

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20240115004

烟台黄渤海海域水产品中镉污染水平及其健康风险评估

秦燕兰, 王加宾*

(烟台科技学院, 烟台 265600)

摘要: **目的** 了解烟台海域水产品中镉(Cd)含量及其污染程度, 评价膳食水产品来源的 Cd 致癌(非)健康风险。**方法** 随机采集 4 类 384 份样本; 依据 GB 5009.15—2014《食品安全国家标准 食品中镉的测定》规定检测 Cd 含量; 运用 Crystal ball 软件, 基于蒙特卡罗拟合计算健康风险概率值。**结果** 黄渤海海域水产品中 Cd 的检出率 100%, 含量均值为(0.783±0.728) mg/kg, 不同水产品 Cd 含量由高到低依次为: 甲壳类>腹足类>头足类>双壳贝类>棘皮类>鱼类; 总体不合格率为 1.82% (7/384)。青少年和成人居民均存在水产品膳食来源 Cd 致癌(非)健康风险。非致癌健康风险潜在危害程度 40~64 岁组>13~17 岁组>18~39 岁组>65 岁以上组, 其风险概率值分别为 13.24%、8.73%、7.46%、4.82%; 摄食人群(19.37%)>全人群(3.87%), 女性(13.01%)>男性(9.51%)。致癌健康风险概率值排序为: 65 岁以上组>40~64 岁组>18~39 岁组>13~17 岁组, 较高风险概率值分别为 97.58%、97.21%、33.69%、20.87%; 致癌健康风险与年龄呈现正相关; 摄食人群与全人群致癌风险相近; 摄入量、Cd 含量是控制致癌(非)健康风险的关键因素。**结论** 黄渤海海域水产品中 Cd 污染程度的概率值差异较大; 各年龄组均存在潜在膳食水产品来源的 Cd 健康风险, 水产品的摄入量及 Cd 含量是健康风险控制的关键因素。

关键词: 水产品; 镉; 污染; 健康风险

Cadmium pollution level and health risk assessment of aquatic products collected from the Yantai Yellow and Bohai sea area

QIN Yan-Lan, WANG Jia-Bin*

(Yantai Institute of Science and Technology, Yantai 265600, China)

ABSTRACT: Objective To understand the concentration and pollution level of cadmium, and evaluate the carcinogenic (non-) health risk of Cd from dietary aquatic products. **Methods** Four kinds 384 samples were randomly collected. The Cd concentration was detected by GB 5009.15—2014 *National standards for food safety-Determination of cadmium in food*, that carcinogenic (non-) health risk probability values were calculated based on Monte Carlo fitting with Crystal ball software. **Results** The detection rate of Cd was 100% of all kinds aquatic products collected from the Yellow and Bohai Sea area, the mean value was (0.783±0.728) mg/kg. The Cd content of different kinds of aquatic products ranked from high to low was: Crustaceans>gastropods>cephalopods>bivalves>echinoderms>fish, and the unqualified rate was 1.82% (7/384). Both adolescent and adult residents were hazarded potential carcinogenic (non-) health risks from ingested aquatic products. Non-carcinogenic health risk

*通信作者: 王加宾, 硕士, 副教授, 主要研究方向为食品安全风险。E-mail: 841299577@qq.com

*Corresponding author: WANG Jia-Bin, Master, Associate Professor, Yantai Institute of Science and Technology, No.34, Xianjing West Road, Penglai District, Yantai 265600, China. E-mail: 841299577@qq.com

potential hazard level was 40–64 years old>13–17 years old>18–39 years old>over 65 years old, the risk probability values were 13.24%, 8.73%, 7.46%, 4.82%, respectively, intake group (19.37%)>whole population (3.87%), female (13.01%)>male (9.51%). Carcinogenic health risk potential hazard level was over 65 years old>40–64 years old>18–39 years old >13–17 years old, which risk probability values were 97.58%, 97.21%, 33.69%, 20.87%, respectively. The carcinogenic health risk was positively correlated with age, and intake group was similar to that of the whole population. The intake of aquatic products and Cd content were critical control point that had higher contribution rate. **Conclusion** The probability values of Cd pollution degree in aquatic products in Yellow and Bohai Sea are different. Potential Cd health risks from dietary aquatic products are present in all age groups, and the intake of aquatic products and Cd content are critical control point to reduce carcinogenic (non-) health risks.

