

DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2022102606

曲良, 谭海涛, 刘涛, 等. 北部湾铁山港附近海域水体和沉积物重金属分布特征及生态风险评价[J]. 环境化学, 2023, 42(3): 757-768.

QU Liang, TAN Haitao, LIU Tao, et al. Distribution characteristics and potential ecological risk of heavy metals in the seawater and sediment of Tieshan Port, Beibu Gulf[J]. Environmental Chemistry, 2023, 42 (3): 757-768.

北部湾铁山港附近海域水体和沉积物重金属分布特征 及生态风险评价*

曲良^{1**} 谭海涛¹ 刘涛² 张文龙¹

(1. 中海石油(中国)有限公司, 北京, 100010; 2. 中海油研究总院责任有限公司, 北京, 100028)

摘要 于2020年11月和2021年3月在北部湾铁山港附近海域开展了2个航次调查, 研究了该海域水体和表层沉积物中铜、铅、锌、铬、砷、汞的分布特征及潜在生态风险. 结果表明, 水体重金属垂直分布较均匀, 而平面分布表现出明显的季节性差异. 在春季, 砷的高值区位于离岸较近的东北部海域, 其余5种重金属高值区位于西南部海域. 在秋季, 铅呈离散性分布, 而铜、锌、铬、砷和汞的浓度分布表现出由近岸向远岸逐渐降低的趋势. 表层沉积物重金属分布也存在显著季节性差异. 在春季, 铜、铅、锌和铬的高值区位于西南部海域, 砷的高值区位于中部海域, 汞的高值区靠近东部海域. 在秋季, 除砷表现出离散性分布外, 其他5种重金属的高值区皆位于西南部海域, 且表现出由近岸向远岸逐渐递增的趋势. 单因子标准指数法和潜在生态风险指数法评估结果表明, 该海域汞和铅的潜在生态风险较高. 相关性分析表明, 沉积物粒径和总有机碳(TOC)是影响沉积物重金属浓度分布的主要因素.

关键词 重金属, 水体, 沉积物, 北部湾, 生态风险.

Distribution characteristics and potential ecological risk of heavy metals in the seawater and sediment of Tieshan Port, Beibu Gulf

QU Liang^{1**} TAN Haitao¹ LIU Tao² ZHANG Wenlong¹

(1. CNOOC (China) Limited, Beijing, 100010, China; 2. CNOOC Research Institute Co., Ltd., Beijing, 100028, China)

Abstract Distribution of heavy metals copper (Cu), lead (Pb), zinc (Zn), chromium (Cr), Arsenic (As) and mercury (Hg) in the seawater and sediments of Tieshan Port, Beibu Gulf were investigated based on data from two surveys carried out in November 2010 and March 2021. The results showed that the heavy metals had an even vertical distributions in seawater, but showed seasonal differences on horizontal distribution. In spring, high concentration of As were detected at the northeast areas, while high concentrations of the other heavy metals were observed at the southwest areas. In autumn, the concentration values of Cu, Zn, Cr, As and Hg were highest at the nearshore areas and gradually decreased from near-shore to offshore area, while Pb showed a discrete distribution. Similarly, distributions of heavy metals in sediment also indicated distinct seasonal differences. In spring, high concentrations of Cu, Pb, Zn and Cr in sediment were generally distributed at the southwestern areas, and As and Hg were highly concentrated at central and eastern area, respectively. In autumn, As was discretely distributed, while other heavy metals were mainly distributed at the southwest areas and

2022年10月26日收稿(Received: October 26, 2022).

* 中国海洋石油集团有限公司科技项目(KJGG-2022-17)资助.

Supported by the Research Program of CNOOC (KJGG-2022-17).

** 通信联系人 Corresponding author, Tel: 01084521214, E-mail: quliang2@cnooc.com.cn

showed an increasing tendency of concentrations from near-shore to offshore areas. Single factor index analysis and potential ecological risk analysis of heavy metals indicate that Hg and Pb should be listed as the priority contaminant metals in this investigated area. Correlation analysis showed that total organic carbon (TOC) and sediment grain size were the major controlling factors for the variations of heavy metal distribution.

Keywords heavy metals, seawater, sediment, Beibu Gulf, ecological risk.

随着海洋经济快速发展,人类开发利用海洋资源的活动日益频繁,人类活动产生的多种污染物随河流、大气沉降以及交通运输等途径进入海洋,给海岸带生态环境造成巨大影响^[1].其中,重金属元素由于对海洋生物具有显著的毒性效应,其在海洋环境中的迁移、分布以及生态环境风险等已引起学者们的广泛关注^[2-3].海洋环境中的重金属主要来源于自然风化、陆源输入、大气沉降以及船舶运输等自然源和人为源^[4].重金属元素进入水体后,通过吸附、富集、沉降等过程使海洋多介质环境造成污染.海洋中的重金属可以通过食物链进行传递与逐级放大,对生物个体生长产生毒性效应,威胁海洋生态系统的功能以及人类健康^[5-7].河流输入的重金属大部分在河口和近海区域通过沉降作用累积到沉积物中,造成底栖环境严重污染^[8].沉积物中的重金属元素通过有机质降解、氧化还原反应、再悬浮等过程也可重新进入水体,对水生生物产生较大危害^[9].

北部湾位于南海西北部海域,其半封闭的自然地理环境,导致湾内外水体交换周期长,污染物扩散无法快速扩散,加之沿岸人类活动干扰,给北部湾海域的海洋生态环境带来多方面影响^[10].针对北部湾海域的重金属污染,学者们已开展了一系列研究^[11-12].研究发现,北部湾沉积物中重金属含量与分布的变化主要与沉积物粒度有关^[13].熊丹等通过分析北部湾海域重金属浓度及分布特征发现北部湾环流的往复运动影响了重金属在高潮带、中潮带和低潮带的浓度分布^[14].滕德强等研究发现,北部湾近岸的工业及生活排污、化肥和农药残留物以及有机物降解释放是导致雷州半岛东南部海域重金属元素含量近岸显著高于远岸的主要原因^[15].通过对北部湾雷州半岛周围海域多个站位沉积物重金属分布情况的分析,学者们发现重金属含量较历史监测数据有增加的趋势,推测人类活动对该研究海域生态环境的影响在日益增大^[16].

港口海域受航运需求增大和港口规模扩大的影响,承载着较大的环境污染压力.铁山港位于广西北部湾的东北部海域,是北部湾海域重要的港口运输基地.目前,多数在北部湾海域开展的研究仅关注重金属在单一环境中的时空变化,缺乏从水体环境和沉积物底质两个方面对重金属的时空变化特征开展系统研究.本研究通过现场调查测定了北部湾典型港口海域海水和表层沉积物中6种重金属含量,分析了该海域重金属的时空分布特征并探讨了其控制因素,通过单因子标准指数评价法和重金属潜在生态风险评价法评估了该海域重金属污染和生态风险状况,为开展北部湾海域区域污染防治和资源合理开发利用提供了理论依据.

1 材料与方法(Materials and methods)

1.1 调查时间及站位

分别于2020年11月和2021年3月在研究海域开展了2次航次调查,调查站位设置如图1所示.

