

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第10期

Vol.35 No.10

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于虚拟撞击原理的固定源 PM ₁₀ /PM _{2.5} 采样器的研制	蒋靖坤, 邓建国, 段雷, 张强, 李振, 陈小彤, 李兴华, 郝吉明 (3639)
1992~2012 年福州市和厦门市酸雨变化特征及影响因素	郑秋萍, 王宏, 陈彬彬, 隋平, 林文 (3644)
青岛近海不同天气状况下大气气溶胶中金属元素浓度分布特征研究	陈晓静, 祁建华, 刘宁, 张翔宇, 申恒青, 刘明旭 (3651)
化学合成类制药行业工艺废气 VOCs 排放特征与危害评估分析	李嫣, 王浙明, 宋爽, 徐志荣, 许明珠, 徐威力 (3663)
烧结过程 NO _x 和 SO ₂ 形成规律及烧结料组成对 NO _x 排放的影响	任重培, 朱天乐, 朱廷钰, 吕栋 (3669)
废茶活性炭脱硫脱硝性能的应用研究	宋磊, 张彬, 邓文 (3674)
黑河中游边缘荒漠-绿洲非饱和带土壤质地对土壤氮积累与地下水氮污染的影响	苏永中, 杨晓, 杨荣 (3683)
海河流域河流生态系统健康评价	郝利霞, 孙然好, 陈利顶 (3692)
台州长潭水库铁锰质量浓度变化特征及其成因分析	刘树元, 郑晨, 袁琪, 王先兵, 王稀炎 (3702)
山地城市新建湖库氮磷营养盐时空特征研究	包静玥, 鲍建国, 李立青 (3709)
岩溶地下水水文地球化学对降雨的响应: 以重庆雪玉洞地下河系统为例	王凤康, 梁作兵, 于正良, 江泽丽 (3716)
岩溶地下河流域水中多环芳烃污染特征及生态风险评价	蓝家程, 孙玉川, 田萍, 卢丙清, 师阳, 徐昕, 梁作兵, 杨平恒 (3722)
废旧电器拆解区河流沉积物中多溴联苯醚 (PBDEs) 的污染特征与生态风险	陈宣宇, 薛南冬, 张石磊, 李发生, 龚道新, 刘博, 孟磊 (3731)
海河流域中南部河流沉积物的重金属生态风险评价	王瑞霖, 程先, 孙然好 (3740)
大辽河口 COD 与 DO 的分布特征及其影响因素	杨福霞, 简慧敏, 田琳, 姚庆祯 (3748)
辽河下游 CDOM 吸收与荧光特性的季节变化研究	邵田田, 赵莹, 宋开山, 杜嘉, 丁智 (3755)
伊乐藻和氮循环菌技术对太湖氮素吸收和反硝化的影响	刘丹丹, 李正魁, 叶忠香, 张万广 (3764)
地表水体放线菌分离鉴定与致嗅能力研究	陈娇, 白晓慧, 卢宁, 王先云, 章永辉, 吴潘成, 郭心驰 (3769)
地下水循环井技术修复硝基苯污染含水层效果模拟	白静, 赵勇胜, 孙超, 秦传玉, 于凌 (3775)
茶叶基水合氧化铁吸附水体中 Pb(II) 的性能	万顺利, 薛瑶, 马钊钊, 刘国斌, 余艳霞, 马明海 (3782)
紫外辐射对小分子有机酸化学凝聚性作用途径探讨	王文东, 王亚博, 范庆海, 丁真真, 王文, 宋珊, 张银婷 (3789)
水中普萘洛尔的紫外光降解机制及其产物毒性	彭娜, 王开峰, 刘国光, 曾令泽, 姚锟, 吕文英 (3794)
二氧化钛 (P25) 光催化降解二苯甲酸的研究	王阿楠, 滕应, 骆永明 (3800)
碳氮比对聚氨酯生物膜反应器短程硝化反硝化的影响	谭冲, 刘颖杰, 王薇, 邱珊, 马放 (3807)
城市污泥中温厌氧消化过程中厌氧耐药菌的分布与去除研究	佟娟, 王元月, 魏源送 (3814)
快速城市化区域表层土壤中杀虫剂的空间分布及风险评估	韦燕莉, 鲍志君, 巫承洲, 曾永平 (3821)
重庆铁山坪马尾松林土壤汞排放特征的现场测试	杜宝玉, 王琼, 罗遥, 段雷 (3830)
应用 X 射线吸收近边结构谱研究东北农耕地土壤中的氯种态及含量	李晶, 郎春燕, 马玲玲, 徐殿斗, 郑雷, 路雨楠, 崔丽瑞, 张晓萌 (3836)
植被重建下煤矿排土场土壤熟化过程中碳储量变化	李俊超, 党廷辉, 郭胜利, 薛江, 唐骏 (3842)
硫素对氧化还原条件下水稻土氧化铁和砷形态影响	唐冰培, 杨世杰, 王代长, 饶伟, 张亚楠, 王丹, 朱云集 (3851)
外生菌根真菌对 Al ³⁺ 胁迫和低钾土壤的响应	张薇, 黄建国, 袁玲, 李阳波, 何林卫 (3862)
长期施用猪粪水稻土抗生素抗性基因污染研究	黄福义, 李虎, 韦蓓, 欧阳伟堂, 苏建强 (3869)
外源添加磷和有机酸模拟铅污染土壤钝化效果及产物的稳定性研究	左继超, 高婷婷, 苏小娟, 万田英, 胡红青 (3874)
污染场地六价铬的还原和微生物稳定化研究	郑家传, 张建荣, 刘希雯, 许倩, 施维林 (3882)
热强化气相抽提对不同质地土壤中苯去除的影响	李鹏, 廖晓勇, 阎秀兰, 崔晓勇, 马栋 (3888)
O ₃ 浓度升高对南方城市绿化树种氮素的影响	杨田田, 张巍巍, 胡恩柱, 王效科, 田媛, 冯兆忠 (3896)
施氮强度对不同土壤有机碳水平桉树林温室气体通量的影响	李睿达, 张凯, 苏丹, 逯非, 万五星, 王效科, 郑华 (3903)
¹³ C ₂ O ₂ 示踪臭氧胁迫对水稻土壤微生物的影响	陈展, 王效科, 尚鹤 (3911)
表面活性剂 <i>Burkholderia xenovorans</i> LB400 体系对低氯代 PCBs 的好氧强化降解	陈少毅, 张静, 汪涵, 任源 (3918)
耐高氮氨异养硝化-好氧反硝化菌 TN-14 的鉴定及其脱氮性能	信欣, 姚力, 鲁磊, 冷璐, 周迎芹, 郭俊元 (3926)
微氧环境中电化学活性微生物的分离与鉴定	吴松, 肖勇, 郑志勇, 郑越, 杨朝晖, 赵峰 (3933)
电极活性菌分离过程中微生物群落结构动态特征解析	王敏, 赵阳国, 卢珊珊 (3940)
铜对草鱼及花鲢的毒性预测: 基于生物配体模型	王万宾, 陈莎, 吴敏, 赵婧 (3947)
天鹅洲故道底栖动物群落特征及水质生物学评价	马秀娟, 沈建忠, 王腾, 王海生, 黄丹, 孙广文, 龚成 (3952)
水生生物基准推导中物种选择方法研究	张铃松, 王业耀, 孟凡生, 周岳溪, 于海斌 (3959)
生产源区人血清中六溴环十二烷水平与甲状腺激素相关性研究	李鹏, 杨从巧, 金军, 王英, 刘伟志, 丁问微 (3970)
金属氧化物-Laponite 黏土复合材料负载氧化钴催化剂的制备及对苯的催化消除性能	牟真, 麻春艳, 程杰, 李进军 (3977)
CuO(-CeO ₂)/Al ₂ O ₃ 催化剂对苯催化氧化性能研究	查键, 周宏仓, 何都良, 单龙, 张露, 谢婕 (3984)
生物毒性检测在水质安全评价中的应用	徐建英, 赵春桃, 魏东斌 (3991)
某城市城镇污水处理厂 COD 排放现状评价分析	周羽化, 卢延娜, 张虞, 朱静, 雷晶, 申晨, 武雪芳 (3998)
北京市再生水利用生态环境效益评估	范育鹏, 陈卫平 (4003)
我国持久性有机污染物污染事故预警指标体系构建	王琳, 吕永龙, 贺桂珍, 王铁宇 (4009)
环境损害评估: 构建中国制度框架	张红振, 王金南, 牛坤玉, 董璟琦, 曹东, 张天柱, 骆永明 (4015)
《环境科学》征稿简则 (3887) 《环境科学》征订启事 (4008) 信息 (3730, 3739, 3774, 3895)	

