

# 微生物群落在生态系统恢复中应用价值探析

张瀚誉

西南交通大学 四川 成都 611756

**摘要:** 随着全球生态系统面临气候变化、污染和栖息地破坏等多重压力,微生物群落的作用逐渐受到人们的重视。研究表明,微生物群落具有独特的代谢能力,在生态系统恢复中发挥着重要作用。本文阐述了微生物群落驱动生态系统恢复的原理,并介绍微生物群落的研究方法,讨论微生物群落在恢复退化生态系统中的关键步骤。最后,强调微生物群落驱动生态系统恢复技术的潜在应用,并展望未来的研究方向。

**关键词:** 环境生物学;微生物群落;生态系统恢复

环境生物学是研究生物与环境之间相互作用的学科分支,近年来取得了许多成果。该领域近期的一个重要研究认为微生物群落是生态系统恢复的关键因素。本文旨在讨论这一问题,阐述其原理,并强调其重要性、潜在应用和未来的研究方向。

## 1 关注微生物群落进行生态系统恢复的背景及意义

全球生态系统正面临着气候变化,污染和栖息地破坏等人为活动带来的越来越大的压力。这些威胁往往导致自然栖息地的退化,生物多样性和生态系统服务功能的减少。近年来有研究表明,传统生态学研究中被忽视的微生物群落在生态系统恢复中起着举足轻重的作用。这项名为“微生物驱动的生态系统恢复”(Microbial-Driven Ecosystem Recovery)的特殊研究侧重于微生物在介导退化的生态系统恢复中的作用。研究指出,这些微生物种类非常丰富,包括细菌、真菌和古细菌等,具有独特的代谢能力,在不同的环境中繁殖和生存,形成不同的微生物群落类型,使它们能够降解污染物、固定养分并促进土壤改良。丰富多样的真菌群落对有机碳储量有较强的正向影响,而细菌则对有机碳储量的影响有限。这个发现强调了真菌在控制自然恢复过程中碳储存方面发挥着更为重要的作用。此外,真菌还与包括植物和动物在内的其他生物形成了复杂的相互作用网络,进一步促进生态系统的恢复。因此,在需要恢复或重建某个生态系统时,有选择性地添加一个不受影响的微生物群落类型,可以有效消除环境污染,同时抑制非有益菌的生长,改善环境质量。

## 2 微生物群落驱动生态系统恢复的原理

微生物种类繁多,能参与环境修复的微生物按来源可分为本土菌、外来菌株和基因工程菌。这些微生物可以在适宜的条件下生存并繁殖,通过生物吸附和氧化还原等作用从环境中去除污染物。不同种类的微生物在环

境恢复中发挥着不同的作用,如乳酸菌可以产生乳酸,其杀菌能力能够抑制有害微生物的繁殖,加速纤维素等难以降解的有机物的分解过程;芽孢杆菌细胞壁的肽聚糖可以螯合重金属,进而去除金属阳离子。图表中展示了有研究得到的一些微生物对不同重金属的吸附量。微生物在环境修复中的作用机理主要包含以下三个方面:

(1) 微生物通过代谢作用将污染物分解为 $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 简单的有机物等产物,或将污染物作为营养源转化为自身所需物质,用于其自身的生长、发育和繁殖。(2) 微生物本身的比表面积较大且含有多糖类黏性物质,这部分特点使其能够将部分污染物进行吸附和降解。(3) 考虑到不同生物的竞争关系,当环境中投加适量的微生物后,这些微生物在环境中一旦成为优势种,就能够抑制其他病原菌和腐败菌的生长,从而提高环境质量。

一些微生物对不同重金属的吸附量比较 (mmol/g)

微生物类别	铅	锌	镉	
细菌	假单胞菌	0.27	0.36	0.07
	铜绿假单胞菌	0.38	—	0.38
	芽孢杆菌	0.45	—	—
真菌	青霉菌	0.56	0.10	0.10
	毛霉菌	0.08	0.08	0.06
	根霉菌	0.27	0.21	0.24

微生物修复技术主要是依赖自然环境中原有的或另外投加的特定微生物,在人为干预条件下,分解污染物,修复被污染的环境。微生物修复技术利用微生物自身的新陈代谢作用,通过吸附、转化和降解环境中的污染物,以降低污染物在环境中的浓度和毒性,实现污染环境的修复。

具体方法包括原位修复及异位修复:

