

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第6期

Vol.34 No.6

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

2008 ~ 2010 年北京城区大气 BTEX 的浓度水平及其 O ₃ 生成潜势	曹函玉, 潘月鹏, 王辉, 谭吉华, 王跃思 (2065)
利用 SPAMS 研究上海秋季气溶胶污染过程中颗粒物的老化与混合状态	牟莹莹, 楼晟荣, 陈长虹, 周敏, 王红丽, 周振, 乔利平, 黄成, 李梅, 李莉, 王倩, 黄海英, 邹兰军 (2071)
沈阳市降水化学成分及来源分析	张林静, 张秀英, 江洪, 张清新 (2081)
秦皇岛大气污染物浓度变化特征	刘鲁宁, 申雨璇, 辛金元, 吉东生, 王跃思 (2089)
笼养鸡生长过程 NH ₃ 、N ₂ O、CH ₄ 和 CO ₂ 的排放	周忠凯, 朱志平, 董红敏, 陈永杏, 尚斌 (2098)
碳化硅协同分子筛负载型催化微波辅助催化氧化甲苯性能	王晓晖, 卜龙利, 刘海楠, 张浩, 孙剑宇, 杨力, 蔡力栋 (2107)
生物滴滤塔净化多组分废气的研究	张定丰, 房俊逸, 叶杰旭, 邱松凯, 钱东升, 戴启洲, 陈东之 (2116)
在氧化和还原氛围下脉冲电晕法降解二硫化碳废气	金圣, 黄立维, 李国平 (2121)
模拟大气 CO ₂ 水平升高对春季太湖浮游植物生理特性的影响	赵旭辉, 汤龙升, 史小丽, 杨州, 孔繁翔 (2126)
一种确定湖泊水质基准参照状态浓度的新方法	华祖林, 汪靛 (2134)
HSPF 径流模拟参数敏感性分析与模型适用性研究	李燕, 李兆富, 席庆 (2139)
基于非点源污染的水质监测方案研究	吴喜军, 李怀恩, 李家科, 李强坤, 董雯 (2146)
不同雨强下黄棕壤坡耕地径流养分输出机制研究	陈玲, 刘德富, 宋林旭, 崔玉洁, 张革 (2151)
春季东海赤潮发生前后营养盐及溶解氧的平面分布特征	李鸿妹, 石晓勇, 陈鹏, 张传松 (2159)
三峡库区大宁河枯水期藻细胞的时空分布	张永生, 郑丙辉, 王坤, 姜霞, 郑浩 (2166)
湖泊沉积物溶解性有机氮组分的藻类可利用性	冯伟莹, 张生, 焦立新, 王圣瑞, 李畅游, 崔凤丽, 付绪金, 甄志磊 (2176)
刚毛藻分解对上覆水磷含量及赋存形态的影响	侯金枝, 魏权, 高丽, 孙卫明 (2184)
反复扰动下磷在沉积物和悬浮物以及上覆水间的交换	李大鹏, 王晶, 黄勇 (2191)
三峡库区主要支流表层沉积物多溴联苯醚的分布特征	李昆, 赵高峰, 周怀东, 刘晓茹, 余丽琴, 文武, 张盼伟 (2198)
UV 和 H ₂ O ₂ 联合消毒灭活饮用水中大肠杆菌研究	张一清, 周玲玲, 张永吉 (2205)
臭氧降解水中邻苯二甲酸二甲酯的动力学及影响因素	于丽, 张培龙, 侯甲才, 庞立飞, 李越, 贾寿华 (2210)
硝酸根对水体中甲基汞光化学降解的影响	毛雯, 孙荣国, 王定勇, 马明, 张成 (2218)
快雌醇氯化反应的动力学和机制研究	王斌楠, 刘国强, 孔德洋, 陆勇鹤 (2225)
金属离子对 δ-MnO ₂ 去除对叔辛基酚抑制作用的研究	李非里, 牟华倩 (2232)
核-壳表面磁性印迹聚合物的制备及其对水中双酚 A 的特异性去除	刘建明, 李红, 熊振湖 (2240)
有机蒙脱石负载纳米铁去除溶液中四溴双酚 A 的研究	闫梦玥, 庞志华, 李小明, 退建宇, 罗隽 (2249)
纳滤预处理测定景观水体中溶解性有机氮质量浓度及其分布特征	于红蕾, 霍守亮, 杨周生, 席北斗, 咎逢宇, 张靖天 (2256)
改性水凝胶的制备及其对 Pb ²⁺ 、Cd ²⁺ 吸附性能研究	吴宁梅, 李正魁 (2263)
直接大红 4BE 的磷钨酸均相光催化还原脱色	魏红, 李克斌, 李娟, 陈经涛, 张涛 (2271)
基于微气泡曝气的生物膜反应器处理废水研究	张磊, 刘平, 马锦, 张静, 张明, 吴根 (2277)
Fenton 法处理竹制品废水生化出水出水的研究	郭庆稳, 张敏, 王炜, 杨治中, 吴东雷 (2283)
二价铁离子对 UASB 反应器厌氧发酵产氢效能的影响	李永峰, 王艺璇, 程国玲, 刘春妍 (2290)
进水底物浓度对蔗糖废水产酸合成 PHA 影响研究	陈志强, 邓毅, 黄龙, 温沁雪, 郭子瑞 (2295)
接种好氧颗粒污泥快速启动硝化工艺的过程研究	刘文如, 沈耀良, 丁玲玲, 丁敏 (2302)
聚磷污泥去除高浓度铅的影响因素研究	杨敏, 卢龙, 冯涌, 方超, 李雄清 (2309)
体积溶氧传递系数在好氧颗粒污泥系统中的变化特性初步分析	李志华, 范长青, 王晓昌 (2314)
我国淡水水体中双酚 A (BPA) 的生态风险评价	汪浩, 冯承莲, 郭广慧, 张瑞卿, 刘跃丹, 吴丰昌 (2319)
麦穗鱼物种敏感性评价	王晓南, 刘征涛, 闫振广, 张聪, 何丽, 孟双双 (2329)
不同评估方法得出的五氯酚的 PNEC 值的比较研究	雷炳莉, 文育, 王艺陪, 康佳, 刘倩 (2335)
桂林市交警头发 Hg、Pb 含量及分布研究	钱建平, 张力, 李成超, 黄栋 (2344)
直流电场处理后降线藻趋光性对 Cu ²⁺ 和 Hg ²⁺ 的响应	王飞祥, 袁玲, 黄建国 (2350)
UV-B 辐射对青冈凋落叶化学组成和分解的影响	宋新章, 卜涛, 张水奎, 江洪, 王志坤, 赵明水, 刘永军 (2355)
7 种树木的叶片微形态与空气悬浮颗粒吸附及重金属累积特征	刘玲, 方炎明, 王顺昌, 谢影, 杨聘聘 (2361)
溶解氧对碳氮硫共脱除工艺中微生物群落影响解析	于皓, 陈川, 张莉, 王爱杰 (2368)
不同耕地利用方式下土壤微生物活性及群落结构特性分析: 基于 PLFA 和 MicroResp TM 方法	陈晓娟, 吴小红, 刘守龙, 袁红朝, 李苗苗, 朱捍华, 葛体达, 童成立, 吴金水 (2375)
典型滨海湿地干湿交替过程氮素动态的模拟研究	韩建刚, 曹雪 (2383)
三峡库区巫山建坪地区土壤镉等重金属分布特征及来源研究	刘意章, 肖唐付, 宁增平, 贾彦龙, 黎华军, 杨菲, 姜涛, 孙昊 (2390)
北京市不同区位耕作土壤中重金属总量与形态分布特征	陈志凡, 赵焯, 郭廷忠, 王永峰, 田青 (2399)
季节变化对贵阳市不同功能区地表灰土重金属的影响	李晓燕 (2407)
东营市孤岛地区土壤中类二噁英类 PCBs 的污染特征	王登阁, 崔兆杰, 傅晓文, 殷永泉, 许宏宇 (2416)
模拟氮沉降对森林土壤有机物淋溶的影响	段雷, 马萧萧, 余德祥, 谭炳全 (2422)
甲基 β 环糊精对污染场地土壤中多环芳烃的异位增效洗脱修复研究	孙明明, 滕应, 骆永明, 李振高, 贾仲君, 张满云 (2428)
胶质芽孢杆菌对印度芥菜根际土壤镉含量及土壤酶活性影响	杨榕, 李博文, 刘微 (2436)
长期施用粪肥蔬菜基地蔬菜中典型抗生素的污染特征	吴小莲, 向垒, 莫测辉, 姜元能, 严青云, 李彦文, 黄献培, 苏青云, 王纪阳 (2442)
有机废弃物堆肥培肥土壤的氮矿化特性研究	张旭, 席北斗, 赵越, 魏自民, 李洋, 赵昕宇 (2448)
北京市生活垃圾转运站耗能和排污特征及其影响因素分析	王昭, 李振山, 冯亚斌, 焦安英, 薛安 (2456)
氨对垃圾焚烧灰渣浸出特性的影响及地球化学模拟	官贞珍, 陈德珍, Thomas Astrup (2464)
焚烧飞灰预处理工艺及其无机氯盐的行为研究	朱芬芬, 高冈昌辉, 大下和傲, 姜惠民, 北岛義典 (2473)
富含中孔与酸性基团的生物炭的制备与吸附性能	李坤彬, 李辉, 郑正, 张雨轩 (2479)
生物炭技术缓解我国温室效应潜力初步评估	姜志翔, 郑浩, 李锋民, 王震宇 (2486)
基于物质流分析的钾素流动与循环研究	白桦, 曾思育, 董欣, 陈吉宁 (2493)
《环境科学》征订启事 (2115) 《环境科学》征稿简则 (2224) 信息 (2217, 2289, 2349, 2398) 专辑征稿通知 (2478)	

