

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第5期

Vol.34 No.5

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于过氧化物的消毒技术研究进展 刁海玲,赵三平,周文 (1645)

环境损害评估:国际制度及对中国的启示 张红振,曹东,於方,王金南,齐霖,贾倩,张天柱,骆永明 (1653)

不同国家基于健康风险的土壤环境基准比较研究与启示 徐猛,颜增光,贺萌萌,张超艳,侯红,李发生 (1667)

蚯蚓堆肥及蝇蛆生物转化技术在有机废弃物处理应用中的研究进展 张志剑,刘萌,朱军 (1679)

基于生态分区的我国湖泊营养盐控制目标研究 刁晓君,席北斗,何连生,邓祥征,吴锋,王鹏腾 (1687)

我国东北地区地表水酸化现状 徐光仪,康荣华,罗遥,段雷 (1695)

西安市对渭河水质的影响分析 于婕,李怀恩 (1700)

极端干旱水文年(2011年)夏季珠江口溶解氧的分布特征及影响因素研究 叶丰,黄小平,施震,刘庆霞 (1707)

应用相平衡分配法建立湘江衡阳段沉积物重金属质量基准 韩超南,秦延文,郑丙辉,张雷,曹伟 (1715)

长江口海域底栖生态环境质量评价——AMBI和M-AMBI法 蔡文倩,孟伟,刘录三,朱延忠,周娟 (1725)

温州城市降雨径流中BOD₅和COD污染特征及其初始冲刷效应 王骏,毕春娟,陈振楼,周栋 (1735)

影响悬浮颗粒物吸收系数测量的相关因素研究 余小龙,沈芳,张晋芳 (1745)

香溪河库湾春季pCO₂与浮游植物生物量的关系 袁希功,黄文敏,毕永红,胡征宇,赵玮,朱孔贤 (1754)

紊流脉动强度对藻类生长及水环境的影响研究 雷雨,龙天渝,伞磊,安强,黄宁秋 (1761)

高铁酸钾对水中藻类及其次生臭味污染物二甲基三硫醚同步去除研究 马晓雁,张泽华,王红宇,胡仕斐,李青松 (1767)

纳米Fe₃O₄-H₂O₂非均相Fenton反应催化氧化邻苯二酚 何洁,杨晓芳,张伟军,王东升 (1773)

水中萘普生的紫外光降解机制及其产物毒性研究 马杜娟,刘国光,吕文英,姚锬,周丽华,谢成屏 (1782)

酸活化赤泥催化臭氧氧化降解水中硝基苯的效能研究 康雅凝,李华楠,徐冰冰,齐飞,赵伦 (1790)

镉污染应急处置含镉絮体稳定性实验研究 柳王荣,魏清伟,杨仁斌,许振成,曾东 (1797)

基于光学在线监测及形态学研究的絮凝体强度分析方法 金鹏康,冯永宁,王宝宝,王晓昌 (1802)

不同电子供体下三氯苯酚的还原脱氯机制研究 王金泉,胡梦蝶,马邕文,黄明智 (1808)

壳聚糖季铵盐磁性颗粒的制备及其对甲基橙的吸附效果 张璐璐,胡筱敏,英诗颖,王芳 (1815)

城市污水二级出水超滤膜污染与膜特性的研究 孟晓荣,张海珍,王磊,王旭东,赵亮 (1822)

倒置A²/O-MBR处理城市污水的中试研究 张健君,邹高龙,杨淑芳,丁星,王莉,毛乾庄,杨丹 (1828)

不同电子供体的硫自养反硝化脱氮实验研究 袁莹,周伟丽,王晖,何圣兵 (1835)

短程同步硝化反硝化过程的脱氮与N₂O释放特性 梁小玲,李平,吴锦华,王向德 (1845)

基于固相萃取的水中多种有毒有害有机污染物富集方法优化 张明全,李锋民,吴乾元,胡洪营 (1851)

多环麝香污染胁迫对蚯蚓特异性蛋白基因表达的影响 陈春,刘潇威,郑顺安,周启星,李松 (1857)

浙江省制药行业典型挥发性有机物臭氧产生潜力分析及健康风险评价 徐志荣,王浙明,许明珠,何华飞 (1864)

苯系物光催化开环降解产物低级醛类的健康效应 赵伟荣,廖求文,杨亚楠,戴九松 (1871)

四川妇女血清中多溴联苯醚的浓度水平与组成特征 邵敏,陈永亨,李晓宇 (1877)

咪唑类离子液体毒性的QSAR/QSPR研究 赵继红,赵永升,张宏忠,张香平 (1882)

宁夏石嘴山河滨工业园区表层土壤重金属污染的时空特征 樊新刚,米文宝,马振宁,王婷玉 (1887)

内蒙古包头白云鄂博矿区及尾矿区周围土壤稀土污染现状和分布特征 郭伟,付瑞英,赵仁鑫,赵文静,郭江源,张君 (1895)

福建省重点城市路面尘负荷及化学组成研究 郑桢,杨冰玉,吴水平,王新红,陈晓秋 (1901)

重金属污染场地电阻率法探测数值模拟及应用研究 王玉玲,能昌信,王彦文,董路 (1908)

丛枝菌根真菌对稀土尾矿中大豆生长和稀土元素吸收的影响 郭伟,赵仁鑫,赵文静,付瑞英,郭江源,张君 (1915)

海洋细菌N3对几种赤潮藻的溶藻效应 史荣君,黄洪辉,齐占会,胡维安,田梓杨,戴明 (1922)

1株分离自煤矿废水的铁硫氧化细菌LY01的鉴定及其氧化特性研究 刘玉娇,杨新萍,王世梅,梁银 (1930)

1株苯并[a]芘高效降解菌的筛选与降解特性 蔡瀚,尹华,叶锦韶,常晶晶,彭辉,张娜,何宝燕 (1937)

2,2',4,4'-四溴联苯醚的好氧微生物降解 张姝,Giulio Franco,李晓豹,卢晓霞,侯珍,杨君君 (1945)

养猪废水培养微生物絮凝剂产生菌群B-737及发酵特性 裴瑞林,信欣,张雪乔,周迎芹,姚力,羊依金 (1951)

1997~2011年北京市空气中酸性物质与降水组分变化趋势的相关性分析 陈圆圆,田贺忠,杨懂艳,邹本东,鹿海峰,林安国 (1958)

