

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第10期

Vol.34 No.10

**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

南京地区大气气溶胶 PM<sub>2.5</sub> 中稳定碳同位素组成研究 ..... 吴梦龙, 郭照冰, 刘凤玲, 孙德玲, 卢霞, 姜文娟 (3727)

太原市空气颗粒物中正构烷烃分布特征及来源解析 ..... 胡冬梅, 彭林, 白慧玲, 牟玲, 韩锋, 刘效峰, 冀豪栋, 张鹏九 (3733)

交通与气象因子对不同粒径大气颗粒物的影响机制研究 ..... 罗娜娜, 赵文吉, 晏星, 官兆宁, 熊秋林 (3741)

公交车燃用生物柴油的颗粒物排放特性 ..... 楼狄明, 陈峰, 胡志远, 谭丕强, 胡炜 (3749)

兰州及其周边区域大气降水 δ<sup>18</sup>O 特征及其水汽来源 ..... 陈粉丽, 张明军, 马潜, 李小飞, 王圣杰, 李菲 (3755)

天山乌鲁木齐河源 1 号冰川区气溶胶水溶性离子变化特征及来源分析 ..... 岳晓英, 李忠勤, 张明军, 周平, 樊晋 (3764)

O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 氧化苯乙烯气体性能及机制 ..... 何觉聪, 黄倩茹, 叶杞宏, 罗雨薇, 张再利, 樊青娟, 魏在山 (3772)

马尾松针叶组织稳定硫同位素地球化学特征及来源示踪 ..... 关晖, 肖化云, 朱仁果, 郑能建, 瞿玲露 (3777)

江西省表层土壤和苔藓硫含量及硫同位素组成对比研究 ..... 李男, 肖化云, 陈永忠, 周丹, 罗笠, 吴代敏 (3782)

辽河流域非点源污染空间特征遥感解析 ..... 王雪蕾, 蔡明勇, 钟部卿, 姚延娟, 殷守敬, 吴迪 (3788)

景观带尺度高寒区水文特征时空变化规律研究 ..... 杨永刚, 胡晋飞, 肖洪浪, 邹松兵, 尹振良 (3797)

金普湾海域表层沉积物中基质结合态磷化氢的分布特征 ..... 游丽丽, 宗海波, 张淑芳, 尹国宇, 李涛, 侯立军 (3804)

崇明东滩湿地干湿交替过程脲酶活性变化初探 ..... 韩建刚, 曹雪 (3810)

FDA 水解酶分析法表征近海泥滩微生物活性 ..... 刘叶, 邹立, 刘陆, 高冬梅 (3818)

中国东北主要河流沉积物中多溴二苯醚的含量状况及生态风险分析 ..... 袁海峰, 成杭新, 赵传冬, 刘应汉, 杨柯, 李括, 彭敏, 刘飞 (3825)

深圳大鹏湾海域表层沉积物和生物体中多环芳烃残留及其风险评价 ..... 孙闰霞, 柯常亮, 谷阳光, 卢腾腾, 杜飞雁, 马胜伟, 林钦 (3832)

PMF 和 PCA/MLR 法解析上海市高架道路地表径流中多环芳烃的来源 ..... 边璐, 李田, 侯娟 (3840)

三峡库区蓄水初期大宁河重金属食物链放大特征研究 ..... 余杨, 王雨春, 周怀东, 高博, 赵高峰 (3847)

小型封闭水体环境因子与叶绿素 a 的时空分布及相关性研究 ..... 李飞鹏, 张海平, 陈玲 (3854)

太湖氮、磷自净能力的实验与模型模拟 ..... 韩涛, 翟淑华, 胡维平, 张红举, 李钦钦 (3862)

湖泊疏浚方式对内源释放影响的模拟研究 ..... 陈超, 钟继承, 范成新, 孔明, 余居华 (3872)

水体/底泥生物基城市河道富营养化水体修复试验研究 ..... 周慧华, 宋晓光, 吴革, 谢鑫源 (3879)

底泥调控剂对感潮河涌沉积物中重金属的影响 ..... 区凤荏, 孙国萍, 许玫英 (3888)

区域水化学条件对淮南采煤沉陷区水域沉积物磷吸附特征的影响研究 ..... 易齐涛, 孙鹏飞, 谢凯, 曲喜杰, 王婷婷 (3894)

4 种人工湿地填料的 f2 噬菌体吸附特性 ..... 陈迪, 郑祥, 魏源送, 杨勇 (3904)

稻壳灰对抗生素磺胺的吸附特性研究 ..... 纪营雪, 王凤贺, 张帆, 张艳红, 王国祥, 顾中铸 (3912)

紫外辐射对腐殖酸化学稳定性影响机制研究 ..... 王文东, 周礼川, 丁真真, 王洪平, 孙学军 (3921)

基于石墨烯载体的铁基材料制备及除砷性能比较 ..... 朝木尔乐格, 冯流, 霍艳霞 (3927)

nTiO<sub>2</sub> 在水中的分散沉降行为研究 ..... 陈金媛, 方金凤, 魏秀珍 (3933)

微生物-铁氧化物交互作用对黄土中砷活化迁移的影响 ..... 谢芸芸, 陈天虎, 周跃飞, 谢巧勤 (3940)

两性离子在聚偏氟乙烯 (PVDF) 膜表面接枝改性的研究 ..... 周桂花, 肖峰, 肖萍, 王东升, 段晋明, 石健, 臧莉 (3945)

化粪池排口处土壤对典型农户生活污水氮素污染物的消减测算研究 ..... 周锋, 王文林, 王国祥, 马久远, 万寅婧, 唐晓燕, 梁斌, 季斌 (3954)

珠江三角洲典型集约化猪场废水污染特征及风险评价 ..... 李文英, 彭智平, 于俊红, 黄继川, 徐培智, 杨少海 (3963)

污泥堆肥草坪基质利用对草坪生长及土壤和水环境的影响 ..... 金树权, 周金波, 陈若霞, 林斌, 王德耀 (3969)

活性污泥絮体粒径分布与分形维数的影响因素 ..... 李振亮, 张代钧, 卢培利, 曾善文, 杨永浩 (3975)

不同恢复方式对硝化颗粒污泥活性的影响 ..... 郭秀丽, 高大文, 卢健聪 (3981)

生物陶粒反应器的氨自养反硝化研究 ..... 陈丹, 王弘宇, 宋敏, 杨开, 刘晨 (3986)

亚高山草甸土壤呼吸的空间异质性研究 ..... 严俊霞, 李君剑, 王洪建, 张义辉 (3992)

SiB3 模式对作物区 CO<sub>2</sub> 通量的模拟研究 ..... 张庚军, 卢立新, 蒋玲梅, 蒋磊, Ian Baker (4000)

缙云山土地利用方式对土壤活性有机质及其碳库管理指数的影响 ..... 徐鹏, 江长胜, 郝庆菊, 祝滔 (4009)

典型农业城市街道灰尘重金属特征及其环境风险评价: 以许昌市为例 ..... 闫慧, 陈杰, 肖军 (4017)

苏州、无锡和南通道路灰尘中的多溴联苯醚和多氯联苯 ..... 史双昕, 董亮, 李玲玲, 张辉, 李斯明, 张天野, 黄业茹 (4024)

废旧汽车拆解区土壤中多环芳烃垂向分布特性 ..... 吴彦瑜, 胡小英, 洪鸿加, 彭晓春 (4031)

铬污染土壤的稳定化处理及其长期稳定性研究 ..... 王旌, 罗启仕, 张长波, 谈亮, 李旭 (4036)

典型磺胺类抗生素在土柱中的淋溶规律研究 ..... 李曼, 陈卫平, 魏福祥, 焦文涛 (4042)

3 种金属氧化物纳米材料在不同土壤中运移行为研究 ..... 方婧, 余博阳 (4050)

