

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20240708001

# 武汉市 14 种市售淡水鱼类中砷和汞的 污染特征及膳食暴露风险评估

程良宇<sup>1</sup>, 殷娇娇<sup>1,2\*</sup>

(1. 武汉轻工大学食品科学与工程学院, 武汉 430023;

2. 农产品加工与转化湖北省重点实验室, 武汉 430023)

**摘要:** **目的** 研究武汉市市售水产品中常见的 14 种淡水鱼类(草鱼、团头鲂、白鲢、鳊鱼、鲫鱼、鲤鱼、翘嘴鲌、鲈鱼、鳊鱼、青鱼、乌鳢、胡子鲇、斑点叉尾鮰、黄颡鱼)背肌和腹肌中的重金属含量特征并评价其膳食暴露风险。**方法** 采用电感耦合等离子体质谱法(inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)对样品不同部位中的砷(As)、汞(Hg)两种重金属含量进行测定, 通过单因子污染指数(single factor pollution index,  $P_i$ )评估了 14 种鱼类中 As 和 Hg 的污染水平、目标风险系数(target hazard quotients, THQ)评估了鱼类中的 As 和 Hg 对于成人、儿童的膳食暴露风险, 并且对样品不同部位中 As 和 Hg 的含量进行了相关性分析。**结果** 14 种鱼类中, As 在背肌和腹肌中的含量范围分别为 0.002~0.312 mg/kg、0.001~0.440 mg/kg, Hg 在背肌和腹肌中的含量范围分别为 0.003~0.104 mg/kg、0.006~0.189 mg/kg。测定结果显示, 不同品种的水产品均具有一定程度的污染。通过计算 THQ 并综合考量无机 As 占总 As 的含量, 所有样品的 THQ 值均小于 1。依据相关性分析, 发现在草鱼和胡子鲇的背肌中, As 和 Hg 的含量具有显著相关性; 在鲤鱼的腹肌中, As 和 Hg 的含量具有相关性。**结论** 本研究所采集的样品中, 均未发现 As 和 Hg 超标, 且样品内 As 和 Hg 污染均处于较低水平, 长期食用这些鱼肉样品不会对人体健康造成潜在威胁。

**关键词:** 水产品; 重金属; 风险评估; 单因子污染指数; 目标风险系数

## Pollution characteristics and dietary exposure risk assessment of arsenic and mercury in 14 kinds of freshwater fish sold in Wuhan

CHENG Liang-Yu<sup>1</sup>, YIN Jiao-Jiao<sup>1,2\*</sup>

(1. School of Food Science and Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China;

2. Hubei Key Laboratory for Processing and Transformation of Agricultural Products, Wuhan 430023, China)

**ABSTRACT: Objective** To study the characteristics of heavy metal content in the dorsal and abdominal muscles of 14 common freshwater fish species (including *Ctenopharyngodon idellus*, *Megalobrama amblycephala*, *Hypophthalmichthys molitrix*, *Hypophthalmichthys nobilis*, *Carassius auratus*, *Cyprinus carpio*, *Culter alburnus*,

基金项目: 武汉轻工大学科研项目(2022RZ037)、武汉轻工大学大学生创新创业训练计划项目(202410496003)

**Fund:** Supported by the Research Funding of Wuhan Polytechnic University (2022RZ037), and the Undergraduate Innovation and Entrepreneurship Training Program of Wuhan Polytechnic University (202410496003)

\*通信作者: 殷娇娇, 讲师, 主要研究方向为食品营养与安全。E-mail: yinjiaojiao@whpu.edu.cn

\*Corresponding author: YIN Jiao-Jiao, Lecturer, School of Food Science and Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China. E-mail: yinjiaojiao@whpu.edu.cn

*Lateolabrax japonicus*, *Siniperca chuatsi*, *Mylopharyngodon piceus*, *Channa argus*, *Clarias fuscus*, *Ictalurus punctatus* and *Tachysurus fulvidraco*) in Wuhan's commercially available aquatic products and evaluate their dietary exposure risks. **Methods** Inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) was used to determine the content of As and Hg in different parts of the sample. The single factor pollution index ( $P_i$ ) was used to estimate the pollution level of As and Hg in 14 fish species, and the target hazard quotients (THQ) was used to evaluate the dietary exposure risk of As and Hg to adults and children, additionally, correlation analysis was conducted on the content of As and Hg in different parts. **Results** Among the 14 fish species, the content range of As in the dorsal muscle and ventral muscle were 0.002–0.312 mg/kg and 0.001–0.440 mg/kg, respectively. The content range of Hg in the dorsal muscle and ventral muscle were 0.003–0.104 mg/kg and 0.006–0.189 mg/kg, respectively. The single factor pollution index showed that different kinds of fish had a certain degree of contamination. By calculating the THQ and taking into account of the proportion of inorganic arsenic in total arsenic content, the THQ values of the sample were less than 1. According to correlation analysis, it was found that there was a significant correlation between the levels of As and Hg in the dorsal muscles of *Ctenopharyngodon idellus* and *Clarias fuscus*. There was a correlation between the levels of As and Hg in the ventral muscles of *Cyprinus carpio*. **Conclusion** The study finds that all samples have As and Hg levels within standard limits and shows relatively low pollution levels. Under long-term consumption, it will not cause significant harm to the human health with these fish consumption.

