

文章编号: 1674-5566(2020)04-0526-07

DOI:10.12024/jsou.20190502651

罗氏沼虾养殖周期中 PAHs 的生物累积特征及食用风险评价

张 丽¹, 陈以芹¹, 戴习林^{2,3,4}, 杨 明⁵, 李娟英¹, 彭自然¹

(1. 上海海洋大学 海洋生态与环境学院, 上海 201306; 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. 上海海洋大学 农业农村部淡水水产种质资源重点实验室, 上海 201306; 4. 上海海洋大学 水产动物遗传育种中心上海市协同创新中心, 上海 201306; 5. 上海申漕特种水产开发有限公司, 上海 201516)

摘 要: 多环芳烃(PAHs)是一种由 2 个或者多个苯环组成的具有致癌性的有机污染物, 广泛地存在于各种环境介质中。为了解上海金山区漕泾建国路某养殖虾塘内罗氏沼虾(*Macrobrachium rosenbergii*)体内多环芳烃的残留水平及食用风险, 测定了采自 2018 年 7—9 月金山区罗氏沼虾体内 16 种 PAHs 的浓度, 分析不同时期的累积特征并计算了其潜在食用风险。研究表明: 除了 ANY、ANA、DBA、IPY 和 BPF 以外, 其余的 11 种 PAHs 均有不同程度的检出, 不同时期罗氏沼虾体内 Σ PAHs 浓度范围为 47.6 ~ 106 ng/g 干重。PAHs 优势组分为 3,4 环结构, 其中 4 环占比最高, 优势单体为 ANT、BaA 和 CHR; 溯源分析结果表明, 研究池塘内 PAHs 主要是来源于燃烧源。采用美国环保署 (USEPA) 推荐的健康风险模型对食用罗氏沼虾引起的健康风险评价结果表明, 金山区罗氏沼虾养殖虾塘 PAHs 致癌风险 R_{ILC} 值处于可接受水平, 不会对消费者的人体健康产生影响。

关键词: 金山区; 养殖虾塘; 多环芳烃; 生物累积; 风险评价

中图分类号: X 132 **文献标志码:** A

多环芳烃(PAHs)在各个环境介质中广泛存在, 是一类具有半挥发性、高毒性和生物累积性的持久性有机污染物^[1]。环境介质中的多环芳烃不仅具有致癌作用、致畸作用和致突变作用, 而且还会对生物体的免疫系统产生一定的威胁^[2-3]。因此, 多环芳烃引发的各种环境污染问题正日益受到高度重视。罗氏沼虾(*Macrobrachium rosenbergii*)也被称为马来西亚大虾, 是一种大型淡水虾, 原产于印度洋、西太平洋岛屿^[4]。罗氏沼虾因具有较快的生长速率且食物来源多样化、个体大、肉质好、生长快和易于养殖等优点, 是目前我国重要的养殖虾类^[5]。金山区是上海市水产养殖大区, 尤其罗氏沼虾池塘养殖较多。据统计, 2017 年金山区养殖水产品产量为 8.55×10^3 t^[6], 廊下特种养殖场、漕泾爱国路虾类养殖场和朱行养殖场等重要的产学研基地都分布在金山区。如今消费者对于水产品质量安全日益关注, 评估罗氏沼虾体内多环芳烃残留

水平和潜在食用风险是当地政府和民众较为关心的问题。

这些污染物可能会通过大气干湿沉降和地表径流等多种途径进入水体, 进而进入鱼、虾、蟹和贝等水生生物体内, 通过食物链传递, 最终被消费者食用后在人体内蓄积, 进而对人体产生潜在的健康风险^[7]。一般来说, 鱼类等水产品只占人类饮食的一小部分(10%左右), 但已被证明也是污染物进入人体的主要途径之一^[8-9]。因此, 本文通过对金山区典型池塘内罗氏沼虾在完整养殖周期中 PAHs 的残留水平、生物体内的单体组成、生物累积特性、生长周期内的浓度变化、来源诊断以及食用风险评价等方面的跟踪监测和风险计算, 基于 PAHs 的残留浓度评价金山区漕泾建国路某养殖虾塘内罗氏沼虾产品品质, 为水产品质量评估和保障消费者的健康提供数据支撑和依据。

收稿日期: 2019-05-13 修回日期: 2019-12-24

基金项目: 上海市现代农业产业技术体系(虾类)项目(沪农科产字〔2018〕第 5 号)

