

广西北部湾鲜活水产品中镉污染的膳食暴露风险评估

田甜^{1*}, 巫剑², 文金华¹, 曾祥林¹

(1. 广西民生中检联检测有限公司, 广西南宁 530007) (2. 广西壮族自治区市场监督管理局, 广西南宁 530028)

摘要: 该研究对北部湾水产品中镉的膳食暴露风险进行了评估。通过对近3年广西北部湾水产品中镉污染进行监测, 分析不同种类水产品中镉含量的差异, 通过简单点评估和概率评估分别对镉的暴露风险进行定量分析。结果表明, 镉总检出率为54.65%, 总超标率为0.66%, 卡方检验表明各类水产品的镉超标率无显著差异, 其中甲壳类和贝类的超标率有高于其他种类的趋势。暴露风险评估结果表明, 摄入镉对低端暴露人群健康影响极小, 但对中高端暴露人群健康有一定风险; 膳食贝类或软体动物类(主要为鱿鱼)的风险商都比其他水产品高出一至三个数量级。由北部湾水产品摄入镉引起健康风险的概率为21.10%。软体动物($r=0.71$)和贝类($r=0.51$)中的镉含量是影响镉风险商的关键敏感因子。广西居民应注意控制软体动物和贝类的消费量, 监管部门应加大对这2类水产品中镉污染量的检测力度, 同时要严格监督工业农业各大项目对水域环境的污染。

关键词: 广西北部湾地区; 鲜活水产品; 镉; 膳食暴露; 风险评估

文章编号: 1673-9078(2021)11-372-378

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2021.11.0199

Assessment of Dietary Exposure to Cadmium from Fresh Aquatic Products from the Gulf of Tonkin, Guangxi

TIAN Tian^{1*}, WU Jian², WEN Jinhua¹, ZENG Xianglin¹

(1. Guangxi Minsheng Sino Assessment Group Co. Ltd., Nanning 530007, China)

(2. Guangxi Zhuang Autonomous Region Market Supervision and Administration Bureau, Nanning 530028, China)

Abstract: The dietary exposure risk to cadmium was evaluated in aquatic products from the Gulf of Tonkin, Guangxi, China. Cadmium pollution in aquatic products in the region in the last 3 years was monitored, and the differences in the cadmium content in different aquatic products were analyzed. The exposure risk to cadmium was quantitatively analyzed separately by point and probability assessments. Cadmium was detected in 54.65% of the samples tested. The cadmium content exceeded the national standard in 0.66% of the samples. Chi-square testing revealed no significant differences in the failure rates of different aquatic products. The failure rates of crustaceans and shellfish tended to be higher than those of other products. The exposure risk assessment results suggested that cadmium intake would have minimal effects on the health for low-exposure but would pose health risks for greater exposure (middle- and high-exposure populations). The dietary hazard quotient (HQ) values for shellfish and mollusks (mainly squid) were one to three orders of magnitude higher than those for other aquatic products. The probability of health risks caused by cadmium intake from aquatic products from the Gulf of Tonkin was 21.10%. Key sensitive factors affecting the cadmium HQ were cadmium content in mollusks ($r=0.71$) and shellfish ($r=0.51$). The findings indicate that the residents of Guangxi should control their consumption of mollusks and shellfish. Authorities should strengthen efforts to monitor the cadmium levels in these aquatic products. Concurrently, water pollution by industrial and agricultural activities should be strictly controlled.

Key words: Gulf of Tonkin, Guangxi; fresh aquatic products; cadmium; dietary exposure; risk assessment

引文格式:

田甜, 巫剑, 文金华, 等. 广西北部湾鲜活水产品中镉污染的膳食暴露风险评估[J]. 现代食品科技, 2021, 37(11): 372-378, +174

TIAN Tian, WU Jian, WEN Jinhua, et al. Assessment of dietary exposure to cadmium from fresh aquatic products from the gulf of tonkin, Guangxi [J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(11): 372-378, +174

在中国-东盟自由贸易区建设的推动下, 广西北部

收稿日期: 2021-02-26

基金项目: 广西市场监管科技项目(GXSJKJ2020-12)

作者简介: 田甜(1989-), 女, 农艺师, 研究方向: 农产品质量安全,

E-mail: tt0357@foxmail.com

湾地区的水产品出口经济快速增长, 同时, 各国对水产品的质量安全把关越来越严。另外, 水环境的污染问题也越来越突出^[1], 这些均对广西北部湾水产品质量安全的监管提出了新的要求。重金属镉因其半衰期长, 可在生物体内长期残存累积, 再由于生物富集效

