

◆海洋科学◆

庙岛群岛西部海域表层沉积物重金属分布特征与生态风险评价*

杨鹏, 王海根**, 王庆同, 宇星辰, 张家浩, 毛方松, 葛祥威

(中国地质调查局烟台海岸带地质调查中心, 山东烟台 264004)

摘要:为了解庙岛群岛西部海域表层沉积物重金属的污染现状, 2021年11月采集该区域32个站位表层沉积物样品, 运用正定矩阵因子分解(PMF)模型、单因子指数(EF)法、富集因子法、地累积指数(I_{geo})法、潜在生态风险指数(RI)法等方法, 综合分析评价重金属元素的含量、分布特征、富集性和潜在生态风险。结果表明, Cu、Cr、Cd、Zn、Pb、As和Hg的平均质量浓度分别为16.56、61.58、0.120、50.51、16.19、7.41和0.021 $mg \cdot kg^{-1}$ 。Cr、As和Pb高值区主要分布在南长山岛西南部; Cu、Zn和Hg高值区在大黑山岛西南部大体呈东西向条带状展布; Cd高值区在大黑山岛以西大体呈北东-南西向展布, 各元素空间分布不均。除HB90站位Cr和As浓度超过标准外, 其他各站位重金属元素浓度均低于国家标准中海洋沉积物质量第一类标准。从富集程度来看, 除HB90站位的Cr为中等富集水平外, 其他各重金属元素均处在无-轻微富集水平。地累积指数法评价结果表明, 研究区的Cd主要为清洁-轻污染状态; HB90站位的Cr为偏中度污染状态, As为轻度污染。潜在生态风险评价结果表明, 研究区表层沉积物重金属总体为轻微-中等潜在生态风险, 主要污染元素为Cd和Hg。总体来说, 庙岛群岛西部海域表层沉积物重金属污染程度较低。

关键词:庙岛群岛; 表层沉积物; 重金属; 生态风险

中图分类号: P736, X820.4 文献标识码: A 文章编号: 1005-9164(2023)04-0672-11

DOI: 10.13656/j.cnki.gxkx.20230928.006

重金属具有显著的生物累积和放大效应, 对生态系统及人类健康存在长期的潜在影响^[1]。十八大以来, 国家对海洋生态环境保护提出了新的任务要求, 公众对海洋环境污染问题也越来越关注和重视, 重金属的污染评价在海洋生态环境评价中的作用日益

突显^[2,3]。

庙岛群岛位于渤海海峡, 黄海与渤海交汇处, 由岛链式分布的岛屿组成^[4]。该海域海洋生物物种丰富, 为多种鱼类洄游必经之地^[5]。其周边有长岛海洋生态文明综合试验区、长岛自然保护区等多个保护区

收稿日期: 2023-06-06

修回日期: 2023-08-17

* 渤海海峡南部海岸带1:5万综合地质调查项目(DD20211578)资助。

【第一作者简介】

杨鹏(1989-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事海洋与海岸带地质研究, E-mail: 825767477@qq.com。

【**通信作者】

王海根(1987-), 男, 工程师, 主要从事海洋与海岸带地质研究, E-mail: 183649943@qq.com。

【引用本文】

杨鹏, 王海根, 王庆同, 等. 庙岛群岛西部海域表层沉积物重金属分布特征与生态风险评价[J]. 广西科学, 2023, 30(4): 672-682.

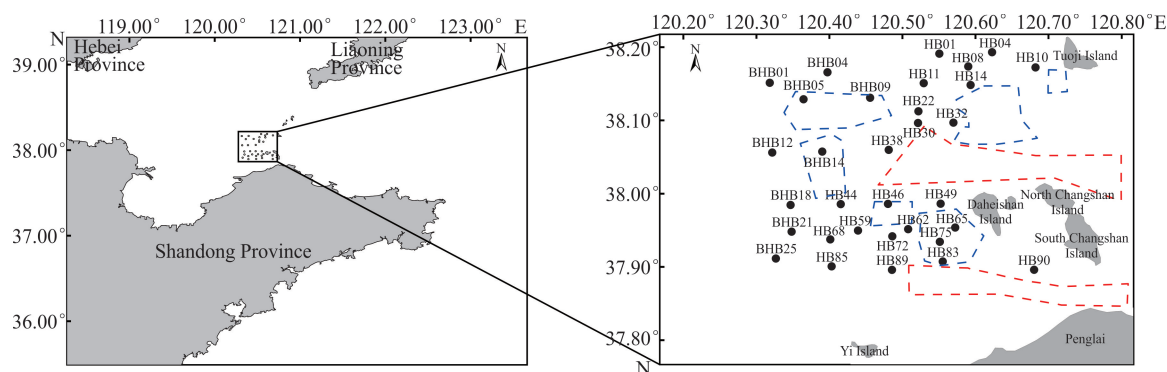
YANG P, WANG H G, WANG Q T, et al. Spatial Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Western Miaodao Archipelago [J]. Guangxi Sciences, 2023, 30(4): 672-682.

以及大片的人工养殖区。长岛常住人口 4 万余人,年接待游客 360 余万人,随着当地养殖业、航运业、旅游业等的快速发展,包含重金属在内的各种污染废水进入该海域,重金属元素在海底沉积物中不断累积,造成该海域沉积物的潜在生态风险日益增加。目前针对渤海海域的重金属生态风险评价较多^[6-9],而针对庙岛群岛西部海域表层沉积物重金属的评价研究偏少。本研究通过对该海域的表层沉积物进行取样调查,研究分析重金属元素的分布特征及潜在生态风险,探讨重金属元素的来源,以期掌握海底表层沉积物质量状况,拟为指导该海域生态环境保护与海洋牧场建设规划选址,实现人与自然和谐共生提供基础环境数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于山东省烟台市蓬莱区长岛海洋生态文明综合试验区,属暖温带季风气候^[10],潮汐为规则半日潮。地层分布有新元古代蓬莱群、中生代晚期火山岩和新生代第四系沉积物^[10],地貌类型以低山和丘陵为主,海岸以基岩-礁石海岸、砂质海岸为特征。



Red dashed line represents the channel; blue dashed line represents the breeding area.

