

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第2期

Vol.33 No.2

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版



目次

基于人体健康风险的水污染事件污染物安全阈值研究	郑丙辉, 罗锦洪, 付青, 秦延文, 胡林林 (337)
基于人体健康风险的水污染事件遗传性致癌物安全浓度研究	罗锦洪, 郑丙辉, 付青, 黄民生 (342)
湿地水环境健康评价方法及案例分析	李玉凤, 刘红玉, 郝敬峰, 郑因, 曹晓 (346)
北运河下游典型河网区水体中氮磷分布与富营养化评价	单保庆, 菅宇翔, 唐文忠, 张洪 (352)
漳卫南运河流域水质时空变化特征及其污染源识别	徐华山, 徐宗学, 唐芳芳, 于伟东, 程燕平 (359)
黄河三角洲浅层地下水化学特征及形成作用	安乐生, 赵全升, 叶思源, 刘贯群, 丁喜桂 (370)
沉积物扰动持续时间对悬浮物中磷形态数量分布的影响	李大鹏, 黄勇, 李勇, 潘杨 (379)
沉水植物生长期对沉积物和上覆水之间磷迁移的影响	王立志, 王国祥, 俞振飞, 周贝贝, 陈秋敏, 李振国 (385)
长寿湖表层沉积物氮磷和有机质污染特征及评价	卢少勇, 许梦爽, 金相灿, 黄国忠, 胡文 (393)
洪泽湖沉积物中营养盐和重金属的垂向分布特征研究	张文斌, 余辉 (399)
降雨对农家堆肥氮磷流失的影响及其面源污染风险分析	彭莉, 王莉玮, 杨志敏, 陈玉成, 乔俊婧, 赵中金 (407)
浅水湖泊水动力过程对藻型湖区水体生物光学特性的影响	刘笑菡, 冯龙庆, 张运林, 赵林林, 朱梦圆, 时志强, 殷燕, 丁艳青 (412)
基于半分析模型的太湖春季水体漫衰减系数 K_d (490) 估算及其遥感反演	刘忠华, 李云梅, 李瑞云, 吕恒, 檀静, 郭宇龙 (421)
基于 QAA 算法的巢湖悬浮物浓度反演研究	张红, 黄家柱, 李云梅, 徐伟凡, 刘忠华, 徐昕 (429)
好氧/厌氧潜流湿地结构工艺优化	李锋民, 单时, 李媛媛, 李扬, 王震宇 (436)
邻苯二甲酸二丁酯对短裸甲藻活性氧自由基的影响	别聪聪, 李锋民, 李媛媛, 王震宇 (442)
Rac-及 S-异丙甲草胺对 2 种微藻毒性特征影响研究	蔡卫丹, 刘惠君, 方治国 (448)
羟基自由基致死船舶压载水海洋有害生物研究	白敏冬, 张拿慧, 张芝涛, 陈操, 孟祥盈 (454)
天然菱铁矿改性及强化除砷研究	赵凯, 郭华明, 李媛, 任燕 (459)
零价铁降解 4-氯硝基苯动力学研究	廖娣劫, 杨琦, 李俊鎔 (469)
水体中氧氟沙星的光化学降解研究	邵萌, 杨桂朋, 张洪海 (476)
阿替洛尔在硝酸根溶液中的光降解研究	季跃飞, 曾超, 孟翠, 杨曦, 高士祥 (481)
吡啶在紫外光辐射下的生物降解	方苗苗, 阎宁, 张永明 (488)
蜜环菌漆酶对蒽醌类染料的脱色条件优化	朱显峰, 秦仁炳, 余晨晨, 范书军 (495)
ϵ -聚赖氨酸生产废菌体对六价铬吸附影响的研究	曹玉娟, 张杨, 夏军, 徐虹, 冯小海 (499)
丝状菌污泥致密过程的强化条件研究	李志华, 孙玮, 姬晓琴, 王晓昌 (505)
亚硝化颗粒污泥对温度变化的响应特性研究	罗远玲, 杨朝晖, 徐峥勇, 周玲君, 黄兢, 肖勇, 曾光明, 汪理科 (511)
我国典型工程机械燃油消耗量及排放清单研究	李东玲, 吴烨, 周昱, 杜让, 傅立新 (518)
北京市 PM_{10} 自动监测网络优化研究	齐玲, 赵越, 谢绍东 (525)
道路绿化带对街道峡谷内污染物扩散的影响研究	徐伟嘉, 幸鸿, 余志 (532)
Fe^{II} (EDTA) 络合协同 RDB 去除 NO 废气效能及过程分析	陈浚, 杨宣, 於建明, 蒋轶锋, 陈建孟 (539)
UV-B 辐射对亚热带森林凋落叶氮、磷元素释放的影响	宋新章, 张慧玲, 江洪, 余树全 (545)
干热河谷林地燥红土固碳特征及“新固定”碳表观稳定性	唐国勇, 李昆, 孙永玉, 张春华 (551)
九龙江河口表层水体及沉积物中甲烷的分布和环境控制因素研究	郭莹莹, 陈坚, 尹希杰, 孙治雷, 邵长伟 (558)
秋季黄河口滨岸潮滩湿地系统 CH_4 通量特征及影响因素研究	姜欢欢, 孙志高, 王玲玲, 牟晓杰, 孙万龙, 宋红丽, 孙文广 (565)
我国典型非木浆造纸二噁英排放研究	王志芳, 丁琼, 王开祥, 吴昌敏, 曲云欢, 赵晓冬 (574)
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	邱孟德, 邓代永, 余乐洹, 孙国萍, 麦碧娴, 许玫英 (580)
电子废物拆解区农业土壤中多氯联苯的污染特征	王学彤, 李元成, 张媛, 缪绎, 孙阳昭, 吴明红, 盛国英, 傅家谟 (587)
北京科教园区绿地土壤中多环芳烃的残留特征与潜在风险	彭驰, 王美娥, 欧阳志云, 焦文涛, 陈卫平 (592)
上海城市样带土壤重金属空间变异特征及污染评价	柳云龙, 章立佳, 韩晓非, 庄腾飞, 施振香, 卢小遮 (599)
海河流域北部地区河流沉积物重金属的生态风险评价	尚林源, 孙然好, 王赵明, 汲玉河, 陈利顶 (606)
三峡库区消落带不同水位高程土壤重金属含量及污染评价	王业春, 雷波, 杨三明, 张晟 (612)
超声波促进好氧/缺氧污泥消化过程中细菌群落结构分析	叶运弟, 孙水裕, 郑莉, 刘宝健, 蔡明山, 许燕滨, 占星星 (618)
大庆聚驱后油藏内源微生物群落结构解析与分布特征研究	赵玲侠, 高配科, 曹美娜, 高梦黎, 李国强, 朱旭东, 马挺 (625)
不同碳源刺激对老化污染土壤中 PAHs 降解研究	尹春芹, 蒋新, 王芳, 王聪颖 (633)
应用电致化学发光分子探针技术对微小原甲藻的检测	朱霞, 甄毓, 米铁柱, 于志刚, 池振明, 路兴岚 (640)
软骨藻酸直接竞争 ELISA 方法的建立及优化	王茜, 程金平, 高利利, 董宇, 席磊 (647)
固相萃取-高效液相色谱法同时测定水体中的 10 种磺胺类抗生素	洪蕾洁, 石璐, 张亚雷, 周雪飞, 朱洪光, 林双双 (652)
五氯酚对 HeLa 细胞毒性及 DNA 损伤的研究	金帮明, 王辅明, 熊力, 张晓峰, 刘堰 (658)
建筑陶瓷碳计量与优化模型研究	彭军霞, 赵宇波, 焦丽华, 曾路, 郑为民 (665)
《环境科学》征订启事 (447)	
《环境科学》征稿简则 (475)	
信息 (524, 586, 605, 624)	

