

DOI:10.3880/j.issn.1006-7647.2020.02.009

甬江感潮河流上下游码头群对河道行洪的联合影响

陈 珺^{1,2}, 邓丽华², 于明田², 施 凌³

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 3. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要:为分析甬江上下游码头群对河道行洪的联合影响,基于 Delft3D 数学模型开展了典型潮洪条件下甬江上下游不同码头群对河道水流特性的影响研究,结果表明:单段码头群位置距河口越远,或码头分布越密集,引起的水位壅高程度越大;在不同码头群共同产生壅水影响的区域,全河段码头群引起的河道洪水位变化比各码头群单独影响时增大,在不同码头群产生水位壅高和降低影响的河段,全河段码头群作用下水位影响部分相抵,但由于降低幅度小于壅高幅度,河道洪水位变化仍呈增大状态;码头群工程局局部流速减少区域和外侧河道流速增加区域均呈带状分布,全河段码头群联合作用加剧了单段码头群引起的河道流速的变化且流速减小程度较流速增加程度大。

关键词:甬江;感潮河流;码头群;行洪影响;数值模拟

中图分类号:TV135.1 文献标志码:A 文章编号:1006-7647(2020)02-0050-08

Joint influence of wharf groups on flood propagation in tidal reach of Yongjiang River//CHEN Jun^{1,2}, DENG Lihua², YU Mingtian², SHI Ling³ (1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: In order to study the joint influence on flood propagation caused by the wharf groups located at different reaches of the Yongjiang River, the influence of the wharf groups on channel flow characteristics under typical tidal and flood conditions was studied based on the numerical model of Delft3D. The results show that the backwater level is higher if the location of the wharf group is farther from the estuary and the distribution of the wharves is denser. In the backwater influencing region induced by different single wharf groups, the increase of flood level caused by all of the wharf groups is higher than that caused by each wharf group. In the area where both backwater and water level drop caused by different wharf groups exist, part of the water level variation can be balanced out. However, due to the degree of water level drop is lower than the backwater, water level during flood discharge still increases. The velocity decreasing zone surrounding the wharf project and the velocity increasing zone in the main channel both show a zonal distribution. The velocity variation caused by all of wharf groups is more than that induced by every single wharf group and the degree of velocity reduction is greater than velocity increase.

Key words: Yongjiang River; tidal river; wharf group; effect on flood propagation; numerical simulation

甬江位于杭州湾最南段,是中国东海独流入海的河流,上游支流奉化江和姚江在宁波市三江口汇合后始称甬江。20 世纪 80 年代以前,甬江码头工程主要位于宁波三江口至宁波大学河段(即宁波老港),80 年代后,为分流上海港运量及承担浙江地区物资进出,在镇海电厂至镇海口河段陆续修建码头工程,形成了新的港区(镇海港)。目前宁波三江口至镇海口的河道南北两岸,码头修建数量共 212 座,主要集中在宁波三江口至宁波大学河段北岸,宁波大学至镇海电厂的北岸以及镇海电厂至镇海口的南北两岸(图 1)。单座码头工程对于甬江河道



1—外滩大桥;2—庆丰桥;3—招宝山大桥
图 1 研究河道区域与码头工程分布示意图

不会造成显著的影响,但大量码头工程的建设,势必造成工程群效应,引起其附近水域水流流态等发生变化,从而可能影响河道河势及防洪安全,因此开展甬江码头群对河道行洪影响的研究具有重要意义。

目前国内外学者关于码头工程对河道行洪影响的研究取得了丰富成果。其中针对单座码头工程对河道行洪影响的研究较多^[1-6],码头工程群对河道行洪影响的研究相对较少^[7-10],而且多以局部码头工程群为研究对象,河道中不同位置码头工程群对河道行洪的联合影响并无研究。本文根据甬江码头工程分布密集程度将甬江河道分为宁波三江口—宁波大学、宁波大学—镇海电厂、镇海电厂—镇海口 3 段,分别以不同河段码头群为基本研究对象(图 1),建立甬江二维非恒定潮流数学模型,针对上述甬江 3 个河段已建码头群对河道行洪联合影响展开研究。

