# 渤海湾曹妃甸深槽海区地形地貌特征及控制因素

褚宏宪<sup>1,2</sup>, 史慧杰<sup>1,2</sup>, 宗 欣<sup>3</sup>, 高小惠<sup>1,2</sup>, 方中华<sup>1,2</sup>, 刘晓东<sup>1,2</sup>

(1. 国土资源部油气资源和环境地质重点实验室,青岛海洋地质研究所,山东 青岛 266071; 2. 海洋国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室,山东 青岛 266061; 3. 大庆钻探工程公司钻井二公司,黑龙江 大庆 163413)

摘要:通过研究浅层地震剖面、侧扫声纳和水深地形等数据资料,得出,曹妃甸沙岛的岬角地貌引起 深槽海域局部潮流流速增大,甸头前沿深槽区以冲刷为主,最大水深达 42 m,刷新了渤海湾最大水深 记录,深槽部位的侵蚀量最大,深槽南坡冲刷幅度大于北坡,工程建设后期深槽区侵蚀冲刷程度有变 小变缓趋势。早期深槽的形成是由于浅部断层受深部构造影响发生阶梯状错断沉陷,海底地层形成古 凹槽,但深槽海底地层沉陷速率略大于沉积速率,使得深槽海域长期保持了渤海湾最大的水深环境。 初步得出在历史时期曹妃甸深槽经过2万 a 以上长期存在,深槽的走向经历了南北向-北东向-北西向的 转化过程。认为地质构造、古滦河三角洲演变、海洋水动力作用和人类活动等内外营力作用共同控制 了曹妃甸海区地貌体系的发育与演化。达到了研究渤海湾曹妃甸深槽海区地形地貌控制因素和深槽的 地质演化的目的,为曹妃甸港的规划、运营期维护和未来发展提供科学依据具有重要意义。

关键词: 曹妃句; 深槽; 潮流; 沉积; 冲刷 中图分类号: P737.23 文献标识码: A doi: 10.11759/hykx20140515002

曹妃甸位于河北唐山市唐海县南部海域, 距海 岸线约 18 km, 地理坐标 38°55′N, 118°30′E。"面向 大海有深槽, 背靠大陆有浅滩"是曹妃甸典型的地理 优势, 岛前南侧水深较大, 甸头南侧 500 m 海域即为 曹妃甸深槽, 近年来, 大规模的吹沙造地、工业建设 改变了滩海区原有的海洋动力边界条件, 势必引起 港区周围海域潮流、地貌特征、冲淤过程、泥沙运 动的改变。曹妃甸矿石码头位于曹妃甸甸头深槽边 缘, 码头前沿水深 25 m, 在风暴潮或地震等外力触 发下极易发生海底滑坡等地质灾害, 直接威胁矿石 码头安全, 对曹妃甸港造成巨大的安全隐患。

曹妃甸港在规划、设计阶段由南京大学、河海 大学、南京水利科学研究院等多家单位采用调查分 析、卫星遥感、现场测量、数学模型和物理模型等 多种手段,历时 10 a 多对曹妃甸地质地貌、水文泥 沙、波浪潮流等进行了大量的研究工作。根据陆永 军等<sup>[1]</sup>研究,曹妃甸港主体工程建成后,甸头前沿深 槽以冲刷为主,工程施工结束 2~3 a 后海底冲淤将基 本达到平衡,深槽部位最大冲深约 2.1 m。2008 年青 岛海洋地质研究所在曹妃甸南部海区进行了 1:5 万 浅地层剖面、水深测量和地质钻探等工作,调查发现 海底斜坡坡度较陡,甸头南侧存在海底滑塌和泥流 文章编号: 1000-3096(2016)03-0128-10

现象。赵鑫等<sup>[2]</sup>开展了围填海工程对渤海湾风浪场影响的研究,得出曹妃甸港口工程对海域波浪场的影响较大,有效波高减少值达 0.19 m。

综上所述,对于曹妃甸港甸头南侧海底斜坡及 海底深槽的研究程度还不够,深槽是曹妃甸港存在 的先决条件,曹妃甸港建成后深槽的地形地貌演变、 边坡的稳定性是关注的重点。本文基于研究区最新 获得的实测水深、全覆盖侧扫声纳等资料,研究曹妃 甸深槽地貌独特特征、海底浅部地层结构,分析深槽 的成因和演变及其地貌控制因素,以期为曹妃甸港 的规划、运营期维护和未来发展提供科学依据。

### 1 资料及方法

资料主要来源于青岛海洋地质研究所 1990 年、2008年实测高分辨率浅地层剖面同步水深测量

收稿日期: 2014-05-15; 修回日期: 2014-12-03

基金项目:国家自然科学基金项目(41276060);国家海洋地质专项 (GZH201200504,121201005000150004)

<sup>[</sup>Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41276060, Special Foundation for Chinese Marine Geology, GZH201200504, 121201005000150004]

