

# 江苏滨海县近岸海域海水、沉积物和生物体 重金属分布及健康风险评价

裘奕斐, 王 静, 徐 敏

(南京师范大学海洋科学与工程学院, 江苏 南京 210023)

**[摘要]** 对江苏滨海县近岸海域 2019 年 1 月、4 月、7 月、10 月、12 月所采样品中海水、沉积物和生物体中重金属含量进行了分析。海水中重金属浓度各月份平均值均符合一类海水水质标准, 1 月、4 月、12 月存在部分站位重金属浓度超标; 调查海域各月份水质污染指数 4~12 月呈递减趋势, 总体数值较为稳定, 没有受到重金属污染。所有站位沉积物中重金属浓度均符合一类海洋沉积物质量标准, 6 种重金属的潜在生态危害指数由大到小依次为  $Cd > As > Hg > Pb > Cu > Zn$ , 且均属于低危害程度; 综合潜在生态危害指数 1 月数值最高, 全年数值较为稳定, 属于低危害程度。本研究选取的 3 种海产品每周评估摄入量 (EWI) 均低于 WHO 制定的人类暂定每周允许摄入量 (PTWI); 相比于沉积物, 海洋生物从海水中富集重金属的能力更强; 危害商数的结果表明研究区内棘头梅童鱼存在了一定程度的 As 污染, 其余重金属均为低危害等级。

**[关键词]** 重金属, 水质综合污染指数法, 综合潜在生态风险, 危害商数, 富集能力

**[中图分类号]** P76 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1001-4616(2021)01-0071-08

## Distribution and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Seawater, Sediments and Organisms in Coastal Areas of Binhai in Jiangsu Province

Qiu Yifei, Wang Jing, Xu Min

(College of Marine Science and Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** In this paper, the contents of heavy metals in seawater, sediments and organisms in coastal areas of Binhai in Jiangsu Province in January, April, July, October and December 2019 were analyzed. Among them, the monthly average concentration of heavy metals in the seawater met Grade I of the Seawater Quality Standard of China, among which heavy metal concentration exceeds the standard in some stations in January, April and December. The water quality pollution index of each month in the surveyed sea area showed a decreasing trend from April to December, and the overall value was relatively stable without heavy metal pollution. The concentration of heavy metals in the sediments at all stations met Grade I of the Sediment Quality Standard of China. The potential ecological hazard indexes of the six heavy metals ranged from  $Cd > As > Hg > Pb > Cu > Zn$ , and were of low harm degree. The comprehensive potential ecological hazard index was the highest in January, and the annual value was relatively stable, indicating a low hazard level. The estimated weekly intake (EWI) of the three seafood products selected in this paper was all lower than the provisional tolerable weekly intake (PTWI) for human beings established by WHO. Marine organisms were more capable of accumulating heavy metals from seawater than from sediments. The results of target hazard quotients (THQ) showed that there was a certain degree of As pollution in *Collichthys lucidus* in the study area, and the other heavy metals were of low hazard grade.

**Key words:** heavy metal, comprehensive pollution index method of water quality, comprehensive potential ecological risk, target hazard quotients (THQ), bioaccumulation ability

进入 21 世纪, 海洋产业飞速发展, 大量研究表明在沿海地区海水已经受到了重金属污染, 目前重金属污染已成为威胁生态系统健康的重要因素并受到了环境科学及海洋科学的广泛关注。重金属一旦进入海水环境中, 极易与悬浮物结合最终在沉积物中积累, 因此重金属可以作为评价区域海水环境质量的重要指

收稿日期: 2020-12-08.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41373115)、江苏省高校重大自然科学基金项目 (19KJA180004)。

通讯作者: 徐敏, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向: 海洋资源与环境。E-mail: xumin0895@njjnu.edu.cn

标<sup>[1-9]</sup>. 海洋生物具有较多的脂肪酸、蛋白质和矿物质,已经成为了沿海居民日常饮食的主要来源<sup>[10-13]</sup>. 然而,由于沿海地区重金属的污染,摄入含有过量重金属的海鲜将会对人体健康造成潜在的风险. 研究表明,海水及沉积物中的重金属会通过海洋生物的摄食进入食物链,从而在海洋生物的肌肉细胞及血液中富集<sup>[14-15]</sup>. 因此,研究海洋生物中重金属的富集对人类潜在的健康风险起到至关重要的作用. 国内许多研究多集中于陆地土壤、近海河口及海岸带附近沉积物中重金属对环境的危害作用,有关海水和沉积物中重金属随季节的变化及海洋生物健康风险的研究相对较少. 因此,本研究选取滨海县外侧海域,对比 2019 年 1 月、4 月、7 月、10 月、12 月海水和沉积物中重金属含量,通过分析该区域海洋生物中重金属含量的分布规律及季节性差异,推测海洋生物体内重金属对人类健康产生的潜在风险及影响.

