

DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.20170105001

谢文平, 朱新平, 马丽莎, 等. 珠江三角洲4种淡水养殖鱼类重金属的残留及食用风险评价[J]. 生态毒理学报, 2017, 12(5): 294-303

Xie W P, Zhu X P, Ma L S, et al. Residues and safety evaluation of heavy metals in four species freshwater fish from fish pond of Pearl River Delta [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2017, 12(5): 294-303 (in Chinese)

## 珠江三角洲4种淡水养殖鱼类重金属的残留及食用风险评价

谢文平, 朱新平, 马丽莎, 郑光明\*, 刘书贵

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  
评估实验室, 广州 510380

收稿日期: 2017-01-05 录用日期: 2017-09-12

**摘要:** 为全面了解珠江三角洲淡水水产品中重金属污染现状, 评估其生态风险与食用安全, 于2014年8月至2015年8月采集罗非鱼、草鱼、乌鳢及鳊鱼主要养殖鱼类样品共计57份, 采用原子荧光光谱仪(AFS), 电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)仪进行分析测定, 并采用单因子污染指数( $P_i$ )、重金属污染指数(MPI)、每周可耐受摄入量(PTWI)以及食入健康风险指标( $R_{i总}$ )分别评估其污染程度、食用安全性与健康风险。结果表明, 样品中Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Hg、Pb的含量范围分别为0.020~3.240, 0.020~0.800, 0.110~1.100, 0.190~19.970, 0.030~1.480, nd~0.606, 0.003~0.118, 0.040~0.803  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (湿重), Cr、As、Cd、Pb在水产品中超标率大小依次为As(7.0%), Pb(7.0%), Cd(5.3%), Cr(1.8%)。  $P_i$ 结果表明, 目前珠江三角洲养殖水域水产品中Cu与Zn残留处于正常范围内, Cr和Hg有少量样品为轻度污染, Pb、Cd与As存在重度污染样品, 所占比例为2.86%、6.02%和5.74%。MPI结果显示不同水产品污染程度为乌鳢>鳊鱼>罗非鱼>草鱼, 总体上各种水产品MPI依然处于较低的水平; 食用安全性结果显示, 目前成人每周摄入水产品是安全的, 但乌鳢Cr、罗非鱼As含量较高分别达到PTWI的37.76%和19.51%, 表明水产品中Cr、As残留可能存在一定的食用安全隐患。健康风险模型结果显示, 所有样品均未超过国际辐射防护委员会(ICRP)的推荐的最大可接受水平( $5\times 10^{-6} \text{ a}^{-1}$ )。综合分析珠江三角洲淡水养殖主要水产品可知, 其尚未出现明显的污染安全问题, 但As与Cr等元素的潜在风险值得进一步关注。

**关键词:** 重金属; 淡水鱼类; 珠江三角洲; 健康风险评估

文章编号: 1673-5897(2017)5-294-10 中图分类号: X171.5 文献标识码: A

## Residues and Safety Evaluation of Heavy Metals in Four Species of Freshwater Fish from Fish Pond of Pearl River Delta

Xie Wenping, Zhu Xinping, Ma Lisha, Zheng Guangming\*, Liu Shugui

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

Received 5 January 2017 accepted 12 September 2017

**Abstract:** In order to investigate the heavy metal pollution of the cultured freshwater fish and its ecological risk, as well as the human health risk, the total 57 fish samples were collected from fish pond of Pearl River Delta. Heavy

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201503108); 广东省省级财政专项

作者简介: 谢文平(1971-), 男, 硕士, 副研究员, 研究方向为环境毒理学, E-mail: xwp7118@163.com

\* 通讯作者 (Corresponding author), E-mail: zgmzy11964@163.com

metals were determined by AFS and ICP-MS. The results showed that the concentration range such as Cr, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Hg and Pb in aquatic products, were 0.020-3.240, 0.020-0.800, 0.110-1.100, 0.190-19.970, 0.030-1.480, nd-0.606, 0.003-0.118 and 0.040-0.803  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  (wet weight), respectively. The freshwater fish was subject to certain degree pollution by Cr, As, Cd, Pb with exceeding rates of As (7.0%), Pb (7.0%), Cd (5.3%), Cr (1.8%). The assessment adopted single factor pollution index ( $P_i$ ), and the results indicated that for Cu and Zn, all fish samples did not exceed the allowable criteria, and for Cr and Hg, 1%-5% of samples exceeded the allowable criteria of "Light Pollution", while for Pb, Cd and As, 2.86%, 6.02% and 5.74% of the samples reached the criteria of "Heavy Pollution". The MPI results showed heavy metal pollution in *Ophicephalus argus* was the most severe, followed by *Siniperca chuatsi* and *Oreochromis* spp, while it was slight in *Ctenopharyngodon idellus*. The evaluation of edible safety of heavy metals in aquatic products was acceptable, based on the model of health risk assessment recommended by US EPA. The health risk assessment indicated that the carcinogenic and non-carcinogenic risks value of heavy metal ingestion were below the maximal acceptable level ( $5\times 10^{-6} \text{a}^{-1}$ ), recommended by International Commission on Radiation (ICRP). In summary, there is a certain degree of pollution in the freshwater fish in Pearl River Delta region, especially for As and Cr pollution. More attention should be paid to the pollution status, edible safety and health risk.

