

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第8期

Vol.33 No.8

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南海北部大气气相多溴联苯醚的含量及来源 李琦路, 李军, 刘向, 徐维海, 张干 (2533)

河北张家口市大气污染观测研究 邵平, 王莉莉, 安俊琳, 周彦丽, 王跃思 (2538)

大气中丙烷光氧化臭氧生成活性的烟雾箱模拟 黄丽华, 莫创荣, 徐永福, 贾龙 (2551)

膜生物反应器处理甲苯性能及机制 叶杞宏, 魏在山, 肖盼, 李华琴, 张再利, 樊青娟 (2558)

厨余垃圾堆肥过程中恶臭物质分析 张红玉, 邹克华, 杨金兵, 李国学, 杨青原, 张锋 (2563)

北京城市生态系统地表水硝酸盐污染空间变化及其来源研究 徐志伟, 张心昱, 任玉芬, 孙晓敏, 王效科, 王升忠 (2569)

枯、平、丰水期长江3条支流表层水中多氯联苯的分布特征及风险评价 李昆, 赵高峰, 周怀东, 曾敏, 廖柏寒, 吴正勇, 张盼伟, 柳敏 (2574)

三峡库区丰水期表层水中酚类的分布特征及潜在风险 吴正勇, 赵高峰, 周怀东, 李科林, 李昆, 张盼伟 (2580)

东湖表层水体中全氟辛酸和全氟辛磺酸空间分布特征 陈静, 王琳玲, 朱湖地, 王贝贝, 刘黄诚, 曹梦华, 苗竹, 胡丽, 陆晓华, 刘光虹 (2586)

三峡库区大宁河与磨刀溪重金属污染特征 安立会, 张艳强, 郑丙辉, 刘玥, 宋双双, 李子成, 陈浩, 赵兴茹, 林进 (2592)

长江水系表层沉积物重金属污染特征及生态风险性评价 王岚, 王亚平, 许春雪, 安子怡 (2599)

江苏如东滩涂贝类养殖区表层沉积物中重金属来源分析及其潜在生物毒性 李磊, 王云龙, 蒋玫, 袁骥, 沈新强 (2607)

扰动强度对太湖沉积物中磷释放及其形态转化的影响 李大鹏, 黄勇 (2614)

干流倒灌异重流对香溪河库湾营养盐的补给作用 张宇, 刘德富, 纪道斌, 杨正健, 陈媛媛 (2621)

常年淹水和干旱对三峡库区消落带菖蒲生长恢复的影响 李强, 高祥, 丁武泉, 朱启红, 欧媛, 刘瑜 (2628)

温州城市降雨径流磷的负荷及其初始冲刷效应 周栋, 陈振楼, 毕春娟 (2634)

沂蒙山区典型小流域降雨径流的磷素输出特征 于兴修, 李振炜, 刘前进, 井光花 (2644)

城郊农业区小流域土地利用结构对氮素输出的影响 杨峰, 王鹏举, 杨珊珊, 吴金水, 胡荣桂 (2652)

基于 AnnAGNPS 模型四岭水库小流域氮磷流失特征的模拟研究 边金云, 王飞儿, 杨佳, 俞洁, 楼莉萍, 俞丹萍 (2659)

基于 GIS 和 L-THIA 模型的深圳市观澜河流域非点源污染负荷变化分析 白凤姣, 李天宏 (2667)

黄土丘陵区坡面水蚀对降雨和下垫面微观格局的响应 卫伟, 贾福岩, 陈利顶, 吴东平, 陈瑾 (2674)

强化混凝对腐殖酸和富里酸去除对比研究 周玲玲, 张永吉, 叶河秀, 张一清 (2680)

九龙江下游水源水中新发病原微生物和抗生素抗性基因的定量 PCR 检测 王青, 林惠荣, 张舒婷, 于鑫 (2685)

布吉河丰水期总细菌和氨氧化细菌的定性和定量研究 孙海美, 白姣姣, 孙卫玲, 邵军 (2691)

曝气生物滤池工艺脱氮性能及反硝化细菌群落结构特征研究 彭晓兰, 刘聪, 陈吕军 (2701)

城市污水处理厂氧化沟工艺微生物种群分析 郭云, 杨殿海, 卢文健 (2709)

IC 反应器处理啤酒废水的效能及其微生物群落动态分析 朱文秀, 黄振兴, 任洪艳, 阮文权 (2715)

原子力显微镜液池成像技术应用于微絮凝过滤工艺过程中的实验条件优化 郑蓓, 葛小鹏, 于志勇, 原盛广, 张文婧, 孙景芳 (2723)

UV/H₂O₂ 法对印染废水生化出水中不同种类有机物的去除效果 李新, 刘勇弟, 孙贤波, 徐宏勇, 钱飞跃, 李欣珏, 李暮 (2728)

蛋白核小球藻 *Chlorella pyrenoidosa*-15 的异养培养条件优化及污水养殖 王秀锦, 李兆胜, 邢冠岚, 李卓凝, 袁红莉, 杨金水 (2735)

“Fe⁰/优势脱氯菌”体系降解 2,4,6-TCP 特性及机制研究 戴友芝, 郭丽丽, 史雷, 刘智勇, 高宝钗 (2741)

树脂 D201 上粗漆酶的固定化及对孔雀石绿的脱色 戚绪亮, 刘翔, 刘波, 王林, 王小春, 方超 (2747)

TiO₂/PS/Fe₃O₄ 光催化剂的低温制备及其光催化和磁回收性能 王雪姣, 任学昌, 念娟妮, 肖举强, 王刚, 常青 (2752)

微波加热下苯的催化氧化性能研究 张钰彩, 卜龙利, 王晓晖, 刘海楠, 张浩 (2759)

纳米磁粉协同解偶联剂作用下活性污泥性能的研究 高丽英, 汤兵, 梁玲燕, 黄绍松, 付丰连, 罗建中 (2766)

好氧颗粒污泥沉降选择实验研究与定量描述 苏德足, 邓绣坤, 郑丽, 王畅, 金旺红, 沈俊 (2773)

超声波促进好氧/缺氧污泥消化过程中水解酶活性变化研究 叶运弟, 孙水裕, 郑莉, 刘宝建, 许燕滨, 占星星, 刘敬勇 (2780)

微生物营养剂浓度对生物沥浸法促进城市污泥脱水性能的影响 宋永伟, 刘奋武, 周立祥 (2786)

实验室条件下蓝藻结皮对低温光照胁迫的响应与微结构变化 饶本强, 李华, 熊瑛, 兰书斌, 李敦海, 刘永定 (2793)

西南地区紫色水稻土活性碳库的季节动态 吴艳, 江长胜, 郝庆菊 (2804)

典型设施菜地土壤抗生素污染特征与积累规律研究 尹春艳, 骆永明, 滕应, 章海波, 陈永山, 赵永刚 (2810)

土壤铜硒复合污染中金属形态转化及其对生物有效性的影响 胡斌, 梁东丽, 赵文龙, 缪树寅 (2817)

土壤微生物群落对多环芳烃污染土壤生物修复过程的响应 张晶, 林先贵, 刘魏魏, 尹睿 (2825)

可可毛色二孢菌对焦化厂土壤多环芳烃污染修复 张志远, 王翠苹, 刘海滨, 孙红文 (2832)

广西茶山梯矿尾砂中微量元素的淋滤实验研究 蔡永兵, 李玲, 魏晓飞, 张国平, 李海霞, 付志平 (2840)

北京市近郊区土壤砷累积特征 戚浩, 王美娥, 汪自强, 欧阳志云 (2849)

抗氧化酶基因作为多环麝香污染分子标志物研究 陈春, 周启星, 刘潇威 (2855)

臭氧污染对不同品种小麦干物质与生物量碳积累与分配的影响 寇太记, 于伟伟, 朱建国, 朱新开 (2862)

