

陕北黄土区石油污染土壤原位微生态修复试验研究

张 胜¹, 陈 立¹, 崔晓梅², 薛 杉³, 张翠云¹, 蔺文静¹, 李政红¹, 殷密英¹,
马琳娜¹, 张发旺¹

(1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 正定 050803; 2. 中国地质科学院, 北京 100037; 3. 长安大学, 陕西 西安 710054)

摘 要:为修复陕北黄土区石油污染土壤,采用优化原位微生物菌群辅以物理和化学方法与地质环境相结合的微生态技术,在试验区均匀加入了 3% 的优化菌群制剂,选择优化出的菌群初步鉴定主要有:假单胞菌属(*Pseudomonas*)、微球菌属(*Micrococcus*)、放线菌属(*Actinomayces*)、真菌类的青霉属(*Penicillium*)、曲霉属(*Aspergillus*)等,调控了土壤温度、含水量、氧和营养物质等,进行了土壤中石油的降解与修复试验研究。结果表明,在试验区土壤中人为添加石油平均含量在 2 318.5 mg·kg⁻¹ 时,经过 11~32 d 原位微生态修复技术的修复,土壤中的石油含量降解可达 68.47%~84.30%,而对照区土壤中人为添加的石油含量变化不大,降解率基本在 10% 以内,说明在自然条件下土壤中石油降解是缓慢的。这个试验验证了地质微生态修复技术在陕北黄土区土壤石油污染修复的有效性,探索了推广应用的可行性。

关键词:陕北黄土区;石油污染;原位;地质微生态修复技术

中图分类号:X53 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2008)06-2200-06

Experimental Study on In-Situ Micro-ecological Remediation for Oil Contaminated Soil in Loess Region of North Shaanxi Province

ZHANG Sheng¹, CHEN Li¹, CUI Xiao-mei², XUE Shan³, ZHANG Cui-yun¹, LIN Wen-jing¹, LI Zheng-hong¹, YIN Mi-ying¹, MA Lin-na¹, ZHANG Fa-wang¹

(1. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, CAGS, Zhengding 050803, China; 2. Chinese Academy of geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: In order to remediate oil contaminated soil in loess region of North Shaanxi Province, micro-ecological techniques of optimized in-situ microbial communities and physical chemistry methods combined with geo-environmental factors were used for experimental studies on oil degradation and polluted soil remediation. In this experiment, 3% optimized microbial populations, which were primarily identified as *Pseudomonas*, *Micrococcus*, *Actinomayces*, *Penicillium* and *Aspergillus*, were added into the experimental plots, and soil temperature (keep soil temperature above 25 °C), moisture content (keep soil moisture content about 20%), oxygen and other nutrients (control soil N, P, S, K, Ca, Mg, Fe contents according to shares) were adjusted. The results of the experiment showed that oil with average contents of 2 318.5 mg·kg⁻¹ added artificially into soil in the experimental plots can reduce by 68.47% to 84.30% after the in-situ enhanced microbial ecological remediation for 11 to 32 days, whereas oil added artificially into soil in the reference plot varied little in content of oil, and rate of oil degradation varied within 10%, which suggested that oil degradation in soil under natural conditions was slow. This experiment demonstrated the effectiveness of the in-situ microbial ecological remediation methods for oil contaminated soil in loess region of North Shaanxi. In addition, it was discussed for feasibility of extend application of the technique.

Keywords: loess region of North Shaanxi Province; oil contamination; in-situ; micro-ecological remediation

陕北黄土高原地区由于石油资源的大量开采利

用,产生了一些环境问题,落地原油已影响土壤和地下水的质量安全。土壤和地下水石油污染的防治研究已显迫切。Jorgensen 的试验显示,经生物堆埋,石油污染的土壤中石油可降低 71%^[1]。微生物修复技术主要机理是石油烃直接参与了微生物的生化反应,通过代谢作用降解土壤中的污染物^[2]。土壤微生物修复技术

收稿日期:2007-11-28
基金项目:科技部国际合作项目(2005DFA90200)
作者简介:张 胜(1956—),男,副研究员,研究方向为微生物地球化学及环境地质等。E-mail: zshenghb@sina.com
通讯作者:张发旺 E-mail: fawangzhang@sina.com

