

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第12期

Vol.36 No.12

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次(卷终)

2014年APEC前后北京城区PM _{2.5} 中水溶性离子特征分析	杨懂艳,刘保献,张大伟,石爱军,周健楠,景宽,富佳明	(4325)
2013年北京市不同方位PM _{2.5} 背景浓度研究	李云婷,程念亮,张大伟,孙瑞雯,董欣,孙乃迪,陈晨	(4331)
APEC期间北京空气质量改善对比分析	李文涛,高庆先,刘俊蓉,李亮,高文康,苏布达	(4340)
嘉兴市春季PM、主要污染气体和气溶胶粒径分布的周末效应	沈利娟,王红磊,吕升,李莉,张孝寒,章国骏,王翥	(4348)
烟花燃放对珠三角地区春节期间空气质量的影响	赵伟,范绍佳,谢文彰,孙家仁	(4358)
典型钢铁行业汞排放特征及质量平衡	张雅惠,张成,王定勇,罗程钟,杨熹,徐凤	(4366)
上海市公园绿地树叶对大气重金属污染的磁学响应	刘飞,褚慧敏,郑祥民	(4374)
重庆金佛山降雪中飞灰单颗粒特征及来源解析	于正良,杨平恒,景伟力,袁道先,任坤,李林立	(4381)
利用新型组合填料的生物滴滤塔净化混合废气研究	梅瑜,成卓韦,王家德,陆胤	(4389)
低浓度CO ₂ 在聚苯胺/Y分子筛复合材料上的吸附	刘凤玲,卢霞,张慧,葛鑫,刘杰,张泳真	(4396)
红壤丘陵区冬季大气湿沉降化学特征及森林冠层对其截留作用机制	郝卓,高扬,张进忠,于贵瑞	(4403)
中亚热带常绿阔叶林湿沉降过程中盐基离子变化特征	安思危,孙涛,马明,王定勇	(4414)
基于Landsat 8影像估算新安江水库光合有效辐射衰减系数	张毅博,张运林,查勇,施坤,周永强,刘明亮	(4420)
白石水库颗粒有机物及沉积物中碳、氮稳定同位素的空间分布特征	郭凯,赵文,王珊,戴玉新,张荣坤,李东明	(4430)
小关水库夏季浮游植物功能群对富营养化特征的响应	李磊,李秋华,焦树林,李钥,肖晶,邓龙,孙荣国,高永春,骆兰	(4436)
湖泊基质客土改良的环境效应:对芦苇生长及光合荧光特性的影响	余居华,钟继承,范成新,黄蔚,商景阁,古小治	(4444)
贵州纳朵洞洞穴水水文地球化学变化特征及其环境意义	沈蔚,王建力,王家录,蒋先淑,毛庆亚,陈挚秋,刘肖	(4455)
碧水岩地下河中微量金属元素对降雨的响应特征及来源分析	邹艳娥,蒋萍萍,张强,汤庆佳,康志强,龚晓萍,陈长杰,俞建国	(4464)
钱塘江(杭州段)表层水中全氟化化合物的残留水平及分布特征	张明,唐访良,俞雅雯,徐建芬,李华,吴敏华,张伟,潘见阳	(4471)
长江中游沉积物中多溴联苯醚的污染特征及风险评价	田奇昌,唐洪波,夏丹,王莎莎,高丽荣	(4479)
城市地表水表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评估:以永康市为例	齐鹏,余树全,张超,梁立成,车继鲁	(4486)
柠檬酸对三峡水库消落区土壤中汞活化及甲基化的影响	覃蔡清,梁丽,游蕊,邓晗,王定勇	(4494)
微生物对冰封期湖泊沉积物中有机磷降解释放的影响	左乐,吕昌伟,何江,王伟颖,颜道浩	(4501)
扰动和加藻共同作用下太湖沉积物中形态磷变化规律	陈俊,李大鹏,朱培颖,黄勇,王忍	(4509)
生态沟渠对氮、磷污染物的拦截效应	张树楠,肖润林,刘锋,吴金水	(4516)
开放系统下方解石对磷的去除	李振炫,刁家勇,黄利东,陈艳芳,刘大刚,许正文	(4523)
铜在壳核结构磁性颗粒上的吸附:效能与表面性质的关系	李秋梅,陈静,李海宁,张晓蕾,张高生	(4531)
基于优质碳源提供的CAMBR复合工艺短程硝化-反硝化除磷研究	程继辉,吴鹏,程朝阳,沈耀良	(4539)
ANAMMOX菌利用零价铁转化氨和硝酸盐实验	周健,黄勇,袁怡,刘忻,李祥,沈杰,杨朋兵	(4546)
基于GIS的天津市饮用水水质健康风险评价	符刚,曾强,赵亮,张玥,冯宝佳,王睿,张磊,王洋,侯常春	(4553)
北京自备井水源内毒素污染及与其他水质参数的相关分析	张灿,刘文君,敖澍,史云,安代志,刘治平	(4561)
广州市小学生多环芳烃内暴露水平	苏慧,赵波,张素坤,刘珊,任明忠,李杰,石小霞	(4567)
构建三元混合污染物的三维等效图	刘雪,刘树深,刘海玲	(4574)
化学提取法表征污染土壤中PAHs老化规律和蚯蚓富集特征	张亚楠,杨兴伦,卞永荣,谷成刚,刘总堂,李娇,王代长,蒋新	(4582)
不同取样尺度下华北落叶松人工林土壤呼吸的空间变异性	严俊霞,梁雅南,李洪建,李君剑	(4591)
基于环境效应的土壤重金属临界负荷制图	施亚星,吴绍华,周生路,王春辉,陈浩	(4600)
土壤中铅锌的稳定化处理及机制研究	谢伟强,李小明,陈灿,陈寻峰,钟宇,钟振宇,万勇,王琰	(4609)
纳米氧化锌、硫酸锌和AM真菌对玉米生长的影响	李帅,刘雪琴,王发园,苗艳芳	(4615)
蜈蚣草中砷与铊的赋存特征及其相互作用	张玉秀,马旭,廖晓勇,阎秀兰,马栋,龚雪刚	(4623)
纳米沸石对土壤Cd形态及大白菜Cd吸收的影响	熊仕娟,徐卫红,谢文文,陈蓉,陈永勤,迟芬琳,陈序根,张进忠,熊治庭,王正银,谢德体	(4630)
黑麦草、丛枝菌根对番茄Cd吸收、土壤Cd形态的影响	陈永勤,江玲,徐卫红,迟芬琳,陈序根,谢文文,熊仕娟,张进忠,熊治庭	(4642)
耐盐类固醇激素降解菌交替赤杆菌MH-B5的降解特性、降解途径及其固定化	马聪,秦丹,孙倩,于昌平	(4651)
浙江省瓯江氨氧化古菌和氨氧化细菌分布及多样性特征	李虎,黄福义,苏建强,洪有为,俞慎	(4659)
缙云山马尾松林和柑橘林土壤微生物PLFA沿海拔梯度的变化	曾清苹,何丙辉,毛巧芝,吴耀鹏,黄祺,李源	(4667)
华北平原耕作土壤特性对基因工程菌迁移的影响	张静,刘平,刘春,陈晓轩,张磊	(4676)
再生铜冶炼过程多氯萘与二噁英类排放特征分析与控制技术评估	田亚静,姜晨,吴广龙,丁琼,王铁宇,吕永龙	(4682)
《环境科学》第36卷(2015年)总目录		(4690)
《环境科学》征订启事(4347)	《环境科学》征稿简则(4454)	信息(4463,4530,4573,4581)

