

◆海洋调查技术◆

渤海中部海域海底地形地貌特征及其影响因素分析^{*}王浩森^{1,2}, 张建兴^{1,3}, 宋永东^{1,3}, 庄丽华^{1,3}, 栾振东^{1,2,3**}, 阎军^{1,3}

(1. 中国科学院海洋研究所, 中国科学院海洋地质与环境重点实验室, 山东青岛 266071; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院海洋大科学研究中心, 山东青岛 266071)

摘要:渤海中部海域位于三湾(渤海湾、莱州湾、辽东湾)交汇处, 形成与演化历史悠久, 沉积物源丰富, 其内部蕴含着丰富的地质信息。本研究基于多年来采集和搜集的高精度地形地貌数据、浅地层剖面数据和沉积物样品的测试分析数据, 精细刻画了渤海中部海域海底地形地貌特征, 并对其影响因素进行了分析。研究表明, 渤海中部海域海底地形总体上呈现中间低、南北两侧高的特征, 北部区域地形复杂, 南部区域地形较平坦。根据海底地貌特点, 本文将研究区海底地貌单元划分为陆架侵蚀洼地、陆架堆积平原及海湾堆积平原。地貌形态是区域地质构造运动、海平面变化、现代海洋水动力、沉积物来源等共同作用的结果。研究渤海中部海域海底地形地貌特征, 有助于深化对其地质构造演化的认识, 并且对海洋工程建设、海洋牧场开发、海洋资源利用及海洋经济发展具有重要意义。

关键词:渤海中部海域 多波束 海底地形 地貌类型 分布特征

中图分类号: P737.2 文献标识码: A 文章编号: 1002-7378(2022)01-0031-09

DOI: 10.13657/j.cnki.gxkxyb.20220421.007

开展区域海洋地质调查, 进行海岸带、大陆架和海底地质情况探测, 对海洋资源的开发利用以及海洋工程建设具有重要意义。渤海中部海域历经多期构造运动, 在新近纪沉降背景下形成了凹陷盆地^[1], 广泛接受沿岸河流沉积物, 地形地貌复杂, 蕴含丰富的油气资源。目前对渤海海域的研究主要集中于三湾(渤海湾、莱州湾、辽东湾)地带, 有关专家分别对渤海湾、莱州湾、辽东湾的地形地貌特征进行了详细描述, 阐

述了其控制因素^[2-4], 但是针对渤海中部海域地形地貌描述的研究较少。本研究通过高精度地形地貌数据、浅地层剖面数据和沉积物样品的测试分析数据等多源数据对渤海中部海域地形地貌进行精细分析, 并讨论其影响因素, 拟加深对渤海中部海域地形地貌的了解, 同时对渤海海域乃至整个渤海湾盆地的油气勘探工作^[5]及海洋牧场开发利用、海洋工程建设提供基础地质信息数据支撑。

收稿日期: 2022-01-07

* 中国科学院战略性先导科技专项(E0B435101T, XDA22050502)和中国科学院关键技术人才项目(2018-2021)资助。

【作者简介】

王浩森(1998-), 男, 在读硕士研究生, 主要从事海洋地形地貌研究, E-mail: wanghaosen21@mails.ucas.ac.cn。

【**通信作者】

栾振东(1976-), 男, 正高级工程师, 硕士研究生导师, 主要从事深海探测技术及海底地形地貌研究, E-mail: luan@qdio.ac.cn。

【引用本文】

王浩森, 张建兴, 宋永东, 等. 渤海中部海域海底地形地貌特征及其影响因素分析[J]. 广西科学院学报, 2022, 38(1): 31-39.

WANG H S, ZHANG J X, SONG Y D, et al. Analysis of Seabed Topographic and Geomorphologic Features and Influencing Factors in the Middle Area of Bohai Sea [J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 2022, 38(1): 31-39.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于渤海中部海域(图1), 渤海中央盆地位于渤海3个海湾与渤海海峡之间, 平面形态近似四边形, 属于浅海堆积平原, 水深20–28 m, 为较浅的大型盆地^[6]。研究区北接辽东湾, 西邻渤海湾, 南侧为莱州湾, 是三湾交汇处。周边有海河、滦河以及黄

河等多条河流注入, 水文特征复杂, 沉积物源丰富。研究区西北侧为唐山市沿海陆地, 西南侧则为黄河口区域。该区系大陆边缘被海水淹没的水下自然延伸部分, 沿海陆地构造单元对其海底地形具有继承性控制作用。此外, 地貌发育还受到海平面变化、入海河流输沙量、潮流、波浪、海底沉积物组成、海岸类型等诸多因素控制。

