

DOI:10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20220674

长江口拦门沙段滩涂形态调整及冲淤响应机制

李溢汶, 张诗媛

(上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200434)

摘要:为研究长江口拦门沙段重要滩涂对水沙条件改变及人类活动的响应机制,以横沙浅滩、九段沙及南汇东滩为例,分析了拦门沙段重要滩涂的平面形态调整特点及其对环境因素变化的响应过程,并建立了代表滩涂面积与汛期水沙条件间的经验关系。结果表明,横沙浅滩、九段沙及南汇东滩近年来滩涂平面形态呈萎缩态势、沙尾总体滞涨,且横沙浅滩及九段沙有不同程度的串沟发育现象;横沙浅滩面积与前7年平均的汛期水流冲刷强度具有良好的幂函数关系,反映了浅滩面积随水沙条件变化的滞后响应过程;河口治理工程对滩涂局部的守护能较快抑制水沙条件改变所引起的冲刷,但其对周边区域可能产生缓慢、长期的累积影响。

关键词: 浅滩演变; 长江口; 水沙条件; 冲淤响应; 工程影响

中图分类号: TV148.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)01-0026-04

1 概况

长江口河段上起徐六泾,下至口外原50号标灯,是较为典型的潮汐型河口,河床平面呈三级分叉、四口入海的复杂河势格局^[1](图1)。1998年以来,随着人类活动对长江流域影响的逐渐显现,长江口南支以下北港和南槽的拦门沙总体呈冲刷趋势^[2]。长江口拦门沙段滩涂主要有崇明东滩、横沙浅滩、九段沙及南汇东滩,目前基本处于自然演变中,除崇明东滩相对稳定外,横沙浅滩及九段沙冲淤变化频繁^[3]、南汇东滩滩涂资源结构有所调整^[4]。长江口拦门沙段滩涂演变趋势的逐渐改变势必会对河势稳定、生态环境资源保护及重大工程安全运行等产生深远影响。由于拦门沙段滩

涂演变受到众多环境因素的共同作用,因此探索并建立主要环境因素与滩涂冲淤变化的响应模式对后续滩涂的保护治理工作具有一定意义。目前针对长江口滩涂冲淤演变的研究大多集中在较宏观的河势变化及其影响因素方面,而定量分析三峡运用后汛期水沙集中输移现象对河口滩涂演变影响的成果较少。为此,本文以2000~2019年大通站水沙资料及2009~2019年滩涂地形资料(九段沙及南汇东滩地形数据截止2018年)为基础,分析了新环境下长江口拦门沙段重要滩涂形态调整特征,并建立代表滩涂面积与汛期水沙条件间的经验关系,获得了一些有益的结论,可供借鉴。

2 水沙条件变化

随着长江上游水土保持工程成效的显现及三峡工程的运用,2000年以后大通水文站年输沙量减少尤为显著^[5],图2为大通水文站近年来水量及输沙量的变化过程。由图2可看出,2000~2019年大通站年均径流量为 $8\,716.5 \times 10^8 \text{ m}^3$,年际间呈波动变化,但总体处在同一水平上;年均输沙量为 $1.57 \times 10^8 \text{ t}$,年际间呈波动减小趋势。其中,2003、2014、2019年年径流量约 $9\,000 \times 10^8 \text{ m}^3$,但年输沙量由 $2.06 \times 10^8 \text{ t}$ 减至 $1.05 \times 10^8 \text{ t}$,说明三

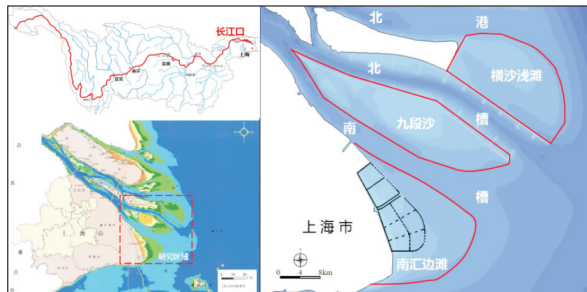


图1 研究区域示意图

Fig. 1 Sketch of the study area

收稿日期: 2022-03-07, 修回日期: 2022-04-29

基金项目: 国家重点研发计划政府间国际科技创新合作项目(2022YFE0117500);上海市科学技术委员会科研计划项目(21DZ1201700)

