

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第10期

Vol.36 No.10

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于细颗粒物来源追踪技术的2013年12月上海市严重污染过程中PM _{2.5} 的源贡献分析·····	李莉, 安静宇, 严茹莎 (3543)
华北地区乡村站点(曲周)夏季PM _{2.5} 中二次无机组分的生成机制与来源解析·····	陈仕意, 曾立民, 董华斌, 朱彤 (3554)
成都市大气PM _{2.5} 中有机磷阻燃剂的污染水平及来源·····	印红玲, 李世平, 叶芝祥, 杨迎春, 梁金凤, 游俊杰 (3566)
不同生物质燃烧排放多环芳烃及糖醇类化合物的模拟研究·····	黄帅, 黄欣怡, 吴水平, 胡清华, 陈晓秋 (3573)
北京地区大气消光特征及参数化研究·····	陈一娜, 赵普生, 何迪, 董璠, 赵秀娟, 张小玲 (3582)
光助芬顿反应催化降解气体中甲苯·····	郑思灿, 陈天虎, 刘海波, 邹雪华, 朱承驻, 陈冬 (3590)
遗体火化二噁英类排放水平及影响因素·····	尹文华, 于晓巍, 韩静磊, 冯桂贤, 付建平, 杨艳艳, 鞠勇明, 张素坤 (3596)
我国餐厨废物生化处理设施恶臭排放特征分析·····	张妍, 王元刚, 卢志强, 韩萌, 商彬彬, 曹阳, 张君 (3603)
太湖湖表反照率时空特征及影响因子·····	曹畅, 李旭辉, 张弥, 刘寿东, 肖薇, 肖启涛, 徐家平 (3611)
基于GOCI影像的太湖水体漫滩系数遥感反演·····	王珊珊, 李云梅, 王桥, 吕恒 (3620)
河口盐度梯度下短叶茳苳沼泽湿地土壤间隙水溶解性甲烷时空特征·····	杨平, 张子川, 杜威宁, 黄佳芳, 全川 (3633)
石家庄市土壤水分运移的稳定同位素特征分析·····	陈同同, 陈辉, 韩璐, 邢星, 付阳阳 (3641)
长寿湖水库垂直剖面不同形态汞的季节变化特征及其影响因素·····	白薇扬, 张成, 唐振亚, 赵铮, 王定勇 (3649)
三峡库区消落带4种典型植物根际土壤养分与氮素赋存形态·····	王晓峰, 袁兴中, 刘红, 张磊, 尉建军, 岳俊生 (3662)
湖泊水-沉积物界面DIC和DOC交换通量及耦合关系·····	王伟颖, 吕昌伟, 何江, 左乐, 颜道浩 (3674)
水体扰动条件下物质在沉积介质中的迁移·····	李邵龙, 陈道毅 (3683)
城市道路径流的排污特征·····	武俊良, 任玉芬, 王雪梅, 王效科, 陈利顶, 刘刚才 (3691)
杭州市余杭区典型农村暴雨径流污染特征·····	段圣辉, 赵钰, 单保庆, 唐文忠, 张文强, 张淑珍, 郎超 (3697)
海水淡化超滤-反渗透工艺沿程溴代消毒副产物变化规律·····	杨哲, 孙迎雪, 石娜, 胡洪管 (3706)
天然有机物和电解质对水中C ₆₀ 凝聚行为的影响·····	方华, 荆洁, 于江华, 王钰葶 (3715)
铅改性高岭土原位改良技术控制重污染河道底泥磷释放效果·····	王虹, 林建伟, 詹艳慧, 章喆, 王笛入 (3720)
污水管网中无机氮类营养盐变迁规律·····	金鹏康, 焦丁, 任武昂 (3730)
微好氧水解酸化在石化废水预处理中的应用研究·····	朱晨, 吴昌永, 周岳溪, 伏小勇, 陈学民, 邱延波, 吴晓峰 (3738)
倒置A ² /O-MBR组合工艺处理生活污水效能及膜污染特性·····	王旭东, 马亚斌, 王磊, 杨怡婷, 黄丹曦, 夏四清 (3743)
高氨氮对具有回流的PN-ANAMMOX串联工艺的脱氮影响·····	李祥, 崔剑虹, 袁砚, 黄勇, 袁怡, 刘忻 (3749)
苯甲酸盐厌氧驯化体系中三氯乙烯的还原脱氯特性·····	李姜维, 杨晓永, 胡安谊, 于昌平 (3756)
驯化污泥厌氧还原脱氯促进2,4,6-三氯酚矿化及胞外呼吸脱氯途径·····	宋佳秀, 李玲, 盛凡凡, 郭翠香, 张永明, 李祖元, 王天丽 (3764)
苯酚对厌氧氨氧化污泥脱氮效能长短期影响·····	杨朋兵, 李祥, 黄勇, 朱亮, 崔剑虹, 徐彬彬 (3771)
连续流好氧颗粒污泥系统处理低COD/N实际生活污水的工艺优化·····	鲁磊, 信欣, 鲁航, 朱辽东, 谢思建, 武勇 (3778)
FNA对好氧吸磷的长期抑制及污泥吸磷方式转化·····	马娟, 李璐, 俞小军, 孙雷军, 孙洪伟, 陈永志 (3786)
污水处理厂不同工艺的污泥脱水效能分析及其影响因素研究·····	刘吉宝, 李亚明, 吕鑑, 魏源送, 杨敏, 郁达伟 (3794)
残留过氧化氢对微波-过氧化氢-碱预处理后污泥水解酸化的影响·····	贾瑞来, 刘吉宝, 魏源送, 才兴 (3801)
大围山典型森林土壤有机氮垂直分布特征·····	丁咸庆, 马慧静, 朱晓龙, 陈珊, 侯红波, 彭佩钦 (3809)
缙云山不同土地利用方式对土壤活性有机碳、氮组分的影响·····	祁心, 江长胜, 郝庆菊, 李鉴霖 (3816)
三峡库区典型退耕还林模式土壤养分流失控制·····	吴东, 黄志霖, 肖文发, 曾立雄 (3825)
坡位与土层对喀斯特原生林土壤微生物生物量与丰度的影响·····	冯书珍, 苏以荣, 张伟, 陈香碧, 何寻阳 (3832)
不同种植方式对亚热带红壤微生物多样性的影响·····	沈冰洁, 祝贞科, 袁红朝, 葛体达, 王久荣, 陈明利, 吴晓英, 吴金水 (3839)
有色冶金区土壤-玉米系统汞累积及健康风险·····	纪小凤, 郑娜, 王洋, 刘强, 张静静 (3845)
改良剂对4种木本植物的铅锌耐性、亚细胞分布和化学形态的影响·····	陈永华, 张富运, 吴晓英, 梁希, 袁斯文 (3852)
菹草乙酸酯组分抑藻活性物质的分离纯化和鉴定·····	孙颖颖, 苏振霞, 浦寅芳, 肖辉, 王长海 (3860)
血吸虫病疫区水生生物体内氯苯化合物的污染特征与潜在风险·····	李昆, 赵高峰, 周怀东, 赵健, 张盼伟, 刘巧娜, 王兴勋, 刘晓茹 (3866)
生物传感细胞ADP1_pWHLux在水环境急性毒性检测中的应用·····	唐慧, 宋一之, 姜博, 陈光玉, 贾建丽, 张旭, 李广贺 (3872)
虹鳟鱼鳃及肝脏多种CYP1基因表达模式作为生物标志物监测海河水污染状况·····	高锴, 闫佩, 檀翠玲, 罗彦鹤, 孙静, Maria E. Jönsson, Ingvar Brandt, 唐运平 (3878)
纳米氧化锌对斑马鱼肝脏的毒性效应·····	刘林, 赵群芬, 金凯星, 朱帅旗, 王小飞, 吕佳昀 (3884)
黄连根茎浸提物对隆线蚤的急性毒性作用·····	陈亚楠, 袁玲 (3892)
发酵稻壳对亚铁离子和硫离子的吸附-解吸附特性·····	谢晓梅, 廖敏, 华嘉媛, 陈娜, 张楠, 徐培智, 解开治, 徐昌旭, 刘光荣 (3896)
搅拌棒吸附萃取-气相色谱-质谱联用测定海水中邻苯二甲酸酯·····	高晨晨, 李锋民, 卢伦, 孙玥 (3906)
COD组分分析的实验条件及结果可靠性分析·····	李志华, 张银, 韩杏, 余科, 李汝佳 (3913)
养猪废水和污泥中11种兽用抗生素的同时分析技术及其在生物降解过程的应用·····	丁佳丽, 刘锐, 郑炜, 余卫娟, 叶朝霞, 陈吕军, 张永明 (3918)
土壤微生物产电技术及其潜在应用研究进展·····	邓欢, 薛洪婧, 姜允斌, 钟文辉 (3926)
《环境科学》征订启事 (3553)	
《环境科学》征稿简则 (3589)	
信息 (3705, 3755, 3763, 3800)	

