

DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2023061302

CSTR:32061.14.hjhx.2023061302

秦海娇, 史秋月, 王永强, 等. 长江中下游典型湖泊鱼体中多环芳烃 (PAHs) 的污染特征及风险评价[J]. 环境化学, 2024, 43(12): 4082-4092.

QIN Haijiao, SHI Qiuyue, WANG Yongqiang, et al. Pollution characteristics and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in fish of typical lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. Environmental Chemistry, 2024, 43 (12): 4082-4092.

长江中下游典型湖泊鱼体中多环芳烃 (PAHs) 的 污染特征及风险评价*

秦海娇^{1,2} 史秋月^{1**} 王永强¹ 毕 斌¹ 张森霖¹ 刘宪斌²
李琳琳¹ 杨莉园¹ 卢少勇^{1**}

(1. 中国环境科学研究院国家环境保护湖泊污染控制重点实验室, 湖泊水污染治理与生态修复国家工程实验室, 北京, 100012; 2. 天津科技大学海洋与环境学院, 天津, 300457)

摘 要 为揭示长江中下游 4 个典型湖泊 (鄱阳湖、洞庭湖、东江湖和梁子湖) 鱼体中多环芳烃 (PAHs) 的污染特征和风险水平, 检测了 20 种鱼样中的 16 种 PAHs, 分析了 PAHs 污染水平, 并开展了风险评价. 结果表明 16 种 PAHs 共检出 11 种, Σ PAHs 的含量分别为鄱阳湖 (32.59—39.81 ng·g⁻¹)、洞庭湖 (29.47—37.60 ng·g⁻¹)、东江湖 (26.07—36.25 ng·g⁻¹) 和梁子湖 (27.78—47.95 ng·g⁻¹). 主要检出物质有 5 种分别是苯并 [b] 荧蒽、苯并 [k] 荧蒽、芘、蒽和茚, 其中苯并 [b] 荧蒽的检出率和检出浓度最高. 萘、苊、苊并 [1,2,3-cd] 芘、二苯并 [a,h] 蒽和苯并 [g,h,i] 芘在所有鱼体内均未检出. 4 个湖泊鱼体内 PAHs 污染水平与国内外相比较低. 健康风险评价结果显示, 4 个湖泊的非致癌风险指数 (HI) 均小于 1, 不会对人体产生非致癌风险; 但致癌风险值 (R) 均超过了 10⁻⁶, 表明可能会对人体产生致癌风险, 应引起重视.

关键词 长江中下游典型湖泊, 鱼体, 多环芳烃 (PAHs), 污染特征, 风险评价.

中图分类号 X-1; O6 **文献标识码** A

Pollution characteristics and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in fish of typical lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River

QIN Haijiao^{1,2} SHI Qiuyue^{1**} WANG Yongqiang¹ BI Bin¹ ZHANG Senlin¹
LIU Xianbin² LI Linlin¹ YANG Liyuan¹ LU Shaoyong^{1**}

(1. State Environmental Protection Key Laboratory for Lake Pollution Control, National Engineering Laboratory for Lake Pollution Control and Ecological Restoration, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing, 100012, China;
2. College of Marine and Environmental Science, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin, 300457, China)

Abstract In order to reveal the pollution characteristics and risk levels of polycyclic aromatic

2023 年 6 月 13 日收稿 (Received: June 13, 2023).

* 科技基础性工作专项重点项目 (2015FY110900), 国家自然科学基金 (41877409) 和湖滨带原位微生物-植物修复技术体系筛选及技术示范项目 (202203AC100002-03-04) 资助.

Supported by National Science and Technology Basic Work Special Project of China (2015FY110900), National Natural Science Foundation of China (41877409) and Selection of In-Situ Microorganism Phytoremediation Technology System and Technology Demonstration Project in Lakeside Zone (202203AC100002-03-04).

** 通信联系人 **Corresponding author**, E-mail: 1050340603@qq.com; lushy2000@163.com

hydrocarbons (PAHs) in fish from four typical lakes (Poyang Lake, Dongting Lake, Dongjiang Lake and Liangzi Lake) in the middle and lower reaches of the Yangtze River, 16 PAHs in 20 fishes were detected, the levels of PAHs contamination were analyzed, and the risk assessment was carried out. The results showed that 11 PAHs were detected, with the concentrations of 32.59—39.81 ng·g⁻¹ in Poyang Lake, 29.47—37.60 ng·g⁻¹ in Dongting Lake, 26.07—36.25 ng·g⁻¹ in Dongjiang Lake and 27.78—47.95 ng·g⁻¹ in Liangzi Lake. The main detected substances were benzo[b]fluoranthene, benzo[k]fluoranthene, pyrene, chrysene and fluorene, of which benzo[b]fluoranthene had the highest detection rate and concentration. Acenaphthylene, acenaphthene, indeno[1,2,3-cd]pyrene, dibenzo[a,h]anthracene and benzo[g,h,i]perylene were not detected in all fish. The levels of PAHs pollution in fish in four lakes were relatively low compared to those at home and abroad. The health risk assessment results showed that the non-carcinogenic risk index of four lakes were all less than 1, which would not cause non-carcinogenic risks to human body. The carcinogenic risk index were all over 10⁻⁶, indicating that it might be carcinogenic risk to human body, to which more attention should be paid.

Keywords The middle and lower reaches of the Yangtze River, fish, polycyclic aromatic hydrocarbons(PAHs), pollution levels, health risk.

多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)是指具有两个及以上芳香环的碳氢化合物,因其在环境中具有持久残留性和生物累积性而受到重点关注^[1].其主要来自人类活动,包括化工燃料的不完全燃烧^[2]、工业生产与加工过程^[3]、石油泄露^[4]等.由于PAHs的污染问题,美国环保署(USEPA)将16种PAHs列入优先控制污染物名单中^[5],其中7种PAHs涵盖在我国优先控制污染物名单中.PAHs能通过工业废水排放、地表径流、大气干湿沉降及原油泄露等多途径进入水体,对水生生物造成不利影响^[6].

鱼类处于水生生态系统食物链的顶端,是水生生态系统的重要组成部分.水体中的PAHs可通过鳃、皮肤或食物等多种途径被鱼体吸收,在鱼体内累积^[7],并产生毒害.Vignet等^[8]将斑马鱼暴露于PAHs中,斑马鱼表现出明显的卵巢发育成熟缺陷.苯并[b]荧蒽可引起实验动物致肿瘤作用、遗传和生殖发育毒性等毒性效应^[9].由于PAHs具有生物毒性,且能通过食物链在生物体内富集和传递,最终对人体产生健康风险.学者多用US EPA的健康风险评价模型(致癌风险和非致癌风险)评价PAHs健康风险^[10-12].Taiwo等^[13]发现,苯并[a]芘对人体的非致癌健康危害表现为神经行为影响、生育率降低和不良出生影响.秦宁等^[14]对巢湖9种鱼体中PAHs进行风险评价发现高于10⁻⁶,同时在汉江下游部分鱼类中PAHs的风险水平高于可接受水平(10⁻⁶)^[15],说明PAHs对人体有毒害作用,存在一定致癌风险.

