

# 海南陵水潟湖典型持久性有机污染物的赋存、来源及生态风险

张银天<sup>1</sup>, 游俊杰<sup>1</sup>, 王维<sup>1</sup>, 支利文<sup>1</sup>, 李十盛<sup>1</sup>,  
李瑞婧<sup>2</sup>, 高会<sup>2</sup>, 张晓迪<sup>1</sup>, 那广水<sup>1</sup>

(1.海南热带海洋学院 崖州湾创新研究院/海南省近岸海洋生态环境与碳汇重点实验室/生态环境学院, 海南 三亚 572022; 2.国家海洋环境监测中心, 辽宁 大连 116023)

**摘要:** 潟湖是天然的养殖场, 具有保护海岸、防风避浪等生态功能, 但区域内人类活动产生的污染物可能会对环境产生健康威胁, 因此, 开展污染物赋存研究是维护潟湖生态平衡和保护渔业资源的重要举措。本研究运用高通量分析技术对海南陵水潟湖表层水中典型持久性有机污染物 (POPs) 赋存状况进行分析, 结合人类活动及潟湖环境特征探讨了表层水中多环芳烃 (PAHs)、有机氯农药 (OCPs) 和多氯联苯 (PCBs) 的来源及生态风险。结果显示, 陵水潟湖表层水体中  $\Sigma$ PAHs 浓度范围为 12.19~291.07 ng/L,  $\Sigma$ OCPs 浓度范围为 17.40~80.79 ng/L,  $\Sigma$ PCBs 浓度范围为 0.49~2.74 ng/L。  $\Sigma$ PAHs 和  $\Sigma$ OCPs 受人为活动干扰强烈, 浓度呈现沿岸高于潟湖内部的分布趋势。表层水体中 PAHs 以低环为主 (94%), 主要来源为燃烧源; OCPs 以六氯环己烷 (HCHs) 为主 (42%), 提示近期可能存在林丹的输入; PCBs 以二氯联苯 (37%) 为主, 可能来源于大气干湿沉降和非故意人为活动。风险熵结果显示, 调查区域存在一定的生态风险, PCB206 为主要生态风险单体。

**关键词:** 持久性有机污染物; 潟湖; 赋存特征; 来源解析; 生态风险

中图分类号: X131; X820.4

文献标识码: A

文章编号: 1007-6336(2024)04-0619-08

## Occurrence, sources and ecological risk of typical persistent organic pollutants in tropical coastal lagoons

ZHANG Yintian<sup>1</sup>, YOU Junjie<sup>1</sup>, WANG Wei<sup>1</sup>, ZHI Liwen<sup>1</sup>, LI Shisheng<sup>1</sup>,  
LI Ruijing<sup>2</sup>, GAO Hui<sup>2</sup>, ZHANG Xiaodi<sup>1</sup>, NA Guangshui<sup>1</sup>

(1.Yazhou Bay Innovation Institute/ Hainan Key Laboratory for Coastal Marine Eco-environment and Carbon Sink/College of Ecology and Environment Hainan Tropical Ocean University Sanya 572022, China; 2.National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China)

**Abstract:** The lagoon serves as a natural breeding ground with ecological functions such as coastal protection and storm shelter. However, pollutants generated by human activities in the region may pose health threats to the environment. Therefore, conducting a study on the presence of pollutants is a crucial measure to maintain

收稿日期: 2023-09-28, 修订日期: 2023-10-30

基金项目: 海南省科技计划 三亚崖州湾科技城科技创新联合项目 (2021CXLH0009); 海南省重点研发项目 (ZDYF2024SHFZ085); 国家自然科学基金项目 (42376234, 41976222); 崖州湾创新研究院重大科技计划项目 (2022CXYZD002); 海南热带海洋学院自然科学基金项目 (RHDR202201); 海南热带海洋学院崖州湾创新研究院课题组学生创新项目 (2022CXYXSCXXM04)

作者简介: 张银天 (1998-), 男, 河南汝州人, 硕士研究生, 研究方向为新污染物监测, E-mail: m15637500025@163.com

通信作者: 那广水 (1977-), 男, 辽宁大连人, 研究员, 研究方向为海洋和极地新兴生态环境问题研究, E-mail: nags@hntou.edu.cn

ecological balance in the lagoon and protect its fishery resources. The occurrence of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), organochlorine pesticides (OCPs), and polychlorinated biphenyls (PCBs) was analyzed by using high throughput analytical technique. The results show that the concentrations of  $\Sigma$ PAHs,  $\Sigma$ OCPs, and  $\Sigma$ PCBs are in the range of 12.19-291.07 ng/L, 17.40-80.79 ng/L and 0.49-2.74 ng/L in Lingshui Lagoon. Both  $\Sigma$ PAHs and  $\Sigma$ OCPs are significantly influenced by human activities, with higher concentrations observed in the coastal areas compared to the lagoon interior. In the surface water, PAHs are primarily dominated by low molecular weight compounds (94%). OCPs are predominantly composed of hexachlorocyclohexanes (HCHs) (42%), primarily derived from the input of lindane. PCBs are primarily composed of dichlorobiphenyls (37%), possibly originating from atmospheric deposition and unintentional human activities. The results of risk entropy analysis indicate that the surveyed area possesses a certain level of ecological risk, with PCB206 being the primary ecological risk component.

