

# 海州湾连岛周边海域沉积物重金属污染评价

卢霞<sup>1</sup>, 范礼强<sup>1</sup>, 包诗玉<sup>2</sup>, 卢高丽<sup>1</sup>, 费鲜芸<sup>1</sup>

(1.淮海工学院 测绘与海洋信息学院, 江苏 连云港 222005; 2.上海海洋大学 海洋生态与环境学院, 上海 201306)

**摘要:** 本文测定了海州湾连岛周边海域 21 个表层沉积物中重金属元素 (Cd、Cr、Cu、Pb 和 Hg) 和类金属 (As) 的含量, 通过克里金插值法得到重金属含量的空间分布, 采用地累积指数法和潜在生态风险指数法评价了重金属污染程度和风险等级。结果表明: 仅 Cu 的平均含量超过 GB 18668-2002《海洋沉积物质量》中规定的 1 类标准; Cu 和 Pb 的空间变异系数为 114.66% 和 108.44%, 空间离散度较强。重金属污染程度从大到小依次为 Cd>Pb>Cu>As>Hg>Cr, 其中 Cd、Cu 和 Pb 为偏中度污染, As 和 Hg 为轻度污染, Cr 无污染; 整体潜在生态风险等级已达中等风险, 其中连岛南部海域港口附近重金属污染为高等级风险, 表层沉积物的生态风险主要由 Cd 元素引起。

**关键词:** 重金属; 分布特征; 污染评价; 生态风险; 海岛

中图分类号: P76 文献标识码: A 文章编号: 1007-6336(\$article\_year)00-0001-07

## Assessment of heavy metal pollution in sediments of the sea area around the Liandao island of Haizhou bay

LU Xia<sup>1</sup>, FAN Li-qiang<sup>1</sup>, BAO Shi-yu<sup>2</sup>, LU Gao-li<sup>1</sup>, FEI Xian-yun<sup>1</sup>

(1.School of Geomatics and Marine Information, Huaihai Institute of Technology, Lianyungang 222005, China; 2.College of Marine Ecology and Environment, Shanghai Ocean University, Shanghai 2013065, China)

**Abstract:** The total 21 surface sediment samples were collected in the sea area around Liandao island, which is located in Haizhou bay, Jiangsu province, China. The heavy metals (Cd, Cr, Cu, Pb and Hg) contents and the metal-like arsenic (As) content were determined. The spatial distribution maps of heavy metals and metal-like As were obtained by using Kriging interpolation method. The pollution degree and risk grade of heavy metals and metal-like As were assessed by ground accumulation index and potential ecological risk index respectively. The results were indicated that the average content of heavy metal Cu was higher than the Class 1 standard according to the Marine Sediment Quality (GB 18668-2002). The variation coefficients of heavy metal Cu and Pb were 114.66% and 108.44% respectively. Therefore, they had strong spatial dispersion. The pollution degree of heavy metals and metal-like As ranked from large to small: Cd>Pb>Cu>As>Hg>Cr based on the analysis results of ground accumulation method, in which heavy metal Cd, Cu and Pb were the moderate pollution, As and Hg were mild pollution, and Cr was non-pollution. The overall potential ecological risk level in the sea area of Liandao island reached the medium level. There existed the high ecological risk level of heavy metals and metal-like As in the southern part of Liandao island. Further, the ecological risk of surface sediments was mainly caused by heavy metal Cd.

**Key words:** heavy metal; distribution characteristics; pollution assessment; ecological risk; sea island

收稿日期: 2019-01-11, 修订日期: 2019-04-12

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (41506106, 31270745); 海岸带地理环境监测国家测绘地理信息局重点实验室开放基金资助项目 (GE-2017-003); 江苏高校优势学科建设工程资助项目; 2017 年江苏省大学生实践创新训练计划项目; 2019 江苏省研究生科研创新项目 (KYCX19-2282)“海岛周边海域沉积物重金属污染空间分布特征及风险评估”; 江苏省海洋技术品牌专业建设项目 (PPZY2015B116)