**Keywords:** heavy metal; freshwater fish; Pearl River Delta; health risk assessment

珠江三角洲地处南方亚热带区域,毗邻中国南海,雨量充沛,水资源丰富,河网密布,是我国华南经济最活跃和人口最集中地区之一,同时也是广东省和我国淡水养殖最集中地区之一<sup>[1-2]</sup>。近30年来,随着珠江三角洲经济快速发展、工业化和城市化加速,重金属也随着大量的生活污水、工业和农业废水直接或间接排放进入河流及相关养殖水域,污染事故时有发生。由于重金属在养殖环境残留具有持久性,当环境条件改变时,重金属能从底泥中释放出来通过食物链直接或间接进入生物体中并在不同营养层级生物体中富集。重金属不仅能对养殖鱼类造成直接毒性危害,更重要的是能通过饮食途径进入人体内,并在人体中富集,长期摄入含重金属污染水产品,即使低浓度也会对人体健康产生危害<sup>[3-7]</sup>。大量相关研究显示:珠江三角洲地区水产品中存在不同程度的重金属残留,如梁辉等<sup>[8]</sup>于2010—2014年采集广东省市售1326份水产品进行检测,发现铅超标率为0.15%,镉超标率为5.35%;王许诺等<sup>[9]</sup>2008年报道了广东沿海近江牡蛎体中Cd和Cu含量存在超标;魏泰莉等<sup>[10]</sup>也报道了珠江口鱼虾存在镉和砷超标现象。水产品含有丰富的蛋白质、不饱和脂肪酸、维生素和微量元素,具有很高营养价值,是人们动物蛋白的主要来源。目前,水产品在我国食品消费中所占比例逐年提高,消费市场日益扩大,2005年我国人均水产品消费量达到39.02 kg,现已成为水产品消费大国<sup>[11]</sup>。随养殖环境污染的加重,养殖水产品成了

环境污染物吸附和富集的载体,水产品质量安全和养殖环境污染风险评估受到社会广泛的关注<sup>[12-13]</sup>。

本文以珠江三角洲主要淡水养殖鱼类罗非鱼(*Oreochromis* spp)、草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)、乌鳢(*Ophicephalus argus*)和鳊鱼(*Siniperca chuatsi*)为研究对象,采用污染指数和膳食摄入风险评价等方法,分析重金属在4种淡水养殖鱼类中残留现状以及食用健康风险,对指导水产品生产和食用安全具有一定意义。

## 1 材料与方法 (Materials and methods)

### 1.1 样品采集

采样时间为2014年8月和2015年4月,分别于淡水养殖鱼塘采集罗非鱼、草鱼、鳊鱼和乌鳢共计57个样品,不同养殖品种以同一养殖区域随机抽取,鱼类养殖周期为6~10个月,体长、体重分别为:罗非鱼体重0.23~0.69 kg,体长21.5~30.5 cm;草鱼体重0.83~0.99 kg,体长39.0~46.3 cm;鳊鱼体重0.32~0.45 kg,体长27.5~33.5 cm;乌鳢体重1.04~1.85 kg,体长45.5~52.1 cm。每个样品为同一采样点随机抽取不同鱼塘3~5条鱼,去皮取背部肌肉搅碎混匀,具体采样位置见图1,样品采集后立即称重分装冰冻保存,带回实验室于聚乙烯自封袋中-20℃保存。

### 1.2 仪器与试剂

仪器采用Agilent 7500电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)(美国安捷伦公司),AFs-930原子荧光分光光度计(AFS)(北京吉天分析仪器公司)。试剂为

65%硝酸(德国 Merck 公司),37%盐酸(德国 Merck 公司),多金属元素混合标准溶液(GNM-0083,国家标准物质网),鱼肌肉标准参考物质(ERM-BB422,国家标准物质网)。



图1 珠江三角洲淡水养殖鱼类采样区域

Fig. 1 Samples of fresh fish collected from Pearl River Delta aquaculture area

### 1.3 样品处理

称取 2 g 样品于聚四氟乙烯烧杯中,加入 5 mL 65% 硝酸后盖上表面皿,置于电热板上加热消解。在 90 °C 下消解 10 h 至固形物消失,加入 2 mL 30% 双氧水,盖上表面皿后加热回流 30 min,待样品冷却后定容,待测。其中 Cr, Ni, Cu, Zn, As, Cd 和 Pb 含量采用 ICP-MS 进行分析, Hg 元素浓度则使用原子荧光光谱仪测定。

### 1.4 质量控制

原子荧光测定 Hg 的标准工作曲线线性均大于 0.9995,平行样相对标准偏差小于 10%; ICP-MS 测定其他重金属的标准工作曲线的线性则均大于 0.9995,平行样相对标准偏差均小于 5%。各测定金属鱼肌肉标准参考物质的回收率 80%~120%。

### 1.5 重金属污染状况评价

运用生物质量指数法评价水产品重金属污染状况<sup>[14-16]</sup>,计算公式为:

$$P_i = C_i/S_i$$

式中  $P_i$  为水产品重金属的单因子污染指数;  $C_i$  为水产品重金属实测值的均值( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ );  $S_i$  为水产品重金属限量标准( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),参照农产品安全质量无公害水产品安全要求(GB 18406.4—2001)和《食品中污染物限量》(GB 2762—2012)<sup>[17-19]</sup>,分别为 Hg 0.3

$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; Cr 2  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; Cu 50  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; Zn 150  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; Cd 0.1  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; As 0.5  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; Pb 0.5  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。评价标准为:  $P_i < 0.2$  为正常背景水平;  $0.2 \leq P_i < 0.6$  为轻污染水平;  $0.6 \leq P_i < 1.0$  为中污染水平;  $P_i > 1.0$  为重污染水平,即重金属含量超标<sup>[20]</sup>。

采用重金属污染指数(MPI)比较水产品之间重金属污染的总体差异,计算公式为:

$$\text{MPI} = (C_1 \times C_2 \times C_3 \times \dots \times C_n)^{1/n}$$

式中:  $C_n$  为第  $n$  种水产品重金属实测值的均值( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )<sup>[12]</sup>。

### 1.6 水产品重金属残留食用健康风险评价

水产品重金属残留经食用途径的健康风险评价是以风险度作为评价指标,把水产品重金属污染与人体健康联系起来,本文采用美国环境保护局(US EPA)使用的评价模型<sup>[21-23]</sup>,参照广东省居民水产品摄入量,对重金属经食用途径产生的致癌和非致癌风险进行评价。非致癌物风险评价公式为:

$$R_{ig}^n = (D_{ig} \times 10^{-6}) / (\text{RfD}_{ig} / \text{安全因子} \times 70) \quad (1)$$

