

# 土壤重金属污染现状及生态修复技术比较研究

段保军

甘肃省庆阳生态环境监测中心

DOI:10.12238/eep.v7i11.2341

**[摘要]** 土壤重金属污染作为全球重大环境问题,对人类健康和生态安全构成严重威胁。本研究深入剖析我国土壤重金属污染现状与特点,全面对比多种生态修复技术,旨在为不同污染情形提供最优修复策略,为我国土壤重金属污染治理筑牢理论与技术根基。

**[关键词]** 土壤重金属污染;生态修复技术;现状;策略

中图分类号: N945.11 文献标识码: A

## Comparative study on the status quo of soil heavy metal pollution and ecological restoration technologies

Baojun Duan

Gansu Qingyang Ecological Environment Monitoring Center

**[Abstract]** Heavy metal pollution in soil is a major global environmental problem that poses a serious threat to human health and ecological security. This study deeply analyzes the current status and characteristics of heavy metal pollution in soil in my country and comprehensively compares a variety of ecological restoration technologies, aiming to provide the best restoration strategy for different pollution situations and lay a solid theoretical and technical foundation for the governance of heavy metal pollution in soil in my country.

**[Key words]** heavy metal pollution in soil; ecological restoration technology; current situation; strategy

随着工业化和城市化进程加速,土壤重金属污染问题愈发严峻。《土壤污染防治行动计划》的出台凸显了对土壤环境问题的重视。土壤是生态系统的关键组成部分,其质量关乎农业可持续发展和人类健康。然而,重金属污染因其自身特点,如不易降解、隐蔽性强和生物富集性,对土壤的破坏日益加剧,引发粮食减产、品质下降等问题,威胁人类健康,开展相关研究迫在眉睫。

### 1 土壤重金属污染现状

#### 1.1 污染特点

##### 1.1.1 地域分布不均

土壤重金属污染呈现出显著的地域性差异。中部地区堪称污染的“重灾区”,这与该地区长期以来作为重要工业基地和农业产区的产业结构及发展历史紧密相关<sup>[1]</sup>。以湖南为例,其作为有色金属之乡,大规模的矿产开采和冶炼活动频繁,大量重金属污染物随废渣、废水肆意排放,致使土壤重金属含量严重超标。山西凭借丰富的煤炭资源,在煤炭开采及煤化工产业蓬勃发展的过程中,也不可避免地导致土壤中重金属的大量累积。相比之下,东部地区尽管经济发达,但随着环保意识的不断提升以及一系列环境治理措施的强力实施,污染程度较中部地区明显减轻。而西部地区由于工业发展相对滞后,土壤重金属污染整体处于相对较低水平。这种地域分布不均的特征,要求在制定污染治理

策略时,必须因地制宜,充分考量不同地区的实际情况,实施精准治理。

##### 1.1.2 污染物以无机元素为主

在众多土壤污染物中,重金属主要以无机元素形态存在,其中镉(Cd)、汞(Hg)、镍(Ni)、铬(Cr)、锌(Zn)等元素是最为常见的污染物质。尤其值得关注的是,镉元素的超标现象最为严重。镉在土壤中的来源广泛,有色金属冶炼、电镀、化工等工业废水的无序排放,以及长期施用含镉磷肥等农业活动,均是其重要来源。镉在土壤中具有较高的活性,极易被植物吸收并在植物体内富集,随后通过食物链进入人体,对人体肾脏、骨骼等重要器官造成不可逆的损害。汞元素毒性极强且具有挥发性,可通过大气沉降进入土壤,对土壤生态系统产生严重危害。镍、铬、锌等元素在工业生产过程中排放量巨大,其在土壤中的过量累积会显著改变土壤的理化性质,抑制土壤微生物活性,干扰植物的正常生长发育<sup>[2]</sup>。

##### 1.1.3 治理难度大

重金属污染物在自然条件下具有高度的稳定性,难以通过常规的物理、化学和生物手段实现有效降解。它们易与土壤胶体发生吸附、络合等复杂相互作用,形成稳定的结合态,从而导致重金属在土壤中的迁移性和生物有效性发生显著改变。同时,重金属污染还会引发土壤pH值的变化,进一步影响土壤中重金

属的化学形态和生物可利用性。例如,在酸性条件下,部分重金属离子的溶解度大幅增加,更容易被植物吸收或随地表径流迁移,进而扩大污染范围。这些因素相互交织、相互影响,使得土壤重金属污染的治理工作面临诸多挑战,需要综合运用多种先进技术手段,并经历长期不懈的治理过程。

