

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)
实验室条件下蓝藻结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)
铈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)	

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^{1,2}, 赵高峰¹, 周怀东^{1*}, 李科林², 李昆^{1,2}, 张盼伟^{1,2}

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 2. 中南林业科技大学林学院, 长沙 410004)

摘要: 采用 GC/MS 技术对三峡库区干流及 22 条支流的 47 个表层水样中的 15 种酚类化合物进行分析, 结果表明库区干流和支流表层水样中酚类总浓度的几何均值分别为 52.47 和 87.99 ng·L⁻¹. 干流和支流中非氯酚类总浓度的几何均值均大于氯酚类, 库区表层水以非氯代酚组分为主. 苯酚、邻甲酚和 2-硝基酚是库区干流水样中的主要的酚类, 分别占干流 ∑ 酚类的 79.1%、3.7% 和 3.6%. 苯酚、邻甲酚、2,6-二氯酚和 2-硝基酚是库区支流水样中的优势污染物, 分别占支流 ∑ 酚类的 77.5%、5.4%、3.8% 和 2.2%. 本研究苯酚和 2-硝基酚的检出浓度与《国家污染物环境健康风险名录》中的标准限值相比较, 远低于可能导致生物毒性危害的标准限值, 与国内外其他地区水体中苯酚含量相比也处于较低污染水平, 说明表层水样中苯酚与 2-硝基酚污染给研究区水环境带来的潜在风险较小.

关键词: 三峡库区; 表层水; 酚类; 分布特征; 潜在风险

中图分类号: X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)08-2580-06

Distribution Characteristics and Potential Risks of Phenols in the Rainy Season Surface Water from Three Gorges Reservoir

WU Zheng-yong^{1,2}, ZHAO Gao-feng¹, ZHOU Huai-dong¹, LI Ke-lin², LI Kun^{1,2}, ZHANG Pan-wei^{1,2}

(1. China Institute of Water Resources and Hydro-power Research, Beijing 100038, China; 2. College of Forestry, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: Forty-seven surface water samples were collected from the main stream and 22 tributaries in area of the Three Gorges Reservoir, 15 phenolic compounds in these samples were analyzed using GC/MS. The results showed that the concentrations of phenolic compounds in the samples from the main stream and tributaries were 52.47 ng·L⁻¹ and 87.99 ng·L⁻¹, respectively. The concentrations of non-chlorinated phenols were higher than those of chlorinated phenols in the main stream and tributaries, and so the non-chlorinated phenols were the predominant compounds in these surface water samples. Phenol, *o*-cresol and 2-nitrophenol were the predominant compounds accounted for 79.1%, 3.7% and 3.6% in the samples from the main stream, respectively. Phenol, *o*-cresol, 2,6-dichlorophenol and 2-nitrophenol were the main compounds accounted for 77.5%, 5.4%, 3.8% and 2.2% in the samples from the tributaries, respectively. As compared the concentrations of phenol and 2-nitrophenol with the standard limits in The National Environmental Health Risk List, the levels of phenol and 2-nitrophenol were much lower than the standard limits, suggesting negligible risk of phenol and 2-nitrophenol in these samples.

Key words: Three Gorges Reservoir; surface water; phenols; distribution characteristics; potential risk

三峡库区位于我国长江中上游河段, 库区沿岸以重庆市主城区及其下属辖区为主. 其行业类型以制造业为主, 在采矿业、制造业和电力、燃气及水的生产和供应这三大行业中制造业占 85%, 其中化学原料及化学制品制造、金属冶炼工业及通用设备制造在整个制造业中约占 30%. 酚类化合物包括苯酚、甲基酚、氯代酚和硝基酚等, 其中苯酚是最简单且毒性最大的酚类有机物, 其在制造业领域被广泛用于绝缘和隔热材料、粘合剂、食品容器的涂料、油漆、合成橡胶、染料等^[1]. 2000 年以来, 我国苯酚的需求增长速度较快, 2004 年我国苯酚的消费量为 61.96 万 t, 1999 ~ 2004 年消费量的年均增长率为 17.3%, 2005 年消费量较 2004 年增长 12.84%^[2]. 制造业领域对苯酚需求的快速增长, 会导致大量的

苯酚物质进入环境水体. 苯酚在空气中也会与羟基和硝基反应, 通过光化反应生成硝基酚^[3,4], 能在水溶液中与硝酸根离子发生反应生成硝基酚^[5]; 苯酚在氯化的饮用水中能生成氯酚^[6], 因此苯酚的使用量增加可能会使氯酚和硝基酚在环境中残留量增加.

