

东海沙脊区沉积物粒度特征及其地质意义

李金铎, 蒋叶娟, 余海俊, 施兴安, 段悦

自然资源部宁波海洋中心, 浙江 宁波

收稿日期: 2025年4月12日; 录用日期: 2025年6月20日; 发布日期: 2025年6月30日

摘要

东海典型沙脊区域沉积物的粒度和输运特征的研究仍比较缺乏。根据2022年和2024年的沉积物采样和测试资料, 对研究区沉积物粒度特征及其沉积环境、输运趋势等地质意义进行分析讨论。结果表明, 峰脊区沉积物比槽洼区稍粗, 沉积物向上粗化, 分选性变好。研究区沉积物有一个突出的细砂组份, 但也含有多种粒级大小的细颗粒粉砂和粘土物质, 沉积环境比较复杂, 很可能是一种多源和多期沉积, 主体是低海面时期滨岸浅海沉积, 受到后期改造和/或现代悬浮细粒物质的混杂。研究区表层沉积物总体上呈现向东南外海输运的趋势。

关键词

粒度特征, 沙脊, 沉积物, 东海

Grain-Size Characteristics and Its Geological Significance in the East China Sea Sand Ridges Area

Jinduo Li, Yejuan Jiang, Haijun Yu, Xing'an Shi, Yue Duan

Ningbo Marine Center, Ministry of Natural Resources, Ningbo Zhejiang

Received: April 12th, 2025; accepted: Jun. 20th, 2025; published: Jun. 30th, 2025

Abstract

Studies on the grain size and transport characteristics of sediments in the typical sand ridge area of the East China Sea are still relatively lacking. Based on the sediment grain size test data in 2022 and 2024, the sediment grain size characteristics, sedimentary environment, transport trend and other geological significance of the study area were analyzed and discussed. The results show that the sediments in the peak ridge area are slightly coarser than those in the trough depression area, and

文章引用: 李金铎, 蒋叶娟, 余海俊, 施兴安, 段悦. 东海沙脊区沉积物粒度特征及其地质意义[J]. 地球科学前沿, 2025, 15(6): 983-990. DOI: 10.12677/ag.2025.156092

the sediments coarsen upward and become better sorted. The sediments in the study area have a prominent fine sand component, but also contain a variety of fine-grained silt and clay materials of various grain sizes. The depositional environment is relatively complex, and it is likely to be a multi-source and multi-phase deposition, with the main body being a coastal shallow marine deposition during the low-surface period, which was subjected to later modification and/or mixing by modern suspended fine-grained materials. The surface sediments in the study area show a general trend of transport to the south-east offshore.

Keywords

Grain-Size Characteristics, Sand Ridges, Sediment, East China Sea

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

海洋沉积物粒度特征能够反映出物源、沉积过程、演化趋势等地质和环境信息[1][2]。东海外陆架分布大面积的砂质沉积组成的沙脊,关于其沉积成因和时代及其在现代的活动性,前人的研究至今仍有分歧[2][3]。早期的研究认为是低海面时期的残留沉积[4][5],而后有学者指出沉积物经历了全新世海侵的改造而形成滨岸滨海相、河口浅海相变余沉积,即物质是老的,形态是新的[5][6],甚至可能经历了复杂多变的多期较强的冲积改造旋迴[2]。沙脊主要以大致 NW-SE 走向呈线状平行分布于水深 60~150 m 的外陆架,现今大部分的学者认为是全新世高海面(约 7 ka BP)之前水深较浅的时期由较强的往复潮流塑造形成的,因此称为线状潮流沙脊[7]-[9],高海面之后的现代海洋环境中,沙脊有迁移[8],至少沙脊的顶部仍然具有活动性[10][11],因此,不但沙脊形成过程中的潮流冲刷以及波浪对沉积物进行了再悬浮再沉积的改造,而且可能接受了现代沉积[2][12];也有学者认为不是潮流沙脊,而是末次海退三角洲体系,上覆海侵时期形成的席状砂体沉积[13]。然而,这些研究集中于对沙脊地貌形态、结构、成因和演化的研究,对典型沙脊区域沉积物的粒度和输运特征的研究仍比较缺乏。