三峡库区主要支流表层沉积物多溴联苯醚的分布特征

李昆, 赵高峰*, 周怀东, 刘晓茹, 余丽琴, 文武, 张盼伟

(中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘要: 采用 GC-MS(NCI) 技术对三峡库区 28 个表层沉积物样品中的多溴联苯醚(PBDEs) 进行分析, 研究了其在三峡库区主要支流的污染现状与分布特征. 实验发现三峡库区 $\sum_{26}$ PBDEs 和 BDE209 在沉积物中的检出含量分别为 $35.24 \text{ pg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $11.92 \text{ pg} \cdot \text{g}^{-1}$, 其中 BDE28, 47, 77 和 99 为 $\sum_{26}$ PBDEs 中最具支配地位的同族体. $\sum_{26}$ PBDEs 和 BDE209 的最高检出含量在龙河河口采样点, 分别为 $146.07 \text{ pg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $502.63 \text{ pg} \cdot \text{g}^{-1}$. $\sum_{26}$ PBDEs 和 BDE209 含量具有良好相关性, 说明两者污染来源相同. 实验结果与国内外水体沉积物中含量相比较, 显示 $\sum_{26}$ PBDEs 和 BDE209 在三峡库区沉积物中含量处于较低污染水平, 引起的潜在风险也相对较低.

关键词: 三峡库区; 沉积物; 多溴联苯醚; 分布特征

中图分类号: X131.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)06-2198-07

Distribution Characteristics of PBDEs in Surface Sediment from the Three Gorges Reservoir of Yangtze River

LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, LIU Xiao-ru, YU Li-qin, WEN Wu, ZHANG Pan-wei

(China Institute of Water Resources and Hydro-power Research, Beijing 100038, China)

Abstract: A total of 28 surface sediment samples (at the top 0-5 cm layer) were collected from the Three Gorges Reservoir of Yangtze River. The content of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in sediments was measured with Varian GC-MS (NCI). The results showed that $\sum_{26}$ PBDEs and BDE209 both had a low concentration in sediments, with a mass concentration of $35.24 \text{ pg} \cdot \text{g}^{-1}$ and $11.92 \text{ pg} \cdot \text{g}^{-1}$, respectively. Among the 26 PBDEs, BDE28, 47, 77 and 99 were the most predominant $\sum_{26}$ PBDEs congeners. The highest concentrations of $\sum_{26}$ PBDEs and BDE209 were detected in the sediment samples collected from Long River, with geometric mean of 146.07 and $502.63 \text{ pg} \cdot \text{g}^{-1}$, respectively. A significant correlation was found between $\sum_{26}$ PBDEs and BDE209, indicating that they might have the same pollution source. The concentrations of $\sum_{26}$ PBDEs and BDE209 in the sediment were in the same order of magnitude with those reported on background levels in sediments of remote lakes in other countries, which shows the toxic biological effects on aquatic biota and potential risk due to $\sum_{26}$ PBDEs and BDE209 contamination in sediments are negligible.

Key words: Three Gorges Reservoir; sediment; polybrominated diphenyl ethers (PBDEs); distribution characteristics

多溴联苯醚(PBDEs)是一种添加型溴代阻燃剂(BFRs),被广泛用于电子电器、化工、纺织品、家具和建筑材料中. 由于缺乏化学键的束缚, PBDEs 很容易通过挥发、渗出等方式进入环境,并随着大气、水体的迁移造成大气、水体、沉积物、土壤及生物圈的污染^[1]. PBDEs 已经在各种环境介质(如大气、沉积物、土壤、室内空气)、动植物和人体中检出^[2~7],并在环境及人体中的含量呈现逐年增加的趋势^[8].

PBDEs 通过各种途径进入水体后主要储存于沉积物中^[9],同时在水生生物圈中发生生物积累与放大作用,将给人类带来潜在风险. 随着三峡工程蓄水按 175 m 方案运行后,上游河流的天然冲淤平衡将被打破,特别是对重庆主城区河段有较大影响,

有可能使沉积物中的污染物重新释放到水体中,从而污染水环境^[10]. 由于三峡库区沉积物采样困难、人员经费投入大等原因,目前尚没有研究报道 PBDEs 在整个三峡库区沉积物中的分布特征,因此有必要开展针对三峡库区表层沉积物 PBDEs 污染现状的调查工作. 本实验对三峡库区表层沉积物中 27 种 PBDEs 含量进行了调查,以期为库区的 PBDEs 污染现状提供重要基础数据.

