DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250926003
引用格式: 徐静, 谭洪兴, 严俊安, 等. 中国沿海地区水产品重金属及类金属污染状况和健康风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(4): 211–218.
XU J, TAN HX, YAN JAN, *et al*. Contamination status and health risk assessment of heavy metal and metalloid in aquatic products in coastal areas of China [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(4): 211–218. (in Chinese with English abstract).

中国沿海地区水产品重金属及类金属污染状况和健康风险评估

徐 静[1,2], 谭洪兴[2], 严俊安[2], 胡绪乔[2], 洪文旭[1,2*]
(1. 广东药科大学公共卫生学院, 广州 510310; 2. 深圳市慢性病防治中心, 深圳 518020)

摘 要: 目的 检测中国 3 个沿海地区水产品中的重金属及类金属含量, 分析不同种类水产品中重金属及类金属含量的差异性和相关性, 评估其污染程度及健康风险。**方法** 利用电感耦合等离子体质谱法(inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)测定 14 种重金属及类金属含量, 分析其在不同水产品中的分布与相关性: 包括淡水鱼与海水鱼的含量差异, 以及鱼类、甲壳类与其他水产品 3 类样本间的两两比较。并采用单因子污染指数法、综合污染指数法及靶标危害系数法(target hazard quotient, THQ)评估了重金属及类金属污染水平和健康风险。**结果** 101 个水产品样品中, 镉的超标率最高, 为 3.96%, 铅和铬元素未出现超标。淡水鱼和海水鱼在铁、钴、锌、砷、硒、锶和镉含量上差异有统计学意义(P<0.05)。其他水产品类别中铬、铁、钴、镍、铅含量均高于鱼类和甲壳类, 钒、锰、铜和镉在 3 类水产品中的含量差异均有统计学意义(P<0.05), 污染评价显示, 水产品中铬、砷、镉、铅处于安全水平, 但健康风险评估表明铬、铅、镍和铜存在较高的健康风险。相关性分析结果显示, 钡与锰(r>0.9, P<0.05)、钡与铁(r>0.8, P<0.05)、钡与铅(r>0.8, P<0.05), 以及铁与锰、铅之间(r>0.8, P<0.05)均存在较强的正相关。**结论** 水产品中的重金属及类金属总体污染程度较轻, 但镉污染问题较为突出; 食用水产品对人体健康存在一定风险, 需要加强监管并实施控制措施。此外, 重金属及类金属的累积量不仅受水产品种类的影响, 也与其他重金属及类金属成分的存在密切相关。

关键词: 重金属; 水产品; 电感耦合等离子体质谱法; 污染程度; 健康风险评估

Contamination status and health risk assessment of heavy metal and metalloid in aquatic products in coastal areas of China

XU Jing[1,2], TAN Hong-Xing[2], YAN Jun-An[2], HU Xu-Qiao[2], HONG Wen-Xu[1,2*]
(1. *School of Public Health*, *Guangdong Pharmaceutical University*, *Guangzhou* 510310, *China*;
2. *Shenzhen Center for Chronic Disease Control*, *Shenzhen* 518020, *China*)

收稿日期: 2025-09-26
基金项目: 国家卫生健康委员会中国食物成分监测项目(NFNS-2025462)
第一作者: 徐静(2001—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为卫生检测与评价。E-mail: 2889484740@qq.com
***通信作者:** 洪文旭(1986—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为药理学。E-mail: szbloodcenter@hotmail.com

ABSTRACT: Objective To detect the heavy metal and metalloid content in aquatic products from 3 coastal areas of China, analyze the differences and correlations of heavy metal and metalloid levels among different types of aquatic products, assess the pollution level and health risks. **Methods** The content of 14 kinds of heavy metals and metalloid was determined using inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). Their distribution and correlations in different aquatic products were analyzed, including the content differences between freshwater fish and marine fish, as well as pairwise comparisons among 3 sample categories: Fish, crustaceans and other aquatic products. Furthermore, the single-factor pollution index method, comprehensive pollution index method and target hazard quotient (THQ) method were employed to evaluate the heavy metal and metalloid pollution levels and health risks. **Results** Among the 101 aquatic product samples, cadmium had the highest exceedance rate at 3.96%, while lead and chromium did not exceed standard limits. Statistically significant differences (P<0.05) were observed in the content of iron, cobalt, zinc, arsenic, selenium, strontium and cadmium between freshwater and marine fish. The content of chromium, iron, cobalt, nickel and lead were higher in other aquatic products than in fish and crustaceans. Significant differences (P<0.05) were found in the content of vanadium, manganese, copper and cadmium among the 3 categories. Pollution evaluation indicated that chromium, arsenic, cadmium and lead were at safe levels, while health risk assessment revealed higher health risks for chromium, lead, nickel and copper. Correlation analysis showed strong positive correlations between barium and manganese (r>0.9, P<0.05), barium and iron (r>0.8, P<0.05), barium and lead (r>0.8, P<0.05), as well as between iron and manganese and lead (r>0.8, P<0.05). **Conclusion** The overall heavy metal and metalloid pollution in aquatic products is relatively mild, but cadmium pollution is notable. Consumption of aquatic products poses certain health risks, necessitating strengthened regulation and control measures. Furthermore, the accumulation of heavy metals and metalloid is influenced not only by the type of aquatic product but also closely related to the presence of other heavy metal and metalloid components.