作者简介: 张 丽(1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向为持久性有机污染物。E-mail: 1726775063@qq.com

通信作者: 彭自然, E-mail: zrpeng@shou.edu.cn

1 材料与方 法

1.1 实验材料

实验中所用到的二氯甲烷(Dichloromethane)、乙腈(Acetonitrile)、石油醚(Petroleum ether)和无水乙醇等均为色谱纯,均购自国药集团;实验硅胶于马弗炉 650 °C 下灼烧 4 h,冷却后转移到干燥器中保存待用。16 种 PAHs 混标购自安捷伦科技(中国)有限公司,置于 4 °C 冰箱中保存备用。

1.2 样品采集

采样虾塘于 2018 年 5 月 22 日投苗,并于养殖的关键阶段即 7 月至 9 月^[10]在金山区漕泾爱国路虾类养殖场(8 个虾塘)进行罗氏沼虾的采集,分别在 7 月 12 日(436 尾)、8 月 2 日(252 尾)、8 月 24 日(178 尾)、9 月 14 日(111 尾)和 9 月 27 日(97 尾)采样。样品由养殖人员从养殖虾塘中随机捕捞,并将样品装入铝箔自封袋中,标明虾塘号及采样时间。随后将采集的虾样置于事先加有冰袋的泡沫保温箱中运回实验室,在 -20 °C 冰箱中保存待测。

1.3 样品的预处理

萃取:将去除虾头、虾壳和肠腺后的肌肉剪碎,用铝箔包好冷冻干燥,再用玻璃研钵研磨成粉末。精确称取 3 g(精确到 0.001 g)研磨后的虾粉置于无水乙醇清洗过的萃取管中,加入 15 mL 二氯甲烷进行微波萃取。

去脂:将萃取得到的样品液氮吹至干,随后加入 4 mL 乙腈旋涡振荡 1 min 充分溶解后,再加入 4 mL 用乙腈饱和过的石油醚。旋涡振荡 1 min,使其充分混合,再于 3 000 r/min 离心 10 min,将上层溶有脂肪的石油醚层吸出,留下乙腈层。将余下的乙腈用氮气吹干,再加入 2 mL 左右的二氯甲烷溶解上述去脂后的残留物。

净化:实验硅胶事先置于马弗炉中将水分烘干,用 10 mL 的二氯甲烷冲洗硅胶净化柱后,将约 2 mL 浓缩去脂后的残留物转移到硅胶柱内,用 10 mL 二氯甲烷分多次进行净化处理,将净化后的洗脱液收集于玻璃离心管中,用氮气吹干浓缩洗脱液,最后用乙腈分多次清洗玻璃离心管将洗脱液定容至 1 mL 自动进样瓶中待测。

1.4 样品的测定

采用气质联用仪测定样品中的 PAHs^[11]。色谱柱为 DB-5MS(30 m × 0.25 mm × 0.25 μm),载气为氦气,流速为 1.2 mL/min,进样口温度 280 °C,进样量 2 μL,进样方式不分流,升温程序以 15 °C/min 的速率升至 190 °C,再以 6 °C/min 的速率升至 215 °C,然后以 20 °C/min 的速率升至 280 °C,保持 10 min,最后以 20 °C/min 的速率升至 310 °C,保持 2 min。

1.5 质量控制与质量保证

为保障数据准确,对其进行严格的质量控制,利用内标法定量获得样品浓度。16 种多环芳烃分别为萘(NAP)、苊烯(ANY)、苊(ANA)、芴(FLU)、菲(PHE)、蒽(ANT)、荧蒽(FLA)、芘(PYR)、蒽(CHR)、苯并[a]蒽(BaA)、苯并[b]荧蒽(BbF)、苯并[k]荧蒽(BkF)、苯并[a]芘(BaP)、二苯并[ah]蒽(DBA)、茚并[1,2,3-cd]芘(IPY)和苯并[ghi]芘(BPE)。

罗氏沼虾体内 PAHs 测定方法的检出限及回收率如表 1 所示。所有样品的测定均设置全流程空白实验及 2 个平行以保障数据准确性。

表 1 罗氏沼虾体内 PAHs 测定方法的检出限及回收率(干质量)

Tab.1 Detection limit and recovery rate of PAHs determination method in *Macrobrachium rosenbergii* (dry mass)

