

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第2期

Vol.38 No.2

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

北京大气颗粒物和重金属铅干沉降通量及季节变化	姚利, 刘进, 潘月鹏, 田世丽, 王振波, 韦霞, 张国忠, 周保华, 王跃思 (423)
海西城市群 PM _{2.5} 中重金属元素的污染特征及健康风险评价	陈衍婷, 杜文娇, 陈进生, 徐玲玲 (429)
峨边地区大气 PM _{2.5} 中汞形态污染及其与碳组分的关系	程娜, 钱冠磊, 段炼, 赵梦飞, 修光利 (438)
泰山夏季 PM _{2.5} 中二元羧酸类 SOA 的分子组成及来源	孟静静, 侯战方, 刘晓迪, 邢继钊 (445)
南京北郊大气 BTEX 变化特征和健康风险评估	张玉欣, 安俊琳, 王健宇, 王俊秀, 师远哲, 刘静达, 梁静舒 (453)
长株潭城市群人为源 VOCs 排放清单及其对环境的影响	尤翔宇, 罗达通, 刘湛, 苏艳蓉 (461)
南京城市交通甲烷排放特征	张雪, 胡凝, 刘寿东, 王淑敏, 高韵秋, 赵佳玉, 张圳, 胡勇博, 李旭辉, 张国君 (469)
2003~2014 年东北三省气溶胶光学厚度变化分析	张宸赫, 赵天良, 王富, 徐祥德, 苏航, 程兴宏, 谭成好 (476)
基于增强回归树的城市 PM _{2.5} 日均值变化分析: 以常州为例	葛跃, 王明新, 孙向武, 齐今笛 (485)
重庆市燃煤电厂汞排放特征及排放量	张成, 张雅惠, 王永敏, 王定勇, 徐凤, 杨熹, 何秀清 (495)
几种可能来源对广东某地空气中二噁英的影响	付建平, 韩静磊, 于晓巍, 杨艳艳, 尹文华, 冯桂贤, 张素坤, 黄锦琼, 任明忠 (502)
养鸡场空气中抗性基因和条件致病菌污染特征	高敏, 仇天雷, 秦玉成, 王旭明 (510)
百年来滇池沉积物中不同形态氮分布及埋藏特征	吴亚林, 李帅东, 江俊武, 沈胤胤, 黄昌春, 黄涛, 杨浩, 余艳红, 罗玉 (517)
岩溶地下河补给的地表溪流溶解无机碳及其稳定同位素组成的时空变化	李丽, 蒲俊兵, 李建鸿, 张陶 (527)
三峡水库大宁河支流浮游植物演变过程及其驱动因素	张佳磊, 郑丙辉, 刘德富, 王丽婧, 谭纤茹 (535)
分层型水库夏季水质对极端厄尔尼诺事件的响应	邱晓鹏, 黄廷林, 曾明正, 史建超, 曹占辉 (547)
淹水-落干与季节性温度升高耦合过程对消落带沉积物氮矿化影响	林俊杰, 刘丹, 张帅, 于志国, 何立平, 余顺慧 (555)
湖泊水体中铁(III)-草酸络合物驱动有机磷光解释放磷酸根	蒋永参, 彭云霄, 刘广龙, 周易勇, 朱端卫 (563)
高效磷吸附剂 Mg/Al-LDO 的制备及除磷机制	王卫东, 郝瑞霞, 张晓娴, 万京京, 钟丽燕 (572)
改性沸石湿地脱氮除磷效能及机制	吴鹏, 陆爽君, 徐乐中, 梁奇奇, 沈耀良 (580)
几种水陆交错带植物对底质氮磷释放的抑制作用	姚程, 胡小贞, 卢少勇, 耿荣妹 (589)
模拟三峡库区消落带优势植物根系低分子量有机酸对土壤中铅的解吸动力学	何沅洁, 刘江, 江韬, 黄京晶, 成晴, 陈宏 (600)
TiO ₂ /膨润土复合材料对 Hg ²⁺ 的吸附性能研究	唐兴萍, 周雄, 张金洋, 张成, 王定勇 (608)
氨氮及 H ₂ O ₂ 对溴酸盐和消毒副产物控制的影响	王永京, 杜旭, 金萌, 冯思捷, 杨凯, 张明露, 于建伟 (616)
配水管网细菌活性影响因素	王晓丹, 赵新华 (622)
施氏矿物的化学合成及其对含 Cr(VI) 地下水吸附修复	朱立超, 刘元元, 李伟民, 牟海燕, 王婉玉, 石德智, 王涛 (629)
臭氧-混凝耦合工艺污水深度处理特性及其机制	侯瑞, 金鑫, 金鹏康, 王晓昌 (640)
单级和多级 A/O 工艺中氮的去除效果及 N ₂ O 的产生特性	郭昌梓, 张凤燕, 刘富宇, 朱超, 裴立影 (647)
有机碳源作用下厌氧氨氧化系统的脱氮效能	管勇杰, 于德爽, 李津, 齐泮晴, 魏思佳 (654)
完全混合式曝气系统运行特性及微生物群落结构解析	王硕, 徐巧, 张光生, 李激 (665)
颗粒+絮体污泥 CANON 工艺的启动与 SRT 影响研究	孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 李星, 曹相生 (672)
游离氨调控对污泥高含固厌氧消化反应器性能的影响	戴晓虎, 何进, 严寒, 李宇, 丁月玲, 董滨, 戴翎翎 (679)
利用卷枝毛霉成球特性高效收获微藻	顾琼, 金文标, 陈远清, 郭仕达, 万超凡 (688)
零价铁对污泥高温厌氧消化过程中四环素抗性基因及第一类整合子的消减影响	魏欣, 薛顺利, 杨帆, 李响, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (697)
沈抚新城不同土地利用类型多环芳烃含量、来源及人体健康风险评价	王静, 刘明丽, 张士超, 鲁垠涛, 姚宏 (703)
河南某市驾校地表灰尘多环芳烃组成、来源与健康风险	陈轶楠, 马建华, 段海静, 魏林恒 (711)
外源微生物对植物根系修复十溴联苯醚污染底泥的强化作用	杨雷峰, 尹华, 彭辉, 李跃鹏 (721)
微生物修复油污土壤过程中氮素的变化及菌群生态效应	叶茜琼, 吴蔓莉, 陈凯丽, 李炜, 袁婧 (728)
沼泽红假单胞菌 PSB06 对辣椒根际微生物群落结构的影响	罗路云, 金德才, 左晖, 张卓, 谭新球, 张德咏, 卢向阳, 刘勇 (735)
再生水补水对河道底泥细菌群落组成与功能的影响	邱琰茗, 王广煊, 黄兴如, 郭逍宇 (743)
矿区不同植被复垦模式对土壤细菌群落结构的影响	贺龙, 李艳琴, 李彬春, 李君剑 (752)
稻田土壤固碳功能微生物群落结构和数量特征	刘琼, 魏晓梦, 吴小红, 袁红朝, 王久荣, 李裕元, 葛体达, 吴金水 (760)
不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳及其组分的影响: 对土壤腐殖物质组成及性质的影响	赵世翔, 于小玲, 李忠徽, 杨艳, 张霞, 王旭东, 张阿凤 (769)
复合菌剂秸秆堆肥对土壤碳氮含量和酶活性的影响	聂文翰, 戚志萍, 冯海玮, 孙玉静, 支月娥, 张进忠, 张丹 (783)
秸秆/生物炭施用对关中地区小麦-玉米轮作系统净增温潜势影响的对比分析	成功, 陈静, 刘晶晶, 张阿凤, 王旭东, 冯浩, 赵英 (792)
1 株氨基高效降解菌的分离鉴定及降解特性	叶杰旭, 林彤晖, 骆煜昊, 陈东之, 陈建孟 (802)
1 株异养反硝化硫细菌的分离鉴定及代谢特性	谭文勃, 马晓丹, 黄聪, 陈川, 王爱杰 (809)
连续施用污泥堆肥土壤剖面中重金属积累迁移特征及对小麦吸收重金属的影响	孙娜, 商和平, 茹淑华, 苏德纯 (815)
施氮对小麦(Ⅵ)吸收、转运和分配的影响	陈玉鹏, 彭琴, 梁东丽, 宋卫卫, 雷凌明, 喻大松 (825)
长期暴露下纳米二氧化钛对典型淡水藻体神累积与生物转化的影响	李金丽, 王振红, 严雅萌, 黄兵, 罗专溪 (832)
不同热解温度制备的玉米芯生物炭对对硝基苯酚的吸附作用	马锋锋, 赵保卫 (837)
《环境科学》征稿简则(526) 《环境科学》征订启事(720) 信息(678, 696, 844)	

