

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第34卷 第11期 Vol.34 No.11 **2014**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 34 卷 第 11 期 2014 年 6 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

土壤大孔隙流研究现状与发展趋势..... 高朝侠,徐学选,赵娇娜,等 (2801)

能源基地生态修复

我国大型煤炭基地建设的生态恢复技术研究综述..... 吴 钢,魏 东,周政达,等 (2812)

国家大型煤电基地生态环境监测技术体系研究——以内蒙古锡林郭勒盟煤电基地为例.....

..... 魏 东,全 元,王辰星,等 (2821)

基于 DPSIR 模型的国家大型煤电基地生态效应评估指标体系 周政达,王辰星,付 晓,等 (2830)

西部干旱区煤炭开采环境影响研究..... 雷少刚,卞正富 (2837)

露天煤矿区生态风险受体分析——以内蒙古平庄西露天煤矿为例..... 高 雅,陆兆华,魏振宽,等 (2844)

草原区矿产开发对景观格局和初级生产力的影响——以黑岱沟露天煤矿为例.....

..... 康萨如拉,牛建明,张 庆,等 (2855)

三七对土壤中镉、铬、铜、铅的累积特征及健康风险评价 林龙勇,阎秀兰,廖晓勇,等 (2868)

某焦化场地土壤中多环芳烃分布的三维空间插值研究..... 刘 庚,毕如田,权 腾,等 (2876)

个体与基础生态

杉木人工混交林对土壤铝毒害的缓解作用 雷 波,刘 彬,罗承德,等 (2884)

基于 $\delta^{15}\text{N}$ 稳定同位素分析的人工防护林大型土壤动物营养级研究 张淑花,张雪萍 (2892)

铅镉抗性菌株 JB11 强化植物对污染土壤中铅镉的吸收 金忠民,沙 伟,刘丽杰,等 (2900)

陕北地区石油污染土壤中不动杆菌属的筛选、鉴定及降解性能 王 虎,吴玲玲,周立辉,等 (2907)

祁连山高山植物根际土放线菌生物多样性..... 马爱爱,徐世健,敏玉霞,等 (2916)

新疆沙冬青 AM 和 DSE 真菌的空间分布 姜 桥,贺学礼,陈伟燕,等 (2929)

聚糠茶水剂对不同积温带玉米花后叶片氮同化的影响..... 高 娇,董志强,徐田军,等 (2938)

内蒙古河套灌区玉米与向日葵霜冻的关键温度..... 王海梅,侯 琼,云文丽,等 (2948)

四种类型栓皮栎栲胶含量..... 尹艺凝,张文辉,何景峰,等 (2954)

食物胁迫对翅二型丽斗蟋飞行肌和繁殖发育的影响..... 吴红军,赵吕权,曾 杨,等 (2963)

颜色对梨小食心虫产卵选择性的影响..... 杨小凡,马春森,范 凡,等 (2971)

缓释单萜类挥发物对落叶松毛虫行为及落叶松主要防御蛋白的影响..... 林 健,刘文波,孟昭军,等 (2978)

种群、群落和生态系统

黄土丘陵沟壑区不同植被恢复格局下土壤微生物群落结构 胡婵娟,郭 雷,刘国华 (2986)

刺参池塘底质微生物群落功能多样性的季节变化..... 闫法军,田相利,董双林,等 (2996)

基于 DGGE 技术的茯砖茶发花过程细菌群变化分析 刘石泉,胡治远,赵运林 (3007)

景观、区域和全球生态

中国区域间隐含碳排放转移..... 刘红光,范晓梅 (3016)

西南地区退耕还林工程主要林分 50 年碳汇潜力 姚 平,陈先刚,周永锋,等 (3025)

青海湖流域草地植被动态变化趋势下的物候时空特征..... 李广泳,李小雁,赵国琴,等 (3038)

黑龙江省温带森林火灾碳排放的计量估算..... 魏书精,罗碧珍,孙 龙,等 (3048)

三峡库区森林植被气候生产力模拟..... 潘 磊,肖文发,唐万鹏,等 (3064)

三峡水库支流拟多甲藻水华的形成机制..... 朱爱民,李嗣新,胡 俊,等 (3071)

流域库坝工程开发的生物多样性敏感度分区..... 李亦秋,鲁春霞,邓 欧,等 (3081)

城乡与社会生态

基于集对分析的京津冀区域可持续发展协调能力评价..... 檀菲菲,张 萌,李浩然,等 (3090)

江西省自然保护区发展布局空缺分析 黄志强,陆 林,戴年华,等 (3099)

鄱阳湖生态经济区生态经济指数评价 黄和平,彭小琳 ,孔凡斌,等 (3107)

基于有害干扰的中国省域森林生态安全评价..... 刘心竹,米 锋,张 爽,等 (3115)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 328 * zh * P * ￥90.00 * 1510 * 35 * 2014-06



封面图说：三峡库区森林植被——三峡地区属亚热带区域,山高坡陡、地形复杂、物种丰富,森林是其最重要的自然资源之一,其面积占到库区总面积的 37%左右,库区内现有森林可初步分为 2 个植被型组,8 个植被型,18 个群系组,44 个群系,102 个群丛,主要树种有马尾松、杉树、柏树等,低海拔处多为落叶阔叶林、常绿阔叶林,较高海拔分布有针阔混交林、针叶混交林、灌木林等,人工林主要有经济林、竹林等。对三峡库区森林气候生产力进行模拟,分析库区森林植被的生产力并进行预测,可以为三峡库区的生态建设决策提供科学依据。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@ 163.com

DOI: 10.5846/stxb201302060248

王虎, 吴玲玲, 周立辉, 胡妍妍, 马小魁. 陕北地区石油污染土壤中不动杆菌属的筛选、鉴定及降解性能. 生态学报, 2014, 34(11): 2907-2915.

Wang H, Wu L L, Zhou L H, Hu Y Y, Ma X K. Identification and oil-degrading performance of *Acinetobacter* sp. isolated from North Shaanxi oil-contaminated soil. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(11): 2907-2915.

陕北地区石油污染土壤中不动杆菌属的 筛选、鉴定及降解性能

王 虎¹, 吴玲玲¹, 周立辉², 胡妍妍¹, 马小魁^{1,*}

(1. 西北濒危药材资源开发国家工程实验室, 陕西师范大学生命科学学院, 西安 710062;

2. 中国石油长庆油田油气工艺研究院, 西安 710018)

摘要:从陕北地区石油污染土壤中分离鉴定得到两株不动杆菌属(*Acinetobacter* sp.)的高效石油降解菌 A.sp 1 和 A.sp 2, 分别从盐浓度、pH 值、氮源、磷源和接种量等因素进行研究以确定其最佳石油降解条件, 并进一步通过 GC-MS (Gas Chromatography-Mass Spectrometer) 方法分析其在最佳条件下对原油组分的不同降解性能。结果显示: A.sp 1 在盐浓度为 1%、pH 值为 6—7、磷源为 KH_2PO_4 和 K_2HPO_4 、氮源为尿素和接种量为 4% 的条件下, 最高降解率可达到 60%。A.sp 2 在盐浓度为 1%、pH 值为 7—9、磷源为 KH_2PO_4 和 K_2HPO_4 、氮源为硝酸铵和接种量为 8% 的条件下, 最高降解率可达到 67%。GC-MS 分析结果表明, 菌株 A.sp 1 对石油烃类 C_{21} — C_{25} 有明显的降解效果, 菌株 A.sp 2 对石油烃类 C_{20} — C_{30} 的降解效果较好。

