

广东省内珠江口海域深海鱼重金属富集特征 及食用安全性评价

倪明龙^{1*}, 周航², 罗立津³

(1. 广东食品药品职业学院, 广州 510520; 2. 安康市质量技术检验检测中心, 安康 725000;
3. 福建省微生物研究所, 福州 350007)

摘要: **目的** 研究广东省内珠江口一带海域捕捞的常见深海鱼类白鲳鱼、红衫鱼、带鱼、午笋鱼等的重金属富集特征并评价其食用安全性。**方法** 采用电感耦合等离子体质谱法(inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)对不同鱼类的不同组织进行铬(Cr)、铜(Cu)、锌(Zn)、镉(Cd)、汞(Hg)、铅(Pb)6种有害元素的含量进行测定, 并采用单因子污染指数(P_i)、均值型污染指数(pollution index, PI)、污染负荷比(L)、每周可耐受摄入量(provisional tolerable weekly intake, $PTWI$)分别评估其污染程度。**结果** 7种海鱼的鱼鳃和内脏重金属含量相对较高, 肌肉中重金属含量相对较低; 鱼鳃中 Zn 含量最高、是主要的富集部位, Cu、Cd、Cr 主要富集在内脏中。所有海鱼中重金属含量最多的是 Zn, 其次是 Cu; 白鲳鱼、金鲳鱼、午笋鱼、大黄花鱼、小黄花鱼、凤尾鱼的肌肉组织均处于未污染级别, 只有带鱼的肌肉处于微污染级别; 成年人对 7 种重金属每周实际摄入量(adults' weekly intake, AWI)占 $PTWI$ 比值范围为 0.00%~5.48%, 均低于 10%。**结论** 重金属元素在水生动物组织或器官内的积累有一定的选择性, 肌肉中所有重金属含量均未超过食品安全限量标准值, 广东成人每周通过水产品摄入重金属的量是安全的。

关键词: 深海鱼; 重金属; 富集特征; 食用安全评价

Accumulation characteristics and safety evaluation of heavy metals of deep-sea fishes from the Pearl river sea area in Guangdong province

NI Ming-Long^{1*}, ZHOU Hang², LUO Li-Jin³

(1. Guangdong Food and Drug Vocational College, Guangzhou 510520, China; 2. Center of Quality and Technology Inspection and Testing of Ankang, Ankang 725000, China; 3. Fujian Institute of Microbiology, Fuzhou 350007, China)

ABSTRACT: Objective To study the heavy metal enrichment characteristics of common deep-sea fishes, such as *Pampus argenteus*, *Red shirt fish*, *Trichiurus lepturus* and *Eleutheronema tetradactylum*, caught in the Pearl river estuary of Guangdong province and evaluate their food safety. **Methods** The content of Cr, Cu, Zn, Cd, Hg, and Pb in different parts of different deep-sea fishes was determined by inductively coupled plasma mass spectrometry

基金项目: 广东省医学科学技术研究基金项目(B2018171)、福建省星火计划项目(2018S0028)、广东食品药品职业学院自然科学研究项目青年项目(2016YZ033)

Fund: Supported by the Science Foundation of Guangdong Medicine (B2018171), the Fujian Spark Project (2018S0028), and the Science Foundation of Guangdong Food and Drug Vocational College (2016YZ033)

***通讯作者:** 倪明龙, 硕士, 工程师, 主要研究方向为食品加工及质量安全检测。E-mail: ww1980111@163.com

***Corresponding author:** NI Ming-Long, Master, Engineer, Guangdong Food and Drug Vocational College, No.321 Longdong North Road, Guangzhou 510520, China. E-mail: ww1980111@163.com

(ICP-MS), and the pollution level was evaluated by single-factor pollution index (P_i), mean pollution index (PI), pollution load ratio (L) and provisional tolerable weekly intake (PTWI). **Results** Heavy metals were mainly distributed in the gill and visceral of all investigated deep-sea fishes, lower in fish muscle. Zn was mainly concentrated in fish gills, while Cu, Cd, Cr were mainly concentrated in fish visceral. The highest content of heavy metals in all deep-sea fishes was Zn, followed by Cu. Furthermore, the muscle tissues of *Pampus argenteus*, *Trachinotus ovatus*, *Eleutheronema tetradactylum*, *Pseudosciaena crocea*, *Pseudosciaena polyactis* and *Coilia mystus* were all in non-polluted level, only *Trichiurus lepturus* muscles was at the level of slight level. Adults' weekly intake (AWI) of 7 heavy metals did not exceed the provisional tolerable weekly intake (PTWI) value. The ratio of Adults' weekly intake (AWI) to the provisional tolerable weekly intake (PTWI) of 7 heavy metals was ranged from 0.00% to 5.48%, which was lower than 10%. **Conclusion** The accumulation of heavy metals in the tissues or organs of aquatic animals is selective, all the heavy metal content in the muscle does not exceed the food safety limit, and it is safe for Guangdong adults to intake heavy metals from aquatic products every week.

