

土壤重金属污染检测技术的最新进展

文 / 陈南阳 山东土地集团土壤科技有限公司

张 倩 泰安现代塑料有限公司

摘要：土壤重金属污染作为当前全球面临的环境挑战之一，其严重性和复杂性不容忽视。随着工业化进程的加速和城市化发展的不断推进，土壤中的重金属污染问题日益凸显，对人类健康、生态平衡以及农业生产构成了严重威胁。因此，开发高效、准确的土壤重金属污染检测技术，对于及时发现污染源、评估污染程度、制定科学合理的治理措施具有重要意义。

关键词：土壤；重金属；污染检测

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.08.097

引言

近年来，土壤重金属污染检测技术取得了显著进展。从传统的实验室分析到现代的现场快速检测，技术的革新不仅提高了检测效率，还降低了检测成本，使得土壤重金属污染的监测与治理工作更加高效、便捷。其中，电化学分析检测技术以其便捷高效、操作简便的特点，成为当前研究的热点之一。该技术通过电化学传感器对土壤中的重金属进行快速分析，无需复杂的预处理步骤，即可在短时间内获取准确的检测结果。

一、土壤重金属概述

土壤重金属污染作为土壤无机污染研究中的重中之重，其潜在危害不容忽视。重金属元素，诸如汞、铅、铜、镍、铁及锌等，因其难以被土壤微生物自然分解的特性，逐渐成为土壤污染的主要源头。这些元素本身即含有毒性，尤其是锌，作为最为常见的重金属元素之一，在土壤中的积累尤为显著。当它们侵入土壤后，会与土壤胶体紧密结合，与土壤内部的有机物或无机物发生复杂的化学反应，生成新的化学形态，进而深刻改变土壤原有的理化性质。

随着时间的推移，这些有毒重金属元素不仅会在土壤中不断累积，还可能转化为毒性更强的甲基或烷基化合物，这些化合物更易被植物吸收，进而通过食物链传递至人体，对人类健康构成严重威胁。土壤本身具有的吸附性，使得重金属一旦进入土壤便难以去除，它们与土壤形成紧密结合体，增加了检测和治理的难度。此外，重金属自身的吸附性也使其更易于在土壤中隐匿，不易被发现，这无疑加大了土壤重金属污染的风险。鉴于土壤重金属污染的严峻形势，我们必须高度重视对重金属污染土壤的检测工作。通过引入和应用新型检测技术，如高分辨质谱分析、激光诱导击穿光谱等，实现对土壤中重金属元素的精准、快速检测，为有效防治土壤重金属污染、保障人类生活安全提供有力支持^[1]。

二、土壤重金属污染现状

土壤作为地球生态系统中的重要组成部分，其健康

状态直接关系到农业经济的可持续发展与人类生存环境的优劣。然而，当前土壤重金属污染问题日益严峻，已成为制约我国农业经济发展的重要瓶颈。据权威调查数据显示，我国受重金属污染的土地面积已超过惊人的5000万亩，并且这一数字仍在以惊人的速度逐年攀升。土壤重金属污染不仅破坏了土壤的生态平衡，导致其循环能力急剧下降，更使得原本肥沃的土地失去了应有的生态效益与经济效益，对人类的生产生活造成了深远且难以估量的影响。深入分析土壤重金属污染不断加剧的成因，自然生态因素与人类活动因素均扮演着不可忽视的角色。在自然生态领域中，土壤重金属污染呈现出复杂的双重性问题。从自然地质作用来看，成土母质的风化过程持续释放重金属元素，这些元素在水文循环的作用下发生迁移转化。特别是在地形低洼地带，重金属元素容易随着水流运动而富集，导致局部区域重金属含量异常升高。这种自然积累过程虽然缓慢，却具有持续性和累积性特征。而人为因素则大大加剧了这一污染态势，尤其是在工业化快速发展的地区。矿产资源的粗放开采造成地表扰动，致使原本稳定的重金属元素暴露于地表并加速释放；工业废水的违规排放直接向土壤输入大量重金属污染物；农业生产中过量使用的化肥和农药，其中所含的重金属残留物持续渗入土壤，形成难以修复的累积性污染。这些人为活动不仅打破了土壤中重金属元素的自然平衡，还造成了污染物在土壤-水体-生物系统中的循环积累，使得生态环境承受着前所未有的压力。这些工农业生产现象不仅直接导致了土壤重金属含量的急剧上升，更通过食物链的传递，对人类健康构成了潜在且长期的威胁^[2]。

