

闫兴国, 袁庆政, 赵明杰, 等. 广东吴川市近岸海域表层沉积物重金属分布特征与污染评价[J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(11): 82-90.

YAN Xingguo, YUAN Qingzheng, ZHAO Mingjie, et al. Assessment on heavy metal pollution in surface sediments off Wuchuan, Guangdong Province[J]. Marine Geology Frontiers, 2022, 38(11): 82-90.

广东吴川市近岸海域表层沉积物重金属分布特征与污染评价

闫兴国, 袁庆政, 赵明杰, 李保飞, 孙志佳*, 晋伟, 孙棧

(中国地质调查局烟台海岸带地质调查中心, 烟台 264004)

摘要: 为了解广东吴川市近岸海域表层沉积物中重金属的污染状况, 2020 年 10 月底在吴川市近岸海域采集了 41 个站点的表层沉积物, 系统地进行了典型重金属检测与沉积物粒度分析, 并运用单因子指数法、富集因子评价法和潜在生态风险指数法对研究区内重金属的污染程度进行评价, 分析了沉积物粒径大小对重金属含量分布的影响, 并讨论了重金属的可能来源。研究表明: 重金属含量分布由西向东总体上呈高-低-高的趋势, 高值区主要分布在西部近岸、东北部和东南部, 低值区主要分布在北部和西南部, 平均含量依次为 $Zn > Cr > Pb > Cu > As > Cd$, 均符合国家一类沉积物质量标准。通过计算得出, 吴川海域表层沉积物中 6 种重金属元素的污染程度排序为 $Cu \approx Cr > Pb > Cd > Zn > As$, 单因子污染指数均 < 1 ; 重金属富集程度主要集中在强富集, 平均富集系数排序为 $Cu > Pb > Zn > Cr > Cd > As$; 吴川海域的近岸海洋生态环境受到一定污染, E_r^i 的平均值排序为: $Cd > Cu > Pb > As > Cr > Zn$, 仅有 29.2% 的站点属于轻微风险, 其中对综合潜在生态风险指数影响最大的重金属元素是 Cd, 综合分析可得, 重金属的毒理作用占主导因素, 推断养殖场废水、工业废水是造成此风险指数较高的主要原因。研究区内表层沉积物中 6 种重金属的分布均遵循“元素粒度控制规律”, 即重金属含量与沉积物平均粒径 (M_z) 呈显著正相关。此外, 重金属之间的相关性分析结果表明, Cu 、 Pb 、 Zn 、 Cr 、 As 主要来源于陆域岩石自然风化剥蚀, Cd 受人类活动影响导致变异系数偏高。

关键词: 表层沉积物; 重金属; 含量与分布; 污染评价; 吴川市

中图分类号: P763.21; X55

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2021.252

0 引言

重金属元素是指在标准状况下单质密度 $> 4\,500\text{ kg/m}^3$ 的金属元素, 通常通过地表径流、工农业污染、大气沉降和居民生活污水等方式进入海洋环境中, 并在海水和沉积物中迅速蓄积^[1-2]。重金属污染具有来源范围广、蓄积速度快、发现难度大、

恢复时间久等特征, 对生物具有明显的毒性效应, 并且当蓄积重金属的生物参与食物链循环后, 还会造成二次污染, 使生物体生理代谢紊乱, 威胁生物体健康^[3]。广东省是全国人口密度最高和经济发展最快的沿海地区之一, 历年对重金属污染的研究多集中于珠江流域及其入海口周边地区^[4-10], 吴川市位于广东省西南部, 地处粤西最大河流鉴江下游, 市区三面环江、一面靠海。本文对吴川近岸海域内表层沉积物中重金属元素 Cu 、 Pb 、 Zn 、 As 、 Cr 和 Cd 的含量、分布等进行分析, 并运用单因子指数法、富集因子评价法和潜在生态风险指数法, 对沉积物中重金属与重金属的危害程度进行了评价与研究, 同时分析了重金属分布与粒度分布的相关性, 讨论了重金属的可能来源, 为海洋环境保护、生态修复

收稿日期: 2021-09-23

资助项目: 广东湛江地区海岸带自然资源综合调查项目(DD20208062)

作者简介: 闫兴国(1997—), 男, 助理工程师, 主要从事自然资源调查与监测研究。E-mail: yxg0777@163.com

* 通讯作者: 孙志佳(1991—), 男, 工程师, 主要从事自然资源调查与监测研究。E-mail: vczsj@qq.com

和吴川市的可持续发展提供科学依据。

1 采样与方法

1.1 样品采集

本研究于 2020 年 10 月底在吴川市近岸海域布设了 41 个表层沉积物站位(图 1)。表层沉积物通过抓斗式采样器采集,用木铲挖取中央未受干扰的表层样放入聚乙烯袋和小磨口瓶中,置于有冰的泡沫箱存运,所有样品均由青岛斯八达分析测试有限公司测试。聚乙烯袋内的样品用于地球化学分析(Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、Cu、Pb、Zn、Cr、As、Cd),上机前经四硼酸锂-偏硼酸锂混合坩埚熔融,通过 X 射线荧光光谱仪(Rigaku ZSX Primus II, 日本理学)测定 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 含量(检出限 0.01%);样品用盐酸-硝酸混合液体体系经水浴法消解,通过原子荧光光度计(AFS-8220, 北京吉天)测定 As 含量(检出限 10×10^{-9});样品用盐酸-高氯酸-硝酸-氢氟酸体系经石墨炉消解,通过电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS, Elan DRII, 美国 PerkinElmer)测定 Cu、Pb、Zn、Cr、Cd 含量(检出限 0.05×10^{-6})。小磨口瓶内的样品进行粒度分析,上机前采用 $(\text{NaPO}_3)_6$ 浸泡 1 d 后搅拌使其充分分散,而后泥质、砂质样品采用 Mastersizer 2000 型激光粒度仪进行测试,含砾石样品采用筛析法分析各粒级百分含量。样品的采集、贮存、运输、预处理和分析均严格按照《海洋监测规范》(GB17378—2007)^[11-12] 中的要求执行。