KEY WORDS: aquatic products; cadmium; pollution; health risk

0 引言

镉(cadmium, Cd)是一种非生物所需的重金属元素, 毒性高, 可经食物链进入身体, 生物体内半衰期长, 因而少量摄入就能够造成体内 Cd 蓄积而导致某些器官的损伤, 尤其是肾脏; Cd 不仅具有危害身体健康的风险, 还会对人体产生致癌、致畸效应, 被国际癌症研究署列为 I 类致癌物, 高 Cd 摄入量与高血压、某些类型的癌症以及骨质疏松有关^[1-4]。近年来, 由于近海海域环境污染严重, 水产品中镉污染现象较为普遍, 特别是贝类、甲壳类和头足类等水产品中的 Cd 含量较高, 已然成为人体内 Cd 摄入的主要来源^[5]。研究表明, 广州市市售甲壳类中 Cd 含量为 0.001~5.9 mg/kg, 其中蟹的超标率高于虾类^[6], 而深圳市售水产品中 Cd 的含量为 0.001~46.900 mg/kg, 超标率为 26.44%^[7]; 柳州市水产品中 Cd 总体超标率为 17.1%, 蟹的污染程度最高^[8]; 扇贝、口蛄虾中普遍存在 Cd 污染, 具有含量高, 超标率严重的特点, 海水鱼 Cd 含量显著高于淡水鱼类($P<0.05$)^[9]; 天津市甲壳类中的 Cd 污染属于中度污染^[10]。而在世界范围内, 水产品是人类摄取重金属的主要途径^[11], Cd 是口蛄虾中金属健康风险主要贡献者^[12]。

Cd 作为 5 种重点重金属污染物之一, 其在环境中难以降解, 却在水生生态系统中能够进行生物累积, 经食物链进入人体, 危害人体健康。考虑烟台作为沿海城市, 水产品消费量较高, 且存在 Cd 超标以及高含量水产品样本的报道^[13], 故本研究针对烟台黄渤海海域水产品中 Cd 的含量开展监测, 基于蒙特卡罗拟合各类水产品中 Cd 含量分布, 对其污染程度、致癌(非)健康风险进行评价, 了解其风险概率分布特征, 以期为海洋渔业规划发展, 推进市场精准监管, 提供数据和理论支持。

1 材料与方 法

1.1 材 料

将烟台濒临黄渤海海域的 8 个县市区设置为监测点,

每个监测点选择 2 处捕捞码头为样本采集点。于 2021 年 10 月—2022 年 3 月随机采集样本, 共采集 4 类 384 份样本(表 1)。监测样本当天用超纯水洗净, 装入密封袋在-20℃冷冻保存、备检。

1.2 仪器与设备

Zceni 700P 石墨炉原子吸收光谱仪(德国耶拿分析仪器股份公司); Tianezk 全自动微波消解仪[天焱仪器制造(成都)有限公司]; BSA224S-CW 德国赛多利斯电子分析天平(精度 0.1 mg, 北京京海佳业科贸有限公司); HM100 刀式研磨仪(北京格瑞德曼仪器设备有限公司); Milli-Q Advantage A10 超纯水机(美国 Milipore 公司)。

1.3 人口学和水产品消费量数据来源

人口学和水产品消费量数据来源于 2011 年中国健康与营养调查数据库中山东省居民水产品摄入量调查数据^[14], 针对青少年(13~17 岁)和成年人(≥ 18 岁)开展健康风险评估。

1.4 方 法

1.4.1 Cd 含量检测与评价标准

按照 GB 5009.15—2014《食品安全国家标准 食品中镉的测定》中的石墨炉原子吸收光谱测定方法检测样本中 Cd 含量, 检出限(limit of detection, LOD)为 0.001 mg/kg。通过空白样、平行样、内标和加标回收等手段进行质量控制。

水产品中 Cd 含量依据 GB 2762—2022《食品安全国家标准 食品中污染物限量》中规定的“限量值”判定, 含量值超出限量值者, 判定“不合格”。

采用 R-3.5.1 软件进行数据统计。未检出数据的比例 <60%时, 未检出数据用 1/2 LOD 替代, 当未检出数据的比例 $\geq 60\%$, 未检出数据用 LOD 替代^[15]。借助 Crystal ball 软件, 基于蒙特卡罗方法拟合^[16]计算水产品中 Cd 含量分布。检验水平 $\alpha=0.05$ 。

1.4.2 污染程度评价

采用单因子污染指数法进行重金属污染评价^[10], 运用 Crystal Ball 软件, 采用蒙特卡罗模拟进行拟合^[15], 迭代 10000 次, 计算其风险概率值。按照公式(1)计算:

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

式中: P_i , 重金属的污染指数; C_i , 重金属的实测含量; S_i , 重金属的标准限值(GB 2762—2022)。

若 $P_i < 0.2$ 时, 表明重金属处于正常的安全值范围; 当 $0.2 \leq P_i \leq 0.6$ 时, 表明轻度污染水平; 当 $0.6 < P_i < 1.0$, 为中度污染水平; $P_i \geq 1.0$ 时, 则为重度污染水平。