三、土壤重金属污染检测技术的最新进展

（一）土壤重金属处理

在土壤重金属污染日益严重的背景下，高效、准确的土壤重金属处理技术显得尤为重要。其中，王水消解法作为一种经典的土壤样品前处理方法，因其对多种重金属元素的有效提取与消解能力，而得到了国内外众多

学者及行业标准的认可。以中华人民共和国农业部行业标准 NY/T 1613—2008《土壤质量重金属测定王水回流消解原子吸收法》为例，该标准详细规定了利用王水回流方式进行土壤样品中重金属元素的消解与测定流程，为土壤重金属污染的监测与评估提供了可靠的技术支撑。

在具体操作中，针对土壤中的砷和汞等元素的消解，需取适量（一般为 0.2~0.5g）土壤样品置于 50mL 比色管中，随后滴加 10mL 王水（1+1 比例），通过充分摇晃确保样品均匀分散，避免黏壁现象的发生。随后，将比色管置于沸水中进行消解，过程中需每隔 30 分钟摇晃一次，以保证消解的均匀性和彻底性^[3]。消解完成后，取出比色管冷却，加入盐酸溶液（5+95 比例）至刻度线，静置过夜后取上清液，即可利用相关仪器测量溶液中汞的含量。对于砷的测定，则需取部分上清液，加入硫脲-抗坏血酸混合液进行还原处理，再滴定至刻度线后混合均匀，待反应完成后进行测量。在处理铜、锌、铅等其他重金属元素时，由于这些元素各自具有不同的化学性质和反应特性，因此其消解处理程序相对更为复杂。尽管整体处理思路相似，即利用盐酸、硝酸、高氯酸等强酸实现元素的分解与消除，但在具体操作中需根据元素特性进行适当调整。例如，在处理过程中需严格控制消解温度和时间，以避免温度过高导致矿物晶体破坏或消解不完全的情况发生。同时，加酸的时间点和酸的比例也需精准把控，以确保消解过程的顺利进行和最终结果的准确性。王水消解法在实际操作中存在一定的挑战。消解过程的温度控制和加酸时间点的把握对操作人员的专业能力提出了较高要求。若消解不完全，则需多次加入酸液，这不仅会延长消解时间，还可能对土壤中的其他成分产生干扰，影响最终实验结果的准确性^[4]。因此，在实际应用中需结合具体情况进行灵活调整和优化，以最大程度地发挥王水消解法在土壤重金属处理中的优势。常见元素测定条件如表 1 所示。

表 1 常见元素仪器测定条件

| 元素 | 波长 /nm | 狭缝 /nm | 火焰类型 |
|----|--------|--------|-----------|
| Zn | 213.9 | 0.7 | 空气-乙炔(贫燃) |
| Cu | 324.8 | 0.7 | 空气-乙炔(贫燃) |
| Pb | 283.3 | 0.7 | 空气-乙炔(贫燃) |
| Cd | 228.8 | 0.7 | 空气-乙炔(贫燃) |

（二）光谱检测技术

光谱检测技术作为当前土壤重金属检测领域的一项重要技术手段，以其高灵敏度检测结果而备受瞩目，如图 1。然而，尽管其检测精度较高，但在实际应用过程中却面临着诸多挑战。首先，光谱检测技术的成本投入