关键词:不动杆菌; 生物降解; 影响因素; GC-MS

Identification and oil-degrading performance of *Acinetobacter* sp. isolated from North Shaanxi oil-contaminated soil

WANG Hu¹, WU Lingling¹, ZHOU Lihui², HU Yanyan¹, MA Xiaokui^{1,*}

1 National Engineering Laboratory for Resource Development of Endangered Crude Drugs in Northwest of China, College of Life Sciences, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China

2 Oil Gas Technology Research Institute Changqing Oilfield Company, Xi'an 710018, China

Abstract: Currently, the accidental releases of petroleum products are of particular concern in the environment. Hydrocarbon contamination is one of the major problems facing industrialized nations today resulting from the activities related to the petrochemical industry. Hydrocarbon contamination may produce toxic effects such as ecotoxicity and carcinogenic risk on the soil and water, and on the human body such as the central nervous system, liver, kidneys, heart, and so forth. The process of bioremediation has been defined as the use of microorganisms to detoxify or remove pollutants owing to their diverse metabolic capabilities and is also an evolving method for the removal and degradation of many environmental pollutants including the products of petroleum industry. It is believed that many indigenous microorganisms in water and soil are capable of degrading hydrocarbon contaminants. Bioremediation functions basically on biodegradation, transforming complex organic contaminants to other simpler organic compounds by biological agents like microorganisms. Biodegradation of petroleum hydrocarbons is a complex process that depends on the nature and the amount of the hydrocarbons present, while biodegradation is relatively noninvasive and more economical than other remediation technologies such as chemical and physical methods. As bioremediation is cost-effective and would lead to complete

基金项目:中央高校科研业务费特别支持项目(GK201003002); 国家大学生创新实验项目(CX13077)

收稿日期:2013-02-06; **网络出版日期:**2014-03-07

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: biomarkuis@gmail.com

mineralization, it is the promising technology for the treatment of these contaminated sites. Bacteria are the most active agents in petroleum degradation, and they work as primary degraders of spilled oil in environment. Numerous scientific articles have covered various factors that influence the rate of oil biodegradation. Different factors influencing hydrocarbon degradation have been reported previously. In this study, two strains of *Acinetobacter*, A.sp 1 and A.sp 2, efficiently capable of degrading crude oil were isolated from North Shaanxi oil-contaminated soil. The influence of the salinity, pH, different N, P sources and inoculation amount on the degradation of crude oil was separately studied to obtain the optimum degradation conditions, and the performance of these two strains under the optimum conditions on crude oil degradation were further separately investigated by GC-MS (Gas Chromatography-Mass Spectrometer) method. The results showed that A.sp 1 was able to efficiently degrade crude oil under the salt concentration of 1%, pH 6—7, KH_2PO_4 and K_2HPO_4 as phosphorus source, urea as nitrogen source, an inoculum ratio of 4%, respectively, and in which a degrading rate of 60% can be reached under the combined optimum conditions. A.sp 2 was observed to efficiently degrade crude oil under the salt concentration of 1%, pH 7—9, KH_2PO_4 and K_2HPO_4 as phosphorus source, ammonium nitrate as nitrogen source, an inoculum ratio of 8%, respectively, and in which a degrading rate of 67% can be obtained under the combined optimum conditions. GC-MS analysis showed that A.sp 1 was performed efficiently for the hydrocarbon C_{21} — C_{25} components of the crude oil. A.sp 2 was shown to efficiently degrade the hydrocarbon C_{20} — C_{30} components of the crude oil. Microbial degradation is the major and ultimate natural mechanism by which one can cleanup the petroleum hydrocarbon pollutants from the environment. Our results may be helpful to establish an efficient biodegradation strategy for Hydrocarbon contamination.

Key Words: *Acinetobacter*; biodegradation; influence factors; GC-MS

随着我国石化工业的快速发展和石油产品在各行业中的广泛应用,土壤中的石油污染日趋严重^[1],人类面临的土壤石油污染的修复治理任务日益紧迫。与物理化学修复方法相比,采用生物修复技术处理石油污染土壤具有不造成二次污染,处理费用低,可彻底降解污染物等优点^[2-7]。迄今为止,已经发现能够降解原油的微生物多达 100 多个属,主要包括有不动杆菌属 (*Acinetobacter*)^[8]、假单胞菌属 (*Pseudomonas*)^[9-10]、红球菌属 (*Rhodococcus*)^[10]、芽孢杆菌属 (*Bacillus*)^[11-12]、链霉菌属 (*Streptomyces*)^[13]、产碱菌属 (*Alcaligenes* sp.)^[14] 等,其中对不动杆菌属菌株的降解性能研究备受关注,但是,其所处环境因素和外加营养物质对此类菌降解效果的影响及其机制研究很少,而此对现场生物修复技术的建立和实施有很大限制。

本研究从陕北地区石油污染土壤中筛选并鉴定得到两株不动杆菌属的高效石油降解菌,并对影响这些菌株降解石油的营养和环境条件进行了研究和优化,以期在实际石油污染土壤的生物修复提供研究基础。

1 材料与方法

1.1 原油及土样来源

实验所用原油:取自陕北产油区原油(陕西长庆油田分公司提供)。石油污染土壤采自陕北地区油田田井废弃钻井液储蓄池附近,用无菌采集袋收集于 4℃ 冰箱中保存待用。

1.2 培养基组成

牛肉膏蛋白胨固体和液体培养基组成参照一般培养基手册。

石油富集液体培养基:石油 4 g/L, K_2HPO_4 2 g/L, KH_2PO_4 0.2 g/L, NaCl 0.04, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 5 g/L, NaNO_3 5 g/L, MgSO_4 0.4 g/L, CaCl_2 0.2 g/L, 微量元素浓缩液 5 mL, 1 L 水, pH 值 7。其中微量元素浓缩液: FeSO_4 4 g/L, MnSO_4 4 g/L, ZnSO_4 4 g/L, CuSO_4 4 g/L, H_3BO_3 4 g/L。石油富集固体培养基:在石油富集液体培养基中外加 2% 的琼脂。

石油降解液体培养基: K_2HPO_4 0.5 g/L, KH_2PO_4 0.5 g/L, MgSO_4 0.4 g/L, NH_4NO_3 1 g/L, NaCl 1 g/L, CaCl_2 0.02 g/L, 微量元素浓缩液 5 mL, 石油 4, 1 L 水, pH 值 7。其中微量元素浓缩液组成同上。

