

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2016.05.008

钱明霞, 路川藤, 罗小峰, 等. 长江口北槽潮波对地形变化的响应研究[J]. 水利水运工程学报, 2016(5): 54-60. (QIAN Ming-xia, LU Chuan-teng, LUO Xiao-feng, et al. Response of tide waves in north channel of Yangtze estuary to topographic variation [J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(5): 54-60.)

长江口北槽潮波对地形变化的响应研究

钱明霞¹, 路川藤¹, 罗小峰¹, 朱思雨²

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 河海大学, 江苏 南京 210098)

摘要: 以长江口北槽为研究背景,建立了二维潮流数学模型,在模型验证良好的基础上,研究了北槽潮波传播对工程与地形变化的响应。研究表明,长江口深水航道治理工程完成后,北槽地形未发生调整前,北槽潮波高、低潮位均升高,潮差减小,涨、落潮相位明显滞后,潮波变形加剧,涨落急流速均呈增大趋势;北槽水深增加后,高、低潮位随之降低,潮差增大,落潮相位略有提前,涨潮相位变化相对较小,潮波变形逐渐趋缓,涨急流速减弱,落急流速增强。

关键词: 长江口; 北槽; 潮波; CJK3D-WEM; 二维潮流模型

中图分类号: TV148

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2016)05-0054-07

长江口是我国第一大河口,多年来,人类为治理长江口付出了诸多努力。长江口大型涉水工程众多,如横沙东滩围垦工程、青草沙水库工程等,其中规模最大的为长江口深水航道治理工程。长江口深水航道治理工程完成后,北槽由宽浅型河段变成有明显边界的相对窄深型河段,本文以此为基础,研究北槽水深变化对潮波传播的影响。

关于长江口潮波传播的研究,前人研究成果较多, Li Guo-fang 等^[1]建立了长周期潮位预报模型,修正径流和风暴潮引起的潮位误差,预报长江口潮位,计算精度可满足科研及工程要求。 Lei Zhi-yi 等^[2]研究了长江口水动力问题,指出江阴以上水域径流动力强,江阴以下水域潮汐动力强,若长江口无径流作用,自口外至口内,水位呈递减趋势,若无潮汐动力,则自口外至口内,水位呈递增趋势。沈焕庭等^[3-4]全面分析总结了长江口潮汐、潮流、余流、余环流的特征,其研究范围为徐六泾下游,认为长江口潮汐特征纵向与横向均存在明显变化,其中横向变化的原因为科氏力。采用低通序列的回归分析和功率谱分析方法,指出长江口高潮位与低潮位近几十年来均在上升,且高潮位上升率大于低潮位,潮差增大。朱玉荣^[5]认为古长江河口潮波以驻波为主,这主要是由入射波与反射波叠加引起,现今长江口潮波以前进波为主。长江口深水航道治理工程实施后,严以新等^[6]采用经 Foreman 改进的 Godin 潮汐调和及预报程序,对北槽横沙站和北槽中站的潮位资料进行调和与分析,比较了两站平均海平面值和特征潮位的变化,指出深水航道工程对平均海平面值影响较小,对潮差影响较大;路川藤等^[7-8]研究了在长江口河床地形不变条件下,北槽潮波变化对各分期工程的响应。

本文在前人研究基础上,深入研究长江口深水航道治理工程结束后,北槽河床地形的变化对北槽潮波传播的影响。

1 控制方程

采用数值模拟软件 CJK3D-WEM^[9]建立数学模型。该软件于 2014 年取得国家软件著作权登记,适用于

收稿日期: 2015-09-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51509161)

作者简介: 钱明霞(1979—),女,江苏盐城人,工程师,硕士,主要从事河口海岸工程治理研究。E-mail: mxqian@nhri.cn

江河湖泊、河口海岸等涉水工程中的水动力、泥沙、水质、温排、溢油模拟预测研究。

二维浅水方程可表示为:

$$\begin{cases} \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial(Hu)}{\partial x} + \frac{\partial(Hv)}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial z}{\partial x} - fu + g \frac{u\sqrt{u^2+v^2}}{C^2H} = N_x \frac{\partial^2 u}{\partial^2 x} + N_y \frac{\partial^2 u}{\partial^2 y} \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial z}{\partial y} + fv + g \frac{v\sqrt{u^2+v^2}}{C^2H} = N_x \frac{\partial^2 v}{\partial^2 x} + N_y \frac{\partial^2 v}{\partial^2 y} \end{cases} \quad (1)$$

