

滨海小流域表层沉积物多环芳烃 污染特征及风险评估

——以厦门市后溪流域为例

刘启明¹, 余世龙¹, 林锦美¹, 刘欣妍¹, 焦玉佩^{1,2}, 林明华³

(1.集美大学港口与海岸工程学院, 福建厦门361021;

2.中国科学院城市环境研究所, 福建厦门361021; 3.厦门市生态环境局, 福建厦门361000)

摘要: [目的] 揭示滨海城市小流域多环芳烃(PAHs)的污染特征及生态风险, 为滨海城市小流域污染溯源及生态风险管理提供科学依据。[方法] 选取厦门后溪流域为研究对象, 系统采集了18个点位的表层(0—5 cm)沉积物样品, 采用气相色谱-质谱联用技术(GC-MS)对16种PAHs进行定量分析。[结果] 研究区域16种PAHs的总含量为115.02~807.27 ng/g(均值371.33 ng/g)。组分以4环和5环芳烃所占比例最大, 均超过25%; 2环芳烃比例最小, 小于4%; 3环和6环芳烃比例居中, 约为20%。空间分布呈现上中下游3个显著梯度特征, 上游(A区)含量最低(86.23~153.61 ng/g), 中游(B区)次之(298.23~456.71 ng/g), 下游(C区)最高(435.24~656.11 ng/g), 表明人类活动强度越大, PAHs污染程度也越高。基于沉积物质量基准法(SQGs)的生态风险评估显示, 大部分的采样点位风险值介于最低级的罕见效应(REL)和次低级的临界效应(TEL)之间, 少部分点位达到中级的偶然效应阈值(OEL), 未出现较高级的可能效应(PEL)和最高级的频繁效应(FEL)风险等级。[结论] 后溪流域PAHs整体生态风险处于可控范围, 但不同点位和不同类型多环芳烃的生态风险存在一定差异, 需引起相关部门的关注。

关键词: 多环芳烃; 污染特征; 风险评估; 厦门市后溪小流域

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)05-0211-07

中图分类号: X820

文献参数: 刘启明, 余世龙, 林锦美, 等. 滨海小流域表层沉积物多环芳烃污染特征及风险评估[J]. 水土保持通报, 2025, 45(5): 211-217. Liu Qiming, Yu Shilong, Lin Jinmei, et al. Pollution characteristics and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments of coastal small watersheds [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(5): 211-217. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.05.010; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.05.010.

Pollution characteristics and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments of coastal small watersheds

—A case study at Houxi River watershed in Xiamen City

Liu Qiming¹, Yu Shilong¹, Lin Jinmei¹, Liu Xinyan¹, Jiao Yupei^{1,2}, Lin Minghua³

(1.College of Harbour and Coastal Engineering, Jimei University, Xiamen,

Fujian 361021, China; 2.Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences,

Xiamen, Fujian 361021 China; 3.Xiamen Ecological Environment Bureau, Xiamen, Fujian 361000, China)

Abstract: [Objective] The pollution characteristics and ecological risks of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in small coastal urban watersheds were explored, to provide a scientific basis for pollution source tracing and ecological risk management in such regions. [Methods] Houxi River watershed in Xiamen City was selected as the study area. Surface sediment samples (0—5 cm) were systematically collected from 18 sites and quantitatively analyzed for 16 PAHs using gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). [Results] The results showed that the total content of 16 PAHs in the surface sediments of Houxi River watershed in Xiamen ranged from 115.02 to 807.27 ng/g, with an average of 371.33 ng/g. Among them, 4-ring and 5-ring PAHs had

收稿日期: 2025-03-18

修回日期: 2025-06-03

采用日期: 2025-06-04

资助项目: 国家自然科学基金项目“珠江口溶解有机碳的生物降解、光化学降解及其耦合作用研究”(41576085); 福建省自然科学基金项目(2023J01794)

