

基于光谱法的土壤重金属污染检测方法

高晓芳

河南广电计量检测有限公司 河南 郑州 450000

【摘要】：土壤重金属污染是威胁生态环境与农产品安全的重要问题，其快速、准确的检测对污染评估与治理至关重要。光谱分析法以其高效、原位、多元素同步检测等优势，成为传统方法的有力补充与发展方向。本文系统阐述了传统检测方法的局限性，对比分析了多种常用光谱技术的原理与特性，并具体探讨了光谱检测技术在农田安全评估、矿区污染监测、修复过程跟踪、城市环境调查及应急普查等实际场景中的应用模式，以及为土壤重金属污染的高效识别与精准管理提供技术参考。

【关键词】：土壤污染；重金属；光谱检测方法

DOI:10.12417/2705-0998.25.24.032

引言

随着工业化与城市化进程的加速，土壤重金属污染问题日益凸显，对生态系统稳定、农作物生长安全及人体健康构成潜在威胁。实现土壤重金属含量的有效监测，是开展污染风险评估、实施修复工程及进行土地资源管理的重要前提。传统实验室分析方法虽然精度较高，但存在流程复杂、时效性差、成本高昂等局限性，难以满足大范围、高频次的监测需求。近年来，光谱检测技术凭借其快速、无损、原位及可多元素同时分析等特点，在环境监测领域发展迅速。

1 传统检测方法的缺点

1.1 样品前处理流程繁琐复杂

传统土壤重金属检测通常依赖于实验室湿化学分析，其过程存在若干固有缺点。首先，样品前处理流程极为繁琐复杂。土壤样品需经历自然风干、研磨过筛、强酸消解或碱熔融等步骤，将待测金属转化为离子态。这个过程不仅耗时费力，通常需要数小时乃至数天，而且在消解过程中使用硝酸、盐酸、氢氟酸等危险化学品，存在操作安全风险，并易产生二次污染，对环境与实验人员均不友好。

1.2 对检测环境与设备要求苛刻

传统方法对分析测试环境与设备要求苛刻，检测费用高昂。原子吸收光谱仪、电感耦合等离子体质谱仪等核心设备购置与维护成本极高。检测过程需在标准实验室内进行，对实验用水、试剂纯度、环境洁净度及操作人员专业素养均有严格要求。单个样品的完整分析成本不容忽视，当面对大规模土壤普查任务时，所需的人力、物力和时间投入使其在经济性与时效性上均面临巨大挑战。

1.3 检测周期过长且时效性不足

传统方法的检测周期过长，时效性严重不足。从野外采样、样品运输、实验室前处理到最终上机检测并出具报告，整个流程往往持续数周。这种显著的延迟使得检测结果无法及时反映土壤污染的实时状况，难以作为突发性污染事件的应急决策，或对污染修复工程的动态过程监控，提供快速有效的反馈与指

导。

1.4 采样方式破坏性及代表性有限

此类方法的采样方式具有破坏性，且空间代表性有限。采样通常基于离散点进行，通过采集少量土壤样品来代表较大区域的污染状况。然而，重金属在土壤中的空间分布往往具有高度异质性，稀疏的采样点难以全面、真实地刻画污染的空间分布格局，容易遗漏局部高污染区域，导致对整体污染程度与范围评估存在偏差或不确定性。

2 常用光谱技术类型及特性对比

2.1 X 射线荧光光谱技术

X 射线荧光光谱技术是一种重要的无损检测方法。其基本原理是利用高能 X 射线激发土壤样品中重金属原子的内层电子，当被激发的原子退激时，会释放出特征 X 射线荧光。通过分析特征荧光的能量与强度，即可对重金属元素进行定性定量分析。该技术优点在于样品前处理简单，固体样品可直接测定，分析速度快，可实现多元素同时检测，并已发展出便携式设备用于现场原位筛查。但其检测限相对某些实验室方法较高，对轻元素分析能力较弱，且基体效应对测量精度存在一定影响。

2.2 激光诱导击穿光谱技术

激光诱导击穿光谱技术是一种极具潜力的原子发射光谱技术。其利用高功率脉冲激光聚焦于土壤样品表面，形成高温高密的激光诱导等离子体。等离子体在冷却过程中，其中被激发的原子或离子会发射出特征波长的光，经光谱仪分光检测后形成光谱。通过分析特征谱线即可确定元素组成与含量。该技术最大优势在于几乎无需样品制备，可实现真正的实时在线、原位或遥测分析，空间分辨率高，并能检测包括轻元素在内的多种元素。其不足之处在于光谱信号稳定性受环境及样品基体影响显著，定量分析模型建立相对复杂，且设备成本较高。