应, 达到一定浓度水平会对免疫系统和各个器官产生一系列损伤^[2,4], 并已被国际癌症研究机构 (IARC) 确认为 I 类致癌物^[5,6]。结合近年来各地水产品的监督抽检和本研究中的风险监测结果, 发现重金属污染中镉的检出率 and 不合格率均较高 (可能由于饲料中带入或是养殖过程中对环境中镉的富集造成), 且吴永宁等^[7]表明水产品是广西居民摄入镉膳食贡献的主要来源之一。

对广西水产品中重金属污染和兽药残留监测的相关报道已有很多, 例如劳其平^[8]对 2012 年钦州市贝类海产品中的无机砷含量进行了分析, 林文斯等^[9]对 2016 年广西水产品中风险较高的 2 类禁用兽药残留量和检出率进行了分析, 但多数缺乏对各类水产品系统的研究以及对监测结果深层次的探讨^[10]。已有研究开展了水产品镉污染膳食暴露风险评估, 例如有学者^[11,12]均通过点评估分别对整个广东省和深圳市水产品中镉的膳食风险进行了探讨, 张文等^[13]采用点评估和概率评估对江苏地区克氏原螯虾中镉的膳食暴露进行了定量研究, 但由广西北部湾水产品摄入镉的健康风险评估尚未见报道。

本研究监测了近 3 年广西北部湾水产品中的镉污染, 分析不同种类水产品中镉含量的差异, 通过 2 种定量评估的方法分别对镉的暴露风险进行分析。探索进一步对重金属镉进行监测的关键点, 提出控制风险的措施, 为监管部门提供一定的参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

1.1.1 试验材料

本研究与已有的研究^[14]属于同一课题中对不同污染物的暴露风险评估, 所以样品来源一致, 均来源于 2018~2020 年的风险监测样品。样品涵盖南宁、北海、钦州、防城港、玉林、崇左等广西北部湾地区 6 个地市, 覆盖环节包括 3 个环节, 分别为养殖环节、流通环节、餐饮环节; 监测种类包括 5 类水产品, 分别为淡水鱼、海水鱼、贝类、甲壳类、软体动物 (以鱿鱼为主), 其中淡水鱼 195 批次, 贝类 91 批次, 海水鱼 68 批次, 甲壳类 63 批次, 软体动物 (以鱿鱼为主) 35 批次, 共 452 批次。样品的采集、制样和保存依据标准《GB/T 30891-2014 水产品抽样规范》^[15]。

1.1.2 试剂耗材

镉 (1000 $\mu\text{g/mL}$), 国家有色金属及电子材料分析测试中心; 硝酸 (优级纯), 成都市科龙化工试剂厂; 盐酸 (优级纯), 西陇科学股份有限公司; 过氧化氢 (优

级纯, 30%), 西陇科学股份有限公司; 磷酸二氢铵 (分析纯), 天津光复精细化工研究所; 超纯水 (UPW-30S 超纯水机), 南京易普易达科技发展有限公司。

1.2 仪器与设备

BSA224S 分析天平, 赛多利斯科学仪器有限公司; TOPEX 微波消解仪, 上海屹尧仪器科技发展有限公司; BHW-09Y 石墨消解仪, 上海博通化学科技有限公司; AA900T 原子吸收光谱仪, 美国 PerkinElmer 公司。

1.3 镉含量的测定

依据标准《GB 5009.15-2014 食品安全国家标准食品中镉的测定》^[16]对样品中镉污染量进行测定。

依据标准《GB 5009.15-2014 食品安全国家标准食品中镉的测定》^[16]的方法检出限 (0.001 mg/kg) 判定镉有无检出; 依据《GB 2762-2017 食品安全国家标准食品中污染物限量》^[17]对各类水产品镉限量的规定 (鱼类: 0.1 mg/kg ; 甲壳类: 0.5 mg/kg ; 贝类、软体动物: 2 mg/kg) 判定样品中镉污染量是否超标。

在镉测定过程中, 采取的质量控制方式以及具体做法与本课题已有的研究^[14]一致, 即通过设置样品空白、平行样、添加回收率、标准曲线中间浓度点复测以及超标样品复核的方式, 其中添加回收率检查的添加水平为 0.01 mg/kg 。

1.4 风险评估方法

对于非遗传毒性致癌污染物, 通常采用风险商 (Hazard Quotient, HQ) 定量评估摄入污染物引起的健康风险^[18]。本研究以镉的暂定每月耐受摄入量 (provisional tolerable monthly intake, PTMI) 为标准进行评估, 通过镉的日暴露量 CDI 与 PTMI 计算 HQ^[19,20]。当 $\text{HQ} < 1$ 时, 表示没有健康风险, 当 $\text{HQ} > 1$ 时, 表明有健康风险, 且风险随数值的增大而增大。通过 CDI 和 HQ 对广西北部湾水产品中镉污染进行风险描述, 其模型见下列公式:

$$\text{CDI} = \frac{(C_i \times IR_i) \times \text{ABS} \times \text{ED} \times \text{EF}}{\text{BW} \times \text{AT}} \quad (1)$$

$$\sum \text{CDI} = \frac{(\sum_{i=1}^n C_i \times IR_i) \times \text{ABS} \times \text{ED} \times \text{EF}}{\text{BW} \times \text{AT}} \quad (2)$$

$$\text{HQ} = \frac{\sum \text{CDI} \times 30}{\text{PTMI}} \quad (3)$$

式中:

$\sum \text{CDI}$ ——由所有水产品摄入镉的日暴露量, $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{bw} \cdot \text{d})$;

C_i ——镉含量, mg/kg , 与本课题已有研究^[14]的分析方法

一致,对镉含量进行分布拟合,通过3种统计检验,求得最优分布函数,见表1;

IR_i —日消费量, kg/d, 参照本课题已有研究^[14]中所分析得出的广西居民日消费量数据和相应的分布函数, 见表1;

ABS —肠胃吸收系数, 假设镉全部被吸收, 则值为1;

ED —暴露持续时间, 70年;

EF —暴露频率, 350 d/年^[21];

BW —体重, kg, 以平均体重60 kg计^[22];

AT —拉平时间, d, $70 \times 365 \text{ d} = 25550 \text{ d}$;

HQ —风险商;

$PTMI$ —镉的暂定每月耐受摄入量, $0.025 \text{ mg}/(\text{kg} \cdot \text{bw})^{[23]}$ 。

1.5 数据处理

对于样本中未检出的样品, 参照普遍采用的赋值方法^[24,25]: 当小于60%的样品未检出时, 以1/2检出限对未检出的结果进行赋值, 当大于60%的样品未检出时, 以0和检出限进行赋值。本研究中分别针对每一类水产品, 按上述方法对测定结果中未检出的样品进行赋值。通过SPSS 22.0进行显著性检验; 采用@risk 7.6软件进行蒙特卡罗模拟和概率分布分析。

2 结果与讨论

2.1 质量控制结果

各种质控方式的结果表明, 样品空白的镉含量均低于方法检出限; 对于测得含量高于检出限的样品,

其测定结果的精密度符合所依据标准^[16]的要求; 添加回收率的平均值在93.00%~105.80%, 相对标准偏差在2.70%~9.60%, 符合食品理化检测质量控制标准^[26]的要求; 各次标准溶液复测的质量浓度与理论质量浓度的相对偏差均低于10%, 仪器精密度良好; 各超标样品初检和复核结果的相对标准偏差均低于10%, 判定结果均为超标。

2.2 镉污染与水产品种类的联系分析

各类水产品中镉的监测结果如表2所示。监测的452批水产品中共有247批检出镉, 总检出率为54.65%, 镉在5类水产品中均有检出, 检出率为软体动物(以鱿鱼为主) > 贝类 > 甲壳类 > 海水鱼 > 淡水鱼, 其中软体动物、贝类、甲壳类的检出率均在80%以上, 海水鱼的检出率接近50%, 而淡水鱼的检出率相对较低(23.08%); 同时由表2可知, 镉总超标率为0.66%, 只有贝类和甲壳类中有镉超标(与覃志英等^[27]表明的结果一致), 而且甲壳类的超标率是贝类的2.9倍, 但软体动物中的镉并未超标, 而检出率最高(97.14%), 可见检出率高的水产品种类未必超标率高, 甲壳类超标率高主要是由于甲壳类富集重金属能力较强, 这与动物的遗传特性、生理解剖特征以及生活习性等因素有关^[28], 卡方检验得出 $\chi^2 = 8.28, p(8.28, 4) = 0.082 > 0.05$, 即不同种类水产品镉超标率无显著差异, 所以甲壳类和贝类的超标率有高于其他3类的趋势, 但不显著。本研究的5类水产品均为广西居民膳食摄入镉的暴露来源。

表1 镉含量C和水产品消费量IR的分布函数

Table 1 The distribution function of cadmium content C and consumption IR

类别	C 概率分布函数	IR 概率分布函数
淡水鱼	RiskExpon [0.0013479, RiskShift (0.00000390683)]	RiskNormal [15.30421, 1.530421, RiskStatic (15.30421)]
贝类	RiskPearson5 [2.9522, 0.45348, RiskShift (0.062974)]	RiskNormal [12.34211, 1.234211, RiskStatic (12.34211)]
海水鱼	RiskExpon [0.0070132, RiskShift (0.00039686)]	RiskNormal [5.06026, 0.506026, RiskStatic (5.06026)]
甲壳类	RiskGamma [0.37434, 0.30479, RiskShift (0.0005)]	RiskNormal [5.43053, 0.543053, RiskStatic (5.430523)]
软体动物	RiskInvgauss [0.38683, 0.25116, RiskShift (0.027335)]	RiskNormal [8.76289, 0.876289, RiskStatic (8.76289)]
所有水产品	RiskPareto (0.43795, 0.0005)	RiskNormal [46.9, 4.69, RiskStatic (46.9)]

