

龚泽权,王晓俊,杜德军,等.长江下游民主沙演变及其治理效果模拟分析[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2024,39(4):61-68.doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2024.04.008

GONG Z Q, WANG X J, DU D J, et al. Evolution Rules of Minzhu Sand in Yangtze River and Its Engineering Control Simulation[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2024, 39(4): 61-68. doi: 10.13582/j.cnki.1672-9102.2024.04.008

长江下游民主沙演变及其治理效果模拟分析

龚泽权¹, 王晓俊^{2,3}, 杜德军², 夏明嫣², 段绍伟^{1*}

(1.中南林业科技大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410004; 2.南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029;
3.南京水科院瑞迪科技集团有限公司, 江苏 南京 210029)

摘要:为解决民主沙右缘冲刷后退,导致长江福姜沙水道下段河势变化,影响现有12.5 m深水航道条件及后续工程治理的问题,在河演分析的基础上,提出民主沙治理措施,并利用数学模型对其治理效果进行模拟分析。从深泓线、断面、等高线及河床冲淤变化等方面进行河演分析,发现近年来民主沙右缘持续冲刷后退、浏海沙水道主槽向左坐弯以及沙尾下延后伸入12.5 m深水航道航槽是导致右侧深水航道水深时有不足的重要原因,急需对民主沙右缘和沙尾进行治理。数学模型计算研究表明:通过守护民主沙右缘和整治民主沙尾初步工程的实施,不仅稳定了河势,而且浏海沙水道主流坐弯的趋势也得到遏制,同时浏海沙水道民主沙下段和如皋中汊出口段航槽的水深条件也得到改善,为后续工程治理奠定了良好的基础。

关键词:长江;福姜沙;民主沙;深水航道演变;工程治理

中图分类号:U655.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2024)04-0061-08

Evolution Rules of Minzhu Sand in Yangtze River and Its Engineering Control Simulation

GONG Zequan¹, WANG Xiaojun^{2,3}, DU Dejun², XIA Mingyan², DUAN Shaowei¹

(1. School of Civil Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China;

2. Institute of Nanjing Hydraulic Science, Nanjing 210029, China;

3. Ruidi Scientific and Technological Group Co., Ltd., Institute of Nanjing Hydraulic Science, Nanjing 210029, China)

Abstract: In recent years, the right bank of Minzhu sand has experienced erosion and retreat, leading to changes in the river course of the lower section of the Fujiang sand waterway in the Yangtze River. This has affected the conditions of the existing 12.5 m deep-water navigation channel and subsequent engineering management. Based on river evolution analysis, this paper proposes control measures for Minzhu sand and uses a mathematical model to simulate and analyze the effects of these measures. The river evolution analysis focuses on the deep thalweg line, cross-section, contour lines, and riverbed erosion and deposition changes. It is found that in recent years, the right bank of Minzhu sand has continued to erode and retreat, while the main channel of the Liuhai sand waterway has shifted to the left. The extension of the sand tail into the 12.5 m deep-water channel is a significant reason for the insufficient water depth on the right side, making it urgent to manage the right bank and sand tail of Minzhu sand. The mathematical model calculations show that after the preliminary engineering

收稿日期:2024-03-10

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2022YFC3204500);中央级公益性科研资助项目(Y222002)

* 通信作者, E-mail: 450741204@qq.com

measures to protect the right bank and manage the sand tail of Minzhu sand, the river's stability improved. The trend of the main channel of the Liuhai sand waterway shifting to the left was curbed, improving the water depth conditions of the lower section of Minzhu sand and the outlet section of the Rugao branch. This is beneficial for enhancing the current navigation channel conditions and lays a good foundation for subsequent engineering interventions.

Keywords: Yangtze River; Fujiang sand; Minzhu sand; evolution of deep-water channels; engineering governance

长江河道治理问题关系着长江经济带的高质量可持续发展.针对长江河道演变特征及其治理问题,很多学者对不同河段开展了大量的研究,提出很多富有成效的治理方案^[1-4].民主沙位于长江福姜沙河段^[5],上游紧邻双涧沙,为出水的洲滩,左侧为如皋中汉,右侧为浏海沙水道.左右两汉均为 12.5 m 深水航道,深水航道于 2015 年 6 月开工,2018 年 5 月完工,2019 年 5 月竣工验收.目前,航道部门正着手实施航道整治后续完善工程(三期工程).多年来,如皋中汉下段和浏海沙水道的水深条件良好,但近年来 12.5 m 水深时有不足.吴道文等^[6-7]通过福姜沙各汉道碍航情况及各汉整治难度,提出在福姜沙左汉和福北水道布置整治工程措施;王爱春等^[8]分析福姜沙水道近期的河演特性,认为福姜沙上段和如皋中汉近年保持稳定,双涧沙的变化是影响福北和福中水道航道条件的关键;杜德军等^[9-10]通过模型试验和实测资料,分析双涧沙守护工程的效果,认为如皋中汉分流比存在明显的洪枯季差异,工程实施会影响如皋中汉分流比;陈德胜等^[11]对如皋中汉左侧连接长青沙和洪北沙导堤施工进行研究;张玮等^[12-13]等研究浏海沙水道南侧老海坝段和九龙港岸段的水动力、冲刷和节点守护作用.

