

# Overview of soil heavy metal pollution control technology and application

Xiaoling Sun

Nanjing Yuanheng Environmental Research Institute Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu, 210000, China

## Abstract

The rapid advancement of industrialization and urbanization has intensified the issue of soil heavy metal pollution, making it a critical focus in global environmental research and remediation. This article systematically reviews the research progress and current application status of soil heavy metal pollution control technologies. It begins by outlining the primary sources of heavy metal pollution and their mechanisms of migration and transformation within the soil. It then provides a comprehensive review of the principles, advantages, and disadvantages of physical, chemical, biological, and integrated remediation techniques for soil heavy metal pollution, and explores the practical applications and potential of emerging technologies such as nanotechnology and plant-based extraction. Finally, it summarizes typical cases and promotion experiences of soil remediation projects both domestically and internationally. The findings indicate that different remediation technologies exhibit significant differences in effectiveness, cost, and ecological impact. The integration of multiple technologies is seen as the future direction, and this review can serve as a valuable reference for the governance of soil heavy metal pollution and related policy formulation.

## Keywords

soil heavy metal pollution; pollution control technology; remediation engineering

# 土壤重金属污染治理技术与应用综述

孙晓玲

南京源恒环境研究所有限公司, 中国·江苏·南京 210000

## 摘要

工业化与城市化的加速发展使得土壤重金属污染问题日益严峻, 已成为全球环境研究与修复的重点领域。本文系统梳理了土壤重金属污染治理技术的研究进展与应用现状。首先概述了重金属污染的主要来源及其在土壤中的迁移转化机制; 接着重点综述土壤重金属污染物理、化学、生物修复及联合治理技术的原理、优劣, 并探讨了纳米技术、植物提取修复等新兴技术的实际应用与潜力; 最后总结了国内外土壤修复工程典型案例及推广经验。结果表明, 不同修复技术在治理效果、成本和生态影响上差异明显, 综合运用多种技术是未来的发展方向, 本综述可为土壤重金属污染治理及相关政策制定提供参考。

## 关键词

土壤重金属污染; 污染治理技术; 修复工程

## 1 引言

工业化和城市化的飞速发展导致土壤重金属污染问题越发突显。土壤重金属污染不仅影响农产品的安全与质量, 从而危害人类食品安全, 还对生态系统稳定性和生物多样性造成显著影响。全球早已意识到, 土壤重金属污染是环境问题的核心挑战之一, 必须依靠科学和技术的协力奋斗来解决。本文全面审视和探讨了土壤重金属污染的治理技术的研究进展和应用现状。从土壤重金属污染的源头到当前的治理措施, 均有科研人员在坚持钻研、攻克难题。不同土壤修复方法的优劣和适应性有显著差异, 采用多种污染处理技术的

有效方案备受关注, 通过总结研究, 本文旨在为土壤重金属污染处理提供科学的详实指导和技术资料, 为环境的可持续发展和管理、政策制定提供有力的理论依据。

## 2 土壤重金属污染概述

### 2.1 重金属污染的全球性质

重金属污染已成为全球环境问题的核心部分, 其分布广泛且影响深远, 引起全世界的广泛关注, 工业化和城市化的快速推进是导致污染范围扩大的主要原因之一。常见的污染金属包括铅、镉、汞、砷、铬、镍等, 这些金属性质稳定且不易分解, 对土壤生态系统和人类健康构成潜在威胁, 污染呈现局部和全球累积的特性, 在农业种植区、工业废弃地、城市扩展区域表现尤为明显, 重金属污染的全球分布存在显著差异, 与各地的产业结构、生产方式、经济发展阶段联系紧密<sup>[1]</sup>。

**【作者简介】**孙晓玲(1992-), 女, 中国山东昌邑人, 硕士, 工程师, 从事环境管理研究。

发达国家普遍经历持久工业化引发的遗留污染问题，发展中国家工业化速度更迅速、监管力度不足，污染问题出现并快速扩散。污染土壤会毁坏肥力和结构，难以保持植物正常生长，通过食物链传递进一步危害人类健康，造成渐进性损害。超标重金属浓度还会威胁土壤中微生物群落，导致地表水和地下水质量下降，产生不利影响，从而形成生态系统整体危害。重金属污染问题生态、社会、经济影响显著，已成为国际环境治理政策和研究的关键领域。增强全球合作和区域协调治理能够有效控制危机，提供重大机会，推动土壤修复技术持续创新和广泛应用。