作者简介: 褚宏宪(1973-), 男, 山东枣庄人, 教授级高级工程师, 硕 士, 主要从事地球物理调查研究, 电话: 13583252258, E-mail: chx-8@163.com

共计 2 050 km(图 1), 以及 2013 年 7 月在曹妃甸甸 头南侧深槽重点海域进行的浅地层剖面、侧扫声纳 和水深测量的加密测量共计 300 km, 并收集了 2004 年曹妃甸水深地形图。海上导航定位采用美国 Trimble 公司 DSM 132 型差分 GPS 定位仪, 定位精 度小于 1 m; 水深测量采用走航式连续测量的方法, 测量仪器采用加拿大生产的 320M 型数字测深仪, 测 量精度小于 3‰; 为实现高精度测量, 配置了涌浪滤 波器用以消除海浪起伏引起的误差<sup>[3]</sup>,并采用声速 仪准确测定海水声速,利用实测潮位站数据进行潮 汐改正,从而使最终水深测量的精度达到 10 cm,满 足海底地形变化分析的高精度需要。水深基准采用 曹妃甸当地理论深度基准面。本文利用上述获得的 水深地形和侧扫声纳资料研究曹妃甸深槽区海底 地形地貌特征,对获得的高分辨率浅层地震剖面 进行了精细解释,取得了一些新的地质认识。



图 1 研究区测线平面分布图 Fig. 1 Existing data distribution

# 2 地形地貌特征及控制因素分析

2.1 地形地貌特征和地形变化分析

#### 2.1.1 海底地形地貌

曹妃甸沙岛位于渤海湾北部岸线转折处,呈长 条状沿 NE-SW 方向延伸,沙岛以北现为曹妃甸工业 区(图 2)。海底的地形和地貌较复杂,属于现代海洋 动力地貌,主要划分为3个地貌体系单元,中间为曹 妃甸深槽地貌体系,西侧为南堡海岸地貌体系,东 侧为老龙沟泻湖地貌体系。

曹妃甸深槽地貌由曹妃甸浅滩和甸头前沿深槽 组成,曹妃甸海岸段双重岸线特征明显,内侧大陆 岸线为沿古滦河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<sup>[4]</sup>。曹 妃甸工程建设前,岛顶高程 2~4 m,沙岛长约 8 km, 宽 400~700 m;沙岛与大陆岸线之间为浅水泻湖区, 分布有大片浅滩.平均水深约 1.5 m;高潮时大部分 滩面被潮水淹没,仅中央沙堤出露。2003 年曹妃甸 开始大面积填海造陆,建设曹妃甸港口工业区,彻 底改变了滩海地貌,形成前岛后陆的格局,障壁岛 呈三角形突出于海中,对该区域的水动力、泥沙运动 及地貌发育起着重要的控制作用;甸头前沿即为渤 海湾潮汐深槽水域,甸头南侧水下岸坡陡峻,30 m 等深线距曹妃甸甸头仅 500 m 左右。

该深槽是渤海湾最深的水域,深槽走向近东 西,底部为侵蚀洼地,与障壁岛形状类似,洼地呈 三角形条带分布;沟槽北陡南缓,北坡坡度为 2°~4°,坡脚有海底滑塌分布,南坡坡度小于 0.5°。 槽底缺失全新世沉积地层,有侵蚀残留脊分布; 深槽区的海底沙波走向为近南北向,与侵蚀洼地 剖面、 的延伸方向近于正交。海底沙波、沙脊在实测水深 反应([ 39°11'N

剖面、浅地层剖面和侧扫声呐图像上均有较清晰的 反应(图 3)。



图 2 渤海湾曹妃甸海区水深地形及剖面位置图 Fig. 2 Topographic map of Bohai Caofeidian sea area





35 m 等深线面积约 3.8 km<sup>2</sup>, 深槽最大水深 2006 年测量为 41 m, 据 2008 年调查发现, 深槽最大水深 为 42 m, 刷新了渤海湾最大水深记录, 同时验证了 曹妃甸深槽目前处于冲刷环境。深槽向东南方向延伸 变浅, 直通渤海海峡, 其中 30 m 等深线长达 26 km, 宽约 3~6 km。

#### 2.1.2 海底地形变化

通过对比曹妃甸海区 2004、2008、2013 年的实 测水深资料,重点分析曹妃甸填海工程期间(2004 年 至今)甸头深槽内海底地形的变化情况。通过水深线 的对比分析(图 4),深槽海域等深线总体保持了原有 形态,0~30 m 等深线基本无变化,35、40 m 等深线面 积增加较大。2004~2013 年近 10 a, 35 m 等深线面 积增加较大。2004~2013 年近 10 a, 35 m 等深线面 和增加了 27%,2013 年其面积达 4.15 km<sup>2</sup>,其中北侧等深 线变化不大,向南平均向外扩大 100 m;2013 年 40 m 等深线面积达 0.14 km<sup>2</sup>,增加了 1.3 倍,表明深槽部 位的侵蚀量最大。为了更好地对比海底地形变化,在 深槽部位选取横切甸头深槽的 N-S 向剖面,剖面位 置见图 2。

