

海南临高海域表层沉积物重金属元素分布特征 及风险评价

丁静宜¹, 孙永根^{1,2*}, 张志卫^{1,2}, 谷东起^{1,2}

(1. 自然资源部第一海洋研究所海岸带科学与海洋发展战略研究中心, 山东 青岛 266061;
2. 自然资源部海岸带科学与综合管理重点实验室, 山东 青岛 266061)

摘要: 2023 年在海南临高海域采集了 30 个表层沉积物样品, 对沉积物中的重金属元素的质量比进行分析, 研究其污染状况、风险水平和污染来源。结果表明: Hg、Cr、Cu、Zn、Cd 和 Pb 六种重金属元素质量比的分布特征相似, 其高值区均为临高海域西北部、红牌港附近海域、黄龙港附近海域和文澜河, As 的高值区在临高海域的中部。7 种重金属的平均质量比均符合第一类海洋沉积物质量标准, 所有站位中 Hg、As、Cr、Cu、Zn、Cd 和 Pb 的一类标准达标率分别为 100%、87%、90%、97%、100%、100% 和 100%。地质累积指数结果显示 7 种重金属元素的污染程度依次为: As>Pb>Hg>Cr>Cd>Cu>Zn, 潜在生态风险水平排序为: Hg>Cd>As>Pb>Cu>Cr>Zn, 研究区域内重金属元素整体上表现为无污染和低风险。临高海域表层沉积物中的 Hg、Cr、Cu、Zn、Cd 和 Pb 主要来源于工业和海洋交通运输业; 近岸的 As 来源于沿岸的养殖业和农业, 远岸的 As 或与自然地质背景因素、外海输入有关。

关键词: 表层沉积物; 重金属污染; 地质累积指数; 潜在生态风险; 临高

中图分类号: P736

文献标志码: A

文章编号: 1671-6647(xxxx)xx-xxxx-12

doi: 10.12362/j.issn.1671-6647.20241018001

引用格式: 丁静宜, 孙永根, 张志卫, 等, xxxx. 海南临高海域表层沉积物重金属元素分布特征及风险评价[J]. 海洋科学进展, x(x): xx-xx. DING J Y, SUN Y G, ZHANG Z W, et al, xxxx. Distribution characteristics and risk assessment of heavy metal elements in surface sediment of Lingao sea area[J]. Advances in Marine Science, x(x): xx-xx.

重金属毒性强、难降解, 且具有累积性, 被认为是威胁海洋环境的污染物之一(Hao et al, 2019)。重金属的来源主要包括自然过程和人类活动, 其中工业、农业和水产养殖业等人类活动是海洋中重金属最主要的来源。大部分人类活动产生的重金属随着地表径流或大气降水进入海洋(Wang et al, 2018), 最终在海洋沉积物中积聚, 所以海洋沉积物被认为是重金属的汇(苏琼源等, 2023)。在水动力、生物活动等外力作用下, 沉积物被扰动, 其中的重金属污染物被释放出来, 会对海洋环境产生二次污染(程嘉熠等, 2021), 因此, 海洋沉积物也被认为是重金属的源(苏琼源等, 2023)。

海南岛部分海湾已有沉积物重金属污染水平的相关研究。例如, 在海南岛北部的铺前湾、澄迈湾、后水湾和洋浦湾的表层沉积物中, As 是污染最严重的重金属元素, 船舶燃油燃烧、水产养殖、化肥施用、矿业废水等活动是导致沉积物重金属污染的主要原因(李越等, 2022)。在海南老爷海表层沉积物重金属来源的研究中, 卢振峰等(2023)得出相似的结论, 认为重金属来源于沿岸的海水养殖、网箱养殖和城镇工农业生产。Che 等(2022)研究认为, 海南岛周围海域沉积物中的重金属可能

收稿日期: 2024-10-18

作者简介: 丁静宜(2001—), 女, 硕士研究生, 主要从事海岸带环境综合管理及技术应用方面研究。

E-mail: dingjingyi@fio.org.cn

*通信作者: 孙永根(1981—), 男, 高级工程师, 硕士, 硕士生导师, 主要从事近岸沉积动力环境和海域使用管理技术及应用方面研究。E-mail: syg@fio.org.cn

(责任编辑 陈 靖)

来源于农业、渔业、工业、旅游业和海上运输业。

临高县位于海南省西北部，具有大规模养殖业。该海域表层沉积物重金属污染水平能够有效反映人类海洋开发利用活动对海域环境的影响，极具代表性。本文分析了临高海域 30 个采样站位的表层沉积物重金属元素质量比数据，研究了 7 种重金属元素(Hg、As、Cr、Cu、Zn、Cd 和 Pb)的分布特征，并利用地质累积指数法和潜在生态风险指数法评估其污染程度和风险水平；采用皮尔逊相关性分析和主成分分析，并结合临高海域使用现状，分析 7 种重金属元素的来源。旨在揭示临高海域重金属的污染现状、潜在生态风险程度和污染来源，为管理临高渔业和保护临高海域环境提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 样品采集

2023 年，自然资源部第一海洋研究所在海南省临高县海域设置了 30 个沉积物采样站位(图 1)，按照《海洋监测规范:第 3 部分 样品采集、贮存与运输》(GB 17378.3—2007)([全国海洋标准化委员会 \(SAC/TC 283\), 2007](#))的相关规定进行沉积物采样。