表面活性剂 *Burkholderia xenovorans* LB400 体系对低氯代 PCBs 的好氧强化降解

陈少毅, 张静, 汪涵, 任源*

(华南理工大学环境与能源学院, 广州 510006)

摘要: 增强多氯联苯(PCBs)的水溶性是强化 PCBs 微生物降解的主要控制因素之一, 本研究选取了 PCB5 (2,3-CB) 和 PCB31 (2,4',5-CB) 作为低氯代 PCBs 的典型代表, 以曲拉通 100(TX-100)、吐温 80(Tween 80)、鼠李糖脂粗提物(RL crude) 3 种表面活性剂和 β -环糊精(HPCD) 联合 *Burkholderia xenovorans* LB400 构建 PCBs 好氧降解体系, 测试了它们对 PCB5 和 PCB31 的溶出率及微生物生长的影响。结果表明, TX-100 (CMC = 194 mg·L⁻¹)、Tween 80 (CMC = 13.1 mg·L⁻¹)、RL crude (CMC = 50 mg·L⁻¹) 浓度在 1~7 CMC 时和 HPCD 浓度在 500~1 500 mg·L⁻¹ 时对 PCB5 和 PCB31 溶出率分别达到 54.7%~100%、59.8%~100%; 10.5%~40.8%、6.8%~31.6%; 10.3%~19.9%、3.3%~11.6% 和 19.5%~34.2%、4.2%~10.7%。TX-100 浓度在 1~7 CMC 时对 *B. xenovorans* LB400 生长的抑制率分别达到 30.3%~45.8%, 而 Tween 80 浓度在 0.1~1 CMC 时对其生长的抑制率为 10.0%~15.4%; RL crude 本身能作为底物促进 LB400 的生长, 而 HPCD 对其生长无明显影响。 *B. xenovorans* LB400 对 PCB31 (5 mg·L⁻¹) 的降解效率在添加表面活性剂后有不同程度的提高: TX-100, 23.7%~65.5%; Tween 80, 14.6%~44.3%; RL crude, 9.6%~27.2%; HPCD, 15.3%~20.7%; 而表面活性剂对 PCB5 (10 mg·L⁻¹) 的降解效率则无明显影响。表面活性剂主要通过增大溶液中 PCBs-表面活性剂的胶束浓度来提高 LB400 对 PCBs 的降解效率, 在水溶液培养体系中当设置 TX-100 和 Tween 80 浓度分别在 1 和 7 CMC 时, PCB31 的降解效率达到 100% 和 81.7%, 而此时 *B. xenovorans* LB400 生长的抑制率为 30.3% 和 5.4%。

关键词: PCBs; 表面活性剂; *Burkholderia xenovorans* LB400; 增溶性; 生长抑制

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)10-3918-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.10.039

Enhanced Aerobic Degradation of Low Chlorinated Biphenyls by Constructing Surfactants *Burkholderia xenovorans* LB400 Based System

CHEN Shao-yi, ZHANG Jing, WANG Han, REN Yuan

(School of Environment and Energy, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: It has been proposed that the increasing of water solubility of PCBs can enhance the biodegradation efficiency. The biodegradation system of PCBs by *Burkholderia xenovorans* LB400 in the presence of different surfactants, namely TX-100, Tween 80, RL crude and HPCD were established to investigate the effect of surfactants on the biodegradation of hydrophobic organic compounds. The results indicated that the water solubility ratios of PCB5 and PCB31 were 54.7%-100%, 59.8%-100%; 10.5%-40.8%, 6.8%-31.6%; 10.3%-19.9%, 3.3%-11.6% and 19.5%-34.2%, 4.2%-10.7%, which were accordingly enhanced by TX-100 (CMC = 194 mg·L⁻¹), Tween 80 (CMC = 13.1 mg·L⁻¹), and RL crude (CMC = 50 mg·L⁻¹) with concentrations of 1-7 CMC, respectively and HPCD with concentrations of 500-1 500 mg·L⁻¹. Moreover, the growth inhibition ratio of *B. xenovorans* LB400 was 30.3%-45.8% with TX-100 concentration of 1-7 CMC, while it was 10.0%-15.4% for Tween 80 with concentration of 0.1-1 CMC; RL crude could boost the growth of strain LB400 as substrate while HPCD exerted no impact on it. The addition of surfactants can improve the biodegradation ratios of PCB31 (5 mg·L⁻¹) by 23.7%-65.5% for TX-100, 14.6%-44.3% for Tween 80, 9.6%-27.2% for RL crude and 15.3%-20.7% for HPCD depending on the surfactant concentrations, while it had minor effects on the biodegradation ratios of PCB5 (10 mg·L⁻¹). It is concluded that the promoting effects of surfactant on PCBs biodegradation are mainly due to the increased concentrations of PCBs-surfactant micelles in aqueous solution and when TX-100 and Tween 80 concentrations are set as 1 and 7 CMC, the biodegradation ratios of PCB31 can achieve 100% and 81.7%, while the growth inhibition ratios of *B. xenovorans* LB400 are 30.3% and 5.4%, respectively.

Key words: PCBs; surfactant; *Burkholderia xenovorans* LB400; water solubility; growth inhibition

收稿日期: 2014-03-01; 修订日期: 2014-04-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178190); 广州市科信局应用基础研究项目(2013J4100107); 教育部留学回国人员科研启动基金项目

作者简介: 陈少毅(1989~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制与治理技术, E-mail: sychen@scut.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: ceyren@scut.edu.cn

多氯联苯 (polychlorinated biphenyls, PCBs) 是环境中最广泛分布的持久性有机污染物 (persistent organic pollutants, POPs) 之一, 从一氯联苯到十氯联苯共有 209 种同系物, 具有极低的水溶解度 (S_w)、高辛醇-水分配系数 (K_{ow}) 和高沉积物吸附系数 (K_{oc})^[1], 一旦进入环境后会被强烈地吸附到土壤颗粒表面或沉积到底泥中, 向环境中缓慢释放, 生物有效性低^[2,3].

疏水性有机物 (hydrophobic organic compounds, HOCs) 可以通过溶解在表面活性剂胶束 ($\geq$ 临界胶束浓度, CMC) 中而增加其在水相中的溶解度^[4]. Fan 等^[5]在运用电动学方法修复受 PCBs 污染的土壤时, 发现添加表面活性剂 Igepal CA-720 能使土壤吸附的 PCBs 部分溶于水相, 促使其迁移到负极而被氧化, 且 Igepal CA-720 的最适量为 2%. 施周等^[6]对表面活性剂溶液中 PCBs 的溶解特性进行了研究, 发现表面活性剂是通过形成胶束显著的增加疏水性污染物 PCBs 的表观溶解度, 而 POL (10) 和 TX-100 等非离子型表面活性剂对 PCBs 的增溶效果优于阴离子型表面活性剂.