PAHs	检出限 limit/(ng/g)	Detection	回收率 rate/%	Recovery
NAP	1.79		74.2	
ANY	2.14		80.1	
ANA	1.33		82.7	
FLU	1.39		78.9	
PHE	0.59		85.1	
ANT	1.62		90.6	
FLA	2.62		91.9	
PYR	0.85		89.4	
CHR	3.52		93.8	
BaA	2.61		88.2	
BbF	2.17		83.9	
BkF	1.71		78.5	
BaP	1.66		110.0	
DBA	0.40		78.6	
IPY	0.53		82.0	
BPE	1.42		85.7	

1.6 健康风险评价

采用终身致癌风险评价模型评估多环芳烃对人体健康危害的大小。因为目前仅苯并[a]芘具有致癌斜率因子(F_{CS}),因而常将 PAHs 各单体的浓度通过毒性当量因子(F_{TEi})转化为 BaP 的毒性当量浓度进行终身致癌风险的估算(R_{ILC} , Incremental Lifetime Cancer Risk), E_{BaP} 和 R_{ITL} 的计算公式:

$$E_{BaP} = \sum_i^n C_i \times F_{TEi} \quad (1)$$

$$R_{ILC} = \frac{E_{BaP} \cdot F_{CS} \cdot R_1 \cdot F_E \cdot D_E}{W \cdot T_A} \quad (2)$$

式中: C_i 表示第*i*个多环芳烃单体的浓度,ng/g; F_{TEi} 表示第*i*个多环芳烃单体基于 BaP 的毒性当量因子^[1]; F_{CS} 为致癌斜率因子,采用苯并[a]芘的致癌斜率因子取值 $7.3 \text{ mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ ^[2]; R_1 是水产品的摄入速率,虾类为 $15.4 \text{ g}/\text{d}$ ^[3]; F_E 是暴露频率,其值为 $365 \text{ d}/\text{a}$; D_E 是暴露持续时间,其值为 30 a ; W 表示体质量,取值 70 kg ; T_A 是平均

年龄,取值 70 a 。罗氏沼虾含水率按 75% 计算。

2 结果与讨论

2.1 罗氏沼虾体内 PAHs 的含量及组成特征

育成期罗氏沼虾体内 Σ PAHs 平均含量为 $106 \text{ ng}/\text{g}$ (表 2),除了 ANY、ANA、DBA、IPY 和 BPF 外,其余 11 种 PAHs 均被检出。与其他地区相比,低于长三角地区上海养殖虾塘($257 \text{ ng}/\text{g}$)、浙江养殖虾塘($120 \text{ ng}/\text{g}$)^[15]、湛江地区($424.3 \text{ ng}/\text{g}$)^[16]、巢湖秀丽白虾($489 \text{ ng}/\text{g}$)^[17]和深圳大鹏湾养殖虾类($493 \text{ ng}/\text{g}$)^[18],略高于渤海湾养殖虾类($56.2 \text{ ng}/\text{g}$)^[19]和厦门地区养殖虾类($21.3 \sim 27.2 \text{ ng}/\text{g}$)^[20],见图 1a。总体来讲,本养殖区罗氏沼虾 PAHs 含量在中等偏低水平,相比其他地区处于相对较低的污染状态。潜在的 7 种致癌性 PAHs (BaA、CHR、BbF、BkF、BaP、DBA 和 IPY)浓度为 $29.9 \text{ ng}/\text{g}$,占 Σ PAHs 比例为 28.2% ,占比较低。

