



海产品与淡水产品中重金属的差异性及其风险评价

齐自元^{1,2}, 曹欢¹, 胡钰梅¹, 杜明³,
潘迎捷^{1,2,4}, 赵勇^{1,2,4*}, 刘海泉^{1,2,4,5*}

(1. 上海海洋大学食品学院, 上海 201306;

2. 上海海洋大学, 上海水产品加工及贮藏工程技术研究中心, 上海 201306;

3. 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, 辽宁 大连 116034;

4. 上海海洋大学, 农业农村部水产品贮藏保鲜质量安全风险评估实验室, 上海 201306;

5. 上海海洋大学, 食品热加工工程技术研究中心, 上海 201306)

摘要: 为了解我国东部沿海地区海产品与淡水产品中重金属污染现状及摄入风险, 实验分析了东部沿海地区市售的 12 种海产品和 8 种淡水产品, 采用微波消解-电感耦合等离子体质谱法 (ICP-MS) 测定铅、镉、汞、砷、铬共 5 种常见重金属, 根据单因子污染指数 (P_i) 和金属污染指数 (MPI) 评价其污染程度, 比较不同水产品重金属含量差异及污染状况, 并通过靶标危害系数 (THQs) 评价其健康风险。检测结果显示, 海产品与淡水产品中, 铅含量范围为 ND~1.100 mg/kg, 铅超标率为 1.4%, 各品种铅均值含量无显著差异。镉含量范围为 ND~1.600 mg/kg, 镉超标率为 2.8%, 长牡蛎、海湾扇贝镉均值含量高于其他品种。总汞含量范围为 ND~1.900 mg/kg, 蓝鳍金枪鱼总汞均值含量高于其他品种, 其他品种总汞均值含量无显著差异。总砷含量范围为 0.004~4.100 mg/kg, 淡水鱼 (乌鳢除外) 总砷均值含量低于其他品种。铬含量范围为 0.010~32.000 mg/kg, 铬超标率为 2.3%, 鳙铬均值含量高于其他品种。单因子污染指数显示: 不同品种的水产品都有一定的污染。重金属污染指数显示: 污染指数呈现海水虾蟹>海水贝>淡水虾蟹>海水鱼>淡水鱼的趋势。健康风险评价显示: 除蓝鳍金枪鱼外, 海产品和淡水产品的健康风险值均小于 1.0, 食用风险较小。研究表明, 我国东部沿海地区的海产品与淡水产品存在一定的重金属污染, 但污染较轻, 摄入风险较小, 这为评价水产品中重金属对东部沿海地区人类健康风险提供了科学依据。

关键词: 海产品; 淡水产品; 重金属; 电感耦合等离子体质谱仪; 健康风险评价

中图分类号: TS 207.5⁺¹

文献标志码: A

自 2000 年以来, 我国一直保持其作为全球最大的鱼类、甲壳类和软体动物生产者、加工者和贸易者的角色, 并快速增长成为主要的消费者^[1]。据国家统计局官网发布的数据, 2019 年我国水产

品产量 6480.36 万 t, 其中海产品产量 3282.50 万 t, 淡水产品产量 3197.87 万 t。随着人们对水产品需求量的增加, 其食用安全与质量安全成了重点关注对象。

收稿日期: 2021-05-21 修回日期: 2021-11-07

资助项目: 国家重点研发计划 (2018YFC1602205); 上海市科委上海市“科技创新行动计划”农业领域项目 (19391901600); 上海市科技兴农项目 (沪农科推字 2017 第 4-4 号); 上海市教育委员会科研创新计划 (2017-01-07-00-10-E00056)

第一作者: 齐自元 (照片), 从事水产品质量安全与检测研究, E-mail: zyqi@shou.edu.cn;

曹欢, 从事食品质量与安全研究, E-mail: 1713565868@qq.com

通信作者: 赵勇, 从事食品安全与生物技术研究, E-mail: yzhao@shou.edu.cn;

刘海泉, 从事食品品质与安全风险评估研究, E-mail: hqliu@shou.edu.cn



重金属是公认的有害环境污染物。城市化和工业化逐渐增加了含有重金属的废物和废水通过河流和地下径流排入河口和海滩生态系统的速度^[2-3],导致水体中重金属污染。重金属在环境中难以降解,且在水生生态系统中能够进行生物累积,从而通过食物链进入人体,干扰人体正常生理功能,对人体健康产生不利影响。在世界范围内,水产品只占人类饮食的10%左右,但却是人类摄取重金属的主要途径,尤其是汞元素^[4-5],如食用受甲基汞污染的鱼类会导致水俣病^[6]。水产品中常见的重金属污染主要有铅、镉、汞、砷、铬等,其来源、毒性和引起的症状各不相同,但大多危害较大^[7]。例如,铅能够对人体任何器官产生不利影响,且会影响人的神经系统、心血管系统、生殖系统和泌尿系统^[8-9];镉对人体的肺、肝脏、肾脏、骨以及心血管系统、泌尿生殖系统、免疫系统、神经系统(听觉系统)等都会造成损伤^[10-11]。

实验选取了淡水鱼、海水鱼、海水贝、淡水虾/蟹、海水虾/蟹等5大类水产品为对象,以期了解不同水产品受重金属污染的差异性和特异性,并进行综合评估,为食用水产品的安全性提供数据支持。

1 材料与方法

1.1 实验材料

原料与制样 蓝鳍金枪鱼(*Thunnus maccoyii*)样品来自太平洋、大西洋、印度洋,中华绒螯蟹(*Eriocheir sinensis*)样品来自东部沿海地区不同区域的63个养殖场,其他水产样品2015—2017年分别取自上海、浙江和福建等地的大型水产批发市场,共采集20个品种215个样品。新鲜生物样品清洗干净后,鱼类取背部两侧肌肉组织,虾类去头、虾皮、肠腺取肌肉组织,蟹类去壳、去鳃后取胸甲肌肉组织,贝类去壳后用超纯水冲洗3遍,再用吸水纸吸干表面水分,取其肌肉或软组织,所有组织分别用捣碎机捣碎,样品保存于-40℃冰箱中待测。

试剂与标准物质 硝酸(优级纯),上海安普实验科技股份有限公司。1000 μg/mL Pb、Cd、Hg、As、Cr单元素标准溶液,美国AccuStandard公司。10 μg/mL的Bi、Ge、In、Li、Sc、Tb、Y多元素内标标准溶液,国家有色金属及电子材料分析测试中心。10 μg/L的Li、Co、In、U、Ba、

Ce调谐溶液,美国赛默飞世尔。标准参考物质(扇贝GBW10024),国家标准物质研究中心。

主要仪器 iCAPQ电感耦合等离子体质谱仪,美国赛默飞世尔。CEM-MARS6微波消解仪,美国CEM公司。Milli-Q超纯水净化器,美国Millipore公司。

1.2 实验方法

样品消解 称取约1.0 g的样品于微波消解罐中,加入5 mL硝酸浸泡过夜,盖塞密闭后放入微波消解系统中,进行微波消解至样品消解完全,至酸冷却后用超纯水定容至25 mL,待上机测定(表1)。每个样品做3次平行,同时随样品做