**作者简介:** 卢霞 (1976-), 女, 江苏泰兴人, 教授, 博士, 主要从事近海海洋环境立体监测与评价研究, E-mail: luxia1210@163.com

近年来,海岛经济的快速发展,排入海岛周边海域的污染物对生态环境产生严重危害<sup>[1]</sup>。重金属绝大部分通过生物、化学、物理作用,由水相转入固相,富集在沉积物中,对底栖生物产生直接的毒害作用,并通过食物链富集和传递,最终对人类健康造成影响<sup>[2-4]</sup>。因此,正确评价沉积物中重金属污染状况对保护海洋生态环境和人类健康都有重要意义。

目前,近海河口和海湾的沉积物中重金属含量、主要来源、空间分布特征和生态风险等方面都有了深入研究<sup>[5-8]</sup>,而对于海岛周边海域沉积物中重金属的研究却鲜有报道<sup>[9]</sup>。因此,本文通过在海州湾连岛周边海域采集表层沉积物样品,测定了 As、Cd、Cr、Cu、Pb 和 Hg 6 种元素的含量,与所在海域背景值进行对比分析。利用克里金插值法分析重金属的空间分布特征,通过地累积指数法确定重金属的污染程度,采用潜在生态风险指数法评估重金属的生态风险。海洋底质中重金属含量是海洋环境可持续发展的重要依据<sup>[10]</sup>,进行重金属分析和评价能较好的反映环境重金属污染状况,为优化海岛周边海域沉积物重金属监测网络、控制重金属污染提供支持,并为海岛生态系统的修复、保护和管理提供参考<sup>[11-12]</sup>。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

连岛位于连云港市海州湾连云区以北的海区,总面积达 7.57 km<sup>2</sup>,海岛岸线长为 17.6 km。连岛北部拥有江苏省最大的海滨浴场,西部修建了西大堤,南部与陆地港口相连,海水养殖业分布在连岛周边海域<sup>[13]</sup>,对连云港及江苏省的海洋经济发展有着重要的推动作用。

### 1.2 样品采集和测试分析

围绕连岛周围设计了 21 个采样点,采样点具体位置如图 1 所示。根据海洋监测规范对表层沉积物进行采集、运输和保存<sup>[14]</sup>。在实验室将所采集的 21 份样品进行冷冻干燥,去除样品中的砂石以及动植物残体后,用玛瑙研钵将沉积物碾磨,用 100 目的尼龙筛子,筛下约 20 g 样品装于密封袋中置于干燥处以供测定。

本次实验采用分析天平称取处理好的沉积

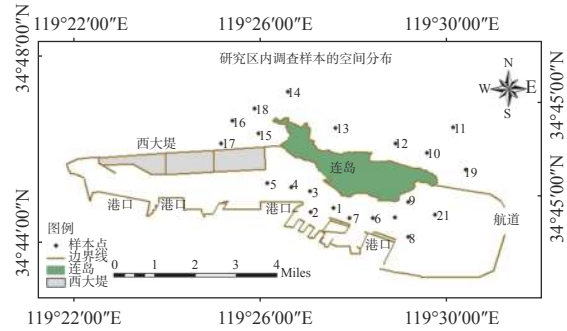


图 1 研究区内调查样本的空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of survey samples in the study area

物样品 0.1 g,并将称取好的样品放于聚四氟乙烯烧杯中,并通过浓硝酸—氢氟酸—高氯酸混合液进行消解,定容至 100 mL 待测。最终样品重金属元素 Cu、Pb、Cr 和 Cd 含量采用 Multiwave 3000 微波消解仪进行消解,利用全谱直读等离子体发射光谱 (ICP-OES) 进行测定,As、Hg 采用原子荧光光谱法 (AFS) 测定,实验中选用的试剂为优级纯试剂,实验用水为超纯水。

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 克里金插值法

克里金 (Kriging) 插值法是一种最优内插法,是非常有用的地质统计格网化方法<sup>[15]</sup>。本文采用普通克里金插值法,计算公式为:

$$\hat{z}_0 = \sum_{i=0}^n \lambda_i Z_i \quad (1)$$

式中:  $\hat{z}_0$  是点  $(x_0, y_0)$  处的估计值,即  $z_0 = z(x_0, y_0)$ ;  $\lambda_i$  是权重系数,利用空间上所有已知点的数据加权求和来估计未知点的值。