血吸虫病疫区水生生物体内氯苯化合物的污染特征与潜在风险

李昆¹, 赵高峰^{1*}, 周怀东¹, 赵健², 张盼伟¹, 刘巧娜¹, 王兴勋¹, 刘晓茹¹

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 2. 中国环境科学研究院, 北京 100012)

摘要: 采用 GC/MS 技术对典型血吸虫病疫区不同水期采集的 1 种软体生物和 5 种鱼体肌肉进行分析. 实验发现 3 类二氯苯和六氯苯(HCB)为优势污染物. $\sum$ CBs 在软体生物肌肉中几何均值(以脂肪质量计,下同)为 $11\,947\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$; 在鱼体肌肉中范围为 $1\,851\sim8\,159\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 鱼体 $\sum$ CBs 最高浓度出现在鲢鱼体内,最低浓度出现在鲫鱼体内;实验结果与国内外相关文献报道值比较,显示该区域软体生物体内 HCB 含量与其他区域相当;鱼体肌肉中 HCB 含量则处于较高污染水平. 癌症风险评估结果表明因软体生物和鱼类摄入 HCB 而带来的风险分别为 1.49×10^{-7} 和 $3.73\sim21.1\times10^{-7}$,说明研究区域水生生物中因 HCB 污染引起的癌症风险处于可接受水平.

关键词: 血吸虫病疫区; 水生生物; 氯苯化合物; 污染特征; 癌症风险

中图分类号: X171; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)10-3866-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.10.041

Distribution Characteristics and Potential Risk of CBs in Aquatic Organisms from Typical Epidemic Areas of Schistosomiasis Prevalence

LI Kun¹, ZHAO Gao-feng^{1*}, ZHOU Huai-dong¹, ZHAO Jian², ZHANG Pan-wei¹, LIU Qiao-na¹, WANG Xing-xun¹, LIU Xiao-ru¹

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: Eleven mollusca samples and 32 fish samples were collected from typical epidemic areas of schistosomiasis prevalence. The contents of 12 CB congeners in aquatic organism samples were measured using the GC/MS technique. The results indicated that 1,3-DIC, 1,4-DIC, 1,2-DIC and HCB were the most predominant CB congeners in the samples from the studying area. The geometric average of CBs in muscle of mollusca was $11\,947\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ lipid weight. The summarized concentration of CBs in fish muscle ranged from $1\,851$ to $8\,159\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ lipid weight. The highest concentration of CBs sum was detected in the catfish, while the lowest one was found in the crucian carp. The concentrations of CBs in fish samples were much higher than those reported in other countries, while in mollusca samples were at the same level. The estimated cumulative cancerigenic risks for the local residents consumed the aquatic organisms from the studying area were 1.49×10^{-7} and $3.73\sim21.1\times10^{-7}$, respectively for mollusca and fish, both of which were acceptable.