1.3 石油降解菌的分离与鉴定

1.3.1 石油降解菌的分离

称取石油污染土壤 1 g 加入到已灭菌的石油富集液体培养基中,在 160 r/min、28 ℃ 条件下培养 7 d。按 5% 的接种量转接到新的石油富集液体培养基中,在同样条件下连续转接培养 4 次后,取 1 mL 富集液按不同的稀释度依次稀释至 10^{-5} 、 10^{-6} 、 10^{-7} ,各取 100 μ L 涂布于石油富集固体培养基上。在恒温培养箱中培养后,观察菌落形态、大小、颜色,挑取其中的单菌落镜检确认其细胞形态是否单一,并划线于牛肉膏蛋白胨固体培养基上进一步进行纯化培养,直到获得单一细胞形态。

1.3.2 石油降解菌的鉴定

(1) 菌落形态鉴定

通过全自动菌落分析仪对菌落形态进行观察。

(2) 菌株分子鉴定

用细菌基因组 DNA 抽提试剂盒(上海生工生物工程股份有限公司)提取石油降解菌的总 DNA。分离菌株的分子鉴定扩增反应体系采用 16S rDNA 通用引物,16S rDNA 的专一性正向引物 7 f(5'-CAGAGTTTGATCCTGGCT-3')和反向引物 1540 r(5'-AGGAGGTGATCCAGCCGCA-3')进行 PCR 扩增,PCR 反应体系为 50 μ L,其中模板 DNA 5 μ L,PCR Mix 25 μ L,引物 7 f 1 μ L,引物 1540 r 1 μ L,去离子水(ddH₂O) 18 μ L。反应程序如下:94 ℃ 预变性 3 min,94 ℃ 变性 30 s,56 ℃ 退火 30 s,72 ℃ 延伸 1 min 30 s,72 ℃ 补充延伸 10 min,共进行 35 个循环,4 ℃ 保存,1% 琼脂糖凝胶电泳检测。送上海生工生物工程股份有限公司测序,测序结果通过 NCBI 数据库比对分析,从中选取同源性较高的序列,利用 MEGA 4.0 软件,采用邻接法构建系统进化树。

1.4 原油降解实验

1.4.1 种子液制备

用接种环从牛肉膏蛋白胨固体培养基上,挑取单菌落接种于新鲜牛肉膏蛋白胨液体培养基中,在 160 r/min、28 ℃ 条件下扩大培养 24 h,做为种子培养液。

1.4.2 原油降解率测定

采用重量法测定原油降解率^[15]。

1.4.3 原油降解过程中微生物生长量测定

通过可见光-紫外分光光度计(THERMOE)在波

长 600 nm 处测定微定生物生长量。

1.4.4 影响石油降解菌降解效果的因素研究

微生物对石油的降解效果受到多种因素的影响,如温度、盐浓度、pH 值、不同形态的 N 源与 P 源、接种量等^[16],主要探讨盐浓度、pH 值、不同形态的 N 源与 P 源、接种量等因素对两株石油降解菌处理石油的影响,以期探讨两株菌的最佳降解条件。

将种子液接种到 50 mL 原油降解液体培养基中,分别考察不同氮源、盐浓度、pH 值、磷源、接种量等因素对其降解效果的影响。氮源影响试验组设硝酸铵、硝酸钠、硫酸铵、尿素、蛋白胨等 5 个试验组,盐浓度影响试验组设 NaCl 浓度 1%、2%、3%、4%、5% 等 5 个梯度试验组,pH 值影响试验组设 5.0、6.0、7.0、8.0、9.0 等 5 个梯度试验组,磷源影响试验组设 K₂HPO₄、KH₂PO₄、NaH₂PO₄、K₂HPO₄+KH₂PO₄(质量比为 1:1)等 4 个试验组,接种量影响试验组设 2%、4%、6%、8%、10% 等 5 个梯度试验组。在 160 r/min、28 ℃ 条件下培养 7 d。取样并测定石油降解率,以不接菌的培养基作为空白对照,每个因素做 3 个平行试验。

1.4.5 降解前后原油的石油烃类变化分析

采用气质联用仪(日本岛津 Thermo DSQ II)对石油降解前后的组分变化进行分析。

GC-MS 条件:采用 Thermo DSQ II 气相色谱-质谱联用仪,HP-5 MS 石英毛细管柱(30 m×0.32 mm×0.25 μ m)。进样口温度 220 ℃,传输线温度 260 ℃,离子源 260 ℃;气体为高纯氦气;进样量 1 μ L,不分流进样;扫描质量范围:50—550 m/z;柱温在 70 ℃ 保留 4 min,再以 10 ℃/min 的速率升到 150 ℃,保留 2 min,最后以 6 ℃/min 的速度升至 260 ℃,保持 15 min。

2 结果与分析

2.1 石油降解菌的菌株鉴定

2.1.1 两株菌的菌落形态观察

通过全自动菌落分析仪对两株菌在牛肉膏蛋白胨固体培养基上的形态进行观察 A.sp 1 菌落形态大且呈圆形,白色,表面突起,湿润有光泽,边缘整齐,显微观察呈杆状。A.sp 2 较 A.sp 1 菌落形态小,显微观察呈短杆状。革兰氏染色均为阴性、无芽孢。通过对两株菌的部分生理生化研究,结果显示,两株菌

除糖发酵和柠檬酸盐试验是阳性反应外,淀粉水解试验、明胶液化试验、吡啶试验、甲基红和 V.P 试验均显示为阴性反应。

2.1.2 分子鉴定

提取菌株的总 DNA,经 16S rDNA 特异引物进行 PCR 扩增后,通过琼脂糖凝胶电泳进行验证,获得两条单一约 1.5 kb 产物,并送至上海生工生物工程(上海)股份有限公司进行序列测定。将测序结果在 NCBI 数据库中进行比对,使用 MEGA 4.0 软件根据基因同源性序列构建系统发育树,通过自举分析进行置信度检测,自举数为 1000(图 2)。

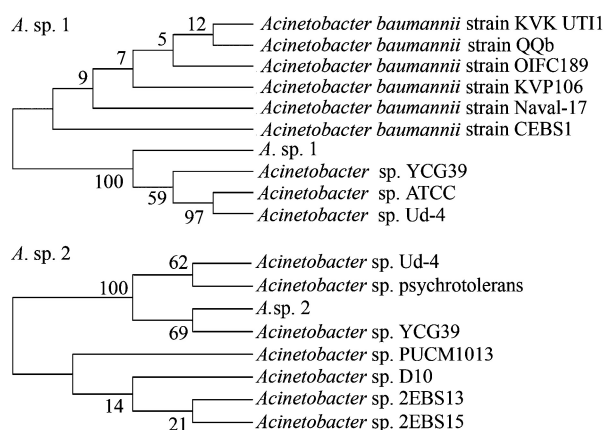


图 1 A.sp 1 和 A.sp 2 两株菌的系统发育树

Fig.1 Phylogenetic tree of bacteria for A.sp 1 and A.sp 2

结合形态和部分生理生化反应及分子生物学鉴定结果确定,两株石油降解菌均属于不动杆菌(*Acinetobacter* sp.),分别命名为 A.sp 1、A.sp 2。

