

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第3期

Vol.33 No.3

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

典型排放源黑碳的稳定碳同位素组成研究 陈颖军,蔡伟伟,黄国培,李军,张干(673)

天山典型冰川区雪冰中碳质气溶胶浓度特征研究 王圣杰,张明军,王飞腾,李忠勤(679)

兰州市夏秋季颗粒物谱分布特征研究 赵素平,余晔,陈晋北,刘娜,何建军(687)

不同交通状况下道路边大气颗粒物数浓度粒径分布特征 杨柳,吴焯,宋少洁,郝吉明(694)

南京市夏季大气气溶胶新粒子生成事件分析 王红磊,朱彬,沈利娟,康汉青,刁一伟(701)

西北干旱区降水中 $\delta^{18}O$ 变化特征及其水汽输送 李小飞,张明军,李亚举,王圣杰,黄小燕,马潜,马雷宁(711)

海南东部河口和近岸海域总溶解态无机砷的分布及季节变化 曹秀红,任景玲,张桂玲,张金娥,杜金洲,朱德弟(720)

大辽河口痕量元素砷的河口混合行为 简慧敏,姚庆祯,于立霞,田琳(727)

渤海湾表层沉积物各形态重金属的分布特征与生态风险评价 徐亚岩,宋金明,李学刚,袁华茂,李宁(732)

青岛近岸表层海水中PAHs的分布特征及物源初步解析 李先国,邓伟,周晓,唐旭利,魏新运,王岩(741)

广西乐业大石围天坑群多环芳烃的干湿沉降 孔祥胜,祁士华,黄保健,张原,李杰(746)

上海宝山区城市土壤铅污染来源的同位素判别 董辰寅,张卫国,王冠,马鸿磊,刘圆,刘莹,叶雷平,俞立中(754)

溶质迁移模型在地下水有机污染源识别中的应用 王树芳,王丽亚,王晓红,林沛,刘久荣,辛宝东,贺国平(760)

地下水污染风险评估中特征污染物量化方法探讨 王俊杰,何江涛,陆燕,刘丽雅,张小亮(771)

用于地下水回灌的再生水预处理工艺研究 高滢滢,张薛,赵璇,赵刚(777)

菲律宾蛤仔养殖对胶州湾沉积物-水界面生源要素迁移的影响 邓可,刘素美,张桂玲,陆小兰,张经(782)

南京市九乡河流域景观格局空间分异对河流水质的影响 胡和兵,刘红玉,郝敬锋,安静(794)

上海都市农业村域地表水非点源氮素的时空分异特征 王楠,毛亮,黄海波,张进忠,周培(802)

不同粒径地表街尘中重金属在径流冲刷中的迁移转化 何小艳,赵洪涛,李叙勇,连宾,王小梅(810)

新型人工湿地对工业区降雨径流的净化研究 何丽君,马邕文,王金泉,李东亚,王艳(817)

改性膨润土应急截留液态有机物的性能及机制 李宇,刘贤君,张兴旺,雷乐成(825)

卵圆卡盾藻香港株过氧化氢产生的影响因素研究 江涛,吴霓,钟艳,江天久(832)

芽孢杆菌B1胞外活性物质对球形棕囊藻的溶藻特性研究 李蕾,赵玲,尹平河(838)

底泥对洋河水库微囊藻和鱼腥藻生长影响的研究 储昭升,张玉宝,金相灿,徐颖,杨红君(844)

新型无极准分子光源深度处理水相中含N-杂环化合物 叶招莲,汪斌,路娟娟,李峰,张仁熙(849)

La/Ce掺杂钛基二氧化铅电极的制备及电催化性能研究 郑辉,戴启洲,王家德,陈建孟(857)

DTT对三苯基甲烷染料脱色的研究 潘涛,刘大伟,任随周,郭俊,孙国萍(866)

pH及络合剂对亚铁活化 $S_2O_8^{2-}$ 氧化去除活性艳蓝的影响研究 张成,王金泉,马邕文,王艳,黄明智,兰明(871)

臭氧降解高浓度腐殖酸动力学 郑可,周少奇,杨梅梅(879)

采用体积信息熵表征颗粒污泥系统稳定性及其稳定机制 李志华,姬晓琴,李胜,谢磊,赵海龙,王晓昌(885)

活性污泥的理化性质与絮凝调理投药量的关系 李婷,王毅力,冯晶,徐萌(889)

不同颗粒龄的好氧颗粒污泥性能的研究 周曼,杨昌柱,濮文虹,罗应东,龚建宇(896)

颗粒粒径与数量对硝化与反硝化过程的影响 李志华,曾金锋,李胜,姬晓琴,王晓昌(903)

氧化沟不同曝气模式对氮磷去除性能的优化与比较 郭昌梓,彭党聪,陈雪梅,王丹(910)

生物沥浸的酸化效应对城市污泥脱水性能的影响 朱海凤,周立祥,王电站(916)

2种不同生物接触氧化工艺性能差异的微生物研究 钱殷,全向春,裴元生,马景赞,陶锬(922)

微生物群落对土壤微生物呼吸速率及其温度敏感性的影响 范分良,黄平容,唐勇军,李兆君,梁永超(932)

干旱沙区人工固沙植被演变过程中土壤有机碳氮储量及其分布特征 贾晓红,李新荣,周玉燕,李元寿(938)

密云水库上游流域土壤有机碳和全氮密度影响因素研究 王淑芳,王效科,欧阳志云(946)

外加营养源作用下微生物黏结剂对土壤团聚体的影响 莫艳华,汤佳,张仁铎,李方舟(952)

低分子量腐殖酸改性蒙脱土对黄曲霉素的吸附作用 姚佳佳,康福星,高彦征(958)

液固比对土壤洗涤去除多环芳烃效果的影响 吴威,姜林,陈家军,彭胜(965)

基于PPI的土地利用优化研究 武晓峰,李婷(971)

若尔盖高原湿地藻类多样性研究 陈曦,刘如钢,王艳芬,张洪勋(979)

3种杀真菌剂对AM真菌侵染和黄芩生长的影响 贺学礼,王平,马丽,孟静静(987)

崇明东滩夏季沉积物厌氧氨氧化菌群落结构与空间分布特征 郑艳玲,侯立军,陆敏,谢冰,刘敏,李勇,赵慧(992)

厌氧条件下2,2',4,4'-四溴联苯醚的微生物降解 卢晓霞,陈超琪,张姝,欧阳,尹力,吴蔚(1000)

重金属对白腐菌降解十溴联苯醚的影响 熊士昌,尹华,彭辉,何宝燕,龙焰,叶锦韶,张娜,彭素芬(1008)

有机农药滴滴涕和毒死蜱生物降解机制的分子模拟研究 林玉珍,曾光明,张娉,陈明,蒋敏,张嘉超,鲁伦慧,刘利锋(1015)

高效木薯渣分解复合菌群RXS的构建及其发酵特性研究 何江,毛忠贵,张庆华,张建华,唐蕾,张宏建(1020)

四环素类抗生素污染畜禽粪便的厌氧消化特征 童子林,刘元璐,胡真虎,袁守军(1028)

上推流厌氧反应器连续干发酵猪粪产沼气试验研究 陈闯,邓良伟,信欣,郑丹,刘刘,孔垂雪(1033)

《环境科学》征稿简则(878) 《环境科学》征订启事(1007) 信息(759, 770, 870, 1027)

厌氧条件下 2,2',4,4'-四溴联苯醚的微生物降解

卢晓霞, 陈超琪, 张姝, 欧阳, 尹力, 吴蔚

(北京大学城市与环境学院, 地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871)