KEY WORDS: deep-sea fish; heavy metal; accumulation characteristics; edible safety assessment

1 引言

我国海水鱼种类繁多, 是人们膳食的重要组成部分, 因其低脂肪、高蛋白、富含多种微量元素而被人们喜爱, 其中, 深海鱼是对水深超过 200 m 的鱼类的总称, 深海鱼大多自然生长, 由于深海污染少, 生长周期长, 具有很高营养价值^[1]。目前全世界海洋环境污染的情况比较严峻, 尤其是珠江三角洲工业区的广东省, 大量含有重金属的工业废水通过各种途径进入珠江和河口区海域, 给海洋环境造成污染。铬(Cr)、镉(Cd)、汞(Hg)、铅(Pb)等元素具有生物富集性、持久性、易迁移性, 长期残存于生物体内, 最终通过食物链转移至高级生物(鱼贝类), 被人类食用后威胁到人类健康^[2-5]。铜(Cu)、锌(Zn)等是维持正常生命活动的必需元素, 但浓度超过一定阈值也会对人体造成危害^[6]。过去对珠江三角洲地区市场的食用鱼及贝类体内重金属含量的测定已发现有超标现象^[7-9], 因此非常有必要对广东省内深海鱼资源进行重金属含量的安全风险评估, 为居民日常消费水产品提供参考。

本研究以广东省珠江口海域捕捞的常见深海鱼类白鲳鱼(*Pampus argenteus*)、金鲳鱼(*Trachinotus ovatus*)、大黄花鱼(*Pseudosciaena crocea*)、午笋鱼(*Eleutheronema tetradactylum*)、小黄花鱼(*Pseudosciaena polyactis*)、带鱼(*Trichiurus lepturus*)、凤尾鱼(*Coilia mystus*)为研究对象, 利用电感耦合等离子体质谱法(inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)测定深海鱼中 Cr、Cu、Zn、Cd、Hg、Pb 6 种元素, 探讨了 7 种深海鱼体不同部位重金属分布情况, 对食用部位采用污染指数法和膳食摄入风险评价等方法, 进行了食用安全性评价, 以期为广东珠江口海域海产品安全提供基础数据支持, 为居民日常选购深海鱼类、合理膳食提供参考文献。

2 材料与方法

2.1 实验材料

白鲳鱼(约 150 g/条)、金鲳鱼(约 600 g/条)、大黄花鱼(约 300 g/条)、午笋鱼(约 500 g/条)、小黄花鱼(约 80 g/条)、带鱼(约 850 g/条)、凤尾鱼(200 g/条)各 10 条, 2018 年 10 月购买于广州南沙水产市场, 采购回来的鱼放置在 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱冻藏以备使用。

2.2 试剂

硝酸(电子纯, 德国 Meker 公司); 双氧水(BV-III级, 北京化学试剂研究所); 超纯水(电阻率 $\geq 18.2\text{ M}\Omega\cdot\text{cm}$, 实验室超纯水机自制); Sc(45)、Ge(72)、In(115)、Bi(209)的内标液($50\text{ }\mu\text{g/L}$, 国家有色金属及电子材料分析测试中心); B、Al、Mn、Cu 等单元素标准溶液(1000 mg/L , 国家钢铁材料测试中心); Cr、Ni、Zn、As、Se、Cd、Sn、Hg、Pb 等单元素标准溶液(1000 mg/L , 国家有色金属及电子材料分析测试中心)。

2.3 仪器与设备

7900Agilent 电感耦合等离子体质谱仪(美国 Agilent Technologies 公司); Milestone ETHOS UP 微波消解仪(意大利 Milestone 公司); Mettler MS204S 电子分析天平($0\sim 220\text{ g}$, 德国梅特勒公司); Milli-Q 超纯水机(美国密理博公司)。

2.4 实验方法

2.4.1 样品前处理

在常温下解冻, 先称量体重和测量体长, 去掉鱼鳞后, 然后用不锈钢剪刀和解剖刀将海鱼分解成内脏、鱼鳃、鱼骨、鱼皮, 全部可食肌肉进行样品测定。鱼体不同组织切分后, 均匀打碎。于消解管中称取 1 g , 精确至 0.0001 g , 加入超纯硝酸 5 mL 、双氧水 2 mL 和超纯水 1 mL , 采用微波

消解处理样品。微波消解升温曲线如表 1 所示。样品消解完冷却后取出消解罐，缓慢打开罐盖排气，用少量水冲洗内盖，将消解管放入超声水浴箱中超声脱气 2~5 min，转移到容量瓶中，用超纯水定容至 50 mL，待分析。

