

顾效源,孔祥淮,王伟,等. 山东丁字湾表层沉积物重金属分布及污染评价[J]. 海洋地质前沿,2019,35(3):13-21.

山东丁字湾表层沉积物重金属分布及污染评价

顾效源^{1,2},孔祥淮³,王伟^{1,2*},赵辉^{1,2},李金鹏^{1,2},汤世凯^{1,2},于剑峰^{1,2},

李亨健^{1,2},史猛^{1,2},强萌麟^{1,2},原帅帅^{1,2},孙韶泽^{1,2}

(1 山东省海洋地质勘查院,山东烟台 264001;2 山东省第三地质矿产勘查院,

山东烟台 264001;3 中国地质调查局青岛海洋地质研究所,青岛 266071)

摘要:通过对丁字湾海域 126 个表层沉积物重金属(Hg、Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、As、Ni)含量的测定及分析,采用潜在生态危害指数法、内梅罗指数法、地质累计指数法等多种评价方法,对研究区海域环境进行评价。结果表明,丁字湾海域表层沉积物中重金属含量主要集中在丁字湾湾口周边海域,Hg、Cd、As、Pb、Cu、Cr、Zn 平均含量分别为 0.02、0.08、8.38、15.31、11.49、60.96、46.42 $\mu\text{g/g}$ 。利用不同的评价方法,可以看出丁字湾海域表层沉积物重金属元素总体呈未污染—轻微污染的现状,这与区内砂质沉积物广泛分布以及不活跃的人类活动密不可分。

关键词:丁字湾;表层沉积物;重金属分布;污染评价

中图分类号:P736.4 **文献标识码:**A **DOI:**10.16028/j.1009-2722.2019.03002

0 引言

近年来,重金属污染问题日益成为关注的焦点,主要是由于重金属具有难降解、易积累、毒性大的特点^[1-4]。由于海岸带地区经济的快速发展,城镇化加速,工矿业和农业活动加剧,生活污水的排放等,这些人为活动使得重金属以河流、地表径流等形式进入滨海水生系统,且在沉积物中得到稳定富集,这部分稳定下来的重金属又有可能通过一系列物理化学反应,再次进入水体,造成“二次污染”^[5-7]。重金属进入海洋环境后,与有机质、铁镁氧化物、硫化物和黏土共存,进而可通过食物

链对人类或其他生物产生毒害。因此,海岸带地区沉积物重金属浓度是该水生生态系统污染的重要指标,了解其分布及污染程度对污染控制及海岸带管理决策具有很重要的意义^[8]。

目前,国内对我国浅海地区(特别是山东青岛胶州湾及周边海域、长江口周边海域等)表层沉积物重金属研究逐步展开,获取了很多一手资料,并取得了显著的成果。例如,通过对胶州湾海底表层沉积物重金属分析,发现其分布极不均匀,重金属含量主要集中在河口三角洲区域。另外,此研究还发现重金属含量与水深、离岸距离等存在一定的关系^[9];对长江口海底表层沉积物的重金属研究发现,其南部海域重金属含量明显高于北部,且离岸越近重金属含量越高,海域环境已受到了不同等级的污染,为下一步环境治理敲响了警钟^[10]。

丁字湾位于山东半岛南部五龙河入海口,地理位置属于即墨市、莱阳市、海阳市三地管辖,面

收稿日期:2018-10-16

作者简介:顾效源(1989—),男,工程师,主要从事近海海洋地质调查及研究工作。E-mail:ggspeed@126.com

* 通讯作者:王伟(1981—),男,高级工程师,主要从事地质矿产、海洋地质调查及研究工作。E-mail:wangwei-2005@sohu.com

积约 380 km²。以往的相关研究并没有重点涉及到丁字湾海域。为了有目的性、针对性地了解丁字湾近海海区沉积物重金属的分布特征及污染程度,此次研究区锁定在丁字湾近海海域及河口周边海域。通过对所采取的 126 个表层沉积物样品进行测试和分析,详细阐述了重金属的分布情况,运用多种评价方法针对该区域沉积物重金属污染现状做出了评价,并得出环境质量评价结论,以期对相关科学研究和政府决策提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域及样品采集

2017 年 5 月在丁字湾海域采集了 126 站海底表层沉积物样品(编号 HB01-126),站位间距 1.5 km×1.5 km,取样采用蚌式取样器,样品重量一般在 2~3 kg,用 DGPS 定位系统定位(图 1)。