在针对 PCBs 污染的修复技术中需要解决的首要问题是高效降解体系的构建. Ponce 等^[7]发现添加维生素 E 或浆果提取物等抗氧化物质能通过保护 *Burkholderia xenovorans* LB400 的细胞膜, 从而提高水溶液中 PCBs 的降解速率. Rehmann 等^[8]发现 *B. xenovorans* LB400 在降解 Aroclor 1242 的过程中菌种活性不断下降, 但通过添加联苯等共代谢基质能实现 Aroclor 1242 的持续降解. Liu 等^[9]在利用 *Pseudomonas* sp. strain LB400 降解土壤中 PCBs 的实验中, 添加了鼠李糖脂 (RL) 作为 PCBs 的增溶剂和代谢碳源, 显著提高了菌种生物量和 PCBs 降解速率. *B. xenovorans* LB400 作为 PCBs 高效降解菌种与对 PCBs 有增溶作用的表面活性剂联合构成降解体系可能会对 PCBs 的降解带来理想的促进效果, 而国内外学者对这方面少有开展系统的基础性研究.

本研究选取具有 PCBs 广谱降解能力的优势菌

Burkholderia xenovorans LB400 以及 3 种典型的表面活性剂 (TX-100、Tween 80、RL crude) 和 HPCD 来构建 PCBs 降解体系, 从 PCBs 的增溶性和菌种的生长状况等方面, 探讨表面活性剂环境和菌种活性条件对 PCBs 降解的影响, 以期为基于不同表面活性剂因子的低氯代 PCBs 降解提供依据.

1 材料与方法

1.1 试剂和耗材

3 种典型的低氯代 PCBs ($n_{Cl} \leq 4$): PCB3 (4-CB)、PCB5 (2,3-CB) 和 PCB31 (2,4',5-CB) 均购自北京百灵威试剂有限公司, 纯度分别为 100%、99.9% 和 100%, 用色谱纯丙酮分别配成 50、10 和 10 g·L⁻¹ 的 PCBs 标准溶液. 联苯 (GC 纯) 购自上海阿拉丁试剂有限公司, 用色谱纯丙酮配成 20 g·L⁻¹ 的标准溶液. 在降解体系中作为 PCBs 增溶剂的 TX-100 (非离子型)、Tween 80 (非离子型) 和 RL crude (阴离子型) 3 种表面活性剂, 以及 HPCD 均为国产分析纯, 其基本性质如表 1 所示^[10,11]. 3 种表面活性剂和 HPCD 均配成系列浓度的溶液. 作为菌种培养的碳源与能源物质的丁二酸钠亦为分析纯.

1.2 菌种及培养条件

实验菌种选择 *B. xenovorans* LB400 (LB400), 该菌种为 Goris 等在莫罗 (美国纽约) 填埋场一处受 PCBs 污染的土壤中分离出来的具有降解广谱 PCBs 能力的优势菌^[12], 购于瑞典 University of Göteborg 菌种保藏中心, 菌种编号为 CCUG 46959.

LB400 经 CASO 培养基活化后, 以 700 mg·L⁻¹ 联苯作为唯一碳源, 利用 M9 复合盐培养液在 28℃, 150 r·min⁻¹ 的条件下进行培养驯化^[13], 待菌种生长进入对数期后进行转接操作. M9 复合盐培养液的成分为^[7]: Na₂HPO₄·12H₂O 17.1 g·L⁻¹; KH₂PO₄ 3.0 g·L⁻¹; NaCl 0.5 g·L⁻¹; NH₄Cl 1.0 g·L⁻¹; MgSO₄ 0.24 g·L⁻¹; CaCl₂ 0.01 g·L⁻¹; 微量元素和维生素. M9 无机盐复合培养基、TX-100、Tween 80、RL crude 和 HPCD 溶液在实验前均经过 102.9 kPa (1.05 kg·cm⁻²), 125℃, 高温高压灭菌 30 min.

表 1 3 种表面活性剂和 β -环糊精的基本性质¹⁾
Table 1 Basic properties of three surfactants and HPCD

名称	相对分子质量	CMC/mg·L ⁻¹	降解性能	毒性
TX-100	646.9	194	稍难降解	口服低毒, 深入皮肤有毒
Tween 80	1 308	13.1	易降解	低毒
RL crude	541	50	易降解	无毒
HPCD	1 200	—	易降解	无毒

1) HPCD 为外缘亲水, 空腔疏水的桶状有机大分子结构, 不是表面活性剂, 不能形成胶束, 故无 CMC 值 (临界胶束浓度)

1.3 *Burkholderia xenovorans* LB400 降解能力实验

采用吸光度法测定菌种的生物量,将 LB400 的菌液在 600 nm 的吸光度值(D_{600})作为测定生物量的标准. 菌种培养 2 d 即达到对数生长期中后期(D_{600} 约为 0.65),经 2 000 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 20 min 去除残留的联苯固体后,取 $D_{600} = 0.65$ 的生长细胞菌液作为 PCBs 降解体系的接种菌液. 在 15 mL 棕色圆底培养管中,用 5 μL 或 10 μL 微量进样针分别加入单一碳源物质 PCB3、PCB5、PCB31 标准溶液 5、10 和 5 μL ,待丙酮挥发完全后,加入 5 mL M9 复合盐培养液,使其浓度分别达到 50、20 和 10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,同时接种 LB400 菌液 500 μL ,接种量为 9%,用透气封口膜封好管口,放入 160 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的恒温摇床 28 $^{\circ}\text{C}$ 下培养 3 d. 为加快微生物好氧代谢 PCBs,分别加入 10、20、40 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 联苯作为 PCBs 降解的共代谢物质.

1.4 表面活性剂对 *Burkholderia xenovorans* LB400 降解 PCBs 的影响

用 5 μL 微量进样针在 15 mL 棕色圆底培养管中分别加入 PCB5、PCB31 和联苯标准溶液 5、2.5 和 2.5 μL ,待丙酮完全挥发后,加入 5 mL M9 复合盐培养液,使以上 3 种物质浓度分别为 10、5 和 10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,LB400 菌液的接种量为 9%;同时向培养管中定量加入不同浓度的表面活性剂和 HPCD 溶液,使 TX-100、Tween 80、RL crude 的系列浓度均为 0、0.1、0.25、0.5、1、3、5、7 CMC,HPCD 的系列浓度为 0、10、25、50、100、500、1 000、1 500 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$;最后用透气封口膜封管口,放入 160 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的恒温摇床 28 $^{\circ}\text{C}$ 下培养 3 d.

1.5 表面活性剂对 PCBs 的增溶作用

在 15 mL 棕色圆底培养管中用 5 μL 或 10 μL 微量进样针加入 PCB5 和 PCB31 标准溶液 10 μL 和 5 μL ,待丙酮完全挥发后,加入 5 mL M9 复合盐培养液,使其浓度分别达到 20 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,同时按 1.4 节中的设计向培养管中定量加入表面活性剂和 HPCD 溶液,并加入少量 Na_3N 作为抑菌剂,之后用带有聚四氟乙烯衬层的盖子拧紧管口,放入 160 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的恒温摇床 28 $^{\circ}\text{C}$ 下振荡 2 d.

1.6 表面活性剂对 *Burkholderia xenovorans* LB400 生长的影响

在 50 mL 锥形瓶中加入 810 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 丁二酸钠作为碳源和能源培养 LB400^[14],同时向锥形瓶中按 1.4 节中的设计定量加入表面活性剂和 HPCD 溶液,放入 160 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的恒温摇床 28 $^{\circ}\text{C}$ 下培养 20 h

后,以测量菌液 D_{600} 来表征菌体的生长状况.

1.7 分析方法

降解体系中 PCBs 的测定:实验均设置 3 个平行(下同),并设置不加菌液的空白对照(加入少量 Na_3N 作为抑菌剂),以扣除在培养过程中 PCBs 的挥发损失. 用整管萃取的方法测定 PCBs 剩余量:向 5 mL 培养液中加入 5 mL 色谱纯乙酸乙酯作为萃取剂^[7],用带有聚四氟乙烯衬层的盖子拧紧管口,涡旋振荡 1 min,静置分层,抽取上层含 PCBs 的乙酸乙酯,重复操作 3 次,合并 3 次萃取液,旋转蒸发、定容至 5 mL,样品进 HPLC. 3 种 PCBs 的萃取率 $\geq 98\%$. 测定用的 HPLC 型号为岛津 LC-20AT,色谱柱为 Synchronis C18 柱,流动相为乙腈:水 = 9:1,样品中 PCBs 含量用标准曲线定量.

