

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第6期

Vol.33 No.6

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

我国湖泊富营养化效应区域差异性分析 曹金玲,许其功,席北斗,李小平,杨柳燕,江立文,魏自民,吴献花(1777)

基于“源”“汇”景观格局指数的海河流域总氮流失评价 孙然好,陈利顶,王伟,王赵明(1784)

云蒙湖流域土地利用变化对非点源氮污染负荷的影响 孟晓云,于兴修,泮雪芹(1789)

深圳市沿岸表层海水中全氟化合物的残留特征及其分布规律 陈清武,张鸿,柴之芳,沈金灿,杨波(1795)

典型电器工业区河涌沉积物中多环芳烃的分布、来源和潜在生态风险 邓代永,邱孟德,孙国萍,郭俊,张宏涛,张琴,许玫英(1801)

珠江下游河段沉积物中重金属含量及污染评价 谢文平,王少冰,朱新平,陈昆慈,潘德博,洪孝友,尹怡(1808)

扎龙湿地南山湖沉积岩芯重金属污染特征及来源判别 苏丹,臧淑英,叶华香,孙丽,贾晓丹,李苗(1816)

汕头湾沉积物磷的形态分布与季节变化特征研究 赵建刚,乔永民(1823)

氮磷比对东海浮游植物群落生长影响的微宇宙实验 黄伟,朱旭宇,曾江宁,寿鹿,陈全震,江志兵(1832)

春季福建北部海域浙闽沿岸流消亡期浮游桡足类种类组成及其分布 王彦国,林景宏,王春光,林茂(1839)

滩涂红树林种植-养殖耦合系统中多环芳烃含量水平分析 陈冠秋,李耀初,黄晋沐,南燕,林茂宏(1846)

四溴双酚A在5种巢湖鱼类体内的组织分布与生物浓缩因子研究 杨苏文,王圣瑞,闫振广,张普青(1852)

五氯酚对稀有鮑肌卵黄蛋白原及p53的诱导效应 熊力,马永鹏,张晓峥,金帮明,李伟,苏永良,毛思予,刘堰(1858)

全氟辛烷磺酸(PFOS)对斑马鱼卵黄蛋白原 mRNA 水平的影响 程艳,崔媛,党志超,谢文平,李海山,殷缓缓,陈会明(1865)

水溶性有机物电子转移能力与荧光峰强度的关系研究 陶亚,袁田,周顺桂,袁勇,庄莉,王辉亮(1871)

MIEX中试实验对二级出水中有机物去除的3DEEM解析 杨建,高金华,常江(1878)

XDLVO理论解析钙离子对腐殖酸反渗透膜污染的影响机制 姚淑娣,高欣玉,郭本华,包南,谢慧君,梁爽(1884)

栅藻LX1在水产养殖废水中的生长、脱氮除磷和油脂积累特性 马红芳,李鑫,胡洪管,于茵,巫寅虎(1891)

氯化铁用于反硝化同步化学生物絮凝工艺研究 王宏杰,董文艺,刘莉莎,韩贵超(1897)

合成氨废水短程反硝化特性研究 李妍,李泽兵,马家轩,王晓毅,赵白航,李军(1902)

基于新型反应器的好氧颗粒污泥的稳定性控制 李志华,杨帆,李胜,谢磊,王晓昌(1907)

采用非生长能量代谢参数表征颗粒污泥稳定性 李志华,吴军,李胜,谢磊,王晓昌(1913)

酸-碱预处理促进剩余污泥厌氧消化的研究 袁光环,周兴求,伍健东(1918)

小回流比条件下污泥浓度分区试验研究 史思,王素兰,李瑞,邢传宏(1923)

非离子表面活性剂对污泥调理脱水效果的影响 侯海攀,濮文虹,时亚飞,于文华,樊明明,刘欢,杨昌柱,李野,杨家宽(1930)

中国空气污染指数变化特征及影响因素分析 李小飞,张明军,王圣杰,赵爱芳,马潜(1936)

南京3类不同大气污染过程下气溶胶水溶性无机离子的特征研究 张秋晨,朱彬,苏继峰,王红磊(1944)

深圳市郊区大气中PM_{2.5}的特征分析 戴伟,高佳琪,曹罡,欧阳峰(1952)

餐饮业油烟的颗粒物分析 谭德生,邝元成,刘欣,戴飞鸿(1958)

Fe-MnO_x-CeO₂/ZrO₂低温催化还原NO性能研究 刘荣,杨志琴(1964)

自然型氨基酸及其钾盐的CO₂吸收和再生特性 晏水平,陈竞翔,徐明亮,艾平,张衍林(1971)

耕作方式对紫色水稻土农田生态系统CH₄和N₂O排放的影响 张军科,江长胜,郝庆菊,唐其文,程炳红,李辉,陈璐豪(1979)

垄作覆膜条件下田间氨挥发及影响因素 上官宇先,师日鹏,李娜,韩坤,李会科,王林权(1987)

添加不同N源条件下典型除草剂对土壤呼吸和N₂O排放的影响 孙青,史淳星,石坤,言儒斌,蒋静艳,吴以中(1994)

某石墨阳极法氯碱生产场地二噁英污染特征分析 余立凤,魏文侠,田亚静,吴广龙,李培中,赵丹(2000)

脱硫石膏对酸化森林土壤短期修复效果的研究 罗遥,康荣华,余德祥,谭炳全,段雷(2006)

岩溶山地土壤氧化铁形态及其与成土环境的关系 张治伟,朱章雄,傅瓦利,文志林(2013)

废弃尾矿库15种植物对重金属Pb、Zn的积累和养分吸收 施翔,陈益泰,王树凤,李江川(2021)

铬胁迫对3种草本植物生长及铬积累的影响 王爱云,黄姗姗,钟国锋,徐刚标,刘志祥,申响保(2028)

湘西花垣矿区主要植物种类及优势植物重金属蓄积特征 杨胜香,田启建,梁士楚,周耀渝,邹慧成(2038)

增施CO₂对C3和C4植物根际氯氰菊酯残留浓度的影响 慕楠,刁晓君,王曙光,王鹏腾,李攀峰(2046)

生物强化去除吡啶的特性及微生物种群动态变化分析 乔琳,赵宏,王建龙(2052)

A/O MBR处理生活污水效率与菌群多样性的关系 邝斌宇,史青, Montcho Leon Monthero,丁嫄,温东辉(2061)