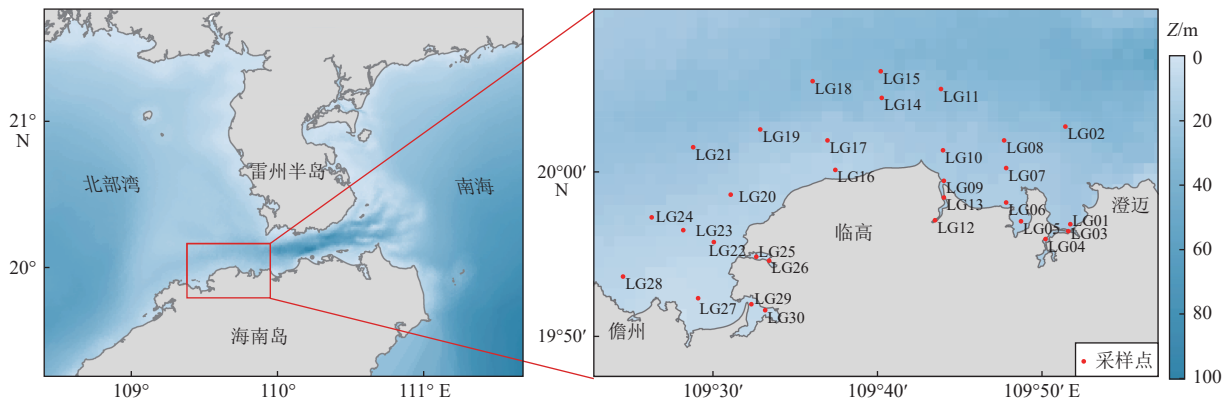


图 1 研究区位置及沉积物采样站位分布

Fig. 1 Study area and sampling stations in Lingao Sea, Hainan Island

1.2 样品分析测试

样品中 Hg、As、Cr、Cu、Zn、Cd、Pb 的质量比及沉积物粒度由自然资源部第一海洋研究所海洋检测中心测定。利用中国北京吉天仪器有限公司生产的 AFS930 型原子荧光光度计(Atomic Fluorescence Spectrometer, AFS)测定沉积物中的 Hg、As 元素质量比，利用美国 Agilent 公司生产的 ICP-MS 7500 型电感耦合等离子体质谱仪(Inductively coupled plasma-Mass Spectrometry, ICP-MS)测定沉积物中的 Cu、Zn、Pb、Cr 和 Cd 元素的质量比。在测定过程中，每种重金属元素设置 2 个平行样品，每个平行样品测定 3 次；随机抽取同批样品的 10%~20% 作为重复样品进行测定，分析误差小于 5%；标准样品选取接近实际浓度及环境质量标准浓度 2~3 倍的有证样品，回收率为 83.5%~118.3%，符合《海洋监测规范:第 5 部分 沉积物分析》(GB 17378.5—2007)([全国海洋标准化委员会 \(SAC/TC 283\), 2007](#))的准确性要求。沉积物粒度的测试设备为英国 Malvern 公司生产的 Mastersizer 2000 型激光粒度仪(Laser Particle Size Analyzer, LPSA)，准确性误差为 0.43%，重复性误差为 0.48%，满足沉积物粒径分析要求。

1.3 评价方法

1.3.1 地质累积指数法

本研究采用地质累积指数法 (Muller, 1969) 评价临高海域表层沉积物中重金属污染程度, 其计算式为:

$$I_{\text{geo}} = \log_2(C_i/kB_i), \quad (1)$$

式中: C_i 为重金属元素 i 的实测质量比; k 为考虑到岩性变化可能引起背景值变动而取的修正系数, 一般取 1.5 (沈芳等, 2018; 胡睿等, 2021); B_i 为重金属元素 i 的地球化学背景值。由于缺乏临高海域表层沉积物的背景值数据, 且临高海域属于中国浅海海域, 故重金属背景值采用赵一阳等 (1993) 给出的中国浅海沉积物重金属背景值, Hg、As、Cr、Cu、Zn、Cd 和 Pb 的背景值分别为 0.025、7.7、61、15、65、0.065 和 20 mg/kg。地质累积指数污染等级划分情况见表 1 (卢振峰等, 2023)。

1.3.2 潜在生态风险指数法

为评价临高海域表层沉积物重金属元素的污染程度和对环境的潜在风险水平, 本文采用了 Hakanson (1980) 提出的潜在生态风险指数法, 其计算式为:

$$C_f^i = C_i/B_i, \quad (2)$$

$$C_d = \sum_{i=1}^n C_f^i, \quad (3)$$

$$E_r^i = T_r^i \cdot C_f^i, \quad (4)$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i, \quad (5)$$

式中: C_f^i 为重金属元素 i 的污染系数; C_i 为重金属元素 i 的实测质量比; B_i 采用赵一阳等 (1993) 给出的中国浅海沉积物重金属背景值; C_d 为多种重金属综合污染指数; E_r^i 为重金属元素 i 的潜在生态风险系数; T_r^i 为重金属元素 i 的毒性响应系数, Hg、As、Cr、Cu、Zn、Cd 和 Pb 的毒性响应系数采用徐争启等 (2008) 给出的数值, 分别为 40、10、2、5、1、30 和 5; RI 为多种重金属元素的潜在生态危害指数。潜在生态风险指数法相关的等级划分情况见表 2 (胡睿等, 2021)。

表 2 潜在生态风险指数法等级分类

Table 2 Potential Ecological Risk Index (PERI) methodology hierarchical classification

C_f^i	单因子污染程度	C_d	综合污染程度	E_r^i	单因子潜在生态风险程度	RI	综合潜在生态风险程度
$C_f^i < 1$	低	$C_d < 8$	低	$E_r^i < 40$	低	$RI < 150$	低
$1 \leq C_f^i < 3$	中等	$8 \leq C_d < 16$	中等	$40 \leq E_r^i < 80$	中等	$150 \leq RI < 300$	中等
$3 \leq C_f^i < 6$	重	$16 \leq C_d < 32$	重	$80 \leq E_r^i < 160$	较重	$300 \leq RI < 600$	重
$C_f^i \geq 6$	严重	$C_d \geq 32$	严重	$160 \leq E_r^i < 320$	重	$RI \geq 600$	严重
				$E_r^i \geq 320$	严重		

注: 表中数据来源于胡睿等 (2021)。

表 1 地质累积指数污染等级
Table 1 Geological accumulation index pollution level

I_{geo} 范围	等级	污染程度
$I_{\text{geo}} \leq 0$	0	无
$0 < I_{\text{geo}} \leq 1$	1	轻度
$1 < I_{\text{geo}} \leq 2$	2	偏中度
$2 < I_{\text{geo}} \leq 3$	3	中度
$3 < I_{\text{geo}} \leq 4$	4	强
$4 < I_{\text{geo}} \leq 5$	5	严重
$5 < I_{\text{geo}} \leq 10$	6	极严重