表2 各类水产品中镉的检出率和超标率统计

Table 2 Statistics of cadmium detection rate and exceeding rate in various aquatic products

监测种类	总批数	检出批数	超标批数	检出率/%	超标率/%
淡水鱼	195	45	0	23.08	0.00
贝类	91	84	1	92.31	1.10
海水鱼	68	33	0	48.53	0.00
甲壳类	63	51	2	80.95	3.17
软体动物	35	34	0	97.14	0.00
所有水产品	452	247	3	54.65	0.66

表 3 各类水产品中镉含量的分布

Table 3 Distribution of cadmium content in aquatic products

类别	镉含量范围/(mg/kg)	概率分布函数	P5/(mg/kg)	P50/(mg/kg)	P95/(mg/kg)
淡水鱼	ND~0.089	RiskExpon [0.0013479, RiskShift (0.00000390683)]	0.000073	0.00094	0.0040
贝类	ND~4.80	RiskPearson5 [2.9522, 0.45348, RiskShift (0.062974)]	0.14	0.24	0.63
海水鱼	ND~0.070	RiskExpon [0.0070132, RiskShift (0.00039686)]	0.00076	0.0053	0.021
甲壳类	ND~1.90	RiskGamma [0.37434, 0.30479, RiskShift (0.0005)]	0.00057	0.039	0.49
软体动物	ND~1.30	RiskInvgauss [0.38683, 0.25116, RiskShift (0.027335)]	0.079	0.25	1.31
所有水产品	ND~4.80	RiskPareto (0.43795, 0.0005)	0.00056	0.0024	0.47

表 4 镉日暴露量和风险商的点评估

Table 4 Point assessment of cadmium daily exposure and HQ

类别	P5		P50		P95	
	日暴露量/[mg/(kg bw·d)]	风险商	日暴露量/[mg/(kg bw·d)]	风险商	日暴露量/[mg/(kg bw·d)]	风险商
淡水鱼	1.49×10^{-8}	1.79×10^{-5}	2.29×10^{-7}	2.75×10^{-4}	1.15×10^{-6}	1.38×10^{-3}
贝类	2.24×10^{-5}	2.69×10^{-2}	4.65×10^{-5}	5.58×10^{-2}	1.46×10^{-4}	1.75×10^{-1}
海水鱼	5.11×10^{-8}	6.14×10^{-5}	4.25×10^{-7}	5.10×10^{-4}	2.02×10^{-6}	2.42×10^{-3}
甲壳类	4.16×10^{-8}	5.00×10^{-5}	3.36×10^{-6}	4.03×10^{-3}	4.90×10^{-5}	5.89×10^{-2}
软体动物	9.20×10^{-6}	1.10×10^{-2}	3.51×10^{-5}	4.21×10^{-2}	2.13×10^{-4}	2.56×10^{-1}
所有水产品	3.17×10^{-5}	3.80×10^{-2}	8.56×10^{-5}	1.03×10^{-1}	4.11×10^{-4}	4.93×10^{-1}

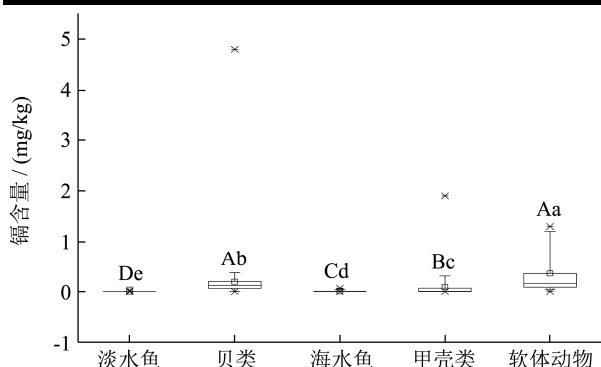


图 1 不同种类水产品中镉含量的差异

Fig.1 Differences of cadmium content in different aquatic products

注：各箱线图上的字母表示不同水产品种类间多重比较结果，大写字母表示差异极显著 ($p < 0.01$)，小写字母表示差异显著 ($p < 0.05$)。

各类水产品中镉含量的分布见表 3。结果表明，贝类中的镉含量最高达到 4.80 mg/kg，而其他均未超过 2 mg/kg；通过分布拟合，得出最优概率分布函数，进一步分析镉含量，得出在 P5 百分位数处为贝类>软体动物（主要为鱿鱼）>海水鱼>甲壳类>淡水鱼，在 P50 和 P95 百分位数处表现为软体动物（主要为鱿鱼）>贝类>甲壳类>海水鱼>淡水鱼；通过 Kruskal Wallis 检验，得出 $\chi^2=316.86$ ， $p(316.86, 4)=2.49 \times 10^{-67} < 0.01$ ，进一步采用 Mann-Whitney U 进行两两检验，结果如图 1 所示，发现软体动物（主要为鱿鱼）和贝类中镉含量要极显著高于其他种类，鱼类