石油污染土壤生物修复过程中氮循环功能基因的动态检测 吴彬彬,卢滇楠,刘铮(2068)

武汉市儿童多途径铅暴露风险评估 郝汉舟,陈同斌,吴基良,雷梅,田辉,祖文普,钟学斌(2075)

电子鼻预处理装置的开发及适用性研究 卜凡阳,文晓刚,万梅,刘锐,陈吕军,张永明(2083)

ToxTell生物传感器在Cu²⁺、Cd²⁺冲击活性污泥系统分析中的应用 王学江,王鑫,刘免,吴真,杨连珍,夏四清(2090)

环境样品免疫检测基质效应分析与控制 盛建武,何苗,施汉昌(2095)

热等离子体熔融固化模拟医疗废物的研究 张璐,严建华,杜长明,陆胜勇,李晓东(2104)

城市生活垃圾组分低温干燥特性及模型研究 吴亚娟,刘红梅,陆胜勇,严建华,李晓东(2110)

厌氧-准好氧联合型生物反应器填埋场产气规律的研究 韩智勇,刘丹,李启彬(2118)

处理垃圾渗滤液的Fe/C空气阴极MFC性能研究 唐玉兰,彭漫,于燕,何亚婷,傅金祥,赵玉华(2125)

基于冗余分析的典型喀斯特山区土壤-石漠化关系研究 龙健,廖洪凯,李娟,陈彩云(2131)

北京市能源消费与经济增长关系的协整检验分析 陈操操,张妍,刘春兰,王海华,李铮(2139)

《环境科学》征稿简则(1877) 《环境科学》征订启事(1890) 信息(1822,1857,1896,2138)

四溴双酚 A 在 5 种巢湖鱼类体内的组织分布与生物浓缩因子研究

杨苏文^{1,2}, 王圣瑞^{1,2}, 闫振广², 张普青¹

(1. 中国环境科学研究院湖泊生态环境创新基地, 北京 100012; 2. 环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012)

摘要: 利用 SPE-HPLC 法, 分析了四溴双酚 A (TBBPA) 在巢湖 5 种经济鱼类体内的组织分布及生物浓缩因子. 结果表明, TBBPA 在 5 种鱼体内的平均含量(以干重计)为 4.70~11.20 ng·g⁻¹, 高低排序为白鱼 > 白鲢 > 鳊鱼 > 鲤鱼 > 长吻鲶. 不同器官中, 白鱼、鳊鱼、鲤鱼和长吻鲶的肾脏中 TBBPA 含量最高, 其次为肝脏和鳃, 腹部和背部组织含量较低, 无显著脂肪蓄积效应. 白鲢体内肝脏的 TBBPA 含量最高, 肾脏和鳃次之. 对白鱼各组织中 TBBPA 含量与体重间的相关关系分析表明, 肝脏、肾脏和鳃中 TBBPA 浓度随体重的增加而增大, 而背部、腹部无显著相关关系. 同时测得巢湖水体中 TBBPA 平均浓度为 0.52 μg·L⁻¹, 计算得到 5 种鱼的生物浓缩因子为 9.56~22.64, 表明 TBBPA 在巢湖鱼体中的浓缩效应不显著.

关键词: 四溴双酚 A; 巢湖; 鱼类; 组织分布; 生物浓缩因子

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)06-1852-06

Tissue Distribution and Bioconcentration Factors of Tetrabromobisphenol A in Five Fishes in Lake Chaohu

YANG Su-wen^{1,2}, WANG Sheng-rui^{1,2}, YAN Zhen-guang², ZHANG Pu-qing¹

(1. Research Center of Lake Eco-environment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Beijing 100012, China)

Abstract: Tissue distribution and bioconcentration factors of tetrabromobisphenol A (TBBPA) in five economic fishes in Chaohu Lake were measured with SPE-HPLC. The results showed that, the average concentration of TBBPA was 4.70-11.20 ng·g⁻¹ (dry weight) in these fishes, in an order as White fish > Silver Carp > Bighead Carp > Common Carp > Longsnout Catfish. The highest concentration of TBBPA was found in the kidney, followed by liver and gill. The concentrations in fat and muscle were very low. Silver carp was really different from the other four fishes with the highest measured level in liver, followed by kidney and gills. In addition, the TBBPA concentration in tissues of the white fish showed positive correlation with the fish weight, especially in liver and kidney, but the trend is not significant in the back and belly tissues. The bioaccumulation factors of TBBPA for the 5 fishes were 9.56-22.64 based on the average concentration of TBBPA in water (0.52 μg·L⁻¹) detected in this study, indicating insignificant bioconcentration effects of TBBPA on five fishes in Chaohu Lake.

Key words: tetrabromobisphenol A; Chaohu Lake; fish; tissue distribution; bioconcentration factor

溴代阻燃剂(BFRs)是合成高分子材料的重要助剂之一,其功能是使合成材料具有难燃性、自熄性和消烟性.其中四溴双酚A(tetrabromobisphenol A, TBBPA)是目前应用最广泛的阻燃剂之一^[1],全球年产量大约 1.2×10^5 t^[2].尽管TBBPA具有共价结合的特性,但研究表明合成材料仍会将TBBPA及其代谢物释放到环境中,并已经在土壤、水体、沉积物和大气等环境介质以及人体内检测到其存在^[3-9].有研究表明,TBBPA可能是一种环境内分泌干扰物,具有潜在细胞毒性、免疫毒性、甲状腺素干扰性以及雌激素干扰特性,对环境 and 生物尤其是水生生物产生严重毒害作用^[10-13].目前对TBBPA及其衍生物或代谢产物在水生生态系统中的迁移转化规律及环境暴露水平的研究还处于起步阶段.为进一步

了解TBBPA在我国水环境中暴露和生物浓缩状况,本研究选取巢湖为研究水体,采集了湖中5种经济鱼类,开展了TBBPA在鱼体不同组织器官的分布与生物浓缩因子(bioconcentration factor, BCF)的研究.多氯联苯(PCBs)对水体污染的评价已有大量报道^[14,15],但对于溴代阻燃剂等新兴有机溴污染物的生态风险评价鲜见报道.巢湖为我国第五大浅水湖泊之一,周边工业产业较发达,有较大型溴代阻燃剂生产厂家^[16],开展巢湖鱼类TBBPA暴露及生物浓缩的研究,有助于识别我国典型浅水湖泊中TBBPA

