

冯永财, 郝连成, 胡延斌, 等. 渤海湾曹妃甸海域沉积物粒度分布特征及运移趋势分析[J]. 海洋地质前沿, 2024, 40(11): 57-69.

FENG Yongcai, HAO Liancheng, HU Yanbin, et al. Characterization of grain size distribution of sediments and transport trend analysis in Caofeidian sea area, Bohai Bay[J]. Marine Geology Frontiers, 2024, 40(11): 57-69.

# 渤海湾曹妃甸海域沉积物粒度分布特征 及运移趋势分析

冯永财<sup>1,2</sup>, 郝连成<sup>1,2</sup>, 胡延斌<sup>1,2\*</sup>, 褚宏宪<sup>1,2</sup>, 李佳林<sup>1,2</sup>, 远继东<sup>1,2</sup>, 黄杏<sup>1,2</sup>, 陈晓日<sup>1,2</sup>, 王超<sup>1,2</sup>

(1 中国地质调查局烟台海岸带地质调查中心, 烟台 264000;

2 自然资源部黄河入海口陆海交互作用野外科学观测研究站, 烟台 264000)

**摘要:**对渤海湾曹妃甸海域 161 个表层沉积物样品进行了粒度组分和参数分析, 利用 Pejrup 三角投图进行沉积动力环境分区, 并运用 GAO-COLLINS 模型模拟沉积物输运趋势。结果显示, 研究区表层沉积物类型包括砂、粉砂质砂、泥质砂、砂质粉砂、粉砂和黏土。粉砂分布范围最广, 其次为粉砂质砂。粒度从东北向西南由粗变细, 分选性逐渐变好。研究区东、西方向各有一个沉积中心, 且二者沉积物输运趋势差异明显。东部海域沉积中心表现为北侧离岸输运, 南侧向近岸输运, 西侧向东输运; 西部海域沉积中心表现为向西南、向西和向北输运。物源、地形地貌和水动力条件是物质输运的主要控制因素。结合周边工程环境因素、海底地形地貌、海流和地质背景等信息, 在 Pejrup 三角图上, 研究区沉积动力环境可划分成 3 个区, 各区沉积动力强度与沉积物类型分布具有较好的对应关系。研究区物质运输主要受潮流、波浪和渤海湾环流控制。本研究揭示了曹妃甸南部海域现代沉积特征和水动力特征, 可为曹妃甸围海造陆后海域沉积环境变化研究提供基础资料。

**关键词:**曹妃甸; 表层沉积物; 粒度参数; 沉积动力环境; 沉积物输运趋势

中图分类号: P736.21

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2024.089

## 0 引言

粒度特征作为沉积物及沉积岩分类的定量指标, 是沉积物和沉积岩的主要特征之一<sup>[1]</sup>, 可用于判别海洋沉积动力环境和沉积物物源等。近年来, 众多学者在中国近海海域开展了相关研究, 主要集中在粒度特征、沉积环境和运移趋势分析等方面<sup>[2-5]</sup>。前人对渤海海域表层沉积物粒度特征做了大量研究, 多以小比例尺为主对渤海海域表层沉积物粒度、

运移趋势和沉积环境等整体特征进行分析<sup>[6-7]</sup>。渤海湾内高密度取样研究集中在渤海湾西部<sup>[8-12]</sup>, 研究内容以表层沉积物粒度分布特征和泥沙来源等为主。渤海南部海域研究程度较高, 主要集中在莱州湾和黄河三角洲海域<sup>[2,3,13-14]</sup>, 开展表层沉积物粒度分布特征、粒度对环境响应分析和动力环境分析研究。渤海湾北部海域表层沉积物粒度研究程度较低, 相关研究多集中在滦河口附近海域<sup>[15-17]</sup>, 研究重点为表层沉积物粒度分布特征、沉积物运移趋势和动力环境等。而曹妃甸近岸海域关于沉积物粒度的研究以围绕曹妃甸周边的稀少数量样品研究为主, 研究成果主要为粒度特征和沉积环境方面<sup>[18-20]</sup>, 缺少高密度粒度分析资料, 围绕粒度特征分析沉积动力环境和泥沙输运趋势的研究鲜有报道。本文基于 2021 年在曹妃甸海域采集的 161 站位表层沉积物样品粒度分析资料, 对沉积物粒度分布特征、沉积物输运趋势和沉积动力环境进行了探

收稿日期: 2024-04-11

资助项目: 中国地质调查局项目(DD20211553, DD20230073, DD20230412); 国家自然科学基金(41276060); 自然资源综合调查指挥中心科技创新基金(KC20220011)

第一作者: 冯永财(1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事海洋地质调查方面的研究工作。E-mail: fyc1107@163.com

\* 通讯作者: 胡延斌(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事海洋地质调查方面的研究工作。E-mail: gojoyo@163.com

讨和分析, 研究结果可为围海造陆后的海域沉积环境变化研究提供基础资料。

## 1 研究区概况

渤海湾位于渤海西部, 面积约 15 000 km<sup>2</sup>, 黄河、海河、滦河等主要河流在此汇入渤海。研究区位于渤海湾北部曹妃甸海域(图 1), 区域内以人工岸线为主, 呈“南有深槽、北靠浅滩”的地理格局, 在地质构造、潮流以及波浪的共同作用下, 形成滩槽结合、地形急剧变化的地形地貌特征。渤海湾海底地形地貌较为复杂, 由东向西划分为老龙沟潟湖、曹妃

甸深槽和南堡海岸 3 个地貌体系单元<sup>[21]</sup>。曹妃甸深槽位于曹妃甸码头南部约 600 m 处, 2023 年测得其最大水深达 43.5 m, 是渤海湾内天然形成的最深水域, 近 EW 走向, 海底天然冲刷形成三角形条带侵蚀洼地, 是渤海唯一天然形成的可停靠 30 万吨级船舶港址。曹妃甸围填海工程是中国最大的吹沙填海造陆工程, 规划总围垦面积约 310 km<sup>2</sup><sup>[22]</sup>, 于 2003 年开工建设, 2005 年开始大规模填海造陆, 2006 年建设曹妃甸码头, 2007 年填筑潮间带, 2008—2011 年在完善海上填海造地的同时, 向陆地发展, 至 2013 年曹妃甸围填成为面积约 250 km<sup>2</sup> 的大型工业示范区<sup>[18,23]</sup>。

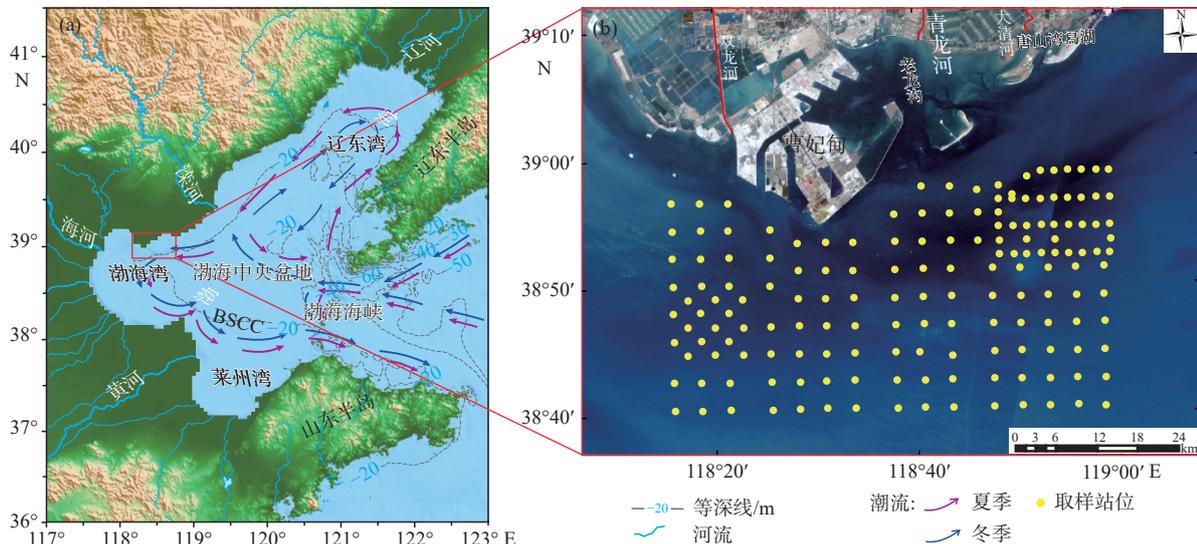


图 1 研究区位置 (a) 及样品分布 (b)

Fig.1 Location of research area (a) and sample distribution (b)

渤海属于暖温带半湿润季风气候。潮汐主要受黄河口外半日潮、秦皇岛外半日潮和渤海海峡半日潮 3 类潮流旋转潮波影响<sup>[24]</sup>, 潮流呈往复运动, 涨潮由东向西运动, 落潮由西向东运动。曹妃甸甸头海域平均高潮位为 0.81 m, 平均低潮位为 -0.73 m, 平均潮差为 1.54 m。海浪以风浪为主, 常浪向为 S、SE 向, 强浪向为 ENE、NE 向, 最大波高 4.9 m<sup>[22,25]</sup>。渤海湾内冬、夏季节环流路径相同。夏季主要为黄海暖流, 由渤海海峡北部进入渤海后分为两支, 一支沿辽东湾西部逆时针流动, 在滦河口附近与另一支海流汇合流入渤海湾, 在渤海湾内逆时针沿黄河三角洲和莱州湾沿岸流动, 在渤海海峡南部流出渤海; 冬季黄海暖流由渤海海峡北部进入渤海后在滦河口附近分为两支, 一支顺时针流入辽东湾, 另一支逆时针流入渤海湾, 流动路径与夏季海流

