

长江口太仓岸段险工成因分析

——基于水动力数值模拟的研究

张东来¹, 张东锋²

¹长沙理工大学水利工程学院, 湖南 长沙

²长江水利委员会水文局长江口水文水资源勘测局, 上海

Email: 120971935@qq.com

收稿日期: 2021年3月24日; 录用日期: 2021年5月24日; 发布日期: 2021年5月31日

摘要

长江口太仓港的岸线及水深资源对长三角地区的经济发展具有重要的作用, 研究该河段的河道变化特征, 特别是险工河段的成因具有重要的意义。通过建立太仓岸段精细水动力模型, 分别考虑现状条件(2016年)和不受人类活动影响(1997年)的自然条件下, 模拟分析了在不同上游来水条件下的水动力变化特征。模拟结果显示在新泾口和荡茜口附近流速增大明显, 动力条件增强, 意味着码头前沿河床有快速冲刷的危险, 监测结果也显示了上述区域的冲刷险情加剧趋势, 对码头安全运行带来严重隐患。由此可知, 太仓岸段水流变化特征和险工岸段的分布有密切联系。

关键词

险工险情, 水动力数值模拟, 长江口, 太仓段

Analysis on the Causes of Risk in the Bank Section of Taicang at the Yangtze Estuary

—Research on Hydrodynamic Numerical Simulation

Donglai Zhang¹, Dongfeng Zhang²

¹School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha Hunan

²Hydrological and Water Resources Geological Bureau of Yangtze Estuary, Shanghai

Email: 120971935@qq.com

Received: Mar. 24th, 2021; accepted: May 24th, 2021; published: May 31st, 2021

文章引用: 张东来, 张东锋. 长江口太仓岸段险工成因分析[J]. 建模与仿真, 2021, 10(2): 586-596.

DOI: 10.12677/mos.2021.102059

Abstract

The shoreline and large water depth along the Taicang reach play import role for economic development of the Yangtze Delta. It is important to study the characteristic of the evolution of the river course along this reach, especially for the formation mechanism of the high-risk reach. The present study proposes a high-resolution hydrodynamic model for the Taicang reach. The hydrodynamics under various combinations of river discharges and tidal forces have been simulated by considering bathymetry and shoreline in the past (1997) and at present (2016). The results show that the velocity increase near Xinjing River mouth and Dangqian river mouth. This indicates the increase of risks for erosion and clapping in these areas, which causes potential hazard to wharf along the Taicang reach. The monitoring result shows the same trend for those areas as the model results. This reveals the high relationship between the hydrodynamic change and the distribution of the high-risk area along the Taicang reach in the Yangtze Estuary.

Keywords

High-Risk Reach, Hydrodynamic Model, The Yangtze Estuary, Taicang Reach

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

长江岸线资源在沿江产业布局及发展中具有先导性、基础性作用,是长江经济带发展战略的重要一环。而长江河床在水流作用下发生冲淤变化,特别是在近岸形成冲刷坑会诱发河岸崩塌,破坏护岸工程,危及堤岸甚至防护区域的安全,可见,长江堤岸险工险情影响重大,是共抓大保护、系统谋划岸线资源保护利用目标中需要重点关注的内容。

针对河道险工险段的成因方面已有学者进行了大量的研究,如张引川等[1]认为水流条件是造成长江下游窝崩的主要因素;唐日长等[2]通过分析荆江河道实测资料,指出水流强度是弯曲河道中凹岸崩塌强度的主要因素;李宝璋[3]认为大尺度纵轴水流方向螺旋流是长江南京河段窝崩成因的主要动力;王学潮等[4]认为断层活动、地震、振动液化、地壳变形等地质因素和黄河的历次决口有所关联;陈小春和李伟康[5]从冲淤平衡的理念分析了险工岸段的成因;龙慧等[6]在分析荆江河段崩岸机理时指出水流条件是崩岸发生的主导因素;段光磊等[7]统计了长江险工段典型冲刷坑的特征,分析了三峡水库蓄水后险工段近岸河床年际、年内演变特点及其影响因素,对三峡水库蓄水后险工状况进行了分析。综上所述可以看出,河道险工岸段的成因通常注意力被放在水动力条件上,主要原因有座弯顶冲、迎流顶冲、深槽迫岸、河床冲刷、堤脚冲刷等,通常认为这些原因和河势相关;除此之外,地质条件也被认为和险工岸段有关联。

本研究主要关注长江口太仓岸段(见图1),位于白茆沙南水道南侧,北望崇明岛,南接上海市宝山区,距河口约80 km。

太仓岸段作为潮汐河道具有其独特的水动力特性,有别于以往相关崩岸研究的单向流河道的特性,如其水动力强度指标可用涨、落急和潮平均流速等进行表征,这些动力的作用效果差异很大,有些甚至是相反的。本研究拟通过建立长江口太仓岸段精细潮波水动力数学模型,模拟太仓岸段原始自然条件下

(1997年)以及现状条件(2018年, 含太仓岸线调整、长江口12.5深水航道上延及其配套工程等)下的水动力条件, 分析前后变化, 以期建立水流变化和险工岸段的联系, 分析太仓岸段险工的成因。

