

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2022.01.09

引用格式: 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.)

广西防城港近岸表层沉积物重金属分布特征及污染评价

庞国涛¹, 阎琨^{1,2}, 李伟¹

(1. 中国地质调查局烟台海岸带地质调查中心, 山东 烟台 264000;

2. 中国地质大学(武汉)环境学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 为了解防城港近岸海域表层沉积物重金属分布及污染特征, 系统采集了 19 件研究区的表层沉积物样品, 检测了 7 种重金属元素的含量。测试结果表明: 研究区表层沉积物中 Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、Hg 和 As 含量均符合政府制定的海洋功能区划要求。单因子潜在生态危害指数法评价结果显示, 不同重金属潜在生态危害排序为 $Hg > Cu > Cd > As > Pb > Cr > Zn$, 除 Hg 外均属于低生态风险。综合潜在风险评价指数显示除 F17 和 F19 站位潜在生态风险等级为高外, 其他站位潜在生态风险等级为中或低, 其中 Hg 是潜在风险的主要控制元素。地质累积指数评价表明企沙半岛南部区域存在轻微的 Cu、Hg 污染, 且这 2 种元素含量在部分站位处于阈值效应含量和可能效应含量之间, 存在一定的概率引发毒性。相关性分析和主成分分析综合显示, Pb、Cr 和 As 主要受陆源输入沉积的影响; Cu 和 Zn 主要来自船体防腐涂料和工业污水; Cd 和 Hg 的来源相对多元, 既有陆源河流汇入, 也有来自电镀、石油燃烧、生活工业污水和海水养殖的影响。

关键词: 防城港; 表层沉积物; 重金属; 地质累积指数; 潜在生态风险

中图分类号: X142; P595

文献标志码: A

文章编号: 2095–8706(2022)01–0082–09

0 引言

海洋表层沉积物中的重金属通常具有来源范围广、存在时间长、污染后难以恢复等特性, 对海洋生态系统具有潜在的危害^[1–2]。沉积物中的重金属一旦进入环境循环就很难被生物降解, 往往通过水体、低等生物等进入食物链, 进而破坏生物体的正常生理代谢活动, 最终通过生物富集作用危害人体健康和生态环境^[3]。此外, 海洋中的重金属还可以抑制酶的活性, 从而干扰环境中的生化反应, 威胁海洋生物的生理健康^[4]。

海洋环境中的重金属来源主要有入海河流输入、大气沉降、人类活动排放等^[2]。近年来随着城市的发展, 广西防城港与企沙港的航运、港口、工业

等活动日渐密集, 与之对应的陆源污染物和工业废弃物排放的问题也不断加剧, 为其近岸污染物尤其是重金属元素的富集沉淀创造了有利条件。

本文通过对防城港近岸海域表层沉积物采样检测, 分析了 7 种重金属元素 (Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、Hg 和 As) 的含量、空间分布等情况。综合运用潜在生态危害指数法、地质累积指数法和一致性沉积物质量基准法, 定量评价防城港近岸海域表层沉积物重金属的污染特征和生物毒理效应, 为防城港近岸海域的沿海产业布局规划、海洋环境和海洋生态保护提供科学参考。

1 研究区概况

防城港位于防城港市南部, 是天然的深水良

港,也是我国西南第一大港,以及铁矿石、建材及煤炭等重要战略物资的中转基地^[5-6]。防城港码头位于防城湾内,属天然半封闭浅水海湾,港口地势北高南低,具有典型的滨海丘陵、滨海台地和海积漫滩地貌特征。防城港为混合潮港,每月有 6~8 d 为小潮汛,属不正规半日潮,其余为正规日潮。防城湾入海河流主要是防城河,其主流由牛头岭入海,湾内海流主要受潮流、防城河流以及风浪流共同影响^[1]。

2 材料与方法

2.1 样品采集

本研究于 2020 年 10 月在广西防城港近岸海域布设采样点进行采样,采样点位如图 1 所示。调查船按 GPS 定位对布设站点的表层沉积物取样。使用不锈钢抓斗取样器采集,样品取出后用木铲取



图 1 研究区采样站位(F)分布
Fig.1 Distribution of sampling sites(F) in the study area

其中央未受污染的表层 0~5 cm 沉积物样,装入干净的聚乙烯袋中密封低温保存。为保证样品不受污染,每次取样前用纯净水冲洗采样器和木铲。

2.2 测试方法

沉积物样品的重金属元素测定分析均在广西壮族自治区地质矿产测试研究中心完成,测定按照 GB 17378.5—2007《海洋监测规范第 5 部分:沉积物分析》^[7]的要求进行,其中,Pb、Cr、Zn 使用 X 光谱仪测定,Hg 和 As 使用原子荧光光谱仪测定,Cu 和 Cd 使用电感耦合等离子体质谱仪测定。