尿素分解共沉淀法中反应时间对 ZnAl 类水滑石结构和磷吸附性能的影响 陆英, 程翔, 邢波, 孙中恩, 孙德智 (2868)

铅和铜离子在纳米羟基磷灰石上的竞争吸附动力学研究 胡田田, 仓龙, 王玉军, 司友斌, 周东美 (2875)

pH 和 Ni²⁺ 对人工纳米氧化硅吸附菲的影响 罗沛, 孙红文, 张鹏 (2882)

铀在凹凸棒石上的吸附特性与机制研究 刘娟, 陈迪云, 张静, 宋刚, 罗定贵 (2889)

环丙沙星在潮土中的吸附特性 崔皓, 王淑平 (2895)

中高温区水合肼 SNCR 脱硝反应机制和特性研究 洪塗, 陈德珍, 王渡, 黄慷 (2901)

H₂S 选择性催化氧化工艺及催化剂研究现状 郝郑平, 姜广玉, 张鑫, 曲思秋 (2909)

《环境科学》征稿简则 (2550) 《环境科学》征订启事 (2568) 信息 (2684, 2714, 2848, 2916)

可可毛色二孢菌对焦化厂土壤多环芳烃污染修复

张志远, 王翠苹, 刘海滨, 孙红文*

(南开大学环境科学与工程学院, 环境污染过程及基准教育部重点实验室, 天津 300071)

摘要: 利用新型菌种可可毛色二孢菌(*Lasiodiplodia theobromae*)对北京焦化厂实际土壤 PAHs 污染进行修复,研究了该菌种在 Tween 80 和 HPCD 两种表面活性剂作用下对北京焦化厂土壤 PAHs 污染的强化修复效果,并探讨了修复过程中酶活动态变化及其与 PAHs 降解关系. 结果表明,在 *L. theobromae* 作用下,焦化厂土壤中 PAHs 降解率在第 70 d 达到 45.3%,比控制组提高了 30 个百分点;当 Tween 80 和 HPCD 在最佳含量($2 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $1 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)时,土壤中 PAHs 降解率达 65.8%和 63.9%,比控制组提高约 50 个百分点. 因此,研究证实 *L. theobromae* 是实际土壤 PAHs 污染修复的可选菌种,表面活性剂与 *L. theobromae* 联合修复实际土壤 PAHs 污染修复是一种可选技术. 在单一 *L. theobromae* 修复组和表面活性剂强化 *L. theobromae* 修复组中,土壤中过氧化氢酶和转化酶活性比控制组土壤中酶活性均提高 2 倍左右,表明 *L. theobromae* 可能产生过氧化氢酶和转化酶或者该菌种与土著微生物有协同作用. 相关性分析表明,过氧化氢酶和转化酶活性最大值与 PAHs 降解率相关系数分别是 0.781 和 0.837,转化酶活性与降解率的相关性高于过氧化氢酶.

关键词: 可可毛色二孢菌; 多环芳烃(PAHs); 修复; 过氧化氢酶; 转化酶; 吐温 80; 羟丙基- β -环糊精

中图分类号: X172; X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)08-2832-08

Bioremediation of PAHs Contaminated Soil from Beijing Coking Plant by *Lasiodiplodia theobromae*

ZHANG Zhi-yuan, WANG Cui-ping, LIU Hai-bin, SUN Hong-wen

(Key Laboratory of Pollution Processes and Environmental Criteria, Ministry of Education, College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: Bioremediation of PAHs contaminated soil from Beijing Coking Plant was performed using a novel fungal strain *Lasiodiplodia theobromae* (*L. theobromae*). Moreover, enhanced bioremediation of PAHs contaminated soil was investigated in the presence of different concentrations of Tween 80 and hydroxypropyl- β -cyclodextrin (HPCD). The correlation of the dynamics of enzyme activities during remediation and the degradation of PAHs was analyzed. The results showed that the degradation rate of PAHs increased to 45.3% on the 70th day after addition of *L. theobromae*, which was 30 percentage points higher than that of the control group. At an optimum concentration of $2 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ for Tween 80 and $1 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ for HPCD, the degradation rate of PAHs was enhanced to 65.8% and 63.9%, respectively, which was 50 percentage points higher than that of the control group. Hydrogen peroxidase and invertase activities in soil in the bioremediation group with only *L. theobromae* and the surfactant enhanced group were both enhanced twice more than that of the control group. These results showed that *L. theobromae* may produce hydrogen peroxidase and invertase or have synergic effect with indigenous microorganisms. Correlation analysis showed that the correlation coefficients of PAHs degradation rate and maximum enzyme activities of hydrogen peroxidase and invertase were 0.781 and 0.837, respectively. Therefore, the correlation between invertase activities and degradation rate was higher.

Key words: *Lasiodiplodia theobromae*; polycyclic aromatic hydrocarbon (PAHs); remediation; hydrogen peroxidase; invertase; Tween 80; hydroxypropyl- β -cyclodextrin (HPCD)

多环芳烃(PAHs)是土壤中广泛存在的一种有机污染物,由于其具有慢性毒性和潜在的致癌、致畸、致突变效应,受到广泛关注,许多国家都将其列入优先控制污染物的黑名单或灰名单中. PAHs 由于性质稳定,难于降解,在环境中正呈不断增加的趋势^[1]. 而 PAHs 的低水溶性和憎水性,使其能强烈地分配到非水相中,吸附于颗粒物上,于是,土壤成为其主要的归宿之一. 残留在土壤中的 PAHs,不仅影响土壤的正常功能,降低土壤的环境质量,而且还可以通过生物富集进入食物链,危及人体健

康^[2],因此,PAHs 污染土壤的修复成为一个亟待解决的问题. 目前,治理 PAHs 污染土壤的方法主要有物理修复,化学修复和微生物修复. 其中微生物修复技术因具有成本低,无二次污染,可大面积应用等独特优点,一直备受学术界和修复产业界的青

收稿日期: 2011-11-02; 修订日期: 2011-12-25

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2008AA06Z333); 国家自然科学基金项目(20907024); 天津市基础研究重点项目(10JCZDJC24200)

作者简介: 张志远(1987~),男,硕士研究生,主要研究方向为生物修复技术, E-mail: zzydreamarea@163.com

* 通讯联系人, E-mail: sunhongwen@nankai.edu.cn

睐^[3],是目前最具潜力的土壤修复技术之一。但是,由于 PAHs 的疏水性及对微生物生长的强抑制作用,严重限制了其生物可利用程度和生物修复速度,因此,通过采取强化措施提高微生物修复效率就成为生物修复 PAHs 污染土壤的关键^[4,5]。

基于以上研究,人们尝试用表面活性剂来提高 PAHs 的生物可利用性,表面活性剂增效修复技术效率高,周期短,已经成为有机污染物修复的主要方法之一。Tween 80 和羟丙基- β -环糊精(HPCD)是其中应用较多的两种。Tween 80 是一种非离子型表面活性剂,具有很好的增溶和乳化作用,其毒性和临界胶束浓度也较小^[6]; HPCD 由 β -环糊精改性而成,是一种生物表面活性剂,其对于疏水性有机化合物有良好的增溶作用,对土壤介质吸附性小且具有微生物无害性^[7,8]。尽管这些表面活性剂提高了微生物对 PAHs 修复的效率,但是这些研究集中在实验室土壤染毒的个别 PAHs 的研究^[4,9,10]。卢晓霞等^[11]从北京焦化厂分离出多株 PAHs 降解菌,并将其应用于焦化厂污染土壤的强化微生物修复,取得较好的效果,但是总体来看,针对实际场址 PAHs 污染土壤的修复研究尚很欠缺,因此,研究并建立实际土壤 PAHs 污染修复技术具有现实的意义。

