

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2020.04.004

长江下游潮流界变动段三益桥边滩与浅滩演变 驱动机制分析

杨云平^{1,2}, 郑金海², 张明进¹, 王建军¹, 朱玲玲³

(1. 交通运输部天津水运工程科学研究所工程泥沙交通运输行业重点实验室, 天津 300456;

2. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;

3. 长江水利委员会水文局, 湖北 武汉 430010)

摘要:潮流界变动段的边滩与浅滩演变关联性强,同时受径潮流水动力、供沙来源及人类活动等多重影响,是航道治理与疏浚维护的重点河段。通过对三益桥河段1976—2017年期间河床冲淤、汉道分流比、三益桥边滩及浅滩演变过程的分析,明确三益桥边滩及浅滩演变的驱动机制。2012年以来三益桥边滩12.5 m水深以浅滩体体积为增大态势,大水年份边滩以淤积为主,设计航槽及深槽以冲刷为主,中水年份边滩淤积厚度小于深槽。上游五峰山弯道河势稳定,具有阻隔上游和畅洲河段河势、汉道分流比调整等传递作用,三益桥边滩淤涨(长)与上游和畅洲河段河势及汉道分流比调整的关系不显著,主要与流域来流流量大小及过程、上游河道冲刷供沙等相关。洪季三益桥上浅区碍航程度大于枯季,汛前中水流量(大通水文站流量介于26 000~34 000 m³/s之间)持续天数长的年份碍航程度大于大洪水年份同时期;因此,流量过程决定边滩与浅滩的冲淤分布,中水流量持续时间长短及供沙量大小决定三益桥边滩淤积量及浅滩碍航淤积量。

关键词:潮流界;变动段;水沙输移;长江下游;三益桥边滩

中图分类号: U611 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2020)04-0502-12

冲积型河流中存在大量的边心滩,其演变过程受来水来沙条件、河道边界、河床组成及人类活动等影响,在潮汐河段受双向来水来沙的影响。长江中下游航道演变分析表明,边心滩冲刷及周期性变化,决定着航道条件的优劣。在流域来沙量减少的条件下,边心滩低滩部分的冲刷增加了枯水河宽,使得边滩头部及汉道进口的水动力减弱,进而出浅碍航^[1-2]。但是,也存在部分边滩,在来沙量减少条件下仍为淤涨(长)态势,逐渐挤压设计航槽或改变下游汉道分流的稳定性等,如东流水道娘娘树边滩^[3]、江心洲水道牛屯河边滩^[4]及福姜沙水道靖江边滩^[5-6]等。因此,进一步开展边滩与浅滩演变的驱动机制,明确其演变过程对航道条件及航道疏浚维护均具有重要科学价值及工程实践意义。

落成洲河段处于长江枯季潮流界变动段,三峡工程运行后来沙量减少引起的冲刷已达到该河段^[7]。近年来左岸三益桥边滩发育明显,航槽逐渐偏移至河道中部或偏右岸侧。2010年以来,落成洲河段维护性疏浚量较大,南京天生港河段中仅次于福北水道^[8]。2015年8月以来,落成洲河段洲头守护工程的实施,显著改善了三益桥下浅区12.5 m水深的航道条件。一般而言,大水年份浅滩的碍航程度大,维护性疏浚量也越大,如沙市河段、东流水道、福姜沙水道等^[9]。分析1976—2009年资料可知,落成洲河段进口段主流右摆,同时落成洲洲头低滩冲刷,使得过渡段主航槽水流动力相对减弱是三益桥浅区航道条件趋差的主要诱

收稿日期: 2019-06-27; **网络出版日期:** 2020-02-14

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20200214.1510.004.html>

基金资助: 国家自然科学基金资助项目(51809131); 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放研究基金(2017491211)

作者简介: 杨云平(1985—),男,黑龙江绥化人,博士,主要从事水库下游水沙输移、地貌调整及河口海岸演变等相关研究。E-mail: yangsan520_521@163.com

通信作者: 张明进, E-mail: zhangmingjin@tiwte.ac.cn

因^[10-11]; 分析 1976—2007 年资料可知, 三益桥浅滩段与上下游河段相比较, 过渡段水流分散, 且浅滩段洪水水流偏离航槽, 加上淮河入江水流顶托的影响, 输沙能力骤然下降, 泥沙易于落淤, 是这一时期三益桥浅滩形成的主要原因^[12]。长江中下游径流段, 洪水期淤积作用在过渡段形成局部沙埂或零星沙包, 汛后退水期持续时间短, 浅滩未得到有效冲刷, 影响枯水期的航道条件^[1], 如沙市河段、东流水道等。在径流河段, 大水年的航道疏浚维护量高于中枯水年份^[9]。2016 年为三峡工程运行以来的大水年份, 2017 年为中水年份, 但 2017 年落成洲河段的维护性疏浚量高于 2016 年^[8], 与径流河段的研究认识不一致。目前, 南京以下 12.5 m 深水航道二期工程已进入运行维护期, 其维护性疏浚量大小与三益桥边滩的演变密切相关。仍需进一步阐明三益桥边滩、浅滩演变的驱动机制, 支撑航道维护及后续航道工程规划。

本研究利用 1976—2017 年落成洲河段实测水文、地形资料, 在汉道分流比与流量关系、河床冲淤分布、边滩及浅滩演变过程等分析基础上, 结合上游汉道分流比、河势及汉道分流比调整等传递作用, 考虑来流条件、供沙来源、淮河入江等因素, 研究枯季潮流界变动段三益桥边滩、浅滩演变驱动机制。

1 研究区域及资料处理

1.1 研究区域

落成洲河段位于长江下游潮汐河段内(图 1(a)), 为弯曲分汉河型(图 1(b)), 其上游为和畅洲汉道, 中间由五峰山弯道连接。三益桥边滩位于落成洲河段进口段的左岸(图 1(c)), 与落成洲心滩形成对峙的边心滩格局。落成洲河段已实施了两期的航道整治工程: 一期工程内容为落成洲洲头护滩工程(实施年份为 2011—2012 年); 南京以下 12.5 m 深水航道二期工程内容为落成洲头部潜堤(长度为 1 700 m)、潜堤左侧和右侧各 2 条丁坝、落成洲左缘 3 条丁坝。二期工程落成洲河段的工程于 2015 年 6 月开始施工, 2016 年 1 月铺排施工完成, 2016 年 3 月头部潜堤施工完成, 2016 年 9 月右汉丁坝及护底带施工完成, 至 2017 年 5 月工程全部竣工, 并进入运行维护期。

