

# 西北黄土区石油污染土壤原位微生物 生态修复试验研究

张胜<sup>1</sup> 陈立<sup>1</sup> 崔晓梅<sup>2</sup> 马彦超<sup>3</sup> 么红超<sup>3</sup> 张翠云<sup>1</sup> 李政红<sup>1</sup>  
张发旺<sup>1\*</sup> 殷密英<sup>1</sup> 马琳娜<sup>1</sup>

- (1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所 正定 050803)  
(2. 河北地质职工大学 石家庄 050081)  
(3. 石家庄经济学院 石家庄 050031)

**摘要:** 通过对西北黄土石油开采区石油污染土壤生物强化原位微生物生态修复方法的试验研究, 充分利用强化原位微生物菌群辅以物理和化学方法与土壤环境相结合的微生物生态技术, 进行了土壤中石油的降解与修复试验研究, 试验结果显示, 土壤中平均石油含量在 2754 mg/kg 时, 经过 11 d~32 d 强化原位微生物生态修复技术的修复, 土壤中石油含量降解可达 40.92%~80.37%, 验证了微生物生态修复技术在西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:** 石油污染, 原位微生物生态修复, 西北黄土区

## Experimental Study of in-situ Microbial Ecological Remediation for Oil Contaminated Soil in Northwestern Loess Region

ZHANG Sheng<sup>1</sup> CHEN Li<sup>1</sup> CUI Xiao-Mei<sup>2</sup> MA Yan-Chao<sup>3</sup> YAO Hong-Chao<sup>3</sup>  
ZHANG Cui-Yun<sup>1</sup> LI Zheng-Hong<sup>1</sup> ZHANG Fa-Wang<sup>1\*</sup> YIN Mi-Ying<sup>1</sup> MA Lin-Na<sup>1</sup>

- (1. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Zhengding 050803)  
(2. Hebei Employee College of Geology, Shijiazhuang 050081)  
(3. Shijiazhuang University of Economics, Shijiazhuang 050031)

**Abstract:** The experimental study of in-situ enhanced microbial ecological remediation for oil contaminated loess soil was carried out in oil production areas of North Shaanxi Province. In the experiments, the microbial ecological techniques of in-situ microbial communities combined with the physical and chemical methods as well as soil environment were used for the oil degradation and contaminated soil remediation. The results of the experiment showed that can degradation rate of oil can be up to 40.92% to 80.37% under oil average contents of 2754 mg/kg in the contaminated soil after the in-situ enhanced microbial ecological remediation for 11 to 32 days, which demonstrated the effectiveness of the in-situ microbial ecological remediation methods for oil contaminated soil in northwestern loess region. In addition, it was discussed for feasibility of extend application of the technique.

**Keywords:** Oil contamination, In-situ microbial ecological remediation, Northwestern loess region

土壤和地下水是人类与地表生态系统的基本维持条件。随着社会经济的发展,人类活动对土壤和地下水的影响越来越大。西北黄土高原地区由于石油资源的大量开采利用,产生了一系列的环境问题。尤其是落地原油的污染已危及土壤包气带和地下水的的天全,使其受到石油不同程度的污染,造成了比较严重的生态失衡、环境退化等等,已形成较为严重的环境问题。土壤和地下水石油污染的防治研究工作已成为环境保护科学技术研究工作的新热点。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%<sup>[1]</sup>。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<sup>[2]</sup>。土壤微生物修复技术的开发与研究已受到许多国家环境科学界的广泛关注<sup>[3,4]</sup>。据报道,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<sup>[5]</sup>。微生物生态技术就是充分利用强化原位微生物菌群(土著微生物)辅以物理和化学方法并与土壤环境相结合的修复技术,以微观效应改变宏观环境为主的原位生物修复技术。应用该技术的关键是强化的微生物和土壤环境的相互结合、相互依存、相互作用和调控环境因子。控制因子主要有温度、水、氧气、营养元素、土壤环境的改善等等。该技术可用于环境的原位治理与保护,提高元素的转化,降解有毒、有害物质,以促进营养物质更易被生物所吸收。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。本研究的创新之处就是在野外原位石油污染的土壤中进行了微生物生态修复技术试验,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 实验方法与材料

