

稻田养殖克氏原螯虾中甲基汞的污染特征与食用安全风险评估

覃东立^{1,2*}, 黄晓丽¹, 高磊¹, 王鹏¹, 陈中祥¹, 郝其睿¹, 白淑艳¹,
杜宁宁¹, 汤施展¹

(1. 中国水产科学研究院黑龙江水产研究所, 哈尔滨 150070;

2. 农业农村部水产品质量安全控制重点实验室, 北京 100141)

摘要: **目的** 探讨我国主产区的稻田养殖克氏原螯虾(*Procambarus clarkii*)甲基汞(methylmercury, MeHg)累积情况与食用安全风险。**方法** 利用高效液相色谱-原子荧光光谱法(high performance liquid chromatography-atomic fluorescence spectrometry, HPLC-AFS)分析了湖北、湖南和安徽3省9个地市生产的127份稻田养殖克氏原螯虾肌肉样品的MeHg含量。采用单因子污染指数(single-element pollution indices, Pi)和每周可耐受摄入量(provisional tolerable weekly intake, PTWI)、目标危害商值(target hazard quotient, THQ)法分别评价了其污染程度和食用安全性。**结果** MeHg的检出率达93.7%, 含量范围为0~0.313 mg/kg, 所有样品的MeHg含量均未超出国家标准限量值; 不同地区稻田养殖克氏原螯虾的MeHg污染程度排序为: 湖南>安徽>湖北。膳食暴露评估结果表明成人每周摄入量(estimated weekly intakes, EWI)低于联合国粮农组织和世界卫生组织下的联合专家委员会(Joint Food and Agriculture Organization/World Health Organization Expert Committee on Food Additives, JECFA)推荐的食物添加剂的PTWI。**结论** 所有稻田养殖克氏原螯虾样品的THQ均小于1, 介于0.044~0.328之间, 表明摄入这些地区稻田养殖克氏原螯虾的MeHg暴露风险较低。

关键词: 克氏原螯虾; 甲基汞; 稻田养殖; 食用安全风险评估

Methylmercury pollution characteristics of *Procambarus clarkia* cultured in ricefield and its food safety risk assessment

QIN Dong-Li^{1,2*}, HUANG Xiao-Li¹, GAO Lei¹, WANG Peng¹, CHEN Zhong-Xiang¹,
HAO Qi-Rui¹, BAI Shu-Yan¹, DU Ning-Ning¹, TANG Shi-Zhan¹

(1. Heilongjiang River Fishery Research Institute Chinese Academy of Fishery Sciences, Harbin 150070, China;

2. Key Laboratory of Control of Quality and Safety for Aquatic Products, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100141, China)

ABSTRACT: Objective To explore the accumulation of methylmercury (MeHg) and food safety risk of *Procambarus clarkii* cultured in ricefield in China's main producing areas. **Methods** The MeHg content of 127 farmed *Procambarus clarkii* from 9 cities in Hubei, Hunan and Anhui Provinces was analyzed by high performance

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFD0900301)

Fund: Supported by the National Key Research and Development Program of China (2020YFD0900301)

*通信作者: 覃东立, 研究员, 主要研究方向为渔业环境及水产品质量安全。E-mail: qdl978@163.com

*Corresponding author: QIN Dong-Li, Professor, Heilongjiang River Fishery Research Institute Chinese Academy of Fishery Sciences, No.232, Hesong Street, Daoli District, Harbin 150070, China. E-mail: qdl978@163.com

liquid chromatography-atomic fluorescence spectrometry (HPLC-AFS). The pollution levels and potential health risks were estimated by single-element pollution indices (Pi), provisional tolerable weekly intake (PTWI) and target hazard quotient (THQ), respectively. **Results** The detection rate of MeHg was 93.7%, the content ranges were 0-0.313 mg/kg, and the MeHg content of all samples did not exceed the national standard limit value; the order of MeHg pollution degree of *Procambarus clarkii* cultured in ricefield from different regions were as follows: Hunan>Anhui>Hubei. Dietary exposure assessment results indicated that the estimated weekly intakes (EWI) of adults were lower than the PTWI of food additives recommended by the Joint Food and Agriculture Organization/World Health Organization Expert Committee on Food Additives (JECFA). **Conclusion** THQ values of all samples of *Procambarus clarkii* cultured in ricefield are less than 1, ranging from 0.044 to 0.328, indicating that the exposure risk of MeHg of *Procambarus clarkii* cultured in ricefield in these areas is low.