2.2 不同的氮源对两株菌降解石油效果的影响

菌株 A.sp 1、A.sp 2 在不同氮源条件下均生长良好,其中 A.sp 1 以尿素为氮源时,降解体系中的生物量和石油降解率均达到最高,而 A.sp 2 以硝酸铵为氮源时,降解体系中的生物量和石油降解率达到最高。如图 2 所示:不同菌株对不同的氮源有不同的代谢水平,从而在一定程度上影响了不同菌株的石油利用效率。本试验选择尿素作为 A.sp 1 菌株的最适氮源,硝酸铵作为 A.sp 2 菌株的最适氮源。

2.3 不同的盐浓度对两株菌降解石油效果的影响

两株菌在盐浓度 1%—5% 均生长良好,且在盐浓度为 1% 时,两株菌对石油的降解率达到最高,虽然两株菌都随着盐度的递增石油降解率在不断的降低,但都长势良好,表现出了一定的盐度耐受能力。实验结果如图 2 所示,与贾群超^[17]等报道的结果一

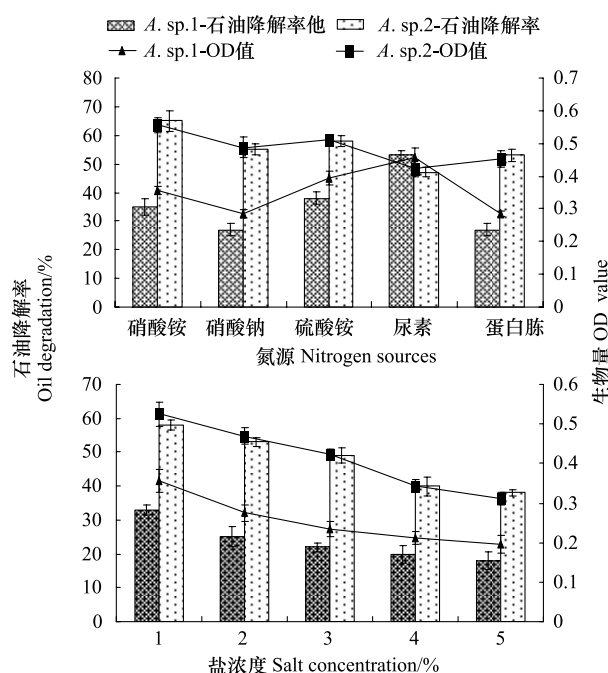


图 2 氮源、盐浓度对石油的生物降解和细菌生长的影响

Fig.2 Effect of nitrogen sources, salt concentration on biodegradation of crude oil and the growth of bacteria

致,即微生物细胞对石油烃的生物降解率随盐浓度的增大而减小。

2.4 pH 对两株菌降解石油效果的影响

环境 pH 值的变化对微生物的生长和代谢有着重要的作用^[18],从图 3 可以看出,培养基初始 pH 值

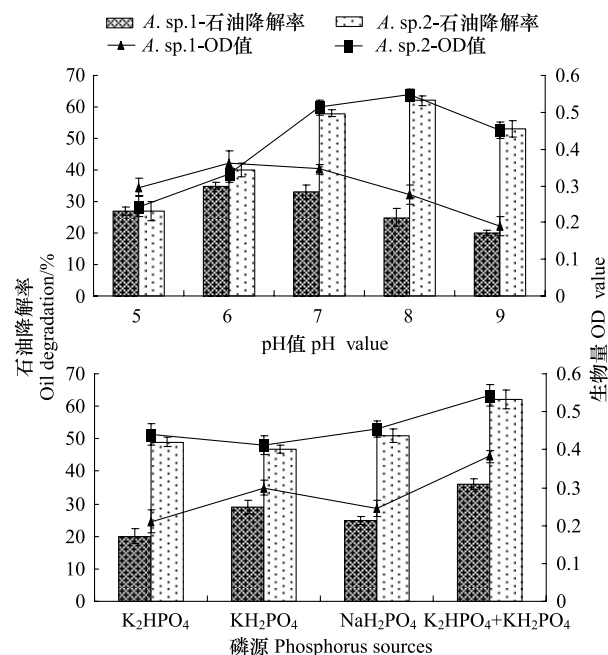


图 3 pH 值、磷源对石油的生物降解和细菌生长的影响

Fig.3 Effect of pH, phosphorus sources on biodegradation of crude oil and the growth of bacteria

对微生物的生长繁殖及其降解石油效率均产生了不同影响,其中两株菌在 pH 值 5—9 生长良好,*A. sp 1* 在 pH 值为 6 时其石油降解率达到最高,*A. sp 2* 在 pH 值为 8 时降解率达到最高。

2.5 不同的磷源对两株菌降解石油效果的影响

磷是细胞生长的必需元素,也是影响石油降解菌降解效率的重要营养物质^[19]。分别选择 K_2HPO_4 、 KH_2PO_4 、 NaH_2PO_4 、 $K_2HPO_4 + KH_2PO_4$ 作为磷源来确定其最佳磷源。实验结果如图 3 所示,两株菌对不同磷源均可利用且石油降解效果较好,尤其当采用 K_2HPO_4 和 KH_2PO_4 (质量比为 1:1)作为共同磷源时,两株菌的石油降解率均达到最大值。

2.6 接种量对降解石油效果的影响

石油降解菌的数量是影响石油降解率的重要因素之一,接种量过多、偏少都不利于菌株对石油烃组分的降解利用。接种量过多会导致微生物种内竞争的加剧,营养物质消耗加速^[20],而接种量过少,意味着微生物细胞数量不足。而高浓度石油会对土壤中微生物细胞生长产生抑制作用,影响酶的合成,导致利用石油的周期延长,降解速率降低^[21]。当 *A. sp 1*、*A. sp 2* 的接种量在 2%—10% 时,两株菌均生长良好。*A. sp 1* 在接种量为 4% 时更有利于对石油的降解,*A. sp 2* 在接种量为 8% 时有利于对石油的降解(图 4)。

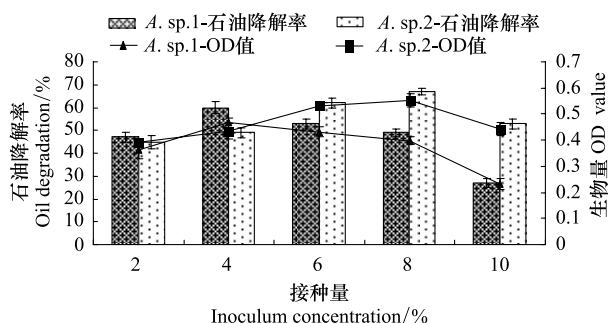


图 4 接种量对石油的生物降解和细菌生长的影响

Fig.4 Effect of inoculum concentration on biodegradation of crude oil and the growth of bacteria

2.7 降解前后石油组分比较分析

通过探讨盐浓度、pH 值、不同形态的 N 源与 P 源,接种量等因素对两株石油降解菌处理石油的影响。分别确定这些因素对两株菌降解石油的最佳降解条件,*A. sp 1* 在盐度 1%、pH 值 6、磷源(K_2HPO_4 和 KH_2PO_4)、氮源为硝酸铵和接种量 4% 时其最高石油

