冯永财,曹斌华,褚宏宪,等. 渤海湾曹妃甸深槽断面监测研究进展[J]. 海洋地质前沿, 2023, 39(8): 78-83. FENG Yongcai, CAO Binhua, CHU Hongxian, et al. Research progress on monitoring of trough section in Caofeidian, Bohai Bay[J]. Marine Geology Frontiers, 2023, 39(8): 78-83.

渤海湾曹妃甸深槽断面监测研究进展

冯永财,曹斌华^{*},褚宏宪,陈玉海,冯兵辉,黄杏 (中国地质调查局烟台海岸带地质调查中心,烟台 264000)

摘 要:通过研究曹妃甸海区 2021 年实测水深和浅地层剖面资料,结合 2004、2008 和 2013 年 历史资料,在区域和深度上对曹妃甸深槽海底地形进行动态对比。研究发现,深槽南侧海底 冲刷作用较强烈,局部冲-淤速率最大可达-65 cm/a,这种现状有利于维持深槽水深,深槽轴线 移动不明显,但 35 和 40 m 等深线均有南移趋势,最大外移距离约 1 000 m。深槽地貌形成是 海洋水体潮流水动力、古滦河三角洲演变和地质构造等内外营力综合作用的结果,结合浅地 层剖面对比分析发现,深槽底部缺失全新世晚期海相沉积层,海底出现新的滑塌和侵蚀洼地 等海洋地质灾害,对曹妃甸港带来一定的安全隐患,应加强深槽监测工作。

关键词:曹妃甸;深槽;水深;地形;冲刷;渤海湾

中图分类号:P736 文献标识码:A DOI:10.16028/j.1009-2722.2022.088

0 引言

曹妃甸工业区位于曹妃甸区最南端,由之前 NE-SW向带状沙岛填海造陆形成,在曹妃甸岛以 南海域,距曹妃甸码头约 500 m 处为曹妃甸深槽 (图 1)。深槽海域海底具有较为复杂的地形和地 貌特征,为现代动力地貌,前人将深槽附近海域海 底地貌划分为 3 个体系单元,由东向西分别为老龙 沟潟湖、曹妃甸深槽和南堡海岸地貌体系单元^[1]; 深槽地貌由浅滩和深槽2 个部分组成,走向呈近 EW 向,位于渤海海域最深处,2004 年以来曹妃甸 开始吹填施工建设,改变了周边海洋环境动力边界 条件,引起了周边海域泥沙冲淤变化^[2]。陆永军等^[34] 从理论角度论述地貌和水沙运动特征,并对深槽区 域海流进行数值模型计算,发现工程建设导致曹妃 甸甸头海流流速有所增加;分析海岸体系形成发育

收稿日期: 2022-03-31

资助项目:中国地质调查局项目(DD20211553,DD20230073,DD20230412); 国家自然科学基金(41276060);自然资源综合调查指挥中心科技创新基 金(KC20220011)

作者简介: 冯永财(1986一), 男, 硕士, 高级工程师, 从事海洋区域地质调查方面的研究工作. E-mail: fyc1107@163.com

*通讯作者:曹斌华(1983-),男,硕士,高级工程师,从事海洋测绘与海 洋地质调查方面的研究工作.E-mail: caobinhua2019@163.com 过程,滩槽长期稳定性的变化趋势,认为甸头前沿 深槽以冲刷为主,海床冲淤基本达到平衡状态。季 荣耀等^[5] 探讨了曹妃甸深槽形成机制,指出曹妃甸 深槽长期以微冲刷为主,2004年以后工程建设对其 冲淤演变有一定影响,之后再次转变成微冲刷,深 槽冲淤基本平衡。2008年青岛海洋地质研究所调 查发现,在曹妃甸甸头南侧海底出现滑塌和泥流等 海底地质灾害,此处斜坡较陡,为地质构造不稳定 区^[6]。2021年烟台海岸带地质调查中心开展地球 物理调查发现,深槽底部仍有新的海底滑塌和侵蚀 洼地等海底地质灾害发生,说明深槽斜坡区域可能 存在不稳定因素。前人多项研究发现海底冲淤、泥 沙输运受到了潮汐、潮流、海浪等海洋动力作用控 制^[6-8],对海底地形地貌变化影响较大,区域上的风 暴潮、地震作用易引发海底滑坡等地质灾害^[9-10],威 胁曹妃甸港区安全。由此可见,在曹妃甸深槽海区 开展海岸地貌、深槽地貌、海洋水动力以及深槽断 面监测,对深槽冲淤及边坡稳定评价具有重要的指 导意义。