多孔介质中 NAPLs 流体毛细管指进形态及分形表征 ..... 李慧颖, 杜晓明, 杨宾, 伍斌, 徐竹, 史怡, 房吉敦, 李发生 (4058)

毛竹入侵对常绿阔叶林主要树种的化感作用研究 ..... 白尚斌, 周国模, 王懿祥, 梁倩倩, 陈娟, 程艳艳, 沈蕊 (4066)

珠江口典型水产养殖区抗生素抗性基因污染的初步研究 ..... 梁惜梅, 袁湘平, 施震 (4073)

江苏盐城地区水产品重金属含量与安全评价 ..... 刘洋, 付强, 高军, 徐网谷, 殷波, 曹亚乔, 秦卫华 (4081)

铜胁迫对不同基因型谷子幼苗基因组 DNA 多态性的影响 ..... 张义贤, 付亚萍, 肖志华, 张喜文, 李萍 (4090)

利用高通量测序对封存 CO<sub>2</sub> 泄漏情景下土壤细菌的研究 ..... 田地, 马欣, 李玉娥, 查良松, 伍洋, 邹晓霞, 刘爽 (4096)

酸性矿山水区域废矿石中真核生物多样性分析 ..... 李思远, 郝春博, 王丽华, 吕铮, 张丽娜, 刘莹, 冯传平 (4105)

十溴联苯醚降解菌的特性及功能蛋白初步分析 ..... 常晶晶, 尹华, 秦华明, 叶锦韶, 彭辉, 宋小飞 (4112)

硒对水稻吸收积累和转运锰、铁、磷和硒的影响 ..... 胡莹, 黄益宗, 黄艳超, 刘云霞, 梁建宏 (4119)

外源铁对不同番茄品种生理特性、镉积累及化学形态的影响 ..... 刘俊, 周坤, 徐卫红, 陈惠, 张明中, 江玲, 杨芸, 王崇力, 熊治庭 (4126)

电子废物排放持久性有毒污染物的控制政策分析 ..... 李力, 吕永龙, 王铁宇 (4132)

《环境科学》征稿简则 (3926) 《环境科学》征订启事 (4057) 信息 (3878, 3953, 3999, 4041)

# 十溴联苯醚降解菌的特性及功能蛋白初步分析

常晶晶<sup>1</sup>, 尹华<sup>2\*</sup>, 秦华明<sup>1</sup>, 叶锦韶<sup>1</sup>, 彭辉<sup>3</sup>, 宋小飞<sup>2</sup>

(1. 暨南大学环境工程系, 广东省高校毒性污染防治与生物修复重点实验室, 广州 510632; 2. 华南理工大学环境与能源学院, 工业聚集区污染控制与生态修复教育部重点实验室, 广州 510006; 3. 暨南大学化学系, 广州 510632)

**摘要:** 筛选获得了 1 株对十溴联苯醚(BDE-209)有较好降解效率的菌株, 经 16S rRNA 基因序列分析, 初步鉴定为铅黄肠球菌(*Enterococcus casseliflavus*)。该菌株最适培养条件为培养基初始 pH 7, 培养时间 48 h。E. casseliflavus 对 BDE-209 有较好的降解效果, 在含有 5 mg·L<sup>-1</sup> 葡萄糖的降解体系中, 1 g·L<sup>-1</sup> 菌体处理 1 mg·L<sup>-1</sup> BDE-209, 4 d 时降解率达到最大(56.7%)。SDS-聚丙烯酰胺凝胶电泳实验结果表明, 在 E. casseliflavus 降解 BDE-209 的过程中, 2 mg·L<sup>-1</sup> 与 5 mg·L<sup>-1</sup> 的 BDE-209 可诱导菌体生成某类新的胞外蛋白, 而胞内蛋白则随着 BDE-209 含量的增加, 表现为蛋白表达量的增减以及受 BDE-209 抑制而不表达某些蛋白质。双向电泳实验结果检测到 31 个差异点, 表明在降解时菌体中与降解相关的蛋白构象发生了变化, 导致蛋白种类和含量变化。

**关键词:** 铅黄肠球菌; 十溴联苯醚; 降解; 特性; 功能蛋白

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)10-4112-07

## Characteristics and Functional Protein Analysis of an Effective Decabromodiphenyl Ether-Degrading Strain

CHANG Jing-jing<sup>1</sup>, YIN Hua<sup>2</sup>, QIN Hua-ming<sup>1</sup>, YE Jin-shao<sup>1</sup>, PENG Hui<sup>3</sup>, SONG Xiao-fei<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Water/Soil Toxic Pollutants Control and Bioremediation of Guangdong Higher Education Institutes, Department of Environmental Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632, China; 2. Key Laboratory of Pollution Control and Ecosystem Restoration in Industry Clusters, Ministry of Education, College of Environment and Energy, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China; 3. Department of Chemistry, Jinan University, Guangzhou 510632, China)

**Abstract:** An effective decabromodiphenyl ether (BDE-209) degrading strain was isolated and identified as *Enterococcus casseliflavus* based on the 16S rRNA gene sequence analysis. The optimal conditions for strain growth were pH 7 and culture time of 48 h, respectively. *E. casseliflavus* has a good ability to degrade BDE-209. The biodegradation rate of 1 mg·L<sup>-1</sup> BDE-209 by 1 g·L<sup>-1</sup> *E. casseliflavus* reached the highest of 56.7% after 4 days degradation with 5 mg·L<sup>-1</sup> glucose as the additional carbon source. During the degradation process of BDE-209, SDS-PAGE demonstrated that some new extracellular proteins were induced under 2 mg·L<sup>-1</sup> and 5 mg·L<sup>-1</sup> BDE-209. As for the intracellular proteins, the quantity of protein expression varied, and some proteins even disappeared compared with the blank control. Two-dimensional electrophoresis steps for protein analysis detected 31 different protein points, demonstrating that during the degradation process, the conformation of some proteins which were related with degradation was changed, and resulted in the variation of type and content of the proteins.

**Key words:** *Enterococcus casseliflavus*; decabromodiphenyl ether; degradation; properties; functional protein

多溴联苯醚 (polybrominated diphenyl ethers, PBDEs) 具有疏水性、难降解、致癌作用以及神经毒性等特性<sup>[1,2]</sup>, 是一类已引起人们普遍关注的持久性有机污染物<sup>[3~8]</sup>。近年来, 国际上针对 PBDEs 的处理方法研究较多, 包括物理法<sup>[9]</sup>、化学法<sup>[1,10]</sup> 及生物法<sup>[11]</sup>。其中, 生物法被认为是最有前景的降解手段<sup>[12~16]</sup>。目前已有的研究表明, 一些微生物在好氧<sup>[3~5]</sup> 或厌氧<sup>[13,15]</sup> 条件下可以通过酶促反应降解 PBDEs。但对 PBDEs 降解过程中功能蛋白变化的研究鲜见报道。

蛋白质是生命活动的执行者及细胞和生物体的重要体现者<sup>[17]</sup>, 研究表明<sup>[18]</sup>, 污染物对微生物的影响首先表现出对其功能蛋白表达的影响。采用蛋白

质组学分析技术<sup>[19]</sup>, 可在整体水平上全景式地研究微生物在各种污染胁迫环境下的蛋白表达的变化情况, 利用双向电泳技术可以分离纯化与微生物在降解污染物过程中有关的蛋白质/酶, 找到与抗性和降解性有关的特异性蛋白质分子, 从而从分子生物学角度解释微生物降解过程中各物质的变化<sup>[20]</sup>。

本研究从 PBDEs 含量较高的沉积物中采集样品筛选得到了 1 株对十溴联苯醚 (BDE-209) 有降解

收稿日期: 2013-01-04; 修订日期: 2013-04-16

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50978122); 国家自然科学基金委-广东省联合基金重点项目 (U0933002); 广州市科技计划项目 (2011J4300075)

