

我国 4 省养殖中华绒螯蟹中甲基汞的 污染特征及健康风险评价

白淑艳¹, 高 磊¹, 黄晓丽¹, 王 鹏¹, 陈中祥¹, 郝其睿¹,
杜宁宁¹, 汤施展¹, 曾斯丽^{1,2}, 覃东立^{1,3*}

(1. 中国水产科学研究院黑龙江水产研究所, 哈尔滨 150070; 2. 上海海洋大学水产与生命学院, 上海 201306;
3. 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** 评估我国江苏、湖北、安徽和辽宁 4 省养殖的中华绒螯蟹(*Eriocheir sinensis*)中甲基汞(methylmercury, MeHg)的含量水平和食用安全风险。**方法** 利用原子荧光形态分析仪检测 4 省 14 个地市养殖的 135 份人工养殖中华绒螯蟹 MeHg 的含量。采用单因子污染指数法(single-factor pollution index, P_i)评价样品中 MeHg 的污染程度, 通过计算膳食暴露量和目标风险系数(target hazard quotient, THQ), 开展食用安全性评估。**结果** 采集中华绒螯蟹样品 MeHg 的含量范围为 ND(未检出)~133.1 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 检出率 91.1%。所有样品 MeHg 的含量均在国家标准规定的限量值范围以内。膳食暴露评估结果表明, MeHg 的成人每周摄入量(estimated weekly intakes, EWI)低于食品添加剂联合专家委员会(Joint Expert Committee on Food Additives, JECFA)推荐的成人每周可耐受摄入量(provisional tolerable weekly intake, PTWI)。样品 MeHg 的 THQ 值介于 0.009~0.288 之间, 均小于 1。**结论** 4 省采集的中华绒螯蟹样品 MeHg 的含量较低, 食用 4 省养殖中华绒螯蟹摄入 MeHg 对消费者没有明显的健康风险。

关键词: 中华绒螯蟹; 甲基汞; 食用安全

Levels of methylmercury and health risk assessment in *Eriocheir sinensis* from 4 provinces of China

BAI Shu-Yan¹, GAO Li¹, HUANG Xiao-Li¹, WANG Peng¹, CHEN Zhong-Xiang¹,
HAO Qi-Rui¹, DU Ning-Ning¹, TANG Shi-Zhan¹, ZENG Si-Li^{1,2}, QIN Dong-Li^{1,3*}

(1. Heilongjiang River Fishery Research Institute Chinese Academy of Fishery Sciences, Harbin 150070, China;
2. School of Fisheries and Life, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 3. 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 content of methylmercury (MeHg) in farmed *Eriocheir sinensis* from Jiangsu, Hubei, Anhui, and Liaoning Provinces of China and to discuss the safety risk for human consumption of

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFD0900301)、中央公益性科研院所基本科研业务费项目(HSY202110Q)、国家公益性行业(农业)科研专项(201503108)

Fund: Supported by the National Key Research and Development Program of China (2020YFD0900301), the Fundamental Research Funds for the Central Public Welfare Research Institutes (HSY202110Q), and the Special Scientific Research Fund of Agricultural Public Welfare Profession of China (201503108)

*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

MeHg. Methods Atomic fluorescence spectrometry was applied to determine the MeHg content in the farmed *Eriocheir sinensis* from 14 prefecture-level cities in Jiangsu, Hubei, Anhui, and Liaoning Provinces of China. MeHg contamination was assessed by single-factor pollution indices (P_i), and the safety risk for human consumption of MeHg was evaluated by exposure assessment and target hazard quotient (THQ). **Results** The detection rate of MeHg in all the *Eriocheir sinensis* samples was 91.1%, and the concentration was in the range of undetected (ND)-133.1 $\mu\text{g/kg}$, meeting the limit value in the national standard. Exposure assessment revealed the adult estimated weekly intake (EWI) of MeHg was lower than the provisional tolerable weekly intake (PTWI) recommended by the Joint Expert Committee on Food Additives (JECFA) of Food and Agriculture Organization/World Health Organization. Moreover, THQ values of MeHg in the sample range from 0.009 to 0.288, all of which were less than 1. **Conclusion** The MeHg levels in the farmed *Eriocheir sinensis* samples from Jiangsu, Hubei, Anhui, and Liaoning Provinces of China are low without posing a significant risk for human consumption.

