

胡延斌, 冯永财, 郝连成, 等. 渤海湾曹妃甸近岸表层沉积物碎屑矿物分布及物源分析[J]. 海洋地质前沿, 2024, 40(11): 70-79.

HU Yanbin, FENG Yongcai, HAO Liancheng, et al. Sediment provenance and distribution in Caofeidian, Bohai Bay, revealed by offshore detrital mineral analysis[J]. Marine Geology Frontiers, 2024, 40(11): 70-79.

渤海湾曹妃甸近岸表层沉积物碎屑矿物 分布及物源分析

胡延斌, 冯永财, 郝连成*, 杨开丽, 庞国涛, 王克超, 刘建

(中国地质调查局烟台海岸带地质调查中心, 烟台 264000)

摘要:为深入了解曹妃甸近岸表层沉积物碎屑矿物来源及分布特征,对该区 161 个表层沉积物样品进行碎屑矿物分析。结果表明,研究区共鉴定出 11 种轻矿物和 27 种重矿物,其中,轻矿物以长石、石英和片状矿物为主,质量百分含量平均值为 82.2%;重矿物以角闪石、绿帘石和自生黄铁矿为主。根据碎屑矿物的组合分布特征及其聚类分析,研究区可分为 3 个矿物区:滦河矿物区、混合源区和黄河矿物区。研究认为,物源是控制研究区碎屑矿物组合与分布的主要因素,曹妃甸填海造陆活动改变了研究区周边水动力及沉积环境,进一步影响了该区碎屑矿物分布特征。

关键词:曹妃甸; 碎屑矿物; 物质来源; 水动力环境; 填海造陆

中图分类号:P736.2

文献标识码:A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2024.161

0 引言

碎屑矿物是海洋沉积物中的重要组成部分,对碎屑矿物组合特征的深入研究,不仅有助于揭示沉积物的来源和搬运途径,还能揭示矿物组分分异规律等信息,为深入理解沉积环境、水动力条件以及气候变化等提供重要依据^[1-2]。

渤海周边有多条河流汇入,根据沉积物的物质来源、渤海的沉积环境和矿物的物理化学性质等因素,渤海海域被划分为 4 个主要矿物区:渤海南部矿物区(包括渤海湾南部与莱州湾)、渤海北部矿物区(包括渤海湾北部、辽东湾及辽东浅滩地区)、渤海海峡矿物区和过渡矿物区^[3]。渤海湾作为渤海的重要组成部分,近年来吸引了大量学者对该区域的

碎屑矿物进行研究^[4-6]。张连杰等^[5]通过聚类分析和物源端元等方法分析了渤海湾碎屑矿物的分布和组合,将该区域划分为黄河矿物区、海河矿物区、滦河矿物区和多物源矿物区,并探讨了水动力环境对碎屑矿物分布的影响。韩宗珠等^[4]分析了渤海湾北部沉积物中的重矿物,提出该区域可划分为滦河矿物区、海河-黄河矿物区以及混合矿物区,揭示了物源和水动力对重矿物分布特征的影响。

随着渤海周边的经济发展和快速城市化建设,沿海地区进行了大规模的填海造陆活动,其中,曹妃甸工业区最具代表性。曹妃甸位于渤海的西北海岸,自晚全新世以来处于废弃的三角洲沉积环境中,逐渐形成了现今的海岸和河道形态^[7]。2004 年以来,曹妃甸海域的填海造陆活动显著增加,改变了原有的海洋动力边界条件,导致港口周边海域潮流和地貌特征等发生明显变化^[8]。曹妃甸海岸地貌复杂多变,具有独特的航道-潮滩特征,同时受到人类活动的显著影响,开展沉积物研究对于理解大规模围填海过程中沉积物的行为具有重要科学意义。以往研究多集中在河道-滩涂的形态动力学响应^[9]、老龙沟潮汐汉道^[10-11]以及曹妃甸通道形成机理和稳定性^[8,12]等方面,对该区域沉积物特征的研究相

收稿日期: 2024-07-12

资助项目: 中国地质调查局项目“渤海曹妃甸海域 1:5 万海洋区域地质调查”(DD20211553)

第一作者: 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

* 通讯作者: 郝连成(1985—),男,硕士,高级工程师,主要从事海岸带综合地质调查方面的研究工作。E-mail: 251035203@qq.com

对较少。现有研究表明, 曹妃甸近岸海域表层沉积物的分布呈现出显著的区域差异: 北部潮间带以砂质粉砂为主, 中部工业区沉积物则富含粉砂质砂, 粒度较粗; 南部沿岸海域沉积物以黏土质粉砂为主, 粒度较细^[13]。此外, 沉积物与人工填海初期相比, 粒度趋于粗化且类型更加单一, 这一变化反映出人工填海工程对曹妃甸海域沉积环境的显著影响^[13]。祝贺等^[14]进一步验证了长期围填海工程的实施影响了研究区粉砂和黏土粒级沉积物的分布特征。前人关于曹妃甸海区沉积物的研究主要集中在沉积物粒度上, 对于碎屑矿物的研究相对匮乏。

本文通过分析曹妃甸近岸海域表层沉积物中的碎屑矿物, 探讨该区域碎屑矿物的分布特征, 进而揭示该区域沉积物的来源及物质运输模式。同时, 结合前人的研究成果, 探讨围填海工程对碎屑

矿物组成和分布特征的影响。该研究有助于进一步理解曹妃甸海域的沉积环境变化, 对预测未来填海工程对沉积物影响提供了重要依据。

1 研究区概况

曹妃甸位于渤海湾西北岸(图 1a), 是全新世早期滦河入海处^[15], 是由废弃的古滦河三角洲发育而来^[8], 具有天然深水航道和广阔潮滩相结合的特征。曹妃甸海区的潮流为逆潮流, 呈逆时针方向, 即涨潮向西, 退潮向东^[16]。在曹妃甸岛以南 500 m 处为曹妃甸深槽, 最大水深约 43 m, 是渤海湾水最深的区域。深槽附近海域海底地貌划分为 3 个体系单元, 由西向东分别为南堡海岸、曹妃甸深槽、老龙沟泻湖^[8]。

