

# 土壤重金属污染快速筛查技术革新方向

王 清

河南迅佳检测有限公司 河南 郑州 450001

**【摘要】**：土壤重金属污染已成为全球性环境问题，对生态系统与人体健康构成严重威胁。传统检测方法存在周期长、成本高、现场适用性弱等局限，难以满足大范围、高频次的污染筛查与应急监测需求。因此，探索快速、便携、高灵敏的新型筛查技术，对于提升土壤环境监管效能、实现污染早期预警与精准防控具有迫切的现实意义。

**【关键词】**：土壤；重金属污染；快速筛查技术；革新；方向

DOI:10.12417/2811-0528.26.10.068

## 引言

面对日益复杂的土壤污染形势，发展快速筛查技术是实施风险管控与修复治理的首要环节。当前技术正朝着现场化、智能化和多元信息融合方向演进，旨在突破实验室分析的时空限制。系统研究传感技术、光谱分析与移动平台等前沿方向的创新融合，是推动土壤环境监测体系向实时、高效、低成本转型的关键技术路径。

## 1 土壤重金属污染的来源及危害

### 1.1 土壤重金属污染的多元来源解析

土壤重金属污染主要源于人为活动的无序排放与自然地质过程的叠加效应。在工业源方面，采矿冶炼、电镀加工及化工生产通过废气沉降、废水排放等途径，向周边土壤输入铅、镉、汞、砷等高毒性重金属。农业源则是面源污染的主力，长期施用含重金属的化肥、农药以及污水灌溉，导致铜、锌、镍等元素在耕层中不断累积。交通源方面，含铅汽油的历史使用及轮胎磨损颗粒，使得公路沿线土壤遭受铅、锌的严重污染。此外，城市生活垃圾的随意堆放与电子废弃物的非正规拆解，也是重金属进入土壤环境的重要渠道。这些污染源往往呈现点源与面源交织、新旧污染物并存的复杂特征，使得污染溯源与管控难度极大增加。

### 1.2 重金属污染对生态与人体健康的危害机制

土壤重金属因其不可降解性与生物富集性，对生态系统与人类健康构成持久威胁。在生态层面，过量的重金属会破坏土壤团粒结构，抑制微生物活性，导致土壤酶活性下降与肥力退化。重金属通过根系吸收进入植物体，不仅抑制作物生长，造成减产，还会通过食物链逐级放大，威胁野生动物生存。在健康层面，重金属进入人体后难以代谢排出，易在肝、肾、骨骼及神经系统富集。例如，镉会导致骨软化症，铅损害儿童智力发育，汞则引发神经系统的不可逆损伤。这种从土壤到餐桌的传递路径，使得即使低浓度的长期暴露也具有显著的致癌、致

畸及致突变风险，严重威胁区域生态安全与人群健康福祉。

## 2 土壤重金属污染快速筛查技术

### 2.1 X射线荧光光谱（XRF）技术的现场原位革新

XRF技术凭借其非破坏性、无需样品前处理及秒级出数的特性，已成为土壤重金属现场筛查的行业标准工具。近年来的革新主要集中在硅漂移探测器（SDD）的小型化与制冷效率提升上，使得手持式设备在保持ppm级检出限的同时，重量大幅减轻，更适合野外长时间作业。新一代仪器集成了GPS定位模块，能够将重金属含量数据与采样坐标自动绑定，直接生成空间分布热力图。此外，针对土壤基质复杂的难题，制造商开发了专用的土壤端窗探测器与康普顿归一化算法，有效克服了土壤湿度、粒径不均带来的基体效应，显著提升了铬、砷、铅等元素在现场复杂环境下的定性与半定量准确度。

### 2.2 激光诱导击穿光谱（LIBS）的微区分析与深度剖面

LIBS技术利用高能脉冲激光烧蚀土壤表面，通过分析等离子体发射光谱实现元素识别，其最大优势在于对轻元素（如碳、锂）的检测能力及对样品的非接触性。最新的技术革新在于将LIBS与显微镜联用，实现了土壤颗粒尺度的微区分析，能够识别重金属在土壤团聚体表面的富集位点。同时，通过调节激光能量密度，LIBS可进行深度剖面分析，揭示重金属在土壤剖面的纵向迁移规律。结合便携式光谱仪与人工智能分类算法，新一代LIBS设备已能在数秒内完成从光谱采集到重金属总量反演的全过程，特别适用于污染事故现场的快速定性与仲裁分析，弥补了XRF在某些高原子序数元素上的检测短板。

