

佛山市禅城区食用鱼中汞和砷形态分析及食用安全性评价

欧阳静茹*, 邵昭明, 戚慕怡, 曾庆坚, 邓冬云, 贺昆路, 曹嘉慧

(广东省佛山市禅城区疾病预防控制中心, 佛山 528031)

摘要: 目的 测定佛山市禅城区食用鱼中汞和砷含量, 并进行形态分析, 了解其污染状况, 评价食用安全性。**方法** 采用直接测汞仪测定食用鱼中总汞含量; 使用微波消解法进行前处理, 用电感耦合等离子体质谱法(inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)测定食用鱼中的总砷含量; 并用高效液相色谱-电感耦合等离子体质谱联用法(high performance liquid chromatography-inductively coupled plasma mass spectrometry, HPLC-ICP-MS)对汞和砷的形态进行分析, 根据 GB 2762-2017《食品安全国家标准 食品中污染物限量》, 采用单因子污染指数法和每周可耐受摄入量对汞和砷进行食用安全性评价。**结果** 禅城区常见食用鱼中汞主要以甲基汞形式存在, 砷主要以砷甜菜碱和少量二甲基砷酸形式存在。所测样本中甲基汞平均含量值为 0.026 mg/kg, 低于国家标准限量值 0.5 mg/kg; 无机砷含量低于检出限 0.02 mg/kg, 砷甜菜碱含量为 0.477 mg/kg。六齿金线鱼(地方名: 红杉鱼)中甲基汞含量均值为 0.104 mg/kg, 属于轻度污染。**结论** 佛山市禅城区食用鱼中汞和砷含量符合食品安全国家标准, 但存在一定食用安全风险, 尤其是六齿金线鱼中甲基汞属于轻度污染, 食用风险高。

关键词: 食用鱼; 汞; 砷; 形态分析; 安全性评价

Species analysis and safety evaluation of mercury and arsenic in edible fish in Chancheng district in Foshan city

OUYANG Jing-Ru*, SHAO Zhao-Ming, QI Mu-Yi, ZENG Qing-Jian, DENG Dong-Yun,
HE Kun-Lu, CAO Jia-Hui

(Chancheng District Center for Disease Control and Prevention, Foshan 528031, China)

ABSTRACT: Objective To determine the content of mercury and arsenic in edible fish in Chancheng district of Foshan city, and analyze the forms of mercury and arsenic in order to understand the pollution status and evaluate the food safety. **Methods** The content of total mercury in edible fish was determined by direct mercury analyzer; the content of arsenic in edible fish was determined by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) after the pretreatment by microwave digestion. The speciation of mercury and arsenic was analyzed by high performance liquid chromatography inductively coupled plasma mass spectrometry (HPLC-ICP-MS), according to GB 2762-2017 *National food safety standard-Limits of pollutants in food*, the food safety of mercury and arsenic was evaluated by

基金项目: 佛山市卫生和计生局医学科研课题项目(20190165)

Fund: Supported by the Medical Research Project Foundation of Foshan Health and Family Planning Bureau (20190165)

*通讯作者: 欧阳静茹, 主管技师, 主要研究方向为食品安全检测。E-mail: jingru211@163.com

*Corresponding author: OUYANG Jing-Ru, Technician, Center of Chancheng District, Foshan for Disease Control and Prevention, No.70, Guxin Road, Chancheng District, Foshan 528031, China. E-mail: jingru211@163.com

single factor pollution index method and weekly tolerable intake. **Results** Mercury in common edible fish in Chancheng district mainly existed in the form of methylmercury, and arsenic was mainly in the form of arsenic betaine AsB and a small amount of dimethylarsenic acid DMA. The average content of methylmercury in the measured samples was 0.026 mg/kg, lower than the national standard limit 0.5 mg/kg; the inorganic arsenic content was lower than the detection limit 0.02 mg/kg, and the content of arsenic betaine (AsB) was 0.477 mg/kg. The average content of methylmercury in the six-toothed golden threadfish (local name: red cedar) was 0.104 mg/kg, belonging to light pollution. **Conclusion** The content of mercury and arsenic in edible fish in Chancheng district of Foshan city meets national food safety standards, but there are certain food safety risks, especially methylmercury in six-toothed golden, which is slightly polluted and has high edible risk