路径相同<sup>[26-27]</sup>。

## 2 材料与方法

### 2.1 样品来源

2021 年 9—10 月, 中国地质调查局烟台海岸带地质调查中心在渤海曹妃甸海域取得表层沉积物样品 161 站位(图 1), 本次样品使用箱式取样器采样, 取样间距约为 1 km×1 km 至 4 km×4 km 不等, 每站位取样深度不少于海底以下 40 cm, 使用无污染取样铲采集表层 0~2 cm 沉积物作为粒度测试样品, 每次采样结束清洗取样铲以备下次取样, 采集样品装入聚乙烯封袋, 编号保存, 待送样测试。

## 2.2 研究方法

在实验室采用安东帕 PSA1190LD 激光粒度分析仪对表层沉积物粒度进行测试, 仪器测量范围为 0.04~2500 μm, 精度优于 ±3%。样品处理流程: 将 0.5 g 样品放入离心管中, 加入 30% 的 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 和 10% 的 HCl 去除沉积物中的有机质和碳酸盐; 然后, 加入 0.5 mol/L 的六偏磷酸钠并经超声波完全分散后, 上机测试。沉积物粒级标准采用 (Udden-Wentworth) Φ 粒级标准<sup>[28]</sup>, 粒度参数计算采用 Folk-Ward 方法计算<sup>[29]</sup>, 沉积物命名和分类采用 Folk 三角分类法<sup>[19]</sup>, 使用 Surfer 软件中的 Kriging 插值法进行粒度组分和粒度参数等值线图绘制。

采用 Pejrup 分类法进行沉积动力环境分区, 以沉积物中砂、粉砂和黏土为端元, 绘制 Pejrup 三角图<sup>[30]</sup>来区分水动力强度, 该方法能够很好地划分沉积动力环境, 这在许多学者的运用中得到了证明<sup>[31]</sup>。Pejrup 沉积物分类方案中, 按照黏土比例划分为 I、II、III、IV 区, 水动力依次增强; 按照含砂量多少依次划分为 A、B、C、D 区, 沉积物粒径依次变细, 水动力依次减弱。

运用 GAO-COLLINS 模型<sup>[32-33]</sup>进行沉积物输运趋势计算。该模型利用沉积物平均粒径、分选系数和偏态 3 个参数来模拟研究区沉积物输运趋势<sup>[34]</sup>, 在粒径趋势模拟过程中要选择合适的特征距离, 以保证粒度趋势分析的合理性<sup>[35]</sup>。该模拟方法操作简单结果明确, 诸多学者在多类型海域进行了应用, 模拟运移趋势成果可靠<sup>[36-39]</sup>。其基本原理是运用沉积物粒度参数的变化趋势来确定净输运方向, 具体计算公式<sup>[32]</sup>如下:

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

式中:  $\vec{R}(x,y)$  为合矢量;

$n$  为采样站位的趋势矢量总数;

$\vec{r}(x,y)$  为各站位的趋势矢量。

为了消除图像中的“噪声”, 将合矢量进行平滑处理, 即取所有矢量平均值, 公式如下:

$$\vec{R}_m(x,y) = \frac{1}{k+1} \left[ \vec{R}_m(x,y) + \sum_1^k \vec{R}_j(x,y) \right] \quad (2)$$

式中:  $R_j$  为合矢量;

$K$  为相邻采样点总数;

$\vec{R}_m(x,y)$  为平滑处理后的趋势矢量, 其平面分布图像即代表表层沉积物净输运格局。

## 3 分析结果

### 3.1 沉积物类型及分布特征

研究区沉积物类型按照 Folk 三角分类法的不含砾碎屑分类方案可分为砂、粉砂质砂、泥质砂、砂质粉砂、粉砂、黏土 6 种类型(图 2a), 其中, 粉砂质砂、砂质粉砂、粉砂占比约 90.68%。粉砂分布范围最广, 在研究区西北部和南部呈带状对称分布; 砂在东部零星分布, 粉砂质砂在东北部和中部海域呈带状分布, 泥质砂零星分布在粉砂质砂中间, 砂质粉砂在研究区中部和北部呈带状或团块状分布, 黏土主要分布于研究区西部(图 2b)。

### 3.2 表层沉积物粒级组分特征

测试结果显示, 曹妃甸南部海域表层沉积物粒度组分主要为砂(0~98.61%)、粉砂(0.87%~79.05%)

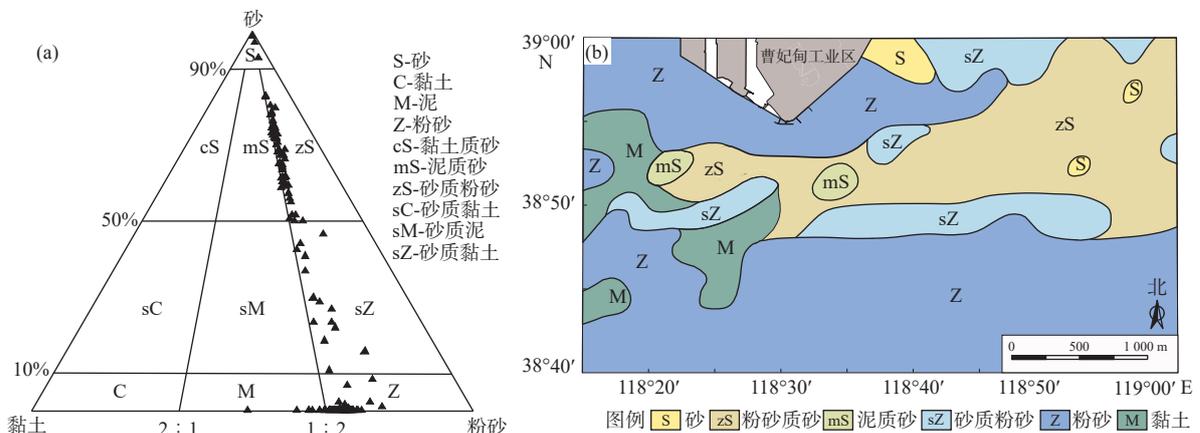


图 2 沉积物 Folk 三角分类图 (a) 和沉积物类型分布图 (b)

Fig.2 The Folk's classification of sediments (a) and distribution of sediment types (b)

和黏土(0.52%~51.11%),其体积质量百分比平均值分别为 28.17%、50.38% 和 21.45%,因此,研究区沉积物以粉砂为主。砂粒级高值区分布于研究区

东北部,粉砂粒级高值区分布于曹妃甸工业区周边海域及研究区南部海域,在区内含量百分比最高,黏土粒级高值区位于研究区西北部(图 3)。

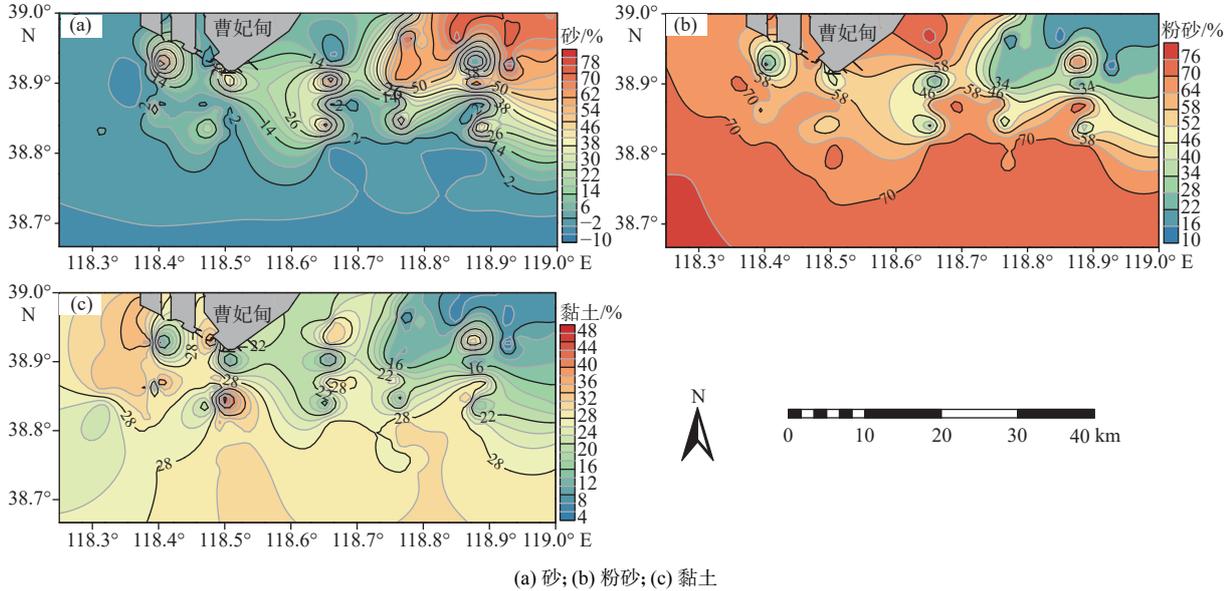


图 3 表层沉积物粒度组分分布

Fig.3 Grain size composition distribution of surface sediments

### 3.3 沉积物粒度参数及分布特征

沉积物粒度参数能够较好地反映粒度特征,对沉积环境及物源分析有较好的指示作用。粒度参数分布情况见图 4,平均粒径变化范围为 1.40Φ~8.23Φ,平均值为 5.73Φ,平均粒径表现为由东北向