1.2 样品采集与分析

海水和沉积物样品的采集、保存、运输和分析均按照《海洋监测规范》(GB 17378—2007)、《海洋调查规范》(GB 12763—2007)以及《海洋监测技术规程》(HY/T147—2013)执行.分析方法如表1所示.

1.3 水体和沉积物重金属含量单因子标准指数评价

重金属的质量状况采用单因子标准指数法进行评价,其计算公式为:

$$I_i = C_i/S_i$$

式中, I_i 为第*i*种重金属的标准指数, C_i 为第*i*种重金属的实测值, S_i 为第*i*种重金属的第一类标准值.当 $I_i \leq 1$ 时,符合标准;当 $I_i > 1$ 时,含量超标.

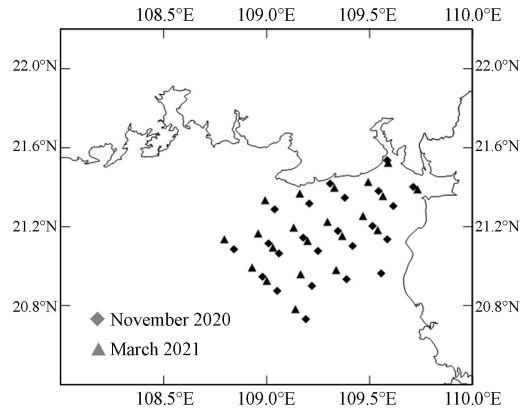


图 1 调查站位图

Fig.1 Investigation sea area and sampling sites

表 1 分析方法

Table 1 Methods of analysis

类型 Type	重金属 Heavy metals	分析方法 Method	规范 Standard
海水	汞	原子荧光法	GB17378.4—2007
	铜	电感耦合等离子体质谱法	HY/T147.1—2013
	铅	电感耦合等离子体质谱法	HY/T147.1—2013
	锌	电感耦合等离子体质谱法	HY/T147.1—2013
	铬	电感耦合等离子体质谱法	HY/T147.1—2013
	砷	电感耦合等离子体质谱法	HY/T147.1—2013
沉积物	汞	热分解冷原子吸收光度法	HY/T147.2—2013
	锌	火焰原子吸收分光光度法	GB17378.5—2007
	铅	火焰原子吸收分光光度法	GB17378.5—2007
	铜	火焰原子吸收分光光度法	GB17378.5—2007
	铬	无火焰原子吸收分光光度法	GB17378.5—2007
	砷	原子荧光法	GB17378.5—2007
	有机碳	重铬酸钾氧化-还原容量法	GB17378.5—2007
	粒度	激光法	GB12763.8—2007

1.4 沉积物重金属的潜在生态风险指数评价

本研究采用重金属潜在生态风险指数评价法评价沉积物重金属生态风险^[17]。利用单个重金属潜在生态风险系数,对调查海域内的各重金属污染及生态危害进行评价,其计算公式为:

$$E_r^i = T_r^i \times C_r^i = T_r^i \times C^i / C_n^i$$

式中, E_r^i 为重金属 i 潜在生态风险系数; T_r^i 为重金属 i 的毒性响应系数,用于反映重金属 i 的毒性水平和生物对污染物的敏感程度; C_r^i 为重金属 i 的污染系数; C^i 为重金属 i 的实测浓度; C_n^i 为重金属 i 的背景参考值。本研究采用的学者在相同海域开展研究所使用的背景值为等级划分参考值(表 2)^[18]。

表 2 沉积物重金属毒性系数和背景值

Table 2 Toxicity response coefficient and background reference values of heavy metals

	重金属元素/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) Heavy metal					
	Hg	Cu	Pb	Cd	Zn	As
T_r^i	10	5	5	40	1	10
$C_n^i (10^{-6})$	0.093	12.91	31.1	0.430	70.2	15

2 结果与讨论(Results and discussion)

2.1 海水重金属分布特征

调查海域海水样品重金属测定结果如表3所示. 在春季, 不同水深(表层、10 m层和底层)的重金属平均值分别为: 铜, 1.563、1.785、1.642 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; 铅, 0.370、0.353、0.675 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; 锌, 3.499、2.152、3.072 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; 铬, 0.342、0.334、0.314 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; 砷, 1.904、1.996、2.010 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; 汞, 0.0272、0.0254、0.0268 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 在秋季, 不同水深的重金属平均值分别为: 铜, 1.996、1.53、1.973 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; 铅, 0.545、0.516、0.525 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; 锌, 3.924、3.16、2.768 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; 铬, 0.692、0.782、0.607 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; 砷, 1.778、1.788、1.948 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; 汞, 0.0241、0.0256、0.0256 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.

表3 海水重金属浓度($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)

Table 3 Concentrations of heavy metals in seawater($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)

季节 Season	水深 Depth	数值 Value	铜 Cu	铅 Pb	锌 Zn	铬 Cr	砷 As	汞 Hg
春季	表层	范围	0.71—4.32	0.07—0.87	0.86—11.75	0.2—0.54	1.44—2.42	0.017—0.037
		平均值	1.563	0.370	3.499	0.342	1.904	0.0272
	10 m	范围	0.78—3.74	0.11—0.6	1.65—3.63	0.24—0.41	1.65—2.45	0.016—0.037
		平均值	1.785	0.353	2.152	0.334	1.996	0.0254
	底层	范围	0.99—4.4	0.16—1.12	1.22—10.8	0.23—0.38	1.65—2.68	0.016—0.035
		平均值	1.642	0.675	3.072	0.314	2.010	0.0268
秋季	表层	范围	0.49—4.32	0.15—2.37	0.97—16.09	0.11—1.91	1.26—2.38	0.008—0.045
		平均值	1.996	0.545	3.924	0.692	1.778	0.0241
	10 m	范围	0.88—3.62	0.08—1.46	0.93—12.44	0.11—4.75	1.08—2.5	0.01—0.046
		平均值	1.53	0.516	3.16	0.782	1.788	0.0256
	底层	范围	0.92—3.76	0.18—0.87	0.77—8.37	0.19—1.8	1.51—2.7	0.014—0.047
		平均值	1.973	0.525	2.768	0.607	1.948	0.0256

本次调查数值与学者们在北部湾开展的相关研究相近, 与国内外的相关研究结果比较, 浓度普遍较低, 可能由于调查海域入海地表径流较少, 海域受沿岸陆源污染影响较低(表4). 总体而言, 海水中6种重金属在两个季节的浓度平均值均无显著差异(Mann-whitney 检验, $P>0.1$), 水体重金属含量较稳定. 在垂直分布上, 6种重金属的分布规律基本相同, 垂直混合较均匀, 无明显垂直变化.