图 1 研究区沉积物采样站位示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sediments at sampling sites in the study area

1.3 数据处理

采用 SPSS 25、Excel 2010 和 PMF 5.0 软件进行统计分析和数据处理。

1.4 评价方法

1.4.1 正定矩阵因子分解(PMF)模型

PMF 模型^[14]为目前常用的源解析模型,根据权重计算沉积物中各化学组分的误差,然后通过最小二乘法来确定主要污染源及其贡献率。计算公式为

$$X = GF + E, \quad (1)$$

1.2 样品采集与测试

于 2021 年 11 月在庙岛群岛西部海域 32 个采样点(图 1),使用箱式取样器从海底抓取表层沉积物样品共 32 件,用木铲取中央未受干扰的表层 0-1 cm 的样品。样品的采集、储存和输送按照《海洋监测规范 第 3 部分:样品采集、贮存与运输》^[11]的标准实施。样品的制备和分析测试分别按照《硅酸盐岩石化学分析方法 第 28 部分:16 个主次成分量测定》^[12]、《海洋监测规范 第 5 部分:沉积物分析》^[13]标准实施。其中,Al₂O₃ 和 Fe₂O₃ 的含量通过 X 射线荧光光谱仪(Axios-mAX,英国马尔文帕纳科)测定;Cu、Pb、Zn、Cd 和 Cr 元素含量通过电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS, ELEMENT XR,美国 Thermo Fisher)测定;As 和 Hg 元素含量通过原子荧光光度计(LC-AFS6500,北京海光仪器有限公司)测定。为确保测试结果的准确性,分析过程中样品按规范要求加 10%空白样和 3 次平行样进行测定,并随机插入国家有证标准物质 GBW07307a(GSD-7a)、GBW07308a(GSD-8a)进行测量,相对偏差均符合要求。Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、As 和 Hg 的检出限分别为 0.013、0.013、0.013、0.003、0.025、0.13 和 0.002 5 mg · kg⁻¹。

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left(\frac{e_{ij}}{s_{ij}} \right)^2, \quad (2)$$

$$e_{ij} = x_{ij} - \sum_{k=1}^h g_{ik} f_{kj}, \quad (3)$$

式中, X 为 $n \times m$ 的矩阵, G 为 $n \times h$ 的矩阵, F 为 $h \times m$ 的矩阵,其中 n 为样品数, m 为化学成分数, h 为污染源数目, E 为残差矩阵; Q 为目标函数, e_{ij} 为第 i 个样品中第 j 个元素的残差, s_{ij} 为第 i 个样品中第 j 个元素的不确定度大小; x_{ij} 为第 i 个样品中第 j 个元素的浓度, g_{ik} 为源 k 对第 i 个样品的贡献, f_{kj}

为源 k 中第 j 个重金属元素含量。在参数值非负的约束条件下, 利用迭代最小化算法对 Q 求解, 在 Q 为最小值的条件下, 求出污染源相对贡献率和污染源成分图谱。模型计算利用 PMF 5.0 进行, 重金属不确定度采用以下公式确定:

$$s_{ij} = \sqrt{(ES \times c)^2 + (0.5 \times MDL)^2}, \quad (4)$$

式中, ES 为常数, 通常取值为 0.05–0.20, 本研究取值 0.05^[15], c 为重金属元素浓度实测值, MDL 为元素检出限。

1.4.2 单因子指数法

海底表层沉积物质量用单因子指数^[16]进行评价, 其评价方法是用某种重金属元素的实测值与该元素的标准值进行比较来确定该重金属的具体质量类别, 计算公式为

$$P_m = \frac{C_m}{S_m}, \quad (5)$$

式中, P_m 为某站位重金属 m 的污染指数, C_m 为重金属 m 的实测值, S_m 为重金属 m 的标准值。当 $P_m \leq 1$ 时, 表层沉积物质量满足标准; 当 $P_m > 1$ 时, 表层沉积物质量不满足标准。评价标准采用《海洋沉积物质量》^[17]中的第一类沉积物质量标准。

1.4.3 富集因子(EF)法

富集因子法可用来评价人类活动对表层沉积物中重金属富集性的影响^[18], 计算公式如下:

$$EF = \frac{(K_m/K_i)_{\text{sample}}}{(K_m/K_i)_{\text{baseline}}}, \quad (6)$$

式中, K_m 为重金属元素 m 的浓度, K_i 为标准化元素 i 的浓度, sample 表示样品, baseline 表示背景。本研究以 Al 作为标准化元素, 采用中国浅海沉积物元素丰度值^[19]作为背景值。富集因子等级见表 1。

表 1 富集因子分级及重金属污染程度

Table 1 Classification of enrichment factors and the pollution degree of heavy metals

富集因子 Enrichment factors	等级 ^[13] Grade ^[13]	污染程度 ^[17] Pollution degree ^[17]
$EF < 2$	Non-slight	Non-slight pollution
$2 \leq EF < 5$	Medium	Medium pollution
$5 \leq EF < 20$	Strong	Heavy pollution
$20 \leq EF < 40$	Very strong	Severe pollution
$EF \geq 40$	Extremely strong	Extreme pollution

1.4.4 地累积指数(I_{geo})法

地累积指数法^[20]用来评价重金属的累积程度,

公式为

$$I_{\text{geo}} = \log_2 \frac{C_m}{1.5 \times B_m}, \quad (7)$$

式中, C_m 为样品中重金属元素 m 的实测值, B_m 为沉积母质中元素 m 的地球化学背景值。本研究采用中国浅海沉积物元素丰度值作为背景值^[19]。

根据地累积指数将重金属元素污染程度分为 7 个等级^[20](表 2)。

表 2 地累积指数(I_{geo})分级及重金属污染程度

Table 2 Geoaccumulative index (I_{geo}) classification and the pollution degree of heavy metals

地累积指数 I_{geo}	等级 Grade	污染程度 Pollution degree
$I_{\text{geo}} < 0$	0	Clean
$0 \leq I_{\text{geo}} < 1$	1	Slight
$1 \leq I_{\text{geo}} < 2$	2	Moderate
$2 \leq I_{\text{geo}} < 3$	3	Medium
$3 \leq I_{\text{geo}} < 4$	4	Relatively heavy
$4 \leq I_{\text{geo}} < 5$	5	Heavy
$I_{\text{geo}} \geq 5$	6	Extremely heavy

1.4.5 潜在生态风险指数(RI)法

潜在生态风险指数法^[21]由瑞典科学家 Hakanson(1980)提出, 该方法被广泛应用于海洋沉积物重金属污染评价^[22], 公式为

$$Er^i = Tr^i \times C_f^i = Tr^i \times C^i / C_n^i, \quad (8)$$

$$RI = \sum_{i=1}^n Er^i, \quad (9)$$

式中, RI 为沉积物重金属综合潜在生态风险指数, Er^i 为重金属 i 的潜在生态风险指数, Tr^i 为重金属 i 的毒性响应系数, C_f^i 为重金属 i 的污染指数, C^i 为重金属 i 的实测值, C_n^i 为重金属 i 的背景值。本研究采用中国浅海沉积物元素丰度值作为背景值^[19]。

