

莱州湾沉积物粒度与重金属分布特征

赵玉庭, 孙 珊, 由丽萍, 苏 博, 马元庆, 王立明, 齐延民, 张昀昌

(山东省海洋资源与环境研究院 山东省海洋生态修复重点实验室, 山东 烟台 264006)

摘要: 作者依据 2019 年 8 月份莱州湾海洋沉积物调查资料, 分析了该海域表层沉积物粒径组成、重金属时空分布特征并评价了其生态风险。结果显示, 莱州湾沉积物分为砂质粉砂、粉砂、粉砂质砂和砂 4 种类型, 以砂质粉砂为主, 其次为粉砂与粉砂质砂, 再次为砂, 中值粒径平均 58.956 μm ; 表层沉积物中 Cr、Zn、Pb、Cu、As、Cd、Hg 和 TOC 平均含量分别为 57.6、52.6、18.7、15.3、9.14、0.130、0.0234 mg/kg 和 0.222%; 由于河流排海物质和莱州湾内潮流运动, 导致 Cu、Pb、Zn、As、Cr 和 Cd 基本呈现中部海域含量较高, 西部海域高于东部海域的特征, 东南部海域 Cd、Hg 与矿产资源的开发相关; 14.3% 的站位综合潜在生态风险属于中生态风险, Cd 对综合潜在生态风险指数的贡献率最高, 为主要潜在生态风险因子; 研究区域中重金属 Cu、Zn 含量的分布与沉积物粒径和有机碳的含量密切相关。

关键词: 莱州湾; 沉积物; 粒度; 分布特征; 重金属; 生态风险评价

中图分类号: X820.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2021)03-0043-08

DOI: 10.11759/hyxx20200806004

沉积物是海洋生态系统的重要组成部分, 是海洋环境中重金属元素的源和汇^[1], 水体中的金属元素经絮凝、沉降、矿化等过程进入沉积物, 而沉积物中的金属元素又可通过再悬浮进入水体中, 从而影响水体质量^[2]。沉积物作为环境演变的信息载体, 系统记录了海洋生态系统中生物、物理及化学作用过程, 保存了自然因素和人为因素对环境影响的记录^[3], 海洋沉积物中重金属的分布特征能反映海域的污染状况^[4-6]。沉积物的粒度受沉积环境、水动力条件、搬运方式等因素的影响, 其组成可能是影响重金属含量的重要因素^[7]。

莱州湾是典型的半封闭性内海, 面积 6 966.93 km², 约占渤海的 10%, 沿岸有黄河、小清河、潍河等 10 余条河流注入^[8]。随着沿岸经济的快速发展, 大量工业废水排入海洋, 2018 年由直排海污染源排入渤海的重金属多达 609 t^[9]。对莱州湾的相关研究认为, 莱州湾局部区域存在 Hg、Pb、Cd 和 As 的潜在污染风险, 黄河口外和西北缘近岸海域沉积物的综合环境质量较差^[10-11]。因此, 评估沉积物中重金属生态风险, 探讨粒度对重金属分布的影响, 可了解莱州湾沉积物重金属污染状况, 为莱州湾环境保护提供科学依据^[12]。

1 材料与方法

1.1 调查时间与站位

调查时间: 2019 年 8 月; 调查海域: 37.2°N~37.8°N,

119°E~120.2°E; 调查站位: 共布设 35 个监测站位(图 1)。

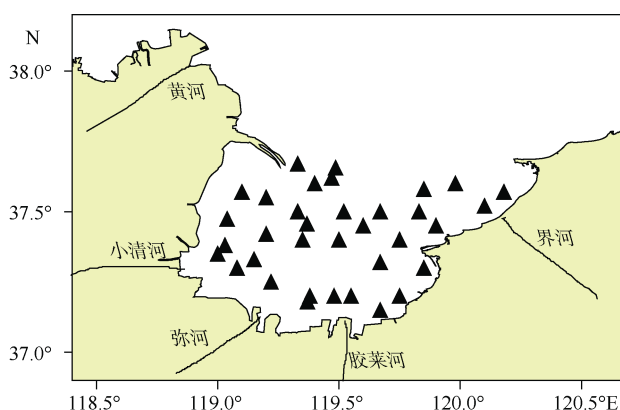


图 1 莱州湾沉积物调查站位

Fig. 1 Location of sampling stations in Laizhou Bay

1.2 调查项目与分析方法

沉积物样品采集、存放均按照《海洋调查规范》^[13]

收稿日期: 2020-08-06; 修回日期: 2020-09-14

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFC1407601、2018YFC1407605); 山东省重点研发计划资助项目(2019JZZY020705) [Foundation: National Key Research and Development Program, No. 2018YFC1407601、2018YFC1407605; Shandong Provincial Key Research and Development Program, No. 2019JZZY020705]

作者简介: 赵玉庭(1986—), 男, 山东诸城人, 工程师, 硕士, 主要从事海洋环境监测与评价研究, 电话: 15098572075, E-mail: zhaoyut-ingnihao@126.com; 孙珊, 通信作者, E-mail: sunsan18@163.com

