

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20240510003

江苏重点养殖海域贝类肌肉铅镉含量特征及健康风险评价

胡月^{1,2}, 任娣^{1,2}, 王鹭^{1,2}, 夏子涵^{1,2}, 李昊泽^{1,2}, 朱晓华^{1,2*}

(1. 江苏省淡水水产研究所, 南京 210017; 2. 江苏省水产质量检测中心, 南京 210017)

摘要: **目的** 分析江苏海域2021—2023年牡蛎(*Crassostrea rivularis*)、贻贝(*Mytilus edulis*)、四角蛤蜊(*Macrta veneriformis*)、文蛤(*Meretrix meretrix*) 4种典型贝类共计536个样品,测定其肌肉样品的铅镉含量,并评估人类摄入的健康风险。**方法** 样品消解后采用石墨炉原子吸收光谱法检测铅和镉的含量。采用单因子污染指数和目标危险系数进行健康风险评价。**结果** 样品铅镉含量均低于限量值,铅含量为ND~1.22 mg/kg,镉含量为0.017~0.627 mg/kg,2021年铅镉含量为3年间最低。不同地区样品铅镉结果整体上表明,如东与启东相当,均高于东台。不同品种样品的铅镉残留水平不同,就铅而言,整体上贻贝>牡蛎,四角蛤蜊>文蛤,镉则相反。贝类样品单因子污染指数 P_i 值均低于1,绝大部分样品处于正常背景水平,只有启东的四角蛤蜊样品为铅轻度污染水平。所有样品目标危险系数值远小于1,表明食用该区域的贝类对成人消费者造成的健康风险可接受。**结论** 本研究补充了华东沿海地区养殖贝类重金属方面数据,研究表明江苏海域养殖贝类肌肉重金属含量处于安全水平,成人长期食用的健康风险在可接受范围内,为保障水产品质量安全,促进地区养殖贝类经济绿色发展提供理论依据。

关键词: 贝类; 重金属; 铅; 镉; 健康风险

Characteristics and health risk assessment of lead and cadmium content in shellfish muscle of key aquaculture areas in Jiangsu Province

HU Yue^{1,2}, REN Di^{1,2}, WANG Lu^{1,2}, XIA Zi-Han^{1,2}, LI Hao-Ze^{1,2}, ZHU Xiao-Hua^{1,2*}

(1. Freshwater Fisheries Research Institute of Jiangsu Province, Nanjing 210017, China;
2. Aquatic Products Analysis and Testing Center of Jiangsu Province, Nanjing 210017, China)

ABSTRACT: Objective To investigate the levels of lead and cadmium in 536 shellfish muscle samples from 4 species (*Crassostrea rivularis*, *Mytilus edulis*, *Macrta veneriformis* and *Meretrix meretrix*), which were collected from coastal waters of Jiangsu from 2021 to 2023, and assess their human intake risks. **Methods** Samples were determined by graphite furnace atomic absorption spectrometry after digestion. The single factor pollution index and target hazard quotient were used for health risk assessment. **Results** None of samples exceeded the standard. Their

基金项目: 江苏省农产品质量安全专项风险监测(水产品)项目(2023-SJ-075)、蓝色粮仓科技创新重点专项(2020YFD0900300)

Fund: Supported by the Agricultural Product Quality and Safety Special Risk Monitoring (Aquatic Product) Project of Jiangsu Province (2023-SJ-075), and the Blue Granary Science and Technology Innovation Key Project (2020YFD0900300)

*通信作者: 朱晓华, 硕士, 研究员, 主要研究方向为水产品质量安全。E-mail: xhz824@sina.com

*Corresponding author: ZHU Xiao-Hua, Master, Professor, Freshwater Fisheries Research Institute of Jiangsu Province, No.90, Nanhu East Road, Jianye District, Nanjing 210017, China. E-mail: xhz824@sina.com