本研究根据各污染因子所占权重结合文献^[9, 23, 24]对 RI 值进行了调整, 具体标准值及相关等级划分见表 3, Al_2O_3 、重金属元素背景值及毒性响应系数见表 4。

表 3 潜在生态风险标准及分级

Table 3 Standards and classification of potential ecological risk

Er^i	RI	潜在生态风险等级 Potential ecological risk classification
$Er^i < 40$	$RI < 105$	Slight
$40 \leq Er^i < 80$	$105 \leq RI < 210$	Medium
$80 \leq Er^i < 160$	$210 \leq RI < 420$	Strong
$160 \leq Er^i < 320$	$RI \geq 420$	Very strong

表 4 Al_2O_3 、重金属元素背景值及毒性响应系数Table 4 Background value and toxicity response coefficients of Al_2O_3 and heavy metals element

元素 Element	Tr^i	$C_n^i /$ ($mg \cdot kg^{-1}$)
Cr	2	61
Cu	5	15
Zn	1	65
Cd	30	0.065
Pb	5	20
Hg	40	0.025
As	10	7.7
Al_2O_3		5.87

2 结果与分析

2.1 重金属分布特征

研究区表层沉积物重金属数据统计结果见表 5。

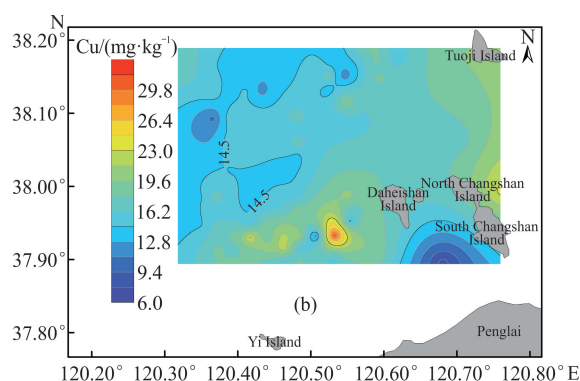
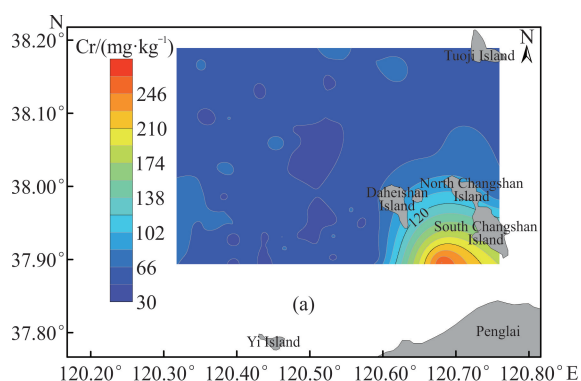
表 5 表层沉积物重金属元素含量统计

Table 5 Statistics of heavy metal element content in surface sediments

Unit: $mg \cdot kg^{-1}$

项目 Item	Cr	Cu	Zn	Cd	Pb	As	Hg
Range	38.67 - 264.90	6.98 - 22.31	14.42 - 72.73	0.062 - 0.196	12.80 - 25.32	5.27 - 21.40	0.013 - 0.035
Average value	61.58	16.56	50.51	0.120	16.19	7.41	0.021
Median	54.28	16.43	49.85	0.121	15.77	7.24	0.019
Standard deviation	38.00	2.91	9.75	0.037	2.62	2.68	0.005
Minimum	38.67	6.98	14.42	0.062	12.80	5.27	0.013
Maximum	264.90	22.31	72.73	0.196	25.32	21.40	0.035
Coefficient of variation/%	61.70	17.58	19.31	31.18	16.16	36.12	23.00

Cr、Cu、Zn、Cd、Pb、As 和 Hg 的质量浓度范围分别为 38.67 - 264.90、6.98 - 22.31、14.42 - 72.73、0.061 - 0.196、12.80 - 25.32、5.27 - 21.40 和 0.013 - 0.035 $mg \cdot kg^{-1}$ ，平均质量浓度 ($mg \cdot kg^{-1}$) 的大小依次为 Cr(61.58) > Zn(50.51) > Cu(16.56) > Pb(16.19) > As(7.41) > Cd(0.120) > Hg(0.021)。从变异系数来看，除 Pb、Cu 和 Zn 小于 20% 外，其他 4 种元素的变异系数 (23.00% - 61.70%) 都比较大，其中 Cr 的变异系数最大，说明其离散程度较高，空间分布不均匀，受人类活动或外来因素影响较大^[9,25]。在空间分布上，Cr、As 和 Pb 高值区主要分布在南长山岛西南部，其中在砣矶岛以西和大黑山岛以西还零星分布有 Pb 次高值区；Cu、Zn 和 Hg 高值区在大黑山岛西南部大体呈东西向条带状展布；Cd 高值区在大黑山岛以西大体呈北东-南西向展布(图 2)。



