

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250226010

引用格式: 梁珊, 税小林, 杨玉莹, 等. 大黄鱼背腹部肌肉 6 种重金属检测及食用安全评价[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(10): 119–125.

LIANG S, SHUI XL, YANG YY, *et al.* Detection and edible safety evaluation of 6 kinds of heavy metals in dorsal and abdominal muscles of *Larimichthys crocea* [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(10): 119–125. (in Chinese with English abstract).

大黄鱼背腹部肌肉 6 种重金属检测及 食用安全评价

梁珊¹, 税小林¹, 杨玉莹¹, 陈许萌¹, 刘书成^{1,2}, 魏帅^{1*}

- (1. 广东海洋大学食品科技学院, 广东省水产品加工与安全重点实验室, 广东省海洋生物制品工程实验室, 广东省海洋食品工程技术研究中心, 水产品深加工广东普通高等学校重点实验室, 湛江 524088;
2. 大连工业大学海洋食品精深加工关键技术省部共建协同创新中心, 大连 116034)

摘要: **目的** 分析野生大黄鱼与养殖大黄鱼背部、腹部中的铜(Cu)、锌(Zn)、汞(Hg)、铅(Pb)、镉(Cd)和砷(As)金属元素的含量分布特征, 并进行食用健康风险评估。**方法** 采集野生大黄鱼[体长(35.16±4.62) cm, 体重(510.68±33.74) g]和养殖大黄鱼[体长(32.90±1.11) cm, 体重(454.19±20.03) g]的背部、腹部肌肉, 采用电感耦合等离子体质谱法和原子荧光光谱法测定 6 种重金属的含量, 采用污染指数法和健康风险评价进行分析。**结果** 野生大黄鱼与养殖大黄鱼背腹部中 Hg、As、Cu、Zn 的平均含量依次为 0.128、0.032、4.179、5.526 mg/kg 和 0.023、0.195、4.106、5.389 mg/kg, Pb、Cd 均未检出。单项重金属污染指数表明, 两种大黄鱼背部、腹部 Cu、Zn、Pb、Cd 和养殖大黄鱼背部、腹部 Hg 均为无污染水平; 野生大黄鱼腹部 Hg 和 As 存在轻度污染, 野生大黄鱼背部 Hg 存在轻度污染; 养殖大黄鱼背部、腹部 As 存在重度污染。野生大黄鱼肌肉中 6 种重金属综合污染指数值小于 1, 无污染; 养殖大黄鱼肌肉中 6 种重金属综合污染指数值在 1.0<PI≤2.0 之间, 为轻度污染。**结论** 野生大黄鱼背部、腹部肌肉重金属含量未超出检测标准, 养殖大黄鱼背部、腹部肌肉 As 元素超标; 两种大黄鱼背部、腹部肌肉无明显健康风险。本研究系统揭示养殖大黄鱼 As 元素富集问题, 预警饲料或环境风险; 通过污染指数与健康风险双维度评估, 构建水产品安全评价模型; 研究成果对完善我国水产养殖标准、提升水产品质量安全监管水平具有现实指导意义。

关键词: 大黄鱼; 重金属; 健康风险评估; 数据评价

Detection and edible safety evaluation of 6 kinds of heavy metals in dorsal and abdominal muscles of *Larimichthys crocea*

LIANG Shan¹, SHUI Xiao-Lin¹, YANG Yu-Ying¹, CHEN Xu-Meng¹,
LIU Shu-Cheng^{1,2}, WEI Shuai^{1*}

收稿日期: 2025-02-26

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD2401404); 广东海洋大学博士科研启动项目(R20048)

第一作者: 梁珊(1998—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为海洋食品保鲜与加工。E-mail: Ls02021010@163.com

*通信作者: 魏帅(1986—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为海洋食品保鲜与加工。E-mail: weishuaiws@126.com

(1. College of Food Science and Technology, Guangdong Ocean University, Guangdong Provincial Key Laboratory of Aquatic Products Processing and Safety, Guangdong Province Engineering Laboratory for Marine Biological Products, Guangdong Provincial Engineering Technology Research Center of Seafood, Key Laboratory of Advanced Processing of Aquatic Product of Guangdong Higher Education Institution, Zhanjiang 524088, China; 2. Collaborative Innovation Center of Seafood Deep Processing, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, China)

