

中原油田石油污染土壤原位生物修复技术实验研究

陈立^{1,3} 张发旺^{1,2*} 刘少玉¹ 何泽¹ 张胜¹

(1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 正定 050803; 2. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 桂林 541004; 3. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083)

摘要 通过实验室选择性富集培养, 从中原油田石油污染土壤中获得能以中原原油为碳源快速生长的石油降解菌群。结合黑麦草(*Ryegrass*)和苜蓿(*Alfalfa*), 采用该降解菌群对原油污染土壤进行了原位生物联合修复实验。接入降解菌的实验区分种植黑麦草、种植苜蓿、未种植区, 另设黑麦草区和空白区。经过 99 d 的生物修复, 石油烃累计降解率达 43.27% ~ 67.38%, 尤以 2 个微生物植物联合区修复效果为最佳, 而空白区的累计降解率不足 2.5%, 说明所选菌群对中原油田污染土壤有明显的降解作用。实验结果表明, 接入的降解菌一般经过 1 ~ 3 d 的适应期后发挥作用; 修复过程中易溶盐、 NO_3^- 、 Cl^- 等易溶物质只有极小部分随水进入下部土层(50 cm); 由于苜蓿草的根部可能具有固氮作用, 使得实验层中的 NH_4^+ 含量比其他实验区的大。实验过程中对包括温度、水、氧气、营养元素等影响修复的因素进行了优化。

关键词 生物修复 石油污染 土壤 原位修复 降解

中图分类号 X53 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2011)10-2385-06

Experimental study on in-situ bioremediation technique for oil contaminated soil in Zhongyuan Oil Field

Chen Li^{1,3} Zhang Fawang^{1,2*} Liu Shaoyu¹ He Ze¹ Zhang Sheng¹

(1. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Zhengding 050803, China; 2. Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, China; 3. School of Water Resource & Environment, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract The degradation microbial communities which were lab selective enrichment cultured from oil polluted soil of Zhongyuan Oil Field could fast grow using crude oil as carbon source. These microbial communities binding with *Ryegrass* and *Alfalfa* were used in experiments on combined in-situ bioremediation of oil contaminated soil. The experimental area was divided into five: microbial communities with *Ryegrass*, microbial communities with *Alfalfa*, only microbial communities, only *Ryegrass* and blank. After 99 d bioremediation, the cumulative degradation rate of petroleum hydrocarbon could reach 43.27% to 67.38%, which were much higher in the two areas of microbial communities with *Ryegrass* or *Alfalfa*. Whereas the cumulative degradation rate of blank area was lower than 2.5%. Those results showed that the selected microbial communities could obviously degrade the oil polluted soil in central plains oil field. The experimental results indicated that the inoculated degradation microbial communities generally need 1 ~ 3 d adaptive phase then being active, few nutriment such as soluble salt, NO_3^- , Cl^- , etc could infiltrate into the lower soil layer(50 cm). The nitrogen fixation of *Alfalfa* roots may cause the distinct increase of NH_4^+ . In addition, some factors containing temperature, water, oxygen, nutriment and mini-geo-environment were optimized in the experiments.

Key words bioremediation; oil contamination; soil; in-situ remediation; degradation

中原油田长期大量开采石油资源的同时, 对周围地区的土壤环境造成严重污染, 不仅破坏了土壤的结构, 使土壤功能下降, 还对土壤生态系统产生了严重的危害^[1,2]。随着国家对环保要求的提高, 石油污染土壤的治理工作也逐渐成为热点问题。对石

基金项目: 科技部国际合作重点项目(2005DFA90200); 河南省国土资源厅基金项目(濮阳市油田区土壤修复项目); 中国地质科学院水文地质环境地质研究所基本科研业务费项目(SK200904)

收稿日期: 2010-06-08; **修订日期:** 2010-09-05

作者简介: 陈立(1974~), 男, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事水土环境修复方面的研究。E-mail: sunboyli2003@126.com

