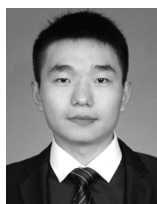


· 综 合 ·



长江口工程群对上游水动力影响 及累加效应研究

白一冰^{1,2}, 路川藤^{1,2}, 丁 伟^{1,2}, 张功瑾^{1,2}

(1. 南京水利科学研究院, 河流海岸研究所, 江苏 南京 210029;

2. 南京水利科学研究院, 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要:以长江口大型工程群为研究对象, 采用 CJK3D-WEM 二维潮流数学模型, 研究工程群对水动力的影响及累加效应。结果表明, 长江口 1998—2016 年间实施的北槽深水航道治理工程、南北港分流工程及南汇边滩和横沙东滩促淤圈围等大型工程群后, 徐六泾河段涨潮量降低约 10%, 潮差降低约 6%, 涨急流速降低约 9%, 落急流速降低约 4%, 北槽分流比由 60%减小至 40%左右。工程群的逐步实施对上游河段水动力变化有较明显的累加效应, 其中北槽深水航道治理工程对上游影响程度最大, 约占 50%, 其一期工程所占比例较大; 其次为南汇边滩圈围工程; 横沙东滩促淤圈围工程影响程度最小。

关键词:长江口; CJK3D-WEM 模型; 工程群; 累加效应

中图分类号: TV 14; U 652. 3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)02-0001-07

Study on influence and cumulative effect of the Yangtze River Estuary engineering group on upstream hydrodynamic

BAI Yi-bing^{1,2}, LU Chuan-teng^{1,2}, DING Wei^{1,2}, ZHANG Gong-jin^{1,2}

(1. River Harbor Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: Taking the large-scale engineering group in the Yangtze River Estuary as the research object, we apply the CJK3D-WEM two-dimensional tidal current mathematical model to study the influence and cumulative effect of engineering group on the hydrodynamic pattern. The results show that after the implementation of large-scale engineering group such as the north passage deepwater channel regulation project, the diversion project of the north and south channel in the Yangtze River Estuary, siltation promoting circle of Nanhui beach and Hengsha east beach from 1998 to 2016, the flood tide volume, tidal range, the maximum velocity in high tide and ebb tide of Xuliujing reach have been reduced by about 10%, 6%, 9% and 4% respectively, and the diversion ratio of the north passage has been reduced from 60% to about 40%. The gradual implementation of the engineering group has obvious cumulative effect on the hydrodynamic changes of the upper reaches. Among many projects, the north passage deepwater channel regulation project has the greatest impact on the upper reaches, accounting for about 50%, where the first phase of the project accounts for a large proportion. The Nanhui beach encircling project has a greater impact on the upstream, and the Hengsha east beach siltation promoting and encircling project has the least impact.

Keywords: the Yangtze River Estuary; CJK3D-WEM model; engineering group; cumulative effect

