

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第8期

Vol.37 No.8

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

中国地区二次有机气溶胶的时空分布特征和来源分析	陈卓,刘峻峰,陶玮,陶澍 (2815)
中国民用煤燃烧排放细颗粒物中重金属的清单	刘海彪,孔少飞,王伟,严沁 (2823)
基于长时间序列的北京 PM _{2.5} 浓度日变化及气象条件影响分析	苗蕾,廖晓农,王迎春 (2836)
2004~2015年北京市清洁点臭氧浓度变化特征	
程念亮,李云婷,张大伟,陈添,魏强,孙彤卉,王步英,富佳明,何乐为,程兵芬,皮帅,马立光,崔继宪,孟凡 (2847)	
抗战胜利70周年大阅兵期间石家庄大气细颗粒物在线来源解析	
周静博,李治国,路娜,徐曼,杨鹏,高康宁,王建国,靳伟 (2855)	
成都平原大气颗粒物中无机水溶性离子污染特征	蒋燕,贺光艳,罗彬,陈建文,王斌,杜云松,杜明 (2863)
嘉兴市春季一次持续雾霾过程中气象条件与污染物变化特征分析	
沈利娟,王红磊,李莉,吕升,袁婧,张孝寒,章国骏,王翥 (2871)	
泉州市大气降尘中金属元素污染特征及来源解析	张棕巍,胡恭任,于瑞莲,刘贤荣,胡起超,王晓明 (2881)
城市室内灰尘重金属水平、影响因素及健康风险:以贵阳市为例	李晓燕,汪浪,张舒婷 (2889)
桂林市酸雨变化特征及来源分析	郭雅思,于爽,黎泳珊,孙平安,何若雪 (2897)
农田土壤施用系列新型氮肥后气态氮(NH ₃ 和N ₂ O)减排效果比较:以夏玉米季为例	范会,姜姗姗,魏茨,蒋静艳 (2906)
青海南部高原积雪期与生长季高寒草甸土壤CO ₂ 、CH ₄ 和N ₂ O通量的观测	吴建国,周巧富 (2914)
三峡库区香溪河秋末至中冬CO ₂ 和CH ₄ 分压特征分析	张军伟,雷丹,肖尚斌,张成,穆晓辉,刘佳,李迎晨 (2924)
气候变化对于桥水库总磷与溶解氧的潜在影响分析	张晨,刘汉安,高学平,张文娜 (2932)
三峡库区小流域土地利用结构变化及其氮素输出控制效应:以兰陵溪小流域为例	
吴东,黄志霖,肖文发,曾立雄,韩黎阳 (2940)	
入湖河流水质对土地利用时空格局的响应研究:以洱海北部流域为例	项颂,庞燕,储昭升,胡小贞,孙莉,薛力强 (2947)
库湾营养盐循环对三峡库区营养盐运输的影响:以草堂河为例	王晓彤,罗光富,操满,王雨春,汪福顺,邓兵 (2957)
农田溪流人工深潭地貌格局暂态存储特征分析	李如忠,黄青飞,钱靖,殷晓曦,韦林 (2964)
农田排水沟渠水体-底泥中溶质氮分布特征试验研究	李强坤,胡亚伟,宋常吉,彭聪 (2973)
三峡库区典型消落带土壤微生物生物量碳、氮的变化特征及其影响因素探讨	
柴雪思,雷利国,江长胜,黄哲,范志伟,郝庆菊 (2979)	
重金属在河口区潮汐界面与盐度界面响应规律研究	刘静,郑丙辉,刘录三,马迎群,林岗璇,汪星,夏阳 (2989)
深圳地区全氟辛烷磺酸的环境多介质迁移和归趋行为研究	崔晓宇,张鸿,罗骥,张若冰 (3001)
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	卫亚宁,潘佳钊,宋玉梅,郭鹏然,王毅 (3007)
北运河水体中荧光溶解性有机物空间分布特征及来源分析	陈永娟,胡玮璇,庞树江,王晓燕 (3017)
昌邑滨海湿地沉积物的放射性核素水平与环境指示意义	王启栋,宋金明,李学刚,袁华茂,李宁,曹磊 (3026)
甯醇对南山老龙洞地下水粪便污染的指示	廖昱,孙玉川,王尊波,梁作兵,张远瞩 (3034)
漳沱河冲洪积扇地下水中酚类化合物的污染现状与分布特征	昌盛,赵兴茹,刘琰,耿梦娇,肖晋翠 (3041)
雨季不同土地利用下表层岩溶泉中脂肪酸来源分析	张媚,孙玉川,谢正兰,余琴,赵瑞一,梁作兵 (3049)
Zn系LDHs覆膜改性人工湿地沸石基质除磷机制	张翔凌,黄华玲,郭露,陈巧珍,阮聪颖,冷玉洁 (3058)
Ce ³⁺ 与Cu ²⁺ 协同强化芬顿体系氧化苯酚的效能与机制研究	张剑桥,迟惠中,宋阳,罗从伟,江进,马军 (3067)
Pt/生物炭电极反应器处理水中腐殖酸的研究	丁文川,向星光,曾晓岚,厉晓宇,梁国强, M. M. Mian (3073)
石墨烯-TiO ₂ 光催化剂复合板制备及其对五氯酚的催化降解	徐琪,周泽宇,王洪涛 (3079)
单偶氮染料AY17的光催化降解动力学及机制	阳海,魏宏庆,胡乐天,胡倩,阳立平,刘华杰,易翔,易兵 (3086)
硫自养反硝化处理高含氟光伏废水可行性	马航,朱强,朱亮,李祥,黄勇,魏凡凯,杨朋兵 (3094)
膜曝气-生物膜反应器生物强化处理阿特拉津废水运行性能	刘春,于长富,张静,陈晓轩,张磊,杨景亮 (3101)
ABR工艺ANAMMOX耦合短程硝化协同脱氮处理城市污水	吴鹏,张诗颖,宋吟玲,徐乐中,沈耀良,张婷 (3108)
活性污泥厌氧Fe(III)还原氨氧化现象初探	李祥,林兴,杨朋兵,黄勇,刘恒蔚 (3114)
低浓度氨氮废水单级自养脱氮EGSB反应器的快速启动	顾书军,方芳,李凯,刘勇,郭劲松,陈猷鹏,蒋甫阳 (3120)
超低溶解氧条件下的EBPR系统除磷性能	马娟,宋璐,俞小军,李璐,孙雷军,孙洪伟,李光银 (3128)
活性污泥表面性质对絮凝沉降性能与出水悬浮物的影响	何志江,赵媛,张源凯,王洪臣,齐鲁,尹训飞,张晓军 (3135)
山东省典型金矿区土壤重金属空间特征分析与环境风险评估	
王菲,吴泉源,吕建树,董玉龙,曹文涛,康日斐,曹见飞 (3144)	
电子垃圾拆解区土壤重金属空间异质性及分布特征	赵科理,傅伟军,叶正钱,戴巍 (3151)
我国18种不同理化性质的土壤对硒酸盐的吸附解吸作用研究	冯璞阳,李哲,者渝芸,黄杰,梁东丽 (3160)
流动搅动法研究针铁矿对亚砷酸盐的吸附特征	李鑫,杨军,饶伟,王代长,杜光辉,化党领,刘世亮,刘红恩 (3169)
聚羧基铝柱撑硅藻土的制备及其对水溶液中Cu ²⁺ 、Zn ²⁺ 的吸附特性	朱健,雷明婧,王平,张伟丽,陈仰 (3177)
新型污泥基吸附材料制备及其氨氮去除性能评价	王文东,刘荟,张银婷,杨生炯 (3186)
纳米复合水凝胶的制备及其对重金属离子的吸附	朱倩,李正魁,张一品,韩华杨,王浩 (3192)
鼠李糖脂与β-环糊精复合提取预测污染土壤中PAHs的生物有效性	
张亚楠,杨兴伦,卞永荣,谷成刚,王芳,王代长,蒋新 (3201)	
不同磷水平下丛枝菌根真菌对纳米氧化锌生物效应的影响	景新新,苏志忠,邢红恩,王发园,石兆勇,刘雪琴 (3208)
中美水生生物基准受试物种敏感性差异研究	王晓南,闫振广,余若祯,王婉华,陈丽红,刘征涛 (3216)
贫营养和痕量抗生素对质粒抗生素抗性适应度代价的影响	林文芳,陈胜,万堃,王春明,林惠荣,于鑫 (3224)
不同氨水平下间作对玉米土壤硝化势和氨氧化微生物数量的影响	吕玉,周龙,龙光强,汤利 (3229)
《环境科学》征订启事(3025) 《环境科学》征稿简则(3057) 信息(3072, 3085, 3143)	

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

卫亚宁^{1,2}, 潘佳钊², 宋玉梅², 郭鹏然^{2*}, 王毅^{1*}

(1. 兰州理工大学石油化工学院, 兰州 730050; 2. 中国广州分析测试中心, 广东省分析测试技术公共实验室, 广州 510070)

