

百方知库
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



2019

Vol.40 No.4
第40卷 第4期

目次

南京江北新区大气单颗粒来源解析及混合状态 于兴娜, 时政, 马佳, 李梅, 龚克坚(1521)

西安市PM_{2.5}中碳质气溶胶污染特征 牟臻, 陈庆彩, 王羽琴, 沈振兴, 华晓羽, 张梓萌, 孙浩堯, 王玛敏, 张立欣(1529)

太原市冬季PM_{2.5}化学组分特征与来源解析 刘素, 马彤, 杨艳, 高健, 彭林, 曹力媛, 逢妮妮, 张浩杰(1537)

郑州市大气细颗粒物中水溶性离子季节性变化特征及其源解析 闫广轩, 张靖雯, 雷豪杰, 黄海燕, 唐明双, 曹治国, 李云蓓, 樊静, 王跃思, 李怀刚(1545)

珠海市郊区大气PM_{2.5}中元素特征及重金属健康风险评价 杨毅红, 贾燕, 卞国建, 于晓巍, 钟昌琴, 全鼎余(1553)

一次沙尘事件对沿海及海洋大气气溶胶中金属粒径分布的影响 金同俊, 祁建华, 郝梓延, 林学辉(1562)

基于SOA转化机制的沧州市重点企业秋冬季大气污染模拟 高爽, 伯鑫, 马岩, 雷团团, 王刚, 李时蓓, 陆朝阳, 毛娜, 郝明亮, 黄向峰(1575)

京津冀大气污染变化规律及其与植被指数相关性分析 孙爽, 李令军, 赵文吉, 齐梦溪, 田欣, 李珊珊(1585)

2015~2017年北京及近周边平房燃煤散烧及其污染排放遥感测算 赵文慧, 李令军, 鹿海峰, 姜磊, 张立坤, 王新辉, 邱昀(1594)

基于地基遥感的杭州地区气溶胶光学特性 齐冰, 车慧正, 徐婷婷, 杜荣光, 胡德云, 梁卓然, 马千里, 姚杰(1604)

四川省人为源挥发性有机物组分清单及其臭氧生成潜势 周子航, 邓也, 谭钦文, 吴柯颖, 宋丹林, 黄凤霞, 周小玲(1613)

餐饮源挥发性有机物组成及排放特征 高雅琴, 王红丽, 许睿哲, 景盛翱, 刘跃辉, 彭亚荣(1627)

广州番禺大气成分站一次典型光化学污染过程PAN和O₃分析 邹宇, 邓雪娇, 李菲, 殷长泰(1634)

北京市典型道路扬尘化学组分特征及年际变化 胡月琪, 李萌, 颜旭, 张超(1645)

南昌市扬尘PM_{2.5}中多环芳烃的来源解析及健康风险评价 于瑞莲, 郑权, 刘贤荣, 王珊珊, 赵莉斯, 胡恭任(1656)

道路扬尘排放因子建立方法与应用 樊守彬, 杨涛, 王凯, 李雪峰(1664)

现实工况下挖掘机电尾气排放特征分析 马帅, 张凯山, 王帆, 庞凯莉, 朱怡静, 李臻, 毛红梅, 胡宝梅, 杨锦锦, 王斌(1670)

雾-霾天人体平均呼吸高度处不同粒径气溶胶的微生物特性 杨唐, 韩云平, 李琳, 刘俊新(1680)

霾天能见度参数化方案改进及预报效果评估 赵秀娟, 李梓铭, 徐敬(1688)

支持向量机回归在臭氧预报中的应用 苏筱倩, 安俊琳, 张玉欣, 梁静舒, 刘静达, 王鑫(1697)

基于中国电网结构及一线典型城市车辆出行特征的PHEV二氧化碳排放分析 郝旭, 王贺武, 李伟峰, 欧阳明高(1705)

岩溶槽谷区地下河硝酸盐来源及其环境效应:以重庆龙凤槽谷地下河系统为例 段世辉, 蒋勇军, 张远瞩, 曾泽, 王正雄, 吴韦, 彭学义, 刘九缠(1715)

胶州湾表层水体中邻苯二甲酸酯的污染特征和生态风险 刘成, 孙翠竹, 张智, 唐燎, 邹亚丹, 徐擎擎, 李锋民(1726)

湛江湾沉积物中六六六(HCHs)、滴滴涕(DDTs)有机氯农药的分布特征与风险评估 彭诗云, 彭平安, 孔德明, 陈法锦, 于赤灵, 李嘉诚, 梁宇钊, 宋建中(1734)

生态净化系统中DOM光学特性及影响因素分析:以盐龙湖春季为例 马睿, 李璇, 王莲, 王家新, 马卫星, 丁成, 吴向阳(1742)

溶解性有机物(DOM)与区域土地利用的关系:基于三维荧光-平行因子分析(EEM-PARAFAC) 李昀, 魏鸿杰, 王侃, 张招招, 于旭彪(1751)

汉丰湖流域农业面源污染氮磷排放特征分析 谢经朝, 赵秀兰, 何丙辉, 李章安(1760)

基于RZWQM模型模拟太行山低山丘陵区农田土壤硝态氮迁移及淋溶规律 郑文波, 王仕琴, 刘丙霞, 雷玉平, 曹建生(1770)

澜沧江流域梯级水库建设下水体营养盐和叶绿素a的空间分布特征 程豹, 望雪, 马金川, 杨正健, 刘德富, 马骏(1779)

福州地区海湾和河口潮汐沼泽湿地秋季上覆水营养盐分布特征 何露露, 杨平, 谭立山, 仝川, 黄佳芳(1788)

尾水受纳河流中PhACs在传统水相中的分布及环境风险 王硕, 刘建超, 郑超亚, 张吉琛, 许嘉诚, 徐莹莹, 陆光华(1797)

绿色屋顶雨洪调控能力与效益评价 李俊生, 尹海伟, 孔繁花, 刚佳宇, 邓金玲(1803)

超声活化过硫酸盐降解水中典型臭味 孙昕, 孙杰, 李鹏飞, 汤加刚, 杨晴, 唐晓(1811)

金属有机框架MIL-53(Fe)可见光催化还原水中U(VI) 闫增元, 刁海玲, 袁立永(1819)

覆盖材料对洱海不同湖区沉积物溶解态有机磷和无机磷释放影响及差异 龚佳健, 倪兆奎, 肖尚斌, 赵海超, 席银, 王圣瑞(1826)

气氧化铜改性介孔稻壳生物炭除磷性能 许润, 石程好, 唐倩, 石稳民, 康建雄, 任拥政(1834)

改性污泥基生物炭的性质与重金属吸附效果 陈坦, 周泽宇, 孟瑞红, 刘彦廷, 王洪涛, 陆文静, 金军, 刘颖(1842)

纳米磁性磷酸二氢钙对Cd的吸附、回收与再生 李玉娇, 杨志敏, 陈玉成, 黄磊, 唐海燕(1849)

赤铁矿抑制硫酸盐废水厌氧消化产甲烷过程中硫化氢形成与机制 黄绍福, 叶捷, 周顺桂(1857)

微藻膜反应器处理海水养殖废水性能及膜污染特性 马航, 李之鹏, 柳峰, 徐仲, 尤宏, 王芳, 陈其伟(1865)

生活污水预沉淀-SNAD颗粒污泥工艺小试 李冬, 崔雅倩, 赵世勋, 刘志诚, 张杰(1871)

生活污水与人工配水对好氧颗粒污泥系统的影响 李冬, 王樱桥, 李帅, 张杰, 王玉刚(1878)

硫磺/硫酸铁自养反硝化系统脱氮性能 周娅, 买文宁, 梁家伟, 代吉华, 牛颖, 李伟利, 唐启(1885)

异养硝化细菌Pseudomonas putida YH的脱氮特性及降解动力学 汪旭晖, 杨垒, 任勇翔, 陈宁, 肖倩, 崔坤, 郇丹(1892)

污泥龄及pH值对反硝化除磷工艺效能的影响 韦佳敏, 黄慧敏, 程诚, 蒋志云, 刘文如, 沈耀良(1900)

盐度条件下ANAMMOX-EGSB反应器颗粒污泥微生物群落 王晗, 李瀚翔, 陈猷鹏, 郭劲松, 晏鹏, 方芳(1906)

内源磷PHA的贮存对混合菌群耐低温特性的影响 杨建鹏, 张健, 田晴, 朱艳彬, 李方, Wolfgang Sand(1914)

中国市政污泥中磷的含量与形态分布 王超, 刘清伟, 职音, 程柳, 王宁, 李彩丹, 毛宇翔(1922)