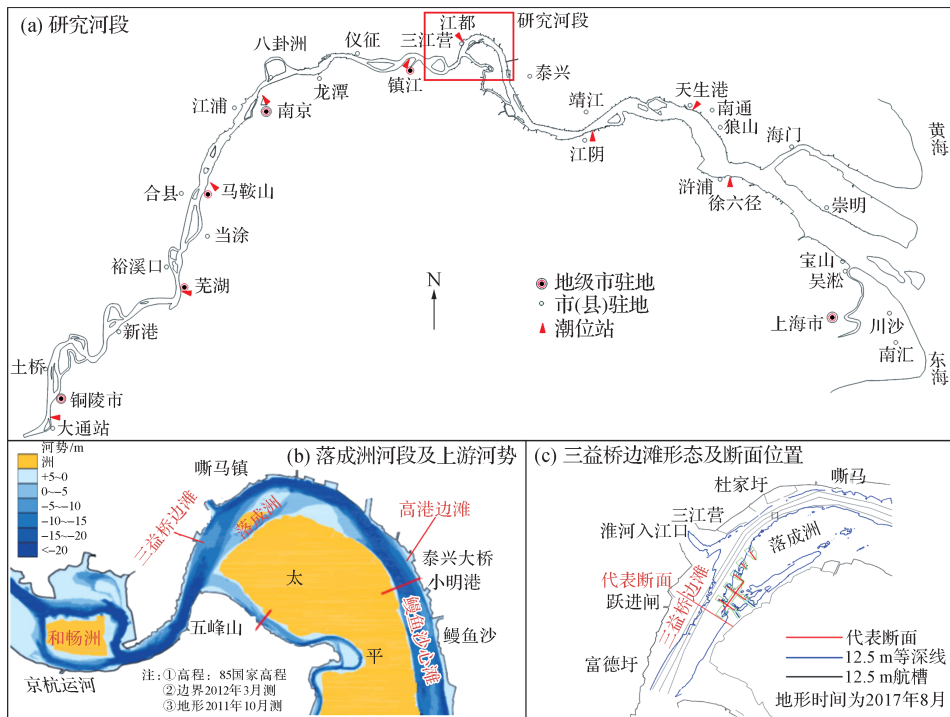


图1 长江下游落成洲河段地理位置及河势

Fig. 1 Geographical location and river regime map of the Luochengzhou reach in the lower reaches of the Yangtze River

1.2 资料来源及分析内容

本研究收集了 1976—2009 年期间落成洲河段 12.5 m 等深线数据以及 2011—2018 年期间 13 套实测水深数据, 分析三益桥边滩 12.5 m 等深线及以浅滩体形态的变化; 以 2016 年 5 月、2016 年 8 月、2017 年 5 月和 2017 年 8 月地形为基础, 分析三益桥边滩及浅滩区域代表断面冲淤分布; 收集 1980—2017 年大通水文站流量数据, 2016—2017 年淮河入江流量, 分析边滩及浅滩演变与流量大小及过程的关系; 以 2016 年 2 月、2016 年 8 月、2017 年 2 月及 2017 年 8 月水文测验资料, 分析不同流量条件下三益桥边滩区域的流速及流向变化特征。本文研究采用的地形数据来源于长江南京以下深水航道建设工程指挥部, 水文泥沙资料来源于长江水利委员会长江水文局。

1.3 来水来沙条件

以三峡工程运行年份划分, 1980—2002 年、2003—2017 年的年均径流量为 9 266 亿 m^3 、8 624 亿 m^3 , 输沙量为 3.77 亿 t、1.37 亿 t; 与 1980—2002 年相比, 2003—2017 年年均径流量和输沙量分别减少 6.93% 和 63.54% (图 2), 含沙量减少 60.95%。大通站含沙量与潮汐河段悬沙浓度存在单调函数关系^[13], 表明近年来流域来沙量的减少, 已引起潮汐河段的悬沙浓度出现同步性减少态势。

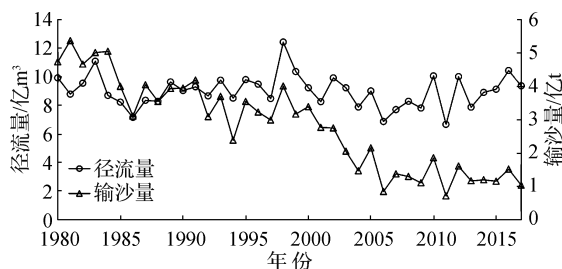


图 2 长江流域来水来沙条件

Fig. 2 Incoming water and sediment conditions in the Yangtze River basin

2 落成洲河段汉道分流比、边滩及浅滩演变特点

潮流界位置为涨潮流速为 0 的断面^[14], 这一断面位置的上下游一定范围内为低流速区。实测资料计算表明, 长江枯季潮流界变动范围为南京—江阴段, 中枯水流量时期活动在落成洲河段^[14]。

2.1 汉道分流比变化

2003—2018 年期间, 落成洲左汉分流比表现出先减小后增大的变化特点 (图 3(a))。2012—2018 年期间, 落成洲河段实施了两期的航道整治工程, 工程的目标之一是稳定分流格局, 2015 年以来落成洲左汉分流比较 2011—2015 年期间为增大态势, 与模拟计算结果一致^[15], 说明工程基本实现了预期。2003—2018 年期间, 当大通站流量小于 28 000 m^3/s 时, 随着流量增加落成洲左汉分流比减少, 流量大于 28 000 m^3/s 时, 随着流量的增加落成洲左汉分流比增大。在长江中下游径流控制的分汉河段, 在人类活动干扰较小或是自然状态的分汉河段, 某一汉道的分流比与来流流量表现为单调函数关系, 即随着流量增加分流比增大或减小态势^[16]。在潮汐河段, 当流量大于某一流量级时, 汉道分流比受河道形态、边心滩等影响^[17]。对于落成洲河段, 汉道分流比与流量关系与径流控制段不同, 这与本河段的径潮流水动力强度、河道形态等有关。

2.2 三益桥浅滩与边滩演变关系

2.2.1 三益桥边滩与浅滩演变过程

1976—2002 年期间, 三益桥浅滩段 12.5 m 槽以上下交错的形式断开, 大水年份断开距离较大, 1998 年和 1999 年断开距离分别为 1 800 m 和 4 680 m。2003—2009 年期间, 三益桥边滩 12.5 m 以浅滩体与落成洲左缘分离, 12.5 m 槽贯通。2007 年以来, 三益桥边滩尾部形态变化较大, 落成洲心滩头部 12.5 m 槽为后退态势, 如 2008 年在河道中部出现水深不足 12.5 m 的浅包。从航道水深条件上看, 三峡工程运行后三益桥浅滩段的航道条件改善。主要原因有两个: 径流条件上, 三峡工程运行后的 2003—2009 年期间未出现大洪水, 碍航程度较 1998—1999 年有所减弱; 输沙条件上, 三峡工程运行后大通站输沙量大幅减少, 落成洲河段悬沙浓度为同步减少态势, 在河道冲刷发展的同时也一定程度改善了航道水深条件。2009 年以来, 三益桥边滩 12.5 m 水深以浅滩体与落成洲左缘分离, 变化集中在三益桥边滩尾部, 以淤宽下延为主, 即下浅区航道

水深条件较差。2016 年 5 月以来, 三益桥边滩尾部冲刷上提, 下浅区 12.5 m 水深航道条件改善(图 4)。

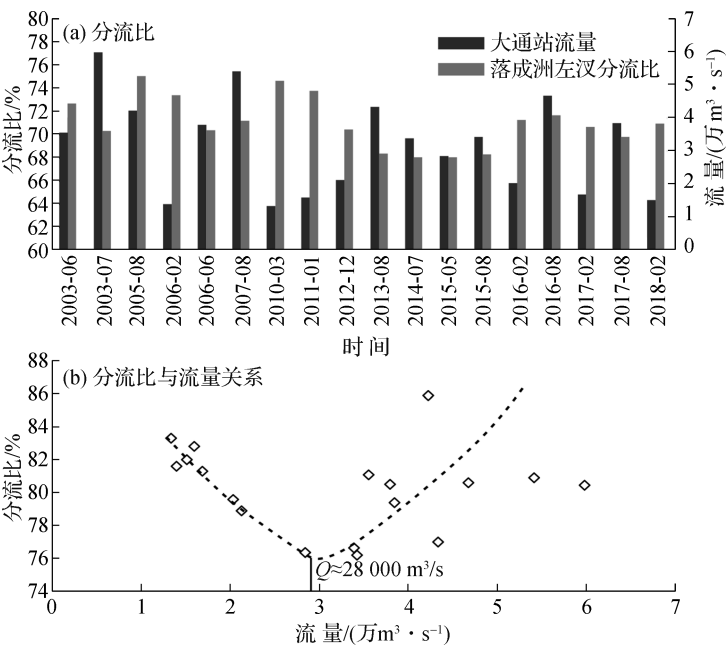


图3 落成洲河段右汊分流比与大通站流量关系

Fig.3 Relationship between the diversion ratio of the right branching channel in the Luochengzhou reach and the discharge at Datong station