**Key words:** persistent organic pollutants; lagoon; occurrence characteristics; source analysis; ecological risk

持久性有机污染物(persistent organic pollutants, POPs)是指一类具有高毒性、在环境中难以降解、在生物体内易积累的有机化合物,典型的有多环芳烃(PAHs)、有机氯农药(OCPs)、多氯联苯(PCBs)。目前, POPs已在大气、水体和沉积物中普遍检出,但关于潟湖的调查研究亟待完善。潟湖具有防止海岸侵蚀、减轻风暴潮的生态功能,在港口航运、旅游资源、水产养殖等方面具有较大的开发利用价值。海南陵水潟湖位于海南省陵水黎族自治县,南北长约4 km,东西宽约6 km,面积约为22 km<sup>2</sup>,西侧存在唯一与外界进行水交换的门户,水体交换时间周期长,半交换时间为400~600 h<sup>[1]</sup>,自净能力较差。船舶航运、海上水产养殖活动产生的废水以及陆源废水的排放,使陵水潟湖水体遭受了一定程度的有机污染<sup>[2]</sup>。本研究以海南陵水潟湖为研究对象,探究了潟湖表层水体中3种 POPs的污染水平及浓度分布特征,结合环境地理特征、人类活动两个因素,分析其赋存特征的成因及主要来源,并对陵水潟湖有机污染物展开生态风险评估,以期提升人们对海南陵水潟湖有机污染物赋存状况及生态风险的认知。开展陵水潟湖 POPs 赋存调查对保护海南沿海生态系统及其生态多样性、实现可持续发展及人与自然和谐共存具有重要意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集

2020年12月,依据海南省陵水潟湖水文特

征选取18个点位(HN01~HN18)进行采样,并对点位进行功能性划分,如图1所示。使用聚丙烯桶采取水面下0.5 m处湖水20 L,采样当天将水样送回实验室进行前处理。

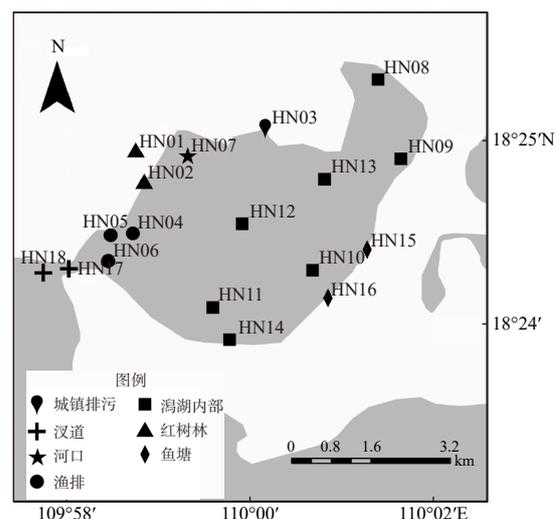


图1 海南陵水潟湖点位

Fig. 1 Sampling sites in Lingshui lagoon, Hainan

### 1.2 仪器试剂

采用气相色谱(Agilent7890)串联质谱(Agilent5975C)技术对目标物进行分析,色谱柱为DB-5MS毛细管柱(30 m × 0.25 mm × 0.25 μm, 美国安捷伦公司),质谱仪为负离子模式。

实验所需装置:大体积水样固相萃取装置(蠕动泵购自保定兰格恒流泵有限公司,萃取柱定制于中国蓝塔有限公司)、旋转蒸发仪(RV-10D-S096,上海力辰仪器科技有限公司)、超声萃取仪(JY96-11N,宁波新芝生物科技股份有限公司)

公司)。

实验所用试剂:正己烷、丙酮、甲醇购自Sigma公司,均为色谱纯级别。5种氘代PAHs(D<sub>8</sub>-Nap、D<sub>10</sub>-Ace、D<sub>10</sub>-Phe、D<sub>12</sub>-Chr和D<sub>12</sub>-Per)、3种PCBs替代标(<sup>13</sup>C-PCB28、<sup>13</sup>C-PCB111、<sup>13</sup>C-PCB178)以及OCPs替代标四氯间二甲苯均购自上海安谱实验科技股份有限公司。

### 1.3 样品前处理

运用大体积固相萃取装置对水样进行前处理。将目标物富集至装有XAD-2和XAD-4树脂填充材料的不锈钢固相萃取采样柱中,流速控制在200~600 mL/min,待水样全部过滤后将密封的不锈钢固相萃取采样柱的主体柱放入真空冷冻干燥机中干燥48 h,充分去除柱内水分,将其放在不锈钢空桶中。向采样柱空腔内加入目标替代物,平衡后加入50 mL正己烷/丙酮(1:1)混合溶剂并置于超声萃取仪中,进行原位超声萃取,设置功率为99%,时间为5 min,收集萃取液。再次加入45 mL正己烷/丙酮(1:1)混合溶剂重复萃取一次,合并两次萃取液,旋蒸浓缩至近干,用正己烷/丙酮(1:1)混合溶剂定容至1 mL,将定容后的样品置于4℃冰箱中保存。