第一作者: 刘启明(1973—), 男(汉族), 江西省瑞金市人, 博士, 教授, 主要从事区域生态环境研究。Email: liuqm@jmu.edu.cn。

the largest proportions, both exceeding 25%. 2-ring PAHs had the smallest proportion, less than 4%. 3-ring and 6-ring PAHs were in the middle, around 20%. The spatial distribution showed a clear gradient among the upper, middle, and lower reaches: the upstream (A) had the lowest concentration (86.23—153.61 ng/g), the middle reaches (B) were intermediate (298.23—456.71 ng/g), and the downstream (C) had the highest concentration (435.24—656.11 ng/g), indicating that the PAH pollution increased with the intensity of human activities. Based on the Sediment Quality Guidelines (SQGs), the ecological risk assessment showed that most sampling sites fell between the lowest-level rare effect level (REL) and the second-lowest-level threshold effect level (TEL), and a few sampling sites reached the medium-level occasional effect level (OEL). None of the sampling sites reached the higher-level probable effect level (PEL) and the highest-level frequent effect level (FEL). [Conclusion] The overall ecological risk of PAHs in the surface sediments of Houxi River watershed in Xiamen City is within a controllable range. However, variations in ecological risks across different sampling sites and PAH compounds should be given attention by relevant authorities.

Keywords: polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs); pollution characteristics; risk assessment; Houxi River watershed in Xiamen City

多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)是指含有2个及以上苯环的芳香烃类化合物,其环境行为和生态风险已成为全球环境科学领域的重要研究议题。这类化合物主要来源于化石燃料不完全燃烧、工业排放及石油泄漏等人类活动^[1-2],具有显著的“三致”效应(致癌、致畸、致突变)和生物累积性^[3-4]。在环境介质中,PAHs因其高疏水亲脂特性,导致其在水体中的赋存形态呈现显著相分配特征——约90%以上的PAHs会通过吸附作用富集于悬浮颗粒物和沉积物中^[5-8],这种特殊的赋存特性使其在沉积物-水界面形成持久污染源,对底栖生物构成持续生态威胁。

流域作为陆地生态系统的基本水文单元,其“源-汇”特征使其成为研究污染物环境行为的理想场所。特别是滨海流域系统,因其独特的水文地理特征(如短促径流过程、陆海交互作用)和强烈的人类活动干扰(工农业污染、城市化进程),往往成为污染物环境效应研究的敏感区域^[9-11]。中国东南滨海丘陵区因其特殊的地形地貌特征(平均坡度 $>15^\circ$ 、河网密度 $>0.5\text{ km/km}^2$),导致污染物在流域内的迁移转化过程呈现显著的空间异质性和快速响应特征。然而,现有研究多聚焦于宏观的大型河流系统或单一环境介质^[12-16]。针对相对微观的滨海小流域多介质界面的PAHs迁移转化机制,及其复合污染效应,仍缺乏系统认知。

厦门后溪流域作为典型滨海复合生态系统,集山地森林、农业灌区、工业园区和红树林湿地等多重环境要素于一体,为研究高强度人类活动下PAHs的“源-过程-汇”耦合机制提供了独特的研究场景^[17]。本研究通过系统解析该流域表层沉积物中16种

PAHs的空间分布特征与组成谱系,并采用沉积物质量基准法(SQGs)做风险评估。研究成果不仅可为滨海小流域污染防控提供理论依据,也可为陆海统筹环境管理策略的制定提供数据支撑,对完善海岸带污染物迁移转化理论体系具有重要科学价值。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

后溪小流域位于福建省厦门市集美区,属南亚热带海洋性气候,年平均气温 21°C ,年平均降雨量 $1\ 100\text{ mm}$ 。干流全长约 29 km ,发源于福建戴云山山脉与博平岭山脉交界处,是厦门市第二大河流。流域内山地丘陵多,平原少,流域面积为 205 km^2 。本文将后溪流域分别以坂头水库大坝和支流许溪汇入口为界,划分为上游(A)、中游(B)和下游(C)共3段。上游为水库区,以山地为主,自然植被保护较好。中游属城乡接合地带,工农业各类经济社会活动较为频繁。下游为后溪镇核心区,基本已城市化。具体采样点位如图1所示。

1.2 研究方法及数据处理

1.2.1 样品采集

于2023年5月开展现场采样。依据《地表水环境质量监测技术规范(HJ 91.2—2022)》,使用不锈钢底泥采样器采集 $0\text{—}5\text{ cm}$ 表层沉积物样品,放置于铝箔采样袋中密封冷藏,并尽快转移至 -20°C 冷藏保存。现场采用多参数水质分析仪(Hach HL4)同步测定采样点位的其他相关数据。共采集18个点位样品,其中上游(A)4个、中游(B)8个、下游(C)6个点位。

