

# 嵊泗区域贻贝重金属污染研究及健康风险评估

吴丹<sup>1</sup>, 张小军<sup>2,3\*</sup>, 曾军杰<sup>1,2,3</sup>, 顾捷<sup>2,3</sup>, 陈瑜<sup>2,3</sup>

(1. 浙江海洋大学食品与医药学院, 浙江舟山 316021; 2. 浙江省海洋水产研究所, 浙江舟山 316021; 3. 浙江省海水增殖重点实验室, 浙江舟山 316021)

**摘要** [目的] 研究嵊泗 4 个主要养殖区贻贝重金属(铅、镉)含量, 为贻贝食用安全研究提供参考。[方法] 对 2016—2018 年浙江省舟山市嵊泗县枸杞岛、绿华岛、壁下岛、嵊山岛固定区域采集的贻贝样品中铅、镉进行监测, 对比国标《食品中污染物限量》(GB 2762—2017), 并采用单因子污染指数法( $P_i$ )、内梅罗综合污染指数( $P_{综合}$ )、靶器官危害系数(THQ)和暴露剂量-反应外推模型( $R_{总}$ )为参考指标进行污染评价和健康风险, 研究通过膳食途径可能导致的健康风险。[结果] 样品中铅检出率为 94.4%, 镉检出率为 100%。检出含量均符合《食品中污染物限量》(GB 2762—2017)的要求。重金属铅和镉的  $P_i$  和  $P_{综合}$  均 < 1.0。健康风险评估结果显示, 4~17 岁儿童及成人的 THQ 均小于安全基准 1.0, 数据表明暴露人群没有明显的健康风险。 $R_{总}$  的评价结果为  $1.61 \times 10^{-5} \sim 4.67 \times 10^{-5} a^{-1}$ , 7~10 岁儿童的评价结果接近国际辐射防护委员会(ICRP)推荐的最大可接受风险值( $5 \times 10^{-5} a^{-1}$ )。[结论] 嵊泗区域贻贝重金属含量及健康风险评估整体情况较好, 部分年龄段儿童健康风险较成人高, 但风险尚在可接受水平内, 望有关部门继续加强贻贝养殖健康风险的防控。

**关键词** 贻贝; 铅; 镉; 监测; 健康风险

中图分类号 X55 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2021)22-0164-06

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2021.22.041



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

## The Pollution and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Mussels in Shengsi Area

WU Dan<sup>1</sup>, ZHANG Xiao-jun<sup>2,3</sup>, ZENG Jun-jie<sup>1,2,3</sup> et al (1. School of Food and Medicine of Zhejiang Ocean University, Zhoushan, Zhejiang 316021; 2. Marine Fisheries Research Institute of Zhejiang Province, Zhoushan, Zhejiang 316100; 3. Key Laboratory of Mariculture and Enhancement of Zhejiang Province, Zhoushan, Zhejiang 316021)

**Abstract** [Objective] Research the content of heavy metals (lead, cadmium) in mussels from four main culture areas of Shengsi, and provide reference for mussel food safety. [Method] The lead and cadmium in mussel samples collected from the fixed areas of Gouqi Island, Lvhu Island, Bixia Island and Shengshan Island in Shengsi County from 2016 to 2018 were monitored and compared with the national standard (GB 2762-2017). The single factor pollution index method, Nemerow comprehensive pollution index, target organ hazard coefficient and exposure dose-response extrapolation model were used as reference indexes for pollution assessment and health risk, and the possible health risk caused by dietary route was studied. [Result] The detection rates of lead and cadmium were 94.4% and 100%, respectively. The detected contents all meet the requirements of the limits of pollutants in food (GB 2762-2017). The single pollution index and Nemerow comprehensive pollution index of heavy metals lead and cadmium were less than 1.0. The results of health risk assessment showed that the THQ of children aged 4-17 and adults were less than the safety benchmark of 1.0, and the data showed that there was no obvious health risk in the exposed population. The results of exposure dose response were in the range of  $1.61 \times 10^{-5} \sim 4.67 \times 10^{-5} a^{-1}$ . The evaluation results of children aged 7-10 were close to the maximum acceptable risk value ( $5 \times 10^{-5} a^{-1}$ ) recommended by ICRP. [Conclusion] The content of heavy metals and health risk assessment of mussels in Shengsi area are generally good. The health risk of some age groups of children is higher than that of adults, but the risk is still within the acceptable level. It is hoped that the relevant departments will continue to strengthen the prevention and control of health risks in mussel breeding.

**Key words** Mussel; Lead; Cadmium; Monitoring; Health risks

舟山市嵊泗县位于我国东海北端, 毗邻长江出海口与杭州湾, 海域面积 8 738 km<sup>2</sup>, 素有“东海渔仓”美誉。嵊泗海域环境优越, 水质肥沃, 饵料丰富, 温度适中, 利于海洋生物栖息, 适合开展海水养殖, 拥有浙江省最大的贻贝产业化基地和深水网箱养殖基地, 是宁波、上海及长三角地区鲜活水产品供应基地。贻贝养殖作为嵊泗县特色产业, 近年来发展迅速, 2018 年全县共有贻贝养殖渔户 860 家, 贻贝深加工生产线 24 条, 解决就业 6 000 余人, 贻贝养殖总面积近 0.2 万 hm<sup>2</sup>, 贻贝总产量逾 12 万 t, 总产值达 4 亿余元<sup>[1-4]</sup>。尽管贻贝味道鲜美, 近年来因食用贝类引起的重金属中毒事件频发, 引起了相关政府部门和消费者的关注。其中镉超标可使人产生慢性中毒, 毒害肝、肾、骨骼等器官; 铅超标会对人体造血系统产生不可逆的损害, 影响血红蛋白的合成, 破坏人体的神经系统。因此, 对贝类中这 2 种重金属元素的检