KEY WORDS: heavy metals; aquatic products; inductively coupled plasma mass spectrometry; pollution level; health risk assessment

0 引 言

随着人们生活水平的提高，水产品在日常饮食中的消费比例逐渐增加。据统计，2023 年全国水产品总产量达到了 7116.17 万 t，同比增长 3.64%，其中养殖产量 5809.61 万 t，同比增长 4.39%；捕捞产量 1306.56 万 t，同比增长 0.47%[1]，同时水产品在我国居民膳食结构中的比重也不断增加[2]。水产品富含优质蛋白质[3]、不饱和脂肪酸和多种微量元素，是人们获取各种营养的重要来源[4]。然而，由于环境污染等因素的影响，铬、铅、镉等重金属在水产品中蓄积，食用这类水产品对人体健康具有严重危害[5−6]。如：镉会导致高血压和心脑血管疾病，破坏骨钙，引起肾功能失调[7]；铅一旦进入人体很难排除，会直接伤害人的脑细胞，特别是胎儿的神经板，可造成先天大脑沟回浅，智力低下[8]。检测水产品中重金属及类金属的含量对于保障消费者的健康至关重要[9−10]。通过检测，可以及时发现并控制市场上水产品的重金属含量，防止消费者摄入过量的重金属及类金属。此外，检测结果还可以提供科学依据，促进水产品行业的健康发展。

目前相关研究主要集中在个别重金属及类金属含量检测和分析，如齐自元等[11]对海产品与淡水产品中重金属的差异性进行分析发现，淡水鱼(乌鳢除外)总砷均值含量低于其他品种；吕昭玮[12]发现 2023 年广东省水产品污染问题轻微，应重点关注蟹类和贝类的重金属污染问题；还有李惠芳[13]发现福建省水产品有较轻微的镉污染问题；同时，国外 KIM 等[14]对韩国水产品中 5 种重金属(铅、镉、砷、汞和甲基汞)的浓度检测，并评估了摄入水产品对人类造成重金属的风险。而涉及不同种类水产品中重金属及类金属含量差异性分析和水产品中各重金属及类金属含量相关性分析的研究较少。研究水产品中的重金属及类金属含量差异性和相关性有助于深入了解水产品的污染情况以及为更健康的饮食提供建议。故本研究利用电感耦合等离子体质谱技术对我国 3 个地区的水产品中的重金属及类金属含量进行定量检测，开展不同种类水产品中的重金属及类金属含量差异性分析，了解水产品中的重金属及类金属污染状况，对水产品中的重金属及类金属元素进行单因子污染指数分析和健康风险评估。并探讨水产品中的各种重金属及类金属元素含量之间的相关性关系。

1　材料与方法

1.1　样　品

2022 年在我国 3 个沿海地区(海南、江苏、广西)范围内, 在各地区的农贸市场、养殖场以及基地等地方采集水产品样本 101 个, 其中鱼类样本 64 个, 甲壳类样本 9 个, 其他水产品类样本(双壳贝类、腹足类、头足类、棘皮类)[15]28 个。将样本可食用部分均质化处理, 样品在真空冷冻干燥机中冷冻干燥, 记录水分, 研磨粉碎, 分装备用。

1.2　仪器和试剂

8800 电感耦合等离子质谱仪(美国 Agilent 公司); Advantage A10 Milli-Q 型纯水机(德国 Merck 公司); XR 205SM-DR 十万分之一电子天平(瑞士 Precisa 公司); 09A24S 赶酸电热板(中国上海博通公司); DHG-9145A 电热鼓风干燥箱(中国上海一恒公司); Multiwave GO 微波消解系统(奥地利 Aoton PAaron 公司); 6Z-101 冷冻干燥机(美国 Labconco 公司); GM 200 粉碎机(美国 Evertech 公司)。

硝酸(优级纯, 德国 Merck 公司); 氩气(Ar)、液氩(纯度≥99.999%)、氦气(He, 纯度≥99.999%)(中国广州市粤佳医疗产品有限公司); 标准品: 元素贮备液(锌、铁、铜、硒、锰、铅、镉、砷、铬、锡、镍、钡、锶、钼、钒、钴, 质量浓度 1000 mg/L 或 100 mg/L)、内标元素贮备液(铱、锗、铟、铑、铼、铋等, 质量浓度 1000 mg/L)(采用经国家认证并授予标准物质证书的单元素或多元素内标标准贮备液, 美国 Agilent 公司); 实验室用水为超纯水(电阻率 18.2 MΩ • cm, 美国 Millpore 公司)。

