

连云港埭子口海域潮动力特征及其变化

邹春蕾¹, 王志力^{2*}, 甄 峰¹, 徐 欢¹

(1. 江苏省水利工程科技咨询股份有限公司, 江苏 南京 210029;

2. 南京水利科学研究院 河流海岸研究所, 江苏 南京 210024)

摘 要:为研究连云港埭子口海域潮流动力特征及其对周边海岸工程的响应,以及为治理埭子口闸下淤积问题提供参考,建立了基于有限体积法离散二维浅水方程的数值模型。采用实测水文资料对模型率定和验证,应用模型分析埭子口潮流动力特征和建设徐圩港防波堤和灌河口导堤后埭子口海域潮流动力的变化。模拟结果表明,建设工程后潮流动力变化较大,埭子口海域涨急流和落急流方向改变,涨、落潮平均流速均减小,距离工程区域越近,流速变化越大。埭子口海域潮流动力减弱将会加重上游挡潮闸的闸下淤积问题,致使埭子口排水不畅,进而增加沂北地区的洪涝风险,所以,相关部门应及时采取措施,保证埭子口排涝畅通。

关键词:连云港;埭子口;徐圩港防波堤;潮流动力;欧拉余流

中图分类号:P753; P731.2

文献标识码:A

文章编号:1002-3682(2020)04-0246-10

doi:10.3969/j.issn.1002-3682.2020.04.002

引用格式: ZOU C L, WANG Z L, ZHEN F, et al. Dynamic characteristics and changes of tidal current in the Liezikou sea area, Lianyungang[J]. Coastal Engineering, 2020, 39(4): 246-255. 邹春蕾, 王志力, 甄峰, 等. 连云港埭子口海域潮动力特征及其变化[J]. 海岸工程, 2020, 39(4): 246-255.

埭子口位于江苏省连云港市徐圩新区灌云县境内,是沂沭泗流域沂北地区主要入海外排口门之一,是烧香河(含烧香支河)、古泊善后河、车轴河、东门五图河和牛墩界圩河五条河道的共用出口处。沂北地区位于江苏省东北部,是江苏省 17 个水利分区之一。该区南至新沂河,西、北至总沭河和苏鲁省界,东临黄海,行政区包含连云港市区、赣榆区、东海县、灌云县的全部和新沂市、沭阳县的一部分。20 世纪 50 年代,在埭子口陆续兴建了烧香河闸、善后河闸、车轴河闸、五图闸和图西闸,沂北地区涝水从埭子口排出^[1]。挡潮闸多年运行之后,由于埭子口闸下港道过长,涨潮流携带的泥沙在闸下逐渐淤积,导致埭子口排水不畅,进而造成沂北地区洪涝灾害频繁发生。近年来,随着连云港 30 万吨级航道建设,徐圩港城港区和灌河口导流堤建设,埭子口所在海域从开放式海岸变成半封闭式海岸,埭子口海域的潮流动力也随之改变。因此,研究埭子口海域潮流动力特征及其对周边海岸工程(徐圩港防波堤和灌河口导堤)的响应,对治理埭子口闸下淤积和解决沂北地区排水不畅问题具有重要意义。

连云港港口是我国海运的重要组成部分,自 20 世纪 70 年代以来,众多学者对连云港的潮波动力特征、沉积物和沉积环境特征以及海岸演变机制等做了大量的研究^[2-6]。在数值模拟方面,林岩等^[7]模拟了连云港旗台防波堤建成前后港区的潮流特性变化;张伟等^[8]建立了潮流数学模型分析环抱式防波堤对潮汐的影响,指出连云港外海潮流以旋转流为主,环抱式防波堤对潮流流矢基本无影响,环抱式防波堤附近的流矢从旋转流到往复流的过渡变成沿防波堤的往复流;丁军华等^[9]从港池平面形态、航道横流和口门流速等方面研究了徐圩港工程不同的布置形式对航道的影响;谢军等^[10]建立了三维潮流数学模型模拟台风“韦帕”作用下的潮流场,研究大风天对潮流的影响。

收稿日期:2020-05-10

资助项目:江苏省水利科技项目——江苏省海堤堤线调整布局及影响研究(2019009)

作者简介:邹春蕾(1995-),女,硕士,主要从事数值模拟方面研究. E-mail: astoria_zou@163.com

*** 通信作者:**王志力(1977-),男,正高级工程师,主要从事数值模拟方面研究. E-mail: zlwang@nhri.cn

(王 燕 编辑)

前人的数值模拟研究主要针对工程布设对自身的影响,极少关注工程对其附近海域的影响,所以,本文将建立基于有限体积法离散二维浅水方程的数值模型,进一步模拟研究圩子口的潮流动力特征及其对徐圩港防波堤和灌河口导堤工程的响应,以期治理圩子口闸下淤积问题提供参考。

1 水动力模型简介

利用由 Wang 等^[11]开发的二维水动力模型,该模型控制方程为基于水深平均的浅水方程:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(hu^2 + \frac{1}{2}gh^2 \right) + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = -\frac{h}{\rho} \frac{\partial P_a}{\partial x} - gh \frac{\partial z_b}{\partial x} + \frac{\tau_{ax} - \tau_{bx}}{h} + fv, \quad (2)$$

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(hvu)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left(hv^2 + \frac{1}{2}gh^2 \right) = -\frac{h}{\rho} \frac{\partial P_a}{\partial y} - gh \frac{\partial z_b}{\partial y} + \frac{\tau_{ay} - \tau_{by}}{h} - fu, \quad (3)$$