该剖面长 6 000 m, 代表性点位的水深变化见表 1。从表 1 和图 5 可以看出, N-S 剖面整体上以侵蚀冲 刷为主, 个别地方有轻微淤积。冲刷最剧烈的地方在 距起点 1 600 m 处, 近 10 a 冲刷了 1.9 m, 总体上在 水深大于 35 m 区域冲刷的更为厉害。对比三期水深 数据发现, 水深最大值都在距起点 900 m 处, 说明甸



#### 图 4 深槽侵蚀洼地海域水深等深线对比图



Tab. 1	Water depth change in N–S trending section
	1 8 8

	水深(m)			冲淤速率(cm/a)		
距刮面起只的距离(m) ·	2004 年	2008 年	2013 年	2004~2008 年	2008~2013 年	2004~2013 年
0	0.3	/	/			
200	2.9	/	/			
400	18.8	/	/			
600	31.6	31.8	/	-4		
800	39.5	39.9	/	-8		
900	40.8	41.9	42.1	-22	-4	-13
1000	39.6	41.6	41.1	-40	10	-15
1200	38.5	39.3	39.6	-16	-6	-9
1400	37.6	38.8	38.4	-24	8	-8
1600	35.4	36.2	37.3	-16	-22	-19
1800	34.8	35.7	36.1	-18	-8	-13
2000	33.6	34.6	35	-20	-8	-14
2200	33.2	34	34.2	-16	-4	-10
2400	32.6	33.1	33.6	-10	-10	-10
2600	32.7	32.8	33.3	-2	-10	-6
2800	32.8	33.1	33.5	-6	-8	-7
3000	32.8	33.1	33.7	-6	-12	-9
3200	*	33.4	33.8		-8	
3400	*	33.5	34		-10	
3600	*	33.7	34.2		-10	
3800	*	32.7	32.7		0	
4000	*	30.6	30.9		-6	
4200	*	30.3	30.6		-6	
4400	*	29.9	30.5		-12	
4600	*	30.3	30.8		-10	
4800	*	30.1	30.5		-8	
5000	*	29.5	30		-10	
5200	*	30.1	30.4		-6	
5400	*	28.9	29.6		-14	
5600	*	29.1	29.2		-2	
5800	*	28.9	29.3		-8	
6000	*	29.5	30		-10	

注:水深一栏中,"/"表示因为矿石码头处于建设中无法测量;"\*"表示 2004 年水深测量没有覆盖到此区域。 冲淤速率一栏中, "-"表示冲刷;空白格表示无对比数据



图 5 N-S 向地形剖面 2004、2008 与 2013 年的水深变化 Fig. 5 Water depth change in N-S trending section

头深槽轴线在工程建设期间较稳定,无明显迁移趋势,但水深值增大,南坡冲刷幅度大于北坡;不同年份的监测数据表明侵蚀厚度有变化,2004~2008 年冲淤速率变化范围-4~-44 cm/a,平均值-14.9 cm/a,2008~2013 年冲淤速率变化范围-4~-22 cm/a,平均值-7.2 cm/a,2004~2013 年冲淤速率变化范围-6~-19 cm/a,平均值-11.1 cm/a,可以看出 2004~2008 年深槽区海底侵蚀冲刷的程度较大,2008~2013 年海底侵蚀冲刷的程度

#### 2.2 沉积特征

通过对地震剖面的频率、振幅和反射波特征等 属性进行解释,以及侧扫声纳声图的判读,结合地 质取样工作,进行海底表层沉积物的实验测试和沉 积物分类,研究沉积物的空间分布特征和变化趋势。

#### 2.2.1 沉积物类型

曹妃甸海域沉积物类型从浅水区到深水区,可 划分为潮滩相、浅海相、沙坝相 3 个沉积相。潮滩 相主要为粉砂和粉砂质砂,沉积物粒径较细;浅海 相沉积物以粉砂质黏土和黏土质粉砂为主,沉积物 较细,在深水区沉积物粒径最细;沙坝相沉积物主 要为细砂和中砂,粒径较粗;沙坝向陆侧的泻湖–潮 滩相沉积物又变细,主要为粉砂和粉砂质砂。从平面 分布上,沉积物粒径分布规律是由海向陆沉积物的变 化为细—粗—细<sup>[5-6]</sup>。沉积物另一平面分布特征是东粗 西细,曹妃甸以东沉积物粒径比西侧粗,反映出曹妃 甸海域表层沉积物搬运历史应为东侧滦河口入海泥 沙,自河口一直搬运到南堡滩海附近,随流速的降低 细粒沉积物搬运到曹妃甸西侧。目前随着滦河流量减 少和沿岸水土保持治理,泥沙供给量总体呈减小趋势。