式中,  $R_{ig}^n$  为非致癌物  $i$  经食入途径所致健康危险的个人平均年风险 ( $\text{a}^{-1}$ ),  $D_{ig}$  为重金属经饮食途径单位体重的日摄入量 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ),  $\text{RfD}_{ig}$  为非致癌污染物  $i$  的食入途径参考剂量 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ), 本研究中非致癌物的  $\text{RfD}_{ig}$  见表 1, 安全因子取值为 10, 70 为平均寿命(a)。

通过饮食途径暴露的日最大暴露剂量  $D_{ig}$  的计算公式为:

$$D_{ig} = \text{日平均水产品摄入量} \times C_i / 60 \quad (2)$$

式中,  $D_{ig}$  为重金属经饮食途径单位体重的日摄入量 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ), 日平均水产品摄入量参照广东省居民水产品摄入量(70.89  $\text{g} \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{日}^{-1}$ )计算<sup>[24]</sup>, 60 为平均体重(kg)。

表1 重金属致癌强度系数和参考剂量<sup>[25-26]</sup>

Table 1 The carcinogenic risk index and reference dose of heavy metals<sup>[25-26]</sup>

非化学致癌物 Chemical noncarcinogens	RfD <sub>ig</sub> /( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ )	化学致癌物 Chemical carcinogens	$q_{ig}$
Hg	$3 \times 10^{-4}$	Cd	0.38
Cu	$5 \times 10^{-3}$	As	1.5
Pb	$1.4 \times 10^{-3}$	Cr	0.91
Cr	$3 \times 10^{-3}$		
Zn	$3 \times 10^{-4}$		



致癌物所致健康危害的风险模型计算公式为:

$$R_{ig}^c = [1 - \exp(-D_{ig} \times q_{ig})] / 70 \quad (3)$$

式中,  $R_{ig}^c$  为重金属经食入途径的个人平均年致癌风险( $a^{-1}$ );  $D_{ig}$  为重金属经食入途径单位体重日均最大暴露剂量( $mg \cdot kg^{-1} \cdot d^{-1}$ );  $q_{ig}$  为重金属经食入途径致癌强度系数( $mg \cdot kg^{-1} \cdot d^{-1}$ ), 致癌强度系数  $q_{ig}$  值见表 1<sup>[25-26]</sup>; 人们平均寿命取值为 70 a。重金属单位体重日均最大暴露剂量( $D_{ig}$ ) 参照式(2)计算。

## 2 结果与讨论 (Results and discussion)

### 2.1 珠江三角洲主要淡水养殖鱼类中重金属分布特征

对珠江三角洲淡水养殖鱼类罗非鱼、草鱼、乌鳢和鳊鱼样品检测分析显示, 8 种典型重金属的含量范围见表 2, Cr, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Hg 和 Pb 在鱼体肌肉中残留均值分别为 0.020~3.240, 0.020~0.800, 0.110~1.100, 0.190~19.970, 0.030~1.480, nd~0.606, 0.003~0.118 和 0.040~0.803  $mg \cdot kg^{-1}$ 。金属元素在生物体中存在一般分为必需元素和非必需元素, 必需元素是肌体正常生理活动不可缺少的组成部分, 如 Zn, Fe 和 Cu, 它们是某些大分子蛋白的组成部分。Zn 与 Cu 为必需元素, 在检测样品中残留量较高<sup>[27]</sup>, 与鱼体本身残留和较强的吸收能力有关。Cr, Ni, As, Cd, Hg 和 Pb 为非必需元素, 它们不参与生理活动, 进入体内能产生较强的毒性, 在鱼体中含量较低, 国内外对其有严格的安全限量标准<sup>[28-29]</sup>。以国家无公害水产品残留标准(GB 18406.4—2001)对检测结果进行评价, 水产品中超标元素有 Cr、As、Cd、Pb, 超标率大小依次为 As(7.0%), Pb(7.0%), Cd(5.3%), Cr(1.8%)。目前, 在我国不同区域水产品中都存在不同程度的重金属超标, 如北京市市售 4 种鱼类中存在铅、镉和砷 3 种重金属超标, 超标率分别为 14.6%、5.2% 和 10.4%; 台海浅滩渔场水产品 Cd 超标率为 9.7%, 广西刁江野生鱼类 As、Pb 超标率分别为 64.56%、5.06%<sup>[11-12, 30]</sup>, 珠江三角洲鱼塘主要鱼类重金属超标率并不明显。

### 2.2 主要养殖鱼类中重金属污染程度与不同鱼体间比较

利用单因子污染指数对 7 种元素在鱼体中污染程度进行评价(图 2, 图 3), 80.7%~100% 样品  $P_n$  值落在正常背景与轻度污染区间内, 说明珠江三角洲鱼塘养殖鱼类重金属污染程度较低。具体分析不同元素污染状况, 其中 Cu 与 Zn 在所测所有水产品( $n$

=57) 中低于 0.2 的背景限值, 表明未受到 Cu、Zn 污染。Cr、Hg 在个别样品中发现有轻度污染, 它们占样品数的 1.82%、4.7%。Cd 与 Pb 的污染程度略高, 中度污染的样品占总数的 3.64% 和 1.82%, 重度污染的样品占总数的 2.86%、6.02%。As 污染程度最高, 中度污染和重度污染分别为 13.6% 和 5.74%。珠江三角洲地区 4 种主要淡水养殖鱼类受重金属污染程度的单因子污染指数评价大小的顺序为: As>Cd、Pb>Hg>Cr>Zn/Cu。