收稿日期: 2011-08-26; 修订日期: 2012-02-06

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07105-005)

作者简介: 杨苏文(1970~),女,博士,副研究员,主要研究方向为湖泊富营养化与生态毒理学, E-mail: yangsw@craes.org.cn

的生态风险。

1 材料与方法

1.1 样品采集

巢湖位于安徽省中部, 江淮分水岭南侧, $116^{\circ}24'30''\text{E} \sim 118^{\circ}00'00''\text{N}$, 北纬 $30^{\circ}58'40''\text{E} \sim 32^{\circ}06'00''\text{N}$ 之间, 湖面面积为 769 km^2 , 平均水深 2.69 m 。2009 年 5 月, 在西半湖中心捕捞鱼并进行筛选, 得到 5 种鱼共 19 条进行测定, 鱼体重范围为 $100 \sim 1500 \text{ g}$, 其中鲤鱼 (*Cyprinus carpio*)、白鱼 (*Culter alburnus*)、白鲢 (*Hypophthalmichthys molitrix*) 和鳊鱼 (*Aristichthys nobilis*) 各 4 条, 长吻鮠 (*Leiocassis longirostris*) 3 条。采集后对活鱼解剖, 取鳃、肝和肾及部分腹部、背部组织, 用清水洗净, 装入自封袋中, 4°C 保存。

1.2 样品提取及净化

TBBPA 前处理方法参照文献[17]所述, 并根据样品不同作了相应修改, 具体步骤为: 鱼样品冷冻干燥, 然后去皮, 粉碎研磨, 准确称量 5.00 g , 加 $100 \mu\text{L}$ 内标, 加入 $10 \text{ mL } 0.2 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的乙酸钠, 均质 1 min , 加 $100 \mu\text{L } \beta$ -葡糖苷酸酶, 40°C 酶解过夜, 冷却至室温, 用 $2 \times 15 \text{ mL}$ 乙酸乙酯提取, $4000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 10 min , 合并上层提取液并蒸干, 用 $2 \times 15 \text{ mL}$ 甲醇水(4:1)溶液溶解残渣并转移至离心管中。加 $2 \times 10 \text{ mL}$ 正己烷振荡去除脂肪和色素, 将下层甲醇水溶液蒸发至约 2 mL , 转移至 50 mL 刻度离心管中。用 8 mL 蒸馏水洗后转移至离心管, 加 $2 \times 15 \text{ mL}$ 二氯甲烷反萃, 合并萃取液蒸至 2 mL 。将萃取液转移至 5 mL 尖底离心管中, 用少量二氯甲烷洗瓶。用旋转蒸发器浓缩至 $3 \sim 5 \text{ mL}$ 。然后过预先活化的固相萃取小柱(萃取柱的活化: 依次用 15 mL 二氯甲烷和 30 mL 正己烷冲洗), 用 10 mL 甲醇进行洗脱, 洗脱液用高纯氮气在 28°C 下浓缩, 定容至 1 mL 。

水样采用液-液萃取法。将水样过 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜, 并用 $6 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 HCl 调整 pH 值为 $2.0 \sim 3.0$, 量取 1 L 倒入 2 L 的分液漏斗中, 分次加入 30 、 30 、 20 mL 二氯甲烷, 摇匀, 静置分层。取下层二氯甲烷萃取液合并, 用旋转蒸发器浓缩至约 0.5 mL 氮气吹干, 用甲醇定容至 1 mL 4°C 保存, 备色谱分析。

1.3 液相色谱分析及主要仪器

液相色谱分析条件: 色谱柱 Agilent ZORBAX SB-C18 ($4.6 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 5 \mu\text{m}$); 紫外检测器, 色谱条件: 等度洗脱。流动相为甲醇: 去离子水 = 80:

20 (体积比); 流速 $0.8 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$; 柱温: 40°C ; PDA 检测波长: 209 nm ; 进样体积 $5 \mu\text{L}$ 。Agilent 1200 高效液相色谱, 固相萃取装置(12 头固相萃取, 奥泰公司)。旋转蒸发器(上海亚荣生化仪器厂), 氮气吹干仪(DC-12, 上海安谱科学仪器有限公司)。

试剂: 甲醇、正己烷、二氯甲烷均为色谱纯, 购自 Merck (德国) 公司; 高纯水产于 Millipore 纯水仪; TBBPA 标样购自 Sigma 公司; TBBPA 样品购自 Alfa Aesar 公司, 纯度 97%。

1.4 质谱定性分析

采用高效液相色谱-离子阱串联质谱仪(Agilent 1200 Ms 6310 ESI-Ion Trap LC-MS)对 TBBPA 标准品及样品进行定性分析鉴定。质谱条件为: Capillary + 4500 v , Nebulizer 25 Psi , Dry gas $5.0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, Dry temp 325°C , Ms 扫描范围 $m/z 500 \sim 560$, Ms/us 扫描范围 $140 \sim 560$, 分离 $m/z 542.9$ 。结果表明, TBBPA 标准品与样品均在 5.237 min 处出峰, 该峰经二次质谱图鉴定为 TBBPA。

1.5 方法检出限

添加不同浓度 TBBPA 标样, 按照实验方法进行测定, 以产生的信噪比大于 3 倍对应的浓度作为检出限 LOD, 则样品中 TBBPA 的最低检出限为 $20 \text{ ng}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

1.6 加标回收率与质量控制

1.6.1 工作曲线的绘制

称取 0.10 g TBBPA 溶解于甲醇中, 定容至 100 mL 。逐级稀释, 配制成浓度为: 200 、 300 、 400 、 500 、 600 、 800 、 1200 和 $2000 \text{ ng}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的 TBBPA 溶液, 以峰面积对浓度作图, 得工作曲线, 线性方程为: $y = 7 \times 10^7 x$, 相关系数为 $R^2 = 0.9993$ 。

1.6.2 加标回收率

从超市购买鲜活鲤鱼进行解剖, 然后冷冻干燥。精确称取 5.00 g 鱼肉样品, 添加折合加入质量为 0.01 、 0.1 、 1 、 10 、 100 、 1000 ng 的 TBBPA 溶液, 每个添加水平做 3 个平行测定, 计算平均回收率, 回收率为 $96.87\% \sim 99.71\%$, RSD 为 $0.16\% \sim 1.00\%$ (见表 1)。