注: 表中数据来源于卢振峰等 (2023)。

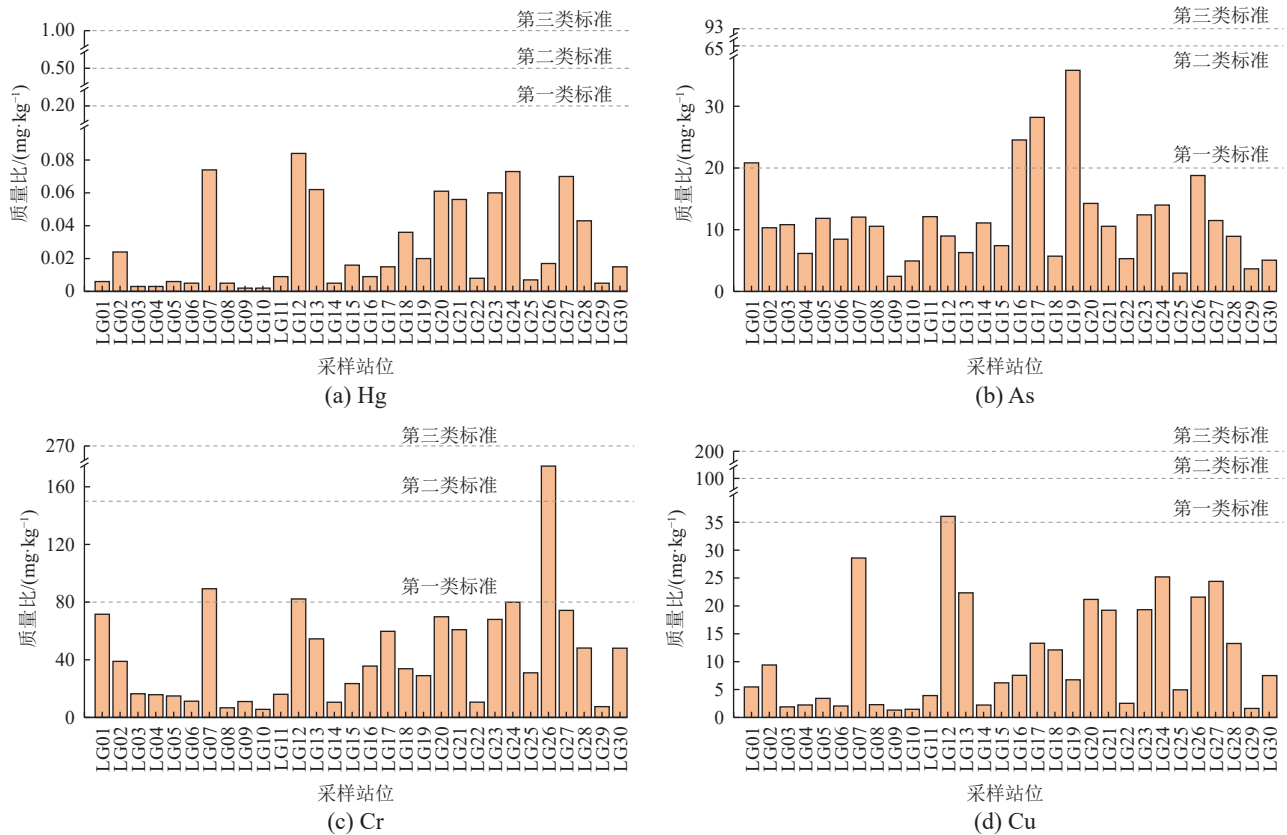
1.4 数据处理分析方法

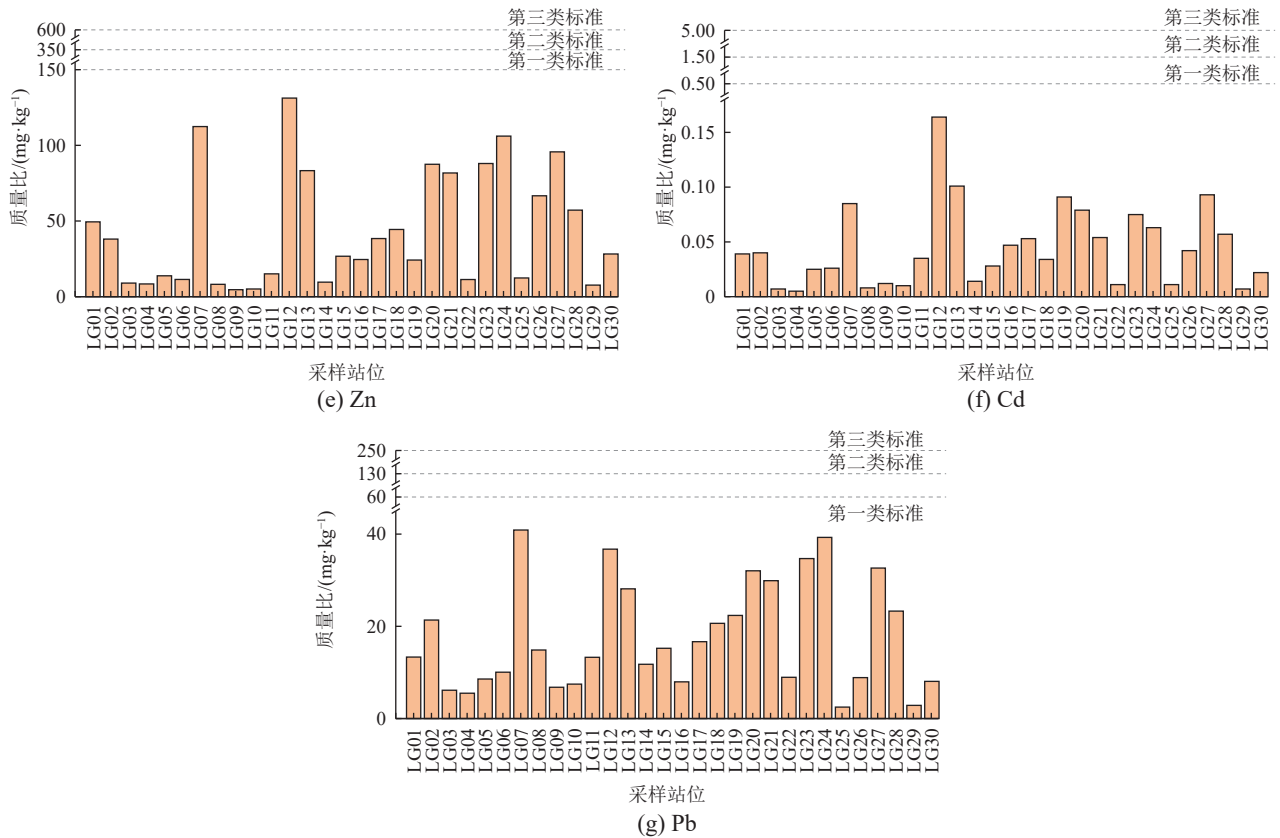
利用 Excel 软件处理临高海域表层沉积物重金属元素质量比数据，并计算地质累积指数和潜在生态风险指数；在 ArcGIS 软件中，采用反距离加权法这一空间差值方法 (Naifar et al, 2018) 绘制重金属含量分布图和 RI 分布图；使用 IBM SPSS Statistics 软件进行皮尔逊相关性分析和主成分分析，用于研究重金属元素来源。

2 结果与讨论

2.1 重金属元素分布特征

临高海域表层沉积物中重金属元素 Hg、As、Cr、Cu、Zn、Cd 和 Pb 的质量比范围分别是 0.002~0.084、2.46~35.82、5.62~174.35、1.32~36.06、4.63~131.19、0.005~0.164 和 2.48~40.88 mg/kg，相应的质量比平均值分别是 0.027、11.54、43.29、10.98、43.33、0.045 和 17.69 mg/kg。根据图 2 可知：临高海域内所有采样站位的 Hg、Zn、Cd 和 Pb 的质量比均低于我国《海洋沉积物质量》(GB 18668—2002) (国家海洋标准计量中心, 2002) 规定的第一类标准；4 个采样站位 (LG01、LG16、LG17 和 LG19) 的 As 质量比、2 个采样站位 (LG07、LG12) 的 Cr 质量比以及 1 个采样站位 (LG12) 的 Cu 质量比超过第一类标准，但都符合第二类标准；1 个采样站位 (LG26) 的 Cr 质量比超过第二类标准，符合第三类标准。