1.2.2 样品前处理和分析方法

沉积物样品经冷冻干燥后研磨过 0.28 mm 筛,将

1 g 沉积物样品放入干净的离心管中,然后加入 5 ml 的 1:1 的丙酮/正己烷和 0.1 ml (10 mg/L) 的替代标准混合溶液。按照相同步骤制备空白样品。通过向 1:1 的丙酮/正己烷中加入标准物质制备标准混合物。所有样品涡旋 1 min。然后,将混合物超声 15 min 以提取 PAHs。最后将离心管在 2 000 r/min 转速下离心 10 min。用巴斯德吸管吸出含有衍生化合物的有机层,并用 5 ml 的 1:1 的丙酮/正己烷对沉积物进行两次重新提取。将提取物合并。向提取物中加入活性铜进行脱硫。提取物用无水硫酸钠干燥,用氮气缓慢气流浓缩至 1.0 ml,加入 0.1 ml (5 mg/L) 的内标混合溶液。

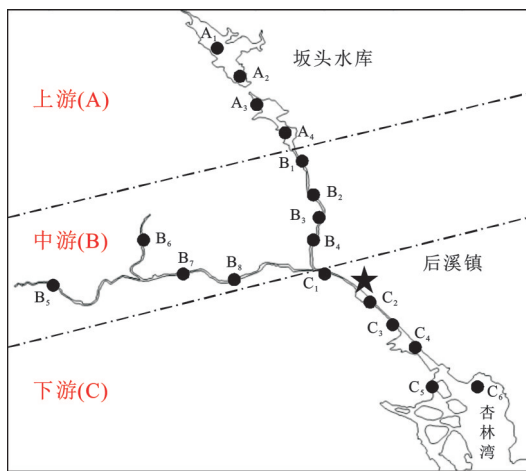


图1 后溪小流域采样点位示意图

Fig.1 Diagram of sampling sites at Houxi River watershed

PAHs 测试使用安捷伦气相色谱仪 (Agilent 6890N, USA)。样品以不分流模式进样,进样温度为 280 °C。柱温最初在 35 °C 保持 2 min,以 5 °C/min 的速率升至 140 °C,然后以 10 °C/min 的速率升至 300 °C,并在此温度下保持 15 min。检测器温度保持在 280 °C。使用氦气作为载气,恒定流速为 1 ml/min。使用电子电离 (EI) 和选择离子监测 (SIM) 模式采集质谱。通过标准 PAH 样品中各化合物的保留时间和定量确认离子的丰度来确认样品中 PAH 类型。基于各化合物的五点校准曲线,使用与相应内标相关的响应因子对 16 种 PAH 组分进行定量。在本研究中,PAHs 的浓度以干重 (ng/g) 表示。

1.2.3 质量控制

在分析过程中采用空白试验、加标回收和平行样品等方法控制测定质量。本研究中所有样品采用 3 个平行样品进行检测,空白试验中未检测出目标物质。标准曲线线性相关性 $R > 0.999$,平行样的相对偏差在 3.9%~11.6%,PAHs 的回收率为 82.3%~126.8%。

1.2.4 数据处理

本试验结果采用统计软件 Excel 2020 和 SPSS 25.0 进行数据处理。

2 结果与讨论

2.1 PAHs 含量特征

厦门后溪沉积物中,美国环境保护署优控的 16 种 PAHs 均被检出。PAHs 含量特征值数据详见表 1。由表 1 可知,厦门后溪表层沉积物 16 种 PAHs 的总含量变化范围为 115.02~807.27 ng/g,平均值为 371.33 ng/g,变异系数为 0.36。表明研究区域 PAHs 污染具有中等程度的空间异质性。研究发现,后溪沉积物 PAHs 含量显著低于厦门滨海区域历史研究数据。前人研究显示厦门滨海区域表层沉积物 $\Sigma 16$ PAHs 范围为 105.3~54 000 ng/g^[18-22],特别是滨海港口区域(如厦门西港)曾检测到异常高值 ($> 5 000$ ng/g)^[21],主要与历史船舶油类泄漏事件有关。本研究区域 PAHs 含量处于相对较低水平,与厦门市生态环境局发布的近 10 a (2013—2023 年)《厦门市生态环境质量公报》数据趋势一致,即厦门海域海水水质从 III—IV 类提升至 II—III 类,后溪流域地表水水质从 IV 类提升至 III 类。这种改善可能与厦门市近 10 a 来实施的“厦门港区油污防治专项(2015—2020 年)”和“九龙江-厦门湾污染物总量控制计划(2017—2020 年)”等环境政策直接相关。

