

目次

2013~2020年天津市PM _{2.5} -O ₃ 污染变化趋势和影响因素分析	肖致美, 李亚菲, 高璟赞, 李鹏, 蔡子颖, 郑乃源, 张裕芬, 戴运峰 (4211)
2015~2020年济南市O ₃ 污染趋势及敏感性变化分析	孙晓艳, 孙军, 郭萌萌, 刘杨, 王宝琳, 范国兰, 许宏宇, 姜腾龙 (4220)
南京市南部地区O ₃ 污染特征、生成敏感性及传输影响分析	郑新梅, 胡崑, 王鸣, 谢放尖, 王艳 (4231)
天津市“十三五”期间O ₃ 污染特征和驱动因子	李源, 肖致美, 毕晓辉, 蔡子颖, 徐虹, 高璟赞, 郑乃源, 杨宁 (4241)
基于随机森林的南京市PM _{2.5} 和O ₃ 对减排的响应	尚永杰, 茅宇豪, 廖宏, 胡建林, 邹泽庸 (4250)
基于四维通量法的佛山臭氧污染输送量化	吴莉萍, 莫海华, 杨丽婷, 蔡梓炯, 吴国彤, 白玉洁, 邓思欣, 司徒淑婷, 常鸣, 王雪梅 (4262)
污染地块VOCs源衰减对室内蒸气入侵风险的影响	钟茂生, 汪洋, 姜林, 张丽娜, 马琳, 张瑞环, 赵莹, 李吉鸿 (4271)
2017~2020年长江流域水体污染物通量时空变化特征分析	郭朝臣, 雷坤, 李晓光, 周波, 吕旭波 (4279)
滹沱河流域山区地表水-地下水水化学空间变化特征、影响因素及其来源	孔晓乐, 常玉儒, 刘夏, 赵小宁, 沈彦军 (4292)
重庆东南部岩溶水金属元素空间分布、源解析及健康风险评价	谢浩, 邹胜章, 李军, 申豪勇, 林永生, 周长松, 王丹尼, 王志恒 (4304)
衡水市桃城区浅层地下水咸化成因	何锦, 张怀胜, 蔡五田, 王雨山 (4314)
吐鲁番南盆地平原区地下水污染风险评价	白凡, 周金龙, 周殷竹, 韩双宝, 孙英 (4325)
金属硫化物矿山水系统中微生物群落组成及多样性	丁聪聪, 朱旭炎, 赵兴青, 陆金, 周宇诚, 张欣怡, 王霄鹏 (4334)
白洋淀上覆水及沉积物中微塑料赋存特征	程昕煜, 杨丽虎, 宋献方 (4344)
基于溶解性有机物分子指纹特征解析城市河道污染来源与机制	朱奔, 叶建峰, 孙晓楠, 胡曙煜, 陈勋, 唐建飞, 陈浩 (4353)
甾体激素在污水处理厂的赋存特征和行为归趋	刘媛媛, 冯慧, 张云, 叶亮, 钟琴, 邹华 (4364)
博鳌近岸海域表层沉积物中持久性有机污染物的分布、来源与生态风险评价	郝润波, 符国伟, 宋艳伟, 傅开哲, 袁坤 (4374)
太原市耕地土壤PAHs的含量、分布、源解析与风险评价	吴张伟, 段永红, 刘立文, 徐立帅, 陈香玲, 姚旭红 (4387)
雄安新区土壤氟地球化学特征及健康风险评价	郭志娟, 刘飞, 周亚龙, 王乔林, 王成文 (4397)
基于APCS-MLR和PMF模型解析黄河下游文化公园土壤重金属污染特征及来源分析	段海静, 马嘉玉, 彭超月, 刘德新, 王玉龙, 李旭辉, 马建华 (4406)
锰矿区周边农田土壤重金属污染特征、来源解析及风险评价	余高, 陈芬, 张晓东, 孙约兵 (4416)
老工业城市土壤-作物系统重金属的迁移累积及风险协同评价	王莹, 董爱俊, 杨建峰, 马彦斌, 王泽晶, 杨凡燕 (4429)
畜禽粪肥还田四环素类抗生素(TCs)在土壤-蔬菜系统的分布特征及风险评估	丁丹, 黄晓依, 顾静仪, 陈澄宇, 龙新亮, 曾巧云 (4440)
地质高背景区外源污染叠加条件下大白菜对Cd、Pb、Zn累积途径探究	简槐良, 刘鸿雁, 梅雪, 毛诗佳, 刘芳, 张秋野, 敬鹏 (4448)
微塑料与铅复合污染对玉米种子萌发与生长的影响	马贵, 廖彩云, 周悦, 丁家富, 周炎炎, 王展, 马燕 (4458)
施加Fe ₃ O ₄ /桑树杆生物炭对土壤团形态和水稻砷含量的影响	阮麟乔, 梁美娜, 丁艳梅, 曹海燕, 刘崇敏, 成官文, 朱义年, 王敦球 (4468)
生物炭与氮肥配施对镉污染水稻土修复效应及机制	张丽, 李如霞, 何玉奎, 姚彦坡, 林大松 (4479)
不同氮肥配施生物炭对镉污染土壤青菜镉吸收的影响	李平, 聂浩, 郎漫, 朱燕菊, 姜海波, 李楠 (4489)
椰纤维生物炭及其硝酸改性对稻田土壤中Pb钝化的影响	侯正伟, 李建宏, 李财生, 张婧旻, 林清火, 赵庆杰, 吴治澎, 王禹 (4497)
生物炭施用对微塑料污染石灰性土壤理化性质和细菌群落的影响	冉泰山, 龙健, 廖洪凯, 李娟, 杨国梅, 赵雨鑫 (4507)
改性生物炭负载零价铁对土壤中三氯乙烯的去除及微生物响应	陆海楠, 理鹏, 郭琳, 徐佳成, 杨洁, 黄沈发, 柯天英 (4519)
改性酒糟生物炭对紫色土养分及酶活性的影响	由乐林, 谢永红, 王子芳, 杨文娜, 高明 (4530)
化肥减量配施生物炭和秸秆增加了坡耕地土壤中流磷流失风险	赖佳鑫, 邓华, 朱浩宇, 黄容, 龙翼, 王子芳, 高明 (4541)
污泥和鸡粪生物炭制备及其老化过程中的碳损失	张滢, 张长浩, 张秀芳, 段文焱, 陈芳媛 (4554)
化肥和有机肥配施生物炭对根际土壤反硝化势和反硝化细菌群落的影响	谢军, 王子芳, 王莹, 熊子怡, 高明 (4565)
黄河下游谷子花生间作农田土壤细菌群落结构与功能预测	刘柱, 南镇武, 林松明, 孟维伟, 于海秋, 谢立勇, 张正, 万书波 (4575)
微咸水灌溉下微生物菌肥对盐渍土壤理化性质和细菌群落的影响	刘月, 杨树青, 张万峰, 姜帅 (4585)
高效石油降解菌修复石油污染土壤与强化机制分析	姚贞先, 王丽萍, 李丹, 李亚平, 何士龙, 赵雅琴 (4599)
土地集约利用程度对华北潮土农田土壤微生物群落丰度和死生物物质积累的影响	李胜君, 盛美君, 李刚, 王蕊, 李洁, 张贵龙, 修伟明 (4611)
中国省域碳达峰路径与政策	苗安康, 袁越, 吴涵, 马欣, 邵辰宇 (4623)
基于碳减排成本的我国省域碳补偿机制	钟诗雨, 张晓敏, 吴佳, 邹娜, 封强, 傅泽强 (4637)
不同施肥措施下长江经济带地区农田土壤有机碳含量的变化分析	刘欣宇, 卢江, 孟璇, 刘锦, 宋鹏, 李季, 田光明 (4647)
中国西北地区多情景土地利用优化与碳储量评估	陈宁, 辛存林, 唐道斌, 张亮, 辛顺杰 (4655)
陕西渭北旱塬区生境质量及碳储量时空演变分析与模拟	古圳威, 刘京, 陈怡, 卢新冉, 王思轶 (4666)
气候变暖对四川盆地水稻土有机碳含量变化的影响	李艾雯, 宋靛颖, 冉敏, 李文丹, 张元媛, 李呈吉, 史文娇, 李启权 (4679)
降水变化下撂荒草地的化学计量失衡改变调节土壤呼吸	王佳懿, 王兴, 王源苗, 房景博, 夏开拉·阿克拜, 祖丽皮耶·居热艾提, 杨改河, 任成杰, 韩新辉 (4689)
水盐环境对黄河口淡水湿地土壤碳、氮、磷生态化学计量特征的影响	秦纪法, 张佳彭, 桑变, 杨云斐, 杨继松, 王志康, 栗云召, 周迪, 于君宝 (4698)
中国省域土壤重金属空间分布特征及分区分区管控对策	石航源, 王鹏, 郑家桐, 肖荣波, 邓一荣, 庄长伟 (4706)
壬基酚的环境生物地球化学研究进展及对新污染物管理的建议	洪亚军, 冯承莲, 徐大勇, 吴丰昌 (4717)
微塑料的形成机制及其环境分布特征研究进展	张龙飞, 刘玉环, 阮榕生, 赵蓝天, 王允圆, 张琦, 曹雷鹏, 崔宪, 巫小丹, 郑洪立 (4728)
生物炭添加对土壤温室气体排放影响的长短期效应研究进展	周咏春, 吴柳林, 李丹阳, 郭思伯, 陈志敏, 李正龙, 赵研 (4742)
铁基双金属催化剂活化过硫酸盐去除水中抗生素研究进展	魏健, 张新怡, 郭壮, 宋永会 (4751)
畜禽粪便污染的环境风险与资源化治理技术进展	安婧, 丁子明, 高程程, 胡芳雨, 魏树和 (4764)
《环境科学》征订启事(4230)	
《环境科学》征稿简则(4303)	
信息	(4506, 4678, 4741)

博鳌近岸海域表层沉积物中持久性有机污染物的分布、来源与生态风险评价

郝润波¹, 符国伟^{2*}, 宋艳伟², 傅开哲², 袁坤²

(1. 中国地质大学(北京)海洋学院, 北京 100083; 2. 中国地质调查局海口海洋地质调查中心, 海口 571127)

摘要: 环境中的持久性有机污染物 (POPs) 具有持久性、生物蓄积性、致畸、致癌和致突变等特点, 低剂量 POPs 长期暴露也会对海洋生态系统及人类自身造成一定影响. 为了解博鳌近岸海域表层沉积物中 POPs 的污染状况, 采用气相色谱-质谱法分别分析了表层沉积物中多环芳烃 (PAHs)、有机氯农药 (OCPs) 和多氯联苯 (PCBs) 这 3 种典型 POPs 的含量, 讨论了 POPs 的分布和来源, 并应用效应区间低/中值法 (ERL/ERM)、平均效应区间中值商法 (M-ERM-Q) 和平均可能影响浓度商法 (M-PEC-Q) 这 3 种不同方法进行生态风险评价. 结果表明, 研究区内表层沉积物中 $\sum$ PAHs、 $\sum$ OCPs 和 $\sum$ PCBs 含量 (以干重计) 分别为 4.58 ~ 367.50、3.99 ~ 175.30 和 ND ~ 2.89 $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 整体分布呈现出向海方向逐渐增加的趋势. POPs 来源分析结果表明, 研究区内 PAHs 的来源主要为木材和煤等的燃烧; OCPs 中六六六类主要为林丹的输入, 历史陆源输入已完全降解, 滴滴涕类以传统 DDTs 类农药为主, 且有持续的 DDT 输入; PCBs 以五氯联苯为主, 可能来源于航运过程中早期船体底部油漆的释放以及废旧船只油漆的剥落. 生态风险评价结果表明, 3 种方法评估结果相差不大, 表现为研究区内 PAHs 仅菲单体存在轻微的负面影响, OCPs 中 DDT 及 γ -HCH 等会产生较大的生态风险性, PCBs 等其他均不产生生态风险影响, 整体上 3 种污染物产生综合生态风险的可能性很小.

