

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.3
第41卷 第3期

目次

长江经济带 PM _{2.5} 分布格局演变及其影响因素	黄小刚, 赵景波, 曹军骥, 辛未冬 (1013)
中国东海近海岛屿冬季与夏季气溶胶中水溶性离子化学组分特征及来源解析	方言, 曹芳, 范美益, 章炎麟 (1025)
阳泉市秋冬季 PM _{2.5} 化学组分及来源分析	王成, 闫雨龙, 谢凯, 李如梅, 徐扬, 彭林 (1036)
泰安市夏季 PM _{2.5} 中正构烷烃和糖类化合物的化学组成及其来源	衣雅男, 侯战方, 杨千才, 刘晓迪, 李政, 孟静静, 燕丽, 魏本杰, 伏梦璇 (1045)
黄山秋季大气颗粒物理化特性	卞逸舒, 银燕, 王红磊, 陈魁 (1056)
北碚区气溶胶光学厚度特征及其与颗粒物浓度的相关性	曾唯, 郝庆菊, 赵仲婧, 熊维霞, 陈俊江, 辛金元, 江长胜 (1067)
淄博市重点工业行业 VOCs 排放特征	王雨燕, 王秀艳, 杜森, 白瑾丰, 杨文 (1078)
鄂州市大气 VOCs 污染特征及来源解析	付昱萌, 杨红刚, 卢民瑜, 曾颜, 邹迎新 (1085)
浙江省汽车整车制造业挥发性有机物产排污系数	滕富华, 杨忠平, 董事壁, 付超, 缪孝平, 顾震宇 (1093)
基于工艺过程的金属包装业 VOCs 污染特征	王迪, 聂磊, 赵文娟, 张玮琦, 党鸿雁, 邵霞, 张新民 (1099)
薪柴和经济作物秸秆燃烧 VOCs 排放特征	牛真真, 孔少飞, 严沁, 郑淑睿, 郑煌, 曾昕, 姚立全, 吴剑, 张颖, 吴方琪, 程溢, 覃思, 刘玺, 燕莹莹, 祁士华 (1107)
精细化工园区工艺过程 VOCs 产生量核算方法	叶茵韵, 田金平, 陈吕军 (1116)
2017 年春季常州 HONO 观测及对大气氧化能力影响的评估	施晓雯, 戈逸峰, 张玉婵, 马嫣, 郑军 (1123)
中国工程机械使用特征及其尾气排放趋势	庞凯莉, 张凯山, 马帅, 王帆 (1132)
京津冀机场群飞机 LTO 大气污染物排放清单	韩博, 孔魏凯, 姚婷玮, 王愚 (1143)
在用汽油和柴油车排放颗粒物的粒径分布特征实测	王瑞宁, 胡馨遥, 任洪娟, 马冬, 徐冲, 赵玺乾, 王孟昊, 徐为标, 安静宇, 黄成 (1151)
参数选取对畜禽养殖业大气氨排放的影响: 以长三角地区为例	张琪, 黄凌, 殷司徒, 王倩, 李红丽, 王杨君, 王军, 陈勇航, 李莉 (1158)
乌海市煤矿区及周边春季降尘污染特征及来源分析	吴红璇, 史常青, 张艳, 赵廷宁, 胡平, 刘韵, 陈童 (1167)
长江中下游地区丰水期河、湖水氢氧同位素组成特征	李静, 吴华武, 周永强, 赵中华, 王晓龙, 蔡永久, 贺斌, 陈雯, 孙伟 (1176)
伊洛河流域河水来源及水化学组成控制因素	刘松韬, 张东, 李玉红, 杨锦媚, 邹霜, 王永涛, 黄兴宇, 张忠义, 杨伟, 贾保军 (1184)
城镇化进程中新疆塔城盆地浅层地下水化学演变特征及成因	吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 周冰, 朱亮, 陈坚 (1197)
基于 Sentinel-2 MSI 影像的河湖系统水体悬浮物空间分异遥感监测: 以安徽省升金湖与连接长江段为例	王行行, 王杰, 崔玉环 (1207)
黄土高原高浑浊水体 CDOM 光学特性及影响因素	梁晓文, 郇田田, 王涛 (1217)
人工强制混合充氧及诱导自然混合对水源水库水质改善效果分析	温成成, 黄廷林, 李楠, 张海涵, 林子深, 李衍庆, 杨尚业, 董亚军 (1227)
滤速与水质对低温含铁锰氨地下水中氨去除的影响	张杰, 梅宁, 刘孟浩, 叶雪松, 李冬 (1236)
太湖梅梁湾浮游动物群落结构长期变化特征 (1997~2017 年)	杨佳, 周健, 秦伯强, 权秋梅, 黎云祥 (1246)
汤旺河水生硅藻群落及其与环境因子的关系	薛浩, 王业耀, 孟凡生, 郑丙辉, 张铃松, 程佩璋 (1256)
盐龙湖水源生态净化系统 FG 和 MBFG 演替特征及水质响应性评价	王莲, 李璇, 马卫星, 邹立航, 赵强强, 丁成, 刘向阳 (1265)
三峡库区石盘丘小流域氮磷输出形态及流失通量	陈仕奇, 龙翼, 严冬春, 高明, 黎嘉成, 徐国鑫, 黄容 (1276)
化肥减量配施生物炭对紫色土坡耕地磷流失的影响	罗东海, 王子芳, 龙翼, 严冬春, 徐国鑫, 李娇, 高明 (1286)
利用铁改性方解石作为活性覆盖材料控制水体内源磷的释放	柏晓云, 林建伟, 詹艳慧, 常明玥, 辛慧敏, 吴俊麟 (1296)
茶渣生物炭制备及其对溶液中四环素的去除特性	范世锁, 刘文浦, 王锦涛, 胡红梅, 杨伊宁, 周娜 (1308)
3 种典型多孔高温改性固废材料对磺胺二甲嘧啶的吸附特性	王静, 朱晓丽, 韩自玉, 胡健, 秦之瑞, 焦文涛 (1319)
新制和老化微塑料对多溴联苯醚的吸附	徐鹏程, 郭健, 马东, 葛蔚, 周震峰, 柴超 (1329)
三峡库区支流汝溪河沉积物重金属空间分布及生态风险	方志青, 王永敏, 王训, 谢德体, 王定勇 (1338)
固城湖及出入湖河道表层水体、沉积物和鱼体中有机氯农药分布及风险评估	阚可聪, 谷孝鸿, 李红敏, 陈辉辉, 毛志刚, 曾庆飞 (1346)
衡水湖沉积物中典型持久性有机污染物污染特征与风险评估	张嘉雯, 魏健, 吕一凡, 段亮, 刘利, 王俭, 孟淑锦 (1357)
北京某污水处理厂及接纳水体中典型有机磷酸酯的污染特征和风险评估	张振飞, 吕佳佩, 裴莹莹, 王春英, 郭昌胜, 徐建 (1368)
基于短程反硝化厌氧氨氧化的低碳源城市污水深度脱氮特性	马斌, 许鑫鑫, 高茂鸿, 委燕, 彭永臻 (1377)
PD-DPR 系统处理城市污水与高硝酸盐废水实现稳定亚硝酸盐积累和磷去除的特性	王秋颖, 于德爽, 赵骥, 王晓霞, 袁梦飞, 巩秀珍, 楚光玉, 何彤晖 (1384)
中试 MBBR 反应器启动 CANON 工艺及其短程硝化	付昆明, 杨宗珏, 廖敏辉, 靳怡然, 张晓航 (1393)
抗生素对耐药型反硝化菌反硝化过程及微生物群落结构的影响	代莎, 李彭, 彭五庆, 刘玉学, 王拯, 何义亮, 亮根祥, 胡双庆 (1401)
多次进水-曝气的好氧颗粒污泥系统实验	张杰, 王玉颖, 李冬, 刘志成, 曹思雨 (1409)
剩余污泥碱性发酵产物对硝化过程及性能的影响	邱圣杰, 刘瑾瑾, 李夕耀, 彭永臻 (1418)
硫酸盐对污泥高级厌氧消化过程中甲基汞迁移转化的影响	何湘琳, 刘吉宝, 阴永光, 谭颖锋, 朱爱玲, 左壮, 高山, 解立平, 魏源送 (1425)
工业城市农田土壤重金属时空变异及来源解析	李艳玲, 卢一富, 陈卫平, 杨阳, 蔡斌 (1432)
耕地土壤重金属健康风险空间分布特征	姬超, 侯大伟, 李发志, 包广静, 邓爱萍, 沈红军, 孙华 (1440)
黄河三角洲盐碱土根际微环境的微生物多样性及理化性质分析	赵娇, 谢慧君, 张建 (1449)
不同土地利用方式对土壤细菌分子生态网络的影响	李冰, 李玉双, 魏建兵, 宋雪英, 史荣久, 侯永侠, 刘△瑶 (1456)
红壤丘陵区土壤有机碳组分对土地利用方式的响应特征	章晓芳, 郑生猛, 夏银行, 胡亚军, 苏以荣, 陈香碧 (1466)
有机肥与无机肥配施对潮土 N ₂ O 排放的影响	孙赫阳, 万忠梅, 刘德燕, 廖霞, 丁维新 (1474)
冬小麦吸收重金属特征及与影响因素的定量关系	王怡雯, 芮玉奎, 李中阳, 苏德纯 (1482)
钙镁磷肥对石灰、海泡石组配修复镉污染稻田土壤的影响	鄢德梅, 郭朝晖, 黄凤莲, 冉洪珍, 张鹏 (1491)
桉树遗态磷灰石材料对铅污染土壤的钝化修复效应	方雅莉, 朱宗强, 赵宁宁, 朱义年, 李超, 张立浩 (1498)
外源亚精胺对 As ⁵⁺ 胁迫下水稻种子萌发和 As 吸收积累的影响	刘书锦, 黄益宗, 保琼莉, 黄永春, 张盛楠, 韩廿, 刘玉荣, 胡红青 (1505)
《环境科学》征订启事 (1024) 《环境科学》征稿简则 (1092) 信息 (1226, 1264, 1417)	

衡水湖沉积物中典型持久性有机污染物污染特征与风险评估

张嘉雯^{1,2}, 魏健^{1*}, 吕一凡^{1,3}, 段亮¹, 刘利², 王俭², 孟淑锦⁴

(1. 中国环境科学研究院水环境治理研究室, 北京 100012; 2. 辽宁大学环境学院, 沈阳 110036; 3. 中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院, 北京 100083; 4. 河北省衡水环境监测中心, 衡水 053000)

