

石油污染土壤的生物修复研究

李春荣¹, 王文科¹, 曹玉清²

(1. 长安大学环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 吉林大学环境与资源学院, 吉林 长春 130012)

摘要:通过田间试验研究了玉米和向日葵两种植物对石油污染土壤的修复作用,考察了外源菌(DX-9)对植物修复的强化和协同效应,对“外源菌-植物”修复效果进行了初步评价。结果表明,在 10 000 mg·kg⁻¹ 污染浓度下,150 d 玉米、向日葵试验区土壤中石油降解率分别为 42.5 %和 46.4 %,较对照区提高了 100.5 %和 118.9 %。外源菌的施加可使生物修复速度显著加快,150 d“DX-9-玉米”和“DX-9-向日葵”试验区石油烃降解率分别达到 72.8 %和 76.4 %,较同期单独植物修复的降解率提高了 71.3 %和 64.7 %。500 d 各试验区土壤中石油烃降解率分别为 95.5 %、96.1 %、97.6 %和 98.9 %,土壤中石油烃含量均低于国家标准规定限量(<500 mg·kg⁻¹);土壤主要理化性质、生物群落分布、呼吸强度及植物不同部位中石油烃的残留量与对照无显著差异。结果表明:玉米、向日葵与节细菌对石油污染土壤的联合生物修复效果显著;经过两年修复,污染土壤恢复健康状态。

关键词:石油污染土壤;玉米;向日葵;生物修复

中图分类号:X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)02-0234-05

Bioremediation of Petroleum-contaminated Soil

LI Chun-rong¹, WANG Wen-ke¹, CAO Yu-qing²

(1. College of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. College of Environment and Resources, Jilin University, Changchun 130012, China)

Abstract: The bioremediation of corn, sunflower, *Arthrobacter*(DX-9)-corn, (DX-9)-sunflower to the petroleum-contaminated soil were studied by field trial, which was obtained by selective enrichment culture from the sludge in sewage of a oil refinery, the tests in shaking flasks showed that it could degrade petroleum hydrocarbon well and the removal rates could reach 90.8% with initial concentration of 10 000 mg·kg⁻¹ at 20 d. The effect of bioremediation of DX-9-corn and DX-9-sunflower was evaluated after the field experiment had been finished. The results showed that, when the initial concentration of petroleum in soil were 10 000 mg·kg⁻¹, removal rate of petroleum in the soil of experimented field of corn and that of sunflower could reach 42.5% and 46.4%, increasing by 100.5%, 118.9% compared with controlled fields by 150 days operation. Adding DX-9 could increased the biodegradation rate of phytoremediation obviously, the degradation rates of corn-DX-9, sunflower-DX-9 section were higher than those of corn and sunflower with removal being 72.8% and 76.4%, increasing by 71.3%, 64.7% at 150 d. After 500 days of bioremediation, the degradation rates of petroleum hydrocarbon in corn, sunflower, corn-DX-9 and sunflower-DX-9 section were up to 95.5%, 96.1%, 97.6% and 98.9% respectively. Petrolic content in the soil of experimented fields was lower than the government-required standard (<500 mg·kg⁻¹). The properties, biome distribution and respiration intensity of the soils in experimented fields, the residue of petroleum in various parts of plants were not significant different compared with controlled fields. It indicated that DX-9 combined with plant could increase evidently the effect of bioremediation, contaminated soil could restore its health after two years of bioremediation.

Keywords: petroleum-contaminated soil; corn; sunflower; bioremediation

随着经济的快速发展,人们对石油的生产与消耗量不断增加。在石油勘探、开采、运输与加工等过程中由于操作不慎或偶然事故使相当量石油进入环境,导致土壤污染负荷日益加重^[1-2]。据报道^[3-4],中国内蒙

古的阿尔善油田平均每口油井年进入环境的落地石油为 0.6~2 t,对草原植被的影响范围为 100×150 m²;在辽河油田重度污染区内,土壤中的含油量已达到 10 000 mg·kg⁻¹,远远超过临界值 500 mg·kg⁻¹^[5]。石油污染土壤使土质恶化,造成生物机能障碍,导致作物发芽出苗率降低,结实率下降,抗倒伏、抗病虫害的能力降低,严重者会导致遭受污染土壤在几年甚至几十年寸草不生^[6-8]。另外,当土壤孔隙较大时,石油废水还