本研究利用本项目组前期分离出的 1 株新型菌种可可毛色二孢菌(*Lasiodiplodia theobromae*)^[12],首次将其应用于环境污染修复的研究中。研究其对北京焦化厂土壤 PAHs 污染修复,探讨其在不同浓度的 Tween 80 和 HPCD 两种表面活性剂作用下,对北京焦化厂 PAHs 污染土壤的强化修复效果。同时,测定修复过程中土壤酶(过氧化氢酶和转化酶)活性的变化特征与规律,进而论述 *L. theobromae* 对 PAHs 土壤污染修复的机制,以期为实际 PAHs 污染土壤的生物修复提供新型菌株及技术支持和理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 供试土壤

实验所用土样为北京某废弃焦化厂长期受 PAHs 污染的土壤。pH 值为 7.95,有机质含量为 1.03%,有效磷 $2.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效钾 $42.9 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,水解氮 $368.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,砂粒、粉粒、黏粒含量分别为 63.5%、34.2%、2.3%,属于砂质土。土壤风干后过 2 mm 筛,备用。

1.1.2 试剂

Tween 80(化学纯,天津市北方化玻购销中心),HPCD(西安德立生物化工有限公司);正己烷,二氯甲烷(色谱纯,天津市康科德科技有限公司);16 种 PAHs 标样和氘代物内标购自美国 J&K Acros。

1.1.3 供试菌株

实验所用菌株是本项目组成员从北京焦化厂污染土壤中筛选出的 1 株新型菌种,经权威鉴定为可可毛色二孢菌(*Lasiodiplodia theobromae*),属于真菌,该菌种是首次应用于环境污染修复研究,其对苯并[a]芘的降解详细研究见前期发表的文章^[12]。且该菌株经过驯化,能够利用 PAHs 作为唯一碳源和能源进行生长,对 PAHs 具有较好的降解能力。

1.2 实验方法

1.2.1 土壤 PAHs 降解实验

准确称取 1.00 kg 北京焦化厂实际土壤放入 2 000 mL 锥形瓶中,加入降解菌的菌悬液,使土壤真菌浓度(以湿重计)达到 $0.02 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$,特定组按实验设计加入一定量的表面活性剂,使土壤含水量为 50%。加塞后置于 32°C 恒温箱中,通风避光培养,每天以无菌水补足因蒸发损失的水分,分别在 5、10、20、30、50、70 d 从锥形瓶中取出 3 g 左右土样,测定其中 PAHs 的残留量和酶活性。其中,控制组实验以高温灭菌(121°C , 30 min)菌悬液替代不灭菌的菌悬液,其它处理同上。各实验组中每一处理均为 3 个重复。实验设计见表 1。

表 1 实验组编号及每组的实验条件

实验组编号	微生物	表面活性剂	表面活性剂含量 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$
C-0	灭菌菌悬液	无	—
C-T	灭菌菌悬液	Tween 80	2.0
C-H	灭菌菌悬液	HPCD	10.0
L	<i>L. theobromae</i>	无	—
L-T1	<i>L. theobromae</i>	Tween 80	0.5
L-T2	<i>L. theobromae</i>	Tween 80	2.0
L-T3	<i>L. theobromae</i>	Tween 80	10.0
L-H1	<i>L. theobromae</i>	HPCD	1.0
L-H2	<i>L. theobromae</i>	HPCD	10.0
L-H3	<i>L. theobromae</i>	HPCD	50.0

1.2.2 土壤中 PAHs 的测定

土壤样品冷冻干燥后研磨过筛,称取 1.00 g 样品,包于定性滤纸中,加入回收率指示物。用 100 ~ 110 mL 二氯甲烷索氏提取 48 h。提取液在旋转蒸发仪(0.04 MPa , $37^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$)上浓缩至 1 mL 左右。将浓缩液转移至硅胶-氧化铝净化柱(内径 1 cm,柱最上方放 1 cm 无水硫酸钠)中净化,然后分别用 20 mL 正己

烷,70 mL的正己烷/二氯甲烷(7:3)混合液淋洗,将第二组分淋洗液旋转蒸发至1 cm,微弱氮气吹至近干,用正己烷定容至1 mL,备GC-MS分析.

PAHs在GC-MS上以选择离子模式(SIM)进行测定,载气为高纯氮气,流速 $1\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$.进样口温度为 280°C ,气质传输线温度为 300°C .无分流进样模式,进样量 $1\ \mu\text{L}$.分析测试升温程序为 70°C 保持2 min,以 $10^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升至 260°C ,保持8 min,以 $5^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升至 300°C ,保持5 min.离子源温度为 250°C ,能量为70 eV的电子轰击源(EI).

该方法16种PAHs回收率为 $85.6\% \pm 4.5\%$ ~ $92.1\% \pm 5.6\%$.

1.2.3 土壤酶活性测定法

过氧化氢酶采用高锰酸钾滴定法^[13,14],转化酶采用3,5-二硝基水杨酸比色法^[13,15],结果以 $\text{IU}\cdot\text{g}^{-1}$ 表示(以干土计,下同),1 IU表示在特定条件(一般为最适条件)下,在1 min内能转化 $1\ \mu\text{mol}$ 底物的酶量.

1.3 数据处理方法

实验数据处理采用Microsoft Office 2007和Origin 7.5.

2 结果与讨论

2.1 北京焦化厂土壤PAHs分布

由图1可以看出北京焦化厂土壤中16种PAHs的分布特征.16种优先控制的PAHs总含量为 $91.4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,低环(2~3环)PAHs含量低于高环(4~6环),2~3环PAHs含量在 $1.3\sim 4.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,4~6环PAHs除BaA($1.9\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)和Chr($3.4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)之外,其余含量均在 $4.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以上,其中BbF和BkF含量在 $9.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以上.北京焦化厂土壤PAHs含量远远高于相关文献报道的农业土壤PAHs含量^[16,17],比一般工业区土壤PAHs含量^[18~20]也要高10倍以上.目前,国际上尚无土壤PAHs的统一治理标准,采用Barbara^[21]提出的总量标准,北京焦化厂土壤属于PAHs重污染土壤,这种PAHs重度污染的土壤会给生态环境带来极大的危害,其修复也迫在眉睫.

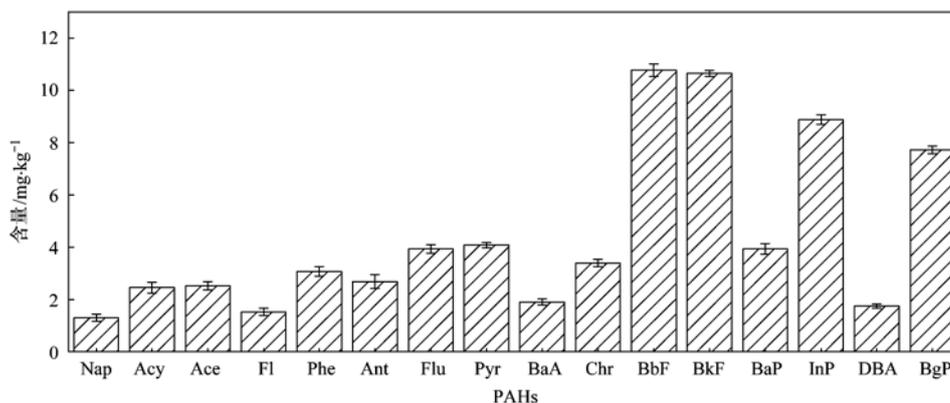


图1 北京焦化厂土壤中PAHs含量

Fig. 1 PAHs concentration in soil from Beijing Coking Plant

2.2 *L. theobromae* 对土壤中PAHs的降解

图2为*L. theobromae*对土壤中PAHs 70 d降解图,从中可知,*L. theobromae*对于实际污染厂址土壤中的PAHs有良好的修复效果.在控制组C-0组,2~3环PAHs降解率为20.5%,4~5环和6环PAHs降解率分别只有9.6%和6.3%;而在加入*L. theobromae*的L组,2~3环PAHs降解率为58.2%,4~5环和6环PAHs降解率提高至38.7%和22.3%.因此,加入*L. theobromae*后,2~3环、4~5环和6环的PAHs降解率分别提高约38、29和16个百分点,且修复整体特征为:低环PAHs降解率明显高于高环.这是因为,不同PAHs性质差异很大,

随着环数的增加,PAHs的辛醇-水分配系数增加,水溶性降低,分子体积增加,使得其与土壤颗粒结合的更加牢固,向水溶液中的释放变慢,因此生物有效性较低,很难被微生物利用^[22,23].

