

文章编号:1009-2722(2018)09-0043-08

广利河口北潮滩重金属分布特征及评价

黄学勇^{1,2}, 张 戈¹, 高茂生², 侯国华², 刘 森², 庄海海^{2,3}

(1 辽宁师范大学城市与环境学院, 大连 116029; 2 自然资源部海洋环境地质重点实验室, 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266071; 3 青岛大学环境科学与工程学院, 青岛 266071)

摘 要:基于广利河口北潮滩 45 个表层沉积物和 2 个岩心柱样重金属、粒度、TOC 数据, 分析了广利河口北潮滩沉积物重金属分布规律及其来源, 采用内梅罗综合指数法进行质量评价。结果表明: Cu、Pb、Zn、Cr、Cd、Hg、As 7 种元素含量低于国家一类标准; 在空间分布特征上, 距岸一定范围内数值相对较高, 主要受沿岸余流作用的影响; 就来源而言, Cr 元素明显为广利河注入, 表层、Z1 和 Z2 沉积物粒度对重金属的控制作用有明显差异; 研究区内 Cr 和 As 污染指数最高, Cu 污染指数变化最大, 综合污染指数呈“哑铃状”分布, 靠近现代黄河口和广利河口各高值相对较高。目前广利河口北潮滩重金属含量没有到达污染的程度, 但有向轻度污染发展的趋势。

关键词:广利河口; 北潮滩; 沉积物; 重金属; 环境评价

中图分类号: P736.2 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16028/j.1009-2722.2018.09006

重金属作为近海环境中最主要的污染物之一^[1,2], 对环境变化敏感, 反映特定时期内的沉积条件, 一部分重金属随外力作用搬运累积于潮间带上, 使潮间带成为重金属富集地^[3,4]。相比水体, 潮间带沉积物中的重金属丰度高、易于准确检测, 更容易受到环境变化影响^[5]。

环渤海地区是我国最重要的经济发展地带之一, 随着经济的发展, 工业排污量增加, 重金属污染问题日益严峻。近年来很多学者针对渤海海域重金属环境背景值^[6]、分布特征和评价^[7-9]以及对海洋生物的影响^[10]展开了研究。其中, 莱州湾作为重点研究区域之一, 主要的研究范围有中部浅

海区^[11-14]、小清河口^[15]、黄河口及附近海域^[16,17]。广利河口北潮滩位于莱州湾西岸, 毗邻山东省东营市经济技术开发区, 目前缺乏专门针对当地重金属分布特征及质量评价的研究, 为此, 本文根据广利河口北潮滩的 45 个表层沉积物和 2 个柱样岩心的重金属、粒度和有机碳数据, 分析广利河口北潮滩沉积物重金属的分布规律, 采用内梅罗综合指数法进行生态环境评价。

1 材料与方 法

采样点位东营市广利河口北部(图 1), 37°20′—37°26′N, 118°55′—119°0′E。广利河曾是入海的河道^[18], 后黄河归流, 该河经过多年河流改造作用, 演变为现在的河道^[19]。广利港建设对沉积环境影响作用明显^[20,21]。2014 年 9 月在广利河口北潮滩布设 15 条表层沉积物调查剖面, 在每条剖面上布设 3 个表层取样站位, 共采集了 45 个站位的沉积物样品。由北向南依次布设柱样, 分别为 Z1、Z2, 按 2 cm 厚度的等间距取样。

收稿日期: 2018-05-31

基金项目: 科技部基础性工作专项(2014FY210600); 国家重点研发专项(2016YFC0402801); 中国地质调查项目“渤海湾西部等重点海岸带综合地质调查”(DD20160144)

作者简介: 黄学勇(1991—), 男, 在读硕士, 主要从事海岸带环境研究方面的工作. E-mail: huangxy1110@126.com

* **通讯作者:** 张 戈(1959—), 男, 教授, 主要从事水资源与环境研究方面的工作. E-mail: zhangge_dl@163.com

所取样品中,采用等离子质谱法(ICP-MS)测定 Pb、Cr、Cd,采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)测定 Cu、Zn,采用 X 荧光光谱法(XRF)测定 Hg、As;容量法(VOL)测定 TOC;粒度分析仪(Mastersizer2000)测定沉积物粒度组成,根据 Fork 三角图命名方法,表层沉积物类型为粉砂质砂和砂质粉砂。