降解率达到 60%,*A. sp 2* 在盐度 1%、pH 值 8、磷源(K_2HPO_4 和 KH_2PO_4)、氮源为尿素和接种量 8% 时其最高石油降解率可达到 67%。为了进一步了解两株菌对原油的不同组分的降解能力,采用 GC-MS 对微生物降解石油前后的石油烃组分变化进行分析。

石油降解菌 *A. sp 1*、*A. sp 2* 降解 7 d 后原油组分的 GC-MS 总离子流图谱,与对照组原油样品的 GC-MS 图谱进行对比,并结合质谱图图 5,进行定性分析可知:(1)两株菌对不同碳链长度的石油烃类物质均有明显降解效果,且降解效果不尽相同;(2)两株菌均对碳原子数大于 20 的石油烃类物质有较好的降解效果,其中 *A. sp 1* 对 C_{21} — C_{25} 的石油烃类降解效果较明显,*A. sp 2* 对 C_{20} — C_{30} 的石油烃类降解效果显著;(3)两株菌对碳原子数小于 20 的石油烃类物质降解效果较差,原因可能是因为,微生物细胞降解高碳原子数的石油烃类物质组分生成了低碳原子数的石油烃类物质,从而导致后者的含量相对增加,这和以前文献报道一致^[22]。

3 讨论

从陕北产油区污染土壤中获得两株高效石油降解菌(*A. sp 1* 和 *A. sp 2*),经形态观察、部分生理生化试验和分子学鉴定(16S rDNA 特征序列测定)等方法,确定所获得的两株石油降解菌均属于不动杆菌属。本试验进一步分别考察了不同盐浓度、pH 值、氮源、磷源、接种量等因素对两株石油降解菌降解石油的影响,确定 *A. sp 1* 的最佳石油降解条件为:盐浓度 1%、pH 值 6、磷源(K_2HPO_4 和 KH_2PO_4)、氮源为硝酸铵和接种量 4%;*A. sp 2* 的最佳石油降解条件为:盐浓度 1%、pH 值 8、磷源(K_2HPO_4 和 KH_2PO_4)、氮源为尿素和接种量 8%。在各自最佳石油降解条件下,两株菌的石油降解率分别可以达到 60% 和 67%。

通过 GC-MS 分析方法对微生物降解石油前后的石油烃组分变化进行进一步分析,确定 *A. sp 1* 对 C_{21} — C_{25} 的石油烃类有较好的降解效果,*A. sp 2* 对 C_{20} — C_{30} 的石油烃类降解效果较好,而且两株菌对大分子的石油烃类有一定的降解效果。与何丽媛^[23]等报道混合菌群对石油烃类的降解种类有所不同,其作用的分子和酶学机制目前还没有研究报道,推测可能是这些菌所含有的降解石油烃类的酶系或分

子基础不同,而这必然和这些降解菌的种属差异性 相关。

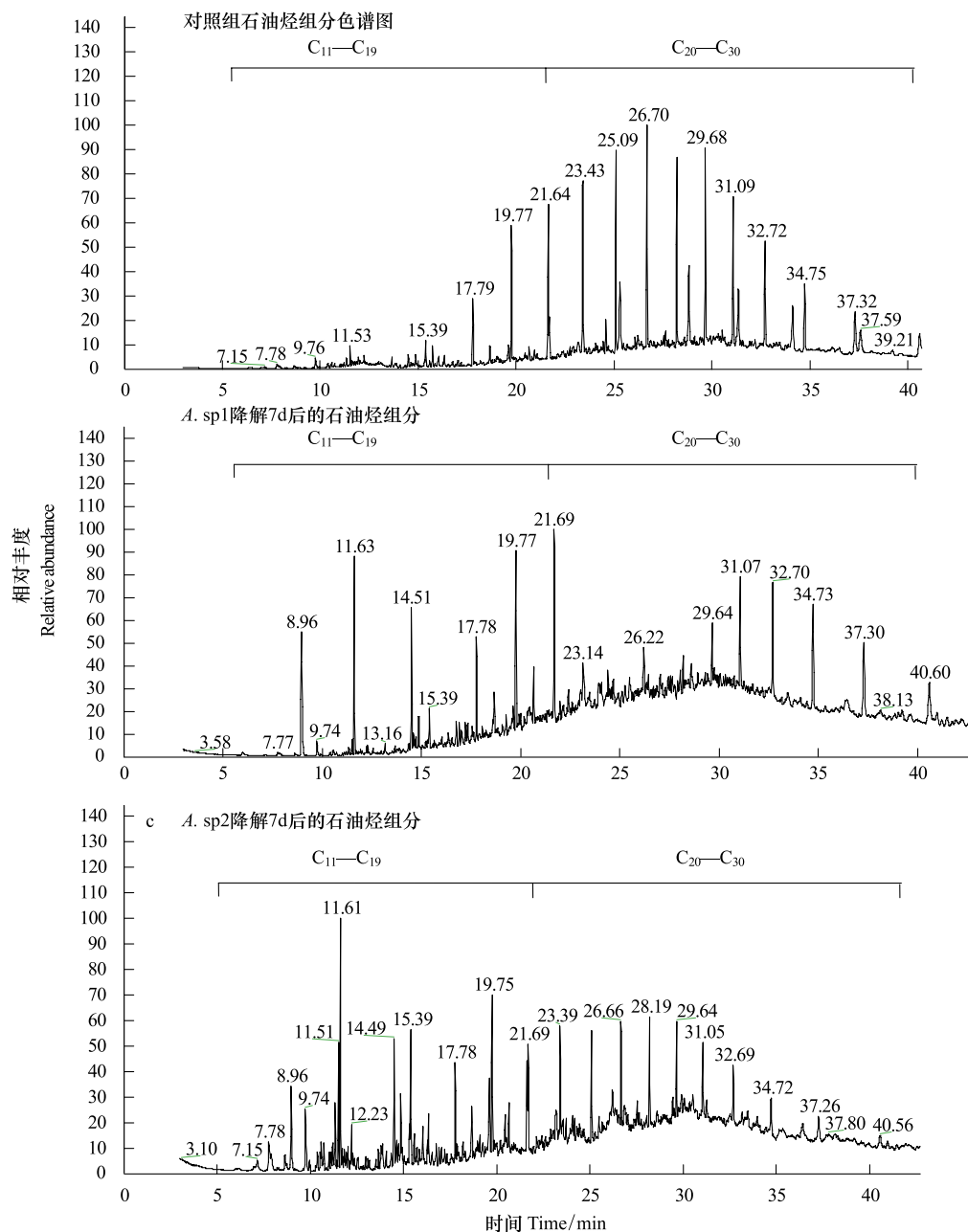


图5 GC-MS (Gas Chromatography-Mass Spectrometer) 分析两株菌对石油的降解效果

Fig.5 The results of crude oil degradation by two strains analyzed by GC-MS (Gas Chromatography-Mass Spectrometer)

据报道,不动杆菌属降解石油的一个关键因素可能和其在降解过程中产生的一种表面活性剂脂肽有关^[24],但其相关分子机制和影响其降解效果的因素报道较少^[25]。近年来对可能影响其现场降解效果因素的研究备受关注,本文的实验结果有可能为将此类菌株应用于现场修复试验过程中营养盐种类的添加提供了参考^[26]。有关其降解过程是否产生表面活性剂以及其作用的机制目前还在研究之中。

