

南海游泳动物重金属含量特征及风险评价

刘 洋, 林 彩, 陈金民, 林 辉, 林龙山, 李 渊

(自然资源部第三海洋研究所, 福建 厦门 361005)

摘 要:以 2019 年夏季采自南海的 11 种游泳动物为研究对象, 测定分析其体内重金属 (Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、As 和 Hg) 的含量, 并评估了上述重金属的污染状况和健康风险。结果显示, 7 种重金属在生物体中的含量, 均符合国内相关污染评价标准。单因子污染指数均值依次为 Zn>Cr>As>Hg>Pb>Cd>Cu, 虽然个别物种的部分元素达到轻度或中度污染水平, 但生物体内 7 种重金属的综合污染评价均属于无污染状态。健康风险评估结果表明, 其膳食暴露风险、非致癌与致癌风险都较低。研究结果表明, 南海夏季游泳动物体内重金属含量较低, 几乎不存在人类食用健康风险。

关键词:重金属; 污染状况; 健康风险; 游泳动物; 南海

中图分类号: Q178.53; X826

文献标识码: A

文章编号: 1007-6336(2021)03-0401-06

Distribution and risk assessment of heavy metal in nekton of South China Sea

LIU Yang, LIN Cai, CHEN Jin-min, LIN Hui, LIN Long-shan, LI Yuan

(Third Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Xiamen 361005, China)

Abstract: To evaluate the pollution statue and health risk of heavy metal in nekton of South China Sea, 11 species were collected from June to July 2019. The concentration of copper (Cu), zinc (Zn), lead (Pb), cadmium (Cd), chromium (Cr), arsenic (As) and mercury (Hg) were measured. The results showed that the contents of 7 heavy metals met the applicable national standards. Using single factor index, a descending order of heavy metal levels showed as Zn>Cr>As>Hg>Pb>Cd>Cu, and some species were moderately polluted. Both the metal pollution index and Nemerow multi-factor index indicated all the organisms were in pollution-free states. Low risk of dietary exposure, little or none carcinogenic and noncarcinogenic risk indicated acceptable consumption of nekton in South China Sea.

Key words: heavy metal; pollution status; risk assessment; nekton; South China Sea

重金属作为一种可持续污染物, 大多具有来源广、毒性大、潜伏期长及生物放大的特征。重金属通过陆源输入、海源自生及大气沉降等过程进入海洋, 在水体、沉积物以及生物体间相互迁移、转化, 是评价海洋环境质量的重要参数。海洋生物体内的重金属经食物链的富集、转化进入人体, 能造成摄食者的潜在健康风险。

海洋游泳动物处于较高的营养级, 且具有明

确的生长周期和栖息环境。游泳动物的污染水平是监测环境质量的良好指标^[1], 其食用风险也是人类膳食健康评价的有力依据^[2]。南海是我国最大的领海, 也是我国渔业资源的重要来源地, 以往研究多集中于北部近岸海区^[3-4]。本文选取南海海域游泳动物, 分析其体内重金属状况, 为海洋环境污染评估和海产食品安全研究提供基础数据。

收稿日期: 2020-04-30, 修订日期: 2020-10-29

基金项目: 全球变化与海气相互作用专项—南海中南部夏季游泳动物调查项目 (GASI-02-SCS-YSMsum); 全球变化与海气相互作用专项—南海深层海水资源特性评估及典型开发应用项目 (GASI-03-02-02-05)

作者简介: 刘 洋 (1985—), 女, 内蒙古赤峰人, 硕士, 主要研究方向为海洋重金属分析与评价, E-mail: jczx_liuyang@tio.org.cn