外源微生物对植物根系修复十溴联苯醚污染底泥的强化作用

杨雷峰¹, 尹华^{1*}, 彭辉^{2*}, 李跃鹏³

(1. 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, 广东省环境风险防控与应急处置工程技术研究中心, 广州 510006; 2. 暨南大学化学系, 广州 510632; 3. 广州市海林电子科技有限公司, 广州 510407)

摘要: 十溴联苯醚(BDE-209)作为溴系阻燃剂的主要代表之一,所造成的沉积物环境污染问题日益引起人们的重视。本研究利用河边常见植物再力花(*Thalia dealbata*)作为修复植物,引入外源微生物短芽孢杆菌(*Brevibacillus brevis*)和铅黄肠球菌(*Enterococcus casseliflavus*)以强化修复效果,通过盆栽试验模拟沉积物环境,考察了外源菌对植物根际修复沉积物中 BDE-209 的强化作用效果,以及不同处理组,沉积物中微生物数量、有机酸含量和微生物碳源利用能力的变化。结果发现,外源菌处理组中 BDE-209 的去除率高于相应的对照组,其中以加入 *B. brevis* 根际处理组 BDE-209 的去除率最好(66%),大于非根际处理组和无植物处理的对照组(37.93% 和 39.27%)。植物的根际作用可以提高底泥中 BDE-209 的去除率、微生物的数量、有机酸含量和碳源利用能力。

关键词: 十溴联苯醚; 微生物; 植物; 生物修复

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)02-0721-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201606180

Remediation of Decabromodiphenyl Ether Contaminated Sediment Through Plant Roots Enhanced by Exogenous Microbes

YANG Lei-feng¹, YIN Hua^{1*}, PENG Hui^{2*}, LI Yue-peng³

(1. Key Laboratory of Pollution Control and Ecosystem Restoration in Industry Clusters, Guangdong Provincial Engineering and Technology Research Center for Environmental Risk Prevention and Emergency Disposal, College of Environment and Energy, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. Department of Chemistry, Jinan University, Guangzhou 510632, China; 3. Guangzhou Hailin Electronic Technology Co., Ltd., Guangzhou 510407, China)

Abstract: Decabromodiphenyl ether (BDE-209), a main ingredient of brominated flame retardants, has drawn more and more attention because of the pollution it caused in sediment. A pot experiment was conducted in a greenhouse to investigate the impact of *Brevibacillus brevis* and *Enterococcus casseliflavus* on the enhancement of phytoremediation by *Thalia dealbata*, which is common in the river bank and was found to be an effective plant for BDE-209 removal. The concentration of organic acids, the amount of microorganisms and the ability of carbon utilization of soil microorganisms in different experimental groups were analyzed. The results showed that the removal rate of BDE-209 in the exogenous microbes containing groups were higher than that of the control. And *B. brevis* presented the highest enhancement of phytoremediation with the removal rate rising highest to 66% compared with the control (non-rhizosphere group 37.93% and no plant group 39.27%) after 60 days. The removal of BDE-209 in sediment, quantity of microorganism, concentration of organic acids and the ability of carbon utilization of soil microorganisms in rhizosphere sediment were higher than those in non-rhizosphere sediment.

Key words: decabromodiphenyl ether; microorganisms; plant; bioremediation

十溴联苯醚(BDE-209)作为溴系阻燃剂的主要代表,因其原料成本低、防火性能好、相对低的毒性等特点而被广泛应用到装潢材料、家电等日常用品中^[1]。由于 BDE-209 一般是通过物理方式添加到高分子聚合物之中,在产品的生产、使用和处置过程中,BDE-209 极易释放到环境中,在一些区域特别是在一些电子垃圾拆解地的土壤、空气、水体沉积物中有着很高的含量^[2-5]。水体沉积物是水环境中生物生存的重要场所,研究发现我国沉积物中 BDE-209 的污染状况是比较严重的,如邱孟德等^[6]在研

究珠江三角洲某一区域多溴联苯醚(PBDES)的分布时发现在河涌沉积物中 PBDEs 的平均含量为

收稿日期: 2016-06-26; 修订日期: 2016-09-05

基金项目: 国家自然科学基金委-广东省联合基金重点项目(U1501234); 广东省自然科学基金重点项目(S2013020012808); 中央高校基本科研业务费专项(2015ZP027); 广东省公益研究与能力建设专项(2015B020215006); 广州市产学研协同创新重大专项(2014Y2-00523); 广州市环保局科技计划项目(穗财建(2012)399号)

