

黄梁, 陈沈良, 程武风, 等. 1985 年以来黄河三角洲东营港工程变化与海床冲淤演变响应关系[J]. 海洋地质前沿, 2023, 39(1): 59-69.

HUANG Liang, CHEN Shenliang, CHENG Wufeng, et al. Response of Dongying Port project change to seabed erosion and siltation since 1985[J]. Marine Geology Frontiers, 2023, 39(1): 59-69.

1985 年以来黄河三角洲东营港工程变化与海床冲淤演变响应关系

黄梁, 陈沈良*, 程武风, 李鹏, 姬泓宇

(华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200241)

摘要:河口三角洲区域地质环境脆弱, 对环境变化响应敏感, 三角洲港口冲淤演变受工程结构影响较大。黄河三角洲的东营港区域以粉砂质海岸为主, 区域内泥沙运移活跃, 此类区域港口建设的关键问题在于工程结构导致的海床冲淤变化。通过东营港建港以来实测水深数据构建水下地形数字高程模型 (DEM), 并结合水动力数值模拟, 探讨了东营港冲淤演变过程和工程影响。结果表明, 由于波浪和潮流导致的海底地形变化, 东营港近岸海域的冲淤演变形势已从单一侵蚀转变到近岸侵蚀、离岸淤积的新情势; 工程结构影响局地潮流流速和流向, 口门处出现高速横流, 最大流速可达 0.7 m/s; 高流速导致北防波堤的堤头位置出现直径约 1 km 的冲刷坑; 工程结构的遮蔽区有促淤效应, 遮蔽区大小与潮流流向、工程结构-岸线夹角有关, 但在波浪、余流的作用下, 2007—2015 年工程结构遮蔽区依旧存在 0.5 m 以上的侵蚀。持续的侵蚀作用使海域防波堤和海堤的不稳定性加剧, 迫切需要加强检测与防护。

关键词:冲淤演变; 工程结构影响; 水动力模型; 工程结构稳定性; 东营港; 黄河三角洲

中图分类号: P753

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2021.295

0 引言

河口三角洲具有环境优美、资源丰富、地势平坦等优势, 全球有约 5 亿人居住在三角洲区域^[1], 港口作为人员和货物流转的重要基础设施, 在三角洲区域社会经济发展中具有极为重要的作用; 但是港口工程的建设会引起附近海域水动力的显著改变, 从而导致地貌的剧烈变动^[2]。海床的淤积会导致港口通航能力降低, 而侵蚀则对工程结构的稳定性构成威胁^[3], 因此, 在三角洲港口工程建设和

维护中, 工程结构导致的海床冲淤问题备受相关部门重视。例如长江口北槽航道的回淤^[4-5]以及尼罗河三角洲的 Damietta 港西面码头等深线前移^[6]等问题都得到了业内研究人员的关注。

黄河三角洲曾是世界大河三角洲造陆最快的区域之一, 近年来, 受气候和人类活动干预, 黄河三角洲正经历从快速淤积造陆到显著蚀退的转型^[7-8]。东营港是黄河三角洲区域最大的港口, 在黄河三角洲转型过程中, 其近岸海域的冲淤情势也发生了明显改变。黄河三角洲沿岸是典型的粉砂质海岸, 在波浪、潮汐等海洋动力作用下泥沙输移活跃, 因此, 东营港区域海床冲淤极易受到工程结构的影响^[9]。以往研究显示, 东营港引堤的建设影响潮流运动和波浪传播, 导致表层沉积物的分布存在空间差异^[10]; 工程结构是造成东营港航道淤积和局部冲淤形势改变的重要原因^[11-12]。

以往的研究都认识到工程结构对于东营港附近海床冲淤的显著影响^[10-12], 但工程结构对海床冲淤的影响机制尚不明晰。本文基于 1985—2015 年

收稿日期: 2021-11-15

资助项目: 国家自然科学基金“黄河三角洲地貌演变的动力机制与环境效应”(U1706214); 国家重点研发计划“黄河三角洲海岸演变过程与动力机制”(2017YFC0405503)

作者简介: 黄梁(1998—), 男, 在读硕士, 主要从事河口海岸学及工程应用方面的研究工作。E-mail: cn.huangliang@foxmail.com

* 通讯作者: 陈沈良(1964—), 男, 博士, 教授, 主要从事河口海岸学及其应用方面的研究工作。E-mail: slchen@sklec.ecnu.edu.cn

实测水深数据, 阐述东营港近岸海域冲淤演变过程, 采用水力数值模拟, 分析研究区港口工程结构对动力地貌环境的影响, 并结合波浪和潮流作用探讨了工程结构对海床局地冲刷和工程结构遮蔽区冲淤的影响, 分析了东营港区域和局地的冲淤演变机制, 以为三角洲港口工程结构的建设、管理和维护提供科学依据。

1 研究区概况

东营港位于黄河三角洲北部岸段, 其附近海岸和海底地形由黄河在 1972—1976 年行河刁口河流路携带的入海泥沙堆积而成。表层沉积物以细颗粒泥沙为主, 岸滩平缓开阔, 坡度 0.1‰~0.15‰^[10], 1976 年, 黄河尾闾河道南迁, 泥沙来源断绝导致东

营港区域侵蚀严重。

东营港区域为典型的正规日潮类型, 涨潮为 SE 向, 落潮为 NW 向, 潮流以往复流的形式运动, 潮流椭圆率 < 0.1, 主流与岸大致平行^[13]。据东营港气象资料统计, 研究区常风向为 S 向, 强风向为 NE 向^[10,13-14]。波浪以风生浪为主, 浪向与风向基本一致, 常浪向与强浪向均为 NE 向, 波浪全年平均周期为 5.8 s^[14], 14 m 水深处实测最大波高为 5.2 m, 平均波高 3.6 m^[15]。

自 1985 年东营港开始建设以来, 目前已建设有防波堤 3 条, 引桥 1 座, 其工程建设大致分为港池建设、引桥建设和防波堤建设 3 个阶段(图 1)。为探究工程与海床冲淤的响应, 本文研究区域为东营港工程结构区及其附近海域。