表 2 养殖周期中罗氏沼虾体内多环芳烃含量

Tab.2 PAHs content in the breeding cycle of *M. rosenbergii*

环数 Ring	PAHs	ng/g				
		幼苗期(07.12) Seeding stage	育成前期(08.02) Pro-stage	育成中期(08.24) Mid-stage	育成后期(09.14) Fin-stage	育成期(09.27) Incubation stage
2	萘 NAP	7.11 ± 0.13	8.77 ± 0.022	8.90 ± 0.21	12.1 ± 0.67	12.8 ± 1.24
	苊烯 ANY	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.
	苊 ANA	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.
3	芴 FLU	N. D.	2.60 ± 0.016	8.88 ± 1.14	9.43 ± 0.87	9.85 ± 1.13
	菲 PHE	4.35 ± 0.27	4.97 ± 1.10	8.01 ± 0.48	8.18 ± 0.071	10.0 ± 1.35
	蒽 ANT	5.12 ± 0.63	7.55 ± 0.90	10.8 ± 0.029	12.5 ± 1.10	12.8 ± 2.60
4	荧蒽 FLT	5.92 ± 0.32	5.93 ± 0.13	9.92 ± 0.19	10.7 ± 1.87	11.4 ± 1.69
	芘 PYR	2.16 ± 1.31	2.82 ± 0.94	3.12 ± 0.058	3.87 ± 0.43	4.05 ± 0.72
	苯并[a]蒽 BaA	8.37 ± 0.89	8.47 ± 2.01	13.9 ± 1.42	14.5 ± 0.85	14.8 ± 0.33
	䓑 CHR*	11.5 ± 1.25	12.3 ± 0.085	13.8 ± 1.65	16.1 ± 0.07	16.8 ± 4.54
	苯并[b]荧蒽 BbF*	N. D.	N. D.	2.61 ± 0.21	3.35 ± 1.35	3.61 ± 1.83
5	苯并[k]荧蒽 BkF*	N. D.	N. D.	2.12 ± 0.28	3.28 ± 0.64	3.82 ± 1.06
	苯并[a]芘 BaP*	3.02 ± 0.33	3.49 ± 0.36	4.48 ± 0.21	5.26 ± 1.52	5.62 ± 2.31
	二苯并[a, h]蒽 DBA*	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.
6	茚并[1,2,3-cd]芘 IPY*	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.
	苯并[g, h, i]芘 BPF	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.
	Σ PAHs	47.6 ± 2.4	56.9 ± 4.1	86.5 ± 0.98	99.3 ± 4.5	106 ± 7.5
	Σ cPAHs	14.5	15.8	24.0	28.0	29.9
	E_{BaP}	3.14	3.61	4.91	5.79	6.19
	R_{ILC}	5.40E-07	6.21E-07	8.45E-07	9.96E-07	1.07E-06

注:N. D. 表示未检出,* 表示致癌性多环芳烃,cPAHs 表示致癌性多环芳烃含量

Notes: N. D. means not detected, * means carcinogenic PAHs, cPAHs means carcinogenic PAHs content

对育成期即将上市的罗氏沼虾体内 PAHs 环数分析(图 1b)可知,3,4 环结构的单体占 Σ PAHs

的 75.2% ,环数分布以 $3 \sim 4$ 环为主,占比最高的为 4 环单体(44.4%),这与珠三角河网水产品组

成研究结果一致^[21],其中尤以 ANT、BaA 和 CHR 等 3 种 PAHs 单体的含量(表 2)最为丰富,检出率为 100%,这与其他研究者得出的淡水水产品中高环 PAHs 的积累较低环 PAHs 多的结论一致^[22-23],总体排序为 4 环 > 3 环 > 2 环 > 5 环 > 6 环,与环渤海地区养殖虾类体内环数分布(3 环 > 2 环 > 4 环 > 5 环 > 6 环)有所不同,体内组成的差异可能是地区污染源不同所致,环渤海地区虾类污染主要来自于船舶石油泄漏污染^[19],而本研

究虾塘地处内陆,受船舶石油泄漏污染可能性较小。长三角地区池塘养殖水产品以 4 环为主,主要来源于草木和煤的燃烧及成岩作用^[15]。高环 PAHs 在罗氏沼虾体内累积浓度偏高可能与该地区 PAHs 污染状况有关,如工厂内煤等化石燃料的燃烧,因为燃烧途径生成的 PAHs 以高分子量单体为主^[24]。此外,罗氏沼虾营底栖生活,一般与底泥直接接触的生物体内高环 PAHs 比例高于与水体直接接触的水生生物^[18]。

