

1998—2023年长江口南槽河床演变特征及其影响因素

刘汝兰, 李俊花, 程海峰, 顾峰峰, 王珍珍, 韩露

Bed evolution characteristics and influencing factors of the South Passage of the Yangtze Estuary (1998–2023)

LIU Rulan, LI Junhua, CHENG Haifeng, GU Fengfeng, WANG Zhenzhen, HAN Lu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20240104002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

1958年以来长江口南、北支河段河床演变及影响因素研究

Riverbed evolution and its influencing factors in the South Branch and the North Branch of the Yangtze River estuary since 1958

水利水运工程学报. 2021(2): 27 <https://doi.org/10.12170/20210105003>

流域水沙变化和人类活动对长江口河槽演变的影响

New trends of river channel evolution of the Yangtze River estuary under the influences of inflow and sediment variations and human activities

水利水运工程学报. 2021(2): 1 <https://doi.org/10.12170/20200313001>

长江宜昌—监利段河床冲淤对宜昌站水沙变化的响应

Response of riverbed evolution of Yichang–Jianli reach of the Yangtze River to water and sediment conditions of Yichang Station

水利水运工程学报. 2020(4): 48 <https://doi.org/10.12170/2019062004>

地形变异条件下长江口南港河段水动力变化

Hydrodynamic changes in south channel of Yangtze River estuary under topographic variation conditions

水利水运工程学报. 2020(1): 51 <https://doi.org/10.12170/20181223001>

宁夏清水河流域水沙变化特点分析

Analysis on the characteristics of flow and sediment variation in Qingshuihe River basin of Ningxia

水利水运工程学报. 2020(4): 57 <https://doi.org/10.12170/20200213002>

长江南京段河床与洲滩平面演变特征遥感分析

Morphological evolution of river and sandbars based on satellite remote sensing images of the Nanjing reach of the Yangtze River

水利水运工程学报. 2023(4): 34 <https://doi.org/10.12170/20221130006>



扫码进入官网，阅读更多精彩文章



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI:10.12170/20240104002

刘汝兰, 李俊花, 程海峰, 等. 1998—2023年长江口南槽河床演变特征及其影响因素[J]. 水利水运工程学报, 2025(1): 37-46. (LIU Rulan, LI Junhua, CHENG Haifeng, et al. Bed evolution characteristics and influencing factors of the South Passage of the Yangtze Estuary (1998—2023)[J]. Hydro-Science and Engineering, 2025(1): 37-46. (in Chinese))

1998—2023年长江口南槽河床演变特征及其影响因素

刘汝兰¹, 李俊花¹, 程海峰², 顾峰峰², 王珍珍², 韩露²

(1. 上海海事大学海洋科学与工程学院, 上海 201306; 2. 上海河口海岸科学研究中心 河口海岸交通运输行业重点实验室, 上海 201201)

摘要: 南槽作为长江口的入海汊道之一, 其河床演变动态受到广泛关注。基于长江口南槽 1998 年以来长序列水下地形、水沙观测数据和大型涉水工程实施情况, 分析南槽近期河床冲淤变化过程, 从流域减沙和工程建设两方面探讨河床演变特征及影响过程。结果表明: 近 25 年, 南槽河床演变总体呈现“缓慢冲刷-趋于平衡-加速冲刷”的三阶段变化特征, 其中第一阶段的“缓慢冲刷”主要受工程建设影响, 流域减沙则是第三阶段“加速冲刷”的主要因素之一。未来, 在稳定河床边界和较低含沙量条件下, 南槽短期内仍将延续冲刷态势, 直至趋于新的平衡。

关键词: 南槽; 河床演变; 水沙变化; 涉水工程

中图分类号: TV147

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2025)01-0037-10

随着现代航运业的发展, 大型河口河床演变研究成为近年来的研究热点之一。Perillo 等^[1]、Traini 等^[2]、Wang 等^[3] 分别对 Quequen Grande 河、Vilaine 河及黄河的河口地貌演变特征进行了分析, 发现与自然条件变化相比, 人为干预对河床演变的影响更为明显。在长江口复杂水沙条件及不稳定边界条件下, 大量人类活动使长江口河床演变状态从 1998 年以前的“自然冲淤”状态向“自然-人工共同控制”转变^[4-7]。

南槽作为长江口主要入海通道之一, 其河床演变动态受到广泛关注。赵庆英等^[8-11] 利用实测地形与水沙资料分析探讨了流域水沙变化对南槽河床演变过程的影响; 杜景龙等^[12-15] 通过对比相关工程建设前后的滩槽变化, 探讨涉水工程对南槽河床动态变化的影响; 戴志军等^[16-18] 分别从沉积物运移和悬沙输运动力机制等角度, 以南槽为例分析探讨大型河口的冲淤规律及其动力泥沙机制。其他学者对南槽某一时段或局部区域的地貌演变及变化机制也开展了诸多研究^[19-23]。

前人对南槽河床演变的研究主要关注水沙条件变化、单项涉水工程、气候条件中部分要素的影响, 而对南槽区域在长时间序列下河床演变特征及影响因素分析的研究仍有待深入。受自然环境变化与人类活动的共同作用, 南槽的冲淤规律可能会出现截然不同的变化, 侧重某一时段、单项工程或某一自然因素变化对南槽影响进行研究难以全面了解南槽近期的河床演变情况。本文综合流域水沙与河床边界条件变化情况, 对南槽近期河床演变特征和影响因素进行分析探讨, 研究结果将进一步加深对大型河口演变规律的认识, 同时对河口治理具有参考价值。

1 研究区域

南槽是长江 4 条入海通道之一, 由主槽、江亚北槽和江亚南沙、九段沙、南汇东滩组成, 滩槽格局较为

收稿日期: 2024-01-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U2040204)

作者简介: 刘汝兰(1998—), 女, 广东东莞人, 硕士研究生, 主要从事港口、近岸与海洋工程水动力学方向研究。

E-mail: liu18934138672@163.com 通信作者: 程海峰(E-mail: ecsr_c hf@163.com)

