

# 莱州湾表层沉积物粒度和黏土矿物分布特征与运移趋势分析

冯利, 冯秀丽, 宋 渥, 肖 晓, 田动会

(海底科学与探测技术教育部重点实验室, 中国海洋大学 海洋地球科学学院, 山东 青岛 266100)

**摘要:** 运用粒度参数分析、黏土矿物含量分析、Flemming 三角图示法和 Gao-Collins 二维的“粒度趋势分析”等方法, 对采自莱州湾海域的表层沉积物样品和黏土矿物样品进行分析, 了解了该研究区域的沉积环境及沉积物的运移趋势。研究区由岸向海沉积物类型大致依次为砂-粉砂质砂-砂质粉砂-粉砂-黏土质粉砂, 并且研究区表层沉积物在近岸区域呈现较为明显的平行岸线的条带状特征; 同时沉积物的平均粒径、分选系数、偏态、峰态等粒度参数也呈现出良好的正相关性或负相关性; 研究区黏土矿物为伊利石、蒙脱石、绿泥石、高岭石, 除伊利石分布大致为黄河三角洲近岸低, 向研究区东北方向逐渐升高外, 其余的黏土矿物都表现出了近岸高, 远海低的分布特征, 且主要物源为黄河物质输入。Flemming 三角图研究区所有采样点大部分分布在 II 区, 少部分分布在 III 区, 说明研究区整体水动力较强; 采样点在 A—E 区均有分布, 但在 C、D 两区分布最多, 说明研究区沉积物粒径较集中。研究区表层沉积物整体呈由岸向海输运的趋势, 具体来看, 黄河沉积物入海后向北、向东、向南运移, 研究区内沉积物的来源是黄河输沙以及周围入海的小河流的输沙和沿岸冲刷的物质。

**关键词:** 莱州湾; 粒度分析; 黏土矿物; 水动力; 运移趋势

中图分类号: P736.4<sup>+</sup>1 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2018)02-0001-09

DOI: 10.11759/hyxx20170112001

莱州湾是位于中国渤海南部的一个海湾, 西边以东营市黄河河口为起点, 东边直到龙口市岬岛高角为止, 同时被黄河三角洲与渤海海湾隔开。莱州湾波浪的主要控制因素为季风, 以风浪为主, NE 向为常浪向, NNE 向为次常浪向, NE 向也为强浪向。莱州湾潮汐的类型属不规则半日潮<sup>[2]</sup>。莱州湾潮流流速由北到南, 由东到西依次减小, 流向的总体特征为涨急时从莱州湾湾口偏 S 向流入湾内, 后于黄河三角洲南侧处转为偏 W 向; 落急时, 在黄河三角洲南侧海域为偏 E 向, 但在湾口处呈现偏 NE 向<sup>[1]</sup>。

前人的大量调查研究表明现行黄河口入海泥沙的扩散范围向南一般约为 35 km, 在极端天气条件下最远可达小清河口附近<sup>[3-4]</sup>, 同时莱州湾内高速潮流场也影响着黄河入海泥沙的分布与扩散<sup>[5]</sup>。前人在莱州湾的沉积动力条件、悬浮泥沙、海岸地貌以及海岸侵蚀等方面做了大量的研究, 江文胜等<sup>[5]</sup>通过研究指出在一般潮流作用下, 河口附近底部沉积物容易形成再悬浮, 水体中悬浮物浓度较高, 而距河口较远的区域底部沉积物情况则相反。卢晓东等<sup>[4]</sup>通过研究指出莱州湾西岸海滩中、高潮滩处于相对稳定状况, 低潮滩呈现弱淤积的特征。本文将在大量的表

层沉积物粒度数据的基础上对整个莱州湾的表层沉积物分布特征和运移趋势进行分析研究。

## 1 研究资料和研究方法

在表层沉积物的分布和运移趋势的研究中, 沉积物的粒度起到了举足轻重的作用。同时, 沉积物的粒度分析也是运用沉积物的粒度组成, 粒度参数以及多种等值线, 类型划分图解等来研究沉积环境等问题的<sup>[6-8]</sup>。本次研究从莱州湾采集表层沉积物样品 194 个(含黏土矿物样品), 采样地点见图 1。将所取得的表层沉积物样品在粒度实验室进行处理, 粒度测定采用现在通用的 Mastersizer2000 型激光粒度仪进行测定。具体步骤为: (1)在烧杯中加入适量取得的表层沉积物样品, 同时需加入过量的 30%的

收稿日期: 2017-01-12; 修回日期: 2017-03-09

基金项目: 国家自然科学基金(41530966); “黄河沉积物环山东半岛陆架的搬运和沉积过程及机制研究”专项

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41530966; Study on the Transport and Deposition Processes and Mechanisms of the Yellow River Sediments on the Continental Shelf of Shandong Peninsula]

作者简介: 冯利(1991-), 女, 河北保定人, 硕士研究生, 主要从事海洋沉积与工程环境方面的研究, E-mail: fenglihp@126.com; 冯秀丽, 通信作者, E-mail: fengxiuli@ouc.edu.cn

H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 溶液并浸泡 24 h 以达到去除样品中有机物的目的; (2)加入 0.25 mol/L 的盐酸去除样品中的碳酸盐(不起泡为止); (3)使用蒸馏水反复离心多次, 至