收稿日期:2008-04-03

基金项目:国家自然科学基金项目(G40472131)

作者简介:李春荣(1960—),男,博士研究生,副教授,主要从事水、土污染生物治理研究。E-mail:changanl@163.com

可以渗透到土壤深层,造成地下水污染。因此,石油污染土壤的修复与治理受到广泛关注^[9-10]。

有关石油污染土壤的植物-微生物联合修复国内报道较少。本文以抗逆性强、根系发达且适应北方地区环境气候条件的玉米和向日葵作为修复植物^[11-14],以陕北黄土中土著微生物为基础,外加自主筛选分离的高效石油降解菌(DX-9)作为强化菌剂,研究石油污染土壤的植物-微生物联合修复技术并对修复后土壤健康状况进行初步评价,为石油污染土壤的工程化治理提供支持。

1 材料与方法

1.1 材料、试剂与仪器

1.1.1 供试种子和土壤

玉米品种为“陕单 902”,向日葵品种为美国油料向日葵 G101,均购于陕西洛川县种子公司。试验场地设在陕北黄土高原洛川塬。土壤类型为粉质粘土,肥力适中,前茬作物为蔬菜,土壤 pH 值为 7.2,总有机碳为 $18.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,总氮含量为 $1.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,总磷含量(以 P_2O_5 计)为 $1.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, Na_2O $16.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, K_2O $23.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,阳离子交换容量(CEC)为 $341.6 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$,苯并[a]芘未检出(注:土壤理化参数测定值均以土壤干重计算)。

1.1.2 试验用石油及供试菌

试验用石油(未经加工的原油)相对密度为 0.852~0.893,苯并[a]芘含量 $7.11 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,属石蜡基石油。试验菌剂,节细菌(*Arthrobacter* sp.),自某炼油厂污水池底泥中筛选分离出的高效石油降解菌(DX-9)^[15]。

1.1.3 培养基

细菌培养用牛肉膏蛋白胨培养基;真菌培养用马丁氏培养基;放线菌培养用高氏 1 号培养基;自生固氮菌培养基配方为:葡萄糖,10 g; KH_2PO_4 ,0.2 g; $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$,0.2 g; NaCl ,0.2 g; $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$,0.2 g; CaCO_3 ,5 g;蒸馏水,1 000 mL;pH,7.0~7.2。氨化细菌培养基配方为:蛋白胨,10 g; MgSO_4 ,0.5 g; K_2HPO_4 ,1 g; NaCl ,0.5 g; FeSO_4 ,0.001 g;微量元素液,1.0 mL;蒸馏水,1 000 mL。微量元素液可由 0.5 g 硼酸、0.5 g 钼酸钠溶于 100 mL 蒸馏水中所得。硝化细菌培养基配方为: NaNO_3 ,1 g; K_2HPO_4 ,0.75 g; KH_2PO_4 ,0.25 g; Na_2CO_3 ,1 g; CaCO_3 ,1 g; $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$,0.03 g; $\text{MnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$,0.01 g;pH,7.2;蒸馏水,1 000 mL;121 °C 灭菌 30 min。

