

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第4期

Vol.39 No.4

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

京津冀地区钢铁行业污染物排放清单及对 PM _{2.5} 影响	段文娇, 郎建全, 程水源, 贾佳, 王晓琦 (1445)
京津冀内陆平原区 PM _{2.5} 浓度时空变化定量模拟	郝静, 孙成, 郭兴宇, 王卫, 刘方田, 党海燕 (1455)
成都市冬季相对湿度对颗粒物浓度和大气能见度的影响	刘凡, 谭钦文, 江霞, 蒋文举, 宋丹林 (1466)
华山地区 PM _{2.5} 中无机离子垂直分布特征	曹聪, 王格慧, 吴灿, 李建军, 刘浪, 李瑾, 余兴 (1473)
烟花爆竹集中燃放的大气细颗粒物 (PM _{2.5}) 成分图谱	谢瑞加, 侯红霞, 陈永山 (1484)
长三角地区中小燃煤锅炉 PM _{2.5} 成分谱特征	徐健, 黄成, 李莉, 陈勇航, 楼晟荣, 乔利平, 王鸿宇 (1493)
民用燃煤排放分级颗粒物中重金属排放因子	严沁, 孔少飞, 刘海彪, 王伟, 吴剑, 郑明明, 郑淑睿, 杨国威, 吴方琪 (1502)
冬、春季青岛大气气溶胶中乙二酸的分布特征及影响因素	张帅, 石金辉, 姚小红, 高会旺 (1512)
青岛大气降水中微量元素的浓度及溶解度	李茜, 石金辉, 李鹏志, 姚小红, 高会旺 (1520)
辽东湾大气中多环芳烃的含量组成及气粒分配	张玉凤, 宋永刚, 田金, 赵海勃, 杨爽, 吴金浩 (1527)
典型地区大气新型卤代阻燃剂污染特征、来源分析及人体暴露	李琦路, 杨孔, 李军, 张干 (1537)
苏州工业园区室内外颗粒物中多溴联苯醚污染特征及人体暴露水平	王俊霞, 顾海东, 张占恩, 钱飞跃 (1544)
上海市大气污染对感冒疾病相对危险度的影响	杨丝絮, 马玉霞, 周建丁, 周骥 (1552)
城镇化河流溶解性有机质的荧光特性与水质相关性: 以宁波市北仑区芦江为例	曹昌丽, 梁梦琦, 何桂英, 纵亚男, 唐剑锋 (1560)
艾比湖区域景观格局与河流水质关系探讨	曹灿, 张飞, 阿依尼格·亚力坤, 朱世丹, 郭苗, 阿丽米热·塔力甫江, Kung Hsiangte (1568)
三峡澎溪河水华期间水体 CH ₄ 浓度及其通量变化特征初探	秦宇, 张渝阳, 李哲, 马健荣 (1578)
漓江段地表水体旱季硝酸盐动态变化特征及其来源	苗迎, 章程, 肖琼, 赵海娟, 李成习 (1589)
柳江流域饮用水源地重金属污染与健康风险评价	张清华, 韦永著, 曹建华, 于爽 (1598)
黄柏河流域梯级水库沉积物磷形态特征及磷释放通量分析	刘佳, 雷丹, 李琼, 王亮, 张平, 肖尚斌 (1608)
白洋淀典型持久性有机污染物污染特征与风险评估	高秋生, 焦立新, 杨柳, 田自强, 杨苏文, 安月霞, 贾海斌, 崔志丹 (1616)
典型有机氯农药在珠三角地区多介质环境中的归趋模拟	高梓闻, 徐月, 亦如瀚 (1628)
河道水旁路处理中试工艺中 PPCPs 的去除效果及机制	李力, 朱楦, 白瑶, 赵健, 曹之淇, 郭泓利, 李凌云, 左剑思 (1637)
蔡普生在氯消毒过程中的去除、转化与风险评价	樊鑫鑫, 杜尔登, 李佳琦, 赵丽丽, 王聿琳, 彭明国 (1645)
真空紫外/氯处理饮用水典型致嗅物质	孙昕, 张焱, 史路肖, 陈笑涵, 唐晓 (1654)
热活化过硫酸盐降解三氯生	蒋梦迪, 张清越, 季跃飞, 陆鸢鹤 (1661)
水体模拟颗粒物对四环素的吸附特性及基本规律	徐龙凤, 魏群山, 吕强, 唐立朋, 刘亚男, 柳建设 (1668)
海水优化 ANAMMOX 包埋固定化及其处理含海水污水的脱氮性能	单晓静, 于德爽, 李津, 陈光辉, 冯莉, 吕廷廷, 邵青 (1677)
外源甜菜碱投加增强高盐废水厌氧氨氧化脱氮性能	于德爽, 吴国栋, 李津, 周同, 王晓静 (1688)
硝化污泥富集及其强化高氨氮冲击的中试研究	盛晓琳, 崔灿灿, 王家德, 刘锐, 徐峰, 陈吕军 (1697)
分段进水对改良 A ² /O-BAF 双污泥系统反硝化除磷脱氮的影响	南彦斌, 彭永臻, 曾立云, 赵智超, 刘宏, 李慧, 陈永志 (1704)
不同温度下应用比值控制实现连续流好氧颗粒污泥短程硝化	梁东博, 卞伟, 阚睿哲, 王文啸, 赵青, 孙艺齐, 李军 (1713)
智能化曝气控制 A/O 工艺活性污泥特性演化对内源反硝化脱氮的作用机制	徐旻昶, 胡湛波, 张穗生, 李昊航 (1720)
温度对一体式厌氧流化床膜生物反应器运行效能及微生物群落结构的影响	李玥, 胡奇, 高文 (1731)
污泥臭原位置量工艺中抗生素的去除	汪鲁, 黄伟伟, 李彦刚, 强志民 (1739)
零价铁对污泥厌氧消化过程中四环素抗性基因水平转移的作用影响	杨帆, 徐雯丽, 钱雅洁, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (1748)
环境因子对全自养脱氮颗粒污泥功能菌协同效应的影响	陈希, 钱飞跃, 王建芳, 高军军, 沈耀良, 贾珣 (1756)
后置固相反硝化滤池工艺沿程微生物特性	张千, 吉芳英, 徐璇 (1763)
复合菌株 YH01 + YH02 强化 SBR 好氧反硝化脱氮及菌群结构分析	陈海升, 曹刚, 张迪, 黄郑郑, 莫测辉 (1773)
氮磷失衡下膨胀污泥性能及膨胀菌群落结构变化	贺雪濛, 丁丽丽, 张璐璐, 顾卓江, 任洪强 (1782)
1 株铜绿假单胞菌对砷的降解特性及代谢途径	李想, 张雪英, 周俊, 宋军, 王建刚, 雍晓雨, 贾红华 (1794)
铜尾矿库坝面土壤微生物群落动态的驱动因子	李鑫, 景炬辉, 刘晋仙, 柴宝峰 (1804)
垦殖对桂林会仙喀斯特湿地土壤养分与微生物活性的影响	黄科朝, 沈育伊, 徐广平, 黄玉清, 张德楠, 孙英杰, 李艳琼, 何文, 周龙武 (1813)
黄土丘陵区退耕还林还草对土壤细菌群落结构的影响	陈孟立, 曾全超, 黄懿梅, 倪银霞 (1824)
河岸带表层土壤的铁氨氧化 (Feammox) 脱氮机制的探究	丁帮琛, 李正魁, 朱鸿杰, 陈湜, 覃云斌, 杨建华, 胡优优 (1833)
藏猪扰动作用下的高寒草甸土壤退化特征及微生物群落结构变化	展鹏飞, 肖德荣, 闫鹏飞, 刘振亚, 马金成, 陈志明, 格茸, 田伟, 王行 (1840)
深圳湾典型红树植物根表铁膜及其重金属富集特征	沈小雪, 李瑞利, 柴民伟, 邱国玉 (1851)
香港周边海域野生鱼体内 DDTs 和 PCBs 的含量分布和食用风险评估	苏杨, 鲍恋君, 曾永平 (1861)
偏远高山湿地土壤中 PAHs 污染特征: 以神农架大九湖为例	胡天鹏, 邢新丽, 柯艳萍, 毛瑶, 黎荧, 郑煌, 喻月, 张家泉, 祁士华 (1872)
西南地区典型森林水库土壤和沉积物汞的迁移转化特征	孙涛, 马明, 王永敏, 安思危, 王定勇 (1880)
广西西江流域土壤镉含量特征及风险评估	宋波, 杨子杰, 张云霞, 王佛鹏, 周浪, 李黎, 钟雪梅 (1888)
长期施肥对旱地红壤及作物中砷累积的影响	张蓉, 余光辉, 李亚青 (1901)
三元土壤调理剂对田间水稻镉累积转运的影响	辜娇峰, 周航, 贾润语, 王倩倩, 李虹呈, 张平, 彭佩钦, 廖柏寒 (1910)
稻田土壤性质与水稻镉含量的定量关系	王梦梦, 何梦媛, 苏德纯 (1918)
钙基膨润土辅助对堆肥及土壤 Cu、Zn 形态转化和白菜吸收的影响	赵军超, 王权, 任秀娜, 李荣华, Mukesh Kumar Awasthi, Altaf Hussain Lahori, 张增强 (1926)
外源碳和氮输入对降水变化下土壤呼吸的短期影响	贺云龙, 齐玉春, 彭琴, 董云社, 郭树芳, 闫钟清, 李兆林, 王丽芹 (1934)
模拟降水量减少对大豆-冬小麦轮作农田土壤呼吸的影响	王朝辉, 陈书涛, 孙鹭, 胡正华 (1943)
紫色土丘陵区农田源头沟渠一氧化氮排放的季节差异及影响因素	田琳琳, 任光前, 朱波 (1952)
季节非对称升温对喀斯特土壤 CO ₂ 释放的影响	唐国勇, 张春华, 刘方炎, 李昆, 马艳 (1962)
《环境科学》征订启事 (1472) 《环境科学》征稿简则 (1511) 信息 (1755, 1839, 1925)	

白洋淀典型持久性有机污染物污染特征与风险评估

高秋生^{1,2,3}, 焦立新^{2,3*}, 杨柳¹, 田自强^{2,3,4}, 杨苏文^{2,3}, 安月霞^{2,3}, 贾海斌^{2,3}, 崔志丹^{2,3}

(1. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083; 2. 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012; 3. 中国环境科学研究院国家环境保护湖泊污染控制重点实验室, 湖泊生态环境创新基地, 北京 100012; 4. 中国环境科学研究院流域水生态技术研究所, 北京 100012)