长江中游沉积物中多溴联苯醚的污染特征及风险评价

田奇昌^{1,2}, 唐洪波¹, 夏丹², 王莎莎², 高丽荣^{2*}

(1. 沈阳工业大学研究生学院, 沈阳 110870; 2. 中国科学院生态环境研究中心环境化学与生态毒理学国家重点实验室, 北京 100085)

摘要: 多溴联苯醚(PBDEs)具有高毒性和生物累积性, 进入水体后易与有机质相结合, 成为PBDEs污染物的重要归宿, 对人类健康和水生生态系统造成潜在的危险。为揭示多溴联苯醚(PBDEs)在长江中游流域的污染现状, 通过采集该地区流域内13个表层沉积物样品, 采用高分辨气相色谱/高分辨质谱法(HRGC/HRMS)对沉积物中9种PBDEs同类物进行分析。结果表明该地区沉积物中9种PBDEs的含量范围(干重)约为46.1~326 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 而BDE-99是其中最主要的贡献单体, 平均贡献率约为51.6%; 其次是BDE-47, 约为19.6%。与国内外其他海域的研究相比, 长江中游沉积物中PBDEs残留量处于较低水平。通过测定沉积物中总有机碳(TOC), 研究结果发现PBDEs含量与TOC无明显的正相关关系。结合商值法对PBDEs的健康风险进行初步评估, 结果表明, 本研究中PBDEs对人体产生的健康风险较小。

关键词: 多溴联苯醚(PBDEs); 长江中游; 沉积物; TOC; 风险评价

中图分类号: X131.2; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)12-4479-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.12.020

Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polybrominated Diphenyl Ethers in the Surface Sediments from Middle Reaches of the Yangtze River

TIAN Qi-chang^{1,2}, TANG Hong-bo¹, XIA Dan², WANG Sha-sha², GAO Li-rong^{2*}

(1. Graduate School of Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Chemistry and Ecotoxicology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) are highly lipophilic compounds with high toxicity and long-term bioaccumulation, which have strong affinities to suspended particulates in water. So PBDEs are easily adsorbed to sediments, and cause potential risks to human beings and aquatic ecosystem. In order to investigate the levels and patterns of PBDEs in the Yangtze River, 13 surface sediment samples were collected from the middle reaches of the regions and the concentrations of 9 PBDE congeners in the sediments were determined using High Resolution Gas Chromatography/High Resolution Mass Spectrometry (HRGC/HRMS). The total concentrations of PBDEs ranged from 46.1 to 326 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ dry weight. BDE-99 and BDE-47 were the dominant PBDE congeners, which averagely contributed 51.6% and 19.6%, respectively. The concentrations of PBDEs were relatively low compared to those in other studies. The total organic carbon (TOC) was also analyzed in this study, and the results indicated that there was no obvious positive correlation between the levels of PBDEs and TOC. In addition, based on the PBDEs concentration levels, the ecotoxicological risks of PBDEs contamination in surface sediments of the Yangtze River were evaluated by the quotient method. The results showed that the levels of PBDEs were considerably low and these compounds should have no risk to human health.

Key words: polybrominated diphenyl ethers; middle reaches of the Yangtze River; sediments; total organic carbon; risk assessment

多溴联苯醚(polybrominated diphenyl ethers, PBDEs)是一种目前使用最广泛的溴代阻燃剂, 具有疏水性、持久性、生物累积性和难降解性^[1], 易吸附于大气颗粒和沉积物中, 而且它可以通过大气沉降、地表径流及工业排放等方式进入到水体系统中, 由于该类污染物具有脂溶性高、水溶性低、半衰期长等特点^[2], 进入水体后易与有机质结合, 成为此类污染物的重要归宿。沉积物中的PBDEs一方面可以通过解吸作用重新进入水体, 造成二次污染, 另一方面则可以通过食物链的富集和逐级放大作用, 对人类健康和水生生态系统造成潜在的危险^[3]。因此, 研究沉积物中PBDEs的残留分布状况对了解水体的污染情况以及PBDEs在水环境中行

为具有重要的意义。

长江流域位置在北纬24°27'~35°54', 东经90°33'~122°19'之间, 呈东西长、南北短的流域形状^[4]。区域面积约680 000 km^2 , 平均流量^[5]约为33 980 $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, 长江中游水系指宜昌至湖口间的河湖水系, 是中国人口密集经济繁荣的地区^[6], 由于上游存在有化工厂、燃煤厂和焚烧厂等, 可能是PBDEs的潜在排放源, 而目前对于此地区的PBDEs的含量水平和污染特征并不清楚。因此本研究对长

收稿日期: 2015-05-25; 修订日期: 2015-07-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(21321004, 21377140)

作者简介: 田奇昌(1989~), 男, 硕士, 主要研究方向为POPs污染特征, E-mail: tianqichang1109@163.com

* 通讯联系人, E-mail: gaolr@rcees.ac.cn

江中游 9 种 PBDEs (BDE-28、BDE-47、BDE-66、BDE-85、BDE-99、BDE-100、BDE-153、BDE-154、BDE-183) 的含量水平进行了分析,考察了其指纹分布特征,探讨了潜在的排放源,并对沉积物中 TOC 进行了测定,分析了 PBDEs 含量与 TOC 之间的相关性,并对此地区 PBDEs 的风险进行了初步评估。

