

· 航道及通航建筑物 ·

南京以下 12.5 m 深水航道通州沙河段
完善工程物理模型研究*

刘高峰, 王统泽

(上海河口海岸科学研究中心, 上海 201201)

摘要: 南京以下 12.5 m 深水航道一期、二期工程总体取得了良好的整治效果, 针对通州沙局部区段未完全稳定、新开沙还在持续冲刷后退等问题, 为进一步稳定航道开展了后续完善工程的研究, 采用定床物理模型试验的方案对完善工程实施后的流场进行研究。研究表明: 完善工程方案的水动力轴线在南通水道和通州沙东水道进口处均有一定程度的向东北偏移, 工程方案使得通州沙堤线的涨潮越堤流量和新开沙—裤子港沙之间串沟的越堤落潮量大幅度减小。完善工程方案实施后天生港—龙爪岩河段落潮平均流速以增加为主, 且普遍覆盖现有航道位置, 落潮动力以及落潮输沙能力增强, 因此工程可以达到稳定沙体和改善航道维护条件的整治目标。

关键词: 通州沙河段; 新开沙; 航道整治; 物理模型

中图分类号: U 617

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)02-0097-06

Physical model for improvement engineering of Tongzhou shoal section
on 12.5 m deepwater navigation channel from Nanjing

LIU Gao-feng, WANG Tong-ze

(Shanghai Estuarine and Coastal Science Research Center, Shanghai 201201, China)

Abstract: Good regulation effects have been achieved for the Phase I and Phase II projects of the 12.5 m deepwater navigation channel from Nanjing. Regarding the problems that the Tongzhou shoal is not completely stable, and the Xinkai shoal is still being scoured and keeps retreating, this study focuses on the subsequent improvement engineering to stabilize the channel and adopts the test scheme of the fixed-bed physical model to study the flow field after the implementation of improvement engineering. The study shows that the hydrodynamic axis of the improvement engineering scheme has a certain degree of northeastward migration at the inlet of the Nantong waterway and eastern Tongzhou shoal waterway. The scheme can greatly reduce the overtopping rising-tide volume of the embankment line of the Tongzhou shoal and the overtopping ebb-tide volume of the erosion ditch between Xinkai shoal and Kuzigang shoal. The average ebb-tide flow velocity in the reach between Tianshenggang and Longzhaoyan generally increases due to the engineering, and the increased range generally covers the existing channel position. The ebb-tide dynamics and the capacity of sediment transport by ebb tides are enhanced. Therefore, the improvement engineering can achieve the desired goal of protecting shoals and improving waterway maintenance conditions.

Keywords: Tongzhou shoal section; Xinkai shoal; channel regulation; physical model

收稿日期: 2022-06-07

*基金项目: 国家自然科学基金项目(U2040204); 上海市科技创新行动计划项目(21DZ1201002)

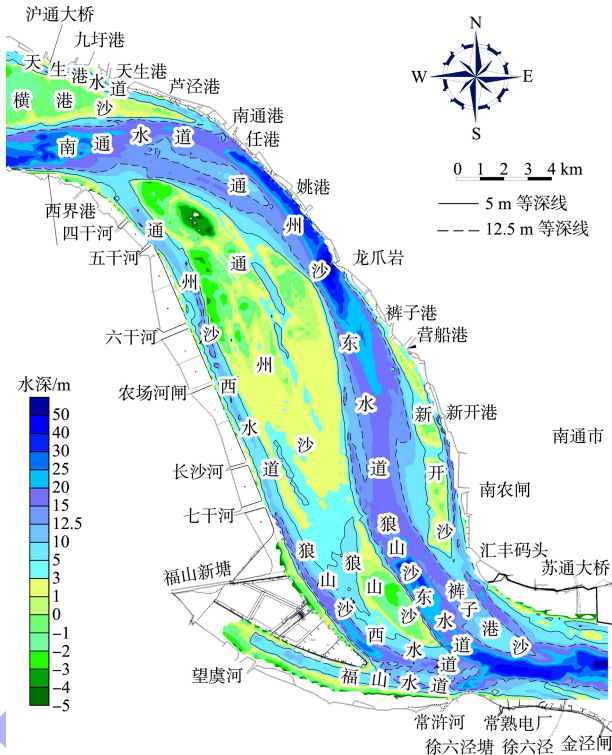
作者简介: 刘高峰(1976—), 男, 博士, 研究员, 从事河口海岸、港口航道工程研究。

