

# 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/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 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)

“Fe<sup>0</sup>/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)

TiO<sub>2</sub>/PS/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 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 Ni<sup>2+</sup> 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)

H<sub>2</sub>S 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)

# 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<sup>1,2</sup>, 林先贵<sup>1,2\*</sup>, 刘魏魏<sup>3</sup>, 尹睿<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院南京土壤研究所土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 南京 210008; 2. 南京土壤研究所-香港浸会大学土壤与环境联合开放实验室, 南京 210008; 3. 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

**摘要:** 采用聚合酶链式反应-变性梯度凝胶电泳 (PCR-DGGE) 方法, 研究了土壤微生物群落多样性对生物表面活性剂强化的植物-微生物联合修复多环芳烃 (PAHs) 污染土壤的响应. 结果表明, 细菌群落的 Shannon-Weaver 指数修复前为 3.17, 修复后为 3.24~3.45, 多样性整体呈上升趋势, 其中以植物-菌根真菌-降解菌处理最高, 但各处理间无显著差异 ( $P > 0.05$ ). 聚类分析结果显示, 植物、植物-鼠李糖脂、植物-菌根真菌和植物-菌根真菌-鼠李糖脂这 4 个处理的群落相似度在 90% 以上, 植物-降解菌处理与这 4 个处理群落结构最近, 此外, 植物-降解菌-鼠李糖脂、植物-降解菌-菌根真菌-鼠李糖脂群落相似度在 80% 以上. 通过测序比对, DGGE 图谱上优势及特征性条带分别为 *Bacillus*、*Pseudomonas*、*Acidobacteria*、*Sphingomonas*、*Rhodopseudomonas*、*Firmicutes* 和 *Methylocytaceae* 等, 可能是与 PAHs 降解密切相关的种属. 生物表面活性剂强化的植物-微生物联合修复污染土壤过程中, 在提高 PAHs 生物有效性基础上, 改变了土壤微生物群落结构和丰度, 从而可以有效提高 PAHs 的降解率.

**关键词:** 多环芳烃; 生物修复; 微生物群落; PCR-DGGE; 生物表面活性剂; 菌根真菌; PAHs-降解菌

中图分类号: X172; X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)08-2825-07

## Response of Soil Microbial Community to the Bioremediation of Soil Contaminated with PAHs

ZHANG Jing<sup>1,2</sup>, LIN Xian-gui<sup>1,2</sup>, LIU Wei-wei<sup>3</sup>, YIN Rui<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Joint Open Laboratory of Soil and the Environment, Institute of Soil Science and Hongkong Baptist University, Nanjing 210008, China; 3. College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

**Abstract:** The diversity of bacterial community in soil contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) was investigated during the plant-microbe remediation enhanced by biosurfactant rhamnolipids (RH), using the polymerase chain reaction-denaturing gradient gel electrophoresis (PCR-DGGE) method. The results showed that Shannon-Weaver diversity index was only 3.17 before bioremediation, and increased to 3.24-3.45 after bioremediation, in particular, highest value was found in the treatment of alfalfa (AL) inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi (AM) and PAHs-degrading bacteria (DB) among all the treatments. The clustering analysis showed that the similarities of soil bacterial community of AL, AL + RH, AL + AM and AL + AM + RH were above 90%. At the same time, the similarity of AL + DB was much closer to those of the four treatments mentioned above. Additionally, when the bacterial communities of AL + DB + RH, AL + DB + AM and AL + DB + AM + RH were grouped together, the similarities of these three treatments were also higher than 80%. By sequence alignment, it was found that the predominant and characteristic bands in DGGE patterns were closely related with PAHs-degrading bacteria, such as *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Acidobacteria*, *Sphingomonas*, *Rhodopseudomonas*, *Firmicutes*, and *Methylocytaceae*. Application of rhamnolipids in plant-microbe bioremediation not only improved the bioavailability of PAHs, but also had a simultaneous influence on the diversity of soil bacterial community, resulting in the efficient promotion of PAHs removal from soils.

**Key words:** PAHs; bioremediation; microbial community; PCR-DGGE; biosurfactant; arbuscular mycorrhizal fungi; PAHs-degrading bacteria

多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 是一类广泛存在于土壤、沉积物等环境中的持久性有机污染物, 其中一些具有潜在的三致 (致癌、致畸和致突变性) 效应. 随着苯环数增加, PAHs 降解速率越来越低, 特别是一些高分子量 PAHs (HMW-PAHs) 难以降解, 在土壤中累积, 严重危害

农产品安全和人类健康<sup>[1]</sup>.

