

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

谢文平, 朱新平*, 郑光明, 单奇, 马丽莎

(中国水产科学研究院珠江水产研究所, 农业部热带亚热带水产种质资源利用与养殖重点实验室, 农业部水产品质量安全风险评价实验室, 广州 510380)

摘要:利用气相色谱质谱仪(GC-MS)对广东罗非鱼主要养殖区水体及罗非鱼肌肉中16种优先控制多环芳烃(PAHs)的含量进行检测,并用美国环保局(USEPA)推荐的健康风险评价模型对罗非鱼食用安全进行健康风险评价。结果表明:水体中16种多环芳烃总量为 $272.53\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,范围为 $53.55\sim 679.97\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$;罗非鱼肌肉PAHs残留含量范围为 $182.66\sim 717.20\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$,平均含量为 $355.28\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$;多环芳烃的组成以低环为主,在水体及罗非鱼肌肉所占比例分别为 $69.64\%\sim 97.09\%$ 和 $59.70\%\sim 74.46\%$;罗非鱼经食用所含6种致癌PAHs造成个人年致癌风险值范围为 $2.87\times 10^{-6}\sim 1.56\times 10^{-5}\text{ a}^{-1}$,低于国际辐射防护委员会(ICRP)推荐的最大可接受风险水平($5.0\times 10^{-5}\text{ a}^{-1}$),但存在一定的致癌风险,8种非致癌PAHs有害污染物对人体的总非致癌风险为 $2.51\times 10^{-10}\sim 1.54\times 10^{-9}\text{ a}^{-1}$,低于国际标准值,健康风险较低。

关键词:多环芳烃;珠江三角洲;养殖鱼塘;健康风险

中图分类号:X820.4 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2014)12-2450-07 doi:10.11654/jaes.2014.12.024

Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water and Fish from *Tilapia* Pond of Guangdong

XIE Wen-ping, ZHU Xin-ping*, ZHENG Guang-ming, SHAN Qi, MA Li-sha

(Key Laboratory of Tropical and Subtropical Fishery Resource Application and Cultivation of Ministry of Agriculture, Laboratory of Seafood Quality and Security Evaluation of Ministry of Agriculture, Pearl River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510380, China)

Abstract: Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) have caused water and aquatic product pollution. In this study, the residual levels of 16 priority PAHs in water and *Tilapia* samples collected from fish ponds, markets and supermarkets in four cities of Guangdong Province were measured by GC-MS. The health risk model recommended by USEPA was used to assess health risk of these fish products. Total concentrations of 16 priority PAHs in the water ranged from $53.55\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ to $679.97\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, averaging $272.53\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, while the contents of PAHs in aquatic products ranged from $182.66\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ to $717.20\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, with the average concentration of $355.28\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$. The predominant PAHs in the water and the fish were low-molecular ones, which accounted for $69.64\%\sim 97.09\%$ and $59.70\%\sim 74.46\%$, respectively. The carcinogenic risk indexes of 6 PAHs through the fish consumption ranged from $2.87\times 10^{-6}\text{ a}^{-1}$ to $1.56\times 10^{-5}\text{ a}^{-1}$, with $8.96\times 10^{-6}\text{ a}^{-1}$ and $3.54\times 10^{-6}\text{ a}^{-1}$ for the town and county residents, respectively. The non-carcinogenic risk indexes of 8 PAHs varied from $2.51\times 10^{-10}\text{ a}^{-1}$ to $1.54\times 10^{-9}\text{ a}^{-1}$, much lower than the maximum tolerable value ($5.0\times 10^{-5}\text{ a}^{-1}$) recommended by the International Commission on Radiological Protection.

Keywords: polycyclic aromatic hydrocarbons; Pearl River Delta; fish pond; health risk assessment

多环芳烃有较高的亲脂性,能通过水产品食用、饮水和皮肤接触等途径进入体内,危害人体健康,具

有潜在致癌、致畸和致突变作用^[1-4],美国环保局(USEPA)已将16种多环芳烃列为水体和土壤优先控制的污染物^[5-6]。近年来,随着区域经济快速发展,大量有毒有害物质通过各种途径进入水环境^[7-9],其中多环芳烃是受到广泛关注的有毒有害化学物质之一^[10],它能通过废水排放、大气沉降、地表径流及原油泄漏等多种途径进入水体^[11]。

广东省地处亚热带,雨量充沛,水资源丰富,是

收稿日期:2014-07-24

基金项目:中国水产科学研究院基本科研业务费专项资金(2012A0303);
广东省省级财政专项资金(海洋与渔业项目水产品质量安全基础研究)