长江口是我国最大的河口, 平面呈喇叭形, 为中潮河口, 入海水道地形复杂, 经过多年的自

然演变及人类活动影响, 现呈三级分汊、四口入海形式^[1]。自 20 世纪末至今, 为更好地开发利用

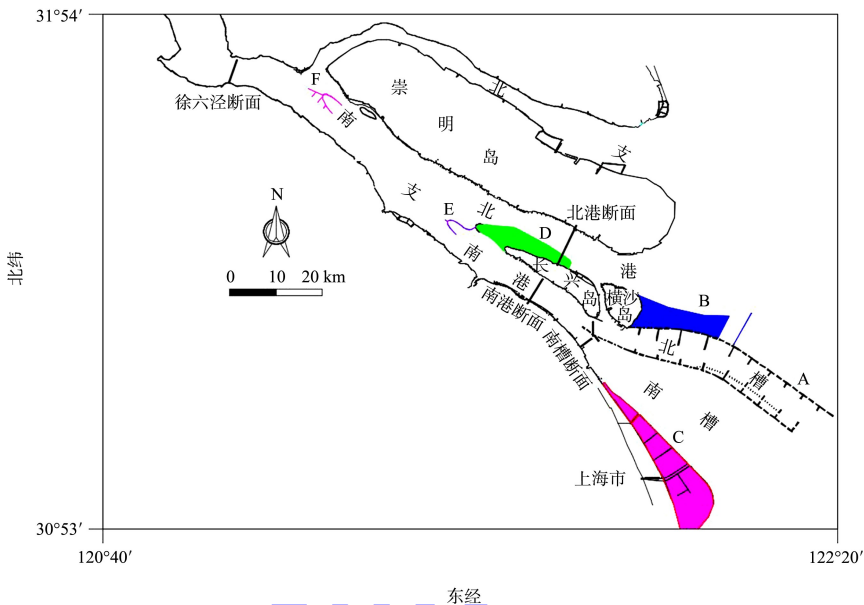
收稿日期: 2021-04-14

作者简介: 白一冰(1992—), 男, 博士研究生, 从事河口、海岸动力学研究。

及稳固河势，长江口实施了众多大型工程，已形成一定规模的工程群。

自 1998—2016 年，长江口主要建设的大型工程如图 1 所示。其中，长江口北槽深水航道治理工程分三期实施，分别使北槽航道水深增至 8.5、10.0 和 12.5 m；横沙东滩促淤圈围工程从 2003 年

开始，工程共分八期，至 2016 年圈围范围如图 1 所示；新浏河沙护滩、中央沙青草沙圈围工程共同组成南北港分界点；南汇东滩圈围工程包括一期圈围、二期促淤工程；白茆沙护滩工程稳固了白茆沙沙体及南北水道。



注：A1 为北槽深水航道治理一期工程(1998—2001 年)，图例为———；A2 为北槽深水航道治理二期工程(2002—2004 年)，图例为———；A3 为北槽深水航道治理三期工程(2007—2010 年)，图例为………；B 为横沙东滩促淤圈围系列工程(2003—2016 年)；C 为南汇东滩、浦东机场外侧促淤圈围工程(2005—2016 年)；D 为中央沙、青草沙圈围工程(2007—2009 年)；E 为新浏河沙护滩工程(2007—2009 年)；F 为白茆沙护滩工程(2012—2014 年)。

图 1 1998—2016 年长江口主要工程

关于工程对长江口河势的影响，国内外学者已经做了很多研究，其中北槽深水航道治理工程，部分学者分析工程实施后对周边水域水动力、潮量^[2]、地形冲淤^[3]、水体交换^[4]的变化；刘杰等^[5]、王维佳等^[6]等通过分析实测资料，研究横沙东滩的演变规律及未来发展；刘曙光等^[7]通过数学模型探讨三峡工程蓄水后的水沙变化对南汇边滩演变的影响；陈琳等^[8]分析新浏河沙护滩工程局部冲刷的原因；陈伟伦等^[9]通过数学模型探讨青草沙水库对周边河床冲淤演变的影响。相对于单个工程的影响，工程群的不断实施会产生累积效应。陈珺等^[10]、张细兵等^[11]分别分析在宁波甬江流域、长江中下游区域中桥梁和码头工程群的累积影响；一些学者研究莱州湾^[12]、罗源湾^[13]、厦门湾^[14]等地区多年围填海工程群的累积影响；李振青等^[15]探讨长江下游世业洲河段岸线

开发利用对河段防洪的累积影响。长久以来，随着工程的不断增加，长江口水域已经建成有一定规模的工程群，工程群使长江口变成了有相对固定边界的较稳定河口，很多的岸段不易变化，与自然河口差别较大。大多学者主要关注单个工程实施后对周边河势的影响，针对多个工程的累积效应研究较少。本文建立大范围二维数学模型，以长江口中下游工程群为研究对象，分析工程群对长江口上游水动力的累加影响，并探讨不同工程对长江口影响的差异性。