式中, t 为时间; x, y 为空间平面方向; h 为水深; u, v 分别为 x, y 方向的流速; P_a 为水面大气压力; ρ 为水的密度; z_b 为床底高程; g 为重力加速度; τ_{ax}, τ_{ay} 为风载的作用力; τ_{bx}, τ_{by} 为床面切应力; f 为科氏力系数, $f = 2\tilde{\omega} \sin \varphi$, 其中 $\tilde{\omega}$ 为地球自转角速度, $\tilde{\omega} = 7.29 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$, φ 是当地纬度。

2 计算区域与模型设置

2.1 计算区域

建立了圩子口及口外海区的水动力模型,计算区域如图 1 所示。模型以北至青岛市黄岛区、南至江苏省射阳县的岸线为闭边界,开边界设置在外海 40 m 等深线附近,向南北延伸与闭边界相交。计算区域沿岸方向距离 251 km,离岸方向距离 157 km,计算区域面积 22 505 km²。

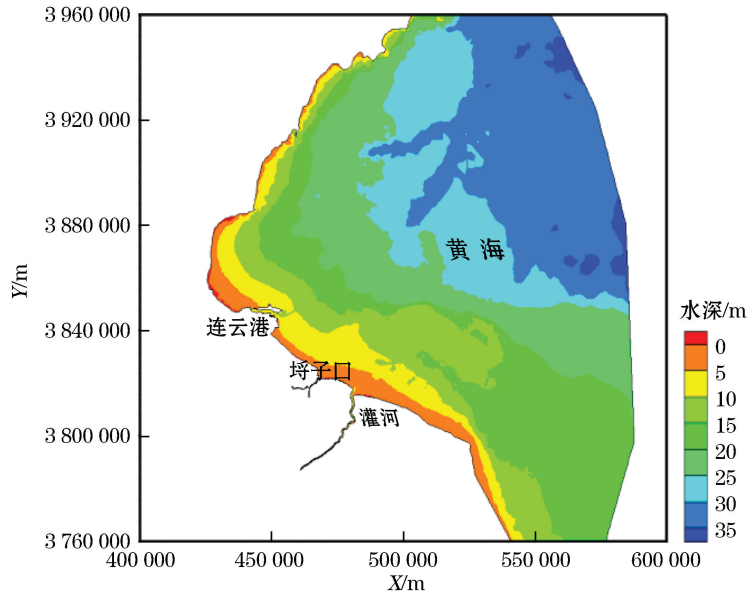


图 1 计算区域

Fig.1 Computational domain

模型计算网格采用非结构网格系统,非结构网格系统可以处理复杂边界并可对局部计算区域加密。外海网格较为稀疏,埭子口及其附近区域网格加密,网格共有 65 344 个单元、57 947 个节点,最深处 40.56 m,最浅处 4.54 m,最大边长 3 143.6 m,最短边长 9.8 m,网格布置如图 2 所示。坐标系统采用“北京 54 坐标系”(X 和 Y 坐标为“北京 54 坐标系”平面坐标值,单位为 m),高程系统采用“1985 国家高程系统”。

2.2 模型设置

大范围的近海模型通常采用水位控制开边界,因为水位沿横断面的变化较小,潮波传播到研究区域时与实际情况相符。对小范围模型而言,如果仅用潮位控制开边界,外海潮波的重力势能得到体现,但潮波的传播动能没有被反映,研究区域潮波的计算流速与实际流速不符,因此小范围近海模型采用水位和流速共同控制开边界^[12]。本文首先建立了渤、黄海大范围潮流数学模型,开边界数据采用潮汐预报系统 NAO.99b 的计算结果。用实测水文资料验证渤、黄海模型的准确性后,从其模拟结果中提取埭子口模型开边界位置对应的水位和流速数据,作为埭子口开边界的控制条件。

水深数据来自潮连岛到射阳河口海图。时间步长取为 60 s,实际计算中,根据方程稳定性条件,时间步长自适应。

3 结果与分析

3.1 模型验证

验证资料为 2006 年 1 月长江下游水文水资源勘测局在连云港南北港区进行的冬季同步全潮水文测验成果^[13],验潮站有 6 个,流速测验点有 12 个(图 3)。

由埭子口潮动力模型的潮位验证(图 4)和流速流向验证(图 5)结果可知,该海域高潮位约为 3 m,低潮位约为 -3 m,潮差小于 6 m(图 4);外海以旋转流为主(图 5d~图 5j),近岸以往复流为主(图 5a 和图 5k),潮流流速一般不大于 1 m/s(图 5a~图 5j);其中 11#点流速较大,主要是因为 11#点在灌河深槽位置,受灌河径流影响较大。模型计

