



DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20160305

渤海湾西部海域底质特征及其沉积环境分析

官少军¹, 赵卫¹, 乔吉果¹, 王飞飞², 李稳¹

(1. 天津市海洋地质勘查中心, 天津 300170; 2. 青岛海洋地质研究所, 青岛 266071)

摘要: 对渤海湾西岸研究海域的 39 个底质沉积物样品进行了分析, 对其类型和参数的分布规律进行了总结; 采用 Flemming 法, 探讨了研究区海域底质沉积物的沉积环境动力规律; 通过对粒度参数矢量化的研究, 探索了沉积物的运移趋势; 并结合沉积物的黏土矿物特征, 进行了物质来源的分析. 研究表明: 研究区底质主要有 4 种类型, 砂质粉砂、粉砂、砂质泥、泥, 平均粒径 Φ 值为 6.36~7.57, 具有从北向南并由岸至海逐渐变细的特征, 整体分选性较差. 通过与几条入海河流沉积物黏土矿物特征的对比, 发现研究区沉积物样品的投影与海河、蓟运河的投影基本一致, 属于海河型沉积物. Flemming 三角图式法反映出研究区海域沉积动力相对较弱, 而粒度输运趋势分析揭示了渤海湾西部海域表层沉积物的净输运方向为由四周趋向中心.

关键词: 表层沉积物; 粒度; 沉积环境; 趋势分析; 渤海湾西部

中图分类号: P76 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6510(2017)03-0050-08

Characteristics of Western Bohai Bay Sea Bottom Sediment: Sedimentary Environment Analysis

GONG Shaojun¹, ZHAO Wei¹, QIAO Jiguo¹, WANG Feifei², LI Wen¹

(1. Tianjin Exploration Center of Marine Geology, Tianjin 300170, China;
2. Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China)

Abstract: The grain size of the 39 surface sediment samples taken from the Western Bohai Bay are studied for sediment types and the distribution patterns of grain size parameters. By using the method of Flemming triangular diagram, the sedimentary environment of surface sediments in the area is analyzed. By studying the grain size parameter vector, the transport trend is explored. Combined with the characteristics of clay minerals, the material source of the sediment is analyzed. The results show that there are mainly sandy silt, silty sand, sandy mud and mud in the studied area. The Φ value of the mean grain size is 6.36-7.57, and sorting is poor in the whole area. Compared with the characteristics of clay minerals in several rivers of the studied area, the projection of samples is basically the same as that in Haihe River and Jiyunhe River which belongs to the type of sediment of Haihe River. Relatively weak depositional dynamics in the area is detected with Flemming triangular diagram method, and the Gao-Collins "trend analysis" indicates that the net transport direction of the seabed sediment is toward the center of the bay.

Key words: surface sediment; grain size; depositional environment; trend analysis; Western Bohai Bay

粒度作为海洋表层沉积物的一项重要属性, 可以通过粒度分析推测沉积物的运移规律、物质来源、水动力等重要信息^[1]. 结合沉积物粒度特征、粒级参数及不同图解形式可以反演沉积物的输运方式并判断

其沉积环境^[2].

针对研究区海域底质沉积物类型及其沉积环境特征, 前人已做过较多的工作, 并对底质沉积物的粒度类型与沉积混合动力特征取得了初步认识, 发现渤

收稿日期: 2016-09-06; 修回日期: 2017-01-05

基金项目: “天津市滨海新区近海海洋地质环境调查与评价”项目(国土房任[2013]17号); “天津港以南海域全新世以来沉积记录研究”项目(国土房任[2016]12号)

作者简介: 官少军(1982—), 男, 山东昌邑人, 工程师, gongtao0904@163.com

海湾西部沉积物粗细组分混合与区内环流输运有关^[3-4],本次研究在此基础上分析了表层沉积物的净输运规律及物源特征。

研究区海域的现代沉积物主要来源于陆源碎屑物,蓟运河、独流减河、海河等多条河流在此入海,以天津港航道为界,位于海域南侧的古黄河、以及北侧的古滦河携带的物质与其他入海河流带入的泥沙一起,在海流、海上工程人为活动等相互作用下形成研究区内的现代表层沉积物。随着填海造陆、港口以及航道建设等大规模经济活动的加剧,使得研究区海域底质类型、分布特点发生了一定的改变,造成了研究区海域底质沉积环境的分布格局。本次分析将利用渤海湾西部海域的底质沉积物样品,测试其粒度组分,得到了沉积物的类型及其相关参数,并结合黏土矿物组合分析,讨论物质来源以及水动力条件对现代沉积物运移趋势及其分布格局的影响。

