

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2023.02.009

长江下游落成洲河段洲滩联动关系与航道浅滩碍航机制

杨云平^{1,2}, 张夏博², 郑金海², 朱玲玲³, 王建军¹, 方娟娟⁴, 魏 稳⁵

(1. 交通运输部天津水运工程科学研究所, 天津 300456; 2. 河海大学, 江苏 南京 210098; 3. 长江水利委员会长江水文局, 湖北 武汉 430010; 4. 长江科学院, 湖北 武汉 430019; 中山大学海洋科学与技术学院, 广东 中山 528406)

摘要: 航道浅滩演变与边心滩形态调整具有强关联性, 叠加河道冲淤不均衡性、上游河段冲刷供沙等综合影响, 使得航道浅滩碍航机制更趋复杂。本研究以长江感潮段内落成洲河段为对象, 通过 1959—2021 年洲滩形态、河床冲淤特征、水动力环境与浅滩碍航特性等分析, 明确边心滩—浅滩演变联动关系、上游河床冲刷供沙及对浅滩演变的影响机制。研究结果表明: ① 1981 年以来落成洲河段所在的扬中河段由淤积转为 1991 年以来的持续冲刷, 1981—2021 年枯水河槽冲刷量为 3.97 亿 m³, 占洪水河槽冲刷量的 95.9%; ② 三峡工程运行前嘶马弯道崩退—落成洲左缘淤积—三益桥边滩未发育, 即嘶马弯道崩退是洲滩联动演变的主要诱因; ③ 三峡工程运行后至航道整治工程实施前的来沙量减少引起洲滩整体冲刷, 落成洲冲刷为三益桥边滩提供了发育空间, 逐渐淤涨的三益桥边滩与水沙条件共同使得落成洲冲刷和右汉冲刷发展, 即三益桥边滩形态变化逐渐由被动淤涨转为洲滩联动演变的主因; ④ 1981—2010 年三益桥边滩淤涨、落成洲洲头与左缘冲刷等决定着三益桥浅滩碍航程度, 由于流域来沙量减少引起的河床冲刷使得碍航程度减弱, 2011—2021 年航道工程作用下的落成洲左缘边界逐渐稳定与下浅区航道条件得到改善, 同时三益桥边滩面积由淤积转为小幅冲刷, 航道碍航位置逐渐上提形成上浅区; ⑤ 二期工程实施以来, 流域来水过程条件、三益桥边滩冲刷和落成洲右汉相对发展等变化仍不利于落成洲河段前滩段航道条件的稳定, 建议后续完善工程中采取稳定洲滩边界与限制右汉冲刷发展的工程措施。

关键词: 洲滩变形; 航道条件; 浅滩演变; 驱动机制; 落成洲河段; 长江下游

中图分类号: TV122 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2023)02-0250-15

进入 21 世纪以来, 人类活动导致的扰动往往会加速或改变自然过程及趋势, 使得河道调整时间尺度缩短^[1]。随着流域大型水库运行, 大部分泥沙滞留淤积在库区, 进入坝下游沙量显著降低^[2], 使得河床为强冲刷态势^[3-4], 河床不均衡冲刷影响航道条件稳定性^[5-6]。由于分汊河段汊道间河床的不均衡冲刷, 洲滩冲刷后的河道展宽^[7], 河槽水动力相对减弱后使得泥沙易于落淤, 在放宽段易出现严重的碍航现象。三峡工程运行后长江感潮河段以冲刷为主^[8-12], 且连续河段存在上冲下淤联动演变关系, 如芜裕河段与马鞍山河段、和畅洲河段与三益桥边滩、江阴河段与靖江边滩^[9,13-15]。同时注意到, 流域来沙减少背景下的感潮河段内部分边滩仍以淤积为主, 如牛屯河边滩、三益桥边滩以及周期性冲淤的靖江边滩^[5,13,16-18], 浅滩碍航程度与洲滩演变关系如何, 航道工程作用下洲滩形态联动演变模式转变对浅滩段航道条件优劣的影响需重点关注。

本研究以长江下游落成洲河段为对象, 河段内分布有三益桥边滩和落成洲, 三益桥浅滩为南京以下深水航道治理的重点滩段。落成洲河段总体河势逐渐稳定, 但左汉主流右摆, 洲头及其左缘冲刷, 汊道段枯水河床展宽, 浅区过渡段冲刷动力不足, 航道条件向不利方向转化^[19]。淮河入江流量大小一定程度上影响着三益桥浅滩航道条件^[20], 近年淮河闸控后入江流量与长江洪峰错开, 其影响程度减弱^[13]。研究河段左岸嘶马