KEY WORDS: *Procambarus clarkii*; methylmercury; ricefield culture; food safety risk assessment

0 引言

汞(mercury, Hg)是重金属元素之一,具有长程跨界污染的属性,被联合国环境规划署列为全球性污染物^[1-2]。Hg在水生生物中有很高的富集率^[3],鱼虾等水产品被认为是人类摄入Hg的主要来源^[4-5]。以往研究表明,水产品中仅含有极少量无机Hg,75%以上的Hg是以甲基汞(methylmercury, MeHg)形式存在,而MeHg在所有Hg形态中毒性最大^[6-8]。GB 2762—2017《食品安全国家标准 食品中污染物限量》标准已将水产品中MeHg含量作为衡量其质量安全的重要指标。因此,水生生物体内MeHg的污染水平受到研究者的广泛关注^[9-10]。

克氏原螯虾(*Procambarus clarkii*),俗称淡水小龙虾,其肉质肥嫩、肉味鲜美,富含人体必需的氨基酸,是我国最重要的淡水虾类之一^[11-12]。作为广受欢迎的淡水养殖产品,克氏原螯虾的食用安全性受到消费者密切关注。在中国,克氏原螯虾有稻虾综合种养、池塘主养、莲田套养、蟹塘混养和大水面人工增养殖等养殖模式^[13]。其中,稻田养殖占比最大,2020年我国稻田养殖克氏原螯虾养殖面积为1892.03万亩,养殖产量为206.23万t,占克氏原螯虾养殖总面积和总产量的86%以上^[14]。目前针对克氏原螯虾中Hg与MeHg的含量分析已有相关研究报道^[15-16],但专门针对稻田养殖克氏原螯虾中MeHg含量分析及食用安全性评价等方面的研究报道较少^[17]。

本研究以全国主要稻田养殖区(湖北、湖南和安徽3省)的克氏原螯虾为研究对象,应用高效液相色谱-原子荧光光谱法(high performance liquid chromatography-atomic fluorescence spectrometry, HPLC-AFS)测定了采集样品可食部分中MeHg的含量,利用单因子污染指数法(single-element pollution indices, Pi)分析其污染水平,并对克氏原螯虾产品中MeHg膳食暴露量及食用安全性进行研究,可为评估MeHg污染状况和稻田养殖克氏原螯虾的质

量安全提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

稻虾综合种养模式主要分布于我国长江中下游地区,其中湖北、湖南、安徽、江苏、江西5省产量占稻田养殖克氏原螯虾总产量的97.23%^[18]。本研究采集了湖北、湖南和安徽3省的稻田养殖克氏原螯虾。根据《2021中国渔业统计年鉴》^[19],以上3省克氏原螯虾产量占全国克氏原螯虾总产量的73.14%。在湖北省采集样品57份,其中荆州市34份、潜江市23份;在湖南省采集样品40份,其中长沙市10份、益阳市15份、岳阳市15份;安徽省采集样品30份,其中滁州市6份、合肥市12份、六安市7份、安庆市5份。采样时间为2020年5月份。样品从各地养殖场采取,每个养殖场采集1~2份样品,每份样品取3kg左右,样品个体平均体重20~50g。采集的样品现场用剪刀等工具逐尾去除虾体外壳和内脏部分,取出肌肉,装入聚四氟乙烯样品袋中,将样品袋放入加有冰块的保温箱中带回实验室,匀浆,样品-20℃贮存,备用。

1.2 仪器与试剂

SA-20原子荧光形态分析仪(北京吉天仪器有限公司);SAP-20液相色谱泵(德国诺尔公司);Practum313-1CN电子分析天平(精度为0.001g,德国赛多利斯公司);T25组织均浆机(德国IKA公司);TGL-16M离心机(湖南湘仪实验室仪器开发有限公司);KQ-250DE超声波清洗器(昆山舒美超声仪器有限公司);UPT-II-100L纯水器(四川优普超纯科技有限公司);0.45 μm滤膜(上海安谱实验科技股份有限公司);Waters Symmetry C₁₈色谱柱(150 mm×4.6 mm, 5 μm)[沃特世科技(上海)有限公司]。

甲醇(CH₃OH, 色谱纯)、过硫酸钾(K₂S₂O₈)、盐酸(HCl, 优级纯)、硼氢化钾(KBH₄)、L-半胱氨酸、乙酸铵(CH₃COONH₄)(分析纯)(国药集团化学试剂有限公司);氢

