



基于粒度端元模型的烟台市养马岛海域沉积动力及物源解析

汤世凯, 李亨健, 强萌麟, 黎奕宏, 孙韶泽, 殷 焘, 于林弘

Sedimentary dynamics and material source in Yangma Island sea area in Yantai based on grain size end-member model

TANG Shikai, LI Hengjian, QIANG Menglin, LI Yihong, SUN Shaoze, YIN Tao, and YU Linhong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2024061201>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

南海中沙群岛海域表层沉积物粒度特征及其输运趋势

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

海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(2): 15–27

临汾盆地黄土粒度分布的端元模型研究

End member model analysis of grain size for the loess in Linfen Basin, China

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(2): 192–200

海南岛东南浅海表层沉积物粒度特征及沉积环境

Grain size distribution of surface sediments in the area off southeast Hainan Island and its implications for environmental interpretation

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(2): 64–74

赣中玉华山泥炭地沉积来源的粒度端元法分析与2 000 aBP以来气候环境重建

Climatic and environmental changes since 2 kaBP by End Member Modeling analysis on grain size data from a peat core of Yuhua Mountain, Jiangxi Province

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(2): 165–173

渤海湾唐山港海域表层沉积物粒度和黏土矿物分布特征及其物源指示

Characteristics of grain size and clay mineral distribution of surface sediments and their provenance implication in Tangshan Harbor, Bohai Bay

海洋地质与第四纪地质. 2023, 43(5): 136–147

黄河三角洲周边海域表层沉积物地球化学特征分布及影响因素

Controlling factors and distribution of geochemical characteristics of the surface sediments in the Yellow River Delta

海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(6): 104–118



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

汤世凯, 李亨健, 强萌麟, 等. 基于粒度端元模型的烟台市养马岛海域沉积动力及物源解析 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2025, 45(3): 62-71.
TANG Shikai, LI Hengjian, QIANG Menglin, et al. Sedimentary dynamics and material source in Yangma Island sea area in Yantai based on grain size end-member model[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2025, 45(3): 62-71.

基于粒度端元模型的烟台市养马岛海域沉积动力及物源解析

汤世凯^{1,2}, 李亨健^{1,2}, 强萌麟^{1,2}, 黎奕宏^{1,2}, 孙韶泽^{1,2}, 殷焘^{1,2}, 于林弘^{1,2}

1. 山东省海洋地质勘查院, 烟台 264004
2. 山东省第三地质矿产勘查院, 烟台 264004

摘要: 基于养马岛海域 30 个表层沉积物粒度测试数据, 计算沉积物粒度参数、分解粒度端元, 结合区域水动力、岸线类型等因素对沉积物的沉积动力环境和物质来源解析判别。结果表明, 海域沉积物平均粒径 Φ 值从河流入海口向远离岸线方向逐渐变大, 分选性由中等逐渐变差, 偏度以极正偏为主, 峰度为中等—尖锐。粒度数据中提取出 4 个单峰端元组分, EM1、EM2、EM3 和 EM4 粒级 Φ 值范围分别为 2.75~8.75、3.00~6.25、2.25~4.25 和 1.50~3.75, EM1 端元代表了水深较深、水动力弱沉积环境, 物源是黄海沿岸流携带的黄河入海泥沙细颗粒物; EM2 端元代表了潮流波浪叠加作用下水动力较弱的沉积环境, 物源是黄海沿岸流携带的黄河入海泥沙与海水侵蚀基岩海岸产生碎屑的混合物质; EM3 端元为潮流、波浪叠加和航道影响下水动力较强的沉积环境, 物源是入海河流携带泥沙混合海水侵蚀砂、泥岸线的碎屑。EM4 端元代表了水深浅, 海水与河水动力共同作用下强水动力沉积环境, 物源为入海河流携带泥沙混合海水侵蚀砂、泥岸线以及人类活动产生的碎屑。

关键词: 表层沉积物; 粒度参数; 端元解析; 沉积动力; 养马岛海域

中图分类号: P736.2 文献标识码: A DOI: [10.16562/j.cnki.0256-1492.2024061201](https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2024061201)

Sedimentary dynamics and material source in Yangma Island sea area in Yantai based on grain size end-member model

TANG Shikai^{1,2}, LI Hengjian^{1,2}, QIANG Menglin^{1,2}, LI Yihong^{1,2}, SUN Shaoze^{1,2}, YIN Tao^{1,2}, YU Linhong^{1,2}

1. Marine Geological Exploration Institute of Shandong Province, Yantai 264004, China
2. No.3 Exploration Institute of Geology and Mineral Resources of Shandong Province, Yantai 264004, China

Abstract: Based on the grain size test data of 30 surface sediments in Yangma Island sea area in Bohai Sea, Yantai, the grain size parameters were calculated and end members were specified. The sedimentary dynamic environment and material source of sediments were analyzed by combining regional hydrodynamics and shoreline types. Results show that the average grain size (Φ) of the marine sediment gradually increased from river estuary off coast seaward, from moderately to poorly sorted, the skewness turned extremely positive, and the kurtosis was from mesokurtic to leptokurtic. Four single-peak end-member components were recognized from the grain size data, namely, EM1, EM2, EM3, and EM4 in the size ranges of 2.75~8.75, 3.00~6.25, 2.25~4.25, and 1.50~3.75, respectively. The EM1 represented a sedimentary environment in deep water and weak hydrodynamics, and the source of the material was the fine-grained material from Yellow River carried out by the Yellow Sea littoral currents. The EM2 end-member represented a weak hydrodynamic sedimentary environment under the effect of tidal wave superposition, and the material source was the mixture of Yellow River inlet sediment carried by the Yellow Sea littoral current and the debris produced by seawater erosion of bedrock coast. The EM3 end-member represented the sedimentary environment with strong hydrodynamic force under the influence of tidal current, wave superposition and channel, and the material source was the debris produced by the inlet river-carried sediments and the mix of seawater erosion of sand and mud coast. The EM4 end-member represented a strong hydrodynamic sedimentary environment under the joint action of seawater and river hydrodynamics, and the source of material was the sediment carried by the

资助项目: 山东省财政项目“山东省烟台市养马岛及邻近海域综合地质调查”(鲁勘字(2023)38号); 烟台市财政项目“烟台市城市地质调查(综合成果编制与数据整合建库部分)”(SDGP370600000202302000134)

作者简介: 汤世凯(1988—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向为海岸带地质与海岸沉积, E-mail: tsktp@163.com

通讯作者: 殷焘(1985—), 男, 正高级工程师, 研究方向为海洋地质勘查及科学研究, E-mail: 397921601@qq.com

收稿日期: 2024-06-12; 改回日期: 2024-09-06. 张现荣编辑

river into the sea, mixed with the sand and mud coast eroded by seawater, and the debris that generated from human activities.