* 通讯联系人, E-mail: fawangzhang@karst.ac.cn

油污染土壤的治理,传统的物理和化学处理方法会造成二次污染,同时处理成本高,这样使得治理不彻底,且增加了经济负担。目前,生物技术已成为国内外环境治理技术的研究热点,日益受到广泛关注^[3,4]。其中微生物和植物修复技术克服了物理和化学方法的缺点,取得了不错的效果。孙东平等^[5]的研究结果显示,从油污土壤中筛选的高效石油降解菌,对石油污染物的降解效果显著;蔺昕等^[6]研究认为植物的吸收和代谢对多环芳烃(PAHs)的降解起明显作用;刘继朝等^[7]通过盆栽实验研究了植物修复中原油田污染土壤的效果。这些研究更多地集中在室内实验的基础上,现场原位修复或原位实验的研究鲜有报道,陈立等^[8]在陕北地区利用纯微生物的方法进行了石油污染土壤原位修复实验,取得了良好的效果。笔者在以往研究的基础上,结合刘继朝等人针对中原油田土壤特点筛选的植物,开展微生物植物联合的生物技术原位修复中原油田石油污染土壤的研究,探索生物技术在中原地区石油污染土壤原位修复的有效性、生态性,以期石油污染土壤的生物修复提供科学依据。

1 实验材料和方法

1.1 实验区背景

实验区位于中原油田某采油井场旁,该油井1991年因发生井喷爆裂事故,对周围的土壤产生污染。据调查,当时漏出原油和高盐水约200~300 m³,被污农田7 000余m²。本次修复0~25 cm的土壤,其类型为潮土,含有少量2~10 mm的小砾石或小姜石,容重为1.53 g/cm³;自然含水量16.3%;pH为7.4;含盐量为1 243~18 650 mg/kg,石油含量为767.7~5 028.8 mg/kg,平均为2 898.25 mg/kg;其下部25~50 cm的土壤石油含量为313.6 mg/kg,pH为8.5;含盐量为1 243 mg/kg。

1.2 所需植物

根据参考文献[7]在实验区所做的石油污染土壤修复实验效果,确定黑麦草(*Ryegrass*)和苜蓿(*Alfalfa*)作为本次修复植物。

1.3 添加剂

麦糠麦秸、尿素和复合肥。

1.4 实验仪器

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、HZ150L恒温摇床培养箱、奥林巴斯生物显微镜、752N紫外可见光栅分光光度计、电热干燥箱及各种化学分析用玻璃仪器。

1.5 分析方法

石油烃含量的测定:土壤中石油烃含量的测定采用紫外分光光度法。

降解石油微生物细菌培养优选方法:土壤微生物细菌培养采用《土壤微生物研究法》^[9],和参考文献^[10-12]介绍的方法,细菌初步鉴定采用《常见细菌系统鉴定手册》^[13]中的方法。

2 实验过程

2.1 菌群制剂的分选和配置

采用细菌的选择性培养基和富集培养基,对实验场石油污染土壤的样品进行菌种、菌群的培养分离,选择优化出实验用降解土壤石油的土著菌种、菌群。选择优化出的土著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*)、真菌类的青霉菌属(*Penicillium*)、曲霉属(*Aspergillus*)等等菌群。将这些降解菌放大培养,直到测试菌液中含菌量为10¹¹~10¹⁵个/mL,在修复工作前将培养好的菌液制剂存放于刷洗干净的25 L的6个塑料桶中。

2.2 实验场地的设置

分4个实验区和1个空白区,每区成长方形,1号实验区为纯微生物修复区,667 m²;2号实验区为黑麦草微生物联合修复区,267 m²;3号实验区为苜蓿微生物联合修复区,267 m²;4号实验区为纯黑麦草修复区,400 m²;空白区,66.7 m²,未作任何处理,未加任何成分。

2.3 实验步骤

实验开始于2009年7月4日,结束于2009年10月15日,实验分7步完成:第1步,将待修复的场地经过拖拉机2次翻耕,3次旋耕,并平整;第2步,按1.05 kg/m²,将准备好的麦糠麦秸均匀地撒到土壤表层,将尿素和硝酸磷钾复合肥均匀撒到修复土壤表层,用拖拉机进行旋耕,深度尽量控制在25 cm左右;第3步,将配置好的菌剂用喷雾器按75 mL/m²均匀的喷洒在1号、2号和3号实验区;第4步,按75 mL/m²将配置好的营养液,用喷雾器均匀

的喷洒在各个实验区;第 5 步,利用拖拉机反复旋耕,翻耕深度尽量控制在 25 cm 左右,使得修复土壤与麦糠麦秸、化肥、菌液和营养液混合均匀;第 6 步,将 1 号实验区表面覆盖薄膜,将准备好的黑麦草籽播种在 2 号、4 号实验区内,将准备好的苜蓿籽播种在 3 号实验区;第 7 步,定期取样,测试修复土壤中石油烃含量、pH、含水量、土壤易溶盐、 NH_4^+ 、 NO_3^- ,取样方法采用同一深度的梅花状 5 分法,即在每个实验区内的东西南北中方位的同一深度各取同样量的土壤样,混合均匀后再行测试。

