

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第3期

Vol.38 No.3

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

我国人为源挥发性有机物反应性排放清单	梁小明, 张嘉妮, 陈小方, 石田立, 孙西勃, 范丽雅, 叶代启 (845)
上海城郊地区冬季霾污染事件反应性 VOCs 物种特征	高爽, 张坤, 高松, 修光利, 程娜, 潘研 (855)
京津冀地区主要排放源减排对 PM _{2.5} 污染改善贡献评估	吴文景, 常兴, 邢佳, 王书肖, 郝吉明 (867)
北京冬季 PM _{2.5} 中金属元素浓度特征和来源分析	乔宝文, 刘子锐, 胡波, 刘景云, 逢妮妮, 吴方堃, 徐仲均, 王跃思 (876)
2015 年石家庄市采暖期一次重污染过程细颗粒物在线来源解析	路娜, 李治国, 周静博, 赵鑫, 杨丽丽, 冯媛, 靳伟 (884)
利用 SPAMS 研究南宁市四季细颗粒物的化学成分及污染来源	刘慧琳, 陈志明, 毛敬英, 梁桂云, 黄炯丽, 李宏姣, 杨俊超, 莫招育 (894)
南半球海洋大气气溶胶单颗粒的理化特性分析	迟建伟, 李传金, 孙俊英, 张剑, 王辉, 王瀚韬, 李卫军 (903)
喷泉产生的细菌气溶胶空间分布特性	张崇森, 袁琳, 许鹏程, 刘可欣 (911)
生物滴滤塔净化含硫混合废气	叶杰旭, 缪孝平, 诸葛蕾, 赵翔宇, 江宁馨, 章晶晓, 陈东之, 陈建孟 (918)
西安城市不同功能区街道灰尘磁学特征及环境污染分析	房妮, 张俊辉, 王瑾, 姜珊, 夏敦胜 (924)
城乡交错带典型溪流沟渠沉积物氮污染特征及硝化-反硝化潜力	秦如彬, 李如忠, 高苏蒂, 张瑞钢 (936)
三峡库区小江支流沉积物硝化反硝化速率在蓄水期和泄水期的特征	王静, 刘洪杰, 雷禹, 徐晶, 宋立岩, 李勇 (946)
隔河岩水库二氧化碳通量时空变化及影响因素	赵登忠, 谭德宝, 李翀, 申邵洪 (954)
白洋淀多环芳烃与有机氯农药季节性污染特征及来源分析	王乙震, 张俊, 周绪申, 孔凡青, 徐铭霞 (964)
唐山陡河水库沉积物汞的分布、来源及污染评价	吴婷婷, 王明猛, 陈旭锋, 刘文利, 李太山, 闫海鱼, 何天容, 李仲根 (979)
三峡库区消落带优势草本植物淹水后汞的释放特征	邓晗, 张翔, 张成, 王永敏, 王定勇 (987)
电镀厂周边地表水中重金属分布特征及健康风险评估	余葱葱, 赵委托, 高小峰, 程胜高, 黄庭, 尹伊梦, 赵珍丽 (993)
九龙江表层沉积物重金属赋存形态及生态风险	林承奇, 胡恭任, 于瑞莲, 韩璐 (1002)
厦门筼筮湖表层沉积物金属元素赋存形态及污染评价	杨秋丽, 于瑞莲, 胡恭任, 林承奇, 韩璐 (1010)
龙口市污水灌溉区农田重金属来源、空间分布及污染评价	李春芳, 王菲, 曹文涛, 潘健, 吕建树, 吴泉源 (1018)
碳化稻壳-铁锰氧化菌耦合净化严寒村高铁锰地下水效能与机制	孙楠, 湛燕丽, 张颖, 鲁岩, 宋秋霞, 李春艳, 姜昭 (1028)
高藻水臭氧预氧化过程有机物转化及消毒副产物生成势	张赛, 胡学斌, 古励, 李莉, 郭显强 (1038)
预处理对短流程超滤工艺不可逆膜污染影响的中试试验	杨海燕, 邢加建, 王灿, 孙国胜, 赵焱, 梁恒, 徐叶琴, 李圭白 (1046)
Cu-Al ₂ O ₃ 中骨架铜类芬顿催化去除水中有机污染物	徐丹, 张丽丽, 柳丽芬 (1054)
过硫酸钾氧化去除 Cu(CN) ₂ 中的氰污染物	王云飞, 李一兵, 王彦斌, 齐璠静, 赵凯, 田世超, 郭涛, 关伟, 赵旭 (1061)
微生物燃料电池强化去除农药 2,4-二氯苯氧乙酸及同步产电性能	全向春, 全燕苹, 肖竹天 (1067)
桉树遗态结构 HAP/C 复合材料对水中 Cu(II) 的吸附特征	李超, 朱宗强, 曹爽, 朱义年, 谭笑, 丁慧 (1074)
基于 A ² /O 处理工艺的生活污水的成组生物毒性评价	张秋亚, 马晓妍, 王晓昌, 游猛 (1084)
污水氮浓度对粉绿狐尾藻去氮能力的影响	马永飞, 杨小珍, 赵小虎, 胡承孝, 谭碧玲, 孙学成, 吴金水 (1093)
全海水盐度抑制下厌氧氨氧化工艺的恢复特性	齐泮晴, 于德爽, 李津, 管勇杰, 魏思佳 (1102)
饥饿对硫自养反硝化反应器生物群落结构的影响	李芳芳, 施春红, 李海波, 袁蓉芳, 马方曙 (1109)
快速启动厌氧氨氧化工艺	闫刚, 徐乐中, 沈耀良, 吴鹏, 张婷, 程朝阳 (1116)
一种 CANON 工艺处理低氨氮废水的新模式	完颜德卿, 袁怡, 李祥, 毕贞 (1122)
侧流磷回收对低溶解氧 EBPR 系统性能的影响	马娟, 宋璐, 俞小军, 孙雷军, 孙洪伟 (1130)
厌氧氨氧化污泥群体感应信号分子检测及影响研究	陈舒涵, 李安婕, 王越兴, 吴玲娟 (1137)
有机负荷对醋糟厌氧消化系统启动的影响	戴晓虎, 于春晓, 李宁, 董滨, 戴翎翎 (1144)
过氧化钙预处理对活性污泥脱水性能的影响机制	白润英, 陈湛, 张伟军, 王东升 (1151)
不同工况蚯蚓人工湿地表层污泥处理效果	董梦珂, 李怀正, 徐一啸 (1159)
全氟辛酸对大肠杆菌的氧化胁迫和膜损伤	杨蒙, 李伟, 叶锦韶, 龙焰, 秦华明 (1167)
纳米银在环境水样和实验介质中的理化性质和毒性效应	衣俊, 程金平 (1173)
血吸虫病疫区鱼体器官中氯苯化合物的污染特征	李昆, 赵高峰, 周怀东, 张盼伟, 刘巧娜, 赵晓辉, 李东佼, 任敏, 赵丹丹 (1182)
纳米沸石对大白菜生长、抗氧化酶活性及镉形态、含量的影响	秦余丽, 熊仕娟, 徐卫红, 赵婉伊, 王卫中, 陈永勤, 迟苏琳, 陈序根, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (1189)
利用 <i>in vitro</i> 方法研究不同铁矿对土壤砷生物可给性的影响	钟松雄, 尹光彩, 黄润林, 何宏飞, 陈志良, 林亲铁, 王文科 (1201)
不锈钢电极对重金属污染土壤的强化电动修复及电极腐蚀结晶现象与机制	温东东, 付融冰, 张卫, 顾莹莹 (1209)
施用无害化污泥影响土壤碳库组分和碳库管理指数的演变	刘晓, 黄林, 郭康莉, 张雪凌, 杨俊诚, 姜慧敏, 张建峰 (1218)
施氮和水分管理对光合碳在土壤-水稻系统间分配的量化研究	王婷婷, 祝贞科, 朱捍华, 汤珍珠, 庞静, 李宝珍, 苏以荣, 葛体达, 吴金水 (1227)
模拟酸雨对次生林土壤呼吸及异养呼吸的影响	陈书涛, 孙鹭, 桑琳, 胡正华 (1235)
土壤硝化和反硝化微生物群落及活性对大气 CO ₂ 浓度和温度升高的响应	刘远, 王光利, 李恋卿, 潘根兴 (1245)
岩性对喀斯特灌丛土壤固氮菌与丛枝菌根真菌群落结构及丰度的影响	梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧 (1253)
板栗产区有机堆肥产物磷形态特征及其对叶片磷含量的影响	宋影, 郭素娟, 张丽, 孙慧娟, 谢明明, 武燕奇, 王静 (1262)
酸性物质对猪粪秸秆堆肥过程中氮素转化的影响	姜继超, 尧倩 (1272)
《环境科学》征稿简则 (1092)	
《环境科学》征订启事 (1158)	
信息 (1166, 1261, 1271)	