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

邱孟德^{1,2,3,4,5}, 邓代永^{2,3,4}, 余乐洹⁶, 孙国萍^{2,3,4}, 麦碧娴⁶, 许玫英^{2,3,4*}

(1. 中国科学院南海海洋研究所, 广州 510301; 2. 广东省微生物研究所, 广州 510070; 3. 广东省菌种保藏与应用重点实验室, 广东省微生物应用新技术公共实验室, 广州 510070; 4. 广东省华南应用微生物重点实验室-省部共建国家重点实验室培育基地, 广州 510070; 5. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 6. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640)

摘要: 对珠江三角洲佛山市顺德区容桂镇电器工业区河涌沉积物多溴联苯醚(PBDEs)的含量进行了空间和垂直分布研究. 选择该镇中心城区内河涌作为研究河道, 根据河涌水流情况选取8个采样点采集沉积物样品. 所有样品中均检出PBDEs. 各监测点的PBDEs总含量变化范围为62~349 ng·g⁻¹ (平均为178 ng·g⁻¹), 各采样点的浓度差异较大. 其中, 十溴联苯醚含量为56~337 ng·g⁻¹ (平均为171 ng·g⁻¹), 占PBDEs总含量的90%~99% (平均95%). 所检测到的部分同系物(如BDE-196、197和203)可能是BDE-209的降解产物. PBDEs的垂直分布模式显示, 0~10 cm层面样品的PBDEs浓度为147 ng·g⁻¹, 30~40 cm层面样品的PBDEs浓度为260 ng·g⁻¹, PBDEs在沉积物中的丰度随垂直深度的增加而增加. 12种同系物在采自各个深度层样品中的比例基本相同, 由十溴工业品来源的BDE-209、208、207和206占总PBDEs的94%, 而五溴和八溴所占比例较低. 由此可见, 该地区普遍存在PBDEs污染, 其中十溴联苯醚是最主要污染物, 这可能与十溴工业品是电器工业主要使用的阻燃材料相关.

关键词: 多溴联苯醚; 十溴联苯醚; 分布模式; 河涌底泥; 电器工业区

中图分类号: X131 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2012)02-0580-07

Horizontal and Vertical Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs) in River Sediment from a Typical Electrical Equipment Industrial Area

QIU Meng-de^{1,2,3,4,5}, DENG Dai-yong^{2,3,4}, YU Le-huan⁶, SUN Guo-ping^{2,3,4}, MAI Bi-xian⁶, XU Mei-ying^{2,3,4}

(1. South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China; 2. Guangdong Institute of Microbiology, Guangzhou 510070, China; 3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Microbial Culture Collection and Application/Guangdong Open Laboratory of Applied Microbiology, Guangzhou 510070, China; 4. State Key Laboratory of Applied Microbiology (Ministry-Guangdong Province Jointly Breeding Base), South China, Guangzhou 510070, China; 5. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 6. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) were determined in sediment collected from a river in a typical electrical equipment industrial area, Ronggui, Foshan. Eight samples were collected from river sediment. The results indicated that PBDEs were presented in all samples. Spatial trends showed that the concentrations of PBDEs in all sediment samples were ranged from 62 ng·g⁻¹ to 349 ng·g⁻¹, with an average of 178 ng·g⁻¹. The predominant congener was BDE-209 (90%-99%), which ranged from 56-337 ng·g⁻¹, with an average of 171 ng·g⁻¹. Some of congeners such as BDE-196, 197 and 203 may be were the degradation product of BDE-209. Vertically, the concentrations of PBDEs were increased with the depth, whereas the concentrations were 147 ng·g⁻¹ in layer 0-10 cm and 260 ng·g⁻¹ in layer 30-40 cm, respectively. Distribution profile of PBDEs in vertical direction was similar in different depths. The commercial deca-BDE (94%), which contained BDE-209, 208, 207 and 206, was the dominate pollutant with minor contributions from penta-and octa-BDEs. The results suggested that this area was polluted by PBDEs and BDE-209 was the most dominate congener, which is related with the manufacturing activities for electrical equipment.

Key words: polybrominated diphenyl ethers (PBDEs); BDE-209; distribution profile; river sediment; electrical equipment industrial area

收稿日期: 2011-03-29; 修订日期: 2011-05-04

基金项目: 广东省自然科学基金研究团队项目(9351007002000001); 佛山市顺德区容桂街道科技计划项目; 广东省中国科学院全面战略合作项目(2010B09031048); 佛山市院市合作项目(2010YS023)

作者简介: 邱孟德(1985~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境微生物学, E-mail: tottiqiu@163.com

* 通讯联系人, E-mail: xumy@gdim.cn

多溴联苯醚 (polybrominated diphenyl ethers, PBDEs) 是一类常用的溴代阻燃剂, 被广泛应用于电子产品、纺织、家具、防火材料、装饰物、塑料等制品中, 主要的工业品有五溴、八溴和十溴联苯醚^[1]. 由于 PBDEs 被大量生产和添加, 并随着产品的使用和废弃进入环境, 在世界范围内进行长距离的迁移转化而被广泛检测到^[2~8], 甚至在人类母乳中以每 5 年增加一倍的速度增长^[9]. 由于 PBDEs 在环境中具有持久性、生物蓄积性和潜在的生物毒性, 有关其污染问题已引起了世界各国的高度关注. 五溴和八溴联苯醚已被欧盟和美国限制使用^[10], 并被列入《持久性有机污染物的斯德哥尔摩公约》的控制清单, 而十溴联苯醚在亚洲和世界各国的生产和使用量仍在上升^[11]. 近年来, 针对我国环境中的 PBDEs 已开展了较多的调查研究^[2,12,13], 结果显示 PBDEs 在我国环境中广泛分布, 个别地区的 PBDEs 浓度已达到惊人的水平 (97 400 ng/g)^[4]. 电子/电器的制造过程和电子废弃物的拆解是 PBDEs 向环境中释放的 2 个主要途径, 目前有关这些典型区域环境中 PBDEs 的研究大多集中于电子废弃物拆解区^[4,14~16], 对于 PBDEs 在电子/电器制造业工业区的分布研究相对较少^[17,18].