1 研究区概况

江苏滨海县近岸海域位于江苏省东部,南黄海海域北部,处于北亚热带向南暖温带过度的气候带,属于湿润的季风气候,年平均气温 14.7 ℃,年平均相对湿度 81%,年平均降水量为 931.6 mm. 该地区风向分布较分散,主要出现在 N~SSE 方向,主导风向为 NNE、ESE、SE,相应频率超过 8%. 滨海县属黄淮冲积平原,属苏北平原的一部分,地势平坦;1855 年黄河北归改至山东省渤海入海,断绝了该海域的泥沙来源,岸线处于侵蚀状态. 该区域海水资源、港口资源及渔业资源丰富,具有显著的生态经济价值.

2 材料与方

2.1 样品采集

2019 年 1 月 7 日、4 月 4 日、7 月 17 日、10 月 15 日和 12 月 27 日在研究区(34°10'N~34°40'N,120°00'E~120°40'E)23 个站位进行了海水、沉积物和生物样品的采样工作,具体采样站位见图 1. 其中海水样品使用水质采样器在 0~5 m 范围内的表层海水中装取 500 mL 海水样品至采样瓶中并采用低温冷藏的方式保存;沉积物样品使用绞车连接抓斗式采泥器在 0~5 cm 的海水底部表层范围内采集后装取至聚乙烯袋中并至于 0~4 ℃ 的环境下冷藏保存;生物样品分别在 7 月 17 日、10 月 15 日和 12 月 27 日在研究区内以 10 节/h 拖网速度拖取,选取 1.5 kg 左右的样品用现场海水冲洗后冷冻保存. 所有样品的采集方法按照中国海洋监测规范(GB-17378—2007).

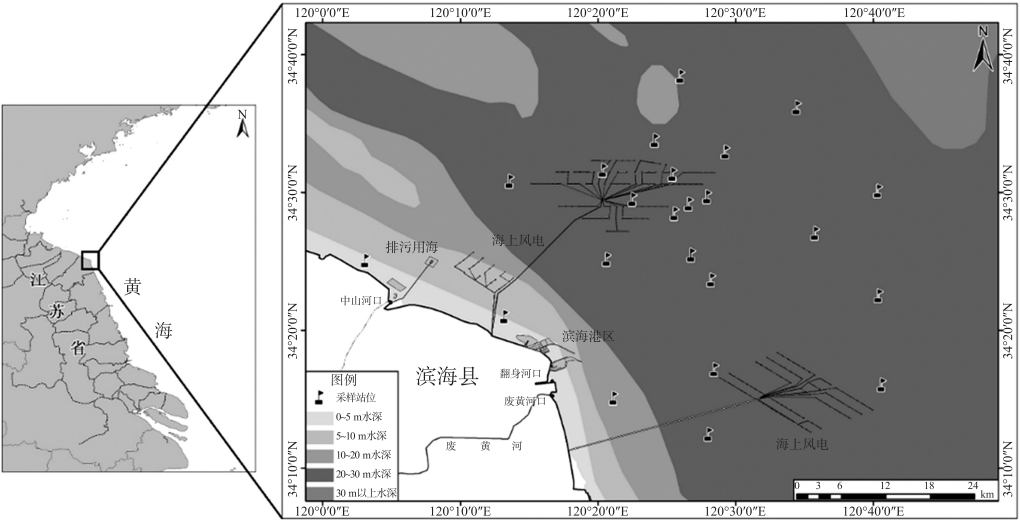


图 1 研究区站位图

Fig. 1 Location of sample sites

2.2 样品处理方法

海水样品使用 0.45 μm 微孔滤膜过滤后用硫酸酸化至 pH<2;沉积物样品储存在干燥通风的环境中,将样品放入玛瑙碗中研磨后通过 160 目尼龙筛;生物样品解剖后,经过 24 h 冷冻干燥提取 200 mg 肌肉组织样本使用 HNO<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>(4:2)酸化后放在电热板加热至 120~140 ℃.

预处理后元素 Cu、Pb、Zn、Cd 使用无火焰原子吸收分光光度法(PinAAcle 900Z),元素 Hg 和 As 使用

原子荧光法(AFS-930)进行分析. 样品分析过程中采用国家标准(GBW07309)规定的标准物质进行质量控制,平行样的误差低于5%,标准物质的回收率介于95%~110%之间.

2.3 评价方法与标准

2.3.1 海水重金属

使用水质综合污染指数法<sup>[15-16]</sup>对表层海水样品中Cu、Pb、Zn、Cd、Hg和As的含量进行污染水平综合评价,公式如下:

$$S_i = \frac{1}{n} \sum_1^n \frac{C_i}{C_{io}}, \tag{1}$$

式中, $C_i$ 为第*i*种重金属的实测浓度; $C_{io}$ 为重金属评价标准(本文采用国家一类海水水质标准);*n*为金属*i*参与分析的样品总数; $S_i$ 为该站位重金属综合污染指数,具体污染水平等级划分标准见表1<sup>[15-16]</sup>.

