

左书华, 赵德招, 谢华亮, 等. 新形势下长江河口南槽河床冲淤演变特征[J]. 海洋地质前沿, 2024, 40(1): 44-54.

ZUO Shuhua, ZHAO Dezhao, XIE Hualiang, et al. Evolution in river regime in the South Passage of the Yangtze Estuary under new situation[J]. Marine Geology Frontiers, 2024, 40(1): 44-54.

新形势下长江河口南槽河床冲淤演变特征

左书华^{1,2,3}, 赵德招^{4*}, 谢华亮^{1,3}, 赵张益^{1,2,3}, 杨华^{1,2,3}

(1 交通运输部天津水运工程科学研究所, 天津 300456; 2 港口水工建筑技术国家工程研究中心, 天津 300456;

3 工程泥沙交通行业重点实验室, 天津 300456; 4 交通运输部长江口航道管理局, 上海 200037)

摘要:随着长江流域来沙的锐减、河口涉水工程的建设、生态环境保护力度的加大和通航环境的高效利用, 长江口河势将面临着新一轮的调整。以长江口南槽河床冲淤演变为研究对象, 采用河床演变分析的方法对南槽近十年来多次水下地形和航道水深数据进行了分析, 并对南槽航道治理一期工程效果进行了讨论。结果表明: 2010—2018 年, 南槽主槽整体呈冲刷态势, 江亚南沙头部窄沟冲刷发展, 沙尾冲刷下延; 2018 年至今, 江亚南沙头部窄沟由冲刷环境转化为淤积环境, 其他区域冲淤形势基本未变; 南槽断面主槽形态总体稳定, 在主槽总体冲刷背景下, “拦门沙”逐渐被削平, 加上南槽航道治理一期工程的作用, 南槽 6 m 以深河槽容积明显扩大, 且保持较好的稳定性。近期南槽河势变化是流域来水来沙和河口自然、人类活动影响的综合结果, 南槽航道治理一期工程对近期江亚南沙的地形变化起到了重要影响, 工程有效地控制了江亚南沙河势, 遏制了局部冲刷发展的趋势, 有利于稳定南槽航道的北侧边界。

关键词:长江口; 南槽; 河势变化; 南槽航道治理一期工程; 江亚南沙

中图分类号: P714^{+.6}

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2022.311

0 引言

长江口地处长江流域与黄海、东海的连接带, 平面形态为喇叭形, 呈“三级分汊, 四口入海”的河势格局^[1]。南槽是长江河口第 3 级分汊的南汊道, 为长江入海四口之一, 也是长江水沙输送向海的主要通道, 其两侧毗邻九段沙和南汇边滩(图 1)。南槽航道是长江口“一主两辅一支”航道规划格局中重要的辅助航道, 是长江口航道体系中的重要组成部分^[2]。为贯彻落实长江经济带发展战略, 充分发挥长江黄金水道功能, 优化长江口通航环境, 交通运输部于 2018 年批准实施了南槽航道治理一期工

程(简称“南槽一期工程”), 并于 2020 年 6 月通过交工验收。因此, 研究南槽河势演变对南槽航道后期治理工程的规划、开发和一期工程效果评价以及生态环境保护研究等有着重要的科学意义。

由于 20 世纪 90 年代以来长江口开发治理的重点集中在以航道为中心的南港、北槽^[3-9], 对南槽的研究较少, 其研究主要集中在南槽拦门沙^[10]、九段沙和南汇边滩^[11-18]及南、北槽分流口^[19-20]等的形成与演变的局部问题上。随着交通运输部在《水运“十三五”发展规划》中提出“研究长江口北港、南槽等航道综合整治开发”的规划建设及河口湿地(南汇边滩和九段沙滩涂)环境保护以来, 对南槽的研究日趋增多, 如南槽表层沉积物分布研究^[21-22]、水沙输移研究^[23-24]、南槽河槽地貌过程演变^[25-26]、南槽航道整治结构物^[27]等。

随着长江流域来沙的锐减、河口涉水工程的建设、生态环境保护力度的加大和通航环境的高效利用, 长江口河势将面临着新一轮的调整^[28-30]。在长江口新的水沙形势下, 本文根据近十年来长江口南槽不同时期的水下地形数据, 结合长江口水沙变化

收稿日期: 2022-11-17

资助项目: 交通运输部重大科技创新项目(2020CX005); 交通运输行业重点科技项目(2022-MS5-133); 国家重点研发计划项目(2019YFB1600605)

第一作者: 左书华(1979—), 男, 博士, 研究员, 主要从事河口海岸动力地貌方面的研究工作。E-mail: zsh0301@163.com

* 通讯作者: 赵德招(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事河口海岸泥沙及港口航道工程方面的研究工作。E-mail: dzzhao@qq.com

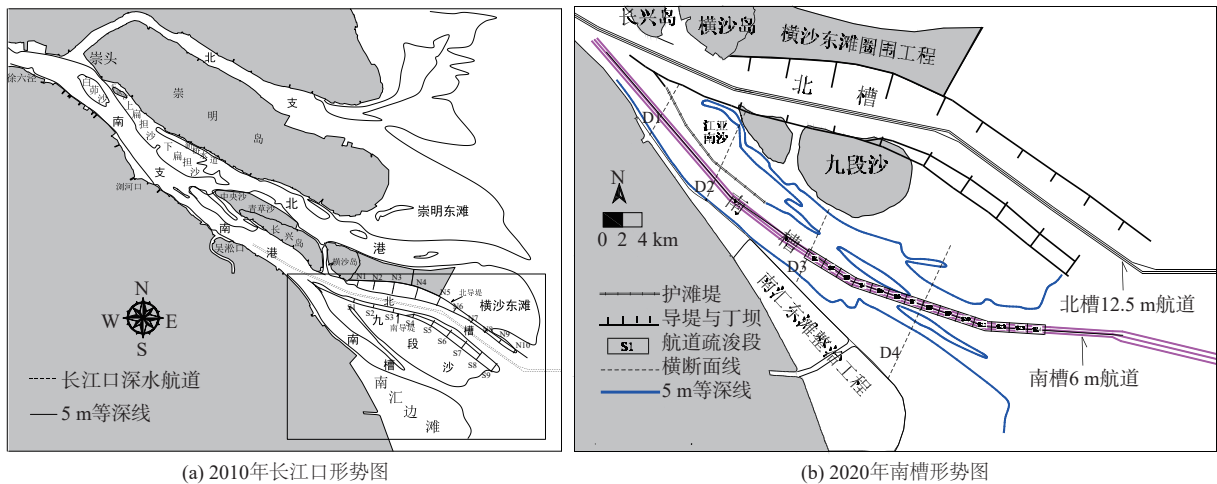


图1 长江口及南槽形势图

Fig.1 Map of the Yangtze Estuary and the South Passage

和南槽一期工程建设背景,研究近期南槽河床冲淤演变过程,为未来南槽水域涉水工程的规划和建设提供一定的科学依据。

1 区域概况与资料方法

1.1 区域概况

长江口是中等强度的潮汐河口,主要受东海前进波影响,口外基本为正规半日潮,口内为非正规浅海半日潮,南槽中浚潮位站多年平均潮差约3 m。长江口受流域来水来沙影响明显,流域来水来沙年内具有明显的季节性变化特征,6—11月为洪水期,其径流量约占年径流总量的72%,输沙量约占年输沙总量的85%。