2.3 评价方法

2.3.1 潜在生态危害指数

潜在生态危害指数(Potential Risk Index, RI)法是通过先评价各单因素危害,而后再累加评价多种金属综合潜在生态危害的方法。这种方法综合应

用生物毒理学、环境化学和生态学等方面的内容,定量呈现出重金属的潜在危害程度,是国内外评价沉积物质量最为有效的方法之一^[8-9]。其计算公式为

$$R_i = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \times \frac{C_m^i}{C_b^i} \quad (1)$$

式中: R_i 为重金属综合潜在生态危害指数; E_r^i 和 T_r^i 分别为第 i 种重金属的单元素潜在生态危害指数和毒性系数; C_m^i 为第 i 种重金属的检测浓度; C_b^i 为第 i 种重金属的区域背景值。本文采用徐争启等^[10]的研究结果作为重金属毒性系数,采用南海表层沉积物中主要污染物的环境背景值作为重金属的区域背景值^[11],如表 1 所示。不同的 R_i 值范围所对应的重金属潜在生态风险程度见表 2。

表 1 沉积物重金属元素的区域背景值和毒性系数
Tab.1 Area background value and toxicity index of heavy metal elements in sediment

重金属元素	$C_b^i / 10^{-6}$	T_r^i
Cu	7.00	5.00
Pb	16.00	5.00
Zn	54.00	1.00
Cd	0.18	30.00
Cr	39.00	2.00
Hg	0.02	40.00
As	10.00	10.00

表 2 重金属元素潜在生态风险程度

Tab.2 Potential ecological risk levels of heavy metal elements

E_r^i 范围	潜在生态风险程度	R_i	潜在生态风险程度
$E_r^i < 40$	低	$R_i < 150$	低
$40 \leq E_r^i < 80$	中等	$150 \leq R_i < 300$	中等
$80 \leq E_r^i < 160$	高	$300 \leq R_i < 600$	高
$160 \leq E_r^i < 320$	较高	$R_i \geq 600$	较高
$E_r^i \geq 320$	很高		

2.3.2 地质累积指数法

地质累积指数法 (the Geo - accumulation Index, I_g) 是一种评价单一重金属污染程度的方法, 这种方法充分考虑了自然成岩作用和人类综合活动对沉积环境的影响, 经常用于评价沉积物中的重金属污染水平 (表 3)^[12], 其计算公式为

$$I_g = \lg \left[\frac{C_m^i}{1.5 \times C_b^i} \right] \text{。} \tag{2}$$

式中: I_g 为地质累积指数, 可分为 7 个污染程度, 具体见表 3; C_m^i 和 C_b^i 分别为第 i 种重金属的实测浓度和背景值; 考虑到成岩作用可能引起的重金属变化, 添加 1.5 作为变动系数。

表 3 地质累积指数和污染程度关系

Tab.3 Relationship between I_g and pollution levels

I_g	污染程度
$I_g \leq 0$	无
$0 < I_g \leq 1$	轻度
$1 < I_g \leq 2$	偏中度
$2 < I_g \leq 3$	中度
$3 < I_g \leq 4$	偏重度
$4 < I_g \leq 5$	重度
$I_g > 5$	严重

2.3.3 一致性沉积物质量基准法

一致性沉积物质量基准 (Consensus Based Sedi-

ment Quality Guidelines, CBSQGs) 法是基于概率统计预测沉积物生物毒性风险的重要评价方法^[13]。针对不同的重金属, 一致性沉积物质量基准法给出其相应的阈值效应含量 (Threshold Effect Concentration, TEC) 和可能效应含量 (Probable Effect Concentration, PEC)。当沉积物中某种重金属实测含量低于 TEC 值时, 该重金属引发的生态危害发生概率通常低于 25%, 可认为其不会产生有害生物效应; 当某种重金属实测含量值高于 PEC 值时, 该重金属引发的生态危害发生的概率通常高于 75%, 认为其引发的有害生物效应可能性较大^[14]。重金属 CBSQGs 值如表 4 所示。

表 4 重金属元素一致性沉积物质量基准值

Tab.4 CBSQGs of heavy metal elements

重金属元素	CBSQGs 值	
	TEC	PEC
Cu	38.20	214.60
Pb	53.00	296.00
Zn	153.50	396.20
Cd	1.04	5.76
Cr	78.30	268.50
Hg	0.18	0.66
As	16.10	54.30

3 测试结果与讨论

3.1 表层沉积物重金属含量

通过分析样品测试结果, 得到了防城港表层沉积物中 7 种重金属含量的统计特征值, 如表 5 所示。防城港近岸表层沉积物中 7 种重金属元素的平均含量具有 $Zn > Cr > Cu > Pb > As > Hg > Cd$ 的分布特征, 除 Zn 以外, 其他元素的变异系数均大于 0.36, 属高度变异, 说明这 6 种重金属元素在各站位的含量分布不均匀, 空间差异性较大。

根据《广西壮族自治区海洋功能区划 (2011—2020 年)》布局要求, 研究区的 19 个站位均位于港口航运区, 沉积物执行 GB 18668—2002《海洋沉积物质量》^[15] 三类标准。通过对比, 研究区海域表层沉积物中 7 种重金属含量均值均符合一类沉积物质量标准 (表 5), 说明防城港近岸海域表层沉积物质量较好, 符合政府制定的海洋功能区划要求。