1 资料及方法

资料主要来源于研究区以往调查研究资料和最 新调查数据,主要包括 2004、2008、2013 和 2021 年 4 期调查数据。2004 年水深数据为曹妃甸填海施





工前的水深图,2008和2013年为青岛海洋地质研 究所实测数据,2021年为烟台海岸带地质调查中心 曹妃甸项目实测数据。

主要工作方法包括水深地形测量、浅地层剖面 测量、潮位观测等方法。受海况及船体起伏影响 会出现 0.3~0.6 m 甚至更大的数据偏差,因此在 2021 年之前的水深测量施工中配置了涌浪滤波器, 用于记录船体起伏等姿态数据,水深数据经涌浪处 理后测量精度可达到厘米级^[11-12],能够满足海底水 深地形测量的精度需要。2021 年,曹妃甸项目外业 调查首次将 IPOS 惯性导航技术应用于参量阵浅地 层剖面测量,用于减小波浪引起的船横摇、纵摇、升 沉误差,以提高海底水深和浅地层剖面的测量精度, 优化效果明显,使水深测量和浅部地层分辨率精度 均达到厘米级。外业现场采用声速仪准确测定海 水声速,利用实测潮位站数据进行潮汐改正,水深 基准采用统一标准的曹妃甸当地理论深度基准面。

通过对区域性和典型深槽断面多期海底地形 数据变化的对比分析,结合 2021 年同步浅地层剖 面解释成果,综合分析研究海底地形地貌变化原因。

2 海底地形变化

为研究海底地形变化趋势,对比研究 2021 年 曹妃甸深槽部位实测水深数据与历史数据,分析深 槽海底冲-淤变化,研究等深线变化趋势;在深槽部 位分别横切深槽和沿深槽轴线布设 N-S和W-E 向2条剖面进行新老数据对比研究,立体化展现海 底地形变化趋势,剖面位置见图2。两剖面交点位 于深槽区水深最深点处。

2.1 区域性地形变化分析

对比分析曹妃甸深槽海域新老水深线变化,绘制等深线变化平面图(图 3)。图中可看出,深槽海域新老等深线形态变化不大, <30 m 等深线基本保持原来状态, 35 和 40 m 等深线面积有较大增加,两者相比, 35 m 等深线面积增加率较大,具体变化情况见表 1。

2013-2021年,近8年间35m等深线面积增加了90%,北侧35m等深线变化不大,南侧35m 等深线向南最大外移约1000m;40m等深线面积 增加了75%,表明2013-2021年深槽部位的侵蚀量 较大,面积扩大约89%,同时验证了曹妃甸深槽目 前处于冲刷环境。基于2021年实测数据分析发现, 最大水深值变化不大,2013年测量最大水深值为 42.2m,2021年测量最大水深值为42.3m,原因可 能是全新世晚期地层被冲刷殆尽,现保存地层推测 为全新世中期^[13]相对密实地层,附近采用箱式取 样器采取表层沉积物多次采集失败或取样量极少, 取得沉积物较硬,说明沉积物密实度较大。





表1 各时期等深线面积

 Table 1
 Isobath area in each time period

		km ²
统计年份	35 m等深线面积	40 m等深线面积
2004年	3.26	0.06
2008年	3.80	0.08
2013年	4.15	0.40
2021年	7.90	0.70
2004—2013年增加面积	0.89	0.34
2013-2021年增加面积	3.75	0.30

注:2004、2008、2013年等深线面积数据来源于文献[1]。

2.2 N-S 向横切曹妃甸深槽的地形剖面对比

N-S向剖面长度 6 000 m, 从图 4上可以看出, 2013-2021 年以来 N-S向剖面整体上以冲刷为主, 距剖面起点 1 200~1 800、3 400~3 800 m 处有轻微 淤积, 淤积速率+0.9~+14.8 cm/a。深槽海域整体以 冲刷为主, 对比 4 期水深数据发现, 2013 年以前海 底地形变化不大, 2013-2021 年期间局部海底地形 变化较大, 分别位于距起点 2 400、4 800 和 5 600 m 位置, 海底水深变化较大, 近 8 年冲刷深度分别达 到 1.8、2.7 和 5.2 m。图 5 可看出, 对应年冲刷速率 较大, 分别达到-23.0、-35.3 和-65.0 cm/a。总体上, 在水深>35 m 区域冲刷较为严重, 说明曹妃甸深槽 轴线在工程建设后基本稳定, 但有向南侧迁移趋势, 南坡冲刷幅度大于北坡。