表4 国内外海水重金属浓度($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)

Table 4 Concentrations of heavy metals in the seawater of various sea areas($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)

海域 Area	铜 Cu	铅 Pb	锌 Zn	铬 Cr	砷 As	汞 Hg	参考文献 Reference
北部湾铁山港春季表层平均值	1.563	0.370	3.499	0.342	1.904	0.0272	
北部湾铁山港春季10 m层平均值	1.785	0.353	2.152	0.334	1.996	0.0254	本研究
北部湾铁山港春季底层平均值	1.642	0.675	3.072	0.314	2.010	0.0268	
北部湾铁山港秋季表层平均值	1.996	0.545	3.924	0.692	1.778	0.0241	
北部湾铁山港秋季10 m平均值	1.53	0.516	3.16	0.782	1.788	0.0256	本研究
北部湾铁山港秋季底层平均值	1.973	0.525	2.768	0.607	1.948	0.0256	
辽东湾表层	1.01—3.40	0.38—3.21	7.57—22.13	—	2.01—3.51	0.03—0.05	宋永刚, 2016 ^[19]
渤海湾表层	9.39—39.37	0.062—3.69	17.36—31.86	3—5.89	2.35—5.89	0.010—0.060	蔡端波, 2015 ^[20]
防城港近岸	1.76—4.79	0.59—2.75	16.9—24.9	0.55—1.72	0.72—2.49	0.012—0.088	何祥英, 2014 ^[21]
钦州湾东部	2.2	1.1	4	0.2	0.68	0.036	张荣灿等, 2015 ^[22]
广西近岸	5.06	0.70	12.5	2.38	0.61	0.048	李萍等, 2018 ^[23]

续表 4

海域 Area	铜 Cu	铅 Pb	锌 Zn	铬 Cr	砷 As	汞 Hg	参考文献 Reference
湛江湾	11.17	23.28	54	—	6.12	0.047	赵佳林等, 2022 ^[24]
铁山港	3.380—4.780	0.680—0.940	3.820—7.500	—	—	0.012—0.026	李萍等, 2018 ^[25]
Arabian Gulf, Saudi Arabia	—	0—0.002	28.22—34.17	0.78—0.51	21.07—24.61	0.84—1.13	Mahboob et al., 2022 ^[26]
Persian Gulf, Iran	0.251	0.011	0.251	0.116	1.41	—	Jafarabadi et al., 2017 ^[27]
Northeastern Mediterranean Sea	1.731	—	18.876	0.211	2.001	—	Çiftçi et al., 2021 ^[28]
Red Sea, Egypt	1.07	2.52	5.78	1.65	—	—	Masoud et al., 2019 ^[29]
South Australian, Southern Ocean	0.9—64.2	0.4—55	14—67	0.35—1.32	3.2—8.2	—	Chakraborty et al., 2014 ^[30]

调查海域海水表层、10 m 与底层分布类似, 因此以表层为例展示重金属不同季节的平面分布情况. 表层海水重金属不同季节分布如图 2 所示. 在春季, 除砷之外的 5 种重金属分布规律相似, 高值区位于西南部海域, 可能与西南部海域靠近多条航路船舶航运产生的污染有关. 砷的高值区位于离岸较近的东北部. 在秋季, 铜、锌、铬、砷和汞的浓度分布表现出由近岸向远岸逐渐降低的趋势. 调查区域被陆域包围, 该分布趋势可能是由于临海工业分布较集中, 陆域工业废水和生活污水排放入海的影响.

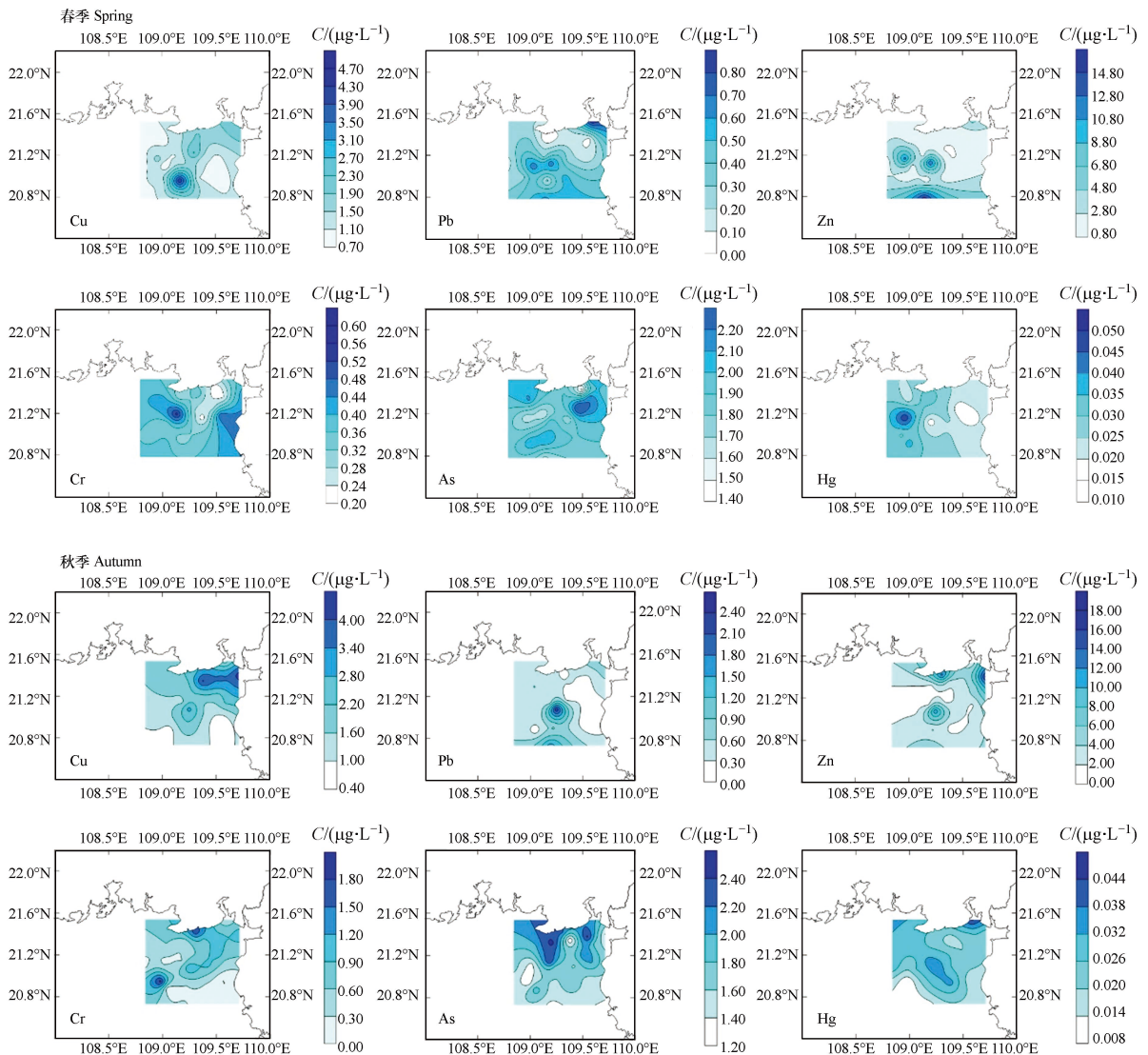


图 2 表层海水重金属分布情况

Fig.2 Distributions of heavy metals in the surface seawater of investigated areas

