

风险评估

珠海市市售水产品中常见重金属含量监测及初步膳食暴露风险评估

郑正男,张秋平,朱婷婷,任亮,陈丹丹,朱华媚,朱妹芳,凌莉
(珠海市疾病预防控制中心,广东珠海 519000)

摘要:目的 了解珠海市市售水产品中铅、镉、甲基汞、无机砷、铬的污染状况,并评估其膳食暴露风险。方法 在2018—2022年采集珠海市666份市售水产品样本,采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)和液相色谱-电感耦合等离子体质谱法(LC-ICP-MS)检测样品中铅、镉、甲基汞、无机砷、铬的含量,采用单因子污染指数(P_n)和内梅罗污染指数(P_n)对水产品中重金属污染进行评价,结合珠海市居民膳食摄入量用点评估方法评估其潜在危险。结果 贝类的铅、镉、无机砷和铬含量水平最高,鱼类的甲基汞含量水平最高;4种水产品的 P_n 均处于安全水平,但贝类和头足类的 P_n 处于轻度污染水平;铅、镉、甲基汞、无机砷、铬5种重金属元素的平均膳食暴露量和高端膳食暴露量对居民健康水平均可接受。结论 珠海市部分市售水产品存在一定程度的镉污染情况,尤其需关注贝类和头足类,同时需要加强对高消费人群镉和甲基汞的膳食暴露风险监测,进一步开展累积暴露风险评估。

关键词:珠海;水产品;重金属;膳食暴露;风险评估

中图分类号:R155 文献标识码:A 文章编号:1004-8456(2024)12-1366-07

DOI:10.13590/j.cjfh.2024.12.009

Monitoring of common heavy metals in sold aquatic products and preliminary dietary exposure risk assessment in Zhuhai City

ZHENG Zhengnan, ZHANG Qiuping, ZHU Tingting, REN Liang, CHEN Dandan,
ZHU Huamei, ZHU Meifang, LING Li
(Zhuhai Center for Disease Control and Prevention, Guangdong Zhuhai 519000, China)

Abstract: Objective To investigate the pollution states of lead, cadmium, methyl mercury, inorganic arsenic and chromium for sold aquatic products in Zhuhai City, and to assess their exposure risk. **Methods** The total of 666 sold aquatic products samples in Zhuhai City were collected during 2018—2022. The level of lead, cadmium, methyl mercury, inorganic arsenic and chromium in samples were analyzed by inductively coupled plasma-mass spectrometry (ICP-MS) and liquid chromatograph inductively coupled plasma-mass spectrometry (LC-ICP-MS), evaluated by the method of single-factor pollution index and Nemerow integrated pollution index, based on the dietary intake of residents in Zhuhai to assess its potential health hazard. **Results** Shellfish had the highest levels of lead, cadmium, inorganic arsenic, chromium and fish had the highest levels of methylmercury. The P_n of the four aquatic products was at safe levels, but the P_{cadmium} of shellfish and cephalopods was mildly contaminated. The average dietary exposures and high-end dietary exposures of lead, cadmium, methylmercury, inorganic arsenic, and chromium to health of resident were acceptable. **Conclusion** There has been the varying degrees of cadmium pollution of sold aquatic products in Zhuhai City, especially shellfish and cephalopod. It is necessary to strengthen the monitoring of dietary exposure risk of high-consumption groups in cadmium and methyl mercury, and to further carry out cumulative exposure risk assessment.

Key words: Zhuhai City; aquatic products; heavy metal; exposure level of dietary intake; risk assessment

珠海市地属广东省沿海地区,水产品丰富。近年来,随着社会和工业发展,珠江流域重金属污染日趋严重,对珠海市市售水产品的安全状况产生威胁,是公共卫生面临的重大问题之一^[1]。重金属,不

仅是指密度在 $5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 以上的金属元素,如镉(Cd)、铬(Cr)、铅(Pb)和汞(Hg)等,还包括生态毒性较高的砷(As)等元素^[2]。重金属具有不易降解、易在生物体内富集的特点,主要通过水介质在沉积物

收稿日期:2024-04-09

基金项目:2023年度珠海市社会发展领域科技计划项目(2320004000098)

作者简介:郑正男 男 工程师 研究方向食品安全监测与评估 E-mail:103052982@qq.com

中沉降,随后通过复杂的食物链进行转移富集,当人体逐渐食入大量水产品而有蓄积时,在身体不同部位累积,因此长期摄入可能对人体健康产生慢性损害^[3]。

本研究旨在通过对珠海市市售水产品中常见重金属进行检测,并结合珠海市本地居民水产品消费量,评估由此产生的膳食暴露风险,从而有助于了解当前珠海市市售水产品重金属污染状况,并为相关部门制定针对性的防控措施提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

