

曹妃甸深水大港滩槽稳定及工程效应研究

陆永军^{1,2}, 季荣耀^{1,2}, 左利钦^{1,2}

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 水文水资源及水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要: 曹妃甸是渤海唯一不需要开挖航道和港池即可建设 30 万 t 级大型泊位的天然港址. 该深水大港滩槽及潮沟为一个整体, 自然条件下能否长期稳定是关注的焦点, 只有稳定才能建港. 本文简述了曹妃甸近岸海区地貌及水沙运动特征, 从海岸体系的形成发育过程出发, 分析了滩槽长期稳定性的变化趋势. 近期接岸大堤、港区围填与码头建设等工程效应的分析表明, 甸头前沿深槽以冲刷为主, 规划方案实施两至三年后工程引起的甸头前沿海床冲淤基本达到平衡状态.

关键词: 滩槽演变; 动力地貌; 稳定性; 深水大港; 曹妃甸; 渤海湾

中图分类号: TV148:U651

文献标识码: A

文章编号: 1009-640X(2009)04-0033-14

曹妃甸地处渤海湾湾口北侧, 介于天津新港和京唐港之间(见图 1), 西距塘沽 70.4 km, 东北距京唐港约 61.6 km. 未开发之前, 曹妃甸岛原为 NE-SW 向的带状沙岛, 距离大陆岸线约 18 km, 在平均海平面以上沙岛长约 8 km, 宽约 1 km. “面向大海有深槽, 背靠陆地有滩涂”是曹妃甸最明显的特征和优势, 为大型深水港口和临港工业的开发建设提供了得天独厚的条件.

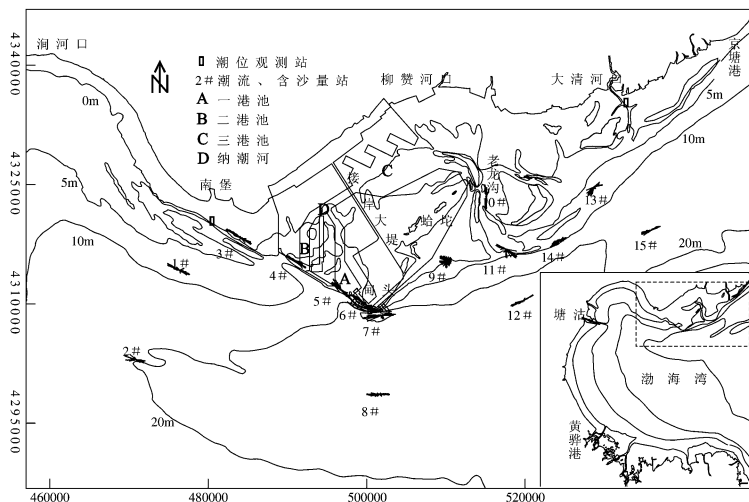


图 1 渤海湾曹妃甸港区位置、水文测点布置、大潮流速矢量及港区规划示意图

Fig. 1 Layout of the observing stations, vector diagram of flow velocities and the proposed scheme in the Caofeidian sea area

曹妃甸前沿 30 m 水深岸线长达 6 km 且不冻不淤, 是渤海唯一不需要开挖航道和港池即可建设 30 万 t

收稿日期: 2009-10-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50879047, 50779037)

作者简介: 陆永军(1964-), 男, 江苏南通人, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事河流海岸泥沙研究.

E-mail: yjlu@nhri.cn

级大型泊位的“钻石级”天然港址;曹妃甸岛后方与大陆岸线之间有 450 km^2 的广阔滩涂,可为临港产业布局和城市的开发建设提供足够的用地.曹妃甸建设深水大港及临港产业区不仅具有得天独厚的资源优势,而且处于环渤海经济圈前沿,区位优势十分明显.曹妃甸港区的开发建设,既能消除我国北方地区能源、原材料瓶颈制约,又可提升环渤海地区港口的布局 and 整体功能.

曹妃甸深水大港滩槽及潮沟是一个整体,自然条件下尤其是在风暴潮等海洋强动力作用下能否长期稳定是大家关注的焦点,只有稳定才能建港,建港工程不能影响滩槽及潮沟整体的基本稳定^[1].由于在潮滩上成陆面积巨大,是否会影响甸头深槽的动力环境从而使其淤浅,失去了水深的优势,为此,南京水科院等多家科研、高校、勘察、设计单位开展了理论分析、数值模拟和物理模型试验研究^[2-8].根据这些研究成果,由交通部规划研究院提出了前岛后陆的布置格局,将各潮沟建成挖入式港池(图1).在近几年的施工过程中,不断加强现场观察,基本证实了预测结果的可信性,为继续实施规划增强了信心^[2].本文简述了曹妃甸滩槽的形成机理,分析了其稳定性,从近期已实施的工程效果预测了其演变趋势.

1 曹妃甸近岸海区地貌特征

曹妃甸近岸海区位于渤海湾与辽东湾交界过渡地带,海岸与海底地貌类型复杂.根据其不同类型及特征,滦河口至涧河口沿海以大清河口、南堡为界,可划分为3个明显不同的岸段.其中大清河口~滦河口岸段长约 50 km ,为沙质海岸.海岸走向近 NE-SW,岸线较为平直,沿岸地势低平,以沙滩为主,水下岸坡较陡,堆积地貌不发育.本岸段近岸海域发育多处泻湖和离岸沙坝岛,其中打网岗是滦河三角洲外围最大的堆积体,原有灯笼铺沙岛现与陆地相连.京唐港区岸线位于湖林口至小港之间,南北两端沙坝泻湖均在此消失,海岸直接与外海相接.南堡~涧河口岸段陆域为海积平原,属淤泥粉沙质海岸.陆域沿岸有古贝壳堤一条,堤外发育了现代淤泥粉沙质浅滩,宽度达 3.5 km .本岸段历史上受到黄河和滦河细颗粒泥沙的影响,海积作用较强,目前潮滩仍在淤长,在围涂养殖和盐田开辟等人类活动的影响下,每年平均淤进速率可达数十米.大清河口~南堡岸段双重岸线特征明显,内侧大陆岸线为沿滦河古三角洲前沿发育的冲积海积平原,地势低平,海拔 $1 \sim 3 \text{ m}$,沿岸多荒滩地和盐场;外侧是曹妃甸、腰坨、蛤坨和东坑坨等沙岛构成的沙质岛屿岸线,与大陆岸线走向基本一致;沙岛与陆岸之间则发育有泻湖湾和大片潮滩,沙岛间还有潮汐通道深槽发育(图2^[9]).

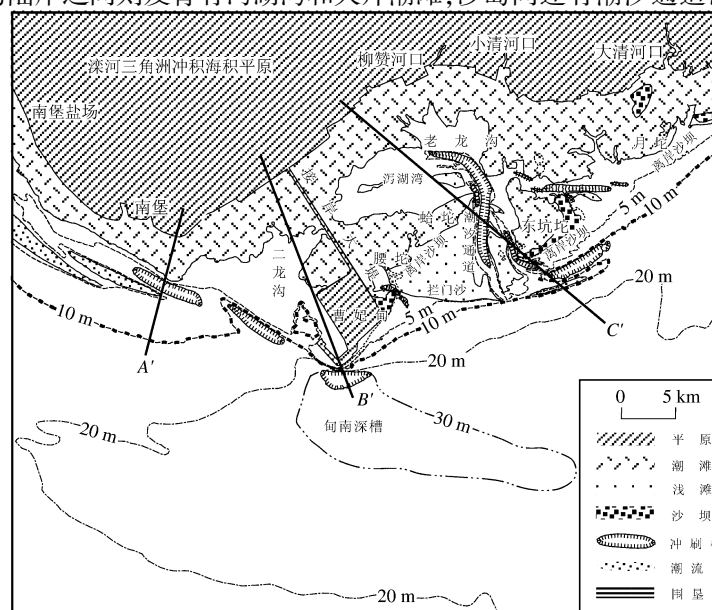


图2 曹妃甸海区海岸地貌体系示意图

Fig. 2 Layout of coastal system of the Cao Feidian sea area

本岸段发育有3个相对独立的海岸动力地貌体系^[9],其中甸头前沿深槽地貌体系主要由曹妃甸沙岛及其前沿深槽组成,老龙沟离岸沙坝-泻湖海岸体系主要由蛤坨、东坑坨等离岸沙坝、老龙沟泻湖湾、通道深槽与拦门沙等组成,南堡海岸地貌体系主要由南堡深槽与岸外潮流沙脊组成(图2)。