测和分析显得尤为重要<sup>[5-9]</sup>。该研究监测了 2016—2018 年嵊泗县 4 个主要养殖区 30 个采样点贻贝中铅、镉含量, 并通过国际上常用的单因子污染指数( $P_i$ )、内梅罗综合污染指数( $R_{综合}$ )、目标危害系数(THQ)和暴露剂量-反应外推模型( $R_{总}$ )分析方法综合评估食用嵊泗贻贝可能导致的健康风险。

## 1 材料与方法

**1.1 样品采集** 在浙江省舟山市嵊泗县 4 个主要养殖区共设置 30 个贻贝质量监测抽样点, 每个岛选择典型、具有代表性的贻贝养殖区进行采样, 采样点见图 1。枸杞岛设置了 12 个贝类产品监测点, 绿华岛设置 6 个监测点, 壁下岛设置 6 个监测点, 嵊山岛设置 6 个监测点。每个监测点分别于 2016—2018 年 6—8 月进行了 6 次采样。

**1.2 试剂与仪器** 硝酸(杂质小于 100 μg/L, 安徽泽钜化工有限公司); 30%过氧化氢、磷酸(优级纯, 安徽泽钜化工有限公司); 多元素混合标准溶液(1 000 μg/mL, 天津渤化化学试剂有限公司)。AA240Z 原子吸收光谱仪(厦门海达精密仪器有限公司); ETHOSUP 型微波消解仪(意大利 Milestone 公

**作者简介** 吴丹(1989—), 女, 安徽歙县人, 硕士, 从事水产品加工与质量安全研究。\* 通信作者, 高级工程师, 博士, 从事水产品加工与质量安全等方面研究。

**收稿日期** 2021-03-11; **修回日期** 2021-04-28

司);VB24 Plus 型赶酸器(厦门海达精密仪器有限公司);超纯水系统(Milli-Q Reference,美国 Millipore 公司);AL204 型电子天平(杭州旌斐仪器科技有限公司)。检测过程用到

50 mL容量瓶预先进行计量检定;玻璃器皿在使用前用10%~20%硝酸溶液浸泡 1 d,再用超纯水冲洗多次再进行试验操作。



图 1 嵊泗养殖区贻贝样品采样点位示意

Fig.1 Sampling points of mussel in Shengsi culture area

### 1.3 试验方法

**1.3.1 样品制备。**样品经解冻后去壳、去内脏(镉),经超纯水多次清洗并自然滤干水分后再按 GB 17378.6—2007《食品安全国家标准》<sup>[10]</sup>制备成匀浆(湿样),并冷冻保存,待测。

**1.3.2 铅、镉含量的测定。**参照 GB 5009.15—2014 运用石墨炉原子吸收光谱法测定<sup>[11]</sup>。经自然解冻后,在天平上称取 0.3~0.5 g(精确至 0.000 1 g)贻贝样品,置于微波消解罐中,然后加入 5.0 mL 硝酸(75%)、2.0 mL 过氧化氢(30%),轻轻摇匀后装入微波消解仪中,按设定的消解工作程序进行消解。消解完成后,将微波消解罐取出去盖,按序放置到赶酸器上,温度设置为 170 ℃。加热赶酸器至样液剩 1~2 mL。冷却至室温后,将其移入 50 mL 容量瓶中,并用超纯水多次淋洗消解罐内壁,合并洗液于容量瓶中,定容至刻度,混匀,即为上机样品溶液。同时按相同方法制备空白样品。分别取定量样品溶液和空白样品注入石墨炉中,测定吸光值。

### 1.4 评价方法

**1.4.1 判定标准。**参照 GB 2762—2017《食品安全国家标准 食品中铅的测定/食品中镉的测定》<sup>[12-13]</sup>对贻贝样品中的铅、镉含量进行判定,其限量标准分别为 1.5 mg/kg 和不超过 2.0 mg/kg(去除内脏)。

**1.4.2 单因子污染指数评价。**参照 GB 2762—2017 的铅、镉限量值,采用单因子污染指数对嵊泗海域中贻贝样品的重金属含量进行评估。单因子污染指数法可直接反映受单一污染物的影响程度, $P_i$ 值越大,表明污染越严重<sup>[14]</sup>。计算公式

如下:

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

式中, $P_i$ 为某种污染物的生物质量指数, $C_i$ 为该种污染物实际测定的浓度, $S_i$ 为该污染物国标中最高允许的限值。根据  $P_i$  值可以得到贻贝中重金属污染水平的评价。

**1.4.3 内梅罗综合污染指数评价。**内梅罗综合污染指数法是根据单因子污染指数评价的结果,对贻贝中多种污染物污染水平进行评价的方法,能够凸显高浓度污染物对结果的影响<sup>[15]</sup>,评估模型如下:

$$P_{\text{综合}} = \{ [(C_i/S_i)_{\text{max}}^2 + (C_i/S_i)_{\text{avg}}^2] / 2 \}^{1/2} \quad (2)$$