式中: H 为总水深(m); z 为水位(m); u, v 流速矢量 V 沿 x, y 方向的速度分量(m/s); t 为时间(s); f 为科氏力; g 为重力加速度(m/s²); N_x, N_y 分别为 x, y 向水流紊动黏性系数(m²/s); C 为谢才系数。

采用三角形网格对计算区域进行离散处理,并将单一网格单元作为控制单元,水深布置在网格顶点,其他物理变量配置在每个单元中心。采用有限体积法对方程(1)进行离散求解,具体求解过程参见文献[10]。

2 数学模型

2.1 长江口深水航道治理工程

长江口深水航道治理工程^[11](图1)按照“一次规划,分期治理”的原则,分三期实施。一期工程于1998年1月开工,2001年3月竣工,航道水深由7 m增加到8.5 m(理论深度基准面,下同)。二期工程于2002年4月开工,2005年3月底竣工,航道水深由8.5 m增加到10 m。三期工程于2006年9月底开工,2010年3月通过国家验收,航道全长92.2 km,宽350~400 m的航道实现了12.5 m水深的全线贯通。

2.2 数学模型模拟范围

数学模型模拟范围上边界至徐六泾附近,北侧边界至连兴港,外海边界至-50 m等深线附近,南侧边界至杭州湾北侧,如图2所示。整个计算区域采用三角形网格划分单元,模型计算参数为:网格最小边长107 m,网格数73 259个,时间步长15 s,糙率0.013+0.014/h,紊动黏性系数 KhU_* ,其中, K 为系数, h 为水深, U_* 为摩阻流速。动边界水深0.02 m,开边界控制条件为潮位控制。

2.3 数学模型验证

模型地形采用2014年长江口实测地形,验证资料选取2014年2月28日7:00至2014年3月1日7:00各水文测点的同步潮位、潮流资料。潮位和潮流验证如图3和4,由图可见潮位与实测资料吻合程度高,验证良好,潮流偏差相对较大,主要原因是北槽网格插值与实际地形有所偏差,涨落急偏差总体控制在10%以内,基本满足规程^[12]要求。

