



崇明岛草鱼池塘沉积物中多环芳烃的分布状况及生态风险

刘云飞^{1,2}, 刘兴国^{1*}, 高子昕^{1,2}, 程峰^{1,3}

(1. 中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所, 上海 200092;

2. 上海海洋大学, 水产科学国家级实验教学示范中心, 上海 201306;

3. 南京农业大学无锡渔业学院, 江苏 无锡 214081)

摘要: 为探究崇明岛池塘养殖持久性污染状况, 采用气相色谱-质谱联用法对崇明岛不同区域草鱼池塘沉积物中 16 种优先控制多环芳烃 (PAHs) 的含量及分布情况进行了研究, 同时运用主成分分析法、特征比值法和质量标准法等对草鱼池塘中 PAHs 的来源及生态风险进行了分析。结果显示, 崇明岛草鱼池塘养殖沉积物中的 PAHs 总含量为未检出 (ND)~1 654.09 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 平均含量为 95.13 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 其中 4~5 环 PAHs 对总浓度的贡献率最高; 崇明岛不同区域草鱼池塘沉积物中的 PAHs 含量差异较大, 表现为岛中部池塘含量低, 沿岛四周池塘含量较高, 尤其是岛西部沿岸区池塘含量最高且种类多; 分析发现, 崇明岛草鱼养殖池塘中的 PAHs 主要来源于岛内生物燃烧和石油燃烧, 总体处于中等偏下污染水平, 生态风险较低, 但在西北部池塘存在潜在生态风险, 应予以重视。

关键词: 草鱼池塘; 多环芳烃; 沉积物; 生态风险; 崇明岛

中图分类号: X 132; S 965

文献标志码: A

崇明岛位于长江入海口, 是世界上最大的河口冲积岛, 是上海重要的生态屏障^[1]。2016 年上海市人民政府将崇明定位于世界级生态岛, 对崇明的生态环境提出了更高的要求。崇明岛南北向长, 四面临江, 鱼类生物资源丰富, 年产各类水产苗种、商品鱼 4.93 万 t^[2], 是上海市最重要的优质水产品养殖基地, 也是全国重要的水产苗种基地。草鱼池塘养殖是崇明岛最普遍且产量最大的养殖方式, 在全岛均有分布, 河道及周边环境的持久性风险污染物是池塘养殖最大的潜在污染源。分析和掌握养殖环境中持久性污染物特征及来源, 对于开展崇明岛生态养殖风险防控, 保障养殖水产品食品安全有重要意义。

多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 是指 2 个及以上苯环以稠环形式相连的化

合物, 是一类具有致突变、致癌、致畸等“三致”作用的有机污染物。PAHs 主要产生于有机物的不完全燃烧和高温热解, 美国国家环境保护局 (USEPA) 将 16 种 PAHs 确定为优先控制的持久性有机污染物^[3]。PAHs 在水体中广泛存在, 大部分经过吸附沉积累积在沉积物中, 对周围生态环境产生潜在危害^[4]。PAHs 对水产品具有发育毒性、生殖毒性^[5-6]等影响, 沉积物中的部分 PAHs 会被再次释放进水体或被水产品利用^[7]。近年来各类环境中的 PAHs 污染备受关注^[8-11], 国内淡水环境 PAHs 研究主要集中在松花江^[12]、黄河^[13]、长江^[14]和珠江^[15]等重要水系及重工业污染水域^[16-17], 主要研究水体沉积物中 PAHs 分布特征及生态风险。针对淡水养殖水域 PAHs 的调查研究和风险分析较为缺乏。本实验以崇明岛不同

收稿日期: 2020-02-24 修回日期: 2020-05-07

资助项目: 国家现代农业产业技术体系建设项目 (CARS-46)

通信作者: 刘兴国, E-mail: liuxingguo@fmiri.ac.cn

区域的草鱼养殖池塘为对象, 研究分析池塘表层沉积物中 PAHs 含量、分布特征、来源及生态风险水平, 为崇明岛水产养殖污染防控和水域生态修复提供了依据。

1 材料与方法

1.1 取样点与样品采集

在代表崇明全岛区位特征的 10 个乡镇中分别选择 1 个草鱼养殖场池塘作为采样点进行取样分析。各采样点分别记为 XH(新海标准化水产养殖场)、XF(鑫飞标准化水产养殖场)、XZ(徐章水产养殖合作社)、XM(新茂水产养殖场)、QS(前哨标准化水产养殖一场)、AS(鳌山水产养殖场)、RB(瑞钵水产养殖合作社)、PA(平安村养殖场)、CC(陈超水产养殖合作社)、CJ(长江标准化水产养殖场)(图 1)。

分别于 2018 年 7 月、2018 年 10 月和 2019 年 1 月采集样品。使用抓斗式采样器采用五点法采集池塘距水层 2 cm 的沉积物, 混匀后将沉积物样品分别放入干净的铝箔样品袋中运回实验室冷冻保存。

1.2 样品分析

按照 USEPA 8270D《气相色谱质谱法分析半挥发性有机物法》检测沉积物样品中的 16 种优先控制 PAHs。GC-MS 分析条件: 进样口温度为 280 °C, 不分流, 进样量为 1.0 μL, 柱流量为 1 mL/min, 柱温为 80 °C 保留 2 min, 以 20 °C/min 升至 180 °C, 保持 5 min, 再以 10 °C/min 升至 290 °C, 保持 5 min。离子源温度为 230 °C, 离子化能量为 70 eV, 接口温度为 280 °C, 四级杆温度为 150 °C, 用选择离子扫描进行定量检测。

以氘代多环芳烃作回收率指示物控制操作流程的回收率。每 10 个样品增加 1 个方法空白、基质加标、样品平行样。基质加标回收率为 70%~106%, 方法空白无检出。指示物回收率: 蔡-d₈ 为 70.3%~113.4%, 二氢芘-d₁₀ 为 76.3%~105.1%, 菲-d₁₀ 为 80.14%~91.2%。最后结果经回收率校正。

1.3 来源分析

特征分子比值法 特征分子比值法是判断 PAHs 来源的常用方法^[18]。常用的分析指标有 Ant/(Ant+Phe)、Flu/(Flu+Pyr)、InP/(InP+BghiP) 和 BaA/(BaA+Chr) 4 种见 (表 1)。