2.1 原位修复:不移动受污染的土壤或污染物,直接在污染场地进行修复。如生物培养法、投菌法和生物通

风处理法等。

2.1.1 生物培养法：通过添加营养物质，促进土著微生物的生长和代谢活动，增强其对污染物的降解能力。

2.1.2 投菌法：向污染环境投加具有高效降解能力的外源微生物，以加速污染物的降解。

2.1.3 生物通风处理法：通过向污染土壤中通入空气或氧气，提高土著微生物的活性，促进污染物的降解。

2.2 异位修复：将被污染的土壤挖出，集中到其它地点进行修复。如土耕法、生物堆制法、土壤堆肥法、生物泥浆法和预制床法等。

2.2.1 土耕法：将污染土壤挖出并放置于处理垫上，通过定期翻动和补充空气，促进微生物的好氧降解。

2.2.2 生物堆制法：在指定地点对污染土壤进行堆放，通过通风、添加营养物质等手段，模拟土壤中的好氧微生物降解过程。

2.2.3 土壤堆肥法：在有氧条件下，利用微生物降解土壤中的有机污染物，并加入土壤调理剂以提高修复效果。

2.2.4 生物泥浆法：将污染土壤与水混合后置于容器中，加入营养物质，增强微生物的降解能力，通过控制温度、混合强度和营养物质等条件，实现污染物的有效降解。

2.2.5 预制床法：在防止渗漏的平台上铺设石子和沙子，上面铺设污染土壤，通过定期翻动和添加营养物质，促进微生物的生长和代谢。

### 3 对微生物群落的研究方法

#### 3.1 分子生物学技术和生态建模方法结合

分子生物学技术包括PCR（聚合酶链反应）、克隆与表达等，用于分析微生物基因组、基因调控及新功能鉴定等，能够快速、灵敏且直接从环境样品中提取微生物DNA进行分析。研究人员通过在湿地、草地、矿产采收区等不同生态环境中的野外调查、土壤取样、数据分析等科学研究，重点观察记录这些环境中的微生物种类，以及土壤和水源的理化性质变化，从而确定不同微生物在生态修复过程中的贡献。

#### 3.2 新兴技术：下一代测序技术

下一代测序（NGS）的新技术，又叫高通量测序技术，在微生物的类型和功能研究中大放异彩，如16S rRNA基因测序、全基因组测序等，通过对微生物群落的DNA或RNA进行大规模测序，获取大量序列数据。该技术可以一次对非常长的遗传分子进行测序，从而迅速产生大量的基因组数据，能够全面了解微生物群落的组成和丰度，鉴定出多种微生物，并精确统计微生物的相对

丰度。通过这项技术，研究人员能够更深入地了解微生物群落的组成、功能和多样性，为环境生态学提供新的视角。

#### 3.3 微生物群落指纹图谱分析法

利用高通量测序技术，对微生物群落的特定基因区域进行扩增和测序，从而构建微生物群落的指纹图谱。这种技术可以快速获得微生物群落的组成信息，具有较高的分辨率和可重复性。

#### 3.4 元素组成分析法

利用质谱、石蜡剥离、扫描电镜等技术，对微生物组织的元素进行分析，从而获得微生物群落的组成信息。这项技术可以对死亡微生物进行分析，研究微生物群落的化学组成信息。

### 4 微生物群落在恢复退化生态系统中的关键步骤

#### 4.1 对重金属等元素的吸附、富集

土壤中重金属浓度超过微生物的耐受程度，经过转化的重金属粒子可以与微生物表面活性剂发生作用，通过其它方式与土壤分离。从胶束中分离出的微生物表面活性剂通过吸附作用固定在土壤表面，在土壤两相界面环境下，由表面活性剂产生的单分子层会出现重排情况，通过与土壤中重金属产生络合作用，形成较稳定的可溶物，以此达到去除土壤中重金属的目的。

#### 4.2 微生物的转化作用

4.2.1 氨氮的氨氧化：氨氮是水质中的重要指标之一，其含量高低直接影响水体的水质。高浓度的氨氮会对水生生物产生毒害作用，影响水生生态系统的健康发展。通过氨氧化作用，氨氮可以被转化为硝酸盐。氨氧化是一种由氨氧化细菌（如氨氧化菌）催化的反应，其中，氨氧化细菌将氨氮氧化为亚硝酸盐，亚硝酸盐进一步氧化为硝酸盐。

4.2.2 硝酸盐的反硝化：在污水中，硝酸盐作为一种常见的氮源，可以快速被微生物利用，通过反硝化作用，硝酸盐可以被还原为氮气。反硝化是一种由反硝化细菌催化的反应，其中，反硝化细菌将硝酸盐还原为氮气，释放到大气中。反硝化反应是氮循环的重要组成部分，它使得土壤中因淋溶而流入江河湖泊中的硝酸盐减少，有助于维持氮素在自然界中的平衡。

4.2.3 磷的去除：磷是污水中的另一个重要污染物，它可以通过微生物的作用被转化为无机磷盐，并沉淀下来。这个过程涉及到多种微生物的参与，如磷酸菌和磷酸根还原菌等。磷酸菌可以将有机磷转化为无机磷盐，而磷酸根还原菌可以将无机磷盐还原为可溶性的磷酸根。聚磷菌可以在厌氧、好氧条件下利用自身的生物代