目前, 国内针对三峡库区水体的研究主要集中在重金属^[7,8]、水体富营养化^[9,10]等方面, 少数学者

收稿日期: 2011-10-30; 修订日期: 2011-12-15

基金项目: 中国水利水电科学研究院青年基金项目(环集 1113, 环集 1233); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07203-006, 2008ZX07209, 2009ZX07527); 国家创新研究群体基金项目(51021006)

作者简介: 吴正勇(1985~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境化学, E-mail: jcdw@163.com

* 通讯联系人, E-mail: hdzhou@iwhr.com

的研究涉及了水中持久性有机污染物污染状况分析,而针对库区水体中痕量酚类的研究尚未见报道。酚类污染物可经皮肤粘膜、呼吸道及消化道进入体内,能与细胞原浆中的蛋白质发生化学反应,低浓度时使细胞变性,高浓度时使蛋白质凝固,长期低剂量暴露可致癌、致畸和致突变性^[11,12],研究表明大部分人群主要通过饮水途径受到苯酚的暴露^[13]。三峡库区是沿岸居民的主要饮用水水源地,其水质的好坏直接关系库区居民的饮水安全。因此,开展库区表层水中酚类污染物的污染现状的研究尤为重要。

本研究针对库区干流及 22 条支流表层水中的 15 种酚类化合物进行分析,采用固相萃取(SPE)和五氟苄基溴衍生化前处理方法,配合 GC-MS 分析技术,分析了酚类污染物在三峡库区表层水中的分布特征和潜在风险,以期库区的水质评价提供数据支持。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

实验中所用有机溶剂乙酸乙酯、二氯甲烷和甲醇均为农残级(J. T. Baker, Phillipburg, USA); 优级纯浓硫酸(BDHL, England); 超纯水(经 MILLIQ 水纯化系统纯化,电阻率为 18.1 MΩ·cm); 无水硫酸钠(分析纯,用二氯甲烷淋洗,然后置于 600℃ 的马弗炉中烘烤 6 h,干燥器中密闭保存,备用); 碳酸钾(分析纯); 五氟苄基溴(PFBBBr)衍生化试剂(纯度为 99%, Di kma); HLB 萃取柱(Waters)。

Varian CP3800/300 GC-MS/MS, 配备 30 m VF-5-MS (5% phenyl/95% methyl silicone, 0.25 mm i. d., 0.25 μm film, Varian, USA) 毛细管柱。

1.2 样品采集与处理

2010 年 10 月在三峡库区约 700 km 长的河段

选取 5 个干流断面(黄桷渡、铜罐驿、官渡口、清溪场、茅坪)和 22 个支流采样点(嘉陵江、御临河、乌江、珍溪河、渠溪河、壤渡河、汝溪河、龙河、小江河、汤溪河、草塘河、大溪河、神女溪、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)的表层水进行分析(见图 1)。所有采样点除官渡口、嘉陵江选取河流左岸为采样点外,其余各采样点均选取河流中间采取水样; 每个采样点和采样断面取水面以下 5 cm 处水样 400 mL,置于无污染的玻璃瓶内低温避光存放。带回实验室后经 0.45 μm 孔径玻璃纤维滤膜过滤,用稀盐酸(6 mol·L⁻¹)调节 pH=2.0,每个样品中添加回收率替代内标 50 μL (2, 4, 6-Tribromophenol, 100 ng·mL⁻¹),超声振荡混匀,再按以下步骤进行 SPE 萃取:①6 mL/500 mg, 60 μm 的 Waters Oasis HLB 固相萃取小柱清洗、活化:在不启用真空泵的情况下,加入 5 mL 乙酸乙酯让其自然流出;再使用 5 mL 二氯甲烷重复上述过程,弃去清洗液。再加入 10 mL 甲醇,甲醇浸泡柱体 30 s(注意控制溶剂液面高度,确保填料湿润,避免空气暴露),然后让甲醇慢慢流出。再加入超纯水 10 mL,淋洗活化,最后柱体内保留 1~2 mL 超纯水液面高于填料面 1~2 mm。②富集:开启真空泵,调节流速为 15 mL·min⁻¹。样品富集完毕后继续真空抽取 5~10 min,使柱体干燥。③洗脱目标化合物:给 SPE 装置装上防污染交叉管,每个柱体中加入 10 mL 二氯甲烷让其自然流出并用 K-D 管收集洗脱液。氮吹浓缩:将气阀开至适当大小,液面无明显波动为最佳。氮吹至 1 mL 转移至 10 mL 刻度管,再次氮吹至 2 mL 待衍生化处理。