2.2 沉积物重金属分布特征

调查海域沉积物样品重金属浓度见表 5. 在春季, 6 种重金属浓度平均值分别为: 铜 $9.933 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$;

铅 21.609 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$; 锌 42.681 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$; 铬 31.057 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$; 砷 7.482 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$; 汞 0.0199 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$. 在秋季, 6 种重金属平均值分别为: 铜 8.717 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$; 铅 21.517 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$; 锌 49.387 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$; 铬 44.596 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$; 砷 1.600 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$; 汞 0.0169 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$. 本次调查与学者们之前在北部湾调查结果相比(表 6), 铅、锌、砷、汞浓度较低, 铜和铬浓度相近, 表明该海域沉积物中的铜与铬浓度较为稳定, 且沉积物污染状况有所减轻. 表层沉积物重金属浓度除砷存在季节差异外, 其余重金属含量季节差异不显著(Man-Whitney 检验, $P>0.1$)(表 5). 与国内外相关研究比较, 本次调查海域沉积物重金属浓度普遍偏低(表 6).

表 5 沉积物重金属浓度($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)Table 5 Concentrations of heavy metals in seawater ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)

季节 Season	数值 Value	铜 Cu	铅 Pb	锌 Zn	铬 Cr	砷 As	汞 Hg
春季	范围	5.3—21.2	30.2—30.2	24.8—75.8	4.9—79.3	1.58—10.6	0.005—0.026
	平均值	9.933	21.609	42.681	31.057	7.482	0.0199
秋季	范围	2—21.3	1.9—38.5	6.8—103	19—72.2	0.34—2.44	0.0035—0.029
	平均值	8.717	21.517	49.387	44.596	1.600	0.0169

表 6 国内外海域沉积物重金属浓度($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)Table 6 Concentrations of heavy metals in sediments of different sea areas ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)

海域 Sea area	铜 Cu	铅 Pb	锌 Zn	铬 Cr	砷 As	汞 Hg	参考文献 Reference
本研究(春季)	5.3—21.2	30.2—30.2	24.8—75.8	4.9—79.3	1.58—10.6	0.005—0.026	—
本研究(秋季)	2—21.3	1.9—38.5	6.8—103	19—72.2	0.34—2.44	0.0035—0.029	—
胶州湾	12.97—37.72	8.81—33.93	37.00—87.92	32.59—62.73			肖彩玲, 2017 ^[31]
海州湾北部	3.23—30.69	21.22—43.28	15.6—122.1	10.58—77.01	3.93—6.73	0.002—0.009	孟昆, 2018 ^[32]
防城港近岸	22.37	22.44	65.07	37.78	9.08	0.07	庞国涛等, 2022 ^[33]
雷州半岛附近海域	15.62	26.71	66.33	59.54	11.20	0.037	夏嘉等, 2022 ^[16]
广西近岸海域	8.95	17.6	43.6	20.0	7.12	0.0359	闭文妮等, 2022 ^[34]
钦州湾沙井岛临近海域	18.13	26.69	61.16	47.02	10.80	0.06	曹宏明等, 2020 ^[35]
Red Sea, Saudi Arabia	17.2—217.2	11.5—111.3	48.8—511.5	14.9—289	—	—	Alharbi et al., 2019 ^[36]
Bizerte coastal line, Tunisia	1.1	4.7	2.7	0.6	—	—	Aydi et al., 2022 ^[37]
Mid-Black Sea, Turkey	7.99—16.66	6.32—33.05	13.9—43.8	361.9—1084.85	3.6—5.95	0.03—0.22	Özkoç et al., 2022 ^[38]
Caspian Sea, Russia	8.3	4.19	17.1	—	—	—	de Mora et al., 2004 ^[39]
South east coastal sea, India	1.81—25.66	0.79—18.62	1.07—66.93	2.68—60.02	—	—	Satheeswaran et al., 2019 ^[40]

沉积物重金属平面分布如图 3 所示. 在春季, 铜、铅、锌和铬的高值区位于西南部海域, 砷的高值区位于中部海域, 汞的高值区靠近东部海域. 在秋季, 除砷表现出离散性分布外, 其他 5 种重金属的高值区皆位于西南部海域, 且也表现出由近岸向远岸逐渐递增的趋势. 这可能是由于不同区域沉积物类型的差异, 西南部海域沉积物主要为粉砂和黏土, 更容易吸附重金属^[41-42].

相关性分析结果(表 7)表明, 铬、汞、铅、铜、锌 5 种金属的浓度呈显著正相关关系, 表明 5 种重金属可能具有相似的迁移转化行为和类似的来源. 砷与其他 5 种重金属无显著相关性, 表明砷的来源可能与其他重金属不同. 以往研究表明海洋环境中的砷多来自陆源, 在土壤施肥过程中进入水体, 通过径流进入海洋^[43-44]. 此外, 有研究显示, 砷主要来源于自然环境, 这与其他 5 种金属可能主要来自人类活动有所差异, 可能也是砷与其他五种金属相关性差的原因^[45]. 研究的 6 种重金属浓度与有机碳含量(TOC)均表现出显著的正相关, 表明随着有机质含量的增加, 重金属浓度也呈增加的趋势. 研究表明, 有机质可通过络合作用吸附重金属导致沉积物重金属浓度升高, 是影响沉积物中重金属浓度的重要因素^[46-47]. 6 种重金属浓度与砂含量均呈显著的负相关性, 除砷以外的其余 5 种重金属与粉砂和黏土的含量均呈显著正相关性, 表明颗粒物越小, 比表面积越大, 吸附重金属的能力越强^[48].