1 样品及其处理方法

研究材料依托天津市海洋地质勘查中心“天津市滨海新区近海海洋地质环境调查与评价”项目于2014年夏季取得,共39个表层站位,站位分布如图1所示。

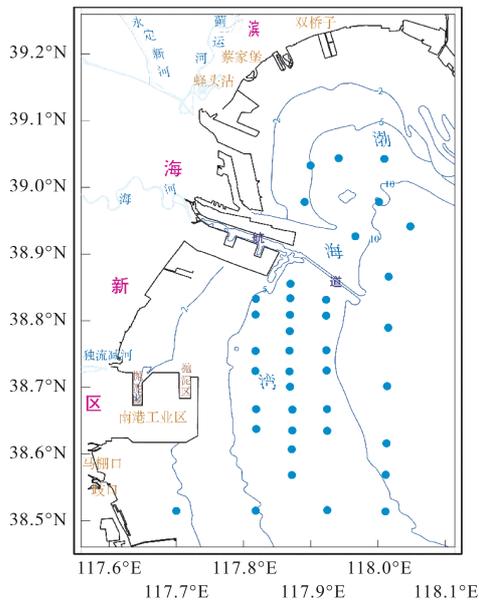


图1 研究区样品站位分布图

Fig. 1 Locations of samples in the studied area

利用箱式取样器获得沉积物后,取表层0~10 cm样品保存以备后续测试分析。样品测试在青岛

国家海洋局第一海洋研究所海洋环境测试中心完成,操作规范以《海洋调查规范》为准,即采取适量湿度较大的沉积物样品,加入一定量标准的H₂O₂溶液和HCl溶液去除贝壳碎屑与杂质的干扰,利用离心机清洗1~2次。混入适量去离子水,利用超声波仪,充分分散后进行测试。所用的测试仪器为Mastersizer型激光粒度仪,仪器测试范围为0.02~2 000 μm,通过重复测试,所得到的测试结果误差不大于2.00%。

2 结果

2.1 沉积物类型特征

调查区海域表层沉积物类型图如图2所示,样品的类型特征数据见表1。

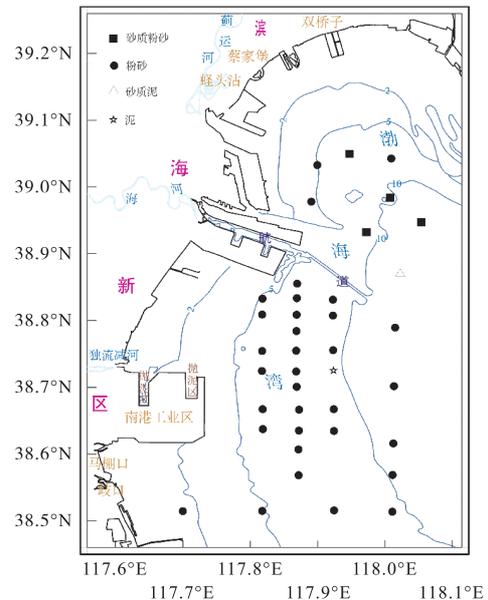


图2 研究区底质沉积物类型图

Fig. 2 Categories of surface sediment in the studied area

沉积物根据“Folk法”进行命名与分类^[5]。结合命名的原则,研究区内表层沉积物可分为4类,粉砂、砂质粉砂、砂质泥、泥,其中以粉砂为主。具体特征描述如下:

粉砂:该沉积物类型在研究区内分布面积最广,遍布于整个研究区海域,在所有样品中比例最高,达到了84.62%。其中,粉砂质量分数的平均值为70.45%,砂的质量分数平均值为1.45%,个别站位砂的质量分数甚至为零;黏土质量分数的范围为22.66%~33.29%。

表 1 研究区海域表层沉积物类型及组分含量

Tab. 1 Types and components of surface sediment in the studied area

类型	所占份额	特征值	w(砂)/%	w(粉砂)/%	w(黏土)/%
粉砂	84.62%	最大值	9.89	74.23	33.29
		最小值	0.00	65.17	22.66
		平均值	1.45	70.45	28.10
砂质粉砂	10.26%	最大值	18.21	68.08	24.36
		最小值	10.80	59.90	20.04
		平均值	13.63	63.86	22.51
砂质泥	2.56%	—	14.19	57.10	28.72
泥	2.56%	—	0.00	65.13	34.87

注：砂质泥、泥分别只出现在一个调查站位。

砂质粉砂：主要位于研究区海域北部，是底质沉积物主要类型之一，在所有站位中所占比例为 10.26%。砂质量分数为 10.80% ~ 18.21%，变化范围不大；粉砂质量分数为 59.90% ~ 68.08%；黏土质量分数的平均值为 22.51%。