1 工程概况

长江南京以下 12.5m 深水航道上起南京新生圩、下迄太仓浏河口，全长约 306 km。南京以下 12.5 m 深水航道一期工程(以下简称“一期工程”)在太仓至南通约 56 km 河段建设深水航道，整治措施主要包括修建潜堤及齿坝^[1]，一期工程方案的通州沙工程起到了明显的沙体守护效果，通州沙顺堤和齿坝能遏制通州沙及狼山沙沙体左缘的冲刷后退^[2]；南京以下 12.5 m 深水航道二期工程(以下简称“二期工程”)在南通—南京约 227 km 河段建设深水航道。目前一、二期工程总体整治效果明显，初步实现了预期的前阶段整治目标。

通州沙水道造床作用以底沙为主，悬沙中部分床沙质也参与了造床^[3]，本河段泥沙运动以含沙浓度较高的底沙输移，甚至以暗沙形态大规模输移^[4]。通州沙水道为浅滩暗沙型分汊河道，南通水道右侧、通州沙东北角发育一个 12.5 m 以浅沙体和一条 12.5 m 甬沟(图 1)，该甬沟的分流分沙影响任港弯道水动力条件，进而影响深水航道右侧边界条件的稳定。自 2014 年一期工程试运行以来，南通水道航道维护量前几年逐年增加，如从 2015 年的维护量 249 万 m³增加到 2016 年维护量 1 000 万 m³左右^[5]。随后几年航道维护量有所回落，年均维护量为 372 万 m³。

通州沙东水道下段深水航道左侧的新开沙—裤子港沙尚未采取整治措施，目前新开沙—裤子港沙 10 m 甬沟已与东水道和新开沙夹槽贯通，甬沟过流量已占上游落潮量的 25%左右，如任其发展，可能会进一步引起狼山沙东水道下段落潮流分配变化，乃至滩槽易位的局面，对通州沙河段深水航道的稳定产生不利影响。为进一步改善长江南京至浏河口河段航道条件，需要研究后续在通州沙头部、新开沙—裤子港沙河段实施航道整治工程，以稳定航道边界条件。



注：2021 年 1 月水深图(理基高程)。

图 1 长江通州沙河段河势

2 研究方法

2.1 研究手段

本研究在上海长江口整体物理模型厅上开展，模型水平比尺为 1:1 000，垂直比尺为 1:125，模型上游地形做到江阴利港，该处为长江口的平均潮流界。利港以上采用扭曲水道连接到安徽省大通水文站，使模型上潮波传播与原型相似^[6]。本次研究中采用移动式 PIV 粒子测流技术实现多范围的数据采集，以得到整体范围的流速数据。

2.2 模型的验证

采用 2015 年 8 月洪季水文资料对物理模型进行验证，主要有潮位和流速验证。

1)潮位验证：采用西界港、五千河、六干河、七干河、望虞河、任港、汇丰码头、太海汽渡、天生港、营船港、徐六泾、崇明洲头、白茆河、新建河等共 14 个潮位站的同期潮位资料。