和《海洋监测规范》^[14]进行; 镉、铅、锌、铜、铬及类金属砷的分析依据《海洋监测技术规程》^[15]进行; 汞、有机碳分析依据《海洋监测规范》^[14]进行; 粒度分析依据《海洋调查规范》^[13]进行。镉、铅、锌、铜、铬、砷和汞检出限分别为 0.015、0.070、0.160、0.008、0.070、0.180 μg/kg 和 0.002 mg/kg。

沉积物粒度采用尤登—温德华氏等比值粒级标准粒径由细到粗归纳为 3 类, 分别为黏土(<4 μm)、粉砂(4~63 μm)、砂(63~2 000 μm); 采用谢帕德(Shepard)沉积物三角分类法对沉积物分类和命名; 采用图解法计算中值粒径(M_d)。

1.3 数据统计及评价方法

沉积物平面分布图采用 Surfer8.0 软件绘制; 采用 SPSS19.0 软件进行统计, 应用 Pearson 相关系数对重金属、有机碳和粒度含量进行双变量相关分析。

重金属环境影响评价采用潜在生态风险指数法^[16], 计算公式如下:

$$E_n^i = T_n^i \frac{S_n^i}{C_n^i}$$

$$RI = \sum E_n^i$$

式中, E_n 、 T_n 分别为重金属 i 的潜在生态风险指数、毒性系数; S_n 、 C_n 分别为重金属 i 的实测量、背景量; RI 为 n 种重金属的综合潜在生态风险指数。

选取渤海沉积物重金属含量^[17]作为背景值(表 1)。潜在生态危害指数法除 7 种重金属外还包括多氯联苯, 因本文调查数据未包含多氯联苯, 故采用调整后的 RI 分级标准(表 2)^[18]。

表 1 Hakanson 指数法重金属的毒性系数及背景值
Tab. 1 Toxicity coefficients and background reference level of heavy metals

元素	Hg	Cd	Pb	Cu	As	Cr	Zn
毒性系数	40	30	5	5	10	2	1
背景值 (mg/kg)	0.036	0.09	20	22	9	57	64

表 2 潜在生态风险分级标准

Tab. 2 Grade standard of potential ecological risk

E 分级标准	E 程度分级	RI 分级标准	调整后 RI 分级标准	RI 程度分级
$E < 40$	低潜在生态风险	$RI < 150$	$RI < 105$	低生态风险
$40 \leq E < 80$	中潜在生态风险	$150 \leq RI < 300$	$105 \leq RI < 210$	中生态风险
$80 \leq E < 160$	较高潜在生态风险	$30 \leq RI < 600$	$210 \leq RI < 420$	较高生态风险
$160 \leq E < 320$	高潜在生态风险	$RI \geq 600$	$RI \geq 420$	很高生态风险
$E \geq 320$	很高潜在生态风险			

2 结果与讨论

2.1 粒度组成分析

莱州湾表层沉积物中粉砂含量最高, 占比 6.82%~84.95%, 平均(51.46±22.14)%; 砂含量次之, 占比 6.82%~84.95%, 平均(45.73±24.52)%; 黏土含量较低, 占比 0~14.24%, 平均(2.81±3.87)%(表 3); 调查海域未出现含砾样品。砂含量高值区(>50%)主要分布在近岸海域, 粉砂含量高值区(>50%)主要分布在中部及北部海域, 黏土与粉砂分布趋势基本一致。中值粒径范围为 16.535~109.142 μm, 平均为(58.956±22.023) μm。沉积物均在砂、粉砂质砂、砂质粉砂和粉砂范围内, 以砂质粉砂为主, 占调查站位的 37.1%, 主要分布在莱州湾北部海域; 其次为粉砂与粉砂质

砂, 均占 22.9%, 粉砂质砂主要分布在东南部海域, 粉砂主要分布在西北部海域; 砂最少, 占 17.1%, 主要分布在西南部近岸海域(图 2)。

2.2 表层沉积物重金属与有机碳统计特征

表层沉积物重金属含量从大到小依次为 Cr、Zn、Pb、Cu、As、Cd、Hg(表 4)。Cr 平均值为(57.6±6.81) mg/kg; Zn 平均值为(52.6±7.14) mg/kg; Pb 平均值为(18.7±2.45) mg/kg; Cu 平均值为(15.3±2.66) mg/kg; As 平均值为(9.14±1.03) mg/kg; Cd 平均值为(0.130±0.031 3) mg/kg; Hg 平均值为(0.023 4±0.003 26) mg/kg; 有机碳(Total Organic Carbon, TOC)平均值为(0.222±0.179)%, 重金属含量与胡宁静^[11]、罗先香^[19]、刘金虎^[10]、郑懿珉^[20]、徐艳东^[18]、赵玉庭^[21]等研究结果基本一致,