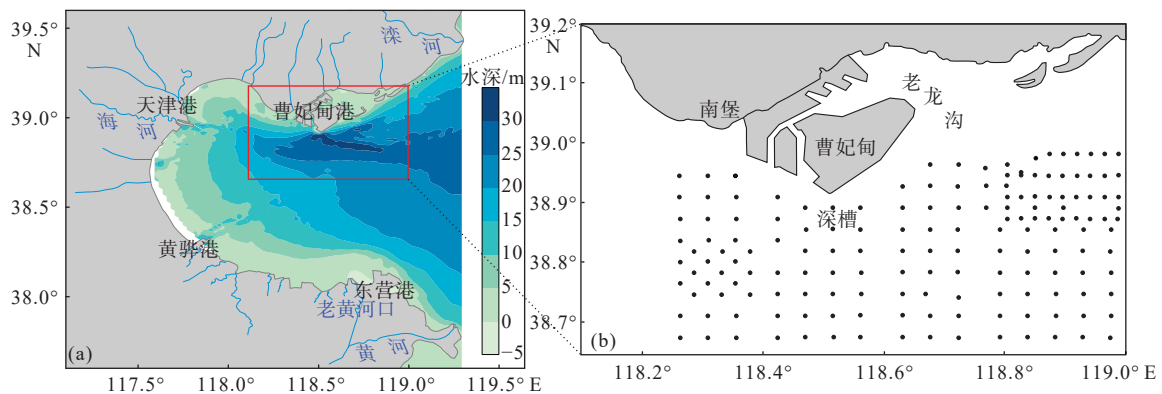


图 1 研究区位置及取样站位分布

Fig.1 Location of the study area and sampling sites deployment

2 材料与方法

2.1 样品采集

中国地质调查局烟台海岸带地质调查中心于 2021 年利用箱式取样器在曹妃甸近岸海区采集了表层沉积物样品 161 个(图 1b)。东北部海域和西部海域加密采样, 间距约 2 km, 其他区域站位均匀分布, 间距约 4 km。由于部分站位设计位置位于风力发电田或钻井平台或渔网处, 取样时进行了临时调整。样品选取底质上覆 0~2 cm 沉积物, 保存于聚乙烯样袋中, 于 4 °C 低温保存。

2.2 实验方法

取适量沉积物样品恒温 60 °C 烘干并称量, 得到干样重量。将沉积物干样置于烧杯中用清水浸

泡并搅拌, 使其充分分散。随后利用水筛法对沉积物进行分离, 收集得到 0.063~0.125、0.125~0.25、>0.25 mm 粒级的沉积物, 待样品烘干后分别称重。碎屑矿物是指矿物颗粒在 0.063~0.125 mm 的单矿物颗粒, 根据密度大小分为轻矿物和重矿物^[17]。取 0.063~0.125 mm 细砂样品加入重液(三溴甲烷, 比重 2.88), 对轻、重矿物进行分离, 烘干后称重得到轻、重矿物的质量。用体式显微镜对轻、重矿物进行鉴定, 并辅以油浸法, 每个样品分析 300~400 颗矿物, 确保精度, 最终求得各种轻、重矿物的颗粒百分含量。该实验在中国海洋大学海底科学与探测技术教育部重点实验室完成。

碎屑矿物的含量为重量百分含量, 即轻、重矿物质量之和与原始沉积物干重的百分比。轻、重矿物中每种矿物在其中的百分含量为矿物颗粒数与矿物颗粒总数的百分比。

3 结果

3.1 轻矿物组成及分布特征

曹妃甸海区共鉴定出 11 种轻矿物类型,包括石英、斜长石、钾长石、绿泥石、方解石、白云石、海绿石、黑云母和白云母。此外,还有生物碎屑和有机质碎屑 2 种碎屑类型。轻矿物的含量介于 1.91%~99.82%,平均为 82.21%。长石、石英、片状矿物(包含绿泥石、白云母、黑云母)是研究区主要的轻矿物,平均含量占轻矿物总量的 85.52%。有机质碎屑是含量最低的轻矿物类型,含量为 0~4.1%,平均为 0.41%。平面上,轻矿物的高值区主要集中在研究区西部和南部,东北部为低值区(图 2b)。

长石是曹妃甸海区含量最高的轻矿物,含量介于 14.3%~78.3%,平均为 51.20%。长石包括钾长石和斜长石,其中以斜长石为主,平均含量为 42.46%;钾长石含量为 0.7%~32.9%,平均为 8.75%。斜长石呈条带状和斑块状分布,且研究区北部斜长石含量整体低于南部。钾长石同样以斑块状分布,前缘深潮附近含量最高(图 2e)。

石英含量仅次于长石,介于 2.2%~32.2%,平均为 15.14%。石英通常是碎屑沉积物经长期搬运沉积下来的主要产物,其富集一般指示机械磨损和化学风化都较强的高能环境^[14]。研究区北部和东部石英含量高,南部海区为石英低值区(图 2c)。

片状矿物含量为 5.7%~58.1%,平均为 19.18%,由白云母、黑云母和绿泥石组成。其中,白云母为优势矿物,含量介于 3.2%~28.2%,平均为 10.55%。黑云母含量次于白云母,变化范围为 1.5%~29%,平均为 8.24%。绿泥石是其中含量最低的矿物,含量介于 0~3.2%。曹妃甸甸头附近海域是片状矿物的高含量区,其他海域含量较低(图 2f)。

方解石和白云石是常见的碳酸盐矿物。方解石含量为 0.2%~27.5%,平均为 4.86%,主要分布在研究区南部(图 2g)。白云石含量介于 0.3%~4.2%,平均为 1.58%,呈圆斑状分布(图 2h)。

3.2 重矿物组成及分布特征

研究区共鉴定出重矿物类型 27 种,以角闪石(24.18%)、绿帘石(28.24%)和自生黄铁矿(18.31%)为主,占重矿物总量的 70.73%。铁氧化物(磁铁矿-钛铁矿等)次之,含量介于 0.39%~33.76%,平均为 12.74%。透闪石(5.75%)、黑云母(2.41%)、白云母