KEY WORDS: edible fish; mercury; arsenic; species analysis; safety evaluation

1 引言

鱼能够吸收并富集广泛存在于自然界中的汞、砷化合物,是人体内这 2 种元素的重要来源。汞、砷化合物的毒性与其存在的形态密切相关,对于砷化合物来说,无机砷的毒性远大于有机砷,且砷与有机基团结合越多,毒性越小;而对于汞化合物来说,有机汞的毒性远大于无机汞,烷基汞的毒性远比芳基汞毒性大^[1,2],因此对食用鱼中汞和砷的污染情况进行评价是很有必要的。GB 2762-2017《食品安全国家标准 食品中污染物限量》^[3]标准规定,鱼类及其制品中,以甲基汞和无机砷进行卫生学评价。在测定汞、砷含量及评价食用安全性时,进行形态分析比测定总量更具科学性。

对于食用鱼体内汞和砷食用安全的研究,往往集中对总量进行研究,未见对形态单独分析评价^[4,5]。本研究通过测定佛山市禅城区市售食用鱼中汞和砷含量,并进行形态分析,从而有效地判定其自然代谢和污染程度,准确评价对人体摄入的风险,科学评价食用安全性,从而引导居民合理选用鱼类品种,对保障居民身体健康具有重要的现实意义,并有助于推进佛山创建国家食品安全示范城市。

2 材料与方 法

2.1 样品采集与制备

2019 年 9 月选择禅城区所辖 4 个镇街内具有代表性且人流量大的超市、农贸市场和餐饮饭店随机购买生鲜鱼类产品,尽量覆盖禅城区常见食用鱼种类,海水鱼类(7 种 84 份)、淡水鱼类(7 种 84 份)共计 14 种 168 份。取肌肉组织匀浆后装入塑料封口袋中,-20℃保存。

采用 10%平行样测定,采用标准物质、砷用加标回收进行质量控制。

2.2 仪器与试剂

MAS6 微波消解仪(美国 CEM 公司);DMA80 直接测汞仪(意大利 Milestone 公司);1260-7800 高效液相-电感耦

合等离子体质谱联用仪(美国安捷伦公司);BT125D 万分之一电子天平(德国赛多利斯公司)。

65%硝酸(分析纯)、甲醇(色谱纯)(美国默克公司);过氧化氢(优级纯,广州化学试剂厂);乙酸铵(色谱纯,加拿大 Fluka 试剂公司);L-半胱氨酸(99%)、碳酸铵(分析纯,上海麦克林生化科技有限公司);汞、砷(GBW08611, 1000 μg/mL)、甲基汞(GBW08675, 65.2 μg/g±2.5 μg/g)、乙基汞(GBW(E)081524, 70.6 μg/g±2.5 μg/g)、砷甜菜碱(GBW08670, 0.518 μmol/g)、二甲基砷(GBW08669, 0.706 μmol/g)、一甲基砷(GBW08668, 0.335 μmol/g)、亚砷酸根(GBW08666, 1.011 μmol/g)、砷酸根(GBW08667, 0.233 μmol/g)(中国计量科学研究院)。

标准参考物质:鱼肉中总汞与甲基汞成分分析标准物质[GBW10029, 总汞 0.85 mg/L、甲基汞(以汞计) 0.84 mg/L](中国计量科学研究院)。

2.3 实验方法

2.3.1 直接测汞仪测总汞

称取 0.2000 g 试样直接上机测定。仪器条件:干燥温度 200℃、时间 60 s;分解温度 650℃、时间 120 s,等待时间 45 s;齐化加热时间 12 s;记录时间 30 s;载气流量:200 mL/min。

2.3.2 微波消解-电感耦合等离子体质谱联用仪测总砷

样品前处理:称取 1 g 试样于聚四氟乙烯消解罐中,加入 6 mL 硝酸,冷消化 1~2 h,加入 1 mL 过氧化氢,按表 1 微波消解程序进行消解,消解完全后,用超纯水将消化液定容至 25 mL,混匀备用,同时做空白实验。