收稿日期: 2012-09-26; 修订日期: 2012-10-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(21247007); 中国水利水电科学研究院专项(环集 1339); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07203-006)

作者简介: 李昆(1987~),男,硕士研究生,主要研究方向为环境化学, E-mail: likun_1987@126.com

* 通讯联系人, E-mail: zhgaofeng@yahoo.com.cn

1 材料与方法

1.1 实验材料与仪器

有机溶剂正己烷、二氯甲烷和丙酮等均为农残级 (J. T. Baker, Phillipburg, USA); 优级纯浓硫酸 (BDHL, England); 无水硫酸钠 (分析纯, 用二氯甲烷淋洗, 然后置于 400℃ 的马弗炉中烘烤 6 h, 干燥器中密闭保存、备用); 超纯水 (经 MILLIQ 系统纯化, 电阻率为 18.2 MΩ·cm); 硅胶 (Merck, Darmstadt, Germany); 酸化硅胶 (质量分数 44% 硫酸), 去活硅胶 (质量分数 3.3% H₂O)。

冷冻干燥仪 (Alpha 2-4, CHRIST 公司)、烘箱 (Thermo Scientific Heraeus oven, Thermo 公司)、加速溶剂萃取仪 (ASE300, Dionex 公司), 配备 34 mL 的萃取池。

1.2 样品采集与处理

样品采集于 2010 年 11 月, 采样点如图 1 所示。本研究沿途经重庆至宜昌段约 700 km 的长江江段, 包括乌江、壤渡河、汝溪河、黄金河、龙河、小江河、汤溪河、磨刀溪、长滩河、梅溪河、草塘河、大溪河、大宁河、神农溪、泄滩河、青干河、叱溪河、童庄河、香溪河、龙马溪、九畹溪等 21

条支流以及官渡口、茅坪等 2 个干流断面, 途经重庆市涪陵区、丰都县、忠县、万州区、云阳县、奉节县、巫山县、巴东县等八个区县, 宜昌市秭归县、宜昌县等二个区县。本实验共采集 28 个表层沉积物样品, 采用 GC (NCI)-MS 分析沉积物样品中 27 种 PBDEs。

支流采样点为各支流河口 (距离干流 3 km) 位置, 左中右为采样断面的不同采样垂线。本实验在采用回声探测仪测量水深后, 使用铅鱼采样器采集表层沉积物约 0.5 kg, 经冷冻干燥、研磨、过 100 目筛备用。称取 10.00 g 土样和 4.00 g 硅藻土, 加入替代内标搅拌均匀后加入到萃取池中。ASE 的萃取条件为 100℃, 约 100 bar, 加热 5 min, 静态萃取 7 min, 清洗溶液体积 60%, 循环 2 次, 溶剂 A 为二氯甲烷用量 50%, 溶剂 B 为正己烷用量 50%。旋转浓缩 ASE 萃取液至 1~2 mL。浓缩液经混合硅胶柱 (由下至上依次填充 2 g 无水硫酸钠、1 g 去活硅胶、15 g 酸化硅胶、2 g 去活硅胶、2 g 无水硫酸钠、2 g 铜粉) 纯化, 分别使用 60 mL 正己烷和 60 mL 正己烷: 二氯甲烷为 9:1 (体积比) 的溶液进行洗脱, 收集洗脱液。洗脱液经旋转浓缩、氮吹后, 用正己烷定容至 100 μL, 待测。

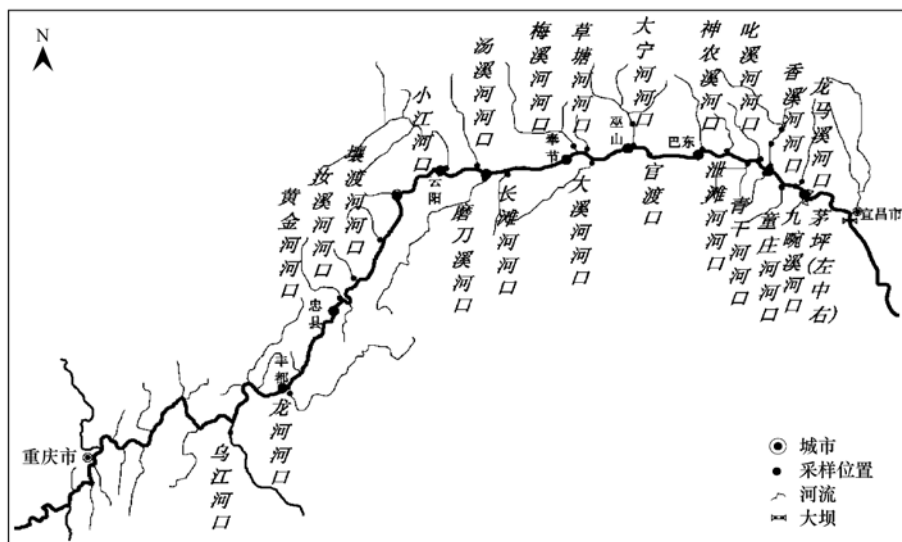


图 1 长江中游重庆至宜昌段采样位置示意

Fig. 1 Sampling sites in the middle reaches of Yangtze River from Chongqing to Yichang

1.3 仪器分析

气相色谱-三重四极杆质谱联用仪 Varian CP3800/300, 配备 15 m VF-5-MS (5% phenyl/95% methyl silicone, 0.25 mm i. d., 0.1 μm film, Varian, USA) 色谱柱。采用无分流进样方式, 载气为高纯 He, 恒流 1.5 mL·min⁻¹, 进样量 1 μL。离子源和传

输杆的温度分别为 230℃ 和 250℃; 采用负化学离子源 (NCI) 模式分析, 以 ⁷⁹Br 和 ⁸¹Br 为定量检测离子, BDE209 的定量离子为 *m/z* 484.6 和 *m/z* 488.6。GC 程序升温为 90℃ 保留 1 min, 以 4℃·min⁻¹ 的速率升至 250℃, 然后以 25℃·min⁻¹ 的速率从 250℃ 升至 290℃ 停留 15 min, 电子倍增器的电压设置为

1 450 V.

1.4 质量保证与控制

玻璃器皿依次用丙酮、洗涤剂、重铬酸钾洗液、自来水和去离子水漂洗,再用烘箱烘干. 每 10 个样品添加一个溶剂空白和程序空白,避免背景污染. 回收率指示物 TMX 和 PCB209 的回收率分别为 70.4% ~ 92.5% 和 81.6% ~ 107.4%. 27 种 PBDEs 混标购自 Wellington 公司, PBDEs 定量标准曲线的含量为 0.5、1.0、5.0、10.0、50.0、和 100.0 $\text{pg}\cdot\text{g}^{-1}$; 线性复相关系数 $r^2 > 0.99$. 样品的最低检测限 (LOD) 以 3 倍信噪比 (S/N) 来计算.

