

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第5期

Vol.37 No.5

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2015年12月北京市空气重污染过程分析及污染源排放变化	薛亦峰,周震,聂滕,潘涛,齐璐,聂磊,王占山,李云婷,李雪峰,田贺忠(1593)
北京 APEC 期间大气颗粒物中类腐殖酸的污染特征及来源	周雪明,仝雪娇,项萍,谭吉华,段菁春,何晓明,贺克斌,马永亮(1602)
利用 SPAMS 分析北京市硫酸盐、硝酸盐和铵盐季节变化特征及潜在源区分布	刘浪,张文杰,杜世勇,侯鲁健,韩斌,杨文,陈敏东,白志鹏(1609)
兰州城区大气 $PM_{2.5}$ 污染特征及来源解析	王新,聂燕,陈红,王博,黄韬,夏敦胜(1619)
成都市西南郊区春季大气 $PM_{2.5}$ 的污染水平及来源解析	林瑜,叶芝祥,杨怀金,张菊,殷蔚雯,李晓芬(1629)
中亚热带背景区重庆四面山大气气态总汞含量变化特征	刘伟明,马明,王定勇,孙涛,魏世强(1639)
固定源排放污染物健康风险评价方法的建立	陈强,吴焕波(1646)
北京市典型燃烧源颗粒物排放水平与特征测试	胡月琪,郭晓东,王琛,梁云平,马召辉(1653)
南京公园降尘中重金属污染水平及风险评价	王呈,钱新,李慧明,孙一轩,王金花(1662)
CoCuMnO ₂ 光催化氧化多组分 VOCs 特性及其动力学	孟海龙,卜龙利,刘嘉栋,高波,冯奇奇,谭娜,谢帅(1670)
大辽河感潮河段及近岸河口氮、磷的分布及潜在性富营养化	张雷,曹伟,马迎群,韩超南,秦延文,赵艳民,刘志超,杨晨晨(1677)
典型温冰川区湖泊的稳定同位素空间分布特征	史晓宜,蒲焘,何元庆,陆浩,牛贺文,夏敦胜(1685)
利用 $\delta^{15}N-NO_3^-$ 和 $\delta^{18}O-NO_3^-$ 示踪北京城区河流硝酸盐来源	赵庆良,马慧雅,任玉芬,王效科,彭剑锋,贺成武,武俊良,刘梦贞,闫苗苗(1692)
柳江盆地浅层地下水硝酸盐分布特征及影响因素分析	王贺,谷洪彪,迟宝明,李海君,姜海宁(1699)
三峡库区小流域不同土地利用类型对氮素流失影响	陈成龙,高明,倪九派,谢德体,邓华(1707)
亚热带农区生态沟渠对农业径流中氮素迁移拦截效应研究	王迪,李红芳,刘锋,王毅,钟元春,何洋,肖润林,吴金水(1717)
平原河网典型污染物生物降解系数的研究	冯帅,李叙勇,邓建才(1724)
沉水植物对沉积物微生物群落结构影响:以洪泽湖湿地为例	张丁予,章婷曦,董丹萍,李德芳,王国祥(1734)
苏南水库硅藻群落结构特征及其控制因素	任杰,周涛,朱广伟,金颖薇,崔扬,许海,朱梦圆,夏明芳,陈伟民(1742)
河北衡水湖湿地汞污染现状及生态风险评价	王乃姗,张曼胤,崔丽娟,马牧源,颜亮,穆泳林,秦鹏(1754)
顺德水道土壤及沉积物中重金属分布及潜在生态风险评价	蔡怡敏,陈卫平,彭驰,王铁宇,肖荣波(1763)
台州电子垃圾拆解区水和沉积物中多溴联苯醚污染特征与生态风险	陈香平,彭宝琦,吕素平,陈强,张勇,黄长江,董巧香(1771)
乌江中上游段河水主要离子化学特征及控制因素	黄奇波,覃小群,刘朋雨,蓝芳宁,张连凯,苏春田(1779)
岩溶流域地下水 TOC 输出及影响因素分析:以重庆丰都雪玉洞地下河流域为例	王巧莲,蒋勇军,陈宇(1788)
广东英德宝晶宫洞穴滴水元素季节变化与影响因素	黄嘉仪,陈琳,陈琼,刘淑华,杨亮,童晓宁,贺海波,米小建,邓肖敏,彭小桃,李汉杰,杨琰,周厚云(1798)
基于 PCR-DGGE 和拟杆菌(<i>Bacteroides</i>) 16S rRNA 的岩溶地下水粪便污染源示踪研究:以重庆南山老龙洞地下河系统为例	张弘,蒋勇军,张远瞩,段逸凡,吕现福,贺秋芳(1805)
典型岩溶区地下河中溶解态脂类生物标志物来源解析及其变化特征	梁作兵,孙玉川,李建鸿,王尊波,谢正兰,张媚,廖昱,江泽利(1814)
钴活化过一硫酸盐氧化过程中卤代副产物的生成	刘阔,金浩,董为,季跃飞,陆隽鹤(1823)
天冬氨酸在氯化过程中生成消毒副产物二氯乙腈的研究	丁春生,李乃军,张涛,章梦青(1831)
臭氧氧化饮用水过程中可同化有机碳生成的影响因素	董秉直,张佳丽,何畅(1837)
污水管网典型混流制区域水量水质波动特征解析	程珣,张明凯,刘艳臣,施汉昌(1845)
HDTMA 改性沸石的制备及吸附废水中对硝基苯酚的性能和动力学	郭俊元,王彬(1852)
放射性废水处理中吸附铀的优势藻种筛选	李鑫,胡洪营,余骏一,赵文玉(1858)
微米 Fe ₃ O ₄ 磁粉调理-压力电场污泥脱水工艺过程研究	钱旭,王毅力,赵丽(1864)
间歇曝气 SBR 处理养猪沼液的短程脱氮性能	宋小燕,刘锐,税勇,川岸朋树,占新民,陈吕军(1873)
不同灌溉方式对华北平原冬小麦田土壤 CO ₂ 和 N ₂ O 排放通量的影响	郭树芳,齐玉春,尹飞虎,彭琴,董云社,贺云龙,闫钟清(1880)
卫河新乡市区段春季溶解 CH ₄ 与 N ₂ O 浓度特征	侯翠翠,张芳,李英臣,王奇博,刘赛(1891)
模拟氮沉降对内蒙古克氏针茅草原 N ₂ O 排放的影响	杨涵越,张婷,黄永梅,段雷(1900)
土壤呼吸与土壤有机碳对不同秸秆还田的响应及其机制	曹湛波,王磊,李凡,付小花,乐毅全,吴纪华,陆兵,徐殿胜(1908)
黑土丘陵区小流域土壤有机质空间变异及分布格局	高凤杰,马泉来,韩文文,单培明,周军,张少良,张志民,王宏燕(1915)
耕作方式对紫色水稻土团聚体中有机质及重金属的分布特征影响	史琼彬,赵秀兰,常同举,卢吉文(1923)
北京东南郊典型地层重金属分布特征与潜在生态风险	赵倩,马琳,刘翼飞,何江涛,李广贺(1931)
准东煤田露天矿区土壤重金属污染现状评价及来源分析	刘巍,杨建军,汪君,王果,曹月娥(1938)
纳米 TiO ₂ 对土壤重金属释放及形态变化的影响	张金洋,王定勇,梁丽,李楚娟,张成,周雄,刘娟(1946)
纳米零价铁铜双金属对铬污染土壤中 Cr(VI) 的还原动力学	马少云,祝方,商执峰(1953)
低分子有机酸对硫杆菌活性的抑制作用及对土壤重金属脱除的影响	宋永伟,王鹤茹,曹艳晓,李飞,崔春红,周立祥(1960)
粒径和包裹物对纳米银在海洋微藻中的毒性影响	黄俊,衣俊,强丽媛,程金平(1968)
萱草修复石油烃污染土壤的根际机制和根系代谢组学分析	王亚男,程立娟,周启星(1978)
高温堆肥过程对猪粪来源抗生素抗性基因的影响	郑宁国,黄南,王卫卫,喻曼,陈晓旻,姚燕来,王卫平,洪春来(1986)
磺胺抗性消长与堆肥进程交互特征	林辉,汪建妹,孙万春,符建荣,陈红金,马军伟(1993)
《环境科学》征订启事(1830) 《环境科学》征稿简则(1977) 信息(1698,1851,1992)	