氧化钠(NaOH)、氢氧化钾(KOH)(分析纯,天津市科密欧化学试剂有限公司);氨水(分析纯,广东西陇科学有限公司);氯化甲基汞标准品(100 $\mu\text{g}/\text{mL}$,中国计量科学研究院);超纯水(电阻率 $\geq 18.2 \text{ M}\Omega\cdot\text{cm}$);氩气纯度 $\geq 99.999\%$ 。

1.3 样品检测

MeHg 的提取与测定参考 GB 5009.17—2014《食品安全国家标准 食品中总汞及有机汞的测定》。前处理条件为称取 1.0 g 样品(精确至 0.001 g),加入 5 mol/L HCl 溶液 5 mL,放置过夜。涡旋 2 min,在 4 $^{\circ}\text{C}$ 、8000 r/min 离心 10 min 后取上清液 2 mL 至 15 mL 离心管中,逐滴加入 6 mol/L NaOH 溶液 1.5 mL,加入 10 g/L L-半胱氨酸溶液定容至 5 mL,经 0.45 μm 滤膜过滤后进行 HPLC-AFS 形态分析。液相色谱条件:Waters Symmetry C₁₈ 色谱柱(150 mm \times 4.6 mm, 5 μm),流动相组成为 5% CH₃OH+0.06 mol/L CH₃COONH₄+0.1% L-半胱氨酸,流速 1.0 mL/min,柱温 30 $^{\circ}\text{C}$,自动进样量 100 μL 。形态分析预处理装置条件:打开紫外灯,泵速设置为 40 r/min,载流 7% HCl,还原剂 0.5% KOH+2.0% KBH₄,氧化剂 5 g/L KOH+1.0 g/L K₂S₂O₈。SA-20 原子荧光形态分析仪条件:总电流 30 mA,负高压 270 V,载气(氩气)流速 400 mL/min,屏蔽气(氩气)流速 500 mL/min。

本方法对标准参考物质 GBW10029 中的甲基汞进行测定,测定结果为(0.835 \pm 0.020) mg/kg,参考值为(0.840 \pm 0.030) mg/kg,测定结果与参考物定值相符。7次测定相对标准偏差为 2.35%。利用本方法测定 3 个加标水平(0.050、0.100、0.500 mg/kg)的平均回收率为 91%~113%,相对标准偏差均小于 8%。本方法的检出限为 0.008 mg/kg,定量限为 0.025 mg/kg。满足国家污染物限量标准 GB 2762—2017 规定的甲基汞限量(0.5 mg/kg)的检测要求。

1.4 污染程度评估

根据 GB 2762—2017,确定克氏原螯虾中 MeHg 的限量为 0.5 mg/kg。根据上述的限量标准,采用单因子污染指数法进行 MeHg 污染程度评估, P_i 按照式(1)计算:

$$P_i = C/S \quad (1)$$

式(1)中, P_i 为污染指数; C 为样品 MeHg 含量; S 为限量标准。当 $P_i < 0.2$ 时表示未受污染; $0.2 \leq P_i \leq 0.6$ 表示轻度污染; $0.6 < P_i < 1.0$ 表示中度污染; $P_i \geq 1.0$ 表示重度污染^[20]。

1.5 膳食暴露评估

参照文献[21]按公式(2)计算居民每周通过消费克氏原螯虾摄入的 MeHg 估计量(estimated weekly intakes, EWI):

$$EWI = IR \times C \times 7 / BW \quad (2)$$

式(2)中,EWI 为人体 MeHg 的估计每周摄入量, $\mu\text{g}/\text{kg}$; IR 为鱼虾类的人均日摄入量(29.6 g/d, 湿重)^[22]; C 为克氏原螯虾中 MeHg 的含量, mg/kg; BW 为成年人平均体重, kg, 按 60 kg 计算。

采用目标危害商值(target hazard quotient, THQ)来评价 MeHg 暴露对人体健康造成的潜在风险^[23]。计算公式见式(3):

$$THQ = EWI / PTWI \quad (3)$$

式(3)中, THQ 为 MeHg 的目标危害商值; 2003 年联合国粮农组织和世界卫生组织下的食品添加剂联合专家委员会(Joint Food and Agriculture Organization/World Health Organization Expert Committee on Food Additives, JECFA)确定人体每周可耐受 MeHg 摄入量(provisional tolerable weekly intake, PTWI)为 1.6 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ^[24]。当 THQ < 1 时,表明风险较低,且该比值越小表明风险越低;当 THQ ≥ 1 时,表明风险较高。