水深 60~110 m 的区域是东海沙脊的主要分布区域[7],2022 年空间资源调查项目和生态监测项目在东海陆架进行了表层沉积物采样和多波束测量,2023 年基础调查项目在研究区进行了柱状样采样,本文根据沉积物粒度测试资料,对东海沙脊区典型沉积物粒度和分布特征及其输运特征进行了分析,探讨了研究区的沉积物在指示潮流沙脊形成演化方面的地质和环境意义。

2. 材料与方法

表层采样网格间距 10 Km (见图 1),箱式取样器采样,取表层 0~1 cm 样,置于聚乙烯袋中密封存于冷藏箱中带回陆地实验室测试。柱状取样采用插管法,在箱式采样的样品中采取 0~40 cm 的样品,两端盖帽蜡封,存于冷藏箱中。在实验室内,按照 2 cm 的间隔取样,每个柱状样取得 20 个样品进行测试分析。样品的采集、贮存、预处理按有关规范进行[14]。采用综合法(筛分法 + 沉析法)进行粒度分析。去除大的贝壳碎屑,取 5~10 g 样品放入玻璃烧杯,加入分散剂[NaPO₃]₆ 溶液和蒸馏水,浸泡一昼夜,倒入孔径 0.063 mm 孔径的筛子,蒸馏水反复冲洗,留在筛子上的粗粒物质烘干做筛分法分析,小于 0.063 mm 的物质冲洗入量筒之中,加入蒸馏水制成 1000 ml 悬液,用来做沉析法分析。根据 Stokes 沉降定律的原理,分别抽取各个粒级的悬液,烘干后称重,得到各粒级的质量分数。各粒级质量分数之和在 95%~105%

之间认为合格, 并据此进行各粒级质量分数校正, 超出上述范围的样品重新进行实验分析, 保证粒度分析结果的准确。沉积物粒级采用等比制 Φ 值($\Phi = -\log_2 D$, D 为用 mm 表示的粒径值)粒级标准, 根据粒度分析结果采用 Shepard 分类法对沉积物分类命名, 采用图解法公式计算粒度参数。

选用位于主要沙脊分布区的 249 站表层样和 2 个柱状样资料(见图 1)。图件采用 Suffer 16.0 和 Origin 2018 软件制作。

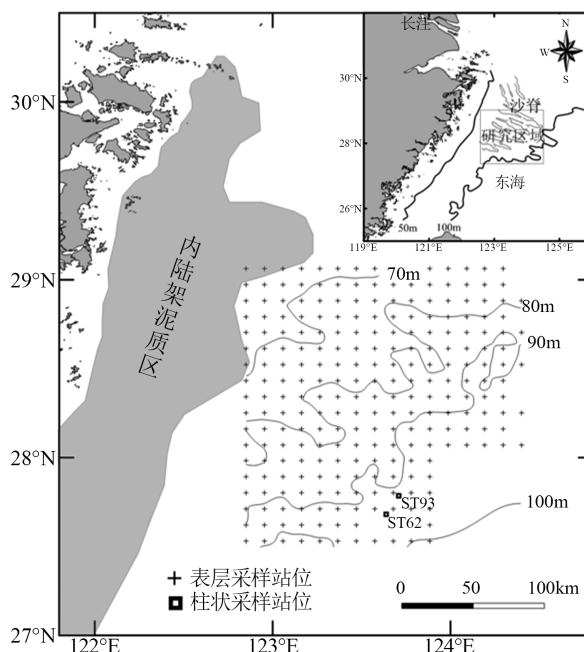


Figure 1. Investigated area and sampling position (modified from literature [3] [7] [8])

图 1. 研究区域位置和采样站位(参考文献[3] [7] [8])

3. 结果与讨论

3.1. 沉积物类型和分布

根据采样和测试结果, 研究区表层沉积物以细砂为主, 含有贝壳碎屑, 约占总站位的 3/4 以上, 分布在中部以东以南的大部分区域; 西北部以粘土质砂为主, 近岸少量站位为砂-粉砂-粘土。