### 2.3 生物传感与纳米酶介导的比色检测技术

基于生物分子识别与纳米材料催化的比色传感技术，以其极高的灵敏度与低廉的成本，在基层筛查中崭露头角。该技术利用重金属离子对特定酶活性的抑制作用，或利用适配体与重金属的特异性结合，引发溶液颜色变化，通过智能手机摄像头

即可实现比色分析。近年来,纳米酶(如铂纳米粒子、氧化钼纳米酶)的发现取代了大量天然酶,解决了天然酶易失活、保存难的问题。研究人员设计了基于纸基微流控芯片的试纸条,只需滴加土壤浸提液,即可通过显色斑点判读重金属浓度。这种技术无需复杂仪器,操作简单,非常适合在农村地区或应急监测中大规模推广使用,实现了从实验室精密分析向现场粗筛的有效下沉。

## 2.4 高光谱与多源遥感协同的空天地监测体系

针对大面积农田或矿区,地面单点筛查效率低下,高光谱遥感技术提供了宏观解决方案。航空或无人机载高光谱成像仪可捕获土壤表面的可见光至短波红外光谱信息,其中包含了重金属胁迫下的微弱光谱特征。技术革新的核心在于利用深度学习模型挖掘光谱特征与重金属含量的非线性关系,克服了传统统计回归模型精度不足的缺陷。同时,通过融合多源遥感数据(如热红外、雷达数据),可以有效去除植被覆盖、土壤水分及有机质对光谱信号的干扰。这种非接触式的立体监测技术,能够在数小时内完成平方公里级别的污染热点识别与分级制图,为后续的精细化网格布点提供精准导航。

## 2.5 拉曼光谱与表面增强技术的现场应用突破

拉曼光谱通过探测分子振动指纹图谱来识别化学物质,对土壤中的特定重金属化合物具有独特的分子识别能力。传统拉曼信号极弱,限制了其现场应用。近年来的突破在于表面增强拉曼散射(SERS)基底材料的研发,利用金、银纳米阵列或金属有机框架材料(MOFs)作为增强基底,可将重金属分子的拉曼信号放大百万倍以上。结合便携式拉曼光谱仪与手持式激光探头,操作人员可直接对土壤原样进行无损检测,无需消解或化学前处理。这种技术不仅能给出重金属总量,还能提供其化学形态(如价态)信息,对于评估重金属的生物有效性与生态毒性具有不可替代的价值。

## 3 现存挑战

### 3.1 复杂基质干扰与标准化定标难题

土壤是一个由矿物质、有机质、水分及微生物组成的非均质复杂体系,这种复杂性给快速筛查带来了根本性挑战。不同类型的土壤在质地、pH值、阳离子交换量及有机质含量上存在巨大差异,这些因素会显著影响光谱信号的吸收峰位与强度,导致同一重金属含量在不同土壤类型中产生迥异的检测读数。目前的快速检测设备大多依赖通用型定标曲线,难以覆盖全国范围内千差万别的土壤背景值。缺乏针对特定区域土壤的高精度本地化定标模型,使得现场筛查结果往往存在较大的系统偏差,难以满足环境执法的数据准确性要求。

### 3.2 低检出限与现场实用性的矛盾

虽然实验室仪器分析能够达到ppb级甚至ppt级的超低检出限,但大多数现场快速筛查技术在灵敏度上仍存在量级差距。对于砷、汞、镉等具有高毒性的痕量重金属,现有的便携式XRF或比色试纸往往在接近环境标准限值附近出现漏检或误判。此外,为了提高信噪比,许多光学检测技术需要较长的积分时间或复杂的样品前处理,这与“快速”筛查的初衷背道而驰。如何在保证设备便携、操作简便的前提下,突破物理检测极限,将检出限降低到法规标准线以下,同时保持结果的稳定性,是目前技术研发面临的重大物理瓶颈。

### 3.3 形态分析缺失与生物有效性评估盲区

现有的快速筛查技术绝大多数仅能提供重金属的总量信息,而无法区分其化学形态。然而,重金属的生态毒性和生物有效性主要取决于其赋存形态,例如六价铬的毒性远高于三价铬,离子态的重金属远比结合态更易被植物吸收。单纯的总量数据往往高估或低估了实际的污染风险,导致管理部门做出错误的决策。虽然实验室形态的提取与分析技术已相对成熟,但将其微型化、快速化并应用于现场筛查仍是巨大的挑战。缺乏能够原位识别重金属价态与形态的快速手段,使得当前的快速筛查在环境风险评估的深度上存在明显不足。