1.6 数据处理

样品测定结果中未检出数据按照 WHO 推荐的方法表示^[25],当食品污染物监测数据小于检出限(limit of detection, LOD)的比例低于 60%时,所有低于 LOD 的结果以 1/2 LOD 计算。采用 Excel 2010 统计软件进行数据初步分析,数据结果用平均值 \pm 标准偏差表示;利用 SPSS Statistics 18.0 软件,对数据进行统计学分析。

2 结果与分析

2.1 不同地区克氏原螯虾中 MeHg 的含量分析

湖北、湖南和安徽 3 省稻田养殖的克氏原螯虾中 MeHg 的检出率达 93.7%,检测结果见表 1。湖北省的克氏原螯虾中 MeHg 的检出率为 89.5%,含量范围为 ND~0.133 mg/kg;湖南省的克氏原螯虾中 MeHg 的检出率为 97.5%,含量范围为 ND~0.313 mg/kg;安徽省的克氏原螯虾中 MeHg 的检出率为 86.7%,含量范围为 ND~0.260 mg/kg。3 省区的稻田养殖克氏原螯虾样品中 MeHg 的含量均低于 0.5 mg/kg,符合 GB 2762—2017 要求。

2.2 不同地区稻田养殖克氏原螯虾中 MeHg 的含量差异

3 个省区克氏原螯虾样品中 MeHg 含量的平均值及各个百分位数的结果排序为:湖南>安徽>湖北(表 1)。采用单因素方差分析 3 个省份稻田养殖克氏原螯虾中 MeHg 的含量数据,结果表明 3 省份间克氏原螯虾中 MeHg 的含量水平均存在显著性差异($P < 0.05$)。湖南省 3 个城市克氏原螯虾中 MeHg 含量排序为:岳阳>长沙>益阳,岳阳市和益阳市的克氏原螯虾中 MeHg 的含量水平存在显著性差异($P < 0.05$),长沙市与这两市之间均不存在显著性差异($P > 0.05$)。湖北省 2 个城市克氏原螯虾中 MeHg 含量排序为:潜江>荆州,且两市 MeHg 的含量水平存在显著性差异($P < 0.05$)。安徽省 4 个地市克氏原螯虾中 MeHg 含量的平均值结果排序为:安庆市 \approx 六安市<合肥市<滁州市。其中,滁州市和另外 3 个地市的克氏原螯虾中 MeHg 的含量水平均存在显著性差异($P < 0.05$),其他两市之间均不存在显著性差异($P > 0.05$)。

表 1 不同地区克氏原螯虾中 MeHg 含量
Table 1 MeHg content in *Procambarus clarkii* from different regions

省份	样品数量(n)	检出率/%	平均值/(mg/kg)	中位值/(mg/kg)	90 分位数/(mg/kg)	最大值/(mg/kg)
湖北	57	89.5	0.036±0.026	0.029	0.064	0.133
湖南	40	97.5	0.115±0.075	0.105	0.207	0.313
安徽	30	86.7	0.060±0.068	0.033	0.153	0.260

此前,也有学者报道了其他地区克氏原螯虾中 Hg 与 MeHg 的含量水平。河南信阳市不同水域克氏原螯虾中 MeHg 含量介于 0.04~0.41 mg/kg 之间^[15],肌肉中 MeHg 的平均含量为 0.19 mg/kg,普遍高于本研究的 3 个省份的稻田养殖克氏原螯虾中 MeHg 含量水平。泉州地区市售克氏原螯虾 Hg 的检出范围为 0.005~0.082 mg/kg^[16]。扬州地区稻田养殖克氏原螯虾中 Hg 含量为 0.0369 mg/kg^[17],与本研究中湖北地区稻田养殖克氏原螯虾的 MeHg 含量相近。湖北出口克氏原螯虾 Hg 含量为 0.0252 mg/kg^[26],略低于本研究中湖北地区稻田养殖克氏原螯虾中 MeHg 含量平均值。可能的原因包括两者监测的时间跨度较大(前者为 2012 年,本研究为 2020 年),监测季节不同(前者为 4 月~9 月,本研究为 5 月)和取样地点不同等。