摘要: 对白洋淀表层水体和表层沉积物中多环芳烃(PAHs)、有机氯农药(OCPs)和多溴联苯醚(PBDEs)三类典型持久性有机污染物(POPs)的污染特征进行综合调查和分析。结果表明:①白洋淀水体中 PAHs、OCPs 和 PBDEs 浓度范围分别是 71.32 ~ 228.27、2.62 ~ 6.13 和 0 ~ 6.5 ng·L⁻¹; 沉积物中 PAHs、OCPs 和 PBDEs 含量范围分别是 163.20 ~ 861.43 ng·g⁻¹、2.25 ~ 6.07 ng·g⁻¹ 和 230.96 ~ 1224.13 pg·g⁻¹。与历史数据相比, 白洋淀沉积物 PAHs 和 OCPs 含量均有明显下降; 与国内外湖泊相比, 白洋淀沉积物中 PBDEs 含量处于较低水平。②水体和沉积物 PAHs 污染来自于油类排放和木材、煤炭燃烧的共同作用; 白洋淀水体和沉积物中 OCPs 组成均以 HCHs 为主(93.76% 和 63.10%), 水体中 HCHs 主要来源于工业 HCHs 的降解, 部分地区来源于大气的远距离传输和林丹的使用, DDTs 则主要来源于历史残留。沉积物中 HCHs 主要来源于新的林丹使用, 也有少量工业 HCHs 的输入, DDTs 则以历史残留为主, 可能部分地区存在新的 DDTs 输入; 白洋淀水体中 PBDEs 组成以 BDE-2 为主(65.80%), 可能主要来源于大气远距离传输和高溴代联苯醚的降解, 沉积物中 PBDEs 组成以 BDE-209 为主(63.82%), 主要来源为商用的十溴联苯醚。③生态风险评估结果表明, 白洋淀尚无生态风险, 但部分采样点存在生态风险的可能性, 应加强监控。

关键词: 持久性有机污染物; 白洋淀; 源解析; 生态风险

中图分类号: X524; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)04-1616-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.201707190

Occurrence and Ecological Risk Assessment of Typical Persistent Organic Pollutants in Baiyangdian Lake

GAO Qiu-sheng^{1,2,3}, JIAO Li-xin^{2,3*}, YANG Liu¹, TIAN Zi-qiang^{2,3,4}, YANG Su-wen^{2,3}, AN Yue-xia^{2,3}, JIA Hai-bin^{2,3}, CUI Zhi-dan^{2,3}

(1. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. Research Center of Lake Eco-Environment, State Environmental Protection Key Laboratory for Lake Pollution Control, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 4. Laboratory of Riverine Ecological Conservation and Technology, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: A comprehensive survey of the pollution characteristics of persistent organic pollutants (POPs) in the surface water and surface sediment of Baiyangdian Lake was carried out. The survey showed that: ① The concentrations of the polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), organic chlorine pesticides (OCPs), and polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in the surface water of Baiyangdian Lake were 71.32-228.27 ng·L⁻¹, 2.62-6.13 ng·L⁻¹, and 0-6.5 ng·L⁻¹, respectively, and those in the surface sediment were 163.20-861.43 ng·g⁻¹, 2.25-6.07 ng·g⁻¹, and 230.96-1224.13 pg·g⁻¹, respectively. On comparison with historical data, the concentrations of PAHs and OCPs in both the surface water and surface sediment were found to be decreasing, while compared with the domestic and foreign lakes, the concentration of PBDEs in the surface sediment was at a low level. ② The main source of PAHs, both in the surface water and surface sediment in Baiyangdian Lake, originated from fuel discharge and combustion sources. HCHs compose the main part of OCPs in both the surface water (93.76%) and surface sediment (63.10%). In the surface water body, HCHs mainly originated from the degradation of industrial HCHs; in some sites HCHs originated from atmospheric long-distance transmission and the usage of Lindane, while DDTs originated from historical residues. In surface sediment, HCHs mainly originated from the usage of new Lindane, with little industrial HCHs, and DDTs mainly originated from historical residues, while new DDTs may have been used in some sites. BDE-2 (65.80%) composed the main part of PBDEs in the surface water, and it mainly originated from atmospheric long-distance transmission and degradation of high brominated diphenyl ethers; BDE-209 (63.82%) constituted the main part of PBDEs in the surface sediment, and it mainly originated from the commercial Deca-BDEs. ③ Ecological

收稿日期: 2017-07-22; 修订日期: 2017-09-26

基金项目: 科技基础性工作专项(2015FY110900)

作者简介: 高秋生(1992~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境化学, E-mail: wintersgaoo@163.com

* 通信作者, E-mail: 287559418@qq.com

Risk Assessment show that there was no obvious ecological risks in Baiyangdian Lake, but in some sites POPs may cause ecological risks; these sites should be monitored more frequently.

Key words: persistent organic pollutants (POPs); Baiyangdian Lake; source apportionment; ecological risk

持久性有机污染物 (persistent organic pollutants, POPs) 是一类具有高毒性、半挥发性、生物蓄积性和长期残留性的物质, 可通过食物链富集放大、通过各种环境介质进行全球性迁移对人类健康产生巨大危害^[1,2]. 研究发现 POPs 不仅具有“三致”效应(致癌、致畸、致突变性), 而且具有内分泌干扰素的作用, 对生殖系统、免疫系统、神经系统等产生毒性, 是生殖障碍、出生缺陷、发育异常、代谢紊乱以及某些恶性肿瘤发病率增加的潜在原因之一^[3]. 多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)、有机氯农药 (organochlorine pesticides, OCPs) 和多溴联苯醚 (polybrominated diphenyl ethers, PBDEs) 是三类典型的持久性有机污染物. PAHs 由两个及以上苯环组成, 具有高毒性、持久性和生物富集效应. OCPs 是我国曾经使用量最大的一类农药, 如今大量残留于土壤中, 可通过地表径流、蒸发、沉降等方式进入水体中^[4], 通过物理化学作用可被沉积物所吸附对生态系统造成持久性危害^[5]. PBDEs 属于溴系阻燃剂的一类, 作为添加型阻燃剂被广泛的应用在电子、纺织等领域^[6,7]. 可引起人体甲状腺的增生, 导致甲状腺素代谢改变, 同时还具有一定的致癌性, 致畸毒性^[8]. 这三类有机污染物已被《关于持久性有机污染物的斯德哥尔摩公约》列为限制使用或削减的化合物, 引起了国内外学者的广泛关注.

白洋淀位于河北省中部, 东经 $115^{\circ}39' \sim 116^{\circ}11'$, 北纬 $38^{\circ}48' \sim 38^{\circ}57'$ 之间是河北省第一大内陆湖, 素有“华北明珠”之称. 20 世纪 70 年代以后, 随着白洋淀流域内工农业的发展、人口增长以及旅游业的开发, 城镇工业废水、生活污水猛增, 使白洋淀水域遭到严重污染. 2015 年监测结果显示白洋淀水体大部分处于 V 类水质, 部分区域甚至为劣 V 类^[9]. 20 世纪 90 年代以来对于白洋淀的有机污染已经有了广泛的研究, 王怡中等^[10]于 1995 年研究发现白洋淀水体中石油烃类污染较为严重, 不同湖区污染物种类浓度差异较大. 窦微等^[11]于 1998 年研究发现白洋淀水体, 沉积物和鲫鱼体内 DDTs 富集能力高于 HCHs. 朱樱等^[12]于 2010 年研究发现白洋淀水体、沉积物、悬浮物中 PAHs 均以 2~3 环为主, 沉积物中 PAHs 来源以生物质和煤燃

烧为主. 秦宁等^[13]于 2010 年研究发现 PAHs 在白洋淀 7 种挺水植物组织中分布模式极为相似. 胡国成等^[14]于 2010 年研究发现 DDTs 和 PBDEs 在白洋淀鸭子肌肉、肝脏、脑组织中含量水平差异较大 ($P < 0.05$), HCHs 差异不明显 ($P > 0.05$). 王乙震等^[15]于 2017 年研究了白洋淀水体中 PAHs 和 OPCs 季节性变化特征和来源. 然而这些研究大多是 2010 年之前, 近些年来关于白洋淀有机污染物的监测相对较少, 而 2010 年以来随着国家经济和能源结构的转变以及新的环保法规的颁布, 白洋淀水体和沉积物的污染状况也在发生着改变. 尤其今年 4 月 1 日, 中共中央、国务院印发通知, 决定设立河北雄安新区用于缓解北京的大城市病、发挥首都城市的区域经济增长极效应、新发展理念的现实实验和探索^[16], 而白洋淀作为雄安新区核心水系, 其当前环境质量关系着新区的建设更关系着国家京津冀协同发展战略的稳步推进. 本文通过对白洋淀 15 个点位水体和沉积物中 PAHs、OCPs 和 PBDEs 进行监测探讨白洋淀环境中这 3 类典型 POPs 的污染特征、来源以及生态风险, 通过与历史数据相对比掌握其变化方向, 以期对白洋淀环境中 POPs 污染防治和新区环境治理提供科学依据和技术支持.

1 材料与方法

1.1 样品采集及前处理

2016 年 3 月参照 GPS 定位, 根据白洋淀 9 条入淀河流入淀口位置在白洋淀设置 15 个采样点位 (图 1), 他们依次是鸳鸯岛、寨南、洛网淀、端村、东田庄、采蒲台、圈头、枣林庄、杨庄子、光淀张庄、王家寨、郭里口、烧车淀、南刘庄和安新大桥. 采样点详细地理信息如表 1, 每个点位用不锈钢采水器采集 0.5 m 表层水样 4 L 保存于棕色玻璃瓶中, 用抓斗式采样器采取 0~10 cm 表层沉积物约 1 kg 装入金属盒子中, 水样和沉积物样品均密封后冷藏待运回实验室进行后续处理.

1.2 样品前处理

量取 1 L 水样, 过 $0.45 \mu\text{m}$ 混合纤维滤膜去除杂质, 用 SPE 小柱 ENVI-18 (6 mL) 进行富集^[17], 最后用 10 mL 二氯甲烷进行洗脱, 氮吹至 $200 \mu\text{L}$ 后装于棕色进样瓶中, 冷藏保存, 待 GC-MS 分析.