在 PAHs 污染土壤修复技术中, 主要有 3 个类

收稿日期: 2011-10-24; 修订日期: 2011-12-04

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (40801091); 国家高技术研究发展计划 (863) 重点项目 (2007AA061101)

作者简介: 张晶 (1979~), 女, 博士, 副研究员, 主要研究方向为污染土壤生物修复技术, E-mail: zhangj79@issas.ac.cn

\* 通讯联系人, E-mail: xglin@issas.ac.cn

型:物理修复、化学修复和生物修复. 与其他 2 种修复技术相比,生物修复具有温和、对土壤理化性质破坏小、修复效率高、无二次污染等特点<sup>[2]</sup>. 目前,包括植物修复、微生物修复和植物-微生物联合修复等形式的生物修复方法广泛应用在 PAHs 土壤修复中,取得了一定的修复效果<sup>[3]</sup>. 由于疏水性 PAHs 容易吸附在土壤有机质等组分上,从而生物有效性大大降低. 为提高 PAHs 生物有效性,往往添加表面活性剂来促进 PAHs 增溶降解. 与化学表面活性剂相比,生物表面活性剂(鼠李糖脂、皂角苷等)具有成本低、绿色和可降解等特点. 目前,有关生物表面活性剂产生菌筛选及应用效果研究较多<sup>[4,5]</sup>,但是研究者对生物表面活性剂如何影响土壤中微生物群落了解很少.

土壤微生物多样性(包括结构、组成和丰度)与污染修复效率密切相关<sup>[6]</sup>,特别是细菌,在 PAHs 生物降解过程中发挥了至关重要的作用. 近年来,国内外研究者分离筛选出较为丰富的 PAHs 降解性微生物种类,主要包括芽孢杆菌(*Bacillus*)、分枝杆菌(*Mycobacterium*)、诺卡氏菌(*Nocardia*)、鞘氨醇单胞菌(*Sphingomonas*)、产碱杆菌(*Alcaligenes*)、假单胞菌(*Pseudomonas*)和黄杆菌(*Flavobacterium*)等<sup>[7]</sup>,并对一些高效降解菌的降解机制进行了深入探讨<sup>[8-10]</sup>. 已有研究报道了接种外源微生物、添加养分或种植植物等措施通过不同机制改变了土壤细菌群落的丰度、组成和结构,进而提高了 PAHs 修复效率<sup>[11-14]</sup>. 而目前,有关植物-菌根真菌-降解菌三者联合修复对微生物群落的影响报道较少.

在前期筛选出高效降解 HMW-PAHs 微生物和丛枝菌根真菌的基础上,笔者利用鼠李糖脂强化紫花苜蓿-菌根真菌-降解菌联合修复 PAHs 污染土壤,获得比较理想的修复效果:与植物单独修复 17.19% 相比,生物表面活性剂强化植物-微生物联合修复的降解率达到 60.48%,是植物单独修复的 3.52 倍<sup>[15]</sup>. 为进一步了解植物-菌根真菌-降解菌三者如何相互作用促进 PAHs 降解,土壤微生物群落组成和结构是如何响应这一过程的,特别是生物表面活性剂是否对土壤微生物群落有一定影响. 本研究中,笔者拟采用 PCR-DGGE 的分子生态学方法,探讨土壤微生物群落对生物表面活性剂强化植物-微生物联合修复过程的响应,从土壤细菌多样性变化角度,阐明该修复方法能够高效降解 PAHs 的微生物学机制,以期为 PAHs 污染土壤生物修复研究提供理论和实践指导.

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

供试土壤采自无锡某化工废水污染多年的农田表层(0~20 cm),捡出植物根系、石子等残留物,过 2 mm 不锈钢筛,充分混匀,供盆栽实验用,同时测定土壤基本理化性质,供试土壤的 pH(H<sub>2</sub>O)6.4,有机质 19.2 g·kg<sup>-1</sup>,全 N 1.3 g·kg<sup>-1</sup>,全 P 0.5 g·kg<sup>-1</sup>,全 K 14.2 g·kg<sup>-1</sup>,速效 P 3.6 mg·kg<sup>-1</sup>,速效 K 86.0 mg·kg<sup>-1</sup>,供试土壤的 PAHs 本底值为 12.85 mg·kg<sup>-1</sup><sup>[4]</sup>.

供试植物为紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)购自江苏省农业科学院牧草研究所.

供试生物表面活性剂为鼠李糖脂(rhamnolipids),浓度为 4 g·L<sup>-1</sup>,系由鼠李糖脂产生菌液体发酵所得,由南京农业大学环境工程实验室提供.

供试 PAHs 专性降解菌由中国科学院沈阳应用生态所提供. 具体为以四环芘和五环苯并[a]芘为污染物,采用液体培养基进行分离筛选,从污染土壤中分离出来的具有高效 PAHs 降解能力的土著细菌芽孢杆菌(*Bacillus* sp.)和黄杆菌(*Flavobacterium* sp.).

