体作为识别元件，通过与目标物特异性结合产生显色、电化学或发光信号。酶抑制法用于有机磷农药和重金属筛查，免疫层析试纸条操作简便，CRISPR技术正被探索用于病原微生物识别。其特异性高，但抗干扰能力弱，温度、pH及非靶向结合易致假性结果。在水利工程中更适合作为初步筛查工具，阳性结果需经理化方法复核。

表1：主流便携式快速检测技术性能对比

技术类型	典型检测参数	检出限（mg/L）	单次响应时间	抗干扰能力	试剂消耗	适用场景
电化学传感	pH、DO、ORP、NH_3-N、NO_3^-	10^{-3} ~ 10^{-1}	数秒 ~ 数分钟	中（温敏、离子强度敏感）	极低	常规离子连续监测

续表：

技术类型	典型检测参数	检出限（mg/L）	单次响应时间	抗干扰能力	试剂消耗	适用场景
光谱分析	COD、TP、TN、叶绿素a、石油类	10^{-2} ~ 10^{0}	1 ~ 5分钟	低（浊度/色度干扰显著）	极少/无	有机物及营养盐快速筛查
微流控芯片	Cr^{6+}、S^{2-}、挥发酚、重金属	10^{-3} ~ 10^{-1}	3 ~ 5分钟	中（颗粒物堵塞风险）	极低（传统1% ~ 5%）	复杂前处理指标的集成检测
生物快速检测	有机磷农药、重金属、病原微生物	10^{-2} ~ 10^{0}（半定量）	5 ~ 20分钟	弱（温/pH/非靶标干扰）	中等	应急筛查与初步预

2 野外水质监测的特殊需求与技术适配性分析

2.1 水利工程野外环境的约束条件

水利工程监测点位往往分布在河流中上游、水库库尾、引水隧洞出口或偏远灌区，交通不便、电力供应不稳定、温湿度变化剧烈。设备须具备宽温工作范围（-10℃ ~ 50℃）和一定的防尘防水等级（至少IP65）。此外，野外水体具有显著的时空变异性——汛期泥沙含量骤增、枯水期富营养化加剧、昼夜温差引起溶解氧大幅波动——这些都对检测技术的动态响应范围和抗干扰能力提出了更高要求。与传统环保监测站点不同，水利工程更关注流量变化对水质浓度的影响，因此便携设备最好能同步接入流速或水位数据，实现通量估算。

2.2 技术适配性的分层评价框架

为客观评估各类便携技术对野外场景的适用程度，本文提出“五维评价”框架：检测灵敏度（方法检出限是否满足地表水标准）、现场可操作性（是否需要外接电源、是否需频繁校准）、环境鲁棒性（基体干扰程度及校正可行性）、数据可靠性（重复性和再现性）以及经济成本（设备单价、耗材寿命和维护频次）。据此评估，电化学传感在常规离子检测中综合评分最高，光谱法在有机物和营养盐方面优势明显，微流控适用于复杂前处理指标，而生物法主要用于应急筛查[2]。需要强调的是，没有任何单一技术能覆盖所有水质参数，实际工作中应采用“主参数专用设备+辅助参数多合一传感器”的组合策略。

2.3 现场快速检测与实验室标准方法的关系辨析

一个常见的认知误区是将便携快速检测视为实验室方法的简易替代。实际上，两者属于不同层级的技术定位：实验室方法（如气相色谱-质谱联用、电感耦合等离子体质谱）提供准确、可溯源的权威数据，是执法和仲裁的依据；而便携快速检测的价值在于大幅提高监测频次和空间覆盖密度，实现“早发现、早预警”。合理的关系应是“互补而非替代”。在水利工程日常巡查中，可先使用便携设备进行高频次筛查，当检测值接近或超过阈值时，再采集平行样品送实验室确认。这种分层模式既保障了监管的时效性，又控制了误判风险。

3 应用中的关键瓶颈与应对策略

3.1 灵敏度不足与低浓度检出困境

多数便携设备受限于小型化后的光程缩短或电极面积减小，检出限往往比实验室仪器高1 ~ 2个数量级。对于地表水Ⅰ类或Ⅱ类标准中的微量重金属、特定有机污染物，现场设备常常难以准确定量。针对这一瓶颈，可行的改进方向包括：采用富集单元（如固相萃取微柱）与检测芯片在线联用，在进样阶段提高目标物浓度；运用差分脉冲伏安法或方波伏安法增强电化学信号；引入信号放大策略，如纳米酶催化或等温核酸扩增。同时，在监测策略上，可将快速检测界定为“半定量筛查”，对超阈值样品启动实验室精密分析，从而在工程实践中平衡效率与精度。

3.2 野外环境下的干扰抑制与校准难题

野外水体的基体复杂性远高于实验室配制标准溶液。悬浮颗粒物不仅造成光散射，还可能吸附待测离子，导致负偏差；溶解性有机物会产生荧光猝灭或光谱重叠；高盐度水体则影响电极活度和离子强度。目前有效的现场对策包括：双波长或多波长背景校正算法、透射-反射联合光路设计、以及动态标准添加法。但上述方法增加了操作步骤和设备成本[3]。更务实的方案是建立“现场空白”和“基质匹配标样”制度，即每次检测前用当地清洁水源（如上游未受扰动的表层水）配制低浓度标样，以抵消基体差异。此外，设备内置的自动清洗和自动校准程序应针对野外工况优化，减少人工干预频率。