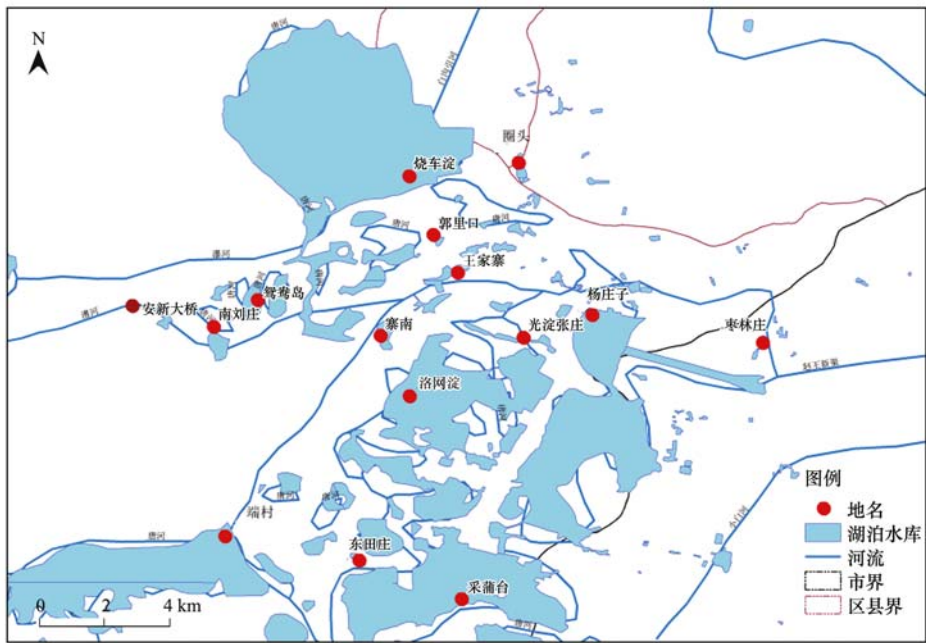


图1 白洋淀采样点示意
Fig. 1 Map of sampling sites in Baiyangdian Lake

表1 白洋淀表层沉积物采样点地理信息
Table 1 Geographical information of 15 sampling sites in Baiyangdian Lake

样品编号	采样点	经度	纬度
S1	鸳鸯岛	115°57'24.43"	38°54'37.74"
S2	寨南	115°59'26.11"	38°54'02.83"
S3	洛网淀	115°59'54.53"	38°53'02.66"
S4	端村	115°57'07.76"	38°50'55.28"
S5	东田庄	115°58'48.04"	38°50'22.92"
S6	采蒲台	116°00'46.69"	38°49'41.61"
S7	圈头	116°01'21.44"	38°57'08.80"
S8	枣林庄	116°05'1.6"	38°54'00.32"
S9	杨庄子	116°02'45.81"	38°54'31.19"
S10	光淀张庄	116°01'46.95"	38°54'00.64"
S11	王家寨	116°00'42.24"	38°55'05.18"
S12	郭里口	116°00'18.10"	38°55'42.47"
S13	烧车淀	115°59'54.15"	38°56'40.21"
S14	南刘庄	115°56'41.23"	38°54'11.46"
S15	安新大桥	115°55'25.73"	38°54'16.73"

将采集到沉积物样品先冷冻干燥 48 h, 研磨过 100 目筛子后装于棕色瓶中避光保存, 待后续使用. PAHs 采用活化硅胶柱和凝胶色谱柱联合净化, OCPs 采用失活硅胶柱和凝胶色谱柱联合净化^[18,19], PBDEs 采用多层硅胶柱净化^[20,21].

PAHs 主要检测萘 (Na)、蒎 (Acy)、蒎烯 (Ace)、芴 (Flr)、菲 (Phe)、蒎 (Ant)、荧蒎 (Flu)、芘 (Fyr)、苯并[a]蒎 (BaA)、䟽䟽 (Chr)、苯并[b]荧蒎 (BbF)、苯并[k]荧蒎 (BkF)、苯并[a]芘 (BaP)、

茚并[1,2,3-cd]芘 (InP)、二苯并[a,h]蒎 (DBA)、苯并[g,h,i]芘 (BghiP) 共 16 种 EPA 优先控制的 PAHs; OCPs 主要检测 4 种 HCHs (α -HCH、 β -HCH、 γ -HCH 和 δ -HCH) 和 4 种 DDTs (p,p' -DDD、 p,p' -DDE、 p,p' -DDT 和 o,p' -DDT) 共 8 种 OCPs 同系物; 水体中 PBDEs 主要检测 BDE-2、BDE-28、BDE-30、BDE-37、BDE-47、BDE-49、BDE-66、BDE-116、BDE-138 和 BDE-153 这 10 种水体中常见的 PBDEs 同系物, 沉积物中 PBDEs 主要检测了 BDE-28、BDE-47、BDE-99、BDE-100、BDE-153、BDE-154、BDE-183 和 BDE-209 这 8 种沉积物中常见的 PBDEs 同系物.

1.3 质量控制与保证 (QA/QC)

为了防止在采样过程中造成交叉污染, 在每两个采样点之间对采样设备进行清洁. 样品前处理过程中, 萃取池、鸡心瓶等容器需分别通过超纯水、甲醇、丙酮、二氯甲烷 3 次洗涤烘干后使用. 分析过程中, 每 5 个样品做一个平行样和方法空白的测定, 水样中 PAHs、OCPs 和 PBDEs 加标回收率分别为: 71.3% ~ 108.6%、74.1% ~ 110.5% 和 79.2% ~ 115.7%; 方法检出限分别为: 0.01 ~ 0.03、0.02 ~ 0.04 和 0.02 ~ 0.18 ng·L⁻¹. 沉积物样品中 PAHs、OCPs 和 PBDEs 加标回收率分别为: 67.2% ~ 96.1%、71.7% ~ 101.2% 和 65.7% ~ 92.6%, 方法检出限分别为 0.15 ~ 0.4 ng·g⁻¹、0.75 ~ 6.21 ng·g⁻¹ 和 0.27 ~ 1.17 pg·g⁻¹.

2 结果与讨论

2.1 白洋淀持久性有机污染物浓度分布特征

研究了白洋淀不同湖区 15 个点位水体和沉积物中 $\sum$ PAHs、 $\sum$ OCPs 和 $\sum$ PBDEs 浓度的空间分布特征。由图 2 可见,白洋淀水体中 $\sum$ PAHs 浓度范围在 $71.32 \sim 228.27 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,沉积物中 $\sum$ PAHs 含量范围在 $163.20 \sim 861.43 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间。白洋淀不同湖区水体和沉积物 $\sum$ PAHs 浓度分布规律相似,总体来讲,以安新大桥、光淀张庄等湖区 $\sum$ PAHs 浓度较高,东田庄、郭里口等湖区 $\sum$ PAHs 浓度相对较低。安新大桥处于白洋淀上游府河的入淀口,未经处理的生活污水和工业废水经过府河流入湖区,此外,河道两侧是人口相对集中的安新县城,大量车辆产生的尾气也是加重污染的原因。光淀张庄位于湖区中心位置,此处河道较为封闭且周围村庄密集,大量的生活和生产污水直接排入封闭的湖水中,使 PAHs 在湖内累积造成水体和沉积物中 $\sum$ PAHs 浓度较高。Guo 等^[22] 通过研究白洋淀沉积物柱状样发现白洋淀沉积物中 $\sum$ PAHs 在 20 世纪 90 年代污染最严重之后 20a 呈现下降趋势,周怀东等^[23] 研究了白洋淀 2007 年沉积物中 $\sum$ PAHs 含量在 $324.6 \sim 1738.5 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 之

间,本研究中白洋淀沉积物中 PAHs 污染水平比历史上要低。

白洋淀水体中 $\sum$ OCPs 浓度范围在 $2.62 \sim 6.13 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,沉积物中 $\sum$ OCPs 含量范围在 $0.9 \sim 2.4 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间。白洋淀不同湖区水体和沉积物 $\sum$ OCPs 浓度分布规律大致相似,总体上,以杨庄子、圈头等湖区 $\sum$ OCPs 浓度较高,洛网淀和东田庄等湖区浓度较低。我国在 1983 年已全面禁止 OCPs 的生产、销售和使用,目前环境中的 OCPs 主要来源于残留,杨庄子和圈头等湖区附近存在大量农田,地表径流和土壤流失可能是导致这两个湖区 $\sum$ OCPs 浓度相对较高的原因^[24]。而洛网淀位于湖区中央远离排污口和耕作区,东田庄位于居民区附近均没用于农耕的土地,且河道相对封闭,所以可能导致这两个湖区处 $\sum$ OCPs 浓度较低。与历史上数据相比较白洋淀水体中 $\sum$ OCPs 浓度在 1995 年检出量为 $3050 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,2008 年检出量为 $13.21 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[25],20 多年以来白洋淀水体中 $\sum$ OCPs 浓度显著降低,沉积物中 $\sum$ OCPs 含量也与 2008 年检测数据 ($7.42 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$) 相比有所降低,表明白洋淀地区禁用有机氯农药成效显著,有机氯农药污染减弱。

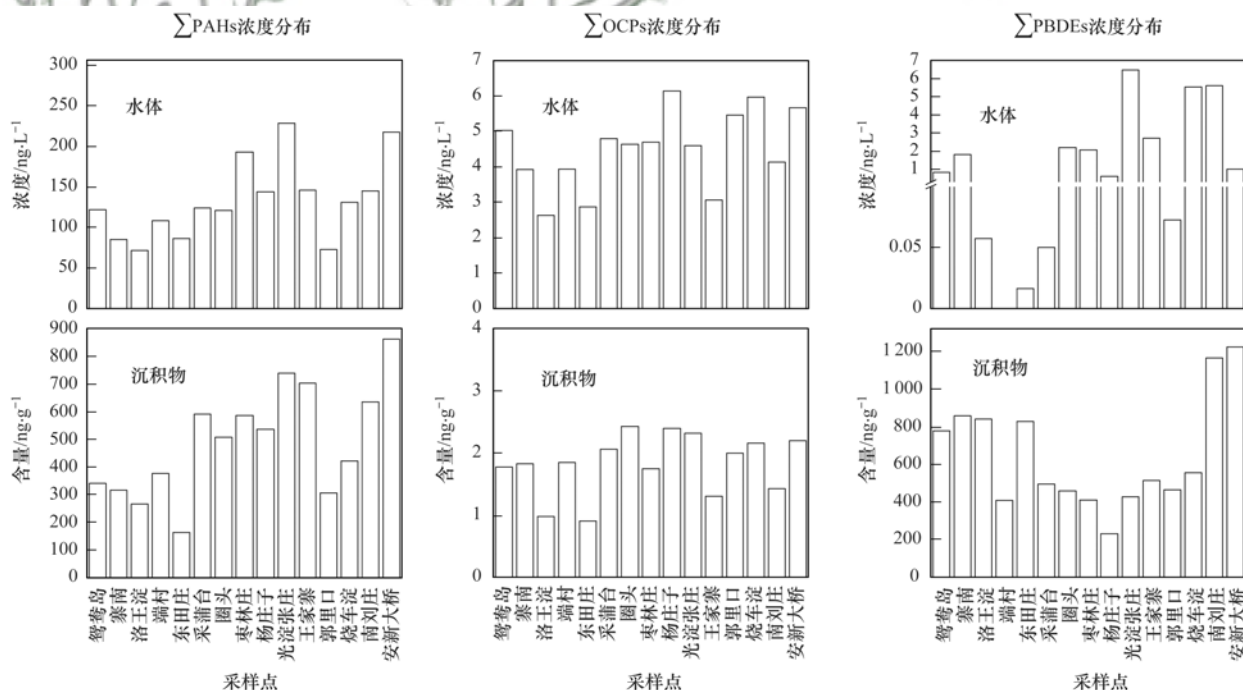


图2 白洋淀 POPs 含量分布情况

Fig. 2 Concentrations of POPs in Baiyangdian Lake

白洋淀水体中 $\sum$ PBDEs 浓度范围在 $0 \sim 6.50 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, 其中光淀张庄等湖区 $\sum$ PBDEs 浓度较高, 端村处 $\sum$ PBDEs 浓度低于检出限未检出. 沉积物中 $\sum$ PBDEs 含量范围在 $230.96 \sim 1\,224.13 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间, 其中以安新大桥处 $\sum$ PBDEs 含量最高, 杨庄子处 $\sum$ PBDEs 含量最低. 将白洋淀沉积物中 $\sum$ PBDEs 总含量与国内外其他河流海岸沉积物中 $\sum$ PBDEs 含量相对比 (表 2), 白洋淀 $\sum$ PBDEs 总含量与美国的休伦湖、挪威的 Ellasjoen 湖、波斯湾伊朗沿岸、越南的 Thi Nai Lagoon 以及中国的长江中游处于同一水平, 远低于荷兰的斯海尔德河以和中国的太湖. 其中荷兰的斯海尔德河以及中国的太湖沉积物中 $\sum$ PBDEs 含量也分别达到白洋淀沉积物 $\sum$ PBDEs 含量的 458 倍和 718 倍. 表明白洋淀沉积物中 PBDEs 污染程度在国际范围内属于较低污染水平.