摘要: 考察了柘林湾 11 个位点表层沉积物中 20 种有机氯农药含量分布及污染状况, 采用风险商 RQ 和 NOAA 的 SQG 沉积物质量标准评价了沉积物中 OCPs 的生态风险和各位点的综合生态风险, 初步分析了沉积物中 HCHs、DDTs 的来源以及沉积物中 OCPs 与沉积物性质参数的相关性。结果表明, 柘林湾沉积物中 DDTs 的含量较高, 尤其是 p,p' -DDD, 沉积物中 DDTs 含量超出中国海洋沉积物质量标准; 沉积物中 $\sum$ OCPs 的浓度在 14.14 ~ 306.88 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间, 平均值为 78.37 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 其中 S8 位点的 $\sum$ OCPs 含量最高。 p,p' -DDD、 p,p' -DDT 在多数研究位点具有必然的不利生物效应和高度生态风险, S8、S10 位点处于强影响生态风险状态。柘林湾沉积物中 HCHs 主要来源于林丹类农药的使用; S1、S2、S10、S11 位点均有近期的 DDTs 输入, 其它位点 DDTs 主要来自早期残留或施用农药长期风化后的沉积物。沉积物中 HCHs、硫丹、氯丹、狄氏剂之间存在极显著正相关性, 它们与沉积物 TOC 间存在负相关, TOC 的存在促进了生物降解; p,p' -DDD 与 Ca 的明显正相关揭示了早期施用 DDT 随生物碳酸盐沉积; 沉积物中颗粒物逐渐增大不利于 OCPs 在沉积物中的积累和富集。

关键词: 柘林湾; 沉积物; 有机氯农药; 分布; 生态风险

中图分类号: X131; X55; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)08-3007-10 DOI: 10.13227/j.hjks.2016.08.023

Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Surface Sediments of Zhelin Bay in Guangdong Province, China

WEI Ya-ning^{1,2}, PAN Jia-chuan², SONG Yu-mei², GUO Peng-ran^{2*}, WANG Yi^{1*}

(1. College of Petrochemical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Guangdong Provincial Public Laboratory of Analysis and Testing Technology, China National Analytical Center (Guangzhou), Guangzhou 510070, China)

Abstract: The distribution characteristics and pollution degrees of 20 organochlorine pesticides (OCPs) were investigated in surface sediments from Zhelin Bay south of China and the ecological risk of OCPs and integrated ecological risk at the samples stations in sediments were evaluated by risk quotient (RQ) and sediment quality guideline of NOAA. The possible sources of HCHs and DDTs in sediments were preliminarily studied, and the correlation between OCPs and sediment characteristic parameters was discussed. The concentrations of DDTs in surface sediments were found to be higher than those of other OCPs, especially p,p' -DDD, and the concentrations of DDTs were higher than the limited values of Chinese Marine sediment quality criteria. The total concentration of 20 OCPs in surface sediments ranged from 14.14 to 306.88 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, with a mean concentration of 78.37 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, and the highest total concentration was at site 8 (S8). There were inevitable adverse biological effects and high ecological risk of p,p' -DDD and p,p' -DDT, high integrated ecological risk at S8 and S10. The possible sources of HCHs in surface sediments of Zhelin Bay were mainly from the application of Lindane pesticides. At S1, S2, S10, S11 there was input of DDT into mariculture area of Zhelin Bay, and at the other sites the sources of DDT were from the early residue in sediments or the long-term weathering sediments of using pesticides. There was a very significant positive correlation between HCHs, endosulfan, chlordane and dieldrin in sediments, while there was a negative relation between the above OCPs and TOC, which indicated that the presence of TOC could promote their biodegradation. There was a significant positive correlation between p,p' -DDD and Ca, which revealed that DDT used in the early period was deposited with biological carbonate. Increasing size of sediment particles discouraged the accumulation and enrichment of OCPs in sediments.

Key words: Zhelin Bay; sediments; organochlorine pesticides; distribution; ecological risk

有机氯农药 (organochlorine pesticides, OCPs) 是各国环境保护部门制订的优先控制的持久性有机污染物 (persistent organic pollutants, POPs), 已被《关于持久性有机污染物的斯德哥尔摩公约》列为首批控制的 12 种化合物之一^[1,2]。OCPs 在 20 世纪 80 年代前被广泛用于控制农业害虫, 但由于其在环

境介质中具有高残留、极不易降解的特性, 现仍能

收稿日期: 2015-12-11; 修订日期: 2016-03-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (21307120); 广东省科技计划项目 (2012B061700058, 2015A020218001)

作者简介: 卫亚宁 (1989 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为毒害污染物环境化学行为及生态风险评价, E-mail: weiyanning@hotmail.com

* 通讯联系人, E-mail: prguo@fenxi.com.cn

广泛存在环境介质中^[3,4],而且有机氯农药对水环境污染问题已成为全世界广泛关注的重大环境问题^[5-7].

由于海水养殖废水大量排放、航运的快速发展以及周边农业生态活动的影响,除导致富营养化的发生外,我国海水养殖海湾 OCPs 污染问题日益突出^[8-10],对海洋生态环境和人体健康均造成了一定的不利影响^[11,12]. 柘林湾位于闽、粤两省交界处,因其良好的避风条件,海水养殖业于 20 世纪 80 年代后期迅猛发展,成为广东养殖规模最大的海湾之一^[13,14]. 柘林湾海水富营养化和沉积物中重金属的污染及生态风险评价已有较多研究^[14-16],但有关有机氯农药的污染状况及危害风险评价尚未见报道.

本研究针对柘林湾表层沉积物中 OCPs 的含量及污染状况进行了考察,对该海湾中 OCPs 的生态风险进行了评价,进一步分析了沉积物中 OCPs 的来源及其相关性,以期为该海湾沉积物污染控制和环境管理等提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 仪器与试剂

气相色谱-三重串联四级杆质谱仪 (Agilent7890A GC 和 Agilent7000A MS)、电感耦合等离子体发射光谱仪 (Agilent4100 MP-AES)、YSI ProPlus 多参数水质测量仪、TDL-40B 离心机、Winner2308A 激光粒度仪、冷冻干燥机 (博医康, FD-1C-80)、低温冷却液循环泵 (巩义市予华仪器有限责任公司, DLSB-5L/20)、旋转蒸发仪 (德国 BuchiRotavapor® R-100)、定容氮吹仪 (北京八方世纪科技有限公司, BF-2000F).

标准试剂: 20 种有机氯农药标样 (α -HCH、 β -HCH、 γ -HCH、 δ -HCH、七氯、环氧七氯、硫丹-I、硫丹-II、氯丹-I、氯丹-II、艾氏剂、狄氏剂、异狄氏剂、 p,p' -DDD、 p,p' -DDE、 p,p' -DDT、异狄氏剂醛、甲氧基氯、异狄氏酮、硫丹硫酸酯)、回收率指示物 (200 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 十氯联苯) 和内标化合物 (500 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 五氯硝基苯) 购自 AccuStandard 公司.

试剂: 二氯甲烷 (农残级, CNWTechnologies)、正己烷 (农残级, CNWTechnologies)、丙酮 (HPLC, 百灵威科技有限公司)、盐酸 (GR)、甲醇 (HPLC, Honeywell)、中性氧化铝 (99%, Acros-organics)、超纯硅胶 (60~200 μm , Acros-organics)、铜粉 (GR, 国药集团化学试剂有限公司)、玻璃棉 (Sigma-alorich)、无水硫酸钠 (GR, 天津市科密欧化学试剂

有限公司, 用前需在 450℃ 下焙烧 12 h, 冷却至室温后储存于密封广口瓶中)、18.2 $\text{M}\Omega\cdot\text{cm}$ 二次去离子水 (由超纯水系统制得).

硅胶、中性氧化铝分别在 120℃ 和 180℃ 条件下活化 12 h, 冷却至室温, 加入其重量 3% 的蒸馏水活性, 超声振荡 30 min, 放置 12 h 平衡, 加入正己烷浸没其表面备用.

实验所用玻璃容器皆在重铬洗液中浸泡 24 h 以上, 180℃ 烘烤, 并依次用丙酮、二氯甲烷、正己烷淋洗, 用锡箔纸包好备用.

1.2 样品的采集

实验共设置了 11 个位点, 分布在近岸、网箱养殖区、牡蛎养殖区、水道和湾口等, 具体位点位置如图 1 所示. 沉积物采样时间为 2013 年 8 月, 用皮德森底泥采样器采集柘林湾表层沉积物样品, 装于经氮气吹扫的密实袋中, 放入装有冰块的恒温箱中运回实验室后, 于 -20℃ 冰箱内保存至分析, 每个位点采集 3 个样品.