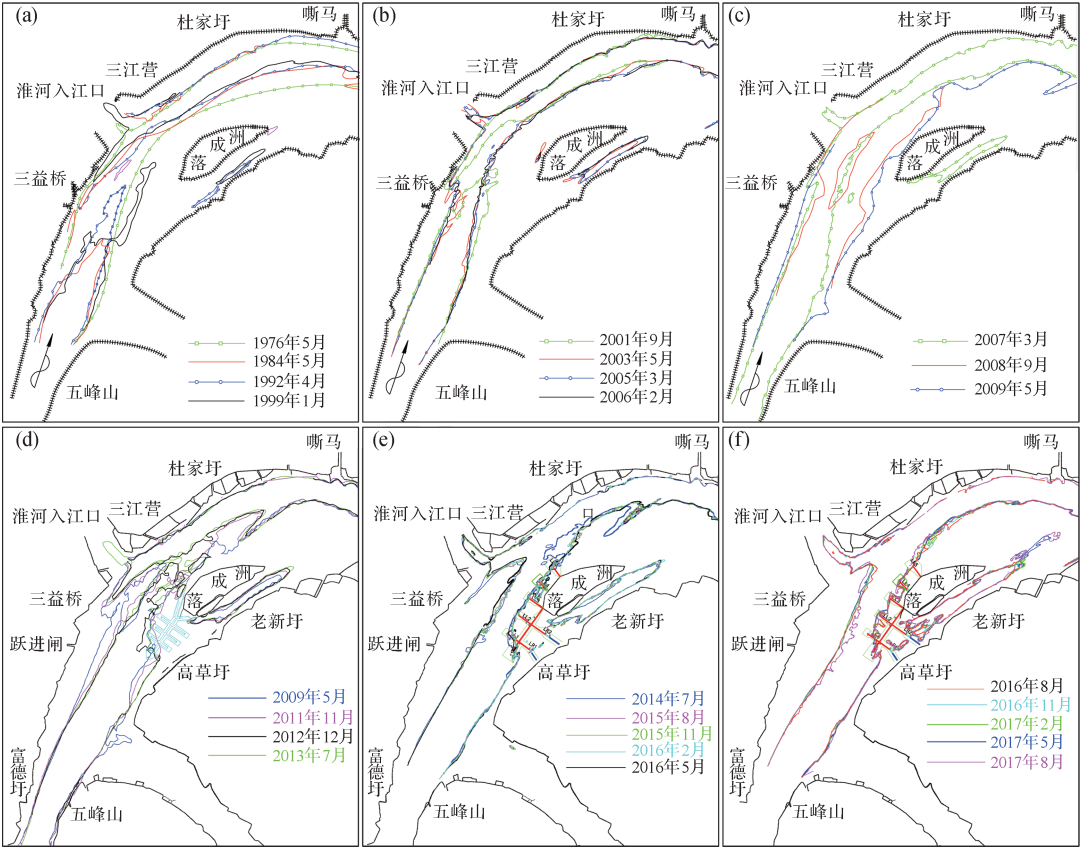


图4 三益桥边滩与浅滩演变年际变化(12.5 m 等深线)

Fig.4 Inter-annual change of the evolution of Sanyiqiao point bars and shoals (depth contour is 12.5 m)

2.2.2 三益桥边滩体积变化

2012 年 12 月以来,三益桥边滩 10.0 m 和 12.5 m 以浅滩体体积为增大态势(图 5);2012 年 12 月—2017 年 8 月期间,三益桥边滩 10.0 m 和 12.5 m 以浅滩体体积分别增加了 667 万 m³和 987 万 m³;2015 年 8 月—2017 年 8 月期间,三益桥边滩 10.0 m 和 12.5 m 以浅滩体体积分别增加了 460 万 m³和 640 万 m³。2016 年 5—8 月三益桥边滩 10.0 m、12.5 m 以浅滩体体积分别增加了 346 万 m³和 467 万 m³,2017 年 5 月—2017 年 8 月三益桥边滩 10.0 m、12.5 m 以浅滩体体积分别增加了 143 万 m³和 255 万 m³,表明大水年份的洪季三益桥边滩显著淤积。

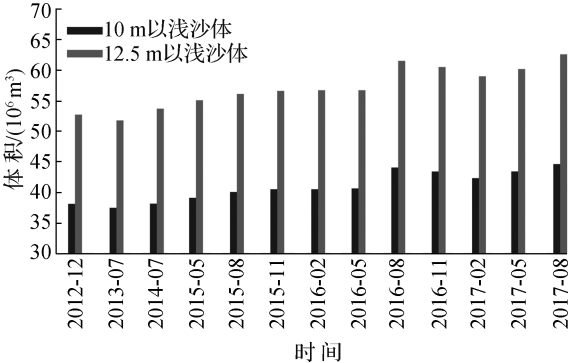


图 5 三益桥边滩及浅滩体积变化

Fig. 5 Volume change of Sanyiqiao point bars and shoals

2.3 三益桥浅滩与边滩演变关系

2.3.1 三益桥边滩航道条件变化

图 6(a)为 1976—2017 年期间三益桥浅滩段 12.5 m 水深航道条件变化,分析表明:1976—2002 年期间,三益桥浅区 12.5 m 水深的航道条件变幅较大,大水年份碍航程度大,12.5 m 槽以断开为主,如 1998 年和 1999 年。三峡工程运行初期,三益桥浅区的航道条件显著改善,12.5 m 槽逐渐贯通,最大宽度达 500 m 以上。2012—2014 年期间,三益桥浅区航道条件相对较差,主要与 2012 年大水有关。随着二期工程效果的逐步发挥,三益桥边滩尾部冲刷上提,下浅区的航道条件显著改善,航宽不足的区域已上提至三益桥边滩的中上段(称为上浅区),航道宽度小于 350 m(航道规划宽度为 350 m)。2017 年 8 月三益桥边滩上浅区设计航槽内 12.5 m 槽有效宽度仅 7 m,需进行疏浚维持航道畅通,2017 年的年疏浚量为 102.3 万 m³(图 6(b))。