ABSTRACT: Objective To analyze the content characteristics of copper (Cu), zinc (Zn), mercury (Hg), lead (Pb), cadmium (Cd) and arsenic (As) in the dorsal and abdominal muscles of wild and farmed *Larimichthys crocea*, and carry out the food health threat and risk assessment. **Methods** The content of 6 kinds of heavy metals were determined by inductively coupled plasma mass spectrometry and atomic fluorescence spectrometry in the dorsal and abdominal parts of wild [(35.16±4.62) cm in length and (510.68±33.74) g in weight] and farmed [(32.90±1.11) cm in length and (454.19±20.03) g in weight] *Larimichthys crocea*. The pollution index method and health risk assessment were used for analysis. **Results** The average content of Hg, As, Cu and Zn in the dorsal and abdominal of wild and farmed *Larimichthys crocea* were 0.128, 0.032, 4.179 and 5.526 mg/kg, and 0.023, 0.195, 4.106 and 5.389 mg/kg, respectively. Pb and Cd were not detected. Based on the single heavy metal pollution index, Cu, Zn, Pb, Cd in the dorsal and abdominal of wild and farmed *Larimichthys crocea* and Hg in the dorsal and abdominal of farmed *Larimichthys crocea* were pollution-free levels. There was slight pollution of Hg and As in the abdomen part of wild *Larimichthys crocea*, and mild pollution of Hg in the dorsal of wild *Larimichthys crocea*. Serious pollution level of As was found in the dorsal and abdominal of the farmed *Larimichthys crocea*. The comprehensive pollution index value of 6 kinds of heavy metals in the muscle of wild *Larimichthys crocea* was less than 1, which were pollution-free. And comprehensive pollution index value in the muscle tissue of farmed *Larimichthys crocea* was between $1.0 < PI \leq 2.0$, which were mildly polluted. **Conclusion** The content of heavy metals in the dorsal and abdominal muscles of wild *Larimichthys crocea* don't exceed the detection standard, and the As element in the dorsal and abdominal muscles of farmed *Larimichthys crocea* exceeds the standard. There is no obvious health risk for the wild and farmed *Larimichthys crocea* muscles. This study systematically reveals the problem of As enrichment in farmed *Larimichthys crocea*, and early warning of feed or environmental risks; through the two-dimensional assessment of pollution index and health risk, the safety evaluation model of aquatic products is constructed. The research results have practical guiding significance for improving China's aquaculture standards and improving the quality and safety supervision level of aquatic products.

KEY WORDS: *Larimichthys crocea*; heavy metal; health risk assessment; data evaluation

0 引言

大黄鱼(*Larimichthys crocea*)又名大鲜、大黄花,是石首鱼科、黄鱼属鱼类^[1],我国特有的 4 大传统海鲜之一。大黄鱼肉质细腻、味道鲜美、营养丰富,显著的经济效益使其在海水鱼类的捕捞和养殖中占据重要地位^[2]。大黄鱼作为一种经济海洋鱼类,胆固醇含量低且富含多种微量元素、不饱和脂肪酸和氨基酸等营养物质,食用价值高,因此深受消费者喜爱^[3-4]。

随着城市化和工业化的快速发展,重金属通过各种自然和人为活动引入环境中,如未经处理的工业废水和生活用水直接或间接地排入江河、海洋等自然水域,从而造成水域重金属污染,并进一步在水生生物体内富集并积累^[5],而且重金属的毒性高,可能对水生生物的肾组织、肝组织和神经组织等造成无法弥补的损害^[6]。人类通过食物链、皮肤

接触和吸入等途径不断接触污染物,食物消费则是人类摄入污染物的主要途径,占污染物总摄入量的 90%以上^[7]。目前,市场上的大黄鱼资源主要来源于自然海域的野生大黄鱼及深海围网养殖的大黄鱼。作为一种海洋鱼类,大黄鱼体内的重金属来源可能是直接从海域环境中吸收或者通过捕食浮游生物、小型鱼虾及底栖生物而吸收重金属并富集在体内^[8-9]。重金属在环境中的残留具有持久性,可以在植物和动物体内积累难以代谢出体外^[10],根据生物毒性特征,Hg、Pb、Cd 和 As 的被世界卫生组织列为优先控制污染物,具有强神经毒性、致癌性及致畸性,其中甲基 Hg 可通过血脑屏障引发不可逆神经损伤,而无机 As 已被国际癌症研究机构(International Agency for Research on Cancer, IARC)列为 I 类人类致癌物;Cu、Zn 作为必需微量元素,在工业废水、船舶防污漆及水产饲料添加剂中广泛存在,过量摄入会导致代谢紊乱;大黄鱼肌肉组织因其蛋白质含量高更易

与金属离子结合蓄积, 因此作为主要食用部位直接关系消费安全, 系统的评估这 6 种特征污染物对完善水产品安全标准具有重要科学价值。随着国民健康意识的提升, 重金属在鱼类的积累情况及产生的相关健康风险备受关注。郑瑞生等^[11]对 9 种近海鱼类的头、尾、皮等部位进行了重金属含量检测, 结果表明内脏重金属污染较严重, 但鱼肉食用均安全。曾欢等^[12]对鄱阳湖鱼类进行重金属含量进行测定, 结果表明鄱阳湖鱼类单项重金属含量无污染且复合目标危险系数均小于 1, 该地区鱼类重金属的富集不会对人群食用产生潜在危害。王进芳等^[13]对高体鲮的背肉、腹肉、皮等部位的重金属含量进行测定, 结果表明, 高体鲮的 5 种重金属均达到无污染水平, 且单一金属风险和重金属复合风险都小于 1。MENDOZA 等^[14]对菲律宾卡拉潘市地区的罗非鱼内脏、皮、尾等不同部位的重金属含量进行检测分析, 结果表明 Cu、Pb、锰、Hg 和 Zn 在皮、鳍和内脏的浓度超出相关限定标准。PELIĆ 等^[15]对不同养殖水源的鲤鱼进行重金属分析, 研究结果表明鲤鱼不同器官中重金属的含量因季节而异, 重金属在鲤鱼体内的浓度远低于世界卫生组织标准。