收稿日期: 2023-01-10; 网络出版日期: 2023-03-28

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20230328.1048.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52279066; U2240206)

作者简介: 杨云平(1985—), 男, 黑龙江绥化人, 副研究员, 博士, 主要从事河流演变理论与治理技术方面研究。

E-mail: yangsan520_521@163.com

通信作者: 郑金海, E-mail: jhzheng@hhu.edu.cn

弯道因二元土体结构、表底层流速等差异,1954—2001年期间为崩退态势^[21]。同时,研究河段上游镇扬河段历史时期河势条件调整较大,受五峰山边界约束,上游河势调整对落成洲河段滩槽演变的影响较小^[22-23],近年来和畅洲汊道分流关系调整与落成洲汊道分流比无明显对应关系^[13,24]。落成洲河段已实施了2期航道整治工程,工程取得了预期效果^[25-26],建设过程中受2017年汛前中水历时长度的影响,汛期三益桥浅滩碍航程度高于大水年的2016年^[13]。综上分析,受河床冲淤泥沙来源与水动力等差异影响,落成洲河段内洲滩演变联动关系及对浅滩航道条件的影响机制仍需深入探究,航道工程作用下的浅滩碍航动力机制需要进一步厘清,以期支撑南京以下12.5 m深水航道后续完善工程论证工作的模型试验与工程可行性报告编制。

本研究以长江下游落成洲河段为对象,采用1959—2021年实测水文泥沙与地形数据,分析河床冲淤强度与分布特征,研究10.0 m洲滩联动关系及对12.5 m航槽的影响,综合分析落成洲河段边心滩—浅滩演变的关联机制、上游河床冲刷供沙对浅滩演变的影响。

1 研究区域

落成洲河段位于长江下游扬中段(图1(a)),上游为和畅洲河段,中间由五峰山弯道连接,下游依次为鳊鱼沙和江阴河段。落成洲河段位于太平洲左汉上段,河道形态为弯曲型分汊,左岸侧分布有三益桥边滩、江中为落成洲,且左汊为主汊和主航道(图1(b))。落成洲河段已实施了2期航道整治工程:一期工程为落成洲洲头护滩工程(2011—2012年);南京以下12.5 m深水航道二期工程为落成洲头部潜堤(长度为1 700 m)、潜堤左侧和右侧共4条丁坝、落成洲左缘3条丁坝。二期工程落成洲河段工程于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月全部竣工。