表1 海水重金属污染水平等级划分标准

Table 1 Standard for classification of heavy metal pollution level in seawater					
污染等级	1	2	3	4	5
水质指数	<1	1~2	2~3	3~5	>5
污染效应	没有影响	轻微影响	中等影响	较强影响	严重影响

2.3.2 沉积物重金属

本文采用瑞典学者Hankanson建立的应用于评价沉积物中重金属污染水平潜在生态危害指数法,相比于单因子污染指数法,潜在生态危害指数法综合考虑不同重金属之间的协同作用、污染水平及毒性作用上的不同<sup>[17-18]</sup>. 公式如下:

$$E_r^i = T_r^i \times C_f^i = T_r^i \times \frac{C_i^i}{C_n^i}, \tag{2}$$

式中, $E_r^i$ 为金属*i*的潜在生态危害系数; $T_r^i$ 为重金属毒性响应系数; $C_f^i$ 为金属*i*的污染系数; $C_i^i$ 为第*i*种重金属的实测浓度; $C_n^i$ 为金属*i*的研究区背景评价参考值,沉积一般采用工业化前沉积物中重金属的最高背景值<sup>[19]</sup>.

单个站位*i*种重金属综合潜在生态危害指数为*i*种潜在生态危害指数之和:

$$E_{RI} = \sum_1^n E_r^i. \tag{3}$$

单个金属潜在生态危害指数由低到高共分为5个等级,综合潜在生态危害指数分为4个等级,通过潜在生态危害指数评价标准可以评价某一点单个或多个污染物的污染程度,具体评价标准见表2<sup>[18,20]</sup>.

表2 潜在生态危害指数评价标准

Table 2 Potential ecological harm index evaluation criteria			
$E_r^i$	单因子污染物生态危害程度	$E_{RI}$	综合潜在生态风险程度
<40	低	<150	低
40~80	中等	150~300	中等
80~160	较重	300~600	重
160~320	重	≥600	严重
≥320	严重		

2.3.3 生物体重金属

BAF是用来评估单个重金属在生物体内与海水和沉积物样品相关程度的评价方法,BAF可以描述重金属在生物体内的积累能力,BAF值越高表明该污染物通过介质在生物体内的积累能力越强<sup>[21-22]</sup>,公式如下:

$$BAF = C_{\text{organism}} / C_{\text{seawater or sediment}}, \tag{4}$$

式中, $C_{\text{organism}}$ 、 $C_{\text{seawater or sediment}}$ 分别为生物体内重金属、海水及沉积物中重金属的实际浓度.

2.3.4 重金属对人体潜在健康风险评价

危害商数法(target hazard quotients, THQ)是用来评价污染物对人体健康产生风险的方法,公式如下:

$$THQ = \frac{EF \times ED \times FIR \times c \times 10^{-3}}{RFD \times WAB \times TA}, \tag{5}$$

式中,EF 为污染物暴露频率(365 d/年);ED 为污染物暴露年限(选取人类平均寿命 70 年);FIR 为人体对食物的摄取率(选取联合国粮食及农业组织(FAO)的统计数据,其中鱼类的摄取量为 36 g/d,甲壳类的摄取量为 5.42 g/d);c 为海产品中重金属含量(mg/kg);RFD 为污染物单日服用参考剂量(Hg 为 0.000 5 mg/(kg·d),Cd 为 0.001 mg/(kg·d),Pb 为 0.004 mg/(kg·d),As 为 0.000 3 mg/(kg·d));WAB 为人类的平均体重(60 kg);TA 为非致癌源的平均暴露时间(365 d/年×ED)<sup>[23]</sup>. TTHQ 为海产品中各种重金属的危害商数的总和. 危害商数小于 1 时代表食用该海产品不会对人体产生健康风险;相反,当危害商数大于 1 时表明食用具有一定的潜在风险.

评价重金属的摄入对人体健康造成的风险不仅需要评价海产品的危害商数,还需确定饮食摄入量,世界卫生组织(WHO)针对重金属制定了人类暂定每周允许摄入量(PTWI),其中 Hg、Cd、Pb 和 As 每周允许摄入量分别为 5 μg/(kg·bw)、7 μg/(kg·bw)、25 μg/(kg·bw)和 15 μg/(kg·bw)<sup>[24]</sup>. 重金属每周评估摄入量(EWI)公式如下:

$$EWI = c \times FIR \times 7 / WAB. \tag{6}$$

3 结果与讨论

3.1 表层海水中重金属分布

海水样品中 6 种重金属含量分析:1 月、4 月和 12 月各有 2 个、11 个和 1 个站位中 Cu 的含量超过一类海水水质标准;1 月、4 月、7 月和 10 月各有 2 个、3 个、4 个和 6 个站位的 Pb 离子浓度超过一类海水水质标准,主要分布在研究区东南部滨海港外侧海域;1 月和 4 月均有 1 个站位的 Hg 离子浓度超过一类海水水质标准,处于临界值附近;5 个月份内 6 种重金属含量平均值均符合一类海水水质标准(表 3).