1.3　样品检测

按照 GB 5009.268—2016《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》第一法 电感耦合等离子体质谱法测定水产品中的钒、钴、镍、铁、锌、锰、铜、铬、砷、硒、镉、锶、钡、铅(消解方法选用微波消解法)。

1.4　重金属污染评价

依据 GB 2762—2022《食品安全国家标准 食品中污染物限量》中规定的相应项目限量值进行评价。铅、镉、铬和砷的限值见表 1。研究采用单因子污染指数、内梅罗综合污染指数评价水产品中铅、镉、铬的污染程度。

表 1　水产品中重金属及类金属限量指标

Table 1　Maximum levels of heavy metals and metalloids in aquatic products

重金属	铅			镉			铬	砷	
食品类别	鲜、冻水产动物(鱼类、甲壳类、双壳贝类除外)	鱼类、甲壳类	双壳贝类	鱼类	甲壳类	双壳贝类、腹足类、头足类、棘皮类	水产动物及其制品	鱼类及其制品	水产动物及其制品(鱼类及其制品除外)
限量/(mg/kg)	1.0	0.5	1.5	0.1	0.5	2.0	2.0	0.1	0.5

其中单因子污染指数法按公式(1)计算:

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

式中: P_i 为重金属及类金属元素 i 的单项污染指数; C_i 为重金属及类金属元素 i 的实际测量值, mg/kg; S_i 为污染物 i 的评价标准值, mg/kg。

其中内梅罗综合污染指数按公式(2)计算:

$$P_n=[(P_{i\text{ave}}^2+P_{i\text{max}}^2)/2]^{1/2} \tag{2}$$

式中: P_n 为内梅罗综合污染指数; $P_{i\text{ave}}$ 为水产品中各重金属及类金属单因子污染指数平均值; $P_{i\text{max}}$ 为水产品中各重金属及类金属单因子污染指数中最大值。评价标准分为 5 个等级(表 2)。

表 2　重金属及类金属污染物分级标准

Table 2　Grading standard for heavy metal and metalloid pollutants

分级	单项污染		综合污染	
	污染指数	污染等级	污染指数	污染等级
1	$P_i\leqslant 0.7$	优良	$P_n\leqslant 0.7$	安全
2	$0.7<P_i\leqslant 1.0$	清洁	$0.7<P_n\leqslant 1.0$	警戒线
3	$1.0<P_i\leqslant 2.0$	轻度污染	$1.0<P_n\leqslant 2.0$	轻度污染
4	$2.0<P_i\leqslant 3.0$	重度污染	$2.0<P_n\leqslant 3.0$	重度污染
5	$P_i>3.0$	重度污染	$P_n>3.0$	重度污染

1.5　健康风险评价模型

本研究依据美国环保署(U.S. Environmental Protection Agency, USEPA)提出的靶标危害系数(target hazard quotient, THQ)评估水产品对于人体的健康风险。THQ 计算如公式(3):

$$\text{THQ}=\frac{C\times\text{EF}\times\text{ED}\times\text{FIR}}{\text{BW}\times\text{AT}\times\text{RFD}} \tag{3}$$

式中: C 为污染物中重金属及类金属含量, mg/kg; EF 为暴露频率, 365 d/年; ED 为暴露年限(exposure annual), 70 年; AT 为非致癌源的平均暴露时间(average exposure time), 取人平均寿命 70 年×365; BW 为人体平均体质量(body weight), 采用国际通用标准成人为 55.9 kg, 儿童为 32.7 kg; FIR 为食物摄取率, g/d, 儿童取值 8.82, 成人取值 20.1; USEPA 提供的日参考剂量(reference dose, RFD)为铜 0.04 mg/kg, 铅 0.0035 mg/kg, 砷 0.06 mg/kg, 镉 0.001 mg/kg, 镍 0.02 mg/kg, 铬 1.5 mg/kg。

1.6　数据处理

本次研究中参考食品添加剂联合专家委员会 2011 年在会议上提出鱼和其他水产品中总砷与无机砷的转换系数

范围是 2%~4%[16]。依据风险评估保守原则，按总砷的 4%转换估算无机砷含量。对于样品含量低于方法检出限的数据(未检出值)均按检出限的 1/2 计算替换[17]。采用 SPSS 20.0 软件对数据结果进行统计学分析。Kolmogorov-Smirnov test (K-S test)法检验数据正态性，不符合正态性的数据用[*M*(*P*25, *P*75)]表示，使用 Mann-Whitney U 检验对淡水鱼和海水鱼中的重金属及类金属含量进行差异性分析。使用 Kruskal-Wallis H 检验对鱼类、甲壳类和其他水产品类 3 类水产品中的重金属及类金属含量进行两两比较，对比不同类别中的重金属及类金属含量差异，使用 Spearman 法对各种重金属及类金属之间相关性进行分析，使用 GraphPad Prism 9.0 绘制相关性热图。检验水准 α=0.05。