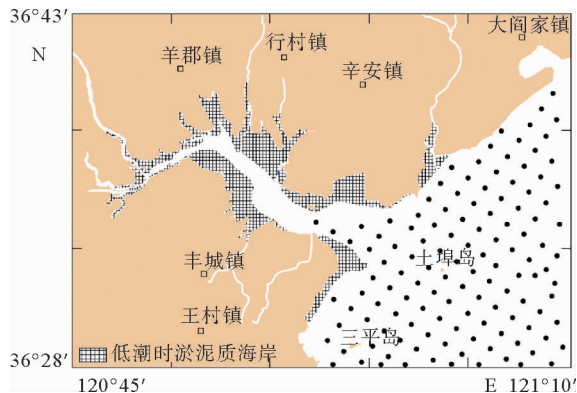


图 1 丁字湾表层沉积物取样站位

Fig. 1 Geographical map and sampling stations

1.2 样品分析

(1) 样品预处理

取 50 g 表层沉积物样品用双重纯水多次洗盐,筛取粒径 < 63 μm 的部分,最后将沉积物烘干、研磨、干燥。样品的采集、保存、处理等均严格执行国标《海洋监测规范》。

(2) 样品前处理

取 0.05 g 预处理样品经 HNO₃-HF-HClO₄ 微波消解,然后倒入 PTFE 坩埚中,再在 300 °C

电热板上蒸至近干时加入 0.1 mL HF,继续加热直至溶液呈黏液状。用 2% 的 HNO₃ 定重至 25 g,再移取 5 g 溶液定重至 20 g。

(3) 重金属元素分析方法

重金属元素 As、Cd、Cr、Cu、Pb、Zn 采用美国安捷伦公司的 Agilent7500C 电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测试,常量元素 Al、Fe 采用美国 PE 公司的 DV4300 型电感耦合等离子发射光谱仪(ICP-AES)测试,同时用平行样和国家标准物质 GB07315 分别控制样品分析的精确性和标准性。重金属元素平行样的相对误差 < 5%,标准物的回收率在 110%~125%;常量元素平行样的相对误差 < 5%,标准物的回收率在 95%~120%。

(4) 粒度分析

粒度数据分析前,首先将样品分样,每份样品称重 30~50 g,然后将烧杯洗净加入 30% 的 H₂O₂ 15 mL 溶液浸泡,直到 24 h 后将沉积物中的有机质除净后,再加入 3 mol/L 的 HCL 稀溶液 5 mL,再等 24 h 后将沉积物中的钙质及碳酸钙物质溶解去除,最后将样品经过多次离心、洗盐。重复上述过程到溶液 pH 到接近 7 为止。最后的步骤需要用超声波震荡分散样品。使用 Mastersizer 2000 型激光粒度仪,仪器测试粒径范围为 0.02~2 000 μm,每次测量的相对误差 < 3%。

1.3 评价方法

对海底表层沉积物中重金属污染评价,目前尚没有统一的标准。为了了解区内沉积物对生态环境的危害程度,分别选取了潜在生态危害指数法、内梅罗综合指数法和地质累积指数法进行分析评价,以期探讨区内沉积物的综合质量。

(1) 潜在生态危害指数法(Hakanson)

潜在生态危害指数法是瑞典科学家 Hakanson^[7]提出的,是目前最为常用的重金属污染评价方法之一,采用的公式为:

$$C_f^i = C^i / C_n; C_d = \sum_i^n C_f^i$$

$$E_r^i = T_r \cdot C_f^i; E_{RI} = \sum_i^n E_r^i = \sum_i^n (T_r \cdot C^i / C_n)$$

式中: C_f^i 为单个重金属的污染系数;

C^i 为样品中金属 i 的实测浓度;
 C_n^i 为金属 i 的背景值;
 C_d 为重金属总体污染程度;
 E_r^i 为单个重金属的潜在生态危害系数;
 T_r^i 为单个重金属的毒性响应系数;
 E_{RI} 为多种重金属潜在生态危害指数。
重金属的背景值采用工业化之前全球海底底质中的最高值,毒性响应系数见表 1。

表 1 重金属背景值和毒性系数							
Table1	Background of heavy metals and toxic coefficient						
重金属	Hg	Cd	As	Pb	Cu	Cr	Zn
背景值	0.25	1	15	70	50	90	175
毒性系数	40	30	10	50	5	2	1

重金属污染评价指标及其与污染程度和生态风险程度的关系如表 2 所示。

表 2 污染程度及生态危害程度分级							
Table 2 The levels of pollution and ecological hazard							
C_f	单个重金属 污染程度	C_d	重金属总体 污染程度	E_r^i	单个重金属 生态危害程度	E_{RI}	重金属总体 生态危害程度
<1	低	<8	低	<40	低	<150	低
1~3	中等	8~16	中等	40~80	中等	150~300	中等
3~6	重	16~32	重	80~160	较重	300~600	重
≥6	严重	≥32	严重	160~320	重	≥600	严重
				≥320	严重		

