

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, 刘杰, 甄莹莹, 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 庞莉莉, 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, 赵奎乾, 王孟昊, 徐为标, 安静宇, 黄成 (1151)

参数选取对畜禽养殖业大气气排放的影响: 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, 邹翔, 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, 邵田田, 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, 吴向阳 (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 阙可聪, 谷孝涛, 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, 杨宗玥, 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, 沈根祥, 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, 刘志诚, 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 N₂O 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 As⁵⁺ 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, 韩甘, 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)

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*

(中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境重点实验室, 南京 210008)

摘要: 为研究固城湖环境中有机氯农药(organochlorine pesticides, OCPs)时空分布、来源与生态风险, 采用 GC- μ ECD 定性定量分析了固城湖及其出入湖河道 12 个监测点夏、冬两季水体、沉积物和鱼类体内 19 种 OCPs 的含量。结果表明, 固城湖表层水、沉积物和鱼类中(以干重计)有机氯农药总量范围分别是 26.74 ~ 48.12 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 、9.01 ~ 35.34 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 13.39 ~ 124.29 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 。水中有机氯农药污染特征表现为夏季含量高于冬季, 出入湖河道高于养殖塘和湖区; 沉积物中季节性污染特征不明显。从组成特征上看, 夏、冬两季水体、沉积物和生物体内 19 种 OCPs 均有不同程度地检出, 均呈现以 HCHs 和 DDTs 为主的污染特征, 其中, 夏冬两季各监测点表层水和沉积物中 HCHs 以 α -HCH 为主, 占 HCHs 总含量的 21% ~ 42%; 表层水中 DDTs 以 p,p' -DDD 为主, 占 DDTs 总含量的 30% ~ 76%, 沉积物中以 p,p' -DDT 为主, 占 DDTs 总含量的 68% ~ 93%。分析固城湖环境中 OCPs 来源, 根据异构体比值, 可以推断环境中 HCHs 和 DDTs 主要来源于近期新的农药输入, 且主要发生厌氧分解。生态风险评估显示, 固城湖水体中 OCPs 的健康风险不大, 沉积物中的有机氯农药残留量有一定的生态风险。固城湖各监测点所采生物样均在可接受的潜在致癌风险范围内。

关键词: 固城湖; 有机氯农药(OCPs); 污染特征; 来源分析; 风险评估

中图分类号: X171.5; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)03-1346-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.201909043

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, CHEN Hui-hui, MAO Zhi-gang, ZENG Qing-fei*

(State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: To investigate the distribution, source, and ecological risk of organochlorine pesticides (OCPs) residues in Lake Gucheng, surface water, sediment, and biological samples were collected from 12 sampling sites of Lake Gucheng and its inlets and outlets during summer and winter, and the concentrations of 19 OCPs were analyzed. The results showed that the concentration (dry weight) of OCPs in Lake Gucheng ranged from 26.74 to 48.12 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ in surface water, 9.01 to 35.34 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ in sediment, and 13.39 to 124.29 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ in organisms. The pollution characteristics of OCPs in surface water showed that the concentration was much higher in summer than in winter, and much higher at inflow and outflow rivers than in farming ponds and the central region of Lake Gucheng; the seasonal pollution characteristics in sediment were not obvious. All 19 kinds of OCPs in water, sediment, and organisms were detected in different degrees, and the dominant contaminants were HCHs and DDTs. α -HCH was the main pollutant at all sites in both surface water and sediment, with 21% to 42% of total HCHs in two seasons. p,p' -DDD was the main pollutant in surface water with 30% to 76% of total DDTs, whereas p,p' -DDT was the main pollutant in sediment with 68% to 93% of total DDTs in two seasons. Source analysis based on ratios of HCHs isomers and DDTs isomers indicated that there was a new input of OCPs under anaerobic conditions in the study area. The ecological risk assessment showed that the OCPs in surface water did not lead to significant health risks, but the OCPs in sediments might pose ecological risks to the Lake Gucheng ecosystem. The organisms were within the acceptable potential carcinogenic risk range.

Key words: Lake Gucheng; organochlorine pesticides(OCPs); pollution characteristics; source apportionment; risk assessment

有机氯农药(organochlorine pesticides, OCPs)是一种典型的持久性有机污染物(persistent organic pollutants, POPs), 是一类应用最早的人工合成高效杀虫剂。物理化学性质稳定, 具有高生物富集性、生物毒性和环境持久性, 能够远距离迁移, 一些有机氯农药比如六六六(hexachlorocyclohexanes, HCHs)和滴滴涕(dichlorodiphenyltrichloroethane, DDTs)等会通过食物链影响生物体的生理系统^[1, 2], 因此受到全球范围的广泛关注。我国是第二大农药生产国, 虽

然 20 世纪 80 年代禁止了工业 HCHs 的生产以及农业领域滴滴涕的使用^[3], 但由于这类物质在环境中的持久性, OCPs 通过污染土壤的径流、废水的排放、大气迁移和沉降扩散到水中, 吸附到悬浮颗粒

收稿日期: 2019-09-04; 修订日期: 2019-10-30

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2015BAD13B06); 江苏省太湖水环境综合治理科研课题项目(TH2018303); 高淳区水环境综合治理科研课题项目(YDCG-19060)

作者简介: 阚可聪(1993~), 女, 硕士, 主要研究方向为湖泊生态学, E-mail: 673981318@qq.com

* 通信作者, E-mail: qfzeng@niglas.ac.cn

物并随之沉降到沉积物中,再通过食物链富集到鱼体中^[2,4]。目前,我国土壤、水体、沉积物甚至鱼类中均有检测存在^[5~7]。水体、沉积物和鱼体中 OCPs 的含量能够在一定程度上反映某区域内 OCPs 的污染状况、来源和致癌风险。因此,开展某区域水环境和生物体内 OCPs 的时空分布、来源及风险评估,对高效防控 OCPs 释放和污染,保护人类和生态环境健康可持续发展具有重要意义。

近年来,国内外针对水环境和生物体中 OCPs 的研究已取得了一定的研究进展。我国水环境中有机氯农药污染程度远高于其他发达国家,鄱阳湖^[8]和千岛湖^[9]水中有机氯农药残留量高出意大利台伯河^[10]水中残留量一个数量级;加纳沃尔特湖^[11]、太湖梅梁湾^[12]和福建诏安湾^[13]的鱼体内也都有不同程度的有机氯农药检出,且残留含量都可能会对人体健康产生危害。而固城湖作为著名的大闸蟹养殖基地,针对其流域有机氯农药污染的研究还不充分。

固城湖位于江苏省南京市高淳区西南部,属长江水系。是长江中下游地区生态经济重要水体,也是高淳区最重要的集中式饮用水源地^[14]。目前对固城湖的研究已经有很多报道,谷先坤等^[14]对固城湖及

其出入湖河道进行了水质时空分布差异进行分析;Zeng 等^[15]对固城湖表层水及沉积物中多环芳烃的污染特征进行了评价和分析。本文通过监测固城湖水体、沉积物和鱼类中的 19 种 OCPs 成分、时空分布和含量,分析固城湖中有机氯农药的可能来源与生态风险,以期为固城湖持久性有机污染物控制提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集与预处理

在固城湖及其出入湖河道布设了 12 个监测点(图 1),其中湖区及固城湖周边养殖区样点 8 个(S3~S10)、出入湖河道 4 个(运粮河:S1、官溪河:S2、东坝:S11 和定埠桥:S12)。样品分别采集于夏季和冬季,时间是 2015 年 8 月和 2016 年 2 月。分别在 12 个监测点采上层水(顶部 20 cm)和表层沉积物(表面 3 cm),每个监测点各采 3 份表层水和表层沉积物样品后混合。水样用棕色玻璃瓶保存,表层沉积物样品采集后置于密封袋中,低温运回实验室后置于 -20℃ 冰箱中冷冻保存至分析。生物样品从当地渔民收购,用黑色塑料袋包裹,放置于低温盒里运回实验室进行解剖。