Key words: surface sediments; grain-size parameters; end-member analysis; sedimentary dynamics; Yangma Island sea area

海域沉积物在沉积过程中受到不同强度的潮汐、潮流和波浪等水动力环境影响,其物源有入海河流的泥沙、海岸侵蚀及外海输入等不同方式。Weltje 等^[1-2]将水动力和物源统称为动力组分,并构建了沉积物粒度端元分析模型。沉积物样品在沉积过程中不可避免的受不同的水动力环境和物质来源控制^[3-5],沉积物粒度分布曲线具有多个峰值,代表了多个动力组分。利用粒度端元分析模型,可将每一峰代表的动力组分分解出来,从而易于构析沉积物的水动力和物源特征。该模型在陆域古河道、湖泊以及海域海湾、近海沉积物粒度分析中,用于揭示沉积物动力特征、物质运输和沉降等方面应用效果良好^[6-10]。

关于养马岛海域的沉积物组成及沉积环境等方面的研究已有较多文献记载^[11-14],孔祥淮等^[11]对山东半岛东北部海底表层沉积物类型和黏土矿物组分分析,揭示了养马岛北部海域主要为砂质粉砂,主要物源为黄河物质;顾效源等^[12]对芝罘湾海域浅地层结构研究表明晚更新世以来的 3 次海侵和 2 次海退的沉积环境;汤世凯等^[13]利用 Folk-Ward 法计算了其研究海域的沉积物粒度参数,并采用粒径趋势分析模型(GSTA)和沉积动力判别图解得出了养马岛海域沉积物运移由 NE 向 SW,整体沉积动力环境较弱的研究结果。以往的研究工作

是在多个动力组分混合情况下开展的,未对单一组分及其地质意义进行解析,不能精确刻画水动力和物源对沉积物的影响。因此本次工作以养马岛海域 30 个表层样为研究对象,通过粒度参数、端元综合分析,研究表层沉积物粒度参数和端元空间分布特征,进一步探究端元组成对沉积环境、物源的指示意义,从而更好地了解养马岛海域表层沉积物的沉积规律和运输机制。

1 研究区概况

养马岛海域位于山东省烟台市牟平区北部,为东亚暖温带季风型气候,年均气温 12.6℃,年均降水量 682.4 mm,辛安河、鱼鸟河和沁水河 3 条河流汇入海域(图 1)。海域内海流为自渤海湾起沿山东半岛北部向东流的黄海沿岸流^[11]。潮汐类型属于正规半日潮,年均潮差为 160 cm,最大潮差为 288 cm。潮流类型以不正规半日潮流为主,潮流运动形式以往复流为主,主流流向为 WNW-ESE,余流较弱,流向紊乱。波浪以风浪为主,频率 79×10^{-2} ,涌浪出现频率 21×10^{-2} ,常浪向为 NNW,强浪向为 NNE,最大波高为 3.6~6.4 m^[15]。海底坡度起伏不大,水深由南向北逐渐增大,最大不超过 20 m,海底地貌主要有沙洲浅滩、水下岸坡和浅海平原 3 种类型。

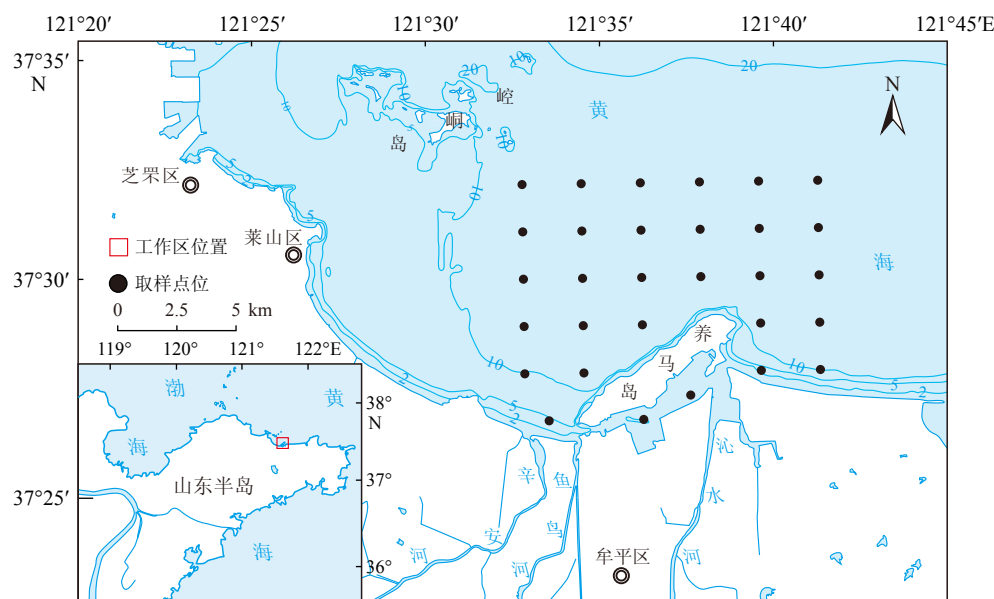


图 1 研究区及取样点位置示意图

Fig.1 Location of the study area and surface sediment sampling sites

2 样品采集与分析

2.1 样品采集及粒度分析

2023 年 8 月,项目组在养马岛海域采取表层样 30 站,取样站位见图 1。站位采用 DGPS 定位,采样网格间距为 2.5 km×2 km。采样过程前先进行水深测量,所取样品水深<18 m,然后用蚌式取样器采取 0~15 cm 厚度范围的沉积物,每件样品重量 1.5~2.0 kg。样品采集后立即进行现场描述,然后装入聚乙烯袋中排气密封,贴上标签放入样品箱中,置于阴凉处。取样当天即送至山东省第三地质矿产勘查院实验室进行测试分析。

样品分析前处理流程依据国家海洋调查规范^[16]执行,粒度分析采用美国贝克曼库尔特(Beckman Coulter)公司生产的 LS133200 激光粒度分析仪,仪器测量范围为 0.375~2 000 μm,重复分析结果误差小于 3%。粒度数据采用 Φ 值标准,按照 0.25 Φ 间隔进行粒级划分。本次采用 Folk-Ward 法计算沉积物的粒度参数(平均粒径、分选系数、偏度、峰度),参照粒度参数分级标准^[17]进行描述。

2.2 端元分析

Weltje 等^[1-2]提出了一种非参数化的沉积物粒度端元分解方法,Paterson 等^[18]对此方法进行改进,并编写了基于 MATLAB 运行的 AnalySize(V1.2.2)程序,该程序在分析粒度端元时有非参数化方法和参数化方法两种选择。研究表明,参数化方法适用于沉积动力和物源相比较稳定、持续性较好,而且在混合度高的粒度数据中拟合的结果优于非参数化方法^[6,19-21]。