2.2 PAHs 空间分布特征

空间分布特征分析显示(图 2),后溪流域上中下游 PAHs 污染呈现显著的纵向梯度差异 ($p < 0.05$)。上游坂头水库库区 (A_1 — A_4) $\Sigma 16$ PAHs 最低 (86.23~153.61 ng/g),与库区作为饮用水源保护地,严格限制工业活动密切相关。中游城乡接合带 (B_1 — B_8) 含量升至 298.23~456.71 ng/g,可能源于农业面源污染(如农药施用、秸秆焚烧等)。下游城镇区 (C_1 — C_6) 出现峰值 435.24~656.11 ng/g,特别是 C_1 点位的异常高值 (656.11 ng/g),可能是因为该点位正好位于交通与商业枢纽处,与该点位密集的交通流量和餐饮业油烟排放有关。整体而言,PAHs 值与区域生态环境状况直接相关。

研究区域各点位不同 PAH 组成比例如图 3 所示。16 种 PAHs 中, Pyr, Bap 和 Inp 的比例最大,均超过 9%,分别为 9.32%, 9.51% 和 10.47%。Ace 和 Acy 的比例最小,均低于 2%,分别为 1.42% 和 0.72%。其余 11 种 PAH 的比例居中,均在 3%~9% 中间。组分比例分析(图 3)揭示空间分异特征,如 Nap 在 B_6 仅占 0.59%,而在 B_3 点位占 5.40%; Ant 在 A_3 仅占 2.86%,

而在 C₁ 点位占 17.23%。这可能与燃烧源贡献率沿程变化,以及不同河段历史采砂活动导致的石油类污染

物释放有关。也表明不同站点的不同介质环境,对不同类型 PAH 的赋存与分布有一定程度的影响。

表 1 后流域表层沉积物 PAHs 含量特征值

组分	最小值	最大值	平均值	标准偏差	变异系数	回收率/%
萘(Nap)	1.89	23.65	12.62	3.13	0.31	85.3
芘(Ace)	0.98	6.64	3.87	0.85	0.29	78.5
芘烯(Acy)	0.33	4.13	2.75	0.87	0.22	91.0
芘(Flo)	2.10	17.42	13.40	3.24	0.57	88.6
菲(Phe)	9.84	124.21	32.86	9.80	0.33	68.9
蒽(Ant)	11.26	61.98	29.59	8.46	0.29	74.3
荧蒽(Fla)	8.19	35.78	28.04	9.32	0.52	102.4
芘(Pyr)	13.25	78.54	34.61	10.19	0.42	85.1
苯并(a)蒽(BaA)	5.56	35.24	20.23	5.42	0.13	77.3
蒽(Chr)	9.69	32.10	18.92	5.23	0.59	83.6
苯并(b)荧蒽(BbF)	12.24	67.55	26.41	8.71	0.62	92.1
苯并(k)荧蒽(BkF)	8.73	51.27	30.07	9.88	0.18	80.7
苯并(a)芘(BaP)	10.71	84.51	35.27	11.23	0.26	88.5
二苯并(a, h)蒽(DbA)	2.56	32.14	11.33	2.86	0.34	79.8
茚并(1,2,3-cd)芘(InP)	11.24	49.76	38.90	10.32	0.46	94.5
苯并(g, h, i)芘(BghiP)	6.45	102.35	32.46	9.84	0.27	70.3
2环	1.89	23.65	12.62	3.13	0.31	—
3环	24.51	214.38	82.47	5.86	0.33	—
4环	36.69	181.66	101.80	6.02	0.42	—
5环	34.24	235.47	103.08	8.17	0.35	—
6环	17.69	152.11	71.36	10.08	0.36	—
ΣPAHs	115.02	807.27	371.33	126.37	0.36	—