样品呈中性; 向处理好的样品中加入 5 mL, 0.5 mol/L 六偏磷酸钠溶液, 经超声波分散后, 使用激光粒度仪进行测试。

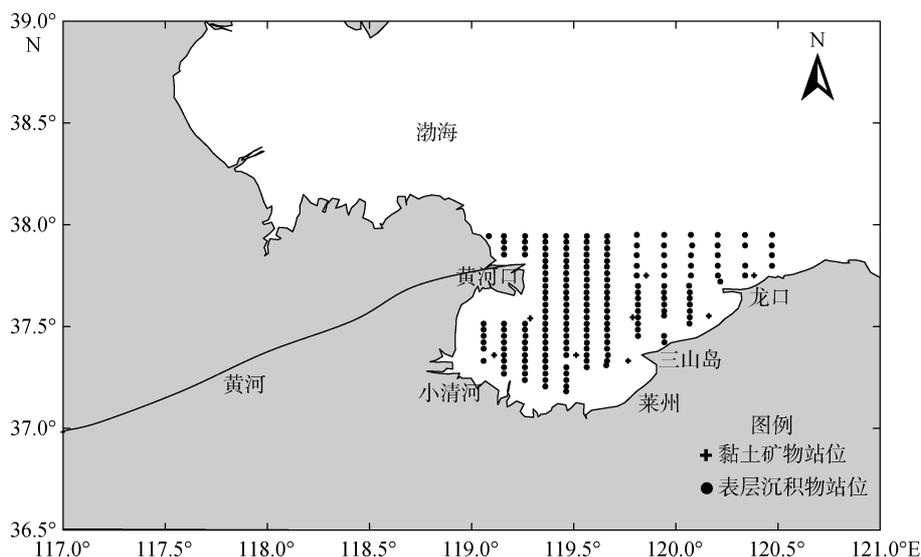


图 1 研究区站位分布图

Fig. 1 The research stations distribution

用 Shepard<sup>[10]</sup>划分方法进行沉积物的分类和定名。用 Folk-Ward<sup>[11]</sup>图解法计算平均粒径、分选系数、偏态、峰态等粒度参数。

黏土矿物采用 XRD 方法进行分析, 取 10~20 g 沉积物样品, 加入适量 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 去除有机质, 等到有机质全部去尽后, 加入分散剂六偏磷酸钠, 同时分散剂的浓度为 0.1 mol/L, 静置并且过夜; 依据 Stokes 沉降原理提取 <2 μm 的悬浊液, 至少提取 5 次; 之后进行黏土矿物的抽滤, 所用仪器为真空泵, 抽滤到微孔滤膜上, 滤膜孔径为 0.45 μm; 最后进行上机分析, 上机分析之前需要在乙二醇蒸汽浴中把附有黏土矿物的微孔滤膜浸泡 24 h。

粒度是表层沉积物的最基本特征之一, 沉积物粒度分布特征可以反映沉积物的沉积、再悬浮、搬运、再沉积等过程及相应的水动力特征, 是研究沉积环境的重要手段之一<sup>[26]</sup>。采用 Flemming 三角图示法<sup>[9]</sup>对表层沉积物的沉积动力学特征进行分析, Flemming 三角图包含 25 个区块, 表层沉积物的不同的沉积结构分别对应其中, 可用于指示研究区的水动力强弱和不同的沉积动力环境<sup>[13-14]</sup>。本文为对表层沉积物的输运方向及运移趋势进行分析, 需要采用 Gao-Collins<sup>[14]</sup>运移趋势分析方法, 同时结合潮流波浪等动力因素进行分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 表层沉积物分布特征

#### 2.1.1 沉积物类型分布特征

为将研究区表层沉积物样品的类型进行划分, 计算了样品的砂、粉砂、黏土粒级的相对体积分数, 据此将研究区的表层沉积物类型分为: 砂(S)、粉砂(T)、黏土质粉砂(YT)、粉砂质砂(TS)、砂质粉砂(ST)5 种类型(图 2)。其中的主要类型为粉砂、砂质粉砂、黏土质粉砂三种。根据计算结果, 莱州湾海域粉砂、砂质粉砂、黏土质粉砂共占 92.31%, 砂和粉砂质砂占 7.69%。沉积物大致呈条带状分布, 由岸向海粒度逐渐由粗变细, 其中砂质粉砂成片分布在三山岛附近海域靠陆地一侧, 大致沿岸线分布, 反映了该区的水动力较强; 黏土质粉砂成片的分布在离岸较远的远海海域, 反映了该海域水动力较弱; 砂和粉砂质砂只在小清河河口附近有零星分布, 粉砂的分布位于砂质粉砂和黏土质粉砂之间。砂-粉砂质砂-砂质粉砂-粉砂-黏土质粉砂表层沉积物类型由岸向海大致依次分布, 通过图 2 可以看出研究区表层沉积物类型分布在近岸区域呈现较为明显的平行岸线的条带状特征。

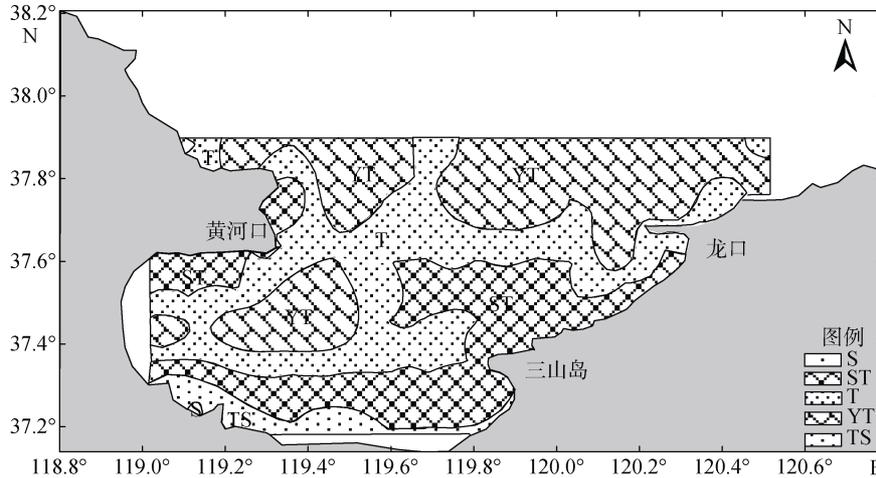


图 2 沉积物类型分布图  
Fig. 2 Sediment type distribution

### 2.1.2 沉积物粒度组分的平面分布特征

我们将研究区的表层沉积物分为砂、粉砂、黏土 3 个粒组，并详尽的分析 3 个粒组中各个粒组的平面分布特征，以此可以更加清楚的了解研究区莱州湾的沉积环境的特征。

砂粒组颗粒较粗，搬运形式主要为推移和跃移，研究区的砂粒组主要分布在莱州湾南部靠近陆地的近海海域，由陆向海逐渐减少。砂粒组的高值区主要位于小清河、弥河口、虞河口、潍河口、胶莱河口等区域，这与河口附近水流速度大，水动力强有关，细粒沉积物易被搬运，较粗的砂颗粒易保留下来。