摘要: 多溴联苯醚是环境中的新兴污染物, 其中 2,2',4,4'-四溴联苯醚 (BDE-47) 在环境 (尤其是水环境) 中普遍存在且生物毒性很高. 以 BDE-47 为对象, 研究了 6 组含脱卤球菌的培养液对 BDE-47 的降解, 目的是了解厌氧条件下 BDE-47 的微生物降解及其动力学. 采用 100 mL 血清瓶作为厌氧反应器, 对厌氧微生物进行培养. 对每组菌作两种处理, 一是仅加入 BDE-47 作为能源 (设计终浓度为 $200 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), 另一是同时加入 BDE-47 和三氯乙烯 (TCE) 作为能源 (设计终浓度分别为 $200 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $13 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$). 经过 3 个月的实验, 两组含脱卤球菌的培养液 (6M6B 和 T2) 均能明显降解 BDE-47, 生成 BDE-17、BDE-4 及少量的 DE, TCE 的存在一定程度上减弱了 6M6B 和 T2 菌对 BDE-47 的降解. 采用 PCR-DGGE 法对不同培养菌液的群落结构进行比较, 发现醋酸杆菌属与 BDE-47 的降解关联较大. 在 3 种不同初始浓度 (50 、 250 和 $500 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) 条件下, BDE-47 的降解速率分别为 0.0033 、 0.0014 和 0.0010d^{-1} . 本研究表明, 厌氧条件下 BDE-47 在细菌的作用下可发生还原降解, 生成 BDE-17 和 BDE-4. 醋酸杆菌属可能在 BDE-47 的降解中起较大作用. 高浓度的 BDE-47 在一定程度上会抑制降解菌的活性.

关键词: 2,2',4,4'-四溴联苯醚; 微生物降解; 细菌培养液; 群落结构; 动力学

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)03-1000-08

Microbial Degradation of 2, 2', 4, 4'-Tetrabrominated Diphenyl Ether Under Anaerobic Condition

LU Xiao-xia, CHEN Chao-qi, ZHANG Shu, OU Yang, YIN Li, WU Wei

(Laboratory for Earth Surface Processes, College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Polybrominated diphenyl ethers are emerging contaminants in the environment, among which 2,2',4,4'-tetrabrominated diphenyl ether (BDE-47) is one of the most frequently detected and the most toxic to organisms. Using BDE-47 as the object, this study investigated the degradation of BDE-47 by six enriched cultures containing *Dehalococcoides* species. The purpose is to understand the microbial degradation of BDE-47 under anaerobic condition and its kinetics. Serum bottles of 100 mL were used to construct the microcosms and enrich the anaerobic microorganisms. For each culture, two treatments were performed. One used BDE-47 as the only energy source with the designed concentration of $200 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, and the other used both BDE-47 and trichloroethene (TCE) as the energy source with the designed concentrations being $200 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ and $13 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively. After three months of experiment, two enriched cultures (6M6B and T2) could obviously degrade BDE-47, producing BDE-17 and BDE-4 (and small amount of DE). The presence of TCE inhibited the degradation of BDE-47 by 6M6B and T2 cultures to a certain degree. The PCR-DGGE assay was performed to compare the microbial community structure of various enrichments and it was found that *Acetobacterium* sp. had good correlation with the degradation of BDE-47. Under three different initial BDE-47 concentrations ($50 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, $250 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ and $500 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), the degradation rates of BDE-47 were 0.0033 , 0.0014 and 0.0010d^{-1} , respectively. This study demonstrated that BDE-47 could be reductively degraded by bacteria under anaerobic condition, producing BDE-17 and BDE-4. *Acetobacterium* sp. might play an important role in the degradation of BDE-47. High concentration of BDE-47 might inhibit the activity of the BDE-47 degrading bacteria to a certain degree.

Key words: 2,2',4,4'-tetrabrominated diphenyl ether; biodegradation; enrichment cultures; community structure; kinetics

多溴联苯醚 (PBDEs) 作为溴代阻燃剂有 30 多年的历史, 其生产和使用已对环境造成了污染^[1]. PBDEs 具有亲脂疏水性, 容易在生物体内富集并通过食物链放大. 有报道指出, 在 1970 ~ 2001 的 30 a 时间内, 北美、欧洲以及日本人体血液、母乳及组织中 PBDEs 的浓度增加了 100 倍, 平均每 5 a 就会增加一倍^[2]. 我国珠江三角洲等地方的环境和生物体中也具有较高的 PBDEs 含量^[3~8]. 2,2',4,4'-四溴联苯醚 (BDE-47) 是最普遍检出且生物毒性较大的一种 PBDE, 有研究表明 BDE-47 会降低小鼠甲状腺

激素和维生素 A 在血液中的含量, 进而导致神经系统发育异常^[9~13]. 除来源于五溴联苯醚产品的使用外, BDE-47 也可来源于高溴联苯醚的降解 (如光降解和生物降解)^[14,15].

微生物降解是消除环境中 PBDEs 的一个重要

收稿日期: 2011-04-20; 修订日期: 2011-07-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40871214, 40830746, 41030529); 高等学校博士学科点专项科研基金项目 (20070001047)

作者简介: 卢晓霞 (1972 ~), 女, 博士研究生, 副教授, 主要研究方向为污染环境修复, E-mail: luxx@urban.pku.edu.cn

作用过程. 许多污染环境(如污染沉积物)通常处于厌氧状态,有利于厌氧微生物对污染物的降解. 关于 PBDEs 的厌氧微生物降解,国外已有一些研究,但主要针对高溴代联苯醚. 例如, Gerecke 等^[16]于 2005 年报道 BDE-209 在以厌氧污泥为载体的微生物作用下,可被还原脱溴生成九溴联苯醚和八溴联苯醚. Tokarz 等^[17]报道在厌氧沉积物中 BDE-209 可被土著微生物还原脱溴成九至六溴取代的联苯醚. 该研究还在一个维生素 B12 生物模拟系统中比较了 BDE-209、BDE-99、以及 BDE-47 这 3 种 PBDEs 的还原脱溴速率,发现随着溴取代数目的减少,还原脱溴速率降低. He 等^[18]报道 *Sulfurospirillum multivorans* 可将 BDE-209 降解为八溴和七溴的联苯醚,而脱卤球菌 (*Dehalococcoides* sp.) 可将八溴联苯醚混合物降解为七至二溴的联苯醚,但两者都必须在有 TCE 的情况下发生,即降解是通过共代谢进行的. Lee 等^[19]进一步研究了土壤和沉积物中微生物对八溴联苯醚混合物的降解,发现在加 TCE 和不加 TCE 的培养液中,八溴联苯醚均能降解成低溴代的联苯醚,表明环境中存在一些未知的具有脱卤功能的菌可以降解 PBDEs. 本研究以 BDE-47 为对象,分析了 6 组含脱卤球菌的培养液在不同能源体系中对 BDE-47 的降解,目的是了解厌氧条件下 BDE-47 的微生物降解、有关降解菌及降解动力学,以期对环境中的 PBDEs 的风险管理与污染修复提供依据.