2 结果与分析

2.1 淡水鱼和海水鱼中重金属及类金属含量差异性分析

将鱼类样本分为两组，分别为淡水鱼组和海水鱼组，将两组样本用 SPSS 20.0 软件进行 Mann-Whitney U 检验，如表 3 所示。分析发现淡水鱼和海水鱼中的铁、钴、锌、砷、硒、锶、镉和钡 8 种重金属及类金属含量差异有统计学意义(P<0.05)，砷、硒、锶、镉含量淡水鱼低于海水鱼，海水鱼中的铁、钴、锌和钡含量低于淡水鱼，其余的钒、铬、锰、镍、铜和铅 6 种重金属氧含量在海水鱼和淡水鱼中差异无统计学意义(P>0.05)。

2.2 水产品中重金属及类金属含量评价

将样本分为 3 类：鱼类、甲壳类和其他水产品类[15]，各类水产品中的重金属及类金属含量如表 4 所示。GB 2762—2022 规定铅、镉、砷(无机砷)和铬的限量要求。3 类样本中的铅和铬含量无超标现象。28 份其他水产品类样本镉超标率 14.81%，超标样本分别是八爪鱼、青口螺、马蹄螺和象跋螺。超标率最高的是镉项目，101 个水产品样本镉总超标率为 3.96%。

对 3 类水产品中的重金属及类金属含量进行差异性分析，结果见表 4。不同种类的水产品中的重金属及类金属含量差异有统计学意义(P<0.05)，鱼类和甲壳类中的铬、铁、钴、镍、铅 5 种重金属元素含量低于其他水产品类，钒、锰、铜和镉 4 种重金属在 3 类水产品中的含量差异均有统计学意义(P<0.05)，其次是鱼类中的锌、砷和锶 3 类重金属及类金属含量低于甲壳类和其他水产品类，鱼类中的钡含量低于其他水产品类，甲壳类中的镉等重金属的含量也高于鱼类中的含量，硒在 3 类水产品中的含量没有显著性差异。重金属的总体污染趋势为：其他水产品类>甲壳类>鱼类。

2.3 重金属及类金属污染程度评价结果

根据现有标准中规定的铬、砷、镉、铅的限值，本研究对 101 个水产品样本中的铬、砷、镉、铅含量进行污染程度评价(表 5)。4 种重金属及类金属的单因子污染指数均小于 0.7，为优良级，内梅罗综合污染指数分析，3 类水产品均处于安全水平。

2.4 健康风险评估

根据水产品中 6 种重金属及类金属元素铬、砷、镉、铅、镍和铜的平均含量，结合居民膳食摄入量，计算了居民膳食摄入水产品的非致癌风险(THQ)，结果见表 6。当 THQ<1，表明对暴露人群的健康风险可接受；THQ>1，则表明存在非致癌健康风险。几类水产品中铬和砷的 THQ 均小于 1，表明铬和砷元素的非致癌风险较低。镍元素在鱼类和甲壳类的 THQ<1，但是在其他类水产品中的 THQ>1，有非致癌风险。其次是镉、铅和铜在所有水产品中的 THQ>1，存在明显的非致癌风险，尤其是在其他类水产品中 THQ 异常高，这主要源于样本中部分螺的这 3 种重金

表 3 淡水鱼和海水鱼中的重金属及类金属含量差异分析[*M*(*P*25, *P*75)]

Table 3 Comparative analysis of heavy metal and metalloid concentrations in freshwater and marine fish [*M*(*P*25, *P*75)]

重金属	淡水鱼(n=26)/(mg/kg WW)	海水鱼(n=38)/(mg/kg WW)	Z	P
钒	0.002(0.001, 0.004)	0.002(0.001, 0.005)	–0.357	0.721
铬	0.027(0.020, 0.058)	0.035(0.021, 0.072)	–0.522	0.601
锰	0.139(0.102, 0.266)	0.115(0.070, 0.217)	–1.420	0.156
铁	5.121(3.507, 9.842)	2.767(1.372, 4.563)	–3.428	0.001
钴	0.005(0.002, 0.010)	0.002(0.001, 0.005)	–2.626	0.009
镍	0.027(0.011, 0.044)	0.019(0.013, 0.051)	–0.060	0.952
铜	0.236(0.175, 0.284)	0.230(0.124, 0.345)	–0.462	0.644
锌	6.567(5.674, 9.406)	4.609(3.392, 6.916)	–3.160	0.002
砷	0.038(0.013, 0.071)	0.712(0.329, 1.674)	–6.294	0.000
硒	0.162(0.104, 0.223)	0.297(0.149, 0.449)	–2.290	0.022
锶	0.225(0.132, 0.406)	0.862(0.492, 1.024)	–4.566	0.000
镉	0.001(0.001, 0.003)	0.003(0.001, 0.005)	–2.381	0.017
钡	0.046(0.026, 0.101)	0.025(0.013, 0.066)	–2.485	0.013
铅	0.017(0.005, 0.031)	0.009(0.004, 0.027)	–0.825	0.410

表 4　不同分类水产品中的重金属及类金属含量差异性分析[*M*(*P*25, *P*75)] (mg/kg WW)

