

石油污染土壤的微生物修复技术研究进展

黄曼曼¹, 邓百万^{1,2}, 武晓雨¹, 李艳丽¹

(1. 陕西理工大学 生物科学与工程学院, 陕西 汉中 723000; 2. 陕西省食药菌工程技术研究中心, 陕西 汉中 723000)

摘要:利用微生物修复技术对石油污染土壤进行处理是现代新型的一种经济、高效且生态可接受的绿色清洁技术。目前,越来越多的国内外学者在解决石油污染土壤问题中引进微生物修复技术。总结了石油污染土壤微生物修复技术的修复类型;能够降解石油烃类物质的微生物种类、复合菌群及利用基因工程构建石油高效降解菌;影响石油烃降解菌降解效率的多种因素,探讨了石油污染土壤的微生物修复技术中存在的问题及应用前景,以期为进一步研究提供参考。

关键词:石油污染土壤;微生物修复;高效降解菌

中图分类号:X53 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-2767(2017)04-0149-05 DOI:10.11942/j.issn1002-2767.2017.04.0149

随着现代石油工业的发展,石油逐渐成为现代社会的主要能源,广泛应用于生产及生活的各个领域,包括农业、工业生产,交通运输等行业,有着工业“血液”之称,目前,全球每年石油产出总量已超过 30 亿 t^[1-2]。然而在石油开采过程中由于技术水平的限制,加工、运输环节的非正常泄漏,造成土壤及水体的污染^[3-5]。土壤有机质的组成和结构被进入到土壤中的石油类物质改变从而影响土壤的通透性,土壤中的微生物及植物受土壤有机质的影响,导致作物产量和品质显著下降,石油中的苯系物质和多环芳烃等多种物质具有致癌、致畸、致突变三致作用,这些污染土壤中的石油烃类物质在粮食农作物中长时间的积累,经食物链的传递进入人体,久而久之影响人体健康,甚至危害生命^[6-8]。

目前,石油污染土壤的治理以引起人们的高度重视,而解决石油污染问题研究最多是通过一系列物理及化学方法,包括常见的焚烧法、隔离法、萃取法、土壤洗涤法等,但均存在二次污染、成本较高等诸多问题。随之兴起了一种既经济又高效且生态可接受的绿色清洁技术——生物修复技术,与治理土壤石油污染的传统方法相比,其具有

操作简单,成本低廉,不破坏土壤环境,无二次污染且处理效果好等多种优点^[9]。本文着重介绍了生物修复技术中主要的微生物修复技术及其主要的影响因素,以期对石油污染土壤的治理及生态修复提供参考。

1 生物修复技术

广义的生物修复技术包括植物修复技术,微生物修复技术以及植物-微生物联合修复技术,狭义的生物修复技术仅仅指微生物修复技术。植物修复技术对石油烃类物质降解能力强,但植物生长周期较长,无法直接快速的分解石油烃类物质,降解效率慢,且植物生长对土壤环境要求较高,大部分对于土壤肥力、水分和酸碱度等均有较高要求;植物-微生物联合修复技术,修复效率高,但成本及技术要求相对较高,且影响因素多,影响植物、微生物的因素均能影响其修复效果^[10];而微生物修复技术不仅能很好的解决此类问题,且存在着光谱、高效、稳定、适应性强诸多优点,且有些菌株能很好的适应强酸强碱等极端环境,这些是植物达不到的,所以利用微生物降解有机油以成为石油污染土壤治理及环境保护的研究热点^[11]。

2 石油污染土壤微生物修复技术

2.1 降解石油的微生物种类多样性

降解石油烃类化合物的微生物有 200 多种,其中细菌、放线菌、真菌等微生物均可使石油烃类化合物得到降解。降解石油烃类化合物的细菌主要有:无色杆菌属(*Achromobacte* sp)、节杆菌属(*Archrobacter* sp)、鞘氨醇杆菌属(*Sphingob-*

收稿日期:2017-02-20

基金项目:陕西省科技厅科技创新工程资助项目(2016HB-GC-07)