南、北槽分流口是长江口第3级分汊。根据近十年来分流比资料,南槽分流比基本在56%上下变化,总体稳定。分沙比与分流比趋势基本相同,但分沙比波动相对较大,波动区间为60%~75%,总体在合理变化范围之内。

长江口南槽中上段主槽、江亚南沙头部甬沟与江亚北槽及南汇东滩沿岸测站水流受地形约束影响,往复流性质明显,涨、落潮的流向与主流的走向基本一致;下段至口外垂线以及外旋转流特征逐渐明显。南槽主槽沿程潮流分布特征表现为南槽入口处附近流速最大,涨潮平均流速约1.1 m/s,落潮平均流速约1.5 m/s,然后由内向外略有减小趋势。拦门沙及其以上河段表现为落潮流速大于涨潮流速,落潮流优势明显;口门附近涨、落潮流速基本一致;口外则表现为涨潮流速略大于落潮流速的特征。

长江口的波浪以风浪为主,平均波高约1 m。大风浪主要出现在冬季北方寒潮来袭和夏季台风入侵时,最大波高可达6 m^[11]。根据近十年来台风资料,共有20多次台风和寒潮过程影响长江口,平均每年2~3次。

长江口不同河段底质特征差异较大,以细砂、粉砂质砂、砂质粉砂、粉砂和黏土质粉砂为主;南港河段主要以细砂和粉砂质砂为主,北槽河段主要以黏土质粉砂和粉砂为主,中值粒径为0.03~0.1 mm,北槽中段较上、下段粗;南槽河段主槽底质中值粒径呈现“两端细,中间粗”的特征,中值粒径介于0.006~0.147 mm,江亚南沙及其沙尾附近的底质则相对较粗,以细砂为主,中值粒径约0.12 mm。

1.2 南槽周边工程

近年来,长江口区实施了航道治理、滩涂围垦和河势整治等大量涉水工程^[31]。除深水航道工程外,还有南汇东滩滩涂整治工程(2013年至今)、北槽航道南坝田拦沙堤加高工程(2015—2016年)等。

南槽一期工程于2018年12月29日开工,2020年6月通过交工验收,主要包括江亚南沙南缘护滩堤工程(简称“护滩堤工程”)和南槽6.0 m航道基建疏浚工程(简称“航道工程”)。护滩堤工程上游顺接长江口深水航道分流鱼嘴南线堤,总长约16 km。航道工程于2019年11月4日开工,2020年3月实现6 m航道全线贯通,形成水深6 m、航宽600 m(口外航宽1 000 m)的同向多线航道,2020年4月1日起正式试运行。根据前期工程可行性研究报告^[32],建设护滩堤工程的目的就是通过封堵江亚南沙头部甬沟,将甬沟水域从冲刷环境变为淤积环

境,遏制江亚南沙局部冲刷发展的不利河势进一步发展。

1.3 研究资料与方法

收集了2010年8月、2013年8月、2016年11月、2018年11月、2019年11月和2020年11月长江口南槽水域水下地形图。主槽水深数据采用单波束测深技术获取,滩地区域(江亚南沙、九段沙等)采用RTK无验潮水下地形测量的方法进行施测,选取的特征点位要能反映滩地地貌形状,并经过多站实时潮位修正,最终获取绝对水深。以上水深数据均采用北京54坐标,基面为理论最低潮面,水深数据在GIS平台上处理,提取河槽断面(图1b)、等深线和叠加计算冲淤图。

另外,还收集了南槽航道2020年3月与试运行期间以后(2020年5月和8月以及2021年1月、5月、8月)航道沿程断面水深(数据坐标系统为北京54坐标,基面为理论最低潮面)与航道试运行期第1年和第2年的回淤量资料。

1.4 历史演变现状

1945年以前,南港口门区域一直被铜沙浅滩所覆盖,水浅、滩长。在后期的演变过程中,不断被大

洪水过程切割、下移,特别是1954年长江流域特大洪水对铜沙浅滩的切割,逐步形成北槽上段河槽雏形,九段沙上沙和中沙连成一体,其南北两侧的5 m等深线贯通,正式形成以九段沙分流的南槽和北槽。自北槽形成后,随着分流口河势的变化,特别是江亚南沙的发育,限制了南港落潮流进入南槽,因此,北槽分流分沙的数量逐渐增加,呈发展趋势,北槽呈冲刷扩大。由于南槽的严重淤积和北槽的改善,1983年上海航道正式开通北槽为主航道,但拦门沙区域水深不足的问题一直是通航的瓶颈。为了适应经济的发展,充分发挥长江黄金水道的作用,打通长江口拦门沙“瓶颈”,使高等级货轮直通南京,1998年开始实施建设长江口深水航道治理工程。

在长江口人为控制工程作用下,多年来长江口分汊格局总体稳定。受长江流域来沙锐减影响,长江口河势总体上由淤积环境向冲刷环境转化,各主要汊道,除北支外,均出现河槽断面扩大,主槽平均水深呈增深的趋势(图2)^[30,32-34]。1997—2010年,南槽主槽冲淤总体呈现为“冲刷-淤积-冲刷”的格局,九段沙沙体淤涨,其南沿和甬沟冲刷发展;南汇东滩区域由于是涨落潮流路分歧形成的缓流区,泥沙极易堆积,多年持续有所淤涨,陆续实施了多期滩涂围垦工程(图3)。

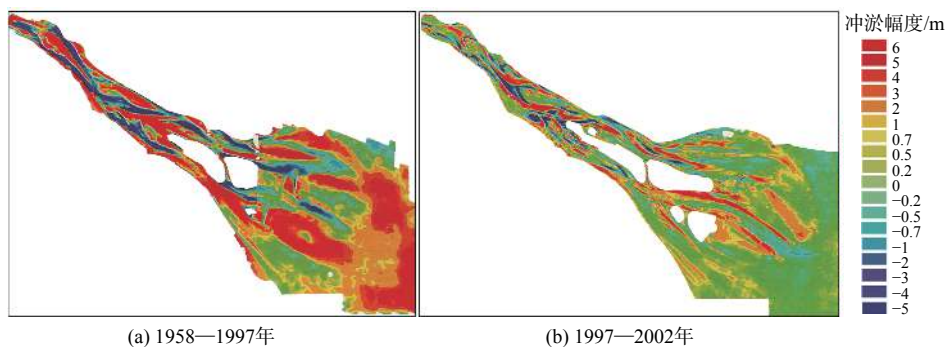


图2 1958—2002年长江口区地形冲淤变化^[35]

Fig.2 Topographic erosion and silting changes in the Yangtze Estuary from 1958 to 2002^[35]

2 结果

2.1 等深线变化

5 m等深线能较好反映沙洲或浅滩的变化形势,图4为2010—2020年的南槽5 m等深线变化,图5为典型区域江亚甬沟和江亚南沙沙尾的变化。

2010年江亚南沙头部甬沟开始发展,2010—

2013年,江亚南沙头部5 m等深线向下游发展约850 m,沙尾向下延伸约3.5 km,江亚北槽向上冲刷发展距离较大,约13 km。贴近浦东机场一侧5 m等深线基本没有变化,向下游在南汇附近等深线逐步转化为冲刷,向岸移动了最大约1.9 km,到南汇嘴附近等深线向海略有所移动,表现为略有淤积。在此期间,九段沙下沙南沿有所冲刷,5 m等深线向北侧移动了约1 km,落潮沟有发展的迹象,基本没有变化,沙尾附近5 m等深线略有冲淤变化,幅度不大。