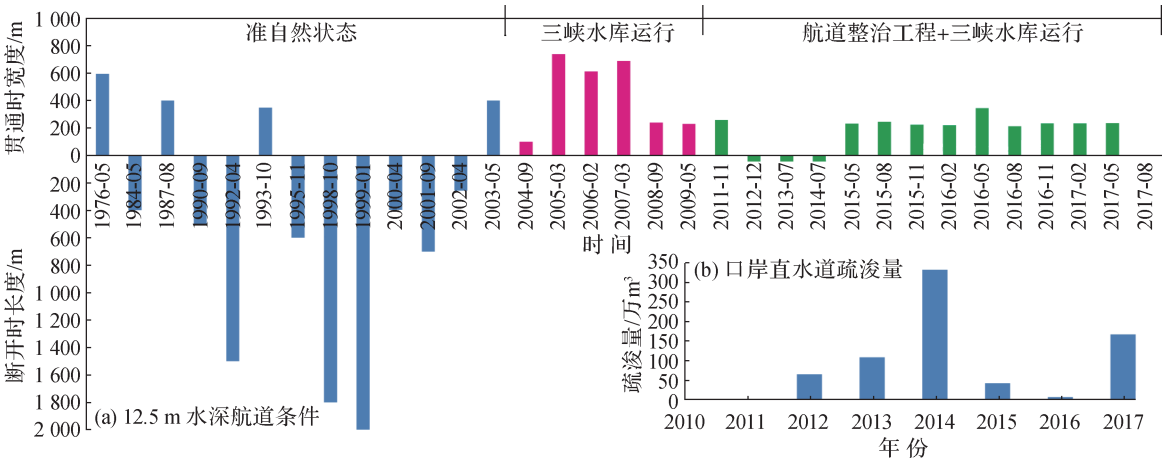


图 6 三益桥浅滩段 12.5 m 水深航道条件变化

Fig. 6 Change in the conditions of the 12.5 m-deep waterway in the shallow area of Sanyiqiao shoals

2.3.2 三益桥边滩与浅滩演变关系

2016 年 5 月、2016 年 8 月、2017 年 5 月和 2017 年 8 月水深测图显示(图 7),三益桥上浅区设计航槽内均存在水深不足 12.5 m 沙体。2016 年 8 月与 5 月比较,上浅区设计航槽内水深不足 12.5 m 的长度、最大宽度分别增加了 2 610 m 和 132 m,2017 年 8 月与 5 月比较,分别增加了 1 110 m 和 130 m。2012 年以来,三益桥边滩为淤涨(长)态势,边滩逐渐挤压设计航槽,2016 年 5—8 月、2017 年 5—8 月期间 12.5 m 水深航道条件趋差。两时段内三益桥下浅区设计航槽均以冲刷为主,2016 年 8 月和 2017 年 8 月三益桥下浅区 12.5 m 槽

均贯通, 且宽度大于 350 m。从断面变化上看(图 7): 2016 年 8 月与 5 月比较, 三益桥边滩大幅淤积, 对应设计航槽冲刷; 2017 年 8 月与 2017 年 5 月比较, 三益桥边滩淤积幅度小于设计航槽。

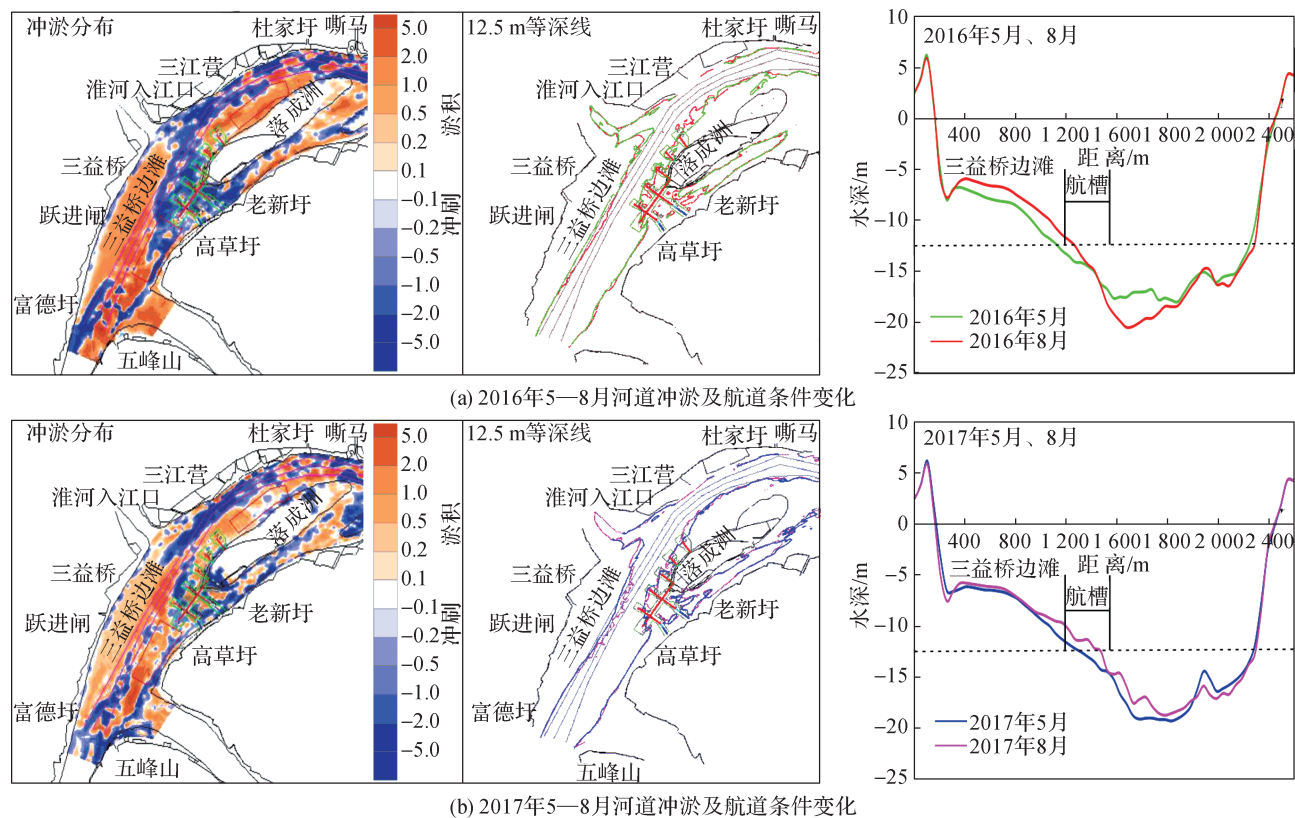


图7 2016年5月和8月、2017年5月和8月落成洲浅区12.5 m水深条件变化

Fig. 7 Change in the conditions of the 12.5 m-deep waterway in the Luochengzhou shallow area in May and August during 2016 and 2017

3 落成洲河段边滩、浅滩演变的驱动成因

南京以下 12.5 m 深水航道二期工程设计阶段, 开展了口岸直水道航道整治工程数学模型计算和物理模型试验, 从工程效果上看, 落成洲河段航道整治工程目的之一是改善下浅区航道条件, 对三益桥边滩中上段(上浅区)影响不大^[18], 表明三益桥边滩中上段的演变与二期工程的关系不显著。依据阻隔性河流理论^[19-20], 弯曲河段在满足一定条件时, 具有阻隔上下游分汊河段河势调整的长河段传递作用。落成洲河段与和畅洲汊道由五峰山弯道连接, 识别五峰山弯道是否具有阻隔上游河势调整的传递作用, 可进一步明确三益桥边滩、浅滩演变的主控因素。

3.1 汉道分流变化的影响

上下游长河段河势调整的关联性, 首先是水动力的关联性, 汉道分流比的联动关系最为直接。2002 年以前和畅洲左汊分流比增大态势, 由 1971 年 27% 增加至 2002 年 76.1%, 下游太平洲左汊分流比在 87.1% ~ 91.5% 之间(平均值为 89.3%), 在分流比对应上, 和畅洲汉道分流比变化与太平口汉道分流比关系不显著(图 8); 和畅洲左汊二期工程实施后, 2002—2014 年期间左汊分流比增幅显著小于 2002 年以前, 同时太平洲、落成洲左汊分流比与和畅洲左汊分流比关系不显著。2014—2017 年期间和畅洲左汊分流比减少, 太平洲左汊分流比较为稳定, 落成洲左汊分流比增加, 从数值上看上下游汉道分流比对应关系较好。2015 年以来, 南京以下实施了