表 1 微波消解程序
Table 1 Microwave digestion procedure

步骤	控制温度/℃	升温时间/min	恒温时间/min
1	120	5	5
2	150	5	10
3	190	5	20

2.4.2 仪器的调谐

仪器的样品管和内标管都插入调谐液中，依次对矩

管位置、雾化气流速、透镜等进行日常调谐，得到最佳的灵敏度、最低的氧化物、双电荷干扰以及较好的分辨率。

2.4.3 半定量扫描

把样品管依次插入空白溶液、供试品溶液中，内标管插入内标溶液中，调用仪器内置的半定量扫描方法，进行半定量扫描，根据扫描结果选择待测元素的种类，选择合适的内标元素，制定合理的标准曲线范围及确定样品的稀释倍数。

2.4.4 标准溶液的制备及标准曲线制作

以 2% HNO₃ 溶液做介质，将不同元素的单元素标准溶液进行逐级浓度稀释，制备成混合标准储备溶液，最后配制成含待测物质标准系列浓度如表 2 所示。

表 2 各元素的内标元素、标准曲线系列浓度
Table 2 Internal standard elements and standard curve concentration

名称	质量数	内标名称	内标质量数	标准曲线系列浓度/μg/L					
				1	2	3	4	5	6
Cr	52	Sc	45	0.00	1.00	2.00	5.00	10.0	20.0
Cu	63	Ge	72	0.00	5.00	10.0	25.0	50.0	100
Zn	66	Ge	72	0.00	20.0	40.0	100	200	400
Cd	111	In	115	0.00	1.00	2.00	5.00	10.0	20.0
Hg	202	Bi	209	0.00	0.10	0.20	0.50	1.00	2.00
Pb	208	Bi	209	0.00	1.00	2.00	5.00	10.0	20.0

2.4.5 仪器运行参数

等离子体气流速度：氩气，15.0 L/min；射频功率：1550 W；载气流速：氩气，1.0 L/min；采样锥孔径 1.0 mm，截取锥孔径 0.4 mm，进液速度 0.40 r/s，进液时间 20 s；稳定时间 20 s，重复次数 3 次。

2.4.6 运行过程

开机，启动真空系统，待仪器真空度符合要求后，点火，用质谱调谐液进行仪器性能测试，使灵敏度、氧化物、双电荷离子比率以及分辨率等各项指标达到测试要求，编辑方法，仪器稳定后进行空白样、标准系列、样品的测试。

2.4.7 评价标准与方法

(1) 污染程度评价

采用单因子污染指数法和均值型污染指数法评价 6 种深海鱼体内重金属污染状况，采用污染负荷比评价主要污染因子。

单因子污染指数法用于评价某一重金属元素的单一污染程度，其计算见式(1)^[10]。

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \tag{1}$$

式中： P_i 为单因子污染指数； C_i 为生物体内污染物的实测平均含量，mg/kg； S_i 为某种污染物的评价标准值，mg/kg；评价标准值参照 GB 2762-2017《食品安全国家标准 食品中

污染物限量》^[11]，NY 5073-2006《无公害食品 水产品中有毒有害物质限量》对 Cu(≤50 mg/kg)^[12]，GB 13106-1991《食品中锌限量卫生标准》对 Zn(≤50 mg/kg)的限量规定^[13]。

均值型污染指数法^[14]用于评价样品中重金属的污染程度，本质是各项单因子污染指数的平均值，其计算见式(2)。

$$PI = \sum \frac{P_i}{n} \tag{2}$$

式中： PI 为均值型污染指数； P_i 为单因子污染指数； n 为所测重金属种类数。根据均值型污染指数法的计算结果将重金属污染程度分为 6 个等级^[15]，即未污染级别($PI < 0.1$)、微污染级别($0.1 \leq PI \leq 0.2$)、轻污染级别($0.2 < PI \leq 0.5$)、中污染级别($0.5 < PI \leq 0.7$)、重污染级别($0.7 < PI \leq 1.0$)、严重污染级别($PI > 1.0$)。

(2) 污染因子分析

污染负荷比可用于说明主要污染因子，其计算见公式(3)^[16]。

$$L = \frac{P_i}{\sum P_i} \tag{3}$$

式中： L 为污染物负荷比； P_i 为单因子污染指数。

(3) 食用安全性评价

根据上述含量检测结果，根据公式(4)计算出居民每周实际摄入重金属质量(mg)，并与世界卫生组织和联合国

粮农组织食品添加剂联合专家委员会制定的暂定每周可耐受摄入量(provisional tolerable weekly intake, PTWI)标准进行对比, 评价太湖水产品的食用安全性。

居民每周实际摄入重金属质量/mg=7 种海鱼肌肉重金属平均含量/(mg/kg)×0.403 kg (4)
式中: 0.403 kg 为我国居民人均每周水产品摄入量, 2016 年中国居民膳食指南参考值^[14]。