1.3 五氟苄基溴(PFBBBr)衍生化

向 2 mL 浓缩液中依次加入 2 g 无水硫酸钠、0.2

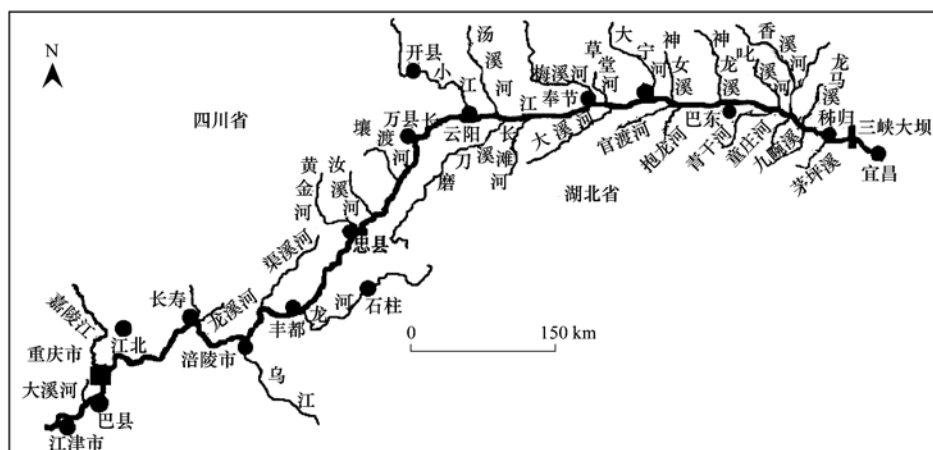


图 1 三峡库区采样点示意

Fig. 1 Sampling sites in the Three Gorges Reservoir

g 碳酸钾;依次移取 8 mL 丙酮和 100 μL 5% PFBBr 衍生化试剂,盖紧管塞,振荡 10 s 确保混合均匀;30 $^{\circ}\text{C}$ 水浴加热 20 min,盖紧瓶塞保证衍生化反应在密闭系统中进行;反应完毕室温下冷却 20 min;移取上清液,氮吹浓缩至 0.5 mL;加入 3 mL 正己烷剧烈振荡 1 min,氮吹浓缩定容至 100 μL ,待测。

1.4 GC/MS 检测方法

采用 SIM 模式,无分流进样,载气为高纯 He,恒流 1.5 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$,进样量 1 μL 。进样口温度 260 $^{\circ}\text{C}$,离子源和传输杆的温度分别为 230 $^{\circ}\text{C}$ 和 250 $^{\circ}\text{C}$;升温程序:50 $^{\circ}\text{C}$ 停留 1.5 min,以 7 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升温速率升至 280 $^{\circ}\text{C}$,停留 2 min。

2 质量保证与控制

2.1 排除背景干扰

实验过程中所用玻璃器皿依次用丙酮、重铬酸钾洗液、洗涤剂、自来水和去离子水清洗,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。

2.2 定量曲线

运用外标法定量,标准曲线浓度梯度依次为 0、20、50、100、200 $\text{ng}\cdot\text{mL}^{-1}$,可决系数 $r^2 > 0.90$,方法检测限以 3 倍信噪比 S/N 计算得到,15 种酚类化合物的检出限范围为 0.01 ~ 1.09 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

2.3 准确度与精密度

为保证方法的准确性与可靠性,实验过程中进行了加标回收率实验,用超纯水分别配制出酚类化合物浓度为 20 $\text{ng}\cdot\text{mL}^{-1}$ 和 50 $\text{ng}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的水样 2 组