通讯作者: 林 彩, E-mail: lincai@tio.org.cn

1 材料与方法

1.1 试验材料

样品于 2019 年 6 月—7 月采自南海海域,包

括 10 种鱼类和 1 种软体动物共 11 种游泳动物,具体采样信息如表 1 所示。采集到的样品冷冻保存运回陆地实验室,取可食用部分测定重金属含量。

表 1 生物样品基本信息

Tab.1 Basic information of samples

生物种类	作业方式	经度/E	纬度/N	体长/cm	习性
短尾大眼鲷 <i>Priacanthus macracanthus</i>	底拖网	110°00'	5°30'	12 ~ 15.5	暖水性中小型近底层鱼类,主要栖息于水深 80 ~ 120 m 海域
多齿蛇鲻 <i>Saurida tumbil</i>	底拖网	109°30'	18°00'	21 ~ 23	暖水性中下层鱼类,栖息于砂泥底质、近海沿岸
银方头鱼 <i>Branchiostegus argentatus</i>	底拖网	109°30'	18°00'	20 ~ 22	暖温性底层鱼类,栖息于砂泥底质海区
大头银姑鱼 <i>Pennahia argentata</i>	底拖网	109°00'	18°00'	20 ~ 23	栖息于水深 100 m 内的砂泥底海域
竹荚鱼 <i>Trachurus japonicus</i>	底拖网	109°00'	18°00'	11.5 ~ 14	暖水性鱼类,栖息于中层
黄鳍金枪鱼 <i>Thunnus albacares</i>	灯光罩网	110°30'	16°00'	20	大洋暖水性上层鱼,肉食性,幼体具趋光性,成体为大型摄食性
双鳍舵鲹 <i>Auxis rochei rochei</i>	灯光罩网	110°30'	15°00'	26	沿岸表层性洄游性鱼类,肉食性
长体圆鲹 <i>Decapterus macrosoma</i>	灯光罩网	113°00'	13°00'	24	小型趋光性鱼类
脂眼凹肩鲹 <i>Selar crumenophthalmus</i>	灯光罩网	110°30'	11°00'	12 ~ 14.5	暖水性,洄游于水深 200 m 的中底层水域
鲹 <i>Katsuwonus pelamis</i>	灯光罩网	113°00'	9°30'	20	小型趋光性,大洋中上层洄游性鱼类,肉食性
鸚乌贼 <i>Symplectoteuthis oualaniensis</i>	灯光罩网	110°30'	8°30'	25 ~ 29	小型趋光性,大洋暖水性生物,幼体生活在表层 ~ 20 m,成体有明显的垂直活动

1.2 样品预处理和分析方法

样品的前处理方法参照《海洋监测规范 第 6 部分:生物体分析》^[5],分析方法按《海洋监测技术规范 第 3 部分:生物体》^[6]的要求执行。Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、As 采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定,Hg 由原子荧光光谱法(AFS)测定。同类生物样品选取大小相似的个体进行测定,重金属含量以湿重计。

1.3 质量控制

分析过程采用实验室平行样分析和标准样品测定进行质量控制,使用的标准物质分别为扇贝生物成分分析标准物质(GBW10024)和大虾生物成分分析标准物质(GBW10050)。平行样相对偏差为 0.20% ~ 6.62%,平均为 2.16%,符合《海洋监测规范 第 6 部分:生物体分析》^[5]对数据质量的要求,标准物质测定结果符合标准值。

1.4 评价方法

1.4.1 污染状况评价

单因子污染指数法(single factor index, SFI)

是利用实测数据与标准值对比进行污染评价^[7],计算公式如式(1):

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

式中: P_i 为污染物 i 的污染指数; C_i 为污染物 i 的实测值($\times 10^{-6}$); S_i 为污染物 i 的评价标准值($\times 10^{-6}$)。一般认为 $P_i < 0.2$ 时,属正常背景值水平; $0.2 \leq P_i < 0.6$ 时,属轻污染水平; $0.6 \leq P_i < 1.0$ 时,属中度污染水平;当 $P_i \geq 1.0$ 时,属重污染水平^[8]。

内梅罗综合污染指数法($N. L. Nemerow$)是目前国内外进行综合污染指数计算最常用的方法之一^[8],计算公式如式(2):

$$P_{in} = \sqrt{\frac{(\max P_i)^2 + (\text{ave} P_i)^2}{2}} \tag{2}$$

式中: P_{in} 为内梅罗综合污染指数; $\max P_i$ 为各评价因子计算结果中,单因子污染指数的最大值; $\text{ave} P_i$ 为各单因子污染指数的平均值。若 $P_{in} \leq 1$,污染程度为无污染; $1 < P_{in} \leq 2$,为轻度污染; $2 < P_{in} \leq 3$,为中度污染; $P_{in} > 3$,为重度污染。