增溶体系中 PCBs 的测定:在 2 d 取出培养管,培养管经 10 000 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 20 min,抽取上清液 3 mL,加入 3 mL 色谱纯乙酸乙酯进行上述的萃取操作和测定,以上清液中 PCBs 的含量多少作为增溶效果的评价标准.

表面活性剂对菌种生长的影响测定:每个锥形瓶抽取 10 mL 培养液经 2 000 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 20 min 后,用 UV-2800 分光光度计(Unico,上海)测定菌液的 D_{600} 来确定 LB400 的生物量^[11].

2 结果与讨论

2.1 *Burkholderia xenovorans* LB400 对 3 种 PCBs 的降解

以 PCBs 为唯一碳源及以联苯为共基质条件的情况下 LB400 对 3 种 PCBs 的降解见图 1. 在以 PCBs 为唯一碳源时,3 d 内 LB400 降解的速率顺序是:PCB3 > PCB5 > PCB31;随着时间的延长,3 种 PCBs 降解速率的增量也是同样趋势. 这是由于 PCBs 的氯代程度越高,其在水相中的溶解度越低,LB400 越难以利用其作为生长底物而进行自身的代谢增殖. 微生物降解 PCBs 遵循的是联苯代谢途径,主要通过 2,3 双加氧酶攻击 2,3 位 C—C 键,实现 PCBs 的间位开环降解;氯原子数目过多会阻止 PCBs 与酶活性位点结合,故 PCBs 的氯代程度越高,微生物好氧降解越困难,且速率越慢^[15,16].

在添加联苯处理中,低联苯浓度($< 20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)的条件下对 PCB31 的降解几乎没有影响. 添加 20 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、40 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 联苯后,0 ~ 2 d 内 PCB31 的降解效率没有明显提高反而有所下降,这可能是由于 LB400 在前期优先利用含量较大且更易降解的联苯;在 2 ~ 3 d PCB31 的降解效率明显

高于没有添加联苯的处理,且随着联苯添加量的增加,PCB31 的共基质降解效率有显著提高。同时,在 3 d 后各处理的菌液 D_{600} 的大小顺序为:0.357 ($40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) > 0.195 ($20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) > 0.178 ($10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) > 0.092 ($0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),这说明添加联苯除了有助于诱导 PCBs 降解酶外^[14],还有利于维持或提高降解菌的数量,促使 LB400 以共代谢的方式降解 PCBs,加速难溶性的 PCBs 向水相的迁移和溶解。

2.2 表面活性剂对 2 种 PCBs 的增溶效果

强化 PCBs 好氧降解的措施主要有两方面:一是促使 PCBs 的降解以共代谢方式进行,如添加适量联苯;二是增强 PCBs 的水溶性以提高其生物有效性,如添加表面活性剂。为增加 PCBs 的溶解度,笔者考察了表面活性剂对 PCB5 和 PCB31 的增溶效果。由图 2 可知,当 TX-100、Tween 80 和 RL crude 在浓度低于各自的 CMC (见表 1) 以及 HPCD 在浓度低于 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,均对 2 种 PCBs 没有明显的增溶作用。而当 TX-100、Tween 80 和 RL crude 在浓度高于 (或等于) 各自的 CMC 以及 HPCD 在浓度高于 $500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,均对 2 种 PCBs 有明显的增溶作用,且不同表面活性剂的增溶效果有明显差别。实验 2 d 后,培养管中 2 种 PCBs 的实际量为 PCB5

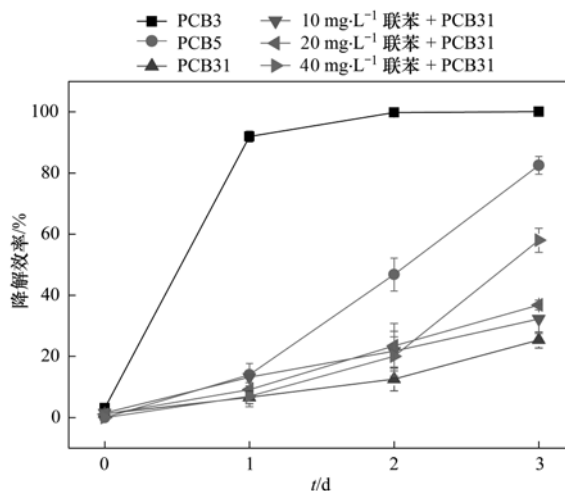
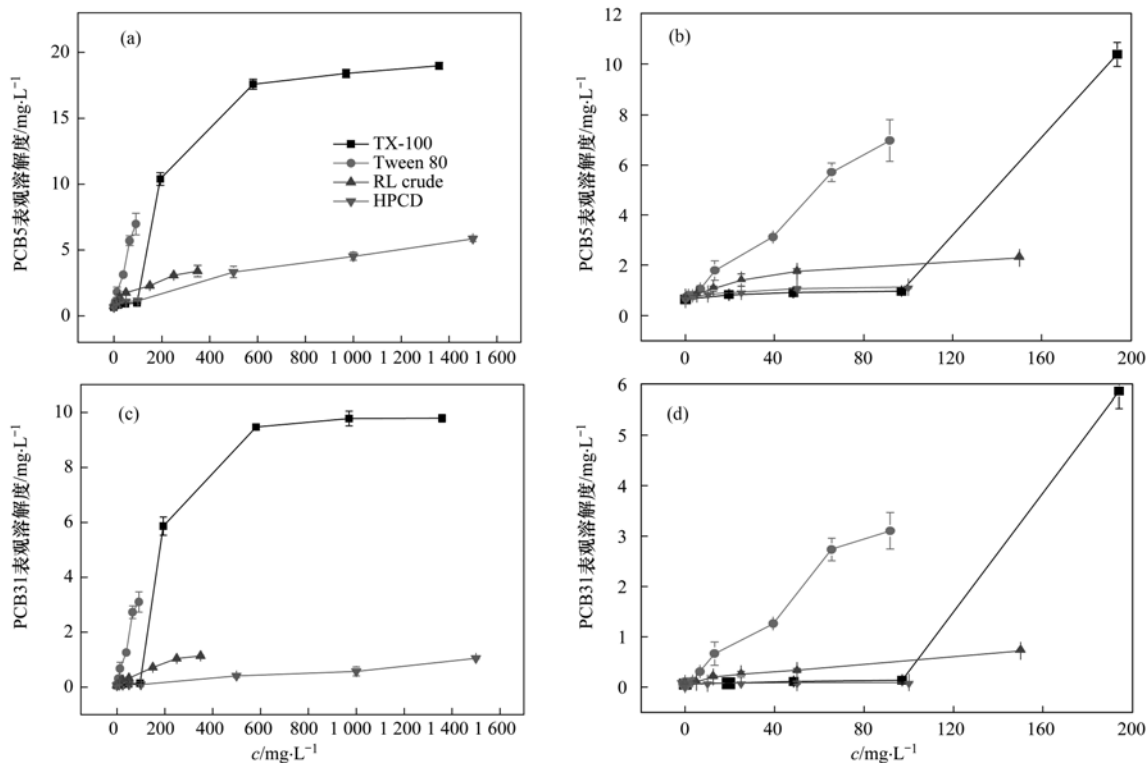


图 1 LB400 对 PCB3 ($50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)、PCB5 ($20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 和 PCB31 ($10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 的单一碳源降解以及联苯共代谢降解

Fig. 1 Degradation ratios of PCB3 ($50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), PCB5 ($20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) and PCB31 ($10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) as sole carbon sources and biphenyl co-metabolism