表 3 海水重金属浓度  
Table 3 Heavy metal concentrations in seawater

月份	指数	浓度(μg/L)					
		Cu	Pb	Zn	Cd	Hg	As
1 月	范围	1.56~5.39	0.11~1.30	7.06~12.60	0.04~0.18	0.019~0.051	0.63~1.75
	平均值	3.10	0.52	9.63	0.11	0.031	1.21
4 月	范围	1.66~5.55	0.52~1.80	4.43~17.10	0.05~0.12	0.012~0.051	1.05~1.89
	平均值	3.94	0.82	9.76	0.09	0.027	1.55
7 月	范围	2.20~4.65	0.32~1.10	7.28~19.20	0.05~0.15	0.013~0.044	1.01~2.65
	平均值	3.17	0.70	11.56	0.10	0.020	1.60
10 月	范围	1.18~4.84	0.10~1.91	5.42~14.60	0.04~0.16	0.020~0.047	1.18~2.90
	平均值	2.23	0.70	9.18	0.08	0.033	1.99
12 月	范围	1.65~5.30	0.20~0.91	5.63~16.80	0.06~0.183	0.007~0.042	0.88~1.98
	平均值	3.24	0.44	10.75	0.10	0.019	1.31
平均值		3.14	0.64	10.18	0.09	0.026	1.53
海水水质标准(一类)		≤5	≤1	≤20	≤1	≤0.05	≤20
海水水质标准(二类)		≤10	≤5	≤50	≤5	≤0.2	≤30

海水中 Cu 和 Pb 的主要来源为工业和农业废水及生活污水的排放,滨海县设有江苏沿海工业园,工业园区内尾水处理达标后通过排污管道或河流排入海洋. 滨海港位于采样的研究区内,伴随着大量船舶的进出,可以推断出研究区内存在 Cu、Pb 含量部分超出主要是由废水的排放和船舶通航所引起的. 海水中 Hg 离子的主要来源为人为排放,通过含汞废水排放入海或含汞废气沉降最终在海水中积累<sup>[1-2]</sup>.

表 4 中研究区内 5 个月份的水质污染指数均小于 1 表明该海域没有受到明显的污染影响,其中 1 月和 10 月研究区北部及中山河口附近海域海水污染指数相对较高,4 月和 7 月中山河口至翻身河口岸段中部海水污染指数相对较高. 根据滨海气象站年内风速变化统计,冷暖气团活跃,气旋活动频繁,4 月份平均风速为 3.0 m/s 为全年最大值. 由苏大鹏等<sup>[25]</sup>对江苏盐城近岸海域水动力特征的研究,废黄河三角洲处潮流流速较大,以往复流为主,流向与岸线基本保持一致,可以推测 4 月份海水污染综合指数偏高的主要



原因为风速大引起的近岸表层高浓度重金属海水扩散形成的季节性现象. 中山河口处外侧排污口附近表现出了相对较大的污染指数,结合采样站位中存在 Cu 和 Pb 离子浓度高出一类海水水质标准,可以推测中山河口外侧海域环境受到了工业废水及生活污水排放的影响.

相比于有关对海水中重金属方面的研究<sup>[26-33]</sup>,滨海海域海水中金属 Pb、Hg、As 等有毒金属含量较低,金属 Cu、Zn 的含量与其他研究区接近,整体上研究区海域目前没有受到重金属污染. 但仍需注意随着滨海港的扩建,船舶吞吐量的提升及沿海工业的飞速发展带来的潜在重金属污染影响.

表 4 海水污染综合指数评价表  
Table 4 Seawater pollution index evaluation

月份	1 月	4 月	7 月	10 月	12 月
$S_i$ 范围	0.26~0.53	0.34~0.63	0.28~0.57	0.28~0.63	0.23~0.52
$S_i$ 平均值	0.40	0.46	0.42	0.41	0.35

3.2 表层沉积物中重金属分布

通过表 5 可以看出,5 次采样中所有站位 6 种重金属含量及平均值均符合一类沉积物质量标准 (GB 18668—2002). 通过计算沉积物中重金属的变异系数及偏度发现 1 月份 Hg、4 月份 Cd 的变异系数分别为 43.7%、47.41%,均大于 36%,属于高度变异 ( $CV>36\%$ );偏度上 Hg 的表现同样突出,根据马群等对变异程度及偏度的分类,可以推断出研究区沉积物中 Cd 和 Hg 可能受到人为来源的控制造成了较高的变异系数<sup>[34-35]</sup>,同样人为来源影响了沉积物造成 Hg 的大幅度正偏度. 根据之前的研究,沉积物中 Cd 的人为来源主要为工业和农业活动,Hg 的人为来源主要为人为排放的大气沉降<sup>[36-37]</sup>. 1855 年黄河北归后,废黄河三角洲附近岸段表现为向岸侵蚀,潮流流速较大,流向与岸线保持一致,沿岸受侵蚀影响泥沙主要向南部运输,因此研究区内沉积物主要来源为废黄河三角洲的侵蚀残余以及局部工程区附近的再次沉积.