1.1.1 市售水产品中五种重金属含量数据

本研究所有市售水产品重金属含量数据来源于 2018—2022 年珠海市疾病预防控制中心食品安全风险监测数据,在珠海市 3 个行政区(香洲区、金湾区、斗门区)的大型农贸市场、商店超市随机采集市售水产品样品共 666 份,每份样品采样量保证可食用部分至少 500 g。样品采集后立即送往实验室,取可食部均质后保存在聚丙烯罐中,−20 °C 冷冻保存至检测。

1.1.2 检测方法

按照 GB 5009.268—2016《食品安全国家标准食品中多元素的测定》、GB 5009.11—2014《食品安全国家标准食品中总砷及无机砷的测定》、GB 5009.17—2021《食品安全国家标准食品中总汞及有机汞的测定》^[4-6] 中电感耦合等离子体质谱法(Inductively coupled plasma-mass spectrometry, ICP-MS)和液相色谱-电感耦合等离子体质谱法(Liquid chromatography-inductively coupled plasma mass spectrometry, LC-ICP-MS)对样品的铅、镉、铬、无机砷、有机汞进行检测,样品检出限分别为 0.003、0.000 7、0.003、0.02、0.008 mg/kg。

1.1.3 质量控制

采样空白试验、平行样测定、标准曲线绘制、加标回收、标准质控样监控、人员比对、超标复检验证等技术手段开展质量控制,确保检测结果可靠。

1.1.4 水产品消费量调查

本研究中水产品消费量数据来自 2021 年珠海市居民食物消费量调查。该调查参照“中国居民营养与健康状况调查的总体方案”^[7] 的方案和原则,采用多阶段分层随机抽样的方法,对全市 1 510 位居民进行了连续 2 d(包括 1 个工作日和 1 个休息日)的 24 h 膳食回顾食物消费量调查。调查对象为在调查点内居住超过 6 个月的 3 岁及以上健康人群。

1.2 方法

1.2.1 水产品重金属污染评价方法

采用单因子污染指数法(P_i)评价市售水产品中重金属元素的污染状况^[8]。

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

式中 P_i 为重金属元素 i 的单因子污染指数, C_i 为水产品中第 i 种重金属实测值, S_i 为该水产品中第 i 种重金属对应标准限量(GB 2762—2022《食品安全国家标准 食品中污染物限量》)^[9]。评价标准为:当 $P_i < 0.2$, 表示样品清洁; $0.2 \leq P_i \leq 0.6$, 表示样品轻度污染; $0.6 \leq P_i \leq 1.0$, 表示样品中度污染; $P_i > 1.0$, 表示样品重度污染^[10]。

利用内梅罗综合污染指数法评价市售水产品中重金属中综合污染水平^[11]。

$$P_n = \sqrt{\frac{P_{\max}^2 + P_{\text{ave}}^2}{2}}$$

式中 P_n 为水产品中重金属元素综合污染指数, P_{\max} 为重金属污染物单项污染指数中的最大值, P_{ave} 为各单项污染指数中的平均值。评价标准为: $P_n \leq 0.7$ 为安全; $0.7 < P_n \leq 1$ 表示达到警戒线; $1 < P_n \leq 2$ 表示轻度污染; $2 < P_n \leq 3$ 表示中度污染; $P_n > 3$ 表示重度污染^[12]。

1.2.2 膳食暴露风险评估

采用 FAO 和 WHO 推荐的“点评估法”^[13] 进行膳食暴露风险评估,根据珠海市市售水产品中重金属的平均值和珠海市居民食用水产品的平均消费量及高端(P_{95})消费量分别计算各水产品中重金属元素的平均暴露量和高端暴露量。点评估模型为:

$$\text{Exp} = \frac{F_k \times C_k}{\text{BW}} \times f \times \beta$$

式中 Exp 为评估人群每日膳食暴露量, $\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{BW})$; F_k 为第 k 类水产品重金属含量, mg/kg ; C_k 为第 k 类水产品平均消费量或高端消费量(P_{95}), g/d ; BW 为居民平均体质量, kg ; f 为加工因子,本研究未考虑食品加工前后重金属含量变化,取值为 1; β 为重金属生物可及性和生物利用度,本研究未考虑重金属在体内生物转换变化,取值为 1。

1.2.3 风险特征描述

粮农组织/世界卫生组织食品添加剂联合专家委员会(Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives, JECFA)分别在第 72 次、第 73 次会议中取消了铅和无机砷的每周耐受摄入量(Provisional tolerated weekly intake, PTWI)。本研究铅暴露的参考剂量为成人的心血管效应的基准剂量 95%CI 下限值 $1.2 \mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{BW})$ ^[14],无机砷暴露的参考剂量为导致人类肺癌为终点的基准剂量下限值(BDML_{0.5})

