

# 土壤重金属污染微生物修复技术的应用研究

潘玲悦

百色市平果市生态环境监测站 广西百色 531400

**摘要:** 随着工业化和都市化进程的加速,土壤重金属污染问题日益凸显,已成为全球环境保护的焦点之一。重金属污染不仅影响土地的利用价值,而且对生态系统和人类健康产生长远的危害。传统的土壤修复方法如物理和化学方法,虽然效果显著,但往往伴随着高成本和可能产生的二次污染。微生物可以通过吸附、转化、固定等多种机制,实现对重金属的去除或稳定,因为高效、环保和经济等优势,微生物修复技术逐渐成为研究热点。基于此,本文详细分析了土壤重金属污染微生物修复技术的应用措施。

**关键词:** 土壤重金属污染;微生物;修复技术;应用

## 引言

重金属污染会对土壤造成巨大的损害,影响土壤的质量和功能。大部分重金属随着空气沉积到云层,之后通过降水在土壤中累积,如甲基汞。降解重金属是一个极其困难的过程,相当大一部分重金属会以沉淀形式存在。土壤被重金属污染后,修复概率很低,同时重金属会随着食物链进行传递,对生态系统造成损害。按照现有的条件,土壤修复技术可以分为生物修复和非生物修复,其中:传统的非生物修复可以在较短时间内取得显著的效果,但是其缺点也十分明显,非生物修复的成本往往很高,且会破坏土壤本身的生态平衡,对土壤生态系统造成不可逆的伤害;生物修复方式相较于其他修复方式来说是一种绿色无污染的方法,生物修复取决于生物本身的代谢能力。

## 一、微生物修复的基本原理

微生物修复的基本原理涉及多个关键步骤。首先,微生物通过表面结构或胞外聚合物等,物理吸附或化学吸附土壤中的重金属,这种吸附过程可以改变重金属的形态,降低其活性和可溶性,从而降低其对环境和生物的毒性。其次,微生物内部的代谢活动可以促进重金属的转化过程。例如,一些微生物具有还原能力,可以将重金属离子还原为不具活性的金属纳米粒子或沉淀物,使其在土壤中固定并降低毒性。此外,微生物也可以通过酶系统的参与,加速重金属的降解和转化过程。

## 二、微生物修复的优势和局限性

微生物修复技术在土壤重金属污染治理中具有多种

优势。首先,微生物修复是一种自然、可持续的方法,与传统的物理和化学处理方法相比,更具环境友好性。其次,微生物修复技术广泛适用于重金属污染情况,并且能够处理多种不同类型的重金属污染物。此外,微生物修复通常成本较低,并且对土壤结构和养分保持较好。然而,微生物修复技术也存在一些局限性。首先,微生物的活动速率受到环境因素和营养物质的影响,需要较长的时间来实现修复效果。其次微生物修复效果可能受到土壤pH值、温度、含水量等因素的限制。此外,微生物修复技术在大规模应用时也面临着技术标准化、监测评估等挑战<sup>[1]</sup>。

## 三、土壤重金属污染修复中的微生物技术

### (一) 微生物吸附法

在土壤重金属污染修复领域,微生物吸附作用显现出独特的优势。微生物细胞壁和细胞膜上含有特定的生化组分,如多糖、蛋白质和脂质,这为重金属离子提供了大量的吸附位点,将微生物的这种吸附作用应用到重金属污染的土壤中,可将重金属离子移除。微生物细胞还可以通过阳离子交换、络合、沉淀和吸附等多种方式与重金属结合,使其稳定并降低其生物有效性。研究表明,许多微生物包括细菌、真菌和放线菌可以生物积累和生物吸附,比如蓝细菌、硫酸盐还原菌等能够产生胞外聚合物如多糖、糖蛋白等阴离子集团,与重金属离子形成络合物。通过微生物吸附重金属离子具有成本低、操作简便、环境友好等优点。