关键词: 博鳌近海海域; 表层沉积物; 持久性有机污染物 (POPs); 来源分析; 生态风险评价

中图分类号: X55; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)08-4374-13 DOI: 10.13227/j.hj.kx.202209149

Distribution, Source, and Ecological Risk Assessment of Persistent Organic Pollutants in Surface Sediments of Boao Coastal Waters

HAO Run-bo¹, FU Guo-wei^{2*}, SONG Yan-wei², FU Kai-zhe², YUAN Kun²

(1. School of Ocean Sciences, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Haikou Research Center of Marine Geology, China Geological Survey, Haikou 571127, China)

Abstract: Persistent organic pollutants (POPs) in the environment have the characteristics of persistence, bioaccumulation, teratogenicity, carcinogenicity, and mutagenicity. Long-term exposure of low-content POPs will also have a certain impact on marine ecosystems and human beings. The contents of three typical persistent organic pollutants [polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), organochlorine pesticides (OCPs), and polycyclic biphenyls (PCBs)] of surface sediments were analyzed using gas chromatography and mass spectrometry (GC-MS) to assess the pollution characteristics of persistent organic pollutants in Boao coastal waters. The distribution and source of persistent organic pollutants were analyzed in this study, and the ecological risk was assessed using three different methods; the effect interval low/median method (ERL/ERM), mean effect interval median quotient method (M-ERM-Q), and mean potential impact concentration quotient method (M-PEC-Q). The results indicated that the contents (measured by dry weight) of $\sum$ PAHs, $\sum$ OCPs, and $\sum$ PCBs in the study area were 4.5-367.50, 3.99-175.30, and ND-2.89 $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$, respectively, which were at a low level, and the overall distribution showed a trend of gradually increasing toward the sea. The results of POPs source analysis showed that the PAHs in the study area were mainly from the combustion of wood and coal. Among OCPs, the HCH was mainly from lindane, the historical land-based input had been completely degraded, and the DDT was mainly the traditional DDTs pesticides, with additional continuous DDT input. The PCBs were primarily pentachlorobiphenyls, which might have come from the release of paint on the bottom of the hull in the early stage of shipping and the peeling off of paint from old ships. The ecological risk assessment results showed that there was little difference among the assessment results of the three methods, which showed that only phenanthrene monomer of PAHs in the study area had a slight negative impact, and the DDT and the γ -HCH among PAHs would cause great ecological risk, whereas PCBs and other pollutants would not cause ecological risk. On the whole, the possibility of comprehensive ecological risk caused by the three pollutants was very small.

Key words: Boao coastal waters; surface sediments; persistent organic pollutants (POPs); source analysis; ecological risk assessment

持久性有机污染物 (persistent organic pollutants, POPs) 是天然或人工合成的疏水性有机化学物质, 具有持久性、半挥发性、生物蓄积性和高毒性等特点^[1], 能在全球范围内进行传播, 通过生物链进行富集, 并具有潜在的致畸、致癌和致突变效应或慢性毒性^[2], 对人体具有潜在的负面影响. 多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)、有机氯农药 (organochlorine pesticides, OCPs) 和多

氯联苯 (polycyclic biphenyls, PCBs) 是常见的持久性有机污染物, 也是《关于持久性有机污染物的斯德哥尔摩公约》中优先控制生产和使用的有机污染物^[3], 而水域沉积物是天然吸附剂, 能吸附水体环

收稿日期: 2022-09-15; 修订日期: 2022-11-01

基金项目: 中国地质调查局项目 (ZD20220608)

作者简介: 郝润波 (1998 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为海洋地质和海洋表层沉积物, E-mail: hrb0721@163.com

* 通信作者, E-mail: fuguowe@mail.cgs.gov.cn

境中的有机污染物,是环境中 POPs 的归宿之一^[4]。

国内外对 POPs 开展了大量的研究,其中也有较多的学者对海南岛内各种储存介质内的 POPs 进行研究,如汪慧娟等^[5]和于紫玲等^[6]选择海南岛生物体内的 PAHs 进行了影响研究,张禹等^[7]和刘华峰等^[8]对东寨港潟湖水体的 PAHs 含量及风险开展了评价,项楠等^[9]则是对三亚珊瑚体内的 PAHs 含量及来源进行了研究,Li 等^[10]和黎平等^[11]对 PAHs 在洋浦湾海域表层海水中的含量进行了研究,任磊等^[12]则对海南岛中部五指山地区的水体和沉积物中 OCPs 和 PCBs 含量及其关系进行了研究。但是,对海南岛近海海域沉积物中的 POPs 的研究相对较少,尤其是对近海沉积物 POPs 生态风险评价更少。生态风险评价是研究污染物生态危害的重要手段,主要用于评估生态系统及其组分遭遇风险的可能性及防线大小^[13]。沉积物是 POPs 在环境中重要储存库之一,沉积物中的 POPs 会通过再悬浮作用重新进入水中^[14],再经过迁移、食物链的累积和放大,最终危害人类自身健康。因此,对沉积物中 POPs 进行生态风险评价具有重要意义,可为区域风险管理提供科学依据和技术支持。

博鳌位于海南省琼海市,是博鳌亚洲论坛的会址所在地,随着近些年博鳌亚洲论坛的发展和影响力,带动旅游业和商业的迅速发展,近岸海域生态压力也随之增长,根据 2022 年海南省生态环境监测中心的最新数据,博鳌港湾水质达标率有所下降,超标指标为无机氮和活性磷酸盐,虽然持久性有机污染物不是该海域的主要污染物,但低剂量长期暴露仍然会对海洋生态系统产生深远影响^[15]。本研究通过实地采样,对博鳌近海海域表层沉积物的 PAHs、OCPs 和 PCBs 这 3 类持久性有机污染物进行测试分析,探究其含量、分布和来源,并采用 3 种生态风险评价方法,综合评估博鳌近海沉积物生态环境质量。

1 材料与方法

1.1 样品采集

沉积物样品采集于 2020 年 6 月,采用抓斗采样器抓取近海表层沉积物(0~10 cm)样品 30 站位,采样点站位如图 1 所示。样品的采集、存储及运输等操作严格按照《海洋监测规范-第 3 部分:样品的采集、贮存与运输》(GB 17378.3-2007)^[16]有关规定进行。

1.2 样品处理、分析和质量控制

样品处理:在萃取池底部放置两层的经 450℃ 灼烧过的玻璃纤维滤膜,填入 5.0 g 硅藻土颗粒,称取 5.00 g 研磨后沉积物样品,2 g 经活化的铜粉,加



图1 沉积物采样站示意

Fig. 1 Location of sediment sampling station

入多环芳烃同位素和 PCB209 替代物标准,混匀后放入快速溶剂萃取仪(accelerated solvent extraction, ASE)中用正己烷和丙酮混合溶剂进行萃取,经 3 个循环萃取。萃取后的萃取液旋转蒸发至 1 mL 左右,过弗罗里硅土的固相萃取小柱,用正己烷和丙酮混合溶剂淋洗后氮吹浓缩至 200 μ L,加入六甲基苯内标得到待测样品。

样品分析:用气相色谱-质谱联用仪(GC-MS, Agilent 6890 Plus GC-5973MSD,美国 HP 公司)分别对沉积物中 PAHs、OCPs 和 PCBs 进行分析,采用两种升温分析程序。仪器分析条件及升温分离程序如下:选择性离子扫描模式(SIM)测定定量;HP-5MS 毛细管色谱柱(30 m $\times$ 0.25 mm $\times$ 0.25 μ m),以 He 作载气,流速 1 mL $\cdot$ min⁻¹;无分流进样(进样体积 1 μ L),进样口温度 280℃,PAHs 测定初始炉温 60℃;程序升温到 300℃(5℃ $\cdot$ min⁻¹),整个程序运行时间 68 min。OCPs 和 PCBs 测定的初始炉温 50℃,程序升温 260℃保持 5 min,整个程序运行时间 35 min。MS 条件:EI 电离源 70 eV,离子源温度 230℃;扫描范围:50~550 u。

质量控制:实验过程进行严格的质量控制,根据特征分子离子峰、保留时间以及质谱图的质谱数据库(NIST2002)匹配分析,对样品中的组分进行定性分析,用回收率指示物的回收率来监测和评价实验质量。为了保证数据质量控制,采用了方法空白和样

品平行样等质控手段,用来控制实验流程中是否有人为因素污染以及操作过程的准确性. 沉积物样品中一批测 13 个样,包括 1 个空白,1 个平行,1 个加标回收率,有效数据 10 个; PAHs 回收率指示物的回收率为 50.46% ~ 90.31%, PCB209 回收率为 86.91%.

1.3 生态风险评价方法

生态风险评价目前尚未建立统一的评价标准,但存在多种生态风险评价方法,包括定性评价的效应区间低/中值法 (effects range-low and effects range-median, ERL/ERM)^[17]、有机碳归一化法^[18]等,以及定量评价的相平衡分配法 (equilibrium partition approach, EqPA)、平均效应区间中值商法 (mean effect range median-quotient, M-ERM-Q) 和平均可能影响浓度商法 (mean potential effects concentration quotient, M-PEC-Q) 等^[19~21]. 不同的方法其预测精度及适用范围存在一定的差异, ERL/ERM 法适用于海洋与河口底泥中 PAHs 潜在生态风险效应区间低值 (ERL) 和效应区间高值 (ERM)^[17], 只能定性预测污染物的生态风险, 广泛用于筛选评价或建立环境质量标准, 结果比较粗略. M-PEC-Q 法是以 2003 年美国环保署 (Environmental Protection Agency, EPA) 总结的沉积物中 16 种 PAHs 的可能影响浓度 (probable effect concentration, PEC) 用于评价沉积物的毒性^[22], 但是该方法对海洋沉积物中多种污染物的联合毒性进行风险评价时, 其预测结果是否可靠还难以确定, 有待进一步深入研究. 而 M-ERM-Q 法可定量预测海洋及河口沉积物中多种污染物联合毒性的风险评价法^[23,24], 近年来 McCready 等^[25]通过实验证明, 随污染物种类的增多, M-ERM-Q 法仍然具有预测污染物综合生态毒性的能力.