2.3 表面活性剂对PAHs降解总量的影响

表2为各个实验组土壤中PAHs总量降解的动力学数据,在控制组C-0中,PAHs损失率低于15.0%,其中损失部分归因于土著微生物作用致使的PAHs降解及2~3环PAHs在土壤中的非生物损失(挥发,水解).在仅加入表面活性剂后(C-T和C-H),PAHs降解率有一定的提高,但是变化并不显著.加入*L. theobromae*后,PAHs降解率有了显著的

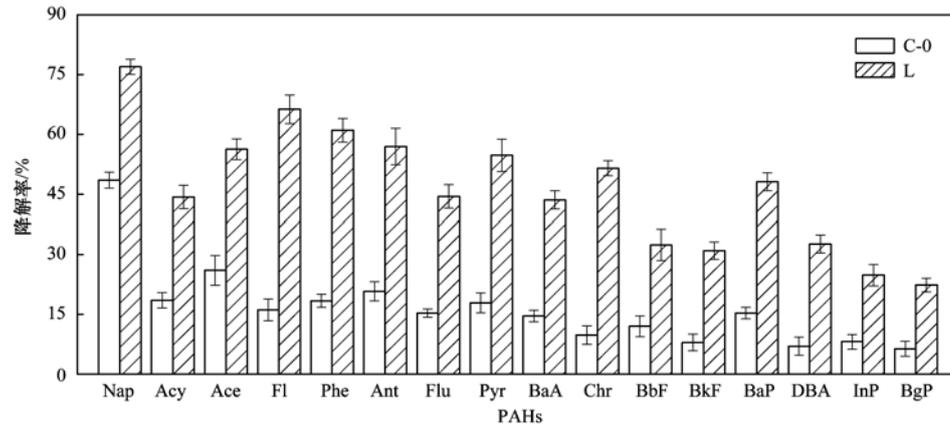
图2 *L. theobromae* 对土壤中 PAHs 降解Fig. 2 Degradation of soil PAHs by *L. theobromae*

表2 各个实验组土壤中 PAHs 降解率/%

Table 2 Degradation rate of PAHs in different experimental groups/%

实验组	10 d	20 d	30 d	50 d	70 d
C-0	5.2 ± 0.4	8.6 ± 1.2	9.7 ± 1.0	13.0 ± 1.8	14.2 ± 1.0
C-T	7.6 ± 1.4	13.7 ± 0.9	16.5 ± 1.8	18.5 ± 0.4	17.1 ± 2.3
C-H	7.6 ± 1.6	12.9 ± 0.8	14.2 ± 2.1	15.7 ± 0.9	17.9 ± 1.8
L	24.4 ± 3.6	30.1 ± 1.8	37.3 ± 2.5	44.9 ± 1.8	45.3 ± 2.5
L-T1	29.2 ± 2.1	43.2 ± 1.7	49.9 ± 1.3	58.9 ± 0.4	61.5 ± 3.3
L-T2	28.4 ± 1.8	40.6 ± 0.4	53.5 ± 3.0	63.8 ± 2.0	65.8 ± 2.4
L-T3	20.2 ± 1.7	32 ± 2.0	44.3 ± 2.1	49.1 ± 0.8	48.7 ± 2.0
L-H1	27.3 ± 1.8	40.4 ± 1.7	52.4 ± 1.3	60.8 ± 2.4	63.9 ± 1.8
L-H2	21.4 ± 0.4	35.9 ± 4.0	47.2 ± 2.6	59.1 ± 3.2	63.7 ± 0.2
L-H3	22.3 ± 1.2	33.6 ± 1.8	45.5 ± 2.0	50.5 ± 1.0	55.1 ± 2.7

提高,在 70 d 达到了 45.3%,比控制组提高 30 个百分点. 在加入表面活性剂强化微生物修复的实验组中,PAHs 降解率比单一微生物组中有不同程度的提高. 在降解的前 30 d,添加表面活性剂的组,PAHs 降解率都达到 45.0% 以上,降解速度显示为前期较快,之后降解逐渐变慢. 根据反应动力学理论,底物(PAHs)浓度越大,降解速率越快^[24]. 在反应初期,土壤中 PAHs 浓度较大,吸附在土壤颗粒上的 PAHs 能够很快地进入液态介质,使得液体中 PAHs 浓度增高,同时,表面活性剂的存在也使得 PAHs 更容易被微生物利用^[25],因此反应初期降解速度较快;在 30 d 后,降解速度变慢的原因是:一方面,系统中 PAHs 浓度降低,另一方面,降解过程中产生的中间产物的竞争代谢和毒性作用也可能造成微生物降解速率降低^[12]. 因此,在经过最初的快速降解后,降解速度逐渐变慢,而在 70 d 左右时,PAHs 几乎不再降解.

对于加入表面活性剂 Tween 80 的实验组,当其含量从 0.5 g·kg⁻¹和 2 g·kg⁻¹增加到 10 g·kg⁻¹时,在第 70 d, *L. theobromae* 对 PAHs 降解率分别为

61.5%、65.8% 和 48.7%,比单一微生物修复组分别提高约 16、21 和 3 个百分点,不同含量 Tween 80 对 *L. theobromae* 修复 PAHs 促进程度不同,但加入 Tween 80 最佳量为 2 g·kg⁻¹土时,*L. theobromae* 对 PAHs 修复效果最佳. Guha 等^[26]认为,适宜的含量内,Tween80 能够解除 PAHs 对土壤微生物活性的抑制,同时由于其增溶作用,增加了 PAHs 的生物可利用性,导致 PAHs 降解率有了显著的提高;研究发现,高浓度 Tween 80 会产生毒性,抑制微生物的活性^[27,28],进而抑制 PAHs 降解;其次,Tween 80 浓度大于临界胶束浓度后,形成大量胶束,一部分 PAHs 分布于 Tween 80 胶束内部,PAHs 从胶束中迁移到真菌中的速率受限制^[28],因此当 Tween 80 含量增加到 10 g·kg⁻¹时,PAHs 降解率有了显著的下降.

对于加入表面活性剂 HPCD 的实验组,当其含量从 1 g·kg⁻¹,10 g·kg⁻¹增加到 50 g·kg⁻¹时,在第 70 d, *L. theobromae* 对 PAHs 的降解率分别为 63.9%、63.7% 和 55.1%,比单一微生物修复组分别提高约 19、18 和 10 个百分点,表面活性剂 HPCD

加入量为 $1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,对强化 *L. theobromae* 修复 PAHs 效果最佳. HPCD 含量从 $1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 增加至 $50 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,PAHs 降解率有一定的降低,但是,仍有显著的促进作用,这也与相关文献所得结论相似^[25]. 与 Tween 80 相比,HPCD 在较大的浓度范围内对 PAHs 降解都有显著的促进作用. 这是因为,HPCD 是完全水溶性的,土壤对其吸附作用很小,不会形成胶束,对微生物无毒且可生物降解^[8]. 由于这些优点,即使在比 Tween 80 最大浓度都高的情况下,HPCD 对于 PAHs 的降解依然有良好的效果.