## 2.2 重金属污染的来源

重金属污染的来源包含天然背景因素和人为活动两大类。天然背景因素如岩石风化、火山喷发等自然地质过程，排放出的重金属元素通过水流传输或者风力扩散，渗透进土壤，形成土壤重金属污染的天然基础<sup>[1]</sup>。人为活动转变为重金属污染的关键来源，工业生产、城市建设、农业活动等对土壤环境质量产生重大影响。工业生产过程中，冶金、矿产开采、化工生产等活动排放大量的重金属废弃物，污染物经由释放和沉降渗入土壤，导致土壤环境质量产生严重的污染问题。城市建设领域，交通排放、大气沉降、垃圾填埋等活动加剧了土壤重金属的积累程度。农业生产采用化肥、农药、污水灌溉也是重金属污染的关键途径，化肥、农药、污水灌溉的过程进一步提高了土壤重金属的含量。人为活动导致的重金属污染干扰土壤质量，对生态系统和人类健康造成潜在威胁，污染的复杂性和持久性增加了治理重金属污染的难度。

## 2.3 金属在土壤中的迁移和转化机制

土壤中的重金属拥有复杂的迁移和转化机制，作用于环境行为和生态风险。重金属在土壤中扩散、流动和机械混合进行迁移，其化学形态因转化过程出现而发生变化<sup>[2]</sup>。重金属与矿物颗粒、有机质及氧化物发生剧烈的吸附和解吸作用，影响其溶解能力和生物有效性。土壤的理化性质，酸碱度 pH、氧化还原电位 Eh、离子强度等土壤理化性质会影响重金属的稳定性和反应活性。重金属在土壤中发生沉淀、络合及氧化还原反应，形成多种化学形态，如游离态、络合态及晶体态，这些形态决定了重金属的毒性和迁移能力。微生物代谢活动通过生物地球化学作用参与重金属的转化过程，改变重金属存在状态。再复杂的土壤系统中，重金属迁移转化具有动态特性，影响修复过程的难度和效果。研究这些机制为土壤污染治理提供了基础理论支持。

# 3 土壤重金属污染的治理技术

## 3.1 物理治理技术

物理治理技术是一类通过改良土壤的物理性质或者经由物理过程清除或分离重金属污染物的修复方法，它的特点是为实施简便、治理效能较高，于一些特定污染场景中拥有

重大应用价值<sup>[4]</sup>。例如：土壤换置技术是一种直接移走污染土壤并以清洁土壤置换的治理方法，适合于重度污染区域，但需要较高的投入成本和后续管理强度。固化/稳定化技术通过添加固化剂或稳定剂，使重金属污染物丧失迁移转化的能力和溶解性，从而减少对于环境的风险，适合于需快速减少污染危害的场地，但可能导致长时间环境安全问题。

热处置技术通过高温处置土壤，使其分化或者挥发某些重金属污染物，从而达到治理目标。它的优点是清楚完全污染物，但是耗能偏高，并且或许可能导致土壤性质改变。电动修复技术为一种依靠电流传输的物理过程，经由电场效应推动重金属离子移动，因此实现抽取与隔离的目的，此类技术对于污染物的清除功效相对明显，但是受限于土壤条件与污染物性质。物理治理技术于实际应用中展现出治理效能较高、技术成熟水平较高的优点，但是其应用范围和适用土壤类型受限，并且成本通常偏高。与其他的治理方法相较，物理技术一般在临时性治理或污染源控制中发挥关键作用，然而在常规修复项目中需与别的技术结合使用，以达成更好的修复效果。

## 3.2 化学修复技术的原理和应用

化学修复技术是治理土壤重金属污染的重要方法，通过向污染土壤中加入化学试剂，转变重金属形态或者降低重金属生物毒性，显著改善土壤环境质量<sup>[5]</sup>。化学修复技术包含固化/稳定化、化学淋洗和氧化还原修复等多种方法。固化/稳定化技术采用化学试剂与重金属产生化学作用，生成低溶解度化合物，减少生物的可利用性。化学淋洗技术是通过输入特定的试剂溶液，将重金属从污染土壤中去除。化学修复技术修复效率高且具有多种优势，但应用具有一定限制，采用化学试剂或许引发新的污染问题，例如盐分累积或二次污染，因此，在应用化学修复技术时，必须评估修复区域地质特点及污染物物理化学性质，根据具体污染情况选择适宜技术和试剂，实际应用中，化学修复技术经常与其他修复方法一起使用，实现生态、经济及修复效果的最佳平衡。

## 3.3 生物修复技术的研究进展及限制

生物修复方法是处理土壤重金属污染重要手段，具有生态友好和可持续发展特性。生物修复方法包含微生物修复和植物修复，微生物修复通过运用微生物代谢功能，将重金属转化为低毒性形态或稳固在土壤中。植物修复利用超富集植物吸取或固定土壤中的重金属，慢慢获得广泛关注。生物修复方法再修复过程展现出明显的生态友好性和成本效益优势，但修复周期较长，处理效果受土壤性质和污染物浓度多种因素的制约。