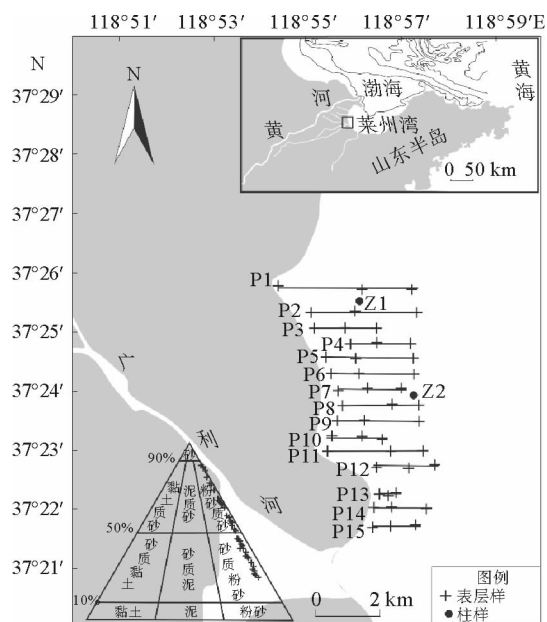


图 1 研究区位置、取样地点和沉积物类型示意图

Fig. 1 Map of location showing sampling sites and sediment types

2 结果与讨论

2.1 重金属含量

根据国家海洋沉积物质量标准^[22],对 Cu、Pb、Zn、Cr、Cd、Hg、As 7 种元素含量进行分析统计(表 1),由表 1 看出,表层样中 Cu、Pb、Zn、Cr、Cd、Hg、As 7 种元素平均含量分别为 9.16、17.08、47.23、61.54、0.084、0.015、9.51 $\mu\text{g/g}$; Z1 平均含量分别为 16.39、18.02、54.69、58.04、0.079、0.018、9.05 $\mu\text{g/g}$; Z2 平均含量分别为 13.66、17.96、50.27、55.84、0.082、0.015、10.24 $\mu\text{g/g}$ 。最大值小于一类标准,表层样中 Cu 元素变异系数为 0.543,说明表层样中 Cu 元素空间分布不均匀、离散性比较大。其余变异系数均小于

表 1 沉积物重金属的统计特征值

Table 1 Heavy metal contents of sediments

特征值	Cu	Pb	Zn	Cr	Cd	Hg	As
最小值	1.20	12.20	40.40	51.70	0.06	0.008	7.79
最大值	22.80	19.80	60.50	81.30	0.12	0.028	11.40
平均值	9.16	17.08	47.23	61.54	0.084	0.015	9.51
变异系数	0.54	0.086	0.092	0.11	0.202	0.30	0.076
最小值	1.00	14.80	43.70	47.10	0.051	0.010	7.46
最大值	25.00	21.50	68.20	93.60	0.18	0.039	15.90
平均值	16.39	18.02	54.69	58.04	0.079	0.018	9.05
变异系数	0.30	0.088	0.110	0.12	0.23	0.32	0.14
最小值	8.10	15.00	44.50	40.40	0.059	0.006	8.49
最大值	21.40	21.00	60.80	67.10	0.12	0.043	11.70
平均值	13.66	17.96	50.27	55.84	0.082	0.015	10.24
变异系数	0.22	0.068	0.087	0.10	0.16	0.44	0.071
一类标准 ^[22]	35.00	60.00	150.00	80.00	0.50	0.20	20.00
二类标准 ^[22]	100.00	130.00	350.00	150.00	1.50	0.50	65.00
莱州湾 ^[13]	21.96	21.99	60.41	60.00	0.12	0.05	12.64
渤海 ^[23]	22.00	20.00	64.00	57.00	0.09	0.04	9.00

0.35,说明空间分布较均匀、离散性小。

为了说明元素贫化与富集程度,采用富集系数 K(本区沉积物元素含量与其他地区沉积物含量比值)^[23]与黄河、莱州湾和渤海沉积物进行比较(表 2), $0.75 < K < 1.5$ 时为接近, $K < 0.75$ 时为贫化, $K > 1.5$ 时为富集。与黄河沉积物相比,除表层沉积物中 Cu 富集系数若贫化(0.70)外,

表 2 广利河口北潮滩沉积物重金属元素富集系数

Table 2 Enrichment factor of heavy metal elements of the sediments in study area

研究区域		Cu	Pb	Zn	Cr	Cd	Hg	As
黄河 ^[24]	表层	0.70	1.14	1.18	1.03	1.09	0.99	1.27
	Z1	1.26	1.20	1.37	0.97	1.02	1.17	1.21
	Z2	1.05	1.20	1.26	0.93	1.06	1.01	1.37
莱州湾 ^[13]	表层	0.42	0.78	0.78	1.03	0.70	0.29	0.75
	Z1	0.75	0.82	0.91	0.97	0.66	0.35	0.72
	Z2	0.62	0.82	0.83	0.93	0.68	0.30	0.81
渤海 ^[23]	表层	0.42	0.85	0.74	1.08	0.93	0.41	1.06
	Z1	0.74	0.90	0.85	1.02	0.88	0.49	1.01
	Z2	0.62	0.90	0.79	0.98	0.91	0.42	1.14