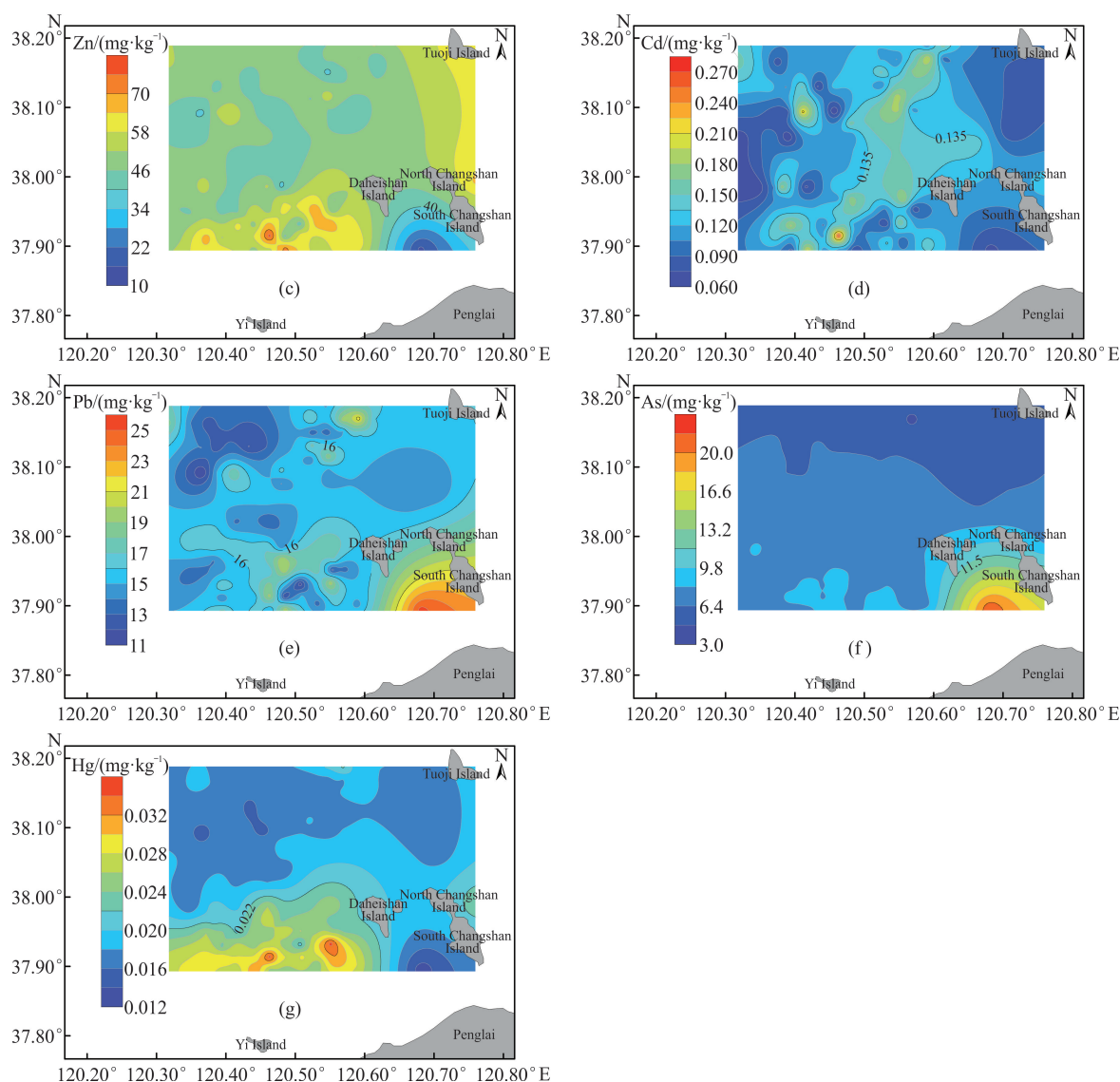


图2 表层沉积物重金属的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of heavy metal in surface sediments

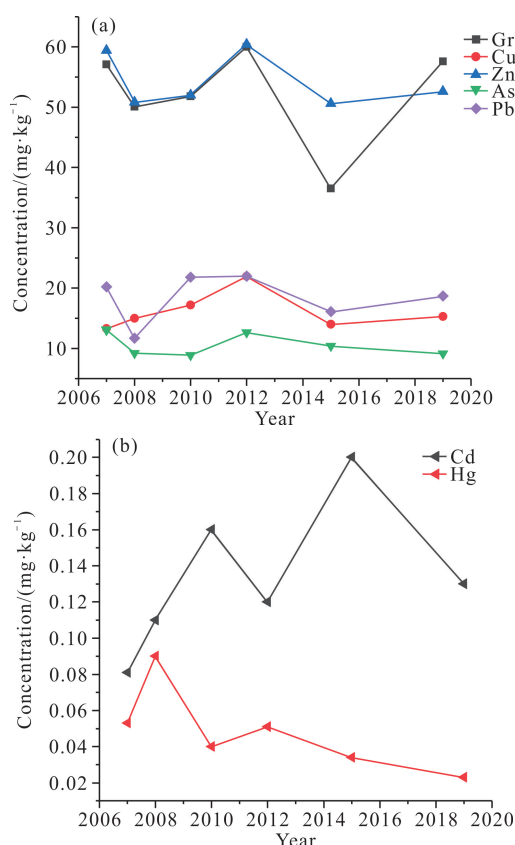
与山东半岛北部、渤海、北黄海、南黄海表层沉积物相比(表6),本研究区表层沉积物中除Cu含量略高于北黄海,As含量略高于南黄海沉积物的浓度外,其他重金属元素含量均处于较低水平;与渤海沉积物背景值、南海北部陆架区相比,Cr含量高出2倍以上,Cu含量高出南海北部陆架区约2倍且略高出渤海沉积物背景值,Zn含量高出渤海沉积物背景值2倍以上且高出南海北部陆架区沉积物的浓度值,Pb和As含量略高出渤海沉积物背景值,其他元素含量均处于较低水平;与庙岛群岛南部海域相比,Cr含量高出2倍以上,Hg含量略高,其他元素含量均处于

较低水平;与第一类沉积物标准值相比较,7种重金属元素平均含量均处于较低水平。为了解研究区周边海域表层沉积物重金属元素含量历年变化情况,通过查阅文献资料^[31-36],得出庙岛群岛以西的渤海莱州湾海域表层沉积物重金属含量的年度变化规律(图3):Zn、Cr、Pb、Cu和As含量在2012年有一个峰值,Cd含量分别在2010年、2015年存在峰值,Hg含量分别在2008年、2012年存在峰值;从总体上看,Zn、Pb、Cu、As和Hg含量呈稳中有降的变化趋势,Cr和Cd含量年度变化较大。

表 6 庙岛群岛西部海域与其他典型海域表层沉积物重金属元素平均含量比较

Table 6 Comparison of average contents of heavy metals in surface sediments between the western coastal area of Miaodao Archipelago and other typical coastal areas

区域 Area	Cr	Cu	Zn	Cd	Pb	As	Hg
Northern Shandong Peninsula ^[26]	61	59.5	65.13	0.12	23.84	7.41	0.030
Bohai Sea ^[27]		24.7		0.177	17.6	7.51	0.038
Background value of Bohai sediment ^[19]	23.1	16.5	20.7	0.12	14.6	7.06	0.025
North Yellow Sea ^[28]		11.6	52.7	0.22	25.2	13.3	0.070
South Yellow Sea ^[29]		17.72	69.95	0.135	16.27	6.89	0.022
Continental shelf of northern South China Sea ^[30]	25.5	9	46.9	0.79	23		
Southern Miaodao Archipelago ^[9]	28.1	17.5	52.8	0.121	18.2	8.37	0.018
Standard value of first type sediment ^[17]	80	35	150	0.5	60	20	0.200
Western Miaodao Archipelago (this study)	61.58	16.56	50.51	0.120	16.19	7.41	0.021

图 3 渤海莱州湾海域表层沉积物重金属年度变化^[31-36]Fig. 3 Annual variation of heavy metals in surface sediments of Laizhou Bay, Bohai Sea^[31-36]