2) 流速验证: 2015 年 8 月洪季水文测验中, 有 7 条固定垂线的流速可用于本河段验证, 站点分别是 SW1~SW7。

模型验证潮位和流速验证的特征值对比见表 1、2。

表 1 2015 年洪季验证潮位特征值比较

站位	高潮			低潮		
	天然/m	模型/m	差值/m	天然/m	模型/m	差值/m
徐六泾	2.76	2.74	-0.02	-0.09	0.00	0.09
汇丰码头	2.78	2.76	-0.02	-0.12	-0.01	0.11
荡湾口	2.63	2.54	-0.09	-0.25	-0.19	0.06
任港	2.99	2.90	-0.09	0.25	0.23	-0.02
五干河	2.91	2.95	0.04	0.19	0.16	-0.03
七干河	2.78	2.79	0.01	0.13	0.14	0.01
六干河	2.81	2.88	0.07	0.18	0.18	0.00
营船港	2.84	2.90	0.06	0.10	0.15	0.05
望虞河	2.73	2.82	0.09	-0.07	0.00	0.07
西界港	2.95	2.96	0.01	0.24	0.29	0.05
天生港	3.05	2.99	-0.06	0.23	0.25	0.02

表 2 2015 年流速特征值验证比较

站点	落潮			涨潮		
	天然/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	模型/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	误差/ %	天然/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	模型/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	误差/ %
SW3	1.01	1.06	5.0	-1.16	-1.15	-0.9
SW1	0.88	0.94	6.8	-0.68	-0.69	1.5
SW4	1.15	1.18	2.6	-0.82	-0.89	8.5
SW2	0.93	0.92	-1.1	-0.78	-0.84	7.7
SW7	1.44	1.53	6.3	-0.78	-0.85	9.0
SW6	0.84	0.89	6.0	-0.93	-1.03	10.8

从表 1、2 来看, 模型高低潮位和实测高低潮位误差在 10 cm 以内, 模型流速的涨落急值和实测值误差在 10% 以内, 所以模型的模拟精度符合 JTS/T 231-2—2021《水运工程模拟试验技术规范》要求。

2.3 整治方案

由于通州沙东水道龙爪岩以上主流右摆、槽淤滩冲, 通州沙滩面串沟发展^[7]。本文研究的通州沙河段完善工程的具体布置见图 2, 工程主要由通州沙段和新开沙两段组成。具体包括通州沙上段左缘潜堤(长 11 km)、东北侧 4 条丁坝工程、头部分流鱼嘴及西水道上口 3 条护底带。沿新开沙—裤子港沙沙脊线布置护滩潜堤(长 12.4 km), 两侧有 10 对护滩丁坝。为对比研究方案的工程效果, 把当前一期工程条件下的状态作为比较的本底方案。

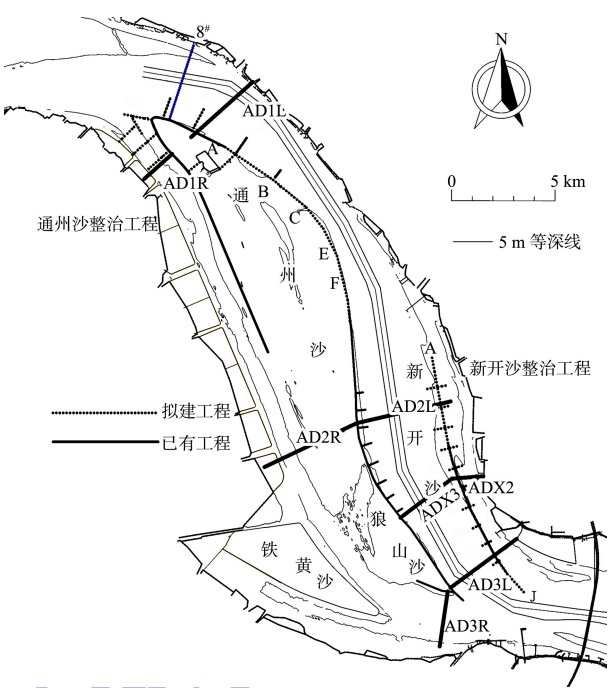


图 2 工程方案的流速和分流比位置

2.4 水沙条件

试验采用 2019 年 4 月地形条件, 大通站的洪季典型流量为 5.75 万 m^3/s , 下游采用徐六泾站点潮型, 平均潮差为 2.61 m, 潮差保证率为 83%。