广州市售水产品中全氟烷基化合物的污染特征和安全风险评价 王旭峰, 王强, 黎智广, 黄珂, 李刘冬, 赵东豪(1931)

长江上游典型农业源溪流溶存氧化亚氮(N₂O)浓度特征及影响因素 田琳琳, 王正, 胡磊, 任光前, 朱波(1939)

内蒙古河套灌区不同盐碱程度土壤CH₄吸收规律 杨文柱, 焦燕, 杨铭德, 温慧洋(1950)

水稻光合碳在植株-土壤系统中分配与稳定对施磷的响应 王莹莹, 肖谋良, 张昀, 袁红朝, 祝贞科, 葛体达, 吴金水, 张广才, 高晓丹(1957)

土壤水分和温度对西南喀斯特棕色石灰土无机碳释放的影响 徐学池, 黄媛, 何寻阳, 王桂红, 苏以荣(1965)

黄土丘陵区侵蚀坡面土壤微生物量碳时空动态及影响因素 覃乾, 朱世硕, 夏彬, 赵允格, 许明祥(1973)

农用地土壤抗生素组成特征与积累规律 孔晨晨, 张世文, 聂超甲, 胡青青(1981)

生物发酵制药VOCs与臭味治理技术研究与发展 王东升, 朱新梦, 杨晓芳, 焦茹媛, 赵珊, 宋荣娜, 吕明晗, 杨敏(1990)

《环境科学》征订启事(1612) 《环境科学》征稿简则(1787) 信息(1663, 1796, 1833)

湛江湾沉积物中六六六 (HCHs)、滴滴涕 (DDTs) 有机氯农药的分布特征与风险评估

彭诗云^{1,2,3}, 彭平安¹, 孔德明³, 陈法锦³, 于赤灵¹, 李嘉诚³, 梁宇钊³, 宋建中^{1*}

(1. 中国科学院广州地球化学研究所, 有机地球化学国家重点实验室, 广州 510640; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 广东海洋大学海洋与气象学院, 湛江 524088)

摘要: 从湛江湾的遂溪河入海口至其与南海相交的湾口采集了 16 个表层沉积物样品, 采用气相色谱-质谱分析方法检测了沉积物中的有机氯农药 (HCHs、DDTs), 旨在探讨其分布与风险特征。结果表明, 湛江湾表层沉积物中 OCPs 的含量为 $nd \sim 189.52 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均值为 $32.17 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 其中六六六 (HCHs) 与滴滴涕 (DDTs) 的含量平均值分别为 $5.81 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $26.90 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 。总体分布特征表现为湾区的河流入海口和主航道区具有较高的 OCPs, 近岸区含量高于离岸区域。对其来源进行分析发现, HCHs 的输入以农业为主, 工业输入影响不明显, DDTs 在港口航道区域呈现高值“热点”区, 可能存在防污漆的输入。另外风险评估显示湛江海湾表层沉积物中 DDTs 存在一定的不利生物效应影响风险。总体上, 湛江湾的有机氯农药污染状况相比国内其他海湾属中等偏上, 尤其是港口和船舶维修区域可能存在较高的有机氯农药输入, 存在一定的生态风险, 需要引起重视和进一步的研究。

关键词: 湛江湾; 有机氯农药 (OCPs); 表层沉积物; 分布; 生态风险

中图分类号: X55 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)04-1734-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201809208

Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Sediments of Zhanjiang Bay

PENG Shi-yun^{1,2,3}, PENG Ping-an¹, KONG De-ming³, CHEN Fa-jin³, YU Chi-ling¹, LI Jia-cheng³, LIANG Yu-zhao³, SONG Jian-zhong^{1*}

(1. State Key Laboratory of Organic Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Ocean and Meteorology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China)

Abstract: Sixteen surface sediment samples were collected from the estuary of the Suixi river to the mouth of Zhanjiang Bay and then analyzed for organochlorine pesticides (OCPs) by GC-MS to investigate their distribution and ecological risk. The results showed that the concentrations of OCPs in the sediments ranged from nd to $189.52 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ (mean $32.17 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$), including HCHs (mean $5.81 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$) and DDTs (mean $26.90 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$). The distribution characteristics showed that the highest OCPs concentrations were found in the estuary and the main shipping lane areas, and the concentration in the nearshore area was higher than that offshore. Source analysis indicated that the HCHs mainly originated from agricultural applications, while no industrial input was observed. Some “hot-spots” areas occurred in harbors and shipping channels, likely as a result of the presence of paint flakes. Additionally, the concentrations of DDTs were found to be higher than the limits of Chinese Marine sediment quality criteria, and *p,p'*-DDT was the main type of DDT, presenting inevitable adverse biological effects and high ecological risk. Compared with other bays in China, the concentrations of OCPs in this study were in the upper-median pollution level, especially in harbors and boat maintenance facility areas. High OCPs inputs may occur, and thereby represent a certain ecological risk in Zhanjiang Bay.

Key words: Zhanjiang Bay; organochlorine pesticides (OCPs); surface sediments; distribution; ecological risk

有机氯农药 (organochlorine pesticides, OCPs) 如滴滴涕 (dichlorodiphenyltrichloroethane, DDTs)、六六六 (hexachlorocyclohexane, HCHs) 等, 是一类具有内分泌干扰作用的持久性有机污染物 (persistent organic pollutants POPs)。由于它的生物毒性、持久性, 可生物蓄积放大和长距离迁移能力^[1, 2], 对人体健康和生态环境等存在着严重威胁^[3, 4], 一直为环境科学领域专家和公众关注的热点之一。我国的 OCPs 在 20 世纪 50 年代开始用于农业生产病虫害控制, 在 80 年代得到了广泛地使

用, 后期由于其对环境负面影响而陆续禁用^[5]。然而由于具有较强的迁移能力和难降解性, 有机氯农药一直能在水体、沉积物、生物体等环境介质中检出^[6~13]。近年的研究发现海湾、红树林等区域仍能检测到有机氯农药残留, 且不排除有新的污染源输入^[8, 9]; 在港口、航道、船舶维修区域也有明显的

收稿日期: 2018-09-27; 修订日期: 2018-10-31

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41473104); 有机地球化学国家重点实验室开放基金项目 (SKLOG-201723)

作者简介: 彭诗云 (1988~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为环境地球化学, E-mail: pengsy@gdoul.edu.cn

* 通信作者, E-mail: songjzh@gig.ac.cn

DDT 的高值“热点”区域存在^[14~16]。

湛江湾是一个半封闭的海湾, 地处我国粤西与南海交汇处, 汇集着大量由陆源输入的营养盐和重金属、有机农药等污染物。由于湾内水体交换能力差^[17, 18], 汇集的污染物在湾内聚集, 会存在一定的生态环境健康风险。有研究显示在 20 世纪 80 年代, 粤西地区海域沉积物中检出的 DDT 含量则为 2.5 ~ 12.0 ng·g⁻¹^[19]; 2010 年时, 含量为 6.18 ~ 13.4 ng·g⁻¹ (均值为 9.06 ng·g⁻¹)^[20], OCPs 的含量在 30 a 内并无明显变化。湛江湾内容纳了海水养殖、港口航运和旅游休闲等众多功能区, 其周边城市经济的快速发展以及农业生态活动的影响, 湾内的 OCPs 对海洋生态环境和人体健康均存在一定的威胁。目前关于湛江湾内的有机污染物状况研究主要集中在多环芳烃等污染物^[21, 22], 而有机氯农药方面鲜有报道。针对这个问题, 本研究主要对湛江湾表层沉积物中 OCPs 的含量及污染状况进行了分析, 并进一步对沉积物中 OCPs 的来源进行了探讨, 对该地区 OCPs 的生态风险进行了评价, 以为为该海湾沉积物污染控制和环境管理等提供科学依据。