表 3 莱州湾表层沉积物粒度组成

Tab. 3 Grain size composition of surface sediments in Laizhou Bay

站号	粒组系数(%)			中值粒径 (μm)	名称	站号	粒组系数(%)			中值粒径 (μm)	名称
	砂	粉砂	黏土				砂	粉砂	黏土		
61900	4.15	81.61	14.24	16.535	粉砂	62900	47.75	51.82	0.44	61.603	砂质粉砂
72225	8.61	79.14	12.24	19.914	粉砂	62710	48.28	51.71	0	61.971	砂质粉砂
72314	10.16	79.73	10.11	22.666	粉砂	62800	47.94	45.68	6.39	60.266	粉砂质砂
72327	7.47	84.95	7.59	24.324	粉砂	73509	51.09	48.92	0	63.604	粉砂质砂
72139	11.49	83.02	5.49	32.741	粉砂	73809	51.2	48.81	0	63.665	粉砂质砂
61600	17.24	79.32	3.45	35.907	粉砂	73347	59.41	40.59	0	69.54	粉砂质砂
61987	21.04	74.27	4.68	36.372	粉砂	73552	64.93	35.07	0	71.949	粉砂质砂
61999	23.92	72.81	3.26	41.609	粉砂	72692	72.31	27.7	0	77.196	粉砂质砂
73104	30.73	65.64	3.63	45.68	砂质粉砂	73432	57.08	32.12	10.81	78.228	粉砂质砂
61764	25.88	73.32	0.8	46.338	砂质粉砂	72123	69.65	29.95	0.4	78.933	粉砂质砂
72190	36.75	60.51	2.73	51.21	砂质粉砂	72535	77.25	22.34	0.4	81.154	砂
62996	33.8	64.18	2.02	51.673	砂质粉砂	72632	76.86	23.14	0	81.313	砂
73254	38.33	59.79	1.87	52.988	砂质粉砂	72101	82.14	17.86	0	89.811	砂
61946	38.77	58.88	2.36	54.785	砂质粉砂	61823	81.85	17.69	0.47	90.869	砂
62915	40.05	58.13	1.81	56.52	砂质粉砂	72612	86.69	13.31	0	93.24	砂
73167	44.8	54.61	0.58	59.811	砂质粉砂	72458	93.18	6.82	0	109.142	砂
63761	45.41	54.01	0.58	59.911	砂质粉砂	最小值	4.15	6.82	0	16.535	/
63814	46.09	53.39	0.52	60.423	砂质粉砂	最大值	93.18	84.95	14.24	109.142	/
73618	48.19	50.39	1.42	61.562	砂质粉砂	平均值	45.73	51.46	2.81	58.956	/

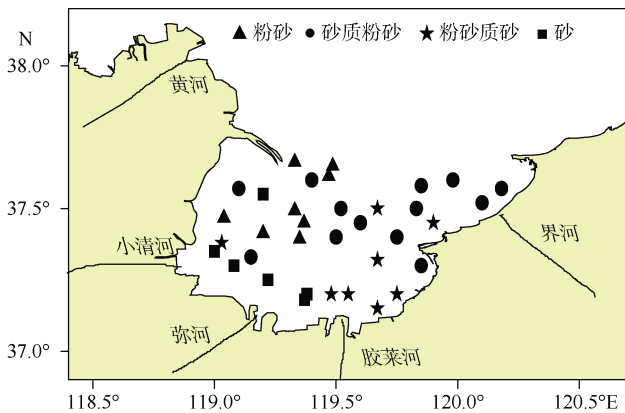


图 2 莱州湾沉积物类型
Fig. 2 Types of sediments in Laizhou Bay

2007~2019 年, 重金属含量略有波动, 总体含量差别不大(表 5)。7 种重金属含量均符合第一类海洋沉积物质量标准。Cd 和 Cu 的变异系数较大, 分别为 24.0% 和 17.3%, 二者含量在该海域的分布差异较大, 可能受多重因素影响^[22]; 其他 5 种重金属的变异系数均较小, 空间分布较 Cd 和 Cu 更为均匀。

莱州湾西南部沉积物粒径较大(图 3), 中部出现 1 个低值区, 随着搬运距离的加大, 由近岸向远岸沉积物粒径逐渐变小。Cu、Pb、Zn、As、Cr 和 Cd 基本呈现中部海域含量较高, 西部海域高于东部海域的特征, 此外, 重金属 Cd、Hg 在东南部海域也出现一个高值区。

表 4 莱州湾表层沉积物中重金属、有机碳的含量统计

Tab. 4 Statistics of studied element contents in surface sediment from Laizhou Bay

统计量	Hg	Cd	Cu	Pb	As	Cr	Zn	TOC
最小值(mg/kg)	0.0179	0.0790	10.4	14.2	7.68	46.6	37.3	0.0838
最大值(mg/kg)	0.0354	0.194	22.3	23.2	11.9	76.7	68.7	1.14
平均值(mg/kg)	0.0234	0.130	15.3	18.7	9.14	57.6	52.6	0.222
标准差(mg/kg)	0.00326	0.0313	2.66	2.45	1.03	6.81	7.14	0.179
变异系数(%)	13.9	24.0	17.3	13.1	11.2	11.8	13.6	80.8