1.4.3 健康风险评价

膳食暴露评估模型的基本原理为膳食暴露量等于食物消费量(F)与化学物含量(C)的乘积, 单位暴露量则为膳食暴露量除以体重, 进而与暂定每周耐受量(provisional tolerable weekly intake, PTWI)和每日可接受摄入量(acceptable daily intake, ADI)比较, 量化其风险, 若 F 、 C 分别为来自消费量和化学物含量分布的随机变量, 则就为“概率模型”^[16]。考虑到水产品膳食消费量数据为可食部及其终生摄入, 故采用公式(2)计算 Cd 的日暴露量(exposure daily intake, EDI)^[17]:

$$EDI = (F \times C) / BW \quad (2)$$

式中: EDI, 日暴露量[mg/(kg·BW·d)]; C : 水产品中 Cd 的含量(mg/kg); F , 水产品消费量(kg/d); BW, 体重(kg)。

1.4.4 非致癌健康风险评价

采用风险商(hazard quotient, HQ)描述 Cd 的非致癌膳食暴露风险^[10,18-19], 采用 Monte Carlo 模拟进行拟合^[15], 迭代 10000 次, 计算其风险概率值。采用公式(3)计算 HQ^[20]:

$$HQ = EDI / RfD \quad (3)$$

式中: HQ, 风险商值; EDI, 日暴露量[mg/(kg·BW·d)]; RfD, 为参考剂量, Cd 为 0.001 mg/(kg·BW·d)^[21-22]。

若 $HQ < 1$, 表明膳食暴露风险处在安全水平; $HQ \geq 1$, 表明膳食暴露存在潜在的健康风险。

1.4.5 致癌健康风险评价

依据美国环保总署(US Environmental Protection Agency, USEPA)规定的剂量-效应模型评价致癌健康风险, 采用公式(4)计算致癌风险值(Risk)^[23-25]:

$$Risk = (EDI \times q_i) \quad (4)$$

式中: Risk, 致癌风险值; EDI, 日均暴露量[mg/(kg·BW·d)]^[24]; q_i , 致癌斜率因子, [mg/(kg·BW·d)]⁻¹; Cd 取值为 0.38^[23]。

可接受安全水平为 10^{-6} , 即 1/100 万的发病率; 风险值

$< 10^{-6}$, 致癌风险可以忽略; $10^{-6} < \text{风险值} < 10^{-4}$, 较低致癌风险, 值得关注; 风险值 $> 10^{-4}$, 较高致癌风险, 需要重点关注^[23]。

1.5 数据处理

采用 Origin 2018 软件进行数据统计描述, 借助 Excel 2007, 运用 Crystal Ball 11.1.1 软件进行蒙特卡罗拟合计算, 获得概率值。

2 结果与分析

2.1 各类水产品中 Cd 含量分布特征

烟台海域水产品中均能检出 Cd, 含量均值为(0.783±0.728) mg/kg, 呈现“Gamma”分布(表 1)。甲壳类中 Cd 含量均值高于其他 5 类水产品, 仅甲壳类中存在 8.75% 的不合格率(7/80), 总体不合格率为 1.82% (7/384)。含量均值大小为: 甲壳类>腹足类>头足类>双壳贝类>棘皮类>鱼类, 可能与不同生物摄食方式、对 Cd 富集作用差异有关; 基于 Monte Carlo 拟合的分布类型集中为对数正态、最小极值分布。

2.2 人口学及其摄入量分布特征

2011 年中国健康与营养调查数据库中涉及山东省居民水产品摄入量调查数据中, 青少年(13~17 岁)和成年人(≥ 18 岁)的有效调查数据 1049 人, 男女比例为 1:1.098; 其中, 水产品摄食者为 366 人; 年龄范围为 13~101 岁^[6]。按照年龄、性别、摄食情况分为 8 个组, 13~17 岁、18~39 岁、40~64 岁、 ≥ 65 岁、男、女、摄食人群、全人群。各组人群水产品体重、摄入量拟合分布见表 2~3。

2.3 各类水产品 Cd 污染程度

各类水产品中 Cd 污染程度概率值各异(表 4)。甲壳类的 Cd 污染程度概率值最高, 棘皮类的污染程度最低, 按照污染程度概率值大小排序为: 甲壳类>头足类>腹足类>双壳贝类>鱼类>棘皮类, 与含量均值大小排序略有区别。甲壳类中 Cd 的中度污染为主, 概率值为 49.06%; 其含量均值最高且存在超限量值结果一致, 说明甲壳类富集 Cd 能力高于其他水产品。

表 1 烟台黄渤海海域水产品中 Cd 含量及其拟合的分布类型、参数

Table 1 Distribution and parameters of Cd content of aquatic products in the Yellow and Bohai Sea areas of Yantai fitted by Monte Carlo