而国内外关于野生和养殖大黄鱼背腹部肌肉重金属含量及健康风险评估的研究较少。鉴于此, 本研究测定了两种大黄鱼背腹部肌肉中的 Cu、Zn、Hg、Pb、Cd 和 As 含量, 通过运用单因子污染指数法(single-factor pollution index, SFP)、综合污染指数法及目标危害系数法(target hazard quotient, THQ)对两种大黄鱼可食用部位进行食用安全性评价, 根据大黄鱼体内的重金属含量情况, 为消费者提供安全预警, 合理调整食用量和食用频率, 降低因食用受污染大黄鱼而患病的风险。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

2022 年 9 月—2023 年 6 月间采集大黄鱼样本, 其中野生大黄鱼[体长(35.16±4.62) cm, 体重(510.68±33.74) g]取样数量为 3 条, 采集于湛江市硇洲海域; 养殖大黄鱼[体长(32.90±1.11) cm, 体重(454.19±20.03) g]取样数量为 3 条, 购于三都港官方旗舰店, 养殖于福建省宁德市三都港海域, 主要采用深海围网养殖, 养殖时长达一年半, 采用小鱼小虾喂养。

过氧化氢(分析纯, 北京化工厂有限责任公司); 无水乙醇、硝酸(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司); Cu、Zn、Hg、Pb、Cd 和 As 标准品(质量浓度 10 mg/L, 坛墨质检科技股份有限公司)。

1.2 仪器与设备

7500cx 型电感耦合等离子体质谱仪(美国安捷伦科技

有限公司); SK-锐析原子荧光光谱仪(北京金索坤技术开发有限公司); PRO 41HVT56 型微波消解仪(奥地利安东帕有限公司); BSA235S-SH 万分之一电子天平(上海精密有限公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 样品前处理

将新鲜大黄鱼样品装入带冰保温箱, 运回实验室, 去除内脏、头、尾、皮, 清洗干净后将鱼肉分为背部肌肉和腹部肌肉, 进行液氮速冻后放入-80℃冰箱保存备用。

1.3.2 As、Cu、Zn、Cd、Pb 和 Hg 测定前处理

采用微波消解法对 As、Cu、Zn、Cd、Pb 和 Hg 金属元素进行前处理。

1.3.3 重金属的测定及标准曲线的配制

As、Cu、Zn、Cd 和 Pb 5 种重金属元素含量的测定使用电感耦合等离子体质谱法; Hg 元素含量的测定使用原子荧光光谱法, 6 种重金属含量的标准曲线及相关系数如表 1 所示。

表 1 标准曲线及相关系数
Table 1 Standard curve and correlation coefficient

重金属	回归方程	相关系数(r^2)
Pb	$Y=0.806X+0.00005$	0.9999
Cd	$Y=0.321X+0.00004$	0.9996
Cu	$Y=2.122X-0.0022$	0.9999
Zn	$Y=0.921X+0.0020$	0.9999
Hg	$Y=436.11X-16.055$	0.9999
As	$Y=0.632X-0.0091$	0.9998

1.3.4 数据评价方法

(1)单因子污染指数法

通过 SFP^[16]对两种大黄鱼背部和腹部肌肉的重金属污染状况进行分析, 评价单项重金属元素在背部、腹部肌肉中的污染情况, 计算如公式(1)所示:

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

式中: P_i 为重金属的单项污染指数; C_i 为重金属的实际测定测值, mg/kg; S_i 为重金属的标准值, mg/kg。重金属污染物限量标准参考 GB 2762—2022《食品安全国家标准 食品中污染物限量》、NY 5073—2006《无公害食品水产品中有毒有害物质限量》和联合国粮农组织^[17]提供的鱼类重金属限量标准, 其中 Zn 元素的最高限量为 40 mg/kg。SFP 分级标准^[18-19]如表 2 所示。

表 2 SFP 分级标准
Table 2 Classification standard of SFP

P_i 值	$P_i \leq 0.2$	$0.2 < P_i \leq 0.6$	$0.6 < P_i \leq 1.0$	$P_i > 1.0$
污染标准	无污染	轻度污染	中度污染	重度污染

