

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第8期

Vol.33 No.8

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

南海北部大气气相多溴联苯醚的含量及来源	李琦路, 李军, 刘向, 徐维海, 张干 (2533)
河北张家口市大气污染观测研究	邵平, 王莉莉, 安俊琳, 周彦丽, 王跃思 (2538)
大气中丙烷光氧化臭氧生成活性的烟雾箱模拟	黄丽华, 莫创荣, 徐永福, 贾龙 (2551)
膜生物反应器处理甲苯性能及机制	叶杞宏, 魏在山, 肖盼, 李华琴, 张再利, 樊青娟 (2558)
厨余垃圾堆肥过程中恶臭物质分析	张红玉, 邹克华, 杨金兵, 李国学, 杨青原, 张锋 (2563)
北京城市生态系统地表水硝酸盐污染空间变化及其来源研究	徐志伟, 张心昱, 任玉芬, 孙晓敏, 王效科, 王升忠 (2569)
枯、平、丰水期长江3条支流表层水中多氯联苯的分布特征及风险评价	李昆, 赵高峰, 周怀东, 曾敏, 廖柏寒, 吴正勇, 张盼伟, 柳敏 (2574)
三峡库区丰水期表层水中酚类的分布特征及潜在风险	吴正勇, 赵高峰, 周怀东, 李科林, 李昆, 张盼伟 (2580)
东湖表层水体中全氟辛酸和全氟辛磺酸空间分布特征	陈静, 王琳玲, 朱湖地, 王贝贝, 刘黄诚, 曹梦华, 苗竹, 胡丽, 陆晓华, 刘光虹 (2586)
三峡库区大宁河与磨刀溪重金属污染特征	安立会, 张艳强, 郑丙辉, 刘玥, 宋双双, 李子成, 陈浩, 赵兴茹, 林进 (2592)
长江水系表层沉积物重金属污染特征及生态风险性评价	王岚, 王亚平, 许春雪, 安子怡 (2599)
江苏如东滩涂贝类养殖区表层沉积物中重金属来源分析及其潜在生物毒性	李磊, 王云龙, 蒋玫, 袁璐, 沈新强 (2607)
扰动强度对太湖沉积物中磷释放及其形态转化的影响	李大鹏, 黄勇 (2614)
干流倒灌异重流对香溪河库湾营养盐的补给作用	张宇, 刘德富, 纪道斌, 杨正健, 陈媛媛 (2621)
常年淹水和干旱对三峡库区消落带菖蒲生长恢复的影响	李强, 高祥, 丁武泉, 朱启红, 欧媛, 刘瑜 (2628)
温州城市降雨径流磷的负荷及其初始冲刷效应	周栋, 陈振楼, 毕春娟 (2634)
沂蒙山区典型小流域降雨径流的磷素输出特征	于兴修, 李振炜, 刘前进, 井光花 (2644)
城郊农业区小流域土地利用结构对氮素输出的影响	杨峰, 王鹏举, 杨珊珊, 吴金水, 胡荣桂 (2652)
基于 AnnAGNPS 模型四岭水库小流域氮磷流失特征的模拟研究	边金云, 王飞儿, 杨佳, 俞洁, 楼莉萍, 俞丹萍 (2659)
基于 GIS 和 L-THIA 模型的深圳市观澜河流域非点源污染负荷变化分析	白凤姣, 李天宏 (2667)
黄土丘陵区坡面水蚀对降雨和下垫面微观格局的响应	卫伟, 贾福岩, 陈利顶, 吴东平, 陈瑾 (2674)
强化混凝对腐殖酸和富里酸去除对比研究	周玲玲, 张永吉, 叶河秀, 张一清 (2680)
九龙江下游水源水中新发病原微生物和抗生素抗性基因的定量 PCR 检测	王青, 林惠荣, 张舒婷, 于鑫 (2685)
布吉河丰水期总细菌和氨氧化细菌的定性和定量研究	孙海美, 白姣姣, 孙卫玲, 邵军 (2691)
曝气生物滤池工艺脱氮性能及反硝化细菌群落结构特征研究	彭晓兰, 刘聪, 陈吕军 (2701)
城市污水处理厂氧化沟工艺微生物种群分析	郭云, 杨殿海, 卢文健 (2709)
IC 反应器处理啤酒废水的效能及其微生物群落动态分析	朱文秀, 黄振兴, 任洪艳, 阮文权 (2715)
原子力显微镜液池成像技术应用于微絮凝过滤工艺过程中的实验条件优化	郑蓓, 葛小鹏, 于志勇, 原盛广, 张文婧, 孙景芳 (2723)
UV/H ₂ O ₂ 法对印染废水生化出水中不同种类有机物的去除效果	李新, 刘勇弟, 孙贤波, 徐宏勇, 钱飞跃, 李欣珏, 李暮 (2728)
蛋白核小球藻 <i>Chlorella pyrenoidosa</i> -15 的异养培养条件优化及污水养殖	王秀锦, 李兆胜, 邢冠岚, 李卓凝, 袁红莉, 杨金水 (2735)
“Fe ⁰ /优势脱氯菌”体系降解 2,4,6-TCP 特性及机制研究	戴友芝, 郭丽丽, 史雷, 刘智勇, 高宝钗 (2741)
树脂 D201 上粗漆酶的固定化及对孔雀石绿的脱色	戚绪亮, 刘翔, 刘波, 王林, 王小春, 方超 (2747)
TiO ₂ /PS/Fe ₃ O ₄ 光催化剂的低温制备及其光催化和磁回收性能	王雪姣, 任学昌, 念娟妮, 肖举强, 王刚, 常青 (2752)
微波加热下苯的催化氧化性能研究	张钰彩, 卜龙利, 王晓晖, 刘海楠, 张浩 (2759)
纳米磁粉协同解偶联剂作用下活性污泥性能的研究	高丽英, 汤兵, 梁玲燕, 黄绍松, 付丰连, 罗建中 (2766)
好氧颗粒污泥沉降选择实验研究与定量描述	苏德足, 邓绣坤, 郑丽, 王畅, 金旺江, 沈俊 (2773)
超声波促进好氧/缺氧污泥消化过程中水解酶活性变化研究	叶运弟, 孙水裕, 郑莉, 刘宝建, 许燕滨, 占星星, 刘敬勇 (2780)
微生物营养剂浓度对生物沥浸法促进城市污泥脱水性能的影响	宋永伟, 刘奋武, 周立祥 (2786)
实验室条件下蓝藻绿皮对低温光照胁迫的响应与微结构变化	饶本强, 李华, 熊瑛, 兰书斌, 李敦海, 刘永定 (2793)
西南地区紫色水稻土活性碳库的季节动态	吴艳, 江长胜, 郝庆菊 (2804)
典型设施菜地土壤抗生素污染特征与积累规律研究	尹春艳, 骆永明, 滕应, 章海波, 陈永山, 赵永刚 (2810)
土壤铜硒复合污染中金属形态转化及其对生物有效性的影响	胡斌, 梁东丽, 赵文龙, 缪树寅 (2817)
土壤微生物群落对多环芳烃污染土壤生物修复过程的响应	张晶, 林先贵, 刘魏魏, 尹睿 (2825)
可可毛色二孢菌对焦化厂土壤多环芳烃污染修复	张志远, 王翠苹, 刘海滨, 孙红文 (2832)
广西茶山梯矿尾砂中微量元素的淋滤实验研究	蔡永兵, 李玲, 魏晓飞, 张国平, 李海霞, 付志平 (2840)
北京市近郊区土壤砷累积特征	戚洁, 王美娥, 汪自强, 欧阳志云 (2849)
抗氧化酶基因作为多环麝香污染分子标志物研究	陈春, 周启星, 刘潇威 (2855)
臭气污染对不同品种小麦干物质与生物量碳积累与分配的影响	寇太记, 于伟伟, 朱建国, 朱新开 (2862)
尿素分解共沉淀法中反应时间对 ZnAl 类水滑石结构和磷吸附性能的影响	陆英, 程翔, 邢波, 孙中恩, 孙德智 (2868)
铅和铜离子在纳米羟基磷灰石上的竞争吸附动力学研究	胡田田, 仓龙, 王玉军, 司友斌, 周东美 (2875)
pH 和 Ni ²⁺ 对人工纳米氧化硅吸附菲的影响	罗沛, 孙红文, 张鹏 (2882)
铀在凹凸棒石上的吸附特性与机制研究	刘娟, 陈迪云, 张静, 宋刚, 罗定贵 (2889)
环丙沙星在潮土中的吸附特性	崔皓, 王淑平 (2895)
中高温区水合肼 SNCR 脱硝反应机制和特性研究	洪彦, 陈德珍, 王渡, 黄慷 (2901)
H ₂ S 选择性催化氧化工艺及催化剂研究现状	郝郑平, 冀广玉, 张鑫, 曲思秋 (2909)
《环境科学》征稿简则 (2550) 《环境科学》征订启事 (2568) 信息 (2684, 2714, 2848, 2916)	