以上研究主要针对福姜沙中上段的整治工作,如在福姜沙左缘和双涧沙两侧布置工程,较少涉及民主沙及其附近水域.本文重点对民主沙右缘及尾部的演变进行分析,发现其演变是导致右侧深水航道水深时有不足的重要原因,在此基础上,提出初步的整治措施并分析其效果,该措施对稳定河势以及开展深水航道整治后续完善工程有着重要的意义.

1 工程河段概况

1.1 河段概况

民主沙位于长江福姜沙河段.福姜沙河段上起鹅鼻嘴,下至九龙港,全长近 40 km.进口由鹅鼻嘴节点控制,江面宽 1.4 km,河床窄深,主流傍南岸;出口由九龙港节点段控制,江面宽约 2 km,为多级分汉河段.进口鹅鼻嘴往下至长山江面放宽至 4.1 km,其后长江主流为福姜沙,分左右两汉,为一级分汉,右汉为鹅头型弯道,长约 22.2 km,江面宽约 950 m,分流比约为 20%;左汉顺直,为主汉,江面宽约 3 km,长约 19 km,分流比约为 80%.福姜沙左汉下段又被双涧沙分为福北水道和福中水道,为二级分汉,水流走福中水道至福姜沙尾和福南水道汇合,进入浏海沙水道,福北水道部分水流经双涧沙进入浏海沙水道,部分进入如皋中汉.如皋中汉长约 10 km,江面宽 850~1 000 m,洪季分流比约为 30%,浏海沙水道江面宽约 2.5 km,分流比约为 70%.浏海沙水道和如皋中汉在九龙港一带汇合,此处江面宽约 2.0 km.其后长江主流紧贴南岸,经九龙港至十二圩港,脱离南岸过渡到南通姚港至任港一带,主流紧贴左岸顺通州沙东水道下泄.民主沙紧邻双涧沙下游,为出水的洲滩,左侧为如皋中汉,右侧为浏海沙水道.工程河段河势如图 1 所示.

1.2 水文泥沙概况

民主沙距上游长江大通水文站约 450 km.据大通站至 2019 年来流资料分析,年均流量为 28 310 m³/s,年平均含沙量为 0.39 kg/m³.历年最大流量为 92 600 m³/s,最小流量为 4 620 m³/s.5 月—10 月为汛期,流量及沙量超过全年的 70%^[8].相比三峡工程运行前,蓄水后洪峰流量减少约 10%,枯季流量增加约 7%,而沙量只有蓄水前的 30%左右.

洪季大潮的最大涨潮流速小于 0.5 m/s,断面上大流速区不出现涨潮流,最大落潮流速可达 1.8 m/s 以上,平均落潮流速 0.70~1.17 m/s.洪季小潮不存在涨潮流,平均落潮流速为 0.6~0.9 m/s.枯季大潮和中潮相差不大,平均落潮流速为 0.5~0.8 m/s,平均涨潮流速小于 0.57 m/s.本河段落潮流速明显大于涨潮流速,落潮流速是塑造河床的主要动力.

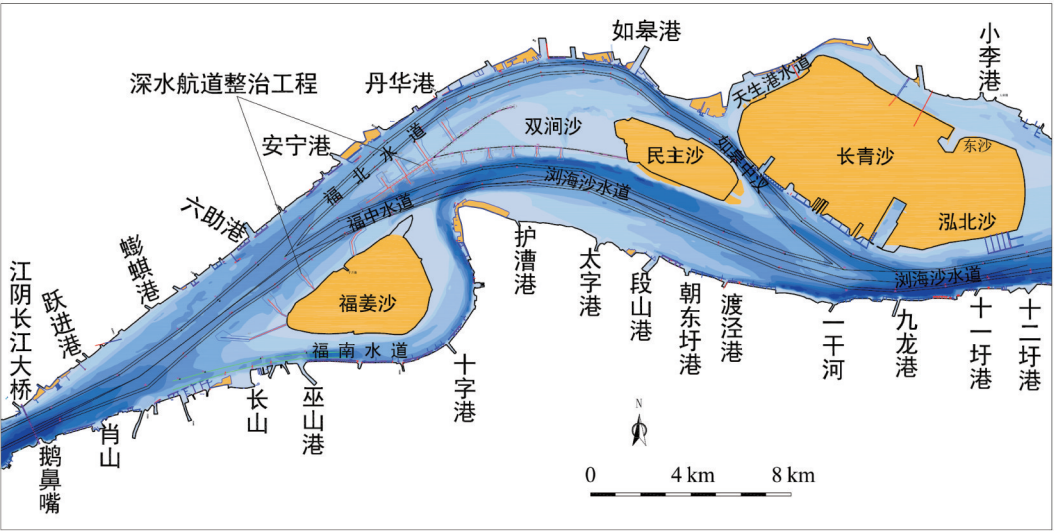


图 1 工程河段河势

2 民主沙及其附近河段近期演变概况

20 世纪 60 年代,又来沙右半部及沙尾出现纵横交错的串沟,沙体分裂出民主沙、反修沙、小沙、驷沙、界址沙和胜利长沙.后来,民主沙的头部和左边又分裂为和平沙和骥沙,这些沙洲分裂合并,演变十分频繁.20 世纪 70 年代,又来沙右边各沙体又合并为一个沙体,统称民主沙,又称长沙.1998 年,民主沙上已筑有大堤,堤顶高程在 6.8~7.4 m,洲堤工程的实施促进了沙体的稳定.1999 年后福姜沙河段民主沙附近的近期演变主要表现在以下几点:

1) 双涧沙—民主沙右缘冲刷,浏海沙水道主槽向北坐弯.