**KEY WORDS:** aquatic products; heavy metal; risk assessment; single factor pollution index; target hazard quotients

## 0 引言

武汉市位于我国中部地区,处在长江汉江的交汇之处。武汉市境内湖泊数量众多,截至 2017 年,武汉市市内湖泊数量已达约 160 个<sup>[1]</sup>,具有“百湖之市”的美誉。2021 年,武汉城市圈水产品产量达 334.6 万 t,占湖北省总产量的 69.2%<sup>[2]</sup>。巨大的消费量,为水产的发展既带来了机遇,也带来了挑战。

鱼类产品作为居民重要的蛋白质摄入食品,氨基酸含量丰富,并且含有各种必需脂肪酸和二十碳五烯酸(eicosapentaenoic acid, EPA)、二十二碳六烯酸(docosahexaenoic acid, DHA)<sup>[3]</sup>,是居民餐桌上不可或缺的食品。因此,保障鱼类的质量安全,对于消费者而言具有重要意义。

重金属是指相对密度在  $5 \text{ g/cm}^3$  以上的金属元素<sup>[4]</sup>,由于砷(As)的毒性与重金属类似,所以列入重金属范畴。重金属主要通过水体的转运,以及食物链的传递,富集至生物体内<sup>[5]</sup>。当人体食用含有重金属的食物时,重金属便会在人体内富集,进而对身体造成伤害。研究表明,近年来,随着工业化、城镇化的不断推进,水体重金属污染不断加重。而鱼类由于其特殊的生存环境,易受其生存水体环境的影响,并且鱼类作为水生食物链的顶端,容易富集更多的重金属<sup>[6]</sup>。当鱼类被人体摄入后,鱼类体内重金属传递到人体,长期以来便会危及人体健康。砷(As)一般会蓄积在肝脏、肾脏等组织中,引起人体慢性中毒,增加患心血管疾病、呼吸道疾病、糖尿病的风险<sup>[7]</sup>。汞(Hg)是毒

性最强的重金属之一,具有生物放大性,Hg 在人体内的水平对人体健康具有重要影响,可引起包括肾衰竭在内的几种神经和生理疾病<sup>[8]</sup>。本研究以常见的 14 种淡水鱼类的背部和腹部肌肉作为研究材料,对其体内 As 和 Hg 的污染水平以及膳食暴露风险进行评估,旨在增强武汉市居民对水产品消费信心,为政府部门制定相关政策提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

#### 1.1.1 样品采集及处理

本研究中鱼类全部购自武汉市白沙洲市场,购买日常食用频次较高的 14 个品种(草鱼、团头鲂、白鲢、鳊鱼、鲫鱼、鲤鱼、翘嘴鲌、鲈鱼、鳊鱼、青鱼、乌鳢、胡子鲶、斑点叉尾鲴、黄颡鱼),每种鱼 5 尾,共 70 尾。样品购买完成后,运回实验室,称重后分别取鱼肉样品的背部肌肉(背肌)和腹部肌肉(腹肌),所有组织用绞肉机捣碎后,置于  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$  冰箱中待测。

#### 1.1.2 试剂

硝酸(优级纯)、As、Hg 元素标准溶液( $1000 \text{ } \mu\text{g/mL}$ )(上海国药集团化学试剂有限公司)。

### 1.2 仪器与设备

XPE304 电子天平(精度  $0.1 \text{ mg}$ , 瑞士梅特勒-托利多公司); MARS6 微波消解仪(配有聚四氟乙烯消解罐)(美国培安公司); NJ-GS 赶酸仪(南京滨正红仪器有限公司); NexION1000 电感耦合等离子体质谱仪(美国铂金埃尔默公司)。