实验设计与处理见表 1,实验共设 9 个处理,每个处理,每个处理重复 5 次. 实验采用底部有孔的钵钵,PAHs 专性降解菌按 3% (质量分数)用量与土壤混合均匀,鼠李糖脂按 10 mL·kg<sup>-1</sup>与土壤混合均匀装盆,每盆装土 3 kg,每盆播种 10 株,盆栽实验在温室进行. 在 0 d 对修复前土壤取样,在 90 d 修复后对各处理土壤分别取样. 用土钻采集各处理 0~20 cm 深的土壤样品,由随机 10 钻作为一个混合样放入密封袋,放在 -70℃,供分子生物学实验中的 DNA 提取.

表 1 实验设计与处理

Table 1 Experimental design and details for each treatment				
样品编号	采样时间/d	紫花苜蓿	鼠李糖脂	降解菌剂 菌根真菌
1	0			
2	90			
3	90	+		
4	90	+	+	
5	90	+		+
6	90	+	+	+
7	90	+		+
8	90	+	+	+
9	90	+		+
10	90	+	+	+

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 土壤总 DNA 的提取与纯化

称取 0.5 g 土壤样品, 采用 MP FastDNA<sup>®</sup> Spin Kit for Soil (土壤基因组 DNA 提取试剂盒) 通过 Bead beating 法提取基因组总 DNA. DNA 粗提液放置在 -20℃ 保存, 备用.

### 1.2.2 基因组 DNA 的 PCR 扩增

细菌 PCR 扩增采用引物对 341-GC (CGCCCCCGCGCCCCGCGCCCGTCCCGCCGCCCGCCCGCCCGCC TACGGGAGGCAGCAG-3') 和 907R (5'-CCGTCAATTCCTTTTRAGTT-3')<sup>[16]</sup>, 以上引物均由上海捷瑞生物技术有限公司合成.

PCR 扩增体系为 50 μL 体积, 其中含有 1 × Ex Taq Buffer, dNTP 200 μmol · L<sup>-1</sup>, 引物各 20 pmol, DNA 模板 100 ng, Ex Taq 聚合酶 1.25 U (TaKaRa). PCR 反应在 PTC-200 PCR 仪 (Bio-Rad) 进行, 温度程序如下: 预变性条件为 95℃ 5 min, 并在 95℃ 0.5 min, 45℃ 0.5 min, 72℃ 1 min 条件下运行 35 个循环, 然后 72℃ 条件下延伸 10 min<sup>[16]</sup>.

### 1.2.3 DGGE 分析

DGGE 采用 D-Code system (Bio-Rad), 6% 聚丙烯酰胺凝胶, 细菌 PCR 产物的变性梯度为 30% ~ 65%, (100% 变性相当于 7 mol · L<sup>-1</sup> 尿素和 40% 去离子甲酰胺), PCR 产物加样量 20 μL, 在 60℃、1 × TAE、200V 条件下电泳 5 h, 电泳胶片利用 SYBR Green I 荧光染料染色. 采用 Bio-Rad 凝胶成像分析系统观察样品的电泳条带并拍照. 用 DGGE 图像分析软件 Quantity One (4.2.3) 对图谱进行分析.

### 1.2.4 切胶、测序和同源性比对

选择 DGGE 胶上比较亮和特异性的条带, 进行切胶回收, 从回收 DNA 后再次进行 PCR 扩增, 并用 DGGE 检查再扩增结果与切胶前迁移位置是否一致. 确认后, 使用引物对 (无 GC 夹) 按 PCR 条件重新进行扩增并纯化, 送上海生工生物工程技术有限公司测序. 用 BLAST 软件在 GenBank 数据库中进行相似性比较, 获取同源性较高的相关菌株 16S rRNA 基因序列.

### 1.3 细菌多样性指数的计算

利用 DGGE 图谱的数字化结果计算土壤样品中细菌群落结构的 Shannon-Weaver 多样性指数  $H' = - \sum (P_i \lg P_i)$ , 其中  $P_i = n_i / N$ , 式中,  $n_i$  为某个带的峰强度,  $N$  为该带所在泳道的所有带峰强度之和. 同时将各土壤样品的条带转为 0、1 矩阵, 利用 PHYLIP 3.0 和 TREEVIEW 软件, 采用非加权成对

算术平均法 (UPGMA) 对所有土壤样品进行聚类分析<sup>[17]</sup>.