作者简介: 常晶晶 (1989~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制与修复, E-mail: 412108631@qq.com

\* 通讯联系人, E-mail: huayin@scut.edu.cn

效果的菌株,考察了其降解特性,并从菌体蛋白的提取、SDS-聚丙烯酰胺凝胶电泳(SDS-PAGE)等关键环节入手,建立 BDE-209 降解菌功能蛋白提取、表达和分析的技术方法,初步分析了影响 BDE-209 降解的功能蛋白,以期为进一步从分子生物学角度探讨 BDE-209 的降解机制奠定理论及技术基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

#### 1.1.1 试剂

BDE-209 购自 Sigma-Aldrich 公司(St. Louis, MO, USA), ReadyPrep™ 全蛋白提取试剂盒、ReadyPrep™ 2-D 上样缓冲液、ReadyPrep™ 磷酸三丁酯均购自美国 Bio-Rad 公司。BDE-209 母液:用 HPLC 级甲苯为溶剂,将 BDE-209 制备成浓度为 1 000 mg·L<sup>-1</sup> 标准母液,于 4℃ 冰箱保存备用。

#### 1.1.2 培养基及培养条件

肉膏蛋白胨培养基(g·L<sup>-1</sup>):牛肉膏 3, 蛋白胨 10, NaCl 5, pH 7, 固体培养基加琼脂 1.5% ~ 2.0%, 用于菌株的分离富集及扩大培养。培养基 121℃ 高压蒸汽灭菌 30 min。

基础培养基(g·L<sup>-1</sup>):(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0.6, NaCl 0.5, MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O 0.1, FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 0.02, KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 0.3, K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>·3H<sub>2</sub>O 0.3。培养基 121℃ 高压蒸汽灭菌 30 min。

培养条件:如无特别说明,均为 30℃, 130 r·min<sup>-1</sup> 恒温培养箱振荡培养。

### 1.2 菌种的筛选鉴定及生长性能测定

#### 1.2.1 BDE-209 降解菌的筛选、鉴定

将从广州某河涌底泥中采得的样品用无菌双蒸水搅拌混匀静置后,取上清液稀释,稀释液经平板分离得到纯化的 BDE-209 降解菌。

BDE-209 降解菌的 16S rRNA 基因序列分析参照文献[21,22],委托广东省微生物分析检测中心完成。

#### 1.2.2 生长曲线

将菌株接种到肉膏蛋白胨培养基中,分别于 0、4、6、12、18、24、30、36、42、48、54、60、66、72、84、96、120 和 144 h 取样,以未接种的肉膏蛋白胨培养基为空白对照,稀释 10 倍后用分光光度计测定 600 nm 下的吸光值,绘制其生长曲线。每个处理设置 3 个平行样,进行 2 次重复实验。

#### 1.2.3 初始 pH 对 *E. casseliflavus* 生长的影响

将菌株接种到肉膏蛋白胨培养基中,分别设置

培养基的 pH 为 5、6、7、8、9 和 10,在 20 mL 培养液中接入菌种使其终浓度为 1 g·L<sup>-1</sup> (前期实验已证明此投菌量为最佳投菌量),摇床培养 48 h,稀释 10 倍后用分光光度计测定 600 nm 下的吸光值。每个处理设置 3 个平行样,进行 2 次重复实验。

#### 1.2.4 不同初始 pH 的培养液 pH 变化

将菌株接种到肉膏蛋白胨培养基中,分别设置培养基的初始 pH 为 5、6、7、8、9 和 10,在 20 mL 培养液中接入菌种使其终浓度为 1 g·L<sup>-1</sup>,摇床培养 1、2、3、5、8、10、12、24、44、67 h 后,用 pH 快速测定计测定各样品的 pH 值。每个处理设置 3 个平行样,进行 2 次重复实验。

#### 1.2.5 不同 BDE-209 浓度下培养液 D 变化

在 20 mL 肉膏蛋白胨培养液中接入菌种使其终浓度为 1 g·L<sup>-1</sup>,分别设置培养基的 BDE-209 浓度为 0、1、2、5、10、20 和 50 mg·L<sup>-1</sup>,摇床培养 48 h,稀释 10 倍后用分光光度计测定 600 nm 下的吸光值。每个处理设置 3 个平行样,进行 2 次重复实验。

### 1.3 BDE-209 降解实验

#### 1.3.1 葡萄糖浓度的影响

将扩大培养 24 h 后的菌体投入 BDE-209 浓度为 1 mg·L<sup>-1</sup> 的 20 mL 基础培养体系中,使得降解菌终浓度为 1 g·L<sup>-1</sup>,葡萄糖浓度为 0、1、2、5、10、15 mg·L<sup>-1</sup>,摇床培养 4 d 后采用液液萃取方法提取 BDE-209,测定 BDE-209 降解率,设置未加菌样品组作为对照。每个处理设置 3 个平行样,进行 2 次重复实验。

#### 1.3.2 降解时间的影响

在含 2 mg·L<sup>-1</sup>, 5 mg·L<sup>-1</sup> 葡萄糖总体积为 20 mL 的基础培养体系中接入菌悬液,并加入 BDE-209 溶液,使得 BDE-209 最终浓度为 1 mg·L<sup>-1</sup>,分别将样品置于摇床中振荡培养 1、2、3、4、5、7 d。设置未加菌样品组作为对照。每个处理设置 3 个平行样,进行 2 次重复实验。

### 1.4 BDE-209 测定方法

40 mL 正己烷与二氯甲烷混合溶液分 2 次等量萃取整个培养体系,100 mL 鸡心瓶收集有机相,过无水硫酸钠去除水分,经旋转蒸发仪蒸至微干,10 mL 色谱纯正己烷淋洗鸡心瓶,取 2 mL 淋洗液于细胞瓶,待上机。所有步骤避光操作。

利用 GC-MS (Agilent, US),采用选择离子模式,通过外标法对 BDE-209 进行定量分析,分析条件为:色谱柱为 DB-5MS 石英毛细管柱(15 m × 0.25 mm × 0.25 μm),载气为氦气。质谱条件为:EI 源,

离子源温度 250℃,检测器电压 1.1 kV,全扫描  $m/z$  范围为 50~1 000,接口温度 290℃. 测定时进样口温度为 280℃,初始温度 40℃ 保持 1.5 min,以 45℃·min<sup>-1</sup> 的速率升至 140℃,以 10℃·min<sup>-1</sup> 升至 325℃,保持 1 min.

### 1.5 细菌全菌蛋白制备

降解菌接种于 50 mL 培养基中,扩大培养 24 h,然后接种培养物于已加 BDE-209 的细菌培养液中,降解菌终浓度为 1 g·L<sup>-1</sup>,培养 4 d,设置不加 BDE-209 处理的空白对照.

胞外蛋白的提取:将培养得到的培养液在 4℃,6 000 r·min<sup>-1</sup> 离心 10 min,取上清液用 80% 硫酸铵溶液盐析 12 h 后用 0.05 mol·L<sup>-1</sup> Tris-HCl 透析至无 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 后得胞外蛋白,利用考马斯亮蓝法测定蛋白含量.

胞内蛋白的提取:用 0.05 mol·L<sup>-1</sup> Tris-HCl 洗涤菌体 2 次,细胞在离心管中重悬于 0.05 mol·L<sup>-1</sup> Tris-HCl 中,超声破壁(功率 550 W,工作 5 s,间歇 10 s,破壁 50 次),静置 20 min 后于 4℃ 6 000 r·min<sup>-1</sup> 离心 10 min,取上清液得胞内蛋白,利用考马斯亮蓝法测定蛋白质含量.

### 1.6 SDS-聚丙烯酰胺凝胶电泳

取 300 μg 蛋白加入 12.5% 分离胶,4% 浓缩胶制成的胶槽样品孔中,浓缩胶段电泳条件为恒流 20 mA,分离胶段电泳条件为恒流 30 mA,直至溴酚蓝前沿抵达胶底边缘约 0.5 cm 时为止,取出凝胶经染色脱色后于 BIO-RAD 凝胶成像系统中观察.