采用重金属污染指数(MPI)比较水产品之间重金属污染的总体差异, 结果见图 4, MPI 值大小显示不同水产污染程度依次为: 乌鳢>鳊鱼>罗非鱼>草鱼。不同鱼类重金属残留的差异主要与其食性、生存环境和对特定重金属积累能力不同有关, 重金属

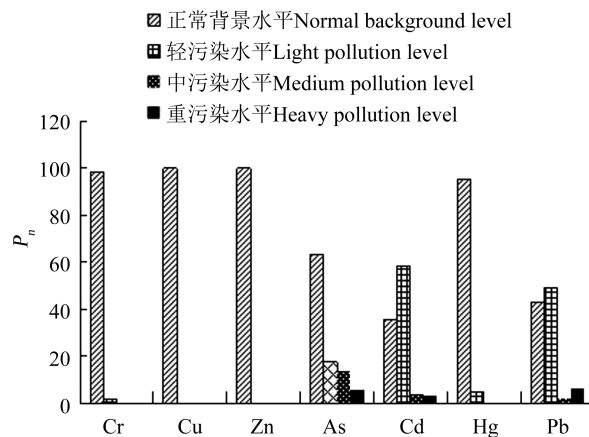


图 2 不同重金属元素的单因子污染指数

Fig. 2 Single factor pollution index of different heavy metals

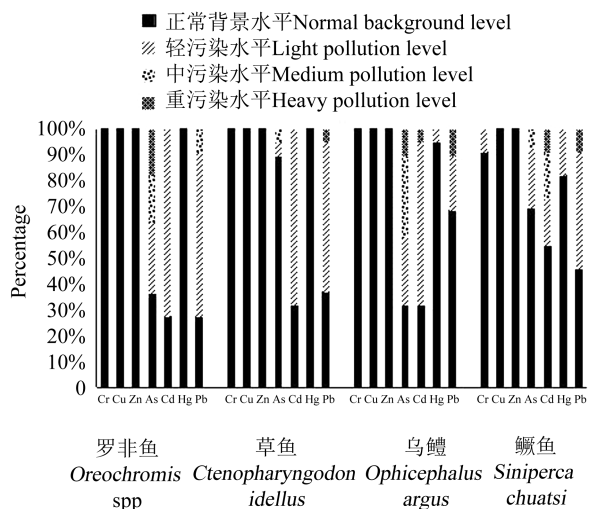


图 3 不同淡水鱼重金属元素的单因子污染指数

Fig. 3 Comparison of single factor pollution index of different freshwater fish

表2 珠江三角洲淡水养殖主要水产品中重金属元素含量范围、平均值和超标率(湿重)  
Table 2 The concentration range, mean value, and over-proof rate of heavy metal in freshwater fish from fish pond of Pearl River Delta (wet weight)

种类 Species	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Hg	Pb
罗非鱼 <i>Oreochromis</i> spp (n=11)	含量范围 0.010~0.180 平均值 0.067 超标率 0	0.050~0.325 0.115 -	0.180~0.547 0.327 0	2.493~6.380 4.186 0	0.024~1.480 0.354 18.1	nd~0.032 0.023 0	0.003~0.093 0.035 0	0.047~0.390 0.182 0
草鱼 <i>Ctenopharyngodon</i> <i>idellus</i> (n=19)	含量范围 0.030~0.093 平均值 0.054 超标率 0	0.025~0.174 0.091 -	0.112~0.547 0.314 0	2.017~17.067 4.104 0	0.007~0.460 0.064 0	nd~0.028 0.022 0	0.003~0.083 0.010 0	0.049~0.803 0.153 5.3
乌鳢 <i>Ophicephalus argus</i> (n=16)	含量范围 0.030~3.240 平均值 0.306 超标率 6.2	0.030~0.800 0.157 -	0.110~1.100 0.313 0	0.190~19.970 4.198 0	0.039~0.950 0.335 6.2	0.007~0.606 0.074 6.2	0.003~0.118 0.036 0	0.060~0.530 0.149 12.5
鳊鱼 <i>Simiperca chuatsi</i> (n=11)	含量范围 0.020~1.180 平均值 0.212 超标率 0	0.020~0.720 0.227 -	0.130~0.470 0.298 0	1.2510~5.770 3.950 0	0.030~0.480 0.111 0	nd~0.204 0.070 18.1	0.004~0.109 0.064 0	0.040~0.600 0.140 9.1
水产品 Aquatic product (n=57)	含量范围 0.020~3.240 平均值 0.158 超标率 1.8	0.020~0.800 0.140 -	0.110~1.100 0.313 0	0.190~19.970 4.116 0	0.030~1.480 0.205 7.0	nd~0.606 0.046 5.3	0.003~0.118 0.033 0	0.040~0.803 0.155 7.0
残留限量 Residue limits ≤	2	-	50	150	0.5	0.1	0.5	0.5

注：“-”未见相关的限量标准；“nd”表示未检出；空白为未检测。

Note: “-” No limits were found; “nd” not detected; Blank is not detected.

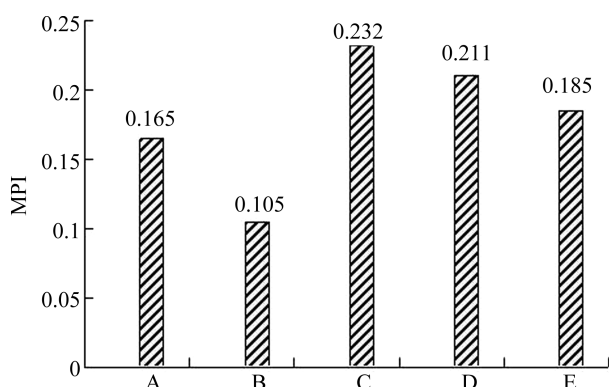


图4 珠江三角洲主要淡水产品重金属污染指数

注:“A”罗非鱼;“B”草鱼;“C”乌鳢;“D”鳊鱼;“E”水产品。

Fig. 4 Heavy metal pollution index (MPI) for aquatic product from Pearl River Delta

Note: “A”, *Oreochromis* spp; “B”, *Ctenopharyngodon idellus*; “C”, *Ophicephalus argus*; “D”, *Siniperca chuatsi*; “E” Aquatic product.