1.5 统计分析

样品中 $\sum_{26} \text{PBDEs}$ ($\sum_{26} \text{PBDEs}$ 为除 BDE209 外的其他 26 种 PBDEs 含量之和) 和

BDE209 的含量低于 LOD 时用 1/2 LOD 进行统计, 各沉积物样品中 PBDEs 的含量根据指示物的回收率进行校正. 统计分析软件为 SPSS (版本 17.0, SPSS Inc., Chicago, IL, USA), 使用几何均值、数值范围等统计指标用来描述污染物的含量, 用 Pearson 检验各指标间的相关性.

2 结果与分析

对三峡库区 28 个表层沉积物 PBDEs 数据进行统计分析发现 (数据如表 1), 研究区域表层沉积物中 BDE28 ($2.40 \text{ pg}\cdot\text{g}^{-1}$)、BDE 47 ($2.91 \text{ pg}\cdot\text{g}^{-1}$)、BDE 77 ($3.49 \text{ pg}\cdot\text{g}^{-1}$) 和 BDE 99 ($3.82 \text{ pg}\cdot\text{g}^{-1}$) 含量较高且检出率 $> 80\%$, 是最具支配地位的 PBDEs 同族体, BDE209 在 11 个样品中被检出, 几何均值为 $11.92 \text{ pg}\cdot\text{g}^{-1}$.

表 1 表层沉积物中 PBDEs 含量的统计结果¹⁾/ $\text{pg}\cdot\text{g}^{-1}$

Table 1 Statistical results of PBDEs in the surface sediments/ $\text{pg}\cdot\text{g}^{-1}$

污染物	表层沉积物 ($n=28$)				
	极小值	极大值	中位数	几何均值	检出率/%
BDE3	ND	ND	ND	ND	0
BDE7	ND	ND	ND	ND	0
BDE15	ND	8.55	ND	ND	7
BDE17	ND	4.49	0.82	0.18	64
BDE28	ND	12.36	4.74	2.40	93
BDE49	ND	32.53	ND	0.05	39
BDE71	ND	30.36	ND	0.06	39
BDE47	ND	12.83	4.71	2.91	93
BDE66	ND	8.02	2.08	0.53	64
BDE77	ND	20.10	5.53	3.49	93
BDE100	ND	8.50	2.35	1.13	86
BDE119	ND	16.98	3.30	1.63	86
BDE99	ND	38.66	8.64	3.82	86
BDE85	ND	3.85	ND	0.05	14
BDE126	ND	12.25	1.66	0.44	61
BDE154	ND	3.91	ND	0.03	21
BDE153	ND	39.63	5.79	1.00	68
BDE138	NA	NA	NA	NA	0
BDE156	NA	NA	NA	NA	0
BDE184	NA	NA	NA	NA	0
BDE183	ND	0.97	ND	0.02	4
BDE191	NA	NA	NA	NA	0
BDE197	NA	NA	NA	NA	0
BDE196	NA	NA	NA	NA	0
BDE207	NA	NA	NA	NA	0
BDE206	ND	4.36	ND	0.58	4
$\sum_{26} \text{PBDEs}$	ND	146.07	46.10	35.24	96
BDE209	ND	502.63	ND	11.92	39

1) ND: 未检出; 在统计分析时使用 1/2 LOD 代替; NA: 未统计

分析三峡库区 PBDEs 类污染物含量发现, 研究区域 PBDEs 类污染物以十溴联苯醚 (BDE209, 占

PBDEs 的 32.1%) 为主, 其次是四溴、五溴和三溴联苯醚类污染物, 各污染物含量占三峡库区 PBDEs

的质量分数分别为 26.4%、25.0% 和 8.2% (图 2)。
 $\sum_{26}$ PBDEs 与 BDE209 的含量相关性分析结果显示三峡库区各采样点沉积物样品中两者具有显著性相关关系($r=0.47$, $P<0.05$)。

三峡库区各采样点 $\sum_{26}$ PBDEs 和 BDE209 含量如图 3 所示,龙河河口表层沉积物中 $\sum_{26}$ PBDEs 和 BDE209 含量最高,分别为 $146.07\text{ pg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $502.63\text{ pg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。研究区域各采样点间 PBDEs 含量变化范围较大: $\sum_{26}$ PBDEs 含量范围为 ND ~ $146.07\text{ pg}\cdot\text{g}^{-1}$, BDE209 含量范围为 ND ~ $502.63\text{ pg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

3 讨论

3.1 沉积物中 PBDEs 优势污染物分析

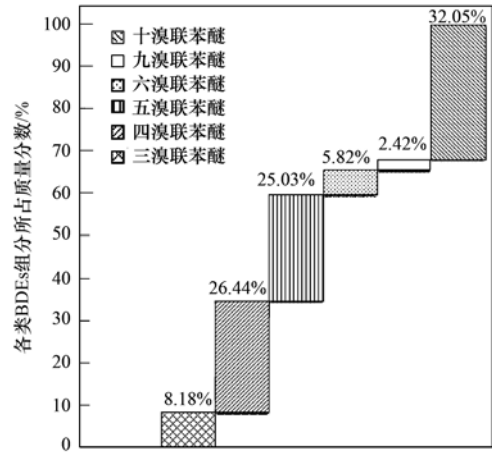


图 2 采样区域 PBDEs 各同系物所占质量分数分布
Fig. 2 Concentrations in different homologues of PBDEs in surface sediment samples collected from middle reaches of Yangtze River

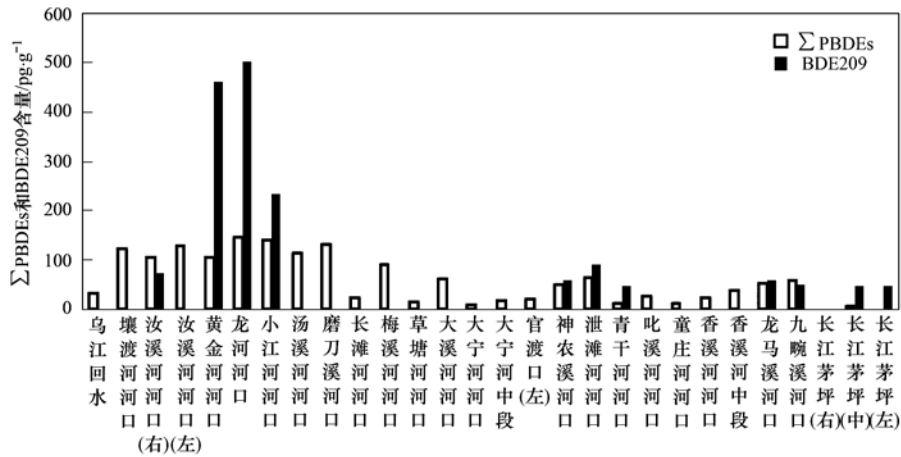


图 3 各采样点表层沉积物中 $\sum$ PBDEs 和 BDE209 含量分布
Fig. 3 Total concentrations of $\sum_{26}$ PBDEs and BDE209 in surface sediment samples collected from middle reaches of Yangtze River

