

## 上海金山罗氏沼虾养殖塘多环芳烃分布、源解析及风险评价

戴智, 谌一涵, 彭自然, 何文辉, 潘宇迪, 沈路遥, 戴习林

Distribution, source apportionment and risk assessment of PAHs in the culture ponds of *Macrobrachium rosenbergii* in Jinshan, Shanghai

DAI Zhi, CHEN Yihan, PENG Ziran, HE Wenhui, PAN Yudi, SHEN Luyao, DAI Xilin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12024/jsou.20200803148>

### 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

#### 罗氏沼虾养殖周期中PAHs的生物累积特征及食用风险评价

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

上海海洋大学学报. 2020, 29(4): 526 <https://doi.org/10.12024/jsou.20190502651>

#### 罗氏沼虾养殖塘草甘膦残留特征及生态风险评估

Residual characteristics and ecological risk assessment of glyphosate in *Macrobrachium rosenbergii* culture ponds

上海海洋大学学报. 2021, 30(5): 821 <https://doi.org/10.12024/jsou.20200503054>

#### 湖州市沿圩湾村河流多环芳烃分布及生态风险评价

Distribution and ecological risk assessment of PAHs in rivers of Yanweiwan Village, Huzhou

上海海洋大学学报. 2021, 30(2): 284 <https://doi.org/10.12024/jsou.20191002832>

#### 牡蛎池中多环芳烃的分布、来源和生态风险评价

Distribution, sources and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in coastal waters in oyster pond

南方水产科学. 2017, 13(2): 43 <https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-0780.2017.02.006>

#### 上海市养殖池塘沉积物中重金属分布及生态风险评价

Distribution and ecological risk assessment of heavy metals in the sediment of aquaculture ponds in Shanghai

上海海洋大学学报. 2021, 30(3): 501 <https://doi.org/10.12024/jsou.20191202877>

#### 海洋生物体多环芳烃污染残留及其健康风险评价研究

Review of assessment on residual contamination and health risk of PAHs in marine organisms

南方水产科学. 2012, 8(3): 71 <https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-0780.2012.03.011>

文章编号: 1674-5566(2021)06-1002-11

DOI:10.12024/jsou.20200803148

## 上海金山罗氏沼虾养殖塘多环芳烃分布、源解析及风险评价

戴智<sup>1</sup>, 谌一涵<sup>1</sup>, 彭自然<sup>1</sup>, 何文辉<sup>1</sup>, 潘宇迪<sup>1</sup>, 沈路遥<sup>1</sup>, 戴习林<sup>2,3,4</sup>

(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)

**摘要:** 为研究上海市金山区罗氏沼虾养殖环境中多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 的污染水平、来源和评估其食用健康风险, 采用高效液相色谱 (HPLC) 检测环境中 16 种优控多环芳烃, 结果表明: 养殖区内, 大气干、湿沉降中多环芳烃总含量及沉降通量分别为 5.52 ~ 9.45  $\mu\text{g/g}$ 、47.99 ~ 100.42  $\text{ng/L}$  和 3.75 ~ 6.42  $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、83.32 ~ 174.36  $\text{ng}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ , 干沉降中以高环为主, 湿沉降中以低环为主; 水体中多环芳烃总含量为 342.76 ~ 1 520.83  $\text{ng/L}$ , 以低环为主, 对比国内其他养殖区, 研究区水体多环芳烃污染处于中等水平; 土壤与沉积物中多环芳烃含量分别为 1 000.45 ~ 2 138.46  $\text{ng/g}$  和 1 763.70 ~ 3 656.97  $\text{ng/g}$ , 高环多环芳烃含量远高于低环, 相比于其他养殖区处于较高水平; 浮游动物与浮游植物中多环芳烃总含量分别为 46.18 ~ 134.63  $\mu\text{g/g}$  和 26.13 ~ 145.39  $\mu\text{g/g}$ , 均以 4 环多环芳烃为主; 罗氏沼虾在幼虾期、成长期、育成期体内多环芳烃平均总含量分别为 63.09  $\text{ng/g}$ 、111.89  $\text{ng/g}$ 、148.77  $\text{ng/g}$ , 存在生物富集现象, 虾肉中 3、4 环多环芳烃含量相对较高, 相比于其他养殖区水产品, 研究区罗氏沼虾体内多环芳烃处于较低水平。采用比值法和主成分分析法进行污染源分析, 结果表明: 养殖区大气沉降为多污染源并存, 其中湿沉降中污染源主要为石油源; 干沉降中污染源主要为煤炭、木材的燃烧源; 水体主要污染源为石油源; 土壤中主要为煤炭燃烧源; 沉积物中污染源与土壤中类似, 以煤炭燃烧和化石燃料不完全燃烧为主。食用风险评价结果表明: 罗氏沼虾终身致癌风险为  $1.89 \times 10^{-8} \sim 1.37 \times 10^{-6}$ , 在可接受范围内, 正常食用不会对人类健康产生危害。

**关键词:** 罗氏沼虾; 多环芳烃; 源解析; 风险评价

**中图分类号:** X 5      **文献标志码:** A

多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 是一类由两个或两个以上的苯环按线形、角形或簇状等稠环形式相连构成的有机化合物, 具有致癌、致畸和致突变风险<sup>[1-2]</sup>。作为一种持久性有机污染物, PAHs 具有难降解、易富集的特性<sup>[3]</sup>, 在全球范围内都是较为普遍的持久性环境污染物, 也是与人类接触频率最高的致癌污染物。水产品则是人类与 PAHs 接触的主要载体<sup>[4-5]</sup>, 其质量安全日益成为人们关注的焦点。

罗氏沼虾 (*Macrobrachium rosenbergii*) 自 1976 年引进以来, 已成为我国主要养殖水产品之一, 2018 年产量高达 13.33 万 t<sup>[6]</sup>。金山区作为上海三大水产养殖区之一, 罗氏沼虾养殖塘较多, 淡

水养虾已成为农业转型发展和农民致富的重要产业, 也可成为乡村产业发展的切入点。近年来, 学者们对养殖塘的 PAHs 研究仅限于养殖生物或者单一环境介质<sup>[7-8]</sup>, 对养殖区污染监测缺乏系统性和全面性。本研究以上海金山罗氏沼虾养殖塘为对象, 考察养殖塘水、悬浮物、浮游动植物、沉积物、塘埂土和大气沉降等多种环境介质中 PAHs 对罗氏沼虾养殖的影响, 测定养殖环境与罗氏沼虾体内 PAHs 含量, 分析 PAHs 的构成、来源, 评估罗氏沼虾的食用健康风险。研究结果为改进水产养殖工艺技术、加强持久性有机化合物治理、完善养殖生态系统和环境调控措施、防止水产品 PAHs 污染提供依据。

收稿日期: 2020-08-17      修回日期: 2020-11-01

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: 戴智 (1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为环境有机污染物。E-mail: 25919909@qq.com

通信作者: 彭自然, E-mail: zrpeng@shou.edu.cn

## 1 材料与方法

### 1.1 采样点概况

选取上海市金山区 3 个罗氏沼虾养殖塘 (121.41°E, 30.82°N) 为研究对象, 分别记为 T1、T2、T3, 面积均为 0.47 hm<sup>2</sup>, 养殖密度为 37.5 万尾/hm<sup>2</sup>。于 2019 年 5 月投放虾苗时开始采样, 样品包括养殖塘水、悬浮物、浮游动植物、沉积物、塘埂土和大气沉降。