### 1.3 实验方法

样品测定参考实验室前期方法<sup>[9]</sup>。称取约 0.3 g 样品放入聚四氟乙烯消解罐中,加入 8 mL 浓硝酸后,盖紧,室温保存。预消解过夜后,采用微波消解系统,设置升温程序为:在 5 min 内升温至 120 °C 并保持 5 min,然后在 5 min 内升温至 150 °C 并保持 10 min,最后在 5 min 内升温至 190 °C 保持 30 min。消解完成待样品冷却至室温后,取出消解内罐放置在 120 °C 的赶酸仪上,以此消除内罐中剩余的硝酸,最终得到 1~2 mL 的终溶液,并用去离子水稀释。样品溶液中的 As、Hg 含量采用电感耦合等离子体质谱仪进行测定,主要工作参数为:RF 功率 1500 W,冷却气流量 14 L/min,辅助气流量 0.8 L/min,雾化器流速 1 L/min,采样深度 5 mm。本研究中,As 和 Hg 的检出限分别为 0.016 μg/L 和 0.006 μg/L,加标回收率在 93.5%~103.4%之间,相对标准偏差(relative standard deviation, RSD)均小于 5%。

### 1.4 重金属污染评价

本研究采用单因子污染指数法(single factor pollution index,  $P_i$ )<sup>[10]</sup>对鱼体内重金属污染状况进行评估,该方法评估公式如式(1):

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (1)$$

式中,  $P_i$  为重金属的单项污染指数,  $C_i$  为样品中重金属  $i$  的含量, mg/kg;  $S_i$  为 GB 2762—2022《食品安全标准 食品中污染物限量》中所规定的重金属  $i$  的限量值, mg/kg, 其中, As、Hg 分别为 0.1、0.5 mg/kg。当  $P_i < 0.2$  时,表明重金属浓度处于正常的背景值范围内;  $0.2 \leq P_i \leq 0.6$  时,表明重金属浓度处于轻度污染水平;  $0.6 < P_i < 1.0$  时,表明重金属浓度处于中度污染水平;  $P_i \geq 1.0$  时,表明重金属浓度处于重度污染<sup>[10]</sup>。在进行 As 的评价时,按无机砷占总 As 含量的 10%计。

### 1.5 健康风险评价

本研究采用目标危害系数法(target hazard quotients, THQ)<sup>[11]</sup>评估鱼肉中 As 和 Hg 对暴露人群的健康风险。该方法通过各项参数,综合评估暴露人群摄入食物中的污染物剂量是否超过参考剂量,来判断健康风险的有无。该方法评估公式如式(2):

$$THQ = \frac{EF \times ED \times FIR \times C}{RDF \times BW \times TA} \times 10^{-3} \quad (2)$$

式中:  $C$  为鱼肉样品中重金属的含量, mg/kg。EF 为暴露频率(365 d/y); ED 为暴露年限(70 y); FIR 为每日平均水产品摄入量(成人取 28.6 g/d, 儿童取 25.3 g/d)<sup>[12]</sup>; RDF 为参考剂量(As 取 0.0003 mg/kg<sup>[13]</sup>, Hg 取 0.0005 mg/kg<sup>[14]</sup>); BW 是人的平均体重(成人取 60 kg, 儿童取 30 kg<sup>[15]</sup>); TA 是非致癌源平均暴露时间(25550 d)。其评估标准为:  $THQ < 1$ , 对人体健康影响较小;  $THQ \geq 1$ , 对人体健康有较显著风险<sup>[16]</sup>。

### 1.6 数据处理

本研究中数据均以均值±标准偏差表示。利用 SPSS statistics 21 对样品不同部位中 As 和 Hg 的含量进行相关性分析及显著性分析,其中显著性分析采用最小显著性差异法(least-significant difference, LSD),以此探讨水产品中 As 和 Hg 的富集规律。使用 Origin 2021 进行图形绘制。