#### 1.3.2 地累积指数评价法

地累积指数的计算公式为:

$$I_{geo} = \log_2 [C_n / (K \times B_n)] \quad (2)$$

式中:  $I_{geo}$  为地累积污染指数;  $C_n$  为重金属元素  $n$  的实测浓度 (mg/kg);  $B_n$  为沉积岩中重金属元素  $n$  的地球化学背景值 (mg/kg),考虑到成岩作用可能会引起背景值的变动,设定常数  $k$  为 1.5<sup>[16]</sup>。

#### 1.3.3 潜在生态风险指数法

采用潜在生态风险指数法对沉积物重金属的生态风险进行评价,综合考虑重金属毒性、江苏省海域土壤背景值等因素,定量划分潜在生态风险等级<sup>[17]</sup>。

$$E_r^i = T_r^i C_f^i = T_r^i \times C^i / C_n^i \quad (3)$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i \quad (4)$$

式中:  $T_r^i$  为第  $i$  种重金属的毒性系数, 体现重金属的毒性水平及生物对重金属污染的敏感程度;  $C_f^i$  为第  $i$  种重金属的污染指数;  $C^i$  为重金属元素  $i$  的实际测量含量 (mg/kg);  $C_n^i$  为重金属元素  $i$  的背景值 (mg/kg);  $E_r^i$  为单个重金属的潜在生态危害指数;  $RI$  为多种重金属潜在生态危害指数的综合。

表 1 沉积物重金属含量

Tab.1 Heavy metal contents in the surface sediments

统计值	As	Cd	Cr	Cu	Pb	Hg
平均值/ $\times 10^{-6}$	13.1851	0.1605	51.9299	57.1722	43.6241	0.0433
最小值/ $\times 10^{-6}$	6.7650	0.0800	32.2555	25.3067	21.9877	0.0160
最大值/ $\times 10^{-6}$	20.6613	0.2600	79.4493	329.8498	245.9641	0.0810
变异系数/(%)	23.99	34.04	21.58	114.66	108.44	49.61

表 2 可看出: As、Cd、Hg、Pb、Cr 的平均含量均优于 GB 18668-2002《海洋沉积物质量》中规定的 I 类标准; Cu 的平均值高于 I 类标准, 符合 II 和 III 类标准, 符合滨海旅游区、海洋港口

## 2 结果与讨论

### 2.1 海州湾连岛周边海域沉积物重金属空间分布特征

#### 2.1.1 海州湾连岛周边海域沉积物重金属含量

由表 1 可知: As、Cd、Hg 和 Cr 的变异系数介于 10%~100%, 属于中等变异; Cu 和 Pb 的空间变异系数均大于 100%, 属于强变异, Cu 和 Pb 的空间离散度较大。

开发作业对沉积物质量的要求。但是 As、Cd、Hg、Pb、Cu 的平均含量均高于江苏省海域土壤背景值和中国浅海土壤背景值, 海洋环境存在一定程度的污染。

表 2 连岛周边海域沉积物中各重金属含量与背景值对比

Tab.2 Comparison of heavy metals contents and background values in sediments

统计值	As	Cd	Cr	Cu	Pb	Hg
本研究中各重金属元素含量平均值/ $\times 10^{-6}$	13.185	0.161	51.930	57.172	43.624	0.043
江苏省海域土壤背景值/ $\times 10^{-6}$	7.380	0.042	60.110	15.020	11.400	0.023
中国浅海土壤背景值/ $\times 10^{-6}$	7.700	0.065	61.000	15.000	20.000	0.025
一类标准/ $\times 10^{-6}$	20	0.5	80	35	60	0.2
二类标准/ $\times 10^{-6}$	65	1.5	150	100	130	0.5
三类标准/ $\times 10^{-6}$	93	5	270	200	250	1

#### 2.1.2 海州湾连岛周边海域沉积物重金属空间分布特征

运用 ArcGIS 地统计分析模块, 采用普通克里金插值法进行空间插值得到重金属和 As 含量空间分布 (图 2), 通过自然间断点分级法确定 10 个分级标准<sup>[18]</sup>。