1.1.4 主要仪器与试剂

GCMS-QP2010 气相色谱质谱联用仪,Oil-460 型红外分光测油仪,752 型紫外分光光度计,AL204-IC

电子天平(瑞士梅特勒-托利多公司),TOC-VCPH 总有机碳测定仪。正十六烷、异辛烷和苯及苯并[a]芘标准品购自 Aldrich Chemical Co.。

1.2 试验方法

1.2.1 试验田设计及土壤处理方法

试验田分为玉米试验区(Y00、Y01、YJ01),向日葵试验区(X00、X01、XJ01)和无植被空白对照区(K01)。每块试验田面积 $4 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ 。“00”区为未污染对照区,“01”试验区是根据土壤干容重,于 15 cm 深的耕作土层拌入质量分数为 1%的原油。具体方法为:利用环刀法测定供试土壤的湿容重,通过含水率测定结果计算出供试土壤的平均密度,进而计算出各试验区所需加入的原油质量。将计算量的原油均匀地喷洒在地面,用锄头从不同方向反复锄动并用铁耙反复耙耱,当日喷灌浇水一次,次日早、晚各锄、耙一次,第 3 d 再次锄、耙、耱,然后下种。“J01”试验区除拌入质量分数为 1%的原油外,分别于玉米的穗期和花粒期,向日葵的花期和现蕾期各施高效降解菌一次,施菌剂量为 $1 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2}$,菌悬液含菌量为 $10^{12} \sim 10^{14} \text{ cfu} \cdot \text{mL}^{-1}$ 。各试验区均设一组平行试验区。播种前,生育季节和施菌后适时灌溉,采用常规田间管理。次年同期进行 2 次修复试验。

1.2.2 测定指标

于播种当日、35、80、120、150、360、450、500 d 取土样测定石油烃含量,计算降解率;500 d 测定各试验区土壤理化性质、土壤呼吸强度。统计试验区细菌、真菌、放线菌、自生固氮菌、氨化细菌和硝化细菌的菌群分布;测定植物成熟期不同部位石油烃残留量及子实中苯并[a]芘含量。

1.2.3 微生物计数

选用选择性培养基,牛肉-蛋白冻培养基、马丁氏培养基和高氏合成一号培养基、自生固氮菌培养基、氨化细菌培养基和硝化细菌培养基,采用平板计数法分别统计 500 d 土壤样品中细菌、真菌、放线菌、自生固氮菌、氨化细菌和硝化细菌的数量^[16]。

1.2.4 石油烃含量测定

土样中石油烃含量的测定采用重量法^[17]。子实中苯并[a]芘含量采用气相色谱质谱联用仪测定^[18-19]。植物样品中石油烃含量的测定采用非分散红外光谱法^[20]。

2 结果与分析

2.1 植物-微生物对石油烃的降解性能

分别在播种后 35、80、120、150、360、450 和 500 d 取土样测定石油烃含量,结果见图 1 和图 2。

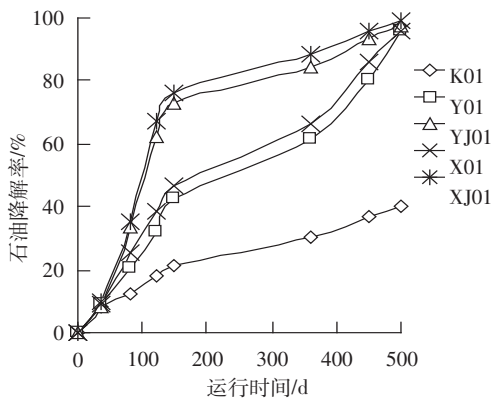


图 1 土壤中石油降解曲线

Figure 1 Degradation curve of petroleum in the soil

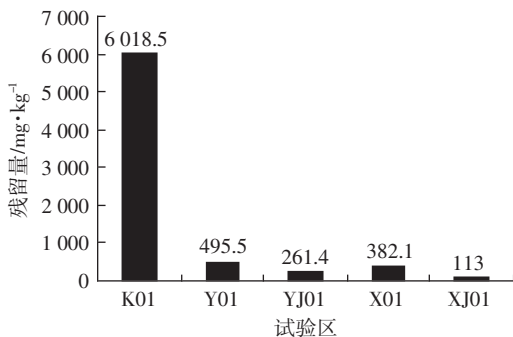


图 2 500 d 土壤中石油残留量

Figure 2 Residue of petroleum after 500 d in the soil

可见,玉米和向日葵对石油污染土壤具有明显的修复功能,在第 150 d 其降解率分别达到 42.5 %和 46.4 %;DX-9 的施加显著加速了生物修复的速度,在第 150 d,YJ01 和 XJ01 试验区的石油降解率达到 72.8 %和 76.4 %,比未施菌试验区(Y01、X01)提高了 71.3 %和 64.6 %。150~360 d 各试验区石油烃降解速度减慢。这是因为该时期试验区地面无植被,表层土壤温度低,甚至处于冰冻状态,导致微生物代谢减慢或不能生长繁殖,因而,石油烃的生物利用率明显降低。360 d 之后,Y01、X01 区降解速度又明显加快,其原因是土壤温度的提高和植物根际效应极大地促进了微生物对石油污染物的降解速度。500 d 各试验区的降解率分别达到 95.5 %、97.6 %、96.1 %、98.9 %,土壤中石油烃的残留量分别为 495.5、261.4、382.1、113.0 mg·kg⁻¹,均低于国家标准限量^[21]。