Key words: epidemic areas of schistosomiasis prevalence; aquatic organisms; chlorobenzenes(CBs); distribution; cancerigenic risk

氯苯类化合物广泛应用于染料、医药、农药、有机合成等工业中^[1],在水体^[2]、沉积物^[3]、水生生物^[4]和人体^[5]中均已有检出.早在2001年5月23日联合国环境规划署在瑞典颁布的《关于持久性有机污染物的斯德哥尔摩公约》,提出了包括六氯苯(hexachlorobenzene, HCB)在内的12种持久性有机污染物(persistent organic pollutants, POPs);在2004年8月,该公约进一步增加了包括五氯苯(1,2,3,4,5-pentachlorobenzene, PeCB)在内的9种化合物.在我国,公约所约束的第一批12种以及后续增补的包括五氯苯在内的9种化合物分别于2004和2013年正式生效.由于HCB曾被大量使用,其对环境的影响仍是一个非常严峻的问题^[6].

有研究表明^[7~10],HCB在一定条件下可降解为低氯代氯苯类化合物,这些化合物最终会以各种途径进入人体而影响人体健康^[5].

我国从1959年起在长江中下游地区大量使用五氯酚及其钠盐灭螺防治血吸虫病,同时作为五氯酚钠合成主要中间体的HCB也用量巨大;尽管1992年国家规定停用PCP改用氯硝柳胺作为灭螺剂,但由于氯硝柳胺杀螺作用缓慢,在施药后有钉螺

收稿日期: 2015-01-06; 修订日期: 2015-05-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(21377168); 中国水利水电科学研究院专项(环集1539)

作者简介: 李昆(1987~),男,硕士,助理工程师,主要研究方向为水环境污染检测, E-mail: likun@iwhr.com

* 通讯联系人, E-mail: zhaogf@iwhr.com

上爬现象,导致灭螺效果降低,因此在一些地方血防单位仍将 PCP 和氯硝柳胺混合使用从而提高灭螺效果。

茅草街镇位于澧水尾间、湖南省益阳市南县最南端,处在湘、资、沅、澧、赤磊洪道、藕池西支和沱江七大水系交汇处,是典型的血吸虫病疫区(曾大量施用五氯酚及其钠盐进行灭螺)。该镇镇域面积 2.48 km²,居民 6 417 户,人口 18 337 人,是南县主要农副产品集散地,也是益阳市的经济强镇。据统计,南县 2011 年水生生物年产量为 9.63 万 t,其中鱼年产量为 8.59 万 t。本研究以茅草街镇为中心,在枯水期、平水期和丰水期,对沱江、藕池河下游与松澧洪道 3 条河流收集的 43 只水生生物(软体生物 11 只,鱼体 32 尾)肌肉体内的 12 种氯苯化合物(chlorobenzenes, CBs)进行检测,进而对该区域的 CBs 类化合物来源进行分析,以期为该区域的 CBs 类化合物生态风险评估提供基础数据支持。

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 水纯化系统纯化,电阻率为 18.2 MΩ·cm);硅胶(Merck, Darmstadt, Germany);去活硅胶(H₂O 质量分数为 3.3%);酸化硅胶(H₂SO₄ 质量分数为 44%);12 种 CBs 标准品均购置于德国 Dr. 公司(纯度 ≥ 98%)。

1.2 样品采集与处理

样品采集于 2010-11、2011-04 和 2011-06,共采集河蚌 11 只和鱼样 32 尾(有样品采集的点如图 1 所示),4℃ 保存。将每个样品转移至实验室后分别进行前处理。

经冷冻干燥机干燥后,研磨过 200 目筛,准确称取 5 g 样品与 3 g 硅藻土混合均匀,加入 10 μL TMX 回收率指示物后使用加速溶剂萃取仪(accelerated solvent extraction, ASE)进行萃取。ASE 条件为 100℃,1500 psi,加热 5 min,静态萃取 7 min,清洗溶液体积分数 60%,循环 2 次,溶剂 A 为二氯甲烷用量 50%,溶剂 B 为正己烷用量为 50%。

将上述萃取液经旋转浓缩、氮吹后定容至 6 mL,经凝胶渗透色谱仪(Gel Permeation

Chromatography, GPC)去除大分子物质(蛋白质和脂肪等),GPC 条件设置为:流动相为环己烷:乙酸乙酯(1:1,体积比),流速:4.7 mL·min⁻¹,柱形:co780,注射环型号:2.5 mL,收集 8~16 min 洗脱液。GPC 注射剩余样品用于样品脂肪含量检测。

收集洗脱液再次氮吹浓缩至 1~2 mL,经酸化硅胶柱净化(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 2 g、酸化硅胶 5 g、去活硅胶 2 g、无水硫酸钠 2 g),依次用 30 mL 正己烷、30 mL 正己烷:二氯甲烷(9:1)溶液洗脱;收集洗脱液浓缩、定容至 100 μL,待测。

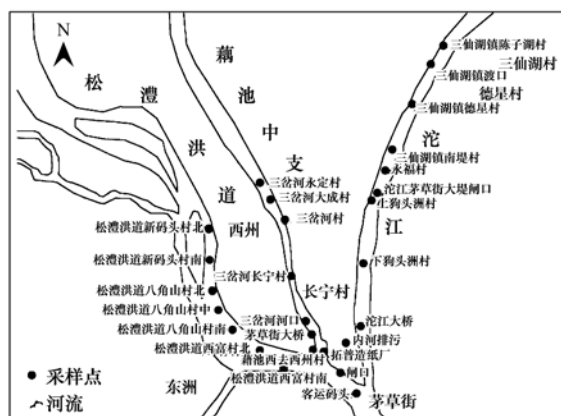


图 1 典型血吸虫病疫区水生生物采集位置示意

Fig. 1 Sampling sites for aquatic organism in regions of schistosomiasis prevalence

