

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第1期

Vol.38 No.1

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

南京北郊冬季挥发性有机物来源解析及苯系物健康评估 张玉欣,安俊琳,林旭,王俊秀,师远哲,刘静达(1)

南京冬季重污染过程中黑碳气溶胶的混合态及粒径分布 蒋磊,汤莉莉,潘良宝,刘丹彤,花艳,张运江,周宏仓,崔玉航(13)

基于 GAM 模型分析影响因素交互作用对 PM_{2.5} 浓度变化的影响 贺祥,林振山(22)

模拟烹饪油烟的粒径分布与扩散 李双德,徐俊波,莫胜鹏,李文辉,高佳佳,曹亚裙,陈运法(33)

基于光谱分析仪的通量-梯度法测量小型池塘水-气界面温室气体交换通量 张维,唐翔宇,鲜青松(41)

闽江口短叶茳茅+芦苇沼泽湿地大、小潮日土壤间隙水溶解性 CH₄ 与 CO₂ 浓度日动态 谭立山,杨平,何雨露,黄佳芳,胡智强,全川(52)

河南鸡冠洞 CO₂ 季节和昼夜变化特征及影响因子比较 张萍,杨琰,孙喆,梁沙,张娜,田宁,李建仓,凌新有,张志钦(60)

蠡湖表层沉积物荧光溶解性有机质(FDOM)荧光光谱特征 陈俊伊,王书航,姜霞,黄晓峰,赵丽(70)

滇池沉积物有机质沉积特征与来源解析 韩秀秀,黄晓虎,余丽燕,杨浩,黄昌春,黄涛,余艳红,罗玉(78)

紫色土小流域浅层井水中胶体颗粒的季节变化 张维,唐翔宇,鲜青松(87)

太湖湖滨带春季悬浮物沉降特征与水体营养盐响应 祁闯,王国祥,吴馨婷,许晓光,韩睿明,吴松峻(95)

基于 LDI 的土地利用类型与湿地水质的相关性:以苏州太湖三山岛国家湿地公园为例 杨朝辉,苏群,陈志辉,白俊武,钱新强,张志敏(104)

基于分位数回归的洱海藻类对氮、磷及水质的响应特征 陈小华,李小平,钱晓雍,胡双庆(113)

深水型水库藻类生态功能组(MBFG)的季节演替特征 杨毓,卢金锁,张颖(121)

三峡库区水体中可溶性 C、N 变化及影响因素 范志伟,郝庆菊,黄哲,柴雪思,江长胜(129)

三峡库区古夫河小流域氮磷排放特征 华玲玲,李文超,翟丽梅,崔超,刘宏斌,任天志,张富林,雷秋良(138)

黄土高原坝系流域干湿季交替下氮输出特征及其源解析:以羊圈沟为例 贾璐杰,高扬,陈维梁,郝卓,汪亚峰,陈利顶(147)

5 种沉水植物的氮、磷吸收和水质净化能力比较 金树权,周金波,包薇红,陈君,李丹丹,李洋(156)

骆马湖表层水体中 32 种 PPCPs 类物质的污染水平、分布特征及风险评估 张芹,张圣虎,汪贞,郭敏,刘济宁,石利利,古文(162)

大冶湖表层沉积物-水中多环芳烃的分布、来源及风险评价 张家泉,胡天鹏,邢新丽,郑煌,张丽,占长林,刘红霞,肖文胜,祁士华(170)

pH 和络合剂对五价砷在水钠锰矿和水铁矿表面吸附行为的影响 王华伟,李晓月,李卫华,孙英杰(180)

紫外辐射对高岭土混凝过程的影响机制 王文东,王昌鑫,刘荟,韩雨(188)

水环境中溶解态腐殖酸对锌抗甲状腺激素干扰效应的影响 艾扬,孔东东,于畅,沈扬,李剑(195)

污水中常见违禁药物分析方法优化及验证 高婷婷,杜鹏,徐泽琼,杨军,张华方,李喜青(201)

阴极电场增强活性炭纤维-臭氧体系去除水中硝基苯 赵纯,张帅,周宇,李琨,周炜,黎鹏宇,杨广,孙志华,郑怀礼(212)

碳纳米管改性 PVDF 中空纤维超滤膜处理二级出水抗污染性能研究 王利颖,石洁,王凯伦,关羽琪,郭瑾(220)

曝气生物滤池(Fe²⁺)-臭氧组合工艺强化处理石化二级出水 徐敏,吴昌永,周岳溪,郭明昆,王翼(229)

4 种反应器中厌氧氨氧化菌完整烷烃的特异性 王晗,方芳,李凯,邢晖,郭劲松,陈猷鹏,曾前松(238)

疏自养填充床反应器降解水中高浓度高氯酸盐的特性及菌群分析 张超,陶华强,宋圆圆,逯彩彩,郭延凯,廉静,郭建博(247)

CANON 在 SBAF 中的快速启动及其微生物特征 刘竹寒,岳秀,于广平,金腊华,唐嘉丽,吉世明(253)

高浓度游离氨冲击负荷对生物硝化的影响机制 季民,刘灵婕,翟洪艳,刘京,苏晓(260)

有机物对亚硝化颗粒污泥中功能菌活性的影响 王书永,钱飞跃,王建芳,沈耀良(269)

一种新型生物膜法除磷工艺中聚磷菌的富集培养过程 郑莹,潘杨,周晓华,廖旭弘,孟璇,夏健伟(276)

应用于矿山修复的高效菌株鉴定与溶岩机制:基于增强回归树分析 吴雁雯,张金池,郭晓平,刘鑫(283)

镉对铜绿假单胞菌降解水体中壬基酚的影响 史广宇,程媛媛,施维林(294)

华北平原不同农田管理措施对于土壤碳库的影响 石小霞,赵诣,张琳,吴文良,孟凡乔(301)

缙云山柑橘林土壤微生物磷脂脂肪酸(PLFAs)及酶活性的季节变化特征 李南洁,曾清苹,何丙辉,周飞(309)

中条山十八河铜尾矿库微生物群落组成与环境适应性 刘晋仙,李磊,景炬辉,贾彤,刘兴港,王小云,柴宝峰(318)

安徽省部分城市土壤中全氟化合物空间分布及来源解析 李法松,倪卉,黄涵宇,徐志兵,张倩,李长霞,黄文秀,金陶胜(327)

不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳及其组分的影响:对土壤活性有机碳的影响 赵世翔,于小玲,李忠徽,杨艳,刘丹,王旭东,张阿凤(333)

水分管理模式与土壤 Eh 值对水稻 Cd 迁移与累积的影响 田桃,曾敏,周航,徐璐,杨文骏,辜娇峰,邹佳玲,张平,彭佩钦,廖柏寒(343)

苾、镉单一及复合污染胁迫下土壤生态功能稳定性的影响机制 陈欣瑶,杨惠子,李敏,牛晓丛,苏雨轩,张园(352)

生物炭、蒙脱石及其混合添加对复合污染土壤中重金属形态的影响 高瑞丽,唐茂,付庆灵,郭光光,李响,胡红青(361)

某电镀厂六价铬污染土壤还原稳定化试剂筛选与过程监测 李培中,吕晓健,王海见,杨苏才,魏文侠,宋云(368)

多孔 SBA-15 颗粒对 Cd(II) 的吸附缝合及其对土壤 Cd(II) 的修复潜力 黄辉,宁西翠,郭瞻宇,郭堤,张增强,李荣华,王力,Ali Amjad(374)

卤系阻燃剂在东江水体中的生物富集 何明靖,杨婷,李琦,王登祥,赵佳渊(382)

广州市蔬菜中重金属污染特征研究与评价 陈志良,黄玲,周存宇,钟松雄,王欣,戴玉,蒋晓璐(389)