### 1.4 质量保证与质量控制(QA/QC)

所有样品分析实行严格的质量保证和质量控制。通过实验室方法空白、基质加标确保实验的精确性。PAHs、OCPs和PCBs的方法检测限分别为0.4~600.0 pg/L、18.387~135.962 pg/L、1.93~892.4 pg/L,最终结果均经过回收率校正,满足质量控制要求。

### 1.5 生态风险评价方法

采用风险熵值(RQ)公式计算污染物的生态风险,若 $RQ < 0.1$ ,表示存在低等生态风险;若 $0.1 \leq RQ < 1$ ,表示存在中等生态风险;若 $RQ \geq 1$ ,表示存在高等生态风险,具体公式为:

$$RQ = \frac{MEC}{PNEC}$$

式中:MEC为污染物的环境观测浓度;PNEC为环境无效应浓度。

PNEC根据国家生态环境部《化学物质环境风险评估技术方法框架性指南(试行)》相关规定推导获得,具体为:

$$PNEC = \frac{LC_{50}}{AF}$$

式中:LC<sub>50</sub>为半数致死浓度;AF为评估系数。

半数致死浓度来源于美国环境保护署(EPA)开发的EPI Suit 4.1软件。考虑研究对象为野外样本,AF评估系数取1000。

## 2 结果与讨论

### 2.1 POPs 赋存现状

#### 2.1.1 PAHs

陵水潟湖18个点位划分为7个功能区,其PAHs浓度分布及组成特征如图2所示。水体中ΣPAHs的浓度范围为12.19~291.07 ng/L,中位值和平均值分别为62.08 ng/L和92.03 ng/L。由图2(a)可见,7个功能区ΣPAHs的平均浓度表现为:河口(227.57 ng/L)>渔排(171.02 ng/L)>排污口(145.96 ng/L)>汉道(97.40 ng/L)>鱼塘(66.53 ng/L)>红树林(55.78 ng/L)>潟湖内部(47.20 ng/L),其中,ΣPAHs浓度高值出现在渔排HN05点位(291.08 ng/L)和河口HN07点位(227.57 ng/L)。水产饲料是渔排养殖行业常见的消耗品,其生产环节极易发生PAHs沾污现象<sup>[3]</sup>,因此,HN05点位ΣPAHs浓度高值可能是渔排养殖过程中水产饲料投喂导致。污染物经雨水冲刷等物理作用转移至水体中,通过地表径流汇入河口,致使河口区域成为上流污染物的“汇”,导致HN07点位出现浓度高值。此外,汉道附近ΣPAHs浓度变化趋势明显,可能是冬季潟湖潮汐通道受波流与浪潮的影响,在汉道入口的东西两侧分别形成了顺时针和逆时针涡流,造成泥沙落淤<sup>[4]</sup>,经潮汐通道入海后,污染物被稀释,出现HN17点位ΣPAHs浓度高于HN18的现象。整体来看,潟湖东、西侧沿岸点位ΣPAHs浓度普遍高于潟湖内部点位,ΣPAHs浓度分布大致呈现湖岸向湖心逐步递减的态势。

根据PAHs的化学结构,将16种PAHs单体分为低环(2~3环)、中环(4环)和高环(5~6环)。从图2(b)可以看出,研究区水体中PAHs主要由低环组成,研究区各个点位低环PAHs占比为63%~98%,平均占比为88%,其次是高环,平均占比为11%。潟湖内部点位高环

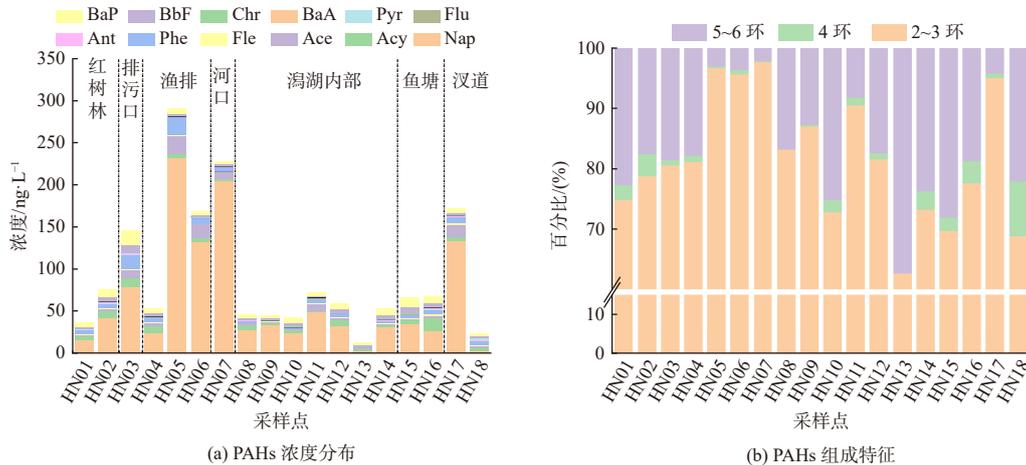


图2 瀉湖水体 PAHs 的浓度分布及组成特征

Fig. 2 Concentration distribution and composition characteristics of PAHs in lagoon water