黄山降水酸度及电导率特征分析 石春娥,邓学良,吴必文,洪杰,张苏,杨元建 (1964)

夏季黄山不同高度大气气溶胶水溶性离子特征分析 文彬,银燕,秦彦硕,陈魁 (1973)

广州秋季灰霾污染过程大气颗粒物有机酸的污染特征 谭吉华,赵金平,段菁春,马永亮,贺克斌,杨复沫 (1982)

福建省三大城市冬季PM_{2.5}中有机碳和元素碳的污染特征 陈衍婷,陈进生,胡恭任,徐玲玲,尹丽倩,张福旺 (1988)

上海市含碳大气颗粒物的粒径分布 袁宁,刘卫,赵修良,王广华,姚剑,曾友石,刘邃庆 (1995)

上海市浦东新区二次气溶胶生成的估算 崔虎雄,吴迺名,段玉森,伏晴艳,张懿华,王东方,王茜 (2003)

沙尘暴期间上海市大气颗粒物元素地球化学特征及其物源示踪意义 钱鹏,郑祥民,周立旻 (2010)

厦门秋季近郊地面CO₂浓度变化特征研究 李燕丽,穆超,邓君俊,赵淑惠,杜可 (2018)

GC-MS和GC-ECD同时在线观测本底大气中的HCFC-142b 郭立峰,姚波,周凌晔,李培昌,许林 (2025)

城市居家环境空气真菌群落结构特征研究 方治国,欧阳志云,刘芄,孙力,王小勇 (2031)

城市污水处理厂挥发性芳香烃的气味指纹及定量评价研究 郭薇,王伯光,唐小东,刘舒乐,何洁,张春林 (2038)

内河多点分散码头大气污染叠加影响特征 刘建昌,李兴华,徐洪磊,程金香,王忠岱,肖杨 (2044)

义马煤中铅的热稳定性及转化行为研究 刘瑞卿,王钧伟 (2051)

基于能源消费情景模拟的北京市主要大气污染物和温室气体协同减排研究 谢元博,李巍 (2057)

《环境科学》征订启事(1652) 《环境科学》征稿简则(1789) 信息(1807,1821,1881,1987) 专辑征稿通知(1863)

2,2',4,4'-四溴联苯醚的好氧微生物降解

张姝, Giulio Franco, 李晓豹, 卢晓霞*, 侯珍, 杨君君

(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: 从北京高碑店污水处理厂活性污泥中筛选出 1 株能好氧降解 2,2',4,4'-四溴联苯醚 (BDE-47) 的细菌, 并对其降解特性及有关蛋白质进行分析, 目的是了解好氧条件下 BDE-47 的微生物降解机制. BDE-47 降解菌通过平板划线法获得, 其 16S rDNA 与不动杆菌 (*Acinetobacter* sp.) 的相似度最大, 为 90%. 采用 250 mL 锥形瓶研究了所得菌对 BDE-47 的降解情况, 在 BDE-47 初试浓度为 $146 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的条件下, 经过 63 d 的培养, 所得菌降解了 45.44% 的 BDE-47, 降解产物主要为 4-OH-联苯醚, 菌量增加了 7 倍左右. 分别以 BDE-47 和酵母提取物为碳源培养所得菌 2 周, 然后各自提取蛋白质, 通过蛋白质双向电泳及质谱检测, 发现了与 BDE-47 降解有关的一些特异蛋白质. 研究表明, 在好氧条件下, 细菌可以 BDE-47 为碳源生长, 其过程涉及多种蛋白质的作用.

关键词: 2,2',4,4'-四溴联苯醚; 活性污泥; 好氧条件; 微生物降解; 蛋白质组分析

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)05-1945-06

Aerobic Microbial Degradation of 2,2',4,4'-Tetrabrominated Diphenyl Ether

ZHANG Shu, Franco Giulio, LI Xiao-bao, LU Xiao-xia, HOU Zhen, YANG Jun-jun

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

Abstract: By isolating a bacterial strain from the activated sludge of Gaobeidian wastewater treatment plant of Beijing and investigating its degradation property as well as the proteins involved in the degradation, this study aimed at elucidating the mechanism of microbial degradation of 2,2',4,4'-tetrabrominated diphenyl ether (BDE-47) under aerobic condition. The streak plate method was employed in the isolation of the bacteria. The 16S rDNA of the isolated bacterium had maximum similarity of 90% to *Acinetobacter* sp.. The degradation of BDE-47 by the isolated bacterium was studied in 250 mL conical flasks. At the initial concentration of $146 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, the bacterium degraded 45.44% BDE-47 after 63 d, the major product was 4-OH-BDE, and the bacterial mass was increased about seven times. BDE-47 and yeast extract were respectively used as the sole carbon source to enrich the bacterium for two weeks and then the proteins were extracted from the enrichments. Some specific proteins related to the degradation of BDE-47 were identified by analysis via the two dimensional electrophoresis and mass spectrometric detection. This study indicated that under aerobic condition BDE-47 can be degraded by bacteria as carbon source and multiple proteins are involved in the process.

Key words: 2,2',4,4'-tetrabrominated diphenyl ether (BDE-47); activated sludge; aerobic condition; microbial degradation; proteomic analysis

多溴联苯醚 (polybrominated diphenyl ethers, PBDEs) 作为一种阻燃剂的主要成分在近 30 多年广泛应用于聚氨酯塑料、纺织、家电等产品中, 造成了环境中 PBDEs 含量的升高^[1,2], 对生态系统和人类健康构成威胁^[3-6]. 2,2',4,4'-四溴联苯醚 (BDE-47) 是在环境中普遍检出且生物毒性较大的一种 PBDE^[7]. 有研究表明, BDE-47 会增加细胞内的氧化压力、线粒体损伤, 导致细胞死亡^[8]; BDE-47 也可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].