式中, $P_{\text{综合}}$ 为贻贝样品的内梅罗综合污染指数; $(C_i/S_i)_{\text{max}}^2$ 为贻贝样品各单项污染物污染指数的最大值; $(C_i/S_i)_{\text{avg}}^2$ 为贻贝样品各单项污染物污染指数的平均值。

评价标准:单因子污染指数( $P_i$ )和内梅罗综合污染指数( $P_{\text{综合}}$ )的评价标准见表 1<sup>[16-17]</sup>。

**1.4.4 靶器官危害系数评价。**靶器官危害系数(THQ)是由美国环保署(USEPA)推荐采用的健康风险评价模型,用于评估人体通过食物摄取重金属风险的常用方法。以污染物暴露剂量与参考剂量的比值来表征健康风险水平,若比值超过安全基准值 1.0,说明该污染物对暴露人群具有潜在健康风险,反之则暴露人群没有明显的健康风险<sup>[18]</sup>,计算公式如下:

$$\text{THQ} = \frac{\text{EF} \times \text{ED} \times \text{FIR} \times c}{R_i \times \text{D} \times \text{BW} \times \text{TA}} \times 10^{-3} \quad (3)$$

式中,EF为暴露频率,d/a,一般取365 d/a;ED为暴露年限,a,通常为人均寿命。根据2019年世界卫生组织报告显示<sup>[19]</sup>,我国男性人均期望寿命为74.6岁,女性则为77.6岁,取二者均值76.1岁;FIR为食物摄取率,g/d,参照中国居民膳食结构调查及水产品平均摄入量<sup>[20-22]</sup>,取4~6岁儿童的FIR为8 g/d,7~10岁儿童的FIR为22 g/d,11~14岁青少年的FIR为23 g/d,15~17岁的FIR为25 g/d,成人30 g/d;c为贻贝中实际检测到的重金属含量,mg/kg;R<sub>i</sub>D为摄取参考

剂量,根据USEPA标准镉为 $1 \times 10^{-3} \text{ mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ ;USEPA未明确铅的标准,采用JECFA的摄入量,取铅的R<sub>i</sub>D为 $0.0036 \text{ mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ <sup>[23-24]</sup>;BW为人群的平均体重,kg,参考相关文献<sup>[25-26]</sup>,取4~6岁儿童平均体重20 kg,7~10岁儿童平均体重27 kg,11~14岁儿童平均体重42 kg,15~17岁儿童平均体重56 kg,成人平均体重60 kg;TA为非致癌源的平均暴露时间(ED×EF,即76.1 a×365 d/a)。

表1 单因子污染指数(P<sub>i</sub>)和内梅罗综合污染指数(P<sub>综合</sub>)评价标准

Table 1 Evaluation standard of single factor pollution index and Nemeru comprehensive pollution index

P <sub>i</sub>	P <sub>综合</sub>	污染等级评价 Pollution grade evaluation	生物质量标准 Biological quality standard	可食用性 Edible
P <sub>i</sub> <0.2	P <sub>综合</sub> <0.2	正常背景	符合	可以
0.2≤P <sub>i</sub> ≤0.6	0.2≤P <sub>综合</sub> ≤0.6	轻度污染		
0.6<P <sub>i</sub> ≤1.0	0.6<P <sub>综合</sub> ≤1.0	污染水平		
P <sub>i</sub> >1.0	>1.0	重度污染	超标	不可以

1.4.5 暴露剂量-反应外推模型评价。采用USEPA暴露剂量-反应外推模型,把重金属摄入风险分为化学致癌物风险模型和非致癌物风险模型,对致癌风险重金属镉进行致癌风险评价,对非致癌风险重金属铅进行非致癌风险评价,最后累计2种重金属的总健康风险<sup>[27]</sup>。用R<sub>c</sub><sup>e</sup>表示化学致癌风险,经过食物摄入途径导致的平均个人年致癌风险;用R<sub>ig</sub><sup>n</sup>表示非致癌物风险,表示通过食物摄入途径导致的平均个人非致癌风险,计算公式如下:

$$D_{ig} = Q_i C_{ig} / BW \quad (4)$$

$$R_{ig}^e = [1 - \exp(-D_{ig} \times q_{ig})] / 76.1 \quad (5)$$

$$R_{ig}^n = (D_{ig} \times 10^{-6}) / \text{PAD}_{ig} \times 76.1 \quad (6)$$

假设各重金属对人体的健康危害作用是累加关系,且不存在协同或拮抗关系,则贻贝的总健康风险(R<sub>总</sub>),计算公式如下:

$$R_{总} = R_c + R_n \quad (7)$$

式中,D<sub>ig</sub>为暴露剂量,mg/(kg·d),是污染物经膳食摄入的单位质量日均暴露剂量;Q<sub>i</sub>为日消费量,kg/d,参照中国居民膳食结构的调查<sup>[20-22]</sup>,取4~6岁儿童Q<sub>i</sub>为0.008 kg/d,7~10岁儿童Q<sub>i</sub>为0.022 kg/d,11~14岁青少年Q<sub>i</sub>为0.023 kg/d,15~17岁Q<sub>i</sub>为0.025 kg/d,成人0.030 kg/d;C<sub>ig</sub>为贻贝中的实际检测到的重金属含量,mg/kg;q<sub>ig</sub>为致癌物轻度系数,mg/(kg·d),镉取6.1 mg/(kg·d)<sup>[27-28]</sup>;76.1为人类平均寿命<sup>[19]</sup>;PAD<sub>ig</sub>为非致癌污染物食入途径调整剂量,mg/(kg·d),PAD<sub>ig</sub><sup>n</sup>=R<sub>i</sub>D<sub>ig</sub>/安全因子,安全因子取10<sup>[27,29]</sup>;R<sub>i</sub>D<sub>ig</sub>为非致癌物参考剂量,取铅的R<sub>i</sub>D为0.0036 mg/(kg·d)<sup>[21]</sup>。