重金属和 As 的空间分布特征: As 含量的变化范围 (6.77 ~ 20.66)  $\times 10^{-6}$ , 最小值位于连岛东部海域的 21 号站点, 最大值位于港口附近的 2 号站点; 整体表现为南部高于北部的空间分布趋势。Cd 含量的变化范围 (0.08 ~ 0.26)  $\times 10^{-6}$ , 最小

值位于西大堤附近的 17 号站点, 最大值位于港口附近的 2 号站点; 整体表现为以连岛为中心向四周递增的空间分布趋势; 港口附近为高值区。Cr 含量的变化范围为 (32.26 ~ 79.45)  $\times 10^{-6}$ , 最小值位于连岛东部海域的 21 号站点, 最大值位于港口附近 2 号站点; 整体表现为西南部海域向外递增, 北部海域向外递减的空间分布趋势; 高值区较为集中, 位于 2 号站点附近。Cu 含量的变化范围为 (25.31 ~ 329.85)  $\times 10^{-6}$ , 最小值位于东部海域的 21 号站点, 最大值位于港口附近的 2 号站点; 整体表现为南高北低的空间分布趋势; 在

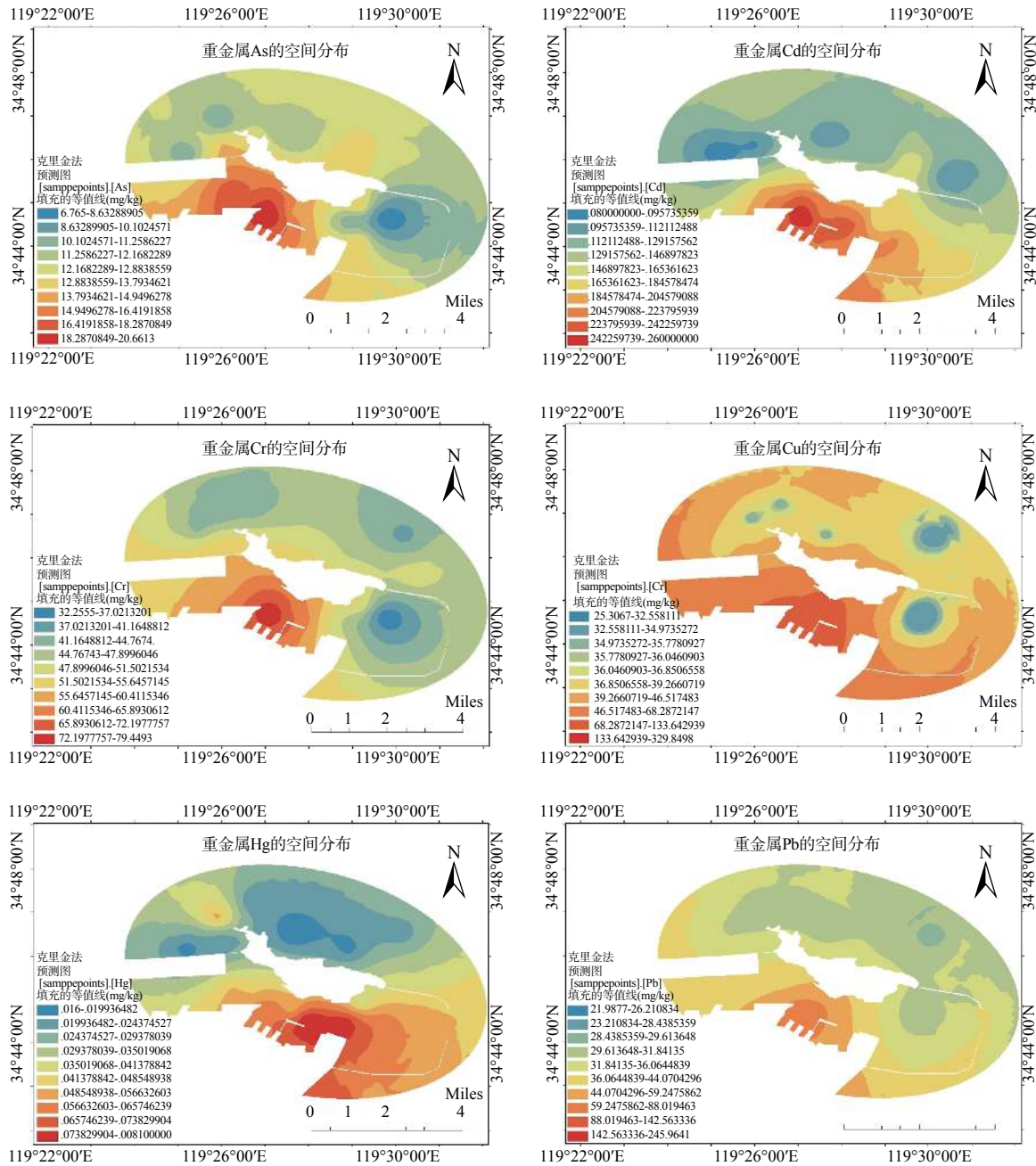


图 2 连岛周边海域重金属含量空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of heavy metals in the sea area around Liandao island

21 和 11 号站点出现明显低值区。Hg 含量的变化范围为  $(0.016 \sim 0.081) \times 10^{-6}$ , 最小值位于北部海域的 13 号站点, 最大值位于港口附近 7 号站点; 整体表现为西南部海域向北部海域阶梯式递减的空间分布趋势; 高值区位于东南部海域。Pb 含量的变化范围为  $(21.99 \sim 245.96) \times 10^{-6}$ , 最小值位于连岛东部海域的 21 号站点, 最大值位于南部海域的 2 号站点; 整体表现为东北部向

外递减, 其余海域向外递增的空间分布趋势; 高值区不明显。

海州湾连岛周边海域重金属空间分布特点为连岛南部海域即港口附近海域的含量偏高, 西北部海域偏低, 且随着离岸距离的增加浓度逐渐递减。因西大堤和港口码头的建设, 减弱了水动力条件, 导致水体自净能力下降, 加上海上交通及化工厂排污等因素, 使得连岛南部海域沉积物