(2.18%)和磷灰石(3.60%)含量相当。含量<1%且常见的矿物有阳起石、钛铁矿、磁铁矿、赤铁矿、褐铁矿、普通辉石、褐帘石、黝帘石、锆石、榍石、金红石、电气石、蓝晶石、十字石、绿泥石、白钛石、矽线石、风化云母、碳酸盐和生物碎屑。重矿物含量介于 0.18%~98.10%,平均为 17.79%。平面上,其分布特征与轻矿物相反,其高值区主要在研究区东北部,低值区位于研究区的西北部(图 3a),由东北向西南呈现逐渐降低的趋势(图 3a)。

闪石类矿物(包括角闪石、透闪石、阳起石)是研究区的优势重矿物,含量为 5.54%~76.01%,平均为 30.62%,分散分布在研究区(图 3b)。闪石类矿物属于易风化的不稳定矿物,研究区西北侧附近海域为含量高值区,含量高达 50%~80%(图 3b)。

帘石类矿物含量(包括绿帘石、褐帘石和黝帘石)仅次于闪石类矿物,是研究区第 2 大优势重矿物,含量为 4.25%~63.07%,平均为 28.44%。帘石类矿物多由闪石类蚀变而成,易于风化,为不稳定矿物,呈串珠状和斑点状分布在研究区(图 3c)。

钛铁氧化物类矿物(包括钛铁矿、磁铁矿、赤铁矿、褐铁矿等)含量介于 0.78%~33.76%,平均为 13.30%,优势矿物为铁氧化物(磁铁矿-钛铁矿等)。研究区内钛铁氧化物类矿物呈斑状分布(图 3g)。

研究区辉石类矿物为普通辉石,未发现紫苏辉石和透辉石。该类矿物是极易风化的不稳定矿物,在重矿物中的比重较小,平均含量为 0.04%,仅在曹妃甸甸头及研究区的东北部零星分布(图 3h)。

研究区的稳定矿物包括锆石、榍石、金红石、电气石、白钛石、磷灰石,含量为 0.46%~19.08%,平均为 3.68%,其高含量区位于研究区的东北部,主要以磷灰石为主(图 3d)。

变质类矿物(包括蓝晶石、十字石、矽线石)含量为 0~9.21%,平均为 0.32%,研究区的东北部含量最高,其他海域含量极低(图 3e)。

片状矿物(包括黑云母、白云母、绿泥石和风华云母)含量为 0~48.43%,平均为 4.61%,高值区位于曹妃甸甸头海域附近(图 3f),与轻矿物中片状矿物含量平面分布基本相同(图 3f)。

自生黄铁矿是常见的自生矿物,含量为 0.39%~50.90%,平均含量为 18.31%,其生成受控于细粒泥质沉积、活性铁含量以及有机质含量^[18]。曹妃甸近岸特别是研究区东北部黄铁矿含量低,从北向南含量逐渐升高,表明研究区南部为局部微还原的低能稳定环境(图 3i)。