### (二) 内生菌修复技术

植物内生菌是指生活于植物体内,可以与植物互利

共存的一类微生物总称。其在高等植物体内广泛存在，常作为生防菌应用于农业领域。内生菌的分布范围极其广泛，现已在超过80属的几百种禾本科植物中发现有与之共生的内生真菌。(1) 内生菌对土壤修复具有一定的作用。重金属污染会对植物微生物群落造成一定破坏，植物的某些内生菌如芽孢杆菌属、巴氏微杆菌属等均有降低土壤重金属的能力。有学者分离出来的苏云金芽孢杆菌能将土壤中大部分铅、锌、砷转移到植物体内，减少重金属在土壤中的积累。有学者分离出来的球形沙门氏菌可对铜、铅、铬进行富集，将重金属从土壤中剥离，是一种修复重金属污染的试验性菌株。(2) 内生菌可减轻重金属对植物的损害。内生菌能减轻重金属对植物的毒性。研究人员已分离出抗金属镉的内生菌，会促进植物对锌、铁的吸收，进而降低镉的毒性。内生菌有助于植物生长，促进铁载体、植物激素的产生及利用。植物内生菌在重金属的刺激下会产生大量的铁载体，然后与二价态的金属结合，有利于重金属在植物体内累积，从而降低土壤中的重金属含量。内生菌不仅能够加快植物生长，还可以提高植物对重金属的抗性。虽然内生菌在植物抗重金属毒性方面具有重要作用，但目前尚不清楚内生菌在高浓度重金属环境中的存活方式、对重金属最大耐受浓度及在细胞分子水平上的修复机理。内生菌的存在加强了植物对重金属的抗性，植物吸收重金属的能力不断增强，利用内生菌修复土壤重金属污染有着广阔的前景<sup>[2]</sup>。

### (三) 微生物固定法

微生物固定法是利用微生物的天然能力来固定、吸附或沉淀土壤中的重金属离子，使其从可生物利用状态转变为稳定、低毒或不可生物利用的状态。在这一方法中，特定的微生物如某些细菌、真菌和藻类可以通过其细胞壁、细胞膜或外源多糖产生的胶体物质，与土壤中的重金属离子形成稳定的化学或物理键合，从而减少其在土壤中的流动性和生物有效性。例如，硫细菌、绿藻和产气雷柏杆菌均可以分泌H<sub>2</sub>S与汞或铅等重金属形成不溶性的硫化物沉淀；而轮枝孢属真菌和许多外生菌能分泌草酸，则可以通过其菌丝体对铅、镉、铜等金属进行固定。这些微生物固定后的金属形态在土壤中更为稳定，极大减少了其对植物和微生物的毒性，有效降低了食物链中的重金属迁移<sup>[3]</sup>。

### (四) 抗性微生物修复技术

抗性微生物修复重金属污染的土壤基于两种形式：

一是使重金属变成沉淀状态；二是随着植物的富集作用，重金属不断从土壤中抽离。(1) 抗性微生物通过植物富集土壤重金属。抗性微生物转变了重金属的物态，将其变为无毒形态，从而提高了植物对其吸收的能力。有学者研究表明，假单胞菌属细菌可将钴胺素转变为甲基钴胺素，甲基钴胺素可与汞结合生成易被植物吸收的甲基汞，增强植物对汞的吸收。袁正通等<sup>[4]</sup>研究表明，根瘤菌可以恢复土壤的活力，增加植物的抗氧化活性，在根瘤菌存在的情况下，重金属不会进入植物体内，而是存在于植物表面，从而减轻重金属对植物的毒害，不断提高植物对重金属的修复能力。重金属不能以沉淀的形式被植物吸收，但抗性微生物可通过不断释放各类酸加速土壤中重金属的溶解，从而加大植物对重金属的吸收量。同时，抗性微生物通过自身的作用将重金属转变成无毒的价态，进一步增强植物对重金属的吸收，从而对重金属污染的区域进行有效修复。有学者研究发现：荧光假单胞菌可以产生多种形式的有机酸，使包括氧化锌在内的多种重金属活化，进而被植物吸收；在荧光假单胞菌存在的情况下，重金属被植物吸收的概率明显增加，重金属在植物根、茎、叶中的富集程度较无菌对照显著上升。(2) 抗性微生物的重金属转化作用。重金属在抗性微生物的作用下会进行转化，主要包括氧化还原和去甲基化，这是抗性微生物特有的优势。这种重金属转化作用多出现在革兰氏阴性菌上，少部分革兰氏阳性菌也有此作用，但研究甚少。抗性微生物可以借助其体内的还原酶把毒性较强的金属离子还原成低毒或者无毒的金属单质，如某些细菌和真菌会把铜离子还原成铜单质，铜单质无毒无害，不会对土壤造成污染。在其他的抗性微生物中也有类似的情况。因为在微生物细菌的胞外物质上具有很多可能与重金属结合的位点，所以目前开始研究利用悬浮或经固定化的细菌细胞对重金属再吸收的方法。抗性微生物会使重金属朝着毒性降低的方向转变，这一特点可以使植物更好地吸收、固定重金属，甚至在某些情况下植物会对某些重金属产生抗性，进而为大批量除去土壤中的重金属打下基础。最近，还有学者提出利用基因工程方法在抗性微生物表面表达MT蛋白，使种类繁多的重金属在细胞周围形成一系列量子点，这样可以轻松检测出植物吸附重金属的能力<sup>[4]</sup>。