表 5 沉积物中重金属含量  
Table 5 Heavy metal concentrations in sediments

月份	指数	浓度 (mg/kg)					
		Cu	Pb	Zn	Cd	Hg	As
1 月	范围	17.1~28.6	17.5~28.8	63.2~81.7	0.135~0.255	0.010~0.056	5.5~19.8
	变异系数	16.54%	15.81%	7.10%	20.50%	43.70%	28.23%
	偏度	1.19	1.49	0.40	1.14	4.05	0.34
4 月	范围	8.7~27.8	11.0~24.5	46~138	0.047~0.239	0.016~0.059	7.2~19.4
	变异系数	35.47%	25.69%	33.33%	47.41%	34.41%	26.54%
	偏度	-1.21	-1.32	1.11	-0.98	0.86	-0.96
7 月	范围	15.4~25.1	17.9~25.2	49.5~60.9	0.109~0.192	0.016~0.043	10.6~16
	变异系数	15.08%	8.52%	6.70%	13.71%	25.32%	10.90%
	偏度	-0.92	1.14	-1.09	1.26	1.68	0.26
10 月	范围	17.7~29.5	15.9~27.5	53.5~76.8	0.123~0.214	0.011~0.028	4.7~11.9
	变异系数	17.73%	13.33%	9.48%	15.24%	22.58%	24.06%
	偏度	-1.47	1.43	0.05	-0.54	0.24	0.43
12 月	范围	10.1~25.8	15.5~23.3	43.9~81.3	0.073~0.181	0.010~0.029	8.3~19.3
	变异系数	25.02%	12.00%	18.94%	21.85%	26.43%	23.27%
	偏度	0.04	-0.98	-1.02	0.05	4.32	-0.22
沉积物质量标准(一类)		≤35	≤60	≤150	≤0.5	≤0.2	≤20
沉积物质量标准(二类)		≤100	≤130	≤350	≤1.5	≤0.5	≤65

利用潜在生态危害指数法对研究区内沉积物中重金属含量评价,结果得出(见表 6):6 种重金属的潜在生态危害指数由大到小依次为  $Cd>As>Hg>Pb>Cu>Zn$ ,且均小于 40,属于低危害程度,其中 Cd、Hg、As 的危害程度相对较高,金属 Hg 和 Cd 同样在变异系数和偏度上表现出了已经受到了人为来源的影响,因此研究区内沉积物潜在生态危害指数主要受沿海工业、农业活动和人为排放影响;综合潜在生态危害指数 1 月份为最大值 34.95,整体上呈现递减趋势,属于低危害程度.

相比于其他沿海地区例如钦州湾、北部湾、辽东湾等<sup>[26-33]</sup>海水表层沉积物中重金属的浓度,滨海海域沉积物整体质量良好. Cu、Cd、Pb、Zn 的含量高于南黄海辐射沙脊群,小于南黄海背景值,根据吕建树

等<sup>[35]</sup>的研究,Cu、Cd、Pb、Zn 主要受成土母质控制. 因此可以推断出,整体上滨海海域沉积物保持在自然本底状态,受人为活动影响较小,研究区没有受到明显的重金属污染,但是仍需注意人为活动导致的部分重金属潜在污染影响.

表 6 沉积物重金属潜在危害指数  
Table 6 Potential hazard index of heavy metals in sediments

月份	指数	$E_r^i$						$E_{RI}$
		Cu	Pb	Zn	Cd	Hg	As	
1 月	范围	2.85~4.77	3.50~5.76	0.79~1.02	8.10~15.30	2.08~11.24	3.64~13.2	24.71~41.86
	平均值	3.94	4.52	0.91	10.97	4.62	9.99	34.95
4 月	范围	1.45~4.63	2.20~4.90	0.58~1.73	2.83~14.34	3.18~11.78	4.81~12.93	15.79~42.76
	平均值	2.75	3.43	0.92	7.61	6.13	9.40	30.25
7 月	范围	2.57~4.18	3.58~5.04	0.62~0.76	6.54~11.52	3.10~8.50	7.07~10.67	26.62~36.03
	平均值	3.51	4.50	0.68	9.83	5.20	9.24	32.96
10 月	范围	2.95~4.92	3.18~5.50	0.67~0.96	7.38~12.84	2.18~5.64	3.10~7.93	24.03~34.64
	平均值	3.94	4.14	0.81	10.20	3.83	5.88	28.87
12 月	范围	1.68~4.30	3.10~4.66	0.55~1.02	4.38~10.86	1.94~5.80	5.53~12.87	18.01~35.67
	平均值	3.23	3.81	0.80	7.65	3.31	8.93	27.57
平均值		3.47	4.08	0.82	9.25	4.62	8.69	30.92