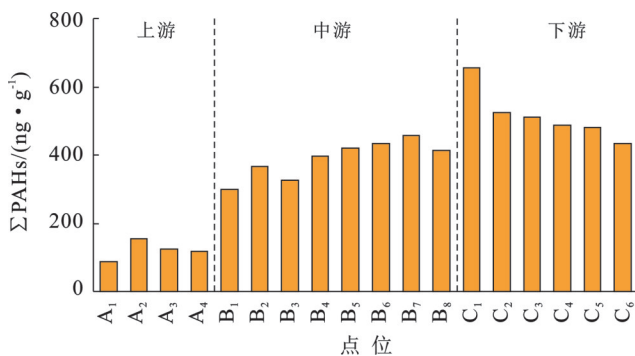


图 2 后流域各站点 PAHs 平均含量

Fig.2 Average PAHs concentrations at each site at Houxi River watershed

2.3 PAHs 来源分析

PAHs 组成按照其环数分为 5 组: 2 环(Nap), 3 环(Ace, Acy, Flo, Phe, Ant), 4 环(Fla, Pyr, BaA, Chr), 5 环(BbF, BkF, BaP, DbA), 6 环(InP, BghiP)。PAHs 组成中的 2 环(Nap)和 3 环(Ace, Acy, Flo, Phe, Ant)为低分子量多环芳烃,通常指示石油泄漏源。4 环(Fla, Pyr, BaA, Chr), 5 环(BbF, BkF, BaP, DbA)和 6 环(InP, BghiP)为高分子量多环芳烃,通常指示燃烧源^[23-24]。如图 4 所示,

本研究区域的 PAHs, 4 环和 5 环比例最大,均超过 25%, 2 环比例最小,不足 4%。3 环和 6 环比例居中,为 20% 左右。对比不同区域不同采样点 PAHs 中不同环数的组成比例。上中下游变化趋势没有显著差异。说明本研究区域 PAHs 污染源具有同源性。

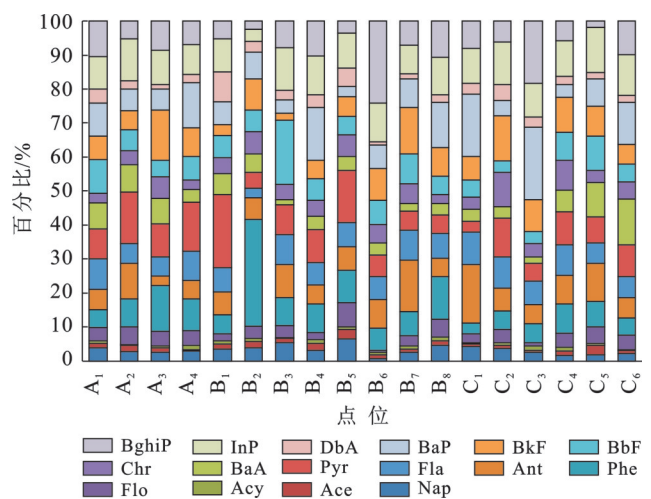


图 3 后流域各站点 PAHs 组成比例

Fig.3 Composition percentages of PAHs at each site of Houxi River watershed

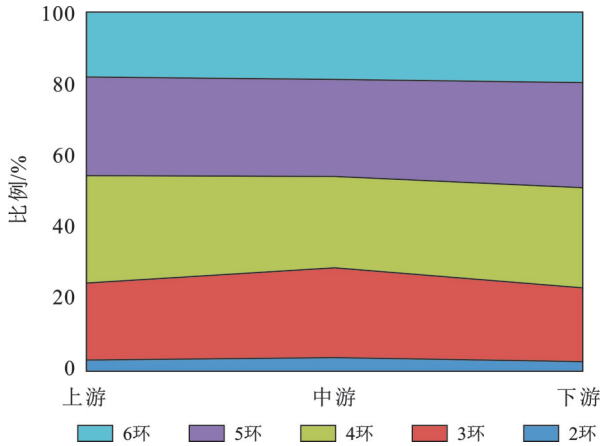


图 4 后溪流域各点位不同环数 PAHs 组成比例
Fig.4 Composition percentages of PAHs with different ring numbers at each site of Houxi River watershed

2.4 PAHs 风险评估

本研究采用沉积物质量基准法 (sediment quality guideline, SQGs) 来评价沉积物的生态风险^[25-26]。本方法对各 PAHs 划分为 5 个阈值: REL (rare effect level, 罕见效应), TEL (threshold effect level, 临界效应), OEL (occasional effect level, 偶然效应), PEL (probable effect level, 可能效应) 和 FEL (frequent effect level, 频繁效应)。对应数据详见表 2 所示。