本研究拟采用 3 种方法进行生态风险评价, 首先通过效应区间低/中值法 (ERL/ERM) 定性筛选研究区沉积物污染物风险区域, 然后通过平均效应区间中值商法 (M-ERM-Q) 定量预测多种污染物的综合生态风险级别, 以减少风险评价的不确定性并提高评价精度. 最后采用多用于陆域淡水的平均可能影响浓度商法 (M-PEC-Q) 进行评价, 研究验证该方法是否适用于海洋沉积物的风险评价.

1.3.1 ERL/ERM 法

ERL/ERM 法是根据 Long 等^[17] 1995 年研究总结而来, 当污染物浓度高于 ERM 时, 风险发生概率高于 75%, 经常对生物体产生负效应, 风险较大; 浓度在 ERM ~ ERL 之间时, 生物有害效应概率介于 10% ~ 75% 之间, 偶尔存在生态风险对生物体产生负效应; 浓度低于 ERL 时, 风险发生概率小于

10%, 产生的负效应几乎可以忽略, 无生态风险.

1.3.2 M-ERM-Q 法

$$M-ERM-Q = \left[\sum (C_x / ERM_x) \right] / n \quad (1)$$

式中, C_x 为沉积物中检测组分 x 的测量浓度; ERM_x 为这些组分对应的 ERM; n 为组分数量.

当 $M-ERM-Q < 0.1$, 毒性概率 $< 10\%$, 基本无生态风险; $M-ERM-Q$ 在 $0.11 \sim 0.5$ 之间时, 毒性概率为 30%, 具有中低毒性, 产生较低生态风险; $M-ERM-Q$ 在 $0.51 \sim 1.5$ 之间, 毒性概率约为 50%, 具有中高毒性, 产生中等生态风险; $M-ERM-Q > 1.5$ 时, 毒性概率约 75%, 具有较高毒性, 产生较大的生态风险^[25].

1.3.3 M-PEC-Q 法

$$M-PEC-Q = \left[\sum (C_x / PEC_x) \right] / n \quad (2)$$

式中, C_x 为沉积物中检测组分 x 的测量浓度; PEC_x 为这些组分对应的 PEC; n 为组分数量.

当 $M-PEC-Q < 0.25$, 平均发生毒性概率为 0, 表明没有生态风险; $M-PEC-Q$ 值在 $0.25 \sim 0.5$ 之间时发生毒性概率为 20%, 可能会发生生态风险影响; $M-PEC-Q$ 值在 $0.51 \sim 0.75$ 之间时发生毒性概率为 40%, 偶尔会发生轻微不良生态风险影响; 若 $M-PEC-Q$ 值在 $0.76 \sim 1.00$ 之间时发生毒性概率为 54%, 会发生较轻生态风险影响; 若 $M-PEC-Q$ 值在 $1.01 \sim 1.50$ 之间时发生毒性概率为 70%, 会发生中度生态风险影响; 若 $M-PEC-Q$ 值在 $1.51 \sim 2.50$ 之间时发生毒性概率为 90%, 会发生重度生态风险影响; 若 $M-PEC-Q > 2.50$ 时发生毒性概率 $> 90\%$, 会发生严重生态风险^[26].

2 结果与讨论

2.1 表层沉积物中 POPs 含量和分布特征

对博鳌近海海域 30 站位表层沉积物样品进行有机污染物测定, 测定内容包括 16 种 PAHs 单体、23 种 OCPs 和 7 类 PCBs, 根据测定结果对博鳌近海表层沉积物的 POPs 的含量和分布特征进行分析, POPs 空间分布如图 2 所示.

2.1.1 PAHs 的含量和分布特征

PAHs 测试结果如表 1 所示, 除 qwbc138 和 qwbc144 未检测出萘烯外, 其余样品均检测出 16 种单体 PAHs. $\sum$ PAHs 含量范围为 $4.58 \sim 367.50 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 平均值为 $57.37 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 其中单体菲在 16 种 PAHs 中含量平均值最高, 且检出率为 100%, 尤其是 qwbc08 站位, 菲含量高达 $276.43 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 远超其余采样点, 此外, qwbc08 其余 PAHs 单体含量与

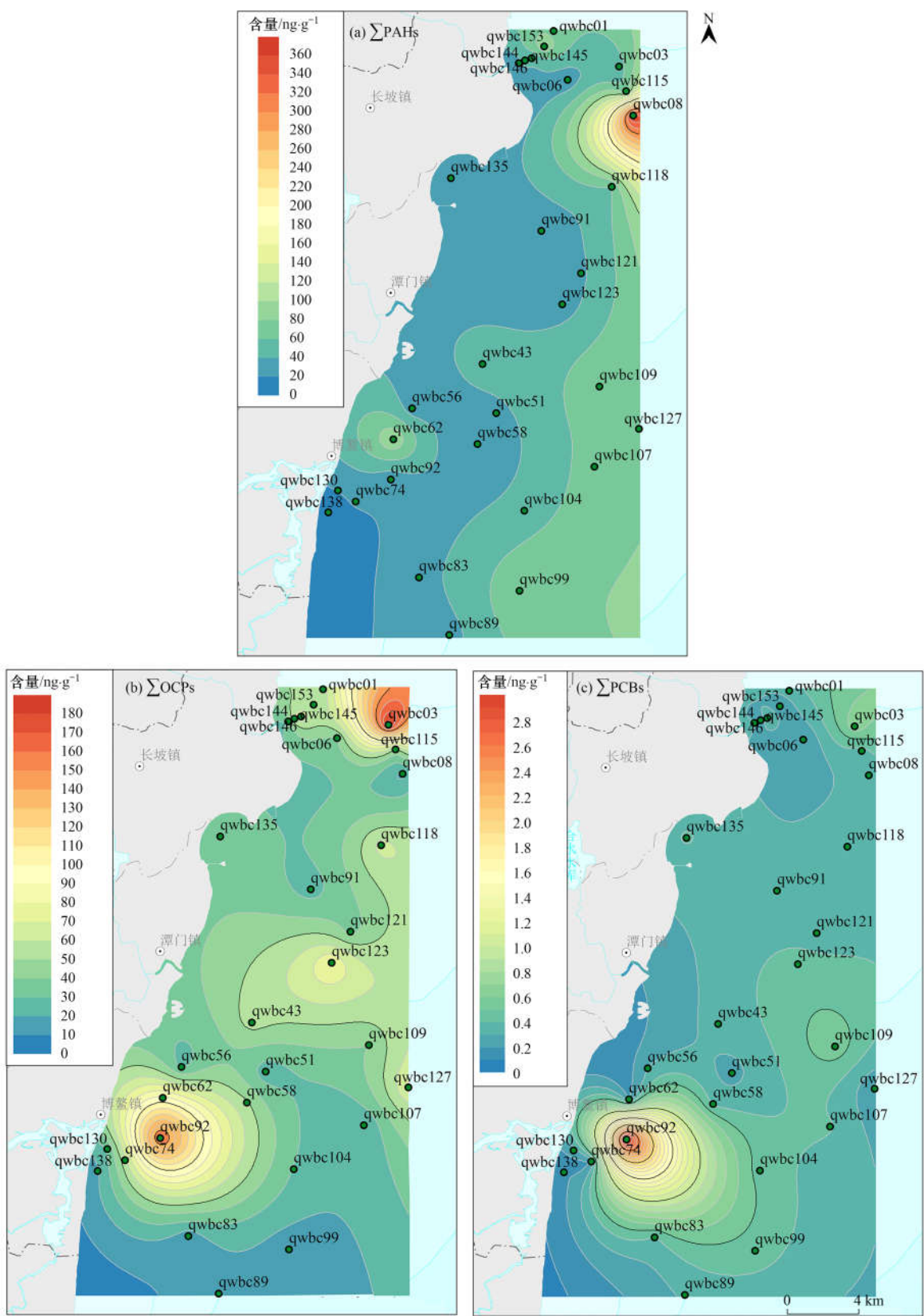


图 2 POPs 含量分布

Fig. 2 Distribution of POPs content

其他采样点相比都处于较高水平,故推测在 qwbc08 附近可能存在 PAHs 的点状污染源,需要引起重视.整体上相对分子质量低的 2~3 环 PAHs 的含量略高于相对分子质量高的 4~6 环 PAHs,其中 3 环类

PAHs 的含量最高,占 $\sum$ PAHs 的 43%,可能与 qwbc08 站位单体菲(属 3 环类)含量过高有关.与国内外其他河口和近海表层沉积物相比(表 2),博鳌

近岸海域的 $\sum$ PAHs 含量与福建三沙湾相当,略高于渤海湾、伊朗 Gorgan 湾及爱琴海 Edremit 湾,低于海南三亚河、青岛近海及印度 Hooghly 河口,处于中等偏低水平. $\sum$ PAHs 含量分布如图 2(a)所示,

最高值出现在东北侧,以 qwbc08 站位向四周逐渐降低,表现为点状污染源现象,最低值出现在研究区西南侧博鳌镇万泉河口附近,整体上表现为向海方向 $\sum$ PAHs 含量逐渐增加.

表 1 表层沉积物样品中 16 种 PAHs 单体含量(以干重计)和检出率¹⁾

Table 1 Content (measured by dry weight) and detection rate of 16 PAHs monomers in surface sediment samples

项目	化合物	最小值/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$	最大值/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$	平均值/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$	检出率/%
2 环(12%)	萘	0.65	27.34	6.66	100
	萘烯	ND	0.62	0.26	93
	萘	0.12	2.62	1.49	100
3 环(43%)	芴	0.42	7.48	3.57	100
	菲	1.31	276.43	17.49	100
	蒽	0.14	22.45	1.85	100
	荧蒽	0.39	7.96	3.57	100
4 环(15%)	䓛	0.30	5.80	2.73	100
	苯并(a)蒽	0.07	2.70	0.97	100
	䓛	0.08	3.32	1.26	100
	苯并(b)荧蒽	0.20	10.64	3.63	100
5 环(16%)	苯并(k)荧蒽	0.07	3.15	0.96	100
	苯并(a)䓛	0.09	3.84	1.30	100
	二苯并(a,h)蒽	0.26	6.75	3.12	100
	苯并(1,2,3-c,d)䓛	0.23	15.13	4.04	100
6 环(15%)	苯并(g,h,i)䓛	0.25	14.99	4.46	100
$\sum$ PAHs		4.58	367.50	57.37	100

1) ND 表示未检测出(低于检出限);括号内的百分数表示该类物质占总体的百分比

表 2 国内外河口和近海表层沉积物中 POPs 含量¹⁾

Table 2 Content of POPs in the surface sediment of the estuaries and offshore at home and abroad