金属污染指数法(metal pollution index, MPI)也常被用于海洋生物中重金属含量的综合评价^[9],计算公式如式(3):

$$MPI = \sqrt[n]{C_1 \times C_2 \times C_3 \times \cdots \times C_n} \quad (3)$$

式中: C_n 为样品中第 n 种重金属的浓度($\times 10^{-6}$); n 为评价元素个数。

1.4.2 健康风险评价

膳食暴露风险评估以人体每日从海产品中摄入重金属的量(daily intake, DI)为评价指标,评估人体食用受重金属污染的海产品的摄入风险^[10],计算公式如式(4):

$$DI_i = \frac{FIR \times C_i}{BW} \quad (4)$$

式中: DI_i 为重金属 i 单位体重日均摄入量($\mu\text{g}/\text{kg}/\text{d}$); FIR 为食品摄入量(g/d),根据联合国粮农组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)统计数据,软体类为每人 $9.8 \text{ g}/\text{d}$,鱼类为每人 $36 \text{ g}/\text{d}$; C_i 为海产品中重金属 i 的浓度($\times 10^{-6}$); BW 为平均体重(kg),本文采用世界卫生组织(World Health Organization, WHO)推荐的男女平均值 60 kg 。

本文以目标危害系数法(target hazard quotient, THQ)对非致癌风险进行评价^[11]。该方法将重金属人体摄入剂量与标准限值的比值作为风险评价标准,可综合评价单一或多种重金属的健康风险,计算公式如式(5)。非致癌危害指数为各污染物目标风险系数之和,即总目标危险系数(target hazard quotients, $THQs$),计算公式如式(6)。当 $THQ > 1$,说明暴露人群存在潜在非致癌健康风险, THQ 值越大表明有害重金属对人体健康的非致癌风险越严重,同理适用于 $THQs$ ^[12]。

$$THQ = \frac{EF \times ED \times FIR \times C_i}{RfD_i \times BW \times AT} \quad (5)$$

$$THQs = \sum_{i=1}^n THQ_i \quad (6)$$

式中: EF 为膳食暴露频率(d/a),一般为 356; ED 为膳食暴露时间(a),多取 70; AT 为目标人群平均寿命(d),即 $365 \times 70 = 25550$; RfD_i 为重金属 i 的经口参考剂量($\text{mg}/\text{kg}/\text{d}$)。

重金属所导致的致癌风险计算公式如式(7)^[13]:

$$R_i = \frac{1 - \exp(-DI_i \times OSF_i)}{70} \quad (7)$$

式中: R_i 为重金属 i 经食入途径产生的平均个人致癌年风险; OSF_i 为重金属 i 经食入途径致癌斜率因子($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$); 70 为人类平均寿命。若 $R_i \leq 1 \times 10^{-6}$,表示不会对人体健康造成致癌风险; $1 \times 10^{-6} < R_i \leq 1 \times 10^{-4}$,表明风险程度在人体可接受范围内; $R_i > 1 \times 10^{-4}$,表明可能存在致癌风险^[14]。

2 结果与讨论

2.1 游泳动物体内重金属含量

南海 11 种生物体内 Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、As 和 Hg 的含量范围分别为 $0.111 \times 10^{-6} \sim 1.91 \times 10^{-6}$ (均值 0.830×10^{-6})、 $0.057 \times 10^{-6} \sim 0.774 \times 10^{-6}$ (均值 0.272×10^{-6})、 $3.03 \times 10^{-6} \sim 19.0 \times 10^{-6}$ (均值 8.11×10^{-6})、未检出 $\sim 0.299 \times 10^{-6}$ (均值 0.0574×10^{-6})、 $0.284 \times 10^{-6} \sim 0.442 \times 10^{-6}$ (均值 0.352×10^{-6})、 $0.325 \times 10^{-6} \sim 1.42 \times 10^{-6}$ (均值 0.722×10^{-6}) 和 $0.0035 \times 10^{-6} \sim 0.187 \times 10^{-6}$ (均值 0.0360×10^{-6}) (表 2)。重金属含量均值为 $\text{Zn} > \text{Cu} > \text{As} > \text{Cr} > \text{Pb} > \text{Cd} > \text{Hg}$, 与南海其他研究结果相比,各重金属含量均值无明显差异,表明游泳动物的重金属污染情况受海域影响较小^[3, 15-17]。