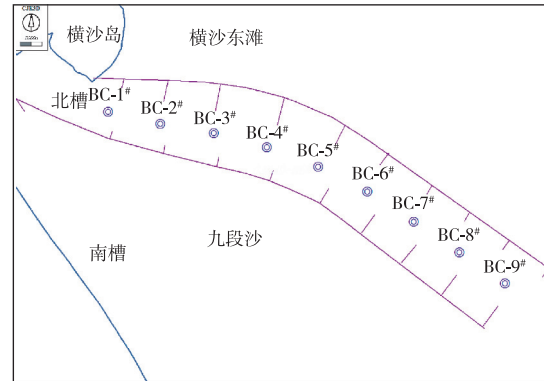


图1 长江口深水航道治理工程

Fig. 1 Yangtze estuary deepwater channel regulation works

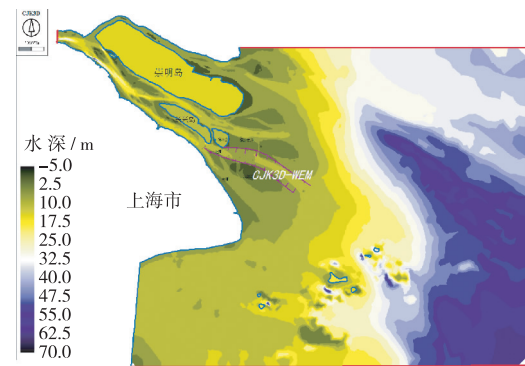


图2 数学模型范围

Fig. 2 Range of mathematical model

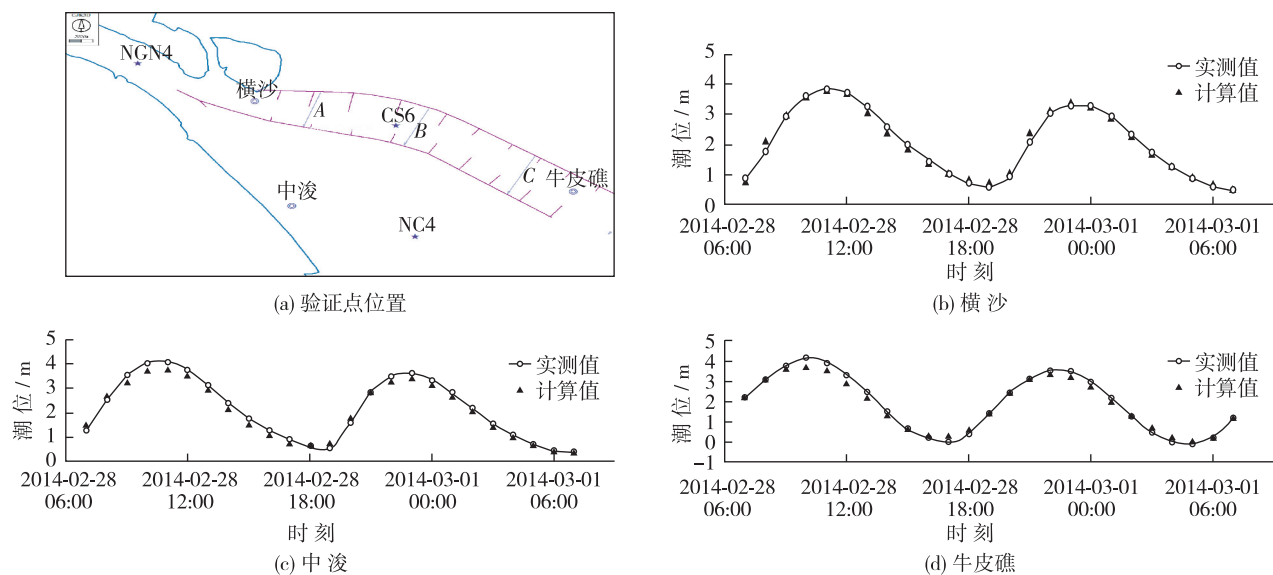


图 3 潮位验证

Fig. 3 Tide level verification

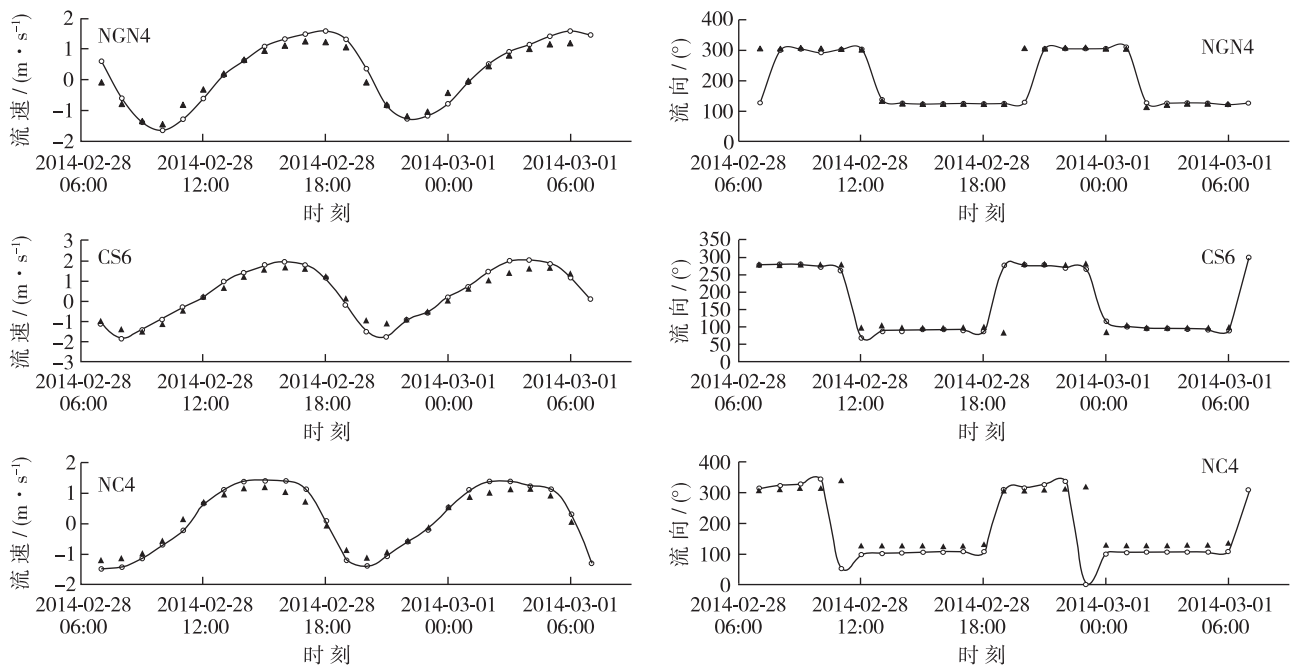


图 4 潮流验证

Fig. 4 Tidal current verification

3 北槽潮波对地形变化的响应

以多年平均流量大潮为代表潮型(流量通过徐六泾断面反算获得),三期工程整治建筑物为背景,地形分别采用整治工程实施前的 1998 年地形、二期工程竣工后的 2006 年地形和三期工程后的 2014 年地形,研究长江口北槽潮波对河床地形变化的响应,计算工况见表 1。

图 5 为工况 2~4(1998 年、2006 年、2014 年)长江口

表 1 计算工况

Tab. 1 Calculation working conditions			
工况	地形年份	潮型	整治建筑物
1	1998 年	大潮	无
2	1998 年	大潮	深水航道治理三期工程
3	2006 年	大潮	深水航道治理三期工程
4	2014 年	大潮	深水航道治理三期工程

北槽典型断面河床水深的变化,断面位置见图3(a)。由图5可知,自1998年长江口深水航道治理工程实施以来,随着工程的进行,北槽丁坝群坝田淤积明显,主槽水深逐步增大,北槽河床形态由“宽浅”型向“窄深”型发展。北槽河床形态的变化,不仅改变了北槽原有的水流结构,而且对潮波传播亦有影响。