1 研究方法

1.1 模型范围及参数设置

为探讨工程群建设对水动力的影响，采用 CJK3D-WEM 软件^[16]进行数值模拟研究。CJK3D-WEM 水环境数值模拟软件适用于江河湖泊、河口

海岸等涉水工程中的水动力、泥沙、水质、温排水、溢油模拟预测研究。该软件采用有限体积法, 算法稳定, 可编制出完整的河口海岸数值模拟可视化系统, 具有系统集成性好、操作界面友好、可视化程度高、借鉴可视化编程思路、适用范围广等优点。具体数值求解方法参见文献[17]。

数学模型范围选取上游至大通水文站段, 下游至长江口外海 100 km 左右。模型东西总长约 510 km, 南北总宽约 210 km, 模型总范围及长江口地形如图 2 所示。

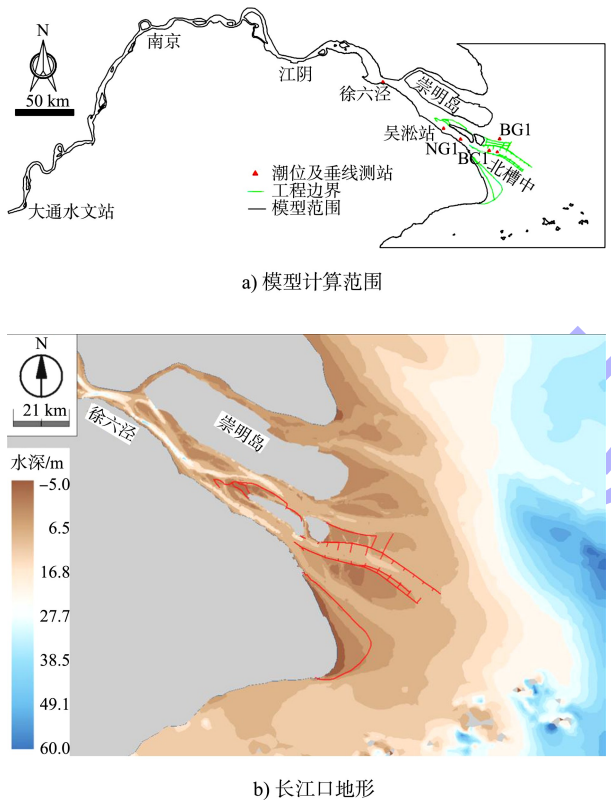


图 2 模型总范围及长江口地形

模型采用三角形网格, 划分网格总数 56 681 个, 网格空间步长最小为 70 m、最大为 5 000 m, 局部工程区域网格进行加密。糙率设置随水深的变化而变化 $0.012+0.013/h$ ($h>1$ m, h 为水深), 上限为 0.025, 紊动黏性系数取 $Kh\nu^*$ (其中 K 为系数, 取 0.5~1.0, ν^* 为摩阻流速), 判断干湿的动边界水深取 0.05 m, Coriolis 系数取 $f=\alpha\Omega\sin\phi$ (其中 Ω 为地球自转角速率, ϕ 为当地纬度)。

1.2 模型验证

模型采用 2015-07-30T05:00—2015-08-03T08:00

的长江口实测同步水文资料进行验证。水文验证点位置如图 2a) 所示, 数学模型潮位、流速与流向验证见图 3、4。可以看出, 大潮期间潮位误差基本在 0.10 m 内, 平均流速和平均流向验证误差基本在 10% 以内, 模型总体验证良好, 能够反映长江口附近海域的潮流运动。