双鳍舵鲈体内 Zn、Cr、Hg 含量最高,鸢乌贼体内 Cu、Pb、Cd 含量最高,短尾大眼鲷体内 As 含量最高。大头银姑鱼体内 Zn、Cd、Cr 含量最低,Cu、Pb、As、Hg 的最小值分别出现在银方头鱼、黄鳍金枪鱼、多齿蛇鲭和脂眼凹肩鲷样品中。

底拖网采集的 5 种鱼类的 Cu 含量远低于灯光罩网采集的 5 种鱼类和鸢乌贼,Zn 含量也有相似趋势,但含量差异不如 Cu 明显。与之相反,灯光罩网采集的生物,除鸢乌贼外,Pb 含量略低于底拖网采集的生物。Cd 和 Hg 除个别生物含量较高,其余含量相差不大,Cr 和 As 含量分布没有明显趋势。同一海域同类生物,因生活习性、摄食行为、体内代谢以及栖息地环境的不同,对相同重金属的累积程度不同,与相关研究认为的生物体内的重金属含量主要取决于其生理特性和重金属的生物功能的结果相符^[18],不同种类生物呈现相似的重金属累积趋势,也部分佐证了生物体内重金属含量与其所处营养级并不相关的观点^[19]。

表 2 不同生物样体内各重金属元素含量及评价标准

Tab.2 Concentrations of 7 heavy metal elements in different marine organisms and reference standard contents in this study

生物种类	含量/ $\times 10^{-6}$						
	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	As	Hg
短尾大眼鲷	0.244	0.211	4.54	0.0143	0.304	1.42	0.012
多齿蛇鲭	0.161	0.353	4.10	0.0149	0.312	0.325	0.032
银方头鱼	0.111	0.323	3.44	未检出	0.288	0.716	0.065
大头银姑鱼	0.147	0.235	3.03	未检出	0.284	0.795	0.027
竹荚鱼	0.486	0.365	5.85	0.0151	0.314	1.13	0.0072
黄鳍金枪鱼	1.02	0.0571	6.01	0.0102	0.392	0.525	0.0079
双鳍舵鲈	1.77	0.126	19.0	0.193	0.442	0.454	0.187
长体圆鲹	0.773	0.103	10.2	0.0152	0.408	0.444	0.014
脂眼凹肩鲷	0.929	0.256	10.6	0.0387	0.396	0.679	0.0035
鲈	1.58	0.191	8.96	0.0257	0.412	0.487	0.012
鸢乌贼	1.91	0.774	13.5	0.299	0.327	0.966	0.028
南海北部鱼类 ^[3]	0.12	0.13	1.42	0.16	0.670		
南海北部头足类 ^[3]	0.19	0.10	1.65	0.09	0.390		
北部湾鱼类 ^[15]	1.18	0.32	12.7	0.05	0.17		
大亚湾鱼类 ^[16]		1.20		0.02		0.87	0.03
大亚湾软体动物 ^[17]	7.28	1.20	22.6	0.96	0.45		
鱼类标准	20 ^[7]	2 ^[7]	40 ^[7]	0.6 ^[7]	2 ^[20]	5 ^[20]	0.3 ^[7]
软体动物标准	100 ^[7]	10 ^[7]	250 ^[7]	5.5 ^[7]	2 ^[20]	5 ^[20]	0.3 ^[7]