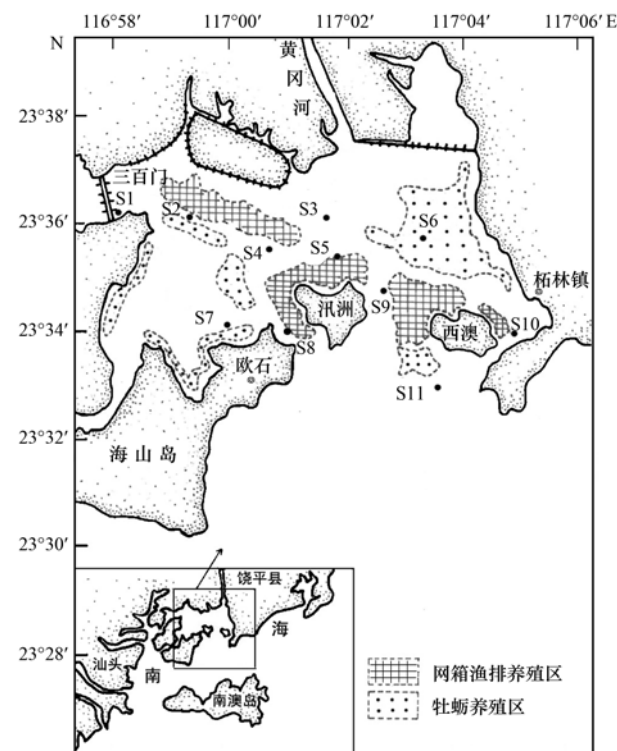


图 1 柘林湾沉积物样品采集点分布示意

Fig. 1 Sketch map of sampling sites in Zhelin Bay

1.3 样品预处理

沉积物样品经真空冷冻干燥后, 研磨过 60 目筛. 称取 10 g 样品, 加入 0.1 μg 回收率指示物, 用 200 mL 二氯甲烷索氏提取 48 h, 同时加入活化的铜粉脱硫. 通过无水硫酸钠转移提取液至 KD 浓缩器中, 50℃ 浓缩至 1 mL, 加入 10 mL 正己烷进行溶剂

置换,70℃浓缩至 1 mL.

将 1 mL 待净化的正己烷抽提样品用滴管移入净化柱中,浸泡 5 min 以上. 用 15 mL 正己烷分 3 次洗涤盛有样品的 KD 浓缩器,用滴管移入净化柱中,以 60 滴·min⁻¹左右的流速流出,滴至氧化铝层面之上. 再用 20 mL 正己烷: 二氯甲烷(7:3)混合液、50 mL 正己烷: 二氯甲烷(3:7)混合液淋洗净化柱,控制流速为 90 滴·min⁻¹左右,洗脱液用 KD 浓缩器收集,先浓缩至 1.0 mL,最后用 10 mL 正己烷分 3 次洗涤 KD 浓缩器后转移至细胞瓶中,在柔和高纯氮气吹干浓缩至 0.5 mL. 进行仪器分析前,加入 100 μL 内标化合物.

1.4 测定与分析

沉积物中 OCPs 采用 GC-MS 进行分析,仪器的配置与使用条件为:在气相色谱-三重串联四级杆质谱仪上以 MRM 离子模式进行测定,气相色谱柱为 DB-5MS(30 m×0.25 mm×0.25 μm). 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 2 min,然后以 25℃·min⁻¹的速度升温至 150℃,接着以 8℃·min⁻¹的速度升温至 235℃,最后以 20℃·min⁻¹的速度升温至 280℃并保留 13 min. 质谱离子源为 MRM 测定,离子源温度为 230℃,连接线温度为 280℃.

相关性质参数测定:参数包括沉积物干重率、上覆水体 TOC、沉积物间隙水 TOC、上覆水体溶解氧(DO)和 pH、Al、Ca、Fe、Mn、粒径(体积比%). pH 和 DO 采用多参数水质测量仪现场测定;沉积物消解溶液(HNO₃-HClO₄-HF)中 Al、Ca、Fe、Mn 元素采用 MP-AES 分析,沉积物 TOC 采用重铬酸钾氧化-还原容量法分析,间隙水用离心机分离,间隙水 TOC 采用 TOC-2000A 测定仪测定,粒径的测定采用 Winner2308A 激光粒度仪,沉积物基本性质见表 1.

表 1 柘林湾表层沉积物的性质参数

Table 1 Characteristic parameters of surface sediments in Zhelin Bay

位点	水体 DO /mg·L ⁻¹	pH	间隙水 TOC /mg·L ⁻¹	沉积物									
				干重率 /%	TOC /%	Al /mg·g ⁻¹	Ca /mg·g ⁻¹	Fe /mg·g ⁻¹	Mn /mg·g ⁻¹	≤0.2 μm 颗粒/%	≤1 μm 颗粒/%	≤2 μm 颗粒/%	≤10 μm 颗粒/%
S1	4.07	7.33	24.5	50.7	1.14	94.80	6.14	41.05	1.25	0.620	5.958	15.779	80.635
S2	4.01	7.49	24.1	48.7	1.10	85.98	5.95	40.12	0.89	0.345	3.961	11.513	75.203
S3	4.02	7.51	24.9	51.4	0.92	84.55	6.64	37.49	0.68	0.467	4.844	13.374	77.210
S4	3.94	7.64	16.3	53.4	0.96	91.80	6.95	41.05	1.04	0.336	4.102	12.224	79.433
S5	4.92	7.77	49.0	52.1	1.21	85.98	8.14	40.12	1.04	0.382	4.248	12.151	76.095
S6	5.53	7.85	26.9	46.0	0.84	85.23	19.58	40.99	1.00	0.367	4.128	11.879	75.657
S7	6.74	7.86	99.5	49.4	0.78	65.30	15.08	31.24	0.71	0.413	4.425	12.426	75.579
S8	4.60	7.65	33.0	52.1	0.93	80.80	19.14	38.55	0.85	0.407	4.487	12.758	77.581
S9	4.66	7.74	27.9	48.4	1.19	86.23	6.70	40.18	1.08	0.323	3.805	11.200	75.067
S10	4.91	7.90	25.9	49.9	1.34	83.86	7.39	38.55	0.78	0.272	3.543	10.917	77.589
S11	5.83	7.80	24.5	47.0	1.10	81.48	7.95	38.43	0.88	0.080	2.652	12.390	98.780

1.5 有机氯农药的生态风险评价方法

SQGs 是由美国国家海洋和气象管理局(NOAA)建立,广泛应用于预测污染沉积物中不利生物毒性影响^[17,18]. 根据污染物加标的水体生物测定结果,对应于 10% 和 50% 不利(或负面)生物效应的化学浓度分别称为效应范围低值(ERL)和效应范围中值(ERM)^[19],同时 MacDonald 等通过计算确定了产生效应的临界浓度(TEL)和必然产生效应的临界浓度(PEL)^[20,21].

由于其他有机氯农药的 ERM 值数据不够健全,而 *p,p'*-DDT 的毒性数据最多,最具有统计学意义^[22],其他化合物毒性数据主要取自美国地质调查局提供的 Acute Toxicity Database 数据库,筛选条件为重量约 0.6~1.0 kg 的常食用深水鱼类的 LC₅₀

(24 h) 毒理数据. 因此以 *p,p'*-DDT 为参照物,计算其他有机氯农药相当于 *p,p'*-DDT 的等效 ERL_{*i*}、ERM_{*i*}^[22]:

$$ERM_i = ERM_{ref} \times \frac{LC_{50,i}}{LC_{50,ref}}$$

式中,ERM_{ref}为参照化合物(*p,p'*-DDT)的 ERM 值,LC_{50,*i*}和 LC_{50,ref}分别为有机氯农药 *i* 和参考化合物(*p,p'*-DDT)的 LC₅₀的几何均值.

商值法(RQ)是最普遍、最广泛的表征污染物对于单种生物的风险评价方法^[23]. 本研究通过采用 OCPs 的测定浓度与表征污染物危害的 ERM 相比,计算柘林湾沉积物中 OCPs 的风险商 RQ_{ERM}. RQ_{ERM}为中值效应范围商. RQ_{ERM}≥1,表明沉积物中 OCPs 污染物存在高生态风险;RQ_{ERM}<1,表明污染物的

生态风险低; $0.1 \leq RQ_{ERM} < 1$, 对于风险管理而言需要降低风险; $RQ_{ERM} < 0.1$, 风险可以忽略^[24].

平均沉积物质量基准商 (mSQG-Q) 是由 Long 等^[21]提出基于 SQG 的污染物质综合生态风险评价指标. mSQGs 可以由 SQGs 中的 ERM 或 PEL 值计算得到. 本研究选取 ERM 的平均质量基准商 (mERM-Q) 评价柘林湾各位点沉积物的综合生态风险:

$$mERM = \left(\sum_{i=1}^n RQ_{ERMi} \right) / n$$

式中, n 指污染物种类数, RQ_{ERMi} 指第 i 种污染物的 ERM 商.

mERM-Q 指数分为 4 个评价水平: mERM-Q ≤ 0.1 , 位点生态风险可忽略, 暂时不需要采取新的措施降低风险; $0.1 < mERM-Q < 0.5$, 位点生态风险较低, 需要进一步的信息或实验; $0.5 \leq mERM-Q \leq 1.5$, 位点具有中度的生态风险影响, 需要限制风险生态风险影响, 应考虑采取一定的措施降低风险; $mERM-Q > 1.5$ 位点具有强烈的生态风险, 污染物浓度较高, 需要采取更为严格的措施降低风险^[20].