12.5 m 深水航道二期工程，工程的目的之一是限制和畅洲左汊、增加落成洲左汊分流比，分流比变化主要是工程影响。综合航道整治工程影响，分析认为上游和畅洲汊道分流比调整对下游汊道分流比的影响较小。

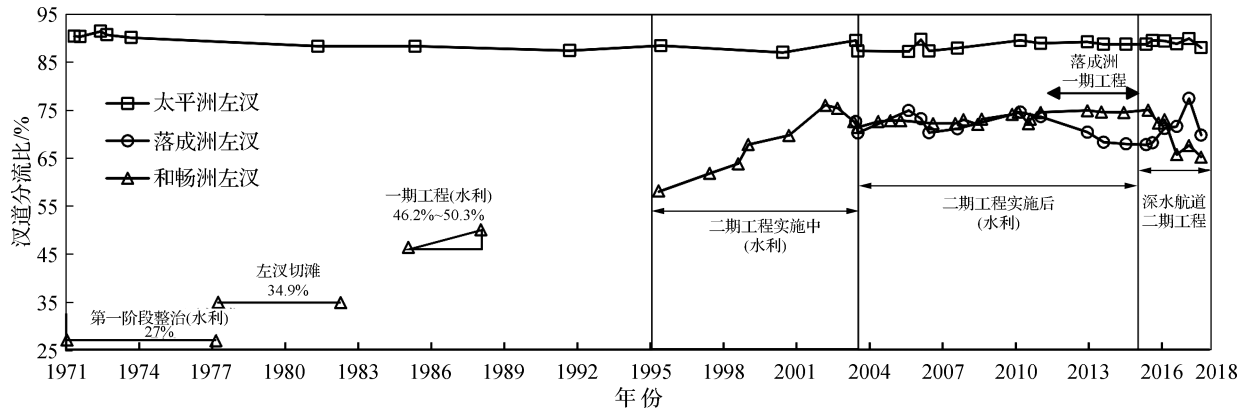


图 8 和畅洲汊道与落成洲汊道分流比的对应关系

Fig. 8 Corresponding relationship between the diversion ratios of the Hechangzhou branching channels and Luochengzhou branching channels

3.2 上游河势调整传递的影响

对于长江中下游径流控制河段，充分考虑来流流量大小及过程、河岸组成、河相系数、水面比降等参数，建立了识别弯曲河段阻隔性强弱的计算公式^[19-20]：

$$\frac{R_0}{R_*} = \frac{\left[\left(\frac{Q}{\sqrt{R_*}} \frac{Q_{\max} - Q_{\min}}{\lambda Q_{\max}} \right)^2 \frac{\zeta^{5-4\frac{B-L}{B}}}{\varphi} \right]^{\frac{1}{3}}}{\left[gB^{\frac{5}{2}} \left(Jh_0^{\frac{2}{3}} + \frac{Md^{\frac{1}{3}}}{\rho} \right) \right]^{\frac{1}{3}}} \tag{1}$$

式中： R_0/R_* 为河湾曲率半径对水流动力轴线弯曲半径的约束作用，该值越小，表明河湾曲率半径对水流动力轴线弯曲半径约束作用越大，主流相对摆幅越小，河段的阻隔性增强； Q 、 $Q_{\max}$ 和 $Q_{\min}$ 为大通站年均、最大和最小流量，万 m^3/s ； B 和 h_0 为平均河宽和水深，m； λ 为节点挑流强度； L 为节点突出河岸的程度，m； g 为重力加速度； φ 为河流的弯曲度； ρ 为水体的密度； J 为比降； ζ 为河相系数； M 为岸滩地质综合评分； d 为床沙中值粒径，mm。

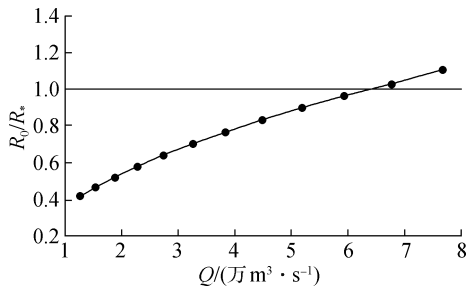


图 9 五峰山弯道阻隔性强弱变化

Fig. 9 Change in barrier strength of the Wufeng Mountain bend

利用长河段二维潮流泥沙数学模型，以 2017 年 8 月为起始地形，计算不同流量条件下五峰山弯道的阻隔性强弱，计算结果表明(图 9)：当大通站流量大于 60 000 m^3/s 时，五峰山弯道阻隔性减弱，上下游河道的河势变化具有一定的联动关系；大通站流量小于 60 000 m^3/s 时，五峰山弯道具有阻隔上游和畅洲汊道河势调整的传递作用。2003 年以来，大通站流量大于 60 000 m^3/s 以上天数显著减少，2003—2017 年期间该流量级天数占全年比例约为 3%。综上，五峰山弯道具有阻隔上游河势调整的传递作用，上游和畅洲汊道河势调整对落成洲河段的影响较小。

3.3 上游河床冲刷供沙的影响

统计 2015 年 8 月—2017 年期间和畅洲水道进口—五峰山段、三益桥边滩的冲淤量(表 1，统计范围见图 1)，上游和畅洲汊道的河床冲刷量越大，三益桥边滩 10.0 m 和 12.5 m 以浅滩体的淤积量越大。从供沙关系看，上游河道的河床冲刷为三益桥边滩及浅滩淤积提供大量沙源。

表 1 和畅洲水道河床冲淤量与三益桥边滩淤积量关系

Table 1 Relationship between the amounts of deposition and erosion of the Hechangzhou waterway and the amount of erosion of the Sanyiqiao point bars

统计时段	和畅洲水道河床 冲刷量/万 m ³	三益桥边滩体积/万 m ³		三益桥边滩 12.5 m 以浅滩体淤积量/ 和畅洲水道河床冲刷量/%
		10.0 m	12.5 m	
2015 年 8 月—2016 年 5 月	293	56	69	23.55
2016 年 5 月—2016 年 8 月	1 745	346	472	27.05
2016 年 8 月—2017 年 2 月	480	186	251	52.50
2017 年 2 月—2017 年 8 月	727	223	334	45.94

3.4 来流过程的影响

在三益桥边滩 12.5 m 等深线附近选取特征点, 利用 2016 年 2 月、2016 年 8 月、2017 年 2 月和 2017 年 8 月实测断面及潮周期内流速测验资料, 分析不同流量条件下潮周期内断面及代表点位底层流速及流向变化 (图 10, 采样断面及特征点位置见图 1), 结果表明: 小流量时落潮流向偏向于深槽, 有利于增强设计航槽内的水动力, 底沙沿深槽方向输移, 即枯水期航道条件相对较好; 大流量时期, 涨潮和落潮时期底层流向均指向三益桥边滩, 即三益桥边滩淤积, 如 2016 年 5—8 月; 在中水流量时, 涨潮和落潮时期的流向集中在 12.5 m 等深线边缘附近。当潮流界活动在落成洲河段时, 水动力减弱易于泥沙淤积, 即中水流量作用天数长, 三益桥浅滩段的碍航程度大, 如 2017 年 5—8 月。在断面流速分布上, 2017 年与 2016 年比较, 三益桥边滩区域的流速增大, 使得边滩的淤积幅度相对较小。

