

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第5期

Vol.33 No.5

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

区域空气质量模拟中查表法的应用研究 谢旻,王体健,江飞,李树,蔡彦枫,庄炳亮(1409)

长江三角洲地区秸秆露天焚烧大气污染物排放清单及其在空气质量模式中的应用 苏继峰,朱彬,康汉青,王红磊,王体健(1418)

北京及周边城市一元脂肪酸大气颗粒物干沉降通量及来源分析研究 徐小娟,李杏茹,王跃思,刘晨书,潘月鹏,王英锋(1425)

上海大气超细颗粒物和工业纳米颗粒的表征及细胞毒性的比较研究 张睿,吕森林,尚羽,易飞,任晶晶,郝晓洁,安静,吴明红(1431)

青岛市大气PM_{2.5}元素组成及来源研究 李秀镇,盛立芳,徐华,屈文军(1438)

冬季天津家庭室内空气颗粒物中邻苯二甲酸酯污染研究 王夫美,陈丽,焦姣,张雷波,姬亚芹,白志鹏,张利文,孙增荣,张星梅(1446)

再悬浮装置在大气PM_{2.5}源谱分析中的应用 段恒轶,钱冉冉,吴水平,印红玲(1452)

黔西南煤燃烧产物微量元素分布特征及富集规律研究 魏晓飞,张国平,李玲,项萌,蔡永兵(1457)

三峡水库不同运行状态下支流澎溪河水-气界面温室气体通量特征初探 蒋滔,郭劲松,李哲,方芳,白镭,刘静(1463)

香溪河库湾夏季温室气体通量及影响因素分析 王亮,肖尚斌,刘德富,陈文重,王雨春,陈小燕,段玉杰(1471)

臭氧浓度升高与土壤湿度对农田土壤微生物呼吸温度敏感性的影响 陈书涛,张勇,胡正华,史艳妹,沈小帅(1476)

托木尔峰青冰滩72号冰川径流水化学特征初步研究 赵爱芳,张明军,李忠勤,王飞腾,王圣杰(1484)

五大连池水溶性有机磷矿化特性的研究 张斌,席北斗,赵越,魏自民,白雪,王曼林(1491)

7条环太湖河流沉积物氮含量沿程分布规律 卢少勇,远野,金相灿,焦伟,吴瑶洁,任德有,周羽化,陈雷(1497)

巢湖十五里河沉积物氮磷形态分布及生物有效性 李如忠,李峰,周爱佳,童芳,钱家忠(1503)

北运河系地表水近10年来水质变化及影响因素分析 郭婧,荆红卫,李金香,李令军(1511)

东莞运河排涝对东江河水水质影响分析 孙磊,毛献忠,黄旻旻(1519)

北京平原区地下水污染源识别与危害性分级 陆燕,何江涛,王俊杰,刘丽雅,张小亮(1526)

地下水曝气修复过程的三维数值模拟 李恒震,胡黎明,王建,武晓峰,刘培斌(1532)

垂向水动力扰动机的蓝藻控制效应数值实验研究 邹锐,周璟,孙永健,嵇晓燕,岳佳,刘永(1540)

新型生物岛栅中污染物去除的微生物机制研究 高明瑜,谢慧君,王文兴(1550)

营养盐水平对念珠藻胞外有机物产生的影响 齐飞,刘晓媛,徐冰冰,黄岳,封莉,张立秋(1556)

水网藻种植水对铜绿微囊藻生长的抑制作用研究 傅海燕,柴天,赵坤,刘智峰,张明真,侯明,许鹏成(1564)

酞酸酯在模拟海河菹草微宇宙中的消减和分布特征 迟杰,杨青(1570)

电子束辐射对铜绿微囊藻毒素产生和释放的抑制作用研究 刘书宇,吴明红,姜钦鹏(1575)

青铜峡灌区典型排水沟水污特征解析 李强坤,胡亚伟,罗良国(1579)

四溴双酚A的辐照降解研究 李杰,徐殿斗,马玲玲,吴明红(1587)

污泥基活性炭催化臭氧氧化降解水中微量布洛芬的效能研究 王红娟,齐飞,封莉,张立秋(1591)

高水力负荷对人工湿地处理精养虾塘排水效果的影响 李怀正,章星异,陈卫兵,叶剑峰(1597)

城市污水生物脱氮系统出水经氯胺消毒形成NDMA的影响因素研究 尚晓玲,李咏梅(1604)

利用淀粉基共混物作为反硝化固体碳源的研究 沈志强,吴为中,杨春平,陈佳利,王建龙(1609)

好氧污泥颗粒化过程中Zeta电位与EPS的变化特性 王浩宇,苏本生,黄丹,崔晓娟,竺建荣(1614)

活性污泥对病毒的生物吸附特性 周玉芬,郑祥,雷洋,陈迪(1621)

阴离子型聚丙烯酰胺在离子交换膜上的吸附规律 邓梦洁,于水利,时文歆,衣雪松(1625)

两性修饰膨润土对苯酚的吸附及热力学特征 李婷,孟昭福,张斌(1632)

表面活性剂对苯并[a]芘在黑炭表面吸附解吸的影响 张景环,陈春溶,张玮航,栗桂州(1639)

南京市4个污水处理厂的活性污泥中细菌的分离鉴定和抗生素耐药性分析 葛峰,郭坤,周广灿,张会娟,刘济宁,戴亦军(1646)

焦化废水中苯酚降解菌筛选及其降解性能 陈春,李文英,吴静文,李静(1652)

Xanthobacter flavus DT8降解二噁英的特性研究 金小君,陈东之,朱润晔,陈静,陈建孟(1657)

未开发油气田地表烃氧化菌空间定量分布 满鹏,齐鸿雁,呼庆,马安周,白志辉,庄国强(1663)

矿化垃圾中氧化甲烷兼性营养菌的筛选与生物特性研究 赵天涛,项锦欣,张丽杰,全学军,赵由才(1670)