1.5 未检出数据的处理 考虑未检出数据的不确定性,按WHO食品污染物含量低水平数据进行处理。污染物含量低于最低检出限(LOD)的情况下,样品未检出率大于60%的按照LOD赋值计算;样品检出率小于60%的按照LOD/2赋值计算<sup>[30]</sup>。

## 2 结果与分析

2.1 贻贝样品中铅、镉含量 2016—2018年对嵊泗养殖区

的贻贝样品进行检测,结果见表2。共检测贻贝样品120个,所测样品中铅的检出范围在≤0.005~0.510 mg/kg,最高值为2016年绿化岛检出的贻贝样品,略低于王林等<sup>[31]</sup>检出的山东贻贝中铅含量(0.18~0.77 mg/kg)、陈云英<sup>[32]</sup>检出的2014—2018年福建东部贻贝中铅含量(ND~0.73 mg/kg)、夏涛等<sup>[33]</sup>研究的广州市双壳类铅含量(0.002~0.963 mg/kg);重金属镉的检出范围在0.11~1.90 mg/kg,高于陈云英<sup>[32]</sup>检出的2014—2018年福建东部贻贝中镉含量(ND~1.05 mg/kg),何依娜等<sup>[34]</sup>2015年检出的舟山养殖场贝类中镉含量(0.027~1.300 mg/kg),最低值为2018年嵊山岛检出的贻贝样品,最高值为2017年枸杞岛检出的贻贝样品,需要注意的是部分贻贝样品的镉含量接近限量值(去内脏2.0 mg/kg)。相对来说,贻贝的铅污染较轻,镉污染较严重,这与隋茜茜等<sup>[35]</sup>的研究结论一致。2项重金属参数的超标率均为0,符合国家标准GB 2762—2017的限量要求。

虽然贻贝样品的铅、镉含量低于国际限量标准,但检出率较高,其中重金属铅的平均检出率为94.4%,仅2017、2018年部分区域样品中未检测出重金属铅。而重金属镉的检出率为100%。检测样品的平均值大多大于中位值,表明在贻贝样品中检出重金属含量偏大数较多。对比不同区域养殖场的样品,嵊泗绿华岛的样品中铅平均含量高于嵊山岛、枸杞岛、壁下岛,而镉平均含量低于其他3岛。对比2016—2018年的检测差异来看,嵊泗区域贻贝样品中的铅含量2017年最低,镉含量2018年最低(图2,3)。

2.2 贻贝样品中铅、镉污染指数评价 由表3可知,2016—2018年嵊泗海域养殖区贻贝样品中铅的P<sub>i</sub>值均小于0.2,为正常背景水平;贻贝样品中镉的P<sub>i</sub>值大部分大于0.2,属于轻度污染。其中检出情况最优的为绿华岛,其2017、2018年间检出镉的平均P<sub>i</sub>指数小于0.2,属于正常背景。贻贝样品重金属的P<sub>综合</sub>小于1.0,提示整体污染处于安全水平,表明嵊泗区域贻贝中铅、镉总体污染程度较轻。

**2.3 健康风险评估** 将 2016—2018 年被调查的贻贝样品按不同年龄进行健康风险评估,结果见表 4。由表 4 可知,无论

何种年龄,贻贝样品经摄食途径所产生的 THQ 值均小于安全基准值 1.0,表明暴露人群无明显的健康风险。

表 2 2016—2018 年嵊泗养殖区贻贝样品中重金属含量检测结果

Table 2 Determination of heavy metals in mussel samples from Shengsi culture area during 2016–2018

重金属 Heavy metal	采集地点 Collection location	站位数 Number of stations			样品数 Number of samples//个			含量 Content//mg/kg		
		2016 年	2017 年	2018 年	2016 年	2017 年	2018 年	2016 年	2017 年	2018 年
铅 Lead	绿华岛	6	6	6	12	12	12	0.095~0.510	0.010~0.200	≤0.005~0.320
	壁下岛	6	6	6	12	12	12	0.076~0.240	0.005~0.130	0.055~0.170
	嵊山岛	6	6	6	12	12	12	0.092~0.150	≤0.005~0.100	0.030~0.210
	枸杞岛	12	12	12	24	24	24	0.055~0.250	≤0.005~0.130	≤0.005~0.440
镉 Cadmium	绿华岛	6	6	6	12	12	12	0.47~0.89	0.30~0.54	0.13~0.31
	壁下岛	6	6	6	12	12	12	0.45~0.83	0.30~0.59	0.27~0.82
	嵊山岛	6	6	6	12	12	12	0.49~1.00	0.45~0.82	0.11~1.50
	枸杞岛	12	12	12	24	24	24	0.46~1.10	0.40~1.90	0.13~0.80