研究区 28°N 以北和 123.5°E 的西北部海域, 水深 60~80 m, 沉积物从西北到东南外海方向逐渐变粗的趋势相当明显, 砂粒级含量从 40% 左右逐渐增大到 70% 左右(见图 2(a)), 同时, 粉砂和粘土粒级从各占 30% 左右逐渐减小到 15% 左右, 可以认为是位于外陆架砂质沉积和西侧内陆架泥质区的过渡区域的砂泥混合沉积[15], 受到了泥质区现代细颗粒沉积物在地形、海流、风浪等条件下向东南侧外海输运的影响[3] [12]。

在该区的东南侧的研究区大片海域, 沉积物比较均一, 粗细变化小, 砂粒级含量基本上在 70%~80%, 中值粒径在 3 Φ (125 μm) 左右(见图 2(b)), 受到现代陆源输入物质的影响较小。根据多波束测量结果, 选取明显位于峰脊区的 67 站和相邻的槽洼区的 59 站的沉积物进行对比(见表 1)。峰脊区的表层沉积物总体上比槽洼区稍粗, 平均粒径和中值粒径增大, 砂粒组百分含量增大 8% 左右, 粉砂粒组和粘土粒组含量相应各减小 4% 左右, 水深变浅 5~10 m 左右。峰脊区的表层沉积物粒级分布明显更正偏, 分选也较槽洼区好。柱状样粒度分析结果表明, 沉积物向上粗化, 分选性变好, 其中沙脊区更加明显(见图 3)。上述结果

表明, 研究区在沙脊地貌形成过程中, 沉积物经历了水动力改造, 使得粒度粗化, 分选性变好。

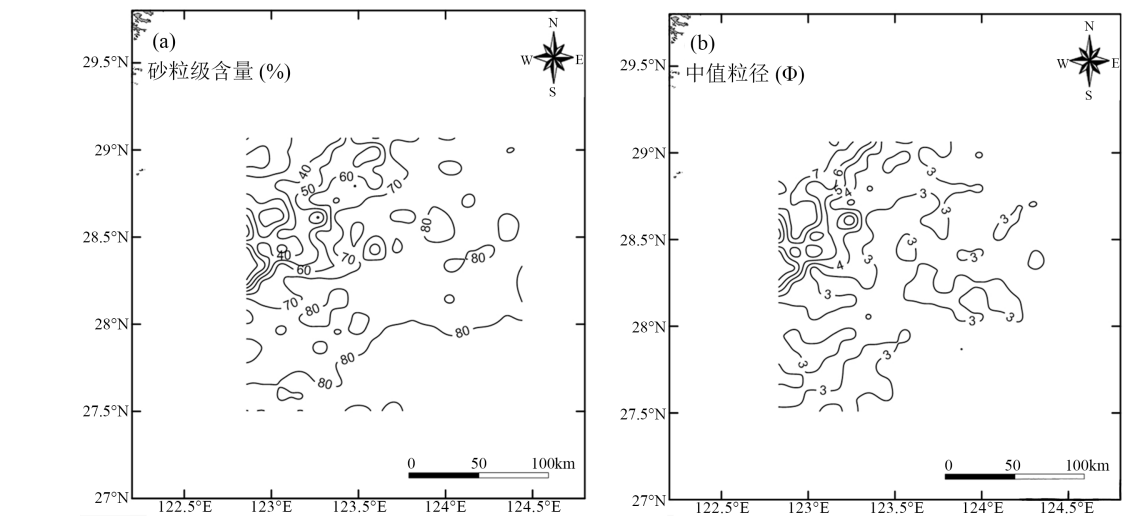


Figure 2. Distribution of sand concentration (%) (a), and median particle size (Φ) (b) of surface sediments in the study area
图 2. 研究区表层沉积物砂粒级含量(%), (a)和中值粒径(Φ), (b)分布图