KEY WORDS: *Eriocheir sinensis*; methylmercury; food safety

0 引言

汞(mercury, Hg)作为全球性污染物, 在环境中普遍存在^[1-2]。尽管自然水体和养殖水体中 Hg 的含量极低(通常 $<0.1 \mu\text{g/L}$)^[3], 但水生生物对 Hg 有很强的富集能力^[4-5], 鱼虾等水产品被认为是人类摄入 Hg 的主要来源^[6-7]。甲基汞(methylmercury, MeHg)是水产品中 Hg 的主要存在形态^[8-9]。且 MeHg 的毒性强于水产品中其他形态的汞, 因此国内外相关的食品安全标准在制定水产品中 Hg 含量限值时, 仅规定了 MeHg 的限量指标^[10-11]。

中华绒螯蟹(*Eriocheir sinensis*)因肉质鲜美, 营养丰富^[12], 深受消费者喜爱。2021 年, 我国淡水养殖中华绒螯蟹产量 808274 t, 位列我国淡水养殖品种第 9 位^[13], 作为我国重要的淡水养殖水产品, 中华绒螯蟹的食用安全性受到消费者的密切关注。MeHg 含量水平是评价水产品质量安全的重要指标, 开展重点水产品中 MeHg 的检测和评估对保障水产品质量安全, 保护消费者身心健康至关重要。目前针对海水蟹中 Hg 与 MeHg 含量分析的相关研究报道较多^[14-17], 但针对淡水养殖中华绒螯蟹中 MeHg 污染程度及食用安全评估的相关研究报道较少^[18]。

根据 2021 年《中国渔业统计年鉴》^[13], 2020 年江苏、湖北、安徽、辽宁 4 省中华绒螯蟹产量分别占全国中华绒螯蟹总产量的 46.3%、19.4%、12.9%和 8.1%, 全国排名 1~4 名, 是我国中华绒螯蟹养殖养殖的主要集中地。因此, 本研究以江苏、湖北、安徽和辽宁 4 省养殖的中华绒螯蟹为研究对象, 应用原子荧光形态分析仪测定了中华绒螯蟹可食部分中 MeHg 的含量, 采用单因子污染指数法(single-factor pollution index, P_i)分析了水产品中 MeHg 的污染程度, 采用暴露评估和目标风险系数(target hazard quotient, THQ)分析了上述 4 个省份养殖中华绒螯蟹的食用安全性, 旨在评估我国养殖主产区养殖的中华绒螯蟹的 MeHg 污染水平及其食

用安全性, 为保障水产品质量安全提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

氯化甲基汞标准品(100 $\mu\text{g/mL}$, 国家标准物质中心); 硼氢化钾(KBH_4)、L-半胱氨酸、乙酸铵($\text{CH}_3\text{COONH}_4$)、氨水($\text{NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$)、氢氧化钾(KOH)、氢氧化钠(NaOH)(分析纯)、过硫酸钾($\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$)、盐酸(HCl)(优级纯)、甲醇(CH_3OH)(色谱纯)(上海安谱实验科技股份有限公司); 超纯水(电阻率 $\geq 18.2 \text{ M}\Omega\cdot\text{cm}$, 德国密里博公司); 高纯氩气(纯度 $\geq 99.999\%$, 哈尔滨卿华工业气体有限公司)。

1.2 仪器与设备

SA-20 型原子荧光形态分析仪(北京吉天仪器有限公司); C_{18} 色谱柱(150 mm $\times$ 4.6 mm, 5 μm)[沃特世科技有限公司(上海)]; Allegra X-30R 离心机(美国贝克曼库尔特公司); KQ-700E 超声波清洗器(昆山市超声仪器有限公司); T25 组织均质机(德国 IKA 公司); XS205 电子分析天平(精度 0.0001 g, 瑞士梅特勒-托利多公司); Milli-Q 纯水器(德国密理博公司); 0.45 μm 滤膜(上海安谱实验科技股份有限公司)。

1.3 方法

1.3.1 样品采集

江苏省的样品主要采自扬州、淮安、宿迁、常州、无锡和苏州; 安徽省的样品主要采自安庆、铜陵、芜湖、宣城、马鞍山等地; 湖北省的样品主要采自孝感和荆州; 辽宁省的样品采自盘锦市。

