

Research on the Mechanism of Microbial Remediation Technology in Acidic Soil Remediation in Cultivated Land

Long Cheng¹ Xiaohong Guo² Xiucan Zhai² Yuzhen Liu³

1. Leizhou Zhanken Agricultural Development Co., Ltd., Xiamen, Fujian, 361000, China

2. Fujian Sanju Biotechnology Co., Ltd., Xiamen, Fujian, 361000, China

3. Zhangzhou Sanju Biotechnology Co., Ltd., Zhangzhou, Fujian, 350600, China

Abstract

Cultivated acid soil is a common soil type, and the cultivated land area in China accounts for 1/4 of the total cultivated land area in the world. Acidic soil generally shows the characteristics of high soil acidity, low nutrient content, low soil organic matter content and serious nutrient loss. Therefore, the remediation of acidic soil is imminent. Microbial remediation technology is a promising technology for acidic soil remediation in cultivated land. This paper mainly studies the mechanism of microbial remediation technology in the remediation of cultivated acid soil, and discusses the future research direction and development trend of microbial remediation technology in China.

Keywords

farmland acid soil; microbial remediation technology; pollution status

微生物修复技术在耕地酸性土壤修复中的作用机制研究

程隆¹ 郭小红² 翟修彩² 刘玉珍³

1. 雷州湛垦农业发展有限公司, 中国·福建 厦门 361000

2. 福建三炬生物科技股份有限公司, 中国·福建 厦门 361000

3. 漳州三炬生物技术有限公司, 中国·福建 漳州 350600

摘 要

耕地酸性土壤是一种普遍存在的土壤类型, 中国耕地面积占世界耕地总面积的1/4。酸性土壤一般呈现出土壤酸度高、养分含量低、土壤有机质含量低和养分流失严重等特点, 因此酸性土壤的修复迫在眉睫。微生物修复技术具有环境友好、经济高效等优点, 是一种有前途的耕地酸性土壤修复技术。论文主要对微生物修复技术在耕地酸性土壤修复中的作用机制进行了研究, 并对未来中国微生物修复技术研究方向和发展趋势进行了展望。

关键词

耕地酸性土壤; 微生物修复技术; 污染现状

1 引言

土壤微生物修复是指将土著微生物或经过人工驯化的、具有特殊功能的微生物, 在合适的环境条件下, 通过其自身的代谢过程, 使其对土壤中的有害物质产生抑制或使其转化为无害的物质。与化学、物理等方法相比, 该方法具有造价低廉、不会对土壤养分及代谢活性造成不利影响等优点, 可有效地防止污染物迁移对人体健康及生态环境造成的危害。

土壤化肥的质量是保证农作物和农作物产量的重要保证。随着中国经济的发展和农业的迅速发展, 农药和化肥的大量使用, 加上工业生活的不断加剧, 使得土壤受到了严重

的污染。

现阶段, 中国土壤主要的污染形式包括重金属、土地盐渍化和土地荒漠化等, 其中受镉、砷、铬和铅等重金属污染的土壤面积达 2000 万 hm^2 , 约占全国总耕地面积 1/5。化肥、农药的总使用剂量高达 130 万 t 左右, 在此过程中, 只有很少一部分的农药化学成分被使用于病虫害防治, 大量的农药、化肥等有害物质直接进入到土壤生态循环系统中, 土壤污染情况变得愈发严重。

2 土壤微生物修复原理

微生物修复重金属污染土壤的基本原理是“生物累积”和“生物转化”, 其中“胞外络合”“沉淀”和“细胞内累积”三种形态, 其过程是“微生物氧化还原”“甲基化-去甲基”“溶出”和“有机体”协同的“环境”, 最终建立起

【作者简介】程隆(1984-), 男, 中国广东人, 本科, 农艺师, 从事农学(观光农业方向)研究。

特定微生物对重金属的“脱毒”机制。

微生物对有机污染物的降解主要依赖于两个途径：一是由微生物分泌的胞外酶进行降解；二是通过胞内的酶对污染物进行降解。微生物通过主动转运、被动扩散、促进扩散、群体移位和细胞吞噬等途径从细胞外环境中获取和利用。微生物在土壤中对有机污染物的降解与转化主要依赖于氧化、还原、基团迁移、水解等几种最基本的反应方式。

微生物能够直接利用有机污染物中的羟基、羧基、酯基等官能团，直接或间接地将有机物中的碳元素转化为可被植物吸收利用的元素，如水解反应生成二氧化碳和氢气；氧化还原反应生成水和氧气；羧化反应生成羧酸；羟基化合成醇等。微生物还能利用有机污染物中的芳香族类物质进行脱除，如芳香羧酸类化合物能与卤代芳烃的苯环反应，生成卤代芳烃类化合物。微生物对重金属的作用主要是通过微生物代谢作用降低土壤中重金属的活性，从而达到降低土壤中重金属毒性的目的。同时，微生物也能对重金属产生钝化作用，使重金属离子不能对生物细胞产生毒害作用。