由图 1 可见,土壤中石油含量随运行时间的延续而降低,其速率规律可以表示为:

$$C=C_0e^{-k}$$
 (1)

式中: C_0 为土壤中石油的初始浓度; C 为土壤中石油的瞬时浓度; k 为降解常数。

对各试验区不同时期土壤中石油质量浓度进行回归分析得到石油烃降解的动力学方程。由(1)式可推导出土壤中石油烃降解的半衰期($t_{1/2}$)为:

$$t_{1/2}=0.693/k$$
 (2)

拟合及数值计算结果见表 1。

表 1 石油降解的动力学特征				
Table 1 Dynamic characters of oil degradation				
试验区	降解动力学方程	相关系数	降解常数/d ⁻¹	半衰期/d
Y01	$y=13\ 017e^{-0.004\ 9x}$	$R^2=0.834\ 0$	4.9×10^{-3}	141
YJ01	$y=10\ 950e^{-0.006\ 6x}$	$R^2=0.944\ 9$	6.6×10^{-3}	105
X01	$y=11\ 455e^{-0.005\ 4x}$	$R^2=0.875\ 3$	5.4×10^{-3}	128
XJ01	$y=10\ 887e^{-0.007\ 9x}$	$R^2=0.943\ 2$	7.9×10^{-3}	88

降解常数(k)和半衰期($t_{1/2}$)是衡量降解速度的两个特征参数, k 值越大, $t_{1/2}$ 越小,则降解速度越快。由表 1 可见,XJ01 区降解速度最快,其半衰期仅为 88 d,其次是 YJ01,半衰期为 105 d;未施加外源菌的 X01、Y01 区降解速度较慢,半衰期分别为 128 和 141 d。

2.2 植物中石油残余量测定结果

利用非分散红外分光光度法测定了 2005 年和 2006 年各试验区植物样品中石油烃及子实中苯并[a]芘的含量,结果见表 2、表 3。

如果以试验区石油残留量测定值与对照区测定值之差表示石油残留绝对值,由表 2、表 3 可以看出,试验第一年土壤中石油烃在植物根部残留量最大,其

表 2 玉米不同部位石油烃残留量(mg·kg ⁻¹)							
Table 2 The residues of petroleum in different parts of corn(mg·kg ⁻¹)							
时间	试验区	根	茎	叶	穗芯	籽仁	籽仁中BaP/ μg·kg ⁻¹
2005 年	Y00	24.63a	25.59a	27.15a	23.16a	25.84a	ND
	YJ01	29.40b	25.79a	27.35a	23.64a	29.66b	5.78
2006 年	Y00	24.72a	26.21a	28.24a	22.46a	24.95a	ND
	YJ01	26.72b	26.23a	28.76a	22.49a	24.98a	1.52

注:表中数据为平均值;同一列数据中有相同字母表示在 $\alpha=0.05$ 水平上无显著差异。下同。

表 3 向日葵不同部位石油烃残留量(mg·kg ⁻¹)								
Table 3 The residues of petroleum in different parts of sunflower(mg·kg ⁻¹)								
时间	试验区	根	茎	叶	葵盘	籽仁壳	籽仁	籽仁中 BaP/ μg·kg ⁻¹
2005 年	X00	3.46a	4.97a	8.63a	4.80a	4.82a	13.97a	ND
	XJ01	9.82b	5.03a	8.73a	4.91a	4.86b	18.34b	3.66
2006 年	X00	3.61a	5.21a	8.35a	4.98a	4.62a	14.56a	ND
	XJ01	3.78a	5.08a	8.59a	4.80a	4.76a	15.08	ND