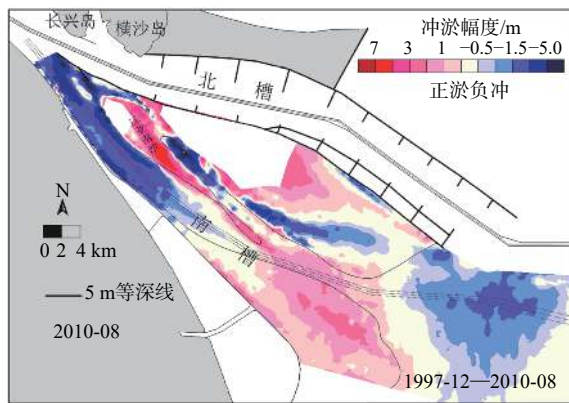


图 3 1997—2010 年南槽区域河床冲淤分布

Fig.3 Topographic erosion and siltation changes in the South Passage from 1997 to 2010

2016 年江亚窰沟已初具规模, 江亚北槽冲刷上移, 两者相距仅 500 m。与 2013 年相比, 江亚南沙头部 5 m 等深线向下发展了约 3 km, 沙尾继续下延了约 500 m; 九段沙下沙体南侧 5 m 等深线向下游有所冲刷发展, 落潮沟初步显现, 九段沙沙尾略有

向外移动淤积。贴近浦东机场一侧 5 m 等深线基本没有变化, 向下游至南汇嘴边滩均呈现为向陆冲刷移动, 最大移动距离约 1.7 km。

2016—2018 年, 江亚窰沟继续向下发展, 江亚北槽继续冲刷上移, 江亚南沙沙尾断开, 一分为二, 沙尾最远距离基本没变; 九段沙下沙体南侧落潮沟向下发展了约 3.9 km。九段沙沙尾和贴近浦东机场一侧的 5 m 等深线基本没有变化, 南汇嘴边滩 5 m 等深线略有向岸冲刷移动。

2018 年开始实施南槽一期工程中的护滩堤工程。2018—2019 年, 江亚窰沟和江亚北槽均没有明显变化, 沙尾最远距离略有下移, 紧贴南槽 6 m 航道, 在航道南侧又新发育了 5 m 沙包; 2019—2020 年, 江亚南沙头部窰沟消失, 江亚北槽向上发展, 江亚南沙沙尾继续下移, 沙尾紧贴航道南边线, 航道南侧沙包继续向下游延伸了 4.1 km。浦东机场上游的 5 m 等深线变化不大, 下游南汇嘴边滩附近 5 m

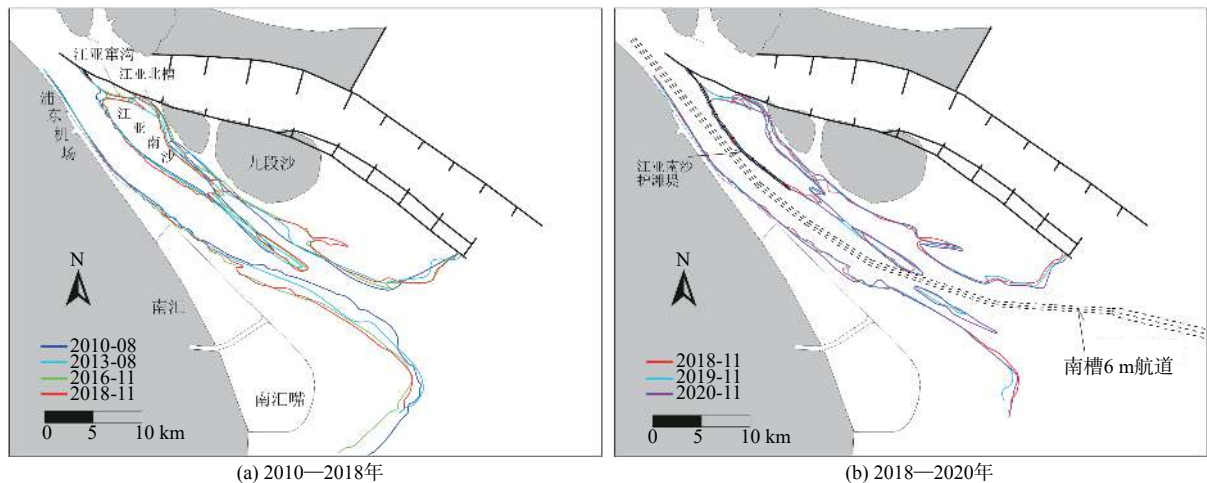


图 4 南槽 5 m 等深线变化

Fig.4 Variation of the 5 m isobath in the South Passage

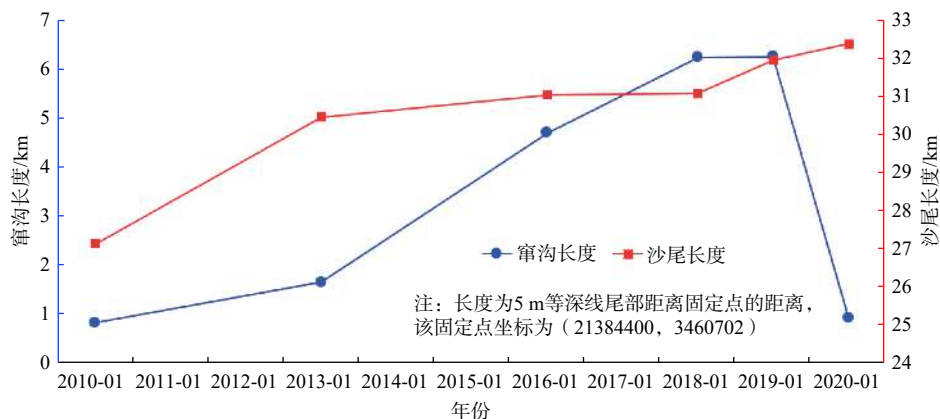


图 5 江亚窰沟和江亚南沙沙尾长度变化

Fig.5 Change in length of Jiangya Ditch and Jiangyanan Shoal tail

等深线仍略有向岸冲刷移动。九段沙下沙体南侧落潮沟向下发展,沙尾5 m等深线向外淤积扩张。

图6为2010—2020年的南槽10 m等深线分布与变化,由图可以看出,10 m等深线主要分布在南

槽上段,总体呈冲刷下移趋势,工程后2018—2019年略向下移动,航道北侧10 m线相对稳定;航道南侧10 m线有向南扩展趋势,向南最大推移距离>200 m。2019—2020年又继续下移约500 m。