蔬菜镉(Cd)富集因子变化特征及其影响因素 杨阳,李艳玲,陈卫平,王美娥,彭驰(399)

施用污泥堆肥品对土壤和植物总汞及甲基汞的影响 余亚伟,杨雨洽,张成,易建婷,安思危,王定勇(405)

大气臭氧污染对冬小麦气孔吸收通量的影响机制及其时空格局 赵辉,郑有飞,曹嘉晨,徐静馨,黄积庆,袁月(412)

《环境科学》征稿简则(12) 《环境科学》征订启事(194) 信息(21, 51)

卤系阻燃剂在东江鱼体中的生物富集

何明靖^{1,2}, 杨婷¹, 李琦¹, 王登祥¹, 赵佳渊¹

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400716; 2. 重庆市农业资源与环境研究重点实验室, 重庆 400716)

摘要: 准确获取化合物的生物富集因子(BAF)对于判定化合物是否属于潜在毒害性污染物、评价其生态环境风险都具有重要的意义. 本文以东江水体为研究区域, 以 PBDEs、DBDPE、DP、TBBPA 和 HBCDs 为目标化合物, 研究了其在 3 种鱼体中的富集特征. 结果表明, 5 种化合物的 lgBAF 的变化范围分别为 5.0~7.4、6.1~7.1、4.6~7.9、2.6~4.6 和 4.8~7.7. 在本研究中, 大多数的化合物 lgBAF 值均大于 3.7, 说明这些污染物都具有生物富集能力. HFRs 的 BAF 值总体随着 lgK_{ow} 值的增加而增加, 但当 lgK_{ow} >7 时, 生物对 PBDEs 的生物富集能力有所下降. γ -HBCD 向 α -HBCD 的生物转化以及生物体对 BDE66 和 BDE99 的代谢导致这几种单体偏离了这个模型预测趋势. DBDPE 的 BAF 值大于 BDE209 的 BAF 值, 作为大分子污染物, DBDPE 的生物富集能力应该值得关注. 通过对污染物的生物沉积物富集因子(BSAF)的计算, 发现绝大多数的污染物的 BSAF 值均小于 1, 表明沉积物不太可能作为水生生物的污染源.

关键词: 卤系阻燃剂; 生物富集; 生物富集因子; 生物沉积物富集因子; 东江

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)01-0382-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201607155

Bioaccumulation of Halogenated Flame Retardants in Fish of Dongjiang River

HE Ming-jing^{1,2}, YANG Ting¹, LI Qi¹, WANG Deng-xiang¹, ZHAO Jia-yuan¹

(1. College of Resources and Environment Science, Southwest University, Chongqing 400716, China; 2. Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, Chongqing 400716, China)

Abstract: Bioaccumulation factor (BAF) plays a key role in identification of bioaccumulative substance and in assessment of chemical risks. In order to reveal the bioaccumulation behavior of fish in Dongjiang River, sediment, water and fish samples were collected from Dongjiang River and PBDEs, DBDPE, DP, TBBPA and HBCDs were measured. The ranges of lgBAF were 5.0-7.4, 6.1-7.1, 4.6-7.9, 2.6-4.6 and 4.8-7.7, respectively. In the present study, most HFRs had a lgBAF of higher than 3.7, which suggested that they might be bioaccumulative. The BAF values of HFRs increased with increasing lgK_{ow}, when lgK_{ow} >7, the bioaccumulation extent decreased with the increase of lgK_{ow}. Biotransformation of γ -HBCD toward α -HBCD and the metabolism of BDE66 and BDE99 of these isomers might attribute to the deviation from the general trend predicted by K_{ow}. More attention should be paid to DBDPE, since its BAF value was higher than that of BDE209. The BSAF values of most PBDEs, DBDPE, DP, TBBPA and HBCDs congeners in three fish species were less than 1, indicating that these compounds were unlikely to become a source of pollution to the aquatic organisms due to the poor bioavailability.

Key words: halogenated flame retardant; bioaccumulation; bioaccumulation factor; biota-sediment accumulation factor; Dongjiang River

近几年, 卤系阻燃剂 (halogenated flame retardants, HFRs) 的环境污染及其生物富集是当前环境生物地球化学研究的前沿领域之一^[1]. 除了传统的三大类溴系阻燃剂四溴双酚 A (TBBPA)、多溴联苯醚 (PBDEs) 和六溴环十二烷 (HBCDs) 外, 一些新的替代品如十溴二苯乙烷 (DBDPE) 和得克隆 (DPs) 的生物富集行为也日渐受到人们的关注^[2,3]. 这些化学物质在生物体内的累积和富集不仅可能对生物自身带来不利影响, 同时也可能通过食物链传递对生态系统和人类健康造成潜在威胁^[4]. 因此, 对环境中卤系阻燃剂在生物体内吸收和富集作用的研究已成为环境化学与生态毒理学领域的一项重要内容, 此外, 通过研究所获得的污染物生物富集数据通常用来评价对动物和人类的暴露危害, 这些数据不仅是污染物环

境管理的生态毒理学基础数据, 同时也是欧美国家环境风险评价程序的触发要素之一^[5].

生物富集 (bioaccumulation) 是指生物从环境介质 (水和大气) 和食物摄取污染物, 使得生物体内污染物的含量超过环境介质中该污染物的含量的过程^[6]. 评估有机污染物在生物体内的富集能力是评价有机污染物生态风险的重要手段. 在水生环境中, 鱼类由于对有机污染物代谢很少, 又处在食物链

收稿日期: 2016-07-23; 修订日期: 2016-08-26

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41403078); 中央高校基本科研业务费专项 (XDJK2016B042, XDJK2016E163); 重庆市基础科学与前沿技术研究专项 (cstc2016jcyjA0399); 广东省科技计划项目 (2014B030301064)

作者简介: 何明靖 (1985~), 男, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为持久性有机污染物地球化学行为, E-mail: mjhe@swu.edu.cn

的高端以及长期暴露在水体中,体内积累了大量的污染物,经常被应用于生物检测工程^[7],是水生环境中非常好的指示生物.同时鱼类也是有机污染物从沉积物或者水体进入鸟体内或更高级动物的“媒介”^[8,9].因此鱼类作为水生环境的指示生物,在研究有机污染物的生物富集效应可能对人类和环境造成风险的科学评估中有着重要的意义.在水生环境中,生物富集因子(bioaccumulation factor, BAF)和生物沉积物富集因子(biota-sediment accumulation factor, BSAF)是两种评价污染物的生物富集能力和生物可利用度的重要手段^[10].评价有机污染物是否存在生物富集效应一般有两个标准.第一是有机物的正辛醇/水分配系数(K_{ow}),一般地,当 $\lg K_{ow} > 4 \sim 5$ 时,该化合物可能具有生物富集效应,而 $\lg K_{ow}$ 在 $5 \sim 7$ 时,化合物具有最大的生物富集效应^[11];第二是生物富集因子(BAF),当 $BAF > 5000$ ($\lg BAF > 3.7$)时,该化合物具有生物富集效应^[11].PBDEs、DBDPE、DP、HBCD和TBBPA的 $\lg K_{ow}$ 都大于4,并且HBCDs和PBDEs的部分低溴代单体的 $\lg K_{ow}$ 值都在 $5 \sim 7$ 之间,这些化合物可能具有潜在的生物富集效应.尽管关于PBDEs、TBBPA和HBCDs在环境中的分布及生物富集的文献报道已非常丰富,但对于DBDPE及DP等新近关注的污染物的生物富集能力到目前还缺乏比较全面地评价,特别是DBDPE这类大分子化合物是否能在生物体内富集也是科学界关注的焦点.本研究采集了珠江三角洲东江流域水体中3种鱼、表层沉积物和水样,以PBDEs、DBDPE、DP、TBBPA和HBCDs为目标化合物,计算