摘要: 在衡水湖布设 11 个点位, 于 2018 年 8 月和 2019 年 3 月开展两次采样, 对衡水湖沉积物中多环芳烃 (PAHs)、有机氯农药 (OCPs) 和多溴联苯醚 (PBDEs) 这 3 类典型持久性有机污染物 (POPs) 进行污染特征分析及生态风险评价。结果表明: ①8 月和 3 月衡水湖沉积物中 $\sum$ PAHs 平均值分别为 $875.49 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $1010.17 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 与国内外其他地区相比处于中等污染水平, $\sum$ PAHs 空间分布存在差异, 但是季节变化差异不明显; PAHs 污染来源复杂, 最主要为木材和煤燃烧, 其次为石油污染; PAHs 生态风险处于较低水平, 建议加强对芡的防控。②8 月和 3 月衡水湖沉积物中 $\sum$ OCPs 平均值分别为 $35.57 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $38.39 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 与国内外其他地区相比处于中等污染水平, $\sum$ OCPs 空间差异较小, 季节差异变化显著; 沉积物中 DDTs 含量主要受土壤中长期分化残留的 DDTs 和新 DDTs 源输入的影响, HCHs 含量同时受工业历史使用和农业林丹的输入的影响; OCPs 总体生态风险处于中等水平, 需加强对 DDTs 防控。③8 月和 3 月衡水湖沉积物中 $\sum$ PBDEs 平均值分别为 $1.77 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $1.45 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 与国内外其他地区相比处于较低污染水平, 各点位 $\sum$ PBDEs 空间差异较小, 季节变化差异不明显; 沉积物中 PBDEs 主要为低溴代 PBDEs, 其污染可能来源于纺织、泡沫品产生的五溴联苯醚, 也可能是通过远距离的大气、水体沉降迁移或岸边土壤冲刷入湖; PBDEs 暂时没有生态风险。

关键词: 持久性有机污染物; 衡水湖; 沉积物; 源解析; 生态风险

中图分类号: X171.5; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)03-1357-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.201908036

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

ZHANG Jia-wen^{1,2}, WEI Jian^{1*}, LÜ Yi-fan^{1,3}, DUAN Liang¹, LIU Li², WANG Jian², MENG Shu-jin⁴

(1. Department of Water Environment Treatment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. College of Environmental Sciences, Liaoning University, Shenyang 110036, China; 3. College of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China; 4. Hengshui Environmental Monitoring Center, Hengshui 053000, China)

Abstract: Sediment samples were collected from 11 typical sites in Hengshui Lake separately in August 2018 and March 2019. Characteristics and ecological risk assessment of typical persistent organic pollutants (POPs), including polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), organochlorine pesticides (OCPs), and polybrominated diphenyl ethers (PBDEs), in these sediments were analyzed. The results showed that the average content of $\sum$ PAHs in sediments of Hengshui Lake was $875.49 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ and $1010.17 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ in August 2018 and March 2019, respectively. Compared with other regions in China and abroad, $\sum$ PAHs in sediments from Hengshui Lake were at moderate pollution level. Distribution of $\sum$ PAHs varied between different sites, but the values changed within a narrow range in different seasons. Sources of PAHs in sediments from Hengshui Lake were complex, but combustion of wood and coal was the main source, followed by oil pollution. Generally, the ecological risk of PAHs was at a low level. However, fluorene pollution control should be strengthened. For $\sum$ OCPs, the average values in sediments were $35.57 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ and $38.39 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ in August and March, respectively. Compared with other regions, the pollution of $\sum$ OCPs was at a moderate level. In addition, the distribution of $\sum$ OCPs varied a small amount between different sites. There were significant differences between the two seasons. The contents of DDTs in sediments were mainly related to the residual DDTs after long-term soil weathering and the input of recent DDTs sources. Contents of HCHs in sediments were influenced by the use of HCHs in industrial history and inputs of agricultural lindane. Generally, the ecological risk of OCPs was at a medium level, but the DDTs pollution control should be strengthened. For $\sum$ PBDEs, the

收稿日期: 2019-08-05; 修订日期: 2019-10-28

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(2019YSKY-009)

作者简介: 张嘉雯(1995~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为流域水污染治理与管理, E-mail: ZhangJW8609@163.com

* 通信作者, E-mail: weijian0911@163.com

average values were $1.77 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ and $1.45 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ in the sediments in August 2018 and March 2019, respectively. Compared with other regions, they were at a lower pollution level. The distribution of $\sum$ PBDEs showed small differences between different sites, and did not obviously vary between spring and summer. The PBDEs in sediments were mainly low-bromine PBDEs, which might be contaminated with penta-BDEs from textiles and foams. Additionally, PBDEs were also probably input by distant settlement and migration from the atmosphere, and soil flushing into the lake. PBDEs posed no immediate ecological risk.

Key words: persistent organic pollutants; Hengshui Lake; sediment; source analysis; ecological risk

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 3 种典型的持久性有机污染物, 在环境中可以通过多种介质进行远距离传输, 并通过食物链在生物体富集, 对生态环境和人体健康产生严重的危害^[1,2]. 这类污染物往往具有长期残留性、半挥发性、生物蓄积性、高毒性和难降解性, 在世界很多地区均有检出, 部分地区甚至超出标准值几十倍以上, 严重威胁到生态环境和人体健康, 虽然已经进行了大量的调查、研究, 但目前仍是国际上环境领域关注的热点^[3~5].

生态风险评估 (ecological risk assessment, ERA) 是通过与人类活动相关的任何可能对生态成分产生不利影响的化学、物理或生物实体, 来评估造成不利生态影响的可能性, 为环境管理和决策提供依据^[6,7]. 在自然环境中, 持久性有机污染物可以通过干湿沉降沉积到湖泊沉积物中, 在沉积物和上覆水之间的交换作用下, 沉积物中的污染物可能会释放至水体形成二次污染, 威胁湖泊生态安全^[8,9]. 因此, 研究持久性有机污染物在沉积物中的分布特征、污染状况以及开展生态风险评价具有重要意义. 近年来, 有关学者针对沉积物中的持久性有机污染物分布特征及风险评价等已开展大量的研究, 并取得了一些研究成果^[10~13].

衡水湖是华北平原上第一个国家级湿地自然保护区, 加强衡水湖湿地的建设和保护对维护华北平原内陆淡水湿地生态系统、调节周边乃至京津地区气候环境具有重要作用^[14,15]. 近年来, 国家省市各级政府针对衡水湖的生态环境保护开展了大量的工作, 水环境质量得到明显的改善. 由于衡水湖历史上曾有过一段污染较重的时期, 对整个衡水湖的生态环境带来的不利影响至今仍然存在. 例如, 沉积物中富集的有机污染物会对底栖生物等造成直接影响, 及其再次释放会造成水体的二次污染. 然而, 目前鲜有关于衡水湖持久性有机污染物的研究, 针对持久性有机污染物的系统调查与生态风险评估也未见报道. 开展衡水湖沉积物持久性有机污染物污染特征调查及生态风险评价, 解析湖区有机污染物来源, 有助于提高衡水湖生态治理与保护工作的针对性, 对

衡水湖生态环境保护具有十分重要的指导意义.

本研究以衡水湖表层沉积物中持久性有机污染物为研究对象, 分析 PAHs、OCPs 和 PBDEs 这 3 种典型有机污染物的残留量和分布特征, 探讨各污染物的来源和风险水平, 在此基础上开展区域生态环境风险评价, 以期为衡水湖的水环境保护和管理提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

衡水湖位于河北省衡水市境内, 流域总面积 187.87 km^2 , 总蓄水面积 75 km^2 , 水源补给主要来自定期的黄河引水, 是“南水北调”调蓄工程的枢纽, 为南水北调中线工程丹江口—北京的必经之路^[16,17].

1.2 点位布设与样品采集

综合考虑衡水湖的湖区功能划分、水动力特征和污染源分布等因素, 科学布设 11 个采样点 (图 1), 其编号及地理位置信息详见表 1. 参照相关标准规范^[18,19], 于丰水期 (2018 年 8 月) 和枯水期 (2019 年 3 月) 分两次用抓斗式采样器采取该 11 个点位的表层沉积物 (0 ~ 10 cm), 密封保存于棕色玻璃瓶

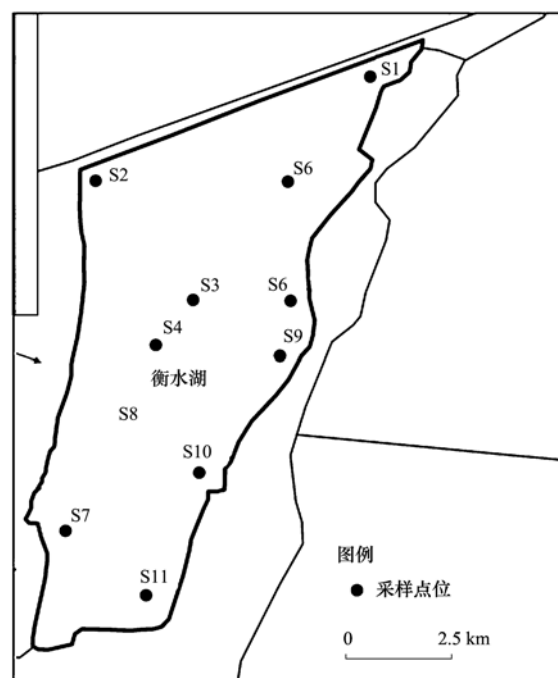


图 1 衡水湖沉积物采样点分布示意

Fig. 1 Map of sediment sampling sites in Hengshui Lake

中,低温储存。

表 1 衡水湖沉积物采样点分布地理位置信息

Table 1 Geographic location information of sediment sampling sites in Hengshui Lake

编号	点位名称	纬度	经度
S1	大赵闸	37°39'24.55"	115°38'41.93"
S2	南李庄村	37°38'23.09"	115°35'27.37"
S3	大湖心	37°36'33.76"	115°36'26.86"
S4	顺民庄	37°36'45.05"	115°35'41.95"
S5	王口闸	37°36'36.76"	115°37'48.10"
S6	梅花岛	37°38'33.20"	115°37'27.01"
S7	道安寺	37°34'32.45"	115°34'43.01"
S8	前冢村	37°35'23.45"	115°34'56.58"
S9	小湖王口闸	37°36'16.90"	115°36'55.72"
S10	小湖心	37°35'14.15"	115°36'15.49"
S11	小湖碧水湾酒店	37°34'22.72"	115°35'41.7"