极显著低于其他类，而鱼类中海水鱼镉含量极显著高于淡水鱼，这与诸多学者^[11,12,29]所表明的其他地区各种类水产品镉含量的表现规律接近。

2.3 北部湾水产品中镉的膳食暴露风险评估

2.3.1 简单点评估

通过点评估，各百分位数的镉日暴露量和风险商见表 4。由表 4 可知，镉日暴露量在各百分位数均较低，摄入镉的风险商在 P5 百分位数处远小于 1，在 P50 和 P95 百分位数处分别达到 0.10 和 0.49，即由水产品摄入的镉对 ADI 的贡献分别达到 10.00% 和 49.00%，考虑到居民每天可能摄入镉的来源还有很多（蔬菜、水果、谷物等），所以低端暴露人群因膳食北部湾水产品摄入的镉对健康影响极小，但中高端暴露人群应注意控制对北部湾水产品的消费量。

表 4 表明，对于镉日暴露量，各类水产品的贡献为：软体动物（主要为鱿鱼）、贝类>甲壳类、海水鱼>淡水鱼，在各百分位数处，贝类和软体动物的贡献率之和均达到 85.00% 以上，且膳食这 2 类水产品的风险商都比其他几类高出一至三个数量级，因此贝类和软体动物（主要为鱿鱼）是水产品镉暴露的主要来源，其他几类中，海水鱼和甲壳类的贡献率之和平均为 5.70%，而 2.2 节的分析表明甲壳类中镉的超标率最大，可见超标率高的种类未必对总暴露量的贡献大，淡水鱼的贡献平均仅 0.20%，所以中高端暴露量人群应注意控制贝类和软体动物（主要为鱿鱼）的消费量。

表 5 镉日暴露量和风险商的概率评估

Table 5 Probability assessment of cadmium daily exposure and HQ

类别	P5		P50		P95	
	日暴露量/[mg/(kg bw·d)]	风险商	日暴露量/[mg/(kg bw·d)]	风险商	日暴露量/[mg/(kg bw·d)]	风险商
淡水鱼	1.81×10^{-8}	2.17×10^{-5}	2.27×10^{-7}	2.73×10^{-4}	9.82×10^{-7}	1.18×10^{-3}
贝类	2.61×10^{-5}	3.14×10^{-2}	4.64×10^{-5}	5.57×10^{-2}	1.25×10^{-4}	1.50×10^{-1}
海水鱼	6.08×10^{-8}	7.30×10^{-5}	4.25×10^{-7}	5.10×10^{-4}	1.72×10^{-6}	2.06×10^{-3}
甲壳类	5.05×10^{-8}	6.06×10^{-5}	3.33×10^{-6}	4.00×10^{-3}	4.24×10^{-5}	5.09×10^{-2}
软体动物	1.08×10^{-5}	1.29×10^{-2}	3.51×10^{-5}	4.22×10^{-2}	1.84×10^{-4}	2.21×10^{-1}
所有水产品	5.18×10^{-5}	6.22×10^{-2}	1.03×10^{-4}	1.24×10^{-1}	2.77×10^{-4}	3.33×10^{-1}

2.3.2 概率评估

根据镉日暴露量和风险商的评估模型，应用蒙特卡罗模拟（迭代次数为 5000 次）进行概率评估，各百分位数的镉日暴露量和风险商见表 5。由表可知，摄入镉的风险商在 P5 百分位数处远小于 1，在 P50 和 P95 百分位数处分别达到 0.12 和 0.33，即由水产品摄入的镉对 ADI 的贡献分别达到 12.00%和 33.00%。与简单点评估结果一致，低端暴露人群摄入的镉对健康影响极小，但中高端暴露人群应控制对北部湾水产品的消费量。

表 5 表明，对于镉日暴露量，各类水产品的贡献为：软体动物（主要为鱿鱼）、贝类>甲壳类、海水鱼>淡水鱼，而且在各百分位数处，膳食贝类或软体动物类的风险商都比其他几类高出一至三个数量级。和点评估结果相同，贝类和软体动物（主要为鱿鱼）是水产品镉暴露的主要来源，中高端暴露量人群应尤其注意控制这 2 类的消费量，这与诸多学者^[11,12,29]所表明的其他地区水产品镉暴露量主要来源的种类一致。