### 1.2 样品采集与保存

采用圆柱形玻璃集尘桶 (内径 0.15 m、高 0.30 m) 同时收集大气干、湿沉降样品, 超纯水为收集液, 将全部收集液过滤, 滤膜冷冻干燥后称质量, 滤液待萃取。在养殖塘对角线上离岸 2 m 处的 4 个点采集水样并混合, 用盐酸调节 pH 为 2~3, 过滤后称质量, 按同温度下水的密度将质量换算成水样体积。在养殖塘 4 个角采集土壤、沉积物, 样品采集后分别装入铝箔袋中保存, 冷冻干燥后粉碎过 100 目筛, 密封储存待用。采集水样 100 L, 用 13 号浮游生物网过滤, 收集网内浮游动物至 50 mL 样品瓶, 过滤使其完全固定在滤膜上, 干燥后称质量记录。取 2 L 经浮游生物网过滤的水样静置 30 min, 取上层水 500 mL 为浮游植物水样, 下层 1 500 mL 为悬浮物水样, 过滤后用铝箔包裹滤膜, 冷冻干燥后称质量<sup>[9]</sup>。去除罗氏沼虾头部、外壳和肠腺, 留下肌肉, 经冷冻干燥后保存。

### 1.3 样品的预处理和分析

水样用 Supelco Visiprep DL SPE 固相萃取仪萃取, 用 10 mL V(正己烷): V(丙酮) = 1:1、10 mL 甲醇和 10 mL pH 为 3 的纯水依次活化 Oasis HLB 固相萃取柱 (6 mL, 500 mg) 并完成萃取, 依次使用 10 mL 甲醇、10 mL V(正己烷): V(丙酮) = 1:1 洗脱, 收集洗脱液, 氮吹至近干, 用乙腈转移至进样瓶中, 定容至 1 mL 待测。

土壤、沉积物提取采用索氏提取法, 用滤纸包裹样品放于索氏抽提瓶中, 加入 100 mL V(二氯甲烷): V(丙酮) = 1:1 溶液, 加入 2 g 无水硫酸钠和 1 g 铜片, 65 °C 水浴提取 24 h, 氮吹萃取液, 用正己烷定容至 1 mL<sup>[10]</sup>。在净化柱中依次放入无水硫酸钠、硅胶、无水硫酸钠, 用 40 mL 正己烷淋洗, 弃掉淋洗液。将萃取液加入净化柱, 用 50 mL V(二氯甲烷): V(正己烷) = 2:3 混合液洗脱,

收集洗脱液, 氮吹至近干, 用乙腈转到进样瓶中, 定容至 1 mL 待测。

分别取出固定在滤膜上的悬浮物、浮游动植物, 粉碎后移至 50 mL 提取管, 加入 25 mL V(二氯甲烷): V(正己烷) = 1:1 溶液, 超声提取 15 min。静置, 转移至平底烧瓶, 重复提取 3 次, 合并提取液。提取液经旋转蒸发浓缩至 1 mL, 转至样品瓶, 定容至 3 mL<sup>[9]</sup>。浓缩液经固相萃取柱富集, 用 15 mL V(二氯甲烷): V(正己烷) = 1:1 洗脱, 收集洗脱液, 氮吹至近干, 用乙腈转换到进样瓶中, 定容至 1 mL 待测。

将干虾研成粉末, 加入 100 mL V(二氯甲烷): V(丙酮) = 1:1 溶液进行索氏提取。提取液氮吹至近干, 加入 2 mL 乙腈溶解 PAHs, 加入 4 mL 乙腈饱和的石油醚, 吸出顶部脂肪, 将剩余的乙腈用氮气吹干, 加入 2 mL 二氯甲烷溶解残留物。在净化柱中填充适量硅胶, 加入 10 mL 二氯甲烷清洗净化柱, 将去脂后的样品移至净化柱, 加入 10 mL 二氯甲烷洗脱, 收集洗脱液。将洗脱液氮吹至近干, 用乙腈转换到进样瓶中, 定容至 1 mL 待测。

大气湿沉降参照水体富集与制备方法, 大气干沉降参照土壤制备方法。

### 1.4 标准溶液与质量控制

使用纯度大于 99% 的美国环境保护署优控 16 种 PAHs 混合标准溶液, 加标回收率均为 71.3%~112.4%。对所有样品设置平行实验, 相对标准偏差均在 20% 以下。水体、大气湿沉降的检出限为 0.12~0.96 ng/L; 土壤、沉积物和大气干沉降的检出限为 0.10~4.83 ng/g; 浮游动植物、悬浮物的检出限为 0.58~4.65 ng/g; 罗氏沼虾的检出限为 0.40~3.52 ng/g。

### 1.5 仪器分析与试剂标准

所有待测样品均采用 SP-20A 高效液相色谱仪 (日本岛津公司) 测定 16 种 PAHs 浓度, 2~3 环 PAHs: 萘 (NAP), 萘烯 (ANY), 芴 (FLU), 芘 (ANA), 菲 (PHE), 蒽 (ANT); 4 环 PAHs: 荧蒽 (FLA), 芘 (PYR), 蒽 (CHR), 苯并[a]蒽 (BaA); 5 环 PAHs: 苯并[b]荧蒽 (BbF), 苯并[k]荧蒽 (BkF), 苯并[a]芘 (BaP), 二苯并[a,h]蒽 (DBA); 6 环 PAHs: 茚并[1,2,3-cd]芘 (IPY) 和 苯并[g,h,i]芘 (BPF)。色谱柱型号为 ODS-P (4.6 mm × 250 mm × 5 μm), 柱温箱温度为室温。

用水-甲醇溶剂作为流动相进行梯度洗脱,流速 1 mL/min。紫外检测波长为 254 nm,进样量 20  $\mu$ L。梯度洗脱顺序为:0 ~ 7 min,水/甲醇 [V(水):V(甲醇) = 20:80];7 ~ 17 min,水/甲醇 [V(水):V(甲醇) = 0:100];17 ~ 40 min,水/甲醇 [V(水):V(甲醇) = 20:80];40 ~ 42 min,水/甲醇 [V(水):V(甲醇) = 20:80],保持此状态至 60 min。

有机试剂丙酮、甲醇、正己烷、二氯甲烷、乙腈均为色谱纯;盐酸为分析纯;硅胶、无水硫酸钠、玻璃纤维滤膜均在马弗炉中恒温 400  $^{\circ}$ C 煅烧 4 h 以去除有机物。

## 1.6 多环芳烃来源解析

### 1.6.1 LMW/(LMW + HMW) 比值法

根据 PAHs 苯环 2 ~ 3 环为低环(LMW),4 ~ 6 环为高环(HMW)进行判定:当 LMW/(LMW + HMW) > 0.5 时,认为主要污染源为石油源;当 LMW/(LMW + HMW) < 0.5 时,则认为主要污染源为燃烧源<sup>[11]</sup>。

### 1.6.2 主成分分析法

考虑到用比值法对多环芳烃污染源的判断有一定局限性,故结合主成分分析法深入研究。采用 R 语言对养殖环境中水体、土壤、沉积物和大气沉降进行主成分分析,选取特征值较高的 3 个因子,分析 PAHs 污染源。

## 1.7 食用健康风险评价

本研究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。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(Incremental Lifetime Cancer Risk,  $R_{ILC}$ ), $E_{BaP}$  和  $R_{ILC}$  的计算公式<sup>[7,12]</sup> 分别如下:

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

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

式中: $R_{ILC}$ 为终身致癌风险值; $E_{BaP}$ 为毒性当量; $C_i$

为多环芳烃含量,ng/g; $F_{TEi}$ 为致癌斜率因子<sup>[7]</sup>; $F_{CS}$ 为致癌斜率因子,其值为 7.3 mg/(kg · d); $R_1$ 为水产品摄入速率,取 0.093 kg/d<sup>[13]</sup>; $F_E$ 为暴露频率,取 365 d/a; $D_E$ 为暴露时间,取 30 a; $W$ 为人体质量,取 70 kg; $T_A$ 是平均年龄,取 70 岁。

## 2 结果

### 2.1 金山区罗氏沼虾养殖塘多环芳烃污染水平

#### 2.1.1 养殖塘大气沉降 PAHs 含量变化及其沉降通量

研究区 5 ~ 9 月大气沉降中干沉降平均含量为 5.52 ~ 9.45  $\mu$ g/g,检出率为 96.9%。湿沉降平均含量为 47.99 ~ 100.42 ng/L,检出率为 87.5%。干、湿沉降通量分别为 3.75 ~ 6.42  $\mu$ g/( $m^2 \cdot d$ )和 83.32 ~ 174.36 ng/( $m^2 \cdot d$ )。如图 1 所示:干沉降中 BaA 和 CHR 含量最高,4 环 PAHs 占比最高,其次是 5 环和 3 环,6 环和 2 环占比较少;湿沉降中以 NAP、ANY 和 ANA 等低环 PAHs 含量较高。研究区大气沉降中 PAHs 含量较高,与林根满<sup>[14]</sup>等研究金山区大气沉降中 PAHs 含量较为一致。低环 PAHs 易溶于水相,使得湿沉降中低环占比较高<sup>[15]</sup>。

#### 2.1.2 养殖区水体多环芳烃含量变化与构成

研究区水体中 16 种 PAHs 总含量为 342.76 ~ 1 520.83 ng/L,总检出率为 91.8%,16 种 PAHs 均有检出,其中 9 种多环芳烃检出率达到 100%。可以看出,养殖塘水体中多环芳烃较为常见。如图 1 所示,研究区水体中 16 种 PAHs 的组分构成以低环为主,6 环比重较小,低环 PAHs 占比超过 50%,这与多环芳烃正辛醇-水分配系数有关,低环多环芳烃的正辛醇-水分配系数较低,溶解度较高,而高环多环芳烃的正辛醇-水分配系数高,溶解度较低<sup>[15]</sup>。如表 1 所示,与国内部分淡水、海水养殖区水体中 PAHs 含量相比较,本研究养殖水体中 PAHs 含量处于中等水平,低于微山湖养殖区<sup>[16]</sup>和台州湾养殖区<sup>[17]</sup>,略高于广东罗非鱼养殖区<sup>[18]</sup>和厦门马銮湾养殖海区<sup>[19]</sup>。

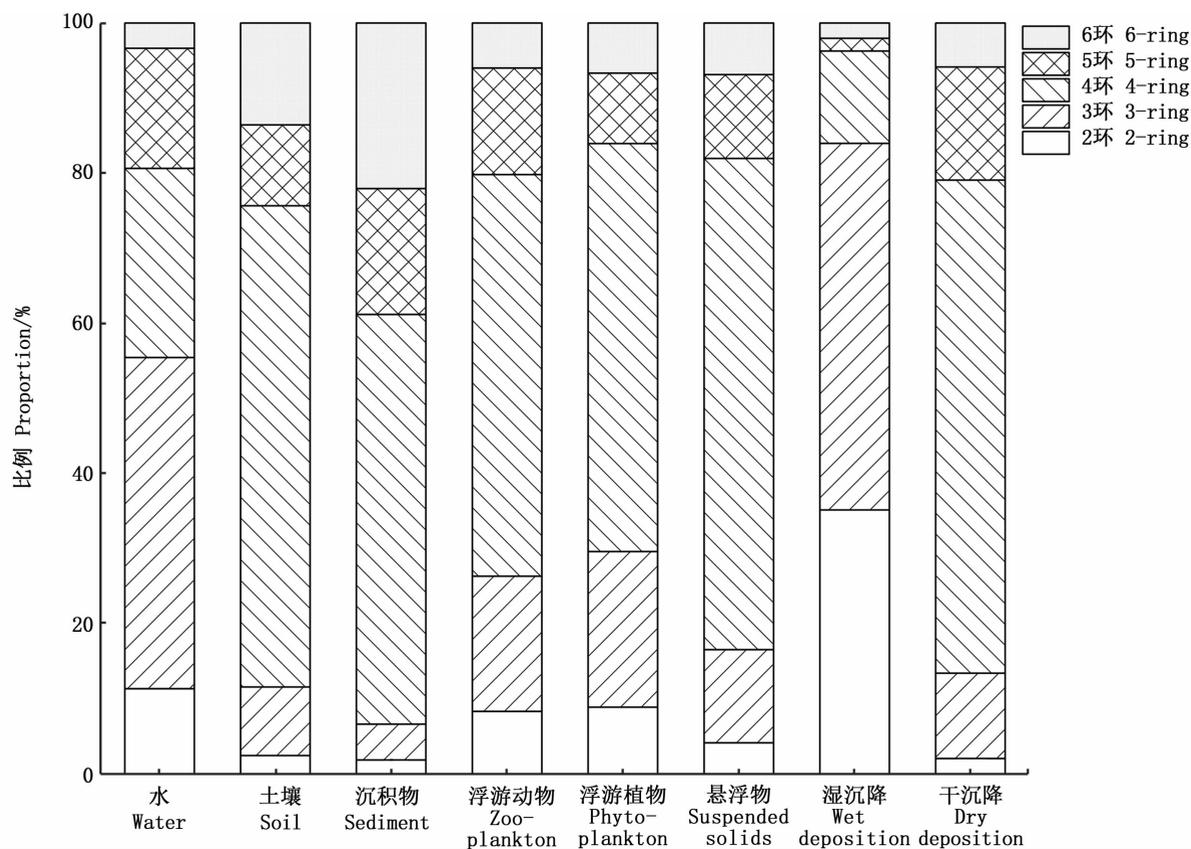


图 1 养殖塘不同环境介质中 PAHs 组成

Fig. 1 Composition of PAHs in different ambient media

表 1 部分地区养殖区水体 PAHs 含量

Tab.1 Content of PAHs in different aquaculture water

| 水产养殖区<br>Aquaculture area | PAHs 含量<br>Content of PAHs/<br>(ng/L) | 来源<br>Source |
|---------------------------|---------------------------------------|--------------|
| 微山湖 Weishan Lake          | 5 348.80 ~ 12 970.80                  | [16]         |
| 台州湾 Taizhou Bay           | 5 868.70 ~ 15 156.10                  | [17]         |
| 广东 Guangdong              | 53.55 ~ 679.97                        | [18]         |
| 厦门马銮湾 Maluan Bay, Xiamen  | 99.00 ~ 478.80                        | [19]         |
| 上海金山 Jinshan, Shanghai    | 342.76 ~ 1 520.83                     | 本研究          |

### 2.1.3 土壤与沉积物多环芳烃含量变化与构成

研究区周围土壤中 16 种 PAHs 总含量为 1 000.45 ~ 2 138.46 ng/g, 平均值为 1 475.01 ng/g。沉积物中 PAHs 的总含量为 1 763.70 ~ 3 656.97 ng/g, 平均值为 2 567.39 ng/g。土壤和沉积物中的 PAHs 检出率达到了 96.7% 和 97.0%, 其中 11 种物质的检出率达到 100%。如图 1 所示, 养殖环境中土壤和沉积物中 4 环 PAHs 含量明显高于其他环数。土壤与沉积物中 PAHs 含量为 4 环 > 6 环 > 5 环 > 3 环 > 2 环。沉积物为养殖塘水环境中 PAHs 富集的主要场所, 同时也