(2)综合污染指数法

通过综合污染指数法^[20]对两种大黄鱼背部和腹部肌肉的重金属污染进行计算分析,评价重金属元素在背部肌肉中的污染情况,计算如公式(2)所示:

$$PI = \sqrt{\frac{P_{均值}^2 + P_{最大值}^2}{2}} \quad (2)$$

式中: PI 为综合污染指数; $P_{均值}$ 为 P_i 的平均值; $P_{最大值}$ 为 P_i 最大值。综合污染指数分级标准如表 3 所示。

表 3 综合污染指数分级标准
Table 3 Classification standard of comprehensive pollution index

PI 值	PI≤1.0	1.0<PI≤2.0	2.0<PI≤3.0	PI>3.0
分级标准	未受污染	轻度污染	中度污染	重度污染

(3)重金属健康风险分析

采用 THQ 评价两种大黄鱼背部和腹部肌肉重金属对人体健康的影响^[21]。当 THQ 值≤1 时,污染物对暴露人群无明显的健康风险;当 THQ 值>1 时,则表明污染物对暴露人群造成健康风险^[22]。单一重金属健康风险 THQ 计算如公式(3)所示:

$$THQ = \frac{E_F \times E_D \times F_{IR} \times C}{R_{FD} \times W_{AB} \times T_A} \times 10^{-3} \quad (3)$$

式中: E_F 为暴露频率, d/a, 取值为 365; E_D 为暴露时间, 取值为 75.76 a; F_{IR} 为日常近海鱼类的摄入率, 取值为 63.41 g/d^[23]; C 为检测鱼类肌的重金属实际测量含量, mg/kg; R_{FD} 为参考剂量, mg/(kg·d); 其中 $R_{FD}(Zn)=0.3 \text{ mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ 、 $R_{FD}(Pb)=0.004 \text{ mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ 、 $R_{FD}(Cd)=0.001 \text{ mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ 、 $R_{FD}(As)=0.0003 \text{ mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ 、 $R_{FD}(Hg)=0.0003 \text{ mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ ^[20-21]。参照 NY 5073—2006 中的标准 $R_{FD}(Cu)=0.04 \text{ mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$; W_{AB} 为人体平均体重, 取值为 60.0 kg; T_A 为平均接触时间 ($E_D \times 365 \text{ d/a}$), 即 $T_A=27652.4 \text{ d/a}$ 。

多种重金属复合风险系数(total target hazard quotient, TTHQ)为各元素 THQ 的总和, 计算如公式(4)所示:

$$TTHQ = \sum THQ = THQ_{Zn} + THQ_{Cu} + THQ_{Pb} + THQ_{Cd} + THQ_{Hg} + THQ_{As} \quad (4)$$

1.4 数据处理

实验结果以平均值±标准偏差表示, 使用 SPSS 20 进

行数据处理, 根据单因素方差分析和 Duncan 法多重检验进行数据显著差异性分析, $P<0.05$ 表示显著差异。

2 结果与分析

2.1 野生大黄鱼与养殖大黄鱼背腹部肌肉的重金属含量分析

野生大黄鱼与养殖大黄鱼背部、腹部肌肉重金属元素的含量见表 4, 野生大黄鱼与养殖大黄鱼背部、腹部中 Hg、As、Cu、Zn 的平均含量依次为 0.128、0.032、4.179、5.526 mg/kg 和 0.023、0.195、4.106、5.389 mg/kg, 其中野生大黄鱼与养殖大黄鱼背部、腹部肌肉中所测重金属元素含量较高的是 Cu 元素: 4.102~4.191 mg/kg 和 Zn 元素: 5.121~5.751 mg/kg, 其次为 Hg 元素: 0.023~0.144 mg/kg 和 As 元素: 0.019~0.223 mg/kg, Zn 和 Cu 元素的含量明显高于其他元素, 这与匡荃芬等^[24]的研究结果一致。Zn 和 Cu 元素在生物体内能够维持神经系统正常功能, 参与免疫调节活动, 是生物体中必需的微量元素, 更易于被生物体主动吸收^[25-26], 因此在两种大黄鱼背部、腹部肌肉中 Zn 和 Cu 元素含量较高。而 Pb、Cd、Hg 和 As 元素作为非必需元素, 在鱼类中 As 元素和 Hg 元素的含量相对较低, Pb 元素和 Cd 元素在两种大黄鱼背部、腹部肌肉中则未检出, 即 Pb 元素和 Cd 元素在两种大黄鱼背部、腹部肌肉中蓄积量较小, 对人体不构成危害。研究表明, Pb 和 Cd 重金属中毒会导致影响神经系统的正常发育和功能, 增加高血压、心脏病等心血管疾病的发病风险以及肾小管功能障碍, 长期暴露可能引发肾功能衰竭^[27]。