在4种鱼体中残留规律基本体现了底层鱼残留高于中上层鱼,肉食性鱼大于植食性和杂食性鱼的特征,乌鳢和鳊鱼主要以肉食性为主,在水生食物链处在顶端,同时乌鳢在养殖水体中主要生活于中下层,对环境耐受性较强,因此对重金属的富集能力相对较强,罗非鱼主要以杂食性为主而草鱼以植食性为主,故重金属残留量相对较低,这和相关的报道相一致<sup>[31-32]</sup>。

### 2.3 食用安全性评价

水产品食用安全性评价,主要以世界卫生组织(WTO)制定的污染物每周可耐受摄入量(provisional tolerable weekly intake, PTWI)作为食用安全性评价依据<sup>[18]</sup>,根据广东省居民每周水产品消费量计算成人每周实际重金属摄入量,并与PTWI值比较,评价其食用安全性,广东省居民每周水产品消费量为0.496 kg<sup>[23]</sup>,成人人均体重以60 kg计算,采用成人每周实际重金属摄入量(AWI)占PTWI的百分比进行食用安全性评价,其所占比例越高,说明其食用安全性越低<sup>[18, 33-34]</sup>,具体结果和评价标准见表3。成年人对7种重金属每周摄入量均未超过PTWI值,AWI占PTWI比值范围为0.07%~37.76%,表明广东成人每周通过水产品摄入重金属的量是安全的。具体对每种元素分析,Cr和As的成人每周摄入量相对较高,分别为PTWI的19.49%和11.30%,其中乌鳢和罗非鱼的AWI占PTWI比值达37.76%和19.51%,说明在大量食用乌鳢或罗非鱼情况下,摄入Cr、As存在一定的食用安全隐患。

### 2.4 潜在健康风险评价

采用US EPA健康风险评价方法分析4种淡水鱼重金属残留健康危害年风险,对致癌元素As、Cr、Cd分析显示,As致癌风险最大,Cr次之,Cd最低;非致癌风险分析,Zn风险性最大,Hg和Pb次之,Cu风险最低;7种重金属在鱼体中产生的健康风险大小表现为As>Cr>Zn>Cd>Pb>Hg>Cu。对4种淡水养殖鱼类通过食入途径产生健康危害年风险大小评估依次为:乌鳢>罗非鱼>鳊鱼>>草鱼。MIP分析显示鳊鱼重金属污染程度大于罗非鱼,但健康危害年风险却小于罗非鱼,主要由于罗非鱼致癌风险物As含量较高所致。

利用国际辐射防护委员会(ICRP)推荐的重金属通过饮食途径最大可接受年风险水平( $5 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$ )分析,所测水产品中重金属致癌、非致癌及总风险值均未超过 $5 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$ ,表明珠江三角洲地区4种主要淡水养殖鱼类经食入途径所导致的健康危害年风险均处于可接受范围之内。尽管如此,由于乌鳢、罗非鱼肌肉中Cr、As致癌风险较高,其( $R_{\text{总}}$ )值为 $1.61 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$ 和 $1.25 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$ 已与ICRP推荐的最大可接受水平( $5 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$ )处于同一数量级,食用风险高于鳊鱼和草鱼,如成年人每天食用219.87 g乌鳢就可达到最大可接受年风险水平,产生潜在健康风险,说明食入大量该养殖区域乌鳢和罗非鱼,其残留的Cr和As可能会影响人体健康;综合比较7种重金属元素中Cr、As在水产品中通过食入途径所产生的潜在个人健康年风险最高,这与食用安全性(PTWI)结果一致。

总体分析评价,珠江三角洲4种淡水养殖鱼类不同程度受到重金属污染,超标率大小依次为As(7.0%),Pb(7.0%),Cd(5.3%),Cr(1.8%)。具体对不同元素分析,发现Cu、Zn在所测样品中未见污染,Cr、Hg对部分样品有轻度污染,Cd、Pb、As存在中度污染和重度污染样品,不同种类鱼中重金属污染程度为乌鳢>鳊鱼>罗非鱼>草鱼。7种重金属在水产品中产生的健康风险大小依次为As>Cr>Zn>Cd>Pb>Hg>Cu。珠江三角洲地区淡水水产品食用安全和健康风险均处于可接受范围之内,健康危害年风险大小评估依次为:乌鳢>罗非鱼>鳊鱼>>草鱼。Cr、As在水产品中通过食入途径所产生的潜在个人健康年风险最高,这与食用安全性(PTWI)分析结果一致。综合分析重金属在珠江三角洲4种主要淡水鱼鱼体存在一定残留,相比于国内其他区域水产品污