台州电子垃圾拆解区水和沉积物中多溴联苯醚污染特征与生态风险

陈香平^{1,2}, 彭宝琦¹, 吕素平¹, 陈强⁴, 张勇^{2,3}, 黄长江¹, 董巧香^{1*}

(1. 温州医科大学环境安全与健康风险评估研究院, 温州 325035; 2. 厦门大学环境与生态学院, 近海海洋环境科学国家重点实验室, 厦门 361102; 3. 漳州职业技术学院, 漳州 363000; 4. 温州医科大学浙南水科学研究院, 温州 325035)

摘要: 以台州某电子垃圾拆解工业园为圆心, 在半径为 16 km 的范围内, 由近及远设计了 C(3 km)、S(5~10 km) 和 R(10~16 km) 三圈共 30 个采样点, 研究了该区域水及沉积物中多溴联苯醚(PBDEs)的污染特征与生态风险。结果表明, 水中 PBDEs 含量为 9.4~57.2 ng·L⁻¹, 平均值为 25.9 ng·L⁻¹; 沉积物中 PBDEs 含量为 3.7~38 775 ng·g⁻¹, 平均值为 2 779 ng·g⁻¹; BDE-209 均为主要成分。水及沉积物中 PBDEs 含量的空间分布态势均为: C 圈 > S 圈 > R 圈, 沉积物中 PBDEs 含量和离工业园区中心的距离呈极显著负相关($P < 0.01$)。与国内外其它地区相比, 该调查区 PBDEs 污染较为严重, 电子垃圾拆解是 PBDEs 污染的主要来源。经推算, 该区域近 40 年的拆卸活动向该地输入的 PBDEs 总量达 30.7 t, 其中 BDE-209 为 28.9 t。采用商值法对 PBDEs 进行初步的生态风险评估表明, 拆解核心区(半径为 1.5 km)沉积物中五溴联苯醚(Penta-BDEs)的污染程度已达高风险等级, 对该地区的生态安全和人群健康可能造成严重影响。

关键词: 多溴联苯醚; 水; 沉积物; 生态风险; 电子垃圾拆解区

中图分类号: X52; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)05-1771-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.05.022

Pollution Characteristics and Ecological Risk of PBDEs in Water and Sediment from an Electronic Waste Dismantling Area in Taizhou

CHEN Xiang-ping^{1,2}, PENG Bao-qi¹, LÜ Su-ping¹, CHEN Qiang⁴, ZHANG Yong^{2,3}, HUANG Chang-jiang¹, DONG Qiao-xiang^{1*}

(1. Institute of Environmental Safety and Human Health of Wenzhou Medical University, Wenzhou 325035, China; 2. School of Environment and Ecology of Xiamen University, State Key Laboratory of Marine Environmental Science, Xiamen 361102, China; 3. Zhangzhou Institute of Technology, Zhangzhou 363000, China; 4. Southern Zhejiang Water Research Institute of Wenzhou Medical University, Wenzhou 325035, China)

Abstract: An e-waste dismantling industrial park of Taizhou was selected as the sampling center, within a radius of 16 km, and a total of 30 sampling sites were designed in three circles as follows: C (3 km), S (5-10 km) and R (10-16 km). Pollution characteristics and ecological risk of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in water and sediments were investigated. The concentrations of PBDEs in water ranged from 9.4 to 57.2 ng·L⁻¹, with a mean value of 25.9 ng·L⁻¹; and 3.7 to 38 775 ng·g⁻¹, with an average of 2 779 ng·g⁻¹ in sediments. BDE-209 was the predominant congener. The spatial distribution patterns of PBDE levels in water and sediment were both in the following order: C > S > R. Furthermore, the concentrations of PBDEs in sediments showed significant negative correlation against the distance from the industrial park ($P < 0.01$). Compared with other regions around the world, the PBDEs contamination was more serious in the area, which indicated that e-waste dismantling activity was one of the significant sources for PBDEs pollution. It was estimated that a total of 30.7 t PBDEs (including 28.9 t BDE-209) was discharged into surrounding environment as a result of dismantling industrial activities in last 40 years. A preliminary ecological risk assessment for PBDEs in water and sediments was conducted by hazard quotient method. The results demonstrated that the Penta-BDEs in the center of e-waste dismantling area (a radius of 1.5 km) was at particularly high risk level and could cause serious influence on the ecological safety and human health.

Key words: polybrominated diphenyl ethers (PBDEs); water; sediment; ecological risk; e-waste dismantling area

台州(28°01'~29°20'N, 121°11'~121°56'E)位于浙江省中部沿海, 是中国最早形成和规模最大的电子垃圾拆解地之一, 素有“中国再生金属之都”和“塑料制品之都”的美称。自 20 世纪 70 年代起, 大量的、原始粗放的电子垃圾拆卸活动导致当地普遍遭受重金属和多溴联苯醚等污染, 使其成为近年来

的研究热点。本实验室早期的调查研究发现, 高水

收稿日期: 2015-11-10; 修订日期: 2015-12-15

基金项目: 环境保护公益性行业科研专项(201309047)

作者简介: 陈香平(1985~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为持久性有机污染物的环境化学行为, E-mail: pxc850222@163.com

* 通讯联系人, E-mail: dqxdong@163.com

平的多溴联苯醚存在于台州峰江拆解工业园附近的水($36.5 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$)和沉积物($58\,479 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$)中^[1],但目前对该地区水以及沉积物中多溴联苯醚的污染特征和生态风险缺乏系统的研究.

多溴联苯醚(polybrominated diphenyl ethers, PBDEs)因其优异的阻燃性能在全球得到广泛的应用.近年来,PBDEs在大气^[2]、粉尘^[3]、水/沉积物^[1]、动物^[4]以及人体乳汁^[5]和血液^[6]中被广泛检出,其分布遍及全球各地,且含量在过去几十年内一直呈上升趋势^[7].毒理学研究表明,PBDEs具有生殖、神经、免疫和内分泌等多种毒性^[8~10],甚至对人体有潜在的致癌性^[11],因而被视为环境中具有生态和健康风险的新型有机污染物.本文主要调查研究了台州某电子垃圾拆解工业园及其周边16 km范围内水和沉积物中PBDEs的污染水平、分布特

征以及生态风险,以期为当地污染监控和环境管理提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 样品采集

采样站位以浙江台州某电子垃圾拆解工业园区为圆心,C1~C10位于工业园3 km内,标记为C圈;S1~S10距离园区中心5~10 km,记为S圈;R1~R10离园区中心10~16 km,归为R圈,共设30个采样位点(见图1).2011年11月,使用玻璃采水器采集河道表层水样(0~20 cm)共30份,用活塞式柱状采泥器采集底层河道沉积物(0~5 cm)共23份.表层水经 $0.45 \mu\text{m}$ 混合滤膜过滤后,储存于棕色玻璃瓶中待用;沉积物经冷冻干燥后,研磨过80目筛,放入棕色玻璃干燥器中保存待用.