作者简介: 李溢汶(1994-),男,工程师,研究方向为河口海岸动力学,E-mail: lyw@whu.edu.cn

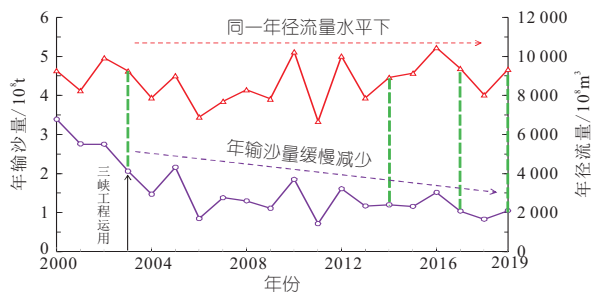


图 2 大通水文站水沙过程图

Fig. 2 Variations in the flow and sediment process at Datong station in 2000-2019

峡运用后,同一年径流量水平下,年输沙量难以保持在前期水平。此外,根据《长江泥沙公报》公布数据,2000年后大通水文站存在明显的汛期水沙集中输移现象,年均汛期输沙量占比约 0.80,水量占比约 0.68。

3 研究方法

上游水沙过程改变是造成长江口滩涂冲淤调整的主要环境因素。由于三峡工程运用对下游水沙过程的调控,长江口河道汛期(5~10月)水沙集中输移的现象明显,故暂不考虑非汛期水沙过程对滩涂冲淤的影响,此处仅考虑汛期水沙条件的影响。根据文献[6],冲积平原河道内的洲滩^[7],可采用汛期水流冲刷强度(F_f)来表征汛期的水沙条件,可表示为:

$$F_f = \frac{1}{N_f} \sum_{j=1}^{N_f} \frac{Q_j^2/S_j}{1 \times 10^8} \quad (1)$$

式中, N_f 为汛期的总天数; Q_j 为汛期日均流量, m^3/s ; S_j 为汛期日均悬移质含沙量, kg/m^3 。

长江口河道存在约 15 d 的大小潮周期过程^[8],是引起拦门沙段形成浑浊带的主要原因,区域滩涂的冲淤调整对水沙条件变化存在明显的滞后性,此处则采用前 n 年平均的汛期水流冲刷强度参数 \bar{F}_{nf} 来表征前期水沙条件^[6,9]。相关性分析表明, \bar{F}_{nf} 与代表滩涂滩体面积 A_i 具有幂函数关系,且随着指数 n 逐渐增大,相关程度先增大后略有减小,当 $n=7$ 时两者相关程度最高。该幂函数关系可表示为:

$$A_i = \alpha (\bar{F}_{7f})^\beta \quad (2)$$

式中, α 、 β 均为待率定的系数。

采用滩涂地形资料来自于历年来不同工程规划、设计、建设阶段的实测水下地形数据,比例尺为 1:25 000~1:50 000,高程系统为上海城建吴淞高程系,通过 Surfer 软件对水下地形数据进行 DEM 建模后提取对应的等深线数据。

4 拦门沙段滩涂平面形态调整过程

长江口拦门沙段主要分布有崇明东滩、横沙浅滩、九段沙及南汇东滩四大潮滩,考虑到崇明东滩受人类活动影响相对较小,滩涂总体稳定。故应重点研究横沙浅滩、九段沙及南汇东滩的平面形态调整过程。