1.6.3 质量控制

质量控制包括初始精密度实验和实验进行中的精密度实验以及伴随整个实验过程的试剂空白实验。初始精密度实验: 取巢湖鱼样品 4 份, 加入质控样品 $100 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 样品。冷冻干燥后研磨, 用正己烷与二氯甲烷 1:2 快速溶剂提取, 净化后浓缩至 $20 \mu\text{L}$, 进样测定, 根据工作曲线, 得到样品 TBBPA 平均含

表 1 平均加标回收率及相对标准偏差

Table 1 Average recovery and relative standard deviation

样品名称	标样加入量 /ng	回收率 /%	回收率 /%	回收率 /%	平均回收率 /%	相对标准偏差 RSD/%
鱼肉(5.00 g)	0.01	98.3	96.2	97.3	97.3	1.0
	0.1	99.9	98.9	99.0	99.3	0.5
	1	99.9	99.9	99.3	99.7	0.4
	10	98.0	97.4	98.1	97.8	0.4
	100	98.9	99.1	99.2	99.1	0.2
	1 000	96.4	97.3	96.9	96.9	0.5

量为 $99.84 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 误差 $<0.5\%$, 属于允许范围. 实验进行中的精密度实验: 实验过程中取 1 份环境样品重复上述实验. 空白实验中目标化合物的含量低于检出限, 或不影响目标化合物定量. TBBPA 样品前处理过程中, 用铝箔包裹器皿以防其分解.

2 结果与讨论

2.1 不同区域、不同鱼类体内 TBBPA 含量

水生动物对水环境污染物的暴露途径主要有呼吸和摄食等, 一般说来, 越是处于高营养级的生物, 摄食途径在环境暴露中也就越重要, 本文选择了不同食性的鱼类进行 TBBPA 在体内分布及浓缩因子的对比研究. 分别对巢湖 5 种经济鱼类体内 TBBPA 含量进行了检测, 结果示于图 1. 5 种鱼体内 TBBPA 的平均浓度 (以干重计, 下同) 为 $4.70 \sim 11.20 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 含量高低依次为: 白鱼 ($11.20 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$) $>$ 白鲢 ($6.69 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$) $>$ 鳊鱼 ($7.34 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$) $>$ 鲤鱼 ($6.14 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$) $>$ 长吻鮠 ($4.70 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$), 其中白鲢、鳊鱼和鲤鱼三者之间的差异不显著, 白鱼明显高于以上 3 种, 长吻鮠体内含量最小. 白鱼体内 TBBPA 含量最高可能是因为其为凶猛肉食性鱼类, 在食物链中所处营养级高于其他 4 种鱼, TBBPA 通过摄食在白鱼体内有一定累积, 其在肉食性鱼类体内的暴露水平高于杂食性鱼类, 与某些重金属的水体污染规律相似^[18,19].

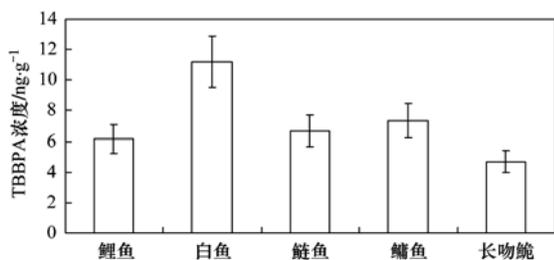


图 1 巢湖 5 种鱼体内 TBBPA 平均浓度

Fig. 1 Mean concentration of TBBPA in 5 fishes from Chaohu Lake

据报道, 比利时的北海海域的海螺体内 TBBPA 的平均含量为 $45 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ^[13], 略高于本研究测定值.

美国佛罗里达海域的宽吻海豚体内 TBBPA 含量 (脂重) 在 $0.056 \sim 8.48 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间^[5], 而大西洋灰鯖鲛体内的含量 (脂重) 在 $0.495 \sim 1.43 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ^[5]; 日本海域梭鱼体内 TBBPA 含量为 $0.01 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 鲱鱼为 $0.03 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 沙丁鱼为 $0.11 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ^[20]; 荷兰水域生物体内的 BFRs 含量则低于检测限^[21]. 巢湖鱼体内的 TBBPA 含量与美国佛罗里达海域海豚体内含量比较接近, 但明显高于大西洋和日本海域鱼体内浓度.

2.2 TBBPA 在鱼类不同组织器官中的分布

TBBPA 在鱼类不同组织器官中的检测结果见图 2, 在肾脏中的浓度为 $10.33 \sim 29.10 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均值为 $20.07 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 5 种鱼肾脏中 TBBPA 的浓度由大到小依次为白鱼 $>$ 白鲢 $>$ 鳊鱼 $>$ 鲤鱼 $>$ 长吻鮠; 肝脏中 TBBPA 浓度平均值为 $9.17 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 浓度大小依次为白鱼 $>$ 鳊鱼 $>$ 白鲢 $>$ 鲤鱼 $>$ 长吻鮠. 鳃中 TBBPA 平均浓度为 $7.44 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 背部组织中浓度平均值为 $3.09 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 腹部为 $3.70 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$.

总体来说, TBBPA 在巢湖 5 种鱼类的肾脏中含量最高, 在鳃和肝脏中也有较高含量, 在肌肉中含量相对较低, 这一结论与另一典型 BFRs 多溴联苯醚 (PBDEs) 在桂花鱼体内不同组织间暴露水平差异的结论一致^[22]. 肾脏是生物体代谢物质排泄的主要器官, 具有重吸收作用, 可能是 TBBPA 在其中含量最高的原因; 鳃作为鱼类的呼吸器官, 与外界水环境具有密切接触, 是鱼体与外界进行物质交换的重要途径之一, 肝脏作为物质代谢的主要器官, 也是众多环境污染物质在生物体内积聚的主要器官, 因此, TBBPA 在鱼类的鳃和肝脏中含量也相对较高. 文献报道, 在比利时的北海海域, 鳕鱼肝脏中 TBBPA 浓度为 $0.3 \sim 1.8 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 海星消化系统中浓度为 $4 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 寄居蟹腹部的浓度为 $1 \sim 35 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 值得注意的是, 鳕鱼肌肉中 TBBPA 浓度为 $97 \sim 245 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 远远大于它在肝脏中的浓度^[13], 其结论与本研究具有一定的差异性.