3 实验结果与讨论

3.1 修复土壤中菌群分布状况

天然土壤中含有丰富的微生物,分布着具有潜在的降解石油能污染物的微生物。将这些微生物经过驯化、放大培养,投加到土壤中,能克服其他外源菌所面临的存活力较弱、与土著微生物之间存在竞争关系等一系列问题,且使土壤中这类降解菌数目明显增加,增强了降解石油污染物的能力。表 1 是在修复后第 99 天分析各实验区土壤微生物数量分布情况。

由表 1 看出,1 号、2 号、3 号实验区中的嗜油菌数量明显比 4 号实验区的嗜油菌数量高,比空白区的嗜油菌更高,其原因在于撒入的菌液含有大

量的嗜油菌,且修复土壤中经过一段驯化能产生代谢污染物的能力,使原本不能够转化或转化非常慢的污染物被代谢降解,微生物的这种适应性促使嗜油菌数量增加^[14]。4 号纯植物区的微生物总数为空白区的 9 倍,这说明植物的根际效应促进了土壤中微生物的生长繁殖。

3.2 修复土壤中石油的去除率

分别在播种 0、3、10、18、28、36、44、56、76 和 99 d 取土壤样品测试,结果见表 2 和图 1。

从表 2、图 1 中可知,植物与微生物联合方法对石油污染土壤具有明显的修复效果,第 99 天石油烃累计降解率分别达到了 67.38% 和 65.27%,纯微生物的修复效果也比较明显,第 99 天累计降解率达到了 57.34%,说明菌液的施加加速了生物修复的速度;纯植物(黑麦草)4 号实验区,第 99 天石油烃的降解率在 43.5% 之间,说明黑麦草的根系作用有助于石油污染土壤修复。

微生物对石油污染物代谢的生理过程一般通过接触并吸附石油、分泌胞外酶、石油污染物的吸收及胞内代谢完成。它降解石油的关键是氧化酶对石油的氧化^[15]。1 号、2 号、3 号实验区在第 3 天污染土壤中石油烃降解率就达到了 11.7% 以上,而 4 号实验区石油烃降解率明显低于这 3 个实验区,说明加

表 1 99 d 土壤样品中微生物数量分布
Table 1 Distribution of microbes numbers in soil samples after 99 days

实验区	细菌(个/g)		真菌(个/g)		放线菌(个/g)	
	总 数	嗜油菌	总 数	嗜油菌	总 数	嗜油菌
空白区	7.1×10^5	3.6×10^3	7.6×10^5	2.8×10^3	1.8×10^4	1.8×10^2
1 号(纯微生物修复区)	6.2×10^7	4.5×10^5	8.1×10^6	3.2×10^4	1.4×10^5	1.7×10^3
2 号(黑麦草微生物联合修复区)	5.6×10^8	6.4×10^7	2.8×10^7	1.8×10^5	3.1×10^5	7.1×10^3
3 号(苜蓿微生物联合修复区)	4.7×10^8	5.5×10^7	2.6×10^7	1.6×10^5	2.9×10^5	5.2×10^3
4 号(纯黑麦草修复区)	2.8×10^6	1.9×10^4	1.4×10^6	7.2×10^3	4.2×10^4	4.1×10^2

表 2 各实验区土壤中石油含量随时间的变化情况
Table 2 Change of oil contents in the soils of experimental plots with time (mg/kg)

实验区号	0 d	3 d	10 d	18 d	28 d	36 d	44 d	56 d	76 d	99 d
1 号	3 245.6	2 865.9	2 744.8	2 650.0	2 430.3	2 295.6	2 338.1	1 740.6	1 467.7	1 384.6
2 号	2 398.1	2 100.8	1 969.1	1 862.4	1 691.4	1 603.6	1 478.7	1 196.2	882.3	782.3
3 号	3 512.9	3 087.9	2 920.3	2 762.9	2 515.6	2 298.8	2 208.9	1 816.5	1 477.2	1 220.0
4 号	2 734.6	2 595.1	2 573.5	2 460.3	2 183.0	2 047.1	1 991.1	1 601.1	1 661	1 551.3
空白区	2 972.8	2 967.5	2 937.1	2 979.6	3 329.5	2 919.6	2 910.4	3 044.2	2 934.6	2 904.4