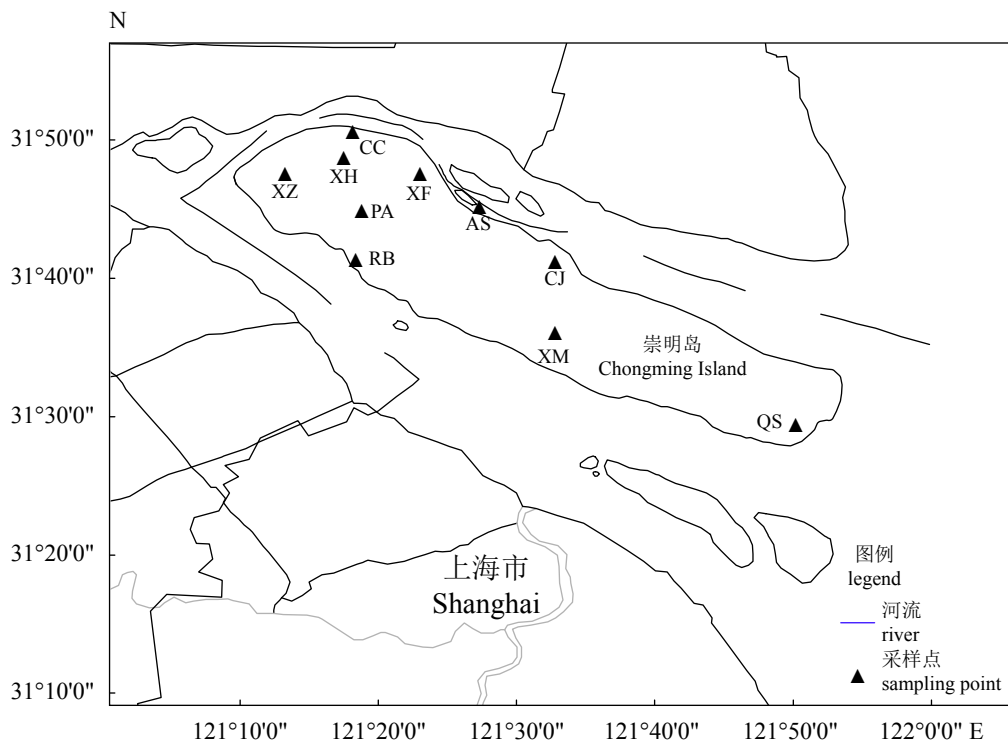


图 1 崇明岛草鱼养殖池塘采样点分布图

Fig. 1 Distribution of samoling points of grass carp ponds in Chongming Island

表 1 PAHs 的来源判定指标

Tab. 1 Source determination indicators of PAHs

PAHs种类 types of PAHs	石油燃烧 petroleum combustion	煤炭燃烧 coal combustion	草、木材燃烧 burning of grass and wood	石油源 petroleum
Ant/(Ant+Phe)	>0.1	>0.1	>0.1	>0.1
Flu/(Flu+Pyr)	0.4~0.5	>0.5	>0.5	<0.4
InP/(InP + BghiP)	0.2~0.5	>0.5	>0.5	<0.2
BaA/(BaA+Chr)	>0.35	>0.35	>0.35	<0.2

主成分分析法 使用 SPSS 软件对 16 种不同种类 PAHs 之间做相关性分析, 将采样点与 PAHs 含量作为一个关系矩阵, 对矩阵进行归一化处理后用主成分分析法进行计算, 运算得到各个因子的主成分权重和各主成分所解释的累计方差。

1.4 生态风险评价

沉积物质量基准法 Long 等^[19]1995 年提出的效应区间低值法 (effects range low, ERL) 和效应区间中值法 (effects range median, ERM) 是常用的沉积物质量基准。当有机物含量值小于 ERL, 则产生负面生态效应的可能性不大, 若含量介于 ERL 和 ERM 之间, 则具有潜在的生态风险; 如含量大于 ERM, 就会产生严重的生态效应。

采用基于质量基准 ERL 的超标系数 K 值法^[20]来评价沉积物中 PAHs 的生态风险, 计算公式如下:

$$K = c(\text{PAHs}) / \text{ERL}$$

式中, K 代表超标系数; $c(\text{PAHs})$ 表示沉积物中 PAHs 的浓度 ($\mu\text{g}/\text{kg}$)。当 $K < 0.1$ 时, PAHs 对环境无潜在风险; $0.1 < K < 3$ 时, 潜在风险几率较低; $3 < K < 7$ 时, 潜在风险几率中等; $7 < K < 10$ 时, 潜在风险几率较高; $K > 10$ 时, 可能存在生态风险。

沉积物质量标准法 沉积物质量标准法 (SQG) 是一种广泛用于评价沉积物中 PAHs 生态风险的方法^[21]。2006 年加拿大魁北克省颁布的沉积物质量标准包含罕见效应浓度值 (the rare effect level, REL)、临界效应浓度值 (the threshold effect level, TEL)、偶然效应浓度值 (the occasional effect level, OEL)、可能效应浓度值 (the probable effect level, PEL) 和频繁效应浓度值 (the frequent effect level, FEL)^[22]。当污染物浓度大于 FEL 时, 该环境存在高生态风险, 当其介于 PEL 和 FEL 之间时潜在风险几率较高, 介于 OEL 和 PEL 之间时潜在风险几率中等, 介于

TEL 和 OEL 之间时潜在风险几率较低, 介于 REL 和 TEL 之间时潜在风险几率最低, 当该数值小于 REL 时则无潜在风险^[22]。相应限值标准见表 2。

2 结果

2.1 PAHs 含量及分布情况

对崇明岛草鱼池塘表层沉积物进行取样分析, 发现 16 种优先控治的 PAHs 均有检出, ΣPAHs 含量范围为未检出 (ND)~1 654.09 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 平均含量为 95.13 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。

季节变化上, PAHs 含量范围: 夏季 1.44~1 654.09 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 秋季 ND~246.27 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 冬季 ND~180.33 $\mu\text{g}/\text{kg}$; 平均含量变化规律为夏季 (204.56 $\mu\text{g}/\text{kg}$) > 秋季 (43.36 $\mu\text{g}/\text{kg}$) > 冬季 (37.47 $\mu\text{g}/\text{kg}$)。