次是籽仁;植物的茎、叶、玉米的穗芯、向日葵的葵盘中石油烃含量与对照无显著差异。试验第一年,玉米、向日葵根部石油烃残留量较对照分别增加了 19.4 %、183.8 %;籽仁中石油烃残留量较对照增加了 14.8 %、31.3 %;玉米籽仁中 BaP 含量达到 $5.78 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 超过国家食品规定的限量($<5 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$), 向日葵籽仁中 BaP 含量未超过国家食品规定的限量^[22]。试验第二年,两种植物各部位石油烃含量均与对照无显著差异;玉米籽仁中 BaP 含量降至 $1.52 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。污染土壤经过 2 a 植物-微生物联合修复,基本消除了石油烃对植物的生态毒性影响。

2.3 修复后土壤理化性质

修复 2 a 后,对试验区土壤基本理化性质进行测定,结果见表 4。

表 4 500 d 供试土壤基本理化性质

Table 4 The basic preperities of the soil used 500 days

试验区	气味	pH	CEC/ $\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$	总氮/%	总磷/%	总钾 $\text{K}_2\text{O}/\%$
Y00	无异常	7.1a	326.7a	0.15a	0.12a	2.12a
YJ01	无异常	6.8a	333.2a	0.14b	0.11b	2.13a
X00	无异常	7.0a	312.7a	0.15a	0.13a	2.09a
XJ01	无异常	6.7a	318.4a	0.15a	0.12b	2.11a

土壤理化性质不仅对植物吸收污染物有很大影响,而且是土壤健康标志的集中体现。由表 4 可见,运行 500 d 后各试验区阳离子交换容量与对照无显著差异,且都大于 $300 \text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$,说明污染土壤经过修复后仍然保持良好的保肥供肥能力;试验结束后土壤无任何异常气味;土壤 pH 值较对照有所降低但无显著差异;YJ01 区土壤总氮,YJ01、XJ01 区土壤总磷因微生物对石油烃污染物代谢消耗而较对照有所降低。

2.4 土壤微生物群落分布

500 d 采用平板菌落计数法分别对各试验区土壤中的细菌、真菌、放线菌、固氮菌、氨化细菌、硝化细菌进行计数,结果见表 5。

土壤微生物群落对于土壤功能发挥具有十分重要的意义,是土壤健康质量的重要指标之一。自生固

表 5 试验区微生物计数结果($\text{cfu}\cdot\text{g}^{-1}$)

Table 5 The number of microorganisms in experimental field ($\text{cfu}\cdot\text{g}^{-1}$)

试验区	细菌	真菌	放线菌	自生固氮菌	氨化细菌	硝化细菌
Y00	$2.8\times 10^7\text{a}$	$6.2\times 10^5\text{a}$	$4.7\times 10^4\text{a}$	$2.6\times 10^6\text{a}$	$3.4\times 10^5\text{a}$	$1.6\times 10\text{a}$
YJ01	$2.9\times 10^7\text{a}$	$5.9\times 10^5\text{a}$	$4.9\times 10^4\text{a}$	$2.4\times 10^6\text{a}$	$3.5\times 10^5\text{a}$	$1.7\times 10\text{a}$
X00	$5.4\times 10^7\text{a}$	$6.7\times 10^5\text{a}$	$6.1\times 10^5\text{a}$	$3.6\times 10^6\text{a}$	$4.7\times 10^5\text{a}$	$2.9\times 10\text{a}$
XJ01	$5.7\times 10^7\text{a}$	$6.4\times 10^5\text{a}$	$6.3\times 10^5\text{a}$	$3.8\times 10^6\text{a}$	$4.9\times 10^5\text{a}$	$3.1\times 10\text{a}$

氮菌、氨化细菌、硝化细菌等有益菌在土壤的许多生命活动及营养循环中发挥着重要的作用。由表 5 可见,修复后各区的微生物群落分布与相应对照区均无显著差异,表明修复对土壤固氮作用、氨化功能等均无遗留性影响。

2.5 土壤呼吸强度

试验运行 500 d 后,各试验区土壤呼吸作用测定结果见表 6。

表 6 500 d 供试土壤呼吸强度

Table 6 Respiration intensity of soils used 500 days

试验区	Y00	Y01	YJ01	X00	X01	XJ01
消耗 NaOH/mL	1.02	1.04	1.03	1.00	1.02	0.99
CO_2 释放量/ $\text{mg}\cdot 20\text{g}^{-1}$ dry soil	2.24	2.29	2.27	2.20	2.24	12.18

