

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第10期

Vol.33 No.10

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

淀山湖百年营养演化历史及营养物基准的建立	李小平, 陈小华, 董旭辉, 董志, 孙敦平 (3301)
矿化度作为蒙新高原湖泊营养物基准影响指标的可行性	席北斗, 张亚丽, 许秋瑾 (3308)
小波分析在湖泊常见浮游藻荧光识别测定中的应用	张翠, 苏荣国, 宋志杰, 张珊珊, 王修林 (3314)
湖面亮温对巢湖水华影响的遥感监测分析	张红, 黄勇, 李堃 (3323)
基于地下水暴露途径的健康风险评价及修复案例研究	姜林, 钟茂生, 贾晓洋, 夏天翔, 姚珏君, 樊艳玲, 张丽娜, 唐振强 (3329)
基于多生物标志物污染指数法的北部湾潮间带污染程度评价	杜秀萍, 孟范平, 王志峰, 李祥蕾, 杨菲菲, 程凤莲, 杨跃志, 李正炎 (3336)
东海无机氮排海通量年际变化估算	吴家林, 方倩, 石晓勇, 李克强, 张传松, 王修林 (3344)
海洋酸化对大型海藻生长以及磷酸盐、硝酸盐吸收利用的影响	于娟, 张瑜, 杨桂朋, 田延旺 (3352)
北黄海表层沉积物中颗粒态磷的形态分布	孟佳, 姚庆祯, 陈洪涛, 于志刚 (3361)
湖泊疏浚对沉积物再悬浮及磷迁移影响的模拟研究	余居华, 钟继承, 张银龙, 范成新, 何伟, 张雷, 唐阵武 (3368)
降雨条件下岩溶泉水中悬浮颗粒物的运移特征及来源分析	杨平恒, 刘子琦, 贺秋芳 (3376)
三峡水库试验性蓄水前后大宁河富营养化状态比较	张佳磊, 郑丙辉, 刘录三, 王丽婧, 吴光应 (3382)
三峡库区不同土地利用类型氮磷流失特征及其对环境因子的响应	曾立雄, 黄志霖, 肖文发, 田耀武 (3390)
山地城市地表径流源区水质特征监测研究	李立青, 单保庆, 赵建伟, 郭树刚, 高勇 (3397)
唐山开滦煤矿区土壤及地表水中 Se 元素赋存状态及其生态效应研究	张秀芝, 马忠社, 王荫楠, 王志军, 谢伟民 (3404)
西藏地表水中砷的分布	王明国, 李社红, 王慧, 肖唐付, 郑宝山 (3411)
锡林河流域地表水痕量元素的时空分布	薛丽洋, 吴锦奎, 张明泉, 丁永建, 叶柏生 (3417)
天津滨海地区表层沉积物中持久性有机污染物的含量特征与生态风险	卢晓霞, 张姝, 陈超琪, 侯珍, 杨君君 (3426)
松花江流域河流沉积物中多氯联苯的分布、来源及风险评价	聂海峰, 赵传冬, 刘应汉, 彭敏, 李括, 杨柯, 刘飞 (3434)
长江口近岸表层沉积物中基质结合态磷化氢的分布特征	李涛, 侯立军, 刘敏, 赵迪, 尹国宇, 郑艳玲, 赵慧 (3443)
烟台四十里湾柱状沉积物氮形态地球化学特征	杨玉玮, 高学鲁, 李培苗 (3449)
黄河口湿地土壤中正构烷烃分子指标及物源指示意义	姚鹏, 尹红珍, 姚庆祯, 陈洪涛, 刘月良 (3457)
含藻水中壬基酚的光降解转化研究	彭章娥, 冯劲梅, 何淑英, 吴峰 (3466)
硝酸铁-过硫酸盐改性 GAC 催化 H ₂ O ₂ 氧化橙黄 IV	张瑛洁, 徐淑芬, 廖霞, 曹天静, 杨榕, 李大鹏 (3473)
Pd/CMK-3 的合成、表征及对甲酸的电催化氧化性能研究	还中科, 宗恩敏, 魏丹, 万海勤, 郑寿荣, 许昭怡 (3479)
曝气稳定塘处理农村生活污水曝气控制条件研究	李怀正, 姚淑君, 徐祖信, 陈卫兵 (3484)
以亲水化改性聚氨酯为多孔载体的生物膜移动床反应器处理污水中试研究	王玉晓, 孔秀琴, 冯权, 卢海涛, 王德源, 唐黎明, 邢新会 (3489)
光催化降解渗滤液 DOM 不同组分的相对分子量变化特征	贾陈忠, 王焰新, 张彩香 (3495)
短程硝化-反硝化生物滤池脱氮机制研究	孙迎雪, 徐栋, 田媛, 李燕飞 (3501)
CANON 反应器运行稳定性及温度冲击的影响	付昆明, 张杰, 曹相生, 李冬, 孟雪征 (3507)
MUCT 工艺全程硝化和短程硝化模式下反硝化除磷研究	曾薇, 王向东, 张立东, 李博晓, 彭永臻 (3513)
活性污泥胞外聚合物 (EPS) 的分层组分及其理化性质的变化特征研究	袁冬琴, 王毅力 (3522)
有机负荷条件对间歇式气提内循环反应器中好氧颗粒污泥形成的影响	刘孟媛, 周丹丹, 高琳琳, 马德方, 张予萌, 李克宇 (3529)
厌氧污泥降解蔡动力学与生物多样性研究	曹新垲, 杨琦, 郝春博 (3535)
雌二醇在土壤/沉积物中的吸附特征及猪粪 DOM 对吸附的影响	张丰松, 李艳霞, 黄泽春, 杨明 (3542)
近海沉积物对粪固醇的等温吸附和热力学研究	张晓蕾, 薛文平, 徐恒振, 马新东 (3547)
甲苯在北京褐潮土中的运移分布及其 STOMP 模拟研究	韩春媚, 冉娟, 张慧, 李发生, 李雁, 谷庆宝 (3554)
聚丙烯酸钠为结合相的梯度扩散薄膜技术预测甘蔗田土壤中镉的生物有效性	王芳丽, 宋宁宁, 赵玉杰, 张长波, 沈跃, 刘仲齐 (3562)
土壤改良剂及其组合原位钝化果园土壤中的 Pb、Cd	汤民, 张进忠, 张丹, 陈舜, 张训, 刘万平, 余建 (3569)
基于不同通车时间的路旁土壤重金属健康风险:以连霍高速郑州—商丘段为例	谷蕾, 全致琦, 宋博, 马建华 (3577)
生活污水污泥制备的生物质炭对红壤酸度的改良效果及其环境风险	卢再亮, 李九玉, 姜军, 徐仁扣 (3585)
沉积物中多环芳烃对反硝化功能基因垂直分布的影响	吴艳阳, 黄珊, 叶嘉欣, 张恒军, 张仁铎 (3592)
阴离子黏土(层状双氢氧化物)对鲢鱼精 DNA 在重金属作用下的保护作用研究	唐旖旎, 吴平霄, 朱能武 (3598)
预处理后生物成因施氏矿物的矿物学特征及对 As(III) 吸附的影响	梁剑茹, 李浙英, 刘奋武, 周立祥 (3606)
铜绿假单胞菌 ZGKD2 的重金属耐性机制研究	张玉秀, 王姣, 柴团耀, 张倩, 刘金光, 李霞, 白志强, 苏增健 (3613)
1 株 1,2-二氯乙烷降解菌的分离及降解特性研究	王小春, 陈东之, 金小君, 陈建孟 (3620)
PCBs 降解菌的筛选及其降解特性研究	史舜燕, 冯流, 龚吉 (3627)
青草沙水库蓄水期间细菌群落结构变化的初步研究	彭青, 谢冰, 袁琦, 黄智婷, 崔璐璐, 王文婷 (3634)
华北平原玉米-小麦轮作农田 N ₂ O 交换通量的研究	裴淑玮, 张圆圆, 刘俊锋, 伦小秀, 牟玉静 (3641)
影响南京地区的两次典型空气污染过程分析	王飞, 朱彬, 康汉清, 高晋徽, 王瑛, 江琪 (3647)
济南市夏季环境空气 VOCs 污染特征研究	刘泽常, 张帆, 侯鲁健, 刘玉堂, 吕波 (3656)
活性炭分解臭氧机制研究	刘海龙, 张智辉, 张忠明, 焦媛媛, 王瑞军 (3662)
大气 O ₃ 浓度升高对 2 种基因型矮菜豆丛枝菌根 (AM) 结构及球囊霉素蛋白产生的影响	王鹏腾, 刁晓君, 王曙光 (3667)
铝胁迫下外源钙对外生菌根真菌抗氧化保护酶活性的影响	王明霞, 黄建国, 袁玲, 周志峰 (3675)
锌冶炼不同群落生境蟋蟀汞污染	郑冬梅, 李昕馨, 罗庆 (3680)
《环境科学》征订启事 (3313) 《环境科学》征稿简则 (3322) 信息 (3328, 3512, 3561, 3640)	