重金属含量高于北部。

## 2.2 海州湾连岛周边海域沉积物重金属污染评价

### 2.2.1 海州湾连岛周边海域沉积物重金属污染程度评价

利用地累积指数法开展重金属污染程度评价, 如表 3 所示: 从平均情况来看, 研究区 Cr 地累积指数分级为 0 级, 污染程度为无污染级别;

As 和 Hg 地累积指数分级为 1 级, 污染程度为无-轻度污染级别; Cd、Pb 和 Cu 的地累积指数分级为 2 级, 污染程度为偏中度污染级别; 从受污染程度来看, Cr 受污染程度最轻, Cd 受污染程度最重, 污染程度从大到小依次为 Cd>Pb>Cu>As>Hg>Cr。

表 3 海州湾连岛周边海域沉积物重金属地累积指数法评价结果

Tab.3 Pollution degree evaluation results of heavy metals based on ground accumulation index

$I_{geo}$ 值	级数	污染程度	所占比例/(%)					
			As	Cd	Cr	Cu	Pb	Hg
$\leq 0$	0	无污染	23.8	0	100	0	0	38.1
0~1	1	轻度污染	81.0	33.3	0	66.7	66.7	47.6
1~2	2	偏中度污染	0	61.9	0	23.8	28.6	14.3
2~3	3	中度污染	0	4.8	0	4.8	0	0
3~4	4	偏重污染	0	0	0	4.8	4.8	0
4~5	5	重污染	0	0	0	0	0	0
$\geq 5$	6	严重污染	0	0	0	0	0	0
最大值			0.90	2.05	-0.18	3.87	3.85	1.23
最小值			-0.17	0.34	-1.48	0.17	0.36	-1.11
平均值			0.21	1.26	-0.83	1.00	1.07	0.13

就单个采样点而言, Cr 元素无污染; 其它元素都存在局部污染情况。其中 Cd 元素的污染最为严重, 约有 66.7% 的采样点达到偏中度污染以上污染; Cu、Pb 约有 33.3% 的采样点达到偏中度污染及以上, 部分采样点达到偏重污染; As 几乎处于无污染到轻度污染的程度。