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 | 10 | 10 |
| 2 | 160 | 8 | 10 |
| 3 | 190 | 6 | 25 |

2.3.3 汞形态分析高效液相色谱条件

色谱柱: C₁₈ (4.6 mm×150 mm, 4 μm); 流动相: 5%甲醇+0.05 mol/L 乙酸铵+0.1%L-半胱氨酸; 流速: 1.0 mL/min; 进样体积: 10 μL。

2.3.4 砷形态分析高效液相色谱条件

色谱柱: PRP-X100(4 mm×250 mm, 10 μm); 流动相: A 5 mmol/L 碳酸铵, B 100 mmol/L 碳酸铵, 梯度洗脱: 0~3 min 100%A, 3~8.5 min 100%B, 8.5~12 min 100% A; 流速: 1.0 mL/min; 进样体积: 10 μL。

2.3.5 电感耦合等离子体-质谱联用仪条件

RF 功率 1550 W, 检测电压 1065 V, 冷却气 15 L/min, 辅助气 0.8 L/min, 雾化气 1.0 L/min, 雾化室温度 2 °C, 泵速 0.3 r/s。

2.4 数据处理

原始数据采用 MS Office 和 SPSS 21.0 软件进行整理分析。采用独立样本 *T* 检验和单因素方差分析(one-way ANOVA), 并用 LSD 最小显著差异法进行两两之间多重比较分析, 显著水平 $P < 0.05$ 表示差异性显著。

2.5 安全性评价方法与依据

2.5.1 单因子污染指数法^[6]

计算公式如下: $P_i = C_i/S_i$

式中, P_i 为第 i 种重金属的单因子污染指数, C_i 为第 i 种重金属的实测值, mg/kg; S_i 为第 i 种重金属的标准值, mg/kg。

当 $P_i < 0.2$ 为正常背景值水平, $0.2 \leq P_i < 0.6$ 为轻污染水平, $0.6 \leq P_i < 1$ 为中污染水平, $P_i \geq 1$ 为重污染水平。

2.5.2 每周可耐受摄入量

每周可耐受摄入量是国际化学安全规划署提出的一项针对有害物质通过食物的摄入而损害人体健康的污染物质评价标准, 是根据居民的每周鱼类消费量计算成人每周的实际重金属摄入量(acceptable weekly intake, AWI),

计算公式如下: $AWI = C_i \times WC$

式中, AWI 是成人每周的重金属实际摄入量, mg; C_i 是鱼体重金属 i 含量实测值的平均值, mg/kg; WC 是居民每周鱼类消费量, kg。

成人每周的可耐受摄入量的计算公式为: $PTWI$

$= Ptwi \times \text{成人体重}$

式中, $PTWI$ 代表成人每周的可耐受摄入量, mg; $Ptwi$ 代表污染物每周可耐受摄入量, mg/kg。

利用 AWI 与 $PTWI$ 的比例百分含量数值来对不同样品的食用安全性进行评价, 数值越高, 表示该种鱼类的食用安全性越低, 风险越高。

3 结果与分析

3.1 质控结果

按照标准配制汞、砷及形态元素的标准系列, 根据各仪器的参考条件进行测定, 各元素的标准曲线均具有良好的线性相关性, 相关系数 $r^2 \geq 0.999$, 采样过程的过程空白及试剂空白中目标元素的含量均远低于方法检出限和仪器检出限。样品平行测定标准偏差小于 9%。

对鱼肉中总汞与甲基汞成分分析标准物质(GBW10029)进行测定, 检测结果: 总汞为 0.838 mg/kg, 甲基汞为 0.817 mg/kg, 均满足要求; 对砷及其形态元素加标回收率在 90%~110%, 表明样品检测数据的准确度、精密度和回收率均满足要求, 检测结果是真实可靠的。