图 1 固城湖监测点分布示意

Fig. 1 Sampling sites of Lake Gucheng

水样先经孔径为 0.75 μm 玻璃纤维膜(滤膜用铝箔包好放置在 450℃ 的马弗炉中焙烧 4 h)过滤,取 1.0 L 过滤后的水样,以 C18 固相萃取小柱(500 mg, 6 mL, SPE-PAK-C18, Waters)为吸附固定相进行固相萃取,然后进行旋转蒸发并用正己烷溶剂置换,待溶液剩余小体积时,用氮吹仪浓缩定容至 0.5 mL 装入棕色气相小瓶中,待分析。

沉积物样品冷冻干燥后,研磨过 100 目不锈钢筛。称取 5 g 研磨的沉积物样品粉末加入 5 g 石英砂和 5 g 铜粉,搅拌混匀后以二氯甲烷为萃取剂进行加速溶剂萃取(ASE),静态萃取 2 次。待

萃取结束后进行旋蒸,蒸发至小体积时从仪器侧面加入 10 mL 正己烷,继续浓缩。将浓缩液过体积比为 2:1 的硅胶/氧化铝柱,然后依次以 15 mL 正己烷和 70 mL 正己烷/二氯甲烷(7:3, 体积比)进行淋洗,收集淋洗液再旋转蒸发,正己烷置换,最后氮吹仪浓缩定容至 1 mL,装入棕色气相小瓶中待分析。

生物样的处理和提取方法与沉积物相同,将鱼类除鳞、洗净,分器官解剖,将同一种鱼同类的解剖器官及组织聚于一起,不加水匀浆机匀浆;冷冻干燥后研磨粉碎,过筛萃取后待分析。

1.2 实验仪器条件

使用 Agilent7890 气相色谱仪配以 63Ni 微电子捕获检测器(GC- μ ECD)对样品中的 OCPs 进行定性定量分析. 色谱柱: HP-5MS 毛细管色谱柱 30 m \times 0.25 mm \times 0.25 μ m; 气相色谱载气为高纯氮气, 流速 1.5 mL \cdot min⁻¹, 恒流; 进样口温度 250 $^{\circ}$ C, 不分流进样, 进样量 1 μ L. 程序升温: 起始温度 60 $^{\circ}$ C, 升温速率 10 $^{\circ}$ C \cdot min⁻¹ 到 170 $^{\circ}$ C, 保持 2 min; 以 5 $^{\circ}$ C \cdot min⁻¹ 升温到 280 $^{\circ}$ C, 保持 3 min; 最后以 15 $^{\circ}$ C \cdot min⁻¹ 升温到 300 $^{\circ}$ C. 汽化室和检测器的温度分别是 250 $^{\circ}$ C 和 320 $^{\circ}$ C.

1.3 质保与质控

样品分析过程中通过方法空白、空白加标、样品加标、样品平行等方法保证监测结果质量. 水中 OCPs 的回收率范围为 60% ~ 108%; 沉积物中 OCPs 回收率范围为 63% ~ 115%.

1.4 风险评价

采用 EPA 推荐的健康风险评价模型, 对固城湖表层水体中 OCPs 污染的健康风险进行评价(计算公式参照文献[9]). 采用 Long 等^[16] 在沉积物质量基准法(SQGs)基础上提出的效应区间低值(ERL)和效应区间中值(ERM), 对固城湖沉积物中 OCPs 污染的生态风险进行评价.

以 EPA 提出的致癌风险指数(CRI)和接触风险指数(ERI)作为食品中污染物对人体健康的风险

评估标准(计算公式参照文献[17]).

2 结果与讨论

2.1 固城湖及出入湖河道有机氯农药的分布

2.1.1 表层水体中 OCPs 的季节性分布

固城湖及出入湖河道春夏两季表层水体中 19 种农药均有不同程度的检出, 由表 1 可以看出, 夏冬两季表层水体中 DDTs、HCHs 和七氯存在最为广泛. 从季节变化上看, 由表 1 可见, 夏季表层水体中 \sum OCPs 的含量范围为 36.83 ~ 48.12 ng \cdot L⁻¹, 平均含量是 41.26 ng \cdot L⁻¹; 冬季表层水体中 \sum OCPs 的含量范围为 26.74 ~ 32.90 ng \cdot L⁻¹, 平均含量是 30.02 ng \cdot L⁻¹; 夏冬两季的观测最高值分别出现在定埠桥和养殖塘 S7 断面. 从图 2 可见, 12 个监测点夏季 OCPs 总含量远高于冬季 OCPs 总含量, 尤其是各个断面夏季 DDTs 出现大幅增加, 呈现面源污染的特征. 分析原因可能是夏季和冬季分别为固城湖及出入湖河道的丰水期和枯水期, 丰水期随着径流量增大, 对土壤侵蚀得也越强, 更多的土壤残留 OCPs 进入水体^[18]. 从空间分布上看, 夏季在入湖河道定埠桥和出湖河道官溪河处 OCPs 含量较高, 而养殖塘和湖区表层水体中含量较低, 可能原因是出入湖河道两岸人类活动更频繁, 且丰水期水量较大, 对污染物有一定稀释作用^[18]. 对比巢湖^[19] (5.97 ~ 16.29 ng \cdot L⁻¹); 白洋淀^[18] (0.69 ~ 4.50 ng \cdot L⁻¹);

表 1 固城湖表层水体中 OCPs 污染情况/ng \cdot L⁻¹

Table 1 Concentrations of organochlorine pesticides in surface water of Lake Gucheng/ng \cdot L⁻¹

有机氯农药	夏季				冬季			
	最高值	最低值	平均值	标准差	最高值	最低值	平均值	标准差
α -HCH	2.49	1.89	2.15	0.19	3.01	1.40	2.26	0.58
β -HCH	1.79	0.62	1.14	0.29	2.51	0.83	1.55	0.62
γ -HCH	1.78	1.41	1.51	0.10	1.55	1.37	1.43	0.07
δ -HCH	5.09	1.98	2.55	0.84	2.16	1.56	1.84	0.19
七氯	6.50	3.63	4.30	0.86	8.83	4.64	6.46	1.54
环氧七氯	1.08	0.85	0.97	0.06	1.23	0.80	0.89	0.12
硫丹	1.35	0.90	1.08	0.12	0.71	0.57	0.63	0.05
硫丹硫酸盐	4.62	0.77	2.25	1.16	0.83	0.52	0.58	0.09
氯丹	1.45	0.49	0.86	0.31	0.49	0	0.40	0.19
反氯丹	1.23	0.71	0.88	0.14	1.51	0	0.64	0.33
<i>p,p'</i> -DDD	14.86	7.77	12.4	1.85	3.75	1.67	2.59	0.55
<i>p,p'</i> -DDE	0.51	0.46	0.48	0.02	0.83	0.47	0.63	0.09
<i>p,p'</i> -DDT	6.87	3.10	4.67	1.12	4.26	2.86	3.20	0.38
艾氏剂	3.10	0.89	1.40	0.63	2.19	0.71	0.96	0.43
狄氏剂	0.84	0.64	0.76	0.06	0.74	0	0.51	0.24
异狄氏剂	3.43	0.18	1.16	0.85	3.70	0	0.38	1.06
异狄氏剂醛	0.93	0.55	0.76	0.11	0.81	0.55	0.64	0.07
异狄氏剂酮	2.36	1.32	1.79	0.36	1.06	0	0.93	0.29
甲氧滴滴涕	1.78	0	0.15	0.51	5.17	1.80	3.51	0.94
\sum HCHs	10.95	6.22	7.36	1.22	8.46	5.38	7.08	0.90
\sum DDTs	20.53	14.21	17.55	1.91	7.44	5.47	6.42	0.59
\sum OCPs	48.12	36.83	41.26	4.06	32.90	26.74	30.02	2.21