表1 微波消解程序参数

Tab. 1 Working parameters of the microwave digestion

步骤 step	功率/W power	升温时间/min heating time	升至温度/°C heating to temperature	保温时间/min holding time
1	1600	25	180	0
2	1600	0	180	30

试剂空白样。

测定条件 用调谐液优化ICP-MS测定条件,使Li>50000、⁵⁹Co>100000、¹¹⁵In>220000、²³⁸U>300000CPS、¹⁴⁰Ce¹⁶O/¹⁴⁰Ce<2%,以氦气作为碰撞反应气,去除多原子离子的干扰,待⁵⁹Co/³⁵Cl¹⁶O>18、⁵⁹Co>30000 CPS后将样品消解液用ICP-MS测定,并用内标元素⁴⁵Sc(校正⁵²Cr)、⁷³Ge(校正⁷⁵As)、¹¹⁵In(校正¹¹¹Cd)、²⁰⁹Bi(校正²⁰²Hg、²⁰⁸Pb)进行校正。

测定方法 金属元素总量参考GB 5009.268—2016^[12]的方法采用ICP-MS进行测定。参考DB 35/T895—2009^[13]的方法采用HPLC-ICP-MS对蓝鳍金枪鱼中甲基汞进行测定。

1.3 评价方法及标准

限量标准 采用GB 2762—2017《食品安全国家标准食品中污染物限量》^[14]对不同水产品中重金属污染程度进行评价。

重金属污染程度评价 利用单因子污染指数法来评价水产品中各种重金属的污染状况,单因子污染指数法的计算公式:

$$P_i = C_i/S_i$$

式中, P_i 表示*i*污染因子的污染指数, C_i 表示*i*污染因子的检测数据, S_i 表示*i*污染因子的评价标准。当 $P_i < 0.2$ 时,表明重金属浓度处于正常的背

景值范围内; $0.2 \leq P_i \leq 0.6$ 时, 表明处于轻污染水平; $0.6 < P_i < 1.0$ 时, 为中度污染水平; $P_i \geq 1.0$ 时, 为重污染^[15]。

采用金属污染指数 (X_{MPI})^[16] 对各种水产品中重金属含量进行综合评价, 比较不同水产品之间对所检测重金属总含量及富集能力的差异性, 指数值越大表明该水产品对重金属的富集能力越强。 X_{MPI} 的计算公式:

$$X_{MPI} = \sqrt[n]{C_1 \times C_2 \times \dots \times C_n}$$

式中, C_n 表示样品中污染因子的浓度。

健康风险评价 重金属暴露对人体的风险评价采用美国环保署 (USEPA) 推荐的健康风险评价模型目标危险系数 (targethazardquotient, THQ) 进行评价^[17]。THQ 的计算公式如下:

$$THQ = \frac{EFr \times ED \times IR \times C}{RfD \times BW \times ATn}$$

式中, EFr 为人群暴露频率 (350 d/a); ED 为暴露持续时间 (70 a); IR 为每天摄取速率 (kg/d), C 为水产品可食部分重金属残留量 (mg/kg); BW 为成年人平均体质量 (成人 60 kg); ATn 为平均暴露时间, $ATn = ED \times 365 \text{ d/a}$; RfD 为参比剂量 [mg/(kg·d)], 铅、镉、汞、砷和铬等的参考值分别为 4.0×10^{-3} 、 1.0×10^{-3} 、 0.1×10^{-3} 、 0.3×10^{-3} 和 $3 \times 10^{-3} \text{ mg/(kg·d)}$ 。重金属对人体健康的影响一般是多种元素共同作用的结果, 采用总目标危险系数 (targethazardquotients, THQs) 评价重金属暴露对人体健康的风险 $THQs = THQ_1 + THQ_2 + \dots + THQ_n$ 。若 $THQs \leq 1.0$, 表明重金属对人体健康造成的影响不明显; $THQs > 1.0$, 表明对人体存在健康风险。

1.4 数据分析

采用 SPSS 18.0 软件处理数据, 结果以平均值±标准差表示, 组间分析采用单因素方差 (One-Way ANOVA) 检验。

2 结果

2.1 测定方法的评价

以 5% 硝酸溶液为稀释剂, 配制一系列不同浓度含 5 种元素的混合标准溶液, 在仪器最佳条件下进行测定。根据各元素的信号强度与浓度做线性回归方程, 绘制标准曲线。结果显示, 各元素的相关系数均大于 0.999 6, 线性关系良好 (表 2)。为了验证方法的准确度, 对标准参考物质 (扇贝

GBW10024) 进行测定, 其测定值与参考值相符 (表 3), 说明检测方法和结果准确可靠。

表 2 5 种元素的线性回归方程、相关系数及检出限

Tab. 2 Regression equations, correlation coefficients and detection limits of 5 elements

元素 element	线性方程 linear equation	相关系数 (R^2) correlation coefficient	检出限/($\mu\text{g/kg}$) detection limit
Pb	$Y=74\,900.464X+5\,862.083$	0.999 9	1.5
Cd	$Y=5\,983.569X+32.235$	0.999 8	0.19
Hg	$Y=21\,186.872X+1\,765.840$	0.999 8	2.0
As	$Y=1\,008.838X+3.342$	0.999 6	0.3
Cr	$Y=12\,753.582X+18\,857.091$	0.999 9	2.4

表 3 标准参考物质 (扇贝 GBW10024) 分析结果与标准值的比较

Tab. 3 Comparison between measured values and standard values in GBW10024

元素(质量分数) element (mass fraction)	标准值 standard value	测定值 measured value	回收率/% recovery
Pb (10^{-6})	0.12 [*]	0.12±0.06	97.23
Cd (10^{-6})	1.06±0.10	1.07±0.05	101.54
Hg (10^{-9})	40.00±7.00	44.00±0.80	96.12
As (10^{-6})	3.60±0.60	3.80±0.02	96.87
Cr (10^{-6})	0.28±0.07	0.34±0.03	102.44

注: *表示参考值

Notes: *indicates the reference value

2.2 海产品与淡水产品中重金属限量标准评价

在海产品和淡水产品中, 铅含量范围为 ND~1.1 mg/kg, 铅超标率为 1.4%, 3 个样品超标, 分别为鲫 (*Carassius auratus*) (0.510±0.021)、鳊 (*Aristichthys nobilis*) (0.770±0.032)、团头鲂 (*Megalobrama amblycephala*) (1.100±0.021) mg/kg, 均为淡水产品, 各品种铅均值含量无显著差异 (表 4); 镉含量范围为 ND~1.6 mg/kg, 镉超标率为 2.8%, 6 个样品超标, 分别为蓝鳍金枪鱼 (0.120±0.010)、(0.121±0.022)、(0.132±0.021)、(0.140±0.041)、(0.162±0.030) mg/kg 和中华绒螯蟹 (0.570±0.021) mg/kg, 海水贝类中长牡蛎 (*Crassostrea gigas*)、海湾扇贝 (*Argopecten irradians*) 镉均值含量高于其他品种 ($P < 0.05$); 铬含量范围为 0.010~32.000 mg/kg, 铬超标率为 2.3%, 5 个样品超标, 3 个淡水鱼样品, 分别为乌鳢 (*Channa argus*) (14.000±0.472) mg/kg、鳊 (24.003±0.661) mg/kg、鳊 (32.000±0.982) mg/kg, 2 个海水鱼样品, 分别为大菱鲂 (*Scophthalmus maximus*) (2.900±0.331) mg/kg、石斑鱼 (9.800±0.563)