采样时间为 2020 年 9 月份。共采集样品 135 份, 每份样品均来自不同的养殖场所, 其中湖北省 40 份、安徽省 35 份、辽宁省 35 份、江苏省 25 份。每份样品采雌、雄蟹各 15 只, 共采集中华绒螯蟹 4050 只。样品均为达到上市规格的成蟹。除辽宁省的样品全部来自稻田养殖模式外,

其他 3 省的样品均来源于池塘养殖模式。

1.3.2 样品制备

将采集的中华绒螯蟹在使用冰袋保持较低温度的状态下带回实验室。样本制备前,用吸水纸去除样本体表水分,用分析天平称重。样品去壳、蟹腮后,刮取所有可食部位,用均质机混成匀浆,装入聚四氟乙烯材质的塑料袋中,贮存温度为-20℃。

1.3.3 样品检测

MeHg 的检测及质量控制参考文献[19]。

本方法的检出限和定量限分别为 0.008 mg/kg 和 0.025 mg/kg,与 GB 5009.17—2021《食品安全国家标准 食品中总汞及有机汞的测定》中甲基汞的测定第一法 液相色谱-原子荧光光谱联用法的规定基本一致,满足 GB 2762—2022《食品安全国家标准 食品中污染物限量》规定的相关检测要求。

1.4 污染指数评估

由 GB 2762—2022 确定中华绒螯蟹中 MeHg 的限量为 0.5 mg/kg。采用单因子污染指数法^[19]评估中华绒螯蟹 MeHg 的污染程度,计算公式如式(1):

$$P_i = C_i/S \tag{1}$$

公式(1)中, P_i 表示样品 MeHg 的污染指数; C_i 表示第 i 份样品中 MeHg 含量; S 表示中华绒螯蟹中 MeHg 的限量(0.5 mg/kg)。当 $P_i<0.2$ 时,表示未受污染; $0.2\leq P_i\leq 0.6$ 时,表示受轻度污染; $0.6<P_i<1.0$ 时,表示受中度污染; $P_i\geq 1$ 表示受重度污染^[20]。

1.5 暴露评估

采用 THQ 来评价中华绒螯蟹中 MeHg 的膳食暴露对人体健康造成的潜在风险^[21-22]。计算公式见式(2)、(3):

$$EWI = IR \times C \times 7/BW \tag{2}$$

$$THQ = EWI/PTWI \tag{3}$$

式(2)中,EWI 表示人体通过食用中华绒螯蟹导致 MeHg 的每周摄入量[μg/(kg·wk)];IR 表示鱼虾类水产品的人均每日摄入量(29.6 g/d,湿重)^[19];C 表示中华绒螯蟹中 MeHg 的含量(mg/kg);7 表示每周 7 d;BW 表示成年人的平均体重,按 60 kg 计算。

式(3)中,THQ 为人体 MeHg 暴露的风险系数;2003 年联合国粮食农业组织(UN Food and Agriculture Organization, FAO)和世界卫生组织(World Health Organization, WHO)设立的食

品添加剂联合专家委员会(Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives, JECFA)确定,人体可耐受 MeHg 的每周摄入量(provisional tolerable weekly intake, PTWI)为 1.6 μg/(kg·wk)^[23-24]。当 THQ<1 时,风险较低,且 THQ 值越小风险越小;当 THQ≥1 时,表示风险较高。

1.6 数据分析

使用 SPSS Statistics 18.0 和 Excel 2010 对数据进行统计和分析。当检测结果的数值低于检出限(limit of detection, LOD)时,以 1/2 LOD 计算^[23]。

2 结果与分析

2.1 中华绒螯蟹样品中 MeHg 的含量水平

4 省养殖中华绒螯蟹样本中 MeHg 的检测结果见表 1。总体检出率为 91.1%,含量范围为 ND~133.1 μg/kg,均低于 0.5 mg/kg,符合 GB 2762—2022 对中华绒螯蟹中 MeHg 的限量规定。表明 4 省养殖的中华绒螯蟹 MeHg 含量水平较低,满足国家食品安全标准要求。