作者简介:谢文平(1971—),男,硕士,副研究员,主要研究方向为环境与质量安全。E-mail:xwp7118@163.com

*通信作者:朱新平 E-mail:zhuxinping_1964@163.com

我国水产品主要产区^[12-13],过去人们对典型化学污染物的研究工作更多集中在河流等自然水域污染,对养殖环境及水产品食用安全方面研究相对欠缺。随着人们对水产品质量安全及养殖环境关注度的提高,开展相关研究具有现实意义。罗非鱼(*Tilapia*)是我国南方主要养殖水产品,其主要特点为肉质鲜美、少刺、蛋白质含量高,深受消费者喜爱,广东省是我国罗非鱼最大的养殖和出口大省,年产量约为 60 万 t,占全国产量的 45%,选用罗非鱼主要养殖区具有较强的地域代表性。本研究针对广东省罗非鱼主要养殖区域水体及罗非鱼体中多环芳烃污染现状开展调查,采用美国环境保护(USEPA)评价模式对罗非鱼食用安全进行健康风险评价,以期了解广东罗非鱼主要养殖区域环境和水产品多环芳烃污染状况,为居民水产品食用安全提供可靠的依据。

1 材料和方法

1.1 仪器与试剂

仪器设备包括气相色谱质谱联用仪(Agilent 7890A -5975C)和旋涡混匀器(德国 IKA 公司);试剂

包括二氯甲烷、正己烷、乙酸乙酯(美国 Tedia 公司);中性氧化铝(国药集团),C18(Agela 公司);16 种 PAHs 混合标准样品和内标(美国 Supelco 公司)。

1.2 样品采集

采样时间为 2013 年 5 月和 2013 年 12 月,样品采集于广州、肇庆、惠州和茂名 4 市(图 1),水样分别采集于 12 个不同的罗非鱼养殖鱼塘,具体位置如表 1。采集鱼塘表层水样,每个鱼塘采集水样 10 L,采用不锈钢采水器,分 2 次采集,装于棕色玻璃瓶内,样品运回实验室于 4 ℃保存后进行处理分析。罗非鱼样品分别采集于鱼塘、农贸市场和超市,采集比例为 3:2:1,每个采样点采集罗非鱼成鱼 3~5 条,体重 1~2 kg,所有样品经调查确认均产自当地养殖水域,共计 24 份样品,带回实验室于-20 ℃保存。

1.3 样品处理

水样:取 2 L 水样用盐酸酸化至 pH 3~4,过活化固相萃取小柱(SEP-PAK18, Water),进样速度为 10~15 mL·min⁻¹,使用 30 mL 二氯甲烷洗脱,浓缩后用正己烷替换并定容至 1 mL,加入内标,用气相色谱-质谱联用仪(GC-MS)分析测定样品中 PAHs 含量。

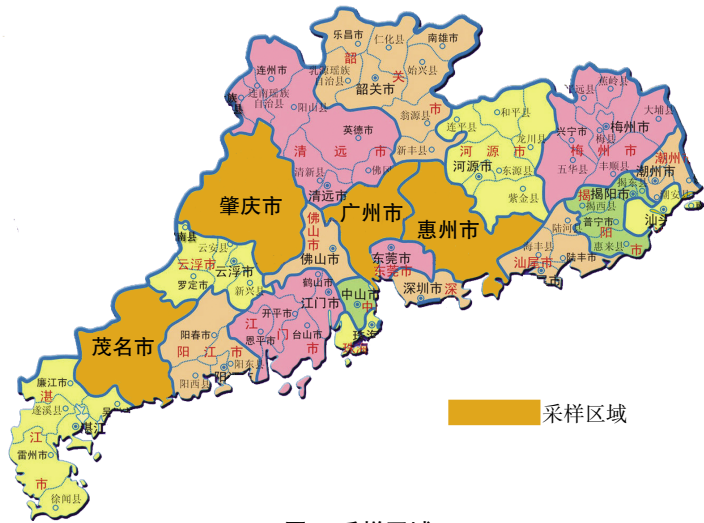


图 1 采样区域
Figure 1 Sampling area in Guangdong Province

表 1 主要养殖水体采样点分布
Table 1 Sampling sites in freshwater fish pond

编号	采样点	经纬度	编号	采样点	经纬度
G1	广州番禺鱼窝头	N23°03.014,E114°35.309	Z1	肇庆四会	N22°40.300,E113°36.744
G2	广州番禺万顷沙	N22°43.347,E113°32.334	Z2	肇庆四会	N23°22.225,E112°39.108
G5	广州番禺 12 涌	N22°40.01,E113°36.745	Z3	肇庆高要	N23°56.507,E112°37.385
H1	惠州汝湖	N23°11.058,E114°26.378	M1	茂名红丰	N21°40.908,E110°42.004
H2	惠州小金	N23°11.168,E114°22.949	M2	茂名茂南区	N27°37.421,E110°41.586
H3	惠州平潭	N23°03.815,E114°35.309	M3	茂名茂南区	N21°41.921,E110°48.224