均为接近,除表层沉积物中得 Hg 外,富集系数均为 1~1.5,说明黄河沉积物可能是该区重金属来源之一。相比莱州湾沉积物,表层和 Z2 沉积物中 Pb、Zn、Cr、As 富集系数为接近,其余为贫化;Z1 沉积物中 Cu、Pb、Zn、Cr 富集系数为接近,其余为贫化。相比渤海沉积物,表层沉积物中 Pb、Cr、Cd、As 富集系数为接近,其余为贫化;Z1 和 Z2 沉积物中 Pb、Zn、Cr、Cd、As 富集系数为接近,Cu 元素为贫化。

沉积物中重金属含量分布特征与海水动力、沿岸河流注入、生活生产污水排放等条件有关^[25-27]。通过对 P1、P4、P7、P10 和 P13 重金属含量的丰枯季节变化(表 3),大部分站位元素枯季含量高于丰季。其中,广利河口附件(P13),Cr 枯季含量明显减小,Cu 枯季含量明显增加,As 元素所有站位枯季含量均高于丰季。说明 Cr 元素来自于丰季广利河的注入,Cu 和 As 来自沿岸生产生活污水排放,与本区工业发展类型有关。

表 3 丰枯季重金属含量变化

Table 3 Comparison of heavy metal element contents between flooding and drying seasons

样品号	Cu		Pb		Zn		Cr		Cd		Hg		As		
	丰	枯	丰	枯	丰	枯	丰	枯	丰	枯	丰	枯	丰	枯	
P1	潮上带	16	14.5	13	17	49.5	54	60.1	61	0.08	0.087	0.0098	0.013	7.79	9.79
	潮间带	10.2	11	18.6	18.3	48	49	61.4	62	0.092	0.084	0.012	0.016	9.58	11
	潮下带	6.2	9.2	16.8	18	41.2	44	57.2	59	0.066	0.059	0.01	0.014	10.1	10.1
P4	潮上带	6.3	15.4	17.5	20.4	51.2	54	73.6	64	0.1	0.11	0.022	0.014	9	9.83
	潮间带	3	9.3	15.6	19.6	44.9	53	66.3	71	0.076	0.099	0.016	0.02	9.41	10.4
	潮下带	5.7	12.3	15.6	19.5	41.5	47	58.6	59	0.064	0.075	0.012	0.016	10.4	13.6
P7	潮上带	15.2	13.4	16.2	16.8	53.6	54	57.8	64	0.11	0.1	0.015	0.018	9.71	11.2
	潮间带	7.9	8.3	17.8	16.6	46.6	49	66.5	67	0.077	0.096	0.018	0.022	9.04	10.6
	潮下带	8.9	7.2	16.7	17.7	46.5	44	56.7	60	0.078	0.081	0.015	0.017	10.1	10.7
P10	潮上带	13.1	14.2	17.3	18.9	52.5	56	64.1	73	0.12	0.085	0.017	0.017	9.21	10.9
	潮间带	1.2	2.8	17.1	17.3	48.7	49	72.4	75	0.096	0.1	0.016	0.018	8.6	9.47
	潮下带	4.8	8.05	17.7	18.8	45.2	46	69.5	65	0.089	0.081	0.014	0.016	9.01	12
P13	潮上带	4.15	13.7	16.8	14.2	43.3	47	66.3	19	0.066	0.04	0.011	0.014	8.35	9.81
	潮间带	2.1	7	16.3	17.6	42.9	42	74.9	55	0.071	0.079	0.0082	0.015	9.38	11.1
	潮下带	2.1	11.1	16.4	16.8	40.4	42	55.9	45	0.061	0.071	0.011	0.013	9.64	12.7

2.2 重金属分布特征

表层沉积物中 Cu、Pb、Zn、Cr、Cd、Hg、As 重金属含量分布和平均粒径数值如图 2 所示。由图 2 可以看出,Cu、Zn、Cd 距岸越远含量越低,与平均粒径数值分布基本一致,随沉积物粒径变粗,元素含量逐渐变低。Pb 的分布与岸线方向平行,由北向南含量先降低后升高。Cr 由岸向海,含量先增加后降低。Hg 含量由研究区东北向东南方向先增加后降低。As 含量由研究区西南向西北方向先降低后升高。总体而言,重金属含量在广利河口附近有一个低值区域。Cu、Pb、Cr、Hg、As 在距岸一定范围内形成一个峰值中心,这一分布特征与现代黄河口那侧的

余流作用有关,余流对漂浮泥沙扩散作用明显^[28],重金属随泥沙在余流作用下以旋涡为中心沉积下来。

岩心柱样中 Cu、Pb、Zn、Cr、Cd、Hg、As 含量和粒度组分垂向分布如图 3 所示。Z1 中 Cu、Pb、Zn、Cd 含量在垂向上高低相间,变化趋势与 TOC 含量变化趋势基本一致,Cr 与 As 含量变化不大,只有在接近表层有一个含量峰值,Hg 在 0~92 cm 范围内,含量逐渐增加,在 92 cm 与砂质含量变化一致,含量逐渐减少。Z2 中,Hg 含量垂向变化较小;Cu、Pb、Cd、As 含量垂向变化与 TOC 变化趋势一致;Zn、Cr 含量垂向变化与平均粒径变化趋势接近,在深度>80 cm 时,Zn、Cr 含量变化与砂质组分变化趋势一致。