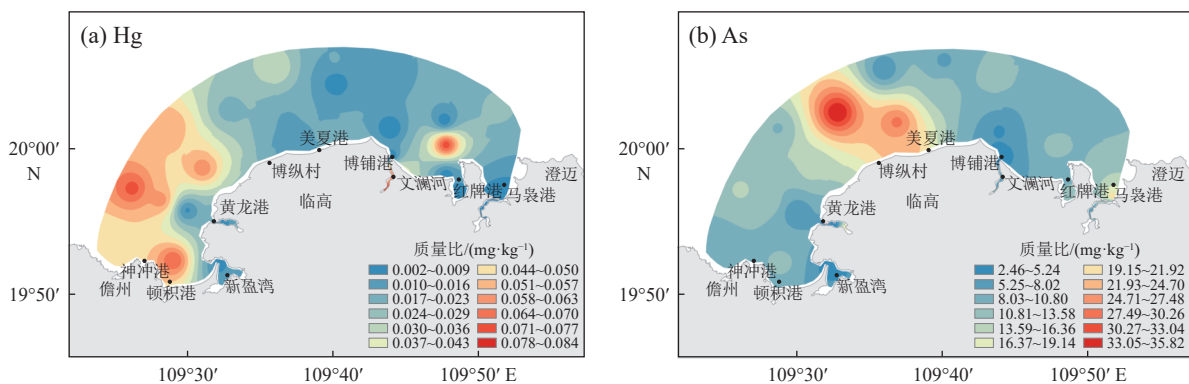


注: 图中 3 类标准数据来源于《海洋沉积物质量》(GB 18668—2002)(国家海洋标准计量中心, 2002)。

图 2 表层沉积物重金属元素质量比与海洋沉积物质量标准对比

Fig. 2 Comparison of heavy metal contents in surface sediments with marine sediment quality

从图 3 可以看出, 除 As 外, 其他 6 种重金属元素的分布特征较为相似。Hg、Cr、Cu、Zn、Cd 和 Pb 六种重金属元素质量比的高值区主要分布在研究区域的西北部、东部的红牌港附近海域以及黄龙港和文澜河处, 其余海域重金属元素的质量比较低。从临高县沿岸的博纵村和美夏港起向外海延伸的海域是 As 质量比的高值分布区, 主要集中在研究区域的中部。总体上来说, 重金属元素在沿岸海域质量比低, 远离海岸的海域则质量比高, 且海域西部的重金属元素质量比高于东部海域。



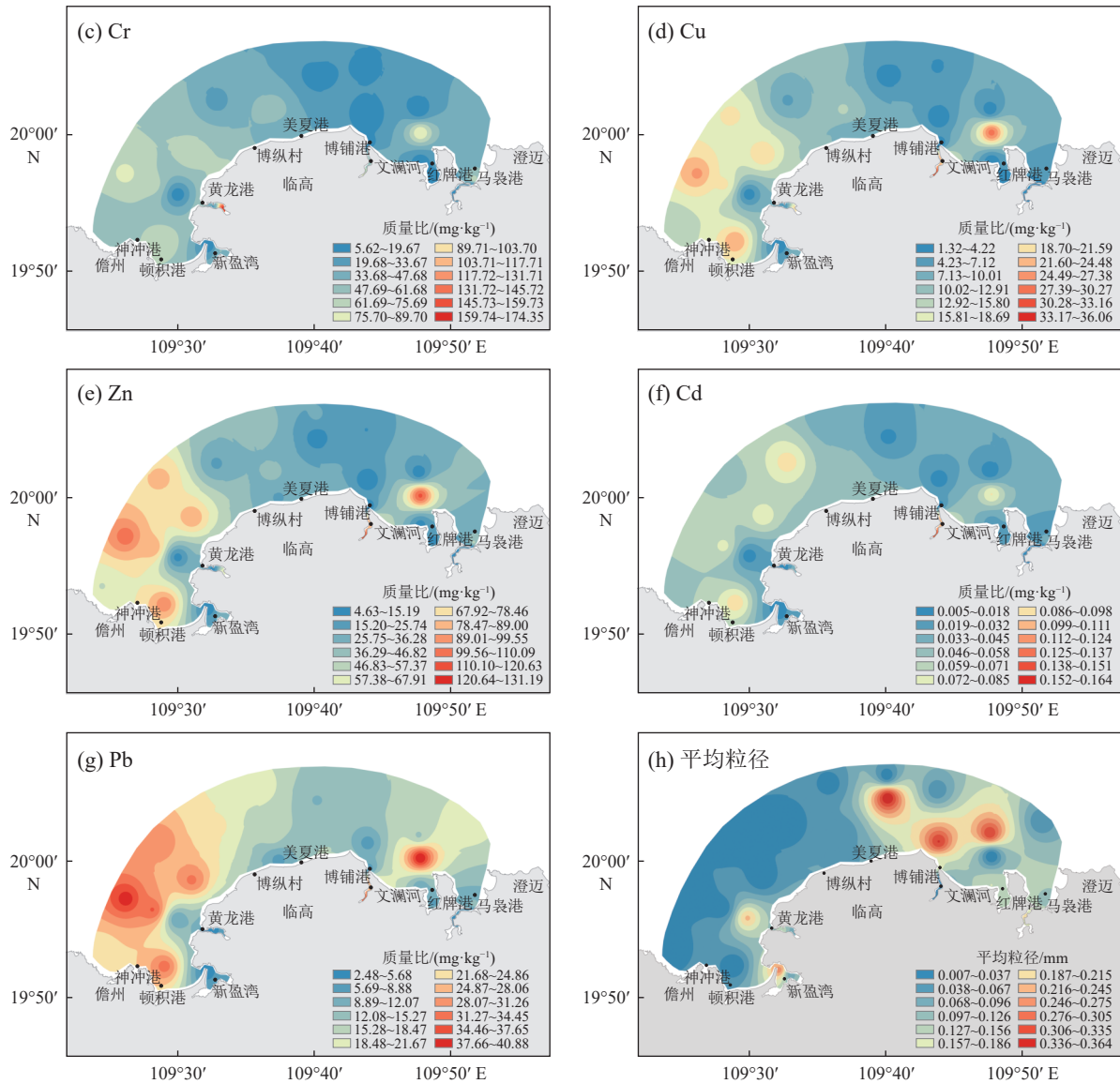


图3 临高海域表层沉积物中重金属元素质量比及平均粒径分布

Fig. 3 Distribution of heavy metals and average particle size in surface sediment in Lingao Sea area

临高海域表层沉积物的平均粒径分布(图3)总体呈现西低东高和沿岸高、离岸低的特征,与重金属元素Hg、Cr、Cu、Zn、Cd和Pb的分布特征相反。前期研究表明,重金属元素的质量比随着沉积物粒径的减小而逐渐增加(Zhao, 1985),由此可知,临高海域表层沉积物中重金属元素质量比的分布在一定程度上受到沉积物粒径分布的控制。