concentrations were: Lead (ND-1.22 mg/kg), cadmium (0.017–0.627 mg/kg). Lead and cadmium concentration in 2021 was the lowest during 3 years. The results of samples from different regions implied that Rudong was similar with Qidong and higher than Dongtai. The residual levels of lead and cadmium in different species were different. As for lead, *Mytilus edulis*>*Crassostrea rivularis*, *Macrta veneriformis*>*Meretrix meretrix*, while cadmium was on the opposite side. Most of the samples were at the background level ($P_1 < 1$). Only the *Macrta veneriformis* samples in Qidong were slightly polluted by lead. The target hazard quotient values of lead and cadmium were less than 1, suggesting that health risk from the consumption of shellfish was acceptable for adult consumers. **Conclusion** This study supplements the data on heavy metals in cultured shellfish from East China. The heavy metals in muscle from shellfish in Jiangsu Province are at a safe level. Long-term health risks for adults are also within acceptable limits. It provides theoretical basis for ensuring the quality and safety of aquatic products. Meanwhile, the local economy of shellfish is developed in a green and healthy way.

KEY WORDS: shellfish; heavy metals; lead; cadmium; health risk

0 引言

重金属作为持久性污染物, 在环境中难以降解, 其中铅和镉低浓度条件下也存在毒性, 其主要来源包括工厂排污、生活废水排放等人类活动^[1-4]。贝类的滤食性特征和蓄积特异性导致其受养殖环境影响大, 更容易富集环境中的重金属, 铅、镉超标现象较多^[5-8]。宋晓昀等^[9]对大连贝类铅镉污染状况进行分析, 结果表明贝类铅超标率为 2.6%, 处于轻度污染水平。梁辉等^[10]对广东 5 种水产品铅镉含量进行调查, 结果表明贝类铅镉含量相对较高, 铅均值为 0.142 mg/kg, 为铅含量最低的虾类的 8 倍, 镉均值分别为 0.544 mg/kg, 为镉含量最低的淡水鱼的 60 倍。陈清德等^[11]研究表明, 广西市售贝类镉含量为 ND~3.16 mg/kg, 超标率为 33.30%。张荣昶^[12]研究表明, 青岛市售贝类镉含量为 ND~4.09 mg/kg, 超标率为 23.1%。

食用贝类是人类接触重金属的主要途径之一, 铅镉随食物链进入人体, 因蓄积作用而长期储留在体内, 造成慢性中毒^[13-16]。SHAN 等^[17]研究发现深圳沿海水域的象牙凤螺(*Babylonia areolata*)富集镉, 食用后面临较高的健康风险。蔡艳等^[18]研究表明, 浙江养殖区的牡蛎(*Crassostrea rivularis*)的目标危险系数(target hazard quotient, THQ)值大于 1.0, 长期食用存在一定的健康风险。

江苏省是我国海水养殖大省, 据统计, 2022 年江苏贝类海水养殖产量面积和养殖产量分别为 10.91 万公顷和 69.26 万 t, 占海水养殖总面积和总产量的 63.4% 和 74.9%^[19]。本研究重点关注江苏主要养殖海域的 4 种典型贝类[牡蛎(*Crassostrea rivularis*)、贻贝(*Mytilus edulis*)、四角蛤蜊(*Macrta veneriformis*)、文蛤(*Meretrix meretrix*)]肌肉样品铅镉含量, 分析不同海域、不同品种贝类铅镉含量差异, 并采用单因子污染指数(pollution index, P_1)对贝类样品的铅、镉污染程度进行评估, 采用 THQ 进行食用健康风险评估, 以期对贝类重金属含量提供数据支撑, 评估其食用

的健康风险, 保障水产品质量安全。

1 材料与方法

1.1 样品采集

根据江苏省贝类生产的实际情况, 贝类采样频率为每年 3 次, 采样时间为 5—6 月、7—8 月、9—10 月。2021—2023 年共采集样品 536 个, 涉及海域为连云港市赣榆区、南通启东市、盐城市东台市、南通市如东县, 品种为牡蛎、贻贝、四角蛤蜊、文蛤。具体采样信息见表 1。

表 1 采样信息
Table 1 Sampling information

样品名称	采样地点	采样时间	样品数量
牡蛎	赣榆	2021	31
贻贝	赣榆	2021	14
四角蛤	东台	2021	45
	启东	2022	16
		2023	22
		2021	65
文蛤	启东	2022	65
		2023	42
	如东	2021	75
		2022	89
		2023	72