(2)内梅罗综合指数法(Nemerow Index)
内梅罗指数法(Nemerow Index)也称综合污染指数法,由美国叙拉古大学内梅罗(N. L. Nemerow)提出。主要通过计算内梅罗污染指数和标准指数,与相应的等级标准指数进行对照而进行的评价方法,其计算公式为:
$$P_i = C_i / S_i \tag{①}$$
$$P = \sqrt{(P_{\max}^2 + \bar{P}_i^2) / 2} \tag{②}$$
式中: P_i 为单因子污染指数;
 C_i 为沉积物元素实测值;
 S_i 评价标准(采用《海洋沉积物质量》一类标准);

表 3 沉积物污染评价分级标准			
Table 3 Grading standards of sediment pollution with single element			
评价等级	P	污染程度	污染水平
I	$P \leq 0.7$	安全	清洁
II	$0.7 < P \leq 1$	警戒线	尚清洁
III	$1 < P \leq 2$	轻度污染	轻度污染
IV	$2 < P \leq 3$	中度污染	中度污染
V	$3 < P$	重度污染	重度污染

P 为内梅罗综合污染指数;
 $P_{\max}$ 为样品中各重金属污染系数的最大值;
 $\bar{P}_i$ 为样品中各重金属污染系数的平均值。
单因子污染指数等级分别为: $P_i \leq 1$,未污染;
 $1 < P_i \leq 2$,轻污染; $2 < P_i \leq 3$,中污染; $3 < P_i$,重污染(表 3)。
单因子污染指数只能反映单项重金属元素的污染程度,为了掌握沉积物综合污染现状,利用单因子指数的均值和最大值进行综合计算(见上述公式),从而评价综合状况。

(3)地质累积指数法(I_{geo})
地质累积指数法(I_{geo}),是利用重金属总浓度与背景值的关系来确定重金属污染程度的参数,是 20 世纪 60 年代晚期在欧洲发展起来的广泛用于研究沉积物及其他物质中重金属污染程度的定量指标(表 4),其表达式为:
$$I_{geo} = \log_2 [C_n / 1.5 B_n]$$
式中: C_n 是重金属元素 n 的实测浓度;
 B_n 是背景值(采用《海洋沉积物质量》一类标准)。

表 4 沉积物污染评价分级标准

Table 4 Grading standards of sediment pollution with I_{geo}

评价等级	I_{geo}	污染程度
1	$I_{\text{geo}} \leq 0$	无污染
2	$0 < I_{\text{geo}} \leq 1$	轻度污染
3	$1 < I_{\text{geo}} \leq 2$	偏中污染
4	$2 < I_{\text{geo}} \leq 3$	中度污染
5	$3 < I_{\text{geo}} \leq 4$	偏重污染
6	$4 < I_{\text{geo}} \leq 5$	重度污染
7	$5 < I_{\text{geo}}$	严重污染

2 结果与讨论

2.1 重金属含量与分布

Cr 含量在 22.5~85.8,均值为 60.956,变异系数为 0.218,标准偏差为 13.303(表 5)。高值区在主要集中丁字湾海域外围;低值区主要分布在湾口附近海域。总体看,Cr 在工作区内呈现东

南高,东北低的趋势(图 2)。根据 GB18668—2002《海底沉积物质量》规定元素标准值(Cr 一级国标值为 80 $\mu\text{g/g}$),仅在土埠岛以东局部海域 Cr 含量达国标一级质量标准,其他海域均未超标。

Cu 含量在 3.2~21.5,均值为 11.487,变异系数为 0.405,标准偏差为 4.649 1(表 5)。高值区在主要集中在研究区东部海域;低值区主要分布在丁字湾湾口周边海域。总体看,Cu 在工作区内呈现东部、南部高,西部低的趋势(图 2)。根据 GB18668—2002《海底沉积物质量》规定元素标准值(Cu 一级国标值为 35 $\mu\text{g/g}$),区内均未超标。

Zn 含量在 8.0~76.4,均值为 46.424,变异系数为 0.306,标准偏差为 14.216 6(表 5)。高值区在主要集中在东部及南部海域;低值区主要分布在丁字湾湾口及北部靠岸海域。总体看,Zn 在工作区内呈现东部、南部高,西部低的趋势(图 2)。根据 GB18668—2002《海底沉积物质量》规定元素标准值(Zn 一级国标值为 150 $\mu\text{g/g}$),区内均未超标。

表 5 重金属元素特征统计表

Table 5 Statistic of characteristics of heavy metal elements

特征	Cr	Cu	Zn	As	Cd	Pb	Hg
平均值	60.95	11.48	46.42	8.37	0.08	15.30	0.02
中值	63.00	12.20	49.85	8.09	0.08	15.60	0.02
众数	62.5	3.4	49.2	7.98	0.07	12.5	0.01
标准差	13.30	4.64	14.21	2.30	0.04	3.45	0.01
变异系数	0.21	0.40	0.30	0.27	0.52	0.22	0.43
偏度	-1.21	-0.27	-0.59	2.98	2.05	-0.46	-0.19
峰度	1.37	-0.74	-0.04	17.63	7.28	0.67	-0.49
最小值	22.5	3.2	8.0	3.26	0.02	2.1	0
最大值	85.8	21.5	76.4	24.00	0.30	23.6	0.04