2.5 数据分析

实验中所需数据以 Excel 2010 软件统计并计算, 结果用平均值±标准差表示, 本研究所有指标测定均设 3 次重复($n=3$)。

3 结果与分析

3.1 重金属元素在海鱼不同部位的分布特征

通过表 3 可以看出, 同种重金属在海产品不同组织中的分布不同。7 种海产品的鱼鳃和内脏重金属含量相对较高, 肌肉中重金属含量相对较低, 金属进入鱼虾体内主要是通过饵料摄食、体表渗透和腮膜吸附^[17,18]等途径, 鱼虾类通过腮不断吸收溶解的氧, 从而使溶解在水中的重金属离子不停地通过腮部直接从水中吸收重金属离子成为主要途径。通过摄食、渗透或吸附等途径进入鱼体的重金属参与代谢后又多在内脏聚集^[19], 因此一般鱼鳃和内脏中重金属含量比肌肉中高的多, 所以一般居民食用鱼类时, 一定要将鱼鳃、内脏去掉。除了白鲳鱼、大黄花鱼, 其他鱼类重金属含量趋势为: 鱼鳃、内脏>鱼皮>肌肉。可能是因为金属元素有部分是透过体表渗透进入鱼体内, 所以鱼皮中重金属含量高于肌肉中。数据分析结果发现, 鱼鳃中 Zn 含量最高、是主要的富集部位。Cu、Cd、Cr 主要富集在内脏中。通过数据分析可以看出, 肌肉中 Pb 和 Zn 的含量为正相关($r=0.7640$, $P=0.006$), 鱼鳃中 Zn 和 Cr 的含量为正相关($r=0.7846$, $P=0.009$), Cr 和 Cu 为正相关($r=0.9417$, $P=0.020$), 内脏中 Cr 和 Cu 为正相关($r=0.9135$, $P=0.02$), 鱼骨中 Zn 和 Cd 为正相关($r=0.8548$, $P=0.014$), Zn 和 Pb 为正相关($r=0.7921$, $P=0.014$), 鱼皮中 Zn 和 Cd 为正相关($r=0.7688$, $P=0.008$), 这说明重金属元素之间有协同吸收的趋势, 很多研究表明, 重金属元素之间存在相互作用, 包括协同、拮抗或加和作用, 这种相互作用也会影响各种金属元素在动物体内的吸收和积累^[17]。

本研究结果显示, 不同重金属在同种鱼同一组织的积累分布规律是, 所有海鱼中重金属含量最多的是 Zn, 其次是 Cu, 其他元素没有统一规律, Zn 和 Cu 是生命必需元素, 水生动物往往表现出对 Zn、Cu 的易吸收性, 所以在检测样品中残留量较高; Pb、Cd、Hg、Cr 是非必需元素, 表现出一定的抗性, 这跟谢文平等^[20]的研究结果一致, 说明重金属元素在水生动物组织或器官内的积累有一定的选择

性。但不同鱼种的相同组织器官中的重金属含量有差异性, 7 种海鱼中, 带鱼体内 Zn 含量最高、凤尾鱼次之、白鲳鱼最低; 午笋鱼体内 Cu 含量最高, 而带鱼、午笋鱼在受检的海鱼中, 属于体重较高、鱼龄较长的鱼种, 这可能与不同鱼种的体重、水体中生活时间长短以及生理、代谢差异有关^[14]。受检的所有海鱼中, 所有组织的重金属含量均未超过食品安全限量标准值(凤尾鱼的鱼骨除外)。

3.2 海鱼肌肉组织重金属污染分析

根据 2.4.7(1)的计算公式, 计算各元素的污染指数。GB 2762-2017《食品安全国家标准 食品中污染物限量》^[11]中未规定海鱼中总汞的限量值, 由于实验所有样品鱼总汞含量均低于甲基汞的限量值(0.5 mg/kg), 所以总汞限量值暂定为甲基汞的限量值。前面 3.1 所述结果显示鱼鳃和内脏中重金属含量一般高于肌肉中重金属含量, 平时居民日常消费习惯, 都会把鱼鳃和内脏去掉食用, 整体降低了安全风险, 肌肉作为鱼类的主要食用部分, 有必要对 7 种常见海鱼肌肉进行重金属污染指数分析, 结果见表 4。

由表 4 可知, 不同种类的海鱼污染程度不同。白鲳鱼、金鲳鱼、午笋鱼、大黄花鱼、小黄花鱼、凤尾鱼的肌肉组织均处于未污染级别, 只有带鱼的肌肉组织处于微污染级别, 这可能是由于带鱼属于体长, 而且属于肉食性鱼类的原因。

3.3 海鱼食用安全性评价

由表 3 以看出, 海鱼肌肉中所有重金属含量均未超过食品安全限量标准值, 7 种海鱼肌肉组织的均值型污染指数结果表明, 重金属污染水平基本属于未污染级别, 只有带鱼的肌肉属于微污染级别, 整体状况良好。

从表 5 可以看出, 7 种海鱼肌肉组织中 Zn、Hg、Cr 贡献值较大, 说明肌肉中主要污染因子是 Zn、Hg、Cr 元素。人体内 Zn 含量超标会引起免疫功能降低、代谢紊乱、缺铁性贫血等有害作用, 本研究所有样品均没有超过。从食品安全角度来讲, 应严格控制该区域的 Zn、Hg、Cr 污染。