1.2 仪器与试剂

Agilent 280DUO 原子吸收光谱仪(美国 Agilent 公司); Milli-Q IQ7000 超纯水仪(德国 Merck 公司); BSA423S 电子天平(0.001 g, 德国 Sartorius 公司); MARS 6 Classic 型微波消解仪(美国 CEM 公司); EH 20A plus 型赶酸仪(美国

LabTech 公司)。

硝酸、过氧化氢(优级纯, 国药集团化学试剂有限公司); 铅、镉单元素标准溶液(1000 mg/L, 中国计量科学研究院)。

本研究所用器皿均预先用 10%硝酸浸泡 24 h 以上, 超纯水冲洗多遍后备用。

1.3 实验方法

1.3.1 样品制备与消解

样品保鲜运回实验室, 按 GB 17378.6—2007《海洋监测规范第 6 部分: 生物体分析》要求取贝类肌肉组织制备成匀浆(湿样), -20 °C 冷冻保存。

样品自然解冻后, 称取 1~2 g(精确到 0.001 g)待测样品, 置于微波消解罐中, 加入 6.0 mL 硝酸, 2.0 mL 过氧化氢。微波消解条件: 功率 1000 W, 在 20 min 内升至 210 °C; 保持 35 min。消解完成后, 140 °C 赶酸 2~3 h, 至样液剩 1 mL 左右结束。冷却至室温后, 用超纯水少量多次洗涤消解管, 定容至 50 mL, 混匀上机待测。同时制备试剂空白。

1.3.2 样品检测方法

按照 GB 5009.12—2023《食品安全国家标准 食品中铅的测定》第一法 石墨炉原子吸收光谱法, 测定铅的含量, 仪器参数为: 波长 283.3 nm, 狭缝 0.5 nm, 灯电流 10.0 mA, 干燥温度 85、95、120 °C, 时间 5、40、10 s, 灰化温度 400 °C、时间 8 s, 原子化温度 2100 °C、时间 4 s; 按照 GB 5009.15—2023《食品安全国家标准 食品中镉的测定》, 测定镉的含量, 仪器参数为: 波长 228.8 nm, 狭缝 0.5 nm, 灯电流 4.0 mA, 干燥温度 85、95、120 °C, 时间 5、40、10 s, 灰化温度 250 °C、时间 8 s, 原子化温度 1800 °C、时间 4 s。采用大虾生物成分分析标准物质(GBW10050, 中国地质科学院地球物理化学勘查研究所), 实施质量控制。

1.4 评价方法

1.4.1 单因子污染指数评价

参照 GB 2762—2022《食品安全国家标准 食品中污染物限量》的铅限量值 1.5 mg/kg, 镉限量值 2 mg/kg, 采用单因子污染指数(P_i)对贝类样品的铅、镉污染程度进行评估。计算公式如式(1):

$$P_i = C_i / S_i \quad (1)$$

式中, P_i 为第 i 项元素的单因子污染指数; C_i 为第 i 项元素的平均含量; S_i 为第 i 项元素在评价标准中的限量值。当 $P_i < 0.2$ 时, 表明样品未受到该元素污染, 可视为正常背景水平; 当 $0.2 \leq P_i \leq 0.6$ 时, 视为轻度污染水平; 当 $0.6 < P_i < 1.0$ 时, 视为污染水平; 当 $P_i \geq 1.0$ 时, 则视为重度污染水平, 不能安全食用^[20-21]。

1.4.2 健康风险评价

本研究采用美国环保署(United States Environmental Protection Agency, USEPA)提出的 THQ 进行重金属暴露对人体的健康风险评价。THQ 计算公式如式(2):

$$THQ = \frac{EF \times ED \times FIR \times C}{RFD \times BW \times AT} \times 10^{-3} \quad (2)$$

式中, EF 为暴露频率(取 365 d/a); ED 为暴露持续时间(参考 CHAI 等^[22]的研究, 取 70 a)。FIR 为摄取速率(取 20.1 g/d^[23]); C 为样品含量(mg/kg, 以湿重计); RFD 为口服参比剂量[铅和镉的 RFD 值分别为 4 $\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ 和 1 $\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ ^[22]]; BW 为平均体重(取 60 kg^[24]); AT 为非致癌物的平均暴露时间(取 365 d/a \times 70 a)。