### 2.2.2 海州湾连岛周边海域沉积物重金属污染生态风险评价

沉积物中重金属含量越高, 对生态环境的潜在危害性就越大<sup>[19]</sup>。根据公式 (3)、(4), 并结合毒性响应系数和江苏海域背景值计算重金属元素潜在危害污染指数  $E_i^i$  和综合指数  $RI$ 。

由表 4 可知, 研究区全部采样点的生态风险

指数均高于 85, 为中等及以上范围。其中 76.2% 的采样点为强生态风险以上等级, 研究区整体的潜在生态风险为强风险等级, 生态风险情况较为严重。从各站点来看, 位于连岛北部海域 11、12、13、15、17 号 5 个站点达到了中等潜在生态风险水平。13 个站点达到了强等级生态风险水平, 其中 10、14、16、18、19 号站点在北部海域, 其余属于南部海域。位于连岛南部海域的 2、6、7 号这 3 个站点达到了达到很强等级, 其中 2 号站点的生态风险水平最高 ( $E_i^i=185.71$ )。潜在生态风险指数总体表现为南部海域大于北部海域。南部海域靠近连云港港口, 随着港口经济的发展, 人类工农业和船舶排放污染物显著增

表 4 海州湾连岛周边海域沉积物重金属潜在生态风险指数综合评价结果

Tab.4 Comprehensive potential ecological risk assessment results of heavy metals

$RI$	潜在生态风险程度	所占比例/(%)	站点编号
$RI < 85$	低	0	
$85 \leq RI < 165$	中等	23.8	11、12、13、15、17
$165 \leq RI < 330$	强	61.9	1、3、4、5、8、9、10、14、16、18、19、20、21
$RI \geq 330$	很强	14.3	2、6、7

加,这可能导致海州湾连岛周边海域沉积物重金属污染加重。

由表 5 中可知: 单项重金属潜在生态风险程度由强到弱依次为  $Cd>Hg>Pb>Cu>As>Cr$ 。Cd 元素在全部采样点都达到中风险以上等级, 其中 71.4% 的采样点为强风险以上等级; Hg 元素

则在 71.4% 的采样点达到中风险以上等级; 其它 4 种元素的风险程度整体为低风险。虽然 6 种元素中 Cd 和 Hg 的含量较低, 但因为 Cd 和 Hg 的生物毒性极强, 对潜在生态风险的影响较大。因此, 海洋相关管理部门在今后的海洋环境保护工作中应重视 Cd 和 Hg 的污染治理。

表 5 海州湾连岛周边海域沉积物各元素潜在风险指数评价结果

Tab.5 Potential ecological risk evaluation results of each heavy metal and As

$E_r^i$	潜在生态风险程度	所占比例/(%)					
		As	Cd	Cr	Cu	Pb	Hg
$E_r^i < 40$	低	100	0	100	95.2	95.2	28.6
$40 \leq E_r^i < 80$	中等	0	28.6	0	0	0	23.8
$80 \leq E_r^i < 160$	强	0	57.1	0	4.8	4.8	47.6
$160 \leq E_r^i < 320$	很强	0	14.3	0	0	0	0
$E_r^i \geq 320$	极强	0	0	0	0	0	0
最大值		28.00	185.71	2.64	109.80	107.88	140.87
最小值		9.17	57.14	1.07	8.42	9.64	27.83
平均值		17.87	114.63	1.73	19.03	19.13	75.28

### 3 结 论

(1) 研究区表层沉积物中 5 种重金属和 As 的平均含量从大到小依次为  $Cu>Cr>Pb>As>Cd>Hg$ , 其中 As, Cd, Hg 和 Cr 的变异系数小于 50%, 空间分布较均匀; 而 Cu 和 Pb 的变异系数都大于 1, 变异程度较大; 南部海域重金属含量高于北部海域, 南部海域的 2 号站点重金属含量最高。

(2) 研究区整体污染情况为轻度污染, 港口附近的 2 号站点污染最严重; Cd、Cu 和 Pb 达中度污染, As 和 Hg 为轻度到偏中度污染之间, Cr 在所有站点都为无污染。