粉砂颗粒较细，搬运形式主要为悬移，研究区粉砂粒组分布的高值区主要在莱州湾北部海域和黄河口附近海域，主要原因应该为黄河入海悬沙在入海处沉积多，随着搬运距离的增加沉积越来越少，导致粉砂组分呈现出黄河口附近高，随着搬运距离的增加其逐渐减少的特征。由图 3 可以看出，研究区粉砂与砂的质量分数具有很好的负相关性。

黏土粒组是泥沙颗粒中最细的部分，研究区黏土粒组分布的高值区也主要集中在莱州湾北部海域和黄河口附近海域，形成原因与粉砂粒组一致。由图 3 可以看出，黏土总体分布情况与粉砂分布呈正相关关系，与砂粒呈负相关关系。

### 2.1.3 沉积物粒组特征参数分析

本文粒度参数采用了 Folk-Ward 图解法计算了研究区表层沉积物的平均粒径，分选系数等粒度参数。沉积物粒度特征中主要的特征之一是平均粒径，沉积物粒径频率分布的中心趋向于被其很好的指示，

沉积物的平均动能情况被平均粒径大体进行了反映，在强水动力情况下，细粒沉积物被搬运，粗粒沉积物沉积下来；在弱水动力环境下，粗粒沉积物不易被搬运，同时潮流携带的细粒沉积物沉积下来。同源物质的粒径递减的方向可沿运移的方向进行，这在一定程度上可有平均粒径进行反映。研究区平均粒径  $\phi$  在 0.8~7.6(图 4)，平均值为 5.5，反映出部分区域水动力较弱。整个研究区域内平均粒径的大小分布与砂，粉砂和黏土的分布是一致的，砂分布高的地区沉积物的平均粒径就大，砂分布低的地区沉积物的平均粒径就小；粉砂及黏土分布高的地区沉积物的平均粒径就小，粉砂及黏土分布低的地区沉积物的平均粒径就大。

分选系数指示沉积物粒度的分选程度，研究区分选系数在 0.4~1.4(图 4)，平均值为 1.7，分选较差。在整个研究区域内靠近岸的地区分选好，远离岸的地区分选差。这可能是由于靠近岸的地区动力作用强，潮流和波浪的分选作用强，使得沉积物在近岸地区分选较好；远离岸的地区动力作用复杂，沉积物的来源复杂，所以沉积物的分选就差。

偏态表明的就是平均值与中值粒径的相对位置，也就是沉积物粒径偏粗时表明的就是正偏，相反的当沉积物粒径偏细时就是负偏，研究区偏态在 -0.044~0.52(图 4)，平均值为 0.32，大部分区域为正偏。

峰态也是表层沉积物粒度参数之一。研究区峰态在 0.78~2.03(图 4)，平均值为 1.17，整体较尖锐。由图 4 可知，莱州湾南部表层沉积物的峰态较窄，其他区域沉积物的峰态较平。