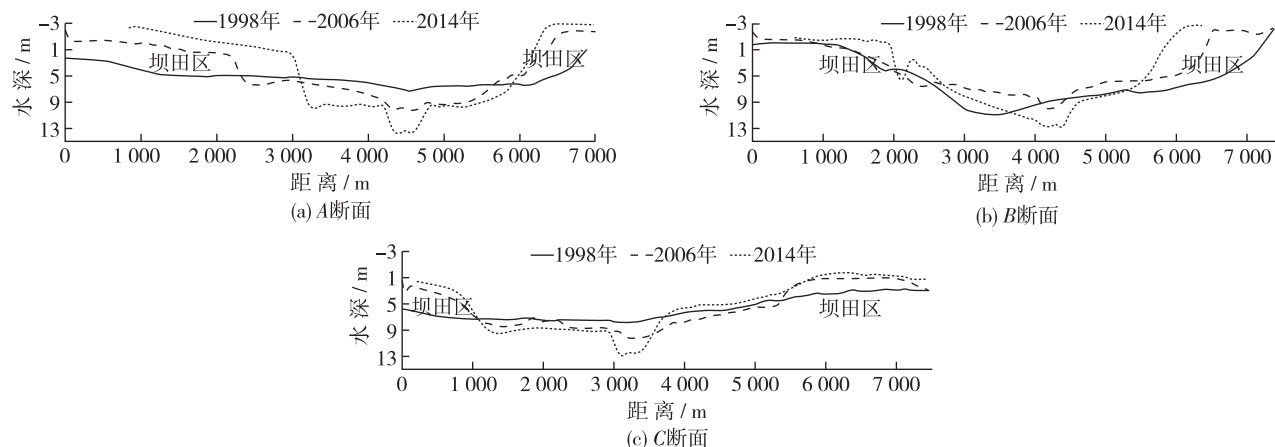


图5 北槽典型断面河床水深变化

Fig. 5 Water depth variation in north channel of Yangtze estuary

3.1 潮位特征

北槽深水航道治理工程实施前,北槽高、低潮位自下游至上游呈逐渐升高趋势,潮差逐渐减小,北槽深水航道治理工程实施后,这一趋势基本不变。工程实施后,河床地形未发生调整前(工况2),在丁坝、导堤的作用下,北槽潮波能量有一定损失,致使北槽高潮位降低,低潮位抬升,潮差减小,且自下游至上游潮差减小幅度逐渐增大,BC-1#点(采样点位置见图1),潮差减幅达0.41 m,如图6。河床地形调整后(工况3~4),随水深增加,北槽高潮位与低潮位均降低,潮差增大,靠近北槽口处BC-9#点,潮差基本恢复至工程前潮差,北槽上游BC-1#点潮差相比工程前减少约0.20 m。北槽水深增加后,潮波能量损耗明显减少,主要因为水深增加致使河床底摩擦对潮波能量的损耗降低。

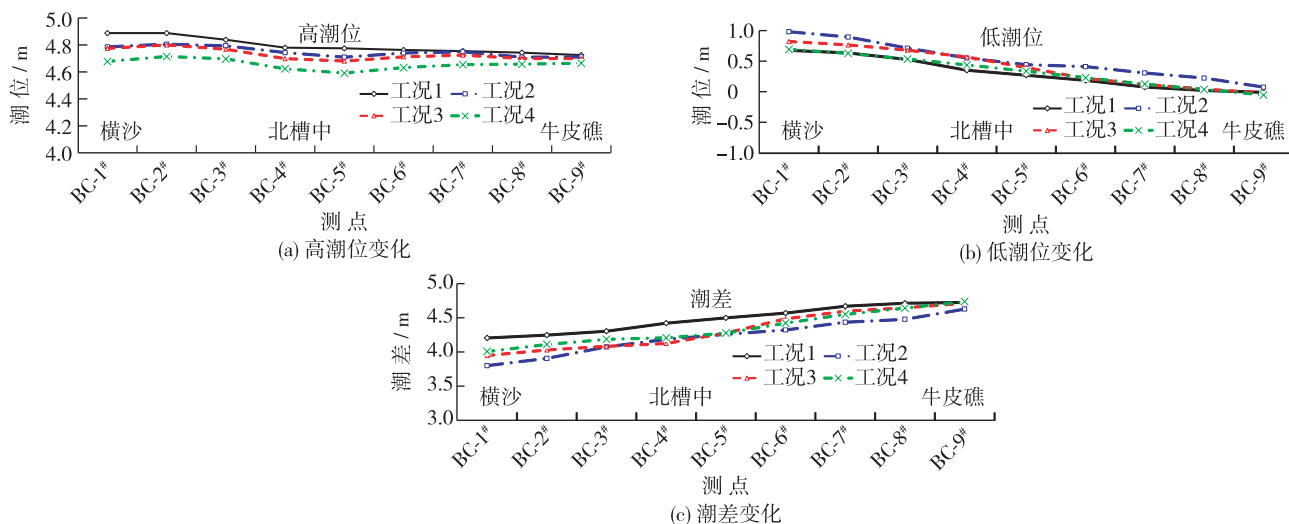


图6 北槽潮位和潮差变化

Fig. 6 Variation of tide level and tidal range in north channel

3.2 潮波变形

以北槽上游 BC-3#点、北槽下游 BC-7#点(图 7)为代表,分析北槽潮波变形对河床地形变化的响应。工况 2 实施后,涨潮、落潮相位明显滞后,随着北槽河床水深的增大(工况 3,工况 4),落潮相位略有提前,涨潮相位变化相对较小。