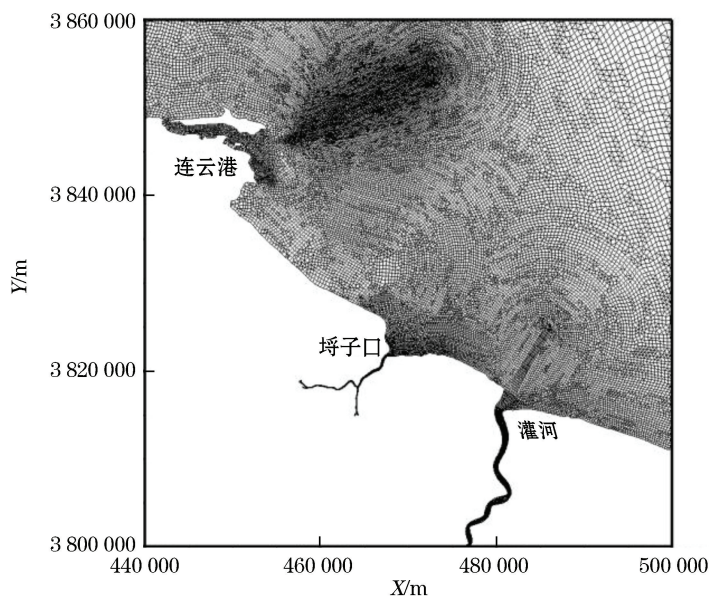


图 2 埭子口及其附近海域网格分布

Fig.2 Grids in the Liezikou and its adjacent sea areas

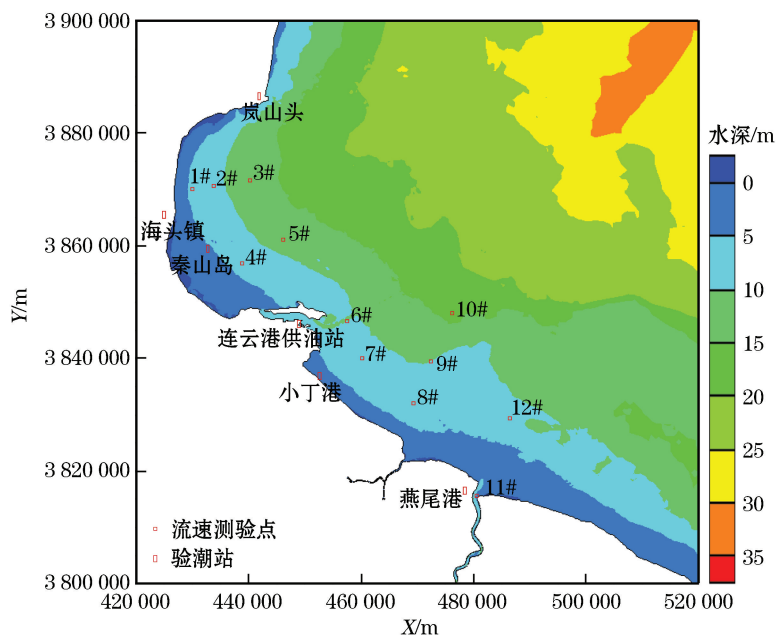


图 3 水文测验测点布置

Fig.3 Layout of hydrographic survey points

算所得潮位过程、流速流向过程在相位和数值上与实测值吻合较好,也与实际情况符合,这说明模型能够反映圩子口海域的潮流动力特性。

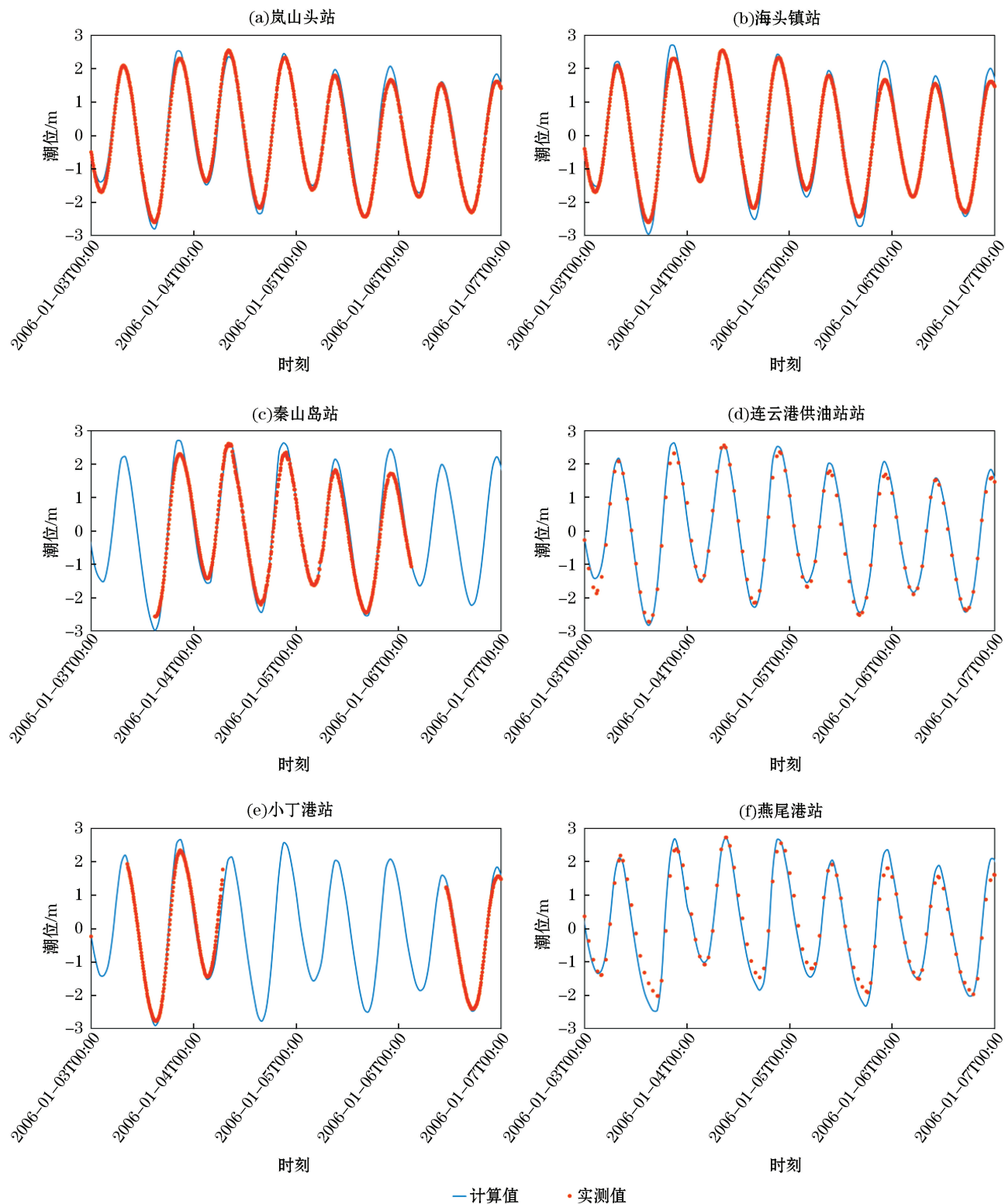


图4 6个验潮站潮位验证

