# 烟台芝罘区北部海域表层沉积物粒度特征及其对 沉积动力环境的指示作用

马志颖1, 王洪松<sup>2,3,4</sup>, 袁庆政<sup>2,3</sup>, 董华洋<sup>5</sup>, 何 腾<sup>2,3</sup>

(1.山东科技大学地球科学与工程学院,山东 青岛 266590; 2.中国地质调查局烟台海岸带地质调查中心, 山东 烟台 264000; 3.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,山东 烟台 264000; 4.中 国地质大学(武汉)地球科学学院,湖北 武汉 430074; 5.国家海洋环境监测中心,辽宁 大连 116023)

摘 要:本文对烟台芝罘区北部海域的 80 个表层沉积物样品进行了粒度组分、粒度参数、沉积物类型及 输运趋势分析。结果表明研究区共有两种沉积物类型,分别是粉砂质砂和砂质粉砂,粒级组成以砂、粉 砂和黏土为主,其中粉砂占据了优势地位,沉积物的平均粒径介于 3.460~6.100。研究区沉积物东南 部粒径较粗,分选较差,正偏,峰态尖锐;西北部粒径较细,分选较差,正偏,峰态更尖锐。通过研究区粒 度多元统计以及输运趋势分析,将研究区划分为 A 区 (远岸沉积区)和 B 区 (近岸沉积区):A 区主 要沉积物类型为粉砂质砂,B 区主要沉积物类型为砂质粉砂,A 区与 B 区受山东半岛沿岸流、黄海暖流 余流的影响,区域主要物质来源均为黄河入海沉积物。 关键词:表层沉积物; 粒度参数; 输运趋势; 沉积动力环境; 烟台芝罘区

中图分类号: P736 文献标识码: A 文章编号: 1007-6336(2025)01-0059-08

## Grain size characteristics of surface sediments in the northern waters of Zhifu District, Yantai and their indications of the sedimentary dynamical environment

MA Zhiying<sup>1</sup>, WANG Hongsong<sup>2,3,4</sup>, YUAN Qingzheng<sup>2,3</sup>,

DONG Huayang<sup>5</sup>, HE Teng<sup>2,3</sup>

(1.College of Earth Science and Engineering Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;
2.Yantai Center of Coastal Zone Geological Survey China Geological Survey, Yantai 264000, China;
3.Ministry of Natural Resources Observation and Research Station of Land-Sea Interaction Field in the Yellow River Estuary, Yantai 264000, China;
4.School of Earth Sciences China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;
5.National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China)

Abstract: In this paper, the grain size composition, grain size parameters, sediment types and transport trend of 80 surface sediment samples from the northern area of Zhifu District, Yantai were analyzed. The results show that there are two types of sediment in the study area, namely, silty sand and sandy silty sand. The grain size is mainly composed of sand, silt and clay, in which silt occupies the dominant position. The average particle size of the sediment ranges from  $3.46\Phi$  to  $6.10\Phi$ . In the study area, the sediment in the southeast of the study area has coarser particle size, poor sorting, positive bias, and sharp peak state, and the sediment in the northwest is

收稿日期:2024-04-17,修订日期:2024-08-16

基金项目:山东省自然科学基金(ZR2023MD105);山东省自然科学基金面上项目(ZR2022MD114)

作者简介:马志颖(2000-),男,山东潍坊人,硕士研究生,研究方向为第四纪地质与全球变化,E-mail:17860751270@163.com 通信作者:王洪松(1991-),工程师,主要研究方向为海洋地质,E-mail:hsongwang@cug.edu.com

董华洋,博士, E-mail: hydong@nmemc.org.cn

fine, poor sorting, positive bias, and sharper peak state. Based on multivariate grain size statistics and transport trend analysis, the study area is divided into A region (far shore sediment area) and B region (near shore sediment area) : The main sediment type in A region is silty sand, and the main sediment type in B region is sandy silt. Both areas are affected by coastal current of Shandong Peninsula and residual current of Yellow Sea warm current, and the main material source in the region is the Yellow River sediment.

