

土壤重金属污染的生态效应及修复技术研究

张婷婷 宋媛媛

山东省威海生态环境监测中心

摘要: 本文主要探讨了土壤重金属污染的生态效应及其修复技术。首先介绍了土壤重金属污染的主要来源,包括工业废弃物、农药和化肥的使用等。接着分析了土壤重金属污染对生态系统的影响,包括植物生长受限及生理效应、土壤生态系统的改变、土壤微生物群落的变化以及土壤-水环境的相互作用。最后,对土壤重金属污染的修复技术进行了分析,包括植物修复、化学修复和微生物修复等方法。本文的研究对于正确评估土壤重金属污染的生态效应以及选择合适的修复技术具有重要意义。

关键词: 土壤重金属; 污染; 生态效应; 修复技术

【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2023.19.118

引言

随着工业化和城市化的快速发展,大量的工业废弃物、农药和化肥的使用导致土壤中重金属元素的积累,对生态系统产生了严重的影响。土壤重金属污染不仅对植物生长和土壤生态系统的健康造成了威胁,还可能通过土壤-水环境的相互作用,对地下水和水体生态系统造成进一步的危害。因此,研究土壤重金属污染的生态效应及其修复技术具有重要的科学意义和实践价值。

一、土壤重金属污染的主要来源

土壤重金属污染是一种全球性的环境问题,其主要来源可以分为自然来源和人为来源两类。自然来源主要包括地壳元素的富集、气候和地质等自然因素引起的土壤重金属含量升高。这些重金属如铁(Fe)、锰(Mn)、铜(Cu)、锌(Zn)等是地壳中常见的元素,其存在量通常在土壤中属于自然水平。然而,自然因素的作用下,这些重金属可能会在一定程度上富集,形成自然来源的土壤重金属污染。例如,火山喷发、岩浆活动和气候变化等地质和气候事件会导致土壤中重金属含量的升高。

另一方面,土壤重金属污染的主要人为来源是工业活动、农业实践和城市化进程。工业活动是重要的土壤重金属污染源之一,诸如矿山开采、冶炼、金属加工、化工生产等都会释放大量重金属污染物到环境中,最终进入土壤。农业实践中,长期使用含有重金属污染物的化肥和农药,以及废弃物的不当处理,也会导致土壤重金属污染。城市化进程使得工业区、交通区等城市功能区域的土壤受到人为污染,特别是交通污染(例如车辆尾气)会导致土壤中重金属的累积。总体而言,人类活动对土壤重金属污染的贡献逐渐增加,成为主要的污染源之一,加剧了土壤生态系统的健康风险。

二、土壤重金属污染的生态效应

(一) 植物生长受限及生理效应

土壤重金属污染对植物生长和发育产生直接影响,限制植物的生存和繁衍能力。重金属在土壤中积累,可被植物根系吸收并转移到植物体内。高浓度的重金属对植物根系和叶片造成毒害,抑制根系的吸收和运输水分和养分的功能,导致植物根系生长受限。此外,重金属离子可以干扰植物体内的生理过程,如光合作用、呼吸作用和酶活性等,导致植物叶片黄化、凋落,甚至死亡。一些植物对重金属具有不同程度的耐受性,但高浓度重金属的积累会影响植物的生长速度、生物量和种群结构,导致植物多样性降低,从而影响土壤生态系统的稳定性。

(二) 土壤生态系统的影响

土壤重金属污染会对土壤生态系统产生深远的影响。重金属的积累会导致土壤结构的改变,使土壤变得致密,减少土壤通气性和透水性,降低土壤肥力和水分保持能力。这些变化直接影响土壤中微生物的活性和数量,降低土壤微生物的多样性和功能。土壤中的微生物在有机质分解、养分循环和植物养分吸收等方面发挥着重要的作用。重金属污染会抑制土壤中微生物的生长和代谢,影响土壤生态系统的稳定性和功能。

(三) 土壤微生物群落的变化

土壤微生物是土壤生态系统的重要组成部分,对土壤有机质分解、养分转化和植物生长等过程起着关键作用。然而,土壤重金属污染会引起土壤微生物群落的变化。高浓度的重金属抑制了某些微生物的生长,导致微生物多样性降低,优势菌种数量减少。此外,土壤中的某些重金属还会对土壤中的特定微生物产生选择性毒性,影响它们的代谢途径和功能,导致微生物群落结构的改变。这些变化会影响土壤中的养分循环和有机质分解速率,进而影响植物的生长和土壤生态系统的稳定性。