第一作者简介:黄曼曼(1991-),女,宁夏宁夏回族自治区银川市人,在读硕士,从事微生物资源保育研究。E-mail:765447467@qq.com。

通讯作者:邓百万(1963-),男,陕西省眉县人,硕士,教授,从事微生物资源保护与开发利用研究。Email:2210309868@qq.com。

acterium sp)、黄杆菌属(*Flavobacterium* sp)、产碱杆菌属(*Alealigenes* sp)、*Shinella zoogloeoides* sp、芽孢杆菌属(*Bacillus* sp)、棒杆菌属(*Coryneforms* sp)、嗜麦芽窄食单胞菌(*Stenotrophomonas* sp)、微杆菌属(*Microbacterium* sp)、苍白杆菌属(*Ochrobactrum* sp)、假单胞菌属(*Pseudomonas* sp)等,其中假单胞菌对于污染土壤中石油烃类的降解治理研究较多,它对烷烃及芳香烃类均具有较好的降解作用;降解石油烃类化合物的放线菌中主要有:分支杆菌属(*Mycobacterium* sp)、诺卡氏菌属(*Nocardia* sp)、放线菌属(*Actinomycetes* sp)等,其中研究较多的是诺卡氏菌属;降解石油烃类化合物的真菌主要有:金色担子菌(*Aureobasidium* sp)、假丝酵母属(*Candida* sp)、红酵母属(*Rhodotorula* sp)等,其中研究最多的是假丝酵母,因为它营养要求低,生长繁殖快且降解效果显著^[12]。

2.2 石油烃的种类和组成对石油降解菌降解效率的影响

石油烃是由各种烷烃、环烷烃、芳香烃等组分构成的混合烃类物质,其主要构成元素是碳(C)和氢(H),此外还含有铁(Fe)、镁(Mg)、锌(Zn)、钾(K)等多种微量元素。石油烃类化合物可分为沥青、树脂、芳香烃和饱和烃四种类型,一般情况下其降解的难易程度为:高分子量芳烃类>多环烷烃>低分子量芳烃类>支链烷烃>饱和烷烃,其中高分子量芳烃类对微生物的作用最不敏感,只有少数的菌株能利用降解它,支链烷烃和饱和烷烃较易分解^[13]。

2.3 微生物种类和微生物菌群对石油降解效果的影响

不同种属的微生物对石油烃的降解效率不同,每种微生物对特定的石油烃中的某种成分降解能力较强,如罗小艳^[14]所分离出一株 *Massilia* sp. Wf1 菌株对多环芳烃中菲的降解,在培养温度 28℃、pH6、菲初始浓度 100 mg·L⁻¹,培养 48 h 菲的降解率达 96.78%,伍凤姬^[15]等分离出一株茈高效降解菌 *Mycobacterium gilvum* strain,在茈初始浓度为 75 mg·L⁻¹、温度范围在 30~35℃,pH 为 7 的条件下,茈的降解率可达到 95%以上。赵硕伟^[16]等研究表明,由所分离出的两株红球菌属,一株大头茶菌属和一株假单胞菌属组成的复合菌群 D,石油烃降解能力超过其中

任何单一菌株,在培养 5 d 后,复合菌群 D 能够降解 71% 的芳香化合物和 70% 石油总量,对于 C₁₃₋₁₉ 烷烃, C₂₀₋₂₆ 烷烃和 C₂₇₋₃₂ 烷烃降解能力达到 90% 以上。因此接种混合的微生物群落,构建微生物菌群,通过微生物间的协同作用,能更完全的降解石油^[17]。

2.4 生物表面活性剂对石油降解效果的影响

生物表面活性剂是由微生物代谢产生的具有一定表面活性的物质。其与化学合成的表面活性剂相比,它具有适应范围广、无毒、能被微生物降解,对环境无二次污染,耐酸碱能力强且稳定性好等多种优点,现代生物修复技术中越来越多的采用生物表面活性剂^[18]。

在微生物修复石油污染土壤过程中添加生物表面活性剂是近几年发展起来的土壤石油污染修复技术,生物表面活性剂具有润湿、乳化和增溶等作用,且无毒、能被微生物降解对环境无二次污染,微生物修复过程中加入生物表面活性剂通过减小难以降解的石油烃类物质和水溶液间的表面张力,从而加大微生物与石油烃的接触面,提高污染土壤中石油烃的降解率^[19]。牛明芬^[20]等从大庆油田土壤中分离出 3 株产表面活性剂的细菌菌株 B22、B24、B25,三株菌株生物表面活性剂不仅具有较高的耐高温、耐酸碱能力,对石油烃类物质均具有较好的降解效果,处理 72 h 后对石油烃的降解分别为 62.31%、81.69% 和 71.38%。