PAHs 平均占比(20%)高于其他点位,可能是瀉湖内部船只航运较为频繁,渔船柴油发动机排放的高环 PAHs 导致<sup>[5]</sup>。

同内陆淡水湖相比,陵水瀉湖  $\Sigma$ PAHs 浓度均值(92.03 ng/L)低于国内 26 个内陆淡水湖(360 ng/L)<sup>[6]</sup>;同环境特征相似的区域相比,低于杭州湾河口(220 ng/L)<sup>[7]</sup>和上海人工滴水湖(139 ng/L)<sup>[8]</sup>,但高于威尼斯瀉湖(17.30 ng/L)<sup>[9]</sup>、厦门沿海(61.56 ng/L)<sup>[10]</sup>、贝宁共和国波多诺伏瀉湖(2.20 ng/L)<sup>[11]</sup>。综上所述,陵水瀉湖 PAHs 处于中、低污染水平。

### 2.1.2 OCPs

陵水瀉湖 OCPs 浓度分布及组成特征如图 3 所示,水体中  $\Sigma$ OCPs 浓度范围为 17.40 ~ 80.79 ng/L,中位值和平均值分别为 42.30 ng/L 和 39.29 ng/L。由图 3(a)可见,7 个功能区  $\Sigma$ OCPs 浓度表现为:排污口(75.88 ng/L) > 渔排(63.09 ng/L) > 河口(56.52 ng/L) > 鱼塘(46.83 ng/L) > 汉道(46.72 ng/L) > 红树林(40.31 ng/L) > 瀉湖内部(29.47 ng/L),OCPs 主要集中于瀉湖近岸区域,浓度高值出现在城镇排污口 HN03 点位和渔排 HN05 点位,与  $\Sigma$ PAHs 检测结果一致。

从图 3(b)可以看出,HCHs 是研究区域水体中 OCPs 的主要组成部分,水体中  $\Sigma$ HCHs( $\alpha$ -HCH、 $\beta$ -HCH、 $\gamma$ -HCH、 $\delta$ -HCH)平均占比为 42%,浓度范围为 7.48 ~ 39.26 ng/L,平均值为 18.13 ng/L,在 HN05 点位检测到了  $\Sigma$ HCHs 的浓度高值,与

瀉湖中  $\Sigma$ OCPs 浓度最高的点位一致。陵水瀉湖水体中 HCHs 各同分异构体的总浓度为: $\gamma$ -HCH >  $\beta$ -HCH >  $\delta$ -HCH >  $\alpha$ -HCH, $\gamma$ -HCH 持久性较强,其浓度远高于其他同分异构体,占  $\Sigma$ HCHs 的 50% 以上,且在所有点位均有检出。

$\Sigma$ DRINs(Aldrin、Dieldrin、Endrin)浓度范围为 2.38 ~ 30.26 ng/L,平均值为 9.24 ng/L,Aldrin 是瀉湖水体中 DRINs 的主要组分,在所有点位均被检出。 $\Sigma$ DRINs 浓度最高值出现在 HN03 点位,该点位位于排污口附近,通常是污染物汇集的重点区域。 $\Sigma$ DDTs( $p,p'$ -DDE、 $o,p'$ -DDD、 $p,p'$ -DDD、 $o,p'$ -DDT、 $p,p'$ -DDT、 $o,p'$ -DDE)检出浓度较小,浓度范围为 5.22 ~ 9.85 ng/L, $p,p'$ -DDT 为 DDTs 的优势组分。 $\Sigma$ DDTs 浓度高值出现在渔民生产活动频繁的 HN05 点位,与瀉湖中  $\Sigma$ OCPs 浓度最高的点位一致。

同国内外相似水体相比,陵水瀉湖  $\Sigma$ OCPs 浓度均值(41.61 ng/L)明显低于太湖<sup>[12]</sup>(134.91 ng/L)、黄浦江<sup>[13]</sup>(87.28 ~ 148.97 ng/L),略低于巢湖<sup>[14]</sup>(59.3 ng/L),但高于国外突尼斯瀉湖(0.42 ~ 14.92 ng/L)<sup>[15]</sup>。综上所述,陵水瀉湖 OCPs 处于中、低污染水平。

### 2.1.3 PCBs

陵水瀉湖 PCBs 浓度分布及组成特征如图 4 所示,水体中  $\Sigma$ PCBs 浓度范围为 0.49 ~ 2.74 ng/L,中位值和平均值分别为 1.22 ng/L 和 1.37 ng/L,由图 4(a)可见,7 个功能区  $\Sigma$ PCBs 浓度表现