各 7 个平行样,同时在每个样品中添加 50 μL 100 $\text{ng}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的内标指示物 2,4,6-Tribromophenol,选用平均回收率和相对标准偏差来表征准确度和精密度,结果如表 1 所示。

表 1 16 种酚类化合物 2 个浓度加标水平下的

平均回收率及相对标准偏差 ($n=7$)/%

Table 1 Average recovery and RSD of 16 phenolic compounds at two spiked levels ($n=7$)/%

化合物	20 $\text{ng}\cdot\text{mL}^{-1}$		50 $\text{ng}\cdot\text{mL}^{-1}$	
	回收率/%	RSD	回收率/%	RSD
phenol	93.9	14.1	113.0	10.2
<i>o</i> -cresol	98.0	13.0	72.3	9.0
<i>m</i> -cresol	86.6	23.7	77.0	10.4
<i>p</i> -cresol	103.9	16.5	75.1	8.6
2-chlorophenol	72.0	20.2	75.9	10.0
2,4-dimethylphenol	92.1	10.1	95.2	11.2
2,4-dichlorophenol	88.6	20.7	102.4	8.7
4-chloro-3-methylphenol	96.5	11.5	76.3	9.3
2,6-dichlorophenol	108.1	8.0	119.0	7.0
2,4,5-trichlorophenol	91.6	16.6	84.8	8.8
2,4,6-Trichlorophenol	92.0	13.4	76.2	9.1
2-Nitrophenol	119.3	12.7	78.1	9.7
2,3,4,6-Tetrachloropheno	123.7	20.1	93.7	8.9
2,3,5,6-Tetrachloropheno	86.5	21.7	83.1	8.3
2,4,6-Tribromophenol (sur)	106.3	12.8	99.6	12.8
pentachlorophenol	82.8	27.6	85.9	9.0

2.4 数据处理

运用统计分析软件 SPSS (版本 17.0, SPSS Inc., Chicago, IL, USA) 对 27 个采样点检测数据进行处理,各样品的分析数据根据内标指示物的回收率进行了修正(表 2)。在超过 40% 的样品被检出时,才进行统计分析;样品中污染物浓度低于 LOD 时,采用 1/2LOD 来统计。

表 2 三峡库区表层水样中酚类化合物的统计结果¹⁾/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 2 Statistical results of phenolic compounds in collected surface water from the Three Gorges Reservoir/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$

污染物	三峡库区干流 ($n=9$)			三峡库区支流 ($n=55$)		
	几何均值	范围	检出率/%	几何均值	范围	检出率/%
phenol	15.15	0.26 ~ 678.08	100	25.00	0.01 ~ 1318.84	100
<i>o</i> -cresol	2.42	0.33 ~ 31.56	100	1.50	ND ~ 147.53	100
<i>m</i> -cresol	NA	ND ~ 57.57	22	0.99	ND ~ 169.79	47
<i>p</i> -cresol	NA	ND ~ 51.02	22	1.04	ND ~ 71.44	47
2-chlorophenol	NA	ND ~ 1.65	33	0.24	ND ~ 36.35	58
2,4-dimethylphenol	0.07	ND ~ 53.00	78	0.06	ND ~ 88.82	73
2,4-dichlorophenol	NA	ND	0	NA	ND ~ 1.11	16
4-chloro-3-methylphenol	0.12	ND ~ 1.17	78	0.12	ND ~ 2.28	91
2,6-dichlorophenol	1.09	0.01 ~ 10.67	100	1.95	0.01 ~ 41.58	100
2,4,5-trichlorophenol	NA	ND ~ 2.16	33	NA	ND ~ 15.01	7
2,4,6-Trichlorophenol	0.09	ND ~ 1.77	78	0.06	ND ~ 12.33	95
2-Nitrophenol	4.50	ND ~ 15.20	89	2.64	ND ~ 18.31	84
2,3,4,6-Tetrachloropheno	0.10	ND ~ 3.74	67	0.11	ND ~ 37.88	73
2,3,5,6-Tetrachloropheno	0.20	ND ~ 3.38	78	0.15	ND ~ 36.66	85
pentachlorophenol	0.48	0.18 ~ 1.13	100	0.48	ND ~ 20.22	91
$\sum$ 氯代酚	5.23	1.82 ~ 16.10	100	11.93	1.30 ~ 146.86	100
$\sum$ 非氯代酚	38.99	7.04 ~ 876.75	100	54.07	0.79 ~ 1712.27	100
$\sum$ 酚类	52.47	9.89 ~ 880.48	100	87.99	6.21 ~ 1723.77	100