## 2 结果与分析

在 PAHs 污染的农田土壤中, 细菌是主要的微生物类群, 也是 PAHs 降解的重要贡献者. 本研究采用对多数细菌 16S rDNA 基因片断具有特异性的引物, 对供试土壤细菌基因组 DNA 进行特异性扩增, 其 PCR 扩增产物的 DGGE 图谱如图 1 所示. 经过 Shannon-Weaver 多样性指数分析 (图 2) 可知, 与修复前相比, 各处理细菌群落多样性指数在修复后不同程度增加, 其中以植物-菌根真菌-降解菌处理的最高, 而其他各单独和联合处理之间的差异并不显著. 修复前, 土壤细菌多样性指数仅为 3.17, 经过 90 d 修复处理后, 除 4 号 (植物-鼠李糖脂), 包括无处理对照在内的各单独和联合处理的多样性指数略有增加, 其中植物-菌根真菌-降解菌的多样性指数最高, 在此基础上添加鼠李糖脂, 多样性指数反而略有降低, 分别为 3.45 和 3.41, 其他处理多样性指数在 3.24 左右. 但从整体来看, 各生物修复强化措施提高了土壤细菌多样性指数, 但是其影响并不明显 ( $P$

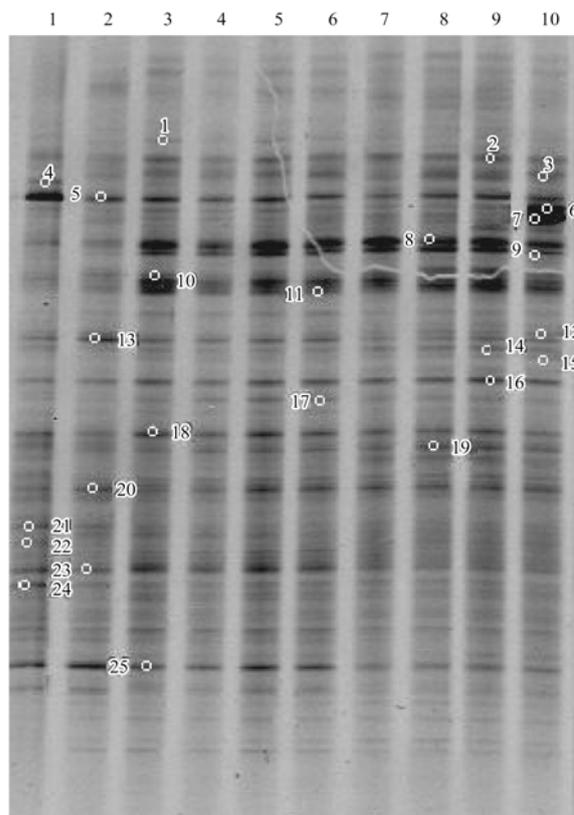


图 1 不同处理土壤细菌群落 DGGE 图谱

Fig. 1 DGGE pattern of soil bacterial community in soils with different treatments

>0.05).

DGGE 指纹图谱的相似性聚类分析(图3)也显示出,经过不同生物修复强化措施,土壤微生物群落结构和丰度分别发生了一系列变化.1号和2号土壤样品聚在一起,显示出无处理对照土壤在0 d和90 d的土壤细菌群落结构最为接近,群落结构相似度为75%;3~6号中细菌群落结构相似度在90%以上,说明添加鼠李糖脂和接种菌根真菌的单独或联合作用并没明显改变土壤细菌群落组成和结构.同时,7号(植物-降解菌联合修复)中的细菌群落结构相似度与这4个处理群落结构最近.此外,8~10号土样中细菌群落相似度在80%以上.值得注意的是,3~10号土壤微生物群落结构与1号仅有68%的相似度,说明经过不同生物修复过程,土壤样品微生物群落结构发生变化,与后者的相似程度降低.