是养殖生物体内污染物的主要来源, 对养殖生物有很大影响<sup>[20]</sup>。研究区养殖塘沉积物 PAHs 含量处于较高水平, 仅次于天津地区鱼塘。天津地区该鱼塘养殖用水引自周围居民区和工业区排污河流, 污染较为严重<sup>[21]</sup>, 而研究区养殖塘位于工业区附近, 沉积物积累的 PAHs 含量较高。

### 2.1.4 悬浮物和浮游动植物 PAHs 含量变化与构成

部分 PAHs 很难溶于水, 但极易吸附于微小悬浮物上<sup>[22-23]</sup>, 作为 PAHs 的主要载体, 悬浮物中 PAHs 含量相对于其环境介质处于较高水平。悬浮物中 16 种 PAHs 总含量为 36.55 ~ 86.20 μg/g, 平均含量达到 66.90 μg/g, 16 种优先控制 PAHs 检出率为 97.9%, 共有 15 种检出率为 100%。其中含量较高的有 ANA、BaA、BbF 和 BPF, 而 BaA 含量最高。如图 1 所示, 悬浮物中不同环数 PAHs 以 4 环为主, 其次从高到低分别是 3 环、5 环、6 环、2 环, 高环 PAHs 占比较高, 由于悬浮物上吸附的 PAHs 大部分都是溶解性较低的高环 PAHs。

养殖水体中浮游动物与浮游植物中 16 种 PAHs 总含量分别为 46.18 ~ 134.63  $\mu\text{g/g}$  和 26.13 ~ 145.39  $\mu\text{g/g}$ , 检出率分别为 99.2% 和 98.7%。其中, 浮游动物中只有少量样品未检出 ANT, 浮游植物中少量样品未检出 FLU、PHE 和 BkF。表明 PAHs 在浮游动植物中存在较为普遍。PAHs 具有疏水亲脂性, 水体和沉积物中的 PAHs 容易通过多种途径在生物体内累积, 经食物链逐级传递。浮游动植物处于食物链底端, 浮游动物直接摄食吸附有 PAHs 的微小颗粒物, 对 PAHs 的富集能力强于高营养级生物<sup>[24]</sup>, 这使得浮游动植物中的 PAHs 含量较高。

如图 1 所示, 浮游动植物中均以 4 环 PAHs 为主, 浮游动植物中含量高低依次是 4 环 > 3 环 > 5 环 > 2 环 > 6 环。浮游动植物中 NAP、ANA、CHR、BaA、BbF 等含量较高, 与水体、沉积物中含量高的 PAHs 种类相似, 证明了浮游动植物对水体、沉积物中的 PAHs 富集效果明显, 其主要 PAHs 也是来自水体和沉积物之中。浮游动植物在水中营浮游性生活, 通过环境接触和滤食对 PAHs 进行累积, 体内 PAHs 与环境介质中多环芳烃含量相关。

### 2.1.5 罗氏沼虾多环芳烃含量变化与构成

本研究将罗氏沼虾的生长过程分为幼虾期、成长期和育成期。其中, 育成期虾体内 16 种 PAHs 平均总含量为 148.77  $\text{ng/g}$ 。含量最高的 PAHs 为 FLA, 为 13.87  $\text{ng/g}$ , BaA、NAP、PYR、CHR、PHE、ANT、BaP 和 BkF 的含量均高于 10  $\text{ng/g}$ 。对比了国内部分地区水产品中 PAHs 的含量, 发现长江干流和沱江干流<sup>[25]</sup>中水产品含量最高, 最高含量达到了  $(2\ 803.78 \pm 215.37)$   $\text{ng/g}$  和  $(8\ 498.57 \pm 1\ 128.22)$   $\text{ng/g}$ 。研究区养殖塘罗氏沼虾体内 PAHs 含量在水产品中处在较低水平, 但略高于浙江<sup>[26]</sup>和江苏高邮<sup>[8]</sup>地区罗氏沼虾中 PAHs 含量。如图 2 所示, 育成期罗氏沼虾体内 PAHs 含量为 4 环 > 5 环 > 3 环 > 6 环 > 2 环, 4 环占比最高(32.6%), 5 环和 3 环占比接近, 分别

为 24.9% 和 23.5%。高邮罗氏沼虾养殖区和长三角区养殖水产品中 PAHs 也均以 3~4 环为主。高环在虾体内比例高于水体中, 表明高环 PAHs 在虾体内存在富集现象, 且高环 PAHs 比低环 PAHs 积累多, 这与汪红军等<sup>[27]</sup>研究的汉江下游鱼体 PAHs 分布特征结论相似。

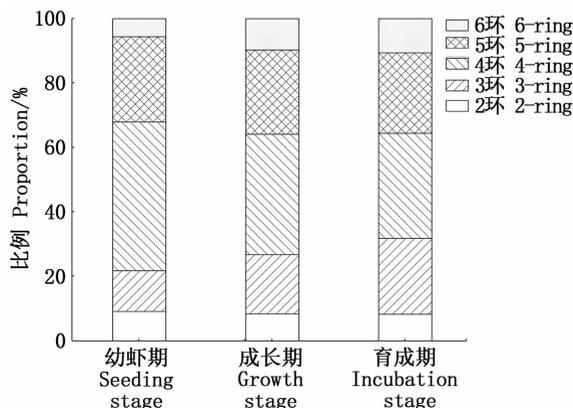


图 2 罗氏沼虾不同生长期 PAHs 组成

Fig. 2 Composition of PAHs in *Macrobrachium rosenbergii* in different growth stages

成长过程中, 5 种不同环数的 PAHs 均随着罗氏沼虾的成长逐步增加, 部分 PAHs 如 ANY、FLU 在幼虾时期含量低于检出限, 在长至成虾时, 这两种 PAHs 出现较高的增长, PAHs 在虾的成长过程中通过食物、水体、沉积物、大气沉降等多种渠道在虾体内累积, PAHs 含量不断增加。根据表 2 对虾成长周期不同阶段的 PAHs 增加量和增加率的统计可以看出, 从幼虾到最后的成虾, PAHs 浓度平均增长率高达 201.7%。幼虾期-成长期的 PAHs 增长量和增长率均高于成长期-育成期阶段。罗氏沼虾体内 PAHs 早期的增长量高于中后期, 这可能与罗氏沼虾的摄食习惯有关, 早期的罗氏沼虾主要摄食浮游动物, 中后期以饲料为主要食物, 本次研究测定了投喂饲料的 PAHs 含量小于 100  $\text{ng/g}$ , 浮游动物中 PAHs 的含量远高于这个值, 不同成长阶段的食性不同使罗氏沼虾体内 PAHs 的含量变化情况存在差异。