本研究对来自广东佛山容桂电器工业区内河涌沉积物中的 PBDEs 进行分析, 考察 PBDEs 的空间分布和垂直变化趋势, 了解其在空间尺度上的分布差异, 以期制订电器工业区河涌沉积物中 PBDEs 污染治理方案提供科学数据.

1 材料与方法

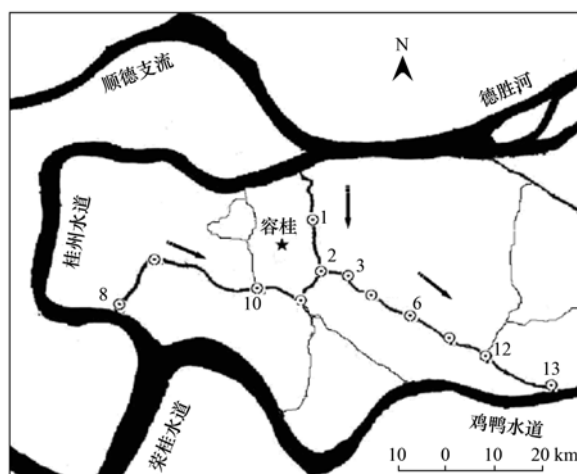
1.1 研究位点与样品采集

选择容桂镇中心城区内河涌作为研究河道. 容桂镇位于佛山市顺德区南部, 该镇辖区被容桂水道、顺德支流、鸡鸭水道和桂洲水道包围, 辖区内大小河涌密布. 该镇已形成了以智能家电、信息电子、医药保健、精细化工、机械模具等五大支柱的工业体系. 该镇生产的电器主要是家用电器, 如: 冰箱、微波炉、空调等. 2010 年实现规模以上工业产值 1 376 亿元, 是电器加工制造业的典型代表. 近年来, 不断加大的人口压力和工业扩张使得镇内河涌受到严重的工业和生活源污染. 西北起始端为桂洲大道中与狮山路交汇处, 西南侧起始于红星桂堂小学, 末端至广珠高速, 全长约 4.2 km 的河道范围 (图 1). 取样点主要有桂洲大道西 (1 号点), 新涌终点 (2 号点), 文塔公园 (3 号点), 容桂实验中学 (6 号点) 等 8 个点, 河

涌的水流方向是 1~2 号, 8~2 号, 2 号沿 3 号至 6 号流向. 2010 年 7 月于此河涌采集表层沉积物, 并采集了 3 号点垂直尺度的沉积物样品, 分别为 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm. 运回实验室后置于 -20℃ 冰箱.

1.2 样品的处理及分析

利用冷冻干燥器 (Christ Alpha-4, Germany) 对样品进行冷冻干燥, 约 24 h, 然后进行研磨, 过 75 目筛后贮存在棕色磨口瓶中, 避光保存. 所有样品均经过 200 mL 的正己烷/丙酮 (1:1, 体积比) 索氏抽提 48 h. 抽提前抽提器和冻凝管等用正己烷/丙酮混合液进行清洗, 并加入定量的回收率指示物 (¹³C-PCB141 和 PCB209) 和铜片除硫.



图中箭头方向表示水流方向

图 1 容桂内河涌沉积物采样点分布示意^[19]

Fig. 1 Location of sampling sites

抽提液在旋转蒸发仪上浓缩并将溶剂置换成正己烷 (约 1 mL). 浓缩液经多层硅胶氧化铝复合柱纯化. 该复合柱从下到上依次是: 6 cm 氧化铝, 2 cm 中性硅胶, 5 cm 碱性硅胶, 2 cm 中性硅胶, 6 cm 酸性硅胶, 1 cm 无水硫酸钠. 用 70 mL 二氯甲烷/正己烷混合溶剂 (1:1, 体积比) 洗脱. 洗脱液浓缩定容至 200 μ L, 加入一定量 PBDEs 进样内标, 详细的前处理流程见文献^[22].

仪器分析采用岛津气相色谱-质谱联用仪 (Shimadzu GCMS-QP2010), 负化学电离 (NCI). 三~七溴联苯醚使用 DB-XLB (30 m $\times$ 0.25 mm $\times$ 0.25 μ m, J&W Scientific) 色谱柱进行分离, 升温程序为: 110℃ 保持 1 min, 以 8℃ $\cdot$ min⁻¹ 的速度上升到 180℃ 后保持 1 min, 再以 2℃ $\cdot$ min⁻¹ 的速度上升到 240℃ 后保持 5 min, 然后以 2℃ $\cdot$ min⁻¹ 的速度上升到 280℃ 后保持 25 min, 最后以 5℃ $\cdot$ min⁻¹ 的速度上升

到 290℃ 后保持 13 min. 其他条件为: 载气为高纯氮, 反应气为甲烷; 柱流速为 1.0 mL·min⁻¹, 离子源温度 200℃, 界面温度 280℃, 进样量为 1 μL, 无分流进样. 八~十溴联苯醚使用 CP-Sil 13CB (12.5 m × 0.25 mm × 0.25 μm, Varian) 色谱柱进行分离, 升温程序为: 110℃ 以 8℃·min⁻¹ 的速度升到 300℃ 后保持 20 min, 柱流速 1.5 mL·min⁻¹, 无分流高压进样. PBDEs 的仪器分析扫描离子为: 三~九溴联苯醚荷质比(*m/z*) 为 79、81; 十溴联苯醚 *m/z* 为 79、81、486.7 和 488.7; 回收率指示物 ¹³C-PCB141 的 *m/z* 为 372、374, PCB209 的 *m/z* 为 498、500; 内标 ¹³C-PCB208 的 *m/z* 为 476、478^[2].

在分析过程中质量保证/质量控制措施 (QA/QC) 包括: 在分析过程中同时运行 QC 控制样 (方法空白、空白加标、基质加标和样品重复样) 及分析前对所有样品添加回收率指示物标样. 空白加标中目标化合物回收率为 96.8% ± 9.2%; 基质加标中目标化合物回收率为 98.7% ± 10.6%; 所有样品中回收率指示物 ¹³C-PCB141 和 PCB209 的回收率分别为 98.4% ± 8.2% 和 97.8% ± 9.5%. BDE-209 的检出限 (3 倍信噪比) 为 0.2 ng·g⁻¹, 其他 PBDEs 为 0.01 ~ 0.1 ng·g⁻¹. 痕量 BDE-47 在方法空白中有检出, 实际样品的含量已进行空白扣除.