东湖表层水体中全氟辛酸和全氟辛磺酸空间分布特征

陈静,王琳玲*,朱湖地,王贝贝,刘黄诚,曹梦华,苗竹,胡丽,陆晓华,刘光虹

(华中科技大学环境科学与工程学院,环境科学研究所,武汉 430074)

摘要:研究了东湖表层水体中全氟辛酸(PFOA)和全氟辛磺酸(PFOS)的含量及空间分布特征,总量范围为 $31.1 \sim 237 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$,几何平均值为 $115 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$,表明整个湖区受到不同程度的PFOS和PFOA污染.全部水样均检出了PFOS和PFOA,峰值达到132和 $158 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$,几何平均值分别为60.4和 $55.0 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$.湖区东部污染最严重,其次是湖区南部,湖区北部和西部污染程度相对较轻.与PFOS相比,高浓度PFOA分布相对分散,PFOS和PFOA含量之间无显著相关性,表明东湖表层水体中PFOS和PFOA属于多源输入.30个(63%)取样点上PFOS含量超过可能对水生生态系统产生影响的临界数值($43 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$),20个(42%)取样点上PFOA含量超过美国新泽西州制定的饮用水标准($40 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$).

关键词:东湖;表层水;PFOA;PFOS;空间分布

中图分类号: X131; X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)08-2586-06

Spatial Distribution of Perfluorooctanoic Acids and Perfluorinate Sulphonates in Surface Water of East Lake

CHEN Jing, WANG Lin-ling, ZHU Hu-di, WANG Bei-bei, LIU Huang-cheng, CAO Meng-hua, MIAO Zhu, HU Li, LU Xiao-hua, LIU Guang-hong

(Research Institution of Environmental Science, Department of Environmental Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Concentrations and spatial distribution of PFOS and PFOA in surface water from East Lake in Wuhan, Hubei, China were studied. The total concentration of PFCs ranged from 31.1 to $237 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, and the mean value was $115 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, revealing lake-wide contamination in East Lake. PFOS and PFOA were detected in all samples with maximum values of $132 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ and $158 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively, whereas the mean values of PFOS and PFOA were 60.4 and $55.0 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively. The highest concentrations of PFOS and PFOA were found in the eastern area of lake, followed by the southern area of lake, and the western and northern areas of East Lake were the least contaminated regions. The specific distribution and composition profile of PFOS and PFOA, and the lack of significant correlation between PFOS and PFOA, suggested that there were various sources of PFCs. The PFOS concentrations at 30 sample sites (63%) were greater than $43 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, which was used to estimate an avian wildlife value for PFOS. The PFOA concentrations at 20 sample sites (42%) were greater than $40 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, which was a health-based guidance level recommended by the State of New Jersey for PFOA.

Key words: East Lake; surface water; PFOA; PFOS; spatial distribution

全氟取代有机物(PFCs)是一种曾广泛使用的工业品.由于其疏水和疏油的特性而被用作地毯、皮革、纸张、食物容器、织物和室内装潢的表面活性剂和表面保护剂,另外还被用于灭火泡沫、地板上光剂和洗发精等产品的功能化学制品.全氟辛磺酸(PFOS)和全氟辛酸(PFOA)是两种典型的代表性物质. PFCs性质稳定,在自然环境中很难分解,已成为持久性有机污染物新成员,并造成了全球性的污染^[1]. 水体环境既是PFCs的汇^[2,3],也是重要污染传输源.水生生态系统中各营养级物种的生物富集作用和沿食物链(网)传递效应都可能导致PFCs在高营养级生物体内的高浓度存在^[4],并且这类物质在水生生态系统中的长期、低剂量暴露也有可能对生物安全构成威胁^[3,5,6]. 因此,了解PFCs在水环境中

的分布特征极为重要. 目前的研究多集中于海洋生态系统^[7,8],与海洋生态系统相比,湖泊生态系统受人类活动的影响程度更大,与人类生活关系更加密切,而相关的湖泊生态系统的研究则较少^[9,10]. 在我国环境介质和生物体内,甚至人体血液和母乳中均有检测到PFCs的报道^[7,11~14]. 在一些受人类活动较为显著的地区,PFCs含量明显较高,其含量与欧美等地区的相当.