2.2 重金属污染及风险评价

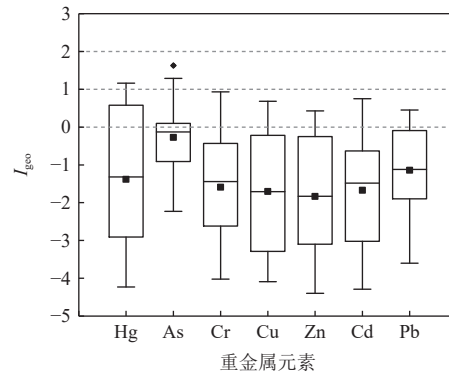
2.2.1 地质累积指数法

根据地质累积指数法计算得出临高海域表层沉积物重金属元素的 I_{geo} 值,其分布见图4。除Hg、As各有1、3个站位 I_{geo} 值为1~2,为偏中度污染,其余5种重金属元素的 I_{geo} 值均小于1。7种重金属元素均存在 I_{geo} 值为0~1的站位,Hg、As、Cr、Cu、Zn、Cd和Pb所有站位中属于轻度污染的站位占比为27%、27%、3%、13%、10%、7%和20%。其余站位的7种重金属元素 I_{geo} 值均小于0,污

染程度为清洁。根据 7 种重金属元素 I_{geo} 值的平均值, 临高海域内表层沉积物的重金属污染程度总体上为清洁, 7 种重金属元素的污染程度依次为: $As > Pb > Hg > Cr > Cd > Cu > Zn$ 。

2.2.2 潜在生态风险指数法

临高海域表层沉积物重金属元素 Hg、As、Cr、Cu、Zn、Cd 和 Pb 的污染系数 C_f^i 、潜在生态风险系数 E_f^i 、多种重金属综合污染指数 C_d 和多种重金属的潜在生态危害指数 RI 结果见图 5 和表 3。由各重金属元素的 C_f^i 知, Hg、As、Cr、Cu、Zn、Cd 和 Pb 属于中等污染的站位占比分别为 30%、57%、30%、30%、30%、23% 和 40%, 除 Hg、As 存在 1、3 个站位为重污染程度外, 其余站位的 7 种重金属元素均属于低污染程度。研究区域的 C_d 值范围为 1.26~14.66, 33% 的站位属于中等污染程度, C_d 均值为 6.25, 综合污染程度为低等级, 临高海域表层沉积物的重金属元素的污染程度较低。各站位 Cr、Cu、Zn 和 Pb 的 E_f^i 值均小于 40, 潜在风险程度为低风险。Hg 低风险、中等风险和较重风险的站位占比分别为 66%、7% 和 27%, As 低风险和中等风险的站位占比分别为 97% 和 3%, Cd 低风险和中等风险的站位占比为 87% 和 13%。各重金属元素的潜在生态风险水平从高到低排序为: $Hg > Cd > As > Pb > Cu > Cr > Zn$ 。从综合潜在生态风险程度来看, 研究区域内 RI 值范围为 14.50~247.68, 23% 的站位属于中等风险, RI 均值为 88.46 (小于 150), 整体属于低风险。RI 值分布图(图 5)显示, 高值区为临高海域西部、文澜河处以及红牌港附近海域。



注: 箱体中间横线指示中位数, 正方形点为平均值, 箱体上下伸出的线条指示最大、最小值, 菱形点为离群值。

图 4 表层沉积物重金属地质累积指数分布

Fig. 4 Distribution map of the geoaccumulation index of heavy metals in surface sediments

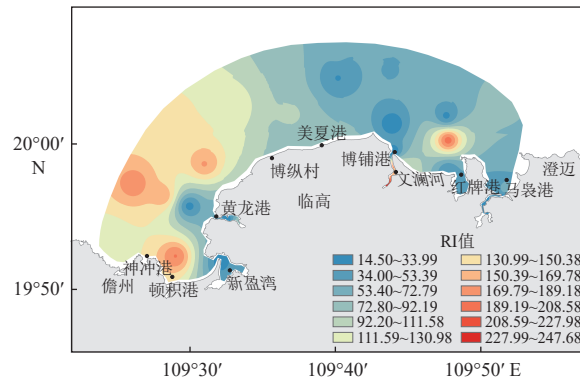


图 5 临高海域表层沉积物重金属元素 RI 值分布

Fig. 5 Distribution map of heavy metal RI values in surface sediments of Lingao sea area

表 3 临高海域表层沉积物重金属元素潜在生态风险指数结果

Table 3 Results of the potential ecological risk index for heavy metals in surface sediments of Lingao sea area

计算结果	Hg		As		Cr		Cu		Zn		Cd		Pb		C_d	RI
	C_f^i	E_f^i	C_f^i	E_f^i	C_f^i	E_f^i	C_f^i	E_f^i	C_f^i	E_f^i	C_f^i	E_f^i	C_f^i	E_f^i		
最大值	3.36	134.40	4.65	46.52	2.86	5.72	2.40	12.02	2.02	2.02	2.52	75.69	2.04	10.22	14.66	247.68
最小值	0.08	3.20	0.32	3.19	0.09	0.18	0.09	0.44	0.07	0.07	0.08	2.31	0.12	0.62	1.26	14.50
平均值	1.07	42.72	1.50	14.98	0.71	1.42	0.73	3.66	0.67	0.67	0.69	20.58	0.88	4.42	6.25	88.46

2.3 重金属来源分析

2.3.1 相关性分析

对表层沉积物重金属元素质量比的数据进行皮尔逊相关性分析, 结果见图 6。一般认为相关系数(r)大于 0.4, 则二者具有相关性; 小于 0.4, 则不相关(王安国等, 2018)。Hg、Cr、Cu、Zn、Cd 和 Pb 六种重金属元素两两之间的相关系数均大于 0.5, 呈显著相关。As 和其他重金属元素间的相关系数均小于 0.4, 不具有相关性。以往研究资料表明, 同一研究区域内沉积物中重金属元素间具有相关性, 表示它们具有相同的地球化学行为或来源(白有成等, 2011; 王恩康等, 2019; El-Sorogy et al, 2020)。因此, 本研究认为, 临高海域表层沉积物中的 Hg、Cr、Cu、Zn、Cd 和 Pb 具有相同的来源, As 则与它们的来源不同。

2.3.2 主成分分析

主成分分析前对数据进行了 KMO 和 Bartlett 球形检验, 结果显示: KMO 值为 0.735(大于 0.5), Bartlett 球形检验结果为 0.000(小于 0.05), 表明本研究的重金属元素数据资料适合采取主成分分析方法进行分析(孟昆等, 2018)。按照特征值大于 1 的原则提取主成分, 从临高海域表层沉积物中 7 种重金属元素的数据中共提取出 2 个主成分, 累计贡献率为 88.72%, 可以反映全部数据的绝大部分信息。