### 1.7 双向电泳

第一向固相 pH 梯度等电聚焦:每胶条上样 300 μg 蛋白,1 mL 矿物油覆盖后,100 V 线性电泳 1 h,500 V 线性电泳 1 h,8 000 V 快速维持 8 h;取出胶条后在摇床上平衡 20 min.

第二向聚丙烯酰胺全细胞蛋白电泳:配制 12.5% 的聚丙烯酰胺分离胶,将平衡后的 IPG 胶条移入凝胶槽中,先用 20 mA·gel<sup>-1</sup> 电泳 15 min 后升至 30 mA·gel<sup>-1</sup> 电泳至溴酚蓝前沿抵达胶底边缘约 0.5 cm 时为止,凝胶于固定液中固定,用考马斯亮蓝法染色 15 min 后用甲醇:乙酸:水 = 4:1:5 的混合液脱色,再用扫描仪检测.

## 2 结果与分析

### 2.1 降解菌的鉴定及其生长性能

经过分离纯化,得到 1 株对 BDE-209 有降解性能的菌株,将培养了 24 h 的斜面送往广东省微生物

分析检测中心进行 16S rRNA 基因序列测定,并将基因序列同 GenBank 数据库中相关种属序列进行同源性比对,发现其与铅黄肠球菌 (*Enterococcus casseliflavus*) 的同源性达 99%.

*E. casseliflavus* 的生长特性实验结果见图 1. 图 1(a) 显示 *E. casseliflavus* 6 h 后进入对数生长期,30 h 后开始进入稳定期,表明其对新的生长环境有很强的适应能力,可以很快地开始繁殖. 由于营养物质的减少及生长环境变恶劣,细胞密度于 96 h 后开始减少,进入衰亡期.

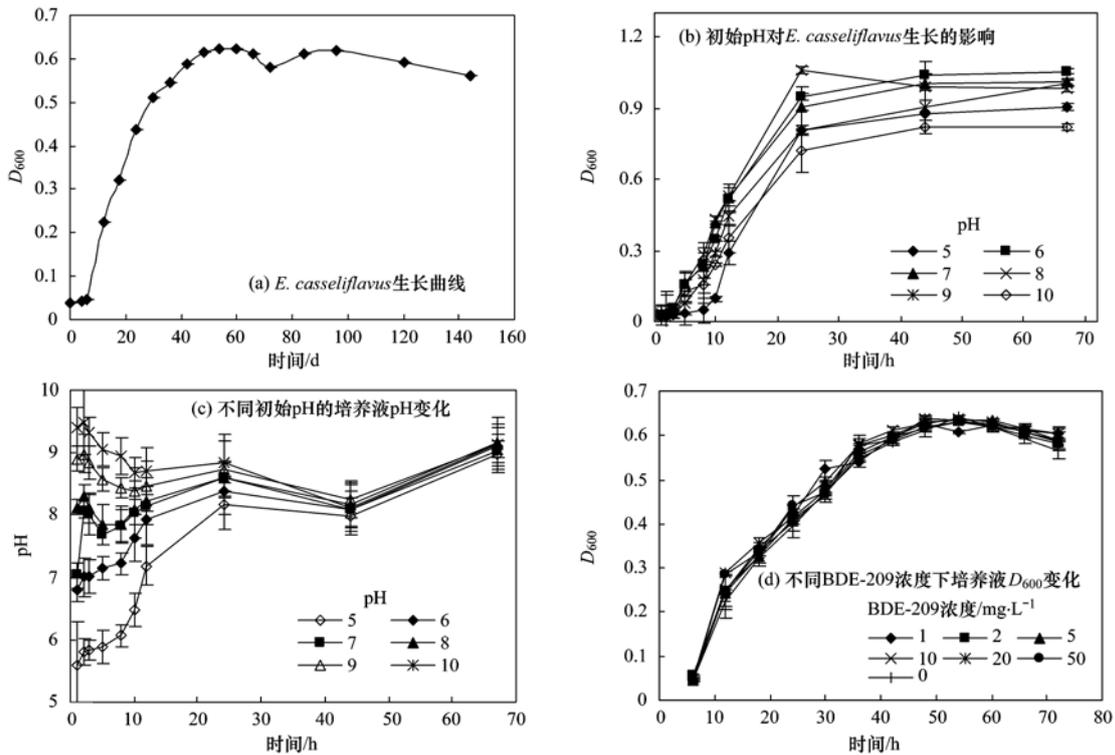
图 1(b) 表明 *E. casseliflavus* 对 pH 的适应能力较强,在不同初始 pH 的培养体系中生长量没有很大的差别. 当初始 pH 为 6~9 时,*E. casseliflavus* 生长情况较好,但其在 pH = 5 和 pH = 10 条件下生长相对较差,说明此条件对该菌的生长有抑制作用,这是因为 pH 的主要效应是引起细胞膜电荷的变化(一般细胞表面带有负电荷),以及营养物质离子化程度的改变,从而影响微生物对营养物质的利用. 大量 H<sup>+</sup> 或 OH<sup>-</sup> 的存在改变膜电位,使得各营养离子的传输发生改变,从而影响菌体生长. H<sup>+</sup> 或 OH<sup>-</sup> 也可改变菌体表面蛋白的构象<sup>[23]</sup>,使得营养物质的运输通道发生障碍,最终抑制了菌体的生长.

从图 1(c) 可以看出,培养过程中,当溶液初始 pH 为 5~7 时,在培养 1 h 之后体系的 pH 值快速上升,随着时间的延长,所有的体系溶液最终 pH 值都趋近于 9. 同时生物量测定实验结果[见图 1(b)]表明,弱碱条件下 *E. casseliflavus* 生长状况较好. 由于每一种微生物体内都有一套适应外界环境变化的自我调节机制,为了创造最佳的生存环境,在生长的过程中,*E. casseliflavus* 分泌各种代谢产物,使溶液的 pH 值维持在弱碱性,以利于自身的生长代谢.

图 1(d) 证实了 *E. casseliflavus* 对 BDE-209 的耐受性极强,其生长受 BDE-209 浓度的影响不明显,各个生长期生长量的变化微小. 不同的微生物对外来污染物都存在一套自身的适应机制,当外来污染物加入至降解体系后,菌体会发生相应的变化以适应生长环境,实验结果表明 *E. casseliflavus* 对 BDE-209 的适应机制反应较灵敏,适应速度较快.

### 2.2 *E. casseliflavus* 对 BDE-209 的降解性能

由图 2 可知,外加碳源葡萄糖后,BDE-209 的降解率随着葡萄糖浓度的增加先增大后减小,加入 5 mg·L<sup>-1</sup> 葡萄糖时降解率最高(56.7%). 这是由于在体系中加入葡萄糖会改善 *E. casseliflavus* 的生长条件,提高菌体的降解效果,但当体系中外加碳源量

图1 *E. casseliflavus* 的生长特性Fig. 1 Growth characteristics of *E. casseliflavus*

过多时, *E. casseliflavus* 会大量利用该碳源而没有利用目标污染物, 致使降解率降低<sup>[23,24]</sup>. 此外, 葡萄糖的存在可以改变 *E. casseliflavus* 对 BDE-209 的运输与利用<sup>[25]</sup>, 且低浓度葡萄糖的加入不会抑制 *E. casseliflavus* 对 BDE-209 的利用, 但可以改变菌体生长过程中代谢物以及某些膜通道<sup>[26]</sup>, 以致一些调控蛋白发生变化, 使得在含有低葡萄糖的体系中菌体对 BDE-209 的降解增加.