1.1 甸头前沿深槽与浅滩

曹妃甸沙岛位居渤海湾北岸岸线转折处,以岬角形态向南伸入渤海湾。建港前,曹妃甸岛原为NE-SW向的带状沙岛,其北侧与大陆岸线之间分布有大片浅滩,平均水深1.5 m,高潮时大部分滩面被水淹没,低潮时出露水面。曹妃甸接岸大堤位于浅滩的滩脊处,其东西两侧分别发育有老龙沟和二龙沟两条较大的潮沟。曹妃甸与南堡之间的二龙沟水深较浅,水深2~3 m。

曹妃甸沙岛前沿即为深槽水域,其水下岸坡陡峻,30 m等深线距岸仅约400~500 m(图3)。该深槽是渤海湾最深的水域,天然水深一般可达25 m以上,最大水深达41 m;其中30 m深槽长达26 km,宽约3.5~7.5 km(图2)。甸头前沿深槽发育于渤海湾北侧始自海河口且伸向渤海海峡的东西向水下谷地,深槽区受甸头岬角效应影响明显,成为本海区的潮流最强区,这也是深槽水深能够维持的主要动力因素。

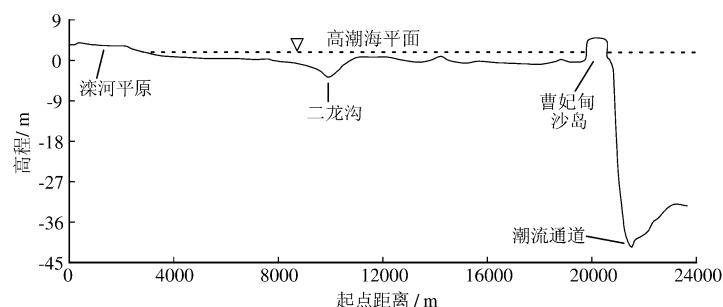


图3 曹妃甸海区曹妃甸典型断面BB'地形

Fig. 3 Topography of typical cross section BB' in the Caofeidian sea area

1.2 老龙沟离岸沙坝-泻湖

老龙沟离岸沙坝-泻湖海岸体系主要由离岸沙坝(沙岛)、泻湖和潮汐通道三大地貌单元组成(图4)。其中,离岸沙坝主要由内、外两列几乎平行的沙岛组成,内列以蛤坨-腰坨-曹妃甸等沙岛为主体,外列则主要由东坑坨和月坨沙岛组成;沙坝内侧为大面积的老龙沟泻湖纳潮水域,沙坝之间则发育有两条大型潮汐通道深槽,形成泻湖东、西口门。该三大地貌单元以动力为基础,以泥沙运动为纽带,形成一个完整的海岸动力地貌体系,并相互依存、相互作用和相互影响。

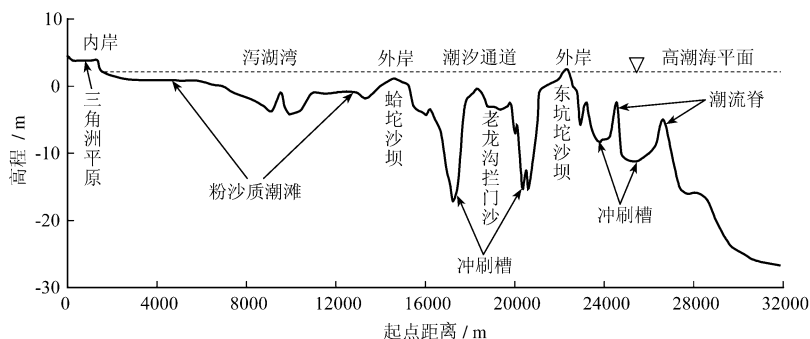


图4 曹妃甸海区老龙沟典型断面CC'地形

Fig. 4 Topography of typical cross section CC' in Laolonggou in the Caofeidian sea area

离岸沙坝的存在使得本海区形成双重岸线,并将沙坝内侧的泻湖浅滩水域与外海分离出来,导致两者在动力条件和地貌特征明显有所不同。离岸沙坝内侧老龙沟泻湖湾纳潮水域面积约350 km²,发育有大面积的粉沙质潮坪,其中0 m以上的浅滩水域面积约160 km²。湾内有深槽发育,最大水深达21 m;并以东坑坨为

界,有东、西两个口门与外海相通(图1).注入老龙沟泻湖湾的柳赞河与小清河等河流来水来沙量极小,径流对泻湖湾的影响可以忽略;由于离岸沙坝的遮蔽作用,外海传来的波浪多在离岸沙坝外侧浅水区发生破碎,因此湾内波浪动力影响较弱;加之本海区平均潮差较小,浅滩平均水深仅1.5 m左右,故随着涨、落潮水的升降形成大面积的漫滩水流,其动能大部分被摩阻损耗,流速较小.

虽然本海区平均潮差较小,但由于纳潮水域广阔,因此泻湖纳潮量巨大,涨、落潮流动力强劲,在离岸沙坝间形成老龙沟大型潮汐通道深槽.以东坑坨为界可分为东支和西支.其中,东支近东西向,规模相对西支较小,长约13 km,目前2 m深槽全线贯通,宽约200~1 200 m,最大水深约19 m;西支为老龙沟潮汐通道深槽的主体部分,由蛤坨北侧的泻湖发源后,近南北向延伸入海,长达17.5 km,宽2~12 km,其5 m深槽全线贯通,最大水深可达22 m.东支与西支口门附近均有拦门沙浅滩发育,其中,西支2 m深槽由蛤坨附近的2 km迅速展宽至东坑坨附近的11 km,落潮水流逐渐扩散,泥沙不断落淤,形成大规模拦门沙浅滩;深槽水深与宽度也在向海方向上逐渐减小,最大水深由蛤坨附近的22 m减小至口门拦门沙处的5 m,5 m深槽宽度也由1 800 m缩窄至330 m.

1.3 南堡深槽潮流沙脊

南堡位于渤海湾北岸岸线转折处,东距曹妃甸约19 km.南堡~曹妃甸岸段双重岸线特征明显,内侧大陆岸线为沿滦河古三角洲前沿发育的冲积海积平原,地势低平;外侧是曹妃甸、腰坨、蛤坨和东坑坨等沙岛构成的沙质岛屿岸线,与大陆岸线走向基本一致.南堡岸段与曹妃甸具有相类似的岬角地貌特征,其中前者位于内侧大陆岸线转折处,后者位于外侧沙质岛屿岸线转折处.

南堡岸外近海区具有滩-槽-脊的典型水下地形特征(图5).其中潮滩属淤泥粉砂质,由黏土质粉砂或砂质粉土质粉砂组成;潮滩宽约2~4 km,坡度平缓,约为0.38‰~0.94‰,平均高程在1 m左右.距潮滩约2 km的水下发育有两条头尾交错的线状潮流沙脊,其中靠近南堡深槽的潮流沙脊顶部最浅水深仅1.2 m,3 m水深以浅的沙体宽约300~500 m,长度超过7.5 km(图2).潮流沙脊与潮坪之间则是一狭长的潮流冲刷槽,即南堡深槽;其走向基本与岸滩平行,10 m深槽长约5 km,宽约900 m.该深槽紧贴0 m等深线,中心靠近南堡岬角,最大水深可达16 m,具有良好的港口岸线开发条件.

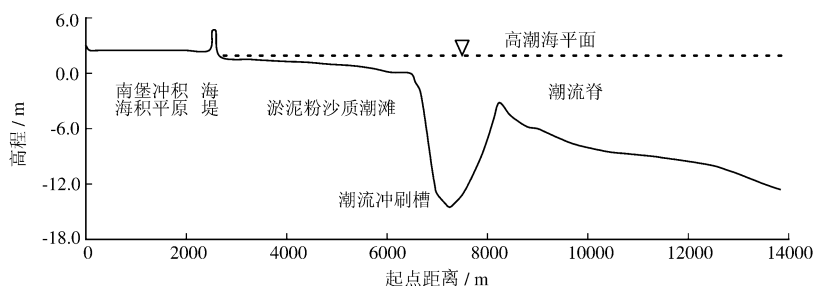


图5 南堡岸段典型断面AA'地形

Fig.5 Topography of typical cross section AA' in Nanbao area

2 水沙运动特征

曹妃甸近岸海区无大河直接注入,流入本海区的主要有大清河、小清河、潮河、青龙河与双龙河等小型河流,上游来水来沙量极小,径流影响基本可以忽略^[6];渤海湾顶入海河流则主要有海河、徒骇马颊河等水系,由于曹妃甸近岸海区距上述河口较远且渤海湾涨潮量巨大,因此其入海水沙对本海区也没有明显的直接影响.可见,对于本海区的海岸地貌体系而言,径流动力的影响基本可以忽略,潮流、波浪以及两者共同作用下的泥沙运动才是影响其发育演变与滩槽稳定性的主要动力因素.