表 2 罗氏沼虾不同生长阶段 PAHs 增加量与增加率

Tab. 2 The increments and increase rate of PAHs in different growth stages of *Macrobrachium rosenbergii*

| 生长阶段<br>Growth stages            | PAHs 增加量<br>Increments of PAHs/<br>(ng/g) | PAHs 增加率<br>Increase rate<br>of PAHs/% | 平均增加量<br>Average Increments/<br>(ng/g) | 平均增加率<br>Average<br>Increase rate/% |
|----------------------------------|---|--|--|-------------------------------------|
| 幼虾期-成长期 Seeding-growth stage     | 0.94 ~ 6.63                               | 16.8 ~ 371.8                           | 3.05                                   | 113.1                               |
| 成长期-育成期 Growth-incubation stage  | 0.64 ~ 5.04                               | 9.6 ~ 112.5                            | 2.34                                   | 42.5                                |
| 幼虾期-育成期 Seeding-incubation stage | 1.95 ~ 9.50                               | 25.7 ~ 750.0                           | 5.39                                   | 201.7                               |

## 2.2 金山区罗氏沼虾养殖塘多环芳烃源解析

### 2.2.1 LMW/(LMW + HMW) 比值法

图 3 所示为大气干、湿沉降、水体、土壤和沉积物中 PAHs 的 LMW/(LMW + HMW) 值。湿沉降中主要以石油源为主,干沉降中以燃烧源为主,因此大气沉降多种污染源并存;养殖水体中石油污染源较多,燃烧源所占比例较少;土壤和沉积物 LMW/(LMW + HMW) 值都小于 0.5,表示其多环芳烃来源多为燃烧源。石油源所释放的 PAHs 为低环,在湿沉降中溶解度高,而主要来源为燃烧源的高环 PAHs 难溶于水,多吸附在颗粒物上。低环溶解度较高,水体中 PAHs 的来源表现为石油源为主,沉积物和土壤中高环占比多,来源主要为燃烧源。

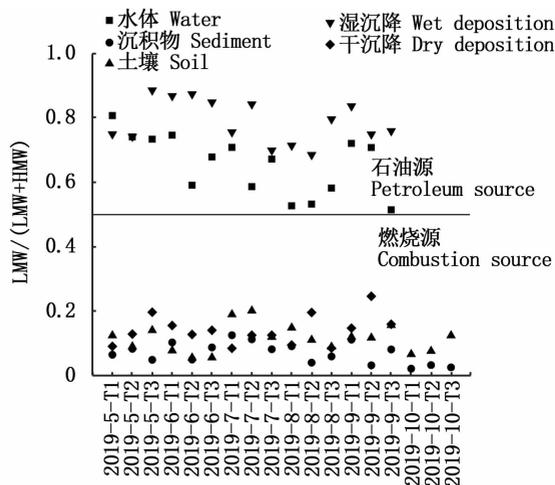


图 3 养殖环境介质中 LMW/(LMW + HMW) 值  
Fig. 3 LMW / (LMW + HMW) ratio in culture ambient media

### 2.2.2 主成分分析法

比值法较为简便,通常用于多环芳烃污染源的粗略判断,结论往往不够全面。研究发现 PYR、

BaA 和 FLA 的主要来源为煤炭燃烧和天然气燃烧<sup>[28]</sup>,BbF 主要来源为煤炭、石油燃料的不完全燃烧<sup>[29-30]</sup>,有研究<sup>[31]</sup>认为 CHR、IPY 和 BPF 为交通污染的指示物,BkF 的主要来源为石油等化石燃料的不完全燃烧。本研究采用 R 语言对养殖环境中 PAHs 进行主成分分析,选取了特征值较高的 3 个因子进行源解析,计算不同污染因子的贡献率,直观展现不同污染源的贡献。

对养殖塘周围大气沉降中多环芳烃进行主成分分析,湿沉降的因子载荷如图 4a 所示。PC1 解释了 72.54% PAHs 数据变化,其中 NAP、ANY 和 ANA 负载较高,NAP 和 ANA 是石油源污染的指示物<sup>[32]</sup>,ANA 又反映中低温转化的石油源<sup>[33]</sup>,因此 PC1 反映为石油污染源;PC2 解释了 19.47% PAHs 数据变化,其中负载较高的为 FLA、PYR 和 BaA,通常将其看作燃煤指示物,因此推断 PC2 可能代表煤炭燃烧所导致的燃烧源;PC3 中 CHR、IPY 和 BPF 负载较高,其中 IPY 和 BPF 被认为是汽车尾气的指示物,所以将 PC3 定义为交通污染源,贡献率为 4.61%。综合来看,研究区大气湿沉降中主要污染源为石油源,其次是燃烧源和交通污染源。

干沉降中主成分分析 3 个因子的载荷如图 4b 所示:PC1 中 BaA、BbF 和 FLA 载荷较高,其中 BaA 和 BbF 均与燃烧有关,FLA 代表了焦炉污染,所以将 PC1 定义为燃烧源,贡献率为 67.66%;PC2 中 CHR、IPY 和 BPF 载荷较高,这表示 PC2 中以交通污染源为主,贡献率为 17.58%;PC3 中 NAP、ANY 和 ANA 载荷较高。这 3 种低环多环芳烃来源为石油源,贡献率为 8.59%。综合来看,大气干沉降中主要污染源为煤炭等燃烧源,其次为交通污染源和石油源,总贡献率为 93.98%。

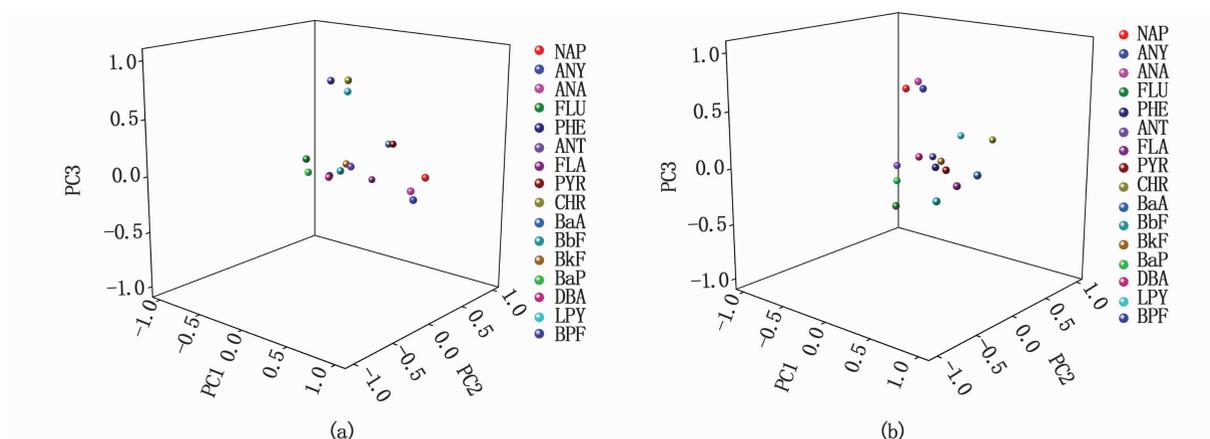


图4 大气湿沉降(a)和干沉降(b)PAHs 载荷

Fig. 4 Loading diagram of PAHs in atmospheric wet deposition(a) and dry deposition (b)