本次利用参数化方法,假设端元数最多为 10,对沉积物粒度数据进行端元分离。在确定沉积物端元数量时,充分考虑粒级的相关系数 R^2 ,通常认为 R^2 达到 0.8 以上,说明端元数基本满足要求,在达到以上标准的基础上,结合端元数量尽量少的原则,选取最优的端元数量。

3 结果

3.1 粒度参数及空间分布

本文利用 AnalySize 程序和 surfer 软件计算、绘制研究区内 30 件表层沉积物的粒度参数和空间分

布等值线图,结果见表 1、图 2。

3.1.1 平均粒径

平均粒径能够反映搬运介质的平均动能。研究区沉积物平均粒径 Φ 值变化范围为 2.35~5.31,

表 1 沉积物粒度参数及端元含量
Table 1 grain size parameters and end member content of sediments

样品编号	平均粒径/Φ	分选系数	偏度	峰度	端元含量/%			
					EM1	EM2	EM3	EM4
HB1	4.55	1.35	0.47	1.17	29.00	30.81	40.19	0.00
HB2	4.32	1.69	0.23	1.24	35.54	23.39	29.27	11.81
HB3	4.74	1.51	0.34	0.98	44.44	23.00	29.87	2.69
HB4	4.44	1.59	0.27	1.13	36.37	25.21	28.15	10.28
HS5	5.31	1.41	0.41	0.89	48.80	49.88	1.32	0.00
HS6	4.94	1.16	0.38	1.10	37.21	60.40	2.39	0.00
HB7	4.57	1.33	0.32	1.25	29.47	42.56	23.37	4.60
HB8	4.64	1.29	0.48	1.18	26.32	40.06	33.62	0.00
HB9	4.35	1.18	0.47	1.30	21.42	31.60	46.97	0.00
HB10	4.26	1.37	0.30	1.17	28.59	26.79	33.53	11.09
HS11	4.40	1.20	0.49	1.13	26.08	23.84	50.08	0.00
HS12	4.94	0.97	0.34	1.20	34.96	65.04	0.00	0.00
HB13	4.99	1.44	0.37	0.90	45.23	30.39	24.37	0.00
HB14	4.59	1.26	0.44	1.23	26.27	43.02	30.70	0.00
HB15	4.44	1.04	0.42	1.36	14.35	55.97	29.69	0.00
HB16	4.50	1.33	0.32	1.18	32.21	35.73	28.14	3.92
HS17	4.64	1.05	0.28	1.23	28.06	58.87	13.07	0.00
HS18	4.87	1.27	0.32	1.02	41.31	40.75	17.94	0.00
HB19	4.94	1.44	0.21	0.88	55.56	21.54	21.56	1.33
HB20	4.61	1.23	0.38	1.08	31.08	41.60	26.94	0.37
HB21	4.28	1.20	0.36	1.51	17.11	40.60	37.79	4.51
HS22	3.40	1.51	0.74	1.13	16.68	10.31	0.00	73.01
HS23	4.78	1.33	0.56	1.11	24.20	46.24	29.56	0.00
HB24	4.27	1.01	0.46	1.63	6.76	50.35	42.89	0.00
HB25	3.92	0.84	0.19	1.66	1.98	41.31	53.20	3.51
HB26	2.35	0.34	0.02	0.94	0.00	0.00	0.00	100.00
HB27	2.71	0.93	0.58	1.58	6.10	10.05	3.95	79.89
HB28	3.04	0.56	0.16	0.87	0.00	0.00	50.65	49.35
HB29	5.02	1.83	0.09	0.79	63.37	8.67	14.58	13.39
HB30	3.60	1.67	0.11	0.99	27.91	26.07	14.16	31.86