2.1 潮汐与潮流特征

曹妃甸海域主要受南渤海潮波系统控制^[11].其潮汐性质属于不规则半日潮,平均潮差由东向西逐渐增

大. 据统计, 甸头平均高潮位为 0.81 m, 平均低潮位为 -0.73 m, 平均潮差为 1.54 m^[6]. 据 1996 年 10 月, 2005 年 3 月, 2006 年 3 月和 2006 年 7 月等多次同步水沙全潮观测资料分析^[6], 甸头以南深槽基本为东西向的往复流(图 1), 虽潮差较小, 但独特的甸头岬角效应使其成为为本海域水流最强区, 这也是维持深槽水深的主要动力. 2006 年 3 月大潮(潮差 1.7 m)实测涨潮最大流速 1.24 m/s, 落潮最大 0.94 m/s. 在近岸浅海区, 受地形变化影响, 主流流向有顺岸或沿等深线方向流动的趋势. 甸头北侧浅滩区以漫滩水流为主, 此水流的汇集与分散是维持各潮沟的主要动力.

2.2 波浪及风暴潮特征

本海域常浪向为 S, 出现频率为 8.6%; 次常浪向为 SE, 出现频率为 5.8%. 强浪向为 ENE, 该方向波能占 16.5%; 次强浪向为 NW 和 NE, 两方向波能分别占 9.9% 和 9.1%^[14,15]. 风浪对含沙量影响明显, $H_{1/10} > 1.8$ m 的中浪和大浪, 波能占 34.0%, 说明波浪对岸滩演变起到重要作用. 该海区波浪对泥沙的作用主要反映在横向输沙的沙坝塑造作用和对潮滩滩面的掀沙侵蚀作用, 沿岸输沙量相对较弱. 为分析曹妃甸港区水域的平均波况, 利用国家海洋环境预报中心对 1996 年、1997 年和 1999 年分方向统计成果按波能平均的方法计算曹妃甸港区的偏西和偏东方向的代表波要素. 统计波浪方向以 NE ~ S 方向的波浪分析偏东方向代表波, 以 SSW ~ WNW 方向的波浪分析偏西方向的代表波. 通过分析得出曹妃甸港区偏东方向的波浪出现频率为 47.4%, 波向指向 SE 偏 E 向 6°, 代表波高 $H_{1/10} = 0.77$ m, 对应波周期 3.5 s; 偏西方向的波浪出现频率为 27.6%, 波向指向 SW 偏 W 向 5°, 代表波高 $H_{1/10} = 0.57$ m, 对应波周期 3.1 s.

渤海湾沿岸是我国风暴潮最严重地区之一. 据塘沽海洋站 1950 ~ 1981 年资料统计, 32 年中发生增水 1 m 以上的风暴潮 253 次, 平均每年 7.9 次; 2 m 以上 7 次, 平均 4.6 年一次; 最大增水值为 2.52 m (1960 年 11 月). 风暴潮主要发生在秋冬季, 占全年的 76.2%, 由 E 和 ES 向持续大风引起. 曹妃甸海域发生风暴潮的气象背景与塘沽基本一致, 但由于位于渤海湾口北部突出部位, 缺乏水体集聚的地理条件, 初步分析, 其增减水幅度约为塘沽的 60.0% ~ 70.0%^[6,14].

2.3 泥沙来源

曹妃甸海域为风浪作用较强区域, 其滩槽能够维持长期的稳定, 也是长期以来海洋动力条件、岸滩边界条件和泥沙条件之间达到一定的平衡所致. 由于曹妃甸海区无大河直接注入, 流入本海区的主要有青龙河、柳赞河与小清河等小河, 上游来水来沙量极小, 其影响基本可以忽略. 大清河口东北约 45 km 外的滦河口, 其入海泥沙可在沿岸流携带下参与本海区的滩槽演变作用, 是本海区泥沙的重要来源之一.

曹妃甸浅滩区是由古滦河废弃三角洲的泥沙在波浪横向作用下改造而成^[10]. 滦河多沙是该海岸地貌形成发育的基本条件, 20 世纪 60 年代以来, 滦河上游大量水库和引水工程修建后, 除洪水期从溢洪道能排出少量水沙外, 绝大部分水沙都被拦截于库区之中. 表 1 给出了滦河 1929 年以来的入海水量和泥沙量.

表 1 不同年代的滦河入海水量和泥沙量统计

时 段	1929 ~ 1939	1940 ~ 1949	1950 ~ 1959	1960 ~ 1969	1970 ~ 1979	1980 ~ 1989	1990 ~ 1999	2000 ~ 2003	1929 ~ 2003
入海水量 / (10^8 m^3)	/	/	53.3	35.2	37.2	7.3	19.5	0.2	23.8
入海泥沙量 / (10^4 t)	3 711.8	1 934.0	2 482.8	1 655.3	1 011.5	88.2	307.9	11.9	1 542.3

可见, 自 20 世纪 60 年代中期后, 滦河入海泥沙量开始减小; 进入 80 年代以来, 受上游水库和引水工程的影响, 入海水量和泥沙量更是锐减. 其中滦河年平均入海沙量 1929 ~ 1969 年达 2 445 万 t, 1970 ~ 1979 年为 1 011 万 t, 1980 ~ 2003 年为 167.1 万 t, 仅为多年平均值的 10.8%; 2001 和 2002 年更是出现了长期断流、入海泥沙量为零的现象. 滦河入海输沙量锐减, 泥沙供给不足, 造成沿岸沙坝轻微冲刷, 已由原滦河泥沙 SW 向沿岸运移供沙转化为相对微弱的沙坝冲刷供沙. 沙坝泥沙在波浪的作用下, 以横向运动为主, 向沙坝内侧运移. 曹妃甸海域残余沙岛的出现也反映其来沙量减少、供沙量不足. 因此, 目前滦河输沙的影响已经非常有

限,本海区的泥沙来源主要是当地海床产沙。

曹妃甸以西海域泥沙主要来源于海河、黄河等所输出大量的细颗粒泥沙。据调查,天津港的抛泥区距曹妃甸西侧很近,对本海域来沙也有重要影响。自 20 世纪 70 年代以来,天津港已抛底泥 1 亿多立方米,相当于一个中等河流输出的泥沙量。此外,日益增强的人类活动也逐渐成为影响本海区泥沙来源的一个重要因素。如河道上游建库筑闸、围海吹填造地、海域人工采砂及海岸工程的兴建等,都使得沙源越来越少,将进一步减少曹妃甸海区的泥沙供给。

2.4 泥沙输移特征

在小浪或无浪条件下,曹妃甸海域含沙量并不大。近年水文测验表明,整体上近岸水域的水体含沙量普遍大于外海深水域;外海深水区约为 $0.05 \sim 0.10 \text{ kg/m}^3$,近岸约为 $0.07 \sim 0.15 \text{ kg/m}^3$ 。近岸水域又以甸头为界,西部水域平均含沙量明显大于东部。如大潮平均含沙量,西部和东部海域 1996 年 10 月实测分别为 0.39 和 0.32 kg/m^3 ,2005 年 3 月为 0.163 和 0.072 kg/m^3 ,2006 年 3 月为 0.137 和 0.054 kg/m^3 。分析表明,风浪的掀沙作用是影响本海区含沙量变化的重要因素,潮流影响较弱;近年来平均含沙量呈总体减少趋势,与滦河来沙量骤减有关;甸西含沙量明显大于甸东,天津港抛泥及风浪引起的周边海滩细颗粒泥沙随潮流输移对含沙量的影响不容忽视。

据 2006 年 3 月底质取样粒度分析结果可知,沉积物的分布由陆向海呈细-粗-细的规律变化,中值粒径也沿水深的分布呈现岸滩粗、深槽细的特点。以甸头分界,沉积物中值粒径分布由西向东呈由小到大的变化趋势。其中西侧海区中值粒径为 $0.008 \sim 0.027 \text{ mm}$,东侧海区为 $0.012 \sim 0.250 \text{ mm}$,两侧中值粒径相比变化可达几倍。甸头以西海域沉积物分选程度一般,东部海域由岸到海分选程度呈分选一般-分选好-分选一般分布。甸东离岸沙坝海域分选程度最好,说明其受波浪动力作用较强^[6,12]。

2.5 深槽动力形成机制

甸头前沿深槽、老龙沟通道、南堡深槽水域均为本海域的潮流动力最强区,潮流是塑造和维持深槽水深的主要动力。但引起局部潮流增大的主要原因,即动力形成机制,不同深槽之间有着明显的差异。其中岬角地貌引起的局部潮流增大是甸头前沿深槽和南堡深槽形成的主要动力条件,而漫滩水流归槽和狭窄口门束水作用导致流速增大则是维持老龙沟通道深槽水深的主要动力。