砂质泥：仅在天津港航道北侧的 1 个站位出现。样品的砂质量分数为 14.19%，粉砂质量分数为 57.10%，黏土质量分数为 28.72%。

泥：泥质沉积只出现在研究区南港工业区以东 10 海里处，仅 1 个调查站位显示该组分。

2.2 粒度组分特征

研究区海域底质沉积物根据粒径大小可分为黏

土 (< 0.004 mm)、粉砂 (0.004 ~ 0.063 mm)、砂 (0.063 ~ 2.000 mm) 3 个粒度组分。利用 Mapgis “距离幂函数反比加权网格化” 插值方法，对各粒度组分的数据进行预处理、异常值剔除，成平面等值线图，原始数据网格化与取样精度 (3 km × 3 km) 一致，更加准确、直观。研究区海域底质沉积物粒度组分含量分布如图 3，粒度组分特征数据见表 2。

从图 3 可以看出，研究区海底表层各类沉积物的分布带有明显的斑块状特征，但是从整个研究区域来看，具有一定的规律性。表层沉积物粒径的分布特征，北部比南部粗，近岸比远海要粗，具有从北向南，由岸至海逐渐变细的特征。

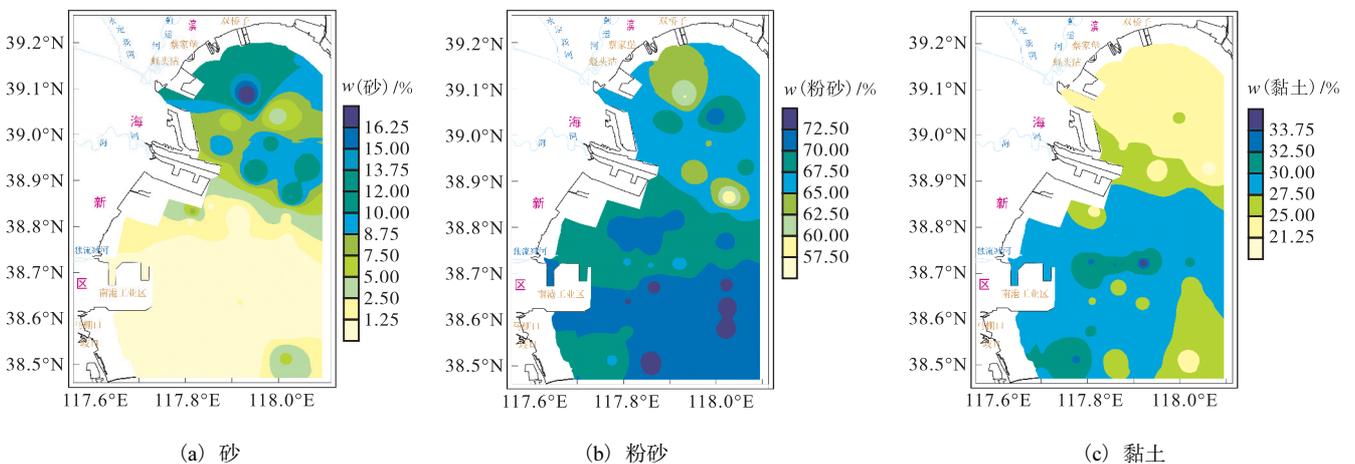


图 3 研究区海域底质沉积物粒度组分含量分布

Fig. 3 Content distribution of grain size fractions in the sediment of the studied area

砂粒级 (Φ 值为 0 ~ 4)，即粒径为 0.063 ~ 2.000 mm 的沉积物组分。从图 3(a) 和表 2 可以看出，研究区砂含量组分的分布特征与沉积物类型对应关系很好。沉积物砂含量高值区主要位于天津港以北海域，该区域砂含量平均质量分数约 11.00%，其中有 7 个站位大于 5.00%，5 个站位大于 10.00%，最高值达到 18.21%。砂粒组分高低值区的分界线为

10.00% 等值线。天津港航道以南的区域，砂粒级组分的质量分数相对较低，平均值为 0.90%，最高值为 9.00%，部分站位的沉积物不含砂粒组分。研究区海域的南北砂含量分布差异较大，航道区内的砂质粉砂覆盖区域，大部分区域条带状分布，局部呈鞍状分布。北部砂质区受入海河流的影响，砂粒级别组分质量分数较高，随着水深加深，未呈现规律性的变化，

基本不受水深的影响。

表 2 研究区表层沉积物粒级组分特征

Tab. 2 Grain size fractions of the sediments in the studied area

粒级组分	特征值	w/%
砂	最大值	18.21
	最小值	0.00
	平均值	2.99
粉砂	最大值	74.20
	最小值	57.10
	平均值	69.30
黏土	最大值	34.87
	最小值	20.62
	平均值	27.70

粉砂粒级(Φ 值为 4~8),即粒径为 0.004~0.063 mm 的组分,研究区粉砂粒级组分质量分数在 57.10%~74.20%,平均值为 69.30%,是研究区内分布最广泛的组分。从图 3(b)和表 2 可以看出粉砂质量分数由南至北逐渐减小,南港工业区以东海域为粉砂含量高值区,质量分数基本高于 70.00%。粉砂粒级组分高低值区的分界线为 67.50% 等值线。研究区南部海域的粉砂粒级组分,与水深有密切联系,随水深加深而增大,个别位于航道区的站位呈点状低值分布,推测为受到航道清淤及海洋抛泥工程的影响。研究区北部海域为粉砂粒级的低值分布区,质量分数在 60.00% 以下。总体来说,粉砂组分质量分数与砂级组分含量的分布规律相反,粉砂含量自天津港航道区往南逐渐增加,水深对于沉积物中砂含量的影响较小。