西南逐渐减小的趋势,较粗粒径沉积物分布于研究区东北部,深槽海域零星出现。平均粒径能够反应沉积介质的平均动能大小,一般粗粒径代表区域水动力强。因而,推测研究区水动力整体为由东北向西南逐渐减弱,深槽海域水动力强。分选系数变化范围为 0.67~2.91,平均值为 2.00,整体分选中等一

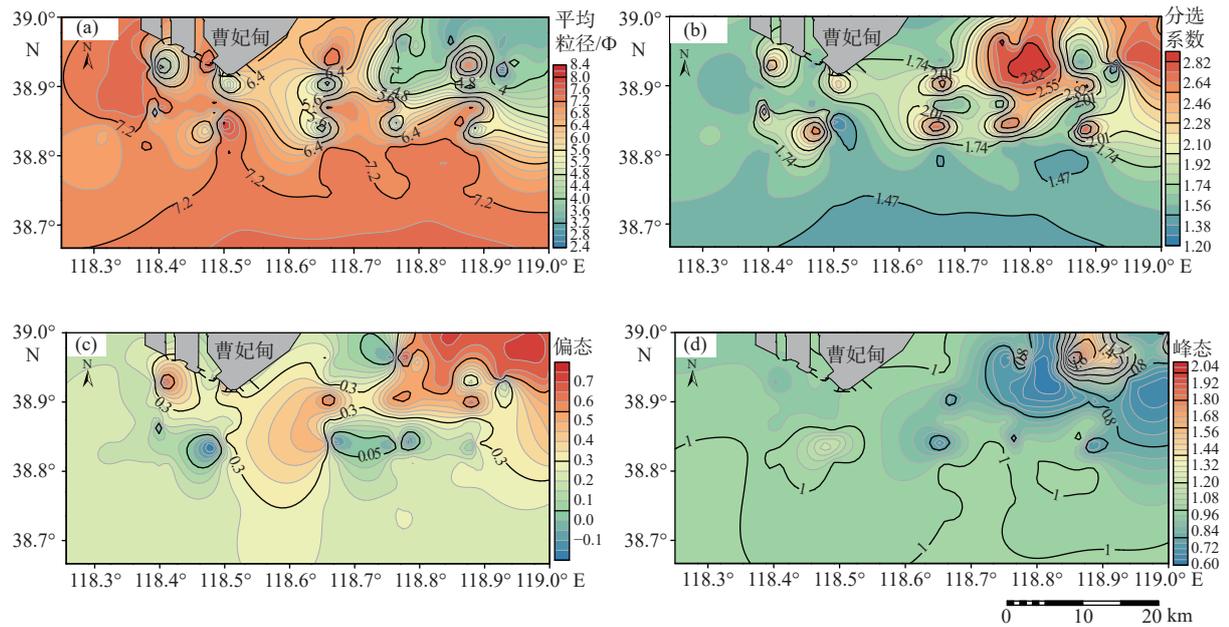


图 4 表层沉积物粒度参数分布

Fig.4 Grain size parameter distribution of surface sediments

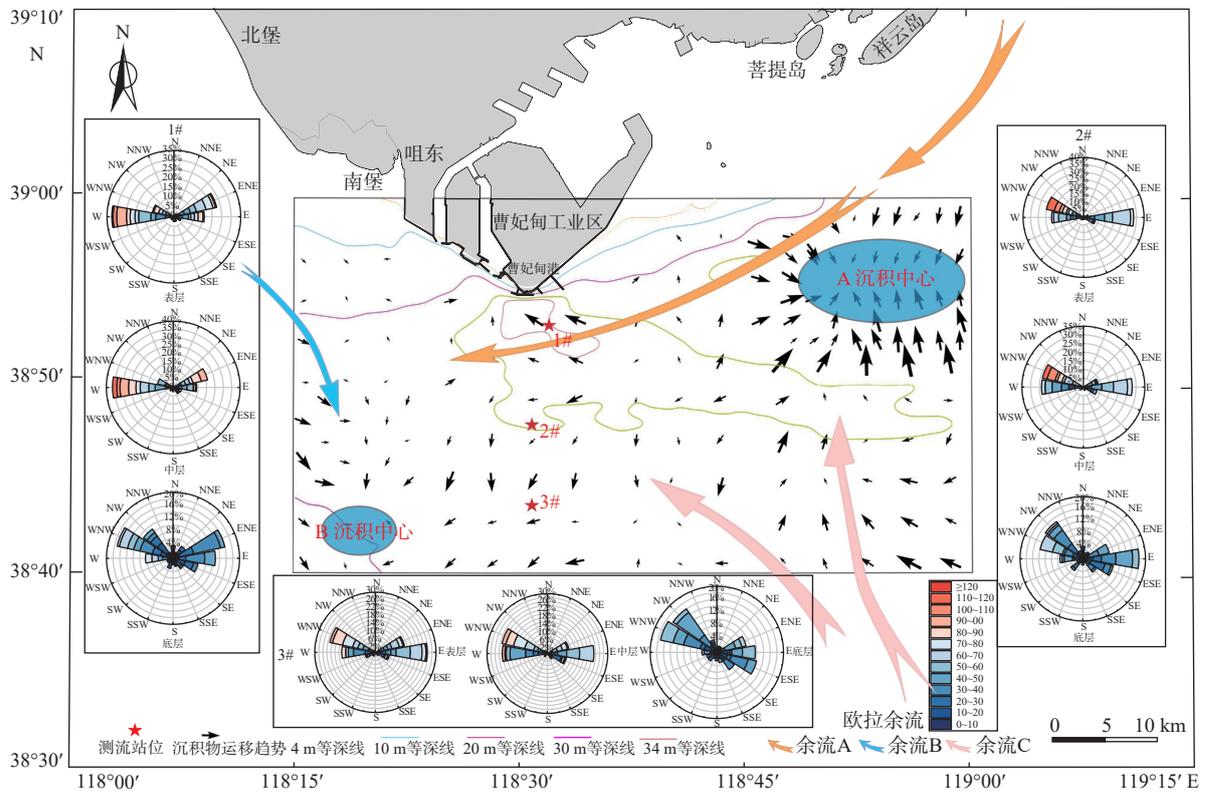
很差,分选系数呈现由西南向东北升高、分选逐渐变差的趋势。东部和中部底质为砂和粉砂质砂,分选性差—很差;南部底质为粉砂,分选性相对较好,为中等分选。偏态反映粒度频率曲线对称情况,指示沉积物成因。区内偏态变化范围为-0.22~0.72,平均为 0.33,绝大部分海域为正偏态,底质沉积物粒径较细,搬运能力弱;东北部海域范围及中部海域断续出现负偏态,底质沉积物粒径较粗,搬运能力强,细粒沉积物亏损。峰态变化范围为 0.66~2.36,平均为 0.97。大部分样品峰度值 < 1.11,粒度频率曲线呈正态分布;东北海域部分站位粒度峰度值 > 1.11,且局部出现极端峰度值,粒度频率曲线尖锐,指示沉积物砂含量较高;大部分海域呈宽平峰态,

峰态表现为由东北向西南先减小后增大的趋势,峰度出现异常值指示沉积物来自于多物源混合沉积,结合偏度特征分析,研究区沉积物为多物源碎屑河流相沉积。

### 4 讨论

#### 4.1 沉积物输运趋势及影响因素分析

本文运用 GAO-COLLINS 模型模拟了沉积物输运趋势,计算使用测区 161 站位表层沉积物粒度参数,选用最大取样间距 5.8 km 为特征距离,获得研究区沉积物输运趋势矢量图(图 5)。



图中箭头方向代表沉积物输运方向,矢量长度仅表示粒径趋势的显著性,大小不具有其他代表性意义 [34,40-41]

图 5 表层沉积物输运趋势及流速和流向玫瑰图

Fig.5 Transport trend of surface sediments and rose diagram of flow velocity and flow direction

研究区海域沉积物输运趋势形成东、西 2 个沉积中心,明显呈现不同特征。东北部海域沉积物输运趋势呈现北侧离岸输运,南侧逆时针向近岸输运,且输运趋势显著性强,指向东北部粗粒物质汇集区,形成东部沉积中心 A。西部沉积中心 B 位于研究区西南海域,沉积物输运趋势呈现西侧顺时针,东侧向西南和向南输运,输运趋势指向沉积中心 B,西侧和东北侧粒径趋势显著性比南侧和东南侧显著

性强。曹妃甸近岸海域输运趋势矢量箭头较为杂乱,除深槽海域显著性较强外,其他区域显著性较弱,东侧输运趋势向东北,深槽海域向西北和西南,西部海域向西和向东,可能是受曹妃甸围填海等人类活动以及“边缘效应”的影响,导致边界输运趋势的不准确性。