曹妃甸沙岛前沿海区原为一条从海河口伸向渤海海峡的水下河谷,因此,该深槽的发育有着一定的地质构造基础,但该深槽在古滦河曾为本海区带来大量沉积物的情况下,仍能继续维持水深并长期保持稳定,这与曹妃甸岬角地貌引起的甸前局部潮流增大、潮流动力冲刷作用增强不无关系。曹妃甸岬角地貌形成渤海湾北部向南突出的三角形地带,必然引起甸头前沿局部海区潮流速度增大(见图 6)。

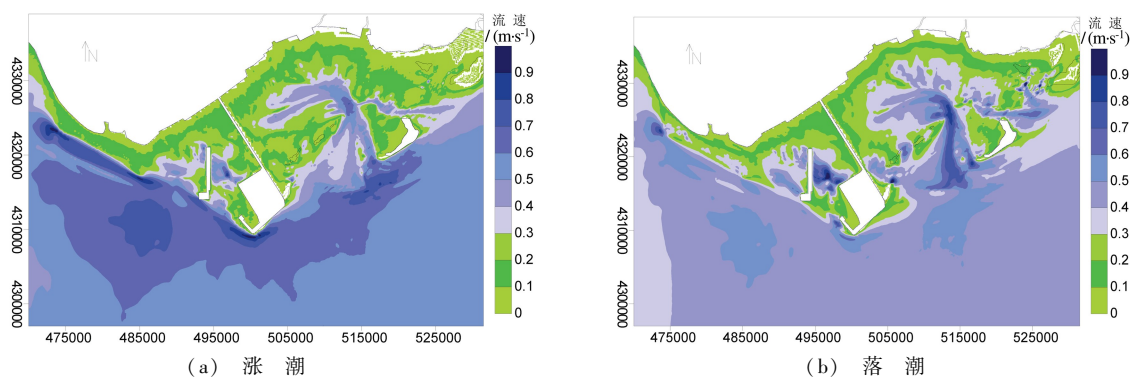


图 6 曹妃甸海区涨、落潮平均流速分布(2006 年 3 月)

Fig. 6 Layout of mean velocity of flooding and ebbing tides in the Caofeidian sea area (Mar., 2006)

图 6(a) 和图 6(b) 分别给出了本海区 2006 年 3 月大潮期间涨、落潮平均流速的空间分布。可见,曹妃甸前沿水域在岬角地貌效应的影响下,明显存在局部流速增大的现象;甸前流速局部增大区与通道深槽水域分

布基本一致,且流速自甸头向外海随着岬角效应的减弱而逐渐减小.如在甸头前沿 500 m 处,涨潮平均流速最大为 0.95 m/s;距甸头约 1 000 m 处,流速减小至 0.8 m/s;距甸头约 2 000 m 处,流速则减小至 0.7 m/s (图 6(a)).甸头前沿水域的落潮平均流速也具有同样的空间分布和变化规律(图 6(b)),但与涨潮相比,落潮期间岬角效应引起的局部流速增大的区域范围和幅度都要明显偏小.可见,涨潮流绕过甸头时岬角效应引起的潮流局部增大和冲刷作用才是通道深槽水深形成与维持的主要动力条件.

3 滩槽演变特征及稳定性分析

滩槽稳定性是评价海区能否进行开发利用的关键问题,而稳定性与滩槽的形成原因和所处的演变阶段密切相关.因此,在分析曹妃甸海区地貌系统形成演变过程的基础上,进行滩槽冲淤计算与现代演变分析,总结滩槽冲淤演变规律及其主要原因,探讨未来的稳定性变化趋势,是曹妃甸深水大港规划与建设的基础.

3.1 滩槽形成发育与稳定性长期变化趋势

3.1.1 海岸体系的形成发育 曹妃甸海区发育的海岸地貌体系是古滦河废弃三角洲沉积体在波浪和潮流动力作用下长期被改造的产物,滦河多沙是这种海岸地貌形成发育的基本条件.滦河是渤海湾地区仅次于黄河的第 2 条多沙河流,1929~1960 年平均每年入海输沙量为 2 680 万 t(滦县站).通过钻孔对沉积物、 ^{14}C 年代测定及考古历史资料的分析,历史上滦河口分流点多次迁徙改道,全新世以来先后形成全新世早期、全新世中期、历史早期、历史晚期和最新的 5 个次一级亚三角洲堆积体,现今滦河口至南堡之间的湖林口、大清河口、东坑坨、曹妃甸等都曾经是古滦河的入海地区^[13].大量的径流来沙在河口区不断沉降,为河口三角洲的发育提供了丰富的物质来源.河流改道后,径流来沙急剧减少,三角洲停止向海淤进,其前缘较粗颗粒泥沙经波浪、激浪流和潮流动力的重新塑造后形成一系列的离岸沙坝;由于沉积物的不断压实并长期遭受波浪动力的侵蚀作用,部分三角洲平原逐渐沉陷而淹没于水下,构成沙坝内侧的泻湖纳潮水域,从而形成离岸沙坝-泻湖海岸体系(图 1).

曹妃甸沙岛即是由古滦河入海泥沙经动力较强的波浪与激浪流作用横向堆积形成的海岸沙坝.根据滦河改道和三角洲形成废弃的过程分析,按时间递变顺序,曹妃甸近岸海区大致经历了以下几个主要动力沉积环境演变阶段.

(1)潮汐动力控制的浅海沉积环境 大约距今 8 000 年以前,南堡平原地区仍为广阔的浅海区,岸线在几十千米之外,其动力沉积环境与今天的渤海湾相似.此时期本海区没有较大的河流注入,波浪动力作用也相对较弱,泥沙运动在潮汐动力控制的沉积环境中以缓慢的淤积作用为主,沿岸发育有大片的泥质潮滩和淤泥质海岸.

(2)径流与波浪动力作用的三角洲快速淤展环境 距今 8 000~3 000 年期间,滦河改道后经溯河、小清河故道在曹妃甸海区注入渤海湾,上游大量的来沙沉降在河口地区形成河口三角洲,其沉积演变过程与现代滦河三角洲相似.即三角洲的演变受径流和波浪动力的共同作用,一方面河流大量来沙落淤使得三角洲快速向海淤积前展,另一方面三角洲前缘的泥沙在波浪的横向搬运和分选作用下形成滨外沙坝,本海区的海岸线也由淤泥质海岸转变为沙质海岸.在滦河三角洲向海快速推进的过程中,滨外沙坝不断与泛滥平原直接相连并被洪水破坏改造;同时滨外形成新的沙坝,孕育新的泻湖,发育新的沙坝-泻湖海岸体系.大约 3 000 年前,当三角洲推进到今天的曹妃甸海区附近时,在三角洲前缘发育曹妃甸沙岛的雏形.南京大学勘测结果^[4]表明,曹妃甸砂层基础深厚,沙岛雏型始现于海底 60 m 处,砂基厚度超过 50 m;1996 年曾在甸头 12~14 m 等深线处取样进行 ^{14}C 测年分析,沉积年代约 $3\,381\pm 136$ 年^[4].

(3)波浪与潮流动力作用的沙坝蚀退环境 大约 3 000 年前,滦河再次发生改道,使曹妃甸海区泥沙供给不足,三角洲前缘的滨外沙坝在波浪的作用下发生侵蚀而内移,形成曹妃甸、腰坨、蛤坨等一系列的离岸沙坝;三角洲平原则因波浪潮流的改造和沉积物压实沉陷而沦为海湾-泻湖.同样,滦河在大清河口入海后经过类似的沉积演变过程,在此时期东坑坨等离岸沙坝发育后,老龙沟海岸地貌系统才初步形成.老龙沟离岸

沙坝-泻湖海岸体系形成后,涨、落潮水只能通过相对狭窄的口门进出,故水流被束窄,流速增大,造成口门附近深槽水道的冲刷.虽然本海区平均潮差较小,但由于纳潮水域广阔,因此泻湖纳潮量巨大,涨、落潮流动力强劲,构成了塑造和维持老龙沟潮汐通道深槽的主要动力条件.由于曹妃甸和东坑坨一带滦河改道最早,因而泻湖口门封闭程度最差,发育为海湾型泻湖.2006 年南京大学沿老龙沟潮汐通道主槽进行的地层剖面探测结果^[5]也表明,老龙沟是古河口被潮流改造而成的现代潮流通带,其谷底为砂及粉砂质,间夹薄层黏土,底质坚实.