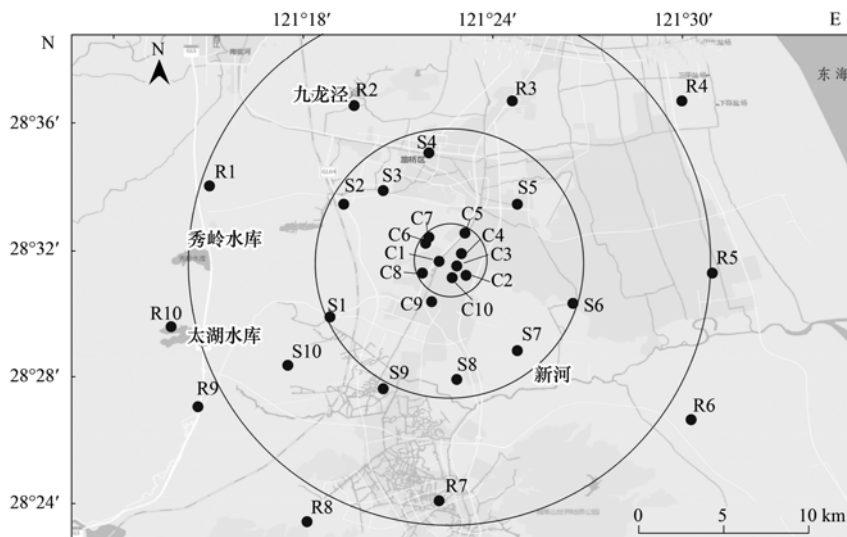


图1 台州采样站位图示意

Fig. 1 Map of sampling sites in Taizhou

1.2 样品前处理

水相:取300 mL水体,加入一定量回收率内标PCB-138和PCB-209,以甲醇作为改性剂,超声混合成40%的甲醇水(体积比).使用C18小柱进行固相萃取:依次加入10 mL正己烷、10 mL二氯甲烷、10 mL甲醇、10 mL超纯水进行活化后,甲醇水溶液以 $5 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 经过C18固相萃取小柱,再用3 mL甲醇、3 mL二氯甲烷和3 mL正己烷依次洗脱.收集的洗脱液经氮吹近干,异辛烷定容后,加入 ^{13}C -PCB-208待分析.

沉积物:称取1.0 g样品,加入PCB-138和PCB-209,用20 mL正己烷/丙酮(1:1,体积比)经微波萃取仪(Multiwave 3000系统,安东帕)提取;然

后加铜粉除硫,使用Florisil小柱经固相萃取仪净化后,5 mL异辛烷洗脱液经氮吹近干,定容至1 mL,最后加入 ^{13}C -PCB-208待测.

1.3 样品分析和质量控制

样品使用气质联用仪(安捷伦科技,6890GC-5975C MSD),色谱柱为DB-5HT($15 \text{ m} \times 0.25 \text{ mm} \times 0.10 \mu\text{m}$,J & W Scientific),对10种PBDEs(即BDE-28、BDE-47、BDE-99、BDE-100、BDE-153、BDE-154、BDE-183、BDE-203、BDE-207和BDE-209)进行定性定量分析.具体气相和质谱的仪器参数设定参照文献[1,3].

QA/QC控制方法包括分析方法空白、加标空白、基质加标平行和样品平行样.以PCB-138和

PCB-209 作为回收率内标,¹³C-PCB-208 作为进样内标. 目标化合物在水及沉积物的基质加标回收率分别为 78%~110% 和 75%~118%. 每分析 10 个样品增加 1 个空白样品,每个样品加 2 个平行样. 样品的最低检测限(LOD)以 3 倍信噪比(S/N)来计算,3~9 溴 PBDEs 的检测限为 0.01~0.22 ng·g⁻¹,BDE-209 为 0.85 ng·g⁻¹. 空白样品检测的目标物质含量均低于其 LOD,平行样品相对标准偏差<10%. 样品中回收率内标 PCB-138 和 PCB-209 的回收率均大于 70%.

1.4 统计分析

相关性分析采用 SPSS 18.0 软件,样品中 PBDEs 同系物的含量低于其 LOD 时,1/2 LOD 进行统计分析.

2 结果与分析

2.1 水体中的 PBDEs

2.1.1 PBDEs 的含量水平

调查结果显示(见图 2),所有水体样品中均有 PBDEs 检出. 水中 PBDEs 总含量($\sum_{10}$ PBDEs)的变化范围为 9.4~57.2 ng·L⁻¹,均值为 25.9 ng·L⁻¹. 平均值的空间分布态势为: C (31.7

ng·L⁻¹)>S(28.0 ng·L⁻¹)>R(18.0 ng·L⁻¹). 其中,C 圈中与电子垃圾拆解工业园最近的 2 个采样点 C1 和 C10 的 $\sum_{10}$ PBDEs 含量最高,分别为 57.2 ng·L⁻¹和 50.4 ng·L⁻¹,这也是所有采样点中的最高值. 虽然随着采样点的外移,水体中 PBDEs 总含量也有所下降,但即使是最外围 R 圈的 PBDEs 总含量也在 9.4~36.8 ng·L⁻¹之间. 这充分显示调查区域河道中的多溴联苯醚主要源自电子垃圾拆解活动的污染特征,而且这种污染已明显向周边外围地区迁移.

此外,与国内外其它调查研究相比,台州工业园区周边河水中的 PBDEs 含量已处在较高水平. 其最低值(9.4 ng·L⁻¹)也大幅高于广州珠江入海口水体中的 0.344 ng·L⁻¹[12],均值(25.9 ng·L⁻¹)则显著高于北美安大略湖中的 4.19 pg·L⁻¹[13]、美国旧金山河口中的 3~513 pg·L⁻¹[14]和香港附近表层海水的 40.2~228.2 pg·L⁻¹[15].

2.1.2 PBDEs 的组成特征

本调查检测了 10 种 PBDEs 同系物,除 BDE-154 外,其余的检出率均为 100%. 但是,各单体在水相中的丰度差异显著. 其中,最主要的单体为 BDE-209,含量为 6.4~48.2 ng·L⁻¹,平均值为 19.9

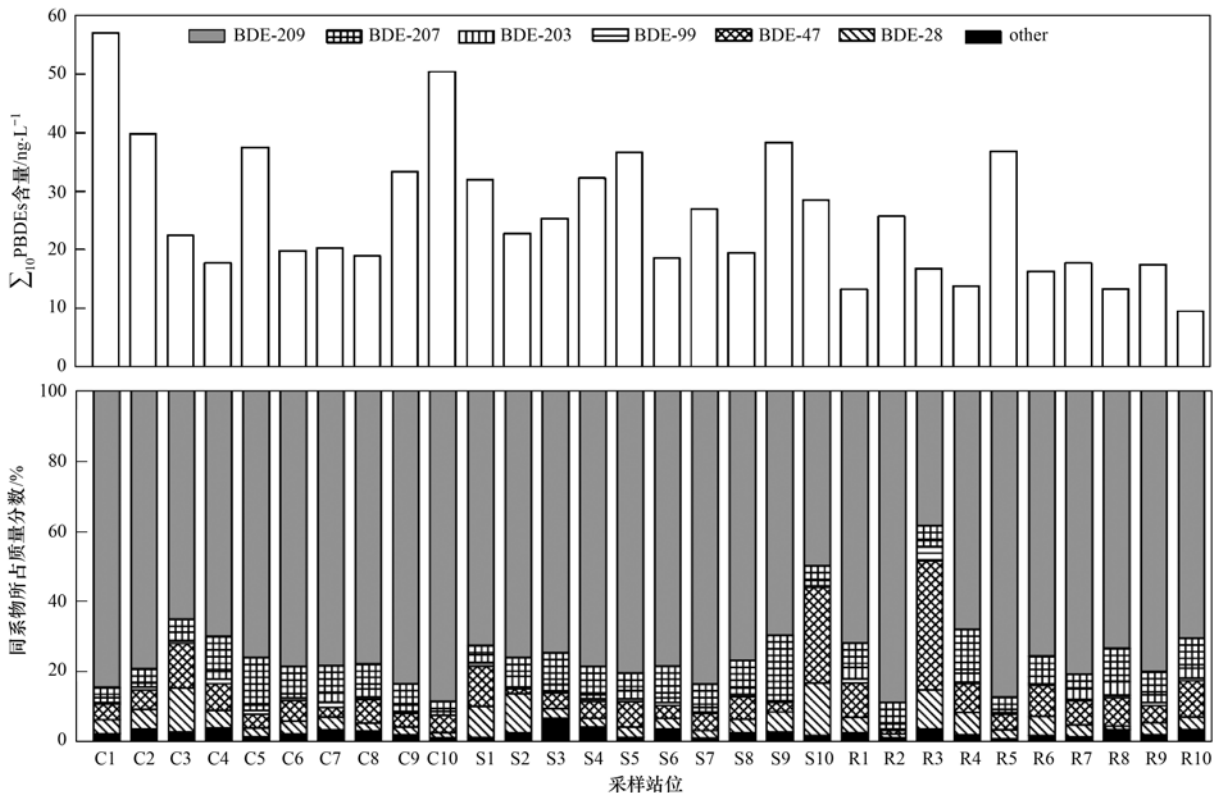


图 2 PBDEs 在水体中的含量分布及其同系物在各采样站点所占百分比

Fig. 2 Distribution of PBDEs in water and distribution profile of PBDEs in water from different sampling sites