Fig.4 Verification of tide level at 6 tidal stations

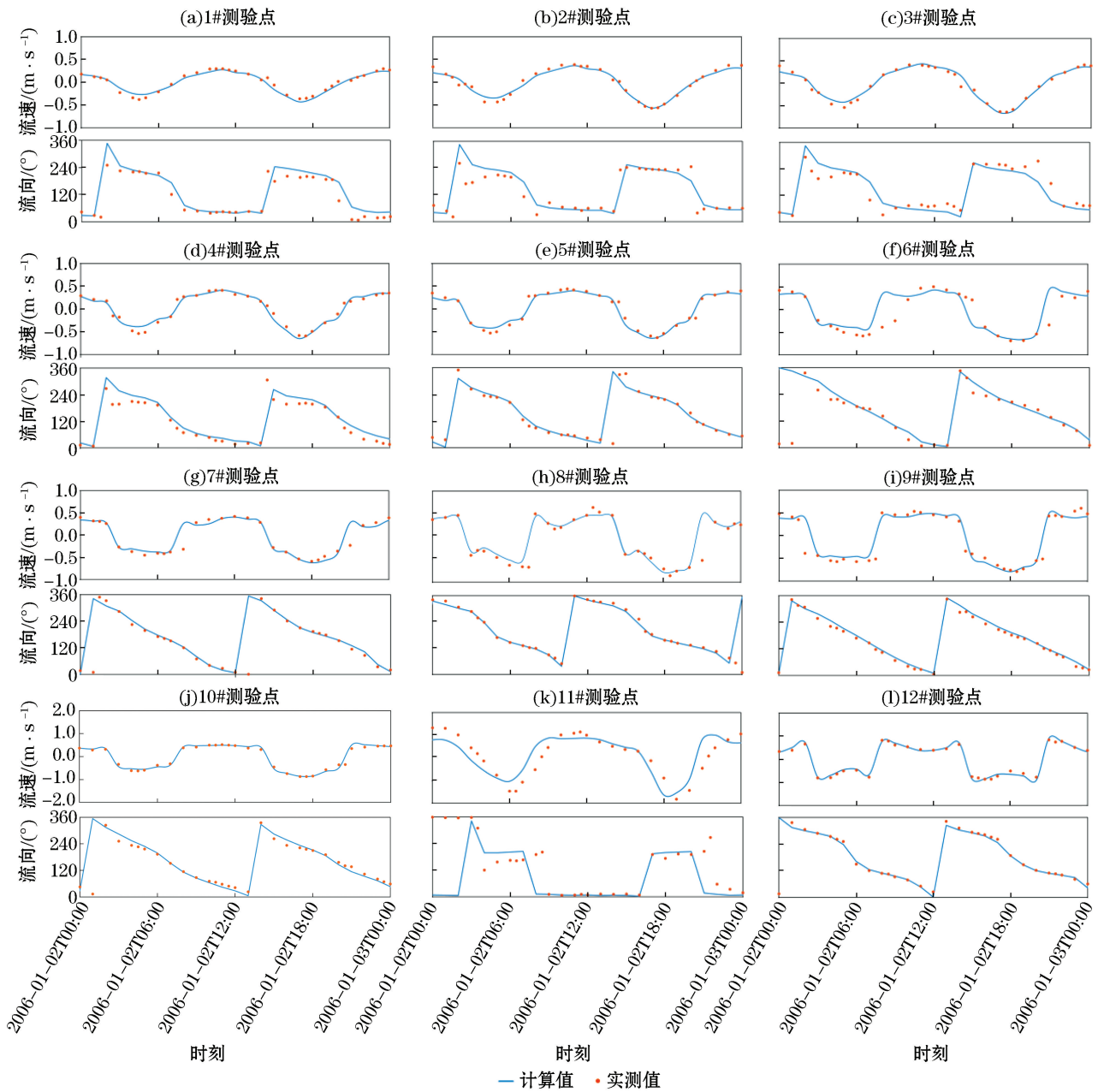


图5 12个测验点流速流向验证

Fig.5 Verification of current velocity and direction at 12 measuring points

3.2 埭子口海域潮流特性

埭子口海域为正规半日潮,一个太阴日内出现两次高(低)潮。由于潮波的浅水变形,涨潮历时与落潮历时不等,涨潮平均历时 5 h 30 min,落潮平均历时 6 h 48 min,平均潮差约 3.4 m。涨潮流速大于落潮流速。潮位与流速的相位在南、北部有明显差异,最大流速出现在高、底平潮阶段,涨、落潮过程中最大流速值出现在中潮位附近。