3 $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{BW})^{[15]}$;镉暴露的参考剂量为 JECFA 提出食品中镉的 PTWI 25 $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{BW})$ [相当于每日 0.833 $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{BW})$]^[16];甲基汞暴露的参考剂量为 JECFA 提出食品中甲基汞的 PTWI 1.6 $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{BW})$ [相当于每日 0.229 $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{BW})$]^[17];铬暴露的参考剂量为 Flora Amerley Amarh 文献中口服参考剂量(Oral reference doses, RfD)为 3 $\mu\text{g}/\text{kg}/\text{d}^{[18]}$ 。

本研究采用风险熵(Hazard quotient, HQ)^[19]进行评估,即水产品中重金属暴露量与重金属暴露的判断指标之间的比值,当 $\text{HQ}\leq 1$ 时表示风险可接受, $\text{HQ}> 1$ 时表示存在一定健康风险。

$$\text{HQ} = \frac{\text{水产品中重金属每日暴露量}}{\text{参考剂量}}$$

1.2.4 数据处理和统计学分析

根据 WHO 推荐方法进行数据处理^[20],当样品重金属检出率 $>40\%$,低于检出限(Limit of detection, LOD)的数据用 $1/2\text{LOD}$ 进行统计;当样品重金属检出率 $\leq 40\%$,低于 LOD 的数据分别用 0 和 LOD 计算均值。数据清理、统计分析和作图采用 Python 语言中 Pandas 1.5.3 库、Scipy 1.10.1 库和 Matplotlib 3.7.1 库。采用 Kolmogorov-Smirnov 正态性检验,本研究中四类水产品的重金属含量均不符合正态分布,则用中位数(四分位数间距)进行统计描述。采用 Kruskal-Wallis H 和 χ^2 检验对不同水产品重金属含量和率的组间差异进行比较,校验水平 $\alpha=0.05$ 。 $P<0.05$ 为

差异有统计学意义。

2 结果

2.1 珠海市市售水产品中重金属分布特征

共检测珠海市市售水产品 666 份,包括鱼类 229 份、甲壳类 168 份、贝类 136 份、头足类 133 份,其中铅、镉、甲基汞、无机砷、铬分布情况见表 1,不同种类水产品中 5 种重金属含量差异较大。对于铅,铅含量最高的品种是贝类(中位数为 0.150 mg/kg),分别是鱼类的 12.50 倍,甲壳类的 10.00 倍,头足类的 5.17 倍,四类水产品中铅含量差异有统计学意义($H=279, P<0.05$);对于镉,贝类和头足类中镉含量中位数分别为 0.261 mg/kg 和 0.152 mg/kg,相比甲壳类和鱼类较高,四类水产品中镉含量差异有统计学意义($H=384, P<0.05$);对于甲基汞,鱼类中甲基汞含量最高(中位数为 0.015 mg/kg),四类水产品中甲基汞含量差异有统计学意义($H=147, P<0.05$);对于无机砷,贝类中无机砷检出率为 40.46%(含量范围为 ND~0.320),是四类水产品中检出率最高,四类水产品无机砷检出率差异有统计学意义($\chi^2=148, P<0.05$),且中位数差异有统计学意义($H=150, P<0.05$);对于铬,四类水产品检出率均达 95%以上,其中贝类的含量最高(中位数为 0.126 mg/kg),四类水产品中铬含量中位数差异有统计学意义($H=239, P<0.05$)。

表 1 2018—2022 年珠海市四类水产品中铅、镉、甲基汞、无机砷、铬分布情况

Table 1 Content distribution of lead, cadmium, methyl mercury, inorganic arsenic and chromium in four types of aquatic products in Zhuhai City from 2018 to 2022