如表 4 所示, Hg、As 和 Cu 元素在两种大黄鱼背部、腹部肌肉的含量分别存在显著差异($P<0.05$)。Cu 元素在两种大黄鱼背部、腹部肌肉间存在显著差异($P<0.05$), 而同种大黄鱼背部、腹部肌肉间无显著差异($P>0.05$); Zn 元素在野生大黄鱼背部与腹部间存在差异显著($P<0.05$); Hg 元素在野生大黄鱼背部、腹部的含量显著高于养殖大黄鱼($P<0.05$), 养殖大黄鱼背部、腹部间无显著差异($P>0.05$); As 元素在两种鱼背部、腹部中存在显著差异, 且养殖大黄鱼背部、腹部 As 元素的含量显著高于野生大黄鱼背部、腹部($P<0.05$), 结果表明同种大黄鱼的不同部位存在显著差异。参照 NY 5073—2006 和 GB 2762—2022, 养殖

表 4 野生大黄鱼与养殖大黄鱼背腹部肌肉的重金属含量(湿重, mg/kg)
Table 4 Heavy metal content in the dorsal and abdominal muscles of wild and farmed *Larimichthys crocea* (wet weight, mg/kg)

组别	Pb	Cd	Cu	Zn	Hg	As
野生大黄鱼背部	ND	ND	4.191±0.012 ^a	5.751±0.015 ^a	0.111±0.004 ^b	0.019±0.008 ^d
野生大黄鱼腹部	ND	ND	4.166±0.013 ^a	5.301±0.011 ^b	0.144±0.005 ^a	0.046±0.003 ^c
养殖大黄鱼背部	ND	ND	4.111±0.003 ^b	5.657±0.040 ^a	0.023±0.001 ^c	0.223±0.005 ^a
养殖大黄鱼腹部	ND	ND	4.102±0.011 ^b	5.121±0.078 ^c	0.023±0.001 ^c	0.166±0.010 ^b

注: ND 表示未检测到该重金属元素, 下同; 同一列上标不同字母表显著差异($P<0.05$)。

大黄鱼背腹部 As 元素超标(最高限量值为 0.1 mg/kg)。As 元素在农业生产和工业中使用广泛, 如中 As 的一些化合物如亚砷酸钠、砷酸铅等曾经被广泛用作农药, 用于防治农作物的害虫、病菌和杂草, 能有效控制病虫害, 提高农作物产量, 也常使用在金属冶炼和半净化工业废气等方面。日常的生活生产中产生的 As 元素污染会通过工业排放、农药化肥的过度使用和陆地径流等途径进入湖泊海洋等水域环境, As 元素污染已造成沿海地区严峻的环境问题之一^[28]。因此, 在日常的养殖生产活动中应加强养殖海域环境监测, 重点关注 As 元素的污染动态。

2.2 野生大黄鱼与养殖大黄鱼肌肉重金属污染评价

对野生大黄鱼与养殖大黄鱼背部、腹部肌肉重金属采用 SFP 和综合污染指数法进行分析(表 5), SFP 表明, 野生大黄鱼背部、腹部肌肉中 Zn、Cu、Pb 和 Cd 4 大重金属元素为无污染, 而野生大黄鱼背部、腹部 Hg 和腹部 As 存在轻度污染。养殖大黄鱼背部、腹部肌肉中 Zn、Cu、Pb、Cd 和 Hg 5 种重金属元素为无污染, 而 As 元素在养殖大黄鱼背部、腹部中存在重度污染。平均值结果表明, 野生大黄鱼与养殖大黄鱼肌肉组织中 Zn、Cu、Pb、Cd 和养殖大黄鱼背部、腹部肌肉中 Hg 均为无污染水平, 而野生大黄鱼背部、腹部肌肉中 As 和 Hg 存在轻度污染, 养殖大黄鱼肌肉中 As 为重度污染。由于野生大黄鱼栖息于开放海域, As 污染主要源于自然地质活动或远距离工业排放, 污染强度相对较低。而养殖大黄鱼通常位于近岸或深海围网区域, 易受沿岸农业废水、工业排污及水产养殖过程中含 As 饲料添加剂、消毒剂残留等自身污染的影响, 导致养殖环境中 As 浓度显著高于自然海域。Hg 在鱼类体内更易富集于

肝脏、肾脏等代谢器官, 而肌肉中浓度相对较低。野生鱼因生存压力可能需更高能量代谢, 导致 Hg 向肌肉的二次分布增加; 养殖鱼代谢环境稳定, Hg 主要滞留于内脏, 肌肉污染水平因而较低。

综合污染指数表明, 野生大黄鱼肌肉组织中 Zn、Cu、Pb、Cd、As 和 Hg 综合污染指数值小于 1, 说明野生大黄鱼背部、腹部肌肉为无污染; 养殖大黄鱼肌肉组织中 Zn、Cu、Pb、Cd、As 和 Hg 综合污染指数值在 1.0<PI≤2.0 之间, 表明为轻度污染。当生物体对重金属的富集和积累超过体内各大系统的能力承受范围, 就会干扰体内细胞的正常代谢和功能, 影响食物的消化和吸收, 导致营养不良, 更严重者会干扰生殖行为、阻碍胚胎发育, 对其繁衍和种群延续构成威胁^[29]。养殖大黄鱼样品采集于福建省宁德市三都港海域, 福建作为全国大黄鱼养殖产量最高的地区, 当地海域的水质状况尤为重要, 对重金属污染的累积趋势等进行综合评估, 可以为防治工作提供科学依据^[30-31]。