重金属 Heavy metal	采集地点 Collection location	算术平均值 Arithmetic mean//mg/kg			中位值 Median value//mg/kg			国标限量 National standard limit mg/kg	超标率 Exceedance rate//%			检出率 Detection rate//%		
		2016 年	2017 年	2018 年	2016 年	2017 年	2018 年		2016 年	2017 年	2018 年	2016 年	2017 年	2018 年
铅 Lead	绿华岛	0.21	0.08	0.16	0.21	0.07	0.12		0	0	0	100	100	92
	壁下岛	0.15	0.05	0.09	0.15	0.06	0.08	1.5	0	0	0	100	100	100
	嵊山岛	0.12	0.07	0.09	0.12	0.06	0.08		0	0	0	100	75	100
	枸杞岛	0.15	0.06	0.10	0.14	0.04	0.06		0	0	0	100	83	83
镉 Cadmium	绿华岛	0.71	0.35	0.24	0.75	0.33	0.25		0	0	0	100	100	100
	壁下岛	0.61	0.44	0.44	0.60	0.44	0.44	2.0(去内脏)	0	0	0	100	100	100
	嵊山岛	0.76	0.61	0.65	0.80	0.56	0.52		0	0	0	100	100	100
	枸杞岛	0.78	0.69	0.32	0.76	0.59	0.26		0	0	0	100	100	100

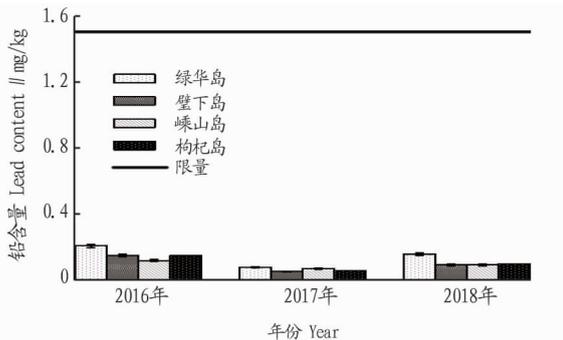


图 2 2016—2018 年嵊泗不同养殖区贻贝样品中平均铅含量

Fig.2 Average lead content in mussel samples from different culture areas of Shengsi from 2016 to 2018

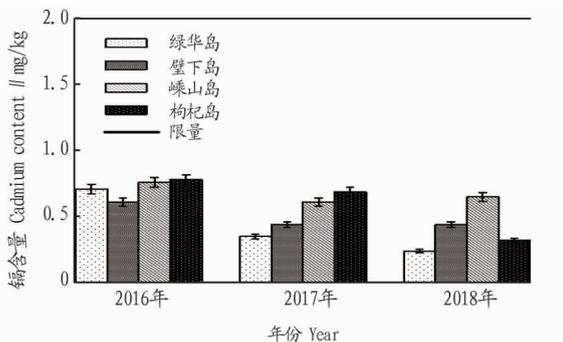


图 3 2016—2018 年嵊泗不同养殖区贻贝样品中平均镉含量

Fig.3 Average cadmium content in mussel samples from different culture areas in Shengsi from 2016 to 2018

该研究同时采用了暴露剂量-反应外推模型评估了嵊泗 4 个主要养殖区贻贝样品的致癌和非致癌个人年风险值,参照国际辐射防护委员会 (ICRP) 和 USEPA 推荐值。ICRP 推荐的最大可接受风险值是  $5.0 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$ 。USEPA 推荐当  $< 1.0 \times 10^{-6} \text{ a}^{-1}$  时,表明污染物对人群的健康风险处于可接受风险水平;当处于  $1.0 \times 10^{-6} \sim 1.0 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$  时,表明污染物对人群存在潜在的健康风险;当  $> 1.0 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$  时,表明存在非常大的健康风险<sup>[27]</sup>。由表 4 可知,嵊泗 4 个养殖区贻贝样品的综合风险处于  $1.61 \times 10^{-5} \sim 4.67 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$ ,存在潜在风险。7~10 岁儿童的综合风险已接近 ICRP 推荐的最大可接受风险值 ( $5.0 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$ ),明显高于其他年龄段人群,需引起关注。这主要是由于 7~10 岁儿童镉元素的风险较高导致。其次需引起注意的还有 11~14 岁儿童。建议该年龄段儿童避免食用受污染的贻贝,以避免风险。

**2.4 风险评估的不确定因素** 该研究仅检测了铅、镉 2 项重金属,实际摄入贻贝时还会有汞、砷等重金属带来的风险,所计算的综合风险可能偏低;没有考虑重金属在人体的生物有效性,可能会存在结构的不确定性;不同地区人群的膳食摄入结构存在一定差异,所参照的中国环境保护部《中国人群暴露参数手册》的食物摄入量不一定符合不同地区人群的实际情况,可能对风险评估产生一定偏差。综上,嵊泗养殖区贻贝健康风险评估还需进一步深入研究和完善。

表3 嵊泗养殖区贻贝样品中铅、镉污染指数

Table 3 Pollution index of lead and cadmium in mussel samples from Shengsi culture area