血吸虫病疫区鱼体器官中氯苯化合物的污染特征

李昆, 赵高峰*, 周怀东, 张盼伟, 刘巧娜, 赵晓辉, 李东佼, 任敏, 赵丹丹

(中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘要: 采用 GC/MS 技术对典型血吸虫病疫区 3 种(共 68 尾)具有代表性鱼体的肌肉、性腺、脑、肾脏和肝脏等器官进行分析. 实验发现各鱼体组织器官样品中二氯苯和六氯苯为优势污染物, 分析其来源发现研究区域六氯苯主要来源为当地施用的五氯酚类杀螺剂, 二氯苯来源为六氯苯降解和当地居民日常生活用品. 同时发现该地区鱼体不同器官内 CBs(chlorobenzenes, CBs)含量有所差异, 肌肉中 CBs 几何均值的含量(脂肪重, 下同)范围为 $2\,731.50 \sim 7\,811.23 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 性腺含量范围为 $2\,557.89 \sim 4\,640.05 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 脑中含量范围为 $2\,423.18 \sim 3\,329.61 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 肾脏中含量范围为 $1\,628.05 \sim 4\,667.76 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 肝脏中含量范围为 $704.92 \sim 1\,086.96 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$. 实验结果与国内外相关研究报道值比较, 显示该区域鱼体各器官中二氯苯和六氯苯含量处于较高污染水平, 应引起重视.

关键词: 血吸虫病疫区; 鱼体器官; 氯苯化合物; 污染特征; 来源

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)03-1182-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201609094

Pollution Characteristics of Chlorobenzenes in Organs of Fish from Typical Epidemic Areas of Schistosomiasis Prevalence

LI Kun, ZHAO Gao-feng*, ZHOU Huai-dong, ZHANG Pan-wei, LIU Qiao-na, ZHAO Xiao-hui, LI Dong-jiao, REN Min, ZHAO Dan-dan

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

Abstract: Sixty-eight fish samples were collected from typical epidemic areas of schistosomiasis prevalence. The contents of 12 CB congeners in fish samples were measured using 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 source of HCB was PCP (pentachlorophenol), which was used to control the schistosomiasis prevalence, used in study area. And DIC came from the degradation of HCB and the articles of daily use. The geometric average of CBs in muscle ranged from $2\,731.50$ to $7\,811.23 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ lipid weight, while the summarized concentration of CBs in fish gonads, brains, kidneys, livers ranged from $2\,557.89$ to $4\,640.05 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ lipid weight, $2\,423.18$ to $3\,329.61 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ lipid weight, $1\,628.05$ to $4\,667.76 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ lipid weight and 704.92 to $1\,086.96 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ lipid weight, respectively. When compared to other studies in China and other countries, the concentrations of CBs in these fish samples were at a relatively high level.

Key words: epidemic areas of schistosomiasis prevalence; organs of fish; CBs; pollution characteristics; source

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,在水体、沉积物、水生生物和人体中均已有检出.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.有研究表明^[1~6],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,例如市场所售食用鱼体和母乳中就有 HCB 的检出^[7,8].进一步

研究表明^[9~11],氯苯类化合物对斑马鱼胚胎发育和仔鱼具有一定的毒性效应.