3.3 海洋生物健康风险评价

本研究选取了棘头梅童鱼、葛氏长臂虾和三疣梭子蟹 3 种在滨海海域较为常见的经济型海产品,其是沿海居民十分重要的海产品食物来源. 通过使用 BAF 来量化海洋生物累积重金属的能力:当  $BAF_{sediment} > 1$  时,表明生物对重金属有富集能力;当  $BAF_{seawater} > 1$  时,表明这种生物可能对重金属具备富集能力(富集能力与数值成正比),当  $BAF_{seawater} > 100$  时,表明这种生物对重金属具备较强的富集能力. 表 7 中数据显示 Cu、Zn、Cd、Hg 和 As 在 7 月、10 月和 12 月 3 种生物的样品中  $BAF_{seawater}$  均大于 100,表明棘头梅童鱼、葛氏长臂虾和三疣梭子蟹对海水中这 5 种金属有一定的富集能力,其中 Cu、As、Zn 的  $BAF_{seawater}$  值较大表明棘头梅童鱼、葛氏长臂虾和三疣梭子蟹对这 3 种金属的富集能力更强. Cu 离子是维持人体生命活动的正常元素,但是当浓度超出一定范围时同样会产生重金属中毒风险. 研究区海水存在超标的 Hg 和 Pb,在棘头梅童鱼和葛氏长臂虾中没有表现出较强的富集能力;三疣梭子蟹对海水中金属汞的富集能力较强. 在 12 月份的样品数据中发现,棘头梅童鱼和葛氏长臂虾对金属 Cd 的  $BAF_{sediment}$  值均大于 1、三疣梭子蟹的  $BAF_{sediment}$  值介于临界值,其他重金属的  $BAF_{sediment}$  值均较低. 整体而言,棘头梅童鱼相比于葛氏长臂虾和三疣梭子蟹对重金属的富集能力较弱. 因此,可以推断出本文选取的 3 种海产品对海水中重金属的富集能力更强,海水的质量状况对于以进食海产品为主的人群显得更加重要.

表 7 海洋生物重金属富集能力  
Table 7 Bioaccumulation ability for marine organisms

月份	物种	$BAF_{seawater}$						$BAF_{sediment}$					
		Cu	Pb	Zn	Cd	Hg	As	Cu	Pb	Zn	Cd	Hg	As
7 月	棘头梅童鱼	916	84	766	414	343	303	0.138	0.003	0.163	0.261	0.263	0.035
	葛氏长臂虾	983	80	871	672	203	1 169	0.148	0.003	0.186	0.424	0.156	0.135
	三疣梭子蟹	1 212	69	903	428	870	910	0.183	0.002	0.192	0.270	0.667	0.105
10 月	棘头梅童鱼	1 170	150	832	863	116	685	0.110	0.005	0.117	0.402	0.202	0.153
	葛氏长臂虾	904	78	795	847	69	1 318	0.085	0.003	0.112	0.394	0.120	0.295
	三疣梭子蟹	1 196	191	746	789	364	2 377	0.113	0.006	0.105	0.367	0.633	0.532
12 月	棘头梅童鱼	1 918	66	585	1 828	144	646	0.318	0.002	0.098	1.391	0.173	0.063
	葛氏长臂虾	1 917	86	757	1 540	272	1 468	0.317	0.002	0.127	1.172	0.327	0.144
	三疣梭子蟹	3 032	91	1 365	1 311	490	1 512	0.502	0.002	0.230	0.997	0.588	0.148

通过表 8 可知,本文选取的 3 种海产品中重金属的每周评估摄入量(EWI)均低于 WHO 所制定的人类暂定每周允许摄入量(PTWI);3 种海产品中重金属 Pb、Cd 和 Hg 的危害商数值均小于 1,表明食用该类

海产品不会存在 Pb、Cd 和 Hg 对人体健康产生的潜在健康风险;10 月和 12 月的棘头梅童鱼中金属 As 的危害商数均大于 1,7 月的危害商数介于临界值,表明食用棘头梅童鱼存在一定的健康风险. 金属 As 在自然环境中广泛存在,人为来源主要为冶炼活动及化学合成剂;金属 As 分为没有毒性的有机形态和毒性较高的无机形态,在实验室测试分析中测定的是金属 As 的总量,其中有机形态的金属 As 在 90%左右;金属 As 中毒会引起人体腹痛、呕吐及肌肉无力等症状并会长期存留在人体内. 通过对比发现 7 月 3 种海产品的每周评估摄入量(EWI)和危害商数低于 10 月和 12 月,这与本文选取的 3 种海洋生物均在 7 月之前完成了产卵有关,随着时间的推移,重金属在生物体内随着食物链累积.