1 码头工程基本情况

甬江码头工程陆续兴建始于 1960 年,其中宁波三江口—宁波大学河段码头工程修建集中于 1975—1985 年;宁波大学—镇海电厂河段码头修建集中于 1985—2000 年,码头吨级为 500 ~ 5 000 t 不等,包括生产性码头(货运、渔业等)、公务码头和工程船码头;镇海电厂—镇海口河段码头工程修建集中于 1975—2006 年,其主要为生产性泊位(散货、集装箱和液体化工泊位),泊位吨级为 1 000 ~ 20 000 t 不等,其中液体化工码头已成为我国最大的商业散装液体化工专用泊位,每年基本上占全国散装液化

品进口总量的 15% ~ 20%。图 2 为甬江河道各时段码头建设数量统计图。图 3 为甬江各河段典型位置附近码头工程分布遥感图。表 1 为甬江河道码头工程信息统计表。

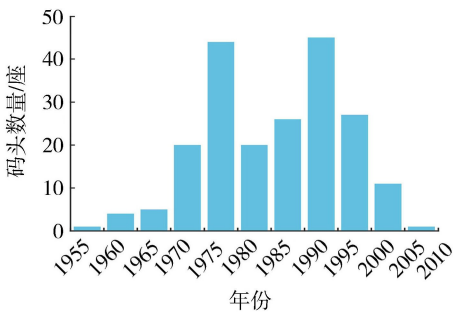


图 2 码头建设年份与数量分布

2 模型建立与验证

基于 Delft3D 模型建立甬江二维非恒定潮流数学模型,针对甬江不同河段码头群对河道行洪联合影响进行模拟研究。该模型采用贴体交错四边形网格划分计算区域,通过 ADI 有限差分格式对二维水动力基本方程进行离散求解,兼具了隐式和显示格式的优点,计算稳定且精度高,具体方程及求解方法见文献[11]。

2.1 计算河段选取及网格划分

在综合考虑甬江河道码头工程分布及实测水文资料等因素的基础上,模型计算范围选取如下:姚江大桥(边界 1)至宁波三江口约 3.3 km,奉化江鄞县大桥附近水文观测断面 CS7(边界 2)至宁波三江口约 9.5 km,宁波三江口至甬江口附近部分海域(边界 3、4),其中河道约 25.6 km。地形采用 2016 年实



(a) 宁波三江口—宁波大学河段



(b) 宁波大学—镇海电厂河段



(c) 镇海电厂—镇海口河段

图 3 甬江各河段典型位置码头工程分布遥感图

表 1 甬江码头工程信息

河段	数量	阻水比/%	分布密度/ (座 · km ⁻¹)	主要码头单位
宁波三江口—宁波大学	80	0.38 ~ 3.83	10.13	宁波港集团公司、宁波粮食局、宁波海事局、海监、渔业公司、疏浚企业、船厂、部队
宁波大学—镇海电厂	38	0.23 ~ 2.75	4.69	镇海发电厂、镇海炼油厂、航管处大件码头、国家粮食储备库、宁波海事局、船厂、疏浚企业
镇海电厂—镇海口	94	0.06 ~ 7.27	12.20	宁波港集团公司(镇海港区)、热电厂、海测大队、航管所、海关、海警、船厂、疏浚企业、航标处、客运中心、水产公司

注:阻水比是在 100 年一遇洪水+5 年一遇潮落急状态下码头阻水面积与河道过水面积之比。

测高程(图4)。姚江大坝至宁波三江口河段网格数为18×186个,网格长度为10~18m;奉化江CS7断面至甬江口网格数为36×2576,已对码头工程所在网格进行加密,网格长度为5~16m(图5)。



图4 研究区域河道地形与断面位置

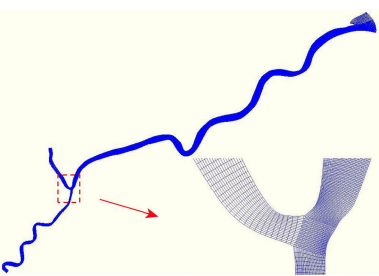


图5 模型计算区域网格划分

2.2 码头工程概化

甬江河段码头结构形式为重力式、高桩式和浮码头,其中以高桩式码头为主。对于码头桩群的概化,重力式码头所在网格,直接作不过水处理,浮码头所在网格直接做过水处理,而高桩式码头桩群所在网格节点,采取修改糙率和抬高地形的方式进行概化,具体原理如下:

a. 局部糙率修正。码头桩群分布可看作为拦污栅形式的阻水建筑物,桩群的存在增加了水流的局部阻力损失,可通过增加桩体所在网格单元的糙率来实现^[12]。可按下式进行计算:

