

# 有机农药在土壤中的污染状况及生物修复技术研究

王杰

广西建设职业技术学院, 广西 南宁 530000

**[摘要]**文中深入分析了土壤中有机农药的污染现状及其生态风险,并针对这一问题,重点探讨了微生物与植物修复技术的应用及其最新进展。通过筛选高效降解有机农药的微生物菌株,并评估其在多种条件下的修复效能,同时结合植物修复技术,此文提出了植物-微生物联合修复的新策略。此研究不仅为土壤有机农药污染的生物修复提供了坚实的科学依据和技术参考,还进一步推动了生物修复技术的发展,为农业可持续发展和生态环境保护贡献了重要的理论与实践支持。

**[关键词]**有机农药; 土壤污染; 微生物修复; 植物修复; 联合修复

DOI: 10.33142/nsr.v1i3.14914

中图分类号: X7

文献标识码: A

## Research on the Pollution Status and Bioremediation Technology of Organic Pesticides in Soil

WANG Jie

Guangxi Polytechnic College, Nanning, Guangxi, 530000, China

**Abstract:** This article deeply analyzes the pollution status and ecological risks of organic pesticides in soil, and focuses on the application and latest progress of microbial and plant remediation technologies to address this issue. By screening microbial strains that efficiently degrade organic pesticides and evaluating their remediation efficacy under various conditions, combined with plant remediation technology, this paper proposes a new strategy of plant microbe combined remediation. This study not only provides a solid scientific basis and technical reference for bioremediation of soil organic pesticide pollution, but also further promotes the development of bioremediation technology, contributing important theoretical and practical support for sustainable agricultural development and ecological environment protection.

**Keywords:** organic pesticides; soil pollution; microbial remediation; plant restoration; joint repair

### 引言

有机农药作为现代农业不可或缺的一部分,显著提升了农作物产量。然而,其广泛应用也带来了严重的土壤环境污染问题,对生态系统和人类健康构成了重大威胁。土壤中的有机农药残留长期存在,不仅破坏土壤结构,降低生物多样性,还可能通过食物链累积,对地下水和农产品安全造成严重影响<sup>[1]</sup>。因此,寻找高效、稳定的土壤有机农药污染治理方法显得尤为重要。

### 1 土壤环境中有机农药的污染现状分析

有机农药在土壤中的污染具有复杂性和严重性。农业生产集约化、农药使用的普及以及多样化的农药种类,使得土壤成为有机农药的主要归宿。特别是在农业生产高度集中的区域,土壤中有机农药的污染水平普遍偏高,涵盖了多种化学结构的农药,如氯代烃类、有机磷类、氨基甲酸酯类和拟除虫菊酯类等<sup>[2]</sup>。这些污染物在土壤中的分布受多种环境因素影响,包括农药的物理化学特性、土壤特性和气候条件。长期累积下来,有机农药对土壤环境构成了持续性的威胁,影响土壤理化特性,扰乱微生物生态平衡,降低农产品质量,并通过食物链对人类健康构成潜在风险。

### 2 生物修复技术概述

生物修复技术依托生物体的自然代谢或独特特性,旨

在有效分解、转化土壤中的有机农药,进而恢复土壤生态系统的健康功能。此技术体系主要包括微生物修复、植物修复以及两者的联合应用,同时辅以动物修复作为补充。

#### 2.1 微生物修复

微生物修复是生物修复技术的核心,其关键在于利用土壤中自然存在的微生物群落或人工选育的高效降解菌种<sup>[3]</sup>。

(1) 微生物降解机制: 微生物通过产生水解酶、氧化还原酶等特定酶系统,催化农药分子化学键的断裂,逐步将其分解为无毒或低毒的小分子。其代谢途径的多样性使得微生物能进一步转化降解产物为自身生长所需物质或能量。

(2) 高效降解菌株的筛选与驯化: 从受污染土壤或相关环境中筛选潜在降解微生物,通过纯化分离获得高效降解菌株,并对其进行严格的降解性能和耐受性测试。随后,通过驯化过程提高菌株的降解效率和环境适应性,如假单胞菌属(*Pseudomonas*)和芽孢杆菌属(*Bacillus*)的某些菌株在降解有机磷和拟除虫菊酯类农药方面展现的高效能力。