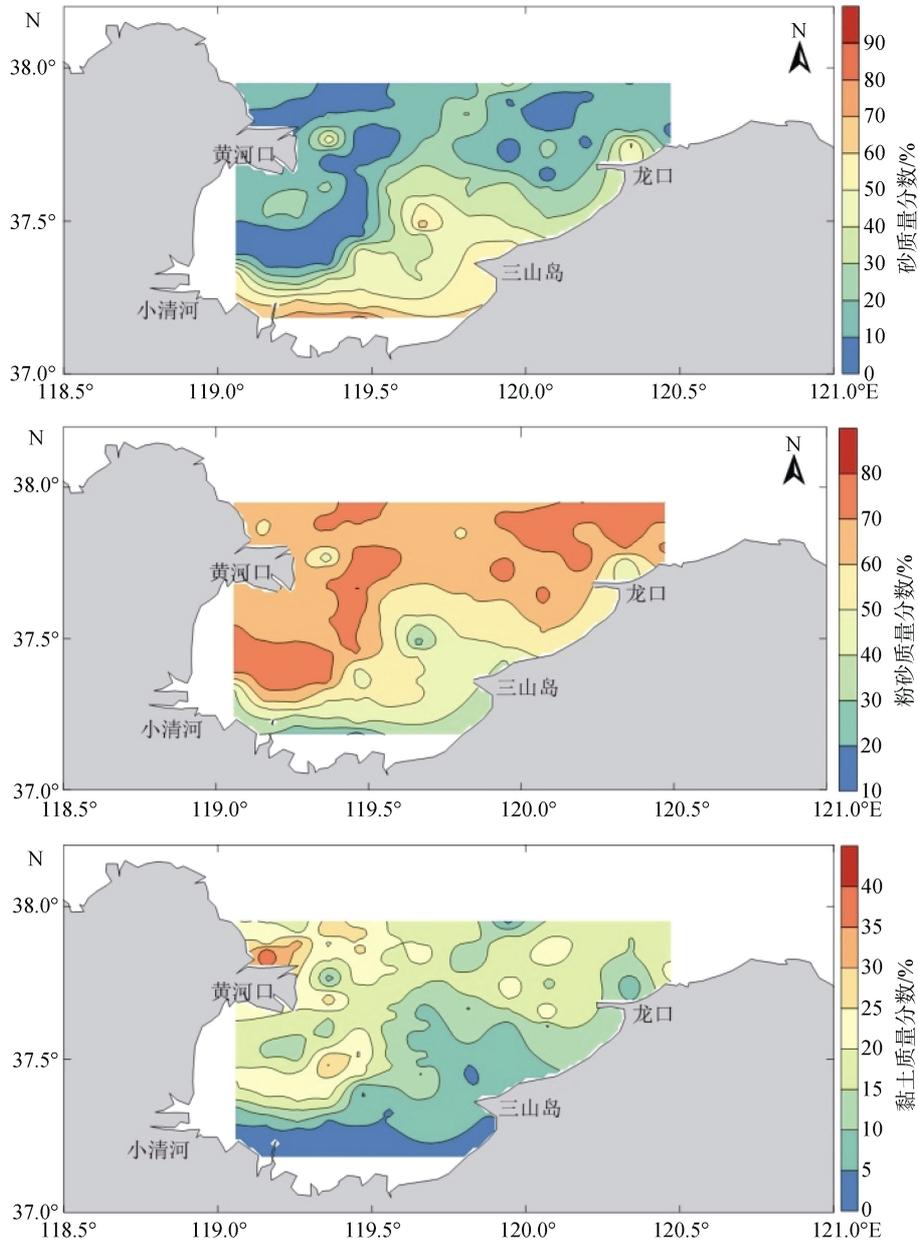


图3 砂、粉砂、黏土质量分数分布图  
Fig. 3 Sand, silt, clay percentage distribution

## 2.2 表层沉积物黏土矿物分布特征

蒙脱石、伊利石、高岭石、绿泥石四种矿物合称为黏土矿物，研究发现在各种类型的沉积物中均能发现黏土矿物的存在，同时黏土矿物是海洋沉积的重要组成部分，黏土矿物约占浅海沉积物总量的 1/4~1/3。黏土矿物能够灵敏的反映海洋地质环境的变化，其组分、形态、结构、组合等特征可用于研究和恢复岩相古地理、古环境、古气候以及对地层和分析成岩成矿条件<sup>[23-24]</sup>。

### 2.2.1 黏土矿物丰度

研究区黏土矿物主要为伊利石、蒙脱石、高岭石和绿泥石，各黏土矿物组合质量分数统计见表 1。总体上，伊利石族矿物是黏土矿物的优势矿物，平均质量分数达到 60%以上；绿泥石次之，平均为 15.49%，高岭石平均为 12.72%，蒙脱石最低，平均为 11.58%。

### 2.2.2 黏土矿物的分布

伊利石在整个研究区表层沉积物黏土矿物中质量分数最高，在 56.28%~67.87%，平均为 60.21%，整

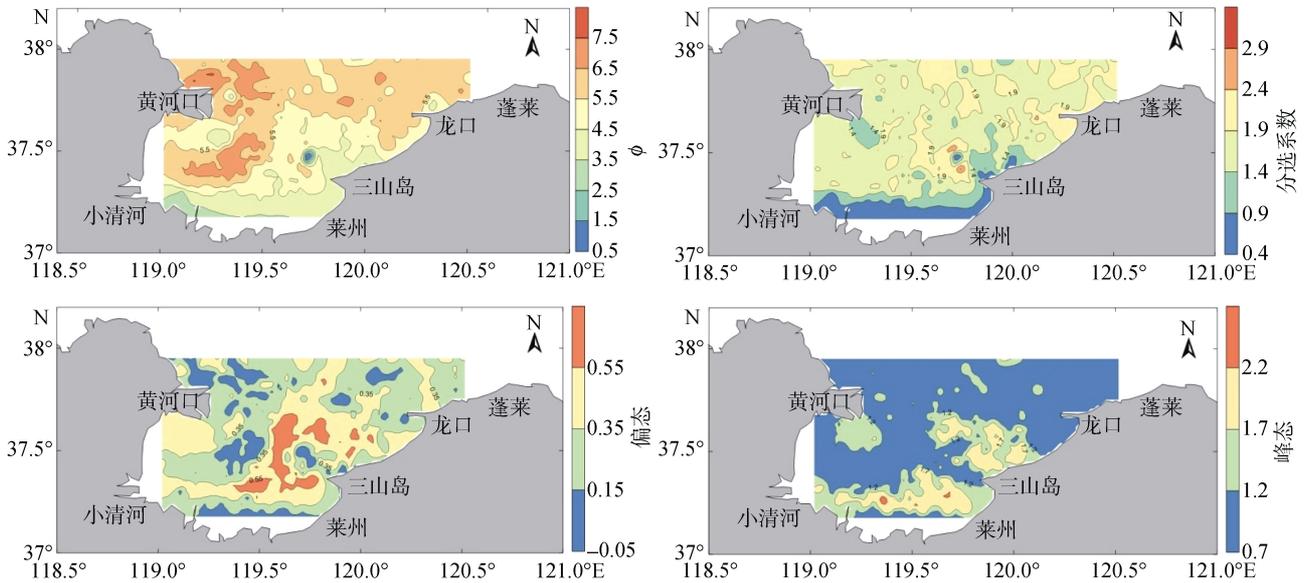


图 4 平均粒径、分选系数、偏态、峰态等值线分布图  
Fig. 4 Average particle size, sorting coefficient, skewness, kurtosis contour

表 1 表层沉积物黏土矿物质量分数统计  
Tab. 1 Percentage statistics of clay minerals in surface sediments

矿物	质量分数/%			标准偏差	变异系数
	最大值	最小值	平均值		
伊利石	67.87	56.28	60.21	3.05	5.07
蒙脱石	13.58	7.63	11.58	1.72	14.83
高岭石	13.83	10.94	12.72	1.05	8.26
绿泥石	17.00	13.56	15.49	1.11	7.18