作者简介: 杨雷峰(1988~),男,硕士研究生,主要研究方向为水污染控制与修复,E-mail:475451674@qq.com

* 通信作者,E-mail:huayin@scut.edu.cn; tbpenghui@163.com

0.18 mg·kg⁻¹, BDE-209 的平均含量达到了 0.17 mg·kg⁻¹, 占据了 PBDEs 总量的 90% 以上, Wang 等^[7]在研究上海河流沉积物中 PBDEs 的生态风险时发现 BDE-209 的含量达到了 0.19 mg·kg⁻¹, 超过了剩余其他 51 种 PBDEs 含量之和. 沉积物中的 PBDEs 会解析到水体中, 水生生物从水体或者沉积物中吸收、累积 PBDEs, 最终通过食物链的途径危害到人类的身体健康^[8]. 目前, 对于土壤、沉积物环境中 BDE-209 的处理方法主要有物理法、化学法和生物法^[9], 而植物修复法因其成本低、应用范围广等特点已逐渐成为人们研究的热点, 土壤、沉积物中的 BDE-209 通过植物根系-微生物系统, 一部分被植物和微生物吸收转化降解, 一部分储存在植物体中. 现有研究主要集中在该体系中不同植物的修复效果以及污染物在该体系中的去除机制, 对于外源微生物强化植物修复沉积物中 BDE-209 的研究较少^[9~11]. 本实验通过盆栽试验模拟沉积物环境, 以经过初步筛选出的对沉积物中 BDE-209 具有较好去除作用的河涌边常见、具有较大生物量和顽强生命力的挺水植物再力花为修复植物, 以本课题组筛选出的对 BDE-209 具有较好降解效果的微生物短短芽孢杆菌 (*Brevibacillus brevis*) 和铅黄肠球菌 (*Enterococcus casseliflavus*) 作为外源菌, 探讨了不同外源菌对植物修复的影响, 以及不同处理组沉积物中微生物的数量和碳源利用能力的差异, 以期对沉积物环境中 BDE-209 的植物-微生物联合修复提供理论基础和依据.

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试植物: 再力花 (*Thalia dealbata*), 购买于广州市花卉市场. 前期研究表明其对沉积物中 BDE-209 具有较好的去除效果^[12].

供试基质: 基质采自华南农业大学试验田, 其基本理化性质如下: TN (1.8 ± 0.3) g·kg⁻¹, TP (3.2 ± 0.5) g·kg⁻¹, 速效钾 (1.15 ± 0.1) g·kg⁻¹, pH 7.3 ± 0.3. 在该土壤中没有检测到 PBDEs 的存在.

化学药品: 有机酸试剂为优级纯, 有机溶剂包括正己烷、二氯甲烷、丙酮、氯仿等均为色谱纯, 实验用水为高纯水. BDE-209 标准物、37 种磷脂脂肪酸 (PLFAs) 混标及内标物购买于百灵威科技有限公司.

1.2 实验方法

1.2.1 污染底泥的制备

首先, 用甲苯试剂配制成 50 mg·L⁻¹ 的 BDE-

209 溶液, 取所需底泥质量的十分之一的量配制成 BDE-209 含量为 15 mg·kg⁻¹ 的底泥, 然后稀释成 1.5 mg·kg⁻¹ 的底泥, 放在通风厨中待甲苯挥发干净, 老化半个月备用 (老化后的样品中 BDE-209 的含量为 1.43 mg·kg⁻¹).

1.2.2 菌悬液的制备

培养基的配制: 取牛肉膏 5 g、蛋白胨和 NaCl 各 10 g 加热溶于 1 L 去离子水中, 调节酸碱度到 pH 7.0 ~ 7.5, 并在 121℃、101.3 kPa 条件下灭菌 30 min 备用. 分别将 *B. brevis* 和 *E. casseliflavus* 接种到培养液中, 于 30℃、130 r·min⁻¹ 摇床中振荡培养 24 h, 6 000 r·min⁻¹ 离心 10 min 获取菌体, 利用双蒸水清洗菌体 3 次, 称重, 用牛肉膏培养基配制成 10 mg·L⁻¹ 的菌悬液, 备用.

1.2.3 实验设计

取 5 kg 加有 BDE-209 污染物的基质于花盆中, 上覆自来水至相同水位, 选出长势均匀一致的再力花幼苗到上述花盆, 之后将 *E. casseliflavus* (J1)、*B. brevis* (J2)、两种菌的混合 (J3) 分别接种到种植有再力花的污染基质中, 同时做无植物、无污染物、无外源菌的对照组, 接种量为 50 mg, 每个处理重复 3 次. 采样方法为剪掉茎叶部分, 小心拔出根系, 植物根系附着的底泥为根际底泥, 小心用药匙刮掉泥土, 保存在真空袋中. 植株样品分别于自来水、去离子水下冲洗干净, 冷冻过夜后经冷冻干燥仪干燥 72 h, 粉碎过 20 目筛, 沉积物底泥样品首先去除较大颗粒, 之后经玛瑙研钵过 60 目筛, 避光保存在 -70℃ 条件下, 除此之外, 取一部分不同处理组底泥鲜样保存在 4℃ 冰箱中以供微生物指标的检测, 实验周期为两个月.

1.3 萃取方法

1.3.1 BDE-209 的萃取方法

采用文献^[12]的萃取方法.

1.3.2 磷脂脂肪酸 (PLFAs) 的提取方法

本研究采用通过测定 PLFAs 的方法来确定沉积物中微生物的数量, PLFAs 提取方法参考文献^[13]的方法并做了改进, 具体方法为: 取 2.0 g 土壤于 50 mL 离心管中, 加入 4 mL B-D 提取剂, 超声 10 min, 之后在 200 r·min⁻¹ 的振荡器中振荡 2 h, 6 000 r·min⁻¹ 离心 10 min, 取上清液 2 mL 于干净的玻璃离心管内, 分别加入 1 mL 氯仿和水, 振荡 5 s, 离心 10 min, 取底层液体 1 mL 于鸡心瓶中, 在 30℃ 条件下旋干, 之后转移到硅胶层析柱中, 用 6 mL 氯仿 (分 3 次) 和 3 mL 丙酮淋洗, 之后加入 2 mL 的甲

酯化试剂(甲醇:氯仿:水体积比为5:5:1),在 37℃ 下保持 15 min,之后分别加入 4 mL 乙酸(0.075 mol·L⁻¹)和氯仿,振荡 10 s,吸取下层有机相 4 mL 于鸡心瓶中旋转蒸发至近干,以正己烷准确定容到 1 mL,加入内标物,置于 -20℃ 冰箱中,待测。

1.3.3 有机酸的萃取方法

测定方法参考 Szmigielska 等^[14]的方法并做了改进,具体方法为:称取土壤样品 5 g,各 3 份,于 50 mL 离心管中,加入 10 mL 0.1% H₃PO₄ 的水溶液,振荡 1 min 后,在 250 r·min⁻¹振荡器中振荡 10 min,之后在 5 000 r·min⁻¹转速下,离心 5 min,过水相滤膜(0.45 μm)于上机瓶中,低温保存。每组实验均设 3 次重复。

1.4 检测条件

1.4.1 BDE-209 的 GC-MS 检测条件

色谱柱条件设置同文献[12]。

1.4.2 PLFAs 的检测条件

其检测条件参考 Frostegård 的方法^[15]并做了改进,实验仪器为 GC-MS(岛津 GC-MS-QP 2010),检测器为 EI 源,石英毛细管色谱柱,其型号为 DB-5MS(30 m×0.25 mm×0.25 μm),仪器的升温程序为:柱温在 140℃ 保持 2 min,之后以 3℃·min⁻¹的速率升到 260℃ 后保持 1 min,进样口和离子源温度设置为 250℃、230℃,以 He 作为载气,流速为 1 mL·min⁻¹,电子能量为 70 eV,扫描范围为 50 ~ 500 *m/z*,采用内标法定量。