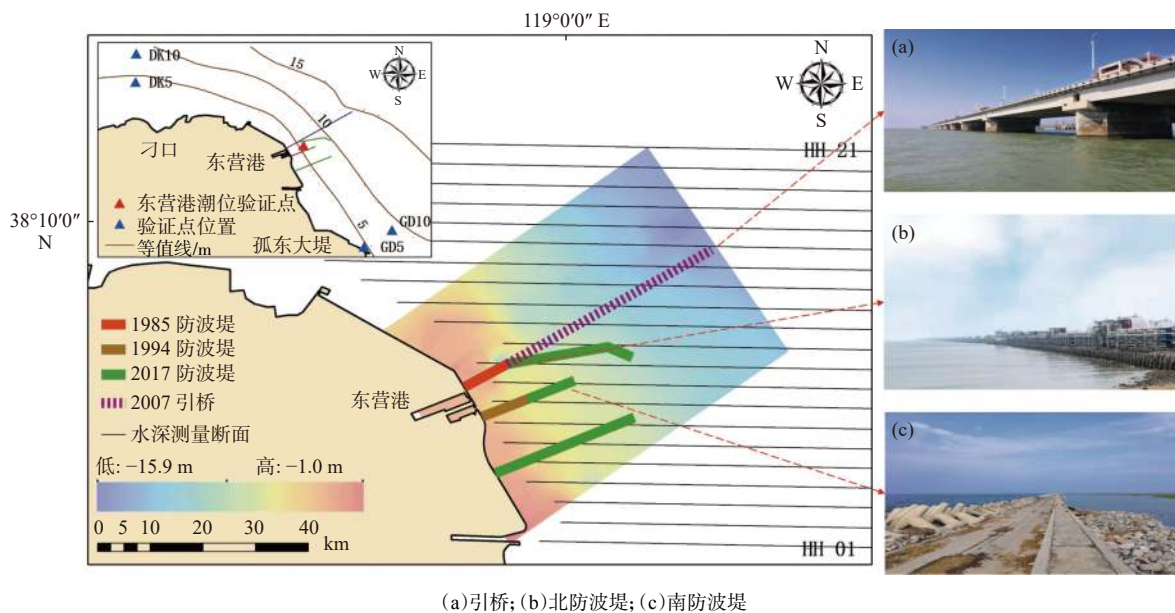


图 1 东营港建设情况及取样位置

Fig.1 The construction of Dongying Port and the location of sampling point

2 材料与方法

2.1 实测数据

2.1.1 水深地形数据

收集整理黄河水利委员会 1985、1992、2000、2007 和 2015 年水深测量资料, 水深测量资料覆盖整个黄河水下三角洲, 提取从神仙沟起往北共计 21 个断面(图 1)。断面水深测量时间通常为测量年份的 8、9 月进行, 在测量时, 采用 AG122 GPS 信标机进行实时差分定位, 定位位置误差 < 3 m; 水深

测量使用 SDH-13D 数字化测深仪, 测深误差 $E = 0.4\% \times h \pm 0.5 \text{ cm}$, 式中, h 为测点水深。由于研究时间尺度内东营港区域水深变化通常 > 0.5 m, 因此, 测深误差在研究允许范围内。测量断面为平行 EW 向, 断面间距约为 1 km, 断面内测量点间距约为 250 m, 近岸点平均距岸 800 m, 测量点插值生成的地形可以满足研究需要。断面测量的高程基准面为 1956 年黄海基准面, 平面坐标系采用北京 54 坐标。将历年水深断面测量数据通过克里金插值法分别构建水下地形数字高程模型(DEM), 通过空间叠加各年份 DEM, 得到不同时期的地形冲淤变化。

收集整理“我国近海海洋综合调查与评价(908)专项”实测 5 km×5 km 分辨率的渤海水深地形数据, 调整到黄河水利委员会 2015 年实测的黄河三角洲地形数据相同坐标系后, 融合形成计算域的地形数据。通过国家海洋科学数据中心网站 (<http://mds.nmdis.org.cn/>), 下载空间分辨率为 2 km×2 km 的全球海底地形数据, 提取大连-烟台以外区域的地形, 用于矫正大连-烟台的潮波变形。

2.1.2 水文数据

东营港位于孤东-刁口区域的中心位置, 距离孤

东、刁口的直线距离仅约为 20 km, 区域内水动力环境相似。因此, 采用课题组于 2018 年 8 月 20—30 日在孤东大堤和刁口河外 5、10 m 等深线分别进行的水文泥沙周日定点观测(图 1)数据进行模型的率定工作。周日定点观测内容包括表、中、底 3 层的流速、流向, 观测资料取平均值后, 用于率定二维水动力模型的流速、流向。通过水利部黄河委员会官方网站水情日报 (<http://www.yrcc.gov.cn/>), 获取黄河最下游的水文站利津站(37°31' N, 118°18' E)流量(图 2), 作为水动力模型黄河口边界条件。

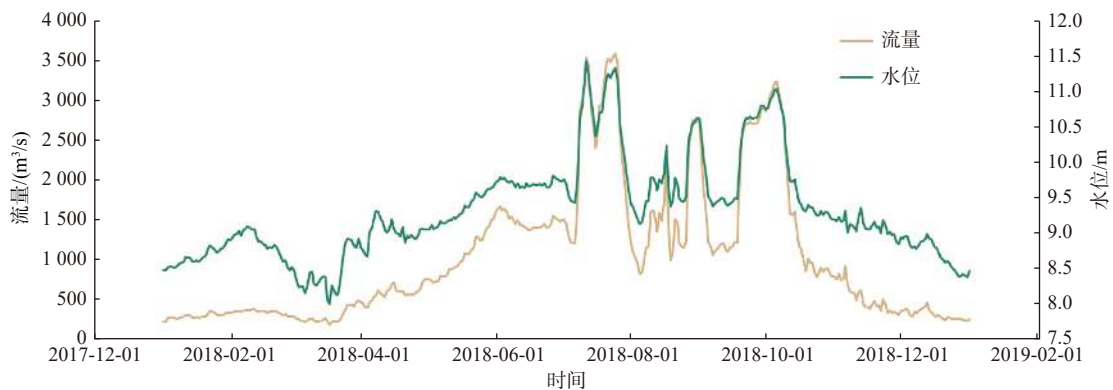


图 2 利津站水位 2018 年 8 月水位-流量图

Fig.2 Water level vs discharge in August 2018 at Lijin station

2.2 潮位、气象数据

2.2.1 潮位数据

为表现地形引起的潮波变形, 通过 MIKE 21 Toolbox 的潮位预测模型提取-50 m 以深区域的潮位, 使用 2.1.1 所述的全球水深地形数据进行水动力模拟, 提取模拟结果中烟台-大连潮位过程, 将其高程矫正至 1985 国家高程基准后, 作为水动力模型的“大连-烟台”边界条件。在潮汐表中提取东营港潮位数据, 矫正高程基准至 1985 国家高程基准, 用于率定水动力模型的潮位。

2.2.2 气象数据

针对研究区的需要, 选择欧洲中期天气预报中心的 ERA-interim 再分析资料, 其可以提供每天 00: 00、06: 00、12: 00 和 18: 00 时每日 4 次的 10 m 高度 U、V 方向风速和同时刻的气压数据, 空间分辨率为 0.25°×0.25°, 用作水动力模型的风场输入数据。

2.3 水动力模型

2.3.1 模型介绍与计算

研究区域的长度与宽度远大于水深, 符合宽浅

水深的定义, 水体垂向差异可以忽略。因此选用 MIKE 21 水动力模块构建二维水动力模型, 模拟受潮汐、风浪作用下的东营港海区水体运动。模型使用整个渤海作为计算域, 根据网格位置与研究区距离远近, 分别设置 6 种边长尺寸的非结构化网格, 其中最大网格区域平均边长约为 8 km, 位于计算域东北侧和东侧; 最小网格区域平均边长约为 200 m。位于东营港堤头位置网格尺寸最小, 边长仅为 20 m, 与防波堤宽度基本一致, 模型网格设置如图 3。模型共有网格 116 681 个, 节点 100 079 个。

由于黄河来水量对研究区域水动力影响不大, 所以只模拟汛期研究区域的水动力情况, 模型模拟时间为 2018 年 8 月 1 日 0 时—2018 年 8 月 31 日 23 时, 使用高精度模式计算, 时间步长设置为 600 s。底床摩擦力可以影响模型水位、流速, 其通过曼宁系数(Manning Number)设定, 并通过模型率定过程不断调整, 区间为 0.06~0.13, 启动干湿边界判断, 取值分别为 $h_{dry}=0.005$ m, $h_{wet}=0.1$ m。初始模型不考虑任何工程结构, 使用平滑岸线作为陆地边界; 考虑工程结构的模型使用固定岸线概化防波堤, 在水工结构物选项中使用桥墩概化引桥对海流的作