生物样品:将冷干研磨后的样品肌肉(约 4 g)用 100 mL 二氯甲烷索氏提取 72 h, 将提取液旋转蒸发浓缩至 20 mL 后用浓硫酸脱脂,继续浓缩至 1 mL,加入 10 mL 正己烷替换,旋转蒸发至近 1 mL 左右,用氧化铝与硅胶柱填充的净化柱净化后再用 70 mL 左右二氯甲烷/正己烷(3:7)洗脱,旋转蒸发正己烷定容 1 mL,加入内标后(GC-MS)分析测定。

1.4 色谱分析与质量控制

色谱条件:载气为纯度高于 99.999%的氦气,流速 1.0 mL·min⁻¹;进样口温度 260 ℃,脉冲不分流进样,脉冲压力 10 psi,持续时间 0.9 min,分流出口开启时间 1 min,进样体积 1 μL;柱程序升温:初始柱温 60 ℃,保持 1 min,以 20 ℃·min⁻¹升至 180 ℃,保持 1 min,再以 10 ℃·min⁻¹升至 230 ℃,保持 4 min,最后以 5 ℃·min⁻¹升至 300 ℃保持 5 min;质谱条件:离子源温度 300 ℃,四极杆温度 200 ℃,接口温度 300 ℃,溶剂延迟 5 min,选择离子监测模式^[14]。

质量控制:水样检出限为 0.24~1.00 ng·L⁻¹,加标回收率为 56%~103%,水产品检出限为 0.12~0.50 ng·g⁻¹,加标回收率为 93%~108%。

2 结果与讨论

2.1 水体中 PAHs 含量

广东罗非鱼养殖场所测样品水体中, Flo、Phe、

Ant、Fla、Pyr、Baa 检出率为 100%; Nap、Acy、Ace、Chr、Bbf、Bkf、Ind 和 BghiP 分别为 16.7%、25.0%、8.3%、91.7%、8.3%、25.0%、16.7%和 33.3%; Bap、Dba 未检出(表 2)。16 种 PAHs 含量平均值为 272.53 ng·L⁻¹, 范围为 53.55~679.97 ng·L⁻¹, 其中 6 种致癌性多环芳烃^[6,16]含量范围为 3.12~28.19 ng·L⁻¹, 平均值为 8.62 ng·L⁻¹, 所占比例为 0.95%~7.58%, 苯并[a]蒽和蒽含量和检出率相对较高;与国内其他水体及河流比较,广东罗非鱼养殖场水体 PAHs 含量高于巢湖平均值 170.72 ng·L⁻¹^[15], 但低于小白洋淀水体 315.72 ng·L⁻¹^[16], 也低于国内主要河流如天津河流(281.6±336.9)ng·L⁻¹、松花江 534 ng·L⁻¹ 及长江 242~6235 ng·L⁻¹ 含量^[17-19]。不同养殖区所检测出多环芳烃含量大小依次为茂名(459.32)ng·L⁻¹>肇庆(368.51)ng·L⁻¹>惠州(119.22)ng·L⁻¹>广州(80.03)ng·L⁻¹, 含量较高的区域为茂名茂南区, 这可能与茂名地区石化和塑料行业在能源以及污染排放过程中产生 PAHs 污染有关。

2.2 罗非鱼肌肉中 16 种 PAHs 含量

罗非鱼肌肉中 PAHs 含量(以干重计)范围为 182.66~717.20 ng·g⁻¹, 平均含量为 355.28 ng·g⁻¹, 水产品中 PAHs 组成以低环 PAHs 为主, 中高环含量较低, 高、中、低环 PAHs 所占比重分别为 2.42%~11.87%、22.03%~34.10%和 59.70%~74.46%(图 2)。比较其他地区水产品 PAHs 含量, 罗非鱼肌肉中含量

表 2 广东省罗非鱼养殖鱼塘水体中 16 种 PAHs 含量(ng·L⁻¹)

Table 2 Concentrations of 16 priority PAHs in water of *Tilapias* ponds in Guangdong Province(ng·L⁻¹)

