

李佳林, 冯永财, 褚宏宪, 等. 北黄海南部海域表层沉积物粒度和黏土矿物特征及其物源指示[J]. 海洋地质前沿, 2024, 40(11): 91-102.
LI Jialin, FENG Yongcai, CHU Hongxian, et al. Grain size and clay mineral characteristics of surface sediments in the southern North Yellow Sea and their source indications[J]. Marine Geology Frontiers, 2024, 40(11): 91-102.

北黄海南部海域表层沉积物粒度和黏土矿物特征及其物源指示

李佳林^{1,2}, 冯永财^{1,2*}, 褚宏宪^{1,2}, 郝连成^{1,2}, 姜文钦^{1,2}, 黄杏^{1,2}, 远继东^{1,2}, 陈玉海^{1,2}

(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:通过分析北黄海南部海域 138 个站位的表层沉积物粒度和黏土矿物组成及其分布特征, 探讨了不同区域沉积物来源及其控制因素。研究结果显示, 研究区海域表层沉积物平均粒径为 $1.47\Phi\sim 6.56\Phi$, 主要沉积物类型为砂质粉砂、粉砂和粉砂质砂。Pejrup 三角图解显示, 区内沉积动力整体较强, 特别是成山头近岸的深水区。黏土矿物组成主要是伊利石 (61.08%) 和蒙脱石 (19.78%), 其次是绿泥石 (10.92%) 和高岭石 (8.22%)。物源分析表明, 北黄海南部海域表层沉积物主要来自黄河携带的陆源碎屑物质, 对是否存在鸭绿江物源存疑。山东半岛沿岸流和冬季北上的黄海暖流为区内主要水动力来源, 二者决定了沉积物的运移趋势, 主导了研究区沉积物的空间分布。

关键词:粒度特征; 黏土矿物; 北黄海南部; 物源指示; 山东半岛沿岸流

中图分类号: P736.2

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2024.165

0 引言

北黄海位于山东半岛东北部、辽东半岛东南部, 东至朝鲜半岛, 是一个半封闭陆架浅海^[1], 平均水深 40 m, 最大水深约 70 m。研究区位于北黄海南部、山东半岛东北部的滨浅海区, 最大水深约 60 m。历史资料及地形图显示, 研究区内海底地形总体呈“一坡一台”特征: 近岸为一陡而窄的岸坡, 向外为明显的台地地形^[2]。研究区附近洋流体系主要有山东半岛沿岸流和黄海暖流, 区内无大型入海河流。全新世以来, 北黄海环境变化显著, 并形成了大面积泥质沉积区^[3]。在过去的几十年, 国内外学者针对北黄海泥质区的成因、物源和沉积环境特征等,

开展了多批次大范围的海底底质调查。PARK 等^[4]通过黏土矿物分析指出, 北黄海黏土矿物主要为陆源输入, 且主要来源于周边河流, 而中部泥质区的物源可能与旧黄河和现代黄河水系密切相关。孔祥淮等^[5]查明了山东半岛东北部滨浅海区海底沉积物类型分布, 其矿物组分分析结果表明, 沉积物来源主要为黄河和少量近源沉积。李国刚等^[6-7]、王安国^[8]、苗晓明等^[9]也分别从矿物学、地球化学等角度得到相似结论, 即黄河泥沙是北黄海泥质沉积体的重要物源, 同时, 鸭绿江被认为是北黄海中东部至东北部的另一个重要沉积物质来源^[10-13], 程鹏等^[14]和边昌伟^[15]从泥沙动力学角度探讨了黄河泥沙入海后穿越渤海海峡向东运移的趋势, 佐证了这一观点。

粒度是沉积物的主要属性之一, 是反映物源特征与沉积动力特征的重要依据^[16-17], 在中国边缘海域沉积学研究中被广泛应用。在北黄海中东部^[18]、西部^[14]、北部^[19]和山东半岛近岸海域^[5,8,20], 已有学者利用海底沉积物粒度特征分析探讨了北黄海沉积动力和沉积来源。而黏土矿物是海洋沉积物的重

收稿日期: 2024-07-15

资助项目: 中国地质调查局项目(DD20211553, DD20230412)

第一作者: 李佳林(1996—), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事海洋基础地质调查方面的研究工作。E-mail: lj1960226@163.com

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

要组成成分,通常由地表母岩经风化作用后随河流、海流等载体搬运至海洋中沉积,常被用以示踪海洋沉积物物源及运移趋势^[21-22]。前人在北黄海海域相继开展了多项研究,对北黄海沉积物源有了较完善的认识^[5-6,23]。以往对北黄海海域泥质沉积体的研究多为大面积海域的低密度取样分析,对于山东半岛近岸海域高密度取样的沉积物粒度特征和黏土矿物分析研究相对较少。本文利用在北黄海南部即山东半岛东北部滨海浅海区高密度采集的表层沉积物样品,分析其粒度和黏土矿物特征,结合海域水动力特征及周边河流黏土矿物最新研究进展,探讨区内沉积动力环境,重新厘定北黄海南部海域

沉积物来源及运移趋势。

1 资料与方法

1.1 样品来源

中国地质调查局烟台海岸带地质调查中心于2023年6—7月在北黄海南部海域,采用箱式取样器共获取138站位表层沉积物样品(图1),取样站位按照10 km×10 km网格间距设计,部分海域加密布设。所有样品在实验室进行粒度和黏土矿物测试分析。

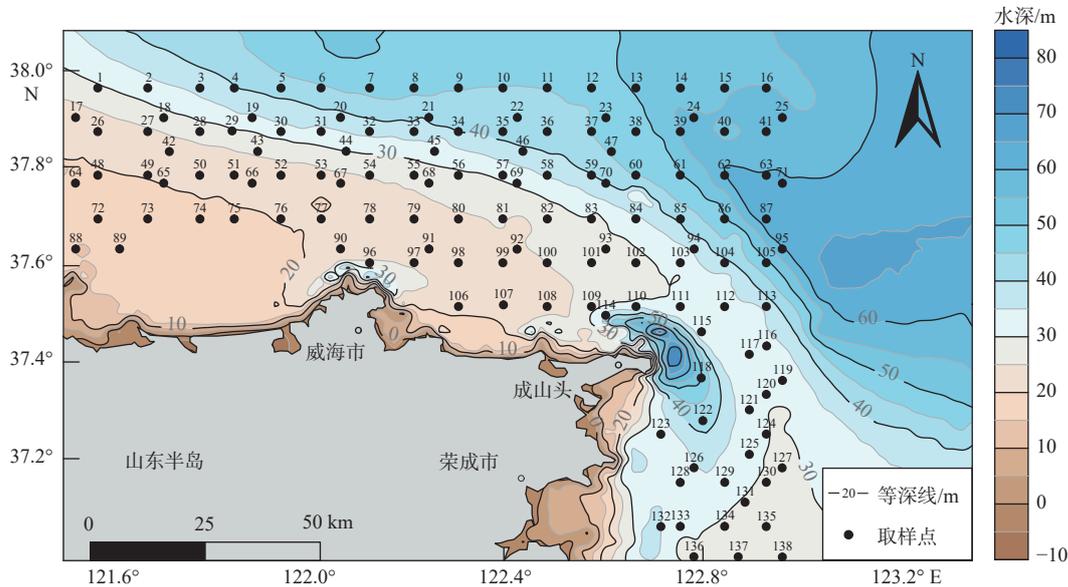


图1 研究区表层沉积物取样站位及水深

Fig.1 Sampling points and water depths of surface sediments in the study area

1.2 测试方法

样品粒度分析由中国地质调查局烟台海岸带地质调查中心分析测试实验室完成,分析仪器为安东帕PSA 1190LD激光粒度仪,测量范围为0.04~2 500 μm ,分辨率 $>0.01 \mu\text{m}$,含粗粒($>2.5 \text{ mm}$)的样品采用筛分法测量。先向样品中加入适量浓度10%的过氧化氢溶液和10%的盐酸,以消除有机质和碳酸盐物质对粒度结果的影响,静置12 h以上。待反应完毕后,吸除上清液并加入1 mol/L的六偏磷酸钠分散剂,使沉积物颗粒充分分离,进行超声清洗后上机测试。