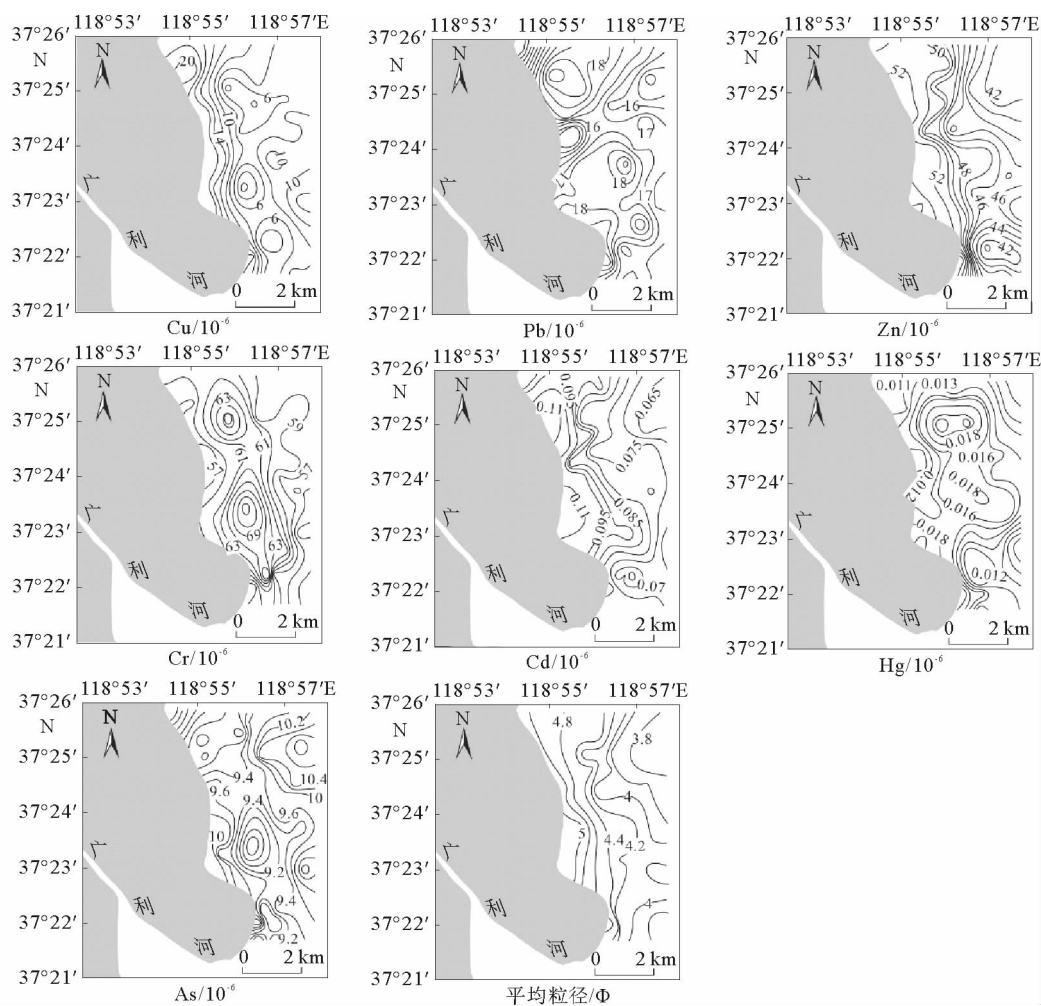


图2 表层沉积物重金属含量与平均粒径分布

Fig. 2 Distribution patterns of heavy metals and mean grain size in the sediments of study area

2.3 重金属来源分析

沉积物粒度和 TOC 含量是影响沉积物重金属分布特征的 2 个重要参数^[29]。表层沉积物的重金属间相关性和重金属与粒度相关性分析如表 4 所示。Cu、Pb、Zn、Cd、Hg 与黏土质和粉砂质呈一定正相关，Cu、Zn、Cd、Hg 与黏土质相关性高于粉砂质，Pb 与粉砂质相关性高于黏土质。Cr 只与粉砂质存在正相关，As 只与砂质存在正相关。说明 Cu、Zn、Cd、Hg 更多吸附于黏土质中，Pb 和 Cr 更多吸附于粉砂质中，As 则吸附于砂质中。Cu、Zn、Cd 相互之间相关性均 > 0.5 ，说明具有同源性。