PCBs 降解菌的筛选及其降解特性研究

史舜燕, 冯流, 龚吉

(北京化工大学化学工程学院, 北京 100029)

摘要: 采用富集培养的方法从多氯联苯(PCBs)污染土壤中筛选到 1 株高效降解 PCBs 的细菌, 命名为 PS-11。经 16S rDNA 初步鉴定, 此菌株属于嗜麦芽寡养单胞菌(*Stenotrophomonas maltophilia*)。结果表明, 菌株 PS-11 能够以 PCBs 作为唯一碳源生长并且能够降解 PCBs, 菌株 PS-11 对 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ PCB52 4 d 的降解率为 31.1%, 7 d 的降解率可达 52.9%; 对难降解的高氯代多氯联苯 PCB153 7 d 的降解率为 10.9%。此外, 该菌株的环境耐受性比较好, 在 30°C 、pH 为 7~9、PCB52 浓度为 $2 \sim 10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的条件下生长较快、降解效果较好, 尤其在 pH 7、PCB52 浓度为 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时降解率最高; 碳源种类不同, 菌株 PS-11 的生长能力也不同, 其中在以蔗糖为碳源时 PS-11 的生长能力最强, 以葡萄糖为碳源时 PS-11 的适应期最短, 且蔗糖、葡萄糖和 Tween-80 均可提高 PS-11 对 PCB52 的降解率; 同时菌株 PS-11 还可耐受一定浓度的重金属, 其耐受性大小为 $\text{Pb}^{2+} > \text{Cd}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Cu}^{2+}$ 。

关键词: 多氯联苯; 降解菌分离; 培养条件; 碳源; 重金属

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)10-3627-07

Isolation and Degradation Characteristics of PCB-degrading Strain

SHI Shun-yan, FENG Liu, GONG Ji

(College of Chemical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: A new PCB-degrading bacterial strain named PS-11 was isolated from soil contaminated with PCBs by enrichment culture. The strain was identified as *Stenotrophomonas maltophilia* according to the results of the analyses of 16S rDNA sequence. It was observed that the degradation rate of PCB52 by strain PS-11 was 31.1% after 4 days and 52.9% after 7 days in cultures containing $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ PCB52. The degradation rate was 10.9% for $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ refractory PCB153 after 7 days. In addition, the strain showed very good environmental tolerance. It could grow and degrade PCB52 in the culture medium at 30°C and pH 7-9 with PCB52 concentrations of $2 \sim 10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, especially, pH 7 and $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ PCB52 was found to be the best condition for cell growth and degradation. The growth of strain PS-11 was affected by different carbon sources. The strain showed best growth when sucrose was used as carbon source and the shortest lag time was observed when glucose was used as carbon source. In addition, sucrose, glucose and Tween-80 could increase the degradation rate of PCB52 by PS-11. Further study showed that the strain PS-11 could resist some heavy metal ions at high concentrations, the tolerance in a descending order was: $\text{Pb}^{2+} > \text{Cd}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Cu}^{2+}$.

Key words: PCBs; isolation of degrading strain; culture condition; carbon source; heavy metal ions

多氯联苯(PCBs)是目前国际上关注的 12 种持久性有机污染物(POPs)之一。由于 PCBs 分子中氯原子的存在, 使其很难被生物降解, 半衰期为几年到几十年。另外, PCBs 通过食物链的传递在生物细胞中富集且对生物体有致癌、致畸和致突变等作用, 目前已在空气、水、土壤、沉积物、鱼、野生动植物和人体脂肪组织、牛奶、血清检测到 PCBs^[1~5]。PCBs 的毒理研究表明^[6], 随着 PCBs 中含氯原子数的增多, 毒性增大, 在环境中的稳定性增强, 更难被降解。因此, PCBs 的难降解、高毒性和高生物富集性, 并以混合物的存在形式等特点, 对生态系统产生长期影响, 导致污染治理的难度大。

目前, 对 PCBs 污染的修复方法主要包括封存、高温处理、化学处理和生物降解^[7~9], 其中微生物降解法最具潜力。微生物法具有廉价、易操作等优点, 尤其可以实施原位修复^[10]。PCBs 的微生物降

解包括厌氧降解和好氧降解^[11]。一般来说, 高氯(≥ 5 个氯) PCBs 因其稳定性更高, 疏水性更强, 可被微生物厌氧降解^[12], 其途径主要是脱氯^[13]。而低氯 PCBs 很少发生厌氧脱氯, 但通过好氧降解可以破坏苯环结构^[14]。

由于 PCBs 对微生物具有毒性, 因此能够筛选出对 PCBs 的毒性具有抵抗作用并且对其具有降解作用的菌株就尤其重要。目前为止, 研究报道的微生物主要是好氧菌, 少数降解菌如 *Alealigenes eutrophus* H850^[15]、*Burkholderia xenovorans* LB400 (原 *Pseudomonas* sp. LB400)^[16, 17] 和 *Rhodococcus* sp. RHA1^[18~20] 等可以降解 6 氯以下的 PCBs, 大部

收稿日期: 2011-12-31; 修订日期: 2012-02-27

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项(ZD0904); 北京市重点学科(环境工程)项目

作者简介: 史舜燕(1986~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为污染控制, E-mail: ssy161@163.com