复杂(图 1)。南槽水域潮流以往复流为主,其中上段以落潮流作用为主、下段涨落潮流作用相当^[24];表层沉积物主要以砂质粉砂为主,沿河槽纵向呈“粗-细-粗”的分布格局^[10]。

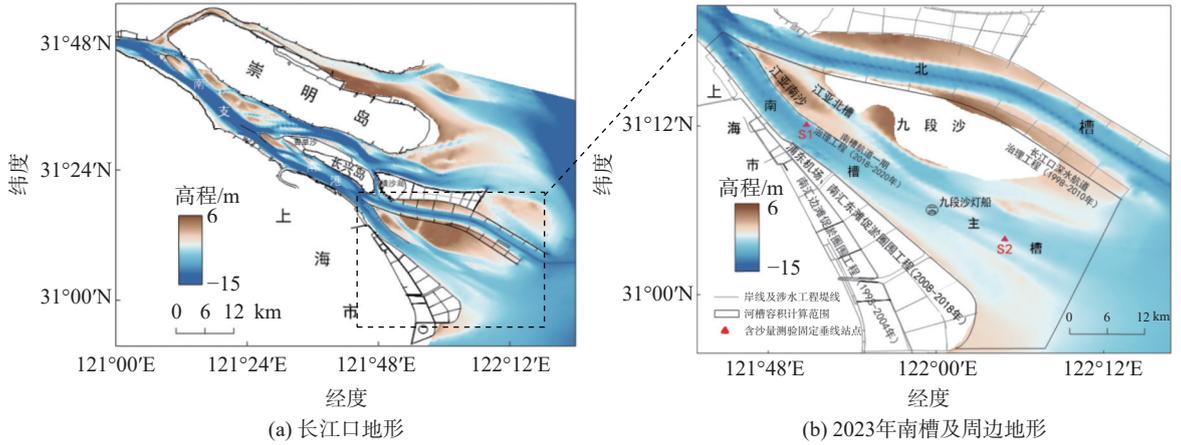


图 1 研究范围
Fig. 1 Study area

2 资料与方法

为分析研究南槽河段及其河槽、沙体的地貌演变情况,收集整理了 1998—2023 年(1998 年、2002 年及 2007—2023 年逐年)长江口航道管理局组织测量的水下地形图,比例尺为 1:25 000,水深参考基准面为理论最低潮面,测量方法为船载单波速测深仪测深法,误差控制在 ± 10 cm 以内。利用三维可视化软件 Surfer 进行图形数字化、构建数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)及冲淤分析。通过不同等深线范围计算出河槽容积变化,表征河槽整体冲淤过程;根据不同等深线包络面积变化,体现沙体冲淤情况;利用等深线变化表征河槽、沙体平面位置变化。

收集 1998—2022 年间大通站年径流量与年输沙量数据,2002—2023 年南槽区域垂线站点 S1(2002—2023 年)、S2(2012—2022 年)逐年洪季大潮期含沙量测验数据(站点位置见图 1(b)),其中 S1 站点位于南槽上段,落潮优势流占 70%~80%,S2 站点位于拦门沙段,落潮优势流占 50%~60%,可代表南槽不同河段的水文泥沙特征;长序列南槽分流比资料及 1998—2023 年南槽区域涉水工程实施情况等资料,综合自然条件变化和人类活动情况,探讨近 25 年来南槽河床演变特征及其主要影响因素。

3 河床演变特征分析

3.1 总体变化

1998—2023 年,南槽整体表现为上段河槽冲刷、下段河槽冲淤交替,沙体总体淤积、局部冲刷(图 2)。其中,南槽主槽上段冲刷,5 m 河槽展宽;下段九段沙灯船附近区域淤积,其下游总体微冲。江亚北槽南淤北冲、整体北靠;江亚南沙沙体淤涨、沙尾下延;九段沙总体淤积、南沿明显冲刷北退;南汇东滩冲淤交替、近岸微冲。从南槽 0 m、5 m 以深河槽容积统计结果(图 3)可以看出,1998—2023 年南槽河槽容积总体呈持续增加趋势,其中 2007 年与 2015 年是容积变化的转折点,1998—2007 年河槽容积缓慢增加,2007—2015 年间有所波动但总体趋于稳定,2015—2023 年河槽容积迅速增加。

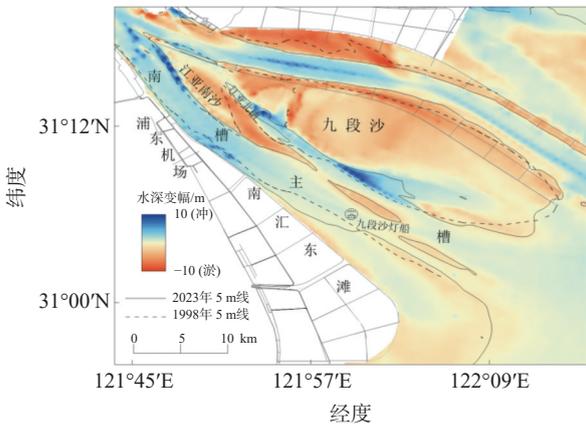


图 2 1998—2023 年南槽冲淤变化

Fig. 2 Erosion and deposition changes in the South Passage (1998—2023)