$\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$. 不包括 BDE-209 的 $\sum_{10}\text{PBDEs}$ 在水体中的含量为 $2.8 \sim 14.3 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均值为 $6.0 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$. 因此, BDE-209 的含量是 $\sum_{10}\text{PBDEs}$ 含量的 3 倍多. 由于 BDE-209 是 Deca-BDEs 产品的最主要成分 (质量分数 $>97\%$), 这充分表明我国目前主要使用或生产的 PBDEs 产品是 Deca-BDEs. 除 BDE-209 外, 同系物中最为丰富的是 BDE-28、BDE-47、BDE-203 和 BDE-207. 前两者均为 Penta-BDEs 工业品的主要成分. 低溴同系物的含量比 $[R = (\text{BDE } 47 + \text{BDE } 99 + \text{BDE } 100) / (\text{BDE } 153 + \text{BDE } 154)]$ 常被用来评估 Penta-BDEs 和 Octa-BDEs 工业品对环境的影响^[16]. 本调查各水样中的 R 值较高, 范围为 $0.8 \sim 23.0$, 平均值为 7.6 . 这说明我国曾经使用或生产过 Penta-BDEs. 另外, 由于高溴 PBDEs (尤其是 BDE-209) 在水环境中可以通过光、化学和生物等降解方式进行脱溴转化^[17], 因而低溴 PBDEs 同系物也可能是来源于 BDE-209 的降解.

2.2 沉积物中 PBDEs

2.2.1 PBDEs 的含量水平

调查结果显示 (见图 3), 所有沉积物中也均检测到 PBDEs 的存在. $\sum_{10}\text{PBDEs}$ 含量水平范围为 $3.7 \sim 38\,774 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 均值为 $2\,623 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$. 沉积物中 PBDEs 含量平均值的空间分布态势与水体一致: $C (12\,654 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}) > S (43.6 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}) > R (28.4 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1})$. C 圈各采样站位沉积物中的 $\sum_{10}\text{PBDEs}$ 含量最低值 ($1\,012 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$) 也显著高于 S、R 圈所有采样站位含量. 其中, 距离电子垃圾拆解工业园中心较近的 2 个采样点 C4 和 C1 的 $\sum_{10}\text{PBDEs}$ 含量最高, 分别为 $38\,774 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $13\,285 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$. 虽然随着采样点的外移, 沉积物中的 PBDEs 含量也显著下降, 但最外围的 R 圈的 $\sum_{10}\text{PBDEs}$ 含量也在 $3.7 \sim 175.8 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间. 这进一步显示调查区域河道中的多溴联苯醚主要源自工业园电子垃圾拆解活动的污染特征, 而且这种污染也已明显向周边外围地区迁移.

此外, 与国内外不同地区的污染现状对比, 台州工业园区周边沉积物中的 PBDEs 含量也已处在较高水平. 其含量范围 ($3.7 \sim 38\,774 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$) 是韩国 Shihwa 湖中沉积物 ($1.3 \sim 18\,700 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$)^[18] 的 2 倍, 均值 ($2\,623 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$) 虽低于同为大规模电子垃圾拆解区的广东贵屿沉积物的 $7\,349 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ^[19], 但

显著高于美国 Hadley 湖^[20]、西班牙 Cinca 河^[21]、荷兰的 Scheldt 河^[22] 和中国的清远^[23]. 这充分说明电子垃圾拆解区严重的 PBDEs 污染现状和由此带来的高潜在生态风险.

2.2.2 PBDEs 的组成特征

本调查沉积物中 PBDEs 的同系物组成和水体分布相似, 除 BDE-153 和 BDE-154 的检出率分别为 75% 和 67% , 其余的检出率均为 100% , 且各单体的丰度也差异显著. 其中, BDE-209 为最主要的单体, 含量为 $2.0 \sim 37\,274 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间 (图 3), 均值为 $2\,623 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$. $\sum_{10}\text{PBDEs}$ 在沉积物中的含量为 $1.7 \sim 1\,500 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 均值为 $156 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$. 因此, 沉积物中 BDE-209 的平均含量比 $\sum_{10}\text{PBDEs}$ 的平均含量高出了 16 倍. 这与国内外的其它调查结果相似, 如瑞典 Viskan 河^[24]、韩国 Shihwa 湖^[18]、中国的长江三角洲^[25]、环渤海^[26]、东江和珠江^[27] 的沉积物中的 PBDEs 最主要同系物也全部是 BDE-209. 这充分说明, Deca-BDEs 是目前全球广泛使用的 PBDEs 工业产品. 除 BDE-209 外, 同系物组成最为丰富的是 BDE-28、47、203 和 207. 沉积物中 $(\text{BDE } 47 + \text{BDE } 99 + \text{BDE } 100) / (\text{BDE } 153 + \text{BDE } 154)$ 的平均比值为 29.8 . 这也进一步表明低溴 PBDEs 同系物可能部分源自 Penta-BDEs 工业品的使用, 另一部分则可能来源于 BDE-209 的降解.

2.3 水和沉积物中 PBDEs 相关性分析

本调查水中 $\sum_{10}\text{PBDEs}$ 含量与采样点离调查核心区的空间距离之间并无显著意义的相关性 [图 4(c)], 这可能与不同河道中各自水体的流动性差异较大有关. 但同一河流水体中 PBDEs 总含量会随离污染核心区的距离的增加而显著下降, 比如同处东官河支流中的 C1 (离工业园中心 0.60 km) 的 $57.2 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 就显著高于 C4 (1.34 km) 的 $37.5 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 C8 (1.64 km) 的 $18.9 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$. 沉积物中 $\sum_{10}\text{PBDEs}$ 含量则与离核心区的空间距离呈极显著意义的负相关性 ($P < 0.01$) [图 4(d)], 即距离电子垃圾拆解核心区越近沉积物中 PBDEs 的污染程度越大. 由于调查区水和沉积物中的 $\sum_{10}\text{PBDEs}$ 的最占优成分是 BDE-209, 因此相关性分析结果表明两者在水体与沉积物中均具有极显著意义的相关性, r^2 分别达到了 0.97 和 1.0 .