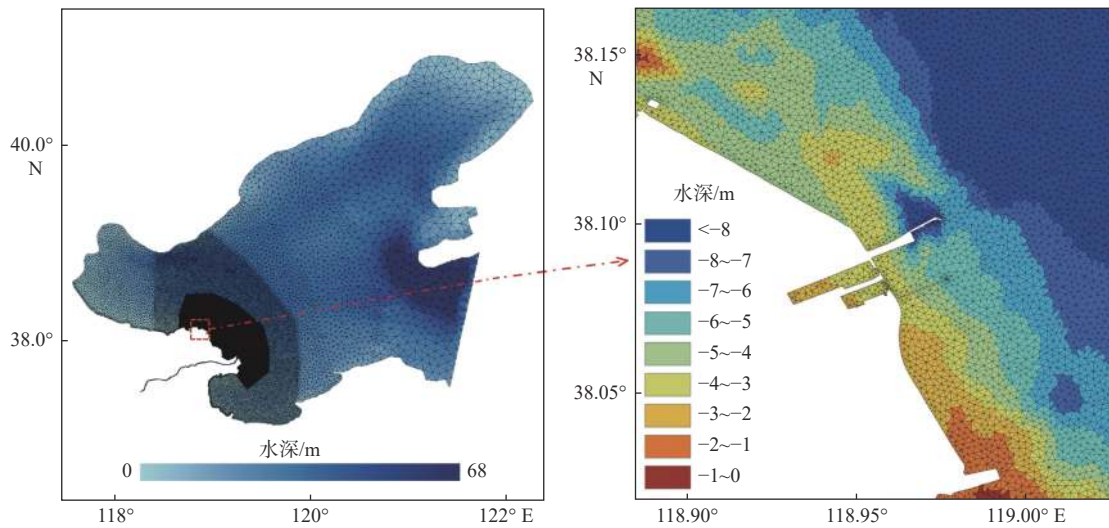


图3 计算网格图

Fig.3 The calculation mesh

用,按照东营港引桥走向,依次设定25个桥墩的亚网格结构,因引桥采用全直柱后张预应力大管柱和组合柱设计,外形类似于矩形,故设置桥墩断面为矩形,桥墩垂直截面法向角度 44° ,随拖曳力增加的流线因子使用默认值1.02,模拟桥墩对海流的阻滞作用。

2.3.2 模型精度评价

泰勒图可以从模拟数据与观测数据的相关系数(R),标准差(σ)以及去除模式系统性误差的均方根误差(E)3个方面综合考察数据的匹配程度^[16]。泰勒图中, R 值越大, σ 越趋近观测值, E 越小,模型的模拟值与观测值越接近。

图4是水动力模型模拟值与实测值的泰勒分布图,可以发现,所有观测点模拟值与实测值均表现出了较强的相关性,除刁口10 m验证点外,其他验证点模拟值与实测值相关性均 >0.8 ,表现出良好的相关性,说明水动力模型能够较好地反映研究区的水动力情况。

3 结果

3.1 海床阶段性冲淤变化

根据水深断面测量密度,结合东营港建设进程,将1985年东营港建港以来的港区及其邻近海域冲淤演变分为1985—1992、1992—2000、2000—2007和2007—2015年4个阶段。其中,1985—2000年为东营港扩建工程开始前,2007—2015年为东营港扩建工程完成后。各个阶段的冲淤演变情况见图5。

由于人工固岸的影响,东营港港池及防波堤范围内岸线稳定,南防波堤以南的岸线有一定程度的侵蚀。在北防波堤堤头位置,一直存在圆形侵蚀坑,1985—1992年侵蚀坑直径约为2.6 km,侵蚀深度 >3 m;1992年以后,侵蚀坑缩小至直径仅约为1 km,除2000—2007年侵蚀深度小于附近海域的,仅为0.4~0.5 m,其余年段侵蚀深度均 >1 m;2007年后修建的北防波堤外侧引桥,由于其具有良好的透水性,对海床冲淤的影响不大。

在工程结构附近的海床冲淤受工程结构的影响较大。1985—1992年,工程结构仅有北防波堤,由于缺乏人工海堤的固岸作用和防波堤的遮蔽作用,北防波堤南侧海床普遍侵蚀2~3 m,而防波堤北侧侵蚀深度普遍 <2.5 m。1992—2000年,东营港近岸出现淤积,防波堤外保持侵蚀状态,由于南防波堤的修建,南防波堤南侧的淤积作用普遍 >0.5 m,北防波堤北侧也有一定程度的淤积,但是淤积作用较弱,普遍 <0.5 m,且面积较小。2000年以后,东营港近岸恢复侵蚀状态,且侵蚀作用逐渐加剧,2000—2007年,近岸海床侵蚀深度大多 <1 m,在2007—2015年,南防波堤南侧出现 >1 m的侵蚀。分析东营港的冲淤等值线可以发现,在近岸区域的冲淤等值线存在着防波堤处向海外延、远离防波堤向岸靠近的特征。

东营港海域的冲淤变化经历了“强烈冲刷-冲刷-淤积”的过程,1985—1992年区域内冲刷严重,东营港大部区域侵蚀深度超过2 m,冲淤等值线出现在距岸17 km处,1992—2007年,东营港区域侵蚀作用较弱,大部地区侵蚀深度不超过1 m,冲淤等