### (五) 微生物脱附法

与吸附法相反，脱附法主要利用微生物生长过程中释放特定的代谢物或表面活性剂，使被土壤吸附的重金

属进入游离状态,进而便于应用其他技术如固定、沉淀或生物转化进一步处理。此外,某些微生物还可以产生特定的脱附酶或生物表面活性剂,进一步增强脱附效率。例如,生物表面活性剂可能通过降低土壤颗粒之间的表面张力,使重金属离子更容易从土壤颗粒表面脱离出来;脱附酶能够作用于土壤中重金属离子与固相成分(如矿物质、有机质)的结合位点。通过催化特定化学反应,这些酶打破了重金属离子与土壤颗粒之间的稳定结合,使重金属离子从土壤固相释放到土壤溶液中<sup>[5]</sup>。

#### 四、未来土壤重金属污染微生物修复技术的发展趋势

##### (一) 利用微生物群落交互改善土壤微生态

土壤生态系统中的微生物不是单独存在的,它们之间的相互作用、竞争和合作对整体的修复效率有着直接的影响。(1) 正向协同效应:某些微生物种类之间存在互利共生关系,一种微生物产生的代谢物可能为另一种微生物提供所需的营养物质,这种交互关系可增强整个微生物群落对污染物的分解和转化能力。(2) 功能互补:在复杂的微生物群落中,不同的微生物可能具有不同的代谢途径和功能。这种功能上的互补性可以使得微生物群落更为全面地对多种污染物进行分解和转化。(3) 生态稳定性:微生物群落中的多样性和交互关系可以提高其对环境变化的适应能力和抗干扰能力,使得修复过程更为稳定和持续。为了提高土壤重金属污染的微生物修复效果,了解并考虑微生物群落内部的交互关系是至关重要的。通过调控微生物群落的结构和功能,可以实现更为高效和可控的污染物修复<sup>[6]</sup>。

##### (二) 利用基因工程技术开发构建多重金属耐受性微生物菌株

可以通过以下几个方面的研究,进行优化并获得多重金属目标改造菌株。(1) 研究重金属耐受菌株的作用机制。利用基因工程技术,将特定的金属转运蛋白、金属结合蛋白或特定的酶等多个耐受性基因整合到菌株基因组中,增强基因表达,以提高菌株对多种金属的耐受性等。(2) 研究菌株的代谢调控机制。例如,利用基因工程技术,提高调控基因的表达,以增强某些金属螯合剂的合成能力,进而提高菌株对重金属污染土壤的修复能力。(3) 对目标菌株进行改造。通过筛选生长能力和重金属修复能力较强的菌株,并对其进行上述的基因

改造,可以进一步提高微生物的对重金属污染土壤的修复能力。基因编辑技术,特别是近年来迅速发展的利用CRISPR/Cas9系统,对目标基因进行精确编辑,为重金属土壤污染中微生物修复带来了革命性的技术变革。利用该技术研究人员可以定制设计具有特定功能的微生物,通过编辑关键的代谢基因,可以引导微生物沿特定的代谢途径分解污染物。经过基因工程改造后的微生物菌株,可提高污染物的吸附能力、重金属耐受菌株的生存能力等,使得该菌株可以更高效地应对各种环境污染问题。(4) 新型的重金属污染修复策略的开发:除了设计和构建全新的微生物,有针对性地处理特定污染物的能力之外,基因编辑还可以被用来构建微生物传感器,这些传感器能够探测并报告污染物的存在和浓度,为环境监测提供了新的工具。同时也是重金属土壤污染中微生物修复的重大变革技术。

#### 结束语

综上所述,重金属毒性较强,且具有蓄积性特质,会对生物造成严重伤害,因此,重金属土壤污染的修复显得尤为重要。在众多修复技术中,微生物技术较为环保、高效,具有广阔的应用前景。通过微生物的代谢特性和生态系统的自我修复能力,能够有效降低土壤中重金属元素的含量,同时也可以促进土壤健康和植物生长。因而,深入研究微生物技术在重金属污染土壤修复中的作用机制,探索更加有效的修复方法,具有重要意义。

#### 参考文献

- [1] 刘颖.微生物在重金属污染土壤修复中的作用研究[J].化工设计通讯,2021,47(10):196-197.
- [2] 符永鹏.土壤重金属污染修复技术的研究进展[J].资源节约与环保,2021,(08):21-22.
- [3] 李威.土壤重金属污染危害及微生物修复[J].现代农村科技,2021,(08):99-100.
- [4] 张贺,许宁,杨贺,等.土壤重金属污染及其修复技术研究进展[J].四川建筑,2020,40(01):111-112.
- [5] 张鑫.土壤重金属污染的危害及修复技术研究[J].中国资源综合利用,2019,37(11):89-90+93.
- [6] 邓琴.土壤重金属污染微生物修复技术探讨[J].西部皮革,2019,41(09):117.