PLFAs 混标 GC-MS 出峰时间和顺序如图 1(详见文献[16]),碳原子个数越多,其保留时间越长。

1.4.3 有机酸检测

检测条件为:反相色谱柱(C₁₈, 4.6×250 mm, 5 μm, pH 2~10),洗脱方式为采用等梯度洗脱,流动相为乙腈和 0.1% 的 H₃PO₄ 水溶液(2:98, 体积比),

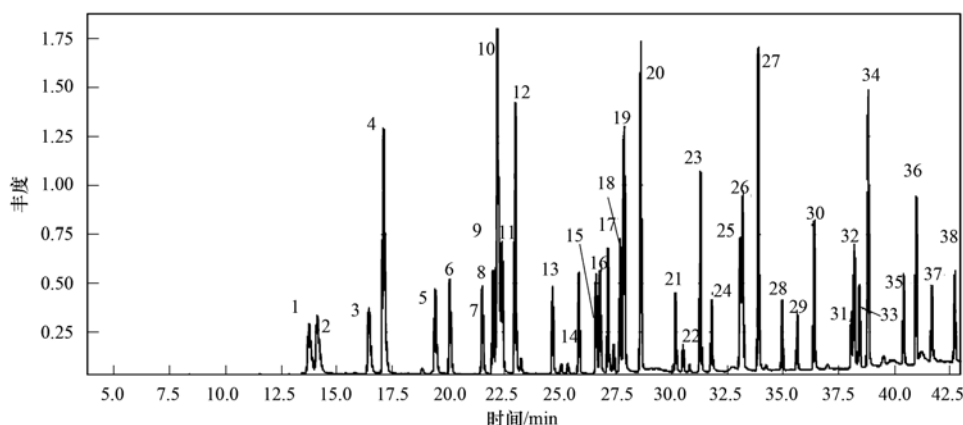


图 1 磷脂脂肪酸甲酯混标和内标物 GC-MS 进样色谱图

Fig. 1 GC-MS chromatograms of FAME mixture and internal standards

检测器波长 210 nm,进样量 20 μL,流速 1 mL·min⁻¹,柱箱温度为 35℃^[14],出峰时间如图 2 所示。

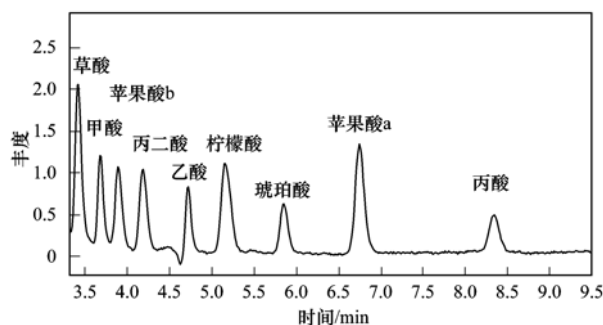


图 2 有机酸出峰时间

Fig. 2 HPLC chromatograms and retention time of organic acids

1.4.4 微生物碳源利用能力的检测方法

称取 10 g 沉积物加入到 100 mL 0.85% 经过高

压灭菌的生理盐水溶液中,置于 150 r·min⁻¹摇床中 15 min,稀释 1 000 倍后,用微量移液枪吸取 150 μL 稀释液到 ECO 板中,重复 3 次,在 30℃ 恒温培养箱中培养 7 d,每 12 h 用 BIOLOG 微生物测定仪读取光密度值 1 次。用以表示微生物碳源利用能力的平均颜色变化率(AWCD)值的计算方法为:

$$AWCD = \sum (C_i - R) / n$$

式中, C_i 和 R 分别表示第 i 个碳源孔和对照孔光密度值,本实验中 n 为 31^[17]。

1.5 质量控制与保证

采用基质加标和内标物定量进行质量控制与质量保证,基质加标试验设置 3 个平行,同时设置 3 个空白平行样,处理后上机检测计算回收率时扣除空白平行样的含量,分析样品设置 3 个平行,在每批样品进行仪器分析前,用空白溶剂和已知浓度标样检

查仪器的灵敏度和稳定性,同一标样测定的误差小于 20% 方可进行样品测定,否则对仪器进行调试。

1.6 数据分析

采用 Excel 数据处理软件(版本为 2003)、Origin 统计软件(版本为 8.0)和 Spss(19.0)进行数据整理、统计分析和绘图。

2 结果与讨论

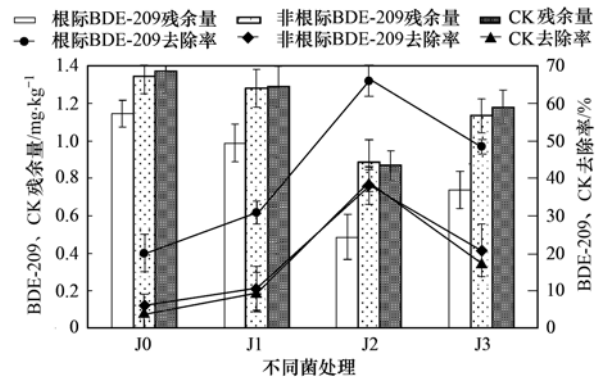
2.1 外源菌对植物修复 BDE-209 的强化作用

植物的根际作用结果如图 3 所示,60 d 后,4 组外源菌处理组中根际底泥中的 BDE-209 含量明显低于非根际和无植物的对照组 CK 底泥中 BDE-209 的含量 ($P < 0.05$),而非根际和对照组 CK 底泥中 BDE-209 含量无显著性差异,说明植物的根际作用有效提高了污染物的去除效果,在根际作用下,植物本身可以从底泥中直接吸收部分 BDE-209^[18],另外植物的根系能够向根际底泥中释放出一系列的有机小分子物质,这些有机小分子可以增加 BDE-209 的生物有效性,促进污染物的去除。同时,沉积物中原有的一些土著微生物也可以对污染物起到一定的去除效果,在根际效应作用下,根际沉积物中微生物的数量和种类发生变化,进一步促进了微生物对 BDE-209 的去除^[19~21]。

从图 3 还可以看出不同外源菌处理结果有一定的差异,加入 *B. brevis* 的植物处理组(J2)污染物的含量低于其它处理组相同类型的底泥中污染物的含量 ($P < 0.05$),该组根际底泥中污染物的去除率最高达到 66.04%,大于相同菌处理组非根际底泥和无植物的空白对照底泥中污染物的去除率(37.93% 和 39.27%),表明 *B. brevis* 去除 BDE-209 的能力大于 *E. casseliflavus*,而在两种菌(J3)的联合作用下,各组处理底泥中污染物的含量高于单独加入 *B. brevis* 处理组(J2)、低于单独加入 *E. casseliflavus* 处理组(J1)和不加菌的处理组(J0),表明两种菌的混合加入反而不利于污染物的去除,原因可能是其中一种菌的代谢产物不利于另外一种菌的生长,或者在利用 BDE-209 时产生了竞争的关系,从而不利于 BDE-209 去除。