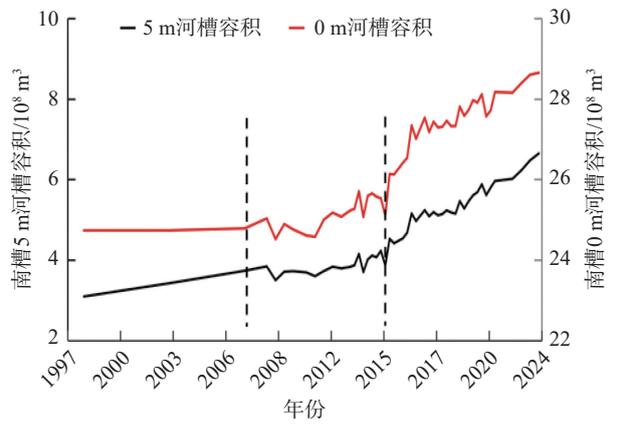


图 3 南槽 0 m、5 m 河槽容积变化

Fig. 3 Changes in the channel volume at 0 m and 5 m depths of the South Passage

3.2 河槽变化

从与河槽容积变化相对应的年均冲淤分布图可见,主槽在 1998—2007 年大致呈“上冲下淤”态势。主槽上段冲刷明显,年均冲刷幅度约为 0.3 m;主槽下段普遍淤积,年均淤积幅度约为 0.28 m,深泓线略有北偏,偏移幅度约 0.7 km(图 4(a))。2007—2015 年主槽上段微冲,年均冲刷幅度仅约 0.13 m;下段仍以淤积为主,但年均淤积幅度仅为 0.02~0.20 m,总体表现为“上段微冲、下段微淤”(图 4(b))。2015—2023 年南槽冲淤分布一改以往“上冲下淤”情况,上段明显冲深,年均冲刷 0.17~0.75 m;下段由淤转冲,年均冲刷幅度为 0.18 m。整体上,南槽表现为“整体冲刷、局部淤积”,深泓线向南侧移动约 0.6 km(图 4(c))。

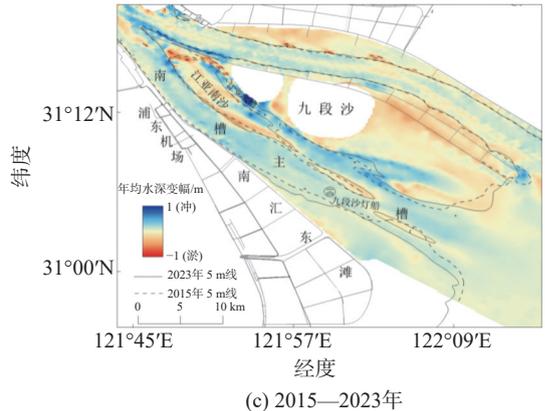
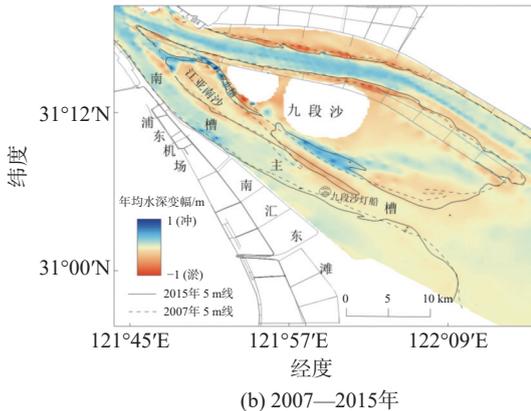
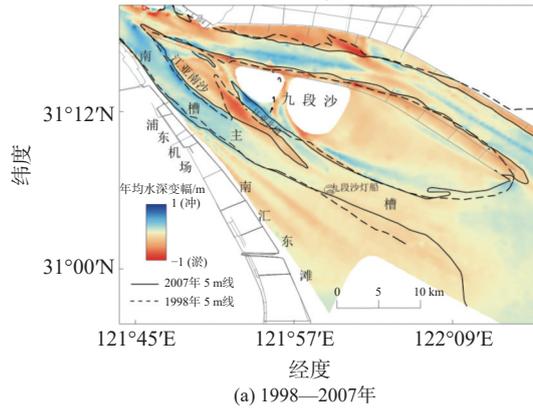


图 4 南槽 3 阶段年均冲淤变化

Fig. 4 Annual erosion and deposition changes in the South Passage's three stages

江亚北槽位于江亚南沙与九段沙两个沙体之间,其动态与相邻两个沙体变化关系密切。综合冲淤变化、深泓线变化可知,江亚南沙在 1998—2007 年间北侧淤积明显,受此影响下江亚北槽平面位置向东北方向移动,其深泓位置偏移幅度为 1.3 ~ 2.3 km,而后 5 m 河槽位置相对稳定,总体冲深发展(图 4、图 5)。

综上可知,近 25 年来,南槽主槽从“上冲下淤”向“整体冲刷、局部淤积”转换;江亚北槽总体向东北方向移动并冲深发展。

3.3 主要沙体情况

江亚南沙在 1998—2007 年 0 m 高滩向上、下游及北侧扩展,同期 5 m 低滩北扩下延,二者滩面面积增大,平均增幅分别为 0.82 和 0.77 km²/a,沙体淤积态势明显,仅沙头位置略有冲刷(图 4(a)、图 6、图 7)。2007—2017 年江亚南沙 0 m 高滩与 5 m 低滩面积整体增速较此前放缓,平均增幅仅为 0.28 和 0.19 km²/a(图 7)。2018 年以来,江亚南沙仍呈淤积态势,其中 5 m 低滩加速淤涨,平均增幅约为 1.06 km²/a。