1 材料与方法

1.1 样品采集

2014 年 10 ~ 11 月利用 GPS 定位仪定位,通过抓斗式采样器采集了长江中游地区表层沉积物样品。该区域采样点比较均匀地分布在湖北宜昌至荆州段的 13 个县镇,沿江而下,总距离 200 km,具体采样点如图 1 所示,分布为艾家镇、红花套镇、高坝洲镇、白洋镇、枝城、顾家店镇、董市镇、百里洲镇、七星台镇、澧市镇、埠河镇、公安县、江陵,采样点详细地理信息见表 1。采集的沉积物样品带回实验室经干燥研成粉末后,密封保存。

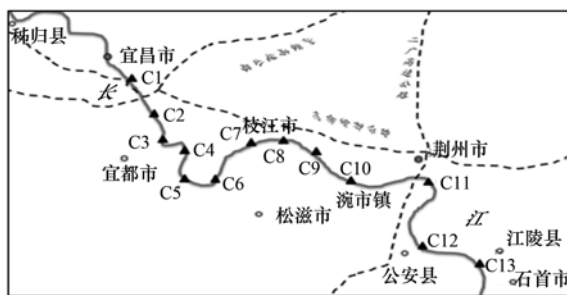


图 1 长江中游采样示意

Fig. 1 Map of the sampling sites in the middle reaches of the Yangtze River

表 1 长江中游表层沉积物采样点地理信息

Table 1 Geographical information of the 13 sampling sites from the middle reaches of the Yangtze River

样品编号	采样点	采样点经纬度	
		纬度/(°)	经度/(°)
C1	艾家镇	30.735 3	111.583 6
C2	红花套镇	30.770 0	111.605 8
C3	高坝洲镇	30.655 3	111.459 2
C4	白洋镇	30.479 4	111.539 7
C5	枝城镇	30.515 3	111.631 1
C6	顾家店镇	30.520 3	111.840 8
C7	董市镇	30.646 7	111.839 7
C8	百里洲镇	30.544 4	111.872 5
C9	七星台镇	30.563 1	111.981 7
C10	澧市镇	30.365 3	112.161 9
C11	埠河镇	30.503 9	112.339 4
C12	公安县	30.310 0	112.418 6
C13	江陵县	30.229 2	112.435 6

1.2 试剂与仪器

本实验所采用的多溴联苯醚(PBDEs)的标准溶液均购自 Wellington 公司(Wellington Laboratories, Gulph, Canada)。多溴联苯醚分析用标准溶液包括: ^{13}C 标记的净化标(PBDE/MBDE-MXFS-200 $\text{ng}\cdot\text{mL}^{-1}$), ^{13}C 标记的进样标(PBDE/MBDE-MXFR-200 $\text{ng}\cdot\text{mL}^{-1}$)。

二氯甲烷,正己烷,丙酮,甲醇均为农残级(Di kma, USA),层析柱为酸性硅胶柱、复合硅胶柱。

高分辨气相色谱-高分辨质谱联用仪(双 Trace GC 1300 气相色谱仪联合 DFS 高分辨质谱仪, HRGC/HRMS),旋转蒸发仪(Heidolph LR4000, Germany),氮吹浓缩仪(Organomation Associates, USA),加速溶剂萃取仪(Dionex, USA)。

1.3 样品前处理

将沉积物样品先冷冻干燥 48 h,研磨过筛,称取 10 g 沉积物样品与 5 g 硅藻土在干净的烧杯中混合均匀,将此混合物转移到装有两片过滤膜的 66 mL 萃取池中,向混合物表面加入 1 ng ^{13}C 标记的 PBDEs 净化内标,再用硅藻土将萃取池填满。此时 ASE 提取条件为温度 100℃,压力 1 500 psi,静态提取时间 8 min,循环提取次数 3 次,溶剂淋洗体积为 70% 萃取池体积,氮气吹扫时间为 120 s。

将提取液先用旋转蒸发仪旋蒸至大约 1 mL,然后利用凝胶渗透色谱柱(GPC, 60、100、60 mL 的正己烷:二氯甲烷 = 1:1 净化)^[7, 8]把沉积物中的含硫化合物除去(收集中间组份),再依次过酸性硅胶柱(1 g 活化硅胶 + 8 g 44% 酸性硅胶 + 1 g 活化硅胶 + 5 g 无水 Na_2SO_4)和复合硅胶柱(1 g 活化硅胶 + 3 g 碱性硅胶 + 1 g 活化硅胶 + 8 g 44% 酸性硅胶 + 1 g 活化硅胶 + 5 g 无水 Na_2SO_4),旋蒸至约 1 mL,再氮吹至 20 μL 。最后向混合物表面加入 1 ng ^{13}C 标记的 PBDEs 进样内标,封装待测。

1.4 样品的 HRGC/HRMS 分析

气相色谱(GC)条件:DB-5MS 色谱柱(30 m $\times$ 0.25 mm $\times$ 0.25 μm);不分流进样,进样量为 2 μL ;载气(氮气,纯度 $\geq 99.999\%$)流速为 2 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$;进样口温度:300℃;程序升温:初始温度 100℃,保持 1 min,以 15℃ $\cdot\text{min}^{-1}$ 的升温速率升至 210℃,然后以 5℃ $\cdot\text{min}^{-1}$ 的升温速率升至 270℃,再以 10℃ $\cdot\text{min}^{-1}$ 的升温速率升至 330℃,保持 10 min。

质谱(DFS)条件:电离方式为电子轰击源(EI),电子能量为 45 eV;测定的质谱调谐参数为:分辨率 $>10\,000$;EI 离子源温度:260℃;采集方式为电压选择离子检测模式(VSIR)。

1.5 TOC 的测定

取 0.1 g 沉积物样品于 20 mL 烧杯中,并加入过量的 1 mol·L⁻¹ HCl,将此酸化样品水浴中振荡数分钟并用去离子水洗涤至烧杯外壁 pH 呈中性,在烘箱 50℃ 条件下干燥过夜,待其重量达到平衡.称取 40~50 mg 样品,之后用元素分析仪(VarioEL III Elementar, Germany)测定总有机碳(TOC).

1.6 质量控制与质量保证(QA/QC)

样品在提取、净化、分析过程中严格按照美国国家环保署 EPA1614 的方法对样品进行质量控制.采样过程中应该防止样品间的交叉污染,在每个

采样点之间的采样设备需要进行清洁.在分析过程中,每分析 6 个样品,做一个平行样和方法空白的测定,每个样品包括空白样在用 HRGC/HRMS 检测前均加入 ¹³C 标记的回收标,基质组分加标回收率为 69.3%~117%,满足 EPA1614 的基本要求.