底质沉积物分布与海洋水动力环境条件具有较 好的一致性,粉砂、细砂、粗粒沉积物分布于海底水 动力条件较强的位置,淤泥质粉土等细粒沉积物分 布在水动力条件较弱的位置。

#### 2.2.2 沉积物运移趋势

2005 年曹妃甸进海路建成后, 甸头南侧深槽区 域潮流流速有所增大, 港池内潮流流速降低, 甸头前沿 深槽内以冲刷为主, 港区和潮沟内以淤积为主<sup>[7]</sup>。曹妃 甸东北侧老龙沟水道的潮流流速有所降低, 老龙沟深 槽宽度有减小趋势, 深槽有向西摆动趋势<sup>[8]</sup>。进海路 的建成将曹妃甸以北浅滩的北部淤积区分成东、西 两部分, 淤积强度也较进海路建成前有所增加, 部 分淤积厚度达 6 cm 以上。曹妃甸东南侧向东北绵延 的淤积区以及蛤坨东侧的海沟淤积量较建成前有所 减少。南堡南侧的冲刷区面积较进海路建成前略有 减小, 冲刷区以南淤积区面积略有增加, 南堡西侧 的顺岸淤积带略有加强, 但变化量均较小。其他地区 的冲淤趋势及强度与进海路建成前基本一致。

#### 2.3 地形地貌的控制因素

海底地貌的发育和演化受到了地球内外营力的 综合作用,曹妃甸海岸地貌类型复杂多样,地质构 造形成的古地貌是控制区域海底地貌的基础,曹妃 甸海区经历了古滦河三角洲的演变,波浪和潮流等 现代海洋水动力对海底的侵蚀和堆积作用是塑造曹 妃甸海底地貌的重要因素。

#### 2.3.1 地质构造基础

2.3.1.1 区域构造特征

渤海湾盆地为新生代裂陷盆地,其构造演化经 历了古近纪断陷(裂陷)和新近纪以来拗陷(后裂陷)两 个阶段,经过古近纪断陷阶段后,新近纪以来整体 沉降<sup>[9]</sup>。曹妃甸海区的构造位置属黄骅拗陷北部的南 堡拗陷腹地,基底构造活动强烈,燕山活动奠定了 本区的主要构造格局<sup>[10]</sup>。控制渤海湾盆地古近纪拗 陷发育的断陷主断裂均属盆地基底断裂,渤海湾盆 地总体伸展方向为 NW-SE 向,其中北侧黄骅拗陷总 体呈 NE 向撒开而向 SW 向收敛,呈左阶斜列分布, 组成黄骅帚状分布断裂系<sup>[11]</sup>。

研究区内断裂构造较发育,位于 NW 向张家口 —蓬莱地质构造带和 NE 向华北平原地质构造带交 汇区,周边存在多条活动断裂,历史上发生多次强震, 主要有 1976 年唐山 7.8 级地震,1969 年渤海 7.4 级地 震,1976 年宁河 6.9 级地震等。研究区南即为渤中活 动断裂,地震烈度区划为 VII度,本区潜在震源区上 限划为 6.5 级,属地壳不稳定区。

#### 2.3.1.2 深槽地质构造成因解释

渤海地区所处的北华北盆地是中国东部一个规 模较大的新生代裂陷盆地,其构造演化经历了古近 纪断陷和新近纪以来拗陷两个阶段<sup>[12]</sup>、新近纪以来 渤海湾盆地处于整体沉降阶段。 强烈的降起和断陷 的构造格局对渤海海底地貌发育的控制作用明显。 NE 和 NNE 为主的走滑断裂构造控制了海底地貌的 基本格局<sup>[13]</sup>, 堆积作用为主的渤海湾与新生代的拗 陷相吻合,曹妃甸位于南堡拗陷的曹妃甸次拗,南 堡拗陷是渤海湾盆地的一个中、新生代发育起来的 小型拗陷、曹妃甸深槽也是沿断裂发育的,研究区 内断裂十分发育、断层走向以北东和北东东向为主, 其次为北西向、研究区内规模最大的北东向断裂系 为沙北断裂带、由一系列平行的北东向断裂组成, 该断裂系发育于古近纪,新构造期断裂,是影响本 区的主控断裂。继续活动断裂构造控制了海底地貌 的基本格局和晚第四纪以来的沉积。通过浅地层剖 面解释成果,发现深槽海域断层较发育,为阶梯状 地堑断层组合,且为高角度正断层,上盘下降,下盘 上升,下降盘沉积厚度大于上升盘。前文已提及曹妃 甸深槽的总体走向为北西-东南向、靠近曹妃甸沙岛 南侧深槽走向为近东西向,向北东方向有一定延伸, 因此浅部海底断层走向与曹妃甸深槽走向具有较 好的相关性。海底 80 m 深度以内地层划分了 T<sub>0</sub>~T<sub>6</sub> 共7个反射界面、深槽处的各层地层均未缺失。但因 海底浅部断层的存在、海底地层发生了明显的错断 现象, 深槽部位  $T_1 \sim T_4$  地层界面均发生明显错断, 且 T<sub>4</sub> 界面以上的地层在深槽部位均有地层厚度增厚的 趋势(图 6)。