2 结果与讨论

2.1 PBDEs 在沉积物中的空间分布

PBDEs 在 8 个表层沉积物样品中均检出, 总含量为 62 ~ 349 ng·g⁻¹, 平均为 178 ng·g⁻¹. 1 号点的浓度最低, 而 6 号点的浓度最高, 约是 1 号的 6 倍. 从图 2(a) 中可以看出各研究区域的含量水平存在一定的差异, 表现为: 6 号 > 13 号 > 2 号 > 12 号 > 10 号 > 8 号 > 3 号 > 1 号. 所检出的 PBDEs 同系物共 13 种, 分别为 BDE-47、66、100、99、153、183、197、203、196、208、207、206 和 BDE-209 (图 2). 其中 BDE-209 是最主要的单体, 平均占总量的 84.6%. 工业品 PBDEs 主要有 3 种: 商用五溴联苯醚 (BDE-28、47、66、99、100、138、153 和 154)、商用八溴联苯醚 (BDE-183、196、197、201 和 203)、商用十溴联苯醚 (BDE-206、207、208 和 209). 本研究来自十溴工业品 PBDEs 的含量为 56 ~ 337 ng·g⁻¹, 平均为 171 ng·g⁻¹, 占有 PBDEs 总量的 90% ~ 99%, 平均占 95% (图 2). 此结果表明, 该地区 PBDEs 的污染源主要来自十溴工业品, 而五溴和八溴的浓度较低. 推测这主要是由于该地区以电子电器工业为主, 而十溴工业品是电子电器产品中使用的主要阻燃材料.

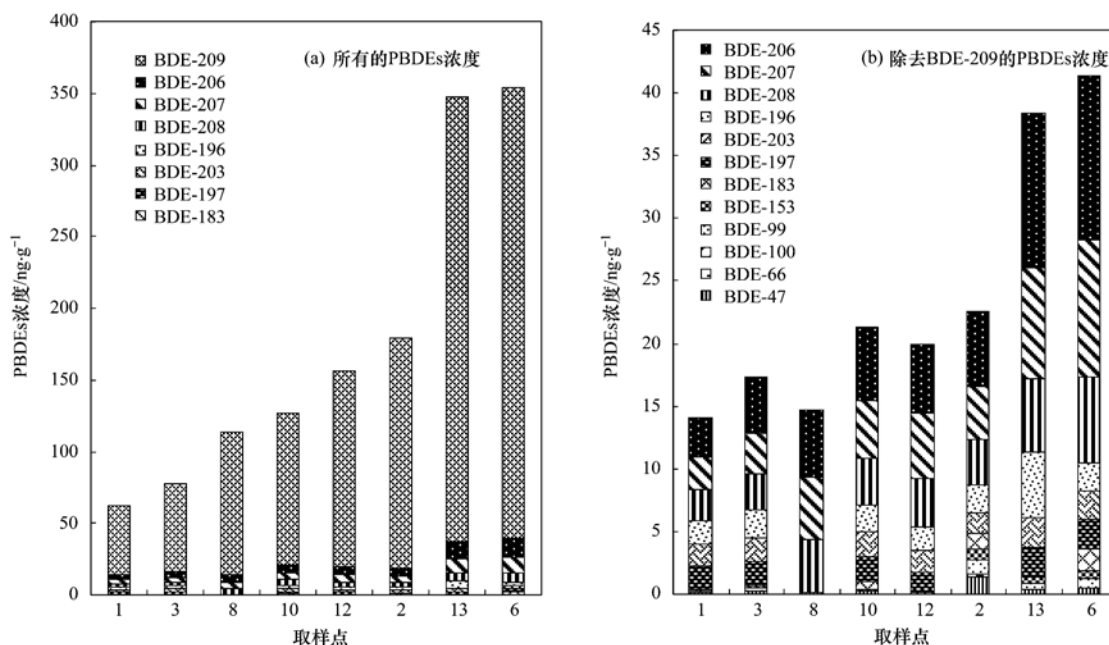


图 2 不同取样点沉积物中 PBDEs 的分布

Fig. 2 Distributions of PBDEs in surface sediments from the sampling sites

PBDEs 的同系物分布模式表明 (除去 BDE-209), 3 种九溴同系物占了绝大部分 (80%), 其次为

BDE-196 (9.1%)、197 (6.6%) 和 203 (7.5%). 不同采样点的分布模式有所不同 (图 3).

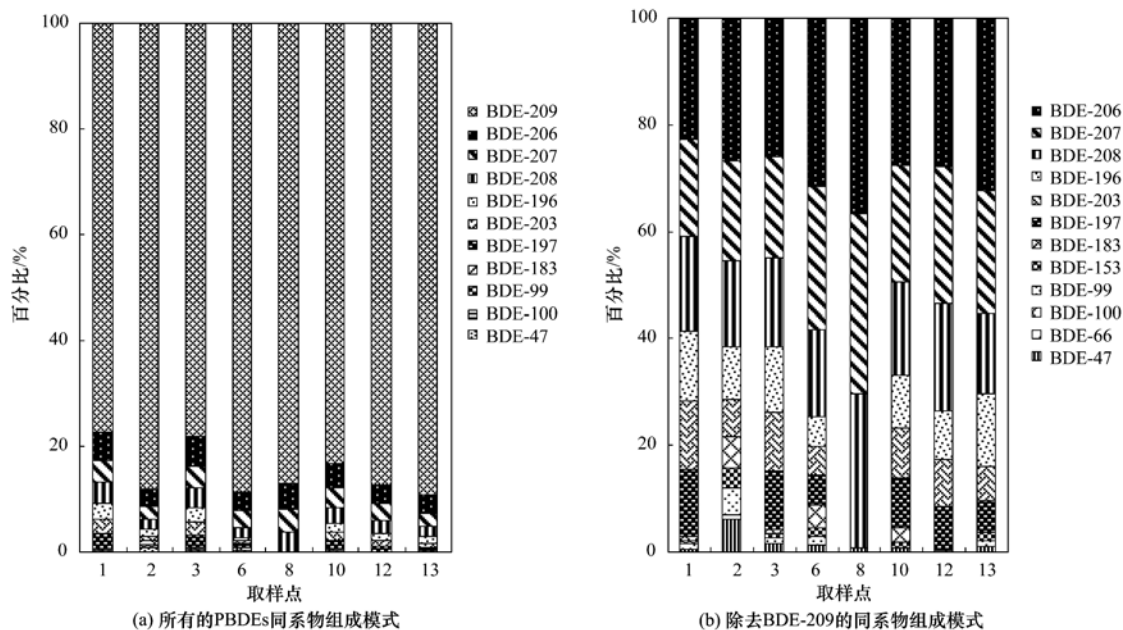


图3 不同取样点的 PBDEs 同系物组成模式

Fig. 3 Distribution profile of PBDEs in surface sediments from the sampling sites