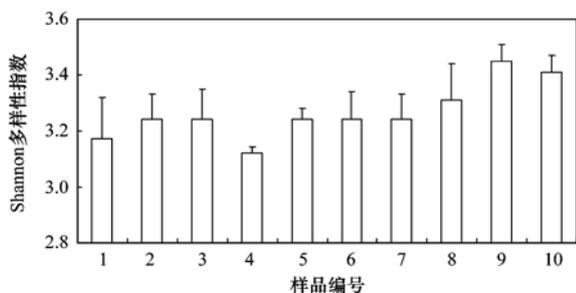


图2 PAHs 污染土壤细菌多样性指数

Fig. 2 Shannon-Weaver index of soil bacterial diversity

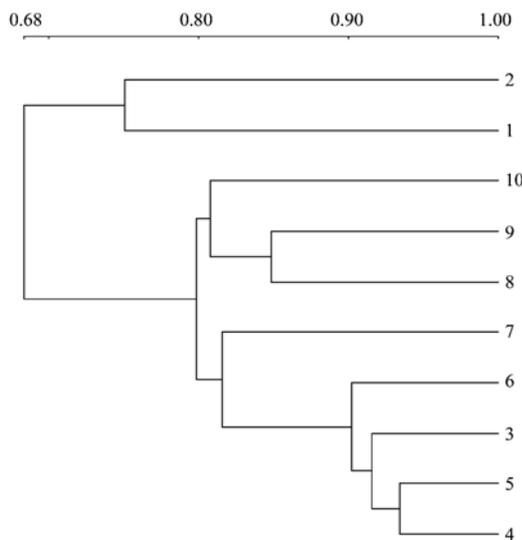


图3 土壤细菌 DGGE 图谱的聚类分析

Fig. 3 Cluster analysis of bacterial population in different treatments

将 DGGE 图谱中的优势和特异性条带切割下来,重新 PCR 扩增,测序比对结果如表2所示,修复前后,土壤微生物群落组成、结构和丰度发生了一系列的改变.其中,土壤中原有的某些微生物优势条

带(例如条带4、5、24、25)的亮度经过不同修复措施后逐渐降低,而一些非优势微生物种类得到不同程度的富集,反映在图谱中某些条带(例如条带6、7、8、9、10)亮度加大.4号条带为不可培养的芽孢杆菌,出现在修复前对照土壤中,但是在修复后,条带均消失.条带5为不可培养的氨氧化细菌,属于优势条带,而在修复后各处理中条带强度变弱,且在10号处理(鼠李糖脂强化紫花苜蓿-菌根真菌-降解菌联合修复),成为弱势条带,推测其可能不是PAHs的优势降解菌.条带6和7分别为假单胞菌和不可培养的芽孢杆菌,是10号处理(鼠李糖脂强化紫花苜蓿-菌根真菌-降解菌联合修复)的优势条带,在修复前后的其他处理中这2种条带所代表的微生物也存在,但丰度较小.8、9、10和11号条带与亚硝化螺菌、酸杆菌、厚壁杆菌和鞘氨醇单胞菌密切相关,两者在3~10号处理中亮度明显增加,而在修复前后无处理对照中的亮度降低,可能受植物根系分泌物影响较大.

### 3 讨论

本研究中,利用生物表面活性剂强化植物-微生物联合修复方法,综合了生物刺激,生物放大,植物修复和根际修复等多个过程,具有最高降解效率(60.48%)<sup>[15]</sup>.由于接种的降解菌剂是由高效降解四环和五环PAHs的微生物组成,该方法在90 d内对HMW-PAHs降解率也高达64.11%,其中荧蒽,芘和苯并[a]芘的降解率都在85%以上.多数植物修复或微生物修复或多过程修复方法的修复效率多在20%~60%左右<sup>[18,19]</sup>,而HMW-PAHs的降解率则更低.生物表面活性剂强化植物-微生物联合修复方法,无论是PAHs总量或HMW-PAHs的降解率在已有报道中都处在较高水平.

植物-微生物联合修复,主要包括植物-菌根真菌和植物-降解菌联合修复.植物根系分泌物的主要组分是一些小分子有机酸、氨基酸和糖类等,一方面它们作为根际微生物生长代谢的碳源和能源,刺激根际微生物数量的增加<sup>[20]</sup>,另一方面,它们可作为HMW-PAHs降解的共代谢底物,从而提高其生物降解率<sup>[21,22]</sup>.菌根真菌通过影响根段长度、植物水分含量、根内氧化还原酶活性、根系分泌物组成和含量等途径改变了植物对污染物的吸收与微生物对污染物的降解,同时促进根际微生物数量和活性增加,进一步提高了污染物的生物降解速率<sup>[23]</sup>.Corgié等<sup>[24]</sup>发现*Glomus mosseae* BEG 69 侵染根部后,改变

表 2 细菌 16S rDNA 片段 DGGE 回收条带序列分析  
Table 2 Sequence analysis of bands excised from DGGE gels