黏土矿物分析采用X射线衍射法,由青岛斯巴达分析测试有限公司黏土矿物测试实验室完成。

首先,取适量样品放入50 mL离心管,少量多次加入10%的过氧化氢溶液进行浸泡,以消除样品中的有机质。然后,向管内加入纯水,上机3 500转离心清洗3遍,后加入50%冰醋酸去除样品中的碳酸盐类矿物,再加入纯水上机3 500转离心,将样品洗为中性。向样品中加入40 mL纯水混匀后,上机700转离心若干分钟,取上层浊液至新的离心管中,加入2滴饱和氯化钠溶液,摇匀后再次上机3 500转离心,吸除上清液,完成黏土矿物提取。最后,在样品中加入1:1的纯水,混匀后在洁净的载玻片上均匀涂片,待其自然风干后放入底部加有乙二醇的干燥器中,60 $^{\circ}\text{C}$ 恒温烘烤6 h后取出,用X射线衍射仪上机测试。根据BISCAYE^[24]提出的X射线衍射峰值计算方法,计算得到4种黏土矿物的百分含量。

校正后, 4 种黏土矿物总含量为 100%。实验过程进行质量控制, 设置 >10% 的平行样, 平行样合格率为 100%。

2 结果

2.1 表层沉积物粒度分布特征

2.1.1 表层沉积物粒度组分平面分布特征

研究区表层沉积物按粒径可主要分为砂、粉砂、黏土 3 种组分。砾组分仅在成山头附近海域的 2 个站位中出现, 平均含量为 9.95%。利用 Surfer 软件内置的 Kriging 插值法完成表层沉积物粒度组分的平面等值线图绘制, 结果如图 2 所示。

砂粒级组分的空间分布变化较大, 含量介于 0.87%~71.15%(图 2a), 平均为 15.85%。砂含量高值区集中在山东半岛东北角成山头近岸海域, 平均含量 >35%。研究区东北缘海域及西北部向中部延

伸的舌状区域, 砂含量较高 (>25%); 研究区中、北部及东部边缘水深较深区域为砂含量低值区。

粉砂粒级组分含量为 19.32%~82.68%(图 2b), 平均为 73.24%, 为研究区海底沉积物主要粒级组分。其高值区、低值区整体与砂的分布呈相反趋势。成山头附近海域低值区粉砂含量变化较大 (20%~64%), 其他区域含量变化总体平稳 (68%~82%)。

黏土粒级组分含量介于 2.78%~20.19%(图 2c), 平均为 10.87%。黏土含量分布趋势与粉砂相似, 与砂的分布呈相反趋势。研究区中、北部海域及山东半岛北部近岸海域, 黏土高值区含量普遍 >13%。整个研究区黏土粒级组分含量总体变化较小。

2.1.2 表层沉积物类型及分布特征

根据 Folk 三角图解法分类命名规则, 研究区沉积物可划分为 4 类(图 3)。其中, 不含砾石的样品有砂质粉砂、粉砂和粉砂质砂; 含砾样品为砾质泥质砂。

砂质粉砂(sZ)是研究区分布最广泛的沉积物类型, 占采样区域的 52.48%。粒级组分以粉砂为主, 平均含量为 70.41%; 砂平均含量为 21.23%; 黏土平均含量为 8.36%。空间上, 集中分布在研究区西北部向中部延伸的舌状区域, 沿山东半岛沿岸流分布; 其次, 在山东半岛东北角成山头近岸、研究区东北缘和东南缘, 也有较多分布。

粉砂(Z)在研究区的分布范围仅次于砂质粉砂, 占采样区域的 43.26%。粒级组分同样以粉砂为主, 平均含量达 79.90%; 砂含量很少, 平均为 5.62%, 最低仅 1.06%; 黏土含量明显高于其他沉积物类型, 平均为 14.48%, 最高达 20.19%。空间上, 集中分布在研究区中部近岸海域及向北、向东部延伸的广泛海域, 西南缘近岸海域也有少量分布。

粉砂质砂(zS)和砾质泥质砂(gmS)在研究区分布较少, 分别仅有 4 站位和 2 站位。前者集中分布在山东半岛东部近岸海域, 大致呈与岸线平行的带状分布, 粒级组分以砂为主, 平均含量为 58.68%, 粉砂组分平均含量为 35.92%, 黏土组分平均含量为 5.39%。后者分布在山东半岛东北角成山头近岸海域, 粒级组分以砂为主, 平均含量为 72.69%, 砾石平均含量为 9.94%, 粉砂平均含量为 15.20%, 黏土平均含量为 2.17%。

2.1.3 表层沉积物粒度参数分布特征

采用矩值法计算研究区表层沉积物的平均粒径(M_z)、分选系数(σ)、偏态(SK)和峰态(KG)等粒度参数, 相关结果如图 4 所示。

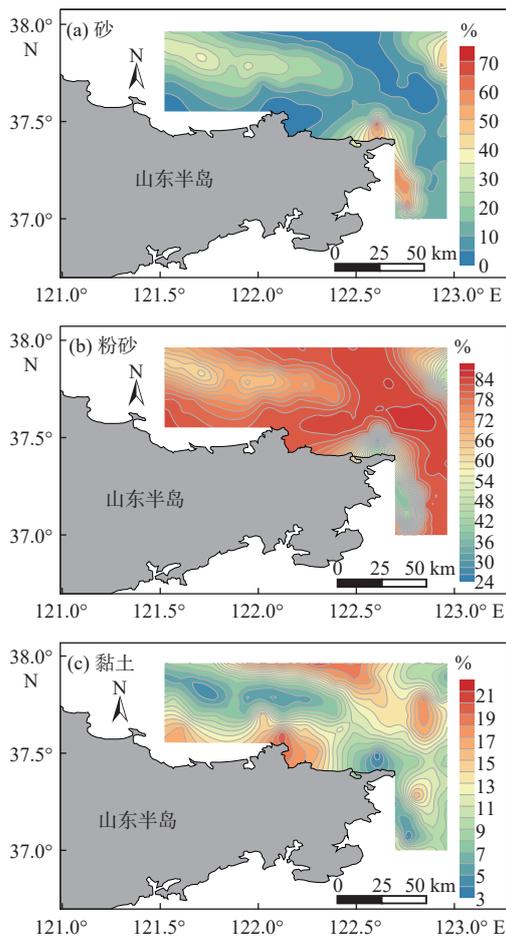


图 2 研究区表层沉积物砂 (a)、粉砂 (b)、黏土 (c) 百分含量分布

Fig.2 Distributions of sand (a), silt (b), and clay (c) percentages in surface sediments of the study area