As 含量在 3.26~24.0,均值为 8.375 9,变异系数为 0.276,标准偏差为 2.309 44(表 5)。高值区分布范围很小,仅湾口处有小片海域含量较高;低值区分布广泛,占据研究区绝大部分海域(图 2)。根据 GB18668—2002《海底沉积物质量》规定元素标准值(As 一级国标值为 20 $\mu\text{g/g}$),仅在丁字湾口有一站样品(HB64)含量达国标一级质量标准,其他海域均未超标。

Cd 含量在 0.02~0.3,均值为 0.081 4,变异系数为 0.526,标准偏差为 0.042 82(表 5)。高值区分布范围较小,主要集中在三平岛以北小片海域;低值区分布范围较广,占据研究区绝大部分海域(图 2)。根据 GB18668—2002《海底沉积物质量》规定元素标准值(Cd 一级国标值为 0.5 $\mu\text{g/g}$),区内均未超标。

Pb 含量在 2.1~23.6,均值为 15.306,变异系数为 0.226,标准偏差为 3.4534(表 5)。高值

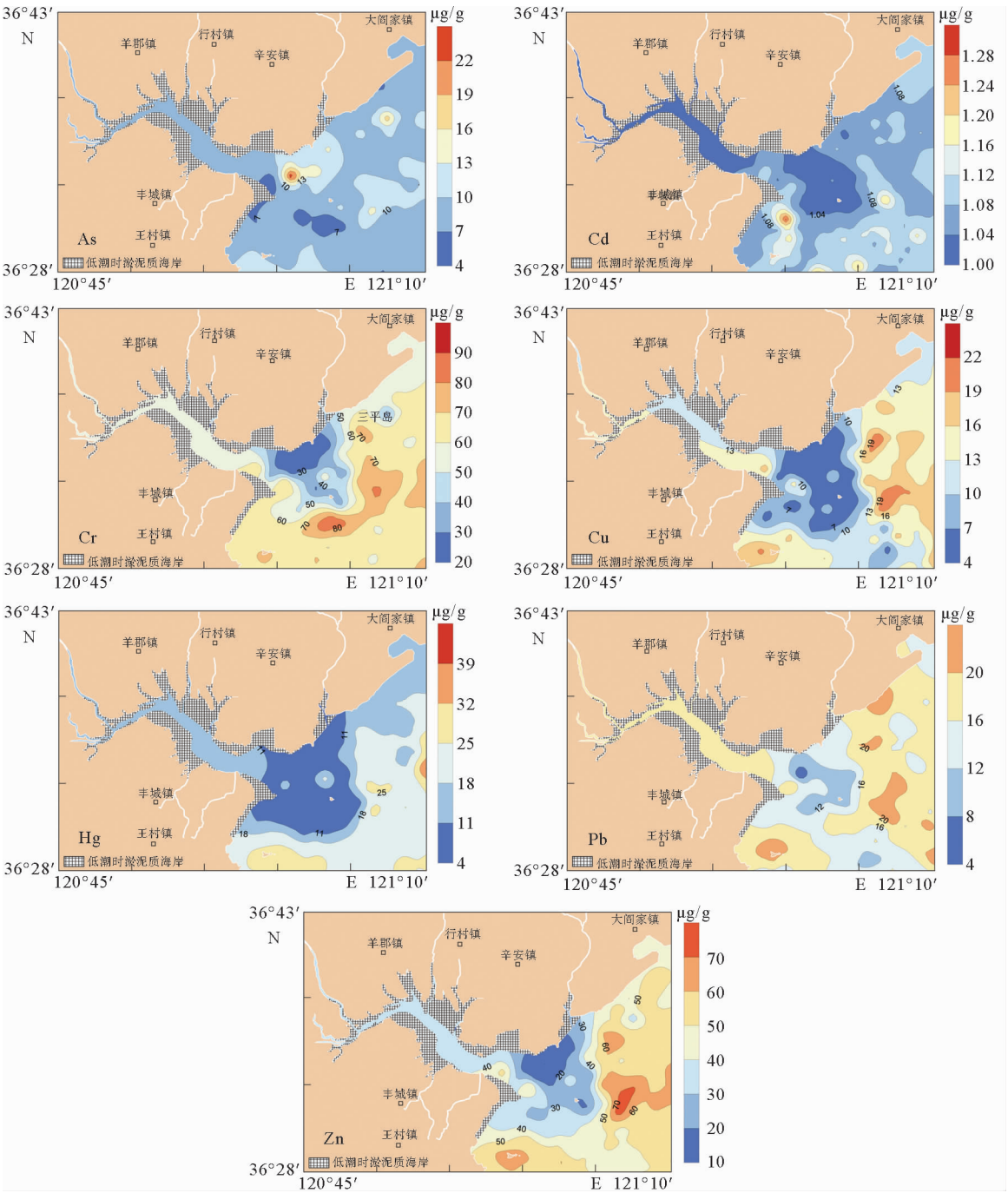


图 2 研究区重金属元素地球化学分布

Fig. 2 Distribution of heavy metals in the surface sediments

区在主要集中在东部及南部海域;低值区主要分布在湾口及东南部海域。总体看,Pb 在工作区内呈现东北、西南高,中部及东南低的趋势(图 2)。根据 GB18668—2002《海底沉积物质量》规定元素标准值(Pb 一级国标值为 60 $\mu\text{g/g}$),区内均未超标。

Hg 含量在 0.003 9~0.039 3,均值为 0.016 717,变异系数为 0.438,标准偏差为 0.007 322 2 (表 5)。高值区在主要集中在东部及南部海域、高值区覆盖范围很小;低值区主要分布在湾口周边海域、分布范围较广。总体看,Hg 在工作区内呈现东部、南部高,西北低的趋势(图 2)。根据

GB18668—2002《海底沉积物质量》规定元素标准值(Hg 一级国标值为 0.2 μg/g),区内均未超标。

2.2 重金属评价结果

本次采用潜在生态危害指数法、内梅罗指数法、地质累计指数法等多种评价方法,对 7 种重金属元素进行评价。

2.2.1 潜在生态危害指数评价结果

通过对潜在生态危害指数的计算评价来看(表 6),区内沉积物未发现存在潜在生态危害程度中等及以上的样品,重金属元素总体处于低危害程度。仅在丁字湾口的 HB064 站位及研究区北部的 HB011 站位存在 As 元素中等污染(其单元素污染系数分别为 1.15 和 1.6),其他区域各