2.3 污染程度评估

按公式(1)分析 3 省区稻田养殖克氏原螯虾 MeHg 的污染指数(见图 1),结果湖北省 57 个样品中有 55 个样品 MeHg 的 Pi 小于 0.2,为未受污染,2 个样品 Pi 介于 0.2 至 0.6 之间,为轻度污染,未污染样品占全部样品的 96.5%,轻度污染样品占全部样品的 3.5%;湖南省 40 个样品中有 20 个样品 Pi 小于 0.2,为未受污染,19 个样品 Pi 介于 0.2 至 0.6 之间,为轻度污染,1 个样品 Pi 大于 0.6,为中度污染,未污染样品占全部样品的 50%,轻度污染样品占全部样品的 47.5%,中度污染样品占全部样品的 2.5%;安徽省 30 个样品中有 25 个样品 MeHg 的 Pi 小于 0.2,为未受污染,5 个样品 Pi 介于 0.2 至 0.6 之间,为轻度污染,未污染样品占全部样品的 83.3%,轻度污染样品占全部样品的 16.7%。综合分析,各省克氏原螯虾受 Hg 污染的程度排序为:湖南>安徽>湖北。与上述不同省份克氏原螯虾中 MeHg 的含量差异分析结果相同。

2.4 膳食暴露评估

本研究用于膳食暴露评估公式(2)的居民每周通过消费克氏原螯虾摄入的 MeHg 估计量有两个参数需要确定,一个是 IR(即鱼虾类的人均日摄入量, g/d),一个是 BW(即成年人平均体重, kg);这两个参数特别是 IR 值对评估结果有较大影响。关于 BW,有的取值高于 60 kg^[23],有的按男性和女性分别取值^[25,27],但大多数统一按 60 kg 计算^[20-21],故本研究取 60 kg。关于 IR,各研究取值的差别较大,如梅光明等^[21]对浙江沿海水产品开展 MeHg 的膳食风险评

估时,将 IR 值定为 141 g/d(农村和城市分别为 121.5 和 158 g/d);吴焯飞等^[28]对福建省捕捞水产品重金属含量进行风险评价时,将 IR 值定为 63.41 g/d;张文等^[29]开展江苏地区克氏原螯虾中镉的膳食暴露及风险评估时,依据江苏省克氏原螯虾消费量占水产品消费量的比例,将 IR 值定为 0.5423 g/d。

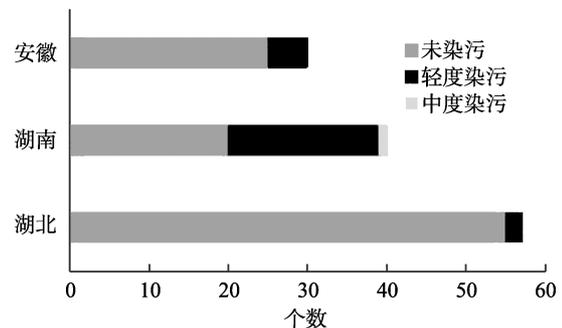


图 1 3 省份克氏原螯虾的 MeHg 污染程度
Fig.1 MeHg pollution degree of *Procambarus clarkii* in 3 provinces

本研究参考刘香丽等^[30]的研究,采用中国环境保护部公布的中国人暴露参数,将 IR 值定为 29.6 g/d。按照本研究确定的 BW 值和 IR 值,将水产品 MeHg 的限量值 0.5 mg/kg 代入本研究公式(2),得出居民每周通过消费含有最高限量的水产品摄入 MeHg 的估计量 EWI 为 1.73 $\mu\text{g}/\text{kg}$,这一结果与 JECFA 确定人体每周可耐受 MeHg 摄入量相近(1.6 $\mu\text{g}/\text{kg}$)^[20]。表明采用本研究确定的参数进行计算,其评估结果与我国现行的食品安全国家标准要求基本相符。

运用膳食暴露评估公式(2)计算成年人食用克氏原螯虾后其 MeHg 的每周摄入量的平均值、中位值、90 分位数和最大值(表 2)。结果均低于 2003 年 JECFA 推荐的人体每周可耐受 MeHg 摄入量 1.6 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。

表 2 克氏原螯虾 MeHg 的每周膳食暴露量
Table 2 Weekly dietary exposure of MeHg in *Procambarus clarkii*

省份	平均值 /($\mu\text{g}/\text{kg}$)	中位值 /($\mu\text{g}/\text{kg}$)	90 分位数 /($\mu\text{g}/\text{kg}$)	最大值 /($\mu\text{g}/\text{kg}$)
湖北	0.124	0.100	0.221	0.459
湖南	0.397	0.363	0.715	1.081
安徽	0.207	0.114	0.528	0.898