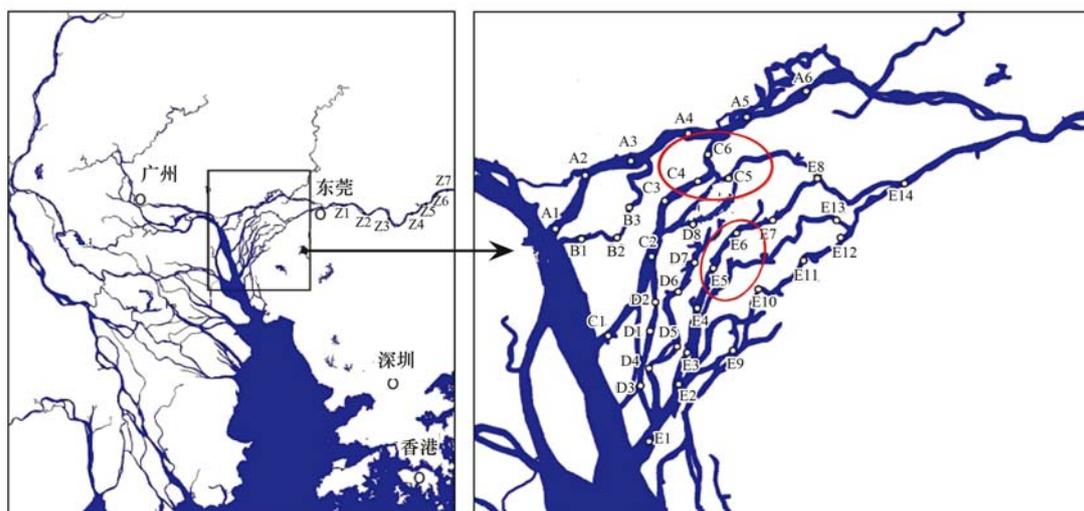
了污染物在鱼中的生物富集因子(BAF)和生物沉积物富集因子(BSAF),并探讨了污染物的生物富集程度以及有机物的正辛醇/水分配系数(K_{ow})对生物富集因子的影响.

1 材料与方法

1.1 样品采集与前处理

2010年在东江下游流域采集表层水样(水面以下 $0.3 \sim 0.4$ m)5个,每个水样约40 L,装在预先清洗干净的10 L棕色玻璃瓶中.在采集水样区域用捕鱼网采集鲮鱼(*Cirrhina molitorella*)9只,罗非鱼(*Tilapia nilotica*)15只,清道夫(*Hypostomus plecostomus*)10只,3种鱼的基本信息见表1.利用抓斗式采样器采集表层沉积物44个(图1中A-Z),表层沉积物采集表层10 cm的样品,具体的采样点分布情况见图1.

将沉积物样品冷冻干燥,除去贝壳、沙石等杂物,研磨后过100目筛.准确称量20 g样品,用200 mL丙酮/正己烷混合溶剂(1:1,体积比)于 60°C 索氏抽提24 h,抽提时加入活化好的铜片6 g除硫.提取液旋转蒸发浓缩至2 mL,转换溶剂为正己烷15 mL,然后浓缩至10 mL,将此浓缩液分为3 mL和7 mL,分别加入PBDEs回收率指示物($^{13}\text{C}_{12}$ -PCB141, BDE77, BDE181)和HBCDs、TBBPA回收率指示物($^{13}\text{C}_{12}$ -TBBPA和 $^{13}\text{C}_{12}$ - α -, β -, γ -HBCD),分别浓缩,再过多层复合硅胶柱纯化,并用50 mL二氯甲烷/正己烷混合溶剂(1:1,体积比)进行洗脱,分别得到含有PBDEs和HBCDs、TBBPA的洗脱液,分别浓缩至



圆圈区域为鱼及水样的采集区

图1 采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites in Dongjiang River

1 mL左右,分别转换溶剂为正己烷和甲醇,氮吹定容至 200 μL ,加入一定量的 PBDEs (BDE118 和 BDE128) 和 HBCDs 内标(d_{18} - α -, β -, γ -HBCD)。

表 1 鱼样的基本信息

种类	重量/g	体长/cm	种类	重量/g	体长/cm
罗非鱼 1	91.1	16.8	鲮鱼 3	57.2	17.0
罗非鱼 2	66.1	13.6	鲮鱼 4	71.8	18.3
罗非鱼 3	46.4	14.0	鲮鱼 5	85.5	18.0
罗非鱼 4	89.4	16.0	鲮鱼 6	107.6	21.0
罗非鱼 5	105.5	17.0	鲮鱼 7	51.6	17.2
罗非鱼 6	26.6	11.0	鲮鱼 8	52.5	17.0
罗非鱼 7	34.9	12.0	鲮鱼 9	36.8	14.3
罗非鱼 8	39.1	12.6	清道夫 1	45.5	17.3
罗非鱼 9	90.0	17.2	清道夫 2	49.6	18.6
罗非鱼 10	92.3	16.8	清道夫 3	33.7	15.9
罗非鱼 11	116.7	17.0	清道夫 4	31.4	15.2
罗非鱼 12	44.6	12.5	清道夫 5	72.3	18.3
罗非鱼 13	55.6	14.2	清道夫 6	95.0	21.3
罗非鱼 14	78.8	15.0	清道夫 7	127.1	23.2
罗非鱼 15	60.4	14.9	清道夫 8	114.8	21.5
鲮鱼 1	96.3	17.5	清道夫 9	77.4	20.0
鲮鱼 2	35.6	15.3	清道夫 10	89.1	20.5

鱼样解剖取出 2 g 肌肉组织、冷冻干燥并混匀后充分混合研磨后,用 200 mL 丙酮/正己烷混合溶剂(1:1, 体积比)于 60 $^{\circ}\text{C}$ 索氏抽提 48 h,抽提液浓缩,定容至 10 mL。取 1 mL 做脂肪测定(重量法),剩余 9 mL 重新定容至 10 mL 之后分体积,将此浓缩液分为 3 mL 和 7 mL,分别加入 PBDEs 回收率指示物和 HBCDs、TBBPA 回收率指示物,分别浓缩至约 2 mL,过 GPC 色谱柱去除大分子组分(脂肪等)。将收集的淋洗液旋转浓缩至 1 mL,转移至多层硅胶复合柱中用 50 mL 正己烷/二氯甲烷混合溶剂淋洗净化。洗脱液旋转浓缩至 1 mL,转移至 1.8 mL 细胞瓶中,氮吹至近干,分别用正己烷和甲醇定容至 200 μL ,加入内标指示物进行仪器分析。

水样的详细前处理流程见文献[12]。

1.2 仪器分析

三至七溴取代 PBDE 单体(28、47、66、99、100、153、154、138 和 183)和 DP 采用 Agilent 6890 GC-5975 MS 在负化学电离、单离子扫描模式下进行定量分析,色谱柱为 DB-XLB(30 m \times 0.25 mm \times 0.25 μm , J&W Scientific)毛细色谱柱,九至十溴取代 PBDE 单体(208、207、206 和 209)和 DBDPE 采用 QP2010 MS (Shimadzu, Japan) 在负化学电离、单离子扫描模式下进行定量分析,色谱柱为 DB-5HT (15 m \times 0.25 mm \times 0.10 μm , J&W Scientific)。

DP、BDE209 和 ^{13}C -BDE209 的定量检测离子分别为 653.8、486.7 和 494.7,其他化合物为 79,柱温程序见文献[12]。

TBBPA 和 HBCDs 的分析仪器为 Agilent 1100 高效液相色谱仪-API4000 三重四级杆质谱仪,质谱分析选用 ESI 负离子扫描模式,以多反应监测(MRM)模式对待测物进行定性和定量分析。HBCDs 异构体的监测离子(m/z)分别为, HBCD: 640.7 \rightarrow 79, $^{13}\text{C}_{12}$ -HBCD: 652.7 \rightarrow 79, d_{18} -HBCD: 658.7 \rightarrow 79。TBBPA 监测的离子(m/z)分别为, TBBPA: 542.7 \rightarrow 79, $^{13}\text{C}_{12}$ -TBBPA: 554.7 \rightarrow 79。HBCDs 立体异构体用 XDB-C $_{18}$ (4.6 \times 50 mm, 1.8 μm , Agilent, CA) 色谱柱进行分离,详细的洗脱程序见文献[13]。