化合物	Z1	Z2	Z3	H1	H2	H3	M1	M2	M3	G1	G2	G5	均值	检出率%
Nap	nd	nd	nd	nd	nd	nd	4.10	nd	nd	1.13	nd	nd	2.62	16.7
Acy	nd	nd	2.26	nd	6.36	nd	5.35	nd	nd	nd	nd	nd	4.66	25.0
Ace	nd	nd	nd	nd	nd	nd	7.77	nd	nd	nd	nd	nd	7.77	8.3
Flo	92.72	52.73	46.74	16.06	63.17	15.33	221.28	71.17	22.61	21.06	29.06	10.12	55.17	100
Phe	233.57	194.17	110.37	55.43	124.20	49.58	357.92	292.61	95.16	71.39	76.77	19.01	140.02	100
Ant	37.45	18.18	10.37	8.57	20.67	1.07	10.42	23.50	100.72	2.97	7.97	1.56	20.28	100
Fla	52.91	56.49	24.46	17.15	24.83	25.20	53.33	36.70	15.24	19.38	11.07	11.49	29.02	100
Pyr	14.21	31.09	12.09	9.86	13.97	1.17	13.29	21.00	9.18	3.10	6.75	4.95	11.72	100
Baa	5.68	10.45	4.04	2.03	2.49	3.19	2.85	3.09	1.41	3.46	2.32	1.81	3.57	100
Chr	7.08	13.01	5.12	2.53	3.09	3.98	3.66	3.90	1.71	nd	2.88	2.25	4.47	91.7
Bbf	nd	nd	1.89	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	1.89	8.3
Bkf	nd	3.25	1.68	nd	nd	1.50	nd	nd	nd	nd	nd	nd	2.14	25.0
Bap	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0	0
Ind	nd	1.48	1.61	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	1.55	16.7
Dba	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0	0
BghiP	nd	2.22	58.22	2.58	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	2.37	16.35	33.33
Σ PAHs	443.61	383.07	278.84	114.21	258.77	101.02	679.97	451.97	246.03	122.48	136.81	53.55	272.53	

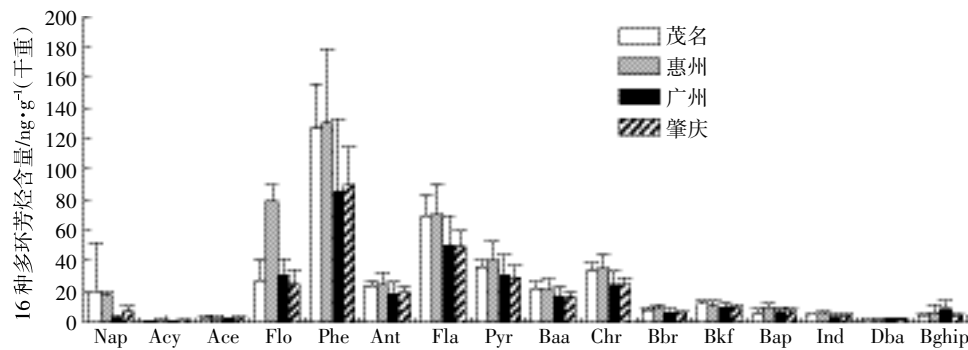


图 2 珠江三角洲水产品中 16 种 PAHs 含量

Figure 2 Contents of 16 priority PAHs in aquatic products (*Tilapia*) from Guangdong Province

(干重计)高于巢湖(320 ng·g⁻¹)。以湿重计,根据鱼类的含水率(约 80%)换算,湿重 PAHs 含量为 36.53~143.44 ng·g⁻¹,平均含量为 71.06 ng·g⁻¹,与香港地区接近 15.5~118 ng·g⁻¹,而略高于太原市场鱼体的 60.30 ng·g⁻¹[20]。

2.3 16 种优控 PAHs 在水体和罗非鱼肌肉中组成特征分析

如图 3 所示,水体中 16 种优控 PAHs 组成主要以低环为主,中高环含量很低或未检出,这与其他水域报道基本一致[15],所占比例低环为 69.64%~97.09%,中环为 2.91%~16.82%,高环为 0~21.45%;采样点 Z3 高环占较高比例,达 21.45%,明显高于其他采样点,可能存在一定程度的污染。

PAHs 主要来源于工业和日常生活中能源利用过程,煤、石油的不完全燃烧产物为 PAHs 的主要来源。水体中多环芳烃的污染来源评价目前有较多的评价方法[21-22],采用相同分子量的菲和蒽,来分析水体中 PAHs 的污染来源受到广泛采用[23]。蒽/(蒽+菲)<0.1 被认为是石油源的标志,蒽/(蒽+菲)>0.1 则以燃烧源为主;结果显示,12 个采样点水体蒽/(蒽+菲)比值范

围在 0.021~0.51 之间,大于 0.1 有 4 个采样点,其余 8 个采样点小于 0.1,说明养殖鱼塘水体中 PAHs 的来源以石油源为主。

2.4 广东罗非鱼体中 PAHs 健康风险及评价

多环芳烃对人类健康风险及评价方法较多[24-25],较常采用的为美国环保局(USEPA)致癌风险系数法[26-28]。多环芳烃的联合致癌效应,采用苯并[a]芘的毒性当量的致癌风险系数法来评价,等效因子是 Nisbet 与 Laygoy 提出的 BaP 等效转换系数,等效系数越