石油污染土壤中往往含有高浓度的多种盐类物质,这些盐离子的存在必然影响微生物细胞降解石油的效果。例如,高浓度的钠离子导致细胞外环境渗透压过高,而这会进一步影响微生物原生质膜上的离子种类和数量,可能影响细胞表面的电荷性质和大小,从而可能影响其细胞活性、生长和繁殖,进而可能影响其降解石油的能力和效率。另外,就降解酶作用的分子机制而言,过高的盐浓度可能影响

微生物细胞脱氢酶和氧化酶的对外分泌,从而可能影响其对石油组分的降解效果^[27]。本文所得菌株在试验盐浓度范围内,甚至在高盐浓度下对所加盐类离子具有耐受性,生长也没有形成强烈抑制,说明这类菌株对高盐浓度有一定的耐受性,在现场修复中有一定的应用前景^[26]。

一般情况下,石油污染土壤中的 C 源非常丰富,石油降解菌利用石油烃污染物作为碳源发生矿化作用和共代谢,但绝大多数土壤中的氮、磷含量都较低,因此,氮源和磷源是常见的烃类生物降解的限制因素^[28],在降解过程中,氮源、磷源等营养物质的补充是微生物降解石油,生长的重要条件。本实验发现,当以 K_2HPO_4 和 KH_2PO_4 为磷源时,更有利于菌株对石油的降解,这可能是由于外源磷源为细胞降解原油提供了有效的营养成分。

另外,氮源对微生物降解石油时的影响作用可能较敏感,有报道认为 NH_4NO_3 是动胶菌属细胞降解石油时的优选氮源,而本文发现 *A. sp 2* 菌株的最佳氮源为尿素,这种结果的差异可能和菌株的种属特异性有关。本文获得的以尿素为最优氮源的不动杆菌属,相对于使用硝酸铵为氮源的其它菌株而言,更具有经济性,毕竟尿素相对便宜易得。本研究发现,相对添加的氮源种类而言,添加有机氮源没有比无机氮源补充对微生物细胞石油降解作用的影响显著,从理论上讲,有机氮源同时作为碳源,将优先于石油烃类被利用,这可能妨碍了石油烃的高效降解,和以前的研究报道一致^[29]。

环境 pH 值变化对微生物的生理活动影响很大^[30],过低的 pH 值导致环境氢离子浓度超过微生物酶的适应范围,进而引起微生物原生质膜的电荷变化,而 pH 值过高又会对微生物的生长和降解酶的分泌产生不利影响,最终影响微生物对营养物质的吸收和酶活性。由此可见,过低或过高的 pH 都可能使微生物细胞对石油的生物降解速率减慢^[27]。从图 3 可以看出,*A. sp 1* 在 pH 值为 6 时,石油降解率和微生物生长均达到最大值,说明 pH 值在 6 左右时,是其降解的最适 pH 值。而 *A. sp 2* 生长和降解的最适 pH 值为 8 左右,表明该菌株适合在偏碱环境下生长,这可能是自然选择的结果,因为采样所在地陕北油田地区土壤的 pH 值为 7.6—8.6^[31]。

接种量大小对微生物群体生长的延滞期长短和

细胞生长速度有一定的影响^[32]。本研究表明,*A. sp 1* 在接种量为 4% 时对石油烃的降解效果较好,*A. sp 2* 在接种量为 8% 时对石油烃的降解效果较好。当 *A. sp 1* 接种量大于 4%、*A. sp 2* 接种量大于 8% 时,菌体之间的相互竞争作用使降解速率降低,同时接种量偏低则可能使微生物处于一种恶劣的生长环境下产生一些抑制自身生长的次级代谢产物甚至导致自身死亡^[23]。

References:

- [1] Hassanshahian M, Emtiazi G, Cappello S. Isolation and characterization of crude-oil-degrading bacteria from the Persian Gulf and the Caspian Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 2012, 64 (1): 7-12.
- [2] Beolchini F, Rocchetti L, Regoli F, Dell'Anno A. Bioremediation of marine sediments contaminated by hydrocarbons: Experimental analysis and kinetic modeling. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 182(1/3): 403-407.
- [3] Hii Y S, Law A T, Shazili N A M, Abdul-Rashid M K, Lee C W. Biodegradation of *Tapis* blended crude oil in marine sediment by a consortium of symbiotic bacteria. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 2009, 63(2): 142-150.
- [4] Mohajeri L, Aziz H A, Isa M H, Zahed M A. A statistical experiment design approach for optimizing biodegradation of weathered crude oil in coastal sediments. *Bioresource Technology*, 2010, 101(3): 893-900.
- [5] Murado M A, Vázquez J A, Rial D, Beiras R. Dose-response modelling with two agents: application to the bioassay of oil and shoreline cleaning agents. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 185(2/3): 807-817.
- [6] Wang X B, Chi C Q, Nie Y, Tanq Y Q, Tan Y, Wu G, Wu X L. Degradation of petroleum hydrocarbons (C_6 - C_{40}) and crude oil by a novel *Dietzia* strain. *Bioresource Technology*, 2011, 102 (17): 7755-7761.
- [7] Wardlaw G D, Nelson R K, Reddy C M, Valentine D L. Biodegradation preference for isomers of alkylated naphthalenes and benzothiophenes in marine sediment contaminated with crude oil. *Organic Geochemistry*, 2011, 42(6): 630-639.
- [8] Sakai Y, Maeng J H, Tani Y, Kato N. Use of long-chain *n*-alkanes (C_{13} - C_{44}) by an isolate, *Acinetobacter* sp. M-1. *Bioscience Biotechnology and Biochemistry*, 1994, 58 (11): 2128-2130.
- [9] Zhang Z Z, Hou Z W, Yang C Y, Ma C Q, Tao F, Xu P. Degradation of *n*-alkanes and polycyclic aromatic hydrocarbons in petroleum by a newly isolated *Pseudomonas aeruginosa* DQ8. *Bioresource Technology*, 2011, 102(5): 4111-4116.
- [10] Van Hamme J D, Ward O P. Physical and metabolic interactions