此前,有学者报道^[25-29]了辽宁、江苏、湖南等地养殖中华绒螯蟹中 Hg 与 MeHg 的监测结果(表 2)。

如陈晓云等^[25]于 2014—2016 年连续 3 年监测了辽宁省盘锦市稻田养殖中华绒螯蟹中 Hg 的含量,结果显示其可食部分中 Hg 含量的平均值为 27.0~30.0 μg/kg,鉴于水产品中绝大多数 Hg 以 MeHg 的形态出现,可以看出该研究的监测结果与本研究结果相近(本研究辽宁稻田养殖中华绒螯蟹中 MeHg 含量平均值为 23.7 μg/kg)。张聪等^[26]于 2015 年在江苏省常州、宜兴、苏州和浙江省湖州的养殖池塘中采集 35 份中华绒螯蟹,检测了蟹黄中 Hg 含量,结果样品中总汞含量的范围为 ND(未检出)~96.35 μg/kg,均值为 26.39 μg/kg。陈风蔚等^[27]检测了江苏地区市场销售的 40 份中华绒螯蟹样品,结果样品可食部分中 Hg 的含量范围为 5.00~20.5 μg/kg。王雪婷等^[28]对江苏省苏州、宿迁、泰州和常州 4 个地区养殖的中华绒螯蟹进行了 MeHg 检测,结果其可食部分 MeHg 的含量范围为 6.1~65.8 μg/kg。综合比较包括平均值和最高值,同时考虑 MeHg 在水产品体内 Hg 的占比,可以看出上述 3 项研究结果与本研究对江苏省池塘养殖中华绒螯蟹中 MeHg 的监测结果相近(范围 ND~41.8 μg/kg,均值 14.4 μg/kg),由于采样时间、地点和

表 1 不同地区中华绒螯蟹中 MeHg 含量
Table 1 MeHg concentration in different regions of *Eriocheir sinensis*

地区	样品数量	含量范围 /(μg/kg)	平均值 /(μg/kg)	50 分位数/ (μg/kg)	75 分位数/ (μg/kg)	90 分位数/ (μg/kg)	最大值/ (μg/kg)	检出率/ %
江苏	25	ND~41.8	14.4±9.7 ^a	11.2	18.2	26.6	41.8	76.0
湖北	40	13.5~133.1	50.5±26.3 ^b	43.4	52.7	88.2	133.1	100
安徽	35	ND~69.3	25.5±16.9 ^c	20.2	20.9	53.1	69.3	91.4
辽宁	35	ND~56.0	23.7±13.1 ^c	21.7	30.9	38.5	56.0	88.6

注: ND 指未检出; 同列数据中不同肩注字母表示有显著差异($P<0.05$)。

表 2 不同地区检测中华绒螯蟹中 Hg 与 MeHg 的含量结果
Table 2 Results of Hg and MeHg in *Eriocheir sinensis* in different areas

省份	样品数量	检测项目	检测部位	检出值/(μg/kg)	年度	参考文献
江苏	25	MeHg	可食部分	14.4±9.7	2020	本研究
湖北	40	MeHg	可食部分	50.5±26.3	2020	本研究
安徽	35	MeHg	可食部分	25.5±16.9	2020	本研究
辽宁	35	MeHg	可食部分	23.7±13.1	2020	本研究
辽宁	6	Hg	可食部分	30.0±4.00	2014	[25]
辽宁	6	Hg	可食部分	29.0±6.00	2015	[25]
辽宁	6	Hg	可食部分	27.0±2.00	2016	[25]
江苏、浙江	35	Hg	蟹黄	26.35	2015	[26]
江苏	40	Hg	可食部分	5.00~20.5	2019	[27]
江苏	200	MeHg	可食部分	6.1~65.8	2021	[28]
湖南	24	Hg	肌肉	34.1~48.6	2017	[29]

检测的组织部位等存在不同, 各项研究结果的偏差均在合理范围之内。暂未检索到此前安徽省和湖北省养殖中华绒螯蟹中 Hg 与 MeHg 含量水平的报道。卢岚等^[29]报道了湖南省大通湖、霍龙湖和西洞庭湖养殖的中华绒螯蟹中 Hg 的监测结果, 三大湖区养殖中华绒螯蟹肌肉中 Hg 的平均含量范围为 34.1~48.6 μg/kg, 综合比较, 其结果略低于本研究对湖北省养殖中华绒螯蟹的可食部分中 MeHg 的检测结果(范围 13.5~133.1 μg/kg, 均值 50.5 μg/kg)。