综上, 野生与养殖大黄鱼重金属污染主要由环境暴露途径、食物来源及人为管理措施共同作用所致。未来可通过加强养殖饲料 As 源控制、优化养殖水域环境监测, 并针对无机 As 形态开展风险评估, 以保障水产品食用安全。

2.3 野生大黄鱼与养殖大黄鱼食用健康风险评价

为进一步明确野生大黄鱼与养殖大黄鱼的日常食用健康风险, 对野生大黄鱼与养殖大黄鱼背部可食用肌肉进行健康风险评价, 其结果如表 6 所示。野生大黄鱼背部、腹部肌肉中 6 种重金属元素的单一重金属风险值由高到低分别为 Hg>Cu>As>Zn>Pb=Cd、Hg>As>Cu>Zn>Pb=Cd, 养殖大黄鱼背部、腹部肌肉中 6 种重金属元素的单一重金属

表 5 野生大黄鱼与养殖大黄鱼背腹部肌肉重金属 SFP 和综合污染指数
Table 5 SFP and comprehensive pollution index of heavy metal of dorsal and abdominal muscles of wild and farmed *Larimichthys crocea*

分类	P_{Cu}	P_{Zn}	P_{Pb}	P_{Cd}	P_{Hg}	P_{As}	PI	综合评价
野生大黄鱼背部	0.0838±0.0002	0.1438±0.0003	ND	ND	0.2215±0.0057	0.1928±0.0565	0.4540±0.0066	无污染
野生大黄鱼腹部	0.0833±0.0002	0.1325±0.0002	ND	ND	0.2886±0.0068	0.4551±0.0207	0.3849±0.0065	无污染
平均值	0.0835±0.0002	0.1382±0.0002	ND	ND	0.2551±0.0063	0.3240±0.0386	0.4195±0.0066	
单因子污染评价	无污染	无污染	无污染	无污染	轻度污染	轻度污染	无污染	
养殖大黄鱼背部	0.0822±0	0.1414±0.0007	ND	ND	0.0464±0.0002	2.2328±0.0334	1.9188±0.0218	轻度污染
养殖大黄鱼腹部	0.0820±0.0002	0.1280±0.0014	ND	ND	0.0463±0.0011	1.6648±0.0735	1.2252±0.0536	轻度污染
平均值	0.0821±0.0001	0.1347±0.0011	ND	ND	0.0464±0.0007	1.9488±0.0534	1.5720±0.0377	
单因子污染评价	无污染	无污染	无污染	无污染	无污染	重度污染	轻度污染	

表 6 野生大黄鱼与养殖大黄鱼背腹部肌肉重金属的健康风险评价
Table 6 Health risk assessment of heavy metals in dorsal and abdominal muscles of wild and farmed *Larimichthys crocea*

组别	THQ						TTHQ
	Cu	Zn	Hg	As	Pb	Cd	
野生大黄鱼背部	0.1107	0.0203	0.3902	0.0679	ND	ND	0.5891
野生大黄鱼腹部	0.1101	0.0187	0.5084	0.1603	ND	ND	0.7975
养殖大黄鱼背部	0.1086	0.0199	0.0818	0.7848	ND	ND	0.9951
养殖大黄鱼腹部	0.1084	0.0180	0.0815	0.5865	ND	ND	0.7944

风险值由高到低均为 As>Cu>Hg>Zn>Pb=Cd, 两种大黄鱼背腹部肌肉 THQ 值均小于 1, 且两种大黄鱼 TTHQ 值也小于 1, 说明暴露人群没有明显的健康风险。TTHQ 值由大到小依次为: 养殖大黄鱼背部>野生大黄鱼腹部>养殖大黄鱼腹部>野生大黄鱼背部。野生大黄鱼背腹部肌肉中 Hg 元素和养殖大黄鱼背部、腹部肌肉中 As 元素的 THQ 值相对较高, 对 TTHQ 值的影响较大。Hg 元素和 As 元素是野生大黄鱼和养殖大黄鱼的主要风险重金属。

3 结 论

本研究测定了野生大黄鱼、养殖大黄鱼背部和腹部的 6 种重金属, 除养殖大黄鱼背部和腹部的 As 元素超出标准 (0.1 mg/kg) 外, 其余 5 种重金属元素含量均低于 GB 2762—2022、NY 5073—2006 和联合国粮农组织提供的鱼类重金属限量标准。综合污染指数表明野生大黄鱼背腹部肌肉为无污染, 养殖大黄鱼背腹部肌肉存在轻度污染。健康风险评估结果显示野生大黄鱼与养殖大黄鱼背腹部肌肉均无健康风险。对大黄鱼的重金属污染进行研究不仅为消费者、生产者和监管部门提供了明确的风险认知与行动依据, 丰富了水产动物污染物分布的基础数据, 为后续开展不同生长阶段、地域或养殖模式的对比研究提供了参考, 推动渔业环境与食品安全领域的深入探索, 对保障水产品质量安全和渔业绿色发展具有重要的现实意义。