个研究区伊利石变化小，变异系数为 5.07%。研究区伊利石总的分布规律为近海低，远海高(图 5)。在黏土矿物中伊利石最为稳定，所以其在研究区也最高。伊利石质量分数受水动力的影响比较明显，近岸区水动力比远海区水动力强，片状或鳞片状的伊利石容易从近岸区搬运到远海区富集沉积。

绿泥石质量分数次于伊利石，在 13.56%~17.00%，平均为 15.49%。研究区绿泥石总的分布规律为自西南向东北递减，同时在黄河口外有一低值区(图 5)，绿泥石的分布特征与伊利石刚好相反。

高岭石的质量分数介于 10.94%~13.83%，平均为 12.72%。高岭石分布趋势与绿泥石大致相同，在黄河口外也有一低值区(图 5)。这是高能河水入海后能量逐渐减弱的反映，近岸区水动力作用较强，而中心区相对较弱，而且高岭石多具有粒状或板状特征，在水动力作用较强的区域易沉积，所以高岭石在近岸区相对较高。

蒙脱石的质量分数介于 7.63%~13.58%，平均为 11.58%，其在整个研究区表层沉积物黏土矿物中最

低。研究区蒙脱石总的分布规律为自西南向东北递减。

### 2.2.3 黏土矿物的组合与物源

海洋黏土矿物的来源分为陆源和自生矿物两种类型。研究区地处黄河三角洲，陆源供应充足，自生一般需要比较稳定的沉积环境，而该海域水体动荡不利于自生黏土矿物的形成，因此研究区基本为陆源物质风化搬运形成黏土矿物。

根据研究区黏土矿物组分数据，以伊利石、蒙脱石、高岭石+绿泥石为端元做三角端元图(ISKc 图)(图 6)，与前人研究黄河沉积物黏土矿物的研究结果做对比<sup>[25]</sup>，发现研究区站位的 ISKc 投影与黄河沉积物高度吻合，说明本研究区黏土矿物的物源主要为黄河物质输入。

## 2.3 表层沉积物动力分区

莱州湾内的表层沉积物除了物源不同，还受到波浪和潮流的改造，因此形成了不同的沉积物类型及参数特征。为进行研究区的现代沉积分区，本文采用 Flemming 三角图式法，用水动力强弱区分沉积环境及其亚沉积环境。

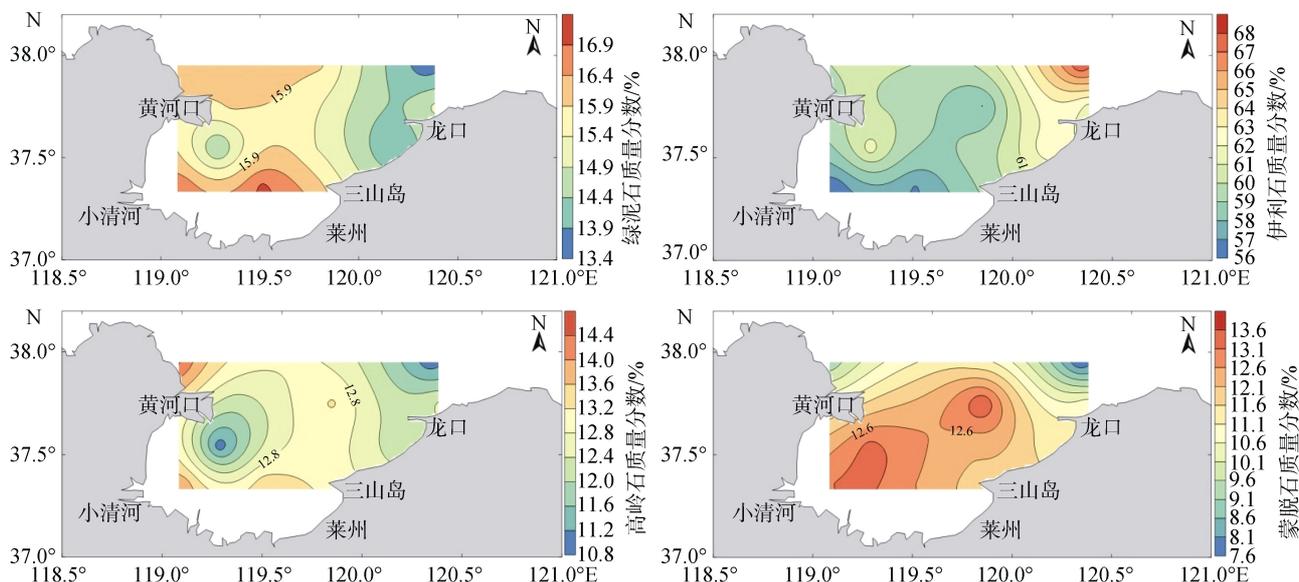


图 5 绿泥石、伊利石、高岭石、蒙脱石质量分数分布图  
Fig. 5 Chlorite, illite, kaolinite, montmorillonite mass fraction map

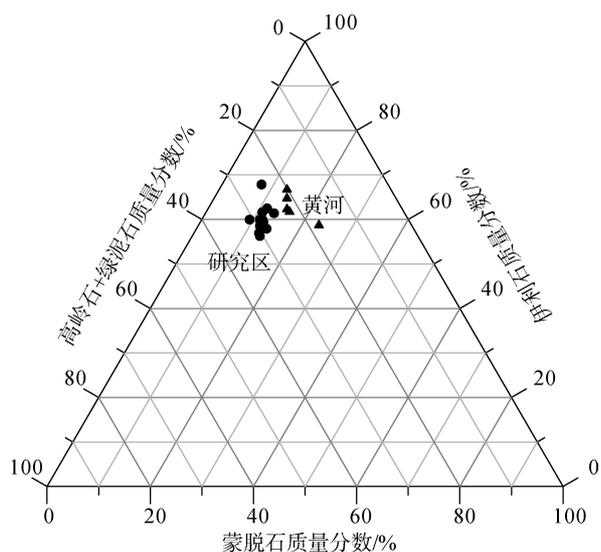


图 6 研究区黏土矿物蒙脱石-伊利石-(高岭石+绿泥石)三角端元图

Fig. 6 Clay mineral montmorillonite - Illite - (kaolinite + chlorite) triangular end-members in the study area