表 2 国内外河流、港湾表层沉积物中 $\sum$ PBDEs 含量水平/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$

Table 2 Concentrations of PBDEs in the surface sediment of rivers and harbors at home and abroad/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$

地点	N ¹⁾	含量/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$	时间年份	文献
斯海尔德河, 荷兰	6	4.7 ~ 527.6	2002	[26]
休伦湖, 美国	10	1.02 ~ 1.87	2005	[27]
尼亚加拉河, 美国	9	0.72 ~ 148	2006	[28]
Lake Ellasjoen, 挪威	10	ND ²⁾ ~ 0.93	2006	[29]
波斯湾, 伊朗沿岸	7	ND ~ 6.91	2016	[30]
Thi Nai Lagoon, 越南	9	ND ~ 9.62	2011	[31]
悉尼河口, 澳大利亚	7	22.1 ~ 67.5	2015	[32]
长江中游, 中国	9	0.0461 ~ 0.326	2014	[33]
太湖, 中国	8	53.55 ~ 848.33	2013	[34]
白洋淀, 中国	8	0.016 ~ 1.18	2016	本研究

1) “N”表示检测到的目标化合物的数目; 2) “ND”表示未检出

2.2 白洋淀持久性有机污染物组成特征及来源解析

根据苯环的个数将 PAHs 进行分类, 白洋淀水体和沉积物中的 PAHs 组成特征如图 3, 水体中 PAHs 组成特征为, 三环芳烃 > 四环芳烃 > 五环芳烃 > 二环芳烃 > 六环芳烃, 其中浓度较高的 PAHs 单体为 Nap, 其平均浓度为 $15.14 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 、其次为 Phe ($12.42 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$) 和 Acy ($12.21 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$), 较低的单体为 BaA ($2.18 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$), 总体来看低环芳烃 (2 ~ 3 环) 单体平均浓度普遍高于高环芳烃 (4 ~ 6 环) 中单体平均浓度; 而沉积物中 PAHs 组成特征为五环芳烃 > 三环芳烃 > 四环芳烃 > 六环芳烃 > 二环芳烃, 其中含量较高的 PAHs 单体为 DBA 其平均含量为 $123.56 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 其次为 BghiP ($92.68 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$) 和 BkF ($91.70 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$), 较低的单体为 Ace ($2.19 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$) 和 Acy ($5.20 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$). 总体来看, 除个别单体外, 高环芳烃单体平均含量均高于低环芳烃单体平均含量, Zeng 等^[35]的研究发现高环芳烃较低环芳烃疏水性更强, 蓝家程等^[36]的研究发现高环芳烃亲脂性更强, 更难以降解. 这些特性使高环芳烃更易被沉积物所吸附, 所以可能导致白洋淀水体中低环芳烃单体平均浓度普遍高于高环芳烃单体平均浓度, 而沉积物高环芳烃单体平均含量基本上均高于低环芳烃单体平均含量.

环境中 PAHs 的来源比较复杂, 不同成因的多环芳烃具有结构和组分上的差异, 因此多环芳烃中某些同分异构体比值常用来指示 PAHs 在环境介质中的来源^[37]. 江敏等^[38]的研究表明, 当 $\text{Ant}/(\text{phe} + \text{Ant})$ 小于 0.1 为石油源; 大于 0.1 则为燃烧源; 当 $\text{Flu}/(\text{Flu} + \text{Pyr})$ 小于 0.4 为石油源; 大于 0.5 主要是木材和煤燃烧来源, 介于 0.4 与 0.5 之间则表明是石油及其精炼产品的燃烧来源. 以 $\text{Aut}/(\text{phe} + \text{Aut})$ 为横坐标, $\text{Flu}/(\text{Flu} + \text{Pyr})$ 为纵坐标绘制白洋

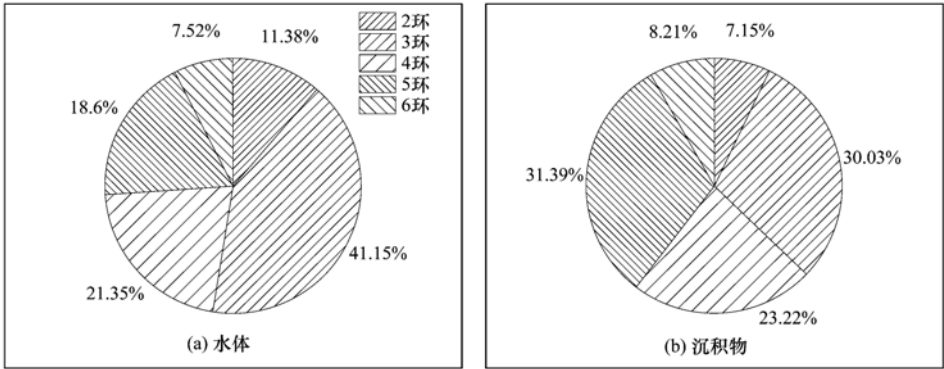


图 3 白洋淀水体和沉积物中 PAHs 同系物分布

Fig. 3 Distribution of the concentrations of PAHs in the surface water and sediment of Baiyangdian Lake

淀水体和沉积物中 PAHs 来源分析如图 4 所示, 白洋淀水体和沉积物中 $Aut/(phe + Aut)$ 比值均大于 0.1, 水体中 $Flu/(Flu + Pyr)$ 比值在安新大桥和烧车淀点位处小于 0.4, 枣林庄、杨庄子、光淀张庄和南刘庄点位处介于 0.4 和 0.5 之间, 其它点位处均大于 0.5. 表明白洋淀水体中 PAHs 来源主要以燃烧源为主, 部分地区存在石油源. 沉积物中 $Flu/(Flu + Pyr)$ 比值在烧车淀处小于 0.4, 洛网淀和枣林庄点位处介于 0.4 和 0.5 之间, 其它点位均大于 0.5, 表明白洋淀沉积物中 PAHs 主要以燃烧源为主, 部分地区存在石油源. 白洋淀地区水体和沉积物 PAHs 污染来源于油类排放和木材、煤炭燃烧的共同作用. 白洋淀湖区内遍布着众多村庄, 村民每天生产生活燃烧大量的木材和煤, 大量未经处理的生活污水直接排入白洋淀水体中, 村民捕鱼以及白洋淀的交通旅游等活动中使用的船舶所造成的尾气排放、油料泄漏等均不同程度造成白洋淀 PAHs 的污染. 同时白洋淀上游保定市的生活污水和工业废水也大量排入白洋淀中, 这也是白洋淀 PAHs 污染的主要来源.

对水体中的 OCPs 检测发现, 水体中 4 种 HCHs 均有不同程度的检出, 而 DDTs 只检测出 p, p' -DDD 和 p, p' -DDE, 将这两种 DDT 归为 DDTs, 白洋淀水体中 OCPs 组成特征如图 5(a), DDTs 类污染物只占 OCPs 总浓度的 6.24%, HCHs 类污染物是水体中 OCPs 的主要污染物, 其中 β -HCH 所占质量分数最高, 为 30.15%, 其次是 δ -HCH 和 α -HCH, 分别为 27.84% 和 25.79%, γ -HCH 所占质量分数最少为 9.99%. 可能是由于 β -HCH 在环境中相较于其它 HCHs 异构体更加稳定和难降解, 而其他 HCHs 异构体在环境中能够转化为 β -HCH 以达到最稳定的状态^[39]. 工业产品中 α -HCH/ γ -HCH 一般比较稳

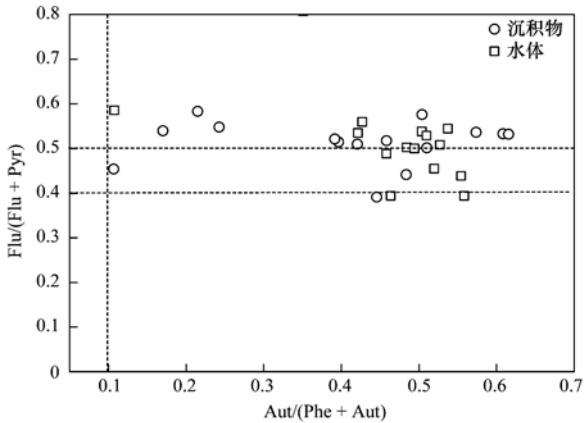


图 4 白洋淀 PAHs 来源分析

Fig. 4 Identification of the sources of PAHs in the surface water and sediments of Baiyangdian Lake

定, 大约在 3~7 之间, 当有林丹输入时, 该比值接近或小于 1; 如果该比值大于 7, 可能是由于 HCHs 长距离传输或工业 HCH 降解所致. 因为 α -HCH 比林丹半衰期长约 25%, 所以该比值越高, 表明长距离传输得越远^[40]. 本研究中各点位 α -HCH/ γ -HCH 在 0.76~7.41 之间, 其中枣林庄处为 7.41, 郭里口和安新大桥处分别为 0.99 和 0.76, 说明白洋淀水体中 HCHs 污染主要来源于工业 HCHs 的降解, 部分地区来源于 HCHs 大气长距离传输和林丹的使用. 一般认为水体中检测出 p, p' -DDT 标志着水体中除了原来残留的农药外还有新的污染来源, 本研究在白洋淀只检测出 p, p' -DDD 和 p, p' -DDE 表明白洋淀水体中 DDTs 污染来源于历史残留^[41].