2.3.3 概率评估的风险大小

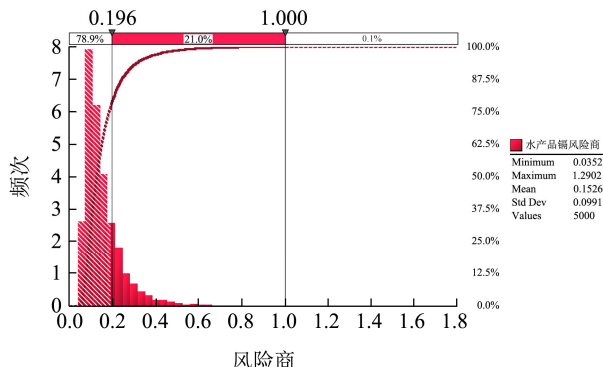


图 2 镉风险商概率分布图

Fig.2 HQ probability distribution plot of cadmium

本研究通过蒙特卡罗模拟得到摄入镉风险商的概率分布（迭代次数为 5000 次），如图 2 所示。吴永宁等^[10]表明水产类对广西居民膳食摄入镉的贡献为 19.57%，所以居民由水产品摄入的镉对 ADI 的贡献一旦超过 19.57%，则总膳食摄入的镉就很可能超过 ADI

值。由图 2 可知，21.10%的人群膳食北部湾水产品摄入的镉对 ADI 的贡献超过了 19.60%，所以由北部湾水产品摄入镉引起健康风险的概率为 21.10%，中高端暴露人群应注意控制对北部湾水产品的消费量。另外，由图 2 可知，由水产品摄入镉的平均风险商为 0.1526，则广西每标准人摄入镉平均为 0.0076 mg/d，是前人^[7]所得结果的 1.8 倍。其原因可能与监测区域的差异、居民膳食结构的变化以及样本的差异等因素有关^[14]。

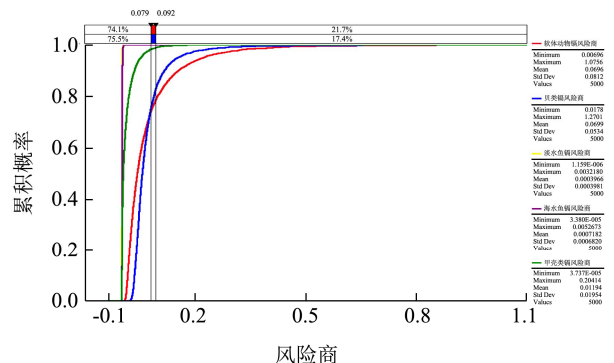


图 3 镉风险商累积概率曲线叠加图

Fig.3 Cumulative probability curves plot of cadmium HQ

由图 3 可知，很明显贝类和软体动物（主要为鱿鱼）影响健康的风险均高于其他几类水产品，在 P70 百分位数之前，贝类风险商高过软体动物类，在 P70 百分位数之后，软体动物类高过贝类。由表 5 可知，膳食软体动物类对总的水产品镉暴露量的贡献平均为 40.35%，膳食贝类对总的水产品镉暴露量的贡献平均为 46.81%，而吴永宁等^[7]表明水产类对广西居民镉的膳食贡献为 19.57%，则软体动物类对广西居民镉的膳食贡献为 7.90%，贝类对广西居民镉的膳食贡献为 9.16%，即膳食北部湾软体动物类水产品摄入的镉对 ADI 的贡献一旦超过 7.90%或者膳食贝类水产品摄入的镉对 ADI 的贡献超过 9.16%，居民总膳食摄入的镉就很可能超过 ADI 值。由图 3 可知，25.90%的人群膳食软体动物摄入的镉对 ADI 的贡献超过了 7.90%，所以由北部湾软体动物类水产品摄入镉引起健康风险的概率为 25.90%，17.40%的人群膳食贝类摄入的镉对

ADI 的贡献超过了 9.16%，则由贝类水产品摄入镉引起健康风险的概率为 17.40%，中高端暴露人群应注意控制对北部湾软体动物类和贝类水产品的消费量。图 3 同时表明，膳食北部湾水产品对镉 ADI 的贡献主要来源于软体动物、贝类以及甲壳类。

2.3.4 敏感性分析

应用蒙特卡罗模拟风险商与各因素的相关系数（迭代次数为 5000 次），结果见图 4。由图 4 可知，软体动物、贝类和甲壳类对风险商的影响要远远高于鱼类，而这 3 类水产品镉含量的影响要大于消费量，其中尤其是软体动物中镉含量，相关系数达到 0.71，其次是贝类中镉含量，相关系数为 0.51，均属于关键敏感因子。因此政府部门应加大对广西北部湾地区软体动物（主要为鱿鱼）中和贝类中重金属镉的检测力度；同时要严格监管工业农业各大项目对水域环境的污染。