PBDEs 在三峡库区各采样点表层沉积物中均有不同程度检出,表明通过大气沉降、地表径流携带等途径,该类污染物已从污染源中释放出来并进入了三峡库区。分析研究结果发现该区域 PBDEs 以 BDE28, 47, 77, 99 和 209 为优势污染物。
据统计,1990 年全球商业 PBDEs 产量为 40 000 t,其中用于各种纺织品和电路板聚酯中(电视、电脑等电子产品)的十溴联苯醚类商用混合物、用于聚碳酸酯和热固塑料中的八溴联苯醚类商用混合物以及主要用于环氧树脂、酚类树脂、聚酯和纤维中五溴联苯醚类商用混合物^[11]的产量分别为 30 000、6 000 和 4 000 t,到 2001 年全球 PBDEs 的需求量已增加到 67 000 t^[12]。检测分析商业五溴联苯醚类混合物发现,混合物中 BDE47 和 BDE99 单体所占比例较高^[13]。该现象与三峡库区表层沉积物

中优势污染物结果相一致,说明了该区域的 BDE47 和 99 有可能来自于商业五溴联苯醚类混合物。BDE28(几何均值为 $2.40\text{ pg}\cdot\text{g}^{-1}$,检出率为 93%)同是三峡库区表层沉积物中的优势污染物,这与垃圾拆解区土壤以及白洋淀底泥等地^[9,14]的研究结果相一致。已有研究表明 BDE28 为 BDE47 在表面活性剂中最主要的降解产物^[15],这也就说明了 BDE28 可由高溴代联苯醚降解而来。因此商业混合物本身含有一定数量,加上高溴代同族体降解以及大气沉降是导致三峡库区沉积物中 BDE28 含量较高的可能原因。本研究中 BDE77 含量几何均值与 BDE99 相当,与南非林波波河中 BDE77 含量相对较高的现象相一致^[16]。有报道指出^[17,18],BDE153 和 BDE183 在持续光照作用下会降解生成 BDE77,此外在暴露于高浓度 BDE209 的斑马鱼血液中也检测到了

BDE77 的存在^[19]. 这些研究证明, BDE77 可由高溴代 PBDEs 通过物理化学和生物化学过程产生, 而本实验中较高含量的 BDE77 可能是高溴代 PBDEs 的降解产物.

BDE209 是十溴联苯醚商业混合物的指示性化合物, 其半衰期一般只有几天, 可通过紫外辐射、强太阳光照射以及水环境中生物活动等 3 种方式降解^[20]. 通过对三峡库区各采样点 $\sum_{26}$ PBDE 与 BDE209 含量进行相关性分析发现, 两者存在显著性相关关系 ($r = 0.47$, $P < 0.05$), 因此可推知两者来源可能相同. 在所采集的三峡库区表层沉积物样品中检出 BDE209 占 PBDEs 总量 30% 以上, 说明该区域持续有 BDE209 输入. BDE209 的持续生产和使用, 以及其从聚苯乙烯、ABS、聚乙烯等热塑性塑料电子垃圾的释放, 可能是造成 BDE209 在三峡库区表层沉积物样品中含量较高的主要原因.

综上所述, 三峡库区中 $\sum_{26}$ PBDEs 和 BDE209 类污染物污染来源主要为大量使用在工业中的多溴联苯醚类商业混合物.

3.2 污染物的区域分布分析

研究数据显示 $\sum_{26}$ PBDEs 和 BDE209 在龙河口沉积物样品中含量最高, 分别为 $146.07 \text{ pg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $502.63 \text{ pg} \cdot \text{g}^{-1}$. 自 2002 年三峡二期移

民搬迁结束, 丰都县开展“兴工强县”后工业经济持续快速增长, 多溴联苯醚类商业混合物使用量也随之骤增, 这正是该地区表层沉积物中 $\sum_{26}$ PBDEs 与 BDE209 含量较高的原因. 其他可能污染源主要是城市、医院、垃圾焚烧、垃圾填埋以及意外火灾等^[21], 由于丰都县垃圾填埋场(该场位于名山镇大梨树村岩风洞, 建设规模为日处理垃圾 204 t 及垃圾收运系统)已在 2003 年 6 月 20 日投入运行, 因此垃圾填埋场也可能是 PBDE 污染来源之一. 实地考察龙河支流后发现, 丰都县主要人口聚集地恰位于龙河河口采样处, 故人类日常生活所使用含有 PBDEs 的产品也可能为龙河 PBDEs 污染来源. 综上所述, 工业中多溴联苯醚的使用, 垃圾填埋场的运行以及当地居民的日常生活是龙河河口 PBDEs 的主要污染来源.

4 国内外研究对比

目前国际上还没有关于 PBDEs 的沉积物质量标准限值, 为了更好地了解当地沉积物的 PBDEs 污染现状, 将本研究结果与国内外最近的报道值作比较(见表 2), 发现三峡库区表层沉积物中 $\sum_{26}$ PBDEs 和 BDE209 的污染水平较低. 表明三峡库区表层沉积物低含量的 $\sum_{26}$ PBDEs 与 BDE209 对环境的潜在危害较小.

表 2 表层沉积物中 PBDEs 和 BDE209 的国内外对比/ $\text{pg} \cdot \text{g}^{-1}$

Table 2 Levels of PBDEs and BDE209 among sediments in various locations in other countries/ $\text{pg} \cdot \text{g}^{-1}$

国家	位置	采集时间(年)	$\sum$ PBDEs	BDE209	文献
中国	三峡库区	2010	0 ~ 146.07(35.24)	0 ~ 502.63(11.92)	本研究
美国 ¹⁾	伊利湖	2003	1 100		[22]
美国 ¹⁾	密歇根湖	2004	2 600		
荷兰 ²⁾	斯凯尔特河	—	420		[23]
西班牙 ³⁾	埃布罗河	2003	10 ~ 10 600		[24]
南非 ⁴⁾	林波波河	2010	920 ~ 6 760		[16]
日本 ⁵⁾	东京湾	2002	51 ~ 3 600	890 ~ 85 000	[25]
韩国 ⁶⁾	马山湾	2004	90 ~ 1 260 (490)	3 310 ~ 23 700 (10 210)	[26]
意大利 ⁷⁾	马加河	2005	200 ~ 3 300 (1 300)	1 600 ~ 15 300 (7 700)	[27]
中国 ⁸⁾	青岛近海	1997	117 ~ 5 510		[28]
美国 ⁹⁾	苏必利尔湖	2001 ~ 2002	490 ~ 3140		[29]
美国 ⁹⁾	休伦湖	2002	1 020 ~ 1 870		[30]
西班牙 ¹⁰⁾	海岸	2002	2 700 ~ 13 4000		[31]
挪威 ¹¹⁾	奥勒松湖	2006	56 ~ 600(250)		[32]