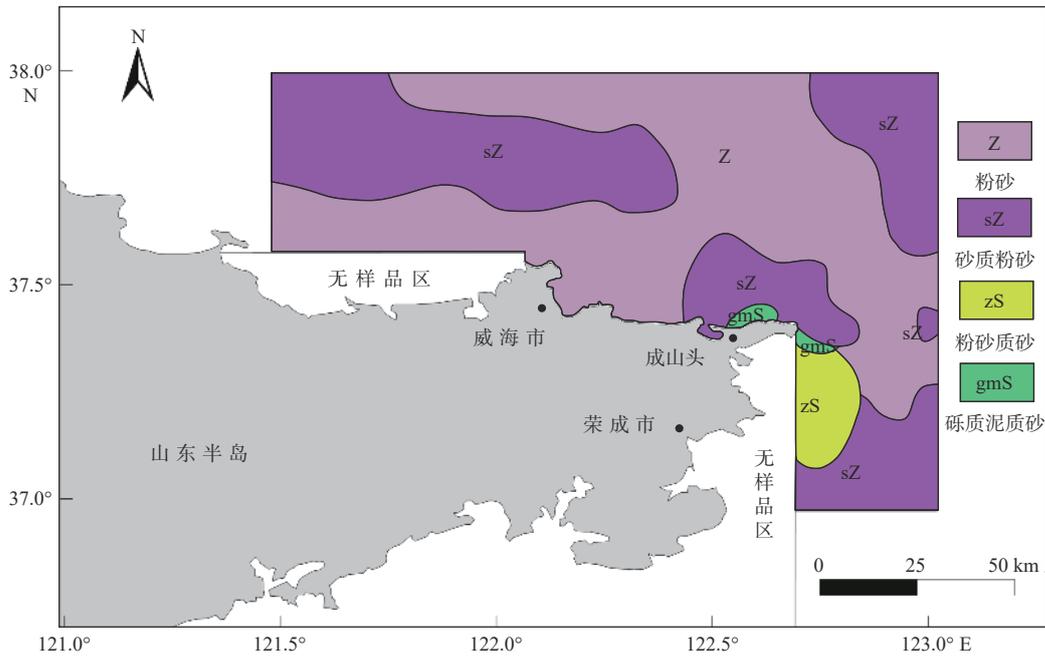
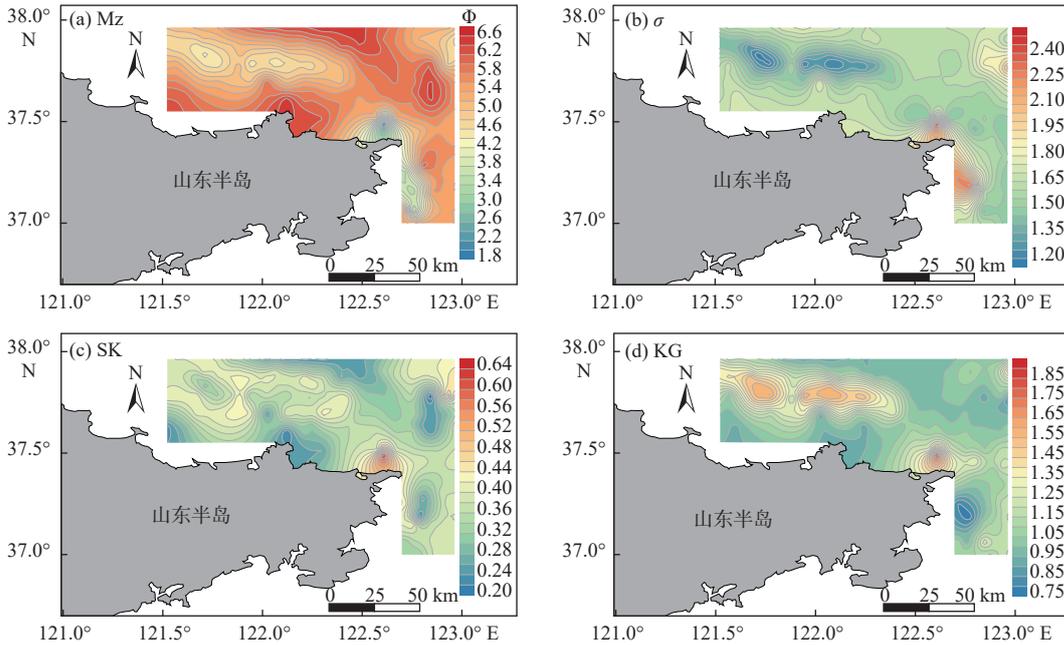


图3 研究区表层沉积物类型分布

Fig.3 Distribution of surface sediment types in the study area



(a)平均粒径;(b)分选系数;(c)偏态;(d)峰态

图4 研究区表层沉积物粒度参数特征

Fig.4 Characteristics of grain size parameters of the surface sediments in the study area

平均粒径代表粒度分布的集中趋势,反映了沉积介质的平均动能,在一定程度上也能反映沉积物的来源。研究区海底沉积物平均粒径空间分布如图4a所示,范围为1.47Φ~6.56Φ,平均为5.44Φ。山东半岛东北角成山头近岸海域沉积物颗粒最粗,平均粒径介于1.4Φ~4.8Φ,其次为研究区东北缘海域及西北部向中部延伸的舌状区域,平均粒径为

4.2Φ~5.8Φ。研究区中、北部及东缘海域主要为细粒沉积物,平均粒径为5.8Φ~6.5Φ。

研究区沉积物分选系数介于1.16~2.58(图4b),平均为1.59,参考粒度参数划分标准,分选程度属于较差(1.0~2.0)和差(2.0~4.0),研究区沉积物总体分选程度较差。对比沉积物平均粒径空间分布发现,总体上粗粒沉积物分选程度更差,细粒沉积

物分选程度相对较好。研究区西北部向中部延伸的舌状区域其分选情况较其南、北两侧海域更好, 而该区域平均粒径却高于周边两侧海域, 初步分析可能受山东半岛沿岸流作用影响。

研究区沉积物偏态介于 0.19~0.66(图 4c), 平均为 0.36, 属于正偏和极正偏。偏态高值区集中在山东半岛东北角成山头近岸海域, 普遍 >0.45, 其余海域普遍介于 0.2~0.4。

研究区沉积物峰态介于 0.79~1.93(图 4d), 平均为 1.13, 整体峰态较为尖锐($KG > 1.1$), 高值区出现在成山头近岸海域及研究区北部由西向东的舌状分布区域($KG > 1.5$)。成山角以南有一近圆状低值区, 峰态相对扁平。

2.2 黏土矿物分布特征

研究区黏土矿物按百分含量由大到小排列依次为伊利石(50.82%~69.58%, 均值为 61.08%)、蒙脱石(12.23%~33.33%, 均值为 19.78%)、绿泥石(7.02%~15.09%, 均值为 10.92%)和高岭石(6.04%~10.58%, 均值为 8.22%), 伊利石为研究区主要的黏土矿物。

空间分布上(图 5), 伊利石高值区分布在研究区西北缘及其向东部延伸的部分海域以及东南部广阔海域。蒙脱石的高值与低值区与伊利石基本呈现相反趋势。而绿泥石和高岭石等值线分布趋