Z1 沉积物重金属间相关性和重金属与粒度、TOC 相关性分析如表 5 所示。粉砂质与黏土质

与 TOC 相关性分别为 0.26、0.31，说明 TOC 在粒径的分布相对分散。Z1 内粉砂、黏土、TOC 与重金属相关性均呈一定正相关，说明重金属与 TOC 在沉积物中分别范围较广，其中，Cu、Pb、Zn 在 TOC 中相对富集，Zn、Cd、Hg 在黏土质中相对富集。Cu、Pb、Zn、Cd 相互之间具有显著相关性，说明物质来源相近。

Z2 沉积物重金属间相关性和重金属与粒度、TOC 相关性分析如表 6 所示。黏土质与 TOC 相关性为 0.87，符合通常情况下，TOC 富集在细颗粒沉积物(黏土质)中的研究结果^[30,31]。除 Cu 外，重金属与 TOC、黏土相关性均 > 0.5 。说明在 Z2 中，重金属与 TOC 通过表面络合、离子交换、表面沉淀等方式吸附于黏土质中。Pb、Zn、Cd 相关性显著，Cu、Hg、As 相关性显著说明物质来源相近。

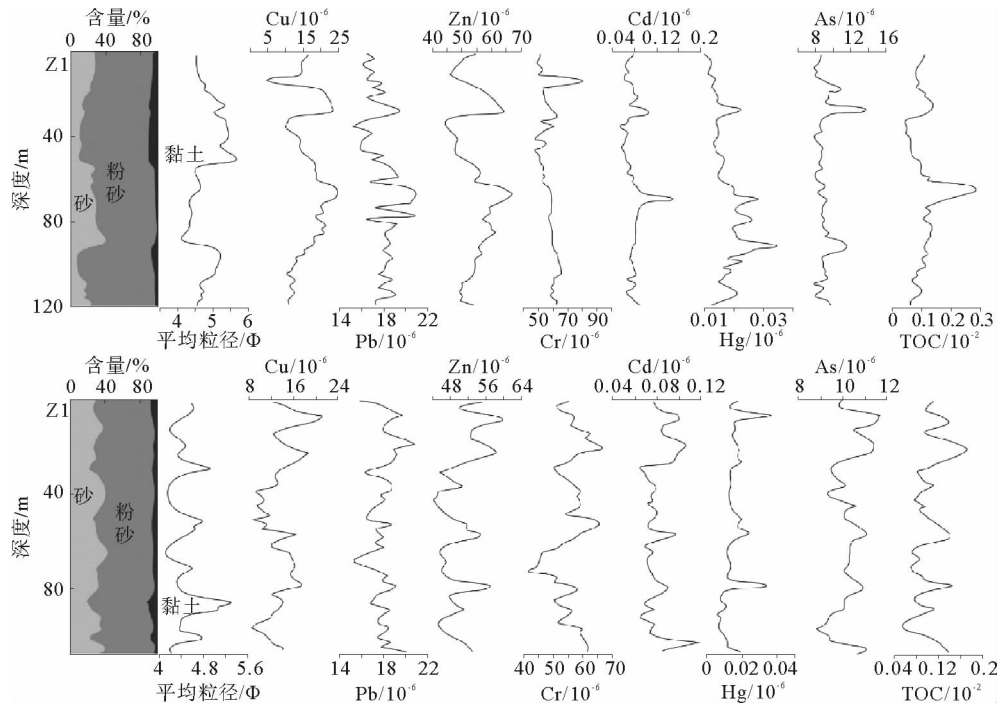


图 3 Z1、Z2 沉积物重金属和 TOC 含量、粒度组分、平均粒径分布示意图

Fig. 3 Distribution patterns of heavy metals, TOC, sediment types and mean grain size in Z1 and Z2

表 4 广利河口北潮滩表层沉积物元素相关性分析

Table 4 Correlation coefficients of the elements in the surface sediments of study area

	Cu	Pb	Zn	Cr	Cd	Hg	As	砂	粉砂	黏土
Cu	1.00									
Pb	0.15	1.00								
Zn	0.71	0.36	1.00							
Cr	-0.52	0.18	0.03	1.00						
Cd	0.58	0.36	0.75	0.09	1.00					
Hg	-0.08	0.33	0.18	0.29	0.06	1.00				
As	0.24	0.09	0.01	-0.39	-0.06	0.10	1.00			
砂	-0.59	-0.25	-0.87	-0.14	-0.74	-0.03	0.28	1.00		
粉砂	0.56	0.56	0.56	0.17	0.72	0.03	-0.31	-1.00	1.00	
黏土	0.70	0.24	0.91	-0.06	0.75	0.05	-0.08	-0.90	0.86	1.00