表 5 防城港近岸表层沉积物各重金属元素含量的统计特征

Tab. 5 Statistics characteristics of heavy metal elements in surface sediments of Fangchenggang inshore

统计特征	$w_B/10^{-6}$						
	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	Hg	As
最小值	8.15	9.19	35.70	0.02	15.90	0.02	3.82
最大值	45.04	37.60	118.20	0.18	62.10	0.25	16.80
平均值	22.37	22.44	65.07	0.07	37.78	0.07	9.08
标准差	9.12	10.16	22.82	0.04	16.17	0.06	4.48
变异系数	0.41	0.45	0.35	0.54	0.43	0.84	0.49
国家一类标准值	35.00	60.00	150.00	0.50	80.00	0.20	20.00
国家二类标准值	100.00	130.00	350.00	1.50	150.00	0.50	65.00
国家三类标准值	200.00	250.00	600.00	5.00	270.00	1.00	93.00

为进一步揭示近年来防城港近岸表层沉积物中重金属含量的变化特征,本文收集了 2010—2020 年防城港近岸表层沉积物的重金属含量数据,如表 6 所示。可以看出 Cu、Cr 含量在逐年升高,Pb、Zn、Hg、As 含量存在波动,但整体上呈上升趋势,Cd 含量变化幅度较小。

表 6 2010—2020 年防城港近岸表层沉积物重金属元素含量变化

Tab. 6 Changes of heavy metal elements in surface sediments of Fangchenggang inshore from 2010 to 2020

年. 日	$w_B/10^{-6}$						
	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	Hg	As
2010.06 ^[16]	10.90	19.20	41.00	0.080	—	0.03	6.83
2010.12 ^[17]	12.30	21.30	30.60	0.18	—	0.05	8.51
2013.08 ^[18]	13.65	30.00	52.50	0.07	—	0.06	10.80
2014.08 ^[19]	20.70	34.90	61.14	0.18	28.20	0.08	8.49
2017.08 ^[20]	21.50	15.60	49.40	0.07	41.70	0.03	9.10
2020.10(本研究)	22.37	22.44	65.07	0.07	37.78	0.07	9.08

3.2 表层沉积物重金属元素分布

防城港近岸沉积物中重金属含量分布如图 2 所示,在港口码头和企沙半岛之间的东湾区域重金属含量呈现出由湾内向湾口逐渐增加的趋势,这与

湾内侧为红树林保护区,外侧为人类活动密集的填海区有关; Cu、Pb、Cd、Cr、Zn 5 种重金属元素均在码头南部的 F06 和 F08 站位(图 2)附近出现高值,且由码头南部自西向东呈现出高一低一高的变化

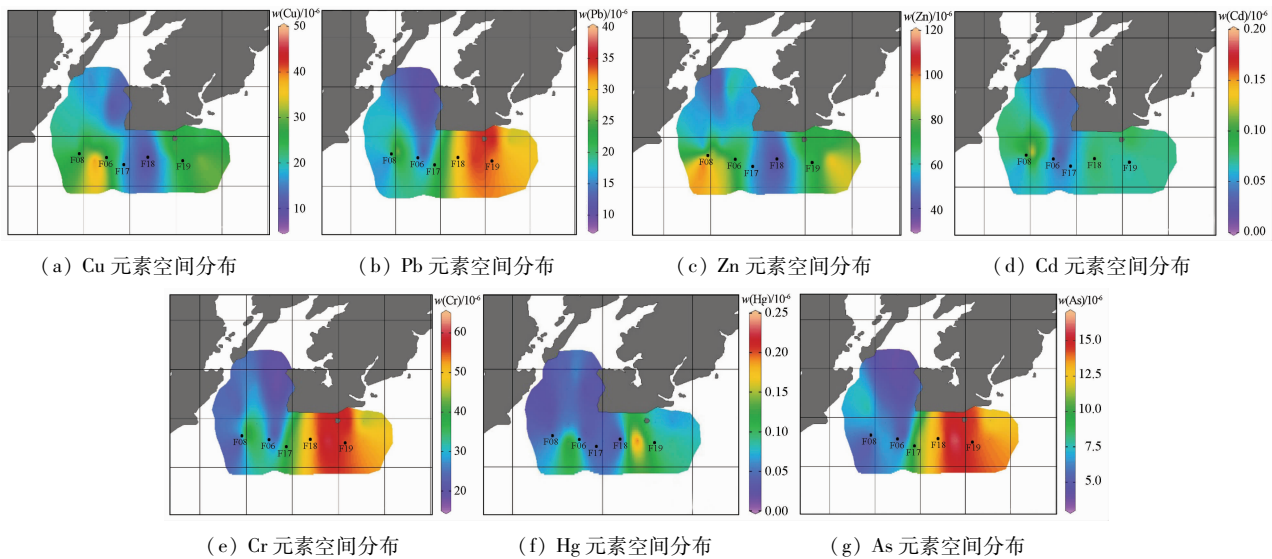


图 2 防城港近岸表层沉积物中重金属元素的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of heavy metal elements in surface sediments of Fangchenggang inshore