地点	采样年份	$\omega/\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$			文献
		$\sum$ PAHs	$\sum$ OCPs	$\sum$ PCBs	
博鳌近海海域	2020	4.58 ~ 367.50	3.99 ~ 175.30	ND ~ 2.89	本研究
海南三亚河	2019	265.00 ~ 6 735.00	—	1.75 ~ 92.75	[27]
福建三沙湾	2013	8.42 ~ 352.97	0.28 ~ 1.83	0.24 ~ 3.05	[28]
渤海湾	2012	51.70 ~ 162.80	0.23 ~ 1.62	0.02 ~ 0.15	[29]
长江口及其毗邻海域	2007	—	0.46 ~ 4.99	5.08 ~ 19.64	[30]
青岛近海	2007	255.77 ~ 1 884.07	2.71 ~ 31.97	1.53 ~ 36.36	[31]
Gorgan Bay, 伊朗	2017	13.70 ~ 23.68	ND ~ 1.41	—	[32]
Edremit Bay, 爱琴海	2015	0.65 ~ 175.00	ND ~ 1.16	—	[33]
Hooghly Estuary, 印度	2019	3.26 ~ 628.61	—	0.28 ~ 7.72	[34]
Cua Dai Estuary, 越南	2013 ~ 2014	—	5.58 ~ 16.70	34.70 ~ 330.00	[35]

1) ND 表示未检测出(低于检出限);“—”表示没有相关数据

2.1.2 OCPs 的含量和分布特征

23 种 OCPs 测试结果如表 3 所示,除未检测出 α -六六六和七氯外,其余 21 种 OCPs 在样品中均有不同程度的检出, $\sum$ OCPs 含量范围为 3.99 ~ 175.30 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$,平均值为 40.92 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$,各采样点的 $\sum$ OCPs 含量差异不大.对 OCPs 进一步统计分析,可以看出博鳌近海表层沉积物的 OCPs 主要为滴滴涕,占 $\sum$ OCPs 的 42%,六六六类 OCPs 占 $\sum$ OCPs 的 22%,其他 OCPs 占 36%.与国内外其他河口和近海表层沉积物相比,博鳌近岸海域的 $\sum$ OCPs 含量

偏高,需引起重视.研究区内 $\sum$ OCPs 的含量分布如图 2(b)所示,最高值出现在东北角和西南侧万泉河口海域,峰值出现在 qwbc03 站位区域,整体上表现为南北向中间区域递减的趋势.

2.1.3 PCBs 的含量和分布特征

对 7 种 PCBs 测试结果显示,7 种 PCBs 均在不同站位检出,其中包含 6 种国际海洋勘探理事会推荐作为评价海洋污染的指标性 PCBs: PCB28、PCB52、PCB101、PCB153、PCB138、和 PCB180^[36].

研究区内 PCBs 的检测结果如表 4 所示,与两种持久性有机污染物不同,PCBs 的检出率为

77%,并非所有样品都检出 PCBs,含量范围为 ND ~ 2.89 ng·g⁻¹,平均值为 0.23 ng·g⁻¹. 其中 qwbc92 的 ∑ PCBs 含量最高,为 2.89 ng·g⁻¹,且该点是唯一检出 7 类 PCBs 的站位,其余样品 ∑ PCBs 含量均不高于 0.5 ng·g⁻¹,推测 qwbc92 位置可能存在 PCBs 点状污染源. 同时 PCBs 以五氯联苯为主,占 ∑ PCBs 的 52%,与 PCB101 的检出率高有关;其次为四氯联苯,占 ∑ PCBs 的 24%;三氯联苯含量最

少,仅占 ∑ PCBs 的 6%. 与国内外其他河口和近海表层沉积物相比,博鳌近岸海域的 ∑ PCBs 含量与福建三沙湾相当,略高于渤海湾,普遍低于国内外其他河口和海域,处于较低水平. 研究区内 ∑ PCBs 的含量分布如图 2(c)所示,最高值出现在西南侧万泉河口附近,受 qwbc92 站位存在的 PCBs 点状污染源影响,整体上表现为向海方向 ∑ PCBs 含量逐渐增加.

表 3 表层沉积物样品中部分 OCPs 含量(以干重计)和检出率¹⁾

Table 3 Content (measured by dry weight) and detection rate of partial OCPs in surface sediment samples					
项目	化合物	最小值/ng·g ⁻¹	最大值/ng·g ⁻¹	平均值/ng·g ⁻¹	检出率/%
六六六(22%)	α-六六六	ND	ND	ND	0
	β-六六六	ND	23.59	4.85	97
	δ-六六六	ND	20.23	2.09	60
	γ-六六六	0.38	6.02	1.89	100
滴滴涕(42%)	4,4'-滴滴伊	ND	3.22	0.13	7
	4,4'-滴滴滴	ND	5.00	0.87	87
	2,4'-滴滴涕	ND	20.04	1.97	27
	4,4'-滴滴涕	ND	56.98	14.10	80
其他(36%)	六氯苯	ND	0.76	0.21	93
	七氯	ND	ND	ND	0
	艾氏剂	ND	1.00	0.09	20
	狄氏剂	ND	7.86	0.85	83
	异狄氏剂	ND	17.83	0.59	3
	异狄氏剂酮	ND	7.59	0.25	3
	异狄氏剂醛	ND	9.43	1.12	57
	硫丹硫酸酯	ND	11.30	0.38	3
	环氧化七氯	ND	2.78	0.37	80
	顺式氯丹	ND	2.87	0.43	83
	反式氯丹	ND	3.11	0.45	83
	β-硫丹	ND	16.69	2.44	30
	α-硫丹	ND	6.31	2.44	93
	甲氧滴滴涕	ND	26.94	4.22	70
	灭蚊灵	ND	3.63	1.17	93
∑ OCPs		3.99	175.30	40.92	100

1) ND 表示未检测出(低于检出限);括号内的百分数表示该类物质占总体的百分比

表 4 表层沉积物样品中 7 类 PCBs 含量(以干重计)和检出率¹⁾

Table 4 Content (measured by dry weight) and detection rate of seven types of PCBs in surface sediment samples					
项目	化合物	最小值/ng·g ⁻¹	最大值/ng·g ⁻¹	平均值/ng·g ⁻¹	检出率/%
三氯联苯(6%)	PCB28	ND	0.4	0.013	3
四氯联苯(24%)	PCB52	ND	0.58	0.057	40
五氯联苯(52%)	PCB101	ND	0.38	0.096	36
	PCB118	ND	0.26	0.024	20
六氯联苯(11%)	PCB153	ND	0.38	0.013	3
	PCB138	ND	0.41	0.014	3
七氯联苯(7%)	PCB180	ND	0.48	0.016	3
∑ PCBs		ND	2.89	0.232	77

1) ND 表示未检测出(低于检出限);括号内的百分数表示该类物质占总体的百分比

2.2 持久性有机污染物的来源分析

2.2.1 PAHs 的来源分析

环境中的 PAHs 主要来源于含碳化合物的不完

全燃烧,如石油、木材、垃圾和煤,并通过废水的排放、大气沉降、地表迁移和石油泄漏等多种形式进入水体,吸附到沉积物中,进行缓慢的生物降解、挥发

及水解等^[37]. 前人对沉积物中 PAHs 的来源开展了详细研究^[37~42], 通常采用分子比值法(又称同分异构体比值法)来分析环境中的 PAHs 来源, 本文依据 Yunker 等^[43]研究的结果: 蒽/(蒽+菲)小于 0.1 通常意味着油类排放而来, 大于 0.1 则代表燃烧产生; 荧蒽/(荧蒽+芘)小于 0.4 意味着油类排放产生, 大于 0.5 主要是木柴、煤等的燃烧产生, 介于 0.4 与 0.5 之间则代表石油及其精炼产品的燃烧产生。

使用蒽/(蒽+菲)和荧蒽/(荧蒽+芘)两个比

值为坐标轴绘制博鳌近海表层沉积物中的 PAHs 来源分析, 结果如图 3 所示, 蒽/(蒽+菲)的值在 0.08~0.16 之间, 且将近 80% 的样品大于 0.10, 说明研究区内 PAHs 的来源为混合源, 且主要为燃烧源, 小部分为石油源; 荧蒽/(荧蒽+芘)的值在 0.48~0.63 之间, 除 3 个样品介于 0.4~0.5 之间, 其余样品均大于 0.5, 说明研究区内表层沉积物中大部分 PAHs 来源为木材、煤等的燃烧产生, 小部分为石油及其精炼产品的燃烧产生。

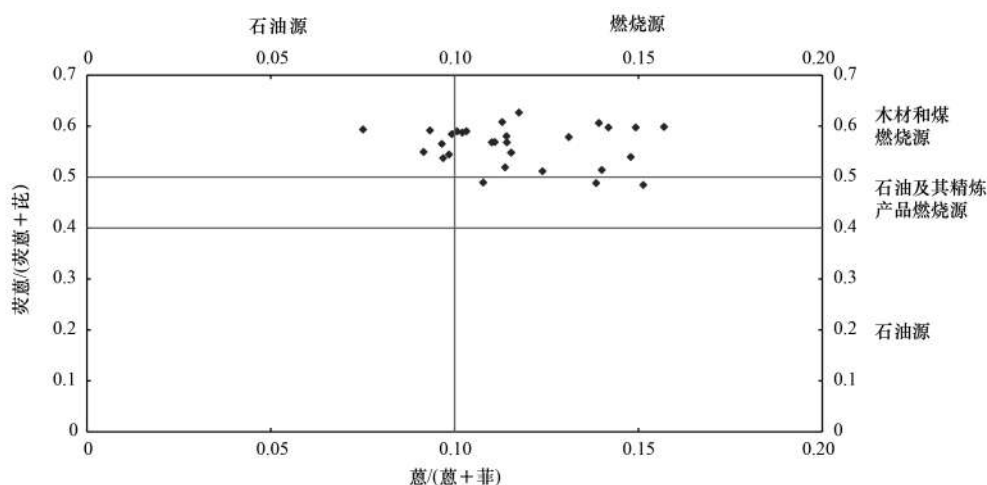


图 3 表层沉积物 PAHs 来源分析
Fig. 3 Source analysis of PAHs in surface sediments

2.2.2 OCPs 的来源分析

环境中常见的 OCPs 主要是六六六和滴滴涕类农药, 六六六(hexachlorocyclohexanes, HCHs) 主要用作林业、果树和拌种用杀虫剂, 工业六六六包含 α -HCH (60%~70%)、 β -HCH (5%~12%)、 γ -HCH (10%~12%) 和 δ -HCH (6%~10%) 这 4 种异构体, 在我国已停用多年, 除工业用六六六外, 林丹(γ -HCH > 99%) 杀虫活性强, 仍广泛用于农业和卫生害虫的防治^[44]. 有研究表明通过环境中 α -HCH/ γ -HCH 的值可以揭示 HCHs 的输入源^[45,46], 当 α -HCH/ γ -HCH 值在 0.1~0.2 之间时, 表明沉积物存在林丹的污染; 当该值在 4~15 之间, 说明其可能来源于工业 HCHs 的输入^[45], 而在 HCHs 的各异构体中 β -HCH 稳定性和抗降解能力最强, 高 β -HCH 含量表明污染源多来源于历史输入^[47]. 本研究中的 α -HCH 的检出率为 0, γ -HCH 的检出率为 100%, 表明研究区内的 HCHs 来源主要为林丹的输入, 工业 HCHs 几乎没有或已被完全降解, 而 β -HCH 的检出率达 97%, 含量平均值为 $4.85 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 在 HCHs 中最高, 占总 HCHs 的 55%, 所以研究区内的 HCHs 可能是历史上陆源输入的残留, 但目前已完全降解。