3.2 食用鱼中汞和砷含量水平及形态分析

禅城区常见食用鱼中汞、砷及形态含量范围、平均值、检出率和超标率见表 2。参照 GB 5009.11-2014《食品安全国家标准 食品中总砷及无机砷的测定》^[7]、GB 5009.17-2014《食品安全国家标准 食品中总汞及有机汞的测定》^[8], 鱼肉中总汞、甲基汞、总砷、无机砷检出限分别为 0.003、0.008、0.003、0.02 mg/kg。由表 2 可知总汞和总砷的检出率 >98%, 其中甲基汞、砷甜菜碱检出率分别是 82.1% 和 79.8%, 该数据与水产品中砷形态分布相关研究^[9]吻合。甲基汞平均含量为 0.026 mg/kg, 低于限量标准 0.5 mg/kg; 无机砷平均含量低于国标检出限 0.02 mg/kg, 表明禅城区市售鱼中汞、砷含量在允许范围内。鱼肉中汞主要以甲基汞形式存在, 砷主要以砷甜菜碱和少量二甲砷形式存在。虽然食用鱼中总砷含量高, 但主要存在形式砷甜菜碱被认为是无毒, 在人体无明显的靶器官, 并且可随人体代谢排出体外^[10]。

表 2 食用鱼中汞和砷含量、检出率和超标率

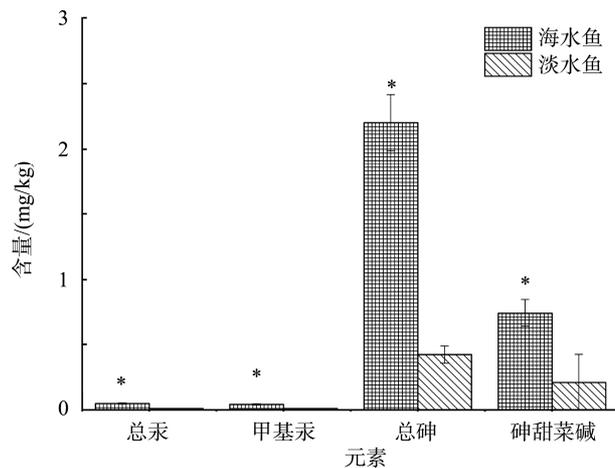
Table 2 Mercury and arsenic content, detection rate and over-standard rate in edible fish

| 元素 | 含量范围/(mg/kg) | 平均值/(mg/kg) | 检出率/% | 超标率/% |
|------|--------------|-------------|-------|-------|
| 总汞 | nd~0.307 | 0.030 | 99.4 | 0 |
| 甲基汞 | nd~0.320 | 0.026 | 82.1 | 0 |
| 总砷 | nd~9.643 | 1.312 | 98.8 | 0 |
| 无机砷 | nd | nd | nd | 0 |
| 砷甜菜碱 | nd~4.428 | 1.077 | 79.8 | 0 |
| 二甲基砷 | nd~0.080 | 0.007 | 10.1 | 0 |

注: nd 表示未检出, 下文同。

3.3 海、淡水鱼中汞、砷含量比较

经过 T 检验, $P < 0.05$ 表明海水鱼和淡水鱼中汞、砷含量存在显著差异, 具有统计学意义。海水鱼中汞、砷含量明显高于淡水鱼, 见图 1, 与国内水产品重金属含量分布规律一致^[11]。本地区销售的海水鱼主要来自于近海人工养殖或捕捞, 但由于近岸海底沉积物和水体受大量工农业废水和生活污水排入、船舶排污及碰撞漏油、海上石油开采溢油等影响, 在鱼体内产生明显的有机污染和重金属富集效应; 且海水鱼大多属于肉食性鱼, 重金属的生物富集效应明显高于淡水鱼。



注: *表示与淡水鱼相比差异显著($P < 0.05$)。

图 1 海水鱼和淡水鱼中汞、砷含量均值比较($n=5$)

Fig.1 Comparison of mean mercury and arsenic content in marine fish and freshwater fish($n=5$)