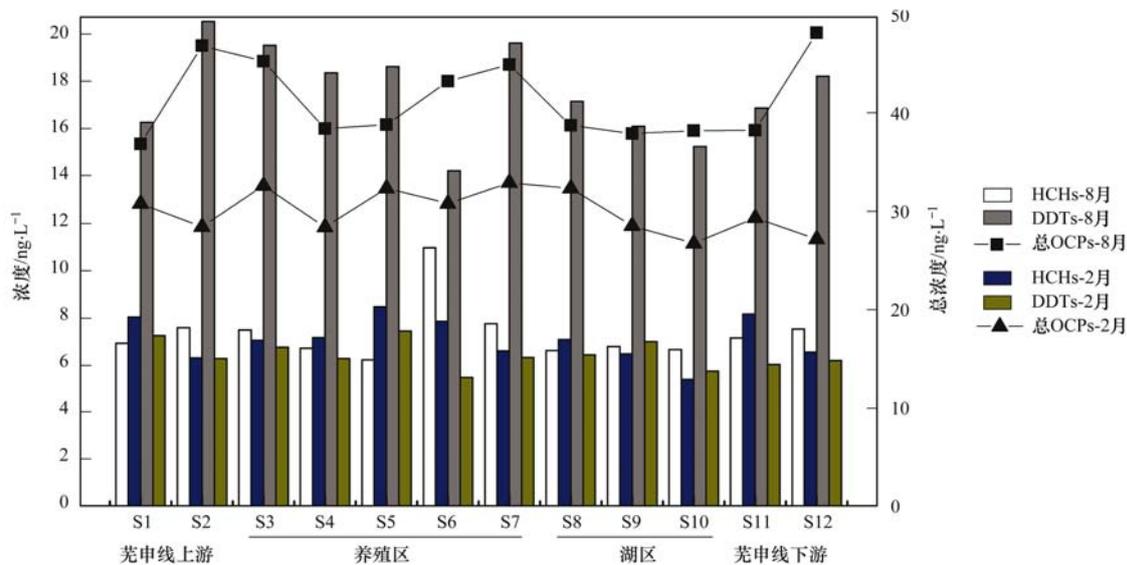


图2 固城湖夏、冬季表层水体中 \sum OCPs、HCHs 和 DDTs 含量分布

Fig. 2 Concentration of \sum OCPs, HCHs, and DDTs in surface water of Lake Guchenghu

千岛湖^[9] ($1.2 \sim 212 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$); 太湖^[20] ($4.03 \sim 18.70 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$); 黄浦江^[21] ($0.29 \sim 44.7 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$) 表层水体中的 OCPs 残留量, 固城湖表层水体中的残留量相对较高。

从夏、冬两季表层水体中 19 种 OCPs 的检出情况来看, 夏季表层水体中 DDTs 质量浓度最高, 占 \sum OCPs 的 33% ~ 48%, 质量浓度范围为 $14.21 \sim 20.53 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 各监测点 DDTs 质量浓度分布较均匀; 其次是 HCHs, 占 \sum OCPs 的 16% ~ 25%, 质量浓度范围为 $6.22 \sim 10.95 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 固城湖湖区较养殖河道质量浓度低。冬季不同监测点 HCHs 与 DDTs 的质量浓度差异较大, HCHs 占 \sum OCPs 的 20% ~ 28%, 质量浓度范围为 $5.38 \sim 8.46 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, DDTs 占 \sum OCPs 的 18% ~ 25%, 质量浓度范围为 $5.47 \sim 7.44 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 因此主要分析表层水体中 HCHs 和 DDTs 的污染组成特征。

2.1.2 沉积物中 OCPs 的季节性分布

沉积物样品中都能检测到绝大部分有机氯农药, 表明固城湖沉积物中有机氯农药的残留较为普遍, 但多数农药含量变异系数大, 表明沉积物中不同种类的有机氯农药含量差异较大。

从季节变化上看, 由表 2 可见, 夏季沉积物中 OCPs 的总含量(以干重计, 下同) 范围为 $11.37 \sim 35.34 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均值是 $17.17 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$; 冬季沉积物中 OCPs 的总含量范围为 $9.01 \sim 16.98 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均值是 $16.98 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 。从空间分布上看, 由图 3 可见, 除了运粮河、官溪河、养殖河道(S3、S4)和养殖塘(S10)这 5 个监测断面夏季 OCPs 总含量高于冬季

OCPs 总含量外, 其他 7 个检测面夏季 OCPs 总含量低于冬季 OCPs 总含量。夏、冬两季 OCPs 总含量最高值均出现在官溪河。

沉积物中 DDTs 和 HCHs 仍然是主要污染物, 占 OCPs 的 37.2% ~ 69.3%。夏季沉积物中 DDTs 和 HCHs 的含量范围分别是 $1.68 \sim 12.06 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $2.06 \sim 10.31 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 。夏季除养殖河道 S4、官溪河处含量明显高于其他监测点, 养殖区与湖区总有机氯农药含量相差不大。地理分布上总体显示出入湖河流低于出湖河流的特点规律, 可能由于入湖河流相较于湖泊流量大、流速快, 不利于沉积物中的污染物沉淀, 污染物可能因解吸和再悬浮重新进入水体而被带走, 另一方面也可能与附近人类工农业活动频繁有关。冬季沉积物中总有机氯农药含量未显示出明显分布规律, 观测最高值仍在官溪河, 与夏季结果一致。

由图 3 可以看出, 养殖河道 S4 HCHs 含量相较夏季大幅减少, 主要是 α -HCH 的大幅度减少; 湖区 S8 HCHs 含量相较夏季大幅增多, 主要变化的污染物仍是 α -HCH。定埠桥 DDTs 含量相较夏季大幅增多。冬季平均值最高仍为 p, p' -DDT, 含量范围为 $1.16 \sim 6.43 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 其次为 α -HCH 和七氯。对比其他湖泊流域沉积物中的 DDTs 和 HCHs 残留水平, 比如太湖流域^[22] ($0.2 \sim 55.9 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $3.29 \sim 64.5 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$)、洞庭湖^[23] ($7.42 \sim 137.75 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $0.383 \sim 30.303 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$) 和巢湖^[24] ($4.2 \sim 7.8 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $2.9 \sim 9.6 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$)。可以看出, 与其他研究相比较, 固城湖沉积物中 DDTs 和 HCHs 的残留水平中等偏低。

表 2 固城湖沉积物中 OCPs 污染情况¹⁾/ng·g⁻¹

Table 2 Concentrations of organochlorine pesticides in sediments of Lake Gucheng/ng·g⁻¹

有机氯农药	夏季				冬季			
	最高值	最低值	平均值	变异系数/%	最高值	最低值	平均值	变异系数/%
α-HCH	3.88	0.71	1.56	68.62	7.77	0.50	2.40	101.66
β-HCH	2.02	0.22	0.71	91.68	3.58	0.23	0.68	137.82
γ-HCH	2.53	0.56	0.76	72.68	0.76	0.56	0.62	9.28
δ-HCH	1.89	0.50	0.70	56.05	0.73	0.48	0.58	15.60
七氯	2.90	1.23	1.49	33.56	4.51	1.31	1.91	44.35
环氧七氯	0.58	0	0.33	50.66	0.91	0.32	0.46	35.12
硫丹	0.92	0.51	0.70	16.87	0.71	0.27	0.48	28.31
硫丹硫酸盐	0.68	0.21	0.28	48.51	1.21	0.21	0.42	72.30
氯丹	2.74	0.19	0.50	147.53	1.83	0.20	0.36	126.70
反氯丹	5.13	0.24	0.74	186.94	1.03	0.23	0.38	55.79
p,p'-DDD	2.02	0.17	0.43	121.36	3.53	0.32	0.88	97.90
p,p'-DDE	0.31	0.19	0.22	14.46	0.28	0.12	0.21	18.97
p,p'-DDT	9.82	1.16	4.18	61.31	6.43	1.16	3.72	48.78
艾氏剂	0.48	0.28	0.34	22.80	0.95	0.28	0.47	40.34
狄氏剂	1.31	0.25	0.71	55.17	2.41	0.33	0.73	89.06
异狄氏剂	1.70	0	0.36	134.27	0.85	0	0.41	75.87
异狄氏剂醛	1.85	0.21	0.44	103.27	1.72	0.33	0.50	77.65
异狄氏剂酮	2.11	0.38	0.63	74.63	1.44	0.38	0.55	51.77
甲氧滴滴涕	5.78	1.07	2.09	79.03	4.04	0.71	1.22	77.27
∑ HCHs	10.31	2.06	3.74	59.54	10.12	1.94	4.29	69.29
∑ DDTs	12.06	1.68	4.82	61.45	10.16	1.67	4.80	49.73
∑ OCPs	35.34	11.37	17.17		34.38	9.01	16.98	