海洋沉积物输运影响因素较多,以物源、地形地貌和水动力条件为主。曹妃甸海域表层沉积物

由砂、粉砂和黏土组成,主要来源于海河、黄河和滦河<sup>[18,20,42-44]</sup>。研究区黏土矿物、碎屑矿物和元素地球化学等研究表明,细粒物质主要来源于海河和黄河,滦河及其他周边中小河流提供较少物源,而东北部粗粒物质主要来源于滦河。滦河在20世纪80年代以前向海输入了大量泥沙,以砂为主,细粒物质较少<sup>[45]</sup>,在潮流、波浪和沿岸流作用下参与曹妃甸海域滩槽地貌演变,是该区重要的粗粒泥沙来源之一,滦河泥沙入海后沉积在滦河-曹妃甸沿岸区域<sup>[46]</sup>,80年代以后,受上游水库和引水工程影响,泥沙输入急剧减少,1980—2003年总输沙量为167.1万t,仅为多年平均值的10.8%,目前滦河输沙量非常有限<sup>[47]</sup>。

潮流和波浪是研究区重要的水动力条件,潮流特征为东西向往复流,涨潮流向西,落潮流向东,大潮涨潮时平均流速为0.40~0.60 m/s,落潮时平均流速为0.35~0.50 m/s<sup>[48]</sup>,主流流向在近岸浅海区平行岸线或沿等深线运动<sup>[25]</sup>,潮流流速涨潮大于落潮,是区内泥沙运输的重要动力因素;潮流系统还控制着研究区海底地形地貌特征,形成了中部深槽地貌(2023年实测最大水深43.5 m,呈三角状)、深槽东西两侧潮流砂脊地貌(砂脊体呈W和SW向,水深20~30 m,带状分布)和南侧水下堆积平原地貌(地形起伏较小,水深约25 m)体系。深槽地貌是在曹妃甸岬角地貌效应作用下逐渐形成,潮流经深槽海域流速增加,水动力增强,底层泥沙被冲刷带走逐渐形成深槽地貌格局。围填海之前深槽海域冲淤基本处于平衡状态,围填海之后深槽海域水动力增强,2023年实测水深达43.5 m,说明围填海后深槽仍处于冲刷状态,潮流作用是塑造和维持深槽水深的主要动力因素<sup>[47]</sup>。潮流砂脊地貌受往复潮流控制,潮脊与潮沟是潮流作用过程中侵蚀与堆积的不同表现<sup>[49]</sup>。潮沟为重要的潮流通道,在强水动力条件下,砂脊受到反复淘洗,细粒物质再悬浮随流运输,导致沉积物粒径整体偏粗。余流(渤海湾环流)场控制着研究区细粒级物质的搬运,是水下堆积平原地貌形成的主要控制因素。相关研究表明,余流通过持续不断的平流输送,在物质输送方面发挥重要作用,余流的分布和变化规律对泥沙输运研究具有重要意义<sup>[50-51]</sup>。

波浪作用是北侧沙坝体泥沙掀起再悬浮的重要动力因素,研究区海浪以风浪为主,常浪向为S、SE向,最大波高4.9 m。全新世早期古滦河在曹妃甸海域入海,形成古滦河三角洲体系,在全新世中

期古滦河改道东移,泥沙供应减少,古滦河三角洲前缘受波浪和潮流改造,形成沙坝-潟湖体系<sup>[16,52]</sup>。后期继续受波浪和潮流改造,滨外坝受到侵蚀向岸移动,泥沙被掀起再悬浮,再悬浮泥沙以细砂为主,含一定量粉砂<sup>[53]</sup>,在离岸流的作用下,沉积中心A北侧物质离岸向海输运,表现出波浪掀沙,潮流输运的特征,这与该区域计算粒度运移趋势结果(向南汇集)相同,形成东北部潮流砂脊区粗粒泥沙沉积,为潮流砂脊提供物质来源,细粒泥沙向外扩散,随着沉积动力减弱,逐渐沉积。唐山湾潟湖细颗粒再悬浮沉积物,落潮时被带出潟湖<sup>[54]</sup>,随流搬运,也是研究区泥沙来源之一。渤海湾欧拉余流控制细粒物质循环,在渤海湾南部形成1个逆时针环流旋涡,东部形成1个小的逆时针环流旋涡,北部形成1个顺时针环流旋涡<sup>[55]</sup>,沉积中心A南侧受到渤海湾南部形成的逆时针环流影响,研究区西部物质主要向北部输送,北侧物质受沿岸流和W—WE向波浪控制,综合表现为向西南方向输运,沿岸流受曹妃甸堤坝阻挡,使曹妃甸东侧物质表现为背离堤岸向东输运的特征。西部沉积中心西北侧受渤海湾北部顺时针环流影响,物质向东南输运;东侧物质受沿岸流控制向西输运;受渤海湾南部形成的逆时针环流影响,南侧物质向北输运。

采用ADCP获取研究区3个站位底层、中层和表层大潮期25小时流速和流向(图5),3个站位周边底质为粉砂,统计分析得出各站位垂向上优势流为中层海流,1#站位位于曹妃甸深槽内东侧,水深约34 m,1#中层流涨潮最大流速1.13 m/s,平均流速0.58 m/s,落潮最大流速0.95 m/s,平均流速0.48 m/s,中层流主要为W和E—ENE向,W向中层流占一定优势,与附近模拟站位的沉积物输运趋势方向大致相同,说明该区域沉积物主要受潮流控制。2#站位位于曹妃甸码头南部约12 km处,水深约30 m,2#中层流涨潮最大流速1.17 m/s,平均流速0.58 m/s,落潮最大流速0.71 m/s,平均流速0.43 m/s,中层流主要为W—WNW和E向,W—WNW向中层流占一定优势,附近模拟站位的沉积物输运趋势与实际监测水流优势方向大致相同。3#站位位于曹妃甸码头南部约20 km处,水深约25 m,3#中层流涨潮最大流速0.95 m/s,平均流速0.47 m/s,落潮最大流速0.83 m/s,平均流速0.45 m/s。中层流主要在W—WNW和E向,其中W—WNW向中层流具有明显优势,与附近模拟沉积物输运趋势大致相同。模拟结果显示,运用GAO-COLLINS粒径趋势分析

模型获得的沉积物输运方向, 与研究区内 3 个站点实测中层流优势方向大致相同, 模拟输运方向与实测优势水流优势方向成较小锐角, 3 个站点周边沉积物类型主要为粉砂(图 2b), 粒度较细, 出现部分偏差的原因可能是由于细粒物质絮凝沉积, 使悬浮泥沙沉积形成的粒度趋势具有独特性<sup>[56]</sup>, 具体原因需进一步研究确定。以上研究说明, GAO-COLLINS 粒度趋势分析方法在该研究区相对适用, 但是用此方法进行趋势分析应与其他运输证据对比使用<sup>[39]</sup>。

物源、地形地貌和水动力条件是控制物质输运的重要因素, 海河、黄河和滦河为研究区提供重要的物源供给, 潮流和波浪提供主要水动力条件, 塑造了区域地形地貌形态, 控制着研究区砂和部分粉砂物质的搬运, 渤海湾环流控制粉砂和黏土矿物的

搬运与沉积。因此, 潮流与环流控制着研究区表层沉积物的分布格局。

#### 4.2 沉积动力环境分区及特征分析

研究区表层沉积物在 Pejrurp 三角图中投图结果如图 6a 所示, 采样点主要落于 A III、B III、C III 和 D III 分区。从 I、II、III、IV 分区来看, 采样点主要落在 III 区, 靠近粉砂端元, 说明研究区水动力相对强。从 A、B、C、D 分区来看, 采样点在 4 个分区均有分布, 水动力强度由 A 至 D 逐渐减弱。采样点在 C-M 图(图 6b)中的分布证明研究区沉积物搬运方式多样, 涵盖远洋悬浮、均匀悬浮、渐变悬浮、悬浮和滚动等方式。综合考虑研究区周边工程环境因素、海底地形地貌、海流和地质背景等信息将研究区划分为 3 个沉积动力环境分区(图 7)。

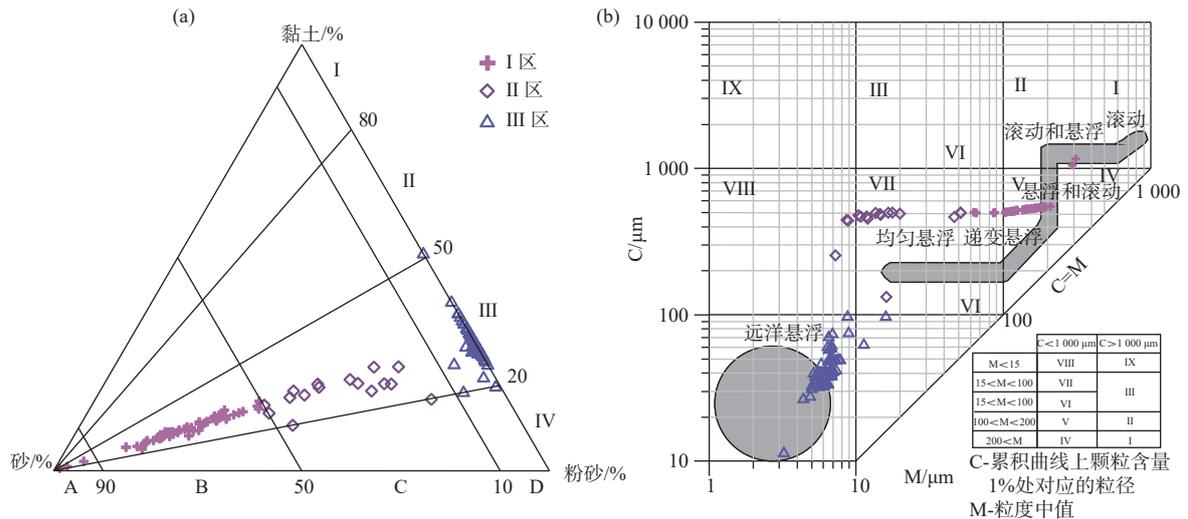


图 6 研究区海域表层沉积物三角图 (a) 和 C-M 图 (b)