1 材料与方法

1.1 实验用菌

6 组实验菌中的 5 组(分别命名为 6M6B、T2、T4、ALT 和 ELI)来自不同场地受有机氯溶剂污染的地下水(取样时间在 2003 ~ 2004 年期间). 其中, 6M6B、T2 和 T4 来自同一场地的不同监测井(6M6B、T2 和 T4 为井编号), ALT 和 ELI 分别来自另外两个不同场地(ALT 和 ELI 为场地名). 这些地下水埋深在 6 ~ 8 m,用蠕动泵从监测井中取样,装入 40 mL 安瓿瓶中(完全装满后密封),运回实验室后第 2 d 即以 TCE 为能源、丙酸钠为碳源在厌氧条件下进行了富集培养. 此外,提取了所取地下水样的细菌总基因组,针对脱卤球菌的 16S rDNA 进行了普通扩增,结果为阳性(表明有脱卤球菌). KB1 是已商用化的有机氯溶剂降解菌(商品标签上表明含有脱卤球菌),由加拿大的 SiREM 公司提供(2004 年),在实验室也进行了培养. 所有培养液表现了降解活性后,又转移了两次,然后放在冰箱保存,至使

用时已有 3 ~ 4 a 的时间. 这六组菌均为混合菌且能将 TCE 完全脱氯生成乙烯.

1.2 实验方法

采用 100 mL 血清瓶作为厌氧反应器培养微生物. 血清瓶内盛 70 mL 培养基,其成分为: NH_4Cl ($1 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$)、 $\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ($0.1 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$)、 $\text{CaCl}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ($0.05 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$)、酵母膏 ($0.1 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$)、 $1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 磷酸缓冲液 ($1 \text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$)、0.1% 刃天青 ($1 \text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$)、 $0.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 丙酸钠 ($10 \text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$)、微量重金属溶液 ($1 \text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$)、以及维生素溶液 ($1 \text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$). 血清瓶的瓶口用特氟龙垫的丁基橡胶塞住,外套铝盖,然后用封口器密封.

对于每组菌,实验分两种处理,一是仅加入 BDE-47 作为能源(设计终浓度为 $200 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$),另一是同时加入 BDE-47 和 TCE 作为能源(设计终浓度分别为 $200 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $13 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$). 接种菌量为 5% (将保存的各组菌母液摇匀后,取 3.5 mL 加入本研究的培养瓶中). 每种处理在接种前,均先对培养基进行灭菌,并设置对照(灭菌,不接种微生物),实验设置平行. 为了防止 BDE-47 的光解,所有培养瓶静置在柜子内,在室温下避光培养. 每隔一定时间取样测定培养液中 BDE-47 及其降解产物的浓度.

在 BDE-47 的降解动力学研究中,采用 20 mL 顶空瓶作为培养装置,顶空瓶内盛 15 mL 培养基,其成分与前述相同. 设置 3 组 BDE-47 初始浓度,即 50、250 和 $500 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,接种 5% 前述 6M6B 培养瓶中经两次转移后的菌液. 每组浓度设置不接种菌的对照,实验设置平行.

1.3 化学分析方法

用 1 mL 气密型玻璃注射器从培养瓶中取 0.5 mL 水样至 1.5 mL 棕色玻璃瓶中,加 30 μL 十氯联苯(PCB209, $3.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 作为回收率指示物,加 1 mL 重蒸过的正己烷作为萃取剂,将瓶口密封,在 $30 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 转盘上旋转萃取 12 h 以上,然后取 0.5 mL 正己烷萃取液至 1.5 mL 棕色玻璃瓶,加 50 ng C^{13} 标记的 BDE-47 为内标,用特氟龙垫的铝盖封口. 用 1 mL 正己烷萃取已知浓度的 BDE-47 标准液做回收率实验,所得回收率为 86% ~ 117%.

BDE-47 用气相色谱-质谱仪 (Agilent 5973/6890N) 测定. 检测条件及部分参数如下. 进样口:不分流进样,进样口温度 290°C . 柱子:恒流,流速为 $1.5 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$,型号为 HP-5MS, $30.0 \text{ m}\times 250 \mu\text{m}\times 0.25 \mu\text{m}$. 炉内升温程序为: 110°C 起始持续 1 min, $8^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 至 180°C ,持续 1 min,以 $2^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升温至

188℃,持续 1 min,以 2℃·min⁻¹升温至 245℃,持续 5 min. 传输线温度为 300℃,EI 离子源为温度 246℃,EI 源能量为 70 eV,四极杆温度为 150℃,测定采用选择离子模式(SIM). 采用外标法定量,绘制六点标准曲线. 配制 BDE-47 及其 9 种可能脱溴产物的标准液,浓度梯度为 10、50、100、250、500 和 1 000 μg·L⁻¹,根据峰面积绘制标准曲线,曲线相关系数 0.99 以上.

1.4 基因分析方法

采用 PCR-DGGE 法分析培养菌的群落结构. 用注射器从培养液中提取 1 mL 菌液,采用蛋白酶 K 法提取细菌总基因组 DNA^[20]. 用带 GC 夹的细菌 16S rDNA 通用引物(341F-GC: 5'-CGCCCGCCGCGCCCGCGCCCGTCCCGCCGCCCGCCCGCCGCTACGGAGGCAGCAG-3', R518: 5'-ATTACCGCGGC TGCTGG-3')对提取的 DNA 进行扩展^[21]. PCR 扩增采用降落 PCR 法. 50 μL PCR 体系中包括: 1.5 mmol·L⁻¹ Mg²⁺, 50 mmol·L⁻¹ KCl, 200 μmol·L⁻¹ dNTPs, 1 μmol·L⁻¹引物, 2.5 U DNA 聚合酶,0.5 μL(1 pg ~ 1 ng)模板 DNA. PCR 程序为:94℃ 预热 5 min; 循环一:变性 94℃ 1 min, 杂交 65℃ 1 min(每个循环降 0.5℃),延伸 72℃ 1 min, 循环数 20; 循环二:变性 94℃ 1 min, 杂交 55℃ 1 min, 延伸 72℃ 1 min, 循环数 10; 最后一次延伸 72℃ 10 min; 然后 4℃ 保存. 升温程序设置为 2℃·s⁻¹,降温程序设置为 -1.5℃·s⁻¹.

配制丙烯酰胺胶,丙烯酰胺变性浓度范围为 35% ~ 65%. 在基因突变分析系统(INGENYphorU System, the Netherlands)中,将 DNA 扩增产物 40 μL 和 6X 载样缓冲液 8 μL 混匀后用 50 μL 注射器注入孔道. 60℃、100 V 高压预电泳 5 min, 然后打开循环水泵,换成 60℃、70 V 恒温恒压电泳 16 h 以上. 取出胶体浸入 3 L EB 染液中,避光染色 45 min, 换至清水中避光脱色 20 min 后,在凝胶成像系统观察 DNA 条带.

对一些特征条带进行切胶,用无菌水浸泡 12 h, 然后用不带 GC 夹的细菌 16S rDNA 通用引物(F341: 5'-CCTACGGGAGGCAGCAG - 3', R518: 5'-ATTACCGCGCTGCTGG - 3')对浸泡液中的 DNA 进行 PCR. 配制 1.5% 琼脂糖凝胶,取 3 μL PCR 产物与 0.6 μL 6X 缓冲液混合上样. 用 100 V 恒压电泳 40 min,在凝胶成像系统中显像,观测 DNA 产物,目的片段为 178 bp. 将扩增产物送到生工(上海)有限公司进行测序. 所得结果与美国国立生物信息中心的基因库进行比对,确定其种属.