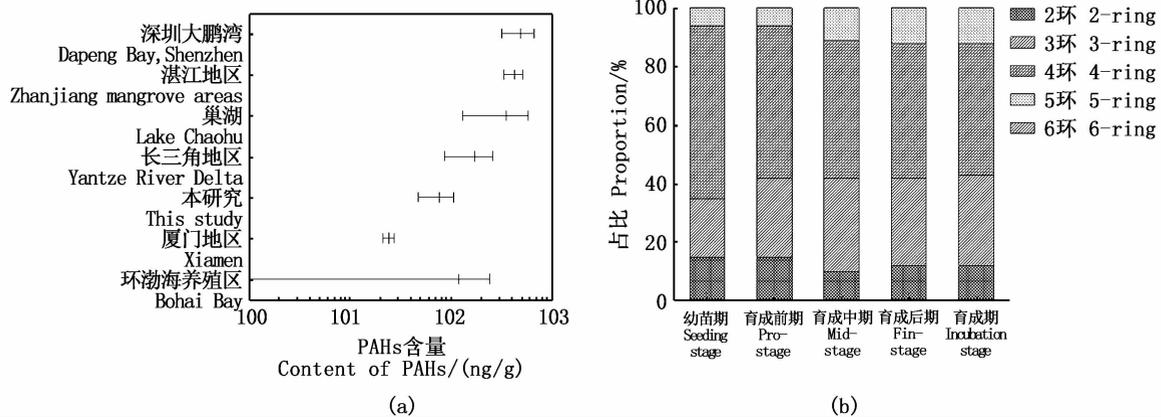


图 1 其他地区养殖水产品体内 PAHs 含量 (a) 及各时期组成特征 (b)

Fig.1 Content of PAHs (a) in cultured aquatic products in other regions and characteristics of each period (b)

2.2 罗氏沼虾养殖过程中 PAHs 的含量变化

将罗氏沼虾的养殖过程分为幼苗期、育成前期、育成中期、育成后期和育成期,养殖日龄分别为 51、72、95、115 和 129 d,平均体质量为 0.46、2.30、5.90、9.86 和 12.9 g,并对不同时期沼虾体内的 PAHs 含量(图 2)进行了跟踪分析。幼苗期至育成期 PAHs 含量从 47.6 ng/g 上升到 106 ng/g,含量增加了 1 倍多,育成初期和育成后期 PAHs 在沼虾体内的浓度变化不大(增长率分别为 19% 和 7%),但中间存在一个沼虾体内 PAHs 含量迅速增加的阶段,育成前期至育成中期 PAHs 增加了 52.0%。这种现象与沼虾养殖周期中生长速率关系最为密切(图 2)^[25],罗氏沼虾在养殖前期(60 d 以内)生长速率较慢,中期到 3 月龄左右(60~100 d)为生长高峰阶段,体质量生长速度达到最大值,应加大投饵量以促进其生长^[26],此阶段对应的 PAHs 在其体内的累积速率也达到最大。因为此时罗氏沼虾的摄食量较大,来源于饲料本身及大气沉降和地表径流中的 PAHs 均可能进入到生物体内,导致 PAHs 残留的上升,因此应

注重饵料投喂量,防止过多饵料残余,同时加强对水体和沉积物质量的监测,养殖中后期注重改良水体环境,减少外部 PAHs 污染。

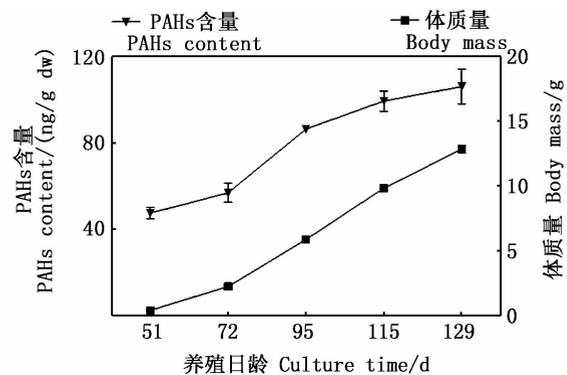


图 2 罗氏沼虾体内多环芳烃含量变化及体质量变化
Fig.2 Changes of PAHs content and body mass
in *M. rosenbergii*

2.3 罗氏沼虾体内 PAHs 的来源分析

比值法是分析生物体内 PAHs 来源的主要方法,低相对分子质量(low molecular mass, LMM, 2~3 环的 PAHs)和高相对分子质量(high

molecular mass, HMM, 4~6 环的 PAHs) 的比值一定程度上可作为指示 PAHs 来源的指标^[27]。LMM/HMM > 1 表示低分子质量 PAHs 占比较多, 说明污染主要来源于石油源; LMM/HMM < 1 表示高分子 PAHs 占比较多, 则污染主要来源于燃烧源^[28-29]。从图 1 可以看出, 各时期 LMM/HMM 均小于 1, 初步表明罗氏沼虾体内 PAHs 主要来自燃烧源。为了进一步确认该区域中 PAHs 的来源, 又采用了两种同分异构体比值法进行验证^[30], 进一步明确了虾塘 PAHs 污染主要来源于草木、煤和化石燃料等的燃烧(图 3)。燃烧源可能来源于其远处工业区生产活动, 该工业区进行工业生产活动已久, 但对 PAHs 污染相关处理装备和预防措施上尚不完善, 生产过程中的原油蒸馏以及催化裂化等生产工艺, 使用以煤为主的化石燃料, 不完全燃烧生成的污染要比天然气和石油严重得多。因此, 草木、化石燃料等的高温燃烧是本实验虾塘 PAHs 的主要来源。