3.3 数据质量保证与标准化缺失

当前便携式检测设备品牌繁多，不同厂家采用的校准方法、信号处理算法和结果显示方式各异，导致数据可比性差。水利工程监测数据往往需要纳入统一信息平台进行趋势分析，若源头数据缺乏标准化的质控标识，则后续的数据挖掘和模型预测将失去可靠基础。解决之道在于推动行业技术标准的制定，明确便携设备的性能验证指标（如检出限、重复性、线性范围、加标回收率）和现场质控频率（每批样品至少附带一个平行样和一个加标样）。同时，应强制要求设备输出带有不确定度范围的检测结果，而非单一的数值。在数据管理端，

可开发专用的移动端应用程序，实时记录检测时间、地理坐标、环境参数和校准日志，形成不可篡改的数据链，以满足水利工程档案管理要求。

3.4 实时传输与智能决策的融合路径

现代便携设备普遍具备蓝牙或4G/5G通信模块，可将检测结果实时上传至云端监测平台。但这仅仅实现了数据的“物联”，而远未达到“智联”。真正有价值的是将快速检测数据与水文模型、水质预警模型耦合。例如，当便携设备在某断面测得氨氮突增时，系统应自动调用上游流量和污染源分布信息，反向推演可能的排放位置和到达下游关键断面的时间。实现这一目标需要建立统一的数据接口协议和模型调用标准。目前水利行业正在推进的数字孪生工程为便携检测数据的高效利用提供了契机，但前提是检测技术本身必须保证足够的时间和空间分辨率—— 这正是快速检测相较于传统监测的核心竞争力所在。

4 面向水利工程的便携检测应用体系构建

4.1 “分级响应”监测模式设计

基于前述分析，本文提出适合水利工程的三级监测响应体系，具体分级配置与要求见表2。

表2：水利工程野外水质监测分级响应体系

级别	目标定位	典型设备配置	检测频率	检测周期	人员资质	质控要求
第一级：日常巡查级	发现显著性突变趋势	手持多参数水质笔（pH/温度/电导/浊度）+试纸条	每1～2小时一次	即时读数	基础操作员（经简单培训）	每日开机校准，每周比对一次
第二级：专项排查级	异常点位多指标快速定量	便携式光谱仪/电化学工作站+配套试剂	按需（异常触发）	≤ 30 min/点位	专职监测人员（掌握校准与故障排查）	每批附带平行样和加标样，每月盲样考核
第三级：应急确认级	精准定性定量及仲裁依据	便携式GC-MS、移动实验室或现场采样后送检	突发事件或阈值超标后	< 2 h（含前处理）	高级分析人员（熟悉方法原理与质控规则）	严格执行实验室质控程序，数据可溯源

三个层级的技术装备、人员资质和质控要求逐级提升，既不过度依赖单一技术，也不浪费高成本资源，实现“宽覆盖、快响应、准判定”的工程目标。

4.2 全流程质量控制要点

质量控制应贯穿“采样—检测—数据审核”全链条。采样环节须注意样品代表性，避免在回水区或排污口附近单点采样，宜采用断面多点混合；检测环节应严格遵循设备预热、校准、测量、清洗的标准操作流程，尤其注意温度平衡时间；数据审核环节需设置合理性阈值检查（如溶解氧不应超过饱和值、pH在合理范围内），并结合历史数据和相邻点位数据进行交叉验证[4]。建议每个监测站点配备标准质控样品，每周进行一次盲样考核，以持续监控设备状态。对于多台设备同时作业的情况，应定期开展设备间比对实验，确保系统偏差在可接受范围。

5 结语

便携式快速检测技术推动水利工程水质监测从“固定站点”向“移动感知”转变。本文从技术原理、野外适配性、关键瓶颈及体系构建四方面论述，指出其核心价值在于重塑监测的时间尺度与空间密度，而非替代实验室标准方法。当前技术已满足常规指标半定量需求，但在灵敏度、环境抗性及标准化方面仍需提升。未来应重点开发针对高浊度水体的专用抗干扰材料，建立覆盖不同流域的现场质控指南，并推动水质数据与水文监测深度融合，使其成为工程安全运行和生态调度的“前哨”。随着微纳制造与人工智能进步，该技术有望实现从“可用”到“好用”的跨越，为智慧水利建设提供坚实的数据底座。

参考文献

[1]王磊,张明辉.基于纳米材料修饰的电化学传感器在水质重金属快速检测中的研究进展[J].环境工程学报,2022,16(4):1123-1132.

[2]陈思远,李建国,赵欣.便携式紫外-可见光谱仪在水质COD现场监测中的应用与改进[J].光谱学与光谱分析,2023,43(7):2156-2163.

[3]刘洋,周海东,吴晓梅.微流控芯片技术在野外水质多参数同步检测中的集成化进展[J].分析化学,2024,52(2):189-198.

[4]赵志强,孙丽丽,高文.基于酶抑制法的便携式农药残留快速检测设备现场适用性评价[J].农业环境科学学报,2023,42(9):2078-2086.