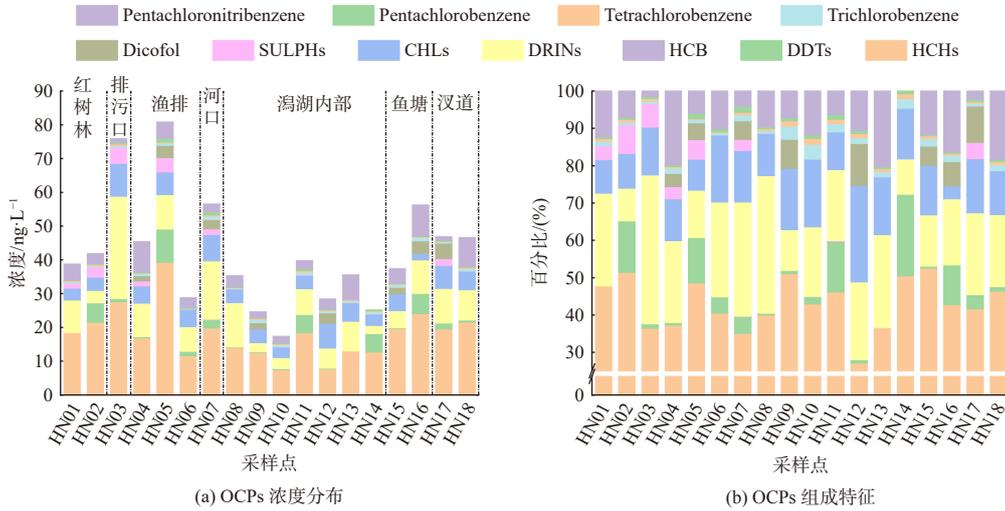


图 3 潟湖水体 OCPs 的浓度分布及组成特征

Fig. 3 Concentration distribution and composition characteristics of OCPs in lagoon water

为: 汉道 (2.44 ng/L) > 渔排 (1.50 ng/L) > 潟湖内部 (1.36 ng/L) > 鱼塘 (1.23 ng/L) > 排污口 (1.10 ng/L) > 红树林 (0.67 ng/L), 整体浓度较低。ΣPCBs 浓度高值出现在潟湖内部 HN12 点位和

汉道 HN17 点位, 其他点位无明显变化。PCBs 是变压器油、润滑剂等工业产品常用的一种添加剂, 因此 ΣPCBs 高值的出现极有可能是渔船行驶过程中相关动力原件油体泄漏导致。

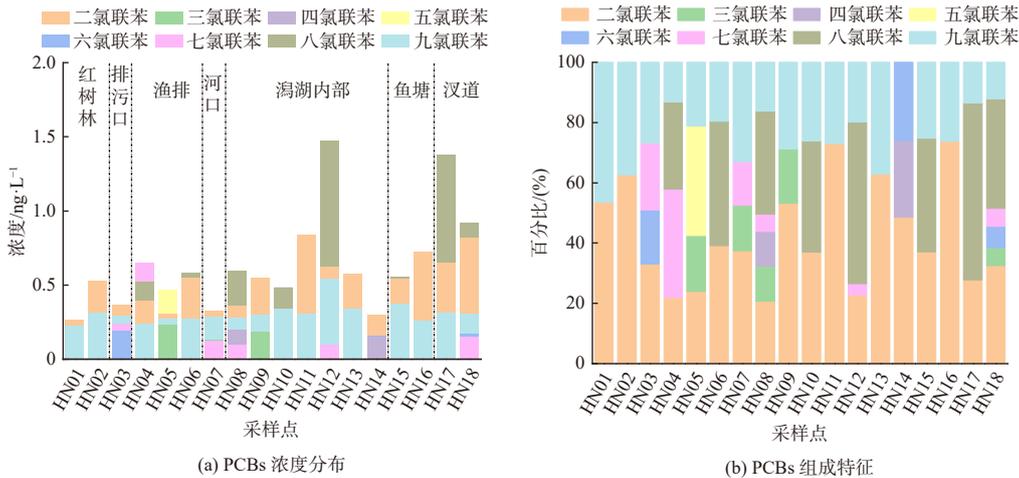


图 4 潟湖水体 PCBs 的浓度分布及组成特征

Fig. 4 Concentration distribution and composition characteristics of PCBs in lagoon water

由图 4(b) 可见, 水体中 PCBs 的主要组成部分为二氯联苯 (37%), 其次为八氯联苯 (26%) 和九氯联苯 (21%)。整体来看, PCBs 呈现高氯苯 (6~9 氯) 占比大于低氯苯 (2~5 氯) 的组成特征。

同国内外相似水体相比, 陵水潟湖 ΣPCBs 整体浓度偏低, 明显低于九龙江河口 (5.448 ng/L)<sup>[16]</sup> 和突尼斯潟湖 (3~10.04 ng/L)<sup>[15]</sup>, 略高于长江大通站 (0.15 ng/L)<sup>[17]</sup>。综上所述, 陵水潟湖 PCBs

处于低等污染水平。

## 2.2 POPs 来源解析

### 2.2.1 PAHs

使用美国环保署的 EPA 正矩阵分解 (PMF) 5.0 对研究区水体中 PAHs 的来源及其贡献率进行解析模拟。模型中输入的点位观测浓度按模型相关要求计算处理, 不确定度矩阵数值误差分数 (Error Fraction) 取 0.1。将 3 种未检出

PAHs 单体、2 种检出率低且  $S/N$  值小于 0.5 的单体物种分类设置为 Bad 进行模型迭代运转, 结果显示第 1 次运行最佳,  $Q_{(\text{Robust})}$  为 90.2, 各单体  $R^2$  为 0.40 ~ 0.99, 模拟结果具有一定的可信度。