BbF, BkF, InP 和 BghiP 等高分子量 PAHs 组分, 只要进入自然环境中, 就会产生生物毒害作用, 因此不设阈值范围。

各点位 PAHs 生态风险评估结果如图 5 所示。大部分介于最低级的罕见效应 (REL) 和次低级的临界效应 (TEL) 之间, 少部分为中级的偶然效应 (OEL)。所有站点均未达到较高级的可能效应 (PEL) 和最高级的频繁效应 (FEL) 的阈值范围。说明后溪流域表层沉积物 PAHs 整体生态风险较低。其中, 上游段 (A) 各点位 PAHs 生态风险均在最低级风险的 REL 阈值范围内, 反映了该区域作为库区, 保持了较好的生态环境。中游段 (B) 各点位 PAHs 生态风险为最低级 (REL) 和次低级 (TEL) 的比例占 94%, 处于较低生态风险范围。下游段 (C) 各点位 PAHs 生态风险达到偶然效应 (OEL) 阈值范围的比例占 15%。下游段作为城镇区域, 各种生产生活活动频繁, 说明已经具备一定程度的偶然效应风险, 需要警惕。

表 2 沉积物质量基准评估法 PAHs 阈值数据

Table 2 PAHs threshold values based on sediment quality guidelines (SQGs)

单位: ng/g

阈值	组分											
	Nap	Ace	Acy	Flo	Phe	Ant	Fla	Pyr	BaA	Chr	BaP	DbA
REL	17	3.7	3.3	10	25	16	47	29	14	26	11	3.3
TEL	35	6.7	5.9	21	42	47	110	53	32	57	32	6.2
OEL	120	21	3	61	130	110	450	230	120	240	150	43
PEL	390	89	130	140	520	240	2 400	880	390	860	780	140
FEL	1 200	940	340	1 200	1 100	1 100	4 900	1 500	760	1 600	3 200	200

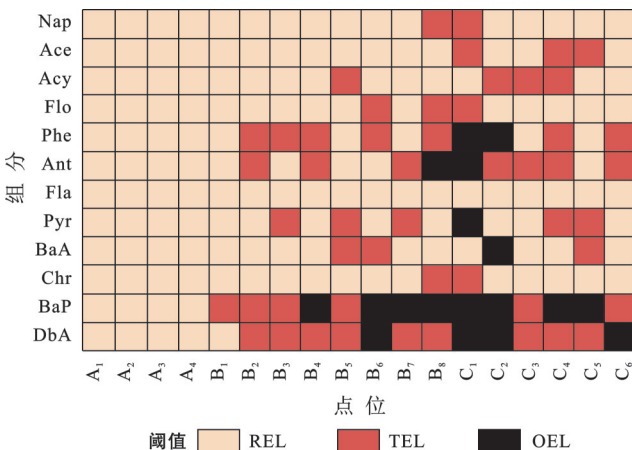


图 5 后溪流域各点位 PAHs 生态风险评估

Fig.5 Ecological risk assessment of PAHs at each site of Houxi River watershed

本研究中, 不同类型的 PAHs 生态风险级别也存在一定差异。其中, 所有点位的 Fla 均在最低级风险

的 REL 阈值范围内, 生态风险最低。Bap 在各点位中达到偶然效应 (OEL) 阈值范围的比例最大, 达 44.4%, 需要重点关注。

3 结论

(1) 厦门后溪流域表层沉积物中 16 种 PAHs 的总含量变化范围为 115.02~807.27 ng/g, 平均值为 371.33 ng/g, 呈现显著的空间分异特征。分子组成特征显示, 4 环和 5 环比例最大, 2 环比例最小, 3 环和 6 环比例居中。空间分布上, 自上游至下游呈现显著递增趋势, 其中上游 (A) PAHs 含量最低 (86.23~153.61 ng/g), 中游 (B) 次之 (298.23~456.71 ng/g), 下游 (C) 达到峰值 (435.24~656.11 ng/g)。与历史数据对比, 本区域 PAHs 含量较厦门滨海环境前期研究明显偏低, 这一分布特征与厦门滨海区域近年来环境质量的持续改善具有显著关联性。

(2) 基于沉积物质量基准法(SQGs)的生态风险评估表明,研究区域整体处于低风险水平。各点位生态风险评估结果大部分介于最低级的罕见效应(REL)和次低级的临界效应(TEL)之间,少部分为中级的偶然效应(OEL)。所有站点均未达到较高级的可能效应(PEL)和最高级的频繁效应(FEL)的阈值范围。但是不同点位和不同类型多环芳烃的生态风险存在一定差异,需要引起关注。建议后续重点关注下游区域特定污染物的迁移转化特征,以完善流域环境风险管理体系。