2.2 不同处理对沉积物中 PLFAs 含量的影响

PLFAs 总量的多少一定程度上反映了微生物量的多少^[15],直接关系到 BDE-209 的去除率。结果如图 4 所示,加菌处理 J1、J2、J3 组中根际底泥中 PLFAs 的含量大都高于未加菌的对照 J0 组,推测微生物数量的增多可能是由于外源菌的引入造成的,

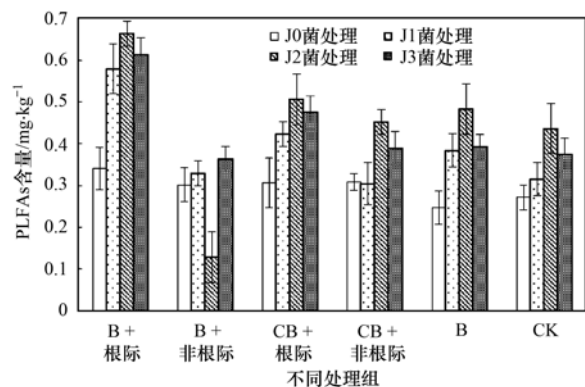


J1 表示 *E. casseliflavus*、J2 表示 *B. brevis*、
J3 表示两种菌、J0 表示不加菌、
CK 表示相应无植物组对照,下同

图 3 不同菌处理组底泥中 BDE-209 残余量和去除率

Fig. 3 Residual concentration and removal rate of BDE-209 in sediment of different groups

也可能是外源菌所产生的一些代谢产物有利于沉积物中土著微生物的生长。在有 BDE-209 存在条件下根际底泥中 PLFAs 的含量明显高于非根际的,说明该条件下植物的根系对微生物的生长起到了促进作用,在植物的正常生长过程中,植物会向环境中释放出一系列的有机小分子等物质,有的在胁迫作用下也会释放出一系列的小分子物质以将对植物的不利影响降低到最小,种类繁多的有机小分子可以作为微生物很好的能源物质,在根系分泌物的作用下,微生物生长得到促进,数量得到提高^[17,20~22],微生物数量的增多有利于污染物的去除。



B 表示有 BDE-209, CB 表示无 BDE-209,
CK 表示完全空白对照,下同

图 4 不同处理组 PLFAs 含量

Fig. 4 Concentration of PLFAs in sediment with different treatment groups

2.3 不同处理组底泥中有机酸总含量的变化

本实验选取了具有代表性的 9 种有机酸作为分析目标,主要考察了不同处理组对于底泥中有机酸总量的影响,结果如图 5 所示,其中最明显的特点是

根际沉积物中的有机酸含量要高于非根际,植物的根系在正常生长或者适应环境过程中,可以向环境中分泌出大量的有机酸等小分子物质,这些物质可以极大地促进根际底泥中微生物的生长,而微生物在自身代谢过程中或者在适应环境过程中也可以向环境中释放出一系列的小分子物质包括有机酸,有学者在研究土壤中有机酸含量时曾发现,一些细菌可以产生一些挥发性的有机酸,而一些真菌则可以产生一些非挥发性的有机酸^[23,24],总的结果是使得根际环境中有机酸的含量增多,进而影响污染物的生物有效性和去除率。

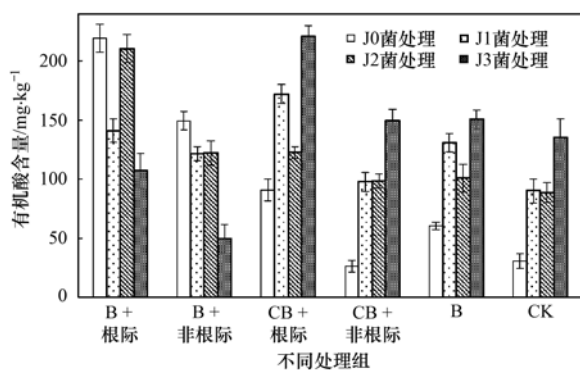


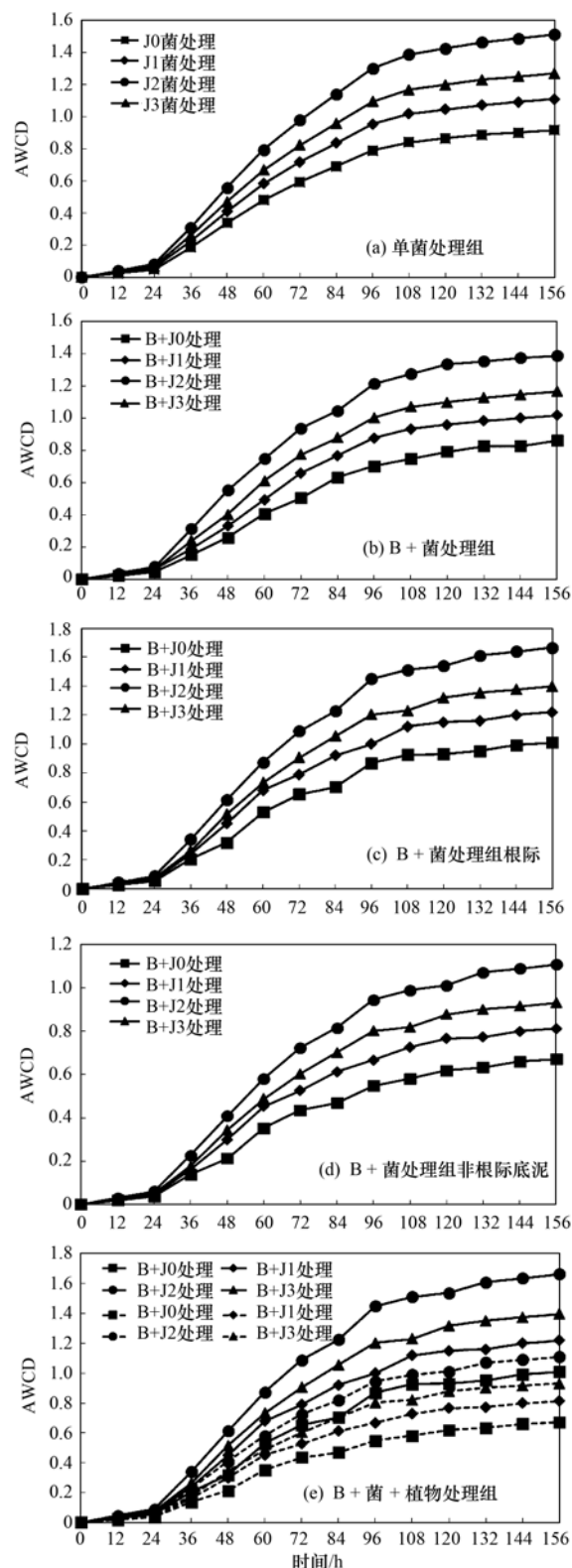
图5 不同处理组底泥中有机酸含量

Fig. 5 Concentration of organic acids in sediment under different treatments

2.4 不同处理组沉积物中 AWCD 值的变化

微生物在利用碳源的过程中,会有一系列的自由电子产生,这些电子与四唑盐染料发生反应时产生颜色变化,因此可以根据颜色的深浅,判断出碳源被利用的情况,AWCD 指标即是反映微生物利用碳源能力大小的重要参考^[24]。结果如图 6 所示,在所有处理组均表现出在 24 h 内,AWCD 值的变化很小,说明在该时间段,微生物处于调整期,对碳源的利用能力较弱,在 24 h 之后,AWCD 值开始有明显的变化,说明微生物开始对碳源有了较大程度的利用^[17,25]。

