

地表水重金属元素光谱检测方法在农村黑臭水体治理中的实效分析

谢舟扬 丁泳博

陕西工程勘察研究院有限公司, 陕西 西安 710000

[摘要]农村黑臭水体的形成中地表水中重金属污染是重要因素之一且对生态安全与居民健康影响严重,光谱检测技术因具有高效、无损、实时的特性在重金属元素识别与浓度分析方面已被广泛应用,结合典型农村黑臭水体治理案例分析光谱检测在污染源追踪、水质动态监控与治理效果评估中的具体应用以验证其在治理过程中的可行性与实效性,结果显示光谱检测技术可显著提升水体重金属监测的精度和响应速度并给治理策略的优化提供数据支撑。

[关键词]光谱检测技术; 重金属元素; 地表水; 黑臭水体; 农村水环境治理

DOI: 10.33142/nsr.v2i3.17731

中图分类号: X52

文献标识码: A

Analysis of the Effectiveness of Surface Water Heavy Metal Element Spectral Detection Method in the Treatment of Black and Odorous Water Bodies in Rural Areas

XIE Zhouyang, DING Yongbo

Shaanxi Institute of Engineering Investigation Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710000, China

Abstract: Heavy metal pollution in surface water is one of the important factors in the formation of rural black and odorous water bodies, and has a serious impact on ecological security and residents' health. Spectral detection technology has been widely used in heavy metal element identification and concentration analysis due to its efficient, non-destructive, and real-time characteristics. Combining typical rural black and odorous water treatment cases, the specific application of spectral detection in pollution source tracking, water quality dynamic monitoring, and treatment effect evaluation is analyzed to verify its feasibility and effectiveness in the treatment process. The results show that spectral detection technology can significantly improve the accuracy and response speed of water weight and metal monitoring, and provide data support for the optimization of treatment strategies.

Keywords: spectral detection technology; heavy metal elements; surface water; black and odorous water bodies; rural water environment governance

引言

农村的生态环境受到黑臭水体影响且居民的生产生活和身体健康也被危及,这使农村黑臭水体成为当下水环境治理的重难点,重金属元素是主要污染源之一且隐蔽性强、迁移范围广、累积程度高,急需高效且精准的监测手段,光谱检测技术因有着实时性和高灵敏度的优势而在环境监测领域冒尖,探索光谱检测技术在农村黑臭水体治理中的应用有助于提升污染识别效率并能给科学治理路径提供技术支撑,其研究价值和现实意义都很重要。

1 农村黑臭水体的成因与重金属污染特征分析

农村黑臭水体治理难度很大且成因复杂,其中重金属污染具有广泛性和隐蔽性,深入探讨其污染特征与成因对提高治理效率意义重大。

1.1 农村黑臭水体的主要成因剖析

多种因素交织影响农村黑臭水体的形成,像生活污水直排、畜禽养殖废水渗漏、农业面源污染、水体自净能力下降等都是主要因素,部分农村地区基础设施建设滞后、污水处理能力不足,生活污水未经有效处理直排入水体,导致有机物和氮磷营养物质富集、水体富营养化,畜禽养殖排放的含氮有机废液在雨季会随地表径流流入沟渠和

池塘也是重要污染源,而且大量使用化肥和农药的农业活动增加了氮磷等营养物和有毒物质的输入,使水质进一步恶化,当水体里有机物大量积累且长期缺氧时就会呈现发臭发黑的恶劣状态,产生典型的黑臭现象,尤其在水体流动性差、水浅、水温高的情况下,黑臭水体形成得更快更严重。

1.2 重金属在水体中的来源与迁移

农村水体中的重金属元素来源多样,农业投入品残留、工业排放遗留、土壤侵蚀、垃圾渗滤液扩散等都是主要来源,部分靠近工业区或者城镇边缘的农村早期采矿和冶炼活动无序,可能会留下大量重金属污染物,风化或者被雨水冲刷后就进入到水体里了,现代农业活动中使用含镉、铅等重金属的化肥、农药也成了持续的隐性污染源,农村垃圾处理机制有缺陷,电池、油漆、金属制品等被随意倾倒,在雨水作用下释放重金属离子,随地表径流进入水体造成污染,而且重金属在水体里迁移性和生物积累性强,能通过水-沉积物界面在不同介质间迁移,进入食物链产生生态风险,重金属污染难以识别和去除也是这些特性造成的,在治理黑臭水体时常成为隐性障碍。