1.3 样品的处理及分析

1.3.1 仪器与试剂

主要仪器:气相色谱-质谱联用仪(Agilent7890B-

5977A,美国 Agilent);恒温水浴氮吹仪(TTL-DC,北京同泰联科技发展有限公司);全温振荡培养箱(HZQ-X160,太仓市实验设备厂);旋转蒸发仪(N-1100V-W,日本东京理化);冷冻干燥机(ALPHA 1-2 LD,北京五洲东方科技发展有限公司);玻璃固相萃取柱(含砂芯滤板,30 cm×10 mm)。

主要试剂:PAHs 混合标准品、OCPs 混合标准品、PBDEs 混合标准品、正己烷、二氯甲烷、丙酮、乙酸乙酯、铜粉、无水硫酸钠、硅胶和中性氧化铝(实验试剂所用均色谱纯,购自北京迈瑞达科技有限公司)。

1.3.2 样品前处理及分析条件

将冷冻后的沉积物样品在冷冻干燥机中进行干燥处理,然后用玛瑙研钵研磨均匀,装入棕色瓶,放入冰箱中在-4℃温度下保存,样品前处理方法及分析条件^[20]如表2所示。

表 2 PAHs、OCPs 和 PBDEs 前处理方法及分析条件

Table 2 Pretreatment method and analysis conditions of PAHs, OCPs, and PBDEs

项目	PAHs	OCPs	PBDEs
分析指标	萘(Nap)、苊(Ace)、苊烯(Acy)、芴(Flu)、菲(Phe)、蒽(Ant)、荧蒽(Fla)、芘(Pyr)、苯并[a]蒽(BaA)、蒽(Chry)、苯并[b]荧蒽(BbF)、苯并[k]荧蒽(BkF)、苯并[a]芘(BaP)、茚并[1,2,3-cd]芘(InP)、二苯并[ah]蒽(DahA)和苯并[ghi]芘(BghiP)	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)	BDE-28、BDE-47、BDE-99、BDE-100、BDE-153、BDE-154、BDE-183 和 BDE-209
前处理方法	称取研磨后的底泥样品 15 g 于 150 mL 锥形瓶中,加入 40 mL 正己烷和丙酮(1:1,体积比)混合溶液,3 g 铜粉,锥形瓶至于摇床振荡 10 h,使溶剂和底泥样品充分混合后,超声萃取 20 min,萃取液通过无水硫酸钠干燥过滤收集于鸡心瓶,再用同样方法重复超声萃取底泥样品 2 次,最后合并 3 次萃取液,用旋蒸仪浓缩至近干,加入 10 mL 正己烷继续浓缩至 1 mL 完成溶剂置换,待净化		
净化方法	玻璃层析柱自下到上依次为:1 cm 无水硫酸钠,5 cm 中性氧化铝,6 cm 硅胶,2 cm 无水硫酸钠。先用 20 mL 正己烷预淋洗层析柱,弃去淋洗液,待上层溶剂液面与无水硫酸钠相切时,加入样品萃取液,用 15 mL 正己烷洗脱层析柱并收集洗脱液,再用 20 mL 正己烷和二氯甲烷(1:1,体积比)混合溶液洗脱柱子,洗脱液全部收集于 100 mL 鸡心瓶中。洗脱液旋蒸浓缩至近干,加入 10 mL 正己烷溶剂置换,最后用氮吹仪浓缩近干,定容 1 mL 待气相色谱质谱(GC-MS)分析检测	玻璃层析柱自下到上依次为:1 cm 无水硫酸钠,5 cm 中性氧化铝,6 cm 硅胶,2 cm 无水硫酸钠。先用 20 mL 正己烷预淋洗层析柱,弃去淋洗液,待上层溶剂液面与无水硫酸钠相切时,加入样品萃取液,用 15 mL 正己烷洗脱层析柱并收集洗脱液,再用 15 mL 正己烷和二氯甲烷(1:1,体积比)混合溶液洗脱柱子,洗脱液全部收集于 100 mL 鸡心瓶中。洗脱液旋蒸浓缩至近干,加入 10 mL 正己烷溶剂置换,最后用氮吹仪浓缩近干,定容 1 mL 待气相色谱质谱(GC-MS)分析检测	玻璃层析柱自下到上依次为 1 cm 无水硫酸钠,5 cm 中性氧化铝,6 cm 硅胶,2 cm 无水硫酸钠。先用 20 mL 正己烷预淋洗层析柱,加入提取液后,用 15 mL 正己烷洗脱层析柱并收集洗脱液,洗脱液全部收集于 100 mL 鸡心瓶中。洗脱液旋蒸浓缩至近干,最后用正己烷定容至 1 mL,待检测
色谱条件	色谱柱型号为 DB-5MS(30 m×0.25 mm×0.25 μm)石英毛细管柱;载气为高纯 He(99.999%);柱流速 1.0 mL·min ⁻¹ ;进样量 1 μL;不分流进样;进样口温度 280℃;升温程序是初始温度 80℃(保持 2 min),然后以 20℃·min ⁻¹ 升至 180℃(保持 5 min),再以 10℃·min ⁻¹ 升至 290℃(保持 5 min)	色谱柱型号为 DB-5MS(30 m×0.25 mm×0.25 μm)石英毛细管柱;载气为高纯 He(99.999%);柱流速 1.0 mL·min ⁻¹ ;进样量 1 μL;不分流进样;进样口温度 250℃;升温程序是初始温度 120℃(保持 2 min),然后以 12℃·min ⁻¹ 升至 180℃(保持 5 min),以 7℃·min ⁻¹ 升至 240℃(保持 1 min),再以 1℃·min ⁻¹ 升至 250℃(保持 2 min),后程序升温至 280℃(保持 2 min)	色谱柱型号为 DB-5MS(30 m×0.25 mm×0.25 μm)石英毛细管柱;载气为高纯 He(99.999%);柱流速 2.0 mL·min ⁻¹ ;进样量 1 μL;不分流进样;进样口温度 270℃;升温程序是初始温度 60℃(保持 1 min),然后以 30℃·min ⁻¹ 升至 200℃(保持 1 min),以 10℃·min ⁻¹ 升至 260℃,再以 30℃·min ⁻¹ 升至 320℃(保持 3 min)
质谱条件	电子轰击(EI)离子源;离子源温度 230℃;电子能量 70 eV;四极杆温度 150℃;传输线温度 280℃;溶剂延迟时间 5 min;m/z 离子全扫描范围为 50~500	电子轰击(EI)离子源;离子源温度 230℃;电子能量 70 eV;四极杆温度 150℃;传输线温度 280℃;溶剂延迟时间 5 min;m/z 离子全扫描范围为 50~500	电子轰击(EI)离子源;离子源温度 230℃;电子能量 70 eV;四极杆温度 150℃;传输线温度 300℃;溶剂延迟时间 5 min;m/z 离子全扫描范围为 50~500

1.3.3 质量控制与保证

采用回收率实验、精密度实验和方法空白实验进行质量控制和保证. 其中, PAHs、OCPs 和 PBDEs 的加标回收率分别为 73.2% ~ 95.1%、67.3% ~ 102.0% 和 70.5% ~ 93.7%. 实验过程中, 每 10 个样品为一批次, 初始精密度的偏差 < 20%. 每 10 个样品增加 1 个方法空白, PAHs、OCPs 和 PBDEs 的方法检出限分别为 0.03 ~ 0.50、0.05 ~ 1.50 和 0.10 ~ 2.70 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$.

2 结果与讨论

2.1 衡水湖沉积物 PAHs

2.1.1 PAHs 含量分布特征

2018 年 8 月 S7 点位沉积物中 $\sum$ PAHs 含量最高, 为 $1785.37 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, S9 点位沉积物中 $\sum$ PAHs 含量最低, 为 $394.89 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均值为 $875.49 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ (图 2). 2019 年 3 月 S7 点位沉积物中 $\sum$ PAHs 含量最高, 为 $2038.99 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, S9 点位沉积物中 $\sum$ PAHs 含量最低, 为 $263.68 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均值为 $1010.17 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$. 衡水湖沉积物各点位 $\sum$ PAHs 含量空间差异较大, 季节分布无显著差异 ($P=0.542 > 0.05$). 基于湖泊沉积物中的 $\sum$ PAHs 已有报道^[21], 衡水湖沉积物中 PAHs 处于中等污染水平.

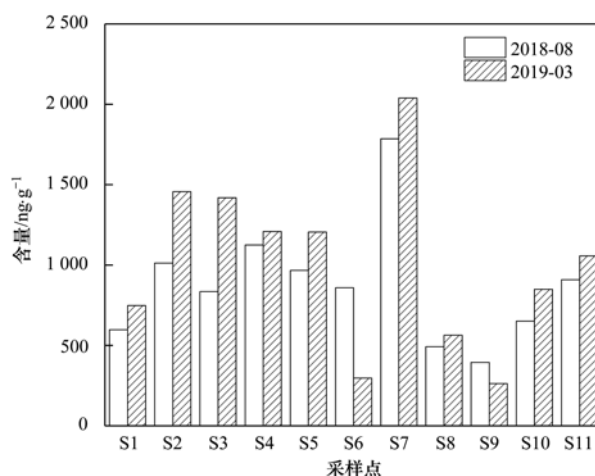


图 2 衡水湖 PAHs 含量空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of PAHs content in Hengshui Lake

2.1.2 PAHs 组成特征及来源解析

PAHs 是环境中普遍存在的一种持久性有机污染物, 种类繁多, 具有毒性、致癌性和诱变性, 美国环保署(EPA)已将 16 种多环芳烃列为重点污染物^[22]. 本研究选取该 16 种具有典型代表的单体进行检测, 各自含量占比分析结果如图 3. 2018 年 8 月采集的样品中菲、荧蒽、芘、蒽和苯并[b]荧蒽等单体在沉积物中占比较高. 其中, 苯并[b]荧蒽含量最高, 达到 25.73%; 二苯并[a,h]蒽和苯并[g,h,i]芘单体在沉积物中未检出. 2019 年 3 月采集的样品中菲、荧蒽、芘、苯并[a]蒽、蒽和苯并[b]荧蒽等单体在沉积物中均占有较高比例. 其中, 苯并[b]荧蒽含量最高, 达到 25.79%; 苯并[g,h,i]芘单体未检出.