长江中游干流及22条支流表层水中多氯联苯的分布特征及其潜在风险 李昆,赵高峰,周怀东,曾敏,廖柏寒,吴正勇,张盼伟,郝红(1676)

典型血吸虫病区表层水中酚类化合物的污染特征及潜在风险 吴正勇,赵高峰,周怀东,李科林,曾敏,李昆,张盼伟,郝红(1682)

闽江福州段沉积物中多环芳烃的空间分布异质性研究 陈卫锋,倪进治,杨红玉,魏然,杨玉盛(1687)

三峡库区蓄水运用期表层沉积物重金属污染及其潜在生态风险评价 王健康,高博,周怀东,陆瑾,王雨春,殷淑华,郝红,袁浩(1693)

典型电器工业区河涌沉积物中重金属的分布和潜在生态风险 邓代永,孙国萍,郭俊,张宏涛,张琴,许玫英(1700)

密云水库上游金属矿区土壤中重金属形态分布及风险评价 高彦鑫,冯金国,唐磊,朱先芳,刘文清,季宏兵(1707)

湘西花垣矿区土壤重金属污染及其生物有效性 杨胜香,袁志忠,李朝阳,龙华,唐文杰(1718)

基于GIS的某训练场土壤重金属污染评价 刘玉通,方振东,杨琴,谢朝新,王大勇,毛华军(1725)

土壤质地和湿度对SVE技术修复苯污染土壤的影响 刘少卿,姜林,姚玉君,李艳霞,刘希涛,林春野(1731)

蒙脱土、高岭土和针铁矿对DNA吸附与解吸特征 王慎阳,饶伟,王代长,张亚楠,李腾,唐冰培,杨世杰(1736)

LNAPL在砂质含水层中动态迁移的电阻率法监测试验研究 潘玉英,贾永刚,郭磊,李进军,单红仙(1744)

亚临界水解预处理稻草秸秆制备活性炭及表征 董宇,申哲民,雷阳明,王茜,刘婷婷(1753)

蓝藻好氧堆肥及其氮素损失控制的研究 任云,崔春红,刘奋武,占新华,周立祥(1760)

固定化微生物技术修复PAHs污染土壤的研究进展 钱林波,元妙新,陈宝梁(1767)

《环境科学》征订启事(1483) 《环境科学》征稿简则(1620) 信息(1490,1496,1586,1743)

长江中游干流及 22 条支流表层水中多氯联苯的分布特征及其潜在风险

李昆^{1,2}, 赵高峰^{2*}, 周怀东², 曾敏¹, 廖柏寒¹, 吴正勇^{1,2}, 张盼伟^{1,2}, 郝红²

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

摘要: 采用 GC/MS/MS 技术对长江中游重庆至宜昌段 22 条支流和干流的 47 个表层水样进行分析. 实验发现支流表层水样中 PCB8、28、52 和 118 是优势污染物, 而干流表层水样中 PCB8 和 28 是优势污染物. \sum PCBs 在支流和干流表层水样中的几何均值分别为 $20.71 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $13.25 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, \sum PCBs 最高检出浓度 $61.79 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 出现在支流壤渡河, 最低浓度 $3.77 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 出现在支流草塘河; 85% 的支流表层水样中 \sum PCBs 的浓度高于美国环境保护署制定的连续暴露基准浓度 $14 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 但所有支流和干流水样中 \sum PCBs 的检出浓度都远低于国家饮用水标准限值 $500 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$; 实验结果与国内外相关文献报道值相比较, 也显示该研究区域表层水中 PCBs 浓度处于较低水平, 癌症风险评价结果表明饮用支流和干流的水因摄入 PCBs 而带来的风险分别为 2.07×10^{-7} 和 1.33×10^{-7} , 说明研究区水样中因 PCBs 污染引起的癌症风险较低.

关键词: 长江中游; 干流; 支流; 多氯联苯; 污染特征; 风险

中图分类号: X131.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)05-1676-06

Distribution Characteristics and Potential Risk of PCBs in Surface Water from 22 Tributaries and Mainstream in Middle Reaches of Yangtze River

LI Kun^{1,2}, ZHAO Gao-feng², ZHOU Huai-dong², ZENG Min¹, LIAO Bo-han¹, WU Zheng-yong^{1,2}, ZHANG Pan-wei^{1,2}, HAO hong²

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

Abstract: 47 surface water samples were collected from 22 tributaries and mainstream of the Yangtze River from Chongqing to Yichang. The contents of 28 PCB congeners in surface water samples were measured using Varian CP3800/300 GC-MS/MS technique. PCB8, 28, 52 and 118 are the most predominant PCB congeners in the samples from tributaries, PCB8 and 28 are the most predominant PCB congeners in those from mainstream. The measured level of PCBs in the samples from the tributaries and from the mainstream were $20.71 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ and $13.25 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ respectively. The highest concentrations of PCBs was detected in the samples from Rangdu River ($61.79 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$), the lowest concentrations of PCBs was detected in water samples from Caotang River ($3.77 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$). The average concentrations of PCBs in the samples from more than 85% of tributaries are higher than the USEPA criterion continuous concentration ($14 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$), however, all the levels of PCBs in mainstream and tributaries are far lower than the Chinese drinking water guideline value ($500 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$). The concentrations of PCBs in the samples were in the same order of magnitude of those reported on lower levels in European and American countries. The estimated cumulative cancer risk for the local residents who drink water from tributaries and mainstream were 2.07×10^{-7} and 1.33×10^{-7} , which shows that cancer risk is negligible due to PCBs contamination in these samples.