规律,这可能与 F06 和 F08 站位位于防城港货运码头航线,F17 和 F18 站位位于企沙工业区南部,受到人类经济活动向附近海域输入重金属元素等影响;Hg 的含量在企沙半岛南部由近岸向南部海域逐渐减少;As 的含量由西向东含量渐增,在 F19 站位附近的区域达到最大值。

3.3 重金属相关性来源解析

3.3.1 重金属相关性分析

对防城港近岸表层沉积物中 7 种重金属元素的含量进行 Pearson 相关性分析,采用单尾 t 检验 (Sig. < 0.05) 进行显著性检验,分析结果见表 7。Pb 与 As、Cr 之间的相关系数均大于 0.8,相关性明显,说明这 3 种重金属元素在沉积基础上具有较强的相似性和同源性;Cu 与 Zn、Cd 与 Pb、Cd 与 Cr 之间的相关系数均在 0.50 ~ 0.80 之间,相关性一般。Cu 与除 Zn 外的其他重金属元素相关系数均较小,相关性较差,说明 Cu 的沉积与其他金属元素差异较大,这可能与人为输入和其自身的沉积特性有关。

表 7 表层沉积物重金属元素间相关系数

Tab.7 Correlation coefficient of heavy metal elements in surface sediments						
元素	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	Hg
Cu						
Pb	0.25					
Zn	0.79	0.13				
Cd	0.12	0.65	-0.03			
Cr	0.19	0.98	0.06	0.536		
Hg	0.37	0.39	0.28	-0.086	0.45	
As	0.06	0.86	-0.01	0.272	0.90	0.458

3.3.2 重金属来源分析

为分析防城港近岸海域重金属的来源,利用变量主成分分析进行来源解析(表 8,图 3)。

表 8 变量主成分分析的荷载和成分矩阵

Tab.8 Load and composition matrix of variable principal component analysis			
元素	PC1	PC2	PC3
Cu	0.39	0.83	0.24
Pb	0.97	-0.18	-0.11
Zn	0.25	0.88	0.20
Cd	0.56	-0.31	0.70
Hg	0.56	0.37	-0.60
As	0.87	-0.24	-0.30
Cr	0.96	-0.21	-0.04
方差贡献率/%	49.43	26.27	15.04
累积贡献率/%	49.43	75.70	90.74

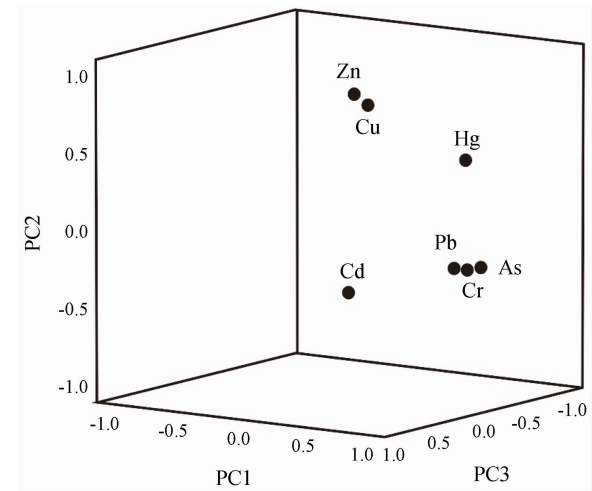


图 3 主成分分析三维荷载

Fig.3 3D load map of principal component analysis

如表 8 所示,PC1、PC2 和 PC3 的方差贡献率分别为 49.43%、26.27% 和 15.04%,3 个主成分的累积方差贡献率已达 90.74% (>85%),说明用这 3 个主成解释绝大多数站位的重金属来源差异是可靠的。

在 PC1 中,Pb、Cr 和 As 均超过 0.85,具有较大的正向载荷,表明这 3 种重金属具有相似的来源,与相关性结果吻合。与 GB 18668—2002《海洋沉积物质量》^[15] 标准相比,3 种重金属各站位含量均低于其一类标准,说明这 3 种重金属受人类经济活动影响较小,主要受地质背景的影响,可能来源于岩石风化经河流搬运进入海域沉积。这与王毅等^[21] 提出的防城港近岸区域防城江的重金属含量最高的观点一致。此外,Cd 和 Hg 在 PC1 上也具有较高的正向载荷,说明这 2 种元素也有部分来自陆源岩石风化。

在 PC2 中,Cu 和 Zn 均具有较大的正向载荷,分别为 0.83 和 0.88,其他重金属的载荷较小。2 者相关性为 0.79,具有显著正相关,说明其具有相同的来源。2 种元素相对高含量的区域均位于码头南部的航道附近和企沙半岛东南部海域,说明 Cu 和 Zn 来源与人类经济活动密切相关,通常 Cu 和 Zn 污染主要来自废弃电池、船体防腐涂料以及印刷、生活、工业污水等^[22-23],对比可知,防城港近岸海域的 Cu 和 Zn 主要来自船体防腐涂料和工业污水。