2.2 中华绒螯蟹 MeHg 含量的地区差异

采用单因素方差分析所采集的 4 个省份中华绒螯蟹样品中 MeHg 的含量差异, 结果发现江苏省、湖北省与另外其他各省之间中华绒螯蟹样品中 MeHg 的含量均存在显著性差异($P<0.05$), 但辽宁省与安徽省的中华绒螯蟹样品中 MeHg 的含量不存在显著性差异($P>0.05$)(表 1)。不同地区中华绒螯蟹汞含量存在差异, 可能的因素包括各地区环境中汞污染水平不同、其他环境因子(如 pH、溶解氧、水温、盐度、硬度等)存在差异、以及采集样品的大小不完全统一等, 此外, 中华绒螯蟹汞含量还与体内其他金属元素的含量有关^[30]。

2.3 不同养殖模式的中华绒螯蟹中 MeHg 的含量差异

4 省样品中, 辽宁省的样品均来源于稻田养殖, 其他 3 省的样品均来源于池塘养殖。两种养殖模式下的中华绒螯蟹 MeHg 含量水平比较发现, 辽宁省稻田养殖中华绒螯蟹 MeHg 含量明显高于江苏省池塘养殖的中华绒螯蟹($P<0.05$), 但明显低于湖北省池塘养殖的中华绒螯蟹($P<0.05$), 与安徽省池塘养殖的中华绒螯蟹相比两者的含量水平不存在显著性差异($P>0.05$)。由此可见, 养殖模式不是影响中华绒螯蟹中 MeHg 含量的决定因素。此前有作者研究了辽宁省稻田养殖中华绒螯蟹与池塘养殖中华绒螯蟹的 Hg 含量差异, 结果表明, 稻田、池塘两种模式下长成的中华绒螯蟹中 Hg 含量差异并不显著($P>0.05$)^[26], 与本研究结果一致。

2.4 污染指数评估

按公式(1)计算 4 个省份抽取的中华绒螯蟹样品中 MeHg 的污染指数, 统计结果显示, 江苏省、安徽省和辽宁省所有样品 MeHg 的污染指数 P_i 均小于 0.2, 表示为未受污染。湖北省 40 个样品中有 38 个样品污染指数 P_i 小于 0.2, 为未受污染, 2 个样品 P_i 值介于 0.2 至 0.6 之间, 为轻度污染。综合分析, 4 省份养殖的中华绒螯蟹样品其绝大多数样品未受到 MeHg 的污染, 未污染样品占全部样品的 98.5%, 仅有极个别样品受到 MeHg 的轻度污染, 轻度污染样品占全部样品的 1.5%。

2.5 暴露评估

由于 MeHg 的暴露量主要与水产类的消费量密切相关, 我国居民的膳食 MeHg 全部来源于水产类^[31], 因此将 JECFA 推荐的 PTWI 值为 1.6 μg/(kg·wk)确定为水产品中 MeHg 的允许摄入量。

运用公式(2)计算食用调查区域内各省份中华绒螯蟹的居民膳食 MeHg 暴露情况, 结果见表 3。由表 3 可以看出, 4 省区的中华绒螯蟹的居民膳食 MeHg 平均暴露量均低于 1.6 μg/(kg·wk), PTWI 占比平均值 3.1%~10.9%, 最高值 28.8%。表明 4 省区中华绒螯蟹的居民膳食 MeHg 暴露量均在安全范围内。

表 3 食用调查区域内各省份中华绒螯蟹的居民膳食 MeHg 暴露情况
Table 3 Dietary MeHg exposure of *Eriocheir sinensis* in each province in the survey area

地区	暴露量		PTWI 占比	
	平均值	范围	平均值	范围
	/[μg/(kg·wk)]	/[μg/(kg·wk)]	/%	/%
江苏	0.050	0.014~0.144	3.1	0.9~9.0
湖北	0.174	0.047~0.460	10.9	2.9~28.8
安徽	0.088	0.014~0.239	5.5	0.9~14.9
辽宁	0.082	0.014~0.193	5.1	0.9~12.1

提取各地区样品中 MeHg 含量的平均值、中位值等统计学数据, 计算成年消费者在食用本研究抽取的中华绒螯蟹后, 其 MeHg 的每周暴露量, 结果见图 1。由图 1 可以看出, 按样品中 MeHg 含量的平均值、50 分位数、75 分位数、90 分位数和最大值计算, 中华绒螯蟹 MeHg 的每周膳食暴露量结果均低于 1.6 $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{wk})$ 。表明居民通过食用调查区域的中华绒螯蟹摄入 MeHg 对健康无明显负面影响。