实验结果表明,河涌各采样点沉积物中 PBDEs 的浓度差异较大,呈现出上游浓度低于下游浓度. 内河涌上游的 1 号、8 号点浓度较低,而最下游的采样点 13、12 和 6 号浓度较高. 而 2 号点浓度高的原因可能与 2 个方向的水流汇集相关,并且此段河涌较宽,水流缓慢,沉积的淤泥较多, PBDEs 得以在此处蓄积. 而 2 号点下游的 3 号点 PBDEs 浓度并不高,原因有待进一步调查. 6 号点下游的 13 号点和 12 号点浓度低于 6 号点,可能是由于这 2 个点靠近水流速较快的鸡鸭水道,不利于沉积物对 PBDEs 的吸附.

从 PBDEs 的同系物组成模式上看,十溴联苯醚是 PBDEs 污染的重要组成部分,十溴联苯醚阻燃剂工业品的使用可能是最重要的来源. 其次是八溴 BDE-196、197 和 203,但八溴工业品中的主要成分 BDE-183 的检出率并不高[图 2(b)],推测八溴工业品也被一定程度地使用,但所检测到的部分 BDE-196、197 和 203 可能是来自 BDE-209 的降解产物^[20,21]. 总体上,不同采样点的分布模式差异较小,这表明它们具有相似的纳污模式.

对研究区域内的十溴工业品浓度与非十溴同系物(除去十溴工业品中的同系物)的浓度之间进行相关分析,结果发现这两者之间具有较好的相关性($R^2 = 0.8073$),即随着沉积物中十溴工业品浓度的

提高,非十溴同系物的浓度也相应提高(图 4),表明十溴与非十溴同系物具有相同的输入途径.

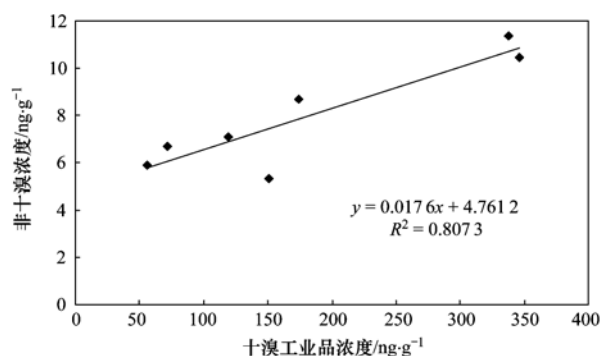


图4 沉积物中十溴工业品浓度与非十溴浓度之间的相关性

Fig. 4 Correlations between commercial deca-BDE mixture and PBDEs (without commercial deca-BDE mixture) concentration

2.2 PBDEs 在沉积物中的垂直分布

PBDEs 在不同深度的沉积物样品中均被检出. 共检出 12 种 PBDEs 的同系物,分别为 BDE-28、47、99、153、183、197、203、196、208、207、206 和 BDE-209. PBDEs 在沉积物中的含量随深度的增加而增加. 0 ~ 10 cm 表层沉积物样品中的 PBDEs 浓度最低($147 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$),而 30 ~ 40 cm 底层沉积物样品中 PBDEs 的浓度最高($260 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$)[图 5(a)]. 低溴代 PBDEs(除去十溴联苯醚)的总量为 25 ~ 40

ng·g⁻¹[图5(b)].

从PBDEs在沉积物垂直方向的组成模式上看,12种同系物在采自不同深度样品中的比例基本相

同,其中BDE-209占83%,BDE-208、207和206共占11%(图6).其中,十溴工业品占PBDEs总量的94%,而五溴和八溴工业品所占比例较低.