在 PC3 中,只有 Cd 具有较大的正向载荷,为 0.70。Cd 高值区分布在码头南侧的航道上,推测

防城港近岸海域部分 Cd 污染来自化石燃料燃烧(发电)^[23]。Hg 在 PC1 和 PC2 为正载荷,在 PC3 为负载荷,说明 Hg 的来源相对多元,综合以上可知 Hg 的来源既有陆源河流汇入,也有电镀、机械制造、化工行业、生活工业污水和海水养殖。

3.4 重金属污染评价

3.4.1 潜在生态危害指数

根据公式(1)和公式(2)计算得出防城港近岸综合潜在生态危害指数、单元素潜在生态危害指数和地质累积指数,结果如图 4 和表 9 所示。除 Hg 外的各调查站位的 E_r^i 值均小于 40,说明防城港近岸海域表层沉积物中除 Hg 外的 6 种重金属元素的单因子潜在生态风险程度属于低生态危害,其中低生态危害 1 站位,中等生态危害 5 站位,高生态危害 8 站位,较高生态危害 3 站位,很高生态危害 2

站位。高生态危害及以上站位多集中在企沙半岛工业区南部海域,这可能与 Hg 的毒性系数较高、对海洋生态环境的危害较大,以及企沙半岛工业园区的污水排放有关。

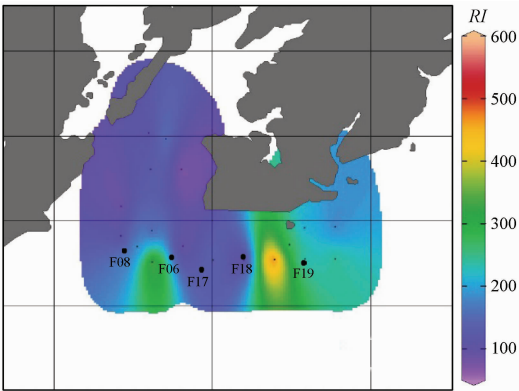


图 4 防城港近岸潜在生态危害指数空间分布
Fig.4 Distribution of R_i in Fangchenggang inshore

表 9 表层沉积物重金属元素评价结果

Tab.9 Results of heavy metal elements assessment in surface sediments

站位	E_r^i							R_i	风险 分级	I_g						
	Pb	Zn	Cd	Cu	Hg	Cr	As			Pb	Zn	Cd	Cu	Hg	Cr	As
F01	3.84	0.66	8.83	10.79	72.00	1.29	4.13	101.55	低	-0.96	-1.18	-2.35	0.53	0.26	-1.22	-1.86
F02	5.34	0.89	8.33	12.57	92.00	1.58	5.07	125.79	低	-0.49	-0.76	-2.43	0.75	0.62	-0.93	-1.56
F03	5.25	1.01	10.17	13.86	42.00	1.04	8.41	81.74	低	-0.51	-0.56	-2.15	0.89	-0.51	-1.53	-0.83
F04	5.41	0.90	14.17	13.93	88.00	1.65	6.33	130.39	低	-0.47	-0.73	-1.67	0.89	0.55	-0.86	-1.24
F05	7.97	1.23	12.33	15.57	122.00	2.18	11.60	172.89	中等	0.09	-0.29	-1.87	1.05	1.02	-0.46	-0.37
F06	11.72	1.72	30.00	23.14	102.00	2.68	6.94	178.20	中等	0.64	0.20	-0.58	1.63	0.77	-0.16	-1.11
F07	10.75	1.44	11.50	23.36	192.00	2.89	14.80	256.73	中等	0.52	-0.06	-1.97	1.64	1.68	-0.05	-0.02
F08	3.13	2.19	4.00	20.07	144.00	0.82	4.21	178.41	中等	-1.26	0.55	-3.49	1.42	1.26	-1.88	-1.83
F09	9.28	0.67	14.00	5.82	30.00	2.62	13.10	75.49	低	0.31	-1.15	-1.68	-0.37	-1.00	-0.20	-0.20
F10	10.00	1.24	10.50	18.72	162.00	2.80	14.10	219.36	中等	0.42	-0.27	-2.10	1.32	1.43	-0.10	-0.09
F11	9.72	1.80	12.00	23.16	188.00	2.71	14.00	251.39	中等	0.37	0.26	-1.91	1.63	1.65	-0.15	-0.10
F12	2.90	1.32	5.33	14.57	142.00	0.88	3.82	170.83	中等	-1.37	-0.19	-3.08	0.96	1.24	-1.77	-1.97
F13	2.87	0.95	5.67	6.20	44.00	0.89	4.28	64.87	低	-1.38	-0.65	-2.99	-0.27	-0.45	-1.75	-1.81
F14	5.59	0.68	18.33	13.54	48.00	1.44	6.76	94.35	低	-0.42	-1.14	-1.30	0.85	-0.32	-1.06	-1.15
F15	11.75	1.34	15.50	17.64	130.00	3.13	14.70	194.07	中等	0.65	-0.16	-1.54	1.23	1.12	0.06	-0.03
F16	3.31	1.28	4.33	17.50	58.00	1.03	4.44	89.90	低	-1.18	-0.23	-3.38	1.22	-0.05	-1.54	-1.76
F17	6.09	1.70	7.17	32.17	340.00	1.78	7.14	396.05	高	-0.30	0.18	-2.65	2.10	2.50	-0.75	-1.07
F18	7.22	0.94	10.00	10.49	96.00	2.21	11.80	138.65	低	-0.06	-0.68	-2.17	0.48	0.68	-0.44	-0.35
F19	11.06	0.93	11.50	10.43	500.00	3.18	16.80	553.90	高	0.56	-0.69	-1.97	0.48	3.06	0.09	0.16
平均值	7.01	1.20	11.25	15.98	136.42	1.94	9.08	182.87	中等	-0.26	-0.40	-2.17	0.97	0.82	-0.77	-0.91