类别	元素	份数	均值	中位数(Q)	P_{95}	范围	检出率/%
鱼类	铅	229	0.018	0.012(0.021)	0.058	ND~0.150	82.53
	镉	229	0.009	0.002(0.008)	0.040	ND~0.210	69.43
	甲基汞	195	0.030	0.015(0.028)	0.081	ND~0.953	72.82
	无机砷	195	0.000 ^a /0.020 ^b	0.010(0)	0.010	ND~0.022	0.51
	铬	229	0.041	0.018(0.023)	0.146	ND~1.000	96.51
甲壳类	铅	153	0.022	0.015(0.027)	0.081	ND~0.130	86.93
	镉	168	0.276	0.020(0.106)	1.660	ND~5.100	97.62
	甲基汞	121	0.013	0.010(0.014)	0.034	ND~0.081	62.81
	无机砷	121	0.002 ^a /0.021 ^b	0.010(0)	0.021	ND~0.047	5.79
	铬	152	0.034	0.021(0.026)	0.100	ND~0.513	98.02
贝类	铅	136	0.210	0.150(0.171)	0.658	0.010~1.450	100
	镉	136	0.822	0.261(0.800)	2.958	0.021~11.800	100
	甲基汞	131	0.000 ^a /0.008 ^b	0.004(0)	0.008	ND~0.022	5.34
	无机砷	131	0.029	0.010(0.025)	0.092	ND~0.320	40.46
	铬	136	0.221	0.126(0.201)	0.636	0.021~1.510	100
头足类	铅	133	0.036	0.029(0.042)	0.084	ND~0.200	92.48
	镉	133	0.433	0.152(0.324)	1.546	0.001 7~11.600	100
	甲基汞	102	0.015	0.011(0.017)	0.045	ND~0.077	61.76
	无机砷	102	0.000 ^a /0.020 ^b	0.010(0)	0.020	ND~0.038	0.98
	铬	133	0.045	0.023(0.027)	0.120	ND~1.330	99.25

注:括号内为四分位间距;a为低于 LOD 的数据用 0 代替计算;b为低于 LOD 的数据用 LOD 代替计算;ND 为未检出

2.2 珠海市 4 类水产品中重金属污染程度

水产品中重金属单因子污染指数见图 1 和表 2。

对于各重金属单项污染指数的均值,只有贝类和头足类的 $P_{\text{铅}}$ 处于轻度污染水平,其余单项污染指数

的均值均处于清洁水平。在各类水产品样品中,污染占比较高且均存在重度污染的是重金属元素镉,其中镉污染占比从高到低为贝类(36.76%)>头足类(24.81%)>甲壳类(20.24%)>鱼类(10.92%),不同种类水产品镉污染占比差异有统计学意义($\chi^2=35, P<0.05$);从水产品种类看,贝类水产品样品的

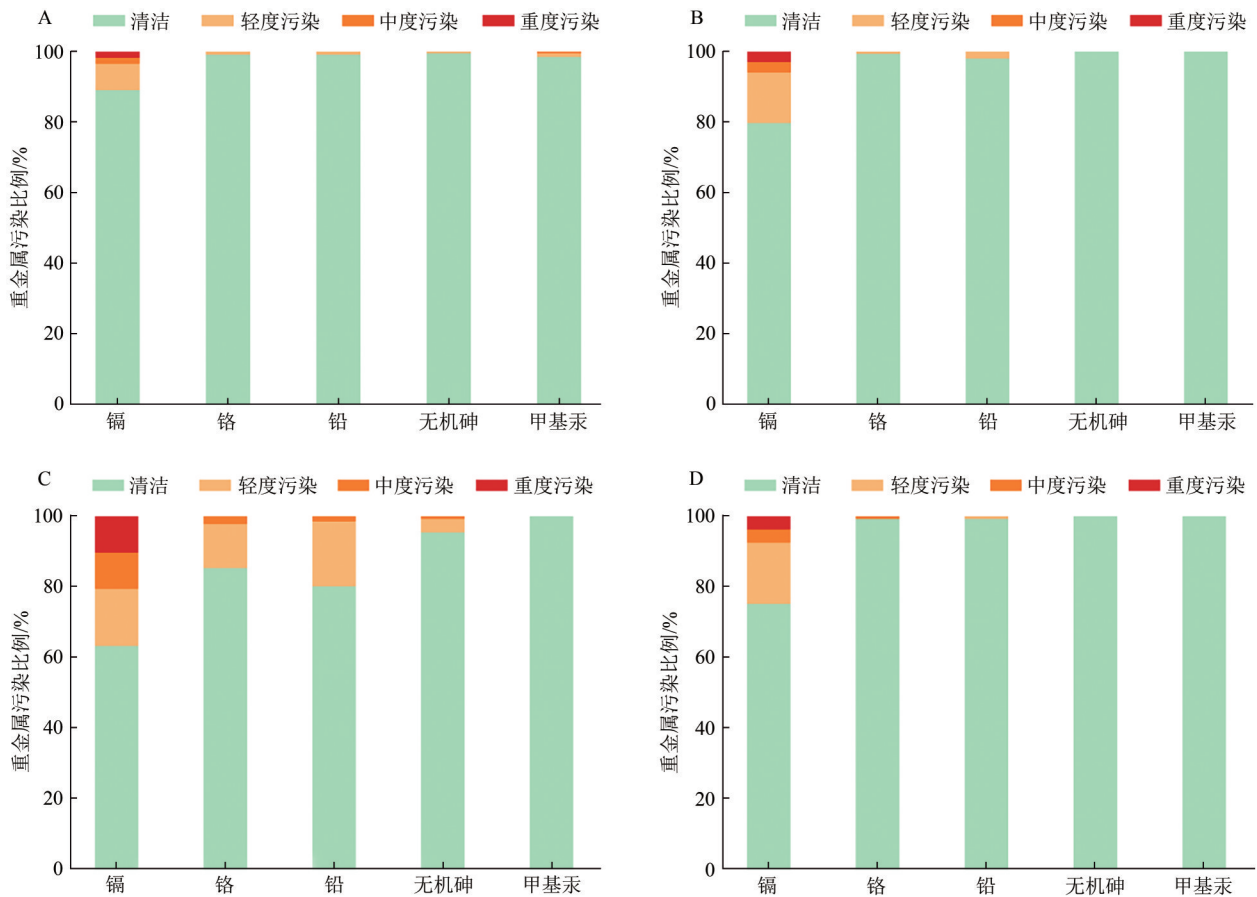
重金属元素镉、铬、铅、无机砷中污染占比(包括轻度污染、中度污染和重度污染)均比其他三类水产品高。内梅罗综合污染指数分析,四类水产品排序依次为贝类($P_n=0.311$)>头足类($P_n=0.160$)>甲壳类($P_n=0.112$)>鱼类($P_n=0.081$),均处于安全水平。