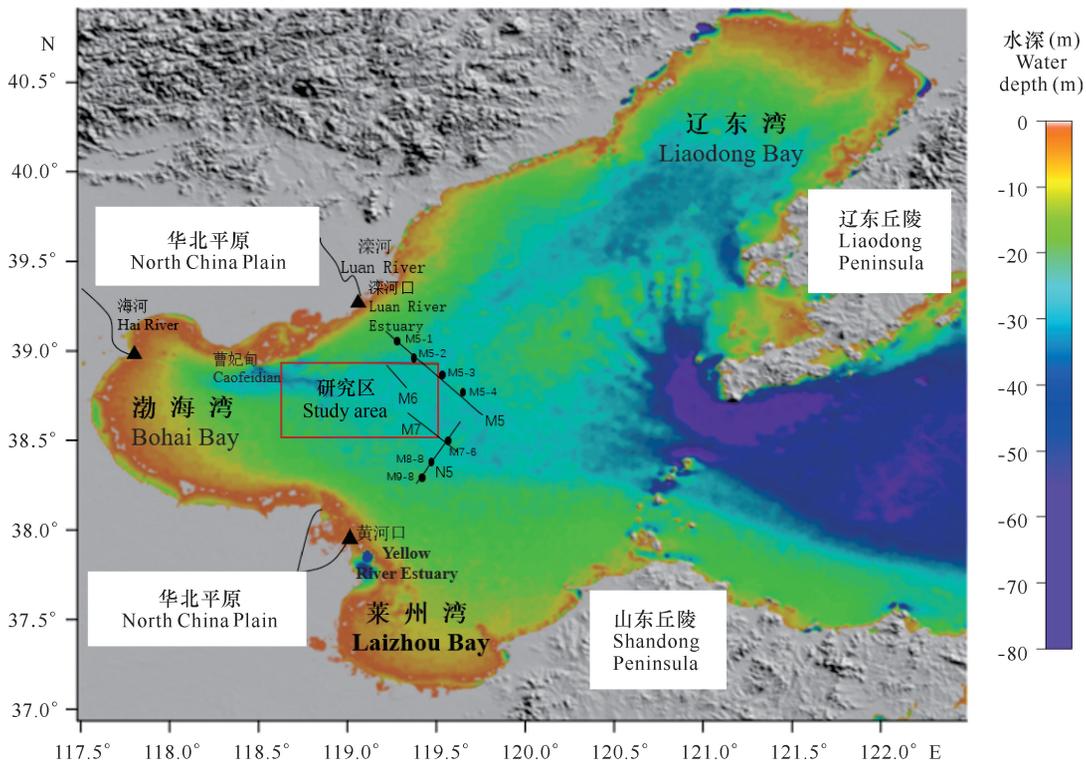


图1 研究区位置

Fig.1 Location of the study area

海区沉积物的粒度组成主要受其源岩物质控制, 以及源区的风化作用、搬运过程中的机械磨蚀、水动力作用、搬运距离以及化学溶蚀等因素制约^[7]。研究区中部表层覆盖6–8 m粉质黏土软土层^[8]。

渤海水深较浅, 浅水分潮的影响不可忽略, 研究区的潮流运动方式主要为旋转流。冬季渤海中部表层余流受制于风的作用, 春夏季某些区域余流受到风的影响较大^[9]。渤海中部海域物质循环及海水流动的主要驱动力为潮汐, 由潮汐产生的余流也是影响整个渤海物质传输和分布的重要因素^[10]。

1.2 方法

利用R2 SONIC2024多波束测深系统对研究区水深进行了高精度地形地貌测量并搜集历史浅地层测量数据、沉积物样品的测试分析等多源数据, 进行融合处理和分析。R2 SONIC2024多波束测深系统

的工作频率为200–400 kHz, 波束角为 $0.5^{\circ} \times 1.0^{\circ}$, 256个波束, 最大覆盖宽度 160° , 最大测量深度500 m。多波束布设原则为平行等深线布设, 测线间隔100 m, 测线按全覆盖测量要求布设, 条幅间一般保持不低于10%的重叠率, 每一个Ping接受的波束数应不少于85%。采用GeoPulse Plus数字调频式浅地层剖面仪, 利用其提供的11 mm同轴拖缆(该电缆能够提供长达10 km的拖曳能力), 在长电缆上实现满功率信号发射和高发射速率。发射功率为0.01–4 kW, 发射带宽为0.5–13.5 kHz。定位采用差分全球定位系统(Differential Global Position System, DGPS), 定位精度优于5 m。为保证结果的准确性, 还进行了现场海水声速剖面测量, 在每 $0.3^{\circ} \times 0.3^{\circ}$ 范围内, 至少有一个声速剖面测试站位。连续作业时, 相邻两个声速剖面测量的时间间隔不大于72 h。实

时横向水深条幅剖面若有对称弯曲现象,则及时布设海水声速剖面测量站位。测量过程中应定期测量船舶的吃水深度,以便为后处理提供换能器吃水校正的依据。利用 CARIS HIPS 等软件对水深数据进行处理,剔除由于环境等因素产生的噪声及干扰,再通过 Surfer、MapGIS、Global Mapper 等绘图软件和人工汇编,绘制研究区海底地形和地貌图。M5、M6、M7、N5 均为浅地层剖面测线,沿测线分布沉积物取样站位(图 1)。

2 结果与分析

2.1 海底地形特征

2.1.1 地形分区特征

研究区位于渤海中部,是一个中间较深、南北两侧水深较浅的区域(图 2)。研究区内水深大部分超过 25 m,平均水深 27 m;最小水深为当地深度基准面 0 m,最大水深接近 38 m,出现在研究区中央西侧的侵蚀洼陷区。研究区南部海底地势较平坦并逐渐向测区中央缓慢倾斜,东南海底平均坡度约为 0.08‰,西南海底平均坡度约为 0.1‰,北部海底地形平均坡度约为 0.14‰。为了便于描述,结合研究区不同区域的地形特点,将研究区划分为北部起伏地形区、中央凹陷地形区、西部平坦地形区和南部平缓地形区。