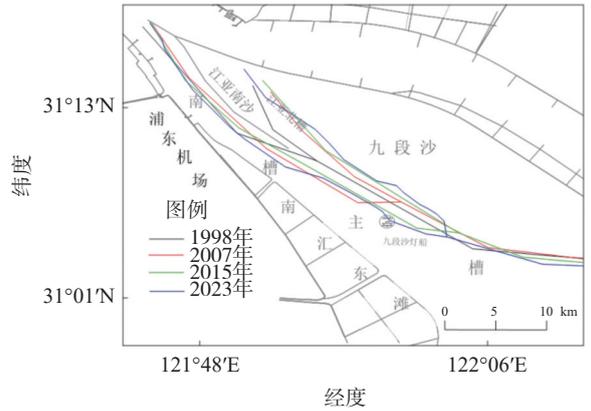


图 5 南槽深泓线变化

Fig. 5 Changes in the deep water line of the South Passage

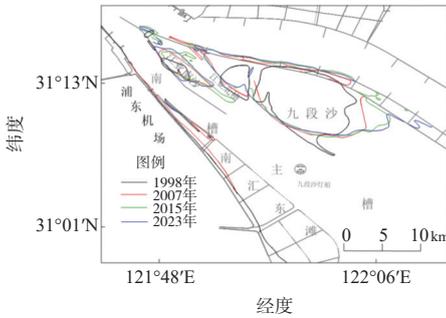


图 6 南槽 0 m 等深线变化

Fig. 6 Changes in the 0 m isobath of the South Passage

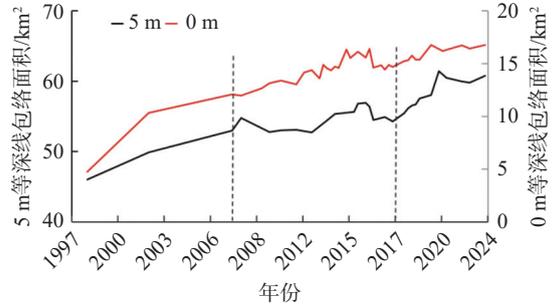


图 7 江亚南沙面积变化过程

Fig. 7 Area changes of the Jiangyan Nan sandbar

九段沙滩面近期总体呈淤积态势,1998—2015 年九段沙 0 m 高滩向北侧及上、下游扩展,滩面面积增幅达 3.6 km²/a,5 m 低滩南侧冲刷、北侧淤积(图 4(b)、图 8),滩面面积变化不大;2015—2023 年九段沙南沿普遍冲刷,0 m 高滩面积稳定增加、5 m 低滩面积则呈下降趋势,减幅约 2.3 km²/a(图 4(c)、图 8)。

从等深线包围面积变化(图 9)可知,1998—2008 年南汇边滩总体淤涨,5 m 滩面面积迅速增加,在 2008 年达到最大值,约为 140.5 km²。2008—2017 年,南汇东滩 5 m 低滩面积大幅减小,减幅约为 2.1 km²/a。2017—2023 年间 5 m 低滩面积仍有所减小但幅度放缓,减幅约为 0.7 km²/a。

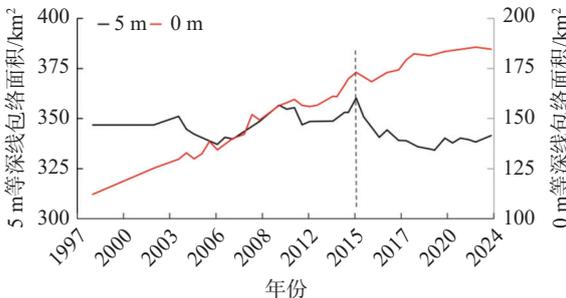


图 8 九段沙 0 m、5 m 等深线包围面积

Fig. 8 Area envelopes of the 0 m and 5 m isobaths of Jiuduansha

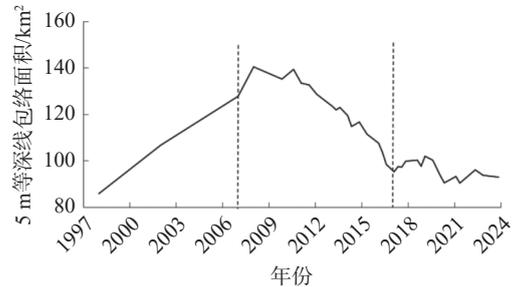


图 9 南汇东滩 5 m 等深线包围面积

Fig. 9 Area envelope of the 5 m isobath at Nanhui Dongtan

可见, 近 25 年来江亚南沙总体淤涨、短期加速淤积; 九段沙高滩稳定增长, 低滩于 2015 年后侵蚀缩小, 沙体平面位置北移并向上、下游扩展; 南汇东滩滩面面积呈先增后减的变化趋势, 变化转折点是 2008 年。

4 影响因素分析

4.1 流域来沙减少

除去 1998、1999 年大洪水异常流量数值对分析的影响, 长江大通站的年输沙量在 2000—2006 年期间下降趋势显著; 2006—2022 年下降趋势减缓, 年输沙量维持在较低的水平; 1998—2006 年和 2006—2022 年的年平均输沙量约为 2.5 亿 t 和 1.2 亿 t。大通站的年径流量在年际间存在一定的波动, 但总体没有明显减少趋势(图 10)。

流域来沙减少导致河口水体悬沙浓度稀释, 水流侵蚀能力相应增强, 从而造成冲刷侵蚀^[11]。有研究表明: 长江口水下三角洲冲淤平衡临界的大通年输沙量约为 2.7 亿 t^[24], 长江口南支以下河槽冲淤转换临界年均输沙量约为 2.5 亿 t^[22]。从南支、南港、南槽(地理位置见图 1(a))相对于 1998 年 5 m 河槽容积变化幅度对比(图 11)可见, 在年输沙量显著降低的背景下, 三峡水库运行后, 南支 5 m 河槽容积在短期内有一定增加, 2007—2013 年容积在此基础上持续加速上升, 2013 年后趋缓并逐渐稳定。南港 5 m 河槽容积在 1998—2007 年基本匀速增加, 2007—2012 年虽年际间略有波动, 但总体相对稳定, 2012—2019 年则呈明显上升趋势, 2019 年后趋于平衡状态。南槽 1998—2007 年 5 m 河槽容积稳定上升, 2007—2015 年变化相对较小, 但 2015 年后快速增加。可见, 流域减沙对长江口河势调整产生了一定影响, 且这种影响存在自上而下的传递过程, 就处于河口最大浑浊带的南槽而言, 流域减沙对河床冲淤的影响存在滞后性^[11]。