参照 2016 年中国居民膳食指南, 按照我国居民人均每周水产品消费量为 0.403 kg, 进一步对广州地区居民每周人均实际重金属摄入量及占 PTWI 百分比进行分析, 结果如表 6 所示。

通过表 6 可以看出, 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 0.00%~5.48%, 均低于 10%, 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 Hg 的每周摄入量高于其他元素, 分别为 2.24%、1.84%, 7 种海鱼中, 白鲳、小黄花鱼 Cr 元素每周摄入量占 PTWI 百分比相对高点, 分别为 5.48%、3.99%, 白鲳、凤尾鱼 Hg 元素每周摄入量占 PTWI 百分比均为 3.34%, 说明白鲳鱼、小黄花鱼、凤尾鱼比其他品种的海鱼类风险高。需要引起相关部门的注意, 并加大监督力度, 来保证食用的安全性。

表 3 海鱼不同部位的重金属平均含量(n=3)
Table 3 Average content of heavy metals in different parts of deep-sea fishes (n=3)

编号	种类	部位	重金属平均含量 C _i /(mg/kg)					
			Cd	Cr	Pb	Hg	Zn	Cu
1	白鲳鱼	肌肉	0.004±0.000	0.054±0.003	0.006±0.000	0.024±0.001	11.0±0.38	0.167±0.004
		鱼鳃	1.553±0.072	0.019±0.005	0.002±0.000	0.045±0.000	27.9±2.69	3.03±0.040
		内脏	0.008±0.004	0.013±0.005	0.003±0.000	0.005±0.001	8.09±4.73	0.192±0.120
		鱼骨	0.005±0.001	0.009±0.002	0.001±0.000	0.044±0.007	5.59±1.33	0.218±0.078
		鱼皮	ND	0.056±0.015	0.005±0.001	0.001±0.000	8.51±1.31	0.045±0.006
2	金鲳鱼	肌肉	0.001±0.000	0.011±0.001	ND	0.003±0.000	5.62±0.215	0.096±0.005
		鱼鳃	0.002±0.000	0.034±0.031	0.014±0.001	0.011±0.002	20.3±2.49	0.206±0.090
		内脏	0.161±0.056	0.036±0.007	0.017±0.003	0.014±0.004	28.3±3.65	1.677±0.708
		鱼骨	0.002±0.001	0.556±0.201	0.012±0.002	0.004±0.002	13.8±1.81	0.271±0.142
		鱼皮	ND	0.222±0.022	0.001±0.000	0.022±0.007	5.36±0.981	0.159±0.026
3	午笋鱼	肌肉	0.001±0.000	0.003±0.000	0.002±0.000	0.022±0.0003	3.72±0.217	0.125±0.004
		鱼鳃	0.021±0.001	0.017±0.001	0.021±0.002	0.003±0.000	29.5±2.02	0.395±0.028
		内脏	0.014±0.004	0.472±0.024	0.011±0.001	0.004±0.000	15.0±0.113	4.725±0.061
		鱼骨	0.006±0.000	0.002±0.000	0.014±0.002	0.008±0.001	23.3±1.75	0.178±0.001
		鱼皮	0.017±0.007	0.002±0.000	0.002±0.001	0.004±0.000	15.2±3.75	0.245±0.074
4	带鱼	肌肉	0.007±0.000	0.015±0.006	0.064±0.011	0.001±0.000	22.1±1.29	0.095±0.002
		鱼鳃	0.816±0.113	0.099±0.026	0.050±0.008	0.009±0.001	113±6.89	2.958±0.592
		内脏	0.043±0.004	0.030±0.010	0.062±0.004	0.001±0.001	22.6±1.32	0.310±0.002
		鱼骨	0.001±0.000	0.007±0.001	ND	0.002±0.001	2.79±0.20	0.091±0.001
		鱼皮	0.009±0.001	0.041±0.003	0.006±0.001	0.010±0.003	7.78±0.614	0.149±0.030
5	大黄花鱼	肌肉	0.001±0.000	0.016±0.004	0.015±0.002	0.001±0.000	21.7±1.008	0.286±0.014
		鱼鳃	0.002±0.001	0.024±0.035	0.038±0.005	0.004±0.001	33.2±3.89	0.410±0.058
		内脏	0.045±0.006	0.042±0.075	0.001±0.000	0.003±0.000	13.1±1.52	1.448±0.215
		鱼骨	0.001±0.000	0.026±0.0018	0.053±0.008	0.001±0.000	10.3±1.206	0.322±0.045
		鱼皮	ND	0.012±0.002	0.001±0.001	0.016±0.002	8.84±0.789	0.520±0.065
6	小黄花鱼	肌肉	0.003±0.000	0.038±0.003	ND	0.015±0.000	3.77±0.173	0.334±0.017
		鱼鳃	0.030±0.005	0.059±0.005	0.025±0.006	0.007±0.002	30.7±1.69	0.385±0.035
		内脏	0.075±0.012	0.020±	0.005±0.001	0.011±0.002	21.6±8.88	0.686±0.095
		鱼骨	0.007±0.001	0.107±0.011	0.015±0.002	0.009±0.001	17.8±0.513	0.159±0.018
		鱼皮	0.014±0.003	0.038±0.006	0.003±0.000	0.012±0.000	17.2±3.48	0.553±0.056
7	凤尾鱼	肌肉	ND	0.024±0.005	0.012±0.003	0.023±0.002	6.98±1.18	0.245±0.082
		鱼鳃	0.003±0.001	0.058±0.013	0.206±0.032	0.006±0.001	23.4±1.49	0.268±0.003
		内脏	0.010±0.004	0.209±0.151	0.081±0.031	0.010±0.001	33.8±6.60	1.359±0.210
		鱼骨	0.011±0.005	0.016±0.005	0.083±0.020	0.011±0.005	52.2±4.90	0.097±0.006
		鱼皮	0.012±0.001	0.048±0.003	0.039±0.018	0.012±0.001	21.3±0.203	0.430±0.058