微生物降解是消除环境中 PBDEs 的一个重要作用过程. Schmidt 等^[14] 从污染土壤中分离出 1 株菌 *Sphingomonas* sp. Strain SS33, 可以联苯醚为碳源生长, 共代谢 4,4'-二溴联苯醚, 产生 4-溴酚和 4-儿茶酚. Kim 等^[15] 从污水处理厂的活性污泥中分离出 1 株菌 *Sphingomonas* sp. PH-07, 可以联苯醚为碳

源生长, 共代谢一溴、二溴和部分三溴代联苯醚, 生成溴代苯酚和儿茶酚. Robrock 等^[16] 报道以联苯为碳源, *Rhodococcus jostii* RHA1 和 *Burkholderia xenovorans* LB400 可好氧降解一至六溴的联苯醚. 在 *Rhodococcus jostii* RHA1 中, 乙苯双氧酶可以催化一至五溴联苯醚的降解, 联苯双氧酶可以催化一至四溴联苯醚的降解^[17]. 然而, 到目前为止, 仅在文献^[18] 中见到以 4-联苯醚为碳源生长的微生物, 鲜见有以更高溴取代联苯醚为碳源生长的微生物, 对 PBDEs 好氧降解中涉及的蛋白质也仍知之甚少. 蛋白质是生理过程的直接执行者, 对细胞蛋白质进行研究对揭示细胞生命本质特征有重要意义^[19,20].

收稿日期: 2012-08-25; 修订日期: 2012-10-19

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40871214, 41030529, 40830746)

作者简介: 张姝 (1987~), 女, 硕士, 主要研究方向为环境微生物学, E-mail: zhangshu_113@yahoo.cn

* 通讯联系人, E-mail: luxx@urban.pku.edu.cn

本研究目的是从北京污水处理厂活性污泥中筛选出能以 BDE-47 为碳源生长的细菌,对其降解 BDE-47 的特性及降解过程中涉及的蛋白质进行分析,探索细菌对 BDE-47 的好氧代谢过程与机制,以期对 BDE-47 污水处理及污染环境修复提供指导。

1 材料与amp;方法

1.1 活性污泥的采集与驯化

活性污泥采自北京高碑店污水处理厂好氧生物处理池,用 5 L 塑料桶盛装,常温保存(约 25℃)。使用 250 mL 锥形瓶,内盛 100 mL 基础培养基(NH_4Cl 1.0 g·L⁻¹, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.1 g·L⁻¹, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.05 g·L⁻¹, 微量元素 1.0 mL·L⁻¹, 磷酸缓冲液 20 mL·L⁻¹, 维生素溶液 0.1 mL·L⁻¹),加入 BDE-47 作为碳源(100 μg·L⁻¹),再接种 5 mL 活性污泥,用有透气孔的封口膜盖住瓶口,在 30℃ 摇床上振荡培养 2 周,对活性污泥进行驯化。

1.2 BDE-47 降解菌的筛选与鉴定

在灭菌的洁净工作台内,将约 20 mL 灭菌固体培养基倒入一次性无菌平板培养皿中,待培养基冷却凝固后,在其表面滴加 100 μL 50 mg·L⁻¹ 的 BDE-47 甲醇溶液,旋转使之均匀散开,待甲醇完全挥发后,取 500 μL 驯化的活性污泥,用灭菌的接种棒均匀涂抹在培养基表面,然后盖上培养皿盖,置 30℃ 的恒温箱中培养。当看到长出的菌落后(一周左右),将菌落挑出在新鲜的灭菌固体培养基上划线培养(以 BDE-47 为唯一碳源)。如此反复 5 次,得到在 BDE-47 上生长的纯菌(标记为 GAO 菌)。

为了对 GAO 菌进行种属鉴定,从平板上挑 1 环纯菌至 8 mL 灭菌的 LB 液体培养基中,在 30℃ 培养箱内振荡培养 24 h,转速 140 r·min⁻¹。然后,将菌的悬浊液在 3 000 r·min⁻¹ 的转速下离心 10 min,弃掉上清液后,加入 1.5 mL 无菌高纯水重新悬浮菌体。将制好的悬浊液用细菌基因组 DNA 提取试剂盒(原平皓生物技术有限公司)提取 DNA,然后对其 16S rDNA 进行扩增。PCR 体系为 50 μL,包括 25 μL 预混液(Premix Taq™ Version 2.0, Takara 公司),2 μL 8F 引物,2 μL 1492R 引物,4 μL 模板 DNA,17 μL 无菌高纯水。PCR 扩增程序如下:94℃ 预热 5 min; 变性 94℃ 30 s, 杂交 52℃ 30 s, 延伸 72℃ 1 min, 循环数 25; 最后延伸 72℃ 10 min; 然后 4℃ 保存。扩增产物送生工生物工程(上海)股份有限公司进行测序,所得序列与美国国立生物信息中心(NCBI)的基因库进行比对,对细菌的种属进行鉴定。

1.3 筛选菌对 BDE-47 的降解特性

使用 250 mL 锥形瓶,进行两组实验,即活菌组和灭菌组,每组做 2 个平行。各组锥形瓶中先加入 400 μL 50 mg·L⁻¹ 的 BDE-47 甲醇溶液,待甲醇挥发后,加入 100 mL 灭菌的基础培养基。在活菌组中,接种 5 mL 具有活性的 GAO 菌;在灭菌组中,接种 5 mL 高温失活的 GAO 菌。实验用的 GAO 菌先用 LB 培养基扩大培养(30℃ 下培养 16 h),然后用灭菌水对菌体上的 LB 进行离心清洗(两次),再用灭菌水制成菌液用于接种。培养瓶用有透气孔的封口膜盖住瓶口,常温下(25℃)置摇床上振荡培养。实验期间,每隔一定时间(1~3 周)取样,测定培养液中微生物量、BDE-47 浓度、以及溴离子浓度。实验结束后,对培养液中 BDE-47 的降解产物进行鉴定。

1.4 与降解 BDE-47 有关的蛋白质解析

分别以 BDE-47 (200 μg·L⁻¹) 和酵母提取物(10 mg·L⁻¹) 为唯一碳源,对筛选出的 GAO 菌进行培养(使用 250 mL 锥形瓶,内盛 100 mL 基础培养基)。3 周后,从培养液中提取蛋白质,进行双向电泳分析,选择具有特征的差异点进行酶解和质谱检测,鉴定出相关蛋白质。蛋白质的分析由北京华大蛋白质研发中心有限公司完成。