表2 珠海市四类水产品中重金属的单因子污染指数和内梅罗综合污染指数

Table 2 The single factor pollution index and Nemerow integrated pollution index of heavy metal in four types of aquatic products from Zhuhai City

种类	单因子污染指数					内梅罗综合污染指数	
	P_{Pb}	P_{Cd}	P_{MeHg}	P_{As}	P_{Cr}	P_n	安全性
鱼类	0.037(0.003~0.300)	0.093(0.004~2.100)	0.032(0.004~0.953)	0.100(0.100~0.220)	0.020(0.001~0.5)	0.081	安全
甲壳类	0.045(0.003~0.260)	0.149(0.001~2.920)	0.027(0.008~0.162)	0.022(0.020~0.094)	0.017(0.001~0.257)	0.112	安全
贝类	0.141(0.010~0.967)	0.411(0.011~5.900)	0.017(0.016~0.044)	0.059(0.020~0.640)	0.109(0.011~0.755)	0.311	安全
头足类	0.036(0.002~0.200)	0.217(0.001~5.800)	0.029(0.008~0.154)	0.021(0.020~0.076)	0.022(0.001~0.665)	0.160	安全

注:括号内为数值范围



注:A为鱼类;B为甲壳类;C为贝类;D为头足类

图1 四类水产品中重金属单因子污染比例

Figure 1 The heavy metal single factor pollution proportion of in four types of aquatic products

2.3 珠海市居民水产品摄入量

根据2021年珠海市居民食物消费量调查结果,4类水产品中珠海市居民鱼类摄入量最高,每天平均摄入量为1.019 g/kg,每天高端摄入量(P_{95})为3.230 g/kg;其次是甲壳类,每天平均摄入量为0.183 g/kg,每天高端摄入量(P_{95})为1.313 g/kg;贝类排名第3,每天平均摄入量为0.050 g/kg,每天高

端摄入量(P_{95})为0.350 g/kg;头足类摄入量最低,每天平均摄入量为0.025 g/kg,每天高端摄入量(P_{95})为0.000 g/kg。

2.4 珠海市水产品中重金属的暴露评估与风险

根据珠海市水产品中五种重金属元素铅、镉、甲基汞、无机砷、铬的平均含量,结合珠海市居民鱼类、甲壳类、贝类、头足类膳食摄入量,分别计算珠

海市居民膳食摄入四种水产品的平均暴露量、平均暴露量风险熵、高端暴露量和高端暴露量风险熵。由于鱼类、甲壳类、头足类的无机砷和贝类的有机汞检出率均低于40%，其含量水平容易造成暴露评估的偏差^[21]。因此，根据风险评估保守的原则，本次暴露评估中低于LOD的数据均采用LOD代替计算。从表3可以看出，珠海市居民摄入四类水产品中铅、镉、甲基汞、无机砷、铬的每日平均膳食暴露量和高端膳食暴露量均小于参考剂量。在平均膳食暴露水平下，鱼类中铅、甲基汞、无机砷、铬暴露水平最高，分别占参考剂量的1.55%、13.47%、0.68%、1.39%；甲壳类镉的暴露水平最高，占参考剂量的6.08%。在高端膳食暴露水平下，鱼类中甲基汞、无机砷、铬暴露水平最高，分别占参考剂量的42.68%、