表4 20种水产品中铅、镉、汞、砷和铬测定结果(湿重)
 Tab. 4 Measurement results of lead, cadmium, mercury, arsenic and chromium of
 20 kinds of aquatic products (wet weight)

水产品类别 aquatic product category	品种 species	样品数 number of samples	Pb	Cd	Hg	As	Cr	
淡水鱼 freshwater fish	鳙 <i>Aristichthys nobilis</i>	9	0.130±0.240 ^a (0.002~0.770)	0.002±0.002 ^e (ND~0.006)	0.024±0.006 ^b (0.002~0.057)	0.063±0.043 ^e (0.023~0.150)	6.400±12.600 ^a (0.032~32.000)	
	鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	8	0.130±0.330 ^a (ND~1.100)	0.002±0.001 ^e (ND~0.004)	0.032±0.011 ^b (0.025~0.052)	0.070±0.028 ^e (0.027~0.120)	0.260±0.470 ^b (0.013~1.400)	
	草鱼 <i>Ctenopharyngodon idella</i>	6	0.023±0.011 ^a (0.011~0.042)	0.001±0.001 ^e (ND~0.003)	0.006±0.001 ^b (0.005~0.006)	0.074±0.084 ^e (0.007~0.240)	0.056±0.028 ^b (0.024~1.000)	
	团头鲂 <i>Megalobrama amblycephala</i>	11	0.130±0.330 ^a (ND±1.100)	0.002±0.001 ^e (ND~0.004)	0.005±0.005 ^b (0.005~0.015)	0.047±0.041 ^e (0.007~0.160)	0.200±0.360 ^b (0.019~1.300)	
	鲫 <i>Carassius auratus</i>	16	0.063±0.120 ^a (ND~0.510)	0.001±0.002 ^e (ND~0.004)	0.013±0.018 ^b (ND~0.060)	0.063±0.042 ^e (0.023~0.178)	0.460±0.230 ^b (0.160~0.940)	
	乌鳢 <i>Channa argus</i>	6	0.019±0.019 ^a (ND~0.056)	0.008±0.003 ^e (0.001~0.016)	0.016±0.062 ^b (0.009~0.024)	0.650±0.430 ^{ef} (0.190~1.400)	2.500±5.500 ^b (0.052~14.000)	
	淡水虾蟹 freshwater prawn and crab	凡纳滨对虾 <i>Litopenaeus vannamei</i>	8	0.026±0.014 ^a (ND~0.042)	0.016±0.015 ^e (0.002~0.040)	0.005±0.008 ^b (ND~0.020)	1.700±1.500 ^{abc} (0.190~4.000)	0.034±0.012 ^b (0.015~0.051)
中华绒螯蟹 <i>Eriocheir sinensis</i>		63	0.025±0.030 ^a (ND~0.141)	0.049±0.012 ^e (ND~0.570)	0.053±0.027 ^b (0.002~0.096)	1.300±0.680 ^{de} (0.004~3.800)	0.300±0.100 ^b (0.085~0.590)	
海水鱼 marine fish	银鲳 <i>Pampus argenteus</i>	6	0.013±0.027 ^a (0.002~0.080)	0.082±0.010 ^e (ND~0.025)	0.017±0.013 ^b (0.005~0.038)	2.000±1.200 ^{ab} (0.880~4.100)	0.260±0.550 ^b (0.015~1.400)	
	大黄鱼 <i>Larimichthys crocea</i>	6	0.007±0.003 ^a (0.004~0.014)	0.001±0.001 ^e (ND~0.003)	0.032±0.008 ^b (0.020~0.040)	0.980±0.360 ^{def} (0.530~1.400)	0.044±0.029 ^b (0.022~0.100)	
	大菱鲆 <i>Scophthalmus maximus</i>	6	0.018±0.014 ^a (0.004~0.036)	0.001±0.001 ^e (ND~0.003)	0.019±0.005 ^b (0.012~0.026)	2.300±0.780 ^a (1.400~3.300)	0.520±1.200 ^b (0.031~2.900)	
	花鲈 <i>Lateolabrax japonicus</i>	6	0.015±0.012 ^a (0.004~0.056)	0.001±0.001 ^e (ND~0.002)	0.039±0.013 ^b (0.024~0.058)	2.000±0.640 ^{ab} (1.100~2.800)	0.037±0.006 ^b (0.031~0.047)	
	石斑鱼 <i>Epinephelus</i> sp.	6	0.022±0.021 ^a (0.004~0.056)	0.002±0.001 ^e (ND~0.004)	0.037±0.023 ^b (0.020~0.087)	0.520±0.280 ^{fe} (0.210~0.890)	1.700±3.000 ^b (0.019~9.800)	
	带鱼 <i>Trichiurus lepturus</i>	6	0.030±0.022 ^a (0.014~0.071)	0.016±0.010 ^e (0.005~0.028)	0.024±0.003 ^b (0.015~0.037)	0.820±0.250 ^{ef} (0.500~1.100)	0.017±0.005 ^b (0.010~0.023)	
	大麻哈鱼 <i>Oncorhynchus keta</i>	6	0.034±0.022 ^a (0.010~0.066)	0.002±0.001 ^e (ND~0.003)	0.012±0.005 ^b (0.006~0.019)	0.330±0.140 ^{fe} (0.150~0.530)	0.035±0.029 ^b (0.010~0.077)	
	蓝鳍金枪鱼 <i>Thunnus maccoyii</i>	22	0.037±0.024 ^a (0.014~0.130)	0.051±0.046 ^e (0.005~0.162)	0.990±0.560 ^e (0.320~1.900)	1.300±0.490 ^{cd} (0.720~2.600)	0.052±0.023 ^b (0.026~0.097)	
	海水贝 marine shellfish	黑鲍 <i>Haliotis rubra</i>	6	0.021±0.011 ^a (0.007~0.035)	0.014±0.009 ^e (0.002~0.024)	0.024±0.003 ^b (0.015~0.037)	1.580±0.480 ^{cd} (0.900~2.300)	0.039±0.021 ^b (0.011~0.071)
		海湾扇贝 <i>Argopecten irradians</i>	6	0.046±0.011 ^a (0.033~0.065)	0.790±0.230 ^b (0.450~1.100)	0.007±0.003 ^b (0.002~0.010)	0.810±0.170 ^{ef} (0.550~1.000)	0.050±0.016 ^b (0.033~0.071)
长牡蛎 <i>Crassostrea gigas</i>		6	0.120±0.029 ^a (0.078~0.152)	1.400±0.190 ^a (1.000~1.600)	0.015±0.004 ^b (0.010~0.021)	2.300±0.440 ^a (1.700~2.900)	0.061±0.031 ^b (0.022~0.091)	
库页岛马珂蛤 <i>Pseudocardium sachalinense</i>		6	0.120±0.022 ^a (0.098~0.160)	0.017±0.009 ^e (0.005~0.031)	0.015±0.005 ^b (0.011~0.024)	0.580±0.150 ^{fe} (0.310~0.720)	0.054±0.015 ^b (0.031~0.071)	