2.2 重金属相关性特征

在同一研究区,如果沉积物中重金属之间存在相关性,那么它们可能有相似的来源^[37]。研究区位于渤海海峡南部,黄河入海物质为其主要沉积物来

源^[38],黄河入海物质向东运移^[39]的同时,受到莱州湾顺时针环流、黄海暖流及渤海海峡内潮流的共同影响^[38],形成现在的海底表层沉积物。对研究区沉积物中重金属、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 进行相关性分析(表 7)可知,Cr 和 As 高度相关,同时与 Pb 呈显著正相关,但与其他元素或氧化物,如 Cu、Zn、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 呈显著负相关;Cu 和 Zn、 Fe_2O_3 高度相关,同时与 Hg、 Al_2O_3 呈显著正相关;Cd 与其他元素相关性都不显著。由此可以看出,Cr、As 和 Pb 具有相近或者相同的来源,Cr 与两种主量元素及其氧化物呈显著负相关,说明其来源与沉积物本身关系不大,可能受人类活动影响较大;Cu、Zn 和 Hg 具有相近或者相同的来源,Cu 与两种主量元素及其氧化物呈显著正相关,说明其主要来源是沉积物本身,受黄河入海泥沙悬浮物和区域动力沉积环境影响较大;Cd 与其他重金属元素具有非同源性,Cd 在搬运、沉积时受到不同因素的影响,它的分布可能受人类活动、水动力环境、悬浮物含量等的共同影响^[40]。

2.3 PMF 模型解析结果

利用 PMF 模型对研究区表层沉积物中重金属的来源进行解析。在软件计算中,选择 2-4 个因子分别运行 20 次,最终确定因子数为 3 个时, $Q(\text{true})/Q(\text{exp})$ 的比值为 1,表明计算效果较好;除 Hg 元素外,其他各元素的复相关系数 R^2 均大于 0.76,表明解析结果可靠。因此,PMF 模型解析出 3 个潜在的污染源,结果见图 4。

表7 表层沉积物中重金属、主量元素及其氧化物之间的相关性分析

Table 7 Correlation analysis of the heavy metals, major elements and their oxide in surface sediments

	Cr	Cu	Zn	Cd	Pb	As	Hg	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
Cr	1								
Cu	-0.671 **	1							
Zn	-0.711 **	0.833 **	1						
Cd	-0.249	0.378 *	0.174	1					
Pb	0.617 **	-0.032	-0.085	0.079	1				
As	0.922 **	-0.517 **	-0.568 **	-0.329	0.648 **	1			
Hg	-0.346	0.651 **	0.639 **	0.084	0.066	-0.113	1		
Al ₂ O ₃	-0.440 *	0.794 **	0.690 **	0.308	0.103	-0.281	0.846 **	1	
Fe ₂ O ₃	-0.805 **	0.832 **	0.819 **	0.271	-0.275	-0.660 **	0.756 **	0.868 **	1

Note: * shows that at level 0.05 (two-tailed), there is a significant correlation; ** shows at level 0.01 (two-tailed), there is a significant correlation.

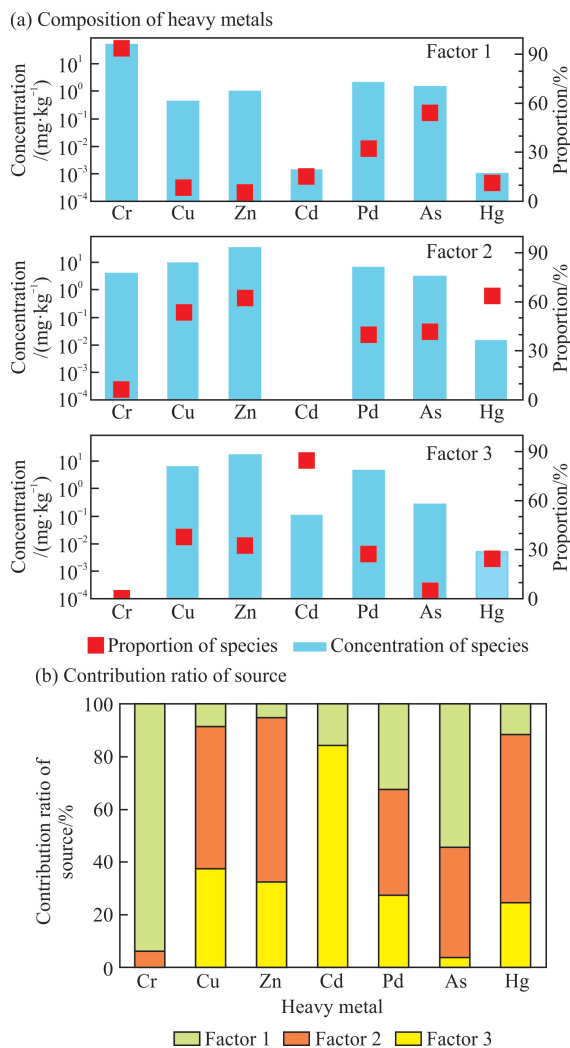


图4 表层沉积物中重金属来源解析结果

Fig. 4 Analysis results of heavy metal sources in surface sediments

PMF 模型解析出的重金属源成分图谱(图4)显示,源1中Cr和As占比超过50%,可以作为该污染源的标志元素,海洋沉积物中的As主要来源于陆源农业废水及海洋养殖饵料,也可能受海洋船舶运输的影响^[41],而Cr主要来源于工业废水、农业污染等^[42-45],因此源1为渔业养殖及工农业生产;源2中Cu、Zn、Hg和Pb的占比相对较高,其中Hg、Cu和Zn占比均超过50%,可以作为该污染源的标志元素,其主要受自然来源影响,海水养殖也有一定的贡献^[42-46],因此源2为黄河入海泥沙及岩石风化;源3中Cd为主要贡献元素,占比达84.4%,Cd主要来源于工业废水的排放,尤其以化工、电力、印刷等行业为主^[47],因此源3为工业废水排放。

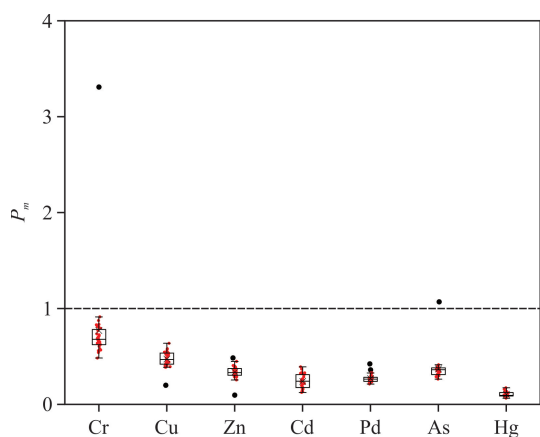
2.4 单因子指数评价

图5箱线图显示了研究区重金属元素的单因子污染指数分布情况[箱线图中箱体下端为下四分位数(Q1)、上端为上四分位数(Q3),中间横线为中位数,“×”表示平均数,黑色圆点表示异常值,红色圆点表示正常值,四分位距 IQR = Q3 - Q1;箱体下边缘为 Q1 - 1.5IQR,上边缘为 Q3 + 1.5IQR]。7种重金属元素单因子指数分布较为集中,除HB90站位Cr和As的污染指数大于1以外,其他各站位重金属元素的污染指数均小于1,质量高于国家标准中海洋沉积物质量第一类标准。