武汉东湖位于武汉市,是长江中下游一个典型的中型浅水湖泊,也是我国最大的城中湖. 东湖处于

收稿日期: 2011-10-23; 修订日期: 2011-11-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(40701159,20907014); 环境模拟和污染控制国家重点实验室开放基金项目(09K07ESPCT)

作者简介: 陈静(1975~),女,博士,副教授,主要研究方向为污染物环境行为, E-mail: chenjing@mail.hust.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: wanglinling@mail.hust.edu.cn

富营养化状态,并向严重富营养化方向发展. 湖区内有渔业养殖,湖滨浅水带有莲藕、菱角及其他经济作物生长,是武汉市鱼类等的副食品基地之一. 因此开展东湖水体中 PFCs 分布特征的研究,评估 PFCs 在东湖水体中的环境风险具有重要的环境意义.

1 材料与方法

1.1 试剂

PFOA(96%)、甲醇和醋酸铵均购于 Aldrich 化学试剂公司(新泽西,美国),PFOS(99%)和全氟十二烷酸(PFDoA,99%)购于 Sigma-Aldrich 化学试剂公司(东京,日本).

1.2 采样

2009 年 6 月,在东湖湖区内布点 48 个,采集表层水样(0~10 cm),采样点分布见图 1. 东湖湖区总体上分为四部分,沿湖大道将东湖分为南北两部分,西部的水果湖(采集样本 4 个)又被两湖桥路分隔开来,东部湖区(采集样本 6 个)被东湖东路分隔. 每个采样点取 3 个平行样,用洁净的 500 mL 聚乙烯瓶采集水样,密封运回实验室后用稀盐酸溶液调节水样的 pH $\leq$ 2,再用直径 50 mm、孔径 0.45 μ m 的醋酸纤维滤膜(55 mm $\varnothing$, 0.8 μ m, Advantec, 东京,日本)过滤,4 $^{\circ}$ C 保存.



图 1 东湖表层水体取样点示意

Fig. 1 Location of sample sites in surface water of East Lake

1.3 分析

水样进行固相萃取(SPE),SPE 柱(3 mL, 500 mg, 400 $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, Supelco, Bellefonte, PA, 美国)预先活化,先用约 6 mL 甲醇以 1~2 $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 的速度通过 SPE 柱,再用约 6 mL 去离子水以 1~2 $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 的速度通过 SPE 柱,然后取 500 mL 水样以 1~2 $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 的流速通过 SPE 柱. 水样萃取完全后,用吸管吸取约 2 mL 去离子水,以 1 滴 $\cdot$ s $^{-1}$ 的流速通过 SPE 柱,直到柱子被完全抽干. 再用 6 mL 甲醇以约半滴 $\cdot$ s $^{-1}$ ($<0.5 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$) 的速度通过

SPE 柱,洗脱液用 10 mL 带盖聚乙烯塑料管接取,最后氮吹浓缩、用甲醇和内标物 PFDoA 定容至 1 mL, 4 $^{\circ}$ C 保存以待 HPLC-MS 分析.

使用高效液相色谱/离子阱质谱联用(Agilent 1100 LC/MSD Trap-XCT)分析 PFOA 和 PFOS. 内标法定量(内标物 PFDoA). 检测条件为:干燥气(N_2)温度 350 $^{\circ}$ C;干燥气流速 10 $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$;喷雾器压力:40 psi;Skimmer 电压:-40 V. 色谱柱为 Luna C18 column (100 $\times$ 2 mm $\times$ 5 μ m, Phenomenex, USA);流动相为甲醇和 1 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 乙酸铵,采用梯度洗脱模式,甲醇含量分别为:0~2 min,40%~60%;2~5 min,60%~75%;5~18 min,75%;18~19 min,75%~60%;然后稳定 6 min;流速:200 $\mu\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$;柱温:40 $^{\circ}$ C;进样量:5 μL . 质谱采用 ESI 离子源,选择负离子模式,扫描电压:1 500 V. MRM 分段检测模式,PFOS 用 m/z 499 定性,而 PFOA 用 2 个子离子(m/z 413 和 369)的相对丰度定性,内标(PFDoA)法定量. PFOS 和 PFOA 的线性范围分别为 0.5~100 和 1~200 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ($R^2=0.998$),回收率为 95.6%~104%,仪器检出限为 0.07 和 0.65 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ($S/N=3$),方法检测限分别为 0.126 和 1.17 $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$ ($S/N \geq 10$). 空白(试剂和器皿)样品得到的总离子流丰度很低,表明整个检测过程中试剂和仪器的干扰可忽略不计.

2 结果与讨论

2.1 东湖表层水体中 PFCs 含量及空间分布特征

全部水样均检出了 PFOS 和 PFOA,总量范围为 31.1~237 $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$,几何平均值为 115 $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$,表明整个湖区受到不同程度的 PFCs 污染. 东部湖区表层水体中 PFCs 含量最高,含量范围在 154~237 $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,几何平均值为 194 $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$,其次为南部湖区,几何均值为 126 $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$,而北部湖区和水果湖受 PFCs 污染相对较轻,几何平均值分别为 68.8 和 80.9 $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$. 东部湖区表层水体 PFCs 污染最严重,含量在 150 $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上,本湖区过去接收周围居民生活和工业生产排放的污水,并且与东湖湖区之间有东湖东路相隔,水体相对较为封闭,这可能是本湖区受 PFCs 污染最为严重的原因之一. 东湖南北两大湖区水体中 PFCs 分布特征存在显著差异,东湖南部湖区(不包括水果湖)水体中 PFCs 含量多在 100~150 $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,局部地区有 150~200 $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 高值分布,这与湖区南部周围分布着密集的高校、居民、医院和商业区有关. 水果湖表层水体

PFCs 含量多在 $50 \sim 100 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,其含量范围与北部湖区的相似,属于污染相对较轻的湖区.