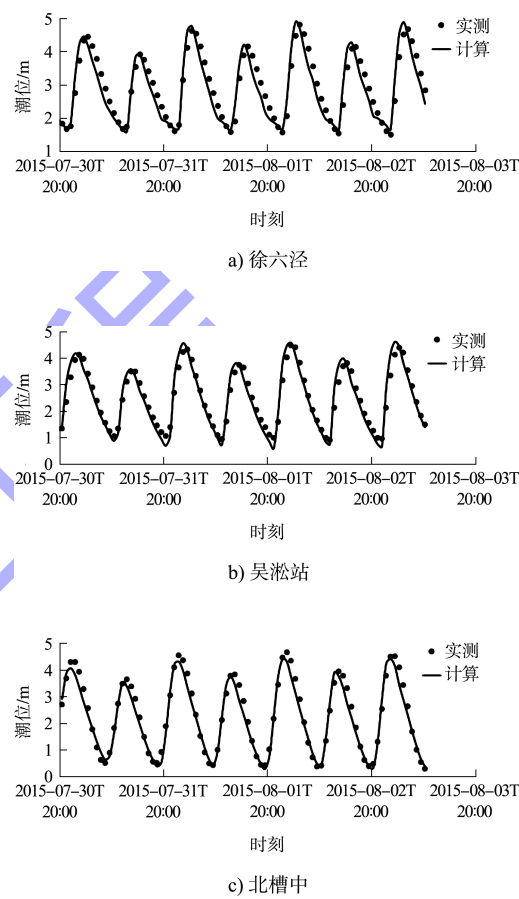
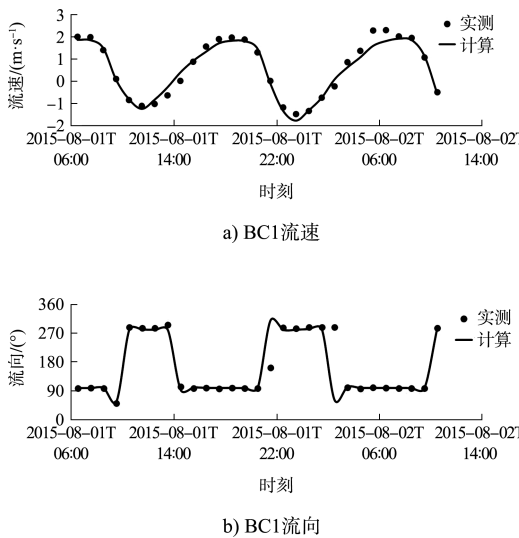