表 3 PAHs 的 BaP 等效因子

Table 3 Toxic equivalent factors(TEFs) and reference dose(RfD) of PAHs

PAHs	TEF	RfD/mg·kg ⁻¹ ·d ⁻¹	PAHs	TEF	RfD/mg·kg ⁻¹ ·d ⁻¹
Nap	0.001	0.02	Baa	0.1	0.03
Acy	0.001	0.06	Chr	0.01	0.03
Ace	0.001	0.06	Bbf	0.1	0.03
Flo	0.001	0.04	Bkf	0.1	0.03
Phe	0.001	0.03	Bap	1	0.03
Ant	0.01	0.3	Ind	5	0.03
Fla	0.001	0.04	Dbp	0.1	0.03
Pyr	0.001	0.03	BghiP	0.01	0.03

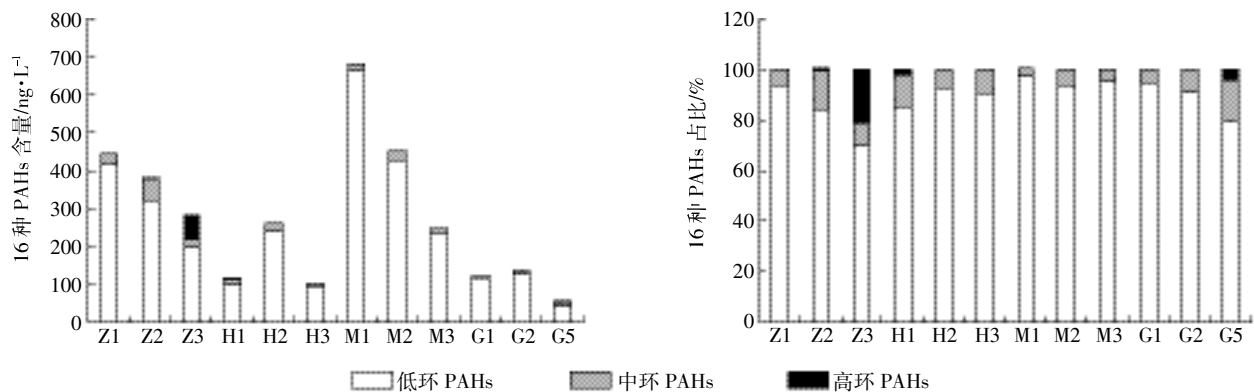


图 3 罗非鱼养殖水体中 16 种 PAHs 含量和占比

Figure 3 Contents and percentages of 16 priority PAHs in water of *Tilapia*s ponds in Guangdong Province

大,毒性越强,具体如表 3 所示^[29]。

本文采用美国 EPA 推荐的健康风险评价方法^[30-31]评估 PAHs 的健康风险。致癌风险 R_c 评价计算见公式(1),非致癌物质所致健康危害的风险评价 R_f 计算见公式(2)。

$$R_c=\frac{C_i\times TEFi\times IR_f\times ED\times SF}{BW\times AT}$$

(1)

$$R_f=\frac{C_i\times IR_f\times 10^{-6}}{BfD\times ED}$$

(2)

式中: C_i 是第 i 个 PAH 的质量浓度, $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$; $TEFi$ 是 BaP 第 i 个 PAH 等效因子; SF 为化学致癌物的致癌斜率系数,取值 $7.3\text{ kg}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{mg}^{-1}$ ^[30]; ED 为暴露历时,致癌物通常取 70 a; BW 为平均人体体重,取值为 58.6 kg; IR_f 是水产品每天的进食率, $\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$, 年我国城市居民平均每人每日购买水产品量为 41.616 g, 农村居民消费量为 14.685 g(中国统计年鉴 2013)^[32]; AT 为总的暴露时间, $70\text{ a}\times 365\text{ d}\cdot\text{a}^{-1}$ 。

根据健康风险评价模型和评价参数,对广东罗非

鱼肌肉中多环芳烃可能致癌物进行风险评价见表 4,经食用造成个人年致癌风险为 $2.87\times 10^{-6}\sim 1.56\times 10^{-5}\text{ a}^{-1}$,城市居民平均值为 $1.08\times 10^{-5}\text{ a}^{-1}$,农村居民平均值为 $3.82\times 10^{-6}\text{ a}^{-1}$,低于国际辐射防护委员会(ICRP)推荐的最大可接受风险水平($5.0\times 10^{-5}\text{ a}^{-1}$)^[33],但高于瑞典环保局、荷兰建设和环境部推荐的最大可接受水平($1.0\times 10^{-6}\text{ a}^{-1}$); 茂名市多环芳烃致癌物风险高于其他地区,单个污染物苯并(a)芘风险贡献率也最大。