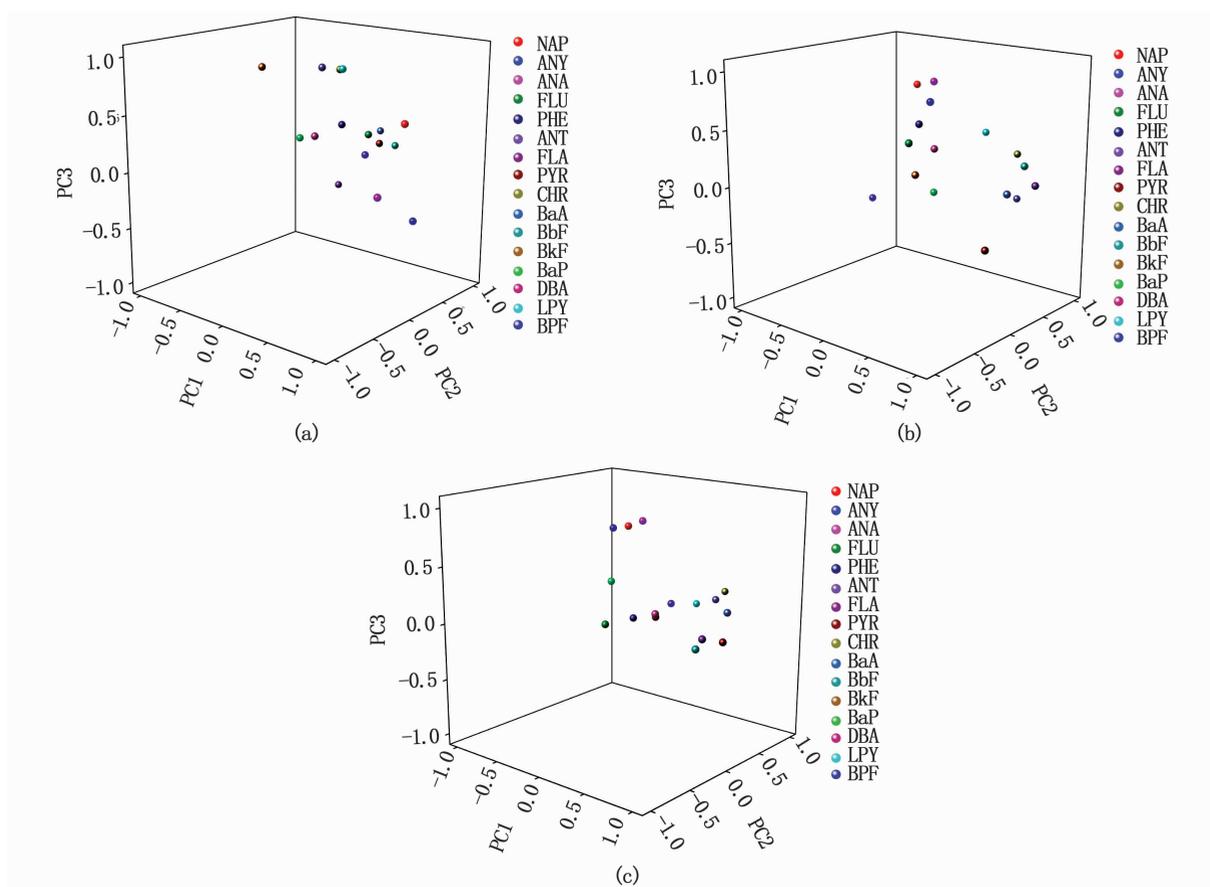


图5 水体(a)、土壤(b)和沉积物(c)PAHs 载荷

Fig. 5 Loading diagram of PAHs in water (a), soil (b) and sediments (c)

对养殖水体中 PAHs 进行主成分分析。如图 5a 所示:主成分 PC1 方差贡献率为 59.75%, NAP、ANY 和 ANA 具有较高的载荷,这 3 种低环多环芳烃主要来源为石油源的燃烧,故将因子 1 定义为石油燃烧源;主成分 PC2 方差贡献率为

31.24%, FLA、PYR、BaA 和 BbF 具有较高的载荷,因此因子 2 主要为煤炭燃烧源;主成分 PC3 方差贡献率为 5.24%, CHR、BkF、IPY 和 BPF 具有较高的载荷,BkF 也是煤炭燃烧的指示物,所以因子 3 主要为交通污染和煤炭燃烧的混合源。

综合 3 个因子,养殖区水体中多环芳烃的主要来源为石油燃烧源、煤炭燃烧源和交通污染源,总方差贡献率为 96.23%。

对养殖区土壤中 PAHs 进行主成分分析,如图 5b 所示:PC1 中 FLA、PYR、BaA 和 BbF 负载较高,这 4 种多环芳烃主要来源为煤炭、木材燃烧和化石燃料的不完全燃烧,故定义土壤的第一因子为煤炭化石燃料燃烧源,方差贡献率为 63.13%;PC2 中以 CHR、IPY 和 BPF 的负载最高,这 3 种物质均为交通污染指示物,故因子 2 定义为交通污染源,方差贡献率为 29.18%;PC3 中负载较高的有 NAP、ANY 和 ANA 3 种低环多环芳烃,这 3 种物质主要来源为石油燃烧,故定义该因子为石油燃烧源,方差贡献率为 6.17%。结合 3 个因子分析,土壤中主要来源由高到低依次为煤炭燃烧、交通污染和石油燃烧,总方差贡献率为 98.48%。

对沉积物 PAHs 进行主成分分析,如图 5c 所示,选取了特征值大的 3 个因子:PC1 解释了总变量的 50.41%,FLA、PYR、BaA 和 BbF 负载系数较高,这几种物质为煤炭燃烧和化石燃料不完全燃烧的指示物;PC2 解释了总变量的 38.22%,CHR、IPY 和 BPF 负载系数较高,主要污染来源为交通污染;PC3 解释了总变量的 7.35%,NAP、ANY 和 ANA 负载系数较高,这 3 种物质来源均为石油燃烧源。沉积物中 PAHs 主要污染源与土壤中相似,以煤炭燃烧和化石燃料不完全燃烧为主,其次是交通污染源,并有少量的石油燃烧源,这 3 个因子的总方差贡献率为 95.98%。

比值法与主成分分析法所得结果基本一致,出现石油源与燃烧源等多种污染源均存在的现象与研究区周围的土地利用情况有很大关系。金山区坐落着上海石油化工股份有限公司和上海化学工业区两个特大型企业,工厂的煤炭燃烧、焦炉燃烧、石油等化石燃料的不完全燃烧有可能增加了该地区多环芳烃的污染<sup>[13]</sup>。同时金山区作为上海的西南门户,水陆运输发达,港口的建立增加了水路运输过程中产生的燃料污染、陆路运输产生的尾气污染也有可能增加环境中多环芳烃的输入。

### 2.3 罗氏沼虾食用健康风险评价

环境中的 PAHs 在罗氏沼虾体内富集,最终通过食物链富集到人体内,从而对人体健康产生

一定的影响。采用终身致癌风险对罗氏沼虾的食用风险进行评价分析。经计算,罗氏沼虾成虾样品的终身致癌风险值(ILCR)为 $1.89 \times 10^{-8} \sim 1.37 \times 10^{-6}$ ,高于鱼外渔场水产品食用致癌风险值( $1.43 \times 10^{-11} \sim 1.66 \times 10^{-8}$ )<sup>[34]</sup>,与长三角地区水产品食用致癌风险值相当( $5.1 \times 10^{-10} \sim 1.3 \times 10^{-6}$ )<sup>[26]</sup>,低于韩国水产品食用致癌风险值( $2.85 \times 10^{-6}$ )<sup>[35]</sup>,基本符合 USEPA 提出的标准值 $1.0 \times 10^{-6}$ ,仅有少数样品超出标准,仍属可以控制的范围,不会对人类的健康安全构成威胁。

### 3 结论

本研究通过对研究区域养殖环境及罗氏沼虾中 16 种优先控制 PAHs 的含量构成、污染源进行分析并进行风险评价,得出以下结论:

(1)大气干、湿沉降中 PAHs 含量及沉降通量分别为 $5.52 \sim 9.45 \mu\text{g/g}$ 、 $47.99 \sim 100.42 \text{ ng/L}$ 和 $3.75 \sim 6.42 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、 $83.32 \sim 174.36 \text{ ng}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ,干沉降中以高环为主,湿沉降中以低环为主;水体中 PAHs 含量为 $342.76 \sim 1520.83 \text{ ng/L}$ ,以低环为主,对比国内其他养殖区,研究区 PAHs 污染处于中等水平;土壤与沉积物中 PAHs 含量分别为 $1000.45 \sim 2138.46 \text{ ng/g}$ 和 $1763.70 \sim 3656.97 \text{ ng/g}$ ,高环 PAHs 的含量远高于低环,相比于其他养殖区处于较高水平;浮游动物与浮游植物 16 种 PAHs 总含量分别为 $46.18 \sim 134.63 \mu\text{g/g}$ 和 $26.13 \sim 145.39 \mu\text{g/g}$ ,均以 4 环多环芳烃为主;罗氏沼虾 3 个生长时期 16 种 PAHs 平均总含量分别为 $63.09 \text{ ng/g}$ 、 $111.89 \text{ ng/g}$ 、 $148.77 \text{ ng/g}$ ,存在生物富集现象,虾肉中 3、4 环 PAHs 含量相对较高,相比于其他养殖区水产品,研究区罗氏沼虾体内 PAHs 处于较低水平。

(2)养殖区大气沉降为多污染源并存,其中:湿沉降中污染源主要为石油源;干沉降中污染源主要为煤炭、木材的燃烧源;水体主要污染源为石油源;土壤中主要为煤炭燃烧源;沉积物中污染源与土壤中类似,以煤炭燃烧和化石燃料不完全燃烧为主。

(3)虾的终身致癌风险为 $1.89 \times 10^{-8} \sim 1.37 \times 10^{-6}$ ,在可接受范围内,正常食用下,不会对人类健康产生危害。

## 参考文献:

- [1] 宁怡,柯用春,邓建才,等. 巢湖表层沉积物中多环芳烃分布特征及来源[J]. 湖泊科学,2012,24(6): 891-898.  
NING Y, KE Y C, DENG J C, et al. Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface sediment in Lake Chao [J]. Journal of Lake Sciences, 2012, 24(6): 891-898.
- [2] 匡少平,孙东亚. 多环芳烃的毒理学特征与生物标记物研究[J]. 世界科技研究与发展,2007(2): 41-47.  
KUANG S P, SUN D Y. Toxicological characteristics and biomarkers of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs)[J]. World Sci-tech R & D, 2007(2): 41-47.
- [3] 申松梅,曹先仲,宋艳辉,等. 多环芳烃的性质及其危害[J]. 贵州化工,2008(3): 61-63.  
SHEN S M, CAO X Z, SONG Y H. The nature and the impact of PAHs[J]. Guizhou Chemical Industry, 2008(3): 61-63.
- [4] SMITH A G, GANGOLLI S D. Organochlorine chemicals in seafood: occurrence and health concerns [J]. Food and Chemical Toxicology, 2002, 40(6): 767-779.
- [5] DOUGHERTY C P, HOLTZ S H, REINERT J C, et al. Dietary exposures to food contaminants across the United States[J]. Environmental Research, 2000, 84(2): 170-185.
- [6] 农业农村部渔业渔政管理局. 中国渔业统计年鉴[M]. 北京:中国农业出版社,2019: 24.  
Bureau of Fisheries, Ministry of Agriculture, PRC. China fishery statistical yearbook[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2019: 24.
- [7] 张丽,陈以芹,戴习林,等. 罗氏沼虾养殖周期中 PAHs 的生物累积特征及食用风险评价[J]. 上海海洋大学学报, 2020,29(4):526-532.  
ZHANG L, CHEN Y Q, DAI X L, et al. Bioaccumulation characteristics and risk assessment of PAHs in the breeding cycle of *Macrobrachium rosenbergii*[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2020, 29(4): 526-532.
- [8] 徐志华,朱晓华,葛筱琴,等. 高邮养殖区罗氏沼虾中多环芳烃的残留现状与健康风险评价[J]. 食品安全质量检测学报,2019, 10(19): 6718-6723.  
XU Z H, ZHU X H, GE X Q, et al. Determination and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons residues in *Macrobrachi* [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2019, 10(19): 6718-6723.
- [9] 于靖. 多环芳烃在长江下游典型湖泊浮游生物网中富集的周年变化及其影响因素研究[D]. 兰州:兰州大学, 2017.  
YU J. Annual bioaccumulation of polycyclic aromatic hydrocarbons in planktonic food webs of lakes in lower Yangtze River basin and the related factors[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2017.
- [10] YUNKER M B, MACDONALD R W, VINGAZAN R, et al. PAHs in the Fraiser River basin: a critical appraisal of PAHs ratios as indicators of PAHs source and composition [J]. Organic Geochemistry, 2002, 33(4): 489-515.
- [11] CHRISTENSEN E R, BZDUSEK P A. PAHs in sediments of the Black River and the Ashtabula River, Ohio: source apportionment by factor analysis[J]. Water Research, 2005, 39(4): 511-524.
- [12] YANG Y, WOODWARD L A, LI Q X, et al. Concentrations, source and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils from Midway Atoll, North Pacific Ocean [J]. PLOS ONE, 2014, 9(1): 1-7.
- [13] 周灵,彭自然,周丽丽,等. 狐尾藻基生物炭对水中草甘膦和  $\text{Cu}^{2+}$  的吸附性能研究[J]. 上海海洋大学学报, 2020, 29(5):779-788.  
ZHOU L, PENG Z R, ZHOU L L, et al. Study on the adsorption properties of glyphosate and  $\text{Cu}^{2+}$  in water by biochar derived from *Myriophyllum verticillatum* [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2020, 29(5):779-788.
- [14] 林根满. 石化工业区周边土壤和大气沉降中多环芳烃组成分布特征及源解析[D]. 上海:东华大学,2015.  
LIN G M. Composition, distribution and source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil and atmospheric deposition around the petrochemical industry region[D]. Shanghai: Donghua University, 2015.
- [15] 李新荣,赵同科,于艳新,等. 北京地区人群对多环芳烃的暴露及健康风险评价[J]. 农业环境科学学报,2009, 28(8): 1758-1765.  
LI X R, ZHAO T K, YU Y X, et al. Population exposure to PAHs and the health risk assessment in Beijing area [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(8): 1758-1765.
- [16] 郑曦,韩宝平,蒋欢,等. 微山湖养殖湖区水体中多环芳烃的分布及来源[J]. 四川环境,2010,29(6): 21-24.  
ZHENG X, HAN BP, JIANG H, et al. Distribution and source of polycyclic aromatic hydrocarbons in the water of aquatic product cage culture area of Weishan Lake [J]. Sichuan Environment, 2010, 29(6): 21-24.
- [17] 江锦花. 台州湾围塘养殖水体中多环芳烃的浓度及来源[J]. 海洋环境科学,2008(1): 47-50.  
JIANG J H. Distribution and source of polycyclic aromatic hydrocarbons in seawater of cage culture area in Taizhou Bay. Marine Environmental Science, 2008(1): 47-50.
- [18] 谢文平,朱新平,郑光明,等. 广东罗非鱼养殖区水体及鱼体中多环芳烃的含量与健康风险[J]. 农业环境科学学报,2014,33(12): 2450-2456.  
XIE W P, ZHU X P, ZHENG G M, et al. Health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in water and fish from tilapia pond of Guangdong. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33(12): 2450-2456.
- [19] 林建清,王新红,洪华生. 养殖水体中多环芳烃污染对水产品安全的影响[J]. 食品科学,2006(12): 41-45.  
LIN J Q, WANG X H, HONG H S. Effect of aquaculture