分菌株仅局限于降解低于 4 氯取代的 PCBs。

另外还有一些嗜热菌和耐寒菌, Shimura 等^[21]在堆肥过程中筛选出 1 株嗜热菌 *Bacillus* sp. JF8, 在 60℃ 可利用联苯作为碳源能降解四氯联苯、五氯联苯。Michaud 等^[22]筛选出 3 株能够降解 PCB 的南极海洋细菌 *Pseudoalteromonas*、*Psychrobacter* 和 *Arthrobacter*。 *Pseudoalteromonas* 在 4℃ 时几乎没有降解率, 在 15℃ 降解率在 0.4% ~ 25.2%; *Psychrobacter* 和 *Arthrobacter* 的降解率则在 36% ~ 82.8% 之间。

除了细菌, 人们也筛选出可降解 PCBs 的真菌^[23,24]。Eaton^[25]通过标记¹⁴C 发现 *Phanerochaete chrysosporium* 能降解 Aroclor 1254 释放出¹⁴CO₂ 且产物可溶于水。Kubátová 等^[24]得到菌株 *Pleurotus ostreatus* 经过 2 个月对 Delor 103 的降解率为 40%。这些菌株的获得为不同区域 PCBs 污染点的修复提供了可用的生物资源。

本研究利用联苯为底物驯化其降解 PCBs 的能力, 采用富集分离的培养方式从北京焦化厂多氯联苯污染土壤中获得 1 株能以 PCBs 为唯一碳源生长的菌株, 并对其生长和降解特性进行了初步分析, 以期为其在生物修复中的应用提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 主要仪器及试剂

气相色谱 GC2010 (日本岛津公司)、UV-2000 紫外可见分光光度计 (美国 UNICO 公司)、HZQ-F160 振荡培养箱 (哈尔滨市东联电子技术开发有限公司)、LRH 生化培养箱 (上海一恒科学仪器有限公司)、LDZX-50KBS 立式压力蒸汽灭菌器 (上海申安医疗器械厂) 等;

标准品 PCB52 (2,2',5,5'-四氯联苯)、PCB153 (2,2',4,4',5,5'-六氯联苯) 购自上海安谱科学仪器有限公司; 正己烷和丙酮为色谱纯, 其他试剂均为分析纯。

1.2 主要溶液及培养基

土壤初步驯化营养液: 葡萄糖 5 g、尿素 2 g、磷酸二氢钾 1 g、联苯 10 g, 配制成大约 10 L 左右的营养液。

无机盐液体培养基: K₂HPO₄ 0.5 g·L⁻¹、KH₂PO₄ 0.5 g·L⁻¹、(NH₄)₂SO₄ 1.0 g·L⁻¹、MgSO₄ 0.2 g·L⁻¹、CaCl₂ 0.1 g·L⁻¹、NaCl 0.2 g·L⁻¹、联苯 2 g·L⁻¹, pH 为 7.0。

LB 培养基: 蛋白胨 10 g·L⁻¹、酵母膏 5 g·L⁻¹、

NaCl 5 g·L⁻¹、联苯 0.5 g·L⁻¹, pH 为 7.0。

固体培养基: 蛋白胨 10 g·L⁻¹、酵母膏 5 g·L⁻¹、NaCl 5 g·L⁻¹、琼脂 15 g·L⁻¹。

培养基 (不加联苯) 均在 121℃、0.1 MPa 下灭菌 20 min 后使用, 联苯 (丙酮溶液) 经过滤除菌后加入灭菌后的培养基中。

1.3 降解细菌的筛选

1.3.1 降解细菌的富集、分离

首先进行初步驯化, 土壤初步驯化装置为 37 cm × 37 cm × 32 cm 的有机玻璃长方体, 底层铺有高度约为 4 cm 的沙层, 沙层上铺 3 cm 的砾石, 砾石层上铺有大约 10 cm 污染土壤层。定期加入含联苯的营养液, 每天翻土, 维持土壤有充足的水分并保持 pH 在 6.5 ~ 7.5 之间, 如此驯化 2 个月。

取 1 g 初步驯化好的土壤放入装有 100 mL 灭菌后的富集培养基中, 30℃、150 r·min⁻¹ 摇床振荡培养, 待培养液发生浑浊时, 取 1 mL 菌悬液, 加入到 100 mL 联苯浓度为 2 g·L⁻¹ 的无机盐液体培养基中, 在相同条件下进行传代培养 2 个月, 传代培养开始后每 5 ~ 7 d 转接 1 次。然后用平板稀释法于固体培养基上进行分离纯化, 将纯化后的降解菌株回接于无机盐基础培养基中, 筛选出能在无机盐培养基很好生长且对多氯联苯降解能力最高的菌株。筛选出的降解菌保存于最终浓度为 30% 的甘油中, -80℃ 冷藏保存。

1.3.2 菌株的生长曲线测定

通过光电比浊法测定不同时间下的生物量 ($D_{600\text{nm}}$)。选取生长较快, 长势较好的的几株菌进行降解率的测定。此时选取的菌株可认为是能利用含苯环的有机物为生长碳源的。

1.3.3 降解菌休眠体系对 PCBs 的降解率效果

制备各菌株的休眠细胞体系: 将处于对数生长期的菌液离心 (6000 r·min⁻¹ × 6 min), 除去上清液, 用 pH 为 7.0、浓度为 0.2 mol·L⁻¹ 的磷酸缓冲液洗涤菌泥, 进一步离心, 如此洗涤两次, 再把菌体重悬在相同缓冲溶液中, 调整 $D_{600\text{nm}}$ 值为 1.0。

测定每株菌分别对 2 mg·L⁻¹ 的 PCB52 和 PCB153 的降解能力, 取 15 mL 的玻璃瓶, 分别加入一定量的 PCB52 或 PCB153 的正己烷溶液, 待正己烷挥发后, 分别加入 $D_{600\text{nm}} = 1.0$ 的休眠细胞菌液 2 mL, 对照组加入相同浓度的热杀菌, 在瓶口内覆盖一层铝箔, 盖紧瓶盖, 30℃、150 r·min⁻¹ 摇床培养。每批样品均设 3 组平行, 测定 4 d、7 d 后的 PCB52 的降解率和 7 d 后 PCB153 的降解率。

1.3.4 休眠体系中 PCBs 的提取

萃取用色谱级的正己烷,每个样品中加入 5 mL 正己烷,加入 0.7 g 硫酸铵作破乳剂,快速混匀器振荡 10 min,超声 5 min,静置 1 h 待分层稳定后取上层有机相 1 mL,无水硫酸钠脱水后进行色谱分析.此方法加标回收率为 80% ~ 100%.

1.4 菌株的鉴定

细菌分离后,观察降解菌在固体培养基上的单菌落形态及显微镜下的细胞形态,并利用分子生物学手段对菌株进行鉴定.通过提取菌株 DNA,然后对 16S rDNA 进行 PCR 扩增. PCR 引物采用 16S rDNA 的通用引物 16F (AGAGTTTGATCCTGGC TCAG) 和 16R (GGTTACCTTGTACGACTT). 菌种鉴定委托北京三博远志生物技术有限责任公司进行,测序结果在 NCBI 网站上进行比对.