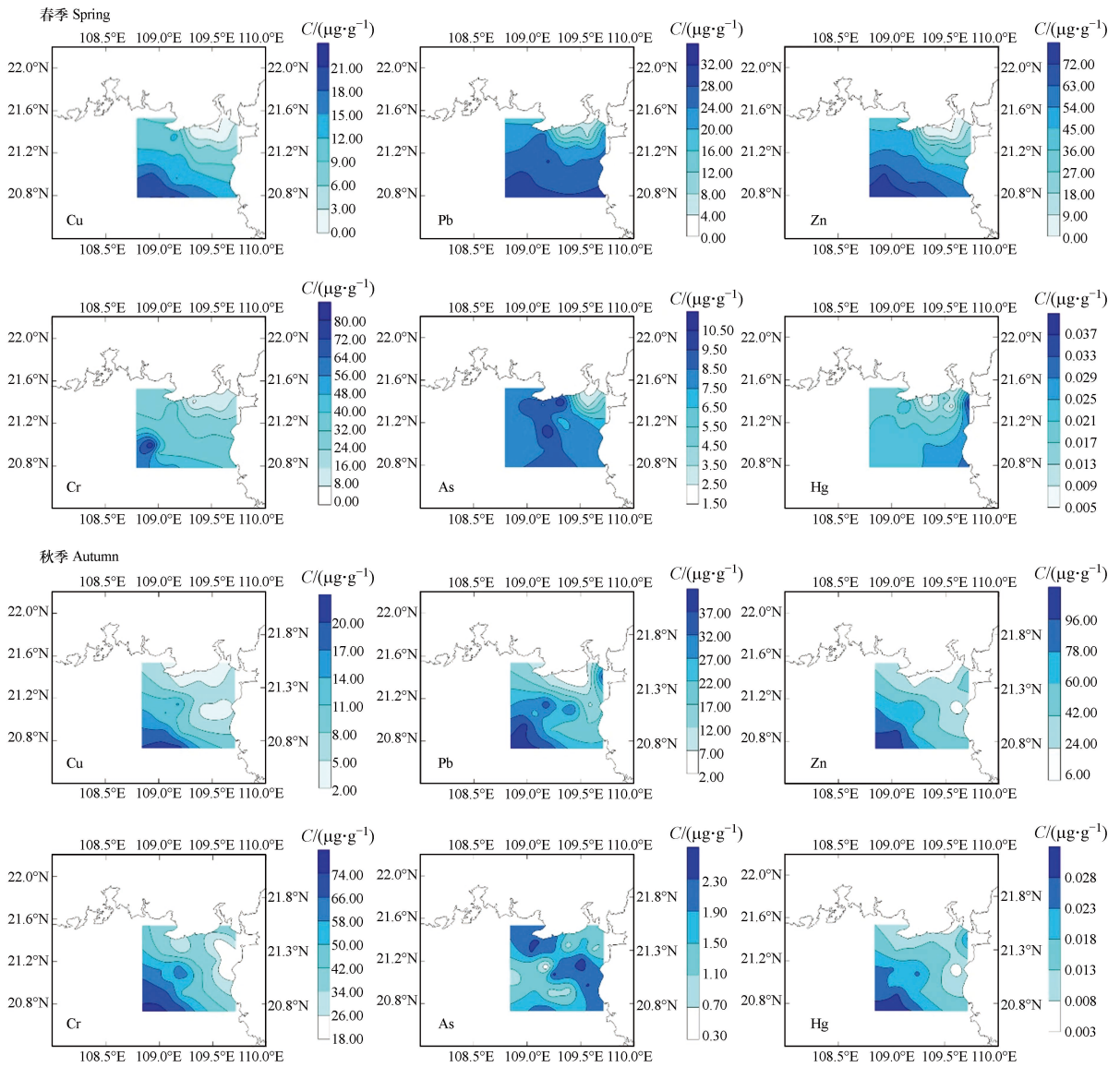


图3 沉积物重金属分布情况

Fig.3 Distributions of heavy metals in sediment of investigated areas.

表7 沉积物重金属与环境因素间的相关性

Table 7 Correlation of heavy metals with environmental factors in sediment

	铬 Cr	砷 As	汞 Hg	铅 Pb	铜 Cu	锌 Zn
TOC	0.613**	0.397**	0.867**	0.812**	0.872**	0.817**
砾	-0.163	0.094	0.372**	0.072	-0.109	-0.112
砂	-0.561**	-0.301**	-0.737**	-0.739**	-0.771**	-0.774**
粉砂	0.560**	0.259	0.549**	0.651**	0.742**	0.740**
黏土	0.576**	0.168	0.544**	0.635**	0.707**	0.737**
铬		-0.222	0.527**	0.702**	0.753**	0.844**
砷			0.264	0.164	0.284	0.060
汞				0.793**	0.723**	0.739**
铅					0.805**	0.876**
铜						0.923**

**表示 $P < 0.01$.

调查海域分布有北海至涠洲航路、北海至海南岛西海岸港口航路、涠洲岛航路以及北部湾港至东南亚各国航路等多条航路,渔业和运输船舶往来频繁,这可能是影响调查区域重金属分布变化的重要因素之一^[49].有学者指出,船舶燃油燃烧、防腐材料使用等会导致海水重金属浓度变化^[50-52].也有学者研究发现,来自琼州海峡的混合水与向北入侵的南海海水可以在春季和秋季导致北部湾海域生源要素发生变化^[53],推测本研究中海水重金属季节性分布差异也受上述因素的影响.同时,重金属也受海洋环境迁移转化过程的影响.有学者探讨了生物扰动对沉积物重金属分布的影响,指出颗粒重建和洞穴冲水的生物扰动方式可使重金属在水相与沉积物表层间迁移^[54].也有学者探讨了影响沉积物中重金属迁移转化分布的影响因素,发现硫化物、酸挥发性硫化物、有机组分、沉积物质地、pH、氧化还原电位和水文动力等都可能影响到沉积物重金属的分布^[55].此外,调查海域临近陆域,相关陆源入海的污染物对重金属的分布变化也会产生一定影响.

2.3 北部湾铁山港邻近海域重金属污染状况评价

按照海水和沉积物的第一类质量标准对北部湾铁山港邻近海域重金属污染状况进行评价,评价结果如表8所示.调查海域所有站位海水中铜、锌、铬、砷和汞含量均低于一类海水水质标准.铅在两个季节均有站位超过一类海水水质标准,但都低于二类海水水质标准.秋季铅超一类海水水质标准站位占比高于春季,且在表层和10 m层均有站位超一类海水水质标准,而春季仅在底层出现超一类水质标准.单因子标准指数评价结果表明,调查海域春季和秋季沉积物质量较好,无超一类水质标准站位.

表8 海水和沉积物重金属单因子标准指数

Table 8 Single factor index of heavy metals in the seawater and sediments

介质	季节	水深	数值	铜	铅	锌	铬	砷	汞
Sample	Season	Depth	Value	Cu	Pb	Zn	Cr	As	Hg
海水	春季	表层	范围	0.148—0.864	0.070—0.870	0.0430—0.0805	0.004—0.0108	0.072—0.109	0.32—1.00
			平均值	0.313	0.371	0.175	0.00683	0.0952	0.545
		10 m	范围	0.156—0.708	0.110—1.000	0.0535—0.182	0.0082—0.01	0.0825—0.123	0.320—0.740
			平均值	0.357	0.354	0.108	0.00667	0.0998	0.508
		底层	范围	0.172—0.880	0.160—1.120	0.060—0.540	0.00460—0.0100	0.0825—0.134	0.400—0.720
			平均值	0.328	0.675	0.154	0.00629	0.101	0.535
	秋季	表层	范围	0.0980—0.864	0.120—2.370	0.0485—0.804	0.00220—0.0382	0.0610—0.122	0.160—0.900
			平均值	0.399	0.545	0.196	0.0138	0.0889	0.483
		10 m	范围	0.176—0.724	0.0800—1.460	0.0465—0.463	0.00200—0.0950	0.0540—0.125	0.200—0.920
			平均值	0.306	0.516	0.158	0.0156	0.0893	0.513
		底层	范围	0.184—0.752	0.180—0.870	0.0385—0.418	0.00380—0.0288	0.0440—0.114	0.280—0.940
			平均值	0.395	0.525	0.139	0.0121	0.0974	0.511
沉积物	春季	范围	0.151—0.606	0.0933—0.503	0.165—0.505	0.0612—0.991	0.0790—0.515	0.025—0.190	
		平均值	0.351	0.378	0.351	0.388	0.374	0.0992	
	秋季	范围	0.0571—0.609	0.0317—0.642	0.0453—0.687	0.237—0.903	0.0170—0.121	0.0175—0.145	
		平均值	0.249	0.359	0.329	0.557	0.0800	0.0846	