2.5 环境因素对石油降解菌降解效率的影响

微生物的生长及代谢除了需要营养物质外,还需要合适的环境生存因子,在适宜的环境下,微生物吸收利用石油中的一些组分将其分解为 CO₂ 和 H₂O 从而起到降解石油的作用,适宜微生物生长的环境会加快微生物的生长及代谢,促进其活性从而促进石油的降解,不适宜微生物生长的环境则相反,会抑制微生物活性从而抑制石油的降解^[21]。影响石油降解菌降解效率的环境因素主要有培养温度、时间,培养基初始 pH 和石油浓度等。经研究石油降解菌细菌的培养温度根据菌种的不同,最适温度范围为 30~37℃,极端环境下的菌株除外。从理论上讲,细菌对石油的降解随着培养时间的增加更彻底,但时间过长时由于次生代谢物质的积累会抑制细菌进一步生长,所以菌株培养时间要控制在一定范围内,一般为 5~10 d,菌株机油降解率不仅能够达到最好效果,且

菌株投入生产时,时间短,效益高^[22]。此外,偏酸性或弱碱性的环境均不利于菌株的机油降解,经研究培养基的初始 pH 控制在 5.0~8.0,石油降解菌的降解效率最高^[23]。张秀霞等^[24] 研究结果表明,菌株 SM-1 和菌株 MM-7 在 pH 为 7 石油降解效率最高,低于或高于 7 时降解率都会下降,SM-1 菌株的接种量在 10% 降解率达到最高,低于或高于此接种量降解率下降,对于菌株 MM-7 最适接种量为 20%。马强^[25] 研究结果表明所分离出的两株石油烃降解菌株 B1、B2 温度为 35℃ 时,石油烃降解率达到最高,分别为 50.2% 和 76.2%,提高或降低温度降解率都会受到影响;pH 不同菌株 B1、B2 的石油烃降解率也明显不同,pH 为 7 时,两株菌的机油降解率达到最高,分别为 78.2% 和 69.4%,pH 为 8 时,两株菌株的机油降解率在 30%~40%,pH 为 9 时,两株菌株的 pH 仅为 10%~20%;此外 C、H、O、N、P 等不同营养元素添加量的不同也对菌株的机油降解率有很大影响。

2.6 利用基因工程构建石油高效降解菌

用于污染土壤石油降解的微生物大部分为环境中的土著微生物,有降解石油能力的单一菌株或复合微生物菌群,单一菌株由于环境因素及自身代谢活性原因降解石油能力会有局限性,复合微生物菌群因菌株各自生长对营养物质的需求发生菌株间的相互抑制或竞争能影响石油降解能力,构建高效的基因工程菌成为了解决此问题的关键^[26-27]。在利用微生物治理石油污染土壤研究方面,越来越多的国内外学者致力于构建高效的石油降解基因工程菌^[28-29]。构建基因工程菌的方法包括多质粒新菌株构建法^[30]、原生质体融合技术^[31]、体外重组技术^[32]。Plotnikova 等^[33] 人利用质粒新菌株构建法将一株多环芳烃降解菌假单胞菌 SN11 中的多环芳烃降解性质粒移入到嗜盐性恶臭假单胞菌 BS394 中,构建出的基因工程菌可以在盐浓度达到 2.5 M 的环境时仍具有较高的降解多环芳烃类化合物的能力。