罗非鱼肌肉中残留 8 种非致癌 PAHs 有害污染物对人体的非致癌风险见表 5,总非致癌风险为 $2.51\times 10^{-10}\sim 1.54\times 10^{-9}\text{ a}^{-1}$,城市居民平均值为 $1.07\times 10^{-9}\text{ a}^{-1}$,农村居民平均值为 $3.75\times 10^{-10}\text{ a}^{-1}$,远低于国际辐射防护委员会(ICRP)和瑞典环保局、荷兰建设和环境部推荐的最大可接受水平;单个非致癌 PAHs 化合物残留以菲风险最大;不同城市罗非鱼肌肉中非致癌 PAHs 风险比较,茂名非致癌风险明显高于珠三角城市,具体排列顺序为茂名>惠州>肇庆>广州,这可能

表 4 多环芳烃的致癌风险(个人年风险, a^{-1})
Table 4 Carcinogenic risks of *Tilapia* from Pearl River Delta

人群	采样点	Baa	Chr	Bbf	Bkf	Bap	DahA	总风险
城市居民	茂名	2.43E-06	3.81E-07	8.37E-07	1.29E-06	9.30E-06	5.20E-07	1.27E-05
	惠州	2.00E-06	2.89E-07	7.96E-07	8.46E-07	7.19E-06	3.90E-07	1.56E-05
	广州	1.25E-06	2.83E-07	4.54E-07	7.13E-07	5.19E-06	2.92E-07	8.14E-06
	肇庆	1.66E-06	2.47E-07	6.56E-07	9.62E-07	7.10E-06	3.82E-07	1.10E-05
	均值	1.84E-06	2.88E-07	6.73E-07	9.53E-07	6.69E-06	3.96E-07	1.08E-05
农村居民	茂名	8.61E-07	1.38E-07	2.94E-07	4.57E-07	2.57E-06	1.84E-07	4.48E-06
	惠州	7.04E-07	1.02E-07	2.81E-07	2.98E-07	2.53E-06	1.37E-07	4.06E-06
	广州	4.40E-07	8.41E-08	1.60E-07	2.52E-07	1.84E-06	1.23E-07	2.87E-06
	肇庆	5.85E-07	8.70E-08	2.16E-07	3.39E-07	2.51E-06	1.35E-07	3.87E-06
	均值	6.49E-07	1.02E-07	2.38E-07	3.36E-07	2.37E-06	1.39E-07	3.82E-06

表 5 多环芳烃的非致癌风险(个人年风险, a^{-1})
Table 5 No-carcinogenic risks of *Tilapia* from Pearl River Delta

人群	采样点	Nap	Acy	Ace	Flo	Phe	Ant	Fla	Pyr	总风险
城市居民	茂名	1.57E-10	2.11E-12	7.45E-12	2.03E-10	6.49E-10	1.22E-11	2.63E-10	1.90E-10	1.54E-09
	惠州	2.94E-11	1.22E-12	3.82E-12	1.19E-10	5.71E-10	9.97E-12	2.29E-10	1.69E-10	1.13E-09
	广州	8.59E-12	1.33E-12	3.05E-12	7.76E-11	3.67E-10	6.13E-12	1.43E-10	1.07E-10	7.14E-10
	肇庆	6.39E-11	2.70E-12	6.63E-12	8.63E-11	4.46E-10	8.76E-12	1.79E-10	1.45E-10	9.39E-10
	均值	6.47E-11	1.84E-12	5.24E-12	1.21E-10	5.08E-10	9.27E-12	2.03E-10	1.54E-10	1.07E-09
农村居民	茂名	5.23E-11	7.40E-13	2.62E-12	7.14E-11	2.28E-10	4.30E-12	9.22E-11	6.67E-11	5.23E-10
	惠州	1.03E-11	4.30E-13	1.34E-12	4.19E-11	2.01E-10	3.50E-12	8.04E-11	5.95E-11	3.99E-10
	广州	2.25E-12	4.68E-13	1.07E-12	2.72E-11	1.29E-10	2.16E-12	5.02E-11	3.78E-11	2.51E-10
	肇庆	2.25E-11	9.48E-13	2.33E-12	3.02E-11	1.57E-10	3.08E-12	6.30E-11	5.10E-11	3.30E-10
	均值	2.28E-11	6.46E-13	1.84E-12	4.26E-11	1.78E-10	3.26E-12	7.14E-11	5.40E-11	3.75E-10

与茂名石化工业较发达有关。

3 结论

(1)与国内主要水体及河流比较,广东养殖鱼塘PAHs含量略高于巢湖水体,但低于小白洋淀及国内主要河流,属较低水平;茂名多环芳烃污染水平高于珠江三角洲其他三市。

(2)广东罗非鱼肌肉中的PAHs含量以湿重计与香港地区水产品含量接近,而略高于太原市场鱼体含量;16种多环芳烃的组成比例,养殖水体及鱼体中均以低环和中环为主,鱼体中高环所占比例高于养殖水体,说明罗非鱼对水体中高环多环芳烃的蓄积能力强于低环。