1.5 培养条件对 PS-11 生长及 PCB52 降解率的影响

不同温度对 PS-11 生长的影响:测定 20、30、40℃ 下 PS-11 的生长曲线.

不同 pH 对 PS-11 生长及 PCB 52 降解率的影响:测定培养基 pH 分别为 6、7、8、9、10 时的 PS-11 生长曲线、各培养体系 pH 值的变化和 PCB52 降解率.

不同底物浓度对 PCB52 降解率的影响:测定 PS-11 对底物浓度为 2、5、10、20、50 mg·L⁻¹ 时的降解率.

不同碳源对 PS-11 生长的影响:选取葡萄糖、蔗糖、乙酸钠、表面活性剂 Tween-80、β-环糊精、十二烷基苯磺酸钠进行分析,碳源浓度均为 2 g·L⁻¹,对照组为同浓度的联苯,测定不同碳源时,PS-11 的生长曲线及对 PCB52 的降解率.

重金属离子对 PS-11 生长的影响:测定含不同浓度的 Cu²⁺、Zn²⁺、Pb²⁺、Cd²⁺ 培养体系中,PS-11 的生长曲线.

以上降解率均测定生长细胞对 PCB52 的降解率,接种 2 mL 对数生长期的 PS-11 菌悬液到 10 mL 不同降解体系中,测定 6 d 后的降解率,其 PCB52 的提取方法为:将菌丝体过滤并用 25 mL 正己烷洗涤两次,洗涤液与培养液混合转入分液漏斗,加入 3 倍体积的正己烷萃取,充分混合静置后,将下相分出,上相倒出.用 25 mL 正己烷洗涤下相两次,洗涤液合并上相,用旋转蒸发仪旋蒸至 3 ~ 5 mL,用无水硫酸钠脱水,转移至 K-D 浓缩瓶并氮吹至 1 mL,上机分析.

1.6 PCBs 的测定

利用岛津 2010 GC-ECD 进行分析,毛细管柱为 DB-5 (30 m × 0.32 mm × 0.25 μm),自动进样.具体分析条件为:不分流,载气流量为 8.8 mL·min⁻¹,进样口温度为 270℃,检测器温度为 300℃,电流 1.00 nA,升温程序如下:初始温度为 150℃,保留 1 min,以 10℃·min⁻¹ 速率升温至 200℃,以 35℃·min⁻¹ 速率升温至 265℃ 保留 5 min,以 10℃·min⁻¹ 升温至 300℃ 保留 1 min,总分析时间为 35 min.

2 结果与讨论

2.1 菌株筛选

通过对所取土样中的微生物进行初步驯化、富集、再次驯化、纯化分离等步骤的操作,从样品中筛选出 6 株菌 A ~ F. 将 6 株菌的单菌落回接种到以联苯为唯一碳源和能源的驯化培养基中,图 1 所示为 6 株菌的生长曲线,可以看出:E 在含联苯的培养基中生长最快,其次为 A;而 B、C 生长较慢,D、F 则不生长,因此,选取菌株 A、B、C、E 作进一步筛选.

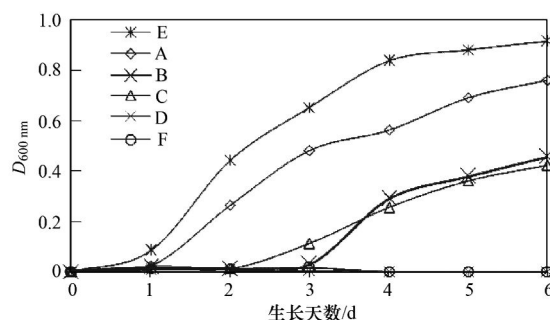


图 1 菌株 A ~ F 的生长曲线

Fig. 1 Growth curves of bacterial strains A-F

2.2 菌株 A、B、C、E 对 PCBs 的降解率效果

图 2 中数据显示可见:A、B、C、E 对 2 mg·L⁻¹ PCB52 的 4 d 降解率分别为:31.1%、15.7%、2.5%、12.6%,7 d 降解率分别为 52.9%、18.1%、10.1%、15.4%,其中 A 对 PCB52 的降解率最高,进一步检验 A、B、C、E 对 2 mg·L⁻¹ 高氯代多氯联苯 PCB153 的降解能力,如图 3 所示:A 对 PCB153 的降解率仍高于 B、C、E,7 d 的降解率达到 10.9%,因此,将 A 取出,命名 PS-11,鉴定其菌属.

2.3 PCBs 降解菌的鉴定

PS-11 在固体培养基上菌落呈淡黄色、圆形、突起、表面光滑、边缘整齐,随培养时间变化颜色变深,显微镜观察为短杆状,革兰氏染色阴性.

采用 16S rDNA 序列分析法初步鉴定 PS-11 属于寡养单胞菌属,与嗜麦芽寡养单胞菌

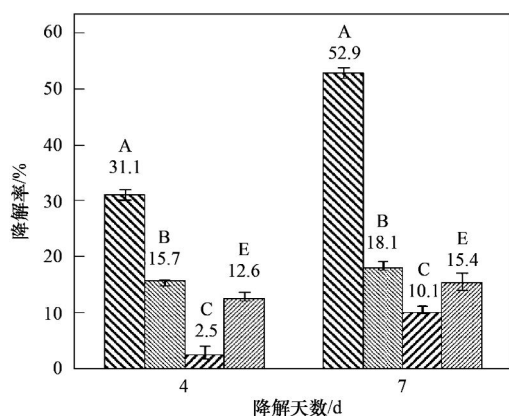


图2 A、B、C、E降解菌休眠细胞对 $2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ PCB52的降解率

Fig. 2 Degradation percentage of PCB52 by resting cells of strains A, B, C, E

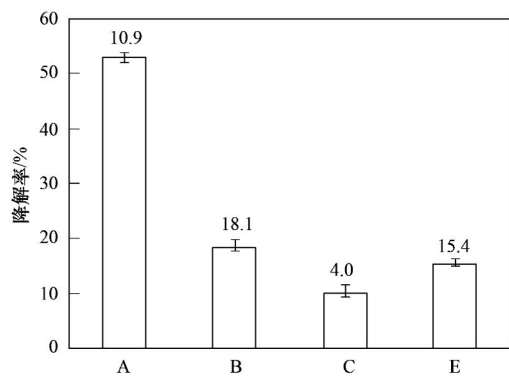


图3 A、B、C、E降解菌休眠细胞对 $2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ PCB153的降解率

Fig. 3 Degradation percentage of PCB153 by resting cells of strains A, B, C, E

(*Stenotrophomonas maltophilia*) 相似性达 97%, 在 GenBank 中的登录号为 HQ166115.1.

2.4 不同培养条件对菌株 PS-11 生长和对 PCB52 降解的影响

2.4.1 温度对细菌生长的影响

不同培养温度对 PS-11 的影响如图 4 所示. 从中可以看出, 在 30°C 下培养时长势最好, 在 20°C 、 40°C 时生长较慢, 可能是由于驯化筛选过程中的温度是 30°C , 因而在该温度下微生物适应能力最强, 所以长势最好.