1 材料与与方法

1.1 试剂与仪器

标准试剂: 19 种有机氯农药标样 (α -HCH、 β -HCH、 γ -HCH、 δ -HCH、*o,p'*-DDD、*o,p'*-DDE、*o,p'*-DDT、*p,p'*-DDD、*p,p'*-DDE、*p,p'*-DDT、七氯 A、七氯 B、环氧七氯、硫丹-I、硫丹-II、艾氏剂、狄氏剂、异狄氏剂、甲氧滴滴涕)、回收率指示物 (PCB191、PCB67) 和内标化合物 (PCB-82) 购自 AccuStandard 公司。试剂: 二氯甲烷 (农残级, CNW)、正己烷 (农残级, CNW)、丙酮 (HPLC, 广试)、盐酸 (GR)、甲醇 (HPLC, CNW)、中性氧化铝 (100 ~ 200 目)、硅胶 (80 ~ 100 目)、铜粉 (酸洗后用二氯甲烷、正己烷依次超声清洗) 脱脂棉 (二氯甲烷溶液中索氏抽提 72 h)、无水硫酸钠 (GR, 用前需在 450°C 下焙烧 12 h, 冷却至室温后储存于密封广口瓶中)。硅胶、中性氧化铝在二氯甲烷溶液中索氏抽提 72 h 后, 分别在 150°C 和 180°C 条件下活化 12 h, 冷却至室温, 加入其重量 3% 的蒸馏水活化, 振荡混匀, 放置 12 h 平衡, 浸没在正己烷中备用。实验所用玻璃容器皆用洗液清洗后, 450°C 烘烤后用锡箔纸包好备用。

仪器: 气相色谱-三重串联四级杆质谱仪 (Agilent5670GC/7980MS)、冷冻干燥机 (北京博医康实验仪器, FD-1)、低温冷却液循环泵 (上海霄汉实业, XHDLB-5/25)、离心机 (上海安亭, TGL-

208)、超声波清洗器 (昆山乔创超声仪器, KH-300DE) 旋转蒸发仪 (德国 BuchiRotavapor, R-210)、氮吹仪 (八方世纪, BFC)。

1.2 样品采集

本研究共设置了 16 个采样点, 由上至下依次分布在遂溪河入海河口、船舶航道、湾中心与湾口, 具体位点位置如图 1 所示, 编号从 ZJ1 ~ ZJ24 号, 部分延续历史采样站点设置。沉积物采样时间为 2017 年 3 月, 用不锈钢抓斗采集表层沉积物, 封装于密实袋中保存, 放入装有冰块的恒温箱中运回实验室后, 于 -20°C 冰箱内保存至分析。

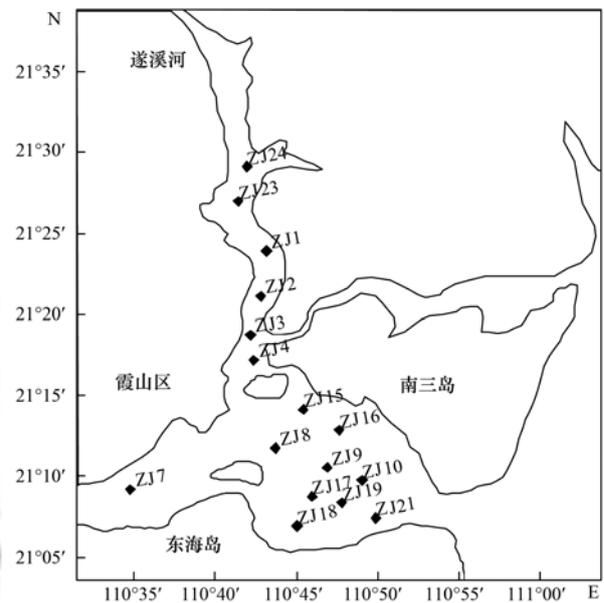


图 1 湛江湾表层沉积物样品采样站点示意

Fig. 1 Stations for surface sediment samples in Zhanjiang Bay

1.3 样品处理与分析

沉积物冷冻干燥后, 研磨过 80 目筛。准确称取 10 g 左右样品, 加入 30 mL 二氯甲烷/正己烷/丙酮 (2:2:1, 体积比) 的混合溶剂, 然后加入铜片和回收率指示剂; 放置在超声清洗仪中超声 15 min; 离心分离后, 将上清液转移至鸡心瓶中。本萃取步骤重复 3 次, 合并上清液。将鸡心瓶中的提取液在旋转蒸发仪中浓缩至 1 ~ 2 mL, 溶剂替换为正己烷 (加入 10 mL 正己烷再浓缩为 1 mL) 后, 在层析柱上进行分离纯化 (层析柱自下而上依次填充氧化铝、硅胶、无水硫酸钠)。浓缩的样品上柱后, 用 10 mL 正己烷和 70 mL 二氯甲烷/正己烷 (3/7, 体积比) 分别淋洗并分离组分 1 和组分 2, 收集组分 2 进行旋蒸, 柔和氮吹定容至 100 μ L, 加入内标后上机检测。

另外用小坩埚取 100 mg 左右沉积物, 用含量约为 2 mol·L⁻¹ 的盐酸浸泡 12 h 后 80°C 加热 1 h 除去碳酸盐, 然后将坩埚上的盐酸洗至中性, 在

80℃ 的鼓风干燥箱中干燥后在碳硫元素分析仪 (德国, ELTEA CS-800) 上检测沉积物 TOC 的含量.

1.4 仪器分析

OCPs 化合物采用 GC-MS 进行分析, 仪器的配置与使用条件: 色谱柱为 HP-5MS (30 m × 0.25 mm × 0.25 μm, Agilent, USA), 色谱纯氦气为载气, 柱流量为 1.2 mL·min⁻¹, 进样口温度为 250℃, 不分流进样 1.0 μL. 色谱升温程序为: 初始温度 70℃, 维持 1 min, 然后以 10℃·min⁻¹ 的速度升温至 150℃, 接着以 3℃·min⁻¹ 的速度升温至 205℃, 最后以 10℃·min⁻¹ 的速度升温至 290℃ 并保留 20 min, 溶剂延迟时间为 5 min. 质谱离子源为 EI 源, 单离子模式, 离子源温度为 230℃.

1.5 质量控制与质量保证

每批次样品分析一个方法空白和一个样品平行样, 用以控制实验流程可能引入的潜在污染和误差. 该方法检测限为 0.005 ~ 0.021 ng·g⁻¹, 方法空

白有机氯农药无检出; 样品加回收率指示剂测定范围为 79.67% ~ 111.64%. 化合物的定量结果经回收率校正.

2 结果与讨论

2.1 湛江湾有机氯农药的含量及分布

湛江湾海域表层沉积物中的 OCPs 的含量分布如表 1 所示, 19 种有机氯农药在沉积物中主要检出的为 HCHs 和 DDTs, 其它有机氯农药仅在少数几个样品中偶有检出. 因此, 本文主要列出了 HCHs 与 DDTs 有机氯农药的含量. 湛江湾沉积物中 OCPs 的检出率约为 94%, 其中 HCHs 为 94% 左右、DDTs 为 88%. 由表 1 可知, HCHs 与 DDTs 在沉积物中的含量分别为 nd ~ 16.33 ng·g⁻¹ (均值为 5.81 ng·g⁻¹) 和 nd ~ 173.19 ng·g⁻¹ (均值为 26.90 ng·g⁻¹), ∑OCPs 的含量范围为 nd ~ 189.52 ng·g⁻¹, 平均值为 32.17 ng·g⁻¹. 与国内其他海湾及河口比较 (表 2, 从南到北列出), 湛江湾沉积物

表 1 湛江湾表层沉积物样品中有机氯农药的含量¹⁾/ng·g⁻¹

Table 1 Concentrations of organochlorine pesticides in surface sediments of Zhanjiang Bay/ng·g⁻¹

站位	水深 /m	TOC /ng·g ⁻¹	α-HCH	β-HCH	γ-HCH	δ-HCH	∑HCHs	<i>o,p'</i> -DDD	<i>p,p'</i> -DDD	<i>o,p'</i> -DDE	<i>p,p'</i> -DDE	<i>o,p'</i> -DDT	<i>p,p'</i> -DDT	∑DDTs	∑OCPs
ZJ1	16.0	1.19	2.00	3.74	8.10	2.39	16.33	1.29	1.58	8.03	88.00	2.39	71.90	173.19	189.52
ZJ2	28.0	0.82	0.30	0.53	1.44	1.16	3.42	0.76	1.34	1.00	8.37	3.14	12.48	27.08	30.50
ZJ3	22.5	1.01	0.38	0.75	1.52	6.07	8.73	0.68	1.97	2.51	1.58	14.41	9.51	30.66	39.39
ZJ4	10.0	0.26	0.44	0.48	0.85	0.68	2.44	0.55	0.59	0.43	1.29	0.70	1.81	5.36	7.81
ZJ7	4.2	0.92	2.08	0.00	1.57	2.27	5.92	4.65	23.67	0.29	nd	2.23	5.72	36.57	42.49
ZJ8	6.0	0.62	0.00	0.77	1.15	11.82	13.74	0.51	nd	nd	1.24	0.99	1.92	4.66	18.40
ZJ9	3.5	0.80	0.30	0.37	0.65	8.88	10.21	0.67	1.46	0.24	nd	1.29	3.09	6.75	16.96
ZJ10	3.5	0.51	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
ZJ15	7.0	0.30	1.01	0.00	0.69	1.21	2.91	7.71	7.36	0.17	39.60	0.17	57.71	112.71	115.62
ZJ16	4.0	0.14	0.13	0.19	0.32	4.13	4.77	0.98	3.60	0.12	1.66	0.38	5.32	12.06	16.83
ZJ17	8.0	0.19	0.00	0.32	0.35	2.17	2.84	nd	nd	0.35	0.82	nd	nd	1.17	4.01
ZJ18	3.0	0.96	0.26	0.00	0.34	0.58	1.18	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	1.18
ZJ19	12.0	0.18	0.23	0.48	0.72	8.54	9.97	nd	nd	0.26	0.64	nd	1.05	1.94	11.91
ZJ21	5.0	0.22	1.14	0.00	0.71	1.60	3.46	1.61	1.39	0.26	nd	nd	3.17	6.42	9.88
ZJ23	15.0	1.21	1.21	0.00	0.86	0.80	2.87	0.80	1.74	nd	nd	1.46	2.18	6.17	9.04
ZJ24	16.0	0.57	2.02	0.00	1.17	1.05	4.23	0.77	1.40	0.16	nd	nd	3.28	5.61	9.84