3.4 淡水鱼中汞、砷含量分析

本研究对 7 种常见淡水鱼中总砷、总汞、甲基汞、砷甜菜碱的含量进行测定, 含量比较见图 2。草鱼的汞、砷含量最低(总汞含量低于检出限 0.003 mg/kg, 总砷含量均值为 0.007 mg/kg), 淡水鲈鱼汞、砷含量最高(总汞含量均值为 0.026 mg/kg, 总砷含量均值为 1.020 mg/kg)。总汞平均含量顺序为: 淡水鲈鱼>鲤鱼>生鱼>黄骨鱼>鲫鱼>罗非鱼>草鱼; 砷含量顺序为淡水鲈鱼>黄骨鱼>生鱼>罗非鱼>鲤鱼>鲫鱼>草鱼, 与珠江三角洲养殖鱼类重金属的残留情况一致^[12], 含量最低的为草鱼。鲈鱼属于冷温性海淡水洄游鱼类, 沿海产卵繁殖, 在淡水中生长肥育, 栖息于清澈流水的底层, 捕食虾类和小鱼, 其体内重金属含量高于其他淡水生长鱼类。一般而言, 鱼体内的重金属富集从高到低依次为: 肉食性鱼类>杂食性鱼类>植物食性鱼类, 草鱼是典型的草食性鱼类, 所以生物富集效应最低, 重金属含量也最低。

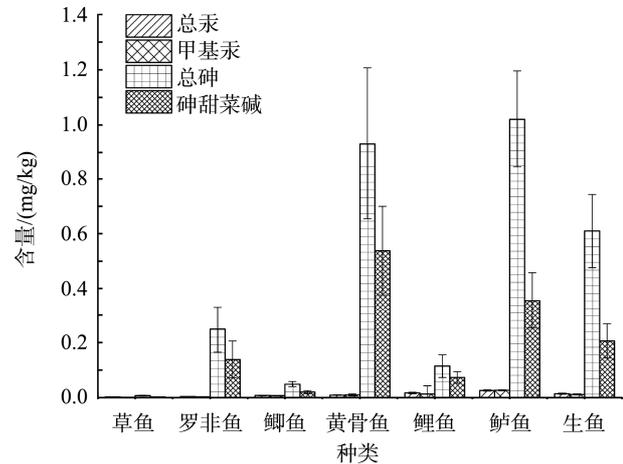


图 2 淡水鱼中汞、砷含量比较($n=5$)

Fig.2 Comparison of mercury and arsenic content in freshwater fish($n=5$)

3.5 海水鱼中汞、砷含量分析

7 种常见海水鱼中总汞含量顺序为: 六齿金线鱼>秋刀鱼>带鱼>黄花鱼>石斑鱼>仓鱼>三文鱼; 总砷含量顺序为: 六齿金线鱼>秋刀鱼>三文鱼>带鱼>黄花鱼>仓鱼>石斑鱼。总汞和总砷含量六齿金线鱼最高(总汞含量均值为 0.116 mg/kg, 总砷含量均值为 4.682 mg/kg), 三文鱼总汞含量最低(含量均值 0.018 mg/kg), 石斑鱼总砷最低(含量均值为 0.977 mg/kg), 见图 3。