## 4 未来发展方向

### 4.1 多模态传感融合与微型化集成芯片

未来的快速筛查技术将打破单一检测原理的局限,走向多模态传感融合。通过将XRF、LIBS、拉曼及电化学传感器集成于单一微型芯片或手持终端,实现对不同元素、不同形态重金属的互补检测。这种集成化设备将利用微机电系统技术,大幅压缩光学与电子元器件的体积,实现真正意义上的口袋实验室。在一次采样中,设备可自动切换多种检测模式,例如先用XRF扫描常量重金属,再利用表面增强拉曼探针痕量有毒元素形态,最后通过电化学传感器测定离子活性。这种多技术联用的微型化趋势,将彻底解决单一技术覆盖面窄、抗干扰能力弱的痛点,实现全元素、全量程的现场精准筛查。

### 4.2 人工智能赋能的光谱解析与自适应校准

人工智能将成为下一代筛查设备的核心大脑,针对土壤基质复杂、光谱重叠严重的问题,深度学习算法将被深度嵌入设备固件中。利用卷积神经网络和Transformer模型,设备能够对采集到的海量光谱数据进行实时去噪、基线校正和特征提取,自动剥离有机质、水分及矿物背景的干扰。更重要的是,AI系统具备在线学习能力,当设备在某地首次使用时,可通过少量样本的自我训练,快速建立适应当地土壤特性的本地化

定标模型,实现无需标准样品的自适应校准。这种智能解析能力将显著提升现场数据的准确度,使其无限逼近实验室大型仪器的分析水平。

#### 4.3 原位、无损与高光谱成像技术的普及

筛查将不再局限于单点取样,而是向原位、面域及可视化方向发展。高光谱成像技术将从昂贵的航空遥感下沉到手持或车载平台,实现对土壤表面的面扫描检测。这种技术无需破坏土壤结构,通过推扫式成像获取每个像素点的光谱信息,结合化学计量学算法,直接生成重金属含量的二维分布热力图。这种可视化筛查方式能让操作者直观看到污染的空间异质性,精准定位污染热点,指导后续的精准采样与修复。结合无人机低空遥感,该技术还能实现对复杂地形或危险区域的远程、非接触式快速普查,极大提升作业安全性与效率。

#### 4.4 基于 CRISPR 的生物传感器与特异性识别

在生物检测领域,基因编辑技术 CRISPR-Cas 系统将为重金属筛查带来革命性的特异性提升。通过设计针对特定重金属离子响应的 DNA 适配体或核糖核蛋白复合物,开发出新一代基因传感器。这种传感器利用重金属结合后引发的构象变化,激活 Cas 酶的切割信号,实现对目标离子的超灵敏、高特异性识别,甚至能区分同一种元素的不同价态。结合等温扩增技术,整个检测过程可在恒温下数分钟内完成,且无需复杂仪器,仅

靠试纸条显色即可读出结果。这种技术将填补传统物理光学方法在形态分析上的空白,为评估重金属生物有效性提供直接的现场证据。

#### 4.5 区块链赋能的物联网大数据监测网络

筛查技术的革新还将体现在数据管理与应用模式的变革上。未来的快速检测设备将标配 5G/6G 通信模块与北斗高精度定位,检测结果实时上传至区块链云平台。利用区块链的不可篡改性,确保每一份现场筛查数据的真实性与溯源性,为环境执法提供铁证。云端大数据平台将汇聚全国范围内的土壤筛查数据,结合气象、水文及土地利用信息,构建重金属污染扩散预测模型与风险预警系统。这种从孤立的单点检测走向万物互联的智能监测网络,将实现土壤环境质量的动态监管与趋势研判,推动土壤污染防治从被动应对向主动预防的战略转型。

### 5 结语

综上所述,土壤重金属污染快速筛查技术的革新,核心在于实现从实验室滞后分析向现场实时感知的范式转变。这需要融合新材料、新原理与新算法,开发出兼具高选择性、高稳定性与操作简便的设备与方法。最终构建起覆盖全面、响应迅速的筛查网络,为土壤环境风险管理与安全利用提供坚实的技术支撑。

#### 参考文献:

- [1] 何雪莲,韦超前,来楷迪,段明宇.耕地土壤重金属污染与修复技术研究进展[J].资源节约与环保,2023,(12):141-148.
- [2] 李子雁,武旻,高丽星.农业土壤重金属污染监测及防治[J].河北农机,2023,(23):37-39.
- [3] 权良贤.矿区土壤重金属污染特征评估模型的构建与评价[J].山西冶金,2023,46(08):130-132.
- [4] 郭冰茹.农田土壤重金属污染监测技术研究[J].皮革制作与环保科技,2023,4(12):59-61.
- [5] 梁家辉.区域土壤重金属污染源解析研究[D].中国环境科学研究院,2023.
- [6] 吴兴洪.土壤重金属污染现状分析与防治策略探讨[J].皮革制作与环保科技,2023,4(09):109-111.