28.23%和4.39%；甲壳类中镉的暴露水平最高，占参考剂量的43.53%；贝类中铅的暴露水平最高，占参考剂量的6.12%。由于头足类居民消费量的95%分位数为0，因此在本研究中头足类高端膳食暴露量无法精确统计。

在对珠海市居民的全种类水产品进行评估时，发现在平均膳食暴露水平下，五种重金属的风险熵均小于1。然而，特别需要指出的是，在高端膳食暴露情况下，镉的暴露量达到了参考剂量的81.67%，而甲基汞的暴露量则占到了参考剂量的51.68%。鉴于本研究的焦点仅限于水产品，并未综合考量其他膳食成分（例如谷物、薯类、蔬菜、水果以及动物性食品等）的潜在影响，因此，在高端膳食暴露水平下，镉和甲基汞的摄入可能带来的健康风险。

表3 珠海市水产品中重金属每日膳食暴露量和风险熵

Table 3 The daily dietary exposure and hazard quotient of heavy metal in four types of aquatic products from Zhuhai City

类别	元素	平均Exp/($\mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{BW}$)	平均HQ/%	高端(P_{95}) Exp/($\mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{BW}$)	高端(P_{95}) HQ/%
鱼类	铅	1.866×10^{-2}	1.55	5.912×10^{-2}	4.93
	镉	9.483×10^{-3}	1.14	3.005×10^{-2}	3.61
	甲基汞	3.085×10^{-2}	13.47	9.775×10^{-2}	42.68
	无机砷*	2.040×10^{-2}	0.68	6.464×10^{-2}	28.23
	铬	4.157×10^{-2}	1.39	1.317×10^{-1}	4.39
甲壳类	铅	4.119×10^{-3}	0.34	2.950×10^{-2}	2.46
	镉	5.063×10^{-2}	6.08	3.626×10^{-1}	43.53
	甲基汞	3.806×10^{-3}	1.08	1.771×10^{-2}	7.73
	无机砷*	3.806×10^{-3}	0.13	2.726×10^{-2}	0.91
	铬	6.275×10^{-3}	0.21	4.494×10^{-2}	1.50
贝类	铅	1.046×10^{-2}	0.87	7.344×10^{-2}	6.12
	镉	4.099×10^{-2}	4.92	2.877×10^{-1}	34.53
	甲基汞*	4.145×10^{-4}	0.18	2.909×10^{-3}	1.27
	无机砷	1.474×10^{-3}	0.05	1.035×10^{-2}	0.34
	铬	1.101×10^{-2}	0.37	7.730×10^{-2}	2.58
头足类	铅	9.107×10^{-4}	0.08	0.000×10^0	0.00
	镉	1.087×10^{-2}	1.31	0.000×10^0	0.00
	甲基汞	3.684×10^{-4}	0.16	0.000×10^0	0.00
	无机砷*	5.066×10^{-4}	0.02	0.000×10^0	0.00
	铬	1.120×10^{-3}	0.04	0.000×10^0	0.00
全种类水产品	铅	3.415×10^{-2}	2.84	1.621×10^{-1}	13.51
	镉	1.120×10^{-1}	13.45	6.804×10^{-1}	81.67
	甲基汞*	3.544×10^{-2}	14.89	1.184×10^{-1}	51.68
	无机砷*	2.619×10^{-2}	0.88	1.023×10^{-1}	29.48
	铬	5.998×10^{-2}	2.01	2.539×10^{-1}	8.47

注：*表示低于LOD的数据用LOD代替结算的结果

3 讨论

本研究表明珠海市部分市售水产品存在一定程度的重金属污染情况，且不同类型水产品中重金属污染水平差异较大。贝类中铅、镉和铬含量均值和中位数水平较高，其中镉含量水平远高于其他三种水产品，与广东省^[22]、深圳市^[23]、上海市^[24]的研究结果一致。头足类、甲壳类中镉含量较其他4种重金属元素高，均值和中位数水平仅次于贝类。鱼类中甲基汞均值和中位数是4类水产品中最高。不

同类型水产品中5种重金属富集特点不同，与其生活习性、生存条件和生态特征有关^[25]。

根据内梅罗综合污染指数，4种水产品重金属均处于安全水平，但贝类和头足类中镉的平均单因子指数处于轻度污染，且个体处于轻度、中度和重度污染的比较高。贝类、头足类具有生物富集作用，能从水体中将低浓度的重金属离子富集于体内^[26]，因此，水产品中镉含量也反映了相应水体的污染情况。近年来，水产品和水体中镉污染情况较