土壤的呼吸作用,是指土壤释放 CO_2 和吸收氧的强度,它是衡量土壤微生物总的活性指标,或作为评价土壤肥力的指标之一。对表 6 中两组数据进行显著性分析发现,试验区 CO_2 释放量与对照无显著差异,表明土著微生物总的活性、土壤肥力正常。

3 结论

以玉米和向日葵为供试植物,节细菌(DX-9)为外源菌,对初始石油浓度为 $10\ 000 \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的污染土壤进行为期 2 a 的田间修复试验研究,所得主要结论如下:

(1)玉米和向日葵对石油污染土壤具有较明显的修复作用。150 d 降解率分别达到 42.5 %和 46.4 %;500 d 降解率分别达到 95.5 %和 96.1 %。

(2)高效石油降解菌 DX-9 能加快土壤中石油烃的降解速度,对修复作用具有显著的强化和协同作用。500 d 施菌试验区土壤中石油烃降解率分别为 97.6 %和 98.9 %,土壤中石油烃含量均低于国家标准规定限量($<500 \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。

(3)污染土壤经过 2 a 植物-微生物联合修复,基本消除了石油烃对植物的生态毒性影响,污染土壤恢复健康状态。

参考文献:

- [1] 刘五星,骆永明,滕 应,等.我国部分油田土壤及油泥的石油污染初步研究[J].土壤,2007,39(2):247-251.
LIU Wu-xing, LUO Yong-ming, TENG Ying, et al. A survey of petroleum contamination in several chinese oil field soils[J]. Soils, 2007, 39(2): 247-251.
- [2] 骆永明,滕 应.我国土壤污染退化状况及防治对策[J].土壤,2006,