Table 1. Characteristics of particles concentrations and grain-size parameters of surface sediments in ridge- and swale-region in the study area

表 1. 研究区峰脊区和槽洼区表层沉积物粒组含量和粒度参数特征值统计表

区域	特征值	粒组含量(%)			粒度参数(Φ 值)					参考水深(m)
		砂	粉砂	粘土	平均粒径	中值粒径	偏态值	峰态值	分选系数	
峰脊区 (n = 67)	平均值	77.36	10.05	12.59	3.52	2.63	0.82	2.27	1.99	79
	最大值	90.33	18.82	25.73	5.65	6.13	0.95	6.18	2.98	85
	最小值	57.56	4.49	7.77	2.39	2.08	0.62	0.60	1.44	67
槽洼区 (n = 59)	平均值	70.42	13.56	16.03	4.45	3.36	0.68	1.54	2.52	86
	最大值	84.43	29.08	35.22	5.70	6.52	0.90	2.58	2.90	105
	最小值	55.30	8.96	11.13	2.44	2.03	0.60	0.67	2.19	77

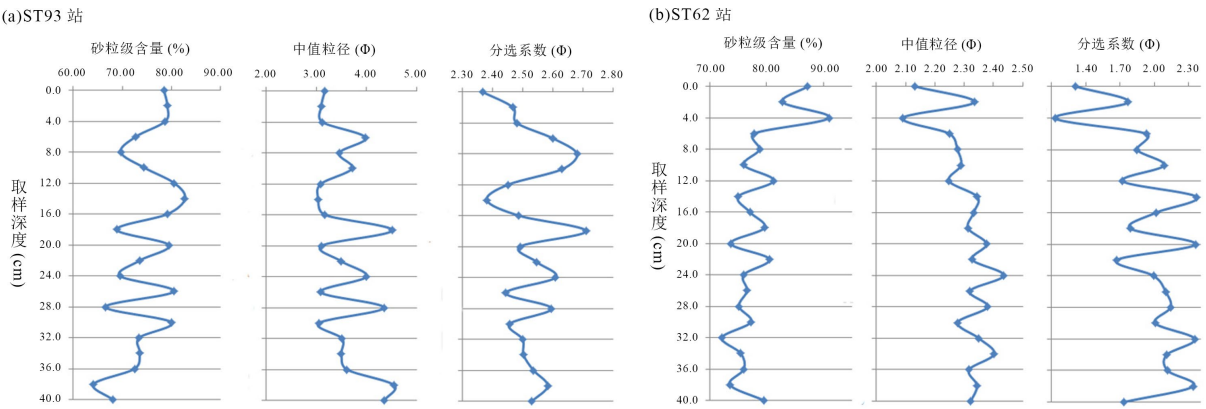


Figure 3. Vertical distribution of sand concentration (%), median particle size (Φ) and sorting coefficient(Φ) of core sediments in the study area: (a) ST93 in swale-region; (b) ST62 in ridge-region