黏土粒级(Φ 值 >8),即粒径 <0.004 mm 的组分。从图 3(c)和表 2 可以看出,研究区黏土质量分数总体上较高,平均质量分数在 27.70%,所有站位的质量分数均在 20.00% 以上。黏土与粉砂同属于细颗粒物,因此分布特点有相似之处。黏土质量分数高值区主要分布于细粒沉积物区,特别是在航道区与南部抛泥区,由于抛泥形成泥堤的阻碍作用,周围的黏土组分质量分数相对较高,最高可达 34.87%。

从以上砂、粉砂、黏土粒级组分的质量分数平面分布图可以发现,粉砂是研究区海域底质沉积物的优势组分,平均质量分数达到了 69.30%。砂质量分数较低,最高值仅为 18.21%,均值 2.99%,最低值为零,且高值范围区很小。黏土质量分数比较稳定,虽然最高质量分数仅为 34.87%,但是所有站位的质量分数不低于 20.00%。砂质量分数与粉砂和黏土质量分数呈负相关,当砂含量高时,粉砂和黏土含量就低;反

之,当砂粒组分质量分数低时,粉砂和黏土粒级组分质量分数就相应的高。从整个研究区来看,粒级组分的质量分数平面分布趋势与调查区底质类型(黏土质粉砂)特征是吻合的,但三者的分布特征,个别区域并不符合常规的沉积特点,如海域北部随着离岸距离的加大,粒度反而变粗。这种分布特征可能受调查区沉积环境的影响,砂质区与航道区的沉积环境有明显的差异,表明北部是海河水下三角洲,随着海岸的侵蚀后退,水下表层沉积物经过长期的搅动悬浮作用,细粒物质随潮流向东南方向运送,使水下三角洲的物质逐渐粗化。

2.3 粒度参数特征

渤海湾西部海域底质沉积物粒度参数分布如图 4 所示,样品粒度参数^[6]数据见表 3,成图方法与粒级组分等值线图的绘制一致,不再赘述。

平均粒径能够代表沉积物粒度分布的总体趋势,也能反映沉积过程中的动能变化和物质来源^[7]。研究区海域底质沉积物的平均粒径 Φ 值为 6.36~7.57,均值为 7.11。如图 4(a)所示,整体上,研究区表层沉积物的平均粒径都较细;相对较粗的沉积物主要分布在北部塘沽海域,天津港主航道以北,与沉积物中砂质量分数较高的区域相对应。研究区内由南向北海域,表层沉积物的平均粒径值有逐渐递减的趋势,这与海域的水动力条件、物源等因素的影响有关。

分选系数为 1.42~1.97,均值 1.58。如图 4(b)所示,沉积物的分选系数值变化较小,整体分选性较差。分选系数较大的区域位于天津港主航道以北,呈点状分布,与砂粒级相对富集的区域分布范围相当,表明沉积物的主要粒级不突出,分选性较差,这与研究区内沉积物的物源比较复杂相关。

偏态在某种程度上可以判别沉积物粒径分布曲线是否对称,反映沉积环境下粒度的被改造程度。研究区以粉砂为主,偏态值为-0.74~1.25,平均值为 1.04,主要是正偏与对称态,只有 2 个站位的样品测得结果为负偏。如图 4(c)所示,正偏及极正偏的分布面积最大,遍及整个海域,除了中部区域,这与填海造陆、航道开挖等有关,反映了沉积动力变化或者异源物质的混入。

峰态值区间为 1.86~2.47,均值 2.06。如图 4(d)所示,研究区内表层沉积物粒度峰态值均属于尖锐型,沉积物具有双峰形态,物质来源的不同可能造成这种结果。