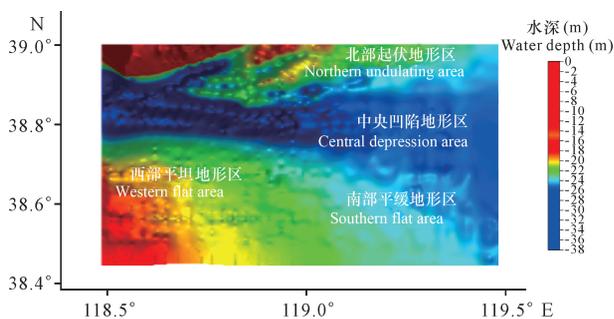


图 2 研究区海底地形图

Fig. 2 Topographic map of the study area

(1) 北部起伏地形区。

研究区北部起伏地形区水深小于中央凹陷地形区,总体上看为一个平缓的斜坡。北部起伏地形区东西两侧的地形有所差异,其中西侧水深变化较为剧烈,海底地形起伏复杂,海底冲蚀凹槽和高地相间分布,丘状高地高度约为 1.5 m,可能为曹妃甸南侧深槽地貌的东向延伸^[2]。而该地形区东侧为一个向南倾斜的斜坡,海底较为平缓,无特殊地貌形态发育。

(2) 中央凹陷地形区。

研究区中央地势低洼,发育侵蚀洼地。洼地北部向中部倾斜,受控于大地构造基本格局。全新世潮流的侵蚀作用也对其有一定的影响。洼地南部始于渤海湾堆积平原北部海河水下河谷,向东延伸至渤海海峡口,渤海湾南部地势平坦,北部自海河水下河谷 16 m 等深线处地势出现倾斜^[11]。自洼地向南北两侧延伸,出现倾斜,北部及西北部发育侵蚀凹槽和潮流沙脊。研究区的中部海底相对平坦,仅在西侧发育一个冲蚀区,水深超过 27.5 m,冲蚀洼地与周边地形高差约为 5 m,研究区中央地形区西部的冲蚀洼地南北宽度约为 20 km,而东部平坦区宽度则可达 40 km。整体而言,研究区呈现西浅东深、东宽西窄的近喇叭状形态。

(3) 西部平坦地形区。

研究区西部地势平坦,无明显起伏,水深约为 20 m。研究区西南古黄河口外的水下三角洲受潮流作用侵蚀,坡度比东南现代黄河口外水下沉积的坡度略大,现代黄河口外缘水下沉积具有更平缓的坡度。而西北部现代滦河的物源输入也使该区域海底地形坡度较缓,与东南部现代黄河口外缘海底类似。研究区西北部现代滦河提供大量物质,在水动力冲刷改造下形成了凹凸不平的复杂地形。

(4) 南部平缓地形区。

研究区南部地形区水深比北部地形区浅,水深为 22-26 m,表现为平缓的斜坡,斜坡向东北倾斜。海底相对平坦,未见大型的特殊地貌。南部地形区的西部边缘相对东部更陡。

在研究区南部,虽然历史上黄河经过多次改道,入海口位置发生变化,但每年大量的物源输入使物质在黄河口外堆积形成水下三角洲沉积,河流入海泥沙在河海动力相互作用下于河口区发生输移、扩散及沉降等过程,河口地貌形态随之塑造^[12]。

2.1.2 典型地形剖面特征

海底地形剖面能直观地反映海底的地形特征,为了对研究区地形特征有一个详细直观的了解,本研究在研究区选取了 6 条典型地形剖面进行分析(图 3)。

(1) A-A'剖面。

A-A'剖面反映了研究区南北方向海底地形变化,海底南北两侧高,中间低,最浅和最深处相差约 6 m,南北两侧地形特征差异明显,在剖面中央及北部区域海底发育复杂地形,地形起伏较大,海底侵蚀明显且沟垄相间,沟槽可深达 1 m;南坡水深 23-26

m, 地形变化相对平缓, 斜坡向北倾斜, 坡度约为 0.08‰ [图 4(a)]。

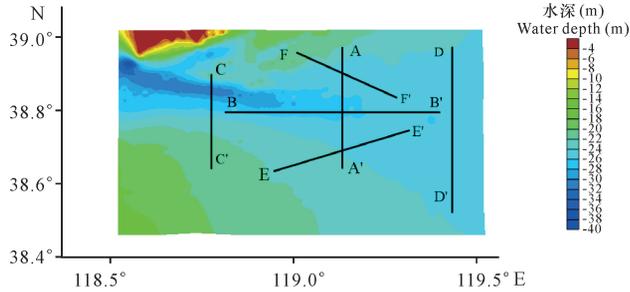


图 3 研究区典型剖面位置

Fig. 3 Location of the typical profiles in the study area

(2) B-B'剖面。

B-B'剖面反映了研究区中部自西向东的地形特征, 显示研究区坡度自西向东逐渐变缓, 水深逐渐增大, 水深最浅与最深差值可达 5 m, 坡度约为 0.15‰ [图 4(b)]。根据研究显示, 该区域西部未见明显地貌特征, 沉积物在此处堆积。东部发育部分侵蚀地貌, 推测是潮流等水动力作用的影响。

(3) C-C'剖面。

C-C'剖面靠近渤海湾, 西南部地形比较平坦, 水深约为 22 m, 北部水深较大, 最浅水深 25 m, 且发育侵蚀沟槽, 侵蚀量较大, 深度约 5 m [图 4(c)]。研究表明, 该区域受到构造、波浪和潮流等现代海洋水动力作用, 加上长期的侵蚀堆积作用, 造成了如今的凹槽[2]。

(4) D-D'剖面。

D-D'剖面中南侧斜坡坡度约为 0.1‰, 南部斜坡发育轻微侵蚀地貌, 侵蚀深度小于 1 m [图 4(d)]。北侧区域由于离现代滦河河口较近, 物源供应充足。而南侧区域离滦河河口较远, 当地海底沉积物得不到足够补充, 海底侵蚀更为严重, 海底起伏不平, 除了物源供应较小之外, 现代海洋水动力的侵蚀作用可能是主要因素。