三角点来自文献[25], 黑点为本研究区的黏土矿物样品

Triangles from literature [25], black spots are clay mineral samples from the study area

本文采用的 Flemming 三角图式法的基本原理是:  
(1)根据表层沉积物的粒径划分砂、粉砂、黏土, 其中粒径在 0.063~2 mm 的颗粒为砂, 在 0.004~0.063 mm 的为粉砂, 小于 0.004 mm 的为黏土; (2)首先, 将 Flemming 三角划分为 6 个区域, 界限为 5 个数据, 这 5 个数据包含砂的质量分数为 5%、25%、50%、75%、

95%, 依次为 S、A、B、C、D、E, 从 S 区到 E 区沉积物中砂质量分数减少, 粉砂质量分数增加, 沉积物粒径变细; (3)然后, 按“粉砂/泥(粉砂+黏土)”的质量分数为 10%、25%、50%、75%、90% 5 个数据作为界线, 划分为 6 个不同的水动力区, 从 I 到 VI 表示水动力逐渐减弱。这样, Flemming 三角图示法将三角图划分为 25 个区域, 每个区域代表不同的沉积动力环境。因此, 在 Flemming 三角图示中, 从 S 到 E, 沉积物粒径逐渐增大; 从 I 到 VI, 沉积动力环境越来越弱。

由图 7 可知, 研究区所有采样点大部分分布于在 II 区, 少部分分布在 I 区, 说明研究区整体水动力较强, 细粒沉积物易被搬运扩散, 因此粗粒沉积

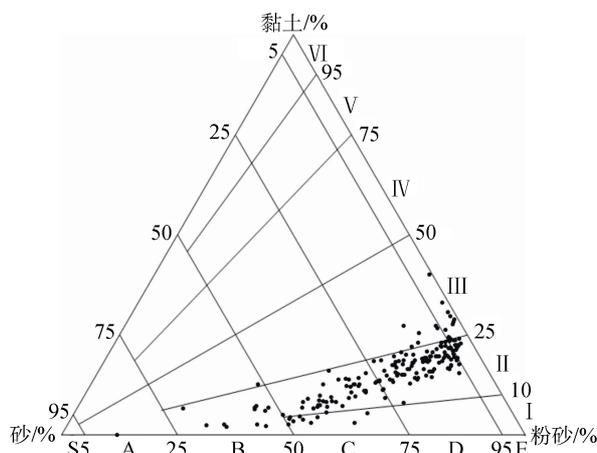


图 7 沉积动力分区三角图

Fig. 7 Sedimentary power partition triangle

物相对集中,这与研究区沉积物分布规律一致;而采样点在 A—E 区均有分布,但在 C、D 两区分布最多,说明研究区沉积物粒径较集中。

### 2.4 表层沉积物运移趋势分析

McLaren 等<sup>[15]</sup>提出沉积物净输运方向必定与平均粒径、分选系数、偏态系数等粒度参数存在某种空间变化型式的相关联系,之后,更多的学者在这一领域进行了更加深入研究,逐步建立了一种称为“粒径趋势分析”的方法,并提出了相应的物质运输

模型,由此形成了 Gao-Collins 运移趋势分析方法。目前,该表层沉积物运输趋势研究已被普遍应用于各种海洋环境条件下表层沉积物运输的研究分析<sup>[16-22]</sup>。

本文的采样间隔具有一定的不均匀性,首先采用插值法统一了样品的空间分辨率,然后才应用了 Gao-Collins 运移趋势分析,其中在进行运移趋势分析时,特征距离选用为 10 000 m。

利用粒径趋势平面图形计算软件得出的研究区域泥沙运移趋势如图 8 所示。

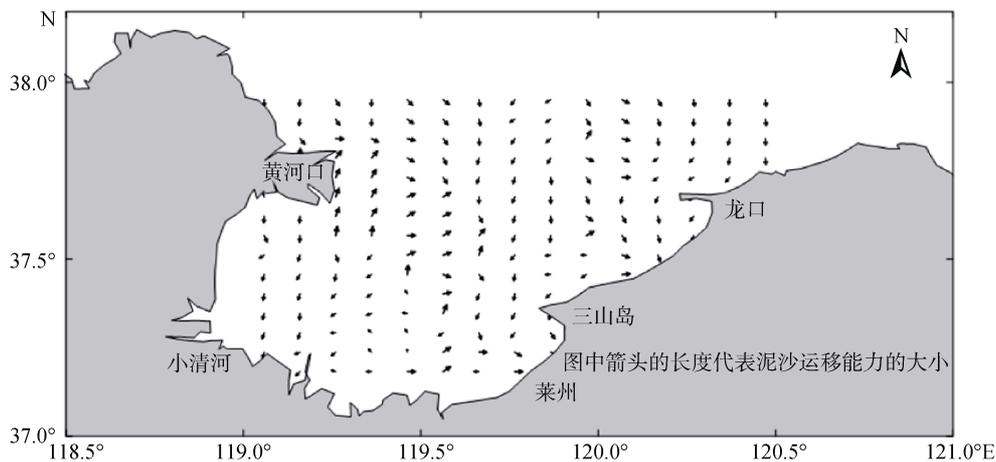


图 8 表层沉积物净输运矢量分布图

Fig. 8 Surface sediment transport vector distribution

根据图 8 可以看出研究区表层沉积物整体上呈现出由岸向海的输运趋势,具体来看,黄河沉积物入海后向北、向东、向南运移。向北运移,主要为东北方向,由岸向海进行沉积物的输运,同时与来自研究区由东北向西南运移的沉积物进行汇合,故在此区域形成了大面积的黏土质粉砂的沉积;向东运移的沉积物也与从三山岛向西北向运移的沉积物进行了汇合,也在汇合区域形成了大面积的黏土质粉砂;向南运移的沉积物由于受莱州湾内潮流及余流的影响运移方向逐步变为向东北向运移。研究区东北海域由于受渤海环流的影响,沉积物表现出明显的由海向岸的运移趋势。