重金属对人体健康产生的风险与其综合效应密切相关, 因此以重金属总风险(target hazard quotients, THQs)衡量, $THQ_s = THQ_1 + THQ_2 + \dots + THQ_n$, 本研究中 $n=2$ 。当 $THQ_s \leq 1$ 时, 对人体健康没有明显的负面影响; 当 $THQ_s > 1$ 时, 会产生负面影响; 当 $THQ_s > 10$ 时, 对人体有明显的慢性毒性效应^[24-25]。

1.5 数据处理

本研究采用 Excel 2016 和 GraphPad Prism 8.0.1 进行数据处理和画图。

2 结果与分析

2.1 贝类铅镉含量分析

2021—2023 年间江苏赣榆、启东、东台、如东地区的 4 种典型养殖贝类(牡蛎、贻贝、四角蛤蜊、文蛤)中铅、镉含量如图 1 和表 2 所示。3 年共采集样品 536 个, 铅检出率为 95.9%, 镉检出率为 100%。铅含量为 ND~1.22 mg/kg, 镉含量为 0.017~0.627 mg/kg, 含量均低于 GB 2762—2022 中规定限值, 说明其符合我国食品安全标准。铅含量最大值是 2023 年的启东四角蛤蜊样品(1.22 mg/kg), 镉含量最大值是 2022 年的如东文蛤样品(0.627 mg/kg)。

2021—2023 年铅镉含量的平均值和中位数均在 0.5 mg/kg 以下, 表明大部分样品处于较低的含量水平。2021 年铅镉含量为 3 年间最低。就铅而言, 2023 年整体水平低于 2022 年; 就镉而言, 两者持平。

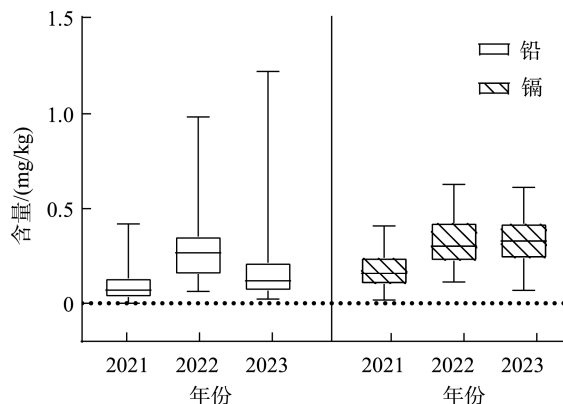


图1 2021—2023年贝类样品铅镉含量

Fig.1 Lead and cadmium content in shellfish samples from 2021 to 2023

表 2 贝类样品铅镉含量(以湿重计)(mg/kg)
Table 2 Lead and cadmium content in shellfish samples (wet weight) (mg/kg)

样品名称	采样地点	采样时间	铅			镉		
			含量范围	平均值	中位数	含量范围	平均值	中位数
牡蛎	赣榆	2021	0.03~0.16	0.08	0.09	0.213~0.410	0.27	0.28
贻贝	赣榆	2021	0.12~0.26	0.19	0.18	0.073~0.211	0.13	0.13
	东台	2021	ND~0.42	0.17	0.12	0.017~0.078	0.04	0.04
四角蛤蜊	启东	2022	0.39~0.87	0.62	0.60	0.160~0.296	0.25	0.26
		2023	0.27~1.22	0.52	0.44	0.067~0.286	0.16	0.17
	启东	2021	ND~0.19	0.07	0.07	0.092~0.318	0.21	0.23
文蛤	启东	2022	0.06~0.52	0.25	0.26	0.111~0.588	0.32	0.31
		2023	0.03~0.51	0.12	0.10	0.201~0.532	0.31	0.26
	如东	2021	ND~0.24	0.06	0.05	0.091~0.280	0.16	0.15
		2022	0.08~0.98	0.25	0.24	0.121~0.627	0.34	0.35
		2023	0.02~0.62	0.13	0.10	0.239~0.611	0.39	0.39

2.2 不同地区贝类铅镉含量分析

2021—2023 年不同地区 4 种贝类铅镉含量变化如图 2 所示。贝类主要从环境中富集重金属,其来源分为天然和人为两种。天然因素主要是岩石风化、陆地径流、大气沉降等,形成环境本底。人为因素则有生活污水、采矿、冶炼等废水进入海洋环境^[26-28]。从同一品种的地区差异来看,启东的四角蛤蜊铅镉含量明显高于东台($P<0.05$),如东的文蛤铅镉含量与启东相当,没有显著差异($P>0.05$),表明环境受重金属污染程度:如东~启东>东台。