1) BDE17, 28, 47, 49, 66, 71, 85, 99, 100, 138, 153, 164, 183, 190, 206, 207 和 208; 2) Hexabromobiphenyl; tetrabromodiphenyl ether; 3) BDE1, 2, 3, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 15, 17, 25, 28, 30, 32, 33, 35, 37, 47, 49, 66, 71, 75, 77, 85, 99, 100, 105, 116, 119, 126, 138, 140, 153, 154, 155, 166, 181, 183 和 190; 4) BDE3, 15, 17, 28, 47, 77, 85, 99, 126, 154 和 209; 5) BDE3, 15, 28, 47, 99, 153, 154, 183, 197, 207 和 209; 6) BDE28, 47, 49, 66, 77, 85, 99, 100, 138, 153, 154, 183 和 209; 7) BDE28, 47, 99, 100, 153, 154, 183, 209, 17, 66, 71, 85 和 190; 8) BDE17, 28, 32, 35, 37, 47, 49, 66, 71, 75, 77, 85, 99, 100, 120, 138, 153, 154, 166, 181 和 190; 9) PBDE28, 47, 66, 85, 99, 100, 153, 154 和 183; 10) BDE28, 33, 47, 66, 77, 100, 99, 118, 154, 153, 183 和 209; 11) BDE3, 7, 15, 17, 28, 47, 49, 66, 71, 85, 100, 119, 138 和 154

5 结论

三峡库区表层沉积物中 PBDEs 主要来自工业生产中所使用的各类化合物, 且以低溴代联苯醚(三溴、四溴和五溴联苯醚)及十溴联苯醚为主。通过与国内外相关研究数据对比发现, 三峡库区表层沉积物中 PBDEs 的含量处于低污染水平, 呈现出较低的生态毒性风险。对 $\sum_{26}$ PBDEs 及 BDE209 的区域分布分析表明, 商业用多溴联苯醚混合物是其主要污染源之一。

参考文献:

- [1] Lee R G M, Thomas G O, Jones K C. PBDEs in the atmosphere of three locations in western Europe[J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, **38**(3): 699-706.
- [2] Rudel R A, Camann D E, Spengler J D, *et al.* Phthalates, alkylphenols, pesticides, polybrominated diphenyl ethers, and other endocrine-disrupting compounds in indoor air and dust[J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, **37**(20): 4543-4553.
- [3] Ohta S, Ishizuka D, Nishimura H, *et al.* Comparison of polybrominated diphenyl ethers in fish, vegetables, and meats and levels in human milk of nursing women in Japan [J]. *Chemosphere*, 2002, **46**(5): 689-696.
- [4] Hites R A. Polybrominated diphenyl ethers in the environment and in people: a meta-analysis of concentrations [J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, **38**(4): 945-956.
- [5] Schecter A, Pavuk M, P  pke O, *et al.* Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in US mothers' milk[J]. *Environmental Health Perspectives*, 2003, **111**(14): 1723-1729.
- [6] Strandberg B, Dodder N G, Basu I, *et al.* Concentrations and spatial variations of polybrominated diphenyl ethers and other organohalogen compounds in Great Lakes air[J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, **35**(6): 1078-1083.
- [7] Wilford B H, Shoeib M, Harner T, *et al.* Polybrominated diphenyl ethers in indoor dust in Ottawa, Canada: implications for sources and exposure [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(18): 7027-7035.
- [8] 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.
- [9] 赵高峰, 周怀东, 付玉芹, 等. 白洋淀表层沉积物中的多卤代芳烃及其潜在风险[J]. *中国工程科学*, 2010, **12**(6): 41-47.
- [10] 陆永军, 左利钦, 季荣耀, 等. 水沙调节后三峡工程变动回水区泥沙冲淤变化[J]. *水科学进展*, 2009, **20**(3): 318-324.
- [11] De Wit C A. An overview of brominated flame retardants in the environment[J]. *Chemosphere*, 2002, **46**(5): 583-624.
- [12] 罗孝俊, 麦碧娴, 陈社军. PBDEs 研究的最新进展[J]. *化学进展*, 2009, **21**(2): 359-368.
- [13] World Health Organization (WHO). Environmental health criteria 162. Brominated diphenylethers. International Program on Chemical Safety, WHO, Geneva, Switzerland, 1994 [EB/OL]. <http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc192.htm>
- [14] Zhao G F, Wang Z J, Dong M H, *et al.* PBBs, PBDEs, and PCBs levels in hair of residents around e-waste disassembly sites in Zhejiang Province, China, and their potential sources [J]. *Science of the Total Environment*, 2008, **397**(1-3): 46-57.
- [15] Li X, Huang J, Fang L, *et al.* Photodegradation of 2,2',4,4'-tetrabromodiphenyl ether in nonionic surfactant solutions [J]. *Chemosphere*, 2008, **73**(10): 1594-1601.
- [16] Olukunle O, Okonkwo J, Kefeni K, *et al.* Concentrations of polybrominated diphenyl ethers in sediments from Jukskei River, Gauteng, South Africa [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2012, **88**(3): 461-466.
- [17] Rayne S, Wan P, Ikononou M. Photochemistry of a major commercial polybrominated diphenyl ether flame retardant congener: 2, 2', 4, 4', 5, 5'-Hexabromodiphenyl ether (BDE153) [J]. *Environment International*, 2006, **32**(5): 575-585.
- [18] Fang L, Huang J, Yu G, *et al.* Photochemical degradation of six polybrominated diphenyl ether congeners under ultraviolet irradiation in hexane [J]. *Chemosphere*, 2008, **71**(2): 258-267.
- [19] Feng C L, Xu Y P, He Y, *et al.* Debrominated and methoxylated polybrominated diphenyl ether metabolites in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) after exposure to decabromodiphenyl ether [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, **22**(9): 1425-1434.
- [20] Hagmar L, Hallberg T, Leja M, *et al.* High consumption of fatty fish from the Baltic Sea is associated with changes in human lymphocyte subset levels [J]. *Toxicology Letters*, 1995, **77**(1-3): 335-342.
- [21] 赵高峰, 王子健. 电子垃圾拆解地表层土壤中的多卤代芳烃及其潜在污染源 [J]. *环境科学*, 2009, **30**(6): 280-284.
- [22] Zhu L Y, Hites R A. Brominated flame retardants in sediment cores from Lakes Michigan and Erie [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(10): 3488-3494.
- [23] De Boer J, De Boer K, Boon J P. Chapter 4-Polybrominated biphenyls and diphenylethers. The handbook of environmental chemistry Vol. 3 Part K New types of persistent halogenated compounds [M]. Heidelberg: Springer-Verlag, 2000.
- [24] Lacorte S, Rald  a D, Mart  nez E, *et al.* Pilot survey of a broad range of priority pollutants in sediment and fish from the Ebro river basin (NE Spain) [J]. *Environmental Pollution*, 2006, **140**(3): 471-482.
- [25] Minh N H, Isobe T, Ueno D, *et al.* Spatial distribution and vertical profile of polybrominated diphenyl ethers and hexabromocyclododecanes in sediment core from Tokyo Bay, Japan [J]. *Environmental Pollution*, 2007, **148**(2): 409-417.