2 结果与讨论

2.1 不同培养菌对 BDE-47 的还原降解

经过 96 d 的培养,在两组菌(6M6B 和 T2)的 2 个平行培养液中,BDE-47 发生了还原脱溴反应,生成 2,2',4-三溴联苯醚(BDE-17)和 2,2'-二溴联苯醚(BDE-4)及少量的联苯醚(DE). 该反应的发生不依赖于 TCE 作为细菌的能量,相反,TCE 的存在一定程度上减弱了所培养菌对 BDE-47 的降解. 在 BDE-47 为唯一能源的情况下,6M6B 和 T2 对 BDE-47 的去除率分别达 93% 和 82%,但在 BDE-47 和 TCE 同时为能源的情况下,6M6B 和 T2 对 BDE-47 的去除率分别为 67% 和 71%. 在 6M6B 和 T2 的培养瓶中,经两周的培养均产生 BDE-17 和 BDE-4,但 TCE 的存在一定程度上抑制了 BDE-4 的生成. 实验第三周后,培养瓶中 BDE-17 和 BDE-4 的浓度均逐渐下降,但还原产物(如 BDE-3、BDE-1 和 DE)没有增加,其原因可能是 BDE-17 和 BDE-4 发生了氧化降解,但其机制有待进一步研究. BDE-47 的脱溴优先发生在对位,这与文献[16,22]的报道一致. 在仅加 BDE-47 的一个 ELI 菌培养瓶中,BDE-47 也发生了降解(去除率为 89%),生成 BDE-17 和 BDE-4,但 ELI 菌的另一个培养瓶中没有观察到 BDE-47 的降解. 在其它菌的培养瓶和对照中,BDE-47 均没有发生降解. 图 1 和图 2 分别给出不同处理条件下 6M6B 和 T2 菌对 BDE-47 的降解情况.

本研究结果表明,不同菌液对 BDE-47 的脱溴能力不同. Robrock 等^[22]研究了 3 种菌对 BDE-47 的降解,其中一种为含脱卤球菌的混合菌(ANAS195),另 2 种为具有脱卤功能的纯菌(*Dehalobacter restrictus* PER-K23 和 *Desulfitobacterium hafniense* PCP-1). BDE-47 的初始浓度为 25 μg·L⁻¹,经过两周的培养,*Dehalobacter restrictus* PER-K23 降解了大部分的 BDE-47,生成 BDE-17(为初始 BDE-47 浓度的 2.8%)和 BDE-4(为初始 BDE-47 浓度的 84%). 在 3 个月的培养期内,*Desulfitobacterium hafniense* PCP-1 将 BDE-47 降解为 BDE-17(摩尔分数为 44%)和 BDE-4(摩尔分数比为 28%). 然而,经过 6 个月的培养,ANAS195 仅能少量地降解 BDE-47,生成 BDE-17(摩尔分数为 5%)和 BDE-28(摩尔分数为 0.2%),这表明脱卤球菌在 BDE-47 的降解中可能不起主要作用. ANAS195 对 BDE-47 的降解途径似乎与 *Dehalobacter restrictus* PER-K23 和 *Desulfitobacterium*

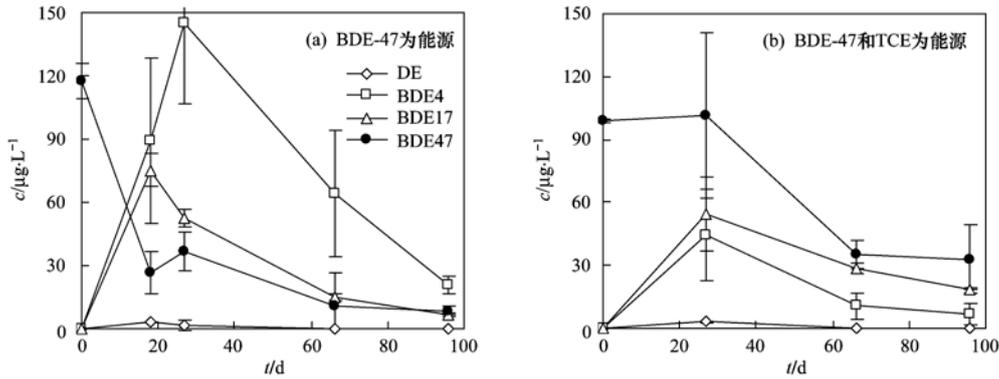


图 1 不同处理条件下 6M6B 菌液对 BDE-47 的降解

Fig. 1 Biodegradation of BDE-47 under different treatments in the 6M6B culture

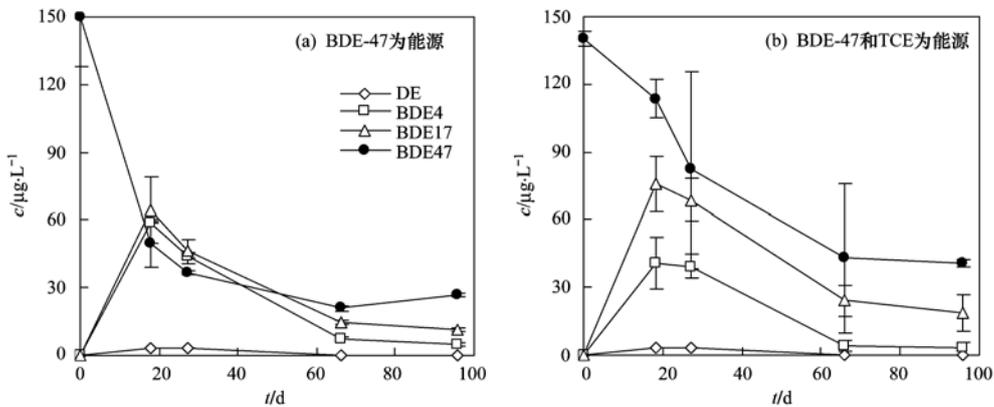


图 2 不同处理条件下 T2 菌液对 BDE-47 的降解

Fig. 2 Biodegradation of BDE-47 under different treatments in the T2 culture

hafniense PCP-1 略有不同. 其它作用如光解也可能使 BDE-47 发生降解. Zeng 等^[23]的研究表明, BDE-47 光解可产生 BDE-28 和 BDE-17, 且 BDE-28 的产生量大于 BDE-17.

研究中还考察了 6 组菌对 BDE-209 的降解. 按同样条件进行微宇宙实验, 经过半年的培养, 未检测到 BDE-209 的脱溴产物. He 等^[18]在研究中也发现, 含脱卤球菌的培养液不能降解 BDE-209^[18], 这可能与脱卤菌球的特性和 BDE-209 的结构相关.

2.2 与 BDE-47 降解有关的优势菌解析

为了查明对 BDE-47 降解起作用的细菌种属, 采用 PCR-DGGE 法分析了以 BDE-47 为唯一能源 6M6B 和 T2 两组菌中微生物群落结构随时间的变化, 结果如图 3 和图 4 所示. 泳道 L1、L2、L3 和 L4 分别表示第 0、20、96 和 126 d 的群落结构. 6M6B 和 T2 菌液中, 均有个别种属特别占优势或者随时间有逐渐增长的趋势. 研究中对这些变化明显的种属进行了分析, 经过切胶、回收、扩增和测序等过程, 对优势菌进行了鉴定. 6M6B 和 T2 菌液中, 有 3 种优势菌都相同 (条带 1~3), 它们分别是假单胞菌属