### 1.2 污染危害

土壤重金属污染对农业生产和人类健康产生了深远而严重的影响。从农业生产角度来看,重金属污染严重阻碍农作物的生长发育,致使农作物产量显著降低。重金属可干扰植物的光合作用、呼吸作用等关键生理过程,影响植物对养分的吸收和利用效率,导致农作物生长迟缓、发育不良。同时,污染还会导致农产品质量严重下降,农产品中的重金属含量超标现象屡见不鲜。据农业农村部统计数据,超过10%的耕地遭受重金属污染,这一庞大的污染面积每年导致粮食减产约1000万吨,造成的经济损失高达200亿元。更为严峻的是,受污染的农产品通过食物链进入人体后,重金属会在人体内长期蓄积,对人体的各个器官和系统造成严重损害<sup>[3]</sup>。例如,镉中毒可引发肾脏损伤、骨骼病变,汞中毒则会对神经系统和肾脏功能造成毁灭性破坏,严重威胁人类的健康和生命安全。

## 2 生态修复技术比较研究

### 2.1 工程修复技术

#### 2.1.1 换土法

换土法是一种较为直接有效的土壤修复手段,其核心原理是将被重金属污染的土壤全部或部分挖掘移除,随后用洁净的土壤进行替换。该方法的显著优点在于操作相对简便,能够在短时间内迅速降低土壤中的重金属含量,显著改善土壤质量。然而,换土法也存在诸多局限性。首先,其工程量极为庞大,需要投入大量的人力、物力和财力资源。大规模的土壤挖掘、运输和替换作业,离不开专业的机械设备和众多劳动力的协同参与,导致修复成本高昂。其次,在换土过程中,若处理不当,极易引发二次污染问题。例如,在运输过程中可能出现土壤散落,对沿途环境造成污染。新土来源地的生态环境也可能因过度开采而遭到破坏。

#### 2.1.2 客土法

客土法的操作方式是将被污染的土壤转移至其他适宜地点,然后在原污染区域覆盖干净土壤。与换土法类似,客土法能够在一定程度上减轻原污染土壤中重金属对生态系统的危害。在实施客土法过程中,必须高度重视防止次生污染的发生。一方面,要谨慎选择污染土壤的堆放地点,防止土壤中的重金属在堆放期间因雨水冲刷等作用进入周边水体或土壤,形成新的污染区域。另一方面,对于覆盖的新土,必须确保其质量达标且来源合法合规,避免引入新的污染物。客土法虽在一定程度上避免了换土法中大规模土壤替换带来的问题,但对污染土壤的后续处理和新土的管理提出了更高要求。

#### 2.1.3 水洗技术

水洗技术是利用清水对污染土壤进行灌溉,借助稀释或洗

脱作用去除土壤中的重金属离子,从而实现土壤修复目的。该技术适用于低渗透土壤,因为此类土壤能够在一定程度上保持水分,有利于重金属离子的溶解和迁移。然而,水洗技术的实施对水资源需求量巨大,在水资源匮乏地区,其应用可能受到严重限制。此外,水洗过程中产生的含重金属废水若处理不当,将对水环境造成严重污染。同时,水洗技术可能导致土壤中的养分大量流失,破坏土壤肥力,影响后续植被恢复<sup>[4]</sup>。

### 2.2 物理-化学修复技术

#### 2.2.1 施用改良剂

施用改良剂是一种常见且有效的物理-化学修复方法,通过向土壤中添加石灰、碳酸钙等物质,改变土壤的物理化学性质,从而降低重金属的活性。这些改良剂能够提高土壤的pH值,促使重金属离子形成难溶性化合物,减少其在土壤中的迁移性和生物有效性,进而有效控制重金属进入食物链。例如,石灰的施用可显著提升酸性土壤的pH值,使镉、铅等重金属离子形成氢氧化物沉淀,降低其在土壤溶液中的浓度。该方法操作相对简便,成本较低,但改良剂的选择和施用量必须根据土壤类型、重金属污染种类和程度等因素进行精准调整。否则,可能会对土壤结构和微生物群落产生不利影响。

#### 2.2.2 电动修复

电动修复技术是在被污染的土壤中插入电极,施加直流电场,使土壤中的重金属离子在电场作用下向电极附近迁移。此方法适用于低渗透土壤,因为在这类土壤中,水力传导性较差,传统的水洗等方法难以有效去除重金属。在电动修复过程中,重金属离子在电场作用下向阴极或阳极移动,然后通过电极附近的收集装置进行回收或处理。然而,电动修复技术也面临一些问题,如电极极化现象会降低修复效率,修复过程中可能导致土壤局部pH值发生剧烈变化,影响重金属的迁移和沉淀效果。此外,对于复杂的多金属污染土壤,其修复效果可能不够理想,有待进一步优化。

#### 2.2.3 化学淋洗

化学淋洗是向土壤中加入特定的淋洗液,通过水利学或机械搅动使淋洗液与土壤充分接触,将土壤中的污染物洗脱出来。淋洗液的选择至关重要,不同的淋洗液对不同类型的重金属具有不同的洗脱效果。例如,某些有机酸淋洗液对重金属具有较强的络合能力,能够有效地将重金属从土壤颗粒表面解吸下来。但在化学淋洗过程中,淋洗液可能与土壤中的其他成分发生化学反应,影响土壤结构和肥力。同时,淋洗液本身的残留和后续处理也是不容忽视的问题,若处理不当,可能会造成新的环境污染。