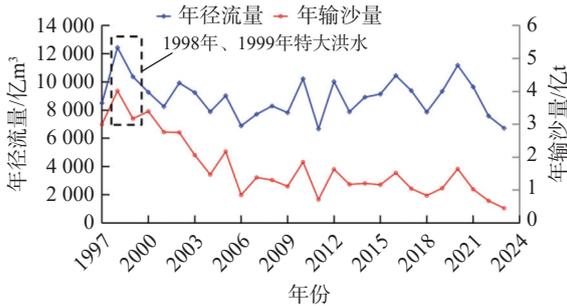


图 10 大通站年输沙量和年径流量变化

Fig. 10 Annual sediment transport and runoff volume changes at Datong station

结合南槽区域含沙量变化情况, 南槽 S1、S2 测点(测点位置见图 1(b))含沙量已呈减少态势(图 12)。其中, 2002—2006 年, 含沙量波动较大, 年平均含沙量约为 1.38 kg/m³。2006—2015 年, 含沙量波动下降, 年平均含沙量约为 1.13 kg/m³, 与 2002—2006 年相比减少约 18.2%。2015—2023 年, 南槽含沙量总体维持在较低水平, 年平均含沙量仅约 0.43 kg/m³, 较 2006—2015 年减少约 61.9%。受流域减沙及河口最大浑浊带滞后特性^[11]影响, 南槽水体含沙量 2015 年后持续偏低, 与此相应, 南槽河床冲淤变化呈现出 2015 年之后整体冲刷加剧的特征。

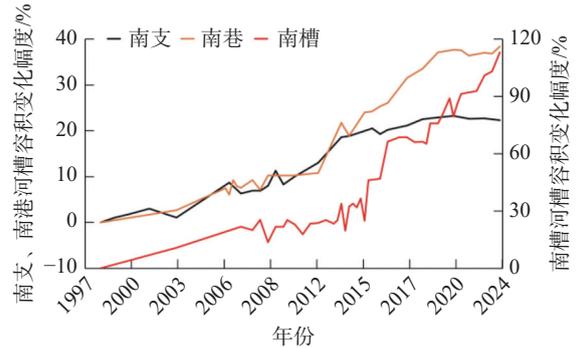


图 11 南支、南港、南槽 5 m 河槽容积相对 1998 年变幅
Fig. 11 Changes in the relative channel volume at 5 m depth for the South Branch, South Channel, and South Passage compared to 1998

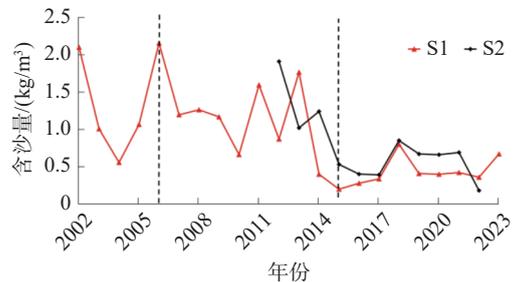


图 12 固定站点含沙量变化

Fig. 12 Changes in sediment concentration at fixed sampling stations

4.2 大型涉水工程

1998年以来,南槽周边实施的大型涉水工程有长江口深水航道治理工程(1998—2010年)、南汇东滩促淤圈围工程(2013—2017年)、南槽航道治理一期工程(2018—2020年),工程布置见图1(b)。

4.2.1 长江口深水航道治理工程

长江口深水航道治理工程在南港至北槽河段实施,工程分三期进行,其中一、二期工程(1998—2006年)在北槽实施双导堤及丁坝群工程(图1(b));三期工程包括航道疏浚和局部丁坝加长,工程规模较小。从南槽分流比变化可以看出,在长江口深水航道治理一、二期工程实施期间(1998—2006年),南槽落潮分流比明显增加,一、二期工程竣工后南北槽分流比例相对稳定。南、北槽分流格局从工程前的“四六开”变为工程后的“六四开”(图13)。结合南槽冲淤变化过程可见,2007年前,长江口深水航道治理一、二期工程的实施改变了南北槽分流格局,南槽分流比增强、上段显著冲刷;2007年后,大规模工程建设基本结束,南槽上段冲刷减缓,南槽整体趋于冲淤平衡。

结合工程阶段冲淤分布与河槽容积变化来看,一、二期工程实施期间,南槽分流增加致使主槽上段冲刷^[25],5 m以深河槽容积增加(图14、图3)。结合工程实施区域来看,南导堤封堵江亚北槽入口和九段沙滩面窄沟,减弱了九段沙漫滩水流冲刷,使得九段沙头部与北侧位置淤积明显;分流口鱼嘴工程的实施使亚南沙沙头呈淤积状态。三期工程实施后,南槽冲淤变化不大,5 m河槽容积趋于稳定。

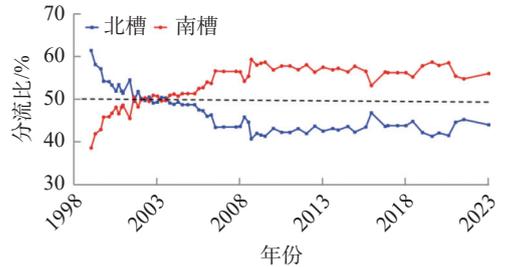
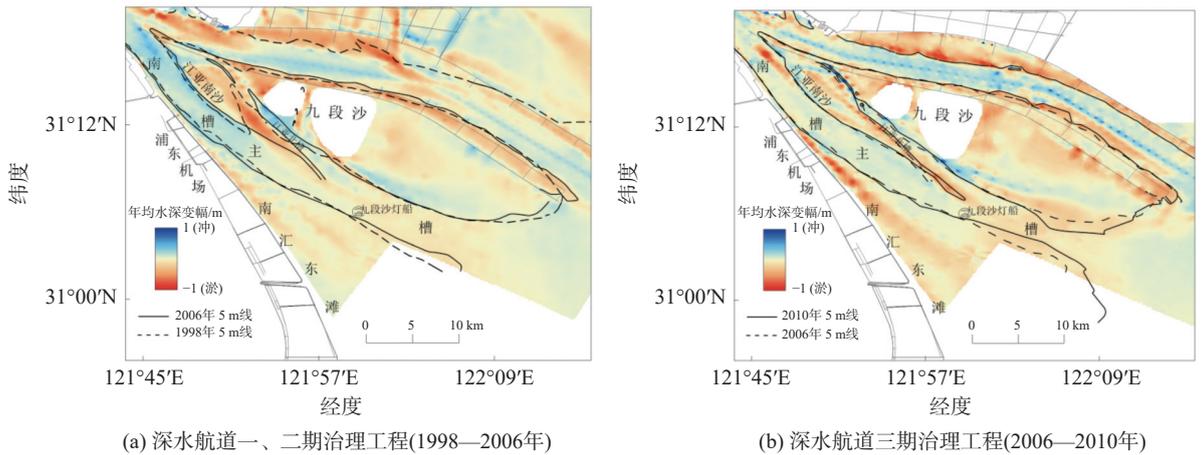