2.4 沉积物重金属潜在生态风险评价

本文采用 Hakanson(1980)提出的潜在生态风险指数评价法对调查海域的沉积物进行了重金属潜在生态风险评价^[17].潜在生态风险指数 E_r^i 如表9所示.6种重金属 E_r^i 值春季由高到低分别为汞>砷>铅>铜>铬>锌,秋季则为汞>铅>铜>铬>砷>锌.该结果与学者在北部湾海域的研究结果相似^[18,56],调查海域汞和铅的潜在生态风险相对较高.考虑到该港口区域航运较集中,海域锚地和习惯航线较多,船舶排放烟气含有汞和铅,烟气排放沉降可能是研究海域汞和铅风险高的一个主要原因.此外,因船舶防腐涂料和航运产生的污染应予以关注^[57-58].

表 9 沉积物重金属潜在生态风险指数(E_r^i)

Table 9 The potential ecological risk indices of heavy metals in the sediments

季节 Season	数值 Value	E_r^i					
		铜 Cu	铅 Pb	锌 Zn	铬 Cr	砷 As	汞 Hg
春季	范围	0.757—3.029	0.467—2.517	0.165—0.505	0.123—1.983	0.790—5.300	1—7.6
	平均值	1.753	1.891	0.351	0.776	3.741	3.971
秋季	范围	0.314—3.043	0.158—3.208	0.045—0.687	0.475—1.805	0.170—1.220	0.7—5.6
	平均值	1.374	1.793	0.329	1.115	0.800	3.385

3 结论(Conclusion)

- (1) 调查海域重金属总体污染较轻, 垂直分布较均匀, 平面分布存在显著季节性差异。
- (2) 沉积物粒径和 TOC 是影响沉积物重金属浓度分布变化的主要环境因素。
- (3) 单因子标准指数法和潜在生态风险指数法评估结果表明, 调查海域汞和铅潜在生态风险较高。
- (4) 船舶航行对北部湾海域海水及沉积物中重金属含量变化的影响应予以关注。

参考文献 (References)

- [1] LIN H Y, LAN W, FENG Q, et al. Pollution and ecological risk assessment, and source identification of heavy metals in sediment from the Beibu Gulf, South China Sea [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2021, 168: 112403.
- [2] DUAN X Y, LI Y X. Distributions and sources of heavy metals in sediments of the Bohai Sea, China: A review [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2017, 24(32): 24753-24764.
- [3] GU X, LIN C Y, LIU Z Y, et al. Heavy metal distribution in Chinese coastal sediments and organisms: Human impacts, probabilistic risks and sensitivity analysis [J]. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 2022, 7: 100147.
- [4] SAEEDI M, HOSSEINZADEH M, RAJABZADEH M. Competitive heavy metals adsorption on natural bed sediments of Jajrood River, Iran [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 62(3): 519-527.
- [5] 刘畅, 陈路锋, 高华阳, 等. 东海沉积物汞形态分布及控制因素 [J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2018, 48(S2): 59-66.
LIU C, CHEN L F, GAO H Y, et al. Distribution of mercury species and their controlling factors in the sediment of the East China Sea [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2018, 48(Sup 2): 59-66(in Chinese).
- [6] 张栋华, 吕钊臻, 邵主峰, 等. 胶州湾沉积物柱状样重金属垂向分布特征及其控制因素 [J]. *海洋环境科学*, 2020, 39(5): 664-669,675.
ZHANG D H, LV Z Z, SHAO Z F, et al. The vertical distribution patterns of heavy metals in a sediment core of the Jiaozhou Bay and their controlling factors [J]. *Marine Environmental Science*, 2020, 39(5): 664-669,675(in Chinese).
- [7] EL-METWALLY M E A, ABU EL-REGAL M A, ABDELKADER A I, et al. Heavy metal accumulation in zooplankton and impact of water quality on its community structure [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2022, 15(1): 1-14.
- [8] 吕钊臻, 邵主峰, 梁生康, 等. 莱州湾海水与沉积物中总汞和甲基汞分布特征与影响因素 [J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2022, 52(8): 111-123.
LV Z Z, SHAO Z F, LIANG S K, et al. Distribution of total mercury and methylmercury in seawater and sediments of the Laizhou Bay and their influencing factors [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2022, 52(8): 111-123(in Chinese).
- [9] MIRANDA L S, AYOKO G A, EGODAWATTA P, et al. Physico-chemical properties of sediments governing the bioavailability of heavy metals in urban waterways [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 763: 142984.
- [10] 劳齐斌, 刘国强, 申友利, 等. 北部湾入海河流营养盐的分布特征及入海通量研究 [J]. *海洋学报*, 2020, 42(12): 93-100.
LAO Q B, LIU G Q, SHEN Y L, et al. Distribution characteristics and fluxes of nutrients in the rivers of the Beibu Gulf [J]. *Haiyang Xuebao*, 2020, 42(12): 93-100(in Chinese).
- [11] 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.
XU Y X, XIE Y, ZHAO P, et al. Heavy metal pollution of seawater in Weizhou Island, Beibu Gulf of Guangxi [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, 27(5): 908-915(in Chinese).
- [12] 青尚敏, 陈海南, 孙燕, 等. 广西铁山港邻近海域表层沉积物中重金属污染现状 [J]. *广西科学*, 2021, 28(6): 568-576.
QING S M, CHEN H N, SUN Y, et al. Pollution status of heavy metals in surface sediments near Tieshangang Bay sea area, Guangxi [J]. *Guangxi Sciences*, 2021, 28(6): 568-576(in Chinese).