2.5 试验断面

为了研究完善工程对分流比的影响, 选取 4 个断面(AD1L 和 AD1R 断面, AD2L 和 AD2R 断面, AD-X2 和 AD-X3 断面, AD3L 和 AD3R 断面)计算分流比。为了研究工程对局部流速分布的影响, 选择在南通水道设置 8# 断面分析流速情况, 断面位置见图 2。

3 试验结果和分析

3.1 涨落急流速

工程方案与本底工况流速的落急流速差值可直观地反映工程对流场影响情况。由图 3 可见, 完善工程缩小了过水断面, 工程方案 TL1~TL4 丁坝间对应天生港—龙爪岩之间河段落急流速普遍增加, 流速增加范围普遍覆盖现有航道位置。而这一河段本身是疏浚维护量较大的航段, 落急增加会增加泥沙输运能力, 因此有利于减少航道的维护量。

一期工程的通州沙潜堤与护滩潜堤之间新建

的潜堤可导致通州沙中上段南北向和东西向甬沟以及通州沙滩面的落急流速大面积减小，可实现封堵通州沙中上段南北向和东西向甬沟守护通州沙上部沙体的目的。

新开沙工程实施后，护滩工程掩护滩面区域落急流速出现了一定程度的减小，并且新开沙和裤子港沙之间的通道流速也出现了较为明显的减小，水动力被削弱有利于沙体稳定。

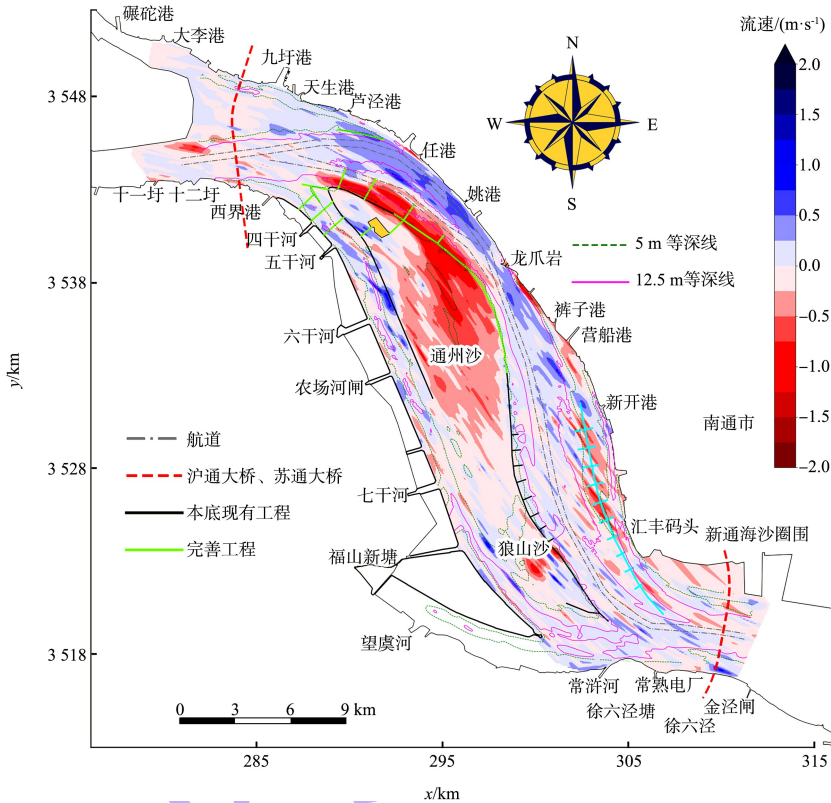


图 3 完善工程方案落急流场差值

3.2 水流动力轴线

落急潮流动力轴线往往能够代表水流塑造深槽的发展趋势，其变化对于分析工程对流场的调整有很好的参考性。绘制本底方案和完善工程方案的水流动力轴线见图 4。