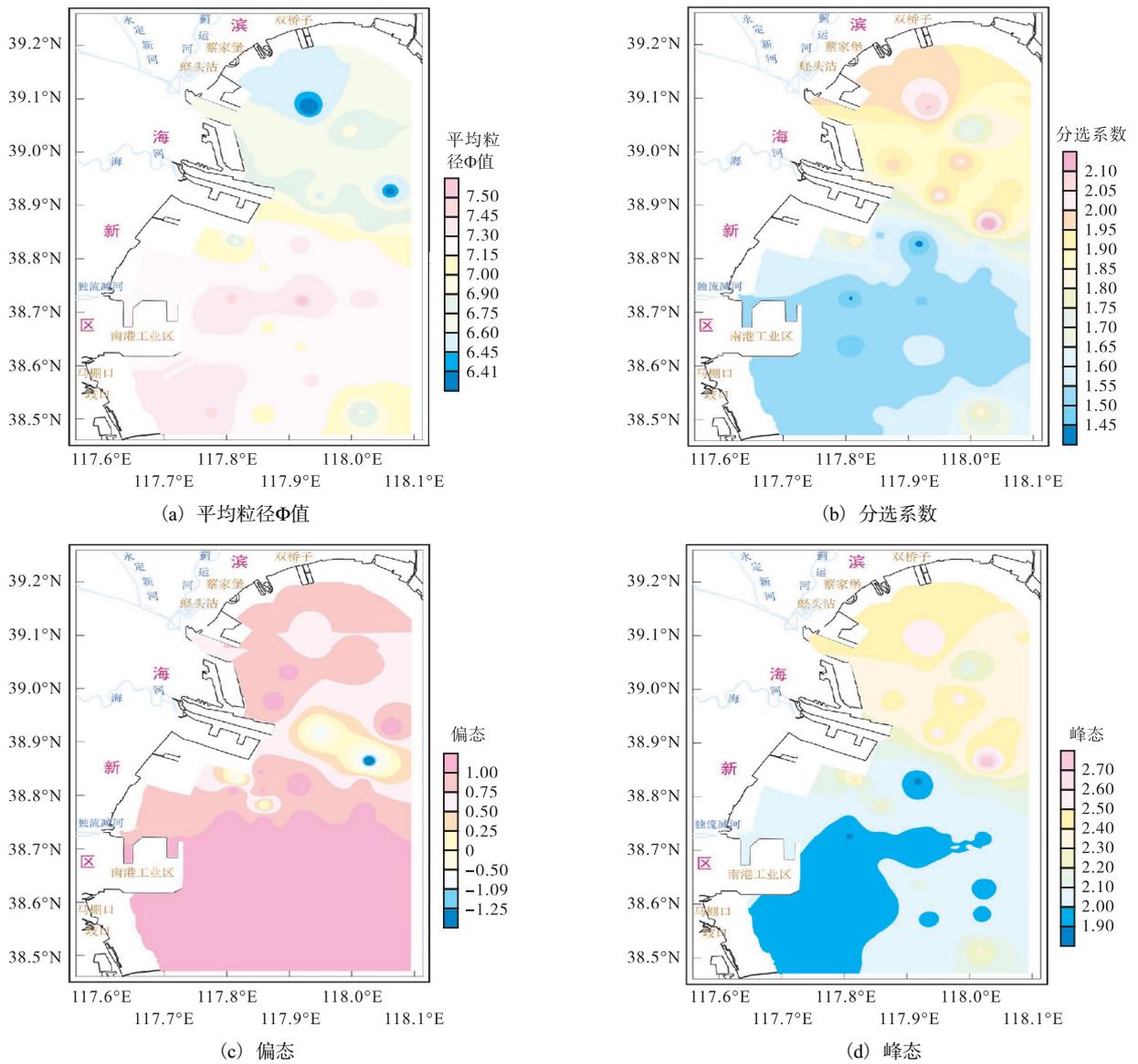


图4 研究区表层沉积物粒度参数分布

Fig. 4 Distribution of grain size parameters of the surface sediment of the studied area

表3 研究区表层沉积物粒度参数

Tab. 3 Grain size parameters of the sediment in the studied area

类型	特征值	Φ 值	分选系数	偏态	峰态
粉砂	最大值	7.51	1.97	1.25	2.47
	最小值	6.64	1.42	-0.74	1.86
	平均值	7.18	1.58	1.04	2.06
砂质粉砂	最大值	6.60	2.10	1.20	2.59
	最小值	6.36	1.93	-0.77	2.42
	平均值	6.48	2.02	0.44	2.52
砂质泥	—	6.78	2.19	-1.53	2.81
泥	—	7.57	1.49	1.13	1.92

3 讨论

海洋底质类型受很多因素的影响,由于沉积环

境、物源以及水动力条件等变化都会对沉积物的粒度特征产生影响. 沉积物粒度类型所代表的水动力条件,可以区别当时沉积环境的动力强弱. 物源是认识海洋沉积物分布的物质表现,包括海陆相互作用、古水深和古气候变化等.