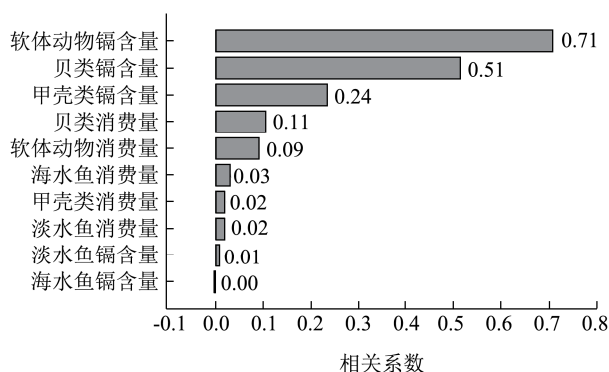


图 4 镉风险商模型中各因素的敏感性分析

Fig.4 Sensitivity analysis of HQ

2.3.5 不确定性分析

暴露风险评估结果均受多个不确定性因素影响^[30]。首先本研究监测的各类水产品中镉含量受样本量影响，而且并非居民食用时的真实镉含量（受清洗、烹饪等因素的影响）；其次水产品消费量以及居民体重均与很多因素（性别、年龄以及区域等）有关；另外，模型中所引用的参数（暴露持续时间和暴露频率等）也均只是参考，并未调查实际数据。所以在今后的研究中应充分考虑这些因素，使得暴露风险评估结果更准确。

3 结论

3.1 通过监测广西北部湾地区水产品中的镉污染量，得出镉总检出率为 54.65%，总超标率为 0.66%。分析表明甲壳类和贝类的超标率有高于其他种类的趋势，但不显著；5 类水产品均为膳食摄入镉的暴露来源；软体动物（主要为鱿鱼）和贝类中镉含量要极显著高于其他种类，鱼类极显著低于其他类，而鱼类中海水

鱼镉含量极显著高于淡水鱼。

3.2 暴露风险评估结果表明，摄入镉对低端暴露人群健康影响极小，但对中高端暴露人群健康有一定风险；软体动物（主要为鱿鱼）和贝类对镉日暴露量的贡献远大于其他几类，是通过水产品摄入镉暴露量的主要来源，中高端暴露量人群应注意控制这 2 类水产品消费量。本研究通过概率评估得出膳食北部湾水产品摄入镉引起健康风险的概率为 21.10%，而且软体动物（主要为鱿鱼）和贝类中的镉含量对镉风险商的影响较大，因此监管部门应加强对这 2 类水产品中镉污染量的检测，同时要严格监督工业农业各大项目对水域环境的污染。

参考文献

- [1] 刘守廷,蒋天成,罗平等.北部湾海产品中重金属元素的测定及评价[J].现代食品科技,2013,29(4):853-857
LIU Shouting, JIANG Tiancheng, LUO Ping, et al. Determination and Evaluation of Heavy Metal Elements in Seafood of Chinese Northern Bay [J]. Modern Food Science and Technology, 2013, 29(4): 853-857
- [2] Qu C S, Sun K, Wang S R, et al. Monte carlo simulation-based health risk assessment of heavy metal soil pollution: a case study in the Qixia mining area, China [J]. Human and Ecological Risk Assessment, 2012, 18(4): 733-750
- [3] Prozialeck W C, Edwards J R, Nebert D W, et al. The vascular system as a target of metal toxicity [J]. Toxicological Sciences, 2008, 102(2): 207-218
- [4] Hartwig A, Schwerdtle T. Interactions by carcinogenic metal compounds with DNA repair processes: toxicological implications [J]. Toxicology Letters, 2002, 127(1): 47-54
- [5] 李学鹏,段青源,励建荣.我国贝类产品中重金属镉的危害及污染分析[J].食品科学,2010,31(17):457-461
LI Xuepeng, DUAN Qingyuan, LI Jianrong. Hazard and pollution analysis of cadmium in Chinese domestic shellfish [J]. Food Science, 2010, 31(17): 457-461
- [6] 王桂安,梁春穗,黄琼,等.广东省居民主要膳食镉暴露风险的初步评估[J].中国食品卫生杂志,2012,24(4):353-357
WANG Guian, LIANG Chunsui, HUANG Qiong, et al. Preliminary risk assessment on the dietary exposure of Cd in Guangdong residents [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2012, 24(4): 353-357
- [7] 吴永宁,李筱薇.第四次中国总膳食研究[M].北京:化学工业出版社,2015:254,267
WU Yongning, LI Xiaowei. The Fourth Chinese Total Diet Study [M]. Beijing: Chemical industry press, 2015: 254, 267