2.7 石油污染土壤微生物修复技术类型

石油污染土壤微生物修复技术按照修复地点分为原位生物修复技术和异位生物修复技术。

2.7.1 原位修复技术 直接在污染场地就地修复污染土壤不用将石油污染土壤移位的修复技术,主要方法有 3 种。(1)生物培养法:也称生物

刺激法,菌株来源为土著微生物,该方法是定期的向污染土壤中添加营养物质、电子受体和表面活性剂等添加剂以提高土著微生物的繁殖及活性,从而提高其石油降解能力^[34]。Kuiperi 等^[35] 向石油污染土壤中投加适量的 NO_3^- 、 O_2 及 H_2O_2 等电子受体以及 N、P 等营养元素,观察几天后污染土壤中石油降解速率提高且石油降解菌丰富度显著增加。(2)生物强化法:也称投菌法,菌株来源为外源降解菌,通常为具有石油高降解能力的驯化菌或工程菌,并且提供充足的营养物质^[36]。Gratzyna A 等^[37] 从石油污染土壤中分离驯化出一株石油烃降解菌株,研究发现其对难以降解的芳香烃化合物有较高的降解作用,改善其生物环境,如温度、营养元素、pH 等可加快其对芳香烃化合物的降解。Mikhail 等^[38] 从石油污染的沉积物中分离筛选出一株以沥青为唯一碳源的菌株 *Sphingomonas* sp. VKMB-2434,将该菌投入到多环芳烃污染环境,在 300 h 内该菌株可以降解 $285 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的菲。(3)生物通气法:将空气通入污染土壤区块,使土壤中的挥发性污染物有效去除,有利于提高土壤中石油降解菌的降解活性。

2.7.2 异位修复技术 异位修复技术指将石油污染土壤从原地挖出运至指定地点进行处置的修复技术,主要方法有两种。(1)生物反应器法:受污染的土壤挖出后分散于水中送入接种微生物的反应器装置内进行处理,反应器可使土壤中分离出已被驯化的微生物及其它添加物如营养盐,表面活性剂等彻底混合,能很好的控制降解条件,从而提高微生物降解石油的效率,达到处理目标后,将土壤排出、脱水再运回原地^[39]。(2)土壤堆肥法:土壤堆肥法是将石油污染土壤挖出运输到处理场地,向石油污染物中加入树叶,干草,麦秸,木屑,粪肥等农业废弃物,并用石灰调节 pH,保持氧气、水分和 pH 的最适值,为微生物提供营养及最适环境,以提高其代谢及活性,促进石油污染物的降解,降解过程为提高效果需要引入驯化的石油高降解微生物或工程菌^[40]。这种修复技术成本低,易操作且效率高,是现在石油污染土壤处理常用的方法。Trejo-Hernandez 等^[41] 研究了堆肥(猪粪)、枯枝烂叶和甘蔗渣等废弃物对微生物降解石油烃的促进作用,结果表明这种农业废弃物作为添加剂可以较好的促进石油污染土壤环境中土著微生物的生长,促进石油烃的降解,在 10~

15 d 可以降解 40% 初始浓度为 $10\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的石油烃物质。

3 石油污染土壤微生物修复技术展望

随着现代石油工业的飞速发展,石油需求量逐年上升,对土壤的污染日益严重,一种绿色的修复技术——微生物修复石油污染土壤技术得到不断发展,但由于微生物本身受环境因素影响,生物特性的限制,还需在以下几个方面进行深入的研究。首先,在治理石油污染土壤过程中,将物理修复法、化学修复法及生物修复法结合起来,高浓度石油的污染土壤中要先用物理化学方法治理再用生物修复方法,做到生物修复法与传统方法的有机结合,构建高效修复体系^[42]。其次,提高技术,优化工艺,构建菌群固定化模型,通过各优势降解菌株间的协同作用提高石油降解率,并且提高外源菌种与土著菌种联合共生的优化程度,也可通过遗传基因工程构建高效降解菌^[43]。可以预见,微生物修复技术以其巨大的经济及环境优势将成为我国石油污染土壤保护领域的研究热点。

参考文献:

- [1] 崔丽虹. 石油烃降解菌的筛选、鉴定及复合菌群降解效果的研究[D]. 北京:中国农业科学院,2009.
- [2] 韩寒冰,刘杰凤,机油降解菌的分离及其降解特性研究[J]. 安徽农业科学,2009,37(21):9883-9884.
- [3] 刘文超,李晓森,刘永民,等. 石油污染土壤修复技术应用现状[J]. 油田化学,2015,32(2):307-310.
- [4] Chen M, Xu P, Zeng G, et al. Bioremediation of soils contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons, petroleum, pesticides, chlorophenols and heavy metals by composting: Applications, microbes and future research needs[J]. Biotechnol Adv, 2015, 33(6):45-55.
- [5] Ameen F, Hadi S, Moslem M, et al. Biodegradation of engine oil by fungi from mangrove habitat. Ameen F[J]. J Gen Appl Microbiol, 2015, 61(5):85-92.
- [6] 邓绍云,徐学义,邱清华. 我国石油污染土壤修复研究现状与展望[J]. 北方园艺,2012(4):184-190.
- [7] Ma J, Yang Y, Dai X, et al. Effects of adding bulking agent, inorganic nutrient and microbial inocula on biopile treatment for oil-field drilling waste[J]. Chemosphere, 2016, 150(10):17-23.
- [8] Montenegro I P, Mucha A P, Reis I, et al. Effect of petroleum hydrocarbons in copper phytoremediation by a salt marsh plant (*Juncus maritimus*) and the role of autochthonous bioaugmentation[J]. Environ Sci Pollut Res Int, 2016, 23(19):71-80.
- [9] 程国玲,李培军,石油污染土壤的植物与微生物修复技术[J]. 环境工程学报,2007,6(1):91-95.
- [10] 阮志勇. 石油降解菌株的筛选、鉴定及其石油降解特性的初步研究[D]. 北京:中国农业科学院,2006.
- [11] 李宝明. 石油污染土壤微生物修复的研究[D]. 北京:中国农业科学院,2007.
- [12] 辛蕴甜. 石油降解菌的降解性能、固定化及降解动力学研究[D]. 上海:东华大学,2013.
- [13] 余薇. 石油降解微生物的筛选及其降解特性的研究[D]. 武汉:华中农业大学,2013.
- [14] 罗小艳. *Massing* sp. WFl 对菲的降解特性研究[D]. 杭州:浙江大学,2015.
- [15] 伍凤姬. 一株茈高效降解菌的筛选及其降解途径研究[D]. 广州:华南理工大学,2015.
- [16] 赵硕伟,沈嘉澍,沈标. 复合菌群的构建及其对石油污染土壤修复的研究[J]. 农业环境科学学报,2011,30(8):1567-1572.
- [17] 贾燕. 石油降解菌和生物表面活性剂在水体石油污染生物修复中的应用及机理研究[D]. 广州:暨南大学,2007.
- [18] 梁生康. 鼠李糖脂生物表面活性剂对石油烃污染物生物降解影响的研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2005.
- [19] 张文. 应用表面活性剂强化石油污染土壤及地下水的生物修复[D]. 广州:暨南大学,2012.
- [20] 牛明芬,李凤梅,韩晓日. 生物表面活性剂产生菌的筛选及表面活性剂稳定性研究[J]. 生态学杂志,2005,24(6):631-634.
- [21] 李燕妮. 细菌菌群降解石油的影响因素及应用研究[D]. 天津:天津理工大学,2013.
- [22] 冯晋阳. 石油烃优良降解菌的筛选分离及其降解性能的研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2004.
- [23] 秦芳玲,曹丽娟,燕永利,等. 几株机油降解菌及其处理含油废水的效果[J]. 2007,24(3):269-271.
- [24] 张秀霞,徐娜娜,秦丽姣. 固定化微生物降解石油的影响因素研究[J]. 安全与环境学报,2011,11(5):77-81.
- [25] 马强. 高效石油烃降解菌的分离、鉴定[D]. 北京:北京化工大学,2008.
- [26] 谢云. 高效石油烷烃降解菌及原油降解基因工程菌构建研究[D]. 西安:西北大学,2014.
- [27] Vigneron A, Alsop E B, Chambers B. Complementary Microorganisms in Highly Corrosive Biofilms from an Off-shore Oil Production Facility[J]. Appl Environ Microbiol, 2016, 82(8):45-54.
- [28] Cui C, Li Z, Qian J. Complete genome of *Martelella* sp. AD-3, a moderately halophilic polycyclic aromatic hydrocarbons-degrading bacterium[J]. J Biotechnol, 2016, 225:29-30.
- [29] Lambo A J, Patel T R. Isolation and characterization of a biphenyl-utilizing psychrotrophic bacterium, *Hydrogenophaga taeniospiralis* IA3- A, that cometabolize dichlorobiphenyls and polychlorinated biphenyl congeners in Aroclor 1221[J]. Journal of basic microbiology, 2006, 46(2):94-107.
- [30] Martinez A, Kolvek S J, Yip C L T, et al. Genetically modified bacterial strains and novel bacterial artificial chromo-

some shuttle vectors for constructing environmental libraries and detecting heterologous natural products in multiple expression hosts[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2004, 70(4): 2452-2463.