注: ND 为未检测到该元素。

表 4 海鱼肌肉组织重金属污染指数
Table 4 Heavy metal pollution indexes in the muscle tissue of deep-sea fishes

编号	种类	PI	单因子污染指数 P_i					
			Cd	Cr	Pb	Hg	Zn	Cu
1	白鲳鱼	0.059	0.04	0.027	0.012	0.048	0.22	0.0034
2	金鲳鱼	0.024	0.01	0.0055	0.00	0.006	0.12	0.0020
3	午笋鱼	0.023	0.01	0.0015	0.004	0.044	0.075	0.0025
4	带鱼	0.11	0.07	0.0075	0.13	0.002	0.45	0.0019
5	大黄花鱼	0.084	0.01	0.008	0.030	0.002	0.44	0.011
6	小黄花鱼	0.027	0.03	0.019	0.00	0.030	0.076	0.0067
7	凤尾鱼	0.038	0.00	0.012	0.024	0.046	0.14	0.0049

表 5 海鱼类肌肉组织重金属污染负荷比
Table 5 Loading ratios of heavy metals in the muscle tissue of deep-sea fishes

编号	种类	污染负荷比					
		Cd	Cr	Pb	Hg	Zn	Cu
1	白鲳鱼	0.114	0.077	0.034	0.137	0.628	0.010
2	金鲳鱼	0.070	0.039	0.000	0.042	0.837	0.014
3	午笋鱼	0.073	0.011	0.030	0.322	0.548	0.019
4	带鱼	0.106	0.012	0.197	0.003	0.681	0.003
5	大黄花鱼	0.020	0.016	0.060	0.004	0.879	0.022
6	小黄花鱼	0.186	0.118	0.000	0.030	0.186	0.042
7	凤尾鱼	0.000	0.053	0.106	0.203	0.617	0.022

表 6 海鱼重金属摄入人体的安全性评价
Table 6 Safety evaluation on heavy metal of deep-sea fishes

元素	种类	$PTWT^1$ /(mg/kg)	$PTWT^2$ (成人)/mg	AWI 每周实际摄入量/mg	重金属含量占 $PTWI$ 百分比/%
Cd	白鲳鱼	0.007	0.420	0.0017	0.41
	金鲳鱼	0.007	0.420	0.0005	0.12
	午笋鱼	0.007	0.420	0.0005	0.12
	带鱼	0.007	0.420	0.0029	0.70
	大黄花鱼	0.007	0.420	0.0005	0.12
	小黄花鱼	0.007	0.420	0.0013	0.31
	凤尾鱼	0.007	0.420	0.000	0.00
	水产品	0.007	0.420	0.0011	0.27
Cr	白鲳鱼	0.0067	0.402	0.022	5.48
	金鲳鱼	0.0067	0.402	0.005	1.25
	午笋鱼	0.0067	0.402	0.0013	0.33
	带鱼	0.0067	0.402	0.007	1.75
	大黄花鱼	0.0067	0.402	0.007	1.75
	小黄花鱼	0.0067	0.402	0.016	3.99
	凤尾鱼	0.0067	0.402	0.010	2.49
	水产品	0.0067	0.402	0.009	2.24
Pb	白鲳鱼	0.025	1.50	0.0025	0.17