图3显示降解率在第2~4 d上升迅速, 4 d后保持平稳. 分析原因可能是, 在2~4 d内, *E. casseliflavus* 处于对数生长期[图1(a)], 细胞活性较大, 相应酶活性也较大, 降解速度较快, 4 d后由于营养物质的减少以及中间产物的生成, 菌体细胞活性降低且抵抗污染物毒性能力有所下降, 对 BDE-209 的利用率降低.

丁娟等<sup>[3]</sup>研究表明好氧菌株白腐真菌对 BDE-209 有显著的降解作用, 投加  $D = 0.5$  的菌体降解 10 d 后, BDE-209 的降解率达到 43.0%, 降解了约 69.7  $\mu\text{g}$ . 还有报道显示在厌氧条件下, 活性污泥中的微生物处理 56  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  的 BDE-209 238 d 后去除率为 50%<sup>[27]</sup>. 与国内外相关研究相比, 本实验结果反映出 *E. casseliflavus* 具有 BDE-209 耐受性强, 降解 BDE-209 周期短、效率较高等特点.

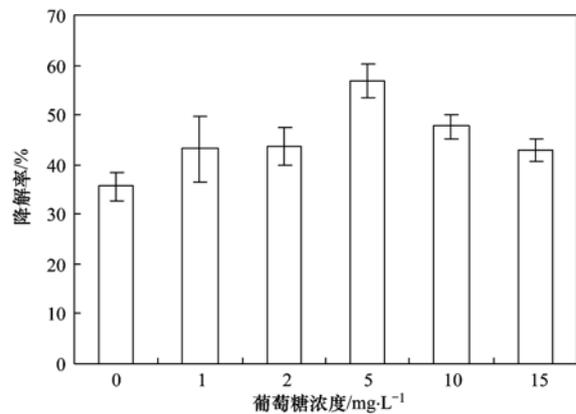


图2 葡萄糖浓度对 BDE-209 降解的影响

Fig. 2 Effects of glucose on biodegradation of BDE-209

2.3 *E. casseliflavus* 细胞蛋白 SDS-PAGE 电泳图谱  
提取降解不同浓度 BDE-209 4 d 后的 *E. casseliflavus* 胞外蛋白、胞内蛋白, 将提取的胞外蛋白、胞内蛋白样品进行 SDS-PAGE, 电泳图谱分别见图 4 和图 5. 从中可以看出, 胞内蛋白电泳条带明显多于胞外蛋白, 且其电泳条带的颜色明显深于胞外蛋白, 这表明胞内蛋白所含蛋白种类多于胞外蛋白且提取出的蛋白浓度较高.

图 4 表明, 加入低浓度的 BDE-209 (0.1  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 后, 胞外蛋白表达没有明显差异, 而当分别加入 2  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  与 5  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  BDE-209 时, 跟空白对照相比, 表

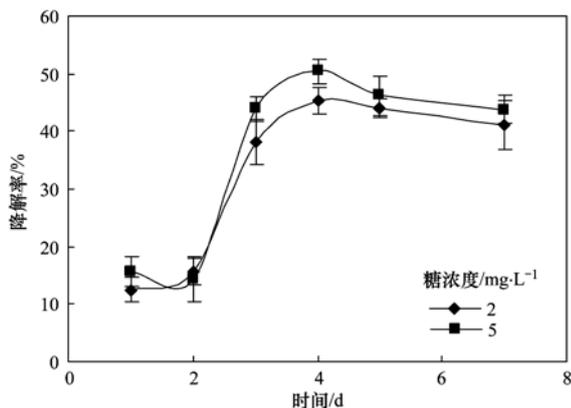


图 3 时间对 BDE-209 降解的影响

Fig. 3 Effects of time on biodegradation of BDE-209

达结果电泳条带均有增加,说明随着 BDE-209 浓度的增加,*E. casseliflavus* 中调控降解 BDE-209 的蛋白组成有了变化,蛋白种类增加. 这可能是由于 BDE-209 的存在可以使某些诱导酶产生,在高浓度 BDE-209 的降解体系中,菌体首先要产生适应高浓度 BDE-209 的蛋白,之后再刺激产生对降解 BDE-209 有作用的蛋白,即 BDE-209 对 *E. casseliflavus* 在降解 BDE-209 过程中胞外蛋白的分泌有刺激作用,刺激了新蛋白质的合成<sup>[28]</sup>. 故相比较而言,高浓度 BDE-209 环境下,蛋白的种类会有一些的变化.

图 5 中,加入不同浓度 BDE-209 后,胞内蛋白的 SDS-PAGE 电泳图谱条带较空白对照电泳结果发生了变化,说明 BDE-209 对 *E. casseliflavus* 在降解 BDE-209 过程中胞内蛋白的分泌也有刺激作用. 在 A 和 B 处,随着 BDE-209 含量的增加,蛋白表达量逐渐增大,为了适应高浓度 BDE-209 的生长环境,*E. casseliflavus* 中与降解 BDE-209 有关的蛋白被激活,表达量增大. 在 C 处,BDE-209 的增加使得菌体部分蛋白表达量下降,原因是 BDE-209 降解过程中,部分蛋白的表达被抑制,表达量降低. 而从 D 处结果可以看出,菌体受 BDE-209 抑制,同空白对照相比,蛋白表达的种类减少.

聚丙烯酰胺凝胶电泳法对菌体可溶性蛋白质酶的分析是现代生物化学技术中的一种重要方法,蛋白质和酶的组成及表达量可以通过电泳图谱反映出来<sup>[29]</sup>. 由胞外及胞内蛋白 SDS-PAGE 实验结果表明,BDE-209 加入量为  $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时,SDS-PAGE 图谱变化最大,因此选择此浓度样品进行双向电泳(two-dimensional electrophoresis, 2-DE).

#### 2.4 *E. casseliflavus* 细胞蛋白双向电泳图谱

分别提取空白体系以及  $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  BDE-209 降

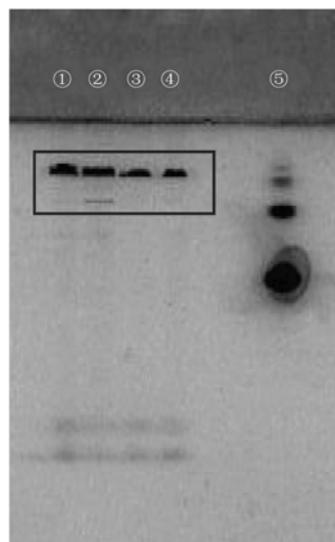
①、②、③、④、⑤泳道加 BDE-209 的量分别为 5、2、0.1  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、空白及 Marker

图 4 细菌胞外蛋白质电泳图谱

Fig. 4 Polyacrylamide gel electrophoresis of exoenzyme

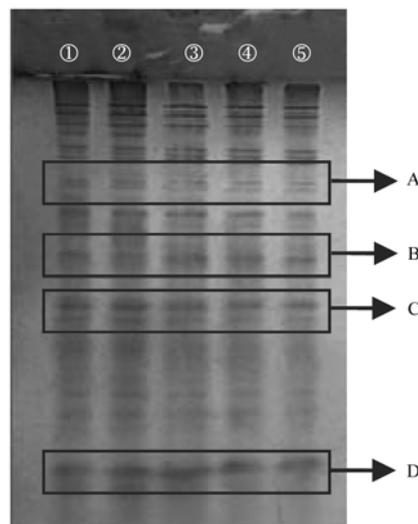
①、②、③、④、⑤泳道加 BDE-209 的量分别为空白、1、0.1、2、5  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 

图 5 细菌胞内蛋白质电泳图谱

Fig. 5 Polyacrylamide gel electrophoresis of endoenzyme

解体系中 *E. casseliflavus* 的胞内蛋白进行 2-DE, 电泳图谱分别见图 6.