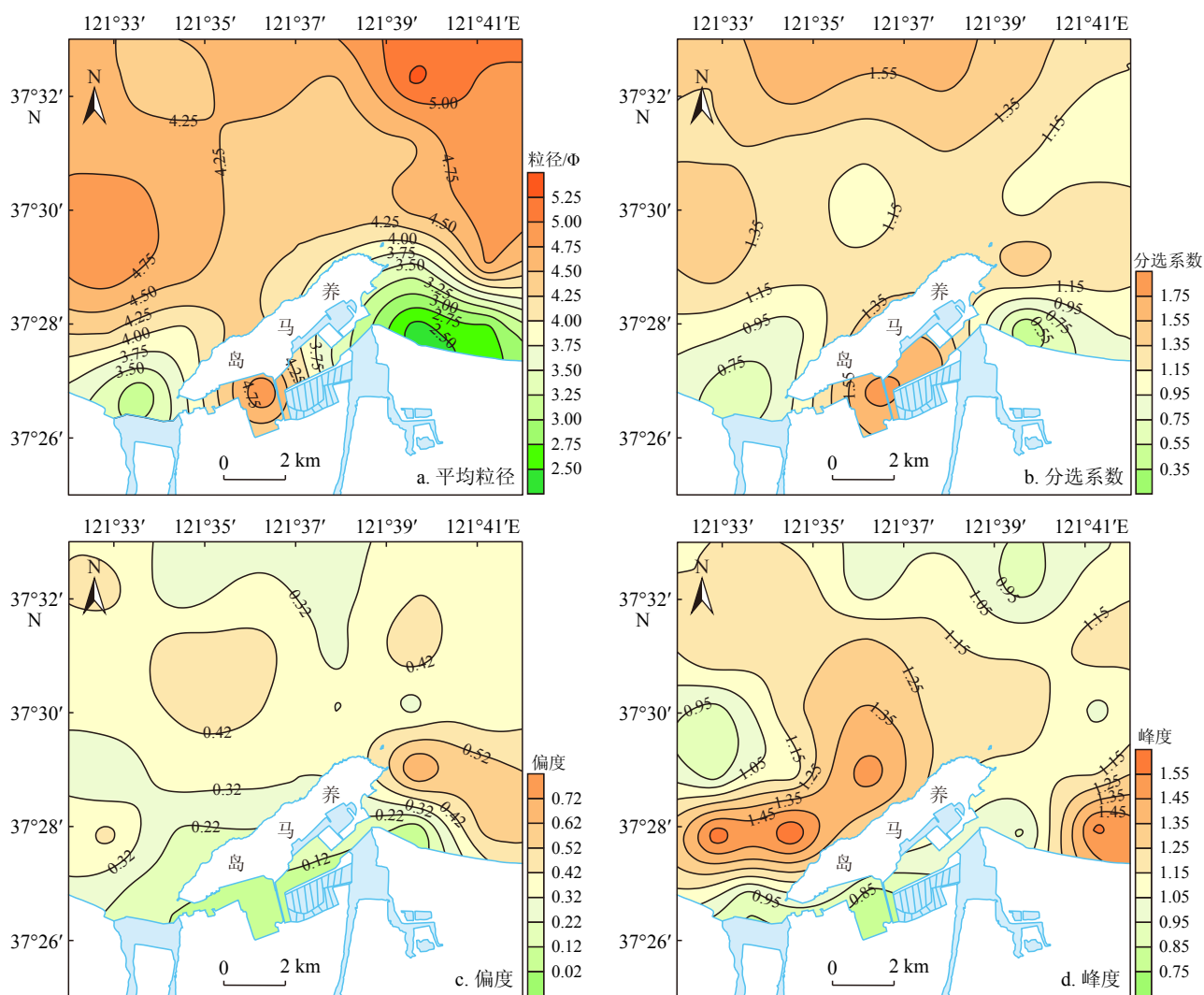


图 2 沉积物粒度参数等值线图

Fig.2 Distribution map of sediment grain size parameters

平均值为 4.35, 均值(含)以上样品数为 20 个, 占比 67%, 均值以下样品数为 10 个, 占比 33%。图 2a 为平均粒径等值线分布图, 如图所示, 养马岛以北大面积海域平均粒径 $\phi > 4.00$, 颗粒较细, 沉积物类型为粉砂; 而养马岛东西两侧海域平均粒径 $\phi < 4.00$, 颗粒较粗, 沉积物类型为砂。从侧面可以反映出养马岛北部宽阔海域水动力较弱, 而辛安河、鱼鸟河和沁水河入海口海域, 河流携带泥沙入海, 同时海流、波浪等受大陆地形条件约束, 导致养马岛东西两侧河流入海口海域的水动力较强。

3.1.2 分选系数

分选系数能够反映水动力条件对沉积物的分选程度。研究区沉积物分选系数变化为 0.34~1.83, 平均值为 1.25, 均值以上样品数为 17 个, 占比 57%, 均值以下样品数为 13 个, 占比 43%。图 2b 为分选系数等值线分布图, 如图所示, 养马岛以北大面积海域分选系数大于 1.00, 分选性差; 而养马岛

东西两侧海域分选系数小于 1.00, 分选性为较好-中等, 说明养马岛以北大面积海域水动力分选作用较弱, 沉积环境复杂导致泥沙相互混杂, 从而沉积物主要粒级不突出。

3.1.3 偏度

偏度是反映粒度分布的不对称程度, 进一步判断搬运介质对粒度的改造程度。研究区沉积物偏度变化范围为 0.02~0.74, 平均值为 0.35, 均值以上样品 15 个, 占比 50%, 均值以下样品 15 个, 占比 50%。图 2c 为偏度等值线分布图, 如图所示, 研究区内偏度为正偏-极正偏, 其中正偏分布面积较小, 主要在河流入海口处, 其余大面积为极正偏。反映了沉积物被改造时趋向于细粒化。

3.1.4 峰度

峰度是反映粒度频率分布曲线峰的宽窄程度。研究区沉积物峰度变化为 0.79~1.66, 平均值为 1.16, 均值以上样品为 15 个, 占比 50%, 均值以下

样品为 15 个, 占比 50%。图 2d 为峰度等值线分布图, 如图所示, 峰度以中等(正态)-尖锐为主, 中等(正态)区域主要分布在养马岛东北部及南部海域; 尖锐区域主要分布在养马岛西北部靠近岛屿的海域和养马岛东部海域, 表明该区域的水动力环境对沉积物的改造不太充分。

3.2 端元分解及空间分布

3.2.1 端元分解

对表层沉积物粒度数据采用参数化方法进行端元分解拟合, 数据拟合结果见表 2、图 3。从图表中可以看出, 当端元数从 1 到 3 增加的过程中, R^2 增幅比较大, 端元数从 3 到 6 增加的过程中, R^2 增幅缓慢, 端元数从 6 到 10 增加的过程中, R^2 增幅几乎不变, 从拟合结果上看, 拟合出 6 个端元组分是最为理想的, 然而端元数过多, 对于解析各端元地质意义具有一定困难。当端元数为 4 时, 相关系数 R^2 为 0.955, 已经达到了 0.8 以上, 且大于 95% 置信度, 角偏差相对较小, 参数化粒度端元与样品粒度曲线拟合程度完全满足需要。端元数从 5 到 10 的增加, 并未对端元数为 4 时的拟合程度有着显著的改善, 本着尽量减少端元数的原则, 本次对粒度数据分解为 4 个端元。

4 个端元组分频率曲线见图 4, EM1、EM2、EM3、EM4 均具有明显主峰、总体接近正态分布。EM1 粒级范围(Φ 值)为 2.75~8.75, 粒级组分大部分归属于粉砂质沉积物范围, 平均粒径为 5.97, 分选系数为 1.37, 偏度为-0.01, 峰度为 0.97; EM2 粒级范围(Φ 值)为 3.00~6.25, 粒级组分归属于砂质和粉砂

表 2 沉积物端元拟合结果

Table 2 End member fitting results of sediments

端元个数	端元相关系数 R^2	角度离差
1	0.521	35.7
2	0.839	19.9
3	0.920	13.8
4	0.955	10.3
5	0.976	7.4
6	0.990	4.9
7	0.994	3.7
8	0.995	3.4
9	0.995	2.7
10	0.997	2.6

质混合的沉积物范围, 平均粒径为 4.42, 分选系数为 0.59, 偏度为 0.15, 峰度为 1.03; EM3 粒级范围(Φ 值)为 2.25~4.25, 粒级组分大部分归属于砂质沉积物范围, 平均粒径为 3.54, 分选系数为 0.44, 偏度为-0.06, 峰度为 0.97; EM4 粒级范围(Φ 值)为 1.50~3.75, 粒级组分归属于砂质沉积物范围, 平均粒径为 2.46, 分选系数为 0.40, 偏度为 0.17, 峰度为 1.04。从 EM1 到 EM4 平均粒径和分选系数逐渐变小, EM1 分选性最差, EM2 和 EM4 稍正偏, 峰度均为中等, EM1 曲线形态相对平缓。