参考文献(References)

- [1] Tarigholizadeh S, Sushkova S, Rajput V D, et al. Transfer and degradation of PAHs in the soil-plant system: A review [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2024,72(1):46-64.
- [2] Teixeira J, Bessa M J, Delerue-Matos C, et al. Firefighters' personal exposure to gaseous PAHs during controlled forest fires: A case study with estimation of respiratory health risks and in vitro toxicity [J]. *Science of The Total Environment*, 2024,908:168364.
- [3] Hasan G M M A, Rinky F, Ahmed K S, et al. Assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and heavy metal contamination in Shitalakshya River water: Ecological and health risk implications [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2025,197(3):282.
- [4] Samarajeewa U. Polycyclic aromatic hydrocarbons and food safety: A review [J]. *Journal of the National Science Foundation of Sri Lanka*, 2023,51(2).
- [5] Tulcan R X S, Liu Lianhua, Lu Xiaoxia, et al. PAHs contamination in ports: Status, sources and risks [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2024,475:134937.
- [6] Osman H E, El-Morsy M H E, El-Hamid H T A. Ecotoxicity and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments of Burullus Lake in Egypt [J]. *China Geology*, 2024,7(3):460-468.
- [7] Esmaeilzadeh M, Mehdi A. Analysis of PAHs content, source identification and ecological risk assessment in surface sediments from the Caspian Sea [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2025,211:117472.
- [8] Nourian G, Jaafarzadeh Haghghi Fard N, Pazira A R, et al. An extensive investigation on human risk associated with PAHs in fish and sediment in Bushehr, northern of Persian Gulf [J]. *Scientific Reports*, 2024,14:10585.
- [9] 弓耀奇,岳甫均,刘鑫,等.基于流域系统水文水环境耦合模型的氮循环研究进展[J].*地学前缘*,2025,32(3):183-195.
- Gong Yaoqi, Yue Fujun, Liu Xin, et al. Research progress of coupled hydrological and water environment models in nitrogen cycle of watershed system [J]. *Earth Science Frontiers*, 2025,32(3):183-195.
- [10] 王佳,于莉莉,耿林,等.大沽河流域滨海湿地景观格局变化及其驱动机制[J].*海洋地质前沿*,2023,39(8):29-37.
- Wang Jia, Yu Lili, Geng Lin, et al. Effects of human activities on landscape alteration and aquatic environment of coastal wetland in Dagu River basin [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2023,39(8):29-37.
- [11] Ghosh S, Jha M K. Hydrogeochemical characterization of groundwater and critical assessment of its quality in a coastal basin [J]. *Environment, Development and Sustainability*, 2025,27(1):765-830.
- [12] 凌郡鸿,张依章,周北海,等.深圳茅洲河下游沉积物中多环芳烃来源分析与生态风险[J].*农业环境科学学报*,2018,37(12):2846-2853.
- Ling Junhong, Zhang Yizhang, Zhou Beihai, et al. Source identification and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments in the downstream Maozhou River, Shenzhen, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018,37(12):2846-2853.
- [13] 吉冰静,刘艺,吴杨,等.长江口及邻近东海沉积物中多环芳烃和含氧多环芳烃的分布特征、来源及生态风险[J].*生态环境学报*,2022,31(7):1400-1408.
- Ji Bingjing, Liu Yi, Wu Yang, et al. Occurrence, source and potential ecological risk of parent and oxygenated polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments of Yangtze River estuary and adjacent east China Sea [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022,31(7):1400-1408.
- [14] Zheng Ziyi, Ni Honggang. Predicted no-effect concentration for eight PAHs and their ecological risks in seven major river systems of China [J]. *Science of The Total Environment*, 2024,906:167590.
- [15] McLamb F, Feng Zuying, Shea Damian, et al. Evidence of transboundary movement of chemicals from Mexico to the U. S. in Tijuana River estuary sediments [J]. *Chemosphere*, 2024,348:140749.
- [16] Refai H M, Helmy A M, Ghuniem M M. Exposure and cancer risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in River Nile of Egypt [J]. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 2024,104(3):552-565.
- [17] 朱珍香,高肖飞,彭凤,等.厦门后溪水质与流域景观特征沿城乡梯度的变化分析[J].*生态学报*,2019,39(6):2021-2033.
- Zhu Zhenxiang, Gao Xiaofei, Peng Feng, et al. Relationship between water quality and landscape characteristics of the Houxi River watershed in Xiamen City along