茅草街镇位于澧水尾闾、湖南省益阳市南县最南端,处在湘、资、沅、澧、松澧洪道、藕池西支和沱江这七大水系交汇处,是典型的血吸虫病疫区;该地区曾大量使用五氯酚及其钠盐(PCP)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 也大量进入环境.该镇面积 2.48 km^2 ,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

收稿日期: 2016-09-11; 修订日期: 2016-10-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(21377168)

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

* 通信作者, E-mail: zhaogf@iwhr.com

万 t. 已有研究表明^[12],该地区野生鱼体肌肉中 CBs 类污染物含量较高,长期食用该区域鱼体具有一定的健康风险. 本研究以茅草街镇为中心,收集具有代表性的三类鱼体(鲫鱼、黄颡鱼和鲢鱼)各器官进行分析,以期为该区域的 CBs (chlorobenzenes) 类化合物在鱼体各器官赋存状态进行研究,并对该区域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 2013 年 4 月,采样点见图 1. 共采集鲫鱼 30 尾(体长范围为 8 cm ~ 12 cm)、黄颡鱼 8 尾(体长范围为 23 ~ 26 cm)和鲢鱼 30 尾(体长范围为 38 ~ 42 cm),4℃ 保存. 将样品转移至实验室后分别进行前处理; 将 30 尾鲫鱼分类混合为肌肉样品 5

个、性腺样品 1 个、脑样品 2 个和肾脏样品 2 个,8 尾黄颡鱼分类混合为肌肉样品 2 个、性腺样品 1 个、脑样品 1 个、肾脏样品 1 个和肝脏样品 1 个,30 尾鲢鱼分类混合为肌肉样品 5 个、性腺样品 1 个、脑样品 2 个、肾脏样品 2 个和肝脏样品 2 个.

经冷冻干燥机干燥后,研磨过 200 目筛,准确称取 5 g 样品(不满 5 g 的以实际质量为准)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℃,1 500 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 为二氯甲烷含量 50%,溶剂 B 为正己烷含量为 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: 正己烷 (1:1, 体积比),流速: 4.7 mL·min⁻¹,柱型: 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上至下依次为无水硫酸钠 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),依次使用 30 mL 正己烷、30 mL 正己烷: 二氯甲烷 (9:1, 体积比) 溶液洗脱; 收集洗脱液浓缩、定容至 100 μL,待测.

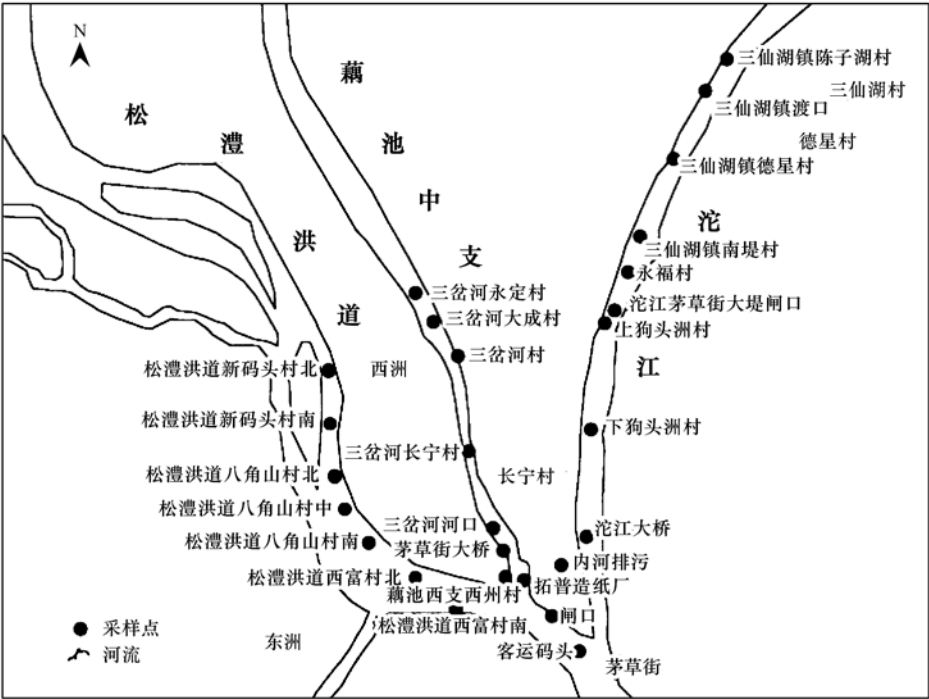


图 1 典型血吸虫病疫区水生生物采集位置示意

Fig. 1 Sampling sites for aquatic organisms in typical 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 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$, 进样量 1 μL . 离子源和传输杆的温度分别为 230 $^{\circ}\text{C}$ 和 250 $^{\circ}\text{C}$; 采用电子轰击 (EI) 模式检测; 程序升温: 90 $^{\circ}\text{C}$ 保留 1 min, 以 4 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速率升至 250 $^{\circ}\text{C}$, 然后以 25 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速率从 250 $^{\circ}\text{C}$ 升至 280 $^{\circ}\text{C}$ 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 定量标准曲线的质量浓度包括 5.0、10.0、20.0、50.0、100.0 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 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及方法检出限如表 1 所示.

表 1 CBs 化合物加标回收率及方法检出限

Table 1 Recovery test and detection limit of CBs

化合物	添加 20 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ($n=5$)			
	平均值/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	相对标准偏差/%	回收率/%	方法检出限/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$
氯苯	8.54	0.37	42.70	0.10
1,3-二氯苯	16.64	2.24	83.18	0.07
1,4-二氯苯	20.00	0.43	100.02	0.06
1,2-二氯苯	13.93	1.24	69.65	0.07
1,3,5-三氯苯	16.90	1.17	84.48	0.08
1,2,4-三氯苯	21.24	0.88	106.22	0.08
1,2,3-三氯苯	23.06	0.83	115.30	0.08
1,2,4,5-四氯苯	24.22	0.65	121.10	0.05
1,2,3,5-四氯苯	22.44	0.52	113.18	0.05
1,2,3,4-四氯苯	21.50	0.71	107.51	0.05
五氯苯	20.20	0.37	100.98	0.04
六氯苯	22.86	0.42	114.32	0.04

1.5 统计分析

鲫鱼样品分类混合为肌肉样品 5 个, 性腺样品 1 个, 脑样品 2 个和肾脏样品 2 个; 黄颡鱼样品分类混合为肌肉样品 2 个, 性腺样品 1 个, 脑样品 1 个、肾脏样品 1 个和肝脏样品 1 个; 鲶鱼样品分类混合为肌肉样品 5 个, 性腺样品 1 个, 脑样品 2 个、肾脏样品 2 个和肝脏样品 2 个. 对上述样品分别进行统计分析. 样品中 CBs 的质量浓度低于 LOD 时用 1/2 LOD 进行统计计算. 统计分析软件为 SPSS (版本 17.0, SPSS Inc., Chicago, IL, USA), 几何均值用来描述 CBs 在鱼体各器官内的含量.

