

# Research progress on microbial degradation of petroleum hydrocarbons in deep soil

Yu Wang<sup>1</sup> Ziyin Yang<sup>2,3</sup> Peizhong Li<sup>2</sup> Tianwen Zheng<sup>2\*</sup>

1. Production Safety and Environmental Protection Department of Sinopec Lubricants Co., Ltd., Beijing, 102200, China  
2. Institute of Resources and Environment, Beijing Academy of Science and Technology, Beijing, 102200, China  
3. China University of Petroleum(Beijing), Beijing, 102200, China

## Abstract

With the continuous expansion of the global petroleum energy industry, the ecological and environmental risks caused by petroleum hydrocarbon pollution are increasingly prominent, which poses potential threats to human health and the public health system. This paper first analyzed the multi-dimensional features of the underground environment, and then discussed the overall progress of microbial remediation of petroleum hydrocarbons in deep soil, and focused on the key limiting factors and degradation mechanisms of microbial degradation of petroleum hydrocarbon pollutants. Finally, this paper looked forward to the development trend of microbial degradation of petroleum hydrocarbons in deep soil.

## Keywords

Petroleum hydrocarbon pollution, deep soil, microbial remediation, degradation mechanism

# 基于微生物降解技术的深层土壤中石油烃修复研究

王煜<sup>1</sup> 杨子茵<sup>2,3</sup> 李培中<sup>2</sup> 郑天文<sup>2\*</sup>

1. 中国石化润滑油有限公司生产安全环保部, 中国·北京 102200  
2. 北京市科学技术研究院资源环境研究所, 中国·北京 102200  
3. 中国石油大学(北京), 中国·北京 102200

## 摘要

随着全球石油能源产业持续扩张, 石油烃污染引发的生态环境风险日益显著, 对人类健康及公共卫生体系构成潜在威胁。本文首先解析了深层土壤的环境特征, 探讨了深层土壤中石油烃的微生物修复总体进展, 叙述了微生物降解石油烃污染物的关键限制因素及降解机制, 最后展望了微生物降解深层土壤中石油烃的发展趋势。

## 关键词

石油烃污染; 深层土壤; 微生物修复; 降解机制

## 1 引言

### 1.1 石油烃的产生和危害

在全球石油工业快速发展的背景下, 石油烃污染控制已成为国际社会共同关注的环境挑战。石油资源从勘探开发到加工运输的全过程, 均会产生污染物, 对周边生态环境形成叠加性威胁。国际能源机构研究指出, 全球超过 80% 的原油产自陆地油田, 我国石油行业每年产生的落地原油约 700 万吨, 其中 60 万吨未能有效回收而进入自然环境, 导致土壤成为主要污染受体<sup>[1]</sup>。

石油烃作为复杂混合物, 主要包含碳、氢、氧、氮、

硫等元素及微量金属成分, 按化学结构可分为饱和烃(如直链烷烃、环状烷烃)和不饱和烃(如芳香烃、多环芳烃)两大类。这些污染物通过降雨冲刷和土壤渗透等途径迁移扩散, 对农田生态系统和地下水资源构成严重威胁。首先, 黏稠油质堵塞土壤孔隙结构, 使渗透性下降; 其次, 强极性基团与土壤养分结合形成稳定化合物, 导致氮磷循环受阻, 土壤肥力下降。再者, 多环芳烃等有毒物质破坏生物细胞结构, 使农作物出苗率降低近三成, 抗倒伏、抗病虫害的能力降低, 同时使土壤微生物多样性减少。

由于地下水系统中的氧气含量低、温度恒定, 污染物自然净化速度仅为地表环境的 1/100~1/1000。相关研究表明, 石油类污染物在地下含水层中的自然清除周期长达 50 年左右, 这使世界用水安全保障形成重大压力。值得注意的是, 石油污染物具有长期残留性和生物放大效应, 可通过食物链威胁人体健康, 影响人们的正常生产和生活。因此对石油污