1.5 化学测定方法

1.5.1 BDE-47 的测定

用移液器(灭菌枪头)从培养瓶中取 1 mL 培养液至 5 mL 棕色玻璃瓶中,加 50 mL 2 mg·L⁻¹ BDE-28 作为回收率指示物,加 1.2 mL 重蒸过的正己烷作为萃取剂,将瓶口密封,在 60 r·min⁻¹ 转盘上旋转萃取 10 h 以上,然后取 1 mL 正己烷萃取液至 1.5 mL 棕色玻璃瓶,加 50 nL C¹³ 标记 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%。样品采用气相色谱-质谱仪(Agilent 6890N/MS 5973)进行测定,具体见文献[21]。

1.5.2 微生物量的测定

采用浊度法测定培养液的微生物量。使用微量移液器(灭菌枪头)从不同培养液中每次取样 200 μL 于无菌的 96 孔板内,用基础培养基作空白对照,每组 3 个平行。准备好样品后将 96 孔板置于酶标仪(美国伯乐 BIO-RAD680)内,检测程序为振动 3 s,吸光光度值 595 nm。

2 结果与amp;讨论

2.1 BDE-47 降解菌的筛选与amp;鉴定

以 BDE-47 为碳源($100 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)对采自北京高碑店污水处理厂好氧生物处理池中的活性污泥进行驯化,2 周内 BDE-47 的浓度下降 35.42%。通过多次平板划线分离,从该驯化的活性污泥中筛选出 1 株菌(标记为 GAO 菌),其菌落形态呈橙黄色、圆形、中等大小、表面光滑、边缘整齐,革兰氏染色结果为阴性。提取该菌 DNA,分析其 16S rDNA,结果表明其与不动杆菌(*Acintobacter sp.*)的相似性最大,为 90%。

2.2 GAO 菌对 BDE-47 的好氧降解及其产物解析

文献[22, 23]中报道 BDE-47 在水环境中的浓度一般为几十~几百 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,因此本实验中设计的 BDE-47 初始浓度为 $200 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。由于 BDE-47 浓度较低,无法直接添加纯品,只能溶于有机溶剂(本研究中用甲醇)后再添加,然后挥发去除甲醇(在洁净工作台进行)。在这个过程中,BDE-47 也可能部分挥发了,导致实际上测定的浓度低于设计的浓度。在活菌组和灭菌组中,由于细菌的状态不同,对 BDE-47 的萃取效率有所影响,使得测定所得的初始浓度不同。从时间序列上看,经过 63 d 的培养,在活菌组中 BDE-47 浓度下降了 45.44%,而在灭菌组(对照)中 BDE-47 浓度基本无变化,如图 1 所示。活菌组中微生物量明显增多,尤其在第 1 周内上升迅速,后期基本稳定,而在灭菌组中微生物量没有增加,见图 2。研究中采用离子色谱(万通 792 Basic IC,瑞士)对培养液中的溴离子进行了测定,但由于样品中溴离子浓度过低,测定结果受干扰峰影响较大,数据不可靠,需要在今后的研究中进一步解决这个问题。

在实验后期,用乙酸乙酯对活菌组和灭菌组培

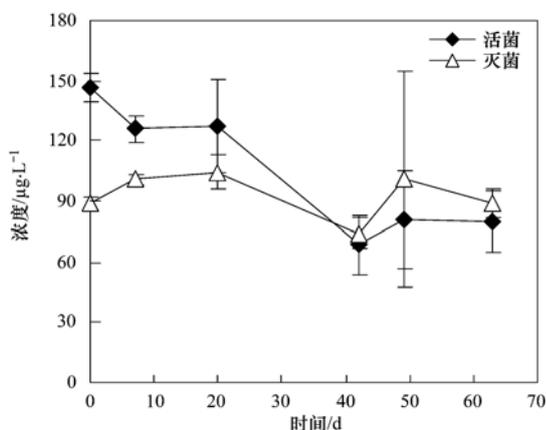


图 1 活菌组和灭菌组中 BDE-47 浓度随时间的变化

Fig. 1 Change of BDE-47 concentrations over time in the active group and the sterilized group

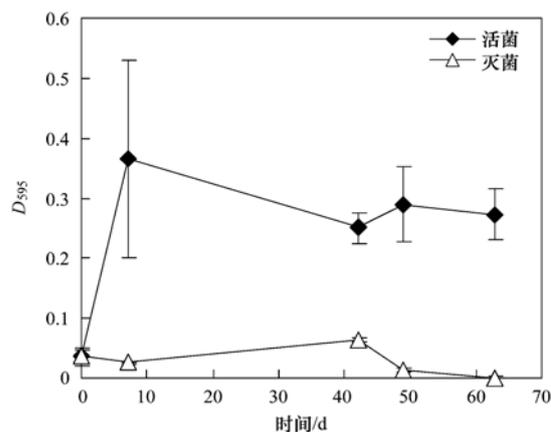


图 2 活菌组和灭菌组中微生物量随时间的变化

Fig. 2 Change of microbial mass over time in the active group and the sterilized group

养液分别进行了提取,用气相色谱-质谱对样品进行全离子扫描分析。结果显示,在活菌组中出现 4-OH-联苯醚(见图 3),而在灭菌组中没有,因此推断 4-OH-联苯醚是 BDE-47 好氧降解的产物。PBDEs 在微生物降解过程中的羟基化,在其它研究中也有报道。Schmidt 等^[14]报道 *Sphingomonas sp.* strain SS33 在共代谢 4,4'-二溴联苯醚时,产生 4-溴苯酚和 4-溴儿茶酚。Kim 等^[15]报道 *Sphingomonas sp.* PH-07 在共代谢 2,4,4'-三溴联苯醚、2,4-二溴联苯醚和 4-溴联苯醚时,产生 2,4-二溴苯酚、4-苯酚等。Robrock 等^[16]报道 *Burkholderia xenovorans* LB400 在共代谢单溴联苯醚(BDE-3)时产生羟基化的单溴联苯醚,在加入联苯双氧酶或乙苯双氧酶的重组菌对 4-溴联苯醚的降解中主要产物为双羟基化的联苯醚^[17]。这表明不同菌对 PBDEs 的好氧降解途径及涉及的酶有所不同。