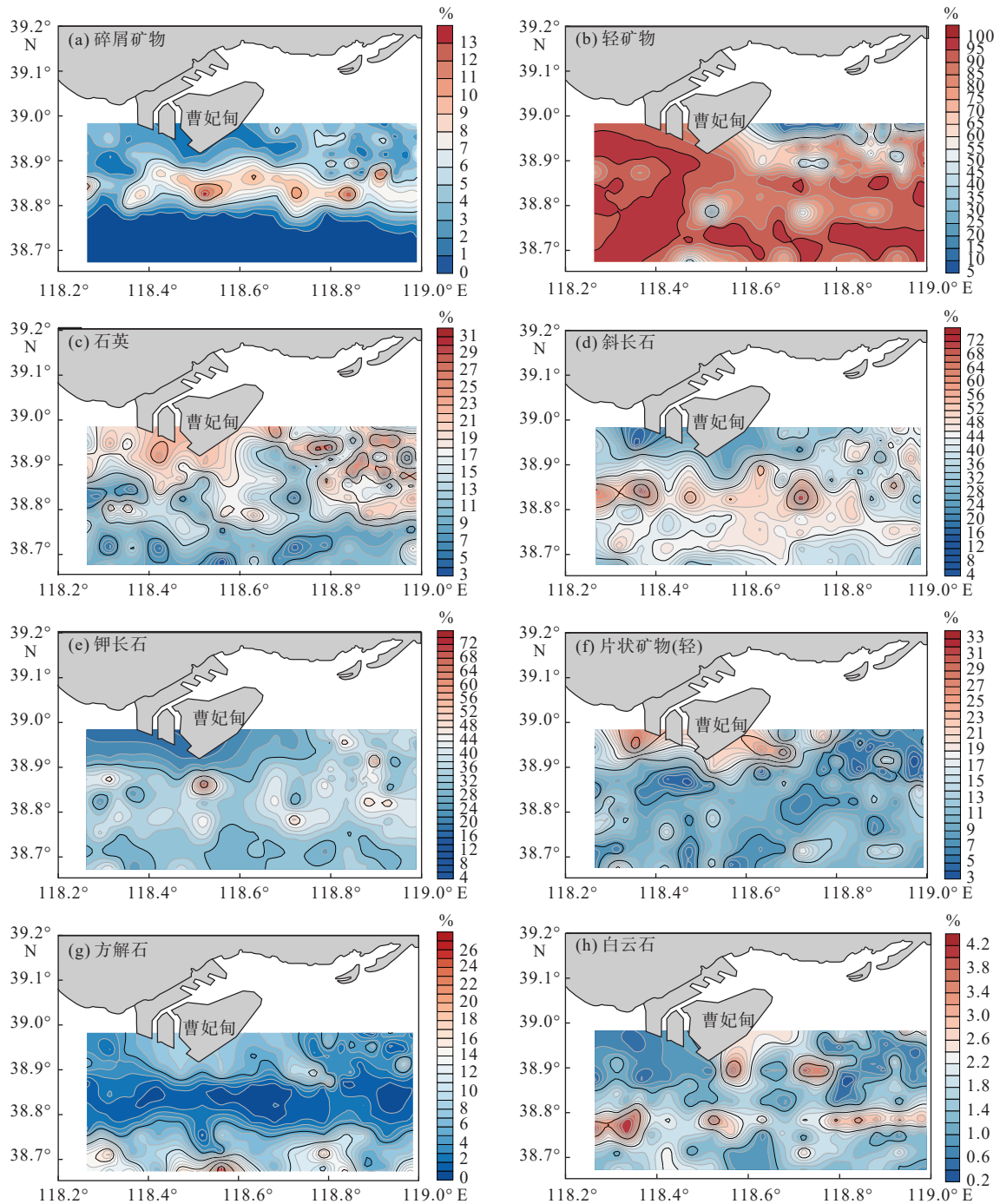


图 2 研究区表层沉积物碎屑矿物和轻矿物含量分布

Fig.2 The percentages distribution of detrital minerals and light minerals in surface sediments in the study area

不稳定矿物/稳定矿物(UM/SM)是重矿物的稳定性指标,可以指示物源和沉积环境。UM 为闪石类、帘石类和辉石类矿物,SM 为锆石、榍石、金红石、电气石、白钛石、磷灰石。UM/SM 比值越高表明风化程度越低,不稳定矿物得以保存;UM/SM 比值越低则表明矿物风化程度高,不稳定矿物被风化剥蚀未能保存。研究区 UM/SM 比值平均为 26.75,曹妃甸近岸东北部 UM/SM 比值最低,曹妃甸近岸

的西部 UM/SM 比值较高(图 3j),西部的风化强度低于东北部。

3.3 碎屑矿物组合分区

研究区碎屑矿物分布具有明显的空间差异性(图 2、3),本文使用 SPSS 26 软件对研究区的样品进行聚类分析,从而获得碎屑矿物组合分区(图 4),以讨论研究区物质来源和水动力等因素对于碎屑

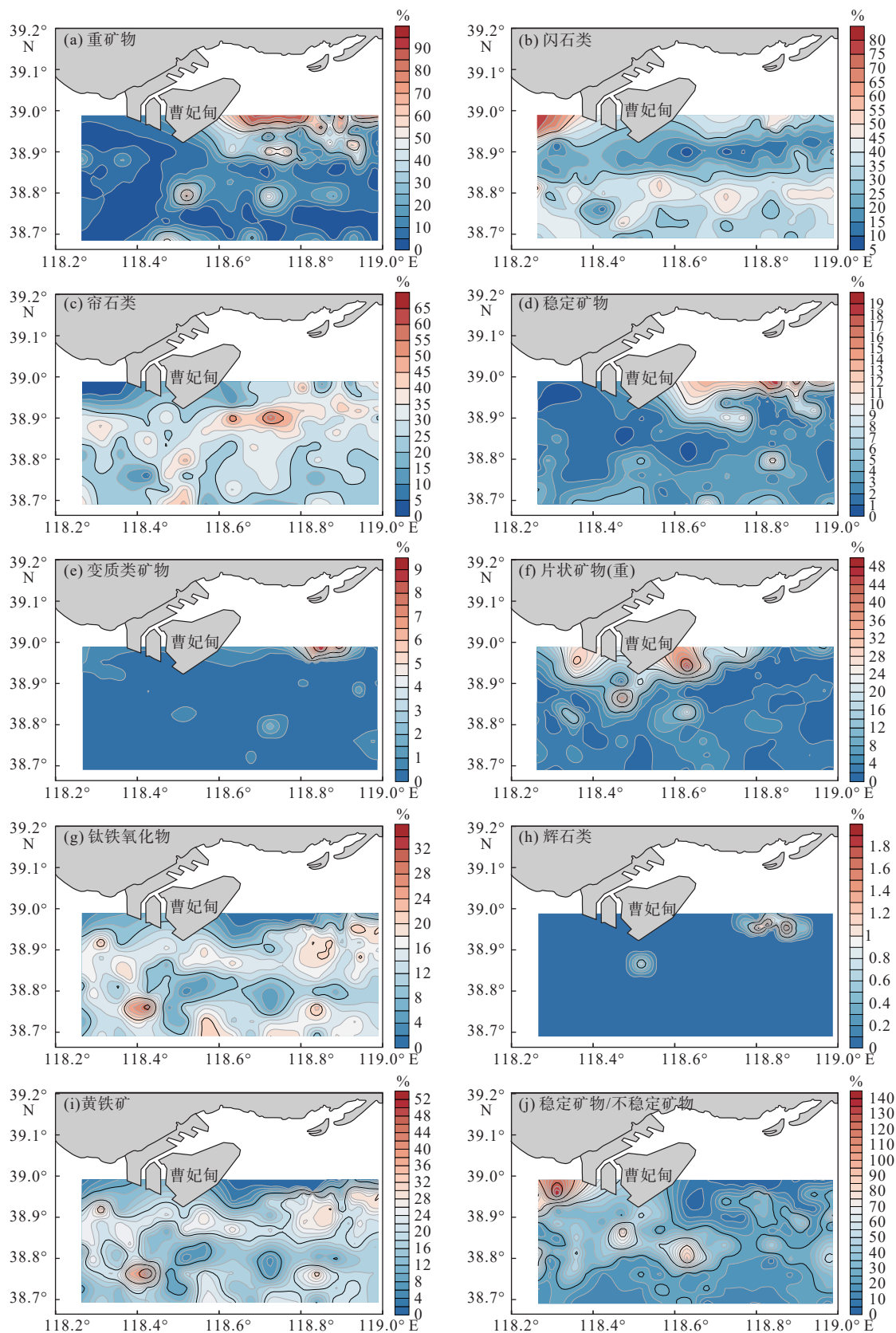


图3 研究区表层沉积物重矿物含量分布

Fig.3 The percentages distribution of heavy minerals in surface sediments in the study area