按照公式(3), 分别计算不同省份采集的中华绒螯蟹样品中 MeHg 的目标风险系数 THQ。结果 4 个省份生产的中华绒螯蟹 MeHg 的 THQ 值介于 0.009~0.288 之间, 均小于 1, 表明食用这些地区养殖的中华绒螯蟹所导致的 MeHg 暴露风险较低。

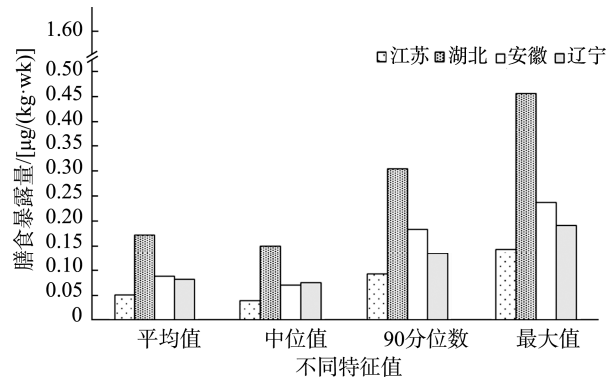


图 1 中华绒螯蟹 MeHg 的每周膳食暴露量(n=7)

Fig.1 Estimated weekly intakes of methylmercury in *Eriocheir sinensis* (n=7)

为了更为直观地引导消费者, 本研究将中华绒螯蟹按每只 100 g, 产肉率为 28%^[32], 计算当 EWI 达到 JECFA 推荐的 PTWI 值时, 各地区养殖中华绒螯蟹在不同 MeHg 含量水平下, 成人每人每天可食用的中华绒螯蟹数量(表 4)。消费者可以参考表 4 推荐的数量, 结果本地区养殖中华绒螯蟹 MeHg 的污染状况, 选择合理膳食。建议污染指数评估为未受污染的样品, 成人每人每天可食用的中华绒螯蟹数量可以从表 4 所列的平均值至 50 分位数之间选取, 例如江苏省评估为未受污染的样品, 成人每人每天可食用的中华绒螯蟹数量为 34~44 只; 污染指数评估为轻度污染的样品, 成人每人每天可食用的中华绒螯蟹数量可以从表 4 所列的 75 分位数至最大值之间选取, 如湖北省评估为轻度污染的样品, 成人每人每天可食用的中华绒螯蟹数量为 4~9 只。

表 4 不同地区养殖中华绒螯蟹的可食用安全数量

Table 4 Edible safety quantity of *Eriocheir sinensis* cultured in different areas

地区	平均值 /只	50分位数 /只	75分位数 /只	90分位数 /只	最大值 /只
江苏	34	44	27	18	12
湖北	10	11	9	6	4
安徽	19	24	23	9	7
辽宁	21	23	16	13	9

3 结 论

本研究采用原子荧光形态分析仪对江苏、湖北、安徽和辽宁 4 省养殖的中华绒螯蟹样品选取可食部分进行了 MeHg 的检测。结果表明, 4 省养殖的中华绒螯蟹中 MeHg 的含量较低, 满足国家食品安全标准的限量要求, 绝大多数样品未受到 MeHg 的污染, 仅有极个别样品受到 MeHg 的轻度污染。消费者食用这 4 个省份养殖的中华绒螯蟹导致 MeHg 摄入而产生的安全风险较小。对 4 个省份养殖的中华绒螯蟹 MeHg 含量进行比较, 发现湖北省养殖中华绒螯蟹 MeHg 的检出率和检出浓度相对较高, 不同地区中华绒螯蟹 MeHg 含量存在差异, 建议对不同区域中华绒螯蟹 MeHg 含量差异的形成原因开展深入研究。

参考文献

[1] 董丽君, 张展华, 张彤. 土壤环境汞污染现状及其影响因素研究进展[J]. 地球与环境, 2022, 50(3): 397-414, 319.
DONG LJ, ZHANG ZH, ZHANG T. Mercury pollution in soil environment: Current status and its influencing factors [J]. Earth Environ, 2022, 50(3): 397-414, 319.

[2] WANG XJ, ZHONG W, WANG BX, et al. Spatial-temporal variations and pollution risks of mercury in water and sediments of urban lakes in Guangzhou City, South China [J]. Environ Sci Pollut Res Int, 2022. DOI: 10.1007/s11356-022-21424-2

[3] DONADT C, COOKE C, GRAYDON J, et al. Mercury bioaccumulation in stream fish from an agriculturally-dominated watershed [J]. Chemosphere, 2021, 262: 128059.