长江中下游典型湖泊中的洞庭湖、鄱阳湖、东江湖和梁子湖,是我国重要淡水资源,也是PAHs的主要汇集地^[16].因此,探究PAHs在这些典型湖泊生物体内的污染特征和健康风险,为确保长江流域湖泊水质安全和生态健康风险具有重大意义.本文旨在研究长江中下游典型湖泊(鄱阳湖、洞庭湖、东江湖和梁子湖)鱼体中的PAHs污染特征,并评价其风险,以期对长江中下游湖泊水环境管理和生态健康风险评估提供科学依据.

1 材料与方法(Materials and methods)

1.1 研究区域概况

洞庭湖、鄱阳湖、东江湖和梁子湖均为长江流域重要过水性、吞吐型浅水湖泊.鄱阳湖是我国第一大淡水湖,最大水面面积4070 km²,为江西省提供了农业用水、居民饮用水和工业用水等主要的经济和社会功能^[17];洞庭湖是我国第二大淡水湖,容积为178亿m³,在饮用水源、灌溉和水产品供应等方面发挥重要作用^[18];东江湖是东江水电站的蓄水水库,蓄水81.2亿m³,被确定为长株潭城市群的重要水源地^[19-20];梁子湖为湖北省第二大淡水湖,是当地居民的重要饮用水水源地^[21];洞庭湖、鄱阳湖、东江湖和梁子湖也是长江经济带生态廊道的重要节点,对保障长江水资源安全具有重要作用.

1.2 样品采集与预处理

2021 年 5 月分别在鄱阳湖、洞庭湖、东江湖和梁子湖当地渔民手中购买鱼样,共 20 种鱼(鲢鱼、黄颡鱼、鳊鱼、丁桂鱼、仙骨鱼、花斑鱼、鳊鱼、杂交鲟、鲈鱼、鳊鱼、鳊鱼、大口鲶、回头鱼、黄鳝、鲫鱼、乌鳢、鲤鱼、草鱼、三角坊和翘嘴鱼),不同湖泊鱼品种略有差异,在鄱阳湖采集 10 种鱼且每种 3 条,其余 3 个湖泊均采集 5 种鱼且每种 3 条,具体各个湖泊鱼品种见表 2. 现场测量记录鱼体全长(平均体长 35 cm),将鱼洗净,在低温下(-4—0 ℃)冷冻保存带回实验室,将采集的鱼类样品于室温下解冻,用超纯水洗净后解剖,用陶瓷刀取鱼肌肉部分,然后用家用食物绞肉机研磨后在搅拌机中混匀,将样品匀浆在冷冻式干燥机上冻干,用玛瑙研钵研磨,过 100 目尼龙筛低温保存备用.

1.3 样品处理与测定

1.3.1 样品前处理

PAHs 抽提方法参照文献^[22]. 称取研磨后混匀鱼粉 2 g,与 3 g 硅藻土混合均匀,在萃取池中依次装入 3 g 硅藻土、9 g 氧化铝、6 g 硅胶、2 g 无水硫酸镁以及鱼样与硅藻土的混合物,采用二氯甲烷作为抽提溶剂,使用快速溶剂萃取仪对样品在温度 100 ℃、压力 10.34 MPa 条件下加热 6 min 后萃取 6 min;以萃取池体积 65% 的二氯甲烷分 4 次进行淋洗,氮气吹扫 3 min. 上述过程重复 4 次. 所得萃取液以氮气浓缩至 1 mL,再加入 10 mL 正己烷浓缩至约 1 mL,最后用正己烷定容至 5 mL 用于 GC-MS 分析.

1.3.2 样品测定

标准物质使用 US-EPA 规定的 16PAHs 混合标样(SUPELCO, 美国). 气相色谱测定条件如下:毛细管柱为色谱柱(SH-Rxi-5sil MS 30 m × 0.25 μm × 0.25 mm);固定相为 5%-苯基-甲基聚硅氧烷;进样口温度为 280 ℃;进样体积为 1.0 μL 且不分流;载气为高纯氮气;柱温在 40 ℃ 保持 2 min,以 20 ℃·min⁻¹ 速率升至 180 ℃,保持 5 min;再以 5 ℃·min⁻¹ 速率升至 280 ℃,保持 7.5 min.

质谱测定条件如下:EI 源 70 eV;离子源温度 280 ℃;四极杆温度 150 ℃;传输线温度 280 ℃;选择离子模式(SIM);经 NIST 谱库检索对照确定各物质保留时间和定性定量离子参数,并采用外标法定量测定 16 种 PAHs.

1.4 质量控制及质量保证

所用试剂皆为分析纯,除乙醚外所有试剂均经双蒸处理,经气相色谱检验合格后使用. 所用玻璃仪器用清洁剂经超声波清洗器洗净,在 120 ℃ 条件下烘干后再以正己烷淋洗. 分析过程参照 USEPA 的 QA/QC 控制样监控:试剂空白、空白加标和基质加标,并以加标回收率和检出限指示样品制备过程的影响,PAHs 检出限范围为 0.19—0.34 ng·g⁻¹,加标回收率为 81%—135%.

1.5 健康风险评价

1.5.1 PAHs 健康风险评价

基于人类食用鱼体的主要部位为肌肉,参考 USEPA 方法,本文选取鱼体肌肉作为主要暴露风险源. 健康风险包括致癌风险和非致癌风险,非致癌风险通常用风险系数(HI)描述,计算公式如下:

$$HI = \frac{CDI}{RfD} \quad (1)$$

式中,CDI 为长期日摄入剂量,mg·(kg·d)⁻¹;RfD 为污染物的经口暴露参考剂量 mg·(kg·d)⁻¹.

致癌风险通常用风险值 R(Risk)表示,其计算公式如下:

$$R_{\text{低剂量暴露}} = CDI \times CSF (R < 0.01) \quad (2)$$

$$R_{\text{高剂量暴露}} = 1 - \exp(-CDI \times CSF) (R \geq 0.01) \quad (3)$$

式中,CSF 为污染物的致癌斜率因子,(kg·d)·mg⁻¹.