### 1.1 实验材料和方法

化学试剂:  $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 、 $NH_4NO_3$ 、 $CaCl_2$ 、 $FeCl_3$ 、 $KH_2PO_4$ 、 $K_2HPO_4$ 、 $KCl$ 、盐酸、石油醚、三氯甲烷等均为分析纯,主要由北京北化精细化学品公司和天津市四通化工厂生产,生化试剂主要从北京陆桥技术有限责任公司购置。

添加剂: 鲜草(主要为当地生长的禾本科茅草类植物)等等。

试验场地位于陕西延安安塞西北约 20 km 处,为黄土土壤,试验深度 0 cm~15 cm 最后至 50 cm,土中含有少量 2 mm~10 mm 的小砾石,土壤湿容重为  $1.821 g/cm^3$ ; 自然含水量 9.18%; pH 为 8.4; 硝酸盐含量为 55.3 mg/kg; 铵含量为 8.85 mg/kg; 石油含量为 1.3 mg/kg~4.6 mg/kg。试验用水为当地浅层地下水, pH 为 8.2, 可溶性固体总量(TDS)为 420.5 mg/L。实验用石油为试验场地下 2400 m 采出的原油。

实验用玻璃器皿等: 150 mL、250 mL 具塞三角瓶, 125 mL、1000 mL 磨口细口试剂瓶, 各种不同类型的细菌培养试管、培养皿, 试管, 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、生物恒温箱、高速离心机、高压蒸汽灭菌器、无菌实验室、生化培养箱、752N 紫外可见光栅分光光度计、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》<sup>[6]</sup>和参考文献[7-9]介绍的方法, 细菌初步鉴定用《常见细菌系统鉴定手册》<sup>[10]</sup>中的方法。

### 1.2 土壤石油污染原位修复方法与步骤

1.2.1 菌种的分离与优选: 自然界物质循环微生物细菌的作用是非常重要的一环, 碳的循环也不例外。许多细菌就是碳循环的主要因子之一, 对石油降解作用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, 也是自然界对石油污染的自净功能的生态效应, 对土壤和地下水环境保护具有一定的实际意义。据此我们用细菌的选择性培养基和富集培养基, 对试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、微球菌

属、放线菌属、真菌类(毛霉、曲霉)等等菌群。

**1.2.2 野外试验区的平整与本底数据的采取:** 分为各类试验小区, 如试验区、对照区、空白区等, 各小区为: 120 cm × 120 cm, 各小区相间 20 cm, 小区由西向东一字排列。

**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 深均匀混入一定量的石油。按试验区试验层土壤重 1.4% 混入剁碎长为 1 cm~3 cm 的鲜茅草, 作为添加剂。并将放大培养的菌液按 3%(3%的计算方法: 120 cm × 120 cm × 15 cm × 1.82 g/cm<sup>3</sup>=393120 g=393.12 kg, 每 100 kg 加入 3 kg, 总共 1 个试验小区加入约 12 kg 即 12 L) 液体喷雾翻耕均匀接入试验区土壤, 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, 用当地地下水调节试验土层含水量在 20% 左右。在试验区覆盖塑料薄膜用于保温、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, 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。对照区加入与试验区相同的石油量其它不加, 作为自然降解。空白区不加任何物质作为监控样品。3 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<sub>4</sub><sup>+</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>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~表 5 和图 1。

## 2 结果与讨论

### 2.1 土壤中石油的去除率

由表 1 和图 1 可知: 通过野外现场上述实验, 可以认识和了解土壤微生物生态技术, 在土壤石油污染原位修复的实施技术是具有一定的实效性。从表 1 可见, 试验区在试验初期 0 d~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), 图 1 显示在试验的第 11 d 即适应期后 5 d 去除率就达 40% 以上, 试验至 32 d 时则去除率达 80.32%。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, 说明在自然条件下短时间内土壤中石油降解是缓慢的。两个异常值 16 d、21 d 的测试数据可能取样不均所致, 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, 但在试验后期因对照区与空白区