本实验的中后期,在活菌组培养液中也检测出联苯醚。联苯醚是 BDE-47 还原降解的产物,通常发生在厌氧条件下。本实验过程中,虽然培养瓶的瓶口用有透气孔的封口膜盖住,但不能避免培养液在某个时段、某个部位会处于厌氧状态。Chen 等^[24]在研究 4-溴代联苯醚的好氧降解时同样发现降解产物中存在联苯醚,表明在有氧环境下会形成局部厌氧环境。GAO 菌与不动杆菌(*Acintobacter sp.*)的相似性较大(90%),因而有可能表现出与不动杆菌相似的性能。Prakash 等^[25]从 2-氯-4-硝基苯酸污染场地分离出 1 株不动杆菌(*Acintobacter sp.* Strain RKJ12),发现其在降解 2-氯-4-硝基苯酸的过程中涉及氧化的和还原的代谢机制。在本研究中,GAO 菌对 BDE-47 的降解也可能涉及氧化的和还原的代

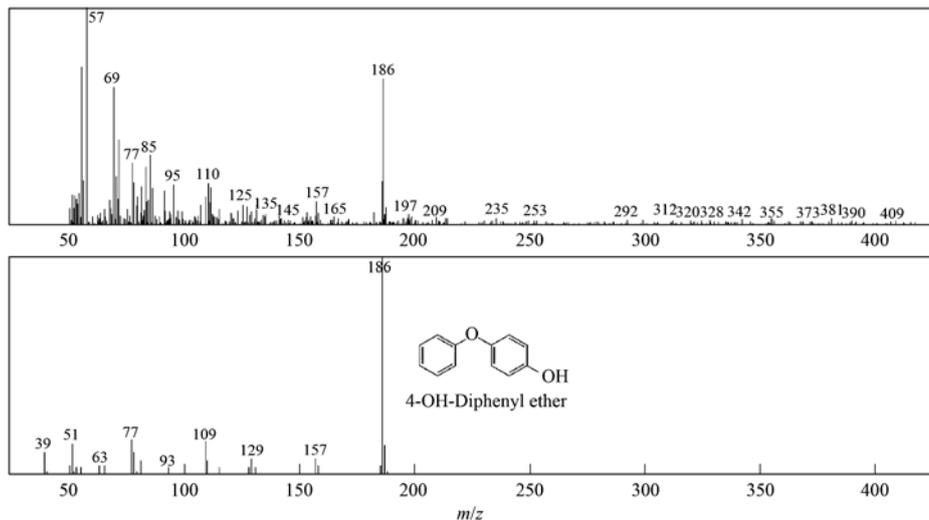


图3 BDE-47 降解产物的质谱图和可能的化学结构

Fig. 3 Mass spectrum and the proposed chemical structure of the degradation product of BDE-47

谢机制,使 BDE-47 变为 4-OH-联苯醚。

2.3 与降解 BDE-47 有关的蛋白质

通过蛋白质双向电泳分析,发现分别以 BDE-47 和酵母提取物为碳源时,培养的 GAO 菌中蛋白质有明显变化。蛋白质表达量差异倍数大于 3 的蛋白质有 24 种,其中,以 BDE-47 为碳源时蛋白质表达量下调的有 19 种、表达量上调的有 5 种。以 BDE-47 为碳源时有、而以酵母提取物为碳源时无的蛋白质有 47 种(用 chy 标记),如图 4 所示。

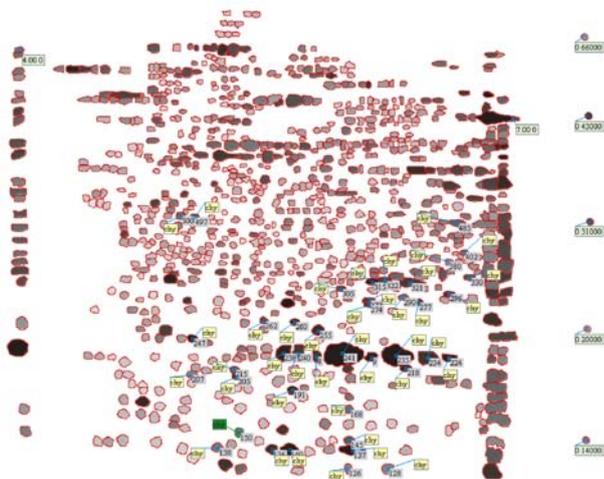


图4 不同碳源培养体系中蛋白质对比

Fig. 4 Comparison of proteins in different enrichments

对图 4 中强度较大的 16 个 chy 标记点进行了切胶、酶解和质谱分析,结果列于表 1。给出的是序列比对在 NCBI 数据库中得分最高的蛋白质,得分高于 83 的为显著性比对结果($P < 0.05$)。

在比对结果显著的 9 种蛋白质中,有 3 种在

NCBI 的蛋白质库中未被鉴定出来,其它 6 种被鉴定出,它们均具有特定的功能,例如,催化嘧啶生物合成、调控染色体复制与分割、促进营养物的运送、催化磷酸甘露糖的合成、催化含氮化合物的还原、调节操纵子的转录等。另外 7 种蛋白质,虽然比对结果得分低于 83,但也可能与 BDE-47 的降解相关,它们的功能包括 DNA 系统修复、菌毛伸展、信号转导、脂肪酸代谢等。由于经费有限,没有对另外 25 个特异蛋白质进行质谱分析,导致所获信息不够全面。一些降解关键酶,由于表达量较低,有可能没有在蛋白质分析中未被检出。从已有结果可看出,细菌对 BDE-47 的降解是一个复杂的过程,涉及多种蛋白质的作用,其机制可能为细菌从遗传物质的合成与复制开始,再通过转录和翻译,形成能降解 BDE-47 的酶,发挥降解作用。这一过程需要合成材料的生成、营养物质的运输、DNA 系统的修复、信号的转导、细菌的运动等,而所有这些活动都是在相关蛋白质的作用下完成的,体现了细胞生命的本质特征。在后续研究中,拟有针对性地对一些氧化酶进行检测。

3 结论

(1) 从北京高碑店污水处理厂活性污泥中筛选出 1 株能以 BDE-47 为碳源生长的细菌(标记为 GAO 菌),其 16S rDNA 与不动杆菌(*Acintobacter* sp.)的相似性最大,为 90%。

(2) 在 BDE-47 初始浓度为 $146 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的条件下,经过 63 d 的培养,GAO 菌可降解 45.44% 的