(3) 5 种重金属和 As 的生态风险等级由强到弱依次为  $Cd>Hg>Pb>Cu>As>Cr$ , 其中 Cd 已达到了强等级的潜在生态风险水平, Hg 达到中等等级的潜在生态风险水平, Pb、Cu、As 和 Cr 均为轻微的潜在生态风险水平。

### 参考文献:

- [1] 孙元敏, 陈彬, 黄海洋, 等. 中国南亚热带海岛海域沉积物重金属污染及潜在生态危害[J]. 中国环境科学, 2011, 31(1): 123-130.
- [2] 乔水民, 顾继光, 杨扬, 等. 南澳岛海域表层沉积物重金属分布、富集与污染评价[J]. 热带海洋学报, 2010, 29(1): 77-84.
- [3] 李玉, 李宏观. 连云港近海沉积物重金属历史分布特征及其来源[J]. 水生态学杂志, 2016, 37(6): 59-67.
- [4] YANG H J, SUN J K, SONG A Y. A probe into the contents and spatial distribution characteristics of available heavy metals in the soil of shell ridge island of yellow river delta with ICP-OES method[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2017, 37(4): 1307-1313.
- [5] 吕利云, 董树刚, 刘阳, 等. 南黄海近岸海域表层沉积物重金属分布特征及污染评价[J]. 海洋湖沼通报, 2013, (4): 101-110.
- [6] BAY S M, ZENG E Y, LORENSEN T D, et al. Temporal and spatial distributions of contaminants in sediments of Santa Monica Bay, California[J]. Marine Environmental Research, 2003, 23(1/2): 255-276.
- [7] YU R L, YUAN X, ZHAO Y H, et al. Heavy metal pollution in intertidal sediments from Quanzhou Bay, China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2008, 20(6): 664-669.
- [8] SUNDARAMANICKAM A, SHANMUGAM N, CHOLAN S, et al. Spatial variability of heavy metals in estuarine, mangrove and coastal ecosystems along Parangipettai, Southeast coast of India[J]. Environmental Pollution, 2016, 218: 186-195.
- [9] 彭加喜, 刘金铃, 徐向荣, 等. 西沙永兴岛珊瑚重金属水平及其富集效应[J]. 海洋环境科学, 2014, 33(6): 848-853.
- [10] 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.
- [11] 胡红美, 张霞, 郭远明, 等. 舟山长白岛邻近海域沉积物重金

- 属污染及生态风险[J]. 广州化工, 2017, 45(20): 114-116, 119.
- [12] 晏宏, 张文超, 刘成程, 等. 重金属元素Hg、Cd、Cu、Zn和Se在南海东岛上的时空分布特征[J]. 地球环境学报, 2015, 6(5): 330-340.
- [13] 张瑞, 张帆, 刘付程, 等. 海州湾潮滩重金属污染的历史记录[J]. 环境科学, 2013, 34(3): 1043-1054.
- [14] 刘宏伟, 杨君, 杜东, 等. 秦皇岛近岸海域沉积物重金属含量及污染评价[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(5): 155-158.
- [15] 王超, 王纪华, 陆安祥, 等. 土壤重金属分布空间插值方法的优选-以湖南某地土壤重金属Cd的分布为例[J]. 吉林农业, 2015, 26(21): 74-75.
- [16] 谢谊, 张腾, 雷富, 等. 涠洲岛西面及西南面沉积物重金属污染分析[J]. 广西科学, 2018, 25(1): 57-62, 67.
- [17] 张鑫, 余树全, 李清林, 等. 洞头列岛土地利用对土壤及沉积物重金属污染的影响及其生态风险评价[J]. 生态科学, 2016, 35(5): 126-135.
- [18] 胡益峰, 刘蒙蒙, 李璐璐, 等. 绿华海上散货减载平台附近海域沉积物重金属风险评估[J]. 上海海洋大学学报, 2015, 24(2): 249-255.
- [19] 李平, 郭晓娟, 杨清书, 等. 珠江磨刀门河口表层沉积物中重金属的分布特征及生态风险评价[J]. 海洋环境科学, 2017, 36(5): 746-753.