$19.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、PCB31 $9.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,扣除空白对照, TX-100、Tween 80、RL crude 浓度在 1 ~ 7 CMC 时和 HPCD 浓度在 $500 \sim 1500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时对 PCB5 和 PCB31 溶出率分别达到:54.7% ~ 100% (100% 为 PCBs 几乎完全溶解)、59.8% ~ 100%; 10.5% ~



(b) 为 (a) 的局部放大, (d) 为 (c) 的局部放大

图 2 TX-100、Tween 80、RL crude 和 HPCD 对 PCB5 ($20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 和 PCB31 ($10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 的增溶效果

Fig. 2 Solubility of PCB5 ($20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) and PCB31 ($10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) in TX-100, Tween 80, RL crude and HPCD solutions

40.8%、6.8% ~ 31.6% ; 10.3% ~ 19.9%、3.3% ~ 11.6% ; 19.5% ~ 34.2%、4.2% ~ 10.7%, 从以上数据可见, 3 种表面活性剂和 HPCD 中对 PCB5 和 PCB31 增溶效果最为显著的是 TX-100, 其次是 Tween 80, 最差的是 RL crude, 其中因为 HPCD 的结构为具有一定内径的外缘亲水, 空腔疏水的桶状大分子, 故可能对分子直径较小的 PCB5 具有更好的增溶效果^[17], 因此表面活性剂的添加有利于增加 PCBs 的溶解度, 提高其生物有效性。

2.3 表面活性剂对 *Burkholderia xenovorans* LB400 生长的影响

由图 2 可知, PCBs 的增溶效果随表面活性剂浓度的增加而增大, 但同时表面活性剂可能对微生物的生长也有抑制或毒害, 因此考察了不同的表面活性剂存在对 LB400 的生长影响, 结果见图 3。从中可以看出, TX-100 和 Tween 80 对 LB400 的生长起明显的抑制作用, 其中最为显著的是 TX-100, 这可能与 TX-100 的生物降解性能不好以及毒性作用有关; 当 TX-100 浓度 $< 50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 对 LB400 的生长几乎没有抑制作用, 而浓度在 1 ~ 7 CMC 时则有

明显的抑制作用, 且浓度越大, 抑制作用越强烈, 抑制率达到 30.3% ~ 45.8%。Tween 80 浓度在 0.1 ~ 1 CMC 时对 LB400 的生长有较明显的抑制作用, 抑制率为 10.0% ~ 15.4%, 而当浓度 $> \text{CMC}$ 时, 抑制作用则逐步减轻。不同的表面活性剂会对不同菌种的生长产生促进/抑制效应, 这可能与表面活性剂-细胞膜酶蛋白的相互作用有关^[11,18]。HPCD 对 LB400 的生长没有明显的影响, 而 RL crude 在浓度 $\leq \text{CMC}$ 时对 LB400 的生长有较小的抑制作用, 而在高浓度 ($> 150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 的情况下, 却能显著的促进 LB400 的生长, 且经进一步实验验证, LB400 能以 RL crude 为唯一碳源和能源进行细胞增殖, 这也与前人的研究结果相一致^[9]。

由 2.2 节和 2.3 节的分析可知, 表面活性剂一方面能通过增加 PCBs 的溶解度来提高其生物可利用性, 另一方面又会在一定浓度范围内抑制 (如 TX-100 和 Tween 80) 或促进 (如 RL crude) LB400 的生长, 因此有必要构建基于表面活性剂环境因子的微生物降解体系来确定表面活性剂发挥强化 PCBs 降解作用的合适条件。

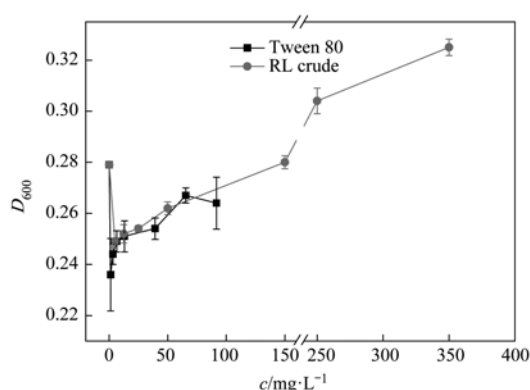
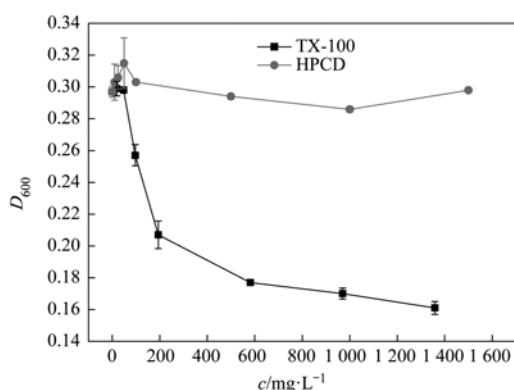


图 3 TX-100、Tween 80、RL crude 和 HPCD 对 LB400 生长的影响

Fig. 3 Impacts of TX-100, Tween 80, RL crude and HPCD on growth of *Burkholderia xenovorans* LB400

2.4 表面活性剂-*Burkholderia xenovorans* LB400 体系对 2 种 PCBs 的降解

在表面活性剂存在的条件下, 微生物对 PCBs 的降解效率是 PCBs 的增溶性和菌种的生长抑制两方面因素竞争的结果, 因此笔者探讨了基于表面活性剂因子的 *Burkholderia xenovorans* LB400 对 PCBs 好氧降解的影响, 结果见图 4。由图 4(a) 可知, 在 Tween 80 浓度 $\leq 13.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (CMC) 时, PCB31 的降解效率均明显低于空白对照, 这可能是因为未形成胶束状态 ($< \text{CMC}$ 时) 的自由的表面活性剂基团吸附在细胞表面和 PCB31 疏水性表面, 降低了整个

PCB31 疏水性表面与细胞的接触几率, 从而阻碍了 LB400 在 PCBs-细胞作用界面上分泌胞外酶对其进行降解^[18~20]; 且低浓度的 Tween 80 对 LB400 的生长有更加明显的抑制作用 (图 3)。在 Tween 80 浓度在 1 ~ 7 CMC 时, PCB31 的降解效率随 Tween 80 浓度的提高而呈显著增大的趋势, 与空白对照相比, PCB31 的降解效率显著提高了 14.6% ~ 44.3%。研究表明, 表面活性剂浓度 $> \text{CMC}$ 时, 会通过形成 PCBs-表面活性剂的胶束来提高 PCBs 的表观溶解度, 从而加强 PCBs 与细胞间的亲水性接触, 提高降解效率^[21~24], 这与 Tween 80 浓度 $> \text{CMC}$ 时对

PCB31 有显著的增溶作用的结果相吻合(图 2),且 Tween 80 在这浓度范围内对 LB400 的抑制作用已大大减轻.

在 RL crude 浓度 $\leq 50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (CMC) 和 HPCD 浓度 $\leq 500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, LB400 对 PCB31 降解效率的变化与 Tween 80 浓度 $\leq \text{CMC}$ 时的情况基本相同. 由图 4(b) 和 4(c) 可知, 当 RL crude 浓度 $> \text{CMC}$ 时, PCB31 的降解效率比空白对照低, 这可能是因为 RL crude 能作为 LB400 的碳源和能源与此时溶解度仍然很低的 PCB31 进行竞争, 故导致 PCB31 降解效率的下降; 直到 RL crude 浓度在 5~7 CMC 时, PCB31 在水相中的表观溶解度开始有明显的增加, PCB31 的降解效率与空白对照相比也相应提高了 9.6%~27.2%, 而此时虽然 RL crude 对 LB400 的生长有促进作用, 但它本身对 PCB31 的增溶作用较小且已趋于饱和(图 2), 故对 PCB31 降解效率提高较小. 在 HPCD 浓度 $\geq 1000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, PCB31 的降解效率比空白对照增大 15.3%~20.7%, 虽然 HPCD 对 LB400 的生长没有明显的抑制作用(图 3), 但它对 PCB31 的溶解效果是最差的(图 2), 故当 HPCD 的浓度增大到一定程度后, 它对 PCB31 的降解效果已经没有明显的促进作用.