类型	N	含量/(mg/kg)	Cd 含量拟合分布类型 ^a	参数
双壳贝类	80	0.526±0.483	对数正态	位置=0.000, 平均值=0.575, 标准偏差=0.784
鱼类	80	0.010±0.012	对数正态	位置=0.001, 平均值=0.010, 标准偏差=0.013
甲壳类	80	1.921±0.878	最小极值	最可能值=2.341, 标度=0.833
头足类	64	0.970±0.519	最小极值	最可能值=1.216, 标度=0.420
腹足类	64	1.036±0.608	最小极值	最可能值=1.315, 标度=0.461
棘皮类	16	0.166±0.256	对数正态	位置=0.021, 平均值=0.174, 标准偏差=0.472
总体	384	0.783±0.728	Gamma	位置=0.001, 标度=1.618, 形状=0.48344

注: 表中数据表示为平均值±标准偏差;^aA-D 检验, 下同。

表 2 各组人群体重均值及其拟合分布情况
Table 2 Mean value and distribution of body weight for different groups of people

年龄组	N	体重/kg	拟合分布类型*	参数
13~17 岁	31	59.2±15.3	对数正态	位置=12.635, 平均值=59.296, 标准偏差=16.068
18~39 岁	177	67.2±13.3	最大极值	最可能值=60.996, 标度=10.934
40~64 岁	610	68.5±12.1	对数正态	位置=-211.864, 平均值=68.455, 标准偏差=12.034
≥65 岁	231	63.6±13.7	逻辑	平均值=63.080, 标度=7.216
男	500	72.0±12.1	对数正态	位置=-271.100, 平均值=71.975, 标准偏差=12.130
女	549	62.3±11.9	逻辑	平均值=61.744, 标度=6.169
摄食人群	366	68.1±13.4	逻辑	平均值=67.568, 标度=7.143
全人群	1049	66.9±12.9	对数正态	位置=-78.545, 平均值=66.896, 标准偏差=12.849

表 3 各组人群水产品每标准人日摄入量均值及其拟合分布情况
Table 3 Mean value and distribution of EDI for different groups of people

年龄组	N	日摄入量/(kg/d)	拟合分布类型*	参数
13~17 岁	31	0.0261±0.0525	对数正态	位置=-0.001, 平均值=0.028, 标准偏差=0.210
18~39 岁	177	0.0209±0.0406	逻辑	平均值=0.011, 标度=0.019
40~64 岁	610	0.0208±0.0384	逻辑	平均值=0.011, 标度=0.019
≥65 岁	231	0.0128±0.0287	逻辑	平均值=0.005, 标度=0.013
男	500	0.0210±0.0410	逻辑	平均值=0.010, 标度=0.019
女	549	0.0177±0.0340	逻辑	平均值=0.009, 标度=0.016
摄食人群	366	0.0551±0.0454	Gamma	位置=0.002, 标度=0.039, 形状=1.36789
全人群	1049	0.0192±0.0375	逻辑	平均值=0.010, 标度=0.018

表 4 各类水产品中 Cd 污染程度及其预测概率情况
Table 4 Cd pollution level and predicted probability of different kinds of aquatic products

类型	Cd 污染程度概率分布/%			
	安全接受水平	轻度污染	中度污染	重度污染
双壳贝类	56.29	33.05	6.78	3.78
鱼类	81.93	9.83	0.71	0.33
甲壳类	5.49	28.67	49.06	11.04
头足类	6.91	47.78	39.69	0.11
腹足类	7.44	39.24	46.75	1.16
棘皮类	91.49	6.72	1.05	0.74

2.4 非致癌健康风险评价

青少年和成人居民均存在水产品膳食来源 Cd 非致癌健康风险, 其 HQ>1 的风险概率值与年龄没有相关性(表 5)。40~64 岁组水产品膳食来源 Cd 非致癌健康风险概率值为 13.24%, 高于其他各年龄组; 13~17 岁组高于 18~39 岁组和 ≥65 岁组; 摄食人群潜在非致癌健康风险明显高于全人群, 女性高于男性。

2.5 致癌健康风险评价

青少年和成年居民各组中, Cd 致癌健康风险程度各异, 致癌风险概率值不同(表 6)。13~17 岁组膳食致癌健康风险最低, 22.36% 概率值不存在 Cd 膳食致癌风险, 40~64

表 5 各组人群 EDI、HQ 均值及非致癌健康风险概率值
Table 5 Mean value of EDI, HQ and probability value of non carcinogenic health risk