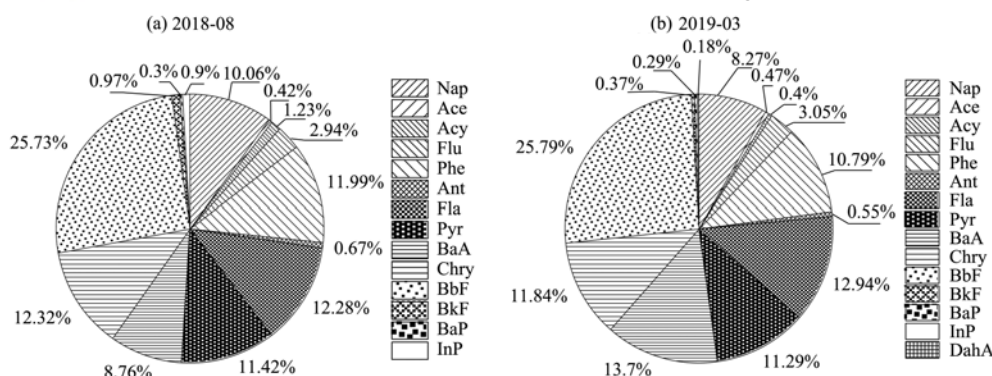


图 3 衡水湖 PAHs 16 种单体含量占比分布

Fig. 3 Distribution of 16 monomer contents of PAHs in Hengshui Lake

根据苯环的个数将 PAHs 进行分类 (图 4), 2018 年 8 月衡水湖沉积物中 PAHs 以高环数为主, 四环占比最高为 59.21%, 其次是三环、二环和五环, 分别占比为 24.93%、14.66% 和 1.20%, 其中六环没有检出. 2019 年 3 月衡水湖沉积物中 PAHs 以高环数为主, 四环占比最高为 63.00%, 其次是三环、二环和五环, 分别占比为 24.28%、12.19% 和 0.53%, 其中六环没有检出. 总体而言, 除个别单体

外, 高环芳烃 (4 ~ 6 环) 单体平均含量高于低环芳烃 (2 ~ 3 环) 单体平均含量, 这主要是因为 PAHs 的分子量越大, 越容易在沉积物中累积^[20].

以 $\text{Ant}/(\text{Ant} + \text{Phe})$ 为横坐标, 以 $\text{Flu}/(\text{Flu} + \text{Pyr})$ 为纵坐标绘制衡水湖沉积物中 PAHs 的来源解析 (图 5). 当 $\text{Ant}/(\text{Ant} + \text{Phe}) < 0.1$ 为石油源; > 0.1 为燃烧源; 当 $\text{Flu}/(\text{Flu} + \text{Pyr}) < 0.4$ 为石油源; > 0.5 主要是木材和煤燃烧源, 在 0.4 ~ 0.5 之

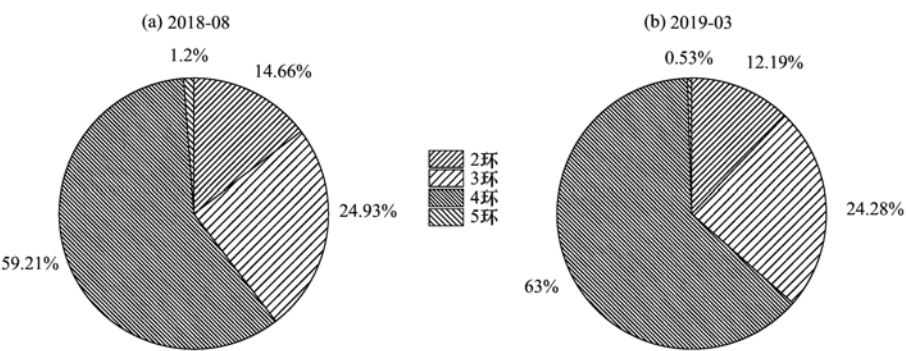


图4 衡水湖 PAHs 同系物含量占比分布

Fig. 4 Distribution of homologues of PAHs in Hengshui Lake

间为石油及其精炼产品的燃烧来源^[23]。2018年8月和2019年3月衡水湖可检出沉积物中 Ant/(Ant + Phe) 比值范围为 0.05 ~ 0.35, 其中大部分比值大于 0.1, 表明衡水湖沉积物中 PAHs 既有石油源又有燃烧源。Flu/(Flu + Pyr) 比值范围为 0.09 ~ 0.88, 其中大部分比值大于 0.5, 部分小于 0.4, 少部分介于 0.4 与 0.5 之间, 结果表明衡水湖沉积物中 PAHs 既受木材、煤、石油及其精炼产品燃烧影响, 同时也受石油污染影响。因此, 衡水湖沉积物中 PAHs 污染来源复杂, 其中最主要为木材和煤燃烧, 其次为石油污染。

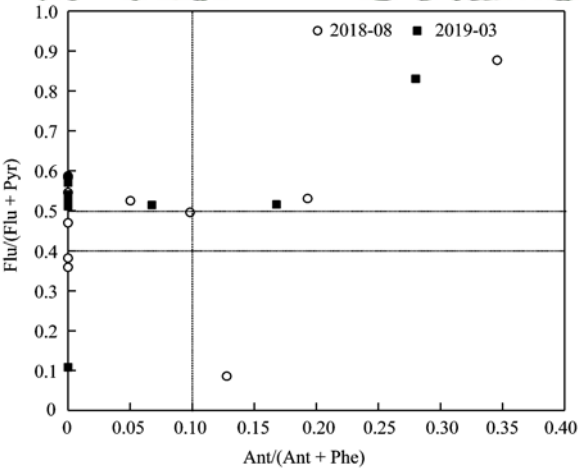


图5 衡水湖 PAHs 来源分析

Fig. 5 Source analysis of PAHs in Hengshui Lake

2.1.3 PAHs 生态风险评价

采用沉积物质量基准法 (SQGs) 对衡水湖沉积物中的生态风险开展评价^[24]。根据 Long 等^[25]提出的沉积物中有机污染物潜在生态风险效应区间低值 (effects range low, ERL) 和效应区间中值 (effects range median, ERM), 当污染物含量小于 ERL 时, 对生物毒副作用不显著 (风险几率 < 10%); 当污染物含量大于 ERM 时, 对生物会产生毒副作用 (风险几率 > 50%), 可能会产生一定的负面生态效应; 当污染物含量在 ERL 与 ERM 之间时 (风险几率介于

10% ~ 50%), 偶尔会产生负面生态效应。

对衡水湖沉积物中 PAHs 生态风险进行评价 (表 3)。结果表明, 衡水湖沉积物中, 萘存在生态风险几率较高, 其它 PAHs 单体存在生态风险几率较低。总体而言, 沉积物中 $\sum$ PAHs 存在较低几率的生态风险。因此, 衡水湖沉积物中 PAHs 总体上处于较低的生态风险水平, 建议在今后的生态环境保护中加强对萘的监测与防控。

表3 衡水湖沉积物中 PAHs 生态风险评价

Table 3 Ecological risk assessment of PAHs in sediments of Hengshui Lake

项目	ERL	ERM	含量/ng·g ⁻¹	比较
Nap	160	2 100	85.84	< ERL
Ace	44	640	4.21	< ERL
Acy	16	500	7.41	< ERL
Flu	19	540	28.29	ERL ~ ERM
Phe	240	1 500	106.98	< ERL
Ant	85.3	1 100	5.72	< ERL
Fla	600	5 100	119.09	< ERL
Pyr	665	2 600	107.05	< ERL
BaA	261	1 600	107.55	< ERL
Chry	384	2 800	113.75	< ERL
BbF	320	1 880	242.90	< ERL
BkF	280	1 620	6.12	< ERL
BaP	430	1 600	2.79	< ERL
InP	—	—	4.86	—
DahA	63.4	260	0.27	< ERL
BghiP	430	1 600	—	< ERL
$\sum$ PAHs	4 022	44 792	942.83	< ERL

2.2 衡水湖沉积物 OCPs

2.2.1 OCPs 含量分布特征

2018年8月S10点位沉积物中 $\sum$ OCPs 含量最高, 为 40.38 ng·g⁻¹, S1 点位沉积物中 $\sum$ OCPs 含量最低, 为 31.53 ng·g⁻¹, 平均值为 35.57 ng·g⁻¹ (图 6)。2019年3月S4点位沉积物中 $\sum$ OCPs 含量最高, 为 41.35 ng·g⁻¹, S1 点位沉积物中 $\sum$ OCPs 含量最低, 为 34.89 ng·g⁻¹, 平均值为

38.39 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$. 可以看出, 两次采样各点位 $\sum$ OCPs 含量空间差异较小, 季节分布呈显著差异 ($P = 0.011 < 0.05$).

2.2.2 OCPs 组成特征及来源解析

OCPs 主要作为杀虫剂被广泛使用, 由于其在环境中具有生物积累性和持久性, 已引起人们的广泛关注^[26]. 本研究选取 8 种具有典型代表性的 OCPs 单体进行检测, 分析获得各自含量占比如图 7. 结果表明, 2018 年 8 月沉积物样品中 p,p' -DDE 和 p,p' -DDT 占有较高比例, β -HCH 和 δ -HCH 的含量较低. 2019 年 3 月沉积物样品中 δ -HCH 和 p,p' -DDD 占有较高比例, γ -HCH、 o,p' -DDT 的含量较低. 总体而言, 衡水湖沉积物中 8 种 OCPs 单体占比较均衡, 各单体含量差别不大.

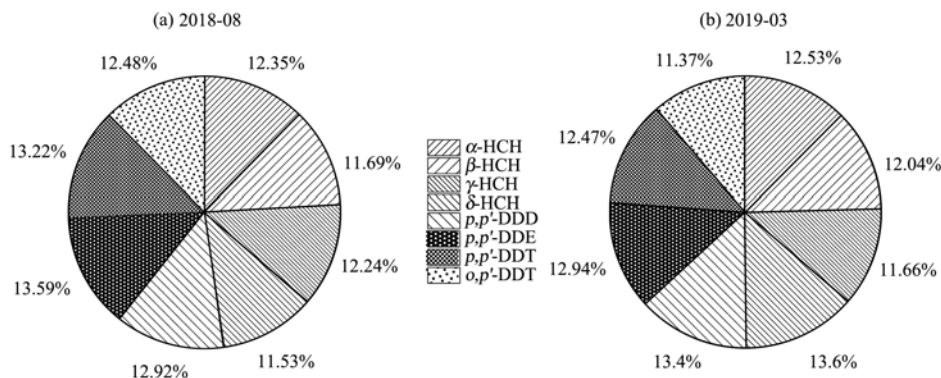


图 7 衡水湖 OCPs 8 种单体含量占比分布

Fig. 7 Distribution of eight monomer contents in OCPs of Hengshui Lake

2018 年 8 月衡水湖沉积物中 $\sum$ DDTs 为 204.24 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 约占 OCPs 总量的 52.20%, $\sum$ HCHs 为 186.99 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 约占 OCPs 总量的 47.80%; DDTs 平均值为 18.57 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, HCHs 平均值为 17.00 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 其中含量较高的 OCPs 为 DDTs. 2019 年 3 月衡水湖沉积物中 $\sum$ DDTs 为 211.89 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 约占 OCPs 总量的 50.18%, $\sum$ HCHs 为 210.41 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 约占 OCPs 总量的 49.82%; DDTs 平均值为 19.26 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, HCHs 平均值为 19.13 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 其中含量较高的 OCPs 为 DDTs. 总体而言, 衡水湖沉积物中 HCHs 和 DDTs 占比差别不大, 各约占 OCPs 总量一半. 基于已有相关调查研究^[27], 表明衡水湖沉积物中 OCPs 处于中等污染水平.