对比空白及在 BDE-209 胁迫条件下蛋白的表达图谱,可以找出 31 个差异蛋白点(表 1),其中有 10 个蛋白点表达上调,21 个蛋白点表达下调. 分析图 6 发现,由于 BDE-209 的胁迫作用,降解体系图谱中出现 5 个新的蛋白表达点,同时有 13 个蛋白点消失,此结果与 2.3 节的实验结果相呼应,说明污染物的存在确实会对菌体胞内蛋白产生影响. 细菌的

物质及能量代谢、生物合成以及转运能力等都与蛋白息息相关,蛋白的差异表达说明蛋白量在 BDE-209 的降解过程中发生了变化. 从实验结果可以看出,多数蛋白出现下调,这是因为在降解 BDE-209 过程中蛋白构象发生变化导致某些蛋白表达量减少或消失. 少数蛋白出现上调,表明这些蛋白在降解过程中参与 BDE-209 或其降解中间产物的酶促降解反应,诱导该类蛋白的产生,表达量增加. Santos 等<sup>[30]</sup>研究发现在苯酚培养压力下会导致恶臭假单胞菌 KT 2440 一系列参与各项生命活动的功能蛋白

表达水平上调. Cao 等<sup>[31]</sup>分别对在  $800 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  苯甲酸酯体系中生长的 *P. putida* P8 进行蛋白质组学分析也发现,不同浓度污染物降解代谢过程中起关键作用的蛋白不同.

实验结果表明,污染物的加入导致菌体蛋白表达差异,说明污染物对菌体的细胞生命活动产生了影响,而表达差异蛋白与降解污染物功能蛋白的联系,以及如何调控这些差异表达蛋白,促进微生物对 PBDEs 的降解是后期利用蛋白组学技术进一步探索 PBDEs 的微生物修复作用机制的基础,是必要的和关键的.

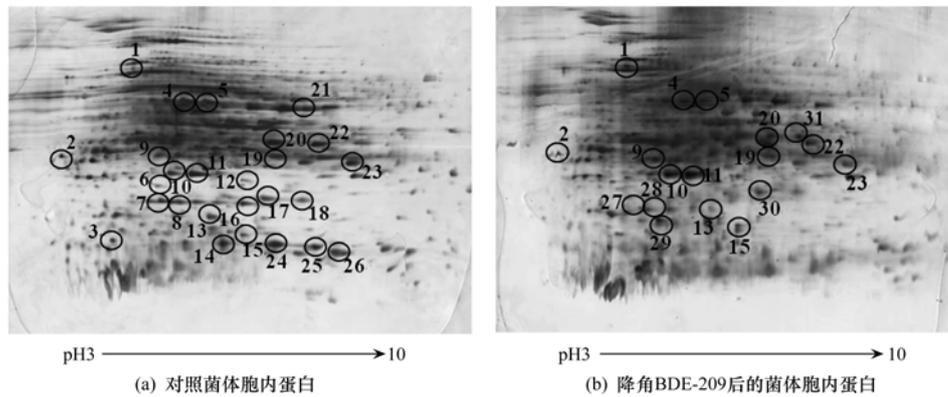


图 6 胞内蛋白双向电泳图谱

Fig. 6 Two-dimensional electrophoresis of endoenzyme

表 1 差异蛋白点<sup>1)</sup>

Table 1 Differentially expressed proteins

编号	表达差异	编号	表达差异	编号	表达差异	编号	表达差异
1	+	9	+	17	-	25	-
2	-	10	+	18	-	26	-
3	-	11	+	19	-	27	+
4	-	12	-	20	-	28	+
5	-	13	-	21	-	29	+
6	-	14	-	22	-	30	+
7	-	15	+	23	-	31	+
8	-	16	-	24	-		

1) “+”表示上调,“-”表示下调

### 3 结论

(1)从广州某河涌沉积物中分离得到 BDE-209 降解菌,鉴定为铅黄肠球菌 (*Enterococcus casseliflavus*). *E. casseliflavus* 适宜的培养条件为:培养基初始 pH 7,培养时间 48 h. 该菌对 BDE-209 有一定抗性,在高浓度 BDE-209 存在下仍能较好生长, $1 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  菌体在含  $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  葡萄糖的降解体系中,可降解  $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  BDE-209,4 d 时降解率达最大,为 56.7%.

(2)加 BDE-209 后胞内蛋白和胞外蛋白的电泳图谱均有明显的变化,*E. casseliflavus* 在降解 BDE-

209 过程中,菌体蛋白质组成发生了变化, $2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  与  $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  BDE-209 可诱导某类新的胞外蛋白质的生成,而胞内蛋白则随着 BDE-209 含量的增加,表现为蛋白表达量的增减以及受 BDE-209 抑制而不表达某些蛋白质. 表明在高浓度 BDE-209 的降解体系中,BDE-209 可以刺激产生适应高浓度污染条件下的生长相关蛋白以及对降解 BDE-209 有作用的蛋白.

(3)菌体降解  $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  BDE-209 4 d 后,与对照菌体相比共出现 31 个差异蛋白点,其中有 10 个蛋白点上调,21 个蛋白点下调,表明在降解时菌体中与降解相关的蛋白构象发生了变化,导致蛋白种类和表达量的变化.

