

# 土壤重金属污染分析及污染治理技术研究进展

李钦森 栾文峰

山东洁行特检测有限公司

**摘要:** 该研究以土壤重金属污染分析及治理技术为重点, 讨论高通量分析技术用于土壤重金属检测的优越性, 评价先进治理技术的环境友好性与可持续性促进作用。本文对土壤重金属污染检测方法进行了详细阐述, 主要包括样品前处理, 原位分析, 生物标志物的应用以及统计学方法对数据处理的关键性作用。同时提出包括物理稳定化, 化学修复和生物修复在内的多维治理策略, 强调策略性综合治理在实践中的意义。综合分析结果表明: 综合性策略是实现土壤重金属有效治理与控制的关键。

**关键词:** 土壤重金属污染; 分析技术; 治理技术

【DOI】10.12252/j.issn.2096-6261.2022.06.240

## 引言

土壤污染已成为全球性的环境问题, 其中重金属污染尤为突出, 给生态系统及人类健康带来极大的威胁。由于重金属具有持久性、生物累积性等特点, 对其污染分析、治理技术等方面的研究及进展就变得尤为紧迫。文章首先论述高通量分析技术对于土壤重金属检测的意义和先进治理技术对于环境可持续性发展的作用。然后, 对目前土壤重金属污染的分析方法及策略进行了深入讨论, 并对其在实践中所面临的挑战及展望进行了展望。该研究旨在为土壤重金属有效监测与控制提供科学依据与技术支撑, 从而推动环境管理与政策制定科学化与精准化。

## 一、土壤重金属污染分析及污染治理技术的重要性

### 1. 高通量分析技术在土壤重金属检测中的应用优势

环境监测领域中应用高通量分析技术已经成了检测土壤重金属污染的有力手段。这些技术可同时快速、准确地定量分析多样多种污染物, 显著提高土壤污染分析效率与效能。在自动化样品处理系统及高效数据处理软件支持下, 采用高通量技术缩短样品分析所需时间及人为误差, 增加实验结果重复性及可靠性。以高通量分析技术为例, 用几个小时就能完成数百个土壤样品重金属的检测, 传统方法检测重金属可能要几天甚至几个星期。另外, 像ICP-MS和同步辐射X射线荧光分析这样的高通量分析方法, 在检测土壤中的微量重金属时, 其灵敏度和准确度都表现得相当出色。这类技术具有对不同物理、化学形态重金属进行判别的功能, 对于了解重金属在土中的行为及其生物有效性具有重要意义。利用高通量分析可揭示重金属在不同土壤类型及环境条件中的分布与迁移情况, 从而为污染源识别及风险评估等提供科学依据。高通量的发展也导致检测限下降, 即使污染水平较低, 土壤重金属仍能被精确地监测。伴随着检测

技术的不断发展及普及应用, 今后将有可能在更为广阔的地理区域开展重金属污染监测及评价工作, 这对于环境保护及公共健康具有深远影响。

### 2. 先进治理技术对环境友好性和可持续性的贡献

对环境友好与可持续性的追求推动了各种先进土壤重金属治理技术的发展。这些技术的目的是在尽可能小的程度上降低污染物生物可用性和生态风险。例如, 固化/稳定化方法是通过加入特定的结合剂, 例如矿物或有机聚合物, 将重金属离子固定在土壤粒子上, 从而降低了它们的流动性和生物可用性。进一步通过化学沉淀法可以使土壤重金属变成不溶性化合物以达到有效分离去除重金属的目的。

## 二、土壤重金属污染分析的方法

### 1. 样品前处理与分析方法的优化

土壤样品前处理工作是非常关键的环节, 直接影响重金属分析结果准确可靠。对该过程进行优化, 能够有效地促进检测效率以及分析数据质量。前期处理时, 一般要对土壤样本进行干燥, 研磨及筛分, 确保其均质性及代表性。再依据不同分析方法选择适宜的萃取或消解技术使土壤重金属变成可检测形态。当前微波消解技术具有效率高, 速度快, 可降低样品污染及消解剂用量等特点, 在土壤样品前处理中得到了广泛运用。通过对微波消解流程的优化, 包括调整消解的温度、时间、压力以及酸的种类和比例, 我们能够有效地从土壤中提取多种重金属。另外, 利用超声波辅助及酶促提取这些非传统手段, 研究人员还考虑将其应用于提高重金属提取效率及选择性。对分析方法进行优化也必不可少。伴随分析技术的进步, 例如原子吸收光谱(AAS)、原子荧光光谱(AFS)和电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)等技术在灵敏度和准确性上都得到了显著的提升。通过微测仪器的各项参数, 例如灵敏度、分辨能力和检测界限,