由此可见,曹妃甸深槽早期的形成是由于深部 构造作用,深部构造处于缓慢沉陷过程中,浅部断 层受深部构造影响发生阶梯状错断沉陷,海底地层 形成古凹槽,上部地层逐渐沉积与沉陷具有较好的 一致性,虽然深槽部位的地层沉积厚度大于其他部 位,但地层沉陷速率略大于沉积速率,使得深槽海 域长期保持了渤海湾最大的水深环境。

#### 2.3.2 古滦河三角洲演变

曹妃甸海区位于渤海湾北部、为古滦河三角洲 发育区、各时期的三角洲发育厚度和轴线位置不同、 渤海湾构造格局对海底地貌的发育起着控制作用, 不同时期三角洲厚度变化与各时期气候变化和海平 面变化、古河流、海洋浪潮流环境等有关, 曹妃甸地 区的古滦河三角洲发育干全新世中期。晚更新世早 期、渤海开始海侵、海平面上升为稳定的高海面时 期。晚更新世晚期为晚大理盛冰期、气候寒冷干燥、 海平面下降剧烈,约为150~160 m,大规模的海退造 成陆地的强烈侵蚀, 渤海地区长时间出露成为陆地 沉积环境、华北平原河流纵横、发育了以河流相沉 积为主的陆相层。当时的曹妃甸深槽位置为古河谷 或古河道。早全新世时期、气候普遍转暖、海平面回 升,曹妃甸地区变为滨岸浅海区,发育了滨海相沉 积地层。全新世中期,出现了冰后期最高海平面,古 滦河三角洲开始发育, 滦河三角洲是多期三角洲的 复合体、它的发育模式是三角洲扇形体从西向东迁 移,迁移到复合体东端之后再回到西端,并向前加积, 再重复从西向东的迁移过程。全新世晚期约 800 aBP 左右,海平面下降,海水退到现代海岸线位置<sup>[14-15]</sup>,滦 河改道北迁,缺少泥沙供应的三角洲停止发育,风浪、 潮流开始对三角洲起蚀退改造作用。由此可见,曹妃甸 地区在全新世晚期以来处于废弃的三角洲沉积环境, 逐渐形成了现今的海岸地貌和深槽地貌[16]。

通过对 T<sub>0</sub>~T<sub>6</sub>反射界面解释成果分析, 深槽位置 T<sub>0</sub>~T<sub>5</sub> 反射界面形态与海底深槽地形均具有较好的 一致性, 各反射界面最深点位置与现在海底地形基 本一致。T<sub>0</sub>反射界面为目前的海底, T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>反射界面 显示, 西侧深槽走向为北西向, 东侧深槽走向为北 东向。T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>反射界面之间为三角洲相沉积, 沉积厚 度 5~30 m, 中部与西部分别有两个南北方向厚度最 大的区域(图 7a), 与三角洲扇状体的轴线大体一 致。该层有发育于古滦河三角洲之上的古河谷, 为 河流相沉积亚层, 切割三角洲形成古河道, 这是埋 藏于海底的第一个古河道带<sup>[17]</sup>, 具有交叉网状特点, 其中河流沉积物最大厚度达 15 m(图 7b); 古河道在 全新世海侵海平面上升的过程中, 被泥沙沉积逐渐 掩埋称为埋藏河谷, 在现代海水潮流的侵蚀作用下 逐渐形成侵蚀洼地地貌。 $T_3$ 反射界面显示,曹妃甸 深槽走向为北北东向。 $T_4$ 反射界面显示,曹妃甸深 槽走向为南北向,同时在调查区的西南角发育一个近 南北向的深槽。 $T_4$ 、 $T_5$ 反射界面显示,曹妃甸深槽开始 发育时期,深槽的范围较大,其最深点位置与现在地形 一致,走向近南北向。 $T_5$ 反射界面在海底下 60 m 左右, 而据曹妃甸深槽区 96-24 孔地质资料,孔深 42 m 地层 对应地质年代为 18 595 aBP $\pm$ 680 aBP 与 21 663 aBP $\pm$ 750 aBP 之间<sup>[14]</sup>,因此 T<sub>4</sub>、T<sub>5</sub>反射界面为早、中更新世陆相沉积层侵蚀界面,年代更为久远。由此可以保守得出在历史时期,曹妃甸深槽是经过 2 万 a 以上长期存在,深槽区为多期古河道发育区,深槽的走向经历了南北向—北东向—北西向的转化过程,在曹妃甸港口的百年设计使用期内是有利的。



a. 三角洲; b. 古河道 a. delta; b. ancient river

#### 2.3.3 海洋水动力作用

曹妃甸近岸海区无大河注入,流入本海区的主 要有大清河、小清河、青龙河等小型河流,上游来水 来沙量极小,径流影响基本可以忽略。因此,现代海 洋水动力条件是塑造曹妃甸海岸地形地貌的主导因 素,现代水动力条件主要包括波浪和潮流。