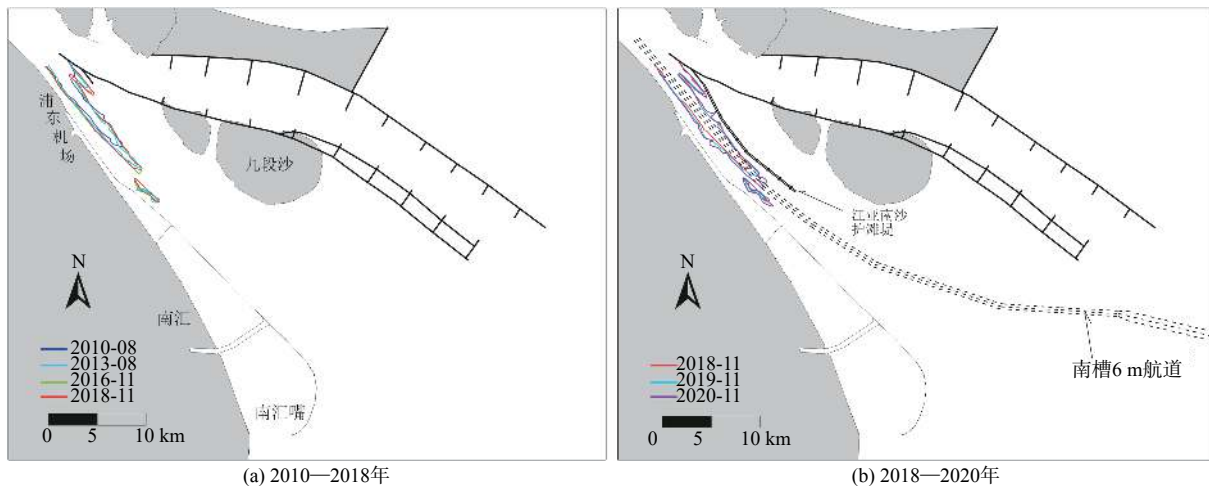


图6 南槽10 m等深线变化

Fig.6 Variation of 10-m isobath in the South Passage

2.2 河床冲淤分布

图7为2010—2020年南槽区域河床冲淤分布图。2010—2018年,南槽主槽总体为冲刷形势,江亚南沙头部窄沟形成,沙体南侧有所淤积,沙尾冲刷下延;江亚北槽深泓东移、冲刷发展;九段沙南沿和窄沟冲刷发展,沙尾总体为淤涨态势;南汇东滩总体呈现为冲刷的特征(图7a)。

2018—2020年(图7b),南槽进口段及中上段主槽延续了南槽一期工程前的冲刷态势;江亚北槽局部继续有所冲刷;江亚南沙护滩堤建成后,江亚南沙头部窄沟淤积萎缩,淤积幅度>2 m,原冲刷发展不利态势得到明显遏制;沙尾总体淤积0.5~1.0 m。

在此期间,九段沙中下沙体南沿5 m等深线微冲、落潮沟有所发展,沙尾附近滩面呈淤积态势。

由以上分析可以看出,2010—2018年南槽主槽整体冲刷,江亚南沙头部窄沟形成,不断冲刷发育,沙尾下延;2018年以后南槽主槽冲淤形势不变,但江亚南沙头部窄沟淤积,沙尾下延有所减缓,其他区域冲淤形势不变;口外则持续冲刷。

2.3 横、纵断面变化

2.3.1 河槽横断面变化

为准确研究长江口南槽区域河槽基本形态及其变化,在南槽区域内自上而下提取了4条横断面,具体位置见图1b,南槽横断面水深变化见图8。

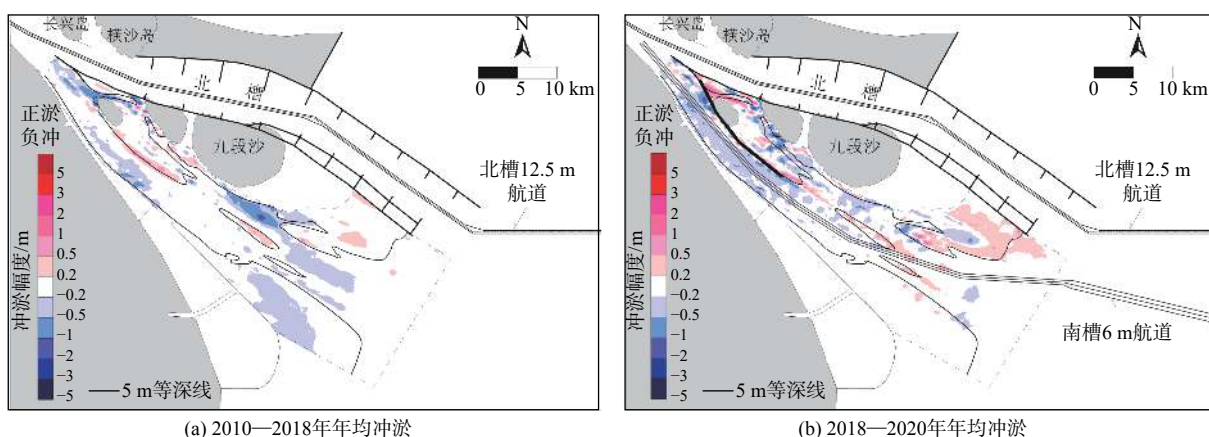


图7 2010—2020年南槽区域河床冲淤分布

Fig.7 Distribution of bed erosion and siltation in the South Passage from 2010 to 2020

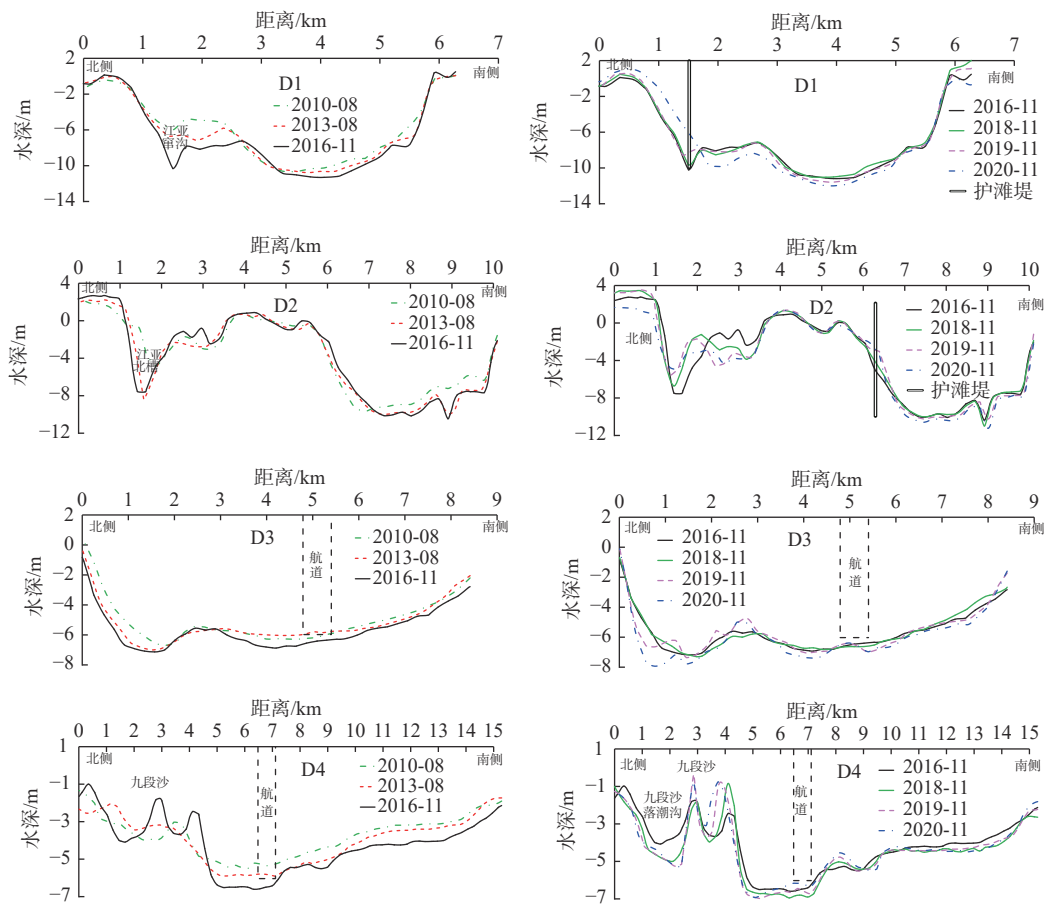


图8 南槽横断面水深变化

Fig.8 Variation of water depth in the section of the South Passage

D1断面位于南槽主槽上段,南北槽分流堤附近。从该断面形态显示,2010—2016年南槽主槽总体冲刷,幅度为1~2 m,江亚南沙呈大幅度冲刷,冲刷幅度>4 m,2016年江亚南沙沟形成;2016年以后南槽主槽形态稳定,护滩堤北侧江亚南沙淤积,淤积幅度>2 m。