2.4 PBDEs 蓄积量估算

PBDEs 具有高亲脂性, 主要存在于土壤和沉积

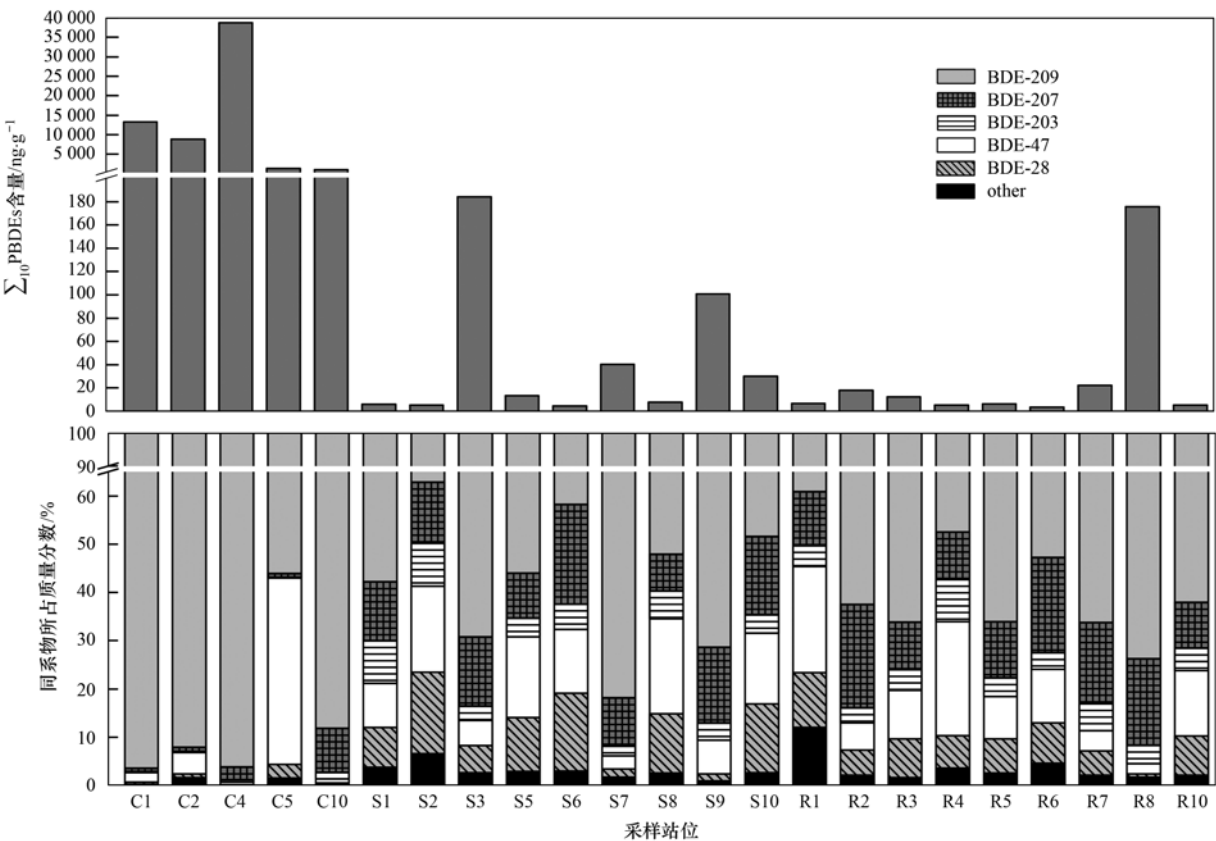


图3 PBDEs在沉积物中的含量分布及其同系物在各采样点所占百分比

Fig. 3 Distribution of PBDEs in sediments and distribution profile of PBDEs in sediments from different sampling sites

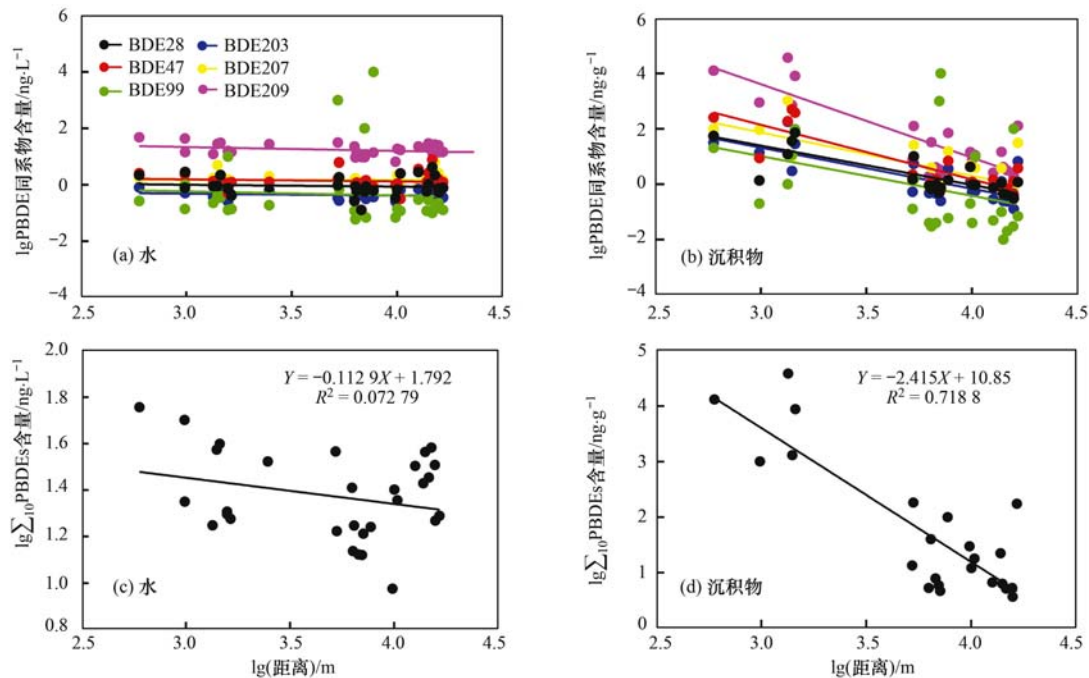


图4 水体和沉积物中各主要PBDEs同系物及总PBDEs含量离拆解区距离相关性分析

Fig. 4 Line regression analysis between PBDEs homologs and total PBDEs level and distance from the dismantling region

物中^[28],通常土壤和沉积物被认为是环境中PBDEs的一个蓄积库。本调查区沉积物中PBDEs的平均含量为2 623 ng·g⁻¹,这与已报道台州电子垃圾拆解区及周边土壤中PBDEs的平均含量(2 090 ng·g⁻¹)

非常接近^[29]. 因此,本研究通过估算沉积物中 PBDEs 蓄积量来粗略地推测该区域 PBDEs 的输入情况,并对今后该污染物的环境管理提供数据支持. 基于陈宣宇等^[30]的研究,将沉积物中的 PBDEs 蓄积量估算公式优化为:

$$I_i = kc_i A_i d \rho \quad (1)$$

式中, I 为区域 i 沉积物蓄积含量(t); c 为区域 i 沉积物样品中 PBDEs 的平均含量 ($\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$); A 为区域 i 面积(km^2); d 为采样深度(cm); ρ 为干燥沉积物平均密度($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); k 为转化系数(10^{-5}).

本研究干燥后沉积物平均密度 ρ 为 $1.7 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 采样深度 d 为 5 cm. 基于沉积物中 PBDEs 含量,通过式(1)计算的 C、S 和 R 三圈区域内的 PBDEs 蓄积量见表 1. 结果表明,电子垃圾拆解地附近 3 km 区域内的 $\sum_9 \text{PBDEs}$ 和 BDE-209 蓄积量分别达到了 1.66 t 和 28.5 t. 虽然 PBDEs 在环境介质中相对稳定,但仍有部分 PBDE 会被植物吸收或微生物降解. 此外, PBDEs 的污染范围肯定远大于本调查区域. 因此,本研究估算的 PBDEs 蓄积量必然比实际的蓄积量低. 由此推测,当地自 20 世纪 70 年代初开始至今 40 年的电子垃圾拆解活动已经向周边环境排放的 PBDEs 总量至少为 30.7 t, 其中 BDE-209 为 28.9 t.

表 2 PBDEs 工业品在台州电子拆解区及周边的水和沉积物中暴露水平

Table 2 Exposure level of industrial products of PBDEs in water and sediments in e-waste of Taizhou

样品类型	研究区域	Penta-BDEs	Octa-BDEs	Deca-BDEs
水相/ $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$	C	1.6 ~ 5.9 (3.2)	2.0 ~ 6.2 (3.1)	12.4 ~ 48.2 (25.4)
	S	1.4 ~ 12.2 (4.0)	2.0 ~ 8.2 (3.4)	14.2 ~ 29.4 (20.7)
	R	0.7 ~ 8.7 (2.5)	1.4 ~ 3 (1.8)	6.4 ~ 32.1 (13.7)
沉积物/ $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$	C	11.2 ~ 563 (338)	18.8 ~ 1 284 (338)	735 ~ 37 274 (11 978)
	S	1.1 ~ 22.4 (5.9)	1.1 ~ 34.4 (8.2)	2.0 ~ 127 (29.5)
	R	0.8 ~ 6.0 (2.2)	0.8 ~ 40.2 (6.4)	1.9 ~ 129 (19.8)