2.3.3.1 波浪作用

波浪作用对曹妃甸沙岛及岸滩影响较为明显, 特别是大风天气造成的大浪、中浪对含沙量和岸滩 形态塑造有重要作用。在小浪或无浪气象条件下曹 妃甸海域含沙量不大,随着风浪增大,海域含沙量 剧增,五级风浪海域含沙量是二级风浪的40倍以上; 当发生风暴潮时,海底冲刷变化较大,使人工岛等 设施周围冲刷侵蚀加大<sup>[18]</sup>。

2.3.3.2 潮流作用

曹妃甸海域位于渤海湾口北侧,主要受渤海潮 波系统控制,潮汐性质属于不规则半日潮。潮流基本 呈往复流形式,涨潮流向西,落潮流向东;涨、落潮 水流受地形控制作用明显,近岸浅滩海区潮流主流 流向有顺岸或沿等深线方向运动的特点。曹妃甸深 槽海区潮流动力为渤海湾最强,存在潮流流速局部增 大区,且分布形态与海底地形分布相似,潮流流速自 甸头向外海随着岬角效应的减弱而逐渐减小<sup>[21-22]</sup>。古 滦河入海泥沙经动力较强的波浪与潮流共同搬运作 用,经横向堆积形成了曹妃甸离岸沙坝,沙坝形成 的岬角地貌构成了深槽的边界条件,也是深槽形成 与维持的重要海洋动力条件。独特地形条件引起局 部潮流增大,海底冲刷能力强,使深槽呈轻微冲刷 态势。

#### 2.3.4 人类活动作用

自 2003 年建设连接曹妃甸沙岛与大陆的长 18 km 通道公路以来, 曹妃甸港区开发强度日益增大, 25 万 t 矿 石码头等工程相继建成, 日益增强的人类活动在很 大程度上改变了曹妃甸海区的水动力条件和地貌演 变趋势, 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。

曹妃甸进海路的建设将南堡海域划分为东部和 西部两个海域,东、西部海域涨落潮流不能进行交换, 各自形成了独立的封闭体系,因此在泥沙运移时形 成了各自的淤积区。在青林路大堤两侧的淤积区,从 卫星遥感图片上也可以清晰的看出,水深逐渐变浅, 泥沙沉积逐渐形成。

另外,根据陆永军等对曹妃甸港工程效应的研究,由于曹妃甸港区大面积回填施工改变了海洋动 力边界条件,深槽区域潮流流速增大,港区以北潮 流速降低,使得近工程区海域含沙量减小。工程建设 初期,曹妃甸深槽区以冲刷为主,曹妃甸港北侧港 池和浅滩以淤积为主,施工后3a内曹妃甸深槽海域 海底冲淤基本达到动态平衡状态<sup>[23]</sup>。根据水深监测 的数据分析结果,2004~2008 年深槽区海底侵蚀冲刷 的程度较大,2008~2013 年海底侵蚀冲刷的程度变小 变缓,海底侵蚀程度的变化与 2003 年开工建设的曹 妃甸工程有较大的关系,工程建设初期,深槽区域 潮流流速变化大,海底侵蚀冲刷加剧,2008 年以后为 工程建设后期,大面积的回填改造早已完成,地面 工程的建设对海洋环境动力边界条件基本没有影响, 曹妃甸深槽海域海底冲淤逐渐达到动态平衡,以轻 微冲刷为主。

## 3 结论

 1)曹妃甸海岸地貌具有双重岸线特征,以曹妃 甸沙岛呈岬角为界,内侧大陆岸线原为沿古滦河三 角洲前沿发育的冲积海积平原,现吹填造陆为曹妃 甸工业区,形成前岛后陆的格局。曹妃甸甸头前沿 500 m 即为潮汐通道深槽,为渤海湾最深处,最大水 深达 42 m,形成沙岛与深槽相伴的独特曹妃甸深槽 地貌。曹妃甸深槽的总体走向为北西—东南向,靠近 曹妃甸沙岛南侧深槽走向为近东西向,向北东方向 有一定延伸。

2) 通过 2004、2008 和 2013 年的水深资料对比 分析, 深槽海域等深线总体保持了原有形态, 深槽 轴线位置没有明显移动, 深槽洼地区处于轻微冲刷, 近 10 a, 35 m 等深线向南移动约 100 m, 40 m 等深线 面积增加 1.3 倍, 深槽最大冲淤速率–19 cm/a。表明 深槽海区为冲刷环境, 深槽部位的侵蚀量最大, 深 槽南坡冲刷幅度大于北坡, 2008 年以后深槽区侵蚀 冲刷程度有变小变缓趋势。

