

# 土壤重金属检测技术研究现状及发展趋势

续彦凤 刘奋娥

山西农业大学资源环境学院 山西太原 030031

**摘要:** 重金属在引发土壤环境污染的因素中占据突出地位, 土壤重金属污染具有渐进性、持续性、隐蔽性等特点。近些年来, 土壤重金属的检测技术方法更加多样化, 技术人员能够联合采用光谱检测、质谱检测、生物检测等设备仪器, 从源头入手排查并解决土壤遭受重金属破坏的问题。本研究探讨土壤重金属检测技术的研究与应用现状, 结合土壤遭受重金属破坏的总体情况, 为土壤重金属检测技术的创新发展提供有益的借鉴。

**关键词:** 土壤重金属检测技术; 研究现状; 发展趋势

## 引言

随着当前时期的化工产业加快发展, 土壤重金属污染的问题日益严峻。导致土壤生态平衡遭受破坏的重要根源就在于重金属污染, 渗入土壤深部的有害重金属在短时间里很难彻底得到分解, 从而持续累积形成严重的土壤环境破坏。由此可见, 如何采用因地制宜的技术手段来检测土壤中的重金属污染物, 应成为修复土壤生态环境的关键。

## 一、土壤重金属污染的危害性

导致土壤生态平衡遭到破坏的重金属元素主要包括汞、铅、锌、镉、锡、镍等, 以上各种形式的重金属元素都能够渗入土壤深部, 然后长期存在于土壤的生态系统当中。重金属本身具有较强的毒害性, 达到一定浓度指标的土壤重金属能够直接导致植物与动物死亡, 还有可能威胁附近居民的饮水安全。随着时间的推移, 蕴含在土壤或地层深部的重金属还会缓慢迁移, 从而扩散至地下水、河流以及湖泊, 客观上加大了土壤重金属污染造成的潜在影响<sup>[1]</sup>。

土壤重金属污染的常见来源为化工厂的超标排污, 此外还包括未经处理的生活垃圾、建筑垃圾等固体废弃物。在目前的现状下, 国内外的研究人员已经普遍关注土壤重金属污染的生态破坏问题, 并且致力于建构自动化、智能化的土壤重金属污染检测体系。通过以上分析能够得出, 土壤重金属污染的形成根源存在复杂性, 决定了土壤重金属污染的排查与治理难度也是相对较大的<sup>[2]</sup>。

## 二、土壤重金属检测技术的研究现状

### (一) 原子吸收分光光度法

原子吸收分光光度法, 主要基于光源发出的土壤重

金属辐射线, 然后在蒸气状态下被基态原子吸收, 并通过判断辐射波或辐射线的减弱程度来评估土壤重金属的成分与含量。原子吸收分光光度法的测量对象主要为原子状态的土壤重金属元素, 利用待测元素灯发出的特征谱线, 并通过原子化产生的原子蒸气来测定辐射光的减弱程度。从土壤重金属检测角度分析, 原子吸收分光光度法具有检出限低、精密度高、抗干扰能力强、分析速度快、应用范围广等优势。

土壤重金属检测中的原子吸收分光光度法, 重要优势在于检测结果的精准度较高, 具有操作简便、运行成本较低等特点。但是原子吸收分光光度法无法同时测定多种元素, 检测效率较低, 耗时长; 同时该方法技术适用范围仍有待实现进一步的扩大, 对于汞 (Hg)、砷 (As)、硒 (Se) 等易挥发或形成氢化物的元素, 直接用FAAS或GFAAS测定灵敏度低、干扰大, 需联用“氢化发生装置”(将元素转化为氢化物后导入原子化器), 增加了仪器成本和操作复杂度。

### (二) 电感耦合等离子体质谱法

电感耦合等离子体质谱仪在土壤重金属检测领域发挥显著的作用, 此种形式的环境检测仪器能够适应高能量、高温的特殊空间环境, 经过蒸发与电离转化后的待检测土壤样本将会析出一定数量的带电离子。在此前提下, 环境检测人员就可以利用质谱仪将上述的带电离子进行分离与测试。通常来讲, 土壤重金属检测中的电感耦合等离子体质谱仪具有样本雾化处理、激发等离子体、电离、离子质量筛选、重金属成分检测的功能, 经过检测得出的原始离子信号将会输入计算机控制中心, 从而将其转化为可识别的电信号<sup>[3]</sup>。

环境检测人员还应当借助数据采集系统,做到详细记录不同重金属元素的“特征峰”,以此为依据分辨土壤重金属的浓度指标、分布规律、同位素的分布状况等信息。电感耦合等离子体质谱仪可以同时测定多种元素,提高检测效率,具备精准性、灵敏性、实时性等应用优势,支撑环境监管部门制定更具可行性的土壤污染整治方案。