3.1 物质来源

渤海湾西岸入海的河流众多,为研究区海域带入大量的陆源碎屑物,研究区北部的表层沉积物主要为滦河入海泥沙,受东北向海流影响逐渐沉积;西部沉积受海河、蓟运河的入海物质影响较大;南部海域受夏季东南风影响,以黄河物质来源为主,特别是黄河河口处泥沙经过再悬浮作用,在潮流作用下向研究区海域运输^[8]. 近年来,因人类对海岸带开发利用的进

程加快,渤海湾沿岸一些河流的入海输沙、河口水文条件及海岸线形态等已经发生了较大改变,逐渐形成新的底质沉积分布格局。

为了区分和验证渤海湾西部海域沉积物与入海河流的物源关系,对研究区内 39 个样品进行了黏土矿物组合的分析,与前人对海河类、黄河及滦河入海沉积物的黏土矿物研究成果进行对比^[8],把黏土矿物组合类型划分为 3 类,以此为基础作三角端元图(如图 5 所示)。从图 5 可以看出,渤海湾西部海域样品投影与这几条入海河流的沉积物黏土矿物特征投影关系,其中与海河类沉积物的投影基本一致,进一步佐证了前人的研究成果^[9],为海河型沉积物。研究区海域沉积物中的蒙皂石平均质量分数仅为 4.20%,前人对黄河沉积物的黏土矿物进行过类似分析,与此数值差距较大,且由于黄河的频繁改道,近几十年入海沉积物量急剧减少,因此,黄河对于渤海湾西部海域表层沉积物的贡献已大不如以前^[10]。而研究区海域沉积物黏土矿物组合特征投影与滦河沉积物投影距离很大,表明滦河沉积物对渤海湾西部海域沉积物的贡献更小。

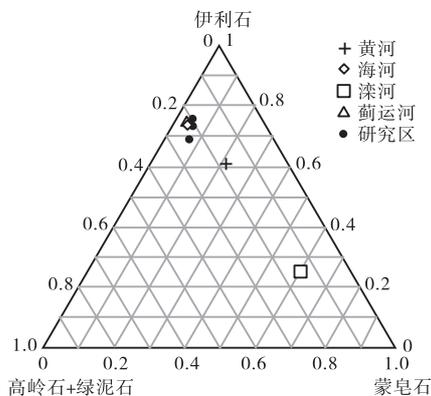


图 5 黏土矿物三角端元图

Fig. 5 Ternary diagram of clay minerals

由此可见,渤海湾西部海域底质沉积物以海河、蓟运河等海河型物质为主,通过黏土矿物组合分析对比,滦河入海物质对本区海域表层沉积物的贡献很小,而黄河由于改道、水流量减少等原因,对海域底质沉积物的影响力亦逐渐降低。

3.2 沉积动力环境分区

采用 Flemming 三角图式法^[11],对渤海湾西部海域表层沉积物的动力环境特征进行分析,结合沉积物的粒度特征及其参数所代表的水动力强弱,划分其沉积动力环境与亚环境^[12-14]。

在沉积动力分区图(图 6)中,沉积物的粒度划分

标准:砂的沉积物颗粒直径为 0.063 ~ 2.000 mm,粉砂为 0.004 ~ 0.063 mm,黏土为 <0.004 mm;图中的结构分类标志线以砂的质量分数为节点,分别为 5%、25%、50%、75%、95%,由此构成了 S ~ E 6 个组分,从 S 到 E 表示沉积物粒径逐渐变细;按细粒组分(黏土和粉砂)在沉积物中的质量分数作为三角结构的分类标志线,分别是 10%、25%、50%、75%、90%,从 I 到 VI,划分了 6 块水动力区,离黏土和粉砂端元越近,表明水动力越弱^[11]。

本次研究通过沉积物粒度进行分类,采用 Flemming 三角图式法,将各个采样站位的沉积物参数投影到 Flemming 三角图中(图 6)。可以看出,研究区表层沉积物样品基本落在 D II、D III 和 E III 区,与前人的研究结果基本一致^[9]。这说明渤海湾西岸沉积动力相对较弱,水动力偏弱,这与研究区海域表层沉积物主要为粉砂和黏土质粉砂基本吻合。

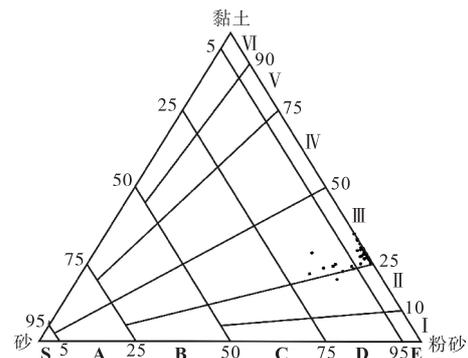


图 6 研究区沉积动力分区三角图

Fig. 6 Sedimentary dynamic zoning triangle of the studied area

3.3 沉积物运移规律分析

现今很多国内外学者在对沉积物粒度的研究过程中认为沉积物粒度参数的改变与其自身的运移规律存在特定的联系,比如沉积物运输的方向、迁移路径等^[15-16]。

McCave^[15]提出,粒度数据中的 3 个参数对运移规律的研究有联系:分选系数(σ)、偏态系数(SK)和平均粒径(μ)。沉积物从一个位置运输到另一个位置,由于搬运、悬浮和再堆积,造成沉积物的粒径变得越来越细,分选性也趋向好,使偏态更加正偏;或造成平均粒径愈变愈粗,分选性亦变好,负偏更加明显,满足以下两种情况: $\mu_2 > \mu_1, SK_2 < SK_1, \sigma_2 < \sigma_1$; 或 $\mu_2 < \mu_1, SK_2 > SK_1, \sigma_2 < \sigma_1$ 。其中下标 1、2 表示两个相邻站点点。Gao 等^[16]在此理论的基础上提出了沉积物运移趋势的二维分析方法:将研究点位的 3 个粒度参