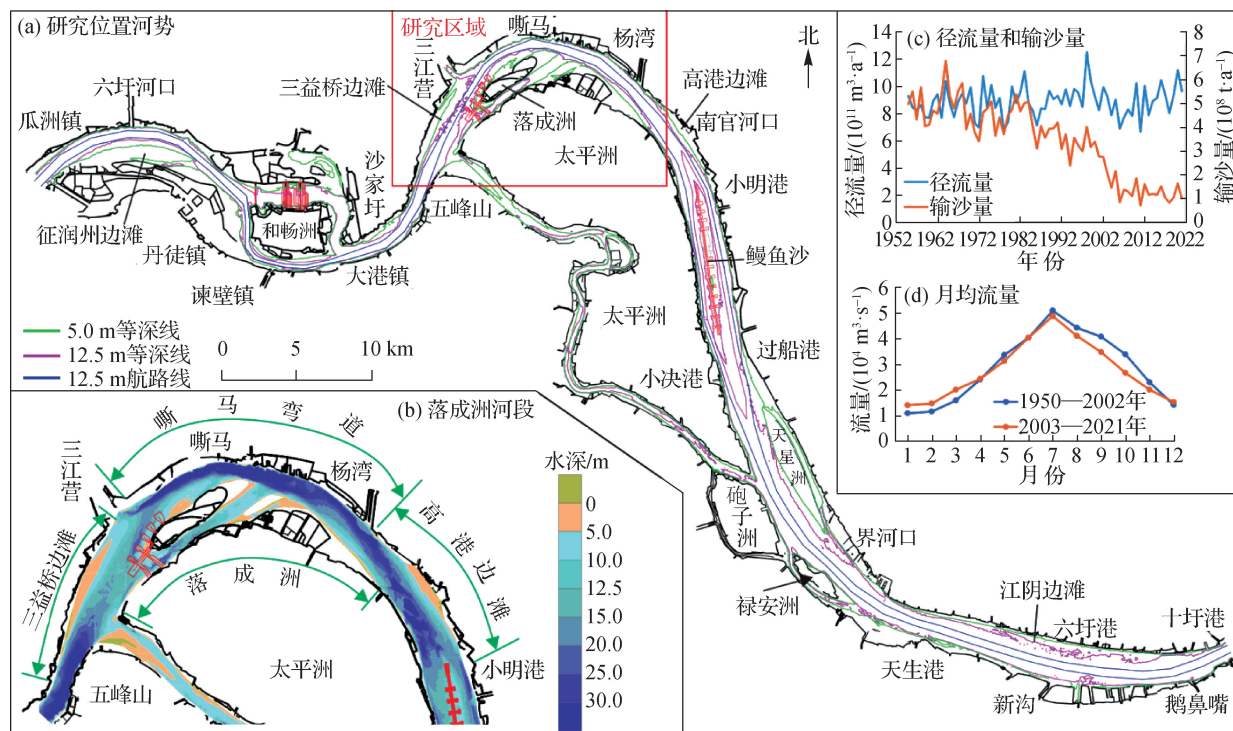


图1 落成洲河段的地理位置与水沙条件

Fig.1 Geographical location and water and sediment conditions of Luochengzhou reach

大通站可代表落成洲河段流域来水来沙条件,1955—2021 年径流量无趋势性变化,输沙量为减少态势;1955—2002 年、2003—2021 年大通站年均径流量分别为 8 924 亿 m³/a 和 8 827 亿 m³/a,年均输沙量分别为 4.26 亿 t/a 和 1.32 亿 t/a,径流量和输沙量的减幅分别为 1.1% 和 69.0% (图 1(c))。2003—2021 年与 1950—2002 年比较,月均流量为汛期减少、汛后枯水期增加的特征,变幅为 -21.3% ~28.9% (图 1(d))。

2 研究资料与方法

2.1 研究资料

收集了 1950—2021 年大通站流量和输沙量数据,分析研究河段流域来水来沙条件变化;收集了 1959—2021 年落成洲河段河床地形 36 套,比例尺为 1:10 000 (部分年份为航道监测图),分析河床冲淤强度、冲淤分布与洲滩形态等变化;收集了 2012—2021 年期间落成洲河段水文监测数据,分析代表断面流速的横向分布特征。以上实测数据的特征、时间长度与来源见表 1。

表 1 研究数据类型、来源及研究内容对照表
Table 1 Comparison table of research data types, sources and research contents

数据类型	时间长度	数据特征	数据来源
大通站流量、输沙量	1950—2021 年	逐日、月均、年均	长江航道局、长江泥沙公报、长江水利委
河床地形	1959—2021 年	36 套,比例尺为 1:10 000	员会水文局、长江南京以下深水航道建设
水深、流速	2012—2021 年	洪季/枯季的现场监测	工程指挥部

2.2 研究方法

2.2.1 河床冲淤与航道条件

河床冲淤计算方法采用截面法,具体参见文献[3-4]。长江感潮河段通航区域采用定线制,航道宽度为 350 ~500 m,非浅滩段航道宽度为 500 m,浅滩段为 350 m。在本研究中,采用航行基准面以下 12.5 m 等深线进行航道条件分析,以厘清浅滩段碍航程度与各要素的关系。

2.2.2 断面流速与流量计算方法

采用船载 ADCP 进行流速测量与流量计算,测量横向间距为 100 m。利用 ADCP 测量得到水面 0H (水面, H 为水深)、0.2H、0.4H、0.6H、0.8H 和 1.0H (水底)的流速和流向,垂线平均流速采用矢量合成法。

(1) 测点流速分解为东西方向流速(V_E)和南北方向流速(V_N), $V_E = V\sin\alpha$, $V_N = V\cos\alpha$ 。其中, V 为 ADCP 测得流速, α 为与正北方向夹角。

(2) 加权法计算垂线 m 的流速 V_{Em} 与 V_{Nm} , 即:

$$V_{Em} = \frac{1}{10}(V_{0E} + 2V_{0.2E} + 2V_{0.4E} + 2V_{0.6E} + 2V_{0.8E} + V_{1.0E})$$