为了更直观地引导消费者合理膳食,将克氏原螯虾按每只 35 g, 产肉率 18%计^[11-13,31],反推 EWI 为 1.6 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 时在不同含量水平下每人每天可食用的虾数量。以 MeHg 膳食暴露评估计算消费者每人每天可食用的克氏原螯虾最大数量,在不同产地得出的结果不同。以克氏原螯虾中 MeHg 的平均值计算,湖北、湖南和安徽稻田生产的克氏原螯虾每人每天可食用数量分别为 57、18 和 34 只;以克氏原螯虾中 MeHg 的中位值计算,湖北、湖南和安徽稻田生产的克氏原螯虾每人每天可食用数量分别为 70、19 和 62 只;以克氏原螯虾中 MeHg 的 90 分位数计算,湖北、湖南和安徽稻田生产的克氏原螯虾每人每天可食用数量分别为 32、10 和 13 只;以克氏原螯虾中 MeHg 的最大值计算,湖北、湖南和安徽稻田生产的克氏原螯虾每人每天可食用数量分别为 15、7 和 8 只。

消费者也可以参考本研究关于不同地区稻田养殖克氏原螯虾中 MeHg 的含量差异,当产品来源于污染较轻的区域时,可适当增加本研究推荐的数量;而当产品来源于污染较重的区域时,应按本地区克氏原螯虾中 MeHg 的最大值来确定每人每天最大可食用数量。为了更好地指导消费者,本研究以各地区监测的克氏原螯虾中 MeHg 的平均值为依据,按照公式(2)、(3)分别计算了不同地区稻田养殖克氏原螯虾中 MeHg 的 THQ(图 2)。3 省 9 个地市生产的稻田养殖克氏原螯虾的 MeHg 的 THQ 均小于 1,介于 0.044~0.328 之间,表明食用来源于这些地区稻田养殖克氏原螯虾所导致的 Hg 暴露风险较低。但 THQ 值越大,食用的安全风险也相对较高。消费者可参考不同地区克氏原螯虾 MeHg 的 THQ 值大小,来推算每人每天可食用的克氏原螯虾的最大数量。

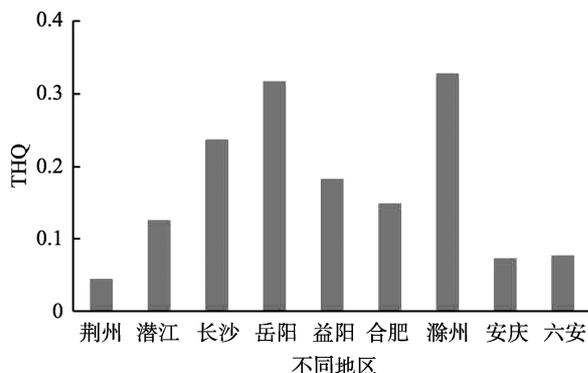


图 2 不同地区稻田养殖克氏原螯虾 MeHg 的 THQ
Fig.2 THQ of MeHg of *Procamburus clarkii* ricefield culture patterns from different regions

3 结论

本研究分析了湖北、湖南和安徽 3 省 9 地市生产的稻田养殖克氏原螯虾 MeHg 含量水平,127 份样品的 MeHg 含量全部低于国家食品安全限量(0.5 mg/kg),Hg 污染程度评估表明

绝大多数样品为未污染,少部分样品为轻度污染,极个别样品为中度污染。3 省区克氏原螯虾 Hg 污染程度排序为:湖南>安徽>湖北。Hg 的膳食暴露评估表明 3 个省区生产的稻田养殖克氏原螯虾 MeHg 的 EWI 均处于安全水平,风险较小。但各省区和省内各地区人群食用克氏原螯虾 MeHg 的 EWI 各不相同。建议 THQ 相对较高的地区(如岳阳市、长沙市、滁州市等地)人群控制克氏原螯虾的食用量,同时相关部门应加大监管力度,防止出现 Hg 超标的现象,从而减少该地区因食用克氏原螯虾引起 MeHg 的暴露量超标的风险。