2 结果与分析

采集并分析了血吸虫病疫区三类代表性鱼类肌肉及不同器官中 $\sum$ CBs (表示 12 种 CBs 总量) 含量, 结果见表 2. 鲶鱼肌肉和脑中 $\sum$ CBs 总含量 (几何均值分别为 7 811.23 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 3 329.61 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 按脂肪质量计, 下同) 较另外两种鱼体高;

鲫鱼为不同鱼种肾脏内 $\sum$ CBs 含量最高的鱼种 (几何均值为 4 667.76 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$); 性腺中 $\sum$ CBs 含量最高的鱼种为黄颡鱼, 几何均值为 4 640.05 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$. 本研究区域鱼类体内 1,3-二氯苯、1,4-二氯苯、1,2-二氯苯和 HCB 这四类化合物检出率和含量均较高, 为研究区域鱼体各器官内 CBs 类化合物典型污染物.

对研究区域鱼体器官内各类 CBs 化合物所占质量分数进行分析 (图 2), 发现 HCB 在鲶鱼和黄颡鱼各器官中所占质量分数最高的为肌肉和性腺, 且两者质量分数相当 (鲶鱼肌肉和性腺中 HCB 所占 $\sum$ CBs 的质量分数分别为 19.73% 和 22.21%, 黄颡鱼肌肉和性腺中 HCB 所占质量分数分别为 8.28% 和 7.34%); 同时该数值明显高于相应鱼种肾脏和脑中质量分数; 鲶鱼体内各类器官肝脏中 HCB 质量分数占到 20.37%, 为 HCB 比重最高的器官; 鲫鱼肌肉内 HCB 质量分数明显高于该鱼种其他器官. 3 种二氯苯化合物的质量分数总和比重则恰相反.

表 2 典型血吸虫病疫区鱼体器官中氯苯类化合物的含量¹⁾/ng·g⁻¹

项目	鲫鱼(<i>n</i> = 30)				黄颡鱼(<i>n</i> = 8)					鲢鱼(<i>n</i> = 30)				
	肌肉 (<i>S</i> = 5)	性腺 (<i>S</i> = 2)	脑 (<i>S</i> = 2)	肾脏 (<i>S</i> = 2)	肌肉 (<i>S</i> = 2)	性腺 (<i>S</i> = 1)	脑 (<i>S</i> = 1)	肾脏 (<i>S</i> = 1)	肝脏 (<i>S</i> = 1)	肌肉 (<i>S</i> = 5)	性腺 (<i>S</i> = 1)	脑 (<i>S</i> = 2)	肾脏 (<i>S</i> = 2)	肝脏 (<i>S</i> = 2)
脂肪含量/%	1.87 ~ 3.68	4.56	18.27 ~ 24.26	5.80 ~ 9.52	2.80 ~ 15.09	4.69	21.93	13.19	15.74	1.14 ~ 1.51	5.76	22.03 ~ 22.20	3.31 ~ 5.24	7.76 ~ 11.70
氯苯	0.73	3.49	0.17	1.71	1.06	3.46	2.78	2.09	0.46	0.43	0.29	0.56	3.68	0.28
1,3-二氯苯	495.85	678.95	656.69	1317.96	655.96	749.86	722.17	397.34	164.21	2116.68	657.64	946.33	968.63	200.90
1,4-二氯苯	480.95	487.13	455.78	899.83	417.79	621.37	488.62	286.47	113.89	1333.67	438.73	634.60	668.98	143.00
1,2-二氯苯	1 141.09	1 705.32	1 308.51	2 441.71	1 105.87	2 229.26	1 418.65	837.93	384.97	3 676.62	1 260.86	1 722.29	2 217.24	500.71
1,3,5-三氯苯	N. D.	2.13	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	1.98	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	0.22
1,2,4-三氯苯	6.33	N. D.	N. D.	N. D.	8.32	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	22.11	7.17	N. D.	N. D.	N. D.
1,2,3-三氯苯	0.83	N. D.	N. D.	2.82	1.48	N. D.	2.12	N. D.	25.41	14.71	5.45	1.67	2.50	10.21
1,2,4,5-四氯苯	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	0.90	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.
1,2,3,5-四氯苯	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	1.09	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.
1,2,3,4-四氯苯	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	0.52	0.52	N. D.	0.33	0.77	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.
五氯苯	1.14	N. D.	N. D.	N. D.	1.49	4.97	N. D.	N. D.	0.25	0.40	N. D.	N. D.	N. D.	0.35
六氯苯	697.93	128.83	2.03	3.72	539.00	1 030.61	38.10	103.90	109.91	646.60	187.74	24.16	117.39	218.95
∑ CBs	2 824.84	3 005.85	2 423.18	4 667.76	2 731.50	4 640.05	2 672.45	1 628.05	704.92	7 811.23	2 557.89	3 329.61	3 978.43	1 086.96

1) “*n*”代表各研究鱼体采集尾数; “*S*”代表由各采集鱼体分装成检测样品个数; “N. D.”代表未检出

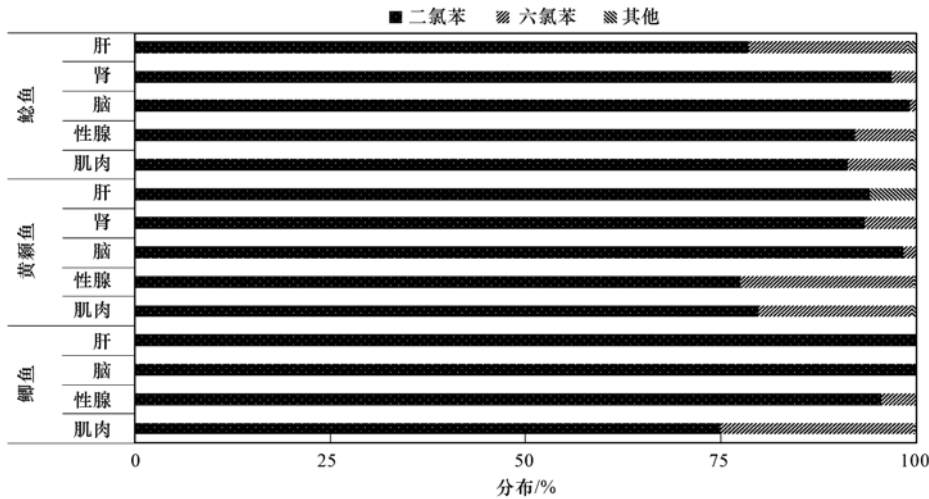


图 2 典型血吸虫病疫区 CBs 各同系物所占质量分数分布

Fig. 2 Mass fractions 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, 鲢鱼肌肉内 $\sum$ CBs 最高, 为各类鱼体器官中污染物含量的 1.67 ~ 11.08 倍. 原因可能是 $\sum$ CBs 具有一定的生物富集放大作用, 所以导致在水中营养等级较高的肉食性鱼体鲢鱼体内该类化合物含量较高, 这一结果与本实验室之前所做的调查结果相一致^[12]; 另外, 鲢鱼体内各器官 $\sum$ CBs 含量为肌肉 > 肾脏 > 脑 > 性腺 > 肝脏, 说明鲢鱼肌肉较其他器官而言更易于 CBs 类