3.2.2 端元空间分布

通过 AnalySize 程序计算, 样品中 4 个端元组分相对含量见表 1, 对各端元组分采用克里金插值法

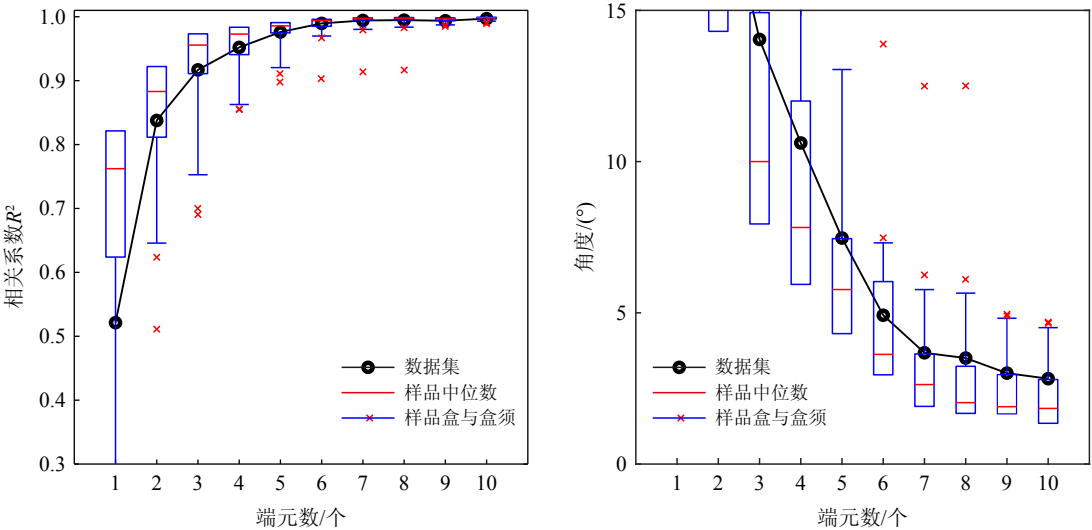


图 3 端元数线性相关和角度离差

Fig.3 Linear correlations and angular deviation of end member

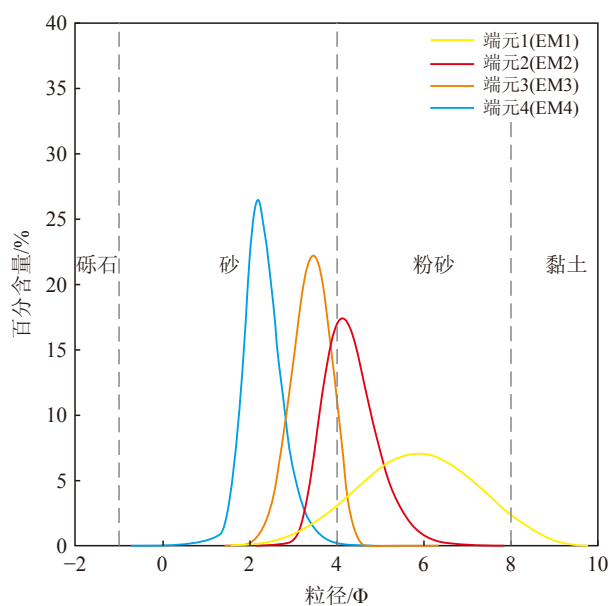


图 4 各端元粒度自然频率分布曲线

Fig.4 Natural frequency distribution curve of the grain size of each end member

绘制其空间分布情况, 见图 5。

EM1 空间分布见图 5a, 形态为开口向东南的“C”形, 由东南向西北呈现逐渐增高的趋势。在养马岛南部海域有小面积高值区, 岛两侧河流入海口处最低。西部海域端元 1 组分含量从 10% 增加至 40% 的距离约为 1.2 km, 等值线较为密集, 而东部海域从 10% 增加至 40% 的距离约有 6 km, 等值线相对稀疏。

EM2 空间分布见图 5b, 形态大体为“X”形, 南北部海域为相对低含量区, 等值线密集分布在岛东西两侧, 在河流入海口及岛南部海域存在最低值。东西部海域为相对高含量区, 东部海区等值线较为密集。

EM3 空间分布见图 5c, 形态大体为开口向西的“C”形, 海域中部及西南部为高值区, 东部和西部为低值区。养马岛两侧河流入海口处组分含量为反相关趋势, 西侧河流入海口处为高值区, 东侧河流

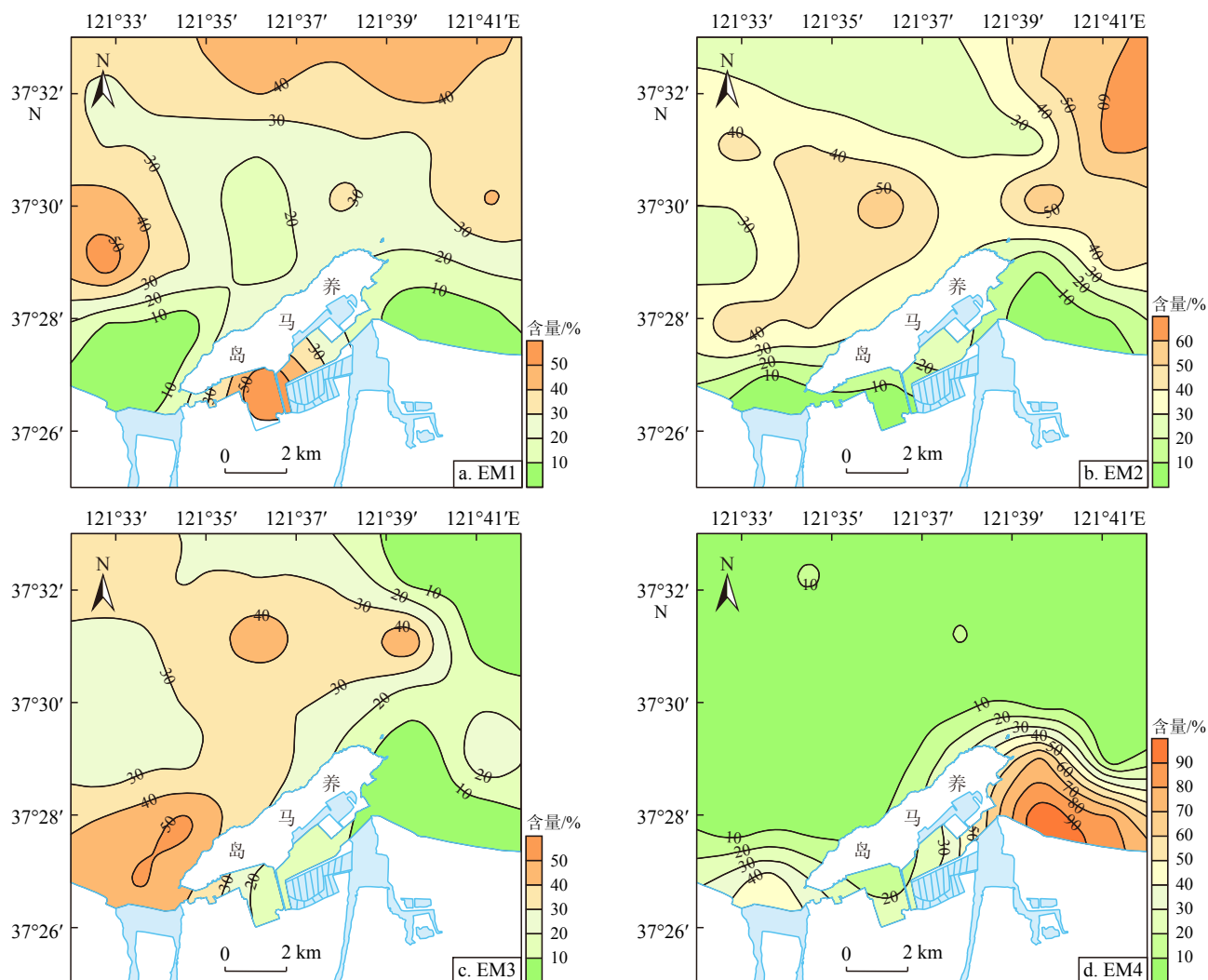


图 5 粒度端元含量等值线分布图

Fig.5 Distribution of grain size end member content

入海口处为低值区。

EM4 空间分布见图 5d, 大面积海域为含量低值区。与端元 1 呈现反相关趋势, 高值区主要分布在养马岛两侧河流入海口处海域, 且由北向南逐渐升高, 50%~90% 等值线密集分布在岛东侧河流入海口处。