(1)

$$V_{Nm} = \frac{1}{10}(V_{0N} + 2V_{0.2N} + 2V_{0.4N} + 2V_{0.6N} + 2V_{0.8N} + V_{1.0N})$$

(2)

(3) 矢量法计算垂线平均流速及流向, 即

$$V_m = \sqrt{V_{Em}^2 + V_{Nm}^2}$$

(3)

(4) 断面流量计算公式为

$$Q = \iint_s \boldsymbol{u} \cdot \boldsymbol{\xi} ds = |V_b| dzdt$$

(4)

式中: Q 为流量, m³/s; s 为河流某断面面积, m²; $\boldsymbol{u}$ 为河流断面某点处流量矢量; $\boldsymbol{\xi}$ 为作业船航迹上的单

位法线矢量; V_b 为作业船速度, z 为自河底高程起算的水深, m ; t 为时间。

将沿航迹的断面离散为 n 个微小断面, 流量的计算公式为

$$Q = \int_0^T \left(\int_0^H u dz \right) \xi |V_b| dt = \int_0^T \left[\int_0^H (u \times V_b) \right] k dz dt = \sum_{i=1}^n [(V \times V_b) k]_i H_i \Delta t \tag{5}$$

式中: T 为跨断面航行时间, h ; H_i 为微断面 i 处的水深, m ; n 为断面内总的微小断面数目; Δt 为相应于测量微断面的测量时间平均步长, s ; k 为垂向单位矢量; V 为相应于测量微小断面的垂线平均流速, m/s 。

$$V = \frac{1}{H} \int_0^H u dz \tag{6}$$

汉道分流比体现某一汉道进口位置流量的分配关系, 分汉系数为 $j(j=1, 2, 3 \cdots N, N$ 为整数), 某一汉道的分流量为 Q_j , 汉道分流比(η_j)为

$$\eta_j = \frac{Q_j}{Q} \times 100\% \tag{7}$$

3 结果及讨论

3.1 落成洲河段河床冲淤与航道条件变化

以落成洲河段所在的扬中河段为对象, 分析 1981—2021 年(测量时间为每年的汛后枯水期)河床冲淤强度与分布特征; 以 12.5 m 等深线为对象, 分析落成洲河段三益桥浅滩形态的时空变化过程与发育特征。

3.1.1 河床冲淤强度变化

1981—2001 年, 落成洲进口段以冲刷为主, 左岸侧三益桥边滩淤积但宽度较小, 嘶马弯道冲刷且落成洲左缘及下游侧均为淤积态势, 出口段高港边滩淤积幅度大(图 2(a)); 2001—2016 年, 落成洲进口段与右汉发生显著冲刷, 三益桥边滩显著淤宽, 嘶马弯道区域冲淤变幅减小, 高港边滩冲刷且淤积范围减小(图 2(b)); 2016—2021 年, 落成洲进口段以小幅冲刷为主, 三益桥边滩上段与尾部冲刷且中段略有淤宽, 落成洲左缘和右汉仍延续小幅冲刷态势, 高港边滩冲淤幅度较小(图 2(c))。1981—1991 年扬中河段河床为淤积态势, 1991—2021 年各时段均为冲刷态势; 1981—2021 年枯水、平滩和洪水河槽冲刷量分别为 3.97 亿、3.64 亿和 4.14 亿 m^3 , 冲刷强度分别为 1 324.10 万、1 214.63 万和 1 385.50 万 m^3/a , 表现为深槽冲刷、低滩(平滩河槽与枯水河槽之间区域)淤积和高滩(洪水河槽与平滩河槽之间区域)冲刷态势, 其中枯水河槽冲刷量占洪水河槽的 95.9%(表 2)。2006—2021 年, 扬中河段河床冲刷强度高于蓄水前各时段, 且 2016—2021 年冲刷强度低于 2006—2016 年(表 2)。