(3)采用美国国家环保局(EPA)推荐的评价模型对食用罗非鱼引起健康风险评价结果表明,造成个人年致癌健康风险低于国际辐射防护委员会(ICRP)推荐的最大可接受风险水平,但略高于瑞典环保局、荷兰建设和环境部推荐的最大可接受标准,8种非致癌PAHs风险远低于ICRP等国际标准,4个市罗非鱼致癌和非致癌风险具体排列顺序为茂名>惠州>肇庆>广州。

参考文献:

- [1] 王凡,沙玉娟,夏星辉,等.长江武汉段水体邻苯二甲酸酯分布特征研究[J].环境科学,2008,29(5):1163-1169.
WANG Fan, SHA Yu-juan, XIA Xing-hui, et al. Distribution characteristics of phthalic acid esters in the Wuhan Section of the Yangtze River[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(5):1163-1169.
- [2] Larsen R K, Baker J E. Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in the urban atmosphere: A comparison of three methods[J]. *Environmental Science and Technology*, 2003, 37(9):1873-1881.
- [3] 李新荣,赵同科,刘宝存,等.官厅水库周边蔬菜地表土中多环芳烃的污染[J].环境科学学报,2010,30(7):1492-1498.
LI Xin-rong, ZHAO Tong-ke, LIU Bao-cun, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the surface soils of vegetable plots around the Guanting Reservoir[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(7): 1492-1498.
- [4] 冯承莲,雷炳莉,王子健,等.中国主要河流中多环芳烃生态风险的初步评价[J].中国环境科学,2009,29(6):583-588.
FENG Cheng-lian, LEI Bing-li, WANG Zi-jian, et al. Preliminary ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in main rivers of China[J]. *China Environmental Science*, 2009, 29(6):583-588.
- [5] Thyssen J, Althoff J, Kimmeler G, et al. Inhalation studies with benzo [a] pyrene in syrian golden hamsters[J]. *Nation Cancer Institute*, 1981, 66 (3):575-577.
- [6] Deutesch-Wenzel R P, Brune H, Grimmer G, et al. Experimental studies in rat lungs on the carcinogenicity and dose-response relationships of eight frequently occurring environmental polycyclic aromatic hydrocarbons [J]. *Nation Cancer Institute*, 1983, 71(3):539-544.
- [7] 谢文平,王少冰,朱新平,等.珠江下游河段沉积物中重金属含量及污染评价[J].环境科学,2012,33(6):1808-1815.
XIE Wen-ping, WANG Shao-bing, ZHU Xin-ping, et al. Residues and potential ecological risk assessment of metal in sediments from lower reaches and estuary of Pearl River[J]. *Environmental Science*, 2012, 33 (6):1808-1815.
- [8] 李翠田,王淑红,于红兵,等.珠江口海域表层沉积物中重金属含量分布特征及其环境质量评价[J].海洋环境科学,2009,28(5):528-538.
LI Cui-tian, WANG Shu-hong, YU Hong-bing, et al. Distribution and environment quality evaluation on heavy metals in surface sediments of Pearl River Estuary[J]. *Marine Environmental Sciences*, 2009, 28(5): 528-538.
- [9] 刘昕宇,刘胜玉,李建民,等.珠江三角洲重点入河排污口污染物分析与评价[J].水资源保护,2013,29(4):36-44.
LIU Xin-yu, LIU Sheng-yu, LI Jian-min, et al. Analysis and assessment of pollutants from key outlets in Pearl River Delta[J]. *Water Resources Protection*, 2013, 29(4):36-44.
- [10] 余刚,牛军峰,黄俊,等.持久性有机污染物:新的全球环境问题[M].北京:北京科学出版社,2005:56-130.
YU Gang, NIU Jun-feng, HUANG Jun, et al. The new global environmental issues of persistent organic pollutants [M]. Beijing: Beijing Science Press, 2005:56-130.
- [11] Heemken O P, Stachel B. 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 Environment Contamination and Toxicology*, 2000, 38(1):11-31.
- [12] 孟祥周,余莉萍,郭英,等.滴滴涕类农药在广东省鱼类中的残留及人体暴露水平初步评价[J].生态毒理学报,2006,1(2):116-122.
MENG Xiang-zhou, YU Li-ping, GUO Ying, et al. DDT residues in typical fishes of Guangdong Province and human exposure via fish consumption[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2006, 1(2):116-122.
- [13] Cheng Z, Chen K C, Li K B, et al. Arsenic contamination in the freshwater fish pond of Pearl River Delta: bioaccumulation and health risk assessment[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, 20(7): 4484-4495.
- [14] 尹怡,郑光明,朱新平,等.分散固相萃取/气相色谱-质谱联用法快速测定鱼虾中的16种多环芳烃[J].分析测试学报,2011,30(10): 110-1112.
YIN Yi, ZHENG Guang-ming, ZHU Xin-ping, et al. Determination of PAHs in fish and shrimp by gas chromatography-mass spectrometry with dispersive solid phase extraction[J]. *Journal of Instrumental Analysis*, 2011, 30(10):1110-1112.
- [15] 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 Ning, HE Wei, WANG Yan, 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.