谢作用，将污水中的磷转化为不溶性的磷酸盐沉淀，并随同污泥一起排出系统。

**4.2.4 生物转化：**汞还原酶（如MerA）是一种在微生物中广泛存在的酶，其主要功能是将二价汞离子（ $Hg^{2+}$ ）还原为零价汞（ $Hg^0$ ）。这一反应过程需要酶的催化作用，通过提供电子使 $Hg^{2+}$ 获得电子而还原。在受到汞污染的环境中，微生物通过汞还原酶的作用将可溶性的汞离子还原成不易挥发的汞形式，进而减轻环境中汞的毒性影响，促进环境修复。

#### 4.3 有机物的生物降解

生物降解的过程：通过微生物群落的作用，有机物可以被分解为较简单的化合物。这个过程涉及到多种微生物的协同作用，如分解菌、脱氮菌和硝化菌等。有机物的生物降解过程可以分为好氧降解和厌氧降解两大类。好氧降解在氧气充足的环境下进行，主要由好氧微生物如细菌、真菌等通过分泌酶类将有机物分解为 $CO_2$ 、 $H_2O$ 等无机物。厌氧降解在缺氧或无氧环境下进行，涉及厌氧微生物如产甲烷菌等。厌氧降解过程复杂，通常包括水解、酸化、产氢产乙酸和甲烷化四个阶段。

### 5 技术应用与潜在价值

#### 5.1 技术应用

研究表明，微生物群落在调节退化生态系统的恢复方面发挥着至关重要的作用，具体来说，微生物群落可以应用于降解污染物、固定养分并改善土壤结构，从而提高土壤肥力和促进植物生长。此外，这些微生物与其他生物形成的复杂相互作用网络，增强了生态系统的整体复原力。土壤有机碳（SOC）是土壤中最重要有机质组分之一，对于维持土壤肥力、调节气候以及保护环境都起着重要的作用。它是陆地生态系统碳循环的重要组成部分，是评估土壤质量和碳循环的重要指标。细菌和真菌是土壤微生物的主要成员，它们在调控SOC储存方面发挥着不同的作用。真菌占主导地位的群落具有更高的分解复杂土壤有机碳的能力，真菌具有更强的菌丝生长形式和酶促能力，对土壤有机碳的贡献比细菌大。而细菌的碳利用效率低于真菌，不利于SOC的储存。微生物驱动生态系统恢复的发现具有以下重要意义。首先，它为微生物在生态系统过程中的作用提供了一个新的视角，突出了它们超越其作为分解者的传统作用的重要性。其次，它表明恢复和保护微生物群落可能是促进

生态系统恢复和提高其复原力的有效策略。最后，这些发现为开发基于微生物群落对生态系统修复的技术应用开辟了新的途径。

#### 5.2 潜在价值

微生物驱动生态系统恢复的发现具有许多潜在的应用价值。例如，它可以指导旨在促进退化生态系统恢复的项目设计。通过了解微生物群落的作用，也可以更有效地有针对性地开展生态系统恢复工作，从而提高其成功的机率。此外，这些发现可能促进新型生物修复技术的发展，这些技术利用微生物的代谢能力来降解污染物并恢复生态系统。这些技术可用于清理受污染的地点，如石油泄漏区域和矿区，从而减少对高成本投入或不利于环境的清理方法的需求。

### 6 未来展望

微生物驱动生态系统恢复的发现代表了环境生物学的重大突破。它为微生物在生态系统过程中的作用提供了新的见解，并为开发微生物群落对生态系统的恢复技术开辟了新的途径。然而，这项技术还需要进一步深入研究，以充分理解微生物驱动生态系统恢复的机制，并开发这些知识的实际应用。未来的研究可以侧重于阐明生态系统恢复中涉及的特定代谢途径和物种间相互作用，以及评估基于微生物群落的恢复技术的有效性。

#### 结束语

综上所述，微生物驱动生态系统恢复的发现为推进生态修复提供了新的视角与方法，应用前景广阔，在维护生态平衡、处理污染物、减缓气候变化等方面发挥着独特作用，也将为解决全球环境问题贡献更多的解决方案。

#### 参考文献

[1]Zhang Shan. Recovery of soil organic carbon storage driven by microbial communities during long-term natural restoration in wetland ecosystems. *Ecological Engineering*,2024,Volume 199.

[2]李龙翔.铀污染环境微生物修复研究进展.有色金属(冶炼部分),2023,8:129-138.

[3]王铁健.分析微生物群落在污水处理过程中的作用.清洗世界,2023,39(12):136-138.

[4]李会杰.矿区土壤重金属污染微生物生态修复技术研究.环境科学与管理,2024,49(2):159-161.