防城港近岸海域的 R_i 变化范围为 64.87 ~ 553.90,平均值为 182.87,其中低生态危害 9 站位,中等生态危害 8 站位,高生态危害 2 站位。重金属潜在生态危害占比排序为 Hg(74.6%) > Cu(8.74%)

>Cd(6.15%) > As(4.96%) > Pb(3.83%) > Cr(1.06%) > Zn(0.66%),其中 Hg 的占比远高于其他金属,说明 Hg 主要控制着防城港近岸海域沉积物中重金属的潜在生态危害程度。

3.4.2 地质累积指数评价

防城港近岸海域沉积物中重金属的地质累积指数结果(图 5)显示,Cd 无污染,Cr、As、Pb 和 Zn 在少部分站位存在轻微污染,Cu 和 Hg 在大部分站位均处在轻度、偏中度污染区间内,Cu 的地质累积指数集中在 1 附近,属于轻度污染程度,Hg 的地质累积指数大于 1 的站位多集中在企沙半岛工业区附近,进一步表明防城港近岸沉积物中 Hg 的污染主要受人为活动的影响。

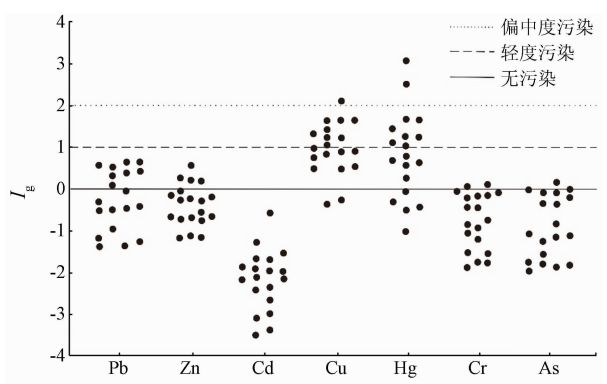


图 5 重金属元素地质累积指数

Fig. 5 Geological accumulation index of heavy metal elements

3.4.3 毒性效应预测

根据一致性沉积物重金属质量基准,对防城港近岸表层沉积物的生物毒性风险进行了划分(表 10),可以看出,研究区 19 个站位中 7 种重金属含量均低于 PEC,说明该区域表层沉积物发生生物中毒的概率不大。Pb、Zn、Cd 和 Cr 在所有站位的实测含量均低于 TEC,可认为这 4 种金属不会产生有害的生物效应,Cu 在 F17 站位、Hg 和 As 在 F19 站位处于 TEC 和 PEC 之间,即两站位有 25% ~ 75% 的概率引发毒性,需要引起一定的重视。

表 10 沉积物重金属元素生物毒性风险
Fig. 10 Biological toxicity risk of heavy metal elements in sediments

元素	站位数		
	小于 TEC	TEC ~ PEC	大于 PEC
Cu	18	1	0
Pb	19	0	0
Zn	19	0	0
Cd	19	0	0
Cr	19	0	0
Hg	18	1	0
As	18	1	0

4 结论

通过对防城港近岸海域表层沉积物重金属元素分布特征、潜在生态风险评价及来源分析研究,得到以下结论:

- (1)防城港南部海域沉积物中 7 种重金属元素均符合政府制定的海洋功能区划要求,但通过与往年数据对比发现 Cd 元素变化较小,其他元素含量均呈上升趋势。重金属元素的分布呈现出湾内含量低,码头航道和企沙半岛南部较高的特点。
- (2)研究区单因子潜在生态危害评价显示引起潜在生态危害的元素为 Hg,高生态危害及以上的站位多集中在企沙半岛工业区南部海域。地质累积指数显示 Cu 和 Hg 在部分站位存在轻微至偏中度污染,污染站位多集中在企沙半岛南部海域。
- (3)相关性分析和主成分分析综合显示,Pb、Cr 和 As 呈显著正相关,主要受陆源输入沉积的影响;Cu 和 Zn 主要来自船体防腐涂料和工业污水。Cd 和 Hg 的来源相对多元化,Cd 部分来自化石燃料燃烧(发电),部分来自陆源输入,Hg 既有陆源河流汇入,也有来自电镀、机械制造、化工行业、生活工业污水和海水养殖等方面。