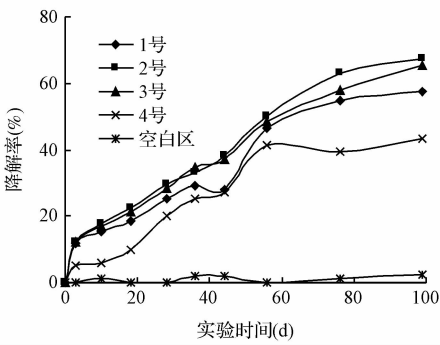


图 1 各实验区土壤中石油累积降解率随时间的变化

Fig. 1 Change of oil cumulative degradation rate in the soils of experimental plots with time

入的优化菌液修复作用速度很快,其适应期 1~3 d; 76 d 后 1 号、2 号、3 号实验区石油降解率增加变缓主要是由于石油中易被微生物所利用的组分逐渐消耗所致。

植物根际有着特殊的物理和化学性质,它是土壤圈中一个重要微生态系统,其修复功能主要体现在植物根系的吸收、转化作用及分解有机污染物的作用^[16]。第 3~18 天期间,4 号实验区中污染土壤中石油烃降解率虽低但仍在 5% 以上,这是由于加入的营养液、化肥、麦糠麦秸以及翻耕等综合作用,为原有土壤中的微生物提供了营养物质和氧气,激活了原有土壤中微生物对其中的石油烃的降解作用,第 28 天后,油污土壤中石油烃降解率明显增加,说明植物根系对油污土壤起到修复作用。

空白区中石油烃的降解率变化很小,实验期间没有超过 2.5%,说明在自然状态下,石油中易被微生物所利用的组分几乎被消耗殆尽。空白区中石油烃累计降解率时高时低,18、28 和 56 d 其累计降解率为 0,实际情况是土壤中的石油含量比实验当天测试结果要高,这可能与取样的不均一性有关,空白区中能见

到块状板结的土油块,取样时可能取到这种油块。另外,土壤物质成分的不均一性和复杂性,也可能引起这种情况的发生,从 1 号实验区第 44 天和 4 号实验区第 56 天石油烃累计降解率数值有突变可见一斑。

3.3 实验过程对下层土壤的影响

修复第 99 天,对实验区下部土壤 50 cm 深度处取样测试石油烃、易溶盐、 NH_4^+ 、 NO_3^- 、 Cl^- 含量,结果见表 3。

由表 3 可知,修复层的下部土壤石油烃含量未有明显增加,说明修复层土壤中石油没有向下扩散均被降解;易溶盐、 NO_3^- 、 Cl^- 含量变化均为变化不大,说明氮、磷等易溶盐营养物质只有极小部分随水而进入下部土层。但是 NH_4^+ 的含量变化不一致,种有苜蓿的 3 号实验区,50 cm 处土壤中含量增加明显,说明苜蓿草的根部可能具有固氮作用,使加入的大量化肥进入了土层下部,这为今后此类修复工作对营养物质的要求和添加方法具有重要的意义。

3.4 调控修复技术的影响因素

微生物生态修复技术是充分优化利用原位微生物菌群,辅以植物、物理和化学方法并与地质环境相结合,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、相互依存、相互作用和调控。调控因素主要有温度、水、氧气、营养元素、地质环境的改善等等。

3.4.1 土壤温度的调控

温度是影响微生物生长与存活重要因素之一,微生物的活动强度、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微生物死亡,环境中的微生物均在一定的温度范围内生存,温度的适中可使细菌细胞中的生物化学反应速率加快。实验区强化的微生物菌群大多为中温微生物(13~45℃),25~38℃ 为最适生长温度。通过测试修复阶

表 3 实验后各区土壤(50 cm 深度)中石油烃、易溶盐、 NH_4^+ 、 NO_3^- 、 Cl^- 含量

Table 3 Contents of oil, TDS, NH_4^+ , NO_3^- , Cl^- in the soils(50 cm deep) of experimental plots after experiments