续表 6

元素	种类	$PTWI^1$ /(mg/kg)	$PTWI^2$ (成人)/mg	AWI 每周实际摄入量/mg	重金属含量占 $PTWI$ 百分比/%
Hg	金鲳鱼	0.025	1.50	0.000	0.00
	午笋鱼	0.025	1.50	0.0009	0.06
	带鱼	0.025	1.50	0.026	1.74
	大黄花鱼	0.025	1.50	0.007	0.47
	小黄花鱼	0.025	1.50	0.000	0.00
	凤尾鱼	0.025	1.50	0.005	0.34
	水产品	0.025	1.50	0.006	0.40
	白鲳鱼	0.005	0.300	0.010	3.34
	金鲳鱼	0.005	0.300	0.0013	0.44
	午笋鱼	0.005	0.300	0.009	3.0
	带鱼	0.005	0.300	0.0005	0.17
	大黄花鱼	0.005	0.300	0.0005	0.17
	小黄花鱼	0.005	0.300	0.007	2.34
	凤尾鱼	0.005	0.300	0.010	3.34
	水产品	0.005	0.300	0.0055	1.84
Zn	白鲳鱼	7	420	4.44	1.06
	金鲳鱼	7	420	2.27	0.55
	午笋鱼	7	420	1.50	0.16
	带鱼	7	420	8.91	2.13
	大黄花鱼	7	420	8.75	2.09
	小黄花鱼	7	420	1.52	0.37
	凤尾鱼	7	420	2.82	0.68
	水产品	7	420	4.23	1.08
Cu	白鲳鱼	3.5	210	0.068	0.033
	金鲳鱼	3.5	210	0.039	0.019
	午笋鱼	3.5	210	0.051	0.025
	带鱼	3.5	210	0.039	0.019
	大黄花鱼	3.5	210	0.116	0.056
	小黄花鱼	3.5	210	0.135	0.065
	凤尾鱼	3.5	210	0.099	0.048
	水产品	3.5	210	0.079	0.038

注: $PTWI^2$ 为成年人体平均质量(取 60 kg)与 $PTWI^1$ 值相乘结果。

4 结论与讨论

同种重金属在海鱼不同组织中的分布不同。7 种海产品的鱼鳃和内脏重金属含量相对较高,肌肉中重金属含量相对较低;除了白鲳鱼、大黄花鱼,其他鱼类不同组织重金属含量趋势为:鱼鳃、内脏>鱼皮>肌肉;鱼鳃中 Zn 含量最高、是主要的富集部位,Cu、Cd、Cr 主要富集在内脏中。不同重金属在同种鱼同一组织的积累分布规律是所有海鱼中重金属含量最多的是 Zn,其次是 Cu;不同鱼种的相同组织器官中的重金属含量有差异性,肌肉中所有重金属含量均未超过食品安全限量标准值,不同种类的海鱼污染程度不同。白鲳鱼、金鲳鱼、午笋鱼、大黄花鱼、小黄花鱼的肌肉组织均处于未污染级别,只有带鱼的肌肉处于微污染级别,7 种海鱼肌肉组织中,Zn、Hg、Cr 贡献值较大,

说明肌肉中主要污染因子是 Zn、Hg、Cr 元素。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 0.00%~6.72%,均低于 10%。

以上结论表明广东成人每周通过水产品摄入重金属的量是安全的,未出现明显的污染安全问题。建议广东省内居民在烹调、食用海鱼时去掉其鱼鳃和内脏,在日常选择水产品时,避免长期食用同种水产品。同时,当地环保部门继续加强对珠江口海域的重金属监测工作,以防出现污染。

参考文献

[1] 刘芳芳,杨少玲,林婉玲,等. 7 种海水鱼背部肌肉营养成分分析及矿物元素分布与健康评价[J]. 水产学报, 2019, 43(11): 2413–2423.
Liu FF, Yang SL, Lin WL, *et al.* Analysis of nutritional components and mineral element distribution and health evaluation of back muscle of seven kinds of marine fish [J]. J Fish China, 2019, 43(11): 2413–2423.