矿物分布的影响。选取轻矿物中的石英、长石、方解石、白云石,以及重矿物中的闪石类、帘石类、稳

定矿物、变质类矿物、片状矿物、铁氧化物、辉石类作为变量,对曹妃甸表层沉积物样品进行快速聚类

分析, 分类结果预设 3 类, 聚类方法为迭代分类。验均小于显著水平 0.001, 分类效果良好。表层沉积物碎屑矿物分区对比指标见表 1。

聚类分析结果表明, 大多数变量的类间差异 F 值检

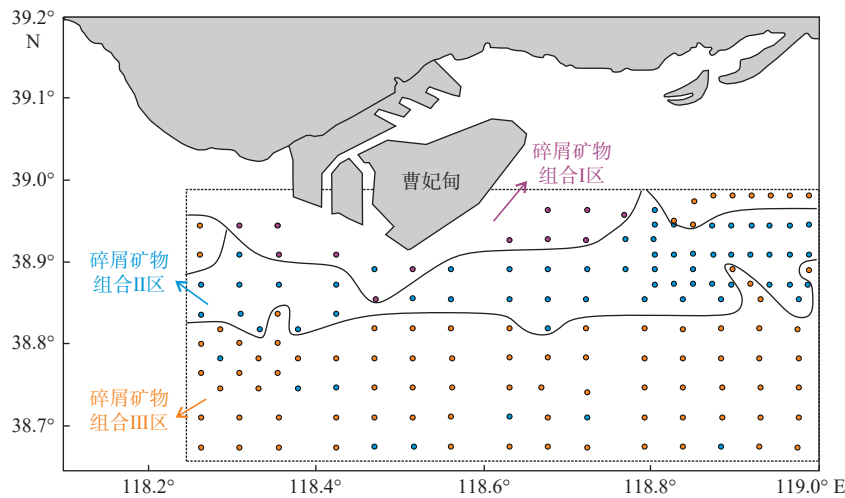


图 4 碎屑矿物组合分区

Fig.4 Assemblages and provinces of detrital minerals in sediments of the study area

表 1 研究区表层沉积物碎屑矿物分区数据统计

Table 1 Data statistics of detrital minerals in surface sediments in the study area

矿物类型	矿物种类	矿物颗粒百分比/%			
		I 区(n=15)	II 区(n=55)	III 区 (n=73)	全区(n=161)
轻矿物	石英	19.06	18.17	12.70	15.14
	长石类	36.53	52.52	52.46	51.20
	方解石	5.20	3.09	5.92	4.86
	白云石	1.26	1.22	1.85	1.58
重矿物	闪石类	32.69	19.64	37.21	30.62
	辉石类	1.53	0.10	0.00	0.04
	帘石类	18.75	34.63	25.97	28.44
	稳定矿物	7.41	3.36	3.73	3.68
	变质类矿物	0.46	0.20	0.40	0.32
	片状矿物	21.28	2.56	3.50	4.61
	钛铁氧化物	6.55	16.22	12.46	13.30
	重矿物质量百分数	26.28	20.44	14.20	17.79

注: n 为样品数量。

I 区重矿物含量最高, 平均为 26.28%, 远高于研究区平均水平。长石类矿物(36.53%)、闪石类矿物(32.69%)在 I 区表现出显著富集。相比之下, 白云石(1.29%)和变质类矿物(0.46%)的含量较低。辉石类矿物(1.53%)、稳定矿物(7.41%)和片状矿物(21.28%)远高于全区水平。

II 区优势矿物组合为长石类矿物(52.52%)和帘石类矿物(34.63%)。白云石(1.22%)、片状矿物(2.51%)、稳定矿物(3.36%)、辉石类矿物(0.10%)及变质类矿物(0.17%)含量在 II 区相对较低。铁氧化物(16.49%)显著高于其他区域和全区平均水平。

III 区重矿物含量最低(14.20%), 低于研究区平均水平。长石类矿物(52.9%)和闪石类矿物(38.63%)含量高。片状矿物(3.61%)、稳定矿物(3.74%)以及变质类矿物(0.44%)的含量也相对较低, 辉石类矿物在 III 区则完全缺失, 方解石(5.90%)和白云石(1.85%)高于全区平均水平。

4 讨论

4.1 沉积物来源

渤海沉积物的来源主要包括周边河流输入的

沉积物、外海物质输入、大气沉降物质以及周围基岩海岸的海岸侵蚀产物,其中,河流输入的物质对沉积物总量的贡献最为显著^[19]。这些河流沉积物主要集中于渤海西部和北部沿岸。渤海湾作为渤海的三大海湾之一,其沉积物主要来源于黄河、滦河和海河 3 条河流的泥沙输入,这三者共同贡献了渤海沉积物总量的 90% 以上。黄河以其庞大的入海泥沙量(约 1.1×10^9 t/a),成为影响渤海湾沉积作用最为显著的河流^[20]。相比之下,滦河对前三角洲和邻近的渤海浅海的沉积物供应较少,其入海泥沙主要沉积在滦河口至曹妃甸沿岸^[21-22],沉积物粒度较粗,细粒级物质较少^[23],年平均向渤海输送沉积物量约为 2.67×10^7 t/a^[19]。海河则以其细粒沉积物为主,通过底质再悬浮机制搬运至浅海区域^[4],年平均排沙量约为 6×10^6 t/a^[19]。

全新世早期,滦河在曹妃甸地区入海,并在海平面缓慢上升过程中逐渐形成了向海突出的古滦河三角洲,为当前区域的地貌格局奠定了基础^[24]。随着古滦河河道的北移,沉积物供给减少,三角洲停止发育,在波浪和潮汐等共同作用下形成了一系列沙坝^[12,24]。曹妃甸岛正是由古滦河入海沉积物在强烈波浪和激浪流作用下横向堆积而成的海岸沙坝^[12]。曹妃甸附近海域过去依赖滦河的输沙量,20 世纪 70 年代以来上游大规模建设水库和水坝,滦河的输沙量显著降低^[25]。目前,曹妃甸泥沙主要由少量潮滩和沙洲侵蚀沉积物补充,泥沙疏浚、填海造陆以及岸线硬化等人类活动进一步减少了区域泥沙补给^[9]。