注: 有机碳统计量单位为%

表 5 莱州湾表层沉积物重金属含量历史统计

Tab. 5 Statistics of heavy metal contents in surface sediments taken from Laizhou Bay

研究海域	Hg	Cd	Cu	Pb	As	Cr	Zn	调查时间(年.月)	站位数(个)	资料来源
莱州湾	0.053	0.081	13.3	20.2	13.1	57.1	59.4	2007.8	31	[11]
莱州湾	0.09	0.11	15.0	11.7	9.20	—	50.8	2008.5	30	[19]
莱州湾	0.04	0.16	17.2	21.8	8.88	51.8	52.0	2010.8	31	[10]
莱州湾	0.051	0.12	22.0	22.0	12.6	60.0	60.4	2012.9	154	[20]
莱州湾东部	0.013	0.091	9.7	11.7	9.2	46.3	40.9	2015.8	15	[18]
莱州湾	0.0774	0.169	11.9	12.1	11.6	31.1	45.3	2016.8	32	[21]
莱州湾	0.0234	0.130	15.3	18.7	9.14	57.6	52.6	2019.8	35	本研究

注：“—”代表未检测

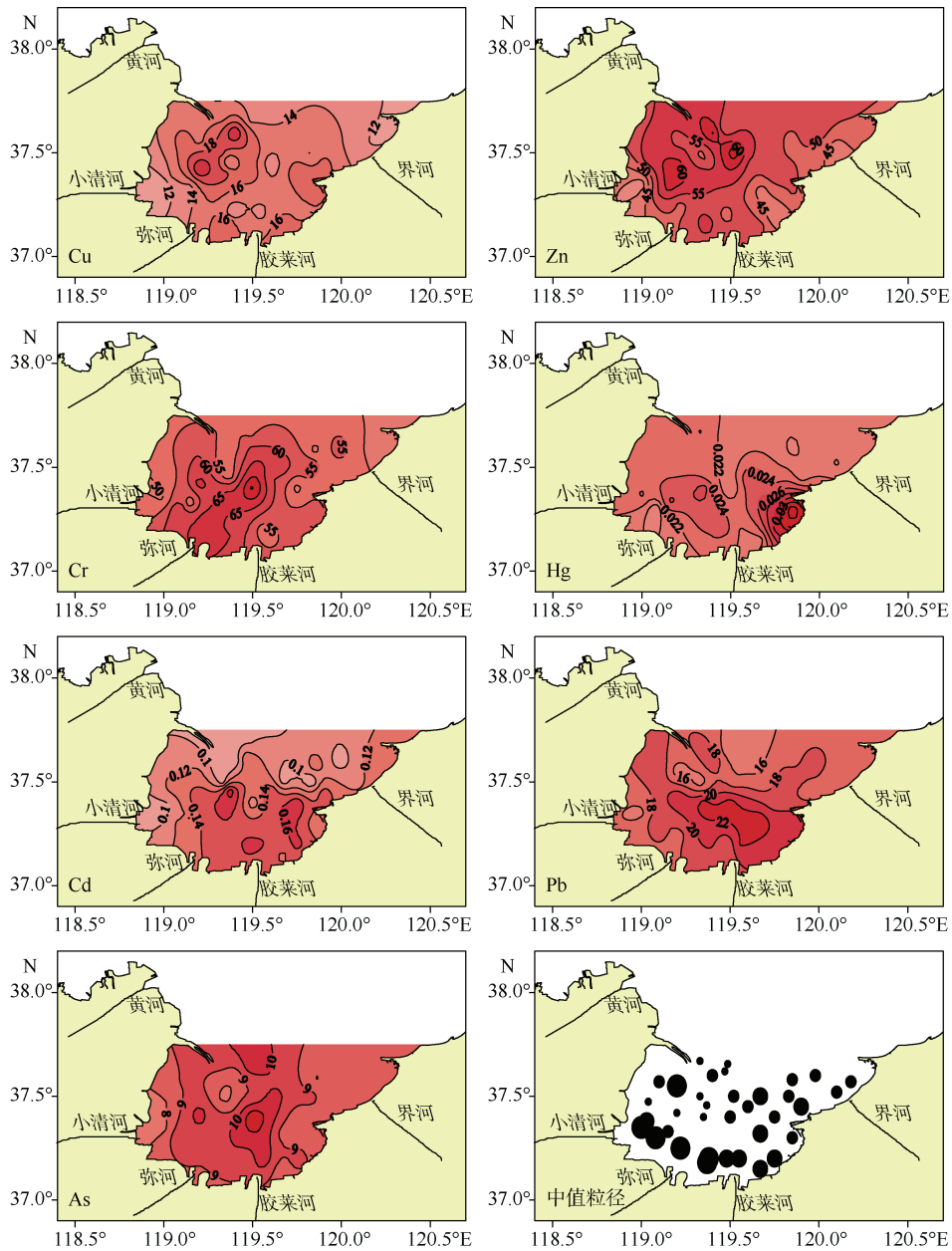


图 3 莱州湾表层沉积物中重金属、粒径的平面分布

Fig. 3 Horizontal distribution of heavy metal and median diameter of surface sediments taken from Laizhou Bay