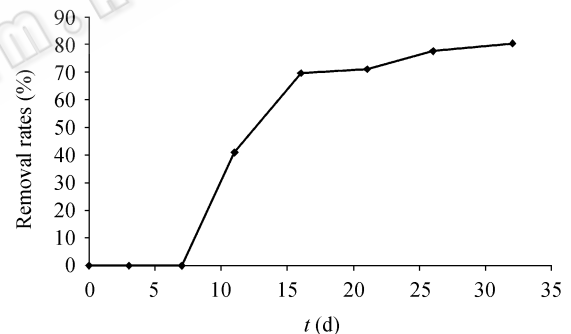


图 1 试验区微生物生态修复土壤中石油随时间的去除率(%)

Fig. 1 Temporal removal rates (%) of oil during in-situ microbial ecological remediation in the experimental plot

表 1 各区土壤中石油含量随时间变化测试结果 (mg/kg)  
Table 1 Temporal test results of oil contents in the soils of various plots (mg/kg)

取样日期(月/日) Sampling date(M/d)	8/19	8/23	8/26	8/30	9/4	9/9	9/14	9/20
试验天数(d) Experimental days(d)	0	3	7	11	16	21	26	32
试验区 Experimental plot	2268.0	2959.0	3035.0	1627.0	799.4	767.6	617.4	540.6
对照区 Reference plot	2279.0	2442.0	2245.0	2122.0	1532.2	1855.2	2110.6	2120.2
本底区 Blank plot	4.6	18.2	4.0	0.95	5.75	29.55	46.55	159.0

相邻又加之降雨和人为取样活动污染了该区,造成含量有所增加。

## 2.2 土壤微生物生态修复技术的控制因素

土壤微生物生态技术是充分强化利用原位微生物菌群(土著微生物)辅以物理和化学方法并与土壤环境相结合的,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优化的微生物和土壤环境的相互结合、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、土壤环境因子的改善等等,用于促进元素的转化,降解有

毒、有害物质,在原位对环境污染的治理与修复。

**2.2.1 土壤温度的调控:** 温度是影响微生物生长与存活的重要因素之一,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微生物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。我们试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。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

表 2 试验区与空白区(8-9月)天气与地表最高与最低温度(°C)

Table 2 Weather and the highest and the lowest temperatures of ground surface in the experimental plot and the blank plot during August to September, 2007( )

日期 Monitoring date	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	1	2	3
天气 Weather	晴	多云	晴	晴	晴	多云	多云	阴	阴	阴	阴	多云	雨	晴	多云	晴
试验区 Experimental plot	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
空白区 Blank plot	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 Monitoring date	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14			19	20	
天气 Weather	多云	晴	多云	雨	雨	晴	晴	晴	多云	雨	晴			晴	晴	
试验区 Experimental plot	高	38.5		18.5		37.5										
	低		17.0		17.5	16.5		22.0		20.5						
空白区 Blank plot	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 cm-15 cm) 8 时与 18 时的温度(°C)

Table 3 Soil (5 cm-15 cm depth) temperatures in the experimental plot and the blank plot at 8:00 and 18:00 in September, 2007

日期 Monitoring date		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	19	20
试验区 Experimental plot	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 Blank plot	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 Experimental plot	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 Blank plot	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

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。因此我们在试验区用农用塑料薄膜进行保温, 使试验区土壤温度保持在 25 以上, 但进入 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。从试验效果图 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如若利用微生物生态修复技术的最佳时期应在每年的 6 月下旬~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(TDS)、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{NO}_3^-$ 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 7.6~8.4, 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 比试验区略高一些。但在此 pH 值范围内对此次试验影响不大, 试验区加入的磷酸盐主要是为微生物的生长增加营养元素。

水是细胞生存不可少的物质, 也是微生物对石油污染物降解过程中的重要介质和氧的来源。因此

表 4 各区土壤 pH、含水量与易溶盐、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{NO}_3^-$ 含量随时间变化测试结果  
Table 4 Temporal pH values, soil water contents, contents of TDS,  $\text{NH}_4^+$  and  $\text{NO}_3^-$  in soils of various plots