势相似, 高值区皆分布在研究区中部向东北部延展的广阔海域, 并对应于伊利石含量的低值区。

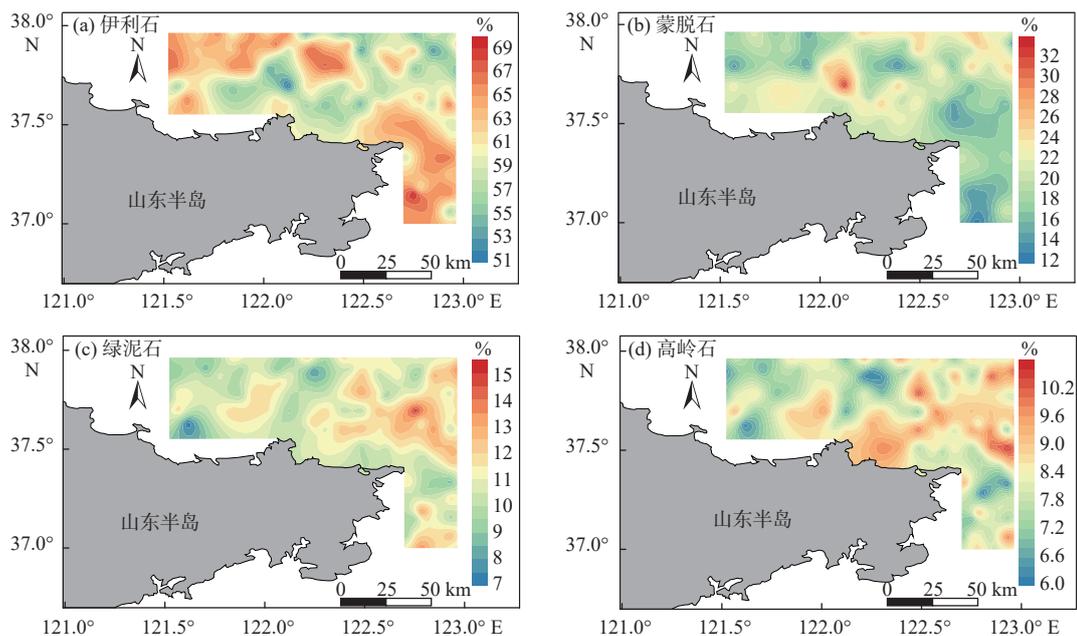
3 讨论

3.1 沉积动力分区

沉积物颗粒结构组成往往可以反映其沉积动力条件。本文采用 PEJRUP^[25] 提出的三角图分区法, 通过分析沉积物粒级组成及三角图分区投点来反映研究区沉积动力情况。三角图中的 A、B、C、D 反映沉积物源的距离、搬运介质的强弱, 而 I、II、III、IV 代表沉积物的扰动程度。

研究区表层沉积物经 Pejrup 三角投图(图 6), 所有样品分别落点于 B-IV、C-IV、D-IV 区内, 表明区内整体沉积动力较强, 这与该海域沉积物主要为粉砂、砂质粉砂且分选较差基本吻合。由 B 到 D 水动力强度逐渐减弱, 综合海底沉积物类型特征与水深、潮流等因素, 研究区按沉积动力环境可划分为 3 个分区。

①区主要分布于威海成山头北部及东南部近岸海域, 共有 11 站位, 多数站位位于成山头近岸深水区, 水深普遍 >40 m, 明显高于周边海域。该区位于山东半岛沿岸流流向急转区, 自西向东流动的沿岸流绕过成山头后急转南下, 流速增大, 侵蚀



(a) 伊利石; (b) 蒙脱石; (c) 绿泥石; (d) 高岭石

图 5 研究区表层沉积物黏土矿物分布

Fig.5 Distribution of clay minerals of surface sediments in the study area

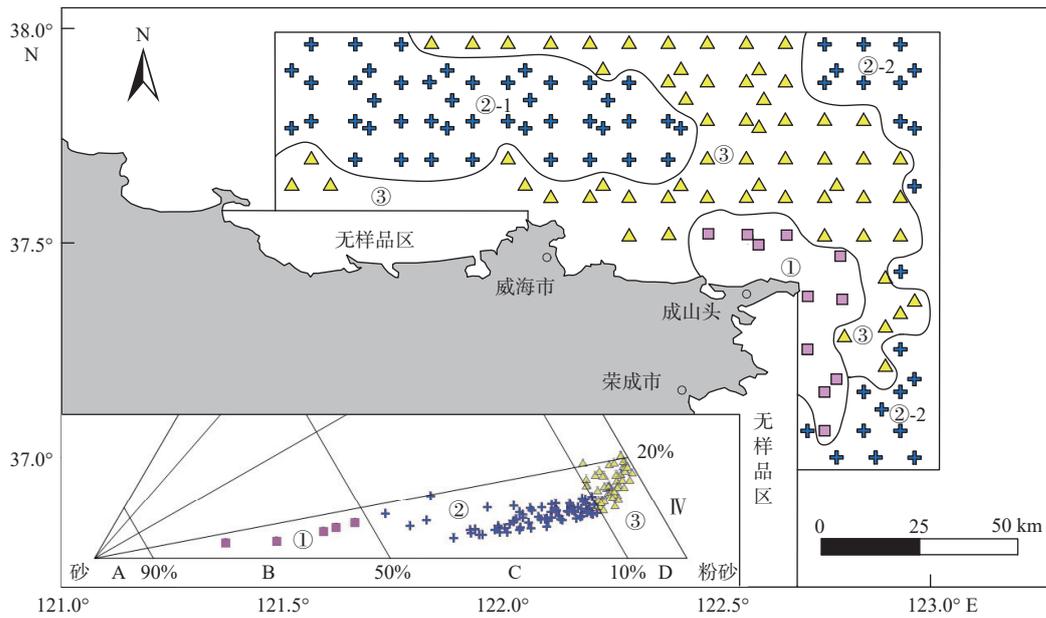


图6 研究区沉积动力环境分区

Fig.6 Zoning of sedimentary dynamic environment in the study area

岸体并向海底冲蚀形成一处冲蚀洼地,最深处水深 $>80\text{ m}$ ^[5]。该区沉积物类型多以相对较粗的粉砂质砂和砾质泥质砂为主,砂组含量为研究区内最高,而受制于强水动力作用,粉砂、黏土细粒物质较难在此处大量沉积。该区中2站位采到较大块砾石,并且砾石磨圆度较差,而在整个研究区内再未检出砾石成分,因而推测为近岸岸体侵蚀产物。

②区主要由两部分区域组成。②-1区位于研究区西北部向中部延伸的舌状区域,共有44站位;②-2区位于研究区东北缘至东南缘长条状区域,共有23站位。该区内沉积物类型以砂质粉砂为主,在整个研究区内颗粒分选程度最佳。除②-2区东北角离岸较远处水深达 $50\sim 70\text{ m}$ 外,该区平均水深 $<30\text{ m}$ 。

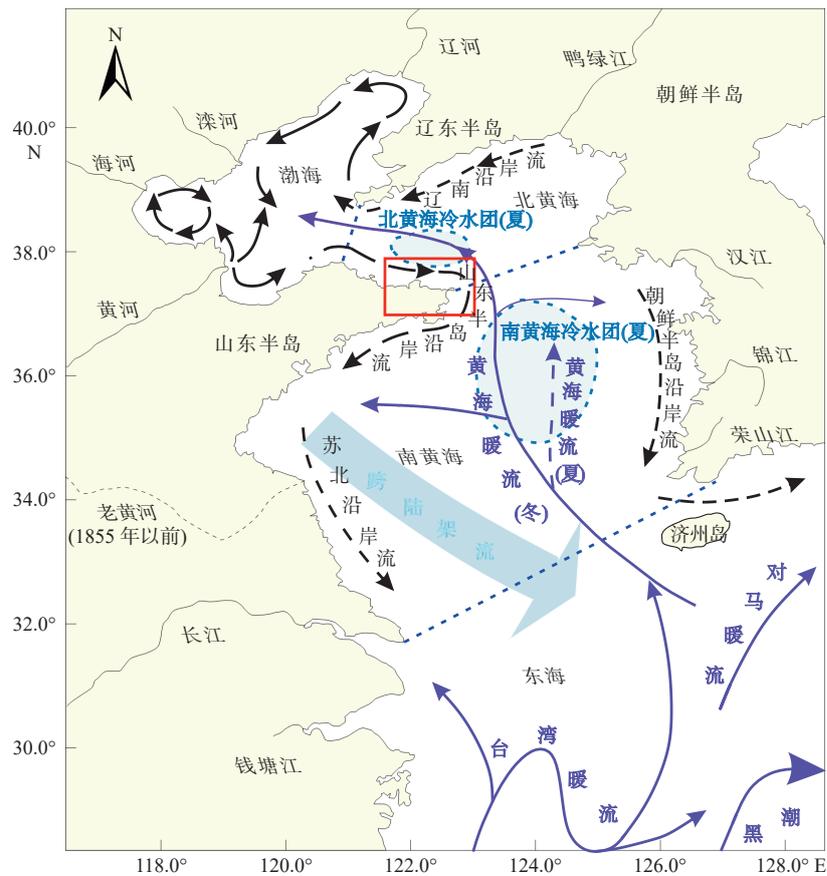
③区共有60站位,广泛分布于研究区中部、北部深水区以及山东半岛北部近岸浅水区内,该区海流流速平缓,水动力相对较弱,近岸处水深普遍 $<10\text{ m}$,并大致沿东北方向向海递增,最深处水深约 65 m ,沉积物类型以粉砂为主,为研究区内最细粒沉积物分布区域。