- [2] Iavicoli I, Carelli G, Stanek EJ, *et al.* Effects of per os lead acetate administration on mouse hepatocyte survival [J]. *Toxicol Lett*, 2002, 159(1/2): 143–149.
- [3] Copat C, Grasso A, Fiore M, *et al.* Trace elements in seafood from the Mediterranean sea: An exposure risk assessment [J]. *Food Chem Toxicol*, 2018, 115: 13–19.
- [4] Ral V, Vajpayee P, Singh SN, *et al.* Effect of chromium accumulation on photosynthetic pigments, oxidative stress defense system, nitrate reduction, proline level and eugenol content of *Ocimum tenuiflorum* L. [J]. *Plant Sci*, 2004, 167(5): 1159–1169.
- [5] 王营, 陈苗苗, 谭婷婷, 等. 海产品中的砷及其代谢机制的研究进展 [J]. *现代食品科技*, 2014, 30(11): 256–265.
Wang Y, Chen MM, Tan TT, *et al.* Research progress on arsenic species in seafood and their metabolic mechanisms [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2014, 30(11): 256–265.
- [6] Demirel S, Tuzen M, Saracoglu S, *et al.* Evaluation of various digestion procedures for trace element contents of some food materials [J]. *J Hazard Mater*, 2008, 152(3): 1020–1026.
- [7] 杨丽华, 方展强, 郑文彪, 等. 广州市市场食用鱼和贝类重金属含量及评价 [J]. *环境科学与技术*, 2002, 25(6): 15–16, 34.
Yang LL, Fang ZQ, Zheng WB, *et al.* Contents and Evaluation of Heavy metals in edible fish and shellfish in a market in Guangzhou [J]. *Environ Sci Technol*, 2002, 25(6): 15–16, 34.
- [8] 梁辉, 刘志婷, 周少君, 等. 广东省居民贝类产品中镉暴露的风险评估 [J]. *中国食品卫生杂志*, 2017, 29(4): 492–495.
Liang H, Liu ZT, Zhou SJ, *et al.* Risk assessment of cadmium exposure in shellfish in Guangdong province [J]. *Chin J Food Hyg*, 2017, 29(4): 492–495.
- [9] 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 SJ, Dai GW, *et al.* Investigation and evaluation of lead and cadmium in aquatic products in Guangdong province from 2010 to 2014 [J]. *Chin J Food Hyg*, 2017, 29(2): 209–212.
- [10] 谭秀慧, 朱晓华, 李萍, 等. 即食海蜇中金属元素含量分析及食用安全性评价 [J]. *食品工业*, 2019, 40(3): 155–158.
Tan XH, Zhu XH, Li P, *et al.* Analysis and safety evaluation of aluminum, chromium, arsenic, cadmium, mercury and lead in instant jellyfish products [J]. *Food Ind*, 2019, 40(3): 155–158.
- [11] GB 2762-2017 食品安全国家标准 食品中污染物限量[S].
GB 2762-2017 National food safety standard-Limit of pollutants in food [S].
- [12] NY 5073-2006 无公害食品 水产品中有毒有害物质限量[S].
NY 5073-2006 Pollution-free food-Limits on toxic and harmful substances in aquatic products [S].
- [13] GB 13106-1991 食品安全国家标准 食品中锌限量卫生标准[S].
GB 13106-1991 National food safety standard-Hygienic standard for limit of zinc in food [S].
- [14] 张家泉, 李琼, 童勇勇, 等. 黄石市磁湖鱼体内重金属的富集及风险评价 [J]. *湖北农业科学*, 2013, 52(11): 2653–2656.
Zhang JQ, Li Q, Tong YY, *et al.* Enrichment of heavy metals in fishes of Cihu lake and pollution assessment [J]. *Hubei Agric Sci*, 2013, 52(11): 2653–2656.
- [15] 杨晨驰, 黄亮亮, 李建华. 东苕溪下游鲫鱼不同组织重金属含量分析及食用安全性评价 [J]. *食品科学*, 2013, 34(19): 317–320.
Yang CC, Huang LL, Li JH. Analysis of heavy metals and safety evaluation of crucian carp (*Carassius auratus*) from the downstream east Tiaoxi river [J]. *Food Sci*, 2013, 34(19): 317–320.
- [16] 王兆群, 肖扬. 洪泽湖鱼体内重金属含量调查 [J]. *环境监控与预警*, 2013, 5(3): 47–50.
Wang ZQ, Xiao Y. Survey of heavy metals in fish bodies of the Hongze lake [J]. *Environ Monit Forewarn*, 2013, 5(3): 47–50.
- [17] 张晓文, 邵柳逸, 连宾. 4 种太湖水产品体内重金属富集特征及食用安全性评价 [J]. *食品科学*, 2018, 39(2): 310–314.
Zhang XW, Shao LY, Lian B. Accumulation characteristics and safety evaluation of heavy metals in four kinds of aquatic products from lake Taihu [J]. *Food Sci*, 2018, 39(2): 310–314.
- [18] 张震燕, 张美琴, 吴瑛, 等. 重金属 Cd 与 Cu 在克氏原螯虾体内富集与释放规律 [J]. *食品科学*, 2014, 35(17): 250–254.
Zhang ZY, Zhang MQ, Wu Y, *et al.* Biological accumulation and release of Cd and Cu in *Procambarus clarkia* [J]. *Food Sci*, 2014, 35(17): 250–254.
- [19] 简敏菲, 宋玉斌, 倪才英, 等. 鄱阳湖湿地水生生物重金属污染的特征分析 [J]. *江西师范大学学报(自然科学版)*, 2006, 30(5): 504–508.
Jian MF, Song YB, Ni CY, *et al.* Characteristics of heavy metal pollution of aquatic organisms in Poyang lake wetland [J]. *J Jiangxi Norm Univ (Nat Sci Ed)*, 2006, 30(5): 504–508.
- [20] 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 WP, Wang SB, Zhu XP, *et al.* Residues and potential ecological risk assessment of metal in sediments from lower reaches and estuary of Pearl river [J]. *Environ Sci*, 2012, 33(6): 1808–1815.

(责任编辑: 于梦娇)

作者简介



倪明龙, 硕士, 工程师, 主要研究方向为食品加工及质量安全检测。
E-mail: ww1980111@163.com