I 区位于曹妃甸的近岸区域,其很大程度上受到古滦河的影响。滦河沉积物以近岸沉积为主,主要沉积在滦河河口向西至曹妃甸的沿海区域。而滦河发源地的花岗岩经过太古宙变质作用形成了大量角闪石等暗色矿物^[26]。滦河沉积物以高含量的辉石特征而有别于黄河、辽河^[3],具有较高含量的稳定矿物^[26]。I 区角闪石含量高,稳定矿物和辉石含量虽较低,但显著高于 II 区和 III 区(表 1),因此认为 I 区沉积物主要受到滦河的影响。

II 区主要位于研究区的中部以及 I 区以南,海河东侧。与黄河和滦河相比,海河入海的泥沙量相对较少,沿岸输沙活动较弱,其影响范围主要局限于海河口附近^[5],且海河河口潮流主导方向为西向^[27],因此,海河对研究区的影响很小。前人研究表明,黄河物质入海后大致分为 3 个输运方向,其中主要输运方向为东北方向,可直达滦河口一带;

其二为沿渤海湾南部向西运移;其三则是进入莱州湾,通过海峡向南把黄河物质带入黄海^[3]。因此,研究区主要是受到黄河前 2 个方向的输运物质的影响。同时,由于沉积物的近源性影响,滦河物质也对该区域存在一定程度的影响。综上,II 区应同时受到黄河和滦河物质的共同影响,并由此形成一个混合矿物沉积区。

III 区主要位于研究区南端。众所周知,黄河泥沙主要来自于黄土高原,故其沉积物组成与黄土较为相似,以富含方解石等碳酸盐矿物且稳定重矿物少为特征,这也是明显区别于其他河口沉积物的典型特征^[3]。该区方解石含量较 I 区和 II 区为最高(表 1),方解石在该区的富集表明其明显受到黄河物质的影响,因此,可将其划分为黄河矿物区。

4.2 物质输运模式

碎屑矿物的分布特征不仅受沉积物来源影响,还受区域动力的影响。渤海湾具有双环流结构,北部环流为逆时针方向,南部为顺时针方向^[28]。在渤海湾逆时针潮流影响下,现代滦河沉积物从东北向西南方向输运迁移,但因曹妃甸岬角的存在,导致沉积物易在曹妃甸前沿积聚沉积^[4,27](图 5)。曹妃甸甸头的深槽是典型的海湾型潮汐入口系统,主要依靠潮汐流来维持较大的水深^[29],潮汐流使得沉积物由东向西迁移^[27]。且由于曹妃甸岬角周边水动力较强,沉积物难以在此沉积,而是向西输运,直至水动力条件减弱区域再次沉积^[15]。滦河特征矿物的变化特征也反映了沉积物的输运过程。自 I 区到 II 区,滦河特征矿物辉石类矿物和稳定矿物含量均有明显减少(表 1),表明滦河物质从三角洲向西南方向输运和扩散过程中,其沉积通量从东北向西南逐渐降低。而黄河物质在老黄河口以西海域沿近岸向西移动,穿过黄骅港北侧后又向西北方向输运,最终在渤海湾中部沉积,到达研究区的 II 区,对 I 区沉积物特征也有一定程度的影响。黄河物质在从黄河三角洲向周边地区输送扩散过程中,随着距离的增加其影响从西南向东北逐渐减弱^[4,30]。

本研究沉积物样品于 2021 年采集,其碎屑矿物平均含量为 3.30%,重矿物平均含量为 17.79%,轻矿物平均含量为 82.21%。祝贺等^[6]对该区域 2013 年所采集的沉积物样品进行分析研究的结果表明,该区碎屑矿物、重矿物含量和轻矿物的平均含量分别为 11.70%、3.37%、96.63%。通过对比可明显发现,研究区重矿物含量明显升高,碎屑矿物

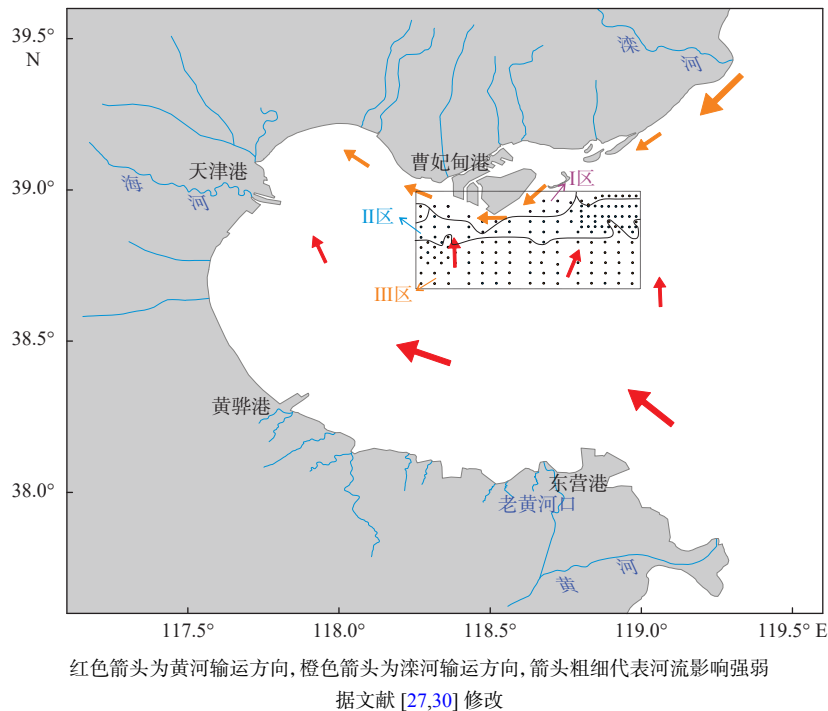


图5 渤海湾泥沙输运方向

Fig.5 Sediment transport direction in the Bohai Bay

和轻矿物含量显著降低。2000—2016年,在曹妃甸区域依托甸头进行了大规模的工业区建设,推测曹妃甸海区填海造陆活动对该区碎屑矿物的分布特征产生了影响。特别是I区重矿物含量最高,平均含量高达26.28%(表1),受围填海影响最大。