分组	EDI/[mg/(kg·BW·d)]		HQ		非致癌健康风险概率值/%
	M±SD	中位数	M±SD	中位数	
13~17 岁	5.21E-4±2.50E-5	3.30E-5	0.461±3.329	0.029	8.73
18~39 岁	3.77E-4±1.00E-6	1.01E-4	0.356±0.547	0.098	7.46
40~64 岁	4.70E-4±1.00E-5	8.10E-5	0.431±1.169	0.079	13.24
≥65 岁	6.90E-5±4.00E-7	4.60E-6	0.233±0.189	0.067	4.82
男	3.72E-4±1.00E-6	1.08E-4	0.377±0.658	0.097	9.51
女	4.18E-4±7.81E-7	2.00E-6	0.394±0.781	0.074	13.01
摄食人群	5.91E-04±1.40E-6	1.62E-4	0.63±1.396	0.192	19.37
全人群	1.23E-4±3.99E-7	1.30E-5	0.101±0.399	0.009	3.87

表 6 各组人群膳食水产品来源 Cd 致癌风险概率值
Table 6 Probability value of Cd carcinogenic health risk in taking aquatic products for different groups people

分组	致癌健康风险概率值/%		
	安全水平	较低潜在风险	较高潜在风险
13~17 岁	22.36	56.77	20.87
18~39 岁	9.07	57.24	33.69
40~64 岁	0.00	2.79	97.21
≥65 岁	0.00	2.42	97.58
男	0.16	0.78	99.06
女	0.17	2.31	97.52
摄食人群	0.00	0.59	99.41
全人群	0.00	2.04	97.96

岁组、≥65 岁组、摄食人群、全人群均存在潜在致癌风险, 成年居民中 ≥65 岁组潜在风险程度概率值最高, 男性高于女性。

2.6 致癌(非)健康风险敏感度分析

致癌(非)健康风险敏感度分析表明, 水产品 Cd 含量、膳食摄入量是致癌(非)健康风险的主要敏感因素基本一致, 其在各组人群中的贡献率不同(表 7)。13~17 岁组、全人群主要考虑摄食量的影响, 其他各组主要是 Cd 含量贡献率较大, 体重敏感度最低, 存在负值, 即体重越大, 风险越小。总体上考虑, 摄入量、Cd 含量是控制致癌(非)健康风险的关键控制因素。

表 7 各组人群膳食产品来源 Cd 致癌(非)健康风险敏感度情况
Table 7 Sensitivity value of intake of aquatic products and Cd content for Cd carcinogenic health risk of different groups people

分组	HQ/%		Risk/%	
	摄食量/(kg/标准人日)	Cd 含量/(mg/kg)	摄食量/(kg/标准人日)	Cd 含量/(mg/kg)
13~17 岁	51.40	43.10	51.40	43.10
18~39 岁	19.60	78.10	19.60	78.10
40~64 岁	35.30	61.40	35.30	61.40
≥65 岁	24.40	71.30	24.40	71.30
男	20.50	74.30	20.50	74.30
女	37.90	57.50	37.90	57.50
摄食人群	18.60	78.10	18.60	78.10
全人群	85.50	9.20	16.80	78.90

3 讨论与结论

烟台黄渤海海域水产品中 Cd 检出率 100%, Cd 污染程度因种类而存在不同程度的差别, 按照大小排序: 甲壳类 > 头足类 > 腹足类 > 双壳类 > 鱼类 > 棘皮类; 均值 (0.783±0.728) mg/kg, 甲壳类含量均值最高, Cd 污染程度最高, 与青岛、武汉、厦门、舟山四地水产品 Cd 含量和污染程度结果一致^[9], Cd 含量和污染程度明显高于鱼类和棘皮类; 齐自元等^[11]报道长牡蛎和海湾扇贝的 Cd 污染为中度污染和轻度污染, 含量明显高于其他类品种, 海南省市售水产品中, 双壳类、甲壳类中的 Cd 平均浓度均高于鱼类^[26]。这可能与海水中 Cd 污染程度较高以及甲壳类动物生活习性和生理代谢相关, 从而导致富集更多的 Cd。研究表明秦皇岛海域的牡蛎对 Cd 富集能力更强, 说明海洋环境的低浓度 Cd, 可能通过海洋生物的富集和食物链的传递累积至较高浓度^[27], 进而能增加潜在健康风险。因此, 可能会存在近海水产品通过生物链自身富集 Cd, 导致其 Cd 高污染的情况。故需要持续监测和评价, 溯源其污染源头, 进而采取有效措施控制其污染和降低其潜在风险。

致癌(非)健康风险概率值显示, 水产品中的 Cd 对青少年和成年人均存在不同程度的致癌(非)健康风险, 非致癌健康风险潜在危害程度为: 40~64 岁组 > 13~17 岁组 > 18~39 岁组 > 65 岁以上组, 摄食人群组的非致癌健康风险概率值为 19.37%, 高于全人群组约 4 倍。致癌健康风险与非致癌健康风险概率值未呈现线性关联, 其致癌健康风险和较高致癌健康风险概率值排序为: 65 岁以上组 > 40~64 岁组 > 18~39 岁组 > 13~17 岁组, 与年龄呈现正相关; 摄食人群致癌健康风险与全人群致癌风险相近。致癌(非)健康风险敏感度分析表明, 水产品 Cd 含量、膳食摄入量是致癌(非)健康风险的主要敏感因素基本一致, 其在各组人群中的贡献率不同。13~17 岁组、全人群主要是摄食量的影响, 其他各组主要是 Cd 含量贡献率较大, 体重敏感度最低, 贡献率相对较小, 且呈现负相关。总体考虑, 摄入量、Cd 含量是控制致癌(非)健康风险的关键控制因素。