化合物的富集. 分析鲫鱼体内各器官中 $\sum$ CBs 含量发现, 肌肉、性腺和脑等器官中 $\sum$ CBs 含量处于同一水平(2 423.18 ~ 3 005.85 ng·g⁻¹), 而在主要负责去除血液中代谢废物的肾脏中含量较高(4 667.76 ng·g⁻¹), 这说明鲫鱼具备一定的功能将体内 $\sum$ CBs 通过自身排泄排出体外. 观察黄颡鱼体内各器官污染物含量发现, 性腺中 $\sum$ CBs 含量(4 640.05 ng·g⁻¹) 为污染物含量最高的器官, 说明黄颡鱼母体体内 CBs 毒性较另外两种鱼体更易影响子代的受精及发育过程, 对子代产生毒性效应.

3.2 典型污染物来源分析

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^[13,14],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. 有报道指出^[15,16],疫区血防人员灭螺时,每 m^2 土地面积的 PCP 用药量高达 $5 \sim 20 \text{ g}$,导致表层土壤沉积物中 PCP 的含量非常高,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. 这也就解释了当地鱼体体内 HCB 含量较高的现象.

本研究表明 1,2-二氯苯在各鱼体组织器官中含量为二氯苯类化合物首要污染物(所占二氯苯类化合物质量分数均高于 52%,含量范围为 $384.97 \sim 3\,676.62 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$). 分析 1,2-二氯苯在日常生产生活中的用途发现,在医药方面该类化合物可用于生产氟氯苯胺,用作氟哌酸的生产;在农药方面,可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,广谱驱虫药甲苯咪唑的中间体,以及农药呋喃丹的基本原料等;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、还原草绿 GB 等. 裴丽萍等^[17]研究表明,根据鱼类急性毒性分级标准,1,2-二氯苯对斑马鱼 96h 的半致死质量浓度为 $5.13 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,安全质量浓度为 $0.51 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,属于高毒性物质,所以 1,2-二氯苯在环境中的赋存状况应引起重视. 相应地,1,3-二氯苯和 1,4-二氯苯之和在各鱼体组织器官中所占二氯苯类化合物质量分数均低于 48%. 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除草剂地草平的中间体,喹诺酮酸类抗菌剂的起始原料和对苯二酚等. 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 $5\,000 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$. 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^[12]. 同时,有研究表明六氯苯可在厌氧环境下最终降解为二氯苯类化合物也是重要的来源^[3,6].

因此可以推断该研究区域鱼体各器官中六氯苯主要来源于该地区之前长期使用的杀螺剂(五氯酚钠);二氯苯化合物一方面主要来源于六氯苯在厌氧条件下的降解,另一方面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.

3.3 典型污染物在各生物体内含量分析

分析 HCB 在各鱼体器官中的含量发现,各鱼体肌肉中 HCB 含量相当(几何均值分别为鲫鱼 $697.93 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 、黄颡鱼 $539.00 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 以及鲢鱼 $646.60 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$),在鲫鱼和鲢鱼体内,肌肉中 HCB 含量均高于其他器官中含量. 此次采集的鱼体样品中六氯苯和二氯苯类化合物在不同生物体内含量相当且与在生物链内的生物等级并无明显关系,这可能与此次采集各类鱼体样品的生长时间以及各自生活环境和习性有关.

3.4 国内外研究对比

对比国内外相关研究报道(见表 3)发现该区域肌肉中 HCB 与之前报道的该区域鱼体($160 \sim 906 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$)肌肉中含量相当,略高于中国各地区报道的相关含量;与其他国家和地区报道值(日本 $2 \sim 100 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$,挪威 $36 \sim 79 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$,丹麦 $19 \sim 54 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$)相比,研究区域 HCB 含量同样处于较高水平. 与已有报道的鱼体肝脏中 HCB 含量相比较发现,格陵兰岛的鳕鱼、比目鱼和狼鱼肝脏中含量较低($27 \sim 42 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$),研究区域黄颡鱼 HCB 含量与我国中华鲟肝脏中含量相当,且高于新乡超市中购买的草鱼和鲤鱼. 另外,与我国中华鲟体内的性腺相比,研究区域鲫鱼和鲢鱼性腺中的含量与之持平,但黄颡鱼性腺中含量远高于中华鲟性腺中 HCB 含量.

由于本研究在计算 $\sum \text{CBs}$ 时使用的是 12 种氯苯类化合物含量,所以在与格陵兰岛和中国新乡(仅将四氯苯、五氯苯和六氯苯作为 $\sum \text{CBs}$ 加和项)相关报道值相比较时发现,本研究区域 $\sum \text{CBs}$ 含量较高;但当与中国珠江口(将二氯苯、三氯苯、四氯苯、五氯苯和六氯苯作为 $\sum \text{CBs}$ 加和项)相关报道中各鱼体 $\sum \text{CBs}$ 值相比较发现,本研究区域与珠江口研究区域的 $\sum \text{CBs}$ 含量相当. 上述现象说明环境中二氯苯类污染物不仅占 CBs 比重较高并且较其他氯苯类化合物更易被忽略.