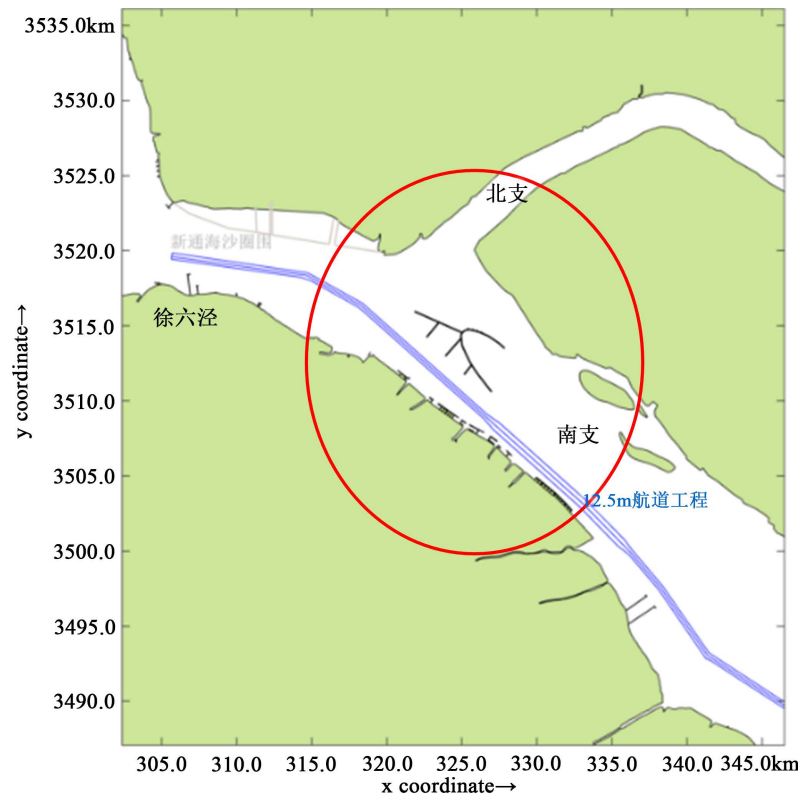


Figure 1. Sketch of the shoreline of Taicang

图 1. 太仓岸段位置示意图

2. 研究方法及数据

2.1. 长江口太仓段水动力模型

2.1.1. 长江口大区域模型

1) 模型网格

本研究主要关注于长江口内南支上段太仓沿岸水动力要素的变化状况, 研究重点位置为长江口河口地区三级分汊四口入海的区域, 考虑到上下边界及相关水体的交换作用, 而实际采用的数学模型(开源 Delft3D-FLOW)涵盖的区域远远大于长江口, 数学模型的区域如图 2(a)所示, 即数学模型涵盖了整个长江口感潮区域(自大通以下), 杭州湾以及连接长江口和杭州湾的大部东中海。

考虑到整个模型跨经的水平区域较大, 以及模型区域内水动力及盐度垂向结构的不一致性, 拟采用分区域模式: 即徐六泾以上河段基本不受盐水影响[8], 可采用二维模型, 徐六泾以下考虑盐水及淡水的混合, 模型采用三维垂向分层(垂向分 12 层)的方法(如图 2(a)所示)。

2) 边界条件

长江口大区域模型主要驱动动力为上游径流量和外海潮波, 上边界直接采用大通实测的流量过程代表径流条件, 下游边界则采用 M_2 , S_2 , N_2 , K_2 , K_1 , O_1 , P_1 以及平均海平面代表外海潮波动力。上游大通来水考虑为淡水, 外海边界的盐度则采用海洋图集的月平均盐度进行插值得到。

3) 初始条件

模拟时采用冷启动, 即初始条件的水位, 流速均设为 0, 盐度则根据海洋图集的各月长江口盐度分布进行插值得到。仅考虑水动力时, 模型在 2 天内达到稳定并且初始条件的影影响将被滤除; 考虑盐度时, 一般需要模拟 2~3 个月达到稳定。

4) 模型验证

上述长江口大范围模型已对各种径、潮流组合(洪 - 平 - 枯流量, 大 - 中 - 小潮型)进行了验证, 模拟结果和实测水动力、盐度等过程吻合良好[9] [10] [11] [12] [13]。

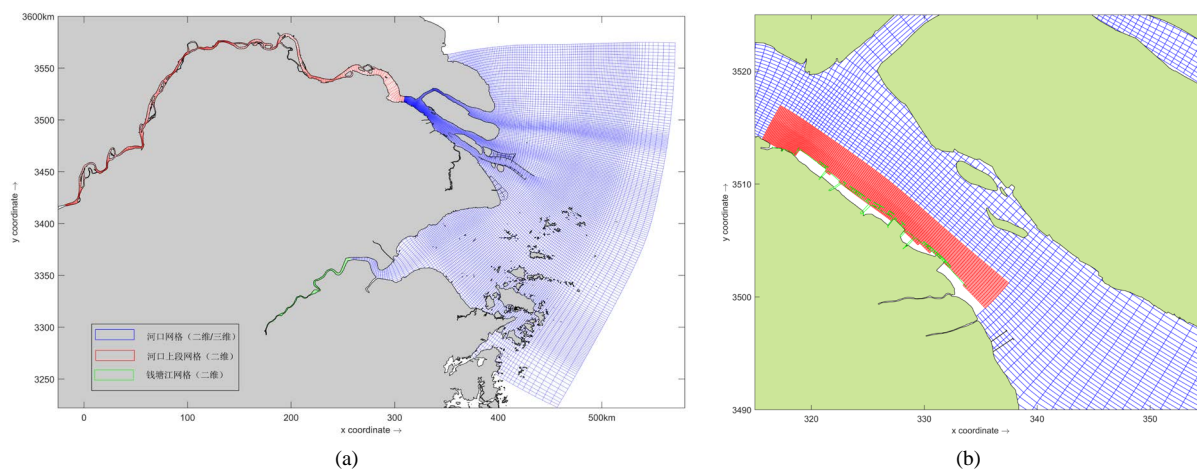


Figure 2. (a) Model domain of the hydrodynamic model for the Yangtze Estuary (Blue: grid for 3D model, from Xuliujing to offshore; Red: grid for 2D model, from Datong to Xuliujing; Green: grid for 2D model of the Qiantang River, from Lucipu to Haining); (b) Grid for the Taicang area with higher resolution