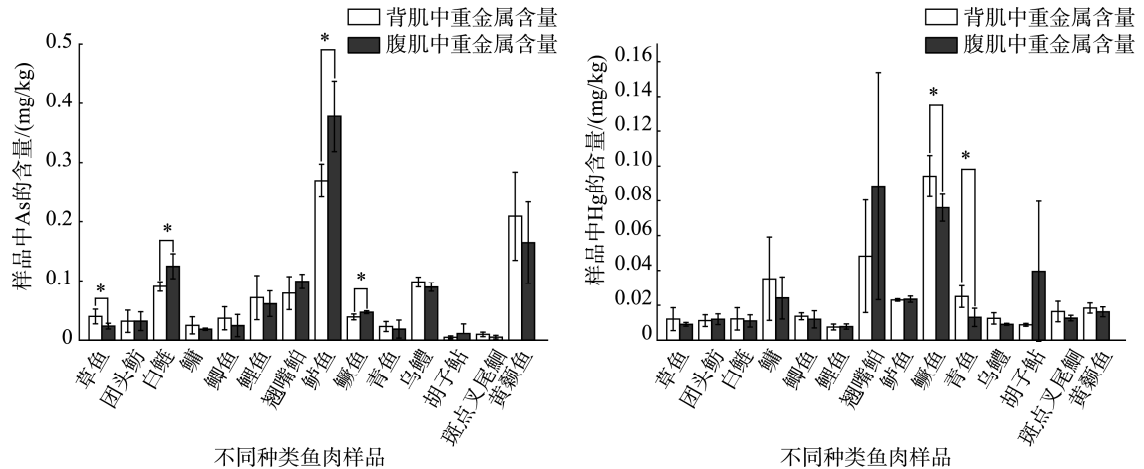
## 2 结果与分析

### 2.1 样品中重金属污染情况

本研究对购自武汉市白沙洲市场的 14 种鱼肉样品中的重金属 As 和 Hg 含量进行了检测,结果如图 1 及表 1 所示。其中,As 在鲈鱼、黄颡鱼和白鲢中的含量较高,最大值在鲈鱼的腹肌中被检出,其腹肌中 As 平均含量为 0.322 mg/kg; 而 Hg 在鳊鱼、翘嘴鲌中的含量较高,最大值在鳊鱼的背肌中被检出,其背肌中 Hg 的平均含量为 0.094 mg/kg(图 1)。表 1 中总结了 14 种鱼类共 70 个样本中 As 和 Hg 的含量范围,As 在背肌和腹肌中的含量范围分别为 0.002~0.312 mg/kg、0.001~0.440 mg/kg; Hg 在背肌和腹肌中的含量分别为 0.003~0.104 mg/kg、0.006~0.189 mg/kg。从重金属含量的均值而言,腹肌中 As 的含量最高,为 0.078 mg/kg,背肌中 Hg 的含量最低,为 0.024 mg/kg。由于本研究中测定的 As 和 Hg 是总 As 和总 Hg,而 As 和 Hg 的毒性主要取决于其不同的形态<sup>[17]</sup>。现行国标 GB 2762—2022 中,对甲基汞和无机砷的含量进行了限量规定(甲基汞为 0.5 mg/kg,无机砷为 0.1 mg/kg)。将 Hg 全部视为甲基汞,本研究所测得的鱼肉样品中的总 Hg 含量,均小于国标中甲基汞的限量值。由于水产品中的 As 主要由有机砷的形式存在,无机砷的比例较小<sup>[18]</sup>,通常在 0.02%~11.00%之间<sup>[19]</sup>。所以在本研究中,无机砷含量按照总 As 含量的 10%计算。经转换后,本研究所测样品中的总 As 含量均低于限量值。经过显著性分析发现:鳊鱼、青鱼的背肌和腹肌中 Hg 的含量具有显著性差异( $P < 0.05$ );草鱼、白鲢、鲈鱼、鳊鱼的背肌和腹肌中的 As 含量具有显著性差异( $P < 0.05$ )。

### 2.2 暴露评估结果

结合样品中重金属含量以及国家标准中的限定值计算  $P_i$  值(无机砷的含量按照总 As 含量的 10%计算)。得出样品中重金属污染水平如表 2 所示,并根据  $P_i$  的结果对不同污染程度的占比进行计算。结果显示:鱼肉样品受到 As 轻度污染的水平较高,占比为背肌中 10.00%,腹肌中 8.57%,从  $P_i$  均值来看,受 As 污染较为严重的为鲈鱼、黄颡鱼。而样品受到 Hg 的污染程度较低,背肌和腹肌均受到 Hg 的轻度污染,占比均为 4.29%。在所有样品中,As 和 Hg 的含量均未达到中度、重度污染。



注: \*表示样品背肌和腹肌中的重金属含量具有显著性差异( $P < 0.05$ )

图1 14种鱼中背肌、腹肌中的As、Hg含量

Fig.1 As and Hg content in dorsal muscle and ventral muscle of 14 kinds of species of fish

表 1 样品重金属含量范围和平均值  
Table 1 Range and average of heavy metal content in samples

元素	部位	含量范围/(mg/kg)	平均值/(mg/kg)
As	背肌	0.002~0.312	0.073
	腹肌	0.001~0.440	0.078
Hg	背肌	0.003~0.104	0.024
	腹肌	0.006~0.189	0.025

### 2.3 重金属风险健康评估结果

本研究结合 14 种鱼类中 As 和 Hg 的平均含量与成人和儿童的水产品日均消耗量、平均体重、暴露时长等相关参数, 对目标危害系数进行估算, 结果如表 3 所示。所有样品的 THQ 值均小于 1, 这代表在长期摄入本研究所涉鱼类的情况下, 不会对人体健康造成潜在危害。