2.5.2 生态风险评价

关于 PBDEs 生态风险评估,常采用较为保守的商值法来评价调查区域 PBDEs 的生态风险水平. 该方法是基于低等水生生物及底栖生物的毒理学数据和美国 EPA 标准^[32],确定了水体中 Penta-BDEs 和 Octa-BDEs 的无显著影响含量 (MSNOEC) 分别为 $0.053 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.017 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, Deca-BDEs 目前无毒性数据; 沉积物中 Penta-BDEs、Octa-BDEs 和 Deca-BDEs 的 MSNOEC (以干重计) 则分别为 0.031、13.40 和 $45.36 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 将调查区暴露水平 MEC 与无显著影响含量 MSNOEC 相比,可计算出风险商值(Q):

$$Q = \text{MEC}/\text{MSNOEC} \quad (2)$$

商值法表征原理是: $Q < 1$, 无生态风险; $1 \leq Q < 5$, 为低等风险; $5 \leq Q < 10$, 为中等风险; $Q \geq 10$ 则为高等风险. 由图 5(a) 可见,本调查水体的 Penta-BDEs 和 Octa-BDEs 的 Q 值分别为 0.01 ~ 0.23 和 0.08 ~ 0.48, 生态风险水平较低. 沉积物中 Octa-BDEs 和 Deca-BDEs 的 Q 值也均小于 1 [图 5(b)], 生态风险较低,但电子垃圾拆解中心区(C 圈)沉积物中 Penta-BDEs 的生态风险水平则较高. 其中,采样站位 C1、C2 和 C5 的 Q 值分别达到了 11.04、18.17 和 17.99, 为高风险等级; 采样站位 C4 的 Q 为 6.96, 为中等风险. Penta-BDEs 主要成分

表 1 基于沉积物的台州电子垃圾拆解地周边环境 PBDEs 含量估算

Table 1 Mass inventory estimation of PBDEs based on sediments in e-waste of Taizhou

研究区域	面积/ km^2	$\sum_9 \text{PBDEs} / \text{t}$	BDE-209/t
C	28	1.66	28.5
S	79	0.09	0.20
R	113	0.08	0.19

2.5 PBDEs 的生态风险评估

2.5.1 暴露水平分析

与国内外其它地区的含量对比,该调查区域水和沉积物中 PBDEs 均处于较高的污染水平. 但是这不能全面反映环境中 PBDEs 污染的生态风险,故有必要对其作进一步的深入分析. 本调查采用测定环境含量 (MEC) 作为暴露评价方式,对环境中 PBDEs 的生态风险进行评估.

商品化的 PBDEs 主要包括五溴联苯醚 (Penta-BDEs)、八溴联苯醚 (Octa-BDEs) 和十溴联苯醚 (Deca-BDEs). 根据 PBDEs 主要工业品的同类物成分组成^[31],将三 ~ 五溴联苯醚归纳为 Penta-BDEs, 六 ~ 九溴联苯醚归为 Octa-BDEs, BDE-209 为 Deca-BDEs. 本调查得出 C、S 和 R 三圈的水体及沉积物中 Penta-BDEs、Octa-BDEs 和 Deca-BDEs 的暴露水平 MEC 如表 2.

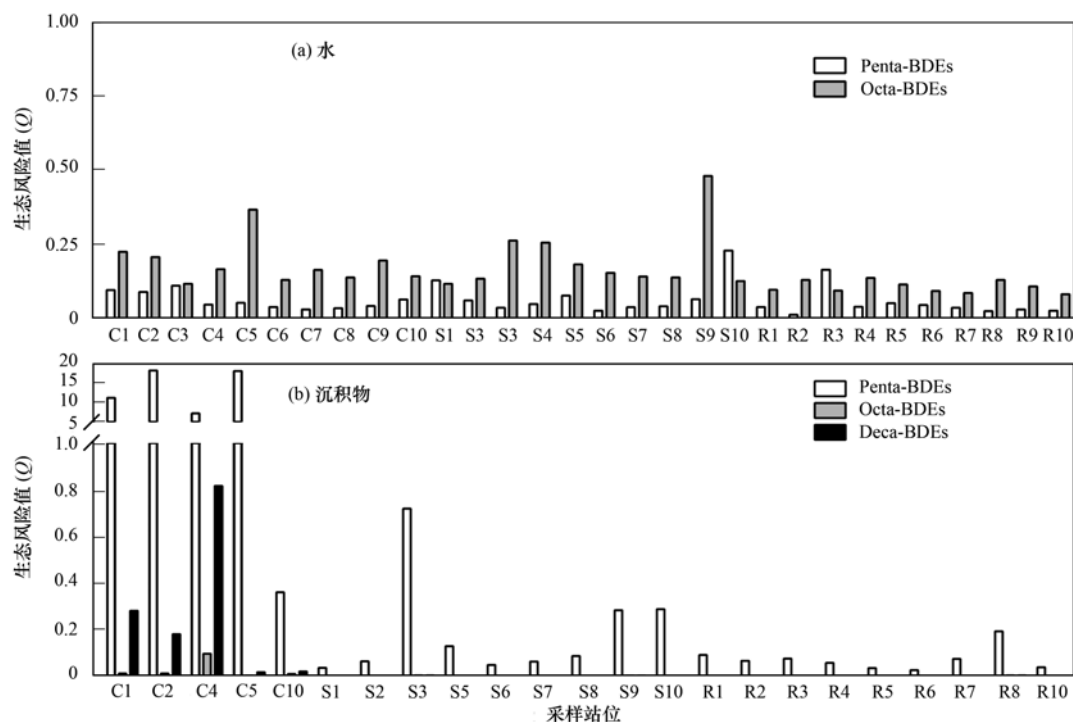


图5 水体和沉积物中 PBDEs 生态风险商值

Fig. 5 Estimated hazard quotients of three commercial categories of PBDE in water and sediments

为四~六溴联苯醚,溴化度较低,因而燃烧时形成二噁英几率增大,毒性较高。研究表明,BDE-47(四溴联苯醚)暴露可以抑制浮游植物的生长以及水蚤的生殖^[33];小鼠幼体期 BDE-99(五溴联苯醚)暴露可导致小鼠成体期持续自主行为异常,学习和记忆能力减弱^[34]。此外,本实验室也发现低剂量 BDE-47 暴露能够明显引起斑马鱼行为异常^[8]。Darnerud^[35]等也报道 Penta-BDEs 具有较强的生殖毒性、发育神经毒性,高剂量时还具有甲状腺素干扰效应。由此可见拆解核心区(半径为 1.5 km) Penta-BDEs 已达到高风险等级,可能严重威胁着当地的生态安全和人群健康。

3 结论

(1)本调查区域水中的 $\sum_{10}$ PBDEs 含量为 9.4 ~ 57.2 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$,均值为 25.9 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$;沉积物中的 $\sum_{10}$ PBDEs 含量为 3.7 ~ 38 775 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$,均值为 2779 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 。其中,BDE-209 均为主要同系物。与国内外其它地区的调查结果相比,本调查区域 PBDEs 处于较高的污染水平。

(2)水及沉积物中 PBDEs 含量的空间分布态势均为:C 圈 > S 圈 > R 圈,其中沉积物中的 $\sum_{10}$ PBDEs 含量和离工业园中心区的空间距离之

间呈极显著负相关性($P < 0.01$),充分说明河道中 PBDEs 的主要污染源为工业园区的电子垃圾拆解。

(3)由沉积物中的 PBDEs 含量推算出本调查区域内的 PBDEs 蓄积量为 30.7 t,其中 BDE-209 为 28.9 t。采用商值法进行的生态风险分析,结果表明,Deca-BDEs 和 Octa-BDEs 暂无生态风险,但在工业园区中心区(半径为 1.5 km)沉积物中的 Penta-BDEs 则处于高风险等级,对当地的生态安全和人群健康可能具有极高的风险。

参考文献:

- [1] Wang J X, Lin Z K, Lin K F, *et al.* Polybrominated diphenyl ethers in water, sediment, soil, and biological samples from different industrial areas in Zhejiang, China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **197**: 211-219.
- [2] Jaward F M, Zhang G, Nam J J, *et al.* Passive air sampling of polychlorinated biphenyls, organochlorine compounds, and polybrominated diphenyl ethers across Asia [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(22): 8638-8645.
- [3] Jiang H, Lin Z K, Wu Y Y, *et al.* Daily intake of polybrominated diphenyl ethers via dust and diet from an e-waste recycling area in China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, **276**: 35-42.
- [4] Chen D, Mai B X, Song J, *et al.* Polybrominated diphenyl ethers in birds of prey from Northern China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**(6): 1828-1833.
- [5] Zhu L Y, Ma B L, Li J G, *et al.* Distribution of polybrominated diphenyl ethers in breast milk from North China: implication of