- [8] 劳其平.2012 年钦州市贝类海产品中无机砷检测结果分析[J].中国卫生工程学,2013,12(2):142-143
LAO Qiping. Analysis of inorganic arsenic detection results in shellfish of Qinzhou city in 2012 [J]. Chinese Journal of Public Health Engineering, 2013, 12(2): 142-143
- [9] 林文斯,廖艳华,刘君,等.2016年广西水产品中孔雀石绿和硝基呋喃残留状况调查[J].应用预防医学,2018,34(1):47-49,52
LIN Wensi, LIAO Yanhua, LIU Jun, et al. Investigation of malachite green and nitrofurans residues in aquatic products of Guangxi in 2016 [J]. Journal of Applied Preventive Medicine, 2018, 34(1): 47-49, 52
- [10] 田甜,文金华,曾祥林,等.鲜活水产品质量安全风险监测与评估现状及展望[J].食品安全质量检测学报,2019,10(24):8524-8530
TIAN Tian, WEN Jinhua, ZENG Xianglin, et al. Research status and prospect of quality and safety risk monitoring and assessment of fresh aquatic products [J]. Journal of Food Safety and Quality, 2019, 10(24): 8524-8530
- [11] 戴光伟,梁辉,周少君,等.广东省食用水产品中镉膳食暴露风险评估[J].华南预防医学,2016,42(3):223-226
DAI Guangwei, LIANG Hui, ZHOU Shaojun, et al. Risk assessment of dietary exposure to cadmium from edible aquatic products in Guangdong province [J]. South China Journal of Preventive Medicine, 2016, 42(3): 223-226
- [12] 罗贤如,张锦周,王舟,等.深圳市市售水产品中的镉膳食暴露风险评估[J].现代预防医学,2019,46(2):238-241
LUO Xianru, ZHANG Jinzhou, WANG Zhou, et al. Risk assessment of dietary exposure to cadmium from edible aquatic products sold in Shenzhen city [J]. Modern Preventive Medicine, 2019, 46(2): 238-241
- [13] 张文,吴光红,卢元玲,等.江苏地区克氏原螯虾中镉的膳食暴露及风险评估[J].食品科学,2017,38(23):201-206
ZHANG Wen, WU Guanghong, LU Yuanling, et al. Dietary exposure and risk assessment of cadmium from crayfish (*Procambarus clarkia*) in Jiangsu province [J]. Food Science, 2017, 38(23): 201-206
- [14] 田甜,巫剑,文金华,等.广西北部湾鲜活水产品中氯霉素残留的膳食暴露风险评估[J].现代食品科技,2021,37(5):310-318, 286
TIAN Tian, WU Jian, WEN Jinhua, et al. Risk assessment of dietary exposure to residual chloramphenicol from consuming fresh aquatic products from Beibu gulf, Guangxi [J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(5): 310-318, 286
- [15] GB/T 30891-2014,水产品抽样规范[S]
GB/T 30891-2014, Specification for Sampling Aquatic Products [S]
- [16] GB 5009.15-2014,食品安全国家标准食品中镉的测定[S]
GB 5009.15-2014, National Standard for Food Safety-determination of Cadmium in Foods [S]
- [17] GB 2762-2017,食品安全国家标准食品中污染物限量[S]
GB 2762-2017, National Standard for Food Safety-contaminant Limits in Foods [S]
- [18] US EPA. Risk assessment guidance for superfund volume I human health evaluation manual (part A) (EPA/540/1-89/002) [R]. Washington DC: Office of Emergency and Remedial Response, U.S. Environmental Protection Agency, 1989
- [19] 钱永忠,李耘.农产品质量安全风险评估-原理、方法和应用[M].北京:中国标准出版社,2007
QIAN Yongzhong, LI Yun. Risk Assessment of Quality and Safety of Agricultural Products-principles, Methods and Applications [M]. Beijing: China Standards Press, 2007
- [20] US EPA. Guidelines for exposure assessment, EPA/600/Z-92/001 [R]. Washington DC: Environmental Protection Agency, Risk Assessment Forum, 1992
- [21] US EPA. Risk Assessment Guidance for Superfund (RAGS), vol.1. Human health evaluation manual supplemental guidance: standard default exposure factors. OSWER Directive 9285.6-03 [R]. United States Environmental Protection Agency, Washington DC, Office of Emergency and Remedial Response, 1991
- [22] 唐振柱.2010-2015 年广西居民膳食营养与健康状况报告[M].南宁:广西人民出版社,2017:37
TANG Zhenzhu. Dietary Nutrition and Health Status Report of Guangxi Residents from 2010-2015 [M]. Nanning: Guangxi People's Publishing House, 2017: 37
- [23] The Joint FAO/WHO Expert Committee. Food additives summary and conclusion. JECFA/73/SC [R]. Geneva: WHO, 2010
- [24] US EPA. Tolerance reassessment advisory committee. Regulating risk from undetected residues in food [R]. Washington DC, USA: Office of Pesticide Programs, Environmental Protection Agency, 1998
- [25] GEMS/Food-WHO. Reliable evaluation of low-level contaminant of food, workshop in the frame of GEMS/Food-EURO [R]. Kulmbach: WHO, 1995
- [26] GB/T 27404-2008,实验室质量控制规范食品理化检测[S]
GB/T 27404-2008, Laboratory Quality Control Standard for Physical and Chemical Inspection of Food [S]