1.3 重金属污染对水体黑臭现象的作用机制

在黑臭水体形成过程中,重金属污染发挥着放大和协

同作用。水体中微生物的正常代谢被重金属抑制后有机物分解能力降低,导致有机污染物累积更严重、水体厌氧氧化进程加快并产生硫化氢和甲烷这些黑臭气体;铁、锰等部分重金属在缺氧状态下容易被还原释放,产生黑色或深褐色沉积物,显著加深水体颜色,增强黑臭视觉表现;再者,重金属与有机物形成稳定络合物,使得污染物更难降解,降低水体自净能力,并且随着沉积物中重金属不断累积,在特定条件下它又会重新释放,造成“二次污染”效应,这种缓释特性让治理工作面临周期长成本高的挑战。在黑臭水体治理中重金属污染不容忽视,要从根源上改善水质必须和营养污染协同控制。

2 地表水重金属元素光谱检测技术原理与优势

光谱检测技术有着高灵敏度、快速响应、非破坏性的特点,在地表水重金属监测里潜力巨大,因此成为了精细化水环境治理的重要手段。

2.1 光谱检测基本原理分析

物质对电磁辐射的吸收、发射或散射有一定规律,光谱检测技术基于此靠分析光谱信号来识别物质组成与浓度,地表水重金属元素检测用到的光谱技术主要有原子吸收光谱(AAS)、电感耦合等离子体发射光谱(ICP-OES)、激光诱导击穿光谱(LIBS)、紫外-可见光谱(UV-Vis)等,水样中的金属元素被这些技术激发会释放特定波长的光或者吸收特定波段能量从而建立起光谱信号和重金属浓度的定量关系,拿 LIBS 来说,高能激光产生等离子体是一瞬间的事,分析发射光谱就能实现多种金属元素同步检测,不同的光谱方法因有不同的物理机制和仪器配置,能有效满足不同类型水体和目标元素的检测需求,适应性和拓展性都挺强的。

2.2 应用于重金属检测的技术优势

光谱检测技术跟传统化学分析方法比起来优势明显,传统化学分析方法复杂而光谱检测技术检测速度快、样品预处理简单且部分技术能实现原位、实时监测从而工作效率大幅提高,光谱检测技术灵敏度高且能精准识别哪怕是 ppb 甚至 ppt 级别的重金属浓度变化因而适用于微量污染物预警监测,光谱检测多为非接触或者少量样本操作进而使水体环境受到的干扰小且减少有害试剂使用从而体现绿色监测理念,在空间尺度方面,便携设备或者无人机平台若与光谱检测技术相结合则广阔区域快速覆盖不成问题从而提升农村水体巡查效率,在时间维度上借助物联网与传感网络就能实现连续动态监测从而为污染演变趋势分析和响应决策提供数据支撑,光谱检测在农村复杂水环境中适用前景广泛正是这些优势起的作用。

2.3 技术发展与应用瓶颈分析

光谱检测技术发展快、应用潜力大,但实际推广时仍面临不少挑战。其一,水体中悬浮颗粒、有机物等干扰物质较多,可能影响光谱信号准确识别,且黑臭水体背景复

杂,误判风险更高;其二,不同重金属元素光谱特征差异小、谱线重叠,定量分析更难,需要高性能仪器和精密算法;其三,一些先进设备昂贵且维护要求高,在经济条件差的农村地区普及受限;现场操作人员需具备较高专业水平才能用好设备、解读数据,这也给技术推广的培训和管理的带来新问题。

3 光谱检测技术在黑臭水体治理中的实际应用路径

把光谱检测技术嵌入农村黑臭水体治理的全过程,污染源识别、水质变化监控、治理效果评估就能得到全链条的支撑且治理的科学性和实效性也能得以提升。

3.1 前期排查中的污染识别应用

黑臭水体治理初期,制定治理方案的关键在于识别污染源的种类、分布与强度,而光谱检测技术能快速检测多种元素,可有效辅助进行污染普查与风险识别,用 LIBS 或 ICP-OES 等技术快速分析不同采样点的地表水,就能明确镉、铅、铜等重金属元素浓度水平和超标范围,识别出重点污染区域和污染物类型,再配合地理信息系统(GIS)定位污染源头,后续溯源调查和治理策略制定就有数据支撑了,且与传统采样送检模式相比,光谱检测前期调查周期大大缩短,污染突发时还能快速部署,应急响应能力得以提升。