条带编号	序列相关的微生物	相似性/%	接收编号
1	<i>Bacillus funiculus</i>	100	AB271137
2	Uncultured <i>Pseudomonas</i> sp.	100	EU026406
3	Uncultured bacterium clone DS3-70	100	DQ463249
4	Uncultured <i>Bacillus</i> sp.	95	FJ493061
5	Uncultured ammonia-oxidizing bacterium DGGE-SC-TNF-E1	100	AF157734
6	<i>Pseudomonas tolaasii</i>	100	EF154274
7	Uncultured <i>Bacillus</i> sp.	100	EU043767
8	Uncultured <i>Nitrosospira</i> sp. clone S6a	100	AY605675
9	Uncultured <i>Acidobacteria</i> bacterium	100	EF663355
10	Uncultured <i>Firmicutes</i> bacterium clone GASP-WC1W1_D10	100	EF074651
11	<i>Sphingomonas</i> sp. IMER-A2-12	100	FJ436425
12	Uncultured actinobacterium	100	AY694692
13	Uncultured <i>Acidobacteria</i> bacterium clone	100	FJ870595
14	<i>Rhodopseudomonas</i> sp. TUT3615	100	AB498822
15	Uncultured soil bacterium clone RFS-C268	99	DQ154582
16	Uncultured <i>Methylocystaceae</i> bacterium clone	100	EF020129
17	Uncultured soil bacterium clone L1A. 12G08	100	AY989427
18	Uncultured actinobacterium clone	100	EU298919
19	Uncultured <i>Acidobacteria</i> bacterium clone	100	EU628689
20	Uncultured <i>Firmicutes</i>	100	EU299959
21	Uncultured bacterium clone	100	EU137532
22	Uncultured <i>Nitrosospira</i> sp. isolate DGGE gel band F7	100	DQ421795
23	<i>Pseudomonas fluorescens</i> strain 2R37	99	EF178447
24	Uncultured soil bacterium clone Te128-3	100	AY242652
25	Uncultured soil bacterium clone CWT ST03_C06G	100	DQ129215

了根际细菌群落结构组成和数量,特别是增加了 PAHs 降解菌数量。外源接种 PAHs 降解菌与根系分泌物相互作用,进一步提高土壤 PAHs 在土壤中降解速率<sup>[22]</sup>。Cunliffe 等<sup>[25]</sup>发现,接种 PAHs 降解菌鞘酯菌 *Sphingobium yanoikuyae* B1 于老化、新添加和无 PAHs 污染这 3 种土壤中,因为土壤微生物群落功能冗余机制的存在,不会引起三者土著微生物群落大范围变化。本实验中,接种的降解菌剂含有数量基本对等的芽孢杆菌属和黄杆菌属,但是在 DGGE 谱图中,仅检测到芽孢杆菌属微生物,并未检测到黄杆菌属,一方面,这可能由于分子生物学方法有一定的局限,仅能检出样品中的优势条带,而丰度低的种类则难以被检出,另一方面,可能由于黄杆菌属在土著微生物群落中本来就并非优势菌群,受环境因子限制以及土壤土著微生物的竞争,无法在土壤中有效定殖存活。

老化污染土壤中,PAHs 生物有效性降低,是污染土壤的重要物理化学特性之一。生物表面活性剂可通过增溶作用,促进难溶的疏水 PAHs 降解,同时对微生物不产生毒害作用,且在土壤中无残留<sup>[26]</sup>。已有报道有关添加生物表面活性剂对土壤微生物群

落的影响少见报道。González 等<sup>[27]</sup>采用可培养和不可培养技术对化学表面活性剂对石油污染土壤 PAHs 降解菌群落的生态效应进行探讨,发现假单胞菌属和寡养单胞菌属是 Tergitol NP-10 处理的可培养优势菌群,肠杆菌属和寡养单胞菌属是 Tween 80 处理的可培养优势菌群。其 DGGE 图谱结果显示,PAHs 含量变化对细菌群落结构影响不大,其主要变化菌群为假单胞菌属、鞘氨醇单胞菌属、鞘酯菌属和单胞菌属等。Wan 等<sup>[28]</sup>在研究  $\beta$ -环糊精强化电动修复石油烃污染土壤时,发现在  $200 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$  条件下,10 d 内石油烃降解率达到 37%,土壤微生物群落主要包括芽孢杆菌属、芽胞八叠球菌属、链霉菌属、拟杆菌属、固氮根瘤菌属、整形杆菌属和威廉姆斯氏菌属等。本实验中,与植物修复相比,添加鼠李糖脂处理的土壤细菌群落组成与结构无明显差异,说明鼠李糖脂对污染土壤土著细菌群落多样性的影响相对有限。其他结果也发现,单独添加鼠李糖脂在 PAHs 去除方面受到一定局限,甚至有时还会增加土壤中可提取 PAHs 含量,降低土壤微生物整体活性<sup>[29]</sup>,这可能与污染土壤中缺乏一定数量的 PAHs 降解菌,无法有效发挥作用有关。