PAHs 的致癌 CDI 公式如下:

$$CDI = \frac{TEQ_{\text{BaP}} \times F_{\text{IR}} \times ED \times EF}{BW \times AT \times 10^6} \quad (4)$$

$$TEQ_{\text{BaP}} = \sum_{i=1}^n C_{\text{fish}} \times TEF_i \quad (5)$$

PAHs 的非致癌 CDI 公式如下:

$$CDI_{\text{非}} = \frac{C_{\text{fish}} \times F_{\text{IR}} \times ED \times EF}{BW \times AT \times 10^6}$$

(6)

式中, CDI 为长期摄食鱼类的日均暴露量, $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$; C_{fish} 为鲫鱼体内污染物的浓度, $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$; F_{IR} 为鱼肉的摄入频率, $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$, 依据《中国食物与营养发展纲要(2014—2020 年)》, F_{IR} 取 $49.30 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$; ED 为暴露时限, a, 非致癌取 30 a, 致癌取 70 a; EF 为暴露频率, $365 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$; BW 为体重, kg, 按成年人 60 kg 的平均体重计算; AT 为无健康风险事件发生的平均时限, $ED \times 365 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$; TEQ_{BaP} 为 PAHs 基于 BaP 的毒性当量 ($\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$); PAHs 的毒性当量因子 TEF^[23] 和 RfD 见表 1; PAHs 的 CSF 取值为 $7.3 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ ^[24].

表 1 PAHs 的 TEF 和 RfD 数据
Table 1 TEF 和 RfD data of PAHs

PAHs		RfD/($\text{kg} \cdot \text{d} \cdot \text{mg}^{-1}$)	TEF	PAHs		RfD/($\text{kg} \cdot \text{d} \cdot \text{mg}^{-1}$)	TEF
萘	Nap	0.02	0.001	苯并[a]蒽	BaA	0.03	0.1
二氢苊	Acy	0.06	0.001	蒽	Chr	0.03	0.01
苊	Ace	0.06	0.001	苯并[b]荧蒽	BbF	0.03	0.1
芴	Fle	0.04	0.001	苯并[k]荧蒽	BkF	0.03	0.1
菲	Phe	0.03	0.001	苯并[a]芘	BaP	0.03	1
蒽	Ant	0.3	0.01	茚并[1,2,3-cd]芘	InD	0.03	0.1
荧蒽	Flu	0.04	0.001	二苯并[a,h]蒽	DahA	0.03	5
芘	Pyr	0.03	0.001	苯并[g,h,i]芘	BghiP	0.03	0.01

当致癌风险值(R)低于 10^{-6} 时, 表明不会对人体造成致癌风险; 当致癌风险值(R)介于 10^{-6} 和 10^{-4} 之间, 人体暴露可能具有潜在致癌风险; 当健康风险值高于 10^{-4} 时, 对人体造成致癌危害.

当非致癌风险系数 $HI \leq 1$ 时, 人体不会产生非致癌风险, 反之, 将会产生非致癌风险^[25].

1.5.2 复合暴露健康风险

根据 EPA 得出水中各有毒物质对人体健康危害的毒性作用呈相加关系^[26], 不考虑它们的协同和拮抗作用.

多种污染物复合暴露致癌风险 $R_{\text{总}}$ 计算公式如下:

$$R_{\text{总}} = \sum R_i$$

(7)

多种污染物复合暴露非致癌风险 $HI_{\text{总}}$ ($HI \leq 1$ 时, 人体不会产生非致癌风险, 反之, 将会产生非致癌风险) 计算公式如下:

$$HI_{\text{总}} = \sum HI_i$$

(8)

2 结果与讨论(Results and discussion)

2.1 长江中下游典型湖泊鱼体中 PAHs 累积及污染特征

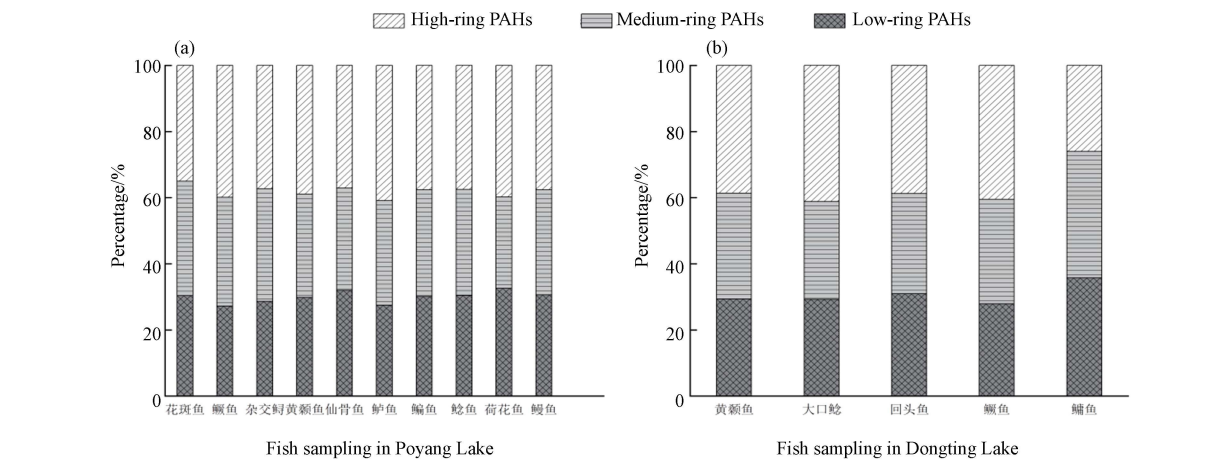
2.1.1 鄱阳湖鱼体内 PAHs 累积及污染特征

鄱阳湖鱼体中 16 种 PAHs 共检出 11 种, 从 PAHs 含量看, 鱼体 $\sum$ PAHs 含量范围在 $32.59 \sim 39.81 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间, 平均值为 $35.33 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 各种鱼体内 PAHs 的总含量范围见表 2. 除荷花鱼体内富集了 10 种不同含量的 PAHs 外, 其他 9 种鱼体内均富集了 11 种 PAHs. 二苯并[a,h]蒽、苊烯、苊、茚并[1,2,3-cd]芘和苯并[g,h,i]芘在所有鱼体内均未检出, 同时荷花鱼体内也未检出荧蒽. 检出含量最高的物质为苯并[b]荧蒽和苯并[k]荧蒽, 最高值分别为 $6.49 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $6.16 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$. 从 PAHs 检出率看, 鱼体检出率为 100% 的 PAHs 共有 10 种, 其余 6 种检出率在 $0 \sim 90.91\%$ 之间. 从 PAHs 组成看, 根据环数的不同, 把所测的 PAHs 分为 2—3 环、4 环和 5—6 环, 即低环、中环和高环, 鄱阳湖不同鱼体内 PAHs 环数组成有显著性差异($P < 0.05$). 在 10 种鱼体内 PAHs 平均组成中, 低环、中环、高环 PAHs 分别占总