由表 4 可知, PC1(第一主成分)的方差贡献率为 73.39%, Hg、Cu、Zn、Cd、Pb 在 PC1 中具有高正载荷, 分别为 0.953、0.981、0.986、0.907、0.921, 均大于 0.9; Cr 在 PC1 中也具有较高正载荷, 为 0.750。这表明 PC1 反映的是 Hg、Cr、Cu、Zn、Cd 和 Pb 的来源。PC2(第二主成分)的方差贡献率是 15.33%, 且在 PC2 中的 As 具有高正载荷, 为 0.946, 其他重金属元素在 PC2 中的载荷很低, 说明 PC2 主要反映的是 As 的来源。这与相关性分析得出的结论相同, 即重金属元素 Hg、Cr、Cu、Zn、Cd 和 Pb 具有相同的来源, As 的来源则与之不同。

表 4 重金属元素主成分分析结果

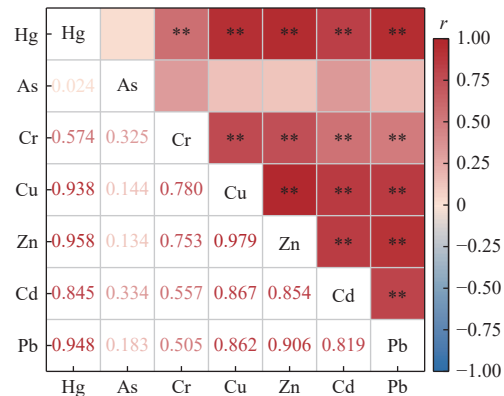
Table 4 Results of principal component analysis of heavy metal elements

主成分	重金属元素载荷						
	Hg	As	Cr	Cu	Zn	Cd	Pb
PC1	0.953	0.245	0.750	0.981	0.986	0.907	0.921
PC2	-0.254	0.946	0.275	-0.075	-0.102	0.094	-0.116

2.3.3 重金属来源分析

7 种重金属元素均存在质量比大于 0 的站位, 并且均存在质量比超过背景值的站位, 表明临高海域表层沉积物受到人为源的污染。图 7 为临高已确权的海域使用现状, 显示了临高沿海范围内主要的人类活动, 包括工业、港口的船舶运输、养殖业和旅游娱乐活动。

查阅文献资料可知, 沉积物中的重金属来源广泛, 涉及工业排放、化石燃料燃烧、船舶运输活动、港口疏浚作业等多个方面(刘俊华等, 1998; 徐艳东等, 2015; 沈芳等, 2018; 王晶等, 2020; 张海军



注: **代表 $p < 0.01$, 为极显著相关关系。

图 6 7 种重金属元素间的相关性关系

Fig. 6 Correlation between 7 heavy metal elements

等, 2021; 郑江鹏等, 2022)。其中, 船舶运输业对海域表层沉积物重金属污染的影响不容忽视。船舶在运输过程中需要燃烧燃料提供动力, 这一过程会释放含有重金属成分的尾气, 随后经过干湿沉降等过程进入海洋, 最终富集在海域表层沉积物中。此外, 船舶使用的防腐蚀涂料也是海域表层沉积物重金属污染的主要来源。为避免船体遭受海水腐蚀, 船只广泛使用防腐蚀涂料, 重金属则是防腐蚀涂料添加剂的主要成分(Wang et al, 2019; 贾磊等, 2020; 郑江鹏等, 2022)。在船舶航行过程中, 涂料会逐渐磨损、剥脱, 经过一系列物理、化学和生物过程后, 其中包含的重金属元素最终在表层沉积物中累积, 导致沉积物重金属含量上升。

Hg、Cr、Cu、Zn、Cd 和 Pb 的高值区包括研究区海域西部、文澜河和红牌港附近海域(图 3)。研究区海域西部港口众多, 如神冲港、顿积港、新盈港、黄龙港、武莲港和调楼港等; 红牌港作为海南工业重点发展区域, 聚集了船舶制造业、石油化工和电子信息产业等。工业生产过程中产生的废气、废水、船舶运行时产生的尾气, 以及船只表面剥落的涂料, 是导致附近海域表层沉积物中重金属含量较高的主要因素。作为研究区域内重要的入海河流, 文澜河贯穿临高县全境, 受沿岸人类活动影响, 其入海口处沉积物中重金属易发生累积。结合已有文献中关于海域沉积物重金属来源的研究, 以及研究区实际存在的人类活动类型可知, 临高海域表层沉积物中的 Hg、Cr、Cu、Zn、Cd 和 Pb 主要来源于船舶运输业和石油化工等工业活动。这一结论与贾磊等(2020)、庞国涛等(2024)关于防城港和三亚湾的研究结果相似——防城港和三亚湾海域沉积物中的重金属同样被证实来源于周边的船舶运输业和工业。同时, 这也进一步表明, 临高海域内表层沉积物中除 As 外 6 种重金属元素污染的主要因素是船舶运输业和工业。

在自然环境中, As 的天然存在量极低。养殖业和农业活动是 As 的主要来源, 饲料、肥料和农药的使用向环境中释放了大量的 As(Siano et al, 2017; Liu et al, 2018; 庞国涛等, 2024)。本次研究发现在博纵村至美夏港的沿岸海域, As 的质量比较高。依托天地图多时相影像服务平台(<https://image.tianditu.gov.cn/multidate>), 选取由自然资源部海南基础地理信息中心提供的 2022 年 3 月 1 日的 18 级影像数据开展目视解译, 发现在 As 质量比较高的博纵村至美夏港的海岸带分布有养殖池、农田和入海径流, 且近岸海域存在网箱养殖开发活动(图 7)。上述农业、养殖业生产过程中残留的饲料、农药和化肥, 均是造成研究海域表层沉积物 As 污染程度较高的主要原因, 与相关报道结论一致。在远岸海域 As 也有高值分布区, 与海口湾、铺前湾和木兰湾海域 As 的分布特征类似, 或与自然地质背景因素及外海物质来源相关(曾维特等, 2018)。

3 结 论

对 2023 年在临高海域采集的 30 个表层沉积物样本进行分析测定, 获得样本中 7 种重金属元素的质量比数据。基于重金属元素的质量比数据, 利用地质累积指数法、潜在生态风险指数法、相关性分析和主成分分析对临高海域内 7 种重金属元素的分布情况、污染水平、潜在风险水平以及来源进行分析, 得到如下结论。