### (三) X-射线荧光光谱法

X-射线荧光光谱法(XRF)是土壤重金属检测中快速、无损/半无损的核心技术,基于“初级X射线激发土壤样品中重金属原子,使其发射特征荧光X射线,通过荧光的能量/波长定性、强度定量”原理,分为能量色散型(EDXRF)和波长色散型(WDXRF)两类。其核心优势是土壤样品无需强酸高温消解,仅需简单处理即可检测,提升检测效率,缺点集中在灵敏度和基体干扰控制,XRF检出限普遍为ppm级,针对轻元素(如As、Se、Hg、Sb等)荧光强度弱、干扰多,具有检测灵敏度和准确性不足等缺点,在操作光谱检测仪的过程中,操作人员还需要避免放射线对人体健康构成某种损伤,并应当加强对光谱检测流程的控制<sup>[4]</sup>。

此外,土壤重金属的电化学检测技术主要包括电位溶出分析法、溶出伏安法、离子选择性电极法,以上三种形式的电化学检测技术手段都表现为良好的适用性。目前应用范围较广的土壤重金属电化学检测技术为溶出伏安法,该方法的基本原理在于预先电解待检测样本,等到样本中的重金属富集直至溶出的情况下,再去对其进行自动扫描以及成分鉴定。将溶出伏安法应用于检测有害的重金属成分,能够在相对较短的时间里快速判断土壤污染物的含量,并可以达到节约检测成本以及提升抗干扰能力的目的。但同时,采用溶出伏安法实施土壤重金属检测的仪器灵敏度有待提升;技术人员需要谨慎操作重金属检测仪器,才能够获得比较精确的结果数据。土壤重金属的电化学检测手段还包括离子选择性电极法,该方法主要通过判断电位与离子活度对数的线性关系,从而将待检测土壤样本中的离子活度转化成一定的电位指标数据;然后按照电位与线性关系的计算公式,最终能够确定某一重金属成分在土壤检测样本溶液中的占比结果。此外,电位溶出分析法的重金属检测原理在于观察电极表面上的富集物质变化规律,并借助化学试剂来促进待检测土壤样本发生氧化还原的反应,从而实现快速溶出土壤重金属的目标。

## 三、土壤重金属检测技术的发展趋势

### (一) 精细化

土壤重金属的检测技术目前正在朝着精细化的方向转型,环境监管部门在联合采用多种检测仪器或者技术方法的前提下,可以显著降低土壤中有害金属元素检测结果的误差率,对于提升土壤重金属检测结果的精准度具有深远的影响。未来时期的土壤重金属检测仪器将会呈现出更低的检出限,经过计算机自动验证的检测结果数据更符合土壤环境污染的实际情况。例如在微电子技术获得广泛应用的发展趋势下,环境监测部门主要采用微电子技术、物联网技术、云计算技术相结合的人工智能检测系统,旨在进一步改善土壤重金属检测的试验环境,确保最终检测结果的精准度以及可靠性符合要求。

例如,环境磁学检测技术主要应用了土壤有害重金属物质的磁性特点,从而将一定强度的电流施加于待检测的土壤样本表面。基于此,技术人员即可通过观察待检测土壤样本产生的“对外加磁场效应”,并通过判断土壤重金属成分的磁参数特征指标,进一步确定土壤重金属的种类与数量。与传统的土壤重金属检测手段相比,采用环境磁学检测技术不会造成土壤生态环境的二次污染,并能够明显提升土壤重金属污染的检测实施效率。环境磁学检测技术原理下的土壤有害重金属分布规律将会表现得更加清晰,技术人员通过观察可视化的检测结果图像,能够精准获取土壤重金属污染有关的元素分布规律、严重等级、发展趋势等特征指标。

### (二) 智能化

现阶段的土壤重金属检测技术逐步趋向于智能化以及自动化,人工智能技术与土壤重金属检测的融合程度不断加深。高精度的物联网检测仪器能够远程识别土壤中的有害重金属类型及其含量,总体上达到了节约土壤污染检测成本、提升检测作业效率等目的。为推动土壤重金属检测的设备与方法创新,相关部门应充分利用数字化的物联网设备。并需要进一步加强针对操作人员的技能培训,确保操作人员能够掌握物联网传感仪的技术原理、作业流程、数据采集与分析步骤等,以期在根源上降低土壤重金属检测的误差率。