Fig.6 Triangular classification (a) and C-M map (b) of surface sediments in the study area

(1) 沉积动力环境 1 区由 A III 和 B III 分区组成, 共有 56 个站点, 分布于研究区东北部海域, 水深约 25 m, 主体为 NE 向潮流砂脊, 属老龙沟潟湖体系地貌单元<sup>[21]</sup>, 中部深槽海域属于深槽地貌体系单元<sup>[21]</sup>。沉积物类型主要为砂和粉砂质砂, 含砂量占比 50.51%~82.79%, 粉砂含量占比 11.75%~34.03%, 黏土含量占比 5.01%~16.27%, 平均粒径介于  $2.89\Phi$ ~ $4.45\Phi$ , 沉积物粒级为中—细砂, 反映区域水动力较强, 分选系数介于 2.03~2.86, 分选很差。偏态为 0.38~0.72, 极正偏, 峰态为 0.66~2.22, 大部分峰度宽平, 少部分中等—尖窄。频率曲线形态变化及相应的粒级组合能反映出不同的沉积水动力环境<sup>[57]</sup>, 概率累积曲线的变化形式可以反映沉积物搬运方式, 能

进行水动力环境条件判别<sup>[58]</sup>。本区频率曲线呈宽平极正偏双峰曲线(图 8), 主峰众数在  $1.3\Phi$ ~ $2.4\Phi$ , 跨度小, 曲线尖锐, 对应粗砂—细砂粒径, 分选好; 次峰众数在  $6.3\Phi$ ~ $6.8\Phi$ , 跨度大, 曲线宽平, 对应粗粉砂—细粉砂, 分选很差; 主峰峰值远大于次峰峰值, 说明沉积物物源复杂, 且水动力复杂。概率累积曲线呈三段样式(图 8), 主要由推移、跃移和悬浮组组成, 跃移组为主, 含量约 60%, 斜率较大, 分选性好, 推移组分占比约 10%, 含量较低, 悬浮组分占比约 30%, 呈现两段性, 粗粒段呈近水平直线, 说明此时期沉积环境较稳定<sup>[59]</sup>。细粒段分选中等, 渐变悬浮和均匀悬浮以约  $10\Phi$  分界, 跃移组分和悬浮组分在约  $3\Phi$  分界。在 C-M 图上, 采样点主要位

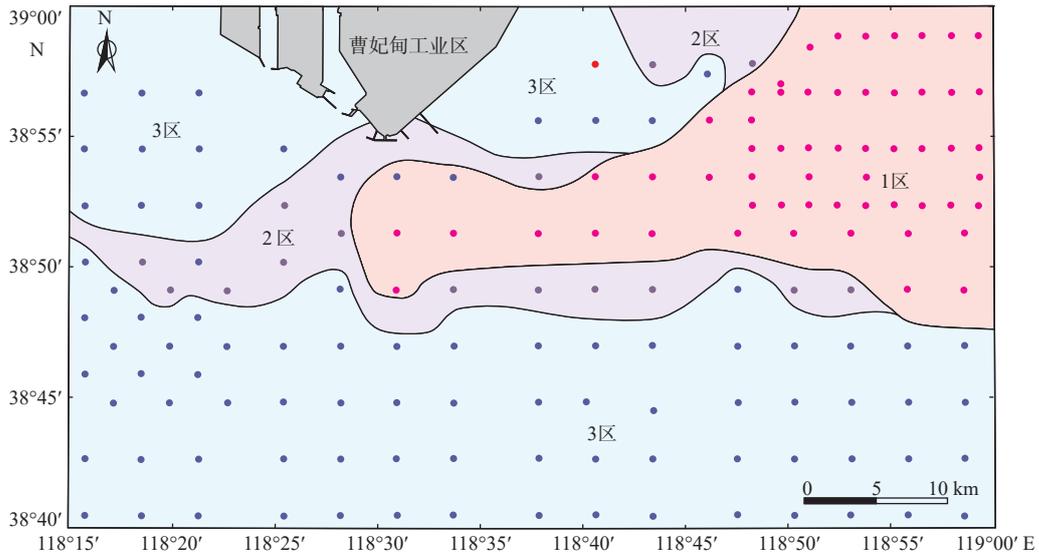


图7 研究区沉积动力环境分区

Fig.7 Partitioning of the dynamic environment of sediments in the study area

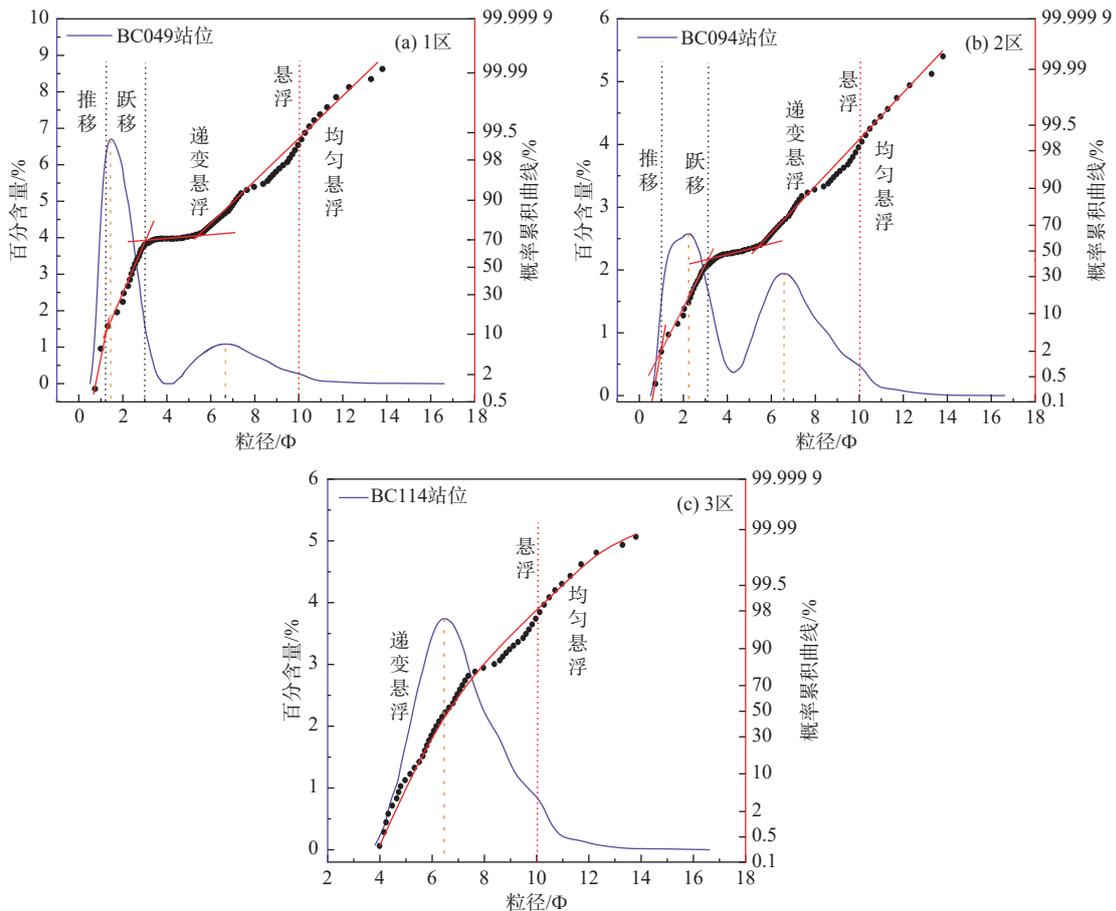


图8 各沉积动力环境分区典型频率分布曲线和概率累积曲线特征

Fig.8 Characteristics of typical frequency distribution curves and probability accumulation curves for each sedimentary-dynamic environment subzone