Table 4　Comparative analysis of heavy metal and metalloid concentrations in different categories of aquatic products [*M*(*P*25, *P*75)] (mg/kg WW)

重金属	鱼类	甲壳类	其他水产品类
钒	0.002(0.001, 0.005)^{a}	0.007(0.006, 0.016)^{b}	0.1765(0.041, 0.438)^{c}
铬	0.033(0.021, 0.068)^{a}	0.032(0.028, 0.056)^{a}	0.378(0.165, 0.695)^{b}
锰	0.126(0.078, 0.238)^{a}	0.319(0.202, 1.851)^{b}	4.990(1.173, 18.933)^{c}
铁	3.616(1.936, 5.736)^{a}	3.243(2.015, 4.782)^{a}	57.657(17.153, 259.272)^{b}
钴	0.003(0.001, 0.008)^{a}	0.005(0.003, 0.008)^{a}	0.080(0.030, 0.177)^{b}
镍	0.020(0.012, 0.046)^{a}	0.026(0.023, 0.049)^{a}	0.241(0.128, 0.539)^{b}
铜	0.234(0.146, 0.298)^{a}	5.467(3.553, 9.312)^{b}	1.439(0.866, 6.773)^{c}
锌	5.536(4.154, 7.865)^{a}	14.723(9.827, 17.347)^{b}	16.470(11.421, 77.648)^{b}
砷	0.231(0.042, 1.001)^{a}	2.134(1.015, 9.130)^{b}	1.310(0.785, 1.914)^{b}
硒	0.209(0.119, 0.353)^{a}	0.278(0.242, 0.589)^{a}	0.379(0.225, 0.578)^{a}
锶	0.520(0.222, 0.914)^{a}	3.537(2.585, 48.287)^{b}	6.234(2.205, 10.442)^{b}
镉	0.002(0.001, 0.005)^{a}	0.016(0.009, 0.061)^{b}	0.451(0.070, 1.285)^{c}
钡	0.036(0.017, 0.081)^{a}	0.097(0.025, 1.177)^{ab}	0.409(0.101, 2.630)^{b}
铅	0.014(0.005, 0.028)^{a}	0.008(0.002, 0.027)^{a}	0.125(0.059, 0.252)^{b}

注: 同一行不同字母表示差异有统计学意义(P<0.05)。

表 5　水产品中的重金属及类金属污染指数评价

Table 5　Assessment of pollution indices for heavy metals and metalloids in aquatic products

种类	单因子污染指数				内梅罗综合污染指数	
	$P_{砷}$	$P_{铬}$	$P_{铅}$	$P_{镉}$	P_n	安全性
鱼类	0.300	0.043	0.048	0.072	0.247	安全
甲壳类	0.300	0.020	0.032	0.180	0.190	安全
其他类(双壳贝类、腹足类、头足类、棘皮类)	0.134	0.173	0.106	0.299	0.207	安全

表 6　水产品中的中重金属及类金属非致癌风险

Table 6　Non-cancer risk of heavy metals and metalloids in aquatic products

元素	THQ 儿童			THQ 成人		
	鱼类	甲壳类	其他类	鱼类	甲壳类	其他类
铬	0.015	0.007	0.062	0.021	0.010	0.083
砷	0.135	0.674	0.288	0.180	0.899	0.402
镉	1.942	24.275	161.026	2.589	32.361	214.664
铅	1.865	1.233	12.716	2.486	1.644	16.951
镍	0.607	0.593	3.533	0.809	0.791	4.710
铜	2.461	44.626	32.171	3.281	59.491	42.888

属元素含量较高。总的来说是不同生物对重金属及类金属积累能力的差异, 主要受其生理结构、生态习性及所处环境的影响[18]。以软体动物为例, 其滤食性摄食方式导致它们更易富集某些重金属。高浓度重金属及类金属不仅可能破坏生态系统的健康与稳定, 还会通过食物链产生生物放大效应, 致使重金属及类金属在营养层级中逐渐累积, 最终对顶级捕食者(包括人类)造成较高的重金属及类金属暴露风险[19]。

2.5　水产品中重金属及类金属含量的相关性分析

使用 Spearman 法对各种重金属及类金属进行相关性分析, 结果如图 1 所示。通过对所测数据进行元素之间的相关性研究发现, 钡和锰(r>0.9, P<0.05)、钡和铁(r>0.8, P<0.05)、钡和铅(r>0.8, P<0.05)之间存在显著的正相关, 铁和锰、铅(r>0.8, P<0.05)之间也存在显著正相关, 其余的几种重金属元素相互之间成正相关关系, 正相关关系较小。