1) nd 表示低于检出限, 下同

表 2 湛江湾沉积物中有机氯农药的含量与国内其他地区比较¹⁾/ng·g⁻¹

Table 2 Concentrations of organochlorine pesticides in surface sediments of Zhanjiang Bay and other areas in China/ng·g⁻¹

地点	年份	∑HCHs	∑DDTs	∑OCPs	文献
湛江湾 (广东)	2017	nd ~ 16.33 (5.81)	nd ~ 173.19 (26.90)	nd ~ 198.03 (38.94)	本研究
海陵湾 (广东)	2014	—	65 ~ 400 (187)	65 ~ 400 (187)	[16]
大亚湾 (广东)	2001	1.79 ~ 4.64 (2.72)	8.69 ~ 34.34 (19.05)	10.48 ~ 38.98 (21.77)	[24]
广州南沙红树林湿地	2015	0.67 ~ 7.29 (3.35)	2.37 ~ 9.4 (5.23)	3.10 ~ 16.02 (8.58)	[8]
珠江口	2003	0.18 ~ 1.39 (0.55)	0.057 ~ 2.244 (1.14)	0.24 ~ 3.63 (1.69)	[6]
柘林湾 (广东)	2013	nd ~ 3.25	13.88 ~ 391.59	14.14 ~ 306.88 (78.37)	[9]
杭州湾	2012	0.82 ~ 1.76	0.54 ~ 1.18	1.61 ~ 4.71 (2.29)	[23]
胶州湾	2010	0.22 ~ 0.78 (0.33)	0.9 ~ 26.27 (10.33)	1.18 ~ 26.77 (10.09)	[7]
大连湾	2011	3.35 ~ 21.59	2.9 ~ 20.32	2.98 ~ 32.23 (13.91)	[23]

1) 括号内为平均值; “—”表示数据缺失

的 HCHs 残留量属中等偏高, 高于珠江口、大亚湾、柘林湾、杭州湾等, 与大连湾的残留量水平类似^[6, 7, 9, 23]. DDTs 的污染程度重于大亚湾、珠江口、大连湾、胶州湾等, 略轻于海陵湾(广东省)^[18]和柘林湾(广东省)^[9].

在湛江湾, 不同点位沉积物中有机氯农药的分布情况见图 2, 分布特点表现为: 湾区近河口端的 HCHs 与 DDTs 均为最高值, 部分港口和主航道区域高于湾内其他功能区. 首先 HCHs 的最高值出现在 ZJ1 站位, 位于湾区上游, 近遂溪河入海湾区. 另外在港口区的 ZJ8、ZJ9、ZJ19、ZJ3 和 ZJ7 站位沉积物中也具有较高的检出. 沉积物中 DDTs 的含量则表现为: 主航道区域的 DDTs 含量由河口端

向湾口端逐渐降低, 靠近南三岛的 ZJ15、ZJ16 站点含量高于湾中心区域. DDTs 的最高值同样出现在 ZJ1, 该站位位于主航道上、地处海滨船厂与军港的中间位置, 船舶防污漆的输入可能是引起该区域 DDT 高值的主要原因. ZJ15 的值也相对其他站位偏高, 其余较高含量区依次出现在湾区内的 ZJ2、ZJ3、ZJ7, 都属于湾内主航道船舶来往繁忙的区域.

对湛江湾的 OCPs 与 TOC 进行相关性分析发现, OCPs 与 TOC($r=0.01$, $P=0.9$) 没有相关性, 说明沉积物中 OCPs 分布的主要控制因素不是 TOC, 而是受其他因素的控制. HCHs($r=0.09$, $P=0.02$)、DDTs($r=0.09$, $P=0.024$) 与 TOC 的相关性同样不显著.

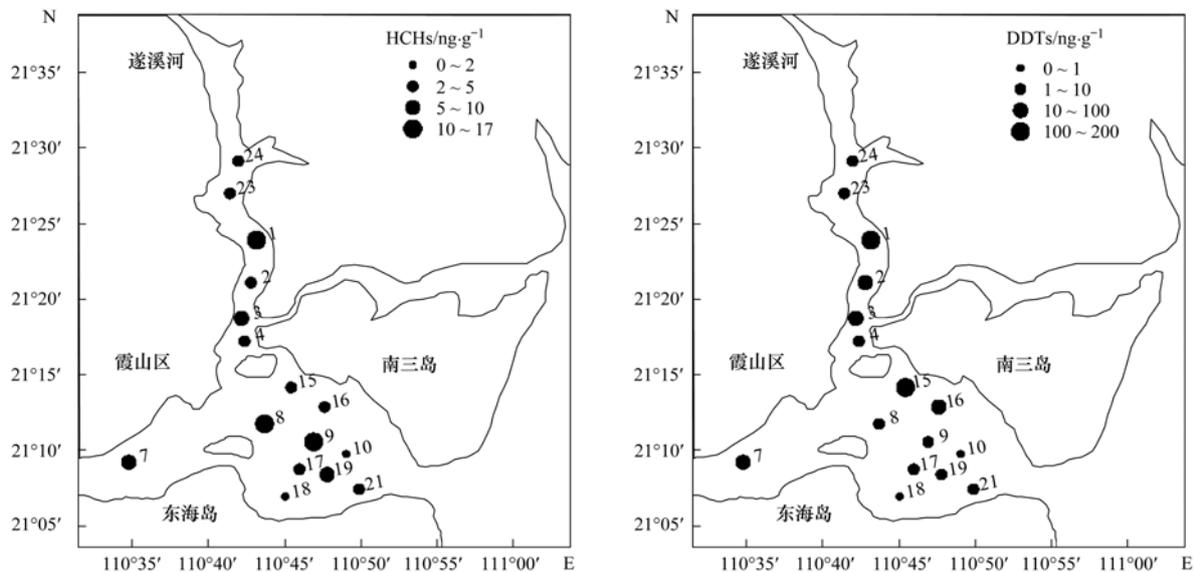


图 2 湛江湾沉积物中 HCHs、DDTs 含量与分布

Fig. 2 Distributions of HCHs and DDTs in the sediments of Zhanjiang Bay

2.2 湛江湾表层沉积物 HCHs 的组成特征

我国环境中 HCHs 的来源主要有工业用 HCH 和农业用林丹, 其中典型工业 HCHs 的组分为 α -HCH (60% ~ 70%)、 β -HCH (5% ~ 12%)、 γ -HCH (10% ~ 15%)、 δ -HCH (6% ~ 10%) 和其他次要组分, 杀虫剂林丹主要组分为 γ -HCH (>99%). α -HCH/ γ -HCH 的比值常被用来评估 HCHs 的来源, 当沉积物中 α -HCH/ γ -HCH 比值在 0.2 ~ 1 之间, 表明存在林丹的污染; 当该值在 4 ~ 15 之间时, 说明其可能主要来源于工业 HCHs 的输入, 也可能是 γ -HCH 经过光化学转化成 α -HCH 造成的^[25, 26]. 因此通过分析沉积物中 HCHs (包括 α -HCH、 β -HCH、 γ -HCH、 δ -HCH 这 4 种异构体) 的组成特征可用于评价污染物输入的类型及方式^[11, 27].