图13 南、北槽落潮分流比变化

Fig. 13 Changes in the tidal diverting ratio between the South and North Passages



(a) 深水航道一、二期治理工程(1998—2006年)

(b) 深水航道三期治理工程(2006—2010年)

图14 深水航道治理工程不同阶段年均冲淤分布

Fig. 14 Distribution of annual erosion and deposition in different phases of deepwater navigation channel improvement

4.2.2 浦东机场外侧、南汇东滩促淤圈围工程 浦东机场外侧、南汇东滩促淤圈围工程位于南槽岸。工程实施前,南汇东滩淤积明显,5 m河槽束窄;九段沙中部南沿微冲。工程实施后,南汇东滩促淤堤线外侧区域由淤转微冲,5 m槽展宽(图15),同期九段沙中部南侧冲刷幅度增大,局部形成5 m窄沟。南汇东滩圈围促淤工程的实施,使南槽区域河道束窄,水流动力相应增强^[22];结合2015年后南槽5 m河槽容积与区域含沙量情况来看,在工程、流域减沙共同作用下,南汇东滩促淤堤线外侧普遍由淤转冲,拦门沙区段淤积范围减小^[26],九段沙中部南沿冲刷加剧^[22]。

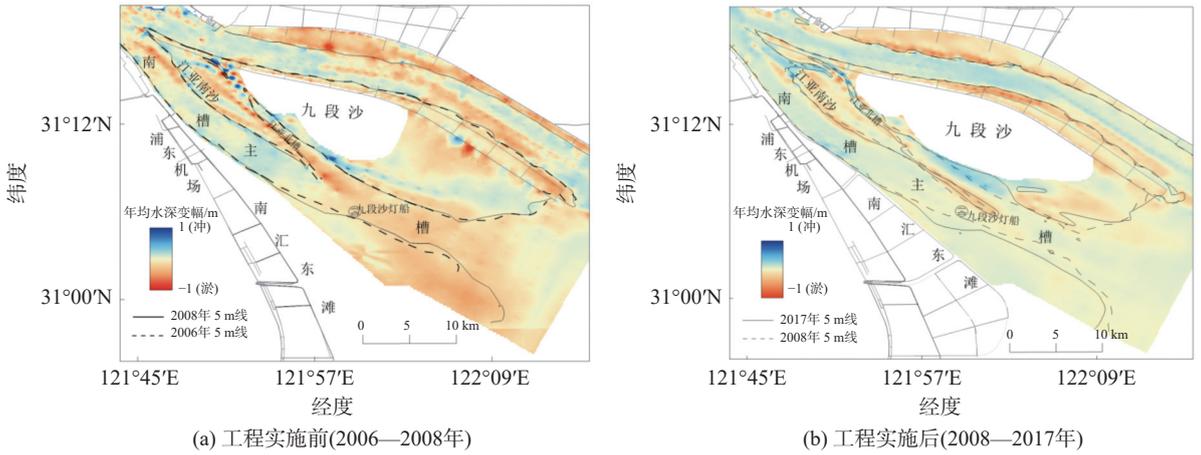


图 15 机场外侧、南汇东滩圈围促淤工程实施前后冲淤分布

Fig. 15 Erosion and deposition distribution before and after the implementation of the enclosure sedimentation project at Nanhui Dongtan and outside the airport

4.2.3 南槽航道一期治理工程 南槽航道一期治理工程在江亚南沙南侧建设江亚南沙护滩堤,并疏浚南槽航道实现 6 m 水深。工程实施前,江亚南沙头部窄沟冲深发展形成 5 m 窄沟(图 15(b))。南槽航道一期治理工程实施后江亚南沙滩面冲淤交替,沙头窄沟淤积明显,5 m 窄沟萎缩消失(图 16)。结合工程实时位置可见,护滩堤掩护了江亚南沙南侧边界,水流对江亚南沙的冲刷减弱,沙体滩面得到守护,同时工程封堵了沙头窄沟,进入江亚北槽的水流减少,沙头窄沟冲刷态势得到遏制,与之对应,江亚南沙滩面面积在短期内迅速增加。

结合各工程实施前后河床冲淤变化可见,南槽河势对工程的响应是敏感、迅速的;与流域减沙影响相比,工程影响范围相对较小、影响时间相对较短。

因此,涉水工程影响应该是南槽 5 m 河槽容积在 1998—2007 年间变化的主要因素之一;流域减沙应是南槽冲淤分布特征从 2015 年前的“上冲下淤”向 2015 年后“整体冲刷、局部淤积”转换的主导因素之一。

5 结 语

本文基于实测资料分析了长江口南槽近期河床演变特征,初步探讨了影响南槽冲淤演变的主要因素,研究结论如下:

(1)1998—2023 年南槽河床演变总体变化可划分为 3 个阶段:第一阶段(1998—2007 年)南槽冲淤变化主要受深水航道治理工程影响,总体表现为缓慢冲刷;第二阶段(2007—2015 年)南槽河槽容积变化相对较小,冲淤变化趋于平衡;第三阶段(2015—2023 年)主要受流域减沙引起的区域含沙量下降影响,整体加速冲刷发展。