取样日期(月/日) Sampling date (M/d)	8/20	8/23	8/26	8/30	9/4	9/9	9/14	9/20
试验天数(d) Experimental days (d)	1	3	7	11	16	21	26	32
试验区 pH pH in the experimental plot	8.1	7.6	8.1	8.0	8.0	8.4	8.3	7.8
试验区含水量(%) Soil water contents in the experimental plot(%)	9.8	15.87	16.43	20.13	19.02	20.0	19.58	18.66
试验区易溶盐(mg/kg) TDS in the experimental plot (mg/kg)	144.5	835.0	915.0	1042.5	547.5	424.5	394.0	423.5
试验区 $\text{NH}_4^+$ (mg/kg) $\text{NH}_4^+$ in the experimental plot (mg/kg)		233.85			55.0	40.0	15.0	10.0
试验区 $\text{NO}_3^-$ (mg/kg) $\text{NO}_3^-$ in the experimental plot (mg/kg)		830.3			280.0	293.3	241.7	247.0
对照区 pH pH in the reference plot	8.1	8.2	8.4	8.5	8.6	8.9	8.8	8.7
对照区含水量(%) Soil water content in the reference plot (%)	9.18	7.41	9.31	15.75	17.09	15.72	16.45	11.35
对照区易溶盐(mg/kg) TDS in the reference plot(mg/kg)	144.5	116.0	132.0	93.6	58.45	57.45	52.95	37.4
对照区 $\text{NH}_4^+$ (mg/kg) $\text{NH}_4^+$ in the reference plot (mg/kg)						15.0	11.25	1.5
对照区 $\text{NO}_3^-$ (mg/kg) $\text{NO}_3^-$ in the reference plot (mg/kg)					54.0	42.7	41.6	29.3
空白区 pH pH in the blank plot	8.1	8.2	8.4	8.4	8.5	8.7	8.7	8.8
空白区含水量(%) Soil water content in the blank plot (%)	9.18	6.94	8.04	15.19	13.74	13.39	13.59	8.85
空白区易溶盐(mg/kg) TDS in the blank plot (mg/kg)	144.5	117.0	131.0	88.1	63.8	49.25	48.25	49.35
空白区 $\text{NH}_4^+$ (mg/kg) $\text{NH}_4^+$ in the blank plot(mg/kg)					7.4	12.5	12.5	3.0
空白区 $\text{NO}_3^-$ (mg/kg) $\text{NO}_3^-$ in the blank plot (mg/kg)					43.0	94.8	48.9	34.5

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,这一含量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,并没有对土壤石油降解起到足够的作用,当然这仅是原因之一。因此试验区调控了含水量促进了微生物对石油的降解作用。

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,其中C、H来自有机物如石油污染物。氧来自水和空气及其它调控的氧源。而氮和磷及S、K、Ca、Mg、Fe微量元素等作为营养物质需要进行补充和调控。因此我们对试验区土壤进行了N、P、S、K、Ca、Mg、Fe等元素的补充和调控,并利用当地鲜茅草剁碎作为添加剂补充其它生物素和营养盐。表4为各区易溶盐、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{NO}_3^-$ 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。表中8月23日至30日土壤含盐量是增高的,显示出添加剂的矿化为土壤增加了易溶盐类元素,该过程验证了本次试验调控添加的营养元素是比较适度。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:**环境条件的调控包括氧气的供给,氧的供应成为微生物降解有机物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有机物的降解能力。尤其是对石油污染的微生物降解尤为重要,一般每氧化3.5 g石油需要1 g  $\text{O}_2$ ,只有在氧充分的条件下才能迅速降解。本次试验主要从3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。另外是利用茅草剁碎作为添加剂,该添加剂不仅廉价易取,并能作为土壤补充营养元素,而且对试验层土壤条件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。加入的营养元素 $\text{NO}_3^-$ 不仅增加氮源也是氧的来源之一。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。

### 2.3 试验过程对下层土壤的影响

表5是试验完成后对试验各区下部土壤不同深度进行了石油、pH、含水量、易溶盐(TDS)、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{NO}_3^-$ 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还有些降低,说明试验层土壤中石油没有向

表5 试验后各区下部土壤中石油、pH、含水量、易溶盐(TDS)、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{NO}_3^-$ 随深度变化测试结果

Table 5 Oil contents, pH values, soil water contents and contents of TDS,  $\text{NH}_4^+$  and  $\text{NO}_3^-$  with depth in the lower soils of various plots after experiments