不同处理组对沉积物中微生物碳源利用能力不同,如图 6(a)~6(d),不管是在有无污染物和植物的情况下,不同菌处理组的微生物碳源利用能力均有显著性差异($P < 0.05$),依次为 $J2 > J1 > J3 > J0$, $J0$ 处理组中的微生物主要为一些土著微生物,活性比较低,碳源利用能力较弱,而 *B. brevis* ($J2$) 的碳源利用能力大于 *E. casseliflavus* ($J1$),这可能是不同种类的微生物其自身特性引起的,另外两种菌混合后的碳源利用能力($J3$)介于单菌处理之间,推测原因



实线、虚线分别表示根际、非根际底泥,B表示有 BDE-209

图6 不同处理组 AWCD 值变化

Fig. 6 AWCD change under different treatments

是两种菌之间存在着拮抗作用,各自产生的代谢产物不利于对方的生长。植物的加入明显提高了微生物的碳源利用能力[图 6(e)],由于根际效应,植物

的根系向环境中分泌大量的有机小分子等物质,提高了微生物的活性和数量^[26~30],从而使得碳源利用能力增加,而 *B. brevis* 和植物的联合作用最大程度地提高了底泥微生物的活性^[30],该组处理的污染物的去除效果最高,结果与沉积物中 BDE-209 去除率大小是一致的。

3 结论

植物的种植产生的根际效应有效提高了 BDE-209 的去除率,而外源菌可以对原有的植物-微生物体系的修复效果起到不同程度的强化作用,其中以单独加入 *B. brevis* 的强化作用最好,历经 60 d 时间 BDE-209 的去除率达到了 66%。植物的根际效应可以增加底泥中微生物的数量、有机酸的含量和微生物的活性,加入 *B. brevis* 处理组底泥中微生物的碳源利用能力最强,与污染物的去除率高低趋势相一致。

参考文献:

- [1] Coelho S D, Sousa A C A, Isobe T, *et al.* Flame retardants in indoor dust-a review on the levels of polybrominated diphenyl ethers and hexabromocyclododecanes [J]. *Current Organic Chemistry*, 2014, **18**(17): 2218-2230.
- [2] Ni K, Lu Y L, Wang T Y, *et al.* A review of human exposure to polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in China [J]. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 2013, **216**(6): 607-623.
- [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.
Chen S J, Mai B X, Zeng Y P, *et al.* Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in surficial sediments of the Pearl River Delta and adjacent South China Sea [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, **25**(9): 1265-1271.
- [4] de Wit C A. An overview of brominated flame retardants in the environment [J]. *Chemosphere*, 2002, **46**(5): 583-624.
- [5] Sahlström L M O, Sellström U, de Wit C A, *et al.* Estimated intakes of brominated flame retardants via diet and dust compared to internal concentrations in a Swedish mother-toddler cohort [J]. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 2015, **218**(4): 422-432.
- [6] 邱孟德, 邓代永, 余乐涓, 等. 典型电器工业区河涌沉积物中的多溴联苯醚空间和垂直分布[J]. *环境科学*, 2012, **33**(2): 580-586.
Qiu M D, Deng D Y, Yu L H, *et al.* Horizontal and vertical distribution of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in river sediment from a typical electrical equipment industrial area [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(2): 580-586.
- [7] Wang X T, Chen L, Wang X K, *et al.* Occurrence, profiles, and ecological risks of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in river sediments of Shanghai, China [J]. *Chemosphere*, 2015, **133**: 22-30.
- [8] Ma X D, Zhang H J, Yao Z W, *et al.* Bioaccumulation and trophic transfer of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in a marine food web from Liaodong Bay, North China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2013, **74**(1): 110-115.
- [9] Lewis M, Pryor R, Wilking L. Fate and effects of anthropogenic chemicals in mangrove ecosystems: a review [J]. *Environmental Pollution*, 2011, **159**(10): 2328-2346.
- [10] Singh O V, Jain R K. Phytoremediation of toxic aromatic pollutants from soil [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2003, **63**(2): 128-135.
- [11] Huang H, Zhang S, Christie P, *et al.* Behavior of decabromodiphenyl ether (BDE-209) in the soil-plant system: uptake, translocation, and metabolism in plants and dissipation in soil [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(2): 663-667.
- [12] 杨雷峰, 尹华, 叶锦韶, 等. 再力花对河涌底泥中多溴联苯醚的去除[J]. *农业环境科学学报*, 2015, **34**(1): 130-136.
Yang L F, Yin H, Ye J S, *et al.* Removal of polybrominated diphenyl ethers in river sediments by *Thalia dealbata* [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, **34**(1): 130-136.
- [13] Buyer J S, Sasser M. High throughput phospholipid fatty acid analysis of soils [J]. *Applied Soil Ecology*, 2012, **61**: 127-130.
- [14] Szmigielska A M, Van Rees K C J, Cieslinski G, *et al.* Low molecular weight dicarboxylic acids in rhizosphere soil of durum wheat [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1996, **44**(4): 1036-1040.
- [15] Frostegård Å, Bååth E. The use of phospholipid fatty acid analysis to estimate bacterial and fungal biomass in soil [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1996, **22**(1-2): 59-65.
- [16] 杨雷峰. 沉积物中多溴联苯醚的生物修复[D]. 广州: 暨南大学, 2015. 28.
Yang L F. Bioremediation of polybrominated diphenyl ethers in sediment [D]. Guangzhou: Jinan University, 2015. 28.
- [17] Ye J S, Yin H, Peng H, *et al.* Pyrene removal and transformation by joint application of alfalfa and exogenous microorganisms and their influence on soil microbial community [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2014, **110**: 129-135.
- [18] 吕俊, 尹华, 叶锦韶, 等. 杂交狼尾草对土壤镉/十溴联苯醚复合污染的生理响应及修复[J]. *农业环境科学学报*, 2013, **32**(12): 2369-2376.
Lü J, Yin H, Ye J S, *et al.* Physiological responses and phytoremediation effects of *pennisetum americanum* on Zn/BDE-209 co-contaminated soils [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, **32**(12): 2369-2376.
- [19] Birnbaum L S, Staskal D F. Brominated flame retardants: cause for concern? [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2004, **112**(1): 9-17.
- [20] 刘贝贝, 陈歆, 陈森, 等. 根系分泌物在土壤有机污染物降解中的作用[J]. *热带农业科学*, 2013, **33**(10): 47-52, 55.
Liu B B, Chen X, Chen M, *et al.* Role of root exudates in the degradation of organic pollutants in soils [J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2013, **33**(10): 47-52, 55.
- [21] Wang Y X, Oyaizu H. Enhanced remediation of dioxins-spiked soil by a plant-microbe system using a dibenzofuran-degrading *Comamonas* sp. and *Trifolium repens* L. [J]. *Chemosphere*, 2011, **85**(7): 1109-1114.