东湖表层水体中 PFOS 和 PFOA 含量范围分别为 $9.06 \sim 132 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $15.8 \sim 158 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ (表 1),几何平均值分别为 60.4 和 $55.0 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,两者平均值相差不大,但 PFOS 和 PFOA 中值差异较大,分别为 56.5 和 $32.9 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,PFOS 的中值比 PFOA 高出 71.7% . 分析各个湖区 PFOS 和 PFOA 含量的差异,发现除了北部湖区,其余湖区表层水体中 PFOS 的中值均显著高于 PFOA,例如南部和西部湖区表层水体中 PFOS 中值约为 PFOA 的 2 倍,而东部湖区中的 PFOS 中值比 PFOA 的约高出 34.1% . 因此从整体上来说,PFOS 的污染更为严重.

表 1 东湖表层水体中 PFOS 和 PFOA 含量/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 1 Concentrations of PFCs in surface water of East Lake/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$					
位置	PFCs	最小值	最大值	平均值	中值
东湖	PFOS	9.06	132	60.4	56.5
	PFOA	15.8	158	55.0	32.9
北部湖区	PFOS	9.1	48.3	29.9	23.9
	PFOA	22.0	144	38.9	25.6
南部湖区	PFOS	12.7	132	66.2	67.7
	PFOA	15.8	158	59.9	34.2
东部湖区	PFOS	84.1	124	108	110
	PFOA	43.9	127	86.2	82.1
水果湖	PFOS	45.0	57.5	51.3	51.3
	PFOA	25.0	38.4	29.6	27.5

东湖表层水体中各采样点上 PFOS 和 PFOA 含量分布见图 2,表层水体中 PFOA 和 PFOS PFOA/

PFOS 比值在 $0.25 \sim 4.44$ 之间,中值为 $0.87 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,说明与 PFOA 相比,东湖表层水体受 PFOS 污染程度更重. 相关性分析表明 PFOA 和 PFOS 含量之间无显著相关性,表明东湖水体中 PFOS 和 PFOA 来自多种污染源的输入.

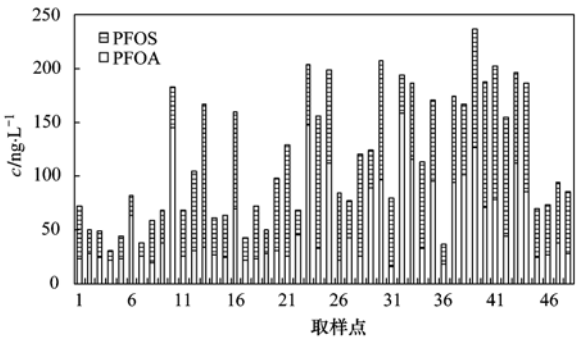


图 2 东湖表层水体中 PFOS 和 PFOA 分布

Fig. 2 Concentration distribution of PFOA and PFOS in surface water of East Lake

总体上,PFOS 和 PFOA 空间分布特征十分相似 (图 3). 东部湖区污染最严重,PFOS 含量多在 $100 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上,而 PFOA 含量多在 $80 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上,其次为南部湖区,北部湖区和水果湖污染相对较轻,均值为 $20 \sim 30 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$. 南部湖区中,尽管 PFOS 和 PFOA 均值相差不大 (66.2 和 $59.9 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$),但 PFOS 中值约是 PFOA 的 2 倍,这与空间模拟结果一致. 高浓度 PFOA 分布相对分散,且污染程度和覆盖面积相对较小,这种局部的异常高值使得 PFOA 浓度在空间分布上表现出相对不均一.

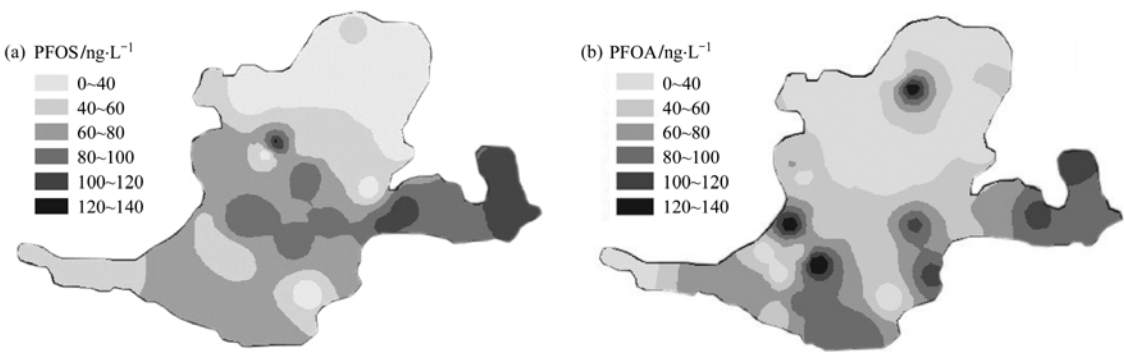


图 3 东湖表层水体中 PFOS 和 PFOA 空间分布特征

Fig. 3 Spatial distribution of PFOA and PFOS in surface water of East Lake

2.2 与世界其它地区湖泊和河流中 PFCs 分布的比较

东湖表层水体中 PFOS 和 PFOA 平均含量均高于国内报道的其它地区的湖泊和河流. 我国地表水体中 PFOS 和 PFOA 一般在 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 级. 太湖表层水体中 PFOS 和 PFOA 比东湖的低一倍左右^[10],但太

湖中检测到 PFOS 异常高值达到了 $394 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,是东湖 PFOS 峰值的 3 倍. 其它地区报道的湖泊中 PFOS 和 PFOA 含量均显著低于东湖. 例如,沈阳市周围的 10 个湖泊中检测到的 PFOA 含量在 $10 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,而 PFOS 含量低于检测限^[15]. 北京的官

厅水库中的 PFOS 和 PFOA 比东湖的低 1~2 个数量级^[16]. 国内的河流中 PFOS 和 PFOA 含量一般低于东湖, 含量在零点几到十几 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右^[10,12,16~18]. 但在高度工业化地区及密集居民区附近的水域中检出了高浓度 PFOS 和 PFOA. 例如辽宁阜新工业园区附近的西河^[18] 和长江入海口检测到数百 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 PFOA 和 PFOS^[12]. 总的来说, 与我国其它地区的湖泊和河流相比, 东湖表层水体中 PFOS 和 PFOA 含量偏高, 这与东湖是城中湖, 受周围密集的居民和商业活动影响幅度较大有关.