表 2 单因子污染指数评价结果  
Table 2 Results of single factor pollution index

品种	$P_i$ (以均值计)			
	As		Hg	
	背肌	腹肌	背肌	腹肌
草鱼	0.040	0.023	0.024	0.018
团头鲂	0.032	0.032	0.022	0.024
白鲢	0.091	0.125	0.024	0.022
鳊	0.025	0.019	0.070	0.048
鲫鱼	0.037	0.025	0.027	0.024
鲤鱼	0.072	0.061	0.015	0.016
翘嘴鲌	0.079	0.099	0.096	0.177
鲈鱼	0.270	0.378	0.046	0.047
鳊鱼	0.039	0.047	0.188	0.152
青鱼	0.023	0.019	0.050	0.026
乌鳢	0.098	0.090	0.025	0.018
胡子鲇	0.005	0.011	0.018	0.079
斑点叉尾鲴	0.010	0.005	0.033	0.025
黄颡鱼	0.209	0.165	0.037	0.032
	污染评价			
未受污染/%	90.00	91.43	95.71	95.71
轻度污染/%	10.00	8.57	4.29	4.29
中度污染/%	0	0	0	0
重度污染/%	0	0	0	0

注: As 含量按总 As 的 10% 计。

表 3 样品中不同部位的 As 和 Hg 的目标风险系数  
Table 3 Target hazard quotients for As and Hg in different parts of the samples

品种	As				Hg			
	背肌		腹肌		背肌		腹肌	
	THQ(成人)	THQ(儿童)	THQ(成人)	THQ(儿童)	THQ(成人)	THQ(儿童)	THQ(成人)	THQ(儿童)
草鱼	0.006	0.011	0.004	0.007	0.011	0.020	0.009	0.015
团头鲂	0.005	0.009	0.005	0.009	0.011	0.019	0.011	0.020
白鲢	0.014	0.025	0.020	0.035	0.012	0.021	0.010	0.019
鳊	0.004	0.007	0.003	0.005	0.034	0.059	0.023	0.041
鲫鱼	0.006	0.010	0.004	0.007	0.013	0.023	0.011	0.020
鲤鱼	0.011	0.020	0.010	0.017	0.007	0.013	0.007	0.013
翘嘴鲌	0.013	0.022	0.016	0.028	0.046	0.081	0.084	0.149
鲈鱼	0.043	0.076	0.060	0.106	0.022	0.039	0.022	0.039
鳊鱼	0.006	0.011	0.007	0.013	0.090	0.159	0.072	0.128
青鱼	0.004	0.006	0.003	0.005	0.024	0.042	0.012	0.022
乌鳢	0.016	0.028	0.014	0.025	0.012	0.021	0.009	0.015
胡子鲇	0.001	0.001	0.002	0.003	0.008	0.015	0.038	0.067
斑点叉尾鮰	0.002	0.003	0.001	0.001	0.016	0.028	0.012	0.021
黄颡鱼	0.033	0.059	0.026	0.046	0.018	0.031	0.015	0.027

注: 无机砷含量按总 As 的 10% 计。

## 2.4 重金属相关性分析结果

对样品背肌和腹肌中 As 和 Hg 的含量分别进行相关性分析, 结果如表 4。发现草鱼、胡子鲇背肌中 Hg 与 As 的含量具有显著相关性( $P < 0.05$ ), 鲤鱼腹肌中 Hg 与 As 的含量具有显著相关性( $P < 0.05$ )。其中, 草鱼和鲤鱼中表现出显著正相关, 这表明这 2 类样品中 As 和 Hg 可能具有相似的来源。

表 4 样品中不同部位 Hg 和 As 含量的相关性  
Table 4 Correlation between Hg and As content in different tissues of samples

品种	相关性系数(背肌)	相关性系数(腹肌)
草鱼	0.900*	0.104
团头鲂	-0.519	0.300
白鲢	0.500	0.852
鳊	-0.425	0.601
鲫鱼	-0.316	-0.515
鲤鱼	-0.321	0.949*
翘嘴鲌	0.554	-0.826
鲈鱼	-0.285	-0.688
鳊鱼	0.833	0.462
青鱼	0.606	-0.462
乌鳢	0.600	0.671
胡子鲇	-0.949*	0.359
斑点叉尾鮰	0.822	0.330
黄颡鱼	-0.600	-0.702