4.1 横沙浅滩

横沙浅滩位于长江口北槽与北槽河道之间,紧邻横沙东滩整治工程,滩体平面形态呈舌形。图 3 为横沙浅滩 2011~2019 年 -5 m 等深线变化过程图。由图 3 可知,自 2011 年始横沙浅滩平面形态呈现缓慢的萎缩态势,其中滩涂北缘 -5 m 等深线主要呈现三段不同的调整过程,冲退段长约 5 km,表现为在 2011~2016 年间 -5 m 线整体后退约 800 m,随后至 2019 年基本保持稳定;间隔段长约 9 km,表现为 -5 m 线冲淤间隔分布、较动荡;外淤段长约 13 km,表现为 -5 m 线年际间小幅度调整、总体外淤 200~800 m。横沙浅滩沙尾呈萎缩后退态势,幅度约 800 m,滩涂南缘受沿堤流等因素影响,在 2011~2016 年间出现串沟发育,上溯约 5 km,至 2019 年串沟稍有横向展宽态势。N23 潜堤头部附近在 2019 年出现了串沟发育的现象,可能存在上下游串沟连通的趋势,横沙浅滩的整体稳定性极差。总的来说,横沙浅滩由于处在开阔水域,西侧及南侧又受到整治工程影响,滩面的水动力过程比较复杂,加之上游减沙影响的逐渐显现,滩涂冲淤变化频繁,平面形态扁平化。

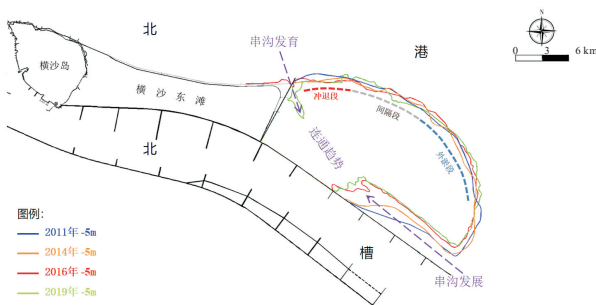


图 3 2011~2019 年横沙浅滩 -5 m 等深线变化图

Fig. 3 Morphological variations of the Hengsha shoal in 2011-2019

4.2 九段沙

九段沙位于长江口北槽与南槽河道之间,北缘为长江口北槽深水航道治理工程南导堤。图 4 为九段沙 2009~2018 年 -5 m 等深线变化过程图。由图 4 可知,自 2009 年以来,九段沙北缘在

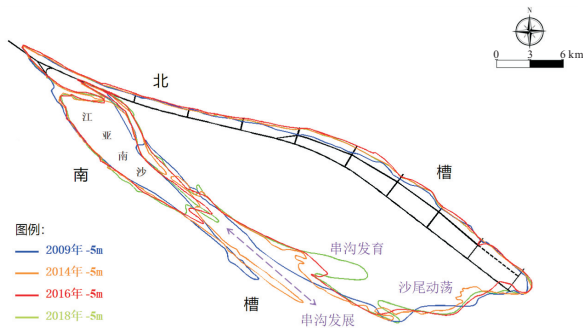


图 4 2009~2018 年九段沙 -5 m 等深线变化图
Fig. 4 Morphological variations of the Jiuduansha shoal in 2009-2018

北槽航道治理工程的守护下基本稳定,而南缘及沙尾相对动荡,其中江亚南沙南缘基本稳定、稍有外淤,沙尾 2014 年后有所冲蚀、北侧串沟(江亚北槽)呈持续发展态势,并进一步对九段沙主体造成影响,九段沙南缘中下部分 -5 m 等深线整体冲退,且在 2019 年出现串沟发育现象、长度约 5 500 m,沙尾的冲淤变化比较频繁,但未有明显的向外发育趋势。综上所述,九段沙头部及北缘边界在治理工程的守护下相对稳定,但自然状态下的南缘及沙尾仍较动荡,究其原因,一方面南槽河道尚未完全得到有效治理,水动力过程复杂,且已实施的治理工程大幅改变了区域原有的水沙条件;另一方面上游来沙减少的影响在南槽区域也逐渐在显现。

4.3 南汇东滩

南汇东滩位于长江口南槽河道南岸,平面形态头部窄中下部宽。图 5 为南汇东滩 2010~2018 年 -5 m 等深线变化过程图。由图 5 可知,自 2010 年后,南汇东滩 N1 库区中部至大治河段外侧 -5 m 等深线整体呈冲退态势,最大幅度约 3 000 m,主要发生在 2010~2017 年间;大治河以南区域 -5 m 等深线在 2014 年后相对稳定、稍有