### 2.3 生物修复技术

#### 2.3.1 植物修复

植物修复是利用超富集植物对土壤中的重金属进行吸收、积累和转化,从而降低土壤中重金属的生物有效性。超富集植物具有独特的生理机制,能够在体内大量富集重金属而不影响自身生长发育。例如,蜈蚣草对砷具有超强的富集能力,东南景天对

锌、镉等重金属有较好的吸收效果。植物修复技术具有成本低、环境友好等显著优点,不会对土壤结构和生态系统造成破坏。然而,植物修复过程相对缓慢,需要较长时间才能取得显著修复效果。而且,超富集植物的生物量通常较小,对于大面积、高浓度污染土壤的修复能力有限。此外,植物修复的效果还受到土壤条件、气候等多种因素的影响。

### 2.3.2 微生物修复

微生物修复是利用土壤中的微生物对重金属的吸收、沉淀、氧化还原等作用来改善土壤质量。微生物可通过分泌胞外聚合物、产生还原酶等方式与重金属相互作用。例如,某些细菌能够将六价铬还原为三价铬,降低其毒性和迁移性。微生物修复具有原位修复、成本低等优点,但微生物的生长和代谢活动受到土壤环境条件的严格限制,如温度、湿度、pH值等。此外,微生物对重金属的修复效果因重金属种类和污染程度不同而存在较大差异,对于复杂的重金属污染情况,单一微生物的修复能力往往有限。

### 2.3.3 动物修复

动物修复是利用低等动物如蚯蚓、鼠类等对土壤中的重金属进行吸收、降解或转移。蚯蚓在土壤中活动时,可通过吞食土壤颗粒,将其中的重金属富集在体内,并通过自身代谢作用对重金属进行一定程度的转化。一些研究表明,蚯蚓体内的某些酶可与重金属发生络合反应,降低重金属毒性。但动物修复也面临诸多问题,如动物活动范围和生存环境受限,对于深层土壤中的重金属难以有效接触和修复。而且,动物修复可能受到土壤中其他污染物的影响,同时,对于引入的动物种群需要进行严格监测和管理,以防止对当地生态平衡造成破坏。

## 2.4 联合修复技术

### 2.4.1 生物联合修复

生物联合修复是将植物、微生物、动物等多种生物修复技术有机结合,充分发挥各自优势<sup>[5]</sup>。例如,将超富集植物与具有促进植物生长和重金属活化能力的微生物共同应用于污染土壤修复。微生物可通过分泌生长素等物质促进植物生长,同时提高土壤中重金属的生物可利用性,使植物更易吸收重金属。此外,引入蚯蚓等动物可进一步改善土壤结构,促进植物根系生长和

微生物活动,从而提高整个修复系统的效率。生物联合修复能够克服单一生物修复技术的局限性,增强对复杂重金属污染土壤的修复能力,但在实施过程中需充分考虑不同生物之间的相互作用和生态适应性,确保修复系统的稳定性。

### 2.4.2 物理化学联合修复

物理化学联合修复是将物理和化学修复技术相结合,以提升修复效率。例如,在化学淋洗基础上结合电动修复技术,可在淋洗液洗脱重金属的同时,利用电场作用加速重金属离子迁移,提高洗脱效果。或者在施用改良剂后,结合水洗技术,能更好地去除土壤中因改良剂作用而形成的重金属沉淀。物理化学联合修复技术可综合利用各种技术优点,但也需注意不同技术之间的协同效应和可能产生的负面效应,如联合修复过程中对土壤性质的影响、修复成本的增加等问题。

## 3 结论

土壤重金属污染治理是长期艰巨任务。对比多种生态修复技术可知,工程修复工程量大、费用高。物理-化学修复受多种因素限制。生物修复周期长或有环境限制。联合修复虽有优势但需协调配合。应依据污染程度、土壤类型和经济条件综合选择修复策略。综合考虑各种因素并选择合适修复技术,是提高修复效果、保障土壤质量和生态安全的关键。

### [参考文献]

- [1]李会杰,刘雨.矿区土壤重金属污染微生物生态修复技术研究[J].环境科学与管理,2024(2):11.
- [2]杨怀.重金属污染对土壤生态系统的影响及其修复技术研究[J].皮革制作与环保科技,2024,5(6):134-136.
- [3]霍霄玮,张蕾.土壤重金属污染修复技术及其在生态修复中的应用研究[J].皮革制作与环保科技,2024(17):14.
- [4]胡旻,余程凤,陈伟东.土壤重金属污染现状及生态修复策略分析[J].皮革制作与环保科技,2024(7):11.
- [5]刘阳,王继宇.土壤重金属污染的有效治理及生态修复方法探究[J].皮革制作与环保科技,2024,5(10):96-98.

### 作者简介:

段保军(1972--),男,汉族,甘肃庆阳人,大专,工程师,研究方向:环境监测。