突出,建议加强环境治理,控制源头污染。

膳食暴露评估结果显示,珠海市居民在平均膳食暴露情况下,不论是各类水产品的风险熵值还是全部水产品累积风险熵值均 <1 ,表明普通居民通过市售水产品膳食摄入铅、镉、甲基汞、无机砷、铬风险较低。但值得注意的是,在高消费膳食暴露下,全种类水产品中镉的每日膳食暴露量达到参考剂量的 81.67%,其中甲壳类和贝类分别贡献了 43.53% 和 34.53%,成为镉暴露量的主要来源;同样地,全种类水产品中甲基汞的每日膳食暴露量占到了参考剂量的 51.68%,而鱼类中甲基汞的暴露量贡献了 42.68%。因此我们需要关注甲壳类、贝类在镉暴露和鱼类在甲基汞暴露的显著作用。本次研究未考虑居民其他膳食消费量高的食品中重金属情况,并不代表人群重金属的总暴露风险。同时,本研究亦未考虑重金属之间的协同效应和累积风险^[27],因此需要进一步进行累积风险的研究。

综上所述,珠海市市售水产品中的铅、镉、甲基汞、无机砷和铬所带来的健康风险总体上较低,但对于高消费人群,特别是那些可能通过水产品摄入较高水平镉和甲基汞的个体,持续的关注和监测是必要的。开展重金属累积暴露风险评估,进一步评估珠海市人群的水产品膳食暴露风险。

参考文献

- [1] 韦彬,侯青叶,唐志敏,等. 珠江水系沉积物重金属元素背景值估算及污染特征分析[J]. 现代地质, 2019, 33(2): 293-304. WEI B, HOU Q Y, TANG Z M, et al. Estimation of background values and contamination characteristics of heavy metals in sediments of the Pearl River, China[J]. GEOSCIENCE, 2019, 33(2): 293-304.
- [2] 范开文,梁浩亮,杨玉峰,等. 惠州海洋功能区重金属污染分析与评价[J]. 中国资源综合利用, 2018, 36(6): 121-125. FAN K W, LIANG H L, YANG Y F, et al. Analysis and evaluation of heavy metal pollution in marine function area in Huizhou[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2018, 36(6): 121-125.
- [3] PARIDA L, PATEL TN. Systemic impact of heavy metals and their role in cancer development: a review[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2023, 195(6): 766.
- [4] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. GB 5009.268—2016 食品安全国家标准 食品中多元素的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017. The National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China, the China Food and Drug Administration. National Food Safety Standard - Determination of Multi-elements in Foods: GB 5009.268—2016 [S]. Beijing: China Standards Press, 2017.
- [5] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 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]. 北京: 中国标准出版社, 2015. The National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China, the China Food and Drug Administration. National Food Safety Standard -Determination of Total Arsenic and Abio-arsenic in Foods: GB 5009.11—2014 [S]. Beijing: China Standards Press, 2015.
- [6] 中华人民共和国国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. GB 5009.17—2021 食品安全国家标准 食品中总汞及有机汞的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021. The National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China, the State Administration for Market Regulation. National Food Safety Standard -Determination of Total Mercury and Organic-mercury in Foods: GB 5009.17—2021[S]. Beijing: China Standards Press, 2021.
- [7] 杨晓光,孔灵芝,翟凤英,等. 中国居民营养与健康状况调查的总体方案[J]. 中华流行病学杂志, 2005(7): 471-474. YANG X G, KONG L Z, QU F Y, et al. The overall plan for the survey on the nutrition and health status of Chinese residents [J]. Chinese Journal of Epidemiology, 2005(7): 471-474.
- [8] LIU X W, CHEN S Y, et al. Evaluation of potential ecological risks in potential toxic elements contaminated agricultural soils: Correlations between soil contamination and polymetallic mining activity[J]. Journal of Environmental Management, 2021(300): 113679.
- [9] 中华人民共和国国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. GB 2762—2022 食品安全国家标准 食品中污染物限量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022. The National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China, the State Administration for Market Regulation. National Food Safety Standard -Maximum Levels of Contaminants in Foods: GB 2762—2022 [S]. Beijing: China Standards Press, 2022.
- [10] 姚雪漫,张秋萍,蒋建荣,等. 动物性海产品中镉的健康风险评估的研究进展[J]. 预防医学论坛, 2022, 28(11): 872-875. YAO X M, ZHANG Q P, JIANG J R, et al. Research progress on health risk assessment of cadmium in animal seafood [J]. Preventive Medicine Tribune, 2022, 28(11): 872-875.
- [11] 罗芳,伍国荣,王冲,等. 内梅罗污染指数法和单因子评价法在水质评价中的应用[J]. 环境与可持续发展, 2016, 41(5): 87-89. LUO F, WU G R, WANG C, et al. Application of Nemerow pollution index method and Single factorevaluation method in water quality evaluation[J]. Environment and Sustainable Development, 2016, 41(5): 87-89.
- [12] 朱丹丹,王翠玲,余艳明,等. 泉州洛阳江流域水产品重金属污染情况及健康风险评价[J]. 医学动物防制, 2021, 37(8): 727-730. ZHU D D, WANG C L, YU Y M, et al. Accumulation and health risks of heavy metals in the aquatic products from Luoyang River of Quanzhou[J]. Journal of Medical Pest Control, 2021, 37(8): 727-730.
- [13] 联合国粮农组织, 世界卫生组织. 食品中化学物风险评估原则和方法[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2012. Food and Agriculture Organization of the United Nations, World Health Organization. Principles and Methods for The Risk