图 4 2004-2021 年 N-S 向地形剖面实测水深变化 Fig.4 Variation in water depth measured in N-S direction from 2004 to 2021



图 5 2004-2013 年与 2013-2021 年 N-S 向剖面 平均冲-淤速率对比

Fig.5 Comparison in erosion-siltation rate in N-S direction between 2004-2013 and 2013-2021

2.3 W-E 向沿曹妃甸深槽轴线的地形剖面对比

W-E向剖面长 7 300 m, 从图 6 可以看出, 2013-2021 年, 沿深槽轴线方向整体上以冲刷为 主, 距离剖面起点 4 200~5 200 m 处有轻微淤积, 淤积速率+0.6~+5.9 cm/a; 断面其他部位均以冲刷 为主, 冲刷幅度变化较大, 冲-淤速率变化范围-4.1~ -51 cm/a, 深槽底部冲-淤速率<-4.6 cm/a; 冲刷剧 烈的位置为起点和离起点 3 200 m 处, 近 8 年冲刷 侵蚀深度是 4.08 和 3.42 m, 最大侵蚀达 4 m 以上。 由图 7 可看出, 在 2 100~2 400 m 处, 近 8 年相比 2013 年之前 10 年, 冲-淤速率减小, 但仍然处于冲 刷状态。整体来看, 其两侧冲刷严重, 深槽底部冲 刷较轻, 东侧中部边坡处于轻微淤积状态。



图 6 2004、2013 和 2021 年 W-E 回地形剖面 实测水深变化

Fig.6 Variation in water depth in W-E direction in 2004, 2013, and 2021



图 7 2004-2013 年与 2013-2021 年 W-E 向剖面 平均冲-淤速率对比



3 地形地貌变化原因分析

曹妃甸海域是全新世滦河入海处^[14],古滦河长 期向海输送泥沙,并经受潮汐和波浪等作用形成沙 坝,曹妃甸工业区即在此基础上围填海而形成。曹 妃甸深槽所处地理位置特殊,形成发育受地质构造 和水下河谷作用影响^[15],特殊的地形和岬角地貌特 征导致深槽海域潮流水动力增大,对深槽冲刷作用 增强,古滦河改道北移、入海泥沙减少,是长期维持 深槽水深的重要因素。2004年以后人工围填海工 程导致海岸形态及地貌结构变化,影响了水动力、 泥沙、生物等环境,改变了曹妃甸海域生态环境特 征^[16];曹妃甸深槽和南堡深槽海域海流流速略有增 加,有利于维持深槽水深,曹妃甸港区东部浅滩海 流流速减小,出现轻微淤积,不利于维持浅滩水深^[4]。 2004-2005年,由于围填海施工导致海水中泥沙含 量增高,致使深槽区域及东部浅滩出现淤积,之后 随着泥沙来源的减少,深槽区域在此转变为冲刷为 主的状态,在施工后的3年内深槽冲-淤基本达到动 态平衡^[5,8]。但从目前最新调查数据来看,深槽海域 海底冲-淤还未达到动态平衡。总之,地质构造、古 滦河三角洲演变是曹妃甸深槽形成的深部驱动力, 人类活动和海洋水动力作用是控制海底地貌变化 的外部驱动力。

通过对 2004-2021 年 4 期水深地形历史数据

对比分析发现,深槽海域局部侵蚀加剧,2013年之前变化不大,2013-2021年期间海底水深局部变化较大。为了探索地形变化的根源,研究分析了同步浅地层剖面数据,发现深槽海域出现了新的海底滑塌和侵蚀洼地(图8),实测浅地层剖面变化与水深变化具有较好的对应关系,这也验证和解释了海底水深地形变化的原因。初步预测潜在地质灾害主要为海底滑塌和侵蚀洼地,海底滑塌主要发生于深槽南坡约35m水深区域,侵蚀洼地主要发生于深槽南坡约30m水深区域。



图 8 水深变化与浅地层剖面对比

Fig.8 Water depth in different years and the comparison with that by seismic shallow profiling

4 结论

(1)本研究以点面结合、浅深结合,开展曹妃甸 深槽区域和深度上的地形地貌对比研究,通过多期 水深地形变化的表象,探究其深部成因,发现海洋 水体潮流水动力、海底浅部地层和地质构造等综合 控制海底地貌。