由埭子口海域未修建徐圩港防波堤和灌河口导堤时的涨、落急流场图(图 6)可以看出:连云港外海深水区为逆时针旋转流,近海为沿岸往复流;涨潮时潮流由沿岸(SE向)的涨潮流和外海的向岸方向(SW

向)涨潮流组成,圩子口以 SE 向涨潮流为主;落潮时水流由近岸的 NW 向逐渐转为 N 向直至外海的 NE 向。流速分布方面,从外海至近岸流速逐渐减小,外海流速一般不大于 1 m/s ,近岸垂线平均流速低于 0.5 m/s ,涨急时刻流速略大于落急时刻流速。由余流的计算结果表明,圩子口海域余流方向为 SE 向,近似与岸平行,灌河口沙嘴处余流受地形影响向东偏转,余流流速表现出“外海小,近岸大”的分布特点,余流最大流速约为 0.12 m/s 。

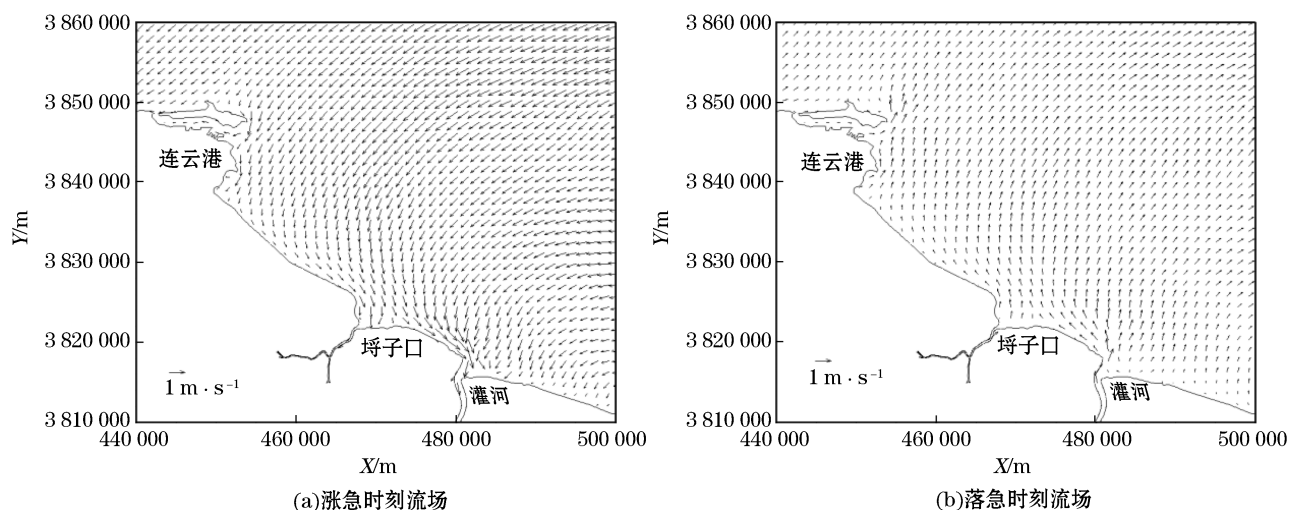


图 6 工程前涨、落急时刻流场

Fig.6 Maximum flood and ebb flow fields before the projects

3.3 徐圩防波堤和灌河口导堤对潮动力的影响

3.3.1 工程概况

徐圩港区由东、西防波堤形成环抱型港湾,两条防波堤之间海岸线总长约 13 km ,口门离岸距离 9.5 km ,口门位于 5 m 等深线附近。东、西防波堤从现有海堤至港区口门一次形成,防波堤总长约为 22.0 km 。港内最终可形成约 34.6 km 码头岸线,形成后方陆域约 48.71 km^2 。于 2012 年 10 月开工建设,2017 年 6 月建成。

灌河口为灌河入海口,海域海岸线大致为 NW—SE 走向。灌河口海域水下地形平坦, 5 m 等深线离岸约 12 km 左右, 10 m 等深线离岸约 19 km ,近岸水深小,低潮位时近岸露出大片滩涂。2012 年灌河口建成双导流堤。

3.3.2 潮流动力变化

在海岸线和徐圩港东防波堤附近,潮流为沿堤岸的往复流,随着向外海推移,潮流的旋转性质逐渐凸显。受工程建筑物的影响,涨潮时潮流从外海的 SE 向在徐圩港东防波堤附近为沿堤向(S 向),东防波堤与灌河口导堤之间海域的涨潮流以 SE 向涨潮流为主。圩子口口门处涨潮流由 SE 向转至 S 向,与灌河口之间的近岸处以 SE 向沿岸流为主(图 7)。相比于未修建工程时,外海涨潮流速基本不变,徐圩港防波堤和灌河口导堤建筑物内流速普遍减小,圩子口口内流速也减小。

当落潮时,水流由近岸的 NW 向逐渐转为 N 向直至转为外海的 NE 向。外海落潮流速略小于涨潮流速,且小于未修建工程时的落潮流速;徐圩港防波堤口门处和灌河口导堤堤头处流速大幅增大,最大流速可达 1.9 m/s 。余流除在徐圩港东防波堤附近为沿堤向(S 向)外,仍以 SE 向为主,余流流速基本不变。