的开发与研究已受到国内外学者的广泛关注^[3-12]。目前已知能降解石油中各种烃类的微生物共有约 100 余属 200 多种,它们分属于细菌、放线菌、霉菌、酵母以及藻类^[13]。地质微生态技术就是充分利用优化原位微生物菌群辅以物理和化学方法并与地质环境相结合的综合修复技术。以往报道的研究资料多为室内研究,本次是在野外原位土壤中进行了修复试验研究,取得了较好效果。此项研究为该技术的推广应用提供了技术支撑,具有重要的实际意义。

1 试验方法与材料

1.1 试验材料和方法

化学试剂: $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、 NH_4NO_3 、 CaCl_2 、 FeCl_3 、 KH_2PO_4 、 K_2HPO_4 、 KCl 、盐酸、酒石酸钾钠、石油醚、三氯甲烷等均为分析纯。

填加剂:鸡粪、鸡粪土等。

试验场地位于陕西省延安安塞西北约 20 km 处,采油场内。为黄土土壤,试验深度 0~15 cm 最后至 50 cm,土中含有少量 2~10 mm 的小砾石,土壤湿容重为 $1.821 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$;自然含水量为 9.18%;pH 为 8.4;硝酸盐含量为 $55.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;铵含量为 $8.85 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;石油本底含量为 $1.3 \sim 4.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。试验用水为当地浅层地下水,pH 为 8.2,TDS 为 $420.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。试验用石油为试验场地下 2 400 m 采出的原油。

试验用玻璃器皿等:150、250 mL 具塞三角瓶,125、1 000 mL 磨口细口试剂瓶,各种不同类型的细菌培养试管、培养皿、橡胶塞、25 L 塑料桶。

主要仪器:QZD-1 型电磁振荡器、KQ218 超声波清洗器、生物恒温培养箱、高速离心机、高压蒸汽灭菌器、无菌实验室、生化培养箱、摇床培养箱、莱卡生物显微镜、752N 紫外可见光光栅分光光度计、pHB-3 型 pH 计、DDB-303A 型电导率仪、电热干燥箱及各种化学分析用玻璃仪器。

化学分析测试方法:石油、 NO_3^- 为紫外分光光度法、 NH_4^+ 为纳氏试剂比色法、pH 用 pHB-3 型 pH 计,TDS 用 DDB-303A 型电导率仪换算得出。

降解石油微生物细菌培养优选方法:土壤微生物细菌培养用《土壤微生物研究法》^[14],和参考文献[15~17]介绍的方法,细菌初步鉴定用《常见细菌系统鉴定手册》^[18]中的方法。

1.2 土壤人为石油污染原位修复方法与步骤

1.2.1 石油降解菌的分离与优选

细菌降解石油的机理,就是在细菌的作用下将碳

氢化合物降解为 CO_2 和 H_2O 的整个过程。本文用细菌的选择性培养基和富集培养基,对试验场采油井周围石油污染土壤的样品进行菌种、菌群的培养分离,选择优化出试验用降解土壤石油污染的菌种、菌群。本次试验选择优化出的细菌初步鉴定主要为:假单胞菌属(*Pseudomonas*)、微球菌属(*Micrococcus*)、放线菌属(*Actinomayces*)、真菌类的青霉属(*Penicillium*)、曲霉属(*Aspergillus*)等菌群。

1.2.2 野外试验区的平整与本底数据的采取

并分为各类试验小区,如试验区、对照区、空白区等。

1.2.3 试验步骤

用试验区取得的原油为碳源(污染物),将选择优化出试验用降解土壤石油的各菌种、菌群进行放大培养,根据试验用接种量培养出足够用的菌液制剂,并通过镜检可见生长出大量的试验用菌群。通过计算在试验区土壤表层 15 cm 深人为均匀混入一定量的石油。按试验区试验层土壤重 4.3%均匀混入鸡粪与鸡粪土各 50%,作为添加剂。并将放大培养的菌液按 3%喷雾翻耕均匀接入试验区,随后按培养基成分比例调控氮、磷、钙、镁、硫、铁等营养液均匀加入,用当地地下水调控试验土层含水量在 20%左右。在试验区覆盖农用塑料薄膜用于保温、保湿、防雨等。在一定时间间隔取样,取样方法是在各区以梅花状取 5 个不同点的同一深度土样(15 cm),而后充分混合后 4 分法取样测试。取样后翻耕试验区试验层使其暴气充氧并补充一定水量保证试验土壤含水量在 20%左右。对照区人为加入与试验区基本相同的石油量,其他不加,作为自然降解。空白区不加任何物质作为监控样品。3 个区同时取样测试,测试成分为:石油量、pH、土壤易溶盐、含水量、 NH_4^+ 、 NO_3^- 等等。并同时监测地表及试验土壤温度。试验期完成后分别对各区试验层下部分层取样。测试结果见表 1~5。