1) ND: 未检出; NA: 未统计

3 结果

统计结果如表 2 所示,15 种酚类化合物在库区水样中大都能被检出.在库区干流和支流中的 $\sum$ 酚类污染物浓度分别为 $52.47 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $87.99 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$.支流水样中 $\sum$ 氯代酚浓度为 $11.93 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, $\sum$ 非氯代酚的浓度为 $54.07 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,均高于其在干流中的浓度.库区支流中苯酚、邻甲酚、2,6-二氯酚和 2-硝基酚在表层水中的浓度分别为 25、1.5、1.95 和 $2.64 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,是支流表层水中的优势组分.苯酚、邻甲酚和 2-硝基酚在库区干流中的浓度分别为:15.15、2.42 和 $4.50 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,在干流表层水中是主要的酚类化合物.在检测的 47 个采样点中,发现嘉陵江河口表层水中的 $\sum$ 酚类和苯酚的含量都是最高的,分别为 $1723.77 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $1314.47 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$.就库区总体分布特征而言,苯酚和 2-硝基苯酚是整个库区表层水中的优势酚类化合物.

4 讨论

表 2 的统计数据显示库区干流和支流中的酚类污染物的总浓度分别为 $52.47 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $87.99 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,支流水体酚类污染物浓度显著高于干流($P < 0.05$).有研究表明有机污染物在水体中的分布与水体流动与混合情况相关^[14];同时受河流沿途的人为排污因素影响较大^[8].库区支流采样点所处地区多为山地、丘陵地形,多为呈点状分布的农耕地,有研究资料表明库区工业废水和生活污水 80% 源于重庆主城区、涪陵区和万州区^[15].因此,支流水体中高浓度的酚类污染物并非来自采样点周围的工业污染源.支流水域面积相对较小,水流速度慢,水体交换周期长,自净能力差,这是导致支流酚类污染物浓度高于干流的原因之一.

苯酚在库区干流和支流表层水中的浓度都是最高的,分别为 $15.15 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $25 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,为最主要的组分.苯酚是重要的有机化工原料,主要用于制造酚醛树脂、双酚 A 和己内酰胺以及其他合成材料^[1,11].苯酚在绝缘和隔热材料、黏合剂、食品容器的涂料、染料、合成橡胶等方面广泛使用^[1].有报道指出重庆市主要污染行业排在前 3 位的依次是^[16]:化工原料及化学制品业、食品烟草及饮料制造业、黑色金属冶炼及压延加工业.产品中的苯酚会通过泄露、释放等途径进入废水,随着废水排入河流,是导致研究区表层水中的苯酚浓度较高的

原因.

统计结果显示 2-硝基苯酚在库区干流和支流中的污染水平仅次于苯酚分别为: $4.5 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $2.64 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$. Chiron 等^[17]认为硝基酚是酚类农药发生环境转变或降解的中间产物.有报道指出^[16],1999 年全年的库区农药按折纯量计,使用量为 1 160.6 t,比 1998 年增加 20.4%.由于库区农药的品种、质量和施用方式相对落后,其中约有 60% 左右是以污染物的形式流失在土壤和水环境中.常态下,氯酚类化合物不易被氧化,难于水解,不易挥发,难以通过空气迁移.另外,氯酚类有蓄积作用,在高有机质含量的酸性土壤或沉积物上具有很高的吸附性^[18,19],农药中酚类有机物的残留,以及成库后淹没区土壤中的大量酚类农药及其转化降解的中间产物很可能会从土壤中再次释放到水体.此外,苯酚能与硝基反应,通过光化反应生成硝基酚^[3,4],也能在水溶液中与硝酸根离子发生反应生成硝基酚^[5].因此研究区内的 2-硝基苯酚污染除库区周边集中布局的医药和染料行业持续排放的废水输入外,酚类农药在环境中的转化也是其重要来源.