对沉积物中 OCPs 检测发现, 4 种 HCHs 和 4 种 DDTs 均有不同程度的检出, 白洋淀沉积物中 OCPs 组成如图 5(b), 沉积物中主要以 HCHs 类污染物为主, 平均含量占总含量的 63.1%, 一般而言, 当沉积物中 α -HCH/ γ -HCH 比值在 0.2~1.0 之间时, 表明存在林丹的污染; 当该值在 4~15 之间时, 说

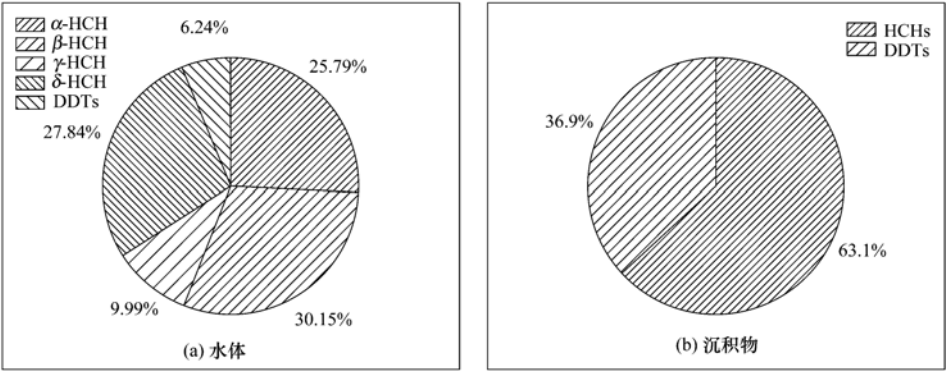


图 5 白洋淀水体和沉积物中 OCPs 同系物分布

Fig. 5 Distribution of the concentrations of OCPs in the surface water and sediment of Baiyangdian Lake

明其可能来源于工业 HCHs 的输入^[42]. 在 HCHs 各异构体中 β -HCH 稳定性和抗降解能力最强, 高 β -HCH 含量表明污染多来源于历史输入^[43]. 本研究中 β -HCH 平均含量只占 HCHs 总含量的 25.4% 而 α -HCH/ γ -HCH 的比值在 0.02 ~ 2.2 之间, 大多集中在 1.1 以内, 表明白洋淀沉积物中 HCHs 污染主要来源于新的林丹的使用, 也有少量工业 HCHs 的输入. 在自然环境中, DDTs 在好氧条件下被微生物降解为 p, p' -DDE, 厌氧条件下可降解为 p, p' -DDD, 如果存在持续的 DDT 输入, 则 DDT 在 $\sum$ DDTs 中的相对含量就会保持较高的水平; 相反, DDT 降解产物的相对含量就会高. 因此, 可以用 $(DDD + DDE) / \sum$ DDTs 来指示 DDT 的降解程度及其来源, 其数值高于 0.5 表示污染物可能主要来自土壤中长期分化残留的 DDT^[44,45], 在白洋淀 15 个点位中有 13 个点位 $(DDD + DDE) / \sum$ DDT 比值大于 0.5, 说明白洋淀沉积物中 DDTs 污染主要以历史残留为主, 可能部分地区存在新的 DDTs 输入.

对水体中的 PBDEs 进行检测发现, 水体中主要存在 BDE-2、BDE-28、BDE-30、BDE-37、BDE-47、BDE-49、BDE-66、BDE-116、BDE-138 和 BDE-153 这 10 种 PBDEs 污染物, 根据溴原子的个数对

这 10 种 PBDEs 进行分类, 白洋淀水体中 PBDEs 污染物组成特征如图 6(a). 水体中 PBDEs 污染主要为 1-Br 即 BDE-2, 其浓度占 PBDEs 总浓度的 65.87%, 其次是 9-Br 和 4-Br 分别占总浓度的 18.86% 和 12.68%, 含量最少的 3-Br 和 5-Br 分别占总浓度的 1.61% 和 0.98%. Kuch 等^[46]发现德国污水处理厂污水中以 BDE-49 和 BDE-99 为主. Ikonomou 等^[47]等用半透膜研究了加拿大弗雷泽河 PBDEs 同类物组成, 结果表明以 BDE-47 为主, BDE-99 和 BDE-100 次之, BDE-209 没有检出. 罗孝俊等^[48]研究了珠江口水体中 PBDEs 的分布发现 BDE-47 和 BDE-99 在全部溶解相中均被发现, 且以 BDE-47 和 BDE-99 为主. 一般情况下 BDE-47 和 BDE-99 通常是水相 PBDEs 的主要组成, 工业废水、污水处理厂出水以及其它未经处理废水通常是水中 PBDEs 污染的主要来源^[49], 而白洋淀水体中只检测 BDE-47 的存在, 未检测出 BDE-99 且白洋淀水体污染以一溴的 BDE-2 为主, 反映了白洋淀水体 PBDEs 来源的复杂性, 有研究表明低溴代联苯醚具有较高的蒸气压可以通过大气远距离传输^[50], 而高溴代联苯醚在紫外线和强可见光源的照射下可以分解产生低溴代联苯醚^[51], 表明白洋淀水体中 BDE-2 污染可能主要来源于大气远距离传输和高溴代联苯醚的降解.

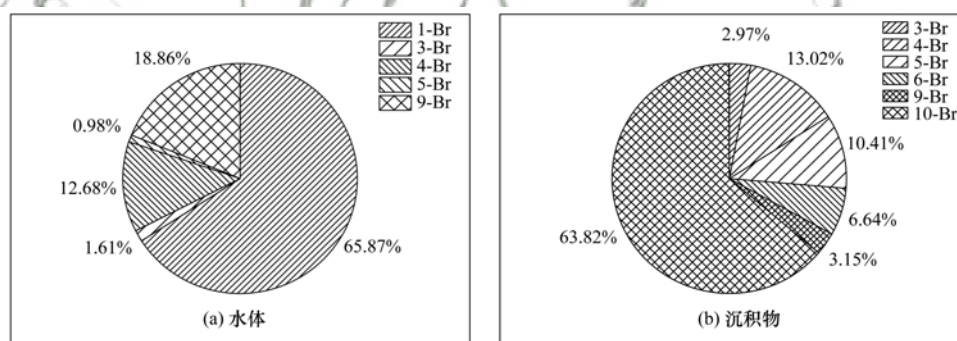


图 6 白洋淀水体和沉积物中 PBDEs 同系物分布

Fig. 6 Distribution of the concentrations of PBDEs in the surface water and sediment of Baiyangdian Lake

对沉积物中 PBDEs 进行检测发现, 沉积物中主要存在 BDE-28、BDE-47、BDE-99、BDE-153、BDE-154、BDE-183 和 BDE-209 共 7 种 PBDEs 污染物, 根据溴原子个数对这 7 种 PBDEs 进行分类, 白洋淀沉积物中 PBDEs 污染物组成特征如图 6(b), 沉积物中 PBDEs 污染主要为 10-Br 即 BDE-209, 其含量占 $\sum$ PBDEs 总含量的 63.82%, 其次是 4-Br 和 5-Br 分别占总含量的 13.02% 和 10.41%. 含量

较少的 6-Br、9-Br 和 3-Br 分别为 6.64%、3.15% 和 2.97%. 由于 BDE-209 是商用的十溴联苯醚阻燃剂的主要成分 (>90%)^[52] 说明白洋淀地区沉积物中 PBDEs 污染主要来源于商用的十溴联苯醚. 十溴联苯醚作为阻燃剂被大量添加于各种纺织品和电路板聚酯中. 而羽绒、制鞋、服装是白洋淀的支柱产业, 流域周边有着大量的纺织企业, 说明白洋淀沉积物中 PBDEs 主要来源可能是纺织企业的工业添加剂.

2.3 白洋淀持久性有机污染物生态风险评价

根据我国《地表水环境质量标准 GB 3838-2002》中对 BaP 标准的要求是 $2.8 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 对 γ -HCH 和 DDTs 标准的要求分别是 $2000 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $1000 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[53], 白洋淀各点位水体中 BaP、 γ -HCH 和 DDTs 均未超过国家规定标准, 表明白洋淀水体中这两种污染物符合我国地表水环境标准, 但目前此标准中尚无对多 PBDEs 浓度标准的规定. 关于 PBDE 生态风险评估的研究相对较少, 常采样基于低等水生生物及底栖生物的毒理学数据和 EPA 标准的商值法^[54~56], 本研究采用此方法来评价白洋淀水体和沉积物中 PBDEs 的生态风险, 其公式为:

$$Q = \frac{\text{MEC}}{\text{MSNOCE}}$$

式中, Q 为风险值商值, MEC (measured environment concentration) 为 3 种工业 PBDEs 的检测浓度,

MSNOCE (multi-species no observable effect concentration) 为 3 种工业 PBDEs 无显著影响含量, 常见的 PBDEs 工业品主要有 3 类 Penta-BDEs、Octa-BDEs 和 Deca-BDEs^[57]. 本研究将三至五溴联苯醚归为 Penta-BDEs, 六至九溴联苯醚归为 Octa-BDEs, 十溴联苯醚归为 Deca-BDEs, 根据加拿大环保部提供的数据^[58], 水体中 Penta-BDEs 和 Octa-BDEs 的 MSNOCE 为 $0.053 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.017 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, Deca-BDEs 目前无数据; 沉积物中 Penta-BDEs、Octa-BDEs、Deca-BDEs 的 MSNOCE (以干重计) 值分别为 0.031 、 13.40 、 $45.36 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 根据商值法表征原理: $Q < 1$, 无生态风险; $1 \leq Q < 5$, 低等风险; $5 \leq Q < 10$, 中等风险; $Q \geq 10$, 高等风险. 白洋淀各点位水体和沉积物中三类工业 BDEs 风险商值如图 7, 所有点位中水体和沉积物三类工业 BDEs 风险商值均小于 1, 表明白洋淀的 PBDEs 污染暂时没有生态风险.

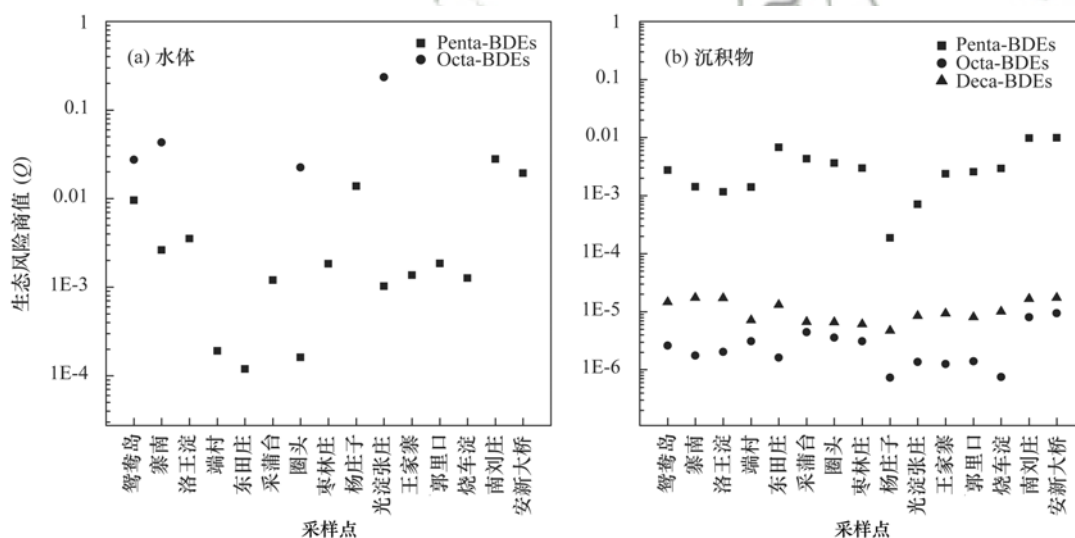


图 7 白洋淀水体和表层沉积物中 PBDEs 的生态风险评价结果

Fig. 7 Evaluation results of the ecological risks of PBDEs in the surface water and sediments of Baiyangdian Lake