注: 同一列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$), 表5同; 每行上格为测量平均值, 每行下格为测定范围值; "ND"表示未检出
 Notes: different lowercase letters in the same column indicate significant differences ($P<0.05$), the same as Tab. 5; up in the row mean average value, down in the row mean range value; "ND" means not detected

mg/kg。养殖环境和饵料污染是造成淡水产品中重金属超标的主要原因, 海水贝中镉含量较高是因为贝类是滤食性生物, 消化和代谢能力比鱼类差, 在摄入饵料的同时也会将水体中的污染物蓄积在体内, 近海养殖环境的污染也是贝类蓄积镉高于其他品种的重要原因。蓝鳍金枪鱼为远洋肉食性鱼类, 处于食物链的顶端, 易于从其他品种中积

蓄金属镉。

由于汞和砷的毒性主要取决于其存在的化学形态, 总汞和总砷含量已经不能用于评价水产品中汞与砷的健康风险, 在现行的国家标准中, 总汞与总砷无限量标准, 故设定了甲基汞和无机砷的限量值。在所检测的海产品和淡水产品中, 除蓝鳍金枪鱼中总汞均值含量高于甲基汞的限量值

外,其他海产品和淡水产品中总汞含量均值均小于甲基汞的限量值,且各品种间总汞均值含量无显著差异。对于蓝鳍金枪鱼,甲基汞含量为0.102~0.921 mg/kg,均值含量为(0.432±0.283) mg/kg,甲基汞与总汞的比值范围为14%~81%,蓝鳍金枪鱼中甲基汞的含量均低于限量值1.0 mg/kg。淡水鱼(乌鳢除外),总砷均值含量均小于无机砷限量值0.1 mg/kg,海水鱼、海水贝、淡水虾蟹以及乌鳢的总砷均值含量都高于无机砷限量值。水产品中砷主要以有机砷的形态存在,无机砷的含量占总砷的0.02%~11%^[18],无机砷为强致癌物质。按无机砷含量占总砷含量的11%计算,海水鱼中大黄鱼、大菱鲆、花鲈(*Lateolabrax japonicus*)以及蓝鳍金枪鱼中无机砷含量会高于限量值。

2.3 海产品与淡水产品中重金属含量分析

在6种淡水鱼中,铅、镉、总汞的均值含量均无显著差异,乌鳢中总砷均值含量最高,与其他5种淡水鱼有显著差异($P<0.05$),鳙中铬均值含量最高,与其他5种淡水鱼有显著差异($P<0.05$)。在8种海水鱼中,铅、镉、铬的均值含量均无显著差异,蓝鳍金枪鱼中总汞均值含量与其他7种海水鱼有显著差异($P<0.05$),大菱鲆中总砷均值含量最高,与银鲳(*Pampus argenteus*)、花鲈(*Lateolabrax japonicus*)的总砷均值含量无显著性差异,与其他5种海水鱼有显著性差异($P<0.05$)。在4种海水贝中,铅、总汞、铬的均值含量均无显著性差异,长牡蛎、海湾扇贝中镉的均值含量与黑鲍(*Haliotis rubra*)、库页岛马珂蛤(*Pseudocardium sachalinense*)有显著差异($P<0.05$)。在淡水虾蟹中,凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)与中华绒螯蟹铅、镉、总汞和铬的均值含

量均无显著差异,凡纳滨对虾总砷均值含量高于中华绒螯蟹,差异显著($P<0.05$) (表4)。

5大类水产品中除蓝鳍金枪鱼和个别样品铬含量超标外,汞、铬的均值含量均无显著差异。海水虾蟹中铅均值含量高于其他4大类水产品,有显著差异($P<0.05$),淡水鱼、海水鱼、海水贝、淡水虾蟹之间无显著差异。海水贝中镉均值含量最高,与淡水鱼和海水鱼镉均值含量有显著差异($P<0.05$),与淡水虾蟹、海水虾蟹无显著差异,淡水鱼与海水鱼镉均值含量无显著差异。淡水虾蟹中总砷均值含量最高,与海水鱼、海水贝总砷均值含量无显著差异,与淡水鱼、海水虾蟹有显著差异($P<0.05$) (表5)。

2.4 海产品与淡水产品中重金属污染程度评价

海水鱼与海水贝中铅的单因子污染指数均小于0.2,处于正常范围,鹰爪虾(*Trachypenaeus curvirostris*)处于轻污染,三疣梭子蟹(*Portunus trituberculatus*)处于重污染,淡水产品中鳙、鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)和团头鲂处于轻污染范围(图1),其他品种均为正常范围。海产品中镉的单因子污染指数较高,银鲳与长牡蛎处于中度污染,蓝鳍金枪鱼、海湾扇贝、鹰爪虾和三疣梭子蟹处于轻污染,其他海产品与淡水产品均处于正常范围。除了蓝鳍金枪鱼的汞单因子污染指数处于重污染之外,其他海产品与淡水产品均处于正常范围。总砷在海水鱼和海水贝中均属于重污染范围,海水虾蟹处于轻污染,淡水产品也都大于0.2,团头鲂处于轻污染,鳙、鲢、草鱼(*Ctenopharyngodon idella*)及鲫属于中度污染,乌鳢、凡纳滨对虾及中华绒螯蟹属于重污染。铬在海产品中污染率较低,大菱鲆、鹰爪虾、三疣梭子蟹

表5 不同类别水产品中的5种重金属含量(湿重)
Tab. 5 Contents of 5 heavy metals in different types of aquatic products (wet weight) mg/kg

水产品类别 aquatic product category	Pb	Cd	Hg	As	Cr
淡水鱼(不含超标样品) freshwater fish (except over-standard samples)	0.082±0.054 ^b	0.003±0.003 ^b	0.016±0.010 ^a	0.161±0.240 ^b	0.261±0.031 ^a
海水鱼(不含蓝鳍金枪鱼) marine fish (except <i>T. maccoyii</i>)	0.022±0.011 ^b	0.019±0.031 ^b	0.025±0.008 ^a	1.281±0.743 ^a	0.333±0.579 ^a
海水贝 marine shellfish	0.077±0.051 ^b	0.555±0.671 ^a	0.015±0.007 ^a	1.318±0.782 ^a	0.051±0.009 ^a
淡水虾蟹 freshwater prawn and crab	0.026±0.001 ^b	0.033±0.023 ^{ab}	0.028±0.032 ^a	1.500±0.283 ^a	0.167±0.188 ^a
海水虾蟹 ^[19] marine prawn and crab	0.417±0.200 ^a	0.146±0.006 ^{ab}	0.033±0.005 ^a	0.234±0.177 ^b	0.506±0.047 ^a