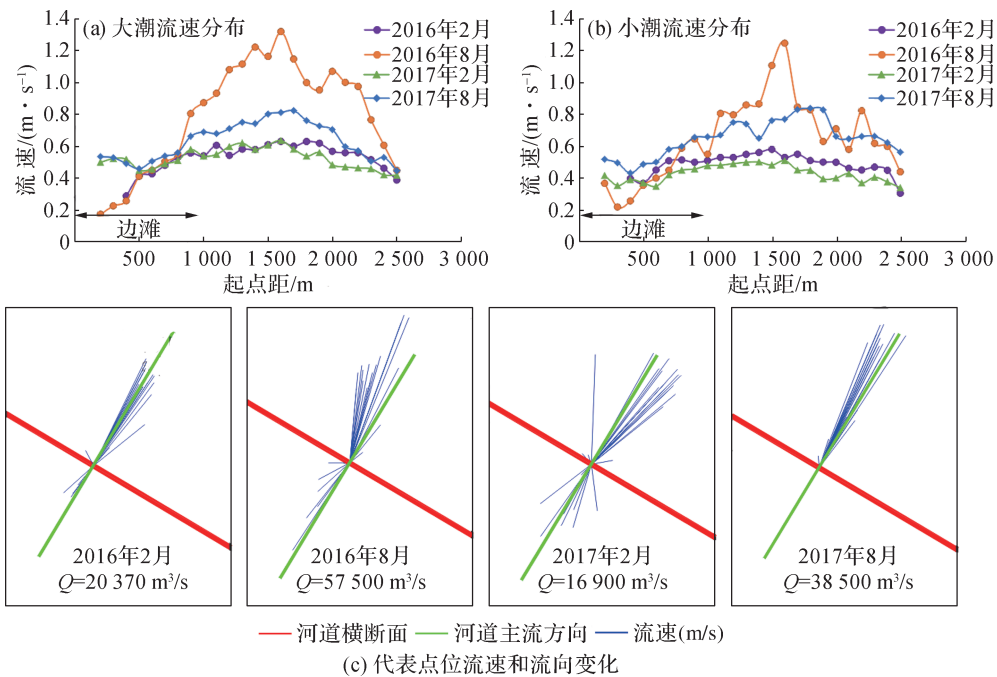


图 10 不同流量条件下三益桥边滩区域潮周期内底层流速及流向特征

Fig. 10 Variation in the tidal cycle flow direction in the Sanyiqiao point bar area under different discharge conditions

河床冲淤分布上, 2016 年 5—8 月落成洲河段淤积集中在三益桥边滩区域, 2017 年 5—8 月淤积集中在设计航槽内。12.5 m 水深条件上, 2016 年 5—8 月、2017 年 5—8 月设计航槽内 12.5 m 等深线宽度小于 350 m, 但 2017 年 5—8 月碍航宽度高于 2016 年 5—8 月。2016 年汛期大通站流量大于 45 000 m³/s 天数高于 2017 年 (图 11), 对应三益桥边滩 10.0 m 和 12.5 m 水深以浅滩体淤积量 2016 年大于 2017 年, 表明汛期流

量大是三益桥边滩淤积量大的主要驱动因素。2017 年 5—8 月期间大通站流量在 $26\,000 \sim 34\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 之间的天数为 81 d, 明显高于 2016 年(20 d)及 2003—2015 年期间(平均值为 13 d, 最大值为 33 d, 最小值为 5 d), 即中水年份且中水流量持续天数长是三益桥浅滩段碍航的主要驱动因素。

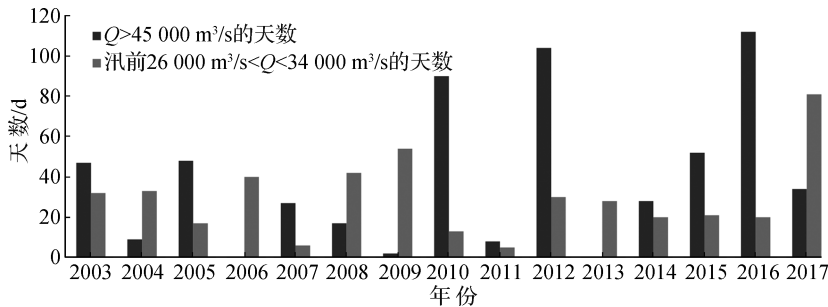


图 11 大通站流量过程变化
Fig. 11 Change in discharge at Datong station

3.5 淮河入江和下游河道演变的影响

(1) 淮河入江的影响 淮河入江口位于嘶马弯道进口段北岸, 从平面形态来看, 正对落成洲洲头, 几乎与长江正交。2016 年淮河入江径流量集中在 6 月、7 月、10 月下旬及 11 月, 年内流量为 $3\,600\text{ m}^3/\text{s}$, 占总流量比例为 5.17%; 2017 年集中在 9 月—11 月上旬, 年内最大半月流量为 $4\,610\text{ m}^3/\text{s}$, 占总流量比例为 12.32% (图 12)。

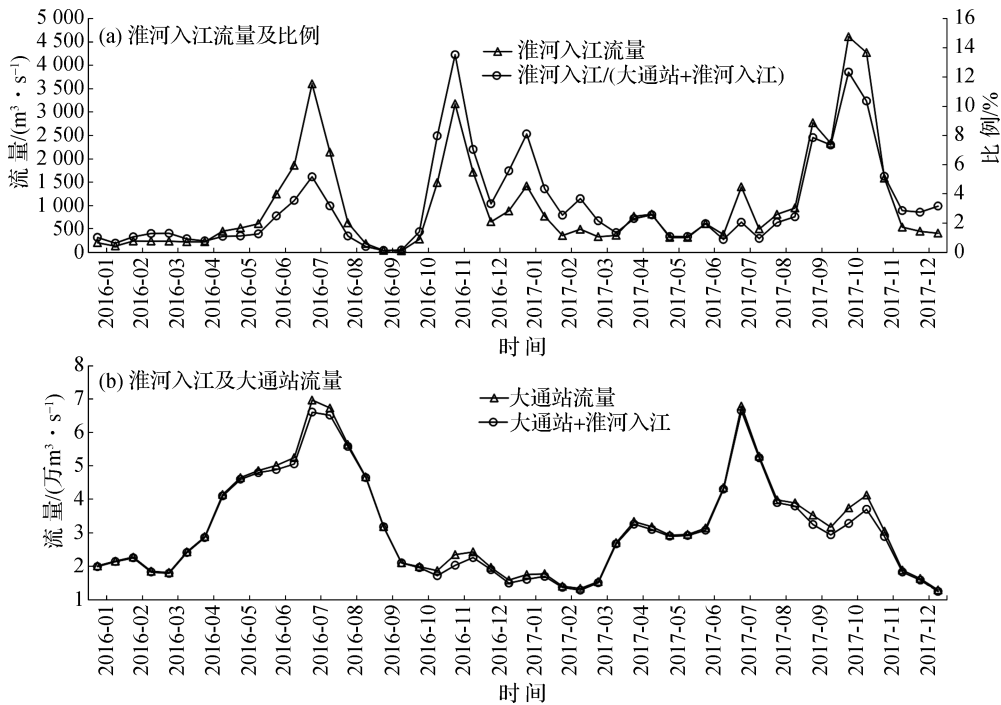


图 12 淮河入江流量与长江大通站流量关系
Fig. 12 Relationship between the inflow of Huaihe River and the discharge of Datong station