本研究中,通过修复处理的细菌群落多样性指数不同程度增加,组成和结构发生了一定程度的改变,其中大部分优势和特征条带代表的土壤微生物是不可培养的,且一些微生物种类与 PAHs 降解密切相关,例如:芽孢杆菌、鞘氨醇单胞菌和假单胞菌等. Lora 等<sup>[30]</sup>指出土壤细菌群落在修复过程中是不断进化的,对降解 PAHs 有降解作用的细菌主要属于  $\gamma$ -变形菌纲,而  $\beta$ -变形菌纲可能是该过程的重要生物标志物. 由于细菌功能冗余的存在,细菌群落多样性指数的增加对修复效果的可能是正面或负面的,同样,其对土壤微生物特征的影响也取决于细菌功能冗余程度的大小<sup>[31]</sup>. 本研究由于 DGGE 方法本身的局限性,只能观察到修复前后细菌群落多样性的整体变化,无法确认土壤细菌群落中执行 PAHs 降解功能的主要类群. 未来工作重点主要集中在,利用稳定同位素探针技术,在<sup>13</sup>C 标记 PAHs 培养实验基础上,确定原位修复过程活跃代谢 PAHs 的微生物种类.

#### 4 结论

鼠李糖强化紫花苜蓿-菌根真菌-降解菌联合修复过程,土壤细菌群落多样性的组成和结构发生了不同程度变化. 虽然生物修复强化措施对土壤细菌多样性指数的影响并不明显,但相似性聚类分析显示出明显的群落结构分异. 细菌群落中的优势及特征性条带分别与芽孢杆菌、鞘氨醇单胞菌和假单胞等种属 PAHs 降解密切相关,从而大大提高了 PAHs 降解效率.

致谢:感谢中国科学院沈阳应用生态所台培东研究员提供的多环芳烃降解菌菌剂,感谢南京农业大学占新华副教授提供的鼠李糖脂发酵液.

#### 参考文献:

- [ 1 ] Dong T T T, Lee B K. Characteristics, toxicity, and source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in road dust of Ulsan, Korea [J]. *Chemosphere*, 2009, **74**(9): 1245-1253.
- [ 2 ] 程国玲, 李培军, 王凤友, 等. 多环芳烃污染土壤的植物与微生物修复研究进展 [J]. *环境污染治理技术与设备*, 2003, **4**(6): 30-36.
- [ 3 ] Mohan S V, Kisa T, Ohkuma T, *et al.* Bioremediation technologies for treatment of PAH-contaminated soil and strategies to enhance process efficiency [J]. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 2006, **5**(4): 347-374.
- [ 4 ] 姜萍萍, 郭楚玲, 党志, 等. 鼠李糖脂与疏水底物及其降解菌的相互作用 [J]. *环境科学*, 2011, **32**(7): 2144-2151.
- [ 5 ] Bordas F, Lafrance P, Villemur R. Conditions for effective removal of pyrene from an artificially contaminated soil using *Pseudomonas aeruginosa* 57SJ rhamnolipids [J]. *Environmental Pollution*, 2005, **138**(1): 69-76.
- [ 6 ] Jain R K, Kapur M, Labana S, *et al.* Microbial diversity: application of micro organisms for the biodegradation of xenobiotics [J]. *Current Science*, 2005, **89**(1): 101-111.
- [ 7 ] 邹德勋, 骆永明, 徐凤花, 等. 土壤环境中多环芳烃的微生物降解及联合生物修复 [J]. *土壤*, 2007, **39**(3): 334-340
- [ 8 ] Haritash A K, Kaushik C P. Biodegradation aspects of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs): a review [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **169**(1-3): 1-15.
- [ 9 ] 温洪宇, 廖银章, 李旭东. 微生物降解多环芳烃的研究进展 [J]. *微生物学杂志*, 2005, **25**(6): 73-75.
- [ 10 ] Fernández-Luqueño F, Valenzuela-Encinas C, Marsch R, *et al.* Microbial communities to mitigate contamination of PAHs in soil-possibilities and challenges: a review [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2011, **18**(1): 12-30.
- [ 11 ] Kahng H Y, Oh K H. Molecular detection of catabolic genes for polycyclic aromatic hydrocarbons in the reed rhizosphere of suncheon bay [J]. *Journal of Microbiology*, 2005, **43**(6): 572-576.
- [ 12 ] Wu Y C, Luo Y M, Zou D X, *et al.* Bioremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons contaminated soil with *Monilinia* sp.: degradation and microbial community analysis [J]. *Biodegradation*, 2008, **19**(2): 247-257.
- [ 13 ] Wu N Y, Zhang S Z, Huang H L, *et al.* Enhanced dissipation of phenanthrene in spiked soil by arbuscular mycorrhizal alfalfa combined with a non-ionic surfactant amendment [J]. *Science of the Total Environment*, 2008, **394**(2-3): 230-236.
- [ 14 ] Zucchi M, Angiolini L, Borin S, *et al.* Response of bacterial community during bioremediation of an oil-polluted soil [J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2003, **94**(2): 248-257.
- [ 15 ] Zhang J, Yin R, Lin X G, *et al.* Interactive effect of biosurfactant and microorganism to enhance phytoremediation for removal of aged polycyclic aromatic hydrocarbons from contaminated soils [J]. *Journal of Health Science*, 2010, **56**(3): 257-266.
- [ 16 ] Ishii K, Fukui M, Takii S. Microbial succession during a composting process as evaluated by denaturing gradient gel electrophoresis analysis [J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2000, **89**(5): 768-777.
- [ 17 ] 陈灏, 唐小树, 林洁, 等. 不经培养的农田土壤微生物种群构成及系统分类的初步研究 [J]. *微生物学报*, 2002, **42**(4): 479-483.
- [ 18 ] Andreoni V, Gianfreda L. Bioremediation and monitoring of aromatic-polluted habitats [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2007, **76**(2): 287-308.
- [ 19 ] Huang X D, El-Alawi Y, Penrose D M, *et al.* A multi-process phytoremediation system for removal of polycyclic aromatic hydrocarbons from contaminated soils [J]. *Environmental Pollution*, 2004, **130**(3): 465-476.