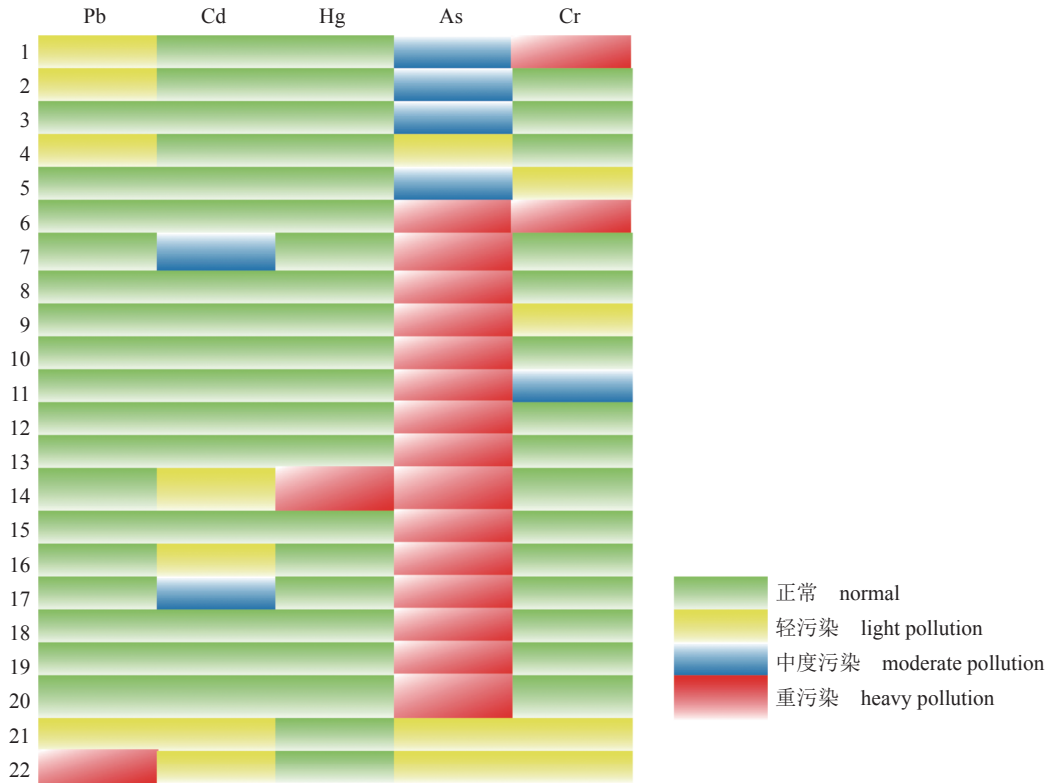


图1 海产品与淡水产品的单因子污染指数

1. 鳙, 2. 鲢, 3. 草鱼, 4. 团头鲂, 5. 鲫, 6. 乌鳢, 7. 银鲈, 8. 大黄鱼, 9. 大菱鲆, 10. 花鲈, 11. 石斑鱼, 12. 带鱼, 13. 大麻哈鱼, 14. 蓝鳍金枪鱼, 15. 黑鮪, 16. 海湾扇贝, 17. 长牡蛎, 18. 库页岛马珂蛤, 19. 凡纳滨对虾, 20. 中华绒螯蟹, 21. 鹰爪虾, 22. 三疣梭子蟹。图2同

Fig. 1 Single factor pollution index of seafood and freshwater products

1. *A. nobilis*, 2. *H. molitrix* 3. *C. idella*, 4. *M. amblycephala*, 5. *C. auratus*, 6. *C. argus*, 7. *P. argenteus*, 8. *L. crocea*, 9. *S. maximus*, 10. *L. japonicas*, 11. *Epinephelus* sp., 12. *T. lepturus*, 13. *O. keta*, 14. *T. maccoyii*, 15. *H. rubra*, 16. *A. irradians*, 17. *C. gigas*, 18. *P. sachalinense*, 19. *L. vannamei*, 20. *E. sinensis*, 21. *T. curvirostris*, 22. *P. trituberculatus*. The Same as Fig.2

属于轻污染, 石斑鱼属于中度污染, 其他海产品均在正常范围内, 淡水产品中鳙与乌鳢的铬单因子污染指数处于重污染, 鲫属于轻污染, 其他淡水产品在正常范围。

通过金属污染指数 (MPI) 对不同水产品中铅、镉、汞、砷及铬的污染情况进行分析, 按平均值的大小排序为海水虾蟹 (0.181)>海水贝 (0.101)>淡水虾蟹 (0.080)>海水鱼 (0.063)>淡水鱼 (0.054), 海水甲壳类明显高于海水贝、鱼类 (图 2)。可能是因为重金属易被水体中悬浮颗粒和底泥吸附, 甲壳类栖息在底质环境中, 以底栖生物、底层浮游生物为食, 易摄入重金属。海水贝中长牡蛎 (0.204) 的重金属污染指数最高, 仅次于甲壳类中三疣梭子蟹 (0.205), 牡蛎是滤食性动物, 主食单细胞浮游生物和有机碎屑。鱼类中蓝鳍金枪鱼 (0.166) 的金属污染指数最高, 蓝鳍金枪鱼常以甲壳类、鱿鱼等为食, 且蓝鳍金枪鱼生长年限较长, 重金属不断在其体内富集, 导致重金属含量高于其他鱼类。

2.5 健康风险评价

根据殷鹏等^[20]对我国成年人主要食物的摄入状况调查结果, 东部沿海人均水产品食用量为 15 g/d, 海产品与淡水产品中铅、镉和铬的 THQ 值均小于 1.0, 说明食用水产品由铅、镉和铬污染造成的健康风险很小 (表 6)。汞元素 THQ 值在蓝鳍金枪鱼中大于 1.0, 其他品种均小于 1.0, 蓝鳍金枪鱼中甲基汞的含量为 0.100~0.920 mg/kg, 其 THQ 值为 0.240~2.206, 平均值为 1.031, 说明长期食用蓝鳍金枪鱼存在一定的健康风险。海产品中有 6 个样品总砷 THQ 值大于 1.0, 淡水产品中凡纳滨对虾和中华绒螯蟹总砷 THQ 值大于 1.0, 将总砷含量换算为无机砷含量, 海产品中 6 个样品的无机砷 THQ 值范围为 0.114~0.202, 凡纳滨对虾与中华绒螯蟹的无机砷 THQ 值分别为 0.149 和 0.114, 食用健康风险很小。综合考虑甲基汞 (平均值)、无机砷 (总砷含量的 11%) 的含量, 22 种