1) 临高海域内整体上表现为西部海域重金属质量比高, 东部低; 其中 As 的高值区分布在海域

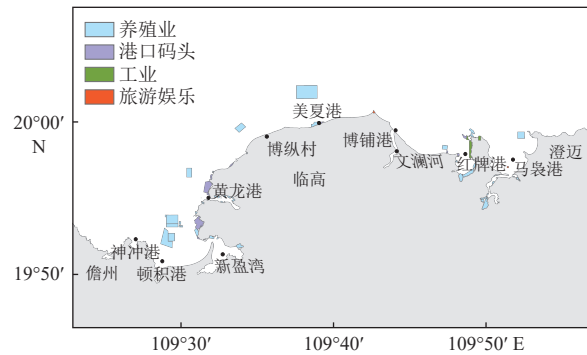


图 7 临高海域使用现状

Fig. 7 Current status of sea use in Lingao

中部, 与其他重金属分布不同。部分站位的 As、Cr 和 Cu 质量比超过《海洋沉积物质量》(GB 18668—2002)(国家海洋标准计量中心, 2002)中规定的第一类标准, 超标率为 13.33%、6.67% 和 3.33%, 1 个站位 Cr 的质量比超过第二类标准, 其他重金属元素均符合第一类标准。

2) 根据 I_{geo} 值、综合污染程度指数(C_d)和综合潜在生态风险指数(RI), 临高海域表层沉积物重金属元素整体上表现为无污染和低风险。7 种重金属元素中, As 是污染程度最高的重金属元素, Hg 的潜在生态风险最强, 临高当地需要加强与 As、Hg 相关的监测、防控和治理。

3) 对重金属元素质量比数据进行了相关性分析和主成分分析, 结合临高海域周边人类活动及沉积物重金属来源相关资料分析得出, 临高海域表层沉积物中的重金属主要来源于船舶运输、造船厂等工业活动以及沿岸的养殖池废水和农药残留。

参考文献 (References):

- 白有成, 高生泉, 金海燕, 等, 2011. 长江口及邻近海域沉积物重金属潜在生态风险评价[J]. *海洋学研究*, 29(4): 32-42. BAI Y C, GAO S Q, JIN H Y, et al, 2011. Potential ecological risk assessment of heavy metals in the sediments of Changjiang River Estuary and its adjacent sea area[J]. *Journal of Marine Sciences*, 29(4): 32-42.
- 程嘉熠, 王晓萌, 杨正先, 等, 2021. 双台子河口沉积物重金属溯源及生态风险评估[J]. *中国环境科学*, 41(3): 1345-1353. CHENG J Y, WANG X M, YANG Z X, et al, 2021. Sources and assessment of heavy metals in sediments in Shuangtaizi Estuary[J]. *China Environmental Science*, 41(3): 1345-1353.
- 国家海洋标准计量中心, 2002. 海洋沉积物质量: GB 18668—2002[S]. 北京: 中国标准出版社: 3. National Center of Ocean Standards and Metrology, 2002. Marine sediment quality[S]. Beijing: Standards Press of China: 3.
- 胡睿, 窦衍光, 邹亮, 等, 2021. 胶州湾海域表层沉积物重金属元素分布特征与风险评价[J]. *海洋地质前沿*, 37(11): 11-21. HU R, DOU Y G, ZOU L, et al, 2021. Distribution pattern and risk assessment for heavy metals in the surface sediments of Jiaozhou Bay[J]. *Marine Geology Frontiers*, 37(11): 11-21.
- 贾磊, 刘文涛, 唐得昊, 等, 2020. 三亚湾及周边海域表层沉积物重金属分布特征及生态风险评价[J]. *海洋地质前沿*, 36(12): 22-31. JIA L, LIU W T, TANG D H, et al, 2020. Distribution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments in Sanya Bay and surrounding waters[J]. *Marine Geology Frontiers*, 36(12): 22-31.
- 李越, 李顺, 蔡观强, 2022. 海南岛北部海湾重金属污染分布及来源[J]. *海洋地质前沿*, 38(8): 37-46. LI Y, LI S, CAI G Q, 2022. Distribution and origination of heavy metal pollution in bays of northern Hainan Island[J]. *Marine Geology Frontiers*, 38(8): 37-46.
- 刘俊华, 王文华, 彭安, 1998. 北京市二个主要工业区汞污染及其来源的初步研究[J]. *环境科学学报*, 18(3): 331-336. LIU J H, WANG W H, PENG A, 1998. Pollution and sources of Hg in top soil in two district of Beijing City[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 18(3): 331-336.
- 卢振峰, 唐棣, 李乐, 等, 2023. 海南老爷海表层沉积物重金属分布特征及污染评价[J]. *海洋环境科学*, 42(3): 410-417. LU Z F, TANG D, LI L, et al, 2023. Distribution characteristics and pollution evaluation of heavy metals in the surface sediment of Laoyehai lagoon, Hainan province[J]. *Marine Environmental Science*, 42(3): 410-417.
- 孟昆, 徐敏, 徐文健, 等, 2018. 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)*, 41(2): 99-106. MENG K, XU M, XU W J, et al, 2018. 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)*, 41(2): 99-106.
- 庞国涛, 杨源祯, 罗钧升, 2024. 防城港红树林湿地沉积物重金属分布特征及生态风险评价[J]. *广东海洋大学学报*, 44(2): 69-75. PANG G T, YANG Y Z, LUO J S, et al, 2024. Distribution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in mangrove wetland sediments in Fangchenggang[J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 44(2): 69-75.
- 全国海洋标准化委员会(SAC/TC 283), 2007. 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: 13. National Technical Committee 283 on Ocean of Standardization Administration of China,