2.4.2 pH 对降解率的影响

由图 5 可见: PS-11 在 pH 为 7~9 范围内能够快速生长, 且在 pH 为 7 时适应期较短, 在 pH 为 9 时生长最旺盛, 在偏酸和强碱溶液中不生长. 因此, 该菌适宜在中性及弱碱性环境下生长. 但是由图 6 可以看出: pH 为 7 时对 PCB52 的降解率最高, 弱碱

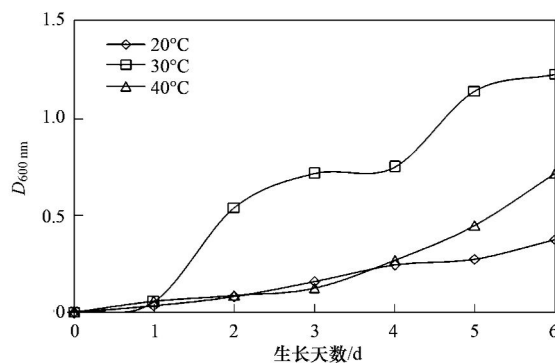


图4 不同温度下的 PS-11 细胞生长曲线

Fig. 4 Growth curves of PS-11 cells at different temperature

条件下降解率下降, 在酸性条件下只有极低的降解率. 这是因为在 PS-11 能够生长的培养体系中, pH 值均下降(图 7), 可能由于该菌株在生长过程中产生酸性物质, 使得生长环境 pH 下降, 当 pH 低于 7 时, 生长受到抑制, 生长速率下降. 其中初始 pH 为 9 的培养体系菌株生长最快, 同时 pH 下降也最快, 从而抑制了 PS-11 对 PCB52 的降解, 而当初始 pH 为 7 时, pH 下降较慢且平稳, 因此 PS-11 在初始 pH 7 时对多氯联苯的降解效果最好. 综合以上因素, 仍选取 pH 值为 7.

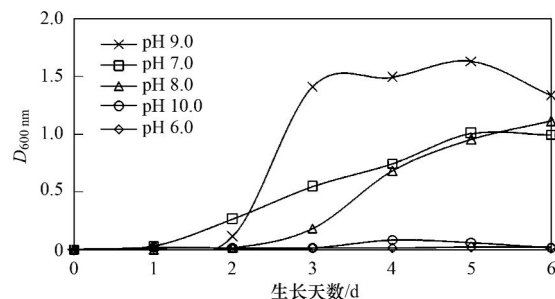


图5 不同 pH 下 PS-11 的生长曲线

Fig. 5 Growth curves of PS-11 cells at different pH

2.4.3 底物浓度对降解率的影响

不同底物浓度对 PCB52 降解率的影响如图 8 所示: PS-11 在 PCB52 浓度 $2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时降解率最高, 为 42.1%; 在浓度为 $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时的降解率为 29.7%、27.0%. 同样培养条件下, 当 PCB52 浓度增加至 $20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 降解率仅有 6.8%、4.3%. 由此可知, 菌株 PS-11 只能对一定浓度范围内的 PCB52 具有较强的降解能力, 在 2~50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度范围内, 随着培养液中 PCB52 浓度的增加, 菌株 PS-11 对 PCB52 的降解能力下降.

2.4.4 碳源对细菌生长的影响

通过联苯驯化有利于降解菌产生 PCBs 共代谢降解酶系, 但联苯本身也是污染物, 因此, 考察菌种

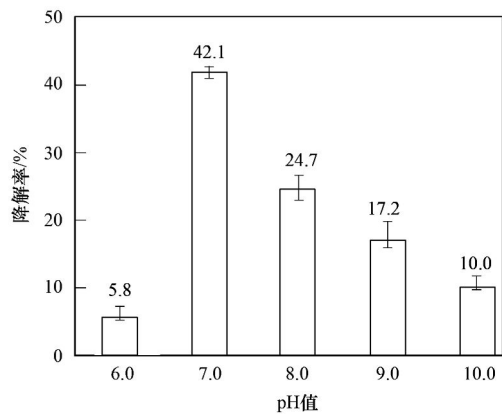


图6 PS-11 初始 pH 对降解率的影响

Fig. 6 Effect of different initial pH on the degradation percentage of PCB 52

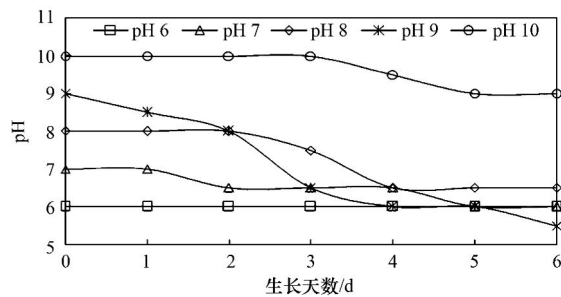


图7 不同初始 pH 培养体系中的 pH 值随时间的变化

Fig. 7 Time course of culture pH during the process of PS-11 cell growth

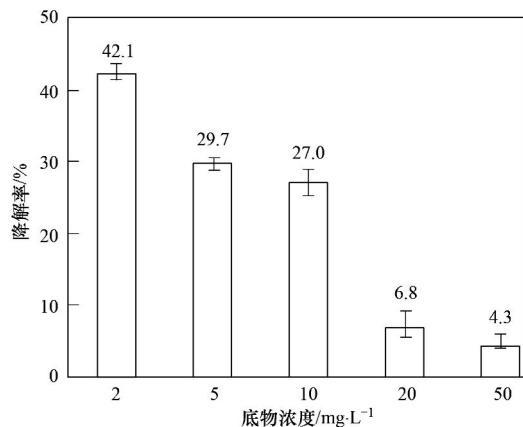


图8 底物浓度对降解率的影响

Fig. 8 Effects of different initial concentrations of PCB52 on the degradation percentage of PCB52

PS-11 在不同碳源中的生长情况选择新的碳源^[26]. 如图 9 所示:培养基中外加碳源不同,菌株 PS-11 的生长量不同. 碳源对菌体生长量的影响为:蔗糖 > 葡萄糖 > Tween-80 > 乙酸钠 > 联苯 > β-环糊精 > 十二烷基苯磺酸钠; 菌株 PS-11 以蔗糖为碳源时生物量最高,以葡萄糖为碳源时适应期最短,而 β-环糊

精、十二烷基苯磺酸钠对菌株 PS-11 有一定的毒性导致细胞死亡不能生长.

考察 PS-11 可利用的碳源蔗糖、葡萄糖和 Tween-80 对其降解能力的影响,由图 10 所示,3 种碳源的添加均提高了 PS-11 对 PCB52 的降解率. 其中 Tween-80 最明显,其次是蔗糖、葡萄糖,分别提高了 20.7%、17.6%、12.8%. 因此,可以替代联苯作为新的碳源.