1.3 仪器分析

气相色谱-质谱仪 Agilent 6890GC/5975MS, 配备 30 m HP-5MS (5% phenyl/95% methyl silicone, 30 m, 0.25 mm i. d., 0.25 μm film, Agilent, USA) 色谱柱。采用无分流进样方式,载气为高纯 He,恒流 1.0 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)模式检测;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(保证空白无污染后方可进行实验)。CBs 定量标准曲线的浓度包括 5.0、10.0、20.0、50.0、100.0 μg·L⁻¹ 共 5 个级别;线性相关系数 $r^2 > 0.98$ 。样品的最低检测限(LOD)以 3 倍信噪比(S/N)来计算。化合物加标回收率数据如表 1 所示。

表 1 CBs 化合物加标回收率

Table 1 Recovery test of CBs

化合物	添加浓度 20 ng·g ⁻¹ (n=5)		
	平均值/μg·L ⁻¹	相对标准偏差/%	回收率/%
氯苯	8.54	0.37	42.70
1,3-二氯苯	9.04	1.64	45.18
1,4-二氯苯	20.00	0.43	100.02
1,2-二氯苯	13.93	1.24	69.65
1,3,5-三氯苯	16.90	1.17	84.48
1,2,4-三氯苯	21.24	0.88	106.22
1,2,3-三氯苯	23.06	0.83	115.30
1,2,4,5-四氯苯	24.22	0.65	121.10
1,2,3,5-四氯苯 和 1,2,3,4-四氯苯	22.64	0.52	113.18
五氯苯	20.20	0.37	100.98
六氯苯	22.86	0.42	114.32

1.5 统计分析

将样品分为河蚌、鳊鱼、鲫鱼、鲤鱼、黄颡鱼和鲢鱼这 6 类,并分别进行统计分析;样品中 CBs 的浓度低于 LOD 时用 1/2 LOD 进行统计计算;各样品中 CBs 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、检出率等统计指标用来描述 CBs 在水生生物体内的浓度,*T* 检验用来描述草食性鱼体与杂食性鱼体污染物总含量的显著性。

2 结果与分析

采集并分析了血吸虫病疫区代表性软体生物(河蚌)以及鱼类(草食性鱼类包括鳊鱼;杂食性鱼类包括鲫鱼、鲤鱼和黄颡鱼;肉食性鱼类包括鲢鱼)体内的 $\sum$ CBs 含量。不同水生生物体内的 $\sum$ CBs 含量(以脂肪质量计,下同)统计数据见表 2。对其中数据进行分析发现,河蚌体内 $\sum$ CBs 总含量为最高(几何均值为 11 947 ng·g⁻¹);鲢鱼为鱼体肌肉内 $\sum$ CBs 含量最高的鱼种(几何均值为 8 159 ng·g⁻¹),其次为鲤鱼(几何均值为 4 744 ng·g⁻¹),最低的鱼种为鲫鱼(几何均值为 1 851 ng·g⁻¹)。

表 2 典型血吸虫病疫区水生生物中氯苯类化合物含量/ng·g⁻¹Table 2 Concentration of CBs in aquatic organism in typical epidemic areas of schistosomiasis prevalence/ng·g⁻¹

化合物	河蚌 (n=11)		鳊鱼 (n=4)		鲫鱼 (n=8)		鲤鱼 (n=8)		黄颡鱼 (n=2)		鲢鱼 (n=10)	
	几何 均值	检出率 /%	几何 均值	检出率 /%	几何 均值	检出率 /%	几何 均值	检出率 /%	几何 均值	检出率 /%	几何 均值	检出率 /%
氯苯	2.44	18	ND	ND	1.27	25	ND	ND	ND	ND	13.9	60
1,3-二氯苯	3 248	100	1 192	75	246	88	605	88	1 031	100	1 253	100
1,4-二氯苯	2 932	100	578	75	201	88	846	100	703	100	967	100
1,2-二氯苯	4 848	100	1 585	75	123	88	833	88	1 347	100	1 117	100
1,3,5-三氯苯	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
1,2,4-三氯苯	1.40	9	ND	ND	ND	ND	1.17	25	3.83	50	5.40	40
1,2,3-三氯苯	2.35	27	ND	ND	0.40	13	2.50	25	ND	ND	3.03	40
1,2,4,5-四氯苯	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
1,2,3,5-四氯苯 和 1,2,3,4-四氯苯	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	1.27	ND	1.32	20
五氯苯	1.73	9	ND	ND	0.70	25	1.41	25	15.5	100	1.27	20
六氯苯	64.0	91	238	100	160	100	318	88	906	100	492	100
$\sum$ CBs ¹⁾	11 947	100	3 779	100	1 851	100	4 744	100	4 062	100	8 159	100

1) 表示 12 种 DBs 总量

分析表 2 发现,研究区域鱼类和河蚌体内 1,3-二氯苯、1,4-二氯苯、1,2-二氯苯和 HCB 四类化合物检出率和含量均较高,为研究区域水生生物体内 CBs 类化合物典型污染物。

对研究区域水生生物体内各类 CBs 化合物所占质量分数进行分析(图 2),发现 HCB 在黄颡鱼体内百分含量最高,为 22.59%;其次为鲫鱼,含量为 21.79%;百分含量最低的水生生物为河蚌,仅为 0.58%。3 种二氯苯化合物的质量百分含量总和比

重恰相反。

根据 US EPA^[11] 提出的癌症风险计算公式如下:

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

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

式中,LADD:生命周期内平均日摄入量;*c*:各类食物中 HCBs 浓度;IR:生物日摄入量(g·d⁻¹);ED:暴露持续时间;BW:体重;LT:生命周期;RISK:生命周期内癌症风险;CSF:癌症斜率因子(kg·d·mg⁻¹)。

根据中国统计年鉴 2013 年数据^[12],以普通居民水生生物日摄入量为 41.62 g 计算,其他数据为 EPA 默认数据,既上式中 $IR = 41.62 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$, $ED = 30$

a, $BW = 60 \text{ kg}$, $LT = 70 \text{ a}$; 根据 US EPA 标准^[13]中规定食物中 HCB 的 CSF 为 $1.6 \text{ kg} \cdot \text{d} \cdot \text{mg}^{-1}$. 通过上述公式进行计算,结果如表 3.