图 2. (a) 长江口水动力模型网格示意图(蓝色: 长江口河口三维网格, 徐六泾至口外; 红色: 长江口河道二维网格, 大通至徐六泾; 绿色: 钱塘江二维河道网格, 卢茨埔至海宁); (b) 长江口太仓岸段精细模型网格示意图

2.1.2. 太仓岸段精细水动力模型

上述长江口水动力模型的水平分辨率不能很好的刻画本研究重点关注的太仓岸段区域的细部水下地形及局部工程的影响, 因此, 本研究在长江口水动力模型的基础上, 进一步建立了太仓岸段精细模型。

图 2(b)为太仓岸段精细模型的计算网格, 模型采用区域分割的技术, 在长江口水动力模型的长江河口模式中嵌套了太仓岸段的精细模型, 模型网格 256×71 (沿主流方向 \times 垂直于主流方向), 最小分辨率约为 50 m, 垂向采用 12 层网格(σ 坐标)。该精细模型直接内嵌入长江口大范围水动力模型, 无需提供边界条件直接由大模型进行驱动。

2.2. 研究基础数据

2.2.1. 水下地形及岸线数据

本研究主要考虑现状条件下的水动力条件, 并与之前未受影响的自然状况下的水动力条件进行对比。现状条件下的水下地形采用 2016 年实测长江口南支数据, 并在太仓岸段采用最新实测数据(201808)进行离散插值处理。图 3 为现状条件下图 3(a)和 1997 年图 3(b)研究区域的水下地形图及相应岸线。

2.2.2. 水文观测数据

本研究采用的水文观测基础数据来自于长江口水文水资源勘测局为长江南京以下 12.5 m 深水航道一期工程动态监测数据和长江河口段(太仓段)水文地形监测 2018 年度监测数据, 以及大通站实测 2011, 2015 和 2016 年径流量。

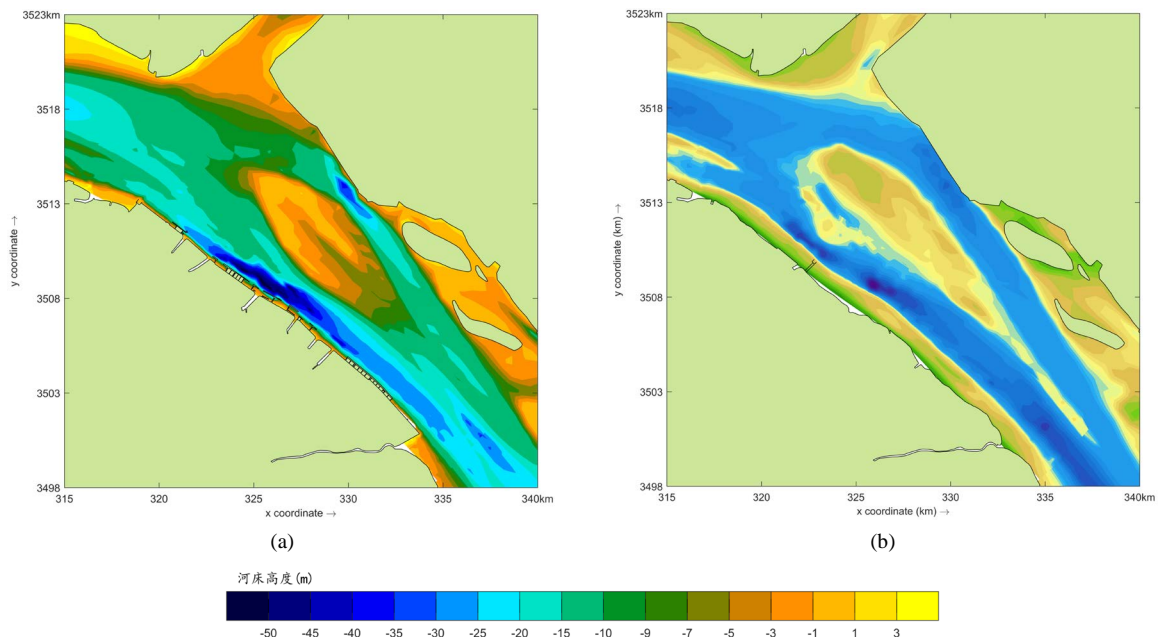


Figure 3. Bathymetry and shoreline of Taicang ((a) 2016; (b) 1997)
图 3. 太仓水域水下地形及岸线((a) 2016 年; (b) 1997 年)

2.2.3. 工程布置方案

影响太仓岸段的水动力条件的变化因素, 既有天然河势演变, 也有人类活动的影响。特别是在自然河势调整的大前提下(流域来水格局调整、来沙总体下降), 河道本身在做调整, 再加上不同时期的人类活动, 使得动力条件变化的成因极其错综复杂。本研究以 1997 年的地形和岸线布局作为自然条件的状况, 以 2016 年地形及岸线为基础加入人类活动的影响作为现状条件, 分别对太仓水域的水动力条件进行模拟。其中, 影响该水域的人类活动主要考虑了以下几个方面:

1) 12.5 m 深水航道

在长江口太仓岸段精细模型中, 按图 1 所示的深水航道的位置进行浚深, 保证航道所在位置的水深大于 12.5 m。

2) 白茆沙航道整治工程

如图 1 中所示的白茆沙航道整治工程采用潜堤、丁坝和护堤坝相结合的整治建筑物布置方案[14]。白茆沙南、北潜堤长度分别为 8562 m 和 4888 m, 堤顶高程均为 1.0 m; 白茆沙头部潜堤高-7.0 m, 下端与南北潜堤相接, 长度 3500 m。白茆沙头部潜堤南侧布置丁坝 3 座, 长度分别为 1300 m、1600 m 和 800 m, 3 条丁坝根部 900 m、700 m、0 m 与潜堤齐平、坝头高程渐变至-7.0 m。白茆沙北潜堤北侧布置护堤坝 4 座, 长度均为 100 m, 坝身高度为 2~3 m, 以及崇明岛新建河附近的抛石护岸及丁坝工程。除了北侧护堤坝比较短小不能在模型中考虑外, 其他整治工程根据各自的堤顶高程和长度, 在模型作为局部围堰或鱼梁(local weir) [13]考虑。

3) 太仓岸段岸线调整工程

1997 年, 太仓实施了第一期岸线调整工程, 至 2010 年, 太仓岸线调整工程共进行了 6 期, 此外还有一些规模相对较小的岸线调整围滩工程, 除了一期工程, 其他几期在 2002~2006 年之间完成。对比图 3(a)和图 3(b)可知, 工程后太仓岸线整体前河道前移了约 1 km。在模型计算中, 太仓岸线调整工程在 1997 年地形条件下不做考虑, 现状条件则是考虑圈围的影响, 整个圈围区域作为陆地来考虑。

3. 研究结果

3.1. 太仓岸段水动力模型计算工况

本研究旨在通过分析太仓岸段自然条件下以及诸多工程影响下水动力条件的变化, 探究太仓岸段险工段的形成机制。在模拟计算该区域的水动力要素时空分布特性时, 首先需要确定代表性的驱动动力条件, 即代表径流量及潮型。

代表径流量选取枯水年、平水年和丰水年为代表样本, 为了较好的反映径流量变化引起的水动力条件变化, 此处选取了枯水年枯季月份、平水年平水月份以及丰水年洪季月份作为代表。水动力模拟结果输出 15 天, 以保证覆盖大中小潮的不同潮型。

长江口上游来水量多年平均约为 9000 亿 m^3 , 因此, 可以选取大通站 2011 年、2015 年和 2016 年分别代表枯水年、平水年和丰水年, 对应各年的径流量分别为 6662, 9139 和 10450 亿 m^3 。另外, 分别选取相应年份的枯季, 平水和洪水月份, 分别为 2011 年 02 月代表特枯条件, 2015 年 05 月代表平水以及 2016 年 07 月代表较大洪水条件。具体径流计算条件见表 1, 模拟时采用表 1 所示的流量驱动水动力模型。

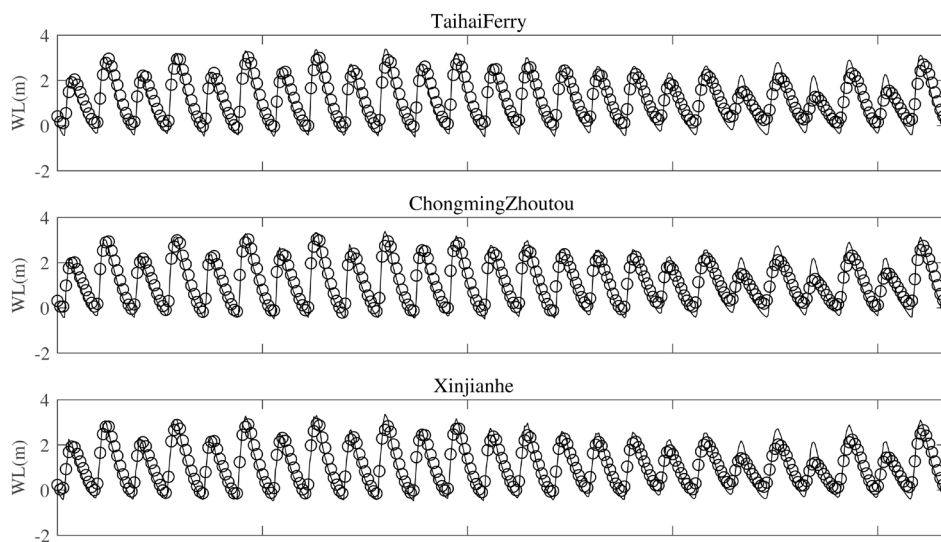
Table 1. Discharge condition for the Taicang model

表 1. 太仓岸段水动力模型计算工况

径流类型	年份	径流量(m^3)	月份	流量(m^3/s)
枯水	2011	6662	02	13,900
平水	2015	9139	05	31,000
丰水	2016	10450	07	65,800