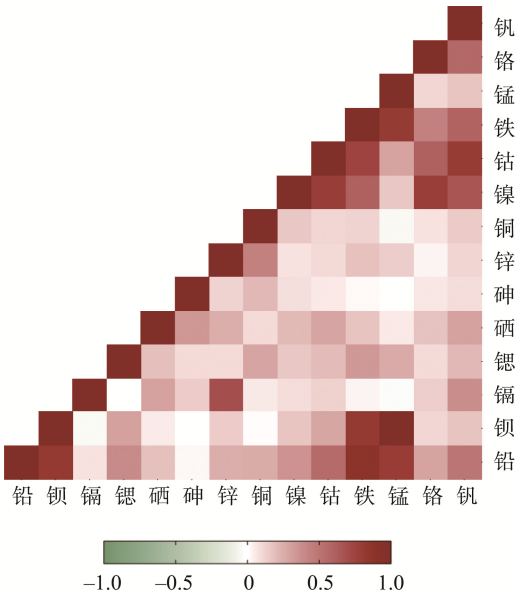


图 1 重金属及类金属含量之间的关联性分析热图

Fig.1 Heatmap of correlation analysis among heavy metal and metalloid concentrations

3 讨 论

本研究使用 ICP-MS 对我国 3 个地区 101 份水产品样本中的铅、镉、铬等 14 重金属及类金属进行了定量分析。首先对鱼类样品检测结果进行差异性分析发现，海水鱼和淡水鱼中铁、钴、锌、钡、砷、硒、锶和镉含量有显著差异(P<0.05)。其次将测定结果与 GB 2762—2022 规定的水产品及其制品中铅、镉、砷和铬限值相比，仅有八爪鱼、青口螺、马蹄螺和象跋螺 4 种水产品样本中的镉含量超标，超标率仅为 3.96%，表明水产品中重金属总体污染情况较轻，此结果与刘丽南等[20]的研究结果一致。对水产品进行分类，并对不同类别水产品中的重金属含量进行比对分析，发现不同种类的水产品中的多种重金属含量差异有统计学意义。其他水产品类(双壳贝类、腹足类、头足类、棘皮类)中的钒、锰、铜等多种重金属含量较甲壳类和鱼类中的高，甲壳类中的镉等重金属的含量也高于鱼类中的含量。重金属的总体污染趋势为：其他水产品类>甲壳类>鱼类。这可能是因为生长在受污染的水域底部及泥层的腹足类水产品对重金属的富集能力较强[20−21]，也有研究结果指出重金属含量的差异可能是不同水产品的种类、生存环境和对特定重金属累积能力不同所导致[22−25]。

重金属及类金属污染程度评价发现单因子污染指数和综合污染指数均小于 1，处于安全等级较高。健康风险评估数据显示，铬和砷元素 THQ<1，但镉、铅、镍和铜的 THQ>1，说明长期食用这些水产品可能会产生潜在的非致癌风险[26]。最后相关研究分析[27]指出，海水中海藻类对重金属及类金属具有较强的富集能力，在被海底生物摄取后，重金属及类金属会通过食物链逐级累积，导致位于食物链顶端的海洋生物体内重金属及类金属含量相对较高[28]。水产品中重金属及类金属含量之间的相关性研究发现，水产品中的重金属及类金属含量之间存在相关关系，所以需要注意多种重金属及类金属间可能存在累积污染的风险[29−30]。本研究使用了 ICP-MS 对我国沿海 3 个地区的水产品中重金属及类金属含量进行了评估，为我国水产品重金属及类金属污染情况及质量安全提供参考，达到了预期。但仍存在一些问题，此次检验未将汞元素纳入检测范围，主要是因为汞，尤其是其无机离子(Hg^{2+})，具有极强的记忆效应，长期积累会导致仪器背景信号显著增高，降低信噪比，影响检测限，其次是没有采集水藻等植物样本和环境样本进行检测分析。为减轻重金属及类金属对水生生态的威胁，建议建立长期监测机制，评估污染时空变化与生态风险，其次是从源头控制，削减重金属及类金属排放。

4 结 论

本研究揭示了我国 3 个地区水产品中重金属及类金属的总体污染水平较轻，但镉元素的污染问题相对突出，且在螺类等特定水产品中存在超标现象。研究普遍证实了不同类别水产品对重金属的富集能力存在显著差异，其规律总体表现为其他水产品类(如贝类、螺类)>甲壳类>鱼类，这与其生理结构、摄食方式及在食物链中的位置密切相关。尤为重要的是，相关性分析表明多种重金属元素(如钡与锰、铁、铅)之间存在强正相关关系，提示在评估环境暴露与健康风险时，需关注多种污染物的协同与累积效应。然而，本研究亦存在一定局限性，未将汞及其化合物纳入检测范围，未能全面评估所有主要有毒金属的污染状况；同时，缺乏对水环境基质及水生植物样本的同步检测，限制了从“环境-生物”链条上深入追溯污染源与迁移转化规律。