【作者简介】王煜, 男, 硕士, 从事安全环保管理研究。

【通讯作者】郑天文, 男, 博士, 从事污染场地修复与调查研究。

染的土壤及地下水开展治理刻不容缓。

## 1.2 石油烃的修复技术

目前,经过诸多科研工作者的长期研究,石油烃污染场地修复治理已形成多种技术体系。根据修复原理的不同,石油烃类污染物修复可分为物理、化学和生物三大修复技术。在物理修复技术中,热解吸技术与土壤气相抽提工艺具有较高工程应用频率。化学修复技术则涉及溶剂萃取、氧化还原法、光催化法等。而生物修复作为一种新兴的技术方法,其核心机理在于通过微生物代谢作用将有机污染物转化为无毒或低毒产物。相较于需要复杂设备支撑的物理修复和高成本化学处理,基于生物代谢作用的修复技术因其环境兼容性好且成本可控的特点,在污染场地治理中展现出显著应用优势。

## 1.3 微生物修复进展

目前,大多数有关石油污染土壤、地下水现场的研究都是在好氧条件下进行。以石油烃好氧代谢作用建立的生物修复技术,具有经济、高效、二次污染少等优点。但当前主要集中在单一污染物体系下的基础性探究,关于复合污染协同降解的研究仍较为有限,且分子水平的作用机制解析方面尚存理论空白。这种技术瓶颈直接导致微生物修复技术难以突破实验室规模的限制。基于上述技术困境,构建高效复合菌群体系或许成为关键突破口。且由于深层土壤中溶解氧含量极低,需结合原位曝气等方法加速治理。

传统基于有氧代谢的生物修复技术在低氧或无氧环境的应用中存在明显局限性。通过构建厌氧生物屏障系统,可有效降低修复工程对场地条件的依赖程度。国内外对石油烃厌氧降解的研究主要集中在以下几个方面:厌氧降解菌的筛选和鉴定、污染物厌氧降解影响因素、厌氧降解菌的微生物学特性、厌氧降解菌的代谢机理和降解途径<sup>[2]</sup>。

本文将从深层土壤的环境特征、深层土壤中石油烃的生物修复总体进展、微生物降解深层土壤中石油烃的影响因素、深层土壤中石油烃的微生物降解过程四部分来总结叙述。

## 2 深层土壤中的石油烃污染生物修复现状

### 2.1 深层土壤的环境特征

深层土壤通常指地表以下一米至数十米深度范围的土壤,具有独特的物理、化学和生物环境特征,显著区别于表层土壤,其环境特征主要包括:

- 1、低氧与厌氧环境:深层土壤因孔隙度低、气体交换受限,常处于缺氧或严格厌氧状态。
- 2、高压与高密度:随着深度增加,土壤容重升高,孔隙水压力增大,机械压实作用显著,限制了微生物和营养物质的迁移。
- 3、营养贫瘠与低代谢活性:有机碳含量通常低于0.5%,且氮、磷等关键营养元素匮乏,导致微生物代谢速率较表层低。

4、微生物群落特殊性:以寡营养型厌氧菌为主(如产甲烷菌、硫酸盐还原菌),丰度仅为表层土壤的1%~10%,但具备降解卤代烃、多环芳烃等顽固污染物的潜力。

这些特征共同导致深层土壤原位修复面临传质受限、微生物活性抑制等核心挑战。因此研究和扩展深层土壤中微生物修复石油烃的微生物种类和修复途径至关重要。

## 2.2 深层土壤中石油烃生物修复的总体进展

### 2.2.1 生物强化

高效降解菌是深层石油烃修复的关键策略。近年来,诸多学者将重心放在了高效石油烃降解菌的筛选与优化上,从深层土壤、油藏或极端环境中筛选出多种耐高压、耐低氧的石油烃降解菌。

Meckenstock等<sup>[3]</sup>研究发现脱硫弧菌(*Desulfovibrio*)和地杆菌(*Geobacter*)可在无氧条件下通过硫酸盐还原或铁还原途径降解烷烃。张兰英等人<sup>[4]</sup>通过定向富集培养从石油污染土壤中获得甲苯高效降解菌群,并构建渗流槽模拟系统验证其工程适用性。该成果为地下水中氯代烃污染的靶向修复提供了优良菌种资源。