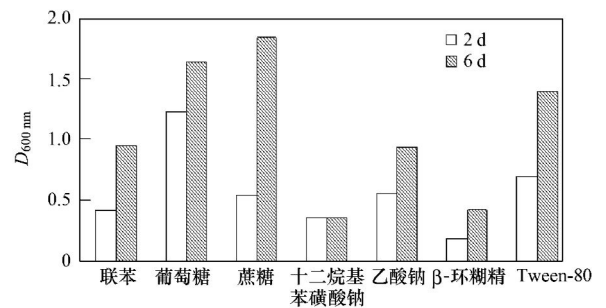


图9 碳源对细菌生长的影响

Fig. 9 Effect of different carbon sources on the growth of PS-11

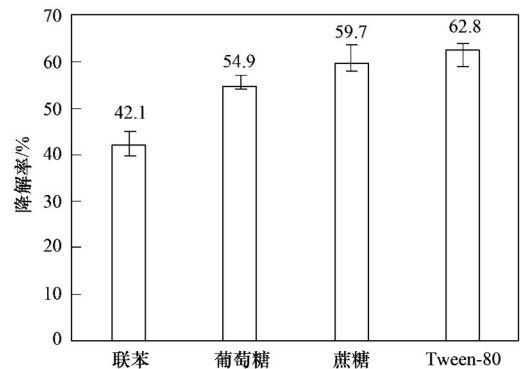


图10 碳源对降解率的影响

Fig. 10 Effect of different carbon sources on the degradation percentage of PCB52

2.4.5 重金属对细菌生长的影响

由表 1 可知,菌株对于不同金属离子耐受性不同,其耐受性大小为 $\text{Pb}^{2+} > \text{Cd}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Cu}^{2+}$. PS-11 在 Cu^{2+} 浓度低于 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时能够生长,高于 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 不生长; Zn^{2+} 浓度为 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,PS-11 的生长不受其影响,随着 Zn^{2+} 浓度增加对 PS-11 的抑制作用越明显,高于 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 则不生长;在 Cd^{2+} 浓度为 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,PS-11 的生长不受其影响,高于 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时几乎不生长;而 PS-11 对 Pb^{2+} 的耐受性较高,在 $50 \sim 200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围内仍能很好的生长,高于 $500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 则不生长. 因此,PS-11 适合修复金属离子 Pb、Cd、Zn 污染土壤,不适合含 Cu 高的污染土壤.

表 1 重金属对细菌生长的影响

Table 1 Effect of heavy metalions on the growth of PS-11

金属离子	浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	生物量($D_{600 \text{ nm}}$)
—	0	1.106
Cu^{2+}	0.005	1.177
	0.05	0.782
	≥ 0.5	0
	5	1.022
Zn^{2+}	10	0.632
	≥ 50	< 0.1
	50	1.231
Pb^{2+}	200	0.576
	500	0.038
	10	1.25
Cd^{2+}	25	0.383
	≥ 50	< 0.2

3 结论

(1)本研究从多氯联苯(PCBs)污染土壤中筛选到1株高效降解多氯联苯的细菌PS-11,经16S rDNA初步鉴定属于嗜麦芽寡养单胞菌(*Stenotrophomonas maltophilia*)。菌株PS-11对 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ PCB52 4 d的降解率为31.1%,7 d的降解率可达52.9%;对难降解的高氯联苯PCB153 7 d的降解率为10.9%。

(2)菌株PS-11的生长和降解过程受环境条件的影响,在 30°C 、pH为7~9、PCB52浓度为 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的条件下生长较快、降解效果较好;碳源种类不同,菌株PS-11的生长能力也不同,其中在以蔗糖为碳源时PS-11的生长能力最强,以葡萄糖为碳源时PS-11的适应期最短,且蔗糖、葡萄糖和Tween-80均可提高PS-11对PCB52的降解率;同时菌株PS-11还可耐受一定浓度的重金属,其耐受性大小为: $\text{Pb}^{2+} > \text{Cd}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Cu}^{2+}$ 。研究表明菌株PS-11在生物修复多氯联苯污染土壤方面具有一定的应用前景。

参考文献:

- [1] Harrad S J, Sewart A P, Alcock R, et al. Polychlorinated biphenyls (PCBs) in the British environment: sinks, sources and temporal trends[J]. Environmental Pollution, 1994, **85**(2): 131-146.
- [2] Turrio-Baldassarri L, Alivernini S, Carasi S, et al. PCB, PCDD and PCDF contamination of food of animal origin as the effect of soil pollution and the cause of human exposure in Brescia[J]. Chemosphere, 2009, **76**(2): 278-285.
- [3] 毕新慧, 储少岗, 徐晓白. 多氯联苯在土壤中的吸附行为[J]. 中国环境科学, 2001, **21**(3): 284-288.
- [4] 崔兆杰, 宋善军, 刘静. 多氯联苯在土壤中的吸附规律及其影响因素研究[J]. 生态环境学报, 2010, **19**(2): 325-329.
- [5] 许环文. 多氯联苯的环境行为及其预测方法研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2011.
- [6] 聂湘平. 多氯联苯的环境毒理研究动态[J]. 生态科学, 2003, **22**(2): 171-176, 182.
- [7] Varanasi P, Fullana A, Sidhu S. Remediation of PCB contaminated soils using iron nano-particles[J]. Chemosphere, 2007, **66**(6): 1031-1038.
- [8] Whitfield Åslund M L, Zeeb B A, Rutter A, et al. In situ phytoextraction of polychlorinated biphenyl-(PCB) contaminated soil[J]. Science of the Total Environment, 2007, **374**(1): 1-12.
- [9] Singer A C, Jury W, Luepromchai E, et al. Contribution of earthworms to PCB bioremediation [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2001, **33**(6): 765-776.
- [10] Furukawa K, Fujihara H. Microbial degradation of polychlorinated biphenyls: Biochemical and molecular features [J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2008, **105**(5): 433-449.
- [11] Field J A, Sierra-Alvarez R. Microbial transformation and degradation of polychlorinated biphenyls [J]. Environmental Pollution, 2008, **155**(1): 1-12.
- [12] Bertin L, Capodicasa S, Fedi S, et al. Biotransformation of a highly chlorinated PCB mixture in an activated sludge collected from a Membrane Biological Reactor (MBR) subjected to anaerobic digestion[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, **186**(2-3): 2060-2067.
- [13] Fagervold S K, Watts J E M, May H D, et al. Effects of bioaugmentation on indigenous PCB dechlorinating activity in sediment microcosms [J]. Water Research, 2011, **45**(13): 3899-3907.
- [14] Tsuneta T, Loch-Carusio R, Quensen III J F, et al. Stimulatory effects of a microbially dechlorinated polychlorinated biphenyl (PCB) mixture on rat uterine contraction in vitro [J]. Environmental Research, 2008, **107**(2): 185-193.
- [15] Bedar D L, Wagner R E, Brennan M J, et al. Extensive degradation of aroclors and environmentally transformed polychlorinated biphenyls by *Alcaligenes eutrophus* H850 [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1987, **53**(5): 1094-1102.
- [16] Bopp L H. Degradation of highly chlorinated PCBs by *Pseudomonas* strain LB400[J]. Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology, 1986, **1**(1): 23-29.
- [17] Ponce B L, Latorre V K, González M, et al. Antioxidant compounds improved PCB-degradation by *Burkholderia xenovorans* strain LB400[J]. Enzyme and Microbial Technology, 2011, **49**(6-7): 509-516.
- [18] Seto M, Kimbara K, Shimura M. A novel transformation of polychlorinated biphenyls by *Rhodococcus* sp. Strain RHA1[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1995, **61**(9): 3353-3358.
- [19] Ohmori T, Morita H, Tanaka M, et al. Development of a strain for efficient degradation of polychlorinated biphenyls by patchwork