- [26] Hong S H, Munschy C, Kannan N, *et al.* PCDD/F, PBDE, and nonylphenol contamination in a semi-enclosed bay (Masan Bay, South Korea) and a Mediterranean lagoon (Thau, France) [J]. *Chemosphere*, 2009, **77**(6): 854-862.
- [27] Guzzella L, Roscioli C, Binelli A. Contamination by polybrominated diphenyl ethers of sediments from the Lake Maggiore basin (Italy and Switzerland) [J]. *Chemosphere*, 2008, **73**(10): 1684-1691.
- [28] Pan J, Yang Y L, Xu Q, *et al.* PCBs, PCNs and PBDEs in sediments and mussels from Qingdao coastal sea in the frame of current circulations and influence of sewage sludge [J]. *Chemosphere*, 2007, **66**(10): 1971-1982.
- [29] Song W L, Ford J C, Li A, *et al.* Polybrominated diphenyl ethers in the sediments of the Great Lakes. 1. Lake Superior [J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, **38**(12): 3286-3293.
- [30] Song W L, Li A, Ford J C, *et al.* Polybrominated diphenyl ethers in the sediments of the Great Lakes. 2. Lakes Michigan and Huron [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(10): 3474-3479.
- [31] Eljarrat E, De La Cal A, Larrazabal D, *et al.* Occurrence of polybrominated diphenylethers, polychlorinated dibenzo-p-dioxins, dibenzofurans and biphenyls in coastal sediments from Spain [J]. *Environmental Pollution*, 2005, **136**(3): 493-501.
- [32] Jiao L P, Zheng G J, Minh T B, *et al.* Persistent toxic substances in remote lake and coastal sediments from Svalbard, Norwegian Arctic: Levels, sources and fluxes [J]. *Environmental Pollution*, 2009, **157**(4): 1342-1351.