2 结果与分析

2.1 柘林湾表层沉积物中 OCPs 的含量

柘林湾 11 个位点表层沉积物位点中 20 种有机

氯农药含量见表 2. 分析结果表明, 柘林湾表层沉积物中七氯、七氯环氧化物、硫丹-II、艾氏剂、异狄氏剂、异狄氏剂醛、异狄氏剂酮、硫丹硫酸盐等 8 种有机氯农药未检出 (检出限为 $0.01 \sim 1.95 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$), 12 种检出的 OCPs 浓度大小顺序为: p,p' -DDD $> p,p'$ -DDT $> p,p'$ -DDE $> \beta$ -HCH $> \delta$ -HCH $> \gamma$ -HCH $>$ 硫丹-I $>$ 氯丹-I $> \alpha$ -HCH $>$ 氯丹-II $>$ 狄氏剂 $>$ 甲氧 DDT. 除 p,p' -DDE、 p,p' -DDT 和甲氧 DDT 在湾西北部 S1 和 S2 位点、湾东南 S10 和 S11 位点可检出且含量较高外, 其它 OCPs 化合物在这两个区域均未检出. HCHs 在 S3 ~ S8 位点中的含量相差不大, 范围在 $0.79 \sim 0.85 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$; 硫丹-I、氯丹-I、氯丹-II、狄氏剂在这些位点的含量也相近, 而 p,p' -DDD 在不同的检出位点含量差异较大, 范围在 $20.09 \sim 273.20 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, S8 位点浓度含量最高; p,p' -DDE、 p,p' -DDT 在各位点均可检测出, 特别在湾西北 S1、S2 和湾东南 S10、S11 含量显著较高, 其次 S8 位点含量也较高. 甲氧 DDT 仅在 S1、S2、S10、S11 位点检测出, 这 4 个位点含量范围在 $0.25 \sim 0.59 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$. 各位点表层沉积物中 $\sum$ OCPs 的浓度范围为 $14.14 \sim 306.88 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 平均值为 $78.37 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 总体而言, S8 位点 $\sum$ OCPs 含量最高.

表 2 柘林湾表层沉积物中 OCPs 的含量¹⁾/ $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$

Table 2 Concentrations of 20 OCPs in the surface sediments in Zhelin Bay/ $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$

项目	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	均值
α -HCH	nd	nd	0.79	0.79	0.79	0.79	0.79	0.79	0.79	nd	nd	0.50
β -HCH	nd	nd	0.85	0.84	0.85	0.85	0.84	0.84	0.84	nd	nd	0.54
γ -HCH	nd	nd	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	nd	nd	0.51
δ -HCH	nd	nd	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	nd	nd	0.51
七氯	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
七氯环氧化物	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
硫丹-I	nd	nd	0.79	0.79	0.79	0.80	0.80	0.80	0.79	nd	nd	0.51
硫丹-II	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
氯丹-I	nd	nd	0.78	0.78	0.83	0.81	0.78	0.78	0.77	nd	nd	0.50
氯丹-II	nd	nd	0.77	0.77	0.82	0.80	0.77	0.78	0.77	nd	nd	0.50
艾氏剂	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
狄氏剂	nd	nd	0.77	0.77	0.77	0.79	0.77	0.77	0.77	nd	nd	0.49
异狄氏剂	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
p,p' -DDD	nd	nd	22.82	49.24	35.95	88.47	62.76	273.20	20.09	nd	nd	50.23
p,p' -DDE	22.91	9.92	1.00	1.38	1.30	2.12	1.86	3.39	1.04	20.29	3.87	6.28
p,p' -DDT	45.91	18.29	1.13	1.46	1.66	3.47	3.69	23.92	1.22	83.60	10.01	17.67
异狄氏剂醛	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
甲氧 DDT	0.59	0.33	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.25	0.26	0.13
异狄氏剂酮	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
硫丹硫酸盐	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
$\sum$ OCPs	69.41	28.54	31.31	58.43	45.38	100.51	74.66	306.88	28.70	104.15	14.14	78.37

1) nd < 检出限, 下同

2.2 柘林湾表层沉积物中 OCPs 的污染状况

柘林湾表层沉积物中 HCHs 和 DDTs 的含量及中国海洋沉积物质量标准(GB 18668-2002)见表 3,柘林湾表层沉积物中各位点 HCHs 的含量明显低于标准中的第一类指标限值,而 DDTs 的含量仅 S11 处位点符合第一类指标限值,其中 S2、S3、S5、S8、S9 位点含量高于第一类指标限

值,低于第二类指标限值,S1、S4、S6、S7 位点高于第二类指标限值,低于第三类指标限值,S10 处位点的含量超出第三类指标限值,严重超出海洋渔业水域功能的沉积物质量要求.另外,除 S11 位点未超出我国沉积物质量要求,其它各位点均存在不同程度超标,需加强农药使用管理,采取相应措施进行改善.

表 3 柘林湾表层沉积物中 HCHs 和 DDTs 的含量/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$

Table 3 Concentrations of HCHs and DDTs in the surface sediments of Zhelin Bay/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$

项目	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	海洋沉积物质量标准/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$		
												第一类	第二类	第三类
HCHs	nd	nd	3.25	3.24	3.25	3.25	3.24	3.24	3.23	nd	nd	0.50	1.00	1.50
DDTs	68.82	28.21	24.95	52.08	38.91	94.06	68.31	300.51	22.36	103.89	13.88	0.02	0.05	0.10

2.3 沉积物中 OCPs 的生态风险评价

SQGs 中 OCPs 的生物效应阈值经查找、换算得表 4 中 12 种 OCPs 相关数据,各位点沉积物样品中可检出 OCPs 含量的效应范围见表 5.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.根据表 5 的结果, p,p' -DDD 在大多数位点必然频发不利生物效应影响,其它位点偶尔产生负面生态效应影响. p,p' -DDT 在 45% 位点必然频发不

利生物效应影响,其它位点很少发生负面生态效应影响.氯丹(包括 I 和 II)和狄氏剂在全部位点偶尔产生负面生态效应影响. γ -BHC、硫丹(只包括硫丹-I,硫丹-II未检出)、 p,p' -DDE 在大多数位点偶尔产生负面生态效应影响,其它位点偶尔产生负面生物效应影响.七氯、七氯环氧化物、艾氏剂、异狄氏剂、甲氧 DDT 等,在全部位点很少发生负面生态效应影响.总体而言,柘林湾沉积物中 p,p' -DDD、 p,p' -DDE、 p,p' -DDT 会产生负面生态效应影响较大,应采取减少对海水养殖影响措施.

表 4 SQGs 中 OCPs 的生物效应阈值¹⁾/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 4 Thresholds for biological effects of OCPs in SQGs/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

SQGs	γ -BHC ²⁾	七氯 ³⁾	七氯环氧化物 ²⁾	硫丹 ³⁾	氯丹 ²⁾	艾氏剂 ²⁾	狄氏剂 ²⁾	异狄氏剂 ²⁾	p,p' -DDD ²⁾	p,p' -DDE ²⁾	p,p' -DDT ²⁾	甲氧 DDT ³⁾
ERL	0.32	2.37	1.27	0.19	0.5	1.98	0.02	0.02	2	2.2	1	2.37
ERM	1	16.6	8.88	1.33	6	13.89	8	8	20	27	7	16.58
TEL	0.09	—	0.06	—	2.26	—	2.85	2.67	3.54	1.42	1.19	—
PEL	1.38	—	2.7	—	4.79	—	6.67	62.4	8.15	6.8	4.77	—

1) “—”表示数据缺失; 2) 数据来自 NOAA; 3) 数据来自等效换算

表 5 柘林湾沉积物样品中 OCPs 分类/%

Table 5 Classification of OCPs in sediment samples in Zhelin Bay/%

项目	γ -BHC	七氯	七氯环氧化物	硫丹	氯丹	艾氏剂	狄氏剂	异狄氏剂	p,p' -DDD	p,p' -DDE	p,p' -DDT	甲氧 DDT
≤ERL	27.3	100	100	27.3	0	100	0	100	27.3	45.5	0	100
ERL-ERM	72.7	0	0	72.7	100	0	100	0	0	54.5	54.5	0
≥ERM	0	0	0	0	0	0	0	0	72.7	0	45.5	0
≤TEL	27.3	—	100	—	100	—	100	100	27.3	36.4	9	—
TEL-PEL	72.7	—	0	—	0	—	0	0	0	36.4	45.5	—
≥PEL	0	—	0	—	0	—	0	0	72.7	27.2	45.5	—

柘林湾沉积物中 8 种 OCPs 的 RQ_{ERM} 和各位点的 $m\text{ERM-Q}$ 见表 6(其中七氯、七氯环氧化物、艾氏剂、异狄氏剂等 4 种 OCPs 含量未检出,故略之).据表 6 中 RQ_{ERM} , p,p' -DDD 在可检出位点、 p,p' -