相对较大，这主要源于其所需的专业设备购置与维护费用高昂。此外，检测作业流程复杂且技术标准严苛，不仅要求检测人员具备扎实的专业知识与技能，还需投入大量时间进行精细操作。

在具体操作过程中，光谱检测技术以 X 射线作为主要检测载体，这一特性使得检测人员在作业期间必须佩戴专业的防护设施，以减轻 X 射线对身体健康的潜在危害。然而，即便采取了严格的防护措施，长期暴露于 X 射线环境下仍可能对检测人员的健康造成不利影响。因此，如何在保障检测精度的同时，有效降低 X 射线对检测人员的危害，成为光谱检测技术发展中亟待解决的问题。此外，光谱检测技术无法实现现场快速检测，这在一定程度上限制了其在应急监测和现场调查中的应用。为了克服这一局限，当前光谱检测技术正逐渐转向紫外可见光光度法的研究与开发。紫外可见光光度法具有操作简便、检测速度快等优势，有望在未来成为土壤重金属检测领域的重要补充手段^[5]。



图 1 光谱检测

（三）电化学分析检测技术

相较于光谱检测技术，电化学分析检测技术在土壤重金属检测领域展现出了更为便捷高效的特点。该技术主要依赖于电化学传感器，这一核心部件能够迅速对土壤中的各类重金属进行精准分析，使得检测人员无需受限于专业实验室的环境，即可在指定作业区域内快速完成重金属含量的测定工作。电化学分析检测技术的这一优势，无疑极大地提升了检测效率，降低了检测成本，为土壤重金属污染的快速响应与监测提供了有力支持。

然而，尽管电化学分析检测技术具有诸多优势，但其检测过程同样面临着外界因素的干扰。当土壤中存在大量的大分子颗粒、有机物以及表面活性剂等污染物时，这些物质可能会与重金属离子发生复杂的相互作用，从而影响电化学传感器的检测精度。因此，在实际应用中，如何有效克服这些干扰因素，提高检测数据的准确性和可靠性，成为电化学分析检测技术发展中亟待解决的问题。鉴于我国土壤重金属污染问题的广泛性和严重性，电化学分析检测技术因其便捷高效的特性而具备广阔的发展前景。为了进一步提升该技术的检测性能，相关科研机构应加大研发投入，致力于电化学传感器检测精准

度与抗干扰能力的提升^[6]。通过不断优化传感器设计,提高其对重金属离子的选择性识别能力,以及增强其在复杂土壤环境中的稳定性,电化学分析检测技术有望在未来成为土壤重金属污染监测与治理领域的重要工具。

(四) 太赫兹光谱检测技术

太赫兹光谱检测技术作为一种新兴的土壤重金属含量监测方法,其核心原理是基于分子层面的相互激励作用,通过精密的仪器设备捕捉和分析这些微观层面的能量变化。该技术在应用中具有显著优势,不仅能够实现快速、无损和高精度的检测,还可以同时对多种重金属元素进行实时监测。从物理学角度来看,当太赫兹波与样品相互作用时,分子内部的振动、转动以及分子间的相互作用会导致特定频率的太赫兹辐射被选择性吸收,从而在光谱中形成独特的吸收峰和指纹特征。这些特征性谱线不仅能反映出重金属离子的种类,还能通过吸收峰的强度定量分析其含量。由于不同重金属离子及其化合物在太赫兹频段具有不同的吸收特性和光谱响应,因此可以通过建立标准谱库和数据模型来实现准确识别。在实际检测过程中,先进的数据处理算法和智能分析系统能够自动完成谱图解析、峰值识别和含量计算等工作,大大提高了检测效率和准确性。此外,该技术还可以结合化学计量学方法,通过多变量分析和机器学习算法,进一步提升复杂基质中重金属检测的准确度和可靠性。随着技术的不断发展,便携式太赫兹光谱检测设备的出现使得现场快速检测成为可能,这对于环境监测、农业生产和食品安全等领域具有重要的应用价值。然而,目前该技术仍面临着一些挑战,如样品前处理方法的优化、检测灵敏度的提升以及光谱数据库的完善等,这些都需要通过深入研究和技术创新来逐步解决^[7]。