- of *pseudomonas* sp. strain ja5-b45 and *rhodococcus* sp. strain f9-d79 during growth on crude oil and effect of a chemical surfactant on them. *Applied and Environmental Microbiology*, 2001, 67(10): 4874-4879.
- [11] Sorkhoh N A, Ibrahim A S, Ghannoum M A, Radwan S S. High-temperature hydrocarbon degradation by *Bacillus stearothermophilus* from oil-polluted Kuwaiti desert. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 1993, 39(1): 123-126.
- [12] Kato T, Haruki M, Imanaka T, Morikawa M, Kanaya S. Isolation and characterization of long-chain-alkane degrading *Bacillus thermoleovorans* from deep subterranean petroleum reservoirs. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2001, 91(1): 64-70.
- [13] Balachandran C, Duraipandian V, Balakrishna K, Ignacimuthu S. Petroleum and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) degradation and naphthalene metabolism in *Streptomyces* sp. (ERI-CPDA-1) isolated from oil contaminated soil. *Bioresource Technology*, 2012, 112: 83-90.
- [14] Zhang L J, Yang Q, Li Y, Zhang X D. Study on isolation, screening and degradation characteristics of petroleum-degrading strains. *Journal of Natural Science of Heilongjiang University*, 2007, 24(6): 743-746, 750-750.
- [15] Chen B E, Liu Z D. Biotransformation of petroleum hydrocarbons by marine filamentous fungi. *Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section)*, 2002, 18(3): 13-17.
- [16] He L J, Li P J, Wei D Z, Wang D Z. Nutrient balance and mechanism of biological degradation of oil. *Environmental Science*, 2004, 25(1): 91-94.
- [17] Jia Q C, Guo C L, Lu G N, Yi X Y, Yang C, Dang Z. Isolation and identification of two strains efficiently degrading heavy oil and their degradation characteristics. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2011, 5(5): 1181-1186.
- [18] Chen M M, Qian W, Tian S, Liu G Q, Guo Y F. Optimization of degradation properties and conditions of oil-degrading bacteria with salt tolerance. *Environmental Protection of Oil and Gas Fields*, 2012, 22(3): 7-9.
- [19] Li Z, Zhao C C, Zhang Y B, Liu C S, Zhao D F. Study on degrading performance of a Thermophilic oil-degrading bacterial group. *Chemistry and Bioengineering*, 2011, 28(12): 37-42.
- [20] Hu C Q, Bao Y T, Xu W, Zheng C Y. Study on the screening and degradation characteristics of filamentous petroleum degrading fungi. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38(4): 1664-1666, 1742-1742.
- [21] Zhang X X, Zheng M S, Wang R J, Liang C F, Xu S. Screening of efficient hydrocarbon degrading bacteria Y-16 from petroleum contaminated soil and its degradation characteristics. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2010, 4(8): 1916-1920.
- [22] Huang X, Wu X L, Hou Z W. Mechanism of degradation for petroleum hydrocarbon by *Brevibacillus brevis* and *Bacillus cereus*. *Acta Petrolei Sinica*, 2006, 27(5): 92-95.
- [23] He L Y, Dang Z, Tang X, Lu G, Guo C L, Wu P X, Lu C Q. Biodegradation characteristics of petroleum by mixed strains. *Acta Science Circumstantiae*, 2010, 30(6): 1220-1227.
- [24] Cao J, Xu Z H, Li L Z, Shen B. Biosurfactant-producing petroleum-degrader-*Acinetobacter* BHSN. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2009, 25(1): 73-78.
- [25] Navon-Venezia S, Zosim Z, Gottlieb A, Legmann R, Carmeli S, Ron E Z, Rosenberg E. Alasan, a new bioemulsifier from *Acinetobacter radioresistens*. *Applied and Environmental Microbiology*, 1995, 61(9): 3240-3244.
- [26] Zhang X S, Xu D J, Zhu C Y, Lundaa T, Scherr K E. Isolation and identification of biosurfactant producing and crude oil degrading *Pseudomonas aeruginosa* strains. *Chemical Engineering Journal*, 2012, 209: 138-146.
- [27] Jia Y, Yin H, Peng H, Ye J S, Qin H M, Zhang N. Isolation, identification and characteristics of crude oil-degrading microorganism. *Journal of Jinan University: Natural Science*, 2007, 28(3): 296-301.
- [28] Zhu H H. Study on Degradation Ability of Crude Oil Contaminants by Soil Bacterium and Activity of Degradation-Related Enzyme [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2011.
- [29] Huang Y L, Cai B B, Ning Y P. Isolation and nutrient balance of predominant bacteria for degrading petroleum of contaminated soil. *Environmental Engineering*, 2006, 24(3): 7-9.
- [30] Yi L, Ya H Y, Li D, Zhang X S. Analysis of characteristics of hydrocarbon degrading bacteria. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2011, 38(6): 165-167.
- [31] Lu X. Isolation and Breed of Biosurfactant Producing and Petroleum-Degrading Strain and Study on Bioremediation of Petroleum Contaminated Soil in Northwest of China by this Strain [D]. Xi'an: Northwest University, 2010.
- [32] Yao W J. Study on Selection of High-Effective Strains for Degrading Petroleum and Augmentation of Surfactant on Biodegradation [D]. Chongqing: Chongqing University, 2007.

参考文献:

- [14] 张鲁进, 杨谦, 李妍, 张向东. 石油降解菌株的分离筛选及降解性能研究. *黑龙江大学自然科学学报*, 2007, 24(6): 743-746, 750-750.
- [15] 陈碧娥, 刘祖同. 海洋丝状真菌转化石油烃的研究. *石油学报 (石油加工)*, 2002, 18(3): 13-17.
- [16] 何良菊, 李培杰, 魏德洲, 王淀佐. 石油烃微生物降解的营养平衡及降解机理. *环境科学*, 2004, 25(1): 91-94.
- [17] 贾群超, 郭楚玲, 卢桂宁, 易筱筠, 杨琛, 党志. 两株稠油高效降解菌的筛选鉴定及其降解性能研究. *环境工程学报*, 2011, 5(5): 1181-1186.
- [18] 陈梅梅, 钱文, 田生, 刘光全, 郭耀峰. 耐盐石油降解菌性能及降解条件优化. *油气田环境保护*, 2012, 22(3): 7-9.
- [19] 李政, 赵朝成, 张云波, 刘春爽, 赵东风. 耐热石油降解混合

- 菌群的降解性能研究. 化学与生物工程, 2011, 28(12): 37-42.
- [20] 胡长庆, 鲍玉婷, 徐伟, 郑春艳. 丝状石油降解真菌的筛选及其降解特性研究. 安徽农业科学, 2010, 38(4): 1664-1666, 1742-1742.
- [21] 张秀霞, 郑茂盛, 王荣靖, 梁昌峰, 徐硕. 石油污染土壤中高效石油烃降解菌 Y-16 的筛选及其降解性能. 环境工程学报, 2010, 4(8): 1916-1920.
- [22] 黄学, 伍晓林, 侯兆伟. 短短芽孢杆菌和蜡状芽孢杆菌降解原油烃机制研究. 石油学报, 2006, 27(5): 92-95.
- [23] 何丽媛, 党志, 唐霞, 卢桂宁, 郭楚玲, 吴平霄, 刘从强. 混合菌对原油的降解及其降解性能的研究. 环境科学学报, 2010, 30(6): 1220-1227.
- [24] 曹娟, 徐志辉, 李凌之, 沈标. 产生物表面活性剂的石油降解菌 *Acinetobacter* BHSN 的研究. 生态与农村环境学报, 2009, 25(1): 73-78.
- [27] 贾燕, 尹华, 彭辉, 叶锦韶, 秦华明, 张娜. 石油降解菌株的筛选、初步鉴定及其特性. 暨南大学学报: 自然科学版, 2007, 28(3): 296-301.
- [28] 祝慧慧. 石油降解细菌的降解能力以及降解相关酶活性研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2011.
- [29] 黄廷林, 柴蓓蓓, 宁亚平. 低残油土壤中高效降油菌的筛选分离及其营养平衡. 环境科学, 2006, 24(3): 7-9.
- [30] 易力, 押辉远, 李迪, 张祥胜. 几株石油烃降解菌的研究. 广东农业科学, 2011, 38(6): 165-167.
- [31] 陆昕. 产表面活性剂石油降解菌的选育及对陕北石油污染土壤生物修复的试验研究 [D]. 西安: 西北大学, 2010.
- [32] 姚伟静. 高效除油微生物菌株的筛选及表面活性剂增强生物降解石油烃的研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2007.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.34, No.11 June, 2014 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