- exposure pathways [J]. *Chemosphere*, 2009, **74** (11): 1429-1434.
- [6] Wang C Y, Lin Z, Dong Q X, *et al.* Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in human serum from Southeast China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2012, **78**: 206-211.
- [7] Ikononou M G, Rayne S, Addison R F. Exponential increases of the brominated flame retardants, polybrominated diphenyl ethers, in the Canadian Arctic from 1981 to 2000 [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **36**(9): 1886-1892.
- [8] Chen X J, Huang C J, Wang X C, *et al.* BDE-47 disrupts axonal growth and motor behavior in developing zebrafish [J]. *Aquatic Toxicology*, 2012, **120-121**: 35-44.
- [9] He J H, Yang D R, Wang C Y, *et al.* Chronic zebrafish low dose decabrominated diphenyl ether (BDE-209) exposure affected parental gonad development and locomotion in F1 offspring [J]. *Ecotoxicology*, 2011, **20**(8): 1813-1822.
- [10] Zhu B R, Wang Q W, Wang X F, *et al.* Impact of co-exposure with lead and decabromodiphenyl ether (BDE-209) on thyroid function in zebrafish larvae [J]. *Aquatic Toxicology*, 2014, **157**: 186-195.
- [11] McDonald T A. A perspective on the potential health risks of PBDEs [J]. *Chemosphere*, 2002, **46**(5): 745-755.
- [12] 管玉峰, 涂秀云, 吴宏海. 珠江入海口水体中多溴联苯醚及其来源分析 [J]. *生态环境学报*, 2011, **20**(3): 474-479.
- [13] Watanabe I, Sakai S I. Environmental release and behavior of brominated flame retardants [J]. *Environment International*, 2003, **29**(6): 665-682.
- [14] Oros D R, Hoover D, Rodigari F, *et al.* Levels and distribution of polybrominated diphenyl ethers in water, surface sediments, and bivalves from the San Francisco Estuary [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(1): 33-41.
- [15] Wurl O, Lam P K S, Obbard J P. Occurrence and distribution of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in the dissolved and suspended phases of the sea-surface microlayer and seawater in Hong Kong, China [J]. *Chemosphere*, 2006, **65**(9): 1660-1666.
- [16] Hites R A. Polybrominated diphenyl ethers in the environment and in people: a meta-analysis of concentrations [J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, **38**(4): 945-956.
- [17] 刘芑岩, 路佳良, 孙佳惠, 等. 多溴联苯醚(PBDEs)光降解研究现状 [J]. *环境化学*, 2015, **34**(2): 270-278.
- [18] Moon H B, Choi M, Yu J, *et al.* Contamination and potential sources of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in water and sediment from the artificial Lake Shihwa, Korea [J]. *Chemosphere*, 2012, **88**(7): 837-843.
- [19] Nie X P, Fan C P, Wang Z H, *et al.* Toxic assessment of the leachates of paddy soils and river sediments from e-waste dismantling sites to microalga, *Pseudokirchneriella subcapitata* [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2015, **111**: 168-176.
- [20] Song W L, Ford J C, Li A, *et al.* Polybrominated diphenyl ethers in the sediments of the Great Lakes. 1. Lake Superior [J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, **38**(12): 3286-3293.
- [21] Eljarrat E, De La Cal A, Raldua D, *et al.* Occurrence and bioavailability of polybrominated diphenyl ethers and hexabromocyclododecane in sediment and fish from the Cinca River, a tributary of the Ebro River (Spain) [J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, **38**(9): 2603-2608.
- [22] De Boer J, Wester P G, Van Der Horst A, *et al.* Polybrominated diphenyl ethers in influents, suspended particulate matter, sediments, sewage treatment plant and effluents and biota from the Netherlands [J]. *Environmental Pollution*, 2003, **122**(1): 63-74.
- [23] Luo Q, Cai Z W, Wong M H. Polybrominated diphenyl ethers in fish and sediment from river polluted by electronic waste [J]. *Science of the Total Environment*, 2007, **383**(1-3): 115-127.
- [24] 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.
- [25] Chen S J, Gao X J, Mai B X, *et al.* Polybrominated diphenyl ethers in surface sediments of the Yangtze River Delta: levels, distribution and potential hydrodynamic influence [J]. *Environmental Pollution*, 2006, **144**(3): 951-957.
- [26] 林忠胜, 马新东, 张庆华, 等. 环渤海沉积物中多溴联苯醚(PBDEs)的研究 [J]. *海洋环境科学*, 2008, **27**(S2): 24-27.
- [27] 陈社军, 麦碧娴, 曾永平, 等. 珠江三角洲及南海北部海域表层沉积物中多溴联苯醚的分布特征 [J]. *环境科学学报*, 2005, **25**(9): 1265-1271.
- [28] 任金亮, 王平. 多溴联苯醚环境行为的特征与研究进展 [J]. *化工进展*, 2006, **25**(10): 1152-1157.
- [29] 张龙, 王俊霞, 徐峰, 等. 多溴联苯醚在电子拆解区及周边土壤和灰尘中的分布规律和源分析 [J]. *农业环境科学学报*, 2015, **34**(9): 1730-1736.
- [30] 陈宣宇, 薛南冬, 张石磊, 等. 废旧电器拆解区河流沉积物中多溴联苯醚(PBDEs)的污染特征与生态风险 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(10): 3731-3739.
- [31] World Health Organization. Environmental health criteria 162. Brominated diphenylethers [R]. Geneva, Switzerland: WHO, 1994.
- [32] Environment Canada. Ecological Screening Assessment Report on Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs) [R]. Environment Canada, Ottawa, Canada, 2006.
- [33] Källqvist T, Grung M, Tollefsen K E. Chronic toxicity of 2, 4, 2', 4' - tetrabromodiphenyl ether on the marine alga *Skeletonema costatum* and the crustacean *Daphnia magna* [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2006, **25**(6): 1657-1662.
- [34] Viberg H, Fredriksson A, Eriksson P. Neonatal exposure to the brominated flame-retardant, 2, 2', 4, 4', 5-pentabromodiphenyl ether, decreases cholinergic nicotinic receptors in hippocampus and affects spontaneous behaviour in the adult mouse [J]. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2004, **17**(2): 61-65.
- [35] Darnerud P O. Toxic effects of brominated flame retardants in man and in wildlife [J]. *Environment International*, 2003, **29**(6): 841-853.