3.2. 长江口太仓岸段精细水动力模型验证

鉴于太仓岸段精细模型内嵌于长江口水动力模型中, 模型参数的率定, 结果的验证可参考长江口水动力模型的结果。此外, 本研究对太仓岸段精细模型的水位计算结果做了进一步的验证。采用内嵌于长江口水动力模型的太仓精细模型, 模拟计算 2012 年 7 月后半月的水位结果, 并与同步实测水位数据进行比较, 结果见图 4。从图中可以看出, 模拟结果和实测值吻合良好。



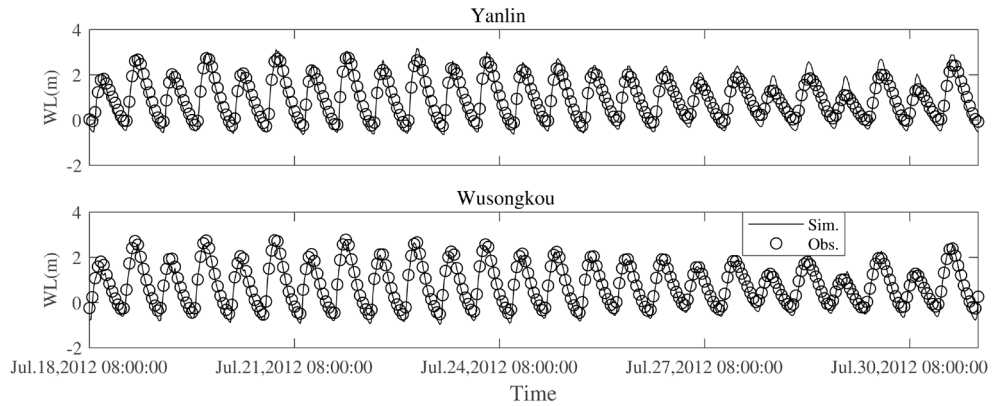


Figure 4. Modeled water level validation against observation (From top to bottom: Taihai Ferry, ChongmingZhoutou, Xinjian, Yanglin, Wusong)

图 4. 长江口太仓岸段精细模型模拟水位与实测值对比(从上至下: 太海汽渡、崇明洲头、新建河、杨林、吴淞等站)

综上, 长江口水动力模型嵌套太仓岸段精细模型可细致刻画出太仓岸段的局部水下地形及岸线布局, 模型结果与实测吻合良好, 可用于进一步模拟分析太仓岸段水动力条件的变化特征。

3.3. 太仓岸段水动力要素模拟结果

3.3.1. 太仓沿岸流速平面分布及其变化

采用上述太仓岸段精细模型, 对工程前的自然条件和综合考虑各类工程影响的现状条件的工况, 模拟计算了不同径流量级(洪、平、枯)和潮型(大、中、小)组合条件下的太仓沿岸水动力状况。限于篇幅, 本文给出了以图 5、图 6 为例的枯水年枯季大潮落、涨急时刻太仓沿岸流速(表、底层)分布。

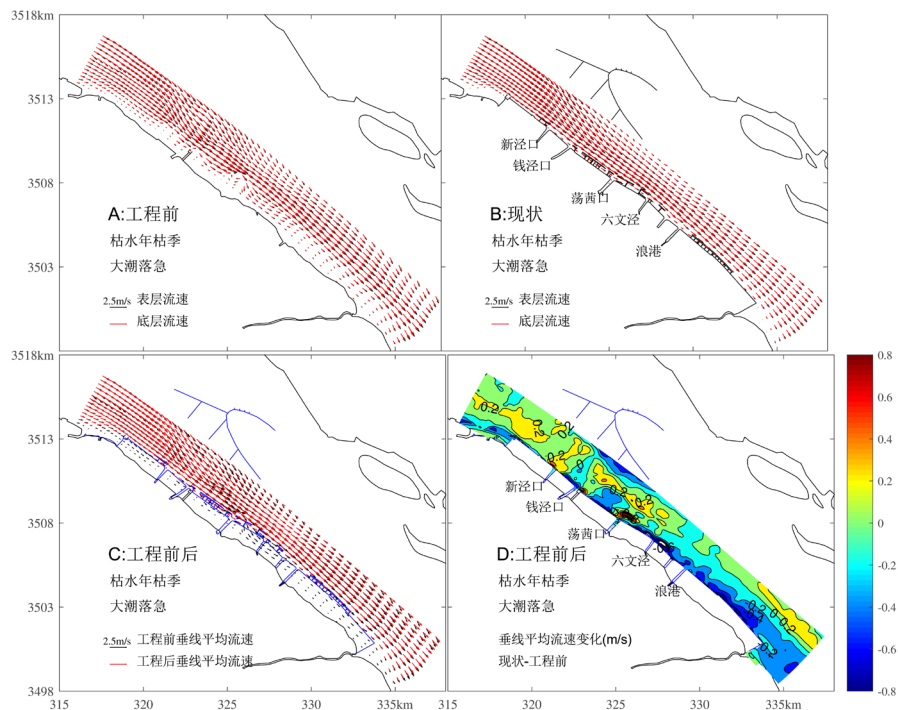


Figure 5. Velocity at surface and bottom at ebb maximum during spring tide in dry season of drought year ((A) Past; (B) Present), depth average velocity (C) and difference of depth average velocity (D)

图 5. 太仓沿岸枯水年枯季大潮落急时刻表、底层流速(A) 工程前; (B) 现状)和垂线平均流速(C)及垂线平均流速变化(D)