物理模型试验表明^[21], 淮河入流造成长江水域局部水位壅高较多, 对长江行洪不利; 入流口以上流速减小会加剧洪水期泥沙淤落, 特别会影响三益桥航道畅通; 入流口以下流速增大, 近岸流速的增大对护岸工程不利。数学模型计算表明^[22], 淮河大流量入汇, 淮河入江口以上三益桥边滩、左汊 12.5 m 设计航槽内淤积幅度和范围均有所增加, 使得落成洲左汊设计航槽内水深不满足 12.5 m 的最小宽度较不考虑淮河入汇时

有所增加。数学模型和物理模型试验中,基于单一的淮河入江流量与大通站流量组合,考虑的是最不利工况。实际上,淮河入江流量受蚌埠闸控制,入江流量大小对落成洲河段的影响需注重累积效应。从2016年和2017年淮河入江与大通站流量总和上看,2016年淮河入江流量偏大时期,潮流界位置并不在落成洲河段,对泥沙淤积的影响偏小;2017年淮河入江流量较大时期,汛前和汛后的总流量均长时间处于中水流量附近,使得落成洲河段浅滩淤积量大,进而维护疏浚量增大。

淮河入江流量变化对落成洲河段边滩及浅滩演变产生一定的影响。无论入江流量大小,对入汇口上游的三益桥边滩及浅滩的演变均会产生一定影响;淮河入江增加了长江干流的流量,抑制下游涨潮流的顶托,减少潮流界活动在落成洲河段的时间,可减缓落成洲河段由于潮流界低流速产生淤积的影响。

(2) 下游河道演变的影响 三益桥边滩下游为嘶马弯道,历史时期这一弯道是落成洲河段重点的崩岸区域。20世纪70年代以前,河道处于自然状态,嘶马弯道岸线的崩退较为剧烈;经过护岸整治后,岸线崩退有所控制,但由于护岸工程标准偏低,崩岸险情时有发生。具体影响为:下游受嘶马弯道发生大幅崩岸时,主流顶冲点下移,使得洪水主流右摆趋中、深泓向中右侧发展,这一时期加速了三益桥边滩尾部的淤积延伸。1976—2001年期间,嘶马弯道段共完成护岸长度10 km,累计兴建护岸丁坝10座、沉柴排 7.33万 m^3 、沉软体排 10.89万 m^3 ,抛石 $261 \text{万 t}^{[23]}$,2006年以来嘶马弯道的岸线崩退得到控制,对上游三益桥边滩及浅滩的影响逐渐减弱。

上游和畅洲汉道分流比、河势调整对下游落成洲河段进口的水动力影响较小,流量大小及年内过程、河道内水动力的综合作用是三益桥边滩及浅滩演变的主要驱动因子。其中,流量过程决定了滩槽的冲淤分布,中水流量持续时间及供沙量决定三益桥边滩淤积量及浅滩碍航程度,淮河入江的影响程度需与淮河入江流量及大通站流量组合进行关联分析。

4 结 论

(1) 落成洲河段处于枯季潮流界变动范围内,左汉分流比随来流量增加表现为先减小后增加的变化特点,临界转换流量约为 $28\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ (大通站);在来沙减少的条件下,三益桥边滩10.0 m和12.5 m水深以浅滩体体积为增大态势,大水年份三益桥边滩淤积,设计航槽及深槽冲刷,中水年份滩面淤积厚度小于深槽。上游河道的冲刷,为三益桥边滩的淤积提供了丰富的沙源。

(2) 三益桥上浅区的碍航程度与年内径流过程相关,整体上洪季碍航程度大于枯季,在中水流量($26\,000 \text{ m}^3/\text{s} < \text{大通站流量} < 34\,000 \text{ m}^3/\text{s}$)作用天数长的年份碍航程度高于大洪水年份同时期。上游五峰山弯道对水流的约束能力强,使得上下游汉道分流比关联性弱,具有阻隔上游和畅洲河势及汉道分流比调整的传递作用,三益桥边滩及浅滩的演变主要受来流流量大小及过程、上游河道冲刷供沙等影响,其中流量过程决定边滩及浅滩的冲淤分布,中水流量持续时间及供沙量大小决定三益桥边滩及浅滩的淤积量。淮河入江对三益桥边滩及浅滩演变存在一定影响,其影响程度与淮河入江流量及大通站流量组合有关。

参考文献:

- [1] 孙昭华,李义天,黄颖,等.长江中游城陵矶一湖口分汉河道洲滩演变及碍航成因探析[J].水利学报,2011,42(12): 1398-1406. (SUN Z H, LI Y T, HUANG Y, et al. Fluvial process of sandbars and shoals in branching channels of the middle Yangtze River[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(12): 1398-1406. (in Chinese))
- [2] 唐金武,由星莹,李义天,等.三峡水库蓄水对长江中下游航道影响分析[J].水力发电学报,2014,33(1): 102-107. (TANG J W, YOU X Y, LI Y T, et al. Impacts of the operation of Three Gorges Reservoir on navigation conditions in middle and lower Yangtze River[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(1): 102-107. (in Chinese))
- [3] 刘洪春,张玮,李文全.东流水道左岸边滩演变特征及其对航道条件影响分析[J].水运工程,2013(8): 110-114. (LIU H C, ZHANG W, LI W Q. Evolution characteristics of the left beach of Dongliu waterway and its effect on waterway condition[J]. Port & Waterway Engineering, 2013(8): 110-114. (in Chinese))