空间分布上, 崇明岛不同区域草鱼池塘沉积物中 ΣPAHs 的变化幅度较大, 岛内部区域池塘 (RB、PA、CJ) 的 ΣPAHs 明显低于沿岸池塘 (QS、XZ、AS 和 PA), 在沿岸池塘中, 岛西部沿岸区域池塘 (XH、XZ、CC) 的 ΣPAHs 含量明显高于东部沿岸池塘。崇明岛池塘中 ΣPAHs 表现为中部低, 沿岸高, 且西部又高于东部 (表 3)。

2.2 PAHs 的组成特征

分析发现, 不同环数 PAHs 对总含量的贡献从大到小分别为 4 环 (62.50%) > 5 环 (18.22%) > 3 环 (17.86%) > 6 环 (1.28%) > 2 环 (0.15%)。显示崇明草鱼池塘中的持久性污染物主要为 4~5 环 PAHs (图 2)。2 环和 6 环 PAHs 仅在崇明岛西部采样点中检出。不同季节中, 仅在秋季 2 环 PAHs 含量高于 6 环 (表 3)。

崇明岛草鱼池塘沉积物中不同 PAHs 单体的含量情况不同 (表 4), 其中 2 环 PAHs 的平均含量为 0.15 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 3 环 PAHs 平均含量为 3.44 $\mu\text{g}/\text{kg}$,

表 2 表层沉积物中 PAHs 的生态风险限值

Tab. 2 Ecological risk limits of PAHs in surface sediments

PAHs种类 types of PAHs	效应区间低值 ERL	效应区间中值 ERM	罕见效应浓度值 REL	临界效应浓度值 TEL	偶然效应浓度值 OEL	可能效应浓度值 PEL	频繁效应浓度值 FEL
萘 Nap	160	2 100	17	35	120	390	1 200
蒽 Ace	16	500	3.3	5.9	30	130	340
蒽烯 Acp	44	640	3.7	6.7	21	89	940
葱 An	19	540	16	47	110	240	1 100
芴 Fl	240	1 500	10	21	61	140	1 200
菲 Phe	85.3	1 100	25	42	130	520	1 100
苯并[a]葱 BaA	600	5 100	14	32	120	390	760
蒎 Chr	665	2 600	26	57	240	860	1 600
荧葱 Flu	261	1 600	47	110	450	2 400	4 900
芘 Pyr	384	2 800	NA	NA	NA	NA	NA
苯并[ghi]芘 BghiP	430	1 600	NA	NA	NA	NA	NA
苯并[a]芘 BaP	63.4	260	11	32	150	780	3 200
二苯并[a,h]葱 DbA	NA	NA	3.3	6.2	43	140	200
总量 Σ PAHs	4 022	40 792	NA	NA	NA	NA	NA

表 3 崇明岛草鱼池塘表层沉积物 PAHs 含量及季节变化

Tab. 3 Content and seasonal variation of PAHs in surface sediments of grass carp pond in Chongming Island

PAHs	季节 season	采样点 sampling point										
		XZ	XH	CC	RB	PA	XF	AS	XM	CJ	QS	
2环 2 rings	夏季 summer	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	秋季 autumn	ND	ND	ND	ND	ND	4.16	ND	ND	ND	ND	ND
	冬季 winter	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
3环 3 rings	夏季 summer	11.76	257.43	32.26	14.52	6.40	22.25	9.06	38.62	1.44	ND	ND
	秋季 autumn	50.39	6.13	4.13	3.72	0.75	25.66	ND	ND	0.72	ND	ND
	冬季 winter	6.61	ND	ND	ND	ND	ND	6.06	ND	0.78	11.06	ND
4环 4 rings	夏季 summer	54.90	1 012.43	43.55	35.16	4.00	33.38	16.72	24.13	ND	14.62	ND
	秋季 autumn	156.84	29.63	14.46	ND	5.23	49.94	3.09	3.79	0.72	ND	ND
	冬季 winter	99.13	0.87	19.87	ND	6.80	ND	122.74	ND	10.13	21.43	ND
5环 5 rings	夏季 summer	14.90	347.72	6.45	ND	ND	7.42	ND	ND	ND	ND	ND
	秋季 autumn	39.03	6.13	8.26	ND	ND	20.81	ND	ND	ND	ND	ND
	冬季 winter	ND	ND	17.66	ND	ND	ND	51.52	ND	ND	ND	ND
6环 6 rings	夏季 summer	ND	36.50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	秋季 autumn	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	冬季 winter	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Σ PAHs	夏季 summer	81.57	1 654.09	82.25	49.68	10.39	63.05	25.77	62.75	1.44	14.62	ND
	秋季 autumn	246.27	41.89	26.85	3.72	5.97	100.57	3.09	3.79	1.45	ND	ND
	冬季 winter	105.74	0.87	37.52	ND	6.80	ND	180.33	ND	10.91	32.50	ND