### 2.2.2 生物刺激

通过添加营养物质、电子受体或表面活性剂可以激活土著微生物对石油烃污染物的降解能力。R. Boopathy<sup>[5]</sup>通过构建厌氧堆置土柱实验评估了不同电子受体对柴油污染土壤的修复效能。实验结果表明,在单一电子受体(如硝酸盐、硫酸盐等)体系中均能实现柴油的厌氧转化,但混合电子受体体系对柴油的降解速率较单一体系有较高提升。

另外可采用固定化载体(如生物炭、纳米材料)提升外源菌的存活率。例如,通过将*Rhodococcus erythropolis*负载在生物炭上后,可使在华北某油田深层土壤中的石油烃降解率从25%提高至68%。

## 2.2 深层土壤中石油烃生物修复的总体进展

### 2.2.1 生物强化

高效降解菌是深层石油烃修复的关键策略。近年来,诸多学者将重心放在了高效石油烃降解菌的筛选与优化上,从深层土壤、油藏或极端环境中筛选出多种耐高压、耐低氧的石油烃降解菌。

Meckenstock等<sup>[3]</sup>研究发现脱硫弧菌(*Desulfovibrio*)和地杆菌(*Geobacter*)可在无氧条件下通过硫酸盐还原或铁还原途径降解烷烃。张兰英等人<sup>[4]</sup>通过定向富集培养从石油污染土壤中获得甲苯高效降解菌群,并构建渗流槽模拟系统验证其工程适用性。该成果为地下水中氯代烃污染的靶向修复提供了优良菌种资源。

### 2.2.2 生物刺激

通过添加营养物质、电子受体或表面活性剂可以激活土著微生物对石油烃污染物的降解能力。R. Boopathy<sup>[5]</sup>通过构建厌氧堆置土柱实验评估了不同电子受体对柴油污染土壤的修复效能。实验结果表明,在单一电子受体(如硝酸

盐、硫酸盐等)体系中均能实现柴油的厌氧转化,但混合电子受体体系对柴油的降解速率较单一体系有较高提升。

### 3 微生物降解深层土壤中石油烃的影响因素

#### 3.1 微生物代谢能力

基于微生物新陈代谢作用的石油烃生物转化机制是污染修复研究的理论基础。在微生物代谢过程中,功能菌群通过酶促反应将石油烃类物质分解为小分子化合物,实现了污染物浓度削减及生态毒性降低。因此,在工程实践中筛选具有高效降解特性的功能菌株,成为提升污染物修复效率的关键技术环节。

#### 3.2 pH 值、温度

微生物的生理活性受环境酸碱条件的显著调控。当体系处于极端 pH ( $\text{pH} < 5$  或  $\text{pH} > 9$ ) 时,功能微生物的蛋白质三级结构易发生不可逆变性,导致关键酶活性位点构象改变,进而引发酶促反应效率下降甚至细胞凋亡。

温度对生物修复过程具有双重调控作用,既影响微生物菌群的繁殖速率,也决定其代谢活性。宋泽贤<sup>[6]</sup>研究了在缺氧条件下温度对深层土壤中石油烃生物降解的影响,结果表明,在 18~70℃ 温度梯度内,石油烃降解菌的种群丰度、代谢基因表达水平及污染物去除率均呈现先升高后降低的趋势,并且 60℃ 时土著微生物对深层土壤中石油烃降解的强化效果最佳。

#### 3.3 污染物的浓度

微生物降解石油烃的能力与石油烃的浓度密切相关,高浓度的石油烃会改变微生物的群落结构和生活环境。此外,由于石油烃的毒害作用,高浓度的石油烃污染会导致微生物生长受限,长时间接触会改变微生物群落,从而导致微生物的死亡。当石油烃浓度过低时,由于碳源有限,微生物的生物降解活性也会降低,限制了微生物的生长。

#### 3.4 电子受体

地下水石油烃污染物的生物代谢效率主要受氧化还原条件制约,其中电子受体的种类与浓度起决定性作用。在底物氧化过程中,石油烃分子作为电子供体释放电子,这些电子经传递链转移至末端电子受体完成能量转化。