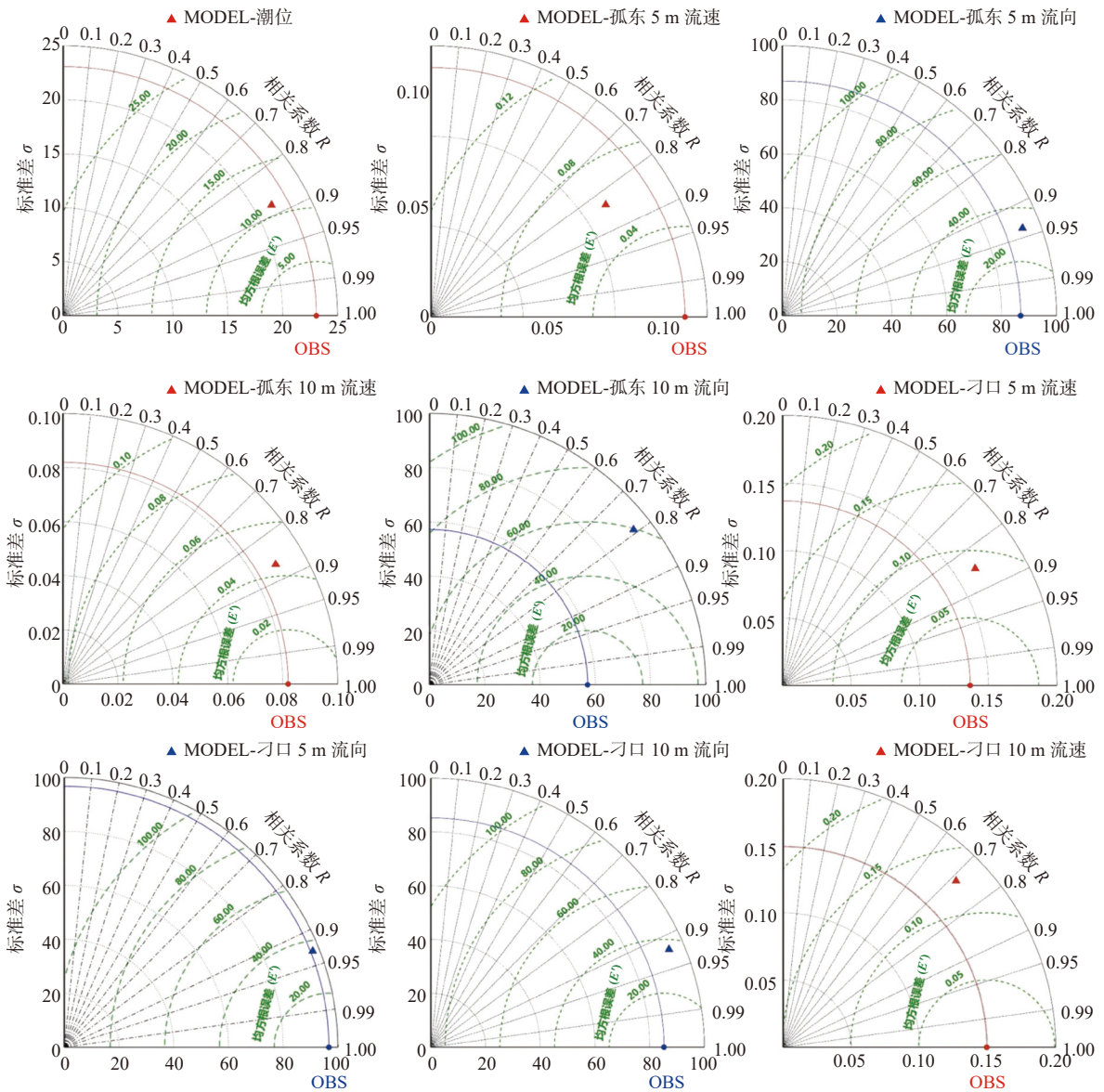


图 4 东营港潮位、流速、流向模拟值的泰勒分布图

Fig.4 The Taylor distribution of simulation on tidal level, velocity, and direction in the Dongying Port

值线距岸分布为 11 和 13 km, 2007 年以后, 区域内出现大范围淤积, 淤积深度 0~1.5 m, 冲淤等值线出现在防波堤堤头位置。随着冲淤等值线的向岸移动, 东营港近岸的冲淤形势也发生改变, 从以侵蚀作用为主导转换到“近岸侵蚀、离岸淤积”的冲淤新情势。

3.2 水动力对工程结构的响应

使用 MIKE 21 构建东营港区域的水动力模型, 模型模拟了工程前后大潮期东营港港区涨落潮时的流场流速(图 6)。无工程结构时(即不概化工程结构), 东营港区域的潮流表现为沿岸流, 区域内流向、流速较为一致, 涨潮流向东南, 落潮流向西

北。涨潮流速为 0.4~0.65 m/s, 落潮流速为 0.3~0.55 m/s。

在 2015 年工程情况下, 涨潮时, 从西北而来的沿岸流在堤头位置形成强烈的东向沿堤流, 沿堤流在北防波堤堤头处转向南, 并在口门处形成最高速度达 0.7 m/s 的高速横流, 向南的海流在越过南防波堤后, 逐渐向岸靠近, 形成沿岸流。在向南的海流带动下, 陆域港界口门内形成流速为 0.15 m/s 的顺时针旋转流, 旋转流在向北流动时受到南防波堤的挤压, 形成流速约为 0.2 m/s 的小型高速流区, 旋转流作用范围最远可到距岸 1.1 km 处。防波堤内部水团仅受到旋转流的影响产生运动, 流速最大不超过 0.1 m/s, 南防波堤南侧遮蔽区面积较北防波堤