Key words: middle reaches of Yangtze River; mainstream; tributaries; PCBs; distribution character; risk

长江是亚洲第一大河,世界第三大河,水量和水资源都很丰富.随着经济的高速发展,沿江分布的化工厂、发电厂及人口密集的城镇居民生活区越来越多;经济繁荣的同时也导致大量人工合成的化学物质伴随着污水的排放而进入长江水体.多氯联苯(PCBs)是国际上最关注的首批持久性有机污染物(POPs)之一,也是人类因工业需求而生产合成的产物,由于其具有优良的化学惰性、不可燃性和抗热性,曾被作为热交换剂、润滑剂、变压器和电容器的

绝缘介质、增塑剂等而被广泛应用于化工、电力工业和塑料工业等领域.我国生产的 PCBs 大约有 1 万吨,其中约有 9 000 t 三氯联苯商业混合物(相当于

收稿日期: 2011-07-15; 修订日期: 2011-09-14

基金项目: 中国水利水电科学研究院青年基金项目(环集 1113); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07104, 2008ZX07209, 2009ZX07527); 国家自然科学基金创新研究群体基金项目(51021066)

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

Aroclor1242) 主要用于电容器的浸渍液和变压器的绝缘油^[1]. 多氯联苯能够干扰生物体内激素的合成、转运、结合、代谢和反馈调节, 是典型的内分泌干扰物, 长期暴露于 PCBs 可能诱发癌症, PCBs 被世界卫生组织确认为可能致癌的物质^[1,2].

近年来, 国内针对长江水体的研究工作多集中在重金属^[3]、水体富营养化^[4]等方面; 也有少数学者对长江的局部小范围区域内的有机氯农药及多环芳烃污染进行了研究^[5~8], 而针对含量低、毒性强的 PCBs 等 POPs 开展大范围的调查、大面积的研究工作却较少, 且其研究内容主要集中在

水体沉积物中^[9,10], 对可能直接影响到人类健康的水体中 PCBs 含量研究却较为稀少. 本研究通过采集长江重庆至宜昌段约 700 km 的河段包括嘉陵江、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、九畹溪等 22 条支流以及黄桷渡、铜罐驿、官渡口、清溪场、茅坪等 5 个干流断面的表层水进行分析(见图 1), 研究表层水中 28 种 PCBs 的污染状况, 以为 POPs 的流域性水环境污染提供重要的基础数据支撑.

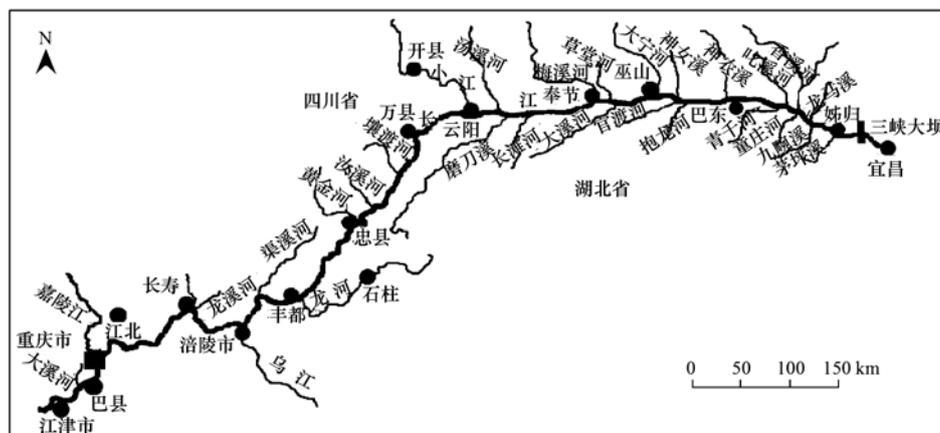


图 1 长江中游重庆至宜昌段采样位置示意

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

1 材料与方法

1.1 实验材料

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 Milli-Q 水纯化系统纯化, 电阻率为 18.2 MΩ·cm); 硅胶 (Merck, Darmstadt, Germany); 去活硅胶 (3.3% H₂O, 质量分数).

1.2 样品采集与预处理

样品采集于 2010 年 11 月, 分别采集各样点表层水 500 mL (其中各支流河口表示入江口 3 km 处, 未标注左中右各点则均为河道中央采集, 如图 1 所示), 选用玻璃纤维滤纸 (0.45 μm, Whatman, England) 过滤, 混合后转移至 500 mL 无污染的容器中; 使用稀盐酸 (6 mol·L⁻¹) 调节 pH 至 2.0, 4℃ 保存, 待进一步处理.

将样品转移至实验室进行前处理, 使用 SPE 装

置进行富集. 富集后的 SPE 柱 (Supelco ENVI-18) 依次选用 10 mL 正己烷、10 mL 二氯甲烷洗脱. 收集洗脱液氮吹浓缩至 1~2 mL, 浓缩后的洗脱液经去活硅胶柱净化. 净化柱填料及用量从下至上依次为无水硫酸钠 2 g、去活硅胶 4 g、无水硫酸钠 2 g. 依次用 20 mL 正己烷、20 mL 正己烷: 二氯甲烷 (1:1) 溶液洗脱. 收集洗脱液浓缩、定容至 50 μL, 待测.

1.3 分析条件

气相色谱-三重四极杆质谱联用仪 Varian CP3800/300, 配备 30 m VF-5-MS (5% phenyl/95% methyl silicone, 30 m, 0.25 mm i. d., 0.25 μm film, Varian, USA). 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℃; 采用电子轰击 (EI) 多反应监测 (MRM) 模式; 程序升温: 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 280℃ 停留 5 min.

1.4 质量控制与保证

玻璃器皿依次用洗涤剂、重铬酸钾洗液、自来水、去离子水和丙酮漂洗, 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 的回收率为 70.4% ~ 92.5%. PCBs 定量标准曲线的浓度包括 5.0、10.0、20.0、50.0、100.0 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 5 个级别;线性复相关系数 $r^2 > 0.98$. 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 PCBs 的浓度低于 LOD 时用 1/2 LOD 进行统计计算,各水样中 PCBs 的浓度根据指示物 TMX 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), 几何均值、数值范围等统计指标用来描述 PCBs 在水样中的浓度.