(四) 土壤-水环境的相互作用

土壤重金属污染不仅影响土壤生态系统,还可能通过土壤-水环境的相互作用,对水环境造成污染。重金属在土壤中积累后,可以通过降水的淋溶作用或地下水的渗透作用进入地下水和地表水体。特别是在酸性土壤环境下,重金属的淋溶作用更为明显。一旦重金属进入水体,会对水生生物产生毒害效应,影响水生生态系统的结构和功能。因此,土壤重金属污染与水环境之间的相互作用是一个重要的研究方向,对于维护生态环境和保障人类健康具有重要意义。

三、重金属污染修复技术分析

(一) 传统修复技术

1. 土壤修复基本方法

常用的土壤修复方法主要包括物理修复、化学修复

以及生物修复三种，具体如下图1：

(1) 物理修复法：物理修复法是通过物理手段将土壤中的污染物彻底或部分去除的方法。常见的物理修复方法包括深耕法、客土法和淋洗法等。深耕法是通过深度翻耕土壤，将污染物向土壤深处转移，降低其对植物生长的影响。客土法是将受污染土壤挖掘出来，置换为新的无污染土壤。淋洗法是通过向土壤中灌注清洗液，将污染物溶解并从土壤中冲洗出去。物理修复法可以较为彻底和稳定地去除土壤中的污染物，但其工作量较大，成本较高，且操作不当可能导致二次污染。

(2) 化学修复法：化学修复法是利用土壤添加剂进行土壤改良的方法。添加的化学改良剂可以通过吸附、沉淀等化学反应与土壤中的污染物发生作用，从而去除污染物。化学法操作相对简单，应用效果较为持久。常见的化学修复剂包括活性炭、氧化剂、还原剂等。然而，选择合适的改良剂需要针对具体污染物和土壤类型进行科学调查和实验验证。

(3) 生物修复法：生物修复法是利用生物自身的活动进行土壤修复的方法。生物修复法可以分为动物、植物以及微生物的方法。植物修复是利用植物的根系吸收和累积土壤中的污染物，达到减少土壤污染程度的目的。微生物修复是利用微生物的代谢能力降解或转化污染物，从而减少其毒性和迁移性。生物修复方法操作简便、成本较低，并且一般不会产生二次污染。其中，紫花苜蓿作为植物修复的代表，具有很好的吸收重金属的能力，被广泛应用于土壤修复工程中。

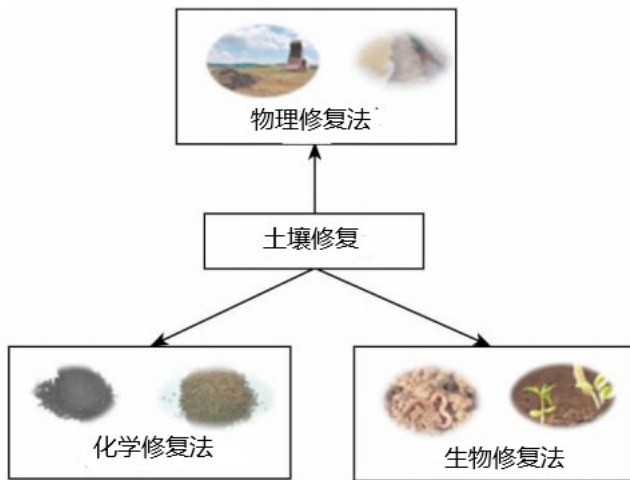


图1 土壤修复法

2. 原位稀释与稀释固化

(1) 原位稀释技术

原位稀释技术是一种常用的土壤重金属污染修复方法，通过向受污染土壤中注入大量的清水或其他无害物质，将土壤中的重金属浓度稀释到较低的水平，从而降低重金属对生态系统和人类健康的风险。原位稀释技术的主要优点在于操作简单、成本较低，并且不需要将受污染土壤挖掘出来，可以在原地进行修复。