PAHs 的 29.93%、31.92%、38.15%，总体为高环>中环>低环。其中，仙骨鱼和荷花鱼 2 种中低环 PAHs 占比次之，中环最低；其余 8 种鱼中环次之，低环最低，见图 1(a)。

表 2 长江中下游典型湖泊鱼体中 PAHs 含量

Table 2 Contents of PAHs in fish of the middle and lower reaches of the Yangtze River					
湖泊 Lake	鱼品种 Fish species	低环PAHs/(ng·g ⁻¹) Low-ring PAHs	中环PAHs/(ng·g ⁻¹) Medium-ring PAHs	高环PAHs/(ng·g ⁻¹) High-ring PAHs	ΣPAHs/ (ng·g ⁻¹)
鄱阳湖	花斑鱼	12.09	13.78	13.94	39.81
	鳊鱼	10.30	12.44	15.09	37.84
	杂交鲟	10.59	12.61	13.78	36.98
	黄颡鱼	10.66	11.18	13.90	35.74
	仙骨鱼	11.20	10.85	13.01	35.07
	鲈鱼	9.52	10.93	14.14	34.59
	鳊鱼	10.17	10.92	12.71	33.79
	鲢鱼	10.21	10.74	12.56	33.51
	荷花鱼	10.89	9.22	13.28	33.40
	鳊鱼	9.98	10.35	12.26	32.59
洞庭湖	黄颡鱼	11.04	12.03	14.53	37.60
	大口鲶	10.48	10.59	14.74	35.81
	回头鱼	10.95	10.73	13.69	35.38
	鳊鱼	9.24	10.47	13.42	33.13
	鳊鱼	10.54	11.28	7.66	29.47
东江湖	鲈鱼	15.26	12.34	8.64	36.25
	鳊鱼	9.70	11.17	12.87	33.74
	三角坊	11.13	12.22	8.51	31.86
	翘嘴鱼	10.15	10.52	7.63	28.30
	草鱼	9.33	9.35	7.39	26.07
梁子湖	鲤鱼	12.41	28.54	7.01	47.95
	乌鳢	10.86	17.81	6.95	35.62
	鲫鱼	11.34	15.37	7.35	34.06
	鳊鱼	10.59	11.51	6.46	28.57
	黄鳝	12.35	8.50	6.92	27.78



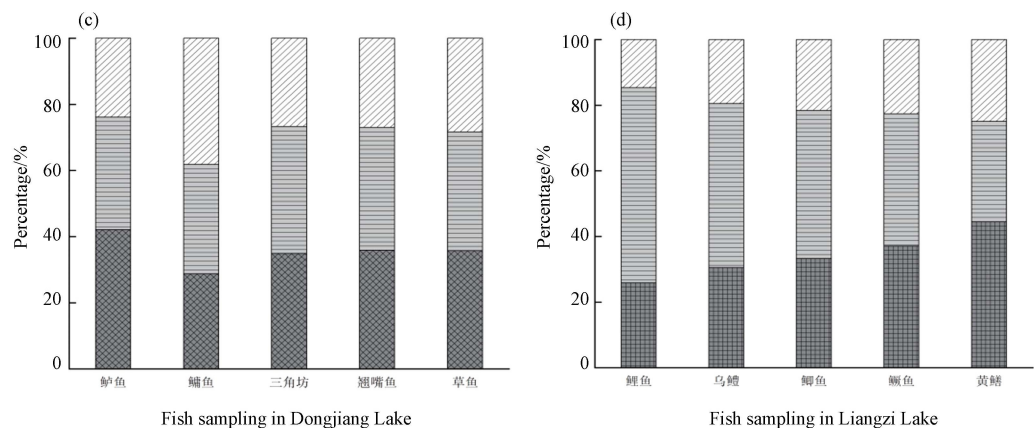


图1 长江中下游典型湖泊鱼体中 PAHs 的组成
(鄱阳湖(a), 洞庭湖(b), 东江湖(c), 梁子湖(d))

Fig.1 The composition of PAHs in the muscles of fish in typical lake of the middle and lower reaches of the Yangtze River (Poyang Lake(a), Dongting Lake(b), Dongjiang Lake(c), Liangzi Lake(d))

2.1.2 洞庭湖鱼体内 PAHs 累积及污染特征

洞庭湖鱼体中 16 种 PAHs 共检出 11 种, 鱼体 Σ PAHs 含量范围在 29.47—37.60 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间, 平均值为 34.28 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 各种鱼体内 PAHs 的总含量范围见表 2, 除鳊鱼体内富集了 10 种不同含量的 PAHs, 其他 4 种鱼体内均富集了 11 种 PAHs. 二苯并 [a,h] 蒽、苊烯、苊、茛并 [1,2,3-cd] 芘和苯并 [g,h,i] 芘在所有鱼体内均未检出, 同时鳊鱼体内也未检出苯并 [k] 荧蒹. 检出含量最高的物质为苯并 [b] 荧蒹和苯并 [k] 荧蒹, 最高值分别为 6.35 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 6.02 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$. 从 PAHs 检出率看, 洞庭湖鱼体检出率为 100% 的 PAHs 共有 10 种, 其余检出率在 0—80% 之间. 从 PAHs 组成看, 其结果见图 1(b), 5 种鱼体内 PAHs 平均组成中, 低环、中环、高环 PAHs 分别占总 PAHs 的 30.64%、32.36%、37.00%, 总体为高环>中环>低环. 其中鳊鱼中环比例最高(38.27%), 低环次之(35.75%), 高环最低(25.98%); 回头鱼高环比例最高(38.71%), 低环次之(30.96%), 中环最低(30.33%); 其余 3 种鱼中均为高环比例最高, 中环次之, 低环最低; 但总体来看, 洞庭湖不同鱼体内 PAHs 环数组成相差不大.

2.1.3 东江湖鱼体内 PAHs 累积及污染特征

东江湖鱼体中 16 种 PAHs 共检出 11 种, 从 PAHs 含量看, 鱼体 Σ PAHs 含量范围在 26.07—36.25 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间, 平均值为 31.24 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 各种鱼体内 PAHs 的总含量范围见表 2, 鳊鱼体内富集了 11 种不同含量的 PAHs, 鲈鱼、三角鲂、翘嘴鱼体内富集了 10 种不同含量的 PAHs, 草鱼体内富集了 9 种不同含量的 PAHs. 苊烯、苊、茛并 [1,2,3-cd] 芘、二苯并 [a,h] 蒽和苯并 [g,h,i] 芘在所有鱼体内均未检出, 苯并 [k] 荧蒹只在鳊鱼体内检出, 荧蒹只在草鱼体内未检出. 检出含量最高的物质为苯并 [b] 荧蒹, 最高值为 6.11 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$. 从 PAHs 检出率看, 鱼体检出率为 100% 的 PAHs 共有 9 种, 其余检出率在 0—80% 之间; 从 PAHs 组成看, 其结果见图 1(c), 5 种鱼体内 PAHs 平均组成中, 中环、低环、高环 PAHs 分别占总 PAHs 的 35.49%、35.71%、28.80%, 总体为中环>低环>高环. 其中鲈鱼中低环最高(42.10%), 中环次之(34.05%), 高环最低(23.85%); 其余 4 种鱼中均为中环占比最高, 低环次之, 高环最低; 但总体来看, 东江湖不同鱼体内 PAHs 环数组成相差不大.