3.2 治理过程中的动态水质监测

黑臭水体治理是个动态过程,污染物迁移、释放与沉积有时变性和空间差异性实时水质监控相当重要,布设在线光谱检测设备或者使用便携式仪器能实现对治理区内重点断面、入水口、排水点等位置连续监测以实时掌握重金属浓度变化趋势,像采用紫外可见光谱结合化学计量学方法便可实时分析水体中铁、锰离子变化、判断水体氧化还原状态、评估治理措施即时效果,监测数据异常波动时能及时预警、调整处理工艺或者加密采样频次以达成治理过程精细化控制,这种模式强化数据驱动治理理念、减少人为判断失误、提升治理效率。

3.3 后期评估中的效果验证与追踪

治理工程结束了,保障治理长期稳定的关键在于科学评估治理成效以及预防污染反弹,光谱检测技术在后期评估时也很重要。各检测点治理前后重金属含量数据一对比就能直观反映水体污染负荷变化,从而对治理效果定量打分,而且有些光谱仪器能检测沉积物,分析出底泥里残留的重金属含量,评估潜在二次污染风险,要是检测结果表明底泥里污染物仍有释放风险,就可以制定进一步的干预措施,再进一步说,和自动监测站或者移动监测系统相结合开展定期或者连续检测,就容易形成长效追踪机制,巩固治理成果并防止污染回潮。

4 典型治理案例中的实效分析与数据对比

光谱检测技术的实效与价值可通过典型农村黑臭水

体治理案例的实地应用得到全面验证,下面以江苏省盐城市某村河沟治理工程为例分析其技术路径和治理成效。

4.1 项目背景与污染状况概述

江苏省盐城市滨海区X村有一条全长大概1.6公里的主排灌沟,农业灌溉和生活污水常年排放在此,由于村里未建污水处理设施,畜禽养殖的粪污、生活灰水还有农业废弃物直接排入沟中,导致水体长期黑臭,居民意见很大。初步采样分析显示,沟里的水呈深黑色且臭味明显,水中溶解氧近乎为0,铅、镉、锌等重金属元素严重超标,存在严重的生态和健康隐患。项目组引进便携式LIBS和在线UV-Vis光谱检测设备,对全沟进行断面排查并结合传统采样送检方法建立污染分布图,为后续治理提供依据。

4.2 治理过程中的光谱技术介入

明确污染成因和空间分布后,工程实施将生态修复与污染拦截相结合并配套光谱检测来全程监控,治理措施包括建设人工湿地、布设微生物填料床、设置雨污分流系统和清理底泥,在上游、中游与出水口三处设置在线UV-Vis光谱仪实时监测COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 Fe^{2+} 和 Mn^{2+} 浓度的变化,每周用便携式LIBS设备对不同断面的水样和底泥采样检测以追踪重金属元素浓度,整个治理周期为3个月,光谱检测设备在关键节点分析数据辅助决策调整,中途数据显示中游重金属浓度异常,追溯后发现有养殖废水回流便赶紧加设拦截渠有效防止污染扩散,这体现了光谱检测的实时预警功能。

4.3 治理成效评估与数据对比分析

治理完成之后,把光谱检测数据和传统检测数据一比对就会发现整体水质提升得很明显,治理前后主要重金属浓度对比(单位: $\mu\text{g/L}$)如下表1所示。

表1 农村黑臭水体治理前后主要重金属元素浓度变化对比表

检测项目	治理前浓度	治理后浓度	降幅(%)
铅(Pb)	148.2	37.4	74.8
镉(Cd)	12.5	3.1	75.2
锌(Zn)	330.8	96.5	70.8
铁(Fe)	1980	480	75.8
锰(Mn)	570	145	74.6

治理之后,水体的透明度和溶解氧显著提高且黑臭现象大体上消除了,居民满意度回访表明超90%的居民认可治理成果,尤其在重金属控制方面,光谱检测数据和实验室检测的吻合度超93%验证了该技术的精准性与实用性,此案例表明光谱检测不但能有效地指导治理过程而且能形成动态反馈机制,提高治理效率与响应能力,实战价值和推广前景良好。