$$n = \sqrt{n_0^2 + h^{1/3} \frac{\zeta}{8g}} \tag{1}$$

其中

$$\zeta = \beta \left(\frac{b_1}{b} \right)^{4/3} \sin \theta$$

式中: n 为桩体所在网格单元综合糙率; n_0 为工程前码头附近河床糙率; ζ 为桩体局部阻力系数; b_1 为网格单元中桩体沿河宽方向总宽度; b 为桩间距; θ 为桩与河底夹角; β 为桩体形状系数; h 为水深; g 为重力加速度。

b. 局部地形修正。假设网格单元河底高程增加值阻挡的流量与桩群阻挡的流量相同^[13-14],得到

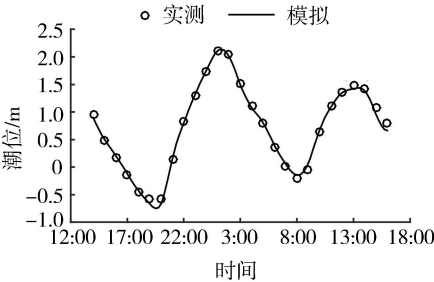
单元内河底高程增加值为

$$a = h(b_1/b_2)^{6/7} \tag{2}$$

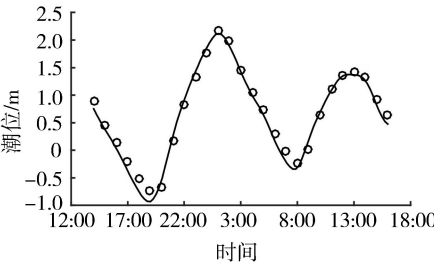
式中: b_2 为沿河宽方向网格宽度。

2.3 模型率定和验证

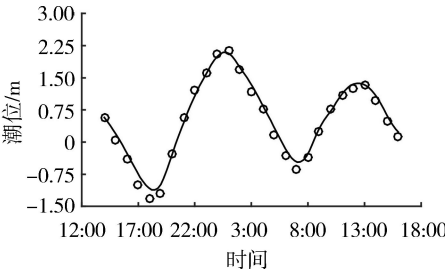
模型边界均给定非恒定流条件,边界1为姚江大坝实际统计排放流量过程,边界2为CS7断面实测潮流量过程,边界3、边界4为镇海口水文测站实测潮位过程。采用曼宁糙率系数反映滩槽的床面阻力,河槽糙率小于滩地糙率,通过2015年6月17日14时至18日16时洪季大潮实测水文资料进行率定(图6和图7),河槽糙率取 $n=0.016\sim0.025$,滩地糙率取 $n=0.026\sim0.032$ 。采用2016年1月9日18时至10日22时实测枯季大潮水文资料对模型进行验证(图8和图9)。从图中可以看出,各水文测站计算潮位与实测潮位误差较小,各观测