滴滴涕主要用于防治棉花后期害虫、森林害虫

和卫生害虫等方面, 1946 年在农业投入使用, 1984 年停止使用, 目前环境中的 DDTs 含量呈递减趋势, 以其降解产物 DDT 和 DDE 为主^[48]. 传统 DDTs 农药以 4,4'-DDT 为主, 2,4'-DDT/4,4'-DDT 值在 0.2~0.3 之间; 三氯杀螨醇以 2,4'-DDT 为主, 2,4'-DDT/4,4'-DDT 值在 1.3~9.3 之间^[49]. DDTs 在好氧条件下被微生物降解为 4,4'-DDE, 厌氧条件下可降解为 4,4'-DDD, 如果存在持续的 DDT 输入, 则 DDT 在 $\sum \text{DDTs}$ 中的相对含量就会高, 反之 DDT 的降解产物的相对含量会升高^[50]. 研究中常使用环境中的 4,4'-DDT/(4,4'-DDD + 4,4'-DDE) 值来揭示传统工业 DDTs 的残留痕迹, 若其值 < 1, 表明该地区存在 DDTs 的使用历史^[51]. 博鳌近岸沉积物中的 4,4'-DDT 检出率为 80%, 含量平均值为 $14.10 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 占总 DDTs 的 83%, 说明研究区内 DDTs 以传统 DDTs 类农药为主, 且有持续的 DDT 输入; 2,4'-DDT 检出率 27%, 含量平均值为 $1.97 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 说明研究区内某些地区也有三氯杀螨醇的输入, 但使用较少; 4,4'-DDD 和 4,4'-DDE 为 4,4'-DDT 的主要降解产物, 在研究区内均有检出, 检出率分别为 87% 和 7%, 表明研究区内也有部分早期 DDTs 残留, 好氧和厌氧降解过程都有发生, 且以厌氧降解过

程为主。

2.2.3 PCBs 的来源分析

PCBs 的主要污染源是来自工业生产过程中含有 PCBs 的废弃物排放,以及蓄电池和变压器的拆解泄漏等,此外垃圾填埋场渗滤液的泄漏、城市垃圾的焚烧、工业焚烧和大气的干湿沉降、电子产品的泄漏和外排也是 PCBs 的重要来源^[52]。我国 PCBs 的生产主要在 1965~1974 年,生产最多的为三氯和五氯联苯,三氯联苯主要用于电力电容器的浸渍剂,五氯联苯主要用作油漆等工业产品的添加剂,还有一些进口变压器油中 PCBs 质量分数高达 70% 以上^[53,54]。

研究区内的 PCBs 数据显示:除站位 qwbc92 外检测出 7 种 PCBs 外,其余站位最多检测出 PCB25、PCB101 和 PCB118 这 3 种 PCBs,主要为四氯和五氯联苯,分别占总 PCBs 的 24% 和 52%,结合研究区内分布有青葛港、博鳌港以及千年渔港潭门港等众多港口,航运较为发达,故推测航运过程中船体底部油漆的释放以及废旧船只油漆的剥落是研究区内 PCBs 的主要污染源。同时,有研究表明高氯联苯相比于低氯联苯具有较强的亲脂性,更容易聚集在颗粒相及沉积物中^[55],并且会随潮流迁移至更远的地方,这也可能是造成表层沉积物中四氯和五氯联苯

较其他低氯联苯含量高的原因之一。

2.3 生态风险评价

2.3.1 ERL/ERM 法

基于 ERL/ERM 法对研究区内表层沉积物生态风险评价结果如表 5 所示,以 PAHs 单体为评价标准,仅有 1 个站位(qwbc08)的单体菲含量介于 ERL~ERM 之间,偶尔对生物体产生负效应;其余单体 PAHs 的含量均低于 ERL,对生物体产生的负效应几乎可以忽略,无生态风险。而 OCPs 单体 4,4'-DDE 评价显示,仅 1 个站位(qwbc92)的含量在 ERL~ERM 之间,偶尔对生物体产生负效应,其余 29 个站位(93%)含量低于 ERL,几乎不会对生物体产生负效应;以 DDTs 为评价标准时,3 个站位的含量大于 ERM,经常对生物体产生负效应,该区域存在较大生态风险,21 个站位(73%)的含量在 ERL~ERM 之间,偶尔对生物体产生负效应,毒性发生概率在 10%~75% 之间;整体上,博鳌近海表层沉积物中 POPs 以 DDTs 呈现较高生态风险,3 个站位经常对生物体产生负面影响,73% 的站位偶尔会对生物体产生负面影响。PCBs 生态评价以 $\sum$ PCBs 为标准,结果显示 30 个站位含量均低于 REL,几乎不会对生物体产生负效应,无生态风险。

表 5 基于 ERL/ERM 法的 POPs 生态风险评价结果¹⁾

Table 5 POPs ecological risk assessment results based on ERL/ERM method

化合物	质量基准法阈值/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$		含量(本研究) $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$	站位数		
	ERL	ERM		< ERL	ERL ~ ERM	> ERM
PAHs	萘	160	2 100	0.65 ~ 27.34	30	—
	苊烯	44	640	ND ~ 0.62	30	—
	苊	16	500	0.12 ~ 2.62	30	—
	芴	19	540	0.42 ~ 7.48	30	—
	菲	240	1 500	1.31 ~ 276.43	29	1
	蒽	85.3	1 100	0.14 ~ 22.45	30	—
	荧蒽	600	5 100	0.39 ~ 7.96	30	—
	芘	665	2 600	0.30 ~ 5.80	30	—
	苯并(a)蒽	261	1 600	0.07 ~ 2.70	30	—
	䓑	384	2 800	0.08 ~ 3.32	30	—
	苯并(a)芘	430	1 600	0.09 ~ 3.84	30	—
	二苯并(a,h)蒽	63.4	260	0.26 ~ 6.75	30	—
	$\sum$ PAHs	4 022	44 792	4.58 ~ 367.50	30	—
	4,4'-DDE	2.2	27	ND ~ 3.22	29	1
OCPs	DDTs	1.58	46.1	ND ~ 63.39	6	21
PCBs	$\sum$ PCBs	22.7	180	ND ~ 2.89	30	—

1) ND 表示未检测出(低于检出限);“—”表示没有相关数据

2.3.2 M-ERM-Q 法

根据公式(1)算出基于 M-ERM-Q 法生态风险评价结果如表 6 所示,结果显示单体评价结果几乎与 ERL/ERM 法相一致,但更精确了每个站位个体生态风险发生的概率值。M-ERM-Q(PAHs)中仅单体菲有一个站位(qwbc8)会产生较低生态风险,毒

性概率 30%,具有中低毒性,其余均显示无生态风险状态。而 M-ERM-Q(OCPs)中 DDTs 显示具有较复杂和较高的生态风险情况,其中有 13 个站位(43%)毒性概率 30%,10 个站位(33%)毒性概率 50%,于 qwbc92 点处显示最高 75% 毒性发生概率,该处 DDTs 会产生较大的生态风险性。M-ERM-Q

(PCBs)显示无生态风险。

本研究对3种持久性污染物叠加计算显示,域沉积物中PAHs、OCPs和PCBs这3种污染物产生综合生态风险的可能性较小,影响概率小于10%。

M-ERM-Q(POP_s)值均小于0.1,表明博鳌近岸海

表6 基于M-ERM-Q法的POP_s生态风险评价结果¹⁾

Table 6 POP_s ecological risk assessment results based on M-ERM-Q method

化合物		ERM / ng·g ⁻¹	M-ERM-Q 值不同范围内点位数(毒性发生概率)			
			<0.1(10%)	0.11~0.5 (30%)	0.51~1.5 (50%)	>1.5 (75%)
PAHs	萘	2 100	30	—	—	—
	蒽	640	30	—	—	—
	苊	500	30	—	—	—
	芴	540	30	—	—	—
	菲	1 500	29	1	—	—
	蒽	1 100	30	—	—	—
	荧蒽	5 100	30	—	—	—
	芘	2 600	30	—	—	—
	苯并(a)蒽	1 600	30	—	—	—
	䓛	2 800	30	—	—	—
	苯并(a)芘	1 600	30	—	—	—
	二苯并(a,h)蒽	260	30	—	—	—
	M-ERM-Q(PAHs)	—	30	—	—	—
	4,4'-DDE	27	29	1	—	—
OCPs	DDTs	46.1	6	13	10	1
	M-ERM-Q(OCPs)	—	30	—	—	—
PCBs	∑ PCBs	180	30	—	—	—
	M-ERM-Q(PCBs)	—	30	—	—	—
	M-ERM-Q(POP _s)	—	30	—	—	—

1) “—”表示没有相关数据

2.3.3 M-PEC-Q 法

根据公式(2)算出基于M-PEC-Q法的生态风险评价,结果如表7所示,由于收集到更多的OCPs中PEC值,故M-PEC-Q法中具有更多的单体评价结果。结果显示,M-PEC-Q(PAHs)中评价基本与前两种方法一致,仅单体菲qwbc8站位偶尔会发生轻微不良的生态风险影响,但风险发生概率有所区别为40%,其余站位PAHs单体均显示无生态风险。而M-PEC-Q(OCPs)中单体存在风险性的站位较多,其中γ-HCH毒性发生概率小于40%的有16站位,占比53%,毒性发生概率超过50%共有9处,占比30%,位于qwbc92站位呈现出重度生态风险,毒性发生概率达90%以上;除此之外,Sum DDT也呈现出较复杂的生态风险分布状态,共有10站位(33%)毒性发生概率小于40%,6站位毒性发生概率超过50%,且同样是qwbc92站位呈现出较高的生态风险性,表明qwbc92点区域中具有较严重的OCPs点源污染状态;总体平均上M-PEC-Q(OCPs)仅显示在qwbc92站位处于0.26~0.5之间,风险概率20%,可能会发生生态风险影响,其余显示无生态风险。M-PEC-Q(PCBs)显示无生态风险。

综合3种持久性污染物叠加计算显示,M-PEC-

Q(POP_s)值均小于0.1,表明3种污染物产生综合生态风险的可能性很小,这与M-ERM-Q法综合评价基本相一致。

2.3.4 整体评价

ERL/ERM、M-ERM-Q和M-PEC-Q法这3种评价结果显示,博鳌近海沉积物生态风险性基本一致,表现为PCBs中DDT和γ-HCH单体具有较大生态风险性,毒性发生概率较高,主要在qwbc92站位附近呈点状污染源形式分布,PAHs中仅菲单体呈现较小的生态风险性,其余PAHs和OCPs均无生态风险性。整体上,3种污染物产生综合生态风险的可能性较小。