2 结果与分析

水样中 PCBs 的检出浓度如表 1 所示,长江支流 40 个水样中 PCBs 的几何均值为 $20.71 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$

($3.77 \sim 61.79 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$), 干流 7 个水样中 PCBs 的几何均值为 $13.25 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ($3.81 \sim 46.69 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$). 支流水样中以 PCB8、28、52 和 118 的检出浓度最高 ($>0.20 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$) 是优势污染物,干流水样中以 PCB8、28 的检出浓度最高为优势污染物;支流与干流样品中 PCBs 的检出浓度之间不存在显著性差异 ($P = 0.65 > 0.05$), 处于同一污染水平.

图 2 为各采样点 PCBs 浓度分布图,结果显示干流中最低浓度 ($3.81 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$) 出现在清溪场断面,最高浓度出现在长江茅坪-左断面为 $46.69 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 干流中铜罐驿、清溪场和长江茅坪-中 3 个采样点 \sum PCBs 含量低于美国环境保护署制定的 PCB 连续暴露基准浓度 $14 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 占干流采样点的 43%. 支流中草塘河、大溪河、大宁河、神农溪、龙马溪、龙河河口这 6 个采样点 \sum PCBs 含量均低于 $14 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 占有支流采样点的 15%, 其他采样点含量

表 1 水样中 PCBs 含量的统计结果¹⁾/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 1 Statistical results of PCBs in the water samples/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$

污染物	长江支流样品 ($n=40$)			长江干流样品 ($n=7$)		
	范围	中值	几何均值	范围	中值	几何均值
PCB8	ND ~ 3.91	2.52	1.23	0.86 ~ 3.84	3.68	2.20
PCB18	ND ~ 3.71	0.28	0.13	ND ~ 1.11	0.26	0.06
PCB28	ND ~ 7.41	1.85	0.25	ND ~ 6.38	1.44	0.24
PCB52	ND ~ 6.08	1.06	0.23	ND ~ 6.51	1.01	0.06
PCB44	ND ~ 9.05	0.78	0.19	ND ~ 4.56	NA	0.03
PCB66	ND ~ 1.41	0.17	0.02	ND ~ 2.98	0.07	0.02
PCB101	ND ~ 4.22	0.92	0.08	ND ~ 4.10	NA	0.04
PCB81	ND ~ 0.35	NA	NA	ND ~ 4.15	NA	NA
PCB77	0.06 ~ 0.34	0.06	0.09	0.06 ~ 0.21	0.06	0.07
PCB123	0.05 ~ 0.42	0.06	0.08	0.06 ~ 0.63	0.06	0.09
PCB118	0.06 ~ 5.95	0.77	0.37	0.06 ~ 1.26	0.06	0.12
PCB114	0.04 ~ 5.39	0.04	0.16	0.04 ~ 5.70	0.04	0.12
PCB153	0.02 ~ 2.94	0.65	0.16	0.02 ~ 2.88	0.02	0.07
PCB105	0.05 ~ 0.12	0.05	0.06	0.05 ~ 0.15	0.05	0.06
PCB138	0.01 ~ 5.07	1.11	0.11	0.01 ~ 1.12	0.01	0.02
PCB126	ND ~ 9.52	1.68	0.05	ND ~ 5.02	NA	NA
PCB187	ND ~ 7.15	NA	NA	ND ~ 7.66	NA	NA
PCB128	0.01 ~ 5.14	0.01	0.04	0.01 ~ 1.20	0.01	0.02
PCB167	0.01 ~ 6.63	0.01	0.04	0.01 ~ 1.43	0.01	0.04
PCB156	0.01 ~ 6.32	0.01	0.06	0.01 ~ 1.34	0.01	0.03
PCB157	0.01 ~ 5.81	0.01	0.06	0.01 ~ 5.51	0.01	0.04
PCB180	0.01 ~ 3.20	0.01	0.03	ND	NA	NA
PCB169	ND ~ 8.61	0.84	0.09	ND ~ 0.88	NA	NA
PCB170	ND ~ 4.26	NA	NA	ND ~ 4.05	NA	NA
PCB189	ND ~ 4.41	0.94	0.04	ND	NA	NA
PCB195	ND	NA	NA	ND	NA	NA
PCB206	ND	NA	NA	ND	NA	NA
PCB209	ND	NA	NA	ND	NA	NA
\sum PCBs	3.77 ~ 61.79	20.33	20.71	3.81 ~ 46.69	20.16	13.25

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

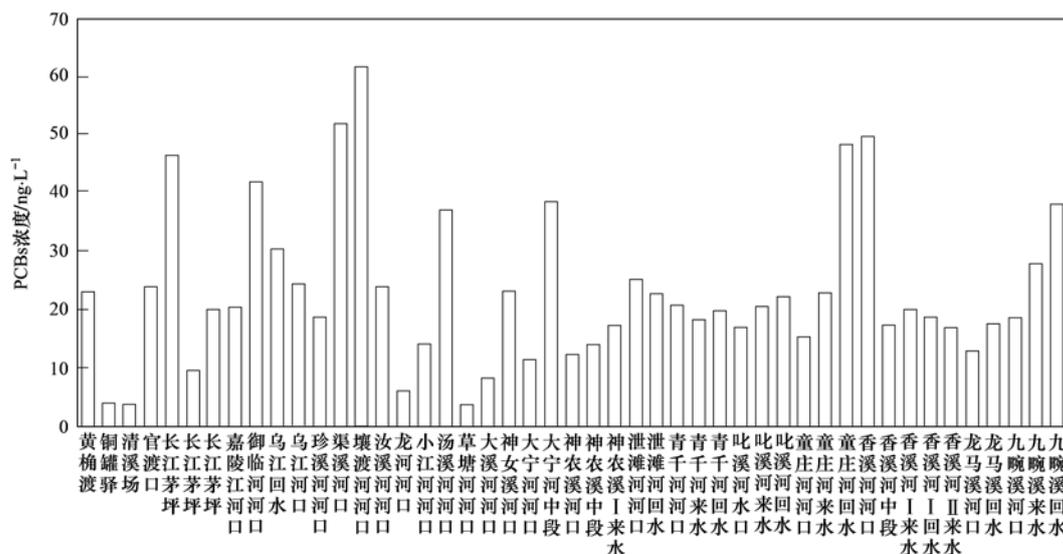


图 2 各采样点表层水中 PCBs 质量浓度分布

Fig. 2 Total concentrations of PCBs in surface water samples collected from the middle reaches of Yangtze River

均超过 $14 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 其中以壤渡河水样中 \sum PCBs 的浓度最高达 $61.79 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$.