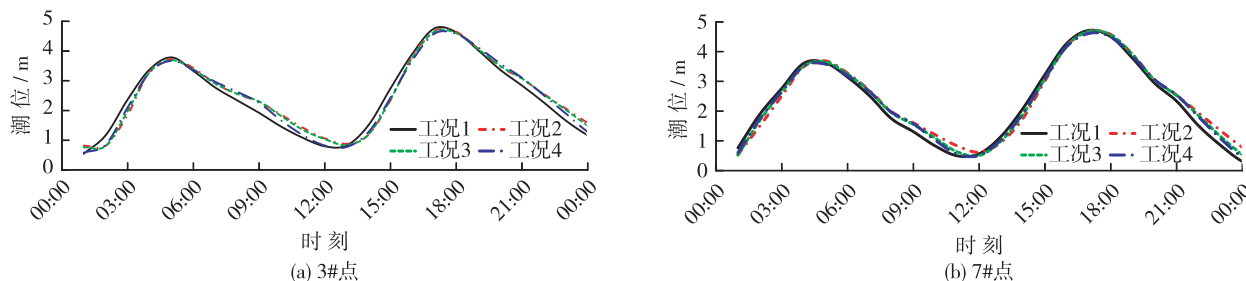


图 7 潮波变形

Fig. 7 Tide wave transformation

图 8 为北槽河床地形变化前后,落潮历时与涨潮历时比的变化,该值越大,说明潮波变形越严重。工程前(工况 1),北槽自下游至上游,潮波变形逐渐加剧,工况 2 实施后,这一趋势不变,但潮波变形明显加剧,北槽河床水深增大后,潮波变形逐渐趋缓。工况 4 北槽潮波变形与工程前已较接近。说明北槽丁坝导堤的实施加剧了潮波变形,而河床水深的增加能在一定程度上减缓工程引起潮波加剧变形。

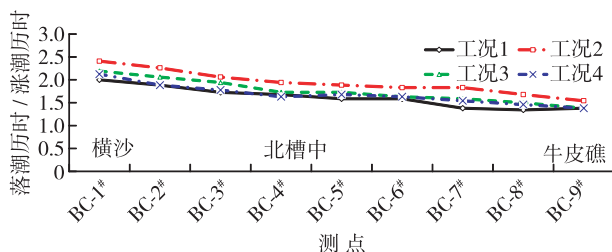


图 8 落潮历时与涨潮历时比

Fig. 8 Ratios of flood and ebb duration

3.3 潮流变化

图 9 为北槽沿程涨、落潮平均流速变化。由图 9(a)可见,北槽涨潮平均流速变化相对较小;工况 2 实施后,在丁坝导堤的束水作用下,涨潮平均流速整体增大,随着北槽水深增大(工况 3~4),北槽涨潮平均流速呈减小趋势,主要因为涨潮时,北槽丁坝导堤均处于淹没状态,从北槽南侧、东侧进入的涨潮量(工况 2~4)变化相对较小。由图 9(b)可见,北槽落潮平均流速变化相对较大,工况 2 实施后,在丁坝导堤的束水作用下,落潮平均流速整体增大,北槽水深增加后(工况 3~4),在深槽引流作用下,北槽落潮量增大,从而导致落潮平均流速继续增大,且形成中间大两头小的流速分布形态。

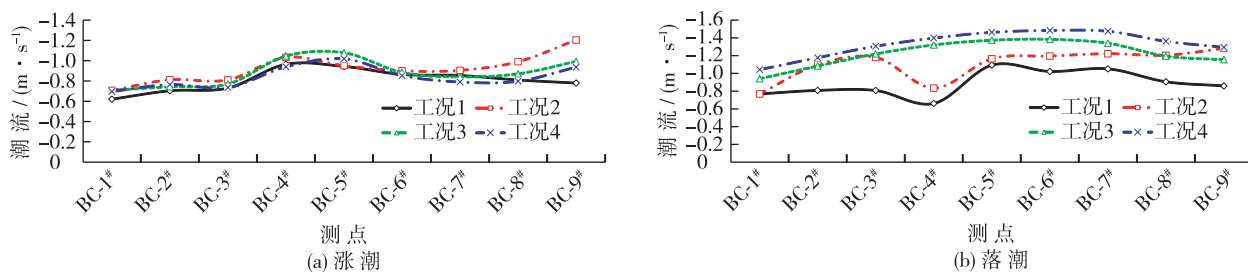


图 9 涨落潮平均流速变化

Fig. 9 Variation in average flood and ebb velocities

以北槽上游 3#点、下游 7#点为代表,分析北槽潮流过程对河床地形变化的响应(见图 10)。工况 2 实施后,北槽涨落急流速均呈增大趋势,北槽上段尤为明显,潮流相位较工程前有一定滞后。随着北槽水深的增