图 3 潮位验证



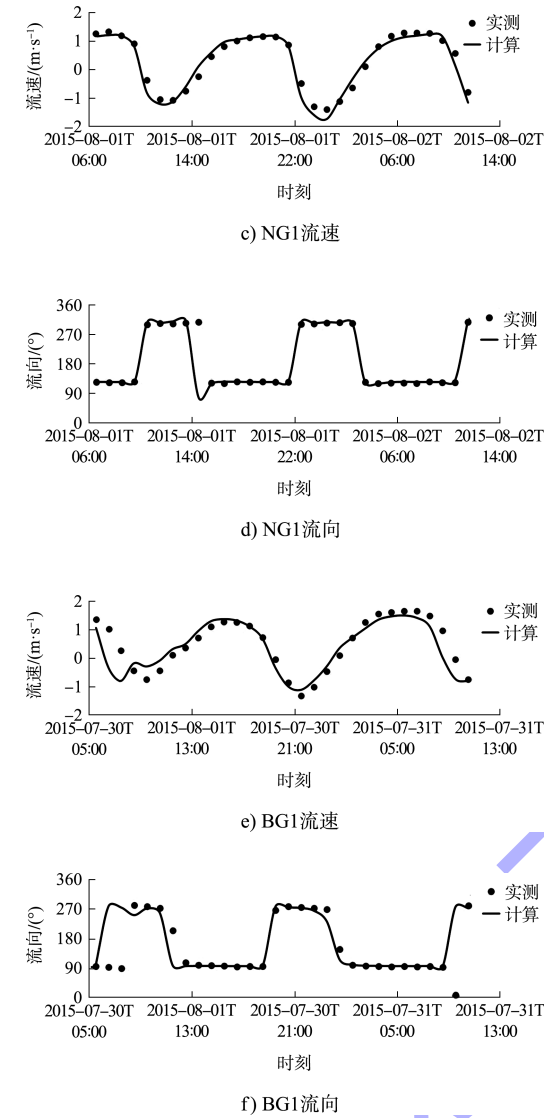


图 4 流速与流向验证

2 工程群水动力影响分析

水文条件考虑有代表性的径流潮汐条件，以反映工程对长江口的整体影响。模型上游选用大通站 2003—2018 年多年统计流量为计算条件，其中枯季流量选用 11 月—次年 2 月平均流量，为 1.55 万 m³/s，洪季流量选用 6—9 月平均流量，为 4 万 m³/s。模型外海潮差控制条件采用绿华山站 1996 年 1 月—2009 年 12 月累积频率分别为 10%、90% 的典型潮差控制，分别为 3.6、1.5 m。数学模型采用 1998 年地形作为计算地形。为探讨工程群的累加效应，按照工程实际实施的先后顺序设置多组工况，模拟计算工程群对长江口水动力的累加影响，研究工况见表 1。

表 1 数学模型工况

工况	工程群
本底	无
1	北槽深水航道治理一期工程
2	工况 1+北槽深水航道治理二期工程
3	工况 2+北槽深水航道治理三期工程
4	工况 3+横沙东滩圈围系列工程
5	工况 4+新浏河沙护滩、中央沙青草沙圈围工程
6	工况 5+南汇边滩圈围工程

2.1 对潮差的影响

潮差与径流的相对比值被认为是潮流和径流水动力的变化过程^[18]，潮差的变化一定程度上反映了潮波能量的变化。工程群的实施整体改变了河口的地貌，除了改变周边水域水动力，对上游也有着深远的影响。随着逐个工程的实施，上游南支河段深泓线沿程潮差变化见图 5。由于工程的实施一定程度上增加了河口潮波的上溯阻力，随着工程群的逐步实施，南支潮差逐渐降低。单个工程影响相对较小，工程群实施后，累加影响使得上游潮差变化较大。统计各个水文条件下工程群实施后徐六泾区域潮差变化，枯季大潮条件降低 6.22%，洪季大潮降低 6.51%，枯季小潮降低 5.50%，洪季小潮降低 6.60%。上游径流越大，潮波上溯消耗的能量越大，故工程群实施后，洪季条件下潮差减小幅度略大于枯季。

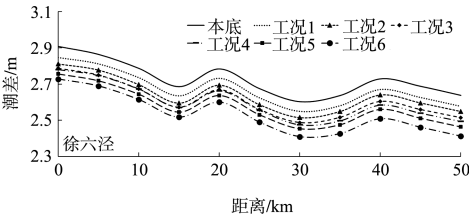


图 5 工程群实施后上游南支河段深泓线沿程潮差变化

2.2 对上游流速的影响

工程的实施明显改变了地貌，使周边水域的流速发生明显变化，关于工程实施后对周边水域水动力的影响已有多位学者做过相应的研究，本文不再描述。由前文可知，工程群的实施使上游潮差沿程降低，这同时也会引起上游潮波动力减弱。徐六泾附近采样点一个潮周期内的涨落急流速变化情况见表 2。可见工程群实施后，上游流速

整体降低, 其中落急流速减幅约为 4%, 涨急流速减幅为 10% 左右。由于径流的持续下泄, 使得落潮流速受工程影响的程度相对较小, 落急流速变化率整体小于涨急流速。对于落急流速, 随着径流的增加, 受工程影响而导致的潮波动力减弱部分占比降低, 故洪季的流速减幅低于枯季; 随着潮差的增加, 潮波能量增加, 受工程影响导致的潮波能量降低部分占比增加, 使大潮的流速减幅大于小潮。对于涨急流速, 其减幅随着洪枯季的变化规律与潮差相同。

表 2 工程群实施后长江口上游(徐六泾)最大流速变化

潮流	流速减小幅度/%			
	枯季大潮	洪季大潮	枯季小潮	洪季小潮
落急	4.36	3.95	4.14	3.73
涨急	7.72	8.42	9.64	14.89