(2)受流域减沙和大型涉水工程作用,南槽近 25 年总体冲淤分布特征由“上冲下淤”向“整体冲刷、

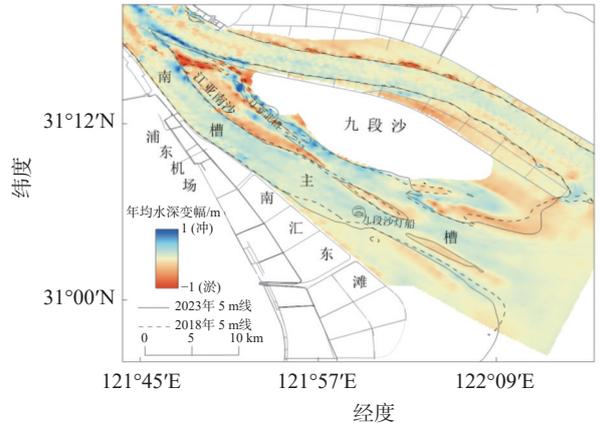


图 16 南槽航道一期治理工程实施后(2018—2023 年)年均冲淤分布

Fig. 16 Annual erosion and deposition distribution after the first phase of South Passage navigation improvement (2018—2023)

局部淤积”转换,拦门沙区段淤积范围明显缩小;主要沙体总体淤积趋缓、甚至局部低滩出现冲刷。

(3)流域减沙对长江口河势影响存在自上而下的传递过程。结合南槽上游河段河槽容积“先增后稳”的变化趋势看,在稳定河床边界和含沙量维持较低水平的情况下,未来短期内南槽仍将延续冲刷发展态势,直至达到新的冲淤平衡。

参 考 文 献:

- [1] PERILLO G M E, PÉREZ D E, PICCOLO M C, et al. Geomorphologic and physical characteristics of a human impacted estuary: Quequén Grande River Estuary, Argentina[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2005, 62(1/2): 301-312.
- [2] TRAINI C, PROUST J N, MENIER D, et al. Distinguishing natural evolution and human impact on estuarine morpho-sedimentary development: a case study from the Vilaine Estuary, France[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2015, 163: 143-155.
- [3] WANG Y H, XU C L, DONG P, et al. Impact of human intervention on channel shrinkage and restoration in the Huanghe Estuary[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2020, 79(10): 238.
- [4] 王俊, 田淳, 张志林. 长江口河道演变规律与治理研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013. (WANG Jun, TIAN Chun, ZHANG Zhilin. Study on the evolution law and regulation of the Yangtze River Estuary[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2013. (in Chinese))
- [5] 黄宇明, 缴健, 窦希萍, 等. 基于 Copula 函数的大通站水沙特征分析[J]. *水利水电工程学报*, 2022(4): 37-45. (HUANG Yuming, JIAO Jian, DOU Xiping, et al. Analysis of runoff and sediment characteristics of Datong Station based on Copula function[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2022(4): 37-45. (in Chinese))
- [6] 万远扬, 吴华林. 径流量变化对长江口北槽最大浑浊带影响分析[J]. *水利水电工程学报*, 2021(5): 1-7. (WAN Yuanyang, WU Hualin. Study on the effect of river inflow on estuarine turbidity maximum in the North Passage of the Yangtze Estuary[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2021(5): 1-7. (in Chinese))
- [7] 刘杰, 程海峰, 韩露, 等. 流域水沙变化和人类活动对长江口河槽演变的影响[J]. *水利水电工程学报*, 2021(2): 1-9. (LIU Jie, CHENG Haifeng, HAN Lu, et al. New trends of river channel evolution of the Yangtze River estuary under the influences of inflow and sediment variations and human activities[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2021(2): 1-9. (in Chinese))
- [8] 赵庆英, 杨世伦, 朱骏. 河口河槽季节性冲淤变化及其对河流来水来沙响应的统计分析: 以长江口南槽为例[J]. *地理科学*, 2003, 23(1): 112-117. (ZHAO Qingying, YANG Shilun, ZHU Jun. The statistical analysis of response of the river mouth passage to water and sediment discharges from the Changjiang River[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2003, 23(1): 112-117. (in Chinese))
- [9] 杨世伦, 朱骏, 赵庆英. 长江供沙量减少对水下三角洲发育影响的初步研究: 近期证据分析和未来趋势估计[J]. *海洋学报*, 2003, 25(5): 83-91. (YANG Shilun, ZHU Jun, ZHAO Qingying. A preliminary study on the influence of Changjiang River sediment supply on subaqueous delta: Evidences in late 20th century and an expectation for the coming decades[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2003, 25(5): 83-91. (in Chinese))
- [10] 谢华亮. 长江口南槽近期动力地貌演变研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2014. (XIE Hualiang. The recent morphodynamic evolution of the south passage, Changjiang (Yangtze) Estuary[D]. Shanghai: East China Normal University, 2014. (in Chinese))
- [11] 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. (LIU Jie, CHENG Haifeng, HAN Lu, et al. Influence of fluvial sediment decline on the morphodynamics of the Yangtze River Estuary and adjacent seas[J]. *Advances in Water Science*, 2017, 28(2): 249-256. (in Chinese))
- [12] 杜景龙, 杨世伦, 张文祥, 等. 长江口北槽深水航道工程对九段沙冲淤影响研究[J]. *海洋工程*, 2005, 23(3): 78-83. (DU Jinglong, YANG Shilun, ZHANG Wenxiang, et al. Study of influence on erosion and accumulation of Jiuduansha tidal island by deep-water channel project at North passage of the Yangtze River[J]. *The Ocean Engineering*, 2005, 23(3): 78-83. (in Chinese))
- [13] 付桂, 李九发, 应铭, 等. 长江河口南汇嘴潮滩近期演变分析[J]. *海洋通报*, 2007, 26(2): 105-112. (FU Gui, LI Jiufa, YING