- a rural-urban gradient [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(6):2021-2033.
- [18] 张珞平,陈伟琪,林良牧,等. 厦门西港和香港维多利亚港表层沉积物中多环芳烃的含量分布和来源分析[J]. *海洋学报*, 1996, 18(4):120-124.
Zhang Luoping, Chen Weiqi, Lin Liangmu, et al. Analysis of the content and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in the surface sediments of Xiamen Western Harbor and Victoria Harbour in Hong Kong [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1996, 18(4):120-124.
- [19] 田蕴,郑天凌,王新红. 厦门西港表层沉积物中多环芳烃(PAHs)的含量、分布及来源[J]. *海洋与湖沼*, 2004, 35(1):15-20.
Tian Yun, Zheng Tianling, Wang Xinhong. Concentration, distribution and source of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments of Xiamen Western Harbor [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2004, 35(1):15-20.
- [20] 黎晓霞,蔡河山,张珞平. 厦门西海域表层沉积物中多环芳烃含量分布及生态风险评价[J]. *热带海洋学报*, 2008, 27(5):43-46.
Li Xiaoxia, Cai Heshan, Zhang Luoping. Concentrations and distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments at western Xiamen Bay and assessment of their ecological risk [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2008, 27(5):43-46.
- [21] 冯胜,段雪梅,朱广伟. 厦门市不同城市化区域水体表层沉积物多环芳烃的含量、分布、来源及生态风险评价[J]. *环境化学*, 2011, 30(8):1520-1521.
Feng Sheng, Duan Xuemei, Zhu Guangwei. Content, distribution, sources and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments of water bodies in different urbanized areas of Xiamen City [J]. *Environmental Chemistry*, 2011, 30(8):1520-1521.
- [22] 程启明,黄青,廖祯妮,等. 厦门杏林湾水系表层沉积物中PAHs分析与风险评估[J]. *环境科学*, 2015, 36(1):179-185.
Cheng Qiming, Huang Qing, Liao Zhenni, et al. Risk assessment and analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons in the surface sediments of Xinglin Bay suburb rivers of Xiamen [J]. *Environmental Science*, 2015, 36(1):179-185.
- [23] 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.
- [24] 韩尔瑄,李小水,秦世斌,等. 沉积物中PAHs不可萃取组分及其对源解析的影响[J]. *中国环境科学*, 2025, 45(7):3916-3924.
Han Erxuan, Li Xiaoshui, Qin Shibin, et al. Study on non-extractable residues of PAHs in sediments and their effects on source analysis [J]. *China Environmental Science*, 2025, 45(7):3916-3924.
- [25] 郭加汛,谢煜,齐维晓,等. 查干湖沉积物及土壤中多环芳烃及其衍生物污染特征和风险区识别[J/OL] (2024-12-24). *环境科学*, <https://link.cnki.net/doi/10.13227/j.hjkk.202409321>.
Guo Jiaxun, Xie Yu, Qi Weixiao, et al. Pollution characteristics, identification of risk zones of polycyclic aromatic hydrocarbons and their derivatives in sediments and Soils of Chagan Lake [J/OL] (2024-12-24). *Environmental Science*, <https://link.cnki.net/doi/10.13227/j.hjkk.202409321>.
- [26] 谢煜,黄适尔,郭加汛,等. 长江沉积物中多环芳烃的污染特征、来源解析及生态风险评价[J]. *环境科学学报*, 2023, 43(5):10-18.
Xie Yu, Huang Shier, Guo Jiaxun, et al. Pollution characteristics, source apportionment and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediment of the Yangtze River [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2023, 43(5):10-18.

(上接第198页)

- [34] 蒲嘉霖,刘亮. 亚热带森林凋落物分解特征及水文效应[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(6):165-170.
Pu Jialin, Liu Liang. Hydrology functions and decomposition characteristics of litter in subtropical forest [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(6):165-170.
- [35] 陈晶亮,杨慧,刘超,等. 宁夏罗山自然保护区3种典型林分凋落物和土壤层水源涵养能力综合评估[J]. *生态学报*, 2023, 43(19):7987-7997.
Chen Jingliang, Yang Hui, Liu Chao, et al. Comprehensive evaluation of the water conservation capacity of litter and soil layers in three typical forest types in the Luoshan Nature Reserve, Ningxia [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(19):7987-7997.