在富氧环境中,专性好氧菌以分子氧作为唯一末端电子受体,其石油烃氧化速率可达厌氧条件的 5-8 倍。但由于水体溶解氧浓度限制,工程实践中常采用曝气增氧等人工强化措施维持微生物的代谢活性。

在缺氧和无氧条件下,厌氧微生物通过代谢途径创新实现石油烃污染物的转化:硝酸盐还原菌利用  $\text{NO}_3^-$  作为电子受体,铁还原菌通过  $\text{Fe}^{3+}$  还原获取能量,硫酸盐还原菌则依赖  $\text{SO}_4^{2-}$  完成电子传递。

### 4 深层土壤中石油烃的微生物降解过程

石油烃污染物的微生物代谢过程可分为三个关键阶段:首先,微生物通过表面吸附作用与石油类物质发生界面接触;随后,在诱导型转运系统作用下,这些物质通过扩散或

主动运输机制穿过细胞膜屏障;最后,在微生物胞内镁离子参与的催化反应下,石油烃经氧化代谢转化为低分子量产物。

在有氧代谢体系中,脂肪酸经  $\beta$ -氧化途径转化为乙酰辅酶 A 后,通过三羧酸循环实现完全降解,其最终产物为二氧化碳和水。对于多环芳烃类污染物,其分解通过双加氧酶介导的双羟基化作用形成顺式二醇中间体。这些代谢产物经过水解反应后,进入乙酰辅酶 A 代谢网络,最终降解为  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$  或被微生物利用合成所需细胞成分。

在缺氧或厌氧环境中,微生物通过替代电子受体实现石油烃污染物的降解。四价锰、三价铁、硫酸盐、硝酸盐等无机化合物作为末端电子受体参与呼吸作用,从而将石油烃氧化为低分子量物质。

### 5 总结与展望

随着化石能源开采活动的全球性扩张,烃类化合物引发的环境风险已演变为亟待解决的世界性难题。地下深层污染的修复工程面临特殊挑战。深层土壤因为传质受限、土著微生物竞争抑制、长链烷烃降解效率低等问题,使得其中石油烃污染物的生物修复仍存在较大的研究空间。

全球对深层石油污染土壤微生物修复多停留在实验室阶段,对于实际工程和中试的报道微乎其微。需重视极端环境微生物资源的保护性开发,建立深层特异功能菌种资源库,为生物修复技术迭代储备战略资源。同时,成功开发深层修复技术也可使现有污染治理成本降低,并缩短修复周期。相信不久的将来,深层土壤中石油烃生物修复的突破将推动微生物修复技术向“深地工程”领域延伸,为页岩油开采区、深层储油罐泄漏等典型场景提供环境解决方案。

#### 参考文献

- [1] Whang L M, Liu P W G, Ma C C, et al. Application of biosurfactants, rhamnolipid, and surfactin, for enhanced biodegradation of diesel-contaminated water and soil [J]. *Journal of hazardous materials*, 2008, 151(1): 155-63.
- [2] Wartell B, Boufadel M, Ronriguez-freire L. An effort to understand and improve the anaerobic biodegradation of petroleum hydrocarbons: A literature review [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2021, 157: 105156.
- [3] Meckenstock R U, Boll M, Mouttaki H, et al. Anaerobic degradation of benzene and polycyclic aromatic hydrocarbons [J]. *Journal of Molecular Microbiology and Biotechnology*, 2016, 26(1-3): 92-118.
- [4] 张兰英, 林学钰, 毛世忠. 模拟地下水环境微生物降解甲苯的研究 [J]. *环境科学学报*, 2002, 22(5): 634-6.
- [5] Boopathy R. Anaerobic biodegradation of no. 2 diesel fuel in soil: a soil column study [J]. *Bioresource Technology*, 2004, 94(2): 143-51.
- [6] 宋泽贤. 环境科学与工程. 缺氧条件下温度对深层土壤中石油烃生物降解的影响研究[D]. 兰州大学.