[4] 徐勤勤. 汞和有机磷酸酯在三峡库区水、土/沉积物中的分布与鱼体富集特征[D]. 重庆: 西南大学, 2019.
XU QQ. Distribution of mercury and organophosphate in water, soil/sediment and fish enrichment in the three gorges reservoir area [D]. Chongqing: Southwest University, 2019.

[5] 马志龙. 汞在三江平原鱼—鹭食物链中的生物富集[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2017.
MA ZL. The bioaccumulation of mercury in the fish-heron food chain at the Sanjiang Plain [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2017.

[6] 曹宁. 南宁市场及邕江鱼类 Hg 含量研究[D]. 桂林: 广西师范学院, 2015.
CAO N. Study of fish mercury content in Nanning market and Yongjiang River [D]. Guilin: Guangxi Normal University, 2015.

[7] SONG YJ, LEE CK, KIM KH, et al. Factors associated with total mercury concentrations in maternal blood, cord blood, and breast milk among pregnant women in Busan, Korea [J]. Asia Pacif J Clin Nutr, 2016, 25(2): 340-349.

[8] GUI Y, WANG XC, CHEN X, et al. Balancing the health effect between risks of methylmercury and benefits of nutrients in consumption of Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) in China [J]. Environ Sci Pollut, 2022, 29(25): 38527-38534.

[9] ZHANG HY, GUO CQ, FENG HR, et al. Total mercury, methylmercury, and selenium in aquatic products from coastal cities of China: Distribution characteristics and risk assessment [J]. Sci the Total Environ, 2020. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140034

[10] REGNELL O, TESSON SVM, OSKOLKOV N, et al. Mercury-selenium accumulation patterns in muscle tissue of two freshwater fish species,