与先前多数聚焦于单一或少数几种重金属的研究相比，本研究同时测定了 14 种元素，并深入分析了其在不同水产品间的差异性、相关性及综合健康风险，提供了更为全面的污染图谱。风险评估结果与部分研究一致，指出了镉、铅的潜在风险，但本研究进一步明确了铜、镍在特定水产品中也存在不可忽视的非致癌风险。本研究结果所获数据可为部门制定针对性的水产品质量安全监管策略、确定重点监控品种和污染物提供科学依据，并为公众进行膳食风险交流与健康饮食选择提供参考。为进一步深化该领域研究，首先，需要扩大监测范围，将汞、甲基汞等重要污染物以及水体、沉积物等环境样本纳入监测体系，构建更完整的风险评估模型；其次，深入开展重金属在水生生态系统中的迁移转化机制及生物富集动力学研究；最后，探索有效的源头控制与污染削减技术，从根本上保障水产品的食用安全与水生生态健康。

参考文献

[1] 付凌辉, 叶礼奇. 中国统计年鉴 2023[M]. 北京: 中国统计出版社, 2023.
FU LH, YE LQ. China statistical yearbook 2023 [M]. Beijing: China Statistical Press, 2023.

[2] 王宇光, 赵明军, 赵蕾. 居民膳食平衡目标下我国水产品消费研究[J]. 中国水产, 2021(10): 48–50.
WANG YG, ZHAO MJ, ZHAO L. Research on the consumption of aquatic products in China under the goal of residents' dietary balance [J]. China Fisheries, 2021(10): 48–50.

[3] SHAHJAHAN M, TASLIMA K, RAHMAN MS, *et al*. Effects of heavy metals on fish physiology-a review [J]. Chemosphere, 2022, 300: 134519.

[4] 刘冰, 王怡, 朱艳杰, 等. 膳食摄入水产品中重金属的风险评估[J]. 中国食品学报, 2021, 21(7): 267–275.
LIU B, WANG Y, ZHU YJ, *et al*. Risk assessment of dietary intake of heavy metals in aquatic products [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(7): 267–275.

[5] 化天赐, 李艳, 黎晏彰, 等. 场地铬污染的微生物治理及资源化实验[J]. 硅酸盐学报, 2024, 52(10): 1–7.
HUA TC, LI Y, LI YZ, *et al*. Experiments on microbial treatment and resource utilization of chromium pollution in the site [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2024, 52(10): 1–7.

[6] LIU Y, KUANG W, XU J, *et al*. Distribution, source and risk assessment of heavy metals in the seawater, sediments, and organisms of the Daya Bay, China [J]. Marine Pollution Bulletin, 2022, 174: 113297.

[7] 李妃, 陶建斌. 养殖对虾和海捕虾中重金属和硒元素的含量测定和分布研究[J]. 中国检验检测, 2021, 29(1): 36–39.
LI F, TAO JB. Determination and distribution of heavy metals and selenium in cultured shrimp and sea shrimp [J]. China Inspection & Testing, 2021, 29(1): 36–39.

[8] 赵欣, 刘贺, 武中波. 国内外有关水、土壤、沉积物和食品中烷基汞监测方法的研究进展[J]. 科技创新与应用, 2020(36): 107–109, 111.
ZHAO X, LIU H, WU ZB. Research progress on monitoring methods of alkylmercury in water, soil, sediment and food at home and abroad [J]. Technology Innovation and Application, 2020(36): 107–109, 111.

[9] 罗莎, 赵静, 刘佳琳, 等. 天津市市售动物性海产品中四种常见重金属含量分析及风险评估[J]. 中国食品卫生杂志, 2025, 37(6): 547–552.
LUO S, ZHAO J, LIU JL, *et al*. Analysis and risk assessment of four common heavy metals in animal seafood sold in Tianjin [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2025, 37(6): 547–552.

[10] 郑正男, 张秋平, 朱婷婷, 等. 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[J]. 中国食品卫生杂志, 2024, 36(12): 1366–1372.
ZHENG ZN, ZHANG QP, ZHU TT, *et al*. Monitoring of common heavy metal content in aquatic products sold in Zhuhai and preliminary dietary exposure risk assessment [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2024, 36(12): 1366–1372.

[11] 齐自元, 曹欢, 胡钰梅, 等. 海产品与淡水产品中重金属的差异性及其风险评价[J]. 水产学报, 2022, 46(7): 1246–1256.
QI ZY, CAO H, HU YM, *et al*. Differences and risk assessment of heavy metals in seafood and freshwater products [J]. Journal of Fisheries of China, 2022, 46(7): 1246–1256.

[12] 吕昭玮. 2023 年广东省市场销售水产品中镉、铅、铬元素污染情况评价分析[J]. 现代食品, 2024, 30(16): 183–186.
LV ZW. Evaluation and analysis of cadmium, lead and chromium pollution in aquatic products sold in Guangdong Province in 2023 [J]. Modern Food, 2024, 30(16): 183–186.

[13] 李惠芳. 2020—2022 年福建省销售水产品中镉含量检测结果分析[J]. 食品安全导刊, 2023(33): 49–52, 57.
LI HF. Analysis of cadmium content in aquatic products sold in Fujian Province from 2020 to 2022 [J]. China Food Safety Magazine, 2023(33): 49–52, 57.