同时本研究发现,ERL/ERM法能定性筛选划分沉积物污染风险大小,较为粗略地描述沉积物风险毒性发生概率的大小范围,但无法评估多种污染物综合生态风险性;而M-ERM-Q法通过计算单体污染物的ERM-Q值进而求出多污染物综合M-ERM-Q值,定量评估多种污染物下的综合生态毒性,两种方法的相互结合,既弥补了ERL/ERM法的低精度缺陷,也减少了M-ERM-Q法单一预测沉积物生态风险的不可靠性,提高了生态风险评价的准确度。同时,M-PEC-Q法评估结果与M-ERM-Q结果

几乎一致,差别在毒性风险发生概率上,M-PEC-Q法更加详细,评估精度上也有更进一步的提高,也验证了 M-PEC-Q 法不仅适用于陆域淡水的生态风险评价,也适用于海水沉积物的生态风险。

表 7 基于 M-PEC-Q 法的 POPs 生态风险评价结果¹⁾

Table 7 POPs ecological risk assessment results based on M-PEC-Q method							
化合物	PEC /ng·g ⁻¹	M-PEC-Q 值不同范围内点位数(毒性发生概率)					
		<0.25 (0)	0.26~0.5 (20%)	0.51~0.75 (40%)	0.76~1 (54%)	1.01~1.5 (70%)	1.51~2.5 (90%)
PAHs	萘	561	30	—	—	—	—
	苊烯	89	30	—	—	—	—
	苊	128	30	—	—	—	—
	芴	536	30	—	—	—	—
	菲	1 170	29	—	1	—	—
	蒽	845	30	—	—	—	—
	荧蒽	2 230	30	—	—	—	—
	芘	1 520	30	—	—	—	—
	苯并(a)蒽	1 050	30	—	—	—	—
	䓛	1 290	30	—	—	—	—
	苯并(a)芘	1 450	30	—	—	—	—
	二苯并(a,h)蒽	135	30	—	—	—	—
	M-PEC-Q(PAHs)	—	30	—	—	—	—
OCPs	α-HCH	100	30	—	—	—	—
	β-HCH	210	30	—	—	—	—
	γ-HCH	5	5	8	8	5	3
	艾氏剂	80	30	—	—	—	—
	狄氏剂	62	30	—	—	—	—
	Sum DDD	28	29	1	—	—	—
	4,4'-DDE	31	30	—	—	—	—
	Sum DDT	63	14	6	4	2	3
	DDTs	572	30	—	—	—	—
	异狄氏剂	207	30	—	—	—	—
	环氧七氯	16	30	—	—	—	—
	灭蚁灵	14	29	1	—	—	—
	M-PEC-Q(PAHs)	—	30	—	—	—	—
PCBs	Total PCBs	676	30	—	—	—	—
	M-PEC-Q(PCBs)	—	30	—	—	—	—
	M-PEC-Q(POPs)	—	30	—	—	—	—

1) “—”表示没有相关数据

3 结论

(1)研究区内 $\sum$ PAHs、 $\sum$ OCPs 和 $\sum$ PCBs 含量(以干重计)分别为 4.58 ~ 367.50、3.99 ~ 175.30 和 ND ~ 2.89 ng·g⁻¹,与国内外其他海域及河口的研究结果相比,除个别站位外含量较高外,研究区内 POPs 的整体含量偏低,整体分布呈现出向海方向逐渐增加的趋势。

(2)POPs 来源分析结果表明,研究区内 PAHs 的来源主要为木材和煤等的燃烧;OCPs 中六六六类主要为林丹的输入,历史陆源输入已完全降解,滴滴涕类以传统 DDTs 类农药为主,且有持续的 DDT 输入;PCBs 以五氯联苯为主,可能来源于航运过程中早期船体底部油漆的释放以及废旧船只油漆的剥落。

(3)3 种风险评价方法结果基本一致,表现为

PCBs 中 DDT 和 γ-HCH 单体具有较大生态风险性,毒性发生概率较高,主要在 qwbc92 站位附近呈点状污染源形式分布,PAHs 中仅菲单体呈现较小的生态风险性,其余 PAHs 和 OCPs 均无生态风险性;整体上,3 种污染物产生综合生态风险的可能性较小。3 种方法综合评价提高了生态风险性的预测精度,也验证了 M-PEC-Q 法适用于海水沉积物的生态风险评价。

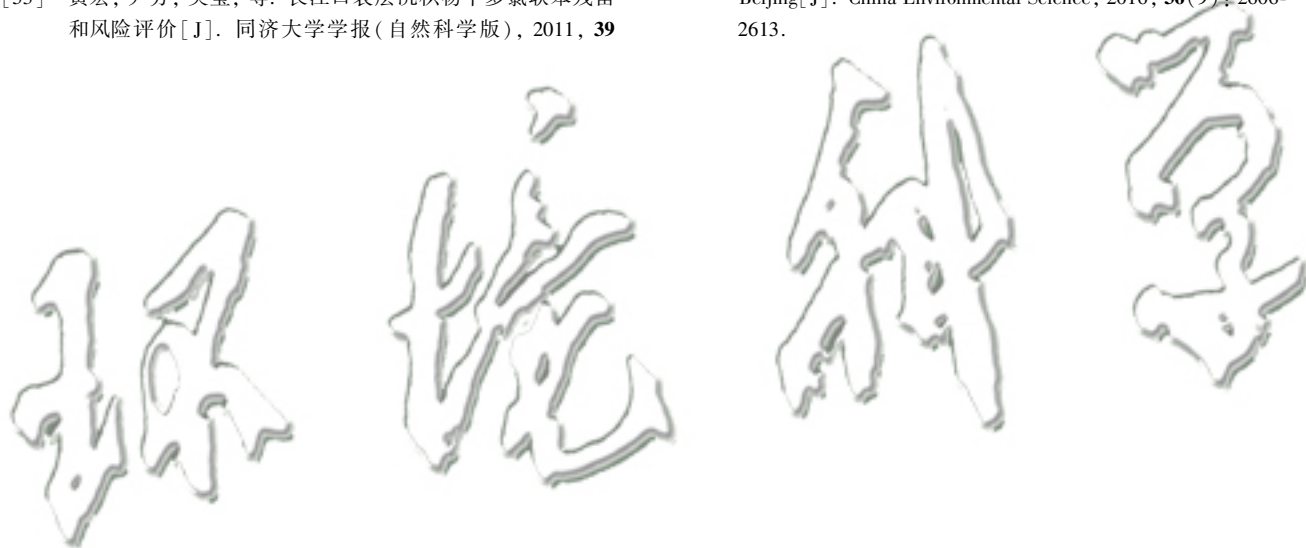
参考文献:

[1] 戴国华,刘新会. 影响沉积物-水界面持久性有机污染物迁移行为的因素研究[J]. 环境化学, 2011, 30(1): 224-230.
Dai G H, Liu X H. Factors affecting the migration of persistent organic pollutants across the sediment-water interface of aquatic environment[J]. Environmental Chemistry, 2011, 30(1): 224-230.
[2] Hansen J C. Environmental contaminants and human health in the Arctic[J]. Toxicology Letters, 2000, 112-113: 119-125.
[3] 关于持久性有机污染物的斯德哥尔摩公约[J]. 中华人民共

- 和国全国人民代表大会常务委员会公报, 2004, (5): 342-365.
- [4] 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价[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 Sciences*, 2014, **38**(7): 47-56.
- [5] 汪慧娟, 旷泽行, 周贤, 等. 海南省昌化江河口海域生物体中多环芳烃污染特征、来源解析及健康风险评价[J]. 环境科学, 2020, **41**(6): 2942-2950.
- Wang H J, Kuang Z X, Zhou X, *et al.* Characteristics, source analysis, and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) pollution in marine organisms from estuaries of Changhua River in Hainan province [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(6): 2942-2950.
- [6] 于紫玲, 林钦, 孙闰霞, 等. 海南岛沿海牡蛎体中PAHs的时空分布及其健康风险评价[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(5): 1570-1578.
- Yu Z L, Lin Q, Sun R X, *et al.* Spatial-temporal distribution and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in oysters along the coast of Hainan Island [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(5): 1570-1578.
- [7] 张禹, 刁晓平, 黎平, 等. 东寨港表层海水中多环芳烃(PAHs)的分布特征及来源分析[J]. 生态环境学报, 2016, **25**(11): 1779-1785.
- Zhang Y, Diao X P, Li P, *et al.* Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in seawater from coastal areas of the Dongzhai Harbor [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, **25**(11): 1779-1785.
- [8] 刘华峰, 祁士华, 李敏, 等. 海南岛东寨港区域水体中有机氯农药组成与时空分布[J]. 环境科学研究, 2007, **20**(4): 70-74.
- Liu H F, Qi S H, Li M, *et al.* Composition and distribution of organochlorine pesticides in water from Dongzhai Harbor, Hainan Island [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2007, **20**(4): 70-74.
- [9] 项楠, 刁晓平, 姜春霞, 等. 三亚珊瑚礁区珊瑚体内多环芳烃(PAHs)的分布特征及来源分析[J]. 生态环境学报, 2017, **26**(12): 2112-2119.
- Xiang N, Diao X P, Jiang C X, *et al.* Distribution characteristics and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in corals from Sanya coral reefs [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, **26**(12): 2112-2119.
- [10] Li P, Cao J, Diao X P, *et al.* Spatial distribution, sources and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface seawater from Yangpu Bay, China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, **93**(1-2): 53-60.
- [11] 黎平, 刁晓平, 赵春风, 等. 洋浦湾表层海水中多环芳烃的分布特征及来源分析[J]. 环境科学与技术, 2015, **38**(1): 127-133.
- Li P, Diao X P, Zhao C F, *et al.* Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface seawater from coastal areas of the Yangpu Bay [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **38**(1): 127-133.
- [12] 任磊, 毕宇强, 苏燕, 等. 五指山地区水和沉积物中HCHs、DDTs和PCBs分布特征及生态风险[J]. 农业环境科学学报, 2007, **26**(5): 1707-1713.
- Ren L, Bi Y Q, Su Y, *et al.* Distribution and risk assessment of DDTs, HCHs and PCBs in waters and surface sediments of Wuzhishan area [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, **26**(5): 1707-1713.
- [13] 李明. 上海市崇明县农田生态风险评价[D]. 上海: 华东师范大学, 2006.
- Li M. Ecological risk assessment for the farmland Chongming country, Shanghai [D]. Shanghai: East China Normal University, 2006.
- [14] Cousins I T, Beck A J, Jones K C. A review of the processes involved in the exchange of semi-volatile organic compounds (SVOC) across the air-soil interface [J]. *Science of the Total Environment*, 1999, **228**(1): 5-24.
- [15] 徐向荣. 我国近海海域持久性有机污染物的污染现状[A]. 见: 第六届全国环境化学大会暨环境科学仪器与分析仪器展览会摘要集[C]. 上海: 中国化学会, 2011. 313.
- [16] GB 17378.3-2007, 海洋监测规范 第3部分: 样品采集、贮存与运输[S].
- [17] 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.
- [18] 罗孝俊, 陈社军, 麦碧娴, 等. 珠江三角洲地区水体表层沉积物中多环芳烃的来源、迁移及生态风险评价[J]. 生态毒理学报, 2006, **1**(1): 17-24.
- Luo X J, Chen S J, Mai B X, *et al.* Source, transport and risk assessment of PAHs in surface sediments from Pearl River Delta [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2006, **1**(1): 17-24.
- [19] 陈云增, 杨浩, 张振克, 等. 水体沉积物环境质量基准建立方法研究进展[J]. 地球科学进展, 2006, **21**(1): 53-61.
- Chen Y Z, Yang H, Zhang Z K, *et al.* Review of approaches for deriving sediment quality guidelines [J]. *Advances in Earth Science*, 2006, **21**(1): 53-61.
- [20] 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.
- [21] Kemble N E, Hardesty D G, Ingersoll C G, *et al.* An evaluation of the toxicity of contaminated sediments from Waukegan Harbor, Illinois, following remediation [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2000, **39**(4): 452-461.
- [22] MacDonald D D, Ingersoll C G. Tools for assessing contaminated sediments in freshwater, estuarine, and marine ecosystems [A]. In: Poletto C, Charlesworth S (Eds.). *Sedimentology of Aqueous Systems* [C]. London: Blackwell Publishing Ltd, 2010.
- [23] 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.
- [24] Long E R, MacDonald D D. Recommended uses of empirically derived, sediment quality guidelines for marine and estuarine ecosystems [J]. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 1998, **4**(5): 1019-1039.
- [25] McCready S, Birch G F, Long E R, *et al.* Predictive abilities of numerical sediment quality guidelines in Sydney Harbour, Australia, and vicinity [J]. *Environment International*, 2006, **32**(5): 638-649.
- [26] Ingersoll C G, MacDonald D D, Wang N, *et al.* Predictions of sediment toxicity using consensus-based freshwater sediment quality guidelines [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2001, **41**(1): 8-21.
- [27] 詹咏, 韦婷婷, 叶汇彬, 等. 三亚河沉积物PAHs和PCBs的分布、来源及风险评价[J]. 环境科学, 2021, **42**(4): 1830-