在整个研究区域内沉积物的来源是黄河输沙以及周围入海的小河流的输沙和沿岸冲刷的物质,其中主要以黄河输沙为主。因为黄河携带的泥沙绝大部分来自黄土高原,黄土高原的黄土含量最多的为粉砂粒级,含量较少的为黏土粒级,这可以从粉砂粒组质量分数分布图反映出来。黄河携带的沉积物入海后,从黄河口向外扩散,而在莱州湾的南岸的部分地区由于

海流的影响作用,黄河携带的沉积物并没有进入上述地区。同时注入研究区域内的河流还有小清河、弥河、虞河、潍河、胶莱河等,这些河口输入的物质对研究区域内的沉积物的分布也有一定的影响。

### 3 结论

本文通过对研究区表层沉积物的粒度及粒度参数和黏土矿物的分布特征的分析研究,同时采用 Flemming 三角图示法,对研究区的沉积物进行了动力分区,采用 Gao-Collins 二维“粒度趋势分析”方法对研究区运移趋势进行了预测,得到研究区表层沉积物运移趋势特征。

1) 研究区由岸向海沉积物类型大致依次为砂-粉砂质砂-砂质粉砂-粉砂-黏土质粉砂,并且研究区表层沉积物在近岸区域呈现较为明显的平行岸线的条带状特征;同时沉积物的平均粒径、分选系数、偏态、峰态等粒度参数也呈现出良好的正相关性或负相关性。

2) 研究区黏土矿物为伊利石、蒙脱石、绿泥石、

高岭石,除伊利石分布大致为黄河三角洲近岸低,向研究区东北方向逐渐升高外,其余的黏土矿物都表现出了近岸高,远海低的分布特征,且主要物源为黄河物质输入。

3) 研究区所有采样点大部分分布于在 II 区,少部分分布在 I 区,说明研究区整体水动力较强,细粒沉积物易被搬运扩散,因此粗粒沉积物相对集中,这与研究区沉积物分布规律一致;而采样点在 A—E 区均有分布,但在 C、D 两区分布最多,说明研究区沉积物粒径较集中。

4) 研究区表层沉积物整体呈由岸向海运输的趋势,具体来看,黄河沉积物入海后向北、向东、向南运移。研究区东北海域由于受渤海环流的影响,沉积物表现出明显的由海向岸的运移趋势。在整个研究区域内沉积物的来源是黄河输沙以及周围入海的小河流的输沙和沿岸冲刷的物质,其中主要以黄河输沙为主。

#### 参考文献:

- [1] 刘建强. 莱州湾海洋工程建设对小清河口环境影响数值研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.  
Liu Jianqiang. Numerical study on coastal engineering impact of Xiaoqing Estuary environmental[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012.
- [2] 程义吉, 高菁. 莱州湾海域水文特征及冲淤变化分析[J]. 海岸工程, 2006, 25(3): 1-6.  
Chen Yiji, Gao Jing. Analysis of hydrographic characteristics and changes in scour and silting in the Laizhou Bay area[J]. Coastal Engineering, 2006, 25(3): 1-6.
- [3] 刘艳霞, 黄海军, 杨晓阳. 基于遥感反演的莱州湾悬沙分布及其沉积动力分析[J]. 海洋学报, 2013, 35(6): 43-53.  
Liu Yanxia, Huang Haijun, Yang Xiaoyang. The transportation and deposition of suspended sediment and its dynamic mechanism analysis based on Landsat images in the Laizhou Bay[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2013, 35(6): 43-53.
- [4] 卢晓东, 刘艳霞, 严立文. 莱州湾西岸滩冲淤特征分析[J]. 海洋科学, 2008, 32(10): 39-44.  
Lu Xiaodong, Liu Yanxia, Yan Liwen. Analysis of character of beach erosion and accumulation in the west coast of Laizhou Bay[J]. Marine Sciences, 2008, 32(10): 39-44.
- [5] 江文胜, 王厚杰. 莱州湾悬浮泥沙分布形态及其与底质分布的关系[J]. 海洋与湖沼, 2005, 36(2): 97-103.  
Jiang Wensheng, Wang Houjie. Distribution of suspended matter and its relationship with sediment particle size in Laizhou Bay[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2005, 36(2): 97-103.
- [6] 蒋明丽. 粒度分析及其地质应用[J]. 石油天然气学报, 2009(1): 161-163.  
Jiang Mingli. Grain size analysis and geological application[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2009, 31(1): 161-163.
- [7] 肖晨曦, 李志忠. 粒度分析及其在沉积学中应用研究[J]. 新疆师范大学学报: 自然科学版, 2006, 25(3): 118-123.  
Xiao Chenxi, Li zhizhong. There search summary of grain size analysis and its application in the sedimentation[J]. Journal of Xinjiang Normal University (Natural Sciences Edition), 2006, 25(3): 118-123.
- [8] 石学法. 海洋沉积环境的基本参数和研究流程[J]. 海洋科学, 1992, 16(6): 30-33.  
Shi xuefa. Basic parameters and research process of marine sedimentary environment[J]. Marine Sciences, 1992, 16(6): 30-33.
- [9] 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.
- [10] Shepard F P. Nomenclature based on sand-silt-clay rations[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1954, 24: 151-158.
- [11] Folk R L, Ward W C. Brazos River bar: A study in the significance of grain-size parameters[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1957, 27: 3-26.
- [12] 范恩梅, 陈沈良, 张国安. 连云港近岸海域沉积物特征与沉积环境[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(2): 33-40.  
Fan Enmei, Chen Shenliang, Zhang Guoan. Sediment characteristics and sedimentary environment in Lianyungang coastal waters[J]. Marine Geology and Quate Geology, 2009, 29(2): 33-40.
- [13] 彭俊, 陈沈良. 连云港近岸海域沉积物特征与沉积环境分析[J]. 海洋科学进展, 2010, 28(4): 445-454.  
Peng Jun, Chen Shenliang. Analysis on sedimentary characteristics and environments in nearshore of Lianyungang[J]. Advances in Marine Science, 2010, 28(4): 445-454.
- [14] Gao S, Collins M. A Fortran program for grain size trend analysis to define net sediment transport pathways[J]. Computers and Geosciences, 1996, 22: 449-452.
- [15] McLaren P, Bowles D. The effects of sediment transport on grain size distribution[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1985, 55(4): 457-470.
- [16] Gao S, Collins M. Analysis of grain size trends for defining sediment transport pathways in marine environments[J]. Journal of Coastal Research, 1994, 10(1): 70-78.
- [17] Vinther N, Christiansen C, Bartholdy J, et al. Sediment transport across a tidal divide in the Danish Wadden Sea[J]. Danish Journal of Geography, 2004, 104(1): 71-86.
- [18] Stevens R L, Bengtsson H, Lepland A. Textural provinces and transport interpretation with fine-grained sediments in the Skagerrak[J]. Journal of Sea Research, 1996, 35(1-3): 99-110.
- [19] Poizot E, Mear Y, Thomas M, et al. The application of