风险评估不确定性分析。膳食暴露评估过程中, 不确定度则是由于人们缺乏相关信息、知识、技术等造成的测量值与真实值间的差别。污染物摄入量估计的不确定性受评估过程许多因素的影响, 例如数据缺失、测量误差、不同的数据处理方法, 膳食调查数据和污染物检测数据的搭配情况等^[28]。膳食风险评估可以用点评估和概率评估 2

种方式进行评估分析,点评估和概率评估,其中概率评估是通过全部数据进行大量随机抽样,可以考虑到危害发生的所有可能性,最终以概率分布的形式呈现风险评估结果,相对于确定性评估更具有科学性、更符合实际的特点^[29]。目前,蒙特卡罗模拟是最为有效的概率风险评估方法之一,将污染物浓度和暴露参数的概率分布引入了评估模型,经随机抽样的方式,多次迭代模拟计算,可获取更加准确的预测值用以表征风险评估结果^[30]。但是该方法对数据量要求高,暴露参数和环境浓度数据越丰富,模拟结果越精准^[22]。然而,本研究涉及到风险评估的水产品 Cd 含量、海产品消费量及人口学关键参数存在不确定性,进而导致致癌(非)健康风险概率值存在不确定性。例如,海产品样本采集时间相对集中,忽视了水产品中 Cd 含量与时间、海洋生态环境密切关联,监测水产品的样本量相对偏少,会导致结果准确度减低;区域性居民膳食消费量数据缺失,也是膳食风险评估的短板之一;本研究所用膳食消费量数据是海产品的消费量数据,取用数值偏高,考虑到人体对水产品中 Cd 非 100%吸收,例如虾蛄和梭子蟹中 Cd 就不能被人体全部吸收,模拟胃消化液的生物可给性高于模拟肠消化液^[31],考虑到环境中普遍存在 Cd、Hg 等重金属,经食物链转移到人体内并在人体内富集,即使在低浓度下,也会对健康产生不利影响,当超过安全阈值时,会干扰人体正常的生理功能;加之食品中的重金属是进入人体的主要途径之一^[32]。导致风险值有所高估。因此,对于水产品中 Cd 的致癌(非)健康风险评估应该是长期持续的监测项目,需要开展区域性膳食调查、食品安全风险监测,构建适合特定人群的剂量-效应模型,以期获得精准的食品安全风险结果,推进“食安城市”建设。