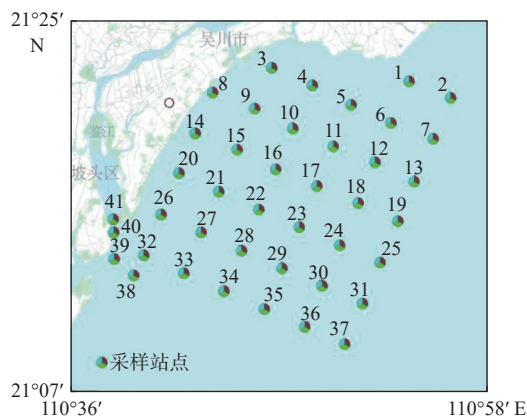


图 1 采样站位分布

Fig.1 Distribution of sampling stations

1.2 评价方法

1.2.1 单因子指数法

单因子指数法是最简便的环境质量评价方法,

该方法单独将每个污染因子进行评价,通过实测值与标准参照值的比值求得单因子指数,即可分别统计出每个污染因子的超标率、达标率和超标倍数等结果^[13]。计算公式为:

$$I^i = C_s^i / S^i \quad (1)$$

式中: I^i 、 C_s^i 、 S^i 分别为第 i 项因子的污染指数、第 i 项因子的实测值、第 i 项因子的标准值。

根据《海洋沉积物质量》(GB18668—2002)中重金属含量的标准值,研究区内表层沉积物均以国家一类沉积物质量标准作为评价指标,各重金属元素含量评价标准值见表 1。

表 1 各重金属元素的标准值^[14]

Table 1 Standard values of each heavy metal element^[14]

重金属元素	各类重金属元素的评价标准值/(mg/kg)					
	Cu	Pb	Zn	As	Cr	Cd
第一类	≤35	≤60	≤150	≤20	≤80	≤0.50
第二类	≤100	≤130	≤350	≤65	≤150	≤1.50
第三类	≤200	≤250	≤600	≤93	≤270	≤5.00

1.2.2 富集因子评价法

富集因子评价法是通过重金属的实测值与背景值的比值,分辨出其来源和富集状况^[15-16]。计算公式为:

$$C_f^i = C_s^i / C_b^i \quad (2)$$

式中: C_f^i 、 C_s^i 、 C_b^i 分别为沉积物中第 i 种重金属的富集系数、实测值、背景值。其中,富集系数采用廖启林等的研究成果^[17](表 2);背景值采用南海表层沉积物中重金属的背景值^[18](表 3)。

表 2 富集因子评价标准^[17]

Table 2 Evaluation standard of the enrichment factors^[17]

C_f	分级
<0.85	贫化
0.85~1.15	背景
1.15~1.50	弱富集
>1.50	强富集

表 3 各重金属毒性系数与环境背景值^[18-19]

Table 3 The toxic coefficient of heavy metals in marine sediment and background value^[18-19]

评价参数	各类重金属元素的评价标准值/(mg/kg)					
	Cu	Pb	Zn	As	Cr	Cd
T_r^i	5.00	5.00	1.00	10.00	2.00	30.00
C_b^i	7.00	16.00	54.00	10.00	40.00	0.20

1.2.3 潜在生态风险指数法

潜在生态风险指数法由瑞典学者 HÄKAN-

SON^[20] 在 1980 年首次提出, 其不仅考虑了单项重金属的污染系数, 还考虑了毒性系数和背景值的地域分异性^[21]。该方法由于可以较为简便、准确地评价沉积物中重金属元素对生态环境的危害, 已为国内外学者广泛用于沉积物重金属的质量评价研究。计算公式为:

$$E_{ir} = T_{ir} \cdot C_{if} \quad (3)$$

$$RI = \sum T_{ir} \cdot C_{is} / C_{ib} \quad (4)$$

式中: C_f^i 为第 i 种重金属的富集系数;

C_s^i 为第 i 种重金属含量的实测值;

C_b^i 为第 i 种重金属的背景值;

E_r^i 为第 i 种重金属的潜在生态风险指数;

T_r^i 为第 i 种重金属的毒性系数;

RI 为重金属的综合潜在生态风险指数。其中, 毒性系数采用徐争启等^[19] 的研究成果(表 3); 因本文调查数据未包含 Hg 和 PCB, 故采用调整后的 HAKANSON 潜在生态风险危害评价标准(表 4)。

表 4 Hakanson 潜在生态风险危害评价标准^[20]

Table 4 Index and classification of potential ecological risk as per Hakanson^[20]

E_r^i	风险分级	调整后RI分级	风险分级
<30	轻微风险	<60	轻微风险
30~60	中等风险	60~120	中等风险
60~120	强风险	120~240	强风险
120~240	很强风险	≥240	很强风险
≥240	极强风险		