[14] KIM DY, JEON H, SHIN HS. Risk assessment and determination of arsenic and heavy metals in fishery products in Korea [J]. Foods, 2023, 12(20): 3750.

[15] 谢思柔, 温权, 杜田, 等. 2018—2020 年深圳市市售水产品重金属污染状况[J]. 预防医学情报杂志, 2022, 38(5): 603–606.
XIE SR, WEN Q, DU T, *et al*. Heavy metal pollution in aquatic products sold in Shenzhen from 2018 to 2020 [J]. Journal of Preventive Medical Information, 2022, 38(5): 603–606.

[16] FAO/WHO. Safety evaluation of certain contaminants in food [Z]. WHO, 2011(8): 153–316.

[17] 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 XQ, WU YN, CHEN JS. Low-level data processing of food contamination monitoring [J]. Chinese Journal of Preventive Medicine, 2002, 36(4): 278–279.

[18] 吴昊, 张乐蒙, 黄智伟, 等. 厦门湾常见海洋经济生物重金属污染特征及风险评价[J]. 应用海洋学学报, 2022, 41(3): 395–406.
WU H, ZHANG LM, HUANG ZW, *et al*. Pollution characteristics and risk assessment of heavy metals in common marine economic organisms in Xiamen Bay [J]. Applied Journal of Oceanography, 2022, 41(3): 395–406.

[19] 陈星星, 虞雯煊, 薛峰, 等. 温州海域水产品的重金属分布特征与健康风险评价[J]. 浙江农业学报, 2025, 37(11): 2354–2363.
CHEN XX, YU WX, XUE F, *et al*. The distribution characteristics and health risk assessment of heavy metals in aquatic products in Wenzhou sea area [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2025, 37(11): 2354–2363.

[20] 刘丽南, 吴春敏, 王岩, 等. 水产品中典型重金属的含量分析及评价[J]. 食品安全导刊, 2024(21): 100–104.
LIU LN, WU CM, WANG Y, *et al*. Analysis and evaluation of typical heavy metals in aquatic products [J]. China Food Safety Magazine, 2024(21): 100–104.

[21] 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]. Journal of Hygiene Research, 2018, 47(5): 740–743.

[22] 程国霞, 郭蓉, 王彩霞, 等. 陕西省市售水产品中重金属污染状况及安全评价[J]. 中国卫生检验杂志, 2016, 26(22): 3313–3316.
CHENG GX, GUO R, WANG CX, *et al*. Heavy metal pollution and safety evaluation of aquatic products in Shaanxi Province [J]. Chinese Journal of Health Laboratory Technology, 2016, 26(22): 3313–3316.

[23] 祝云龙, 姜加虎, 黄群, 等. 大通湖及东洞庭湖区生物体重金属的水平及其生态评价[J]. 湖泊科学, 2007, 19(6): 690–697.
ZHU YL, JIANG JH, HUANG Q, *et al*. Levels and ecological assessment of heavy metals in organisms from Datong Lake and East Dongting Lake [J]. Journal of Lake Sciences, 2007, 19(6): 690–697.

[24] 李楠, 戚佳妮, 成丽娜, 等. 辽宁省海水贝类养殖高质量发展探究[J]. 辽宁农业科学, 2025(4): 79–81.
LI N, QI JN, CHENG LN, *et al*. High-quality development of marine shellfish aquaculture in Liaoning Province [J]. Liaoning Agricultural Sciences, 2025(4): 79–81.

[25] 张剑涛. 2021 年度平潭地区流通领域水产品重金属镉含量分析调查[J]. 食品安全导刊, 2022(24): 60–62.
ZHANG JT. Analysis and investigation of heavy metal cadmium content in aquatic products in Pingtan area in 2021 [J]. China Food Safety Magazine, 2022(24): 60–62.

[26] PASINSZKI T, PRASAD SS, KREBSZ M. Quantitative determination of heavy metal contaminants in edible soft tissue of clams, mussels, and oysters [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2023, 195(9): 1066.

[27] DJEDJIBEGOVIC J, MARJANOVIC A, TAHIROVIC D, *et al*. Heavy metals in commercial fish and seafood products and risk assessment in adult population in Bosnia and Herzegovina [J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 13238.

[28] 崔正国. 环渤海 13 城市主要化学污染物排海总量控制方案研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008.
CUI ZG. Research on the total amount control scheme of the main chemical pollutants discharged into the sea in 13 cities around the Bohai Sea [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2008.

[29] SUN T, JI C, LI F, *et al*. Bioaccumulation and human health implications of trace metals in oysters from coastal areas of China [J]. Marine Environmental Research, 2023, 184: 105872.

[30] 陈晓敏, 陈韵, 梁智安, 等. 基于电感耦合等离子体质谱法对广州市售水产品中 6 种重金属的含量测定与污染评价[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(14): 59–66.
CHEN XM, CHEN Y, LIANG ZAN, *et al*. Determination and pollution evaluation of 6 heavy metals in aquatic products sold in Guangzhou based on inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(14): 59–66.

(责任编辑: 安香玉 冯东慧)