于V区(图6b),以悬浮和滚动为主,表明区域水动力条件相对较强。沿岸流、潮流和波浪是该区域主要水动力来源。沿岸流水动力强,沿着北部岸堤或

沙坝向西南流动,带动沙坝体和潟湖中再悬浮泥沙以推移和跃移的方式向研究区运输,在研究区东北海域分出支流转向老龙沟潟湖,之后水动能减弱,

粗粒泥沙开始沉积, 沿岸流继续向西流经曹妃甸深槽海域, 因岬角地貌效应, 水动能增强, 海底以冲刷为主; 余流 C 向岸流动, 且水动力减弱, 悬浮泥沙沿路径沉积, 也是导致概率累积曲线出现次峰的原因之一。潮流基本呈往复运动, 是悬浮泥沙搬运的重要动力条件。波浪作用是古滦河三角洲泥沙再悬浮的动力因素, 其对沙坝、海床的塑造导致泥沙再悬浮, 是近些年曹妃甸海域粗粒泥沙的重要来源。1 区沉积物粒度相对粗, 分选差, 频率分布曲线与现代滦河三角洲相沉积特征相近<sup>[15]</sup>, 也印证了研究区粗粒物质主要来源于古滦河三角洲再悬浮泥沙。曹妃甸东部浅滩海域 BC010 站位出现粗粒沉积物, 推断为曹妃甸围填海施工过程中粗粒泥沙入海沉积形成。

(2) 沉积动力环境 2 区由 CⅢ分区组成, 共有 17 个站位, 主要分布于沉积动力环境 1 区外围, 集中在研究区中部, 曹妃甸码头周边, 以及研究区东北部-20 m 等深线附近。沉积物类型为砂质粉砂, 砂含量占比 10.59%~49.98%, 粉砂含量占比 34.70%~67.70%, 黏土含量占比 10.60%~27.23%, 平均粒径介于  $4.46\Phi\sim 6.83\Phi$ , 沉积物粒级为细砂—粗粉砂, 水动力比 1 区减弱, 分选系数介于 1.98~2.91, 分选很差, 偏态为-0.22~0.32, 负偏—正偏, 峰态为 0.66~1.22, 大部分峰度宽平, 极少数为尖窄。频率分布曲线呈宽平极负偏或正偏双峰曲线(图 8), 主峰众数  $1.3\Phi\sim 3.6\Phi$ , 跨度大, 曲线宽平, 对应粒级为粗粉砂—细砂, 分选中等, 次峰众数在  $6.2\Phi\sim 6.8\Phi$ , 跨度大, 曲线宽平, 对应粒级为粗粉砂—细粉砂, 分选很差; 概率累积曲线呈三段样式(图 8), 由推移、跃移和悬浮组分组成, 以悬移组分为主, 占比约 57%, 其中, 递变悬浮和均匀悬浮以约  $10\Phi$  分界, 跃移组分占比约 41%, 二者分界线约在  $3\Phi$ , 推移组分占比较少约 2%。在 C-M 图上, 采样点落在 VII(图 6b), 沉积物表现为均匀悬浮, 2 区和 1 区概率累积曲线样式基本相同, 两者沉积物物源相似, 2 区分布在 1 区外围, 可能是其水动力条件在外围减弱的结果。沿岸流向西流动过程中, 部分海流向外海辐散, 水动能快速减弱, 在深槽海域向外海随着岬角效应逐渐减弱, 平均流速向外海逐渐减小<sup>[22]</sup>, 动能逐渐降低, 相应细砂—粗粉砂粒级泥沙逐渐沉积。曹妃甸工业区西部海域, 海流向西经过深槽区域后流速快速减小, 动能急速降低, 相应细砂—粗粉砂粒级泥沙快速沉积; 曹妃甸工业区东部海域沿岸流分出支流进入老龙沟潟湖, 部分继续向西流动受到曹妃甸工业区人工堤坝

的阻挡流速快速减小, 水动能快速降低, 相应细砂—粗粉砂粒级泥沙快速沉积; 潮流系统表现为涨潮平均流速大于落潮平均流速, 泥沙向 NWW 方向搬运, 是物质输送的因素之一; 该海域水深均  $>20\text{ m}$ , 波浪对区域泥沙沉积作用影响不明显。

(3) 沉积动力环境 3 区由 DⅢ区组成, 共有 88 站位, 分布于研究区南部和曹妃甸东西两侧, 沉积物类型为粉砂和泥, 砂含量占比为 0~8.16%, 含砂量较低, 粉砂含量占比 48.89%~79.05%, 黏土含量占比 18.62%~51.11%, 平均粒径介于  $6.09\Phi\sim 8.23\Phi$ , 粒级为粗—细粉砂, 分选系数介于 1.18~2.00, 分选差, 偏态介于 0.10~0.34, 主要呈近对称—正偏, 峰态介于 0.93~1.14, 峰宽中等。频率分布曲线呈近对称—正偏单峰曲线(图 8), 峰值为  $4.3\Phi\sim 7.4\Phi$ , 大多数约在  $6.5\Phi$ , 曲线中等峰宽, 对应细砂—细粉砂, 主要为粗粉砂, 分选差, 概率累积曲线呈一段样式(图 8), 均由悬移组分组成。在 C-M 图上(图 6b), 采样点落在远洋悬浮周边, 表明该区域水动力很弱。研究区域主要受到沿岸流和余流(渤海湾环流)的影响, 在余流 C 和沿岸流作用下, 其携带的来自黄河和海河入海泥沙搬运到研究区南部海域随水动力减弱沉积; 西部海域物质受控于余流 B、C 和沿岸流, 余流 B 携带海河入海泥沙, 沿着渤海湾北岸向西顺时针返回研究区, 南部逆时针余流 C 返回研究区, 与余流 B 和沿岸流汇合, 此时水动能进一步减弱, 携带的黏土质悬浮泥沙在研究区西部沉积; 曹妃甸东部海域沿岸流受到曹妃甸工业区人工堤坝阻流作用影响, 水动能进一步快速减弱, 泥沙快速沉积。

## 5 结论

(1) 渤海湾曹妃甸海域表层沉积物可划分为 6 种沉积物类型, 分别为砂、粉砂质砂、泥质砂、砂质粉砂、粉砂、泥等, 其中, 粉砂质砂、砂质粉砂和粉砂为主要沉积物类型, 约占总体 90% 以上。平均粒径范围跨度较大, 表现为由东北向西南逐渐减小的趋势, 与沉积物类型相吻合。沉积物粒度分选性由西南向北东逐渐变差, 绝大部分海域为正偏态和宽平峰态。

(2) 运用 GAO-COLLINS 模型对沉积物输运趋势进行了计算, 获得东、西 2 个沉积中心。东部海域沉积中心周边沉积物输运趋势表现为北侧离岸输运, 南侧向近岸输运, 西侧向东输运的特点; 西部

海域沉积中心周边沉积物输运趋势表现为向西南、向西和向北输运特点。海洋沉积物输运受物源、地形地貌和水动力条件影响,潮流与环流控制着研究区表层沉积物的分布格局。实测优势水流(中层)优势方向与 GAO-COLLINS 模型模拟粒度输运趋势方向大致相同。

(3)采用 Pejrup 三角图投图,结合周边工程环境因素、海底地形地貌、潮流和地质背景等信息将研究区沉积动力环境划分为 3 个沉积动力环境分区,沉积动力依次减弱,与沉积物类型分布基本一致,物质运输主要受潮流、波浪和渤海湾环流控制。