另外, 本文还通过分析重金属分布与沉积物粒度分布的相关性, 探讨了平均粒径(Mz)对重金属分布的影响。

2 结果与讨论

2.1 表层沉积物中重金属含量与空间分布

由沉积物中重金属的含量可以判断调查区内受污染的程度, 根据重金属含量的水平分布可以追踪其污染源, 了解其扩散范围。如图 2 所示, 研究区内 Cu 的含量为 2.93~40.40 mg/kg, 平均值为 (22.81±9.72) mg/kg, 变异系数为 0.43, 高值区为东北部、东南部, 低值区为北部、西南部; Pb 的含量为 10.10~59.00 mg/kg, 变异系数为 0.36, 平均值为 (32.12±11.56) mg/kg, 高值区为西部近岸, 低值区为北部、西南部; Zn 的含量为 10.50~135.00 mg/kg,

变异系数为 0.41, 平均值为 (72.62±29.94) mg/kg, 高值区为西部近岸、东北部, 低值区为北部、西南部; Cr 的含量为 9.90~89.00 mg/kg, 平均值为 (52.36±20.22) mg/kg, 变异系数为 0.38, 高值区为东北部、东南部, 低值区为北部、西南部; Cd 的含量为 0.08~0.52 mg/kg, 平均值为 (0.25±0.12) mg/kg, 变异系数为 0.48, 高值区为西部近岸、南部, 低值区为北部、西南部; As 的含量为 3.82~14.20 mg/kg, 平均值为 (8.35±2.79) mg/kg, 变异系数为 0.33, 高值区为西北部、东南部, 低值区为中部、中北部。

综上所述, 研究区内 6 种重金属的含量分布由西向东总体上呈高-低-高的趋势, 高值区主要分布在西部近岸、东北部和东南部, 低值区主要分布在北部和西南部。6 种表层沉积物中重金属的平均含量 (mg/kg) 依次为 Zn(72.62)>Cr(52.36)>Pb(32.12)>Cu(22.81)>As(8.35)>Cd(0.25), 均低于国家一类沉积物质量标准限值, 即研究区域沉积物重金属环境质量总体优秀。

将 6 种重金属每个站点的含量与表 1 作对比, 可以看出, 1 号站点样品中的 Cr 含量是标准值的 1.11 倍, Cu 含量是标准值的 1.13 倍; 8 号站点样品中的 Cu 含量是标准值的 1.13 倍, Cd 含量是标准值的 1.3 倍; 35 号站点样品中的 Cr 含量是标准值的 1.05 倍, Cu 含量是标准值的 1.15 倍; 41 号站点样品中的 Cu 含量是标准值的 1.05 倍, Cd 含量是标准值的 1.04 倍。其余站点样品中的重金属含量均低于第一类标准限值(图 3), 即研究区可以用作海洋自然保护区、海洋渔业水域、海水浴场和海水养殖区。

与南海周边海域比较, 除了 Cu 和 Cd 的含量高于其他海域(表 5), 研究区内表层沉积物中大部分重金属的含量处于中等水平, 这也进一步证明吴川市近岸海域 Cu 和 Cd 污染较为严重。

2.2 表层沉积物的粒径分布

海洋表层沉积物中元素的含量分布特征受粒度控制, 不同粒级沉积物由于其矿物组成、表面特征以及结构的不同, 导致元素在其中的含量各异。这一“元素粒度控制规律”最早由赵一阳^[28] 提出, 近年来已被越来越多的学者所证实。研究区表层沉积物的平均粒径(Mz)分布如图 4 所示, 平均粒径为 -0.4Φ~6.44Φ, 平均值为 4.64Φ, 由西到东总体上呈细-粗-细变化趋势, 一般来说粗粒沉积常见于高能环境, 细粒沉积见于低能环境。