徐圩港防波堤和灌河导堤工程建设后,圩子口潮流的平均流速发生变化(图 8)。受工程影响,圩子口海

域的涨、落潮平均流速都减小。涨潮时,徐圩港防波堤附近平均流速减小 $0.1 \sim 0.2 \text{ m/s}$,灌河口西导堤附近平均流速减小可达 0.3 m/s ,埭子河的平均流速减小 0.1 m/s 以上。落潮时,河道内流速略微增加,埭子口区域平均流速减小 $0.1 \sim 0.2 \text{ m/s}$,灌河口西导堤附近平均流速最大减小幅度可达 40% 。

在埭子口内选取 9 个取样点(位置见图 9),比较工程前后最大涨潮流速、最大落潮流速变化(表 1)可知,修建徐圩港防波堤工程和灌河口导堤工程后,埭子口最大涨潮流速和最大落潮流速的变化都呈减小的趋势。可以看到,工程对涨潮流速的影响更大,大多数点(除 1#、3#、5# 外)的最大涨潮流速变化值大于最大落潮流速的变化值;越靠近工程区域,流速受影响越大,7# 点最大涨潮流速减小 0.1 m/s ,远大于其他点的变化幅度。

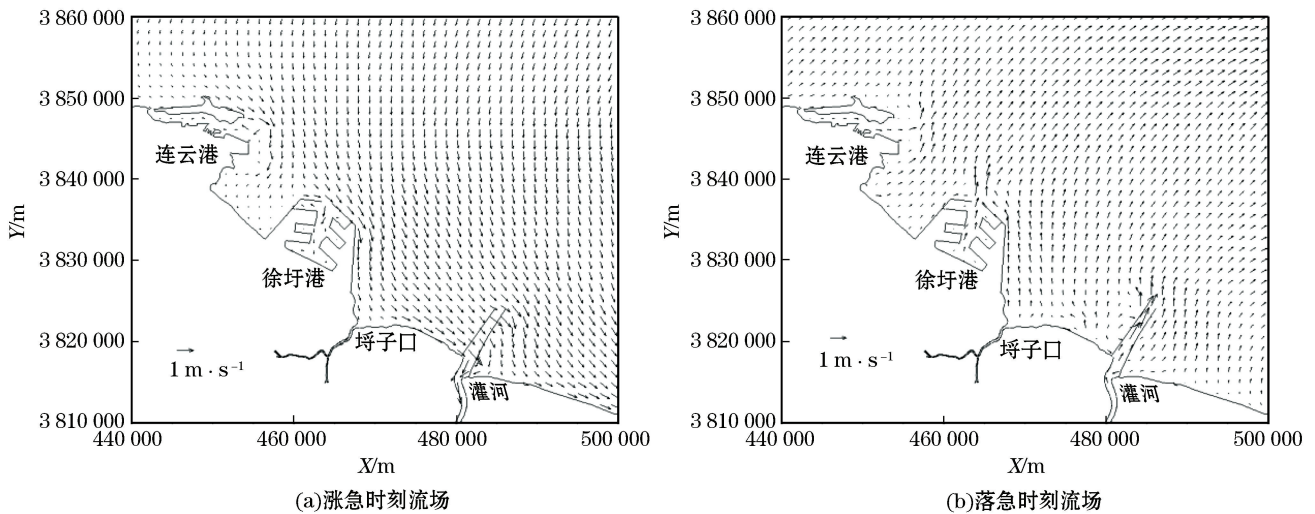
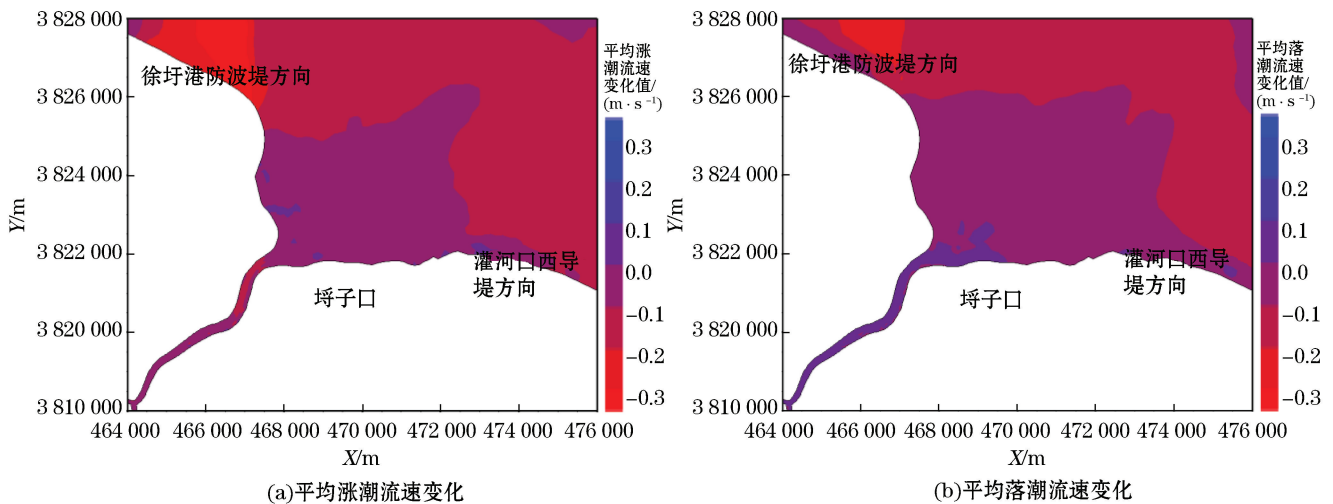