沉积物质量基准法 (SQGs) 常被用来评价沉积物生态风险, Long 等^[59] 在大量实验基础上提出用于确定淡水、海湾和海洋沉积物中有机污染物的潜在生态风险的效应区间低值 (effects range low, ERL) 和效应区间中值 (effects range median, ERM), 用来反映沉积物生态风险水平. 当污染物含量 $< \text{ERL}$ 时, 对生物产生的毒副作用不明显 (风险几率 $< 10\%$); 当污染物含量 $> \text{ERM}$ 时, 则对生物会产生毒副作用 (风险几率 $> 50\%$), 可能会产生一定程度的负面生态效应; 当污染物含量在 ERL 与 ERM 之间时, 生物有害效应几率介于 $10\% \sim 50\%$

之间, 只会偶尔产生负面效应. 白洋淀各点位沉积物中 OCPs 和 PAHs 含量与 OCPs 和 PAHs 沉积物基准^[60,61] 的比较如表 3. 白洋淀沉积物中 DDE、DDD 和 DDT 这 3 类物质均未超过其效应区间低值, 表明对生物产生的毒副作用不明显, 但光淀张庄沉积物中 $\sum \text{DDTs}$ 含量位于 ERL 和 ERM 之间, 偶尔会对生物产生一定的负面生态效应, 应加强监控. 白洋淀沉积物中 PAHs 总体生态风险处于较低水平, 但除东田庄和枣林庄以外的其它采样点沉积物中的 Flr、鸳鸯岛和光淀张庄的 Ace 以及安新大桥的 Ant 均处于 ERL 和 ERM 之间, 偶尔会对生物产生一定

的负面效应造成生态风险应加强监控。

表 3 白洋表层沉积物中 OCPs 和 PAHs 的质量标准评价

Table 3 Assessment according to the quality guidelines of OCPs and PAHs in the surface sediments of Baiyangdian Lake

化合物	ERL /ng·g ⁻¹	ERM /ng·g ⁻¹	点位数		
			< ERL	ERL ~ ERM	> ERM
DDE	2.2	7.0	15	0	0
DDD	2.0	20.0	15	0	0
DDT	1.0	27.0	15	0	0
∑ DDTs	3.0	46.1	14	1	0
Nap	160	2 100	15	0	0
Acy	44	640	15	0	0
Ace	16	500	13	2	0
Flr	19	540	3	12	0
Phe	240	1 500	15	0	0
Ant	85	1 100	14	1	0
Flu	600	5 100	15	0	0
Pyr	670	2 600	15	0	0
BaA	261	1 600	15	0	0
Chr	384	2 800	15	0	0
BbF	320	1 880	15	0	0
BkF	280	1 620	15	0	0
BaP	430	1 600	15	0	0
InP	—	—	0	0	0
DBA	430	1 600	15	0	0
BghiP	63	260	15	0	0
∑ PAHs	4 022	44 792	15	0	0

3 结论

(1) 白洋淀水体中 ∑ PAHs、∑ OCPs 和 ∑ PBDEs 浓度范围分别是 71.32 ~ 228.27、2.62 ~ 6.13 和 0 ~ 6.5 ng·L⁻¹；白洋淀沉积物中 ∑ PAHs、∑ OCPs 和 ∑ PBDEs 含量范围分别是 163.20 ~ 861.43 ng·g⁻¹、2.25 ~ 6.07 ng·g⁻¹ 和 230.96 ~ 1 224.13 pg·g⁻¹。沉积物中 ∑ PAHs 和 ∑ OCPs 含量与历史数据相比均显著下降，沉积物中 ∑ PBDEs 与国内外其他地区相比处于较低污染水平。

(2) 白洋淀水体和沉积物 PAHs 污染来源均是油类排放和木材、煤炭燃烧共同作用的结果；白洋淀水体和沉积物中 OCPs 组成均以 HCHs 为主，水体中 HCHs 主要来源于工业 HCHs 的降解，部分地区来源于大气的远距离传输和林丹的使用，DDTs 则主要来源于历史残留。沉积物中 HCHs 主要来源于新的林丹的使用，也有少量工业 HCHs 的输入，DDTs 则以历史残留为主，可能部分地区存在新的 DDTs 输入；白洋淀水体中 PBDEs 组成以 BDE-2 为

主，可能主要来源于大气远距离传输和高溴代联苯醚的降解，沉积物中 PBDEs 组成以 BDE-209 为主，主要来源为商用的十溴联苯醚。

(3) 对白洋淀沉积物中三类持久性有机污染物进行生态风险评价，白洋淀尚无明显生态风险，但部分采样点存在生态风险的可能性，应加强监控。

参考文献:

- [1] 员晓燕, 杨玉义, 李庆孝, 等. 中国淡水环境中典型持久性有机污染物 (POPs) 的污染现状与分布特征[J]. 环境化学, 2013, **32**(11): 2072-2081.
Yuan X Y, Yang Y Y, Li Q X, *et al.* Present situation and distribution characteristics of persistent organic pollutants in freshwater in China[J]. Environmental Chemistry, 2013, **32**(11): 2072-2081.
- [2] 周京花, 马慧慧, 赵美蓉, 等. 持久性有机污染物 (POPs) 生殖毒理研究进展——从实验动物生殖毒性到人类生殖健康风险[J]. 中国科学: 化学, 2013, **43**(3): 315-325.
Zhou J H, Ma H H, Zhao M R, *et al.* Health implications of POPs on mammal and human reproduction[J]. Scientia Sinica (Chimica), 2013, **43**(3): 315-325.
- [3] Rostami I, Juhasz A L. Assessment of persistent organic pollutant (POP) bioavailability and bioaccessibility for human health exposure assessment: a critical review[J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2011, **41**(7): 623-656.
- [4] 方晓航, 仇荣亮. 农药在土壤环境中的行为研究[J]. 生态环境学报, 2002, **11**(1): 94-97.
Fang X H, Qiu R L. Behavior of pesticide in soil environment[J]. Soil and Environmental Sciences, 2002, **11**(1): 94-97.
- [5] Hendy E J, Peake B M. Organochlorine pesticides in a dated sediment core from Mapua, Waimea Inlet, New Zealand[J]. Marine Pollution Bulletin, 1996, **32**(10): 751-754.
- [6] Rahman F, Langford K H, Scrimshaw M D, *et al.* Polybrominated diphenyl ether (PBDE) flame retardants[J]. Science of the Total Environment, 2001, **275**(1-3): 1-17.
- [7] De Wit C A. An overview of brominated flame retardants in the environment[J]. Chemosphere, 2002, **46**(5): 583-624.
- [8] 万斌, 郭良宏. 多溴联苯醚的环境毒理学研究进展[J]. 环境化学, 2011, **30**(1): 143-152.
Wan B, Guo L H. Research progress on the investigation of environmental toxicology of polybrominated diphenyl ethers[J]. Environmental Chemistry, 2011, **30**(1): 143-152.
- [9] 程磊. 白洋淀水环境现状分析[J]. 水科学与工程, 2016, (5): 50-52.
Cheng L. Analysis of Baiyangdian water environment situation[J]. Water Sciences and Engineering Technology, 2016, (5): 50-52.
- [10] 王怡中, 刘季昂, 胡春, 等. 白洋淀地区水中有机污染物的定性分析[J]. 环境化学, 1995, **14**(5): 442-448.
Wang Y Z, Liu J A, Hu C, *et al.* Analysis of organic contaminants in the water of Bai-Yang-Dian Lake[J]. Environmental Chemistry, 1995, **14**(5): 442-448.
- [11] 窦薇, 赵忠宪. 白洋淀水体、底泥及鲫鱼体内 DDT、BHC 污染状况研究[J]. 环境科学学报, 1998, **18**(3): 308-312.
Dou W, Zhao Z X. Contamination of DDT and BHC in water,

- sediments and fish (*Carassius auratus*) muscle from Baiyangdian Lake[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1998, **18**(3): 308-312.
- [12] 朱樱, 吴文婧, 王军军, 等. 小白洋淀水-沉积物系统多环芳烃的分布、来源与生态风险[J]. *湖泊科学*, 2009, **21**(5): 637-646.
- Zhu Y, Wu W J, Wang J J, *et al.* Distribution, sources and ecological risks of polycyclic aromatic hydrocarbons in water-sediment system in Lake Small Baiyangdian[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2009, **21**(5): 44-53.
- [13] 秦宁, 朱樱, 吴文婧, 等. 多环芳烃在小白洋淀挺水植物中的分布、组成及其影响因素[J]. *湖泊科学*, 2010, **22**(1): 49-56.
- Qin N, Zhu Y, Wu W J, *et al.* The distributions, composition and their determining factors of polycyclic aromatic hydrocarbons in emergent macrophytes in Small Baiyangdian Lake[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, **22**(1): 49-56.
- [14] 胡国成, 许振成, 戴家银, 等. 有机氯农药和多溴联苯醚在白洋淀鸭子组织中分布特征研究[J]. *环境科学*, 2010, **31**(12): 3081-3087.
- Hu G C, Xu Z C, Dai J Y, *et al.* Distribution characteristic of organochlorine pesticides and polybrominated diphenyl ethers in tissues of ducks from Baiyangdian Lake, North China [J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(12): 3081-3087.
- [15] 王乙震, 张俊, 周绪申, 等. 白洋淀多环芳烃与有机氯农药季节性污染特征及来源分析[J]. *环境科学*, 2017, **38**(3): 964-978.
- Wang Y Z, Zhang J, Zhou X S, *et al.* Seasonal pollution characteristics and source identification of polycyclic aromatic hydrocarbons and organochlorine pesticides in surface water of Baiyangdian Lake[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(3): 964-978.
- [16] 蔡之兵. 雄安新区的战略意图、历史意义与成败关键[J]. *中国发展观察*, 2017, (8): 9-13.
- [17] 汪瑾彦. 水体沉积物中多环芳烃和有机氯农药分析方法研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2010.
- Wang J Y. Studies on the analysis method of polycyclic aromatic hydrocarbons and organochlorine pesticides in sediments [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2010.
- [18] 中国环境监测总站. 固体废弃物试验分析评价手册[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1992.
- U. S. EPA. Test method for evaluating solid waste[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1992.
- [19] 傅珊. 典型区域中持久性有机污染物的分布空间规律与源解析[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2007.
- [20] 赵兴茹. 卤代持久性有机污染物在非洲爪蟾体内的富集代谢及台州污染区居民暴露风险的初步研究[D]. 北京: 中国科学院化学研究所, 2007.
- [21] Liang S X, Zhao Q, Qin Z F, *et al.* Levels and distribution of polybrominated diphenyl ethers in various tissues of foraging hens from an electronic waste recycling area in South China [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2008, **27**(6): 1279-1283.
- [22] Guo W, Pei Y S, Yang Z F, *et al.* Historical changes in polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) input in Lake Baiyangdian related to regional socio-economic development[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **187**(1-3): 441-449.
- [23] 周怀东, 赵健, 陆瑾, 等. 白洋淀湿地表层沉积物多环芳烃的分布、来源及生态风险评价[J]. *生态毒理学报*, 2008, **3**(3): 291-299.
- Zhou H D, Zhao J, Lu J, *et al.* Distribution, sources and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments from Baiyangdian wetland [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2008, **3**(3): 291-299.
- [24] 肖春艳, 邵超, 赵同谦, 等. 黄河湿地孟津段水体及沉积物中有机氯农药的分布特征[J]. *环境科学*, 2009, **30**(6): 1614-1620.
- Xiao C Y, Tai C, Zhao T Q, *et al.* Distribution characteristics of organochlorine pesticides in surface water and sediments from the Mengjin wetland [J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(6): 1614-1620.
- [25] Dai G H, Liu X H, Liang G, *et al.* Distribution of organochlorine pesticides (OCPs) and poly chlorinated biphenyls (PCBs) in surface water and sediments from Baiyangdian Lake in North China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, **23**(10): 1640-1649.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] Aghadadashi V, Mehdinia A. Occurrence, spatial deposition and footprint of polybrominated diphenyl ethers in surficial sediments of Bushehr peninsula, the Persian Gulf [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2016, **112**(1-2): 211-217.
- [31] Romano S, Piazza R, Mugnai C, *et al.* PBDEs and PCBs in sediments of the Thi Nai Lagoon (Central Vietnam) and soils from its mainland [J]. *Chemosphere*, 2013, **90**(9): 2396-2402.
- [32] Drage D, Mueller J F, Birch G, *et al.* Historical trends of PBDEs and HBCDs in sediment cores from Sydney estuary, Australia [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **512-513**: 177-184.
- [33] 田奇昌, 唐洪波, 夏丹, 等. 长江中游沉积物中多溴联苯醚的污染特征及风险评价[J]. *环境科学*, 2015, **36**(12): 4479-4485.
- Tian Q C, Tang H B, Xia D, *et al.* Pollution characteristics and risk assessment of polybrominated diphenyl ethers in the surface sediments from middle reaches of the Yangtze River [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(12): 4479-4485.
- [34] 何隽杰, 陆光华, 丁剑楠, 等. 太湖北部表层沉积物中多环芳烃和多溴联苯醚及多氯联苯的分布和来源及生态风险评价[J]. *环境与健康杂志*, 2013, **30**(8): 699-702.