表 5 Z1 沉积物元素相关性分析

Table 5 Correlation coefficients between elements in Z1

	Cu	Pb	Zn	Cr	Cd	Hg	As	TOC	砂	粉砂	黏土
Cu	1.00										
Pb	0.50	1.00									
Zn	0.79	0.66	1.00								
Cr	-0.43	0.14	0.15	1.00							
Cd	0.49	0.51	0.64	0.11	1.00						
Hg	0.34	0.45	0.47	0.21	0.51	1.00					
As	0.23	0.15	0.35	0.16	0.29	0.47	1.00				
TOC	0.70	0.65	0.81	0.10	0.49	0.37	0.11	1.00			
砂	-0.43	-0.26	-0.55	-0.14	-0.36	-0.33	-0.36	-0.30	1.00		
粉砂	0.39	0.16	0.45	0.07	0.23	0.17	0.32	0.26	-0.96	1.00	
黏土	0.37	0.43	0.61	0.27	0.55	0.64	0.33	0.31	-0.70	0.49	1.00

表6 Z2沉积物元素相关性分析

Table 6 Correlation coefficients between elements in Z2

	Cu	Pb	Zn	Cr	Cd	Hg	As	TOC	砂	粉砂	黏土
Cu	1.00										
Pb	0.24	1.00									
Zn	0.62	0.53	1.00								
Cr	-0.28	0.51	0.46	1.00							
Cd	0.43	0.56	0.68	0.42	1.00						
Hg	0.52	0.32	0.62	0.26	0.45	1.00					
As	0.59	0.31	0.74	0.26	0.53	0.54	1.00				
TOC	0.48	0.54	0.87	0.55	0.64	0.57	0.71	1.00			
砂	-0.41	-0.47	-0.73	-0.40	-0.52	-0.45	-0.45	-0.69	1.00		
粉砂	0.35	0.32	0.56	0.24	0.37	0.34	0.27	0.49	-0.95	1.00	
黏土	0.41	0.61	0.83	0.59	0.67	0.51	0.67	0.87	-0.75	0.52	1.00

2.4 重金属环境质量评价

内梅罗指数法是目前国内外进行综合污染指数计算最常用的多因子综合评价方法^[8]。

其计算公式为：

$$P = \sqrt{\frac{(P_{i\max})^2 + (P_{iavr})^2}{2}} \quad (1)$$

式中： P 为内梅罗污染污染指数；

$P_{i\max}$ 为各污染因子污染指数最大值；

P_{iavr} 为各污染因子污染指数平均值。

当内梅罗指数 $P < 1$ 时，污染程度为无；当 $1 \leq P < 2.5$ 时为轻度污染。

公式(1)中单因子污染指数 P_i 计算公式为：

$$P_i = \frac{\rho_i}{S_i} \quad (2)$$

式中： ρ_i 为沉积物 i 中的实测浓度值；

S_i 为沉积物 i 中污染物评价标准，本文选取《中国浅海沉积物地球化学》^[23]中渤海沉积物重金属背景值作为评价标准(表1)。

根据公式(2)计算表层、Z1、Z2沉积物重金属污染指数如表7所示，Z1各单因子污染指数高于表层和Z2。Cr与As污染指数最高，Cu污染指数数值变化最大。

运用内梅罗综合指数法对沉积物中Cu、Pb、Zn、Cr、Cd、Hg、As进行评价。评价结果表明，表层沉积物 P 值均 < 1 ，距岸越远，污染指数越小。总体而言，广利河口北潮滩表层污染指数分别呈“哑铃状”分布(图4)。广利河以北约2 km处数值最高(0.96)。距离广利河口约4 km处，等值

表7 广利河口北潮滩沉积物重金属单因子污染指数

Table 7 Single factor pollution index of heavy metals in the sediments of study area

单因子污染指数	Cu	Pb	Zn	Cr	Cd	Hg	As
最小值	0.055	0.610	0.631	0.907	0.667	0.228	0.866
表层	最大值	1.036	0.990	0.945	1.426	1.333	0.778
平均值	0.416	0.854	0.738	1.080	0.932	0.411	1.056
Z1	最小值	0.045	0.740	0.683	0.826	0.567	0.278
最大值	1.136	1.075	1.066	1.642	2.000	1.083	1.767
平均值	0.745	0.901	0.855	1.018	0.876	0.489	1.005
Z2	最小值	0.368	0.750	0.695	0.709	0.656	0.175
最大值	0.973	1.050	0.950	1.177	1.333	1.194	1.300
平均值	0.621	0.898	0.786	0.980	0.906	0.421	1.138

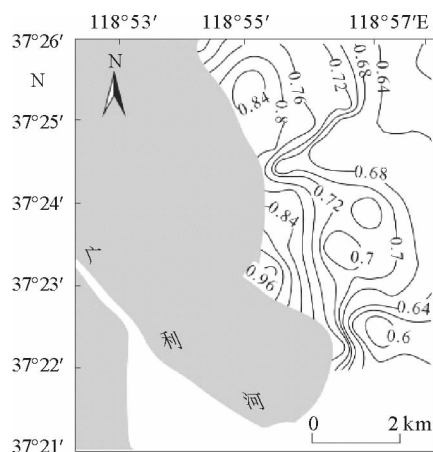


图4 广利河口北潮滩表层沉积物内梅罗综合污染指数评价结果

Fig. 4 Results of Nemerow comprehensive pollution index assessment for surface sediments