衡水湖沉积物中 p,p' -DDT 在各个点位均有检出, 其代谢产物 p,p' -DDE 和 p,p' -DDD 也均有检出. 一般情况下, 可以用 $(\text{DDD} + \text{DDE}) / \sum \text{DDTs}$ 来判断 DDT 的降解程度及其来源, 其数值高于 0.5 时, 说明污染物可能来自土壤中长期分化残留的

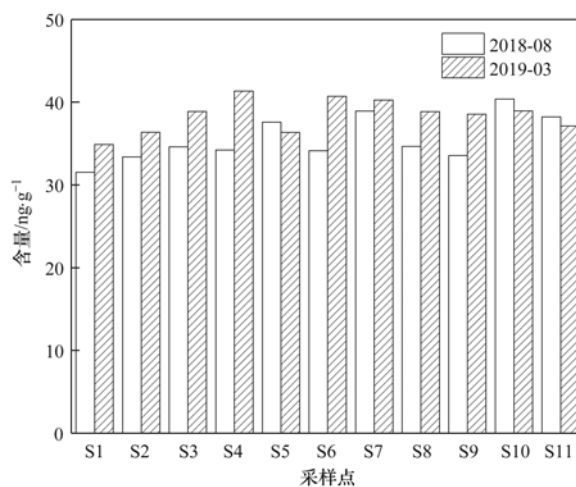


图 6 衡水湖 OCPs 含量空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of OCPs content in Hengshui Lake

DDT^[28]; 比值低说明有新 DDT 输入. 一般认为, DDE/DDD 可指示 DDTs 降解条件^[29], DDE/DDD 大于 1, 说明沉积物中的 DDT 主要被好氧微生物降解; 小于 1 说明沉积物中的 DDT 主要被厌氧微生物降解. 此外, 通过 $\omega(p,p'\text{-DDT}) / \omega(p,p'\text{-DDD} + p,p'\text{-DDE})$ 的比值可以判断传统商用 DDTs 的残留迹象, 如果比值小于 1, 表明该地区存在 DDTs 的使用历史^[30].

以 DDD/DDE 与 $(\text{DDD} + \text{DDE}) / \sum \text{DDTs}$ 解析衡水湖沉积物中 OCPs 来源(图 8), 结果表明, 2018 年 8 月和 2019 年 3 月, 两次采集的沉积物样品 DDE/DDD 比值范围为 0.54 ~ 1.94, 平均值 1.06, 其中半数点位大于 1, 表明衡水湖沉积物中 DDTs 的降解既有好氧微生物又有厌氧微生物参与. $(\text{DDD} + \text{DDE}) / \sum \text{DDTs}$ 比值范围为 0.44 ~ 0.64, 平均值 0.52, 其中超过半数点位大于 0.5, 表明衡水湖沉积物中 DDTs 主要来自于土壤中长期分化残留的 DDTs, 此外还受新 DDTs 源输入影响. $\omega(p,p'\text{-DDT}) / \omega(p,p'\text{-DDD} + p,p'\text{-DDE})$ 比值范围为 0.27 ~ 0.74, 比值均小于 1, 进一步表明衡水湖沉积物中的 DDTs 主要为

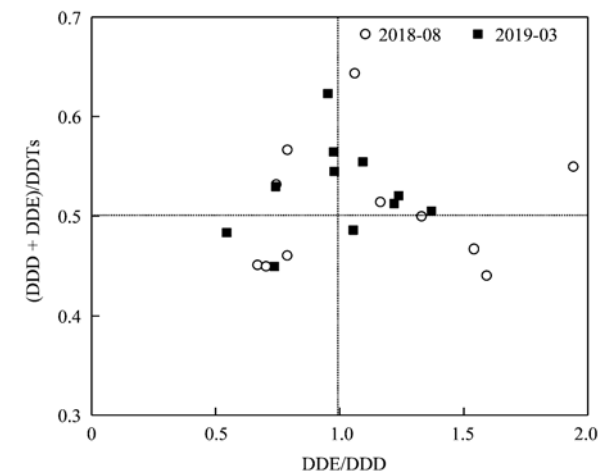


图 8 衡水湖 DDTs 来源分析

Fig. 8 Source analysis of DDTs in Hengshui Lake

历史残留。

HCHs 的 4 种异构体在所有的样品中均有检测出,其在环境中的生物降解速率依次为 α -HCH $>$ γ -HCH $>$ δ -HCH $\gg$ β -HCH, HCHs 在环境中存在的越久, β -HCH 的比例越高,同时 α -HCH/ γ -HCH 比值可以被大体评判环境中是否有新的 γ -HCH 输入,若 α -HCH/ γ -HCH 小于 1,可以认为有新的 γ -HCH 输入^[31]. 因此,较高的 $\omega(\alpha\text{-HCH})/\omega(\gamma\text{-HCH})$ 比值表明 HCHs 来源于历史上商业 HCHs 的使用,较低的 $\omega(\alpha\text{-HCH})/\omega(\gamma\text{-HCH})$ 比值则表明近期林丹的输入^[30].

衡水湖沉积物中 α -HCH/ γ -HCH 为 0.24 ~ 2.56, 平均值 1.12, 其中半数点位大于 1, 表明衡水湖沉积物既有历史上商业 HCHs 的使用又有近期林丹的输入. 总体而言,衡水湖沉积物中 HCHs 同时受工业和农业的影响,工业 HCHs 源为历史上商业 HCHs 的使用,农业 HCHs 源为近期林丹的输入.

2.2.3 OCPs 生态风险评价

OCPs 生态风险评价方式与 PAHs 评价方式相同(表 4),结果表明,衡水湖沉积物中,4 种 DDTs 单体和 $\sum$ DDTs 含量均在 ERL 和 ERM 之间,说明存在一定几率的生态风险. 因此,衡水湖沉积物中 OCPs 总体生态风险处于中等水平,同时建议加强对 DDTs 的防控监测.

表 4 衡水湖沉积物中 OCPs 生态风险评价

Table 4 Ecological risk assessment of OCPs in sediments of Hengshui Lake

OCPs	ERL	ERM	含量/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$	比较
p,p' -DDE	2.2	27	4.90	ERL ~ ERM
p,p' -DDD	2	20	4.87	ERL ~ ERM
p,p' -DDT	1	7	4.75	ERL ~ ERM
o,p' -DDT	1	7	4.40	ERL ~ ERM
$\sum$ DDTs	3	46.1	18.92	ERL ~ ERM

2.3 衡水湖沉积物 PBDEs

2.3.1 PBDEs 含量分布特征

根据 8 月和 3 月沉积物各点位 $\sum$ PBDEs 数据及图 9 可知,8 月 S1 点位沉积物中 $\sum$ PBDEs 含量最高,为 $5.46\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 其次 S3 点位,为 $5.01\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 其中 2 处点位未检出,各点位平均值为 $1.77\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$. 3 月 S3 点位沉积物中 $\sum$ PBDEs 含量最高,为 $3.51\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 其次 S4 点位,为 $2.84\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 其中 1 处点位未检出,各点位平均值为 $1.45\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$. 可以看出,衡水湖沉积物中各点位 $\sum$ PBDEs 含量空间差异较小,季节分布无显著差异($P = 0.984 > 0.05$). 参考国内外其他研究结果^[32,33],衡水湖沉积物中 PBDEs 处于较低污染水平.

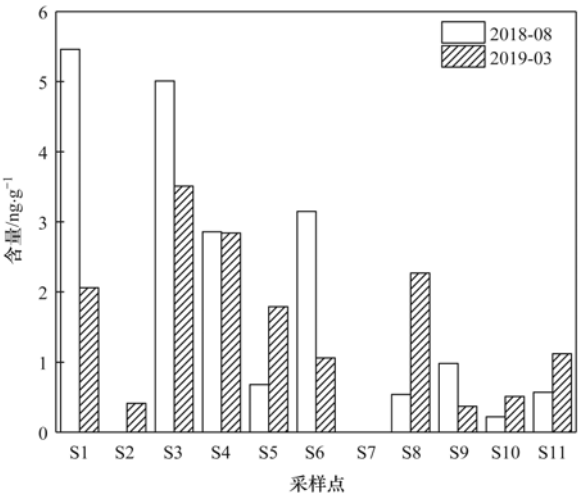


图 9 衡水湖 PBDEs 含量空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of PBDEs in Hengshui Lake

2.3.2 PBDEs 组成特征及来源解析

多溴二苯醚种类繁多,不仅具有生物蓄积作用,而且对人体内分泌功能具有潜在的负面影响. 研究发现,在一定条件下,多溴二苯醚在环境中的迁移转化会释放出高毒性、致癌的多溴二苯二噁英(PBDDs)和多溴二苯呋喃(PBDFs),对环境和人体具有潜在危害^[34]. 本研究选取 8 种典型 PBDEs 单体进行检测,分析各自含量占比,结果如图 10. 从中可知,8 月和 3 月沉积物中 BDE-47、BDE-153 和 BDE-154 等均占有较高比例,但 BDE-209 单体未检出.