山东半岛沿岸流的北段,又称鲁北沿岸流,常年自西向东沿山东半岛北岸流动,对于沿岸沉积物的搬运起到重要作用(图7)。尤其在冬季,受季风影响沿岸流流速明显增强,最大流速达 44 cm/s ^[19]。②-1区位于沿岸流主流轴上,区内海流流速较大,水动力较强,沉积物粒度相对较粗,其舌状分布形态也能反映海流的流径。而在舌状末端及南北两

侧,随沿岸流流速减缓,水动力减弱,主要沉积物类型也由砂质粉砂过渡至③区的粉砂。夏季,北黄底层存在一个冷水团,其中心大致位于 38.5°N 、 122.5°E 附近^[26],②-1区以北恰好处于北黄海冷水团边缘。从本次海域调查实测的底层海水温度分布(图8)来看,研究区最北部确实存在一个温度低值区,与先前研究结果一致,而冷水团内部的弱水动力环境可以为细颗粒物沉积提供良好的环境^[27],因此,也可以很好地解释②-1区北侧沉积物粒度变细的现象。沿岸流流经成山头时水动力强度已变弱,携带泥沙能力减弱,悬浮体多以细粒组分为主,沿岸流绕过成山头后转而南下,流速在此突然增大^[5],并以其强侵蚀作用不断剥蚀近岸岩体,流体搬运能力大大增强,除大颗粒砾石组分在①区沉落外,较多粗颗粒混入悬浮体并沿流南下,导致研究区东南部即②-2区的最南端出现较③区更粗的颗粒沉积。而研究区东北部又出现一粗粒沉积区,这与上述趋势相反且距岸较远,推测周边区域属于非同源沉积或多源沉积,仍需结合物源分析进一步讨论。

3.2 海底沉积物来源分析

黏土矿物的成分组成与含量常被作为沉积物物源判定的重要依据,例如,黄河沉积物具有较高的蒙脱石含量,而长江沉积物中蒙脱石含量则较低^[28]。海洋沉积物中的自生黏土矿物较少,绝大多数为陆源供给,其中又以河流搬运为主要供给方式^[29]。研究区陆域范围主要位于山东半岛东北部,



据文献 [30] 修改

图 7 中国边缘海主要洋流及黄海冷水团示意图

Fig.7 Schematic diagram of the main ocean currents in China's marginal seas and the cold water masses in the Yellow Sea

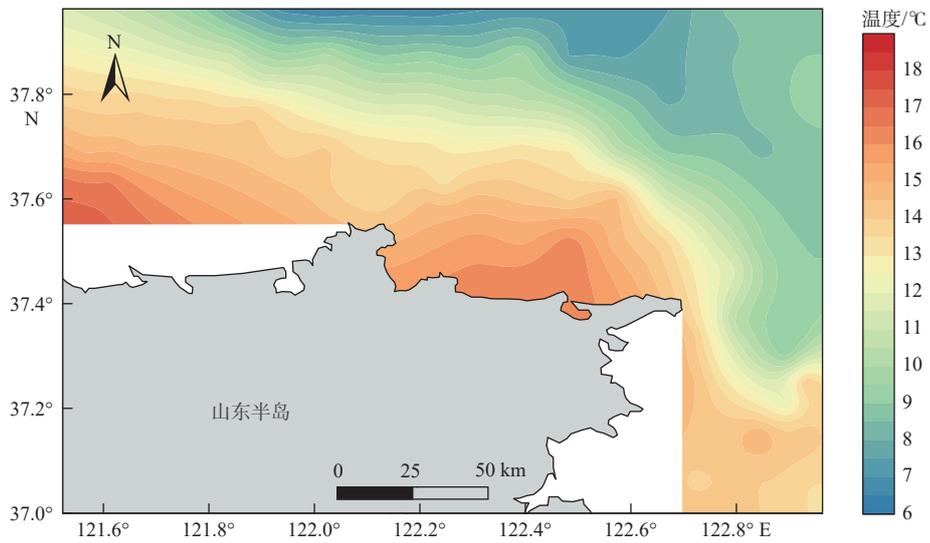


图 8 研究区实测底层海水温度

Fig.8 Bottom seawater temperature in the study area

区内缺乏大型入海河流, 几条小型河流所携带的悬浮体十分有限, 对于源区的供给微乎其微^[31]。因此, 在分析研究区沉积物源时, 优先考虑周边大型入海河流, 包括黄河、长江、海河、滦河、辽河以及朝鲜半岛河流等。根据研究区表层沉积物 138 个样品

的黏土矿物鉴定数据, 以及黄河、长江等周边入海河流黏土矿物的历史资料, 参考前人方法, 以蒙脱石、伊利石、高岭石+绿泥石为端元绘制三角端元图 (ISKc 图)^[5,22], 如图 9 所示。观察发现, 研究区海域大多数样品的 ISKc 投影与黄河沉积物投影相一

致,与辽河、鸭绿江、滦河-1的部分投点重合,而与长江、海河、滦河-2以及朝鲜半岛河流(汉江、锦江、荣山江)沉积物投影距离较远,差异较大。仅78号站位与海河-2距离接近,由于其与周边点位黏土组分存在较大差异,该处又无特殊沉积地质条件,故列为异常点,暂不做考虑。为了进一步确定研究区物源关系,依据前人研究方法,选用伊利石/蒙脱石-高岭石/绿泥石端元图作进一步判别(图10)^[32]。结果显示,研究区沉积物点位仅与黄河近似,而与其他河流沉积物均存在或大或小的差异。

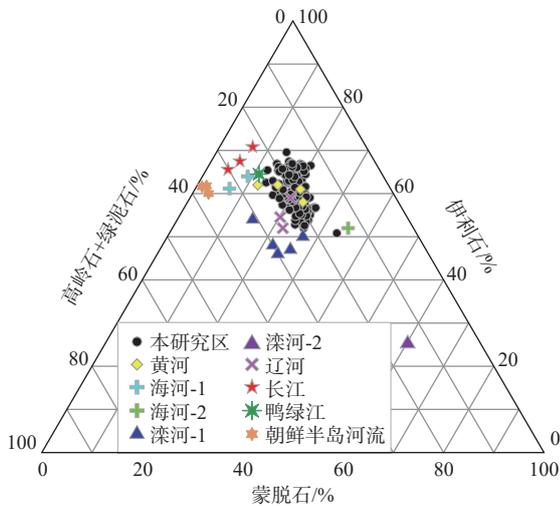


图9 研究区与周边大型河流黏土矿物(蒙脱石、伊利石、高岭石+绿泥石)三角端元图

Fig.9 Triangular end-member diagram of clay minerals (smectite, illite, kaolinite + chlorite) in the study area and large rivers in surrounding areas