然而，原位稀释技术也存在一些限制和挑战。首先，该技术并不能完全去除土壤中的重金属，只是将其浓度降低到一定程度。因此，在重金属浓度特别高的土壤中，可能需要结合其他修复技术来达到更好的修复效果。其次，原位稀释可能会影响土壤的理化性质和生物活性，从而影响土壤的肥力和生态功能。因此，在实施原位稀释时，需要进行充分的风险评估和技术优化，确保修复过程不会对土壤生态系统造成更大的损害。

(2) 稀释固化技术

稀释固化技术是一种将污染土壤与特定固化剂混合，使重金属污染物与固化剂形成稳定的复合物的方法。该技术能够有效地降低土壤中重金属的溶解度和迁移性，从而减少对周围环境的影响。稀释固化技术的优点在于可以在较短时间内将重金属固定在土壤中，避免其进一步扩散。

但是，稀释固化技术也有一些局限性。首先，选择合适的固化剂对于不同污染土壤的修复效果至关重要，不同重金属的固化剂选择和配比需要针对具体情况进行优化。其次，固化剂的添加可能会改变土壤的理化性质，影响土壤的通气性和水分保持能力，因此需要进行充分的试验和监测以确保固化后的土壤能够维持基本的生态功能。最后，稀释固化技术通常适用于局部小面积的修复，对于大面积的重金属污染土壤可能需要结合其他修复技术进行综合治理。

3. 土壤固化与固化剂添加

(1) 土壤固化技术

土壤固化通过向受污染土壤中添加固化剂，使土壤中的重金属形成稳定的固态复合物，从而降低重金属的迁移性和生物可利用性。固化剂一般是一些无毒、无害的物质，如硫酸盐、磷酸盐、氢氧化物等，它们可以与土壤中的重金属形成沉淀或结晶，将重金属稳定在土壤中，从而减少其毒性和环境风险。土壤固化技术适用于重金属浓度较高、土壤面积较小的污染场地，例如工业废弃地、冶炼厂周围等。

固化剂的添加量和配比是土壤固化技术的关键。适当的添加剂可以有效地降低重金属的迁移性，但过量的添加剂可能会导致固化剂与土壤中其他成分发生竞争吸附，影响固化效果。因此，在实施土壤固化修复时，需要进行充分的试验和监测，以确定最佳的固化剂类型和添加量。此外，固化剂的选择也要结合具体污染物类型和土壤类型来进行，以确保固化后的土壤在长期内保持稳定。下表1记录不同固化剂类型和添加量在土壤固化修复中的试验和监测结果。

在实验和监测过程中，可以根据不同的固化剂类型和添加量对土壤重金属去除率进行比较，观察其他可能的影响，如对土壤结构、植物生长和微生物活性的影响。最终根据实验结果确定最佳的固化剂类型和添加量，以实现土壤重金属修复的最佳效果。同时，根据具体的污染物类型和土壤特性，选择适用范围广泛的固化剂，以确保固化后的土壤在长期内保持稳定和持久的修

表1 不同固化剂类型和添加量在土壤固化修复中的试验和监测结果

固化剂类型	固化剂添加量 (g/kg土壤)	重金属去除率 (%)	其他影响观察	适用范围
磷酸盐	5	90	无异常现象	铅污染土壤
活性炭	10	80	改善土壤结构	镉污染土壤
氢氧化钙	2	95	稳定修复效果	铬污染土壤
硫酸盐	8	70	植物生长受限	锌污染土壤
磷酸钙	6	85	微生物活性恢复	镍污染土壤

修复效果。

(2) 固化剂添加的优缺点及适用范围

固化剂添加作为一种土壤重金属污染修复技术，有一些显著的优点和一定的限制。首先，固化剂添加可以迅速固定重金属，减少其迁移和扩散，从而降低对周围环境和生态系统的影响。其次，固化剂添加技术操作简便，适用于小面积的局部修复，可以在较短时间内取得较好的修复效果。此外，固化剂本身通常是低成本、无毒的物质，不会对土壤和周围环境造成二次污染。