表3 重金属摄入安全性评价  
Table 3 Safety evaluation on heavy metal

重金属 Heavy metal	种类 Species	PTWI <sup>①</sup> /(mg·kg <sup>-1</sup> )	PTWI <sup>②</sup> (成人 Adult)/mg	AWI <sup>③</sup> /mg	AWI 占 PTWI 的百分数/% (成人) Ratio of AWI to PTWI /% (Adult)
Cr	罗非鱼 <i>Oreochromis</i> spp	0.0067	0.469	0.033	8.27
	草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>			0.027	6.66
	乌鳢 <i>Ophicephalus argus</i>			0.152	37.76
	鳊鱼 <i>Siniperca chuatsi</i>			0.105	26.16
	水产品 Aquatic product			0.078	19.49
Cu	罗非鱼 <i>Oreochromis</i> spp	3.5	245	0.162	0.08
	草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>			0.119	0.07
	乌鳢 <i>Ophicephalus argus</i>			0.156	0.07
	鳊鱼 <i>Siniperca chuatsi</i>			0.148	0.07
	水产品 Aquatic product			0.155	0.07
Zn	罗非鱼 <i>Oreochromis</i> spp	7	490	2.076	0.49
	草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>			1.704	0.48
	乌鳢 <i>Ophicephalus argus</i>			2.036	0.50
	鳊鱼 <i>Siniperca chuatsi</i>			1.959	0.47
	水产品 Aquatic product			2.042	0.49
As	罗非鱼 <i>Oreochromis</i> spp	0.015	1.05	0.176	19.51
	草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>			0.019	3.53
	乌鳢 <i>Ophicephalus argus</i>			0.032	18.46
	鳊鱼 <i>Siniperca chuatsi</i>			0.055	6.12
	水产品 Aquatic product			0.102	11.30
Cd	罗非鱼 <i>Oreochromis</i> spp	0.007	0.49	0.011	2.72
	草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>			0.011	2.60
	乌鳢 <i>Ophicephalus argus</i>			0.037	8.74
	鳊鱼 <i>Siniperca chuatsi</i>			0.035	8.27
	水产品 Aquatic product			0.022	5.31
Hg	罗非鱼 <i>Oreochromis</i> spp	0.005	0.35	0.017	5.79
	草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>			0.002	1.65
	乌鳢 <i>Ophicephalus argus</i>			0.005	5.95
	鳊鱼 <i>Siniperca chuatsi</i>			0.032	10.58
	水产品 Aquatic product			0.016	5.46
Pb	罗非鱼 <i>Oreochromis</i> spp	0.025	1.75	0.090	6.02
	草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>			0.055	5.06
	乌鳢 <i>Ophicephalus argus</i>			0.076	4.93
	鳊鱼 <i>Siniperca chuatsi</i>			0.069	4.63
	水产品 Aquatic product			0.077	5.13

注：“①”PTWI 为世界卫生组织制定的重金属每周可耐受摄入量<sup>[18]</sup>；“②”PTWI 的成人每周可耐受摄入量以体重 60 kg 计；“③”AWI 为广东省居民成人每周实际重金属摄入量(mg)。

Note: “①”PTWI stands for provisional weekly tolerable intake of heavy metals recommended by WHO; “②”Adult weekly tolerable intake was measured by body weight 60 kg; “③”AWI stands for actual weekly intake (mg) of heavy metal of adults in Guangdong Province.



表 4 用 US EPA 模型评价重金属健康风险(a<sup>-1</sup>)  
Table 4 Health risk assessment of heavy metals in freshwater fish by US EPA model (a<sup>-1</sup>)

	$R_{eg}^c$			$R_{eg}^n$				$R_{总}'$	
	As	Cr	Cd	Cr	Cu	Zn	Hg	Pb	$R'_{Total}$
罗非鱼 <i>Oreochromis spp</i>	$8.96 \times 10^{-6}$	$1.03 \times 10^{-6}$	$1.48 \times 10^{-7}$	$3.77 \times 10^{-9}$	$1.10 \times 10^{-8}$	$2.36 \times 10^{-6}$	$1.97 \times 10^{-8}$	$2.19 \times 10^{-8}$	$1.25 \times 10^{-5}$
草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>	$1.62 \times 10^{-6}$	$8.29 \times 10^{-7}$	$1.42 \times 10^{-7}$	$3.04 \times 10^{-9}$	$1.06 \times 10^{-8}$	$2.31 \times 10^{-6}$	$5.63 \times 10^{-9}$	$1.84 \times 10^{-8}$	$4.94 \times 10^{-6}$
乌鳢 <i>Ophicephalus argus</i>	$8.48 \times 10^{-6}$	$4.69 \times 10^{-6}$	$4.76 \times 10^{-7}$	$1.72 \times 10^{-8}$	$1.06 \times 10^{-8}$	$2.36 \times 10^{-6}$	$2.03 \times 10^{-8}$	$1.80 \times 10^{-8}$	$1.61 \times 10^{-5}$
鳊鱼 <i>Siniperca chuatsi</i>	$2.81 \times 10^{-6}$	$3.26 \times 10^{-6}$	$4.51 \times 10^{-7}$	$1.19 \times 10^{-8}$	$1.01 \times 10^{-8}$	$2.22 \times 10^{-6}$	$3.60 \times 10^{-8}$	$1.69 \times 10^{-8}$	$8.81 \times 10^{-6}$
水产品 Aquatic product	$5.19 \times 10^{-6}$	$2.43 \times 10^{-6}$	$2.90 \times 10^{-7}$	$8.89 \times 10^{-9}$	$1.06 \times 10^{-8}$	$2.32 \times 10^{-6}$	$1.86 \times 10^{-8}$	$1.87 \times 10^{-8}$	$1.03 \times 10^{-6}$

染程度并不突出,尚未出现明显的污染安全问题,但 As 和 Cr 在水产品中具有较高的潜在风险需予以进一步关注。

通讯作者简介:郑光明(1964—),男,硕士,研究员,主要研究方向为水产品质量安全,发表学术论文 40 余篇。

参考文献 (References):

[1] Zhang C, 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 International, 2013, 20(7): 4484-4495

[2] 杨婉玲, 赖子尼, 曾艳艺, 等. 珠三角河网水、沉积物中 As 含量分布特征及污染评价[J]. 生态环境学报, 2015 (5): 831-837  
Yang W L, Lai Z N, Zeng Y Y, et al. The distribution and contamination levels of arsenic in water and sediment of the Pearl River Delta [J]. Ecology and Environment Sciences, 2015(5): 831-837 (in Chinese)