图 3. 研究区柱状样砂粒级含量(%), 中值粒径(Φ)和分选系数(Φ)剖面分布图: (a) 槽洼区 ST93 站; (b) 峰脊区 ST62 站

3.2. 沉积物粒度参数和曲线特征

以研究区东南部槽洼区和峰脊区典型细砂沉积各粒级含量值做粒级分布的频率曲线和概率累积曲线(见图4)。两个区的沉积物粒度曲线特征差别不大。研究区沉积物频率曲线总体上呈现正偏的单峰态,峰态较尖,优势粒级集中在 $2\sim 3\Phi$ ($0.25\sim 0.125\text{ mm}$)粒级和 $3\sim 4\Phi$ ($0.125\sim 0.063\text{ mm}$),分别占35%~45%和20%~30%左右, $4\sim 10\Phi$ ($0.063\sim 0.001\text{ mm}$)各粒级含量一般都在5%左右。说明研究区沉积物有一个突出的粗粒组份(细砂),但也含有多种粒级大小的细颗粒粉砂和粘土物质,使得研究区沉积物分选性总体上较差[14],分选系数基本上都在 1Φ 以上(见表1)。说明原始沉积物分布比较均匀,后期水动力的改造主要表现为沙脊区和浅表层沉积物粗化, $4\sim 10\Phi$ 的细颗粒沉积物在潮流和波浪作用下再悬浮和再沉积,可能在较低海面时期浅水往复潮流的作用下形成脊槽地貌,但随着海平面的进一步上升,水动力条件变弱,冲刷改造作用结束[6][16],地貌和沉积物组成趋于稳定。高海面之后,研究区也可能受到现代沉积作用的影响,陆源细颗粒成分通过跨陆架搬运混入该区沉积物[12],和前述再悬浮作用共同形成了各占5%左右的 $4\sim 10\Phi$ 各粒级(见图4(a))。因此,研究区沉积环境比较复杂,很可能是一种多源和多期沉积[2]。

典型沉积物粒度概率曲线可分5段(图4(b)),极少量滚动组分,跃移段较陡,可分2段,第一段显著,第二段稍弱,分别占40%和30%左右,截点 3Φ 左右;悬移组分占30%左右,可分为2段,并有一个翘尾部分。沉积物的这种粒度概率图形与沙丘砂、海滩砂、浅海砂和一般河流砂都有较大差异,更接近于是一种河口三角洲或天然堤及其附近浅水弱流沉积[17]。与长江河口细砂沉积和陆架晚更新世三角洲砂质沉积物总体形态类似[18],但与之相比,研究区沉积物含有较多的悬移组分。双跃移组份说明物质沉积过程和/或后期可能受到不对称的双向水流的作用,70%左右的跃移组份占比显示沉积物的主体形成于低于现代海面的水动力较强的时期,总体上是一种河海交界处滨海、浅海相沉积[7]-[9],而30%左右的悬移组份又说明了沉积物受到后期改造和/或现代悬浮细粒物质的混杂[10]-[12]。

前人的研究也显示与本文一致的结论。东海陆架砂质沉积的碎屑矿物特征、粘土矿物特征、地球化学特征以及生物面貌等可以推断沉积物主体形成时属于水动力较强的河口海岸或滨海浅海环境[4][5],但是,在现代海平面背景下,海洋动力对沉积物进行了改造,比如重矿物增加和自生矿物的形成等[6]-[11]。

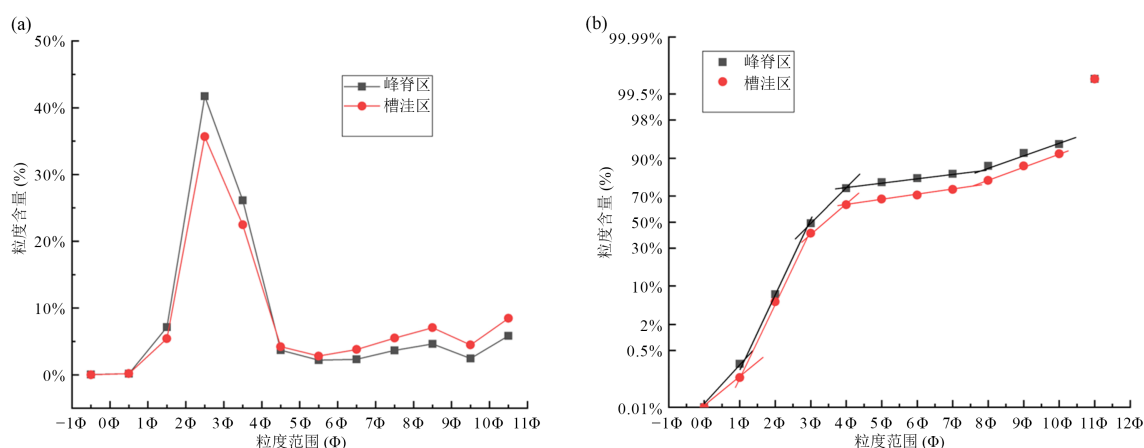


Figure 4. Grain-size frequency curves (%) (a) and cumulative frequency curves (b) of surface sediments in the study area