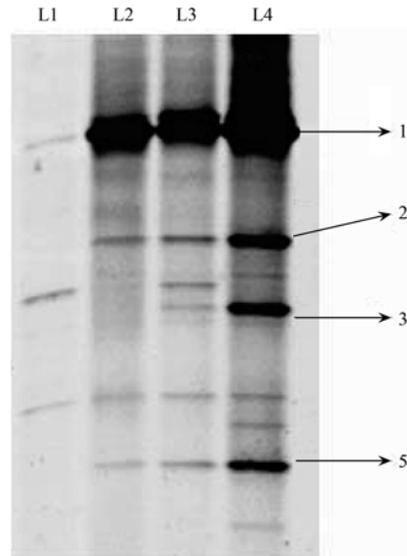


图 3 T2 菌液群落结构随时间的变化

Fig. 3 Change of microbial community over time in T2 culture

(*Pseudomonas* sp.)、醋酸杆菌属 (*Acetobacterium* sp.) 和鞘氨醇杆菌属 (*Sphingobacterium* sp.). 梭菌属 (*Clostridium* sp.) (条带 4) 在 6M6B 菌液中有增长的趋势, 但在 T2 菌液中变化不明显. 柄杆菌属

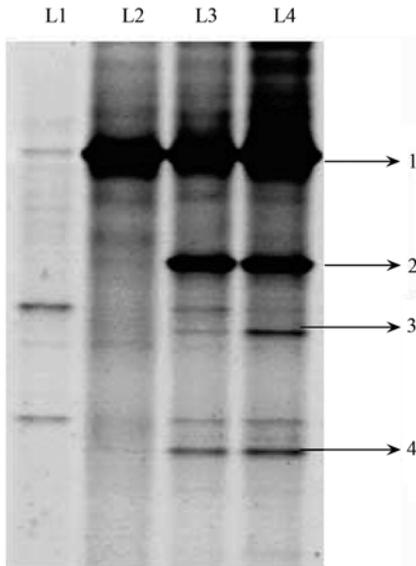


图4 6M6B菌液群落结构随时间的变化

Fig. 4 Change of microbial community over time in 6M6B culture

(*Caulobacter* sp.) (条带5)在T2菌液中增长明显,但在6M6B菌液中未检测到.脱卤球菌在所有培养液中均未被检测到,表明脱卤球菌可能在BDE-47的降解中不起主要作用,这与Robrock等^[22]的研究结果基本一致.

为了进一步识别对BDE-47降解起作用的细菌,对以BDE-47为唯一能源培养了126 d的6组菌均进行了群落结构分析,结果见图5.图中每一泳道表示一种培养液,每组菌有2个平行,其中,泳道L1和L2为ALT菌的平行样,泳道L3和L4为ELI菌的平行样,泳道L5和L6为KB1菌的平行样,泳道L7和L8为T2菌的平行样,泳道L9和L10为T4菌的平行样,泳道L11和L12为6M6B菌的一个样.各组菌中条带1均明显占优势,条带3出现在除T4外的各组,条带4出现在KB1、T2和6M6B组,条带5出现在ALT、KB1、T2和T4组,由于这些条带在有降解活性和无降解活性的培养菌液中均有明显出现,表明它们可能与BDE-47的降解关系不大,而与基础培养基或其它因素有关.条带2在ELI、T2和6M6B组中明显比其它组中的亮,由于这3组菌液中均发生了BDE-47的还原降解,故推测条带2(醋酸杆菌属)可能在BDE-47的还原降解中起较大作用.已有研究报道,醋酸杆菌(*Acetobacterium woodii*)可以还原降解四氯化碳^[24].本研究是首次报道醋酸杆菌可能降解溴代联苯醚.

为全面反映各组菌群落结构的差异,采用凝胶定量软件Quantity one对各组菌群落结构进行了对比.图6给出以泳道7(T2菌)为标准做出的11个

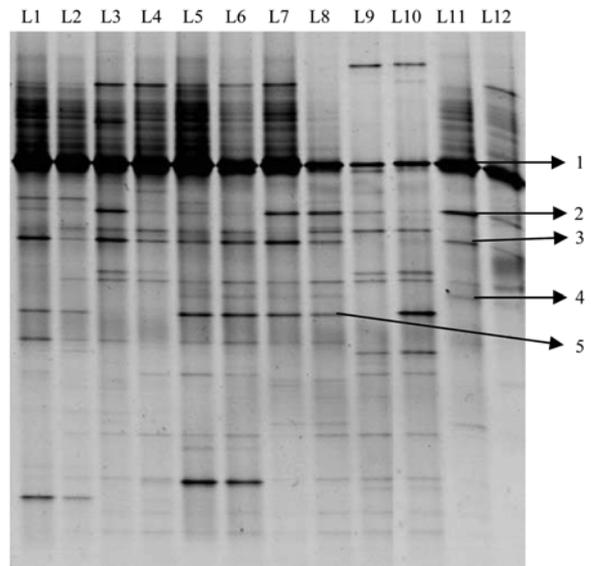


图5 培养3个月后6组厌氧微生物的群落结构比较

Fig. 5 Comparison of microbial community structure in the six enriched cultures after three months of incubation

样品(L1~L11)的条带识别与泳道比较.样品L2(6M6B菌的一个平行样)没有进行识别,因为其位于胶的边缘,在电泳和后续处理中条带略有变形.根据戴斯系数 C_s 计算出各样品的相似性,发现L3(ELI菌)和L11(6M6B菌)与L7(T2菌)的相似度最大,分别为82.3%和81.5%;这3组菌均能将BDE-47降解为BDE-17和BDE-4.泳道L9、L10、L6、L5等与L7的相似度较小,相应地,这些泳道表示的培养液中未观察到BDE-47的降解.

2.3 BDE-47的降解动力学

研究中对以BDE-47为唯一能源的6M6B和T2菌分别进行了2次转移培养,并观察到了同样的结果,即BDE-47还原降解生成了BDE-17和BDE-4.为了进一步了解BDE-47的降解动力学,以6M6B菌为例,研究了不同BDE-47初始浓度条件下,BDE-47的降解情况,结果见图7.

利用单一反应物半衰期法求反应级数的公式 $n = 1 + \lg(t_{1/2}/t'_{1/2})/\lg(c'/c)$,可大致估算培养液中BDE-47的反应级数.式中, n 为反应级数, c 和 c' 分别为2个不同的初始浓度, $t_{1/2}$ 和 $t'_{1/2}$ 分别为不同浓度条件下的半衰期.将本研究中BDE-47初始浓度数据依次代入公式,可得6M6B菌降解BDE-47的反应级数在1~2之间(1.2、1.5和1.7).计算中使用的是水相中的BDE-47浓度数据,即假定BDE-47的减少全部归因于微生物降解,没有考虑BDE-47的挥发以及培养瓶对BDE-47的吸附.BDE-47具有一定的挥发性,其亨利常数为 $6.4 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$