- [20] Fan S X, Li P J, Gong Z Q, *et al.* Promotion of pyrene degradation in rhizosphere of alfalfa (*Medicago sativa* L.) [J]. *Chemosphere*, 2008, **71**(8): 1593-1598.
- [21] Jøner E J, Johansen A, Loibner A P, *et al.* Rhizosphere effects on microbial community structure and dissipation and toxicity of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in spiked soil [J]. *Environmental Science and Technology*, 2001, **35**(13): 2773-2777.
- [22] Sheng X F, Gong J X. Increased degradation of phenanthrene in soil by *Pseudomonas* sp. GF3 in the presence of wheat [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, **38**(9): 2587-2592.
- [23] Rabie G H. Role of arbuscular mycorrhizal fungi in phytoremediation of soil rhizosphere spiked with poly aromatic hydrocarbons [J]. *Mycobiology*, 2005, **33**(1): 41-50.
- [24] Corgié S C, Fons F, Beguiristain T, *et al.* Biodegradation of phenanthrene, spatial distribution of bacterial populations and dioxygenase expression in the mycorrhizosphere of *Lolium perenne* inoculated with *Glomus mosseae* [J]. *Mycorrhiza*, 2006, **16**(3): 207-212.
- [25] Cunliffe M, Kertesz M A. Effect of *Sphingobium yanoikuyae* B1 inoculation on bacterial community dynamics and polycyclic aromatic hydrocarbon degradation in aged and freshly PAH-contaminated soils [J]. *Environmental Pollution*, 2006, **144**(1): 228-237.
- [26] 刘魏魏, 尹睿, 林先贵, 等. 生物表面活性剂-微生物强化紫花苜蓿修复多环芳烃污染土壤 [J]. *环境科学*, 2010, **31**(4): 1079-1084.
- [27] González N, Simarro R, Molina M C, *et al.* Effect of surfactants on PAH biodegradation by a bacterial consortium and on the dynamics of the bacterial community during the process [J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(20): 9438-9446.
- [28] Wan C L, Du M A, Lee D J, *et al.* Electrokinetic remediation and microbial community shift of  $\beta$ -cyclodextrin-dissolved petroleum hydrocarbon-contaminated soil [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2011, **89**(6): 2019-2025.
- [29] 张晶, 林先贵, 李焯楨, 等. 菇渣和鼠李糖脂联合强化苜蓿修复多环芳烃污染土壤 [J]. *环境科学*, 2010, **31**(10): 165-172.
- [30] Lors C, Ryngaert A, Périé F, *et al.* Evolution of bacterial community during bioremediation of PAHs in a coal tar contaminated soil [J]. *Chemosphere*, 2010, **81**(10): 1263-1271.
- [31] Girvan M S, Campbell C D, Killham K, *et al.* Bacterial diversity promotes community stability and functional resilience after perturbation [J]. *Environmental Microbiology*, 2005, **7**(3): 301-313.

## 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 <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 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 <sup>0</sup> /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 <sub>2</sub> /PS/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> 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 <sup>2+</sup> and Cu <sup>2+</sup> on Nano-HAP Surfaces .....	HU Tian-tian, CANG Long, WANG Yu-jun, <i>et al.</i> (2875)
Effects of pH and Ni <sup>2+</sup> 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 <sub>x</sub> Removal at Moderate to High Temperatures .....	HONG Liu, CHEN De-zhen, WANG Du, <i>et al.</i> (2901)
Current Research Situation of H <sub>2</sub> 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