表 3 典型血吸虫病疫区癌症风险计算结果

Table 3 Calculation of cancerigenic risk for the site in typical epidemic areas of schistosomiasis prevalence							
种类	CSF / $\text{kg} \cdot \text{d} \cdot \text{mg}^{-1}$	c / $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$	IR / $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$	ED/a	BW/kg	LT/a	风险
鱼体 软体生物	1.6	160 ~ 906 64.03	41.62	30	60	70	$3.73 \times 10^{-7} \sim 21.1 \times 10^{-7}$ 1.49×10^{-7}

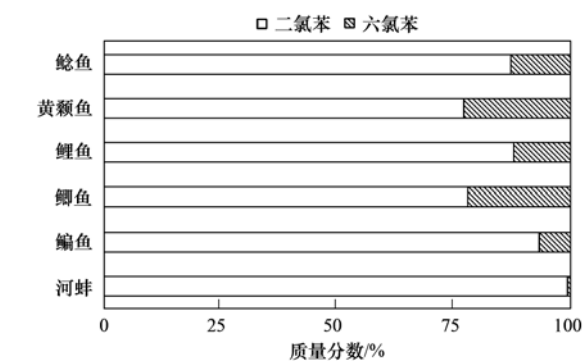


图 2 典型血吸虫病疫区 CBs 各同系物所占质量分数分布

Fig. 2 Concentrations of different homologues of CBs in aquatic organisms collected from typical epidemic areas of schistosomiasis prevalence

3 讨论

3.1 水生生物体内氯苯类有机物的污染特征

从表 2 数据可以看出,河蚌体内 $\sum$ CBs 最高,为鱼体含量的 1.46 ~ 6.45 倍. 一方面原因是河蚌为底栖滤食性生物,摄取水底层悬浮颗粒物;另一方面河蚌分析是取整个内脏团,包括消化道中的食物及颗粒物,从而导致河蚌样品 $\sum$ CBs 增高. 这一结果与魏泰莉等^[14]在珠江口做的调查结果相一致. 其次,肉食性鱼体 $\sum$ CBs 较高(如鳊鱼),说明 $\sum$ CBs 具有生物富集放大作用. 杂食性鱼体 $\sum$ CBs 总量水平略低于肉食性鱼体(如鲫鱼、鲤鱼和黄颡鱼). 草食性鱼体(如鳊鱼)的 $\sum$ CBs 与杂食性鱼体含量相当,且不是污染物含量最低的种类,经 T 检验发现,两者不存在显著性差异($\alpha = 0.05$). 原因可能是一方面由于鳊鱼虽然为草食性鱼体,但其幼鱼主要以枝角类和甲壳动物等污染物浓度较高的底栖生物为食,使得污染物沉积在体内无法排出;另一方面由于鳊鱼在水中的生活环境主要为中下层水体,而一般中下层水体中高浓度污染物的湖底植

物碎屑含量较多,从而导致其更容易将污染物摄入体内富集起来.

3.2 典型污染物来源分析

1,2-、1,3-、1,4-二氯苯这 3 种异构体都是精细化工中的重要中间体,广泛用于医药、农药、燃料、颜料等有关工业产品的合成. 1,2-二氯苯在医药方面可以用于生产氟氯苯胺,用作氟哌酸的生产;在农药方面,可以合成碳酸酐酶抑制药双氯磺酰胺,防治蚊蝇、臭虫的药剂三氯杀虫酯,硝喹等的中间体 3,4-二氯苯甲醛,广谱驱虫药甲苯咪唑的中间体 3,4-二氯二苯酮,农药呋喃丹的基本原料邻苯二酚等;在染料行业主要用于生产 3,4-二氯硝基苯,进一步生产分散紫 4BN、分散翠蓝 BF、还原棕 R、还原草氯 GB 等. 1,4-二氯苯主要用作热塑性工程塑料聚苯硫醚(PPS)的原料;同时也被用作生产家庭卫生用品(防蛀、防霉和防臭剂);农药方面还可以用来合成 2,5-二氯苯甲酸(除草剂地草平的中间体)、2,4-二氯氟苯(喹诺酮酸类抗菌剂的起始原料)、对苯二酚等. 1,3-二氯苯可用于合成间苯二酚、3,5-二氯苯胺等. 我国人口众多,消费基数较大,二氯苯的需求量一直保持着较高水平,以代替精萘用作防蛀防霉剂的 1,4-二氯苯为例,早在 1993 年消耗量已达到 $5000 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$. 而作为中间体,由于生产工艺和技术手段等问题,将不可避免地在各产品中有大量二氯苯的残留,然后通过水体溶解、河流径流、气体挥发、大气沉降等途径使得污染物进入水体环境中,最终被水生生物吸收. 因此可以推断该研究区域鱼体肌肉内二氯苯化合物主要来源于当地居民日常生活所使用的含有二氯苯化合物的生活用品.

HCB 作为工业中间体,曾被大量用于生产五氯酚及其钠盐. 并有研究证明^[15],五氯酚钠成品内含有大量的 HCB 残留(含量达到 $20.95 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). 自 1959 年起长江中下游地区大量使用五氯酚及其钠盐(PCP)用于灭螺防治血吸虫病. 谭大等^[16]报道

2003 年环洞庭湖区的岳阳、常德和益阳这 3 个地区的 PCP 消费量合计达 620 t. 并有报道指出^[17,18],疫区血防人员灭螺时,每 m² 土地面积的 PCP 用药量高达 5~20 g,导致表层土壤沉积物中 PCP 的浓度非常高,常常伴随发生生物和人畜中毒甚至死亡的急性中毒事件. PCP 的大量而且不间断地使用也使得 HCB 大量地进入当地环境中,然后通过各种途径进入水生生物体内. 这也就解释了当地水生生物体内 HCB 含量较高的现象.

3.3 典型污染物在各生物体内含量分析

分析 HCB 在各鱼体中的含量发现,以肉食为主的杂食性鱼类(黄颡鱼)含量最高,其次为食肉性鱼类(鲶鱼),而以底栖滤食性生物(河蚌)为最低,一

定程度上表现出随着生物在食物链上等级的提高,污染物含量增高的现象. 说明 HCB 在生物链上具有一定生物富集作用. 二氯苯类化合物在不同生物体内含量与在生物链内的生物等级并无明显关系,这可能跟各生物体本身的生活习性有关.