采样年份 Sampling year	采集地点 Collection location	铅污染指数 Lead pollution index $P_i$	铅污染等级 Lead pollution level	镉污染指数 Cadmium pollution index $P_i$	镉污染等级 Cadmium pollution level	$P_{imax}$	$P_{avg}$	$P_{综合}$	综合污染等级 Comprehensive pollution level
2016	绿华岛	0.14	正常背景	0.36	轻度污染	0.36	0.25	0.31	轻度污染
	壁下岛	0.10	正常背景	0.31	轻度污染	0.31	0.20	0.26	轻度污染
	嵊山岛	0.08	正常背景	0.38	轻度污染	0.38	0.23	0.31	轻度污染
	枸杞岛	0.10	正常背景	0.39	轻度污染	0.39	0.25	0.33	轻度污染
2017	绿华岛	0.05	正常背景	0.18	正常背景	0.18	0.11	0.15	正常背景
	壁下岛	0.04	正常背景	0.22	轻度污染	0.22	0.13	0.18	正常背景
	嵊山岛	0.05	正常背景	0.31	轻度污染	0.31	0.18	0.25	轻度污染
	枸杞岛	0.04	正常背景	0.35	轻度污染	0.35	0.19	0.28	轻度污染
2018	绿华岛	0.11	正常背景	0.12	正常背景	0.12	0.12	0.12	正常背景
	壁下岛	0.06	正常背景	0.22	轻度污染	0.22	0.14	0.18	正常背景
	嵊山岛	0.06	正常背景	0.33	轻度污染	0.33	0.19	0.27	轻度污染
	枸杞岛	0.07	正常背景	0.16	正常背景	0.16	0.11	0.14	正常背景

表4 嵊泗养殖区贻贝样品铅、镉健康风险结果

Table 4 Health risk analysis of lead and cadmium in mussel samples from Shengsi culture area

年龄 Age	采集地点 Collection location	THQ		致癌风险 Cancer risk Cb//a <sup>-1</sup>	非致癌风险 Pb//a <sup>-1</sup>	$R_{总}$ //a <sup>-1</sup>
		镉 Cadmium	铅 Lead			
4~6岁	绿华岛	0.17	0.017	1.39E-05	2.19E-06	1.61E-05
	壁下岛	0.20	0.011	1.59E-05	1.45E-06	1.74E-05
	嵊山岛	0.27	0.011	2.16E-05	1.39E-06	2.30E-05
	枸杞岛	0.24	0.012	1.91E-05	1.51E-06	2.06E-05
7~10岁	绿华岛	0.35	0.033	2.83E-05	4.45E-06	3.27E-05
	壁下岛	0.40	0.022	3.24E-05	2.95E-06	3.54E-05
	嵊山岛	0.55	0.022	4.39E-05	2.83E-06	4.67E-05
	枸杞岛	0.49	0.023	3.89E-05	3.08E-06	4.20E-05
11~14岁	绿华岛	0.24	0.023	1.90E-05	2.99E-06	2.20E-05
	壁下岛	0.27	0.015	2.18E-05	1.99E-06	2.38E-05
	嵊山岛	0.37	0.014	2.95E-05	1.90E-06	3.14E-05
	枸杞岛	0.33	0.016	2.62E-05	2.07E-06	2.82E-05
15~17岁	绿华岛	0.19	0.019	1.55E-05	2.44E-06	1.79E-05
	壁下岛	0.22	0.012	1.78E-05	1.62E-06	1.94E-05
	嵊山岛	0.30	0.012	2.41E-05	1.55E-06	2.56E-05
	枸杞岛	0.27	0.013	2.13E-05	1.69E-06	2.30E-05
≥18岁	绿华岛	0.20	0.019	1.74E-05	2.55E-06	1.99E-05
	壁下岛	0.23	0.013	1.99E-05	1.69E-06	2.16E-05
	嵊山岛	0.32	0.012	2.70E-05	1.62E-06	2.86E-05
	枸杞岛	0.28	0.013	2.39E-05	1.77E-06	2.57E-05

### 3 结论

综合样品含量测定结果,对照 GB 2762—2017 嵊泗养殖区贻贝的铅检出率为 94.4%,镉检出率为 100%。单因子污染指数评价结果表明,所有样品的铅、镉单项污染指数的  $P_i$  值远低于 1.0,表明其生物质量符合国家标准,达到安全食用基本要求。健康风险评估结果显示,所调查的嵊泗主要养殖区贻贝经摄食途径所产生的 THQ 值均小于安全基准值 1.0,表明暴露人群无明显的健康风险。暴露剂量-反应外推模型的评价结果在  $1.61 \times 10^{-5} \sim 4.67 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$ ,属于美国环保署 (USEPA) 推荐的存在潜在风险范围。但 7~10 岁镉元素的风险值接近国际辐射防护委员会 (ICRP) 推荐的最大可接受风险值 ( $5.0 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$ ),希望有关部门进一步完善食品安全监

测机制,搭建食品安全相关数据监测共享平台,及时通报监测结果,做好预警防范工作,避免因食品摄入导致的健康风险。

### 参考文献

- [1] 柴小平,何松琴,蔡惠文,等.浙江嵊泗贻贝养殖海域环境及贝体重金属含量分布特征与潜在生态风险分析[J].浙江海洋学院学报(自然科学版),2014,33(4):337-341.
- [2] 蒋红,胡益峰,徐灵燕,等.舟山近岸海域表层沉积物中 5 种重金属元素的污染及潜在生态风险评价[J].海洋学研究,2011,29(1):56-61.
- [3] 陈瑜,金雷,鲍静姣.嵊泗县贝类生产海域贻贝和环境监测的研究[J].广州化工,2015,43(7):124-125,167.
- [4] 陈雪昌,金雷,何依娜,等.浙江省乐清湾北部贝类产品质量安全监测[J].安徽农业科学,2016,44(35):127-128,142.
- [5] 翟毓秀,郭荫荫,江艳华,等.贝类产品质量安全风险分析[J].中国渔业质量与标准,2020,10(4):1-25.