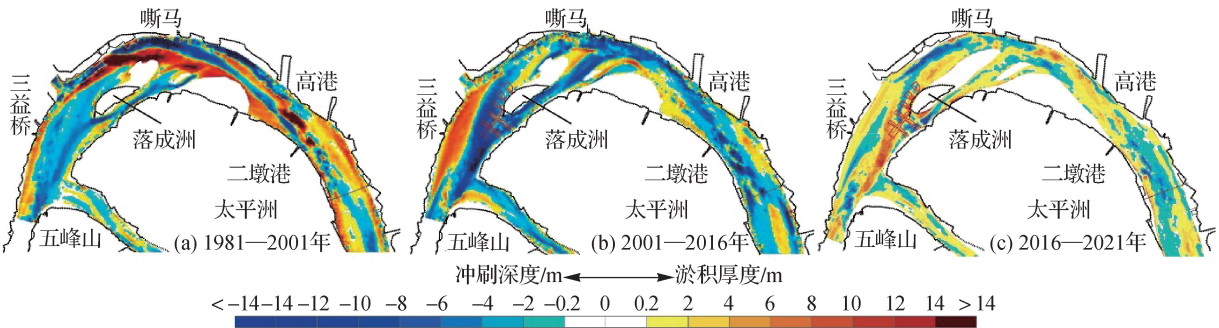


图2 落成洲河段河床冲淤分布
Fig. 2 Distribution of scouring and deposition of Luochengzhou reach

表 2 扬中河段冲淤量与大通站输沙量关系

Table 2 Relationship between scouring and distribution amount and sediment amount at Datong station of Yangzhong reach

年份	河床淤积强度/(万 m ³ · a ⁻¹)			大通站输沙量/ (亿 t · a ⁻¹)	年份	河床淤积强度/(万 m ³ · a ⁻¹)			大通站输沙量/ (亿 t · a ⁻¹)
	枯水河槽	平滩河槽	洪水河槽			枯水河槽	平滩河槽	洪水河槽	
1981—1991 年	1 096.60	1 303.80	1 580.80	4.16	2006—2011 年	-4 113.00	-4 109.00	-4 400.40	1.27
1991—1998 年	-466.86	-639.43	-696.43	3.28	2011—2016 年	-2 817.40	-2 809.40	-3 887.40	1.33
1998—2001 年	-1 174.00	-568.33	-1 044.67	3.11	2016—2021 年	-1 104.00	-1 016.80	-992.80	1.16
2001—2006 年	-745.40	-724.00	-562.20	1.86	1981—2021 年	-1 324.10	-1 214.63	-1 380.50	2.61

3.1.2 水深 12.5 m 槽形态变化特征

南京以下深水航道工程的目标水深为 12.5 m，以 12.5 m 等深线为对象，根据 1976—2021 年落成洲河段三益桥浅滩段航道条件变化(图 3)，分析其年际与年内变化特征。

(1) 1976—2000 年，三益桥浅滩段 12.5 m 槽上下交错且以断开为主，大水年份断开距离较大，如 1998 年和 1999 年大水年份的断开距离分别为 1 800 m 和 4 680 m(图 3(a))。

(2) 2003—2009 年，三益桥边滩尾部水深不足 12.5 m 的浅滩与落成洲左缘分离，12.5 m 槽逐渐贯通。2007—2009 年，三益桥边滩尾部形态变化较大，落成洲心滩头部 12.5 m 槽冲刷后退，如 2008 年河道中部出现水深不足 12.5 m 的浅包(图 3(b)，图 3(c))。

(3) 2009—2015 年，三益桥边滩 12.5 m 水深以浅滩体与落成洲左缘分离，变化主要集中在边滩尾部，尾部向下游淤积延伸加剧了上下深槽交错距离，不利于下浅区航道条件的稳定(图 3(d))。