参考文献(References):

[1] 李啸宇,何祥英,罗万次,等. 广西防城湾表层沉积物重金属的分布及其潜在生态风险评价[J]. 海洋环境科学,2016, 35(5):712-717.
Li X Y,He X Y,Luo W C,et al. Distribution and potential ecological risk evaluation of heavy metals in surface sediments of Fangcheng bay of Guangxi[J]. Mar Environ Sci,2016,35(5): 712-717.

[2] Loska K,Wiechuła D. Application of principal component analysis for the estimation of source of heavy metal contamination in surface sediments from the Rybnik Reservoir[J]. Chemosphere, 2003,51(8):723-733.

[3] Tang D G,Wamken K W,Santschi P H. Distribution and partitioning of trace metals (Cd,Cu,Ni,Pb,Zn) in Galveston Bay waters[J]. Mar Chem,2002,78(1):29-45.

[4] 曹欢,胡钰梅,潘迎捷,等. 水产品中重金属异质性导致的风险[J]. 生态毒理学报,2021,16(6):80-92.
Cao H,Hu Y M,Pan Y J,et al. Risk caused by heterogeneity of heavy metals in aquatic products[J]. Asian J Ecotoxicol,2021, 16(6):80-92.

[5] 邹明明,朱慧兰,郭玉清. 广西防城港东湾红树林湿地春季小型底栖动物丰度与生物量[J]. 生态学杂志,2020,39(6): 1823-1829.