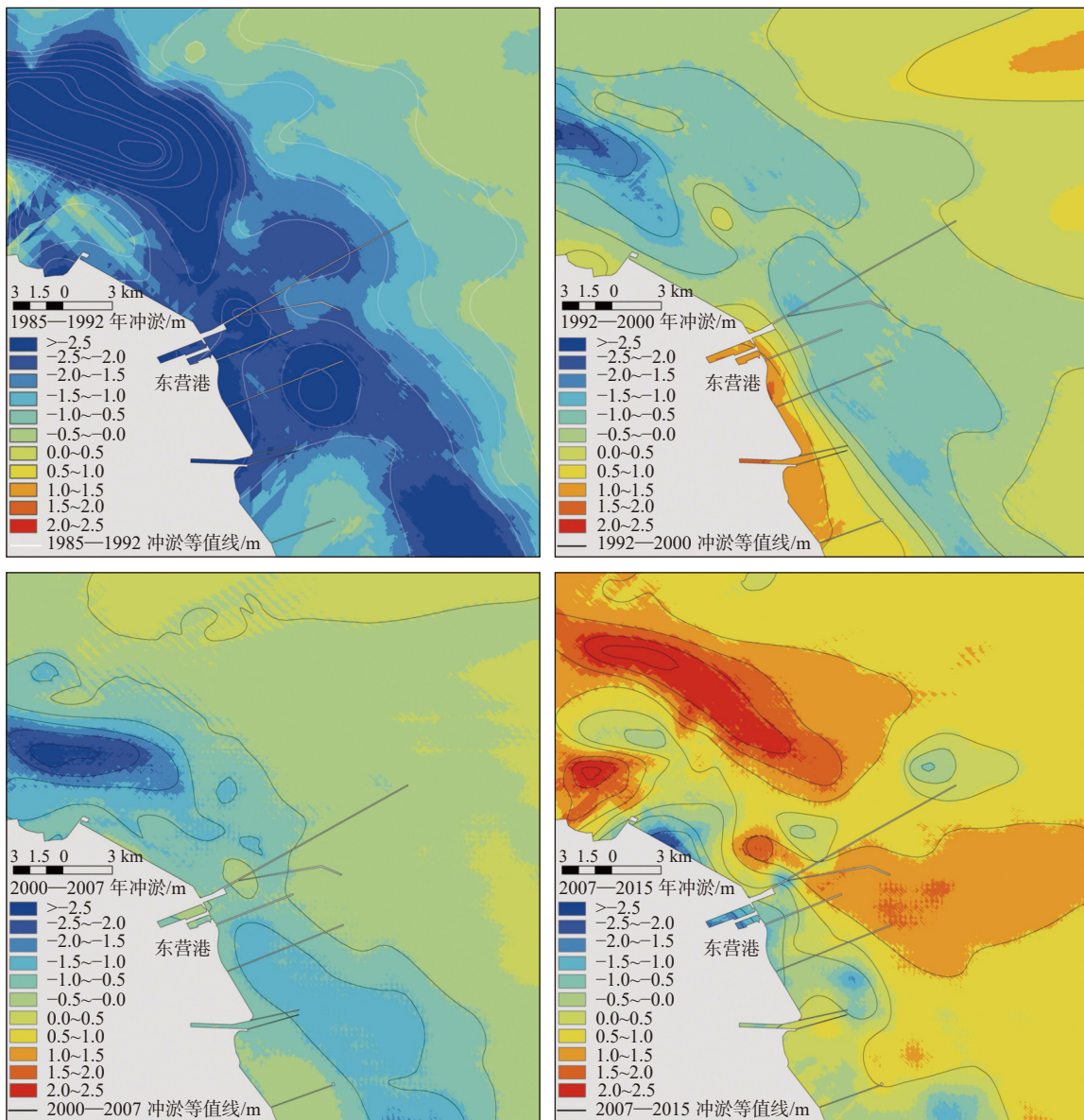


图5 东营港及其邻近海域的冲淤演变

Fig.5 Evolution of erosion and deposition in Dongying Port and adjacent sea area

北侧较大,海流流速较低。

落潮时,潮流由东南向西北方向流动,并在南防波堤前,转向东北绕过南防波堤向北,在口门处形成横流。横流在遇到北防波堤阻挡后一小部分向西,在港区陆域港界内形成流速不大于 0.1 m/s 的微弱逆时针旋转流,大部分绕过北防波堤流向西北方,同时,在北防波堤北侧形成一个微小的逆时针低流速旋转流,流速为 0.15 m/s 。落潮时东营港陆域港界内和防波堤的附近遮蔽区域流速普遍较小,最大值出现在旋转流区域达 0.18 m/s 。防波堤外,即口门以及北防波堤北侧,潮流流速较快,其中,口门处横流流速达到 0.6 m/s ,最大值出现在北防波堤堤头处,流速达 0.62 m/s 。

由于南北防波堤的阻碍作用,相比于无工程结构时,涨潮和落潮的潮流被迫形成绕流,延长了近岸泥沙的搬运时间与距离,在堤根处减缓了潮流流速形成低流速区。堤头处增大了潮流流速并形成多个旋转流,在南北防波堤环抱区域,还形成了几乎不受潮流影响的低流速区域,口门外悬浮的泥沙在旋转流的携运下进入港区内,从而容易导致来自口门外的泥沙在此落淤。2007年修建的引桥对于水体的阻滞作用不明显。在防波堤附近的潮流受到防波堤阻碍作用,形成方向近乎垂直于岸线的沿堤流,而在更远的海域,潮流流向不受工程结构的影响,遵循着涨潮SE向、落潮NW向的规律。

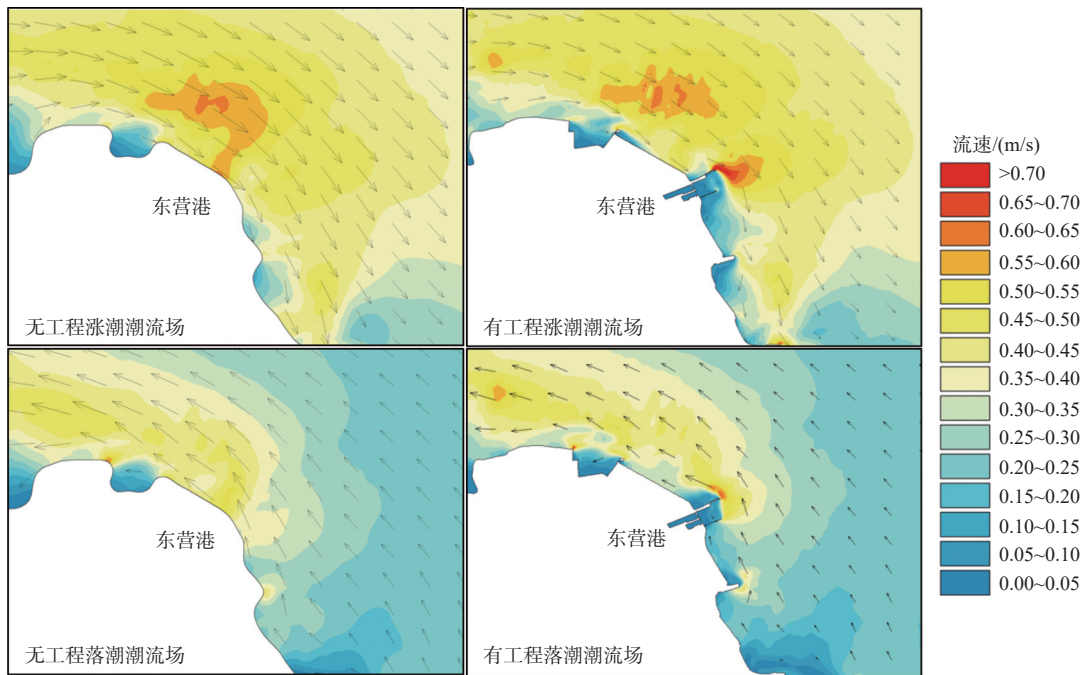


图 6 夏季大潮期间最大流速变化

Fig.6 The max current velocity variation in spring tide in summer

4 讨论

冲淤一般受物源,水动力和人类活动等因素的影响。泥沙锋面的存在导致黄河泥沙仅能向北输移约 15 km^[17],而刁口河-飞雁滩海域的泥沙虽极易被水流搬运起运^[18],但在潮流作用下主要向东偏北运动^[19]。在东营港航道的人工疏浚等人类活动的影响主要集中在港口内。因此,东营港冲淤情势主要受水动力主导,物源影响次之,人工疏浚活动基本不对港池外冲淤产生影响。

4.1 水动力作用下的冲淤情势

2007 年以前,由于飞雁滩区域向外突出^[20],此区域发生较强作用的侵蚀,东营港区域与飞雁滩区域接壤,水动力环境相似,因此该区域也以侵蚀作用为主。但由于人工固岸工程的保护,岸线相对稳定,侵蚀作用主要以下蚀为主。从 1985 年到 2007 年,由于侵蚀导致易于起动的泥沙输移殆尽,东营港区域的侵蚀作用逐渐减缓。图 7 是侵蚀区域与起始年份等深线位置图。可以看出,1985—2007 年,东营港的侵蚀基本发生在水深 12 m 以浅的区域,正是波浪和潮流联合作用强烈的区域^[20]。

波浪掀沙可通过波浪破碎和扰动 2 种方式^[21],根据已有研究资料(表 1),东营港实测最大波高 5.2 m,平均波高 3.6 m,波浪的破碎深度可按波高

的 1.28 倍计算^[22]。以往研究表明^[21,23],佐藤公式^[24]推算该区域不同波级下的全面推移临界水深是可行的:

$$\frac{H_0}{L_0} = 2.4 \left(\frac{D_{50}}{L_0} \right)^{1/3} \cdot \frac{H_0}{H} \cdot \text{sh} \left(\frac{2\pi h}{L} \right)$$

式中: H_0 为深水波波高;

L_0 为深水波波长;

D_{50} 为中值粒径;

h 为全面推移临界水深;

H 和 L 分别代表 h 处波高和波长。

当某处全面推移临界水深大于实际水深时,即认为波浪会对该处泥沙有掀沙作用。根据计算,波浪掀沙临界水深应为 11 m^[10]。6 m 水深以浅为波浪发生破碎区域^[12]。其中,破浪带会起运大量的泥沙并使其被离岸余流^[10] 携带,这与 1992 年以来 14 m 水深以深区域出现淤积的情况相符。

根据水动力模型,东营港平均流速为 0.32 m/s,涨潮流流速最大达 0.53 m/s,落潮流最大流速为 0.5 m/s,涨潮流强度和时长大于落潮流。根据相关研究^[10],东营港海域潮流流速不可使泥沙起运,仅起到输运泥沙的作用。