沉积物重力与水动力的平衡决定沉积物的分配,由河口至浅海,随着潮流流速的变小和搬运距离的增加,沉积物中砂含量越少^[23]。莱州湾西南部海域受小清河等多条河流影响,水动力较强,该海域沉积物含砂量高,以砂为主,与胡宁静^[16]研究结果一致;中部海域随着搬运距离的增加和流速的变小,沉积物粒径变小,以粉砂为主;其他海域介于两者之间,以粉砂质砂和砂质粉砂为主。同时,由于黄河口沙嘴外围存在弧形高流速带,弧形高流速带外围又有潮流剪切锋,控制了黄河入海泥沙的扩散、输运和沉降范围,是控制莱州湾西、南岸地貌差异演化的主要沉积动力过程^[24]。同时,莱州湾的潮汐主要受黄河口外 M2 潮波系统控制,莱州湾大部分海区属于不正规混合半日潮型,受地形影响,潮流以顺时针方向的旋转流为主,伴有往复流,涨潮流方向为东北-西南向,落潮流方向为西北-东南向^[25]。河流排海物质和莱州湾内潮流运动使沿岸小粒径悬浮物被带入湾内,在中部沉积,导致莱州湾中部沉积物重金属含量高于沿岸。莱州湾东南海岸海域 Hg、Cd 含量较高,可能与金矿(三山岛金矿、仓上金矿)及煤矿(龙口煤田)等矿产资源的开发等相关,与杜国云^[26]等研究结果相一致。

2.3 重金属潜在生态风险评价

潜在生态风险指数 E 从大到小依次为 Cd、Hg、As、Cu、Pb、Cr、Zn(图 4)。22 个站位 Cd 潜在生态风险指数 $E > 40$, 属于中潜在生态风险, 占总站位的 68.8%; Hg、As、Cu、Pb、Cr、Zn 潜在生态风险指数 E 均 < 40 , 属于低潜在生态风险, 污染风险较

小。综合潜在生态风险指数 RI 范围 71.9~111.6, 平均值 90.5 ± 12.3 。7 个站位综合潜在生态风险指数 $RI > 105$, 属中生态风险, 占总站位的 14.3%; 其余站位均属低生态风险。Cd 对综合潜在生态风险指数的贡献率 36.6%~59.1%, 平均 47.4%, 为主要潜在生态风险因子, Cd 的 E 值偏高, 源于部分站位 Cd 的含量较高与 Cd 的生物毒性较强; 其次为 Hg, 范围 23.4%~38.8%, 平均 29.0%, 主要与 Hg 的生物毒性较强有关。

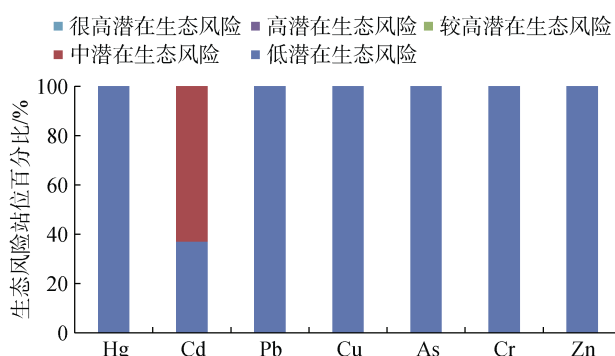


图 4 潜在生态风险指数评价结果

Fig. 4 The results of potential ecological risk index

2.4 沉积物粒径与重金属相关关系

TOC 与粉砂、黏土含量存在极显著正相关关系, 与中值粒径和砂含量存在极显著负相关关系(表 6), TOC 含量分布模式与细粒组分相似, 与粗粒组分相反, TOC 输运和积聚与沉积物的细粒组分相关, 含量受水动力影响^[27]。

表 6 各环境因子间 Pearson 相关系数

Tab. 6 Pearson correlation coefficient between environmental factors

环境因子	TOC	Cu	Zn	Cr	Hg	Cd	Pb	As	中值粒径	砂	粉砂	黏土
TOC	1											
Cu	0.548**	1										
Zn	0.339*	0.540**	1									
Cr	0.178	0.279	0.357*	1								
Hg	0.144	0.065	-0.081	0.006	1							
Cd	0.183	0.067	-0.043	0.043	0.235	1						
Pb	0.283	0.292	0.217	0.376*	0.368*	0.326	1					
As	0.145	-0.003	0.334*	0.619**	-0.087	0.104	0.305	1				
中值粒径	-0.574**	-0.413*	-0.310	0.114	-0.070	0.004	-0.044	-0.001	1			
砂	-0.526**	-0.373*	-0.342*	0.157	-0.015	0.041	-0.054	-0.017	0.987**	1		
粉砂	0.466**	0.347*	0.332	-0.175	0.016	-0.057	0.044	-0.013	-0.975**	-0.991**	1	
黏土	0.668**	0.383*	0.266	0.006	-0.001	0.065	0.090	0.178	-0.676**	-0.665**	0.562**	1