3 癌症风险计算

根据 US EPA^[11] 的癌症风险计算公式:

$$\text{LADD} = (c \times \text{IR} \times \text{ED}) / (\text{BW} \times \text{LT})$$

$$\text{Risk} = \text{LADD} \times \text{CSF}$$

式中, LADD: 生命周期内平均日摄入量; c : 饮用水中 PCBs 的浓度; IR: 日摄入量 ($\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$); ED: 暴露

持续时间 (a); BW: 体重 (kg); LT: 生命周期 (a); Risk: 生命周期内癌症风险; CSF: 癌症斜率因子 [$\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$].

普通居民饮用水日摄入量为 2000 mL 计算, 式中 $\text{IR} = 2000 \text{ g}\cdot\text{d}^{-1}$, $\text{ED} = 30 \text{ a}$, $\text{BW} = 60 \text{ kg}$, $\text{LT} = 70 \text{ a}$; $\text{CSF} = 0.07$. 模型公式及数据均来自美国能源部风险评估信息系统 RAIS (Risk Assessment Information System) 数据库, 且数据采用默认值. 计算结果如表 2.

表 2 癌症风险计算结果

Table 2 Results of cumulative cancer risk

地点	癌症斜率因子 $/\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$	浓度 $/\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	饮用水 $/\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$	ED $/\text{a}$	BW $/\text{kg}$	LT $/\text{a}$	风险
长江支流	0.07	20.71	2000	30	60	70	2.07×10^{-7}
长江干流	0.07	13.25	2000	30	60	70	1.33×10^{-7}

4 讨论

PCBs 是斯德哥尔摩公约致力于削减的 12 种持久性有机污染物之一. 我国从 1965 年开始生产, 到 1974 年宣布停止, 有 10 a 的生产历史, 累计产量近万 t, 其中约有 9000 t 三氯联苯商业混合物用于电容器的浸渍液和变压器的绝缘油. 三氯联苯商业混合物的生产厂家有西安化工厂、上海电化厂、苏州溶剂厂, 产品主要用作电力电容器的介质. 我国的 PCBs 现存量仍然很大, 我国对 PCBs 的处置技术与保管措施都有待完善, 二次污染和永久性污染问题比较严重, 很多含 PCBs 的电力装置的封存期近 20 a, PCBs 的外泄已引起了封存点附近的环境污染^[12]. 随着雨水的淋溶, 这些泄漏出的 PCBs 会流入河道,

引起河流水体污染. 研究结果显示长江干流水样中 PCB8 和 28 是优势污染物, 支流水样中 PCB8、28、52 和 118 是优势污染物, 在干流与支流水体交汇过程中表层水中的 PCBs 会发生复杂的物理化学交换, 导致干支流中的优势污染物略有差别. 我国生产的三氯联苯商业混合物在成分组成上相当于 Aroclor1242 商业混合物, 其中 PCB8、28、52 和 118 分别占到总质量的 7.05%、6.86%、3.53% 和 0.66%^[1,2], 相对其他同族体而言这些同族体在商业混合物中也是最主要的组分, PCB8、28、52 和 118 属于低氯代的同族体, 与高氯代的相比更易溶于水, 上述论述说明研究区域表层水中 PCBs 的污染主要源于我国生产的三氯联苯商业混合物.

表 1 与图 2 所示的结果显示干流表层水中

PCBs 最高浓度出现在长江茅坪-左断面为 $46.69 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 而茅坪断面采样点正好位于三峡大坝的坝前, 由于水流速度缓慢、滞留时间长、稀释能力减弱, 容易形成岸边污染带, 上游带来的污染物可能会在岸边污染带累积, 加上大坝附近人类干扰强度的增加是导致长江茅坪-左断面 PCBs 检出浓度较高的原因. 支流中壤渡河表层水中 PCBs 的检出浓度最高为 $61.79 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 在壤渡河上的采样点正好位于万州市政排污口附近, 因此市政污水携带的 PCBs 是壤渡河表层水样中 PCBs 的可能来源.

表 1 的数据显示研究区域干流与支流的表层水中 PCBs 浓度分别为 $13.75 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $20.75 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 统计分析的显著性结果表明长江干流与支流水样中

PCBs 的检出浓度之间不存在显著性差异 ($P = 0.65 > 0.05$), 两者处于同一污染水平, 这是因为干流与支流水体交换频繁, 导致 PCBs 等污染物在表层水中的分布比较均衡. 部分支流表层水样中 PCBs 的浓度要高于美国环境保护署制定的连续暴露基准浓度 $14 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 说明研究区域表层水中 PCBs 的长期暴露可能会对水生生物带来一定危害, 但所有干、支流水样中 PCBs 的浓度都远低于国家饮用水标准限值 $500 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$.

为了更好地理解研究区域表层水中 PCBs 的污染程度, 将数据统计结果与国内外的报道相比较 (表 3), 发现研究区域表层水中 PCBs 浓度处于较低污染水平.