由于 <2.5 m 的波高占比超过 98%,且常浪向为 NE 向,基本与防波堤结构平行,因此,在波浪掀沙、潮流输沙的作用下,东营港侵蚀区域集中在 4 m 水深以浅。2007 年后,侵蚀作用导致东营港近岸等

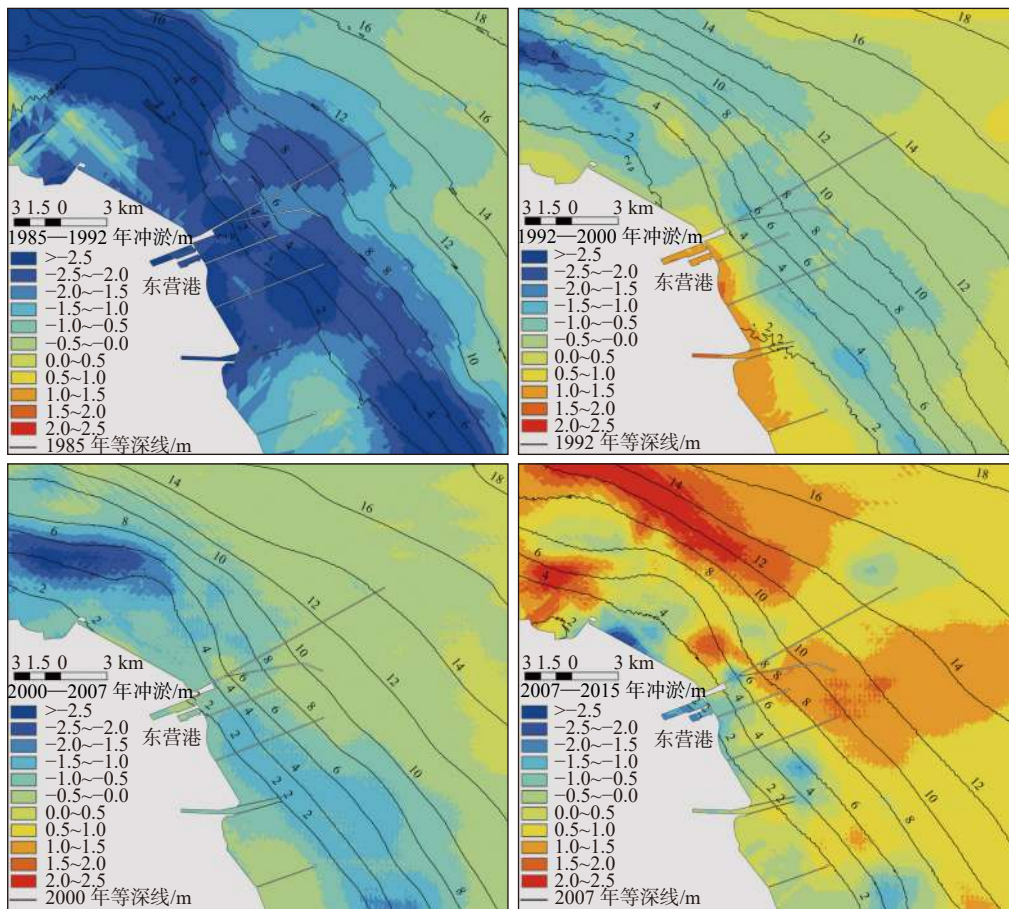


图7 冲淤区域与等深线位置对照图

Fig.7 Contrast of scouring-silting areas with contour lines

表1 东营港波高要素^[25]Table 1 The elements of wave height in Dongying Port^[25]

波高H/m	周期T/s	频率P/%	波高H/m	周期T/s	频率P/%
0.1	1.7	8.82	2.1	6.5	0.52
0.3	3	25.83	2.3	6.4	1.03
0.5	3.5	25.99	2.5	6.8	1.03
0.7	4	13.28	2.7	6.9	0.46
0.9	4.3	10.48	2.9	6.5	0.11
1.1	4.9	4.35	3.1	5.8	0.117
1.3	5.1	3.13	3.3	5	0.11
1.5	5.2	0.86	3.5	6	0.11
1.7	5.6	2.4	3.7	5.5	0.06
1.9	5.8	1.26			

深线更密集,破浪带能量幅聚,侵蚀强度更大,东营港4 m水深以浅的近岸区域继续以侵蚀作用为主,6 m水深以深的区域出现了一定程度的淤积。东营港近岸海域进入近岸侵蚀,离岸淤积的冲淤新情势。

4.2 工程结构对冲淤的影响

根据对东营港30年冲淤演变分析可以发现,

在北防波堤堤头一直存在明显的侵蚀坑。在1985—1992年,东营港区域整体侵蚀作用比较强,侵蚀坑的尺寸也最大,直径达到2.6 km,而1992年后,侵蚀坑的直径大都维持在约1 km。这是由于堤头处海域泥沙中值粒径为0.03~0.07 mm,其活动性较强,侵蚀坑易在大风天气下骤淤^[17],所以2000—2007年侵蚀坑发生了回淤,导致侵蚀坑的侵蚀深度小于其他区域。其他年份的侵蚀坑侵蚀深度都大于附近海域。

通过水动力模型可以发现,在防波堤堤头位置,防波堤阻滞作用导致来水一侧增水,使防波堤两侧形成水位差,高速沿堤流在堤头位置叠加水位差进一步增大流速。而丁坝阻挡将主水流分成3部分,其中加速向下游流动的水流是造成坝头河床冲刷的重要因素^[26]。因此,防波堤导致在口门处形成的高速横流是引起泥沙悬浮和海床冲刷的重要因素。此外,东营港的常浪向为NE向,波浪在向岸传递过程中首先在堤头位置破碎扰动底床泥沙,泥沙在潮流的作用下发生运移,进一步加剧堤头位置的侵蚀。

从涨潮落潮时刻(以流速最大计)东营港流速

分布情况(图 8)可以看出, 涨潮和落潮时流速分布情况具有一定相似性, 最大值都出现在潮流来水一侧的下游, 涨潮时流速最大值为 0.72 m/s, 落潮时最大值为 0.54 m/s。从防波堤向两侧的过程中, 存在宽度逐渐收缩的流速较小的遮蔽区域, 此区域的泥沙不易被潮流携带, 更易发生落淤。这与 1992—2000 年泥沙在南防波堤南侧淤积, 2000—2007 年泥沙在南防波堤南侧、北防波堤北侧近岸侵蚀都弱于距岸更远位置的事实相符。

防波堤两侧低流速区存在不等现象, 来水一侧, 水流没有阻滞, 流速较大, 遮蔽区域面积缩小。背水一侧由于防波堤的阻挡, 形成的遮蔽区域更大。

此外, 岸线与工程结构的夹角也会影响遮蔽区的大小。北防波堤与其北侧岸线交角约为 135° , 南防波堤与其南侧岸线交角约为 90° 。当角度 $>90^\circ$ 时, 防波堤对水流具有较好的引导性, 减缓水流流速的作用不强, 因此遮蔽区面积较小。当角度 $<90^\circ$ 虽然会增大防波堤对水流的阻挡作用, 但是本身与岸线形成面积较小, 遮蔽区面积也不大。结合东营港的冲淤演变可以发现, 1992—2000 年南防波堤南侧的淤积区域显著大于北防波堤北侧区域, 2000—2007 年北防波堤北侧普遍存在 $0.5\sim 1\text{ m}$ 的侵蚀, 南防波堤南侧侵蚀作用 $<1\text{ m}$ 的区域明显大于北防波堤北侧, 部分区域侵蚀深度 $<0.5\text{ m}$ 。