D2断面位于江亚南沙中部和护滩堤中下段。从该断面水深看,2010—2016年南槽主槽呈现为不断冲深的形势,主槽北侧江亚南沙淤积,而江亚北槽呈发展态势;2016年以后南槽主槽形态稳定,江亚南沙变化不明显,其北侧冲刷,冲刷的泥沙导致江亚北槽略有淤积、萎缩。

D3断面位于南槽中段和江亚南沙沙尾附近。2010—2013年,该断面航道南侧为冲刷,航道至江亚南沙沙尾为淤积,再向北至江亚北槽附近又有所冲深;2013—2016年,除了江亚南沙沙尾略有淤积外,全断面总体冲刷;2016年以后江亚南沙沙尾下延续淤积,主槽形态总体稳定,总体以冲刷为主,南槽航道所在位置水深>6 m。

D4断面位于南槽下段。2010—2013年,该断

面南槽主槽总体冲刷,九段沙南沿有所冲刷,九段沙沙体有所淤积,落潮甬沟初步形成;2013—2016年,南槽主槽仍保持总体冲刷加深趋势,九段沙落潮甬沟继续发展,南沿淤积,航道水深逐渐>6 m;2016年以后,九段沙落潮沟继续冲刷发展至目前基本稳定,主槽断面形态稳定,航道水深>6 m,航道南侧5 m沙包呈发育态势。

总体而言,从断面水深变化过程看,江亚甬沟由冲刷逐渐变为淤积,江亚南沙总体有所淤高,江亚北槽冲刷北移;南槽断面主槽形态总体稳定,中上段呈冲刷趋势;航道所在区域在自然调整和疏浚工程综合影响下逐渐加深。

2.3.2 河道纵断面变化

图9为2010年8月—2021年8月沿航道走向的南槽纵向水深变化。2010年南槽存在约20 km水深<6 m的区段,俗称“拦门沙”(图9a)。随着流域来沙的减少和工程自适应过程,南槽上段不断呈冲刷的趋势,“拦门沙”逐渐被削平,断面形态由“ $\cap$ ”变为“ M ”(图9b)。在南槽一期工程实施前夕,<6 m水深的区段缩短至约8 km(图9b)。

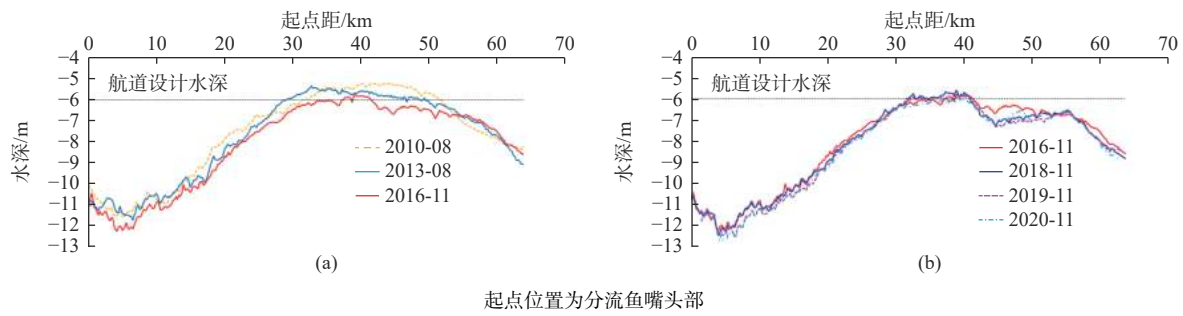


图9 南槽纵断面水深变化

Fig.9 Variation of water depth in longitudinal section of the South Passage

2019 年 11 月南槽航道一期工程达到 6 m 设计水深, 目前水深总体保持在约 6.6 m, 航道水深总体良好, 满足航道设计通航要求。

2.4 6 m 以深的河槽容积变化

图 10 为 2016—2020 年南槽 6 m 以深区域形态变化, 2016—2018 年南槽航道所在的拦门沙区段水深不足 6 m, 随着 2019 年 11 月 6 m 航道的施工, 6 m 水深中断区段上下贯通, 一直保持至今。从河槽面积看(图 11), 工程前, 6 m 以深河槽面积约 $2.22 \times 10^8 \text{ m}^2$, 工程后, 河槽面积总体有所扩大, 2020 年 11 月为 $2.43 \times 10^8 \text{ m}^2$; 6 m 以深河槽容积也有明

显增大, 由工程前的约 $3.73 \times 10^8 \text{ m}^3$ 增大到 2020 年 11 月的 $4.33 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。南槽 6 m 以深区域保持较好的稳定性, 为航道通航提供了保障。