本研究样品中的 HCHs 组成见图 3, 不同站位沉积物样品中 HCHs 异构体组成存在着较大的差异, 表明了湾内不同区域沉积物中 HCHs 的来源可

能存在一定的不同. 在本研究中, 约 94% 的站位检出 3 种以上的 HCHs 的异构体, 其中 γ -HCH 与 δ -HCH 的检出率较高, 而 α -HCH、 β -HCH 检出率相对较低(见表 1), 与部分研究中 β -HCH 的比例最高有一定的差异^[7, 23, 28, 29]. ZJ3、ZJ8、ZJ9、ZJ19 等站点中 δ -HCH 含量高于其他 3 种组分, β -HCH 形态的含量最低, 与丁洋等^[8]和 Yang 等^[11]的观测结果有一定的相似性, 这种分布特征表明了湛江湾的沉积物环境可能更易于赋存 δ -HCH 形态的 HCHs 化合物, 造成这一现象的原因尚需进一步地研究解释. 在本研究中, α -HCH/ γ -HCH 比值范围在 0.1 ~ 1.73 之间(图 3), 其中 0.2 ~ 1 之间的站点占总数的 54%, 比值未有高于 4 的站位, 表明湛江湾的 HCHs 以工业输入的特征不明显, 更可能受农业输入影响.

2.3 湛江湾表层沉积物 DDTs 的组成特征

DDTs 主要由 p,p' -DDD、 p,p' -DDE、 p,p' -DDT 和 o,p' -DDD、 o,p' -DDE、 o,p' -DDT 共 6 种异构体组

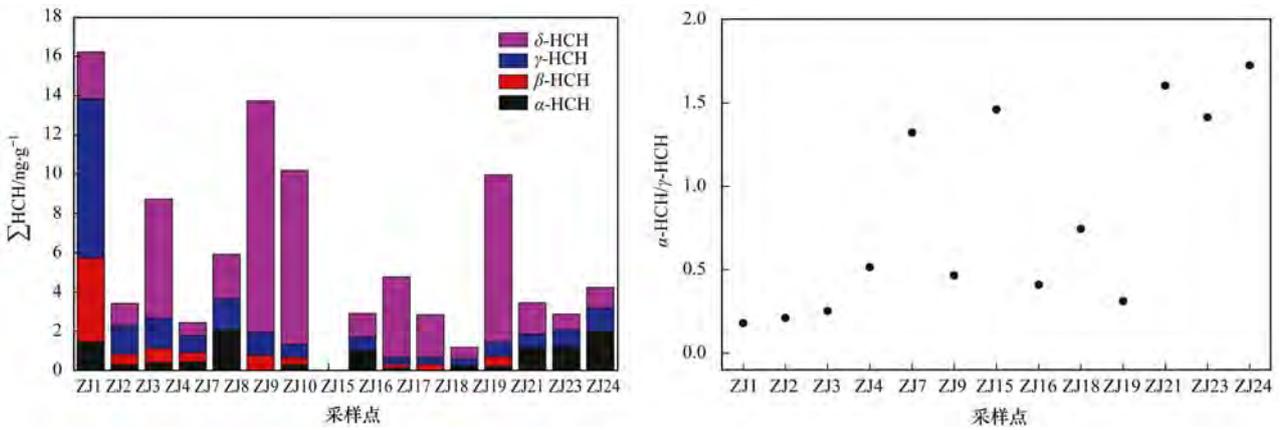


图3 表层沉积物中 HCHs 农药的组成特征与 α -HCH/ γ -HCH 比值
Fig. 3 Composition of HCHs and the α -HCH/ γ -HCH ratio in the sediments

成。通常来说工业用品 DDTs (p, p' -DDD、 p, p' -DDE、 p, p' -DDT) 由大约 70% 的 p, p' -DDT 和大约 15% 的 o, p' -DDT 组成, 而 o, p' -DDT 较 p, p' -DDT 更易降解^[5]。DDT 在自然界中随环境的不同而降解为不同的产物, 在厌氧条件下, DDT 通过还原过程脱氯生成 DDD; 在氧化条件下, DDT 主要降解为 DDE^[30]。因此, 如果存在着持续的 DDT 输入, 则 DDT 的相对含量就会维持在一个较高的水平; 如果没有新的 DDT 输入, 则 DDT 的相对含量就会不断降低, 而相应的降解产物含量就会不断升高^[31]。湛江湾表层沉积物中 DDTs 农药的组成特征如图 4 所示, 从中可见 p, p' -DDT 和 p, p' -DDE 含量占总 DDTs 的比例较高, 这与其结构的稳定性有关。

(DDD + DDE)/DDT 和 DDD/DDE 这 2 个比值能用来示踪 DDTs 农药的降解程度和降解环境, 并被用于判定是否有新的 DDTs 农药的输入^[27]。(DDD + DDE)/DDT 比值为 0.28 ~ 3.60 (均值

1.04) (图 5), 其中采样点 ZJ2、ZJ3、ZJ8、ZJ9、ZJ15、ZJ19、ZJ23 和 ZJ24 样品中的 (DDD + DDE)/DDT 比值小于 1, 表明在湛江湾地区仍然存在着新的 DDTs 输入源; 遂溪河入海口较低的 (DDD + DDE)/DDT 比值暗示其可能存在陆源的农药输入, 港口航道区域的含量值与其他港口或者船舶维修区域的高值点相似^[15, 16], 推测较大可能性来自船舶防污漆的输入。以 2005 年为例, 用于船舶防污漆生产的 DDT 超过 4 000 t, 占市场销售 DDT 总份额的 17%^[32]。虽然 DDT 防污漆在逐渐被替代, 但对港口、船舶维修区及造船厂可能引入的引起其附近海域沉积物中较高的 DDT 值还是应引起重点关注。如图 5 所示, 样品 DDD/DDE 比值范围为 0.03 ~ 96.08, 除去 ZJ7 站位的最高值点后其平均值为 2.61; ZJ7(96.08)、ZJ9(9.0)、ZJ16(2.57)、ZJ 21(11.65) 和 ZJ 24(13.58) 站点比值大于 1, 其余 63% 站点比值均小于 1, 表明研究该区域沉积物环