注: ND表示未检出

Notes: ND means not detected

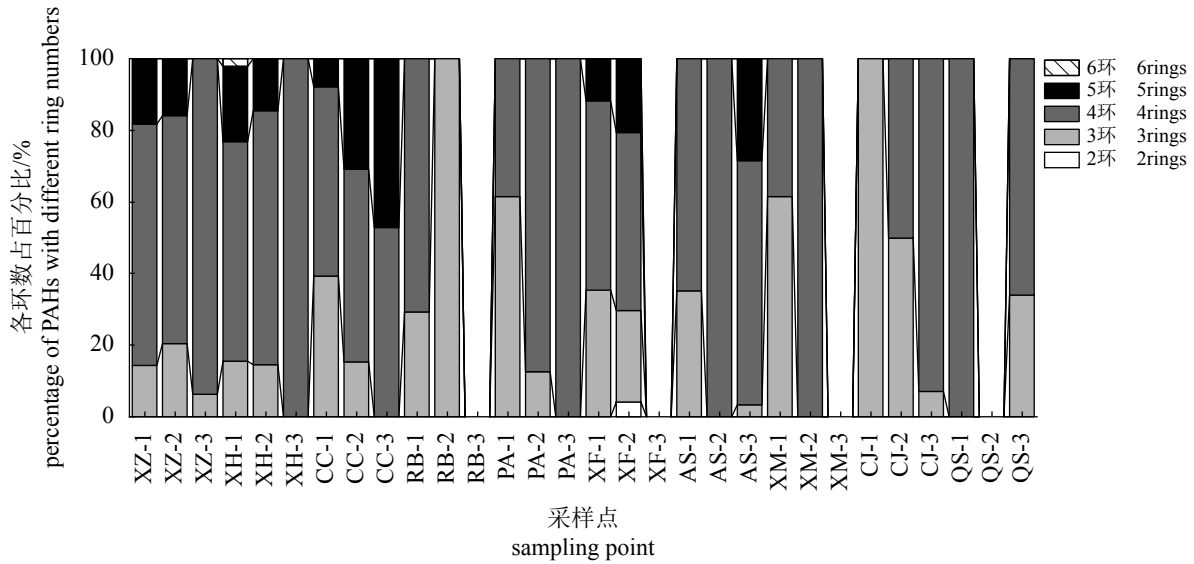


图 2 崇明岛草鱼池塘表层沉积物中不同环数多环芳烃组成分布

1. 夏季, 2. 秋季, 3. 冬季

Fig. 2 Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments of grass carp pond in Chongming Island

1. summer, 2. autumn, 3. winter

表 4 不同 PAHs 单体平均含量及检出率季节变化

Tab. 4 Seasonal variation of average content and detection rate of PAHs

PAHs	单体 monomer	平均含量/($\mu\text{g}/\text{kg}$) average content				检出率/% detection rate			
		夏季 summer	秋季 autumn	冬季 winter	平均值 average	夏季 summer	秋季 autumn	冬季 winter	平均值 average
2环 2rings	Nap	ND	0.46	ND	0.15	0	10	0	3.33
3环 3 rings	Ace	1.08	0.80	ND	0.63	10	30	0	13.33
	Acp	0.58	0.23	0.09	0.30	10	10	10	10.00
	Ant	9.90	1.96	ND	3.95	70	20	0	30.00
	Fl	3.09	0.24	ND	1.11	80	10	0	30.00
	Phe	24.73	6.94	1.90	11.19	90	60	30	60.00
4环 4 rings	BaA	19.13	3.94	3.58	8.89	90	70	40	66.67
	Chr	24.74	8.05	4.61	12.47	90	60	40	63.33
	Flu	39.56	8.43	6.64	18.21	70	50	60	60.00
	Pyr	40.46	8.88	5.37	18.23	50	60	60	56.67
5环 5 rings	BbF	13.71	3.34	2.50	6.52	40	40	20	33.33
	BkF	8.38	2.65	3.25	4.76	30	40	20	30.00
	BghiP	6.72	ND	ND	2.24	10	0	0	3.33
	BaP	8.26	2.26	1.94	4.15	10	30	10	16.67
	DbA	0.58	ND	ND	0.19	10	0	0	3.33
6环 6rings	InP	3.65	ND	ND	1.22	10	0	0	3.33

注: ND. 未检出
Notes: ND means not detected

4 环 PAHs 平均含量为 $14.45 \mu\text{g}/\text{kg}$, 5 环 PAHs 平均含量为 $3.57 \mu\text{g}/\text{kg}$, 6 环 PAHs 平均含量为 $1.22 \mu\text{g}/\text{kg}$ 。

崇明岛草鱼池塘沉积物中 PAHs 平均检出率从大到小依次为 4 环 (61.73%)、3 环 (28.67%)、5

环 (17.33%)、2 环 (3.33%) 和 6 环 (3.33%)。其中, 检出率最高的 PAHs 单体为 BaA, 其他检出率超过 50% 的 PAHs 分别为 Chr、Phe、Pyr 和 Flu。在崇明全部区域的池塘中均有 3 环和 4 环多环芳烃检出 (表 4)。

2.3 PAHs 来源分析

采用特征分子比值法对崇明岛草鱼池塘沉积物中 PAHs 的来源进行比较分析, 发现崇明岛草鱼池塘沉积物中 BaA/(BaA+Chr) 的数值范围为 0~0.59, 平均值为 0.42, 其中 CJ 池塘中的 BaA/(BaA+Chr) 值 < 0.2, XF 点在 0.2~0.35, 其余池塘均大于 0.35, 对照表 1 数据, 可以看出除 CJ 池塘是石油源和 XF 采样点石油燃烧源外, 其他池塘的 PAHs 均来自生物燃烧; 草鱼池塘沉积物中 PAHs 特征值 Ant/(Ant+Phe) 的范围为 0~0.32, 平均值为 0.15, 其中特征值 Ant/(Ant+Phe) < 0.1 的 PA、

AS、CJ 和 QS 池塘中的 PAHs 主要为石油源, XM、XZ、RB、CC、XH 和 XF 等 6 个池塘中 PAHs 主要来自燃烧源, 其中包括石油燃烧和生物燃烧 (图 3)。草鱼池塘沉积物中 PAHs 的 Flu/(Flu+Pyr) 范围为 0~0.62, 平均值为 0.45, Flu/(Flu+Pyr) < 0.4 的 XM、PA 和 XZ 池塘中的 PAHs 来自于石油源, Flu/(Flu+Pyr) > 0.5 的 AS、CJ 和 QS 池塘中的 PAHs 来源为生物燃烧, 其余各采样点的 PAHs 为石油燃烧源。综上比较, 可以判断崇明岛草鱼池塘沉积物中 PAHs 的主要来源为燃烧源, 其中以生物燃烧为主, 其次为石油燃烧。