1.3 质量控制与质量保证

质量控制与质量保证包括空白样、空白加标、基质加标、添加替代内标等。在空白加标中 13 种 PBDEs 单体(BDE28、47、66、99、100、153、154、138、183、208、207、206 和 209)、DBDPE、DP(*syn*-和 *anti*-DP)、TBBPA 和 HBCDs(α -、 β -和 γ -HBCD)的平均回收率为 99% ~ 114%、89%、82% ~ 89%、59%、97% ~ 106%,相对偏差小于 10%;基质(鱼肉)加标中 13 种 PBDEs 单体、DBDPE、DP、TBBPA 和 HBCDs 的平均回收率为 102% ~ 118%、97%、78% ~ 88%、56%、92% ~ 90%,相对偏差小于 15%;样品中 $^{13}\text{C}_{12}$ -PCB141、BDE77、BDE181、 $^{13}\text{C}_{12}$ -TBBPA 和 $^{13}\text{C}_{12}$ - α -、 β -、 γ -HBCD 的回收率分别为 95.2% \pm 1.1%、107.8% \pm 1.0%、100.6% \pm 1.7%、53.6% \pm 3.2% 和 82.7% \pm 2.9%。在方法空白中偶有目标化合物检出,在最后的結果中均经过空白扣除,但没有经过回收率校正。化合物的定量采用内标法和多点校正曲线法,每个化合物的校正曲线的相关系数均大于 0.99。本实验的方法检出限(method detection limits, MDLs)被定义为 10 倍信噪比,不同化合物的检出限介于 0.1 ~ 4 $\text{pg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间。

2 结果与讨论

2.1 生物富集因子(BAF)

由于 HFRs 都具有较强的亲脂性,水生生物很容易富集这些污染物,其生物富集程度通常可以用生物富集因子(BAF)来衡量^[14]。水生生物对 HFRs 的富集因子(BAF)按照下列公式计算:

$$\text{BAF} = \frac{\text{生物样含量(脂重, pg}\cdot\text{kg}^{-1})}{\text{水体溶解相中含量(pg}\cdot\text{L}^{-1})}$$

本研究通过生物脂重计算了 PBDEs、DBDPE、DP、TBBPA 和 HBCDs 的 BAF 值,其 lgBAF 的变化范围分别为 5.0~7.4、6.1~7.1、4.6~7.9、2.6~4.6 和 4.8~7.7(图 2)。BAF 值随化合物的种类和生物种类的不同而不同。本研究中的 PBDEs 的 BAF 值与 Streets 等^[14]报道的美国 Michigan 湖鲑鱼的 lgBAF 范围相当,明显高于北京一接受污水处理厂的出水的湖泊中各淡水生物中的 lgBAF 值(2.2~6.2)^[15]和同样纬度带的广东清远湖泊中的生物中的 lgBAF(2.9~5.3)^[16]以及加拿大 Winnipeg 湖各种鱼类的 lgBAF 值(2.1~4.5)^[17]。目前为止,关于水生生物中 DBDPE 的报道很少,Hardy 等^[18]研究了日本鲤鱼对 DBDPE 的生物富集能力,计算的 BAF < 25,显著低于本研究。Harrad 等^[19]研究了英国 9 个淡水湖中 12 种鱼类的 BAF 值,其 TBBPA 的 lgBAF 的平均值为 0.63, HBCDs 的 lgBAF 的范围为 2.5~3.8。都明显低于本研究。Drottar 等^[20]分别用 0.34 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 3.4 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度的 HBCD 对虹鳟鱼进行了暴露实验,计算的低浓度和高浓度暴露的 lgBAF 值分别为 4.22 和 4.34,与本研究相当。Wu 等^[21]报道的我国华南电子垃圾回收地水生生物和水中 HBCDs 的含量,计算出这些水生生物对 α -HBCD、 β -HBCD、 γ -HBCD 和 \sum HBCDs 的 lgBAF 值分别为 2.58~6.01、3.24~5.58、3.44~5.98 和 2.85~5.98。关于水生生物中 DP 的 BAF 值的研究,Wu 等^[22]报道的我国华南电子垃圾拆解地水生生物对 DP 的 lgBAF 值较高,其中田螺、草虾、鲫鱼、鲤鱼、财鱼和水蛇的 lgBAF 值分别为 2.4~2.7、3.2~3.6、3.0~4.2、3.8、2.3~4.0 和 4.5~4.6,表明大部分生物对 DP 具有生物富集效应。当化合物的 BAF 值大于 5 000,亦或者是 lgBAF 值大于 3.7 的时候,就可以被认为具有生物富集能力^[11]。

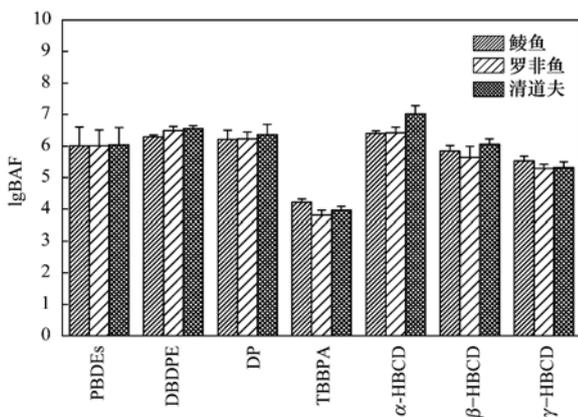


图 2 生物体内卤系阻燃剂的 lgBAF 值
Fig. 2 The lgBAF values for HFRs in biota

在本研究中,所有的化合物,除了 TBBPA(2 个样品 lgBAF 值 < 3.7),其余的 lgBAF 值均大于 3.7,说明了这些污染物都具有生物富集能力。而 Harrad 等^[19]所报道的结果显示仅有 α -HBCD 具有生物富集能力,TBBPA、 β -和 γ -HBCD 不具有生物富集能力,这可能是由于在 Harrad 等的研究中,污染物在鱼体和水质之间的分配还未达到平衡。此外,不同地区的水体温度的差异也可能导致水生动物对 HFRs 的生物富集产生直接影响^[23]。