[3] 陈康, 方展强, 安东, 等. 珠江口沿岸水域表层沉积物中重金属含量分布及污染评价[J]. 应用海洋学学报, 2013, 32(1): 20-28  
Chen K, Fang Z Q, An D, et al. Content distribution and pollution assessment on heavy metals in surface sediment from the Pearl River Estuary coastal waters [J]. Journal of Applied Oceanography, 2013, 32(1): 20-28 (in Chinese)

[4] 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 W P, Wang S B, Zhu X P, 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 (in Chinese)

[5] 赵艳芳, 吴继法, 翟毓秀, 等. 镉胁迫对不同镉富集能力海水养殖贝类抗氧化能力的影响——以扇贝和菲律宾蛤仔为例[J]. 生态毒理学报, 2014, 9(2): 224-232  
Zhao Y F, Wu J F, Zhai Y X, et al. Effects of cadmium stress on the antioxidant responses in two biovalves with different accumulation abilities for cadmium: A case study on the scallop *Chlamys farreri* and the clam *Ruditapes philippinarum* [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2014, 9(2): 224-232 (in Chinese)

[6] 崔晓峰, 李淑仪, 丁效东, 等. 珠江三角洲地区典型菜地土壤与蔬菜重金属分布特征研究[J]. 生态环境学报, 2012, 21(1): 130-135  
Cui X F, Li S Y, Ding X D, et al. Contents of heavy metals in soil and vegetables at typical vegetable plot in the Pearl River Delta [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, 21(1): 130-135 (in Chinese)

[7] 李磊, 王云龙, 沈新强, 等. 文蛤养殖水体中重金属 Cu 的安全限量值研究[J]. 生态毒理学报, 2012, 7(2): 182-188  
Li L, Wang Y L, Shen X Q, et al. Safety levels of Cu in meretrix farming water [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2012, 7(2): 182-188 (in Chinese)

[8] 梁辉, 周少君, 戴光伟, 等. 2010—2014 年广东省水产品中铅镉含量调查及评价[J]. 中国食品卫生杂志, 2017, 29(2): 209-212  
Liang H, Zhou S Z, Dai G W, et al. Investigation and evaluation of lead and cadmium in aquatic products in Guangdong Province from 2010 to 2014 [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2017, 29(2): 209-212 (in Chinese)

[9] 王许诺, 王增焕, 林钦, 等. 广东沿海贝类 4 种重金属



- 含量分析和评价[J]. 南方水产科学, 2008, 4(6): 83-87
- Wang X R, Wang Z H, Lin Q, et al. Analysis and assessment of the content of four heavy metals in shellfish along Guangdong coastal waters [J]. South China Fisheries Science, 2008, 4(6): 83-87 (in Chinese)
- [10] 魏泰莉, 杨婉玲, 赖子尼, 等. 珠江口水域鱼虾类重金属残留的调查[J]. 中国水产科学, 2002, 9(2): 172-176
- Wei T L, Yang W L, Lai Z N, et al. Residues of heavy metals in economic aquatic animal muscles in Pearl River Estuary, south China [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2002, 9(2): 172-176 (in Chinese)
- [11] 刘平, 周益奇, 臧利杰. 北京农贸市场4种鱼类体内重金属污染调查[J]. 环境科学, 2011, 32(7): 2062-2068
- Liu P, Zhou Y Q, Zhan L J. Investigation of heavy metal contamination in four kinds of fishes from the different farmer markets in Beijing [J]. Environmental Science, 2011, 32(7): 2062-2068 (in Chinese)
- [12] 杜冰, 孙鲁闽, 郝文博, 等. 台海浅滩渔场不同水产品中重金属含量与暴露风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(11): 2049-2058
- Du B, Sun L M, Hao W B, et al. Concentration and risk assessment of heavy metals in aquatic products collected from Taiwan shallow fishery [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, 35(11): 2049-2058 (in Chinese)
- [13] Copat C, Bella F, Castaing M, et al. Heavy metals concentrations in fish from Sicily (Mediterranean Sea) and evaluation of possible health risks to consumers [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2012, 88(1): 78-83
- [14] 刘洋, 付强, 高军, 等. 江苏盐城地区水产品重金属含量与安全评价[J]. 环境科学, 2013, 34(10): 4081-4089
- Liu Y, Fu Q, Gao J, et al. Concentrations and safety evaluation of heavy metals in aquatic products of Yancheng, Jiangsu Province [J]. Environmental Science, 2013, 34(10): 4081-4089 (in Chinese)
- [15] 杨天伟, 张霖, 刘鸿高, 等. 云南野生牛肝菌中砷元素含量测定及食用安全评价[J]. 生态毒理学报, 2016, 11(2): 755-761
- Yang T W, Zhang J, Liu H G, et al. Determination and food safety assessment of arsenic in wild-grown bolete mushrooms from Yunnan Province [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2016, 11(2): 755-761 (in Chinese)
- [16] 王玲, 马志凯, 陈锋. 三门湾海域水产品重金属污染现状及对人体健康风险分析[J]. 海洋开发与管理, 2016, 33(8): 39-46
- Wang L, Ma Z K, Chen F. Current pollution status and health risk assessment of heavy metals in aquatic products of Sanmen Bay, Zhejiang Province [J]. Ocean Development and Management, 2016, 33(8): 39-46 (in Chinese)
- [17] 中华人民共和国卫生部. 食品中污染物限量 (GB 2762—2012) [S]. 北京: 中国标准出版社, 2012
- Ministry of Health of the People's Republic of China. Limit of pollutants in foods, Ministry of Health of the People's Republic of China (GB 2762-2012) [S]. Beijing: Standards Press of China, 2012 (in Chinese)
- [18] Anon G. Report on revised standard for metals in food. Appendix I-V [R]. Canberra: Commonwealth Government Printers, 1979: 60-70
- [19] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 农产品安全质量无公害水产品安全要求(GB18406.4—2001) [S]. 北京: 中国标准出版社, 2001
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China (AQ-SIQ). Safety qualification for agriculture product safety requirements for non-environmental pollution products (GB18406.4-2001) [S]. Beijing: Standards Press of China, 2001 (in Chinese)
- [20] 秦春艳, 方展强, 唐以杰, 等. 珠江口伶仃洋习见水生动物体内重金属含量测定与评价[J]. 华南师范大学学报: 自然科学版, 2010, 1(3): 104-109
- Qin C Y, Fang Z Q, Tang Y J, et al. Contents and evaluation of heavy metals in common aquatic from Lingding Yang in Pearl River Estuary [J]. Journal of South China Normal University: Natural Science Edition, 2010, 1(3): 104-109 (in Chinese)
- [21] 葛奇伟, 徐永健, 葛君远. 象山港养殖区缢蛏和泥蚶的Cu, Cd, Pb含量及其健康风险评价[J]. 环境科学学报, 2012, 32(8): 2042-2048
- Ge Q W, Xu Y J, Ge J Y. Levels and health risks of Cu, Cd, Pb in *Sinonovacula constricta* and *Tegillarca granosa* in Xiangshan Bay [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(8): 2042-2048 (in Chinese)
- [22] 李秀珠. 福建三都湾渔业环境和养殖生物体总汞含量及人体暴露健康风险评价[J]. 中国水产科学, 2008, 15(6): 961-969
- Li X Z. Total mercury in the marine culture products and relative environmental samples from Sandu Bay of Fujian Province and its health risk assessment [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2008, 15(16): 961-969 (in Chinese)
- [23] 腾丽华. 宁波市饮用水中重金属铁锌铜健康风险评价[J]. 广东微量元素科学, 2007, 14(6): 33-36
- Tang L H. Health risk assessment of Fe, Zn and Cu on drinking waters in Ningbo [J]. Guangdong Trace Element Science, 2007, 14(6): 33-36 (in Chinese)
- [24] 马文军, 邓峰, 许燕君, 等. 广东省居民膳食营养状况