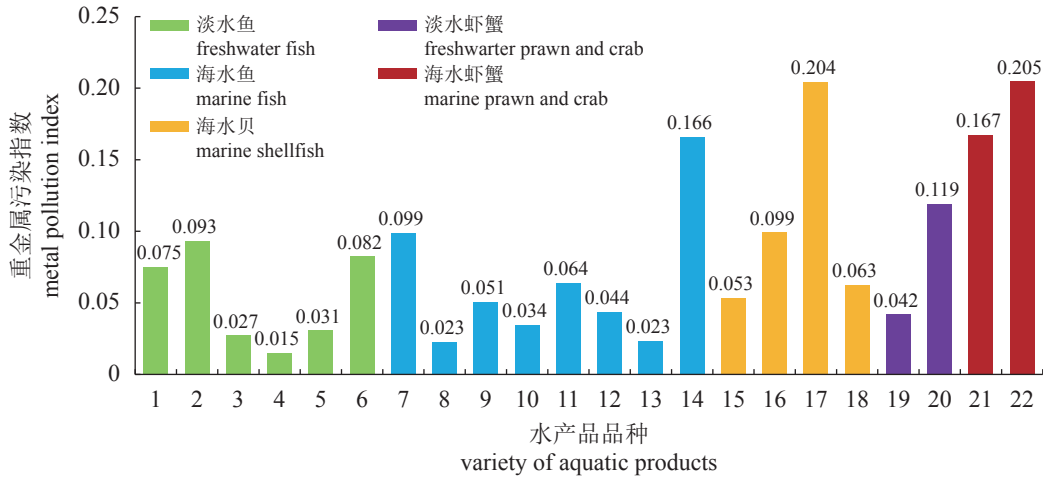


图 2 海产品与淡水产品的金属污染指数

Fig. 2 Metal pollution index of seafood and freshwater products

表 6 22 种水产品重金属目标危险系数

Tab. 6 Target hazard quotient of 22 kinds of aquatic products

类别 category	品种 variety	Pb	Cd	Hg	As	Cr	THQs
淡水鱼 freshwater fish	鳊 <i>A. nobilis</i>	0.008	0.001	0.058	0.050	0.511	0.628
	鲢 <i>H. molitrix</i>	0.008	0.000	0.077	0.056	0.021	0.161
	草鱼 <i>C. idella</i>	0.001	0.000	0.014	0.059	0.005	0.079
	团头鲂 <i>M. amblycephala</i>	0.008	0.0003	0.013	0.038	0.016	0.074
	鲫 <i>C. auratus</i>	0.004	0.0003	0.031	0.050	0.037	0.122
	乌鳢 <i>C. argus</i>	0.001	0.002	0.038	0.519	0.200	0.761
淡水虾蟹 freshwater prawn and crab	凡纳滨对虾 <i>L. vannamei</i>	0.002	0.004	0.013	1.358	0.003	1.379
	中华绒螯蟹 <i>E. sinensis</i>	0.002	0.012	0.120	1.039	0.024	1.196
海水鱼 marine fish	银鲳 <i>P. argenteus</i>	0.001	0.020	0.041	1.598	0.021	1.680
	大黄鱼 <i>L. crocea</i>	0.000	0.000	0.077	0.783	0.004	0.864
	大菱鲆 <i>S. maximus</i>	0.001	0.000	0.046	1.838	0.042	1.926
	花鲈 <i>L. japonicus</i>	0.001	0.000	0.094	1.598	0.003	1.696
	石斑鱼 <i>Epinephelus</i> sp.	0.001	0.000	0.089	0.416	0.136	0.642
	带鱼 <i>T. lepturus</i>	0.002	0.004	0.058	0.655	0.001	0.720
	大麻哈鱼 <i>O. keta</i>	0.002	0.000	0.029	0.264	0.003	0.298
	蓝鳍金枪鱼 <i>T. maccoyii</i>	0.002	0.012	2.373	1.039	0.004	3.431
	黑鲍 <i>H. rubra</i>	0.001	0.003	0.058	1.263	0.003	1.328
海水贝 marine shellfish	海湾扇贝 <i>A. irradians</i>	0.003	0.189	0.016	0.647	0.004	0.859
	长牡蛎 <i>C. gigas</i>	0.007	0.336	0.036	1.838	0.005	2.222
	库页岛马珂蛤 <i>P. sachalinense</i>	0.007	0.004	0.036	0.464	0.004	0.515
	鹰爪虾 <i>Trachypenaeus curvirostris</i>	0.017	0.034	0.695	0.197	0.038	0.354
海水虾蟹 ^[19] marine prawn and crab	三疣梭子蟹 <i>Portunus trituberculatus</i>	0.033	0.036	0.863	0.177	0.043	0.375
	平均值 average value	0.005	0.030	0.158	0.725	0.051	0.969

水产品 THQs 值最高的样品为蓝鳍金枪鱼 (1.164), 其余样品 THQs 值均小于 1.0, 说明长期食用蓝鳍金枪鱼会对人体造成一定的危害, 其他水产品中的重金属对人体健康造成的影响不明显。

3 讨论

除蓝鳍金枪鱼外, 水产品受重金属污染的风险较小, 5 种重金属在海产品和淡水产品中均有

检出,且不同品种元素含量差异较大。海水鱼中蓝鳍金枪鱼受汞和镉的污染较为突出,因为蓝鳍金枪鱼是运动能力较强的大型掠食性鱼类,处于海洋食物链的顶端,很容易蓄积汞和镉等重金属。汞多以无机汞和甲基汞的形式存在,其中甲基汞毒性最强,且易在鱼类体内蓄积,长期食用汞含量高的水产品易对人体尤其是胎儿或婴幼儿造成极大的损害。镉不仅对人体具有毒性效应,还会对人体产生致癌效应,其已被国际癌症研究署列为I类致癌物^[21]。海水贝中长牡蛎和海湾扇贝的镉含量显著高于其他品种。一是因为贝类的生活习性、生理代谢等与鱼类的差异使其更易于蓄积重金属,镉诱导贝类产生的金属硫蛋白能降低或解除镉的毒性,从而使贝类能够富集更多的镉^[22];二是因为生活水域的镉污染较为严重^[23],主要来源于工矿业废水、生活污水及交通运输业等。海水虾蟹和淡水虾蟹中5种重金属含量较低,但三疣梭子蟹的金属富集能力最强,与其生活习性密切相关。淡水鱼中铅和铬有8个样品超标,占淡水鱼总量的14.3%,没有品种特异性,可能是不同养殖环境受铅、铬污染造成。

海产品中总砷含量高于淡水产品,砷对人体的有害形态主要为无机砷,具有高致癌性,流行病学研究表明无机砷暴露可导致心脏病和糖尿病^[24]。水产品中砷主要以砷甜菜碱和砷糖的形式存在,通常认为是无毒的^[25],无机砷通常占总砷含量的11%以下,且海水中砷浓度低于淡水环境,但海洋食物网中砷含量比淡水系统高很多,这种异常可能是海洋食物网底层生物转化无机砷为有机砷化合物,在海洋生物组织中蓄积所造成。海洋环境砷污染也是造成海产品砷含量高的主要原因,有研究报道我国环渤海13个城市砷的排海通量达2000 t/a^[26]。乌鳢中总砷含量高于其他淡水鱼,可能与生物品种有关,乌鳢为肉食性鱼类,其他为食草性鱼类,因此乌鳢更易于从食物链蓄积更多的砷。