各组分在因子贡献率中的占比如图 5 所示。因子 1 主要由 Ant(37.4%) 和 Chr(38.6%) 构成, Ant 和 Chr 是薪材燃烧的主要产物及煤炭燃烧的特征排放组分, 瀉湖沿岸存在多家蛋家餐馆及烧烤店, 其营业过程中使用大量煤炭与木材, 表明因子 1 属于薪材、煤炭燃烧的混合源。因子 2 中, Bbf(40.3%)、Bap(36.5%) 两种高环 PAHs 为主要载荷单体, Bbf 和 Bap 是汽油和柴油发动机排放的标志组分<sup>[5, 18]</sup>, 陵水瀉湖水产养殖行业繁荣, 船只在渔排与陆地间来往频繁, 由于高分子量 PAHs 远距离传输能力较弱, 故因子 2 指示交通排放源。因子 3 主要由 4 环 PAHs 构成, 其中, Flu(71.5%)、Pyr(65.6%) 和 Chr(61.4%) 是化石燃料、煤炭及天然气燃烧的主要产物<sup>[19-20]</sup>, 故因子 3 指示燃烧源。因子 4 主要由 Acy(69.8%)、FLe(53.0%) 和 Ant(41.2%) 构成, 贡献率占比较高的 Acy 和 FLe 是石油化工类物质泄漏的指示物<sup>[21]</sup>, 故因子 4 指示石油类挥发泄漏源。因子 5 主要由低环 PAHs 构成, 贡献率较高的单体有 Nap(71.7%)、Ace(81.7%) 和 Phe(45.6%), 其中 Nap 和 Ace 是生物质燃烧的主要产物<sup>[19]</sup>, 故因子 5 指示生物质燃烧源。

数据经归一化处理, 5 个因子的平均贡献率为: 生物质燃烧源(27%) ≥ 化石燃料燃烧源(27%) ≥ 石油类挥发泄漏源(22%) ≥ 薪材、煤炭燃烧混合源(13%) ≥ 本地交通源(11%)。由此可见, 瀉湖水体 PAHs 多为人为来源, 且与本地居民生活特性相关联, 薪材及生物质的燃烧情况指明燃烧源是该研究区 PAHs 的主要来源, 模型迭代结果与实际相符。

### 2.2.2 OCPs

利用特征比值法对环境中 HCHs 溯源,  $\alpha$ -HCH 与  $\gamma$ -HCH 的比值可确定是否存在林丹输入,  $\beta$ -HCH 与 ( $\alpha$ -HCH+ $\gamma$ -HCH) 的比值可估计 HCHs 在区域内的存在时间。由图 6(a)可见, 瀉湖水体中所有点位的  $\alpha$ -HCH/ $\gamma$ -HCH(红线)均小于 1, 范围为 0.001 ~ 0.058; 94% 的点位中的  $\beta$ -

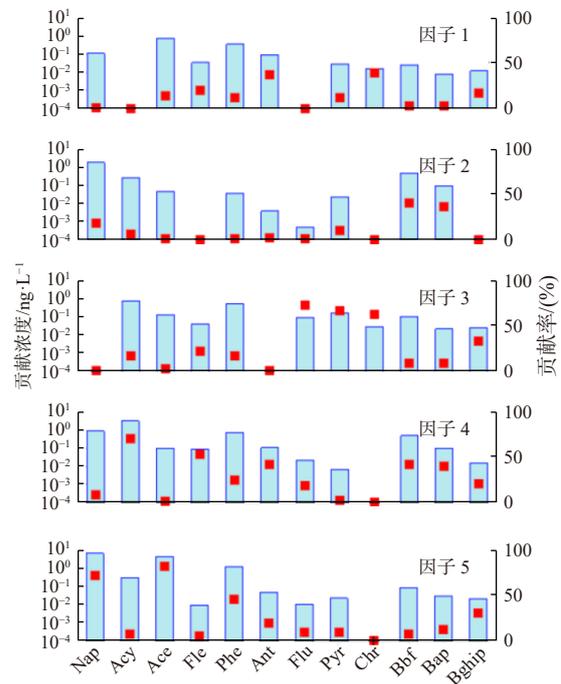


图 5 瀉湖水体 PAHs 的 PMF 源成分谱

Fig. 5 PMF source profile of PAHs in lagoon water

HCH/( $\alpha$ -HCH+ $\gamma$ -HCH)(蓝线)小于 0.5, 表明瀉湖中 HCHs 主要源于新的输入。综上所述, 瀉湖 HCHs 的来源可能是周边环境存在农业林丹的使用, 与目前太湖<sup>[12]</sup>中 HCHs 的来源较为相似。

$o,p'$ -DDT/ $p,p'$ -DDT 的特征比值和(DDE+DDD)/ $\Sigma$ DDTs 的特征比值可用于分析 DDTs 来源。由图 6(b)可见, 所有点位的  $o,p'$ -DDT/ $p,p'$ -DDT(橙线)均小于 0.2, 表明主要源于城镇工业 DDTs。水域内 94% 的点位(DDE+DDD)/ $\Sigma$ DDTs(蓝线)小于 0.5, 表明瀉湖水体 DDTs 可能存在新的输入。唯一异常值出现在渔排 HN05 点位, 此处(DDE+DDD)/ $\Sigma$ DDTs>0.5, 表明此处 DDTs 为历史遗留, 其成因与水产养殖之间的相关性仍需进一步的研究。