嘉陵江河口表层水中的 $\sum$ 酚类和苯酚的含量在所有采样点中是最高的,浓度分别为 $1723.77 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $1314.47 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$.2003 年,中国工程院、重庆大学与中国环境科学研究院对三峡库区污染负荷主要来源及其对水质的影响研究^[15]发现,库区江段的点源排放包括工业废水和生活污水,80% 来自重庆主城区、涪陵区和万州区,其中重庆主城区占库区江段总点源污染负荷的 65% 左右.就地理区位而言,重庆市恰位于嘉陵江河口,长江上游及重庆市主城区工业和生活污水的持续输入带来的酚类污染物会在此河段汇集,这可能是导致 $\sum$ 酚类含量最大值出现在嘉陵江河口表层水的主要原因之一.

为更好地了解研究区酚类污染的现状,以水样中检出的优势污染物苯酚和 2-硝基苯酚为对象,将数据统计结果与表 3 中的毒性危害标准限值相比较^[21],发现苯酚和 2-硝基苯酚在表层水样中的浓度值远低于可能产生毒性危害的标准限值;而与国外其他地区环境水体中的苯酚浓度相比也处于较低水平(见表 4).如 Grayson 等^[20]报道在美国民用给水中检出的苯酚浓度为 $1 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,英国和美国两地的饮用水中检出苯酚的浓度为 $5 \sim 10 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $5 \sim 120 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[6].因此,研究区表层水样中的苯酚污染给城市和农村生活饮用水安全带来的潜在风险较小.

表 3 水体中苯酚、2-硝基苯酚毒性危害标准限值对照/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 3 Comparison of phenol and 2-nitrophenol concentrations in this study with the toxic hazard standards limits in water/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$			
污染物	本研究区水体检出浓度	毒性阈值及毒性效应 ^[21,22]	
		毒性阈值	毒性效应
苯酚	0.01 ~ 0.03	100 ~ 200	鱼肉有酚味
		> 5 000	鱼中毒死亡
		2 560	对淡水水生生物产生慢性毒性
		$\geq 3\,500$	对人体产生危害
2-硝基苯酚	0.003 ~ 0.005	20 000	荧光假单胞菌对葡萄糖的降解受到抑制
		> 10×105	大肠杆菌对葡萄糖降解受到抑制
		60	前苏联(1978)生活饮用水和娱乐用水水体中有害物质的最大允许浓度
		600	前苏联污水中有害物质最高允许浓度

表 4 国内外表层水中苯酚的浓度比较

Table 4 Concentration comparison of phenol in surface water samples in domestic areas and oversea areas				
国家(或地区)	采样时间(年)	研究区域	苯酚/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	文献
重庆、宜昌	2010	三峡库区	ND ~ 1.32	本研究
上海	2004	长江河口三角区	ND ~ 8.1	[23]
美国	1985	波特兰市(雨水)	0.08 ~ 1.2	[24]
美国	1989	休伦湖	3 ~ 24	[25]
荷兰	1986	荷兰(2条主要河流)	0.3 ~ 7	[26]

5 结论

(1)本研究发现库区水样中的酚类污染以苯酚和2-硝基酚为主,支流水样中受酚类污染的水平高于干流,苯酚、邻甲酚、2,6-二氯酚和2-硝基酚是库区支流中的主要污染物;

(2)苯酚、邻甲酚和2-硝基酚是干流中的主要污染物.研究区水样中的苯酚、2-硝基酚的浓度均远低于相关标准限值,因此因酚类污染给库区饮用水安全带来的潜在风险较低.

参考文献:

[1] IARC. IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans; Phenol [A]. In: Some organic solvents, resin monomers and related compounds, pigments and occupational exposures in paint manufacture and painting [C]. Volume 47, Lyon, France; International Agency for Research on Cancer, 2002.

[2] 刘晓东, 庞振涛, 焦凤茹. 国内外苯酚生产现状及市场展望 [J]. 中国石油和化工经济分析, 2007, (15): 36-39.

[3] Pitts J N Jr, Hammond G S, Gollnick K, *et al.* Kinetics and mechanisms of the reactions of the hydroxyl radical with organic compounds in the gas phase [J]. *Advances in Photochemistry*, 1979, **11**: 375-488.