白鱼各组织器官中 TBBPA 浓度与体重之间的

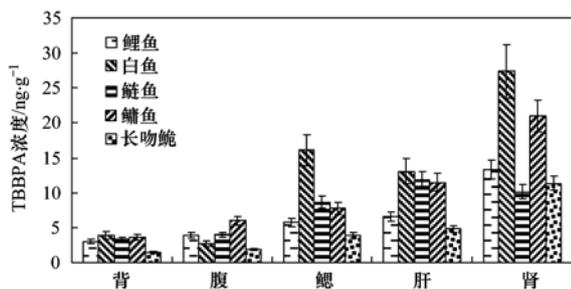


图 2 TBBPA 在鱼体不同组织器官中的分布

Fig. 2 Tissue distribution of TBBPA in fishes

关系分析(图 3)表明,肾脏、肝脏和鳃中 TBBPA 浓度随体重的增长而增大,且趋势比较明显,而背部和腹部组织中 TBBPA 浓度随体重的增长无显著变化. 这表明随鱼龄和鱼体重的增加, TBBPA 在代谢旺盛的器官,如肾脏、肝脏和鳃中有一定的累积,但在肌肉中的累积效应不明显.

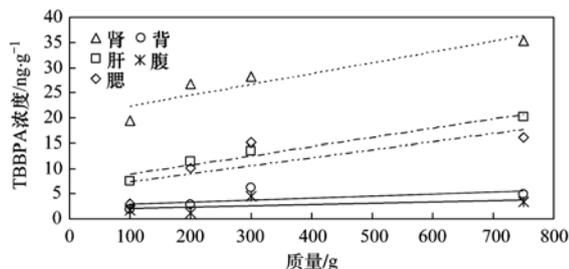


图 3 白鱼各组织中 TBBPA 浓度与体重的关系

Fig. 3 Relationship between TBBPA concentration in different tissues and fish weight

2.3 不同鱼类及不同组织器官对 TBBPA 的生物浓缩因子

环境污染物,特别是有机污染物有可能通过食物链进行生物浓缩,一般来说,脂溶性越高,发生浓缩的可能性越大. 本研究通过对巢湖水体中 TBBPA 浓度的测定以及对 BCF 的计算,对 TBBPA 在鱼体和各组织器官中的蓄积进行了探讨. 测得巢湖水体中 TBBPA 的平均浓度为 $0.52 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 由此计算得出鲤鱼、白鱼、白鲢、鳊鱼和长吻鲩的 BCF 分别为 11.98、22.64、14.84、18.71 和 9.56, 结果示于表 2.

由表 2 可以看出,肾脏的 BCF 最高,其次为肝脏. Voorspoels 等^[23]调查了比利时北海海域以及西部底特律河口区海洋生物体内另一种溴代阻燃剂多溴联苯醚(PBDEs)的含量,以及在比目鱼、欧蝶和白奎等物种的组织器官中的分布状况,发现溴代阻燃剂容易在鱼肝脏中浓缩,与本研究结论一致. 鳃对 TBBPA 的 BCF 肝脏接近,但背部和腹部组织的 BCF 较低.

表 2 巢湖 5 种鱼类对 TBBPA 的 BCF 值

Table 2 BCFs for TBBPA in 5 fishes in Chaohu Lake			
鱼的种类	组织器官	BCF	鱼体平均 BCF
鲤鱼	肝脏	11.02 ± 1.37	11.98 ± 8.12
	鳃	11.16 ± 4.44	
	肾脏	25.74 ± 8.32	
	背部	5.20 ± 2.40	
	腹部	6.79 ± 3.70	
白鱼	肝脏	23.83 ± 2.94	22.64 ± 19.07
	鳃	24.41 ± 6.91	
	肾脏	52.68 ± 2.03	
	背部	7.34 ± 2.88	
	腹部	4.94 ± 2.20	
白鲢	肝脏	19.76 ± 4.79	14.83 ± 8.18
	鳃	18.05 ± 4.50	
	肾脏	23.94 ± 6.38	
	背部	5.48 ± 3.49	
	腹部	6.91 ± 2.24	
鳊鱼	肝脏	22.13 ± 5.72	18.71 ± 12.09
	鳃	14.95 ± 5.26	
	肾脏	37.96 ± 3.39	
	背部	7.01 ± 2.96	
	腹部	11.53 ± 3.98	
长吻鲩	肝脏	10.29 ± 2.57	9.56 ± 6.73
	鳃	7.48 ± 2.90	
	肾脏	22.85 ± 6.73	
	背部	3.18 ± 1.28	
	腹部	4.01 ± 1.10	

有研究表明, PBDEs 在华北高碑店湖的鲤鱼、鳊鱼和罗非鱼体中的 BCF 为 $1.58 \times 10^2 \sim 1.26 \times 10^6$ ^[24]; δ -六六六(δ -六氯环己烷)对斑马鱼的 BCF 为 $1.69 \times 10^4 \sim 3.19 \times 10^4$ ^[25]; 窦薇等^[26]在白洋淀测定了多种鱼和各介质中 DDT 的浓度,经估算,白洋淀杂食性和草食性鱼的 BCF 分别为 3.16×10^2 和 1×10^3 , 均远远高于本研究中 TBBPA 的 BCF. Barlow 等^[27]研究发现,水生无脊椎动物和脊椎动物对 TBBPA 的 BCF 为 20~3200. IARC (International Agency for Research on Cancer) 的报告中,呆头鲮鱼 (*Pimephales promelas*) 对 TBBPA 的 BCF 为 1200^[28]. Hardy^[29]研究了日本鲤鱼对 TBBPA 的生物浓缩能力,估算其 BCF 为 30~485. Harrad 等^[30]经野外测试,得出英国湖中几种鱼类对 TBBPA 的平均 BCF 为 4.2, 与本研究结果十分相近. 从以上可以看出,一般情况下,生物对 TBBPA 的 BCF 并不高,可能是由于其在环境中和生物体内的半衰期较短,容易被降解或代谢转化^[30]. 同时,值得注意的是,虽然 TBBPA 的 BCF 较低,但在某些典型污染区域(如电子拆卸场)的大气和人血清样品中检出含量较高^[31~34],而且 TBBPA 在环境中还可能生成持久性

较大的有机污染物(衍生物),如双酚 A 和四溴双酚 A 双甲基醚等,具有较强的内分泌干扰作用,与其它 BFRs 相比,生物毒性可能更大,因此其环境毒性效应值得进一步关注。

3 结论

(1)巢湖 5 种鱼体内的 TBBPA 的平均浓度为 $4.70 \sim 11.20 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$,浓度由高到低依次为白鱼、白鲢、鳙鱼、鲤鱼和长吻鮠。