### 2.2.3 PCBs

研究区水体中 PCBs 主要组成单体为二氯联苯, 其次为八氯联苯和九氯联苯, 与常见的 PCBs 商品组成不同, 因此不存在 PCBs 商品污染。低氯 PCBs 的蒸汽压普遍高于高氯苯, 更容易通过大气沉降进入水体<sup>[22]</sup>。除此之外, PCBs 作为生产橡胶、油漆、船体阻燃剂的添加剂被广泛使用。陵水有天然橡胶生产保护区, 并设置多个天

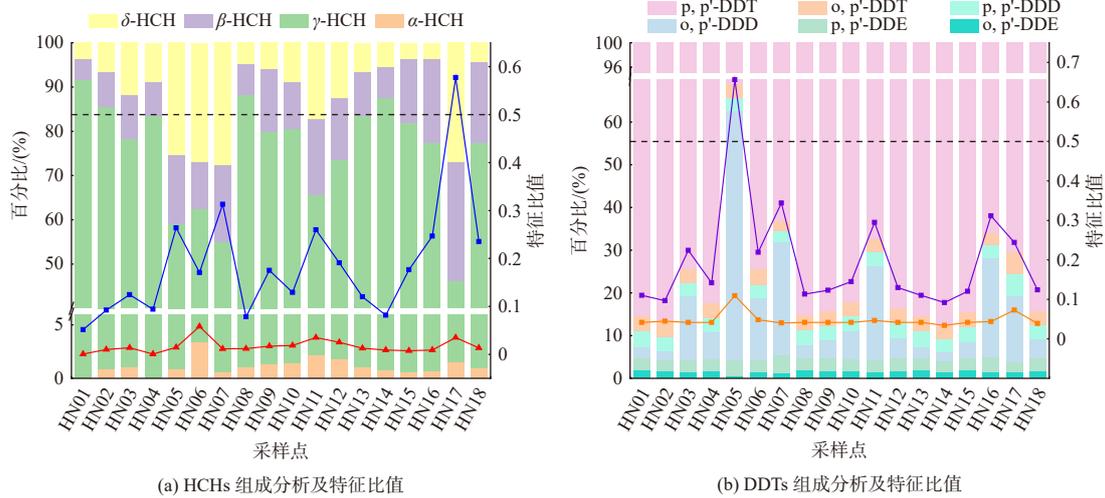


图 6 HCHs 和 DDTs 的组成分析及特征比值

Fig. 6 Composition analysis and characteristic ratios of HCHs and DDTs

然橡胶回收站, 橡胶回收过程是否会造成污染需要进一步的研究来确定。综上所述, 潟湖水体中低氯 PCBs 的来源可能为大气的干湿沉降, 高氯 PCBs 的来源可能为非故意人为活动, 如橡胶的加工生产以及渔船表面油漆或阻燃剂的腐蚀脱落。

### 2.3 生态风险评估

陵水潟湖水体中 PAHs、OCPs 和 PCBs 3 类污染物浓度均未超过《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)规定的浓度限值, 不会对周围环境造成危害和严重污染。

采用熵值法对陵水潟湖表层水体中有机污染物进行生态风险评估, 其结果如表 1 所示。结果表明, 在所有检测的污染物单体中, 3 种单体

出现  $RQ \geq 1$  的情况, 具有高等生态风险; 8 种单体出现  $0.1 \leq RQ < 1$  情况, 具有中等生态风险, 其余污染物单体  $RQ < 0.1$ , 具有潜在低等生态风险。其中 PCB206 在 94% 的点位都存在高等生态风险, 其对人体健康的风险需要开展进一步的研究, 在今后的环境监测工作中应加以关注。

### 3 结论

(1) 陵水潟湖表层水体中  $\Sigma$ PAHs 的浓度范围为 12.19 ~ 291.07 ng/L, 主要组分为低环 PAHs;  $\Sigma$ OCPs 浓度范围为 17.40 ~ 80.79 ng/L, 主要组分为 HCHs;  $\Sigma$ PCBs 浓度范围为 0.49 ~ 2.74 ng/L, 主要组分为二氯联苯。

(2) PAHs 和 OCPs 在渔排和排污口区域均出现了浓度高值, 且表现出潟湖沿岸大于内部的分布趋势, 其空间分布具有相似性。PCBs 浓度较低, 无明显的空间分布规律。

(3) 陵水潟湖中 PAHs 的主要来源为燃烧源, 包括生物质和化石原料的燃烧; OCPs 的主要来源可能是林丹的输入; PCBs 的主要来源可能是大气的干湿沉降、渔船外体油漆脱落以及橡胶生产活动。