综上所述,实验分析了我国东部沿海地区20种水产品中的5种重金属含量,通过重金属污染评价法和健康风险评估法进行风险评估。结果显示,长期食用蓝鳍金枪鱼具有一定的风险,除鳙、乌鳢铬含量外,每种水产品重金属的含量均值都在国家限量标准内。除蓝鳍金枪鱼外,海产品和淡水产品的健康风险值均小于1.0,食用风险较小。水产品重金属污染的差异性,除主要受养殖

环境污染决定外,可能还受非生物因子如温度、盐度、pH、暴露时间和生物因子如种类、年龄、大小、性别、组织水分含量、繁殖状态等影响。如海水鱼类肌肉组织水分含量为69.01%~80.03%^[27];淡水鱼类肌肉组织水分含量为73.40%~79.95%^[28];海水贝类可食组织水分含量为78.0%~82.07%^[29];牡蛎可食组织水分含量较高,为82.03%~89.44%^[30];虾类肌肉组织水分含量为72.48%~79.21%^[31];蟹类肌肉组织水分含量为79.93%~82.80%^[32]。由于水分含量的不同也会造成水产品重金属含量的差异,牡蛎水分含量高于其他水产品,但其重金属污染指数仍高于鱼类,目前GB 2762—2017《食品安全国家标准食品中污染物限量》对不同水产品中重金属污染限量值以湿重计算。所以建议综合考虑各种影响因素,开展水产品中重金属污染的暴露评估研究,明确水产品中重金属的累积暴露风险。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献 (References):

- [1] Naylor R L, Hardy R W, Buschmann A H, *et al.* A 20-year retrospective review of global aquaculture[J]. *Nature*, 2021, 591(7851): 551-563.
- [2] Islam S, Ahmed K, Raknuzzaman M, *et al.* Heavy metal pollution in surface water and sediment: a preliminary assessment of an urban river in a developing country[J]. *Ecological Indicators*, 2015, 48: 282-291.
- [3] Bastami K D, Neyestani M R, Shemirani F, *et al.* Heavy metal pollution assessment in relation to sediment properties in the coastal sediments of the southern Caspian Sea[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, 92(1-2): 237-243.
- [4] Deshpande A, Bhendigeri S, Shirsekar T, *et al.* Analysis of heavy metals in marine fish from Mumbai Docks[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, 159(1-4): 493-500.
- [5] Reimer K J, Koch I, Cullen W R. Organoarsenicals: distribution and transformation in the environment[J]. *Organometallics in Environment and Toxicology*, 2010, 7: 165-229.
- [6] Tsuda T, Yorifuji T, Takao S, *et al.* Minamata disease: catastrophic poisoning due to a failed public health response[J]. *Journal of Public Health Policy*, 2009,

- 30(1): 54-67.
- [7] 戴文津, 杨小满, 陈华, 等. 水产品中主要化学污染物的研究[J]. *湖北农业科学*, 2011, 50(3): 560-563.
Dai W J, Yang X M, Chen H, *et al.* Main chemical pollutants in aquatic products: a review[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2011, 50(3): 560-563 (in Chinese).
- [8] Liu S Y, Li X Y. Colorimetric detection of copper ions using gold nanorods in aquatic environment[J]. *Materials Science and Engineering: B*, 2019, 240: 49-54.
- [9] Liu S Y, Tang L, Wang J L, *et al.* Label-free and sensitive detection of microalgae protein using GNRs-based resonance light scattering system[J]. *RSC Advances*, 2017, 7(23): 14039-14045.
- [10] 余杰. 典型镉污染区长住居民镉暴露与健康影响研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018: 4-5.
Yu J. Cadmium exposure and health effects of long-term residents living in typical cadmium-polluted area of China[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018: 4-5 (in Chinese).
- [11] Zhai Q X, Wang G, Zhao J X, *et al.* Protective effects of *Lactobacillus plantarum* CCFM8610 against chronic cadmium toxicity in mice indicate routes of protection besides intestinal sequestration[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2014, 80(13): 4063-4071.
- [12] 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.
National Health and Family Planning Commission of PRC, State Food and Drug Administration. GB 5009.268—2016 National food safety standard determination of multi-elements in food[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017 (in Chinese).
- [13] 福建省质量技术监督局. DB35/T 895—2009 环境样品中甲基汞、乙基汞及无机汞高效液相色谱-电感耦合等离子体制谱法 (HPLC-ICP-MS) 测定 [S]. 福建省地方标准 2009.
Fujian Provincial Bureau of Quality and Technical Supervision. DB35/T 895 —2009 Determination of methylmercury, ethyl mercury and inorganic mercury in environmental samples by HPLC-ICP-MS with High-performance liquid chromatography Inductively coupled plasma[S]. Local Standards in Fujian Province 2009 (in Chinese).
- [14] 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 2762—2017 《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, 2017.
National Health and Family Planning Commission of PRC, State Food and Drug Administration. GB 2762-2017, National standards for food safety, limits for contaminants in food[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017 (in Chinese).
- [15] 白艳艳, 潘秋仁, 贾玉珠. 2015年厦门市售水产动物及藻类食品中重金属污染状况评价[J]. *实用预防医学*, 2017, 24(11): 1314-1317.
Bai Y Y, Pan Q R, Jia Y Z. Assessment of heavy metal contamination in aquatic animals and algae food sold in the markets in Xiamen City, 2015[J]. *Practical Preventive Medicine*, 2017, 24(11): 1314-1317 (in Chinese).
- [16] Yap C K, Ismail A, Tan S G. Background concentrations of Cd, Cu, Pb and Zn in the green-lipped mussel *Perna viridis* (Linnaeus) from Peninsular Malaysia[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2003, 46(8): 1044-1048.
- [17] 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 Y J, Wu X Y, *et al.* Situation of heavy metal pollution and food risk assessment of 3 kinds of marine shellfish[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2016, 30(6): 1126-1134 (in Chinese).
- [18] 现代食品科技. 海产品中的砷及其代谢机制的研究进展[J]. *现代食品科技*, 2014, 30(11): 256-265.
Wang Y, Chen M M, Tan T T, *et al.* Research progress on arsenic species in seafood and their metabolic mechanisms[J]. *Modern Food Science & Technology*, 2014, 30(11): 256-265 (in Chinese).
- [19] 孙玲玲, 宋金明, 于颖, 等. 荣成湾14种海洋经济生物体中的重金属水平与食用风险初步评价[J]. *海洋与湖沼*, 2018, 49(1): 52-61.
Sun L L, Song J M, Yu Y, *et al.* Preliminary assessment on heavy metal levels and food risk in 14 economic organisms of the Rongcheng Bay[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2018, 49(1): 52-61 (in Chinese).
- [20] 殷鹏, 张梅, 李镒冲, 等. 2010年我国成年人主要食物摄入状况调查[J]. *中华预防医学杂志*, 2012, 46(8): 692-696.
Yin P, Zhang M, Li Y C, *et al.* Survey of dietary intake of Chinese adults in 2010[J]. *Chinese Journal of Preventive Medicine*, 2012, 46(8): 692-696 (in Chinese).