民主沙附近近年来的深泓线变化及分析断面布置如图 2 所示,民主沙附近河段近年来的断面变化如图 3 所示.1999 年以来,浏海沙水道上段的深泓线变化具有一定的规律.首先,由于双涧沙与民主沙右缘一带呈现冲刷后退的态势,深泓线总体逐年左移,其中 1999 年—2011 年的后退速率较快,LHS4[#]断面上左移约 660 m(图 2).由 LHS4[#]断面变化(图 3a)也可以看出:断面右侧的变化不明显,随着上游来沙的减少,深槽还有一定程度的增加.R16[#]断面位于如皋中汊,由于两侧岸线较为稳定,且河道较窄,断面年际间有一定的冲淤变化,但总体稳定(图 3b).2010 年底开始,双涧沙守护工程和深水航道整治二期工程相继实施,双涧沙沙体得到守护,总体河势更趋稳定,双涧沙—民主沙右缘的冲刷减慢,深泓线的左移趋势也有趋缓.2011 年—2019 年,深泓线左移 180 m,左移速度趋缓.

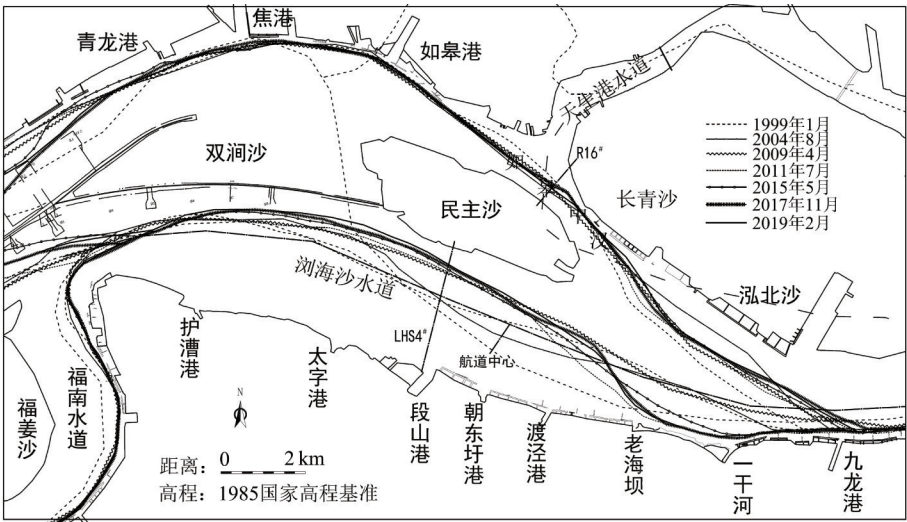


图 2 民主沙附近近年来的深泓线变化及分析断面布置

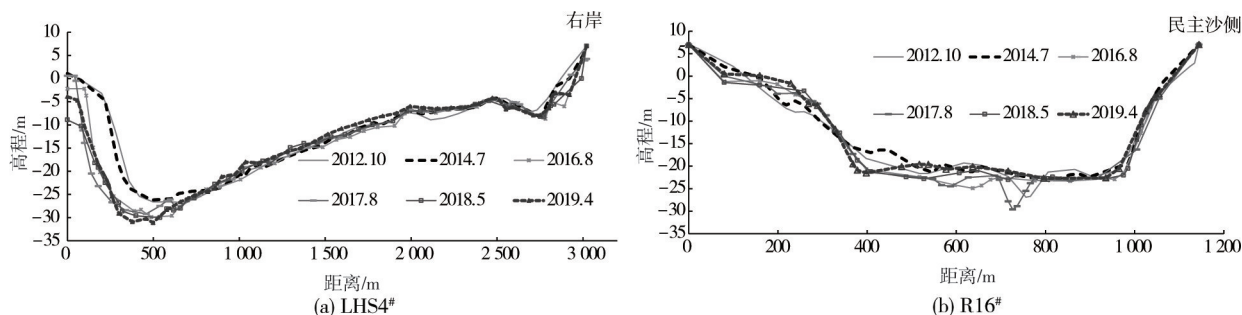


图3 民主沙附近河段近年来的断面变化

2)老海坝—九龙港一线,上游浏海沙水道主流顶冲点上提,下游如皋中汊主流的汇流点下移。

20世纪50年代起,长江主流走如皋沙群浏海沙水道,并不断南移逼岸。水流顶冲点在老海坝一带,引起这一带江岸的大规模崩塌。1970年—1974年在老海坝至九龙港之间共修建11座丁坝,1975年又进行维护和加固,基本抑制了这一带江岸的崩塌。