#### 参考文献:

- [1] 蒋明丽. 粒度分析及其地质应用 [J]. 石油天然气学报, 2009, 31(1): 161-163.  
JIANG Mingli. Particle size analysis and its geological application[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2009, 31(1): 161-163.
- [2] 孔凡彪. 黄河三角洲潮滩表层沉积物粒度特征及其动力沉积分析 [D]. 济南: 山东师范大学, 2024.  
KONG Fanbiao. Grain size characteristics and dynamic deposition of surface sediments in tidal flat of the Yellow River Delta[D]. Jinan: Shandong Normal University, 2024.
- [3] 黄学勇, 高茂生, 侯国华, 等. 莱州湾海洋沉积物粒度特征及其环境响应分析 [J]. 华东地质, 2023, 44(4): 402-414.  
HUANG Xueyong, GAO Maosheng, HOU Guohua, et al. Grain size characteristics and environmental response of marine sediments in Laizhou Bay[J]. East China Geology, 2023, 44(4): 402-414.
- [4] 战庆, 赵宝成, 陈昆钰, 等. 杭州湾北岸现代潮滩沉积物粒度特征及其对古海平面的指示意义 [J]. 地质通报, 2024, 43(4): 516-525.  
ZHAN Qing, ZHAO Baocheng, CHEN Kuniyu, et al. Grain size features of the modern tidal-flat sediment on the north bank of Hangzhou Bay and the implication of sea-level reconstruction[J]. Geological Bulletin of China, 2024, 43(4): 516-526.
- [5] 曾维特, 张东强, 刘兵, 等. 海南岛北部海湾表层沉积物粒度特征及输运趋势 [J]. 海洋地质前沿, 2024, 40(5): 10-18.  
ZENG Weite, ZHANG Dongqiang, LIU Bing, et al. Grain size characteristics and transport trends of surface sediment in the bays of northern Hainan Island[J]. Marine Geology Frontiers, 2024, 40(5): 10-18.
- [6] 王中波, 陆凯, 温珍河, 等. 中国东部海域表层沉积物粒度组成及影响因素 [J]. 地球科学, 2020, 45(7): 2709-2721.  
WANG Zhongbo, LU Kai, WEN Zhenhe, et al. Grain size compositions and their influencing factors of the surface sediments in eastern China Seas[J]. Earth Science, 2020, 45(7): 2709-2721.
- [7] YUAN P, WANG H J, WU X, et al. Grain-size distribution of surface sediments in the Bohai Sea and the Northern Yellow Sea: sediment supply and hydrodynamics[J]. Journal of Ocean University of China, 2020, 19(3): 589-600.
- [8] 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.  
TIAN Lizhu, GENG Yan, PEI Yandong, et al. The grain-size characteristics and sediment mixing pattern of surface sediment from the western Bohai Bay, China[J]. Geological Bulletin of China, 2010, 29(5): 668-674.
- [9] 冯秀丽, 魏飞, 刘杰, 等. 渤海湾西部表层沉积物粒度及黏土矿物特征分析 [J]. 海洋科学, 2015, 39(8): 70-77.  
FENG Xiuli, WEI Fei, LIU Jie, et al. The sediment grain size characteristics and analysis of sources in the western Bohai Bay[J]. Marine Sciences, 2015, 39(8): 70-77.
- [10] 李建伟, 吴建政, 胡日军, 等. 渤海湾西南部海域表层沉积物分布特征 [J]. 海洋地质前沿, 2011, 27(9): 11-17.  
LI Jianwei, WU Jianzheng, HU Rijun, et al. The distribution pattern of surficial sediments in southwest Bohai Bay[J]. Marine Geology Frontiers, 2011, 27(9): 11-17.
- [11] 潘新杯. 渤海湾西部海区现代沉积特征及泥沙来源分析 [J]. 水道港口, 1986(1): 36, 38-44.  
PAN Xinbei. Analysis of modern sedimentary characteristics and sediment sources in the western part of Bohai Bay[J]. Journal of Waterway and Harbor, 1986(1): 36, 38-44.
- [12] 裴艳东, 王云生, 范昌福, 等. 天津市潮间带表层沉积物的类型及其分布 [J]. 地质通报, 2009, 28(7): 915-922.  
PEI Yandong, WANG Yunsheng, FAN Changfu, et al. The surface sediment types and distribution of Tianjin intertidal zone, China[J]. Geological Bulletin of China, 2009, 28(7): 915-922.
- [13] 田国会, 滕珊, 冯秀丽, 等. 黄河三角洲北海域底质沉积物粒度特征及泥沙输运分析 [J]. 海洋学报, 2017, 39(3): 106-114.  
TIAN Donghui, TENG Shan, FENG Xiuli, et al. Grain-size pattern of surface sediment and analysis of sediment transport in the Chengbei area of the Yellow River Delta[J]. Haiyang Xuebao, 2017, 39(3): 106-114.
- [14] YI L, YU H J, ORTIZ J D, et al. A reconstruction of Late Pleistocene relative sea level in the south Bohai Sea, China, based on sediment grain-size analysis[J]. Sedimentary Geology, 2012, 281: 88-100.
- [15] 徐国强, 杜军, 于晓晓, 等. 现代滦河口表层沉积物特征对水动力环境的指示 [J]. 海洋科学进展, 2021, 39(3): 470-482.  
XU Guoqiang, DU Jun, YU Xiaoxiao, et al. Indication of surface sediment characteristics of hydrodynamic environment in modern Luanhe Estuary[J]. Advances in Marine Science, 2021, 39(3): 470-482.
- [16] 于晓晓. 滦河三角洲全新世沉积特征与演化 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2022.  
YU Xiaoxiao. Sedimentary characteristics and evolutions of the Luan River Delta during the Holocene[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2022.

- [17] 于晓晓, 谷东起, 闫文文, 等. 基于地统计学的粒径输运趋势分析在滦河水下三角洲的应用 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2020, 40(4): 204-213.  
YU Xiaoxiao, GU Dongqi, YAN Wenwen, et al. Application of geostatistical grain size trend analysis in the Luanhe River subaqueous delta[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2020, 40(4): 204-213.
- [18] 祝贺, 孙志高, 衣华鹏, 等. 曹妃甸近岸表层沉积物粒度和黏土矿物分布特征研究 [J]. 地球与环境, 2017, 45(3): 306-313.  
ZHU He, SUN Zhigao, YI Huapeng, et al. Research on distribution characteristics of sediment grain size and clay mineral in Caofeidian inshore, China[J]. Earth and Environment, 2017, 45(3): 306-313.
- [19] 刘宪斌, 李孟沙, 梁梦宇, 等. 曹妃甸近岸海域表层沉积物粒度特征及其沉积环境 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2016, 35(3): 507-514.  
LIU Xianbin, LI Mengsha, LIANG Mengyu, et al. Grain size features and sedimentary environment of surficial sediments in the Caofeidian offshore area[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2016, 35(3): 507-514.
- [20] 邹昊. 渤海湾北部沉积物分布特征及沉积环境 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.  
ZOU Hao. Sediment distribution characteristics and sedimentary environment of northern Bohai Bay[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009.
- [21] 褚宏宪, 史慧杰, 宗欣, 等. 渤海湾曹妃甸深槽海区地形地貌特征及控制因素 [J]. 海洋科学, 2016, 40(3): 128-137.  
CHU Hongxian, SHI Huijie, ZONG Xin, et al. Characteristic geomorphology and controlling factors of Caofeidian Channel in the Bohai Bay[J]. Marine Sciences, 2016, 40(3): 128-137.
- [22] 吴澎, 姜俊杰. 曹妃甸港区选址研究 [J]. 水运工程, 2011(9): 68-74.  
WU Peng, JIANG Junjie. Site selection of Caofeidian port area[J]. Port & Waterway Engineering, 2011(9): 68-74.
- [23] 吴越, 杨文波, 王琳, 等. 曹妃甸填海造地时空分布遥感监测及其影响初步研究 [J]. 海洋湖沼通报, 2013(1): 153-158.  
WU Yue, YANG Wenbo, WANG Lin, et al. Primary study on the spatial-temporal changes and the effect of sea reclamation in Caofeidian based on remote sensing[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2013(1): 153-158.
- [24] 褚宏宪, 李强, 王文辉, 等. 曹妃甸浅海人工岛工程海底泥沙冲淤 [J]. 海洋地质前沿, 2013, 29(6): 37-43.  
CHU Hongxian, LI Qiang, WANG Wenhui, et al. Erosional and depositional pattern around the artificial island offshore Caofeidian[J]. Marine Geology Frontiers, 2013, 29(6): 37-43.
- [25] 季荣耀, 陆永军, 左利钦. 渤海湾曹妃甸深槽形成机制及稳定性分析 [J]. 地理学报, 2011, 66(3): 348-355.  
JI Rongyao, LU Yongjun, ZUO Liqin. Formation mechanism and stability of Caofeidian Channel in the Bohai Bay[J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(3): 348-355.
- [26] FANG Y, FANG G H, ZHANG Q H. Numerical simulation and dynamic study of the wintertime circulation of the Bohai Sea[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2000, 18(1): 1-9.
- [27] GUAN B X. Patterns and structures of the currents in Bohai, Huanghai and East China Seas[J]. Oceanology of China Seas, 1994, 1: 17-26.
- [28] FOLK R L, WARD W C. Brazos River bar (Texas): a study in the significance of grain size parameters[J]. Journal of Sedimentary Research, 1957, 27(1): 3-26.
- [29] WENTWORTH, CHESTER K. A scale of grade and class terms for clastic sediments[J]. Journal of Geology, 1922, 30(5): 337-392.
- [30] PEJRUP M. The triangular diagram used for classification of estuarine sediments: a new approach [C]//Tide Influenced Sedimentary Environments and Facies. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, 1988: 289-300.
- [31] 郝连成, 远继东, 郑立龙, 等. 湛江湾海域表层沉积物粒度特征及沉积环境 [J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(8): 1-10.  
HAO Liancheng, YUAN Jidong, ZHENG Lilong, et al. Grain-size characteristics of surface sediment and sedimentary environment in Zhanjiang Bay[J]. Marine Geology Frontiers, 2022, 38(8): 1-10.
- [32] GAO S, COLLINS M, LANCKNEUS J, et al. Grain size trends associated with net sediment transport patterns: an example from the Belgian continental shelf[J]. Marine Geology, 1994, 121(3/4): 171-185.
- [33] GAO S. A FORTRAN program for grain-size trend analysis to define net sediment transport pathways[J]. Computers & Geosciences, 1996, 22(4): 449-552.
- [34] 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.
- [35] 贾建军, 程鹏, 高抒. 利用插值试验分析采样网格对粒度趋势分析的影响 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2004, 24(3): 135-141.  
JIA Jianjun, CHENG Peng, GAO Shu. Comparison between grain size trends derived from irregular and regular sampling grids with the help of GIS interpolation tools[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2004, 24(3): 135-141.
- [36] 陈俊锦, 张经纬, 刘时桥, 等. 南海中沙群岛海域表层沉积物粒度特征及其输运趋势 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(2): 15-27.  
CHEN Junjin, ZHANG Jingwei, LIU Shiqiao, et al. Grain size distribution pattern of surface sediments and its implications for transportation trend: a case from the waters off Zhongsha Islands, the South China Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2022, 42(2): 15-27.
- [37] 张洪运, 庄丽华, 阎军, 等. 南海北部陆架坡折附近表层沉积物的粒度特征和其输运趋势 [J]. 海洋科学, 2019, 43(10): 96-105.  
ZHANG Hongyun, ZHUANG Lihua, YAN Jun, et al. Grain size characteristics of surface sediments and their transport patterns near the shelf break of the northern South China Sea[J]. Marine Sciences, 2019, 43(10): 96-105.