2 结果与讨论

2.1 沉积物中 PBDEs 的含量特征

PBDEs 在采集的 13 个样品中均有检出,所检出的 PBDEs 同类物共 9 种,分别为 BDE-28、47、66、85、99、100、153、154 和 183(见表 2). $\sum$ 9PBDEs

表 2 长江中游表层沉积物中 PBDEs 浓度水平/pg·g⁻¹

Table 2 Concentrations of PBDEs in sediments from the middle reaches of the Yangtze River/pg·g ⁻¹													
单体	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13
BDE-28	1.61	2.14	1.69	2.52	2.14	0.800	1.73	2.11	0.780	1.10	1.34	1.14	1.18
BDE-47	26.6	23.6	26.7	16.4	35.4	9.95	33.2	17.8	12.1	22.6	49.1	16.9	33.2
BDE-66	1.49	1.07	1.03	0.800	16.1	0.410	1.24	1.29	0.390	0.740	1.36	0.820	1.05
BDE-85	0.040	0.320	0.010	0.250	0.030	0.260	0.420	0.010	0.170	0.020	0.150	0.030	0.020
BDE-99	61.3	41.2	64.5	48.7	183	23.2	68.7	40.5	31.7	41.1	84.7	37.9	124
BDE-100	7.83	5.27	5.86	5.74	20.9	2.88	8.86	4.58	3.55	4.90	9.33	4.25	14.7
BDE-153	16.9	11.1	13.7	11.7	52.0	5.79	17.8	10.4	7.74	12.2	15.3	9.57	40.1
BDE-154	4.15	3.36	4.09	1.12	10.4	1.34	4.52	2.85	1.84	2.48	4.28	2.71	9.31
BDE-183	2.94	2.02	2.22	3.51	5.75	1.49	1.71	6.73	0.960	6.60	0.770	10.2	2.34
$\sum$ 9PBDEs	123	90.0	120	90.7	326	46.1	138	86.3	59.2	91.7	166	83.5	226
TOC(100%)	3.36	2.96	3.09	2.98	2.52	2.76	2.26	1.96	0.880	1.88	2.93	1.80	2.94

的含量范围在 46.1~326 pg·g⁻¹之间,平均值为 127 pg·g⁻¹. C5 点(宜都市枝城镇)总含量最高,为 326 pg·g⁻¹;含量最低的是 C6 点(枝江市顾家店镇),为 46.1 pg·g⁻¹. 由于 C5 点上游有燃煤厂及焚烧厂,有可能产生一定量的污染排放,因此该采样点中 PBDEs 浓度虽略高于其他点位,但总体还处在较低水平.从表 2 同时可以看出各研究区域的含量水平存在一定差异,表现为:C5>C13>C11>C7>C1>C3>C10>C4>C2>C8>C12>C9>C6. 实验结果表明,C5 点含量除了与环境因素有关外,还可能与河流较宽有关,并且水流缓慢,沉积的淤泥较多, PBDEs 得以在此处蓄积.而 C6 点的含量较低,可能是由于此区域靠近水流速较快的三峡东大门,不利于沉积物对 PBDEs 的吸附.

从表 2 中可以看出,长江中游沉积物中有些地区的 PBDEs 含量较高,但与国内外其它地区河流和海岸沉积物中 PBDEs 含量的比较表明(见表 3),仍远低于英国、荷兰、美国、加拿大、西班牙等国家的部分河流的含量:如美国哈德利湖沉积物中 PBDEs 的含量是长江中游宜都市枝城镇流域含量的 125 倍,由此可见,长江中游表层沉积物中的 PBDEs 污染远没有其它地区那么严重,处于较低水平.

表 3 国内外河流和海岸的表层沉积物中 PBDEs 浓度水平/ng·g⁻¹

Table 3 Concentrations of PBDEs in surface sediments among the rivers and coasts in China and other countries/ng·g⁻¹

地点	N ¹⁾	浓度/ng·g ⁻¹	文献
海河流域,中国	— ²⁾	0.200~0.900	[9]
大沽排污河,中国	—	4.60~10.3	[9]
环渤海,中国	13	0.070~5.24	[10]
珠江,中国	9	0.780~49.3	[11]
东江,中国	9	2.21~94.7	[11]
西江,中国	9	0.130~0.590	[11]
澳门,中国	—	0.560~41.3	[11]
珠江口,中国	10	0.330~21.8	[11]
南海,中国	—	0.040~4.48	[11]
香港,中国	14	1.70~53.6	[12]
尼亚加拉河,美国	9	0.72~48	[13]
维斯坎河,瑞典	—	8~50	[14]
耐尤河,日本	—	N. D. ³⁾ ~57.2	[15]
特茹-杜罗-蒙德古河,葡萄牙	—	0.400~18.0	[16]
埃布罗河,西班牙	13	0.010~10.6	[17]
斯海尔德河,荷兰	9	14.0~22.0	[18]
钦克河,西班牙	—	2.00~42.0	[19]
苏必利尔湖,美国	9	0.490~3.14	[20]
新奥勒松湖,挪威	14	0.060~0.600	[21]
休伦湖,美国	17	1.02~1.87	[22]
埃里森湖,挪威	10	N. D.~0.730	[23]
密歇根湖,美国	7	N. D.~2.60	[24]
安大略湖,加拿大	20	N. D.~2.80	[25]
辽河流域,中国	25	0.910~2.98	[26]
长江中游,中国	9	0.046~0.326	本研究

1)“N”表示检测到的目标化合物数目;2)“—”表示文中无相关数据;3)“N. D.”表示未检出

2.2 沉积物中 PBDEs 的分布特征

为了研究各区域 PBDEs 化合物的污染特征,利用 SPSS 软件对区域内采样位点中数据进行了主成分分析 (PCA)^[27] (如图 2)。图 2(a) 表示 9 种 PBDEs 单体的数据分析结果,PC1 和 PC2 分别占 57.7% 和 17.7% 的总变量,其累计贡献方差为 75.4%。PC1 与低溴代联苯醚 BDE99、100、153 和 154 正相关,PC2 可以由 BDE85 所表征。不同的环境介质中, PBDEs 的得分相差较大,说明各单体在不同采样位点中分布有明显差别。图 2(b) 表示 13