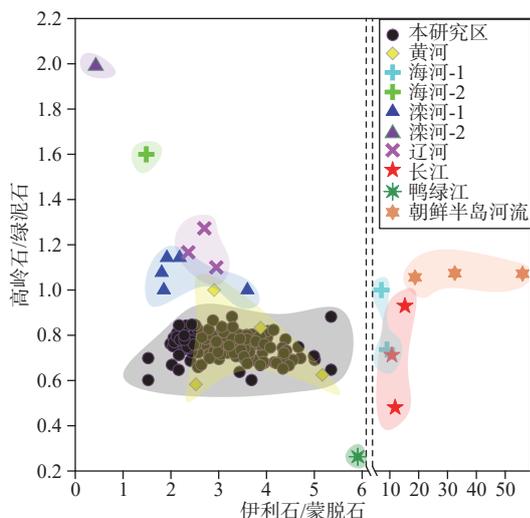


图10 研究区及周边河流伊利石/蒙脱石-高岭石/绿泥石比值散点图

Fig.10 Scatter plot of illite/smectite and kaolinite/chlorite ratios in the study area and large rivers in the surrounding areas

前人调查资料显示,黄河沉积物中黏土矿物组合特征为伊利石(62.5%)-蒙脱石(15.2%)-绿泥石(12.5%)-高岭石(9.7%)^[22,28],而本区为伊利石(61.1%)-蒙脱石(19.8%)-绿泥石(10.9%)-高岭石(8.2%),二者含量分布极为相似。黄河是中国第2大河,也是世界上泥沙含量第2高的河流,2000年以前的调查资料显示,黄河多年平均入海泥沙量高达 1.08×10^9 t,即使近年来受自然条件变化及调水调沙影响使得输沙量减少近80%,年入海泥沙量仍有 1.5×10^8 t^[33]。其中,约10%~15%的入海泥沙沿山东半岛沿岸流向东运输,穿过渤海海峡向东最远可影响至北黄海中部海域^[34-35]。黄河沉积物以富含蒙脱石为特征,平均含量为 $15\% \pm 2\%$ ^[23,28,36],而研究区内蒙脱石平均含量(19.8%)要略高于该值。蓝先洪等^[29]认为,由于蒙脱石在黏土矿物族群中颗粒较小,常随水体搬运至较远距离,而在河口处反而不易稳定沉积。本研究区位于山东半岛东北端,距黄河入海口有一定距离,长距离搬运加之水动力减弱等因素影响,蒙脱石存在大量沉积的条件和可能。

辽河沉积物中伊利石平均含量约55%^[32],相比研究区(61.08%)略低,高岭石含量略高于绿泥石,与研究区恰好相反,表现在图9中与研究区投点存在一定差距。辽河年输沙量在丰水年可达 2.3×10^7 t,其余年份则 $< 5 \times 10^6$ t^[37],远远小于黄河泥沙供给量。且受季节性环流影响,其物质多在辽东湾内运输,很难穿过渤海海峡影响到研究区^[38],因此推测辽河物质对于本区沉积物来源供给极少。

鸭绿江及河口区黏土矿物 ISKc 投图与研究区部分点位较为接近,而鸭绿江富含绿泥石而匮乏高岭石^[11],与研究区存在差异,在图9中投点相距甚远,因此,仅从本文黏土矿物分析结果对物源的示踪来看,区内基本不存在鸭绿江物质。然而前人研究结果表明,鸭绿江年均入海泥沙量约为 1.59×10^6 t,多集中在夏季^[39],入海泥沙多在河口处沉积,也有悬浮泥沙会在沿岸流与潮流作用下被带到北黄海南部和中部沉积^[11,40],但对其能否影响到北黄海南部存疑,仅依据本文数据无法判断。

滦河沉积物中黏土矿物组合特征存在两种结论,DOU等^[32]采样测试结果(图9滦河-1)显示,滦河沉积物黏土矿物中伊利石占主导(46%~54%),而蒙脱石含量中等(15%~27%);而刘建国^[41]测试结果为蒙脱石占主导(63%)而伊利石含量次之(27%)。两种结果均与本研究区存在一定差异。自1982年引滦入津工程启动以来,上游来水被大量

拦蓄, 滦河入海泥沙急剧减少, 年平均输沙量仅为 9×10^6 t, 甚至在枯水期下游出现断流^[42], 且滦河距研究区较远, 据此推断, 研究区很难存在滦河物质。

长江沉积物黏土矿物组合特征为伊利石-绿泥石-高岭石-蒙脱石, 蒙脱石含量很低(约 6%~7%)^[43]。长江虽然年输沙量很大, 可达 1.2×10^8 t, 但是大部分泥沙在长江口外沉积, 少部分随洋流向北、东、南输运, 其中, 向北净输运量仅有 2.6×10^7 t^[44], 再经黄海暖流向上长距离输运, 途中又经春夏季南黄海冷水团的阻隔, 到达研究区时已微乎其微, 因而认为长江对于研究区沉积物源的供给较少, 可忽略不计。对于海河沉积物中黏土矿物组合特征也存在两种结论, DOU 等^[11] 采样测试结果(图 9 海河-1)显示, 海河沉积物中蒙脱石含量很低(<10%), 且含有较高的高岭石和绿泥石(两者均>14%); 刘建国^[41] 的测试结果(图 9 海河-2)则显示, 海河沉积物具有较高蒙脱石含量(>30%)且匮乏高岭石与绿泥石(<10%), 两种结果均与研究区内黏土矿物组成有明显差异。海河由于年输沙量本身较少, 仅为 6×10^6 t, 且大多沉积于河口三角洲地区^[45], 因此认为对本区沉积物源供给亦可忽略。从朝鲜半岛入海的汉江、锦江、荣山江沉积物中蒙脱石含量极低(<4%), 与研究区相差甚远, 并且其入海泥沙多随沿岸流南下输运^[46-47], 因此也不作为源区考虑。

综上所述, 推断黄河为研究区海底沉积物主要物源区, 对研究区海底沉积泥沙供给贡献巨大。前文提到, 研究区东北端有一粗粒沉积区, 与整体分布趋势存在差异。提取该区 10 站位沉积物黏土矿物组合特征分析发现, 与总体结果并无明显区别, 难以通过黏土数据分析解释其成因。根据前人研究, 山东半岛沿岸流在冬季受季风影响流速增大, 同时冬季黄海暖流发育成熟, 流势达到最强, 可以北上一直穿越北黄海、渤海海峡进而影响到渤海海域^[32,41,48], 两支流在交汇处形成气旋式环流, 水动力条件复杂。由图 7 可知, 该粗粒沉积区大致位于此交汇处。因此, 判断该区可能接受了黄海暖流所携带来的物质, 且其复杂的水动力条件对于悬浮泥沙沉积的影响也是造成这一异常的原因之一。由于缺乏更多调查资料, 还需进一步调查分析。

4 结论

(1) 北黄海南部海域表层沉积物有粉砂、砂质粉砂、粉砂质砂和砾质泥质砂 4 种类型。各粒级组

分中, 粉砂含量最高, 平均含量达 73.24%; 其次为砂和黏土, 平均含量分别为 15.85% 和 10.87%; 砾石组分仅在个别站位中存在。从沉积物粒度参数特征来看, 研究区平均粒径介于 $1.47\Phi \sim 6.56\Phi$, 平均为 5.44Φ , 总体粒度较细, 分选程度较差。从粒度分布曲线来看, 主要为正偏和极正偏, 峰度较为尖锐, 部分区域相对扁平。