表 3 水生生物体内 $\sum$ CBs 和 HCB 的国内外对比/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$

Table 3 Levels of $\sum$ CBs and HCB among samples in aquatic organisms from various locations/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$

国家	区域名称	采样年份	鱼种	器官	$\sum$ CBs	HCB	文献
中国	洞庭湖	2013	鲫鱼	肌肉	2 824.84(1 043.91 ~ 7 262.24)	697.93(305.15 ~ 1 635.70)	本研究
				性腺	3 005.85	128.83	
				脑	2 423.18(568.81 ~ 10 766.17)	2.03(0.18 ~ 23.52)	
				肾脏	4 667.76(2 071.11 ~ 10 619.07)	3.72(0.18 ~ 78.73)	
中国	洞庭湖	2013	黄颡鱼	肌肉	2 731.5(1 158.64 ~ 6 738.60)	539(341.49 ~ 850.74)	
				性腺	4 640.05	1 030.61	
				脑	2 672.45	38.1	
				肾脏	1 628.05	103.9	
中国	洞庭湖	2013	鲢鱼	肝脏	704.92	109.91	
				肌肉	7 811.23(4 640.38 ~ 10 237.66)	646.6(508.36 ~ 780.65)	
				性腺	2 557.89	187.74	
				脑	3 329.61(2 371.37 ~ 4 685.35)	24.16(18.74 ~ 31.15)	
中国	洞庭湖	2013	鳙鱼	肾脏	3 978.43(3 775.17 ~ 4 230.62)	117.39(88.80 ~ 155.20)	
				肝脏	1 086.96(842.17 ~ 1 402.91)	218.95(126.83 ~ 377.97)	
丹麦 ¹⁾	格陵兰岛	2000	大西洋鲑鱼	肝脏	30(28 ~ 33)	27(25 ~ 30)	[18]
				肌肉	38(18 ~ 71)	33(16 ~ 49)	
		2000	比目鱼	肝脏	48(39 ~ 730)	42(34 ~ 710)	
				肌肉	51(24 ~ 62)	44(19 ~ 54)	
中国 ²⁾	新乡	2012	草鱼	肝脏	17.4(6.62 ~ 35.2)	5.41 ~ 24.46	[19]
				肝脏	20.3(4.97 ~ 62.3)	2.84 ~ 51.39	
			鲤鱼	肌肉	1 760.4	16	
				肌肉	3 456.9	16.9	
中国 ³⁾	珠江口	2005	花鲈	肌肉	5 458.3	25.7	[20]
				肌肉	— ⁵⁾	98(1.8 ~ 204)	
				肌肉	—	10.3(3.0 ~ 18.7)	
				肌肉	—	34.6(12.5 ~ 121)	
中国	长江	2003 ~ 2005	中华鲟	肾脏	—	17.4	[21]
				肌肉	—	22	
				肌肉	—	23	
				肌肉	—	37	
中国	太湖、杭州湾	2000 ~ 2001	翘嘴鲌	肌肉	—	61	[22]
				肌肉	—	160	
				肌肉	1 851	906	
				肌肉	4 062	492	
中国 ⁴⁾	洞庭湖	2011 ~ 2012	黄颡鱼	肌肉	8 159	—	[12]
				肌肉	—	2 ~ 100	
				肌肉	—	39(36 ~ 41)	
				肌肉	—	62(53 ~ 79)	
日本	—	—	—	肌肉	—	—	[23]
挪威	巴伦支海	1995	北极鳕	肌肉	—	—	[24]
			鳕鱼	肌肉	—	—	

1) $\sum$ CBs 包含四氯苯、五氯苯和六氯苯; 2) $\sum$ CBs 包含四氯苯、五氯苯和六氯苯; 3) $\sum$ CBs 包含二氯苯、三氯苯、四氯苯、五氯苯和六氯苯; 4) $\sum$ CBs 包含氯苯、二氯苯、三氯苯、四氯苯、五氯苯和六氯苯; 5) “—”表示文章中没有相关数据

4 结论

典型血吸虫病疫区鱼体不同器官内 CBs 含量有所差异,肌肉含量范围为2 731.50 ~ 7 811.23 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$,性腺含量范围为2 557.89 ~ 4 640.05 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$,脑中含量范围为2 423.18 ~ 3 329.61 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$,肾脏中含量范围为1 628.05 ~ 4 667.76 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$,肝脏中含量范围为

704.92 ~ 1 086.96 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$. 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 HCB 主要来源为杀螺剂(五氯酚钠),二氯苯主要来源为六氯苯厌氧降解以及当地居民日常生活用品; 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,且二氯苯类化合物含量较高,需引起重视.

参考文献:

- [1] Tong M, Yuan S H. Physiochemical technologies for HCB remediation and disposal: A review [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, **229-230**: 1-14.
- [2] Zhou Y Q, Tigane T, Li X Z, *et al.* Hexachlorobenzene dechlorination in constructed wetland mesocosms [J]. *Water Research*, 2013, **47**(1): 102-110.
- [3] 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.
Gan P, Fan Y B, Wang M J. Experiment of biodegradation of chlorobenzenes [J]. *Environmental Science*, 2001, **22**(3): 93-96.
- [4] 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.
Liu C Y, Jiang X. Effect of composting organic fertilizer supplies on hexachlorobenzene dechlorination in paddy soils [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(4): 1583-1589.
- [5] 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.
Hu X, Hu Y M, Fan Y B, *et al.* Fate and behavior of chlorobenzenes in the soil [J]. *Environmental Science*, 2000, **21**(6): 32-36.
- [6] Yuan S Y, Su C J, Chang B V. Microbial dechlorination of hexachlorobenzene in anaerobic sewage sludge [J]. *Chemosphere*, 1999, **38**(5): 1015-1023.
- [7] Song S L, Ma J, Tian Q, *et al.* Hexachlorobenzene in human milk collected from Beijing, China [J]. *Chemosphere*, 2013, **91**(2): 145-149.
- [8] 于志勇, 金芬, 孙景芳, 等. 北京市场常见淡水食用鱼体内农药残留水平调查及健康风险评估[J]. *环境科学*, 2013, **34**(1): 251-256.
Yu Z Y, Jin F, Sun J F, *et al.* Residual levels of pesticides in freshwater fish from Beijing aquatic product markets and health risk assessment [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(1): 251-256.
- [9] 刘在平, 张松林, 杨敬辉. 氯苯对斑马鱼胚胎发育和仔鱼的毒性效应研究[J]. *环境科学与技术*, 2012, **35**(7): 25-28.
Liu Z P, Zhang S L, Yang J H. Toxic effects of chlorobenzene on embryonic development and larva of zebrafish [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **35**(7): 25-28.
- [10] 刘在平, 李小平, 张顺武, 等. 氯苯和间甲酚对斑马鱼胚胎和仔鱼联合毒理效应研究[J]. *环境科学与管理*, 2014, **39**(3): 91-94.
Liu Z P, Li X P, Zhang S W, *et al.* Joint toxic effects of chlorobenzene and M-cresol on zebrafish embryo and larvae [J]. *Environmental Science and Management*, 2014, **39**(3): 91-94.
- [11] 于红霞, 王连生, 赵元慧. 氯代苯在鱼体内富集和释放行为的研究[J]. *环境科学*, 1995, **16**(1): 8-11.
Yu H X, Wang L S, Zhao Y H. Study on the bioaccumulation of chlorobenzenes in fish and their release behaviour [J]. *Environmental Science*, 1995, **16**(1): 8-11.
- [12] 李昆, 赵高峰, 周怀东, 等. 血吸虫病疫区水生生物体内氯苯类化合物的污染特征与潜在风险[J]. *环境科学*, 2015, **36**(10): 3866-3871.
- Li K, Zhao G F, Zhou H D, *et al.* Distribution characteristics and potential risk of CBs in aquatic organisms from typical epidemic areas of schistosomiasis prevalence [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(10): 3866-3871.
- [13] 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.
- [14] Wang G, Lu Y L, Han J Y, *et al.* Hexachlorobenzene sources, levels and human exposure in the environment of China [J]. *Environment International*, 2010, **36**(1): 122-130.
- [15] 戴建荣, 黄铭西, 朱荫昌. 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.
- [16] 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.
- [17] 裘丽萍, 范立民, 刘琦, 等. 邻二氯苯对斑马鱼的急性毒性[J]. *安徽农业科学*, 2015, **43**(19): 91-92.
Qiu L P, Fan L M, Liu Q, *et al.* Acute toxicity of chloroben on *Brachydanio rerio* [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2015, **43**(19): 91-92.
- [18] 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.
- [19] Li Y F, Yang Z Z, Fan J, *et al.* Occurrence of higher chlorinated benzenes in livers of grass carp and common carp collected from markets of Xinxiang, China [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2013, **91**(5): 522-525.
- [20] 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.
Wei T L, Jia X S, Du Q P, *et al.* Chlorobenzenes in the waters, sediments and aquatic animals from the Pearl River Estuary [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, **27**(10): 1717-1726.
- [21] 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.
- [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] de Brito A P X, 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.
- [24] 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.