- [16] 朱 樱, 吴文婧, 王军军, 等. 小白洋淀水沉积物系统多环芳烃的分布、来源与生态风险[J]. 湖泊科学, 2009, 21(5): 637–646.
ZHU Ying, WU Wen-jing, WANG Jun-jun, et al. Distribution, sources and ecological risks of polycyclic aromatic hydrocarbons in water-sediment system in Lake small Baiyangdian[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2009, 21(5): 637–646.
- [17] Feng C L, Xia X H, Shen Z Y, et al. Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in Wuhan section of the Yangtze River, China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2007, 133(1–3): 447–458.
- [18] 石 璇, 杨 宇, 徐福留, 等. 天津地区地表水中多环芳烃的生态风险[J]. 环境科学学报, 2004, 24(4):619–624.
SHI Xuan, YANG Yu, XU Fu-liu, et al. Ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface water from Tianjin[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2004, 24(4):619–624.
- [19] 孙清芳, 冯玉杰, 高 鹏, 等. 松花江水中多环芳烃(PAHs)的环境风险评价[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2010, 42(4):568–572.
SUN Qing-fang, FENG Yu-jie, GAO Peng, et al. Risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in water of the Songhua River[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2010, 42(4):568–572.
- [20] Xia Z H, Duan X L, Qiu W X, et al. Health risk assessment on dietary exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons(PAHs) in Taiyuan[J]. *Science of the Total Environment*, 2010, 408(22):5331–5337.
- [21] Doong R, Lin Y T. Characterization and distribution of polycycliaromatic hydrocarbon contaminations in surface sediment and water from Gao-ping River, Taiwan[J]. *Water Research*, 2004, 38:1733–1744.
- [22] Mai B X, Fu J M, Sheng G Y, et al. Chlorinated and polycyclicaromatic hydrocarbons in riverine and estuarine sediments from Pearl River Delta, China[J]. *Environmental Pollution*, 2002, 117: 457–474.
- [23] 冯承莲, 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 Cheng-lian, XIA Xing-hui, ZHOU Zhui, 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.
- [24] 胡二邦. 环境风险评价及使用技术方法[M]. 北京:中国环境科学出版社, 2000.
HU Er-bang. The environment risk assessment and application method [M]. Beijing: China Environment Science Press, 2000.
- [25] 毛小琴, 刘阳生. 国内外环境风险评价研究进展[J]. 应用基础与工程科学学报, 2003, 11(3):266–273.
MAO Xiao-ling, LIU Yang-sheng. Current progress of environmental risk assessment research[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2003, 11(3):266–273.
- [26] 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 Xin, WANG Dong-hong, MA Mei, et al. Distribution and health risk of polycyclic aromatic hydrocarbons in drinking water of China[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2011, 6(2):207–214.
- [27] 曾光明, 卓 利, 钟政林, 等. 水环境健康风险评价模式及其应用[J]. 水电能源科学, 1997, 15(4):28–33.
ZENG Guang-ming, ZHUO Li, ZHONG Zheng-lin, et al. Assessment models for water environmental health risk analysis[J]. *International Journal Hydroelectric Energy*, 1997, 15(4):28–33.
- [28] 邹 滨, 曾永年, Benjamin, 等. 城市水环境健康风险评价[J]. 地理与地理信息科学, 2009, 25(2):94–98.
ZOU Bin, ZENG Yong-nian, Benjamin, et al. Spatial and temporal health risk assessment of water environment in urban area[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2009, 25(2):94–98.
- [29] Nisbet C, Lagoy P. Toxic equivalency factors(TEFs) for polycyclic aromatic hydrocarbons(PAHs)[J]. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 1992, 16(3):290–300.
- [30] U.S.EPA. The Risk Assessment Guideline of 1986[R]. EPA/600/18–87/045. Washington DC: Office of Emergency and Remedial Response, U.S.EPA1986.
- [31] 李文杰, 冯精兰, 申君慧, 等. 黄河濮阳段水体中多环芳烃的健康风险评价[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2012, 40(4):94–97.
LI Wen-jie, FENG Jing-lan, SHEN Jun-hui, et al. Health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in the Puyang Section of Yellow River[J]. *Journal of Henan Normal University(Natural Science)*, 2012, 40(4): 94–97.
- [32] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社, 2013.
The people's Republic of China National Bureau of Statistics. Chinese statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2013.
- [33] The International Agency for Research on Cancer(IARC). Agents Reviewed By Theiarc Monographs(Volumes 1–99)[EB/OL]2011–08–11. <http://monographs.iarc.fr/ENG/Classification/index.Php>.