CONTENTS

Exploring the Severe Haze in Beijing During December, 2015; Pollution Process and Emissions Variation	XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, NIE Teng, <i>et al.</i> (1593)
Pollution Characteristics and Source of HULIS in the Fine Particle During the Beijing APEC	ZHOU Xue-ming, QI Xue-jiao, XIANG Ping, <i>et al.</i> (1602)
Seasonal Variation Characteristics and Potential Source Contribution of Sulfate, Nitrate and Ammonium in Beijing by Using Single Particle Aerosol Mass Spectrometry	LIU Lang, ZHANG Wen-jie, DU Shi-yong, <i>et al.</i> (1609)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in Lanzhou City	WANG Xin, NIE Yan, CHEN Hong, <i>et al.</i> (1619)
Pollution Level and Source Apportionment of Atmospheric Particles PM _{2.5} in Southwest Suburb of Chengdu in Spring	LIN Yu, YE Zhi-xiang, YANG Huai-jin, <i>et al.</i> (1629)
Variation Characteristics of Total Gaseous Mercury at Simian Mountain Background Station in Mid-subtropical Region	LIU Wei-ming, MA Ming, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (1639)
Establishment of Method for Health Risk Assessment of Pollutants from Fixed Sources	CHEN Qiang, WU Huan-bo (1646)
Testing of Concentration and Characteristics of Particulate Matters Emitted from Stationary Combustion Sources in Beijing	HU Yue-qi, WU Xiao-dong, WANG Chen, <i>et al.</i> (1653)
Pollution Evaluation and Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in the Parks of Nanjing	WANG Cheng, QIAN Xin, LI Hui-ming, <i>et al.</i> (1662)
CoCuMnO ₂ Photocatalyzed Oxidation of Multi-component VOCs and Kinetic Analysis	MENG Hai-long, BO Long-li, LIU Jia-dong, <i>et al.</i> (1670)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in the Tidal Reach and Estuary of the Daliao River and Analysis of Potential Eutrophication	ZHANG Lei, CAO Wei, MA Ying-qun, <i>et al.</i> (1677)
Spatial Distribution of Stable Isotope from the Lakes in Typical Temperate Glacier Region	SHI Xiao-yi, PU Tao, HE Yuan-qing, <i>et al.</i> (1685)
$\delta^{15}\text{N-NO}_3^-$ and $\delta^{18}\text{O-NO}_3^-$ Tracing of Nitrate Sources in Beijing Urban Rivers	ZHAO Qing-liang, MA Hui-ya, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (1692)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Nitrate Pollution in Shallow Groundwater of Liujiang Basin	WANG He, GU Hong-biao, CHI Bao-ming, <i>et al.</i> (1699)
Nitrogen Losses Under the Action of Different Land Use Types of Small Catchment in Three Gorges Region	CHEN Cheng-long, GAO Ming, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (1707)
Interception Effect of Ecological Ditch on Nitrogen Transport in Agricultural Runoff in Subtropical China	WANG Di, LI Hong-fang, LIU Feng, <i>et al.</i> (1717)
Biodegradation Coefficients of Typical Pollutants in the Plain Rivers Network	FENG Shuai, LI Xu-yong, DENG Jian-cai (1724)
Influence of Submerged Plants on Microbial Community Structure in Sediment of Hongze Lake	ZHANG Ding-yu, ZHANG Ting-xi, DONG Dan-ping, <i>et al.</i> (1734)
Community Structure Characteristics of Diatom in Reservoirs Located in the South of Jiangsu Province, China and Its Control Factors	REN Jie, ZHOU Tao, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i> (1742)
Contamination and Ecological Risk Assessment of Mercury in Hengshuihu Wetland, Hebei Province	WANG Nai-shan, ZHANG Man-yin, CUI Li-juan, <i>et al.</i> (1754)
Spatial Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soils and Sediments in Shunde Waterway, Southern China	CAI Yi-min, CHEN Wei-ping, PENG Chi, <i>et al.</i> (1763)
Pollution Characteristics and Ecological Risk of PBDEs in Water and Sediment from an Electronic Waste Dismantling Area in Taizhou	CHEN Xiang-ping, PENG Bao-qi, LÜ Su-ping, <i>et al.</i> (1771)
Major Ionic Features and Their Controlling Factors in the Upper-Middle Reaches of Wujiang River	HUANG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (1779)
Export of Total Organic Carbon (TOC) from Karst Watershed and Its Influencing Factors; An Example from Xueyudong Underground River System, Chongqing	WANG Qiao-lian, JIANG Yong-jun, CHEN Yu (1788)
Seasonal Variations and Controlling Factors of the Element Contents in Drip Waters Collected from the Baojinggong Cave in Guangdong Province	HUANG Jia-yi, CHEN Lin, CHEN Qiong, <i>et al.</i> (1798)
Tracing the Fecal Contamination Sources Based on <i>Bacteroides</i> 16S rRNA PCR-DGGE in Karst Groundwater; Taking Laolongdong Underground River System, Nanshan, Chongqing as an Example	ZHANG Hong, JIANG Yong-jun, ZHANG Yuan-zhu, <i>et al.</i> (1805)
Sources and Variation Characteristics of Dissolved Lipid Biomarkers in a Typical Karst Underground River	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (1814)
Formation of Halogenated By-products in Co ²⁺ Activated Peroxymonosulfate Oxidation Process	LIU Kuo, JIN Hao, DONG Wei, <i>et al.</i> (1823)
Aspartic Acid Generated in the Process of Chlorination Disinfection By-product Dichloroacetonitrile	DING Chun-sheng, LI Nai-jun, ZHANG Tao, <i>et al.</i> (1831)
Influencing Factors of Assimilable Organic Carbon (AOC) Formation in Drinking Water During Ozonation Process	DONG Bing-zhi, ZHANG Jia-li, HE Chang (1837)
Wastewater Quantity and Quality Fluctuation Characteristics of Typical Area of Hybrid Sewage System	CHENG Xun, ZHANG Ming-kai, LIU Yan-chen, <i>et al.</i> (1845)
Preparation of HDTMA-modified Zeolite and Its Performance in Nitro-phenol Adsorption from Wastewaters	GUO Jun-yuan, WANG Bin (1852)
Selection of Suitable Microalgal Species for Sorption of Uranium in Radioactive Wastewater Treatment	LI Xin, HU Hong-ying, YU Jun-yi, <i>et al.</i> (1858)
Magnetic Fe ₃ O ₄ Microparticles Conditioning-Pressure Electro-osmotic Dewatering (MPEOD) of Sewage Sludge	QIAN Xu, WANG Yi-li, ZHAO Li (1864)
Stability of Short-cut Nitrification Nitrogen Removal in Digested Piggery Wastewater with an Intermittently Aerated Sequencing Batch Reactor	SONG Xiao-yan, LIU Rui, SHUI Yong, <i>et al.</i> (1873)
Effect of Irrigation Patterns on Soil CO ₂ and N ₂ O Emissions from Winter Wheat Field in North China Plain	GUO Shu-fang, QI Yu-chun, YIN Fei-hu, <i>et al.</i> (1880)
Characteristics of Dissolved CH ₄ and N ₂ O Concentrations of Weihe River in Xinxiang Section in Spring	HOU Cui-cui, ZHANG Fang, LI Ying-chen, <i>et al.</i> (1891)
Effect of Stimulated N Deposition on N ₂ O Emission from a <i>Stipa krylovii</i> Steppe in Inner Mongolia, China	YANG Han-yue, ZHANG Ting, HUANG Yong-mei, <i>et al.</i> (1900)
Response of Soil Respiration and Organic Carbon to Returning of Different Agricultural Straws and Its Mechanism	CAO Zhan-bo, WANG Lei, LI Fan, <i>et al.</i> (1908)
Spatial Variability and Distribution Pattern of Soil Organic Matter in a Mollisol Watershed of China	GAO Feng-jie, MA Quan-lai, HAN Wen-wen, <i>et al.</i> (1915)
Effects of Tillage on Distribution of Heavy Metals and Organic Matter Within Purple Paddy Soil Aggregates	SHI Qiong-bin, ZHAO Xiu-lan, CHANG Tong-ju, <i>et al.</i> (1923)
Distribution Characteristics and Potential Ecological Hazards Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Soil Profiles in Southeast Suburb of Beijing	ZHAO Qian, MA Lin, LIU Yi-fei, <i>et al.</i> (1931)
Contamination Assessment and Sources Analysis of Soil Heavy Metals in Opencast Mine of East Junggar Basin in Xinjiang	LIU Wei, YANG Jian-jun, WANG Jun, <i>et al.</i> (1938)
Effect of Nano-TiO ₂ on Release and Speciation Changes of Heavy Metals in Soil	ZHANG Jin-yang, WANG Ding-yong, LIANG Li, <i>et al.</i> (1946)
Reduction Kinetics of Cr(VI) in Chromium Contaminated Soil by Nanoscale Zerovalent Iron-copper Bimetallic	MA Shao-yun, ZHU Fang, SHANG Zhi-feng (1953)
Inhibition of Low Molecular Organic Acids on the Activity of <i>Acidithiobacillus</i> Species and Its Effect on the Removal of Heavy Metals from Contaminated Soil	SONG Yong-wei, WANG He-ru, CAO Yan-xiao, <i>et al.</i> (1960)
Contribution of Particle Size and Surface Coating of Silver Nanoparticles to Its Toxicity in Marine Diatom <i>Skeletonema costatum</i>	HUANG Jun, YI Jun, QIANG Li-yuan, <i>et al.</i> (1968)
Rhizospheric Mechanisms of <i>Hemerocallis middendorffii</i> Trautv. et Mey. Remediating Petroleum-contaminated Soil and Metabonomic Analyses of the Root Systems	WANG Ya-nan, CHENG Li-juan, ZHOU Qi-xing (1978)
Effects of Thermophilic Composting on Antibiotic Resistance Genes (ARGs) of Swine Manure Source	ZHENG Ning-guo, HUANG Nan, WANG Wei-wei, <i>et al.</i> (1986)
Interaction Between Sulfonamide Antibiotics Fates and Chicken Manure Composting	LIN Hui, WANG Jian-mei, SUN Wan-chun, <i>et al.</i> (1993)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年5月15日 第37卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 5 May 15, 2016

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国 内 定 价: 120.00 元

国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行