参考文献

- [1] ZHENG H, REYNOLDS M. Cadmium exposure in living organisms: A short review [J]. *Sci Total Environ*, 2019, (678): 761–767.
- [2] BARBARA AB, ROBERT MR. *Present Knowledge in Nutrition*, 9th Edition [M]. 荫士安, 汪之项, 王茵, 译. 北京: 人民卫生出版社, 2008. BARBARA AB, ROBERT MR. *Present Knowledge in Nutrition*, 9th Edition [M]. YIN SA, WANG ZX, WANG Y, Translation. Beijing: People's Medical Publishing House, 2008.
- [3] 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 GAN, LIANG CS, HUANG Q, *et al.* Preliminary risk assessment on the dietary exposure of Cd in Guangdong residents [J]. *Chin J Food Hyg*, 2012, 24(4): 353–357.
- [4] WEI X, GAO B, WANG P, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in streetdusts from different functional areas in Beijing, China [J]. *Ecotox Environ Saf*, 2015, 112: 186–192. 2012, 24(4): 353–357.
- [5] 刘海新, 杨妙峰, 郑盛华, 等. 概率评估福建南部沿海水产品中镉食用健康风险[J]. *渔业研究*, 2023, 45(5): 480–489. LIU HX, YANG MF, ZHENG SH, *et al.* Probabilistic health risk assessment of cadmium intake in aquatic products along the southern coast of Fujian province in China [J]. *J Fish Res*, 2023, 45(5): 480–489.
- [6] 倩茹, 安文佳, 蒋宁, 等. 广州市售甲壳类中镉污染状况分析及安全性评价[J]. *食品工业*, 2021, 42(5): 497–500. QIAN R, AN WJ, JIANG N, *et al.* Analysis and food safety assessment of cadmium pollution of crustaceans in Guangzhou [J]. *Food Ind*, 2021, 42(5): 497–500.
- [7] 王小倩, 刘金明, 张泽锋. 深圳市某区市售水产品中镉污染特征及健康风险评估[J]. *食品安全导刊*, 2023, (25): 106–109. WANG XQ, LIU JM, ZHANG ZF. Characterization of contamination and health risk assessment of cadmium in aquatic products in one district of Shenzhen [J]. *China Food Saf Magaz*, 2023, (25): 106–109.
- [8] 冯广莲, 梁姣姣, 覃力科, 等. 柳州市水产品中铅镉含量检测及评价[J]. *微量元素与健康研究*, 2022, 39(1): 47–48, 51. FENG GL, LIANG JJ, QIN LK, *et al.* Detection and evaluation of arsenic, lead and cadmium in aquatic products in Liuzhou City [J]. *Stud Trace Elem Health*, 2022, 39(1): 47–48, 51.
- [9] 李渊. 我国典型水产城市水产品重金属含量及居民暴露风险[D]. 贵阳: 贵州医科大学, 2021. LI Y. Heavy metal concentrations in aquatic products and health risk of human exposure in typical aquatic cities in China [D]. Guiyang: Guizhou Medical University, 2021.
- [10] 顾海宁, 胡哲斌, 陈晨, 等. 天津市水产品重金属安全风险评估[J]. *食品与营养科学*, 2017, 6(1): 1–8. GU HN, HU ZB, CHEN C, *et al.* Food safety risk assessment of the heavy metals in aquatic products in Tianjin [J]. *Hans J Food Nutr Sci*, 2017, 6(1): 1–8.
- [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估[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 sea food and fresh water products [J]. *J Fish China*, 2022, 46(7): 1246–1256.
- [12] JIAO Y, YANG LP, LIU YJ, *et al.* Evaluation of trace metals and rare earth elements in mantis shrimp *Oratosquilla oratoria* collected from Shandong Province, China, and its potential risks to human health-Science direct [J]. *Mar Pollut Bull*, 2020. DOI:10.1016/j.marpollbul.2020.111815
- [13] 董峰光, 宫春波, 王朝霞, 等. 烟台市居民主要膳食镉暴露风险评估[J]. *预防医学*, 2016, 28(7):662–665. DONG FG, GONG CB, WANG ZX, *et al.* Preliminary risk assessment on the dietary exposure of Cd in Yantai [J]. *Prev Med*, 2016, 28(7): 662–665.
- [14] China Health and Nutrition Survey. Survey data-Longitudinal [EB/OL]. [2018-06-06]. http://www.cpc.unc.edu/projects/china/data/datasets/data_downloads/longitudinal [2024-01-05].
- [15] 宫春波, 王朝霞, 孙月琳, 等. 食品安全风险监测数据统计处理常见问题探讨[J]. *中国食品卫生杂志*, 2013, 25(6): 575–578. GONG CB, WANG ZX, SUN YL, *et al.* Application of statistical analysis