表 1 GAO 菌以 BDE-47 为碳源时出现的特异蛋白质

Table 1 Specific proteins appeared in GAO bacteria when BDE-47 was used as carbon source

特异点编号	得分	蛋白质	功能
321	109	Orotate phosphoribosyltransferase(乳清酸盐磷酸核糖基转移酶磷酸核糖基转移酶)	嘧啶生物合成中涉及的一个酶,从乳清酸盐和磷酸核糖焦磷酸中催化形成乳清酸核苷 5'-磷酸
218	90	unnamed protein product(未命名的蛋白质)	—
238	88	chromosome partitioning protein Spo0J(染色体分割蛋白质 Spo0J)	调控染色体复制的起始,及时分离复制染色体的起源
140	88	TonB family protein(TonB 家族蛋白质)	膜蛋白质,有助于将铁、维生素 B12 等运送入细胞
315	86	mannose-6-phosphate isomerase/mannose-1-phosphate guanylyl transferase(甘露糖-6-磷酸异构酶/甘露糖-1-磷酸鸟苷酸转移酶)	有助于 6-磷酸果糖和甘露糖-6-磷酸互变的一种酶,也有助于鸟苷二磷酸甘露糖的合成
255	86	unnamed protein product(未命名的蛋白质)	—
224	85	Hypothetical nitroreductase(假定的硝基还原酶)	含氮化合物还原中涉及的一种酶
9	85	unnamed protein product(未命名的蛋白质)	—
8	84	HxlR family transcriptional regulator(HxlR 家族转录调节)	一种 DNA 结合蛋白,有助于 hxlAB 操纵子的表达(该操纵子编码磷酸核酮糖途径中两个关键酶)
241	78	UvrABC system protein A(UvrABC 系统蛋白质 A)	用于 DNA 修复系统的一种蛋白质,可切除修复嘧啶二聚体
136	74	conserved hypothetical protein(保守的假定蛋白质)	—
322	72	hypothetical protein amb0388(假定的蛋白质 amb0388)	—
137	70	type IV-A pilus assembly ATPase PilB(IV 型-菌毛装配 ATP 酶 PilB)	有助于菌毛伸展的一种酶
234	63	Putative MCP-type signal transduction protein(推定的 MCP-型信号转导蛋白质)	用于信号转导的一种蛋白质
235	62	acetyl-CoA carboxylase subunit beta(乙酰辅酶 A 羧化酶 β 亚基)	用于脂肪酸代谢的一种酶
240	61	unnamed protein product(未命名的蛋白质)	—

BDE-47,降解产物主要为 4-OH-联苯醚,菌量增加了 7 倍左右。

(3)GAO 菌对 BDE-47 的降解是一个复杂的过程,涉及多种蛋白质的作用,其机制可能为从遗传物质的合成与复制开始,再通过转录和翻译,形成能降解 BDE-47 的酶,发挥降解作用。

参考文献:

- [1] Kelly B C, Ikonomou M G, Blair J D, *et al.* Hydroxylated and methoxylated polybrominated diphenyl ethers in a Canadian arctic marine food web [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **42**(19): 7069-7077.
- [2] McDonald T A. A perspective on the potential health risks of PBDEs[J]. *Chemosphere*, 2002, **46**(5): 745-755.
- [3] Sellström U, Kierkegaard A, De Wit C, *et al.* Polybrominated diphenyl ethers and hexabromocyclododecane in sediment and fish from a Swedish river [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1998, **17**(6): 1065-1072.
- [4] Hites R A. Polybrominated diphenyl ethers in the environment and in people; a meta-analysis of concentrations [J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, **38**(4): 945-956.
- [5] Watanabe I, Sakai S. Environmental release and behavior of brominated flame retardants [J]. *Environment International*, 2003, **29**(6): 665-682.
- [6] Wu N, Herrman T, Paepke O, *et al.* Human exposure to PBDEs: associations of PBDE body burdens with food consumption and house dust concentrations [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**(5): 1584-1589.
- [7] Haraguchi K, Hisamichi Y, Endo T. Accumulation and mother-to-calf transfer of anthropogenic and natural organohalogenes in killer whales (*Orcinus orca*) stranded on the Pacific coast of Japan [J]. *Science of the Total Environment*, 2009, **407**(8): 2853-2859.
- [8] Chen L G, Huang Y M, Xu Z C, *et al.* Human exposure to PBDEs via house dust ingestion in Guangzhou, South China [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2011, **60**(3): 556-564.
- [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, Birnbaur L S. Impact of repeated exposure on the toxicokinetics of BDE 47 in mice [J]. *Toxicological 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] Thuvander A, Darnerud P O. 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] Schmidt S, Fortnagel P, Witfich R M. Biodegradation and transformation of 4, 4'-and 2, 4-dihalodiphenyl ethers by *Sphingomonas* sp. Strain SS33 [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1993, **59**(11): 3931-3933.
- [15] Kim Y M, Nam I H, Murugesan K, *et al.* Biodegradation of diphenyl ether and transformation of selected brominated congeners by *Sphingomonas* sp. PH- 07 [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2007, **77**(1): 187-194.
- [16] Robrock K R, Coelhan M, Sedlak D L, *et al.* Aerobic biotransformation of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) by bacterial isolates [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43**(15): 5705-5711.
- [17] Robrock K R, Mohn W W, Eltis L D, *et al.* Biphenyl and ethylbenzene dioxygenases of *Rhodococcus jostii* RHA1 Transform PBDEs [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2011, **108**(2): 313-321.
- [18] Schmidt S, Witfich R M, Erdmann D, *et al.* Biodegradation of diphenyl ether and its monohalogenated derivatives by *Sphingomonas* sp. Strain SS3 [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1992, **58**(9): 2744-2750.
- [19] 王呈玉, 孙玉成, 曲迪, 等. 恶臭假单胞菌好氧降解高氯联苯的蛋白质组分析[J]. *环境科学学报*, 2012, **32**(9): 2097-2103.
- [20] Kwok S Y, Siu A F M, Ngai S M, *et al.* Proteomic analysis of *Burkholderia cepacia* MBA4 in the degradation of monochloroacetate [J]. *Proteomics*, 2007, **7**(7): 1107-1116.
- [21] 卢晓霞, 陈超琪, 张姝, 等. 厌氧条件下2,2',4,4'-四溴联苯醚的微生物降解[J]. *环境科学*, 2012, **33**(3): 1000-1007.
- [22] Mizukawa K, Takada H, Takeuchi I, *et al.* Bioconcentration and biomagnification of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) through lower-trophic-level coastal marine food web [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2009, **58**(8): 1217-1224.
- [23] Brown F R, Winkler J, Visita P, *et al.* Levels of PBDEs, PCDDs, PCDFs, and coplanar PCBs in edible fish from California coastal waters [J]. *Chemosphere*, 2006, **64**(2): 276-286.
- [24] Chen C Y, Wang C K, Shih Y H. Microbial degradation of 4-monobrominated diphenyl ether in an aerobic sludge and the DGGE analysis of diversity [J]. *Journal of Environmental Science and Health, Part B: Pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Wastes*, 2010, **45**(5): 379-385.
- [25] Prakash D, Kumar R, Jain R K, *et al.* Novel pathway for the degradation of 2-chloro-4-nitrobenzoic acid by *Acinetobacter* sp. Strain RKJ12 [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2011, **77**(18): 6606-6613.