参考文献

- [1] 陈志, 李水根, 许丽双, 等. 深远海养殖大黄鱼肌肉品质分析与比较[J]. 福建农业科技, 2024, 55(11): 25–31.
CHEN Z, LI SG, XU LS, *et al.* Analysis and comparison of muscle quality of large yellow croaker cultured in deep sea [J]. *Fujian Agricultural Science and Technology*, 2024, 55(11): 25–31.
- [2] 饶从稳, 何亮银, 林志灯, 等. 大黄鱼的营养成分及其加工进展研究[J]. 食品科技, 2023, 48(12): 113–118.
RAO CW, HE LY, LIN ZD, *et al.* Nutritional components and processing progress of large yellow croaker [J]. *Food Science and Technology*, 2023, 48(12): 113–118.
- [3] 宋炜, 李莉珍, 谢伟铭, 等. 我国大黄鱼养殖产业现状与发展途径探究[J]. 中国水产, 2024(11): 17–21.
SONG W, LI LZ, XIE WM, *et al.* Research on the current situation and development path of large yellow croaker aquaculture industry in China [J]. *China Fisheries*, 2024(11): 17–21.
- [4] CHONG Y, FU J, CHAI T, *et al.* Preservation effects and antimicrobial mechanism of ultrasound assisted rosmarinic acid treatment on large yellow croaker during cold storage [J]. *Food Bioscience*, 2024, 57: 103455.
- [5] PANDA BP, MOHANTA YK, PARIDA SP, *et al.* Metal pollution in freshwater fish: A key indicator of contamination and carcinogenic risk to public health [J]. *Environmental Pollution*, 2023, 330: 121796.
- [6] XU C, YAN H, ZHANG S. Heavy metal enrichment and health risk assessment of karst cave fish in Libo, Guizhou, China [J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2021, 60(1): 1885–1896.
- [7] XU M, CHEN Q, KONG X, *et al.* Heavy metal contamination and risk assessment in winter jujube (*Ziziphus jujuba* Mill. cv. Dongzao) [J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2023, 174: 113645.
- [8] CHERA-ANGHEL I, STEFAN-VAN-STADEN R. Extraction of heavy metals by cooking/preserving of seafood, tuna and poultry from Romania—A source of contamination with heavy metals [J]. *Food Chemistry*, 2023, 407: 135158.
- [9] 刘海新. 福建省 3 种养殖鱼食用健康风险评估[J]. 中国渔业质量与标准, 2021, 11(2): 51–62.
LIU HX. Eating health risk assessment of three kinds of cultured fish in Fujian Province [J]. *China Fishery Quality and Standards*, 2021, 11(2): 51–62.
- [10] XU Z, DOU S, DING S, *et al.* Temporal genetic stability despite decades of overexploitation for large yellow croaker in the East China Sea [J]. *Frontiers in Marine Science*, 2022. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.861840>
- [11] 郑瑞生, 王巧燕, 张冰泉, 等. 9 种近海鱼重金属污染状况及食用安全性评价[J]. 食品科学, 2022, 43(14): 353–359.
ZHENG RS, WANG QY, ZHANG BQ, *et al.* Heavy metal pollution status and food safety evaluation of 9 kinds of offshore fish [J]. *Food Science*, 2022, 43(14): 353–359.
- [12] 曾欢, 张华, 熊小英, 等. 鄱阳湖河湖交错区鱼类重金属含量特征及健康风险评估[J]. 环境科学学报, 2021, 41(2): 649–659.
ZENG H, ZHANG H, XIONG XY, *et al.* Heavy metal content characteristics and health risk assessment of fish in the river-lake ecotone of Poyang Lake [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, 41(2): 649–659.
- [13] 王进芳, 杜梓星, 钟洪亮, 等. 不同生长时期高体鲮中 5 种金属测定及健康风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(3): 36–42.
WANG JF, DU ZX, ZHONG HL, *et al.* Determination and health risk assessment of 5 metals in different growth periods of *Seriola australis* [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2023, 14(3): 36–42.
- [14] MENDOZA LC, NOLOS RC, VILLAFLORES OB, *et al.* Detection of heavy metals, their distribution in *Tilapia* spp., and health risks assessment [J]. *Toxics*, 2023, 11(3): 286.
- [15] PELIĆ M, MIHALJEV Ž, ŽIVKOV-BALOŠ M, *et al.* Health risks associated with the concentration of heavy metals in sediment, water, and carp reared in treated wastewater from a slaughterhouse [J]. *Water*, 2023, 16(1): 94.
- [16] TKACHENKO H, KURHALUK N, KASIYAN O, *et al.* Dietary nutrients and health risks from exposure to some heavy metals through the consumption of the farmed common carp (*Cyprinus carpio*) [J]. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 2021, 19: 793–804.
- [17] OBAYEMI OE, AYOADE MA, KOMOLAFE OO. Health risk assessment of heavy metals in *Coptodon zillii* and *Parachanna obscura* from a tropical reservoir [J]. *Heliyon*, 2023, 9(6): e16609.
- [18] 黄小兰, 郑容, 杨家贵, 等. 不同规格胭脂鱼的营养成分分析和安全性评价[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(7): 72–78.
HUANG XL, ZHENG R, YANG JG, *et al.* Nutritional composition analysis and safety evaluation of different specifications of Chinese sucker [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2023, 14(7): 72–78.