图 7 工程后涨、落急时刻流场

Fig.7 Maximum flood and ebb flow fields after the projects



注:流速变化值中的负值表示流速减小

图 8 工程后埭子口平均涨、落潮流速变化

Fig.8 Changes in the average current velocity of flood and ebb tides in the Liezikou area after the projects

表 1 修建工程后圩子口最大涨潮流速和落潮流速变化值

Table 1 Variations of the maximum flow velocities of the flood and ebb tides after the projects

取样点	最大涨潮流速变化 /(m·s ⁻¹)	最大落潮流速变化 /(m·s ⁻¹)	取样点	最大涨潮流速变化 /(m·s ⁻¹)	最大落潮流速变化 /(m·s ⁻¹)
1#	-0.005	-0.030	6#	-0.008	0.003
2#	-0.010	-0.003	7#	-0.100	-0.030
3#	0.010	-0.010	8#	-0.020	0.010
4#	-0.050	-0.010	9#	-0.080	-0.010
5#	0.006	0.010			

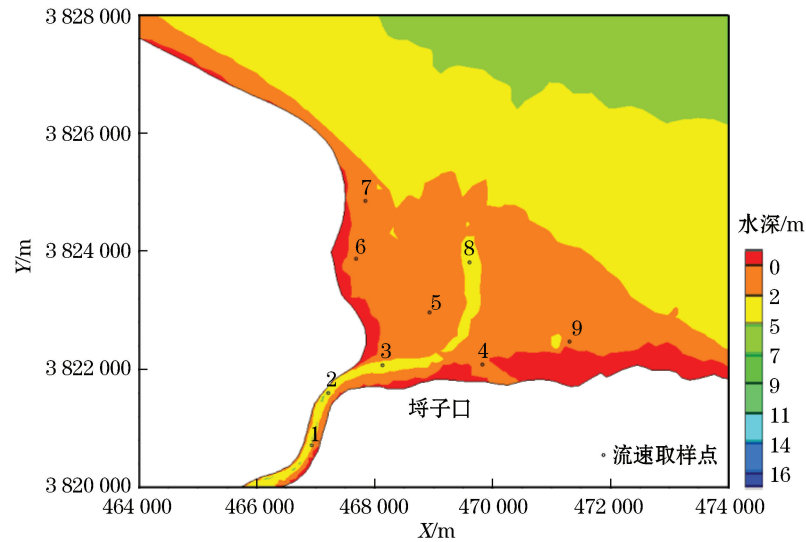


图 9 圩子口内 9 个取样点的位置

Fig.9 Location of the 9 sampling points in the Liezikou area

徐圩港防波堤和灌河导堤工程实施后,对圩子口区域产生较大影响。防波堤与导堤之间形成了遮蔽区,平均流速减小,流速减小范围从近岸至外海,而防波堤堤头的南侧受到堤头的挑流作用,流速略有增加。圩子口口内涨、落潮平均流速均降低,圩子河流速减小 10% 以上。由于外海潮流特性基本不变,挟沙能力不发生改变,而圩子口潮流动力减弱,外海潮流携带的大量泥沙进入圩子口后流速减小,泥沙沿程淤积,挡潮闸闸下淤积将影响圩子口的排水能力,降低沂北地区的防洪排涝标准。因此,相关航运和河闸管理部门应采取措施及时疏浚河道,治理淤积泥沙,保证圩子口排水通畅。

4 结 论

本文建立了圩子口海域二维潮流数值模型。在利用实测水文资料对模型进行率定验证的基础上,应用该模型分析了圩子口的潮流动力特征及其对徐圩港防波堤和灌河口导堤的响应,得到结论:

1) 圩子口海域潮流为正规半日潮,深海以旋转流为主,近岸为往复流。涨急流速略大于落急流速,外海流速一般小于 1 m/s,近岸垂线平均流速小于 0.5 m/s。余流计算显示该海域余流流向主要为沿岸向(SE 向),余流流速小于 0.1 m/s。

2)徐圩港防波堤和灌河口导堤工程对埭子口海域的影响很大。建设工程后,涨、落潮流在建筑物附近变为沿堤向;由于防波堤和导堤的遮蔽作用,埭子口海域涨、落潮平均流速均减小,埭子河流速减小 10%以上;最大涨潮流速变化幅度大于最大落潮流速的变化幅度,且越靠近工程位置,变化越大。

3)徐圩港防波堤工程和灌河口导堤工程建设后,埭子口海域潮流动力减弱,涨潮流携带的泥沙会逐渐淤积在挡潮闸闸下,使得埭子口排水能力下降,降低了沂北地区的排涝标准。相关航运和河闸管理部门应及时采取措施对埭子口进行整治,保证埭子口排水畅通。

参考文献(References):