2006—2016年,曹妃甸近岸填海造陆活动明显改变了曹妃甸海的几何形状,并进一步影响了整个区域的潮汐变化,特别是老龙沟附近,潮汐通道变窄,潮流速度和潮流量略有下降,水动力减弱,该区沉积环境由原来的冲刷为主转变为现在的以轻微淤积为主^[9,27,31]。老龙沟海区沉积物在潮流作用下自东向西输送到曹妃甸岬角附近^[32],大规模填海造陆活动则进一步强化了曹妃甸的岬角效应,导致水流加速,甸前深槽冲刷明显。在此过程中细颗粒的黏土矿物以及轻矿物被水流冲刷,但由于重矿物密度较大难以被冲走,保留了早期滦河在此入海形成的水下浅滩残体的矿物组成特征^[6,12],导致了I区重矿物含量升高。

5 结论

通过对曹妃甸近岸海区沉积物中的碎屑矿物进行分析,揭示该区域碎屑矿物的分布特征和组合规律,讨论其物源和水动力环境对矿物分布特征的影响。主要结论如下:

(1)研究区共鉴定出碎屑矿物38种,其中轻矿物11种,优势矿物为长石、石英和片状矿物;重矿物27种,优势矿物为角闪石、绿帘石和自生黄铁矿。

(2)研究区可分为3个物源区:I区沉积物主要来源于滦河,其重矿物含量最高,平均为26.28%,白云石(1.29%)和变质类矿物(0.46%)含量较低。II区为黄河和滦河物源的沉积物混合区,其优势矿物为长石类矿物(52.52%)和帘石类矿物(34.63%);辉石类矿物(0.10%)以及变质类矿物(0.17%)含量明显降低。III区为黄河物源区,重矿物含量最低(14.20%),辉石类矿物则完全缺失,方解石(5.90%)和白云石(1.85%)远高于I区和II区。

(3)围填海工程明显改变了曹妃甸附近海域的几何形状和沉积动力环境,导致重矿物含量升高,碎屑矿物和轻矿物含量降低,且显著影响了研究区特别是近岸区的碎屑矿物分布特征。

参考文献:

- [1] 刘金庆,宋红瑛,印萍,等.威海南部近岸泥质区晚更新世以来的重矿物组合特征及对物源的指示[J].海洋学报,2018,40(3):129-140.
LIU Jinqing, SONG Hongying, YIN Ping, et al. Characteristics of heavy mineral assemblage and its indication of provenance in the mud area off the southern coast of Weihai since the Late Pleistocene[J]. Haiyang Xuebao, 2018, 40(3): 129-140.

- [2] 宁泽, 徐磊, 林学辉, 等. 东海东北部陆架表层沉积物碎屑矿物分布及其物源分析 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(5): 58-69.
NING Ze, XU Lei, LIN Xuehui, et al. Distribution and provenance of detrital minerals in surface sediments of the northeastern East China Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2022, 42(5): 58-69.
- [3] 陈丽蓉. 中国海沉积矿物学 [M]. 北京: 海洋出版社, 2008.
CHEN Lirong. Sedimentary Mineralogy of the China Sea [M]. Beijing: Ocean Press, 2008.
- [4] 韩宗珠, 衣伟虹, 李敏, 等. 渤海湾北部沉积物重矿物特征及物源分析 [J]. 中国海洋大学学报 (自然科学版), 2013, 43(4): 73-79.
HAN Zongzhu, YI Weihong, LI Min, et al. Analysis for heavy mineral characteristics and material provenance in the sediments of the northern Bohai Bay[J]. Periodical of Ocean University of China (Natural Science Edition), 2013, 43(4): 73-79.
- [5] 张连杰, 胡日军, 朱龙海, 等. 渤海湾碎屑矿物特征及其物源和沉积动力环境指示意义 [J]. 中国海洋大学学报 (自然科学版), 2019, 49(5): 60-70.
ZHANG Lianjie, HU Rijun, ZHU Longhai, et al. Characteristics of detrital minerals in Bohai Bay and their implications for provenance and sedimentary dynamical environment[J]. Periodical of Ocean University of China (Natural Science Edition), 2019, 49(5): 60-70.
- [6] 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.
- [7] 白大鹏, 赵铁虎, 李绍全, 等. 渤海湾南堡海域潮流动力地貌特征 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2011, 31(3): 23-30.
BAI Dapeng, ZHAO Tiehu, LI Shaoquan, et al. Tidal dynamic geomorphology in Nanpu area of Bohai Bay[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2011, 31(3): 23-30.
- [8] 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 Cao-feidian Channel in the Bohai Bay[J]. Marine Sciences, 2016, 40(3): 128-137.
- [9] LIANG H D, KUANG C P, OLABARRIETA M S, et al. Morphodynamic responses of Cao-feidian channel-shoal system to sequential large-scale land reclamation[J]. Continental Shelf Research, 2018, 165: 12-25.
- [10] 季荣耀, 陆永军, 左利钦. 曹妃甸老龙沟潮汐通道拦门沙演变机制 [J]. 水科学进展, 2011, 22(5): 645-652.
JI Rongyao, LU Yongjun, ZUO Liqin. Mechanism of outer delta evolution of the Laolonggou tidal inlet in Cao-feidian sea area on China's Bohai Bay[J]. Advances in Water Science, 2011, 22(5): 645-652.
- [11] 黎刚, 孙祝友. 曹妃甸老龙沟动力地貌体系及演化 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2011, 31(1): 11-19.
LI Gang, SUN Zhuoyou. Morphodynamic system and the evolution of Laolonggou tidal inlet[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2011, 31(1): 11-19.
- [12] 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 Cao-feidian Channel in the Bohai Bay[J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(3): 348-355.
- [13] 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 Cao-feidian offshore area[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2016, 35(3): 507-514.
- [14] 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 Cao-feidian inshore, China[J]. Earth and Environment, 2017, 45(3): 306-313.
- [15] 李从先, 陈刚, 王利. 滦河废弃三角洲和砂坝: 潟湖沉积体系 [J]. 沉积学报, 1983, 1(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, 1(2): 60-72.
- [16] KUANG C P, CHEN S Y, ZHANG Y, et al. A two-dimensional morphological model based on next generation circulation solver II: application to Cao-feidian, Bohai Bay, China[J]. Coastal Engineering, 2012, 59(1): 14-27.
- [17] 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.
- [18] 常鑫, 张明宇, 谷玉, 等. 黄、东海陆架泥质区自生黄铁矿成因及其控制因素 [J]. 地球科学进展, 2020, 35(12): 1306-1320.
CHANG Xin, ZHANG Mingyu, GU Yu, et al. Formation mechanism and controlling factors of authigenic pyrite in mud sediments on the shelf of the Yellow Sea and the East China Sea[J]. Advances in Earth Science, 2020, 35(12): 1306-1320.
- [19] 中国科学院海洋研究所. 渤海地质 [M]. 北京: 科学出版社, 1985.
Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences. Geology of the Bohai Sea [M]. Beijing: Science Press, 1985.
- [20] MILLIMAN J D, MEADE R H. World-wide delivery of river sediment to the oceans[J]. The Journal of Geology, 1983, 91(1): 1-21.
- [21] 陈丽蓉, 栾作峰, 郑铁民, 等. 渤海沉积物中的矿物组合及其分布特征的研究 [J]. 海洋与湖沼, 1980, 11(1): 46-64.
CHEN Lirong, LUAN Zuofeng, ZHENG Tiemin, et al. Mineral