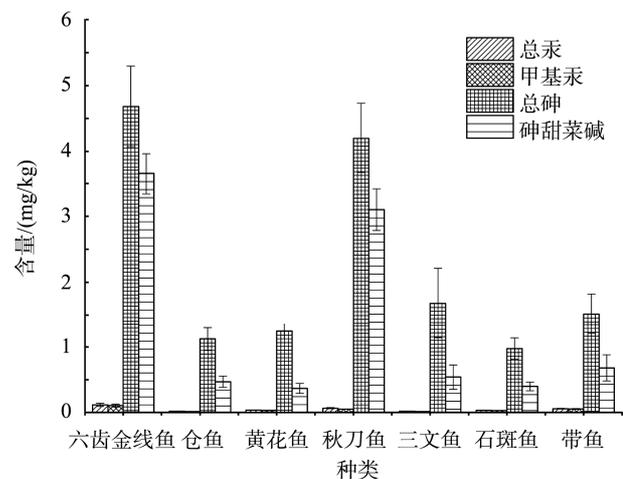


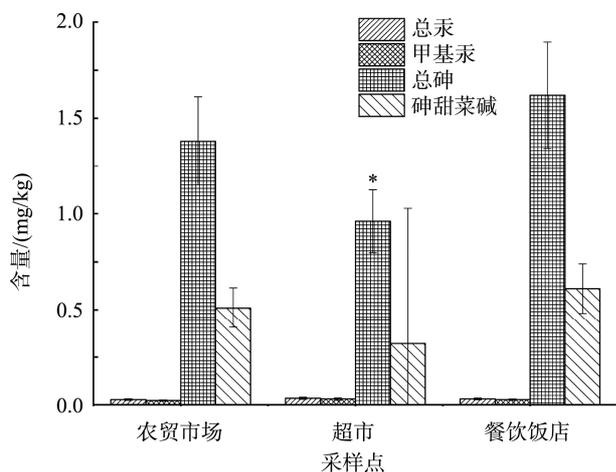
图 3 海水鱼中汞、砷含量比较($n=5$)

Fig.3 Comparison of mercury and arsenic content in marine fish($n=5$)

3.6 采样点分析

3 类采样点经过两两间多重比较分析发现, 四镇街采样点购买的食用鱼之间重金属含量均值未有显著性差异, 但超市购买的食用鱼中砷含量均值明显低于饭店购买的, 见图 4。研究证明鱼类肌肉组织中汞的生物富集来自于生存环境中底

质沉积物, 砷来自于生存的水体环境, 对鱼体内重金属含量作用明显^[13-17], 由此可以推测超市与饭店喂养食用鱼的水体存在一定的重金属含量差异, 需进一步的实验研究确定。



注: *表示与餐饮饭店相比差异显著(P<0.05)。

图 4 采样点比较(n=5)

Fig.4 Comparison of sampling points (n=5)

3.7 安全性评价

单因子污染指数法评价食用鱼中汞、砷含量均为正常背景值水平, 但对六齿金线鱼单独计算 P 为 0.208, 甲基汞含量为 0.104 mg/kg, 为轻度污染水平, 见表 3。

根据问卷调查计算, 禅城区居民每周鱼类摄入量为 0.2 kg, 同广东省居民鱼类消费量水平持平^[18,19]。成人重

量按 60 kg 计算, 得到成人实际每周从食用鱼中摄入的总汞和总砷食用安全性评价值分别为 14.3%和 29.1%, 见表 4, 均大于 10%, 存在一定食用风险。其中砷的主要存在形式砷甜菜碱含量为 0.477 mg/kg, 占比量为 82.1%, 甲基汞占总汞的 86.7%。总汞和总砷含量最大的六齿金线鱼食用安全评价值分别为 50.0%和 104.0%。由于食用鱼中砷的存在形式主要是无毒的砷甜菜碱, 无机砷含量低于检出限 0.02 mg/kg, 所以食用风险主要来自于汞, 特别关注六齿金线鱼中甲基汞食用风险高。

4 结 论

本研究对佛山市禅城区食用鱼中汞和砷含量进行测定并进行形态分析, 对其食用安全性进行科学评价。佛山市禅城区常见食用鱼中汞和砷均有检出, 其中汞主要以甲基汞形式存在, 砷主要以砷甜菜碱和少量二甲基砷形式存在。汞和砷含量海水鱼明显高于淡水鱼, 淡水鱼最高为鲈鱼, 最低为草鱼; 砷、汞含量最高的海水鱼为六齿金线鱼, 汞含量最低的为三文鱼、砷含量最低的为石斑鱼。食用鱼中甲基汞含量均值 0.026 mg/kg 低于限量标准(0.5 mg/kg), 无机砷含量低于检出限(0.02 mg/kg), 禅城区市售鱼中汞和砷含量在标准允许范围内。食用安全性评价食用鱼中汞和砷为正常背景值水平, 但六齿金线鱼为甲基汞轻度污染。总体来看, 禅城区食用鱼中汞和砷含量符合国家食品安全标准, 食用较为安全, 但海水鱼需特别关注六齿金线鱼, 甲基汞食用风险高。居民在长期食用时需注意甲基汞的摄入, 尤其儿童和孕妇需慎重选择食用。