个采样位点, 6 个工业 BDEs 混合物^[28] [2 种工业 Penta-BDEs (DE-71 & Bromkal 70-5DE), 2 种工业 Octa-BDEs (DE-79 & Bromkal 79-8DE) 和 2 种工业 Deca-BDEs (Saytex 102E & Bromkal 82-0DE)] 以及 2 个潜在污染源^[29] [城市生活垃圾焚烧厂 (MSWI) 和燃煤电厂 (TPP)] 的数据分析结果, PC1 的方差贡献是 77.1%, 而 PC2 的方差贡献仅占 12.5%, 从中可说明, 大部分沉积物中 PBDEs 来自工业 Penta-BDEs (DE-71 & Bromkal 70-5DE) 的使用, 及长江中游城市生活垃圾焚烧厂 (MSWI) 焚烧产生的 PBDEs。

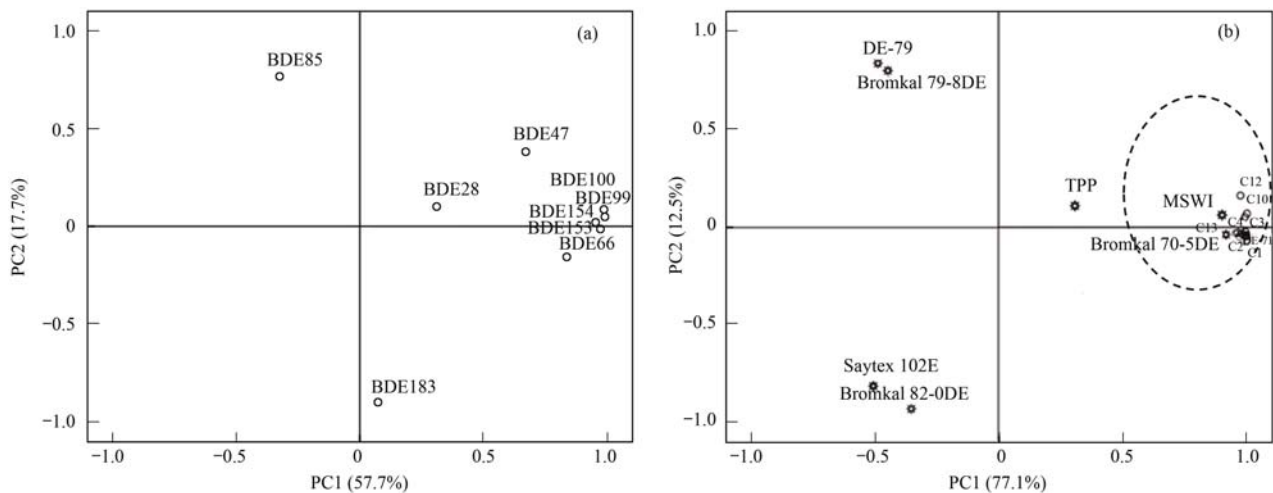


图 2 长江中游表层沉积物中 PBDEs 的主成分分析结果

Fig. 2 Principal component analysis of PBDEs from the surface sediments of the Yangtze River

沉积物中低溴代联苯醚含量较高, 这可能是因为低溴的 BDE 单体有较高的挥发性, 更易从产品和土壤等进入大气再沉降 (或经过地表径流直接) 进入水体, 也可能是在环境迁移过程中高溴代同系物脱溴生成。如图 3 所示, 在长江中游地区, BDE-47 和 BDE-99 是样品中最主要的 BDE 单体, 它们在所有表层样品中均有检出, 平均含量 (质量分数) 分别 19.6% 和 51.6%; 其次分别是 BDE-153 (13.6%), BDE-100 (6.10%), BDE-154 (3.20%), BDE-183 (2.90%), BDE-66 (1.70%) 和 BDE-28 (1.20%)。

2.3 沉积物中 PBDEs 浓度与 TOC 的关系

沉积物中有机碳含量对其中 PBDEs 的含量可能有着较大影响, 本研究依长江沉积物中 TOC 含量 (见表 2) 线性拟合 (见图 4), 当土壤中 TOC 的含量增加时, $\sum 9\text{BDEs}$ 的浓度也随之增加, 但不是很明显, 对 $\sum 9\text{BDEs}$ 和 TOC 线性作图表明, 彼此并不呈明显的正相关, 这与 Nam 等^[30] 报道的欧洲背景沉积物中 PBDEs 含量与 TOC 具有良好的相关性有所差异, 可

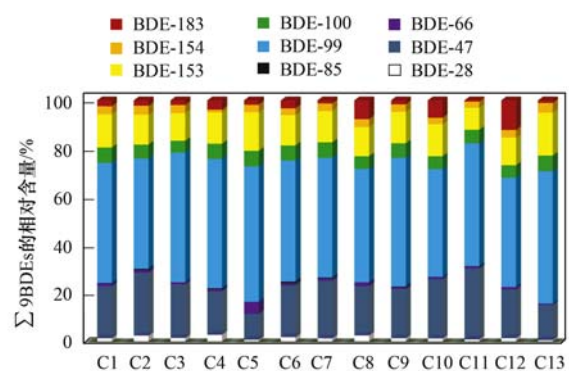


图 3 长江中游表层沉积物中 PBDEs 分布

Fig. 3 Distribution of PBDEs concentration in surface sediment from the middle reaches of the Yangtze River

能是因为本研究流域内大部分沉积物都是以低溴代联苯醚 (二溴代 ~ 七溴代联苯醚) 为主, 且含量比较高, 由于它们的辛醇-水分配系数 (octanol-water coefficients, K_{ow}) 并不高, 在环境中对土壤或底泥具有较弱的亲和性, 故二者之间无明显的正相关性, 对此也有相关报道指出低溴代联苯醚 (二溴代 ~ 八溴代联

苯醚)与 TOC 之间没有明显的相关性^[31].