CONTENTS

Advances in Peroxide-Based Decontaminating Technologies	XI Hai-ling, ZHAO San-ping, ZHOU Wen (1645)
Environmental Damage Assessment; International Regulations and Revelation to China	ZHANG Hong-zhen, CAO Dong, YU Fang, <i>et al.</i> (1653)
Human Health Risk-Based Environmental Criteria for Soil: A Comparative Study Between Countries and Implication for China	XU Meng, YAN Zeng-guang, HE Meng-meng, <i>et al.</i> (1667)
Organic Waste Treatment by Earthworm Vermicomposting and Larvae Bioconversion: Review and Perspective	ZHANG Zhi-jian, LIU Meng, ZHU Jun (1679)
Strategies of Nutrients Control in Lakes Based on Ecoregions of Lakes in China	DIAO Xiao-jun, XI Bei-dou, HE Lian-sheng, <i>et al.</i> (1687)
Current Status of Surface Water Acidification in Northeast China	XU Guang-yi, KANG Rong-hua, LUO Yao, <i>et al.</i> (1695)
Impact Analysis of Xi'an to the Water Quality of Weihe River	YU Jie, LI Huai-en (1700)
Distribution Characteristics of Dissolved Oxygen and Its Affecting Factors in the Pearl River Estuary During the Summer of the Extremely Drought Hydrological Year 2011	YE Feng, HUANG Xiao-ping, SHI Zhen, <i>et al.</i> (1707)
Application of Equilibrium Partitioning Approach to Establish Sediment Quality Criteria for Heavy Metals in Hengyang Section of Xiangjiang River	HAN Chao-nan, QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (1715)
Assessing the Benthic Ecological Status in Yangtze River Estuary Using AMBI and M-AMBI	CAI Wen-qian, MENG Wei, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (1725)
Pollution Load and the First Flush Effect of BOD ₅ and COD in Urban Runoff of Wenzhou City	WANG Jun, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (1735)
Influencing Factors in Measuring Absorption Coefficient of Suspended Particulate Matters	YU Xiao-long, SHEN Fang, ZHANG Jin-fang (1745)
Relationship Between pCO ₂ and Algal Biomass in Xiangxi Bay in Spring	YUAN Xi-gong, HUANG Wen-min, BI Yong-hong, <i>et al.</i> (1754)
Effects of Turbulent Fluctuation Intensity on the Growth of Algae and Water Environment	LEI Yu, LONG Tian-yu, SAN Lei, <i>et al.</i> (1761)
Simultaneous Removal of Algae and Its Odorous Metabolite Dimethyl Trisulfide in Water by Potassium Ferrate	MA Xiao-yan, ZHANG Ze-hua, WANG Hong-yu, <i>et al.</i> (1767)
Catalyzed Oxidation of Catechol by the Heterogeneous Fenton-like Reaction of Nano-Fe ₃ O ₄ -H ₂ O ₂ System	HE Jie, YANG Xiao-fang, ZHANG Wei-jun, <i>et al.</i> (1773)
Photodegradation of Naproxen in Aqueous Systems by UV Irradiation: Mechanism and Toxicity of Photolysis Products	MA Du-juan, LIU Guo-guang, LÜ Wen-ying, <i>et al.</i> (1782)
Catalytic Ozonation of Nitrobenzene in Water by Acidification-activated Red Mud	KANG Ya-ning, LI Hua-nan, XU Bing-bing, <i>et al.</i> (1790)
Experimental Studies on Stability of Floes from Cadmium Pollution Emergency Treatment	LIU Wang-rong, GUO Qing-wei, YANG Ren-bin, <i>et al.</i> (1797)
Evaluation of Floc Strength Based on Morphological Analysis and Optical Online Monitoring	JIN Peng-kang, FENG Yong-ning, WANG Bao-bao, <i>et al.</i> (1802)
Mechanism of Reductive Dechlorination of Trichlorophenol with Different Electron Donors	WAN Jin-quan, HU Meng-die, MA Yong-wen, <i>et al.</i> (1808)
Preparation of Magnetic Quaternary Chitosan Salt and Its Adsorption of Methyl Orange from Water	ZHANG Cong-lu, HU Xiao-min, YING Shi-ying, <i>et al.</i> (1815)
Membrane Fouling by Secondary Effluent of Urban Sewage and the Membrane Properties	MENG Xiao-rong, ZHANG Hai-zhen, WANG Lei, <i>et al.</i> (1822)
Treatment of Municipal Wastewater Using the Combined Reversed A ² /O-MBR Process	ZHANG Jian-jun, ZOU Gao-long, YANG Shu-fang, <i>et al.</i> (1828)
Study on Sulfur-based Autotrophic Denitrification with Different Electron Donors	YUAN Ying, ZHOU Wei-li, WANG Hui, <i>et al.</i> (1835)
Nitrogen Removal and N ₂ O Emission Characteristics During the Shortcut Simultaneous Nitrification and Denitrification Process	LIANG Xiao-ling, LI Ping, WU Jin-hua, <i>et al.</i> (1845)
Optimization of Solid-Phase Extraction for Enrichment of Toxic Organic Compounds in Water Samples	ZHANG Ming-quan, LI Feng-min, WU Qian-yuan, <i>et al.</i> (1851)
Polycyclic Musks Exposure Affects Gene Expression of Specific Proteins in Earthworm <i>Eisenia fetida</i>	CHEN Chun, LIU Xiao-wei, ZHENG Shun-an, <i>et al.</i> (1857)
Health Risk Assessment and Ozone Formation Potentials of Volatile Organic Compounds from Pharmaceutical Industry in Zhejiang Province	XU Zhi-rong, WANG Zhe-ming, XU Ming-zhu, <i>et al.</i> (1864)
Health Effect of Volatile Aldehyde Compounds in Photocatalytic Oxidation of Aromatics Compounds	ZHAO Wei-rong, LIAO Qiu-wen, YANG Ya-nan, <i>et al.</i> (1871)