由图 4 可见，完善工程方案的水流动力轴线在南通水道—通州沙东水道进口处都有一定程度地向东北偏移，而龙爪岩以下河段，完善工程和本底方案水流动力轴线位置基本重叠。说明完善工程方案对于南通水道和通州沙东水道进口处区段的流场动力调整力度大，可导致落潮动力轴线略微向东北偏移，其位置更加贴合现有航道，因此对此处航道维护有利，而对于龙爪岩以下河段落潮动力轴线影响很小。

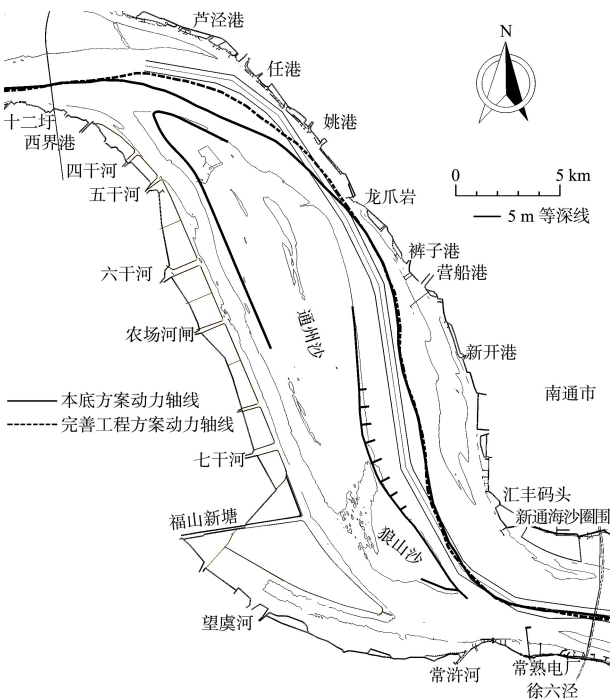


图 4 完善工程的动力轴线位置

3.3 分流比变化

分析分流比变化可以表示工程对于各个汉道动力格局的调整作用, 因此在研究工程实施效果时, 分流比是一个比较重要的分析指标。通州沙河段的分流比统计断面位置见图 2, 分流比的统计结果见表 3。

表 3 完善工程洪季落潮分流比

断面名称	断面号	本底方案/%	完善工程/%	增幅/%
通西水道	AD1R	12.46	13.53	1.07
通东水道	AD1L	87.54	86.47	-1.07
西水道	AD2R	22.52	22.16	-0.36
东水道	AD2L	77.48	77.84	0.36
狼东水道	AD-X3	84.71	85.60	0.89
新开沙	AD-X2	15.29	14.40	-0.89
西水道	AD3R	21.88	21.79	-0.10
狼东水道	AD3L	78.12	78.21	0.10

通州沙东水道进口位置分流比变化最大, 完善工程方案导致通州沙东水道断面的洪季落潮分流比减小 1.07%, 而通州沙西水道相应增加。其次是狼山沙东水道断面位置, 分流比增加 0.89%, 而新开沙夹槽分流比相应减小。可见新开沙—裤子港沙的护滩工程, 一定程度上阻挡了水流进入新开沙夹槽。