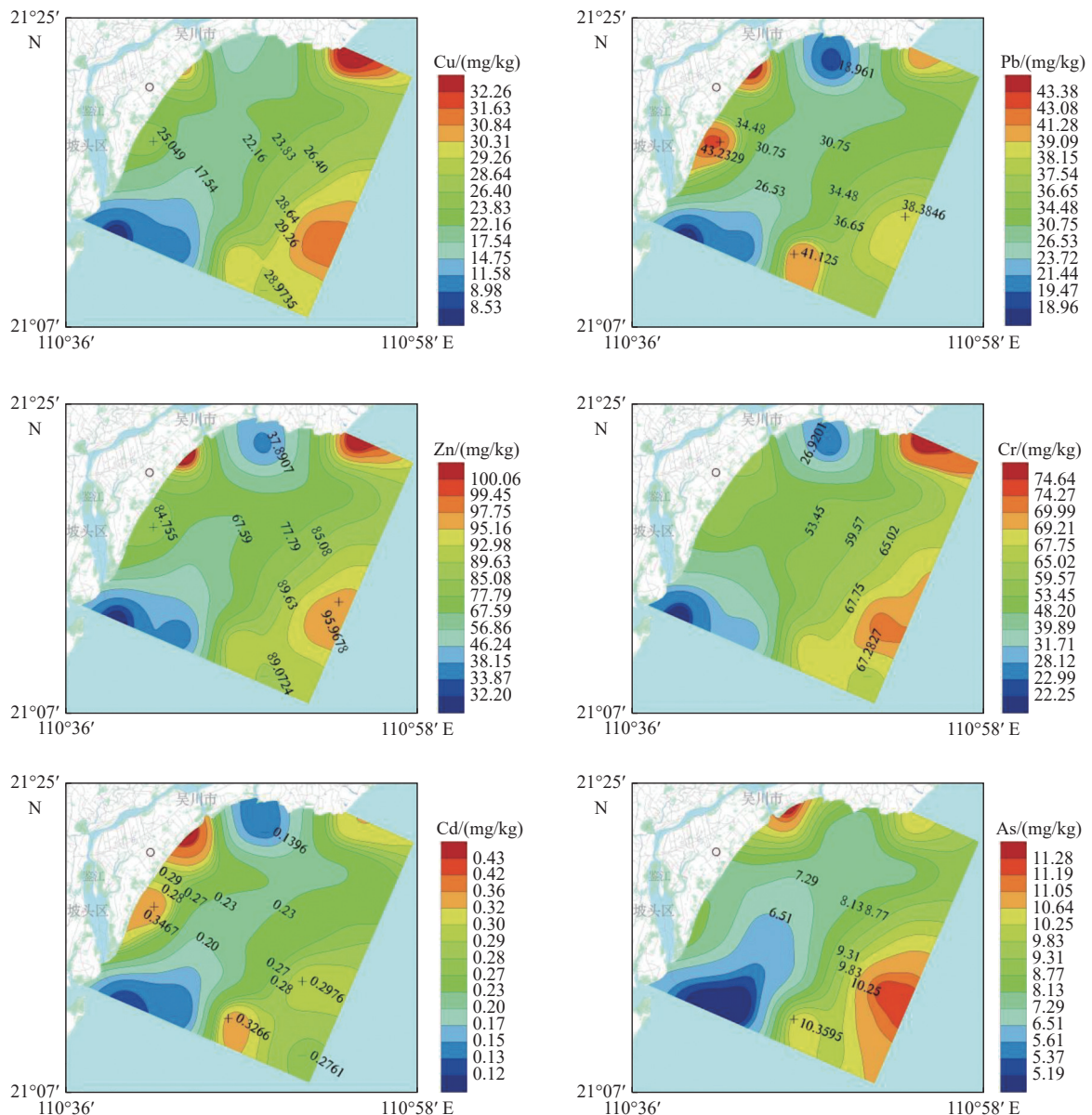


图 2 表层沉积物中重金属的含量分布

Fig.2 Concentration distribution of heavy metals in surface sediments

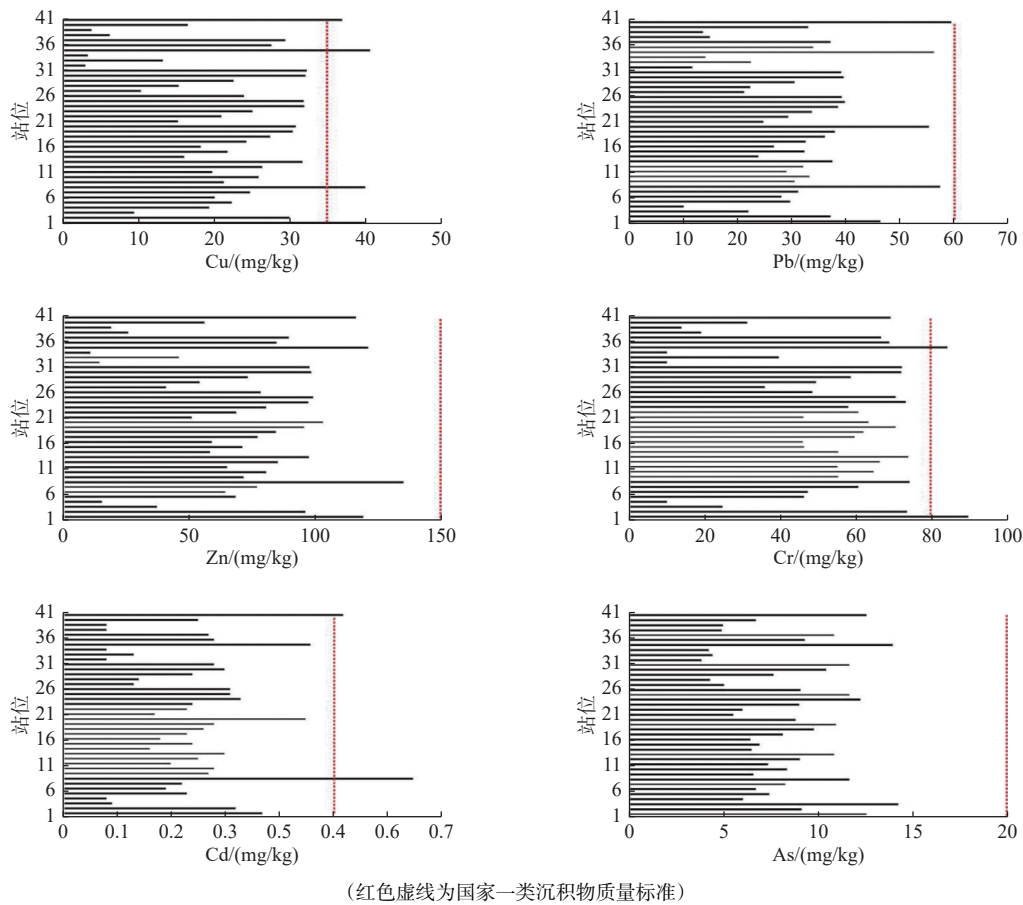
为了研究沉积物粒度大小对重金属分布的影响,将 6 种重金属含量与平均粒径进行了相关性分析,结果如图 5 所示,重金属元素 Cu、Pb、Zn、Cr、Cd、As 的相关系数分别为 0.78、0.77、0.87、0.89、0.74、0.58。只有 As 为弱的正相关,其余重金属的正相关性非常明显,含量都随着平均粒径(M_z) Φ 值的增大而增加,遵循“元素粒度控制规律”。从图 2 也能够清楚的看出,重金属主要富集在东部及西部近岸细粒沉积物区,而在粗粒沉积物覆盖的区域,其含量明显降低。