注: \*表示具有显著相关性  $P < 0.05$ (双尾)。

## 3 讨论与结论

本研究中, As 和 Hg 的检出率均为 100%。将本研究中测得的 As 和 Hg 含量与其他文献中所报道的进行比较, 发现广东、河南、黑龙江<sup>[20-21]</sup>等地的研究结果中鲈鱼中 As 的含量最高, 污染程度最深, 其次为黄颡鱼, 这与本研究具有相同的结论。本研究所测样品中 As 的含量较 Hg 的含量略高, 这与安徽巢湖<sup>[22]</sup>、洞庭湖<sup>[23]</sup>、柳州<sup>[24]</sup>地区的研究结果一致。这可能是因为本研究所选样品大多数生活在中下水层, 而 As 更多地沉积于河流、池塘的底部<sup>[25]</sup>, 导致生活在中下水层的鱼群富集更多的 As。

过去的许多研究揭露了鱼类组织中不同部位对重金属的富集能力不同, 例如有研究表明金枪鱼中不同部位中 Hg 的含量有差异<sup>[26]</sup>。还有研究发现由于腹部富含脂质, 而甲基汞是脂溶性的, 因此甲基汞在腹部的含量较高<sup>[27]</sup>。观察本研究中显著性分析的结果, 发现鳊鱼、青鱼的背肌和腹肌中 Hg 的含量具有显著性差异( $P < 0.05$ ); 草鱼、白鲢、鲈鱼、鳊鱼的背肌和腹肌中的 As 含量具有显著性差异( $P < 0.05$ )。这可能是由于背肌和腹肌在代谢活动和血流量等方面的生理差异进一步导致了 As 和 Hg 的积累和分布不同。

综合考虑无机砷(总 As 含量的 10%)和甲基汞的含量后, 计算不同样品的 THQ 值。结果发现所有样品中成人和儿童的 THQ 均小于 1。这表明, 在长期食用的条件下, 本研究中 14 种鱼肉的 As 和 Hg 污染程度对武汉市居民造成的危害较小。这与贵州<sup>[28]</sup>、北京<sup>[29]</sup>、黑龙江<sup>[30]</sup>地区的研究结果一致。这说明我国近年来对于工业三废监管, 污水治

理等环境保护措施逐渐重视, 并且有了显著的效果, 极大程度上保障了消费者的切身利益。根据相关性分析的结果来看, 部分品种如草鱼、鲤鱼等, 体内 As 和 Hg 的含量体现出显著正相关性, 这与安徽巢湖<sup>[31]</sup>的研究结果一致。这说明样品中的甲基汞和无机砷在来源上具有一定的相关性。由于本研究样本量有限, 所体现出的相关性并不显著, 在后续研究中可以进行多季节、多样点的采样, 以此来体现出更明显的相关性。

以上结论均表明, 武汉市居民在合理消费鱼类的前提下, 所摄取的重金属含量是安全的, 并没有表现出明显的食用风险。其中, 虽然个别鱼类样品内重金属含量较高, 但也处于国家标准限定范围之内。建议武汉市市民合理膳食, 避免长期食用同一种鱼类, 以便于摄取不同的氨基酸和脂肪酸。同时, 武汉市监管部门应持续对市售水产品重金属进行监管, 以防出现食品安全问题。