# 4 新兴治理技术的应用与潜力分析

## 4.1 纳米技术在污染治理中的应用

纳米技术作为一种先进科学技术，在环境污染治理领域展现出广阔的应用前景。在土壤重金属污染治理中，纳米

材料由于特殊突出物理化学特性取得众多关注。纳米材料具有较高比表面积、特殊电子结构和强劲卓越吸附能力,显著提高去除重金属离子效率。常见的纳米材料包括零价铁纳米颗粒、二氧化钛纳米颗粒、纳米羟基磷灰石,被广泛应用于稳定土壤中重金属离子。零价铁纳米颗粒是一种经典的纳米材料,其还原特性和吸附特性使其可以清除土壤中铅、镉、六价铬等重金属离子。

零价铁通过氧化还原反应把重金属离子转变为稳定状态,从而降低土壤中重金属的移动性和环境危害。二氧化钛纳米颗粒依靠光催化性能,能在太阳光或紫外光照射下降解土壤中的有害物质,并且借助吸附作用稳定重金属,广泛应用于治理污染。纳米羟基磷灰石作为高性能固定化材料,通过离子交换和化学沉淀等机制,把重金属稳定为不易溶解的稳定形态,显著降低污染物的生物可利用性。

虽然纳米技术在治理土壤重金属污染方面拥有突出优势,但是实际推广应用依然遭遇一些困难和挑战。譬如纳米材料的昂贵生产成本还有隐性的二次污染风险,限制了在大规模土壤修复中的使用。土壤颗粒结构、重金属种类、污染程度的复杂性,决定了纳米技术在现实治理过程中必须实施专门地调整与改进。未来需要更深入地研究纳米材料的绿色合成工艺、和其它修复技术的融合使用,以提升经济性和环境友好性,为纳米技术于土壤修复中的全面推广给予支持。

#### 4.2 植物提取修复技术探讨

植物提取修复技术依赖绿色特性和相对较低经济成本,已成为为土壤重金属污染治理的关键研究方向。该技术运用特定植物吸收并积聚重金属,实现污染土壤整治工作。超富集植物是植物提取治理技术的核心,它们具有强大的吸收能力,并能在高强污染环境保持非常良好的生长性能。常见的超富集植物包括蜈蚣草、向日葵、蕹菜,其依靠根系摄取土壤重金属,将重金属转移至地上部分,降低土壤重金属含量。

植物提取治理技术效果主要取决于重金属种类、植物种类、土壤性质、地理环境因素。在重金属污染较为严重的土壤环境中,植物提取技术可作为一种有效的恢复手段。通

过加入螯合剂或微生物菌剂等外部改良方法可以提高植物摄取重金属的能力效果,提高修复效率水平。植物提取技术具有一些局限性。修复过程费时较长,污染物清除效率受到植物生理特性约束,必须处置含重金属的植物材料,预防二次污染出现。最新研究显示,采用基因改良技术能增强植物耐受重金属和聚集重金属的能力,提高植物提取技术的实际应用效果。新基因工程方法已顺利培养出能高水平聚集多种重金属的植物,克服了传统植物提取修复效率低和重金属种类受限的问题,为土壤修复领域提供了高性能的新方法。植物提取修复技术能够保护生态系统并提升土壤健康,具备非常广泛的应用可能性,是推动土壤修复领域可持续发展极其重要的方法。

## 5 结语

本文系统研究了土壤重金属污染治理多种技术,详细总结了各种技术原理、优势和局限性,为土壤重金属污染治理提供了科学指导和技术参考。不同治理技术在治理效果、经济成本和生态影响方面存在明显不同,综合运用多种治理技术,开发新颖高效的新兴技术,例如纳米技术和植物提取修复技术,成为未来研究主要重要方向。研究还相关政策制定和环境管理提供可靠的理论基础。尽管已经获得一定的研究成果,但由于土壤重金属污染具有非常复杂特点,并且对自然环境和人类健康造成的影响较为深远,相关研究仍需深入进行,以找到最好高效且节省成本治理方案。

### 参考文献

- [1] 史作然,单广波,杨丽,刘宇.土壤重金属污染修复技术综述[J].当代化工,2020,(08):1812-1815.
- [2] 邓娟,冯婧.土壤重金属污染治理修复技术探讨[J].资源节约与环保,2020,(08):93-93.
- [3] 刘彦宏.重金属污染土壤植物修复治理技术[J].环境与发展,2020,32(10):85-85.
- [4] 熊从洲.土壤重金属污染治理修复技术[J].数字农业与智能农机,2023,(03):31-33.
- [5] 曲永军.土壤重金属污染修复技术[J].乡村科技,2021,12(10):97-98.