2 结果与讨论

2.1 土壤中石油的去除率

由表 1 可知,通过野外现场上述试验,在土壤石油污染原位微生态修复技术的实施是具有一定的实效性。试验区在试验初期 0~7 d 加入的优化菌液并没有发挥作用,也就是说室内优化的菌液应用于野外时,需要有一个适应期或是细菌的延滞期(lag phase),本次试验适应期在 7 d 左右。而后进入增殖期也是对数期(logarithmic phase),表 1 显示在试验的第 11 d 即

适应期后去除率就达 80%以上,此次样品因采样位置和不均匀性使测试结果略高。但在试验至 16 d 时去除率也达 68%以上,当试验至 32 d 时则去除率达 84.3%。而对照区土壤的石油含量变化不大,除去两个异常低值基本在 10%以内,说明在自然条件下土壤中石油降解是缓慢的,两个异常低值 16、21 d 的测试数据可能是土壤中石油含量不均所致,也反映了土壤物质成分的不均一性和复杂性。空白区反映了在没有加任何物质情况下土壤中的石油含量,但在试验后期因试验区 and 对照区与空白区相邻又加之降雨和人为取样污染了该区,造成含量有所增加。

2.2 地质微生态修复技术的控制因素

地质微生态技术是以微观效应改变宏观环境的原位修复技术。应用该技术的关键是微生物和地质环境的相互结合与调控。调控因素主要有温度、水、氧气、营养元素、地质环境的改善等。

2.2.1 土壤温度的调控

温度是影响细菌生长与存活的重要因素之一,细菌的活动强度、生化作用都与此相关。温度的过高或过低都可抑制生长或导致细菌死亡,温度的适中可使

细菌细胞中的生物化学反应速率加快。我们应用的菌群大多为中温微生物 (13~45 ℃),25~38 ℃为最适生长温度。表 2 是试验阶段地表的最高和最低温度监测数据,空白区是地表的自然最高和最低温度,地表最高温度在 8 月下旬至 9 月上旬大多为 25 ℃以上,但最低温度均小于 20 ℃,昼夜温差大。如何调控温度,是试验效果好坏的关键。因此在试验区用农用塑料薄膜进行保温,进入 9 月后因气温明显下降夜晚再用草帘覆盖。从表 3 可看到试验区土壤在试验层 15 cm 深,温度明显增加,比空白区增高 5~8 ℃以上,尤其是在 9 月上旬以前增温保温效果显著。从试验效果表 1 也可看出随着温度的下降土壤中石油的去除率也在降低。因此,我们也可得出在该地区开展微生态修复技术的最佳时期应在每年的 6 月下旬至 9 月上旬,通过调控可使土壤温度保持在 25 ℃以上。

2.2.2 土壤 pH、含水量、易溶盐、NH₄⁺、NO₃⁻含量分析

环境的 pH 对微生物的生命活动有一定影响,它可引起细胞膜电荷的变化,而影响微生物对营养物质的吸收以及酶的活性,并使环境中营养物质的可利用性和有害物质的毒性改变。每一种微生物的生存都有

表 1 各区土壤中石油含量和去除率随时间变化测试结果

Table 1 Results of oil contents and removal rate with time in the soils of different plots								
取样日期(月/日)	8/19	8/23	8/26	8/30	9/4	9/9	9/14	9/20
试验天数/d	0	3	7	11	16	21	26	32
试验区/mg·kg ⁻¹	2 302.0	1 868.0	2 335.0	422.6	731.0	516.0	557.8	364.0
对照区/mg·kg ⁻¹	2 279.0	2 442.0	2 245.0	2 122.0	1 532.2	1 855.2	2 110.6	2 120.2
本底区/mg·kg ⁻¹	4.6	18.2	4.0	0.95	5.75	29.55	46.55	159.0
试验区去除率/%	0	0	0	81.77	68.47	77.74	75.94	84.30