贝类经过摄食、体表吸附等途径蓄积溶解态和颗粒态重金属^[29]。从同一地区的品种差异来看,赣榆的贻贝铅含

量高于牡蛎,但镉含量低于牡蛎;2022—2023 年启东的四角蛤蜊铅含量高于文蛤,但镉含量低于文蛤。表明铅在不同品种贝类肌肉中的残留水平整体上为:贻贝>牡蛎,四角蛤蜊>文蛤;镉在不同品种贝类肌肉中的残留水平整体上为:贻贝<牡蛎,四角蛤蜊<文蛤。不同贝类品种差异,造成其体内重金属含量的差异,与王增焕等^[30]的研究一致。

2.3 单因子污染指数评价

由表 3 可知,所有样品铅、镉的 P_i 均远低于 1,表明贝类能安全食用。除启东的四角蛤蜊样品外,其余样品的 P_i 值均小于 0.2,为正常背景水平。启东的四角蛤蜊样品为铅轻度污染水平,2022 年 P_i 值为 0.41,2023 年 P_i 值为 0.35,值得注意。

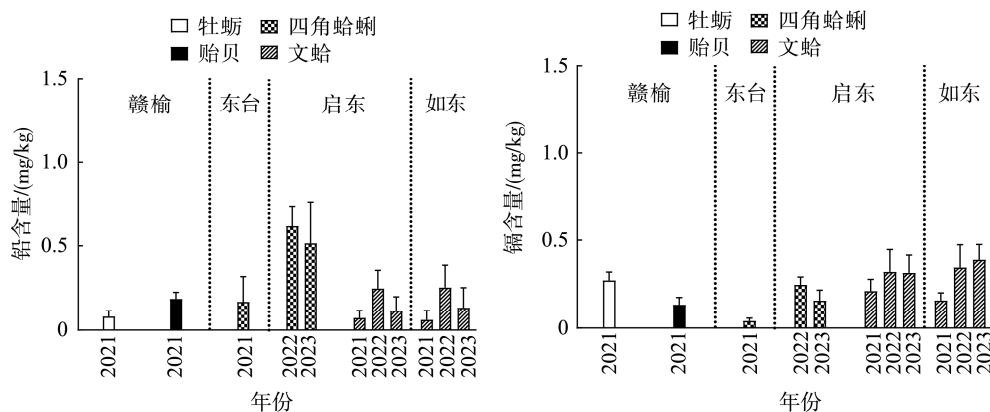


图 2 不同地区贝类样品铅镉含量

Fig.2 Lead and cadmium content in shellfish samples from different sampling points

表 3 贝类样品铅镉的单因子污染评价结果
Table 3 Single factor pollution index of lead and cadmium in shellfish samples

样品名称	采样地点	采样时间	单项污染指数 P_i		污染等级
			铅	镉	
牡蛎	赣榆	2021	0.05	0.14	正常背景
贻贝	赣榆	2021	0.13	0.06	正常背景
四角蛤蜊	东台	2021	0.11	0.02	正常背景
	启东	2022	0.41	0.12	铅轻度污染
		2023	0.35	0.08	铅轻度污染
	文蛤	启东	2021	0.05	0.10
2022			0.17	0.16	正常背景
2023			0.08	0.16	正常背景
如东		2021	0.04	0.08	正常背景
		2023	0.17	0.17	正常背景
		2023	0.09	0.20	正常背景

2.4 健康风险评价

THQs 是以污染物暴露剂量与参考剂量的比值来表征健康风险水平。如图 3 所示, 东台四角蛤蜊 THQs 值最低, 启东四角蛤蜊和如东文蛤 THQs 值相对较高。所有贝类样品 THQs 远低于 1.0, 说明食用贝类肌肉对成人不具有潜在健康风险。CHAI 等^[22]对深圳、舟山和青岛等沿海城市的贝类重金属生物可利用性进行风险评价, 结果显示食用贝类的风险较低。但有研究表明, 贝类内脏团(肝胰腺)重金属含量远高于肌肉^[31-33], 因此建议消费者食用贝类时尽量去除内脏团。