- Zou M M, Zhu H L, Guo Y Q. Abundance and biomass of meiofauna in spring in Dongwan mangrove wetland of Fangchenggang, Guangxi[J]. Chin J Ecol, 2020, 39(6): 1823–1829.
- [6] 庞国涛, 阎琨, 李伟. 广西三娘湾海域表层沉积物多环芳烃特征及风险评价[J]. 中国地质调查, 2021, 8(5): 95–100.
- Pang G T, Yan K, Li W. Characters and risk assessment of hydrocarbons in surface sediments of Sanniang Bay in Guangxi[J]. Geol Surv China, 2021, 8(5): 95–100.
- [7] 马永安, 徐恒振, 于涛, 等. GB 17378.5—2007 海洋监测规范第5部分: 沉积物分析[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- Ma Y A, Xu H Z, Yu T, et al. GB 17378.5—2007 The Specification for Marine Monitoring Part 5: Sediment Analysis[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [8] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach[J]. Water Res, 1980, 14(8): 975–1001.
- [9] 柴小平, 胡宝兰, 魏娜, 等. 杭州湾及邻近海域表层沉积物重金属的分布、来源及评价[J]. 环境科学学报, 2015, 35(12): 3906–3916.
- Chai X P, Hu B L, Wei N, et al. Distribution, sources and assessment of heavy metals in surface sediments of the Hangzhou Bay and its adjacent areas[J]. Acta Sci Circumst, 2015, 35(12): 3906–3916.
- [10] 徐争启, 倪师军, 庾先国, 等. 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, 2008, 31(2): 112–115.
- Xu Z Q, Ni S J, Tuo X G, et al. Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index[J]. Environ Sci Technol, 2008, 31(2): 112–115.
- [11] 张远辉, 杜俊民. 南海表层沉积物中主要污染物的环境背景值[J]. 海洋学报, 2005, 27(4): 161–166.
- Zhang Y H, Du J M. Background values of pollutants in sediments of the South China Sea[J]. Acta Oceanol Sin, 2005, 27(4): 161–166.
- [12] Müller G. Index of Geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. GeoJournal, 1969, 2(3): 108–118.
- [13] MacDonald D D, Ingersoll C G, Berger T A. Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems[J]. Arch Environ Contam Toxicol, 2000, 39(1): 20–31.
- [14] Apitz S E, Barbanti A, Bernstein A G, et al. The assessment of sediment screening risk in Venice Lagoon and other coastal areas using international sediment quality guidelines[J]. J Soil Sediment, 2007, 7: 326–341.
- [15] 马德毅, 汤烈风, 王菊英, 等. GB 18668—2002 海洋沉积物质量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- Ma D Y, Tang L F, Wang J Y, et al. GB 18668—2002 Marine Sediment Quality[S]. Beijing: Standards Press of China, 2004.
- [16] 雷富, 张荣灿, 陈宪云, 等. 夏季广西北部湾近岸海域海水和表层沉积物中重金属污染现状及评价[J]. 海洋技术, 2013, 32(2): 94–100.
- Lei F, Zhang R C, Chen X Y, et al. Pollution assessment and evaluation of heavy metals in the sea water and surface sediments of Guangxi Beibu Gulf Coast in summer[J]. Ocean Technol, 2013, 32(2): 94–100.
- [17] 姜发军, 尹闯, 张荣灿, 等. 2010年冬季广西北部湾近岸海域表层海水和沉积物中重金属污染现状及评价[J]. 海洋环境科学, 2013, 32(6): 824–830.
- Jiang F J, Yin C, Zhang R C, et al. Pollution assessment and evaluation of heavy metals in the sea water and surface sediments of Guangxi Beibu Gulf coast in winter 2010[J]. Mar Environ Sci, 2013, 32(6): 824–830.
- [18] 罗万次, 雷富, 叶朝放, 等. 防城港湾夏季水质及表层沉积物重金属污染评价[J]. 广西科学院学报, 2015, 31(2): 83–88.
- Luo W C, Lei F, Ye C F, et al. Pollution evaluation of heavy metals in seawater and surface sediments of Fangchenggang Bay in summer[J]. J Guangxi Acad Sci, 2015, 31(2): 83–88.
- [19] 李啸宇, 何祥英, 罗万次, 等. 广西防城湾表层沉积物重金属的分布及其潜在生态风险评价[J]. 海洋环境科学, 2016, 35(5): 712–717.
- Li X Y, He X Y, Luo W C, et al. Distribution and potential ecological risk evaluation of heavy metals in surface sediments of Fangcheng bay of Guangxi[J]. Mar Environ Sci, 2016, 35(5): 712–717.
- [20] 刘保良, 陈旭阳, 魏春雷, 等. 广西海域沉积物重金属、滴滴涕、多氯联苯含量及生态风险分析[J]. 海洋湖沼通报, 2019(4): 125–132.
- Liu B L, Chen X Y, Wei C L, et al. Assessment on the pollution and potential ecological risk of heavy metals, DDTs and PCBs in sediments at Guangxi Sea area[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2019(4): 125–132.
- [21] 王毅, 王少鹏, 王英辉, 等. 防城港近岸海域及河口溶解态重金属污染特征[J]. 广西大学学报: 自然科学版, 2018, 43(5): 2069–2078.
- Wang Y, Wang S P, Wang Y H, et al. Pollution characteristics of dissolved heavy metals in nearshore and estuary of Fangchenggang[J]. J Guangxi Univ: Nat Sci Ed, 2018, 43(5): 2069–2078.
- [22] Zhuang W, Gao X L. Integrated assessment of heavy metal pollution in the surface sediments of the Laizhou Bay and the coastal waters of the Zhangzi Island, China: Comparison among typical marine sediment quality indices[J]. PLoS One, 2014, 9(4): e94145.
- [23] 卢明龙, 毛硕乾, 林霞, 等. 象山港表层沉积物6种重金属的污染特征及生态风险分析[J]. 生物学杂志, 2015, 32(4): 30–34.
- Lu M L, Mao S Q, Lin X, et al. Pollution characteristics and risk assessment of six heavy metals in surface sediments from the Xiangshan Bay[J]. J Biol, 2015, 32(4): 30–34.

Distribution characteristics and pollution assessment of heavy metals in coastal surface sediments of Fangchenggang in Guangxi

PANG Guotao^{1,2}, YAN Kun^{1,2}, LI Wei¹

(1. *Yantai Geological Survey Center of Coastal Zone, China Geological Survey, Shandong Yantai 264000, China;*

2. *School of Environmental, China University of Geosciences, Hubei Wuhan 430074, China*)

Abstract: In order to investigate the distribution and pollution characteristics of heavy metals in surface sediments of Fangchenggang inshore, the authors in this paper systematically collected 19 surface sediment samples in the study area to test 7 heavy metal elements. The results show that the average contents of Cu, Pb, Zn, Cd, Cr, Hg and As in surface sediments are accordance with the requirements of marine functional zoning formulated by the government. The evaluation of single factor potential ecological risk index method indicates the potential ecological hazards of various heavy metals are $Hg > Cu > Cd > As > Pb > Cr > Zn$, which all belongs to low ecological risk except Hg. Low or medium potential risk is displayed by the potential risk index except station F17 and F19, and Hg was the main controlling factor for potential risk. The evaluation of geological accumulation index shows that there was slight pollution of Cu and Hg in the southern Qisha Peninsula, and the contents of these two elements were between the threshold effect content and the possible effect content in some stations, meaning a certain probability of causing toxicity. Pb, Cr and As were mainly affected by terrigenous input sedimentation according to the correlation analysis and principal component analysis. While Cu and Zn were mainly from hull anti-corrosion coatings and industrial sewage. The sources of Cd and Hg were relatively diversified, including both land-based rivers and electroplating, oil combustion, domestic or industrial sewage and mariculture.

Keywords: Fangchenggang; surface sediments; heavy metals; geological accumulation index; potential ecological risk

(责任编辑: 魏昊明)