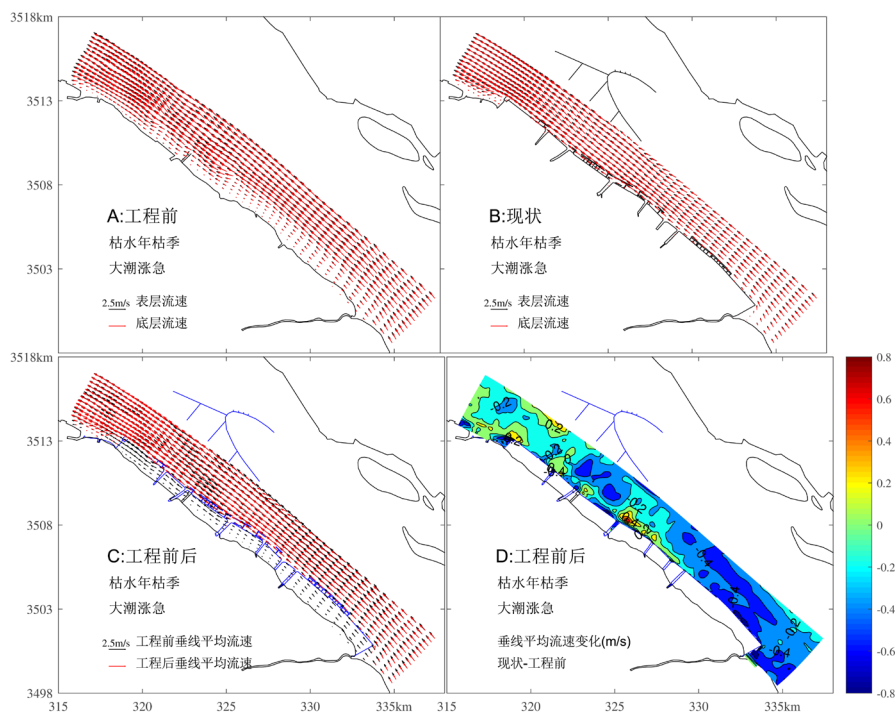


Figure 6. Velocity at surface and bottom at flood maximum during spring tide in dry season of drought year ((A) Past; (B) Present), depth average velocity (C) and difference of depth average velocity (D)

图 6. 太仓沿岸枯水年枯季大潮涨急时刻表、底层流速(工程前 (A); 现状(B))和垂线平均流速(C)及垂线平均流速变化(D)

由模拟得到了流速平面分布结果可知, 1) 现状条件下和工程前自然条件下的流速差异较大, 整体上可分成两个区域。以荡茜口断面为界, 一般上游沿岸流速有所增加, 下游流速有所减小; 2) 从流速变化的绝对值来看, 同一潮型下一般落急时刻流速变化幅度要大于涨急时刻; 3) 荡茜口断面附近是流速增大的集中区域, 各种潮型、不同流量条件下现状条件下流速均大于工程前自然条件的流速, 在新泾河口附近区域也有类似现象。

3.3.2. 太仓沿岸典型断面处流速变化

如图 7 所示, 选取研究区域内沿岸 14 个断面, 分析不同条件下的各断面流速分布。

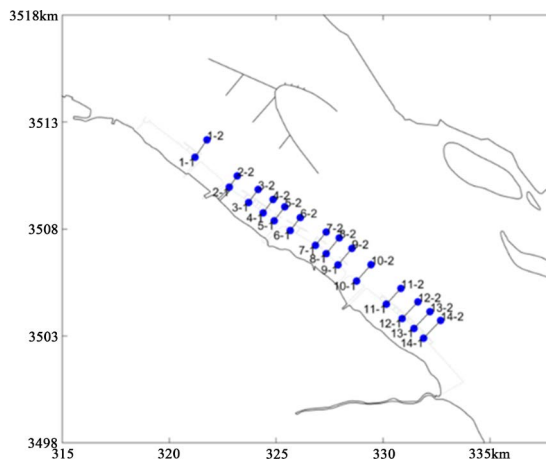


Figure 7. Location schematic diagram of 14 cross-sections and project points along Taicang reach

图 7. 太仓沿岸 14 个断面及工程点位置示意图

如图 8 所示, 各断面在不同条件下的工程前后的流速对比。可以看出, 工程前后的表、底层流速变化较为明显: 其中以 1、6 断面对应的新泾河附近和荡茜口附近流速增大明显, 其他区域流速大部分显现出不变或减小的趋势。