随着双涧沙—民主沙附近右缘冲刷后退,浏海沙水道深泓左偏,深槽坐弯,主流由左向右偏的幅度加剧,南岸顶冲点逐步上移,主流提前贴岸(图2)。提前贴岸的主流与如皋中汊水流汇合后有左偏的趋势,加之近年来如皋中汊的枯季分流比有所减小,也加剧了水流左偏,两水道水流汇合后,九龙港岸段的顶冲点下移。在2010年随双涧沙守护工程、深水航道整治二期福姜沙工程实施后,上述变化趋势趋缓。

3)沙尾—10 m线1999年—2009年淤涨下移,2009年后受冲上提,目前相对稳定;沙尾—15 m等高线受上游弯道坐弯的影响,近年总体淤涨下延南压挤压航槽,中汊出口—15 m槽存在斜向中断现象。

如前所述,双涧沙与民主沙右缘冲刷水道向北坐弯,使得落潮主流向南偏转的幅度增加,主流对南岸的顶冲点上提。主流向南偏转,为下游的民主沙沙尾向下游发展创造了条件。1999年后,主槽左侧—15 m线左移,而尾部—15 m线逐渐下移南偏。民主沙断面及1970年—2019年—15 m等高线变化如图4所示。由图4可知:2004年—2019年,主槽—15 m线左移约460 m,尾部—15 m线下移南偏约2 270 m。民主沙沙尾1999年—2018年的河势如图5所示。由图5可知:1999年—2010年,民主沙沙尾—10 m线尾部逐年下移;随着2010年的大水以及上游整治工程的作用,民主沙尾部—10 m线未继续下移并且局部出现冲刷后退,但—15 m线尾部还在继续下延,直至近几年其尾部已伸入一干河—九龙港间深槽,已无下移空间而渐止。

双涧沙—民主沙右缘冲刷后退,浏海沙水道主流向北坐弯,民主沙沙尾向下延伸等变化,给深水航道带来2个影响:一是浏海沙水道主槽坐弯,下段12.5 m航槽水深时有不足;二是民主沙沙尾在下移南伸的过程中会侵入如皋中汊下段航槽,使12.5 m航槽出现水深不足的现象。稳定河势是航道治理的关键,因此,有必要采取工程措施,守护双涧沙与民主沙的右缘,整治民主沙沙尾,改善浏海沙水道民主沙下段和如皋中汊出口段航槽的水深条件。