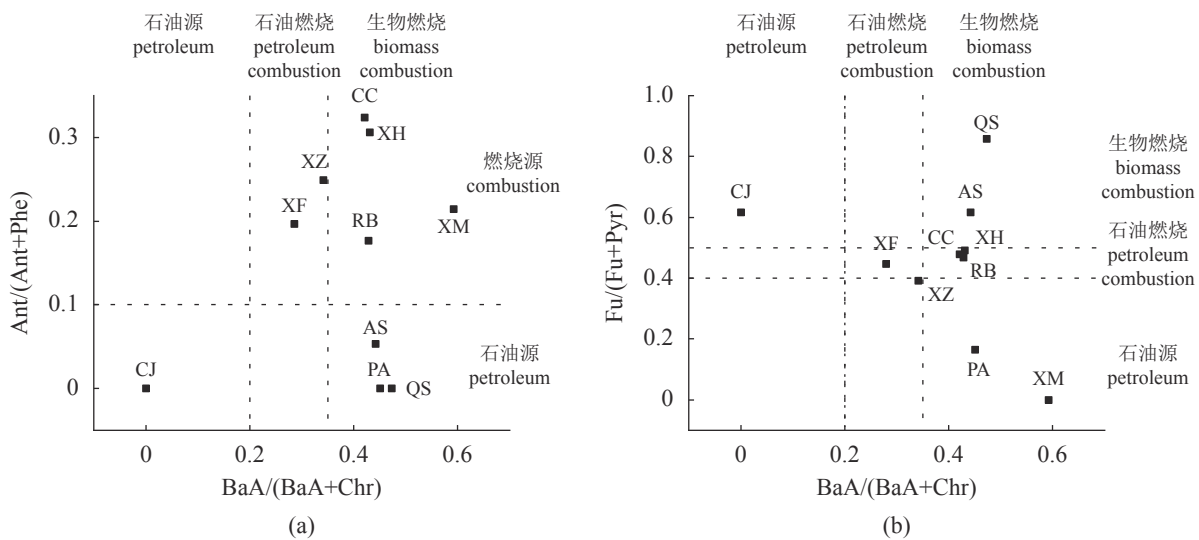


图 3 崇明岛草鱼池塘表层沉积物 PAHs 特征分子比值

Fig. 3 Characteristic molecular ratio of PAHs in surface sediments of grass carp ponds in Chongming Island

对使用 SPSS 软件计算得到的崇明岛 10 个草鱼池塘沉积物中 16 种 PAHs 的贡献率进行分析。结果显示, 沉积物中的 PAHs 主要由 3~6 环 PAHs 组成, 其中 Acp、Fl、Flu 主要是木材、秸秆等生物燃烧的指示物, 而高环 Phe、Pyr、Chr、BbF 和 BkF 主要来源于煤炭燃烧和交通污染, 因此推断沉积物中的 PAHs 来自燃烧混合源 (图 4)。

2.4 PAHs 风险分析

采用沉积物质量基准法对崇明岛草鱼池塘沉积物进行生态风险分析。结果显示, 崇明岛草鱼池塘中 Σ PAHs 和各 PAHs 的平均值均低于 ERL, 总体生态风险很小, 但夏季部分采样点存在一定的生态风险。全年崇明岛草鱼养殖池塘中 Σ PAHs 平均值和最大值均未超过 ERL, 总体上 PAHs 对生态环境潜在风险水平较低。

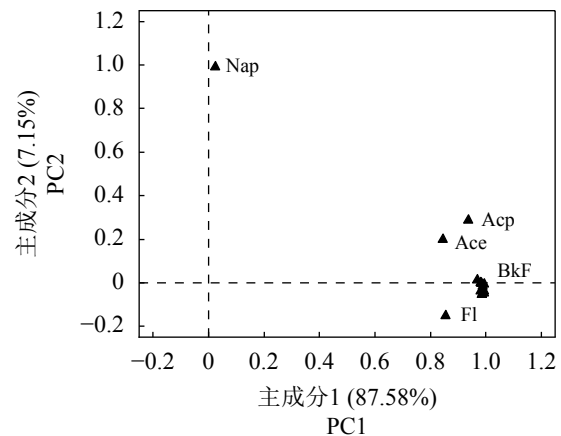


图 4 崇明岛草鱼池塘表层沉积物 PAHs 主成分分析
Fig. 4 Sources identification of PAHs in surface sediments of grass carp ponds in Chongming Island

从季节变化上看, 研究区域中 PAHs 的生态风险逐步降低 (表 5)。夏季风险最高, 其中 Ant 的潜在风险几率中等且仅 2 种 PAHs 单体 (Nap 和 Fl) 无潜在风险, 其余 9 种 PAHs 单体潜在风险几率较低; 秋季次之, 5 种 PAHs 单体 (Nap、

Acp、Fl、BaA、BghiP) 无潜在风险; 到冬季时, 已有 8 种 PAHs 单体达到无潜在风险水平, 其余 PAHs 单体对生态环境造成的风险水平也降至最低水平。

表 5 崇明岛草鱼池塘表层沉积物中 PAHs 生态风险季节变化

Tab. 5 Seasonal variation of PAHs ecological risk in sediments of grass carp pond in Chongming Island

K 值	生态风险等级 ecological risk level		PAHs 单体		
			夏季 summer	秋季 autumn	冬季 winter
$K < 0.1$	无潜在风险	no potential risk	Nap, Fl	Nap, Acp, Fl, BaA, BghiP	Nap, Ace, Acp, Ant, Fl, BaA, Chr, BghiP
$0.1 < K < 3$	潜在风险几率较低	low potential risk	Phe, BaP, Flu, Pyr, Chr, BaA, Ace, BghiP, Acp	Ant, Phe, Ace, BaP, Flu, Pyr, Chr	Flu, Pyr, Phe, BaP
$3 < K < 7$	潜在风险几率中等	medium potential risk	Ant		
$7 < K < 10$	潜在风险几率较高	high potential risk			
$K > 10$	可能存在生态风险	possible ecological risks			

根据沉积物质量标准法, 对 10 个样点中 PAHs 进行生态风险评价。结果显示仅有夏季 XH 池塘中存在 Phe 和 BaA 浓度介于 OEL 和 PEL 之间, 存在中等潜在风险。夏季 XM、秋季的 XZ 和 RB 以及冬季 AS 池塘种 Pyr、Ace 和 Chr 浓度介于 REL 和 TEL 之间。其余池塘的 PAHs 均未超过 REL, 无潜在风险。

从空间分布上来看, 崇明岛沿岸池塘 (XZ、XH、RB 和 AS) 存在潜在风险几率相对较高, 且岛西部池塘的风险值高于东部。从季节变化上看, 夏季风险最高, 达到了中等潜在风险水平, 秋季次之, 冬季风险水平最低 (图 5)。