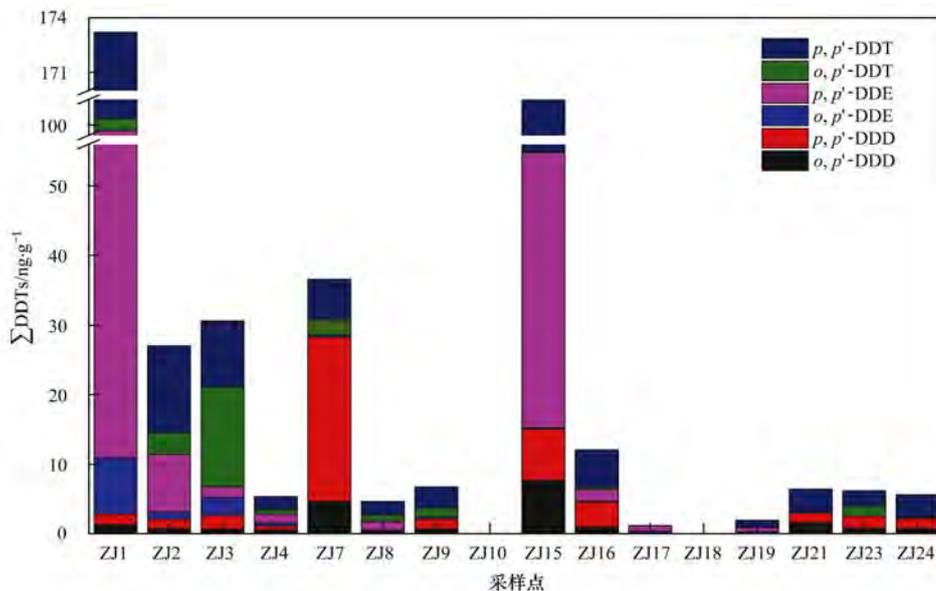


图4 表层沉积物中 DDTs 农药的组成特征
Fig. 4 Composition of DDTs in surface sediments

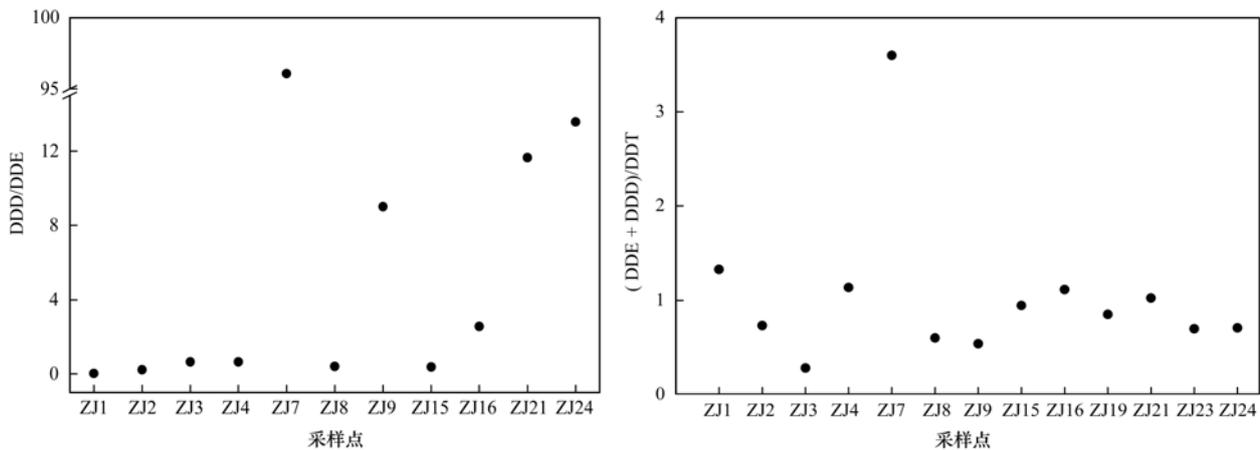


图5 表层沉积物中(DDE + DDD)/DDT和DDD/DDE的比值

Fig. 5 (DDE + DDD)/DDT and DDD/DDE ratios of the DDTs in the surface sediments

境以有氧环境为主, 这跟湾内的环境条件有关。

2.4 有机氯农药含量的风险评估

我国目前用于评价近海海洋沉积物中有机氯农药的标准为《海洋近岸沉积物评价标准 GB-2002》(HCHs 的标准值: 第一类 $0.5 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 、第二类 $1.00 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 、第三类 $1.50 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$; DDTs 的标准值: 第一类 $0.02 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 、第二类 $0.05 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 、第三类 $0.10 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$), 可对不同功能区沉积物中的 HCHs 与 DDTs 的含量进行评价。湛江湾沉积物有机氯农药参照该标准进行评价显示, 各采样点的 HCHs 含量均未超出标准; DDTs 含量优于一类的站点占所有采样点的 68.8%, 劣一类的有 ZJ2、ZJ3、ZJ7 采样点, 而劣三类的站点为 ZJ1、ZJ15 两个采样点, 占总采样点的 12.5%, 应引起关注和重视。

由于我国评价标准相对较为单一, 本文进一步引入目前使用较为广泛的评价体系来对沉积物中 HCHs 和 DDTs 污染进行评价。主要采用的评价体系为由 Long 等^[26, 31]提出并为美国、加拿大等环保机构长期使用的 ERL 值、ERM 值与 TEL 值(产生效应的临界含量)、PEL 值(必然产生效应的临界含量)^[33]。其中, ERL 为生态风险效应区间低值,

ERM 为生态风险效应区间中值, 当污染物含量高于 ERM 值时毒性风险大于 75%。而在 TEL 值与 PEL 值中, 低于 TEL 值时生物毒性效应较少发生, 污染物含量高于 PEL 值时生物毒性效应频繁发生。当目标物含量高于 ERM 和 PEL 时必然频发不利生物效应影响, 含量处于 ERL ~ ERM 和 TEL ~ PEL 之间, 会偶尔产生负面生态效应影响, 含量低于 ERL 和 TEL 则很少发生负面生态效应影响。

利用该指数对湛江湾沉积物中的污染物进行评价显示(表 3): γ -HCH 高于 PEL 值而存在必然频发不利生物效应影响的站点为 25%, 低于 TEL 值的站点为 63%, 生态风险值相对较低; DDTs 值同时高于 ERM 和 PEL 值而存在必然频发不利生物效应影响的站点约为 13%, 其中 p, p' -DDT 含量大于 ERM 值与 PEL 值的比例分别为 25% 与 38%, 高于 p, p' -DDE 与 p, p' -DDD 的 ERM 值与 PEL 值, 显示 p, p' -DDT 为该区域有机氯农药污染毒性风险的主要结构种类。DDTs 高于 ERL、TEL 值的则分别为 81%、75%, 整体呈现较高的风险效应, 可能对湛江湾海域的生态系统健康存在威胁, 应对该区域的滴滴涕类农药重点关注。

表 3 湛江样品沉积物中有机氯农药的生态风险评估

Table 3 Ecological risk of the OCPs in the sediments from Zhanjiang Bay

化合物	含量 / $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$	ERL / $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$	ERM / $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$	比例($n=16$)/%			TEL / $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$	PEL / $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$	比例($n=16$)/%		
				<ERL	ERL ~ ERM	>ERM			<TEL	TEL ~ PEL	>PEL
γ -HCH	0 ~ 8.1	—	—	—	—	—	0.32	0.99	63	13	25
p, p' -DDD	0 ~ 23.67	2	20	81	13	6	1.22	7.81	81	13	6
p, p' -DDE	0 ~ 88.0	2.2	27	81	6	13	2.07	3.74	69	13	19
p, p' -DDT	0 ~ 71.9	1	7	19	56	25	1.19	4.77	25	38	38
\sum DDTs	0 ~ 173.19	1.58	46.1	19	69	13	3.89	51.7	25	63	13

3 结论

(1) 湛江湾 HCHs 与 DDTs 在湛江湾的沉积物

中的含量分别为 $\text{nd} \sim 16.33 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $\text{nd} \sim 173.19 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, \sum OCPs 的含量范围为 $\text{nd} \sim 189.52 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均值为 $32.17 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 。与国内其他海湾

及河口比较, 湛江湾沉积物的 \sum OCPs 残留量属中等偏高水平.

(2) 湾内的污染物的分布表现为湾区近河口端的 HCHs 与 DDTs 均有较高的含量, 部分港口和主航道区域高于湾内其他功能区. HCHs 的输入以农业为主, 工业输入影响不明显, DDTs 在港口航道区域呈现高值“热点”区, 可能存在防污漆的输入.

(3) 湛江湾沉积物的有机氯农药主要表现为滴滴涕类的污染, 部分区域污染程度超过国家三类标准, 风险评估显示 p,p' -DDT 为主要的不利生物效应影响的污染物形态, 总体上, 湾内有机氯农药含量存在一定的生态风险, 对湛江湾海域的生态系统健康存在威胁.

参考文献:

- [1] Lepri L, Desideri P, Cini R, *et al.* Transport of organochlorine pesticides across the air/sea interface during the aerosol process [J]. *Analytica Chimica Acta*, 1995, **317**(1-3): 149-160.
- [2] Iwata H, Tanabe S, Sakai N, *et al.* Distribution of persistent organochlorines in the oceanic air and surface seawater and the role of ocean on their global transport and fate [J]. *Environmental Science & Technology*, 1993, **27**(6): 1080-1098.
- [3] Guo J Y, Wu F C, Shen R L, *et al.* Dietary intake and potential health risk of DDTs and PBDEs via seafood consumption in South China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2010, **73**(7): 1812-1819.
- [4] Yu H Y, Zhang B Z, Giesy J P, *et al.* Persistent halogenated compounds in aquaculture environments of South China: implications for global consumers' health risk via fish consumption [J]. *Environment International*, 2011, **37**(7): 1190-1195.
- [5] Qiu X H, Zhu T, Yao B, *et al.* Contribution of dicofol to the current DDT pollution in China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(12): 4385-4390.
- [6] 罗孝俊, 陈社军, 麦碧娴, 等. 珠江三角洲河流及南海近海区域表层沉积物中有机氯农药含量及分布 [J]. *环境科学学报*, 2005, **25**(9): 1272-1279.
- Luo X J, Chen S J, Mai B X, *et al.* Distribution of organochlorine pesticides (OCPs) in surface sediments in Pearl River Delta and its adjacent coastal areas of South China Sea [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, **25**(9): 1272-1279.
- [7] 刘艺凯, 钟广财, 唐建辉, 等. 胶州湾、套子湾及四十里湾表层沉积物中有机氯农药的含量和分布特征 [J]. *环境科学*, 2013, **34**(1): 129-136.
- Liu Y K, Zhong G C, Tang J H, *et al.* Concentrations and distribution of organochlorine pesticides in the surface sediments of Jiaozhou Bay, Taozi Bay and Sishili Bay [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(1): 129-136.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Yang D, Qi S H, Zhang J Q, *et al.* Organochlorine pesticides in soil, water and sediment along the Jinjiang River mainstream to Quanzhou Bay, Southeast China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2013, **89**: 59-65.
- [12] Zhong G C, Tang J H, Zhao Z, *et al.* Organochlorine pesticides in sediments of Laizhou Bay and its adjacent rivers, North China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, **62**(11): 2543-2547.
- [13] Yu H Y, Shen R L, Yan L, *et al.* Inputs of antifouling paint-derived dichlorodiphenyltrichloroethanes (DDTs) to a typical mariculture zone (South China): Potential impact on aquaculture environment [J]. *Environmental Pollution*, 2011, **159**: 3700-3705.
- [14] Lin T, Hu Z H, Zhang G, *et al.* Levels and mass burden of DDTs in sediments from fishing harbors: the importance of DDT-containing antifouling paint to the coastal environment of China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43**(21): 8033-8038.
- [15] Fang S M, Zhang X M, Bao L J, *et al.* Modeling the fate of p,p' -DDT in water and sediment of two typical estuarine bays in South China: importance of fishing vessels' inputs [J]. *Environmental Pollution*, 2016, **212**: 598-604.
- [16] Wu C C, Bao L J, Tao S, *et al.* Significance of antifouling paint flakes to the distribution of dichlorodiphenyltrichloroethanes (DDTs) in estuarine sediment [J]. *Environmental Pollution*, 2016, **210**: 253-260.
- [17] 李希彬, 孙晓燕, 牛福新, 等. 半封闭海湾的水交换数值模拟研究 [J]. *海洋通报*, 2012, **31**(3): 248-254.
- Li X B, Sun X Y, Niu F X, *et al.* Numerical study on the water exchange of a semi-closed bay [J]. *Marine Science Bulletin*, 2012, **31**(3): 248-254.
- [18] 张志飞, 诸裕良, 何杰. 多年围填海工程对湛江湾水动力环境的影响 [J]. *水利水运工程学报*, 2016, (6): 96-104.
- Zhang Z F, Zhu Y L, He J. Influences of long term reclamation works on hydrodynamic environment in Zhanjiang bay [J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2016, (6): 96-104.
- [19] 廖强. 粤西海区水质、底质、生物中有机氯农药的污染 [J]. *海洋环境科学*, 1983, **2**(4): 37-40.
- [20] 施震, 张大文, 黄小平, 等. 有机氯农药在粤西海域沉积物和生物体中的累积研究 [J]. *热带海洋学报*, 2010, **29**(3): 114-119.
- Shi Z, Zhang D W, Huang X P, *et al.* Bioaccumulation of organochlorine pesticides in organisms and sediments in the western coastal waters of Guangdong province [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2010, **29**(3): 114-119.
- [21] Huang W X, Wang Z Y, Yan W. Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in sediments from Zhanjiang Bay and Leizhou Bay, South China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2012, **64**(9): 1962-1969.
- [22] 柯盛, 赵利容, 孙省利. 湛江湾陆源入海排污口海域 PAHs 分布特征及来源 [J]. *海洋环境科学*, 2014, **33**(1): 71-77.
- Ke S, Zhao L R, Sun S L. Distribution characteristics and sources of PAHs in sea water of the land-based outlet of Zhanjiang

- Bay[J]. *Marine Environmental Science*, 2014, **33**(1): 71-77.
- [23] 姚婷, 张蓬, 赫春香, 等. 大连湾和杭州湾表层沉积物中多氯联苯和有机氯农药及风险评估[J]. *海洋科学*, 2014, **38**(7): 47-56.
- Yao T, Zhang P, He C X, *et al.* Distribution and ecological risk assessment of polychlorinated biphenyls and organochlorine pesticides in marine sediments of Dalian Bay and Hangzhou Bay [J]. *Marine Science*, 2014, **38**(7): 47-56.
- [24] Zhou J L, Maskouli K, Qiu Y W, *et al.* Polychlorinated biphenyl congeners and organochlorine insecticides in the water column and sediments of Daya Bay, China [J]. *Environmental Pollution*, 2001, **113**(3): 373-384.
- [25] Walker K, Vallerio D A, Lewis R G. Factors influencing the distribution of lindane and other hexachlorocyclohexanes in the environment [J]. *Environmental Science & Technology*, 1999, **33**(24): 4373-4378.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 罗孝俊. 珠江三角洲河流、河口和邻近南海海域水体、沉积物中多环芳烃与有机氯农药研究 [D]. 广州: 中国科学院研究生院(广州地球化学研究所), 2004.
- Luo X J. A study of PAHs and OCPs on water body and sediments of rivers in Pearl River Delta, Pearl River estuary and offshore of South China Sea [D]. Guangzhou: Graduate University of Chinese Academy of Sciences (Guangzhou Institute of Geochemistry), 2004.
- [29] 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.
- [30] Hitch R K, Day H R. Unusual persistence of DDT in some western USA soils [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 1992, **48**(2): 259-264.
- [31] Long E R, Field L J, MacDonald D D. Predicting toxicity in marine sediments with numerical sediment quality guidelines [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1998, **17**(4): 714-727.
- [32] 肖亚丽, 陆雍森, 包存宽. 中国用于防污漆生产的滴滴涕(DDT)替代的社会经济影响评价 [A]. 见: 第一届持久性有机污染物全国学术研讨会暨 2006 持久性有机污染物论坛论文集 [C]. 北京: 中国环境科学学会, 中国化学会, 清华大学, 2006. 370-374
- [33] Long E R, Ingersoll C G, MacDonald D D. Calculation and uses of mean sediment quality guideline quotients: a critical review [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **40**(6): 1726-1736.