2.1.4 梁子湖鱼体内 PAHs 累积及污染特征

梁子湖鱼体中 16 种 PAHs 共检出 11 种, 鱼体 Σ PAHs 含量范围在 27.78—47.95 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间, 平均值为 34.80 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 各种鱼体内 PAHs 的总含量范围见表 2, 除鳊鱼体内富集了 10 种不同含量的 PAHs, 其他 10 种鱼体内均富集了 11 种不同含量的 PAHs. 苊烯、苊、茛并 [1,2,3-cd] 芘、二苯并 [a,h] 蒽和苯并 [g,h,i] 芘在所有鱼体内均未检出, 同时鳊鱼体内也未检出苊. 检出含量最高的物质为苊, 最高值为 16.86 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$. 从 PAHs 检出率看, 鱼体检出率为 100% 的 PAHs 共有 10 种, 其余检出率在 0—80% 之间. 从 PAHs 组成看, 梁子湖不同鱼体内 PAHs 环数组成有显著性差异($P<0.05$). 在 5 种鱼体内 PAHs 平均组成中, 中环、低环、高环 PAHs 分别占总 PAHs 的 45.11%、34.24%、20.65%, 总体为中环>低环>高环. 5 种鱼中鳊鱼低环占比最高(44.47%), 中环次之(30.60%), 高环最低(24.93%); 其余 4 种鱼中均为

中环占比最高,低环次之,高环最低,见图 1(d).

2.2 长江中下游部分典型湖泊鱼体内 PAHs 对比

从主要检出物质看,苯并[b]荧蒽、苯并[k]荧蒽、芘、蒽和茚均为长江中游部分湖泊鱼体中主要检出物质,且以苯并[b]荧蒽为主.从含量看,鄱阳湖鱼体中 Σ PAHs 含量范围($32.59\text{--}39.81\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$)、洞庭湖($29.47\text{--}37.60\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$)、东江湖($26.07\text{--}36.25\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$)和梁子湖($27.78\text{--}47.95\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$)相差不大.鄱阳湖、洞庭湖、东江湖和梁子湖鱼类样品中 Σ PAHs 浓度大部分属轻度污染.与国内外其他河流湖泊比,略高于那不勒斯湾($5.45\text{--}17.9\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$)^[27],远低于中国南海($199\text{--}606\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}\text{dw}$)^[28]、太湖($52.5\text{--}247.6\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$)^[29]和 Temsah 湖($1696.4\text{--}4785.7\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$)^[30].

鱼体中的 PAHs 含量与水环境中的 PAHs 含量密切相关^[31],并随水环境 PAHs 浓度的升高而增加^[32],所以从组成看,鄱阳湖和洞庭湖鱼体中高环 PAHs 相对比例较高,中环次之,低环最低,而东江湖和梁子湖鱼体中环 PAHs 相对比例较高,低环次之,高环最低.可知鄱阳湖和洞庭湖水体中的污染以高环 PAHs 为主,东江湖和梁子湖水体中的污染以中环 PAHs 为主.

2.3 长江中下游典型湖泊鱼体中 PAHs 来源分析

运用低环/中高环比值判断 PAHs 来源.通常认为,低环 PAHs 主要源于石油泄漏的石油源;中高环 PAHs 则主要来自煤炭、木材、石油等有机物不完全燃烧的化石燃料燃烧源^[33];因此,当低环/中高环大于 1 时,认为 PAHs 主要来自石油源;小于 1 时,则判定 PAHs 主要来自煤炭、木材、石油等的燃烧^[34].鄱阳湖、洞庭湖、东江湖和梁子湖鱼体中低环/(中高环)分别为 $0.37\text{--}0.48$ 、 $0.39\text{--}0.56$ 、 $0.40\text{--}0.73$ 和 $0.35\text{--}0.8$,表明 4 个湖泊鱼体中的 PAHs 主要来自于燃烧源的污染.

利用同分异构体比值法可判断 PAHs 来源.通常用 PAHs 的组分特征作为区分污染来源的依据,包括蒽/(蒽+菲)和苯并[a]蒽/(苯并[a]蒽+蒽).研究认为^[35-36]蒽/(蒽+菲)小于 0.1,指示为石油源,大于 0.1 则为燃烧源;苯并[a]蒽/(苯并[a]蒽+蒽)小于 0.2,指示为石油源,0.2—0.35 之间为混合源,大于 0.35 为燃烧源.鄱阳湖、洞庭湖、东江湖和梁子湖鱼体中蒽/(蒽+菲)的范围分别在 $0.46\text{--}0.52$ 、 $0.48\text{--}0.55$ 、 $0.41\text{--}0.54$ 和 $0.56\text{--}0.65$ 之间,其中所有鱼体内的比值均大于 0.1,说明 4 个湖泊 PAHs 的来源均为燃烧源;鄱阳湖、洞庭湖、东江湖和梁子湖鱼体中苯并[a]蒽/(苯并[a]蒽+蒽)的范围分别在 $0.34\text{--}0.37$ 、 $0.34\text{--}0.36$ 、 $0.34\text{--}0.35$ 和 $0.33\text{--}1.00$ 之间,其中大部分比值大于 0.35,小部分比值介于 0.2—0.35 之间,说明 4 个湖泊鱼体中的 PAHs 既受木材、煤、石油及其精炼产品燃烧影响,同时也受石油污染影响.因此,鄱阳湖、洞庭湖、东江湖和梁子湖污染来源复杂,其中最主要为木材和煤的燃烧,其次为石油污染(图 2).