## 参考文献:

- [ 1 ] Zhuang Y, Jin L T, Luthy R G. Kinetics and pathways for the debromination of polybrominated diphenyl ethers by bimetallic and nanoscale zerovalent iron; Effects of particle properties and catalyst[J]. *Chemosphere*, 2012, **89**(4): 426-432.
- [ 2 ] Wang S, Hao C, Gao Z X, *et al.* Effects of excited-state structures and properties on photochemical degradation of polybrominated diphenyl ethers: A TDDFT study [ J ]. *Chemosphere*, 2012, **88**(1): 33-38.
- [ 3 ] 丁娟, 周娟, 姜玮颖, 等. 多溴联苯醚好氧生物降解研究[J]. *环境科学*, 2008, **29**(11): 3179-3184.
- [ 4 ] 熊士昌, 尹华, 何宝燕, 等. 白腐菌对十溴联苯醚的酶促降解研究[J]. *环境化学*, 2012, **31**(5): 615-619.
- [ 5 ] 熊士昌, 尹华, 彭辉, 等. 重金属对白腐菌降解十溴联苯醚的影响[J]. *环境科学*, 2012, **33**(3): 1008-1014.
- [ 6 ] Kierkegaard A, Bignert A, Sellström U, *et al.* Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) and their methoxylated derivatives in pike from Swedish waters with emphasis on temporal trends, 1967-2000[J]. *Environmental Pollution*, 2004, **130**(2): 187-198.
- [ 7 ] 张利飞, 黄业茹, 董亮. 多溴联苯醚在中国的污染现状研究进展[J]. *环境化学*, 2010, **29**(5): 787-795.
- [ 8 ] Sun C Y, Zhao J C, Ji H W, *et al.* Photocatalytic debromination of preloaded decabromodiphenyl ether on the TiO<sub>2</sub> surface in aqueous system[J]. *Chemosphere*, 2012, **89**(4): 420-425.
- [ 9 ] Eriksson J, Green N, Marsh G, *et al.* Photochemical decomposition of 15 polybrominated diphenyl ether congeners in methanol/water [ J ]. *Environmental Science & Technology*, 2004, **38**(11): 3119-3125.
- [ 10 ] Bonin P M L, Edwards P, Bejan D, *et al.* Catalytic and electrocatalytic hydrogenolysis of brominated diphenyl ethers[J]. *Chemosphere*, 2005, **58**(7): 961-967.
- [ 11 ] He J Z, Robrock K R, Alvarez-Cohen L. Microbial reductive debromination of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **40**(14): 4429-4434.
- [ 12 ] 韦朝海, 张小璇, 任源, 等. 持久性有机污染物的水污染控制: 吸附富集、生物降解与过程分析[J]. *环境化学*, 2011, **30**(1): 300-309.
- [ 13 ] Rayne S, Ikonou M G, Whale M D. Anaerobic microbial and photochemical degradation of 4,4'-dibromodiphenyl ether [J]. *Water Research*, 2003, **37**(3): 551-560.
- [ 14 ] Zhou J, Jiang W Y, Ding J A, *et al.* Effect of Tween 80 and  $\beta$ -cyclodextrin on degradation of decabromodiphenyl ether (BDE-209) by White rot fungi [J]. *Chemosphere*, 2007, **70**(2): 172-177.
- [ 15 ] Robrock K R, Korytúr P, Alvarez-Cohen L. Pathways for the anaerobic microbial debromination of polybrominated diphenyl ethers [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **42**(8): 2845-2852.
- [ 16 ] Yen J H, Liao W C, Chen W C, *et al.* Interaction of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) with anaerobic mixed bacterial cultures isolated from river sediment [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **165**(1-3): 518-524.
- [ 17 ] 孙正华, 阳小燕, 贺翔, 等. 应用差异蛋白质组学的方法分析左氧氟沙星对肺炎链球菌 D39 的作用 [J]. *微生物学通报*, 2011, **38**(5): 758-764.
- [ 18 ] Xu S Y, Chen Y X, Wu W X, *et al.* Enhanced dissipation of phenanthrene and pyrene in spiked soils by combined plants cultivation [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **363**(1-3): 206-215.
- [ 19 ] 吴谋胜, 彭宣宪. 微生物蛋白质组学研究进展 [J]. *微生物学报*, 2002, **42**(2): 251-254.
- [ 20 ] Benskin J, Chen S X. Proteomics in the classroom: an investigative study of proteins in microorganisms [J]. *American Biology Teacher*, 2012, **74**(4): 237-243.
- [ 21 ] 萨姆布鲁克 J, 拉塞尔 D W. 黄培堂, 译. 分子克隆实验指南 [M]. (第三版). 北京: 科学出版社, 2002.
- [ 22 ] 东秀珠, 蔡妙英. 常见细菌系统鉴定手册 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [ 23 ] Chen S N, Yin H, Ye J S, *et al.* Effect of copper ( II ) on biodegradation of benzo [ a ] pyrene by *Stenotrophomonas maltophilia* [J]. *Chemosphere*, 2012, **90**(6): 1811-1820.
- [ 24 ] Ye J S, Yin H, Qiang J, *et al.* Biodegradation of anthracene by *Aspergillus fumigatus* [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **185**(1): 174-181.
- [ 25 ] Jia C, Zhu X, Tian X, *et al.* Effect of initial glucose concentration on glucose transmembrane transportation and metabolism of hydrogen-producing Photosynthetic Bacteria [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2010, **16**(2): 264-268.
- [ 26 ] Zhao B, Poh C L. Insights into environmental bioremediation by microorganisms through functional genomics and proteomics [J]. *Proteomics*, 2008, **8**(4): 874-881.
- [ 27 ] Gerecke A C, Hartmann P C, Heeb N V, *et al.* Anaerobic degradation of decabromodiphenyl ether [ J ]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(4): 1078-1083.
- [ 28 ] Kim Y H, Cho K, Yun S H, *et al.* Analysis of aromatic catabolic pathways in *Pseudomonas putida* KT 2440 using a combined proteomic approach: 2-DE/MS and cleavable isotope-coded affinity tag analysis [ J ]. *Proteomics*, 2006, **6**(4): 1301-1318.
- [ 29 ] 牛红军, 李建文, 张栋, 等. 两种光合细菌生物转化槲寄生培养液液体中几种同工酶的变化 [J]. *微生物学通报*, 2011, **38**(7): 1043-1050.
- [ 30 ] Santos P M, Benndorf D, Sá-Correia I. Insights into *Pseudomonas putida* KT2440 response to phenol-induced stress by quantitative proteomics [J]. *Proteomics*, 2004, **4**(9): 2640-2652.
- [ 31 ] Cao B, Geng A L, Loh K C. Induction of ortho-and meta-cleavage pathways in *Pseudomonas* in biodegradation of high benzoate concentration: MS identification of catabolic enzymes [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2008, **81**(1): 99-107.