Review on macropore flow in soil GAO Zhaoxia, XU Xuexuan, ZHAO Jiaona, et al (2801)

Ecological Restoration

A summary of study on ecological restoration technology of large coal bases construction in China
..... WU Gang, WEI Dong, ZHOU Zhengda, et al (2812)

The ecology and environment monitoring technical systems in national large-scale coal-fired power base: a case study in Xilingol
League, Inner Mongolia WEI Dong, QUAN Yuan, WANG Chenxing, et al (2821)

Evaluation index system on ecological effect of national large-scale coal-fired power base based on the dpsir conceptual model
..... ZHOU Zhengda, WANG Chenxing, FU Xiao, et al (2830)

Research progress on the environment impacts from underground coal mining in arid western area of China
..... LEI Shaogang, BIAN Zhengfu (2837)

Ecological risk receptors analysis of pingzhuang western open-cut coal mining area in inner mongolia
..... GAO Ya, LU Zhaohua, WEI Zhenkuan, et al (2844)

Impacts of mining on landscape pattern and primary productivity in the grassland of Inner Mongolia: a case study of Heidaigou
open pit coal mining KANG Sarula, NIU Jianming, ZHANG Qing, et al (2855)

Accumulation of soil Cd, Cr, Cu, Pb by *Panax notoginseng* and its associated health risk
..... LIN Longyong, YAN Xiulan, LIAO Xiaoyong, et al (2868)

3D interpolation of soil PAHs distribution in a coking contaminated site of China ... LIU Geng, BI Rutian, QUAN Teng, et al (2876)

Autecology & Fundamentals

Catabatic effect from artificial mixed plantation of *Cunninghamia lanceolata* on soil aluminum toxicity
..... LEI Bo, LIU Bin, LUO Chengde, et al (2884)

Study on the trophic levels of soil macrofauna in artificial protection forests by means of stable nitrogen isotopes
..... ZHANG Shuhua, ZHANG Xueping (2892)

Lead- and cadmium-resistant bacterial strain JB11 enhances lead and cadmium uptake in the phytoremediation of soils
..... JIN Zhongmin, SHA Wei, LIU Lijie, et al (2900)

Identification and oil-degrading performance of *Acinetobacter* sp. isolated from North Shaanxi oil-contaminated soil
..... WANG Hu, WU Lingling, ZHOU Lihui, et al (2907)

Phylogenetic and physiological diversity of actinomycetes isolated from plant rhizosphere soils in the Qilian Mountains
..... MA Aiai, XU Shijian, MIN Yuxia, et al (2916)

Spatial distribution of AM and DSE fungi in the rhizosphere of *Ammopiptanthus nanus*
..... JIANG Qiao, HE Xueli, CHEN Weiyan, et al (2929)

Effects of PASP-KT-NAA on maize leaf nitrogen assimilation after florescence over different temperature gradients
..... GAO Jiao, DONG Zhiqiang, XU Tianjun, et al (2938)

Key temperatures of corn and sunflower during cooling process in Hetao irrigation district, Inner Mongolia
..... WANG Haimei, HOU Qiong, YUN Wenli, et al (2948)

The content of tannin extract in four types of *Quercus variabilis* YIN Yining, ZHANG Wenhui, HE Jingfeng, et al (2954)

Effect of food stress on flight muscle and reproduction development in a wing dimorphic cricket, *Velarifictorus ornatus*
..... WU Hongjun, ZHAO Lüquan, ZENG Yang, et al (2963)

- Effect of colours on oviposition preference of the oriental fruit moth, *Grapholita molesta* Busck
 YANG Xiaofan, MA Chunsen, FAN Fan, et al (2971)
- Monoterpene volatiles affecting host selection behavior of *Dendrolimus superans* and the activities of defense protein in larch needles
 LIN Jian, LIU Wenbo, MENG Zhaojun, et al (2978)
- Population, Community and Ecosystem**
- Soil microbial community structure under different vegetation restoration patterns in the loess hilly area
 HU Chanjuan, GUO Lei, LIU Guohua (2986)
- Seasonal variation of functional diversity of microbial communities in sediment and shelter of sea cucumber (*Apostichopus japonicus*)
 cultural ponds YAN Fajun, TIAN Xiangli, DONG Shuanglin, et al (2996)
- Analysis of bacterial flora during the fahua-fermentation process of fuzhuan brick tea production based on DGGE technology
 LIU Shiquan, HU Zhiyuan, ZHAO Yunlin (3007)
- Landscape, Regional and Global Ecology**
- CO₂ emissions transfer embedded in inter-regional trade in China LIU Hongguang, FAN Xiaomei (3016)
- Carbon sequestration potential of the major stands under the Grain for Green Program in Southwest China in the next 50 years
 YAO Ping, CHEN Xiangang, ZHOU Yongfeng, et al (3025)
- Characteristics of spatial and temporal phenology under the dynamic variation of grassland in the Qinghai Lake watershed
 LI Guangyong, LI Xiaoyan, ZHAO Guoqin, et al (3038)
- Estimates of carbon emissions caused by forest fires in the temperate climate of Heilongjiang Province, China, from 1953 to 2012 ...
 WEI Shujing, LUO Bizhen, SUN Long, et al (3048)
- Simulation of the climatic productivity of forest vegetation in Three Gorges Reservoir area
 PAN Lei, XIAO Wenfa, TANG Wanpeng, et al (3064)
- The mechanism for occurrence of *Peridiniopsis* blooms in the tributaries of Three Gorges Reservoir
 ZHU Aimin, LI Sixin, HU Jun, et al (3071)
- Biodiversity sensitivity zoning of river dam and reservoir engineering development ... LI Yiqiu, LU Chunxia, DENG Ou, et al (3081)
- Urban, Rural and Social Ecology**
- Assessment on coordinative ability of sustainable development of Beijing-Tianjin-Hebei Region based on set pair analysis
 TAN Feifei, ZHANG Meng, LI Haoran, et al (3090)
- Vacancy analysis on the development of nature reserves in Jiangxi Province
 HUANG Zhiqiang, LU Lin, DAI Nianhua, et al (3099)
- Evaluation of ecological economy index in the poyang lake ecological economic zone
 HUANG Heping, PENG Xiaolin, KONG Fanbin, et al (3107)
- Research on China's provincial forest ecological security appraisal based on the detrimental interferences
 LIU Xinzhu, MI Feng, ZHANG Shuang, et al (3115)

《生态学报》2014 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 34 卷 第 11 期 (2014 年 6 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 34 No. 11 (June, 2014)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel: (010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail: journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add: P.O.Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行人

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元