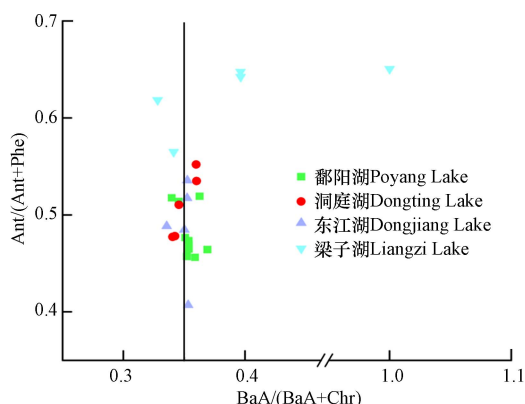


图 2 长江中下游典型湖泊鱼体中 PAHs 来源分析

Fig.2 Source analysis of PAHs in the muscles of fish in typical lake of the middle and lower reaches of the Yangtze River

2.4 长江中下游典型湖泊鱼体中 PAHs 风险评价

2.4.1 长江中下游典型湖泊鱼体中 PAHs 毒性

鱼体中 PAHs 的毒性用 BaP 的毒性当量(TEQ_{BaP})表示,用公式(5)计算了每种单体的当量浓度,并求得总的毒性当量浓度(TEQ_{BaP}).鄱阳湖、洞庭湖、东江湖和梁子湖不同鱼体中 PAHs 的毒性当量浓度(TEQ_{BaP})范围分别是 $3.59\text{--}4.04\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $3.25\text{--}3.98\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $3.13\text{--}3.72\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $3.03\text{--}3.50\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$,

平均值分别为 $3.80\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $3.71\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $3.35\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $3.24\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 。其中 BaP 对毒性当量的贡献值最大, 在 4 个湖泊各种鱼体中的贡献值均超过 60%。通过计算各个湖泊不同环数 PAHs 的毒性当量(表 3), 发现在 4 个湖泊鱼体内高环 PAHs 的毒性当量均显著高于低环和中环($P<0.05$), 说明高环 PAHs 更易在鱼体内累积, 这与 Zhu 等^[37] 和冉雪玲^[38] 研究一致, 因此对高环多环芳烃毒性应更加重视。

表 3 长江中下游典型湖泊鱼体中 PAHs 毒性当量

Table 3 TEQ _{BaP} of PAHsin the muscles of fish in typical lake of the middle and lower reaches of the Yangtze River			
湖泊 Lake	PAHs	范围/(ng·g ⁻¹) Range	均值/(ng·g ⁻¹) Average
鄱阳湖	低环	0.02—0.03	0.03
	中环	0.24—0.31	0.27
	高环	3.33—3.71	3.51
洞庭湖	低环	0.02—0.03	0.03
	中环	0.24—0.29	0.26
	高环	2.94—3.66	3.42
东江湖	低环	0.02—0.04	0.03
	中环	0.23—0.27	0.26
	高环	2.85—3.43	3.06
梁子湖	低环	0.03—0.04	0.04
	中环	0.22—0.44	0.29
	高环	2.77—3.01	2.91

2.4.2 长江中下游典型湖泊鱼体中 PAHs 致癌评价

对鄱阳湖、洞庭湖、东江湖和梁子湖不同鱼体中 PAHs 进行致癌风险评价, 评价结果见图 3, 得到 4 个湖泊不同鱼类食用的致癌风险范围分别是 2.15×10^{-5} — 2.43×10^{-5} 、 1.95×10^{-5} — 2.39×10^{-5} 、 1.88×10^{-5} — 2.23×10^{-5} 和 1.82×10^{-5} — 2.10×10^{-5} , 平均值分别为 2.28×10^{-5} 、 2.22×10^{-5} 、 2.01×10^{-5} 和 1.94×10^{-5} , 4 个湖泊鱼类食用的致癌风险值均在 10^{-6} 和 10^{-4} 之间, 表明各种鱼类对人体暴露可能具有致癌风险; 总体来看, 4 个湖泊鱼体中致癌风险相差不大, 排序为鄱阳湖>洞庭湖>东江湖>梁子湖, 单个污染物苯并 [b] 荧蒽风险贡献率最大。4 个湖泊中致癌风险最高的鱼类是鳊鱼、黄颡鱼、花斑鱼和杂交鲟, 致癌风险最低的是鳙鱼、鳙鱼、翘嘴鱼和草鱼。已有对湖泊致癌风险值进行研究, 如巢湖^[14] 和汉江下游^[15] 鱼体中的致癌风险值均高于 10^{-6} , 与本研究一致。

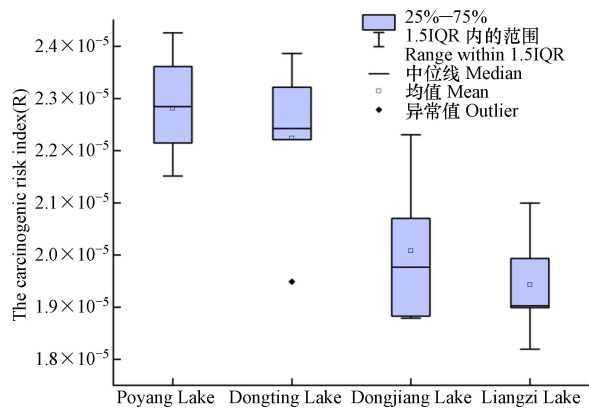


图 3 长江中下游典型湖泊 PAHs 致癌风险评价指数

Fig.3 The carcinogenic risk index of PAHs intypical lake of the middle and lower reaches of the Yangtze River

2.4.3 长江中下游典型湖泊鱼体中 PAHs 非致癌评价

对鄱阳湖、洞庭湖、东江湖和梁子湖不同鱼体中 PAHs 进行非致癌风险评价, 评价结果见图 4, 得到 4 个湖泊不同鱼类食用的非致癌风险范围分别是 8.68×10^{-4} — 1.04×10^{-3} 、 7.70×10^{-4} — 9.98×10^{-4} 、 $7.00\times$

10^{-4} — 9.42×10^{-4} 和 7.06×10^{-4} — 1.24×10^{-3} , 平均值分别为 9.49×10^{-4} 、 9.13×10^{-4} 、 8.27×10^{-4} 和 9.02×10^{-4} , 4 个湖泊鱼类食用的非致癌风险值均小于 1, 表明人体不会产生非致癌风险; 总体来看, 4 个湖泊鱼体中非致癌风险相差不大, 排序为鄱阳湖>洞庭湖>梁子湖>东江湖. 4 个湖泊中非致癌风险最高的鱼类分别是花斑鱼、黄颡鱼、鲈鱼和鲤鱼, 4 个湖泊中非致癌风险最低的鱼类分别是鳊鱼、鳙鱼、草鱼和黄鳝.