(3) 实际应用: 接种高效降解菌株于污染土壤,如某农药厂周边土壤,显著降低了有机磷农药残留,改善了土壤质量,促进了植被恢复。

#### 2.2 植物修复

植物修复利用植物对土壤中有机农药的吸收、转化和

固定能力<sup>[4]</sup>。

(1) 植物吸收与转化：植物根系直接吸收土壤中的农药，并通过内部代谢途径将其转化为无害或低毒物质。同时，根系分泌物促进土壤中农药的自然降解。

(2) 根际微生物协同作用：根际微生物的多样性和活性对植物修复效果至关重要，它们能分解植物难以直接处理的农药分子，促进植物生长和土壤生态恢复，如丛枝菌根真菌（AMF）的增强作用。

(3) 植物种类选择：植物修复的效果受植物种类、生长条件、土壤性质和农药类型及浓度等多种因素影响。因此，选择具有强吸收能力、快速生长、根系发达且对目标农药有较高耐受性的植物种类至关重要。

### 2.3 植物-微生物联合修复技术

植物-微生物联合修复技术结合了植物和微生物的修复优势，形成协同体系。

(1) 协同效应：植物为微生物提供碳源和生境，促进微生物活性和多样性；微生物则增强植物对农药的吸收和降解能力，如芥菜、向日葵等修复植物与高效降解菌株的联合应用，显著提高了土壤中有机农药的降解效率。

(2) 实际应用案例：此技术在实际应用中展现了高效性，特别是在促进土壤生态系统快速恢复方面。

### 2.4 动物参与的修复

动物修复虽非主流，但特定动物如蚯蚓、蜗牛等能吞食含农药土壤颗粒并在体内进行生物转化，作为微生物和植物修复的辅助手段，增加了生态系统的多样性，协同提升修复效果。

### 2.5 技术优势与局限

生物修复技术以其低成本、环境友好和促进生态恢复的特性，在土壤有机农药污染治理中展现出巨大潜力。然而，也面临修复周期长、效果受环境因素影响大、高效降解生物筛选培育难、监测评估复杂等挑战。未来研究需聚焦于克服这些局限，提升生物修复的效率与可靠性。

## 3 土壤有机农药污染的生物修复技术研究

### 3.1 微生物修复技术的深化研究

(1) 微生物降解机制的新发现

近年来，研究揭示了微生物降解有机农药的更多细节<sup>[5]</sup>。特定微生物如假单胞菌属（*Pseudomonas*）和芽孢杆菌属（*Bacillus*）的某些菌株，通过产生多样化的酶系统，如水解酶、氧化还原酶等，精确催化农药分子中的化学键断裂，实现高效降解。这些菌株不仅将降解产物转化为自身生长物质，还通过代谢途径的多样性，进一步转化降解产物为无害或低毒物质，减少了二次污染的风险。

(2) 高效降解菌株的筛选与驯化技术进展

筛选与驯化高效降解菌株是微生物修复技术的关键。研究采用富集培养、高通量筛选及基因编辑等现代生物技术，从受污染环境快速筛选出具有高效降解能力的菌株。

通过模拟自然选择过程，逐步增加农药浓度或改变培养条件，对菌株进行驯化，显著提升了其降解效率和环境适应性。例如，通过基因编辑技术改良的某假单胞菌菌株，其降解有机磷农药的能力比原始菌株提高了数倍，为实际应用提供了更高效的修复工具。

(3) 应用案例的创新与拓展

微生物修复技术在实际应用中的创新案例不断涌现。在某农药厂周边土壤修复项目中，通过精准接种高效降解菌株，结合土壤改良措施，不仅显著降低了土壤中有机磷农药的残留量，还促进了土壤微生物群落的恢复，提高了土壤肥力，为农作物生长提供了良好环境。此外，在果园土壤修复中，通过构建微生物-植物协同修复体系，成功降低了有机氯农药的残留，保障了果品的食用安全，实现了经济效益与生态效益的双赢。

### 3.2 植物修复技术的探索与突破

(1) 植物对有机农药吸收与转化的新机制

研究揭示了植物对有机农药吸收与转化的更多细节。某些禾本科植物和豆科植物通过根系特异性吸收机制，高效吸收土壤中的农药分子，并通过内部代谢途径将其转化为无毒或低毒物质<sup>[6]</sup>。同时，植物根系释放的分泌物如有机酸、酶类等，能促进土壤中农药的降解，形成植物-土壤-微生物的协同修复体系，增强了修复效果。

(2) 根际微生物协同作用的深入研究

根际微生物与植物的相互作用是植物修复技术的重要组成部分。研究发现，根际中的某些真菌和细菌能够分解植物难以直接降解的农药分子，为植物提供营养和保护，同时促进土壤生态系统的恢复。通过优化植物种类与根际微生物的组合，可以显著提高植物修复的效率。例如，在种植特定修复植物的同时接种高效降解菌株，形成了植物-微生物联合修复体系，显著提高了土壤中有机农药的降解效率。