1) 表中含量均以干重计

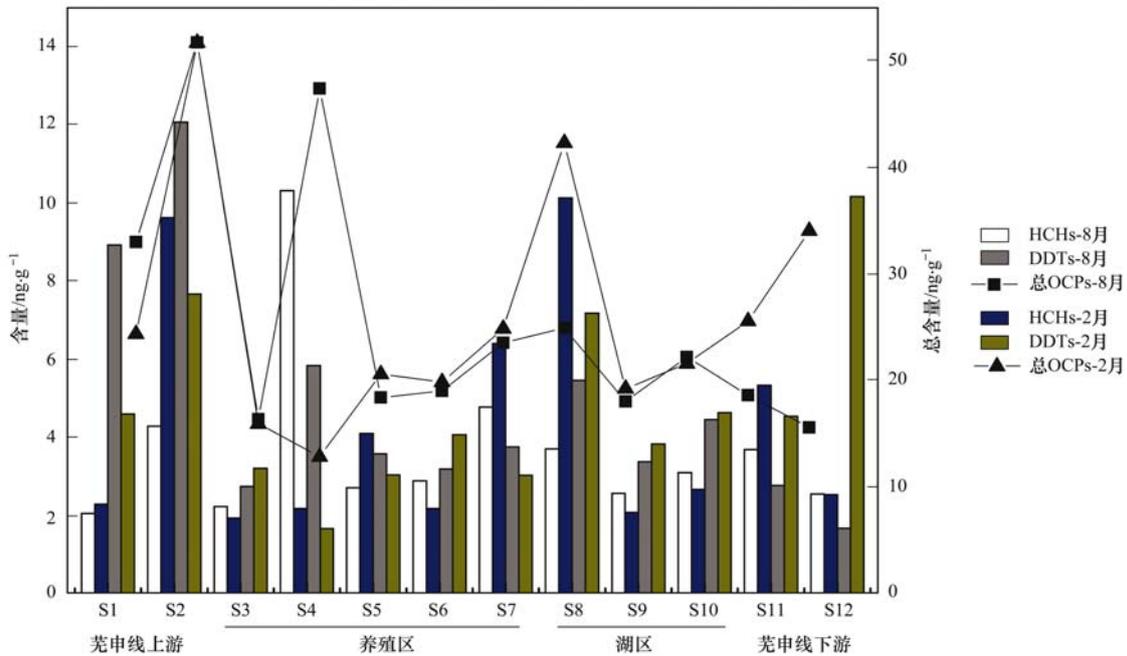


图 3 固城湖夏、冬季沉积物中 ∑ OCPs、HCHs 和 DDTs 含量分布

Fig. 3 Concentration of ∑ OCPs, HCHs, and DDTs in sediments of Lake Gucheng

2.1.3 生物体中 OCPs 的分布

固城湖范围内采集到的鱼类生物体中 19 种有机氯农药均有检出. 由表 3 可见, 鱼体内 OCPs 总含量范围是 13.39 ~ 97.92 ng·g⁻¹. 样品生物体中

OCPs 含量最高为七氯, 范围为 2.95 ~ 16.19 ng·g⁻¹; 其次是 p,p'-DDT, 范围为 1.64 ~ 6.70 ng·g⁻¹, 观测最高值均为棒花鱼. Chlors 类农药在生物体中含量最高, 占 OCPs 的 19.92% ~ 40.22%,

DDTs 类农药次之, 占 OCPs 的 14.51%~30.55%。不同鱼类之间因生活习性、代谢能力等原因的不同, \sum OCPs 的含量也有所差别。鲤鱼含量最高, 为 $97.92 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 主要是由于鲤鱼体内 HCHs 含量相比其他鱼类偏高。由表 3 可知, 不同鱼体内 OCPs 含量规律表现为: 杂食性 > 草食性 > 肉食性。杂食性鱼类以浮游生物、底栖动物和水草为食, 较易吸附污染物^[25], 这可能是本文杂食性鱼类体内 OCPs 含量较高的原因。

鱼体内不同器官有机氯农药残留量也有所不

同, 大致呈现出鱼鳃 > 皮 > 肝胰腺 > 腮 > 肉的规律, 与其他研究结果一致^[26]。这是由于 OCPs 主要通过两种途径进入鱼体内: 一种是通过腮直接从水中吸收, 一种是通过摄食吸收^[27]。皮和腮与水体直接接触, 对有机氯农药的积累较鱼肉高^[28]。有机氯农药会通过食物链产生生物放大作用, 因此, 鱼类通过摄食较水体有机氯农药含量更高的生物, 胃肠道较腮接触到更高含量的有机氯农药, 而食物经过胃肠道被直接吸收, 使得内脏对有机氯农药的积累较鱼肉和腮更多^[27]。

表 3 固城湖鱼体中有机氯农药污染情况¹⁾/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$

Table 3 Concentrations of organochlorine pesticides in fishes of Lake Gucheng/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$

种类	部位	\sum OCPs	HCHs	DDTs
沙塘鳢 <i>Odontobutis obscurus</i>	肉	20.21 ± 2.08	3.24 ± 0.48	4.49 ± 0.22
乌鳢 <i>Ophiocephalus argus Cantor</i>	肉	50.79 ± 2.47	8.25 ± 1.22	15.52 ± 1.26
虾虎鱼 <i>Gobiinae</i>	肉	15.67 ± 1.90	2.94 ± 0.52	2.33 ± 0.81
红鳍原鲈 <i>Cultrichthys erythropterus</i>	肉	13.92 ± 2.51	2.47 ± 0.53	2.77 ± 0.47
黄颡鱼 <i>Pelteobagrus fulvidraco</i>	肉	28.23 ± 2.97	4.40 ± 0.81	7.60 ± 0.96
鳊 <i>Aristichthys nobilis</i>	肉	13.53 ± 2.45	2.70 ± 0.30	2.34 ± 0.43
鲤 <i>Cyprinus carpio</i>	肉	97.92 ± 6.39	25.84 ± 2.09	18.54 ± 0.75
麦穗鱼 <i>Pseudorasbora parva</i>	肉	23.48 ± 1.19	4.29 ± 0.69	3.53 ± 0.57
鲫 <i>Carassius auratus</i>	肉	16.04 ± 0.24	3.07 ± 0.28	2.66 ± 0.42
泥鳅 <i>Missgurnus argullicaudatus</i>	肉	15.22	2.84	2.21
黄尾鱼 <i>Xenocypris davidi</i>	肉	13.39 ± 1.67	2.69 ± 0.35	2.40 ± 0.66
棒花鱼 <i>Abbottina rivularis</i>	肉	57.93 ± 8.17	10.17 ± 1.54	8.79 ± 3.83
草鱼 <i>Ctenopharyngodon idella</i>	肉	15.45 ± 4.29	2.73 ± 0.85	3.79 ± 0.95
鳊 <i>Rhodeus sinensis</i>	肉	47.6 ± 6.08	7.51 ± 0.92	14.2 ± 3.54
鳊	皮	24.11	3.72	4.93
	腮	14.37	2.31	2.76
	肠	16.41	2.54	3.23
	肝胰腺	31.51	3.37	5.35
	鳃	41.49	5.18	10.10
	皮	25.66	3.97	5.07
草鱼	腮	23.45	3.74	4.30
	肠	25.02	4.05	6.06
	肝胰腺	24.59	3.07	6.59
	鳃	26.84	4.23	5.99

1) 数据为平均值 \pm 标准差; 含量均以干重计

2.2 固城湖及出入湖河道有机氯农药的组成特征及来源分析

2.2.1 HCHs

从图 4(a) 可以看出, 夏季各监测断面表层水体中, 固城湖区 (S8) 和东坝等 2 个断面 α -HCH 占 HCHs 的百分比 (质量分数) 明显高于其他, 其他 10 个断面 α -HCH 和 δ -HCH 占 HCHs 的百分比比较接近且较高, 分别占 HCHs 总含量的 25.10%~32.83% 和 29.97%~46.53%。夏季各监测断面沉积物中, 官溪河和固城湖 (S8) 等 2 个断面 β -HCH 占 HCHs 的百分比最大, 定埠桥断面 δ -HCH 占比最大, 其余 9 个断面 α -HCH 占 HCHs 的百分比最大。冬季表层水