曹妃甸沙岛前沿海区原为一始自海河口且伸向渤海海峡的构造深槽,后发育为水下河谷并伴有一定程度的淤积.当滦河三角洲推进到附近海区时,该深槽在一定程度上延阻了三角洲的向前推进.水下河谷与现代潮流深槽均发育于该构造深槽中,现代通道深槽切割于古河谷的均质砂层中,在均质砂层沉积之后,是一个新的侵蚀谷地,小部分承袭古河谷^[5].曹妃甸沙岛形成后,其岬角地貌引起局部潮流流速明显增大,不断冲刷海床,从而形成现在的通道深槽.曹妃甸岬角为松散沉积物组成,与一般的基岩岬角明显不同,其形成的具体过程与如何长期保持稳定状态仍有待进一步研究.

3.1.2 滩槽稳定性的长期变化趋势 曹妃甸等沙岛形成于古滦河输沙量巨大时的沙质海岸带,由动力较强的波浪与激浪流所堆积的海岸沙坝.该沙坝发育时间长,砂基深厚,细砂、粉砂质与黏土质交互成层,已形成稳定的沙质岛屿.由于滦河大量入海泥沙是离岸沙坝形成的基本条件,因此,随着滦河的改道东移与入海泥沙的减少,本海区的泥沙明显供给不足,石臼坨、月坨、东坑坨、蛤坨到曹妃甸一线沿岸目前均处于轻微侵蚀后退状态,同时沿岸泥沙被潮沟切断,也表明本海区沿岸泥沙纵向供给不足.从宏观角度分析,老龙沟离岸沙坝-泻湖体系是滦河改道、泥沙来源减少或断绝、侵蚀作用使该地区发生局部海进的情况下发育的,因而离岸沙坝-泻湖体系基本遵循海进时期的发育规律,其发展方向为:封闭泻湖-半封闭泻湖-海湾泻湖,最终转化为海域.但应该说这种转化是长时期的过程,最终转化要以万年计.

南京大学分别在老龙沟深槽、南堡外深槽和潮滩采集岩芯柱状样,利用²¹⁰Pb 活度变化对本海区百年时间尺度的沉积速率进行了研究分析^[5].研究表明,南堡附近海区及近岸潮滩近百年来呈一定的淤积状态,平均沉积速率约为 1~1.5 cm/a,并且由于处于人类强活动区,沉积层序中有较强的扰动现象;而老龙沟深槽主要表现为冲刷,在近百年在岩芯所代表的区域几乎没有新鲜外来的沉积物堆积.曹妃甸前沿深槽地层剖面表明,潮流通道仍保持完整的双肩谷地形态,靠近甸头的谷肩未被破坏,因此并无骤然侵蚀坍塌之患;同时由于泥沙供给不足,深槽目前呈轻微冲刷态势.

3.2 近年滩槽冲淤变化特征及主要原因分析

图 7 给出了本海区 1996 年和 2006 年的等深线对比和冲淤厚度分布.可见,1996~2006 年间,本海区离岸沙坝外侧海区整体上以冲刷态势为主,等深线不断向陆侧蚀退,甸西海区的蚀退速率大于甸东海区,海床平均刷深则多在 1~2 m.值得注意的是,紧邻曹妃甸码头西侧的局部海区,有面积约 5 km² 的水域海床平均刷深可达 5~10 m,主要与此处进行港池开挖和码头围填有关.沙坝内侧的泻湖缓流区则以淤积态势为主,老龙沟通道深槽附近则有冲有淤,冲淤变化较复杂.此外,本海区由于水产养殖围涂等人类活动的影响,岸线淤进速度较快,10 年间向海推进了 1.5~2.0 km,平均淤进速率约 150~200 m/a.

本海区整体呈冲刷态势与近几十年来滦河入海输沙量锐减、泥沙供给不足密切相关.蛤坨、东坑坨等沙岛外侧浅水区在较强的 E~S 向波浪作用下,海床泥沙在横向上不断发生搬运.沙质海岸滩波浪泥沙横向运动的典型特征是近岸破波区发生侵蚀,而部分被侵蚀的泥沙被带至破波区外深水海区发生淤积.由于本海区泥沙供给不足,且沿岸存在自东向西的较强沿岸流,因此破波区波浪掀扬起来的泥沙大部分被沿岸流带向下游,只有少部分泥沙随水流产生离岸运动,落淤在水深较大、波浪紊动较弱的深水区.曹妃甸、东坑坨等沙岛外缘总体上呈侵蚀趋势,水边线具有向岸平移的倾向.此外,由于供沙不足,水体含沙量小于挟沙能力,因此水流通过不断冲刷海床泥沙来增大含沙量,导致沙岛外侧的深水海区也呈现冲刷态势.由此可见,得不到足够的沿岸泥沙供给是沙坝外侧近岸与深水区发生侵蚀的主要原因.

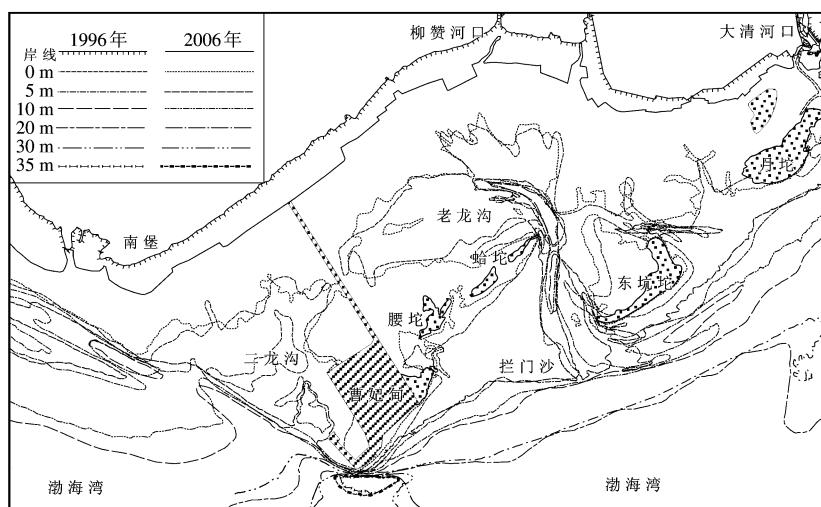


图7 曹妃甸海区1996和2006年等深线比较

Fig. 7 Comparison of isobathic line in 1996 and 2006 in the Cao Feidian sea area

随着曹妃甸港区开发的不断深入,接岸大堤工程、港区围填与码头建设、海床采沙与港池开挖、油田人工岛建设、海水养殖等各种开发活动对本海区水沙动力环境与滩槽演变的影响也越来越大,不仅引起当地水动力沉积环境的变化,还对本海区的滩槽演变与稳定性产生较大影响.日益增强的人类活动已在很大程度上改变了曹妃甸海区的动力条件和地貌演变趋势,已经达到了与自然因素作用相同的量级,在局部岸段人类活动已经成为影响滩槽冲淤演变趋势的主导因素,特别是海床采沙吹填港区形成的采沙坑,表现为海床强烈下切,且采沙期间还会造成水体含沙量大幅增加,浑浊水体随着涨、落潮流而不断迁移运动,对临近海区的冲淤演变会产生一定影响.

4 工程效应

目前,已经对曹妃甸海区海岸体系动力环境与滩槽演变产生重要影响的主要开发工程包括:接岸大堤工程、港区围填与码头建设、海床采沙与港池开挖等.

4.1 接岸大堤工程

本海区未开发前,曹妃甸岛西北侧与大陆岸线之间分布有大片浅滩.曹妃甸接岸大堤位于浅滩的滩脊处,自林雀堡至曹妃甸岛全长18.4 km(图8).该工程于2003年3月正式开工,2004年5月底实现全线贯通,9月底工程主体全部竣工.

天然情况下,涨潮时,一股水体从东侧老龙沟进入并逐步淹没滩地,另一股水体从西侧潮沟进入并逐步淹没滩地,之后在大堤附近交汇;落潮时,由于东侧潮滩较低,滩地上的水体通过老龙沟先落,迫使西侧滩地的一小部分水体向东流动,待西侧潮位降至一定程度,西侧滩地水体通过潮沟流向深槽,再绕过甸头深槽与东侧老龙沟水体交汇.曹妃甸接岸大堤建成通车后,由于大堤位于潮流的分流与汇流区,与建堤前相比,本海区潮流场的整体态势并没有产生较大的变化,但大堤的建成隔断了甸东与甸西沿岸两侧滩地间的部分水体交换,主要是隔断了落潮期间一小股由西侧向东侧滩地流动的水体,现这股水体直接进入西侧深槽.