DDT 在湾西北的 S1、S2 和湾口 S8、S10、S11 位点 RQ_{ERM} 大于 1,特别是 p,p' -DDD 在 S8 位点 RQ_{ERM} 值高达 13.66,表明上述 OCPs 在这些位点存在高生态风险,特别是 p,p' -DDD,除了限制使用外,还需进一

步的管理; γ -HCH、硫丹、氯丹在可检出位点, p,p' -DDE 在湾西北的 S1、S2 和湾口 S8、S10、S11 位点, p,p' -DDT 在除湾西北区域和湾口处的其它位点 RQ_{ERM} 均在 0.1 ~ 1 之间, 表明上述 OCPs 在这些位点存在低生态风险, 但对于风险管理而言仍需要降低; 狄氏剂和甲氧 DDT 在可检出位点, p,p' -DDE 在除湾西北区域和湾口区域位点外的其它位点 RQ_{ERM} 小于 0.1, 表明上述 OCPs 在这些位点生态风险可忽略. 据表 6 中 mERM-Q, 靠近湾口和网箱养殖区位点的 S8 和 S10 的 mERM-Q 大于 1.5, OCPs 在这些位点具有强烈的负面生态风险影响, 需采取严格措施降低风险. S1、S4、S6、S7 这 4 个位点的 mERM-Q

介于 0.51 ~ 1.5 之间, OCPs 在这些位点具有中度负面生态风险影响, 需要限制风险. S2、S3、S5、S9、S11 这 5 个位点的 mERM-Q 介于 0.1 ~ 0.5 之间, OCPs 在这些位点存在低生态风险影响, 生态风险程度分布见图 2. 据风险评价结果, 柘林湾少数位点沉积物中 OCPs 存在比较严重的生态风险, 大多数位点表层沉积物中 OCPs 产生中低度生态风险; 从各研究位点的生态风险等级与各位点所处位置分析, 海水养殖活动 (S2、S5、S6、S7、S8、S10 位点) 与生态风险大小并不密切相关, 同样航运 (航道位点 S3、S9) 与生态风险大也无对应关系, 而湾口对应位置 S11 处 OCPs 生态风险影响最小 (mERM-Q 最小).

表 6 柘林湾沉积物中 8 种 OCPs 的 RQ_{ERM} 和各位点的 mERM-Q
Table 6 RQ_{ERM} and mERM-Q for the 8 OCPs in the surface sediments of Zhelin bay

位点	γ -HCH	硫丹	氯丹	狄氏剂	p,p' -DDD	p,p' -DDE	p,p' -DDT	甲氧滴滴涕	mERM-Q
S1	nd	nd	nd	nd	nd	0.85	6.56	0.04	0.93
S2	nd	nd	nd	nd	nd	0.37	2.61	0.02	0.38
S3	0.80	0.60	0.26	0.10	1.14	0.04	0.16	nd	0.39
S4	0.80	0.60	0.26	0.10	2.46	0.05	0.21	nd	0.56
S5	0.80	0.60	0.28	0.10	1.80	0.05	0.24	nd	0.48
S6	0.80	0.60	0.27	0.10	4.42	0.08	0.50	nd	0.85
S7	0.80	0.60	0.26	0.10	3.14	0.07	0.53	nd	0.69
S8	0.80	0.60	0.26	0.10	13.66	0.13	3.42	nd	2.37
S9	0.80	0.60	0.26	0.10	1.01	0.04	0.18	nd	0.37
S10	nd	nd	nd	nd	nd	0.75	11.94	0.02	1.59
S11	nd	nd	nd	nd	nd	0.14	1.43	0.02	0.20

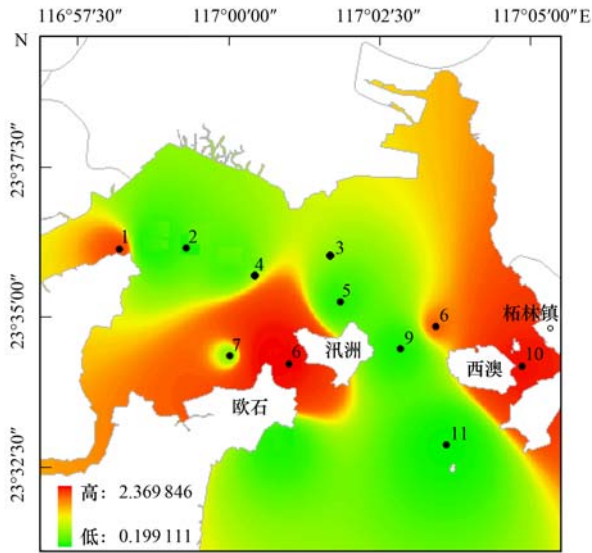


图 2 生态风险程度分布

Fig. 2 Distribution of the levels of ecological risk

3 讨论

3.1 柘林湾表层沉积物 HCHs 的组成特征

柘林湾表层沉积物中 HCHs (包括 α -HCH、 γ -HCH、 δ -HCH、 β -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输入方式^[26]. 历史上, HCHs 曾以两种形态被使用, 一种是工业品 HCHs, 其 4 种同系物及含量分别为 α -HCH (65% ~ 70%)、 γ -HCH (12% ~ 14%)、 δ -HCH (6%)、 β -HCH (5% ~ 6%)^[27]; 另一种俗称林丹, 其 γ -HCH 含量高达 99% 以上. 据研究报道, β -HCH 的抗生物降解能力最强, HCHs 在环境中存在得越久, 该化合物的比例越高. 环境样品中 HCHs 的残留通常以 α -HCH/ γ -HCH 比值来评价, 样品中 HCHs 的 α -HCH/ γ -HCH 比值大于 7, 说明由工业 HCHs 长距离迁移和再循环造成; 比值在 3 ~ 7 之间, 说明 HCHs 源于工业品; 比值接近于 1, 则说明环境中存在林丹的使用^[28,29].

柘林湾沉积物中 HCHs 各异构体所占比例见图 3. 从中可知, 除 S1、S2、S10、S11 位点外, 其它位点沉积物中 HCHs 各异构体所占的比例基本一致, 其中 α -HCH 为 24.2% ~ 24.5%, β -HCH 为 25.9% ~ 26.1%, γ -HCH 为 24.6% ~ 24.7%, δ -HCH 为 24.8% ~ 25.0%. 由于 β -HCH 在检测出位点比例略微高一些, 且这些位点样品中 α -HCH/ γ -HCH 比值

都接近 1, 说明该海湾沉积物中除未检出 HCHs 的位点, 均有林丹类农药的使用, 没有新的工业品 HCHs 输入。

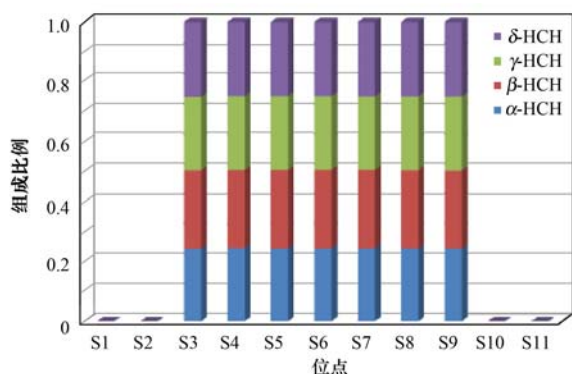


图3 柘林湾沉积物中 HCHs 各异构体所占比例

Fig. 3 Percentages of HCHs congeners in sediments from Zhelin Bay

3.2 柘林湾表层沉积物 DDTs 的组成特征

工业用品 DDTs (包括 p, p' -DDD、 p, p' -DDE、 p, p' -DDT 这 3 种异构体) 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^[26]. 另外, DDT 在不同的自然环境中可降解为不同的产物, DDT 在有氧条件下转化为 p, p' -DDE, 而在厌氧条件下降解为 p, p' -DDD^[30]. 如果没有新的 DDT 输入, 则 DDT 的相对含量就会不断降低, 而相应产物的含量会不断升高. 因此, 可通过 $(\text{DDD} + \text{DDE})/\text{DDTs}$ 、 $\text{DDT}/(\text{DDD} + \text{DDE})$ 和 DDD/DDE 的比值, 来判断 DDT 农药的降解环境和降解程度, 并用于判断是否有新的 DDT 农药输入. 当样品中 $(\text{DDD} + \text{DDE})/\text{DDTs} > 0.5$ 时, 认为 DDT 主要来自早期残留或是施用农药长期风化后的沉积物^[31]; $\text{DDT}/(\text{DDD} + \text{DDE}) > 1$, 说明有新使用的 DDT 进水水体^[32]; DDD/DDE 大于 1, 说明为厌氧生物降解^[26].