- assembly of degradation pathways[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2011, **111**(4): 437-442.
- [20] Mukerjee-Dhar G, Shimura M, Kimbara K. Degradation of polychlorinated biphenyl by cells of *Rhodococcus opacus* strain TSP203 immobilized in alginate and in solution[J]. Enzyme and Microbial Technology, 1998, **23**(1-2): 34-41.
- [21] Shimura M, Mukerjee-Dhar G, Kimbara K, *et al.* Isolation and characterization of a thermophilic *Bacillus* sp. JF8 capable of degrading polychlorinated biphenyls and naphthalene[J]. FEMS Microbiology Letters, 1999, **178**(1): 87-93.
- [22] Michaud L, Di Marco G, Bruni V, *et al.* Biodegradative potential and characterization of psychrotolerant polychlorinated biphenyl-degrading marine bacteria isolated from a coastal station in the Terra Nova Bay (Ross Sea, Antarctica) [J]. Marine Pollution Bulletin, 2007, **54**(11): 1754-1761.
- [23] Ruiz-Aguilar G M L, Fernández-Sánchez J M, Rodríguez-Vázquez R, *et al.* Degradation by white-rot fungi of high concentrations of PCB extracted from a contaminated soil[J]. Advances in Environmental Research, 2002, **6**(4): 559-568.
- [24] Kubátová A, Erbanová P, Eichlerová I, *et al.* PCB congener selective biodegradation by the white rot fungus *Pleurotus ostreatus* in contaminated soil[J]. Chemosphere, 2001, **43**(2): 207-215.
- [25] Eaton D C. Mineralization of polychlorinated biphenyls by *Phanerochaete chrysosporium*; a ligninolytic fungus[J]. Enzyme and Microbial Technology, 1985, **7**(5): 194-196.
- [26] Luo W, D'Angelo E M, Coyne M S. Organic carbon effects on aerobic polychlorinated biphenyl removal and bacterial community composition in soils and sediments[J]. Chemosphere, 2008, **70**(3): 364-373.