(2) 伊利石为研究区主要黏土矿物类型, 平均含量为 61.08%。伊利石高值区分布在研究区西北缘及其向东部延伸的部分海域, 以及研究区东南部广阔海域, 并对应于蒙脱石、绿泥石和高岭石的含量低值区。

(3) 根据 Pejrup 三角图示法确定研究区各站位粒度参数基本落在 B-IV、C-IV、D-IV 区, 区内整体沉积动力较强。结合三角投图结果和水深、水动力条件等因素, 研究区可划分为 3 个沉积动力环境区。山东半岛沿岸流和黄海暖流为研究区主要的水动力来源。

(4) 根据黏土矿物组合特征, 对比周边大型入海河流对研究区海底沉积物来源进行示踪, 基本确定黄河为区内海底沉积物主要物质来源, 对是否存在鸭绿江物质存疑, 而周边其他大型河流供给较少。

参考文献:

- [1] 陈晓辉. 北黄海陆架晚第四纪地层结构与物源环境演变研究 [D]. 青岛: 中国科学院研究生院(中国科学院海洋研究所), 2014.
CHEN Xiaohui. Sedimentary stratigraphic structure and provenance environmental evolution in the North Yellow Sea during the Late Quaternary[D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2014.
- [2] 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.
- [3] YANG S Y. A review on the provenance discrimination of sediments in the Yellow Sea[J]. Earth Science Reviews, 2003, 63: 93-120.
- [4] PARK Y A, KHIM B K. Origin and dispersal of recent clay minerals in the Yellow Sea[J]. Marine Geology, 1992, 104(1/4): 205-213.
- [5] 孔祥淮, 刘健, 李巍然, 等. 山东半岛东北部滨海海区表层沉

- 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.
- KONG Xianghui, LIU Jian, LI Weiran, et al. Grain-size characters and mineral components of surface sediments in the offshore area of northeastern Shandong Peninsula[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2006, 26(3): 21-29.
- [6] 李国刚, 牟信侃, 胡邦琦, 等. 山东半岛近海表层沉积物黏土矿物分布及组合特征[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2010, 30(4): 67-72.
- LI Guogang, MU Xinkan, HU Bangqi, et al. Distribution pattern and assemblage feature of clay minerals in surface sediments from the coastal area of Shandong Peninsula[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2010, 30(4): 67-72.
- [7] 李国刚, 胡邦琦, 李军, 等. 山东半岛沿岸海域表层沉积物的常量元素及其地质意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2012, 32(3): 45-54.
- LI Guogang, HU Bangqi, LI Jun, et al. Geochemistry of major elements in the surface sediments of the offshore area of Shandong Peninsula and its geological implications[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2012, 32(3): 45-54.
- [8] 王安国. 山东半岛北部近岸海区表层沉积物物源与沉积环境[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- WANG Anguo. Surficial sediment provenance and sedimentary environment in the offshore area of the northern Shandong Peninsula[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.
- [9] 苗晓明, 朱龙海, 刘志杰, 等. 山东半岛东北部表层沉积物微量元素分布及其对物源的指示[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2018, 48(S1): 82-92.
- MIAO Xiaoming, ZHU Longhai, LIU Zhijie, et al. Distribution pattern and source of trace elements in the surface sediment offshore the northeastern Shandong Peninsula[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2018, 48(S1): 82-92.
- [10] 窦衍光, 李军, 杨守业. 山东半岛东部海域表层沉积物元素组成及物源指示意义[J]. *海洋学报(中文版)*, 2012, 34(1): 109-119.
- DOU Yanguang, LI Jun, YANG Shouye. Element compositions and provenance implication of surface sediments in offshore areas of the eastern Shandong Peninsula in China[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2012, 34(1): 109-119.
- [11] LI Y, LI A C, HUANG P, et al. Clay minerals in surface sediment of the North Yellow Sea and their implication to provenance and transportation[J]. *Continental Shelf Research*, 2014, 90: 33-40.
- [12] 齐君, 李凤业, 宋金明, 等. 北黄海沉积速率及其沉积通量[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2004, 24(2): 9-14.
- QI Jun, LI Fengye, SONG Jinming, et al. Sedimentation rate and flux of the North Yellow Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2004, 24(2): 9-14.
- [13] 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: 中国科学院研究生院(中国科学院海洋研究所), 2011.
- LI Yan. Sedimentary characteristics and implication to provenance and sedimentary environment since the Last Deglaciation in the North Yellow Sea[D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2011.
- [14] 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.
- CHENG Peng, GAO Shu. Net sediment transport patterns over the Northwestern Yellow Sea, based upon grain size trend analysis[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2000, 31(6): 604-615.
- [15] 边昌伟. 中国近岸泥沙在渤海、黄海和东海的输运[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
- BIAN Changwei. Chinese coastal sediment transport in the Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012.
- [16] WANG L, SARNTHEIN M, ERLLENKEUSER H, et al. East Asian monsoon climate during the Late Pleistocene: high-resolution sediment records from the South China Sea[J]. *Marine Geology*, 1999, 156(1): 243-282.
- [17] MCLAREN P, BOWLES D. The effects of sediment transport on grain-size distributions[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1985, 55(4): 457-470.
- [18] 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.
- WANG Wei, LI Anchun, XU Fangjian, et al. Distribution of surface sediments and sedimentary environment in the North Yellow Sea[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2009, 40(5): 525-531.
- [19] 张剑, 李日辉, 王中波, 等. 渤海东部与黄海北部表层沉积物的粒度特征及其沉积环境[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2016, 36(5): 1-12.
- ZHANG Jian, LI Rihui, WANG Zhongbo, et al. Grain size characteristics of surface sediments in the east Bohai Sea and the Northern Yellow Sea and their implications for environments[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2016, 36(5): 1-12.
- [20] 李恒猛, 王嫚, 王敬, 等. 威海周边海域表层沉积物沉积环境分区与元素组成控制因素[J]. *海洋地质前沿*, 2023, 39(9): 94-106.
- LI Hengmeng, WANG Man, WANG Jing, et al. Control factors of sedimentary dynamic environment zones and element composition of surface sediments in surrounding waters of Weihai[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2023, 39(9): 94-106.
- [21] 韩宗珠, 张军强, 邹昊, 等. 渤海湾北部底质沉积物中黏土矿物组成与物源研究[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2011, 41(11): 95-102.
- HAN Zongzhu, ZHANG Junqiang, ZOU Hao, et al. Characteristics and provenance of clay mineral assemblage of sediments from the northern part of the Bohai Bay[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2011, 41(11): 95-102.
- [22] 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.