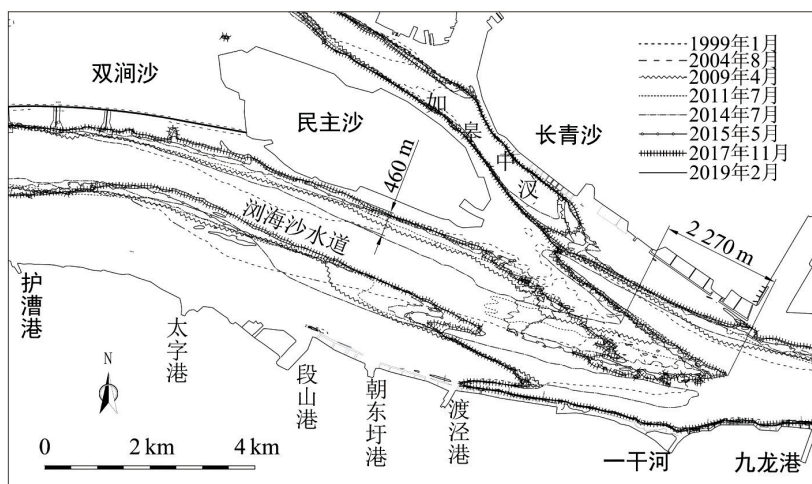


图4 民主沙断面及1970年—2019年—15 m等高线变化

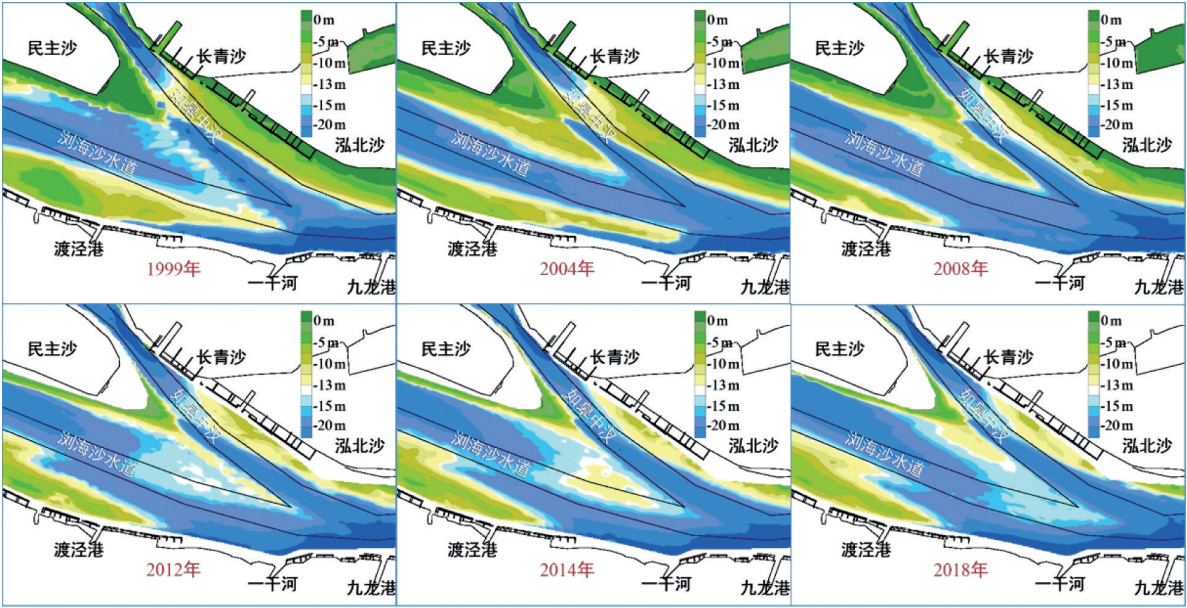


图 5 民主沙尾 1999 年—2018 年河势

3 民主沙治理措施研究

3.1 二维潮流数学模型

考虑计算河段的进出口条件、水文资料和工程影响范围等因素,模型上游以利港作为进口边界,下游以徐六泾作为出口边界,全长约 90 km.一般三维水沙数学模型虽然更能反映天然水沙的运动特性,但存在计算量大等问题,不适用于长河段的模拟.二维水沙数学模型的工程应用则相对成熟,它能反映物理量的平面分布特性,适用于物理量垂向分布非重点关心河段的研究.因此,在以往本河段的水利、航道等研究中,一般采用二维水沙数学模型.

针对双涧沙、民主沙右缘及尾部演变带来的河势变化,提出守护民主沙右缘和整治民主沙尾的初步整治工程措施^[14].采用南京水利科学研究院自主研发的南科院非均匀、非平衡二维潮流泥沙数学模型计算软件(NHRI-Ew,V1.0 版),建立工程河段二维潮流数学模型,计算分析整治工程的效果.

模型上游采用流量控制,给定来流过程;下游采用水位控制,给定水位过程线;初始条件给定计算域内所有计算变量的初值.由压力校正法进行压力(水位)-流速耦合求解,得出正确的流速场和水位值.流速采用无滑动边界条件.除高滩和芦苇处糙率系数 $n=0.030$ 外,计算过程中其他区域的糙率系数 $n=0.017\ 5+0.004\ 5\times\exp(2.0-h)$,其中, h 为水深.水流紊动黏性系数的确定根据零方程紊流模型, $\nu_t=\alpha u^* h$,其中 u^* 为摩阻流速, α 为常数,一般河道中 $\alpha=1\sim10$.采用地形切削法处理动边界问题,露滩临界水深取 $d_h=0.05\text{ m}$.

模型计算时间步长 $\Delta t=1.0\sim10.0\text{ s}$,计算空间步长 $\Delta s=3\sim200\text{ m}$,共有网格节点约 89 877 个,单元 88 623 个,并对工程区域进行网格加密,最小间距为 3 m,以便在进行工程方案计算时充分反映工程的影响,数学模型网格如图 6 所示.采用 2021 年 8 月实测 1:10 000 地形图对模型地形进行更新,数学模型概化地形如图 7 所示.

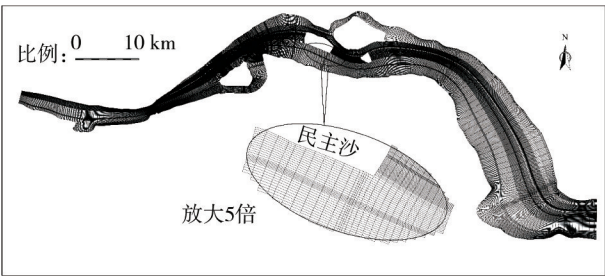


图 6 数学模型网格

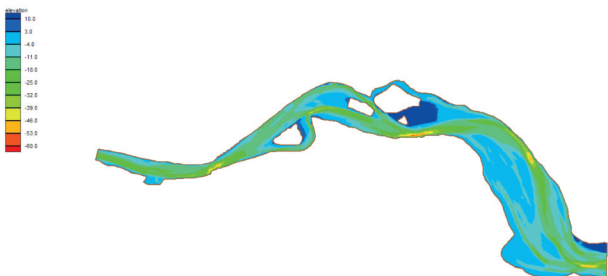


图 7 数学模型概化地形

本模型一直用于工程河段水利、航道、过江通道以及码头等工程的计算研究,2004 年至今先后采用实测水文资料对模型进行多次参数率定和验证.本次验证主要采用 2017 年 2 月枯季实测资料进行水动力参数的率定,采用 2021 年 1 月枯季和 2021 年 7 月洪季的实测资料进行水动力过程的验证,验证结果满足规程规范的要求.本次模型计算水文条件采用洪季大潮和枯季大潮.