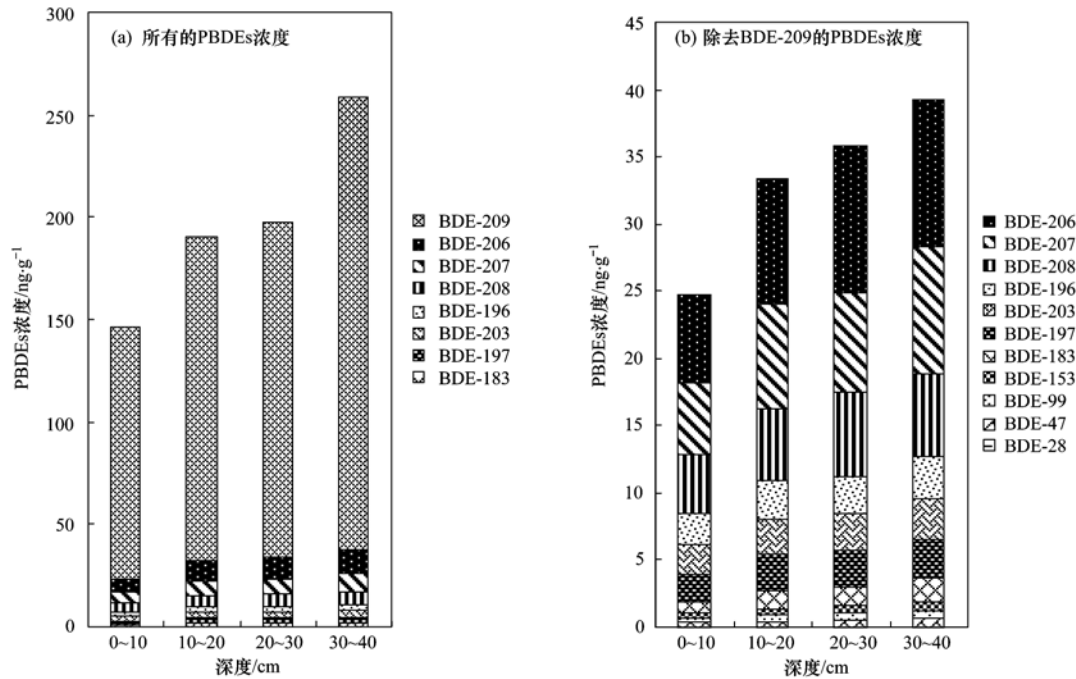


图5 垂直方向上的PBDEs浓度

Fig. 5 Vertical distribution of PBDEs concentrations

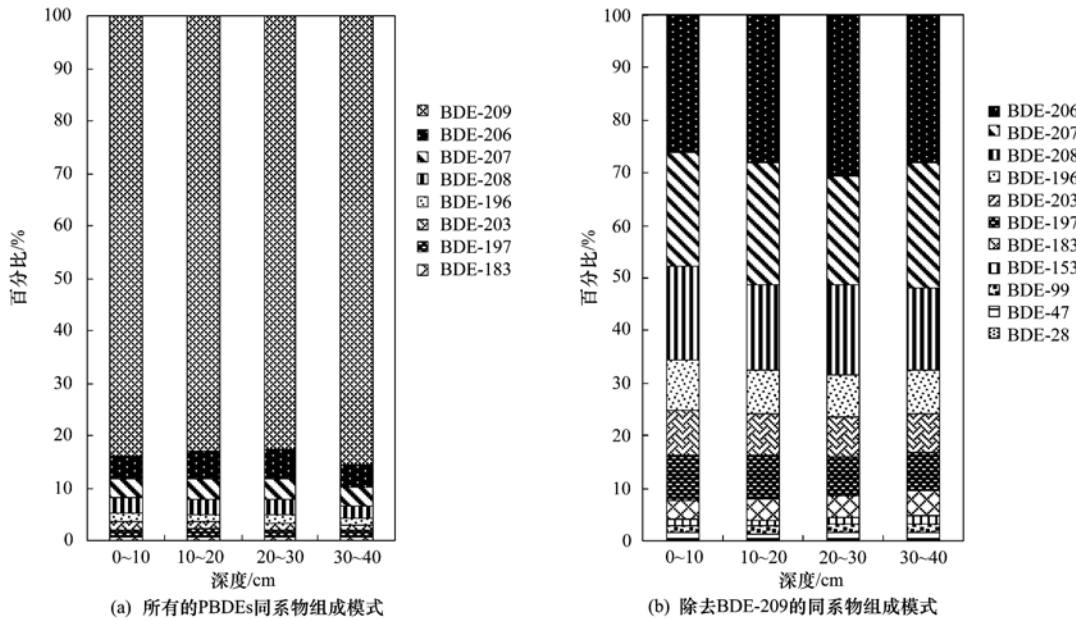


图6 垂直方向的PBDEs组成模式

Fig. 6 Vertical distribution profile of PBDEs

不同深度的PBDEs分布模式展示了不同时间段的污染物输入模式,其含量变化在一定程度上反

映了时间尺度上PBDEs输入到沉积物中的量变.结果表明,近一段时间该地区PBDEs的输入模式比较

接近,但在沉积物中的含量则随深度的增加而增加,越靠近上层,PBDEs 的含量越低. 这种情况估计是由于以下 3 方面的原因引起的:①由于近年来该地区进行了产业结构调整,污染严重、效益差的企业倒闭或者迁出,使环境中 PBDEs 的排放量减少;②由于环保相关部门采取了截污等环保措施,使得污染物的排放减少;③该地区电子/电器工业产品中所使用的 PBDEs 阻燃剂可能正被其它新型的替代品取代. 在广东省另一个电子制造业工业区(东莞)河流沉积物垂向分布研究中也发现类似情况,BDE-209 在近年来(按沉积速率^[18]估算大约从 2000 年初期左右)的沉积物中呈现递减趋势,而其替代品(十溴二苯乙烷)呈现逐渐递增^[22].

3 结论

(1) PBDEs 在沉积物中的水平分布模式表明,PBDEs 在各采样点的含量差异较大,内河涌上游的 1 号、8 号点浓度较低,而最下游的采样点 13、12 和 6 号浓度较高.

(2) PBDEs 的同系物分布模式表明,BDE-209 是最主要的污染物. 十溴工业品占有 PBDEs 的 90%~99%,平均占 95%. 表明该地区 PBDEs 的污染源主要来自于十溴工业品. 这可能与该地区以电子电器工业为主相关. 所检测到的部分同系物(如 BDE-196、197 和 203)可能是 BDE-209 的降解产物.

(3) PBDEs 在沉积物中的垂直分布显示,越靠近沉积物的上层,PBDEs 的含量越低,这表明该地区在生产和使用过程中向环境中释放 PBDEs 的量有所减少. 这可能是由于该工业区所使用的阻燃产品种类发生了转变,有必要加强对其它新型阻燃材料替代品的调查研究.

参考文献:

- [1] De Wit C A. An overview of brominated flame retardants in the environment [J]. *Chemosphere*, 2002, **46**(5): 583-624.
- [2] Mai B X, Chen S J, Luo X J, *et al.* Distribution of polybrominated diphenyl ethers in sediments of the Pearl River Delta and adjacent South China Sea [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(10): 3521-3527.
- [3] Wang L C, Hsi H C, Wang Y F, *et al.* Distribution of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) and polybrominated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans (PBDD/Fs) in municipal solid waste incinerators [J]. *Environmental Pollution*, 2010, **158**(5): 1595-1602.
- [4] Leung A O W, Luksemburg W J, Wong A S, *et al.* Spatial

distribution of polybrominated diphenyl ethers and polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans in soil and combusted residue at Guiyu, an electronic waste recycling site in southeast China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**(8): 2730-2737.

- [5] 黄玉妹, 陈来国, 许振成, 等. 家庭尘土中多溴联苯醚的含量及人体暴露水平初步研究 [J]. *环境科学*, 2010, **31**(1): 168-172.
- [6] Lorber M. Exposure of Americans to polybrominated diphenyl ethers [J]. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 2007, **18**(1): 2-19.
- [7] Uemura H, Arisawa K, Hiyoshi M, *et al.* Congener-specific body burden levels and possible determinants of polybrominated diphenyl ethers in the general Japanese population [J]. *Chemosphere*, 2010, **79**(7): 706-712.
- [8] Gauthier L T, Hebert C E, Weseloh D V C, *et al.* Dramatic changes in the temporal trends of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in herring gull eggs from the Laurentian Great Lakes: 1982-2006 [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **42**(5): 1524-1530.
- [9] Norén K, Meironyté D. Certain organochlorine and organobromine contaminants in Swedish human milk in perspective of past 20-30 years [J]. *Chemosphere*, 2000, **40**(9-11): 1111-1123.
- [10] Shaw S D, Kannan K. Polybrominated diphenyl ethers in marine ecosystems of the American continents: foresight from current knowledge [J]. *Reviews on Environmental Health*, 2009, **24**(3): 157-229.
- [11] Messer A. Mini-review: polybrominated diphenyl ether (PBDE) flame retardants as potential autism risk factors [J]. *Physiology & Behavior*, 2010, **100**(3): 245-249.
- [12] Wang Y W, Yang R Q, Wang T, *et al.* Assessment of polychlorinated biphenyls and polybrominated diphenyl ethers in Tibetan butter [J]. *Chemosphere*, 2010, **78**(6): 772-777.
- [13] Su G Y, Gao Z S, Yu Y J, *et al.* Polybrominated diphenyl ethers and their methoxylated metabolites in anchovy (*Coilia* sp.) from the Yangtze River Delta, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2010, **17**(3): 634-642.
- [14] 陈社军, 田密, 罗勇, 等. 多溴联苯醚在电子废弃物拆卸地沉积物中的垂直分布 [J]. *环境科学*, 2010, **31**(12): 3088-3092.
- [15] 王璟, 陈社军, 田密, 等. 电子废弃物处理地室内外灰尘中多溴联苯醚的污染及其人群暴露水平 [J]. *环境科学*, 2010, **31**(1): 173-178.
- [16] 陈多宏, 李丽萍, 毕新慧, 等. 典型电子垃圾拆解区大气中多溴联苯醚的污染 [J]. *环境科学*, 2008, **29**(8): 2105-2110.
- [17] 曾艳红, 罗孝俊, 孙毓鑫, 等. 东江下游入河排污水卤系阻燃剂质量浓度及排放通量 [J]. *环境科学*, 2011, **32**(10): 2891-2895.
- [18] Zhang X L, Luo X J, Chen S J, *et al.* Spatial distribution and vertical profile of polybrominated diphenyl ethers,