表 3 表层水中 PCBs 的国际对比/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 3 Levels of PCBs among surface water samples in various localities in other countries/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$

国家 (或地区)	采样时间 (年)	研究区域	PCBs	文献
中国	2010	长江中游支流与干流	3.77 ~ 61.79	本研究
美国 ¹⁾	2004	密西西比河	22.2 ~ 163.4	[13]
瑞典 ²⁾	2007	波罗的海	3.4 ~ 29	[14]
意大利 ³⁾	2001, 2003	威尼斯泻湖	0.261 ~ 0.871	[15]
美国 ⁴⁾	2002, 2003	休斯顿船道	0.49 ~ 12.49	[16]
中国 ⁵⁾	2000	九龙江	0.36 ~ 150	[17]
中国 ⁶⁾	2002	通惠河	31.58 ~ 344.9	[18]
中国 ⁷⁾	2004	海河	310 ~ 3110	[19]

1) PCB1, 5, 18, 29, 31, 50, 77, 52, 104, 44, 66, 101, 87, 110, 154, 151, 188, 153, 141, 138, 187, 183, 201, 180, 170, 208, 206, 209; 2) PCB77, 81, 126, 169, 105, 114, 118, 123, 156, 157, 167, 189, 28, 52, 101, 128, 138, 153, 180, 195, 206, 209; 3) PCB18, 28, 31, 52, 95, 84, 90, 101, 110, 153, 138, 180, 194; 4) PCB8, 18, 30, 20, 28, 44, 47, 65, 52, 66, 90, 101, 113, 105, 118, 128, 166, 129, 138, 163, 153, 168, 170, 193, 195, 206, 209; 5) PCB18, 31, 28, 52, 44, 101, 149, 118, 153, 138, 180, 194; 6) PCB18, 31, 28, 52, 44, 101, 149, 118, 153, 138, 180, 194; 7) PCB18, 28, 31, 44, 52, 101, 118, 138, 149, 153, 180, 194

根据 US EPA^[11] 的癌症风险计算方法获得的评价结果显示长江干流与支流地区居民通过饮水摄入 PCBs 引起的癌症风险值分别是 2.07×10^{-7} 和 1.33×10^{-7} , US EPA 癌症风险标准是在无污染理想状态中 1 百万人中出现 1 例癌症提出, 但是现实中不可能完全无污染, 所以风险管理部门可接受的风险区间为 $10^{-6} \sim 10^{-4}$, 因此长江干流与支流地区通过饮水摄入 PCBs 引起的癌症风险值分别是正常风险水平 10^{-6} 的 1/5 与 1/8, 故该区域水体对人体的潜在风险效应相对较低.

5 结论

(1) 长江中游 22 条支流和 5 个干流断面表层水样中 PCBs 的检出浓度分别为 $20.71 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $13.25 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 支流与干流水样中 PCBs 的浓度不存在显著性差异 ($P = 0.65 > 0.05$), 处于同一污染水平.

(2) 与国内外的河流表层水中报道的 PCBs 浓

度相比长江表层水样中 PCBs 污染处于较低水平; 癌症风险的评估结果表明因饮水而摄入 PCBs 引起的潜在癌症风险较低.

参考文献:

- [1] WHO. Polychlorinated biphenyls and terphenyls. Environmental Health Criteria, 140 [S]. Geneva, Switzerland: World Health Organization, 1993. 444-479.
- [2] Van den Berg M, Birnbaum L, Bosveld A T, et al. Toxic equivalency factors (TEFs) for PCBs, PCDDs, PCDFs for humans and wildlife[J]. Environmental Health Perspect, 1998, 106(12): 775-792.
- [3] 王岚, 王亚平, 许春雪, 等. 长江水体中重金属元素来源的分析和评价[A]. 见: 中国矿物岩石地球化学学会第 12 届学术年会论文集[C]. 2009.
- [4] 江涛. 长江口水域富营养化的形成, 演变与特点研究[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2009.
- [5] 许士奋, 蒋新, 冯建, 等. 气相色谱法测定长江水体悬浮物和沉积物中有机氯农药的残留量[J]. 环境科学学报, 2000, 20(4): 494-498.

- [6] 张银华, 徐小青. 武汉长江水体中痕量有机污染物的 GC-MS 研究[A]. 见:第十届全国有机质谱学学术会议论文集[C]. 1999.
- [7] 董玉瑛, 孙成, 王连生. 长江水体多氯有机物的分析与分布规律研究[A]. 见:持久性有机污染物论坛 2007 暨第二届持久性有机污染物全国学术研讨会论文集[C]. 2007.
- [8] 杨嘉谟, 王赞, 苏青青. 有机氯农药在长江武汉段的残留状况调查[J]. 武汉化工学院学报 2004, **26**(4): 38-41.
- [9] Yang Z F, Shen Z Y, Gao F, *et al.* Occurrence and possible sources of polychlorinated biphenyls in surface sediments from the Wuhan reach of the Yangtze River, China[J]. *Chemosphere*, 2009, **74**(11): 1522-1530.
- [10] Yang Z F, Shen Z Y, Gao F, *et al.* Polychlorinated biphenyls in urban lake sediments from Wuhan, Central China: occurrence, composition, and sedimentary record [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2009, **38**(4): 1441-1448.
- [11] US EPA (United States Environmental Protection Agency). PCBs: Cancer dose-response assessment and application to environmental mixtures [S]. National Center for Environmental Assessment Office of Research and Development EPA/600/P-96/001F, 1996.
- [12] 邵春岩. 中国多氯联苯(PCBs) 管理现状及污染防治对策[A]. 见:持久性有机污染物控制研讨会论文集[C]. 北京: 2001.
- [13] Zhang S Y, Zhang Q, Darisaw S, *et al.* Simultaneous quantification of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), polychlorinated biphenyls (PCBs), and pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in Mississippi river water, in New Orleans, Louisiana, USA [J]. *Chemosphere*, 2007, **66**(6): 1057-1069.
- [14] Josefsson S, Karlsson O M, Malmaeus J M, *et al.* Structure-related distribution of PCDD/Fs, PCBs and HCB in a river-sea system[J]. *Chemosphere*, 2011, **83**(2): 85-94.
- [15] Moret I, Gambaro A, Piazza R, *et al.* Determination of polychlorobiphenyl congeners (PCBs) in the surface water of the Venice lagoon[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2005, **50**(2): 167-174.
- [16] Howell N L, Suarez M P, Rifai H S, *et al.* Concentrations of polychlorinated biphenyls (PCBs) in water, sediment, and aquatic biota in the Houston Ship Channel, Texas [J]. *Chemosphere*, 2008, **70**(4): 593-606.
- [17] 张祖麟, 陈伟琪, 哈里德, 等. 九龙江口水体中多氯联苯的研究[J]. 云南环境科学, 2000, **19**(增刊): 124-126.
- [18] Zhang Z L, Huang J, Yu G, *et al.* Occurrence of PAHs, PCBs and organochlorine pesticides in the Tonghui River of Beijing, China[J]. *Environmental Pollution*, 2004, **130**(2): 249-261.
- [19] 王泰, 张祖麟, 黄俊, 等. 海河与渤海湾水体中溶解态多氯联苯和有机氯农药污染状况调查[J]. 环境科学, 2007, **28**(4): 730-735.