各区下部不同深度 Different depth in the lower soil of various plots	石油 Oil contents(mg/kg)	pH	含水量 Soil water contents(%)	易溶盐 (TDS) (mg/kg)	$\text{NH}_4^+$ (mg/kg)	$\text{NO}_3^-$ (mg/kg)
试验区 20 cm-25 cm 20 cm-25 cm in the experimental plot	20.84	8.1	15.73	507.0	45.0	244.5
试验区 30 cm-35 cm 30 cm-35 cm in the experimental plot	74.4	8.1	18.42	525.7	5.0	243.2
试验区 45 cm-50 cm 45 cm-50 cm in the experimental plot	45.8	8.1	17.56	410.5	4.0	243.2
对照区 20 cm-25 cm 20 cm-25cm in the reference plot	90.15	8.5	13.06	97.0	1.5	24.2
对照区 30 cm-35 cm 30 cm-35 cm in the reference plot	58.31	8.4	13.51	96.5	1.5	22.2
对照区 45 cm-50 cm 45 cm-50 cm in the reference plot	76.45	8.4	14.67	123.0	1.5	18.4
空白区 20 cm-25 cm 20 cm-25 cm in the blank plot	99.42	8.7	10.8	68.1	3.0	24.1
空白区 30 cm-35 cm 30 cm-35 cm in the blank plot	36.55	8.7	10.58	80.2	1.5	32.7
空白区 45 cm-50 cm 45 cm-50 cm in the blank plot	36.95	8.5	14.09	171.5	1.5	31.6

下扩散或是也被降解,从 pH、含水量、易溶盐、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{NO}_3^-$ 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有一小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

从整个试验过程和方法上可得出如下主要结论:通过对西北黄土石油开采区石油污染土壤的原位微生物生态修复方法的试验研究,利用强化原位微生物菌群辅以物理和化学方法与土壤环境相结合的微生物生态技术,进行了试验区土壤温度、水、氧气、营养元素、土壤环境因子改善等的调控,对土壤中原油的降解与修复试验研究结果显示,土壤中试验初期平均石油含量在 2754 mg/kg 时,经过 11 d~32 d 原位微生物生态修复技术的修复,土壤中石油含量降解可达 40.92%~80.37%,而对照区土壤中石油含量变化不大,在 10%以内;验证了土壤微生物生态修复技术在西北黄土区土壤石油污染修复的有效性、科学性、生态性,探索了推广应用的可行性;并得出在该地区利用微生物生态修复技术的最佳时期应在每年的 6 月下旬~9 月上旬,通过调控可使土壤温度保持在 25 以上;验证了本次试验调控添加的营养元素和土壤环境的改善是比较适度的。

该试验过程验证了强化原位微生物生态修复技术在野外原位土壤石油污染修复试验效果是显著的,方法也是可行的,并具有处理方法简单、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,尚无负面作用,对修复石油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,具有一定的推广应用作用。原位微生物生态修复技术是一种具有发展潜力大、效率高、投资少的环境修复技术。利用微生物生态的观点探索我国污染土壤修复提供经济有效的技术方法,对人类的可持续发展具有一定的实际意义。

### 参 考 文 献

- [1] Jorgensen KS, Puustinen J, Suortti AM. Bioremediation of petroleum hydrocarbon contaminated soil by composting in biopiles. *Environmental Pollution*, 2000, **107**(2): 245-254.
- [2] Debontj AM. Solvent-tolerant bacteria in biocatalysis. *Trends Biotechnol*, 1998, **16**: 493-499.
- [3] Sanjee Mishra, Jeevan Jyot. In situ bioremediation potential of an oily sludge-degrading bacterial consortium. *Current Microbiology*, 2001, **43**: 328-335.
- [4] JoseL R Gallego, Jorge Loredo, Juan FL Iamas. Bioremediation of diesel-contaminated soil: evaluation of potential in situ techniques by study of bacterial degradation. *Biodegradation*, 2001, **12**: 325-335.
- [5] 沈铁孟, 黄国强, 李 凌, 等. 石油污染土壤的原位修复技术. *环境科学动态*, 2002, **3**: 13-15.
- [6] 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, pp.1-353.
- [7] 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, **7**: 325-329.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 东秀珠, 蔡妙英编著. 常见细菌系统鉴定手册. 北京: 科学出版社, 2001, pp.1-419.