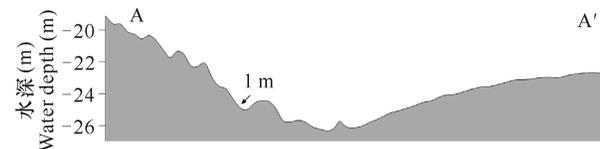
(5) E-E'剖面。

E-E'剖面显示了研究区南部自西南向东北的变化趋势, 该区水深在 22-25 m, 海底缓慢倾斜进入研究区中部, 海底无特殊地形发育, 未见明显侵蚀现象[图 4(e)]。根据研究显示, 该区域接受了大量来自黄河口的沉积物, 沉积物在近岸处堆积。因此, 随着离岸距离的增加, 沉积物堆积逐渐减少, 东北方向水深逐渐加深。

(6) F-F'剖面。

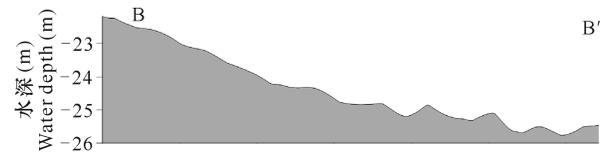
F-F'剖面显示了研究区北部自西北向东南方

向的地形特征, 研究区西北侧斜坡地形复杂且坡度相对较大, 约为 0.2‰, 发育脊状地貌形态, 这些脊状地貌高度小于 1 m, 剖面西南部显示为较平坦海底地形, 这表明中央地形区的东部海底是相对平坦的。剖面最浅与最深处相差 4 m [图 4(f)]。



(a) A-A'地形剖面

(a) Topographic profile of A-A'



(b) B-B'地形剖面

(b) Topographic profile of B-B'



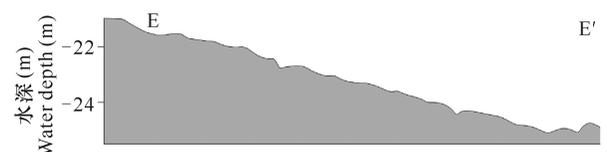
(c) C-C'地形剖面

(c) Topographic profile of C-C'



(d) D-D'地形剖面

(d) Topographic profile of D-D'



(e) E-E'地形剖面

(e) Topographic profile of E-E'



(f) F-F'地形剖面

(f) Topographic profile of F-F'

图 4 研究区海底地形剖面

Fig. 4 Submarine topographic profile in the study area

2.2 海底地貌分类及特征

根据地貌分类原则, 结合研究区所处水深和地貌

形态特征, 研究区一级地貌单元为大陆地貌, 二级地貌单元为陆架地貌、水下岸坡地貌, 三级地貌单元主要为陆架侵蚀洼地 (SH2)、平坦的陆架堆积平原 (SH10_a) 和海湾堆积平原 (CL16), 四级地貌单元发育有海底冲刷槽、侵蚀残留脊等 (图 5)。研究区的三级地貌单元是在不同的内外营力, 如潮流、波浪、沿岸流、风力等作用下形成的, 基本地貌形态类型较多, 因此下文内容主要针对三级地貌进行描述。

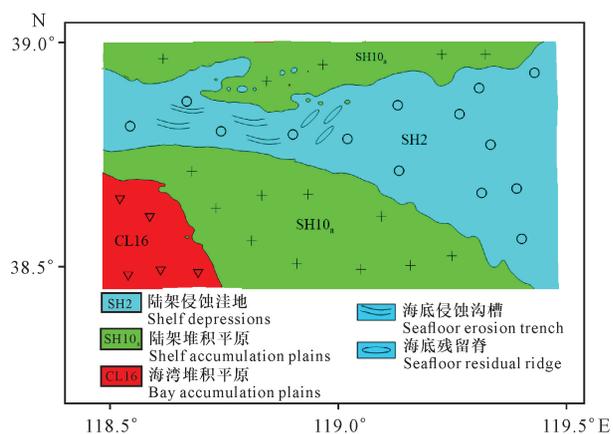


图 5 研究区海底地貌单元

Fig. 5 Submarine geomorphic unit in the study area

(1) 陆架侵蚀洼地 (SH2)。

研究区中部发育陆架侵蚀洼地, 水深明显较南北两侧区域深, 大部分区域水深大于 27 m, 且海底崎岖不平。在研究区西北部发育东西向侵蚀沟槽和数条自东北向西南向的脊状地貌, 表层沉积物主要为黏土质细砂^[13]。研究区北部是连接渤海中部海域盆地与渤海湾的主要通道, 发育有强流速的海流, 海流强力冲刷海底, 使得研究区的西北部形成了典型的侵蚀沟槽 (图 6)。研究区的脊状地貌应为西部曹妃甸东南侧的残留脊向东北的自然延伸部分^[2], 一般高出周围地形少于 1 m, 表现为与海流流向基本一致、宽缓的线性脊, 走向与等深线一致。北部的残留脊自东北向西南线性分布, 脊长约 10 km, 相对水深差 0.5 - 1 m。侵蚀洼地的平面呈现向东开口的喇叭形态特征, 因此, 在潮流向西涌入渤海湾时, 西侧及北侧潮流流速逐渐增大, 造成侵蚀洼地西北及西侧的侵蚀地貌。而东侧海底侵蚀相对来说并不明显, 但侵蚀洼地的全新世地层较薄, 相对于南北两侧来讲, 全新世沉积厚度向西北部逐渐变薄, 向东南增厚 (图 7)。浅地层剖面显示, 反射界面地层反射结构经常突然侧向消失,