3.2 整治工程方案

根据河演分析成果,民主沙右缘冲刷后退以及沙尾下移南伸,导致浏海沙水道下段 12.5 m 航槽左缘、如皋中汊下段 12.5 m 航槽出现水深不足.守护双涧沙与民主沙的右缘有利于抑制民主沙右缘不断冲刷后退的趋势,防止浏海沙水道主流进一步左偏坐弯,稳定航道的左侧边界条件.实施民主沙尾部潜堤工程可以改善浏海沙水道与如皋中汊的汇流条件,适当缓解福北水道常态化淤积的问题.

2014 年—2015 年,南侧浏海沙水道 12.5 m 槽较为顺直,水深条件满足 12.5 m 深水航道的要求,理想的治理方案是将冲刷后退的民主沙右缘至少恢复至 2014 年—2015 年时的状态.2015 年—2019 年,-15 m 线后退 55~200 m.因此,采用变高程的护滩坝对民主沙右缘进行守护,近岸 50~200 m 顶高程+2 m,作用是尽量恢复后退的岸线,同时起到护滩作用;往南侧深水区,坝顶高程逐渐降低至等高 3 m,作用是守护深水区岸坡.

双涧沙—民主沙右缘守护和民主沙尾部潜堤工程平面布置如图 8 所示,民主沙治理优化方案如表 1 所示.

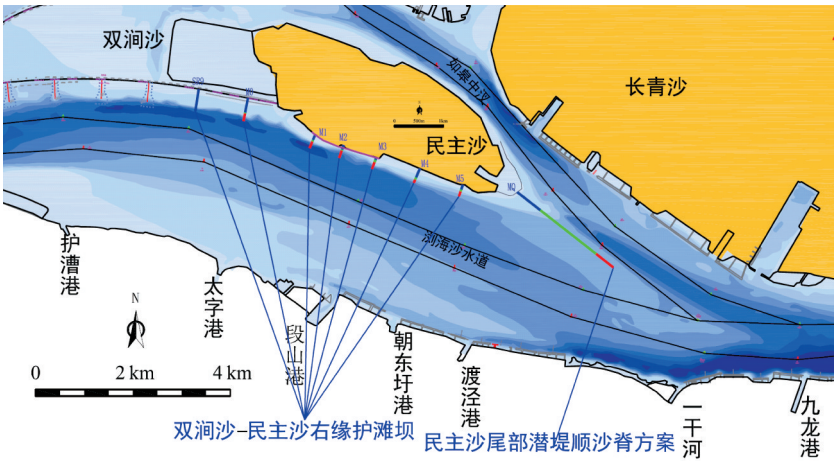


图 8 整治工程平面布置

表 1 民主沙治理优化方案

序号	分项	长度/m	顶宽/m	高度/高程(1985 国家高程基准)
1	民主沙右缘护岸	1 500	-	平顺护岸形式,宽度 250 m,抛石厚度 2 m
2	SR9 护滩坝	450	10	堤身高度 2 m
3	M0 护滩坝	480	10	根部 0~320 m 高程+2.0 m,320~480 m 高程+2 m 过渡到堤身高度 3 m
4	M1 护滩坝	300	10	根部 0~150 m 高程+2.0 m,150~300 m 高程+2 m 过渡到堤身高度 3 m
5	M2 护滩坝	280	10	根部 0~100 m 高程+2.0 m,100~280 m 高程+2 m 过渡到堤身高度 3 m
6	M3 护滩坝	250	10	根部 0~50 m 高程+2.0 m,50~250 m 高程+2 m 过渡到堤身高度 3 m
7	M4 护滩坝	320	10	根部 0~200 m 高程+2.0 m,200~320 m 高程+2 m 过渡到堤身高度 3 m
8	M5 护滩坝	250	10	根部 0~100 m 高程+2.0 m,100~250 m 高程+2 m 过渡到堤身高度 3 m
9	民主沙尾部潜堤	2 500	4	根部 0~600 m 高程+2.0 m 渐变至-1.0 m,中段 600~2 050 m 高程-1.0 m,外段 2 050~2 500 m 高程由-1.0 m 渐变至-10.0 m

3.3 整治工程效果分析

1) 工程实施后的流场变化

枯季大潮条件下,整治工程实施前后工程河段的涨落潮流场比较如图 9 所示.福姜沙左汊的落潮水流被双涧沙和民主沙分汊成两股,北侧水流进入福北水道,在下泄过程中,部分水流会越过双涧沙进入福中水道;南侧部分水流进入福中水道与福姜沙右汊水流汇合,下行后进入浏海沙水道.浏海沙水道和福北水道下段的如皋中汊水流在九龙港一带汇合.涨潮水流流速一般小于落潮,流向反之.