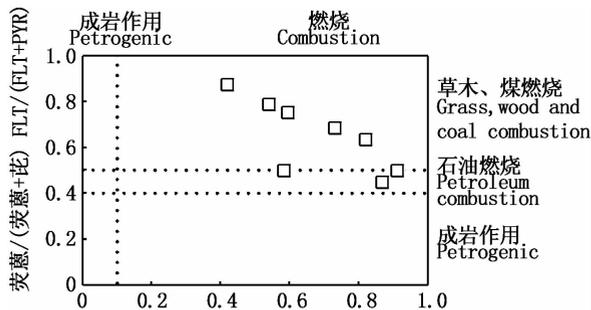


图 3 育成期 8 个虾塘罗氏沼虾 PAHs 来源
Fig. 3 Source of PAHs from 8 shrimp ponds of *M. rosenbergii* during the breeding period

2.4 罗氏沼虾食用健康风险评估

根据公式(1)和(2)计算罗氏沼虾体内 7 种致癌性 PAHs 的苯并芘毒性当量浓度 E_{BaP} 和食用风险值 R_{ILC} (表 2)可知, 养殖虾塘罗氏沼虾的食用健康风险随养殖日龄的延长呈上升趋势, 育成期 R_{ILC} ($1.07E-06$) 与和庆^[15]对上海池塘养殖罗氏沼虾的 R_{ILC} ($1.0E-06$) 评价结果水平相当, 低于郑关超等^[19]在 2015 年对环渤海地区养殖虾类的食用致癌风险结果($3.69E-05$) 和秦宁等^[17]在 2013 年对巢湖地区养殖水产品致癌风险评价结果($3.73E-05 \sim 9.59E-05$)。与 EPA 规定的可接受风险值($1.0E-06$) 相当, 在可控范围, 说明该虾塘罗氏沼虾是安全的, 在正常情况下食用该地区养殖的罗氏沼虾不会对人体健康造成威胁。

3 结论

金山区漕泾建国路罗氏沼虾多环芳烃浓度为 $47.6 \sim 106 \text{ ng/g}$, 与其他地区相比处于中等偏低水平, 所有虾塘 PAHs 优势组分均为 3,4 环结构, 优势单体为 ANT、BaA 和 CHR, 比值法溯源结果表明, 养殖池塘中 PAHs 污染的主要来源是燃烧源。终生致癌风险结果表明金山区罗氏沼虾养殖虾塘 PAHs 致癌风险 R_{ILC} 值处于可接受水平, 正常情况下食用不会对消费者的人体健康产生明显影响。由于本研究只选取了罗氏沼虾, 在水产品的选择上具有局限性, 在以后的研究中可以选择其他不同品种的鱼蟹贝类等了解其累积规律以及对人类的健康风险, 另外可以采集水样和沉积物样品, 对水、沉积物和生物进行系统研究。

参考文献:

- [1] 汤清清. 泉州湾鱼体内典型持久性有机污染物水平与食用安全性研究[D]. 厦门: 集美大学, 2014.
TANG Q Q. Persistent organic pollutants in fish from Quanzhou bay: their levels and risk assessment of edible safety[D]. Xiamen: Jimei University, 2014.
- [2] BOLS N C, BRUBACHER J L, GANASSIN R C, et al. Ecotoxicology and innate immunity in fish [J]. *Developmental & Comparative Immunology*, 2001, 25 (8/9): 853-873.
- [3] VIGANÒ L, CAMOIRANO A, IZZOTTI A, et al. Mutagenicity of sediments along the Po river and genotoxicity biomarkers in fish from polluted areas [J]. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 2002, 515(1/2): 125-134.
- [4] NEW M B. Farming freshwater prawns. A manual for the culture of the giant river prawn (*Macrobrachium rosenbergii*) [M]. Rome: FAO, 2002: 16-8.
- [5] 杨大伟. 罗氏沼虾养殖存在的问题及关键措施[J]. *齐鲁渔业*, 2015 (1): 28-29.
YANG D W. Problems and key measures in culture *Macrobrachium rosenbergii* [J]. *Journal of Shandong Fisheries*, 2015(1): 28-29.
- [6] 农业部渔业渔政管理局. 中国渔业年鉴:2017[M]. 北京: 中国农业出版社, 2017.
Fisheries and Fisheries Administration of the Ministry of Agriculture. China fisheries yearbook: 2017 [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2017.
- [7] 王军帅, 钱卓真, 吴萍萍, 等. 水产品中多环芳烃的污染和健康风险评价模型研究进展[J]. *福建水产*, 2015, 37 (1): 79-88.