表 8 海产品中 Pb、Cd、Hg、As 的每周评估摄入量(EWI)和危害商数(THQ)  
Table 8 Estimated weekly intake(EWI) and target hazard quotients(THQ) for Pb,Cd,Hg and As for marine organisms

月份	物种	EWI				THQ				TTHQ
		Pb	Cd	Hg	As	Pb	Cd	Hg	As	
7 月	棘头梅童鱼	0.25	0.18	0.03	2.03	0.008 9	0.026	0.008	0.97	1.012
	葛氏长臂虾	0.04	0.04	0.00	1.18	0.001 3	0.006	0.001	0.56	0.571
	三疣梭子蟹	0.03	0.03	0.01	0.92	0.001 1	0.004	0.003	0.44	0.446
10 月	棘头梅童鱼	0.44	0.29	0.02	5.73	0.015 7	0.041	0.005	2.73	2.788
	葛氏长臂虾	0.03	0.04	0.00	1.66	0.001 2	0.006	0.000	0.79	0.798
	三疣梭子蟹	0.08	0.04	0.01	2.99	0.003 0	0.006	0.002	1.42	1.435
12 月	棘头梅童鱼	0.12	0.75	0.01	3.54	0.004 3	0.107	0.003	1.69	1.802
	葛氏长臂虾	0.02	0.09	0.00	1.21	0.000 8	0.014	0.001	0.58	0.593
	三疣梭子蟹	0.03	0.08	0.01	1.25	0.000 9	0.011	0.002	0.60	0.609

4 结论

2019 年 5 个月份内水质及沉积物中重金属平均浓度均符合国家一类标准,大部分站位符合一类标准,仅局部站位属于二类标准. 水质污染指数法和潜在生态危害指数法的评价结果表明,研究区内水质及沉积物均属于低污染水平,但是仍在某些月份内发现了一定程度的由人为活动造成的汞污染,应当引起重视.

表层海水和底栖环境是海洋生物主要的栖息环境,良好的生存环境对海产品的日益增加非常重要. 通过对海洋生物重金属富集能力的分析发现,棘头梅童鱼、葛氏长臂虾和三疣梭子蟹对海水中重金属具有一定的富集能力. 其中棘头梅童鱼中 As 的危害商数存在大于 1 的月份,表明研究区内棘头梅童鱼已经受到了一定程度的 As 污染,食用会对人体存在一定的潜在健康风险. 总体而言,滨海外侧海域水质及沉积物质量良好,为海洋生物提供了良好的栖息环境,但是仍需在工业发展的同时提高海水环保意识,降低重金属污染对人体健康产生危害的可能.

[参考文献]

[1] 毛天宇,戴明新,彭士涛,等. 近 10 年渤海湾重金属(Cu,Zn,Pb,Cd,Hg)污染时空变化趋势分析[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2009,42(9):817-825.

[2] 贺志鹏,宋金明,张乃星,等. 南黄海表层海水重金属的变化特征及影响因素[J]. 环境科学,2008(5):1153-1162.

[3] 丘耀文,颜文,王肇鼎,等. 大亚湾海水、沉积物和生物体中重金属分布及其生态危害[J]. 热带海洋学报,2005(5):69-76.

[4] 蔡文贵,林钦,贾晓平,等. 考洲洋重金属污染水平与潜在生态危害综合评价[J]. 生态学杂志,2005(3):343-347.

[5] 阮金山,许翠娅,罗冬莲. 福建兴化湾海水、沉积物及水产生物体内重金属的分析与评价[J]. 热带海洋,2000(1):52-57.

[6] 崔毅,陈碧鹃,宋云利,等. 胶州湾海水、海洋生物体中重金属含量的研究[J]. 应用生态学报,1997(6):650-654.

[7] 叶然,江再昌,郭清荣,等. 洋山深水港区海域秋、冬季沉积物中重金属来源分析及生态风险评价[J]. 海洋通报,2015,34(1):76-82.

[8] 王颢,刘炜,许珠华,等. 沙埕港多种环境介质中重金属的含量分布及来源分析[J]. 应用海洋学学报,2015,34(1):80-86.