- [38] 时翠, 甘华阳, 夏真, 等. 珠江口内伶仃洋表层沉积物粒度特征及其运移趋势 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2015, 35(1): 13-20. SHI Cui, GAN Huayang, XIA Zhen, et al. Characteristics and transport trend of surface sediments in inner Lingdingyang Firth of the Pearl River Estuary[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2015, 35(1): 13-20.
- [39] 高抒. 沉积物粒径趋势分析: 原理与应用条件 [J]. 沉积学报, 2009, 27(5): 826-835. GAO Shu. Grain size trend analysis: principle and applicability[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(5): 826-835.
- [40] 贾建军, 高抒, 薛允传. 图解法与矩法沉积物粒度参数的对比 [J]. 海洋与湖沼, 2002, 33(6): 577-582. JIA Jianjun, GAO Shu, XUE Yunchuan. Grain-size parameters derived from graphic and moment methods: a comparative study[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2002, 33(6): 577-582.
- [41] XU Q M, MENG L S, YUAN G B, et al. Transgressive wave- and tide-dominated barrier-lagoon system and sea-level rise since 8.2 ka recorded in sediments in northern Bohai Bay, China[J]. Geomorphology, 2020, 352: 106978.
- [42] 祝贺, 衣华鹏, 孙志高, 等. 曹妃甸近岸及周边海区碎屑矿物组成特征及其环境意义 [J]. 海洋科学, 2016, 40(8): 76-83. ZHU He, YI Huapeng, SUN Zhigao, et al. Environmental significance of detrital minerals and their composition in the Cao-feidian inshore and adjacent sea[J]. Marine Sciences, 2016, 40(8): 76-83.
- [43] 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. WEI Fei. Surface sediment grain size and clay mineral characteristics and provenance analysis in western Bohai Bay[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013.
- [44] 张连杰, 朱龙海, 张盼, 等. 渤海湾表层沉积物元素地球化学分布特征与影响因素 [J]. 海洋科学, 2019, 43(6): 78-87. ZHANG Lianjie, ZHU Longhai, ZHANG Pan, et al. Geochemical distribution and its controlling factors of the surface sediments in the Bohai Bay[J]. Marine Sciences, 2019, 43(6): 78-87.
- [45] 张义丰, 李凤新. 黄河、滦河三角洲的物质组成及其来源 [J]. 海洋科学, 1983(3): 15-18. ZHANG Yifeng, LI Fengxin. Material composition and source of the Yellow River and Luanhe River Delta[J]. Marine Sciences, 1983(3): 15-18.
- [46] 乔淑卿, 石学法, 王国庆, 等. 渤海底质沉积物粒度特征及输运趋势探讨 [J]. 海洋学报, 2010, 32(4): 139-147. QIAO Shuqing, SHI Xuefa, WANG Guoqing, et al. Discussion on grain-size characteristics of seafloor sediment and transport pattern in the Bohai Sea[J]. Marine Sciences, 2010, 32(4): 139-147.
- [47] 陆永军, 季荣耀, 左利钦. 曹妃甸深水大港滩槽稳定及工程效应研究 [J]. 水利水运工程学报, 2009(4): 33-46. LU Yongjun, JI Rongyao, ZUO Liqin. Stability and engineering effect of shoals and channels in Cao-feidian deepwater harbor area[J]. Hydro-Science and Engineering, 2009(4): 33-46.
- [48] 龚政, 张长宽, 陶建峰, 等. 曹妃甸粉沙质海岸围垦后港内泥沙研究 [J]. 海洋工程, 2012, 30(1): 112-118, 125. GONG Zheng, ZHANG Changkuan, TAO Jianfeng, et al. Siltation in harbor basin after reclamation in Cao-feidian silty coast[J]. The Ocean Engineering, 2012, 30(1): 112-118, 125.
- [49] 耿岩. 渤海湾北部潮流沙脊的形态与粒度特征 [D]. 吉林: 吉林大学, 2009. GENG Yan. The morphology and grain-size of tidal sand ridges in the north of Bohai Bay[D]. Jilin: Jilin University, 2009.
- [50] 刘高峰. 长江口水沙运动及三维泥沙模型研究 [D]. 上海: 华东师范大学, 2011. LIU Gaofeng. The study on sediment transport in the Changjiang Estuary and 3D sediment numerical modeling[D]. Shanghai: East China Normal University, 2011.
- [51] 陈吉余, 沈焕庭, 恽才兴, 等. 长江河口动力过程和地貌演变 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1988. CHEN Jiyu, SHEN Huanting, YUN Caixing, et al. Dynamic Process and Geomorphic Evolution of Changjiang Estuary[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1988.
- [52] 李从先, 陈刚, 王利. 滦河废弃三角洲和砂坝-泻湖沉积体系 [J]. 沉积学报, 1983(2): 60-72. LI Congxian, CHEN Gang, WANG Li. The abandoned deltas of the Luanhe River and the barrier-lagoon sedimentary systems[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1983(2): 60-72.
- [53] 刘振夏. 现代滦河三角洲的影响因素和沉积物分区 [J]. 黄渤海海洋, 1989, 7(4): 55-64. LIU Zhenxia. The influential factors and zoning of the modern Luanhe River delta[J]. Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas, 1989, 7(4): 55-64.
- [54] 王勇智, 谷东起, 王文海, 等. 唐山湾泻湖沙坝海域表层沉积物粒级及分布特征 [J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2012, 42(S1): 131-136. WANG Yongzhi, GU Dongqi, WANG Wenhai, et al. The surface sediments size fraction and the distribution on lagoon and sand barriers in Tangshan Bay[J]. Periodical of Ocean University of China, 2012, 42(S1): 131-136.
- [55] LI Y Y, FENG H, YUAN D K, et al. Mechanism study of transport and distributions of trace metals in the Bohai Bay, China[J]. China Ocean Engineering, 2019, 33(1): 73-85.
- [56] STEVENS R L, BENGTTSSON H, LEPLAND A. Textural provinces and transport interpretations with fine-grained sediments in the Skagerrak[J]. Journal of Sea Research, 1996, 35(1/3): 99-110.
- [57] 刘世昊, 丰爱平, 李培英, 等. 现代黄河三角洲地区晚更新世以来高分辨率沉积粒度特征及动力沉积环境演化 [J]. 第四纪研究, 2015, 35(2): 291-306. LIU Shihao, FENG Aiping, LI Peiying, et al. High-resolution grain size distribution and evolution of the sediment-dynamic environment in the modern Yellow River Delta since the Latest Pleistocene[J]. Quaternary Sciences, 2015, 35(2): 291-306.
- [58] VISHNER G S. Grain size distributions and depositional pro-

- cesses[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1969, 39(3): 1074-1106.
- [59] 潘隆, 方晶, 田立柱, 等. 天津南港工业区海区表层沉积物粒度特征及沉积环境分析 [J]. *应用海洋学学报*, 2018, 37(4): 462-471.
- PAN Long, FANG Jing, TIAN Lizhu, et al. Grain size characteristics of surface sediments and the response to sedimentary environment in the coastal waters of Tianjin Nangang Industrial Zone in Bohai Bay[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2018, 37(4): 462-471.

## Characterization of grain size distribution of sediments and transport trend analysis in Caofeidian sea area, Bohai Bay

FENG Yongcai<sup>1,2</sup>, HAO Liancheng<sup>1,2</sup>, HU Yanbin<sup>1,2\*</sup>, CHU Hongxian<sup>1,2</sup>, LI Jialin<sup>1,2</sup>, YUAN Jidong<sup>1,2</sup>, HUANG Xing<sup>1,2</sup>, CHEN Xiaori<sup>1,2</sup>, WANG Chao<sup>1,2</sup>

(1 Yantai Center of Coastal Zone Geological Survey, China Geological Survey, Yantai 264000, China;

2 Ministry of Natural Resources Observation and Research Station of Land-Sea Interaction Field in the Yellow River Estuary, Yantai 264000, China)

**Abstract:** A total of 161 surface sediment samples were collected in the Caofeidian sea area of Bohai Bay and classified, the grain size fractions and parameters were analyzed, the depositional dynamic environments were partitioned using Pejrup's triangular projection map. The Gao-Collins model was used to simulate sediment transport trends. Results indicate that the surface sediments in the study area included sand, silty sand, sandy mud, muddy sand, silt, and clay, of which silt was the most widely distributed, followed by silty sand. The grain size showed a gradient from coarser to finer from northeast to southwest with increased sorting. Two distinct depositional centers were recognized, each with unique sediment transport patterns. The eastern center showed offshore transport in the northern side and onshore transport in the southern side, while the western center exhibited transport to the southwest, west, and north. The material source, topography, and hydrodynamic conditions were the primary factors controlling the materials transport. The depositional dynamic environment in the study area could be divided into three zones on the Pejrup triangle diagram according to the surrounding engineering environmental factors, seabed topography, ocean current and geological background. Material transport was primarily governed by tidal currents, waves, and the Bohai Bay circulation. This study unveiled the modern sedimentary and hydrodynamic characteristics in the southern Caofeidian area, and provided foundational data for research into the changes in the depositional environment after land reclamation in the area.

**Key words:** Caofeidian; surface sediment; grain size parameters; depositional dynamics environment; sediment transport trend