体中, 运粮河、养殖河道 (S3~S4)、养殖塘 (S6~S7)、固城湖区 (S9) 和东坝等 7 个断面 α -HCH 占 HCHs 的百分比最高, 养殖塘 (S5) 和固城湖区 (S8、S10) 等 3 个断面 β -HCH 占比最高, 官溪河和定埠桥等 2 个断面 δ -HCH 占比最高。从图 4(b) 可以看出, 冬季各监测断面沉积物中, 养殖塘 (S6) 和固城湖 (S9) 等 2 个断面 α -HCH 和 δ -HCH 占 HCHs 的百分比比较接近且较高, 固城湖 (S10) 和定埠桥等 2 个断面 4 种异构体所占百分比比较接近, 其余 8 个断面均为 α -HCH 所占百分比最高。从图 4(c) 可以看出, 不同食性的鱼体内 HCH 异构体含量差异不大, α -HCH 占 HCHs 的百分比最大, 占 HCHs 总含量的 24.30%

~39.76%,其次是 β -HCH 和 δ -HCH 占 HCHs 百分比比较接近. 表层水体和沉积物 HCHs 含量有一定差异的原因可能是 HCHs 的水溶性和辛醇-水分配系数有较大差异, 4 种 HCH 异构体中, γ -HCH 比 α -HCH 更容易进入水体, β -HCH 的水溶性和饱和蒸气压最低, 因此最容易沉积在沉积物中^[29]. 而 HCHs 在进入土壤或沉积物后, α -HCH 和 γ -HCH 结构较不稳定, 容易发生降解, 并且随着时间的推移, 最终在土壤或沉积物中占优势的可能是 β -HCH 和 δ -HCH. 沉积物中有机质含量的差异也会造成不同采样点之间沉积物中污染物含量和组成的差异^[6,29].

环境中 HCH 的异构体组成差异可以表明不同点、不同季节的污染来源. HCH 的主要来源是工业 HCHs 和林丹的使用. 环境中以 α -HCH 为主的原因主要是工业 HCHs 主要以 α -HCH 为主, 占 60%~70%, 同时, HCHs 最初进入环境时, α -HCH 或 γ -HCH 含量最高; 以 δ -HCH 或 β -HCH 为主的原因是 δ -HCH 和 β -HCH 的物理化学性质较稳定, 比其他异构体更稳定, 在环境中难降解^[30]. 通常根据 α -HCH/ γ -HCH 的比值推断监测点附近的污染物来源. 一般情况下, 当有新的林丹输入时, 该比值可能小于 3; 若该比值在 3~7 之间, 则表明环境中 HCHs 主要来源于工业 HCHs; 若该比值大于 7, 则可能是由于 HCHs 的长距离传输或工业 HCHs 的循环降解^[30, 31].

由表 4 可知, 12 个监测断面夏、冬两季表层水体中 α -HCH/ γ -HCH 的比值均小于 3, 可以推测夏、冬两季表层水体中 HCHs 主要来源于近期林丹等农药的新的输入. 部分监测点表层水体中 δ -HCH 含量也较高, 说明夏季这些监测点水中微生物的分解程度较高且活跃.

沉积物中, 夏、冬两季大部分监测断面 α -HCH/ γ -HCH 比值小于 3, 可以推断近期有新的林丹输入. 而夏季养殖塘 (S7) 和东坝断面比值在 3~7 之间, 冬季官溪河、养殖塘 (S5) 和东坝等 3 个监测断面比值也在 3~7 之间, 表明 HCHs 主要来源于工业 HCHs, 冬季养殖塘 (S7) 和固城湖 (S8) 断面 α -HCH/

γ -HCH 的比值大于 7, 显示沉积物中 HCHs 可能来源于环境残留和大气长距离传输.

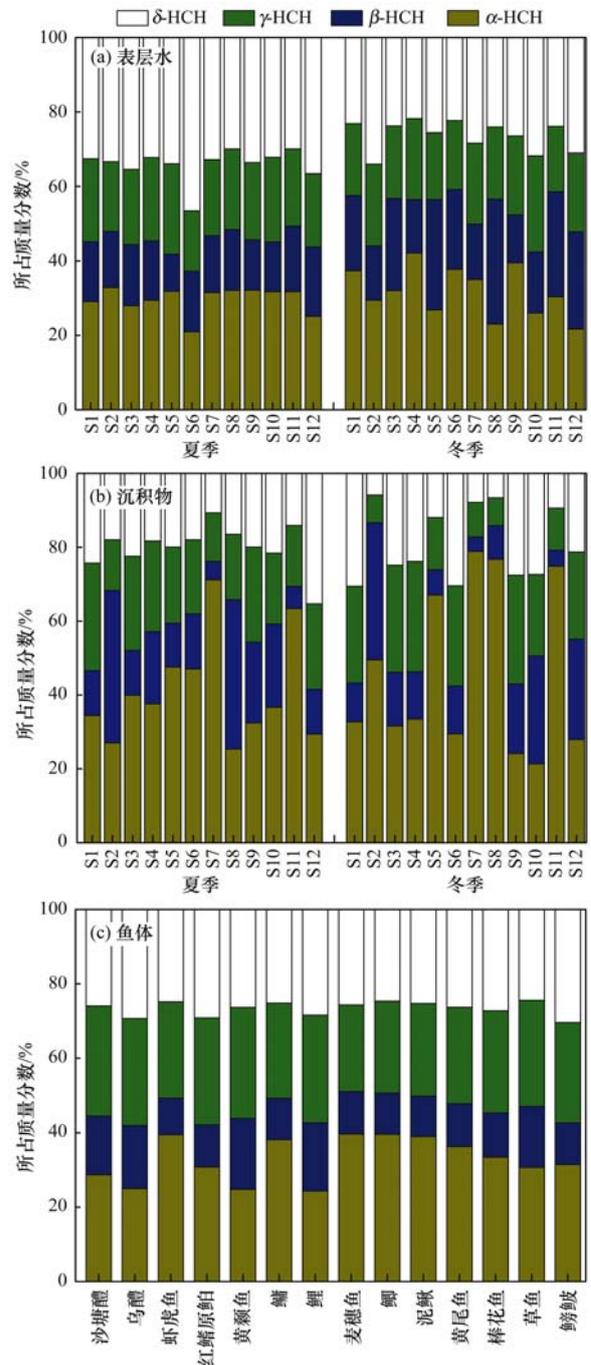


图 4 表层水体、沉积物和鱼体中 HCHs 的组成

Fig. 4 Compositions of HCHs in surface water, sediments, and fish

表 4 表层水体和沉积物中 α -HCH/ γ -HCH 比值

Table 4 Ratios of α -HCH/ γ -HCH in surface water and sediments

项目		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
表层水	夏季	1.31	1.75	1.39	1.31	1.31	1.29	1.54	1.48	1.54	1.39	1.54	1.27
	冬季	1.93	1.34	1.64	1.94	1.50	2.05	1.61	1.19	1.87	1.01	1.73	1.02
沉积物	夏季	1.18	1.97	1.56	1.53	2.3	2.34	5.41	1.42	1.26	1.9	3.84	1.27
	冬季	1.25	6.61	1.09	1.12	4.74	1.08	>7	>7	0.82	0.97	6.56	1.18

2.2.2 DDTs

夏季表层水体中 DDTs 组成以 p,p' -DDD 为主,

占 DDTs 的质量分数为 55%~76%, 冬季表层水体重中 p,p' -DDT 含量较夏季增多, p,p' -DDD 和 p,p' -

DDT 占 DDTs 的质量分数比较接近且较高, 沉积物中夏冬两季 p,p' -DDT 含量均远高于 p,p' -DDE 和 p,p' -DDD 含量, 占 DDTs 的 68%~93%。表层水体和沉积物中 DDTs 的组成情况基本一致。