根据分子结构中溴原子个数对这 7 种 PBDEs 进行分类,结果如图 11. 8 月沉积物中 6-Br 含量占比最高,达到 53.00%,其次是 4-Br 和 3-Br,分别为 28.71% 和 11.61%. 3 月沉积物中 6-Br 占比最高,

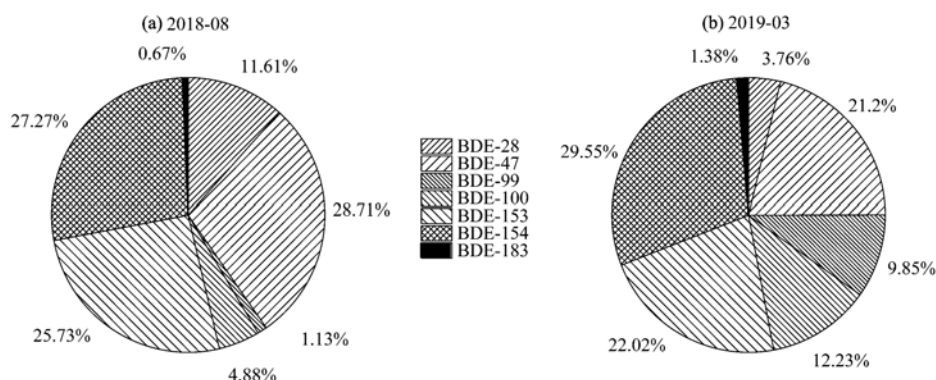


图 10 衡水湖 PBDEs 7 种单体含量占比分布

Fig. 10 Distribution of seven monomer contents in PBDEs of Hengshui Lake

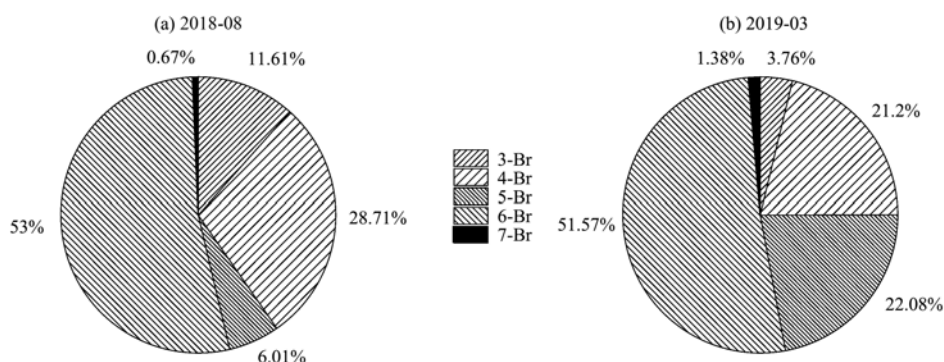


图 11 衡水湖 PBDEs 同系物含量占比分布

Fig. 11 Distribution of homologues of PBDEs in Hengshui Lake

达到 51.57%, 其次是 5-Br 和 4-Br, 分别为 22.08% 和 21.20%。

多溴联苯醚是环境中普遍存在的一种污染物, 可以通过大气的干、湿沉降向水体、土壤和沉积物扩散传输^[35~38]. 低溴代 PBDEs 具有较高的大气压和水溶解度, 易于通过空气及水输送^[39]. 高溴代 PBDEs 在长距离的迁移过程中, 也可能产生脱溴作用形成低溴代 PBDEs^[40]. 一般而言, 大气、水体和生物体内中存在的主要是低溴代联苯醚^[41,42], 土壤中主要是五溴和六溴取代的多溴联苯醚, 浓度在几十到上万 $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间^[43,44]. 工业生产中, 五溴联苯醚 (Penta-BDE, 包括 BDE-47、BDE-99、BDE-100、BDE-153 和 BDE-154 等) 常用于聚氨酯泡沫和纺织品的生产, 八溴联苯醚 (Octa-BDE, 包括 BDE-183 和 BDE-153 等) 常用于苯乙烯、聚氨酯酯和热塑材料的生产, 十溴联苯醚 (Deca-BDE, 主成分为 BDE-209 等) 常用于纺织品和电子电器产品的生产^[45,46], 这些产品在生产、使用和废物处置阶段, 会不同程度地释放多溴联苯醚到环境中。

结果表明, 衡水湖沉积物中 BDE-47、BDE-153 和 BDE-154 含量较高, 主要为低溴代 PBDEs, 以 6-Br 为主, 说明衡水湖沉积物中 PBDEs 污染可能是来源

于纺织、泡沫品产生的五溴联苯醚, 也可能是通过远距离的大气、水体沉降迁移或岸边土壤冲刷入湖而来。

2.3.3 PBDEs 生态风险评价

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^[47~49], 对衡水湖沉积物中 PBDEs 的生态风险进行评价, 其公式为:

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

式中, Q 为风险值商值, MEC 为 3 种工业 PBDEs 的检测浓度, MSNOCE 为 3 种工业 PBDEs 无显著影响含量. 本研究将 BDE-28、BDE-47、BDE-99 和 BDE-100 归为 Penta-BDEs; BDE-153、BDE-154 和 BDE-183 归为 Octa-BDEs; BDE-209 归为 Deca-BDEs^[50]. 根据文献^[51], 沉积物中 Penta-BDEs、Octa-BDEs 和 Deca-BDEs 的 MSNOCE (以干重计) 值分别为 0.031、13.40 和 45.36 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 根据商值法的表征原理, 当 $Q < 1$ 时表明无生态风险; 当 $1 \leq Q < 5$ 时为低风险; 当 $5 \leq Q < 10$ 时为中等风险; 当 $Q \geq 10$ 时为高风险^[52]. 计算衡水湖各点位沉积物中 3 种工业 PBDEs 风险商值 (图 12), 结果表明, 所有点位沉积物的 3 种工业 PBDEs 风险商值均小于 1, 表明衡水湖的 PBDEs 污染暂无生态风险。

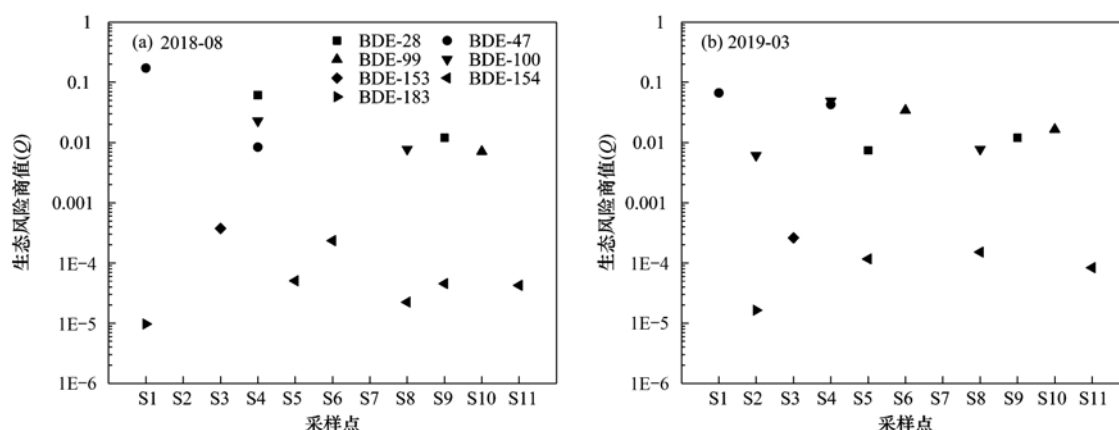


图 12 衡水湖沉积物中 PBDEs 的生态风险评价结果

Fig. 12 Ecological risk assessment results of PBDEs in sediments of Hengshui Lake

3 结论

(1) 2018 年 8 月和 2019 年 3 月衡水湖沉积物中 $\sum$ PAHs 平均值分别为 $875.49 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $1010.17 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 与国内外其他地区相比, 处于中等污染水平. $\sum$ PAHs 空间差异较大, 季节变化差异不明显. 另外, 来源解析表明衡水湖沉积物中 PAHs 来源复杂, 最主要为木材和煤燃烧, 其次为石油污染. 总体而言, PAHs 生态风险处于较低水平, 建议加强对芡的防控.

(2) 8 月和 3 月衡水湖沉积物 $\sum$ OCPs 平均值分别为 $35.57 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $38.39 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 与国内外其他地区相比处于中等污染水平, $\sum$ OCPs 空间差异较小, 季节变化差异显著; 沉积物中 DDT 主要受土壤中长期分化残留的 DDTs 和新 DDTs 源输入的影响, HCHs 同时受工业历史使用和农业林丹的输入. 总体而言, OCPs 总体生态风险处于中等水平, 应加强对 DDTs 防控.

(3) 8 月和 3 月衡水湖沉积物 $\sum$ PBDEs 平均值分别为 $1.77 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $1.45 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 与国内外其他地区相比处于较低污染水平, $\sum$ PBDEs 空间差异较小, 季节变化差异不明显; 沉积物中 PBDEs 主要为低溴代 PBDEs, 污染可能来源于纺织、泡沫品产生的五溴联苯醚, 也可能是通过远距离的大气、水体沉降迁移或岸边土壤冲刷入湖而来. 总体而言, PBDEs 暂时没有生态风险.

参考文献:

- [1] Jones K C, de Voogt P. Persistent organic pollutants (POPs): state of the science[J]. Environmental Pollution, 1999, **100**(1-3): 209-221.
- [2] Unyimadu J P, Osibanjo O, Babayemi J O. Selected persistent organic pollutants (POPs) in water of River Niger: occurrence

and distribution[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2018, **190**(1): 6.

- [3] Grice B A, Nelson R G, Williams D E, *et al.* Associations between persistent organic pollutants, type 2 diabetes, diabetic nephropathy and mortality[J]. Occupational and Environmental Medicine, 2017, **74**(7): 521-527.
- [4] Herzig R, Lohmann N, Meier R. Temporal change of the accumulation of persistent organic pollutants (POPs) and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in lichens in Switzerland between 1995 and 2014[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, **26**(11): 10562-10575.
- [5] 李霞, 王东红, 王金生, 等. 北京市枯水季和丰水季水源水中持久性有机污染物的水平分析[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(2): 437-442.
- Li X, Wang D H, Wang J S, *et al.* Analysis of persistent organic pollutants (POPs) levels in dry and wet seasons in source water of municipal waterworks in Beijing [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, **35**(2): 437-442.
- [6] Norton S B, Rodier D J, van der Schalie W H, *et al.* A framework for ecological risk assessment at the EPA [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 1992, **11**(12): 1663-1672.
- [7] 毛小冬, 倪晋仁. 生态风险评价研究述评[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2005, **41**(4): 646-654.
- Mao X L, Ni J R. Recent progress of ecological risk assessment [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2005, **41**(4): 646-654.
- [8] 杨敏. 辽河流域沉积物中持久性有机污染物的研究[D]. 大连: 中国科学院研究生院(大连化学物理研究所), 2006.
- [9] 李敏桥, 林田, 郭天锋, 等. 长江口大气多氯联苯干湿沉降通量[J]. 环境科学学报, 2019, **39**(8): 2717-2724.
- Li M Q, Lin T, Guo T F, *et al.* Atmospheric dry and wet depositional fluxes of polychlorinated biphenyls over the Yangtze River Estuary [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, **39**(8): 2717-2724.
- [10] 郭雪, 毕春娟, 陈振楼, 等. 滴水湖及其水体交换区沉积物和土壤中 PAHs 的分布及生态风险评价[J]. 环境科学, 2014, **35**(7): 2664-2671.
- Guo X, Bi C J, Chen Z L, *et al.* Distribution and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments and soils from Dishui Lake and its water exchange areas [J]. Environmental Science, 2014, **35**(7): 2664-2671.
- [11] 卫亚宁, 潘佳钊, 宋玉梅, 等. 柘林湾表层沉积物中有机氯农药的分布特征及生态风险评价[J]. 环境科学, 2016, **37**