以及采纳新的标准物质和校正方法,分析技术的表现得到了明显的提升。这样就可以保证连土壤里微量重金属都能精确地检出。

### 2. 原位分析技术在土壤污染诊断中的应用

原位分析技术是诊断土壤重金属污染不需要大量前期处理,快速,直接的方法。该类技术可直接用于野外土壤分析,规避样品运输与存储过程中潜在的污染与改变,以保证数据及时准确。X射线荧光光谱技术作为一种普遍应用的原位分析手段,能迅速而无损地对土壤样本进行分析,并能直接提供各类元素含量的详细信息。利用便携式X射线荧光光谱分析器现场人员可方便地获取土壤重金属污染初步信息,对现场的快速筛选及污染范围界定是极有帮助。近红外光谱和拉曼光谱技术在土壤原位分析方面也展示了巨大的应用潜力。这些先进技术能为我们提供关于土壤有机质和矿物质组成的有用信息,从而有助于我们更准确地判断重金属的形态以及可能的污染源。随着光谱设备便携化以及数据处理算法的改进,这类技术正日益被用于原位土壤分析。另外地球化学探针及传感器的发展也为针对具体重金属离子进行原位实时监测提供了可能性。这类传感器可长时间布设于土壤并持续监测重金属浓度变化情况,为深入了解土壤重金属动态行为及评价污染治理效果等提供一种重要手段。

### 3. 生物标志物技术在污染评估中的作用

评价土壤重金属污染不仅仅依赖于物理、化学分析方法,生物标志物技术为利用生物学反应为手段来指示污染所产生的效应提供了强有力的工具。生物标志物泛指生物体中某些化学物质,生物分子或者生物学变化等,它们可用作环境污染的生物学证据。这一技术对于评价污染生物可利用性及其生态风险特别具有价值。通过检测特定植物,微生物或者土壤动物等生物标志物可评价土壤重金属生物效应。如植物在积累某一重金属时,有些酶活性可发生变化或产生某一应激蛋白。类似地,微生物群落结构改变或者一些代谢活动受到抑制都可被用作生物标志物指示土壤重金属污染程度。生物标志物技术最主要的优势之一就是可以提供生态效应方面的数据,而这些数据仅仅依靠化学分析并不能得到。它们帮助人们理解污染物在生物体中的作用机制及污染物可能对生态系统健康与功能产生的影响。另外,很多生物标志物高度敏感,可在环境污染水平未达到危险阈值之前指示潜在风险。但生物标志物技术同样面临着某些挑战,例如对生物标志物进行筛选要求具有特定生物学

意义以及生物标志物在不同生物体中表达会随着环境条件及生物体本身不同而有所不同等。所以生物标志物技术要想得到有效运用,就必须要对生态系统有一个深刻的认识,同时还要认真地研究生物标志物和污染水平的关系。

### 4. 统计学方法在污染数据处理中的应用

对土壤重金属污染的数据处理中统计学方法起了核心的作用。这些方法有助于研究者从纷繁复杂的数据中挖掘出有意义的信息、确定污染模式、评价污染源和预测污染物在环境中的行为。运用统计分析,提高土壤污染评价与治理的科学性与准确性。地统计学、空间插值技术等空间统计学方法使得研究人员可以根据有限样点对研究区整体污染状况进行评价并产生污染分布图。如采用克里金插值方法可基于采样点数据对未采样位置进行污染水平预测,进而提供更加完整的污染空间分布视图。利用多元统计技术,例如主成分分析(PCA)和聚类分析,我们可以确定污染源和污染物的具体来源。利用这些技术可使数据归结为若干主要组分或群组以揭示不同污染源对其贡献程度,有助于区别自然背景值和人为污染。回归分析又是预测土壤中污染物浓度和环境因子间关系的重要统计工具。通过构建回归模型可对具体环境情况下重金属污染可能存在的风险进行预测,从而为制定污染防控策略奠定基础。另外,不确定性分析与风险评估模型往往与统计学方法相结合,共同评价重金属污染可能给人类健康及生态系统带来的影响。通过上述方法可对污染风险进行定量研究,为污染物管理与决策提供科学依据。

## 三、土壤重金属污染治理技术的策略

### 1. 物理稳定化技术:减少重金属的生物可用性

为了应对土壤中的重金属污染,物理稳定化技术是其中一个策略,旨在降低重金属的生物可用性,从而减少它们对环境和人类健康的潜在风险。这种技术在不彻底清除土壤重金属的前提下,限制污染物迁移及其生物有效性,从而达到污染控制目的。物理稳定化主要有固化,封存等方法。固化方法包括向被污染的土地中加入如水泥或石灰这样的结合剂,目的是降低重金属的流动性和其生物可用性。结合剂和重金属反应生成较稳定复合物使其溶出受到限制。封存的目的是利用物理屏障,如塑料膜或黏土层,来隔离被污染的土壤,防止污染物进一步传播。另外,可通过土壤洗涤,电动力学修复以及固化等技术实现重金属的稳定。土壤洗涤是指用水或化学试剂洗涤土壤中的重金属,再经沉降和过滤后的