- tetrabromobisphenol A, and decabromodiphenylethane in river sediment from an industrialized region of South China [J]. *Environmental Pollution*, 2009, **157**(6): 1917-1923.
- [19] 吴青梅, 罗慧东, 孙国萍, 等. 典型感潮内河涌水质污染特征调查研究 [J]. *环境科学学报*, 2011, **31**(10): 2210-2216.
- [20] 邱孟德, 陈杏娟, 邓代永, 等. 溴代阻燃剂微生物降解的研究进展 [J]. *微生物学通报*, 2010, **37**(7): 1043-1047.
- [21] Deng D Y, Guo J, Sun G P, *et al.* Aerobic debromination of deca-BDE: isolation and characterization of an indigenous isolate from a PBDE contaminated sediment [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2011, **65**(3): 465-469.
- [22] 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.

《环境科学》多项引证指标名列前茅

2011年12月2日,中国科学技术信息研究所在中国科技论文统计结果发布会上公布了2010年度中国科技论文统计结果.统计结果显示2010年度《环境科学》多项引证指标位居环境科学技术、安全科学技术类科技期刊前列.

综合评价总分86.5,排名第一(排名前三名的期刊分别是《环境科学》86.5,《中国环境科学》77.9,《环境科学学报》77.3).

总被引频次5197,排名第一(排名前三名的期刊分别是《环境科学》5197,《环境科学学报》3914,《农业环境科学学报》3700).

影响因子1.125,排名第三(排名前三名的期刊分别是《环境科学研究》1.531,《中国环境科学》1.457,《环境科学》1.125).

综合评价总分是根据中国科技期刊综合评价指标体系,计算多项科学计量指标(总被引频次、影响因子、他引率、基金论文比、引文率等),采用层次分析法确定重要指标的权重,分学科对每种期刊进行综合评定,计算出每个期刊的综合评价总分.这项指标屏蔽了各个学科之间总体指标背景值的差异,使科技期刊可以进行跨学科比较.根据发布的统计结果,2010年度《环境科学》综合评价总分86.5,在被统计的1998种核心期刊中名列第27位,在被统计的36种环境科学技术、安全科学技术类期刊中名列第一.