3 讨论

3.1 南槽一期工程的影响

2018—2020 年期间实施的南槽一期工程对南槽和江亚南沙的地形变化起到了重要影响。一方面是护滩堤工程实施对江亚南沙河势的影响, 另一

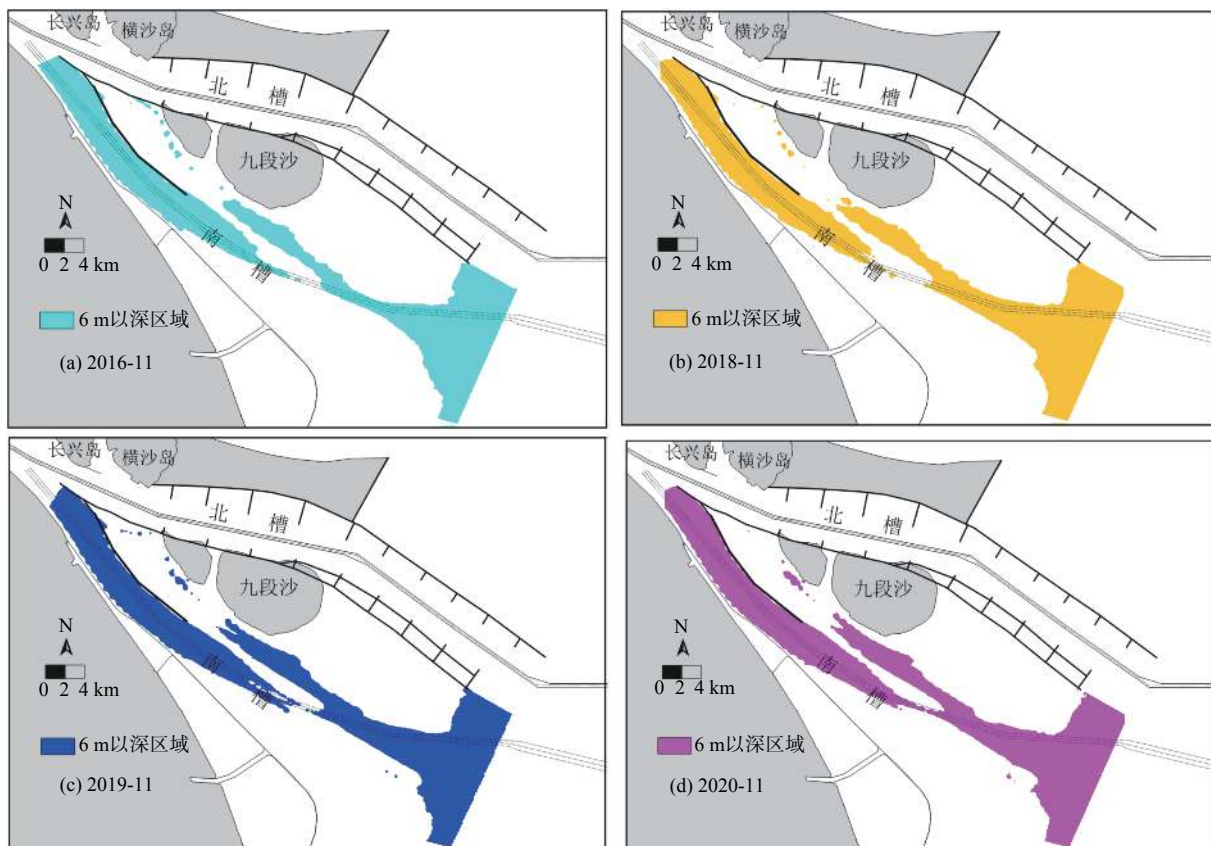


图 10 2016—2020 年南槽 6 m 以深区域形态变化

Fig.10 Morphological changes of the region in water depth greater than 6 m from 2016 to 2020



图11 2016—2020年南槽6 m以深河槽面积变化

Fig.11 Area change of the region in water depth greater than 6 m from 2016 to 2020

方面是航道工程对南槽主槽的影响。

由前述内容看出,护滩堤工程实施以来,江亚南沙附近冲刷发展的河势变化得到了明显的遏制,主要表现在:①江亚南沙2 m、5 m等深线总体稳定,等深线包络面积稳定(图12),其冲刷下延趋势减弱;②甬沟水域2 m等深线宽度缩窄,宽度由2018年的1100 m缩至2020年11月的约600 m;③江亚南沙头部甬沟水域由冲刷环境转化为淤积环境,2018—2020年淤积幅度>2 m(图7b);④对南槽中下段没有明显影响。

南槽一期工程——航道基建疏浚工程于2019年11月12日开工,基建期水深监测资料显示,沿程疏浚单元水深总体呈“马鞍型”分布(图9),在工程开工前航道所在区域S2—S7位置不能满足航道6.0 m水深的要求,且最浅点在S5、S6附近,水深为5.77 m。随着工程的推进,水深逐渐增深,至2020年3月10日疏浚段水深已达到6.21 m,如期实现了南槽6 m航道的贯通。基建疏浚施工情况总体良好,全部疏浚单元累计船方量和回淤量总体在可控、可接受范围。从南槽航道回淤特征、航道回淤物和滩面河床组成及江亚南沙沙尾5 m等深线变化等方面分析,南槽6 m航道主要回淤段与江亚南沙沙尾底沙输移的影响有较大关联,且以底沙淤积为主^[36]。

上述内容已表明护滩堤工程对南槽中下段没

有明显影响,因此,对南槽6 m航道疏浚段也没有明显影响,事实也是如此。南槽6 m航道试运行以来1年的回淤资料显示,2020年4月—2021年3月累计淤积量为580万m³,与前期工程可行性研究报告^[32]预测的664万m³回淤量基本一致;试运行第2年(2021年4—10月)和第1年(2020年4—10月)同期回淤对比,S5—S7单元的回淤峰值有所下降,且回淤总量也有所减小(图13、14)。

综上,南槽一期工程护滩堤工程对控制江亚南沙河势与遏制江亚南沙局部不稳定河势发展起到了重要作用,有利于稳定南槽上段航道北侧边界,对南槽6 m航道回淤亦无不利影响,达到了工程预期的治理效果。

3.2 南汇东滩滩涂整治工程的影响

1994—2009年,南汇东滩实施了不同阶段促淤圈围工程,在工程实施期间,5 m浅滩呈现冲刷或缓慢淤积的过程,工程结束后,由于南汇边滩附近海域存在水沙环流^[13-15,37],滩地又逐渐恢复淤积状态。其中,2003—2010年南汇东滩淤涨速度最快,5 m等深线向外发展了约2.8 km,淤涨速度达350 m/a。2013年以后,实施了新一轮的南汇东滩滩涂整治工程,进一步导致南槽河槽的缩窄。据研究^[16],受该整治工程的影响,南槽涨、落潮流速均有1%~10%的增加,引起河槽冲刷,等深线向岸移动;对九段沙的影响主要集中在九段沙南沿。南汇东滩整治工程有利于滩涂和岸线的稳定,随着工程后影响的结束、水流调整的完成和河槽调整的自适应性,目前,南汇东滩总体处于微冲微淤的动态平衡状态。

3.3 其他因素(流域减沙影响)

长江口是一个丰水多沙的河口,近些年来受人类活动(流域水土保持和水库大坝工程等)影响,在径流总体变化不大的情况下,输沙量明显减小

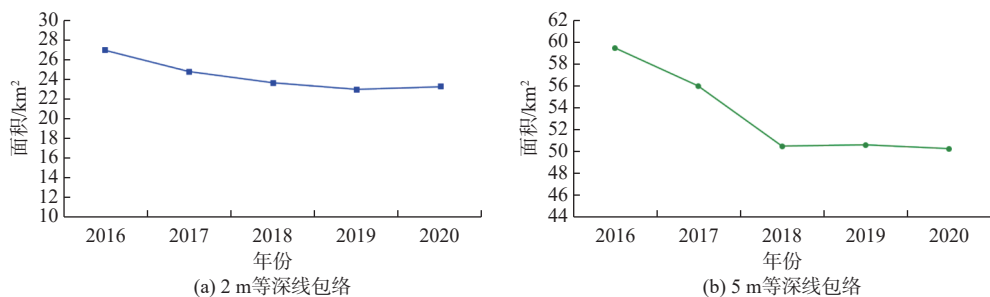


图12 江亚南沙2 m、5 m等深线包络面积变化

Fig.12 Variation of enveloped area of 2 m and 5 m isobaths in the Jiangyanan Shoal

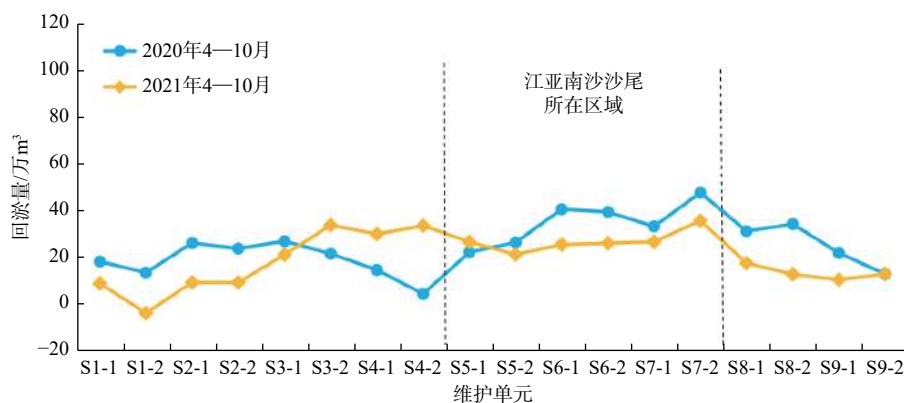


图 13 南槽一期 6 m 航道试运行期沿程回淤量变化

Fig.13 Variation of siltation volume along the 6-m channel in South Passage during the trial operation period