- Ming, et al. Analysis on recent topography evolution of Nanhuizui tidal flat in Yangtze Estuary[J]. *Marine Science Bulletin*, 2007, 26(2): 105-112. (in Chinese))
- [14] DAI Z J, LIU J T, WEI W, et al. Detection of the Three Gorges Dam influence on the Changjiang (Yangtze River) submerged delta[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 6600.
- [15] 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(中). 太原: 中国海洋工程学会, 2011: 518-525. (LIU Hong, YING Ming, ZHANG Hua, et al. The adaptive process of the South channel of the Yangtze Estuary under engineering conditions[C]//Proceedings of the 15th China Ocean (Bank) Engineering Symposium (middle volume). Taiyuan: China Marine Engineering Society, 2011: 518-525. (in Chinese))
- [16] 戴志军, 韩震, 恽才兴. 长江口南槽沉积物特征和运移趋势[J]. *海洋湖泊通报*, 2005(2): 72-78. (DAI Zhijun, HAN Zhen, YUN Caixing. Grainsize characteristics and transport trends of the sediment in the south channel of the Yangtze River[J]. *Transaction of Oceanology and Limnology*, 2005(2): 72-78. (in Chinese))
- [17] 杨世伦, 丁平兴, 赵庆英. 开敞大河口滩槽冲淤对台风的响应及其动力泥沙机制探讨: 以长江口南汇边滩-南槽-九段沙系统为例[J]. *海洋工程*, 2002, 20(3): 69-75. (YANG Shilun, DING Pingxing, ZHAO Qingying. Morphodynamic response of a large river mouth to typhoons[J]. *The Ocean Engineering*, 2002, 20(3): 69-75. (in Chinese))
- [18] 王浩斌. 风暴对长江口悬沙浓度的影响及其动力机制[D]. 上海: 华东师范大学, 2018. (WANG Haobin. A study of the suspended sediment concentration in response to the typhoon in the Yangtze Estuary and its dynamic mechanism[D]. Shanghai: East China Normal University, 2018. (in Chinese))
- [19] 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): 55-65. (YANG Shilun, HE Songlin, XIE Wenhui. The formation and evolution of the Jiuduansha tidal island as well as their relation to the development of the North and South passages in the Yangtze River Estuary[J]. *The Ocean Engineering*, 1998, 16(4): 55-65. (in Chinese))
- [20] 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. (DAI Zhijun, CHEN Jiyu, CHENG Heqin, et al. Sediment characteristics and transport patterns in Nanhui joint area[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2005, 14(6): 735-739. (in Chinese))
- [21] ZHU C Y, GUO L C, VAN MAREN D S, et al. Decadal morphological evolution of the mouth zone of the Yangtze Estuary in response to human interventions[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2019, 44(12): 2319-2332.
- [22] 程海峰, 辛沛, 刘杰, 等. 1959—2018年九段沙地貌演化特征及动力机制[J]. *水科学进展*, 2020, 31(4): 491-501. (CHENG Haifeng, XIN Pei, LIU Jie, et al. Morphological evolution and dynamic mechanics of the Jiuduansha Shoal (China) during 1959-2018[J]. *Advances in Water Science*, 2020, 31(4): 491-501. (in Chinese))
- [23] 王芬, 谭亚, 刘士诚. 海平面上升对长江江阴以下河段风暴潮增水的影响[J]. *水利水运工程学报*, 2023(1): 43-52. (WANG Fen, TAN Ya, LIU Shicheng. Influence of sea level rise on storm surge water increase in the reach below Jiangyin of the Yangtze River[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2023(1): 43-52. (in Chinese))
- [24] 上海河口海岸科学研究中心. 长江口典型滩槽冲淤演变特征及对周围环境影响分析报告[R]. 上海: 上海河口海岸科学研究中心, 2019. (Shanghai Estuarine and Shanghai Estuarine and Coastal Science Research Center. The evolution characteristics of the Yangtze Estuary and its impact on the surrounding environment[R]. Shanghai: Shanghai Estuarine and Shanghai Estuarine and Coastal Science Research Center, 2019. (in Chinese))
- [25] 刘杰, 陈吉余, 徐志扬. 长江口深水航道治理工程实施后南北槽分汊段河床演变[J]. *水科学进展*, 2008, 19(5): 605-612. (LIU Jie, CHEN Jiyu, XU Zhiyang. River-bed evolution in the braided reach of the south and north passage after implementing Yangtze Estuary deepwater navigational improvements[J]. *Advances in Water Science*, 2008, 19(5): 605-612. (in Chinese))
- [26] 简宏康, 汤立群, 郭传胜, 等. 长江口拦门沙冲淤演变及其机理研究综述[J]. *泥沙研究*, 2021, 46(2): 74-80. (JIAN Hongkang, TANG Liqun, GUO Chuansheng, et al. Review of the study on morphological evolution and mechanism of mouth sandbars in the Yangtze River Estuary[J]. *Journal of Sediment Research*, 2021, 46(2): 74-80. (in Chinese))

Bed evolution characteristics and influencing factors of the South Passage of the Yangtze Estuary (1998–2023)

LIU Rulan¹, LI Junhua¹, CHENG Haifeng², GU Fengfeng², WANG Zhenzhen², HAN Lu²

(1. *Collage of Ocean Science and Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China*; 2. *Key Laboratory of Estuarine and Coastal Engineering, Ministry of Transport, Shanghai Estuarine and Coastal Science Research Center, Shanghai 201201, China*)

Abstract: As a inlet of the Yangtze Estuary, the bed evolution dynamics of the South Passage have attracted widespread attention. Based on long-term underwater topographic and sediment data, along with large-scale water-related engineering implementation since 1998, this study analyzes the recent bed erosion and deposition processes of the South Passage. The characteristics and influencing processes of bed evolution are discussed from two aspects: watershed sediment reduction and engineering construction. The results indicate that over the past 25 years, the bed evolution of the South Passage has shown a three-stage change pattern: "slow erosion–approaching equilibrium–accelerated erosion." The first stage of "slow erosion" was primarily influenced by engineering construction, while watershed sediment reduction is one of the main factors driving the "accelerated erosion" in the third stage. In the future, under conditions of a stabilized riverbed boundary and lower sediment concentration, the South Passage is likely to continue the erosion trend in the short term until a new equilibrium is reached.

Key words: South Passage; bed evolution; sediment dynamics; water-related engineering