线向岸凸起,数值低于两侧海域。Z1 和 Z2 沉积物 P 值大多 <1 ,Z1 中污染指数垂向变化相对稳定,基本在 0.8 左右;Z2 污染指数在垂向上呈多旋回变化,污染数值在 0.6~1 之间变化(图 5)。Z2 污染指数变化反应了广利河注入对重金属含量变化的影响。

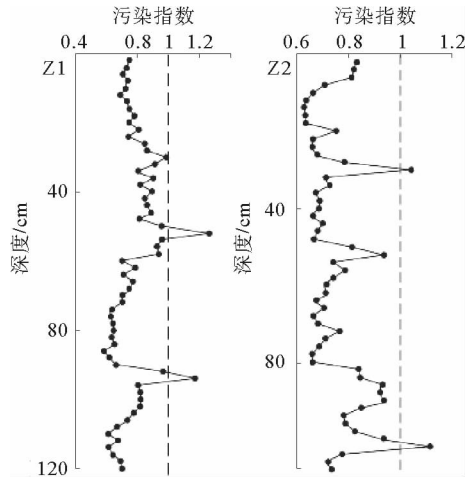


图 5 Z1、Z2 沉积物内梅罗综合污染指数评价结果
Fig. 5 Results of Nemerow comprehensive pollution index assessment in Z1 and Z2

3 结论

(1)广利河口北潮滩表层沉积物和岩心柱样沉积物 Cu、Pb、Zn、Cr、Cd、Hg、As 等 7 种元素平均含量低于国家海洋沉积物质量规范一类标准。最大值也低于国家一类标准,但数值接近。目前广利河口北潮滩重金属含量较小,但呈现增长趋势,在距岸一定范围内重金属含量较高与现代黄河口南侧余流有关。

(2)重金属分布受沉积物粒度影响明显。在表层沉积物中,Cu、Zn、Cd、Hg 受黏土质控制,Pb、Cr 受粉砂质控制,As 受砂质控制。Z1 重金属受粒度和 TOC 控制作用相对较弱,仅有 Zn 同时受 TOC 和黏土质控制,Cu、Pb 相对富集在 TOC 中,Cd、Hg 相对富集在黏土质中;Z2 重金属分布受黏土质控制明显,与 TOC 共同富集于黏土质中。

(3)单因子污染指数中,Cr 与 As 数值最高,Cu 数值变化最大。研究区内,靠近现代黄河口方向和广利河口方向综合污染指数数值最高,有向

轻度污染发展的趋势。柱样中,Z1 沉积物综合污染指数数值基本保持稳定;靠近广利河口的 Z2 数值呈多旋回变化,垂向上呈增加趋势。

参考文献:

- [1] Zhang C, Shan B Q, Tang W Z, et al. Heavy metal concentrations and speciation in riverine sediments and the risks posed in three urban belts in the Haihe Basin[J]. *Ecotoxicology & Environmental Safety*, 2017, 139:263-271.
- [2] 张 勇,张现荣,毕世普,等.我国近海海域沉积物重金属分布特征与环境质量评价[J]. *海洋地质前沿*, 2012, 28(11): 38-42.
- [3] 王永红,张 经,沈焕庭. 潮滩沉积物重金属累积特征研究进展[J]. *地球科学进展*, 2002, 17(1): 69-77.
- [4] 徐 刚,刘 健,孔祥淮,等. 近海沉积物重金属污染来源分析[J]. *海洋地质前沿*, 2012, 28(11): 47-52.
- [5] 王应飞,高建华,石 勇,等. 鸭绿江河口西岸潮间带柱状沉积物中重金属的分布特征及其对流域变化的响应[J]. *地球化学*, 2014, 43(1): 64-76.
- [6] 李淑媛,刘国贤,苗丰民. 渤海沉积物中重金属分布及环境背景值[J]. *中国环境科学*, 1995(5): 370-376.
- [7] 霍素霞,邢聪聪,朱超祁,等. 渤海沉积物重金属含量时间演化特征及影响因素研究[J]. *中国海洋大学学报:自然科学版*, 2017, 47(10): 42-49.
- [8] 林曼曼,张 勇,薛春汀,等. 环渤海海域沉积物重金属分布特征及生态环境评价[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2013, 33(6): 41-46.
- [9] 许 艳,王秋璐,李 潇,等. 环渤海典型海湾沉积物重金属环境特征与污染评价[J]. *海洋科学进展*, 2017, 35(3): 428-438.
- [10] 谢 嘉. 典型重金属(Cd^{2+} 、 Pb^{2+})和有机污染物(BaP、BDE-47)对长牡蛎的复合毒性效应研究[D]. 烟台:中国科学院烟台海岸带研究所, 2017: 37-102.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 刘金虎,宋俊杰,曹 亮,等. 莱州湾表层沉积物中重金属时空分布、污染源及风险评价[J]. *生态毒理学报*, 2015, 10(2): 369-381.
- [15] 沈佳裕,罗先香,郑 浩,等. 小清河口及邻近海域表层沉积物重金属污染及生态风险特征[J]. *环境化学*, 2017, 36(7): 1516-1524.
- [16] 刘淑民,姚庆祯,刘月良,等. 黄河口湿地表层沉积物中重金属的分布特征及其影响因素[J]. *中国环境科学*, 2012, 32(9): 1625-1631.