3.4 国内外研究对比

为了更好地理解研究区域水生生物体内 CBs 类化合物的污染程度,将数据统计结果与国内外相关报道进行比较(表 4). 由于国内外报道大都只有 HCB 的浓度,因此表 4 使用 HCB 为代表对照化合物. 对比发现研究区域 HCB 含量与长江中鱼体相当,并远远高于其他国家和地区所报道的相关含量. 研究区域软体生物体内 HCB 与其他地区含量相当.

表 4 水生生物体内 HCB 的国际对比/ng·g⁻¹

Table 4 Levels of HCB among samples in aquatic organism from various locations in other countries/ng·g⁻¹

国家	区域名称	采样年份	软体生物	鱼体	文献
中国	洞庭湖	2010~2012	64	160~906	本研究
中国	珠江口	2005	52	3~134	[14]
中国	长江	2003~2005	—	158~542	[19]
日本	—	—	—	2~100	[20]
挪威	巴伦支海	1995	—	21~65	[21]
中国	太湖	2000	—	14~37	[22]
中国	杭州湾	2001	—	ND~28	[22]
—	里海	2001~2002	—	14~41	[23]
丹麦	格林兰岛	1999~2001	0.44 (ND~1.2)	13~49	[24]
中国	—	—	0.70~540	—	[25]
印度	—	—	0.40~60	—	[25]
日本	—	—	0.60~29	—	[25]

3.5 癌症风险评价分析

US EPA 癌症风险标准提出在无污染理想状态中 1 百万人中出现 1 例癌症,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 $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-4}$ ^[11]. 因此通过这个标准相比较发现,研究区域通过食用水生生物摄入引起的癌症风险在风险部门可接受范围内,故该区域水生生物对人体的潜在风险效应相对较低. 但是食用黄颡鱼所带来的风险已达到 10^{-6} 等级,需引起一定重视.

4 结论

(1) 典型血吸虫病疫区软体生物检出浓度为 $11\,947 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$; 不同种类鱼体 CBs 含量有所差异,其浓度范围为 $1\,851 \sim 8\,159 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$.

(2) 血吸虫病疫区水生生物体内 CBs 类污染物以二氯苯和 HCB 为主; 当地二氯苯主要来源为日常生活用品, HCB 主要来源为杀螺剂(五氯酚钠); 与国内外报道的水生生物体内 HCB 相比,研究区域

生物体内 HCB 污染处于较高水平.

(3) 癌症风险评价结果表明血吸虫病疫区因食用水生生物而摄入 HCB 引起的潜在癌症风险处于风险部门可接受范围.

参考文献:

- [1] Wolska L, Konieczka P, Jastrzebska A, *et al.* Analytical procedure for the determination of chlorobenzenes in sediments [J]. *Journal of Chromatographic Science*, 2003, **41**(2): 53-56.
- [2] 郑明辉, 包志成, 张兵, 等. 大同市地表水及工业废水中氯苯和酚类化合物的监测[J]. *中国环境监测*, 2000, **16**(4): 35-38.
- [3] Lee C L, Song H J, Fang M D. Concentrations of chlorobenzenes, hexachlorobutadiene and heavy metals in surficial sediments of Kaohsiung coast, Taiwan [J]. *Chemosphere*, 2000, **41**(6): 889-899.
- [4] Finocchio E, Ramis G, Busca G. A study on catalytic combustion of chlorobenzenes [J]. *Catalysis Today*, 2011, **169**(1): 3-9.
- [5] Song S L, Ma J, Tian Q, *et al.* Hexachlorobenzene in human milk collected from Beijing, China [J]. *Chemosphere*, 2013, **91**

- (2): 145-149.
- [6] Tong M, Yuan S H. Physiochemical technologies for HCB remediation and disposal: a review [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, **229-230**: 1-14.
- [7] Zhou Y Q, Tigane T, Li X Z, *et al.* Hexachlorobenzene dechlorination in constructed wetland mesocosms [J]. *Water Research*, 2013, **47**(1): 102-110.
- [8] 甘平, 樊耀波, 王敏健. 氯苯类化合物的生物降解[J]. *环境科学*, 2001, **22**(3): 93-96.
- [9] 刘翠英, 蒋新. 施用堆腐有机肥对水稻土中六氯苯脱氯降解影响[J]. *环境科学*, 2013, **34**(4): 1583-1589.
- [10] 胡泉, 胡永梅, 樊耀波, 等. 土壤中氯苯类化合物的迁移行为[J]. *环境科学*, 2000, **21**(6): 32-36.
- [11] US. The risk assessment information system [EB/OL]. Tennessee: The Department of Energy's (DOE's) Oak Ridge Operations Office (ORO). http://rains.ornl.gov/cgi-bin/tox/Tox_select, 2009-11-20.
- [12] 中国国家统计局. 中国统计年鉴 [EB/OL]. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2013/indexch.htm>, 2013.
- [13] US. Integrated Risk Information System [EB/OL]. <http://www.epa.gov/iris/subst/0374.htm>, 2003-10-28.
- [14] 魏泰莉, 贾晓珊, 杜青平, 等. 珠江口水、沉积物及水生动物中氯苯类有机物的含量及分布[J]. *环境科学学报*, 2007, **27**(10): 1717-1726.
- [15] Tondeur Y, Nestrick T, Silva H A, *et al.* Analytical procedures for the determination of polychlorinated-*p*-dioxins, polychlorinated dibenzofurans, and hexachlorobenzene in pentachlorophenol [J]. *Chemosphere*, 2010, **80**(2): 157-164.
- [16] 谭大, 张剑波. Top-down 法计算中国五氯酚钠消费分布[J]. *环境污染与防治*, 2008, **30**(3): 17-20.
- [17] 戴建荣, 朱荫昌, 黄铭西. 灭螺药物的研究进展[J]. *中国血吸虫病防治杂志*, 2000, **12**(3): 189-192.
- [18] 宗俊安, 陈福鑫, 肖诗焱, 等. 耕牛皮肤接触五氯酚钠导致中毒死亡报告[J]. *中国血吸虫病防治杂志*, 1989, (3): 25-25.
- [19] Wan Y, Wei Q W, Hu J Y, *et al.* Levels, tissue distribution, and age-related accumulation of synthetic musk fragrances in Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*): Comparison to organochlorines [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**(2): 424-430.
- [20] de Brito A P, Takahashi S, Ueno D, *et al.* Organochlorine and butyltin residues in deep-sea organisms collected from the western North Pacific, off-Tohoku, Japan [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2002, **45**(1-12): 348-361.
- [21] Borgå K, Gabrielsen G W, Skaare J U. Biomagnification of organochlorines along a Barents Sea food chain [J]. *Environmental Pollution*, 2001, **113**(2): 187-198.
- [22] Nakata H, Hirakawa Y, Kawazoe M, *et al.* Concentrations and compositions of organochlorine contaminants in sediments, soils, crustaceans, fishes and birds collected from Lake Tai, Hangzhou Bay and Shanghai city region, China [J]. *Environmental Pollution*, 2005, **133**(3): 415-429.
- [23] Kajiwar N, Ueno D, Monirith I, *et al.* Contamination by organochlorine compounds in sturgeons from Caspian Sea during 2001 and 2002 [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2003, **46**(6): 741-747.
- [24] Vorkamp K, Riget F, Glasius M, *et al.* Chlorobenzenes, chlorinated pesticides, coplanar chlorobiphenyls and other organochlorine compounds in Greenland biota [J]. *Science of the Total Environment*, 2004, **331**(1-3): 157-175.
- [25] Monirith I, Ueno D, Takahashi S, *et al.* Asia-Pacific mussel watch: monitoring contamination of persistent organochlorine compounds in coastal waters of Asian countries [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2003, **46**(3): 281-300.