实验区	石油含量 (mg/kg)	易溶盐 (mg/kg)	NH_4^+ (mg/kg)	NO_3^- (mg/kg)	Cl^- (mg/kg)
空白区	313.6	1 243	9.18	31.23	932.33
1 号	310.78	1 289	11.83	32.48	1 017.02
2 号	294.37	1 301	7.46	29.27	901.87
3 号	324.59	1 190	330.23	45.17	965.12
4 号	311.67	1 278	12.34	30.18	890.78

段地表的最高和最低温度显示,该地区地表最高温度在 7—9 月大多为 35℃ 以上,最低温度均大于 20℃,昼夜温差不大。因此不用调控实验区土壤温度,修复效果也是很好的。但是如在其他季节就需要采取措施增温保温等。通过此次修复过程,也可得出在该地区开展微生态修复技术的最佳温度时期应在每年的 6 月下旬—9 月中旬,使土壤温度保持在 25℃ 以上,能保证微生物细菌的活力和繁殖力。

3.4.2 土壤中氧的调控

氧的供应成为微生物细菌降解有机物过程的重要调控因子之一。环境条件的调控包括氧气的供给,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有机物的降解能力。本次修复主要从 4 个方面对土壤氧的供给进行了调控,首先是充分翻耕实验土壤层,使其充分与大气混合。其次是保证实验土壤具有一定的含水量,使含水量保持在 20% 左右,水中提供的氧。另外,实验区土壤中添加麦糠麦秸,该类添加剂不仅廉价易取,并能为土壤补充营养素,而且对修复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。加入的含氧营养元素 K_2HPO_4 、 KH_2PO_4 、 $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 、 NH_4NO_3 、 NO_3^- 等也提供了大量的氧。上述调控措施为微生物降解土壤中的石油提供了充分的氧源。保证了微生物细菌在降解土壤中石油所需要的氧气。

3.4.3 营养元素的供给

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。微生物细胞的组成主要元素是 C、H、O、N、P 等等,其中 C、H 来自有机物如石油污染物。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。因此,利用配置的营养液对实验区土壤进行了 N、P、S、K、Ca、Mg、Fe 等元素的补充和调控;同时,尿素和复合肥中也含有所需的大量营养元素,以及添加的麦糠麦秸也补充其他生物素和营养盐。

4 结 论

由于撒入的菌液含有大量的嗜油菌,修复土壤中经过一段驯化能产生代谢污染物的能力,原本不能够转化或转化非常慢的污染物被代谢降解,且植物的根际效应促进了土壤中微生物的生长繁殖,使得撒有菌群的实验区中的嗜油菌数量明显比未撒入

菌群实验区的嗜油菌数量高,比空白区的嗜油菌更高。

微生物、植物以及两者联合的方法对石油污染土壤具有明显的修复作用,其中的石油烃降解率均在 40%,以黑麦草与微生物联合技术修复效果为最佳,其中石油烃降解率达 67.38%;自然状态下,土著微生物对多年油污土壤的修复作用很弱,对石油烃的降解率在 2.5% 以下;加入培养放大的菌剂一般需要 1~3 d 的适应期,而后才进入对数期发挥其作用。

修复层的下部土壤石油烃含量未有明显增加,易溶盐、 NO_3^- 、 Cl^- 等易溶营养物质只有极小部分随水而进入下部土层;苜蓿草的根部可能具有固氮作用,使加入的大量化肥进入了土层下部,导致种植有苜蓿草实验区 50 cm 土壤层 NH_4^+ 明显增大。这为今后此类修复工作对营养物质的要求和添加方法具有重要的意义。

修复期选择在 6—9 月,当地最低气温 25℃ 以上,最高气温在 35℃ 以上,是修复的最佳气温区间;翻耕作用、添加的麦糠麦秸、营养液以及化肥提供了大量的氧,增强了微生物的生长的降解能力;同时,配置的营养液、添加的麦糠麦秸、化肥提供了大量的营养元素。

参 考 文 献

- [1] 刘文霞,孟祥元,冯建灿,等.中原油田耕地污染分析. 农业环境保护,2002,21(1):56-59
Liu Wenxia, Meng Xiangyuan, Feng Jiancan. Pollution of farmland soil by petroleum industry in the central plains oil field. Agro-Environmental Protection, 2002, 21(1):56-59 (in Chinese)
- [2] 李嘉,魏涛,陆续武.中原油田洒落原油对地下水污染研究. 西安科技大学学报,2006,26(2):196-200
Li Jia, Wei Tao, Lu Xuwu. Pollution of groundwater by scattered oil in Zhongyuan Oil Field. Journal of Xian University of Science and Technology, 2006, 26(2):196-200 (in Chinese)
- [3] Carraway J. W., Doyle J. R. Innovative remedial action at a wood-treating superfund site. Tappi Journal, 1991, 74(7):113-118
- [4] 孙清,陆秀君,梁成华.土壤的石油污染研究进展. 沈阳农业大学学报,2002,33(5):390-393
Sun Qing, Lu Xiujun, Liang Chenghua. Progress on contamination of soils by petroleum. Journal of Shenyang Agricultural University, 2002, 33(5):390-393 (in Chinese)