(2)对比分析 2004-2021 年 4 期实测水深资料, 深槽海域等深线变化不大,形态基本保持不变, 2021 年调查发现曹妃甸深槽仍然处于为冲刷状态, 深槽轴线略微向南迁移。近 8 年数据对比显示, 35 m 等深线南段向南最大外移约 1 000 m,等深线 面积增加 90%, 40 m 等深线面积增加 75%,曹妃甸 深槽冲-淤速率最大达到-65 cm/a。

(3)通过研究曹妃甸海域 2021 年实测资料, 对 比 2004、2008 和 2013 年历史资料, 精细刻画深槽 区海底浅部地层结构。研究发现, 近年来深槽海域 出现了新的海底滑塌和侵蚀洼地等地貌。深槽部 位的侵蚀量最大, 2013-2021 年期间局部侵蚀最大 达 4 m, 深槽两侧沉积层较发育, 深槽海底地层凹陷 且崎岖不平, 顶部缺失全新世晚期海相沉积层, 以 侵蚀冲刷为主, 仍处于冲刷环境, 有利于维持深槽 水深。

参考文献:

- 諸宏宪, 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.
- [2] 褚宏宪,李强,王文辉,等.曹妃甸浅海人工岛工程海底泥沙冲 淤[J].海洋地质前沿,2013,29(6):37-43.
- [3] 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.
- [4] 陆永军, 左利钦, 季荣耀, 等. 渤海湾曹妃甸港区开发对水动力 泥沙环境的影响[J]. 水科学进展, 2007, 18(6): 793-800.
- [5] 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.
- [6] 方中华.曹妃甸甸头深槽灾害地质因素研究及稳定性分析[D]. 青岛:中国海洋大学, 2014.
- [7] 吴澎,姜俊杰.曹妃甸港区选址研究[J].水运工程,2011,9:68-74.
- [8] 陆永军,季荣耀,左利钦,等.海湾型潮汐通道中大型深水港开 发的水沙问题研究[J].水利学报,2007,38(12):1426-1436.
- [9] 褚宏宪, 方中华, 史慧杰, 等. 曹妃甸海底深槽斜坡稳定性分析 与评价[J]. 海洋工程, 2016, 34(3): 114-122.
- [10] 褚宏宪,方中华,史慧杰,等. Newmark位移分析方法在海底斜 坡地震稳定性评价中的应用[J].海洋地质前沿,2017,33(6): 53-58.
- [11] 褚宏宪, 史慧杰, 杨源, 等. 利用涌浪滤波器提高水深测量精 度的实践[J]. 海洋测绘, 2010, 30(4): 51-53, 62.
- [12] 褚宏宪,周小明,史慧杰,等.水深测量误差分析与改正[J].物 探与化探,2011,35(3):358-363.
- [13] 王艳. 渤海西北岸曹妃甸地区晚更新世末期以来古环境恢复[J]. 黄渤海海洋, 2000, 18(3): 47-53.

[15]

[14] 李从先,陈刚,王利. 滦河废弃三角洲和砂坝: 泻湖沉积体 系[J]. 沉积学报, 1983, 1(2): 60-72.

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.

[16] 索安宁, 张明慧, 于永海, 等. 曹妃甸围填海工程的海洋生态 服务功能损失估算[J]. 海洋科学, 2012, 36(3): 108-114.

Research progress on monitoring of trough section in Caofeidian, Bohai Bay

FENG Yongcai, CAO Binhua^{*}, CHU Hongxian, CHEN Yuhai, FENG Binghui, HUANG Xing (Yantai Center of Coastal Geological Survey, China geological survey, Yantai 264000, China)

Abstract: Based on the bathymetric data measured in 2021 and seismic shallow profiling in Caofeidian sea area, Bohai Bay, and combined with the historical data of 2004, 2008 and 2013, the evolution in topography of Caofeidian trough was studied in terms of regional scale and water depth. Results show that the south side of the trough has been strongly scoured, and the maximum local erosion-siltation rate was -65 cm/a, which is good to maintaining the depth of the trough, and the axis movement of the trough is not obvious, except that the 35 and 40 m isobaths had a southward shifting trend, and the maximum distance of displacement was about 1000 m. The formation of the trough geomorphology is the result of the comprehensive action of internal and external forces such as tidal current hydrodynamic force, evolution of ancient Luanhe River delta and geological structure. Combined with the seismic shallow profiling, we found that the late Holocene marine sediments were missing but newer geological disaster deposits such as slumping at the bottom of the trough, forming erosional depression in the sea bottom, which may be a risk to the Caofeidian Harbor. Therefore, close monitoring to the trough shall be strengthened.

Key words: Caofeidian; trough; water depth; topography; erosion-siltation; Bohai Bay