Key words: surficial sediment; grain size parameter; transport trend; sedimentary dynamics; Yantai Zhifu District

粒度是沉积物最基本的表征,蕴含了海洋沉 积动力学等多方面的重要信息,其组成和分布 主要受控于物源组分、输运方式、搬运距离、水 动力条件以及地形地貌特征等因素<sup>[1-2]</sup>。研究 区位于烟台芝罘区北部海域(121.0°E-122°E、 37.75°N-38.5°N), 是一个具有复杂水动力条件 和多样物质来源的区域,此处不仅是黄河入海沉 积物扩散的重要通道,也是黄海暖流进入渤海的 关键区域。探讨沉积物粒度特征对于理解该区 域的沉积过程、环境变化以及物质输送具有重 要意义<sup>[3]</sup>。近年来,学者们对研究区及其周边海 域的沉积物进行了广泛研究,揭示了沉积物粒度 分布的多样性和复杂性。然而,在对山东半岛东 北部海域底质类型认识上尚未达成一致。例如, 孔祥淮等<sup>[4]</sup>根据山东半岛东北部滨浅海区表层 沉积物的粒度分布特征与矿物组成,认为该区底 质类型主要为粉砂、砂质粉砂和粉砂质砂;而王 晓磊等<sup>[5]</sup>利用渤海、黄海表层沉积物粒度参数, 分析了该区冬、夏两季粒度特征差异,将山东半 岛东北部海域底质类型划分为泥质沉积区。本 文利用在烟台芝罘区北部海域以较高密度采集 的表层沉积物样品,通过分析其粒度组分、粒度 参数等数据,进一步探讨该区的沉积物粒度特征 及其控制因素。

## 1 材料与方法

#### 1.1 研究区概况

本研究区域位于烟台市芝罘区北部海域,采 用 1985 国家高程基准测得研究区平均水深 38 m, 潮汐动态特征为非典型半日潮,高潮平均水位达 到 2.5 m,低潮水位为-2.5 m。波浪状况方面,研 究区主要受到风浪的影响,而由远处风暴系统引 起的涌浪则较为少见。波浪平均高度为 0.1 ~ 1.5 m,但在特定条件下,最大波浪高度可能超过 5 m<sup>[6]</sup>。黄河作为本研究区的主要物质供应源, 每年向海洋输送大约 1.08×10<sup>9</sup> t 微细颗粒沉积物 质,在沿岸海流的持续作用下,约有 15% 的微细 颗粒向东漂流并在研究区域内沉积,这一输运和 沉积过程对当地的海洋环境和生态平衡产生了 显著的影响<sup>[7-8]</sup>。来自黄海南部的黄海暖流余 流、黄海密度环流等,改变了研究区内水动力条 件,对沉积环境产生了重要影响<sup>[9-11]</sup>。

## 1.2 采样站位

2023 年 6 月,中国地质调查局烟台海岸带地 质调查中心 HQ-2023-04-01 航次,通过海洋地质 七号科考船在研究区内进行了表层沉积物取样, 取样点均匀分布,间距为 4 km×8 km,共布置 80 个站位,覆盖了 121.0°E-122°E、37.75°N-38.5°N 的区域(图 1)。





沉积物样品均匀混合后,首先使用 3% 的过 氧化氢溶液处理以去除有机质,随后用 1M 盐酸 溶液处理以溶解钙胶结物。处理后的样品通过 超声波振荡分散,并通过激光粒度分析仪 (Mastersizer2000)进行粒度测定,进行 5 次重复 性实验(综合误差小于 5%),确保测量结果的 准确性和可重复性。粒级标准采用 Udden-Wentworth等比制 Φ 粒级标准,对平均粒径 (Mz)、分选系数(δ)、偏态(Sk)和峰态(Kg)等粒 度参数运用 Folk-Ward 图解法<sup>[12]</sup>计算。使用 Pejrup 三角图解法,根据砂、粉砂和黏土的比例 将沉积环境划分为不同的区域,进行沉积动力环 境分区,以识别和划分沉积环境及动力条件<sup>[13]</sup>。 采用 Gao-Collins 二维模型,对相邻采样点的粒 度参数进行比较,提取粒径趋势矢量,并进行平 滑处理以消除噪声进行粒径趋势分析,最终确定 沉积物的净输运趋势<sup>[14-15]</sup>。