## 参考文献

- [1] 马宇翔. 基于 IFMOP 和 PLUS 模型耦合的武汉市土地利用优化配置研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2022.  
MA YX. Research on land use optimization allocation in Wuhan based on IFMOP and PLUS model coupling [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2022.
- [2] 陈浩. 淡水水产调理制品冷链物流体系的构建—以武汉市为例[D]. 武汉: 华中农业大学, 2023.  
CHEN H. Construction of cold chain logistics system for freshwater aquatic conditioning products—taking Wuhan as an example [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023.
- [3] 张志华, 张达娟, 李泽利, 等. 于桥水库 4 种经济鱼类肌肉营养成分分析与评价[J]. 饲料工业, 2024, 1: 1–8.  
ZHANG ZH, ZHANG DJ, LI ZL, *et al.* Nutritional compositions and evaluation of four species economic fish of muscle in Yuqiao reservoir [J]. Feed Ind, 2024, 1: 1–8.
- [4] 黄志宁, 郭新东, 寻知庆, 等. 食用植物油中安全风险物质的研究进展[J]. 现代食品科技, 2024, 1: 1–12.  
HUANG ZN, GUO XD, XUN ZQ, *et al.* Advanced in research on safety risk substances in edible vegetable oils [J]. Mod Food Sci Technol, 2024, 1: 1–12.
- [5] 王梁燕, 戴商, 金妙仁, 等. 重金属污染水环境的微生物修复技术[J]. 生物工程学报, 2024, 1: 1–15.  
WANG LY, DAI S, JIN MR, *et al.* Microbial remediation of heavy metal-polluted water [J]. Chin J Biotechnol, 2024, 1: 1–15.
- [6] 沈天富, 沈佳明, 胡晓波, 等. 浙江地区中华绒螯蟹中甲基汞分布特征与食用风险[J]. 现代农业科技, 2024(7): 153–155, 159.  
SHEN TF, SHEN JM, HU XB, *et al.* Distribution characteristics and consumption risk of methylmercury in Chinese mitten crab in Zhejiang region [J]. Mod Agric Sci Technol, 2024(7): 153–155, 159.
- [7] 王瑛, 林钰清, 李爱军, 等. 重金属危害机制及益生菌清除重金属机制研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(3): 281–292.  
WANG Y, LIN YQ, LI AIJ, *et al.* Research progress on mechanism of heavy metal contamination and probiotics sequestration [J]. Food Ferment Ind, 2020, 46(3): 281–292.
- [8] HOSSAIN MB, AHMED ASS, SARKER MSI. Human health risks of Hg, As, Mn, and Cr through consumption of fish, Ticto barb (*Puntius ticto*) from a tropical river, Bangladesh [J]. Environ Sci Pollut Res, 2018, 25(31): 31727–31736.
- [9] YIN JJ, CHENG LY, JIANG XM, *et al.* Metals levels and human health risk assessment in eight commercial fish species collected from a market, Wuhan, China [J]. Front Sustain Food Syst, 2024, 8: 1346389.
- [10] 秦燕兰, 王加宾. 烟台黄渤海海域水产品中镉污染水平及其健康风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(6): 312–318.  
QIN YL, WANG JB. Cadmium pollution level and health risk assessment of aquatic products collected from the Yantai Yellow and Bohai sea area [J]. J Food Saf Qual, 2024, 15(6): 312–318.
- [11] LIANG G, GONG WW, LI BR, *et al.* Analysis of heavy metals in foodstuffs and an assessment of the health risks to the general public via consumption in Beijing, China [J]. Int J Environ Res Pub Health, 2019, 16(6): 909.
- [12] 罗钦, 吴建行, 潘葳. 3 种养殖淡水鱼重金属含量测定及健康风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(18): 6568–6574.  
LUO Q, WU JY, PAN W. Determination of heavy metal content of 3 kinds of cultured freshwater fish and health risk assessment [J]. J Food Saf Qual, 2020, 11(18): 6568–6574.
- [13] 张小磊, 王晶晶, 安春华, 等. 郑州沿黄地区养殖鱼类中重金属污染与健康风险评估[J]. 生态环境学报, 2018, 27(2): 350–355.  
ZHANG XL, WANG JJ, AN CH, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in cultured fish species along the Yellow River in Zhengzhou [J]. Ecol Environ Sci, 2018, 27(2): 350–355.
- [14] 高志杰, 汪嫒娜, 姚浔平, 等. 海产品中重金属铅、汞、镉、铬对人体健康的潜在风险评估[J]. 中国卫生检验杂志, 2014, 24(7): 1019–1021, 1025.  
GAO ZJ, WANG LN, YAO XP, *et al.* Potential health risk of lead, mercury, cadmium and chromium in saefoods [J]. Chin J Health Lab Technol, 2014, 24(7): 1019–1021, 1025.
- [15] ZHONG WJ, ZHANG YF, WU ZH, *et al.* Health risk assessment of heavy metals in freshwater fish in the central and eastern North China [J]. Ecotox Environ Saf, 2018, 157: 343–349.
- [16] 侯彦琳, 郝青, 孙秀梅, 等. 苍南近岸海域水产品重金属分布特征及风险评估[J]. 中国无机分析化学, 2024, 1: 1–13.  
HOU YL, HAO Q, SUN XM, *et al.* Distribution characteristic and risk assessment of heavy metals in aquatic products from the coastal area of Cangnan [J]. Chin J Inorg Anal Chem, 2024, 1: 1–13.
- [17] 董娜, 罗蓓超, 李伟航, 等. 液相色谱-蒸汽发生-原子荧光联用技术测定食品中砷、汞的形态[J]. 江苏调味副食品, 2023(4): 30–33.  
DONG N, LUO XC, LI WH, *et al.* Determination of As and Hg in food by liquid chromatography-steam occurrence-atomic fluorescence technology [J]. Jiangsu Cond Subs Food, 2023(4): 30–33.
- [18] 姜梦云, 刘旭, 衣然. 4 种前处理方法-原子荧光光谱法测定螺旋藻中总砷含量[J]. 食品安全导刊, 2024, (3): 56–58.  
JIANG MY, LIU X, YI R. Comparison of four pretreatment methods for total Arsenic in *Spirulina* by atomic fluorescence spectrometry [J]. Chin Food Saf Magaz, 2024, (3): 56–58.
- [19] 齐自元, 曹欢, 胡钰梅, 等. 海产品与淡水产品中重金属的差异性及其风险评估[J]. 水产学报, 2022, 46(7): 1246–1256.  
QI ZY, CAO H, HU YM, *et al.* Differences and risk assessment of heavy