- [4] 陆英, 平克军, 刘万利. 长江下游江心洲—乌江长河段河床演变宏观分析研究[J]. 水道港口, 2012, 33(4): 315-320. (LU Y, PING K J, LIU W L. Macro analysis on alluvial process from Jiangxinzhou to Wujiang Reach in Yangtze River downstream [J]. Journal of Waterway and Harbor, 2012, 33(4): 315-320. (in Chinese))
- [5] 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: 1187-1194. (CHEN C, LI W S, YANG Y P, et al. Tidal flat deformation and its effect on channel maintenance in tidal reach [C]//Ocean Engineering Branch of China Ocean Society. Proceedings of the Eighteenth China Marine (Offshore) Engineering Symposium (Lower). Beijing: China Ocean Press, 2017:1187-1194. (in Chinese))
- [6] 闻云呈, 徐华, 夏云峰, 等. 新水沙条件下靖江边滩演变特性及影响因素研究[J]. 人民长江, 2018, 49(增刊1): 6-10. (WEN Y C, XU H, XIA Y F, et al. Study on recent sedimentation cause of Xingang operation zone of Jingjiang Port in lower Yangtze River[J]. Yangtze River, 2018, 49(Suppl 1): 6-10. (in Chinese))
- [7] DAI Z J, LIU J T. Impacts of large dams on downstream fluvial sedimentation: an example of the Three Gorges Dam (TGD) on the Changjiang (Yangtze River)[J]. Journal of Hydrology, 2013, 480(14): 10-18.
- [8] 杨云平. 潮汐河段航槽开挖回淤影响因素及维护量确定方法研究[R]. 天津: 交通运输部天津水运工程科学研究所, 2018: 1-12. (YANG Y P. Research of influencing factors on back-siltation after dredging activities in tidal shipping channels and methods on determining dredging quantities [R]. Tianjin: Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, MOT, 2018: 1-12. (in Chinese))
- [9] 长江航道局. 2016 年度长江干线航道养护管理基础资料汇编[R]. 武汉: 长江航道局, 2017. (Yangtze River Waterway Bureau. Compilation if basic data on maintenance and management of Yangtze River main channel in 2016[R]. Wuhan: Changjiang Waterway Bureau, 2017. (in Chinese))
- [10] 魏延文, 李百连. 长江江苏河段嘶马弯道崩岸与护岸研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2002, 30(1): 93-97. (WEI Y W, LI B L. Bank caving and protection at Sima bend of Jiangsu section of Yangtze River[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2002, 30(1): 93-97. (in Chinese))
- [11] 雷雪婷, 袁达全, 陈飞. 长江下游三益桥浅水区段河床演变与整治[J]. 人民长江, 2012, 43(增刊2): 106-108. (LEI X T, YUAN D Q, CHEN F. River bed evolution and regulation in the shallow section of Sanyiqiao in the lower reaches of the Yangtze River[J]. Yangtze River, 2012, 43(Suppl 2): 106-108. (in Chinese))
- [12] 陈长英, 张幸农. 长江下游扬中河段三益桥浅滩成因分析[J]. 水利水运工程学报, 2010(4): 95-100. (CHEN C Y, ZHANG X N. Cause analysis of Sanyiqiao shallow in the Yangzhong Reach[J]. Hydro-Science and Engineering, 2010(4): 95-100. (in Chinese))
- [13] 杨云平, 张明进, 樊咏阳, 等. 长江河口悬沙颗粒特征变化趋势及成因[J]. 应用基础与工程科学学报, 2016, 24(6): 1-16. (YANG Y P, ZHANG M J, FAN Y Y, et al. Variation trend and causes of suspended sediment characteristic in Yangtze Estuary[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2016, 24(6): 1-16. (in Chinese))
- [14] 杨云平, 李义天, 韩剑桥, 等. 长江口潮区和潮流界面变化及对工程响应[J]. 泥沙研究, 2012(6): 46-51. (YANG Y P, LI Y T, HAN J Q, et al. Variation of tide limit and tidal current limit in Yangtze Estuary and its impact on projects[J]. Journal of Sediment Research, 2012(6): 46-51. (in Chinese))
- [15] YANG D L, DOU X P, ZHANG X Z, et al. Hydrodynamic effect of the regulation project of Yangtze River deepwater channel downstream of Nanjing[J]. China Ocean Engineering, 2013, 27(6): 767-779.
- [16] 韩剑桥, 孙昭华, 袁晶, 等. 三峡水库下游分汉河道滩槽调整及其对水文过程的响应[J]. 水科学进展, 2018, 29(2): 186-195. (HAN J Q, SUN Z H, YUAN J, et al. Responses of riverbed morphology to the hydrological regime in anabranching reaches of the downstream Three Gorges Reservoir[J]. Advances in Water Science, 2018, 29(2): 186-195. (in Chinese))
- [17] CHEN Y P, LI J X, WU Z G, et al. Dynamic analysis of riverbed evolution: Chengtong Reach of Yangtze Estuary[J]. Journal of Coastal Research, 2016, 75(Suppl 1): 203-207.
- [18] 杨云平. 口岸直水道航道整治工程模型试验研究[R]. 天津: 交通运输部天津水运工程科学研究所, 2017. (YANG Y P. Model test study waterway regulation project Kouanzhi Reach[R]. Tianjin: Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, MOT 2017. (in Chinese))
- [19] 由星莹, 唐金武, 张小峰, 等. 长江中下游阻隔性河段作用机理[J]. 地理学报, 2017, 72(5): 817-829. (YOU X Y, TANG J W, ZHANG X F, et al. Mechanism of Barrier River reaches in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J].

- Acta Geographica Sinica, 2017, 72(5): 817-829. (in Chinese))
- [20] YOU X Y, TANG J W, ZHANG X F, et al. The mechanism of Barrier River reaches in the middle and lower Yangtze River[J]. Journal of Geographical Sciences, 2017, 27(10): 1249-1267.
- [21] 谢瑞, 洪大林, 陈长英. 淮河入流对长江水流的影响分析[J]. 水利水电科技进展, 2008, 28(3): 8-12. (XIE R, HONG D L, CHEN C Y. Effect of inflow from Huaihe River the Yangtze River[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2008, 28(3): 8-12. (in Chinese))
- [22] 张明进. 淮河入汇对口岸直水道深水航道整治效果影响的数值计算[J]. 水运工程, 2016(3): 1-9. (ZHANG M J. Numerical calculation and influence of inflow from Huaihe River on deepwater channel regulation effect of Kouanzhi Waterway[J]. Port & Waterway Engineering, 2016(3): 1-9. (in Chinese))
- [23] 胡秀艳, 姚炳魁, 朱常坤. 长江江都嘶马段岸崩灾害的形成机理与防治对策[J]. 地质学刊, 2016, 40(2): 357-362. (HU X Y, YAO B K, ZHU C K. Formation mechanism and prevention strategies of bank collapsing at Sima bend of Jiangdu in the Yangtze River[J]. Journal of Geology, 2016, 40(2): 357-362. (in Chinese))

Driving mechanism of Sanyiqiao point bar and shoal evolution in fluctuation segment of tidal current limit in lower reaches of Yangtze River*

YANG Yunping^{1,2}, ZHENG Jinhai², ZHANG Mingjin¹, WANG Jianjun¹, ZHU Lingling³

(1. Key Laboratory of Engineering Sediment, Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Ministry of Transport, Tianjin 300456, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Bureau of Hydrology Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China)

Abstract: A strong correlation exists between the evolution of the point bar and shoal in the fluctuation segment of the tidal current limit in the lower reaches of the Yangtze River, with simultaneous influences from the hydrodynamic force of runoff and tidal currents, sediment sources, and human activities. This segment is crucial to channel regulation and dredging maintenance. Based on analyses of riverbed scouring and silting, branch channel diversion ratio, and evolution of Sanyiqiao point bar and shoal from 1976 to 2017, the driving mechanism of the evolution of this bar and shoal was clarified. Since 2012, at a depth of 12.5 m at the Sanyiqiao point bar, the shoal-body volume has been increasing. During high rainfall years, the point bar was dominated by silting, and the designed and deep channels were dominated by scouring. In medium rainfall years, the thickness of point bar deposition was less than that in the deep channel. Wufengshan bend in the upper reaches showed a stable river regime and had the functions of blocking the river regime of the upstream Hechangzhou River segment and adjusting the branch channel diversion ratio. The relationship between siltation at the Sanyiqiao point bar and the river-regime adjustment and branch channel diversion ratio of the upstream Hechangzhou River segment was not significant. It was mainly related to the scale and process of incoming flow in the river basin as well as scouring in the upstream river segment as sediment source. During the flood season, navigation obstruction in the upper shallow area of Sanyi Bridge was greater than that during the dry season. Navigation obstruction in years with a long duration of intermediate water flow before the flood season was greater than that during the same period in flood years (flow at Datong hydrological station was 26 000—34 000 m³/s). Therefore, the flow determined the scouring and silting distribution at the point bar and shoal, whereas the duration of intermediate water flow and amount of sediment supply determined the siltation volume at the point bar and shoal, respectively, obstructing navigation.

Key words: tidal current limit; fluctuation segment; water and sediment transport; the lower reaches of Yangtze River; Sanyiqiao point bar

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51809131).