PFOS 和 PFOA 分布在我国呈现出地域差异. 与 PFOA 相比, 东湖表层水体中 PFOS 的污染程度和幅度更大. 汉江(武汉段)^[19]、松花江(哈尔滨段)^[20]、扬子江^[18] 和珠江^[21] 等地水域中也发现类似的分布特征. 但在我国其它地区的地表水中, PFOA 则是主要 PFCs^[10,15~17].

北美五大湖及欧洲一些湖泊水体中均有 PFOS 和 PFOA 含量的报道, 北美地表水中 PFCs 含量普遍较高, 例如, 北美五大湖湖水及美国境内地表水域 PFOS 和 PFOA, 均值为十几到三十几 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[22,23], 这与北美过去是世界主要 PFCs 生产基地并广泛使用有关. 欧洲境内 100 多条河流也检测出了 PFOS 和 PFOA, 均值分别为 39 和 12 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[24,25], 但在其中的一些河流中检测到数千 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 PFOS^[24]. 亚洲地区韩国和日本地表水体中 PFCs 含量相对较低, 一般在 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 级^[26].

水环境中 PFCs 污染水平与人类生活和区域性工业化程度有关. 含 PFOS 和 PFOA 的工业污水和生活污水、垃圾填埋场渗出物以及大量使用的泡沫灭火剂是水环境中 PFOS 和 PFOA 污染的主要来源. 如氟化工厂或者是污水处理厂等周围水域中 PFCs 含量较高, 有的甚至达到数千 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[27]. 东湖表层水体中 PFOS 和 PFOA 的含量及分布未显示出高相关性和一致性, 属于典型的多源输入, 总体上 PFOS 含量占有优势. 由于缺乏 PFCs 在环境中传播源的信息, 目前尚不清楚这类物质如何在环境中积累. 目前公认的是 PFCs 全球大范围的使用以及其前体物(氟聚醇)在大气中的迁移导致这类物质的全球性污染. 研究表明^[28], 湖泊中 PFCs 主要来自污水处理厂的排放, 消费者清洗和维护有表面活性剂处理过的产品(例如衣物、地毯等)以及此类产品的工业生产过程均可能导致 PFCs 泄漏到城市污水处理系统中, 而垃圾渗滤液中也可能将这类物质释放到污水处理系统中, 从而进入湖泊环境. 有研究表

明^[29,30], 污水处理厂及其周围水域均可检测到高浓度 PFCs, 污水处理厂出水中 PFOA 含量比进水中的高 20 倍, 周围水域中 PFCs 含量也明显增加. Zushi 等^[31] 指出, 在人类活动较为频繁的地区, 河水中来自雨水冲刷的 PFCs 负荷比来自污水处理厂出水的负荷高出 2~11 倍. 他们发现用于家居和户外的含有 PFCs 的产品是一个重要污染源, PFCs 排放到环境中, 下雨时被雨水冲刷带入河流中. 除了污水排放和雨水冲刷之外, 气体胶体和颗粒物沉降也是水生生态系统中 PFCs 的重要来源^[28,32]. 从 PFCs 生产中心、处理车间以及被处理过的产品中释放的挥发性物质进入大气中, 通过大气迁移, 然后沉降到地表水体中, 由于 PFCs 性质稳定, 不易降解, 因此导致在全球水生生态系统广泛分布.

Jin 等^[19] 在 2003 年采集武汉东湖表层水体样本, 分析 PFOS 和 PFOA 含量分别为 3.8 和 3.3 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 而本研究样本采自 2008 年, PFOS 和 PFOA 含量均有明显增加, 暗示最近几年武汉可能存在工业化生产或大量使用含有 PFOS 和 PFOA 产品的污染源. 另外, Jin 等^[19] 发现汉江(武汉段)水体中 PFOS 浓度明显高于四川重庆等其他监测点, 表明武汉地区其它地表水体也存在着 PFCs 污染. 东湖地处武汉市中心, 是我国最大的城中湖, 东湖周边地区遍布的各种工业园以及密集的居民、商业和医院是当地环境中 PFCs 的重要污染源, 这种多源排放导致了东湖表层水体中 PFOS 和 PFOA 分布不均且相关性不显著. 由于在武汉段长江和汉江均检出 PFCs, 因此大气沉降是否对武汉地区地表水体中 PFCs 有贡献需要进一步研究.

2.3 东湖表层水体中 PFCs 区域环境风险评价

PFOS 和 PFOA 的生物富集倍数大, 并可以通过食物链传递, 最终在人体内蓄积. 而人类的 PFOS 和 PFOA 生物半减期又明显大于其他动物种属, 因此, 一旦摄入更容易引起体内蓄积. 美国环保署针对鸟类安全给出北美五大湖湖水 PFOS 临界值为 43 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[33], 但有研究者^[34] 认为实际的浓度大概为该临界值的 50~100 倍. 在本研究中, 31 个样本(65%)的 PFOS 含量高于 43 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 根据 PFOS 在东湖表层水体的空间分布模拟结果(图 3), 2/3 湖区表层水体中的 PFOS 含量均高于此临界值. 新泽西环保局基于非癌变和百万分之一的癌变率, 将饮用水中 PFOA 含量标准定为不超过 40 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$. 在本研究中, 20 个取样点(42%)中 PFOA 含量超过 40 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 由于 PFOA 不能被常规饮用水处理法有效

去除^[34], 水体中 PFOA 高于 $40 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 则表明作为饮用水源人体可能面临潜在风险, 东湖作为战略上的储备水源, 因此仍然需要引起有关部门的足够重视。

3 结论

(1) 东湖表层水体中均检出了 PFOS 和 PFOA, 总量范围为 $31.1 \sim 237 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 表明整个湖区受到不同程度的 PFCs 污染。东部湖区污染最为严重, 其次为南部湖区, 北部湖区污染相对较轻, 但均值仍超过了 $65 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 。总体上, PFOS 和 PFOA 空间分布特征与总 PFCs 的十分相似。

(2) 从污染程度上来说, PFOS 的污染更为严重, 中值约为 PFOA 的 2 倍。PFOA 和 PFOS 含量之间未发现有显著相关性, 表明东湖水体中 PFCs 来自多种污染源的输入。