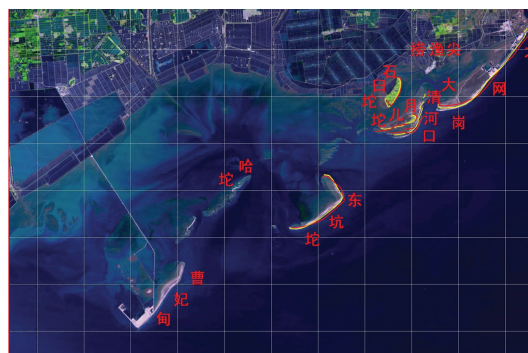


图8 曹妃甸海区2005年底遥感图像

Fig. 8 Remote sensing image of the Cao Feidian sea area in the end of 2005

数学模型计算的大堤建成前后涨、落潮平均流速变化等值线^[6]表明,曹妃甸东侧前沿涨、落潮平均流速有所减小,减小了约 0.03 m/s(约 9%);甸头前沿涨、落潮流速均呈增加趋势,增加了 0.005 ~ 0.020 m/s,最大增幅为 4%,仅落潮时堤头处受局部绕流影响落潮流速有微量减小;曹妃甸西侧涨落潮流速有所增加,而西侧深槽的涨落潮流速则基本没有变化。甸头前沿 1.5 km 处,涨落潮流速有微量增加,增加了 0.001 ~ 0.008 m/s,增幅约 2%,甸头前沿约 3 km 处的涨潮流速微量增加了 0.001 ~ 0.005 m/s,增幅小于 1%,距甸头前沿约 5 km 处涨落潮平均流速已基本无影响。由于大堤的建成隔断了东西两侧间的水体交换,老龙沟深槽全潮平均流速呈减小趋势,最大减幅为 4%。涨潮流速变化较小,上部有所增加,下部有所减小,减幅为 1%,而落潮流速则减小了 0.01 ~ 0.04 m/s,尤其是 10 m 深槽处流速减小了 0.039 m/s,约 6%。这主要是由于大堤建成前落潮时约有 1 h 水体由西向东流入老龙沟,而大堤的建成使这股水体不能进入老龙沟所致。但甸头潮位过程几乎没有变化^[6],说明大堤未改变该海区的潮流结构。

4.2 滩涂围填工程

曹妃甸近岸海区的滩涂围填主要可分为围海养殖和港区围填两类。近 20 年来,本海区海产养殖的规模不断加大,沿岸鱼塘、虾池的数量连年递增,大量海产养殖池塘在潮间带兴建,使岸线不断向海侧推进,前缘已抵达中、低潮滩。围海养殖既直接在潮滩上形成人工海岸地貌,又使自然湿地面积大规模减小,滨海原生性湿地生态系统遭到较大破坏。据统计,仅南堡至大清河口岸段,由于海产养殖围涂 1996 ~ 2006 年岸线向海推进了 1.5 ~ 2.0 km,平均推进速率约 150 ~ 200 m/a,滩涂面积共减少约 96.2 km²。海床养殖围涂引起的滩涂面积减少还会使得老龙沟潮汐通道的纳潮面积与纳潮量有所减少,导致潮流动力的减弱。

根据曹妃甸港区总体规划,港区开发建设需要围填的浅滩面积达 310 km²^[7]。港区围填和海产养殖围涂引起的动力变化与滩槽演变效应基本类似。一方面,港区围填会减少泻湖面积,减小纳潮面积与纳潮量,并引起相应的动力地貌变化。如港区规划方案实施后,港区围填滩涂使得老龙沟泻湖纳潮面积减小约 90 km²;纳潮量的减小又导致老龙沟深槽内潮流动力减弱,口门拦门沙地区波浪动力相对增强,使得落潮三角洲外缘和沙坝发生侵蚀后退。另一方面,港区围填和围堤建设直接改变了海岸的形态和海岸地貌结构,使海岸不断平直化与固化,一定程度上增强了海岸的稳定性。如前所述,本海区离岸沙坝-泻湖海岸体系的发展方向为封闭泻湖型→半封闭泻湖型→海湾泻湖型,最终转化为海域。但港区围填后,老龙沟泻湖湾的陆地边界与口门都得到稳定,自然演变规律的作用被削弱,在某种程度上改变了该海岸体系的演变方向。

4.3 港区开发方案引起水动力条件及海床冲淤变化

4.3.1 港区开发方案简况 甸头前沿深槽水深稳定,深水近岸,适于建设大型深水泊位;两侧潮汐通道基本稳定,通过适当的开挖整治可作港用水域。同时,总体方案布置应当遵循该区域水沙运动规律,尽量少改变现有滩槽相间的地貌环境。据此,形成了以曹妃甸-蛤坨为轴心的大型人工岛式布置格局,并以老龙沟、纳潮河为分界,形成前岛后陆的总体布局形态。通过波流泥沙数学模型^[6,16-18]进行多方案的比选后,形成的推荐方案见图 1^[7]。

4.3.2 推荐方案实施后引起水动力条件变化 方案实施后,对各局部区域的水动力影响有所不同^[6]:甸头深槽区域流速有所增加,涨潮平均流速增加 0.9%,落潮平均流速增加 5.7%,甸头前 1.5 km 处涨潮平均流速增加 2.4%,落潮平均流速增加 1.1%。流速略有增加有利于维护甸头深槽水深。南堡深槽区域,方案实施后流速略有加大,涨潮平均流速增加 2.2%,落潮平均流速增加 4.1%,水流更加归顺,往复流特征更加明显,有利于维护深槽水深。甸头东侧浅滩,港区东翼围填后阻断了涨落潮时的漫滩水流,使围填区以南浅滩区域涨潮平均流速减小了 22.0%,落潮平均流速减小了 18.0%。流速的减小会使浅滩上略有淤积,对陆域围填、护岸稳定有利。由于浅滩区纳潮量的减少,老龙沟潮汐通道流速有所减小,涨潮平均流速减少 11.9% (0.05 ~ 0.10 m/s),落潮平均流速减小 18.4% (0.1 ~ 0.2 m/s),有利于通航安全但不利于水深维护。

虽推荐方案港区围垦面积约 310 km²,但因工程前滩面水深不足 1 m,平均流速小于 0.1 m/s,围垦所占的过水断面面积仅为 0.3% ~ 1.7%,减小的潮棱体与工程前相比很小,故港区开发对周边水动力环境影响

的范围及程度较小.从图9可知,方案实施后甸头南侧及西侧5 km以外、东侧10 km以外,流速变幅降至2.0%以下,约0.01~0.02 m/s.因此,方案实施不会对周边的天津港、京唐港区产生影响.

4.3.3 推荐方案实施后海床冲淤变化^[6,18]

(1) 正常情况下泥沙冲淤强度 在海床初步验证的基础上,采用多年平均波浪和大、中潮组合进行了推荐方案的冲淤强度计算.据波浪资料分析,本海域常浪向为SE向偏东6°和SW向偏西5°,频率分别为47.4%和27.6%.方案实施后,港区大面积围垦阻挡了波浪向浅滩的传播,波浪主要分布在外海区域;与工程前相比,港区中的含沙量大幅减小,外海含沙量则变化不大.

推荐方案实施1年后(图10),甸头前沿深槽年冲刷0.15~0.48 m,西侧前沿冲刷0.09~0.27 m,东侧前沿冲刷0~0.20 m,甸头前1.5~3.0 km处冲刷0.10~0.21 m;老龙沟航槽年回淤0.06~0.83 m,其中靠近三港池处回淤强度较大.一港池年回淤0.35~1.31 m,淤积部位主要位于靠近口门的回流区域;二港池年回淤0.02~0.99 m,口门附近淤积较大;纳潮河基本没有冲淤变化;三港池年回淤0.03~0.64 m,主要淤积部位为靠近老龙沟的一侧区域.预计方案实施2~3年后工程引起的甸头前沿海床冲淤基本达到平衡状态^[6],其中甸头前沿将冲深0.3~1.1 m,最大冲深约2.1 m.

(2) 大风浪天气引起的泥沙骤淤 为了明确大风浪天气引起港池与航道的骤淤问题,采用常浪向为SE向偏东6°10年一遇波浪和大、中潮组合进行了方案实施后的骤淤强度计算,波浪作用时间为48 h.方案实施后,波高主要分布在外海区域,中潮位时有效波高最大为3.8~4.1 m.甸头西侧含沙量较大,达6.0 kg/m³(图11),港池及纳潮河含沙量较小,约0.5 kg/m³.

方案实施后,在10年一遇波浪作用下,一港池淤积了0.01~0.21 m,淤积部位主要位于靠近口门区域;二港池淤积了0~0.20 m,口门附近淤积较大;三港池淤积了0~0.07 m,主要淤积部位为靠近老龙沟的一侧区域;老龙沟航槽淤积较多,达0.06~0.55 m,靠近口外一侧航道骤淤强度相对较大.