2.5 富集因子评价

表层沉积物重金属富集因子评价结果见图6。由图6可知,研究区Cr、Cu、Zn、Pb、As和Hg的富集因子指数分布范围相对集中,Cd分布范围较为疏散。

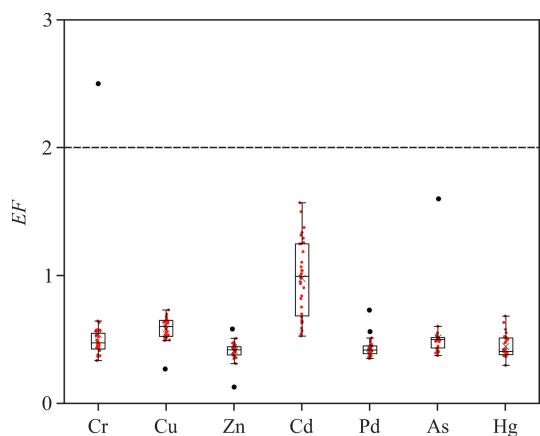
从单个指数来看,除 HB90 站位 Cr 的富集因子稍大于 2,处于中等富集水平外,其他元素均处在无-轻微富集水平。



Dashed line in the figure represents $P_m = 1$.

图 5 表层沉积物重金属单因子指数评价

Fig. 5 Evaluation of single factor of heavy metals in surface sediments



Dashed line in the figure represents $EF = 2$.

图 6 表层沉积物重金属富集因子评价

Fig. 6 Evaluation of heavy metals enrichment factors in surface sediments

2.6 地累积指数法评价

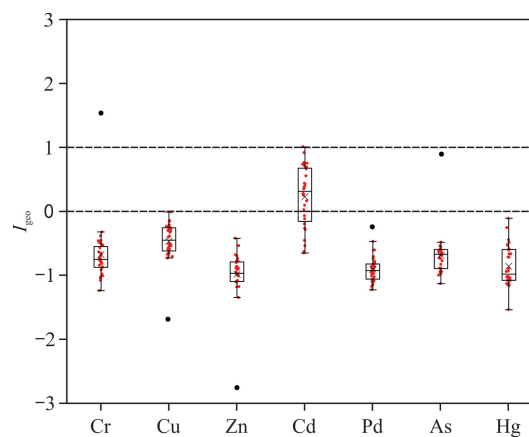
由表层沉积物的重金属地累积指数法评价结果(图 7)来看,Cd 主要分布在清洁-轻污染范围内,其中轻污染站位占 65.63%;Cu、Zn、Pb、Hg 的 I_{geo} 值均小于 0,为清洁状态;Cr 在 HB90 站位为偏中度污染状态,As 在 HB90 站位为轻度污染状态。

2.7 潜在生态风险评价

2.7.1 重金属潜在生态风险评价

通过公式(8)计算获得表层沉积物的重金属潜在

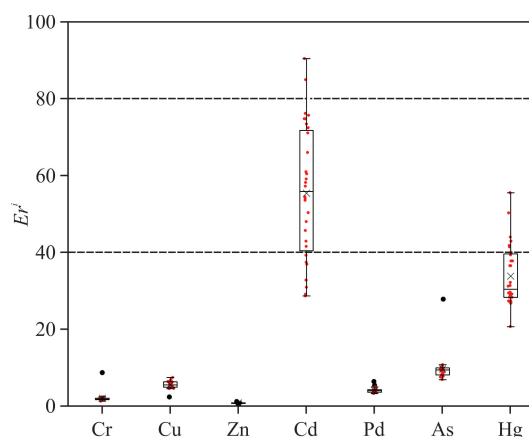
生态风险评价结果(图 8)。由图 8 可见,研究区 Cr、Cu、Zn、Pb 和 As 的潜在生态风险指数分布范围相对集中,Cd 和 Hg 分布范围较为疏散。其中 Cr、Cu、Zn、Pb 和 As 等 5 种元素均为轻微潜在生态风险;有 7 个站位的 Hg 分布在中等潜在生态风险范围内,占 21.88%;Cd 主要分布在中等-较高潜在生态风险范围内,有 22 个站位为中等潜在风险,占 68.75%,有 2 个站位为较高潜在生态风险,占 6.25%。潜在生态风险指数高值区位于砣矶岛西部及大黑山岛西偏南海域。



Dashed line in the figure represents $I_{geo} = 1$ and $I_{geo} = 0$.

图 7 表层沉积物重金属地累积指数评价

Fig. 7 Evaluation of I_{geo} of heavy metals in surface sediments



Dashed line in the figure represents $Er^i = 80$ and $Er^i = 40$.

图 8 表层沉积物重金属潜在生态风险评价

Fig. 8 Evaluation of potential ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments

2.7.2 重金属综合潜在生态风险评价

RI 高值区主要在大黑山岛以西呈北东-南西向展布(图 9),分布于养殖区内及航道附近。

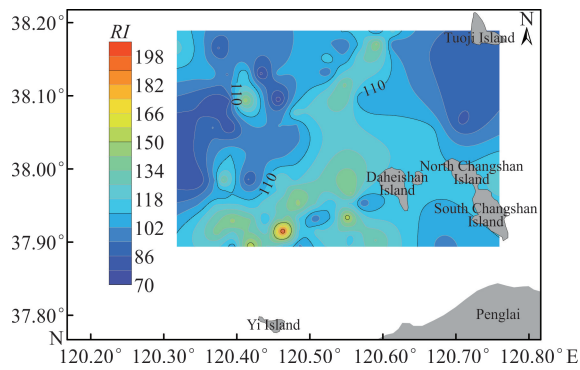


图9 研究区综合潜在生态风险分布

Fig. 9 Distribution of comprehensive potential ecological risks in the study area

通过重金属综合潜在生态风险评价(表8)可见, 14个站位为轻微潜在生态风险, 占43.75%; 18个站位为中等潜在生态风险, 占56.25%, 主要污染元素为Cd和Hg, 这主要是由于Cd和Hg的生物毒性较高以及部分站位两种元素含量较高。