表 3 单因子污染指数评价
Table 3 Single-factor pollution index evaluation

| 品种 | 元素 | C _i | S _i | P _i | 污染评价 |
|----------------|-----|----------------|----------------|----------------|------|
| 海水鱼 (六齿金线鱼) | 甲基汞 | 0.042 | 0.5 | 0.084 | 正常 |
| | | 0.104 | 0.5 | 0.208 | 轻度污染 |
| | 无机砷 | nd | 0.1 | — | 正常 |
| 淡水鱼 | 甲基汞 | 0.011 | 0.5 | 0.022 | 正常 |
| | 无机砷 | nd | 0.1 | — | 正常 |

表 4 禅城区食用鱼中汞和砷的食用安全性评价
Table 4 Food safety evaluation of mercury and arsenic in edible fish in Chancheng district

| 元素 | P _{twi} (mg/kg) | PTWI/mg | C _i 金属含量/(mg/kg) | AWI每周摄入量/mg | AWI占PTWI分数/% | C _{max} 含量(六齿金线鱼)/(mg/kg) | AWI _{max} 每周摄入量/mg | AWI _{max} 占PTWI分数/% |
|-----|--------------------------|---------|-----------------------------|-------------|--------------|------------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| 总汞 | 0.0007 | 0.042 | 0.030 | 0.006 | 14.3 | 0.116 | 0.023 | 54.8 |
| 甲基汞 | | | 0.026 | 0.005 | 11.9 | 0.104 | 0.021 | 50.0 |
| 总砷 | 0.015 | 0.9 | 1.312 | 0.262 | 29.1 | 4.682 | 0.936 | 104.0 |