CONTENTS

Reactivity-based Anthropogenic VOCs Emission Inventory in China	LIANG Xiao-ming, ZHANG Jia-ni, CHEN Xiao-fang, <i>et al.</i> (845)
Characteristics of Reactive VOCs Species During High Haze-Pollution Events in Suburban Area of Shanghai in Winter	GAO Shuang, ZHANG Kun, GAO Song, <i>et al.</i> (855)
Assessment of PM _{2.5} Pollution Mitigation due to Emission Reduction from Main Emission Sources in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	WU Wen-jing, CHANG Xing, XING Jia, <i>et al.</i> (867)
Concentration Characteristics and Sources of Trace Metals in PM _{2.5} During Wintertime in Beijing	QIAO Bao-wen, LIU Zi-rui, HU Bo, <i>et al.</i> (876)
Online Source Analysis of Particulate Matter (PM _{2.5}) in a Heavy Pollution Process of Shijiazhuang City During Heating Period in 2015	LU Na, LI Zhi-guo, ZHOU Jing-bo, <i>et al.</i> (884)
Analysis of Chemical Composition and Pollution Source of the Fine Particulate Matter by the SPAMS in the Four Seasons in Nanning	LIU Hui-lin, CHEN Zhi-ming, MAO Jing-ying, <i>et al.</i> (894)
Physico-chemical Characteristics of Individual Aerosol Particles in Marine Atmosphere on South Hemisphere	CHI Jian-wei, LI Chuan-jin, SUN Jun-ying, <i>et al.</i> (903)
Characteristics of Spatial Distribution of Bacterial Aerosols Produced by Fountain	ZHANG Chong-miao, YUAN Lin, XU Peng-cheng, <i>et al.</i> (911)
Removal of Volatile Sulfur Odor by the Biotrickling Filter	YE Jie-xu, MIAO Xiao-ping, ZHUGE Lei, <i>et al.</i> (918)
Magnetic Characteristics and Environmental Pollution Analysis of Street Dust in Different Functional Zones of Xi'an City	FANG Ni, ZHANG Jun-hui, WANG Jin, <i>et al.</i> (924)
Pollution Characteristics and Nitrification and Denitrification Potential of Superficial Sediments from Streams in an Urban-Rural Fringe	QIN Ru-bin, LI Ru-zhong, GAO Su-di, <i>et al.</i> (936)
Nitrification and Denitrification Rates in a Small Tributary, Nanhe River, of Three Gorge Dam Reservoir During Water Collection and Release Events	WANG Jing, LIU Hong-jie, LEI Yu, <i>et al.</i> (946)
Tempo-spatial Variations and Influential Factors of Carbon Dioxide Emissions from the Geheyan Reservoir over the Qingjiang River Basin, China	ZHAO Deng-zhong, TAN De-bao, LI Chong, <i>et al.</i> (954)
Seasonal Pollution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in Surface Water of Baiyangdian Lake	WANG Yi-zhen, ZHANG Jun, ZHOU Xu-shen, <i>et al.</i> (964)
Distributions, Sources and Pollution Assessment of Hg in Sediment of Douhe Reservoir in Tangshan City	WU Ting-ting, WANG Ming-meng, CHEN Xu-feng, <i>et al.</i> (979)
Release Characteristics of Mercury from Submersed Typical Herbaceous Plants in the Water-Level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Area	DENG Han, ZHANG Xiang, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (987)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Water Around Electroplating Factories	YU Cong-cong, ZHAO Wei-tuo, GAO Xiao-feng, <i>et al.</i> (993)
Speciation and Ecological Risk of Heavy Metals in Surface Sediments from Jiulong River	LIN Cheng-qi, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (1002)
Fractionation and Contamination Assessment of Metal Elements in the Surface Sediments of Yundang Lagoon in Xiamen	YANG Qiu-li, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (1010)
Source Analysis, Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Sewage Irrigation Area Farmland Soils of Longkou City	LI Chun-fang, WANG Fei, CAO Wen-tao, <i>et al.</i> (1018)
Efficiency and Mechanism of Purifying High Iron-Manganese from Ground Water in the Cold Villages and Towns Based on The Coupling of Rice Husk and Iron-Manganese Oxidizing Bacteria	SUN Nan, CHEN Yan-li, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1028)
Peroxidation of High Algae-laden Water by Ozone; Algae Organic Matter Transformation and Disinfection By-products Formation	ZHANG Sai, HU Xue-bin, GU Li, <i>et al.</i> (1038)
Effects of Pretreatment on Hydraulic Irreversible Membrane Fouling During Ultrafiltration Short Process: A Pilot Study	YANG Hai-yan, XING Jia-jian, WANG Can, <i>et al.</i> (1046)
Fenton-like Catalytic Removal of Organic Pollutants in Water by Framework Cu in Cu-Al ₂ O ₃	XU Dan, ZHANG Li-li, LIU Li-fen (1054)
Oxidation Destruction of Cu(CN) ₃ ²⁻ by Persulfate	WANG Yun-fei, LI Yi-bing, WANG Yan-bin, <i>et al.</i> (1061)
Enhanced Removal of Herbicide 2,4-dichlorophenoxyacetic Acid and Simultaneous Power Generation in Microbial Fuel Cells	QUAN Xiang-chun, QUAN Yan-ping, XIAO Zhu-tian (1067)
Adsorption Characteristics of Copper in Water by the Porous Biomorph-Genetic Composite of HAP/C with Eucalyptus Wood Template	LI Chao, ZHU Zong-qiang, CAO Shuang, <i>et al.</i> (1074)
Biological Toxicity Evaluation of Domestic Wastewater Based on A ² /O Treatment Processes Using a Battery of Bioassays	ZHANG Qiu-ya, MA Xiao-yan, WANG Xiao-chang, <i>et al.</i> (1084)
Effect of Wastewater Nitrogen Concentrations on Nitrogen Removal Ability of <i>Myriophyllum aquaticum</i>	MA Yong-fei, YANG Xiao-zhen, ZHAO Xiao-hu, <i>et al.</i> (1093)
Recovery Performance of ANAMMOX Process after Inhibition Resulting from Seawater	QI Pan-qing, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (1102)
Impact of Starvation Conditions on Biological Community Structure in Sulfur Autotrophic Denitrification Reactor	LI Fang-fang, SHI Chun-hong, LI Hai-bo, <i>et al.</i> (1109)
Quick Start-up of Anaerobic Ammonium Oxidation Process	LÜ Gang, XU Le-zhong, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (1116)
A New Model for the Treatment of Low Ammonia Nitrogen Wastewater by CANON Process	WANYAN De-qing, YUAN Yi, LI Xiang, <i>et al.</i> (1122)
Effects of Side-stream Phosphorus Recovery on the Performance of EBPR System Under Low Dissolved Oxygen Condition	MA Juan, SONG Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (1130)
Identification and Influence of Quorum Sensing on Anaerobic Ammonium Oxidation Process	CHEN Shu-han, LI An-jie, WANG Yue-xing, <i>et al.</i> (1137)
Effects of Organic Loading Rate on Startup Performance of Anaerobic Digestion with Vinegar Residues	DAI Xiao-hu, YU Chun-xiao, LI Ning, <i>et al.</i> (1144)
Influencing Mechanism of Calcium Peroxide Pre-treatment on Dewatering Performance of Waste Activated Sludge	BAI Run-ying, CHEN Zhan, ZHANG Wei-jun, <i>et al.</i> (1151)
Treatment Effects of Earthworm Constructed Wetlands in Different Working Conditions	DONG Meng-ke, LI Huai-zheng, XU Yi-xiao (1159)
Effect of PFOA on Oxidative Stress and Membrane Damage of <i>Escherichia coli</i>	YANG Meng, LI Yi, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1167)
Physicochemical Properties and Antibacterial Effect of Silver Nanoparticles; A Comparison of Environmental and Laboratorial Conditions	YI Jun, CHENG Jin-ping (1173)
Pollution Characteristics of Chlorobenzenes in Organs of Fish from Typical Epidemic Areas of Schistosomiasis Prevalence	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1182)
Effect of Nano Zeolite on Growth, Activity of Antioxidant Enzyme, and Chemical Fractions and Concentration of Cd in Chinese Cabbage	QIN Yu-li, XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (1189)
Effect of Different Iron Minerals on Bioaccessibility of Soil Arsenic Using <i>in vitro</i> Methods	ZHONG Song-xiong, YIN Guang-cai, HUANG Run-lin, <i>et al.</i> (1201)
Enhanced Electrokinetic Remediation of Heavy Metals Contaminated Soils by Stainless Steel Electrodes as well as the Phenomenon and Mechanism of Electrode Corrosion and Crystallization	WEN Dong-dong, FU Rong-bing, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (1209)
Influence of the Application of Non-Hazardous Sewage Sludge on the Evolution of Soil Carbon Pool and Carbon Pool Management Index	LIU Xiao, HUANG Lin, GUO Kang-li, <i>et al.</i> (1218)
Input and Distribution of Photosynthesized Carbon in Soil-Rice System Affected by Water Management and Nitrogen Fertilization	WANG Ting-ting, ZHU Zhen-ke, ZHU Han-hua, <i>et al.</i> (1227)
Effects of Simulated Acid Rain on Soil Respiration and Heterotrophic Respiration in a Secondary Forest	CHEN Shu-tao, SUN Lu, SANG Lin, <i>et al.</i> (1235)
Response of Soil Nitrifier and Denitrifier Community and Activity to Elevated Atmospheric CO ₂ Concentration and Temperature	LIU Yuan, WANG Guang-li, LI Lian-qing, <i>et al.</i> (1245)
Effects of Lithology on the Abundance and Composition of Soil Nitrogen-fixing Bacteria and Arbuscular Mycorrhizal Fungal Communities in Karst Shrub Ecosystem	LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (1253)
Characterization of Phosphorus Forms in Organic Composts and Their Effects on Leaf Phosphorus Content of <i>Castanea mollissima</i> in Chinese Chestnut Producing Area	SONG Ying, GUO Su-juan, ZHANG Li, <i>et al.</i> (1262)
Effects of Acidic Materials on the N Transformations During the Composting of Pig Manure and Wheat Straw	JIANG Ji-shao, YAO Qian (1272)