然而，固化剂添加也存在一些限制。首先，该技术只是将重金属与固化剂形成稳定的复合物，而并未去除重金属，因此对于重金属浓度较高的污染场地可能需要结合其他修复技术进行综合治理。其次，固化剂的添加可能会改变土壤的理化性质，如土壤的通气性和透水性，影响土壤的生态功能。因此，选择合适的固化剂和添加量需要综合考虑污染物类型、土壤特性以及修复目标。最后，固化剂添加技术主要适用于较小面积、浓度较高的重金属污染场地，对于大面积的污染场地可能不太适用。固化剂添加是一种有效的土壤重金属污染修复技术，它在特定的污染场地和修复目标下具有显著的优势。在实际应用中，需要根据具体情况综合考虑不同修复方法的优缺点，制定科学合理的修复方案，以取得最佳的修复效果。

(二) 新兴修复技术

新兴修复技术在土壤重金属污染修复领域展现出巨大的潜力。其中，植物修复和微生物修复作为两种主要的新兴修复技术，具有独特的优势和应用前景。

(1) 植物修复：植物修复是利用植物的生物学特性来吸收、转运和积累土壤中的重金属，从而减少土壤重金属含量的方法。植物修复的优势在于其生态友好、经济成本较低，并且不会对土壤结构和生态系统造成破坏。植物修复主要包括以下几种方式：

植物吸收：一些植物对重金属具有高度的耐受性和积累能力，它们可以通过根系吸收土壤中的重金属，并将其富集在根、茎、叶等部位。例如，紫花苜蓿、柳树、铜绿锈等植物被广泛用于重金属修复。

植物共生：植物和微生物之间的共生关系可以增强

植物对重金属的修复能力。植物根际的微生物群落可以促进重金属的生物转化和积累，提高修复效率。比如，根际细菌可以通过螯合、还原、氧化等过程促进重金属的转化和吸收。

植物修复耐受机制：一些植物通过调节生理代谢、产生抗氧化物质和螯合剂等方式来提高其对重金属的耐受能力。这些植物在重金属污染环境能够存活并修复土壤。

(2) 微生物修复：微生物修复是利用微生物的代谢活性来降解、转化或固定土壤中的重金属，从而减少其对环境和生物的危害。微生物修复具有高效、可控和环保等优势。微生物修复主要包括以下几种方式：

菌株筛选与增殖：通过筛选和培育能够高效降解、转化重金属的菌株，然后通过大规模增殖这些菌株，使其能够快速在污染土壤中进行修复。

菌株原位修复：将经过增殖的菌株直接引入污染土壤中，利用其代谢活性来修复土壤中的重金属。这种方式可以在较短时间内实现土壤修复，并且对土壤结构和生态系统的影响较小。

菌株生物合成：利用菌株的生物合成能力，将重金属转化成无毒或较低毒性的物质，从而降低土壤重金属的生物可利用性。这种方式可以有效地减少重金属的迁移和扩散，避免二次污染的发生。

综合来看，植物修复和微生物修复作为新兴的土壤重金属污染修复技术，具有各自独特的优势，可以在不同的污染场地和修复目标下发挥重要作用。在实际应用中，通常会结合植物修复和微生物修复等多种修复技术，形成综合修复方案，以取得更好的修复效果。

四、结束语

本文中深入探讨了土壤重金属污染的主要来源和生态效应，从植物修复、微生物修复以及物理和化学修复等方面详细分析了不同的修复技术。植物修复利用植物的吸收、转运和积累能力来降低土壤中重金属的含量，而微生物修复则是通过微生物的代谢活性来降解、转化或固定重金属。此外，物理和化学修复方法也在一定程度上减少了土壤重金属污染的风险。然而，任何单一的修复技术都难以完全解决土壤重金属污染问题。在实际修复工程中，需要根据不同的污染场地和修复目标，综合应用多种修复技术，形成综合治理方案。

参考文献

[1] 马兴. 镉污染对土壤酶的作用机理及生态效应研究[D]. 西北农林科技大学, 2022.

[2] 张锦路. 不同含磷钝化剂对镉污染农田土壤微生物群落的影响[D]. 南京信息工程大学, 2022.

[3] 冯雪莹. 微塑料和重金属对土壤-植物系统的生态效应[D]. 青岛科技大学, 2022.

[4] 冯天朕. 土壤环境中微塑料对镉吸附解吸特性及生态效应的影响[D]. 沈阳大学, 2021.