CONTENTS

Source Contribution Analysis of the Fine Particles in Shanghai During a Heavy Haze Episode in December, 2013 Based on the Particulate Matter Source Apportionment Technology	LI Li, AN Jing-yu, YAN Ru-sha (3543)
Transformation Mechanism and Sources of Secondary Inorganic Components in PM _{2.5} at an Agriculture Site (Quzhou) in the North China Plain in Summer	CHEN Shi-yi, ZENG Li-min, DONG Hua-bin, <i>et al.</i> (3554)
Pollution Level and Sources of Organic Phosphorus Esters in Airborne PM _{2.5} in Chengdu City	YIN Hong-ling, LI Shi-ping, YE Zhi-xiang, <i>et al.</i> (3566)
Simulation Study of the Emission of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Sugar Alcohols from Biomass Burning	HUANG Shuai, HUANG Xin-yi, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (3573)
Characteristics and Parameterization for Atmospheric Extinction Coefficient in Beijing	CHEN Yi-na, ZHAO Pu-sheng, HE Di, <i>et al.</i> (3582)
Photocatalytic Degradation of Gaseous Toluene by a Photo-Fenton Reaction	ZHENG Si-can, CHEN Tian-hu, LIU Hai-bo, <i>et al.</i> (3590)
Emission of PCDD/Fs from Crematories and Its Influencing Factors	YIN Wen-hua, YU Xiao-wei, HAN Jing-lei, <i>et al.</i> (3596)
Odor Emission Characteristics from Biochemical Treatment Facilities of Kitchen Waste in China	ZHANG Yan, WANG Yuan-gang, LU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (3603)
Temporal and Spatial Characteristics of Lake Taihu Surface Albedo and Its Impact Factors	CAO Chang, LI Xu-hui, ZHANG Mi, <i>et al.</i> (3611)
Remote Sensing Inversion of Diffuse Attenuation Coefficient in Lake Taihu Based on the GOCI Images	WANG Shan-shan, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (3620)
Porewater Dissolved Methane in <i>Cyperus malaccensis</i> Marshes Along Salinity Gradient in the Minjiang River Estuary	YANG Ping, ZHANG Zi-chuan, DU Wei-ning, <i>et al.</i> (3633)
Stable Isotopes Characters of Soil Water Movement in Shijiazhuang City	CHEN Tong-tong, CHEN Hui, HAN Lu, <i>et al.</i> (3641)
Seasonal Variations in Vertical Profile of Hg Species and the Influential Factors in Changshou Reservoir	BAI Wei-yang, ZHANG Cheng, TANG Zhen-ya, <i>et al.</i> (3649)
Nutrient Characteristics and Nitrogen Forms of Rhizosphere Soils Under Four Typical Plants in the Littoral Zone of TGR	WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, LIU Hong, <i>et al.</i> (3662)
Exchange Fluxes and Coupling Relationship of Dissolved Inorganic Carbon and Dissolved Organic Carbon Across the Water-Sediment Interface in Lakes	WANG Wei-ying, LÜ Chang-wei, HE Jiang, <i>et al.</i> (3674)
Mass Transport in Porous Sediments During a Turbulent Disturbance	LI Shao-long, CHEN Dao-yi (3683)
Characterization of Pollutant Wash-off in the Urban Stormwater	WU Jun-liang, REN Yu-fen, WANG Xue-mei, <i>et al.</i> (3691)
Research of the Stormwater Runoff and Pollution Characteristics in Rural Area of Yuhang District, Hangzhou	DUAN Sheng-hui, ZHAO Yu, SHAN Bao-qing, <i>et al.</i> (3697)
Formation and Variation of Brominated Disinfection By-products in A Combined Ultrafiltration and Reverse Osmosis Process for Seawater Desalination	YANG Zhe, SUN Ying-xue, SHI Na, <i>et al.</i> (3706)
Effect of Natural Organic Matter and Electrolytes on the Aggregation of C ₆₀ Nanoparticles in Aquatic Systems	FANG Hua, JING Jie, YU Jiang-hua, <i>et al.</i> (3715)
Efficiency of Sediment Amendment with Zirconium-Modified Kaolin Clay to Control Phosphorus Release from Sediments in Heavily Polluted Rivers	WANG Hong, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (3720)
Transformation of Nitrogen Nutrients in the Urban Sewage Pipe Network	JIN Peng-kang, JIAO Ding, REN Wu-ang (3730)
Application of Micro-aerobic Hydrolysis Acidification in the Pretreatment of Petrochemical Wastewater	ZHU Chen, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (3738)
Efficacy of A ² /O-MBR Combined Process in Wastewater Treatment and the Characteristics of Membrane Fouling	WANG Xu-dong, MA Ya-bin, WANG Lei, <i>et al.</i> (3743)
Effect of High Ammonium on Nitrogen Removal in an Partial Nitrification-ANAMMOX Process with Reflux System	LI Xiang, CUI Jian-hong, YUAN Yan, <i>et al.</i> (3749)
Reductive Dechlorination of Trichloroethylene by Benzoate-Enriched Anaerobic Cultures	LI Jiang-wei, YANG Xiao-yong, HU An-yi, <i>et al.</i> (3756)