(2)TBBPA 在鱼体各组织器官中的分布研究表明,TBBPA 主要浓缩在肾脏,其次是肝脏,表明肝脏和肾脏可能是 TBBPA 对鱼类毒性效应的潜在靶器官。

(3)白鱼肾脏、肝脏和鳃中的 TBBPA 含量随鱼体重增加而增大,具有较明显相关性,背和腹部组织相关性不明显。

(4)巢湖 5 种鱼对 TBBPA 的 BCF 在 $9.56 \sim 22.64$ 之间,浓缩效应不明显。

参考文献:

- [1] 李亚宁,周启星. 四溴双酚-A 的代谢转化与生态毒理效应研究进展 [J]. 生态学杂志, 2008, **27**(2): 263-268.
- [2] Hites R A. Polybrominated diphenyl ethers in the environment and in people: a meta-analysis of concentrations [J]. Environmental Science & Technology, 2004, **38**(4): 945-1056.
- [3] De Wit C A. An overview of brominated flame retardants in the environment [J]. Chemosphere, 2002, **46**(5): 583-624.
- [4] Eriksson J, Rahm S, Green N, *et al.* Photochemical transformations of tetrabromobisphenol A and related phenols in water [J]. Chemosphere, 2004, **54**(1): 117-126.
- [5] Johnson-Restrepo B, Adams D H, Kannan K. Tetrabromobisphenol A (TBBPA) and hexabromocyclododecanes (HBCDs) in tissues of humans, dolphins, and sharks from the United States [J]. Chemosphere, 2008, **70**(11): 1935-1944.
- [6] Bastos P M, Eriksson J, Green N, *et al.* A standardized method for assessment of oxidative transformations of brominated phenols in water [J]. Chemosphere, 2008, **70**(7): 1196-1202.
- [7] Sjödin A, Patterson D G Jr, Bergman Å. A review on human exposure to brominated flame retardants-particularly polybrominated diphenyl ethers [J]. Environment International, 2003, **29**(6): 829-839.
- [8] Alae M, Arias P, Sjödin A, *et al.* An overview of commercially used brominated flame retardants, their applications, their use patterns in different countries/regions and possible modes of release [J]. Environment International, 2003, **29**(6): 683-689.
- [9] Hakk H, Letcher R J. Metabolism in the toxicokinetics and fate of brominated flame retardants-a review [J]. Environment International, 2003, **29**(6): 801-828.
- [10] Hamers T, Kamatra J H, Sonneveld E, *et al.* *In vitro* profiling of the endocrine-disrupting potency of brominated flame retardants [J]. Toxicological Sciences, 2006, **92**(1): 157-173.
- [11] WHO. Tetrabromobisphenol A and derivatives. Environmental Health Criteria [S]. Vol. 131. Geneva: World Health Organization, 1995.
- [12] 瞿璟琰,姚晨岚,施华宏,等. 四溴双酚-A 和五溴酚对红鲫甲状腺组织结构的影响 [J]. 环境化学, 2007, **26**(5): 588-592.
- [13] Morris S, Allchiin C R, Zegers B N, *et al.* Distribution and fate of HBCD and TBBPA brominated flame retardants in North Sea estuaries and aquatic food webs [J]. Environmental Science & Technology, 2004, **38**(21): 5497-5504.
- [14] 王莹,仇雁翎,费勇,等. 养殖鳊鱼体内典型有机氯化化合物的检测与人体健康风险评估初探 [J]. 环境科学, 2011, **32**(8): 2385-2390.
- [15] 岳强,张宝忠,沈汝良,等. 珠江三角洲典型淡水鱼塘生态系统多氯联苯的浓度分布及输入速率 [J]. 环境化学, 2011, **30**(7): 1368-1369.
- [16] Jin J, Liu W Z, Wang Y, *et al.* Levels and distribution of polybrominated diphenyl ethers in plant, shellfish and sediment samples from Laizhou Bay in China [J]. Chemosphere, 2008, **71**(6): 1043-1050.
- [17] Sun Z H, Yu Y J, Mao L, *et al.* Sorption behavior of tetrabromobisphenol A in two soils with different characteristics [J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, **160**(2-3): 456-461.
- [18] 刘平,周益奇,臧利杰. 北京农贸市场 4 种鱼类体内重金属污染调查 [J]. 环境科学, 2011, **32**(7): 2062-2068.
- [19] 闫海鱼,冯新斌,刘霆,等. 贵州百花湖鱼体汞污染现状 [J]. 生态学杂志, 2008, **27**(8): 1357-1361.
- [20] Ashizuka Y, Nakagawa R, Hori T, *et al.* Determination of brominated flame retardants and brominated dioxins in fish collected from three regions of Japan [J]. Molecular Nutrition & Food Research, 2008, **52**(2): 273-283.
- [21] Van Leeuwen S P J, De Boer J. Brominated flame retardants in fish and shellfish (levels and contribution of fish consumption to dietary exposure of Dutch citizens to HBCD [J]. Molecular Nutrition & Food Research, 2008, **52**(2): 194-203.
- [22] 郭英,唐洪磊,孟祥周,等. 多溴联苯醚在桂花鱼体内的分布 [J]. 环境科学, 2007, **28**(12): 2806-2810.
- [23] Voorspoels S, Covaci A, Maervoet J, *et al.* PBDEs in marine and freshwater sediments from Belgium: levels, profiles and relations with biota [J]. Journal of Environmental Monitoring, 2004, **6**(11): 914-918.
- [24] 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.
- [25] 梁丹涛,沈根祥,胡双庆,等. δ -六六六在斑马鱼体内的生物富集情况研究 [J]. 农业环境科学学报, 2007, **26**(14): 509-513.