2.4 表面活性剂对不同环数 PAHs 降解的影响

由表 3 可以看出,添加表面活性剂强化微生物修复的实验组(除 L-T3 和 L-H3),2~3 环 PAHs 总降解率都在 70% 以上,比单一微生物组提高约 15 个百分点,比控制组提高约 50 个百分点;4~5 环 PAHs 降解率为 47.4%~56.9%,比单一微生物组提高了 9~18 个百分点,比控制组提高 38~45 个百分点;6 环 PAHs 降解率在 40% 左右,比单一微生物

物组提高了 20 个百分点,比控制组提高 35 个百分点. 因此,添加表面活性剂后,微生物对低环 PAHs 降解率依然明显高于高环,但是两种表面活性剂对于高环数 PAHs 的降解都有较好的促进作用,尤其是 6 环 PAHs 降解率增加近一倍. 因此,本研究表明, Tween 80 与 HPCD 能促进新型菌种 *L. theobromae* 对实际土壤多环芳烃污染修复,特别是高环难降解 PAHs 的修复. 因此,该技术也是实际土壤污染修复中可选的技术.

2.5 土壤酶活性变化

土壤酶是土壤新陈代谢的重要因素,它主要来自于微生物细胞,与土壤呼吸强度和土壤微生物活动相关^[13, 29]. 本研究分析 *L. theobromae* 对实际土壤 PAHs 污染修复过程中土壤过氧化氢酶和转化酶的动力学,以便阐述 *L. theobromae* 修复 PAHs 的机制.

图 3 为不同实验研究组中 PAHs 降解过程中土壤过氧化氢酶活性的变化. 在第 10 d,C-0 控制组过氧化氢酶最大酶活性为 $10.7 \text{ IU} \cdot \text{g}^{-1}$,当土壤中加入 *L. theobromae*,最大值达 $16.2 \text{ IU} \cdot \text{g}^{-1}$,比控制组高 60% 以上. 说明 *L. theobromae* 加入到焦化厂土壤中,具有较强的生存生长并产生该酶或者与土壤微生物具有协同的能力,因此,土壤中过氧化氢酶的酶活性较高. 当系统添加表面活性剂后,过氧化氢酶活性有显著的增加,酶活性最高值都在 $18.0 \text{ IU} \cdot \text{g}^{-1}$ 以上,其中 L-T2、L-H1 和 L-H3 组的过氧化氢酶活性分别达到了 22.6、22.9 和 $25.4 \text{ IU} \cdot \text{g}^{-1}$,是控制组(C-0)的 2 倍以上. 这表明表面活性剂的添加不仅有效解除了 PAHs 对土壤微生物活性的抑制,同时增加了 *L. theobromae* 或者土壤微生物可利

表 3 不同环数 PAHs 降解率/%

Table 3 Degradation of PAHs of different rings/%			
实验组	2~3 环	4~5 环	6 环
C-0	20.5 ± 1.4	9.6 ± 0.9	6.3 ± 1.8
C-T	28.6 ± 1.4	11.8 ± 0.8	7.4 ± 2.1
C-H	30.5 ± 3.6	13.6 ± 1.8	7.6 ± 2.5
L	58.2 ± 2.1	38.7 ± 1.7	22.3 ± 2.3
L-T1	76.8 ± 2.5	47.4 ± 2.3	40.5 ± 2.6
L-T2	74.7 ± 1.8	56.9 ± 0.4	42.1 ± 2.0
L-T3	59.9 ± 1.7	42.3 ± 2.0	34.8 ± 2.1
L-H1	77.5 ± 1.8	50.9 ± 1.7	42 ± 2.3
L-H2	73.2 ± 3.4	51.1 ± 4.0	39.6 ± 2.6
L-H3	66.5 ± 3.2	46.2 ± 1.8	38.3 ± 2.0

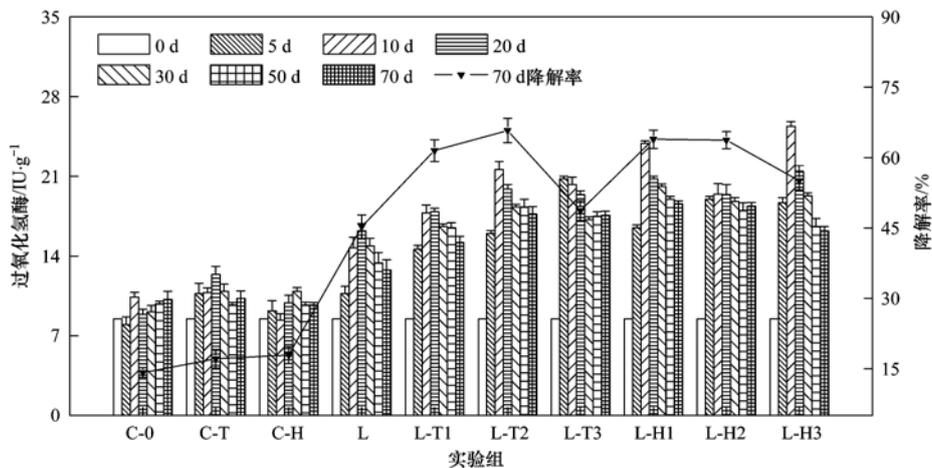


图 3 *L. theobromae* 对 PAHs 降解过程中降解率与土壤过氧化氢酶活性变化动力学

Fig. 3 Degradation rate of PAHs and dynamics of soil hydrogen peroxidase during degradation of PAHs by *L. theobromae* in different groups

用的碳源,从而进一步提高了土壤中过氧化氢酶的活性. 由图 3 还可以看出,在所有的实验研究组中,在修复过程初始阶段,过氧化氢酶活性有一个快速增加的阶段,在第 10 d 左右达到最大值,而后缓慢的降低,这个趋势也与相关研究结论相似^[22]. 根据微生物生长的普遍规律及相关研究的结论^[12]可知,在修复的初始阶段,由于营养物质充足,条件适宜,微生物活性较强,因此,修复初始阶段,土壤酶活快速增加;随着修复的进行,反应体系中产生一系列的转化中间产物(如羧基、羰基、环氧基等),一些中间产物对微生物的毒性作用往往更强,其毒性积累会使微生物生长受到一定程度的抑制,进而导致其活性降低,酶活也逐渐降低^[30].

图 4 为降解过程中土壤转化酶活性变化, C-0

控制组转化酶最大酶活性为 $8.0 \text{ IU}\cdot\text{g}^{-1}$, 当土壤中加入 *L. theobromae*, 最大值到达 $13.0 \text{ IU}\cdot\text{g}^{-1}$; 系统添加表面活性剂后, 转化酶活性最高值都在 $14.0 \text{ IU}\cdot\text{g}^{-1}$ 以上, 活性最高的 L-T2 和 L-H1 酶活最高值分别达到 $16.3 \text{ IU}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $16.4 \text{ IU}\cdot\text{g}^{-1}$, 远高于 C-0 组. 转化酶活提高的原因类似于上述过氧化氢酶活性提高的原因, 且转化酶活性变化趋势与过氧化氢酶相似. 综合过氧化氢酶与转化酶活性动态变化可知, 不管是 Tween 80, 还是 HPCD, 都能够有效促进修复过程中 *L. theobromae* 对两种酶的分泌, 说明 *L. theobromae* 该新型菌种能在 Tween 80 和 HPCD 作用下有效促进修复系统中酶活的产生. 因此, 该菌种是实际土壤 PAHs 污染修复的潜力微生物.