图4. 研究区表层沉积物粒级频率曲线(a)和概率累积曲线(b)

3.3. 沉积物动力和沉积环境

沉积动力分区图利用沉积物组成和水动力情况来区分沉积环境[19][20],以砂粒级百分含量的10%、

50%和 90%将沉积物分为 A、B、C、D 四类,反映沉积动力的强度大小,砂含量越高,水动力强度越强。根据粉砂/粘土组份含量的比值的 1/4、1 和 4 的三条辐射线将沉积物分为I、II、III、IV四类,反映水体的紊动程度。研究区沉积物主要落入到 B_{II}、B_I和 A 区域(见图 5)表明其形成时的水动力条件较强但介质紊动性不强[20],主体很可能是低海面时期滨岸浅海沉积。

典型沉积物的粒度-标准差曲线显示出两个主要峰值(见图 6), 177 μm ~250 μm (2.5~2 Φ)峰值最为突出,代表了含量最高的砂粒级, 88 μm ~125 μm (3.5~3 Φ)附近峰值也较为突出,上述两个环境敏感粒级代表了沉积物中占主体地位的两段跃移组份。细颗粒部分曲线较为平直,出现较多的微弱峰值,显示出细颗粒组份的影响。

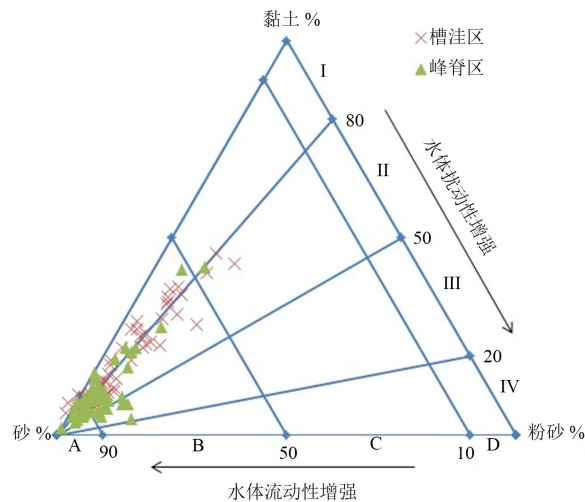


Figure 5. Pejrur ternary diagram for sedimentary environment dynamic classification of surface sediments in the study area
图 5. 研究区表层沉积物沉积环境动力分区 Pejrur 图

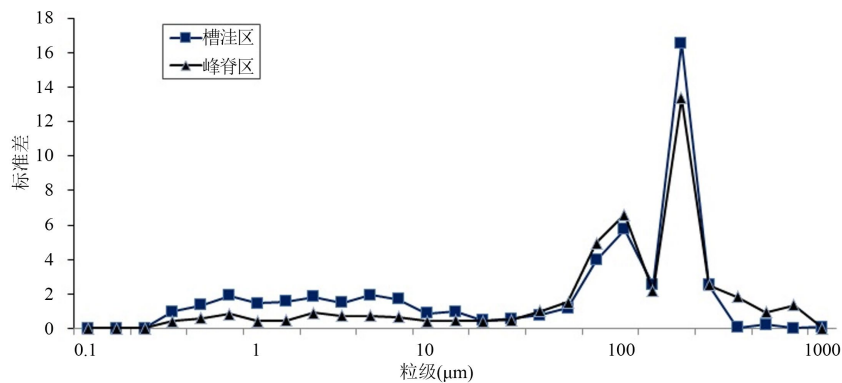


Figure 6. Grain-size grade (μm) and standard deviation curves of typical sediments in the study area
图 6. 研究区表层沉积物粒度-标准偏差曲线

3.4. 表层沉积物运移方向及其意义

依据粒径趋势分析方法做出沉积物运移趋势图[3] [21] (见图 7)。图像显示,研究区表层沉积物总体上呈现向东南外海输运的趋势,表明了东海外陆架砂质沉积主体仍然是来自西北侧陆域,很可能是古长江入海物质[7] [16],低海面时期形成滨岸浅海相沉积,冰后期海面上升过程中受到潮流、风浪的改造,