数与其周围相邻的各点进行一一比较,如果点 1 与其相邻的点 2 之间的粒度参数满足上述两种情况之一,则定义从点 1 向点 2 的单位矢量. 每个采样点的所有粒度趋势矢量进行合成,得出一个合矢量

$$\bar{R}(x,y) = \sum_1^n \bar{r}(x,y) \quad (1)$$

式中: $\bar{r}(x,y)$ 是采样点 (x,y) 的单位矢量; $\bar{R}(x,y)$ 为合矢量; n 为单位矢量的数目.

每个站位的样品粒度参数经过矢量判别,再进行合成运算以后,就可以得到研究区海域沉积物净输运矢量分布图(图 7),特征距离为 2.50 km. 图中沉积物的输运方向由矢量箭头表示,而箭头的长度不代表输运速率,仅表示沉积物输运的趋势强度^[17].

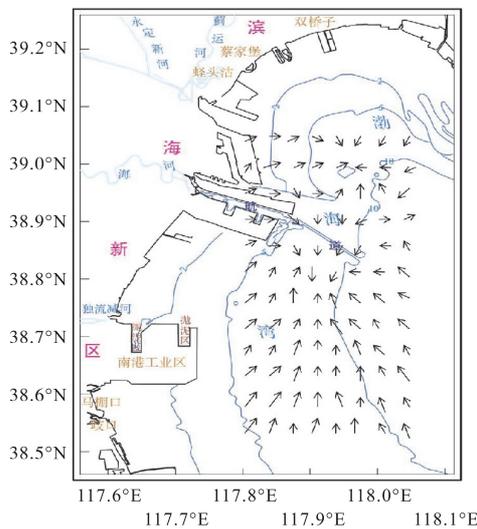


图 7 底质沉积物净输运矢量分布

Fig. 7 Distribution of seabed sediment transport vectors

从沉积物运移趋势(图 7)可以看出,整个研究区沉积物净输运趋势比较有规律,海河以北海域的表层沉积物运移方向为东南,中部海域的表层沉积物净输运方向趋向北,研究区南部海域的沉积物有向北运输的趋势,近岸底质沉积物的输运方向向东. 整体来看,研究区海域底质沉积物的净输运方向是由四周趋向中心.

海域的水动力条件、海底地形地貌特征与沉积物的净输运趋势存在较密切的联系^[18]. 研究区北部海域的蓟运河,河流上游建闸,造成输沙量减少;而且天津港北部由于人为因素,形成了淤积区,因此研究区北部海域的表层沉积物输运方向大致向南. 渤海湾西部的环流状况,北部为逆时针方向,南部为顺时针向的双环结构^[19-21],见图 8^[22]. 研究区海域涨潮流速大于落潮,且东南风的频率较高,造成海河以南海

域的表层沉积物向西北输运^[23]. 研究区南部海域离岸较远,底质沉积物受水深的限制,风浪对其作用减弱,由于中心泥质沉积区的水动力偏弱,重叠研究区南部海域顺时针环流的影响,沉积物的输运方向偏向中心泥质区.

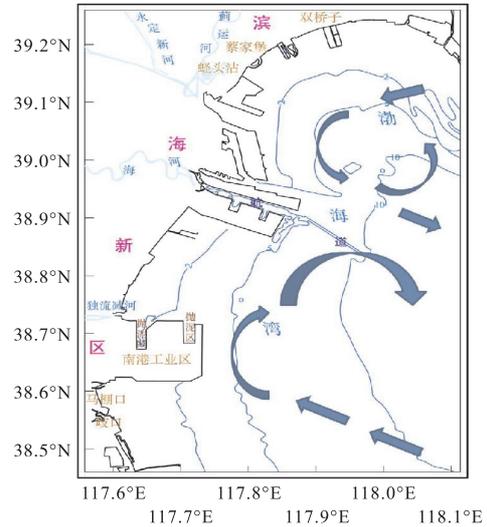


图 8 研究区环流状况

Fig. 8 Circulation situation in the studied area

4 结论

(1) 研究区海域底质沉积物主要有 4 种类型,砂质粉砂、粉砂、砂质泥、泥,平均粒径 Φ 值为 6.36 ~ 7.57,以粉砂为主. 北部比南部粗,近岸比远海粗,具有从北向南,由岸至海逐渐变细的特征;整体分选性较差.

(2) 渤海湾西部海域底质沉积物主要来源于海河型入海河流,滦河沉积物对研究区海域沉积物的贡献很小,黄河对表层沉积物的贡献已大不如以前.