环境中 DDTs 的主要来源是工业 DDTs 和三氯杀螨醇, DDT 在有氧条件下可转化为 DDE, 厌氧条件下降解为 DDD。因此可以通过 DDD/DDE、DDT/(DDD + DDE) 的比值来推断环境中 DDTs 的代谢转化程度, 以此判断环境中 DDTs 主要分解类型和污染来源^[6]。当 DDD/DDE 比值大于 1 时, 代表 DDT 的降解环境为厌氧环境, 小于 1 时为好氧环境; 当 DDT/(DDD + DDE) 比值小于 1 时, 表明 DDTs 已大部分降解为 DDE 和 DDD, 环境中 DDTs 的污染主要来源于历史污染, 比值大于 1 时, 表明有新的污染源输入^[31]。

由表 5 可知, 夏、冬两季各监测断面表层水体中, DDD/DDE 比值均远大于 1, 表明各监测断面表层水体中 DDTs 发生厌氧降解。从图 5 可以看出, 夏季沉积物中养殖河道(S4、S5)、养殖塘(S7)、东坝和定埠桥等 5 个监测断面 DDD/DDE 比值小于 1, 表明这 5 个监测断面夏季沉积物中 DDTs 主要发生好氧反应, 其他断面 DDTs 均发生厌氧分解。冬季沉积物中所有监测断面 DDD/DDE 比值均大于 1, 表明

各监测断面沉积物中 DDTs 发生厌氧降解。夏、冬两季沉积物中 DDT/(DDD + DDE) 的比值均大于 1, 说明监测断面 DDTs 污染的主要原因可能是有新源输入。

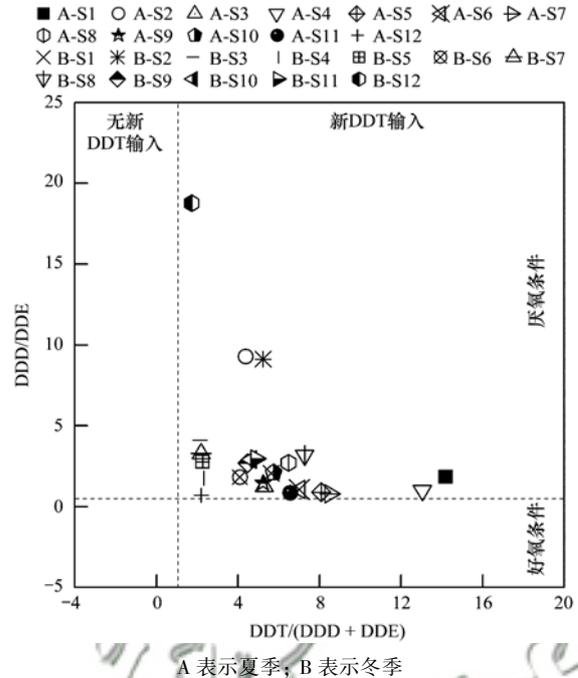


图 5 沉积物中 DDTs 异构体比值
Fig. 5 Isomer ration cross plot of DDTs in sediments

表 5 表层水体 DDD/DDE 比值

Table 5 Ratios of DDD/DDE in surface water

季节	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
夏季	25.7	27.99	29.79	29.28	24.21	15.24	29.97	27.93	24.42	25.13	25.96	27.78
冬季	5.24	3.8	4.25	4.6	6.64	2.52	4.06	3.95	4.77	3.89	2.78	3.71

2.3 安全风险评价

2.3.1 沉积物中 OCPs 生态风险评价

ERL 和 ERM 是用来描述某个化学物质在沉积物中的 3 个含量范围, 含量 < ERL 时表示潜在毒性 < 25%, 含量 > ERM 时表示潜在毒性 > 75%, 当污染含量在 ERL 和 ERM 之间时, 潜在毒性介于 25%~75% 之间。

由表 6 可知, 夏季 12 个点位中 9 个点位样品中的 DDE、DDD 低于 ERL 值; 官溪河处的 DDE、DDD, 养殖塘(S7)的 DDE, 定埠桥处的 DDE 超过了 ERL

值, 但都低于 ERM 值; 运粮河和官溪河处 DDT 超过 ERM 值, 存在较高的安全风险, 所有点位 \sum DDTs 均低于 ERM 值。冬季 12 个点位中 9 个点位样品中的 DDE 低于 ERL 值, 官溪河和定埠桥处 DDD 在 ERL 和 ERM 之间, 所有点位的 DDT 都低于 ERM。

大多数监测点的有机氯农药残留量低于 ERL, 生态毒性 < 25%, 生态风险水平较低; 但也有部分监测点有机氯农药残留量高于 ERM, 有较高生态风险。总体上说, 监测点沉积物中的有机氯农药残留量有一定的生态风险。

表 6 沉积物中有机氯农药的风险评价

Table 6 Risk assessment of organochlorine pesticides in sediments

项目	ERL/ng·g ⁻¹	ERM/ng·g ⁻¹	< ERL		ERL-ERM		> ERM	
			夏季	冬季	夏季	冬季	夏季	冬季
p,p' -DDE	2.2	27 ^[16]	12	12	0	0	0	0
p,p' -DDT	1	7 ^[32]	0	0	10	10	2	2
p,p' -DDD	2	20 ^[32]	11	11	1	1	0	0
\sum DDT	1.6	46 ^[32]	0	0	12	12	0	0

2.3.2 表层水体中 OCPs 健康风险评价

表层水体中 OCPs 的非致癌风险指数夏季最大值为 6.83×10^{-3} , 平均值是 6.36×10^{-3} (如图 6 所示). 固城湖所有监测点位水体中的 OCPs 引起的 \sum HI 低于美国 EPA 推荐的基准值 1, 说明固城湖

表层水体中有机氯农药残留量不会对人体产生明显的非致癌健康风险. 固城湖水体中 OCPs 致癌健康风险指数总体分布和非致癌健康风险指数总体一致. 总致癌健康风险指数在 $7.32 \times 10^{-7} \sim 11.9 \times 10^{-7}$ 之间, 若以人均寿命 70 a 计, 年均致癌健康指

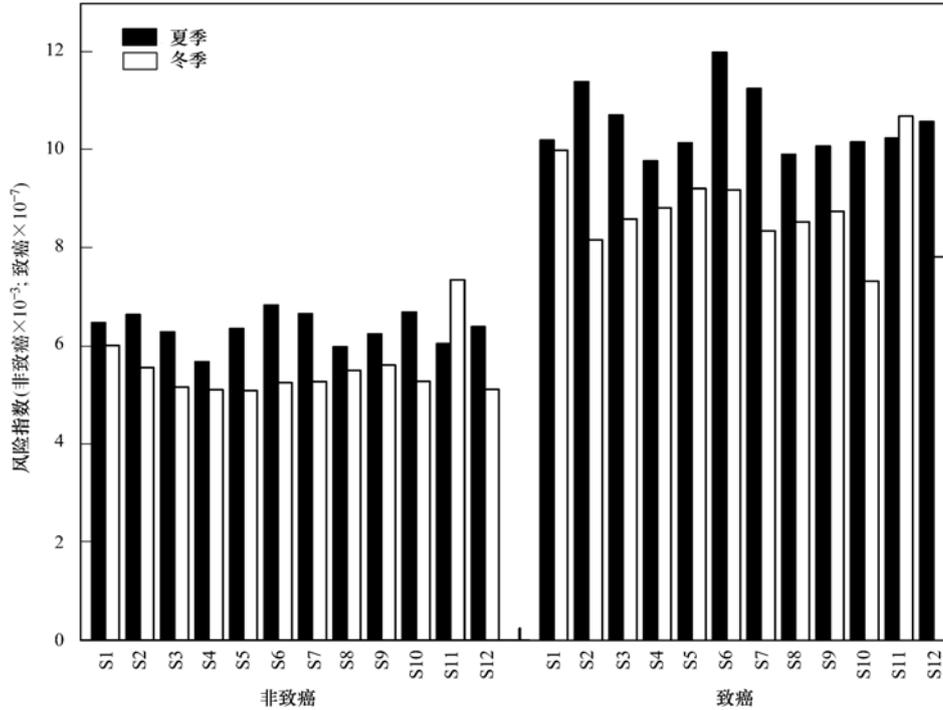


图 6 各点水体中 OCPs 总非致癌风险指数和致癌风险指数分布
Fig. 6 Non-carcinogenic and carcinogenic risk of OCPs in surface water