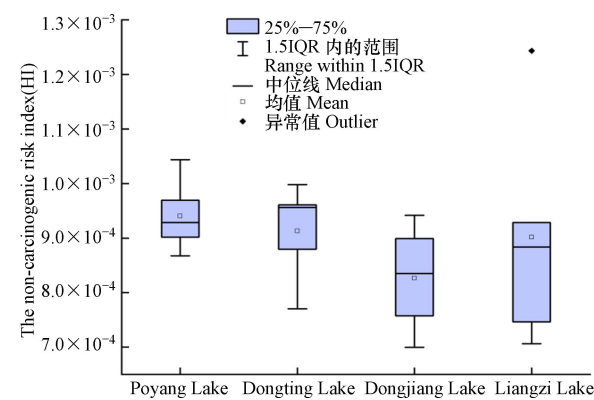


图 4 长江中下游典型湖泊 PAHs 的非致癌风险评价指数

Fig.4 The non-carcinogenic risk index of PAHs intypical lake of the middle and lower reaches of the Yangtze River

3 结论(Conclusion)

洞庭湖、鄱阳湖、东江湖和梁子湖鱼体中 PAHs 含量相差不大, 浓度范围在 $26.07\text{—}47.95\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间, 最大值在梁子湖鲤鱼中($47.95\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$), 最小值在东江湖草鱼中($26.07\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$). 16 种多环芳烃比例组成, 鄱阳湖和洞庭湖以高环为主, 东江湖和梁子湖以中环为主. 木材和煤的燃烧带来的污染输入是长江中下游典型 4 个湖泊 PAHs 的主要来源.

采用 USEPA 推荐的评价模型评价长江中下游部分典型湖泊引起健康风险, 结果表明造成个人年致癌风险均超过 USEPA 推荐的可接受水平(10^{-6}), 有潜在风险; 非致癌风险远低于 USEPA 等国际标准; 4 个湖泊鱼体致癌风险为鄱阳湖>洞庭湖>东江湖>梁子湖; 4 个湖泊鱼体非致癌风险为鄱阳湖>洞庭湖>梁子湖>东江湖.

参考文献 (References)

[1] 员晓燕, 杨玉义, 李庆孝, 等. 中国淡水环境中典型持久性有机污染物 (POPs) 的污染现状与分布特征 [J]. 环境化学, 2013, 32(11): 2072-2081.
YUN X Y, YANG Y Y, LI Q X, et al. Present situation and distribution characteristics of persistent organic pollutants in freshwater in China[J]. Environmental Chemistry, 2013, 32(11): 2072-2081 (in Chinese).

[2] 丁家琪, 罗丽娟, 栾天罡. 海洋多环芳烃及其衍生物的污染特征和来源分析 [J]. 环境化学, 2023, 42(3): 893-903.
DING J Q, LUO L J, LUAN T G. Characteristics and source analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons and their derivatives in marine environment[J]. Environmental Chemistry, 2023, 42(3): 893-903 (in Chinese).

[3] 李海燕, 赖子尼, 曾艳艺, 等. 广东典型湿地环境沉积物及鱼体中多环芳烃的污染特征及风险评估 [J]. 生态毒理学报, 2019, 14(5): 296-307.
LI H Y, LAI Z N, ZENG Y Y, et al. Pollution characteristics and risk assessment of PAHs in sediments and fishes from typical wetlands of Guangdong Province[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2019, 14(5): 296-307 (in Chinese).

[4] KHALILI N R, SCHEFF P A, HOLSEN T M. PAH source fingerprints for coke ovens, diesel and, gasoline engines, highway tunnels, and wood combustion emissions[J]. Atmospheric Environment, 1995, 29(4): 533-542.

[5] Means. Risk-assessment guidance for Superfund. Volume 1. Human Health Evaluation Manual. Part A. Interim report (Final)[R]. 1989.

[6] HEEMKEN O P, STACHEL B, THEOBALD N, et al. Temporal variability of organic micropollutants in suspended particulate matter of the River Elbe at Hamburg and the River Mulde at Dessau, Germany[J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2000, 38(1): 11-31.

[7] 贾立明, 赵然, 陈鑫, 等. 松花江干流鱼体中的多环芳烃分布特征与营养级转移评估 [J]. 环境化学, 2015, 34(3): 599-601.
JIA L M, ZHAO R, CHEN X, et al. Distribution characteristics and trophic level transfer evaluation of polycyclic aromatic