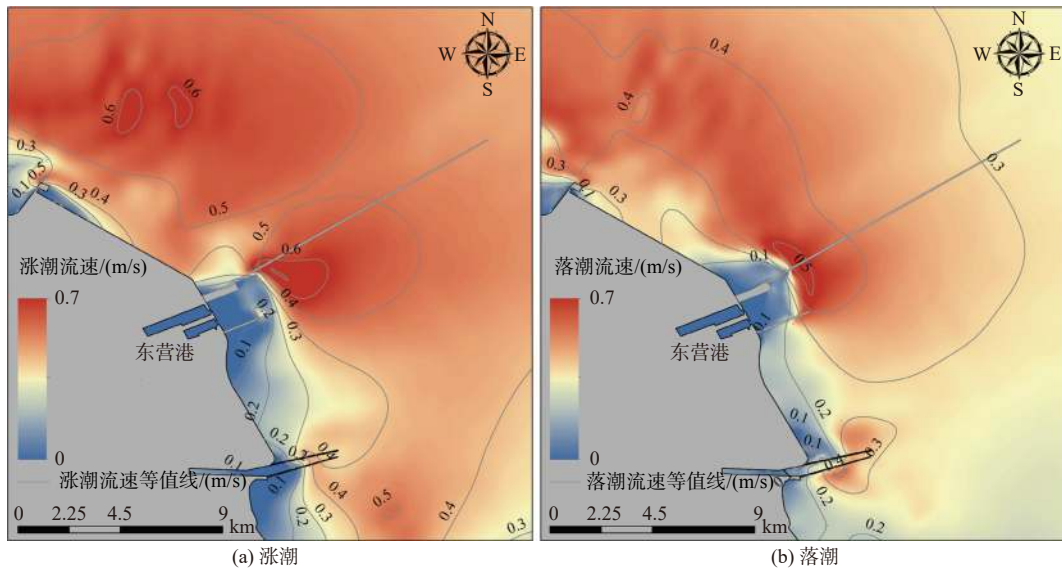


图 8 涨、落潮时刻东营港流速分布情况

Fig.8 The velocity distribution in Dongying Port at rising and falling tide

4.3 工程结构稳定性

工程设施的建设会对海床冲淤演变产生重要影响。提取东营港特征断面探究工程设施对海床滩面形态的影响, 特征断面提取位置如图 9a 所示。自 1985 年起, 3 条断面出现明显的下蚀, 距岸 1、6 和 12 km 平均侵蚀深度分别为 3.4、3.2 和 1 m, 近岸侵蚀作用明显强于离岸海域。2007—2015 年间, 在距岸 4 km 位置出现冲淤转换, 表现出近岸侵蚀, 离岸淤积状态。由于缺少防波堤的掩护作用, S-1 断面下蚀最为严重, 1985—2015 年, 距岸 1 km 位置下蚀深度超过 4.5 m, 断面 3 km 范围内坡度 -0.01% , 出现“近岸区深、离岸区浅”的反剖面形态。反观 S-2、S-3 剖面, 由于防波堤的遮蔽作用, 近岸区域均未形成反剖面形态, 但是相较于 1985 年, 4 km 坡度分

为从 0.09%、0.05% 增长到 0.12% 和 0.09%, 近岸海床在侵蚀作用下变陡。

在水动力的侵蚀作用下, 近岸海床冲淤变化明显, S-1 断面出现的反剖面形态, 海堤堤根存在巨大的冲刷风险。S-2、S-3 断面由于工程设施的保护, 海堤前海床相对稳定, 但是近岸海床的冲刷, 使防波堤的结构稳定性也面临风险。

5 结论

东营港作为黄河三角洲主要港口, 其位置处于黄河三角洲侵蚀最为强烈的岸段之一。受工程结构建设影响, 近岸地形和水沙输运过程显著改变。通过地形分析和数值模拟手段, 探讨了东营港建港 30 年以来冲淤演变形势和工程结构对其冲淤格局

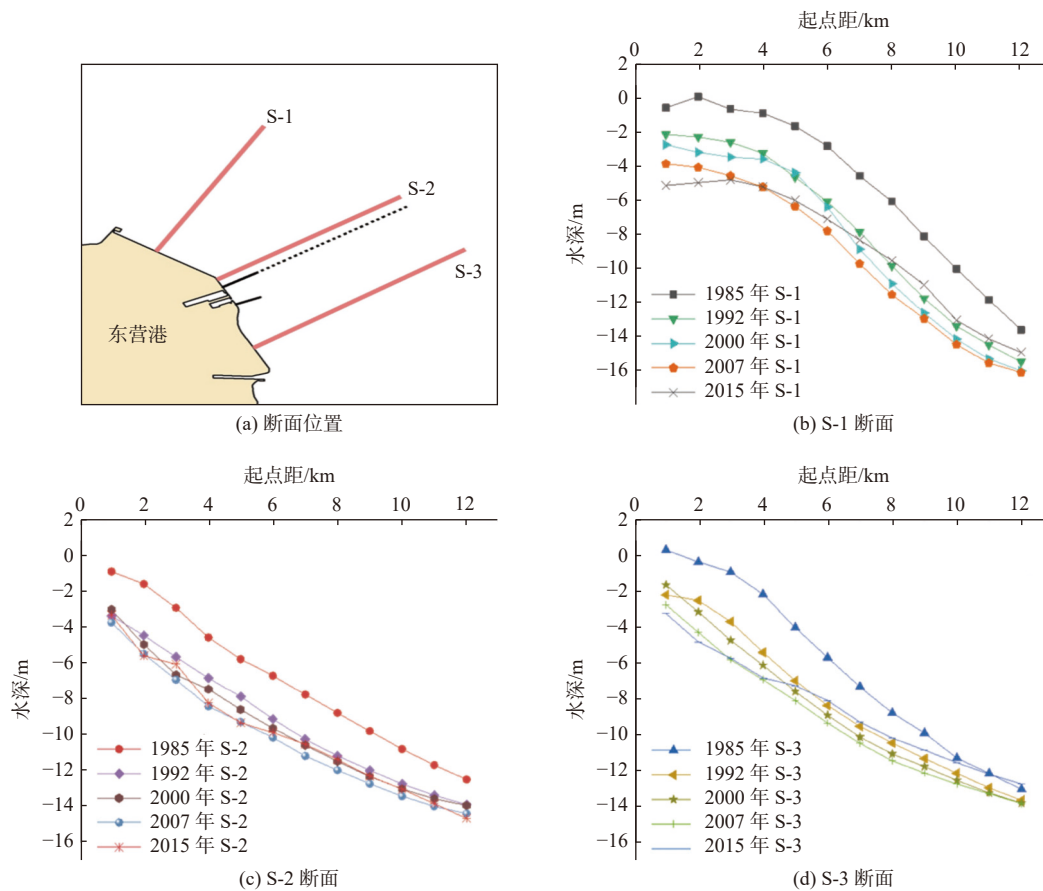


图9 东营港特征断面形态

Fig.9 Topography of some special sections in Dongying Port

的影响,并得到以下结论。

(1)东营港及其周围海域在多年持续累计侵蚀作用下,水下地形发生变化、等深线向近岸侵蚀退缩移动,破浪带能量幅聚,进而导致东营港周围海床的冲淤变化,冲淤等值线从1992年的距岸17 km内移到防波堤堤头位置,由以侵蚀作用为主,向“近岸侵蚀、离岸淤积”的新冲淤情势转变。