- eurasian perch (*Perca fluviatilis*) and vendace (*Coregonus albula*) [J]. Water Air Soil Pollut, 2022. DOI: 10.1007/s11270-022-05709-3
- [11] GIMENES TC, PENTEADO JO, DOS SM, et al. Methylmercury in fish from the Amazon region-a review focused on eating habits [J]. Water Air Soil Pollut, 2021, 232(5): 1-9.
- [12] LI QQ, ZU L, CHENG YX, et al. Carapace color affects carotenoid composition and nutritional quality of the Chinese mitten crab, *Eriocheir sinensis* [J]. LWT, 2020, 126: 109286.
- [13] 王丹, 吴反修. 2022 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2022.
- WANG D, WU FX. 2022 Chinese yearbook of fishery statistics [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2022.
- [14] 蔡华, 罗宝章, 熊丽蓓, 等. 上海市水产品中重金属污染情况[J]. 卫生研究, 2018, 47(5): 740-743.
- CAI H, LUO BZ, XIONG LB, et al. Heavy metal pollution in aquatic products in Shanghai [J]. J Hyg Res, 2018, 47(5): 740-743.
- [15] BAO C, CAI Q, YING XY, et al. Health risk assessment of arsenic and some heavy metals in the edible crab (*Portunus trituberculatus*) collected from Hangzhou Bay, China [J]. Mar Pollut Bull, 2021, 173: 113007.
- [16] DAVID L, TAYLOR NM. Mercury content of blue crabs (*Callinectes sapidus*) from southern New England coastal habitats: Contamination in an emergent fishery and risks to human consumers [J]. Mar Pollut Bull, 2018, 126: 166-178.
- [17] SANDRIN A, JEAN-MICHEL L, ROBERT PM. Mercury accumulation and flux across the gills and the intestine of the blue crab (*Callinectes sapidus*) [J]. Aquatic Toxicol, 2002, 56(4): 303-320.
- [18] 孙博泽. 浙江地区中华绒螯蟹甲基汞的分布特征与食用风险[C]. 第十二届浙江渔业科技论坛论文摘要集, 2017.
- SUN BZ. Distribution characteristics and edible risk of methylmercury in *Eriocheir sinensis* in Zhejiang Province [C]. Proceedings of the Twelfth Zhejiang Fishery Science and Technology Forum, 2017.
- [19] 覃东立, 黄晓丽, 高磊, 等. 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[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(9): 2989-2994.
- QIN DL, HUANG XL, GAO L, et al. Methylmercury pollution characteristics of *Procambarus clarkia* cultured in ricefield and its food safety risk assessment [J]. J Food Saf Qual, 2022, 13(9): 2989-2994.
- [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] CAO H, WANG ZH, MENG J, et al. Determination of arsenic in Chinese mitten crabs (*Eriocheir sinensis*): Effects of cooking and gastrointestinal digestion on food safety [J]. Food Chem, 2022, 393: 133345.
- [22] MONIKA RM, KAMILA PN, AGATA W, et al. Health benefits and risks associated with elements uptake from grilled fish and fish products [J]. J Sci Food Agric, 2021, 102(3): 957-964.
- [23] 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.
- [24] World Health Organization. Summary and conclusions of the 61st meeting of JECFA [R]. Geneva, World Health Organization, 2003.
- [25] 陈晓云, 孙富余, 于凤泉, 等. 中华绒螯蟹生存环境及蟹体中重金属含量变化研究[J]. 辽宁农业科学, 2017, (4): 19-22.
- CHEN XY, SUN FY, YU FQ, et al. Study on the living environment of *Eriocheir sinensis* and the changes of heavy metals in its body [J]. Liaoning Agric Sci, 2017, (4): 19-22.
- [26] 张聪, 宋超, 裴丽萍, 等. 环太湖流域池塘养殖中华绒螯蟹汞的残留现状及评价[J]. 生态环境学报, 2016, 25(3): 477-481.
- ZHANG C, SONG C, QIU LP, et al. Distribution pattern and risk assessment of total mercury in crab (*Eriocheir sinensis*) in aquaculture pond around Taihu Lake [J]. Ecol Environ Sci, 2016, 25(3): 477-481.
- [27] 陈凤蔚, 殷悦, 邵俊杰, 等. 电感耦合等离子体质谱法测定中华绒螯蟹体内的砷、镉、汞、铅[J]. 水产养殖, 2019, 40(7): 35-37, 42.
- CHEN FW, YIN Y, SHAO JJ, et al. ICP-MS determination of arsenic, cadmium, mercury and lead in of Chinese mitten crab [J]. J Aquac, 2019, 40(7): 35-37, 42.
- [28] 王雪婷, 王恒, 姚燕林, 等. 吹扫捕集-气相色谱-冷原子荧光法测定大闸蟹中的甲基汞含量[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(22): 8711-8716.
- WANG XT, WANG H, YAO YL, et al. Determination of methyl mercury in crabs by purge and trap gas chromatography-cold vapor atomic fluorescence spectrometry [J]. J Food Saf Qual, 2021, 12(22): 8711-8716.
- [29] 卢岚, 鲁兵, 李轶, 等. 湖南省中华绒螯蟹中砷、铅、汞、镉、铬检测结果分析[J]. 中国卫生检验杂志, 2019, 29(13): 1610-1612.
- LU L, LU B, LI Y, et al. Detection results analysis of arsenic, lead, mercury, cadmium, chromium in Chinese mitten crab in Hunan Province [J]. Chin J Health Lab Technol, 2019, 29(13): 1610-1612.
- [30] 甘居利, 贾晓平, 蔡文贵. 水生动物体汞污染的生物学特征[J]. 动物学杂志, 1999, (4): 48-52.
- GAN JL, JIA XP, CAI WG. Biological characteristics of mercury contamination in water [J]. Chin J Zool, 1999, (4): 48-52.
- [31] 吴永宁, 赵云峰, 李敬光. 第五届中国总膳食研究[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- WU YN, ZHAO YF, LI JG. The fifth Chinese total diet study [M]. Beijing: Science Press, 2018.
- [32] 王海宁, 姜晓东, 吴旭干, 等. 中华绒螯蟹二龄早熟和晚熟品系第三代成蟹可食率和生化组成的比较研究[J]. 上海海洋大学学报, 2018, 27(4): 487-493.
- WANG HN, JIANG XD, WU XG, et al. The comparison of edible rate and biochemical composition of the second-year early-maturing and late-maturing strains of the third selective generation during the adult culture of Chinese mitten crab *Eriocheir sinensis* [J]. J Shanghai Ocean Univ, 2018, 27(4): 487-493.

(责任编辑: 于梦娇 张晓寒)

作者简介



白淑艳, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为水产品质量安全。

E-mail: baishuyan1216@163.com

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