注:去除率计算以 0、7 d 的平均石油含量为初始浓度(2 318.5 mg·kg⁻¹)计算,第 3 d 的数据代表性差略去。

表 2 试验区与空白区(8—9 月)天气与地表最高、最低温度(℃)

Table 2 Weather and the highest and the lowest temperature of ground surface in the test plot and the reference plot during August to September, 2007(℃)																
日期/日	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	1	2	3
天气	晴	多云	晴	晴	晴	多云	多云	阴	阴	阴	阴	多云	雨	晴	多云	晴
试区	高		50.5		46.5		38.0	26.5			35.0			47.5		44.0
	低		19.0			18.4		18.2	21.5	19.0	21.5			15.5		21.5
空白	高	42.5	51.0		39.5		41.0		41.5	23.5		38.0				44.5
	低		17.8		18.5	19.0		16.5				18.0	16.2		11.5	
日期	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14				19	20
天气	多云	晴	多云	雨	雨	晴	晴	晴	多云	雨	晴				晴	晴
试区	高		38.5		18.5		37.5									
	低		17.0		17.5	16.5		22.0		20.5						
空白	高	32.5		20.5		29.0		42.0	25.5	21.5					27.0	17.0
	低	14.0		9.0			9.5		11.2		9.5					5.5

表 3 试验区与空白区(9 月)土壤(5~15 cm)8 时与 18 时的温度(℃)

地点			日期/d													
			2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	19	20
试验区	8时	5 cm	25.0	22.8	23.1	23.0	23.0	20.0	20.5	20.0	23.0	23.5	23.0	17.0		14.0
	8时	10 cm	25.7	23.2	24.0	24.5	23.0	22.0	21.5	20.0	23.5	24.0	24.5	18.5		16.0
	8时	15 cm	25.0	23.2	24.0	24.5	24.0	23.0	22.0	22.5	24.0	24.5	24.5	20.0		17.0
空白区	8时	5 cm	16.7	16.5	16.8	16.2	14.0	15.0	14.0	14.0	16.0	15.5	16.0	13.01		10.0
	8时	10 cm	17.5	17.0	16.5	17.0	14.0	15.0	15.0	14.5	17.0	16.0	17.0	14.0		10.0
	8时	15 cm	19.3	17.0	18.0	17.5	17.0	15.5	15.5	15.5	17.0	16.0	17.0	14.0		13.0
试验区	18时	5 cm	32.5	28.8			30.1	25.0	21.0		26.0	28.0	27.0		18.0	
	18时	10 cm	30.2	27.2			28.0	26.0	22.0		27.0	27.5	27.5		19.0	
	18时	15 cm	28.2	26.1			27.0	26.0	22.5		26.0	26.5	26.5		19.0	
空白区	18时	5 cm	24.5	22.5			22.2	18.0	17.0		23.0	21.5	22.0		22.0	
	18时	10 cm	23.0	21.7			22.3	17.0	16.0		22.0	21.0	21.0		17.0	
	18时	15 cm	23.0	20.8			22.1	18.0	16.0		21.5	20.0	21.0		17.0	

表 4 各区土壤 pH、含水量与易溶盐、NH₄⁺、NO₃⁻含量随时间变化测试结果

Table 4 pH, moisture contents, contents of soluble salt, NH ₄ ⁺ and NO ₃ ⁻ with time in soils of different test plots								
取样日期(月/日)	8/20	8/23	8/26	8/30	9/4	9/9	9/14	9/20
试验天数/d	1	3	7	11	16	21	26	32
试验区 pH	8.1	7.5	7.3	8.1	7.5	7.6	8.0	7.7
试验区含水量/%	9.8	20.31	18.6	25.39	22.42	21.82	21.53	21.18
试验区易溶盐/mg·kg ⁻¹	144.5	2 235.0	2 045.0	1 015.0	1 150.0	764.5	714.0	957.5
试验区 NH ₄ ⁺ /mg·kg ⁻¹		233.85			47.5	13.75	13.75	5.0
试验区 NO ₃ ⁻ /mg·kg ⁻¹		830.3			256.0	253.3	287.6	261.7
对照区 pH	8.1	8.2	8.4	8.5	8.6	8.9	8.8	8.7
对照区含水量/%	9.18	7.41	9.31	15.75	17.09	15.72	16.45	11.35
对照区易溶盐/mg·kg ⁻¹	144.5	116.0	132.0	93.6	58.45	57.45	52.95	37.4
对照区 NH ₄ ⁺ /mg·kg ⁻¹						15.0	11.25	1.5
对照区 NO ₃ ⁻ /mg·kg ⁻¹					54.0	42.7	41.6	29.3
空白区 pH	8.1	8.2	8.4	8.4	8.5	8.7	8.7	8.8
空白区含水量/%	9.18	6.94	8.04	15.19	13.74	13.39	13.59	8.85
空白区易溶盐/mg·kg ⁻¹	144.5	117.0	131.0	88.1	63.8	49.25	48.25	49.35
空白区 NH ₄ ⁺ /mg·kg ⁻¹					7.4	12.5	12.5	3.0
空白区 NO ₃ ⁻ /mg·kg ⁻¹					43.0	94.8	48.9	34.5