(2)工程结构会极大地改变局地的水动力情况,形成多处高流速区和旋转流区。防波堤的建设,将堤头处最大流速提升至0.7 m/s,堤头位置的波浪破碎作用叠加高速流场,使海床发生了强烈侵蚀,普遍存在直径1 km的冲刷坑。近岸由于防波堤遮蔽作用,流速 <0.1 m/s,形成面积较大的遮蔽区,其面积受到潮流方向和防波堤-岸线夹角的影响,并具有促进泥沙淤积的作用,但在波浪作用下,遮蔽区内侵蚀作用依旧较强。

(3)工程结构改变了东营港局地冲淤形势,人工固岸区域岸线保持稳定,侵蚀作用以下蚀为主。海堤前海床出现“近区水深、远区水浅”的反剖面形态;南、北防波堤区域4 km坡度分别从0.09%

和0.05%增长到0.12%和0.09%,近岸海床变陡。防波堤和海堤都面临堤根冲刷风险,不稳定性日益加剧,迫切需要加强海床地形监测并采取防护措施。

参考文献:

- [1] SYVITSKI J, KETTNER A J, OVEREEM I, et al. Sinking deltas due to human activities[J]. *Nature Geoscience*, 2009, 2(10): 681-686.
- [2] MOHANYT P K, BARIK S K, KAR P K, et al. Impacts of ports on shoreline change along Odisha coast[J]. *Procedia Engineering*, 2015, 116: 647-654.
- [3] SUMER B M, WHITEHOUSE R, TØRUM A. Scour around coastal structures: a summary of recent research[J]. *Coastal Engineering*, 2001, 44: 153-190.
- [4] 赵捷,何青,虞志英,等.长江口北槽深水航道回淤泥沙来源分析[J]. *泥沙研究*, 2014, 19(5): 18-24.
- [5] 刘杰,程海峰,韩露,等.长江口12.5 m深水航道回淤年际变化及成因[J]. *水科学进展*, 2019, 30(1): 65-75.
- [6] EL-ASMAR H M, WHITE K. Changes in coastal sediment transport processes due to construction of New Damietta Harbour, Nile Delta, Egypt[J]. *Coastal Engineering (Amsterdam)*, 2002, 46(2): 127-138.

- [7] 陈沈良, 张国安, 谷国传. 黄河三角洲海岸强侵蚀机理及治理对策[J]. *水利学报*, 2004, 35(7): 1-6.
- [8] FU Y T, CHEN S L, JI H Y, et al. The modern Yellow River Delta in transition; Causes and implications[J]. *Marine Geology*, 2021, 436: 106-476.
- [9] 李孟国, 曹祖德. 粉沙质海岸泥沙问题研究进展[J]. *泥沙研究*, 2009, 14(2): 72-80.
- [10] 周永东, 陈沈良, 谷国传. 东营港海域表层沉积物分布及其迁移趋势[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2009, 29(3): 31-38.
- [11] 李文涛. 东营港内航道淤积问题分析[J]. *海岸工程*, 2001(1): 1-8.
- [12] 罗宗杰, 吴建政, 胡日军, 等. 东营港海域冲淤特征[J]. *海洋地质前沿*, 2016, 32(12): 40-45.
- [13] 陈兆林, 李卫国, 刘锐, 等. 东营港海区悬沙特征及冲淤分析[J]. *海洋工程*, 2009, 27(2): 110-114.
- [14] 李典, 徐振坤, 肖立敏, 等. 东营港水动力要素及泥沙运动特性[J]. *中国港湾建设*, 2017, 37(6): 7-10.
- [15] 刘锐. 东营港建设与施工技术[M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2016: 10-11.
- [16] TAYLOR K E. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2001, 106(D7): 7183-7192.
- [17] 刘锐, 韩志远, 刘涛. 东营港拟建航道沿线滩面沉积物特性及航道可控性分析[J]. *水道港口*, 2013, 34(2): 118-122.
- [18] SHI C, ZHANG D, YOU L. Sediment budget of the Yellow River Delta, China: the importance of dry bulk density and implications to understanding of sediment dispersal[J]. *Marine Geology*, 2003, 199(1/2): 13-25.
- [19] 李东风, 李泽刚. 河口故道分洪入海泥沙对东营港影响的计算研究[J]. *人民黄河*, 1998, 20(3): 8-9.
- [20] 陈沈良, 张国安, 陈小英, 等. 黄河三角洲飞雁滩海岸的侵蚀及机理[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2005, 25(3): 9-14.
- [21] 彭俊, 刘锋, 陈沈良. 黄河三角洲强侵蚀岸段海域的悬沙输运机理研究[J]. *泥沙研究*, 2015, 20(5): 44-50.
- [22] 吴宋仁. 海岸动力学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2000: 52.
- [23] 李向阳, 陈沈良, 胡静, 等. 黄河三角洲孤东海域沉积物及水动力[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2008, 28(1): 43-49.
- [24] 佐藤昭二, 田中则男. 波浪作用下水平床面上泥沙运动[C]//第九届海岸工程会议论文集, 1962: 95-100.
- [25] 李平, 朱大奎. 波浪在黄河三角洲形成中的作用[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1997, 17(2): 40-47.
- [26] 胡志毅. 丁坝挑角对周围流场及局部冲刷影响的三维数值模拟研究[D]. 西安: 西北农林科技大学, 2021.

Response of Dongying Port project change to seabed erosion and siltation since 1985

HUANG Liang, CHEN Shenliang*, CHENG Wufeng, LI Peng, JI Hongyu

(State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

Abstract: The geological environment in estuarine delta region is fragile and sensitive to natural and anthropological changes, and the evolution of alluvial siltation in delta port is influenced by engineering structures. Dongying Port in the Yellow River Delta is dominated by silty sands and active sediment transport. The key issue of engineering in such an area is the change of sea bed flushing and siltation caused by engineering structure. By applying the digital elevation model (DEM) of underwater topography constructed by the measured bathymetry data since the construction of Dongying Port in combination of numerical hydrodynamic simulation, the evolution of the siltation process and engineering impact of Dongying Port were explored. Results show that, due to the change of seafloor topography caused by waves and tides, the situation of siltation in the near-shore area of Dongying Port has evolved from single erosion to near-shore erosion and offshore siltation. The engineering structure affected the local tidal flow velocity and direction, and a high-speed cross-current with a maximum velocity of 0.7 m/s appeared at the mouth gate, which led to a scour pit with a diameter of about 1 km at the head of the north breakwater. The sheltered area of the engineering structure had a siltation-promoting effect, and the size of the sheltered area was related to the tidal flow direction and the angle between the engineering structure and the shoreline. However, under the action of waves and residual currents, more than 0.5 m erosion still existed in the sheltered area from 2007 to 2015. The persistent erosion has increased the instability of sea breakwaters and seawalls. Therefore, it is urgent to strengthen the detection and protection of the port.

Key words: erosion and siltation evolution; influence of engineering structure; hydrodynamic model; stability of engineering structure; Dongying Port; Yellow River Delta