2.3 表层沉积物重金属元素之间的相关性

在同一研究区,可以通过重金属元素之间的相

关分析确定沉积物中重金属的同源性^[29]。本研究对 41 个站位的表层沉积物中 6 种重金属元素与主量元素 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 进行了 Pearson 相关性分析,结果见表 6。

由表 6 可知,研究区内 6 种重金属元素之间均呈极显著-显著的正相关性,与主量元素 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 呈极显著-显著相关性,即它们之间应属同源或近同源,其迁移规律与沉积过程中的变化趋势基本相同,而主量元素主要源于地壳,表明这些重金属元素主要来源是沉积物本身,受地质背景影响较强,主要来自研究区附近陆域岩石自然风化剥蚀。由 2.1 可知 Cd 变异系数为 0.48,与其他重金属元素比较相对较高,推断可能受人类活动影响。



(红色虚线为国家一类沉积物质量标准)

图3 各站位重金属含量

Fig.3 Heavy metal content in each site

表5 吴川市近岸海域表层沉积物重金属含量与其他南海近海海域比较

Table 5 Comparison in heavy metal concentration of surface sediments off Wuchuan, Guangdong, and other sea areas in the South China Sea

海域	平均含量/(mg/kg)						调查年份	来源
	Cu	Pb	Zn	Cr	Cd	As		
吴川市近岸海域	22.81	32.12	72.62	52.36	0.25	8.35	2020	本研究
湛江港海域	8.81	21.61	52.11	—	0.04	8.47	2013	文献[22]
海陵岛北部海域	19.20	15.30	107.00	—	0.13	—	2017	文献[23]
柘林湾	19.20	40.00	89.00	—	0.11	—	2012	文献[24]
大亚湾	10.90	44.18	59.34	—	0.04	—	2011	文献[25]
大鹏湾	15.70	35.90	87.10	—	0.21	—	2008	文献[26]
北部湾	15.80	28.90	75.80	—	0.09	—	2007	文献[27]

注：“—”表示缺数据。

2.4 表层沉积物重金属污染评价

2.4.1 单因子污染指数评价

对吴川近岸海域表层沉积物中各重金属平均含量进行单因子指数法来评价其污染程度,评价标准为表1的一类沉积物质量标准,计算结果见表7。6种重金属元素的污染程度排序为 $Cu \approx Cr > Pb > Cd > Zn > As$, 单因子污染指数均 < 1 。

2.4.2 富集程度评价

通过计算吴川近岸海域表层沉积物中重金属元素的富集程度,可分析人为排污对吴川近岸海域环境的影响,计算结果见表8。

富集系数 C_f 的变化范围为 0.19~5.77, 根据富集程度分级标准(表2), 表层沉积物中重金属属贫化、背景、弱富集和强富集分别占样品总数的 22%、

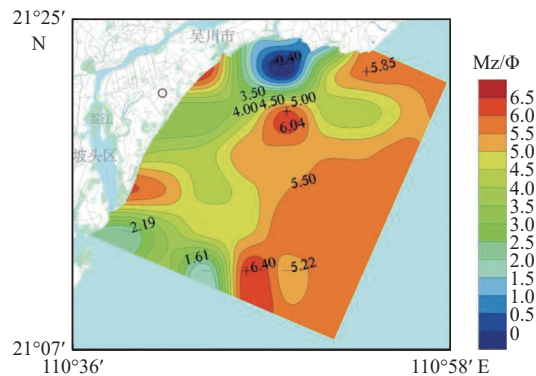


图 4 表层沉积物平均粒径 (M_z) 分布图

Fig.4 Distribution of average particle size (M_z) of the surface sediments

13%、20% 和 45%, 可见重金属富集程度主要集中在强富集, 其次是贫化、弱富集, 最后才是背景。平均富集系数排序为 $Cu > Pb > Zn > Cr > Cd > As$, 其

中 Cu 、 Pb 处于强富集程度, Zn 、 Cr 、 Cd 处于弱富集程度, As 处于贫化程度。

2.4.3 潜在生态风险指数评价

既然研究区表层沉积物中重金属元素呈现富集状况, 说明人类活动已经对该海域产生污染, 对该区的海洋生物存在潜在的风险。本研究通过潜在生态风险指数来分析不同重金属对生物的危害程度, 计算结果见表 9, 重金属综合潜在生态风险指数见图 6。

由表 9 可知, 6 种重金属元素的潜在生态风险指数 E_r^i 的平均值排序为: $Cd > Cu > Pb > As > Cr > Zn$ 。其中有 24 个站点 Cd 潜在生态风险指数 > 30 , 属中等风险, 占总站点的 58.5%, 4 个站点的 Cd 潜在生态风险指数 > 120 , 属强风险, 占总站点的 9.8%; Cu 、 Pb 、 As 、 Cr 、 Zn 潜在生态风险指数均 < 30 , 属