- He J J, Lu G H, Ding J N, *et al.* Distribution, sources and risk assessment of PAHs, PBDEs and PCBs in surface sediments from northern Taihu Lake [J]. *Journal of Environment and Health*, 2013, **30**(8): 699-702.
- [35] Zeng E Y, Vista C L. Organic pollutants in the coastal environment off San Diego, California. 1. Source identification and assessment by compositional indices of polycyclic aromatic hydrocarbons [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1997, **16**(2): 179-188.
- [36] 蓝家程, 孙玉川, 师阳, 等. 岩溶地下河流域表层土壤多环芳烃污染特征及来源分析[J]. *环境科学*, 2014, **35**(8): 2937-2943.
- Lan J C, Sun Y C, Shi Y, *et al.* Source and contamination of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface soil in karst underground river basin [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(8): 2937-2943.
- [37] Wu Y L, Wang X H, Li Y Y, *et al.* Occurrence of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in seawater from the Western Taiwan Strait, China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, **63**(5-12): 459-463.
- [38] 江敏, Tuan L H, 梅卫平, 等. 舟山近海水体和沉积物中多环芳烃分布特征[J]. *环境科学*, 2014, **35**(7): 2672-2679.
- Jiang M, Tuan L H, Mei W P, *et al.* Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in water and sediment from Zhoushan coastal area, China [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(7): 2672-2679.
- [39] 刘翠翠, 何洁妮, 仇雁翎, 等. 黄浦江水相中有机氯农药的污染特征分析[J]. *环境化学*, 2017, **36**(4): 849-857.
- Liu C C, He J N, Qiu Y L, *et al.* Pollution status analysis of organochlorine pesticides in Huangpu River water [J]. *Environmental Chemistry*, 2017, **36**(4): 849-857.
- [40] Willett K L, Ulrich E M, Hites R A. Differential toxicity and environmental fates of hexachlorocyclohexane isomers [J]. *Environmental Science & Technology*, 1998, **32**(15): 2197-2207.
- [41] 柳丽丽, 李剑, 李沫蕊, 等. 官厅水库水体有机氯农药残留特征及健康风险评价[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2014, **50**(6): 657-661.
- Liu L L, Li J, Li M R, *et al.* Residue characteristics and health risk assessment of organochlorine pesticides in Beijing Guanting reservoir [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2014, **50**(6): 657-661.
- [42] Kalantzi O I, Alcock R E, Johnston P A, *et al.* The global distribution of PCBs and organochlorine pesticides in butter [J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, **35**(6): 1013-1018.
- [43] Hong H S, Chen W Q, Xu L, *et al.* Distribution and fate of organochlorine pollutants in the Pearl River estuary [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 1999, **39**(1-12): 376-382.
- [44] 王泰, 黄俊, 余刚. 海河与渤海湾沉积物中 PCBs 和 OCPs 的分布特征[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2008, **48**(9): 1462-1465, 1471.
- Wang T, Huang J, Yu G. Distribution of polychlorinated biphenyls and organochlorine pesticides in sediments of the Haihe River and Bohai Bay [J]. *Journal of Tsinghua University (Science & Technology)*, 2008, **48**(9): 1462-1465, 1471.
- [45] 岳强, 管玉峰, 涂秀云, 等. 广东北江上游流域农田土壤有
- 机氯农药残留及其分布特征[J]. *生态环境学报*, 2012, **21**(2): 321-326.
- Yue Q, Guan Y F, Tu X Y, *et al.* Residual and distribution of organochlorine pesticides in agricultural soils from the upper watershed of Beijiang River in Guangdong province, China [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, **21**(2): 321-326.
- [46] Kuch B, Hagenmaier H, Körner W. Determination of brominated flame retardants in sewage sludges and sediments in south-west Germany [A]. In: *The 11th Annual European Society of Environmental Toxicology and Chemistry Meeting* [C]. Madrid, Spain: ISWA, 2001.
- [47] Ikononou M G, Rayne S, Fischer M, *et al.* Occurrence and congener profiles of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in environmental samples from coastal British Columbia, Canada [J]. *Chemosphere*, 2002, **46**(5): 649-663.
- [48] 罗孝俊, 余梅, 麦碧娴, 等. 多溴联苯醚 (PBDEs) 在珠江口水体中的分布与分配[J]. *科学通报*, 2008, **53**(2): 141-146.
- Luo J X, Yu M, Mai B X, *et al.* Distribution and partition of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in water of the Zhujiang River estuary [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, **53**(4): 493-500.
- [49] 韦朝海, 廖建波, 刘浔, 等. PBDEs 的来源特征、环境分布及污染控制[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(10): 3025-3041.
- Wei C H, Liao J B, Liu X, *et al.* Source, characteristics, environmental distribution and pollution control of PBDEs [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(10): 3025-3041.
- [50] 谢薇, 孙天河, 韩鹏, 等. 青藏高原中部地区表层土壤中多溴联苯醚的分布特征及影响因素[J]. *现代地质*, 2012, **26**(5): 917-925.
- Xie W, Sun T H, Han P, *et al.* Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in surface soil from Central Tibetan Plateau, China: congeners distribution and controlling factors [J]. *Geoscience*, 2012, **26**(5): 917-925.
- [51] 刘芃岩, 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.
- Liu P Y, Lu J L, Sun J H, *et al.* Research status of photodegradation of polybrominated diphenyl ethers (PBDES) [J]. *Environmental Chemistry*, 2015, **34**(2): 270-278.
- [52] 曾甯, 姚建, 唐阵武, 等. 典型废旧塑料处置地土壤中多溴联苯醚污染特征[J]. *环境科学研究*, 2013, **26**(4): 432-438.
- Zeng N, Yao J, Tang Z W, *et al.* Pollution characteristics of polybrominated diphenyl ethers in soils from waste plastic recycling region in China [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2013, **26**(4): 432-438.
- [53] GB 3838-2002, 地表水环境质量标准[S].
- GB 3838-2002, Environmental quality standard for surface water [S].
- [54] Zhang L, Li J G, Zhao Y F, *et al.* Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) and indicator polychlorinated biphenyls (PCBs) in foods from China: levels, dietary intake, and risk assessment [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2013, **61**(26): 6544-6551.
- [55] Wang W, Zheng J S, Chan C Y, *et al.* Health risk assessment of exposure to polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) contained in residential air particulate and dust in Guangzhou and Hong

- Kong[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **89**: 786-796.
- [56] Zhang Q, Ye J J, Chen J Y, *et al.* Risk assessment of polychlorinated biphenyls and heavy metals in soils of an abandoned e-waste site in China[J]. *Environmental Pollution*, 2014, **185**: 258-265.
- [57] 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.
Tang L. Preliminary studies on polybrominated diphenyl ethers and decabromodiphenyl ethane in various typical environmental matrices of shanghai [D]. Shanghai: Shanghai University, 2012.
- [58] Environment Canada. Canadian Environmental Protection Act: ecological screening assessment report on polybrominated diphenyl ethers (PBDEs)[R]. 2006.
- [59] Long E R, MacDonald D D. Recommended uses of empirically derived, sediment quality guidelines for marine and estuarine ecosystems[J]. *Human and Ecological Risk Assessment*, 1998, **4**(5): 1019-1039.
- [60] 陈峰, 唐访良, 徐建芬, 等. 千岛湖表层沉积物中有机氯农药的残留特征及生态风险评价[J]. *湖泊科学*, 2014, **26**(4): 593-599.
Chen F, Tang F L, Xu J F, *et al.* Residue characteristics and ecological risk assessment of organochlorine pesticide (OCPs) in the surface sediments of Lake Qiandao [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2014, **26**(4): 593-599.
- [61] 杨海君, 张海涛, 刘亚宾, 等. 洞庭湖沉积物中持久性有机有毒物质的分布、评价与源解析[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(4): 1530-1539.
Yang H J, Zhang H T, Liu Y B, *et al.* Distribution, assessment and sources analysis of persistent organic toxic chemicals in sediments of Dongting Lake[J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(4): 1530-1539.