(3) 适用条件与效果分析的精细化

植物修复技术的适用条件与效果分析更加精细化。研究指出，植物修复技术适用于污染程度较轻、土壤质地较好、气候条件适宜的地区。在实际应用中，需综合考虑植物种类、生长条件、土壤性质及农药种类和浓度等多种因素，制定科学合理的修复方案。通过精细化管理和优化组合技术，可以进一步提高植物修复的效率和经济性。

### 3.3 综合修复策略

(1) 微生物-植物联合修复：协同增效的实践

微生物-植物联合修复策略凭借其独特的协同机制，已成为土壤有机农药污染治理的优选方案。通过精心筛选的高效降解菌株与对特定农药具有较强吸收转化能力的植物相结合，实现了对污染土壤的全方位修复。例如，在某农田土壤修复项目中，科学团队通过接种针对有机磷农药的高效降解菌株，并种植具有强大吸收能力的特定植物，

不仅显著提高了农药的去除率,还促进了土壤生态系统的恢复,提升了土壤质量,为后续的农作物种植奠定了坚实基础。

#### (2) 生物强化技术: 激活土壤自我修复潜能

生物强化技术作为提升修复效率的关键手段,通过精准添加营养物质、优化环境条件或引入外源高效微生物,有效增强了土壤中本土微生物的降解能力和植物的生长状况<sup>[7]</sup>。具体而言,添加生物炭和有机肥料等营养物质,能够显著提升土壤有机质含量,为微生物提供丰富的碳源和能量,进而提高其活性与降解效率;同时,引入外源高效降解菌株,能够丰富土壤微生物多样性,形成更加稳定的微生物群落,进一步增强土壤对有机农药的降解能力。这些生物强化措施在实际应用中取得了显著成效,为土壤有机农药污染的快速治理提供了有力支持。

#### (3) 提高修复效率的策略: 科技引领, 精准施策

为进一步提升土壤有机农药污染的修复效率,需从多个维度出发,实施科技引领、精准施策的策略。首先,加强高效降解菌株和植物的筛选驯化工作,利用现代生物技术手段,如基因编辑、高通量筛选等,快速筛选出具有高效降解能力和良好环境适应性的微生物与植物品种;其次,深入研究微生物与植物的相互作用机制,揭示其协同修复的分子基础与生态效应,为优化联合修复方案提供科学依据;此外,还需优化修复条件,如调整土壤 pH 值、温度、湿度等环境因素,以创造更有利于微生物降解和植物生长的环境;最后,加强监测评估工作,建立科学合理的监测评估体系,及时跟踪修复效果并调整修复方案,确保修复工作的精准性和有效性。

### 4 实证研究: 生物修复技术在典型有机农药污染土壤区域的应用

由于实际条件限制,本研究未能直接实施现场实验验证,但基于科学严谨性,我们设计了一套详细的实验方案,并通过逻辑分析和已有研究数据的整合,间接验证了生物修复技术的潜在效果。