2007. The specification for marine monitoring: Part 3 sample collection, storage and transportation: GB 17378.3—2007[S]. Beijing: Standards Press of China: 13.
- 全国海洋标准化委员会(SAC/TC 283), 2007. 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: 95. National Technical Committee 283 on Ocean of Standardization Administration of China, 2007. The specification for marine monitoring: Part 5 sediment analysis: GB 17378.5—2007[S]. Beijing: Standards Press of China: 95.
- 沈芳, 毛龙江, 邓晓茜, 等, 2018. 江苏海岸沉积物重金属空间分布与污染性评价再分析[J]. *首都师范大学学报(自然科学版)*, 39(5): 62-71. SHEN F, MAO L J, DENG X Q, et al, 2018. Reanalysis of distribution characteristics and contamination evaluation of heavy metals in coastal sediments of Jiangsu Province[J]. *Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition)*, 39(5): 62-71.
- 苏琼源, 王才广, 黄亮亮, 等, 2023. 广西主要海湾表层沉积物营养物和重金属研究——分布特征及风险评估[J]. *中国环境科学*, 43(增刊1): 221-232. SU Q Y, WANG C G, HUANG L L, et al, 2023. Distribution characteristics and risk assessment of nutrients and heavy metals in surface sediments of major bays in Guangxi[J]. *China Environmental Science*, 43(Suppl.1): 221-232.
- 王安国, 窦衍光, 张训华, 等, 2018. 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*, 34(5): 13-21. WANG A G, DOU Y G, ZHANG X H, et al, 2018. Assessment of heavy metal pollution of the surface sediment in northwestern Bohai Sea[J]. *Marine Geology Frontiers*, 34(5): 13-21.
- 王恩康, 丰爱平, 张志卫, 等, 2019. 兴化湾海域水体和表层沉积物中重金属分布及其源解析[J]. *海洋科学进展*, 37: 696-708. WANG E K, FENG A P, ZHANG Z W, et al, 2019. Heavy metal distribution and its source analysis in seawater and sediments of Xinghua Bay[J]. *Advances in Marine Science*, 37: 696-708.
- 王晶, 张志卫, 闫文文, 等, 2020. 广西防城江口沉积物中重金属环境背景构建[J]. *海洋科学进展*, 38: 91-102. WANG J, ZHANG Z W, YAN W W, et al, 2020. Background levels of heavy metals in marine sediments at the coast of Fangchengjiang River Estuary in Guangxi Province[J]. *Advances in Marine Science*, 38: 91-102.
- 徐艳东, 魏潇, 夏斌, 等, 2015. 莱州湾东部海域表层沉积物重金属潜在生态风险评价[J]. *海洋科学进展*, 33(4): 520-528. XU Y D, WEI X, XIA B, et al, 2015. Potential ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of the eastern Laizhou Bay[J]. *Advances in Marine Science*, 33(4): 520-528.
- 徐争启, 倪师军, 庾先国, 等, 2008. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. *环境科学与技术*, 31(2): 112-115. XU Z Q, NI S J, TUO X G, et al, 2008. Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index[J]. *Environmental Science & Technology*, 31(2): 112-115.
- 曾维特, 杨永鹏, 张东强, 等, 2018. 海南岛北部海湾沉积物重金属来源、分布主控因素及生态风险评价[J]. *环境科学*, 39(3): 1085-1094. ZENG W T, YANG Y P, ZHANG D Q, et al, 2018. Sources, distribution of main controlling factors, and potential ecological risk assessment for heavy metals in the surface sediment of Hainan Island north bay, South China[J]. *Environmental Science*, 39(3): 1085-1094.
- 张海军, 史本宁, 焦学尧, 等, 2021. 深圳近海环境重金属空间分布特征与风险评价[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 57(4): 679-690. ZHANG H J, SHI B N, JIAO X Y, et al, 2021. Spatial distribution characteristics and risk assessment of heavy metals in Shenzhen coastal areas[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 57(4): 679-690.
- 赵一阳, 鄢明才, 1993. 中国浅海沉积物化学元素丰度[J]. *中国科学(B辑)*, 23(10): 1084-1090. ZHAO Y Y, YAN M C, 1993. Abundance of chemical elements in China's shallow-sea sediments[J]. *Science in China (Series B)*, 23(10): 1084-1090.
- 郑江鹏, 王长友, 赵永刚, 等, 2022. 海州湾渔港经济区及邻近海域沉积物主要污染物分布特征和潜在风险[J]. *海洋环境科学*, 41(5): 731-737. ZHENG J P, WANG C Y, ZHAO Y G, et al, 2022. Distribution characteristics and potential risks of major pollutants in sediments of fishing port economic zone and adjacent waters of Haizhou Bay[J]. *Marine Environmental Science*, 41(5): 731-737.
- CHE Z W, AHMED W, WENG J C, et al, 2022. Distribution, pollution, and human health risks of persistent and potentially toxic elements in the sediments around Hainan Island, China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 174: 113278.
- EL-SOROGY A S, YOUSSEF M, AL-KAHTANY K, et al, 2020. Distribution, source, contamination, and ecological risk status of heavy metals in the Red Sea-Gulf of Aqaba coastal sediments, Saudi Arabia[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 158: 111411.

- HAKANSON L, 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach[J]. *Water Research*, 14(8): 975-1001.
- HAO Z, CHEN L H, WANG C L, et al, 2019. Heavy metal distribution and bioaccumulation ability in marine organisms from coastal regions of Hainan and Zhoushan, China[J]. *Chemosphere*, 226: 340-350.
- LIU J J, NI Z X, DIAO Z H, et al, 2018. Contamination level, chemical fraction and ecological risk of heavy metals in sediments from Daya Bay, South China Sea[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 128: 132-139.
- MULLER G, 1969. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. *GeoJournal*, 2(108): 108-118.
- NAIFAR I, PEREIRA F, ZMEMLA R, et al, 2018. Spatial distribution and contamination assessment of heavy metals in marine sediments of the southern coast of Sfax, Gabes Gulf, Tunisia[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 131(Part A): 53-62.
- SIANO F, BILOTTO S, NAZZARO M, et al, 2017. Effects of conventional and organic feed on the mineral composition of cultured European sea bass (*Dicentrarchus labrax*)[J]. *Aquaculture Nutrition*, 23(4): 796-804.
- WANG C L, ZOU X Q, FENG Z Y, et al, 2018. Distribution and transport of heavy metals in estuarine-inner shelf regions of the East China Sea[J]. *Science of the Total Environment*, 644: 298-305.
- WANG X Y, LIU L, ZHAO L L, et al, 2019. Assessment of dissolved heavy metals in the Laoshan Bay, China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 149: 110608.
- ZHAO Y Y, 1985. Some geochemical patterns of shelf sediments of the China Seas[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 3(2): 200-211.

Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metal Elements in Surface Sediment of Lingao Sea Area

DING Jingyi¹, SUN Yonggen^{1,2}, ZHANG Zhiwei^{1,2}, GU Dongqi^{1,2}

(1. *Research Center of Coastal Science and Marine Planning, First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, China;*
2. *Key Laboratory of Coastal Science and Integrated Management, MNR, Qingdao 266061, China*)

Abstract: In 2023, 30 surface sediment samples were collected from the sea area of Lingao County, Hainan, and the heavy metal contents in the sediments were analyzed to study the pollution status, risk level and sources of pollution. The results showed that the distribution characteristics of heavy metal contents of Hg, Cr, Cu, Zn, Cd and Pb were similar, and the high value areas were in the northwestern part of Lingao sea area, the sea area near Hongpai Harbour, Huanglong Harbour and Wenlan River, and the high value area of As was in the middle part of Lingao sea area. The average concentrations of all seven heavy metals, namely Hg, As, Cr, Cu, Zn, Cd, and Pb, comply with the Class I quality standards for marine sediments. Specifically, the compliance rates with Class I standards across all stations for Hg, As, Cr, Cu, Zn, Cd, and Pb are 100%, 87%, 90%, 97%, 100%, 100%, and 100%, respectively. The geological accumulation index results indicate that the pollution levels of the seven heavy metals are in the following order, As>Pb>Hg>Cr>Cd>Cu>Zn, and the potential ecological risk levels are ranked as Hg>Cd>As>Pb>Cu>Cr>Zn. Overall, the heavy metals in the study area show no pollution and low risk. The Hg, Cr, Cu, Zn, Cd, and Pb in the surface sediments of the Lingao sea mainly originate from industries and marine transportation. The As in the nearshore areas is sourced from coastal farming and agriculture, while the As in the offshore areas may be related to natural geological background factors and inputs from the open sea.

Keywords: surface sediments; heavy metal contamination; geological accumulation index; potential ecological risk; Lingao

Received: October 18, 2024