3.4 潜堤越堤水量

为研究工程对于通州沙护滩的效果和新开沙—裤子港沙的守护效果, 统计通州沙护滩堤沿线和新开沙—裤子港沙堤线断面的越堤流量, 以分

析潜堤沿程的水量交换, 断面位置见图 5。

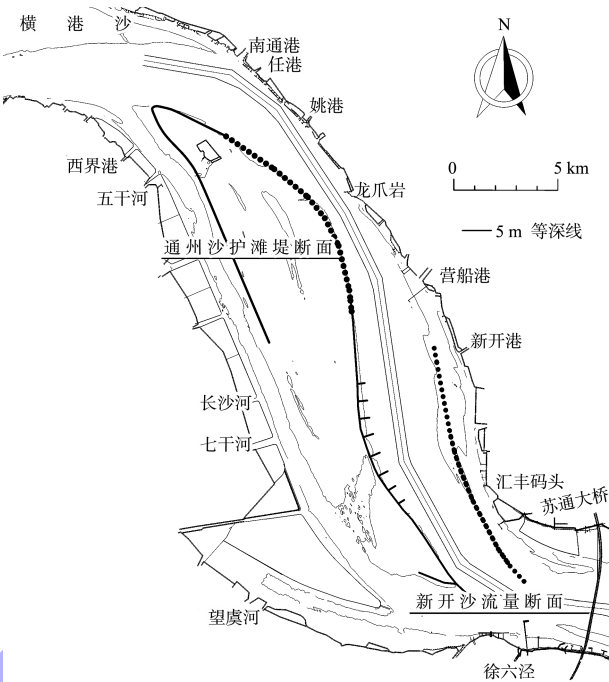


图 5 完善工程潜堤堤线位置

统计通州沙护滩堤沿线洪季涨潮越堤流量见图 6, 在洪季本底情况下, 通州沙护滩堤沿线涨潮量在通州沙串沟处最大, 其他河段的涨潮量较小。和本底相比, 完善工程方案大幅度减小了通州沙护滩堤涨潮越堤流量, 减少幅度为 58%。通州沙护滩堤沿线的涨潮越堤流量大幅度减少, 说明完善工程可以减少滩槽水流交换, 发挥护滩作用。

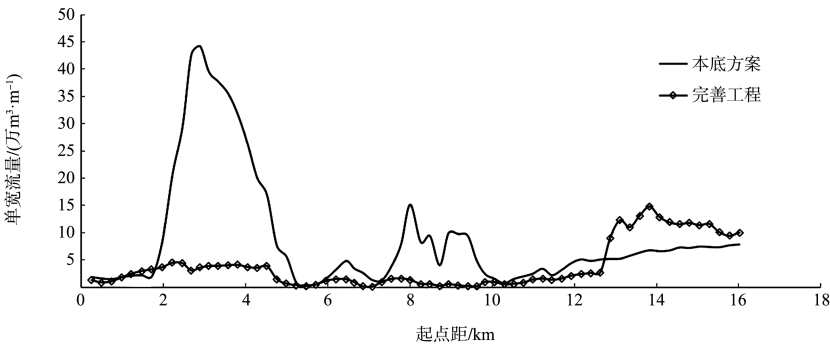


图 6 完善工程前后通州沙潜堤越堤变化

在本底情况下, 新开沙串沟和新开沙—裤子港沙之间串沟的沿堤线落潮量最大, 其它段的落潮量较小。与本底方案相比, 完善工程方案新开沙串沟和新开沙—裤子港沙之间串沟的越堤落潮

量减小, 减小幅度为 13.8%。新开沙—裤子港沙之间串沟的越堤落潮流量有明显减少, 说明工程可以阻断其串沟的过流, 实现限制新开沙—裤子港沙之间进一步发展的目标。