CONTENTS

Concentrations and Ozone Formation Potentials of BTEX During 2008-2010 in Urban Beijing, China	CAO Han-yu, PAN Yue-peng, WANG Hui, <i>et al.</i> (2065)
Aging and Mixing State of Particulate Matter During Aerosol Pollution Episode in Autumn Shanghai Using a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer (SPAMS)	MU Ying-ying, LOU Sheng-rong, CHEN Chang-hong, <i>et al.</i> (2071)
Chemical Characteristics and Source Assessment of Rainwater at Shenyang	ZHANG Lin-jing, ZHANG Xiu-ying, JIANG Hong, <i>et al.</i> (2081)
Variation of Atmospheric Pollutants in Qinhuangdao City	LIU Lu-ning, SHEN Yu-xuan, XIN Jin-yuan, <i>et al.</i> (2089)
NH ₃ , N ₂ O, CH ₄ and CO ₂ Emissions from Growing Process of Caged Broilers	ZHOU Zhong-kai, ZHU Zhi-ping, DONG Hong-min, <i>et al.</i> (2098)
Synergetic Effects of Silicon Carbide and Molecular Sieve Loaded Catalyst on Microwave Assisted Catalytic Oxidation of Toluene	WANG Xiao-hui, BO Long-li, LIU Hai-nan, <i>et al.</i> (2107)
Removal of Mixed Waste Gases by the Biotrickling Filter	ZHANG Ding-feng, FANG Jun-yi, YE Jie-xu, <i>et al.</i> (2116)
Decomposition of Carbon Disulfide by Pulse Corona Under Oxidizing and Reducing Atmosphere	JIN Sheng, HUANG Li-wei, LI Guo-ping (2121)
Effects of Simulated Elevation of Atmospheric CO ₂ Concentration on the Physiological Features of Spring Phytoplankton in Taihu Lake	ZHAO Xu-hui, TANG Long-sheng, SHI Xiao-li, <i>et al.</i> (2126)
A New Method for Estimation of the Lake Quality Reference Condition	HUA Zu-lin, WANG Liang (2134)
Parameter Sensitivity Analysis of Runoff Simulation and Model Adaptability Research Based on HSPF	LI Yan, LI Zhao-fu, XI Qing (2139)
Study on Water Quality Monitoring Scheme Based on Non-Point Source Pollution	WU Xi-jun, LI Huai-en, LI Jia-ke, <i>et al.</i> (2146)
Characteristics of Nutrient Loss by Runoff in Sloping Arable Land of Yellow-brown Under Different Rainfall Intensities	CHEN Ling, LIU De-fu, SONG Lin-xu, <i>et al.</i> (2151)
Distribution of Dissolved Inorganic Nutrients and Dissolved Oxygen in the High Frequency Area of Harmful Algal Blooms in the East China Sea in Spring	LI Hong-mei, SHI Xiao-yong, CHEN Peng, <i>et al.</i> (2159)
Temporal-Spatial Distribution of Algal Cells During Drought Period in Daning River of Three Gorges	ZHANG Yong-sheng, ZHENG Bing-hui, WANG Kun, <i>et al.</i> (2166)
Bioavailability of Dissolved Organic Nitrogen Components in the Lake Sediment to Algae	FENG Wei-ying, ZHANG Sheng, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (2176)
Influence of Decomposition of <i>Cladophora</i> sp. on Phosphorus Concentrations and Forms in the Overlying Water	HOU Jin-zhi, WEI Quan, GAO Li, <i>et al.</i> (2184)
Phosphorus Exchange Between Suspended Solids Sediments Overlying Water Under Repeated Disturbance	LI Da-peng, WANG Jing, HUANG Yong (2191)
Distribution Characteristics of PBDEs in Surface Sediment from the Three Gorges Reservoir of Yangtze River	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (2198)
Study on UV and H ₂ O ₂ Combined Inactivation of <i>E. coli</i> in Drinking Water	ZHANG Yi-qing, ZHOU Ling-ling, ZHANG Yong-ji (2205)
Kinetics and Influencing Factors of Dimethyl Phthalate Degradation in Aqueous Solution by Ozonation	YU Li, ZHANG Pei-long, HOU Jia-cai, <i>et al.</i> (2210)
Effects of Nitrate Ion on Monomethylmercury Photodegradation in Water Body	MAO Wen, SUN Rong-guo, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (2218)
Chlorination of Ethynyl Estradiol: A Kinetic and Mechanistic Study	WANG Bin-nan, LIU Guo-qiang, KONG De-yang, <i>et al.</i> (2225)
Metal Ions Restrained the Elimination of 4- <i>tert</i> -Octylphenol by δ -MnO ₂	LI Fei-li, MOU Hua-qian (2232)
Removal of Bisphenol A in Aqueous Solutions by Core-shell Magnetic Molecularly Imprinted Polymers	LIU Jian-ming, LI Hong-hong, XIONG Zhen-hu (2240)
Research on Removal of Tetrabromobisphenol A from Synthetic Wastewater by Nanoscale Zero Valent Iron Supported on Organobentonite	YAN Meng-yue, PANG Zhi-hua, LI Xiao-ming, <i>et al.</i> (2249)
Measurement of Dissolved Organic Nitrogen with Nanofiltration Pretreatment and Its Distribution Characteristics in Landscape Water	YU Hong-lei, HUO Shou-liang, YANG Zhou-sheng, <i>et al.</i> (2256)
Preparation of a Novel Modified Hydrogel and Study of Its Adsorption Performance	WU Ning-mei, LI Zheng-kui (2263)
Photocatalytic Reductive Degradation of Direct Red 4BE by Phosphotungstic Acid	WEI Hong, LI Ke-bin, LI Juan, <i>et al.</i> (2271)
Wastewater Treatment Using a Microbubble Aerated Biofilm Reactor	ZHANG Lei, LIU Ping, MA Jin, <i>et al.</i> (2277)
Research on Fenton Treatment of the Biochemical Processes Effluent of Bamboo Industry Wastewater	GUO Qing-wen, ZHANG Min, WANG Wei, <i>et al.</i> (2283)
Effect of Fe ²⁺ on Fermentation Hydrogen Production in an UASB	LI Yong-feng, WANG Yi-xuan, CHENG Guo-ling, <i>et al.</i> (2290)
Influence of Substrate Concentration on PHA Production Using Fermented Sugar Cane as Substrate	CHEN Zhi-qiang, DENG Yi, HUANG Long, <i>et al.</i> (2295)
Study on Rapid Start-up of a Nitrifying Process Using Aerobic Granular Sludge as Seed Sludge	LIU Wen-ru, SHEN Yao-liang, DING Ling-ling, <i>et al.</i> (2302)
Influencing Factors of High-Concentration Lead Removal Using the Phosphorus-Accumulating Sludge	YANG Min, LU Long, FENG Yong, <i>et al.</i> (2309)
Preliminary Study on Characteristics of Volumetric Oxygen Transfer Coefficient in Granular Sludge Systems	LI Zhi-hua, FAN Chang-qing, WANG Xiao-chang (2314)
Ecological Risk Assessment of Bisphenol A in Chinese Freshwaters	WANG Hao, FENG Cheng-lian, GUO Guang-hui, <i>et al.</i> (2319)
Species Sensitivity Evaluation of <i>Pseudorasbora parva</i>	WANG Xiao-nan, LIU Zheng-tao, YAN Zhen-guang, <i>et al.</i> (2329)
Comparison of Aquatic Predicted No-Effect Concentrations (PNECs) for Pentachlorophenol Derived from Different Assessment Approaches	LEI Bing-li, WEN Yu, WANG Yi-pei, <i>et al.</i> (2335)
Study on Hair Hg and Pb Content Distribution of Traffic Polices, Guilin	QIAN Jian-ping, ZHANG Li, LI Cheng-chao, <i>et al.</i> (2344)
Changes in Phototoxic Index of <i>Daphnia carinata</i> Under Electric Field of Direct Current in Response to Cr ⁶⁺ and Hg ²⁺	WANG Fei-xiang, YUAN Ling, HUANG Jian-guo (2350)
Effect of UV-B Radiation on the Chemical Composition and Subsequent Decomposition of <i>Cyclobalanopsis glauca</i> Leaf Litter	SONG Xin-zhang, BU Tao, ZHANG Shui-kui, <i>et al.</i> (2355)
Leaf Micro-morphology and Features in Adsorbing Air Suspended Particulate Matter and Accumulating Heavy Metals in Seven Tress Species	LIU Ling, FANG Yan-ming, WANG Shun-chang, <i>et al.</i> (2361)
Effect of Dissolved Oxygen on Microbial Community in Simultaneous Removal of Carbon, Nitrogen and Sulfur Process	YU Hao, CHEN Chuan, ZHANG Li, <i>et al.</i> (2368)
Microbial Activity and Community Structure Analysis Under the Different Land Use Patterns in Farmland Soils: Based on the Methods PLFA and MicroResp TM	CHEN Xiao-juan, WU Xiao-hong, LIU Shou-long, <i>et al.</i> (2375)
Effects of Drying-rewetting Alternation on Nitrogen Dynamics in a Typical Coastal Wetland: A Simulation Study	HAN Jian-gang, CAO Xue (2383)
Cadmium and Selected Heavy Metals in Soils of Jianping Area in Wushan County, the Three Gorges Region: Distribution and Source Recognition	LIU Yi-zhang, XIAO Tang-fu, NING Zeng-ping, <i>et al.</i> (2390)
Total Contents of Heavy Metals and Their Chemical Fractionation in Agricultural Soils at Different Locations of Beijing City	CHEN Zhi-fan, ZHAO Ye, GUO Ting-zhong, <i>et al.</i> (2399)
Influence of Season Change on the Level of Heavy Metals in Outdoor Settled Dusts in Different Functional Areas of Guiyang City	LI Xiao-yan (2407)
Characteristics of Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls Contamination in Soils of Gudao Region in Dongying	WANG Deng-ge, CUI Zhao-jie, FU Xiao-wen, <i>et al.</i> (2416)
Effects of Simulated Nitrogen Deposition on Organic Matter Leaching in Forest Soil	DUAN Lei, MA Xiao-xiao, YU De-xiang, <i>et al.</i> (2422)
<i>Ex-situ</i> Remediation of PAHs Contaminated Site by Successive Methyl- β -Cyclodextrin Enhanced Soil Washing	SUN Ming-ming, TENG Ying, LUO Yong-ming, <i>et al.</i> (2428)
Effects of <i>Bacillus mucilaginosus</i> on the Cd Content of Rhizosphere Soil and Enzymes in Soil of <i>Brassica juncea</i>	YANG Rong, LI Bo-wen, LIU Wei (2436)
Concentrations of Antibiotics in Vegetables from Manure-mended Farm	WU Xiao-lian, XIANG Lei, MO Ce-hui, <i>et al.</i> (2442)
Characteristics of Organic Nitrogen Mineralization in Organic Waste Compost-Amended Soil	ZHANG Xu, XI Bei-dou, ZHAO Yue, <i>et al.</i> (2448)
Characteristics and Influence Factors of the Energy Consumption and Pollutant Discharge of Municipal Solid Waste Transfer Stations in Beijing	WANG Zhao, LI Zhen-shan, FENG Ya-bin, <i>et al.</i> (2456)
Influence of Ammonia on Leaching Behaviors of Incineration Fly Ash and Its Geochemical Modeling	GUAN Zhen-zhen, CHEN De-zhen, Thomas Astrup (2464)
Pretreatment Technology for Fly Ash from MSWI and the Corresponding Study of Chloride Behavior	ZHU Fen-fen, Takaoka Masaki, Oshita Kazuyuki, <i>et al.</i> (2473)
Preparation, Characterization and Adsorption Performance of Mesoporous Activated Carbon with Acidic Groups	LI Kun-quan, LI Ye, ZHENG Zheng, <i>et al.</i> (2479)
Preliminary Assessment of the Potential of Biochar Technology in Mitigating the Greenhouse Effect in China	JIANG Zhi-xiang, ZHENG Hao, LI Feng-min, <i>et al.</i> (2486)
Research of Potassium Flow and Circulation Based on Substance Flow Analysis	BAI Hua, ZENG Si-yu, DONG Xin, <i>et al.</i> (2493)

《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6月15日 34卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 6 Jun. 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