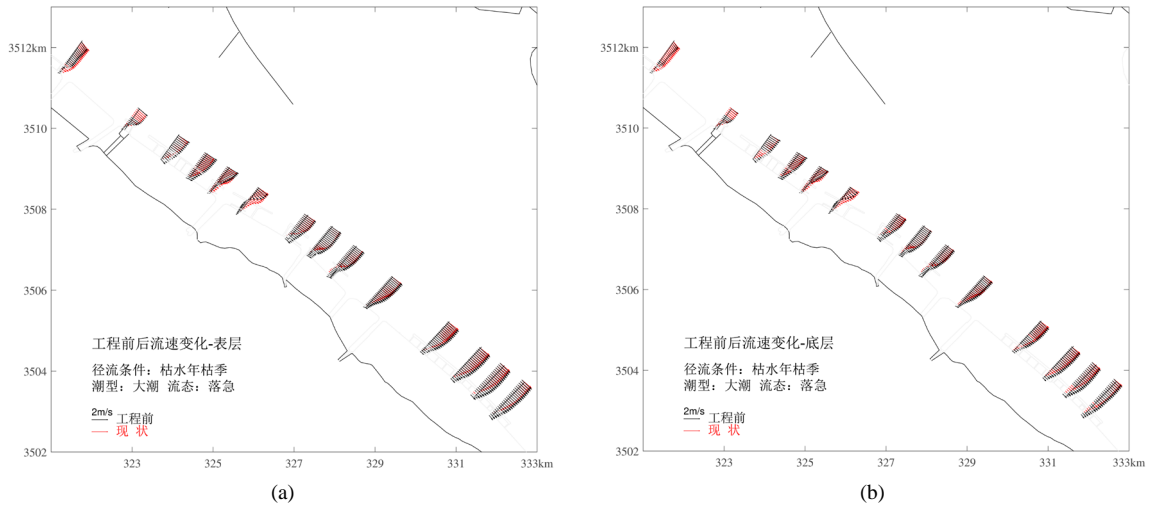


Figure 8. Velocity at surface (a) and bottom (b) at 14 cross-sections along Taicang reach (discharge: low-flow period in dry year; tidal stencils: spring tide; flow regime: maximum velocity during ebb)

图 8. 太仓沿岸 14 个断面表(a)、底(b)层流速分布(流量: 枯水年枯季; 潮型: 大潮; 流态: 落急)

3.3.3. 典型断面工程点流速变化

如图 6 所示, 选取了 14 个断面的两端作为控制点位, 分别提取各点位处的工程前后的流速、流向, 并比较得到流速的变化, 合计选取了 28 个控制点。可以得到如表 2 所示的工程前后枯水年枯季大潮期间垂线平均流速变化。并可由表中的结果绘制如图 9 所示的各断面中部的流速大小变化。

Table 2. Changes of the average flow velocity between the present scheme and before the work along Taicang reach (working condition: low-flow period in dry year, spring tide, maximum velocity during ebb; velocity: m/s)

表 2. 现状方案和工程前太仓沿岸垂线平均流速变化(枯水年枯季、大潮、落急; 流速 m/s)

点位	现状	工程前	流速变化	
			绝对值	变化率(%)
1-1	1.28	0.99	0.30	23.1
1-2	1.43	1.27	0.16	11.1
2-1	1.11	1.27	-0.17	-15.2
2-2	1.43	1.48	-0.05	-3.5
3-1	1.09	1.40	-0.30	-27.7
3-2	1.42	1.59	-0.17	-11.8
4-1	1.24	1.55	-0.32	-25.7
4-2	1.47	1.74	-0.28	-19.0
5-1	1.10	1.14	-0.04	-4.0
5-2	1.51	1.60	-0.09	-5.9
6-1	1.01	0.42	0.60	58.8
6-2	1.55	1.49	0.05	3.4
7-1	1.32	1.48	-0.16	-12.1
7-2	1.58	1.67	-0.10	-6.1

Continued

8-1	1.53	1.59	-0.05	-3.4
8-2	1.53	1.53	0.00	-0.1
9-1	1.21	1.43	-0.23	-18.8
9-2	1.54	1.65	-0.12	-7.5
10-1	1.24	1.48	-0.24	-19.7
10-2	1.58	1.69	-0.12	-7.5
11-1	1.40	1.61	-0.21	-15.2
11-2	1.57	1.74	-0.17	-10.6
12-1	1.35	1.60	-0.25	-18.2
12-2	1.54	1.68	-0.14	-9.1
13-1	1.31	1.71	-0.41	-31.0
13-2	1.52	1.66	-0.15	-9.6
14-1	1.27	1.50	-0.23	-17.9
14-2	1.50	1.60	-0.10	-6.6