3 土壤微生物修复技术方法

根据修复地点的不同，可将其划分为微生物原位和异位两大类。该方法无需将污染土壤移走，而是将氮磷等营养元素直接投入到受污染土壤中，并通过添加氧气等方式，促使土著/特种微生物进行代谢活动，从而实现对污染土壤的有效去除。原位微生物修复技术主要有生物通气（通过对土壤进行生物降解，向土壤中施加气体，再抽取挥发性有机污染物）、生物强化（调控微生物的活力和强度）、耕作（尽量为微生物提供适宜的降解环境）和化学格栅通过化学修复剂与污染物发生氧化、还原、沉淀、聚合等化学反应，实现污染物的降解或转化。

异位微生物修复就是将受污染的土壤挖出来，然后集中处理。主要内容有：在农业生产过程中继续进行，减少污染物在土壤中的运移；采用常规堆肥法，将受污染的土壤和有机物等进行混合，采用机械通气和加压通气，并添加石灰调控 pH。污泥生物反应器：污泥移入生物反应器，通过添加适当 pH 值、添加适量养分、表面活性剂，在底层充氧，在满足微生物生长需要的条件下，促进微生物与污染物的充分接触，促进污染物的快速降解。

因此，在对污染土壤进行微生物修复的过程中，必须综合考虑不同的修复方式的优势和不足，综合考虑污染物的种类、污染场地和污染程度等，使不同的修复方式的优势互补，并进行灵活应用。

4 土壤微生物修复技术的问题与局限性

首先，该技术对受污染的土壤进行了长期的处理，其效果优于其他方法。但因其遗传稳定性差和易变异等原因，在实际应用中往往难以完全清除，而且在许多情况下，其去除效果也较差。

其次，某一种微生物仅对某一种化学物质进行降解，当该物质存在形式发生变化时，该物质很难被同一种酶降解，而且在实际使用中，这些污染物的存在形式也不尽相同，很难被其完全降解。

最后，该菌还需要与土著菌种进行竞争，并受到环境因素的明显影响。同时，由于自身的代谢或死亡，这些污染物也有可能再次被释放到环境中。

5 微生物生态修复步骤

5.1 微生物对重金属的吸附富集机制

利用微生物对重金属的吸附和富集作用，使其转化为对环境重金属的吸附和富集。由于大部分微生物的表面都有一些阴离子团，如氨基、羟基等，这些官能团使其呈现出负电效应（如表 1 所示）。

表 1 微生物中各功能基团的具体表述

基团类型	基团结构	分子载体
咪唑	$-C-N-H$	氨基酸
羟基	$-OH$	多糖、氨基酸、硫酸化物、糖醛酯
氨基	$-NH_2$	氨基酸、壳聚糖
磺酸基	$O-S=O$	硫酸化物
磷酸酯基	$OH-P=O-OH$	磷脂
羧基	$-C=O-OH$	糖醛酯、氨基酸
羰基	$-C=O$	肽键
巯基	$-SH$	氨基酸

关于微生物的吸收容量，已经有一些研究提供了有关的数据，在表 2 中有详细的表达式。

表 2 微生物的重金属吸附容量 mmol/g

微生物种类		重金属类型		
		铅	镉	锌
细菌	假单胞菌	0.27	0.07	0.36
	芽胞杆菌	0.45	—	—
	铜绿假单胞菌	0.38	0.38	—
真菌	毛霉菌	0.08	0.06	0.08
	青霉菌	0.56	0.16	0.10
	根霉菌	0.27	0.24	0.21
藻类	莱茵衣藻	0.95	0.48	0.55
	马尾藻	1.36	0.74	—
	岩衣藻	1.31	0.34	—
	小球藻	0.47	0.30	0.37

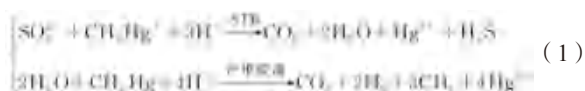
本项目拟以酵母为研究对象，采用细胞表面展示的方法，在酵母细胞表面构建金属硫蛋白复合物。微生物利用胞外聚合物（EPS）可实现对 Mg^{2+} 、 Pb^{2+} 和 Cu^{2+} 的高效固

定,对 Pb^{2+} 具有更强的亲和性。在此基础上,本项目拟采用高通量测序的方法,对不同种类的重金属离子进行富集,提高其对重金属离子的吸附能力。微生物在土壤中富集并形成配合物或沉积物,从而实现重金属的富集与固定。细胞中的金属硫蛋白可通过与镉离子 (Cd^{2+}) 作用在细胞中,与镉 (Cd^{2+}) 结合,从而减少镉的毒性。通过构建大肠杆菌,将镉离子转运到大肠杆菌中,并通过分泌 Cd^{2+} 螯合肽,提高镉在细胞中的累积形态,从而提高镉在细胞中的累积水平,从而提高镉在细胞中的累积水平,从而提高镉的生物有效性。