- hydrocarbons in fish in Songhua River mainstream[J]. *Environmental Chemistry*, 2015, 34(3): 599-601 (in Chinese).
- [8] VIGNET C, LARCHER T, DAVAIL B, et al. Fish reproduction is disrupted upon lifelong exposure to environmental PAHs fractions revealing different modes of action[J]. *Toxics*, 2016, 4(4): 26.
- [9] 杜宏举, 高珊, 张鹏, 等. 苯并 [b] 荧蒽的毒性效应及对人体健康影响的研究进展 [J]. *毒理学杂志*, 2020, 34(3): 214-219.
- DU H J, GAO S, ZHANG P, et al. Research progress on toxic effects of benzo[b]fluoranthene and its effects on human health[J]. *Journal of Toxicology*, 2020, 34(3): 214-219 (in Chinese).
- [10] 昌盛, 樊月婷, 付青, 等. 北江清远段地表水及沉积物中酞酸酯的分布特征与风险评估 [J]. *生态环境学报*, 2019, 28(4): 822-830.
- CHANG S, FAN Y T, FU Q, et al. Distribution characteristics and risk assessment of phthalic acid esters in surface water and sediment of Qingyuan section of Beijiang River[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28(4): 822-830 (in Chinese).
- [11] 贺小敏, 施敏芳. 梁子湖水体和沉积物中邻苯二甲酸酯分布特征及生态健康风险评价 [J]. *中国环境监测*, 2021, 37(2): 115-127.
- HE X M, SHI M F. Distribution characteristics and ecological and health risk assessment of phthalic acid esters in surface water and sediment of liangzi lake, China[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2021, 37(2): 115-127 (in Chinese).
- [12] 张坤峰, 付青, 涂响, 等. 武汉典型饮用水水源中典型 POPs 污染特征与健康风险评估 [J]. *环境科学*, 2021, 42(12): 5836-5847.
- ZHANG K F, FU Q, TU X, et al. Pollution characteristics and risk assessment of typical POPs in typical drinking water sources in Wuhan[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(12): 5836-5847 (in Chinese).
- [13] TAIWO A M, IHEDIOHA E C, NWOSU S C, et al. Levels and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in protein foods from Lagos and Abeokuta, Southwestern *Nigeria* [J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2019, 79: 28-38.
- [14] 秦宁, 何伟, 王雁, 等. 巢湖水体和水产品中多环芳烃的含量与健康风险 [J]. *环境科学学报*, 2013, 33(1): 230-239.
- QIN N, HE W, WANG Y, et al. Residues and health risk of polycyclic aromatic hydrocarbons in the water and aquatic products from Lake Chaohu[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(1): 230-239 (in Chinese).
- [15] 汪红军, 郑金秀, 李嗣新, 等. 汉江下游水体和鱼体多环芳烃分布特征及健康风险 [J]. *水生态学杂志*, 2016, 37(6): 51-58.
- WANG H J, ZHENG J X, LI S X, et al. Distribution characteristics and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in the water and fish of lower Hanjiang River[J]. *Journal of Hydroecology*, 2016, 37(6): 51-58 (in Chinese).
- [16] LI C, YANG L L, SHI M W, et al. Persistent organic pollutants in typical lake ecosystems[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 180: 668-678.
- [17] ZHAO Z H, ZHANG L, CAI Y J, et al. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) residues in several tissues of edible fishes from the largest freshwater lake in China, Poyang Lake, and associated human health risk assessment[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2014, 104: 323-331.
- [18] JIANG X M, WANG J, PAN B Z, et al. Assessment of heavy metal accumulation in freshwater fish of Dongting Lake, China: Effects of feeding habits, habitat preferences and body size[J]. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 2022, 112: 355-365.
- [19] 彭亚辉, 周科平. 东江湖流域产业结构变迁与水环境响应研究 [J]. *江西农业大学学报*, 2014, 36(5): 1152-1158.
- PENG Y H, ZHOU K P. Case study on evolution of industry structure and the response of water environment of Dongjiang Lake basin[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2014, 36(5): 1152-1158 (in Chinese).
- [20] 徐洁, 肖玉, 谢高地, 等. 东江湖流域水供给服务时空格局分析 [J]. *生态学报*, 2016, 36(15): 4892-4906.
- XU J, XIAO Y, XIE G D, et al. Spatiotemporal analysis of water supply service in the Dongjiang Lake Basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(15): 4892-4906 (in Chinese).
- [21] 王丹, 孟鑫, 张洪, 等. 梁子湖沉积物重金属污染现状分析及风险评价 [J]. *环境科学学报*, 2016, 36(6): 1901-1909.
- WANG D, MENG X, ZHANG H, et al. Pollution analysis and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Liangzi Lake[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(6): 1901-1909 (in Chinese).
- [22] 王汨, 闫玉莲, 李建, 等. 长江朱杨江段和沱江富顺江段鱼类体内 16 种多环芳烃的含量 [J]. *水生生物学报*, 2013, 37(2): 358-366.
- WANG M, YAN Y L, LI J, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in fish from the Zhuyang section of the Yangtze River and the Fushun section of the Tuo River, China[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2013, 37(2): 358-366 (in Chinese).
- [23] NISBET I C T, LAGOY P K. Toxic equivalency factors (TEFs) for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs)[J]. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 1992, 16(3): 290-300.
- [24] 昌盛, 樊月婷, 付青, 等. 北江枯水期多环芳烃的污染分布特征与风险评估 [J]. *西北大学学报 (自然科学版)*, 2020, 50(1): 57-67.
- CHANG S, FAN Y T, FU Q, et al. Pollution distribution characteristics and risk assessment of polycyclic-aromatic hydrocarbons in surface water and sediment of Beijiang River[J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2020, 50(1): 57-67 (in Chinese).
- [25] LEI B L, ZHANG K Q, AN J, et al. Human health risk assessment of multiple contaminants due to consumption of animal-based foods available in the markets of Shanghai, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(6): 4434-4446.
- [26] 曾惠, 罗教华, 张卫东, 等. 某市主城自来水中多环芳烃和邻苯二甲酸酯的健康风险评价 [J]. *第三军医大学学报*, 2020,

- 42(11): 1116-1123.
- ZENG H, LUO J H, ZHANG W D, et al. Health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons and phthalates in finished water from waterworks in a metropolis[J]. *Journal of Third Military Medical University*, 2020, 42(11): 1116-1123 (in Chinese).
- [27] PERUGINI M, VISCIANO P, MANERA M, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in marine organisms from the Gulf of Naples, Tyrrhenian Sea[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2007, 55(5): 2049-2054.
- [28] YU Z L, LIN Q, GU Y G, et al. Bioaccumulation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in wild marine fish from the coastal waters of the northern South China Sea: Risk assessment for human health[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 180: 742-748.
- [29] SU H L, WU F C, GUO J Y, et al. Distribution characteristics and risk assessments of PAHs in fish from Lake Taihu, China[J]. *Human and Ecological Risk Assessment:an International Journal*, 2015, 21(7): 1753-1765.
- [30] ALI H R, EL-GENDY N S, EL- EZBEWY S, et al. Assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons contamination in water, sediment and fish of temsah lake, Suez canal, Egypt[J]. *Current World Environment*, 2006, 1(1): 11-22.
- [31] MILINKOVITCH T, KANAN R, THOMAS-GUYON H, et al. Effects of dispersed oil exposure on the bioaccumulation of polycyclic aromatic hydrocarbons and the mortality of juvenile *Liza ramada* [J]. *Science of the Total Environment*, 2011, 409(9): 1643-1650.
- [32] CHEN L, ZHAO Y, LI L X, et al. Exposure assessment of phthalates in non-occupational populations in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 427/428: 60-69.
- [33] 陈卫锋, 倪进治, 杨红玉, 等. 福州内河沉积物中多环芳烃的分布、来源及其风险评价 [J]. *中国环境科学*, 2010, 30(12): 1670-1677.
- CHEN W F, NI J Z, YANG H Y, et al. Distribution, sources and ecological risks of PAHs in inland river sediments of Fuzhou City[J]. *China Environmental Science*, 2010, 30(12): 1670-1677 (in Chinese).
- [34] 张明, 唐访良, 吴志旭, 等. 千岛湖表层沉积物中多环芳烃污染特征及生态风险评价 [J]. *中国环境科学*, 2014, 34(1): 253-258.
- ZHANG M, TANG F L, WU Z X, et al. Pollution characteristics and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons(PAHs) in surface sediments from Xin'anjiang Reservoir[J]. *China Environmental Science*, 2014, 34(1): 253-258 (in Chinese).
- [35] 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.
- [36] 母清林, 方杰, 邵君波, 等. 长江口及浙江近岸海域表层沉积物中多环芳烃分布、来源与风险评价 [J]. *环境科学*, 2015, 36(3): 839-846.
- MU Q L, FANG J, SHAO J B, et al. Distribution, sources and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons(PAHs) in surface sediments of Yangtze Estuary and Zhejiang coastal areas[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(3): 839-846 (in Chinese).
- [37] ZHU L Z, LU H, CHEN S G, et al. Pollution level, phase distribution and source analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons in residential air in Hangzhou, China[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 162(2/3): 1165-1170.
- [38] 冉雪玲. 报废汽车拆解基地大气、水和土壤中多环芳烃的污染特征、来源以及人体健康风险评价 [D]. 绵阳: 西南科技大学, 2023.
- RAN X L. Characteristics, sources and human health risk assessment of PAHS in the atmosphere, water and soil of an end-of-life vehicle dismantling site[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2023 (in Chinese).