表层沉积物粗化, 粘土和粉砂粒级再悬浮并扩散到其他海域[5] [6], 并形成大致 NW-SE 走向的潮流沙脊地貌[7] [8]。至 7 ka BP 左右到达最高海面后, 由于台湾暖流对长江入海泥沙的阻隔作用[2] [3], 同时由于该区水深大于 60 m, 水动力条件较弱, 现代沉积作用基本停止[9]。

研究区西北部沉积物含有较多的粉砂和粘土, 在 28.5°N, 123°E 附近以此为中心呈现辐散状输运趋势, 可能是受到东海陆架上常年存在的上升流和下降流影响[3] [22]。中南部水深大于 90 m 海域少量站位显示 NW-SE 双向的输运趋势, 比如在 28°N, 123°E 和 28.5°N, 124.5°E 附近, 符合该区沙脊的潮流成因[8] [9]。

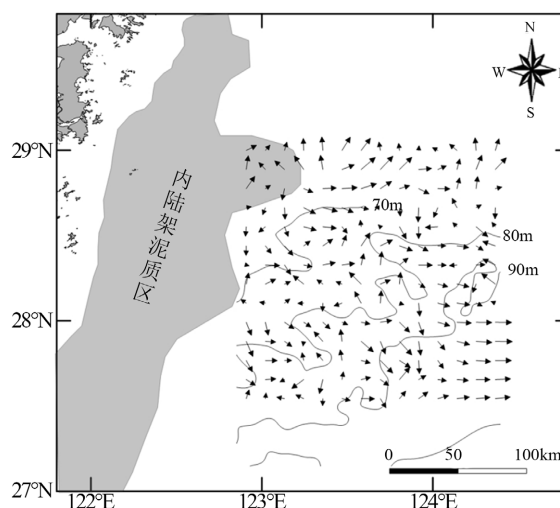


Figure 7. Transport tendency of the surface sediments in the study area
图 7. 研究区表层沉积物输运趋势

4. 结语

1) 研究区表层沉积物以细砂为主, 峰脊区沉积物比槽洼区稍粗, 分选也较槽洼区好, 柱状样沉积物向上粗化, 分选性变好。研究区沉积物有一个突出的细砂组份, 但也含有多种粒级大小的细颗粒粉砂和粘土物质, 沉积环境比较复杂, 很可能是一种多源和多期沉积。

2) 典型沉积物概率曲线表明沉积物类似于河口三角洲或天然堤及其附近浅水弱流沉积, 沉积动力分区图表明其形成时的水动力条件较强但介质紊动性不强, 主体很可能是低海面时期滨岸浅海沉积。典型沉积物的粒级-标准差曲线显示出两个位于砂粒级的主要峰值, 但也显示出沉积物受到后期改造和/或现代悬浮细粒物质的混杂。

3) 粒径趋势分析图像显示, 研究区表层沉积物总体上呈现向东南外海输运的趋势, 表明了东海外陆架砂质沉积主体来自西北侧陆域, 少量站位显示 NW-SE 双向的输运趋势显示了该区沙脊的潮流成因。

参考文献

- [1] Milliman, J.D., Qin, Y.S. and Park, Y.H. (1989) Sediments and Sedimentary Processes in the Yellow and East China Seas. In: Taira, A. and Masuda, F., Eds., *Sedimentary Facies in the Active Plate Margins*, Terra Scientific, 233-249.
- [2] Wang, Z.B., Lu, K., Wen, Z.H., et al. (2020) Grain Size Compositions and Their Influencing Factors of the Surface Sediments in Eastern China Seas. *Earth Science*, **45**, 2709-2721.
- [3] 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): 1-6.
- [4] 刘锡清. 中国陆架的残留沉积[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1987(7): 1-14.