注: *为此类生物体内重金属含量均值

2.2 污染状况评价

鉴于国家海洋生物质量标准的适用生物为双壳贝类, 本文综合考虑生物体的种类和评价要素, 参考《全国海岸带和海涂资源综合调查简明规程》^[7] 和《海洋经济生物质量风险评价指南》^[20], 对实验对象体内重金属污染状况进行评价, 采用的评价标准见表 2。值得注意的是, 在参考评价标准中, As 的评价标准为无机 As 含量小于 0.5×10^{-6} , 但本文所分析的 As 含量为生物体内总 As 的含量。海洋生物体内低毒性的有机 As 占比较大, 研究发现, 海洋贝类和鱼类体内无机 As 含量多占总 As 含量的 0.5% 以下, 仅少数品种占比能达到 1% ~ 5%^[21], 因此本文按无机 As 占总 As 含量的 10% 计算, 确保不会低估 As 的风险^[8, 12]。

南海 11 种游泳生物体内 7 种重金属含量均低于国家标准值, P_i 均值为 $Zn > Cr > As > Hg > Pb > Cd > Cu$ 。其中, 双鳍舵鲈的 Cu、Zn、Cd、Cr、Hg 的 P_i 最高, Pb 和 As 的 P_i 最高值分别出现在竹荚

鱼和短尾大眼鲷。双鳍舵鲈的 Zn、Cd、Cr, 长体圆鲹的 Zn、Cr, 脂眼凹肩鲷的 Zn, 鲈的 Zn、Cr, 短尾大眼鲷的 As, 银方头鱼的 Hg 和竹荚鱼的 As, 均达到轻度污染水平; 双鳍舵鲈的 Hg 达到中度污染水平(图 1a)。

比较各生物的综合污染状况(图 1b), P_{in} 均小于 1, 属于无污染状态, 其中最高值为双鳍舵鲈的 0.480, 最低值为大头银姑鱼的 0.128, 均值为 0.199。 MPI 范围为 0.153 ~ 0.657(均值为 0.290), 最高值与最低值出现在鸢乌贼和大头银姑鱼中。

2.3 健康风险评价

2.3.1 膳食暴露评估

本文涉及的生物样品均为常见的经济水产品, 作为现代人类重要的蛋白质和微量元素来源, 其污染物膳食暴露评估值得我们关注。不同污染物日均摄入量的标准, 不同国家和地区有不同规定。本文参考表 3 标准, 对 11 种南海游泳动物体内重金属进行膳食暴露评估。结果表明,

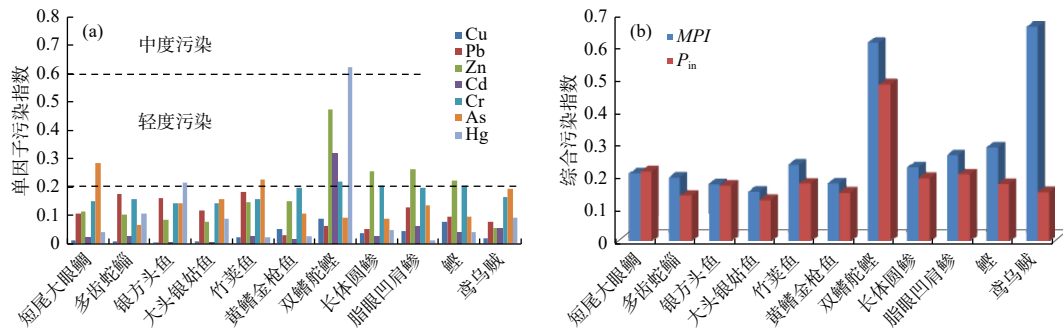


图1 各生物体内重金属含量单因子污染指数及综合污染评价结果

Fig. 1 Single factor indices and integrated pollution evaluation indices for heavy metal levels in different marine organisms

表3 南海游泳动物日均摄入量与每日最大允许摄入量

Tab.3 Daily intakes of the marine organisms in the South China Sea and recommended maximum tolerable daily intake