## 2 结果与讨论

#### 2.1 沉积物类型及分布

根据 Folk 分类法, 研究区沉积物可以划分 为两种类型, 分别是粉砂质砂(zS)和砂质粉砂 (sZ)(图 2)。







如图 2 所示,砂质粉砂(sZ)分布最广,约占 整个研究区的 60%, 主要分布在研究区的南部近 岸区,沉积物粒级组分以粉砂为主,比例在 44.94%~75.61%(平均为62.71%);砂粒组分次 之,比例在10.01%~48.69%(平均为29.55%);黏 土组分最少,比例在 3.52%~ 19.77%(平均为 8.27%)。其频率直方图表现为单峰分布,峰值众 数集中在 10~20, 单峰分布表明沉积物中有一 个主要的粒度群体具有较好的分选性。峰值集 中在 1.50~2.50, 表明沉积环境的能量水平适 中,受一定的水动力控制。粉砂质砂(zS)占整个 研究区的 27.5%, 主要分布在研究区的北部远岸 区,沉积物粒级组分以砂粒为主,比例在 55.82%~74.45%(平均为61.62%);粉砂含量次 之,比例在21.83%~36.56%(平均为32.93%);黏 土组分最少, 黏土比例在 3.72%~7.62%(平均为 5.45%)。频率直方图同样呈现单峰形态,众数集 中在 10~20,表明水动力环境强于砂质粉砂区 (图 3)。研究区沉积物类型呈带状分布,自北向 南沉积物粒度逐渐变细,由粉砂质砂(zS)过渡至 砂质粉砂(sZ)。

## 2.2 表层沉积物粒度参数特征

海洋沉积学领域中,沉积物粒度参数的测量是至关重要的研究手段之一,对于揭示海底 沉积物的成因、解析沉积动力学过程以及环境 识别具有重要意义。本研究采用平均粒径 (Mz)、分选系数(δ)、偏态(Sk)和峰态(Kg)四个 关键参数,对特定海域进行了详尽的粒度分析 (图 4)<sup>[16-17]</sup>。

研究区海域内沉积物平均粒径值为4.72Φ, 以细砂(4Φ~5Φ)组分为主,从空间分布上来说, 研究区内沉积物粒径整体表现为自西北远岸区 向东南近岸区逐渐减小(图4a)。已有研究<sup>[17-18]</sup> 表明,北黄海海域以及近渤海地区,沉积物的平





Fig. 3 Size distribution and probability cumulative curve of typical sediments in the study area

均粒径普遍表现为远岸区大于近岸区,其空间分 布受到多种沉积环境因素的共同调控,这与本研 究结果相一致。

沉积物的分选系数范围为 1.15~2.13, 均值 为 1.64, 从整个研究区来看, 沉积物的分选程度 从相对较好到较差, 沉积物中颗粒大小的差异不 是特别显著(表 1)。分选系数在 1~2, 表现为中 等的分选性,表明沉积环境与沉积过程比较复杂,受到多种因素的影响。已有研究显示<sup>[7,18-19]</sup>,研究区及附近海域沉积物的分选系数变化范围 相对较大,分选系数的地理分布呈现出远岸区大 于近岸区,北部海域大于南部海域,这表明沉积 物来源的多样性以及不同的水动力环境条件会 影响沉积物分选系数的大小。

	Tab.1Grain size parameters of sediment types in the study area						
序号	沉积物类型	所占比例/(%)	平均粒径(Mz/mm)	分选系数(δ)	偏态(Sk)	峰态(Kg)	
1	砂质粉砂(sZ)	73.75%(n=59)	5.01	1.61	0.37	1.19	
2	粉砂质砂(zS)	26.25%(n=21)	4.02	1.72	0.44	1.39	
总		80	4.72	1.64	0.39	1.24	

表1 研究区海域沉积物类型粒度参数特征

沉积物的偏态变化范围为 0.26~0.49, 平均 值为 0.37, 偏态变化范围相对较窄表明大部分样 品偏斜程度相似,平均偏态值与大部分样品偏态 值的范围表明沉积物样品粒度分布普遍呈正偏, 表明研究区沉积环境具有中等强度的水动力条件,如潮汐作用、波浪作用<sup>[18]</sup>,可以搬运和沉积部分较粗的颗粒,但不足以将所有颗粒均匀地搬

运和沉积。沉积物的峰态变化范围为 0.87~1.60, 平均值为 1.19, 整体表现出多峰的特征 (图 4d)。



图 4 表层沉积物粒度参数分布

Fig. 4 Spatial distribution of grain size parameters of the surface sediments

### 2.3 表层沉积物粒级组分特征

研究区砂组分含量在表层沉积物中的比例 波动较大,在10.01%~74.45%,平均值为37.97% (图5)。砂的高值区在研究区西北部(38°15′N-38°30′N、121°10′E-121°40′E),分布范围相对 较小,主要沉积物类型为粉砂质砂,砂含量超过 60%,研究区内其他区域含量相对较低,通常在 50%以下(图5a)。

粉砂的广泛分布与较高的含量表明其在 研究区沉积物中占据重要地位,特别是在研究 区的东南部地区(37°45′N-38°15′N、121°E-122°E),粉砂含量普遍超过 50%,主要沉积物类 型为砂质粉砂,研究区内其余地区粉砂组分含量 相对较低(图 5b)。