一定的 pH 值范围和最适 pH 值。大多数细菌的最适 pH 值为 6.5~7.5,放线菌 pH 值为 7.5~8.0,真菌可以在广泛 pH 范围内生长发育,如 pH 值在 3 以下 9 以上仍能生长,最适在 5~6。由表 4 的 pH 值监测可知,试验区因加入了一定量的磷酸盐缓冲剂使 pH 值保持在 7.3~8.1,大多在 8 左右,而大部分石油降解菌最适环境为偏碱性。而空白区、对照区 pH 值在 8.1~8.9 比试验区高一些。但在此 pH 值范围内对此次试验影响不大。

水是细胞生存的基本物质,也是细菌对石油污染

物降解过程中的重要介质和氧的来源。因此在试验区要使土壤保证需要的水量,一般保持在 20%左右,在每次取样后加入约 4%左右的水,表 4 数据显示试验层土壤含水量保持稳定,调控的含水量促进了细菌的降解作用,基本保证了试验效果。空白区为天然变化的含水量,对照区因每次取样后人为的翻耕可起到一定的保水作用,含水量略高于空白区,但并没有对土壤石油降解起到足够的作用,当然只是原因之一。

营养元素是参与微生物细胞组成、构成酶的活性成分、物质运输系统以及提供生理活动所需的能量。

微生物细胞的组成元素主要是 C、H、O、N、P 等,其中 C、H 来自石油污染物。氧来自水和空气及其他调控的氧源。而氮和磷及 S、K、Ca、Mg、Fe 微量元素等等作为营养物质需要进行补充和调控,并利用当地养鸡场鸡粪作为添加剂补充其他生物素和营养盐。表 4 为各区易溶盐、 NH_4^+ 、 NO_3^- 含量随试验过程的变化,从中可见试验区于 8 月 21 日补充了各种营养元素,反映出随试验进程微生物活动将石油和各类元素利用、降解、转化的过程,该过程验证了本次试验调控添加的营养元素是适度的。对照区、空白区则反映了自然的含量变化,降雨使其含量降低。

2.2.3 土壤中氧的调控

氧的供应成为细菌降解石油污染过程的重要调控因子之一。供氧量的多少能影响微生物细胞内许多酶的活性和细胞的呼吸作用,控制着微生物的生长和对石油污染的降解能力。一般每氧化 3.5 g 石油需要 1 g O_2 ,只有在氧化充分的条件下才能迅速降解。本次试验主要从 4 个方面对土壤氧的供给进行了调控,首先是充分翻耕土壤并且在每次取样后均要翻耕试验层,使其充分与大气混合。其次是保证试验土壤具有一定的含水量,水中提供的氧。另外是利用鸡粪作为添加剂,该物质不仅廉价易取,并能补充营养素,而且对试验层土壤进行了改良增大了蓬松性和通透性,使空气中的氧容易进入。最后是加入的营养 NH_4NO_3 、 KH_2PO_4 、 K_2HPO_4 、 NO_3^- 等不仅增加氮源也是氧的来源之一。

2.3 试验过程对试验区下层土壤的影响

表 5 是试验完成后对试验各区下部不同深度进行了石油、pH、含水量、易溶盐、 NH_4^+ 、 NO_3^- 含量测试,从测试结果可见试验区试验层的下部土层石油含量并没有明显的增加。与对照和空白区对比相差不多,