生物种类	$DI_i / \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$						
	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	As	Hg
短尾大眼鲷	0.146	0.127	2.73	0.0086	0.182	0.854	0.0072
多齿蛇鲭	0.0967	0.212	2.46	0.0090	0.187	0.195	0.0192
银方头鱼	0.0664	0.194	2.06	0.0019	0.173	0.429	0.0390
大头银姑鱼	0.0881	0.141	1.82	0.0019	0.170	0.477	0.0162
竹荚鱼	0.292	0.219	3.51	0.0090	0.188	0.677	0.0043
黄鳍金枪鱼	0.613	0.0343	3.61	0.0061	0.235	0.315	0.0047
双鳍舵鲹	1.06	0.0759	11.4	0.116	0.265	0.272	0.112
长体圆鲹	0.464	0.0621	6.15	0.0091	0.245	0.267	0.0084
脂眼凹肩鲹	0.558	0.153	6.33	0.0232	0.238	0.407	0.0021
鲹	0.948	0.114	5.37	0.0154	0.247	0.292	0.0072
鳶乌贼	0.311	0.126	2.21	0.0488	0.0534	0.158	0.0046
本文标准	500 ^[12]	1.20 ^[8]	1000 ^[12]	1.00 ^[12]	33.3 ^[12]	3.00 ^[8]	0.714 ^[12]

7种重金属元素(Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、As和Hg) DI_i 均低于参考标准,即适量摄食此类生物的健康风险很低,比较安全。

2.3.2 非致癌风险

本文目标危害系数计算中使用的经口参考剂量 $RfDI_i$ 见表4^[22]。

表4 重金属经口摄入参考剂量及经口致癌斜率因子

Tab.4 Reference oral doses and oral slope factors

参数	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	无机As	甲基Hg
$RfDI_i / \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$	0.04	0.004	0.3	0.001	1.5	0.0003	0.0001
$OSF_i / (\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})^{-1}$	/	0.0085	/	0.38	/	1.5	/

由图2a可知,对于单一重金属Cu、Pb、Zn、Cd、Cr,调查生物样的 THQ 均远小于1,说明上

述5种单一重金属对人群非致癌暴露风险不明显。 $RfDI_i$ 标准中的Hg为甲基Hg,本文以甲基Hg在鱼类中占总Hg的71%、在头足类中占72%进行计算^[23],各生物Hg的 THQ 均小于1,其中,双鳍舵鲹Hg的 THQ 最高,达到0.797。可见,食用调查海域的游泳动物对人群不具有非致癌暴露风险。各生物 THQ 均值为 $\text{Hg} > \text{As} > \text{Pb} > \text{Cd} > \text{Zn} > \text{Cu} > \text{Cr}$,比较不同元素 THQ 占 THQ_s 的平均比值(图2b),As(43.5%)大于Hg(30.2%),As和Hg两者均值总和占 THQ_s 的70%以上,为风险的主要贡献者。

综合讨论同一生物中重金属的 THQ_s ,除双鳍舵鲹外($THQ_s=1.09$),其余生物的 THQ_s 均小于1,由此可见,长期连续食用此类经济生物存

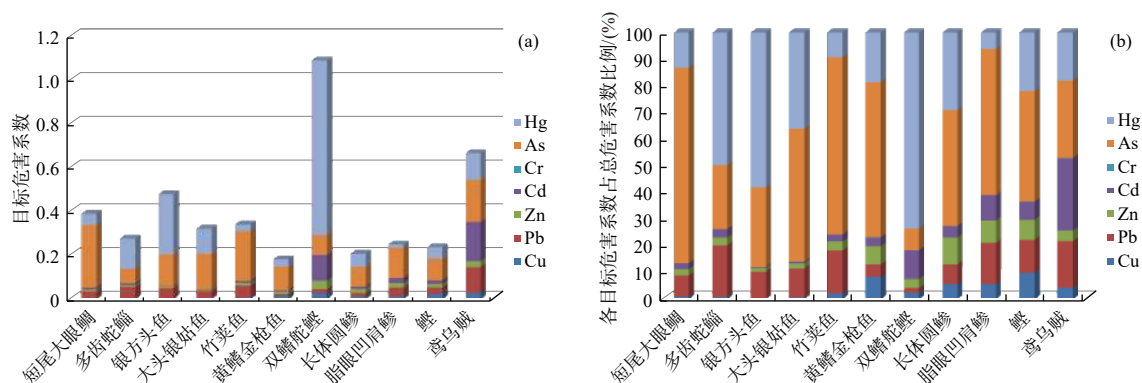


图 2 各生物非致癌风险评价

Fig. 2 The noncarcinogenic risk assessment results for the nektons of South China Sea