1838.
Zhan Y, Wei T T, Ye H B, *et al.* Distribution, source, and ecological risk evaluation of the PAHs and PCBs in the sediments from Sanya River[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(4): 1830-1838.
- [28] 黄磊, 孙桂华, 袁晓婕. 三沙湾表层沉积物中有机污染物的含量及风险评价[J]. *海洋地质前沿*, 2017, **33**(8): 63-69.
Huang L, Sun G H, Yuan X J. Concentrations of organic pollutants in surface sediments of the Sansha Bay and risk evaluation[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2017, **33**(8): 63-69.
- [29] 胡树起, 汤丽玲, 马生明, 等. 渤海湾表层沉积物中有机污染物组成、来源及其生态风险[J]. *物探与化探*, 2014, **38**(2): 309-317, 324.
Hu S Q, Tang L L, Ma S M, *et al.* Composition, source and risk assessment of the organic pollutants in the surface sediments from the Bohai Gulf[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2014, **38**(2): 309-317, 324.
- [30] 杨华云. 长江三角洲毗邻海域有机氯农药和多氯联苯的研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2011.
Yang H Y. Study on organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyls in Yangtze River Delta and adjacent sea [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2011.
- [31] 王江涛, 谭丽菊, 张文浩, 等. 青岛近海沉积物中多环芳烃、多氯联苯和有机氯农药的含量和分布特征[J]. *环境科学*, 2010, **31**(11): 2713-2722.
Wang J T, Tan L J, Zhang W H, *et al.* Concentrations and distribution characteristic of PAHs, PCBs and OCPs in the surface sediments of Qingdao coastal area [J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(11): 2713-2722.
- [32] Zafarani G G, Karbalaie S, Golshani R, *et al.* Baseline occurrence, distribution and sources of PAHs, TPH, and OCPs in surface sediments in Gorgan Bay, Iran[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2022, **175**, doi: 10.1016/j.marpolbul.2022.113346.
- [33] Darilmaz E, Alyuruk H, Kontas A, *et al.* Distributions and sources of PAHs and OCPs in surficial sediments of Edremit Bay (Aegean Sea) [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2019, **77**(2): 237-248.
- [34] Mitra S, Corsolini S, Pozo K, *et al.* Characterization, source identification and risk associated with polyaromatic and chlorinated organic contaminants (PAHs, PCBs, PCBzs and OCPs) in the surface sediments of Hooghly estuary, India[J]. *Chemosphere*, 2019, **221**: 154-165.
- [35] Tham T T, Anh H Q, Trinh L T, *et al.* Distributions and seasonal variations of organochlorine pesticides, polychlorinated biphenyls, and polybrominated diphenyl ethers in surface sediment from coastal areas of central Vietnam [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, **144**: 28-35.
- [36] Ballschmiter K, Zell M. Analysis of polychlorinated biphenyls (PCB) by glass capillary gas chromatography [J]. *Fresenius' Zeitschrift für analytische Chemie*, 1980, **302**(1): 20-31.
- [37] 孙盼盼. 滇北小流域土壤和沉积物中持久性有机污染物的地球化学特征[D]. 南京: 南京师范大学, 2017.
Sun P P. Geochemical characteristics of POPs in soils and sediments from small catchments in the north of Dianchi watershed[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2017.
- [38] 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.
- [39] 江敏, Tuan L H, 梅卫平, 等. 舟山近海水体和沉积物中多环芳烃分布特征[J]. *环境科学*, 2014, **35**(7): 2672-2679.
Jiang M, Tuan L H, Mei W P, *et al.* Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in water and sediment from Zhoushan coastal area, China [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(7): 2672-2679.
- [40] 卢晓霞, 张姝, 陈超琪, 等. 天津滨海地区表层沉积物中持久性有机污染物的含量特征与生态风险[J]. *环境科学*, 2012, **33**(10): 3426-3433.
Lu X X, Zhang S, Chen C Q, *et al.* Concentration characteristics and ecological risk of persistent organic pollutants in the surface sediments of Tianjin coastal area [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(10): 3426-3433.
- [41] 董磊, 汤显强, 林莉, 等. 长江武汉段丰水期水体和沉积物中多环芳烃及邻苯二甲酸酯类有机污染物污染特征及来源分析[J]. *环境科学*, 2018, **39**(6): 2588-2599.
Dong L, Tang X Q, Lin L, *et al.* Pollution characteristics and source identification of polycyclic aromatic hydrocarbons and phthalic acid esters during high water level periods in the Wuhan Section of the Yangtze River, China [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(6): 2588-2599.
- [42] 麦碧娴, 林峰, 张干, 等. 珠江三角洲河流和珠江口表层沉积物中有机污染物研究——多环芳烃和有机氯农药的分布及特征[J]. *环境科学学报*, 2000, **20**(2): 192-197.
Mai B X, Lin Z, Zhang G, *et al.* Organic contaminants in surface sediments from rivers of the Pearl River Delta and Estuary—The distributions and characteristics of PAHs and organochlorine pesticides [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2000, **20**(2): 192-197.
- [43] Yunker M B, Macdonald R W, Vingarzan R, *et al.* PAHs in the Fraser River basin: a critical appraisal of PAH ratios as indicators of PAH source and composition [J]. *Organic Geochemistry*, 2002, **33**(4): 489-515.
- [44] 岳强, 管玉峰, 涂秀云, 等. 广东北江上游流域农田土壤有机氯农药残留及其分布特征[J]. *生态环境学报*, 2012, **21**(2): 321-326.
Yue Q, Guan Y F, Tu X Y, *et al.* Residual and distribution of organochlorine pesticides in agricultural soils from the upper watershed of Beijiang River in Guangdong province, China [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, **21**(2): 321-326.
- [45] Ni H G, Cao S P, Ji L Y, *et al.* Incidence of organochlorine pesticides in soils of Shenzhen, China [J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2011, **13**(4): 951-956.
- [46] Kalantzi O I, Alcock R E, Johnston P A, *et al.* The global distribution of PCBs and organochlorine pesticides in butter [J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, **35**(6): 1013-1018.
- [47] 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.
- [48] Zhang G, Parker A, House A, *et al.* Sedimentary records of DDT and HCH in the Pearl River Delta, south China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **36**(17): 3671-3677.
- [49] 安太成, 陈嘉鑫, 傅家谟, 等. 珠三角地区 POPs 农药的污染现状与控制对策[J]. *生态环境*, 2005, **14**(6): 981-986.
An T C, Chen J X, Fu J M, *et al.* The Pollution situation and control strategy of persistent organic pollutants in the Pearl River delta, China [J]. *Ecology and Environment*, 2005, **14**(6):

- 981-986.
- [50] 王泰, 黄俊, 余刚. 海河与渤海湾沉积物中 PCBs 和 OCPs 的分布特征[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2008, **48**(9): 1462-1465, 1471.
- Wang T, Huang J, Yu G. Distribution of polychlorinated biphenyls and organochlorine pesticides in sediments of the Haihe River and Bohai Bay [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2008, **48**(9): 1462-1465, 1471.
- [51] Aguilar A. Relationship of DDE/ Σ DDT in marine mammals to the chronology of DDT input into the ecosystem[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1984, **41**(6): 840-844.
- [52] 王道玮. 沉积物中多环芳烃和多氯联苯分析方法的建立及其应用研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2013.
- Wang D W. Studies on establishment and application of the analysis method for polycyclic aromatic hydrocarbons and polychlorinated biphenyls in sediment [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2013.
- [53] 黄宏, 尹方, 吴莹, 等. 长江口表层沉积物中多氯联苯残留和风险评价[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, **39**(10): 1500-1505.
- Huang H, Yin F, Wu Y, *et al.* Residual characteristics and ecological risk assessment of polychlorinated biphenyls in surface sediments from Yangtze Estuary and Nearshore of East China Sea [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2011, **39**(10): 1500-1505.
- [54] 邢颖, 吕永龙, 刘文彬, 等. 中国部分水域沉积物中多氯联苯污染物的空间分布、污染评价及影响因素分析[J]. 环境科学, 2006, **27**(2): 228-234.
- Xing Y, Lv Y L, Liu W B, *et al.* Assessment of PCB pollution in spatial distribution and analysis of the PCB sources in sediments in China [J]. Environmental Science, 2006, **27**(2): 228-234.
- [55] 邵阳, 杨国胜, 刘韦华, 等. 北京地区地表水中 OCPs 和 PCBs 的污染分析[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(9): 2606-2613.
- Shao Y, Yang G S, Liu W H, *et al.* The study of organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyls in surface water around Beijing [J]. China Environmental Science, 2016, **36**(9): 2606-2613.