## CONTENTS

Stable Carbon Isotopic Composition in PM <sub>2.5</sub> in Nanjing Region .....	WU Meng-long, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (3727)
Distribution and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes in Atmospheric Particle in Taiyuan, China .....	HU Dong-mei, PENG Lin, BAI Hui-ling, <i>et al.</i> (3733)
Study on Influence of Traffic and Meteorological Factors on Inhalable Particle Matters of Different Size .....	LUO Na-na, ZHAO Wen-ji, YAN Xing, <i>et al.</i> (3741)
Particle Emission Characteristics of Diesel Bus Fueled with Bio-diesel .....	LOU Di-ming, CHEN Feng, HU Zhi-yuan, <i>et al.</i> (3749)
Characteristics of δ <sup>18</sup> O in Precipitation and Water Vapor Sources in Lanzhou City and Its Surrounding Area .....	CHEN Fen-li, ZHANG Ming-jun, MA Qian, <i>et al.</i> (3755)
Characteristics and Sources of Soluble Ions in Aerosols from Glacier No. 1 at the Headwater of Urumqi River, Tianshan Mountains, China .....	YUE Xiao-ying, LI Zhong-qin, ZHANG Ming-jun, <i>et al.</i> (3764)
Mechanism and Performance of Styrene Oxidation by O <sub>3</sub> /H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .....	HE Jue-cong, HUANG Qian-ru, YE Qi-hong, <i>et al.</i> (3772)
Sulfur Isotopic Signatures in Leaves of <i>Pinus massoniana</i> Lamb. and Source Apportionment .....	GUAN Hui, XIAO Hua-yun, ZHU Ren-guo, <i>et al.</i> (3777)
Comparisons of Sulfur Contents and Isotopes Between Mosses and Surface Soils in Jiangxi Province .....	LI Nan, XIAO Hua-yun, CHEN Yong-zhong, <i>et al.</i> (3782)
Research on Spatial Characteristic of Non-point Source Pollution in Liaohe River Basin .....	WANG Xue-lei, CAI Ming-yong, ZHONG Bu-qing, <i>et al.</i> (3788)
Spatial and Temporal Variations of Hydrological Characteristic on the Landscape Zone Scale in Alpine Cold Region .....	YANG Yong-gang, HU Jin-fei, XIAO Hong-lang, <i>et al.</i> (3797)
Distribution of Matrix-Bound Phosphine in Surface Sediments of Jinpu Bay .....	YOU Li-li, ZONG Hai-bo, ZHANG Shu-fang, <i>et al.</i> (3804)
Effects of Drying-Rewetting Alternation on Urease Activity in Chongming East Intertidal Flat; Results of a Simulation Study .....	HAN Jian-gang, CAO Xue (3810)
Characterization of Microbial Activities in Marine Mudflat Sediment Using FDA Hydrolase Analysis .....	LIU Ye, ZOU Li, LIU Lu, <i>et al.</i> (3818)
Analysis of Ecological Risk and the Content Situation of Polybrominated Diphenyl Ethers in Sediments from Northeast China River Basin .....	NIE Hai-feng, CHENG Hang-xin, ZHAO Chuan-dong, <i>et al.</i> (3825)
Residues and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Sediments and Marine Organisms from Dapeng Bay, Shenzhen .....	SUN Run-xia, KE Chang-liang, GU Yang-guang, <i>et al.</i> (3832)
Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Using Two Mathematical Models for Runoff of the Shanghai Elevated Inner Highway, China .....	BIAN Lu, LI Tian, HOU Juan (3840)
Biomagnification of Heavy Metals in the Aquatic Food Chain in Daning River of the Three Gorges Reservoir During Initial Impoundment .....	YU Yang, WANG Yu-chun, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (3847)
Temporal and Spatial Distribution of Environmental Factors and Chlorophyll-a and Their Correlation Analysis in a Small Enclosed Lake .....	LI Fei-peng, ZHANG Hai-ping, CHEN Ling (3854)
Experiment and Model Simulation of Self-Purification Capacity of Nitrogen and Phosphorus in Lake Taihu .....	HAN Tao, ZHAI Shu-hua, HU Wei-ping, <i>et al.</i> (3862)
Simulation Research on the Release of Internal Nutrients Affected by Different Dredging Methods in Lake .....	CHEN Chao, ZHONG Ji-cheng, FAN Cheng-xin, <i>et al.</i> (3872)
Research of Urban Eutrophic Water Repair by Water/Sediment Biological Bases .....	ZHOU Hui-hua, SONG Xiao-guang, WU Ge, <i>et al.</i> (3879)
Effects of Regulatory Agent on the Heavy Metal Stability in Tidal Sediments .....	OU Feng-zhuang, SUN Guo-ping, XU Mei-ying (3888)
Impact of Regional Water Chemistry on the Phosphorus Isothermal Adsorption of the Sediments in Three Subsidence Waters of the Huainan Mine Areas .....	YI Qi-tao, SUN Peng-fei, XIE Kai, <i>et al.</i> (3894)
Adsorption Characteristics of f2 Bacteriophages by Four Substrates in Constructed Wetland .....	CHEN Di, ZHENG Xiang, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (3904)
Adsorption Characteristics of the Antibiotic Sulfanilamide onto Rice Husk Ash .....	Ji Ying-xue, WANG Feng-he, ZHANG Fan, <i>et al.</i> (3912)
Study on the Stability Variation Mechanism of Humic Acid Water Solution After Radiated by the UV Light .....	WANG Wen-dong, ZHOU Li-chuan, DING Zhen-zhen, <i>et al.</i> (3921)
Comparison of As Removal Performance by Graphene/Iron-Based Material .....	Chaomuerlege, FENG Liu, HUO Yan-xia (3927)
Studies on the Dispersion and Deposition Behavior of Nano-TiO <sub>2</sub> in Aquatic System .....	CHEN Jun-yuan, FANG Jin-feng, WEI Xiu-zhen (3933)
Effect of the Interaction of Microorganisms and Iron Oxides on Arsenic Releasing into Groundwater in Chinese Loess .....	XIE Yun-yun, CHEN Tian-hu, ZHOU Yue-fei, <i>et al.</i> (3940)
Surface Modification of Polyvinylidene Fluoride (PVDF) Membrane by Using the Zwitterionic Substance .....	ZHOU Gui-hua, XIAO Feng, XIAO Ping, <i>et al.</i> (3945)
Estimate the Abatement Rate of Septic Tank Sewage Outfall Soil on Nitrogen Pollutants of Typical Farmer Household Sewage .....	ZHOU Feng, WANG Wen-lin, WANG Guo-xiang, <i>et al.</i> (3954)
Wastewater Pollution Characteristics from Typical Intensive Pig Farms in the Pearl River Delta and Its Ecological Risk Assessment .....	LI Wen-ying, PENG Zhi-ping, YU Jun-hong, <i>et al.</i> (3963)
Effects of Sludge Compost Used as Lawn Medium on Lawn Growth and Soil and Water Environment .....	JIN Shu-quan, ZHOU Jin-bo, CHEN Ruo-xia, <i>et al.</i> (3969)
Influencing Factors of Floc Size Distribution and Fractal Dimension of Activated Sludge .....	LI Zhen-liang, ZHANG Dai-jun, LU Pei-li, <i>et al.</i> (3975)
Influence of Different Recovery Methods on the Activity of Nitrification Granular Sludge .....	GUO Xiu-li, GAO Da-wen, LU Jian-cong (3981)
Study on Hydrogen Autotrophic Denitrification of Bio-ceramic Reactor .....	CHEN Dan, WANG Hong-yu, SONG Min, <i>et al.</i> (3986)
Studies on Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Subalpine Meadow .....	YAN Jun-xia, LI Jun-jian, LI Hong-jian, <i>et al.</i> (3992)
Modeling of CO <sub>2</sub> Fluxes at Cropland by Using SIB3 Model .....	ZHANG Geng-jun, LU Li-xin, JIANG Ling-mei, <i>et al.</i> (4000)
Effects of the Different Land Use on Soil Labile Organic Matter and Carbon Management Index in Junyun Mountain .....	XU Peng, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (4009)
Heavy Metal Content in Street Dust and Environmental Risk Assessment of Agricultural City: A Case Study of Xuchang City .....	YAN Hui, CHEN Jie, XIAO Jun (4017)
Polybrominated Diphenyl Ethers and Polychlorinated Biphenyls in Road Dust from Suzhou, Wuxi and Nantong .....	SHI Shuang-xin, DONG Liang, LI Ling-ling, <i>et al.</i> (4024)
Vertical Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Abandoned Vehicles Dismantling Area Soil .....	WU Yan-yu, HU Xiao-ying, HONG Hong-jia, <i>et al.</i> (4031)
Stabilization and Long-term Effect of Chromium Contaminated Soil .....	WANG Jing, LUO Qi-shi, ZHANG Chang-bo, <i>et al.</i> (4036)
Leaching Characteristics of Sulfadiazine and Sulfamethoxazole in Soil Column .....	LI Man, CHEN Wei-ping, WEI Fu-xiang, <i>et al.</i> (4042)
Transport Behaviors of Metal Oxide Nanomaterials in Various Soils .....	FANG Jing, YU Bo-yang (4050)
Fractal Characteristics of Capillary Finger Flow for NAPLs Infiltrated in Porous Media .....	LI Hui-ying, DU Xiao-ming, YANG Bin, <i>et al.</i> (4058)
Allelopathic Potential of <i>Phyllostachys edulis</i> on Two Dominant Tree Species of Evergreen Broad-leaved Forest in Its Invasive Process .....	BAI Shang-bin, ZHOU Guo-mo, WANG Yi-xiang, <i>et al.</i> (4066)
Preliminary Studies on the Occurrence of Antibiotic Resistance Genes in Typical Aquaculture Area of the Pearl River Estuary .....	LIANG Xi-mei, NIE Xiang-ping, SHI Zhen (4073)
Concentrations and Safety Evaluation of Heavy Metals in Aquatic Products of Yancheng, Jiangsu Province .....	LIU Yang, FU Qiang, GAO Jun, <i>et al.</i> (4081)
Effects of Cu <sup>2+</sup> Stress on DNA Polymorphism of Genome in Foxtail Millet of Different Genotypes .....	ZHANG Yi-xian, FU Ya-ping, XIAO Zhi-hua, <i>et al.</i> (4090)
Research on Soil Bacteria Under the Impact of Sealed CO <sub>2</sub> Leakage by High-throughput Sequencing Technology .....	TIAN Di, MA Xin, LI Yu-e, <i>et al.</i> (4096)
Microeukaryotic Biodiversity in the Waste Ore Samples Surrounding an Acid Mine Drainage Lake .....	LI Si-yuan, HAO Chun-bo, WANG Li-hua, <i>et al.</i> (4105)
Characteristics and Functional Protein Analysis of an Effective Decabromodiphenyl Ether-Degrading Strain .....	CHANG Jing-jing, YIN Hua, QIN Hua-ming, <i>et al.</i> (4112)
Effect of Selenium on the Uptake and Translocation of Manganese, Iron, Phosphorus and Selenium in Rice ( <i>Oryza sativa</i> L.) .....	HU Ying, HUANG Yi-zong, HUANG Yan-chao, <i>et al.</i> (4119)
Effect of Exogenous Iron on Accumulation and Chemical Forms of Cadmium, and Physiological Characterization in Different Varieties of Tomato .....	LIU Jun, ZHOU Kun, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4126)
Analysis of Control Policy for Persistent Toxic Substances from Electronic Wastes in China .....	LI Li, LÜ Yong-long, WANG Tie-yu (4132)

# 《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10月15日 34卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 10 Oct. 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