柘林湾沉积物中 DDTs 各异构体所占比例见图 4, 其中 S1、S2、S10、S11 这 4 个位点 DDD 均未检出, 从中可见, 在 S1、S2、S10、S11 这 4 个位点 $\text{DDT}/(\text{DDD} + \text{DDE}) > 1$, 表明这 4 个位点均有新的 DDT 输入该水域; 而其它位点 $(\text{DDD} + \text{DDE})/\text{DDTs} > 0.5$ 、 DDD/DDE 都超过 1, 说明这些位点 DDT 可能主要来自早期残留或是施用农药长期风化后的沉积物; 而且由于柘林湾富营养化严重^[33], 沉积物上覆水体中 DO 含量较低 (见表 1), 造成了沉积物中 DDT 在厌氧条件下的生物降解形成。

3.3 沉积物中 OCPs 与沉积物性质参数的相关性

为了进一步考察柘林湾沉积物中 OCPs 的来

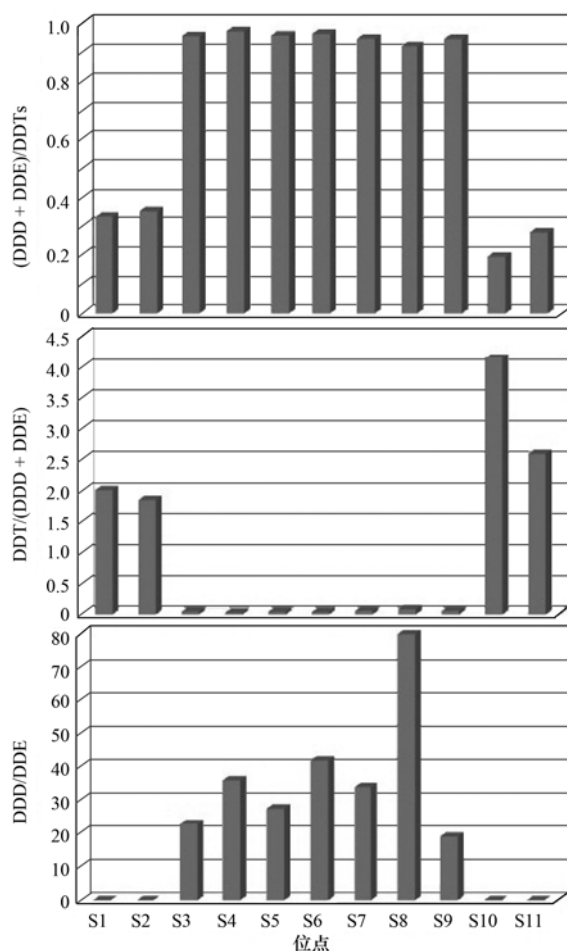


图4 柘林湾沉积物中 DDTs 各异构体所占比例

Fig. 4 Percentages of DDTs congeners in sediments from Zhelin Bay

源, 采用 Pearson 相关分析对 OCPs 间的相关性、OCPs 与沉积物性质参数的相关性进行相关分析, 结果见表 7 (未检出的 8 种化合物表中省略; 其余化合物未检出位点在相关分析时, 含量以最低检出限 $0.01 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 计算). 由表中的相关性矩阵数据, 在柘林湾各位点沉积物中, p, p' -DDD 与 $\sum \text{OCPs}$ 之间显著正相关, 表明在柘林湾沉积物中 p, p' -DDD 是最主要的 OCPs 污染物, 在环境生态风险影响中起着主导地位; 南海近海的化学沉积物主要有碳酸盐、硅铝酸盐、Fe/Mn 氧化物和氢化物等, 其中碳酸盐类所占比例最大^[34]. p, p' -DDD 与沉积物中 Ca 显著相关 ($r^2 = 0.79, P < 0.05$), 这可能是由于早期施用 DDT 农药随生物碳酸盐沉积, 并在厌氧条件下降解为 p, p' -DDD, 这进一步印证了柘林湾中 DDT 有来源于早期施用农药残留在沉积物中的风化释放. HCHs、硫丹、氯丹、狄氏剂相互间存在极显著正相关, 它们可能具有相似的来源或生物化学作用对它们降解影响一致, 但它们与沉积物 TOC 之间存在负

相关性,这可能由于在柘林湾缺氧养殖底泥状态下, TOC 的存在促进了微生物的厌氧还原对 OCPs 的脱氧作用,使 OCPs 更易进一步生物降解^[35]. p,p' -DDE 与 p,p' -DDT 和甲氧 DDT 含量的明显正相关揭示了 p,p' -DDE 含量对后两者的依存关系及有新的 DDT 输入. p,p' -DDE、 p,p' -DDT 和甲氧 DDT 与 HCHs、硫丹、氯丹以及狄氏剂存在明显负相

关,而 p,p' -DDD 与它们具有正相关性,反映了沉积物氧化还原条件对它们在沉积物中的富集和积累具有显著相反的作用. 沉积物干重率、间隙水 TOC 与 OCPs 无明显相关,而沉积物中的颗粒物随着粒径的增大与 OCPs 的相关性由正相关递减到负相关,表明粒径的逐渐增大不利于 OCPs 在沉积物中的积累和富集.

表 7 柘林湾沉积物中 OCPs 与沉积物性质参数的相关性矩阵¹⁾

Table 7 Correlation matrix between OCPs and sediment characteristic parameters of Zhelin Bay

	干重率	TOC	间隙水 TOC	≤0.2 μm 颗粒	≤1 μm 颗粒	≤2 μm 颗粒	≤10 μm 颗粒	α-HCH	β-HCH	γ-HCH
干重率	1	0.048	-0.017	0.421	0.443	0.289	-0.267	0.293	0.291	0.294
TOC		1	-0.398	-0.227	-0.229	-0.189	0.129	-0.567	-0.569	-0.566
间隙水 TOC			1	0.146	0.104	-0.028	-0.232	0.324	0.325	0.324
≤0.2 μm 颗粒				1	0.989	0.687	-0.596	0.213	0.215	0.214
≤1 μm 颗粒					1	0.780	-0.478	0.161	0.163	0.162
≤2 μm 颗粒						1	0.174	-0.139	-0.138	-0.139
≤10 μm 颗粒							1	-0.474	-0.474	-0.474
α-HCH								1	1.000	1.000
β-HCH									1	1.000
γ-HCH										1

	δ-HCH	硫丹- I	氯丹- I	氯丹- II	狄氏剂	p,p' -DDD	p,p' -DDE	p,p' -DDT	甲氧 DDT	∑ OCPs
干重率	0.293	0.288	0.288	0.287	0.281	0.258	-0.001	0.047	-0.153	0.278
TOC	-0.568	-0.570	-0.557	-0.555	-0.572	-0.474	0.552	0.582	0.465	-0.245
间隙水 TOC	0.324	0.327	0.324	0.327	0.322	0.132	-0.243	-0.210	-0.296	0.050
≤0.2 μm 颗粒	0.215	0.214	0.213	0.213	0.213	0.148	0.280	0.059	0.179	0.200
≤1 μm 颗粒	0.163	0.162	0.161	0.160	0.161	0.142	0.309	0.068	0.243	0.197
≤2 μm 颗粒	-0.138	-0.139	-0.141	-0.142	-0.141	0.022	0.346	0.050	0.491	0.067
≤10 μm 颗粒	-0.474	-0.475	-0.475	-0.476	-0.475	-0.202	0.039	0.011	0.330	-0.208
α-HCH	1.000	1.000	0.999	0.999	1.000	0.500	-0.789	-0.667	-0.901	0.236
β-HCH	1.000	1.000	0.999	0.999	1.000	0.500	-0.789	-0.667	-0.901	0.237
γ-HCH	1.000	1.000	0.999	0.999	1.000	0.501	-0.789	-0.667	-0.901	0.237
δ-HCH	1	1.000	0.999	0.999	1.000	0.500	-0.789	-0.667	-0.901	0.236
硫丹- I		1	0.999	0.999	1.000	0.502	-0.789	-0.667	-0.901	0.239
氯丹- I			1	1.000	0.999	0.499	-0.788	-0.667	-0.900	0.235
氯丹- II				1	0.999	0.499	-0.788	-0.667	-0.900	0.235
狄氏剂					1	0.501	-0.788	-0.667	-0.901	0.237
p,p' -DDD						1	-0.327	-0.122	-0.451	0.925
p,p' -DDE							1	0.892	0.868	0.034
p,p' -DDT								1	0.608	0.262
甲氧 DDT									1	-0.195
∑ OCPs										1

1) $P < 0.05$

4 结论

(1)柘林湾表层沉积物含量较高的 12 种 OCPs 的浓度大小顺序为: p,p' -DDD > p,p' -DDT > p,p' -DDE > β-HCH > δ-HCH > γ-HCH > 硫丹- I > 氯丹- I > α-HCH > 氯丹- II > 狄氏剂 > 甲氧 DDT; 七氯、艾氏剂、七氯环氧化物、异狄氏剂、硫丹- II、异狄氏剂醛、异狄氏剂酮、硫丹硫酸盐等 8 种有机氯农药未检出. 沉积物中 DDTs 含量皆超出中国海洋沉

积物质量标准(除 S11 位点). 各位点表层沉积物中 ∑ OCPs 的浓度范围为 14.135 ~ 306.880 ng·g⁻¹, 平均值为 78.372 ng·g⁻¹,其中 S8 位点的 ∑ OCPs 含量最高.