(3) 通过进行沉积物粒度分类,将各个采样站位的沉积物参数投影到 Flemming 三角图中,基本落在 D II、D III 和 E III 区. 说明渤海湾西岸沉积动力相对较弱,水动力偏弱,这与研究区海域表层沉积物主要为粉砂等细粒沉积物基本吻合.

(4) 采用 Gao-Collins “粒度输运趋势分析”法分析,发现整个研究区海域的沉积物净输运趋势比较有规律,净输运方向是由渤海湾西部海域四周趋向中心.

参考文献:

[1] Yang S L, Milliman J D, Li P, et al. 50,000 dams later:

- Erosion of the Yangtze River and its delta[J]. *Global and Planetary Change*, 2011, 75(1/2): 14–20.
- [2] 杨云平,李义天,孙昭华,等. 长江口邻近陆架表层沉积物变化特征及成因[J]. *沉积学报*, 2014, 32(5): 863–872.
- [3] 田立柱,耿岩,裴艳东,等. 渤海湾西部表层沉积物粒度特征与沉积混合[J]. *地质通报*, 2010, 29(5): 668–674.
- [4] 王宏,李建芬,裴艳东,等. 渤海湾西岸海岸带第四纪地质研究成果概述[J]. *地质调查与研究*, 2011, 34(2): 81–97.
- [5] Folk R L, Andrews P B, Lewis D W. Detrital sedimentary rock classification and nomenclature for use in New Zealand[J]. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 1970, 13(4): 937–968.
- [6] 卢连战,史正涛. 沉积物粒度参数内涵及计算方法的解析[J]. *环境科学与管理*, 2010, 35(6): 54–60.
- [7] 杨旭辉,冯秀丽,褚忠信,等. 中国东部陆架表层沉积物粒度特征及其沉积环境浅析[J]. *中国海洋大学学报: 自然科学版*, 2012, 42(7/8): 126–134.
- [8] 刘建国. 全新世渤海泥质区的沉积物物质组成特征及其环境意义[D]. 青岛:中国科学院研究生院(海洋研究所), 2007.
- [9] 魏飞. 渤海湾西部表层沉积物粒度和黏土矿物特征及物源分析[D]. 青岛:中国海洋大学, 2013.
- [10] 戴仕宝,杨世伦,郜昂,等. 近 50 年来中国主要河流入海泥沙变化[J]. *泥沙研究*, 2007(2): 49–58.
- [11] Flemming B W. A revised textural classification of gravel-free muddy sediments on the basis of ternary diagrams[J]. *Continental Shelf Research*, 2000, 20(10): 1125–1137.
- [12] 陈沈良. 黄河三角洲的沉积动力分区[J]. *上海国土资源*, 2012, 33(2): 62–68.
- [13] 赵广明,叶思源,丁喜桂,等. 黄河三角洲全新世以来沉积环境的划分及各环境中碳埋藏速率的评价[J]. *地球科学:中国地质大学学报*, 2014, 39(4): 451–461.
- [14] 张伯虎,陈沈良,刘焱雄,等. 广西钦州湾海域表层沉积物分异特征与规律[J]. *热带海洋学报*, 2011, 30(4): 66–70.
- [15] McCave I N. Grain-size trends and transport along beaches: Example from eastern England[J]. *Marine Geology*, 1978, 28(1): M43–M51.
- [16] Gao S, Collins M. Net sediment transport patterns inferred from grain-size trends, based upon definition of “transport vectors”[J]. *Sedimentary Geology*, 1992, 81(1/2): 47–60.
- [17] 汪亚平,高抒,贾建军. 胶州湾及邻近海域沉积物分布特征和运移趋势[J]. *地理学报*, 2000, 55(4): 449–458.
- [18] 刘升发,刘焱光,朱爱美,等. 东海内陆架表层沉积物粒度及其净输运模式[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2009, 29(1): 11–16.
- [19] Hainbucher D, Wei H, Pohlmann T, et al. Variability of the Bohai Sea circulation based on model calculations[J]. *Journal of Marine Systems*, 2004, 44(3): 153–174.
- [20] Liu J P, Milliman J D, Gao S, et al. Holocene development of the Yellow River's subaqueous delta, North Yellow Sea[J]. *Marine Geology*, 2004, 209(1): 45–67.
- [21] 李淑媛,苗丰民,赵全民,等. 辽东半岛西南及渤海中部海域表层沉积物的地球化学[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2010, 30(4): 128–135.
- [22] 赵保仁,庄国文,曹德明,等. 渤海的环流、潮余流及其对沉积物分布的影响[J]. *海洋与湖沼*, 1995, 26(5): 466–473.
- [23] 鲍献文,林霄沛,吴德星,等. 东海陆架环流季节变化的模拟与分析[J]. *中国海洋大学学报: 自然科学版*, 2005, 35(3): 349–356.

责任编辑:周建军