上层地层多杂乱反射, 层理断续分布, 并且上层地层的大部分剖面无清晰沉积层理, 发育较少的现代海洋沉积, 向东北方向发育一个小型残留宽缓沙脊, 为研究区域西北部脊状地貌的延伸。

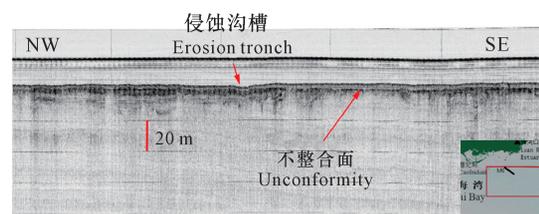


图 6 M6 测线浅地层剖面记录

Fig. 6 Record of M6 line shallow stratigraphic profile

陆架侵蚀洼地的形成与渤海古河系的流路有很大关系, 古滦河三角洲曾发育于研究区北部, 之后经过海平面变化及河流改道, 陆源输入急剧减少, 被埋入水下, 且受到潮流较强的侵蚀作用^[2]。另外, 古黄河及滦河经过多次改道, 在全新世海侵之前, 渤海中部发育多期河道, 在全新世海侵时, 海平面逐渐上升, 河道被掩埋成埋藏河谷, 之后在海侵过程中逐渐形成进入渤海湾的强潮流流路^[14], 强潮流对海底进一步的冲刷更促进了洼地的形成。因此, 古地貌和现代潮流作用是该洼地地貌形成的重要原因。

(2) 陆架堆积平原 (SH10_a)。

研究区南部为渤海陆架堆积平原的一部分, 水深 22 - 26 m, 地形较平坦, 坡度 0.13% - 0.14%, 其东南侧在水深 22 m 等深线处与渤海中部堆积平原相接, 西南侧及南侧与黄河三角洲外缘相接, 西侧与渤海湾堆积平原相邻, 北侧与陆架洼地相接。陆架堆积平原表层主要为松散的泥质沉积, 属于渤海泥质区的一部分, 主要受到渤海沿岸河流特别是源自黄河的沉积物堆积作用的影响, 全新世沉积层厚度大于 4 m。历史上滦河、黄河多次在南、北两侧入海, 沉积大量细粒泥沙, 海底被泥质沉积物覆盖, 该区沉积物特征与黄河物质极为相似^[15]。该区域目前仍接受滦河、黄河等河流和陆源物质沉积, 受波浪及潮汐作用影响, 西南侧部分发育侵蚀地貌。从调查资料可见, 海底表层沉积物主要为泥质沉积物, 厚度由南向北逐渐减薄, 至渤海中部陆架侵蚀洼地尖灭, 而且靠近南侧受黄河入海物质的影响, 沉积层增厚, 沉积物粒度也增粗, 出现相应沉积层 (图 8、图 9)。

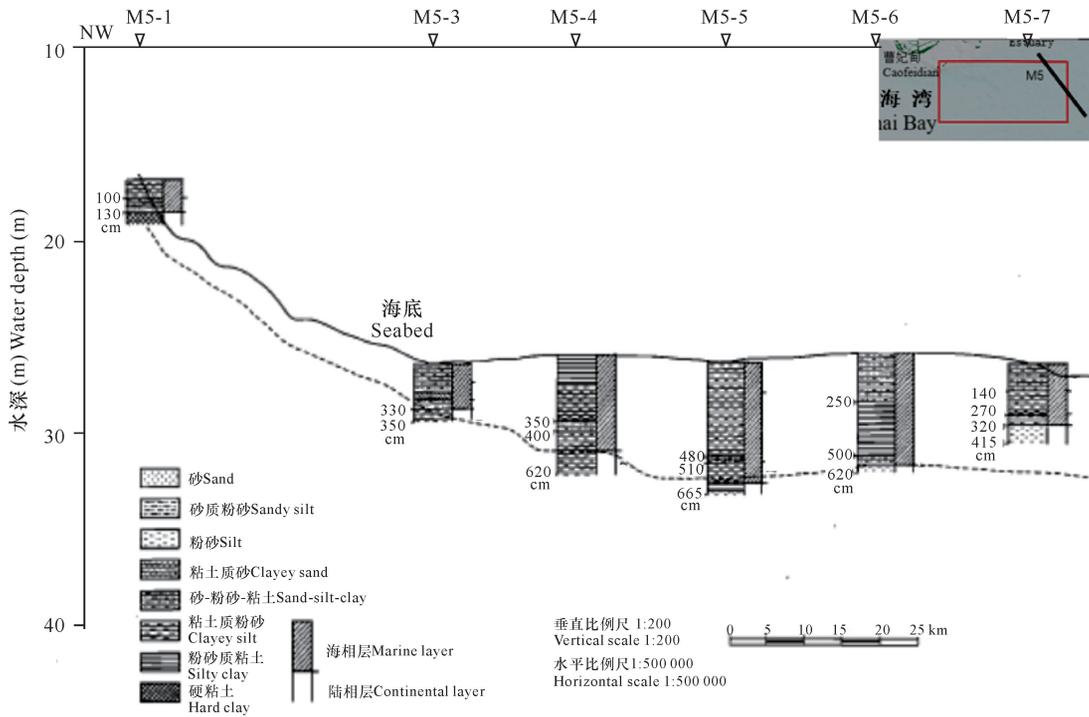


图7 M5剖面沉积地层与岩性、沉积相对比图(引自:中国科学院海洋研究所课题组内部历史资料)

Fig. 7 Contrast map of sedimentary strata, lithology and sedimentation of M5 section (Quoted from the internal historical data of the research group, CAS)