CONTENTS

Using Look-up Table Method in the Simulation of Regional Atmospheric Environment	XIE Min, WANG Ti-jian, JIANG Fei, <i>et al.</i> (1409)
Applications of Pollutants Released from Crop Residues at Open Burning in Yangtze River Delta Region in Air Quality Model	SU Ji-feng, ZHU Bin, KANG Han-qing, <i>et al.</i> (1418)
Atmospheric Dry Deposition Flux and Sources of Monocarboxylic Acids in Beijing and Surrounding Cities	XU Xiao-juan, LI Xing-ru, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (1425)
Comparison of Physicochemical Characterization of Shanghai Ambient Ultrafine Particles and Engineered Nano Particles and Their Cytotoxicity	ZHANG Rui, LÜ Sen-lin, SHANG Yu, <i>et al.</i> (1431)
Element Compositions and Source of PM _{2.5} Aerosols in Qingdao	LI Xiu-zhen, SHENG Li-fang, XU Hua, <i>et al.</i> (1438)
Phthalate Esters Pollution in Household Indoor Air Particles of Tianjin in Winter	WANG Fu-mei, CHEN Li, JIAO Jiao, <i>et al.</i> (1446)
Application of a Resuspension Test Chamber in PM _{2.5} Source Profile Analysis	DUAN Heng-yi, QIAN Ran-ran, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (1452)
Distribution and Enrichment of Trace Elements in Coal Combustion Products from Southwestern Guizhou	WEI Xiao-fei, ZHANG Guo-ping, LI Ling, <i>et al.</i> (1457)
Air-Water Surface Greenhouse Gas Flux in Pengxi River at Different Operational Stages of the Three Gorges Reservoir	JIANG Tao, GUO Jing-song, LI Zhe, <i>et al.</i> (1463)
Fluxes of Greenhouse Gases from Xiangxi River in Summer and Their Influencing Factors	WANG Liang, XIAO Shang-bin, LIU De-fu, <i>et al.</i> (1471)
Effects of Elevated Ozone Concentration and Soil Moisture on Temperature Sensitivity of Soil Microbial Respiration in a Cropland	CHEN Shu-tao, ZHANG Yong, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (1476)
Hydrochemical Characteristics in the Glacier No. 72 of Qingbingtan, Tomur Peak	ZHAO Ai-fang, ZHANG Ming-jun, LI Zhong-qin, <i>et al.</i> (1484)
Mineralization Characteristics of Dissolved Organic Phosphorous in Wudalianchi Lake, China	ZHANG Bin, XI Bei-dou, ZHAO Yue, <i>et al.</i> (1491)
Speciation Distribution of Nitrogen in Sediments of 7 Rivers around Taihu Lake	LU Shao-yong, YUAN Ye, JIN Xiang-can, <i>et al.</i> (1497)
Distribution and Bioavailability of Nitrogen and Phosphorus Species in the Sediments from Shiwuli Stream in Lake Chaohu	LI Ru-zhong, LI Feng, ZHOU Ai-jia, <i>et al.</i> (1503)
Surface Water Quality of Beiyun Rivers Basin and the Analysis of Acting Factors for the Recent Ten Years	GUO Jing, JING Hong-wei, LI Jin-xiang, <i>et al.</i> (1511)
Water Quality Impact of Dongjiang River Network Caused by Dongguan Canal Drainage	SUN Lei, MAO Xian-zhong, HUANG Min-min (1519)
Groundwater Pollution Sources Identification and Grading in Beijing Plain	LU Yan, HE Jiang-tao, WANG Jun-jie, <i>et al.</i> (1526)
3D Numerical Simulation of Air Sparging Remediation Process	LI Heng-zhen, HU Li-ming, WANG Jian, <i>et al.</i> (1532)
Numerical Experiment Study on the Algae Suppression Effect of Vertical Hydrodynamic Mixers	ZOU Rui, ZHOU Jing, SUN Yong-jian, <i>et al.</i> (1540)
Microbial Mechanism of Pollutants Removal in New Biological Island Grid	GAO Ming-yu, XIE Hui-jun, WANG Wen-xing (1550)
Effect of Nutrition Level of Phosphorus and Nitrogen on the Metabolism of the Extracellular Organic Matter of <i>Nostoc flagelliforme</i>	QI Fei, LIU Xiao-yuan, XU Bing-bing, <i>et al.</i> (1556)
Inhibitory Effects of Liquor Cultured with <i>Hydrodictyon reticulatum</i> on the Growth of <i>Microcystis aeruginosa</i>	FU Hai-yan, CHAI Tian, ZHAO Kun, <i>et al.</i> (1564)
Removal and Distribution of Phthalate Acid Esters in <i>Potamogeton crispus</i> L. Microcosm of Haihe River	CHI Jie, YANG Qing (1570)
Control and Removal of Microcystin Production of <i>Microcystis aeruginosa</i> by Irradiation of Electron Beam	LIU Shu-yu, WU Ming-hong, JIANG Qin-peng (1575)
Source Characteristics Analysis of Discharge and Pollutants in Typical Drainage Ditch of Qingtongxia Irrigation District	LI Qiang-kun, HU Ya-wei, LUO Liang-guo (1579)
Degradation of TBBPA by Electron Beam Radiolysis	LI Jie, XU Dian-dou, XU Gang, <i>et al.</i> (1587)
Catalytic Ozonation of Ibuprofen in Aqueous Solution by Activated Carbon Made from Sludge and Corn Cob	WANG Hong-juan, QI Fei, FENG Li, <i>et al.</i> (1591)
Effect of High Hydraulic Loading on Intensive Shrimp Aquaculture Wastewater Treatment Performance in Constructed Wetland	LI Huai-zheng, ZHANG Xing-yi, CHEN Wei-bing, <i>et al.</i> (1597)