注: *显著相关($P < 0.05$); **极显著相关($P < 0.01$), 表中空白栏表示数据与列出数据相对应, 故未列出

Cu 与 TOC 存在极显著正相关关系,与粉砂、黏土含量存在显著正相关关系,与中值粒径和砂含量存在显著负相关关系; Zn 与 TOC 存在显著正相关关系,与砂含量存在显著负相关关系,说明沉积物粒径和有机碳含量是制约沉积物重金属 Cu、Zn 含量的两个重要参数^[28]。小颗粒沉积物具有较大的比表面积,往往具有较高表面活性能力^[29],更利于重金属的吸附;有机碳具有较高的阳离子交换量(CEC),并具有大量不同的功能团(羧基、酚羟基和酮基等),它们通过表面沉淀、络合和离子交换吸附金属元素,因而有机碳含量高的沉积物对相关重金属的吸附量也较高^[30]。Cu 与 Zn 具有相似的构型和性质,地球化学行为相近,具有沉积同源性,Cu 与 Zn 相关系数为 0.540($P < 0.01$),存在极显著正相关关系。

Zn 与 Cr、As 存在显著正相关关系; Cr 与 As 存在极显著正相关关系,与 Pb 存在显著正相关关系; Hg 与 Pb 存在显著正相关关系;其他重金属元素间不存在显著相关关系。同时,其他 5 种重金属元素与粒度不存在显著性相关关系,与“元素的粒度控制律”^[31]不相符,这 5 种重金属元素受粒度影响不明显。研究认为,河口重金属除受自然来源控制外,工、农业活动和与煤炭燃烧有关的大气沉降也对重金属有重要影响。虞河口外工、农业活动和与煤炭燃烧有关的大气沉降对 Cd、Hg 和 Zn 的浓度贡献分别为 23.2%、53.1%和 45.4%,交通排放对 Cu 和 Pb 的贡献为 29.9%和 24.2%;小清河口 27.4%的 Cu 和 30.3%的 Hg 来自工业活动和与煤炭燃烧有关的大气沉降^[32],这可能为本文中 5 种重金属元素受粒度影响不明显的原因。

3 结论

(1) 莱州湾表层沉积物中粉砂含量最高,平均占比 51.46%;砂含量次之,平均占比 45.73%;黏土含量最低,平均占比 2.81%;砂含量高值区(>50%)主要分布在近岸海域,粉砂含量高值区(>50%)主要分布在中部及北部海域;中值粒径 16.535 μm ~109.142 μm ,平均 58.956 μm ;按三角分类法分类,莱州湾沉积物以砂质粉砂为主,占监测站位的 37.1%;其次为粉砂与粉砂质砂,均占 22.9%;再次为砂,占 17.1%。

(2) 表层沉积物中 Cr、Zn、Pb、Cu、As、Cd、Hg 和 TOC 平均含量分别为(57.6、52.6、18.7、15.3、9.14、0.130、0.0234)mg/kg 和 0.222 %;由于河流排海物质和莱州湾内潮流运动,导致 Cu、Pb、Zn、As、

Cr 和 Cd 基本呈现中部海域含量较高,西部海域高于东部海域的特征,东南部海域 Cd、Hg 与矿产资源的开发相关;7 种重金属含量均符合第一类海洋沉积物质量标准。14.3%的站位属于潜在中生态风险,Cd 为主要潜在生态风险因子。

(3) Cu、Zn 与沉积物粒径、TOC 存在一定的相关关系,研究区域中重金属 Cu、Zn 含量的分布与沉积物粒径和有机碳的含量密切相关。

参考文献:

- [1] Sin S N, Chua H, Lo W, et al. Assessment of heavy metal cations in sediments of Shing Mun River, Hong Kong[J]. *Environment International*, 2001, 26(5/6): 297-301.
- [2] Valdes J, Vargas G, Sifeddine A, et al. Distribution and enrichment evaluation of heavy metals in Mejillones Bay (23°S), Northern Chile: geochemical and statistical approach[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2005, 50: 1558-1568.
- [3] 胡宁静,刘季花,黄朋,等.渤海莱州湾表层沉积物中金属元素分布及环境质量[J]. *海洋学报*, 2012, 34(2): 92-100.
Hu Ningjing, Liu Jihua, Huang Peng, et al. The distribution and risk assessment of metals in surface sediments of the Laizhou Bay in the Bohai Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2012, 34(2): 92-100.
- [4] Rubio B, Pye K, Rae J E, et al. Sedimentological characteristics, heavy metal distribution and magnetic properties in subtidal sediments, Ria de Pontevedra, NW Spain[J]. *Sedimentology*, 2001, 48: 1277-1296.
- [5] Birch G F, Taylor S E, Matthai C. Small-scale spatial and temporal variance in the concentration of heavy metals in aquatic sediments: a review and some new concepts[J]. *Environmental Pollution*, 2001, 113: 357-372.
- [6] Liu W X, Li X D, Shen Z G, et al. Multivariate statistical study of heavy metal enrichment in sediments of the Pearl River Estuary[J]. *Environmental Pollution*, 2003, 121: 377-388.
- [7] 翟萌,卢新卫,黄丽,等.渭河(杨凌-兴平段)表层沉积物中重金属的粒径分布特征及污染评价[J]. *陕西师范大学学报(自然科学版)*, 2010, 38(4): 94-98.
Zhai Meng, Lu Xinwei, Huang Li, et al. Particle size distribution and pollution assessment of heavy metals in the surface sediment from Yangling to Xingping reach of the Wei River[J]. *Journal of Shanxi Normal University (Natural Science Edition)*, 2010, 38(4): 94-98.
- [8] 刘义豪,杨秀兰,靳洋,等.莱州湾海域营养盐现状及年际变化规律[J]. *渔业科学进展*, 2011, 32(4): 1-5.
Liu Yihao, Yang Xiulan, Jin Yang, et al. Distribution and inter-annual variation of nutrients in Laizhou Bay.

- Progress in Fishery Sciences, 2011, 32(4): 1-5.
- [9] 国家海洋局. 2018 年中国海洋生态环境状况公报[R]. 北京: 生态环境部, 2019.
State Oceanic Administration. China Marine Environment Bulletin in 2018[R]. Beijing: State Oceanic Administration, 2019.
- [10] 刘金虎, 宋骏杰, 曹亮, 等. 莱州湾表层沉积物中重金属时空分布、污染来源及风险评价[J]. 生态毒理学报, 2015, 10(2): 369-381.
Liu Jinhua, Song Junjie, Cao Liang, et al. Spatial and temporal distribution, sources and ecological risk assessment of heavy metals in the surface sediments of Laizhou Bay[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2015, 10(2): 369-381.
- [11] 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.
Hu Ningjing, Shi Xuefa, Liu Jihua, et al. Distributions and Impacts of Heavy Metals in the Surface Sediments of the Laizhou Bay[J]. Advances in Marine Science, 2011, 29(1): 63-72.
- [12] 牛燕霞, 杨柳, 张洪, 等. 子牙河干流沉积物重金属分布特征和风险评价[J]. 安全与环境学报, 2014, 14(1): 253-257.
Niu Yanxia, Yang Liu, Zhang Hong, et al. Distribution features and risk assessment of heavy-metal pollutants in the sediments of the main stream of Ziya River[J]. Journal of Safety and Environment, 2014, 14(1): 253-257.
- [13] GB/T12763-2007. 海洋调查规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
GB/T12763-2007. Specifications for oceanographic survey[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007.
- [14] GB17378-2007. 海洋监测规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
GB17378-2007. The specification for marine monitoring[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007.
- [15] HY/T 147-2013. 海洋监测技术规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
HY/T 147-2013. Code of practice for marine monitoring technology[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013.
- [16] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001.
- [17] 迟清华, 鄢明才. 应用地球化学元素丰度数据手册[M]. 北京: 地质出版社, 2007: 96-97.
Chi Qinghua, Yan Mingcai. Hand book of elemental abundance for applied geochemistry[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007: 96-97.
- [18] 徐艳东, 魏潇, 夏斌, 等. 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, 2015, 33(4): 520-528.
Xu Yandong, Wei Xiao, Xia Bin, et al. Potential ecological risk assessment of heavy metals in surface sediment of the eastern Laizhou Bay[J]. Advances in Marine Science, 2015, 33(4): 520-528.
- [19] 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]. 海洋通报, 生态环境学报, 2010, 19(2): 262-269.
Luo Xianxiang, Zhang Rui, Yang Jianqiang, et al. Distribution and pollution assessment of heavy metals in surface sediment in Laizhou Bay[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(2): 262-269.
- [20] 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.
Zheng Yimin, Gao Maosheng, Liu Sen, et al. Distribution patterns and ecological assessment on heavy metals in the surface sediments of Laizhou Bay[J]. Marine Environmental Science, 2015, 34(3): 354-360.
- [21] 赵玉庭, 董晓晓, 王立明, 等. 海洋沉积物重金属生态风险评价方法比较及实例验证-以莱州湾为例[J]. 海洋通报, 2019, 38(3): 353-360.
Zhao Yuting, Dong Xiaoxiao, Wang Liming, et al. Selection and comparison of different methods for ecological risk assessment of heavy metals in the sediments of marine in Laizhou Bay[J]. Marine Environmental Science Bulletin, 2019, 38(3): 353-360.
- [22] Celo V, Babi D, Baraj B, et al. An assessment of heavy metal pollution in the sediments along the Albanian coast[J]. Water Air & Soil Pollution, 1999, 111(1-4): 235-250.
- [23] 鲍永恩, 符文侠. 辽东湾北部沉积物对重金属集散的控 制作用[J]. 海洋学报, 1994, 16(3): 139-142.
Bao Yongen, Fu Wenxia. The controlling effect of sediment on heavy metal distribution in the north of Liaodong Bay[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1994, 16(3): 139-142.
- [24] 李蒙蒙, 王庆, 张安定, 等. 最近 50 a 来莱州湾西—南部潮流动力演变的数值模拟研究[J]. 海洋学报, 2014, 36(5): 68-76.
Li Mengmeng, Wang Qing, Zhang Anding, et al. Study on the evolution of the tidal morphodynamic processes in south-western Laizhou Bay based on numerical simulation in the past 50 years[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2014, 36(5): 68-76.
- [25] 吕婷, 苏博, 王佳莹, 等. 海洋工程影响下莱州湾海域水动力环境变化特征[J]. 海洋环境科学, 2017, 36(4): 571-577.
Lv Ting, Su Bo, Wang Jiaying, et al. The hydrodynamic environment variability of Laizhou Bay response to the marine engineering[J]. Marine Environmental