- [13] 夏嘉, 高苑, 林倩妮, 等. 北部湾北部海底表层沉积物重金属污染评价 [J]. *广东化工*, 2021, 48(16): 167-169,166.
XIA J, GAO Y, LIN Q N, et al. Heavy metal pollution assessment in seafloor sediments in the northern Beibu Gulf [J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2021, 48(16): 167-169,166(in Chinese).
- [14] 熊丹, 林清, 赵银军, 等. 北部湾潮间带沉积物总Hg含量分布特征研究 [J]. *环境科学与技术*, 2017, 40(2): 195-199.
XIONG D, LIN Q, ZHAO Y J, et al. Distribution characteristics of total mercury content in top-sediments of intertidal zone of the Beibu Gulf in Guangxi [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 40(2): 195-199(in Chinese).
- [15] 滕德强, 崔振昂, 袁晓婕, 等. 北部湾海域表层沉积物中重金属元素分布特征及潜在生态危害评价 [J]. *中国地质调查*, 2020, 7(6): 79-85.
TENG D Q, CUI Z A, YUAN X J, et al. Distribution patterns and potential ecological risk evaluation of heavy metals in the surface sediments of Beibu Gulf [J]. *Geological Survey of China*, 2020, 7(6): 79-85(in Chinese).
- [16] 夏嘉, 高苑, 王思波, 等. 雷州半岛近海表层沉积物重金属污染评价 [J]. *海洋环境科学*, 2022, 41(2): 276-282.
XIA J, GAO Y, WANG S B, et al. Assessment of the heavy metal pollution in the offshore surface sediments of the Leizhou peninsula [J]. *Marine Environmental Science*, 2022, 41(2): 276-282(in Chinese).
- [17] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, 14(8): 975-1001.
- [18] 陈旭阳, 刘保良. 广西铁山港海域沉积物重金属污染状况及潜在生态风险评价 [J]. *海洋通报*, 2012, 31(3): 297-301.
CHEN X Y, LIU B L. Assessment on the pollution and potential ecological risk of heavy metals in the surface sediments at Tieshangang Bay, Guangxi [J]. *Marine Science Bulletin*, 2012, 31(3): 297-301(in Chinese).
- [19] 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.
SONG Y G, WU J H, SHAO Z W, et al. Evaluation of heavy metal pollution in the offshore surface seawater of the Liaodong Bay [J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2016, 37(3): 14-19(in Chinese).
- [20] 蔡端波, 杨丽坤, 朱娜, 等. 秋季渤海湾(河北省段)水体及鱼体内重金属含量与评价 [J]. *河北大学学报(自然科学版)*, 2015, 35(4): 371-378,384.
CAI D B, YANG L K, ZHU N, et al. Evaluation and content of various heavy metals found in the water and fish collected from Bohai Bay(Section in Hebei)during the autumn [J]. *Journal of Hebei University (Natural Science Edition)*, 2015, 35(4): 371-378,384(in Chinese).
- [21] 何祥英. 近5a北部湾防城港近岸海水重金属的含量分布特征及影响因素 [J]. *安徽农业科学*, 2014, 42(23): 7956-7959,7978.
HE X Y. Distribution characteristics and influencing factors of heavy metals' contents in nearshore seawater of Fangchenggang in Beibu Gulf in recent 5 years [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2014, 42(23): 7956-7959,7978(in Chinese).
- [22] 张荣灿, 石展望, 雷富. 钦州湾东部近岸海域秋季水质模糊综合评价 [J]. *海洋技术学报*, 2015, 34(2): 83-89.
ZHANG R C, SHI Z W, LEI F. Fuzzy comprehensive evaluation on the seawater quality of the coastal waters of the eastern Qinzhou Bay in autumn [J]. *Journal of Ocean Technology*, 2015, 34(2): 83-89(in Chinese).
- [23] 李萍, 郭钊, 莫海连. 广西近岸海域海水表层重金属的含量分布特征及污染评价 [J]. *科技通报*, 2018, 34(3): 223-227,233.
LI P, GUO Z, MO H L. Distribution and pollution evaluation of heavy metals in the surface seawaters in Guangxi coastal area [J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2018, 34(3): 223-227,233(in Chinese).
- [24] 赵佳林, 胡春景, 胡春歧, 等. 基于物种敏感性分布的湛江湾重金属生态风险评价 [J]. *人民长江*, 2022, 53(1): 54-60.
ZHAO J L, HU C J, HU C Q, et al. Ecological risk assessment of heavy metals in Zhanjiang Bay based on species sensitivity distribution [J]. *Yangtze River*, 2022, 53(1): 54-60(in Chinese).
- [25] 李萍, 莫海连, 郭钊. 广西铁山港区域用海环境质量评价 [J]. *科技通报*, 2018, 34(11): 242-250.
LI P, MO H L, GUO Z. Environmental quality assessment of area with the sea of Guangxi Tieshan Port [J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2018, 34(11): 242-250(in Chinese).
- [26] MAHBOOB S, AHMED Z, FAROOQ K M, et al. Assessment of heavy metals pollution in seawater and sediments in the Arabian Gulf, near Dammam, Saudi Arabia [J]. *Journal of King Saud University - Science*, 2022, 34(1): 101677.
- [27] RANJBAR JAFARABADI A, RIYAH BAKHTIYARI A, SHADMEHRI TOOSI A, et al. Spatial distribution, ecological and health risk assessment of heavy metals in marine surface sediments and coastal seawaters of fringing coral reefs of the Persian Gulf, Iran [J]. *Chemosphere*, 2017, 185: 1090-1111.
- [28] ÇİFTÇİ N, AYAS D, BAKAN M. The comparison of heavy metal level in surface water, sediment and biota sampled from the polluted and unpolluted sites in the northeastern Mediterranean Sea [J]. *Thalassas:an International Journal of Marine Sciences*, 2021, 37(1): 319-330.
- [29] MASOUD M S, ABDEL-HALIM A M, EL ASHMAWY A A. Seasonal variation of nutrient salts and heavy metals in mangrove (*Avicennia marina*) environment, Red Sea, Egypt [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2019, 191(7): 425.
- [30] CHAKRABORTY S, OWENS G. Metal distributions in seawater, sediment and marine benthic macroalgae from the South Australian coastline [J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2014, 11(5): 1259-1270.