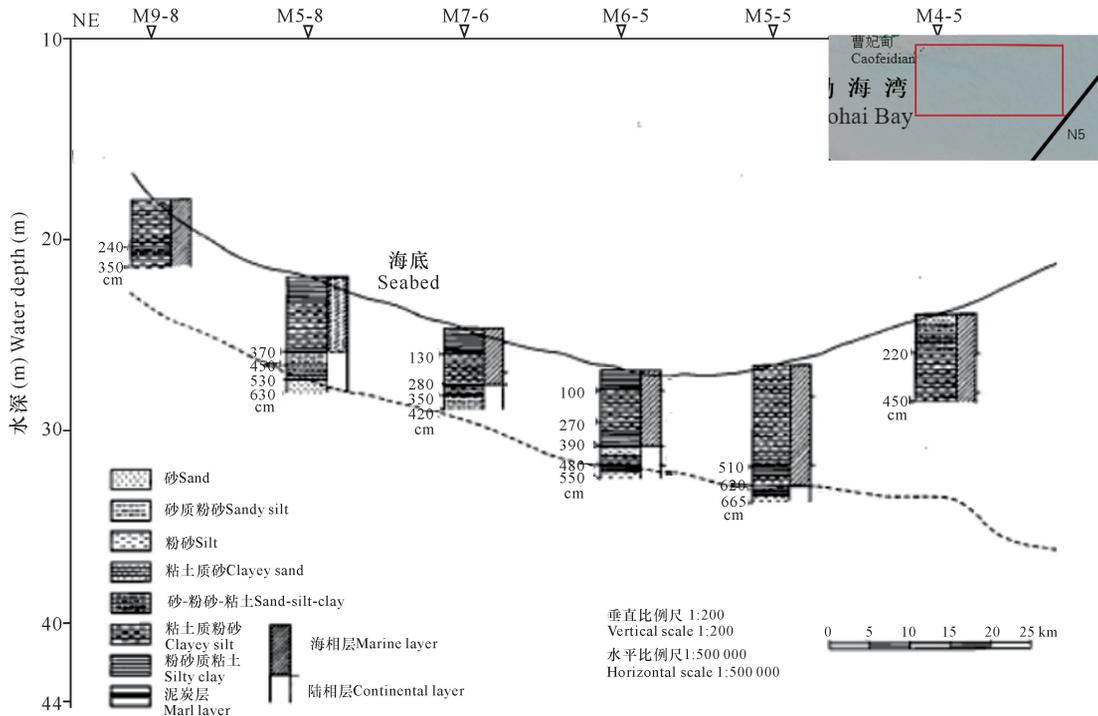


图8 N5剖面沉积地层与岩性、沉积相对比图(引自:中国科学院海洋研究所课题组内部历史资料)

Fig. 8 Contrast map of sedimentary strata, lithology and sedimentation of N5 section (Quoted from the internal historical data of the research group, CAS)

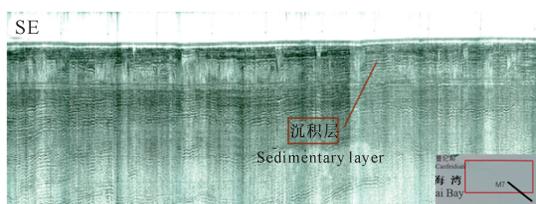


图9 M7测线浅地层剖面记录

Fig. 9 Record of M7 line shallow stratigraphic profile

整个研究区除了南部的陆架堆积平原, 浅洼地的北侧也表现为以砂-粉砂-黏土沉积物为主的陆架堆积平原地貌类型^[11], 浅洼地北侧水深小于 24 m, 相对平坦, 北部陆架堆积平原的北侧与水下岸坡相邻, 南部与陆架浅洼地侵蚀区域连接。以古滦河河道及三角洲塑造的地形地貌为基础, 在现代滦河河流物质大量沉积的基础上, 接受远岸黄河物质甚至海河物质的输入, 同时伴随着海平面上升过程中潮流动力作用的持续, 最终塑造成研究区北部的陆架堆积平原地貌。

陆架堆积平原所对应的构造单元为渤中坳陷南部的断陷部位^[13]。中生代以后, 该部位基本处于下沉过程, 从早中第三纪以来逐渐形成盆地地形, 也是对应的沉积中心, 沉积第三纪湖相沉积物和第四纪海相、陆相沉积物, 进入第四纪全新世以来, 海底环境仍以沉积作用为主^[16]。

(3) 海湾堆积平原 (CL16)。

研究区西部为水下岸坡地貌^[13], 靠近渤海湾, 表现为海湾堆积平原, 沉积环境相对稳定, 潮流作用较弱, 海底沉积环境以堆积作用为主。接受沿海岸河、滦河、黄河等大量泥沙输入。全新世沉积厚度 5-10 m, 水深较浅, 大约在 20 m, 地貌类型比较简单。黄河携带的物质到达该区域后逐渐向外扩散, 沉积物类型主要为淤泥质粉砂^[11]。黄河带来的巨量泥沙在渤海湾和渤海中部海底地貌的塑造中具有非常重要的作用。

3 讨论

地质构造运动、海平面变化、古河系、现代潮流水动力以及沉积物的共同作用, 控制着渤海海岸和海底地貌形态组合与演变^[13]。本次研究区内古河系的影响作用相对较小, 下文着重讨论主要影响因素。