2.3 原子吸收光谱技术

原子吸收光谱技术是一种成熟的实验室定量分析技术。其

原理是基于基态原子对特定波长光辐射的吸收程度来测定样品中元素含量。将处理好的土壤消解液雾化后送入火焰或石墨炉原子化器,使其原子化,并测量对空心阴极灯发射的特征谱线的吸收。该技术灵敏度高,选择性强,干扰相对较少,对多数重金属元素的检测限能够达到较低水平,分析精密度好,是目前环境检测标准方法体系中的重要组成部分。但其主要缺点是单次只能测定一种元素,分析效率较低,且对样品前处理要求严格,无法实现现场快速分析。

2.4 原子发射光谱技术

原子发射光谱技术,特别是电感耦合等离子体原子发射光谱,是实验室多元素同时分析的强有力工具。样品溶液经雾化后由载气送入高温等离子体炬中,待测元素被充分原子化并激发,发射出各自的特征谱线。通过分光系统与检测器对多道谱线同时进行检测。该技术具有线性范围宽、可同时或顺序测定多种元素、分析速度快、基体干扰相对较小等突出优点。然而,其设备极为昂贵,运行与维护成本高,对操作人员专业要求高,且同样依赖复杂的样品消解前处理过程,限制了其在现场的广泛应用。

2.5 近红外光谱技术

近红外光谱技术是一种基于分子振动光谱的快速检测方法。其并非直接检测重金属元素本身,而是通过分析重金属离子与土壤有机质、黏土矿物等组分结合后,所引起的土壤有机基团化学键振动倍频与合频吸收光谱的变化,间接反演重金属含量。该技术优势在于分析速度极快,可实现秒级测定,样品无需复杂化学处理,无试剂消耗,绿色环保,且仪器易于便携化。但其模型严重依赖大量有代表性的标定样品,模型移植性较差,是一种间接测量方法,测量精度受土壤类型、水分、质地等多种因素影响。

3 土壤重金属污染光谱检测方法的应用场景

3.1 基本农田土壤质量安全普查与监测

在基本农田土壤质量安全普查与监测中,光谱检测技术展现出重要应用价值。面对我国广阔的农田面积,运用便携式X射线荧光光谱仪或近红外光谱仪,可在田间地头对土壤进行快速原位筛查。工作人员可按预设网格进行走航式或定点测量,短时间内获取大量土壤中铅、镉、汞、砷、铬等关键毒性重金属元素的含量分布数据。这种模式能够快速识别出污染超标区域,圈定重点管控范围,为农产品产地安全分级、污染源头追溯以及后续针对性加密布点采样提供科学依据,显著提升普查效率,降低整体监测成本,是实现耕地土壤环境质量常态化监管的有效工具。

3.2 矿区及周边土壤污染调查与评估

在矿区及周边土壤污染调查与评估中,光谱技术发挥关键作用。矿山开采、选矿及尾矿堆积过程极易导致重金属向周边

土壤扩散,污染呈现显著的空间异质性。利用车载或机载的激光诱导击穿光谱系统,结合地理信息系统,可对矿区及影响区域进行大范围、非接触式的面状扫描。该技术能够快速绘制出砷、铜、锌、铅等特征污染元素的空间分布图谱,清晰揭示污染物随地形、水系扩散的迁移路径与影响范围,精确界定污染热点区域。这为评估矿区历史遗留环境风险、科学划定生态修复边界、制定分区治理策略提供了不可替代的高效数据支撑。

3.3 污染土壤修复工程的过程监控与效果评估

在污染土壤修复工程的过程监控与效果评估环节,光谱技术提供实时动态的监测手段。在固化稳定化、植物修复或淋洗等工程实施过程中,需要频繁监测修复区域内重金属的有效态含量或总量变化,以评估修复药剂投加效果、植物提取进展或淋洗程度。传统实验室检测的滞后性无法满足过程调控的即时需求。此时,采用便携式光谱设备在现场进行网格化周期性检测,可快速生成修复区域内重金属含量的时空变化趋势图。工程管理人员能够据此及时调整施工参数,优化修复工艺,并对修复工程的最终效果做出快速、客观的阶段性及终期评估,保障修复工程达到预定目标。

3.4 城市工业遗留场地再开发的环境调查

在城市工业遗留场地再开发的环境调查中,光谱技术是高效的初步筛查工具。城市中搬迁后的化工、电镀、冶金等企业遗留场地土壤污染状况不明,是再开发利用的主要环境风险。在详细勘察阶段之前,使用便携式X射线荧光光谱仪对整个场地进行系统性快速扫描,如同对土壤进行一次CT扫描,能够初步探明表层土壤中重金属污染物的种类、浓度水平及异常高值区的空间位置。这种快速筛查能够指导后续布设更具代表性的钻孔取样点位,使得有限的实验室分析资源集中于最可疑的区域,从而以更高的性价比摸清场地污染底数,为风险评估和修复方案设计奠定可靠基础。