- [26] 窦薇, 赵忠宪. 白洋淀水生食物链 BHC、DDT 生物浓缩分析 [J]. 环境科学, 1997, **18**(5): 41-43.
- [27] Sullivan F M, Barlow S M. Reproductive hazards of industrial chemicals: an evaluation of animal and human data [M]. London: Academic Press Incorporation, 1982.
- [28] IARC. Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans [R]. Supplement 6. Lyon: World Health Organization, 1987.
- [29] Hardy M L. A comparison of the fish bioconcentration factors for brominated flame retardants with their nonbrominated analogues [J]. Environmental Toxicology & Chemistry, 2004, **23**(3): 656-661.
- [30] 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.
- [31] George K W, Häggblom M M. Microbial O-methylation of the flame retardant tetrabromobisphenol-A [J]. Environmental Science & Technology, 2008, **42**(15): 5555-5561.
- [32] Hagmar L, Sjödin A, Höglund P, *et al.* Biological half-lives of polybrominated diphenyl ethers and tetrabromobisphenol A in exposed workers [J]. Organohalogen Compound, 2000, **47**: 198-201.
- [33] Harju M, Heimstad E S, Herzke D, *et al.* Current state of knowledge and monitoring requirements-emerging 'new' brominated flame retardants in flame retarded products and the environment [EB/OL]. <http://www.klif.no/publikasjoner/2462/ta2462.pdf>, 2008-12.
- [34] Gill U, Chu I, Ryan J J, *et al.* Polybrominated diphenyl ethers: human tissue levels and toxicology [J]. Reviews of Environmental Contamination & Toxicology, 2004, **183**: 55-97.

《环境科学》再获“百种中国杰出学术期刊” 和“中国精品科技期刊”称号

2011年12月2日,中国科技论文统计结果发布会在北京举行,会议公布了“百种中国杰出学术期刊”和“中国精品科技期刊”获奖名单。《环境科学》连续10次荣获“百种中国杰出学术期刊”称号和再次荣获“中国精品科技期刊”称号。

“百种中国杰出学术期刊”是根据中国科技学术期刊综合评价指标体系进行评定。该体系利用总被引频次、影响因子、基金论文比、他引总引比等多个文献计量学指标进行统计分析,对期刊分学科进行评比,其评价结果客观公正,为我国科技界公认,并具有广泛影响。