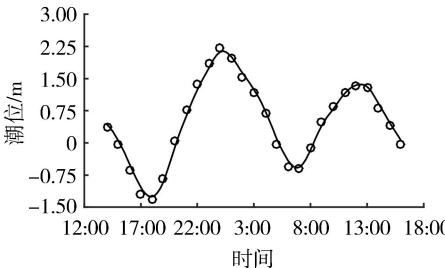
(a) 宁波三江口



(b) 杨木碶



(c) 清水浦



(d) 镇海

图6 2015-06-17 洪季大潮各水文测站潮位率定

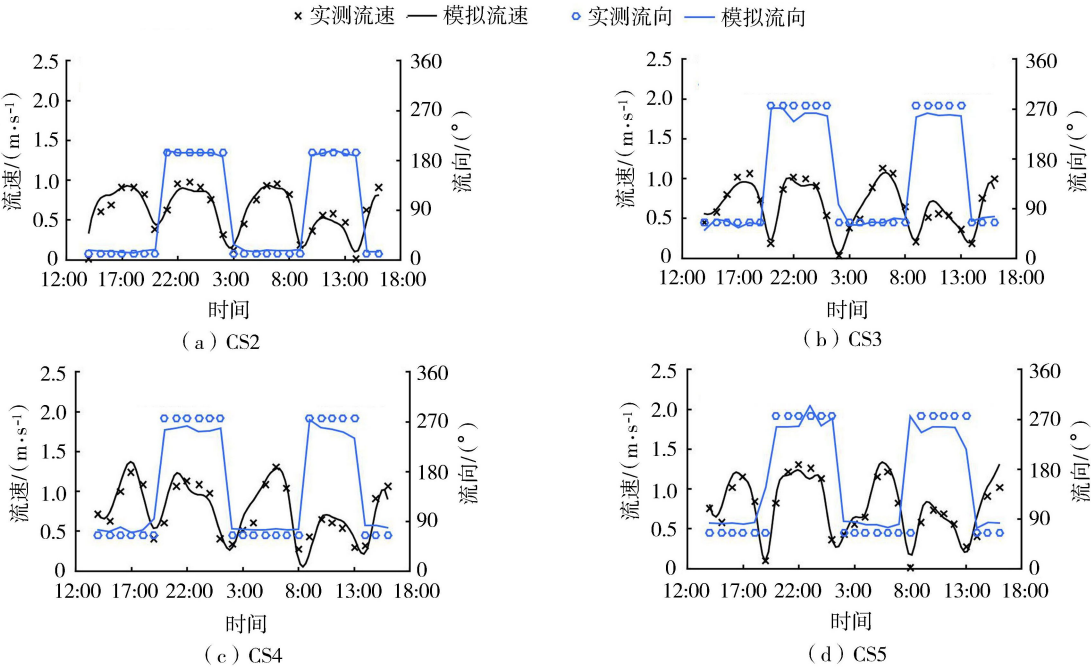


图7 2015-06-17 洪季大潮各断面流速流向率定

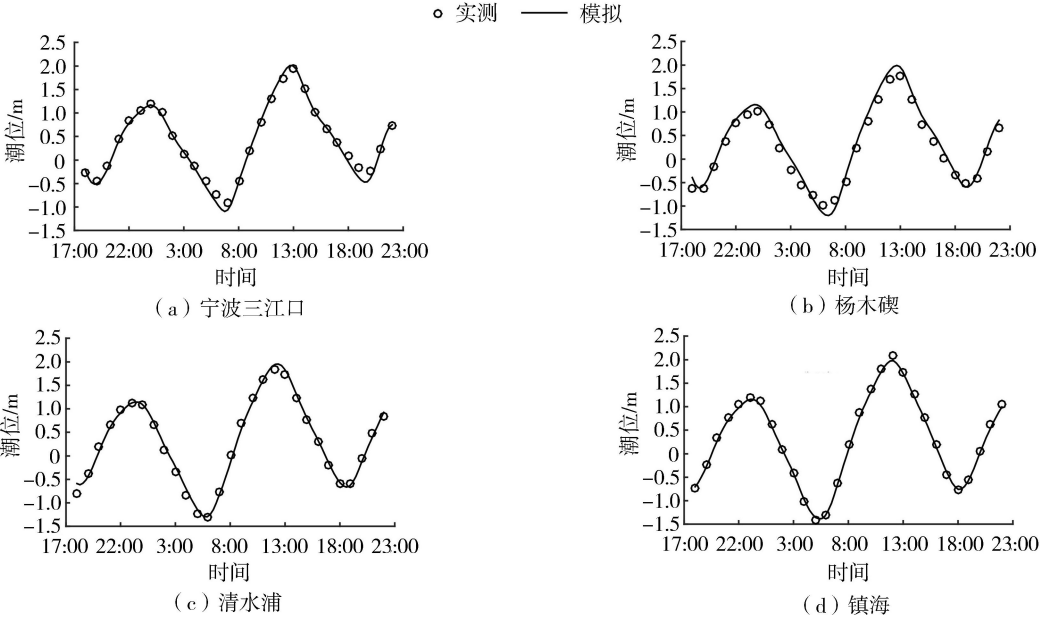


图8 2016-01-09 枯季大潮各水文测站潮位验证

断面垂线流速和流向过程与实测值基本吻合,验证结果较好,表明模型可用于潮洪组合条件下的码头群对河道水流行洪联合影响的模拟研究。

3 模型计算与结果分析

3.1 计算方案

根据甬江河道的码头工程分布密集程度,将甬江河道分为宁波三江口—宁波大学、宁波大学—镇海电厂和镇海电厂—镇海口3段,其中方案1~3主要研究单段码头群对河道行洪的影响,方案4研究全河段码头群对河道行洪的影响,具体计算方案如表2所示。使用所建甬江平面二维潮流数学模型,