- (8): 3007-3016.
- Wei Y N, Pan J C, Song Y M, *et al.* Distribution characteristics and ecological risk assessment of organochlorine pesticides in surface sediments of Zhelin Bay in Guangdong Province, China [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(8): 3007-3016.
- [12] 张家泉, 胡天鹏, 邢新丽, 等. 大冶湖表层沉积物-水中多环芳烃的分布、来源及风险评价[J]. *环境科学*, 2017, **38**(1): 170-179.
- Zhang J Q, Hu T P, Xing X L, *et al.* Distribution, sources and risk assessment of the PAHs in the surface sediments and water from the Daye Lake[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(1): 170-179.
- [13] 王霞, 张青琢, 赵高峰, 等. 水库淹没带土壤有机氯农药分布特征及风险评价[J]. *环境科学*, 2019, **40**(7): 3058-3067.
- Wang X, Zhang Q Z, Zhao G F, *et al.* Distribution and potential risk of organochlorine pesticides in the Soil of a submerged area around Miyun Reservoir[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(7): 3058-3067.
- [14] 王乃姗, 张曼胤, 崔丽娟, 等. 河北衡水湖湿地汞污染现状及生态风险评价[J]. *环境科学*, 2016, **37**(5): 1754-1762.
- Wang N S, Zhang M Y, Cui L J, *et al.* Contamination and ecological risk assessment of mercury in Hengshuihu Wetland, Hebei Province [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(5): 1754-1762.
- [15] 黎聪, 李晓文. 衡水湖湿地恢复预案空间模拟及生态风险评价[J]. *环境科学学报*, 2010, **30**(6): 1312-1321.
- Li C, Li X W. Modeling the scenarios of restoring the wetland in Hengshui Lake national nature reserve and assessing their ecological risk [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, **30**(6): 1312-1321.
- [16] 陈吉, 李秋华, 李仲根, 等. 河北省衡水湖沉积物中汞的分布特征及生态风险[J]. *生态毒理学报*, 2014, **9**(5): 908-915.
- Chen J, Li Q H, Li Z G, *et al.* Distribution and risk assessment of mercury in the sediments of Hengshuihu Lake, Hebei Province [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2014, **9**(5): 908-915.
- [17] 张曼胤, 崔丽娟, 盛连喜, 等. 衡水湖湿地底泥重金属污染及潜在生态风险评价[J]. *湿地科学*, 2007, **5**(4): 362-369.
- Zhang M Y, Cui L J, Sheng L X, *et al.* Pollution and ecological risk assessment of heavy metals in the Hengshuihu Wetland [J]. *Wetland Science*, 2007, **5**(4): 362-369.
- [18] HJ 493-2009, 水质采样 样品的保存和管理技术规定[S].
- [19] HJ 494-2009, 水质 采样技术指导[S].
- [20] 任亚军. 扬州城区水体和表层底泥中3类持久性有机污染物时空分布及风险评价[D]. 扬州: 扬州大学, 2018.
- [21] 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.
- [22] Man Y B, Chow K L, Cheng Z, *et al.* Profiles and removal efficiency of polycyclic aromatic hydrocarbons by two different types of sewage treatment plants in Hong Kong [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2017, **53**: 196-206.
- [23] Yunker M B, Macdonald R W, Vingarzan R, *et al.* PAHs in the Fraser River basin: a critical appraisal of PAH ratios as indicators of PAH source and composition [J]. *Organic Geochemistry*, 2002, **33**(4): 489-515.
- [24] 侯俊, 王超, 王沛芳, 等. 基于平衡分配法的太湖沉积物重金属质量基准及其在生态风险评价中的应用研究[J]. *环境科学学报*, 2012, **32**(12): 2951-2959.
- Hou J, Wang C, Wang P F, *et al.* Sediment quality guidelines and potential ecological risk assessment for heavy metals based on equilibrium partitioning approach in Taihu Lake [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, **32**(12): 2951-2959.
- [25] Long E R, Macdonald D D, Smith S L, *et al.* Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments [J]. *Environmental Management*, 1995, **19**(1): 81-97.
- [26] Yang Y Y, Liu M X, Yun X Y, *et al.* Profiles and risk assessment of organochlorine pesticides in three gorges reservoir, China [J]. *CLEAN-Soil, Air, Water*, 2017, **45**(2): 1600823.
- [27] 舒卫先, 李世杰. 长江三角洲地区典型湖泊表层沉积物中有机氯农药 DDT、HCH 的残留特征与风险评估[J]. *土壤通报*, 2009, **40**(5): 1171-1175.
- Shu W X, Li S J. Residues of organochlorine pesticide DDT and HCH in surface sediments from two typical lakes in the Yangtze River delta and their risk evaluation [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, **40**(5): 1171-1175.
- [28] 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.
- [29] 王江涛, 谭丽菊, 张文浩, 等. 青岛近海沉积物中多环芳烃、多氯联苯和有机氯农药的含量和分布特征[J]. *环境科学*, 2010, **31**(11): 2713-2722.
- Wang J T, Tan L J, Zhang W H, *et al.* Concentrations and distribution characteristic of PAHs, PCBs and OCPs in the surface sediments of Qingdao coastal area [J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(11): 2713-2722.
- [30] 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.
- [31] 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 Qingdao [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2014, **26**(4): 593-599.
- [32] 高秋生, 焦立新, 杨柳, 等. 白洋淀典型持久性有机污染物污染特征与风险评估[J]. *环境科学*, 2018, **39**(4): 1616-1627.
- Gao Q S, Jiao L X, Yang L, *et al.* Occurrence and ecological risk assessment of typical persistent organic pollutants in Baiyangdian Lake [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(4): 1616-1627.
- [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] Wu M H, Xu B T, Xu G, *et al.* Occurrence and profiles of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in riverine sediments of Shanghai: a combinative study with human serum from the locals

- [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2017, **39**(4): 729-738.
- [35] 赵志刚. 大连海域底泥环境多溴联苯醚生态风险分析研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2013.
- [36] 赵高峰, 周怀东, 杜苗, 等. 海河流域 14 条河流表层沉积物中多溴联苯醚的分布特征[J]. *环境科学*, 2011, **32**(7): 2069-2073.
- Zhao G F, Zhou H D, Du M, *et al.* PBDEs in sediments from 14 principal tributaries of Haihe River and their potential risk[J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(7): 2069-2073.
- [37] Ter Schure A F H, Larsson P, Agrell C, *et al.* Atmospheric transport of polybrominated diphenyl ethers and polychlorinated biphenyls to the Baltic sea[J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, **38**(5): 1282-1287.
- [38] de Wit C A. An overview of brominated flame retardants in the environment[J]. *Chemosphere*, 2002, **46**(5): 583-624.
- [39] Eskenazi B, Chevrier J, Rauch S A, *et al.* *In utero* and childhood polybrominated diphenyl ether (PBDE) exposures and neurodevelopment in the CHAMACOS study[J]. *Environmental Health Perspectives*, 2013, **121**(2): 257-262.
- [40] Lu Z, Letcher R J, Chu S G, *et al.* Spatial distributions of polychlorinated biphenyls, polybrominated diphenyl ethers, tetrabromobisphenol A and bisphenol A in Lake Erie sediment[J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2015, **41**(3): 808-817.
- [41] Strandberg B, Dodder N G, Basu I, *et al.* Concentrations and spatial variations of polybrominated diphenyl ethers and other organohalogen compounds in Great Lakes air[J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, **35**(6): 1078-1083.
- [42] Akutsu K, Obana H, Okishashi M, *et al.* GC/MS analysis of polybrominated diphenyl ethers in fish collected from the Inland Sea of Seto, Japan[J]. *Chemosphere*, 2001, **44**(6): 1325-1333.
- [43] Harrad S, Hunter S. Concentrations of polybrominated diphenyl ethers in air and soil on a rural-urban transect across a major UK conurbation[J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **40**(15): 4548-4553.
- [44] Law R J, Allchin C R, de Boer J, *et al.* Levels and trends of brominated flame retardants in the European environment[J]. *Chemosphere*, 2006, **64**(2): 187-208.
- [45] Alcock R E, Sweetman A J, Prevedouros K, *et al.* Understanding levels and trends of BDE-47 in the UK and North America; an assessment of principal reservoirs and source inputs[J]. *Environment International*, 2003, **29**(6): 691-698.
- [46] Birnbaum L S, Staskal D F. Brominated flame retardants; cause for concern? [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2004, **112**(1): 9-17.
- [47] 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.
- [48] 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.
- [49] 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.
- [50] 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.
- [51] 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.
- Zhou D, Zhang W H, Wang L S. Extrapolation in risk assessment of toxicant[J]. *Advances in Environmental Science*, 1995, **3**(2): 42-48.
- [52] 陈香平, 彭宝琦, 吕素平, 等. 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[J]. *环境科学*, 2016, **37**(5): 1771-1778.
- Chen X P, Peng B Q, Lü S P, *et al.* Pollution characteristics and ecological risk of PBDEs in water and sediment from an electronic waste dismantling area in Taizhou[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(5): 1771-1778.