(2)柘林湾表层沉积物中 DDTs 负面生态效应频发,特别是 p,p' -DDD 存在高度生态风险,除了限制使用外,需进一步的管理. 靠近湾口和网箱养殖区位点的 S8 和 S10 的 mERM-Q 大于 1.5,有强烈的负

面生态风险影响,需采取严格措施降低风险. S1、S4、S6、S7 这 4 个位点的 mERM-Q 介于 0.51 ~ 1.5 之间,有中度负面生态风险影响,需要限制风险. S2、S3、S5、S9、S11 这 5 个位点的 mERM-Q 介于 0.1 ~ 0.5 之间,存在低生态风险影响.

(3)除湾西北的 S1、S2 和湾口 S10、S11 位点,其它位点均有林丹类农药的使用,没有新的工业品 HCHs 输入;而对于 DDTs,在上述 4 个位点均有新的 DDT 输入,其它位点 DDT 则主要来自早期残留或是施用有机氯农药长期风化后的沉积物,经厌氧条件降解为 p,p' -DDD.

(4)沉积物中 p,p' -DDD 在环境生态风险影响中起着主导地位. HCHs、硫丹 I、氯丹(包括 I 和 II)、狄氏剂相互间存在极显著正相关,它们与沉积物 TOC 之间存在负相关性,TOC 的存在促进了它们的生物降解. p,p' -DDE、 p,p' -DDT 和甲氧 DDT 与 HCHs、硫丹、氯丹以及狄氏剂存在明显负相关,而 p,p' -DDD 与它们具有正相关性. 沉积物中的颗粒物随着粒径的增大与 OCPs 的相关性由正相关递减到负相关,表明粒径的逐渐增大不利于 OCPs 在沉积物中的积累和富集.

参考文献:

- [1] Hu G C, Luo X J, Li F C, *et al.* Organochlorine compounds and polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediment from Baiyangdian Lake, North China: concentrations, sources profiles and potential risk[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, **22**(2): 176-183.
- [2] Bigus P, Tobiszewski M, Namieśnik J. Historical records of organic pollutants in sediment cores [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, **78**(1-2): 26-42.
- [3] Tao S, Xu F L, Wang X J, *et al.* Organochlorine pesticides in agricultural soil and vegetables from Tianjin, China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(8): 2494-2499.
- [4] 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.
- [5] Kim K S, Lee S C, Kim K H, *et al.* Survey on organochlorine pesticides, PCDD/Fs, dioxin-like PCBs and HCB in sediments from the Han River, Korea[J]. *Chemosphere*, 2009, **75**(5): 580-587.
- [6] Liu L Y, Wang J Z, Qiu J W, *et al.* Persistent organic pollutants in coastal sediment off South China in relation to the importance of anthropogenic inputs [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2012, **31**(6): 1194-1201.
- [7] Zhang Q H, Chen Z J, Li Y M, *et al.* Occurrence of organochlorine pesticides in the environmental matrices from King George Island, west Antarctica [J]. *Environmental Pollution*, 2015, **206**: 142-149.
- [8] Xu X Q, Yang H H, Li Q L, *et al.* Residues of organochlorine pesticides in near shore waters of Laizhou Bay and Jiaozhou Bay, Shandong Peninsula, China[J]. *Chemosphere*, 2007, **68**(1): 126-139.
- [9] Wang Z Y, Yan W, Chi J S, *et al.* Spatial and vertical distribution of organochlorine pesticides in sediments from Daya Bay, South China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2008, **56**(9): 1578-1585.
- [10] Qiu Y W, Zhang G, Guo L L, *et al.* Current status and historical trends of organochlorine pesticides in the ecosystem of Deep Bay, South China [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2009, **85**(2): 265-272.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 林小涛, 晏荣军, 黄长江. 粤东大规模养殖区柘林湾细菌的分布与环境因素关系[J]. *海洋学报*, 2006, **28**(3): 167-172.
- [14] Wang Z H, Feng J, Jiang T, *et al.* Assessment of metal contamination in surface sediments from Zhelin Bay, the South China Sea[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2013, **76**(1-2): 383-388.
- [15] Gu Y G, Liu Q, Jiang S J, *et al.* Metal pollution status in Zhelin Bay surface sediments inferred from a sequential extraction technique, South China Sea [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, **81**(1): 256-261.
- [16] Xia B, Guo P R, Lei Y Q, *et al.* Investigating speciation and toxicity of heavy metals in anoxic marine sediments—a case study from a mariculture bay in Southern China [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, **16**(2): 665-676.
- [17] 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.
- [18] Christophoridis C, Dedepsidis D, Fytianos K. Occurrence and distribution of selected heavy metals in the surface sediments of Thermaikos Gulf, N. Greece. Assessment using pollution indicators[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **168**(2-3): 1082-1091.
- [19] Burton Jr G A. Sediment quality criteria in use around the world [J]. *Limnology*, 2002, **3**(2): 65-76.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 王斌, 余刚, 郁亚娟, 等. 淮河江苏段水体有机氯农药生态风险评价[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, 2006.
- [23] Ogbeide O, Tongo I, Ezemonye L. Risk assessment of agricultural pesticides in water, sediment, and fish from Owan River, Edo State, Nigeria[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, **187**(10): 654.
- [24] Zheng S L, Chen B, Qiu X Y, *et al.* Distribution and risk assessment of 82 pesticides in Jiulong River and estuary in South China[J]. *Chemosphere*, 2016, **144**: 1177-1972.
- [25] MacDonald D D, Ingersoll C G, Berger T A. Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2000, **39**(1): 20-31.
- [26] 谢文平, 朱新平, 陈昆慈, 等. 珠江口水体、沉积物及水生动物中 HCHs 和 DDTs 的含量与生态风险评价[J]. *环境科学学报*, 2009, **29**(9): 1984-1994.
- [27] Lee K T, Tanabe S, Koh C H. Distribution of organochlorine pesticides in sediments from Kyeonggi Bay and nearby areas, Korea [J]. *Environmental Pollution*, 2001, **114**(2): 207-213.
- [28] Hong H, Xu L, Zhang L, *et al.* Special guest paper: environmental fate and chemistry of organic pollutants in the sediment of Xiamen and Victoria Harbours[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 1995, **31**(4-12): 229-236.
- [29] Qian Y, Zheng M H, Zhang B, *et al.* Determination and assessment of HCHs and DDTs residues in sediments from Lake Dongting, China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2006, **116**(1-3): 157-167.
- [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] 胡雄星, 韩中豪, 周亚康, 等. 黄浦江表层沉积物中有机氯农药的分布特征及风险评价[J]. *环境科学*, 2005, **26**(3): 44-48.
- [32] 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**(1-2): 36-382.
- [33] 吴锐, 雷永乾, 王畅, 等. 粤东柘林湾养殖区海水富营养化评价[J]. *环境科学与技术*, 2015, **38**(10): 210-215.
- [34] Liu B L, Wang Y P, Su X, *et al.* Elemental geochemistry of northern slope sediments from the South China Sea: implications for provenance and source area weathering since Early Miocene [J]. *Chemie der Erde-Geochemistry*, 2013, **73**(1): 61-74.
- [35] Wong F, Kurt-Karakus P, Bidleman, T F. Fate of brominated flame retardants and organochlorine pesticides in urban soil: volatility and degradation [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(5): 2668-2674.