- [22] Saeki Y, Yamakawa T, Ikeda M, *et al.* Effects of root exudates of Rj₂Rj₃-and Rj₄-genotype soybeans on growth and chemotaxis of *Bradyrhizobium japonicum* [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1996, **42**(2): 413-417.
- [23] Ryan P R, Delhaize E, Jones D L. Function and mechanism of organic anion exudation from plant roots [J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2001, **52**: 527-560.
- [24] Baziramakenga R, Simard R R, Leroux G D. Determination of organic acids in soil extracts by ion chromatography [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1995, **27**(3): 349-356.
- [25] 王强, 戴九兰, 吴大千, 等. 微生物生态研究中基于 BIOLOG 方法的数据分析 [J]. *生态学报*, 2010, **30**(3): 817-823.
- Wang Q, Dai J L, Wu D Q, *et al.* Statistical analysis of data from BIOLOG method in the study of microbial ecology [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, **30**(3): 817-823.
- [26] Kirk J L, Klironomos J N, Lee H, *et al.* The effects of perennial ryegrass and alfalfa on microbial abundance and diversity in petroleum contaminated soil [J]. *Environmental Pollution*, 2005, **133**(3): 455-465.
- [27] Lee S H, Lee W S, Lee C H, *et al.* Degradation of phenanthrene and pyrene in rhizosphere of grasses and legumes [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, **153**(1-2): 892-898.
- [28] Sun T R, Cang L, Wang Q Y, *et al.* Roles of abiotic losses, microbes, plant roots, and root exudates on phytoremediation of PAHs in a barren soil [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **176**(1-3): 919-925.
- [29] Teng Y, Shen Y Y, Luo Y M, *et al.* Influence of *Rhizobium meliloti* on phytoremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons by alfalfa in an aged contaminated soil [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **186**(2-3): 1271-1276.
- [30] Zhong Y, Luan T G, Lin L, *et al.* Production of metabolites in the biodegradation of phenanthrene, fluoranthene and pyrene by the mixed culture of *Mycobacterium* sp. and *Sphingomonas* sp. [J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(3): 2965-2972.