3.1 地质构造运动

大地构造决定了我国现代海陆格局、海岸轮廓与海岸类型^[17]。研究区所处的渤海位于华北坳陷区北段, 它与辽河平原、华北平原和淮河平原共同组成华

北坳陷。四周分别为燕山褶皱带、太行山及太行山前断裂带、胶辽隆起带、秦岭-大别造山带等构造单元所围限^[18]。整个坳陷区从中生代开始发育, 由中生代部分沉积岩层缺失可见, 中生代时渤海周围大部分地区曾为上升隆起区。进入新生代以来, 渤海开始下沉, 中早第三纪开始, 渤海沿东北向北东陷落成为内陆盆地, 形成 2 000-3 000 m 的湖相沉积^[19]。渤海海底整体地貌是在此基础上发育起来的, 因此岸线轮廓和海底地貌的格局受东北向北东构造的控制, 整体为一个东北向浅海堆积平原。

3.2 海平面变化

渤海盆地自早第三纪就有海水入侵的记录, 进入第四纪更新世以来, 更是发生多次海进与海退, 渤海海域在此期间多次出露为陆, 又多次被海水淹没, 出现数次海陆交替^[20], 因而引起海底地层结构、水动力条件、物质来源和沉积环境的显著变化。

在玉木冰期期间, 海平面曾降到现代海平面以下一百多米, 渤海海域全部出露为陆^[21], 形成堆积平原和盆地地貌。古黄河由渤海湾入海, 经渤海中部的低洼地带和渤海海峡进入黄海^[22], 在渤海湾湾口形成了近东西向河谷, 该河谷也是后期渤海湾曹妃甸南侧深槽形成的构造基础。冰期结束后, 海水重新进入渤海, 并形成新的潮流系统, 渤海海峡、曹妃甸南侧谷底也成了潮流进出的通道。在潮流的冲刷作用下, 原来的河谷被进一步冲刷变深, 形成了目前的曹妃甸南侧深槽, 而曾经为古黄河流路的渤海中部洼地在海水进入后形成了陆架侵蚀洼地。全新世以来, 陆架堆积平原主要接受黄河、海河、滦河等物源物质沉积, 形成了 4 m 左右的现代沉积, 浅洼地内全新世沉积厚度部分小于 4 m, 沉积物主要成分为高塑性黏土。

3.3 现代海洋水动力

海面稳定后, 沿岸径流、入海河流、沿岸流及潮流、波浪等现代水动力的共同作用成为塑造海岸带和海底地貌的重要动力^[17], 水动力作用塑造的海底地貌既有规模宏大的陆架潮流沙脊、潮流冲刷深槽, 又有尺度相对较小的沙波、沙纹。尤其在近岸, 多种类型水动力共同作用下, 容易形成丰富多样的海底地貌景观。在渤海地区, 水动力作用对地貌的塑造非常普遍, 临近研究区西北外侧的曹妃甸冲刷深槽是强水动力作用形成的典型动力地貌, 由于研究区西北部的近东西向侵蚀地貌及残留脊是曹妃甸冲刷槽的自然延伸^[2], 因此也是潮流作用的结果。潮流对海底的冲刷在潮流作用力与海底沉积物沉积作用达到平衡后会

停止对海底的侵蚀,此时潮流动力地貌也会进入相对稳定的阶段,当区域水动力条件改变,打破原来的冲淤平衡时,相应地貌形态也会随着发生变化。

3.4 沉积物的作用

渤海中部为粉砂质平原,沉积物分布呈现极强的条带状区域分异性,且由渤海中央向两侧,沉积物颗粒逐渐变细,沉积类型主要有黏土质粉砂、砂质粉砂。砂的含量相对较低,平均在26%,砂粒分选中等至差,主要是黄河入海携砂和黄海暖流余脉携带的细粒沉积物以悬移的方式,经过长途搬运共同沉积在本区。渤海湾北部区域沉积物以细颗粒为主,黏土质粉砂是海区的主要沉积物类型,粉砂和砂质粉砂呈斑块状分布在黏土质粉砂区。砂的含量相对较低,多数小于20%,分选性差,区域物质来源多样性影响沉积物的粒径均一性。

渤海绝大部分海域年均冲淤量处于动态平衡状态^[23]。渤海中部和渤海海峡东部是细颗粒泥沙的主要沉降区,数值模拟表明渤海中部沉积厚度可达0.2 cm,而渤海海峡东部沉积厚度较之渤海中部还厚,最厚处约为0.4 cm^[22]。辽东湾、渤海湾、清水口南部小部分区域及渤海海峡北部都是潮流较强的海域^[22]。入海河流每年为测区带来大量陆源物质沉积,多达数亿吨。其中大部分用于河口尾间、三角洲建造、平原海岸的下沉补偿^[4]。由此表明,沉积物对渤海中部的地形塑造具有重要作用,它直接改变地形地貌的轮廓和规模。渤海沉积物有向渤海中部汇聚和沿山东半岛向北黄海扩散的趋势^[24]。黄河携带的沉积物运输方向主要为东和东北方向,沉积物最远到达渤海中部海域及东部海域,在渤海中部海域北部地区和南部地区沉积物淤积,导致渤海中部海域地区南北起伏较大,地形较高,中间凹陷。在黄河入海以及黄海暖流的作用下,沉积物有向中部海域输送的趋势,凹陷可能会逐渐变浅。

4 结论

通过对研究海区高精度地形地貌数据、浅地层剖面数据和沉积物样品的测试分析数据等多源数据进行融合处理和综合分析,确定了研究区地形地貌特征及发育控制因素。研究区海底地形呈现中间低、南北两侧高,西浅东深、东宽西窄的形态。研究区北部地形起伏明显,南部总体上较为平缓,无较大地形地貌,西侧发育有冲蚀槽,东侧则较为平缓,没有特殊地形发育。