项污染程度均为低污染。同时,可以看出单元素重金属污染程度由高到低依次为 Cr>As>Zn>Cu>Pb>Cd>Hg,而潜在生态污染程度由高到低排序则为 As>Hg>Cd>Cr>Cu>Pb>Zn。某些单元素虽然污染系数低,但其潜在生态危害程度却较高,例如 Cd 和 Hg,在单元素重金属污染程度排序中靠后,但在潜在生态危害排序中靠前,这主要是由于各元素的毒性系数差异性造成的,毒性系数越高,其潜在生态危害程度越大。

2.2.2 内梅罗指数法评价结果

采用内梅罗指数法对研究区单因子污染指数和综合污染程度的统计分析,可以看出研究区内重金属总体呈清洁,仅有少量的站位存在 Cr、As 元素的轻污染状况(表 7)。

表 6 重金属污染系数及生态危害指数
Table 6 Pollution coefficient and ecological hazard index

样品数 (件)	重金属污染系数(C_i^p)							总体污染 系数(C_d)	污染 程度
	Cr	Cu	Zn	As	Cd	Pb	Hg		
126	0.25~0.95	0.06~0.43	0.05~0.44	0.22~1.60	0.02~0.30	0.03~0.34	0.02~0.16	1.09~3.09	低
平均值	0.68	0.23	0.27	0.56	0.08	0.22	0.07	2.10	
样品数 (件)	重金属潜在生态污染系数(E_i^p)							生态危害 指数(E_{RI})	污染 程度
	Cr	Cu	Zn	As	Cd	Pb	Hg		
126	0.50~1.91	0.32~2.15	0.05~0.44	2.17~16.00	0.60~9.00	0.15~1.69	0.62~6.29	5.99~23.21	低
平均值	1.35	1.15	0.27	5.58	2.44	1.09	2.67	14.56	

表 7 内梅罗指数法特征统计表
Table 7 Statistics of the Nemerow index

		Cr	Cu	Zn	As	Cd	Pb	Hg
单因子 污染程度	范围	0.28~1.07	0.09~0.61	0.05~0.51	0.16~1.20	0.04~0.60	0.04~0.39	0.02~0.20
	均值	0.76	0.33	0.31	0.42	0.16	0.26	0.08
	污染水平	未—轻污染	未污染	未污染	未—轻污染	未污染	未污染	未污染
综合 污染程度	范围	0.83~0.96	0.41~0.49	0.37~0.43	0.43~0.90	0.16~0.45	0.26~0.33	0.12~0.15
	均值	0.92	0.46	0.41	0.68	0.42	0.31	0.13
	污染水平	尚清洁	清洁	清洁	尚—清洁	清洁	清洁	清洁