- 38(5):505-508.
- LUO Yong-ming, TENG Ying. Status of soil pollution degradation and countermeasures in China[J]. *Soils*, 2006, 38(5):505-508.
- [3] 李凯锋, 温青, 夏淑梅. 石油污染土壤的生物处理技术[J]. 应用科技, 2002, 29(10):62-64.
- LI Kai-feng, WEN Qing, XIA Shu-mei. Biological treatment of oil-polluted soil[J]. *Applied Science and Technology*, 2002, 29(10):62-64.
- [4] 任磊, 黄廷林. 石油污染土壤的生物修复技术[J]. 安全与环境学报, 2001, 1(2):50-54.
- REN Lei, HUANG Ting-lin. The biological restoration of oil-polluted soil[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2001, 1(2):50-54.
- [5] 何良菊, 魏德洲, 张维庆. 土壤微生物处理石油污染的研究[J]. 环境科学进展, 1999, 7(3):110-115.
- HE Liang-ju, WEI De-zhou, ZHANG Wei-qin. Research of microbial treatment of petroleum contaminated soil[J]. *Advances in Environmental Science*, 1999, 7(3):110-115.
- [6] Ogboghodo I A, Iruaga E K, Osemwota I O, et al. An assessment of the effects of crude oil pollution on soil properties, germination and growth of maize (*Zea mays*) using two crude types-forcados light and escravos light[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2004(96):143-152.
- [7] 李春荣, 王文科, 曹玉清, 等. 石油污染土壤的生态效应[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(5):1929-1932.
- LI Chun-rong, WANG Wen-ke, CAO Yu-qing, et al. Ecological effects of petroleum-contaminated soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(5):1929-1932.
- [8] Odjegba V J, Sadiq A O. Effects of spent engine oil on the growth parameters, chlorophyll and protein levels of *Amaranthus hybridus* L.[J]. *The Environmentalist*, 2002(22):23-28.
- [9] 李培军, 刘宛, 孙铁珩. 我国污染土壤修复研究现状与展望[J]. 生态学杂志, 2006, 25(12):1544-1548.
- LI Pei-jun, LIU Wan, SUN Tie-heng, et al. Remediation of contaminated soil: its present research situation and prospect[J]. *Chinese Journal Ecology*, 2006, 25(12):1544-1548.
- [10] Gao Y Z, Zhu L Z. Phytoremediation and its models for organic contaminated soils[J]. *Journal of Environmental Science*, 2003(15):302-310.
- [11] 崔良基, 梁国战, 王德兴. 夏播条件下向日葵光合性能与杂交产量的关系[J]. 中国油料作物学报, 2002, 24(1):48-50.
- CUI Liang-ji, LIANG Guo-zhan, WANG De-xing. Relationship between photosynthesis characteristic and yield of sunflower hybrid under summer seeding[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2002, 24(1):48-50.
- [12] 李春荣, 王文科, 曹玉清, 等. 石油污染土壤对向日葵生长的影响[J]. 地球科学与环境学报, 2006, 28(4):97-99.
- LI Chun-rong, WANG Wen-ke, CAO Yu-qing, et al. Influences of petroleum-contaminated soil on growth of sunflower[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2006, 28(4):97-99.
- [13] 郑爱军, 宋海涛, 李杰. 向日葵空秕粒增多的原因及防治措施[J]. 天津农林科技, 2002(4):7-8.
- ZHENG Ai-jun, SONG Hai-tao, LI Jie. Reason and prevention measurement for increment of blighted grain of sunflower [J]. *Science and Technology of Tianjing Agriculture and Forestry*, 2002(4):7-8.
- [14] 李春荣, 王文科, 曹玉清, 等. 石油污染土壤的生态效应与修复技术研究[J]. 环境科学与技术, 2007, 30(9):4-6.
- LI Chun-rong, WANG Wen-ke, CAO Yu-qing, et al. Ecological effect and bioremediation of petroleum-contaminated soil[J]. *Environmental Science and Technology*, 2007, 30(9):4-6.
- [15] 李春荣, 王文科, 曹玉清, 等. 石油污染物的微生物降解研究[J]. 地球科学与环境学报, 2007, 29(2):214-216.
- LI Chun-rong, WANG Wen-ke, CAO Yu-qing, et al. Petroleum pollutants degraded by microorganisms[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2007, 29(2):214-216.
- [16] 沈萍, 范秀容, 李广武. 微生物实验[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- SHEN Ping, FAN Xiu-rong, LI Guang-wu. Microbiology experiments[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002.
- [17] 丁克强, 郑昭佩, 孙铁珩, 等. 石油污染土壤的生物降解研究[J]. 生态学杂志, 2001, 20(4):16-18.
- DING Ke-qiang, ZHENG Zhao-pei, SUN Tie-heng, et al. Biodegradation of petroleum polluted soil[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2001, 20(4):16-18.
- [18] 国家环境保护局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 第四版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002:495.
- State Environmental Protection Administration of China, Standard Method for the Examination of Water and Wastewater Editorial Board. Standard method for the examination of water and wastewater [M] (4th). Beijing: Environmental Science Press of China, 2002: 495.
- [19] 张铃金, 苏建茹, 周立军, 等. 固体模拟样品中多环芳烃有机污染物提取方法研究[J]. 岩矿分析, 2003, 22(2):113-120.
- ZHANG Ling-jin, SU Jian-ru, ZHOU Li-jun, et al. Study on extraction techniques of polynuclear aromatic hydrocarbons in spiked solid samples[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2003, 22(2):113-120.
- [20] 魏复盛, 寇洪茹, 洪水皆, 等. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- WEI Fu-sheng, KOU Hong-ru, HONG Shui-jie, et al. Method for the examination of water and wastewater[M]. Beijing: Environmental Science Press of China, 2002.
- [21] 丁克强, 伊睿, 刘世亮, 等. 石油污染土壤堆制微生物降解研究[J]. 应用生态学报, 2002, 13(9):1137-1140.
- DING Ke-qiang, YIN Rui, LIU Shi-liang, et al. Bioremediation of petroleum-contaminated soil by composting technology[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(9):1137-1140.
- [22] 广西壮族自治区卫生防疫站, 中国预防医学科学院营养与食品卫生研究所. GB 7104-1994. 食品中苯并(a)芘限量卫生标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1994.
- Health and Epidemic Prevention Station, Guangxi Zhuang Autonomous Region, Research Institute for Nutrition and Food of Health, China Preventive Medicine Academy of Science. GB 7104-1994. Health standards of B[a]P limiting quantity in food[S]. Beijing: Chinese Standard Press, 1994.