[4] Bruce R M, Santodonato J, Neal M W. Summary review of the health effects associated with phenol [J]. *Toxicology and Industrial Health*, 1987, **3**(4): 535-568.

[5] Niessen R, Lenoir D, Boule P. Phototransformation of phenol induced by excitation of nitrate ions [J]. *Chemosphere*, 1988, **17**(10): 1977-1984.

[6] Jarvis S N, Straube R C, Williams A L, *et al.* Illness associated

with contamination of drinking water supplies with phenol [J]. *British Medical Journal*, 1985, **290**(6484): 1800-1802.

[7] 林艳华, 罗毅平. 三峡库区的水环境污染 [J]. 河北农业科学, 2010, **14**(7): 84-86.

[8] 傅杨武, 祁俊生, 陈书鸿, 等. 三峡库区垫溪河流域消落带土壤重金属污染调查及评价 [J]. 土壤通报, 2009, **40**(1): 162-166.

[9] 朱俊, 董辉, 王寿兵, 等. 长江三峡库区干流水体主要污染负荷来源及贡献 [J]. 水科学进展, 2006, **17**(5): 709-713.

[10] 吕怡兵, 宫正宇, 连军, 等. 长江三峡库区蓄水后水质状况分析 [J]. 环境科学研究, 2007, **20**(1): 1-6.

[11] WHO. IPCS Health and Safety Guide No. 88 [S]. Published by WHO. Printed by Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, Stuttgart, 1994.

[12] WHO. IPCS Environmental Health Criteria for Phenol (161) [S]. First draft prepared by Ms G. K. Montizan. Published by WHO. Printed in Finland, 1994.

[13] WHO. Environmental health criteria, 161 [S]. Geneva, Switzerland: World Health Organization, 1994.

[14] 郭志顺, 罗财红, 张卫东, 等. 三峡库区重庆段江水中持久性有机污染物污染状况分析 [J]. 中国环境监测, 2006, **22**(4): 45-48.

[15] 三峡水库水污染控制课题技术领导小组. 三峡水库水污染控制研究总报告 [M]. 2003.

[16] 赵刚, 冉光和, 张波. 三峡库区水资源污染问题及对策研究 [J]. 自然资源学报, 2002, **17**(5): 635-639.

[17] Chiron S, Comoretto L, Rinaldi E, *et al.* Pesticide by-products in the Rhône delta (Southern France). The case of 4-chloro-2-methylphenol and of its nitroderivative [J]. *Chemosphere*, 2009, **74**(4): 599-604.

[18] ATSDR (Agency for Toxic Substance and Disease Registry),

2008. Toxfaqs [EB/OL]. <http://www.atsdr.cdc.gov/toxfaqs51.html>.
- [19] IPCS(International Programme on Chemical Safety), Health and Safety Guide No. 19 [EB/OL]. 2008- 06- 20. <http://www.inchem.org/documents/hsg/hsg/hsg019.htm>.
- [20] Grayson M, Eckroth D, Kirk R, *et al.* Kirk-Othmer concise encyclopedia of chemical technology (3rd ed) [M]. New York: John Wiley and Sons, 1985.
- [21] 环境保护部. 国家污染物环境健康风险名录 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2009. 50-52.
- [22] 化工引擎网站/化工词典/毒理学资料及环境行为 [EB/OL] <http://www.chemyq.com/xz/xz1/2286nxa.htm>.
- [23] 王婉华, 刘征涛, 姜福欣, 等. 长江河口水体有机污染物现状分析 [J]. 生态与农村环境学报, 2007, **23**(1): 92-95.
- [24] Leuenberger C, Ligocki M P, Pankow J F. Trace organic compounds in rain. 4. Identities, concentrations, and scavenging mechanisms for phenols in urban air and rain [J]. Environmental Science & Technology, 1985, **19**(11): 1053-1058.
- [25] Howard P H. Handbook of environmental fate and exposure data for organic chemicals [M]. Chelsea, Michigan: Lewis Publishers, 1989. 468-476.
- [26] RIVM. Criteria Document: Phenol [R]. Bilthoven, The Netherlands: National Institute of Public Health and Environmental Protection, 1986.

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

国内外公开发刊