3) 曹妃甸深槽区断层较发育,为阶梯状地堑断 层组合,有多期古河道发育,古河道具有交叉网状 特点,初步得出在历史时期曹妃甸深槽是经过2万a以 上长期存在,深槽的走向经历了由南北—北东—北 西向的转化过程。

 3) 沉积物从沿岸到深水区粒径由粗到细变化, 曹妃甸沙岛近岸浅滩主要为细砂,深水区底质主要 为粉砂质粘土。总体上呈近岸浅滩区沉积物粒径粗, 深水区沉积物粒径细的分布规律。

5) 曹妃甸深槽海区地形地貌的发育受到了地质 构造、古滦河三角洲演变、海洋水动力和人类活动 等内外营力的共同控制作用。海底深部构造的沉陷 是形成曹妃甸深槽海区地形地貌的基础,深槽海底 地层因浅部断层沉陷作用形成海底凹槽;在海洋水 动力作用下古滦河废弃三角洲演变形成了曹妃甸岬 角地貌和深槽地貌,曹妃甸工程建设对潮滩的淤积 作用明显增强,并使深槽区处于冲刷环境。

#### 参考文献:

[1] 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,2009,12(4):

33-34.

Lu Yongjun, Ji Rongyao, Zuo liqin. Stability and engineering effect of shoals and channels in Caofeidian deep-water habor area[J]. Advance in Water Science, 2009, 12(4): 33-34.

[2] 赵鑫,孙群,魏皓.围填海工程对渤海湾风浪场的影响[J].海洋科学,2013,37(1):7-15.

Zhao Xin, Sun Qun, Wei Hao. Effects of coastal reclamation on the wave fields in the Bohai Bay[J]. Marine Sciences, 2013, 37(1): 7-15.

[3] 褚宏宪, 史慧杰, 杨源. 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): 51-62.

Chu Hongxian, Shi Huijie, Yang Yuan. The application of surge wave filter to improve the accuracy of seabed topography[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2010, 30(4): 51-62.

[4] 吴澎,姜俊杰.曹妃甸港区选址研究[J].水运工程, 2011,9(9):457-458.

Wu Peng, Jiang Junjie. Site selection of Caofeidian port area[J].Port and Waterway Engineering, 2011, 9(9): 457-458.

 [5] 闫新兴, 霍吉亮. 河北曹妃甸近海区地貌与沉积特征 分析[J]. 水道港口, 2007, 28(3): 166-168.

Yan Xinxing, Huo Jiliang. The analysis of sea area landform and sedimentary characteristics in Hebei caofeidian[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2007, 28(3): 166-168.

[6] 贾玉连,柯贤坤,许叶华,等.渤海湾曹妃甸沙坝-泻 湖海岸沉积物搬运趋势[J].海洋科学,1999,23(3): 56-60.

Jia Yulian, Ke Xiankun, Xu Yehua, et al. Sedimentary transport trends of within a sand bar/lagoon system in the Bohai Sea[J]. Marine Sciences, 1999: 56-60.

 [7] 何华春,李海宇,高萱,等.渤海湾曹妃甸深水港老 龙沟潮流通道稳定性研究——数字海洋技术的应用[J]. 海洋通报,2009,28(4):154-157.

He Huachun, Li Haiyu, Gao Xuan, et al. The stability of Laolonggou tidal channel analysis based on digital ocean information technology[J]. Marine Science Bulletin, 2009, 28(4): 154-157.

[8] 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]. 水道港口, 2007, 18(6): 94-95.

Lu Yongjun, Zuo Liqin, Ji Rongyao, et al. Effect of development of Caofeidian harbor area in Bohai Bay on hydrodynamic sediment environment[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2007, 18(6): 94-95.

[9] 徐杰,冉勇康,单新建,等.渤海海域第四系发育概况[J]. 地震地质,2004,1(26):24-28.

Xu Jie, Ran Yongkang, Shan Xinjian , et al. Development of the quaternary system in the Bohai sea area[J]. Seismology and Geology, 2004, 1(26): 24-28.

[10] 陶常飞. 曹妃甸浅滩海洋工程地质特征及插桩深度

研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008.

Tao Changfei. Reaserch on the characteristics of marine engineering geology and the depth of pile penetration in Caofeidian shoal[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2008.

 [11] 徐杰,周本刚, 计风桔,等. 华北渤海湾盆地区大震 发震构造的基本特征[J]. 地震地质, 2012, 4(34):
 620-621.

Xu Jie, Zhou Bengang, Ji Fengjü, et al. Features of seismogenic structures of great earthquakes in the Bohai Bay basin area North China[J]. Seismology and Geology, 2012, 4(34): 620-621.

- [12] 徐杰,周本刚, 计风桔,等. 渤海地区新构造格局[J].
  石油学报, 2011, 3(32): 444-445.
  Xu Jie, Zhou Bengang, Ji Fengjü, et al. A primary study on the neotectonic pattern of the Bohai area in China[J].
  Acta Petrolei Sinica, 2011, 3(32): 444-445.
- [13] 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, 1(31): 105-108.