- [21] Wei X, Gao B, Wang P, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in street dusts from different functional areas in Beijing, China[J]. *Eco-toxicology and Environmental Safety*, 2015, 112: 186-192.
- [22] 李玉环. 贝类体内重金属镉的富集和消除规律及食用安全性的研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2005: 11-12.
Li Y H. The study of accumulation and elimination of the heavy metal cadmium in shellfish and the edible safety of shellfish[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2005: 11-12 (in Chinese).
- [23] 周笑白, 梅鹏蔚, 彭露露, 等. 渤海湾表层沉积物重金属含量及潜在生态风险评价[J]. *生态环境学报*, 2015, 24(3): 452-456.
Zhou X B, Mei P W, Peng L L, *et al.* Contents and potential ecological risk assessment of selected heavy metals in the surface sediments of Bohai Bay[J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2015, 24(3): 452-456 (in Chinese).
- [24] Wang W J, Xie Z T, Lin Y, *et al.* Association of inorganic arsenic exposure with type 2 diabetes mellitus: a meta-analysis[J]. *Journal of Epidemiology & Community Health*, 2014, 68(2): 176-184.
- [25] 刘香丽, 汪倩, 宋超, 等. 不同砷形态在水产品中的毒理及转化研究进展[J]. *农学学报*, 2019, 9(12): 33-38.
Liu X L, Wang Q, Song C, *et al.* Arsenic forms in aquatic products: progress research on toxicology and transformation[J]. *Journal of Agriculture*, 2019, 9(12): 33-38 (in Chinese).
- [26] 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: 74-75.
Cui Z G. Study on scheme of total emission control of main chemical pollutants in 13 cities around Bohai Sea[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2008: 74-75 (in Chinese).
- [27] 刘芳芳, 杨少玲, 林婉玲, 等. 七种海水鱼背部肌肉营养成分及矿物元素分布与健康评价[J]. *水产学报*, 2019, 43(11): 2413-2423.
Liu F F, Yang S L, Lin W L, *et al.* Nutritional components and mineral element distribution and health evaluation of back muscle of seven marine fishes[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2019, 43(11): 2413-2423 (in Chinese).
- [28] 王玉林, 林婉玲, 李来好, 等. 4目13种淡水鱼肌肉基本营养成分分析[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(11): 277-283.
Wang Y L, Lin W L, Li L H, *et al.* Basic nutrient composition analysis of freshwater fish muscles based on four orders and thirteen species[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019, 40(11): 277-283 (in Chinese).
- [29] 任红, 黄海, 杨宁, 等. 华贵栉孔扇贝软体部营养成分分析及评价[J]. *食品工业*, 2015, 36(6): 279-282.
Ren H, Huang H, Yang N, *et al.* Analysis and evaluation of nutritional components in edible part of *Chlamys nobilis*[J]. *The Food Industry*, 2015, 36(6): 279-282 (in Chinese).
- [30] 方玲, 马海霞, 李来好, 等. 华南地区近江牡蛎营养成分分析及评价[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(2): 301-307,313.
Fang L, Ma H X, Li L H, *et al.* Analysis and evaluation of nutrient composition in *Ostrea rivularis* from South China Sea Coast[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2018, 39(2): 301-307,313 (in Chinese).
- [31] 张高静, 韩丽萍, 孙剑锋, 等. 南美白对虾营养成分分析与评价[J]. *中国食品学报*, 2013, 13(8): 254-260.
Zhang G J, Han L P, Sun J F, *et al.* Analysis and evaluation of nutritive composition in *Penaeus vannamei*[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2013, 13(8): 254-260 (in Chinese).
- [32] 郭亚男, 胡园, 韩刚, 等. 2个海域野生三疣梭子蟹肌肉中营养成分比较[J]. *食品科学技术学报*, 2021, 39(2): 73-82.
Guo Y N, Hu Y, Han G, *et al.* Comparison of muscle nutritional composition of wild *Portunus trituberculatus* in two sea areas[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2021, 39(2): 73-82 (in Chinese).

Differences and risk assessment of heavy metals in seafood and freshwater products

QI Ziyuan^{1,2}, CAO Huan¹, HU Yumei¹, DU Ming³,
PAN Yingjie^{1,2,4}, ZHAO Yong^{1,2,4*}, LIU Haiquan^{1,2,4,5*}

(1. College of Food Sciences and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. Shanghai Engineering Research Center of Aquatic-product Processing & Preservation, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

3. Key Technologies of Marine Food Processing, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034;

4. Laboratory of Quality & Safety Risk Assessment for Aquatic Product on Storage and Preservation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

5. Engineering Research Center of Food Thermal-processing Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: In order to understand the pollution status and ingestion risk of heavy metals in seafood and fresh water products in eastern coastal areas, 12 kinds of seafood and 8 kinds of fresh water products on the market were analyzed in this study. Microwave digestion-inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) method was used to determine five kinds of common heavy metals, including lead, cadmium, mercury, arsenic and chromium. The pollution degree was evaluated according to single factor pollution index (P_i) and metal pollution index (MPI), the content difference of heavy metals in different aquatic products and pollution status were compared, and the health risk was evaluated by target hazard quotients (THQS). The test results show that the lead content in seafood and freshwater products was in the range of ND-1.100 mg/kg, the lead exceeding rate was 1.4%, and the average lead content of each species had no significant difference ($P>0.05$); the range of cadmium content was ND-1.600 mg/kg, the cadmium exceeding rate was 2.8%, and the average content of cadmium in *Crassostrea gigas* and *Argopecten irradians* was higher than other varieties ($P<0.05$); the mercury content range was ND-1.900 mg/kg, the average total mercury content of *Thunnus maccoyii* was higher than other species ($P<0.05$), and there was no significant difference in the average total mercury content of other species ($P>0.05$); the range of total arsenic content was 0.004-4.100 mg/kg, and the average total arsenic content of freshwater fish (except *Channa argus*) was lower than other species ($P<0.05$); the chromium content range was 0.010-32.000 mg/kg, the chromium exceeding rate was 2.3% and the average chromium content of *Aristichthys nobilis* was higher than other species ($P<0.05$). The single-factor pollution index showed that: different types of aquatic products have certain pollution; the heavy metal pollution index shows the trend of seawater shrimp and crab>seawater shell>freshwater shrimp and crab>sea fish>freshwater fish. The health risk assessment showed that except for *T. maccoyii*, the health risk values of marine products and freshwater products were less than 1.0, and the risk when eating was relatively small. The results of this study show that seafood and freshwater products in the eastern coastal areas have a certain degree of heavy metal pollution, but the pollution is lighter and the intake risk is relatively small.

Key words: marine products; freshwater products; heavy metals; ICP-MS; health risk assessment

Corresponding authors: ZHAO Yong. E-mail: yzhao@shou.edu.cn;

LIU Haiquan. E-mail: hqliu@shou.edu.cn

Funding projects: State Key Research and Development Program (2018 YFC1602205); Shanghai Science and Technology Commission Shanghai Science and Technology Innovation Action Plan Agricultural Sector Project (19391901600) ; Shanghai Project of Developing Agriculture by Science and Technology (4-4,2017); Scientific Research and Innovation Program of Shanghai Education Commission (2017-01-07-00-10-E00056)