- assemblages and their distribution patterns in the sediments of the Gulf of Bohai Sea [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1980, 11(1): 46-64.
- [22] 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.
- [23] 杨娅敏, 张礼中, 沈睿文, 等. 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 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2023, 43(5): 136-147.
- YANG Yamin, ZHANG Lizhong, SHEN Ruiwen, et al. Characteristics of grain size and clay mineral distribution of surface sediments and their provenance implication in Tangshan Harbor, Bohai Bay[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2023, 43(5): 136-147.
- [24] 于晓晓. 滦河三角洲全新世沉积特征与演化 [D]. 青岛: 中国科学院大学 (中国科学院海洋研究所), 2019.
- YU Xiaoxiao. Sedimentary characteristics and evolutions of the Luanhe River Delta during the Holocene [D]. Qingdao: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences), 2019.
- [25] FENG J L, ZHANG W. The evolution of the modern Luanhe River Delta, north China[J]. *Geomorphology*, 1998, 25(3): 269-278.
- [26] 侯孟孜, 衣华鹏, 孙志高, 等. 渤海北部海域碎屑矿物组成特征研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(4): 118-123.
- HOU Mengzi, YI Huapeng, SUN Zhigao, et al. Detrital mineral composition features of the northern Bohai Sea[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2017, 31(4): 118-123.
- [27] LU Y J, JI R Y, ZUO L Q. Morphodynamic responses to the deep water harbor development in the Caofeidian sea area, China's Bohai Bay[J]. *Coastal Engineering*, 2009, 56(8): 831-843.
- [28] 赵保仁, 庄国文, 曹德明, 等. 渤海的环流、潮流及其对沉积物分布的影响 [J]. 海洋与湖沼, 1995, 26(5): 466-473.
- ZHAO Baoren, ZHUANG Guowen, CAO Deming, et al. Circulation, tidal residual currents and their effects on the sedimentations in the Bohai Sea[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1995, 26(5): 466-473.
- [29] 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 Caofeidian deep-water harbor area [J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2009(4): 33-46.
- [30] ZHAO B, ZHANG L J, YAN J S, et al. Migration and diffusion of surface sediments in Bohai Bay: evidence from grain size and elements[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(21): 10738.
- [31] 尹延鸿, 褚宏宪, 李绍全, 等. 曹妃甸填海工程阻断浅滩潮道初期老龙沟深槽的地形变化 [J]. 海洋地质前沿, 2011, 27(5): 1-6.
- YIN Yanhong, CHU Hongxian, LI Shaoquan, et al. An analysis of the topographical change of Laolonggou deep trough in the initial stage of Caofeidian reclamation project after blocking the shoal tidal channel[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2011, 27(5): 1-6.
- [32] LU Y J, ZUO L Q, JI R Y, et al. Effect of development of Caofeidian harbor area in Bohai Bay on hydrodynamic sediment environment[J]. *China Ocean Engineering*, 2008, 22(1): 97-112.

Sediment provenance and distribution in Caofeidian, Bohai Bay, revealed by offshore detrital mineral analysis

HU Yanbin, FENG Yongcai, HAO Liancheng*, YANG Kaili, PANG Guotao, WANG Kechao, LIU Jian

(Yantai Center of Coastal Zone Geological Survey, China Geological Survey, Yantai 264000, China)

Abstract: A comparative study on detrital minerals from 161 surface sediments in Caofeidian, Bohai Bay, was conducted to understand the sediment provenance and distribution. Eleven types of light minerals and 27 types of heavy minerals were identified in the study area. The light minerals were mainly feldspar, quartz, and flake minerals, with an average mass percentage of 82.2%. The heavy minerals consisted of predominantly hornblende, epidote, and authigenic pyrite. Based on the distribution characteristics and cluster analysis of detrital minerals, the study area could be divided into three sedimentary regions: the Luanhe River mineral region, the mixed source region, and the Yellow River mineral region. We concluded that provenance is the main factor controlling the assemblage and distribution of detrital minerals in the study area, and the land reclamation activities have changed the hydrodynamic and sedimentary environment in Caofeidian, and further affected the distribution characteristics of detrital minerals.

Key words: Caofeidian; detrital mineral; provenance; hydrodynamic environment; land reclamation