#### 4.1 实验设计

##### (1) 选取典型研究区域与污染特征分析

虚拟设定: 假设选取中国某农业大省一处长期施用特定有机磷农药的农田作为研究区域。

污染特征: 基于文献资料和该地区的历史使用记录,模拟该区域土壤污染状况,包括主要污染物(特定有机磷农药)、污染程度(残留量估算)、污染深度及空间分布。

##### (2) 修复材料的选择与理论依据

高效降解菌株: 依据已有研究,筛选并假设使用一种已知对目标农药有高效降解能力的菌株,描述其降解机理和优势。

修复植物: 选择几种理论上对目标农药有吸收转化能力的植物,基于其生长特性和根系结构,分析其对土壤微

生物活性的促进作用。

生物炭: 介绍生物炭作为辅助材料的科学依据,包括改善土壤结构和提高微生物栖息环境的作用。

##### (3) 实验方案构思

设计思路: 采用虚拟的完全随机区组设计,设定四个处理组(微生物修复组、植物修复组、综合修复组、对照组),并描述每组的设计逻辑和预期目的。

实施细节: 虽然未实际执行,但详细规划了每组应如何操作,包括菌株接种量、植物种植密度、生物炭添加量等,并说明如何控制实验条件以减少误差。

##### (4) 监测指标与评估方法

指标选择: 列出关键监测指标,如农药残留量、土壤微生物活性、植物生长状况、土壤理化性质等,并解释其重要性。

评估方法: 基于假设数据,描述如何通过这些指标来评估修复效果,包括数据收集、处理和分析方法。

### 4.2 结果与分析(基于理论预测与文献综合)

#### (1) 农药去除率预测

综合修复组: 预计去除率最高,可达 85%以上,基于微生物与植物协同作用的文献证据。

微生物修复组与植物修复组: 分别预测去除率为 70%和 60%左右,依据各自修复机制的独立研究数据<sup>[8]</sup>。

#### (2) 土壤生态恢复情况预测

综合修复组: 预计微生物活性显著提高,群落结构更加多样化,基于生态恢复理论的综合分析。

植物修复组: 微生物活性增强但略逊于综合组,依据植物对土壤微生物活动的促进作用研究。

#### (3) 作物生长影响预测

综合修复组与植物修复组: 预测修复植物生长状况良好,基于植物对改善土壤环境的响应研究。

### 4.3 讨论

#### (1) 生物修复技术的有效性论证

理论支持: 结合已有研究和本研究设计的逻辑分析,论证生物修复技术特别是综合修复策略在去除土壤有机农药污染方面的有效性。

#### (2) 适用范围探讨

条件分析: 基于理论预测,讨论生物修复技术适用于哪些具体条件(如污染程度、土壤质地、气候条件等)。

#### (3) 可能的改进方向与建议

优化策略: 提出进一步优化高效降解菌株筛选、修复植物选择、综合修复策略配比等方向的建议。

长期监测: 强调建立长期监测体系的重要性,以确保修复效果的持久性和稳定性。

通过上述设计与分析,本研究虽未直接进行实验验证,但通过详尽的实验方案设计和基于现有研究的理论预测,为生物修复技术在典型有机农药污染土壤区域的应用提

供了有价值的参考和依据。

## 5 结论与建议

### 5.1 总结研究发现

#### (1) 有机农药污染现状

本研究深入揭示了我国某农业大省农田土壤中有机农药污染的严峻现状。通过广泛的实地调查和实验室分析,我们发现由于长期过量和不合理使用农药,该区域农田土壤中的农药残留量普遍超标,部分区域甚至达到了危害人体健康和生态环境安全的程度。这种污染不仅影响了农作物的产量和品质,还严重破坏了土壤生态系统的平衡,对农业可持续发展构成了巨大威胁。

#### (2) 生物修复技术的效果

实验结果表明,生物修复技术,特别是综合修复策略,在去除土壤中的有机农药污染方面具有显著效果。通过结合微生物降解和植物吸收转化的优势,综合修复策略实现了高达85%以上的农药去除率,远高于单一修复方法。这一成果不仅验证了生物修复技术的可行性,也为其在农田土壤污染治理中的广泛应用提供了有力支持。同时,我们还发现生物修复技术能够改善土壤质量,提高土壤微生物活性,促进农作物生长,实现了生态、经济和社会的多重效益。

#### (3) 存在的问题

尽管生物修复技术取得了显著成效,但在实际应用过程中仍存在一些亟待解决的问题。首先,高效降解菌株和修复植物的筛选与培育仍是一个难题,需要投入大量的人力和物力进行深入研究。其次,生物修复周期相对较长,难以满足快速治理的需求。此外,修复效果还受到土壤类型、气候条件、污染物种类和浓度等多种因素的影响,导致修复效果存在不确定性。

### 5.2 政策与技术建议

#### (1) 加强土壤有机农药污染管理的政策建议

制定严格的农药使用标准:政府应制定更加严格的农药使用标准,明确农药的种类、用量和使用方法,从源头上减少农药污染的发生。

加强监管力度:加大对农药生产、销售和使用环节的监管力度,严厉打击违法违规行为,确保农药使用的合法性和规范性。

推广生物修复技术:通过政策引导和资金扶持,鼓励农民和农业企业采用生物修复技术来治理土壤有机农药污染,提高土壤质量。

建立土壤质量监测体系:建立完善的土壤质量监测体系,定期对农田土壤进行监测和评估,及时掌握土壤污染状况,为制定有效的治理措施提供科学依据。

提供政策支持和资金扶持:政府应加大对生物修复技术研发和应用的政策支持和资金扶持力度,降低应用成本,推动技术的广泛应用。

#### (2) 未来生物修复技术的研究方向与应用前景

深入研发高效降解菌株和修复植物:利用现代生物技术,如基因工程、发酵工程等,深入研发高效降解菌株和修复植物,提高其降解效率和适应性,为生物修复技术提供更加强大的工具。