- [17] Sun Z, Mou X, Sun W. Decomposition and heavy metal variations of the typical halophyte litters in coastal marshes of the Yellow River estuary, China [J]. *Chemosphere*, 2016, 147: 163-172.
- [18] 庞家珍, 司书亨. 黄河河口演变(I)——近代历史变迁[J]. *海洋与湖沼*, 1979, 10(2): 136-141.
- [19] 杨荣民, 李广雪, 李安龙, 等. 广利河口拦门沙的沉积特征与冲淤过程的研究[J]. *中国海洋大学学报: 自然科学版*, 2005, 35(2): 339-343.
- [20] 赵学, 左书华. 广利港海域悬沙分布及黄河口泥沙扩散对其影响[J]. *海洋地质前沿*, 2012, 28(9): 14-19.
- [21] 林维田, 吴永亭, 刘建立. 广利港河道水位变化及河口拦门沙地形变化分析研究[J]. *海岸工程*, 2008(3): 9-14.
- [22] 国家海洋局. GB 18668—2002 海洋沉积物质量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [23] 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: 61-108.
- [24] 刘珊珊, 张勇, 龚淑云, 等. 长江三角洲经济区海域沉积物重金属分布特征及环境质量评价[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2013, 33(5): 63-70.
- [25] 宋静宜, 傅开道, 苏斌, 等. 澜沧江水系底沙重金属含量空间分布及其污染评价[J]. *地理学报*, 2013, 68(3): 389-397.
- [26] 蓝先洪, 孟祥君, 梅西, 等. 辽东湾表层沉积物的重金属污染特征与质量评价[J]. *海洋学报*, 2018, 40(6): 60-73. doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2018.06.006
- [27] 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.
- [28] 程国栋, 薛春汀. 黄河三角洲沉积地质学[M]. 北京: 科学出版社, 1997: 30-49.
- [29] Bilal L E, Rasmussen P E, Hall G E M, et al. Role of sediment composition in trace metal distribution in lake sediments [J]. *Applied Geochemistry*, 2002, 17(9): 1171-1181.
- [30] 李壮伟, 陈巧弟, 罗荣真, 等. 深圳铜鼓航道表层沉积物中重金属含量及潜在生态危害[J]. *海洋地质前沿*, 2011, 27(9): 32-39.
- [31] 吕晓霞, 翟世奎, 于增慧. 长江口及邻近海域表层沉积物中营养元素的分布特征及其控制因素[J]. *海洋环境科学*, 2005, 24(3): 1-5.

DISTRIBUTION PATTERN AND ASSESSMENT OF HEAVY METALS IN THE SEDIMENTS OF NORTH GUANG-LI RIVER ESTUARY

HUANG Xueyong^{1,2}, ZHANG Ge^{1*}, GAO Maosheng², HOU Guohua²,
LIU Sen², ZHUANG Haihai^{2,3}

(1 College of Urban and Environmental Science, Liaoning Normal University, Dalian 116000, China; 2 Key Laboratory of Marine Environmental Geology, Ministry of Natural Resources, Qingdao Institute of marine geology, CGS, Qingdao 266071, China;

3 College of Environmental Science and Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071, China)

Abstract: Based on the data of heavy metals, grain sizes and TOC for 45 surface sediments and 2 core columns taken from the north tidal flat of the Guang-li River estuary, we studied the distribution patterns and sources of heavy metals in the sediments of the estuary. Environmental quality evaluation is made with the Nemerow comprehensive index. The results show that the 7 elements of Cu, Pb, Zn, Cr, Cd, Hg and As, are all lower than the national standard of heavy metal pollution. In the spatial distribution, a high value anomaly of heavy metals is discovered in a place to certain distance from the shore, under the influence of coastal residual current. In terms of the source, however, the Cr element is clearly injected by the Guang-li River. In the sediments taken from the surface and the Z1 and Z2 sinks, grain size has obvious controlling effect over heavy metal distribution. The pollution indices of Cr and As remain the highest in the study area, while the pollution index of Cu changes greatly. The distribution of comprehensive pollution index is in a "dumbbell-like" pattern, with a high value region near the modern Yellow River estuary and another in the Guang-li River estuary. To conclude, the heavy metal content in the north tidal flat of the Guang-li River estuary has so far not reached the level of pollution, but the trend of development towards slight pollution is observed.

Key words: Guang-li River estuary; northern tidal flat; sediment; heavy metals; environments assessment