3 讨论

崇明岛是一个相对独立的岛屿, 选择代表崇明岛全部区域的草鱼池塘进行研究分析, 可以客观、全面地反映崇明 PAHs 的污染情况, 有利于分析污染原因和对症防控。本研究中崇明岛草鱼养殖池塘 Σ PAHs 含量水平与长江武汉段大体相当^[14], 但远低于松花江^[12] 水域和海河河口^[23], 也低于太湖^[24]、淀山湖^[25]、白洋淀^[26] 等水域, 但高于长江口^[27] 沉积物中 PAHs 含量。崇明岛中部区域池塘 Σ PAHs 含量低, 沿岛四周的池塘含量高, 尤其是岛西部沿岸区池塘含量最高, 且种类最多。崇明统计年鉴^[2] 中数据显示, 崇明岛西部经济及工业发展集中, 此外长江上游苏

州及北岸南通等地发电厂等工业设施较多, 可以推断崇明岛养殖池塘中的 PAHs 主要与岛内外工业活动有关。季节变化上, 研究区域 PAHs 夏季含量最高, 秋季冬季逐渐减少, 这与夏季用电高峰, 发电厂等工业设施产生的 PAHs 增加存在相关性。

中、高分子量的 PAHs 疏水性强, 更易于赋存于沉积物中, 导致沉积物中 PAHs 以中、高分子量的 PAHs 为主^[15]。高分子量的 PAHs 通过水体输送及大气沉降传播的能力较低, 而本研究发现崇明岛草鱼池塘沉积物中 PAHs 以 4~5 环为主, 未发现高分子量 PAHs 在沉积物中大量出现, 与王薛平^[28] 对上海市河网中 PAHs 环数组成基本相似, 可能是崇明岛总体生态环境较好, 产生高分子量 PAHs 的污染源较少。通过主成分分析发现, 崇明岛池塘表层沉积物中 PAHs 的主要来自燃烧源, 其中以生物燃烧为主, 其次为石油燃烧源, 其中岛的西部区域以石油源为主, 东部区域以燃烧源为主。吕金刚等^[29] 研究崇明岛农田土壤中 PAHs 的来源发现其主要有石油源和燃烧源 2 种, 且燃烧源主要是以煤和木材燃烧, 与本研究中表层沉积物中 PAHs 的来源解析相类似, 说明池塘中 PAHs 的来源与岛内其他生态系统相似。从季节变化上看, 燃烧源所占比例不断上升, 在冬季比例最高, 这与冬季燃煤取暖有关。从污染源控制来看, 应当重视崇明岛周

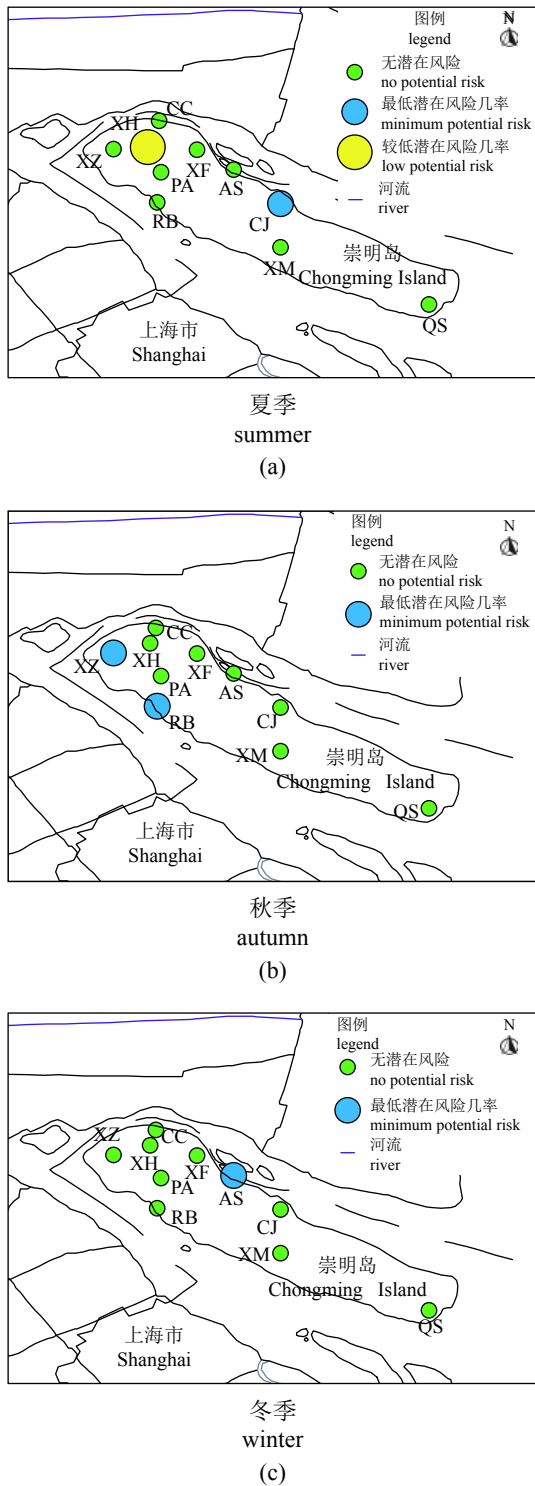


图5 崇明岛草鱼池塘PAHs生态风险图

Fig. 5 Ecological risk of PAHs in surface sediment of grass carp pond in Chongming Island

边水域环境的协同治理, 周边区域工厂排放的管理和产业结构的优化, 其次崇明岛居民的能源消费结构也应当适当调整。

<https://www.china-fishery.cn>

为明确崇明岛草鱼池塘中PAHs的生态风险, 本研究采用了不同的生态风险分析方法进行了分析, 均显示目前崇明岛草鱼池塘中PAHs潜在生态风险很小, 但在崇明岛西部池塘存在潜在生态风险, 因此应加强西部区域的生态治理。从产生风险的PAHs单体来看, 全年中Ant、Pyr、Flu、Phe和BaP都存在潜在风险, 应当着重对这些单体进行环境监测, 加强相关风险的预防监控。崇明的渔业从业者应当重视对沿岸池塘的PAHs风险防控, 尤其是夏秋两季的风险相对较高, 建议养殖户在养殖周期完成后对池塘进行清淤, 以防止PAHs在表层沉积物中的积累。