- [23] 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.
- [24] BISCAYE P E. Mineralogy and sedimentation of recent deep-sea clay in the Atlantic Ocean and adjacent seas and oceans[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1965, 76(7): 803-832.
- [25] 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.
- [26] 任慧军, 詹杰民. 黄海冷水团的季节变化特征及其形成机制研究 [J]. 水动力学研究与进展 (A 辑), 2005, 20(Z1): 887-896.
REN Huijun, ZHAN Jiemin. A numerical study on the seasonal variability of the Yellow Sea cold water mass and the related dynamics[J]. *Journal of Hydrodynamics(A)*, 2005, 20(Z1): 887-896.
- [27] 张凯南. 北黄海冷水团对悬浮体物质组成和沉积环境的影响机制 [D]. 青岛: 中国科学院大学 (中国科学院海洋研究所), 2018.
ZHANG Kainan. The influence of the North Yellow Sea cold water mass on the properties of suspended particulate matter and sedimentary environment[D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2018.
- [28] 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 and geochemistry of the sediments from the Yangtze and Yellow Rivers[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2001, 21(4): 7-12.
- [29] 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): 5-7.
LAN Xianhong. Paleoenvironmental significance of clay mineral assemblages in marine sediments[J]. *Marine Geological Dynamics*, 2001, 17(1): 5-7.
- [30] YUAN D L, ZHU J R, LI C Y, et al. Cross-shelf circulation in the Yellow and East China Seas indicated by MODIS satellite observations[J]. *Journal of Marine Systems*, 2008, 70(1): 134-149.
- [31] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志 (第十四分册)[M]. 北京: 海洋出版社, 1998.
Compiling Council of Chinese Embayment. Chinese Embayment, Part 14 [M]. Beijing: Ocean Press, 1998.
- [32] DOU Y G, LI J, ZHAO J T, et al. Clay mineral distributions in surface sediments of the Liaodong Bay, Bohai Sea and surrounding river sediments: sources and transport patterns[J]. *Continental Shelf Research*, 2014, 73: 72-82.
- [33] 李松, 王厚杰, 张勇, 等. 黄河在调水调沙影响下的入海泥沙通量和粒度的变化趋势 [J]. 海洋地质前沿, 2015, 31(7): 20-27.
LI Song, WANG Houjie, ZHANG Yong, et al. Variation in sediment load and grain-size under the influence of water and sediment regulation scheme (WSRS) of the Huanghe (Yellow River)[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2015, 31(7): 20-27.
- [34] 秦蕴珊, 李凡. 黄河入海泥沙对渤海和黄海沉积作用的影响 [J]. 海洋科学集刊, 1986(27): 125-135.
QIN Yunshan, LI Fan. The impact of Yellow River sediment entering the sea on sedimentation in Bohai Sea and Yellow Sea[J]. *Marine Science Journal*, 1986(27): 125-135.
- [35] LEE H J, CHOUGH S K. Sediment distribution, dispersal and budget in the Yellow Sea[J]. *Marine Geology*, 1989, 87: 195-205
- [36] 乔淑卿, 方习生, 石学法, 等. 黄河河口及邻近渤海海域表层沉积物中 CaO 和蒙皂石分布及其对黄河入海物质运移的指示 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2010, 30(1): 17-23.
QIAO Shuqing, FANG Xisheng, SHI Xuefa, et al. Distribution of CaO and smectite in surface sediments off the Yellow River Mouth and in the nearby Bohai Sea and the implications for dispersion of the river sediments to the sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2010, 30(1): 17-23.
- [37] 郭松. 辽河流域水文特征分析 [J]. 水科学与工程技术, 2016(3): 29-30.
GUO Song. Analysis of hydrological characteristics in the Liaohe River Basin[J]. *Water Sciences and Engineering Technology*, 2016(3): 29-30.
- [38] 刘兴宝. 大凌河与辽河间现代沉积物黏土矿物特征研究 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2019.
LIU Xingbao. Characteristics of clay minerals in modern sediments between Daling River and Liaohe River[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2019.
- [39] 李景玉. 丹东地区鸭绿江有关水文数据 [J]. 丹东海工, 2008(12): 18.
LI Jingyu. Hydrological data related to Yalu River in Dandong area[J]. *Dandong Marine Engineering*, 2008(12): 18.
- [40] 高建华, 高抒, 董礼先, 等. 鸭绿江河口地区沉积物特征及悬沙输送 [J]. 海洋通报, 2003, 22(5): 26-33.
GAO Jianhua, GAO Shu, DONG Lixian, et al. Sediment distribution and suspended sediment transport in Yalu River Estuary[J]. *Marine Science Bulletin*, 2003, 22(5): 26-33.
- [41] 刘建国. 全新世渤海泥质区的沉积物物质组成特征及其环境意义 [D]. 青岛: 中国科学院研究生院 (中国科学院海洋研究所), 2007.
LIU Jianguo. Material compositions of sediments in the Bohai Sea mud area during the Holocene and their environment implications[D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2007.
- [42] 康雪宁, 印萍, 刘金庆. 我国中小河流入海水沙变化对人类活动响应: 以滦河为例 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2016, 36(6): 1-6.
KANG Xuening, YIN Ping, LIU Jinqing. Variations in water and sediment discharges of medium and small rivers and their

- response to human activities: a case study on the Luan River[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2016, 36(6): 1-6.
- [43] 蓝先洪, 张志珣, 李日辉, 等. 长江口外表层沉积物黏土矿物分布特征 [J]. *海洋地质前沿*, 2011, 27(11): 1-7.
- LAN Xianhong, ZHANG Zhixun, LI Rihui, et al. Distribution of clay minerals in surface sediments off Yangtze River Estuary[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2011, 27(11): 1-7.
- [44] 罗志发. 长江口及其邻近海域泥沙输运及其动力机制 [D]. 上海: 华东师范大学, 2018.
- LUO Zhifa. The sediment transport and its mechanism in Changjiang Estuary and its adjacent waters[D]. Shanghai: East China Normal University, 2018.
- [45] 仲小敏, 李兆江. 天津地理 [M]. 北京: 北京师范大学出版社, 2011.
- ZHONG Xiaomin, LI Zhaojiang. Tianjin Geography[M]. Beijing: Beijing Normal University Publishing Group, 2011.
- [46] CHOUGH S K, KIN D C. Dispersal of fine-grained sediments in the southeastern Yellow Sea[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1981, 5(3): 721-725.
- [47] KIM D C. Recent clay mineral of the Yeongsan Estuary and the adjacent continental shelf[D]. Seoul: Seoul National University, 1980.
- [48] 王辉武, 于非, 吕连港, 等. 冬季黄海暖流区的空间变化和年际变化特征 [J]. *海洋科学进展*, 2009, 27(2): 140-148.
- WANG Huiwu, YU Fei, LYU Liangang, et al. Characteristics of spatial and interannual variation in the Yellow Sea warm current area in winter[J]. *Advances in Marine Science*, 2009, 27(2): 140-148.

Grain size and clay mineral characteristics of surface sediments in the southern North Yellow Sea and their source indications

LI Jialin^{1,2}, FENG Yongcai^{1,2*}, CHU Hongxian^{1,2}, HAO Liancheng^{1,2}, JIANG Wenqin^{1,2},
HUANG Xing^{1,2}, YUAN Jidong^{1,2}, CHEN Yuhai^{1,2}

(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: To identify the sources of sediment materials across different regions and their controlling factors, surface sediments from 138 stations in the southern region of the North Yellow Sea were sampled and the grain size and clay mineral composition and distribution characteristics were analyzed. Results show that the average particle size (M_z) of the surface sediments in the study area ranges from 1.47Φ - 6.56Φ , of which sandy silt, silt-like sand, and silt were the predominant types. The Pejrup triangular diagram shows that the overall sedimentary dynamics in the area were strong, particularly in the deepwater areas off Chengshantou. The clay minerals were primarily composed of illite (61.08%) and smectite (19.78%), followed by chlorite (10.92%) and kaolinite (8.22%). The primary source of surface sediment material in the southern North Yellow Sea is continental detritus carried by the Huanghe (Yellow) River, with a potential presence of Yalu River material on the northeast edge of the area. The coastal current of Shandong Peninsula and the northward-moving warm current of Yellow Sea in winter were the main sources of hydrodynamics in the area, and they determined the trend of sediment transport and dominated the spatial distribution of sediments in the study area.

Key words: grain size characteristics; clay minerals; southern North Yellow Sea; material source indication; Shandong Peninsula coastal current