CONTENTS

Safety Value of Contaminant in Water Pollution Accident Based on Human Health Risk	ZHENG Bing-hui, LUO Jin-hong, FU Qing, <i>et al.</i> (337)
Safety Concentration of Genotoxic Carcinogens in Water Pollution Accident Based on Human Health Risk	LUO Jin-hong, ZHENG Bing-hui, FU Qing, <i>et al.</i> (342)
A Quantitative Method and Case Analysis for Assessing Water Health	LI Yu-feng, LIU Hong-yu, HAO Jing-feng, <i>et al.</i> (346)
Temporal and Spatial Variation of Nitrogen and Phosphorus and Eutrophication Assessment in Downstream River Network Areas of North Canal River Watershed ...	SHAN Bao-qing, JIAN Yu-xiang, TANG Wen-zhong, <i>et al.</i> (352)
Spatiotemporal Variation Analysis and Identification of Water Pollution Sources in the Zhangweinan River Basin	XU Hua-shan, XU Zong-xue, TANG Fang-fang, <i>et al.</i> (359)
Hydrochemical Characteristics and Formation Mechanism of Shallow Groundwater in the Yellow River Delta	AN Le-sheng, ZHAO Quan-sheng, YE Si-yuan, <i>et al.</i> (370)
Impacts of Sediment Disturbance Time on the Distribution of Phosphorus Forms in Suspended Solids	LI Da-peng, HUANG Yong, LI Yong, <i>et al.</i> (379)
Influence of Submerged Macrophytes on Phosphorus Transference Between Sediment and Overlying Water in the Growth Period	WANG Li-zhi, WANG Guo-xiang, YU Zhen-fei, <i>et al.</i> (385)
Pollution Characteristics and Evaluation of Nitrogen, Phosphorus and Organic Matter in Surface Sediments of Lake Changshouhu in Chongqing, China	LU Shao-yong, XU Meng-shuang, JIN Xiang-can, <i>et al.</i> (393)
Vertical Distribution Characteristics of Nutrients and Heavy Metals in Sediments of Lake Hongze	ZHANG Wen-bin, YU Hui (399)
Effects of Rainfall on Nitrogen and Phosphorus Loss from Courtyard Compost and Its Risk of Nonpoint Source Pollution	PENG Li, WANG Li-wei, YANG Zhi-min, <i>et al.</i> (407)
Effects of Hydrodynamic Process on Bio-optical Properties in Algal-Dominated Lake Region of Shallow Lake	LIU Xiao-han, FENG Long-qing, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (412)
Estimation and Remote Sensing Inversion of Diffuse Attenuation Coefficient $K_d(490)$ in Lake Taihu in Spring Based on Semi-analytical Model	LIU Zhong-hua, LI Yun-mei, LI Rui-yun, <i>et al.</i> (421)
Monitoring the Total Suspended Matter of Lake Chaohu Based on Quasi-Analytical Algorithm	ZHANG Hong, HUANG Jia-zhu, LI Yun-mei, <i>et al.</i> (429)
Optimization of Aerobic/Anaerobic Subsurface Flow Constructed Wetlands	LI Feng-min, SHAN Shi, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i> (436)
Effects of Allelochemical Dibutyl Phthalate on <i>Gymnodinium breve</i> Reactive Oxygen Species	BIE Cong-cong, LI Feng-min, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i> (442)
Toxicity Effects of <i>Rac</i> - and <i>S</i> -Metolachlor on Two Algae	CAI Wei-dan, LIU Hui-jun, FANG Zhi-guo (448)
Studies for Killing the Oceanic Harmful Organisms in Ship's Ballast Water Using Hydroxyl Radicals	BAI Min-dong, ZHANG Na-hui, ZHANG Zhi-tao, <i>et al.</i> (454)
Modification of Natural Siderite and Enhanced Adsorption of Arsenic	ZHAO Kai, GUO Hua-ming, LI Yuan, <i>et al.</i> (459)
Kinetic Study of 4-Chloronitrobenzene Degradation by Zero-Valent Iron	LIAO Di-jie, YANG Qi, LEE Chun-chi (469)
Photochemical Degradation of Ofloxacin in Aqueous Solution	SHAO Meng, YANG Gui-peng, ZHANG Hong-hai (476)
Photodegradation of Atenolol in Aqueous Nitrate Solution	JI Yue-fei, ZENG Chao, MENG Cui, <i>et al.</i> (481)
Biodegradation of Pyridine Under UV Irradiation	FANG Miao-miao, YAN Ning, ZHANG Yong-ming (488)
Optimization on Decoloration Conditions of Anthraquinone Dyes by Laccase from <i>Amillariella mellea</i>	ZHU Xian-feng, QIN Ren-bing, YU Chen-chen, <i>et al.</i> (495)
Biosorption of Chromium(VI) by Waste Biomass of ϵ -Poly-L-lysine Fermentation	CAO Yu-juan, ZHANG Yang, XIA Jun, <i>et al.</i> (499)
Investigation on Enhanced Conditions for the Densification of Filamentous Sludge	LI Zhi-hua, SUN Wei, JI Xiao-qin, <i>et al.</i> (505)
Effect of Temperature on the Response Characteristics of Shortcut Nitrification Granular Sludge	LUO Yuan-ling, YANG Zhao-hui, XU Zheng-yong, <i>et al.</i> (511)
Fuel Consumption and Emission Inventory of Typical Construction Equipments in China	LI Dong-ling, WU Ye, ZHOU Yu, <i>et al.</i> (518)
Optimization of PM ₁₀ Monitoring Network in Beijing	QI Ling, ZHAO Yue, XIE Shao-dong (525)
Effect of Greenbelt on Pollutant Dispersion in Street Canyon	XU Wei-jia, XING Hong, YU Zhi (532)
Investigation of Effect and Process of Nitric Oxide Removal in Rotating Drum Biofilter Coupled with Absorption by Fe ^{II} (EDTA)	CHEN Jun, YANG Xuan, YU Jian-ming, <i>et al.</i> (539)
Effect of UV-B Radiation on Release of Nitrogen and Phosphorus from Leaf Litter in Subtropical Region in China	SONG Xin-zhang, ZHANG Hui-ling, JIANG Hong, <i>et al.</i> (545)
Characteristics of Carbon Sequestration and Apparent Stability of New Sequestered Carbon in Forested Torrid Red Soil at Dry-Hot Valley	TANG Guo-yong, LI Kun, SUN Yong-yu, <i>et al.</i> (551)
Spatial Distribution of Methane in Surface Water and Sediment of Jiulongjiang Estuary and the Effect Environment factors of It	GUO Ying-ying, CHEN Jian, YIN Xi-jie, <i>et al.</i> (558)
Methane Fluxes and Controlling Factors in the Intertidal Zone of the Yellow River Estuary in Autumn	JIANG Huan-huan, SUN Zhi-gao, WANG Ling-ling, <i>et al.</i> (565)
Study on Dioxin Emission for Typical Non-Wood Pulp Making in China	WANG Zhi-fang, DING Qiong, WANG Kai-xiang, <i>et al.</i> (574)
Horizontal and Vertical Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs) in River Sediment from a Typical Electrical Equipment Industrial Area	QIU Meng-de, DENG Dai-yong, YU Le-huan, <i>et al.</i> (580)
Characteristics of Polychlorinated Biphenyls in Soils from an Electronic Waste Recycling Area	WANG Xue-tong, LI Yuan-cheng, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (587)
Characterization and Potential Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Green Space Soils of Educational Areas in Beijing	PENG Chi, WANG Mei-e, OUYANG Zhi-yun, <i>et al.</i> (592)
Spatial Variability and Evaluation of Soil Heavy Metal Contamination in the Urban-transect of Shanghai	LIU Yun-long, ZHANG Li-jia, HAN Xiao-fei, <i>et al.</i> (599)
Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Sediments of Rivers in Northern Area of Haihe River Basin, China	SHANG Lin-yuan, SUN Ran-hao, WANG Zhao-ming, <i>et al.</i> (606)
Concentrations and Pollution Assessment of Soil Heavy Metals at Different Water-level Altitudes in the Draw-down Areas of the Three Gorges Reservoir	WANG Ye-chun, LEI Bo, YANG San-ming, <i>et al.</i> (612)
Analysis of Community Structure on Sludge Aerobic/anoxic Digestion After Ultrasonic Pretreatment	YE Yun-di, SUN Shui-yu, ZHENG Li, <i>et al.</i> (618)
Research on Population Structure and Distribution Characteristic of Indigenous Microorganism in Post-polymer-Flooding Oil Reservoir	ZHAO Ling-xia, GAO Pei-ke, CAO Mei-na, <i>et al.</i> (625)
Study on Degradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) with Different Additional Carbon Sources in Aged Contaminated Soil	YIN Chun-qin, JIANG Xin, WANG Fang, <i>et al.</i> (633)
Detection of <i>Prorocentrum minimum</i> (Pavillard) Schiller with the Electrochemiluminescence-Molecular Probe	ZHU Xia, ZHEN Yu, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (640)
Development of Direct Competitive Enzyme-Linked Immunosorbent Assay for the Determination of Domoic Acid	WANG Qian, CHENG Jin-ping, GAO Li-li, <i>et al.</i> (647)
Simultaneous Determination of 10 Sulfonamide Antibiotics in Water by Solid-phase Extraction and High Performance Liquid Chromatography	HONG Lei-jie, SHI Lu, ZHANG Ya-lei, <i>et al.</i> (652)
Effects of Pentachlorophenol on DNA Damage and Cytotoxicity of HeLa Cells	JIN Bang-ming, WANG Fu-ming, XIONG Li, <i>et al.</i> (658)
Modeling of Carbon Dioxide Measurement and Optimization on Building Ceramic Industry	PENG Jun-xia, ZHAO Yu-bo, JIAO Li-hua, <i>et al.</i> (665)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2012年2月15日 33卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 2 Feb. 15, 2012

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧 阳 自 远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人