计算100年一遇洪水+5年一遇潮位组合条件下,洪水落急时刻甬江不同位置码头群对河道行洪的影响。边界1和边界2选用流量过程,边界3和边界4选用潮位过程。

表2 计算方案设置

方案	布置情况	方案说明
1	宁波三江口—	研究单段码头群影响
	宁波大学河段码头工程群	
2	宁波大学—	研究单段码头群影响
	镇海电厂河段码头工程群	
3	镇海电厂—	研究单段码头群影响
	镇海口河段码头工程群	
4	甬江全河段码头工程群	研究各段码头群联合影响

(d) 方案4

• 54 • 水利水电科技进展, 2020, 40(2) Tel: 025-83786335 E-mail: jz@hhu.edu.cn http://jour.hhu.edu.cn

表 3 不同计算方案落急时刻河道水位变化

方案	各河段水位变化主要分布/cm					局部水位变化			
	姚江	奉化江	甬江			最大壅高/cm	最大壅高出现位置	最大降低/cm	最大降低出现位置
			宁波三江口— 宁波大学	宁波大学— 镇海电厂	镇海电厂— 镇海口				
1	3.5~4.0	1.5~4.0	壅高:0~5.0 降低:0~1.0	基本没 有影响	基本没 有影响	7.00	宁波海盛股份有限 公司1号码头附近	2.16	宁波港集团公司 1号码头附近
2	0.5~0.6	0.3~0.6	壅高:0.5~1.5	壅高:0.5~1.5 降低:0~0.5	基本没 有影响	2.70	明富砂场码头附近	1.44	镇海发电厂卸煤 码头附近
3	0.7~0.8	0.4~0.8	壅高:0.5~1.5	壅高:1.5~2.5	壅高:0~3.0 降低:0~1.0	7.28	热电厂煤码头附近	1.60	上航二处镇海2 号码头附近
4	4.5~5.5	2.5~5.5	壅高:2.0~6.0	壅高:2~3.5	壅高:0~3.0 降低:0~1.0	8.78	航代白沙码头附近	4.88	上航二处镇海2 号码头附近

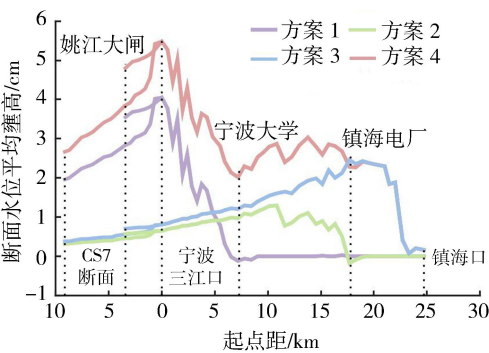


图 11 不同计算方案落急时刻河道断面
水位平均壅高沿程分布

为 4.00 cm、1.30 cm 和 2.46 cm,局部水位壅高最大值分别为 7.00 cm、2.70 cm 和 7.28 cm;②单段码头群所在河段上游洪水位壅高,下游洪水位降低,前者幅度远大于后者,河道水位壅高范围均达到了 CS7 断面处,水位降低范围分别约为 1.86 km、1.29 km 和 1.50 km;③单段码头群引起的水位壅高程度因其所处位置和分布密集程度不同而异,码头群距河口越远,码头工程分布越密集,引起的河道洪水位壅高程度越大,方案 1 中码头群引起的河道洪水位壅高程度最大。全河段码头群在洪水期间引起全河段水位普遍壅高,河道断面水位平均壅高最大值约 5.48 cm,局部水位壅高最大值约 8.78 cm,码头群所在河段水位出现不同程度交错壅高,河道壅水范围达到 CS7 断面处,在临近镇海口附近的河道局部区域出现了较小幅度的水位降低。

对比单段码头群与全河段码头群影响计算结果可知,甬江上下游不同位置码头群对河道洪水位存在联合影响。全河段码头群共同作用时,在各码头群共同产生壅水影响的区域,各段码头群对河道洪水位影响相互累积,使得河道洪水位变化比各码头群单独影响时增加;在上游码头群引起河道洪水位降低而下游码头群引起洪水位壅高的区域,洪水位影响部分相抵,但由于降低幅度小于壅高幅度,河道洪水位变化值仍呈增加状态。例如:全河段码头群