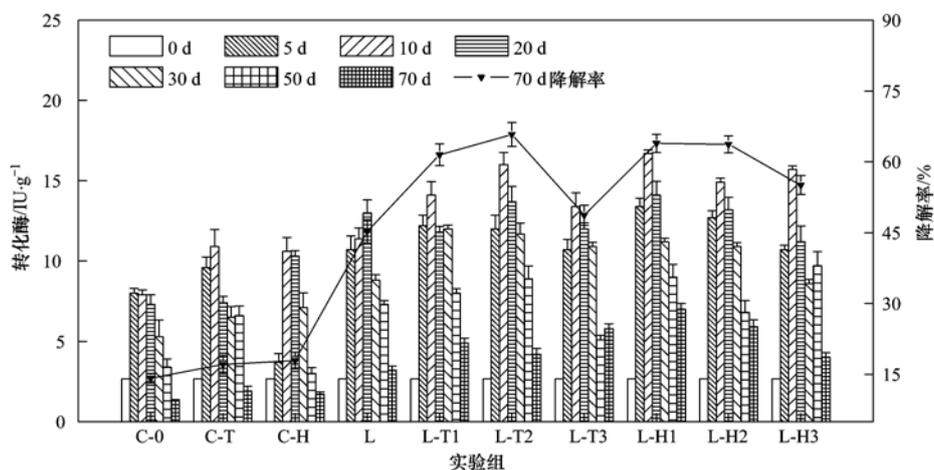


图 4 不同组中 *L. theobromae* 对 PAHs 降解过程中降解率与土壤转化酶活性变化动力学

Fig. 4 Degradation rate of PAHs and dynamics of soil invertase during degradation of PAHs by *L. theobromae* in different groups

2.6 PAHs 降解率与土壤酶活的相关性

当外源微生物加入土壤中会影响土壤生态系统,为此,本研究采用微生态系统酶活变化评价这一动态过程,土壤酶活性高低反映 PAHs 降解过程外源微生物与土壤土著微生物协同的活性. 过氧化氢酶和转化酶都是微生物广泛产生的酶,2 种酶的活性可以反映微生物的活跃程度,2 种酶活性高的组,其微生物更活跃,在降解 PAHs 过程中的作用更大. 由图 3 和图 4 可以看出,总体来讲,PAHs 降解率与酶活性有相同的趋势,酶活性高的组,PAHs 降解率高. 过氧化氢酶活性最高的为 L-T2、L-H1 和 L-H3 组,转化酶活性最高的是 L-T2 和 L-H1,PAHs 降解率最高的是 L-T2 和 L-H1 两组. 与相关文献报道的降解 PAHs 的其他菌株和其他有机污染修复土壤相比^[29, 31],*L. theobromae* 具有较高的酶活活性,反映了修复系统中微生物较高的活性,这也是 *L.*

theobromae 修复效率较高的原因. 本实验对 2 种酶活性和 PAHs 降解率进行了分析,选取各实验组酶活最高点(第 10 d)和降解率(70 d)作了相关性分析. 由图 5 可知,过氧化氢酶和转化酶与 PAHs 降解率的相关性系数分别是 0.781 和 0.837,转化酶活性与降解率的相关性高于过氧化氢酶. 虽然 2 种酶在微生物中广泛存在,但是不同土壤条件会对酶活性产生不同影响. 过氧化氢酶性质较为稳定,其在土壤中失活较慢,能够较长时间的存在^[13, 32]; 实验用土 pH 值为 7.95, 而转化酶在碱性环境中失活较快,一旦微生物活性降低,酶活也会在较短时间内降低^[13, 33], 所以与过氧化氢酶相比,转化酶更能够反映修复过程中某一时间段微生物的活性,其与 PAHs 降解率相关性较高. 添加 *L. theobromae* 和表面活性剂后, 2 种酶活性都较高,反映其微生物更活跃,在降解 PAHs 过程中的作用更大,说明 *L. theobromae*

与土壤土著微生物协同的活性更高。

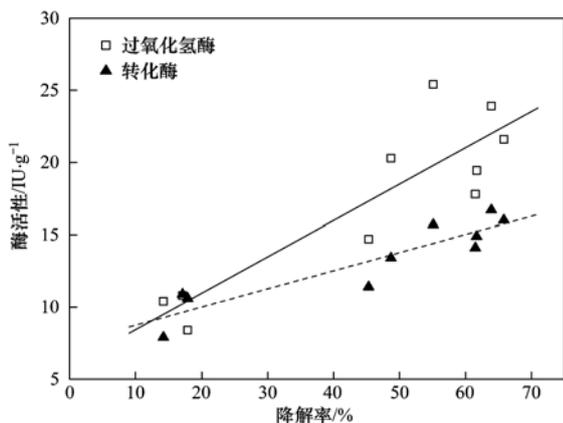


图5 *L. theobromae* 对 PAHs 降解第 10 d 酶活与 PAHs 降解率 (70 d) 相关性

Fig. 5 Correlation of PAHs degradation rate (70 d) by *L. theobromae* with enzyme activities on the 10th day

3 结论

(1) 经过 70 d 的修复, *L. theobromae* 对北京焦化厂实际土壤中 PAHs 降解率达到 45.3%, 比控制组提高约 30 个百分点. 因此, 该研究证实 *L. theobromae* 是实际土壤 PAHs 污染修复的可选菌种.

(2) Tween 80 和 HPCD 最佳含量分别是 $2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, *L. theobromae* 对土壤中 PAHs 降解率分别达到了 65.8% 和 63.9%, 比控制组提高一倍以上, 因此, 表面活性剂与 *L. theobromae* 联合修复实际土壤 PAHs 污染修复, 是一种可选技术.

(3) *L. theobromae* 单一修复组及该微生物在表面活性剂作用下的实验组, 两种酶的活性相对控制组 (C-0) 有较大幅度的提高. 说明 *L. theobromae* 该新型菌种能在 Tween 80 和 HPCD 作用下有效促进修复系统中酶活的产生. 因此, 该菌种是实际土壤 PAHs 污染修复的潜力微生物.

(4) 经过相关性分析, 过氧化氢酶和转化酶活性最高值与 PAHs 降解率相关系数分别是 0.781 和 0.837, 因此, 转化酶更能够反映土壤修复过程中微生物的活性.

参考文献:

- [1] Tiehm A. Degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons in the presence of synthetic surfactants[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1994, **60**(1): 258-263.
- [2] 刘世亮, 骆永明, 丁克强, 等. 菌根真菌对土壤中有机污染物的修复研究[J]. 地球科学进展, 2004, **19**(2): 197-203.
- [3] D'Annibale A, Ricci M, Leonardi V, et al. Degradation of aromatic hydrocarbons by white-rot fungi in a historically contaminated soil[J]. Biotechnology and Bioengineering, 2005, **90**(6): 723-731.
- [4] Leonardi V, Giubilei M A, Federici E, et al. Mobilizing agents enhance fungal degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons and affect diversity of indigenous bacteria in soil [J]. Biotechnology and Bioengineering, 2008, **101**(2): 273-285.
- [5] Gan S, Lau E V, Ng H K. Remediation of soils contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **172**(2-3): 532-549.
- [6] 宋玉芳, 孙铁珩, 许华夏. 表面活性剂 TW-80 对土壤中多环芳烃生物降解的影响[J]. 应用生态学报, 1999, **10**(2): 230-232.
- [7] Doick K J, Clasper P J, Urmann K, et al. Further validation of the HPCD-technique for the evaluation of PAH microbial availability in soil[J]. Environmental Pollution, 2006, **144**(1): 345-354.
- [8] Wang X J, Brusseau M L. Solubilization of some low-polarity organic compounds by hydroxypropyl-beta-cyclodextrin [J]. Environmental Science and Technology, 1993, **27**(13): 2821-2825.
- [9] Zeinali M, Vossoughi M, Ardestani S K. Naphthalene metabolism in *Nocardia otitidiscavarium* strain TSH1, a moderately thermophilic microorganism [J]. Chemosphere, 2008, **72**(6): 905-909.
- [10] Zhou W J, Zhu L Z. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil-water system containing a nonionic surfactant [J]. Chemosphere, 2005, **60**(9): 1237-1245.
- [11] 卢晓霞, 李秀利, 马杰, 等. 焦化厂多环芳烃污染土壤的强化微生物修复研究[J]. 环境科学, 2011, **32**(3): 864-869.
- [12] 刘海滨, 王翠萍, 张志远, 等. 苯并[a]芘高效降解菌筛选及其降解特性研究[J]. 环境科学, 2011, **32**(9): 2696-2702.
- [13] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986. 325-327.
- [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. 263-267.
- [15] Wang M, Markert B, Shen W, et al. Microbial biomass carbon and enzyme activities of urban soils in Beijing[J]. Environment Science and Pollution Research, 2011, **18**(6): 958-967.
- [16] Ma L L, Chu S G, Wang X T, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the surface soils from outskirts of Beijing, China [J]. Chemosphere, 2005, **58**(10): 1355-1363.
- [17] Ye B X, Zhang Z H, Mao T. Pollution sources identification of polycyclic aromatic hydrocarbons of soils in Tianjin area, China [J]. Chemosphere, 2006, **64**(4): 525-534.
- [18] 李静, 吕永龙, 焦文涛, 等. 天津滨海工业区土壤中多环芳烃的污染特征及来源分析[J]. 环境科学学报, 2008, **28**(10): 2111-2117.
- [19] 郝蓉, 彭少麟, 宋艳曦, 等. 汕头经济特区土壤中优控多环芳烃的分布[J]. 生态环境, 2004, **13**(3): 323-326.
- [20] 焦文涛, 吕永龙, 王铁宇, 等. 化工区土壤中多环芳烃的污染特征及其来源分析[J]. 环境科学, 2009, **30**(4): 1166-

- 1172.
- [21] Barbara M K. Polycyclic aromatic hydrocarbons in agricultural soils in Poland; preliminary proposals for criteria to evaluate the level of soil contamination[J]. *Applied Geochemistry*, 1996, **11** (1-2): 121-127.
- [22] Wang C P, Sun H W, Li J M, *et al.* Enzyme activities during degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons by white rot fungus *Phanerochaete chrysosporium* in soils[J]. *Chemosphere*, 2009, **77**(6): 733-738.
- [23] 刘芳, 梁金松, 孙英, 等. 高分子量多环芳烃降解菌 LD29 的筛选及降解特性研究[J]. *环境科学*, 2011, **32**(6): 1799-1804.
- [24] Sutherland J B, Selby A L, Freeman J P, *et al.* Identification of xyloside conjugates formed from anthracene by *Rhizoctonia solani* [J]. *Mycological Research*, 1992, **96**(6): 509-517.
- [25] Allan I J, Semple K T, Hare R, *et al.* Cyclodextrin enhanced biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons and phenols in contaminated soil slurries [J]. *Environmental Science and Technology*, 2007, **41**(15): 5498-5504.
- [26] Guha S, Jaffe P R, Peters C A. Bioavailability of mixtures of PAHs partitioned into the micellar phase of a nonionic surfactant [J]. *Environmental Science and Technology*, 1998, **32**(15): 2317-2324.
- [27] Guha S, Jaffe P R. Biodegradation kinetics of phenanthrene partitioned into the micellar phase of nonionic surfactants [J]. *Environmental Science and Technology*, 1996, **30**(2): 605-611.
- [28] Lee M, Fountain J C. The effectiveness of surfactants for remediation of organic pollutants in the unsaturated zone [J]. *Journal of Soil Contamination*, 1999, **8**(1): 39-62.
- [29] 李玉瑛, 李冰. 柴油污染土壤生物修复对土壤酶活性的影响 [J]. *生态环境学报*, 2009, **18**(5): 1753-1756.
- [30] Jackson W A, Pardue J H. Potential for enhancement of biodegradation of crude oil in Louisiana salt marshes using nutrient amendments[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1999, **109**(1-4): 343-355.
- [31] 肖敏. 丛枝菌根修复多环芳烃污染土壤的几种酶活性研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2009. 49-50.
- [32] 刘昌玲, 王国庆. 细菌过氧化氢酶的分离, 结晶及性质[J]. *生物化学与生物物理进展*, 1990, **17**(5): 380-383.
- [33] 武忠亮. 烟草叶片蔗糖酶的分离纯化及部分性质研究[D]. 重庆: 西南大学, 2007. 21-25.