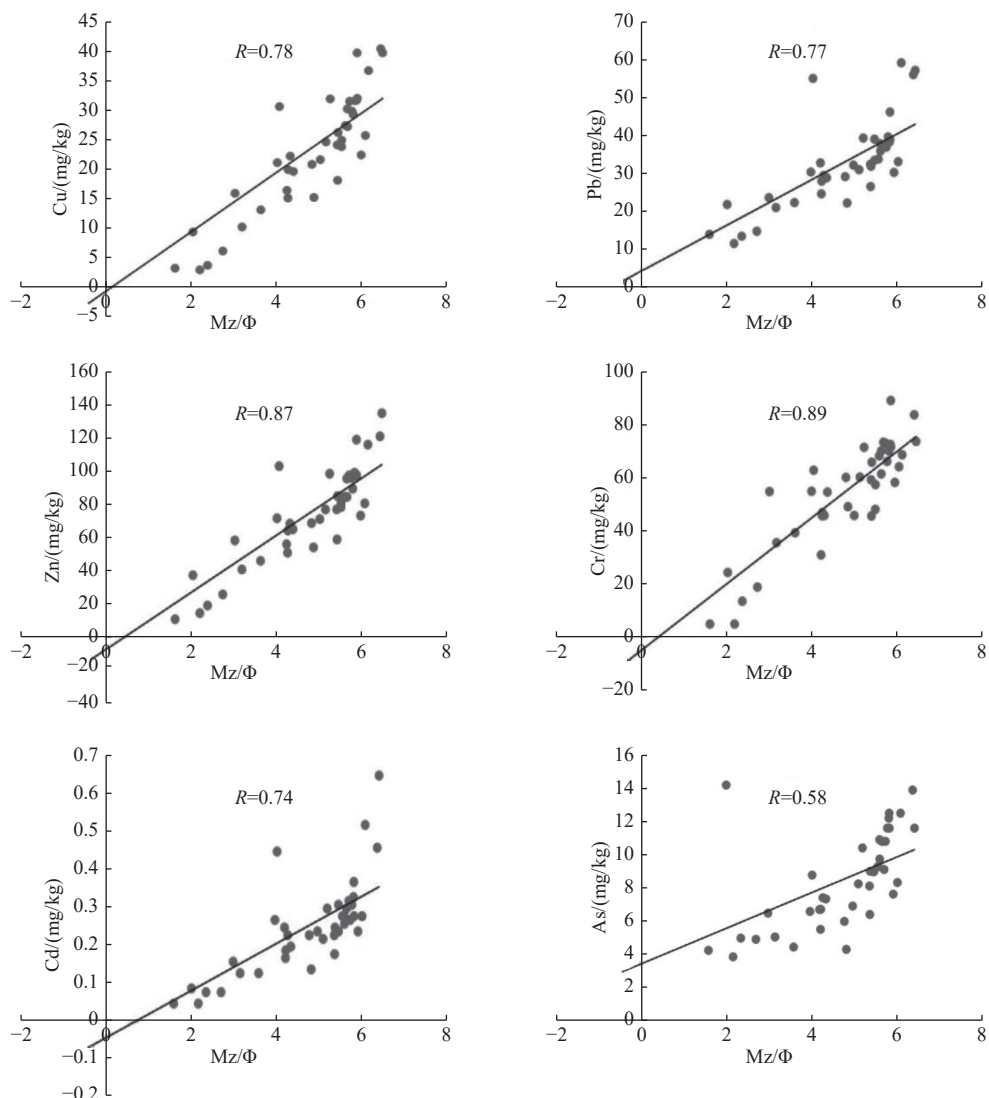


图 5 各重金属含量与平均粒径 (M_z) 之间的相关性

Fig.5 Correlation between the content of each heavy metal and average particle size (M_z)

表 6 表层沉积物重金属元素之间的相关关系

Table 6 Correlation analysis of heavy metals in the surface sediment

要素	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Cu	Pb	Zn	Cr	Cd	As
Al ₂ O ₃	1							
Fe ₂ O ₃	0.946**	1						
Cu	0.925**	0.920**	1					
Pb	0.969**	0.902**	0.902**	1				
Zn	0.957**	0.966**	0.963**	0.949**	1			
Cr	0.870**	0.954**	0.912**	0.828**	0.947**	1		
Cd	0.924**	0.826**	0.878**	0.964**	0.917**	0.770**	1	
As	0.726**	0.762**	0.791**	0.757**	0.778**	0.698**	0.683**	1

注:**表示极显著相关 $P<0.01$, $n=41$ 。

表 7 重金属元素的单因子污染指数

Table 7 Single-factor pollution index evaluation

重金属元素	单因子指数
Cu	0.65
Pb	0.54
Zn	0.48
Cr	0.65
Cd	0.50
As	0.42

表 8 重金属元素的富集系数

Table 8 Enrichment factor of heavy metals

C_f	Cu	Pb	Zn	Cr	Cd	As
最小值	0.53	0.63	0.19	0.25	0.4	0.38
最大值	5.77	3.69	2.24	2.23	3.25	1.39
平均值	3.26	2.00	1.34	1.33	1.24	0.84