4 结论

崇明岛草鱼池塘沉积物中 \sum PAHs范围为ND~1 654.09 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 平均含量95.13 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。季节变化上呈现夏季、秋季、冬季逐渐减少的特征。4~5环PAHs是崇明沉积物中主要PAHs, 其中芘含量最高, 平均值达18.23 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。

崇明岛草鱼池塘中的 \sum PAHs空间分布表现为岛中部池塘含量低, 沿岛四周池塘含量高, 岛西部沿岸区池塘含量最高且种类多。从崇明岛不同区域草鱼池塘PAHs组成分布及来源分析断定, 崇明岛草鱼养殖池塘中的PAHs主要来源为生物燃烧和石油燃烧等, 与区域产业结构有关, 阶段性长江漂浮油污等也会造成岛内池塘PAHs污染。

目前, 崇明岛草鱼池塘中的 \sum PAHs含量处于中低水平, 总体生态风险很小, 尚不构成污染, 但在西北部池塘存在潜在生态风险, 应予以重视。

参考文献 (References):

- [1] 上海市人民政府. 崇明世界级生态岛发展“十三五”规划[Z]. 2016-12-06.
Shanghai Municipal People's Government. 13th five year development plan of Chongming world class ecological island[Z]. 2016-12-06 (in Chinese).
- [2] 《崇明年鉴》编纂委员会. 崇明年鉴[M]. 上海: 学林出版社, 2019.
Compilation Committee of Chongming Yearbook. Chongming yearbook[M]. Shanghai: Xuelin publishing house, 2019 (in Chinese).

中国水产学会主办 sponsored by China Society of Fisheries

- [3] Ribes A, Grimalt J O, Torres García C J, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in mountain soils of the subtropical Atlantic[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2003, 32(3): 977-987.
- [4] 冯精兰, 沈珍瑶, 牛军峰, 等. 再悬浮持续时间对沉积物中PAHs释放的影响[J]. 科学通报, 2008, 53(18): 2777-2782.
Feng J L, Shen Z Y, Niu J F, *et al.* The role of sediment resuspension duration in release of PAHs[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(18): 2777-2782(in Chinese).
- [5] 徐文菊. 三丁基锡和菲对鱼类的毒性效应研究 [D]. 汕头: 汕头大学, 2008.
Xu W J. The toxic effects of tributyltin and phenanthrene on fish[D]. Shantou: Shantou University, 2008 (in Chinese).
- [6] 罗宏敏. 菲和 3-甲基胆蒎对褐菖鲉生殖机能的影响 [D]. 厦门: 厦门大学, 2008.
Luo H M. Effect of phenanthrene and 3-methylcholanthrene exposure on reproductive function of *Sebastes marmoratus*[D]. Xiamen: Xiamen University, 2008 (in Chinese).
- [7] 和庆. 长三角地区池塘养殖水产品重金属和多环芳烃污染评价及其生物有效性研究 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2018.
He Q. Pollution Evaluation and bioavailability of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in pond aquaculture products in the Yangtze river delta[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2018 (in Chinese).
- [8] 田兆雪, 刘雪华. 环境中多环芳烃污染对生物体的影响及其修复[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(12): 79-89.
Tian Z X, Liu X H. Influence of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) from the environment on organisms and their bioremediation effect[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 41(12): 79-89(in Chinese).
- [9] 葛蔚, 程琪琪, 柴超, 等. 山东省农田土壤多环芳烃的污染特征及源解析[J]. 环境科学, 2017, 38(4): 1587-1596.
Ge W, Cheng Q Q, Chai C, *et al.* Pollution characteristics and source analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons in agricultural soils from Shandong[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(4): 1587-1596(in Chinese).
- [10] 田蕴, 郑天凌, 王新红. 厦门西港表层海水中多环芳烃 (PAHs)的含量、组成及来源[J]. *环境科学学报*, 2004, 24(1): 50-55.
Tian Y, Zheng T L, Wang X H. Concentration, composition and origin of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface water of Xiamen Harbor[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2004, 24(1): 50-55(in Chinese).
- [11] 马万里, 李一凡, 孙德智, 等. 哈尔滨市大气中多环芳烃的初步研究[J]. 中国环境科学, 2010, 30(2): 145-149.
Ma W L, Li Y F, Sun D Z, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in air of Harbin City[J]. *China Environmental Science*, 2010, 30(2): 145-149(in Chinese).
- [12] 李泽文, 王海燕, 孔秀琴, 等. 松花江表层沉积物中16种多环芳烃空间分布特征及生态风险评价[J]. 环境科学研究, 2020, 33(1): 163-173.
Li Z W, Wang H Y, Kong X Q, *et al.* Spatial distribution characteristics and ecological risk assessment of 16 PAHs in surface sediment of Songhua River[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(1): 163-173(in Chinese).
- [13] 张旭. 黄河流域不同季节水相、沉积物和土壤中多环芳烃分布、来源和风险评价 [D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
Zhang X. Distribution, sources and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in water, sediment and soil in different seasons of the Yellow River Basin[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017 (in Chinese).
- [14] 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(in Chinese).
- [15] 刘珩, 李建民, 刘昕宇. 珠江流域部分水源地多环芳烃污染物的生态风险评价研究[J]. *水利技术监督*, 2014, 22(3): 11-15.
Liu H, Li J M, Liu X Y. Study on the ecological risk assessment of PAHs in some water sources in the Pearl River Basin[J]. *Technical Supervision in Water Resources*, 2014, 22(3): 11-15(in Chinese).