- PAH pollution on seafood security. *Food Science*, 2006 (12): 41-45.
- [20] SEIICHI U, JIRO K, EMIKO K, et al. Monitoring of PAHs and alkylated PAHs in aquatic organisms after 1 month from the Solar I oil spill off the coast of Guimaras Island, Philippines. [J]. *Environmental monitoring and assessment*, 2010, 165(1-4): 501-515.
- [21] 王岚云. 天津地区鱼塘沉积物中多环芳烃污染浅析[J]. *天津科技*, 2006(4): 35-36.  
WANG L Y. Analysis of polycyclic aromatic hydrocarbon pollution in fish pond sediments in Tianjin [J]. *Tianjin Science & Technology*, 2006(4): 35-36.
- [22] CHIOU C T, MCGRODDY S E, KILE D E, et al. Partition characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons on soils and sediments[J]. *Environmental Science & Technology Easton Pa*, 32(2): 264-269.
- [23] GEARING P J, GEARING J N, PRUELL R J, et al. Partitioning of no. 2 fuel oil in controlled estuarine ecosystems sediments and suspended particulate matter[J]. *Environmental Science & Technology*, 1980, 14(9): 1129-1136.
- [24] 李天云, 黄圣彪, 孙凡, 等. 河蚬对太湖梅梁湾沉积物多环芳烃的生物富集[J]. *环境科学学报*, 2008(11): 2354-2360.  
LI T Y, HUANG S B, SUN F, et al. Bioaccumulation by *corbicula fluminea* of polycyclic aromatic hydrocarbons from sediments in Meiliang Bay, Taihu Lake[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008(11): 2354-2360.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 李涛, 王玉, 徐枫, 等. 太湖流域地表水中多环芳烃的来源解析及风险评价[J]. *环境科学与技术*, 2018, 41(11): 198-204.  
LI T, WANG Y, XU F, et al. Pollution characteristics, source apportionment and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface water from Taihu Lake Basin [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 41(11): 198-204.
- [29] SIMCIK M F, EISENREICH S J, LLOYD P J. Source apportionment and source/sink relationships of PAHs in the coastal atmosphere of Chicago and Lake Michigan[J]. *Atmospheric Environment*, 1999, 33(30): 5071-5079.
- [30] KAVOURAS I G, KOUTRAKIS P, TSAPAKIS M, et al. Source apportionment of urban particulate aliphatic and polynuclear aromatic hydrocarbons (PAHs) using multivariate methods [J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, 35(11): 2288-2294.
- [31] FRASER M P, CASS G R, SIMONEIT B R T. Gas-phase and particle-phase organic compounds emitted from motor vehicle traffic in a Los Angeles Roadway Tunnel [J]. *Environmental Science & Technology*, 1998, 32(14): 2051-2060.
- [32] 王东利, 徐晓白, 储少岗. 塑料废物焚烧与持久性有机物环境污染[J]. *环境与健康杂志*, 2003(4): 58-60.  
WANG D L, XU X B, CHU S G, et al. Waste plastics incineration and environment pollution caused by persistent organic pollutants[J]. *Journal of Environment and Health*, 2003(4): 58-60.
- [33] HARRISON R M, SMITH D J T, LUHANA L. Source apportionment of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons collected from an urban location in Birmingham, UK [J]. *Environmental Science & Technology*, 1996, 30(3): 825-832.
- [34] 彭菲, 尹杰, 王茜, 等. 鱼外渔场海洋生物体内重金属和多环芳烃含量水平与食用风险评价[J]. *生态毒理学报*, 2019, 14(1): 168-179.  
PENG F, YIN J, WANG Q, et al. Occurrence and risk assessment of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in marine organisms from Yuwai fishing ground. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2019, 14(1): 168-179.
- [35] MOON H B, KIM H S, CHOI M, et al. Intake and potential health risk of polycyclic aromatic hydrocarbons associated with seafood consumption in Korea from 2005 to 2007 [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2010, 58(1): 214-221.

## Distribution, source apportionment and risk assessment of PAHs in the culture ponds of *Macrobrachium rosenbergii* in Jinshan, Shanghai

DAI Zhi<sup>1</sup>, CHEN Yihan<sup>1</sup>, PENG Ziran<sup>1</sup>, HE Wenhui<sup>1</sup>, PAN Yudi<sup>1</sup>, SHEN Luyao<sup>1</sup>, DAI Xilin<sup>2,3,4</sup>

(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)

**Abstract:** In order to study the pollution level and source of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the breeding environment of *Macrobrachium rosenbergii* in Jinshan district of Shanghai and to assess the food health risk, 16 kinds of optimal PAHs were detected by HPLC. The results showed that: In the cultivation area, the total PAHs content and the settling flux in the dry and wet deposition were 5.52 – 9.45  $\mu\text{g/g}$ , 47.99 – 100.42  $\text{ng/L}$  and 3.75 – 6.42  $\mu\text{g/m}^2 \cdot \text{d}$ , 83.32 – 174.36  $\text{ng/m}^2 \cdot \text{d}$ , respectively. In the dry deposition, the high ring was dominated, while in the wet deposition, the low ring was dominant. The total PAHs content in the water is 342.76 – 1 520.83  $\text{ng/L}$ , which is mainly dominated by low ring. Compared with other breeding areas in China, PAHs pollution in the water of research areas is at a medium level; the content of PAHs in soil and sediment was 1 000.45 – 2 138.46  $\text{ng/g}$  and 1 763.70 – 3 656.97  $\text{ng/g}$ , respectively. The content of PAHs in high ring was much higher than that in low ring, which was also higher than that in other aquaculture areas. The total PAHs contents in zooplankton and phytoplankton was 46.18 – 134.63  $\mu\text{g/g}$  and 26.13 – 145.39  $\mu\text{g/g}$ , respectively, which were dominated by 4-ring PAHs; The average total PAHs content in the three growth stages of *Macrobrachium rosenbergii* was 63.09  $\text{ng/g}$  (Seeding stage), 111.89  $\text{ng/g}$  (Growth stage) and 148.77  $\text{ng/g}$  (Incubation stage), respectively, showing the existence of bioenrichment phenomenon. The PAHs content in the 3 and 4 cyclic PAHs in the shrimp meat was relatively high. Compared with aquatic products in other breeding areas, PAHs in the study area in *Macrobrachium rosenbergii* were at a lower level. The ratio method and principal component analysis method were used to analyze the pollution sources. The results showed that the air settlement in the breeding area coexisted with many pollution sources, and the pollution sources in the wet settlement were mainly petroleum sources. The main source of pollution in dry deposition was coal and wood combustion. The main pollution sources of water bodies were petroleum sources; the main source of coal combustion was in the soil. The pollution sources in sediments were similar to those in soil, mainly coal combustion and incomplete combustion of fossil fuels. The results of risk assessment showed that the lifetime cancer risk of *Macrobrachium rosenbergii* was  $1.89 \times 10^{-8}$  –  $1.37 \times 10^{-6}$ , which was within the acceptable range and would not harm human health under normal eating conditions.

**Key words:** *Macrobrachium rosenbergii*; PAHs; source apportionment; risk assessment