Liu Xiaoyu, Dong lifeng, Chen Yilan, et al. Analysis on geomorphological features and their controlling in the Bohai Sea[J]. Advances in Marine Science, 2013, 1(31): 105-108.

- [14] 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): 50-52.
  Wang Yan. Restorations of paleoenvironments in Caofeidian area since the last stage of the late pleistocene epoch[J]. Journal of Oceanography of Huanghai and Bohai Sea, 2000, 18(3): 50-52.
- [15] 刘建国,李安春,徐兆凯.全新世以来渤海湾沉积物的粒度特征[J].海洋科学,2006,30(3):60-64.
  Liu Jianguo, Li Anchun, Xu Zhaokai. Grain size characteristics of sediments in Bohai Bay during Holocene[J]. Marine Sciences, 2006, 30(3): 60-64.
- [16] 白大鹏. 冀东南堡海区潮流动力地貌及灾害地质研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
  Bai Dapeng. The geological disasters and tidal dynamic geomorphology of Nanpu area in the east of Bohai Bay[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011.
- [17] 朱琳. 浅剖资料高精度处理与解释方法研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.

Zhu Lin. Study on high-precision method of shallow profile seismic data processing and interpretation[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010.

- [18] 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]. 海洋地质前言, 2013, 29(6): 41-43.
  Chu Hongxian, Li Qiang, Wang Wenhui, et al. Scout and deposit analysis around artificial island at Caofeidian shallow sea[J]. Marine Geology Frontiers, 2013, 29(6): 41-43.
- [19] 王健,刘家顺,宋利杰.曹妃甸港区水下泥沙冲淤监 测系统[J].中国港湾建设,2010,12(6):43-44.

Wang Jian, Liu Jiashun, Song Lijie. Monitoring system for underwater erosion and deposition in Caofeidian harbour[J]. China Harbour Engineering, 2010, 12(6): 43-44.

[20] 孙长青,郭耀同,赵可胜. 渤海湾海域潮流数值计算[J]. 海洋科学, 2004, 28(8): 33-37.

Sun Changqing, Guo Yaotong, Zhao Kesheng. Numerical computation of tidal current in the Bohai Bay[J]. Marine Sciences, 2004, 28(8): 33-37.

- [21] 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 Caofeidian channel in the Bohai Bay[J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 3(66): 348-355.
- [22] 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):108-109.
  Suo Anning, Zhang Minghui, Yu Yonghai, et al. Loss appraisal on the value of marine ecosystem services of the sea reclamation project for Caofeidian[J]. Marine Sciences, 2012, 36(3): 108-109.
- [23] 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):33-36.

Lu Yongjun, Ji Rongyao, Zuo Liqin. Formation mechanism and stability of caofeidian channel in the Bohai Bay[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 3(66): 33-36.

# Characteristic geomorphology and controlling factors of Caofeidian Channel in the Bohai Bay

# CHU Hong-xian<sup>1, 2</sup>, SHI Hui-jie<sup>1, 2</sup>, ZONG Xin<sup>1, 2</sup>, GAO Xiao-hui<sup>1, 2</sup>, Fang Zhong-hua<sup>1, 2</sup>, LIU Xiao-dong<sup>1, 2</sup>

(1. Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resources and Environmental Geology, Ministry of Land Resources, Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China, 2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266061, China, 3. Daqing Drilling & Exploration Engineering Corporation No.2 Drilling Company, Daqing 163413, China)

**Received:** May 15, 2014 **Key words:** Caofeidian; channel; tide; deposit; wash

**Abstract:** In this study, using the shallow seismic detection, side-scan sonar, and bathymetric survey data of multiple historical periods, we outline geomorphic features and characteristics of the bottom sediments of the Caofeidian Channel. Results indicate that unique terrain conditions cause the local enhancement of the tidal current. The channel at the front end is dominated by erosion, and the maximum water depth reaches 42 m, which sets the highest record for water depth in the Bohai Bay. The greatest amount of erosion is at the channel, and the scouring magnitude on the south slope is greater than that on the north slope. The scouring degree of seabed erosion was smaller in the project construction period. We can preliminarily conclude that the formation of the early channel occurred because of shallow step-fault subsidence due to the influence of the deep structure. However, the subsidence rate of the deep structure is slightly less than the deposition rate of the upper strata, and thus, the channel sea area maintains the maximum depth of the Bohai Bay. The Caofeidian Channel has existed for more than 20 000 years. The directional trending of the channel has experienced a transition from NS to NE and then to NW. We conclude that endogenic and exogenic processes, such as those of the geological structure, the evolution of the ancient Luanhe River Delta, marine hydrodynamics, and human activity have jointly controlled the development and evolution of the geographic system in the Caofeidian sea area.

Studies on the controlling factors of the sea topography and the geological evolution of the deep grooves of the Bohai Bay and Caofeidian deep trench are significant to establish a scientific basis for the planning, operation, port maintenance, and future development of Caofeidian.