2.2 BAF 与 $\lg K_{ow}$ 的相关性

有机物的正辛醇/水分配系数(K_{ow})是研究有机污染物在水中化学行为重要的参数。它反映了有机污染物在水相和有机相之间的分配能力,同时也是研究有机污染物的环境行为以及多种环境数学模型的重要参数。BAF 是表示有机污染物在水中和生物中分配的参数,因此 BAF 与 K_{ow} 之间应该有良好的相关性。图 3 显示了 3 种鱼中 HFRs(DBDPE 除外)的 lgBAF 值与 $\lg K_{ow}$ 的相关性。3 种鱼的 lgBAF 与 $\lg K_{ow}$ 都具有统计意义上的抛物线形式的相关性,其中清道夫中的 lgBAF 与 $\lg K_{ow}$ 具有极显著抛物线相关性。3 种鱼遵循从 TBBPA 到 BDE154,lgBAF 随着 $\lg K_{ow}$ 的增大而逐渐增大,而从 BDE154~BDE209,lgBAF 随着 $\lg K_{ow}$ 的增大而逐渐减小的趋势。但 α -HBCD 的 BAF 值偏离了这一趋势,这可能是由于生物体内 γ -HBCD 可以通过生物转化变成 α -HBCD,同时也造成了 γ -HBCD 也偏离这个趋势。这一结果与其他研究对有机污染物在生物体内富集模型的预测相一致,即当 $\lg K_{ow} < 7$ 时,lgBAF 随着 $\lg K_{ow}$ 的增大而逐渐增大,而当 $\lg K_{ow} > 7$ 时,lgBAF 随着 $\lg K_{ow}$ 的增大而逐渐减小^[24]。由图 3 可以看到,清道夫中 BDE99 和 BDE183 的 BAF 值明显大于鲮鱼和罗非鱼,Stapleton 等^[25]已经证实了某些种类鱼可以发生体内脱溴降解,将 BDE183 转变为 BDE154 以及 BDE99 降解为 BDE47。而这两种脱溴产物 BDE154 和 BDE47 在鲮鱼和罗非鱼中的 BAF 值明显高于其在清道夫中的值,证实了清道夫对于 PBDEs 的代谢能力较其他两种鱼要低。同时还发现,3 种鱼中的 BDE66 的 BAF 值均偏离了所在趋势,都比预测值要小,可能与 BDE66 在生物体内发生了代谢有关。此外值得注意的是在 3 种鱼体内都发现 DBDPE 的 BAF 值均高于 BDE209 的 BAF 值,DBDPE 由于具有较高的 $\lg K_{ow}$ 值以及较大的分子体积,很难进入细胞膜从被生物体吸收^[26],被普遍认为其生物富集能力较低^[27]。但本研究的结论显

示 DBDPE 有着比 BDE209 更大的生物富集能力,这可能与 BDE209 比 DBDPE 在生物体内容易发生脱溴降解有关. TBBPA 相对于其他 HFRs 具有较

小的 BAF 值,说明其在生物体内富集能力较弱,这可能与 TBBPA 其进入生物体后,容易被生物体代谢以及甲基化有关.

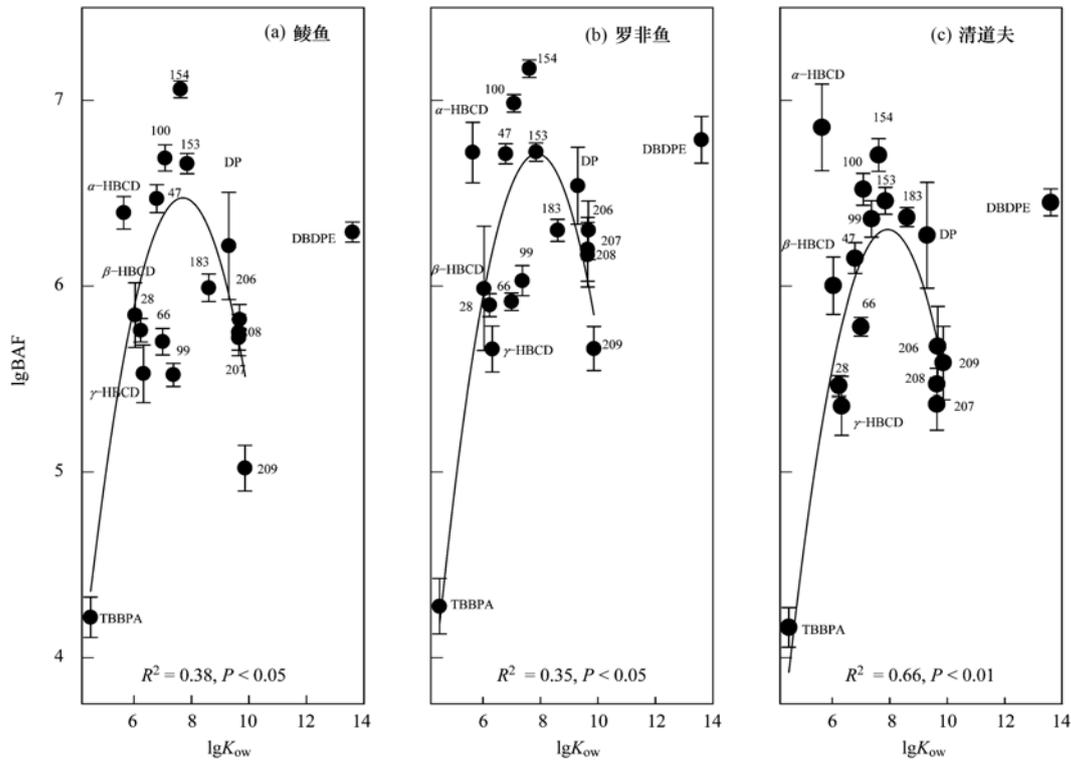


图 3 lgBAF 与 $\lg K_{ow}$ 的相关性

Fig. 3 Correlations between lgBAF and $\lg K_{ow}$

2.3 有机污染物的生物-沉积物富集因子(BSAF)

生物-沉积物富集因子 (biota-sediment accumulation factor, BSAF) 是通过对比生物体和沉积物中有机污染物含量从而衡量有机污染物在生物体内的富集程度. BSAF 按照公式(1)计算:

$$BSAF = (c_{biota} / f_{lipid}) / c_{oc} \quad (1)$$

式中, c_{biota} 是生物体内有机污染物的浓度; f_{lipid} 是生物体中脂类组分; c_{oc} 是沉积物中有机污染物有机碳归一化浓度.

所有污染物的 BSAF 值见图 4. 除了 BDE47 和 BDE100, 其余的 PBDEs 单体的 BSAF 值均小于 1. BDE100 的 BSAF 的均值在 1 左右, 表明 BDE100 在沉积物和鱼体中平衡分布. 而 BDE47 的 BSAF 在 3 种鱼中的均值均大于 1, 说明相比于沉积物中的有机质, BDE47 更容易吸附在鱼类脂肪当中, 当然 BDE47 的 BSAF 值大于 1 也可能是由于生物体内 BDE99 发生了脱溴代谢而生成 BDE47. 本研究中 PBDEs 的 BSAF 值小于珠江口^[28], 美国哈德利湖^[29] 和瑞典一条受到污染的河流所报道的值^[30], 与实验室的模拟研究所报道的值相似^[31,32]. DP 的 BSAF

均值为 0.06 ± 0.04 , 与在中国南方电子垃圾拆卸地所报道的鲢鱼的 BSAF 值接近 (0.025)^[33]. 迄今为止, 仅有 2 项研究野外测定了水生生物中 DP 的 BSAF 值. Shen 等^[34] 报道了 Ontario 湖中鱼类体内 *syn*-DP 和 *anti*-DP 的 BSAF 值分别为 0.8 和 0.3. Jia 等^[35] 计算了北方沿海地区牡蛎体内 DP 的 BSAF 均值为 4.6. 这些报道的水生生物体内 DP 的 BSAF 值均大于本研究所计算的 BSAF 值, 这可能是由于不同物种及其所处的环境条件 (如沉积物中 DP 含量、DP 在水与沉积物之间的分配以及沉积物中有机碳的类型和含量等) 不同, 当然生物体的生理生化参数 (如物种、个体大小、食性、营养级和对 DP 的代谢能力等) 不同也可能造成 DP 的 BSAF 值变化. DP、DBDPE、 β -和 γ -HBCD 的 BSAF 值均小于 1, 而 α -HBCD 的 BSAF 均值在 1 附近, 特别是在清道夫中, 其均值为 4.7, 表明 α -HBCD 相比于其他两种异构体, 更容易在生物体内富集, 可能是由于食性或者异构体之间转化的原因. 从本研究结果来看, 大多数的有机污染物的 BSAF 值均小于 1, 说明沉积物中的这些有机污染物的生物可利用性很低, 尤其是对

鲮鱼和罗非鱼这两种生活在在中下层的鱼类来说, 沉积物不太可能成为这两种鱼类的污染源; 另一方面, BSAF 通常是用于衡量底栖水生生物对污染物的富集程度, 而本研究中所采集的水生鱼类除清道夫生活在底层水域之外, 其余两种生物均不是底栖生物, 这可能也是造成所测得的 BSAF 值偏低的原因. 本研究也同时分析了 BSAF 值与污染物 $\lg K_{ow}$ 的关系(图 5), 对 PBDEs 来说, BDE47 的 BSAF 值最大, BSAF 值随着溴原子数的增大而逐渐降低. 本研究的 BSAF 的分布模式与珠江口底栖无脊椎动物所发现的分布模式相同^[28]. 与 $\lg BAF$ 的分布模式相同, 鲮鱼和罗非鱼中的 BDE66 和 BDE99 也偏离了所在的趋势, 估计是这两种单体在该两种鱼类中发生了代谢, 而对于清道夫来说, BDE99 未偏离所在的趋势, 可能是由于其对 BDE99 的代谢能力较其它两种鱼低.