- [19] 孙安俯, 潘帅, 肖娟, 等. 黄鳍金枪鱼重金属富集特征及食品安全评估[J]. 热带生物学报, 2023, 14(1): 25–31.
SUN ANF, PAN S, XIAO J, *et al.* Heavy metal enrichment characteristics and food safety assessment of yellowfin tuna [J]. Journal of Tropical Biology, 2023, 14(1): 25–31.
- [20] GHANNAM HE. Risk assessment of pollution with heavy metals in water and fish from River Nile, Egypt [J]. Applied Water Science, 2021, 11(7): 125.
- [21] ATIQUE-ULLAH AKM, AKTER M, MUSARRAT M, *et al.* Evaluation of possible human health risk of heavy metals from the consumption of two marine fish species *Tenualosa ilisha* and *Dorosoma cepedianum* [J]. Biological Trace Element Research, 2019, 191: 485–494.
- [22] KAÇAR E. Heavy metal concentrations in various tissues of two fish species from Damsa Dam Lake (Turkey) and associated health risk assessment [J]. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology, 2024, 81: 127339.
- [23] ALBERTO A, FRANCESCO C, ATZEI A, *et al.* Heavy metal and metalloid accumulation in wild brown trout (*Salmo trutta* L., 1758 complex, Osteichthyes: Salmonidae) from a mountain stream in Sardinia by ICP-OES [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2021, 193(7): 448.
- [24] 匡荟芬, 胡春华, 孙丽丽, 等. 鄱阳湖鱼类重金属积累特征及其健康风险评估[J]. 南昌大学学报(理科版), 2018, 42(6): 578–583.
KUANG HF, HU CH, SUN LL, *et al.* Heavy metal accumulation characteristics and health risk assessment of fish in Poyang Lake [J]. Journal of Nanchang University (Natural Science), 2018, 42(6): 578–583.
- [25] TÖRE Y, USTAOĞLU F, TEPE Y, *et al.* Levels of toxic metals in edible fish species of the Tigris River (Turkey); threat to public health [J]. Ecological Indicators, 2021, 123: 107361.
- [26] HOSSEINI SM, PANAHI-AZAR A, SHEYBANI-ARANI M, *et al.* Vitamins, minerals and their maternal levels' role in brain development: An updated literature-review [J]. Clinical Nutrition ESPEN, 2024, 63: 31–45.
- [27] ANDLEEB S, UR-REHMAN K, MAHMOOD A, *et al.* Human health risk hazards by heavy metals through consumption of vegetables cultivated by wastewater [J]. Journal of King Saud University-Science, 2023, 35(2): 102467.
- [28] 杜森, 张黎. 砷在海洋食物链中的生物放大潜力及发生机制探讨[J]. 生态毒理学报, 2019, 14(1): 54–66.
DU S, ZHANG L. Discussion on the biomagnification potential and mechanism of arsenic in the marine food chain [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2019, 14(1): 54–66.
- [29] 杭璐, 谢晓翹, 刘梦莹, 等. 中国部分地区水库可食用鱼中重金属含量及风险评估[J]. 湖北农业科学, 2021, 60(23): 136–139.
HANG L, XIE XQ, LIU MY, *et al.* Heavy metal content and risk assessment of edible fish in reservoirs in some areas of China [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2021, 60(23): 136–139.
- [30] 蔡真珍, 郑盛华, 杨妙峰, 等. 福建东山湾八尺门海域水体及沉积物中的重金属污染评价[J]. 应用海洋学学报, 2022, 41(2): 259–267.
CAI ZZ, ZHENG SH, YANG MF, *et al.* Assessment of heavy metal pollution in water and sediments in Bachimen sea area of Dongshan Bay, Fujian [J]. Journal of Applied Oceanography, 2022, 41(2): 259–267.
- [31] 陈云英. 福建中东部海水养殖贝类质量现状与评价[J]. 渔业研究, 2020, 42(2): 146–152.
CHEN YY. Quality status and evaluation of mariculture shellfish in central and eastern Fujian [J]. Journal of Fisheries Research, 2020, 42(2): 146–152.

(责任编辑: 安香玉 蔡世佳)