(1)单因子污染指数中,Cr 在 5 个站位(HB040、HB048、HB082、HB083、HB093)的样品存在轻污染现象,污染指数值在 1.00~1.07,占所有站位的 3.99%。As 仅有 1 个站位(HB064)的样品存在轻污染,污染指数为 1.2。其他元素污染指数均<1,为未污染状态。

(2)综合污染指数中,研究区整体污染水平为尚清洁或清洁,污染程度很低。

2.2.3 地质累积指数法评价结果

利用地质累积指数法对研究区的 7 种重金属元素进行统计分析(表 8),可以看出研究区内重金属元素地质累积指数均<1,无污染状况。

表 8 重金属元素特征统计表
Table 8 Statistics of Igeo of heavy metal elements

Igeo	Cr	Cu	Zn	As	Cd	Pb	Hg
范围	-2.42~-0.48	-4.04~-1.29	-4.81~-1.56	-3.20~-0.32	-5.23~-1.32	-5.42~-1.93	-6.27~-2.93
均值	-1.02	-2.35	-2.37	-1.88	-3.38	-2.60	-4.36
污染程度	无污染	无污染	无污染	无污染	无污染	无污染	无污染

2.3 重金属分布的影响因素分析

评价结果显示,研究区重金属含量偏低,污染程度很低,与此区域不活跃的人类活动有很大关系。但是,沉积物粒度、水动力条件以及元素自身性质等,都会对重金属分布及富集产生影响。本文将从沉积物粒度等方面予以重点分析。总体来讲,通过粒度分析资料,可以看出丁字湾海域砂层分布较广,主要以砂及粉砂为主,且含有较多的粗砂层(图 3)。我们可以大致认为此研究区由于受入海河流冲刷的影响,海洋动力环境较强,特别是丁字湾湾口附近海域,粒度分选一般,不利于重金属的富集,有利于重金属污染物的疏散。

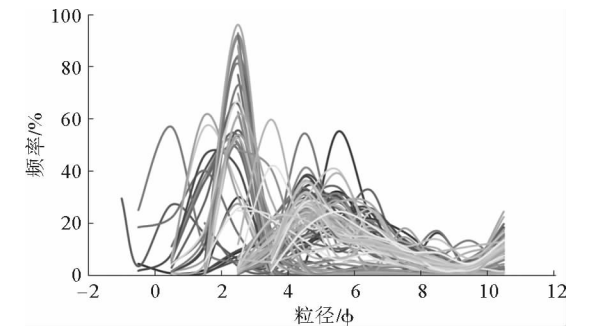


图 3 粒径分析图
Fig.3 Grain size distribution

赵一阳和鄢明才^[11]的元素粒度控制律指出:绝大多数元素含量随沉积物粒度变细而升高,一些元素的含量随沉积物粒度变细而降低,个别元素的含量随沉积物粒度变细先升后降,在中等粒度的粉砂中出现极大值。在自然界中,环境要素与化学要素之间以及诸化学要素间存在相互关系,并存在统计相关关系,因而探讨元素的相关性有助于揭示控制元素分布的主要因素。同一区域具有相关性的元素,也指示了其具有共源性^[12]。

为了定量分析丁字湾海底表层沉积物重金属之间或重金属与粒度之间的相互关系,采用 SPSS 进行 Pearson 相关分析。划定相关系数>0.6 为强相关;0.5~0.6 为中度相关;0.4~0.5 为弱相关;<0.4 为不相关。

相关性分析结果(表 9)表明:各重金属元素除 As 外,其他元素相互之间基本均在 0.01 水平(双侧)上显著相关,As 与 Pb、Cr 在 0.01 水平(双侧)上显著相关。对照丁字湾海域沉积物类型分布图(图 4)(分类参照《海岸带地质环境调查评价规范》中不含砾碎屑的沉积物分类方法,分黏土、粉砂、砂 3 类)和重金属元素分布图,可知,Hg、Cu、Pb、Zn、Cd、Cr 等重金属元素的高值区与泥的分布区相一致。综上结果表明,Hg、Cu、Pb、

表 9 表层样重金属元素 Pearson 相关系数表
Table 9 Pearson correlation coefficient of heavy metals in surface sediments

	Cr	Cu	Zn	As	Cd	Pb	Hg	砂	粉砂	黏土
Cr	1									
Cu	.611**	1								
Zn	.809**	.890**	1							
As	-.296**	.070	-.056	1						
Cd	.412**	.328**	.413**	-.042	1					
Pb	.601**	.688**	.709**	-.240**	.217*	1				
Hg	.610**	.705**	.821**	.039	.424**	.417**	1			
砂	-.576**	-.786**	-.849**	.021	-.389**	-.497**	-.860**	1		
粉砂	.481**	.676**	.716**	-.067	.367**	.459**	.710**	-.884**	1	
粘土	.612**	.734**	.831**	.059	.360**	.465**	.802**	-.825**	.605**	1

