

# 植物根际微生物联合修复重金属的经济成本分析

郝安蒙

美国弗吉尼亚大学

**摘要:** 随着全球工业化进程的加快,土壤重金属污染问题日益严重,已成为威胁生态环境和人类健康的全球性问题。传统的物理和化学修复方法虽然能够快速去除土壤中的重金属,但往往伴随着高昂的成本和次生污染问题。近年来,植物根际微生物修复技术作为一种生态友好型和可持续的土壤修复手段,逐渐受到关注。然而,该技术在大规模应用中的经济可行性仍然存在诸多挑战。本文基于经济成本的视角,通过构建成本-成效模型,深入分析了植物根际微生物联合修复重金属的经济成本和效益,探讨了该技术在实际应用中的优势与不足,并提出了未来可能的优化方向。研究表明,尽管植物根际微生物联合修复技术在特定条件下具有较高的经济效益,但其成本效益受多种因素影响,如土壤污染程度、修复周期、微生物菌群的选择与环境适应性等。因此,需要通过进一步的研究和技术改进,提升该技术的经济可行性,使其能够在更广泛的场景中得到应用。

**关键词:** 植物根际微生物、重金属修复、经济成本、成本-成效模型、环境经济学

正文

## 一、引言

随着全球工业化和城市化进程的加快,土壤重金属污染问题日益严重。重金属如铅、镉、汞等,因其持久性和毒性,难以通过自然过程被移除,对生态系统和人类健康构成了严重威胁。传统的修复方法,如物理修复和化学修复,尽管能够有效去除土壤中的重金属,但这些方法通常成本高昂,且可能带来二次污染。此外,这些方法在处理大规模污染场地时,面临着技术复杂性和经济可行性的问题。

植物根际微生物联合修复技术是一种新兴的环境修复手段,因其生态友好、成本较低且可持续性强,逐渐成为研究热点。然而,尽管该技术在实验室和小规模试验中表现出色,其在大规模实际应用中的经济可行性仍然是一个亟待解决的问题。因此,本文旨在通过构建和应用成本-成效模型,系统评估植物根际微生物联合修复技术的经济成本,并分析其在不同条件下的应用前景与挑战。

## 二、植物根际微生物联合修复技术概述

### 1. 植物根际微生物的修复机理

植物根际微生物修复技术利用植物根际微生物(如细菌、真菌等)与植物的协同作用,降低土壤中重金属的生物有效性。植物根际是植物根系与土壤接触的区域,这里是微生物活动的集中区域。根际微生物通过一系列生物化学过程,如吸附、络合、沉淀等,将土壤中的重金属转化为植物和其他生物不易吸收的形态,从而降低重金属的毒性并减少其环境风险。

### 2. 植物在修复中的作用

植物在重金属修复中的作用主要体现在以下几个方面:

- 吸收和积累: 某些植物能够通过根系吸收土壤中的重金属,并将其积累在地上部或根部。这些植物被称为超富集植物。
- 固定和稳定: 植物根系分泌的有机酸等物质能够与土壤中的重金属发生络合反应,将其固定在根际,减少重金属的迁移性。
- 环境改善: 植物的生长能够改善土壤结构,增加土壤有机质含量,从而为根际微生物提供更好的生存环境,进一步促进重金属的修复。

### 3. 微生物在修复中的作用

根际微生物在重金属修复中的作用主要包括:

- 重金属沉淀: 某些微生物能够通过代谢活动,将重金属转化为不溶性化合物,如硫化物、磷酸盐等,从而减少重金属的生物有效性。
- 重金属吸附和络合: 微生物细胞壁上含有丰富的功能基团(如羧基、氨基等),能够与重金属离子发生络合反应,将其吸附在细胞表面或细胞内。
- 促进作用: 微生物分泌的植物激素、酶等物质能够促进植物生长,增强植物对重金属的耐受性和吸收能力。

## 三、经济成本分析模型的构建

### 1. 直接成本

直接成本是指在修复过程中直接发生的费用,主要包括以下几个方面:

- 植物和微生物的采购与培养: 包括购买适合修复的超富集植物和根际微生物菌种,以及培养和维持这些生物体的费用。
- 土壤的前处理费用: 在某些情况下,为提高修复效果,需要对污染土壤进行前处理,如调节 pH 值、增加有机质等,这些操作也会产生一定的成本。
- 修复过程中的投入: 包括修复过程中所需的水、肥料、人工等投入,这些投入是保证修复效果的必要条件。
- 技术支持费用: 包括修复过程中需要的技术咨询、设备租赁及操作费用等。