2,4,6-Trichlorophenol Mineralization Promoted by Anaerobic Reductive Dechlorination of Acclimated Sludge and Extracellular Respiration Dechlorination Pathway	SONG Jia-xiu, LI Ling, SHENG Fan-fan, <i>et al.</i> (3764)
Short or Long Term Influence of Phenol on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Sludge	YANG Peng-bing, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (3771)
Process Optimization of Aerobic Granular Sludge Continuous-Flow System for the Treatment of Low COD/N Ratio Sewage	LU Lei, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (3778)
Long-Term Inhibition of FNA on Aerobic Phosphate Uptake and Variation of Phosphorus Uptake Properties of the Sludge	MA Juan, LI Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (3786)
Performance and Factors Analysis of Sludge Dewatering in Different Wastewater Treatment Processes	LIU Ji-bao, LI Ya-ming, LÜ Jian, <i>et al.</i> (3794)
Effect of Residual Hydrogen Peroxide on Hydrolysis Acidification of Sludge Pretreated by Microwave -H ₂ O ₂ -Alkaline Process	JIA Rui-lai, LIU Ji-bao, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (3801)
Vertical Distribution Characteristics of Typical Forest Soil Organic Nitrogen in Dawei Mountain	DING Xian-qing, MA Hui-jing, ZHU Xiao-long, <i>et al.</i> (3809)
Effects of Different Land Uses on Soil Active Organic Carbon and Nitrogen Fractions in Jinyun Mountain	QI Xin, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (3816)
Control of Soil Nutrient Loss of Typical Reforestation Patterns Along the Three Gorges Reservoir Area	WU Dong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (3825)
Effects of Slope Position and Soil Horizon on Soil Microbial Biomass and Abundance in Karst Primary Forest of Southwest China	FENG Shu-zhen, SU Yi-rong, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (3832)
Effects of Different Plantation Type on the Abundance and Diversity of Soil Microbes in Subtropical Red Soils	SHEN Bing-jie, ZHU Zhen-ke, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i> (3839)
Accumulation of Mercury in Soil-maize System of Non-ferrous Metals Smelting Area and Its Related Risk Assessment	JI Xiao-feng, ZHENG Na, WANG Yang, <i>et al.</i> (3845)
Effects of Different Modifier Concentrations on Lead-Zinc Tolerance, Subcellular Distribution and Chemical Forms for Four Kinds of Woody Plants	CHEN Yong-hua, ZHANG Fu-yun, WU Xiao-fu, <i>et al.</i> (3852)
Isolation, Purification and Identification of Antialgal Activity Substances of Ethyl Acetate Extracts from the Submerged Macrophytes <i>Potamogeton crispus</i>	SUN Ying-ying, SU Zhen-xia, PU Yin-fang, <i>et al.</i> (3860)
Distribution Characteristics and Potential Risk of CBs in Aquatic Organisms from Typical Epidemic Areas of Schistosomiasis Prevalence	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (3866)
Application of Whole-cell Biosensor ADPI _p WHlux for Acute Toxicity Detection in Water Environment	TANG Hui, SONG Yi-zhi, JIANG Bo, <i>et al.</i> (3872)
Application of Rainbow Trout CYP1 Gene Expression Patterns in Gill and Liver for Haihe River Bio-monitoring	GAO Kai, YAN Pei, TAN Cui-ling, <i>et al.</i> (3878)
Toxic Effect of Nano-ZnO in Liver of Zebrafish	LIU Lin, ZHAO Qun-fen, JIN Kai-xing, <i>et al.</i> (3884)
Acute Toxicity of <i>Coptis chinensis</i> Rhizome Extracts to <i>Daphnia carinata</i>	CHEN Ya-nan, YUAN Ling (3892)
Adsorption-desorption Characteristics of Fermented Rice Husk for Ferrous and Sulfur Ions	XIE Xiao-mei, LIAO Min, HUA Jia-yuan, <i>et al.</i> (3896)
Application of Stir Bar Sorptive Extraction and Gas Chromatograph Mass Spectrometer to the Phthalic Acid Esters Analysis in Seawater	GAO Chen-chen, LI Feng-min, LU Lun, <i>et al.</i> (3906)
Experimental Conditions and Reliability Analysis of Results of COD Components	LI Zhi-hua, ZHANG Yin, HAN Xing, <i>et al.</i> (3913)
Method for Simultaneous Determination of 11 Veterinary Antibiotics in Piggery Wastewater and Sludge and Its Application in Biological Treatment	DING Jia-li, LIU Rui, ZHENG Wei, <i>et al.</i> (3918)
Research Progress in Technology of Using Soil Micro-organisms to Generate Electricity and Its Potential Applications	DENG Huan, XUE Hong-jing, JIANG Yun-bin, <i>et al.</i> (3926)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2015年10月15日 第36卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 10 Oct. 15, 2015

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: 120.00 元

国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行