由图 4(d) 可知, 在 TX-100 的浓度 $< 194 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (CMC) 时, 水相中 PCB31 的溶解度没有明显的增加, 而 PCB31 的降解效率随 TX-100 浓度的增大有较小幅度的提高, 这与 Tween 80、RL crude 和 HPCD 的结果相反, 这一方面可能是由于 TX-100 在浓度 $< \text{CMC}$ 时对 LB400 的生长几乎没有抑制作用, 另一方面可能是由于 TX-100 本身的结构或官能团能改善细胞和 PCB31 疏水性表面之间的接触^[25,26]. 在 TX-100 浓度 = CMC 时, LB400 对 PCB31 的降解效率达到 100%, 与空白对照相比极为显著地提高了 65.5%, 同时 TX-100 对 PCB31 的溶解效果也有极为显著的提高(图 2), 表观溶解度远高于其它处理; 尽管此时 TX-100 对 LB400 的生长已有 30.3% 的抑制率, 远高于其它处理, 但 LB400 对 PCB31 的降解仍然有显著增强的效果, 目前为止未见相关研究报道; 然而在 TX-100 浓度 $> \text{CMC}$ 时, LB400 对 PCB31 的降解效率随 TX-100 浓度的增大而急剧下降, 尽管此时 PCB31 的溶出效率接近 100%, 但高浓度的 TX-100 环境已使 LB400 的生长受到严重的抑制. 另外由图 4 可知, 在 3 种表面活性剂和 HPCD 环境中, PCB5 降解效率的变化不明显, 这可能是相对于 PCB31 而言, PCB5 本身具有较

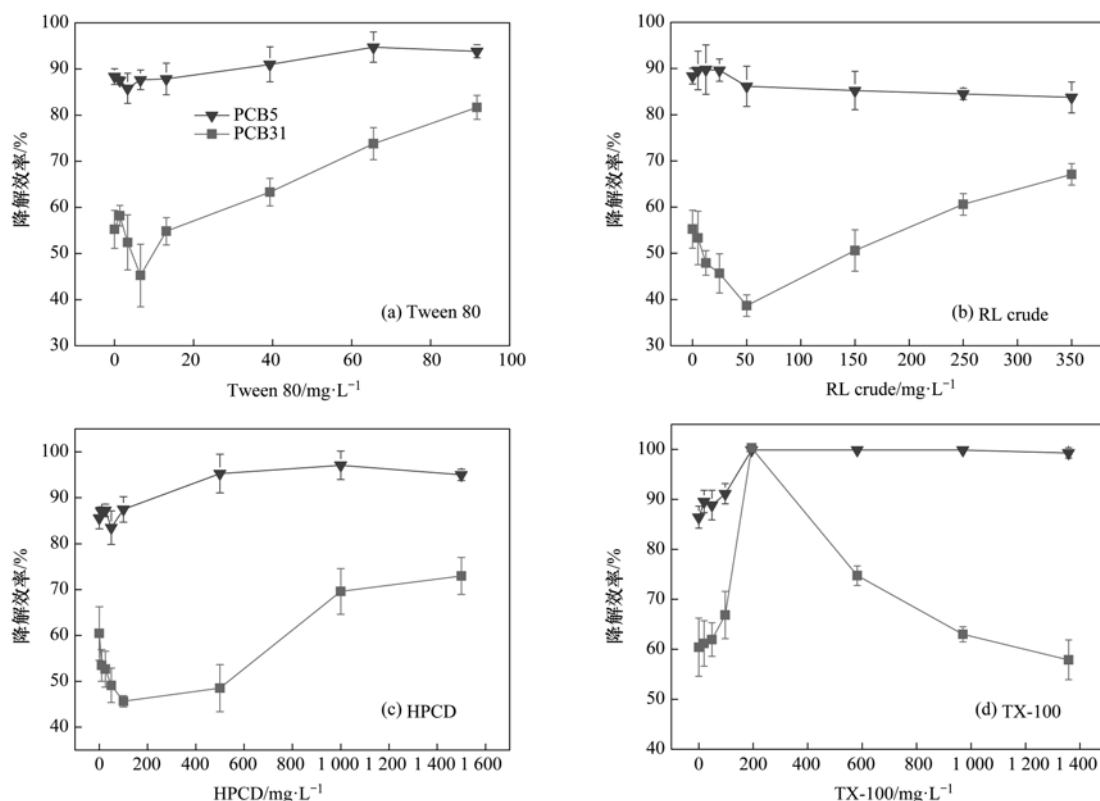


图 4 Tween 80、RL crude、HPCD 和 TX-100 对 LB400 降解 PCB5($10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 和 PCB31($5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 效率的影响

Fig. 4 Impacts of Tween 80, RL crude, HPCD and TX-100 on degradation ratios of PCB5 ($10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) and PCB31 ($5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) by *Burkholderia xenovorans* LB400

高的溶解度和较好的降解性能。

在表面活性剂环境下微生物降解 PCBs 的效率主要受两方面因素的影响:①水相中 PCBs-表面活性剂的胶束浓度;②表面活性剂自身对细胞生长代谢的影响。总体来说,水相中 PCBs-表面活性剂的胶束浓度越高,即 PCBs 在溶液中的表观溶解度越大, LB400 对 PCBs 的降解效率越高,但必须同时定性定量地考虑表面活性剂本身对菌体生长的影响。在本实验中当设置 TX-100 和 Tween 80 浓度分别为 1 和 7 CMC 时, LB400 对 PCB31 的降解效率有显著提高。

3 结论

(1) 在表面活性剂环境下, *Burkholderia xenovorans* LB400 降解低氯代 PCBs 的效率主要受两方面因素的影响:①水相中 PCBs-表面活性剂的胶束浓度;②表面活性剂对 LB400 的生长抑制。在浓度 $\geq$ CMC 时, 3 种表面活性剂和 HPCD ($\geq 500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 对低氯代 PCBs 增溶效果最为显著的是 TX-100、其次是 Tween 80, RL crude 和 HPCD 效果较差;相应地 TX-100 和 Tween 80 对于 LB400 降解低氯代 PCBs 也有极为显著的促进作用;然而 TX-100 和 Tween 80 浓度分别在 1 ~ 7 CMC 和 0.1 ~ 1 CMC 时会不同程度地抑制 LB400 的生长。

(2) 总体来说,水相中 PCBs-表面活性剂的胶束浓度越高,即 PCBs 在溶液中的表观溶解度越大, LB400 对 PCBs 的降解效率越高,但必须同时定性定量地考虑表面活性剂本身对菌体生长的抑制作用。

(3) 在水溶液培养体系中当设置 TX-100 和 Tween 80 浓度分别在 1 和 7 CMC 时, PCB31 ($5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 的降解效率达到 100% 和 81.7%, 而此时 *B. xenovorans* LB400 生长的抑制率为 30.3% 和 5.4%, 但对于受工业 PCBs (如 Aroclor) 污染的实际土壤而言, 仍需进一步探讨表面活性剂对 PCBs 微生物修复带来的影响。

参考文献:

- [1] Xu W G, Wang X, Cai Z W. Analytical chemistry of the persistent organic pollutants identified in the Stockholm Convention: a review[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2013, **790**: 1-13.
- [2] Cao M H, Hu Y, Sun Q, *et al.* Enhanced desorption of PCB and trace metal elements (Pb and Cu) from contaminated soils by saponin and EDDS mixed solution[J]. *Environmental Pollution*, 2013, **174**: 93-99.
- [3] Gomes H I, Dias-Ferreira C, Ribeiro A B. Overview of *in situ* and *ex situ* remediation technologies for PCB-contaminated soils and sediments and obstacles for full-scale application [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **445-446**: 237-260.
- [4] Doong R, Lei W G. Solubilization and mineralization of polycyclic aromatic hydrocarbons by *Pseudomonas putida* in the presence of surfactant [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2003, **96**(1): 15-27.
- [5] Fan G P, Cang L, Fang G D, *et al.* Surfactant and oxidant enhanced electrokinetic remediation of a PCBs polluted soil[J]. *Separation and Purification Technology*, 2014, **123**: 106-113.
- [6] 施周, Ghosh M M. 表面活性剂溶液中多氯联苯溶解的特性[J]. *中国环境科学*, 2001, **21**(5): 456-459.
- [7] 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.
- [8] Rehmann L, Daugulis A J. Enhancement of PCB degradation by *Burkholderia xenovorans* LB400 in biphasic systems by manipulating culture conditions [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2008, **99**(3): 521-528.
- [9] Liu Y S, Ma M Y, Shi Z. Application of rhamnolipid biosurfactant for removing polychlorinated biphenyls from contaminated soil [J]. *Advanced Materials Research*, 2011, **233-235**: 608-613.
- [10] 田齐东, 王国庆, 赵欣, 等. 3 种表面活性剂对有机氯农药污染场地土壤的增效洗脱修复效应[J]. *生态与农村环境学报*, 2012, **28**(2): 196-202.
- [11] Fernando Bautista L, Sanz R, Carmen Molina M, *et al.* Effect of different non-ionic surfactants on the biodegradation of PAHs by diverse aerobic bacteria [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2009, **63**(7): 913-922.
- [12] Goris J, De Vos P, Caballero-Mellado J, *et al.* Classification of the biphenyl- and polychlorinated biphenyl-degrading strain LB400^T and relatives as *Burkholderia xenovorans* sp. nov [J]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2004, **54**(5): 1677-1681.
- [13] Denef V J, Patrauchan M A, Florizone C, *et al.* Growth substrate- and phase-specific expression of biphenyl, benzoate, and C1 metabolic pathways in *Burkholderia xenovorans* LB400 [J]. *Journal of Bacteriology*, 2005, **187**(23): 7996-8005.
- [14] Parnell J J, Denef V J, Park J, *et al.* Environmentally relevant parameters affecting PCB degradation: carbon source- and growth phase-mitigated effects of the expression of the biphenyl pathway and associated genes in *Burkholderia xenovorans* LB400 [J]. *Biodegradation*, 2010, **21**(1): 147-156.
- [15] Arnett C M, Paraless J V, Haddock J D. Influence of chlorine substituents on rates of oxidation of chlorinated biphenyls by the biphenyl dioxygenase of *Burkholderia* sp. Strain LB400 [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2000, **66**(7): 2928-2933.
- [16] Zorádová-Murfnová S, Dudášová H, Lukášová L, *et al.* Adaptation mechanisms of bacteria during the degradation of polychlorinated biphenyls in the presence of natural and synthetic

- terpenes as potential degradation inducers [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2012, **94**(5): 1375-1385.
- [17] 丁娟, 罗坤, 周娟, 等. 表面活性剂 Tween 80 和 β -环糊精对白腐菌降解多环芳烃的影响[J]. *南京大学学报(自然科学版)*, 2007, **43**(5): 561-566.
- [18] Song M, Bielefeldt A R. Toxicity and inhibition of bacterial growth by series of alkylphenol polyethoxylate nonionic surfactants [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, **219-220**: 127-132.
- [19] Feng W, Swift S, Singhal N. Effects of surfactants on cell surface tension parameters and hydrophobicity of *Pseudomonas putida* 852 and *Rhodococcus erythropolis* 3586[J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2013, **105**: 43-50.
- [20] Zhang D, Zhu L Z. Effects of Tween 80 on the removal, sorption and biodegradation of pyrene by *Klebsiella oxytoca* PYR-1 [J]. *Environmental Pollution*, 2012, **164**: 169-174.
- [21] 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.
- [22] Sarma S J, Pakshirajan K. Surfactant aided biodegradation of pyrene using immobilized cells of *Mycobacterium frederiksbergense* [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2011, **65**(1): 73-77.
- [23] Zhang D, Zhu L H, Li F. Influences and mechanisms of surfactants on pyrene biodegradation based on interactions of surfactant with a *Klebsiella oxytoca* strain [J]. *Bioresource Technology*, 2013, **142**: 454-461.
- [24] Lanzon J B, Brown D G. Partitioning of phenanthrene into surfactant hemi-micelles on the bacterial cell surface and implications for surfactant-enhanced biodegradation [J]. *Water Research*, 2013, **47**(13): 4612-4620.
- [25] Neu T R. Significance of bacterial surface-active compounds in interaction of bacteria with interfaces [J]. *Microbiological Reviews*, 1996, **60**(1): 151-166.
- [26] Zhang D, Zhu L Z. Controlling microbiological interfacial behaviors of hydrophobic organic compounds by surfactants in biodegradation process [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2014, **8**(3): 305-315.