注:*表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关,**表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

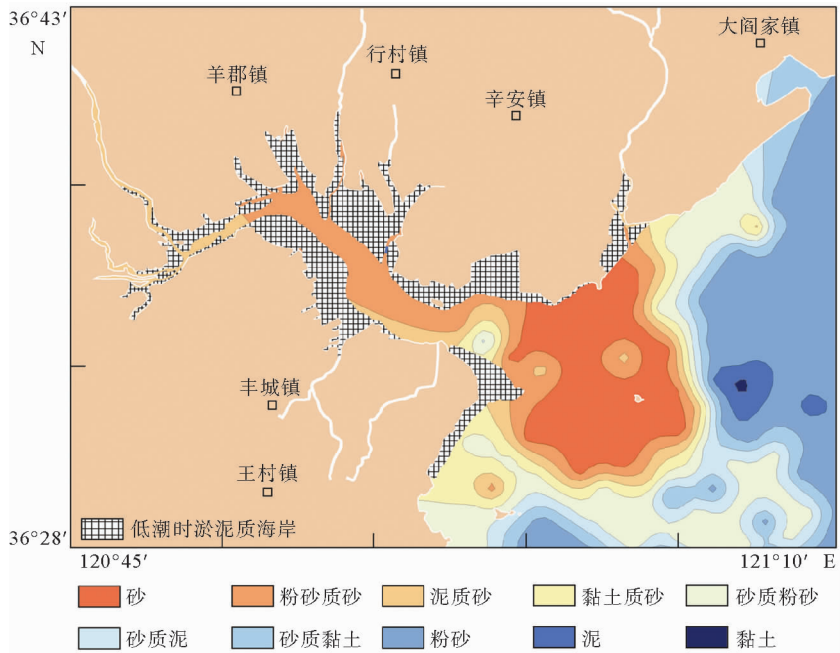


图 4 粒径分布图

Fig. 4 Bottom sediment distribution map

Zn、Cd、Cr 等元素主要集中在细颗粒吸附区域，推断粒度为控制 Hg、Cu、Pb、Zn、Cd、Cr 等富集的重要因素。

相关分析结果得出，As 与砂、泥的相关性较差，表明其分布与粒度关系并不明显。但是它们可能具有同源性。通过重金属含量分布特征可以看出此元素的高值区均集中在湾口——周期性出露的沙洲上，推测这是由于周围居民区垃圾排放及码头（倾倒区及鱼池、航道疏浚物）排污^[13]，重金属经入海河流输送并在沙洲附近降能、聚集，同时经沿岸流和环流搬运、沉积^[14]，导致此区域重金属含量较高。

3 结论

- (1) 丁字湾海域表层沉积物总体质量较好，重金属元素满足《海底沉积物质量》(GB18668—2002)一类标准。各重金属元素潜在生态污染程度中危害次序为 As>Hg>Cd>Cr>Cu>Pb>Zn。
- (2) 采用潜在生态危害指数法进行评价，发现研究区内重金属总体污染系数和生态危害指数均为低污染，仅有 2 站位样品存在 As 元素中等污染的现象。

(3) 通过内梅罗指数法评价结果来看，单因子污染指数中有 5 个站位存在 Cr 元素轻污染现象；综合污染指数中，整体污染水平为尚清洁或清洁，污染程度很低。

(4) 利用地质累积指数法进行评价，研究区内沉积物重金属均未污染。

(5) 利用不同的评价方法，可以看出丁字湾海域表层沉积物重金属元素总体呈未污染—轻微污染的现状，这与区内良好的生态环境和不活跃的人类活动密不可分。

(6) Hg、Cu、Pb、Zn、Cd、Cr 等重金属元素的含量与分布特征受沉积物粒度影响较大，而元素 As 的富集规律并不明显。由于研究区海底沉积物以砂质为主，不利于上述重金属元素的富集，因此海域底质生态环境质量较好。

参考文献：

[1] Bastami K D, Afkhami M, Mohammadizadeh M, et al. Bioaccumulation and ecological risk assessment of heavy metals in the sediments and mullet *Liza klunzingeri* in the northern part of the Persian Gulf [J]. Marine Pollution Bulletin, 2015, 94(1-2): 107-115.

[2] Förstner U, Wittmann G T W. Metal Transfer Between Solid and Aqueous Phases [M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 1979.