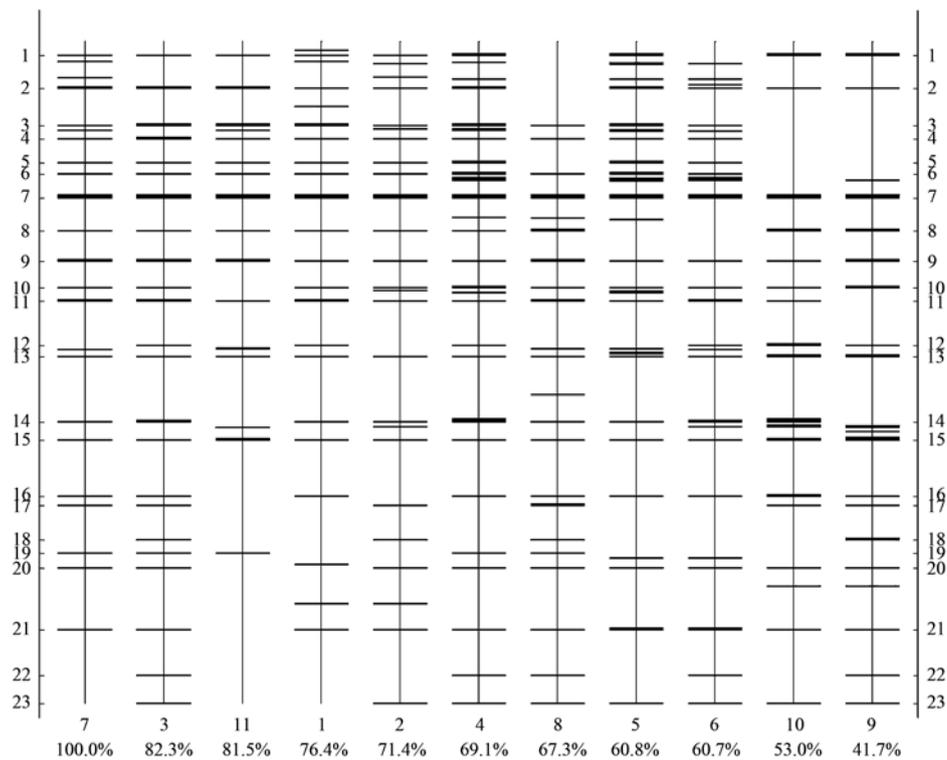


图 6 不同泳道条带的识别与比较(1~11 表示 L1~L11)

Fig. 6 Detection of bands and comparison of lanes (1-11 refer to L1-L11)

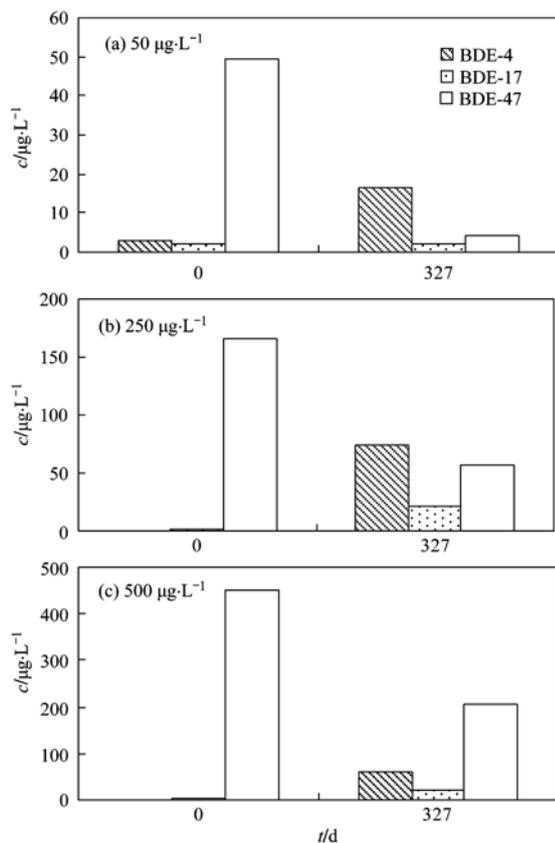


图 7 不同 BDE-47 初始浓度条件下 6M6B 菌液中 BDE-47 的降解

Fig. 7 Degradation of BDE-47 in the 6M6B culture under different initial BDE-47 concentrations

(25℃)^[25],在培养过程中会有小部分挥发至培养瓶的顶空中(约 5 mL).若按一级反应动力学计算,3种初始浓度条件下 6M6B 菌对 BDE-47 的降解速率分别为 0.003 3、0.001 4和 0.001 0 d⁻¹. BDE-47 的降解速率随 BDE-47 浓度的升高而降低,表明高浓度的 BDE-47 对 6M6B 菌的活性有一定的抑制作用.

本动力学研究中所得 6M6B 菌对 BDE-47 的降解速率较低,可能与监测的时间间隔过长有关,在以后的研究中需要进行更频繁的监测.在本研究最初的降解实验中(图 1),6M6B 菌对 BDE-47 的一级降解速率为 0.028 d⁻¹,略优于文献报道的混合菌对 BDE-47 的厌氧降解速率.在 Robrock 等^[22]的研究中,ANAS195 对 BDE-47 的一级降解速率仅为 0.000 3 d⁻¹(BDE-47 初始浓度为 25 μg·L⁻¹).文献中报道的其它 PBDEs 的厌氧微生物降解速率也较低.例如,Nyholm 等^[26]报道厌氧条件下活性污泥对 BDE-28 和 BDE-209 的一级降解速率分别为 0.000 2 d⁻¹和 0.002 d⁻¹.Gerecke 等^[16]报道厌氧条件下活性污泥对 BDE-209 的一级降解速率为 0.001 d⁻¹.

3 结论

(1) 厌氧条件下 BDE-47 可作为唯一能源被细

菌利用,发生还原降解,依次生成BDE-17和BDE-4. TCE 的加入在一定程度上抑制了 BDE-47 的降解. 本研究中,在 6 组具有 TCE 降解能力的细菌培养液中,有 2 组(6M6B 和 T2)能明显降解 BDE-47. 在为期 3 个多月的实验中,在以 BDE-47 为唯一能源的情况下,6M6B 和 T2 对 BDE-47 的去除率分别达 93% 和 82%; 在 BDE-47 和 TCE 同时存在的情况下,6M6B 和 T2 对 BDE-47 的去除率分别为 67% 和 71%.

(2) 醋酸杆菌属可能在降解 BDE-47 中起重要作用. 对不同培养时间段 6M6B 和 T2 的群落结构以及实验结束时 6 组菌液的群落结构进行 DGGE 分析,发现醋酸杆菌属的数量与 BDE-47 的降解有明显的联系.

(3) 6M6B 菌对 BDE-47 的降解基本符合一级反应动力学. 当 BDE-47 初始浓度分别为 50、250 和 500 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,6M6B 菌对 BDE-47 的降解速率分别为 0.003 3、0.001 4 和 0.001 0 d^{-1} . 高浓度的 BDE-47 对 6M6B 菌的活性有一定的抑制作用.

致谢:样品的化学分析得到北京大学城市与环境学院地表过程分析与模拟教育部重点实验室刘煜和蒙冰君等工程师的帮助,在此向他们表示感谢.

参考文献:

- [1] De Wit C A. An overview of brominated flame retardants in the environment[J]. *Chemosphere*, 2002, **46**(5): 583-624.
- [2] Norén K, Meironyté D. Certain organochlorine and organobromine contaminants in Swedish human milk in perspective of past 20-30 years[J]. *Chemosphere*, 2000, **40**(9-11): 1111-1123.
- [3] 陈社军, 麦碧娴, 曾永平, 等. 珠江三角洲及南海北部海域表层沉积物中多溴联苯醚的分布特征[J]. *环境科学学报*, 2005, **25**(9): 1265-1271.
- [4] 杨永亮, 潘静, 李悦, 等. 青岛近岸沉积物中持久性有机污染物多氯萘和多溴联苯醚[J]. *科学通报*, 2003, **48**(21): 2244-2251.
- [5] 沈敏, 于红霞, 余益军, 等. 长江下游沉积物中 PCBs 和 PBDEs 污染现状与特征研究[A]. 见: 持久性有机污染物论坛 2006 暨第一届持久性有机污染物全国学术研讨会论文集[C]. 北京, 2006. 6-10.
- [6] 向彩红, 罗孝俊, 余梅, 等. 珠江河口水生生物中多溴联苯醚的分布[J]. *环境科学*, 2006, **27**(9): 1732-1737.
- [7] 丘耀文, 张干, 郭玲利, 等. 大亚湾海域多溴联苯醚的生物累积特征[J]. *中国环境科学*, 2006, **26**(6): 685-688.
- [8] 胡国成, 许振成, 戴家银, 等. 有机氯农药和多溴联苯醚在白洋淀鸭子组织中分布特征研究[J]. *环境科学*, 2010, **31**(12): 3081-3087.
- [9] 张尚伟, 夏星辉, 吴山. 2, 2', 4, 4'-四溴联苯醚的毒性效应、来源、分布与环境行为[J]. *安徽农业科学*, 2011, **39**(5): 2882-2887.
- [10] Staskal D F, Diliberto J J, Birbaurr L S. Impact of repeated exposure on the toxicokinetics of BDE 47 in mice[J]. *Toxicology Science*, 2006, **89**(2): 380-385.
- [11] 刘早玲, 刘继文, 张建清, 等. 2, 2', 4, 4'-四溴联苯醚对小鼠甲状腺毒性作用[J]. *中国公共卫生*, 2010, **26**(7): 870-871.
- [12] 李卓娜, 孟范平, 赵顺顺, 等. 2, 2', 4, 4'-四溴联苯醚(BDE-47)对 4 种海洋微藻的急性毒性[J]. *生态毒理学报*, 2009, **4**(3): 435-439.
- [13] Damerud P O, Thuvander A. Effects of polybrominated diphenyl ether (PBDE) and polychlorinated biphenyl (PCB) on some immunological parameters after oral exposure in rats and mice[J]. *Toxicological and Environmental Chemistry*, 1999, **70**(1-2): 229-242.
- [14] 方磊, 黄俊, 余刚. 多溴联苯醚光化学降解[J]. *化学进展*, 2008, **20**(7-8): 1180-1186.
- [15] Stapleton H M, Letcher R J, Baker J E. Debromination of polybrominated diphenyl ether congeners BDE 99 and BDE 183 in the intestinal tract of the common carp (*Cyprinus carpio*)[J]. *Environmental Science and Technology*, 2004, **38**(4): 1054-1061.
- [16] Gerecke A C, Hartmann P C, Heeb N V, et al. Anaerobic degradation of decabromodiphenyl ether [J]. *Environmental Science and Technology*, 2005, **39**(4): 1078-1083.
- [17] Tokarz J A, Ahn M Y, Leng J, et al. Reductive Debromination of polybrominated diphenyl ethers in anaerobic sediment and a biomimetic system[J]. *Environmental Science and Technology*, 2008, **42**(4): 1157-1164.
- [18] He J Z, Robrock K R, Alvarez-cohen L. Microbial reductive debromination of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs)[J]. *Environmental Science and Technology*, 2006, **40**(14): 4429-4434.
- [19] Lee L K, He J Z. Reductive debromination of polybrominated diphenyl ethers by anaerobic bacteria from soils and sediments[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2010, **76**(3): 794-802.
- [20] 胡晓红, 彭惠民, 刘昕, 等. PCR 及 Real-time PCR 评价细菌 DNA 提取方法[J]. *重庆医科大学学报*, 2008, **33**(2): 155-158.
- [21] Sekiguchi H, Watanabe M, Nakahara T, et al. Succession of bacterial community structure along the Changjiang river determined by denaturing gradient gel electrophoresis and clone library analysis[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2002, **68**(10): 5142-5150.
- [22] Robrock K R, Korytár P, Alvarez-cohen L. Pathways for the anaerobic microbial debromination of polybrominated diphenyl ethers[J]. *Environmental Science and Technology*, 2008, **42**(8): 2845-2852.
- [23] Zeng X, Massey Simonich S L, Robrock K R, et al. Application of a congener-specific debromination model to study photodebromination, anaerobic microbial debromination, and

- FeO reduction of polybrominated diphenyl ethers [J].
Environmental Toxicology and Chemistry, 2010, **29** (4): 770-778.
- [24] Egli C, Tschan T, Scholtz R, *et al.* Transformation of tetrachloromethane to dichloromethane and carbon dioxide by *Acetobacterium woodii* [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1988, **54** (11): 2819-2824.
- [25] Charles M J, Destailhats H. Experimental determinations of Henry's law constants of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) to evaluate exposure to aquatic biota [R]. Berkeley: Technical Completion Reports, University of California Water Resources Center, 2005. 21.
- [26] Nyholm J R, Lundberg C, Andersson P L. Biodegradation kinetics of selected brominated flame retardants in aerobic and anaerobic soil [J]. Environmental Pollution, 2010, **158** (6): 2235-2240.

欢迎订阅 2012 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发行人,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如美国医学索引 MEDLINE;美国化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA):Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA):Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS):Life Sciences Abstracts 等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

《环境科学》2012 年为 16 开本,70 元/册,全年 12 期。

国内统一刊号:CN11-1895/X 国际标准刊号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 205 国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102;传真:010-62849343;E-mail:hjcx@rcees.ac.cn;网址:www.hjcx.ac.cn