对河道洪水位共同作用时,相对仅有宁波三江口—宁波大学河段码头群作用,姚江和奉化江河段水位壅高值分别增加 1.0~1.5 cm 和 0.7~1.4 cm,宁波三江口—宁波大学河段水位壅高值增加 1.40~2.36 cm,宁波大学—镇海电厂河段水位壅高值增加 2.3~3.0 cm,镇海电厂—镇海口河段临近河口,其水位受海域潮位影响较大,在洪水期间该河段水位基本不受上游码头群影响。

3.2.2 码头群对河道流速影响分析

各方案中码头工程群在 100 年一遇洪水+5 年一遇潮落急时刻对码头群所在河段流速影响分布如图 12 所示。将各方案中码头工程群落急时对河道流速影响统计如表 4 所示。由图 12 和表 4 可知:①单段码头群工程局部区域水流流速减小,码头工程外侧河道水流流速增加,其中宁波三江口—宁波大学河段与镇海电厂—镇海口河段北岸码头群分布密集,工程局部流速减小区域与外侧河道流速增加区域均呈现为带状,方案 1~3 码头工程局部流速减小最大值分别约 67.9 cm/s、47.0 cm/s 和 48.9 cm/s;②单段码头群上游河道流速变化幅度大于其下游河道,上游流速变化随距码头群所在河段的距离的增加而减小,主要呈现为减小状态,下游流速基本不受码头群的影响;③单段码头群对河道水流流速影响程度因其所在河段及分布密集程度不同而异,码头群距河口越远,码头工程分布越密集,河道流速变化越大,方案 1 中码头群引起的河道流速变化最为显著,姚江河段流速减小 0~2 cm/s,奉化江河段流速减小 0~3 cm/s,宁波三江口—宁波大学河段码头工程外侧河道水流流速增加 0~6 cm/s,码头工程局部区域水流流速减小 0~8 cm/s。

在全河段码头群共同作用时,各河段水流流速变化幅度均出现了增加,其中流速减小程度较增加程度大,可见不同河段码头群联合作用加剧了单段码头群阻水作用引起的河道洪水期间水流流速的变化。例如相对于仅有宁波三江口—宁波大学河段码头群