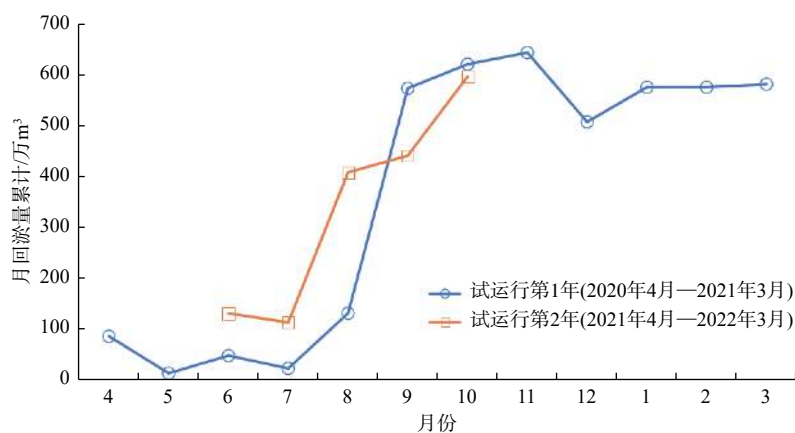


图 14 南槽一期 6 m 航道试运行期月回淤量累计变化

Fig.14 Monthly siltation cumulative changes of the 6-m channel in the South Passage during the trial operation period

(图 15)。统计表明,1986—2002 年多年平均输沙量为 3.4 亿 t,2003 年三峡工程蓄水运用后,流域来沙量进一步下降,2004—2014 年大通站年均输沙量为 1.35 亿 t^[33,38],减少了 60%。长江流域来沙的锐减,对长江口河势变化也产生了深远影响,一方面表现

在主要河槽含沙量的变化,如南支、南港和北港河道中上段含沙量减少 40%~60%,拦门沙河段水体含沙量也有所下降,其中,北槽、南槽 2003—2007 年洪季水体含沙量普遍下降约 20%^[38-40];另一方面表现在河口总体冲淤格局的变化,由淤积环境向冲

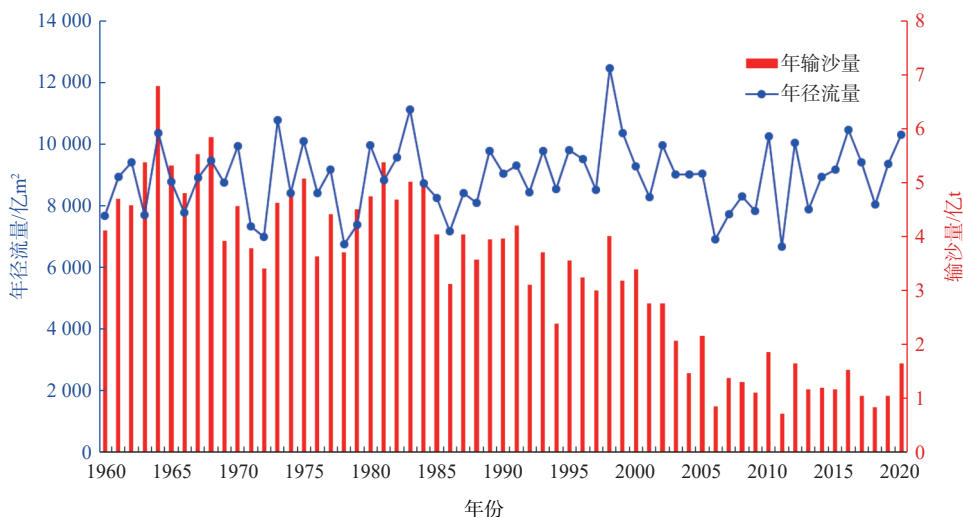


图 15 1960—2020 年大通站年均径流量和输沙量变化

Fig.15 Discharge of water and sediment in the Datong station during 1960—2020

刷环境转化,并在河口新水沙环境下缓慢地适应性自动调整,出现河槽断面扩大,主槽平均水深增深的趋势^[30,32-35],尤以南支、南港、北港中上游河段和河口口门外邻近海域冲刷最为突出,其中,长江口水下三角洲前缘(-10~-20 m)1997—2016年的累计冲刷量为16.8亿m³,累计冲刷深度达2 m^[33]。因此,近期南槽进口段或上段的大幅度冲刷,除了与涉水工程边界固定引起的水流调整有关外,应与流域减沙有着密切的关系。口外区域的大幅度冲刷则主要与流域泥沙来源补给减少有关。

4 结论

(1)2010—2018年,南槽主槽整体冲刷,江亚南沙头部窄沟形成,不断冲刷发育,沙尾下延;2018年以后,南槽主槽冲刷形势未变,江亚南沙头部窄沟淤积,由原来的冲刷环境转化为淤积环境,沙尾下延渐缓,其他区域冲淤形势基本未变,口门外持续冲刷。

(2)南槽断面主槽形态总体稳定,中上段呈冲刷趋势;航道区域在自然调整和疏浚工程综合影响下,呈逐渐加深的过程,“拦门沙”逐渐被削平,6 m以深河槽容积有所增加。目前航道水深总体良好,保持在6.6 m左右,满足航道设计通航要求,且保持较好的稳定性。

(3)南槽一期工程——护滩堤工程有效控制了江亚南沙河势和遏制了江亚南沙局部冲刷发展的趋势,有利于稳定南槽航道的北侧边界,且对南槽中下段和南槽6 m航道回淤无不利影响,达到了工程预期的治理效果。近期南槽河势变化,除了与涉水工程边界固定引起的水流调整有关外,与流域减沙有着密切的关系,是流域来水来沙和河口自然、人类活动影响的综合表现。

参考文献:

- [1] 陈吉余,沈焕庭,恽才兴,等.长江河口动力过程和地貌演变[M].上海:上海科学技术出版社,1988.
- [2] 赵德招,张俊勇.长江口南槽航道进一步开发的基本思路及框架[J].水运工程,2016(3): 98-94.
- [3] 金鏐.长江口深水航道治理前期研究成果[J].港口工程,1998(2): 5-12.
- [4] 窦国仁.长江口深水航道泥沙回淤问题的分析[J].水运工程,1999(10): 36-39.
- [5] 范期锦.长江口深水航道治理工程的创新[J].中国工程科学,2004,6(12): 13-26.
- [6] 赵捷,何青,虞志英,等.长江口北槽深水航道回淤泥沙来源分析[J].泥沙研究,2014,39(5): 18-25.
- [7] 左书华,李松喆,韩志远,等.长江口北槽河槽地形变化及深水航道回淤特征分析[J].水道港口,2015,36(1): 1-7.
- [8] 孙继涛,张庆河,严冰,等.盐度层化对长江口水动力的影响[J].水道港口,2015,36(2): 93-104.
- [9] 应铭,季岚,周海.长江口北槽12.5 m深水航道回淤的物理过程[J].水运工程,2017(11): 77-86.
- [10] 沈金山,朱珍珠,张新琴.长江口南槽拦门沙的成因和演变[J].海洋与湖沼,1983,14(6): 582-590.
- [11] 杨世伦,贺松林,谢文辉.长江口九段沙的形成演变及其与南北槽发育的关系[J].海洋工程,1998,16(4): 56-66.
- [12] 李九发,万新宁,应铭,等.长江河口九段沙沙洲形成和演变过程研究[J].泥沙研究,2006,31(6): 44-49.
- [13] 戴志军,陈吉余,程和琴,等.南汇边滩的沉积特征和沉积物输运趋势[J].长江流域资源与环境,2005,14(6): 735-739.
- [14] 左书华,时连强.南汇嘴潮流滩沉积物粒度特征研究[J].水道港口,2008,29(2): 18-23.
- [15] 左书华,李蓓,杨华.长江口南汇嘴海域表层悬浮泥沙分布和运动遥感分析[J].水道港口,2010,31(5): 88-93.
- [16] 左书华,李蓓,张征,等.长江口南汇嘴潮流滩围垦工程潮流数学模型研究[J].中国港湾建设,2017,37(7): 8-12.
- [17] CAO D F, SHEN Y M, SU M R, et al. Numerical simulation of hydrodynamic environment effects of the reclamation project of Nanhui tidal flat in Yangtze Estuary[J]. Journal of Hydrodynamics, 2019, 31(3): 603-613.
- [18] XIE X P, WANG Z Y, MELCHING C S. Formation and evolution of the Jiuduansha Shoal over the past 50 years[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 135(9): 741-754.
- [19] 谢华亮,戴志军,李为华,等.长江口南北槽分流口动力地貌过程研究[J].应用海洋学报,2014,33(2): 4-12.
- [20] 林益帆,戴志军,李为华,等.长江口南北槽分流口洪季水沙变化过程研究[J].海洋学报,2015,37(3): 116-127.
- [21] 戴志军,韩震,恽才兴.长江口南槽沉积物特征和运移趋势[J].海洋湖沼通报,2005,7(2): 72-78.
- [22] 唐建华,何青,刘玮玮,等.长江口南槽沉积物粒度的分形特性分析[J].泥沙研究,2007,32(3): 50-56.
- [23] 郭小斌,李九发,李占海,等.长江河口南槽近期滩槽水沙输移特性分析[J].人民长江,2012,43(11): 1-5.
- [24] ZHANG L F, YANG Z S, ZHANG F, et al. Longitudinal residual circulation in the South Passage of Yangtze Estuary: Combined influences from runoff, tide and bathymetry[J]. Science China Earth Sciences, 2021, 64(12): 2129-2143.
- [25] 谢华亮,戴志军,左书华,等.1959—2013年长江河口南槽动力地貌演变过程[J].海洋工程,2015,33(5): 51-59.
- [26] WEI W, DAI Z J, MEI X F, et al. Shoal morphodynamics of the Changjiang (Yangtze) Estuary: Influences from river damming, estuarine hydraulic engineering and reclamation projects[J]. Marine Geology, 2017, 386: 32-43.
- [27] 朱治,张学军,沈雨生.长江口南槽航道透水梯形结构整治建筑物水动力特性研究[J].水道港口,2020,41(4): 380-387.
- [28] 李保,付桂,杜亚南.长江口近期来沙量变化及其对河势的影响分析[J].水运工程,2012(7): 129-134.
- [29] 窦希萍,缴健,储廉,等.长江口水沙变化与趋势预测[J].海洋工程,2020,38(4): 2-10.

- [30] 张晓鹤, 李九发, 朱文武, 等. 近期长江河口冲淤演变过程研究[J]. 海洋学报, 2015, 37(3): 134-143.
- [31] 赵德招, 刘杰, 张俊勇, 等. 长江口河势近 15 年变化特征及其对河口治理的启示[J]. 长江科学院院报, 2014, 31(7): 1-6, 20.
- [32] 中交上海中交上海航道勘察设计研究院有限公司. 长江口南槽航道治理一期工程工程可行性研究报告[R]. 上海: 中交上海中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 2018.
- [33] 刘杰, 程海峰, 韩露, 等. 流域减沙对长江口典型河槽及邻近海域演变的影响[J]. 水科学进展, 2017, 28(2): 249-256.
- [34] 李九发, 蒋陈娟, 刘启贞, 等. 长江口水沙输移与河床演变[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- [35] 恽才兴. 图说长江河口演变[M]. 北京: 海洋出版社, 2010.
- [36] 交通运输部天津水运工程科学研究所. 长江口南槽航道治理一期工程实施效果评价研究报告[R]. 天津: 交通运输部天津水运工程科学研究所, 2021.
- [37] 刘红, 应铭, 张华, 等. 工程条件下长江口南槽自适应过程[C]//第十五届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集, 北京: 海洋出版社, 2011.
- [38] 左书华, 杨春松, 付桂, 等. 长江口入海水沙通量变化及其影响分析[J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(11): 56-64.
- [39] DAI Z J, CHU A, LI W H, et al. Has suspended sediment concentration near the mouth bar of the Yangtze (Changjiang) Estuary been declining in recent years? [J]. Journal of Coastal Research, 2013, 29(4): 809-818.
- [40] YANG Y P, LI Y T, SUN Z H, et al. Suspended sediment load in the turbidity maximum zone at the Yangtze River Estuary: The trends and causes [J]. Journal of Geographical Sciences, 2014, 24(1): 129-142.

Evolution in river regime in the South Passage of the Yangtze Estuary under new situation

ZUO Shuhua^{1,2,3}, ZHAO Dezha^{4*}, XIE Hualiang^{1,3}, ZHAO Zhangyi^{1,2,3}, YANG Hua^{1,2,3}

(1 Tianjin Institute of Water Transport Engineering, Ministry of Transport, Tianjin 300456, China; 2 National Engineering Research Center of Port Hydraulic Construction Technology, Tianjin 300456, China; 3 Key Laboratory of Engineering Sediment Transport, Tianjin 300456, China;

4 Changjiang Estuary Waterway Administration, Ministry of Transport, Shanghai 200037, China)

Abstract: With the sharp decrease of sediment flow in the Yangtze River basin, the construction of estuary foraging projects, the strengthening of ecological environmental protection, and the efficient utilization of navigation environment, the Yangtze River estuary is facing a new round of adjustment. Taking the evolution of the South Passage of the Yangtze River Estuary as the research object, the recent river regime changes of the South Passage were studied based on the underwater topography data and the channel water depth data of the South Passage in the past 10 years, and the effects of the first phase of the South Passage regulation project were discussed. Results show that the main channel of the South Passage presented a scouring trend as a whole from 2010 to 2018, and the tidal creek at the head of Jiangyanan Shoal developed and the tail of Jiangyanan Shoal were scoured down. The tidal creek at the head of Jiangyanan Shoal has changed from scour to siltation environment from 2018 to the present, while the scour and siltation situation in other areas remains unchanged. The shape of the main channel in the South Passage section is generally stable. Under the background of the overall erosion of the main channel, the "barrier gate sand" was gradually flattened. Coupled with the role of the first phase of the South Passage regulation project, the volume of the area in the depth greater than 6 m has been significantly expanded and maintained good stability. The recent change of the South Passage regime is the comprehensive outcome of the influences of water and sediment inflows, and estuarine natural and human activities. The first phase of South Passage regulation project has played an important role in the recent topographic changes in Jiangyanan Shoal. The project effectively controlled the river regime of Jiangyanan Shoal and restrayed the local scour development trend of Jiangyanan Shoal, which is conducive to stabilizing the north boundary of the South Passage channel.

Key words: Changjiang Estuary; South Passage; river regime evolution; the first phase of South Passage regulation project; Jiangyanan Shoal