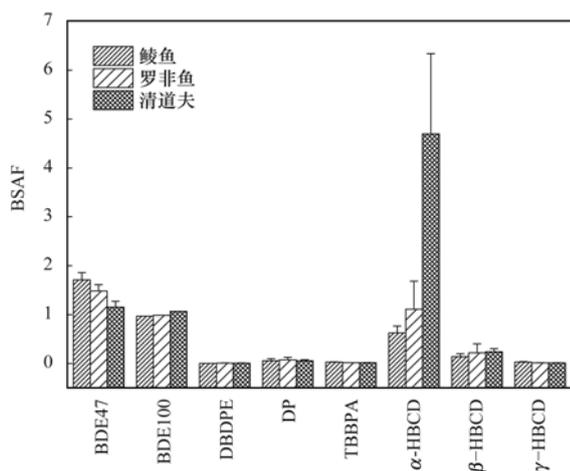


图 4 生物体内卤系阻燃剂的 BSAF 值

Fig. 4 BSAF values for HFRs in biota

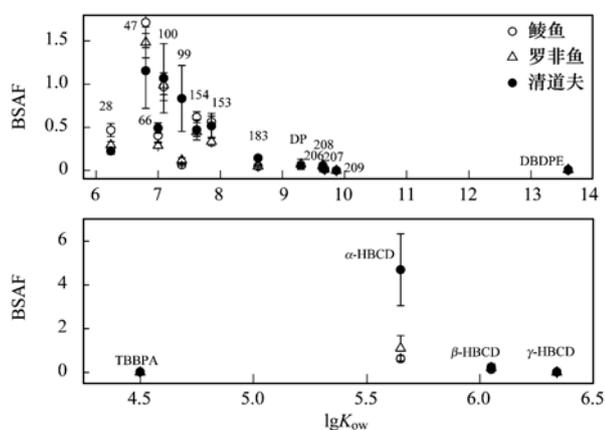


图 5 BSAF 与 $\lg K_{ow}$ 的相关性

Fig. 5 Correlations between BSAF and $\lg K_{ow}$

3 结论

在本研究中, PBDEs、DBDPE、DP、TBBPA 和 HBCDs 的 $\lg BAF$ 值均大于 3.7, 说明这些污染物都具有生物富集能力. HFRs 的 BAF 值总体随着 $\lg K_{ow}$ 值的增加而增加, 但当 $\lg K_{ow} > 7$ 时, 生物对 PBDEs 的生物富集能力有所下降. γ -HBCD 向 α -HBCD 的生物转化以及生物体对 BDE66 和 BDE99 的代谢导致这几种单体偏离了这个模型预测趋势. 大分子化合物 DBDPE 的 BAF 值大于 BDE209 的 BAF 值, 其生物富集能力应值得更多的关注. HFRs 大多数化合物的 BSAF 值小于 1, 一方面可能表明沉积物中这些有机污染物的生物可利用性低, 另一方面, 所采集的生物不是底栖性生物也可能是造成 BSAF 较低的原因.

参考文献:

- [1] Poma G, Volta P, Roscioli C, *et al.* Concentrations and trophic interactions of novel brominated flame retardants, HBCD, and PBDEs in zooplankton and fish from Lake Maggiore (Northern Italy) [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **481**: 401-408.
- [2] Gorga M, Martínez E, Ginebreda A, *et al.* Determination of PBDEs, HBB, PBEB, DBDPE, HBCD, TBBPA and related compounds in sewage sludge from Catalonia (Spain) [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **444**: 51-59.
- [3] Klosterhaus S L, Stapleton H M, Guardia M J L, *et al.* Brominated and chlorinated flame retardants in San Francisco Bay sediments and wildlife [J]. *Environment International*, 2012, **47**: 56-65.
- [4] Damerud P O, Aune M, Larsson L, *et al.* Plasma PBDE and thyroxine levels in rats exposed to Bromkal or BDE-47 [J]. *Chemosphere*, 2007, **67**(9): S386-S392.
- [5] Geyer H J, Rimkus G G, Scheunert I, *et al.* Bioaccumulation and occurrence of endocrine-disrupting chemicals (EDCs), persistent organic pollutants (POPs), and other organic compounds in fish and other organisms including humans [A]. In: Beek B (Ed.). *Bioaccumulation-New Aspects and Developments: The Handbook of Environmental Chemistry*, Vol 2, Part 2J. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2000. 1-166.
- [6] Gobas F A P C, Morrison H A. Bioconcentration and biomagnification in the aquatic environment. In: Boethling R S, Mackay D (Eds.). *Handbook of Property Estimation Methods for Chemicals: Environmental and Health Sciences* [M]. Boca Raton, FL, USA: Lewis, 2000. 189-231.
- [7] O'Connor T P, Lauenstein G G. Trends in chemical concentrations in mussels and oysters collected along the US coast: update to 2003 [J]. *Marine Environmental Research*, 2006, **62**(4): 261-285.
- [8] She J W, Holden A, Adelsbach T L, *et al.* Concentrations and time trends of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) and polychlorinated biphenyls (PCBs) in aquatic bird eggs from San Francisco Bay, CA 2000-2003 [J]. *Chemosphere*, 2008, **73**(1): S201-S209.
- [9] Yogui G T, Sericano J L. Levels and pattern of polybrominated