河流入海口处端元 EM3 和 EM4 分布不同, 这与两侧河流的年径流量、输沙量不同相关, 西侧辛安河年径流量约 1 亿 m^3 , 东侧沁水河年径流量约 0.41 亿 m^3 。

4 讨论

4.1 沉积动力环境

利用 Pejrup^[22] 提出的三角图法能对沉积动力环境进行有效划分, 本次对养马岛海域沉积动力环境进行分区, 结果如图 6 所示。30 件沉积物样品中 2 个样品落于 A 区, 4 个样品落于 B 区, 其余 24 件样品均落于 C 区, 代表介质运动强度相对较小; 全部样品落于 IV 区, 代表粉砂相对黏土含量较多, 沉积环境较为扰动。

综合以上端元分解和空间分布内容可知, EM1 粒级高频组分大部分落入粉砂区域, 为研究区最细粒的沉积物, 分选性差, 频率分布曲线近对称分布, 峰度中等。在养马岛海域分布最为广泛, 该处水深相对较深, 沉积物沉积时受到的水动力影响因素较少, 主要因素为底层潮流, 平均流速为 9.4 cm/s, 流速较弱, 因此, 该端元的分布代表了研究区水动力弱的沉积动力环境。

EM2 粒级高频组分落入粉砂和砂的交界位置, 两者含量相近, 为研究区介于最细粒和最粗粒的中间沉积物, 分选性较好, 频率分布曲线稍正偏, 峰度中等。在养马岛东北和西北开阔海域均有分布, 以东北部海域分布最广, 在较深海域水动力作用以底层流速弱潮流为主, 在较浅海区, 水动力主要为潮流叠加一定程度的波浪作用, 总体而言, 该端元的分布代表了研究区水动力较弱的沉积动力环境。

EM1 和 EM2 粒级组分分布对应于三角图中 CIV 区, 两端元所反映沉积水动力环境与 CIV 区代表的水动力环境一致, 为沉积水动力较弱-弱区。

EM3 粒级高频组分大部分落入砂区域, 为研究区相对粗粒的沉积物, 分选性较好, 频率分布曲线近对称分布, 峰度中等。在养马岛西部较深或较浅海域均有分布, 据烟台西港区至牟平港区海图资

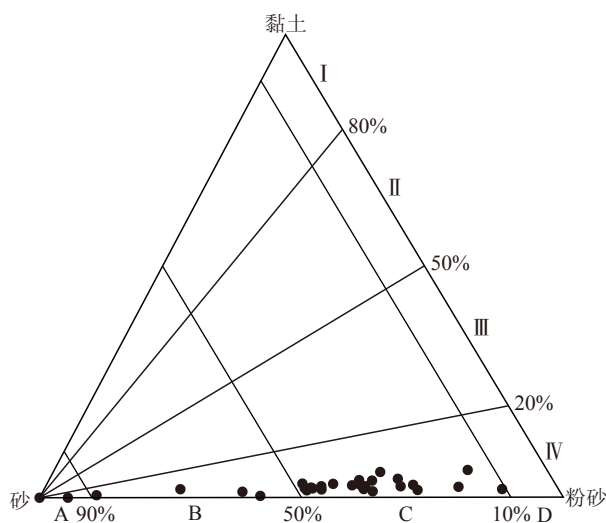


图 6 沉积动力三角图投点结果

Fig.6 Sedimentary dynamic zones in the Pejrup triangle diagram

料, 外航道从辛安河及鱼鸟河入海口向 350° 方向取道, 和 EM3 分布海域重叠, 在潮流水动力、波浪、入海河流及船只航行活动的影响下, 只有较粗的颗粒物才能沉积下来, 因此, 该端元的分布代表了研究区水动力较强的沉积动力环境。

EM4 粒级高频组分几乎全部落入砂区域, 是研究区最粗粒的沉积物, 分选性好, 频率分布曲线稍正偏, 峰度中等。其含量高值分布区的特点是养马岛河流入海口处, 尤其是在东侧河流入海口处含量最高。EM4 的空间分布是河流、波浪、潮汐以及地形等因素的综合作用的结果, 河水从河道汇入海域, 流速突然降低, 速度变化差值较大, 从西北方向传播过来的潮流和波浪受到大陆岸线的阻碍, 尤其是岛东侧海域, 潮流和波浪还会受到养马岛本岛的阻碍, 产生回流和旋转现象, 加之河流入海口区域水深浅, 综合水动力作用能够直接影响海床沉积物, 因此, 该端元的分布代表了研究区水动力强的沉积动力环境。

EM3 和 EM4 粒级组分分布对应于三角图中 AIV 和 BIV 区, 两端元所反映沉积水动力环境与 AIV 和 BIV 区代表的水动力环境一致, 均为沉积水动力强-较强区。