3.5 应对突发环境事件与区域性应急普查

在应对突发性环境事件或进行区域性土壤污染应急普查时,光谱技术的快速响应能力至关重要。当发生尾矿库泄漏、污水灌溉等突发事件,或需要对特定流域、区域进行紧急污染排查时,时间因素尤为关键。移动实验室搭载的原子光谱或激光诱导击穿光谱系统可迅速抵达现场,实现样品随到随测甚至原位分析,在数小时内即可获得大批量样品的重金属检测结果。这种快速获取数据的能力,极大助力于环境应急指挥部在第一时间掌握污染扩散的范围与程度,评估其对周边农田、水源地的潜在影响,为迅速采取隔离、管控、警示等应急措施提供至关重要的决策依据,有效防止污染影响的进一步扩大。

4 光谱法检测技术的发展趋势

4.1 多技术融合与高维光谱探测

单一光谱技术往往存在局限,将两种或多种光谱原理结

合,例如激光诱导击穿光谱与拉曼光谱联用,或激光诱导击穿光谱与激光诱导荧光光谱联用,能够同步获取元素的原子光谱与分子的结构信息,实现对土壤中重金属形态、价态及其与土壤组分相互作用的更深入解析。高光谱成像技术的深入应用,能提供每个像素点连续的光谱信息,结合空间坐标,实现从“点”测量到“面”分布、从“单一成分”到“成分与空间关联”的跨越,为污染空间异质性研究提供前所未有的数据支撑。

4.2 智能化与数据分析的深度结合

随着检测数据量急剧增长,传统数据处理方法已难以应对。机器学习与深度学习算法将被更广泛地应用于光谱数据的预处理、特征提取与定量建模中。这些算法能够自动学习复杂、非线性的光谱特征与重金属含量之间的关系,有效克服土壤基体效应、水分干扰等难题,建立适应性更强、预测更稳健的校准模型。结合地理信息系统与物联网技术,可实现检测数据的实时传输、云端处理与可视化,推动建立土壤环境质量智能监测预警平台,实现从数据采集到决策支持的自动化闭环。

4.3 设备集成化、微型化与网络化

光谱检测设备将继续朝着更便携、更坚固、更低成本的方向发展,芯片级光谱仪、智能手机适配光谱传感器等微型化设

备将普及,极大降低专业检测门槛。设备将更加集成化,内置自动对焦、环境补偿、GPS定位、无线通信等功能。在此基础上,通过部署固定式或移动式传感节点,构建空地一体化的无线传感网络,能够实现对重点区域土壤环境质量的长时序、网格化、自动化监测,形成动态监测网络,为土壤污染的长期演变规律研究和风险管控提供常态化数据流,真正实现智慧环保。

5 结语

综上所述,光谱检测技术为土壤重金属污染识别与监测提供了全新的解决方案,有效弥补了传统方法在效率、成本与空间覆盖能力上的不足。在实际应用中,需根据具体检测目标、精度要求、土壤类型及成本预算,合理选择或联用不同的光谱方法。未来,随着光谱传感技术、化学计量学算法及便携智能化设备的持续发展,光谱检测方法将朝着更高灵敏度、更强抗干扰能力、更便捷智能的方向演进。推动光谱检测技术与地理信息系统、遥感技术及物联网的深度融合,构建天地一体化的土壤污染快速监测网络,对实现土壤环境的实时、精准、智慧化监管,保障国家土壤环境安全与土地资源可持续利用具有深远意义。

参考文献:

- [1] 张硕峰.土壤重金属污染的环境影响评价及管理分析[J].皮革制作与环保科技,2024,5(24):187-189.
- [2] 罗迪汉.城市道路土壤重金属污染及其防治技术[J].中国资源综合利用,2024,42(11):146-148.
- [3] 张锦涛.基于光谱分析的土壤污染快速检测技术研究[J].清洗世界,2024,40(09):43-45.
- [4] 王靖伟.土壤重金属污染及其防治措施分析[J].清洗世界,2023,39(10):172-174.
- [5] 梁建平,王力烽,李刚,等.土壤重金属污染在线检测效果研究[J].中国锰业,2023,41(04):26-29.
- [6] 于纯纯,王智慧,徐雅晴,等.浅谈土壤污染物重金属元素的检测方案[J].天津化工,2023,37(03):69-71.