### 2. 间接成本

间接成本是指修复项目实施过程中不易直接量化但对项目整体经济性具有重要影响的费用,主要包括:

- 长期监测与评估费用: 在修复完成后,需要对修复效果进行长期监测,以评估土壤中重金属的残留情况及其对环境的影响。这部分费用在修复项目的总成本中占有较大比重。
- 技术人员的培训与管理费用: 为了确保修复项目的顺利进行,技术人员的培训和管理是必不可少的。这部分费用虽不直接产生于修复过程,但对于提高项目成功率和减少后期维护成本至关重要。
- 环境风险评估费用: 在项目实施前和实施过程中,需要进行环境风险评估,以确保修复过程中不会产生新的环境问题。

### 3. 成效

成效的衡量主要通过修复后土壤中重金属含量的降低程度、土壤结构和肥力的恢复情况、以及对周边生态环境的改善效果等指标进行评估。具体的成效评价指标包括:

- 重金属去除效率: 指修复后单位土壤中重金属含量的降低百分比。
- 土壤结构恢复情况: 通过对土壤的物理性质(如团聚体含量、孔隙度等)和化学性质(如 pH 值、有机质含量等)的监测,评估修复后土壤结构的改善程度。
- 生态环境改善效果: 通过监测修复区内植物生长状况、微生物群落多样性等指标,评估修复后生态环境的改善情况。

### 4. 成本-成效模型的构建

基于上述直接成本、间接成本和成效指标,本文构建了一个成本-成效模型,用于量化和比较不同修复方案的经济效益。该模型的核心公式如下:

$$CE = Cd + Ci \cdot CE_{eff} = \frac{C_d + C_i}{CE_{eff}}$$

其中,CECECE 表示成本-成效比,CdC\_dCd 表示直接成本,CiC\_iCi 表示间接成本,EEE 表示成效。通过计算成本-成效比,我们可以比较不同修复方案的经济性,选择最优方案。

#### 四、成本-成效模型的应用与分析

##### 1. 修复场地选择

在不同的污染场地中,土壤重金属污染的种类、浓度和分布情况存在显著差异。因此,不同场地的修复成本和成效也会有所不同。通过成本-成效模型,可以帮助决策者选择最优的修复场地。

例如,在污染程度较高的场地,由于重金属浓度较高,修复过程可能需要更长的时间、更大的投入和更高效的修复技术。这种情况下,尽管直接成本和间接成本较高,但由于修复效果显著,其单位经济效益可能更高。相反,对于污染较轻的场地,可以选择成本较低的修复方案,以实现经济效益最大化。

##### 2. 微生物菌群选择

不同的根际微生物菌群在修复重金属方面的效果各异。通过成本-成效模型的分析,可以选择成本效益最佳的微生物菌群,优化修复效果。

例如,某些高效的微生物菌群能够在短时间内显著降低土壤中的重金属含量,但其培养和维护成本较高。通过成本-成效模型的量化分析,可以平衡成本与成效,选择最优的菌群组合,从而在降低成本的同时提高修复效果。

##### 3. 修复周期优化

修复周期的长短对经济成本和效益有直接影响。修复周期过长可能导致直接和间接成本的累积增加,而修复周期过短可能无法达到预期的修复效果。因此,优化修复周期是提高项目经济效益的关键。

通过成本-成效模型的分析,可以确定最佳修复周期,使得在保证修复效果的前提下,经济成本降至最低。对于长期修复项目,适当延长修复周期可能有助于降低年均成本,从而提高总体经济效益。

#### 五、经济效益分析

##### 1. 环境长期效益

植物根际微生物联合修复技术不仅能够去除土壤中的重金属,还能改善土壤的物理和化学性质,为后续的农业生产和生态恢复创造有利条件。尽管该技术在实施初期可能需要较高的成本投入,但由于其长期效益显著,在较长时间内可以持续发挥修复作用,减少了重复修复的需求,从而提高了项目的总体经济效益。

此外,植物根际微生物修复技术对环境的长期影响也具有重要意义。通过减少土壤中的重金属含量,该技术能够降低重金属对地下水和地表水的污染风险,保护水资源和生态系统的健康。