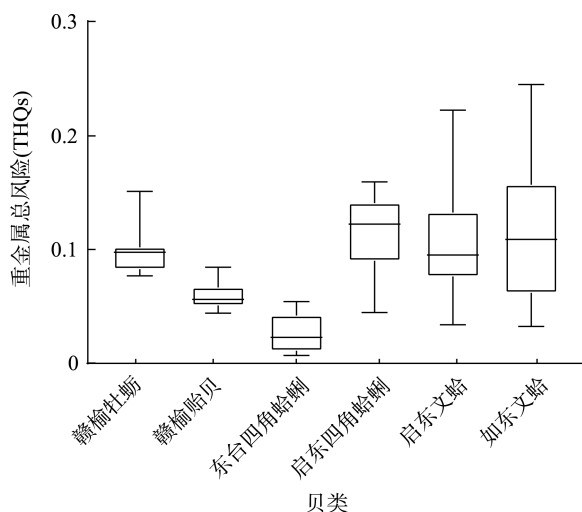


图3 贝类样品铅镉健康风险评价结果
Fig.3 Health risk assessment of lead and cadmium in shellfish samples

3 结 论

江苏省海域养殖贝类肌肉铅镉含量均低于限量标准, 无超标情况。整体而言, 2022 年和 2023 年较 2021 年铅镉含量有所上升。不同地区铅镉含量存在差异, 如东与启东相当, 高于东台。贝类品种的不同影响了其铅镉含量。除启东的四角蛤蜊样品为铅轻度污染水平外, 其余样品的 P_i 值均小于 0.2, 为正常背景水平。所有贝类样品 THQs 远低于 1.0, 说明食用江苏海域养殖贝类肌肉对成人消费者造成的健康风险在可接受范围。

本研究的健康风险评价仍有不确定性: (1)以铅镉总量进行风险评价, 未考虑生物可利用性, 放大了其风险效应; (2)不同地区、不同人群的贝类暴露剂量存在差异, 且对危害因子的敏感程度不同, 导致评价结果具有不确定性; (3)未考虑其他食物摄入、皮肤接触、多污染物复合性污染等暴露途径, 得出的风险评价结果偏低。

参考文献

[1] BRAND AF, HYNES J, WALKER LA, *et al.* Biological and anthropogenic predictors of metal concentration in the Eurasian otter, a sentinel of freshwater ecosystems [J]. *Environ Pollut*, 2020, 266: 115280.

[2] KARTHIK V, KARUNA B, KUMAR PS, *et al.* Development of lab-on-chip biosensor for the detection of toxic heavy metals: A review [J]. *Chemosphere*, 2022, 299: 134427.

[3] 李俊生, 郭小瑞, 綦峥. 谷物中重金属来源、检测技术及膳食风险研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(23): 141-147.

LI JS, GUO XR, QI Z. Advances in heavy metal sources, detection techniques and dietary risks in cereals [J]. *J Food Saf Qual*, 2023, 14(23): 141-147.