[31] Song L, Wang H, Shi HC, et al. Isolation of a pseudomonas stutzeri strain that degrades 1, 2, 4-trichlorobenzene and characterization of its degradative plasmid[J]. Frontiers of Environmental Science and Engineering in China, 2008, 2(1): 69-72.

[32] Lambo A J, Patel T R. Isolation and characterization of a biphenyl-utilizing psychrotrophic bacterium, Hydrogenophaga taeniospiralis IA3-A, that cometabolize dichlorobiphenyls and polychlorinated biphenyl congeners in Aroclor 1221[J]. Journal of basic microbiology, 2006, 46(2): 94-107.

[33] Plotnikova E G, Altyntseva O V, Kosheleva I A, et al. Bacteria—degraders of polycyclic aromatic hydrocarbons, isolated from soil and bottom sediments in salt-mining areas[J]. Mikrobiologiya, 2000, 70(1): 61-69.

[34] 吴作军. 微生物分子生态学技术在石油污染土壤修复中的应用研究[D]. 北京: 清华大学, 2010.

[35] Kuiper I, Legendijke L, Bloemberg V, et al. Rhizoremediation: a beneficial plant-microbe interaction [J]. Molecular Plant-Microbe Interactions, 2004, 17(1): 6-14.

[36] 冯俊生, 张俏晨. 土壤原位修复技术研究与应用进展[J]. 生态环境学报, 2014, 23(11): 1861-1867.

[37] Grazyna A, Karlsson L. Wastewater sludge as a re-source: sludge disposal strategies and corresponding treatment technologies aimed at sustainable handling of waste water sludge[J]. Water Science and Technology, 2002, 46 (1C): 295-303.

[38] Mikhail B, Vladimir A, Boris B, et al. Conversion of polycyclic aromatic hydrocarbons by *Sphingomonas* sp. VK-MB-2434[J]. Biodegradation, 2008, 19: 567-576.

[39] 任慧. 高浓度石油污染土壤原位-异位联合生物修复技术研究[D]. 济南: 济南山东大学, 2015.

[40] 刘雪. 铬渣污染土壤特性与异位修复技术研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.

[41] Trejo-Hernandez M R, Ortiz A, Okoh A I, et al. Biodegradation of heavy crude oil using spent compost and sugar cane bagasse wastes [J]. Chemosphere, 2007, 68 (5): 848-855.

[42] 唐金花, 于春光, 张寒冰. 石油污染土壤微生物修复的研究进展[J]. 湖北农业科学, 2011, 50(20): 4125-4128.

[43] Cappello S, Santisi S, Calogero R, et al. Characterisation of oil-degrading bacteria isolated from bilge water[J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2012, 223(6): 3219-3226.

Research Progress on Microbial Remediation of Petroleum Contaminated Soil

HUANG Man-man¹, DENG Bai-wan^{1,2}, WU Xiao-yu¹, LI Yan-li¹

(1. School of Biological Science and Engineering, Shaanxi Sci-Tech University, Hanzhong, Shaanxi 723000; 2. Shaanxi Provincial Engineering Research Center of Edible and Medicinal Microbes, Hanzhong, Shaanxi 723000)

Abstract: It is a kind of economical, efficient and ecological green cleaning technology to deal with oil contaminated soil by microbial remediation technology. At present, more and more scholars at home and abroad had introduced microbial remediation technology to solve the problem of oil contaminated soil. The type of restoration of petroleum microbe contaminated soil remediation technology was summed up, as well as the species to microbial degradation of petroleum hydrocarbon compound bacteria and the use of genetic engineering to establish oil degrading bacteria and many factors of petroleum hydrocarbon degrading bacteria degradation efficiency. Finally, the existing problems and application prospects of microbial remediation technology of petroleum contaminated soil were discussed in order to provide reference for further research.

Keywords: petroleum contaminated soil; bioremediation; high efficient degradation bacteria

欢迎订閱