CONTENTS

Nutrient Dynamics over the Past 100 Years and Its Restoration Baseline in Dianshan Lake	LI Xiao-ping, CHEN Xiao-hua, DONG Xu-hui, <i>et al.</i> (3301)
Possibility of Total Dissolved Solid as one of Nutrient Baselines in Inner Mongolia-Xinjiang Plateau	XI Bei-dou, ZHANG Ya-li, XU Qiu-jin (3308)
Fluorescence Discrimination Technique for Phytoplankton Based on the Wavelet Analysis	ZHANG Cui, SU Rong-guo, SONG Zhi-jie, <i>et al.</i> (3314)
Analysis of Algae Bloom and Lake Surface Bright Temperature in Chaohu Lake Based on Remote Sensing Data	ZHANG Hong, HUANG Yong, LI Kun (3323)
Case Study on Groundwater Health Risk Assessment and Remediation Strategy Based on Exposure Pathway	JIANG Lin, ZHONG Mao-sheng, JIA Xiao-yang, <i>et al.</i> (3329)
Pollution Assessment in the Intertidal Zone of Beibu Gulf Using Multi-biomarker Pollution Index	DU Xiu-ping, MENG Fan-ping, WANG Zhi-feng, <i>et al.</i> (3336)
Estimation of the Flux of Inorganic Nitrogen Flowing into the East China Sea	WU Jia-lin, FANG Qian, SHI Xiao-yong, <i>et al.</i> (3344)
Effects of Ocean Acidification on Growth, Phosphate and Nitrate Uptake of Macroalgae	YU Juan, ZHANG Yu, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (3352)
Forms and Distributions of Particulate Phosphorus in the Surface Sediments of North Yellow Sea	MENG Jia, YAO Qing-zhen, CHEN Hong-tao, <i>et al.</i> (3361)
Influence of Dredging on Sediment Resuspension and Phosphorus Transfer in Lake; A Simulation Study	YU Ju-hua, ZHONG Ji-cheng, ZHANG Yin-long, <i>et al.</i> (3368)
Transportation and Sources of the Suspended Particle in a Karst Spring During a Storm Event	YANG Ping-heng, LIU Zi-qi, HE Qiu-fang (3376)
Comparison of Trophic Status Analysis of the Daning River Within the Three Gorges Reservoir Before and After Experimental Impoundment	ZHANG Jia-lei, ZHENG Bing-hui, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (3382)
Nitrogen and Phosphorus Loss in Different Land Use Types and Its Response to Environmental Factors in the Three Gorges Reservoir Area	ZENG Li-xiong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (3390)
Research on Stormwater Runoff Quality of Mountain City by Source Area Monitoring	LI Li-qing, SHAN Bao-qing, ZHAO Jian-wei, <i>et al.</i> (3397)
Occurrence Form and Ecological Effect of Selenium in Soil and Surface Water of Kailuan Coalfield of Tangshan	ZHANG Xiu-zhi, MA Zhong-she, WANG Yin-nan, <i>et al.</i> (3404)
Distribution of Arsenic in Surface Water in Tibet	WANG Ming-guo, LI She-hong, WANG Hui, <i>et al.</i> (3411)
Spatial and Temporal Distribution of Trace Elements in Surface Water in the Xilin River Basin	XUE Li-yang, WU Jin-kui, ZHANG Ming-quan, <i>et al.</i> (3417)
Concentration Characteristics and Ecological Risk of Persistent Organic Pollutants in the Surface Sediments of Tianjin Coastal Area	LU Xiao-xia, ZHANG Shu, CHEN Chao-qi, <i>et al.</i> (3426)
Distribution, Sources and Ecological Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyl in Sediments from Songhua River Basin	NIE Hai-feng, ZHAO Chuan-dong, LIU Ying-han, <i>et al.</i> (3434)
Distributions of Matrix-Bound Phosphine in Surface Sediments of the Yangtze Estuary	LI Tao, HOU Li-jun, LIU Min, <i>et al.</i> (3443)
Geochemical Characteristics of Nitrogen in Core Sediments from Sishili Bay, China	YANG Yu-wei, GAO Xue-lu, LI Pei-miao (3449)
Composition of <i>n</i> -Alkanes in Soils of the Yellow River Estuary Wetlands and Their Potential as Organic Matter Source Indicators	YAO Peng, YIN Hong-zhen, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> (3457)
Study on the Degradation and Transformation of Nonylphenol in Water Containing Algae	PENG Zhang-e, FENG Jin-mei, HE Shu-ying, <i>et al.</i> (3466)
Degradation of Orange IV Dye Solution Catalyzed by Fe(NO ₃) ₃ ·(NH ₄) ₂ S ₂ O ₈ Modified GAC in the Presence of H ₂ O ₂	ZHANG Ying-jie, XU Shu-fen, LIAO Xia, <i>et al.</i> (3473)
Synthesis, Characterization and Electrocatalytic Performance of Pd/CMK-3 for Formic Acid Oxidation	HUAN Zhong-ke, ZONG En-min, WEI Dan, <i>et al.</i> (3479)
Research of Controlling Condition for Aeration Stabilization Pond Dealing with Sanitary Waste of Countryside	LI Huai-zheng, YAO Shu-jun, XU Zu-xin, <i>et al.</i> (3484)
Pilot-Scale Study on Treatment of Municipal Sewage by Moving-Bed Biofilm Reactor with the Hydrophobically Modified Polyurethane Cubes as Biofilm Carriers	WANG Yu-xiao, KONG Xiu-qin, FENG Quan, <i>et al.</i> (3489)
Variation Characteristics of Relative Molecular Mass of Different Fractions of Dissolved Organic Matter from Landfill Leachate During Photocatalytic Degradation	JIA Chen-zhong, WANG Yan-xin, ZHANG Cai-xiang (3495)
Mechanism of Nitrogen Removal by Partial Nitrification-Denitrification Biological Filter	SUN Ying-xue, XU Dong, TIAN Yuan, <i>et al.</i> (3501)
Performance Stability of CANON Reactor and Temperature Impact	FU Kun-ming, ZHANG Jie, CAO Xiang-sheng, <i>et al.</i> (3507)
Denitrifying Phosphorus Removal in a Modified University of Cape Town (MUCT) Process Treating Domestic Wastewater Under Nitrification and Nitritation	ZENG Wei, WANG Xiang-dong, ZHANG Li-dong, <i>et al.</i> (3513)
Study on the Stratification Components of Extracellular Polymeric Substances (EPS) in Activated Sludge and Their Variation Characteristics in Physicochemical Properties	YUAN Dong-qin, WANG Yi-li (3522)
Influence of Organic Loading Rate on the Start-up of a Sequencing Airlift Aerobic Granular Reactor	LIU Meng-yuan, ZHOU Dan-dan, GAO Lin-lin, <i>et al.</i> (3529)
Degradation Kinetics of Naphthalene by Anaerobic Sludge and Analysis of the Bacterial Biodiversity	CAO Xin-kai, YANG Qi, HAO Chun-bo (3535)
Sorption of 17 β -estradiol to Soils and Sediment and Influence of Pig Manure DOM	ZHANG Feng-song, LI Yan-xia, HUANG Ze-chun, <i>et al.</i> (3542)
Sorption Isotherms and Sorption Thermodynamics of Faecal Sterols on Offshore Sediment	ZHANG Xiao-lei, XUE Wen-ping, XU Heng-zhen, <i>et al.</i> (3547)
Research on the Characteristic of Toluene Migration and Distribution in Fluvio-Aquic Soil and Its Simulation Using STOMP Model	HAN Chun-mei, RAN Juan, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (3554)
Predicting the Cadmium Bioavailability in the Soil of Sugarcane Field Based on the Diffusive Gradients in Thin Films with Binding Phase of Sodium Polycrylate	WANG Fang-li, SONG Ning-ning, ZHAO Yu-jie, <i>et al.</i> (3562)
<i>In Situ</i> Immobilization of Pb and Cd in Orchard Soil Using Soil Ameliorants	TANG Min, ZHANG Jin-zhong, ZHANG Dan, <i>et al.</i> (3569)
Health Assessment of Heavy Metals in Roadside Soils at Different Operation Time; A Case Study of Zhengzhou-Shangqiu Section Along the Lianyungang-Horgas Highway	GU Lei, TONG Zhi-qi, SONG Bo, <i>et al.</i> (3577)
Amelioration Effects of Wastewater Sludge Biochars on Red Soil Acidity and Their Environmental Risk	LU Zai-liang, LI Jiu-yu, JIANG Jun, <i>et al.</i> (3585)
Effect of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons on the Vertical Distribution of Denitrifying Genes in River Sediments	WU Yan-yang, WU Qun-he, HUANG Shan, <i>et al.</i> (3592)
Role of Layered Double Hydroxide (LDH) in the Protection of Herring Testis DNA from Heavy Metals	TANG Yi-ni, WU Ping-xiao, ZHU Neng-wu (3598)
Mineralogical Characteristics of Biogenic Schwertmannite Amended with Different Pretreatment Methods and the Effects on As(Ⅲ) Absorption	LIANG Jian-ru, LI Zhe-ying, LIU Fen-wu, <i>et al.</i> (3606)
Mechanism of Heavy-Metal Tolerance in <i>Pseudomonas aeruginosa</i> ZGKD2	ZHANG Yu-xin, WANG Jiao, CHAI Tuan-yao, <i>et al.</i> (3613)
Isolation, Degradation Characteristics of a 1,2-Dichloroethane-Degrading Strain	WANG Xiao-chun, CHEN Dong-zhi, JIN Xiao-jun, <i>et al.</i> (3620)
Isolation and Degradation Characteristics of PCB-degrading Strain	SHI Shun-yan, FENG Liu, GONG Ji (3627)
Preliminary Study on the Changes of Bacterial Community Structure in Qingcaosha Reservoir During Water Storage Period	PENG Qing, XIE Bing, YUAN Qi, <i>et al.</i> (3634)
N ₂ O Exchange Fluxes from Wheat-Maize Crop Rotation System in the North China Plain	PEI Shu-wei, ZHANG Yuan-yuan, LIU Jun-feng, <i>et al.</i> (3641)
Analysis of the Impact of Two Typical Air Pollution Events on the Air Quality of Nanjing	WANG Fei, ZHU Bin, KANG Han-qing, <i>et al.</i> (3647)
Pollution Characteristics of VOCs in Ambient Air of Ji'nan City in Summer	LIU Ze-chang, ZHANG Fan, HOU Lu-jian, <i>et al.</i> (3656)
Effects and Mechanism of Catalytic Decomposition of Ozone by Activated Carbon	LIU Hai-long, ZHANG Zhi-ye, ZHANG Zhong-ming, <i>et al.</i> (3662)
Effect of Elevated O ₃ on the Arbuscular Mycorrhizal (AM) Structure and Glomalin Production in Two Genotypes of Snap Bean	WANG Peng-teng, DIAO Xiao-jun, WANG Shu-guang (3667)
Effect of Exogenous Calcium on the Activities of Antioxidative Protective Enzymes in Ectomycorrhizal Fungi Under Aluminum Stress	WANG Ming-xia, HUANG Jian-guo, YUAN Ling, <i>et al.</i> (3675)
Mercury Pollution in Cricket in Different Biotopes Suffering from Pollution by Zinc Smelting	ZHENG Dong-mei, LI Xin-xin, LUO Qing (3680)

《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10月15日 33卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 10 Oct. 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. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. 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