在较低的潜在非致癌健康风险, 而为保证食用安全性, 在摄食双鳍舵鲈时, 应适当降低频率及食用量。

2.3.3 致癌风险

根据美国环境保护署综合风险信息系统的分类信息, As 属于 A 类, 已知的人体致癌物; Cd 属于 B1 类, 很可能的人体致癌物, 人体致癌证据有限; Pb 属于 B2 类, 可能的人体致癌物, 动物致癌证据充分, 风险控制标准可以适度放宽到 1.0×10^{-5} ; Cu、Zn、Cr 和 Hg 同属于 D 类, 非人体致癌物 (Cr^{3+} 为人体必需元素之一, Cr^{6+} 为致癌物, 但在生物体内快速转化为 Cr^{3+} , 不存在生物累积)。本文仅对 As、Cd 和 Pb 进行致癌风险评价, 经口致癌斜率因子见表 4^[24]。

结果表明, 生物样品 As 的 R_i 为 $4.18 \times 10^{-7} \sim 1.83 \times 10^{-6}$, 其中, 鳀乌贼、短尾大眼鲷、大头银姑鱼和竹荚鱼的 R_i 略高于 1.0×10^{-6} , 表明风险程度在人体可接受范围内。Pb 的 R_i 为 $1.0 \times 10^{-9} \sim 1.0 \times 10^{-8}$, Cd 的 R_i 为 $1.0 \times 10^{-8} \sim 1.0 \times 10^{-7}$, 均远低于 1.0×10^{-6} , 不会对人体健康造成致癌风险。

3 结 论

(1) 调查海域 11 种游泳生物体内重金属含量均值为 $\text{Zn} > \text{Cu} > \text{As} > \text{Cr} > \text{Pb} > \text{Cd} > \text{Hg}$, 不同种类生物受环境、生活习性等因素影响, 重金属含量有明显不同。

(2) 生物体内重金属含量均符合国内相应污染评价标准, 除双鳍舵鲈的 Hg 元素单因子污染指数达到中度污染水平, 其余生物各元素均为轻

度或无污染状态。

(3) 生物体中 Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、As 和 Hg 7 种重金属元素, 其每日摄入量均低于参考标准; 除双鳍舵鲈外, 食用相应海产品不具有潜在非致癌健康风险; 各生物的致癌风险也在人体可接受范围内。

参考文献:

- [1] GUSSO-CHOUERI P K, DE ARAÚJO G S, CRUZ A C F, et al. Metals and arsenic in fish from a Ramsar site under past and present human pressures: consumption risk factors to the local population[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 628/629: 621-630.
- [2] AZEVEDO J S, FERNANDEZ W S, FARIAS L A, et al. Use of *Cathorops spixii* as bioindicator of pollution of trace metals in the Santos Bay, Brazil[J]. *Ecotoxicology*, 2009, 18(5): 577-586.
- [3] GU Y G, NING J J, KE C L, et al. Bioaccessibility and human health implications of heavy metals in different trophic level marine organisms: A case study of the South China Sea[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 163: 551-557.
- [4] WANG M Z, TONG Y D, CHEN C, et al. Ecological risk assessment to marine organisms induced by heavy metals in China's coastal waters[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, 126: 349-356.
- [5] GB 17378.6-2007, 海洋监测规范第6部分: 生物体分析[S].
- [6] HY/T 147.3-2013, 海洋监测技术规范第3部分: 生物体[S].
- [7] 全国海岸带和海涂资源综合调查简明规程编写组. 全国海岸带和海涂资源综合调查简明规程[M]. 北京: 海洋出版社, 1986.
- [8] 杨妙峰, 郑盛华, 席英玉, 等. 福建东山湾养殖贝类重金属污染状况及健康风险评价[J]. *生态毒理学报*, 2019, 14(5): 308-317.

(下转第 416 页)