CONTENTS

Air Pollutant Emission Inventory from Iron and Steel Industry in the Beijing-Tianjin-Hebei Region and Its Impact on PM _{2.5}	DUAN Wen-jiao, LANG Jian-lei, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (1445)
Simulation of the Spatio-temporally Resolved PM _{2.5} Aerosol Mass Concentration over the Inland Plain of the Beijing-Tianjin-Hebei Region	HAO Jing, SUN Cheng, GUO Xing-yu, <i>et al.</i> (1455)
Effect of Relative Humidity on Particulate Matter Concentration and Visibility During Winter in Chengdu	LIU Fan, TAN Qin-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (1466)
Vertical Distributional Characteristics of Inorganic Ions of PM _{2.5} at Mt. Huashan, Inland China	CAO Cong, WANG Ge-hui, WU Can, <i>et al.</i> (1473)
Analysis of the Composition of Atmospheric Fine Particles (PM _{2.5}) Produced by Burning Fireworks	XIE Rui-jia, HOU Hong-xia, CHEN Yong-shan (1484)
Chemical Composition Characteristics of PM _{2.5} Emitted by Medium and Small Capacity Coal-fired Boilers in the Yangtze River Delta Region	XU Jian, HUANG Cheng, LI Li, <i>et al.</i> (1493)
Emission Factors of Heavy Metals in Size-resolved Particles Emitted from Residential Coal Combustion	YAN Qin, KONG Shao-fei, LIU Hai-biao, <i>et al.</i> (1502)
Distribution of Oxalate in Atmospheric Aerosols and the Related Influencing Factors in Qingdao, During Winter and Spring	ZHANG Shuai, SHI Jin-hui, YAO Xiao-hong, <i>et al.</i> (1512)
Concentrations and Solubility of Trace Elements in Atmospheric Precipitation in Qingdao	LI Qian, SHI Jin-hui, LI Peng-zhi, <i>et al.</i> (1520)
Occurrence and Gas-particle Partitioning of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Air of Liaodong Bay	ZHANG Yu-feng, SONG Yong-gang, TIAN Jin, <i>et al.</i> (1527)
Analysis of Sources, Pollution Characteristics, and Human Exposure to Atmospheric New Halogenated Flame Retardants in Selected Areas	LI Qi-lu, YANG Kong, LI Jun, <i>et al.</i> (1537)
Contamination Characterization and Human Exposure Levels to Polybrominated Diphenyl Ethers in Indoor and Outdoor Air in Industrial Park of Suzhou City	WANG Jun-xia, GU Hai-dong, ZHANG Zhan-en, <i>et al.</i> (1544)
Effect of Air Pollution on the Cold Disease in Shanghai	YANG Si-xu, MA Yu-xia, ZHOU Jian-ding, <i>et al.</i> (1552)
Fluorescent Dissolved Organic Matter and Its Correlation with Water Quality in a Urban River: A Case Study of the Lujiang River in Beilun, Ningbo	CAO Chang-li, LIANG Meng-qi, HE Gui-ying, <i>et al.</i> (1560)
Relationship Between Landscape Pattern and Water Quality in the Ebinur Lake Region	CAO Can, ZHANG Fei, Ayinigeer·Yalikun, <i>et al.</i> (1568)
CH ₄ Fluxes During the Algal Bloom in the Pengxi River	QIN Yu, ZHANG Yu-yang, LI Zhe, <i>et al.</i> (1578)
Dynamic Variations and Sources of Nitrate During Dry Season in the Lijiang River	MIAO Ying, ZHANG Cheng, XIAO Qiong, <i>et al.</i> (1589)
Heavy Metal Pollution of the Drinking Water Sources in the Lujiang River Basin, and Related Health Risk Assessments	ZHANG Qing-hua, WEI Yong-zhu, CAO Jian-hua, <i>et al.</i> (1598)
Characteristics of Phosphorus Fractions and Phosphate Diffusion Fluxes of Sediments in Cascade Reservoirs of the Huangbai River	LIU Jia, LEI Dan, LI Qiong, <i>et al.</i> (1608)
Occurrence and Ecological Risk Assessment of Typical Persistent Organic Pollutants in Baiyangdian Lake	GAO Qiu-sheng, JIAO Li-xin, YANG Liu, <i>et al.</i> (1616)
Simulating the Fate of Typical Organochlorine Pesticides in the Multimedia Environment of the Pearl River Delta	GAO Zi-wen, XU Yue, YI Ru-han (1628)
Mechanisms and Efficiencies of Removal of PPCPs by Pilot River Water Bypass Treatment Process	LI Li, ZHU Bing, BAI Yao, <i>et al.</i> (1637)
Chlorination of Naproxen: Removal, Transformation and Risk Assessment	FAN Xin-xin, DU Er-deng, LI Jia-qi, <i>et al.</i> (1645)
Removing Typical Odorants in Drinking Water by Vacuum Ultraviolet Combined with Chlorine	SUN Xin, ZHANG Yi, SHI Lu-xiao, <i>et al.</i> (1654)
Degradation of Triclosan by Heat Activated Persulfate Oxidation	JIANG Meng-di, ZHANG Qing-yue, JI Yue-fei, <i>et al.</i> (1661)
Adsorption of Tetracycline on Simulated Suspended Particles in Water	XU Long-feng, WEI Qun-shan, LÜ Qiang, <i>et al.</i> (1668)
Characteristics and Performance of Embedded ANAMMOX Bacteria in Treating Saline Wastewater	SHAN Xiao-jing, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (1677)
Enhanced Nitrogen Removal of ANAMMOX Treating Saline Wastewater With Betaine Addition	YU De-shuang, WU Guo-dong, LI Jin, <i>et al.</i> (1688)
Pilot-scale Experiment on Enrichment of Nitrifying Activated Sludge and Its Application in Enhancing a Wastewater Biological Treatment System Against Ammonia Shocking Loads	SHENG Xiao-lin, CUI Can-can, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (1697)
Effect of Step Feed on Denitrifying Phosphorus and Nitrate Removal in a Modification of the Two Sludge A ² /O-BAF System	NAN Yan-bin, PENG Yong-zhen, ZENG Li-yun, <i>et al.</i> (1704)
Achieving Partial Nitrification in a Continuous-flow Aerobic Granular Sludge Reactor at Different Temperatures Through Ratio Control	LIANG Dong-bo, BIAN Wei, KAN Rui-zhe, <i>et al.</i> (1713)
Mechanism of Action of Activated Sludge Properties in Nitrogen Removal by Endogenous Denitrification Through an Intelligent Aeration-controlled A/O Process	XU Min-yang, HU Zhan-bo, ZHANG Sui-sheng, <i>et al.</i> (1720)
Effect of Temperature on the Performance and Microbial Community Structure in an Integrated Anaerobic Fluidized-bed Membrane Bioreactor Treating Benzothiazole Wastewater	LI Yue, HU Qi, GAO Da-wen (1731)
Removal of Antibiotics During In-situ Sludge Ozone-reduction Process	WANG Lu, BEN Wei-wei, LI Yan-gang, <i>et al.</i> (1739)
Effect of Zero Valent Iron on the Horizontal Gene Transfer of Tetracycline Resistance Genes During Anaerobic Sludge Digestion Process	YANG Fan, XU Wen-li, QIAN Ya-jie, <i>et al.</i> (1748)
Effects of Environmental Factors on the Synergy of Functional Bacteria in Completely Autotrophic Granular Sludge	CHEN Xi, QIAN Fei-yue, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (1756)
Microbiological Characteristics of a Post Solid-Phase Denitrification Biofilter Process	ZHANG Qian, JI Fang-ying, XU Xuan (1763)
Aerobic Denitrification and Microbial Community Shift in SBR Bioaugmented with Strains YH01 and YH02	CHEN Hai-sheng, CAO Gang, ZHANG Di, <i>et al.</i> (1773)
Performance, Sludge Characteristics, and the Microbial Community Dynamics of Bulking Sludge Under Different Nitrogen and Phosphorus Imbalances	HE Xue-meng, DING Li-li, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i> (1782)
Degradation Characteristics and Metabolic Pathway of a Pyrene-Degrading <i>Pseudomonas aeruginosa</i> Strain	LI Xiang, ZHANG Xue-ying, ZHOU Jun, <i>et al.</i> (1794)
Driving Factors of the Dynamics of Microbial Community in a Dam of Copper Mine Tailings	LI Cui, JING Ju-hui, LIU Jin-xian, <i>et al.</i> (1804)
Effects of Reclamation on Soil Nutrients and Microbial Activities in the Huixian Karst Wetland in Guilin	HUANG Ke-chao, SHEN Yu-yi, XU Guang-ping, <i>et al.</i> (1813)
Effects of the Farmland-to-Forest/Grassland Conversion Program on the Soil Bacterial Community in the Loess Hilly Region	CHEN Meng-li, ZENG Quan-chao, HUANG Yi-mei, <i>et al.</i> (1824)
Insight into the Mechanism of Feammox in the Surface Soils of a Riparian Zone	DING Bang-jing, LI Zheng-kui, ZHU Hong-jie, <i>et al.</i> (1833)
Soil Degradation-Associated Microbial Community Structure Changes in an Alpine Meadow Under Tibetan Pig Herding	ZHAN Peng-fei, XIAO De-rong, YAN Peng-fei, <i>et al.</i> (1840)
Characteristics of Iron Plaque and Its Heavy Metal Enrichment in Typical Mangrove Plants in Shenzhen Bay, China	SHEN Xiao-xue, LI Rui-li, CHAI Min-wei, <i>et al.</i> (1851)
Spatial Distribution of DDTs and PCBs in Wild Fish from Hong Kong Coastal Areas and Potential Human Health Risk Assessment	SU Yang, BAO Lian-jun, ZENG Eddy Y (1861)
Pollution Characteristics of PAHs in Soil from a Remote Mountain Wetland-Dajiu Lake, Shengnongjia	HU Tian-peng, XING Xin-li, KE Yan-ping, <i>et al.</i> (1872)
Migration and Transformation of Mercury in Unsubmerged Soil and Sediment at One Typical Forest Reservoir in Southwest China	SUN Tao, MA Ming, WANG Yong-min, <i>et al.</i> (1880)
Accumulation of Cd and Its Risks in the Soils of the Xijiang River Drainage Basin in Guangxi	SONG Bo, YANG Zi-jie, ZHANG Yun-xia, <i>et al.</i> (1888)
Effects of Long-term Fertilization Regimes on As Accumulation in Upland Red Earth and the Crops Growing on It	ZHANG Rong, YU Guang-hui, LI Ya-qing (1901)
Effects of a Tribasic Amendment on Cadmium and Arsenic Accumulation and Translocation in Rice in a Field Experiment	GU Jiao-feng, ZHOU Hang, JIA Run-yu, <i>et al.</i> (1910)
Quantitative Relationship Between Paddy Soil Properties and Cadmium Content in Rice Grains	WANG Meng-meng, HE Meng-yuan, SU De-chun (1918)
Effect of Ca-bentonite on Cu and Zn Forms in Compost and Soil, and Their Absorption by Chinese Cabbage	ZHAO Jun-chao, WANG Quan, REN Xiu-na, <i>et al.</i> (1926)
Effects of Short-term Exogenous Nitrogen and Carbon Input on Soil Respiration Under Changing Precipitation Pattern	HE Yun-long, QI Yu-chun, PENG Qin, <i>et al.</i> (1934)
Effects of Simulated Precipitation Reduction on Soil Respiration in a Soybean-Winter Wheat Rotation Cropland	WANG Zhao-hui, CHEN Shu-tao, SUN Lu, <i>et al.</i> (1943)
Seasonal Variation in Nitric Oxide Emission from an Agricultural Headwater Ditch in the Hilly Purple Soil Area and the Factors Influencing Emission	TIAN Lin-lin, REN Guang-qian, ZHU Bo (1952)
Effects of Seasonal Asymmetric Warming on Soil CO ₂ Release in Karst Region	TANG Guo-yong, ZHANG Chun-hua, LIU Fang-yan, <i>et al.</i> (1962)