- [4] 胡月, 任娣, 王鹭, 等. 中国养殖水产品质量安全总体情况浅析[J]. 中国渔业质量与标准, 2023, 13(3): 60–66.
HU Y, REN D, WANG L, *et al.* Overview of aquatic products quality and safety in China [J]. *Chin Fish Qual Stand*, 2023, 13(3): 60–66.
- [5] 陈胜军, 李来好, 杨贤庆, 等. 我国水产品安全风险来源与风险评估研究进展[J]. 食品科学, 2015, 36(17): 300–304.
CHEN SJ, LI LH, YANG QX, *et al.* Progress in the risk sources and assessment of aquatic products in China [J]. *Food Sci*, 2015, 36(17): 300–304.
- [6] SHALINI R, JEYASEKARAN G, SHAKILA RJ, *et al.* Dietary intake of trace elements from commercially important fish and shellfish of Thoothukudi along the southeast coast of India and implications for human health risk assessment [J]. *Mar Pollut Bull*, 2021, 173: 113020.
- [7] MAO WF, JIANG DG, SUI HX, *et al.* Application of the maximum cumulative ratio (MCR) as a screening tool for the evaluation of multiple metal mixtures in shellfish in Chinese population [J]. *Food Addit Contam Part Chem Anal Control Exp Risk Ass*, 2022, 39(5): 938–948.
- [8] 娄晓祎, 汤云瑜, 田良良, 等. 我国贝类重金属污染现状及其脱除技术研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8(8): 2841–2846.
LOU XY, TANG YY, TIAN LL, *et al.* Research progress of heavy metal pollution and removal in shellfish [J]. *J Food Saf Qual*, 2017, 8(8): 2841–2846.
- [9] 宋晓昀, 李瑞, 张磊, 等. 大连市售海产品铅、镉污染状况分析与评价[J]. 实用预防医学, 2013, 20(12): 1474–1475.
SONG XY, LI R, ZHANG L, *et al.* Analysis and evaluation on the contamination status of lead and cadmium in marine products bought from the markets in Dalian [J]. *Pract Prev Med*, 2013, 20(12): 1474–1475.
- [10] 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.
- [11] 陈清德, 黄艳桃, 唐琼, 等. 2017—2020年广西省售水产品重金属污染评价及健康风险评估[J]. 职业与健康, 2021, 37(17): 2332–2335.
CHEN QD, HUANG YT, TANG Q, *et al.* Evaluation on heavy metals pollution and assessment on health risk of commercial aquatic products in Guangxi Province from 2017—2020 [J]. *Occup Health*, 2021, 37(17): 2332–2335.
- [12] 张荣昶. 青岛市市售海产品中镉、汞、砷的污染状况及居民暴露风险评估[D]. 青岛: 青岛大学, 2020.
ZHANG RC. Pollution status of Cd, Hg and As in marine products sold in Qingdao and residents' exposure risk assessment [D]. Qingdao: Qingdao University, 2020.
- [13] 顾捷, 黄丽英, 梅光明, 等. 乐清湾北部及嵊泗区域养殖贝类肌肉中镉含量调查及健康风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(22): 8276–8283.
GU J, HUANG LY, MEI GM, *et al.* Investigation and health risk assessment of cadmium in muscle from cultured shellfish in northern Yueqing Bay and Shengsi [J]. *J Food Saf Qual*, 2020, 11(22): 8276–8283.
- [14] YU Y, LIU L, CHEN X, *et al.* Brominated flame retardants and heavy metals in common aquatic products from the Pearl River Delta, South China: Bioaccessibility assessment and human health implications [J]. *J Hazard Mater*, 2021. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.124036
- [15] 张柏豪, 方舟, 陈新军, 等. 海洋无脊椎动物重金属富集研究进展[J]. 生态毒理学报, 2021, 16(4): 107–118.
ZHANG BH, FANG Z, CHEN XJ, *et al.* Research progress of heavy metal bioaccumulation in marine invertebrates [J]. *Asian J Ecotoxicol*, 2021, 16(4): 107–118.
- [16] 张萌, 张银烽, 赵晓慧, 等. 云南省水生蔬菜中5种典型重金属含量特征及健康风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(11): 3710–3718.
ZHANG M, ZHANG YF, ZHAO XH, *et al.* Content characteristics and health risk assessment of 5 kinds of typical heavy metals in aquatic vegetables of Yunnan Province [J]. *J Food Saf Qual*, 2022, 13(11): 3710–3718.
- [17] SHAN LA, YL B, DYC E, *et al.* Trace elements in shellfish from Shenzhen, China: Implication of coastal water pollution and human exposure [J]. *Environ Pollut*, 2020, 263: 114582.
- [18] 蔡艳, 周亦君, 吴晓艺, 等. 3种海洋贝类重金属污染及食用风险评价研究[J]. 核农学报, 2016, 30(6): 1126–1134.
CAI Y, ZHOU YJ, WU XY, *et al.* Situation of heavy metal pollution and food risk assessment of 3 kinds of marine shellfish [J]. *Acta Agric Nucl Sin*, 2016, 30(6): 1126–1134.
- [19] 农业农村部渔业渔政管理局. 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2023.
Ministry of Agriculture and Rural Fisheries Administration. China fishery statistical yearbook [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2023.
- [20] 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.
- [21] 万莉, 郭娅, 向琴, 等. 夏枯草中7种重金属元素的测定及污染等级分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(10): 3278–3283.
WAN L, GUO Y, XIANG Q, *et al.* Determination and pollution grade analysis of 7 kinds of heavy metal elements in *Prunella vulgaris* L. [J]. *J Food Saf Qual*, 2022, 13(10): 3278–3283.
- [22] CHAI M, LI R, GONG Y, *et al.* Bioaccessibility-corrected health risk of heavy metal exposure via shellfish consumption in coastal region of China [J]. *Environ Pollut*, 2021, 273: 116529.
- [23] 宋艳伟, 张梁, 朱秀云. 江苏省3种市售贝类重金属污染及食用风险评估[J]. 江苏预防医学, 2017, 28(3): 266–268, 272.
SONG YW, ZHANG L, ZHU XY. Heavy metal pollution investigation and food risk assessment of 3 species of shellfish in Jiangsu Province [J]. *Jiangsu J Prev Med*, 2017, 28(3): 266–268, 272.
- [24] 李如忠, 潘成荣, 徐晶晶, 等. 典型有色金属矿业城市零星菜地蔬菜重金属污染及健康风险评估[J]. 环境科学, 2013, 34(3): 1076–1085.
LI RZ, PAN CR, XU JJ, *et al.* Contamination and health risk for heavy metals via consumption of vegetables grown in fragmentary vegetable plots from a typical nonferrous metals mine city [J]. *Environ Sci*, 2013, 34(3): 1076–1085.
- [25] BOGDANOVIC T, UJEVIC I, SEDAK M, *et al.* As, Cd, Hg and Pb in four edible shellfish species from breeding and harvesting areas along the eastern adriatic coast, croatia [J]. *Food Chem*, 2014, 146(1): 197–203.
- [26] 顾捷. 浙江沿岸养殖贝类重金属(铅、镉)含量的调查与分析[D]. 舟山: 浙江海洋学院, 2014.