黏土组分在研究区表层沉积物中的含量相 对较低,在3.52%~19.77%,平均值为7.54%。相 较于砂和粉砂,黏土组分在整个研究区内的含量 普遍较低,仅在个别采样点的含量超过15%,大 部分地区的黏土含量低于10%(图5c)。

综合分析研究资料可知,表层沉积物的粒级





Fig. 5 Percentage of grain size compositions of surface sediments

组分受到多种水动力条件的影响。前人研究表 明,山东半岛北部沿岸粉砂含量较高,砂的含量 次之,粉砂与黏土含量相对较低,这是山东半岛 沿岸流携带大量黄河沉积物沿山东半岛向东南 输运所致<sup>[20]</sup>;烟台北部近岸海域表层沉积物粒度 分布主要受到潮流、沿岸流等沉积动力环境影 响<sup>[21]</sup>;山东半岛东北部表层沉积物粒度特征差异 主要受控于冷水团及沿岸流、黄海暖流等水动 力因素影响<sup>[5]</sup>。综合以上研究可知,研究区表层 沉积物的粒级组分特征主要受到山东半岛沿岸 流、黄海暖流以及烟台附近潮流、波浪等多种因 素的综合影响。

## 2.4 沉积物输运趋势

沉积物输运趋势分析主要是以沉积物粒度

参数的空间分布变化规律为核心,分析沉积物输运方向的信息<sup>[14-15]</sup>。为了保障分析结果的准确性,本研究采纳了 Gao-Collins 二维粒径趋势分析法,选取了 28 km 作为分析的特征距离,以此来探究研究区域沉积物输运趋势(图 6)。

整体来看,研究区东侧沉积物输运趋势表现 为自东南向西北方输运,该输运方向与黄海暖流 余流方向相吻合,表明研究区东侧沉积物受黄海 暖流的影响;在研究区西侧,沉积物输运趋势整 体表现为自东北向西南方向输运,造成此输运趋 势的原因为山东半岛沿岸流自渤海海峡南侧向 东输运的过程中,在经过研究区西侧时遇到黄海 冷水团阻挡,同时受北黄海密度环流的影响,转 而向南沉积<sup>[4-5]</sup>。



图 6 研究区表层沉积物净输运趋势



2.5 沉积动力环境分区

研究区表层沉积物的 Pejrup 三角投图如图 7 所示,样本投点主要集中在 AIV和 BIV 区域。综 合研究区域的沉积物类型、粒度组分、粒度参数 特征、沉积物输运特征等多重因素,并结合研究 区地形地貌、水动力条件,将研究区沉积动力环 境大致划分为两个区(图 7):西北部远岸区(A) 以及东南部近岸区(B),两个沉积区在沉积环境 上有着较为明显的差异。A 区位于研究区西北 部,共设有 21 个观测点,水深范围在 40~50 m, 潮汐特征为不规则的半日潮。主要沉积物类型 为粉砂质砂,沉积物粒级以砂为主,粉砂次之,黏 土最少,粒径较粗,水动力条件较强。由沉积物 输运趋势可知,A区受到山东半岛沿岸流、黄海 冷水团以及北黄海密度环流的影响。以往研究 表明[4],研究区附近海域表层沉积物中方解石和 白云石(碳酸盐)总含量主要集中在 5%~8%,与 黄河入海物质的碳酸盐矿物含量参数相吻合,说 明其物源主要来自山东半岛沿岸流所携带黄河 入海沉积物。在希腊北爱琴海海域, Vakalas 和 Zananiri<sup>[22]</sup> 为了研究海底沉积物的空间分布 特征,以了解海洋的各种水动力条件,通过分析 粒度参数(包括平均粒径、分选性和偏度),研究 了北爱琴海的泥沙输运模式。其研究结果<sup>[22]</sup>表 明,北爱琴海沿岸的泥沙分布主要受近岸河流输 运和沿岸流的影响,这与本研究 A 区的结果相一 致。B区位于研究区东南部,共设有59个观测 点,水深范围在20~40m之间,潮汐波浪特征与 A 区相似,主要沉积物类型为砂质粉砂,沉积物 粒级以粉砂为主,砂次之,黏土最少,整体粒径较 细,水动力条件较 A 区稍弱。由沉积物输运趋势 可知, B 区主要受到黄海暖流余流的控制。本区 附近表层沉积物中伊利石/蒙脱石比值小于6,以 及伊利石、蒙脱石、绿泥石+高岭石为端元的三 端元图特征都清晰地反映出本研究区主要物源 接近黄河物质<sup>[4]</sup>,表明该区物源同样来自黄河携 带入海的沉积物。





Fig. 7 Classification of sedimentary dynamic environment and Pejrup triangulation map in the study area