- Science, 2017, 36(4): 571-577.
- [26] 杜国云, 王庆, 王秋贤, 等. 莱州湾东岸海岸带陆海相互作用研究进展[J]. 海洋科学, 2007, 31(3): 66-71.
Du Guoyun, Wang Qing, Wang Qiuxian, et al. Research advances on the marine-land interaction in east coast of Laizhou Bay[J]. Marine Sciences, 2007, 31(3): 66-71.
- [27] 高立蒙, 姚鹏, 王金鹏, 等. 渤海表层沉积物中有机碳的分布和来源[J]. 海洋学报, 2016, 38(6): 8-20.
Gao Limeng, Yao Peng, Wang Jinpeng, et al. Distribution and sources of organic carbon in surface sediments from the Bohai Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2016, 38(6): 8-20.
- [28] Bilali 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.
- [29] Horowitz A J, Elrick K A. The relation of stream sediment surface area, grain size and composition to trace element chemistry[J]. Applied Geochemistry, 1987, 2(4): 437-451.
- [30] Hooda P S, Alloway B J. Cadmium and lead sorption behaviour of selected English and Indian soils[J]. Geoderma, 1998, 84(1/2/3): 121-134.
- [31] 赵一阳. 中国海大陆架沉积物地球化学的若干模式[J]. 地球化学, 1983, 4: 307-314.
Zhao Yiyang. Some models of sediment geochemistry in continental shelf of the Chinese sea[J]. Scientia Geologica Sinica, 1983, 4: 307-314.
- [32] 王亚梦. 莱州湾南岸典型河口沉积物重金属空间分布特征及来源解析[D]. 济南: 山东师范大学, 2020: 1-2.
Wang Yameng. Spatial distribution characteristics and source analysis of heavy metals in sediments of typical estuaries on the south coast of Laizhou Bay[D]. Jinan: Shandong Normal University, 2020: 1-2.

Distribution characteristics of grain size and heavy metals of sediments in Laizhou Bay

ZHAO Yu-ting, SUN Shan, YOU Li-ping, SU Bo, MA Yuan-qing, WANG Li-ming, QI Yan-min, ZHANG Yun-chang

(Shandong Marine Resource and Environment Research Institute, Shandong Key Lab of Marine Ecological Restoration, Yantai 264006, China)

Received: Aug. 6, 2020

Key words: Laizhou Bay; sediment; grain size; granulometric distribution; heavy metals; ecological risk assessment

Abstract: Based on the geochemical properties of the sediments observed in Laizhou Bay in August, 2019, the temporal and spatial characteristics of granulometric distribution, heavy metals concentration, and organic carbon content in the surface sediments were analyzed. The results showed that the contents of silt and sand were higher than that of clay, and their median diameter was 58.956 μm ; the average concentrations of Cr, Zn, Pb, Cu, As, Cd, and Hg were 57.6, 52.6, 18.7, 15.3, 9.14, 0.130, and 0.023 4 mg/kg, respectively, and the TOC was 0.222%. Due to the river discharge materials and tidal current movement in Laizhou Bay, the concentrations of Cu, Pb, Zn, Cr, and Cd in the central sea area were higher than those in the eastern sea area. Cd and Hg contents in the southeast sea area were related to the development of mineral resources. The potential ecological risk was moderate in 14.3% of the stations studied. Cadmium was determined as the principal ecological risk factor, and its contribution ratio was the highest among the seven studied elements. Pearson's correlation analysis on the environmental factors revealed that sediment grain size and organic carbon content were important factors in the distribution of heavy metals such as copper and zinc.

(本文编辑: 谭雪静)