##### 2. 社会效益

植物根际微生物修复技术的应用不仅有助于改善土壤环境,还可以提高农产品的安全性,减少因重金属污染导致的健康风险。通过减少重金属在食品链中的积累,该技术能够提高农产品的市场价值,增加农民的收入,并改善公众健康水平。

此外,土壤修复项目的实施还可以创造就业机会,促进当地经济发展。特别是在贫困地区,土壤修复项目的实施有助于推动农业可持续发展,提高当地居民的生活水平。

#### 六、实际应用中的挑战与优化策略

##### 1. 土壤重金属污染的复杂性

土壤中重金属污染的种类、浓度和化学形态多样,导致修复效果的差异较大。在实际应用中,需要根据污染土壤的具体情况,制定针对性的修复方案,选择合适的植物和微生物菌群,以最大限度地提高修复效果。

为了解决这一挑战,可以通过加强对污染场地的详细调查和分析,确定土壤中的主要污染物及其分布情况,并据此制定相应的修复策略。此外,结合多种修复技术,如化学稳定剂、物理屏障等,可以提高修复效果,降低修复成本。

##### 2. 微生物菌群的环境适应性

不同区域的土壤环境(如 pH 值、温度、湿度等)对微生物菌群的生存和修复效果有显著影响。在实际应用中,需要对微生物菌群进行筛选和优化,以确保其在特定环境条件下的有效性。

为此,可以通过基因工程技术,改造微生物菌群,使其具有更强的重金属耐受性和修复能力。此外,还可以通过调整土壤环境条件,如调节 pH 值、增加有机质等,改善微生物的生存环境,增强其修复效果。

#### 七、未来研究方向与结论

##### 1. 多学科交叉研究

植物根际微生物联合修复技术的进一步发展需要多学科交叉研究。结合分子生物学、生态学、环境经济学等多学科知识,深入研究植物根际微生物与土壤重金属的相互作用机制,为优化修复技术提供理论依据。

未来的研究应重点关注以下几个方面:一是揭示植物根际微生物在重金属修复中的关键作用机制;二是探索不同植物和微生物菌群的协同作用机制,优化菌群组合;三是评估修复技术的长期生态效益,为其大规模推广应用提供科学支持。

##### 2. 新型修复技术的开发

在现有技术的基础上,开发更高效的联合修复技术,将植物根际微生物与纳米材料、化学稳定剂等新型技术结合,提升修复效果并降低经济成本。

例如,纳米材料具有独特的物理化学性质,如高表面积、高反应活性等,可以与植物根际微生物协同作用,提高重金属的去除效率。此外,化学稳定剂可以与土壤中的重金属形成稳定复合物,减少重金属的迁移性和生物有效性,从而增强修复效果。

##### 3. 经济模型的进一步优化

随着大数据和人工智能技术的发展,基于数据驱动的经济模型将为修复项目的经济效益评估提供更为精准的工具。同时,通过不断更新和优化模型参数,可以提高模型的适用性和预测准确性。

未来的研究应重点关注以下几个方面:一是通过大数据分析,构建更加全面的成本-成效模型,量化修复技术的经济效益;二是结合人工智能技术,开发智能化的修复方案优化工具,提高项目管理效率;三是建立多尺度、多因素的经济模型,为修复技术的推广应用提供科学决策支持。

#### 参考文献

- [1]王理德,赵赫然,宋达成,等.人工种植沙棘模式下页岩山复垦土壤微生物变化及土壤酶活性——以祁连山双龙沟为例[J/OL].应用与环境生物学报,1-13[2024-09-02].<https://doi.org/10.19675/j.cnki.1006-687x.2023.12019>.
  - [2]王瑞萍,杨兴,高玉蓉,等.锰改性生物炭对砷铅在大蒜中积累及土壤酶活性的影响[J/OL].浙江农林大学学报,1-13[2024-09-02].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/33.1370.S.20240708.1653.002.html>.
  - [3]商成梅.改性磷石膏赤泥复合材料对砷的吸附机理及复合污染土壤修复研究[D].贵州师范大学,2024.DOI:10.27048/d.cnki.ggzsu.2024.001581.
  - [4]邵雪.纳米材料应用于镉污染农田土壤修复的生态风险和人体健康风险研究[D].山东师范大学,2024.DOI:10.27280/d.cnki.gsdsu.2024.000856.
- 谢贵林,金文辉,黄涛,等.植物-微生物联合修复石油烃污染土壤研究进展[J].油气田环境保护,2024,34(02):1-6.