## 3 结论

(1)研究区沉积物可以划分为两种类型,分 别是粉砂质砂(zS)和砂质粉砂(sZ),粒度组成以 粉砂和砂为主,粉砂含量占绝对优势,研究区内 沉积物平均粒径为3.46Φ~6.10Φ,均值为4.72Φ, 以细砂(4Φ~5Φ)组分为主,空间分布上研究区 沉积物粒径呈带状分布自远岸区向近岸区粒径 逐渐降低,由粉砂质砂向砂质粉砂过渡。

(2)研究区东侧沉积物输运趋势表现为自东 南向西北方向输运,研究区西侧沉积物输运趋势 整体表现为自东北向西南方向输运。

(3)结合 Pejrup 三角投图及沉积物输运趋势,将研究区划分为西北部远岸区(A)以及东南部近岸区(B),A区受控于山东半岛沿岸流、黄海冷水团以及黄海密度环流,主要物质来自黄河入海沉积物。B区受控于黄海暖流余流,主要物源同样为黄河入海沉积物。

## 参考文献:

- 张 晋,李安春,万世明,等.生物硅对南海南部表层沉积物 粒度分析结果的影响 [J].海洋地质与第四纪地质,2016, 36(3): 35-46.
- [2] 张连杰,赵 博,王 鹏,等.大连湾海域沉积动力环境与物 质输运 [J]. 海洋地质前沿, 2019, 35(6): 12-19.
- [3] 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.
- [4] 孔祥淮,刘 健,李巍然,等.山东半岛东北部滨浅海区表层 沉积物粒度及矿物成分 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2006, 26(3): 21-29.
- [5] 王晓磊, 冯秀丽, 刘 潇, 等. 冬、夏季渤黄海表层沉积物粒 度特征差异及其成因分析 [J]. 海洋科学, 2015, 39(8): 63-69.
- [6] 刘爱菊, 尹逊福, 卢 铭. 黄海潮汐特征 (II)[J]. 黄渤海海洋, 1984(2): 24-27.
- [7] 程 鹏,高 抒.北黄海西部海底沉积物的粒度特征和净输 运趋势 [J]. 海洋与湖沼, 2000, 31(6): 604-615.
- [8] 王 伟,李安春,徐方建,等.北黄海表层沉积物粒度分布特

征及其沉积环境分析 [J]. 海洋与湖沼, 2009, 40(5): 525-531.

- [9] 刁新源. 黄海暖流、黄海冷水团及其春季演变过程研究 [D]. 青岛: 中国科学院大学 (中国科学院海洋研究所), 2015.
- [10] 曹友华,朱乾坤. 基于 Aqua/MODIS 数据研究黄海暖流的强 度及其时空变化 [J]. 海洋预报, 2021, 38(6): 93-102.
- [11] 皮 仲. 6.0 ka 以来黄海暖流和黄海冷水团的演化 [D]. 青岛: 中国科学院大学 (中国科学院海洋研究所), 2021.
- [12] 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.
- [13] DE BOER P L, VAN GELDER A, NIO S D. Tide-influenced sedimentary environments and facies[M]. Netherlands: D. Reidel, 1988: 289-300.
- [14] LIU Z X, XIA D X, BERNE S, et al. Tidal deposition systems of China's continental shelf, with special reference to the eastern Bohai Sea[J]. Marine Geology, 1998, 145(3/4): 225-253.
- [15] 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.
- [16] 鲍献文,李 真,王勇智,等.冬、夏季北黄海悬浮物分布特征[J]. 泥沙研究, 2010(2): 48-56.
- [17] 刘志杰, 公衍芬, 周松望, 等. 海洋沉积物粒度参数 3 种计算 方法的对比研究 [J]. 海洋学报, 2013, 35(3): 179-188.
- [18] 李 艳. 北黄海末次冰消期以来沉积特征及物源环境指示 [D]. 青岛: 中国科学院大学 (中国科学院海洋研究所), 2011.
- [19] 张 伟,周连成,吴建政,等. 渤海海峽南部海域表层沉积物 分布特征及控制因素 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2015, 35(5): 19-28.
- [20] 韩宗珠, 王一冰, 孙苑高, 等. 黄海表层沉积物的矿物组成特 征及其物源分析 [J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(4): 10-19.
- [21] 吕纪轩, 胡日军, 李 毅, 等. 烟台北部近岸海域表层沉积物 粒度分布及沉积动力环境特征 [J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(4): 27-36.
- [22] VAKALAS I, ZANANIRI I. Net transport patterns of surficial marine sediments in the North Aegean Sea, Greece[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2024, 12(3): 512.

(本文编辑:曲丽梅)