- Assessment of Chemical in Food[M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2012.
- [14] Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives. Safety evaluation of certain food additives and contaminants[R]. 2011(64): 381-497.
- [15] Joint FAO/WHO. Safety evaluation of certain contaminants in food[R]. WHO, 2011(8): 153-316.
- [16] Joint FAO/WHO. Evaluation of certain food additives and contaminants[R]. WHO Technical Report Series, 2011(64): 305-380.
- [17] Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives. Safety evaluation of certain food additives and contaminants[R]. 2007(940): 53-58.
- [18] AMARH FA, AGORKU ES, VOEGBORLO RB, et al. Health risk assessment of some selected heavy metals in infant food sold in Wa, Ghana[J]. Heliyon, 2023, 9(5): e16225.
- [19] 李晨晨, 韩东方, 林增, 等. 上海市某区市售动物性水产品中镉污染及膳食暴露风险评估[J]. 上海预防医学, 2020, 32(5): 381-386.
- LEE C C, HAN D F, LIN Z, et al. Risk assessment of cadmium contamination and dietary exposure in market aquatic products in one district of Shanghai[J]. Shanghai Journal of Preventive Medicine, 2020, 32(5): 381-386.
- [20] 王绪卿, 吴永宁, 陈君石. 食品污染监测低水平数据处理问题[J]. 中华预防医学杂志, 2002, 36(4): 278-279.
- WANG X Q, WU Y N, CHEN J S. The issue of data processing for low-level contamination monitoring in food[J]. Chinese Journal of Preventive Medicine, 2002, 36(4): 278-279.
- [21] CANO-SANCHO G, MARIN S, RAMOS AJ, et al. Occurrence of zearalenone, an oestrogenic mycotoxin, in Catalonia (Spain) and exposure assessment[J]. Food and Chemical Toxicology, 2012, 50(3-4): 835-839.
- [22] 蔡文华, 苏祖俭, 胡曙光, 等. 广东海域代表性海产品中污染物数据库的建立及应用[J]. 中国卫生检验杂志, 2017, 27(24): 3497-3501, 3504.
- CAI W H, SU Z J, HU S G, et al. Establishment and application of pollutant database for representative seafoods in coast of Guangdong[J]. Chinese Journal of Health Laboratory, 2017, 27(24): 3497-3501, 3504.
- [23] 姜杰, 张慧敏, 林凯, 等. 深圳市水产品中铅镉汞含量及污染状况评价[J]. 卫生研究, 2011, 40(4): 527-528.
- JIANG J, ZHANG H M, LIN K, et al. Evaluation of lead, cadmium, and mercury levels and contamination status in aquatic products in Shenzhen City[J]. Journal of Hygiene Research, 2011, 40(4): 527-528.
- [24] 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 B Z, XIONG L B, et al. Status of heavy metal pollution in aquatic products in Shanghai[J]. Journal of Hygiene Research, 2018, 47(5): 740-743.
- [25] SAIDON NB, SZABO R, BUDAI P, et al. Trophic transfer and biomagnification potential of environmental contaminants (heavy metals) in aquatic ecosystems [J]. Environmental Pollution, 2024(340): 122815.
- [26] 李学鹏. 重金属在双壳贝类体内的生物富集动力学及净化技术的初步研究[D]. 浙江工商大学, 2008.
- LI X P. Preliminary studies on the kinetics of bioconcentration and depuration of heavy metals in Bivalves[D]. Zhejiang Gongshang University, 2008.
- [27] 王慧, 毛伟峰, 蒋定国, 等. 中国居民水产品中四种常见重金属暴露评估[J]. 中国食品卫生杂志, 2019, 31(5): 470-475.
- WANG H, MAO W F, JIANG D G, et al. Risk assessment of specific heavy metals exposure to aquatic products in China[J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2019, 31(5): 470-475.