CONTENTS

Atmospheric Dry Deposition Fluxes and Seasonal Variations of Particulate Matter and Lead in Urban Beijing	YAO Li, LIU Jin, PAN Yue-peng, <i>et al.</i> (423)
Pollution Characteristics of Heavy Metals in PM _{2.5} and Their Human Health Risks Among the Coastal City Group Along Western Taiwan Straits Region, China	CHEN Yan-ting, DU Wen-jiao, CHEN Jin-sheng, <i>et al.</i> (429)
Correlation of Speciated Mercury with Carbonaceous Components in Atmospheric PM _{2.5} in Shengsi Region	CHENG Na, QIAN Guan-lei, DUAN Lian, <i>et al.</i> (438)
Compositions and Sources of Summertime Dicarboxylic Acids and Related SOA in PM _{2.5} from Mt. Taishan	MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, LIU Xiao-di, <i>et al.</i> (445)
Variation Characteristics and Health Risk Assessment of BTEX in the Atmosphere of Northern Suburb of Nanjing	ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, WANG Jian-yu, <i>et al.</i> (453)
Inventory and Environmental Impact of VOCs Emission from Anthropogenic Source in Chang-Zhu-Tan Region	YOU Xiang-yu, LUO Da-tong, LIU Zhan, <i>et al.</i> (461)
Characteristics of Methane Emission from Urban Traffic in Nanjing	ZHANG Xue, HU Ning, LIU Shou-dong, <i>et al.</i> (469)
Variations in Aerosol Optical Depth over Three Northeastern Provinces of China, in 2003-2014	ZHANG Chen-he, ZHAO Tian-liang, WANG Fu, <i>et al.</i> (476)
Variation Analysis of Daily PM _{2.5} Concentrations Based on Boosted Regression Tree: A Case Study in Changzhou	GE Yue, WANG Ming-xin, SUN Xiang-wu, <i>et al.</i> (485)
Characteristics of Mercury Emissions from Coal-fired Power Plants in Chongqing	ZHANG Cheng, ZHANG Ya-hui, WANG Yong-min, <i>et al.</i> (495)
Possible Sources of PCDD/Fs in Atmosphere of a Certain District in Guangdong	FU Jian-ping, HAN Jing-lei, YU Xiao-wei, <i>et al.</i> (502)
Sources and Pollution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes and Conditional Pathogenic Bacteria in Concentrated Poultry Feeding Operations	GAO Min, QIU Tian-lei, QIN Yu-cheng, <i>et al.</i> (510)
Distribution and Burial Characteristics of Nitrogen Forms in Sediment of Dianchi Lake During Last Century	WU Ya-lin, LI Shuai-dong, JIANG Jun-wu, <i>et al.</i> (517)
Temporal and Spatial Variations of Dissolved Inorganic Carbon and Its Stable Isotopic Composition in the Surface Stream of Karst Groundwater Recharge	LI Li, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (527)
Succession Pattern of Phytoplankton of Daning River in the Three Gorges Reservoir and Its Driving Factors	ZHANG Jia-lei, ZHENG Bing-hui, LIU De-fu, <i>et al.</i> (535)
Response of the Water Quality of a Stratified Reservoir to an Extreme El Niño Event During Summer	QIU Xiao-peng, HUANG Ting-lin, ZENG Ming-zheng, <i>et al.</i> (547)
Effect of Coupling Process of Wetting-Drying Cycles and Seasonal Temperature Increasing on Sediment Nitrogen Minerization in the Water Level Fluctuating Zone	LIN Jun-jie, LIU Dan, ZHANG Shuai, <i>et al.</i> (555)
Photo-induced Phosphate Release from Organic Phosphorus Decomposition Driven by Fe(III)-oxalate Complex in Lake Water	JIANG Yong-can, PENG Yun-xiao, LIU Guang-long, <i>et al.</i> (563)
Preparation and Phosphorus Removal Mechanism of Highly Efficient Phosphorus Adsorbent Mg/Al-LDO	WANG Wei-dong, HAO Rui-xia, ZHANG Xiao-xian, <i>et al.</i> (572)
Efficiency and Mechanism of Nitrogen and Phosphorus Removal in Modified Zeolite Wetland	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Le-zhong, <i>et al.</i> (580)
Repression of Nitrogen and Phosphorus Release from Lakeshore Sediment by Five Littoral-zone Plants	YAO Cheng, HU Xiao-zhen, LU Shao-yong, <i>et al.</i> (589)
Simulated Desorption Kinetics of Lead by the Dominant Plant Roots Released Low Molecular Weight Organic Acids from the Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir	HE Yuan-jie, LIU Jiang, JIANG Tao, <i>et al.</i> (600)
Experimental Research of Hg ²⁺ Removal by TiO ₂ /Bentonite Composite	TANG Xing-ping, ZHOU Xiong, ZHANG Jin-yang, <i>et al.</i> (608)
Impact of Ammonia and H ₂ O ₂ on Bromate and Disinfection By-products Control	WANG Yong-jing, DU Xu, JIN Meng, <i>et al.</i> (616)
Influencing Factors of Bacterial Activity in Water Distribution Networks	WANG Xiao-dan, ZHAO Xin-hua, <i>et al.</i> (622)
Adsorptive Remediation of Cr(VI) Contaminated Groundwater with Chemically Synthesized Schwertmannite	ZHU Li-chao, LIU Yuan-yuan, LI Wei-min, <i>et al.</i> (629)
Characteristics and Mechanism of Hybrid Ozonation-Coagulation Process in Wastewater Reclamation	HOU Rui, JIN Xin, JIN Peng-kang, <i>et al.</i> (640)
Nitrogen Removal Effect and Conversion Characteristics of Nitrous Oxide in Single-stage and Multi-stage A/O Processes	GUO Chang-zi, ZHANG Feng-yan, LIU Fu-yu, <i>et al.</i> (647)
Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX with Different Organic Carbon Sources	GUAN Yong-jie, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (654)
Operational Performance and Microbial Community Structure in a Completely Mixed Aeration System	WANG Shuo, XU Qiao, ZHANG Guang-sheng, <i>et al.</i> (665)
Start-up of Combined Floc-granule CANON Process and the Effects of SRT on Reactor Performance	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i> (672)
Effects of Free Ammonia Regulation on the Performance of High Solid Anaerobic Digesters with Dewatered Sludge	DAI Xiao-hu, HE Jin, YAN Han, <i>et al.</i> (679)
Highly Efficient Bioflocculation of Microalgae Using <i>Mucor circinelloides</i>	GU Qiong, JIN Wen-biao, CHEN Yuan-qing, <i>et al.</i> (688)
Effect of Zero Valent Iron on the Decline of Tetracycline Resistance Genes and Class 1 Integrons During Thermophilic Anaerobic Digestion of Sludge	WEI Xin, XUE Shun-li, YANG Fan, <i>et al.</i> (697)
Concentration, Sources and Ecological Risks of PAHs of Different Land Use Types in Shenfu New City	WANG Jing, LIU Ming-li, ZHANG Shi-chao, <i>et al.</i> (703)
Compositions, Sources and Health Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Dusts from Driving-schools in a City of Henan Province, China	CHEN Yi-nan, MA Jian-hua, DUAN Hai-jing, <i>et al.</i> (711)
Remediation of Decabromodiphenyl Ether Contaminated Sediment Through Plant Roots Enhanced by Exogenous Microbes	YANG Lei-feng, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> (721)
Impacts of Bioremediation on Microbial Communities and Different Forms of Nitrogen in Petroleum Contaminated Soil	YE Xi-qiong, WU Man-li, CHEN Kai-li, <i>et al.</i> (728)
Effects of <i>Rhodopseudomonas palustris</i> PSB06 on Pepper Rhizosphere Microbial Community Structure	LUO Lu-yun, JIN De-cai, ZUO Hui, <i>et al.</i> (735)
Effect of Reclaimed Water on Bacterial Community Composition and Function in Urban River Sediment	DI Yan-ming, WANG Guang-xuan, HUANG Xing-ru, <i>et al.</i> (743)
Effects of Different Vegetation Types and Reclamation Years on Soil Bacterial Community Structure in Reclaimed Mine Areas	HE Long, LI Yan-qin, LI Bin-chun, <i>et al.</i> (752)
Characteristic of Abundances and Diversity of Carbon Dioxide Fixation Microbes in Paddy Soils	LIU Qiong, WEI Xiao-meng, WU Xiao-hong, <i>et al.</i> (760)
Effects of Biochar Pyrolyzed at Varying Temperatures on Soil Organic Carbon and Its Components: Influence on the Composition and Properties of Humic Substances	ZHAO Shi-xiang, YU Xiao-ling, LI Zhong-hui, <i>et al.</i> (769)
Straw Composts with Composite Inoculants and Their Effects on Soil Carbon and Nitrogen Contents and Enzyme Activity	NIE Wen-han, QI Zhi-ping, FENG Hai-wei, <i>et al.</i> (783)
Comparative Analysis on Effect of Wheat Straw and Its Biochar Amendment on Net Global Warming Potential Under Wheat-Maize Rotation Ecosystem in the Guanzhong Plain	CHENG Gong, CHEN Jing, LIU Jing-jing, <i>et al.</i> (792)
Isolation and Identification of a Chlorobenzene-degrading Bacterium and Its Degradation Characteristics	YE Jie-xu, LIN Tong-hui, LUO Yu-hao, <i>et al.</i> (802)
Isolation, Identification and Metabolic Characteristics of a Heterotrophic Denitrifying Sulfur Bacterial Strain	TAN Wen-bo, MA Xiao-dan, HUANG Cong, <i>et al.</i> (809)
Effects of Continuous Application of Sewage Sludge Compost on Heavy Metals Accumulation and Mobility Characteristics in Soil Profile and on Heavy Metals Uptake of Wheat	SUN Na, SHANG He-ping, RU Shu-hua, <i>et al.</i> (815)
Effects of Nitrogen Application on Selenium Uptake, Translocation and Distribution in Winter Wheat	CHEN Yu-peng, PENG Qin, LIANG Dong-li, <i>et al.</i> (825)
Accumulation and Biotransformation in Typical Freshwater Algae Species Influenced by Titanium Dioxide Nanoparticles Under Long-term Exposure	LI Jin-li, WANG Zhen-hong, YAN Ya-meng, <i>et al.</i> (832)
Sorption of <i>p</i> -Nitrophenol by Biochars of Corn cob Prepared at Different Pyrolysis Temperatures	MA Feng-feng, ZHAO Bao-wei, <i>et al.</i> (837)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 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)

2017年2月15日 第38卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 38 No. 2 Feb. 15, 2017

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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	北京宝昌彩色印刷有限公司	Printed	by	Beijing Baochang Color Printing Co., Ltd.
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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: 140.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人

ISSN 0250-3301



9 770250 330172