(3) 物理模型试验结果 南京水利科学研究院于2007年3月完成了推荐方案一港池口门优化物理模型试验^[8],研究了一港池工程海域和港池内流场变化及泥沙淤积情况,并在此基础上对港池口门布置进行了优化.物理模型水平比尺 $\lambda_l=720$,垂直比尺 $\lambda_h=120$,变率为6.0,波高比尺 $\lambda_H=100$,波长比尺 $\lambda_L=120$,变率1.2,模型沙采

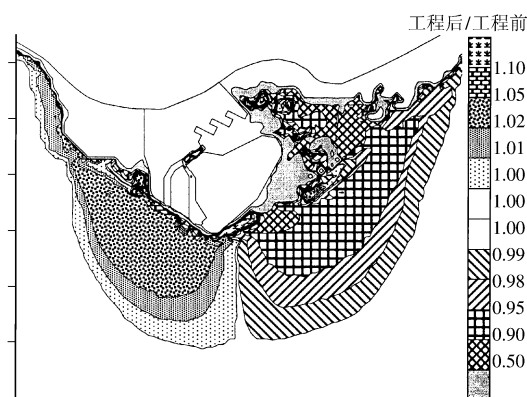


图9 推荐方案实施后落潮平均流速变化等值线

Fig. 9 Percent change of the mean velocity of ebbing tides after the implementation of the proposed scheme

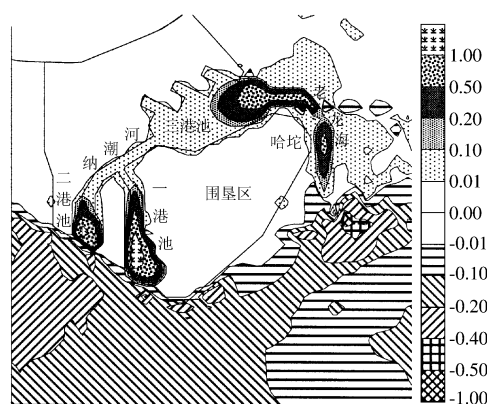


图10 推荐方案实施1年后冲淤强度分布(单位: m)

Fig. 10 Distribution of deposition and erosion depths after the implementation of the proposed scheme (unit: m)

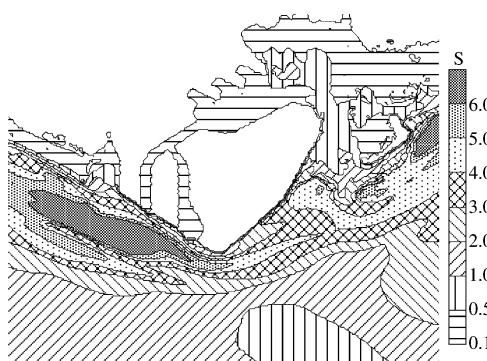


图11 推荐方案实施后SE向偏东6°10年一遇落急含沙量场(单位: kg·m⁻³)

Fig. 11 Suspended load concentration field after the implementation of the proposed scheme under the action of SE waves (with a deflection of 6 degrees) with the recurrence period of 10 years (unit: kg·m⁻³)

用湿重度为 1.16 g/cm^3 的木粉. 与物模试验结果相比, 一港池及纳潮河流速、流态比较接近, 即一港池口门处基本为涨潮时进水, 落潮时出水, 口门处有较大回流. 物理模型给出了不同防波堤形态下的一港池淤积情况. 研究表明, 正常情况下一港池靠口门一侧年平均回淤厚度为 $0.56 \sim 1.22 \text{ m/a}$, 与数模计算的 $0.35 \sim 1.31 \text{ m/a}$ 比较接近, 分布规律也基本一致, 即最大淤积区域靠近口门处的回流区, 离开口门愈远淤积愈少.

4.4 甸头前沿深槽的稳定性

曹妃甸甸头前沿深槽的稳定是该海区滩槽稳定的标志之一. 工程实践表明, 2006 年底曹妃甸近海区已围填滩涂面积约 30 km^2 , 2008 年底已围填约 140 km^2 (图 12), 甸头前沿深槽为深水码头的集中布置区. 自 2004 ~ 2008 年, 甸头前沿海域整体上没有大冲大淤的变化, 甸头海域各等深线总体上保持了原有形态 (图 13 (a)), 海床基本处于冲淤平衡并略有轻微冲刷的状态, 其中深槽冲刷幅度多在 0.5 m 左右 (图 13 (b)), 说明深槽维持了稳定. 该深槽在长期的海洋动力作用下, 边界条件与动力条件已基本适应, 海床整体上处于基本稳定状态. 近年来, 由于本海区泥沙供给不足, 加之甸头围填使得岬角效应增强, 导致甸前局部水域水动力有所加强, 深槽呈轻微冲刷态势.

笔者于 2006 年预测了分步实施后的冲淤变化, 接岸大堤西侧先围垦并开挖一港池及二港池. 预测结果表明^[6], 甸头前沿深槽 2006 ~ 2008 两年冲刷 $0.18 \sim 0.70 \text{ m}$, 甸头两侧近岸 1 km 范围内受矿石码头群桩影响曾微淤态势, 西侧 1 km 以外冲深 $0.14 \sim 0.40 \text{ m}$, 东侧 1 km 以外冲深 $0.04 \sim 0.20 \text{ m}$. 这与 2008 年底工程引起的冲淤变化 (图 13 (b)) 很接近. 需要说明的是, 东侧近岸约 1.3 km 有一采砂坑已超出数模预测的范围.

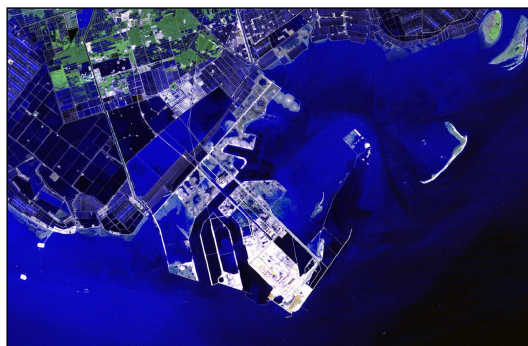


图 12 曹妃甸海区 2008 年底遥感图像

Fig. 12 Remote sensing image of the Caofeidian sea area in the end of 2008

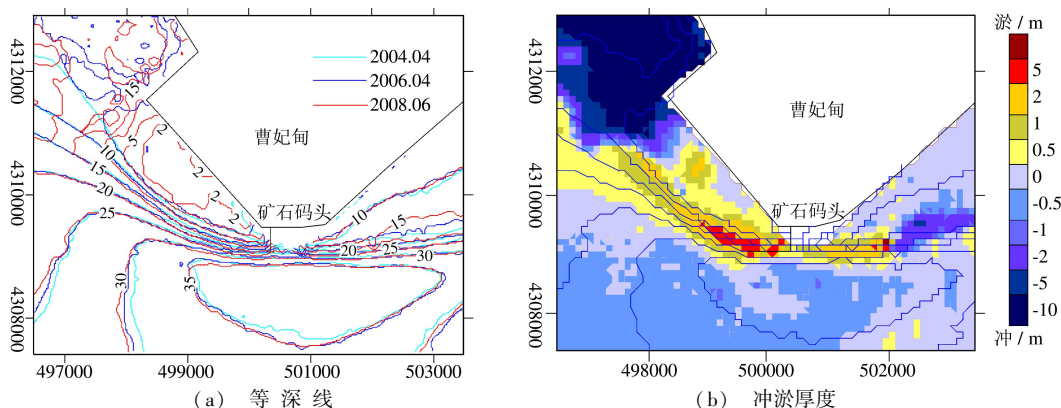


图 13 2004 ~ 2008 年曹妃甸前沿潮流通道深槽等深线及冲淤厚度分布

Fig. 13 Distribution of isobathic line and deposition-erosion depth of deep channel in front of Caofeidian during 2004 ~ 2008

5 结论与建议

曹妃甸近岸海区海岸地貌体系是滦河改道后, 古河口三角洲在波浪和潮流的共同作用下重新改造而成, 潮流是塑造和维持现代潮流通道深槽水深的主要动力. 曹妃甸前沿深槽的发育有着一定的地质构造基础, 沙岛形成的岬角地貌构成了通道深槽的边界条件, 由此引起的局部潮流增大则成为深槽形成的动力条件. 老龙沟潮汐通道由于狭窄口门的束水作用, 引起流速增大并造成深槽冲刷, 是维持深槽水深的主要动力. 该海区