CONTENTS

Spatiotemporal Distribution and Source Attribution of SOA in China	CHEN Zhuo, LIU Jun-feng, TAO Wei, <i>et al.</i> (2815)
Emission Inventory of Heavy Metals in Fine Particles Emitted from Residential Coal Burning in China	LIU Hai-biao, KONG Shao-fei, WANG Wei, <i>et al.</i> (2823)
Diurnal Variation of PM _{2.5} Mass Concentration in Beijing and Influence of Meteorological Factors Based on Long Term Date	MIAO Lei, LIAO Xiao-nong, WANG Ying-chun (2836)
Characteristics of Ozone Background Concentration in Beijing from 2004 to 2015	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2847)
Online Sources about Atmospheric Fine Particles During the 70th Anniversary of Victory Parade in Shijiazhuang	ZHOU Jing-bo, LI Zhi-guo, LU Na, <i>et al.</i> (2855)
Pollution Characteristics of Inorganic Water-soluble Ions in Atmospheric Particulate Matter in Chengdu Plain	JIANG Yan, HE Guang-yan, LUO Bin, <i>et al.</i> (2863)
Observation Analysis on the Characteristics of Meteorological Elements and Pollutants During a Continuous Fog and Haze Episode in Spring in Jiaxing City	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, LI Li, <i>et al.</i> (2871)
Characteristics and Source Apportionment of Metals in the Dustfall of Quanzhou City	ZHANG Zong-wei, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2881)
Level and the Courses of Heavy Metals and Its Risk Assessment in Indoor Dust of City: Take Guiyang as a Case	LI Xiao-yan, WANG Lang, ZHANG Shu-ting (2889)
Chemical Characteristics and Source of Acid Precipitation in Guilin	GUO Ya-si, YU Shi, LI Yong-shan, <i>et al.</i> (2897)
Assessment of Gaseous Nitrogen (NH ₃ and N ₂ O) Mitigation After the Application of a Range of New Nitrogen Fertilizers in Summer Maize Cultivation	FAN Hui, JIANG Shan-shan, WEI Ying, <i>et al.</i> (2906)
Soil CO ₂ , CH ₄ and N ₂ O Fluxes from Alpine Meadows on the Plateau of Southern Qinghai Province During Snow Cover Period and Growing Seasons	WU Jian-guo, ZHOU Qiao-fu (2914)
Partial Pressure of Carbon Dioxide and Methane from Autumn to Winter in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir	ZHANG Jun-wei, LEI Dan, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (2924)
Potential Impacts of Climate Change on Phosphorus and DO in Yuqiao Reservoir	ZHANG Chen, LIU Han-an, GAO Xue-ping, <i>et al.</i> (2932)
Land Use Structure Change and Its Control Effect of Nitrogen Output in a Small Watershed of Three Gorges Reservoir Area: A Case Study of Lanlingxi Watershed	WU Dong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (2940)
Response of Inflow Water Quality to Land Use Pattern in Northern Watershed of Lake Erhai	XIANG Song, PANG Yan, CHU Zhao-sheng, <i>et al.</i> (2947)
Effect of Nutrient Cycles in Tributaries on the Transport of Nutrient in the Three Gorge Reservoirs: A Case Study of Caotang River	WANG Xiao-tong, LUO Guang-fu, CAO Man, <i>et al.</i> (2957)
Transient Storage Characteristics of Artificial Pool Geomorphic Structure in an Agricultural Headwater Stream	LI Ru-zhong, HUANG Qing-fei, QIAN Jing, <i>et al.</i> (2964)
Distribution Characteristics of Solute Nitrogen in the Water-Sediment of Farmland Drainage Ditch	LI Qiang-kun, HU Ya-wei, SONG Chang-ji, <i>et al.</i> (2973)
Characteristics and Influencing Factors of Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen in Drawdown Area in the Three Gorges Reservoir	CHAI Xue-si, LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, <i>et al.</i> (2979)
Response Behaviors of Heavy Metals at Tidal Currents Interface and Salinity Interface in the Estuary Area	LIU Jing, ZHENG Bing-hui, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (2989)
Simulation of Multimedia Transfer and Fate of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) in Shenzhen Region	CUI Xiao-yu, ZHANG Hong, LUO Ji, <i>et al.</i> (3001)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Surface Sediments of Zhelin Bay in Guangdong Province, China	WEI Ya-ning, PAN Jia-chuan, SONG Yu-mei, <i>et al.</i> (3007)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Dissolved Organic Matter in Beiyun River	CHEN Yong-juan, HU Wei-xuan, PANG Shu-jiang, <i>et al.</i> (3017)
Distribution and Environmental Significances of Radionuclides in the Sediment of the Changyi Coastal Wetland	WANG Qi-dong, SONG Jin-ning, LI Xue-gang, <i>et al.</i> (3026)
Fecal Contamination in Laolongdong Underground River as Measured by the Sterol Biomarkers	LIAO Yu, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (3034)
Distribution Characteristics and Pollution Status of Phthalate Esters in the Groundwater of Hutuo River Pluvial Fan	CHANG Sheng, ZHAO Xing-ru, LIU Yan, <i>et al.</i> (3041)
Impacts of Land Use on the Source of Dissolved Fatty Acids in Epikarst Spring During Rainy Season	ZHANG Mei, SUN Yu-chuan, XIE Zheng-lan, <i>et al.</i> (3049)
Mechanisms of Phosphorus Removal by Modified Zeolites Substrates Coated with Zn-LDHs in Laboratory-scale Vertical-flow Constructed Wetlands	ZHANG Xiang-ling, HUANG Hua-ling, GUO Lu, <i>et al.</i> (3058)
Synergistic Enhancement on Oxidation of Phenol by Fenton Processes by Adding Ce ³⁺ and Cu ²⁺ Ions	ZHANG Jian-qiao, CHI Hui-zhong, SONG Yang, <i>et al.</i> (3067)
Removal of Humic Acid from Water Using Pt/biochar Electrode Reactor	DING Wen-chuan, XIANG Xing-guang, ZENG Xiao-lan, <i>et al.</i> (3073)
Generation of Graphene-titanium Dioxide Nanotubes Catalytic Board and Its Photocatalysis Capability to Degrade Pentachlorophenol	XU Qi, ZHOU Ze-yu, WANG Hong-tao (3079)
Photocatalytic Degradation Kinetics and Mechanism of Monoazo Dye Acid Yellow 17 by UV/TiO ₂ in Aqueous Solution	YANG Hai, WEI Hong-qin, HU Le-tian, <i>et al.</i> (3086)
Feasibility of Sulfur-based Autotrophic Denitrification of Photovoltaic Wastewater Containing High Fluorine	MA Hang, ZHU Qiang, ZHU Liang, <i>et al.</i> (3094)
Operation Performance of a Bioaugmented Membrane-aerated Biofilm Reactor Treating Atrazine Wastewater	LIU Chun, YU Chang-fu, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (3101)
Nitrogen Removal of Municipal Wastewater by ANAMMOX Coupled Shortcut Nitrification in Anaerobic Baffled Reactor	WU Peng, ZHANG Shi-ying, SONG Yin-ling, <i>et al.</i> (3108)
Simultaneous Ferric Reduction with Ammonia Oxidation Phenomena in Activated Sludge in Anaerobic Environment	LI Xiang, LIN Xing, YANG Peng-bing, <i>et al.</i> (3114)
Rapid Start-up of One-stage Autotrophic Nitrogen Removal Process in EGSB Reactor for Wastewater with Low Concentration of Ammonia	GU Shu-jun, FANG Fang, LI Kai, <i>et al.</i> (3120)
Phosphorus Removal Performance in EBPR System under Extra-low Dissolved Oxygen Condition	MA Juan, SONG Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (3128)
Influence of Activated Sludge Surface Properties on Flocculating Settling and Effluent Suspend Solid	HE Zhi-jiang, ZHAO Yuan, ZHANG Yuan-kai, <i>et al.</i> (3135)
Spatial Characteristics and Environmental Risk of Heavy Metals in Typical Gold Mining Area of Shandong Province	WANG Fei, WU Quan-yuan, LÜ Jian-shu, <i>et al.</i> (3144)
Spatial Variation of Soil Heavy Metals in an E-waste Dismantling Area and Their Distribution Characteristics	ZHAO Ke-li, FU Wei-jun, YE Zheng-qian, <i>et al.</i> (3151)
Selenate Adsorption and Desorption in 18 Kinds of Chinese Soil with Their Physicochemical Properties	FENG Pu-yang, LI Zhe, ZHE Yu-yun, <i>et al.</i> (3160)
Adsorption Characteristics of Arsenite on Goethite by Flow Stirring Method	LI Xin, YANG Jun, RAO Wei, <i>et al.</i> (3169)
Preparation of Poly-hydroxy-aluminum Pillared Diatomite and Characteristics of Cu ²⁺ , Zn ²⁺ Adsorption on the Pillar in Aqueous Solutions	ZHU Jian, LEI Ming-jing, WANG Ping, <i>et al.</i> (3177)
Preparation and NH ₄ ⁺ -N Removal Performance of a Novel Filter Substrate Made from Sludges	WANG Wen-dong, LIU Hui, ZHANG Yin-ting, <i>et al.</i> (3186)
Preparation of Nanocomposite Hydrogel and Its Adsorption of Heavy Metal Ions	ZHU Qian, LI Zheng-kui, ZHANG Yi-pin, <i>et al.</i> (3192)
Prediction of PAHs Bioavailability in Spiked Soil by Composite Extraction with Hydroxypropyl-β-cyclodextrin and Rhamnolipid	ZHANG Ya-nan, YANG Xing-lun, BIAN Yong-rong, <i>et al.</i> (3201)
Biological Effects of ZnO Nanoparticles as Influenced by Arbuscular Mycorrhizal Inoculation and Phosphorus Fertilization	JING Xin-xin, SU Zhi-zhong, XING Hong-en, <i>et al.</i> (3208)
Difference of Species Sensitivities for Aquatic Life Criteria in China and the USA	WANG Xiao-nan, YAN Zhen-guang, YU Ruo-zhen, <i>et al.</i> (3216)
Effects of Low-level Nutrition and Trace Antibiotics on the Fitness Cost of Plasmids Bearing Antibiotic Resistance	LIN Wen-fang, CHEN Sheng, WAN Kun, <i>et al.</i> (3224)
Effect of Different Nitrogen Rates on the Nitrification Potential and Abundance of Ammonia-oxidizer in Intercropping Maize Soils	LÜ Yu, ZHOU Long, LONG Guang-qiang, <i>et al.</i> (3229)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年8月15日 第37卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 8 Aug. 15, 2016

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行