[9] 王金辉,秦玉涛,孙亚伟,等. 象山港重点增殖养殖区重金属残留量分布及污染源分析[J]. 海洋渔业,2005(3):

- 225-231.
- [10] 鞠青,张婷婷,邱玮茜. 乳山湾水体重金属含量的季节变化与养殖贝类对水体重金属的生物富集效应[J]. 河北渔业, 2020(1):29-34.
- [11] 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.
- [12] 曾珍,陈春亮,柯盛,等. 博贺湾海域海水和生物重金属污染特征和评价[J]. 海洋开发与管理,2019,36(8):24-28.
- [13] 李奇. 止锚湾海水增殖区重金属现状评价分析[J]. 河北渔业,2019(7):39-42.
- [14] 王萧,张文思,迟光希,等. 辽东湾及其附近海域重金属污染研究进展[J]. 环境化学,2019,38(10):2317-2326.
- [15] 宁阳明,尹发能. 水污染指数法和模糊综合评价法在水质评价中的应用[J]. 河南师范大学学报(自然科学版),2020,48(6):57-63.
- [16] 马京久,喻婷,陈燕飞,等. 基于综合水质标识指数法的汉江中下游水质评价[J]. 人民珠江,2020,41(9):63-69.
- [17] 赵庆令,李清彩,谢江坤,等. 应用富集系数法和地累积指数法研究济宁南部区域土壤重金属污染特征及生态风险评价[J]. 岩矿测试,2015,34(1):129-137.
- [18] 何东明,王晓飞,陈丽君,等. 基于地累积指数法和潜在生态风险指数法评价广西某蔗田土壤重金属污染[J]. 农业资源与环境学报,2014,31(2):126-131.
- [19] 李海兴,孙晓新,满秀玲,等. 恢复湿地土壤重金属含量变化及污染评价[J]. 北京林业大学学报,2020,42(3):134-142.
- [20] 方明,吴友军,刘红,等. 长江口沉积物重金属的分布、来源及潜在生态风险评价[J]. 环境科学学报,2013,33(2):563-569.
- [21] HAO Z, CHEN L, WANG C, et al. Heavy metal distribution and bioaccumulation ability in marine organisms from coastal regions of Hainan and Zhoushan, China[J]. Chemosphere, 2019, 226:340-350.
- [22] HAO Y, CHEN L, ZHANG X, et al. Trace elements in fish from Taihu lake, China: levels, associated risks, and trophic transfer[J]. Ecotoxicology and environmental safety, 2013, 90:89-97.
- [23] STORELLI M M. Potential human health risks from metals (Hg, Cd, and Pb) and polychlorinated biphenyls (PCBs) via seafood consumption: estimation of target hazard quotients (THQs) and toxic equivalents (TEQs) [J]. Food and chemical toxicology, 2008, 46(8):2782-2788.
- [24] AGUSA T, KUNITO T, SUDARYANTO A, et al. Exposure assessment for trace elements from consumption of marine fish in Southeast Asia[J]. Environmental pollution, 2007, 145:766-777.
- [25] 苏大鹏,叶思源,王燕,等. 江苏盐城近岸海域水动力特征[J]. 海洋地质前沿,2020,36(8):1-10.
- [26] 林红梅,王伟力,林彩,等. 钦州湾及其邻近海域重金属的时空变化特征和影响因素[J]. 应用海洋学学报,2020,39(4):490-500.
- [27] 徐轶肖,谢谊,赵鹏,等. 北部湾涠洲岛海水重金属污染现状研究[J]. 生态环境学报,2018,27(5):908-915.
- [28] 宋永刚,吴金浩,邵泽伟,等. 辽东湾近岸表层海水重金属污染分析与评价[J]. 渔业科学进展,2016,37(3):14-19.
- [29] ZHAO B, WANG X, JIN H, et al. Spatiotemporal variation and potential risks of seven heavy metals in seawater, sediment, and seafood in Xiangshan Bay, China (2011-2016) [J]. Chemosphere, 2018, 212:1163-1171.
- [30] PAN J, WANG M. Trace elements distribution and ecological risk assessment of seawater and sediments from Dingzi Bay, Shandong Peninsula, North China[J]. Marine pollution bulletin, 2014, 89(1/2):427-434.
- [31] GU Y. Heavy metal fractionation and ecological risk implications in the intertidal surface sediments of Zhelin Bay, South China[J]. Marine pollution bulletin, 2018, 129(2):905-912.
- [32] GAO X, CHEN C T A. Heavy metal pollution status in surface sediments of the coastal Bohai Bay[J]. Water research, 2012, 46(6):1901-1911.
- [33] 王一鹏. 盐城北部近岸海域浮游植物时空变化及环境响应研究[D]. 北京:中国地质大学,2020.
- [34] 马群,赵庚星. 集约农区不同土地利用方式对土壤养分状况的影响[J]. 自然资源学报,2010,25(11):1834-1844.
- [35] 吕建树,张祖陆,刘洋,等. 日照市土壤重金属来源解析及环境风险评价[J]. 地理学报,2012,67(7):971-984.
- [36] 李玉,俞志明,宋秀贤. 运用主成分分析(PCA)评价海洋沉积物中重金属污染来源[J]. 环境科学,2006(1):137-141.
- [37] 丛艳国,魏立华. 土壤环境重金属污染物来源的现状分析[J]. 现代化农业,2002(1):18-20.

[责任编辑:丁 蓉]