表 7 固城湖鱼体中有机氯农药的致癌风险指数和接触风险指数¹⁾

Table 7 Non-carcinogenic and carcinogenic risk of OCPs in fishes of Lake Guocheng

种类	部位	致癌风险指数 $\times 10^{-5}$				接触风险指数 $\times 10^{-3}$		
		HCHs	DDTs	七氯	总指数	DDTs	七氯	总指数
沙塘鳢 <i>Odontobutis obscurus</i>	肉	0.49	0.13	2.03	2.65	7.48	9.04	16.52
乌鳢 <i>Ophiocephalus argus Cantor</i>	肉	1.24	0.44	3.94	5.61	25.86	17.5	43.36
虾虎鱼 <i>Gobiinae</i>	肉	0.44	0.07	1.54	2.04	3.88	6.82	10.7
红鳍原鲌 <i>Cultrichthys erythropterus</i>	肉	0.37	0.08	1.14	1.59	4.61	5.07	9.68
黄颡鱼 <i>Pelteobagrus fulvidraco</i>	肉	0.66	0.22	2.77	3.64	12.66	12.3	24.96
鳊 <i>Aristichthys nobilis</i>	肉	0.40	0.07	1.20	1.67	3.9	5.35	9.25
鲤 <i>Cyprinus carpio</i>	肉	3.87	0.53	1.10	5.50	30.89	4.91	35.8
麦穗鱼 <i>Pseudorasbora parva</i>	肉	0.64	0.10	2.22	2.96	5.88	9.87	15.75
鲫 <i>Carassius auratus</i>	肉	0.46	0.08	1.12	1.66	4.43	4.99	9.42
泥鳅 <i>Missgurnus arguillicaudatus</i>	肉	0.43	0.06	1.22	1.70	3.68	5.4	9.08
黄尾鱼 <i>Xenocypris davidi</i>	肉	0.40	0.07	1.11	1.58	4	4.93	8.93
棒花鱼 <i>Abbottina rivularis</i>	肉	1.52	0.25	6.07	7.84	14.64	26.97	41.61
草鱼 <i>Ctenopharyngodon idella</i>	肉	0.41	0.11	1.39	1.91	6.31	6.18	12.49
鳊 <i>Rhodeus sinensis</i>	肉	1.13	0.40	3.05	4.58	23.66	13.58	37.24
鳊	皮	0.56	0.14	0.84	1.54	8.21	3.75	11.96
	腮	0.35	0.08	0.60	1.02	4.6	2.65	7.25
	肠	0.38	0.09	0.58	1.06	5.38	2.6	7.98
	肝胰腺	0.51	0.15	0.70	1.36	8.91	3.12	12.03
	鳔	0.78	0.29	1.66	2.72	16.83	7.37	24.2
鳊	皮	0.60	0.14	0.95	1.69	8.45	4.22	12.67
	鳃	0.56	0.12	0.95	1.63	7.16	4.23	11.39
草鱼	肠	0.61	0.17	1.66	2.44	10.1	7.4	17.5
	肝胰腺	0.46	0.19	0.61	1.26	10.98	2.7	13.68
	鳔	0.63	0.17	0.99	1.79	9.98	4.38	14.36

1) 数据为平均值

数最大为 $1.38 \times 10^{-8} \text{ a}^{-1}$, 处于可忽略水平. 从饮水和皮肤接触两个暴露途径对水体中 OCPs 进行健康风险评价, 固城湖水体中 OCPs 的健康风险不大.

2.3.3 生物体中 OCPs 食用致癌风险评价

对鱼类的可食用部分即鱼肉的致癌风险 (CRI) 和接触风险 (ERI) 进行评估 (表 7). 假定人体平均体重为 $60 \text{ kg}^{[17]}$, 以每人每天食用鱼 $50 \text{ g}^{[17]}$ 计. 从表 6 可知, 固城湖鱼体内致癌风险指数介于 $1.59 \times 10^{-5} \sim 7.84 \times 10^{-5}$ 之间, 相较于辽东半岛^[17]、保安湖^[33] 生物体内有机氯农药的致癌风险指数 ($0.03 \times 10^{-6} \sim 133.18 \times 10^{-6}$) 更高, 但均 $< 10^{-4}$, 在可接受的致癌范围内. 一些常见的食用鱼类, 如鳊、鲤、鲫和草鱼的致癌风险指数分别是 1.67×10^{-5} 、 5.50×10^{-5} 、 1.66×10^{-5} 和 1.91×10^{-5} , 以每人每天 50 g 的食鱼量计, 固城湖鱼类有机氯农药的残留量对人体不构成致癌风险. 而由于一般不食用鱼组织, 可以不考虑鱼组织的致癌风险, 考虑其接触风险. 不同鱼组织的接触风险在 $7.25 \times 10^{-3} \sim 24.2 \times 10^{-3}$ 之间, 鳊是浮游食性鱼类, 鱼鳃的接触风险指数最高, 为 24.2×10^{-3} ; 而草鱼是草食性鱼类, 鱼肠中的接触风险最高, 为 17.5×10^{-3} , 均可接受的风险范围之内.

3 结论

(1) 固城湖表层水体中有机氯农药总量范围是 $26.74 \sim 48.12 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 总体表现为夏季含量高于冬季, 出入湖河道高于养殖塘和湖区; 固城湖沉积物中有机氯农药总量范围为 $9.01 \sim 35.34 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 季节性特征不明显. 鱼体内残留总量范围在 $13.39 \sim 124.29 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间, 表现为杂食性 > 草食性 > 肉食性的规律. 鱼体内不同器官有机氯农药残留量大致呈现出鱼鳃 > 皮 > 肝胰腺 > 腮 > 肉的规律. DDTs 和 HCHs 为主要的污染物.

(2) 固城湖研究区域 HCHs 和 DDTs 污染主要来源于近期新的农药输入, 且主要发生厌氧分解.

(3) 根据 EPA 推荐的健康风险评价模型, 固城湖水体中 OCPs 的健康风险不大, 固城湖沉积物中的有机氯农药残留量有一定的生态风险. 固城湖所收集鱼类样品致癌风险指数介于 $1.59 \times 10^{-5} \sim 7.84 \times 10^{-5}$ 之间, 均在可接受的潜在致癌风险范围内.

致谢: 感谢孙玉童在 2015 ~ 2016 年样品采集和数据整理上所作的工作.

参考文献:

- [1] Buah-Kwofie A, Humphries M S. The distribution of organochlorine pesticides in sediments from iSimangaliso Wetland Park: ecological risks and implications for conservation in a biodiversity hotspot [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **229**: 715-723.
- [2] Buah-Kwofie A, Humphries M S, Pillay L. Bioaccumulation and risk assessment of organochlorine pesticides in fish from a global biodiversity hotspot: iSimangaliso Wetland Park, South Africa [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **621**: 273-281.
- [3] Wu Q H, Leung J Y S, Yuan X, et al. Biological risk, source and pollution history of organochlorine pesticides (OCPs) in the sediment in Nansha mangrove, South China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, **96**(1-2): 57-64.
- [4] 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.
- [5] Li Y Y, Niu J F, Shen Z Y, et al. Spatial and seasonal distribution of organochlorine pesticides in the sediments of the Yangtze Estuary [J]. *Chemosphere*, 2014, **114**: 233-240.
- [6] 刘佳, 丁洋, 祁士华, 等. 韩江流域土壤中有机氯农药的特征分布 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(11): 5127-5134.
Liu J, Ding Y, Qi S H, et al. Characteristics of organochlorine pesticides (OCPs) in soil samples of Hanjiang River Basin, Southeast China [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(11): 5127-5134.
- [7] 徐佳艳, 彭自然, 和庆, 等. 长三角地区池塘养殖水产品体内农药类污染与食用风险评价 [J]. *生态毒理学报*, 2017, **12**(3): 485-495.
Xu J Y, Peng Z R, He Q, et al. Assessing pesticide residues in pond aquaculture products in Yangtze River Delta and the health hazard for human consumption [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2017, **12**(3): 485-495.
- [8] Zhi H, Zhao Z H, Zhang L. The fate of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and organochlorine pesticides (OCPs) in water from Poyang Lake, the largest freshwater lake in China [J]. *Chemosphere*, 2015, **119**: 1134-1140.
- [9] 唐访良, 张明, 徐建芬, 等. 千岛湖库区及其主要入库河流水中有机氯农药残留污染特征及健康风险评价 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(5): 1735-1741.
Tang F L, Zhang M, Xu J F, et al. Pollution characteristics and health risk assessment of organochlorine pesticides (OCPs) in the water of Lake Qiandao and its major input rivers [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(5): 1735-1741.
- [10] Montuori P, Aurino S, Garzonio F, et al. Polychlorinated biphenyls and organochlorine pesticides in Tiber River and Estuary: occurrence, distribution and ecological risk [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **571**: 1001-1016.
- [11] Adu-Kumi S, Kawano M, Shiki Y, et al. Organochlorine pesticides (OCPs), dioxin-like polychlorinated biphenyls (dl-PCBs), polychlorinated dibenzo-p-dioxins and polychlorinated dibenzo furans (PCDD/Fs) in edible fish from Lake Volta, Lake Bosomtwi and Weija Lake in Ghana [J]. *Chemosphere*, 2010, **81**(6): 675-684.
- [12] 许妍, 周亚子, 陈曦, 等. 太湖梅梁湾沉积物和水生生物中有机氯农药分布特征及风险评估 [J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2015, **45**(2): 328-335.
Xu Y, Zhou Y Z, Chen X, et al. Chemical characterization and risk assessment of organochlorine pesticides in sediments and biota from Meiliang Bay of Taihu Lake [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2015, **45**(2): 328-335.
- [13] 刘四光, 陈岚, 王键, 等. 诏安湾海洋生物体中多氯联苯 (PCBs) 和有机氯农药 (OCPs) 污染特征及对人体健康影响评价 [J]. *福建水产*, 2014, **36**(1): 62-70.

- Liu S G, Chen L, Wang J, *et al.* Character and human health risk assessment of polychlorinated biphenyls (PCBs) and organochlorine pesticides (OCPs) in marine organisms from Zhao'an Bay[J]. *Journal of Fujian Fisheries*, 2014, **36**(1): 62-70.
- [14] 谷先坤, 谷孝鸿, 曾庆飞, 等. 固城湖及其出入湖河道水质时空分布差异与历年变化趋势分析[J]. *生态与农村环境学报*, 2016, **32**(1): 68-75.
- Gu X K, Gu X H, Zeng Q F, *et al.* Spatial-temporal variation and developing tendency of water quality in Gucheng Lake and inlets and outlets of the Lake[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2016, **32**(1): 68-75.
- [15] Zeng Q F, Jeppesen E, Gu X H, *et al.* Distribution, fate and risk assessment of PAHs in water and sediments from an aquaculture- and shipping-impacted subtropical lake, China[J]. *Chemosphere*, 2018, **201**: 612-620.
- [16] 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.
- [17] 王薇, 李清波, 王晨祥, 等. 辽东半岛海域鱼贝中有机氯农药残留及其风险评估[J]. *生态毒理学报*, 2015, **10**(3): 135-143.
- Wang W, Li Q B, Wang C X, *et al.* Residues and risk assessment of organochlorine pesticides in fish and shellfish samples of Liaodong Peninsula [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2015, **10**(3): 135-143.
- [18] 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.
- [19] 王元, 刘桂建, 刘荣琼. 巢湖湖区及入湖河流表层水体、沉积物中有机氯农药分布及风险评估[J]. *环境化学*, 2019, **38**(3): 669-678.
- Wang Y, Liu G Y, Liu R Q. Distribution and ecological risk assessment of organochlorine pesticides in surface water and sediment samples of Lake Chaohu and its inflow rivers [J]. *Environmental Chemistry*, 2019, **38**(3): 669-678.
- [20] 于英鹏, 刘敏. 太湖流域水源地有机氯农药分布特征与生态风险评估[J]. *环境污染与防治*, 2017, **39**(8): 829-834, 840.
- Yu Y P, Liu M. Distribution characteristics and ecological risk assessment of organochlorine pesticides in water sources of Taihu Lake Basin[J]. *Environmental Pollution and Control*, 2017, **39**(8): 829-834, 840.
- [21] 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.
- [22] 蒋豫, 魏永军, 蔡永久, 等. 太湖流域沉积物中有机氯农药空间分布特征及风险评估[J]. *长江流域资源与环境*, 2019, **28**(2): 387-395.
- Jiang Y, Wei Y J, Cai Y J, *et al.* Spatial distribution and risk assessment of organochlorine pesticides in Surface sediments of Taihu Lake Basin [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, **28**(2): 387-395.
- [23] 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.
- [24] 姜珊, 孙丙华, 徐彪, 等. 巢湖主要湖口水体和表层沉积物中有机氯农药的残留特征及风险评估[J]. *环境化学*, 2016, **35**(6): 1228-1236.
- Jiang S, Sun B H, Xu B, *et al.* Characteristics and risk assessment of organochlorine pesticides in water and surface sediment from main estuaries of Chaohu Lake[J]. *Environmental Chemistry*, 2016, **35**(6): 1228-1236.
- [25] 郑林, 施泽明, 李佳宣, 等. 微波萃取气相色谱法测定鱼肉中有机氯残留[J]. *四川理工学院学报(自然科学版)*, 2010, **23**(1): 62-64, 68.
- Zheng L, Shi Z M, Li J X, *et al.* Analysis of organic chlorinated pesticides in fish by microwave extraction/capillary GC [J]. *Journal of Sichuan University of Science & Engineering (Natural Science Edition)*, 2010, **23**(1): 62-64, 68.
- [26] 张小辉, 贾海燕, 祁士华, 等. 汉江水体和鱼体内有机氯农药残留水平及积累特征分析[J]. *安全与环境工程*, 2014, **21**(2): 40-45.
- Zhang X H, Jia H Y, Qi S H, *et al.* Analysis of the residual levels and accumulation characteristics of organochlorine pesticides in water and fish in Han River [J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2014, **21**(2): 40-45.
- [27] 崔庆兰. 太湖不同营养级水生生物体中多氯联苯和有机氯农药的分布特征及其健康风险初探[D]. 南京: 南京大学, 2011.
- [28] 徐彪. 巢湖鱼体内有机氯农药富集及其分布特征研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2016.
- [29] 丁洋, 黄焕芳, 李绘, 等. 广州南沙红树林湿地水体和沉积物中有机氯农药的残留特征[J]. *环境科学*, 2017, **38**(4): 1431-1441.
- Ding Y, Huang H F, Li H, *et al.* Residues of organochlorine pesticides (OCPs) in water and sediments from Nansha Mangrove Wetland[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(4): 1431-1441.
- [30] 谢正兰, 孙玉川, 张媚, 等. 岩溶地下河流域表层土壤有机氯农药分布特征及来源分析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(3): 900-909.
- Xie Z L, Sun Y C, Zhang M, *et al.* Distribution characteristics and source identification of organochlorine pesticides in surface soil in Karst Underground River Basin [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(3): 900-909.
- [31] 王乙震, 张世禄, 孔凡青, 等. 溧河干流水体多环芳烃与有机氯农药季节性分布、组成及源解析[J]. *环境科学*, 2017, **38**(10): 4194-4211.
- Wang Y Z, Zhang S L, Kong F Q, *et al.* Seasonal distribution, composition, and source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons and organochlorine pesticides in the main stream of the Luanhe River[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(10): 4194-4211.
- [32] Macdonald D D, Carr R S, Calder F D, *et al.* Development and evaluation of sediment quality guidelines for Florida coastal waters [J]. *Ecotoxicology*, 1996, **5**(4): 253-278.
- [33] 张敏, 张涛, 郜志云, 等. 保安湖鱼体重金属和有机氯农药污染特征及健康风险评估[J]. *生态毒理学报*, 2018, **13**(6): 288-297.
- Zhang M, Zhang T, Gao Z Y, *et al.* Pollution characteristics and risk assessment of heavy metals and organochlorine pesticides in fish of Baoan Lake[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2018, **13**(6): 288-297.

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)