(3) 在本研究中, 2/3 湖区表层水体中的 PFOS 含量均高于美国环保署针对鸟类安全给出北美五大湖湖水 PFOS 临界值 ($43 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$), 约 1/2 湖区表层水体中 PFOA 含量超过了新泽西环保局饮用水中 PFOA 含量标准 ($40 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$)。

参考文献:

- [1] Tomy G T, Bunakowski W, Halldorson T, *et al.* Fluorinated organic compounds in an eastern arctic marine food web [J]. *Environmental Science and Technology*, 2004, **38**(24): 6475-6481.
- [2] Houde M, De Silva A O, Muir D C G, *et al.* Monitoring of perfluorinated compounds in aquatic biota: an updated review [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(19): 7962-7973.
- [3] Kim S K, Lee K T, Kang C S, *et al.* Distribution of perfluorochemicals between sera and milk from the same mothers and implications for prenatal and postnatal exposures [J]. *Environmental Pollution*, 2011, **159**(1): 169-174.
- [4] Kratzer J, Ahrens L, Roos A, *et al.* Temporal trends of polyfluoroalkyl compounds (PFCs) in liver tissue of grey seals (*Halichoerus grypus*) from the Baltic Sea, 1974-2008. *Chemosphere*, 2011, **84**(11): 1592-1600.
- [5] Kim S K, Kho Y L, Shoeib M, *et al.* Occurrence of perfluorooctanoate and perfluorooctanesulfonate in the Korean water system: Implication to water intake exposure [J]. *Environmental Pollution*, 2011, **159**(5): 1167-1173.
- [6] Loi E I H, Yeung L W Y, Taniyasu S, *et al.* Trophic magnification of poly-and perfluorinated compounds in a subtropical food web [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(13): 5506-5513.
- [7] Cai M H, Zhao Z, Yang H Z, *et al.* Spatial distribution of per- and polyfluoroalkyl compounds in coastal waters from the East to South China Sea [J]. *Environmental Pollution*, 2012, **161**: 162-169.
- [8] Theobald N, Caliebe C, Gerwinski W, *et al.* Occurrence of perfluorinated organic acids in the North and Baltic seas. Part 1: distribution in sea water [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2011, **18**(7): 1057-1069.
- [9] Custer C M, Custer T W, Schoenfuss H L, *et al.* Exposure and effects of perfluoroalkyl compounds on tree swallows nesting at Lake Johanna in east central Minnesota, USA [J]. *Reproductive Toxicology*, 2011, doi: 10.1016/j.reprotox.2011.01.005.
- [10] Yang L P, Zhu L Y, Liu Z T. Occurrence and partition of perfluorinated compounds in water and sediment from Liao River and Taihu Lake, China [J]. *Chemosphere*, 2011, **83**(6): 806-814.
- [11] Liu J Y, Li J G, Zhao Y F, *et al.* The occurrence of perfluorinated alkyl compounds in human milk from different regions of China [J]. *Environment International*, 2010, **36**(5): 433-438.
- [12] Bao J, Liu W, Liu L, *et al.* Perfluorinated compounds in the environment and the blood of residents living near fluorochemical plants in Fuxin, China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(19): 8075-8080.
- [13] Wu Y N, Wang Y X, Li J G, *et al.* Perfluorinated compounds in seafood from coastal areas in China [J]. *Environment International*, 2012, **42**: 67-71.
- [14] Zhao H X, Chen C B, Zhang X, *et al.* Phytotoxicity of PFOS and PFOA to *Brassica chinensis* in different Chinese soils [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2011, **74**(5): 1343-1347.
- [15] Sun H W, Li F S, Zhang T, *et al.* Perfluorinated compounds in surface waters and WWTPs in Shenyang, China: mass flows and source analysis [J]. *Water Research*, 2011, **45**(15): 4483-4490.
- [16] Wang T Y, Khim J S, Chen C L, *et al.* Perfluorinated compounds in surface waters from Northern China: comparison to level of industrialization [J]. *Environment International*, 2012, **42**: 37-46.
- [17] Li F S, Sun H W, Hao Z N, *et al.* Perfluorinated compounds in Haihe River and Dagu Drainage Canal in Tianjin, China [J]. *Chemosphere*, 2011, **84**(2): 265-271.
- [18] Pan G, You C. Sediment-water distribution of perfluorooctane sulfonate (PFOS) in Yangtze River Estuary [J]. *Environmental Pollution*, 2010, **158**(5): 1363-1367.
- [19] Jin Y H, Ding M, Zhai C, *et al.* An investigation of the PFOS and PFOA pollution in three gorges reservoir areas of the Yangtze River and surface water of Wuhan areas [J]. *Ecology and Environment*, 2006, **15**(3): 486-489.
- [20] 刘冰, 金一和, 于棋麟, 等. 松花江水系江水中全氟辛烷磺酸和全氟辛酸污染现状调查 [J]. *环境科学学报*, 2007, **27**(3): 480-486.
- [21] So M K, Miyake Y, Yeung W Y, *et al.* Perfluorinated