说明试验层土壤中石油没有向下扩散或是也被降解,从 pH、含水量、易溶盐、 NH_4^+ 、 NO_3^- 含量也可看出不同于对照区和空白区,也就是说氮、磷等等易溶盐营养物质一部分随水而进入下部土层,该结果为今后此类修复工作对水量和易溶营养的要求和添加方法具有特别重要的意义。

3 结论

(1)通过对陕北黄土石油开采区石油污染土壤的原位微生态修复方法的初步试验研究,利用优化原位(土著)微生物菌群辅以物理和化学方法与地质环境相结合的微生态技术,进行了试验区土壤温度、水、氧气、营养元素、地质环境因素等的调控,对土壤中人为石油污染物的降解与修复试验,试验结果显示,土壤中人为填加的石油平均含量在 $2\,318.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,经过 11~32 d 原位微生态修复技术的修复试验,土壤中石油含量去除率可达 68.47%~84.30%。而对照区土壤人为填加的石油含量变化不大,基本在 10%以内,说明在自然条件下土壤中石油降解是缓慢的。验证了地质微生态修复技术在陕北黄土区土壤石油污染修复的有效性,探索了推广应用的可行性。

(2)得出在该地区利用微生态修复技术的最佳季节应在每年的 6 月下旬至 9 月上旬,通过调控可使土壤温度保持在 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 以上。

(3)验证了本次试验调控添加的营养元素和对土壤环境的改善是比较适度的,方法是可行的。

该试验过程初步验证了地质微生态修复技术在野外原位土壤石油污染修复试验效果是明显的、可行的,具有处理方法简单、费用低、修复效果好、对环境影响小、无二次污染、可原位治理等优点。虽然是试验研究,用于野外大面积修复还有待完善,但通过不断

表 5 试验后各区下部土壤中石油、pH、含水量、易溶盐、 NH_4^+ 、 NO_3^- 随深度变化测试结果

Table 5 Oil contents, pH, moisture contents, contents of soluble salt, NH_4^+ and NO_3^- with depth in different plots after experiments

各区下部不同深度	石油/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	pH	含水量/%	易溶盐/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	NH_4^+ / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	NO_3^- / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
试验区 20~25 cm	61.9	7.8	14.04	821.5	70.0	246.4
试验区 30~35 cm	102.2	8.0	15.27	612.0	5.0	242.7
试验区 45~50 cm	87.7	8.0	17.78	504.0	3.0	242.6
对照区 20~25 cm	90.15	8.5	13.06	97.0	1.5	24.2
对照区 30~35 cm	58.31	8.4	13.51	96.5	1.5	22.2
对照区 45~50 cm	76.45	8.4	14.67	123.0	1.5	18.4
空白区 20~25 cm	99.42	8.7	10.8	68.1	3.0	24.1
空白区 30~35 cm	36.55	8.7	10.58	80.2	1.5	32.7
空白区 45~50 cm	36.95	8.5	14.09	171.5	1.5	31.6

努力是可以实现的。它不仅可以在原位有效地修复土壤、包气带和阻控地下水的石油污染,而且还可以增加土壤的肥力改善土壤环境,对修复污染的土壤和农作物增产都具有重要意义,也是从根本上修复和治理土壤石油大面积污染的有效方法之一,具有一定的实际应用价值。

参考文献:

- [1] Jorgensen K S, Puustinen J, Suortti A M. Bioremediation of petroleum hydrocarbon contaminated soil by composting in biopiles[J]. *Environmental Pollution*, 2000, 107(2):245–254.
- [2] Debontj A M. Solvent–tolerant bacteria in biocatalysis[J]. *Trends Biotechnology*, 1998, 16:493–499.
- [3] Sanjee Mishra, Jeevan Jyot. In situ bioremediation potential of an oily sludge–degrading bacterial consortium[J]. *Current Microbiology*, 2001, 43:328–335.
- [4] Jose L R Gallego, Jorge Loreda, Juan F L Iamas. Bioremediation of diesel–contaminated soil: Evaluation of potential in situ techniques by study of bacterial degradation[J]. *Biodegradation*, 2001, 12:325–335.
- [5] Widdl E. The genome sequence of an anaerobic aromatic–degrading denitrifying bacterium strain EbN1[J]. *Archives of Microbiology*, 2005, 183:27–36.
- [6] Mar n S, Khodijah Tazaiki. Bioremediation of coastal areas 5 years after the nakhodka oil spill in the sea of Japan: Isolation and characterization of hydrocarbon–degrading bacteria[J]. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 2004, 30(7):911–922.
- [7] Wang Jian–long, Zhao Xuan, Wu Wei–zhong. Biodegradation of phthalic acid esters (PAEs) in soil bioaugmented with acclimated activated sludge[J]. *Process Biochemistry*, 2004, 39:1837–1841.
- [8] Ghazali F M, Rahman R N Z A, Salleh A B B M. Biodegradation of hydrocarbons in soil by microbial consortium[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2004, 54:61–67.
- [9] 杨雪莲, 李凤梅, 刘婉婷, 等. 高效石油降解菌的筛选及其降解特性[J]. 农业环境科学学报. 2008, 27(1):230–233.
YANG Xue–lian, LI Feng–mei, LIU Wan–ting, et al. Isolation of petroleum–degrading strains and their degrading characteristics [J]. *Journal of Agro–Environment Science*, 2008, 27(1):230–233.
- [10] 姚治华, 王红旗, 刘敬奇, 等. 石油污染土壤中苯降解菌的筛选及降解特性研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(6):1498–1503.
YAO Zhi–hua, WANG Hong–qi, LIU Jing–qi, et al. Screening and characterization of benzene degrading bacterium in oil–contaminated soil[J]. *Journal of Agro–Environment Science*, 2006, 25(6):1498–1503.
- [11] 郑金秀, 彭 祺, 张甲耀, 等. 优势降解菌群生物强化修复石油污染土壤[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(5):1212–1216.
ZHENG Jin–xiu, PENG Qi, ZHANG Jia–yao, et al. Bioremediation of oil–contaminated soil bioaugmented with consortium bacteria[J]. *Journal of Agro–Environment Science*, 2006, 25(5):1212–1216.
- [12] 马宝瑞, 赵 敏, 张景飞. 假单胞菌 DS–Ⅲ 的脱氢酶活性与石油降解动力学特性[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(2):559–562.
MA Hong–rui, ZHAO Min, ZHANG Jing–fei. Dehydrogenase activity of pseudomonas DS–Ⅲ and its degradation capability for hydrocarbon[J]. *Journal of Agro–Environment Science*, 2007, 26(2):559–562.
- [13] 沈铁孟, 黄国强, 李 凌, 等. 石油污染土壤的原位修复技术 [J]. 环境科学动态, 2002,(3):13–15.
SHEN Tie–meng, HUANG Guo–qiang, LI Ling, et al. In–situ Remediation technique for oil–polluted soil[J]. *Environmental Science Trends*, 2002,(3):13–15.
- [14] 中国科学院南京土壤研究所微生物室. 土壤微生物研究法 [M]. 北京: 科学出版社, 1985. 1–353.
Institute of Soil science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing. Methods of soil microbiology[M]. Beijing: Science Publishing House, 1985. 1–353.
- [15] 林 力, 杨惠芳, 贾省芬. 石油污染土壤的生物整治研究[J]. 上海环境科学, 2000, 7:325–329.
LIN Li, YANG Hui–fang, JIA Sheng–fen. Study on bioremediation of petroleum–polluted soil[J]. *Shanghai Environmental Sciences*, 2000, 7:325–329.
- [16] 张海荣, 李培军, 孙铁珩, 等. 四种石油污染土壤生物修复技术研究 [J]. 农业环境保护, 2001, 20(2):78–80.
ZHANG Hai–rong, LI Pei–jun, SUN Tie–heng, et al. Bioremediation on 4 soils contaminated by petroleum oils using prepared bed processes[J]. *Agro–environmental Protection*, 2001, 20(2):78–80.
- [17] 何 翊, 吴 海, 魏 薇. 石油污染土壤菌剂修复技术研究 [J]. 土壤, 2005, 37(3):338–340.
HE Yi, WU Hai, WEI Wei. Bacteria–based bioremediation technique for oil–polluted soil[J]. *Soils*, 2005, 37(3):338–340.
- [18] 东秀珠, 蔡妙英. 常见细菌系统鉴定手册 [M]. 北京: 科学出版社, 2001. 1–419.
DONG Xiu–zhu, CAI Miao–ying. Handbook of Common Bacteria Systematic Identify[M]. Beijing: Science Publishing House, 2001. 1–419.