- geostatistics in defining the characteristic distance for grain size trend analysis[J]. *Computers and Geosciences*, 2006, 32(3): 360-370.
- [20] Do M D, Mai T N, Chu V N, et al. Sediment distribution and transport at the nearshore zone of the Red River delta, Northern Vietnam[J]. *Journal of Asian Earth Science*, 2007, 29(1): 558-565.
- [21] Pedreros R, Howa H L, Michel D. Application of grain size trend analysis for the Determination of sediment transport pathways in intertidal areas[J]. *Marine Geology*, 1996, 135(1-4): 35-49.
- [22] Asselman E M. Grain-size trends used to assess the effective discharge for floodplain sedimentation, River Waal, the Netherlands[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1999, 69(1): 51-61.
- [23] 石学法. 海洋黏土矿物的研究进展与发展趋势[J]. *海洋地质动态*, 1995, 1: 1-3.  
Shi xuefa. Research progress and trend in marine minerals[J]. *Marine Geology Letters*, 1995, 1: 1-3.
- [24] 蓝先洪. 海洋沉积物中黏土矿物组合特征的古环境意义[J]. *海洋地质动态*, 2001, 17(1): 5-10.  
Lan Xianhong. The palaeoenvironmental significance of the clay minerals assemblage in marine sediments[J]. *Marine Geology Letters*, 2001, 17(1): 5-10.
- [25] 范德江, 杨作升, 毛登, 等. 长江与黄河沉积物中黏土矿物及地化成分的组成[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2001, 21(4): 7-12.  
Fan Dejiang, Yang Zuosheng, Mao Deng, et al. Clay minerals geochemistry of the sediments from the Yangtze and Yellow Rivers[J]. *Marine Geology and Quate Geology*, 2001, 21(4): 7-12.
- [26] 宋涅, 冯秀丽, 刘杰, 等. 凤凰岛东侧海域表层沉积物粒度分布特征与运移趋势分析[J]. *海洋科学*, 2016, 40(4): 94-99.  
Song Sheng, Feng Xiuli, Liu Jie, et al. Grain-size characteristics of sediments and transport patterns in the eastern sea area of Fenghuangdao Island[J]. *Marine Sciences*, 2016, 40(4): 94-99.

## Surface sediment grain size and clay minerals distribution and transport in the Laizhou Bay

FENG Li, FENG Xiu-li, SONG Sheng, XIAO Xiao, TIAN Dong-hui

(Key Laboratory of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

**Received:** Jan. 12, 2017

**Key words:** the Laizhou Bay; particle size analysis; clay mineral; hydrodynamic; migration trend

**Abstract:** In this paper, surface sediment samples and clay mineral samples collected from the Laizhou Bay were analyzed using particle size analysis, clay mineral content analysis, Flemming triangle mapping method, and Gao-Collins two-dimensional grain size trend analysis to study the sedimentary environment and sediment transport trend of the study area. The types of sediments in the study area are sandy silt, sandy sand, and clayey silt from the shore to the sea, and the surface sediments show a stripe-like characteristic of the parallel shoreline in the coastal area. Meanwhile, the average grain size, sorting coefficient, skewness, and peak state of the sediments also show good positive correlation or negative correlation. The clay minerals in the study area are illite, montmorillonite, chlorite, and kaolinite, and the distribution of illite is rather lower in the Yellow River Delta, but gradually increases toward the northeastern part of the study area. The rest of the clay minerals show high and low coastal sea distribution characteristics, mainly because of the Yellow River material input. In the study area of the Flemming triangulation, the sample points are mostly distributed in the area II and least distributed in the area III, indicating that the overall hydrodynamics of the study area is strong. The sample points are distributed in areas A to E, but are mostly distributed in areas C and D, indicating that the sediments are more concentrated in the study area. Generally, the sediments are transported from shore to sea. Specifically, the Yellow River sediments migrate northward, eastward, and southward. The sources of sediments are the Yellow River, surrounding rivers sediments transport, and coastal erosion around the study area.

(本文编辑: 刘珊珊)