- compounds in the Pearl river and Yangtze river of China [J]. *Chemosphere*, 2007, **68**(11): 2085-2095.
- [22] Boulanger B, Varogo J, Schnoor J L, *et al.* Detection of perfluorooctane surfactants in Great Lakes water [J]. *Environmental Science and Technology*, 2004, **38**(15): 4064-4070.
- [23] Nakayama S, Strynar M J, Helfant L, *et al.* Perfluorinated compounds in the cape fear drainage basin in North Carolina [J]. *Environmental Science and Technology*, 2007, **41**(15): 5271-5276.
- [24] Loos R, Gawlik B M, Locoro G, *et al.* EU-wide survey of polar organic persistent pollutants in European river waters [J]. *Environmental Pollution*, 2009, **157**(2): 561-568.
- [25] McLachlan M S, Holmström K E, Reth M, *et al.* Riverine discharge of perfluorinated carboxylates from the European continent [J]. *Environmental Science and Technology*, 2007, **41**(21): 7260-7265.
- [26] Saito N, Sasaki K, Nakatome K, *et al.* Perfluorooctane sulfonate concentrations in surface water in Japan [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2003, **45**(2): 149-158.
- [27] Lien N P H, Fujii S, Tanaka S, *et al.* Contamination of perfluorooctane sulfonate (PFOS) and perfluorooctanoate (PFOA) in surface water of the Yodo River basin (Japan) [J]. *Desalination*, 2008, **226**(1-3): 338-347.
- [28] Boulanger B, Peck A M, Schnoor J L, *et al.* Mass budget of perfluorooctane surfactants in Lake Ontario [J]. *Environmental Science and Technology*, 2005, **39**(1): 74-79.
- [29] Becker A M, Gerstmann S, Frank H. Perfluorooctane surfactants in waste waters, the major source of river pollution [J]. *Chemosphere*, 2008, **72**(1): 115-121.
- [30] Huset C A, Chiaia A C, Barofsky D F, *et al.* Occurrence and mass flows of fluorochemicals in the glatt valley watershed, Switzerland [J]. *Environmental Science and Technology*, 2008, **42**(17): 6369-6377.
- [31] Zushi Y, Takeda T, Masunaga S. Existence of nonpoint source of perfluorinated compounds and their loads in the Tsurumi River basin, Japan [J]. *Chemosphere*, 2008, **71**(8): 1566-1573.
- [32] Loewen M, Halldorson T, Wang F Y, *et al.* Fluorotelomer carboxylic acids and PFOS in rainwater from an urban center in Canada [J]. *Environmental Science and Technology*, 2005, **39**(9): 2944-2951.
- [33] Nakayama S, Strynar M J, Helfant L, *et al.* Perfluorinated compounds in the cape fear drainage basin in North Carolina [J]. *Environmental Science and Technology*, 2007, **41**(15): 5271-5276.
- [34] So M K, Taniyasu S, Yamashita N, *et al.* Perfluorinated compounds in coastal waters of Hong Kong, South China, and Korea [J]. *Environmental Science and Technology*, 2004, **38**(15): 4056-4063.