参考文献

- [1] LIU SJ, WANG XD, GUO GL, *et al.* Status and environmental management of soil mercury pollution in China: A review [J]. *J Environ Manage*, 2021, 277: 111442.
- [2] LIU MD, ZHANG QR, MAAVARA T, *et al.* Rivers as the largest source of mercury to coastal oceans worldwide [J]. *Nat Geosci*, 2021, 14(9): 672-677.
- [3] DONADT C, COOKE CA, GRAYDON JA, *et al.* Mercury bioaccumulation in stream fish from an agriculturally-dominated watershed [J]. *Chemosphere*, 2021, 262: 128059.
- [4] 王昌钊, 张遵, 李子豪. 西安市水产品中汞含量分析及其食用风险评价[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(8): 7140-7145.
WANG CZ, ZHANG L, LI ZH. Analysis of mercury content in aquatic products in Xi'an and its edible risk assessment [J]. *J Food Saf Qual*, 2021, 12(18): 7140-7145.
- [5] XIANG Y, LIU G, YIN Y, *et al.* Periphyton as an important source of methylmercury in everglades water and food web [J]. *J Hazard Mater*, 2020, 410(1): 1-7.
- [6] MARIA EC, MARCUS AO, AMANDA LA, *et al.* Mercury: What can we learn from the Amazon? [J]. *Environ Int*, 2021, 146: 106223.
- [7] GIANPAOLO G, ANNAR B, PAOLO P. Toxic effects of mercury in humans and mammals [J]. *Chemosphere*, 2021, 263: 127990.
- [8] United States Environmental Protection Agency. Mercury study report to congress, volume VII: Characterization of human health and wildlife risks from mercury exposure in the United States [R]. United States: Environmental Protection Agency, 1997.
- [9] DIETZ R, FORT J, SONNE C, *et al.* A risk assessment of the effects of mercury on Baltic Sea, Greater North Sea and North Atlantic wildlife, fish and bivalves [J]. *Environ Int*, 2021, 146: 106178.
- [10] MURILLO-CISNEROS DA, ZENTENO-SAVIN T, HARLEY J, *et al.* Mercury concentrations in Baja California Sur fish: Dietary exposure assessment [J]. *Chemosphere*, 2021, 267: 129233.
- [11] 唐黎, 杨家军, 林艳红, 等. 贵州稻田养殖克氏原螯虾肌肉营养成分分析[J]. *河北渔业*, 2018, (9): 15-19, 45.
TANG L, YANG JJ, LIN YH, *et al.* Analysis on flesh nutrient component of freshwater crayfish *Procamburus clarkii* farmed in ricefield in Guizhou Province [J]. *Hebei Fish*, 2018, (9): 15-19, 45.
- [12] 王广军, 孙悦, 郁二蒙, 等. 澳洲淡水龙虾与克氏原螯虾肌肉营养成分分析与品质评价[J]. *动物营养学报*, 2019, 31(9): 4339-4348.
WANG GJ, SUN Y, YU ERM, *et al.* Analysis and quality evaluation of nutrient components in muscle of *Cherax quadricarinatus* and *Procamburus clarkii* [J]. *Chin J Anim Nutr*, 2019, 31(9): 4339-4348.
- [13] 王金娟, 陈友明, 邵俊杰, 等. 盱眙地区不同养殖模式下克氏原螯虾肌