2.3 对潮量的影响

工程群的实施使上游潮差降低, 潮流动力减弱, 相应的也会对河口纳潮量产生一定的影响。工程群实施后徐六泾断面处一个潮波周期内的涨潮量变化情况见图 6。可以看出, 随着工程群的逐步实施, 徐六泾断面涨潮量不断降低, 最终在枯季大潮条件下降低 8.15%, 洪季大潮条件下降低 11.14%, 枯季小潮条件下降低 14.04%, 洪季小潮条件下降低 24.26%。洪季涨潮量减幅略大于枯季, 这与潮差和流速的变化规律相同。潮差越大, 潮波能量越大, 受到径流的影响程度越小, 故工程群实施后, 小潮条件下的涨潮量减幅大于大潮。

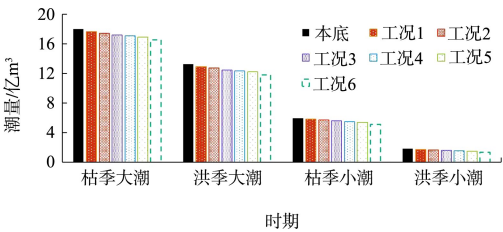


图 6 工程群实施后徐六泾断面涨潮量变化

2.4 对分流比的影响

工程群实施后, 北槽、北港落潮分流比的变化见图 7。北槽深水航道治理工程整体缩窄了北槽的过水断面, 随着工程不断进行, 北槽的分流

比逐渐减小, 由初始情况的 60% 逐渐减小至 40% 左右, 北港分流比稍有增加。横沙东滩圈围、新浏河沙护滩、中央沙青草沙圈围工程的实施使南北港的过流断面均有缩窄, 北港分流比变化不大。南汇边滩圈围工程实施后, 缩窄了南槽的过水断面, 使北槽分流比稍有增加。工程群实施后, 北港的分流比略有增加, 总体变化不大。

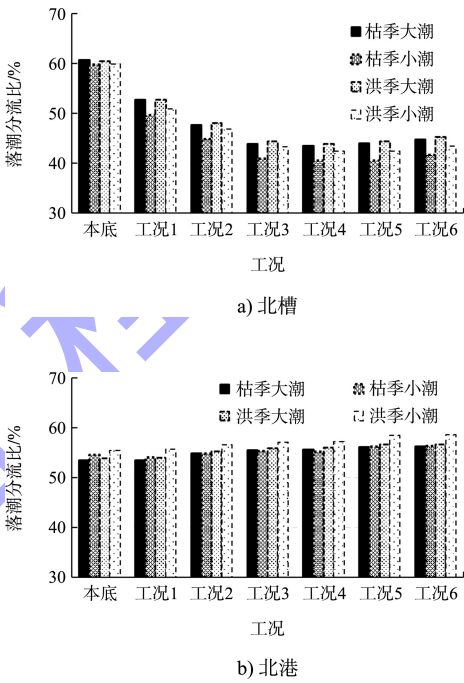


图 7 工程群实施后北槽、北港分流比

3 工程群的累加效应分析

3.1 潮差累加效应分析

为探讨徐六泾潮差变化中各个工程所占的比例, 计算单个工程引起的徐六泾区域潮差变化分布比例见图 8。整体来看, 北槽深水航道治理工程对上游潮差影响最大, 约占整体减小幅度的 50%, 其次为南汇边滩圈围工程。由于北槽中一期工程归顺了北槽流向, 阻碍了南北槽及北港横向的水体交换, 对潮波传播改变程度较大, 后续工程均在一期工程的基础上实施, 故一期工程对上游的影响整体较二、三期更大。北槽深水航道工程沿程长约 56 km, 其南北导堤和丁坝几乎覆盖了北槽的全部区域, 故整体对上游的影响最大。长江口为喇叭口形, 南汇边滩处在长江口入海口处, 虽然其过流断面相对较大, 但其圈围面