CONTENTS

Levels and Sources of Gaseous Polybrominated Diphenyl Ethers in Air over the Northern South China Sea	LI Qi-lu, LI Jun, LIU Xiang, <i>et al.</i> (2533)
Observation and Analysis of Air Pollution in Zhangjiakou, Hebei	SHAO Ping, WANG Li-li, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (2538)
Smog Chamber Simulation of Ozone Formation from Atmospheric Photooxidation of Propane	HUANG Li-hua, MO Chuang-rong, XU Yong-fu, <i>et al.</i> (2551)
Mechanism and Performance of a Membrane Bioreactor for Treatment of Toluene Vapors	YE Qi-hong, WEI Zai-shan, XIAO Pan, <i>et al.</i> (2558)
Analysis of Odor Pollutants in Kitchen Waste Composting	ZHANG Hong-yu, ZOU Ke-hua, YANG Jin-bing, <i>et al.</i> (2563)
Spatial Changes and Sources of Nitrate in Beijing Urban Ecosystem Surface Water	XU Zhi-wei, ZHANG Xin-yu, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (2569)
Distribution Characteristics and Potential Risk of PCBs in Surface Water from Three Tributaries of Yangtze River in Different Periods	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (2574)
Distribution Characteristics and Potential Risks of Phenols in the Rainy Season Surface Water from Three Gorges Reservoir	WU Zheng-yong, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (2580)
Spatial Distribution of Perfluorooctanoic Acids and Perfluorinate Sulphonates in Surface Water of East Lake	CHEN Jing, WANG Lin-ling, ZHU Hu-di, <i>et al.</i> (2586)
Characteristics of Heavy Metal Pollution in Daninghe River and Modaoxi River of Three Gorges Reservoir Areas	AN Li-hui, ZHANG Yan-qiang, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (2592)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Surface Sediments of the Yangtze River	WANG Lan, WANG Ya-ping, XU Chun-xue, <i>et al.</i> (2599)
Analysis of the Source, Potential Biological Toxicity of Heavy Metals in the Surface Sediments from Shellfish Culture Mudflats of Rudong Country, Jiangsu Province	LI Lei, WANG Yun-long, JIANG Mei, <i>et al.</i> (2607)
Effect of Disturbance Intensity on Phosphorus Release and Its Transformation in the Sediment from Taihu Lake	LI Da-peng, HUANG Yong (2614)
Effects of Intrusions from Three Gorges Reservoir on Nutrient Supply to Xiangxi Bay	ZHANG Yu, LIU De-fu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (2621)
Influence of Perennial Flooding and Drought on Growth Restoration of <i>Acorus calamus</i> in Water-level-fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir	LI Qiang, GAO Xiang, DING Wu-quan, <i>et al.</i> (2628)
Pollution Load and the First Flush Effect of Phosphorus in Urban Runoff of Wenzhou City	ZHOU Dong, CHEN Zhen-lou, BI Chun-juan (2634)
Output Characteristics of Rainfall Runoff Phosphorus Pollution from a Typical Small Watershed in Yimeng Mountainous Area	YU Xing-xiu, LI Zhen-wei, LIU Qian-jin, <i>et al.</i> (2644)
Influence of Land Use Structure on Nitrogen Output in the Watershed of Suburban Agriculture Regions	YANG Feng, WANG Peng-ju, YANG Shan-shan, <i>et al.</i> (2652)
Simulation of Nitrogen and Phosphorus Loss in Siling Reservoir Watershed with AnnAGNPS	BIAN Jin-yun, WANG Fei-er, YANG Jia, <i>et al.</i> (2659)
GIS and L-THIA Based Analysis on Variations of Non-point Pollution in the Guanlan River Watershed, Shenzhen	BAI Feng-jiao, LI Tian-hong (2667)
Response of Sloping Water Erosion to Rainfall and Micro-earth Pattern in the Loess Hilly Area	WEI Wei, JIA Fu-yan, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (2674)
Comparison Study of Enhanced Coagulation on Humic Acid and Fulvic Acid Removal	ZHOU Ling-ling, ZHANG Yong-ji, YE He-xiu, <i>et al.</i> (2680)
Real-time PCR Detection and Quantification of Emerging Waterborne Pathogens (EWPs) and Antibiotic Resistance Genes (ARGs) in the Downstream Area of Jiulong River	WANG Qing, LIN Hui-rong, ZHANG Shu-ting, <i>et al.</i> (2685)
Quantitative and Qualitative Analysis of Total Bacteria and Ammonia-oxidizing Bacteria in Buji River in Wet Season	SUN Hai-mei, BAI Jiao-jiao, SUN Wei-ling, <i>et al.</i> (2691)
Study on the Nitrogen Removal Performance and the Characteristics of Denitrification Bacterial Community Structure of Biological Aerated Filter	PENG Xiao-lan, LIU Cong, CHEN Li-jun (2701)
Analysis of Microbial Community Structure at Full-scale Wastewater Treatment Plants by Oxidation Ditch	GUO Yun, YANG Dian-hai, LU Wen-jian (2709)
Performance and Microbial Community Dynamic Characteristics of an Internal Circulation Reactor Treating Brewery Wastewater	ZHU Wen-xiu, HUANG Zhen-xing, REN Hong-yan, <i>et al.</i> (2715)
Coupling AFM Fluid Imaging with Micro-Flocculation Filtration Process for the Technological Optimization	ZHENG Bei, GE Xiao-peng, YU Zhi-yong, <i>et al.</i> (2723)
Study on Removal Effect of Different Organic Fractions from Bio-treated Effluent of Dye Wastewater by UV/H ₂ O ₂ Process	LI Xin, LIU Yong-di, SUN Xian-bo, <i>et al.</i> (2728)
Optimization of <i>Chlorella pyrenoidosa</i> -15 Photoheterotrophic Culture and Its Use in Wastewater Treatment	WANG Xiu-jin, LI Zhao-sheng, XING Guan-lan, <i>et al.</i> (2735)
Characteristics and Mechanism of 2,4,6-TCP Degradation by the "Fe ⁰ /Enriched-Bacteria" System	DAI You-zhi, GUO Li-li, SHI Lei, <i>et al.</i> (2741)
Immobilization of Crude Laccase onto Anion Exchange Resin and Its Application in Decoloration of Malachite Green	QI Xu-liang, LIU Xiang, LIU Bo, <i>et al.</i> (2747)
Low-Temperature Preparation of TiO ₂ /PS/Fe ₃ O ₄ and Its Photocatalytic Activity and Magnetic Recovery	WANG Xue-jiao, REN Xue-chang, NIAN Juan-ni, <i>et al.</i> (2752)
Study on Catalytic Oxidation of Benzene by Microwave Heating	ZHANG Yu-cai, BO Long-li, WANG Xiao-hui, <i>et al.</i> (2759)
Synergistic Effects of Nano-sized Magnetic Particles and Uncoupler to the Characteristics of Activated Sludge	GAO Li-ying, TANG Bing, LIANG Ling-yan, <i>et al.</i> (2766)
Experimental and Modeling Research on the Settlement of Aerobic Granular Sludge	SU Kui-zu, DENG Xiu-kun, ZHENG Li, <i>et al.</i> (2773)
Analysis of Hydrolytic Enzyme Activities on Sludge Aerobic/Anoxic Digestion After Ultrasonic Pretreatment	YE Yun-di, SUN Shui-yu, ZHENG Li, <i>et al.</i> (2780)
Effect of Microbial Nutrient Concentration on Improvement of Municipal Sewage Sludge Dewaterability Through Bioleaching	SONG Yong-wei, LIU Fen-wu, ZHOU Li-xiang (2786)
Response of the Artificial Cyanobacterial Crusts to Low Temperature and Light Stress and the Micro-structure Changes Under Laboratory Conditions	RAO Ben-qiang, LI Hua, XIONG Ying, <i>et al.</i> (2793)
Seasonal Dynamics of Soil Active Carbon Pool in a Purple Paddy Soil in Southwest China	WU Yan, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (2804)
Pollution Characteristics and Accumulation of Antibiotics in Typical Protected Vegetable Soils	YIN Chun-yan, LUO Yong-ming, TENG Ying, <i>et al.</i> (2810)
Transformation and Influences of Copper and Selenium Fractions on Heavy Metals Bioavailability in Co-contaminated Soil	HU Bin, LIANG Dong-li, ZHAO Wen-long, <i>et al.</i> (2817)
Response of Soil Microbial Community to the Bioremediation of Soil Contaminated with PAHs	ZHANG, Jing, LIN Xian-gui, LIU Wei-wei, <i>et al.</i> (2825)
Bioremediation of PAHs Contaminated Soil from Beijing Coking Plant by <i>Lasiodiplodia theobromae</i>	ZHANG Zhi-yuan, WANG Cui-ping, LIU Hai-bin, <i>et al.</i> (2832)
Leaching Experiments on the Release of Trace Elements from Tailings of Chashan Antimony Mine, Guangxi, China	CAI Yong-bing, LI Ling, WEI Xiao-fei, <i>et al.</i> (2840)
Accumulation Characteristics of Arsenic in Suburban Soils of Beijing	QI Jie, WANG Mei-e, WANG Zi-qiang, <i>et al.</i> (2849)
Antioxidant Enzyme Gene Expression as Molecular Biomarkers of Exposure to Polycyclic Musks	CHEN Chun, ZHOU Qi-xing, LIU Xiao-wei (2855)
Effects of Ozone Pollution on the Accumulation and Distribution of Dry Matter and Biomass Carbon of Different Varieties of Wheat	KOU Tai-ji, YU Wei-wei, ZHU Jian-guo, <i>et al.</i> (2862)
Influence of Reaction Time of Urea Hydrolysis-Based Co-precipitation on the Structure of ZnAl Layered Double Hydroxides and the Phosphate Adsorption	LU Ying, CHENG Xiang, XING Bo, <i>et al.</i> (2868)
Competitive Adsorption Kinetics of Aqueous Pb ²⁺ and Cu ²⁺ on Nano-HAP Surfaces	HU Tian-tian, CANG Long, WANG Yu-jun, <i>et al.</i> (2875)
Effects of pH and Ni ²⁺ on Sorption Behavior of Phenanthrene on Engineered Nano-Silica	LUO Pei, SUN Hong-wen, ZHANG Peng (2882)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Uranium on Attapulgite	LIU Juan, CHEN Di-yun, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2889)
Adsorption Characteristics of Ciprofloxacin in Ustic Cambosols	CUI Hao, WANG Shu-ping (2895)
Kinetic Mechanism and Characteristics Researches for Hydrazine-based NO _x Removal at Moderate to High Temperatures	HONG Liu, CHEN De-zhen, WANG Du, <i>et al.</i> (2901)
Current Research Situation of H ₂ S Selective Catalytic Oxidation Technologies and Catalysts	HAO Zheng-ping, DOU Guang-yu, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (2909)

《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8月15日 33卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 8 Aug. 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