Compositions and Distribution Characteristics of Polybrominated Diphenyl Ethers in Serum of Women from Sichuan Province	SHAO Min, CHEN Yong-heng, LI Xiao-yu (1877)
QSAR/QSPR for Predicting the Toxicity of Imidazolium Ionic Liquids	ZHAO Ji-hong, ZHAO Yong-sheng, ZHANG Hong-zhong, <i>et al.</i> (1882)
Spatial and Temporal Characteristics of Heavy Metal Concentration of Surface Soil in Hebin Industrial Park in Shizuishan Northwest China	FAN Xin-gang, MI Wen-bao, MA Zhen-ning, <i>et al.</i> (1887)
Distribution Characteristic and Current Situation of Soil Rare Earth Contamination in the Bayan Obo Mining Area and Baotou Tailing Reservoir in Inner Mongolia	GUO Wei, FU Rui-ying, ZHAO Ren-xin, <i>et al.</i> (1895)
Road Dust Loading and Chemical Composition at Major Cities in Fujian Province	ZHENG An, YANG Bing-yu, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (1901)
Numerical Simulation and Application of Electrical Resistivity Survey in Heavy Metal Contaminated Sites	WANG Yu-ling, NAI Chang-xin, WANG Yan-wen, <i>et al.</i> (1908)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Rare Earth Elements Uptake of Soybean Grown in Rare Earth Mine Tailings	GUO Wei, ZHAO Ren-xin, ZHAO Wen-jing, <i>et al.</i> (1915)
Algicidal Activity Against Red-tide Algae by Marine Bacterial Strain N3 Isolated from a HABs Area, Southern China	SHI Rong-jun, HUANG Hong-hui, QI Zhan-hui, <i>et al.</i> (1922)
Isolation, Identification and Oxidizing Characterization of an Iron-Sulfur Oxidizing Bacterium LY01 from Acid Mine Drainage	LIU Yu-jiao, YANG Xin-ping, WANG Shi-mei, <i>et al.</i> (1930)
Isolation of an Effective Benzo[a]pyrene Degrading Strain and Its Degradation Characteristics	CAI Han, YIN Hua, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1937)
Aerobic Microbial Degradation of 2,2',4,4'-Tetrabrominated Diphenyl Ether	ZHANG Shu, Franco Giulio, LI Xiao-bao, <i>et al.</i> (1945)
Piggery Wastewater Cultivating Biofloculant-Producing Flora B-737 and the Fermentation Characteristics	PEI Rui-lin, XIN Xin, ZHANG Xue-qiao, <i>et al.</i> (1951)
Correlation Between Acidic Materials and Acid Deposition in Beijing During 1997-2011	CHEN Yuan-yuan, TIAN He-zhong, YANG Dong-yan, <i>et al.</i> (1958)
Characteristics of Precipitation pH and Conductivity at Mt. Huang	SHI Chun-e, DENG Xue-liang, WU Bi-wen, <i>et al.</i> (1964)
Chemical Characteristics of Water-Soluble Components of Aerosol Particles at Different Altitudes of the Mount Huang in the Summer	WEN Bin, YIN Yan, QING Yan-shuo, <i>et al.</i> (1973)
Pollution Characteristics of Organic Acids in Atmospheric Particles During Haze Periods in Autumn in Guangzhou	TAN Ji-hua, ZHAO Jing-ping, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> (1982)
Characterization of Organic Carbon (OC) and Elemental Carbon (EC) in PM _{2.5} During the Winter in Three Major Cities in Fujian Province, China	CHEN Yan-ting, CHEN Jin-sheng, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (1988)
Size Distribution of Carbonaceous Particulate Matter in Atmosphere of Shanghai, China	YUAN Ning, LIU Wei, ZHAO Xiu-liang, <i>et al.</i> (1995)
Secondary Aerosol Formation Through Photochemical Reactions Estimated by Using Air Quality Monitoring Data in the Downtown of Pudong, Shanghai	CUI Hu-xiong, WU Ya-ming, DUAN Yu-sen, <i>et al.</i> (2003)
Geochemical Characteristics and Sources of Atmospheric Particulates in Shanghai During Dust Storm Event	QIAN Peng, ZHENG Xiang-min, ZHOU Li-min (2010)
Near Surface Atmospheric CO ₂ Variations in Autumn at Suburban Xiamen, China	LI Yan-li, MU Chao, DENG Jun-jun, <i>et al.</i> (2018)
<i>In-situ</i> Measurement of Background Atmospheric HCFC-142b Using GC-MS and GC-ECD Method	GUO Li-feng, YAO Bo, ZHOU Ling-xi, <i>et al.</i> (2025)
Airborne Fungal Community Composition in Indoor Environments in Beijing	FANG Zhi-guo, OUYANG Zhi-yun, LIU Peng, <i>et al.</i> (2031)
Study on Quantification Assessment and Odor Fingerprint of Volatile Aromatic Hydrocarbons from Sewage Treatment Plant	GUO Wei, WANG Bo-guang, TANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (2038)
Superposition Impact Character of Air Pollution from Decentralization Docks in a Freshwater Port	LIU Jian-chang, LI Xing-hua, XU Hong-lei, <i>et al.</i> (2044)
Thermal Stability and Transformation Behaviors of Pb in Yima Coal	LIU Rui-qing, WANG Jun-wei (2051)
Synergistic Emission Reduction of Chief Air Pollutants and Greenhouse Gases Based on Scenario Simulations of Energy Consumptions in Beijing	XIE Yuan-bo, LI Wei (2057)

《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)

2013年5月15日 34卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 5 May 15, 2013

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