综上, 海域内 80% 的沉积物样品落于三角判别图中 CIV 区, 且 EM1 和 EM2 是海区分布最广泛的两个粒度端元, 该区域的沉积水动力条件整体较弱。

4.2 沉积物源分析

端元空间分布除了能反映沉积水动力环境, 还能反映不同物源分布特征。如图 7 所示, 研究区内泥沙来源主要包括海岸侵蚀、河流(辛安河、鱼鸟

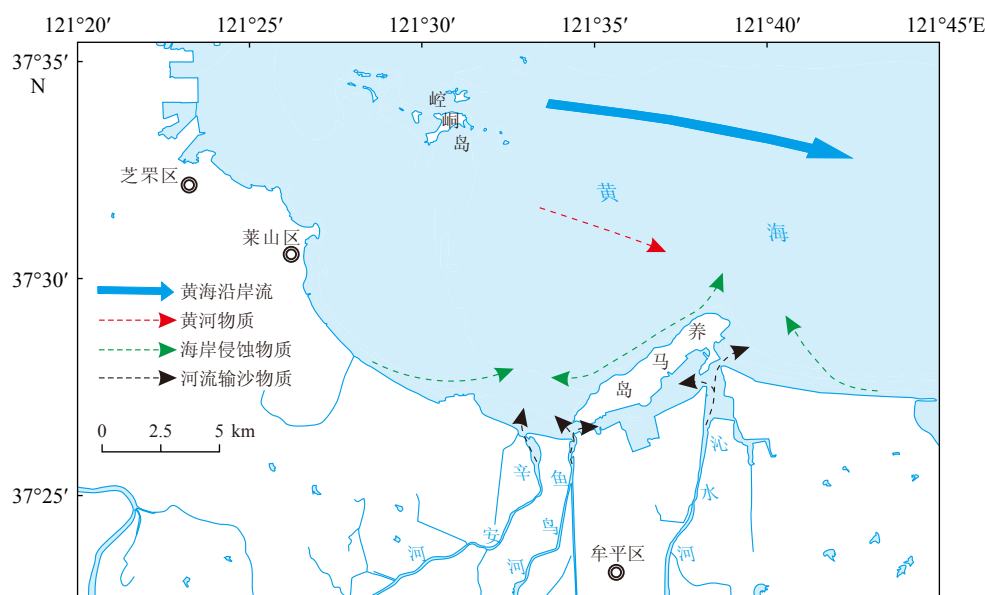


图 7 沉积物源及物质运移方向示意图

Fig.7 Schematic diagram of sediment sources and the direction of material transport

河、沁水河)输沙以及黄海沿岸流携带的黄河入海泥沙^[11,23-24],另外航道疏浚及以往修建大量虾池带来的泥沙直接倾覆周边海域,也是沉积物源中应该考虑的因素。其中养马岛北侧海岸为基岩质岸线,岛南侧及大陆海岸为砂、泥质岸线,波浪、潮流对基岩海岸侵蚀形成泥沙有限,主要侵蚀砂、泥质海岸形成泥沙碎屑。

EM1 主要分布在离岸线以及入海河流均较远的海域,根据前人研究成果^[25-27],该海域内稀土元素组成和黏土矿物组合(伊利石+绿泥石+高岭石+蒙脱石)含量均与黄河物质较为相近,表明该海域的沉积物来源主要是黄海沿岸流携带的黄河泥沙,该部分泥沙经过长距离运移路径的搬运,经过不断的分选、沉降,在本海域弱沉积动力环境区域沉积为粉砂等细粒沉积物。

EM2 分布在养马岛北侧岸线及东北部海域,表明沉积物来源主要为黄海沿岸流携带的黄河入海泥沙混合海水侵蚀岛北侧基岩海岸产生的泥沙碎屑,在较弱的动力环境下形成了粗粒、细粒沉积物含量各占半数的格局。

EM3 分布在辛安河、鱼鸟河入海口及航道附近,反映的沉积物来源主要为辛安河、鱼鸟河携带的泥沙混合海水侵蚀西部砂、泥岸线形成的泥沙碎屑,在河水进入海洋的余动力、船只航行产生的水动力以及海洋动力综合作用下,沿河口及航道周围分布。

EM4 主要分布在沁水河入海口及砂、泥质岸线附近,表明沉积物来源为沁水河携带的泥沙和海水

侵蚀东部砂、泥岸线形成的泥沙碎屑,另外该河口附近为养殖池,养殖户修建、定期清理池底产生的泥沙碎屑,也会受到河水、海水动力共同作用沉积到周边海域。

5 结论

(1)养马岛海域表层沉积物粒度参数空间分布具有一定规律性,从河流入海口向远离岸线方向,平均粒径 ϕ 值逐渐变大,分选性由中等逐渐变差,大部分海域偏度以极正偏为主,峰度为中等-尖锐。

(2)采用参数化方法分解拟合 4 个粒度端元,形态均为单峰,其空间分布基本能反映养马岛海域的沉积动力环境,分别为 EM1 水深较深、水动力弱沉积环境,EM2 潮流和波浪叠加作用下的水动力较弱沉积环境,EM3 潮流、波浪叠加以及航道影响下的水动力较强沉积环境和 EM4 水深较浅、多种因素共同影响下的水动力强沉积环境。研究区整体为水动力较弱的沉积环境。

(3)沉积物物质来源多样,结合端元空间分布及沉积动力环境因素,EM1 指示物质来源于黄海沿岸流携带的黄河泥沙细粒物质;EM2 指示物质来源于黄海沿岸流携带的黄河泥沙与海水侵蚀基岩海岸产生碎屑的混合物质;EM3 指示物质来源于入海河流携带泥沙混合海水侵蚀砂、泥岸线的碎屑。EM4 指示物质来源于入海河流携带泥沙混合海水侵蚀砂、泥岸线以及人类活动产生的碎屑。

参考文献 (References)