研究区地貌单元主要为陆架侵蚀洼地、陆架堆积平原、海湾堆积平原。陆架侵蚀洼地位于研究区中部,其形成与渤海古河系及现代潮流侵蚀作用有直接的关系。陆架堆积平原主要位于研究区北部和南部,地形较平坦,主要受渤海沿岸河流沉积物的堆积作用影响。海湾堆积平原位于研究区西部,受控于泥沙等沉积物的堆积作用。根据调查研究,地质构造运动、海平面变化、现代海洋水动力以及沉积物的共同作用,是塑造近代海底地貌的主要动力。

参考文献

- [1] 高祥林. 渤海中部郟庐断裂带的近期活动与渤海新近纪新生断裂[J]. 地质科学, 2006(2): 355-364.
- [2] 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.
- [3] 李近元, 范奉鑫, 徐涛, 等. 莱州湾东部沙波地貌分布特征及其形成演化[J]. 海洋科学, 2011, 35(7): 51-54.
- [4] 栾振东, 李泽文, 范奉鑫, 等. 渤海辽东湾区海底地形分区特征和成因研究[J]. 海洋科学, 2012, 36(1): 73-80.
- [5] 周心怀, 张如才, 李慧勇, 等. 渤海湾盆地渤中凹陷深埋古潜山天然气成藏主控因素探讨[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2017, 41(1): 42-50.
- [6] 陈义兰, 吴永亨, 刘晓瑜, 等. 渤海海底地形特征[J]. 海洋科学进展, 2013, 31(1): 75-82.
- [7] 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.
- [8] 周星源, 彭艳菊, 方怡, 等. 渤海海域软土层土对地震动参数的影响研究[J]. 震灾防御技术, 2021, 16(1): 91-104.
- [9] 徐珊珊, 杨锦坤, 武双全, 等. 渤海中部海域表层潮流和余流特征分析[J]. 海洋通报, 2017, 36(2): 128-134.
- [10] 李斐. 渤海海域潮流及潮流的数值模拟[D]. 天津: 天津大学, 2009.
- [11] 刘晓瑜, 董立峰, 陈义兰, 等. 渤海海底地貌特征和控制因素浅析[J]. 海洋科学进展, 2013, 31(1): 105-115.
- [12] 蒋超. 黄河口动力地貌过程及其对河流输入变化的响应[D]. 上海: 华东师范大学, 2020.
- [13] 徐晓达, 曹志敏, 张志珣, 等. 渤海地貌类型及分布特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2014, 34(6): 171-179.
- [14] 程丽玉, 胥勤勉, 郭虎, 等. 滦河三角洲晚全新世地层和演化过程[J]. 第四纪研究, 2020, 40(3): 751-763.
- [15] 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(海洋研究所), 2007.

- [16] 张训华. 中国海域构造地质学[M]. 北京: 海洋出版社, 2008.
- [17] 中国科学院海洋研究所海洋地质研究室. 渤海地质[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [18] 薛永安, 吕丁友, 胡志伟, 等. 渤海海域隐性断层构造发育特征与成熟区勘探实践[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(2): 233-246.
- [19] 王祥东. 晚更新世以来现行黄河口地区沉积环境演变[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- [20] 袁文芳, 陈世悦, 曾昌民. 渤海湾盆地古近纪海侵问题研究进展及展望[J]. 沉积学报, 2005(4): 604-612.
- [21] 陈晓辉, 李日辉, 蓝先洪, 等. 渤海西部晚第四纪地层层序特征及沉积响应[J]. 地球科学, 2020, 45(7): 2684-2696.
- [22] 季有俊, 杨作升, 王厚杰, 等. 最大海侵时期古渤海潮流沉积动力环境特征及其与现今对比[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2011, 31(3): 31-39.
- [23] 宋玉鹏, 孙永福, 杜星, 等. 渤海海域海底地质灾害危险性区划[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(3): 140-146.
- [24] 马晓红, 韩宗珠, 艾丽娜, 等. 中国渤黄海的沉积物源及运输路径研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2018, 48(6): 96-101.

Analysis of Seabed Topographic and Geomorphologic Features and Influencing Factors in the Middle Area of Bohai Sea

WANG Haosen^{1,2}, ZHANG Jianxing^{1,3}, SONG Yongdong^{1,3}, ZHUANG Lihua^{1,3},
LUAN Zhendong^{1,2,3}, YAN Jun^{1,3}

(1. Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, CAS, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, Shandong, 266071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China; 3. Center For Ocean Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, Shandong, 266071, China)

Abstract: The central waters of Bohai Sea is located in the intersection of the three bays (Bohai Bay, Laizhou Bay, Liaodong Bay), with a long history of formation and evolution, multiple sediment sources and rich geological information. Based on the high-precision topographic and geomorphologic data, shallow stratigraphic profile data and test analysis data of sediment samples collected over the years, this study finely described the topographic and geomorphologic features of the seabed in the central Bohai Sea, and analyzed its influencing factors. The research shows that the seabed topography of the central Bohai Sea is generally low in the middle and high on the north and south sides. The topography of the northern region is complex, and the southern region is relatively flat. According to the characteristics of submarine geomorphology, the submarine geomorphologic units in the study area are divided into shelf erosion depression, shelf accumulation plain and bay accumulation plain. Geomorphology is the result of the combined action of regional geological tectonic movements, sea level changes, modern marine hydrodynamics, and sediment sources. Studying the topographic and geomorphologic features of the seabed in the central Bohai Sea is helpful to deepen the understanding of the evolution of its geological structure, and is of great significance to the construction of marine engineering, the development of marine pastures, the utilization of marine resources and the development of marine economy.

Key words: central Bohai Sea; multi-beam; submarine topography; type of landforms; characteristics of distribution

责任编辑: 梁 晓