- processing on food safety risk surveillance data [J]. *Chin J Food Hyg*, 2013, 25(6): 575–578.
- [16] 宫春波, 王朝霞, 董峰光, 等. 烟台市居民熟肉制品中亚硝酸盐膳食暴露健康风险评估[J]. *中国食品卫生杂志*, 2018, 30(6): 639–644.
GONG CB, WANG ZX, DONG FG, *et al.* Risk assessment for dietary exposure of nitrite in cooked-meat products in Yantai population [J]. *Chin J Food Hyg*, 2018, 30(6): 639–644.
- [17] 刘沛, 吴永宁. 构建中国膳食暴露评估模型提升我国食品安全风险评估水平[J]. *中国预防医学杂志*, 2010, 44(3): 181–183.
LIU P, WU YN. Interpretation of highlights in the Chinese food safety law from a scientific perspective [J]. *Chin Prev Med*, 2010, 44(3): 181–183.
- [18] KAZI TG, BRAHMAN KD, AFRIDI HI, *et al.* The effects of arsenic contaminated drinking water of livestock on its total levels in milk samples of different cattle: Risk assessment in children [J]. *Chemosphere*, 2016, 165: 427–433.
- [19] 郭辰琦, 江磊, 蔡心怡, 等. 中国典型沿海城市水产品中锑的分布特征及食用风险[J]. *环境化学*, 2022, 41(2): 409–416.
GUO CQ, JIANG L, CAI XY, *et al.* Distribution characteristics and consumption risk of antimony in aquatic products in typically coastal cities of China [J]. *Environ Chem*, 2022, 41(2): 409–416.
- [20] RASHEED H, KAY P, SLACK RJ, *et al.* Human exposure assessment of different arsenic species in household water sources in a high risk arsenic area [J]. *Sci Total Environ*, 2017, 584–585: 631–641.
- [21] CIRILLO T, FASANO E, VISCARDI V, *et al.* Survey of lead, cadmium, mercury and arsenic in seafood purchased in Campania, Italy [J]. *Food Addit Contam B*, 2010, 3(1): 30–38.
- [22] 侯睿. 黑龙江省畜禽肝脏金属微量元素分析及其居民膳食暴露风险评估[D]. 哈尔滨: 黑龙江东方学院, 2022.
HOU R. Analysis of metallic trace elements in liver of livestock and poultry and assessment of dietary exposure risk of residents in Heilongjiang Province [D]. Harbin: East University of Heilongjiang, 2022.
- [23] 岳宣志, 李欢, 高昇, 等. 2021年内蒙古自治区农村饮用水砷、镉、铬、铅和汞健康风险评估[J]. *环境卫生学杂志*, 2023, 13(10): 765–769, 777.
YUE XZ, LI H, GAO S, *et al.* Health risk assessment of arsenic, cadmium, chromium, lead and mercury in rural drinking water in Inner Mongolia Autonomous region, China, 2021 [J]. *J Environ Hyg*, 2023, 13(10): 765–769, 777.
- [24] 宫春波, 王朝霞, 董峰光, 等. 烟台居民膳食来源总砷暴露健康风险评估[J]. *食品安全质量检测学报*, 2018, 9(14): 3650–3655.
GONG CB, WANG ZX, DONG FG, *et al.* Human health risk assessment from arsenic Dietary exposures in Yantai [J]. *J Food Saf Qual*, 2018, 9(14): 3650–3655.
- [25] HU Y, ZHANG W, CHENG H, *et al.* Public health risk of arsenic species in chicken tissues from live poultry markets of Guangdong province, China [J]. *Environ Sci Technol*, 2017, 51(6): 3508–3517.
- [26] 高磊, 刘宝林, 吕林阳, 等. 海南省市售海产品中重金属/类金属含量分析及人体健康风险评估[J]. *安徽农学通报*, 2022, 28(4): 18–21.
GAO L, LIU BL, LV LY, *et al.* Heavy metals/metalloids of concentrations and human health risk assessment of commercially available seafoods in Hainan Province [J]. *Anhui Agric Sci Bull*, 2022, 28(4): 18–21.
- [27] 张玉龙, 尹晓斐, 屈佩, 等. 汞、砷、镉在秦皇岛近海几种典型底栖生物体内的富集特征研究[J]. *福州大学学报(自然科学版)*, 2024, 52(1): 120–126.
ZHANG YL, YIN XF, QU P, *et al.* Bioaccumulation characteristics of Hg, As and Cd in several typical macroinvertebrates off the coast of Qinhuangdao [J]. *J Fuzhou Univ (Nat Sci Ed)*, 2024, 52(1): 120–126.
- [28] 刘沛. 砷膳食暴露评估模型构建与应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.
LIU P. Establishment and application of models for long-term dietary exposure for arsenic [D]. Nanjing: Southeast University, 2015.
- [29] 蒋莹, 邹森, 平小红, 等. 辽宁省大米中无机砷残留的膳食风险评估[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(10): 3266–3270.
JIANG Y, ZHOU M, PING XH, *et al.* Dietary risk assessment of inorganic arsenic residues in rice in Liaoning Province [J]. *J Food Saf Qual*, 2022, 13(10): 3266–3270.
- [30] 张晗, 丁秀丽, 张金良, 等. 基于蒙特卡罗模拟的阿特拉津健康风险评估[J]. *环境监控与预警*, 2021, 13(5): 75–79.
ZHANG H, DING XL, ZHANG JL, *et al.* Health risk assessment of atrazine based on Monte Carlo simulation method [J]. *Environ Monit Forewarn*, 2021, 13(5): 75–79.
- [31] 姚雪漫, 张秋萍, 蒋建荣, 等. 体外模拟消化实验研究虾蛄和梭子蟹体内铅镉元素的生物可给性[J]. *江苏预防医学*, 2023, 34(5): 558–560.
YAO XM, ZHANG QP, JIANG JR, *et al.* Bioavailability of lead and cadmium in mantis shrimps and swimming crabs with *in vitro* simulated digestion experiments [J]. *Jiangsu J Prev Med*, 2023, 34(5): 558–560.
- [32] 林新校, 吴泽. 食品中重金属的健康风险评估研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(12): 226–233.
LIN XX, WU Z. Research progress on health risk assessment of heavy metals in food [J]. *J of Food Safety and Quality*, 2023, 14(12): 226–233.

(责任编辑: 郑丽 韩晓红)

作者简介

秦燕兰, 硕士, 讲师, 主要研究方向为食品安全与卫生。
E-mail: 157380405@qq.com

王加宾, 硕士, 副教授, 主要研究方向为食品安全风险。
E-mail: 841299577@qq.com