积大，从而对上游潮量影响也较大。横沙东滩圈围工程影响最小，这是由于北槽导堤、长兴岛和横沙岛的导流作用，使其圈围面积虽然较大，但对上游影响最小。由于北槽深水航道治理一期和二期工程导堤及丁坝高程最高为 2 m，与中水位相近，这使得小潮条件下潮波受影响程度相对较小，故小潮条件下北槽深水治理工程的影响比例小于大潮条件。

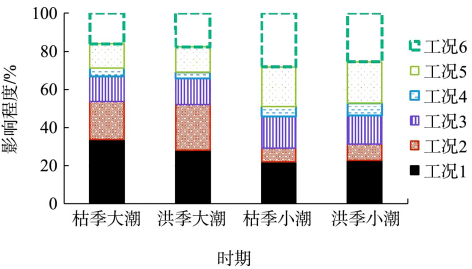
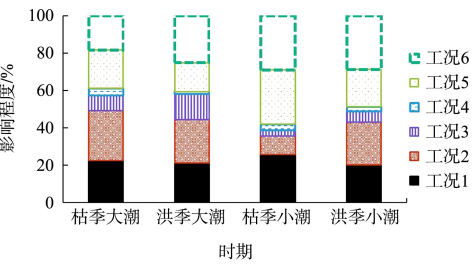


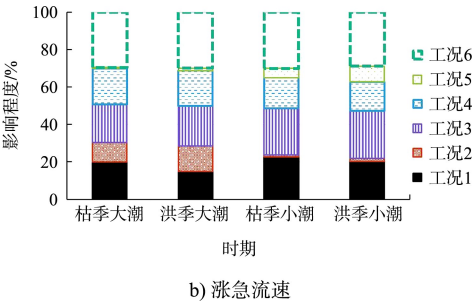
图 8 徐六泾潮差变化分布比例

3.2 流速累加效应分析

计算单个工程引起的徐六泾区域流速变化分布比例见图 9。总体而言，北槽深水航道治理工程对徐六泾流速影响最大，约占总影响的 50%，其次为南汇边滩圈围工程。工况 5 的实施对涨落急流速影响程度差别较大，这是由于徐六泾区域距离南北港分流口较远，潮波传播存在相位差引起的。徐六泾区域涨潮流速最大时，南支末端处在最高潮位附近，而使新浏河沙护滩工程被淹没水下，工况 5 的实施对徐六泾涨急流速影响很小。当徐六泾落潮流速最大时，南支末端处于中低潮水位，新浏河沙工程出水，对潮波传播影响较大，从而工况 5 的实施对徐六泾落急流速的影响程度较大。



a) 落急流速



b) 涨急流速

图 9 徐六泾流速变化分布比例

3.3 潮量累加效应分析

为探讨徐六泾潮量变化中各个工程所占的比例，计算单个累加的工程引起的潮量变化分布比例见图 10。分析可知，北槽深水航道治理工程的实施对长江口涨潮量影响最大，约占总变化的 50%，其次为南汇边滩圈围工程，这是由于其圈围面积相对较大所致。横沙东滩圈围工程对上游潮量的影响最小。

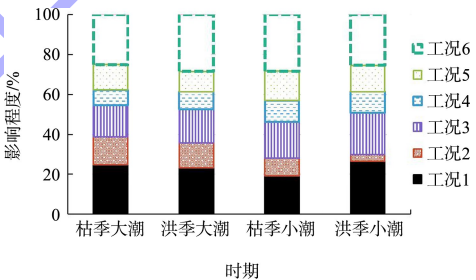


图 10 潮量变化分布比例

3.4 分流比累加效应分析

工程群实施后，北槽分流比主要受深水航道治理工程的影响，分别统计深水航道治理的三期工程影响比例见图 11。可以看出，一期工程的影响程度最大，约占北槽分流比变化的 50%。