CONTENTS

Levels and Sources of Gaseous Polybrominated Diphenyl Ethers in Air over the Northern South China Sea	LI Qi-lu, LI Jun, LIU Xiang, <i>et al.</i> (2533)
Observation and Analysis of Air Pollution in Zhangjiakou, Hebei	SHAO Ping, WANG Li-li, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (2538)
Smog Chamber Simulation of Ozone Formation from Atmospheric Photooxidation of Propane	HUANG Li-hua, MO Chuang-rong, XU Yong-fu, <i>et al.</i> (2551)
Mechanism and Performance of a Membrane Bioreactor for Treatment of Toluene Vapors	YE Qi-hong, WEI Zai-shan, XIAO Pan, <i>et al.</i> (2558)
Analysis of Odor Pollutants in Kitchen Waste Composting	ZHANG Hong-yu, ZOU Ke-hua, YANG Jin-bing, <i>et al.</i> (2563)
Spatial Changes and Sources of Nitrate in Beijing Urban Ecosystem Surface Water	XU Zhi-wei, ZHANG Xin-yu, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (2569)
Distribution Characteristics and Potential Risk of PCBs in Surface Water from Three Tributaries of Yangtze River in Different Periods	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (2574)
Distribution Characteristics and Potential Risks of Phenols in the Rainy Season Surface Water from Three Gorges Reservoir	WU Zheng-yong, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (2580)
Spatial Distribution of Perfluorooctanoic Acids and Perfluorinate Sulphonates in Surface Water of East Lake	CHEN Jing, WANG Lin-ling, ZHU Hu-di, <i>et al.</i> (2586)
Characteristics of Heavy Metal Pollution in Daninghe River and Modaoxi River of Three Gorges Reservoir Areas	AN Li-hui, ZHANG Yan-qiang, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (2592)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Surface Sediments of the Yangtze River	WANG Lan, WANG Ya-ping, XU Chun-xue, <i>et al.</i> (2599)
Analysis of the Source, Potential Biological Toxicity of Heavy Metals in the Surface Sediments from Shellfish Culture Mudflats of Rudong Country, Jiangsu Province	LI Lei, WANG Yun-long, JIANG Mei, <i>et al.</i> (2607)
Effect of Disturbance Intensity on Phosphorus Release and Its Transformation in the Sediment from Taihu Lake	LI Da-peng, HUANG Yong (2614)
Effects of Intrusions from Three Gorges Reservoir on Nutrient Supply to Xiangxi Bay	ZHANG Yu, LIU De-fu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (2621)
Influence of Perennial Flooding and Drought on Growth Restoration of <i>Acorus calamus</i> in Water-level-fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir	LI Qiang, GAO Xiang, DING Wu-quan, <i>et al.</i> (2628)
Pollution Load and the First Flush Effect of Phosphorus in Urban Runoff of Wenzhou City	ZHOU Dong, CHEN Zhen-lou, BI Chun-juan (2634)
Output Characteristics of Rainfall Runoff Phosphorus Pollution from a Typical Small Watershed in Yimeng Mountainous Area	YU Xing-xiu, LI Zhen-wei, LIU Qian-jin, <i>et al.</i> (2644)
Influence of Land Use Structure on Nitrogen Output in the Watershed of Suburban Agriculture Regions	YANG Feng, WANG Peng-ju, YANG Shan-shan, <i>et al.</i> (2652)
Simulation of Nitrogen and Phosphorus Loss in Siling Reservoir Watershed with AnnAGNPS	BIAN Jin-yun, WANG Fei-er, YANG Jia, <i>et al.</i> (2659)
GIS and L-THIA Based Analysis on Variations of Non-point Pollution in the Guanlan River Watershed, Shenzhen	BAI Feng-jiao, LI Tian-hong (2667)
Response of Sloping Water Erosion to Rainfall and Micro-earth Pattern in the Loess Hilly Area	WEI Wei, JIA Fu-yang, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (2674)
Comparison Study of Enhanced Coagulation on Humic Acid and Fulvic Acid Removal	ZHOU Ling-ling, ZHANG Yong-ji, YE He-xiu, <i>et al.</i> (2680)
Real-time PCR Detection and Quantification of Emerging Waterborne Pathogens (EWPs) and Antibiotic Resistance Genes (ARGs) in the Downstream Area of Jiulong River	WANG Qing, LIN Hui-rong, ZHANG Shu-ting, <i>et al.</i> (2685)
Quantitative and Qualitative Analysis of Total Bacteria and Ammonia-oxidizing Bacteria in Buji River in Wet Season	SUN Hai-mei, BAI Jiao-jiao, SUN Wei-ling, <i>et al.</i> (2691)
Study on the Nitrogen Removal Performance and the Characteristics of Denitrification Bacterial Community Structure of Biological Aerated Filter	PENG Xiao-lan, LIU Cong, CHEN Li-jun (2701)
Analysis of Microbial Community Structure at Full-scale Wastewater Treatment Plants by Oxidation Ditch	GUO Yun, YANG Dian-hai, LU Wen-jian (2709)
Performance and Microbial Community Dynamic Characteristics of an Internal Circulation Reactor Treating Brewery Wastewater	ZHU Wen-xiu, HUANG Zhen-xing, REN Hong-yan, <i>et al.</i> (2715)
Coupling AFM Fluid Imaging with Micro-Flocculation Filtration Process for the Technological Optimization	ZHENG Bei, GE Xiao-peng, YU Zhi-yong, <i>et al.</i> (2723)
Study on Removal Effect of Different Organic Fractions from Bio-treated Effluent of Dye Wastewater by UV/H ₂ O ₂ Process	LI Xin, LIU Yong-di, SUN Xian-bo, <i>et al.</i> (2728)
Optimization of <i>Chlorella pyrenoidosa</i> -15 Photoheterotrophic Culture and Its Use in Wastewater Treatment	WANG Xiu-jin, LI Zhao-sheng, XING Guan-lan, <i>et al.</i> (2735)
Characteristics and Mechanism of 2,4,6-TCP Degradation by the "Fe ⁰ /Enriched-Bacteria" System	DAI You-zhi, GUO Li-li, SHI Lei, <i>et al.</i> (2741)
Immobilization of Crude Laccase onto Anion Exchange Resin and Its Application in Decoloration of Malachite Green	QI Xu-liang, LIU Xiang, LIU Bo, <i>et al.</i> (2747)
Low-Temperature Preparation of TiO ₂ /PS/Fe ₃ O ₄ and Its Photocatalytic Activity and Magnetic Recovery	WANG Xue-jiao, REN Xue-chang, NIAN Juan-ni, <i>et al.</i> (2752)
Study on Catalytic Oxidation of Benzene by Microwave Heating	ZHANG Yu-cai, BO Long-li, WANG Xiao-hui, <i>et al.</i> (2759)
Synergistic Effects of Nano-sized Magnetic Particles and Uncoupler to the Characteristics of Activated Sludge	GAO Li-ying, TANG Bing, LIANG Ling-yan, <i>et al.</i> (2766)
Experimental and Modeling Research on the Settlement of Aerobic Granular Sludge	SU Kui-zu, DENG Xiu-kun, ZHENG Li, <i>et al.</i> (2773)
Analysis of Hydrolytic Enzyme Activities on Sludge Aerobic/Anoxic Digestion After Ultrasonic Pretreatment	YE Yun-di, SUN Shui-yu, ZHENG Li, <i>et al.</i> (2780)
Effect of Microbial Nutrient Concentration on Improvement of Municipal Sewage Sludge Dewaterability Through Bioleaching	SONG Yong-wei, LIU Fen-wu, ZHOU Li-xiang (2786)
Response of the Artificial Cyanobacterial Crusts to Low Temperature and Light Stress and the Micro-structure Changes Under Laboratory Conditions	RAO Ben-jiang, LI Hua, XIONG Ying, <i>et al.</i> (2793)
Seasonal Dynamics of Soil Active Carbon Pool in a Purple Paddy Soil in Southwest China	WU Yan, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (2804)
Pollution Characteristics and Accumulation of Antibiotics in Typical Protected Vegetable Soils	YIN Chun-yan, LUO Yong-ming, TENG Ying, <i>et al.</i> (2810)
Transformation and Influences of Copper and Selenium Fractions on Heavy Metals Bioavailability in Co-contaminated Soil	HU Bin, LIANG Dong-li, ZHAO Wen-long, <i>et al.</i> (2817)
Response of Soil Microbial Community to the Bioremediation of Soil Contaminated with PAHs	ZHANG, Jing, LIN Xian-gui, LIU Wei-wei, <i>et al.</i> (2825)
Bioremediation of PAHs Contaminated Soil from Beijing Coking Plant by <i>Lasiodiplodia theobromae</i>	ZHANG Zhi-yuan, WANG Cui-ping, LIU Hai-bin, <i>et al.</i> (2832)
Leaching Experiments on the Release of Trace Elements from Tailings of Chashan Antimony Mine, Guangxi, China	CAI Yong-bing, LI Ling, WEI Xiao-fei, <i>et al.</i> (2840)
Accumulation Characteristics of Arsenic in Suburban Soils of Beijing	QI Jie, WANG Mei-e, WANG Zi-qiang, <i>et al.</i> (2849)
Antioxidant Enzyme Gene Expression as Molecular Biomarkers of Exposure to Polycyclic Musks	CHEN Chun, ZHOU Qi-xing, LIU Xiao-wei (2855)
Effects of Ozone Pollution on the Accumulation and Distribution of Dry Matter and Biomass Carbon of Different Varieties of Wheat	KOU Tai-ji, YU Wei-wei, ZHU Jian-guo, <i>et al.</i> (2862)
Influence of Reaction Time of Urea Hydrolysis-Based Co-precipitation on the Structure of ZnAl Layered Double Hydroxides and the Phosphate Adsorption	LU Ying, CHENG Xiang, XING Bo, <i>et al.</i> (2868)
Competitive Adsorption Kinetics of Aqueous Pb ²⁺ and Cu ²⁺ on Nano-HAP Surfaces	HU Tian-tian, CANG Long, WANG Yu-jun, <i>et al.</i> (2875)
Effects of pH and Ni ²⁺ on Sorption Behavior of Phenanthrene on Engineered Nano-Silica	LUO Pei, SUN Hong-wen, ZHANG Peng (2882)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Uranium on Attapulgite	LIU Juan, CHEN Di-yun, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2889)
Adsorption Characteristics of Ciprofloxacin in Ustic Cambosols	CUI Hao, WANG Shu-ping (2895)
Kinetic Mechanism and Characteristics Researches for Hydrazine-based NO _x Removal at Moderate to High Temperatures	HONG Liu, CHEN De-zhen, WANG Du, <i>et al.</i> (2901)
Current Research Situation of H ₂ S Selective Catalytic Oxidation Technologies and Catalysts	HAO Zheng-ping, DOU Guang-yu, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (2909)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2012年8月15日 33卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 8 Aug. 15, 2012

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行