- [31] 肖彩玲, 陈路锋, 李雁宾. 胶州湾沉积物重金属分布特征及生态风险评价 [J]. *中国科技论文*, 2017, 12(9): 1079-1086.
XIAO C L, CHEN L F, LI Y B. Distribution characteristics and potential risk assessment of heavy metals in the sediment of Jiaozhou Bay [J]. *China Sciencepaper*, 2017, 12(9): 1079-1086 (in Chinese).
- [32] 孟昆, 徐敏, 徐文健, 等. 海州湾北部沉积物重金属来源解析及污染评价 [J]. *南京师大学报(自然科学版)*, 2018, 41(2): 99-106.
MENG K, XU M, XU W J, et al. Sources apportionment and pollution assessment of heavy metals in the sediments of the northern Haizhou Bay in China [J]. *Journal of Nanjing Normal University (Natural Science Edition)*, 2018, 41(2): 99-106 (in Chinese).
- [33] 庞国涛, 阎琨, 李伟. 广西防城港近岸表层沉积物重金属分布特征及污染评价 [J]. *中国地质调查*, 2022, 9(1): 82-90.
PANG G T, YAN K, LI W. Distribution characteristics and pollution assessment of heavy metals in coastal surface sediments of Fangchenggang in Guangxi [J]. *Geological Survey of China*, 2022, 9(1): 82-90 (in Chinese).
- [34] 闭文妮, 洪鸣, 彭梦微, 等. 2005—2020年广西近岸海域表层沉积物重金属含量特征及风险评价 [J]. *海洋环境科学*, 2022, 41(3): 416-422, 429.
BI W N, HONG M, PENG M W, et al. Assessment on the pollution and risk of heavy metals in surface sediments of Guangxi offshore from 2005 to 2020 [J]. *Marine Environmental Science*, 2022, 41(3): 416-422, 429 (in Chinese).
- [35] 曹宏明, 朝鲁, 陈代庚, 等. 钦州湾沙井岛及周边海底沉积物重金属分布与生态风险评价 [J]. *北部湾大学学报*, 2020, 35(8): 1-7.
CAO H M, CHAO L, CHEN D G, et al. Distribution and ecological risk assessment of heavy metals in seabed sediments on Shajing Island and its surrounding areas in Qinzhou Bay [J]. *Journal of Beibu Gulf University*, 2020, 35(8): 1-7 (in Chinese).
- [36] ALHARBI OMAR M L, KHATTAB R A, ALI I, et al. Assessment of heavy metals contamination in the sediments and mangroves (*Avicennia marina*) at Yanbu coast, Red Sea, Saudi Arabia [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, 149: 110669.
- [37] AYDI A, GHANNEM S, NASRI A. Evaluation of heavy metals contamination and pollution indices levels in surface sediments of the Bizerte coastal line, Tunisia [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2022, 184: 114171.
- [38] BÖKE ÖZKOÇ H, ARIMAN S. Contamination and risk assessment of heavy metals in coastal sediments from the Mid-Black Sea, Turkey [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2022: 1-20.
- [39] de MORA S, SHEIKHOLESLAMI M R, WYSE E, et al. An assessment of metal contamination in coastal sediments of the Caspian Sea [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2004, 48(1/2): 61-77.
- [40] SATHEESWARAN T, YUVARAJ P, DAMOTHARAN P, et al. Assessment of trace metal contamination in the marine sediment, seawater, and bivalves of Parangipettai, southeast coast of India [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, 149: 110499.
- [41] 肖晓, 石要红, 冯秀丽, 等. 北部湾表层沉积物粒度分布规律及沉积动力分区 [J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2016, 46(5): 83-89.
XIAO X, SHI Y H, FENG X L, et al. Surface sediment characteristics and dynamics in Beibu Gulf [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2016, 46(5): 83-89 (in Chinese).
- [42] 徐志伟, 汪亚平, 李炎, 等. 多元统计及物源分析支持的北部湾东部海域沉积物输运趋势 [J]. *海洋学报(中文版)*, 2010, 32(3): 67-78.
XU Z W, WANG Y P, LI Y, et al. Sediment transport patterns in the eastern Beibu Gulf based on grain-size multivariate statistics and provenance analysis [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2010, 32(3): 67-78 (in Chinese).
- [43] LI Y B, CAI Y. Mobility of toxic metals in sediments: Assessing methods and controlling factors [J]. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 2015, 31: 203-205.
- [44] 王伟力, 王继纲, 林彩, 等. 福建兴化湾中部表层海水及沉积物中重金属含量特征与生态风险评价 [J]. *应用海洋学学报*, 2016, 35(2): 284-293.
WANG W L, WANG J G, LIN C, et al. Characteristic and ecological risk evaluation of heavy metals in surface seawater and sediments of the central Xinghua Bay in Fujian [J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2016, 35(2): 284-293 (in Chinese).
- [45] NEFF J M. Bioaccumulation in marine organisms: effect of contaminants from oil well produced water [M]. Oxford: Elsevier Science: 57-78, 2002.
- [46] EL-SOROGY A S, YOUSSEF M, AL-KAHTANY K, et al. Assessment of arsenic in coastal sediments, seawaters and molluscs in the Tarut Island, Arabian Gulf, Saudi Arabia [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2016, 113: 65-72.
- [47] LIU X, ZENG B, LIN G. Arsenic (As) contamination in sediments from coastal areas of China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2022, 175: 113350.
- [48] KANG X M, SONG J M, YUAN H M, et al. Speciation of heavy metals in different grain sizes of Jiaozhou Bay sediments: Bioavailability, ecological risk assessment and source analysis on a centennial timescale [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, 143: 296-306.
- [49] 蔡映红, 刘君. 西部陆海新通道战略背景下北部湾航路问题探讨 [J]. *中国海事*, 2022(8): 11-14.
CAI Y H, LIU J. Discussions on the shipping route of Beibu Gulf under the strategy of the new western land-sea corridor [J]. *China*

- Maritime Safety, 2022(8): 11-14(in Chinese).
- [50] 杨华, 王少鹏, 余克服, 等. 南海北部珊瑚生长区海水重金属污染特征 [J]. *生态环境学报*, 2017, 26(2): 253-260.
YANG H, WANG S P, YU K F, et al. Pollution characteristics of heavy metals in seawater of coral growing regions in the northern South China Sea [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, 26(2): 253-260(in Chinese).
- [51] 涂春超. 江苏中部近岸海域表层沉积物重金属分布特征与污染评价 [D]. 南京: 南京师范大学, 2018.
TU C C. Distribution characteristic and pollution assessment of heavy metals in sediments of midcoastal areas in Jiangsu Province [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2018(in Chinese).
- [52] 李越, 李顺, 蔡观强. 海南岛北部海湾重金属污染分布及来源 [J]. *海洋地质前沿*, 2022, 38(8): 37-46.
LI Y, LI S, CAI G Q. Distribution and origination of heavy metal pollution in bays of northern Hainan Island [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2022, 38(8): 37-46(in Chinese).
- [53] 袁涌铨, 吕旭宁, 吴在兴, 等. 北部湾典型海域关键环境因子的时空分布与影响因素 [J]. *海洋与湖沼*, 2019, 50(3): 579-589.
YUAN Y Q, LÜ X N, WU Z X, et al. Temporal and spatial distribution of main environmental factors in typical sea area of the Beibu Gulf and its influencing factors [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2019, 50(3): 579-589(in Chinese).
- [54] 何怡, 门彬, 杨晓芳, 等. 生物扰动对沉积物中重金属迁移转化影响的研究进展 [J]. *生态毒理学报*, 2016, 11(6): 25-36.
HE Y, MEN B, YANG X F, et al. Bioturbation effect on the migration and transformation of heavy metals in sediment: A review [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2016, 11(6): 25-36(in Chinese).
- [55] 邓瑜衡, 赵军. 沉积物中重金属的迁移转化影响机制研究 [J]. *环境工程*, 2017, 35(4): 179-182.
DENG Y H, ZHAO J. Influence of sediment properties on migration and bioavailability of heavy metals [J]. *Environmental Engineering*, 2017, 35(4): 179-182(in Chinese).
- [56] 朱学韬. 广西北部湾表层沉积物中重金属污染现状评价及来源解析 [D]. 南宁: 广西大学, 2020.
ZHU X T. Pollution evaluation and source identification of heavy metals in surface sediment of Beibu Gulf, Guangxi [D]. Nanning: Guangxi University, 2020(in Chinese).
- [57] SHARIFINIA M, TAHERIZADEH M, NAMIN J I. Ecological risk assessment of trace metals in the surface sediments of the Persian Gulf and Gulf of Oman: Evidence from subtropical estuaries of the Iranian coastal waters [J]. *Chemosphere*, 2018, 191: 485-493.
- [58] MORTAZAVI M S, SHARIFIAN S, MOHEBBI-NOZAR S L, et al. The spatial distribution and ecological risks of heavy metals in the north of Persian Gulf [J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2022, 19(10): 10143-10156.