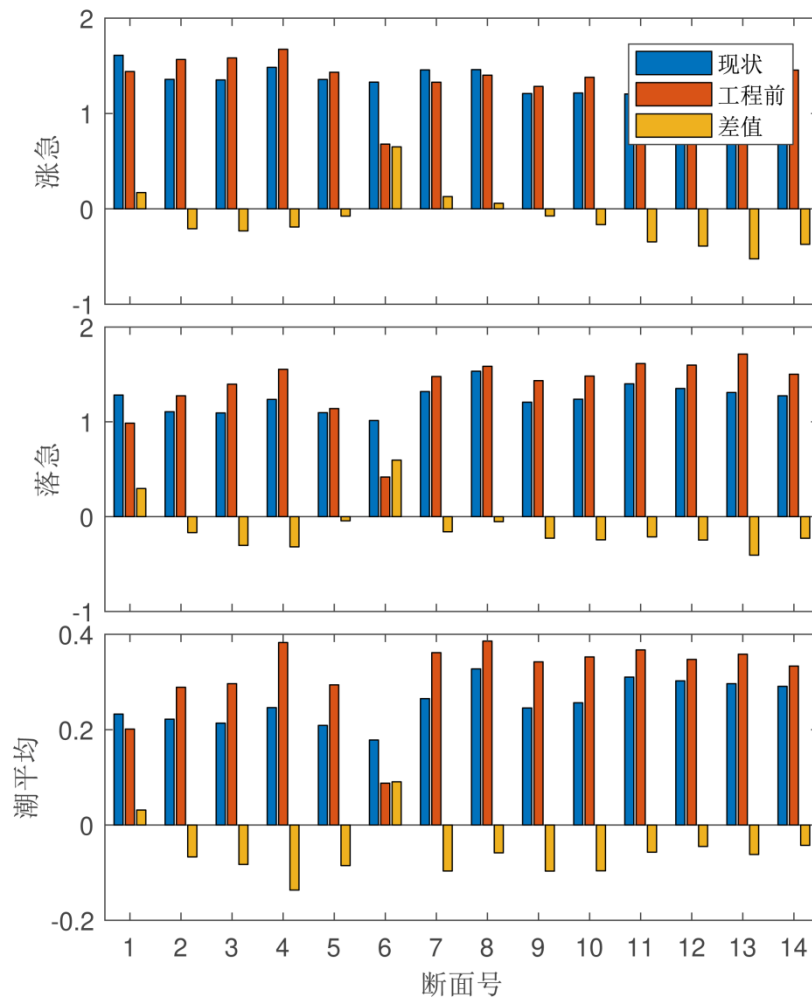


Figure 9. Changes of the average flow velocity before and after the Project at a vertical in the central of 14 sections along Taicang reach

图 9. 太仓 14 个断面中部工程前后垂线平均流速变化(枯水年枯季大潮)

从上述图、表可以得到, 现状和工程前条件下流速有差异, 即流速增大的区域主要集中在断面 1 和断面 6 附近: 断面 1 对应的是新泾口下游附近区域, 剔除较大流量对涨急流速的顶推, 其流速增大幅度在 10%~25% 左右; 断面 6 则是在荡茜口附近水域, 其近岸流速增大极为可观, 一般在 50%。

4. 结论和讨论

本研究建立了太仓岸段精细水动力模型, 模拟了太仓水域现状条件(近期实测地形 + 工程影响)和自然条件(1997 年实测地形)下的水动力要素, 分析模拟结果得到的主要结论为:

太仓岸段的荡茜口附近和新泾口附近水域, 现状条件下的动力条件比无工程影响前有显著增强: 新泾口附近区域现状条件下流速比自然状况下增加约 10%~25%; 在荡茜口附近, 近岸处流速增加超过 50%; 由此可见, 从流速量级的变化来看, 显示了上述区域的水动力条件增强, 对于水下岸坡稳定性有较大影响, 是需要重点关注的险工条件岸段。

本研究通过数学模型模拟结果分析得到的动力增强区域为荡茜口附近, 新泾口附近区域, 和实际监测的结果[15]揭示的险工岸段吻合, 亦表明潮波动力作用下的河道险工成因和水流强度有着密切的联系, 采用类似水动力数值模拟分析的方法有助于河道险工险情的分析研究。

本研究作为太仓险工岸段险工成因的初步探索, 并未考虑各种整治工程之间的相互作用和不同时期工程建设的影响, 也未涉及与水下边坡稳定直接相关的泥沙输运及地形变化等的影响, 以及太仓沿岸诸多码头栈桥等的影响亦未作考虑, 这些都是形成太仓险工岸段的影响因素, 对这些要素的影响分析将留待下一阶段进行深入研究。

基金项目

上海市科学技术委员会科研项目(19YF1452100); 上海市水务局科研项目(沪水科 2020-02)。

参考文献

- [1] 余文畴, 卢金友. 长江河道演变与治理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
- [2] 余文畴. 长江河道认识与实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- [3] 李宝璋. 浅谈长江南京河段窝崩成因及防护[J]. 人民长江, 1992, 23(11): 26-28.
- [4] 王学潮, 戴其祥, 张瑞怡. 黄河下游堤防地质勘察与研究回顾[J]. 人民黄河, 2001, 23(9): 5-6.
- [5] 陈小春, 李伟康. 北江大堤西南镇险段整治措施的思考[J]. 人民珠江, 2003(6): 38-39.
- [6] 龙慧, 严光云, 段光磊. 荆江河段近岸河床演变规律及崩岸机理[J]. 人民长江, 2006, 37(12): 75-77.
- [7] 段光磊, 龙慧, 郭满姣. 三峡水库蓄水后荆江大堤险工段近岸河床演变分析[J]. 长江科学院院报, 2014(5): 117-122.
- [8] 王俊, 田淳, 张志林. 长江口河道演变规律与治理研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- [9] Chu, A., Wang, Z.B. and De Vriend, H.J. (2009) Process-Based for the Yangtze Estuary. *Proceedings Coastal Dynamic*, Tokyo, 7-11 September 2009, 1-13. https://doi.org/10.1142/9789814282475_0032
- [10] Chu, A., Wang, Z.B., De Vriend, H.J. and Stive, M.J.F. (2010) A Process-Based Approach to Sediment Transport in the Yangtze Estuary. *Proceedings ICCE*, Shanghai, 30 June-5 July 2020, 2298-2309. <https://doi.org/10.9753/icce.v32.sediment.83>
- [11] Chu, A., Wang, Z.B., De Vriend, H.J. and Tai, J.A. (2013) Modeling Processes Controlling Sediment Transport at the Mouth bar of the Yangtze Estuary. *Proceedings IAHR Word Congress*, Chengdu, 8-13 September 2013, 4938-4939.
- [12] Chu, A. (2019) Analysis and Modelling of Morphodynamics of the Yangtze Estuary. TU Delft Open Express, Delft.
- [13] (2014) Delft 3D Flow Manual. Deltares, Delft.
- [14] 曹民雄, 应翰海, 钱明霞. 长江南京以下深水航道建设一期工程的主要技术问题与研究成果[J]. 水运工程, 2015(2): 26-35.
- [15] 张朝阳, 刘羽婷, 张志林. 长江口太仓段险工近期发展新特点及趋势[J]. 人民长江, 2019, 50(12): 7-12.