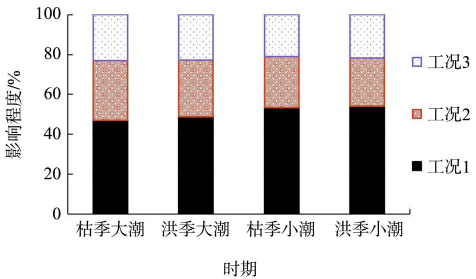


图 11 北槽分流比变化分布比例

4 结论

1)单个工程的实施会增加潮波上溯能量的消耗,工程群实施后,徐六泾涨潮量、潮差、流速均有所降低,累加影响较大。

2)工程群实施后,徐六泾涨潮量降低约10%,潮差降低约6%,涨急流速降低约9%,落急降低约4%,在不同的水文条件中,落急流速在枯季大潮条件降幅最大,其他物理量在洪季小潮条件下降幅最大。北槽分流比主要受深水航道治理工程的影响,工程实施后由60%逐渐减小至40%左右,其中一期工程的实施对分流比影响最大。北港的分流比变化不大。

3)在众多工程中,北槽深水航道治理工程对上游影响程度最大,约占工程群总影响的50%左右,其中一期工程所占比重较大;其次南汇边滩圈围工程对上游影响程度较大;横沙东滩促淤圈围工程最小。

4)工程实施后会改变周围水动力,水动力变化引起河床地形调整,进而减小工程对周围水动力的影响范围和程度。本文数学模型暂未考虑地形的变化,故工程影响计算结果可能与实际有所差别,未来将进一步探讨工程群对河势的持续影响。

参考文献:

[1] 陈吉余,恽才兴,徐海根,等.两千年来长江河口发育的模式[J].海洋学报(中文版),1979(1):103-111.

[2] YANG D L, DOU X P, ZHANG X Z, et al. Hydrodynamic effect of the regulation project of Yangtze River deepwater channel downstream of Nanjing[J]. China ocean engineering, 2013, 27(6): 767-779.

[3] 朱博章,付桂,高敏,等.长江口近期水沙运动及河床演变分析[J].水运工程,2012(7):105-110.

[4] WU H, WU T N, BAI M. Mega estuarine constructions modulate the Changjiang River plume extension in adjacent seas[J]. Estuaries and coasts, 2018, 41(5): 1234-1252.

[5] 刘杰,吴华林,程海峰,等.长江口横沙东滩中长期开发利用研究[J].水运工程,2012(7):111-116.

[6] 王维佳,蒋雪中,薛靖波,等.长江口横沙附近河势变化与可利用港航资源分析[J].长江流域资源与环境,2014,23(1):39-45.

[7] 刘曙光,郁微微,匡翠萍,等.三峡工程对长江口南汇边滩近期演变影响初步预测[J].同济大学学报(自然科学版),2010,38(5):679-684.

[8] 陈琳,冯建军.新浏河沙护滩工程滩头堤段局部冲刷原因分析及护底现状调查[J].水运工程,2012(12):178-183.

[9] 陈伟伦,王伟.青草沙水库工程对河床冲淤演变的影响[J].水利水电科技进展,2018,38(4):44-50.

[10] 陈珺,于明田,邓丽华,等.感潮河道桥梁和码头工程群对行洪累积影响[J].水利水电科技进展,2021,41(2):49-56.

[11] 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.

[12] 田艳,于定勇,李云路.莱州湾围填海工程对海洋环境的累积影响研究[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2018,48(1):117-124.

[13] 王勇智,孙惠凤,谷东起,等.罗源湾多年围填海工程对水动力环境的累积影响研究[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2015,45(3):16-24.

[14] 陆荣华,于东生,杨金艳,等.围(填)海工程对厦门湾潮流动力累积影响的初步研究[J].台湾海峡,2011,30(2):165-174.

[15] 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.

[16] 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.

[17] 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.

[18] 杨云平,李义天,韩剑桥,等.长江口潮区和潮流界面变化及对工程响应[J].泥沙研究,2012(6):46-51.