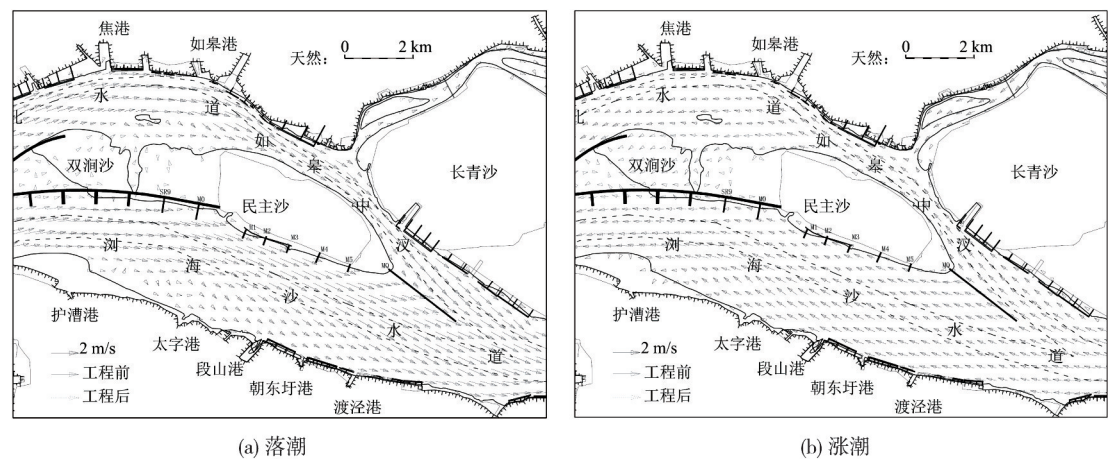


图 9 整治工程实施前后工程河段的涨落潮流场比较

整治工程效果如表 2 所示.由表 2 可知:民主沙右缘主流区贴岸,流速较大,整治工程实施后近岸流速有所减小,流向变化较小.落潮时,浏海沙水道靠近沙尾潜堤处水流受坝体的影响有所南偏;越滩进入如皋中汉的部分水流被拦截,仍有部分水流越过坝体进入如皋中汉,对如皋中汉下泄水流的顶托作用减弱.涨潮时,自九龙港上溯的涨潮流经北侧水流进入如皋中汉,靠近沙尾潜堤处越滩的部分水流受坝体拦截,北偏进入如皋中汉.落急时刻,民主沙尾部越滩水流的流向与尾部沙脊夹角为 $19^{\circ}\sim 26^{\circ}$,往下游的夹角减小;涨急时刻,越滩水流的流向与尾部沙脊夹角为 $11^{\circ}\sim 17^{\circ}$,往上游的夹角增大.整治方案实施后,民主沙尾部的涨落潮流态趋于平顺,福北水道出口分流有所增强.

表 2 整治工程效果

内容	效果
流态	民主沙右缘近岸流向变化较小;沙尾涨落潮流态趋于平顺,如皋中汉水流下泄更为畅通
流速	民主沙右缘近岸守护区域流速减小 $0.02\sim 0.10\text{ m/s}$;航道碍航浅区流速增加 $0.01\sim 0.04\text{ m/s}$
分流比	如皋中汉洪季落潮分流比增加约 0.47% ,枯季涨潮分流比增加约 0.89%

2) 工程实施后的流速变化

工程实施后的洪季大潮落急流速变化等值线如图 10 所示.民主沙右缘守护区域的流速减小,减幅一般在 $0.02\sim 0.10\text{ m/s}$,有利于浏海沙水道北岸岸坡的稳定.太字港附近航道内的流速增加,增幅一般在 $0.01\sim 0.03\text{ m/s}$.