CONTENTS

Analysis of Change Trend and Influencing Factors of PM _{2.5} -O ₃ Pollution in Tianjin from 2013 to 2020	XIAO Zhi-mei, LI Ya-fei, GAO Jing-yun, <i>et al.</i> (4211)
Changes in Ozone Pollution Trend Characteristics and Sensitivity in Jinan from 2015 to 2020	SUN Xiao-yan, SUN Jun, GUO Meng-meng, <i>et al.</i> (4220)
Analysis of O ₃ Pollution Characteristics, Formation Sensitivity, and Transport Impact in Southern Nanjing	ZHENG Xin-mei, HU Kun, WANG Ming, <i>et al.</i> (4231)
Characteristics and Driving Factors of O ₃ Pollution During 13 th Five-Year Period in Tianjin	LI Yuan, XIAO Zhi-mei, BI Xiao-hui, <i>et al.</i> (4241)
Response of PM _{2.5} and O ₃ to Emission Reductions in Nanjing Based on Random Forest Algorithm	SHANG Yong-jie, MAO Yu-hao, LIAO Hong, <i>et al.</i> (4250)
Quantification of Ozone Pollution Transport Based on Four-dimensional Flux Method in Foshan, China	WU Li-ping, MO Hai-hua, YANG Li-ting, <i>et al.</i> (4262)
Effects of Source Depletion on Vapor Intrusion Risk Assessment	ZHONG Mao-sheng, WANG Yang, JIANG Lin, <i>et al.</i> (4271)
Spatiotemporal Variation Characteristics of Main Pollutant Fluxes in the Yangtze River Basin from 2017 to 2020	GUO Chao-chen, LEI Kun, LI Xiao-guang, <i>et al.</i> (4279)
Spatial Variation Characteristics, Influencing Factors, and Sources of Hydrogeochemical of Surface Water and Groundwater in Mountainous Area of Hutuo River	KONG Xiao-le, CHANG Yu-ru, LIU Xia, <i>et al.</i> (4292)
Spatial Distribution, Source Analysis, and Health Risk Assessment of Metal Elements in Karst Water in Southeastern Chongqing	XIE Hao, ZOU Sheng-zhang, LI Jun, <i>et al.</i> (4304)
Mechanism of Salinization of Shallow Groundwater in Taocheng District, Hengshui City	HE Jin, ZHANG Huai-sheng, CAI Wu-tian, <i>et al.</i> (4314)
Assessment of Groundwater Contamination Risk in the Plain Area of Southern Turpan Basin	BAI Fan, ZHOU Jin-long, ZHOU Yin-zhu, <i>et al.</i> (4325)
Microbial Community Composition and Diversity in Metal Sulfide Mine Water Systems	DING Cong-cong, ZHU Xu-yan, ZHAO Xing-qing, <i>et al.</i> (4334)
Occurrence Characteristics of Microplastics in Baiyangdian Lake Water and Sediments	CHENG Xin-yu, YANG Li-hu, SONG Xian-fang (4344)
Analyzing the Pollution Sources and Mechanisms of Urban Rivers Based on Identifying the Molecular Signature of Dissolved Organic Matter	ZHU Yi, YE Jian-feng, SUN Xiao-nan, <i>et al.</i> (4353)
Occurrence and Fate of Steroid Hormones in Sewage Treatment Plants	LIU Yuan-yuan, FENG Hui, ZHANG Yun, <i>et al.</i> (4364)
Distribution, Source, and Ecological Risk Assessment of Persistent Organic Pollutants in Surface Sediments of Boao Coastal Waters	HAO Run-bo, FU Guo-wei, SONG Yan-wei, <i>et al.</i> (4374)
Content, Distribution, Source Analysis, and Risk Assessment of PAHs in Arable Soils of Taiyuan	WU Zhang-wei, DUAN Yong-hong, LIU Li-wen, <i>et al.</i> (4387)
Potential Ecological Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Soil-crop System in Xiong'an New District	GUO Zhi-juan, LIU Fei, ZHOU Ya-long, <i>et al.</i> (4397)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Soils in Yellow River Cultural Park Based on APCS-MLR and PMF Receptor Model	DUAN Hai-jing, MA Jia-yu, PENG Chao-yue, <i>et al.</i> (4406)
Pollution Characteristics, Source Analysis, and Risk Assessment of Heavy Metals in the Surrounding Farmlands of Manganese Mining Area	YU Gao, CHEN Fen, ZHANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (4416)
Translocation, Accumulation, and Comprehensive Risk Assessment of Heavy Metals in Soil-Crop Systems in an Old Industrial City, Shizuishan, Ningxia, Northwest China	WANG Ying, DONG Ai-jun, YANG Jian-feng, <i>et al.</i> (4429)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Tetracycline Antibiotics (TCs) in Soil-Vegetable System with Soil Fertilized with Animal Manure	DING Dan, HUANG Xiao-yi, GU Jing-yi, <i>et al.</i> (4440)
Accumulation Pathway of Cd, Pb, and Zn in Chinese Cabbage under the Condition of Exogenous Pollution Superposition in High Geological Background Area	JIAN Huai-liang, LIU Hong-yan, MEI Xue, <i>et al.</i> (4448)
Effects of Combined Pollution of Microplastics and Lead on Maize Seed Germination and Growth	MA Gui, LIAO Cai-yun, ZHOU Yue, <i>et al.</i> (4458)
Application of Fe ₃ O ₄ /Mulberry Stem Biochar Effects on Soil Arsenic Species and Rice Arsenic Content	RUAN Lin-qiao, LIANG Mei-na, DING Yan-mei, <i>et al.</i> (4468)
Remediation Effect and Mechanism of Biochar in Combination with Nitrogen Fertilizer on Cd-contaminated Paddy Soil	ZHANG Li, LI Ru-xia, HE Yu-lei, <i>et al.</i> (4479)
Effects of Combined Application of Different Nitrogen Fertilizers and Biochar on Cadmium Uptake by Pakchoi (<i>Brassica chinensis</i> L.) in Cadmium Contaminated Soil	LI Ping, NIE Hao, LANG Man, <i>et al.</i> (4489)
Effect of Coconut Fiber Biochar and Its Nitrate Modification on Pb Passivation in Paddy Soils	HOU Zheng-wei, LI Jian-hong, LI Cai-sheng, <i>et al.</i> (4497)
Effects of Biochar Application on Physicochemical Properties and Bacterial Communities of Microplastic-contaminated Calcareous Soil	RAN Tai-shan, LONG Jian, LIAO Hong-kai, <i>et al.</i> (4507)
Effects of Modified Biochar-Supported Zero-Valent Iron on the Removal of Trichloroethylene and Responses of Microbial Community in Soil	LU Hai-nan, LI Peng, GUO Lin, <i>et al.</i> (4519)
Effects of Modified Distiller's Lees Biochar on Nutrients and Enzyme Activities in Purple Soil	YOU Le-lin, XIE Yong-hong, WANG Zi-fang, <i>et al.</i> (4530)
Biochar or Straw Substituting Chemical Fertilizer Increase the Risk of Phosphorus Loss in Subsurface Runoff in Sloping Farmland	LAI Jia-xin, DENG Hua, ZHU Hao-yu, <i>et al.</i> (4541)
Carbon Loss During Preparation and Aging of Sludge Livestock Manure Biochars	ZHANG Ying, ZHANG Chang-hao, ZHANG Xiu-fang, <i>et al.</i> (4554)
Effect of Chemical Fertilizer and Manure Combined with Biochar on Denitrification Potential and Denitrifying Bacterial Community in Rhizosphere Soil	XIE Jun, WANG Zi-fang, WANG Ying-yan, <i>et al.</i> (4565)
Soil Bacterial Community Structure and Function Prediction of Millet/Peanut Intercropping Farmland in the Lower Yellow River	LIU Zhu, NAN Zhen-wu, LIN Song-ming, <i>et al.</i> (4575)
Effects of Microbial Fertilizer on Physicochemical Properties and Bacterial Communities of Saline Soil Under Brackish Water Irrigation	LIU Yue, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, <i>et al.</i> (4585)
Remediation of Petroleum-contaminated Soil by Highly Efficient Oil-degrading Bacteria and Analysis of Its Enhancement Mechanism	YAO Zhen-xian, WANG Li-ping, LI Dan, <i>et al.</i> (4599)
Impacts of Land Use Intensification Level on Fluvio-aquic Cropland Soil Microbial Community Abundance and Necromass Accumulation in North China	LI Sheng-jun, SHENG Mei-jun, LI Gang, <i>et al.</i> (4611)
Pathway and Policy for China's Provincial Carbon Emission Peak	MIAO An-kang, YUAN Yue, WU Han, <i>et al.</i> (4623)
Carbon Offsetting Mechanism of China Province Based on Carbon Reduction Cost	ZHONG Shi-yu, ZHANG Xiao-min, WU Jia, <i>et al.</i> (4637)
Analysis on Change in Soil Organic Carbon Content of Farmland in Yangtze River Economic Belt Under Different Fertilizing Measures	LIU Xin-yu, LU Jiang, MENG Xuan, <i>et al.</i> (4647)
Multi-scenario Land Use Optimization and Carbon Storage Assessment in Northwest China	CHEN Ning, XIN Cun-lin, TANG Dao-bin, <i>et al.</i> (4655)
Analysis and Simulation of the Spatiotemporal Evolution of Habitat Quality and Carbon Storage in the Weiwei Dry Plateau Region of Shaanxi	GU Zhen-wei, LIU Jing, CHEN Yi, <i>et al.</i> (4666)
Impact of Climate Warming on Paddy Soil Organic Carbon Change in the Sichuan Basin of China	LI Ai-wen, SONG Liang-ying, RAN Min, <i>et al.</i> (4679)
Stoichiometric Imbalance of Abandoned Grassland Under Precipitation Changes Regulate Soil Respiration	WANG Jia-yi, WANG Xing, WANG Yuan-zhuo, <i>et al.</i> (4689)
Effects of Water-salt Environment on Freshwater Wetland Soil C, N, and P Ecological Stoichiometric Characteristics in the Yellow River Estuary Wetland	QIN Ji-fa, ZHANG Jia-peng, SANG Luan, <i>et al.</i> (4698)
Spatial Distribution of Soil Heavy Metals and Regional Control Strategies in China at Province Level	SHI Hang-yuan, WANG Peng, ZHENG Jia-tong, <i>et al.</i> (4706)
Comprehensive Review on Environmental Biogeochemistry of Nonylphenol and Suggestions for the Management of Emerging Contaminants	HONG Ya-jun, FENG Cheng-lian, XU Da-yong, <i>et al.</i> (4717)
Research Progress on Distribution Characteristics and Formation Mechanisms of Microplastics in the Environment	ZHANG Long-fei, LIU Yu-huan, RUAN Rong-sheng, <i>et al.</i> (4728)
Review on the Long-term and Short-term Effects of Biochar Addition on Soil Greenhouse Gas Emissions	ZHOU Yong-chun, WU Liu-lin, LI Dan-ying, <i>et al.</i> (4742)
Iron-based Bimetallic Catalysts for Persulfate Activation to Remove Antibiotics in Water: A Review	WEI Jian, ZHANG Xin-yi, GUO Zhuang, <i>et al.</i> (4751)
Analysis of the Environmental Risk of Livestock Manure Pollution and Resource Treatment Technology	AN Jing, DING Zi-ming, GAO Cheng-cheng, <i>et al.</i> (4764)