参考文献

- [1] 吕超. 水产品中砷、汞形态分析研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2010.
Lv C. Analysis of arsenic and mercury speciation in aquatic products [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2010.
- [2] 刘香丽, 汪倩, 宋超, 等. 不同砷形态在水产品中的毒理及转化研究进展[J]. 农学学报, 2019, 9(12): 33–38.
Liu XL, Wang Q, Song C, *et al.* Research progress on toxicology and conversion of different arsenic forms in aquatic products [J]. Acta Agro Sin, 2019, 9(12): 33–38.
- [3] 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-Limits of pollutants in food [S].
- [4] 张海燕, 刘宇, 王雷, 等. 市售鲤鱼和罗非鱼中重金属元素对人体健康的潜在风险评价[J]. 河北渔业, 2017, (9): 46–50.
Zhang HY, Liu Y, Wang L, *et al.* Potential risk assessment of heavy metal elements in commercially available carp and tilapia on human health [J]. Hebei Fish, 2017, (9): 46–50.
- [5] 黄芮, 陈子慧, 王萍, 等. 2015 年广东省成年居民水产品类食物摄入状况分析[J]. 华南预防医学, 2019, 45(3): 283–286.
Huang R, Chen ZH, Wang P, *et al.* Analysis of aquatic food intake status of adult residents in Guangdong province in 2015 [J]. South China Prev Med, 2019, 45(3): 283–286.
- [6] 刘庄, 林嘉立, 潘巧敏, 等. 食用鱼类食用安全性评价方法综述[J]. 广东化工, 2019, 46(11): 122–123.
Liu Z, Lin JL, Pan QM, *et al.* A review of edible fish food safety evaluation methods [J]. Guangdong Chem Ind, 2019, 46(11): 122–123.
- [7] GB 5009.11-2014 食品安全国家标准 食品中总砷及无机砷的测定[S].
GB 5009.11-2014 National food safety standard-Determination of total arsenic and inorganic arsenic in food [S].
- [8] GB 5009.17-2014 食品安全国家标准 食品中总汞及有机汞的测定[S].
GB 5009.17-2014 National food safety standard-Determination of total mercury and organic mercury in food [S].
- [9] 汤施展, 陈中祥, 黄晓丽, 等. 水产品中砷形态分析研究进展[J]. 水产学杂志, 2019, 32(2): 55–60.
Tang SZ, Chen ZX, Huang XL, *et al.* Research progress of arsenic speciation analysis in aquatic products [J]. Chin J Fish, 2019, 32(2): 55–60.
- [10] 颜惠芬, 符郁馥, 林志藩, 等. 水产品中砷的形态分布研究[J]. 现代食品, 2019, (4): 180–185.
Yan HF, Fu YF, Lin ZF, *et al.* Study on the distribution of arsenic in aquatic products [J]. Mod Food, 2019, (4): 180–185.
- [11] 何桂, 尚晴晴, 云慧敏, 等. 水产品中形态汞的研究进展[J]. 云南科技管理, 2018, 31(2): 50–52.
He G, Shang QQ, Yun HM *et al.* Research progress of mercury in aquatic products [J]. Yunnan Sci Technol Manag, 2018, 31(2): 50–52.
- [12] 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 WP, Zhu XP, Ma LS, *et al.* Residues and risk assessment of heavy metals in four freshwater farmed fish species in the Pearl River delta [J]. J Ecotoxicol, 2017, 12(5): 294–303.
- [13] Khallaf EA, Authman MMN, Alne NEAA. Contamination and ecological hazard assessment of heavy metals in freshwater sediments and *Oreochromis niloticus* (Linnaeus, 1758) fish muscles in a Nile River canal in Egypt [J]. Environ Sci Pollut Res, 2018, 25(14): 13796–13812.
- [14] Yun RJ, Chiu WC, Chih FC, *et al.* Assessment of heavy metals in aquaculture fishes collected from southwest coast of Taiwan and human consumption risk [J]. Int Biodeter Biodegr, 2017, (124): 314–325.
- [15] 万慧珊, 程波, 宋晓红, 等. 循环水养殖欧洲鲈鱼重金属污染状况与富集分布特征[J]. 渔业科学进展, 2017, 38(5): 83–91.
Wan HS, Cheng B, Song XH, *et al.* Heavy metal pollution status and enrichment distribution characteristics of European seabass (*Dicentrarchus labrax*) in circulating water aquaculture [J]. Adv Fish Sci, 2017, 38(5): 83–91.
- [16] 施沁璇, 孙博泽, 王俊, 等. 钱塘江流域鱼肉中重金属含量特征及食用安全性评价[J]. 上海海洋大学学报, 2017, 26(4): 536–545.
Shi QX, Sun BY, Wang J, *et al.* Characteristics of heavy metal content in fish meat and evaluation of food safety in Qiantang River basin [J]. J Shanghai Ocean Univ, 2017, 26(4): 536–545.
- [17] 高雪飞, 吴胜春, 尤琼智, 等. 海洋养殖鱼类体内汞污染及其在不同器官中的生物富集特征[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(6): 1078–1086.
Gao XF, Wu SC, You QZ, *et al.* Mercury pollution in marine fish and its bioaccumulation characteristics in different organs [J]. J Agric Environ Sci, 2017, 36(6): 1078–1086.
- [18] 戴光伟, 梁辉, 周少君, 等. 广东省食用水产品中镉膳食暴露风险评估[J]. 华南预防医学, 2016, 42(3): 223–226.
Dai GW, Liang H, Zhou SJ *et al.* Risk assessment of dietary exposure to cadmium in edible aquatic products in Guangdong province [J]. South China J Prev Med, 2016, 42(3): 223–226.
- [19] 张明月, 商博东, 段梦茹, 等. 天津地区水产品重金属污染状况调查[J]. 环境与健康杂志, 2015, 32(6): 538–539.
Zhang MY, Shang BD, Duan MR, *et al.* Investigation of heavy metal pollution in aquatic products in Tianjin [J]. J Environ Health, 2015, 32(6): 538–539.

(责任编辑: 李磅礴)

作者简介

欧阳静茹, 主管技师, 主要研究方向为食品安全检测。

E-mail: jingru211@163.com