表8 表层沉积物重金属综合潜在生态风险评价

Table 8 Comprehensive evaluation of potential ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments

RI	潜在生态风险分级 Potential ecological risk classification	站位数量 Number of sampling sites	比例/% Proportion/%	主要污染元素 Main polluting elements
$RI < 105$	Slight	14	43.75	
$105 \leq RI < 210$	Medium	18	56.25	Cd, Hg
$210 \leq RI < 420$	Strong			
$RI \geq 420$	Very strong			

3 结论

①从单因子指数来看, 庙岛群岛西部海域表层沉积物重金属除HB90站位Cr和As的污染指数大于1以外, 其他各站位重金属元素的污染指数均小于1, 质量高于国家标准中海洋沉积物质量第一类标准; 从富集因子来看, 除HB90站位Cr的富集因子稍大于2, 为中等富集水平外, 其他站位各重金属元素均处在无-轻微富集水平; 从地累积指数来看, Cr和As除HB90站位外, 在其他站位均为清洁状态, Cd主要为清洁-轻污染状态, 其他重金属元素为清洁状态。

综合各评价指数来看, Cr和As在单因子指数评价、富集因子评价、地累积指数评价中均存在高异常值; Cd在地累积指数评价、重金属潜在生态风险评价中存在一定程度的污染。

②庙岛群岛西部海域表层沉积物重金属的中等潜在生态风险区域在大黑山岛以西呈北东-南西向展布, 可能受渔业养殖及航运活动的影响, 主要污染元素为Cd和Hg。

③庙岛群岛西部海域表层沉积物重金属元素主要受黄河入海泥沙悬浮物和区域动力沉积环境、来往船只船体涂料释放、渔业养殖活动、工农业生产、港口活动和生活污水经地表径流入海等的影响。

综上所述, HB90站位附近表层沉积物Cr和As污染主要受渔业养殖活动、工业废水、农业污染、港口活动和生活污水经地表径流入海等因素的综合影响, 下一步要加强周边海域Cr和As的监测治理, 同时加强对研究区表层沉积物Cd和Hg的监测预警, 重点关注其潜在生态风险高值区, 进一步查明其主要物质来源, 采取有效措施及时消除相关隐患。

参考文献

- [1] PAN K, WANG W X. Trace metal contamination in estuarine and coastal environments in China [J]. Science of the Total Environment, 2012, 421/422: 3-16.
- [2] 雷富, 陈宪云, 陈默, 等. 广西茅尾海夏季海水和表层沉积物中重金属污染现状及评价[J]. 广西科学, 2013, 20(3): 205-209.
- [3] 徐艳东, 王茂剑, 马建新, 等. 庙岛群岛南部海域海水和表层沉积物重金属分布特征及生态风险评价[J]. 海洋湖沼通报, 2016(2): 30-39.
- [4] 石洪华, 郑伟, 丁德文, 等. 典型海岛生态系统服务及价值评估[J]. 海洋环境科学, 2009, 28(6): 743-748.
- [5] 范国坤, 韩家波, 黄继成, 等. 庙岛群岛海域斑海豹的分布与保护[J]. 水产科学, 2005, 24(3): 16-18.
- [6] 孙铭阳, 张旭志, 夏斌, 等. 休渔期和捕捞作业期黄、渤海区沿海中心渔港表层海水重金属分布及生态风险评估[J]. 海洋环境科学, 2022, 41(6): 857-864.
- [7] 林霖, 苗晓明, 韩宗珠, 等. 渤海中部海域黏土粒级沉积物中重金属的变化及其对160年来人类活动的指示[J]. 海洋环境科学, 2022, 41(1): 99-105.
- [8] 段云莹, 裴绍峰, 廖名稳, 等. 渤海莱州湾沉积物REE与重金属污染特征及物源判别[J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(10): 8-24.
- [9] 赵肖依, 魏海峰, 黄欣, 等. 环渤海湿地沉积物重金属污染监测与风险评价[J]. 中国野生植物资源, 2020, 39(12): 33-37, 41.
- [10] 朱远峰, 尹延鸿, 于洪社, 等. 长岛独特海洋地质遗迹成因与景观综合评价[C]//姜建军, 赵逊, 陈安泽. 旅游地理学与地质公园建设: 旅游地理学论文集第十二集. 北京: 中国林业出版社, 2006: 94-100.