洗涤液。电动力学的修复方法是在土壤中产生电场，从而驱动带电的重金属离子向电极方向移动。固化化技术的目的是将重金属转化为更为稳定的形态，例如硫化物或磷酸盐，从而降低它们在土壤中的活跃性。物理稳定化技术对于治理大范围污染土壤效果特别好，这是因为这类技术一般造价低廉、操作简单、对土壤结构损害比较小。但他们不会去除土壤重金属，所以可能要配合其他修复技术才能达到对土壤的长期管理及再利用。

### 2. 化学修复技术：通过化学反应降低重金属毒性

另一类土壤重金属污染治理策略为化学修复技术，涉及利用化学手段改变重金属形态或者化学状态进而减少其毒性及生物可用性。化学修复技术可以实现对具体污染场地进行定制化处理。通过加入如石灰石、磷酸盐或硫化物这样的化学试剂，我们能够将可溶解和生物可利用的重金属转化为不溶于水的矿物形态。比如石灰石能促进土壤pH升高，使镉、铅等重金属产生沉淀并减少它们在土壤溶液里的富集。化学稳定化技术又包括螯合剂和络合剂的应用。这类物质可与重金属离子生成稳定螯合物或者络合物以降低重金属迁移性及生物可用性。但由于所加化学物质有可能造成环境二次污染，此法需谨慎。纳米材料还被越来越多地用于化学修复，因为纳米材料具有比表面积大、反应活性高等特殊性能而被吸附、在土壤重金属转化与去除上表现出了很大的潜力。如纳米零价铁可以还原部分重金属离子生成难溶金属颗粒。化学修复技术可快速降低污染土壤重金属生物可用性，但这些技术通常费用昂贵，而且可能需前期深入调查才能找出最合适的化学改良剂。另外，实施上述技术还需兼顾长期环境安全和生态平衡，以免造成新环境问题。

### 3. 生物修复技术：利用植物和微生物实现重金属去除

生物修复是指利用生物体特别是植物，微生物等对土壤重金属进行清除，改造或者稳定的技术。植物能够通过对重金属的吸收，累积与转化达到净化土壤的目的，这就是植物修复。一些植物种类对重金属有很高的耐受和累积能力，能把重金属吸收到土壤中在体内累积起来，然后可对其进行收割和安全处理，从而达到清除土壤污染物的目的。就微生物修复而言，具体的微生物如细菌，真菌，藻类等还可以在生长的同时对重金属进行吸收与转化。微生物可直接使金属变成较稳定且毒性较小的形式，也可通过吸附富集作用对重金属生物可用性产生间接作用。比如一些细菌可以通过生物沉淀把溶解性重金属变成不溶性的形态，真菌则可以通过生物

吸附把金属离子吸附到它们的细胞壁。生物修复技术成本低，环境友好，公众接受度高。另外，该项技术还能恢复污染土壤生态功能而不损害土壤结构及肥力。然而，生物修复过程受土壤类型，气候条件，污染程度以及生物种类等诸多因素影响，清理过程也会耗时很长。

### 4. 策略性综合治理：结合政策和技术的多方位治理途径

策略性综合治理就是要综合运用政策法规，技术开发与实施，社会参与及环境监测等诸多要素，构成处理土壤重金属污染的系统方案。该方法既兼顾了目前修复需求又注重了长期土壤健康可持续发展。在政策层面，建立严格的排放标准与污染控制规定为根本，其要求污染源头必须降低重金属排放。同时政府可推进立法以保障污染地块修复职责清晰并推广污染预防与土壤管理最佳做法。通过税收优惠，补贴及财政支持等经济激励措施可激励企业与农户采取环境友好型操作。从技术上讲，物理稳定化，化学修复与生物修复相结合，可根据不同污染物，不同土壤类型与不同场地条件，制定出最佳修复策略。同时，利用现代技术，例如遥感和地理信息系统，可以有效地监控土壤污染情况，评估修复效果，并进行污染风险评估。社会参与还是综合治理策略必不可少的组成部分。提高公众意识，构建社区参与机制以及进行教育培训等措施可加强公众对土壤重金属污染的感知并推动利益相关方主动参与。策略性综合治理也需要不断地进行环境监测与土壤质量评估来保证修复措施实施的效果以及对治理策略进行及时地调整。

### 结束语

对于土壤重金属污染进行分析和处理，需要利用高通量和高灵敏度检测技术对分析方法进行持续优化，从而对污染程度进行准确评价。同时综合运用物理，化学及生物等多种手段进行综合治理策略对污染土壤修复与可持续管理具有重要意义。今后的研究应该更加注重策略性综合治理在实际工作中的运用，并建立健全相关的政策及技术体系，以实现更加有效地土壤污染治理及环境保护。

### 参考文献

- [1] 高连东, 吴丛杨慧. 重金属污染土壤修复技术及其研究进展[J]. 环境与发展, 2020, 12.
- [2] 张松柏. 重金属污染土壤的修复技术探讨[J]. 环境与生活. 2014, 04.
- [3] 于家峰. 重金属污染土壤修复技术及其修复实践[J]. 科技创新导报, 2020, 13.