(4) 人类活动影响了陵水潟湖水体中 POPs 的赋存, 海水养殖活动以及城镇排污是引起陵水潟湖水体 POPs 污染的主要原因。

(5) 陵水潟湖存在 POPs 污染, 但浓度均低

表 1 陵水潟湖水体有机污染物生态风险评价

Tab.1 Ecological risk of organic pollutants in in Lingshui lagoon

化合物	PNEC/ ng·L <sup>-1</sup>	比例(n=18)		
		RQ<0.1/(%)	0.1≤RQ<1/(%)	RQ≥1/(%)
BbF	42	66%	33%	0%
BaP	42	23%	67%	0%
Heptachlor	22	6%	94%	0%
Aldrin	3.4	0%	83%	17%
o,p'-DDE	14	78%	22%	0%
p,p'-DDE	87	94%	6%	0%
Methoxychlor	144	56%	44%	0%
PCB187	0.76	66%	33%	0%
PCB195	0.22	56%	0%	44%
PCB206	0.06	6%	0%	94%

于国家地表水环境质量标准,不会对环境及人体健康产生危害。PCB206为生态风险的重要单体,其在大多数点位均存在高等生态风险。总体上,表层水体中多数 POPs 具有低等生态风险,但部分单体存在中、高等生态风险,对陵水潟湖的生态系统存在健康威胁。

#### 参考文献:

- [1] 刘尚辰,孙昭晨,梁书秀.新村潟湖水体交换能力数值模拟研究[J].水道港口,2020,41(3):257-266.
- [2] 梁泰尔,万莉,薛东梁,等.海南陵水新村港海水增殖区环境质量状况综合评价[J].渔业研究,2022,44(4):336-344.
- [3] 石九四,陈浩铭,王壬,等.多环芳烃对鱼类生理危害的研究进展[J].饲料研究,2023,46(13):166-170.
- [4] 龚文平,汪亚平,王道儒,等.海南新村港潮汐道波流联合作用下的动力特征及其沉积动力学意义[J].海洋学研究,2008,26(2):1-12.
- [5] ILIĆ P, NIŠIĆ T, FAROOQI Z U R. Polycyclic aromatic hydrocarbons contamination of soil in an industrial zone and evaluation of pollution sources[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2021, 30(1): 155-162.
- [6] 陶玉强,赵睿涵.持久性有机污染物在中国湖库水体中的污染现状及分布特征[J].湖泊科学,2020,32(2):309-324.
- [7] WU Y Y, ZHANG Z M, HUANG W, et al. Environmental profile, potential sources, and ecological risk of polycyclic aromatic hydrocarbons in a typical coastal bay and outer bay area[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(31): 77757-77770.
- [8] 韩任琳云,饶若宸,董奕岑,等.滴水湖水系表层水体、沉积物和生物体内多环芳烃的污染特征及风险评价[J].生态毒理学报,2020,15(2):240-251.
- [9] MANODORI L, GAMBARO A, PIAZZA R, et al. PCBs and PAHs in sea-surface microlayer and sub-surface water samples of the Venice Lagoon (Italy)[J]. Marine Pollution Bulletin, 2006, 52(2): 184-192.
- [10] TANG G W, LIU M Y, ZHOU Q, et al. Microplastics and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Xiamen coastal areas: Implications for anthropogenic impacts[J]. Science of the Total Environment, 2018, 634: 811-820.
- [11] ZONKPOEDJRE S, ZONKPOEDJRE S, EZEORAH C, et al. Sources, pollution, and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Porto-Novo Lagoon, Benin Republic[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2023, 45(3): 825-841.
- [12] 尹晓静,李星豪,朱道旭,等.太湖西北流域水体有机氯及有机磷农药的残留特征、时空分布及生态风险评价[J].环境科学学报,2023:1-16,doi:10.13671/j.hjkxxb.2023.0184.
- [13] 夏凡,胡雄星,韩中豪,等.黄浦江表层水体中有机氯农药的分布特征[J].环境科学研究,2006,19(2):11-15.
- [14] 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价[J].环境化学,2016,35(6):1228-1236.
- [15] NECIBI M, MZOUGHU N, YAHIA M N D, et al. Distributions of organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyl in surface water from Bizerte Lagoon, Tunisia[J]. Desalination and Water Treatment, 2015, 56(10): 2663-2671.
- [16] 窦志远.九龙江河口最大浑浊带中有机氯农药与多氯联苯的环境行为及影响因素研究[D].厦门:厦门大学,2020.
- [17] 林明兰,林田,徐良,等.长江水体多氯联苯和有机氯农药污染特征与通量研究[J].环境科学研究,2022,35(9):2100-2109.
- [18] 向鑫鑫.沈抚新区地下水和土壤剖面层中多环芳烃的迁移、来源和生态健康风险评价[D].北京:北京交通大学,2020.
- [19] 彭珂醒,李瑞飞,周亦辰,等.地表水悬浮态多环芳烃时空变化特征及主要输入源响应机制[J].环境科学,2022,43(7):3645-3655.
- [20] 吴杰.上海市郊道路径流多环芳烃污染特征对比、来源解析及生态风险评价[D].上海:华东理工大学,2019.
- [21] QIAO X C, ZHENG B H, LI X, et al. Influencing factors and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in groundwater in China[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 402: 123419.
- [22] MEN B, HE M C, TAN L, et al. Distributions of polychlorinated biphenyls in the Daliao River estuary of Liaodong Bay, Bohai Sea (China)[J]. Marine Pollution Bulletin, 2014, 78(1/2): 77-84.

(本文编辑:胡莹莹)