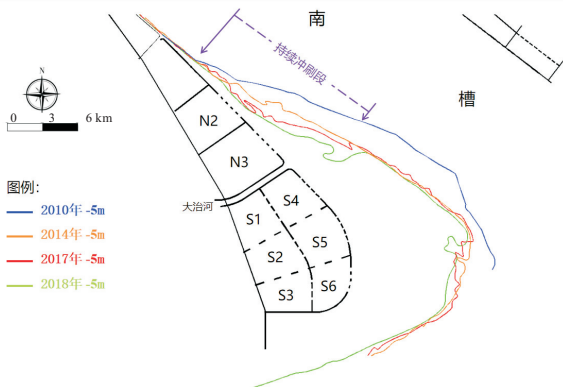


图 5 2010~2018 年南汇东滩 -5 m 等深线变化图
Fig. 5 Morphological variations of the Eastern Nanhui beach in 2010-2018

冲退,靠近口门的沙尾相对动荡、最大冲退约 900 m。总的来说,南汇东滩 -5 m 等深线处在缓慢的萎缩中,这种平面形态调整是多种因素共同影响的结果,一方面北槽深水航道建成后,南槽进口断面缩窄,落潮流分流比增加,进口段主流南偏,逐渐引起了南岸边滩的持续冲退;另一方面,南汇东滩作为长江口水下三角洲发育的南岬角,受到上游减沙的影响,其向外发育的趋势明显滞缓。此外,南汇东滩促淤工程实施后虽对过境泥沙有一定拦截作用,且加速了促淤区内滩涂的淤涨,但南汇促淤工程区域本属于滩涂自然淤涨区域,促淤工程难以对大范围 -5 m 等深线调整产生影响。

5 滩涂冲淤响应机制分析

依据 2000~2019 年大通水文站水沙资料,通过式(1)计算得到 \bar{F}_{7f} ,再结合从实测水下地形中提取得到的滩涂面积资料,这里主要选取横沙浅滩 2009~2019 年及九段沙 2009~2018 年(2011 年资料缺失) -5 m 等深线面积对式(2)中的参数 α 、 β 进行率定,南汇东滩由于南侧边界多次未施测,面积统计不全,故不再进行分析。

图 6 为横沙浅滩及九段沙 -5 m 等深线以浅面积与 \bar{F}_{7f} 的相关关系。由图 6 可看出,横沙浅滩的面积在年际间虽有所波动(可能与施测时间相关),但与 \bar{F}_{7f} 具有良好的幂函数关系,相关系数约 0.92,说明汛期来水来沙条件变化对横沙浅滩面积的影响较大,且 2011 年以后,横沙浅滩面积与 \bar{F}_{7f} 间的相关性明显增加;九段沙与 \bar{F}_{7f} 的

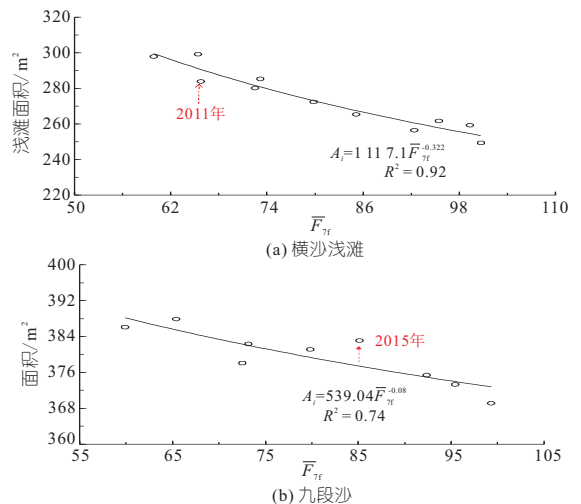


图 6 滩涂面积与 7 年平均汛期水流冲刷强度关系
Fig. 6 Relationships between the values of the shoal areas and the seven-year average fluvial erosion intensity during flood seasons