- WANG J S, QIAN Z Z, WU P P, et al. Research progress of pollution and health risk assessment model for polycyclic aromatic hydrocarbons in aquatic products [J]. Journal of Fujian Fisheries, 2015, 37(1): 79-88.
- [8] BINELLI A, PROVINI A. POPs in edible clams from different Italian and European markets and possible human health risk [J]. Marine Pollution Bulletin, 2003, 46(7): 879-886.
- [9] HARRISON N, WEARNE S, DE M GEM M G. Time trends in human dietary exposure to PCDDs, PCDDs and PCBs in the UK [J]. Chemosphere, 1998, 37(9/12): 1657-1670.
- [10] 陈正兴,董学洪,马建社. 高温季节罗氏沼虾养殖技术管理要点 [J]. 水产养殖, 2016, 37(8): 48-49.
- CHEN Z X, DONG X H, MA J S. Key points of management of *Macrobrachium rosenbergii* culture in high temperature season [J]. Journal of Aquaculture, 2016, 37(8): 48-49.
- [11] 崔昱. 洋山港重金属与多环芳烃污染评价与相间分布研究 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2015.
- CUI Y. Research on pollution characters and phase distribution of heavy metal and PAHs from Yangshan Port [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2015.
- [12] 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.
- [13] 刘新,王东红,马梅,等. 中国饮用水中多环芳烃的分布和健康风险评价 [J]. 生态毒理学报, 2011, 6(2): 207-214.
- LIU X, WANG D H, MA M, et al. Distribution and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in drinking water of China [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2011, 6(2): 207-214.
- [14] ZHANG B, ZHAI F Y, DU S F, et al. The China health and nutrition survey, 1989-2011 [J]. Obesity Reviews, 2014, 15(s1): 2-7.
- [15] 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.
- [16] 于紫玲,林钦,谷阳光,等. 湛江红树林海域生物体中多环芳烃污染水平及其健康风险评价 [J]. 中国水产科学, 2015, 22(5): 994-1006.
- YU Z L, LIN Q, GU Y G, et al. Levels and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in marine organisms from Zhanjiang mangrove waters [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2015, 22(5): 994-1006.
- [17] 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.
- [18] 孙闰霞,柯常亮,谷阳光,等. 深圳大鹏湾海域表层沉积物和生物体中多环芳烃残留及其风险评价 [J]. 环境科学, 2013, 34(10): 3832-3839.
- SUN R X, KE C L, GU Y G, et al. Residues and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in the surface sediments and marine organisms from Dapeng Bay, Shenzhen [J]. Environmental Science, 2013, 34(10): 3832-3839.
- [19] 郑关超,郭萌萌,赵春霞,等. 环渤海地区养殖水产品中多环芳烃(PAHs)污染残留及健康风险评估 [J]. 中国渔业质量与标准, 2015, 5(6): 20-26.
- ZHENG G C, GUO M M, ZHAO C X, et al. Residue levels of PAHs in aquaculture products from Bohai Bay and their health risk assessment [J]. Chinese Fishery Quality and Standards, 2015, 5(6): 20-26.
- [20] 王军帅. 厦门地区海产品中多环芳烃污染水平及膳食暴露评估研究 [D]. 厦门: 集美大学, 2015.
- WANG J S. Research for pollution level and dietary exposure assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in aquatic products from Xiamen [D]. Xiamen: Jimei University, 2015.
- [21] 李海燕,赖子尼,曾艳艺,等. 珠三角河网表层水及水产品中多环芳烃的分布特征 [J]. 生态环境学报, 2017, 26(8): 1384-1391.
- LI H Y, LAI Z N, ZENG Y Y, et al. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface water and aquatic products from the river network of the Pearl River Delta [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017, 26(8): 1384-1391.
- [22] LIANG Y, TSE M F, YOUNG L, et al. Distribution patterns of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in the sediments and fish at Mai Po Marshes Nature Reserve, Hong Kong [J]. Water Research, 2007, 41(6): 1303-1311.
- [23] ZHANG G Z, PAN Z K, WANG X M, et al. Distribution and accumulation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in the food web of Nansi Lake, China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2015, 187(4): 173.
- [24] 金晓佩. 上海市大气PM_{2.5}与气相中PAHs的污染特征、来源及其健康风险 [D]. 上海: 华东师范大学, 2018.
- JIN X P. Pollution characteristics, sources and health risks of polycyclic aromatic hydrocarbons in PM_{2.5} and gas phase in Shanghai [D]. Shanghai: East China Normal University, 2018.
- [25] 杨明,丁福江,戴习林. 池塘精养罗氏沼虾生长特性研究 [J]. 水产科技情报, 2017, 44(5): 229-235.
- YANG M, DING F J, DAI X L. Study on growth characteristics of *Macrobrachium rosenbergii* in culture pond [J]. Fisheries Science & Technology Information, 2017, 44(5): 229-235.