Factors Influencing the Formation of NDMA During Chloramination Disinfection of Effluent from Biological Nitrogen Removal System for the Treatment of Municipal Sewage	SHANG Xiao-ling, LI Yong-mei (1604)
Denitrification Using Starch/PCL Blends as Solid Carbon Source	SHEN Zhi-qiang, WU Wei-zhong, YANG Chun-ping, <i>et al.</i> (1609)
Profiles of Zeta Potential and EPS in Granulation Process of Aerobic Sludge	WANG Hao-yu, SU Ben-sheng, HUANG Dan, <i>et al.</i> (1614)
Biosorption Characteristics of f2 Bacteriophage onto Activated Sludge	ZHOU Yu-fen, ZHENG Xiang, LEI Yang, <i>et al.</i> (1621)
Adsorption of Anionic Polyacrylamide on the Surface of Ion Exchange Membranes	DENG Meng-jie, YU Shui-li, SHI Wen-xin, <i>et al.</i> (1625)
Adsorption of Amphoteric Modified Bentonites to Phenol and Its Thermodynamics	LI Ting, MENG Zhao-fu, ZHANG Bin (1632)
Effect of Surfactants on Sorption and Desorption of Benzo[a]pyrene onto Black Carbon	ZHANG Jing-huan, CHEN Chun-rong, ZHANG Wei-hang, <i>et al.</i> (1639)
Isolation and Identification of Bacteria in the Activated Sludge from Four Sewage Treatment Plants in Nanjing City and Its Antibiotic Resistance Analysis	GE Feng, GUO Kun, ZHOU Guang-can, <i>et al.</i> (1646)
Screening and Characterization of Phenol Degrading Bacteria for the Coking Wastewater Treatment	CHEN Chun, LI Wen-ying, WU Jing-wen, <i>et al.</i> (1652)
Characteristics of 1,4-Dioxane Degradation by <i>Xanthobacter flavus</i> DTS	JIN Xiao-jun, CHEN Dong-zhi, ZHU Run-ye, <i>et al.</i> (1657)
Spatial Quantitative Distribution of Hydrocarbon-Oxidizing Bacteria of Unexploited Oil and Gas Fields	MAN Peng, QI Hong-yan, HU Qing, <i>et al.</i> (1663)
Screening and Biological Characteristics of Amphitrophic Methane-Oxidizing Bacteria from Aged-Refuse	ZHAO Tian-tao, XIANG Jin-xin, ZHANG Li-jie, <i>et al.</i> (1670)
Distribution Characteristics and Potential Risk of PCBs in Surface Water from 22 Tributaries and Mainstream in Middle Reaches of Yangtze River	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1676)
Pollution Characteristics and Potential Risks of Phenolic Compounds in Schistosomiasis Epidemic Areas	WU Zheng-yong, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1682)
Spatial Heterogeneity and Autocorrelation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediment of Minjiang River in Fuzhou City	CHEN Wei-feng, NI Jin-zhi, YANG Hong-yu, <i>et al.</i> (1687)
Heavy Metals Pollution and Its Potential Ecological Risk of the Sediments in Three Gorges Reservoir During Its Impounding Period	WANG Jian-kang, GAO Bo, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1693)
Investigation on the Distribution and Potential Ecological Risk of Heavy Metal in the Sediments from Typical Electrical Industrial Zone	DENG Dai-yong, SUN Guo-ping, GUO Ju, <i>et al.</i> (1700)
Fraction Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Iron and Gold Mine Soil of Miyun Reservoir Upstream	GAO Yan-xin, FENG Jin-guo, TANG Lei, <i>et al.</i> (1707)
Heavy Metal Contamination and Bioavailability in Huayuan Manganese and Lead/Zinc Mineland, Xiangxi	YANG Sheng-xiang, YUAN Zhi-zhong, LI Zhao-yang, <i>et al.</i> (1718)
Evaluation of Heavy Metal Pollution in Soils from a Training Ground Based on GIS	LIU Yu-tong, FANG Zhen-dong, YANG Qin, <i>et al.</i> (1725)
Effects of Soil Texture and Water Content on Remediation of SVE on Soils Contaminated by Benzene	LIU Shao-qing, JIANG Lin, YAO Yu-jun, <i>et al.</i> (1731)
Characteristics of DNA Adsorption and Desorption in Montmorillonite, Kaoline and Goethite	WANG Shen-yang, RAO Wei, WANG Dai-zhang, <i>et al.</i> (1736)
LNAPL Migration Monitoring in Simulated Sand Aquifer Using Resistivity Method	PAN Yu-ying, JIA Yong-gang, GUO Lei, <i>et al.</i> (1744)
Preparation and Characterization of Activated Carbon from Rice Straw Pre-treated by the Subcritical Hydrolysis	DONG Yu, SHEN Zhe-min, LEI Yang-ming, <i>et al.</i> (1753)
Study on Composting of Cyanobacteria Amended with Different N Loss Inhibitor	REN Yun, CUI Chun-hong, LIU Fen-wu, <i>et al.</i> (1760)
Research Progress About Bioremediation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Contaminated Soil with Immobilized Microorganism Technique	QIAN Lin-bo, YUAN Miao-xin, CHEN Bao-liang (1767)

《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5月15日 33卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 5 May 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