- [3] Bastami K D, Bagheri H, Kheirabadi V, et al. Distribution and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments along southeast coast of the Caspian Sea [J]. Marine Pollution Bulletin, 2014, 81(1): 262-267.
- [4] Yamada M, Senna S, Fujiwara H. The distribution and speciation of trace metals in surface sediments from the Pearl River Estuary and the Daya Bay, Southern China [J]. Marine Pollution Bulletin, 2010, 60(8): 1364-1371.
- [5] Pekey H. Heavy metal pollution assessment in sediments of the Izmit Bay, Turkey [J]. Environmental Monitoring & Assessment, 2006, 123(1-3): 219-231.
- [6] Neşer G, Kontas A, Ünsalan D, et al. Heavy metals contamination levels at the Coast of Aliğa (Turkey) ship recycling zone [J]. Marine Pollution Bulletin, 2012, 64(4): 882-887.
- [7] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001.
- [8] 万 群, 李 飞, 祝慧娜, 等. 东洞庭湖沉积物中重金属的分布特征、污染评价与来源辨析 [J]. 环境科学研究, 2011, 24(12): 1378-1384.
- [9] 刘珊珊, 张 勇, 毕世普, 等. 青岛近海底质沉积物重金属元素分布特征及环境质量评价[J]. 海洋环境科学, 2015, 34(6): 891-897.
- [10] 盛菊江, 范德江, 杨东方, 等. 长江口及其邻近海域沉积物重金属分布特征和环境质量评价[J]. 环境科学, 2008, 29(9): 2405-2412.
- [11] 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.
- [12] 刘文新, 李向东. 深圳湾水域中重金属在不同相间的分布特征[J]. 环境科学学报, 2002, 22(3): 305-309.
- [13] 余运勇, 王 剑, 王艳华, 等. 南黄海海洋表层沉积物中重金属的分布特征及潜在生态风险评价[J]. 海洋环境科学, 2011, 30(5): 631-635.
- [14] 夏 鹏, 臧家业, 王湘芹, 等. 连云港近岸海域表层沉积物中重金属的地球化学特征及其源解析[J]. 海洋环境科学, 2011, 30(4): 520-524.
- [15] 徐丹亚, 赵保仁. 青岛-石岛近海反气旋中尺度旋涡存在证据及数值模拟[J]. 海洋学报, 1999, 21(2): 19-26.
- [16] 郑 琳, 崔文林, 贾永刚. 青岛海洋倾倒区海水水质模糊综合评价[J]. 海洋环境科学, 2007, 26(1): 38-41.
- [17] 丁喜桂, 叶思源, 高宗军. 近海沉积物重金属污染评价方法[J]. 海洋地质动态, 2005, 21(8): 31-36.
- [18] 丁喜桂, 叶思源, 鲁 静. 浙江省近岸海域表层沉积物重金属分布特征及地球化学分区[J]. 海洋地质动态, 2010, 26(12): 1-8.
- [19] 吴建政, 余晓玲, 鲍 鹏, 等. 芝罘湾近期沉积物中重金属元素记录[J]. 中国海洋大学学报, 2006, 36(1): 141-144.
- [20] 顾效源, 鲁青原, 叶思源, 等. 黄河三角洲进积与滨海湿地地质环境演替模式[J]. 地质论评, 2016, 62(3): 682-692.

DISTRIBUTION AND ENVIRONMENT ASSESSMENT OF HEAVY METALS IN THE SEDIMENTS OF DINGZI BAY, SHANDONG PROVINCE

GU Xiaoyuan^{1,2}, KONG Xianghuai³, WANG Wei^{1,2*}, ZHAO Hui^{1,2}, LI Jinpeng^{1,2},
TANG Shikai^{1,2}, YU Jianfeng^{1,2}, LI Hengjian^{1,2}, SHI Meng^{1,2}, QIANG Menglin^{1,2},
YUAN Shuaishuai^{1,2}, SUN Shaoze^{1,2}

(1 Shandong Marine Geological Survey, Yantai 264001, Shandong, China;

2 No. 3 Exploration Institute of Geology and Mineral Resources, Yantai 264001, Shandong, China;

3 Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China)

Abstract: Based on the concentrations of heavy metals (Hg, Cu, Pb, Zn, Cd, Cr, As, Ni) of 126 surface sediments collected from Dingzi Bay, Shandong province, the method of ecological hazard index is used in this paper to evaluate the pollution of sediments. The content of heavy metals and the distribution patterns and pollution status of the surface sediments are discussed. Results show that the average contents of Hg, Cd, As, Pb, Cu, Cr and Zn in the surface sediments of Dingzi Bay are 0.02, 0.08, 8.38, 15.31, 11.49, 60.96 and 46.42 $\mu\text{g/g}$, respectively, indicating that the ecological hazard of the area is limited in a reasonable range. This is the first time to evaluate the environmental quality objectively by heavy metals in Dingzi Bay according to the local needs. As an important contribution it may serve the local economic construction and marine ecological civilization.

Key words: Dingzi Bay; sediment; heavy metals distribution; pollution assessment