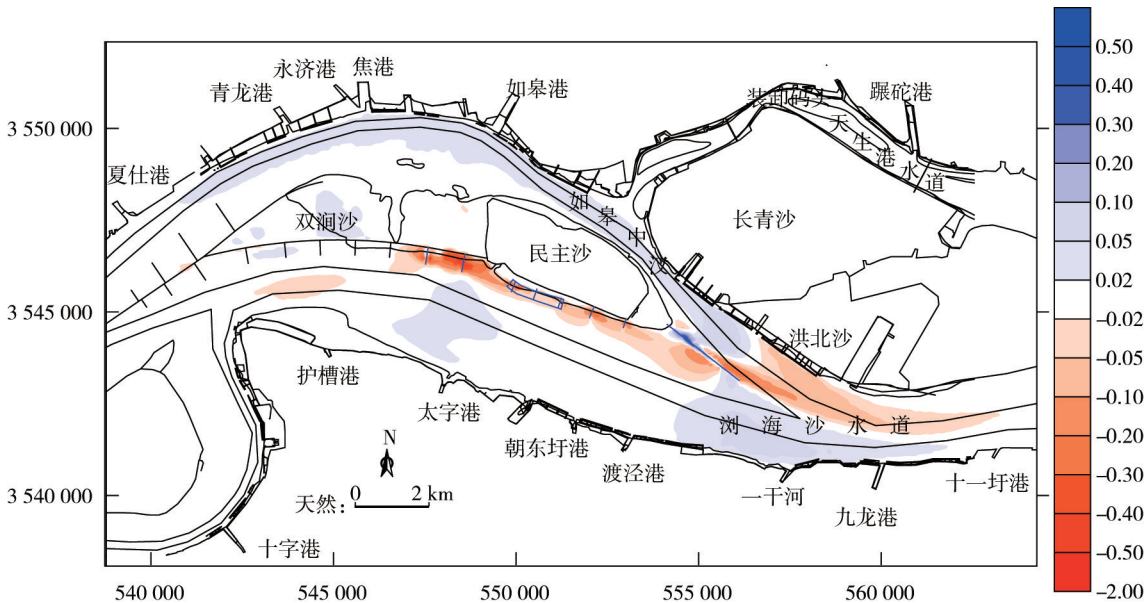


图 10 整治工程实施后的洪季大潮落急流速变化

民主沙尾部沙脊越滩流约占浏海沙水道洪季大潮落潮总量的6%~11%,越滩流强度沿沙脊不同高程有所差异,90%左右的越滩流分布于-10 m以下沙尾.工程实施后,沙脊线北侧的流速减小,潜堤下游流速的最大减幅为0.2 m/s,流速0.02 m/s的减小范围下游可至十一圩港对开处;沙脊线南侧流速增加,增幅一般在0.02~0.03 m/s.九龙港附近的流速增幅约为0.03 m/s,如皋中汊内的流速增加,增幅在0.02~0.03 m/s.

3) 工程实施后的汊道分流比变化

整治工程实施后,如皋中汊洪季落潮分流比增加约0.47%,枯季涨潮分流比增加约0.89%;民主沙尾浏海沙水道航道左侧的流速增加0.01~0.04 m/s.碍航区域的水动力条件增强,航道条件将有所改善.

4 结论

1) 民主沙右侧深水航道水深时有不足的重要原因是右缘持续冲刷后退和浏海沙水道上游主槽向左坐弯导致下游主流南偏,致使沙尾附近的水动力减弱,沙尾淤积下延伸入12.5 m深水航道航槽,影响深水航道水深和后续工程.

2) 针对民主沙右缘近年来冲刷后退,导致下游民主沙水动力减弱,沙尾淤积下延的演变规律,提出修建民主沙右缘护岸,SR9和M0~M5等7座护滩坝来守护民主沙右缘,以及采用民主沙尾部潜堤治理民主沙尾部等工程治理措施.

3) 工程治理措施实施后,守护了民主沙右缘,浏海沙水道主流坐弯的趋势得到遏制;如皋中汊下段落潮流速略有增加,如皋中汊分流比也有所增加,表明治理工程能在一定程度上改善如皋中汊的水动力,这有利于12.5 m深水航道水深条件的改善.建议通过物理模型等手段对治理方案进行深入研究,尽快稳定长江福姜沙水道下段的河势和改善现有12.5 m深水航道条件,同时为后续工程治理奠定基础,促进长江经济带的高质量可持续发展.

参考文献:

- [1] 袁媛,彭广东,华长平,等.深水航道整治后世业洲河段河床演变及通航条件改善分析[J].中国水运,2023(8):112-114.
- [2] 孙鹏,白一冰,刘星璐,等.长江口横沙浅滩演变及水沙变化特征研究[J].人民长江,2023,54(2):77-84.
- [3] 孙孟喆,胡鹏,李有为,等.航道工程作用下福姜沙水道滩槽演变特性及对水沙过程响应的数值研究[J].海洋工程,2022,40(6):62-75.
- [4] 魏伟,骆蓓菁,丁玲.近三十年长江口横沙岛滩滩湿地地貌演变对河口工程的响应[J].吉林大学学报(地球科学版),2021,51(4):1193-1203.
- [5] 曾乐,吴文刚,蔡昊.长江下游福姜沙水道深水航道维护特性分析[J].水运工程,2022(12):181-184.
- [6] 吴道文,夏云峰.福姜沙水道深水航道整治思路及工程布置[J].水运工程,2014(7):1-7.
- [7] 刘高峰,郭文华,贾晓,等.长江口福姜沙河段近期河势演变分析[J].水运工程,2013(11):130-135.
- [8] 王爱春,杨芳丽,沈磊.福姜沙水道近期河道演变特性[J].水运工程,2013(4):7-12.
- [9] 杜德军,夏云峰,闻云呈,等.福姜沙水道双洄沙守护工程水动力特性[J].水运工程,2015(4):1-7.
- [10] 乔红杰,朱巧云,胡国栋.长江口双洄沙整治工程效果及影响分析[J].水利水电快报,2019,40(10):24-29.
- [11] 陈德胜,杜永红,汤文君,等.长江如皋中汊出口导流堤工程龙口设置方法[J].江苏水利,2007(2):35,37.
- [12] 张玮,杨松,许才广,等.长江张家港老海坝段水动力及冲刷分析研究[J].水道港口,2016,37(2):147-153.
- [13] 栾华龙,余文畴.长江下游澄通河段九龙港节点控制作用变化趋向研究[J].水利水电快报,2020,41(2):22-26.
- [14] 陈诚,李旺生,杨云平,等.潮汐河段边心滩变形及对航道维护的影响研究[C]//中国海洋学会海洋工程分会.第十八届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(下).北京:海洋出版社,2017:428-435.