- [6] 李鹏. 福建部分沿海地区贝类重金属污染及镉形态的分析研究[D]. 厦门:集美大学, 2020.
- [7] YULIANTO B, RADJASA O K, SOEGIANTO A. Heavy metals (Cd, Pb, Cu, Zn) in green mussel (*Perna viridis*) and health risk analysis on residents of Semarang Coastal waters, central Java, Indonesia[J]. *Asian journal of water, environment and pollution*, 2020, 17(3): 71-76.
- [8] 徐铁肖, 张腾, 赵鹏, 等. 北部湾贝类重金属污染特征及健康风险评估[J]. *环境科学与技术*, 2019, 42(S2): 38-44.
- [9] LI D B, PAN B Z, CHEN L, et al. Bioaccumulation and human health risk assessment of trace metals in the freshwater mussel *Cristaria plicata* in Dongting Lake, China[J]. *Journal of environmental sciences*, 2021, 104: 335-350.
- [10] 国家海洋环境监测中心. 海洋监测规范 第 6 部分 生物体分析: GB 17378.6—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [11] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中镉的测定: GB 5009.15—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [12] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中铅的测定: GB 5009.12—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [13] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中镉的测定: GB 5009.15—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [14] 黄飞飞, 王瑛, 张宁. 苏州市地产大米重金属污染状况及人群膳食暴露风险评估[J]. *食品安全质量检测学报*, 2020, 11(23): 9039-9045.
- [15] 雷用东, 张正红, 朱玉龙, 等. 新疆葡萄干中 4 种重金属含量分析与膳食暴露评估[J]. *农产品质量与安全*, 2020(6): 49-53, 82.
- [16] 郭廷敏, 谢旭光, 翟君, 等. 2015-2018 年聊城市市售淡水鱼中 Cu 等 6 种元素污染现状及健康风险评估[J]. *预防医学论坛*, 2020, 26(11): 824-827.
- [17] 刘立婷, 陈希超, 于云江, 等. 广州市市售水产品中重金属健康风险评估及消费建议[J]. *环境与健康杂志*, 2019, 36(8): 731-735.
- [18] 罗钦, 钟茂生, 朱品玲, 等. 3 种养殖淡水鱼兽药残留及其食用健康风险评估[J]. *食品安全质量检测学报*, 2020, 11(22): 8253-8259.
- [19] 《2019 年我国卫生健康事业发展统计公报》发布[J]. *职业卫生与应急救援*, 2020, 38(3): 214.
- [20] 王增焕, 王许诺. 华南沿海贝类产品重金属含量及其膳食暴露评估[J]. *中国渔业质量与标准*, 2014, 4(1): 14-20.
- [21] 崔佳佳, 曹佩, 孙嘉逸, 等. 环渤海地区常见贝类消费状况调查[J]. *中国食物与营养*, 2021, 27(1): 40-44.
- [22] 翟凤英, 何宇纳, 马冠生, 等. 中国城乡居民食物消费现状及变化趋势[J]. *中华流行病学杂志*, 2005, 26(7): 485-488.
- [23] 顾捷, 黄丽英, 梅光明, 等. 乐清湾北部及峡湾区区域养殖贝类肌肉中镉含量调查与健康风险评估[J]. *食品安全质量检测学报*, 2020, 11(22): 8276-8283.
- [24] 潘柳波, 王舟, 杨林清. 深圳市售贝类铅的污染状况与健康风险评估[J]. *中国公共卫生管理*, 2020, 36(1): 63-66.
- [25] 李子一, 张雅蓉, 王金子, 等. 中国 3-12 岁儿童膳食种类及摄入量调查[J]. *中国食物与营养*, 2014, 20(9): 78-82.
- [26] 霍苗苗. 沿海地区居民摄入水产品中重金属安全风险评估[D]. 天津: 天津科技大学, 2016.
- [27] 杨洋. 2013—2016 年六安市主要膳食食品中重金属铅、镉、汞、砷的暴露量及风险评估[D]. 合肥: 安徽医科大学, 2019.
- [28] 成娟, 何智宏, 郭明玲, 等. 甘肃省核桃果仁铅、镉含量及膳食暴露评估[J]. *农产品质量与安全*, 2019(5): 58-62.
- [29] CAO B Z, LV W, JIN S, et al. Degeneration of peripheral nervous system in rats experimentally induced by methylmercury intoxication[J]. *Neurological sciences*, 2013, 34(5): 663-669.
- [30] 孙晓薇, 于磊, 金钰, 等. 河南大枣铅镉污染及膳食暴露风险评估[J]. *粮食与饲料工业*, 2019(8): 26-31.
- [31] 王林, 孔正桥, 陈芳芳, 等. 2018 年山东省贝类中金属元素的污染情况及健康风险评估[J]. *预防医学论坛*, 2020, 26(7): 483-486.
- [32] 陈云英. 福建中东部海水养殖贝类质量现状与评价[J]. *渔业研究*, 2020, 42(2): 146-152.
- [33] 夏涛, 李晓晶, 李汪, 等. 广州市南沙区居民部分食品中铅、镉含量调查及初步膳食暴露评估[J]. *食品安全导刊*, 2020(27): 118-120.
- [34] 何依娜, 金雷, 梅光明, 等. 舟山市海水养殖贝类质量安全现状评价[J]. *安徽农业科学*, 2016, 44(27): 122-123, 203.
- [35] 隋茜茜, 余金橙, 朱金艳, 等. 秦皇岛海域食用贝类重金属污染情况分析[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(10): 196-202.