CONTENTS

Regional Heterogeneity of Lake Eutrophication Effects in China	CAO Jin-ling, XU Qi-gong, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (1777)
Correlating Landscape Pattern with Total Nitrogen Concentration Using a Location-weighted Sink-source Landscape Index in the Haihe River Basin, China	SUN Ran-hao, CHEN Li-ding, WANG Wei, <i>et al.</i> (1784)
Impact of the Land-use Change on the Non-point Source Nitrogen Load in Yunneng Lake Watershed	MENG Xiao-yun, YU Xing-xiu, PAN Xue-qin (1789)
Residue Characteristics and Distributions of Perfluorinated Compounds in Surface Seawater Along Shenzhen Coastline	CHEN Qing-wu, ZHANG Hong, CHAI Zhi-fang, <i>et al.</i> (1795)
Distribution and Potential Ecological Risk of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments from Typical Electronics Industrial Zone	DENG Dai-yong, QIU Meng-de, SUN Guo-ping, <i>et al.</i> (1801)
Residues and Potential Ecological Risk Assessment of Metal in Sediments from Lower Reaches and Estuary of Pearl River	XIE Wen-ping, WANG Shao-bing, ZHU Xin-ping, <i>et al.</i> (1808)
Character and Sources Identification of Heavy Metals Contamination in Sediment from the Core Sediment in Nanshan Lake, the Zhalong Wetland	SU Dan, ZANG Shu-ying, YE Hua-xiang, <i>et al.</i> (1816)
Distribution Characteristics of Phosphorus Forms in Surface Sediments of the Shantou Bay in China	ZHAO Jian-gang, QIAO Yong-min (1823)
Microcosm Experiments on the Influence of Different N/P Ratios on Phytoplankton Community Growth in the East China Sea	HUANG Wei, ZHU Xu-yu, ZENG Jiang-ning, <i>et al.</i> (1832)
Species Composition and Distribution Characteristics of Pelagic Copepods in the Northern Sea of Fujian During Withdraw of Zhe-Min Coastal Current	WANG Yan-guo, LIN Jing-hong, WANG Chun-guang, <i>et al.</i> (1839)
PAHs Concentrations in Aquatic Products and Food Safety Evaluation in the Coupled Mangrove Planting-Aquaculture Ecological System	CHEN Guan-qiu, LI Yao-chu, HUANG Jin-mu, <i>et al.</i> (1846)
Tissue Distribution and Bioconcentration Factors of Tetrabromobisphenol A in Five Fishes in Lake Chaohu	YANG Su-wen, WANG Sheng-rui, YAN Zhen-guang, <i>et al.</i> (1852)
Induction Effects of Pentachlorophenol on Vitellogenin and p53 in Chinese Rare Minnow (<i>Gobiocypris rarus</i>)	XIONG Li, MA Yong-peng, ZHANG Xiao-zheng, <i>et al.</i> (1858)
Effects of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) Exposure on Vitellogenin mRNA Level in Zebrafish (<i>Brachydanio rerio</i>)	CHENG Yan, CUI Yuan, DANG Zhi-chao, <i>et al.</i> (1865)
Relationship Between Electron Transfer Capacity and Fluorescence Characteristics of Dissolved Organic Matter	TAO Ya, YUAN Tian, ZHOU Shun-gui, <i>et al.</i> (1871)
Characterization of the Change in DOM During Municipal Secondary Effluent Treatment with Magnetic Ion Exchange Resin by 3DEEM	YANG Jian, GAO Jin-hua, CHANG Jiang (1878)
Reverse Osmosis Membrane Fouling by Humic Acid Using XDLVO Approach; Effect of Calcium Ions	YAO Shu-di, GAO Xin-yu, GUO Ben-hua, <i>et al.</i> (1884)
Growth, Removal of Nitrogen and Phosphorus, and Lipid Accumulation Property of <i>Scenedesmus</i> sp. LX1 in Aquaculture Wastewater	MA Hong-fang, LI Xin, HU Hong-ying, <i>et al.</i> (1891)
Iron Chloride for Simultaneous Denitrification and Chemical-Biological Flocculation Process	WANG Hong-jie, DONG Wen-yi, LIU Li-sha, <i>et al.</i> (1897)
Characteristic Research of Shortcut Denitrification in Synthetic Ammonia Industrial Wastewater Treatment Process	LI Yan, LI Ze-bing, MA Jia-xuan, <i>et al.</i> (1902)
Stability Control of Aerobic Granules Using an Innovative Reactor	LI Zhi-hua, YANG Fan, LI Sheng, <i>et al.</i> (1907)
Description of the Stability of Granules Using Nongrowth-related Parameters	LI Zhi-hua, WU Jun, LI Sheng, <i>et al.</i> (1913)
Enhancement of Anaerobic Digestion of Excess Sludge by Acid-Alkali Pretreatment	YUAN Guang-huan, ZHOU Xing-qiu, WU Jian-dong (1918)
Pilot Validation of Sludge Concentration Partition at Small Reflux Ratio Condition	SHI Si, WANG Su-lan, LI Rui, <i>et al.</i> (1923)
Influence of Non-ionic Surfactants on Sludge Dewaterability	HOU Hai-pan, PU Wen-hong, SHI Ya-fei, <i>et al.</i> (1930)
Variation Characteristics and Influencing Factors of Air Pollution Index in China	LI Xiao-fei, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, <i>et al.</i> (1936)
Characteristics of Aerosol Water-Soluble Inorganic Ions in Three Types Air-Pollution Incidents of Nanjing City	ZHANG Qiu-chen, ZHU Bin, SU Ji-feng, <i>et al.</i> (1944)
Characterization of Atmospheric PM _{2.5} in the Suburb of Shenzhen	DAI Wei, GAO Jia-qi, CAO Gang, <i>et al.</i> (1952)
Analysis on Oil Fume Particles in Catering Industry Cooking Emission	TAN De-sheng, KUANG Yuan-cheng, LIU Xin, <i>et al.</i> (1958)
Low-Temperature Catalytic Reduction of NO over Fe-MnO _x -CeO ₂ /ZrO ₂ Catalyst	LIU Rong, YANG Zhi-qin (1964)
CO ₂ Absorption and Regeneration Performance of a Natural Amino Acid and Its Potassium Salt	YAN Shui-ping, CHEN Jing-ao, XU Ming-liang, <i>et al.</i> (1971)
Effects of Tillage-Cropping Systems on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Agro-Ecosystems in a Purple Paddy Soil	ZHANG Jun-ke, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (1979)
Factors Influencing Ammonia Volatilization in a Winter Wheat Field with Plastic Film Mulched Ridges and Unmulched Furrows	SHANGGUAN Yu-xian, SHI Ri-peng, LI Na, <i>et al.</i> (1987)
Effects of Typical Herbicides on Soil Respiration and N ₂ O Emissions from Soil Added with Different Nitrogen Fertilizers	SUN Qing, SHI Chun-xing, SHI Kun, <i>et al.</i> (1994)
Analysis of Characteristics of Dioxin Contamination in the Chlor-alkali Site that Uses Graphite Anode for Production	YU Li-feng, WEI Wen-xia, TIAN Ya-jing, <i>et al.</i> (2000)
Effect of Flue Gas Desulfurization Gypsum Application on Remediation of Acidified Forest Soil	LUO Yao, KANG Rong-hua, YU De-xiang, <i>et al.</i> (2006)
Morphology of Soil Iron Oxides and Its Correlation with Soil-Forming Process and Forming Conditions in a Karst Mountain	ZHANG Zhi-wei, ZHU Zhang-xiong, FU Wa-li, <i>et al.</i> (2013)
Pb, Zn Accumulation and Nutrient Uptake of 15 Plant Species Grown in Abandoned Mine Tailings	SHI Xiang, CHEN Yi-tai, WANG Shu-feng, <i>et al.</i> (2021)
Effect of Cr(VI) Stress on Growth of Three Herbaceous Plants and Their Cr Uptake	WANG Ai-yun, HUANG Shan-shan, ZHONG Guo-feng, <i>et al.</i> (2028)
Bioaccumulation of Heavy Metals by the Dominant Plants Growing in Huayuan Manganese and Lead/Zinc Mineland, Xiangxi	YANG Sheng-xiang, TIAN Qi-jian, LIANG Shi-chu, <i>et al.</i> (2038)
Effect of CO ₂ Fertilization on Residual Concentration of Cypermethrin in Rhizosphere of C3 and C4 Plant	MU Nan, DIAO Xiao-jun, WANG Shu-guang, <i>et al.</i> (2046)
Bioaugmented Removal of Pyridine and the Microbial Community Dynamic Analysis	QIAO Lin, ZHAO Hong, WANG Jian-long (2052)
Relationship Between Sewage Treatment Efficiency and Bacterial Community Diversity in an A/O MBR	KUANG Bin-yu, SHI Qing, Montcho Leon Monthero, <i>et al.</i> (2061)
Dynamic Changes in Functional Genes for Nitrogen Cycle During Bioremediation of Petroleum-Contaminated Soil	WU Bin-bin, LU Dian-nan, LIU Zheng (2068)
Risk Assessment of Lead Exposure from Different Intake Pathways for Children in Wuhan City	HAO Han-zhou, CHEN Tong-bin, WU Ji-liang, <i>et al.</i> (2075)
Implementation of a Pretreatment Device for an Electronic Nose	BU Fan-yang, WEN Xiao-gang, WAN Mei, <i>et al.</i> (2083)
Copper and Cadmium Toxicities to Activated Sludge Investigated with ToxTell Biosensor	WANG Xue-jiang, WANG Xin, LIU Mian, <i>et al.</i> (2090)
Matrix Effect and Control of Immunoassay for Environmental Samples	SHENG Jian-wu, HE Miao, SHI Han-chang (2095)
Study on Vitrification of Simulated Medical Wastes by Thermal Plasma	ZHANG Lu, YAN Jian-hua, DU Chang-ming, <i>et al.</i> (2104)
Study on the Low Temperature Drying of Components of Municipal Solid Waste and Its Model Analysis	WU Ya-juan, LIU Hong-mei, LU Sheng-yong, <i>et al.</i> (2110)
Aerogenesis Evolution of the Anaerobic-semiaerobic Bioreactor Landfill	HAN Zhi-yong, LIU Dan, LI Qi-bin (2118)
Performance of Microbial Fuel Cells with Fe/C Catalyst Carbon Felt Air-Cathode for Treating Landfill Leachate	TANG Yu-lan, PENG Man, YU Yan, <i>et al.</i> (2125)
Relationships Between Soil and Rocky Desertification in Typical Karst Mountain Area Based on Redundancy Analysis	LONG Jian, LIAO Hong-kai, LI Juan, <i>et al.</i> (2131)
Energy Consumption and GDP Growth in Beijing: Cointegration and Causality Analysis	CHEN Cao-cao, ZHANG Yan, LIU Chun-lan, <i>et al.</i> (2139)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2012年6月15日 33卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 6 Jun. 15, 2012

主 管	中国科学院	Supervised	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行