- metals in seafood and freshwater products [J]. *J Fish China*, 2022, 46(7): 1246–1256.
- [20] 欧阳静茹, 邵昭明, 戚慕怡, 等. 佛山市禅城区食用鱼中重金属含量现状调查与健康风险评估[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(7): 2671–2678.
- OUYANG JR, SHAO ZM, QI MY, *et al.* Investigation and health assessment of heavy metals in edible fish in Chancheng district Foshan city [J]. *J Food Saf Qual*, 2021, 12(7): 2671–2678.
- [21] 吴迪, 张龙飞, 王梦圆, 等. 11 种四省市售淡水鱼肌肉中重金属含量特征与污染状况评价[J]. *核农学报*, 2023, 37(3): 569–576.
- WU D, ZHANG LF, WANG MY, *et al.* Concentrations and pollution evaluation of heavy metal in the muscle of 11 commercially available freshwater fish from four provinces [J]. *J Nucl Agric Sci*, 2023, 37(3): 569–576.
- [22] FANG T, LU WX, LI J, *et al.* Levels and risk assessment of metals in sediment and fish from Chaohu Lake, Anhui Province, China [J]. *Environ Sci Pollut Res Int*, 2017, 24(18): 15390–15400.
- [23] BI B, LIU XH, GUO XC, *et al.* Occurrence and risk assessment of heavy metals in water, sediment, and fish from Dongting Lake, China [J]. *Environ Sci Pollut Res Int*, 2018, 25(34): 34076–34090.
- [24] LI J, MIAO XY, HAO YP, *et al.* Health risk assessment of metals (Cu, Pb, Zn, Cr, Cd, As, Hg, Se) in angling fish with different lengths collected from Liuzhou, China [J]. *Int J Environ Res Pub Health*, 2020, 17(7): 2192.
- [25] MARCUSSEN H, HA LT, POLPRASERT C, *et al.* Contents and mass balances of cadmium and arsenic in a wastewater-fed fish pond of Hoang Mai, Hanoi, Vietnam [J]. *J Environ Sci Heal A*, 2012, 47(14): 2246–2253.
- [26] LARES ML, HUERTA-DIAZ MA, MARINONE SG, *et al.* Mercury and cadmium concentrations in Faemed Bluefin Tuna (*Thunnus orientalis*) and the suitability of using the Caudal Peduncle muscle tissue as a monitoring tool [J]. *J Food Prot*, 2012, 75(4): 725–730.
- [27] PAL M, GHOSH M. Relationship of methyl mercury accumulation with lipid and weight in two river cat fish species, *Wallagoo attu* and *Mystus aor*, from West Bengal, India [J]. *Environ Monit Assess*, 2013, 185(1): 31–37.
- [28] CAI SW, ZENG BP, LI CT. Potential health risk assessment of metals in the muscle of seven wild fish species from the Wujiangdu Reservoir, China [J]. *Qual Assur Saf Crops Foods*, 2023, 15(1): 73–83.
- [29] PUYANG XH, GAO CH, HAN LB. Risk assessment of heavy metals in water and two fish species from golf course ponds in Beijing, China [J]. *Bull Environ Contam Toxicol*, 2015, 94(4): 437–443.
- [30] JIANG HF, QIN DL, CHEN ZX, *et al.* Heavy metal levels in fish from Heilongjiang river and potential health risk assessment [J]. *Bull Environ Contam Toxicol*, 2016, 97(4): 536–542.
- [31] 王璨. 安徽巢湖水产品重金属污染特征及人群健康风险评估[D]. 南京: 南京大学, 2019.
- WANG C. Pollution characteristics and risk assessment of heavy metals in aquatic products from Chaohu Lake, Anhui [D]. Nanjing: Nanjing University, 2019.

(责任编辑: 于梦娇 蔡世佳)

### 作者简介



程良宇, 主要研究方向为食品科学与工程。

E-mail: 18872888703@163.com



殷娇娇, 讲师, 主要研究方向为食品营养与安全。

E-mail: yinjiaojiao@whpu.edu.cn