近些年来,国内研究人员正在致力于“太赫兹光检测技术”在检测土壤重金属污染方面的应用可行性调研。现阶段的国内研究人员倾向于认为,太赫兹光检测技术能够直接判断分子之间以及分子内部的振动频率。由于

待检测土壤样本的分子之间以及分子内部会在氢键与微观力学作用下呈现出相互激励的效应，从而产生振动并吸收一定的能量，因此环境检测人员就能够以此为依据判断土壤重金属污染的严重等级。然而截至目前为止，“太赫兹光检测技术”在土壤重金属检测领域的应用仍处于起步阶段，该技术手段的推广与普及仍面临着成本过高的问题。建构人工智能的土壤重金属检测实施方案，还应当体现在优化资源配置，充分依靠数字技术降低检测作业负担，简化土壤重金属检测的操作流程。

### （三）协同化

检测土壤有害重金属的实施过程存在复杂性，因此凭借单一的机构或部门很难保证制定出最佳的土壤生态修复或者污染防控方案。未来时期的土壤重金属检测技术将会呈现“机构协同”的变化发展趋势，在打破专业或机构界限的基础上增进各业务领域人员的协作，着眼于源头防范土壤重金属威胁。技术人员在检测土壤有害重金属成分时，应当突破单一的技术手段局限，促进多种检测仪器或者技术方法的联合采用。环境检测机构只有长期坚持协同化的土壤重金属检测实施原则，才能够在最大限度内节约环境检测经费，打造机构协同、专业协同的土壤重金属检测新模式。

例如，早在上世纪80年代的中后期，域外研究人员就尝试将生物学的检测技术应用于土壤污染检测领域。截至目前为止，土壤重金属检测实践中的生物学检测方法已经较为成熟、完善，集中体现在酶分析法、免疫分析法、生物传感器分析法等。在现有的土壤重金属生物学检测技术范围内，应用最为广泛的一类方法就是免疫分析法，该方法主要用于测定土壤中的有机污染成分。具体需要选择特定的金属络合物，使得金属络合物与土壤金属离子发生某种反应<sup>[5]</sup>。由于金属络合物加入待检测土壤样本导致的影响，就会促使检测载体蛋白上的物质免疫特性发生变化，技术人员能够据此推断得出土壤样本中的重金属类型、含量与浓度。例如，“生物量间接测定技术”主要利用了部分生物基因在表达过程中出现发光的特质，从而借助高精度的遥感设备接收其发射的光谱；然后环境检测人员针对光谱特征展开详细的分析，最终确定有害重金属在土壤中的实际含量。生物传感器属于近些年来新兴的快速检测仪器，该仪器能够远距离

探测一定深度土壤中的重金属物质，方便技术人员实时读取传感仪的传输与显示数据。尤其是在检测汞离子、铅锌等土壤有害重金属成分的实践中，利用生物传感器可以在较短时间里获取土壤污染检测数据，并能够节约样本处理的前期投入成本。近些年来，国内研究人员着眼于酶抑制法在土壤重金属污染检测领域的可行性分析。现阶段的研究人员普遍认为，采取酶抑制法用于测定土壤中的有害重金属成分具备良好的可行性，该检测方法具有操作简便、用时较短、采样量较小等优势，因此适合应用于复杂地质环境下的土壤污染检测。

### 结束语

综上所述，土壤重金属检测的实施过程不能够缺少自动化、智能化的仪器设备，并应当建立在物联网传感技术作为支撑的基础上。与单一的土壤重金属检测形式相比，联合采用多种检测仪器或方法的土壤重金属检测模式更加贴合实际需要，客观上起到了降低成本与提升精准度的土壤有害物质检测目标。为更好地发挥土壤重金属检测技术的功能，环境监管部门需坚持因地制宜的指导原则，做到全面评估土壤遭受重金属污染的根源因素。在打破机构局限以及专业边界的前提下，推动土壤重金属检测领域的信息共享，健全土壤重金属检测的评价指标体系。

### 参考文献

- [1] 袁佳旭. 基于智能机械的土壤重金属污染快速检测技术实验研究[J]. 数字农业与智能农机, 2025(09): 26-29.
- [2] 孟凤娇. 便携式金属测定仪在化工园区周围土壤重金属检测中的应用[J]. 中国资源综合利用, 2025, 43(08): 46-48.
- [3] 李睿, 卢杰, 许文燕等. ICP—MS技术在土壤重金属污染研究中的应用现状及未来发展趋势[J]. 现代农业研究, 2024, 30(11): 46-51.
- [4] 张静, 赵倩, 穆琳. 土壤重金属检测方法应用现状及发展趋势[J]. 天津化工, 2022, 36(06): 25-28.
- [5] 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.