CONTENTS

Development of a Two Stage Virtual Impactor for Stationary Source PM ₁₀ and PM _{2.5} Sampling	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, DUAN Lei, <i>et al.</i> (3639)
Characteristics and the Impact Factors of Acid Rain in Fuzhou and Xiamen 1992-2012	ZHENG Qiu-ping, WANG Hong, CHEN Bin-bin, <i>et al.</i> (3644)
Concentration Distribution of Metal Elements in Atmospheric Aerosol Under Different Weather Conditions in Qingdao Coastal Region	CHEN Xiao-jing, QI Jian-hua, LIU Ning, <i>et al.</i> (3651)
Emission Characteristics and Hazard Assessment Analysis of Volatile Organic Compounds from Chemical Synthesis Pharmaceutical Industry	LI Yan, WANG Zhe-ming, SONG Shuang, <i>et al.</i> (3663)
NO _x and SO ₂ Formation in the Sintering Process and Influence of Sintering Material Composition on NO _x Emissions	REN Zhong-pei, ZHU Tian-le, ZHU Ting-yu, <i>et al.</i> (3669)
Application of Activated Carbon from Waste Tea in Desulfurization and Denitrification	SONG Lei, ZHANG Bin, DENG Wen (3674)
Effect of Soil Texture in Unsaturated Zone on Soil Nitrate Accumulation and Groundwater Nitrate Contamination in a Marginal Oasis in the Middle of Heihe River Basin	SU Yong-zhong, YANG Xiao, YANG Rong (3683)
Health Assessment of River Ecosystem in Haihe River Basin, China	HAO Li-xia, SUN Ran-hao, CHEN Li-ding (3692)
Analysis on the Variation Characteristics of Iron and Manganese Concentration and Its Genesis in Changtan Reservoir in Taizhou, Zhejiang Province	LIU Shu-yuan, ZHENG Chen, YUAN Qi, <i>et al.</i> (3702)
Spatiotemporal Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in a Mountainous Urban Lake	BAO Jing-yue, BAO Jian-guo, LI Li-qing (3709)
Formation of Geochemistry in Underground River Under Rainfall Conditions: An Example for Underground River at Xueyu Cave, Chongqing	WANG Feng-kang, LIANG Zuo-bing, YU Zheng-liang, <i>et al.</i> (3716)
Contamination and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water and in Karst Underground River Catchment	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, TIAN Ping, <i>et al.</i> (3722)
Pollution Characteristics and Ecological Risk of Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs) in River Sediments from an Electrical Equipment Dismantling Area	CHEN Xuan-yu, XUE Nan-dong, ZHANG Shi-lei, <i>et al.</i> (3731)
Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments in the Southern and Central Haihe River Basin	WANG Rui-lin, CHENG Xian, SUN Ran-hao (3740)
Distribution Characteristics of COD and DO and Its Influencing Factors in the Daliaohe Estuary	YANG Fu-xia, JIAN Hui-min, TIAN Lin, <i>et al.</i> (3748)
Seasonal Variation in the Absorption and Fluorescence Characteristics of CDOM in Downstream of Liaohe River	SHAO Tian-tian, ZHAO Ying, SONG Kai-shan, <i>et al.</i> (3755)
Nitrogen Uptake and Denitrification Study on the Joint Treatment of Aquatic Vegetation and Immobilized Nitrogen Cycling Bacteria in Taihu Lake	LIU Dan-dan, LI Zheng-kui, YE Zhong-xiang, <i>et al.</i> (3764)
Actinobacteria and Their Odor-producing Capacities in a Surface Water in Shanghai	CHEN Jiao, BAI Xiao-hui, LU Ning, <i>et al.</i> (3769)
Laboratory Evaluation of Remediation of Nitrobenzene Contaminated Aquifer by Using Groundwater Circulation Well	BAI Jing, ZHAO Yong-sheng, SUN Chao, <i>et al.</i> (3775)
Sorption Characteristics of Tea Waste Modified by Hydrated Ferric Oxide Toward Pb(II) in Water	WAN Shun-li, XUE Yao, MA Zhao-zhao, <i>et al.</i> (3782)
Effects of UV Radiation on the Aggregation Performance of Small Molecular Organic Acids	WANG Wen-dong, WANG Ya-bo, FAN Qing-hai, <i>et al.</i> (3789)
UV Photolysis of Propanolol in Aqueous Solution: Mechanism and Toxicity of Photoproducts	PENG Na, WANG Kai-feng, LIU Guo-guang, <i>et al.</i> (3794)
Photo-catalytical Degradation of Diphenylarsinic Acid by TiO ₂ (P25)	WANG A-nan, TENG Ying, LUO Yong-ming (3800)
Effect of Carbon/Nitrogen Ratio on Short-Cut Nitrification and Denitrification of Polyurethane Biofilm Reactor	TAN Chong, LIU Ying-jie, WANG Wei, <i>et al.</i> (3807)
Distribution and Removal of Anaerobic Antibiotic Resistant Bacteria During Mesophilic Anaerobic Digestion of Sewage Sludge	TONG Juan, WANG Yuan-yue, WEI Yuan-song (3814)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Insecticides in Surface Soil from a Rapidly Urbanizing Region	WEI Yan-li, BAO Lian-jun, WU Cheng-zhou, <i>et al.</i> (3821)
Field Measurement of Soil Mercury Emission in a Masson Pine Forest in Tieshanping, Chongqing in Southwestern China	DU Bao-yu, WANG Qiong, LUO Yao, <i>et al.</i> (3830)
Chlorine Speciation and Concentration in Cultivated Soil in the Northeastern China Studied by X-Ray Absorption Near Edge Structure	LI Jing, LANG Chun-yan, MA Ling-ling, <i>et al.</i> (3836)
Soil Organic Carbon Storage Changes with Land Reclamation Under Vegetation Reconstruction on Opencast Coal Mine Dump	LI Jun-chao, DANG Ting-hui, GUO Sheng-li, <i>et al.</i> (3842)
Effect of Sulfur on the Species of Fe and As Under Redox Condition in Paddy Soil	TANG Bing-pei, YANG Shi-jie, WANG Dai-zhang, <i>et al.</i> (3851)
Response of Ectomycorrhizal Fungi to Aluminum Stress and Low Potassium Soil	ZHANG Wei, HUANG Jian-guo, YUAN Ling, <i>et al.</i> (3862)
Long-Term Manure Application Induced Shift of Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in Paddy Soil	HUANG Fu-yi, LI Hu, WEI Bei, <i>et al.</i> (3869)
Effect of Phosphate and Organic Acid Addition on Passivation of Simulated Pb Contaminated Soil and the Stability of the Product	ZUO Ji-chao, GAO Ting-ting, SU Xiao-juan, <i>et al.</i> (3874)
Bioremediation of Chromium(VI) Contaminated Site by Reduction and Microbial Stabilization of Chromium	ZHENG Jia-chuan, ZHANG Jian-rong, LIU Xi-wen, <i>et al.</i> (3882)
Effect of Thermal Enhanced Soil Vapor Extraction on Benzene Removal in Different Soil Textures	LI Peng, LIAO Xiao-yong, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (3888)
Effects of Elevated O ₃ Concentration on Nitrogen in Greening Tree Species in Southern China	YANG Tian-tian, ZHANG Wei-wei, HU En-zhu, <i>et al.</i> (3896)
Effects of Nitrogen Application on Soil Greenhouse Gas Fluxes in <i>Eucalyptus</i> Plantations with Different Soil Organic Carbon Content	LI Rui-da, ZHANG Kai, SU Dan, <i>et al.</i> (3903)
Ozone Effects on Soil Microbial Community of Rice Investigated by ¹³ C Isotope Labeling	CHEN Zhan, WANG Xiao-ke, SHANG He (3911)
Enhanced Aerobic Degradation of Low Chlorinated Biphenyls by Constructing Surfactants <i>Burkholderia xenovorans</i> LB400 Based System	CHEN Shao-yi, ZHANG Jing, WANG Han, <i>et al.</i> (3918)
Identification of a High Ammonia Nitrogen Tolerant and Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacterial Strain TN-14 and Its Nitrogen Removal Capabilities	XIN Xin, YAO Li, LU Lei, <i>et al.</i> (3926)
Isolation and Identification of Electrochemically Active Microorganism from Micro-Aerobic Environment	WU Song, XIAO Yong, ZHENG Zhi-yong, <i>et al.</i> (3933)
Characteristics of Microbial Community Structure During Isolation of Electrical Active Bacteria	WANG Min, ZHAO Yang-guo, LU Shan-shan (3940)
Predicting Copper Toxicity to <i>Hypophthalmichthys molitrix</i> and <i>Ctenopharyngodon idellus</i> Based on Biotic Ligand Model	WANG Wan-bin, CHEN Sha, WU Min, <i>et al.</i> (3947)
Macrobenthos Community Structure and Water Quality Evaluation of Tian'e Zhou Oxbows	MA Xiu-juan, SHEN Jian-zhong, WANG Teng, <i>et al.</i> (3952)
Species Selection Methods in Deriving Water Quality Criteria for Aquatic Life	ZHANG Ling-song, WANG Ye-yao, MENG Fan-sheng, <i>et al.</i> (3959)
Correlations Between HBCD and Thyroid Hormone Concentrations in Human Serum from Production Source Area	LI Peng, YANG Cong-qiao, JIN Jun, <i>et al.</i> (3970)
Preparation of Cobalt Oxide Mesoporous Metallic Oxide-Clay Composites and Their Catalytic Performance in the Oxidation of Benzene	MU Zhen, MA Chun-yan, CHENG Jie, <i>et al.</i> (3977)
Catalytic Degradation of Naphthalene by CuO(-CeO ₂)/Al ₂ O ₃	ZHA Jian, ZHOU Hong-cang, HE Du-liang, <i>et al.</i> (3984)
Toxicity Tests and Their Application in Safety Assessment of Water Quality	XU Jian-ying, ZHAO Chun-tao, WEI Dong-bin (3991)
Assessment on the COD Discharge Status of Municipal Wastewater Treatment Plant in a City of China	ZHOU Yu-hua, LU Yan-na, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (3998)
Assessment of Ecological Environment Benefits of Reclaimed Water Reuse in Beijing	FAN Yu-peng, CHEN Wei-ping (4003)
Construction of Index System for Early Warning of Persistent Organic Pollutants (POPs) Pollution Incidents in China	WANG Lin, LÜ Yong-long, HE Gui-zhen, <i>et al.</i> (4009)
Environmental Damages Assessment: Establishment of System Framework in China	ZHANG Hong-zhen, WANG Jin-nan, NIU Kun-yu, <i>et al.</i> (4015)

《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)

2014年10月15日 第35卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 10 Oct. 15, 2014

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行