表 9 重金属元素的潜在生态风险指数

Table 9 Potential ecological-risk index of heavy metals

统计值	E_r						RI
	Cu	Pb	Zn	Cr	Cd	As	
最小值	2.09	3.16	0.19	0.50	12.00	3.82	22.33
最大值	28.86	18.44	2.24	4.45	97.5	14.2	161.45
平均值	16.29	10.04	1.34	2.66	37.2	8.35	75.86

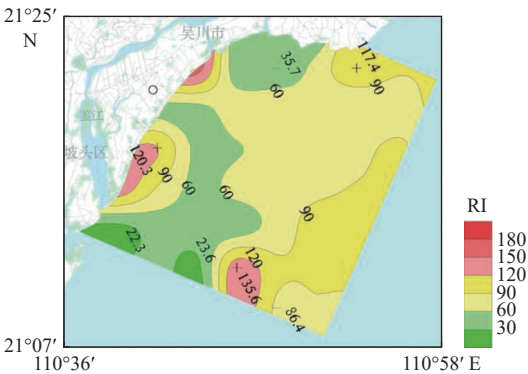


图 6 重金属综合潜在生态风险指数图

Fig.6 Heavy metal overall potential ecological-risk index

轻微风险。

综合潜在生态风险指数 RI 的平均值为 75.86, 属中等风险, 其中有 25 个站点的 $RI>60$, 属中等风险, 占总站点的 61.0%, 4 个站点的 $RI>120$, 属强风险, 占总站点的 9.8%。这主要与该区域 Cd 有关, 说明人类活动已经对研究区海域造成影响, 强综合潜在生态风险主要集中于研究区西侧近岸。该区域是渔业养殖场集中地, 推断造成此风险指数较高的主要原因为: 养殖场废水、工业废水。综合来看, 对 RI 影响最大的元素是 Cd , 虽然它的含量和富集程度远不如其他元素, 但由此可见重金属的毒理作用对生态风险可以产生巨大影响。

3 结论

(1) 吴川海域表层沉积物中 6 种重金属的含量分布由西向东总体上呈高-低-高的趋势, 高值区主要分布在西部近岸、东北部和东南部, 低值区主要分布在北部和西南部, 平均含量依次为 $Zn>Cr>Pb>Cu>As>Cd$, 均符合国家一类沉积物质量标准。

(2) 吴川海域表层沉积物中 6 种重金属的分布均遵循“元素粒度控制规律”, 即重金属含量与沉积物平均粒径(Mz)呈显著正相关, 相关系数排序为 $Cr>Zn>Cu>Pb>Cd>As$ 。

(3) 通过 Pearson 相关性分析可得, 研究区 6 种重金属元素与主量元素 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 两两之间多呈极显著-显著的正相关性, 推断表层沉积物中重金属元素的主要来源为陆域岩石自然风化剥蚀, 人类活动可能对 Cd 产生影响。

(4) 通过单因子指数法分析可得, 吴川海域表层沉积物中 6 种重金属元素的污染程度排序为

$Cu \approx Cr > Pb > Cd > Zn > As$, 单因子污染指数均 <1 。通过富集程度分析可得, 吴川海域重金属富集程度主要集中在强富集, 平均富集系数排序为 $Cu > Pb > Zn > Cr > Cd > As$, 其中 Cu 、 Pb 处于强富集程度, Zn 、 Cr 、 Cd 处于弱富集程度, As 处于贫化程度。

(5) 通过潜在生态风险指数评价可得, 吴川海域的近岸海洋生态环境受到一定污染, E_r 的平均值排序为: $Cd > Cu > Pb > As > Cr > Zn$ 。仅有 29.2% 的站点属于轻微风险, 其中对 RI 影响最大的重金属元素是 Cd , 得出重金属的毒理作用占主导因素, 推断养殖场废水、工业废水是造成此风险指数较高的主要原因。

参考文献:

- [1] 温琰茂, 韦照韬. 广州城市污泥化学成分和农业利用的环境容量[J]. 中山大学学报(自然科学版), 1996, 35(2): 124-128.
- [2] 林祖亨, 梁舜华. 珠江河口的现代沉积环境与底质重金属的含量分布[J]. 海洋通报, 1995, 14(4): 43-49.
- [3] AKHTER M S, AL-JOWDER O. Heavy metal concentrations in sediments from the coast of Bahrain[J]. *International Journal of Environmental Health Research*, 1997, 7(1): 85-93.
- [4] 李翠田, 王淑红, 于红兵, 等. 珠江口海域表层沉积物中重金属含量分布特征及其环境质量评价[J]. *海洋环境科学*, 2009, 28(5): 535-538.
- [5] 刘芳文, 颜文, 黄小平, 等. 珠江口沉积物中重金属及其相态分布特征[J]. *热带海洋学报*, 2003, 22(5): 16-24.
- [6] 王增焕, 李纯厚, 林钦, 等. 珠江河口经济动物体铜铅锌镉的含量[J]. 湛江海洋大学学报, 2003, 23(3): 33-38.
- [7] 王增焕, 林钦, 李纯厚, 等. 珠江口重金属变化特征与生态评价[J]. *中国水产科学*, 2004, 11(3): 214-219.
- [8] 黄向青, 张顺枝, 霍振海. 深圳大鹏湾、珠江口海水有害重金属分布特征[J]. *海洋湖沼通报*, 2005, 27(4): 38-44.
- [9] 杨永强, 陈繁荣, 张德荣, 等. 珠江口沉积物酸挥发性硫化物与重金属生物毒性的研究[J]. *热带海洋学报*, 2006, 25(3): 72-78.
- [10] 黄向青, 梁开, 刘雄. 珠江口表层沉积物有害重金属分布及评价[J]. *海洋湖沼通报*, 2006, 28(3): 27-36.
- [11] 国家海洋环境监测中心. GB17378.3—2007, 海洋监测规范第3部分: 样品采集、贮存与运输 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [12] 国家海洋局第二海洋研究所. GB17378.5—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, 2007.
- [13] 罗芳, 伍国荣, 王冲, 等. 内梅罗污染指数法和单因子评价法在水质评价中的应用[J]. *环境与可持续发展*, 2016, 41(5): 87-89.
- [14] 国家海洋环境监测中心. GB18668—2002, 海洋沉积物质量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [15] 蓝先洪, 顾兆峰, 密蓓蓓, 等. 渤海西部表层沉积物中重金属的环境地球化学特征[J]. *现代地质*, 2017, 31(2): 367-373.
- [16] 李娟, 杨忠芳, 夏学齐, 等. 长江沉积物环境地球化学特征及生态风险评价[J]. *现代地质*, 2012, 26(5): 939-946.
- [17] 廖启林, 金洋, 吴新民, 等. 南京地区土壤元素的人为活动环境富集系数研究[J]. *中国地质*, 2005, 32(1): 141-147.
- [18] 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.
- [19] 徐争启, 倪师军, 虞先国, 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.
- [20] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14(8): 975-1001.
- [21] 贾振邦, 梁涛. 香港河流重金属污染及其潜在生态危害研究[J]. 北京大学学报, 1997, 33(4): 185-192.
- [22] 刘芳文, 颜文, 苗莉, 等. 湛江湾海域海水和表层沉积物重金属分布特征及其污染评价[J]. *海洋技术学报*, 2015, 34(2): 74-82.
- [23] 冯晓博, 肖凯, 李海龙, 等. 广东海陵岛北部海域表层沉积物重金属分布特征与污染评价[J]. *海洋环境科学*, 2021, 40(4): 507-514.
- [24] 袁国明, 何桂芳. 广东柘林湾至大埕湾海域表层沉积物重金属分布与环境地球化学特征[J]. *地球与环境*, 2015, 43(2): 190-197.
- [25] 曹玲珑, 王建华, 黄楚光, 等. 大亚湾表层沉积物重金属元素形态特征、控制因素及风险评价分析[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2014, 44(6): 1988-1999.
- [26] 周凯, 李绪录, 夏华永, 等. 大鹏湾中表层沉积物的有害要素及其环境质量[J]. *海洋环境科学*, 2011, 30(2): 172-176.
- [27] 张志锋, 王燕, 韩庚辰, 等. 北部湾沉积物中重金属元素的地球化学特征及物源初探[J]. *海洋学报*, 2013, 35(2): 72-81.
- [28] 赵一阳, 鄢明才. 中国浅海沉积物地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- [29] 姜文博, 梁斌, 高范, 等. 杭州湾表层沉积物中重金属空间分布特征与污染状况评价[J]. *海洋环境科学*, 2021, 40(4): 555-561.

Assessment on heavy metal pollution in surface sediments off Wuchuan, Guangdong Province

YAN Xingguo, YUAN Qingzheng, ZHAO Mingjie, LI Baofei, SUN Zhijia*, JIN Wei, SUN Yan

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

Abstract: To understand the pollution of heavy metals in the surface sediment in the coastal waters of Wuchuan City, Guangdong Province, 41 samples of surface sediment were collected in the end of October 2020 in nearshore waters, the content of typical heavy metals were detected, sediment particle size was analyzed, and the sources of heavy metals were discussed. The distribution of heavy metals was characterized, the pollution level of enrichment factors was evaluated, and the relationship between sediment particle size and heavy-metal concentration was explored based on correlation analysis. Results show that heavy metal content showed a high-low-high trend in west-east; high-value areas were mainly distributed in the western nearshore, northeast and southeast, low-value areas were mainly distributed in the north and southwest. The average content (in mg/kg) was in the descending order of Zn (72.62 ± 29.94) > Cr (52.36 ± 20.22) > Pb (32.12) > Cu (22.81 ± 9.72) > As (8.35 ± 2.79) > Cd (0.25 ± 0.12), which met the national Class I of sediment quality standards. The pollution degree of the 6 heavy metal elements in the surface sediment in Wuchuan coastal area was in a descending order of Cu ≈ Cr > Pb > Cd > Zn > As, and the single factor pollution index was below 1. Heavy metals were mainly concentrated in strong enrichment area and the average enrichment coefficient was in a descending order of Cu > Pb > Zn > Cr > Cd > As; Cu and Pb were strongly enriched; Zn, Cr, and Cd were weakly enriched; and As was depleted. The coastal ecological environment in was polluted to some extents. The average ranking of enrichment factor was: Cd > Cu > Pb > As > Cr > Zn. Only 29.2% of the site was in slight risk, of which Cd was the biggest contributor to the overall potential ecological risk and was the dominant factor in toxicology. It is inferred that wastewater discharged from farms and factories are accountable for the high risk. In addition, heavy metal content showed a significant positive correlation with the sediment average grain size following the law of element particle size dependency. Meanwhile, correlation among heavy metals show that Cu, Pb, Zn, Cr and As were mainly derived from natural rock erosion and Cd was from human activities.

Key words: surface sediments; heavy metal; content and distribution; pollution assessment; Wuchuan