- [1] YAN B L, DU B Y, SUN Y D. Analysis of Liezikou governance problems[J]. Jiangsu Water Resources, 2010(9): 15-17. 颜秉龙, 杜宝义, 孙宜达. 埭子口治理问题浅析[J]. 江苏水利, 2010(9): 15-17.
- [2] HUANG W M, WANG W H, ZHANG W S, et al. Analysis of characteristics of the tides and the tidal currents in adjacent waters of Lianyungang Port[J]. Zhejiang Hydraulics, 2012(3): 1-5, 14. 黄卫明, 王维华, 章卫胜, 等. 连云港附近海域潮汐与潮流特征分析[J]. 浙江水利科技, 2012(3): 1-5, 14.
- [3] CHEN X F, JIA H L, LIU C Z. Sedimentary character and sedimentary environment of nearshore zone in southern Lianyungang[J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 2000(1): 74-81. 陈祥峰, 贾海林, 刘苍宇. 连云港南部近岸带沉积特征与沉积环境[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2000(1): 74-81.
- [4] ZHANG R S. Land-forming history of the Huanghe River delta and coastal plain of the Jiangsu[J]. Acta Geographica Sinica, 1984(2): 173-184. 张忍顺. 苏北黄河三角洲及滨海平原的成陆过程[J]. 地理学报, 1984(2): 173-184.
- [5] WANG Y H, ZHANG R S, WU D A, et al. Development and mechanism of transitional coast[J]. The Ocean Engineering, 2003, 21(2): 65-70. 王艳红, 张忍顺, 吴德安, 等. 淤泥质海岸形态的演变及形成机制[J]. 海洋工程, 2003, 21(2): 65-70.
- [6] WANG Y H. Study of variation features during coast erosion processes on the abandoned Huanghe River delta and integrated protection measures[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2006. 王艳红. 废黄河三角洲海岸侵蚀过程中的变异特征及整体防护研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2006.
- [7] LIN Y, LU C T. Two-dimensional tidal current and sediment numerical simulation to Qitai Breakwater in Lianyungang[J]. Port & Waterway Engineering, 2014(4): 30-34. 林岩, 路川藤. 连云港旗台防波堤工程二维潮流泥沙数值模拟[J]. 水运工程, 2014(4): 30-34.
- [8] ZHANG W, XIAO T B, PANG L. Effect of encircled breakwater on waterway siltation in Lianyungang area[J]. Port & Waterway Engineering, 2015(6): 93-99. 张玮, 肖天葆, 庞亮. 连云港港区环抱式防波堤对航道回淤的影响[J]. 水运工程, 2015(6): 93-99.
- [9] DING J H, ZHANG J S, GAO Z R, et al. Analysis of layout scheme of entrance of encircled basin along muddy coast[J]. Hydro-Science and Engineering, 2014(1): 17-23. 丁军华, 张金善, 高正荣, 等. 淤泥质海岸环抱式港池口门布置方案研究[J]. 水利水运工程学报, 2014(1): 17-23.
- [10] XIE J, DING Q, CAO H J, et al. 3D Numerical simulation of tidal current and sediment during Typhoon Wipha in Lianyungang sea area [J]. Port & Waterway Engineering, 2016(11): 34-40. 谢军, 丁琦, 曹慧江, 等. “韦帕”台风连云港海域三维潮流、泥沙数值模拟[J]. 水运工程, 2016(11): 34-40.
- [11] WANG Z L, GENG Y F. Two-dimensional shallow water equations with porosity and their numerical scheme on unstructured grids[J]. Water Science and Engineering, 2013, 6(1): 91-105.
- [12] YU K. 2D Numerical simulation of tidal current and petroleum pollutant in the Jiangsu offshore waters[D]. Nanjing: Hohai University, 2007. 俞琨. 江苏近海二维潮流及石油类污染物的数值模拟[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [13] JIANG J P, CHANG T P. Technical report on site winter hydrological survey in preliminary feasibility study of Lianyungang new port area[R]. Nanjing: Bureau of hydrology and water resources of the lower reaches of the Yangtze River, 2006. 蒋建平, 常太平. 连云港新港区初步可行性研究现场冬季水文测验技术报告[R]. 南京: 长江下游水文水资源勘测局, 2006.

Dynamic Characteristics and Changes of Tidal Current in the Liezikou Sea Area, Lianyungang

ZOU Chun-lei¹, WANG Zhi-li², ZHEN Feng¹, XU Huan¹

(1. *Jiangsu Province Water Engineering Sci-tech Consulting Corp., Ltd.*, Nanjing 210029, China;

2. *Nanjing Hydraulic Research Institute*, Nanjing 210024, China)

Abstract: In order to study the dynamic characteristics of the tidal current and its response to the surrounding coastal engineering in the Liezikou sea area, Lianyungang and to provide a reference for controlling the siltation under the Liezikou gate, a numerical model is established based on the finite volume method for two-dimensional shallow water equations and then calibrated and verified by using measured hydrological data. By using this model the dynamic characteristics of the tidal current in the Liezikou sea area and its changes after constructing the breakwater at Xuwei Port and the guide levee at Guanhe River mouth are analyzed. The simulation results indicate that the change of the tidal current dynamics is significant after the engineering constructions, which include changes in the direction of rising and falling currents and the decreases in the average velocity of both rising and falling currents, being the nearer the distance away from the engineering area the greater the change in current velocity. The weakening of tidal current power will aggravate the siltation under the upstream tide gate, which will make the drainage become poor in the Liezikou area and the flood risk increase in the Yibei region. Therefore, the relevant departments should take measures timely to ensure the drainage is smooth in the Liezikou area.

Key words: Lianyungang; Liezikou; Xuwei Port breakwater; tidal current dynamics; Euler residual current

Received: May 10, 2020