- diphenyl ethers in eggs of Antarctic seabirds: endemic versus migratory species[J]. *Environmental Pollution*, 2009, **157**(3): 975-980.
- [10] Arnot J A, Gobas F A P C. A review of bioconcentration factor (BCF) and bioaccumulation factor (BAF) assessments for organic chemicals in aquatic organisms [J]. *Environmental Reviews*, 2006, **14**(4): 257-297.
- [11] Kelly B C, Ikononou M G, Blair J D, *et al.* Food web-specific biomagnification of persistent organic pollutants [J]. *Science*, 2007, **317**(5835): 236-239.
- [12] 何明靖, 李琦, 赵佳渊, 等. 卤系阻燃剂在东江工业水体中的质量浓度及其分配特征[J]. *环境科学*, 2016, **37**(7): 2539-2546.
- He M J, Li Q, Zhao J Y, *et al.* Concentrations and partitioning of halogenated flame retardants in industrial water of Dongjiang River[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(7): 2539-2546.
- [13] He M J, Luo X J, Yu L H, *et al.* Tetrabromobisphenol-A and hexabromocyclododecane in birds from an e-waste region in South China: influence of diet on diastereoisomer-and enantiomer-specific distribution and trophodynamics [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(15): 5748-5754.
- [14] Streets S S, Henderson S A, Stoner A D, *et al.* Partitioning and bioaccumulation of PBDEs and PCBs in Lake Michigan [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **40**(23): 7263-7269.
- [15] Wang Y W, Li X M, Li A, *et al.* Effect of municipal sewage treatment plant effluent on bioaccumulation of polychlorinated biphenyls and polybrominated diphenyl ethers in the recipient water [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**(17): 6026-6032.
- [16] Zhang Y, Luo X J, Wu J P, *et al.* Contaminant pattern and bioaccumulation of legacy and emerging organohalogen pollutants in the aquatic biota from an E-waste recycling region in South China [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2010, **29**(4): 852-859.
- [17] Law K, Halldorson T, Danell R, *et al.* Bioaccumulation and trophic transfer of some brominated flame retardants in a Lake Winnipeg (Canada) food web [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2006, **25**(8): 2177-2186.
- [18] Hardy M L. A comparison of the fish bioconcentration factors for brominated flame retardants with their nonbrominated analogues [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2004, **23**(3): 656-661.
- [19] Harrad S, Abdallah M A E, Rose N L, *et al.* Current-use brominated flame retardants in water, sediment, and fish from English lakes [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43**(24): 9077-9083.
- [20] Drott K R, Krueger H O. Hexabromocyclododecane (HBCD): a flow-through bioconcentration test with the rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). Final report [R]. Easton, Maryland, USA: Wildlife International Ltd, 2000. 78.
- [21] Wu J P, Guan Y T, Zhang Y, *et al.* Trophodynamics of hexabromocyclododecanes and several other non-PBDE brominated flame retardants in a fresh water food web [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(14): 5490-5495.
- [22] Wu J P, Zhang Y, Luo X J, *et al.* Isomer-specific bioaccumulation and trophic transfer of Dechlorane Plus in the freshwater food web from a highly contaminated site, South China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(2): 606-611.
- [23] 周东星, 高小中, 许宜平, 等. 有机化合物生物富集的度量与评价方法进展[J]. *环境化学*, 2014, **33**(2): 175-185.
- Zhou D X, Gao X Z, Xu Y P, *et al.* Advances in metrics and assessment of organic chemical bioaccumulation [J]. *Environmental Chemistry*, 2014, **33**(2): 175-185.
- [24] Thomann R V. Bioaccumulation model of organic chemical distribution in aquatic food chains [J]. *Environmental Science & Technology*, 1989, **23**(6): 699-707.
- [25] Stapleton H M, Brazil B, Holbrook R D, *et al.* In vivo and in vitro debromination of decabromodiphenyl ether (BDE 209) by juvenile rainbow trout and common carp [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **40**(15): 4653-4668.
- [26] Hardy M L, Margitich D, Ackerman L, *et al.* The subchronic oral toxicity of ethane, 1,2-bis (pentabromophenyl) (Saytex 8010) in rats [J]. *International Journal of Toxicology*, 2002, **21**(3): 165-170.
- [27] Yang Z Y, Greenstein D, Zeng E Y, *et al.* Determination of poly (dimethyl) siloxane-water partition coefficients for selected hydrophobic organic chemicals using ¹⁴C-labeled analogs [J]. *Journal of Chromatography A*, 2007, **1148**(1): 23-30.
- [28] Xiang C H, Luo X J, Chen S J, *et al.* Polybrominated diphenyl ethers in biota and sediments of the Pearl River Estuary, South China [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2007, **26**(4): 616-623.
- [29] Dodder N G, Strandberg B, Hites R A. Concentrations and spatial variations of polybrominated diphenyl ethers and several organochlorine compounds in fishes from the northeastern United States [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **36**(2): 146-151.
- [30] Sellström U, Kierkegaard A, De Wit C, *et al.* Polybrominated diphenyl ethers and hexabromocyclododecane in sediment and fish from a Swedish river [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1998, **17**(6): 1065-1072.
- [31] Leppänen M T, Kukkonen J V K. Toxicokinetics of sediment-associated polybrominated diphenyl ethers (flame retardants) in benthic invertebrates (*Lumbriculus variegatus*, *Oligochaeta*) [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2004, **23**(1): 166-172.
- [32] Ciparis S, Hale R C. Bioavailability of polybrominated diphenyl ether flame retardants in biosolids and spiked sediment to the aquatic oligochaete, *Lumbriculus variegatus* [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2005, **24**(4): 916-925.
- [33] 张炎, 吴江平, 余乐涸, 等. 非多溴联苯醚(PBDE)类卤系阻燃剂的生物富集特征[J]. *环境化学*, 2011, **30**(1): 34-43.
- Zhang Y, Wu J P, Yu L H, *et al.* A review on bioaccumulation behavior of non-PBDE halogenated flame retardants [J]. *Environmental Chemistry*, 2011, **30**(1): 34-43.
- [34] Shen L, Reiner E J, Helm P A, *et al.* Historic trends of Dechloranes 602, 603, 604, Dechlorane Plus and other norbornene derivatives and their bioaccumulation potential in Lake Ontario [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(8): 3333-3340.
- [35] Jia H L, Sun Y Q, Liu X J, *et al.* Concentration and bioaccumulation of dechlorane compounds in coastal environment of northern China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(7): 2613-2618.