- [11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 海洋监测规范: 第3部分 样品采集、贮存与运输: GB 17378.3-2007 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [12] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 硅酸盐岩石化学分析方法: 第28部分 16个主次成分量测定: GB/T 14506.28-2010 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [13] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 海洋监测规范: 第5部分 沉积物分析: GB 17378.5-2007 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [14] PAATERO P, TAPPER U. Positive matrix factorization: a non-negative factor model with optimal utilization of error estimates of data values [J]. *Environmetrics*, 1994, 5: 111-126.
- [15] LIU Y B, MA Z H, LIU G N, et al. Accumulation risk and source apportionment of heavy metals in different types of farmland in a typical farming area of northern China [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2021, 43(12): 5177-5194.
- [16] 中华人民共和国环境保护部. 近岸海域环境监测规范: HJ 442-2008 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2008.
- [17] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 海洋沉积物质量: GB 18668-2002 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [18] 孙志佳, 李保飞, 陈玉海, 等. 广东湛江湾红树林沉积物重金属分布特征及生态风险评价[J]. *海洋环境科学*, 2022, 41(2): 215-221.
- [19] 赵一阳, 鄢明才. 中国浅海沉积物化学元素丰度[J]. *中国科学(B辑)*, 1993, 23(10): 1084-1090.
- [20] SABO A, GANI A M, IBRAHIM A Q. Pollution status of heavy metals in water and bottom sediment of River Delimi in Jos, Nigeria [J]. *American Journal of Environmental Protection*, 2013, 1(3): 47-53.
- [21] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, 14: 975-1001.
- [22] 岳梦宇, 任雨璇, 徐刚, 等. 环渤海芦苇湿地沉积物重金属污染评价[J]. *环境科学与技术*, 2022, 45(9): 160-168.
- [23] 刘文新, 栾兆坤, 汤鸿霄. 乐安江沉积物中金属污染的潜在生态风险评价[J]. *生态学报*, 1999, 19(2): 206-211.
- [24] 刘志杰, 李培英, 张晓龙, 等. 黄河三角洲滨海湿地表层沉积物重金属区域分布及生态风险评价[J]. *环境科学*, 2012, 33(4): 1182-1188.
- [25] CELO V, BABI D, BARAJ B, et al. An assessment of heavy metal pollution in the sediments along the Albanian Coast [J]. *Water Air and Soil Pollution*, 1999, 111(1/4): 235-250.
- [26] 梁源, 刘健, 孔祥准, 等. 重金属在山东半岛东北部滨海海区表层沉积物中的分布和污染评价[J]. *海洋地质动态*, 2008, 24(3): 27-32.
- [27] 霍索霞. 渤海沉积物重金属分布特征及生态风险研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
- [28] 杜俊涛, 陈洪涛, 田琳. 北黄海表层沉积物中重金属含量及其污染评价[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2010, 40(S1): 167-172, 178.
- [29] HE Z P, SONG J M, ZHANG N X, et al. Variation characteristics and ecological risk of heavy metals in the south Yellow Sea surface sediments [J]. *Environmental Monitoring and Assess*, 2009, 157(1/4): 515-528.
- [30] 甘居利, 贾晓平, 李纯厚, 等. 南海北部陆架区表层沉积物中重金属分布和污染状况[J]. *热带海洋学报*, 2003, 22(1): 36-42.
- [31] 胡宁静, 石学法, 刘季花, 等. 莱州湾表层沉积物中重金属分布特征和环境影响[J]. *海洋科学进展*, 2011, 29(1): 63-72.
- [32] 罗先香, 张蕊, 杨建强, 等. 莱州湾表层沉积物重金属分布特征及污染评价[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(2): 262-269.
- [33] 刘金虎, 宋骏杰, 曹亮, 等. 莱州湾表层沉积物中重金属时空分布、污染来源及风险评价[J]. *生态毒理学报*, 2015, 10(2): 369-381.
- [34] 郑懿珉, 高茂生, 刘森, 等. 莱州湾表层沉积物重金属分布特征及生态环境评价[J]. *海洋环境科学*, 2015, 34(3): 354-360.
- [35] 徐艳东, 高会旺, 魏潇, 等. 莱州湾表层沉积物中重金属污染特征和生态风险评估[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2021, 51(11): 74-85.
- [36] 赵玉庭, 董晓晓, 王立明, 等. 海洋沉积物重金属生态风险评价方法比较及实例验证: 以莱州湾为例[J]. *海洋通报*, 2019, 38(3): 353-360.
- [37] 王安国, 窦衍光, 张训华, 等. 渤海西北近岸海域表层沉积物重金属污染及评价[J]. *海洋地质前沿*, 2018, 34(5): 13-21.
- [38] 马晓红, 韩宗珠, 艾丽娜, 等. 中国渤黄海的沉积物源及输运路径研究[J]. *中国海洋大学学报*, 2018, 48(6): 96-101.
- [39] 徐晓达, 曹志敏, 张志珣, 等. 渤海地貌类型及分布特征[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2014, 34(6): 171-179.
- [40] 郭福星. 东、黄海海域沉积物中重金属、生源要素的分

- 布特征和生态风险评价[D]. 广州:暨南大学, 2011.
- [41] 阎琨, 庞国涛, 邢新丽, 等. 广西企沙半岛近岸表层海水重金属分布、来源及生态风险评价[J]. 海洋环境科学, 2023, 42(1): 89-96.
- [42] 崔衍波, 冯永亮, 刘群群, 等. 东营市三个河口区域表层海水重金属的分布与生态风险评价[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2019, 49(1): 93-101.
- [43] ZHANG M, CHEN G, LUO Z T, et al. Spatial distribution, source identification, and risk assessment of heavy metals in seawater and sediments from Meishan Bay, Zhejiang coast, China [J]. Marine Pollution Bulletin, 2020, 156: 111217.
- [44] 裘奕斐, 王静, 徐敏. 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[J]. 南京师大学报(自然科学版), 2021, 44(1): 71-78.
- [45] DANG P, GU X, LIN C Y, et al. Distribution, sources, and ecological risks of potentially toxic elements in the Laizhou Bay, Bohai Sea: under the long-term impact of the Yellow River input [J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 413: 125429.
- [46] OTA Y, SUZUKI A, YAMAOKA K, et al. Geochemical distribution of heavy metal elements and potential ecological risk assessment of Matsushima Bay sediments during 2012–2016 [J]. Science of the Total Environment, 2021, 751: 141825.
- [47] 汤世凯, 于剑峰, 李金鹏, 等. 丁字湾近岸海域表层沉积物粒度特征及沉积动力环境[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2019, 39(2): 70-78.

Spatial Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Western Miaodao Archipelago

YANG Peng, WANG Haigen^{**}, WANG Qingtong, YU Xingchen, ZHANG Jiahao, MAO Fangsong, GE Xiangwei

(Yantai Geological Survey Center of Coastal Zone, China Geological Survey, Yantai, Shandong, 264004, China)

Abstract: In order to understand the pollution status of heavy metals in surface sediments in the western waters of Miaodao Archipelago, 32 surface sediment samples were collected in November 2021. Various assessment approaches, including Positive Matrix Factorization (PMF) model, single factor index, Enrichment Factors (EF), Index of geo-accumulation (I_{geo}), and Hakanson's potential ecological Risk Index (RI), were used to comprehensively analyze and evaluate the content, distribution characteristics, enrichment, and potential ecological risk of heavy metals. The results showed that the average mass concentrations of Cu, Cr, Cd, Zn, Pb, As and Hg were 16.56, 61.58, 0.120, 50.51, 16.19, 7.41 and 0.021 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively. The high value areas of Cr, As and Pb were mainly distributed in the southwest of Nanchangshan Island. The high value areas of Cu, Zn and Hg in the southwest of Daheishan Island were generally distributed in an east-west banding pattern. The high value area of Cd element was generally distributed in the northeast-southwest direction in the west of Daheishan Island, and the spatial distribution of each element was uneven. Except for the HB90 station, where concentrations of Cr and As elements exceeded the standard values, the concentrations of heavy metal elements at other stations were lower than those of Class I marine sediments in the national standard. From the perspective of enrichment degree, except for Cr at the HB90 station, the other heavy metal elements were at the level of no-slight enrichment. The evaluation results of the geo-accumulation index method showed that Cd in the study area was mainly clean-lightly polluted, Cr at the HB90 site was moderately polluted, and As was slightly polluted. The results of potential ecological risk assessment showed that the heavy metals in the surface sediments of the study area were generally mild to moderate potential ecological risks, and the main pollution elements were Cd and Hg. In general, the heavy metal pollution of surface sediments in the western waters of the Miaodao Archipelago is relatively low.

Key words: Miaodao Archipelago; surface sediments; heavy metals; ecological risk

责任编辑: 梁 晓