(上接第 163 页)

- [6] 岳冰冰, 李鑫, 张会慧, 等. 连作对黑龙江烤烟土壤微生物功能多样性的影响[J]. *土壤*, 2013, 45(1): 116-119.
- [7] 唐莉娜, 陈顺辉. 不同种类有机肥与化肥配施对烤烟生长和品质的影响[J]. *中国农学通报*, 2008, 24(11): 258-262.
- [8] 王锋, 晋艳, 杨焕文, 等. 有机肥对烤烟部分生理指标的影响[J]. *中国农学通报*, 2009, 25(6): 131-135.
- [9] 彭艳, 周冀衡, 杨虹琦, 等. 烟草专用肥与不同有机肥配施对烤烟生长及主要化学成分的影响[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2008, 34(2): 159-163.
- [10] 彭华伟, 刘国顺, 吴学巧, 等. 生物有机肥对烤烟氮磷钾积累、吸收和含量的影响[J]. *中国烟草科学*, 2008, 29(1): 25-29.
- [11] 介晓磊, 王镇, 化党领, 等. 生物有机肥对土壤氮磷钾及烟叶品质成分的影响[J]. *中国农学通报*, 2010, 26(1): 109-114.
- [12] 王忠平, 罗应坤, 张晓平, 等. 不同有机-无机复合肥配施对烤烟产质量的影响[J]. *云南农业大学学报(自然科学)*, 2011, 26(S2): 70-73.
- [13] 徐健钦, 徐智, 宋建群, 等. 不同有机肥对烤烟生长发育、产质量及青枯病的影响[J]. *云南农业大学学报(自然科学)*, 2013, 28(1): 118-123.
- [14] 易克, 孙康, 杨文蛟, 等. 不同商品有机肥对烤烟生长发育及产质量的影响[J]. *安徽农业科学*, 2018, 46(36): 137-139.
- [15] 王林虹, 刘宝宜, 姜亚历, 等. 不同有机肥对云烟 99 生长发育及产质量的影响[J]. *安徽农业科学*, 2016, 44(29): 17-19.
- [16] 施河丽, 谭军, 秦兴成, 等. 不同生物有机肥对烤烟生长发育及产质量的影响[J]. *中国烟草科学*, 2014, 35(2): 74-78.
- [17] 国家烟草专卖局. 烟草农艺性状调查测量方法: YC/T 142—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010: 102.
- [18] 中国烟草总公司青州烟草研究所. 烟草病虫害分级及调查方法: GB/T 23222—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008: 1-6.
- [19] 陈江华, 刘建利, 龙怀玉. 中国烟叶矿质营养及主要化学成分含量特征研究[J]. *中国烟草学报*, 2004, 10(5): 20-27.
- [20] 王彦亭, 谢剑平, 李志宏. 中国烟草种植区划[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [21] 《烟叶技术》编写组. 烟叶技术[M]. 北京: 北京出版集团公司, 北京出版社, 2012.
- [22] 马盼丽, 潘文杰, 田晓琴, 等. 有机氮源对烤烟生理指标及经济性状的影响[J]. *贵州农业科学*, 2010, 38(9): 61-64.
- [23] 王镇. 生物有机肥对植烟土壤质量和烟叶品质影响的研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2010.
- [24] 叶沁鑫. 生物有机肥与无机肥配施对烤烟氮素供应及烤烟生长、品质的影响[D]. 雅安: 四川农业大学, 2019.
- [25] 杨云高, 王树林, 刘国, 等. 生物有机肥对烤烟产质量及土壤改良的影响[J]. *中国烟草科学*, 2012, 33(4): 70-74.
- [26] 杨玉爱, 何念祖, 叶正钱. 有机肥料对土壤锌、锰有效性的影响[J]. *土壤学报*, 1990, 27(2): 195-201.
- [27] 韩锦峰, 刘国顺, 王瑞新, 等. 微量元素与烟草花叶病、烟草产质的研究初报[J]. *中国烟草*, 1983, 4(2): 7-10.
- [28] 何念祖, 孟赐福. 植物营养原理[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1987: 379-382.
- [29] 刘汉军, 刘蕾, 刘秩豪, 等. 不同生物有机肥对烤烟产质量及土壤养分的影响[J]. *生态科学*, 2018, 37(6): 91-96.
- [30] 周舰, 卢朝军. 生物有机肥在烤烟种植中的应用效果研究[J]. *现代农业科技*, 2018(22): 18, 22.