- GU J. Investigation and analysis of heavy metals (lead and cadmium) in maricultured shellfish from Zhejiang coast [D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2014.
- [27] EKPERUSI AO, ASIWA DO. Trophodynamics and health risk assessment of heavy metals in seafood from a tropical estuary in the gulf of Guinea [J]. Environ Res, 2024, 252(2): 118977.
- [28] BRIFFA J, SINAGRA E, BLUNDELL R. Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans [J]. Heliyon, 2020, 6(9): e04691.
- [29] WANG WX, FISHER NS. Assimilation of trace elements by the mussel *Mytilus edulis*: Effects of diatom chemical composition [J]. Mar Biol, 1996, 125(4): 715–724.
- [30] 王增焕, 王许诺. 华南沿海贝类产品重金属含量及其膳食暴露评估[J]. 中国渔业质量与标准, 2014, 4(1): 14–20.
- WANG ZH, WANG XN. The heavy metal contents in shellfish from South China Sea coast and its dietary exposure risk [J]. Chin Fish Qual Stand, 2014, 4(1): 14–20.
- [31] JIA Y, GAO Z, SUN Z, *et al.* The toxicokinetic of arsenic in the edible and non-edible tissues of freshwater shellfish [J]. Environ Technol Innov, 2021, 24: 101940.
- [32] 陈清香, 杨文, 初庆柱. 湛江硃洲岛海域 19 种贝类食用部位的重金属含量及评价[J]. 生态环境学报, 2011, 20(1): 175–180.
- CHEN QX, YANG W, CHU QZ. Assessments on contents of heavy metals in the edible parts of 19 mollusks from Naozhou Island, Zhanjiang [J]. Ecol Environ Sci, 2011, 20(1): 175–180.
- [33] 金玲亚. 三门县缢蛭体中重金属富集规律及其污染评价[D]. 宁波: 宁波大学, 2022.
- JIN LY. Enrichment and pollution evaluation of heavy metals in *Simonovacula constricta* in Sanmen County [D]. Ningbo: Ningbo University, 2022.

(责任编辑: 于梦娇 安香玉)

作者简介

胡 月, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为水产品质量安全。

E-mail: 765894344@qq.com

朱晓华, 硕士, 研究员, 主要研究方向为水产品质量安全。

E-mail: xhz824@sina.com