- [1] Weltje G J. End-member modeling of compositional data: Numerical-statistical algorithms for solving the explicit mixing problem[J]. *Mathematical Geology*, 1997, 29(4): 503-549.
- [2] Weltje G J, Prins M A. Muddled or mixed? Inferring palaeoclimate from size distributions of deep-sea clastics[J]. *Sedimentary Geology*, 2003, 162(1-2): 39-62.
- [3] 张云峰, 张振克, 丁海燕, 等. 江苏启东嘴潮滩敏感粒度组分及环境意义[J]. *海洋环境科学*, 2021, 40(1): 81-86. [ZHANG Yunfeng, ZHANG Zhenke, DING Haiyan, et al. The sensitive grain-size components of core sediments and environmental significance at tidal flat around Qidong cape, Jiangsu province[J]. *Marine Environmental Science*, 2021, 40(1): 81-86.]
- [4] 陈洪云, 孙有斌. 黄土高原风尘沉积的物质来源研究: 回顾与展望[J]. *第四纪研究*, 2008, 28(5): 892-900. [CHEN Hongyun, SUN Youbin. Study on provenance of eolian dust deposits on the Chinese Loess Plateau: Retrospects and prospects[J]. *Quaternary Sciences*, 2008, 28(5): 892-900.]
- [5] Middleton G V. Hydraulic interpretation of sand size distributions[J]. *The Journal of Geology*, 1976, 84(4): 405-426.
- [6] 王伟斌, 姚弘毅, 吴昊, 等. 厦门五缘湾及同安湾口表层沉积物粒度端元解析[J]. *渔业研究*, 2023, 45(1): 54-63. [WANG Weibin, YAO Hongyi, WU Hao, et al. End-member analysis of surface sediments in Wuyuan Bay and Tong'an Bay mouth of Xiamen, Fujian Province[J]. *Journal of Fisheries Research*, 2023, 45(1): 54-63.]
- [7] 张晓东, 季阳, 杨作升, 等. 南黄海表层沉积物粒度端元反演及其对沉积动力环境的指示意义[J]. *中国科学: 地球科学*, 2015, 45(10): 1515-1523. [ZHANG Xiaodong, JI Yang, YANG Zuosheng, et al. End member inversion of surface sediment grain size in the South Yellow Sea and its implications for dynamic sedimentary environments[J]. *Science China Earth Sciences*, 2016, 59(2): 258-267.]
- [8] 林镇坤, 王爱军, 叶翔. 南流江河口水下三角洲表层沉积物端元分析及其沉积动力环境意义[J]. *沉积学报*, 2019, 37(1): 124-134. [LIN Zhenkun, WANG Aijun, YE Xiang. End-member analysis for surficial sediment of Nanlijiang river subaqueous delta and associated sediment dynamic environmental significance[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2019, 37(1): 124-134.]
- [9] 黎武标, 李志文, 王志刚, 等. 粒度端元揭示的芝罘剖面末次间冰期: 末次冰期气候环境变化特征[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2019, 39(2): 177-187. [LI Wubiao, LI Zhiwen, WANG Zhigang, et al. Climatic environment changes during the last interglacial-glacial cycle in Zhifu loess section: Revealed by grain-size end-member algorithm[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2019, 39(2): 177-187.]
- [10] 张晓东, 翟世奎, 许淑梅. 端元分析模型在长江口邻近海域沉积物粒度数据反演方面的应用[J]. *海洋学报*, 2006, 28(4): 159-166. [ZHANG Xiaodong, ZHAI Shikui, XU Shumei. The application of grain-size end-member modeling to the shelf near the estuary of Changjiang River in China[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2006, 28(4): 159-166.]
- [11] 孔祥淮, 刘健, 李巍然, 等. 山东半岛东北部海底表层沉积物粒度分布特征和沉积作用研究[J]. *海洋湖沼通报*, 2006(3): 37-47. [KONG Xianghuai, LIU Jian, LI Weiran, et al. Study on grain-size distribution of surface sediments and modern sedimentation in the littoral zone in the northeastern part of the Shandong Peninsula[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2006(3): 37-47.]
- [12] 顾效源, 王伟. 山东芝罘湾附近海域浅地层结构特征[J]. *海岸工程*, 2021, 40(2): 131-139. [GU Xiaoyuan, WANG Wei. Characteristics of the shallow stratigraphic structure in the sea area near the Zhifu Bay, Shandong[J]. *Coastal Engineering*, 2021, 40(2): 131-139.]
- [13] 汤世凯, 于剑峰, 李金鹏, 等. 烟台芝罘湾底质沉积物粒度特征和沉积动力环境研究[J]. *山东国土资源*, 2020, 36(1): 22-28. [TANG Shikai, YU Jianfeng, LI Jinpeng, et al. Study on grain size characteristics of surface sediments and sedimentary dynamic environment in Zhifu Bay in Yantai city[J]. *Shandong Land and Resources*, 2020, 36(1): 22-28.]
- [14] 王莹, 吴建政, 胡日军, 等. 养马岛连陆海堤对沉积动力环境的影响[J]. *海洋地质动态*, 2008, 24(6): 19-25. [WANG Ying, WU Jianzheng, HU Rijun, et al. The impact of Yangma Island's land connected seawall on sedimentary dynamic environment[J]. *Marine Geology Letters*, 2008, 24(6): 19-25.]
- [15] 山东省科学技术委员会. 山东省海岛志[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1995: 95-96. [Shandong Provincial Science and Technology Commission. Shandong island Chronicle[M]. Ji'nan: Shandong Science and Technology Press, 1995: 95-96.]
- [16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 12763.8-2007 海洋调查规范 第8部分: 海洋地质地球物理调查[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008: 1-94. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB/T 12763.8-2007 Specifications for oceanographic survey-Part 8: Marine geology and geophysics survey[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008: 1-94.]
- [17] Folk R L, Ward W C. Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1957, 27(1): 3-26.
- [18] Paterson G A, Heslop D. New methods for unmixing sediment grain size data[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2015, 16(12): 4494-4506.
- [19] 王兆夺, 于东生, 汪卫国, 等. 泉州湾表层沉积物粒度指示的沉积动力端元解析[J]. *热带地理*, 2021, 41(5): 975-986. [WANG Zhaoduo, YU Dongsheng, WANG Weiguo, et al. End-member analysis of sedimentary dynamics indicated by the grain-size of surface sediments in the Quanzhou Bay[J]. *Tropical Geography*, 2021, 41(5): 975-986.]
- [20] Prins M A, Vriend M, Nugteren G, et al. Late Quaternary Aeolian dust input variability on the Chinese Loess Plateau: Inferences from unmixing of loess grain-size records[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2007, 26(1-2): 230-242.
- [21] Sun D H, Bloemendal J, Rea D K, et al. Grain-size distribution function of polymodal sediments in hydraulic and Aeolian environments, and numerical partitioning of the sedimentary components[J]. *Sedimentary Geology*, 2002, 152(3-4): 263-277.
- [22] Pejrup M. The triangular diagram used for classification of estuarine sediments: a new approach[M]//de Boer P L, van Gelder A, Nio S D.

- Tide-Influenced Sedimentary Environments and Facies. Dordrecht: Reidel, 1988: 289-300.
- [23] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志: 第三分册 (山东半岛北部和东部海湾)[M]. 北京: 海洋出版社, 1991: 215-216. [China Bay Record Committee. The Bay Chorography in China: The Northern and Eastern Bays of the Shandong Peninsula[M]. Beijing: China Ocean Press, 1991: 215-216.]
- [24] 薛佐, 印萍, 王文海. 养马岛西南海域泥沙运移及近岸演化态势研究 [J]. [海岸工程](#), 2005, 24(1): 19-28. [XUE Zuo, YIN Ping, WANG Wenhai. Study on the sediment transport and nearshore evolution situation in the sea area southwest of Yangma Island[J]. [Coastal Engineering](#), 2005, 24(1): 19-28.]
- [25] 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的稀土元素及其物源判别 [J]. [海洋地质与第四纪地质](#), 2007, 27(3): 51-59. [KONG Xianghuai, LIU Jian, LI Weiran, et al. Geochemistry of REE and provenance of surface sediments in the littoral area of the northeastern Shandong Peninsula[J]. [Marine Geology and Quaternary Geology](#), 2007, 27(3): 51-59.]
- [26] 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. [HAN Zongzhu, WANG Yibing, SUN Yuangao, et al. Composition of minerals in surface sediments of the Yellow Sea and their provenance[J]. [Marine Geology Frontiers](#), 2022, 38(4): 10-19.]
- [27] 乔淑卿, 石学法, 方习生, 等. 渤海-北黄海沉积物黏土矿物特征及其环境意义 [J]. [海洋科学进展](#), 2020, 38(2): 253-262. [QIAO Shuqing, SHI Xuefa, FANG Xisheng, et al. Distribution and composition of clay minerals in seafloor surface sediments of the Bohai Sea and North Yellow Sea and their implications for sedimentary environment[J]. [Advances in Marine Science](#), 2020, 38(2): 253-262.]