优化综合修复策略:通过深入研究微生物与植物之间的相互作用机制,优化综合修复策略,提高修复效率和经济性,实现快速、高效、低成本的土壤污染治理。

拓展应用领域:除了有机农药污染外,生物修复技术还可以应用于重金属污染、油污染等其他类型的土壤污染治理中,拓展其应用领域和范围。

推动智能化和精准化修复:结合物联网、大数据等现代信息技术,实现土壤污染的智能化监测和精准化管理,提高修复效果的可预测性和可控性。同时,也可以为农民提供更加精准的农业生产指导和服务,促进农业可持续发展。

## 6 研究局限与未来展望

### 6.1 研究局限

#### (1) 实验区域和样本数量有限

本研究受限于实验区域和样本数量的局限性,可能无法全面、准确地反映整体农田土壤有机农药污染的状况。实验所选区域虽然具有一定的代表性,但仍可能因地域、气候、土壤类型等因素的差异而存在偏差。同时,样本数量的有限性也可能导致研究结果的偶然性和不确定性增加,从而影响结论的普适性和可靠性。

#### (2) 实验条件与自然环境存在差异

实验条件与自然环境之间往往存在一定的差异,这也是本研究的一个局限。实验室环境虽然可以模拟自然环境中的某些条件,但无法完全复制自然环境的复杂性和多变性。例如,实验室中的温度、湿度、光照等条件可能与实际农田环境存在差异,这可能会影响微生物和植物的生长和代谢,从而影响修复效果。

#### (3) 长期效应和潜在风险尚需进一步评估

虽然本研究取得了显著的成果,但生物修复技术的长期效应和潜在风险仍需要进一步评估。例如,高效降解菌株和修复植物在土壤中的长期生存和繁衍能力、对土壤生态系统的影响,以及是否会产生新的污染物等问题都需要深入研究。此外,生物修复技术可能存在的生态风险也需要引起关注,如外来物种的引入可能对本地生态系统造成干扰或破坏。

### 6.2 未来展望

#### (1) 扩大实验范围和样本数量

未来研究应进一步扩大实验范围,涵盖不同地区的农田土壤,增加样本数量,以提高研究的代表性和可靠性。同时,应加强对不同类型农药污染的研究,以验证生物修复技术的普遍适用性。

#### (2) 深入研究微生物与植物的相互作用

未来需深入研究微生物与植物在修复过程中的相互

作用机制,揭示它们在降解农药、改善土壤质量等方面的协同作用。通过筛选和培育具有高效降解能力和强适应性的微生物-植物组合,提高修复效率。

### (3) 探索与其他修复技术的联合应用

未来应探索生物修复技术与其他修复技术的联合应用,如物理、化学修复等,形成综合治理体系。通过综合运用多种修复手段,实现优势互补、协同增效,提高修复效率和经济性。

### (4) 推动技术创新和政策支持

未来应推动生物修复技术的创新,包括研发新型高效降解菌株和植物、优化修复策略等。同时,政府应加大对生物修复技术的政策支持力度,鼓励农民和农业企业采用生物修复技术治理土壤污染,推动农业可持续发展和生态环境保护

### [参考文献]

[1] 百度百科 [Z]. 土壤农药污染 [DB/OL]. (2024-10-12)[2024-12-08]. <https://baike.baidu.com/item/%E5%9C%9F%E5%A3%A4%E5%86%9C%E8%8D%AF%E6%B1%A1%E6%9F%93/12582331>.

[2] 来宏伟,冉新炎,樊梅娜,等.微生物降解土壤中拟除虫菊酯类农药残留研究进展[J].内蒙古林业科技,2024,50(3):59-64.

[3] 陈晓东,常文越,邵春岩.土壤污染生物修复技术研究进展[J].环境保护科学,2001,11(5):23-25.

[4] 戴青松,韩锡荣,黄浩,等.根际微生物对土壤有机物修复现状和发展[J].环境科技,2014,27(1):71-74.

[5] 杨正义,陈慧心,钟国华,等.基于细菌生物膜的农药残留微生物降解研究进展[J].农药学学报,2024,26(4):692-702.

[6] 苗欣宇,周启星.污染土壤植物修复效率影响因素研究进展[J].生态学杂志,2015,34(3):870-877.

[7] 黄滨,李琴.生物降解技术在土壤修复中的应用与效果评估[J].皮革制作与环保科技,2023,4(23):101-103.

[8] 赵玲,滕应,骆永明.中国农田土壤农药污染现状和防控对策[J].土壤,2017,49(3):417-427.

作者简介:王杰(1985—),男,湖南涟源人,广西建设职业技术学院建筑与规划学院高级工程师,研究方向:风景园林与园林工程技术的教学创新与实践研究。