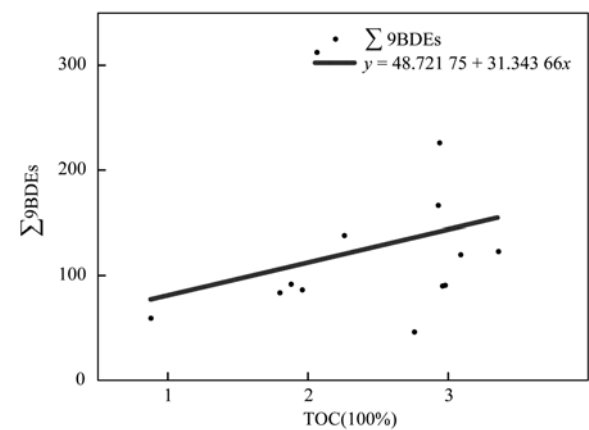


图4 PBDEs 总浓度与 TOC 的线性关系
Fig. 4 Linear relationship between the total concentration of PBDEs and TOC

2.4 沉积物 PBDEs 生态风险评价

由于 PBDEs 在水生动物体内的传递及富集作用,并在一定程度上直接威胁水生生态系统甚至人类的健康,因此对本研究区域内河流表层沉积物中 PBDEs 可能对生物造成的生态风险进行了评估. 目前广泛使用的 PBDEs 产品主要有工业的 Penta-BDEs、Octa-BDEs 及 Deca-BDEs (主要的同类物成

分组成^[32]如表 4). 本研究将三至五溴联苯醚归为工业 Penta-BDEs,六至九溴联苯醚归为工业 Octa-BDEs,针对这两种工业 PBDEs 的毒性采用商值法^[33]进行生态风险评估. 该方法是采用研究区的暴露水平(即测定沉积物浓度 measured environmental concentration, MEC)与来自工业的 Penta-BDEs、Octa-BDEs 产品针对淡水或海水沉积相环境中潜居生物(成年红虫)的多物种无显著影响浓度(multi-species no observable effect concentration, MSNOEC)的比值求得生态风险商值^[34]. Penta-BDEs、Octa-BDEs 产品的 MSNOEC^[35]分别为 310 ng·g⁻¹、1 340 ng·g⁻¹,运用公式:

$$Q = \frac{MEC}{MSNOEC}$$

式中,Q 为生态风险商值. 由此计算得出的长江中游表层沉积物中 PBDEs 的生态风险商值如图 5 所示. 根据商值法原理,Q>1 时,存在生态风险,且数值越大,风险水平越高;当 Q≤1 时,无生态风险. 从中可以看出,在长江表层沉积物中,Penta-BDEs、Octa-BDEs 的风险商值均在 0.010 0 以下,远低于 1,故存在的生态风险较低.

表 4 主要工业品 PBDEs 的同系物成分组成/%
Table 4 General compositions of main commercial PBDEs/%

工业品名	溴原子数						
	4	5	6	7	8	9	10
Penta-BDEs	24~38	50~60	4~8	—	—	—	—
Octa-BDEs	—	—	10~12	44	31~35	10~11	<1
Deca-BDEs	—	—	—	—	—	<3	97~98

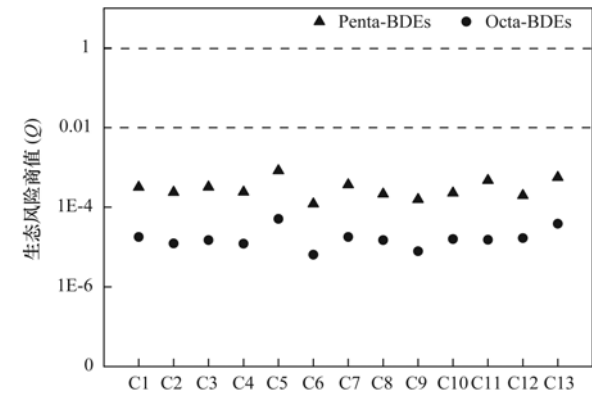


图5 长江中游表层沉积物中 PBDEs 的生态风险评价结果
Fig. 5 Evaluation results of ecological risk of PBDEs in the surface sediments of the Yangtze River

3 结论

- (1)对长江中游各采样点沉积物中 PBDEs 的研究结果表明,不同区域 PBDEs 的含量不同,总体来说长江中游区域 PBDEs 处于较低的含量水平.
- (2)不同区域中的分布大致相同,其主要是以 BDE-47,BDE-99 为主.
- (3)通过测定总有机碳,表明长江中游表层沉积物 PBDEs 的含量与 TOC(100%)含量无明显的正相关关系,说明沉积物中 PBDEs 浓度可能还要受到其它因素的影响.
- (4)对沉积物 PBDEs 的生态风险评价发现,沉积物中的 PBDEs 可能对该地区造成的生态危害较小.

参考文献:

[1] 刘汉霞,张庆华,江桂斌,等. 多溴联苯醚及其环境问题

- [J]. 化学进展, 2005, **17**(3): 554-562.
- [2] Kim K S, Lee S C, Kim K H, *et al.* Survey on organochlorine pesticides, PCDD/Fs, dioxin-like PCBs and HCB in sediments from the Han river, Korea[J]. *Chemosphere*, 2009, **75**(5): 580-587.
- [3] Liu X B, Li G F, Liu Z G, *et al.* Water pollution characteristics and assessment of lower reaches in Haihe River Basin[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2010, **2**: 199-206.
- [4] 燕乃玲, 赵秀华. 长江源区生态系统完整性测量与评价[J]. *生态学杂志*, 2007, **26**(5): 723-727.
- [5] 徐慧娟, 黎育红, 孙燕. 长江宜昌水文站流量、含沙量和悬移质粒度关系[J]. *长江流域资源与环境*, 2006, **15**(S1): 110-115.
- [6] 虞孝感, 张维阳. 沿江开发成就卓著 环境保护任重道远——热烈祝贺《长江流域资源与环境》创刊二十周年[J]. *长江流域资源与环境*, 2012, **21**(7): 781-785.
- [7] 向彩红, 罗孝俊, 余梅, 等. 珠江河口水生生物中多溴联苯醚的分布[J]. *环境科学*, 2006, **27**(9): 1732-1737.
- [8] 王旭亮, 何欢, 李文超, 等. 加速溶剂萃取/凝胶渗透色谱净化/气相色谱-负化学离子源质谱测定生物样品中的四溴联苯醚[J]. *环境化学*, 2011, **30**(6): 1186-1191.
- [9] 刘汉霞. 多溴联苯醚的分析方法及其在我国典型区域的分布研究[D]. 北京: 中国科学院生态环境研究中心, 2006. 57-65.
- [10] 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**(Z2): 24-27.
- [11] 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.
- [12] Liu Y, Zheng G J, Yu H X, *et al.* Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in sediments and mussel tissues from Hong Kong marine waters[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2005, **50**(11): 1173-1184.
- [13] Samara F, Tsai C W, Aga D S. Determination of potential sources of PCBs and PBDEs in sediments of the Niagara River[J]. *Environmental Pollution*, 2006, **139**(3): 489-497.
- [14] 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.
- [15] Watanabe I, Kashimoto T, Tatsukawa R. Polybrominated biphenyl ethers in marine fish, shellfish and river and marine sediments in Japan[J]. *Chemosphere*, 1987, **16**(10-12): 2389-2396.
- [16] Lacorte S, Guillaumon M, Martínez E, *et al.* Occurrence and specific congener profile of 40 polybrominated diphenyl ethers in river and coastal sediments from Portugal[J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, **37**(5): 892-898.
- [17] Lacorte S, Raldúa D, Martínez E, *et al.* Pilot survey of a broad range of priority pollutants in sediment and fish from the Ebro river basin (NE Spain)[J]. *Environmental Pollution*, 2006, **140**(3): 471-482.
- [18] Verslycke T A, Dick Vethaak A, Arijs K, *et al.* Flame retardants, surfactants and organotins in sediment and mysid shrimp of the Scheldt estuary (The Netherlands)[J]. *Environmental Pollution*, 2005, **136**(1): 19-31.
- [19] 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.
- [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] Jiao L P, Zheng G J, Minh T B, *et al.* Persistent toxic substances in remote lake and coastal sediments from Svalbard, Norwegian Arctic: Levels, sources and fluxes[J]. *Environmental Pollution*, 2009, **157**(4): 1342-1351.
- [22] Song W L, Li A, Ford J C, *et al.* Polybrominated diphenyl ethers in the sediments of the Great Lakes. 2. Lakes Michigan and Huron[J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(10): 3474-3479.
- [23] Evensen A, Christensen G N, Carroll J, *et al.* Historical trends in persistent organic pollutants and metals recorded in sediment from Lake Ellasjøen, Bjørnøya, Norwegian Arctic[J]. *Environmental Pollution*, 2007, **146**(1): 196-205.
- [24] Zhu L Y, Hites R A. Brominated flame retardants in sediment cores from Lakes Michigan and Erie[J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(10): 3488-3494.
- [25] Qiu X H, Marvin C H, Hites R A. Dechlorane plus and other flame retardants in a sediment core from Lake Ontario[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**(17): 6014-6019.
- [26] 聂海峰, 成杭新, 赵传冬, 等. 中国东北主要河流沉积物中多溴二苯醚的含量状况及生态风险分析[J]. *环境科学*, 2013, **34**(10): 3825-3831.
- [27] 刘广明, 吕真真, 杨劲松, 等. 基于主成分分析及 GIS 的环渤海区域土壤质量评价[J]. *排灌机械工程学报*, 2015, **33**(1): 67-72.
- [28] La Guardia M J, Hale R C, Harvey E. Detailed polybrominated diphenyl ether (PBDE) congener composition of the widely used penta-, octa-, and deca-PBDE technical flame-retardant mixtures[J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **40**(20): 6247-6254.
- [29] Tu L K, Wu Y L, Wang L C, *et al.* Distribution of polybrominated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans and polybrominated diphenyl ethers in a coal-fired power plant and two municipal solid waste incinerators[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2011, **11**(5): 596-615.
- [30] Nam J J, Gustafsson O, Kurt-Karakus P, *et al.* Relationships between organic matter, black carbon and persistent organic pollutants in European background soils: Implications for sources and environmental fate[J]. *Environmental Pollution*, 2008, **156**

- (3): 809-817.
- [31] Wang X T, Chen L, Wang X K, et al. Occurrence, profiles, and ecological risks of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in river sediments of Shanghai, China[J]. *Chemosphere*, 2015, **133**: 22-30.
- [32] 唐量. 多溴联苯醚及十溴二苯乙烷在上海市典型环境介质中的分布及生态风险评估[D]. 上海: 上海大学, 2012. 21-22.
- [33] 曹洪法, 沈英娃. 生态风险评价研究概述[J]. *环境化学*, 1991, **10**(3): 26-30.
- [34] 张永春, 林玉锁, 孙勤芳, 等. 有害废物生态风险评价[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 172-195.
- [35] 周玳, 张文华, 王连生. 毒物风险评价外推方法[J]. *环境科学进展*, 1995, **3**(2): 42-48.