- 肉品质的比较分析[J]. 动物营养学报, 2020, 32(2): 965-972.
- WAN JJ, CHEN YM, SHAO JJ, *et al.* Comparative analysis on muscle quality of red swamp crayfish (*Procambarus clarkia*) cultured under different aquaculture modes in Xuyi region [J]. Chin J Anim Nutr, 2020, 32(2): 965-972.
- [14] 中国小龙虾产业发展报告(2021)[J]. 中国水产, 2021, 7: 27-33. China crayfish industry development report 2021 [J]. China Fish, 2021, 7: 27-33.
- [15] 吴坤杰. 信阳市克氏原螯虾对5种重金属的生物富集特征及其污染评价[J]. 河南农业科学, 2015, 44(9): 118-121. WU KJ. The bioaccumulation characteristics of five kinds of heavy metals and assessment on quality and safety of *Procambarus clarkia* from Xinyang City [J]. J Henan Agric Sci, 2015, 44(9): 118-121.
- [16] 陈细香, 刘银铃, 陈秋月, 等. 泉州地区克氏原螯虾重金属含量测定及评价[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(3): 151-153. CHEN XX, LIU YL, CHEN QY, *et al.* Determination and assessment of the content of heavy metals in *Procambarus clarkii* Girard in Quanzhou area [J]. J Anhui Agric Sci, 2015, 43(3): 151-153.
- [17] 王龙根, 成强, 陈红燕, 等. 稻田养殖克氏原螯虾重金属监测分析[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(22): 103-104. WANG LG, CHENG Q, CHEN HY, *et al.* Monitoring analysis of heavy metals in rice paddy *Procambarus clarkii* [J]. J Anhui Agric Sci, 2016, 44(22): 103-104.
- [18] 中国稻渔综合种养产业发展报告(2020)[J]. 中国水产, 2020, 10: 12-19. Report on the industry development of china's integrated rice-fish farming (2020) [J]. China Fish, 2020, (10): 12-19.
- [19] 王丹, 吴反修. 2021 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2021. WANG D, WU FX. Chinese yearbook of fishery statistics [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2021.
- [20] 王丽, 李华杰, 许海丽, 等. 茂名地区主要水产品汞含量分析与风险评估[J]. 食品与机械, 2021, 37(9): 73-77. WANG L, LI HJ, XU HL, *et al.* Mercury content analysis and risk assessment of the major aquatic products in Maoming [J]. Food Mach, 2021, 37(9): 73-77.
- [21] 梅光明, 张小军, 钟志, 等. 浙江沿海水产品甲基汞污染调查及膳食风险评估[J]. 食品科学, 2016, 37(17): 207-212. MEI GM, ZHANG XJ, ZHONG Z, *et al.* Survey of methylmercury contamination in coastal sea foods in Zhejiang Province and potential dietary health risk assessment [J]. Food Sci, 2016, 37(17): 207-212.
- [22] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册(成人卷)[M]. 北京: 中国环境出版社, 2013. Department of Environmental Protection. Exposure factors handbook of Chinese population [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2013.
- [23] 孟春英, 张小军, 黄丽英, 等. 浙江沿海水产品无机砷和汞含量调查及膳食风险评估[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(9): 247-253. MENG CY, ZHANG XJ, HUANG LY, *et al.* The investigation of inorganic arsenic and mercury in aquatic products of Zhejiang Province and their dietary risk assessment [J]. Food Ferment Ind, 2018, 44(9): 247-253.
- [24] World Health Organization. Summary and conclusions of the 61st meeting of JECFA [R]. Geneva, World Health Organization, 2003.
- [25] 郭莹莹, 王联珠, 朱文嘉, 等. 南极磷虾及其产品中砷含量分析及安全性评价[J]. 食品科学, 2018, 39(19): 182-187. GUO YY, WANG LZ, ZHU WJ, *et al.* Arsenic content analysis and safety evaluation of Antarctic krill (*Euphausia superba*) and its products [J]. Food Sci, 2018, 39(19): 182-187.
- [26] 王华全, 沈伊亮. 湖北出口淡水小龙虾重金属污染监测与分析[J]. 湖北农业科学, 2014, 53(9): 2140-2145. WANG HQ, SHEN YL. Monitoring and analysis of heavy metal pollution of Hubei exported crayfish [J]. Hubei Agric Sci, 2014, 53(9): 2140-2145.
- [27] 顾景范. 《中国居民营养与慢性病状况报告(2015)》解读[J]. 营养学报, 2016, 38(6): 525-529. GU JF. Interpretation of the report on nutrition and chronic diseases in Chinese residents (2015) [J]. Acta Nutr Sin, 2016, 38(6): 525-529.
- [28] 吴焯飞, 陈火荣, 吴镇, 等. 福建省中北部海域捕捞水产品中4种重金属含量与风险评估[J]. 渔业研究, 2018, 40(6): 478-489. WU YF, CHEN HR, WU Z, *et al.* Concentrations and risk evaluation of four kinds of heavy metals in fishing aquatic products of the central and northern sea areas of Fujian Province [J]. J Fish Res, 2018, 40(6): 478-489.
- [29] 张文, 吴光红, 卢元玲, 等. 江苏地区克氏原螯虾中镉的膳食暴露及风险评估[J]. 食品科学, 2017, 38(23): 201-206. ZHANG W, WU GH, LU YL, *et al.* Dietary exposure and risk assessment of cadmium from crayfish (*Procambarus clarkia*) in Jiangsu Province [J]. Food Sci, 2017, 38(23): 201-206.
- [30] 刘香丽, 汪倩, 宋超, 等. 安徽养殖中华绒螯蟹体内砷形态的分布特征及膳食风险评估[J]. 南方水产科学, 2020, 16(6): 105-114. LIU XL, WANG Q, SONG C, *et al.* Distribution characteristics and dietary risk assessment of arsenic speciations in Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) in Anhui Province [J]. South China Fish Sci, 2020, 16(6): 105-114.
- [31] 田娟, 许巧倩, 田罗, 等. 洞庭湖克氏原螯虾肌肉成分分析及品质特性分析[J]. 水生生物学报, 2017, 41(4): 870-877. TIAN J, XU QQ, TIAN L, *et al.* The muscle composition analysis and flesh quality of *Procambarus clarkia* in the Dongting Lake [J]. Acta Hydrobiol Sin, 2017, 41(4): 870-877.

(责任编辑: 张晓寒 于梦娇)

作者简介



覃东立, 研究员, 主要研究方向为渔业环境及水产品质量安全。

E-mail: qdl978@163.com