5.2 生物转化

微生物在体内代谢过程中会生成汞还原酶,将其转化为单质汞,从而减少对土壤中汞的危害。

以 As (As) 为对象,通过甲基化,获得低毒、低毒的甲基化产物。本项目拟采用 mer (mer) 作为子编码蛋白,对汞进行去甲基化。在汞分解酶和还原酶的催化下,甲基汞可以转化成单质汞和甲烷,从而减少汞对土壤的污染。而产甲烷菌与 SRB (SRB) 协同作用,可将甲基汞 (Hg) 分解成 CO_2 、 H_2 等,从而实现对环境介质中重金属的吸附特征的变化,其转换式可由式 (1) 表达。



5.3 生物指示剂

当土壤中的重金属含量超出了微生物的承受能力时,这些被转化的重金属颗粒就会被表面活性剂所吸附,从而从土壤中被分离出来。研究表明,微生物表面活性剂—胶束复合体通过吸附作用被固定于土壤表面;在土—土界面条件下,表面活性剂单分子层会发生重排,并与土壤中的重金属发生配位,生成更稳定的可溶物质,实现对土壤中重金属的有效去除。

6 土壤微生物修复技术在中国的发展现状及其未来的发展方向

中国已经形成了一套有效的农药降解菌种筛选技术、微生物修复剂的制备技术以及土壤中残留的微生物降解技术;同时,筛选出一批能高效降解石油烃的微生物菌株,并与不同种类的微生物复合,开发出生物修复用的预制床及污泥反应器。目前,以 PCBs、PAHs 等 POPs 为代表的土壤微生物修复技术已在国内得到广泛应用。目前,已经筛选出能够以多环芳烃为唯一碳源的假单胞菌属、黄杆菌等,也有能与四环以上 PAHs 共代谢的白腐真菌等。本项目拟构建菌根真菌增强苜蓿根系对 PAHs 的修复技术,并将其应用于受污染农田土壤中的固氮菌—根瘤菌—菌根复合生物修复。

从理论上讲,该领域的研究重点集中于对特定的、高效的降解菌的筛选与驯化,以及对土壤中营养、温湿度等关键因素的优化,以及对土壤中功能菌群的活性、寿命及安全

性的提升。微生物固定化是一种能够保证土壤中功能微生物群落结构和数量稳定、高效修复效果的有效手段。

目前,该技术的应用领域主要集中在石油、石化、煤制天然气等工业生产过程中排放的各类有机废水,以及生活污水、畜禽养殖污水等方面。利用微生物固定化技术将特定功能的微生物固定在载体上,实现了对污染物的原位修复。该技术已经成功应用于工业废水及生活污水的处理。

从当前的研究结果看,中国土壤微生物修复技术的研究取得了较大进展,但仍存在一些问题,如土壤微生物修复中的环境因子调控机制尚不明确,生物修复过程中土壤酶活性、微生物群落结构、基因表达等方面的研究较少,对生物修复过程中土壤理化性质与生物修复之间相互作用机理等方面的研究较少。

在未来,土壤微生物修复技术还需要加强以下几个方面:

①本项目拟在前期工作基础上,对已有的高效降解菌进行分离、驯化,并对其进行全基因组测序,阐明其基因多样性及相关功能基因;在充分了解其生理生化、遗传特征的基础上,对其进行基因工程改造。

②土壤复合污染具有普遍性、复杂性和特殊性,常需多途径联合修复,因此将微生物法与其他原位修复方法相结合,可实现对重金属、有机污染土壤的有效治理。

③在室内环境中,由于环境的理想性,受扰动因子很小,可以得到较好的恢复效果,但在野外环境中,扰动因子就比较复杂了。本项目拟通过环境工程学、水利学、环境化学和土壤学等多学科交叉,建立一种适用于不同时间、不同地点的土壤原位修复方法,开发针对性强、效率高、成本低的微生物修复装备,为该技术的工程化应用奠定基础。

④在生物修复过程中,土壤的理化性质、营养成分以及土壤中的污染物可能会发生变化,这可能会影响微生物群落结构以及生物修复的效果。因此,需要对土壤的理化性质、营养成分、微生物群落结构及功能基因等进行长期监测,研究其动态变化规律,以获得土壤微生物修复过程中的相关数据。

⑤生物修复是一个复杂的过程,涉及到多个学科领域。因此,需要在对多种生物修复技术进行综合评价和比较的基础上,选择一种更有效、更经济的方法;同时还应进一步研究生物修复过程中的微生物群落结构、功能基因表达、代谢产物积累等变化规律。

参考文献

- [1] 鞠铁男,雷梅.地累积指数法评价多金属环境质量的方法优化探索:以农业发达地区为例[J].环境科学,2022,43(2):957-964.
- [2] 王昌宇,张素荣,刘继红,等.雄安新区某金属冶炼区土壤重金属污染程度及风险评价[J].中国地质,2021,48(6):1697-1709.
- [3] 倪碧珩,陆胤,施维林.土壤重金属元素含量的预测方法仿真研究[J].计算机仿真,2022,39(5):234-237+392.
- [4] 谢晓倩,田华,贺军辉,等.疏基化多孔氧化硅纳米球及其对汞的吸附富集[J].水处理技术,2021,47(7):48-53.