- [5] 孙东平,胡凌燕,周伶俐,等. 高效石油降解微生物堆制法处理油污土壤. 环境科学与技术, **2007**, 30(6): 86-89
Sun Dongping, Hu Lingyan, Zhou Lingli, *et al.* A compost process for oil-contaminated soil by high efficiency petroleum degrading microorganisms. Environmental Science & Technology, **2007**, 30(6): 86-89 (in Chinese)
- [6] 蔺昕,李培军,台培东. 石油污染土壤植物-微生物修复研究进展. 生态学杂志, **2006**, 25(1): 93-100
Lin Xin, Li Peijun, Tai Peidong, *et al.* Research progress in phyto-microbial remediation of petroleum-contaminated soil. Chinese Journal of Ecology, **2006**, 25(1): 93-100 (in Chinese)
- [7] 刘继朝,张燕平,邹树增. 土壤石油污染对植物种子萌发和幼苗生长的影响. 水土保持通报, **2009**, 29(3): 123-126
Liu Jichao, Zhang Yanping, Zou Shuzeng. Effects of oil-contaminated soil on the germination and growth of plant seedling. Bulletin of Soil and Water Conservation, **2009**, 29(3): 123-126 (in Chinese)
- [8] 陈立,张发旺,张胜,等. 陕北石油污染土壤原位生物修复技术实验研究. 水土保持学报, **2009**, 23(2): 162-165
Chen Li, Zhang Fawang, Zhang Sheng, *et al.* Experimental study of in-situ geomicrobial remediation for oil contaminated soil in North Shaanxi Province. Journal of Soil and Water Conservation, **2009**, 23(2): 162-165 (in Chinese)
- [9] 中国科学院南京土壤研究所微生物室. 土壤微生物研究法. 北京: 科学出版社, **1985**
- [10] 林力,杨惠芳,贾省芬. 石油污染土壤的生物整治研究. 上海环境科学, **2000**, 19(7): 325-329
Lin Li, Yang Huifang, Jia Shengfen. Study on bioremediation of petroleum-polluted soil. Shanghai Environmental Sciences, **2000**, 19(7): 325-329 (in Chinese)
- [11] 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. 农业环境保护, **2001**, 20(2): 78-80
Zhang Hairong, Li Peijun, Sun Tieheng, *et al.* Bioremediation on 4 soils contaminated by petroleum oils using prepared bed processes. Journal of Agro-Environment Science, **2001**, 20(2): 78-80 (in Chinese)
- [12] 何翊,吴海,魏薇. 石油污染土壤菌剂修复技术研究. 土壤, **2005**, 37(3): 338-340
He Yi, Wu Hai, Wei Wei. Bacteria-based biorremediation technique for oil-polluted soil. Soils, **2005**, 37(3): 338-340 (in Chinese)
- [13] 东秀珠,蔡妙英. 常见细菌系统鉴定手册. 北京: 科学出版社, **2001**
- [14] 周启星,宋玉芳,丁颖,等. 污染土壤修复原理与方法. 北京: 科学出版社, **2004**
- [15] 刘国良,苏幼明,顾书敏,等. 石油污染土壤生物修复研究新进展. 化学与生物工程, **2008**, 25(8): 84-88
Liu Guoliang, Su Youming, Gu Shumin, *et al.* New progress in bioremediation of petroleum-contaminated soil. Chemistry & Bioengineering, **2008**, 25(8): 84-88 (in Chinese)
- [16] 李云辉,文荣联,莫测辉. 土壤有机污染的植物修复研究进展. 广东农业科学, **2007**, 35(12): 96-98
Li Yunhui, Wen Ronglian, Mo Cehui. Advances in phytoremediation of organic pollutants in soil. Guangdong Agricultural Sciences, **2007**, 35(12): 96-98 (in Chinese)