- [16] 苗迎, 孔祥胜, 李成展. 重工业城市岩溶地下水中多环芳烃污染特征及来源[J]. 环境科学, 2019, 40(1): 239-247.
Miao Y, Kong X S, Li C Z. Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in a karst groundwater system in a strongly industrial city[J]. Environmental Science, 2019, 40(1): 239-247(in Chinese).
- [17] 周庆红. 采煤沉陷水体中底泥—水界面持久性有机污染物迁移行为研究 [D]. 淮南: 安徽理工大学, 2015.
Zhou Q H. Study on migration behavior of POPs in sediment-water interface of coal mining subsidence[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2015 (in Chinese).
- [18] Dahle S, Savinov V M, Matishov G G, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in bottom sediments of the Kara Sea shelf, Gulf of Ob and Yenisei Bay[J]. *Science of the Total Environment*, 2003, 306(1-3): 57-71.
- [19] 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.
- [20] 王瑞琦. 黄浦江沉积物中多环芳烃的赋存、源解析及风险评价 [D]. 上海: 华东师范大学, 2015.
Wang R Q. The occurrence level, source analysis and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbon in Sediments of Huangpu River[D]. Shanghai: East China Normal University, 2015 (in Chinese).
- [21] Gu Y G, Li H B, Lu H B. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface sediments from the largest deep plateau lake in China: Occurrence, sources and biological risk[J]. *Ecological Engineering*, 2017, 101: 179-184.
- [22] 李利荣, 王艳丽, 高璟赟, 等. 中国表层水体沉积物中多环芳烃源解析及评价[J]. *中国环境监测*, 2013, 29(6): 92-98.
Li L R, Wang Y L, Gao J Y, *et al.* Source and risk assessment of PAHs in surface sediments from rivers and lakes of China[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2013, 29(6): 92-98(in Chinese).
- [23] 尤晓光, 李毅, 史璇, 等. 海河流域典型河口表层沉积物多环芳烃生态风险评价及来源辨析 [C]//2014 中国环境科学学会学术年会论文集. 成都: 中国环境科学学会, 2014: 1-9.
You X G, Li Y, Shi X, *et al.* Ecological risk assessment and source discrimination of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments of typical estuaries in the Haihe River Basin[C]//Proceedings of 2014 Annual Meeting of the Chinese Academy of Environmental Sciences. Chengdu: Chinese Academy of Environmental Sciences, 2014: 1189-1195 (in Chinese).
- [24] 余云龙, 李圆圆, 林田, 等. 太湖表层沉积物中多环芳烃的污染现状及来源分析[J]. *环境化学*, 2013, 32(12): 2336-2341.
Yu Y L, Li Y Y, Lin T, *et al.* Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments from Taihu Lake[J]. *Environmental Chemistry*, 2013, 32(12): 2336-2341(in Chinese).
- [25] 杜威宁, 刘敏, 朱俊敏, 等. 淀山湖沉积物PAHs季节分布与风险度指数评价[J]. *中国环境科学*, 2019, 39(9): 3999-4006.
Du W N, Liu M, Zhu J M, *et al.* Season distribution characteristics and the risk index assessment of PAHs in surface sediments of Dianshan Lake[J]. *China Environmental Science*, 2019, 39(9): 3999-4006(in Chinese).
- [26] 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(in Chinese).
- [27] 张晨晨, 高建华, 郭俊丽, 等. 长江口及废黄河口海域表层沉积物中多环芳烃分布特征和生态风险评价[J]. *海洋通报*, 2018, 37(1): 38-44.
Zhang C C, Gao J H, Guo J L, *et al.* Distribution and ecological risk assessment of PAHs in surface sediments from the Yangtze Estuary and the old Yellow River Estuary[J]. *Marine Science Bulletin*, 2018, 37(1): 38-44(in Chinese).
- [28] 王薛平. 上海市地表水体中多环芳烃与多氯联苯的环境行为与风险研究 [D]. 上海: 华东师范大学, 2017.
Wang X P. Environmental behaviors and risks of polycyclic aromatic hydrocarbons and polychlorinated biphenyls in the surface water of Shanghai[D]. Shanghai: East China Normal University, 2017 (in Chinese).
- [29] 吕金刚, 毕春娟, 陈振楼, 等. 上海市崇明岛农田土壤中多环芳烃分布和生态风险评价[J]. *环境科学*, 2012, 33(12): 3336-3341.
Lyu J G, Bi C J, Chen Z L, *et al.* Distribution and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in farmland soil of Chongming Island, Shanghai[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(12): 3336-3341(in Chinese).

33(12): 4270-4275.

Lü J G, Bi C J, Chen Z L, *et al.* Distribution and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocar-

bons in agricultural soil of the Chongming Island in Shanghai[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(12): 4270-4275(in Chinese).

Distribution and ecological risk of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments of Chongming Island grass carp ponds

LIU Yunfei^{1,2}, LIU Xingguo^{1*}, GAO Zixin^{1,2}, CHENG Feng^{1,3}

(1. *Institute of Fishery Machinery and Instruments, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200092, China;*

2. *National Demonstration Center for Experimental Fisheries Science Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;*

3. *Wuxi Fisheries College, Nanjing Agricultural University, Wuxi 214081, China)*

Abstract: In order to investigate the polycyclic aromatic hydrocarbons pollution of pond aquaculture in Chongming Island, the contents and distribution of 16 PAHs in the sediments of 10 grass carp ponds in different areas of Chongming Island were analyzed by GC-MS. The sources of PAHs in ponds in different areas were analyzed by principal component analysis and characteristic ratio method. At the same time, the ecological risk was evaluated by sediment quality standard method and quality standard method. The results showed that the total PAHs content in the aquaculture sediment of grass carp pond in Chongming Island ranged from ND to 1 654.09 $\mu\text{g}/\text{kg}$, with an average content of 95.13 $\mu\text{g}/\text{kg}$, of which the contribution rate of PAHs in the 4-5 rings was high; the PAHs content in the sediment of grass carp pond in different areas of Chongming Island was quite different, the content of pond in the middle of island was low, and the content of pond around the island was high, especially in the west coastal area of of Chongming Island. PAHs mainly come from biomass combustion and oil combustion, which are generally at the lower middle pollution level, and the ecological risk is low, but there are potential ecological risks in the ponds along the west coast of the island, which should be paid attention to.

Key words: grass carp pond; polycyclic aromatic hydrocarbons; sediment; ecological risk; Chongming Island

Corresponding author: LIU Xingguo. E-mail: liuxingguo@fmiri.ac.cn

Funding projects: National Modern Agricultural Technology System Construction Project (CARS-46)