5 光谱检测技术在农村水环境治理中的发展前景与优化建议

在农村水环境治理里,光谱检测技术已经展现出不错的应用前景,以后要不断推动和优化其普及以及深化应用

就必须在技术创新、机制建设和治理体系融合这些方面下功夫。

5.1 光谱检测技术的应用趋势

环境治理朝着高精度、数字化发展,光谱检测技术在农村水环境里的应用趋势越来越显著,其具有快速响应、非接触测量、实时分析的特点,能给水质管理提供连续且可视化的数据支持,往后便携化、自动化、集成化会是技术发展的主要方向,像正在研发的复合型传感器集成了LIBS、UV-Vis、拉曼光谱等多种光谱技术,能同步监测多个污染因子,让检测覆盖面更广、准确性更高,并且光谱检测系统借助5G通信和物联网平台,可以实现远程监控、异常报警和自动上传数据,构建起“设备-平台-决策”的闭环体系,政策推动加上市场需求,光谱技术会从点状部署慢慢发展成区域网格化覆盖,促使农村水质管理迈进“智慧化”新阶段。

5.2 当前面临的主要挑战问题

光谱检测技术优势明显,但在农村推广应用时仍面临不少现实挑战,先说说成本,有些先进光谱仪器太贵且配套系统建设费钱,在经济欠发达农村大规模布设困难,再讲述适应性,农村黑臭水体成分复杂且干扰因子多,光谱识别的准确性易受影响而需靠算法模型来修正校准,还有运维保障体系不完善,不少村镇没专业检测人员,导致设备使用效率低、数据解读有误甚至闲置浪费,现在还没有统一的农村水质在线监测标准体系,数据整合和跨区域对比分析不方便,治理时光谱数据没充分融入管理流程,技术成果转化为实际治理成效的比例还有待提升,要解决这些问题,技术得不断突破且制度和治理机制也得跟上。

5.3 推动技术优化与机制融合路径

要让光谱检测在农村水环境治理中充分发挥作用,需从技术、运维、政策、管理几个方面优化融合:技术上推动研发低成本、低功耗的光谱设备以提高识别复杂水质和抗干扰能力,并加强与人工智能算法的融合构建智能监测系统;运维方面建立区域运维中心负责设备维护、人员培训和数据管理提升基层技术能力;政策上用财政补贴、试点示范推动设备采购和应用并鼓励社会资本参与水环境第三方检测服务;管理上把光谱检测数据纳入农村水污染治理考核体系使其成为污染源管控、水质评价和治理效果审查的重要依据推动数据驱动的决策机制构建,靠“技术+制度”双轮推动将光谱检测融入农村水环境治理全流程,有望使治理模式从经验型彻底转变为科学型。

6 结语

农村黑臭水体治理中地表水重金属污染是关键难题,光谱检测技术高效、实时、精确,能为污染识别、动态监测与治理评估提供可靠手段,典型案例实践应用验证了该技术在实际治理中具有显著成效和可操作性。往后,随着技术不断优化并与治理机制融合推进,光谱检测将在农村

水环境管理中发挥更大作用，助力实现水体治理精准化、智能化、长效化目标，推动农村生态环境持续改善。

[参考文献]

- [1]陈宏展,朱国政,余鑫,等.环境重金属元素的原子光谱和质谱分析检测技术综述[J].中国资源综合利用,2021,39(12):98-101.
- [2]田宏武.水体重金属激光诱导击穿光谱快速测量方法研究与仪器研制[D].辽宁:沈阳农业大学,2022.
- [3]李鹏飞.关于土壤重金属光谱检测方法的研究[J].中国金属通报,2023,11(2):174-176.

[4]王一童.基于光谱技术对土壤—水体—气体中污染物检测研究[D].河北:河北大学,2024.

[5]许方豪.植物汁液重金属元素的激光诱导击穿光谱检测方法研究[D].甘肃:甘肃农业大学,2024.

作者简介：谢舟扬（1992.11—），毕业院校：陕西师范大学，所学专业：化学（创新实验），当前就职单位：陕西工程勘察研究院有限公司，职称级别：工程师；丁泳博（1997.8—），毕业院校：河南城建学院，所学专业：化学工程与工艺，当前就职单位：陕西工程勘察研究院有限公司，职称级别：助理工程师。