CONTENTS

Source Apportionment and Mixing State of Single Particles in the Nanjing Jiangbei New Area	YU Xing-na, SHI Zheng, MA Jia, <i>et al.</i> (1521)
Characteristics of Carbonaceous Aerosol Pollution in PM _{2.5} in Xi'an	MU Zhen, CHEN Qing-cai, WANG Yu-qin, <i>et al.</i> (1529)
Chemical Composition Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} During Winter in Taiyuan	LIU Su, MA Tong, YANG Yan, <i>et al.</i> (1537)
Seasonal Variation and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter in Zhengzhou	YAN Guang-xuan, ZHANG Jing-wen, LEI Hao-jie, <i>et al.</i> (1545)
Elemental Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric PM _{2.5} in a Suburb of Zhuhai City	YANG Yi-hong, JIA Yan, BIAN Guo-jian, <i>et al.</i> (1553)
Impact of a Dust Event on the Size Distribution of Metal Elements in Atmospheric Aerosols at a Coastal Region and over the Ocean	JIN Tong-jun, QI Jian-hua, XI Zi-yan, <i>et al.</i> (1562)
CALPUFF Modeling of the Influence of Typical Industrial Emissions on PM _{2.5} in an Urban Area Considering the SOA Transformation Mechanism	GAO Shuang, BO Xin, MA Yan, <i>et al.</i> (1575)
Variation in Pollutant Concentrations and Correlation Analysis with the Vegetation Index in Beijing-Tianjin-Hebei	SUN Shuang, LI Ling-jun, ZHAO Wen-ji, <i>et al.</i> (1585)
Estimation of Coal Consumption and the Emission of Related Contaminants in the Plain Area Around Beijing During 2015-2017	ZHAO Wen-hui, LI Ling-jun, LU Hai-feng, <i>et al.</i> (1594)
Column-integrated Aerosol Optical Properties Determined Using Ground-based Sun Photometry Measurements in the Hangzhou Region	QI Bing, CHE Hui-zheng, XU Ting-ting, <i>et al.</i> (1604)
Speciated VOCs Emission Inventory and Ozone Formation Potential in Sichuan Province	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, TAN Qin-wen, <i>et al.</i> (1613)
Characterization of Volatile Organic Compounds from Cooking Emissions	GAO Ya-qin, WANG Hong-li, XU Rui-zhe, <i>et al.</i> (1627)
Analysis of Peroxyacetyl Nitrate and Ozone During a Typical Photochemical Pollution Process at the Panyu Atmospheric Composition Station	ZOU Yu, DENG Xue-jiao, LI Fei, <i>et al.</i> (1634)
Characteristics and Interannual Variation of Chemical Components in Typical Road Dust in Beijing	HU Yue-qi, LI Meng, YAN Xu, <i>et al.</i> (1645)
Sources Analysis and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the PM _{2.5} Fraction of Fugitive Dust in Nanchang City	YU Rui-lian, ZHENG Quan, LIU Xian-rong, <i>et al.</i> (1656)
Methods and Application of Road Fugitive Dust Emission Factor Localization	FAN Shou-bin, YANG Tao, WANG Kai, <i>et al.</i> (1664)
Characterization of Tailpipe Emissions from in-use Excavators	MA Shuai, ZHANG Kai-shan, WANG Fan, <i>et al.</i> (1670)
Microbial Properties of Different Size Aerosols at Human Average Respiratory Height During Fog-haze Days	YANG Tang, HAN Yun-ping, LI Lin, <i>et al.</i> (1680)
Modification and Performance Tests of Visibility Parameterizations for Haze Days	ZHAO Xiu-juan, LI Zi-ming, XU Jing (1688)
Application of Support Vector Machine Regression in Ozone Forecasting	SU Xiao-qian, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (1697)
Analysis of PHEV CO ₂ Emission Based on China's Grid Structure and Travelling Patterns in Mega Cities	HAO Xu, WANG He-wu, LI Wei-feng, <i>et al.</i> (1705)
Sources of Nitrate in Groundwater and Its Environmental Effects in Karst Trough Valleys: A Case Study of an Underground River System in the Longfeng Trough Valley, Chongqing	DUAN Shi-hui, JIANG Yong-jun, ZHANG Yun-zhu, <i>et al.</i> (1715)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Phthalate Esters (PAEs) in the Surface Water of Jiaozhou Bay	LIU Cheng, SUN Cui-zhu, ZHANG Ge, <i>et al.</i> (1726)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Sediments of Zhanjiang Bay	PENG Shi-yun, PENG Ping-an, KONG De-ming, <i>et al.</i> (1734)
Analysis of the Optical Properties and Factors Influencing DOM in an Ecological Purification System: A Case Study of Yanlong Lake in Spring	MA Rui, LI Xuan, WANG Lian, <i>et al.</i> (1742)
Analysis of the Relationship Between Dissolved Organic Matter (DOM) and Watershed Land-use Based on Three-dimensional Fluorescence-Parallel Factor (EEM-PARAFAC) Analysis	LI Yun, WEI Hong-jie, WANG Kan, <i>et al.</i> (1751)
Analysis of the Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Emissions from Agricultural Non-point Sources on Hanfeng Lake Basin	XIE Jing-chao, ZHAO Xiu-lan, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (1760)
Simulation of the Migration and Leaching of Nitrate Nitrogen in the Farmland Soil Profile in a Hilly Area of Taihang Mountain with the RZWQM Model	ZHENG Wen-bo, WANG Shi-qin, LIU Bing-xia, <i>et al.</i> (1770)
Spatial Distribution Characteristics of Nutrients and Chlorophyll A in the Lancang River Basin Under Cascade Reservoirs	CHENG Bao, WANG Xue, MA Jin-chuan, <i>et al.</i> (1779)
Nutrient Distribution of Overlying Water in Tidal Marshes in Five Estuaries and Bays of the Fuzhou Region in Autumn	HE Lu-lu, YANG Ping, TAN Li-shan, <i>et al.</i> (1788)
Distribution and Environmental Risk of Pharmaceutically Active Compounds in the Traditionally Aqueous Phase of Effluent-receiving Rivers	WANG Shuo, LIU Jian-chao, ZHENG Chao-ya, <i>et al.</i> (1797)
Effects of a Green Roof on Stormwater Regulation and Cost-benefit Analysis	LI Jun-sheng, YIN Hai-wei, KONG Fan-hua, <i>et al.</i> (1803)
Ultrasonically Activated Persulfate Degrades Typical Odors in Water	SUN Xin, SUN Jie, LI Peng-fei, <i>et al.</i> (1811)
Metal Organic Framework MIL-53(Fe) as a Photocatalyst for Visible-light Catalytic Reduction of U(VI) in Aqueous Solution	YAN Zeng-yuan, XI Hai-ling, YUAN Li-yong (1819)
Effects and Differences of the Release of Dissolved Organic and Inorganic Phosphorus in Different Sediments Covered by Different Materials of Erhai Lake	GONG Jia-jian, NI Zhao-kui, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (1826)
Phosphate Removal Using Rice Husk Biochars Modified with Lanthanum Hydroxide	XU Run, SHI Cheng-hao, TANG Qian, <i>et al.</i> (1834)
Characteristics and Heavy Metal Adsorption Performance of Sewage Sludge-derived Biochar from Co-pyrolysis with Transition Metals	CHEN Tan, ZHOU Ze-yu, MENG Rui-hong, <i>et al.</i> (1842)
Adsorption, Reclaim, and Regeneration of Cd by Magnetic Calcium Dihydrogen Phosphate Nanoparticles	LI Yu-jiao, YANG Zhi-min, CHEN Yu-cheng, <i>et al.</i> (1849)
Effect of Hematite on the Inhibition of Hydrogen Sulfide Formation and Its Mechanism During Anaerobic Digestion and Methanogenesis of Sulfate Wastewater	HUANG Shao-fu, YE Jie, ZHOU Shun-gui (1857)
Pollutant Removal Performance and Membrane Fouling Characteristics in Marine Aquaculture Wastewater Treatment by a Microalgae Membrane Reactor	MA Hang, LI Zhi-peng, LIU Feng, <i>et al.</i> (1865)
Pre-precipitation of Sewage-SNAD Granular Sludge Process Test	LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, <i>et al.</i> (1871)
Impact of Actual Domestic Sewage and Simulated Wastewater on an Aerobic Granular Sludge System	LI Dong, WANG Ying-qiao, LI Shuai, <i>et al.</i> (1878)
Nitrogen Removal Performance of a Sulfur/Pyrite Autotrophic Denitrification System	ZHOU Ya, MAI Wen-ning, LIANG Jia-wei, <i>et al.</i> (1885)
Nitrogen Removal by Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Pseudomonas putida</i> YH and Its Kinetic Characteristics	WANG Xu-hui, YANG Lei, REN Yong-xiang, <i>et al.</i> (1892)
Effect of Sludge Retention Time and pH on the Denitrifying Phosphorus Removal Process	WEI Jia-min, HUANG Hui-min, CHENG Cheng, <i>et al.</i> (1900)
Microbial Community of Granular Sludge in an ANAMMOX-EGSB Reactor Under Saline Conditions	WANG Han, LI Han-xiang, CHEN You-peng, <i>et al.</i> (1906)
Effect of Intracellular Carbon Source (PHA) Storage on the Mixed Growth Microbial Community Resistance to Low Temperature	YANG Jian-peng, ZHANG Jian, TIAN Qing, <i>et al.</i> (1914)
Contents and Forms of Phosphorus in the Municipal Sewage Sludge of China	WANG Chao, LIU Qing-wei, ZHI Yin, <i>et al.</i> (1922)
Contamination Characteristics and Safety Risk Assessment of Perfluorinated Alkylated Substances in Aquatic Products from Guangzhou	WANG Xu-feng, WANG Qiang, LI Zhi-guang, <i>et al.</i> (1931)
Characteristics of the Dissolved Nitrous Oxide (N ₂ O) Concentrations and Influencing Factors in a Representative Agricultural Headwater Stream in the Upper Reach of the Yangtze River	TIAN Lin-lin, WANG Zheng, HU Lei, <i>et al.</i> (1939)
CH ₄ Uptake in Different Saline-alkaline Soils in Hetao Irrigation District, Inner Mongolia	YANG Wen-zhu, JIAO Yan, YANG Ming-de, <i>et al.</i> (1950)
Allocation and Stabilization Responses of Rice Photosynthetic Carbon in the Plant-Soil System to Phosphorus Application	WANG Ying-ying, XIAO Mou-liang, ZHANG Yun, <i>et al.</i> (1957)
Effect of Soil Moisture and Temperature on the Soil Inorganic Carbon Release of Brown Limestone Soil in the Karst Region of Southwestern China	XU Xue-chi, HUANG Yuan, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (1965)
Temporal and Spatial Dynamics of Soil Microbial Biomass Carbon and Its Influencing Factors on an Eroded Slope in the Hilly Loess Plateau Region	QIN Qian, ZHU Shi-shuo, XIA Bin, <i>et al.</i> (1973)
Composition, Characteristics, and Accumulation of Antibiotics in the Soil in Agricultural Land	KONG Chen-chen, ZHANG Shi-wen, NIE Chao-jia, <i>et al.</i> (1981)
VOCs and Odors Control and Development in Pharmaceutical Fermentation Industry	WANG Dong-sheng, ZHU Xin-meng, YANG Xiao-fang, <i>et al.</i> (1990)