海岸地貌形成发育年代较长,曹妃甸、东坑坨等离岸沙坝基础深厚,已形成稳定的沙质岛屿,加之潮汐通道深槽内泥沙淤积速率较小,因此长期以来滩槽形势基本稳定;同时由于沿岸泥沙供给不足,曹妃甸、东坑坨等离岸沙坝外缘在今后一定时期内仍将呈轻微冲刷态势。随着曹妃甸海区开发的深入,各种人类活动对曹妃甸海区的动力条件和地貌演变趋势的影响日益增强,并已经达到了与自然因素作用相同的量级,在局部岸段人类活动已经成为影响滩槽冲淤演变趋势的主导因素。

曹妃甸规划方案实施后的模型研究表明,甸头深槽区域流速有所增加,港区、航道内流速有所减小;由于工程前滩面水深不足 1 m,围垦减小潮棱体与工程前相比很小,因此港区开发对周边水动力环境影响的范围及程度较小。与工程前相比,由于港区大面积围垦阻挡了波浪向浅滩的传播,使得其含沙量大幅减小,外海含沙量则变化不大。方案实施后,甸头前沿深槽以冲刷为主,港池和潮沟内则以淤积为主,预计方案实施 2~3 年后工程引起的甸头前沿海床冲淤基本达到平衡状态。工程实践表明,2004~2008 年,甸头前沿海域整体上没有大冲大淤,甸头海域各等深线总体上保持了原有形态,海床基本处于冲淤平衡并略有轻微冲刷的状态,深槽稳定。曹妃甸甸头前沿深槽的稳定表明曹妃甸前岛后陆的布置格局,将各潮沟建成挖入式港池是合理可行的。

对于曹妃甸的开发利用,应全面、充分地考虑泥沙供沙不足这一因素的近期和长期影响;不但要从积极面(如可减少港口航道泥沙回淤)去考虑,更要多考虑可能产生的负面影响,并给出有效可行的对策和措施。此外,还需加强施工期的水文、泥沙及地形的监测,以便及时发现问题,解决问题。

致谢:参加研究的还有徐啸教授、张金善教授、潘军宁教授、王红川教授、余小建高工、章卫胜工程师及研究生李寿千等,并得到刘家驹教授、黄建维教授的指导与帮助,特此致谢。

参 考 文 献:

- [1] 梁应辰. 我所参与的建港论证工作[J]. 纵横(两会专刊-唐山曹妃甸), 2008: 29-33. (LIANG Ying-chen. My work participated about demonstration of construction of Caofeidian harbor[J]. Zongheng (Journal of the Two Conferences-Special Issue of Caofeidian, Tangshan), 2008: 29-33. (in Chinese))
- [2] 邱大洪. 从曹妃甸海域开发想起的[J]. 纵横(两会专刊-唐山曹妃甸), 2008: 74-75. (QIU Da-hong. Ideas about development of Caofeidian sea area[J]. Zongheng (Journal of the Two Conferences-Special Issue of Caofeidian, Tangshan), 2008: 74-75. (in Chinese))
- [3] 徐 啸. 京唐港曹妃甸港区泥沙运动及冲淤趋势分析报告[R]. 南京:南京水利科学研究院, 1997. (XU Xiao. Analysis of sediment motion and trend of deposition and erosion in Caofeidian harbor area of Jingtang Port[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 1997. (in Chinese))
- [4] 王 颖, 汪亚平, 邹欣庆, 等. 京唐港曹妃甸港区海洋动力地貌调查报告[R]. 南京:南京大学, 1997. (WANG Ying, WANG Ya-ping, ZOU Xin-qing, et al. Investigation on coastal dynamic geomorphology in Caofeidian harbor area of Jingtang Port[R]. Nanjing: Nanjing University, 1997. (in Chinese))
- [5] 王 颖, 邹欣庆, 汪亚平. 唐山港曹妃甸港区开发海岸动力地貌研究[R]. 南京:南京大学, 2006. (WANG Ying, ZOU Xin-qing, WANG Ya-ping. Study on coastal dynamic geomorphology for development of Caofeidian harbor area of Tangshan Port[R]. Nanjing: Nanjing University, 2006. (in Chinese))
- [6] 陆永军, 徐 啸, 黄建维, 等. 唐山港曹妃甸港区波浪潮流泥沙数学模型及滩槽稳定性研究[R]. 南京:南京水利科学研究院, 2006. (LU Yong-jun, XU Xiao, HUANG Jian-wei, et al. Mathematical model of waves, tidal currents and sediment for Caofeidian harbor area of Tangshan Port and researches on stability of shoals and channels[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2006. (in Chinese))
- [7] 张明辉, 孙 路. 唐山港曹妃甸港区建港条件及建设方案研究[R]. 北京:交通部规划研究院, 2006. (ZHANG Ming-hui, SUN Lu. Study on construction conditions and schemes of Caofeidian harbor area of Tangshan Port[R]. Beijing: Traffic Planning Research Institute, 2006. (in Chinese))
- [8] 徐 啸, 余小建. 曹妃甸挖入式港池航道及防波堤工程泥沙运动、流场物理模型试验研究[R]. 南京:南京水利科学研究院, 2007. (XU Xiao, SHE Xiao-jian. Study on sediment motion and flow field of excavated harbor basin and channels with different breakwaters in the Caofeidian sea area by use of physical model[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2007. (in Chinese))

- [9] 季荣耀. 潮汐深槽动力地貌过程及工程效应研究[D]. 南京: 南京水利科学研究院, 2008. (JI Rong-yao. Morphodynamic processes and engineering reaction of tidal channels-taking Caofeidian nearshore area in Bohai Bay for example [D]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2008. (in Chinese))
- [10] 徐 啸. 曹妃甸海域潮汐水流模型试验及滩槽稳定性研究[J]. 纵横(两会专刊-唐山曹妃甸), 2008: 34-36. (XU Xiao. Study on physical model of flow field and researches on stability of shoals and channels in Caofeidian sea area[J]. Zongheng (Journal of the Two Conferences-Special Issue of Caofeidian, Tangshan), 2008: 34-36. (in Chinese))
- [11] 苏纪兰. 中国近海水文[M]. 北京: 海洋出版社, 2005. (SU Ji-lan. Hydrology in the China Sea[M]. Beijing: Ocean Press, 2005. (in Chinese))
- [12] 杨 华. 曹妃甸矿石码头冲淤变化分析[R]. 天津: 天津水运工程科学研究所, 2006. (YANG Hua. Analysis of change of deposition and erosion for Caofeidian ore terminal[R]. Tianjin: Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, 2006. (in Chinese))
- [13] 高善明. 全新世滦河三角洲相和沉积模式[J]. 地理学报, 1981, 36(3): 303-314. (GAO Shan-ming. Facies and sedimentary model of the Luan River Delta[J]. Acta Geographica Sinica, 1981, 36(3): 303-314. (in Chinese))
- [14] 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. (LU Yong-jun, JI Rong-yao, ZUO Li-qin, et al. Study on hydrodynamic and sedimentation problems in development of harbors located at bay-type tidal inlet[J]. Journal of Chinese Hydraulic Engineering, 2007, 38(12): 1426-1436. (in Chinese))
- [15] 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. (LU Yong-jun, ZUO Li-qin, JI Rong-yao, et al. Effect of development of Caofeidian harbor area in Bohai Bay on hydrodynamic sediment environment[J]. Advances in Water Science, 2007, 18(6): 793-800. (in Chinese))
- [16] LU Yong-jun, ZUO Li-qin, SHAO Xue-jun, et al. A 2D mathematical model for sediment transport by waves and tidal currents [J]. China Ocean Engineering, 2005, 19(4): 571-586.
- [17] LU Yong-jun, ZUO Li-qin, JI Rong-yao, 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.
- [18] LU Yong-jun, JI Rong-yao, ZUO Li-qin. 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.

Stability and engineering effect of shoals and channels in Caofeidian deep-water harbor area

LU Yong-jun^{1,2}, JI Rong-yao^{1,2}, ZUO Li-qin^{1,2}

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210029, China)

Abstract: Caofeidian sea area is the only waterway and harbor basin suitable for building a large-sized berth of 300 000 tons without excavation in Bohai Bay. In Caofeidian harbor area, the stability of the coastal system consisting of shoals and inlets under natural conditions is a key point. The harbor could be developed only if the coastal system is stable. The characteristics of waves, tidal currents, sedimentation and seabed evolution in the Caofeidian near-shore area is briefly described, and the trend of stability of shoals and channels is predicted based on the research on the formation of the coastal system. Engineering effect of some projects is studied such as the dam linking the Caofeidian island and the coastline, the shoal reclamation and the construction of ore terminals. The analysis results show that the deposition and erosion of the sea bed in front of Caofeidian foreland will reach its equilibrium 2-3 years after the construction.

Key words: evolution of shoals and channels; dynamic geomorphology; stability; deep-water harbor; Caofeidian; Bohai Bay