CONTENTS

Source Apportionment of Volatile Organic Compounds and Health Assessment of Benzene Series in Northern Suburb of Nanjing in Winter	ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, LIN Xu, <i>et al.</i> (1)
Size Distribution and Mixing State of Black Carbon Aerosol in Nanjing During a Heavy Winter Pollution Event	JIANG Lei, TANG Li-li, PAN Liang-bao, <i>et al.</i> (13)
Interactive Effects of the Influencing Factors on the Changes of PM _{2.5} Concentration Based on GAM Model	HE Xiang, LIN Zhen-shan (22)
Particle Size Distribution and Diffusion for Simulated Cooking Fume	LI Shuang-de, XU Jun-bo, MO Sheng-peng, <i>et al.</i> (33)
Greenhouse Gas Fluxes at Water-Air Interface in Small Pond Using Flux-Gradient Method Based on Spectrum Analyzer	ZHAO Jia-yu, ZHANG Mi, XIAO Wei, <i>et al.</i> (41)
Diurnal Variations of Concentration of Porewater Dissolved CH ₄ and CO ₂ in a Brackish Marsh Dominated by <i>Cyperus malaccensis</i> and <i>Phragmites australis</i> During Neap and Spring Tidal Days in the Minjiang River Estuary	TAN Li-shan, YANG Ping, HE Lu-lu, <i>et al.</i> (52)
Comparisons Between Seasonal and Diurnal Patterns of Cave Air CO ₂ and Control Factors in Jiguan Cave, Henan Province, China	ZHANG Ping, YANG Yan, SUN Zhe, <i>et al.</i> (60)
Fluorescence Spectral Characteristics of Fluorescent Dissolved Organic Matter (FDOM) in the Surface Sediments from Lihu Lake	CHEN Jun-yi, WANG Shu-hang, JIANG Xia, <i>et al.</i> (70)
Sedimentary Characteristics and Sources of Organic Matter in Sediments of Dianchi Lake	HAN Xiu-xiu, HUANG Xiao-hu, YU Li-yan, <i>et al.</i> (78)
Seasonal Variation of Colloid Particles in the Shallow Well Water of a Small Watershed of Purple Soil	ZHANG Wei, TANG Xiang-yu, XIAN Qing-song (87)
Deposition Characteristics of Suspended Solids and the Response of Dissolved Nutrients in Spring in the Western Lakeside of Taihu Lake	QI Chuang, WANG Guo-xiang, WU Xin-ting, <i>et al.</i> (95)
Correlation Between LDI-based Land Use Types and Water Quality in Sanshan Island of Taihu Lake National Wetland Park, Suzhou	YANG Zhao-hui, SU Qun, CHEN Zhi-hui, <i>et al.</i> (104)
Response Characteristics of Algal Chlorophyll-a to Nitrogen, Phosphorus and Water Temperature in Lake Erhai Based on Quantile Regression	CHEN Xiao-hua, LI Xiao-ping, QIAN Xiao-yong, <i>et al.</i> (113)
Seasonal Succession Characteristics of the Morphologically-based Functional Groups (MBFG) in Deep-water Reservoir	YANG Yu, LU Jin-suo, ZHANG Ying (121)
Change and Influencing Factors of Dissolved Carbon and Dissolved Nitrogen in Water of the Three Gorges Reservoir	FAN Zhi-wei, HAO Qing-ju, HUANG Zhe, <i>et al.</i> (129)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Emissions in the Gufu River Small Watershed of the Three Georges Reservoir Area	HUA Ling-ling, LI Wen-chao, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (138)
Characteristics of Nitrogen Transport and Its Source Trace in Loess Plateau's Dam Watershed in Alternating Wet and Dry Seasons: A Case Study of Yangjuangou Watershed	JIA Jun-jie, GAO Yang, CHEN Wei-liang, <i>et al.</i> (147)
Comparison of Nitrogen and Phosphorus Uptake and Water Purification Ability of Five Submerged Macrophytes	JIN Shu-quan, ZHOU Jin-bo, BAO Wei-hong, <i>et al.</i> (156)
Pollution Level, Distribution Characteristics and Risk Assessment of 32 PPCPs in Surface Water of Luomahu Lake	ZHANG Qin, ZHANG Sheng-hu, WANG Zhen, <i>et al.</i> (162)
Distribution, Sources and Risk Assessment of the PAHs in the Surface Sediments and Water from the Daye Lake	ZHANG Jia-quan, HU Tian-peng, XING Xin-li, <i>et al.</i> (170)
Effects of pH and Complexing Agents on Sb(V) Adsorption onto Birnessite and Ferrihydrite Surface	WANG Hua-wei, LI Xiao-yue, LI Wei-hua, <i>et al.</i> (180)
Effects of UV Radiation on the Coagulation Process of Kaolin and Involved Mechanisms	WANG Wen-dong, WANG Chang-xin, LIU Hui, <i>et al.</i> (188)
Effect of Dissolved Humic Acid on Thyroid Receptor Antagonistic Activity of Zinc in Aquatic Environment	AI Yang, KONG Dong-dong, YU Chang, <i>et al.</i> (195)
Optimization and Validation of the Analytical Method to Detect Common Illicit Drugs in Wastewater	GAO Ting-ting, DU Peng, XU Ze-qiong, <i>et al.</i> (201)
Cathode Electric Field Enhanced Removal of Nitrobenzene from Aqueous Solution Based on Activated Carbon Fibers (ACF)-Ozone Technique	ZHAO Chun, ZHANG Shuai, ZHOU Yu, <i>et al.</i> (212)
Effect of PVDF Hollow Fiber Ultrafiltration Membranes Modification with Carbonnanotube on Membrane Fouling Control During Ultrafiltration of Sewage Effluent	WANG Li-ying, SHI Jie, WANG Kai-lun, <i>et al.</i> (220)
Enhanced Treatment of Petrochemical Secondary Effluent by Biological Aerated Filter (Fe ²⁺)-Ozonation Process	XU Min, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (229)
Specificity of Intact Ladderane Lipids in Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria from Four Reactors	WANG Han, FANG Fang, LI Kai, <i>et al.</i> (238)
Characteristics of Perchlorate Reduction and Analysis of Consortium Structure in a Sulfur-Based Reactor at a High Perchlorate Concentration	ZHANG Chao, TAO Hua-qiang, SONG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (247)
Fast Start-up of SBAF System Assisted CANON Process and the Microbial Analysis	LIU Zhu-han, YUE Xiu, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (253)
Mechanism for Effects of High Free Ammonia Loadings on Biological Nitrification	JI Min, LIU Ling-jie, ZHAI Hong-yan, <i>et al.</i> (260)
Impact of Biodegradable Organic Matter on the Functional Microbe Activities in Partial Nitrification Granules	WANG Shu-yong, QIAN Fei-yue, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (269)
Process of Enrichment and Culture of PAOs on a Novel Biofilm Process of Dephosphorization	ZHENG Ying, PAN Yang, ZHOU Xiao-hua, <i>et al.</i> (276)
Identification of Efficient Strain Applied to Mining Rehabilitation and Its Rock Corrosion Mechanism: Based on Boosted Regression Tree Analysis	WU Yan-wen, ZHANG Jin-chi, GUO Xiao-ping, <i>et al.</i> (283)
Effect of Cadmium on Biodegradation of Nonylphenol by <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	SHI Guang-yu, CHENG Yuan-yuan, SHI Wei-lin (294)
Effects of Different Agricultural Practices on Soil Carbon Pool in North China Plain	SHI Xiao-xia, ZHAO Yi, ZHANG Lin, <i>et al.</i> (301)
Seasonal Variations of Soil Microbial PLFAs and Soil Enzyme Activity Under the Citrus Plantation in Mt. Jinyun, Chongqing	LI Nan-jie, ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (309)
Composition and Environmental Adaptation of Microbial Community in Shibabe Copper Tailing in Zhongtiao Mountain in Shanxi	LIU Jin-xian, LI Cui, JING Ju-hui, <i>et al.</i> (318)
Spatial Distribution and Source of Perfluorinated Compounds in Urban Soil from Part of Cities in Anhui Province, China	LI Fa-song, NI Hui, HUANG Han-yu, <i>et al.</i> (327)
Effects of Biochar Pyrolyzed at Varying Temperatures on Soil Organic Carbon and Its Components; Influence on the Soil Active Organic Carbon	ZHAO Shi-xiang, YU Xiao-ling, LI Zhong-hui, <i>et al.</i> (333)
Effects of Different Water Managements and Soil Eh on Migration and Accumulation of Cd in Rice	TIAN Tao, ZENG Min, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (343)
Mechanism of Soil Eco-Functional Stability Under Pyrene/Cadmium Simplex and Combined Pollution Stress	CHEN Xin-yao, YANG Hui-zi, LI Min, <i>et al.</i> (352)
Fractions Transformation of Heavy Metals in Compound Contaminated Soil Treated with Biochar, Montmorillonite and Mixed Addition	GAO Rui-li, TANG Mao, FU Qing-ling, <i>et al.</i> (361)
Screening of the Reduction/Stabilization Reagent for Cr(VI) Contaminated Soil in a Planting Site and Reaction Process Monitoring	LI Pei-zhong, LÜ Xiao-jian, WANG Hai-jian, <i>et al.</i> (368)
Cd(II) Ion Adsorption and Sealing onto SBA-15 Mesoporous Particles and the Related Potential on Cd(II) Polluted Soil Remediation	HUANG Hui, NING Xi-cui, GUO Zhan-yu, <i>et al.</i> (374)
Bioaccumulation of Halogenated Flame Retardants in Fish of Dongjiang River	HE Ming-jing, YANG Ting, LI Qi, <i>et al.</i> (382)
Characteristics and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Vegetables in Guangzhou	CHEN Zhi-liang, HUANG Ling, ZHOU Cun-yu, <i>et al.</i> (389)
Variation Characteristics of Vegetables Cadmium Uptake Factors and Its Relations to Environmental Factors	YANG Yang, LI Yan-ling, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (399)
Effect of Sewage Sludge Compost Products Application on Total Mercury and Methylmercury in Soil and Plants	YU Ya-wei, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (405)
Influencing Mechanism and Spatio-temporal Pattern of Stomatal Ozone Flux of Winter Wheat Under Ozone Pollution	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, CAO Jia-chen, <i>et al.</i> (412)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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
赵进才 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)

2017年1月15日 第38卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 38 No. 1 Jan. 15, 2017

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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	北京宝昌彩色印刷有限公司	Printed	by	Beijing Baochang Color Printing Co., Ltd.
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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: 140.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行

ISSN 0250-3301



9 770250 330172