3.5 典型断面流速

为分析整体方案对流场动力的影响，在南通

水道区段选取典型断面(图 2)绘制落急流速进行分析，见图 7。

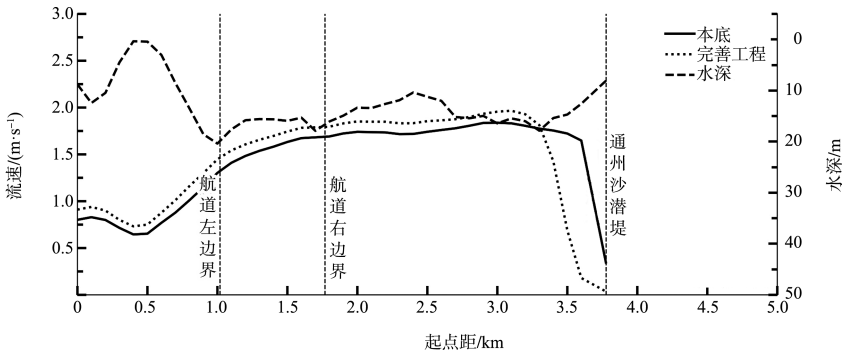


图 7 南通水道 8#断面流速分布

由南通水道通州沙东水道 8#断面可见，完善工程方案导致这些断面的落潮动力增强，而且整体落潮主动力区域和轴线分布向北侧移动，并与现有航道的位置相吻合，有利于航道的维护稳定。落潮主动力区域和轴线分布向北侧移动的主要原因是完善工程设置了 4 座丁坝，一方面减小了过水面积，另一方面对水流有一个顶推的作用。

3.6 航道沿程水动力

为进一步准确分析完善工程对于航道的影响，

选取航道沿线的落潮期平均流速和本底方案的差值分析，见图 8，完善工程方案对洪季落潮平均流速影响从西界港—天生港断面开始到龙爪岩断面，落潮平均流速有较大幅度增加，最大增幅为 0.18 m/s。从龙爪岩到汇丰码头河段航道中落潮平均流速也略有增加，但增幅略小，仅龙爪岩到营船港增幅为 0.05~0.10 m/s，其余从营船港到徐六泾段增幅为 0.01~0.05 m/s。

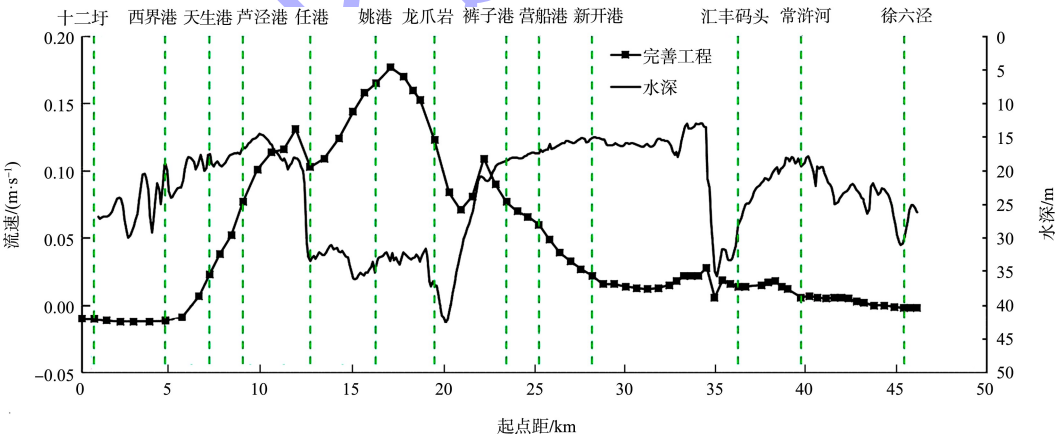


图 8 航道洪季落潮平均流速差值

根据现场维护情况可知，天生港—任港河段水深较浅、航道的维护量比较大。由图 8 可见，完善工程方案在该河段洪季落潮平均流速以增加为主，增加幅度在 0.1~0.2 m/s 之间，该流速增幅增强了落潮动力及落潮输沙能力，改善了航道的维护条件。不足之处是航道中落潮平均流速增幅最大区域位于姚港和龙爪岩区域，而此航段水

深条件本来就比较好。

4 结论

1)完善工程实施了通州沙沙体的护滩工程以及 4 座丁坝，对应天生港—龙爪岩之间河段的落急流速增加，流速增加范围普遍覆盖现有航道位置，有利于减少航道维护量。 (下转第 108 页)