CONTENTS

Evolution of the Distribution of PM _{2.5} Concentration in the Yangtze River Economic Belt and Its Influencing Factors	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, CAO Jun-ji, <i>et al.</i>	(1013)
Chemical Characteristics and Source Apportionment of Water-Soluble Ions in Atmosphere Aerosols over the East China Sea Island During Winter and Summer	FANG Yan, CAO Fang, FAN Mei-yi, <i>et al.</i>	(1025)
Analysis of Chemical Components and Sources of PM _{2.5} During Autumn and Winter in Yangquan City	WANG Cheng, YAN Yu-long, XIE Kai, <i>et al.</i>	(1036)
Chemical Compositions and Sources of <i>n</i> -Alkanes and Saccharides in PM _{2.5} from Taian City During the Summer	YI Ya-nan, HOU Zhan-fang, YANG Qian-cai, <i>et al.</i>	(1045)
Physical and Chemical Characteristics of Atmospheric Particles in Autumn in Mt. Huangshan	BIAN Yi-shu, YIN Yan, WANG Hong-lei, <i>et al.</i>	(1056)
Characteristics of Aerosol Optical Depth in the Urban Area of Beibei and Its Correlation with Particle Concentration	ZENG Wei, HAO Qing-ju, ZHAO Zhong-jing, <i>et al.</i>	(1067)
Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds from Typical Industries in Zibo	WANG Yu-yan, WANG Xiu-yan, DU Miao, <i>et al.</i>	(1078)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of Atmospheric VOCs in Ezhou City	FU Yu-meng, YANG Hong-gang, LU Min-yu, <i>et al.</i>	(1085)
Producing Coefficients and Emission Coefficients of Volatile Organic Compounds from the Automobile Manufacturing Industry in Zhejiang Province	TENG Fu-hua, YANG Zhong-ping, DONG Shi-bi, <i>et al.</i>	(1093)
Pollution Characteristics of Volatile Organic Compounds Emission from the Metal Packaging Industry Based on Analysis of Process	WANG Di, NIE Lei, ZHAO Wen-juan, <i>et al.</i>	(1099)
Profile Characteristics of VOCs from Wood and Economic Crop Burning	NIU Zhen-zhen, KONG Shao-fei, YAN Qin, <i>et al.</i>	(1107)
Accounting Methods of VOCs Emission Associated with Production Processes in a Fine Chemical Industrial Park	YE Han-yun, TIAN Jin-ping, CHEN Lü-jun	(1116)
HONO Observation and Assessment of the Effects of Atmospheric Oxidation Capacity in Changzhou During the Springtime of 2017	SHI Xiao-wen, GE Yi-feng, ZHANG Yu-chan, <i>et al.</i>	(1123)
Analysis of Activity and Its Emissions Trend for Construction Equipment in China	PANG Kai-li, ZHANG Kai-shan, MA Shuai, <i>et al.</i>	(1132)
Air Pollutant Emission Inventory from LTO Cycles of Aircraft in the Beijing-Tianjin-Hebei Airport Group, China	HAN Bo, KONG Wei-kai, YAO Ting-wei, <i>et al.</i>	(1143)
Particle Size Distribution of PM Emission from In-use Gasoline and Diesel Vehicles	WANG Rui-ning, HU Qing-yao, REN Hong-juan, <i>et al.</i>	(1151)
Impact of Parameterization on the Estimation of Ammonia Emissions: A Case Study over the Yangtze River Delta	ZHANG Qi, HUANG Ling, YIN Si-jia, <i>et al.</i>	(1158)
Characteristics and Source Apportionment of Dustfall Pollution in the Coal Mine Area and Surrounding Areas of Wuhai City in Spring	WU Hong-xuan, SHI Chang-qing, ZHANG Yan, <i>et al.</i>	(1167)
Variations of Stable Oxygen and Deuterium Isotopes in River and Lake Waters During Flooding Season Along the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River Regions	LI Jing, WU Hua-wu, ZHOU Yong-qiang, <i>et al.</i>	(1176)
Water Sources and Factors Controlling Hydro-chemical Compositions in the Yiluo River Basin	LIU Song-tao, ZHANG Dong, LI Yu-hong, <i>et al.</i>	(1184)
Chemical Evolution of Groundwater in the Tacheng Basin of Xinjiang in the Process of Urbanization	LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i>	(1197)
Remote Sensing Monitoring on Spatial Differentiation of Suspended Sediment Concentration in a River-Lake System Based on Sentinel-2 MSI Imaging: A Case for Shengjin Lake and Connected Yangtze River Section in Anhui Province	WANG Hang-hang, WANG Jie, CUI Yu-huan	(1207)
CDOM Optical Characteristics and Related Environmental Factors of High-turbidity Waters on the Loess Plateau	LIANG Xiao-wen, SHAO Tian-tian, WANG Tao	(1217)
Effects of Artificial Destratification and Induced-natural Mixing on Water Quality Improvement in a Drinking Water Reservoir	WEN Cheng-cheng, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i>	(1227)
Effect of Filter Speed and Water Quality on Ammonia Removal in Groundwater Containing Iron, Manganese, and Ammonia at Low Temperature	ZHANG Jie, MEI Ning, LIU Meng-hao, <i>et al.</i>	(1236)
Long-term Variation Characteristics of Zooplankton Community Structure in Meiliang Bay, Lake Taihu	YANG Jia, ZHOU Jian, QIN Bo-qiang, <i>et al.</i>	(1246)
Community of Benthic Diatoms and Their Relationship with Aquatic Environmental Factors in the Tangwang River, China	XUE Hao, WANG Ye-yao, MENG Fan-sheng, <i>et al.</i>	(1256)
Succession Characteristics and Water Quality Responsiveness Evaluation of FG and MBFG in Yanlong Lake Water Source Ecological Purification System	WANG Lian, LI Xuan, MA Wei-xing, <i>et al.</i>	(1265)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Output and Loss Flux in the Shipanqiu Watershed, Three Gorges Reservoir Area	CHEN Shi-qi, LONG Yi, YAN Dong-chun, <i>et al.</i>	(1276)
Effect of Optimized Fertilization and Biochar Application on Phosphorus Loss in Purple Soil Sloping Farmland	LUO Dong-hai, WANG Zi-fang, LONG Yi, <i>et al.</i>	(1286)
Use of Iron-modified Calcite as an Active Capping Material to Control Phosphorus Release from Sediments in Surface Water Bodies	BAI Xiao-yun, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i>	(1296)
Preparation of Tea Waste Biochar and Its Application in Tetracycline Removal from Aqueous Solution	FAN Shi-suo, LIU Wen-pu, WANG Jing-tao, <i>et al.</i>	(1308)
Adsorption Characteristics of Sulfamethazine on Three Typical Porous High-temperature Modified Solid Waste Materials	WANG Jing, ZHU Xiao-li, HAN Zi-yu, <i>et al.</i>	(1319)
Sorption of Polybrominated Diphenyl Ethers by Virgin and Aged Microplastics	XU Peng-cheng, GUO Jian, MA Dong, <i>et al.</i>	(1329)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Ruxi Tributary of the Three Gorges Reservoir	FANG Zhi-qing, WANG Yong-min, WANG Xun, <i>et al.</i>	(1338)
Distribution and Risk Assessment of OCPs in Surface Water, Sediments, and Fish from Lake Gucheng and Inflow and Outflow Rivers	KAN Ke-cong, GU Xiao-hong, LI Hong-min, <i>et al.</i>	(1346)
Occurrence and Ecological Risk Assessment of Typical Persistent Organic Pollutants in Hengshui Lake	ZHANG Jia-wen, WEI Jian, LÜ Yi-fan, <i>et al.</i>	(1357)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Typical Organophosphate Esters in Beijing Municipal Wastewater Treatment Plant and the Receiving Water	ZHANG Zhen-fei, LÜ Jia-pei, PEI Ying-ying, <i>et al.</i>	(1368)
Advanced Nitrogen Removal Characteristics of Low Carbon Source Municipal Wastewater Treatment via Partial-denitrification Coupled with ANAMMOX	MA Bin, XU Xin-xin, GAO Mao-hong, <i>et al.</i>	(1377)
Stable Nitrite Accumulation and Phosphorus Removal from High-nitrate and Municipal Wastewaters in a Combined Process of Partial Denitrification and Denitrifying Phosphorus Removal (PD-DPR)	WANG Qiu-ying, YU De-shuang, ZHAO Ji, <i>et al.</i>	(1384)
Start-up of CANON Process and Short-cut Nitrification in a Pilot-scale MBBR Reactor	FU Kun-ming, YANG Zong-yue, LIAO Min-hui, <i>et al.</i>	(1393)
Influence of Antibiotics on the Denitrification Process of Antibiotic Resistant Denitrifying Bacteria and the Analysis of Microbial Community Structure	DAI Sha, LI Peng, PENG Wu-qing, <i>et al.</i>	(1401)
Aerobic Granular Sludge System with Multiple Influent-Aeration Operation Strategy	ZHANG Jie, WANG Yu-ying, LI Dong, <i>et al.</i>	(1409)
Effect of Alkaline Sludge Fermentation Products on the Nitrification Process and Performance	QIU Sheng-jie, LIU Jin-jin, LI Xi-yao, <i>et al.</i>	(1418)
Effect of Sulfate on the Migration and Transformation of Methylmercury in Advanced Anaerobic Digestion of Sludge	HE Xiang-lin, LIU Ji-bao, YIN Yong-guang, <i>et al.</i>	(1425)
Spatial-temporal Variation and Source Change of Heavy Metals in the Cropland Soil in the Industrial City	LI Yan-ling, LU Yi-fu, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i>	(1432)
Assessment and Spatial Characteristics Analysis of Human Health Risk of Heavy Metals in Cultivated Soil	JI Chao, HOU Da-wei, LI Fa-zhi, <i>et al.</i>	(1440)
Microbial Diversity and Physicochemical Properties of Rhizosphere Microenvironment in Saline-alkali Soils of the Yellow River Delta	ZHAO Jiao, XIE Hui-jun, ZHANG Jian	(1449)
Effects of Different Land Use Types on the Molecular Ecological Network of Soil Bacteria	LI Bing, LI Yu-shuang, WEI Jian-bing, <i>et al.</i>	(1456)
Responses of Soil Organic Carbon Fractions to Land Use Types in Hilly Red Soil Regions, China	ZHANG Xiao-fang, ZHENG Sheng-meng, XIA Yin-hang, <i>et al.</i>	(1466)
Effect of Organic Fertilizer and Inorganic Fertilizer Application on N ₂ O Emissions from Fluvo-aquic Soil in the North China Plain	SUN He-yang, WAN Zhong-mei, LIU De-yan, <i>et al.</i>	(1474)
Characteristics of Heavy Metal Absorption by Winter Wheat and Its Quantitative Relationship with Influencing Factors	WANG Yi-wen, RUI Yu-kui, LI Zhong-yang, <i>et al.</i>	(1482)
Effect of Calcium Magnesium Phosphate on Remediation Paddy Soil Contaminated with Cadmium Using Lime and Sepiolite	YAN De-mei, GUO Zhao-hui, HUANG Feng-lian, <i>et al.</i>	(1491)
Passivation and Remediation Effects and Mechanisms of Plant Residual Modified Materials on Lead-Contaminated Soils	FANG Ya-li, ZHU Zong-qiang, ZHAO Ning-ning, <i>et al.</i>	(1498)
Effects of Exogenous Spermidine on Seed Germination and As Uptake and Accumulation of Rice Under As ⁵⁺ Stress	LIU Shu-jin, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i>	(1505)