- 研究[J]. 华南预防医学, 2005, 31(1): 1-5
- Ma W J, Deng F, Xu Y J, et al. Study on dietary nutritional status of residents in Guangdong Province [J]. South China Journal of Preventive Medicine, 2005, 31(1): 1-5 (in Chinese)
- [25] 高继军, 张力平, 黄圣彪, 等. 北京市饮用水源水重金属污染物健康风险的初步评价[J]. 环境科学, 2004, 25(2): 47-50
- Gao J J, Zhang L P, Huang S B, et al. Preliminary health risk assessment of heavy metals in drinking waters in Beijing [J]. Environmental Science, 2004, 25(2): 47-50 (in Chinese)
- [26] 李筱薇, 高俊全, 王永芳, 等. 2000年中国总膳食研究—膳食砷摄入量[J]. 卫生研究, 2006, 35(1): 63-66
- Li X W, Gao J Q, Wang Y F, et al. 2000 Chinese total dietary study—The dietary arsenic intakes [J]. Journal of Hygiene Research, 2006, 35(1): 63-66 (in Chinese)
- [27] Sun P, Wang B. Accumulation and distribution of Zn, Cu and Pb in *Sesarm dehaani* [J]. Marine Environmental Science, 2002, 22(1): 43-47
- [28] Farag A M, May T, Marty G D, et al. The effect of chronic chromium exposure on the health of Chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*) [J]. Aquatic Toxicology, 2006, 76: 246-257
- [29] 杨晓云, 温勇, 陈晓燕, 等. 重金属在北江鱼类和底栖动物体内的富集及污染评价[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(6): 200-204
- Yang X Y, Wen Y, Chen X Y, et al. Heavy metals enrichment in aquatic organisms of Beijiang River: Its characteristics and pollution evaluation [J]. Environmental Science and Technology, 2010, 33(6): 200-204 (in Chinese)
- [30] 王俊能, 马鹏程, 张丽娟, 等. 广西刁江野生鱼类重金属积累特征及其健康风险评价[J]. 环境科学, 2017, 38(6): 2600-2606
- Wang J L, Ma P C, Zhang L J, et al. Accumulation characteristics and health risk assessment of heavy metals in wild fish species from Diaojiang River, Guangxi [J]. Environmental Science, 2017, 38(6): 2600-2606 (in Chinese)
- [31] 祝云龙, 姜加虎, 黄群, 等. 大通湖及东洞庭湖区生物体重金属的水平及其生态评价[J]. 湖泊科学, 2007, 19(6): 690-697
- Zhu Y L, Jiang J H, Huang Q, et al. The heavy metal content in organisms at Lake Dongting and its ecological assessment [J]. Journal of Lake Sciences, 2007, 19(6): 690-697 (in Chinese)
- [32] 闫海鱼, 冯新斌, 刘霆, 等. 贵州百花湖鱼体汞污染现状[J]. 生态学杂志, 2008, 27(8): 1357-1361
- Yan H Y, Feng X B, Liu T, et al. Present situation of fish mercury pollution in heavily mercury-contaminated Baihua Reservoir in Guizhou [J]. Chinese Journal of Ecology, 2008, 27(8): 1357-1361 (in Chinese)
- [33] 顾佳丽, 赵刚. 辽宁沿海城市海鱼和贝类中重金属含量的测定及评价[J]. 食品工业科技, 2012, 33(8): 63-67
- Gu J L, Zhao G. Determination and safety evaluation of heavy metals in fish and shellfish from Liaoning coastal city [J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(8): 63-67 (in Chinese)
- [34] 杨天伟, 张霁, 刘鸿高, 等. 云南山区野生牛肝菌中重金属汞和镉来源分析及食用安全评估[J]. 生态毒理学报, 2016, 11(2): 762-770
- Yang T W, Zhang J, Liu H G, et al. Origin and food safety assessment of mercury and cadmium in wild bolete mushrooms from Yunnan mountainous area [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2016, 11(2): 762-770 (in Chinese) ◆