- [5] 沈华悌. 东海陆架残留沉积时代和成因模式[J]. 海洋学报, 1985, 7(1): 69-79.
- [6] 陈方. 中国东南部海岸砂与大陆架砂沉积特征比较及其环境意义[J]. 第四纪研究, 1997, 17(4): 367-375.
- [7] Wu, Z., Jin, X., Cao, Z., Li, J., Zheng, Y. and Shang, J. (2010) Distribution, Formation and Evolution of Sand Ridges on the East China Sea Shelf. *Science in China Series D: Earth Sciences*, **53**, 101-112. <https://doi.org/10.1007/s11430-009-0190-0>
- [8] Liu, Z., Berné, S., Saito, Y., Yu, H., Trentesaux, A., Uehara, K., *et al.* (2007) Internal Architecture and Mobility of Tidal Sand Ridges in the East China Sea. *Continental Shelf Research*, **27**, 1820-1834. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2007.03.002>
- [9] Uehara, K. and Saito, Y. (2003) Late Quaternary Evolution of the Yellow/East China Sea Tidal Regime and Its Impacts on Sediments Dispersal and Seafloor Morphology. *Sedimentary Geology*, **162**, 25-38. [https://doi.org/10.1016/s0037-0738\(03\)00234-3](https://doi.org/10.1016/s0037-0738(03)00234-3)
- [10] 苏大鹏, 胡刚, 刘健, 等. 东海陆架区潮流沙脊的沉积动力学[J]. 海洋地质动态, 2008, 24(6): 15-18.
- [11] 印萍. 东海陆架冰后期潮流沙脊地貌与内部结构特征[J]. 海洋科学进展, 2003, 21(2): 181-186.
- [12] Zhang, K., Li, A., Huang, P., Lu, J., Liu, X. and Zhang, J. (2019) Sedimentary Responses to the Cross-Shelf Transport of Terrigenous Material on the East China Sea Continental Shelf. *Sedimentary Geology*, **384**, 50-59. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2019.03.006>
- [13] 杨文达. 东海海底沙脊的结构及沉积环境[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2002, 22(1): 9-16.
- [14] 中华人民共和国国家技术监督检验检疫总局、中国国家标准化管理委员会. GB/T12763-2007 海洋调查规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [15] 李家彪. 东海区域地质[M]. 北京: 海洋出版社, 2008.
- [16] Li, G., Li, P., Liu, Y., Qiao, L., Ma, Y., Xu, J., *et al.* (2014) Sedimentary System Response to the Global Sea Level Change in the East China Seas since the Last Glacial Maximum. *Earth-Science Reviews*, **139**, 390-405. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.09.007>
- [17] Visher, G.S. (1969) Grain Size Distributions and Depositional Processes. *Journal of Sedimentary Petrology*, **39**, 1074-1106.
- [18] 庄克琳. 长江水下三角洲的沉积特征[D]: [博士学位论文]. 青岛: 中国海洋大学, 2005.
- [19] Pejrup, M. (1988) The Triangular Diagram Used for Classification of Estuarine Sediments: A New Approach. In: de Boer, P.L., van Gelder, A. and Nio, S.D., Eds., *Tide-Influenced Sedimentary Environments and Facies*, Springer, 289-300. https://doi.org/10.1007/978-94-015-7762-5_21
- [20] 章伟艳, 张霄宇, 金海燕, 等. 长江口-杭州湾及其邻近海域沉积动力环境及物源分析[J]. 地理学报, 2013, 68(5): 640-650.
- [21] le Roux, J.P., O'Brien, R.D., Rios, F. and Cisternas, M. (2002) Analysis of Sediment Transport Paths Using Grain-Size Parameters. *Computers & Geosciences*, **28**, 717-721. [https://doi.org/10.1016/s0098-3004\(01\)00074-7](https://doi.org/10.1016/s0098-3004(01)00074-7)
- [22] Hu, D.X. (1984) Upwelling and Sedimentation Dynamics: I. The Role of Upwelling in Sedimentation in the Huanghai Sea and East China Sea: A Description of General Features. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, **2**, 12-19. <https://doi.org/10.1007/bf02888388>