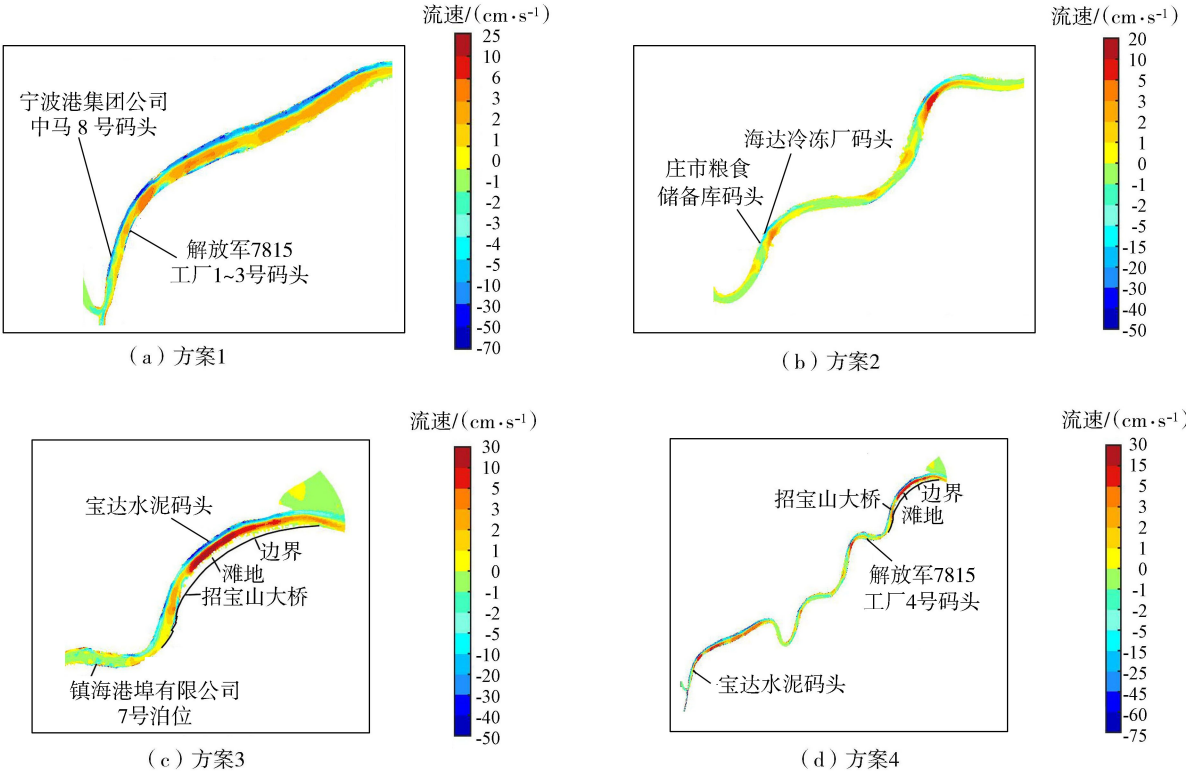


图 12 不同计算方案中码头群所在河段落急时刻流速变化分布

表 4 不同计算方案落急时刻河道流速变化

方案	各河段流速变化主要分布/(cm·s ⁻¹)					局部流速变化			
	姚江	奉化江	甬江 宁波三江口— 宁波大学	宁波大学— 镇海电厂	镇海电厂— 镇海口	最大 增加/ (cm·s ⁻¹)	最大增加 出现位置	最大减少/ (cm·s ⁻¹)	最大减少 出现位置
1	-2.0~0	-3.0~0	增加:0~6 减小:0~8	基本没有影响	基本没有影响	21.0	宁波港集团公司中 马 8 号码头附近	67.9	解放军 7815 工厂 1 ~3 号码头附近
2	-0.5~0	-0.5~0	增加:0~1 减小:0~1	增加:0~3 减小:0~2	基本没有影响	14.7	庄市粮食储备库 码头附近	47.0	海达冷冻厂码头附 近
3	-0.5~0	-1.0~0	增加:0~1.5 减小:0~1.0	增加:0~2 减小:0~1	增加:0~7 减小:0~7	31.2	宝达水泥码头附 近	48.9	镇海港埠有限公司 7 号泊位附近
4	-2.5~-0.5	-4.0~0	增加:0~7 减小:0~13	增加:0~5 减小:0~6	增加:0~8 减小:0~9	30.8	宝达水泥码头附 近	74.1	解放军 7815 工厂 码头附近

作用,全河段码头群作用引起的宁波三江口—宁波大学河段流速增加值从 0~6 cm/s 扩大为 0~7 cm/s,流速减小值从 0~8 cm/s 扩大为 0~13 cm/s。

4 结 论

a. 单段码头群所处河段码头群末端水位降低,越往上游,壅水不断累积,呈现出不同程度的交错壅高,其上游河段洪水位壅高,下游局部河段洪水位降低,壅高幅度大于降低幅度。因单段码头群所处位置与分布密集程度不同,水位壅高程度存在一定差异,码头群距河口越远,码头工程分布越密集,引起的水位壅高程度越大。

b. 不同位置码头群对河道行洪存在联合影响。在各码头群共同产生壅水影响的区域,各段码头群

对河道洪水位影响相互累积,使得河道洪水位变化比各码头群单独影响时增大;上游码头群引起河道洪水位降低而下游码头群引起洪水位壅高的区域,洪水位影响部分相抵,但由于降低幅度小于壅高幅度,河道洪水位变化仍呈增大状态。

c. 无论是单段码头群还是全河段码头群作用,码头工程局部区域水流流速减小明显,码头工程外侧河道水流流速增加;宁波三江口—宁波大学河段与镇海电厂至镇海口河段,码头群工程局部流速减小区域和外侧河道流速增加区域均呈带状分布;单段码头群所在河段上游河道流速变化幅度大于其下游河道,上游流速变化主要呈现为减小状态,下游流速基本不受码头群的影响;全河段码头群共同作用时,相对单段码头群作用,各河段水流流速变化加

剧,流速减小程度较增加程度大。

参考文献:

- [1] 孙东坡,曹兵,王鹏涛,等.甬江扩建油码头对所在河段的行洪影响分析[J].水利水运工程学报,2008(3):1-7. (SUN Dongpo, CAO Bing, WANG Pengtao, et al. Influence of oil wharf expansion on the floodway reach [J]. Hydro-Science and Engineering, 2008(3):1-7. (in Chinese))
- [2] 高辉巧,张晓雷,孙东坡.宝达码头扩建对甬江河段行洪影响分析[J].水利水电技术,2008,39(7):82-85. (GAO Huiqiao, ZHANG Xiaolei, SUN Dongpo. Analysis on impact from enlargement of Baoda Dock on flood discharge of reach of Yongjiang River [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2008, 39(7):82-85. (in Chinese))
- [3] 黄本胜,程香菊,袁丽蓉,等.码头桩群对河道行洪与流场影响的三维数值模拟[J].水动力学研究与进展(A辑),2010,25(1):99-105. (HUANG Bensheng, CHENG Xiangju, YUAN Lirong, et al. Three dimensional numerical simulation of the effect of piled wharf on the flood passage ability of river and its flow field wharf [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2010, 25(1):99-105. (in Chinese))
- [4] 李光炽,周晶晏,张贵寿.高桩码头对河道流场影响的数值模拟[J].河海大学学报(自然科学版),2004,32(2):216-220. (LI Guangzhi, ZHOU Jinyan, ZHANG Guishou. Numerical simulation of river flow patterns affected by standing pile wharf [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2004, 32(2):216-220. (in Chinese))
- [5] 徐芳,杨胜发,付旭辉.码头工程对山区河道水位影响的水槽试验研究[J].人民长江,2011,42(7):77-81. (XU Fang, YANG Shengfa, FU Xuhui. Flume test study on the influence of wharf engineering on river level in mountainous area [J]. Yangtze River, 2011, 42(7):77-81. (in Chinese))
- [6] 王玲玲,徐雷诺.周口港湾道码头工程水动力特性[J].河海大学学报(自然科学版),2018,46(2):134-139. (WANG Lingling, XU Leinu. Hydrodynamic characteristics of wharf project in bend river at Zhoukou Harbor [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018, 46(2):134-139. (in Chinese))
- [7] 汪鹏.岸线开发利用对河道防洪影响的初步研究[D].南京:长江科学院,2008.
- [8] 李振青,廖小永.涉河工程群对防洪的累积影响研究[J].水利水运工程学报,2011(4):121-125. (LI Zhenqing, LIAO Xiaoyong. The cumulative impact of river construction projects on flood control [J]. Hydro-Science and Engineering, 2011(4):121-125. (in Chinese))
- [9] 刘长波.涉水工程对河道行洪及冲淤叠加影响的初步研究[D].武汉:长江科学院,2010.
- [10] 张细兵,卢金友,蔺秋生.长江中下游岸线利用对防洪累积影响初步研究[J].长江流域资源与环境,2011,20(9):1138-1142. (ZHANG Xibing, LU Jinyou, LIN Qiusheng. Preliminary study on accumulated influence of the bankline use on flood control in the middle and lower reaches of the yangtze river [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2011, 20(9):1138-1142. (in Chinese))
- [11] 戴文鸿,胡涛,丁梦娇,等.感潮河段交汇区水流特性数值模拟:以宁波三江口为例[J].南水北调与水利科技,2018,16(6):171-177. (DAI Wenhong, HU Tao, DING Mengjiao, et al. Numerical simulation of flow characteristics in a tidal river confluence: a case study of Sanjiangkou [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(6):171-177. (in Chinese))
- [12] 吴祥华.潮流河道上建码头对防洪影响的有限元算法[C]//中国力学学会,《水动力学研究与进展》编委会,中国造船工程学会,等.第七届全国水动力学学术会议暨第十九届全国水动力学研讨会文集(下册).上海:《水动力学研究与进展》杂志社,2005:7-11.
- [13] 张细兵,余新明,金琨.桥渡壅水对河道水位流场影响二维数值模拟[J].人民长江,2003,34(4):23-24. (ZHANG Xibing, YU Xinming, JIN Kun. Numerical simulation of flow field inupstream back water area of bridge and aqueduct [J]. Yangtze River, 2003, 34(4):23-24. (in Chinese))
- [14] 曹民雄,甘小荣,周丰年,等.潮汐河段桥墩对水流影响的数值计算与分析[J].人民长江,2006,37(4):81-84. (CAO Minxiong, GAN Xiaorong, ZHOU Fengnian, et al. Numerical calculation and analysis of the influence of bridge piers on flow in tidal river [J]. Yangtze River, 2006, 37(4):81-84. (in Chinese))

(收稿日期:2019-09-10 编辑:郑孝宇)