CONTENTS

Characterization of Water-soluble Ions in PM _{2.5} of Beijing During 2014 APEC	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (4325)
PM _{2.5} Background Concentration at Different Directions in Beijing in 2013	LI Yun-ting, CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (4331)
Comparative Analysis on the Improvement of Air Quality in Beijing During APEC	LI Wen-tao, GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, <i>et al.</i> (4340)
Weekend Effect in Distributions of Particulate Matters, Main Gas Pollutants and Aerosol Size in Spring of Jiaxing	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, LÜ Sheng, <i>et al.</i> (4348)
Influence of Burning Fireworks on Air Quality During the Spring Festival in the Pearl River Delta	ZHAO Wei, FAN Shao-jia, XIE Wen-zhang, <i>et al.</i> (4358)
Characteristic of Mercury Emissions and Mass Balance of the Typical Iron and Steel Industry	ZHANG Ya-hui, ZHANG Cheng, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4366)
Magnetic Response of Dust-loaded Leaves in Parks of Shanghai to Atmospheric Heavy Metal Pollution	LIU Fei, CHU Hui-min, ZHENG Xiang-min (4374)
Characteristics and Resources of Fly Ash Particles in the Snowpack of Jinfo Mountain, Chongqing	YU Zheng-liang, YANG Ping-heng, JING Wei-li, <i>et al.</i> (4381)
Removal of Mixed Waste Gases by a Biotrickling Filter Packed with a Novel Combined Packing Material	MEI Yu, CHENG Zhuo-wei, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (4389)
Low-Concentration CO ₂ Adsorption on Polyaniline/Zelite Y Composites	LIU Feng-ling, LU Xia, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (4396)
Chemical Characteristics of Atmospheric Wet Deposition in Winter and Its Forestry Canopy Interception Mechanism in Red Soil Hilly Area	HAO Zhuo, GAO Yang, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (4403)
Dynamic Characteristics of Base Cations During Wet Deposition in Evergreen Broad-leaf Forest Ecosystem	AN Si-wei, SUN Tao, MA Ming, <i>et al.</i> (4414)
Estimation of Diffuse Attenuation Coefficient of Photosynthetically Active Radiation in Xin'anjiang Reservoir Based on Landsat 8 Data	ZHANG Yi-bo, ZHANG Yun-lin, ZHA Yong, <i>et al.</i> (4420)
Spatial Distribution of Stable Isotopes in Particle Organic Matters and Sediments from Baishi Reservoirs	GUO Kai, ZHAO Wen, WANG Shan, <i>et al.</i> (4430)
Response of Phytoplankton Functional Groups to Eutrophication in Summer at Xiaoguan Reservoir	LI Lei, LI Qiu-hua, JIAO Shu-lin, <i>et al.</i> (4436)
Environmental Effect of Substrate Amelioration on Lake; Effects on <i>Phragmites communis</i> Growth and Photosynthetic Fluorescence Characteristics	YU Ju-hua, ZHONG Ji-cheng, FAN Cheng-xin, <i>et al.</i> (4444)
Variation Characteristics of Cave Water Hydrogeochemistry in Naduo Cave of Guizhou and Its Implications for Environment Research	SHEN Wei, WANG Jian-li, WANG Jia-lu, <i>et al.</i> (4455)
Response Mechanism of Trace Metals in the Bishuiyan Subterranean River to the Rainfall and Their Source Analysis	ZOU Yan-e, JIANG Ping-ping, ZHANG Qiang, <i>et al.</i> (4464)
Residue Concentration and Distribution Characteristics of Perfluorinated Compounds in Surface Water from Qiantang River in Hangzhou Section	ZHANG Ming, TANG Fang-liang, YU Ya-yun, <i>et al.</i> (4471)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polybrominated Diphenyl Ethers in the Surface Sediments from Middle Reaches of the Yangtze River	TIAN Qi-chang, TANG Hong-bo, XIA Dan, <i>et al.</i> (4479)
Pollution Characteristics and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in Urban Surface Water Sediments from Yongkang	QI Peng, YU Shu-quan, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (4486)
Effects of Citric Acid on Activation and Methylation of Mercury in the Soils of Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	QIN Cai-qing, LIANG Li, YOU Rui, <i>et al.</i> (4494)
Impacts of Microorganisms on Degradation and Release Characteristics of Organic Phosphorus in Lake Sediments During Freezing Season	ZUO Le, LÜ Chang-wei, HE Jiang, <i>et al.</i> (4501)
Sedimentary Phosphorus Forms Under Disturbances and Algae in Taihu Lake	CHEN Jun, LI Da-peng, ZHU Pei-ying, <i>et al.</i> (4509)
Interception Effect of Vegetated Drainage Ditch on Nitrogen and Phosphorus from Drainage Ditches	ZHANG Shu-nan, XIAO Run-lin, LIU Feng, <i>et al.</i> (4516)
Removal of Phosphate by Calcite in Open-System	LI Zhen-xuan, DIAO Jia-yong, HUANG Li-dong, <i>et al.</i> (4523)
Adsorption of Cu on Core-shell Structured Magnetic Particles: Relationship Between Adsorption Performance and Surface Properties	LI Qiu-mei, CHEN Jing, LI Hai-ning, <i>et al.</i> (4531)
Shortcut Nitrosation-Denitrifying Phosphorus Removal Based on High-quality Carbon Source in Combined Process of CAMBR	CHENG Ji-hui, WU Peng, CHENG Chao-yang, <i>et al.</i> (4539)
Simultaneous Biotransformation of Ammonium and Nitrate via Zero-Valent Iron on Anaerobic Conditions	ZHOU Jian, HUANG Yong, YUAN Yi, <i>et al.</i> (4546)
Health Risk Assessment of Drinking Water Quality in Tianjin Based on GIS	FU Gang, ZENG Qiang, ZHAO Liang, <i>et al.</i> (4553)
Endotoxin Contamination and Correlation with Other Water Quality Parameters of Groundwater from Self-Contained Wells in Beijing	ZHANG Can, LIU Wen-jun, AO Lu, <i>et al.</i> (4561)
Internal Exposure Levels of PAHs of Primary School Students in Guangzhou	SU Hui, ZHAO Bo, ZHANG Su-kun, <i>et al.</i> (4567)
Construction of Three-Dimensional Isobologram for Ternary Pollutant Mixtures	LIU Xue, LIU Shu-shen, LIU Hai-ling (4574)
Aging Law of PAHs in Contaminated Soil and Their Enrichment in Earthworms Characterized by Chemical Extraction Techniques	ZHANG Ya-nan, YANG Xing-lun, BIAN Yong-rong, <i>et al.</i> (4582)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Larch Plantation of North China at Different Sampling Scales	YAN Jun-xia, LIANG Ya-nan, LI Hong-jian, <i>et al.</i> (4591)
Mapping Critical Loads of Heavy Metals for Soil Based on Different Environmental Effects	SHI Ya-xing, WU Shao-hua, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i> (4600)
Stabilization Treatment of Pb and Zn in Contaminated Soils and Mechanism Studies	XIE Wei-qiang, LI Xiao-ming, CHEN Can, <i>et al.</i> (4609)
Effects of ZnO Nanoparticles, ZnSO ₄ and Arbuscular Mycorrhizal Fungus on the Growth of Maize	LI Shuai, LIU Xue-qin, WANG Fa-yuan, <i>et al.</i> (4615)
Occurrence Characteristics of Pyrene and Arsenate and Their Interaction in <i>Pteris vittata</i> L.	ZHANG Yu-xiu, MA Xu, LIAO Xiao-yong, <i>et al.</i> (4623)
Effect of Nano Zeolite on Chemical Fractions of Cd in Soil and Its Uptake by Cabbage	XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, XIE Wen-wen, <i>et al.</i> (4630)
Effect of Ryegrass and Arbuscular Mycorrhizal on Cd Absorption by Varieties of Tomatoes and Cadmium Forms in Soil	CHEN Yong-qin, JIANG Ling, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4642)
Degradation of Steroidal Hormones by Salt-tolerant <i>Altererythrobacter</i> Strain MH-B5; Degradation Characteristics, Metabolites and Its Immobilization	MA Cong, QIN Dan, SUN Qian, <i>et al.</i> (4651)
Distribution and Diversity of Ammonium-oxidizing Archaea and Ammonium-oxidizing Bacteria in Surface Sediments of Oujiang River	LI Hu, HUANG Fu-yi, SU Jian-qiang, <i>et al.</i> (4659)
Effects of Different Altitudes on Soil Microbial PLFA and Enzyme Activity in Two Kinds of Forests	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, MAO Qiao-zhi, <i>et al.</i> (4667)
Effects of Cultivation Soil Properties on the Transport of Genetically Engineered Microorganism in Huabei Plain	ZHANG Jing, LIU Ping, LIU Chun, <i>et al.</i> (4676)
Assessment of Emission and Co-Reduction of PCDD/Fs and PCNs in the Secondary Copper Production Sector	TIAN Ya-jing, JIANG Chen, WU Guang-long, <i>et al.</i> (4682)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年12月15日 第36卷 第12期(卷终)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 12 Dec. 15, 2015

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行