- [26] 贾若鲁. 罗氏沼虾池塘养殖技术[J]. 现代农业科技, 2018(15): 221, 223.
JIA R L. *Macrobrachium rosenbergii* pond culture technology [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2018 (15): 221, 223.
- [27] ZHANG W, ZHANG S C, WAN C, et al. Source diagnostics of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban road runoff, dust, rain and canopy throughfall [J]. Environmental Pollution, 2008, 153(3): 594-601.
- [28] LOUTFY N, FUERHACKER M, TUNDO P, et al. Monitoring of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans, dioxin-like PCBs and polycyclic aromatic hydrocarbons in food and feed samples from Ismailia city, Egypt [J]. Chemosphere, 2007, 66(10): 1962-1970.
- [29] 许云竹, 花修艺, 董德明, 等. 地表水环境中 PAHs 源解析的方法比较及应用[J]. 吉林大学学报(理学版), 2011, 49(3): 565-574.
XU Y Z, HUA X Y, DONG D M, et al. Comparison among methods of source apportionment of PAHs and their application in surface water analysis [J]. Journal of Jilin University (Science Edition), 2011, 49(3): 565-574.
- [30] 冯承蓬, 夏星辉, 周追, 等. 长江武汉段水体中多环芳烃的分布及来源分析[J]. 环境科学学报, 2007, 27(11): 1900-1908.
FENG C P, XIA X H, ZHOU Z, et al. Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in the Wuhan section of the Yangtze River [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2007, 27(11): 1900-1908.

Bioaccumulation characteristics and risk assessment of PAHs in the breeding cycle of *Macrobrachium rosenbergii*

ZHANG Li¹, CHEN Yiqin¹, DAI Xilin^{2,3,4}, YANG Ming⁵, LI Juanying¹, PENG Ziran¹

(1. College of Marine Ecology and Environment, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. National Demonstration Center for Experiential Fisheries Science Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 3. Key Laboratory of Freshwater Aquatic Germplasm Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 4. Aquatic Animal Genetic Breeding Center, Shanghai Collaborative Innovation Center, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 5. Shanghai Shen Cao Special Aquatic Development Company, Shanghai 201516, China)

Abstract: Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) are carcinogenic organic pollutants composed of two or more benzene rings and are widely present in various environmental media. In order to understand the health risk of PAHs in *Macrobrachium rosenbergii* (*M. rosenbergii*) in the culture ponds in Jianguo Road, Caojing Town, Jinshan District, Shanghai, 16 PAHs collected from *M. rosenbergii* in Jinshan District from July to September 2018 were determined. Concentrations were analyzed for cumulative characteristics over time and their potential food risks were calculated. The results showed that except for ANY, ANA, DBA, IPY and BPF, the other 11 PAHs were detected in different degrees. The concentration of Σ PAHs in *M. rosenbergii* in different periods ranged 47.6 – 106 ng/g dw. The dominant components of PAHs were 3- or 4-ring structure, of which 4-ring compounds accounted for the highest proportion, and the dominant monomers were ANT, BaA and CHR. Traceability analysis showed that the PAHs in the pond are mainly derived from the combustion sources. Using the US Environmental Protection Agency's (USEPA) recommended health risk model to evaluate the health risks caused by the consumption of *Macrobrachium rosenbergii*, the ILCR value of PAHs in *M. rosenbergii* culture farms in Jinshan District was at an acceptable level and would not have impact on the human health.

Key words: Jinshan District; culture pond; PAHs; bioaccumulation; risk assessment