加,北槽涨急流速减弱,落急流速增大,潮流相位略有滞后,变化较小。

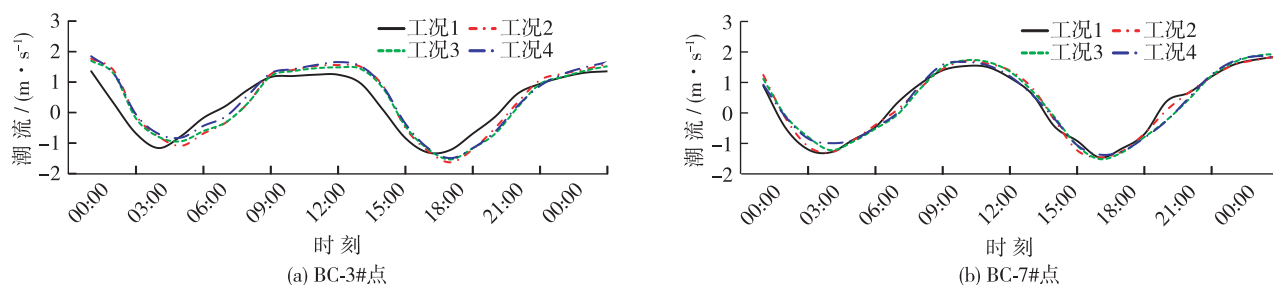


图10 BC-3#点和BC-7#点潮流变化

Fig. 10 Tidal current variations at BC-3# and BC-7# points

3.4 优势流分析

图11为北槽落潮优势流变化,优势流能反映落潮动力情况。由图可知,深水航道治理工程实施前,北槽优势流自上游至下游呈逐渐减小趋势,口门处,优势流接近50%,BC-4#点位于横沙串沟未封堵前的出口处,水流复杂,优势流较上下游差异大。深水航道治理工程实施后,北槽地形未变化前(工况2),在丁坝导堤的作用下,优势流增大,北槽水深增加后(工况3~4),由于落潮流速明显增大,因此优势流继续增大。综上,北槽水深的增加致使北槽落潮动力持续增强,这对深水航道的维护有利。

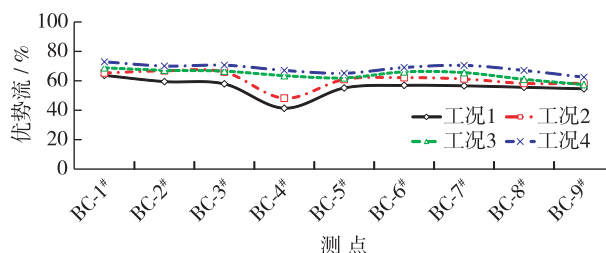


图11 北槽优势流变化分析

Fig. 11 Predominant current variation in north channel

4 结 语

通过建立的长江口二维潮流数学模型,模型验证良好,说明模型具有模拟长江口潮波传播的能力。长江口深水航道治理工程完成后,北槽地形未发生调整前,北槽潮波高、低潮位均升高,涨、落潮相位明显滞后,潮波变形加剧,涨落急流速均呈增大趋势;北槽水深增加后,高、低潮位随之降低,潮差增大,落潮相位略有提前,涨潮相位变化相对较小,潮波变形逐渐趋缓,涨急流速减弱,落急流速增强,优势流增大。

参 考 文 献:

- [1] LI Guo-fang, XIANG Xin-yi, WU Jie, et al. Long-term water level forecasting and real-time correction model in the tidal reach of the Yangtze River[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2013, 18(11): 1437-1442.
- [2] LEI Zhi-yi, ZHANG Jin-shan, KONG Jun. Numerical simulation of water level under interaction between runoff and estuarine dynamic in tidal reach of the Yangtze River[J]. China Ocean Engineering Society, 2009(3): 543-551.
- [3] 沈焕庭, 李九发. 长江河口水沙输运[M]. 北京: 海洋出版社, 2011. (SHEN Huan-ting, LI Jiu-fa. Water and sediment transport in the Yangtze Estuary[M]. Beijing: China Ocean Press, 2011. (in Chinese))
- [4] 朱玉荣. 冰后期最大海侵以来长江口潮波特性的变化[J]. 海洋科学, 2000, 24(5): 34-39. (ZHU Yu-rong. The change of characteristics of tidal wave in the Changjiang River mouth area since the post-glacial transgression maximum[J]. Marine Sciences, 2000, 24(5): 34-39. (in Chinese))
- [5] 刘新成, 沈焕庭, 杨清书, 等. 长江河口段潮差变化研究[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 1999(2): 89-94. (LIU Xin-cheng, SHEN Huan-ting, YANG Qing-shu, et al. Analysis of tidal range in Changjiang estuary[J]. Journal of East China Normal University(Natural Science), 1999(2): 89-94. (in Chinese))
- [6] 严以新, 刘均卫, 吴德安, 等. 长江口综合整治工程前后潮汐特征分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2009, 37(1):

- 100-104. (YAN Yi-xin, LIU Jun-wei, WU De-an, et al. Analysis of tidal characteristics before and after construction of regulation projects in Yangtze River estuary[J]. Journal of Hohai University(Natural Science), 2009, 37(1): 100-104. (in Chinese))
- [7] 路川藤, 陈志昌, 罗小峰. 长江口北槽潮波传播变化特征研究[J]. 长江科学院院报, 2015(8): 9-14. (LU Chuan-teng, CHEN Zhi-chang, LUO Xiao-feng. Variation characteristics of tidal wave propagation in the north channel of Yangtze Estuary[J]. Journal of Yangtze River Scientific Institute, 2015(8): 9-14. (in Chinese))
- [8] 路川藤. 长江口潮波传播模拟研究及主要影响因素分析[D]. 南京: 南京水利科学研究院, 2013. (LU Chuan-teng. Simulation of tidal propagation in Yangtze estuary and analysis of its main influence factors[D]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2013. (in Chinese))
- [9] 罗小峰, 王登婷. 河口海岸数值模拟可视化编程[M]. 北京: 海洋出版社, 2012. (LUO Xiao-feng, WANG Deng-ting. Numerical simulation of estuarine and coastal programming[M]. Beijing: China Ocean Press, 2012. (in Chinese))
- [10] 路川藤, 罗小峰. 基于非结构网格的高分辨率隐式算法研究及应用[J]. 海洋通报, 2015, 34(1): 59-64. (LU Chuan-teng, LUO Xiao-feng. The study of unstructured grids implicit algorithm and its application[J]. Marine Science Bulletin, 2015, 34(1): 59-64. (in Chinese))
- [11] 交通运输部长江口航道管理局. 长江口深水航道治理工程实践与创新[M]. 北京: 人民交通出版社, 2015. (Yangtze Estuary Channel Administration. Practice and innovation in the Yangtze estuary deepwater channel improvement project[M]. Beijing: China Communications Press, 2015. (in Chinese))
- [12] JTST 231-2—2010 海岸与河口潮流泥沙模拟技术规程[S]. (JTST 231-2—2010 Coastal and estuarine tidal current and sediment simulation technology rules[S]. (in Chinese))

Response of tide waves in north channel of Yangtze estuary to topographic variation

QIAN Ming-xia¹, LU Chuan-teng¹, LUO Xiao-feng¹, ZHU Si-yu²

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the numerical simulation of tide waves along the north channel of the Yangtze estuary, a 2D tidal current mathematical model is established to study the tidal wave variation in the Yangtze estuary under the conditions of topographic changes. The research results show that after the completion of the Yangtze estuary deepwater channel regulation works, the high and low tidal levels in the north channel increase, and the tidal range decreases; at the same time, there is a remarkable lag of phase of the flood tide and ebb tide, an intensive deformation of the tidal waves, and the maximum flood and ebb currents increase after the north channel terrain remains unchanged. When the water depth of the north channel increases, the high and low tidal levels in the north channel fall down, and the tidal range increases, and there is a slight phase leading of the ebb tidal level. The increase in water depth along the north channel has gradually slowed down the deformation of the tidal waves, and as a result of the regulation works, the maximum flood tide velocities decrease and the maximum ebb velocities increase.

Key words: Yangtze estuary; north channel; tidal waves; CJK3d-WEM; 2D tidal current model