幂函数相关性为 0.74, 弱于横沙浅滩, 这可能由于长江口南北槽分流鱼嘴及北槽深水航道工程的实施基本固定了九段沙头部及北缘滩面, 促进了北缘滩面的淤涨, 致使九段沙与汛期来水来沙变化的相关性较一般, 而横沙浅滩仍处于自然状态。总的来说, 长江口拦门沙段水域开阔及最大浑浊带的存在使得滩涂演变具有一定的自我调节能力, 上游减沙的影响在前期基本未显现, 这与长江中游荆江河道内滩涂的冲淤响应模式稍有不同^[7], 滞后性更明显。此外, 从图 6 中幂函数曲线的斜率来看, 尚未有明显的变缓趋势, 说明横沙浅滩及九段沙仍可能会持续受到汛期来水来沙变化的影响, 呈现滩涂面积萎缩的调整趋势。

6 结论

a. 受上游来沙大幅减少的影响, 长江口拦门沙段横沙浅滩、九段沙及南汇东滩近年来滩涂平面形态呈萎缩态势、沙尾总体滞涨。横沙浅滩及九段沙南缘均存在串沟发育现象, 对滩体的完整性、稳定性存在不利影响, 南汇东滩头部持续冲退, 引起南槽河道放宽, 存在不利影响。

b. 横沙浅滩滩涂面积变化与 7 年平均的汛期水流冲刷强度具有良好的滞后响应关系且相关性强于九段沙。拟合幂函数式显示, 若上游来沙仍持续减少, 横沙浅滩及九段沙面积存在进一步减小的可能性。本文未考虑到滩涂的季节性冲淤特点, 仍有进一步研究的空间。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 樊咏阳, 陈正兵, 张志林, 等. 长江口水下三角洲演变规律及河势控制初探[J]. 海洋工程, 2020, 38(4): 91-99.
- [4] 徐骏, 刘羽婷, 唐敏炯, 等. 长江口滩涂变化及其原因分析[J]. 人民长江, 2019, 50(12): 1-6, 30.
- [5] 窦希萍, 缴健, 储麇, 等. 长江口水沙变化与趋势预测[J]. 海洋工程, 2020, 38(4): 2-10.
- [6] XIA J, LI X, LI T, et al. Response of reach-scale bankfull channel geometry to the altered flow and sediment regime in the lower Yellow River [J]. *Geomorphology*, 2014, 213(4): 255-265.
- [7] 李溢汶, 夏军强, 周美蓉, 等. 三峡工程运用后沙市段洲滩形态调整特点分析[J]. 水力发电学报, 2018, 37(10): 76-85.
- [8] 张赛赛, 杨世伦, 李鹏, 等. 长江口潮差中长期变化对河口生态环境的影响[J]. 海洋科学进展, 2020, 38(2): 317-325.
- [9] WU B, ZHENG S, THORNE C R. A general framework for using the rate law to simulate morphological response to disturbance in the fluvial system[J]. *Progress in physical geography*, 2012, 36(5): 575-597.

Adjustment Characteristics and Response of the Shoals in the Bar Area of the Yangtze River Estuary

LI Yi-wen, ZHANG Shi-yuan

(Shanghai Investigation, Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200434, China)

Abstract: In order to study the adjustment characteristics and response of the important shoals in the bar area of the Yangtze River estuary under the influence of sediment discharge decreasing and human activities, this article took the Hengsha shoal, the Jiuduansha shoal and the eastern Nanhui beach as examples. The measured hydrological and topographic data were used to investigate the morphological adjustment of the shoals and the response to changed environment. The results show that in recent years, the two-dimensional geomorphology of the shoals were shrank in the bar area of the Yangtze River estuary, and the tail of the shoals stop progradation in general. The Hengsha shoal and Jiuduansha shoal had different degrees of tidal creeks development; Empirical relationships were developed between the areas of the Hengsha shoal and the previous seven-year average fluvial erosion intensity during flood seasons. This relationship can be used to reflect the change tendency of shoal's area with the altered flow and sediment regime; The estuarine regulation project can restrain some part of the shoal's erosion, which was caused by the variation of the flow and sediment conditions. However, the estuarine regulation project may have a slow and long-term cumulative impact on the surrounding regions.

Key words: shoal evolution; Yangtze River estuary; flow and sediment conditions; erosion and siltation response; project impact