四、土壤重金属污染检测技术的发展趋势

(一) 低成本化发展

在农产品产地土壤重金属污染检测技术的发展进程中,低成本化趋势日益凸显。现阶段的检测技术呈现出明显的两极分化现象,经济型检测方案往往存在精确度不足、可靠性欠佳等问题,难以满足实际监测需求;而高精度检测设备则因其昂贵的价格标签,严重制约了推广应用的范围和深度。针对这一现状,我国正在积极推进检测技术的成本优化工作。其中,最具突破性的方向是加强检测设备的自主研发能力。通过开发具有自主知识产权的核心部件,优化系统集成方案,建立标准化生产流程,有效降低设备制造和维护成本。同时,新型检测技术的创新研发也为成本控制提供了新思路,如采用多功能集成设计、模块化构建方案等,既保证了检测效果,又实现了成本的合理控制^[8]。我国在光谱分析、电化学传感等领域的技术创新已达到国际领先水平,这不仅为检测技术的低成本化提供了重要支撑,也为打破国外技术垄断奠定了坚实基础。

(二) 智能创新发展

智能化创新已成为土壤重金属污染检测技术发展方向的。这一趋势主要体现在两个层面,一是检测过程的智能化升级。通过整合大数据分析技术、深度学习算法和专家知识库系统,构建了一个智能化的检测分析平台。该平台不仅能够实现检测数据的自动采集、处理和分析,还可以基于历史数据和专家经验,为土壤污染治理提供科学的决策建议。系统通过布设高精度智能传感器网络,结合云计算技术和边缘计算节点,实现了数据的实时监测和动态分析。二是检测手段的创新应用。引入无人机遥感技术和三维建模技术,实现了对检测区域的立体化监测。通过多光谱成像、热红外探测等先进手段,结合地理信息系统(GIS)和遥感数据处理技术,构建了精确的土壤环境数字模型。这种方法不仅能够快速获取大面积区域的污染分布信息,还可以通过时序分析掌握污染物迁移规律,为污染防治提供科学依据。虽然这些新型技术目前仍处于发展完善阶段,但通过与传统检测方法的协同应用,已经显著提升了土壤重金属污染监测的整体效能,展现出广阔的应用前景。

结语

综上所述,土壤重金属污染检测技术的最新进展为我们提供了更加高效、准确的手段来应对这一环境挑战。然而,技术的发展仍需不断突破和完善,以适应复杂多变的土壤环境和日益严格的环保要求。未来,我们应继续加强技术研发和创新,推动土壤重金属污染检测技术的进一步发展。

参考文献

- [1] 赵虎. 土壤重金属检测方法 & 污染治理技术研究 [J]. 山西化工 2024, 44(11): 115-117.
- [2] 张中桥. 土壤重金属污染监测技术及其数据处理方法探究 [J]. 皮革制作与环保科技 2024, 5(21): 93-95+107.
- [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] 安蕾. 简述土壤重金属污染检测技术的进展及其在农业生态安全领域中的应用 [J]. 皮革制作与环保科技 2024, 5(17): 111-113.
- [5] 薄乐. 土壤重金属检测技术应用及其污染治理研究 [J]. 皮革制作与环保科技 2024, 5(14): 111-113.
- [6] 钟云辉. 地质实验测试方法对于土壤重金属污染的检测及评估研究 [J]. 中国金属通报 2023, (09): 240-242.
- [7] 杨国晶. 基于 LIBS 技术的土壤重金属元素污染快速检测与治理方法研究 [J]. 环境科学与管理 2023, 48(04): 108-113.
- [8] 吴倩永. 农产品产地土壤重金属污染检测技术的应用与发展趋势 [J]. 化工管理 2022, (30): 29-32.