CONTENTS

Stable Carbon Isotope of Black Carbon from Typical Emission Sources in China	CHEN Ying-jun, CAI Wei-wei, HUANG Guo-pei, <i>et al.</i> (673)
Characteristics of Carbonaceous Aerosol Concentration in Snow and Ice of Glaciers in Tianshan Mountains	WANG Sheng-jie, ZHANG Ming-jun, WANG Fei-teng, <i>et al.</i> (679)
Size Distribution Properties of Atmospheric Aerosol Particles During Summer and Autumn in Lanzhou	ZHAO Su-ping, YU Ye, CHEN Jin-bei, <i>et al.</i> (687)
Particle Number Size Distribution near a Major Road with Different Traffic Conditions	YANG Liu, WU Ye, SONG Shao-jie, <i>et al.</i> (694)
Atmospheric Particle Formation Events in Nanjing During Summer 2010	WANG Hong-lei, ZHU Bin, SHEN Li-juan, <i>et al.</i> (701)
Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ in Precipitation and Moisture Transports over the Arid Region in Northwest China	LI Xiao-fei, ZHANG Ming-jun, LI Ya-ju, <i>et al.</i> (711)
Distributions and Seasonal Variations of Total Dissolved Inorganic Arsenic in the Estuaries and Coastal Area of Eastern Hainan	CAO Xiu-hong, REN Jing-ling, ZHANG Gui-ling, <i>et al.</i> (720)
Mixing Behavior of Arsenic in the Daliaohe Estuary	JIAN Hui-min, YAO Qing-zheng, YU Li-xia, <i>et al.</i> (727)
Variation Characteristics and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Surface Sediments of Bohai Bay	XU Ya-yan, SONG Jin-ming, LI Xue-gang, <i>et al.</i> (732)
Distribution of PAHs in Surface Seawater of Qingdao Coast Area and Their Preliminary Apportionment	LI Xian-guo, DENG Wei, ZHOU Xiao, <i>et al.</i> (741)
Atmospheric Deposition of PAHs in Dashiwei Karst Tiankeng Group in Leye, Guangxi	KONG Xiang-sheng, QI Shi-hua, HUANG Bao-jian, <i>et al.</i> (746)
Lead Isotope Signatures and Source Identification in Urban Soil of Baoshan District, Shanghai	DONG Chen-yin, ZHANG Wei-guo, WANG Guan, <i>et al.</i> (754)
Solute Transport Modeling Application in Groundwater Organic Contaminant Source Identification	WANG Shu-fang, WANG Li-ya, WANG Xiao-hong, <i>et al.</i> (760)
Quantitative Method of Representative Contaminants in Groundwater Pollution Risk Assessment	WANG Jun-jie, HE Jiang-tao, LU Yan, <i>et al.</i> (771)
Study on the Advanced Pre-treatments of Reclaimed Water Used for Groundwater Recharge	GAO Yu-tuan, ZHANG Xue, ZHAO Xuan, <i>et al.</i> (777)
Influence of <i>Ruditapes philippinarum</i> Aquaculture on Benthic Fluxes of Biogenic Elements in Jiaozhou Bay	DENG Ke, LIU Su-mei, ZHANG Gui-ling, <i>et al.</i> (782)
Influence of Spatial Difference on Water Quality in Jiuxiang River Watershed, Nanjing	HU He-bing, LIU Hong-yu, HAO Jing-feng, <i>et al.</i> (794)
Temporal and Spatial Variation of Non-Point Source Nitrogen in Surface Water in Urban Agricultural Region of Shanghai	WANG Nan, MAO Liang, HUANG Hai-bo, <i>et al.</i> (802)
Migration and Transformation of Heavy Metals in Street Dusts with Different Particle Sizes During Urban Runoff	HE Xiao-yan, ZHAO Hong-tao, LI Xu-yong, <i>et al.</i> (810)
Treatment Studies of Industrial Rainoff With a New Type of Constructed Wetland	HE Li-jun, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (817)
Emergent Retention of Organic Liquid by Modified Bentonites: Property and Mechanism	LI Yu, LIU Xian-jun, ZHANG Xing-wang, <i>et al.</i> (825)
Production of Peroxide Hydrogen in <i>Chattonella ovata</i> Hong Kong Strain	JIANG Tao, WU Ni, ZHONG Yan, <i>et al.</i> (832)
Characteristics Study of Extracellular Active Substance of <i>Bacillus</i> sp. B1 on <i>Phaeocystis globosa</i>	LI Qiang, ZHAO Ling, YIN Ping-he (838)
Effects of Sediment on the Growth of <i>Microcystis</i> and <i>Anabaena</i> in Yanghe Reservoir	CHU Zhao-sheng, ZHANG Yu-bao, JIN Xiang-can, <i>et al.</i> (844)
New-Type Electrodeless Excilamp for Advanced Treatment on Nitrogen-Heterocyclic Compounds (NHCs) in Aqueous Solution	YE Zhao-lian, WANG Bin, LU Juan-juan, <i>et al.</i> (849)
Preparation and Electro-catalytic Characterization on La/Ce Doped Ti-base Lead Dioxide Electrodes	ZHENG Hui, DAI Qi-zhou, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (857)
Study on Decolorization of Triphenylmethane Dyes by DTT	PAN Tao, LIU Da-wei, REN Sui-zhou, <i>et al.</i> (866)
Influences of pH and Complexing Agents on Degradation of Reactive Brilliant Blue KN-R by Ferrous Activated Persulfate	ZHANG Cheng, WAN Jin-quan, MA Yong-wen, <i>et al.</i> (871)
Degradation Kinetics of Ozone Oxidation on High Concentration of Humic Substances	ZHENG Ke, ZHOU Shao-qi, YANG Mei-mei (879)
Index of Stability and Its Mechanisms of Aerobic Granular System Using Volume-based Information Entropy	LI Zhi-hua, JI Xiao-qin, LI Sheng, <i>et al.</i> (885)
Relationship Between Physicochemical Characteristics of Activated Sludge and Polymer Conditioning Dosage	LI Ting, WANG Yi-li, FENG Jing, <i>et al.</i> (889)
Research of Aerobic Granule Characteristics with Different Granule Age	ZHOU Man, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (896)
Effect of Size and Number of Aerobic Granules on Nitrification and Denitrification	LI Zhi-hua, ZENG Jin-feng, LI Sheng, <i>et al.</i> (903)
Optimization and Comparison of Nitrogen and Phosphorus Removal by Different Aeration Modes in Oxidation Ditch	GUO Chang-zi, PENG Dang-cong, CHENG Xue-mei, <i>et al.</i> (910)
Effect of Acidification on the Dewaterability of Sewage Sludge in Bioleaching	ZHU Hai-feng, ZHOU Li-xiang, WANG Dian-zhan (916)
Microbial Ecology Analysis of the Biofilm from Two Biological Contact Oxidation Processes with Different Performance	QIAN Yin, QUAN Xiang-chun, PEI Yuan-sheng, <i>et al.</i> (922)
Altered Microbial Communities Change Soil Respiration Rates and Their Temperature Sensitivity	FAN Fen-liang, HUANG Ping-rong, TANG Yong-jun, <i>et al.</i> (932)
Storages and Distributed Patterns of Soil Organic Carbon and Total Nitrogen During the Succession of Artificial Sand-Binding Vegetation in Arid Desert Ecosystem	JIA Xiao-hong, LI Xin-rong, ZHOU Yu-yan, <i>et al.</i> (938)
Factors Controlling Soil Organic Carbon and Total Nitrogen Densities in the Upstream Watershed of Miyun Reservoir, North China	WANG Shu-fang, WANG Xiao-ke, OUYANG Zhi-yun (946)
Impact of Microbial Aggregating Agents on Soil Aggregate Stability Under Addition of Exogenous Nutrients	MO Yan-hua, TANG Jia, ZHANG Ren-duo, <i>et al.</i> (952)
Adsorption of Aflatoxin on Montmorillonite Modified by Low-Molecular-Weight Humic Acids	YAO Jia-jia, KANG Fu-xing, GAO Yan-zheng (958)
Influence of Operating Parameters on Surfactant-enhanced Washing to Remedy PAHs Contaminated Soil	WU Wei, JIANG Lin, CHEN Jia-jun, <i>et al.</i> (965)
Study on the Land Use Optimization Based on PPI	WU Xiao-feng, LI Ting (971)
Research on Algal Diversity in Zoige Alpine Wetland	CHEN Xi, LIU Ru-yin, WANG Yan-fen, <i>et al.</i> (979)
Effects of Three Fungicides on Arbuscular Mycorrhizal Fungal Infection and Growth of <i>Scutellaria baicalensis</i> Georgi	HE Xue-li, WANG Ping, MA Li, <i>et al.</i> (987)
Community Structure and Spatial Distribution of Anaerobic Ammonium Oxidation Bacteria in the Sediments of Chongming Eastern Tidal Flat in Summer	ZHENG Yan-ling, HOU Li-jun, LU Min, <i>et al.</i> (992)
Microbial Degradation of 2,2',4,4'-Tetrabrominated Diphenyl Ether Under Anaerobic Condition	LU Xiao-xia, CHEN Chao-qi, ZHANG Shu, <i>et al.</i> (1000)
Effect of Heavy Metals on Degradation of BDE-209 by White-rot Fungus	XIONG Shi-chang, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> (1008)
Biodegradation Mechanism of DDT and Chlorpyrifos Using Molecular Simulation	LIN Yu-zhen, ZENG Guang-ming, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (1015)
Construction of a Microbial Consortium RXS with High Degradation Ability for Cassava Residues and Studies on Its Fermentative Characteristics	HE Jiang, MAO Zhong-gui, ZHANG Qing-hua, <i>et al.</i> (1020)
Anaerobic Digestion of Animal Manure Contaminated by Tetracyclines	TONG Zi-lin, LIU Yuan-lu, HU Zhen-hu, <i>et al.</i> (1028)
Continuous Dry Fermentation of Pig Manure Using Up Plug-Flow Type Anaerobic Reactor	CHEN Chuang, DENG Liang-wei, XIN Xin, <i>et al.</i> (1033)

《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3月15日 33卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 3 Mar. 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