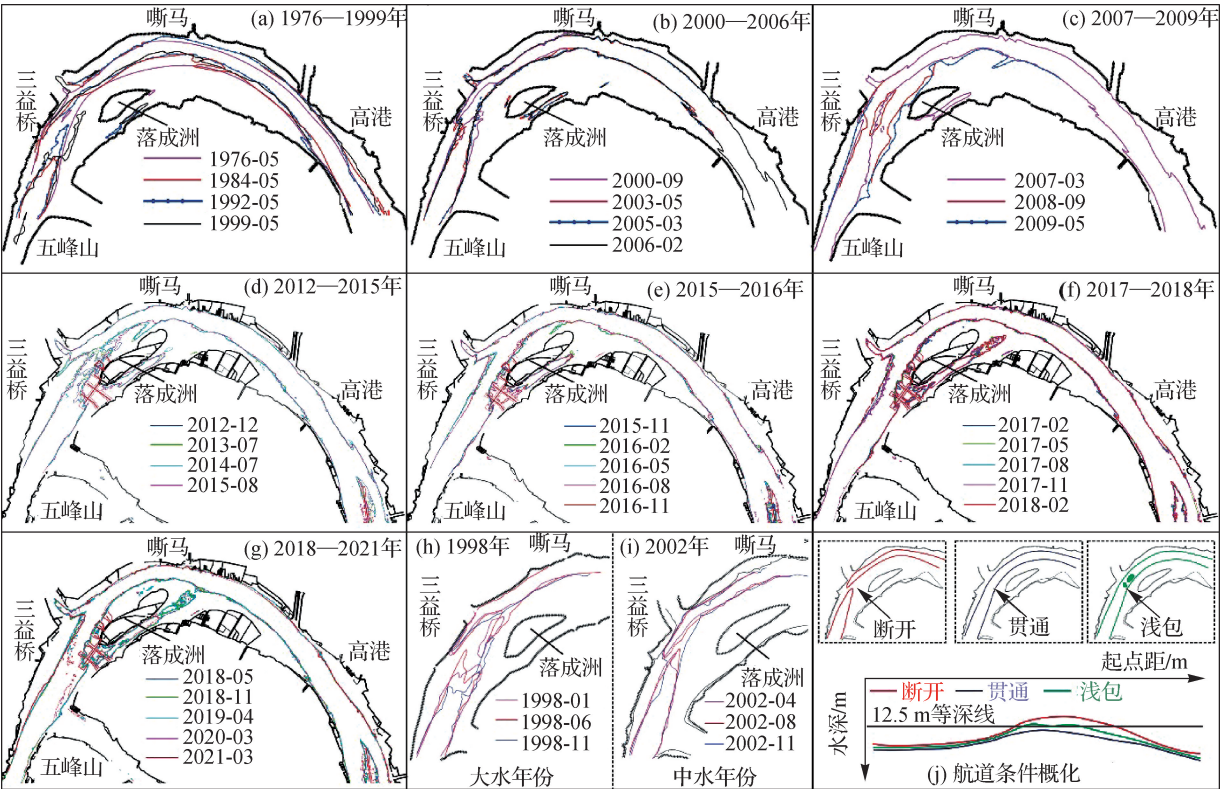


图 3 落成洲河段 12.5 m 等深线变化过程
Fig.3 Variation process of 12.5 m isobath of Luochengzhou reach

(4) 2016—2021 年, 随着南京以下深水航道二期工程效果发挥, 三益桥边滩尾部冲刷上提, 下浅区 12.5 m 水深航道条件得到改善, 仅在洪水期存在零星碍航浅包(图 3(e)—图 3(g))。

(5) 1998 年为大水年份, 年内各测次三益桥浅滩段 12.5 m 槽均断开, 受洪水大流量(最大值为 83 600 m³/s)时期主流趋直作用影响, 进口段 12.5 m 槽尾端显著右摆, 有利于三益桥边滩淤涨(图 3(h)); 2002 年为中水年份, 年内 4 月和 8 月 12.5 m 槽断开, 至汛后 11 月逐渐贯通(图 3(i))。综合而言, 三益桥浅滩段大水年份汛期航道条件较差, 中、小水年份有利于航道条件的维持或发展。

3.2 落成洲河段洲滩形态演变过程与联动关系分析

以 10.0 m 等深线为对象, 分析落成洲河段三益桥边滩、落成洲、嘶马弯道、落成洲右汊河槽等演变过程及联动关系。

3.2.1 洲滩形态演变过程与形态特征变化

分析 1959—2021 年三益桥边滩、落成洲演变过程与特征(图 4), 洲滩之间的演变关系的时段特征见图 4(h), 主要变化特征如下:

(1) 1959—1984 年, 落成洲河段以落成洲洲体和嘶马弯道的联动性演变为主; 落成洲河段为微弯分汊河型, 经历了 1964 年、1973 年和 1983 年大洪水, 嘶马弯道崩退引起落成洲左缘大幅淤积, 淤宽态势的落成洲向左挤压水流后会加剧下一阶段嘶马弯道的蚀退。

(2) 1984—2003 年(图 4(a)—图 4(b)), 嘶马弯道崩退逐渐得到控制, 来沙量减少的影响集中在落成洲头部与左缘; 这一期间落成洲头部与左缘形态变化遵循弯曲河型的演变特征^[27], 即凸岸侧边滩因水情和年内流量过程差异表现为大水年份头部及左缘蚀退、中小水年份淤宽。同时, 落成洲头部及左缘冲刷增加了进

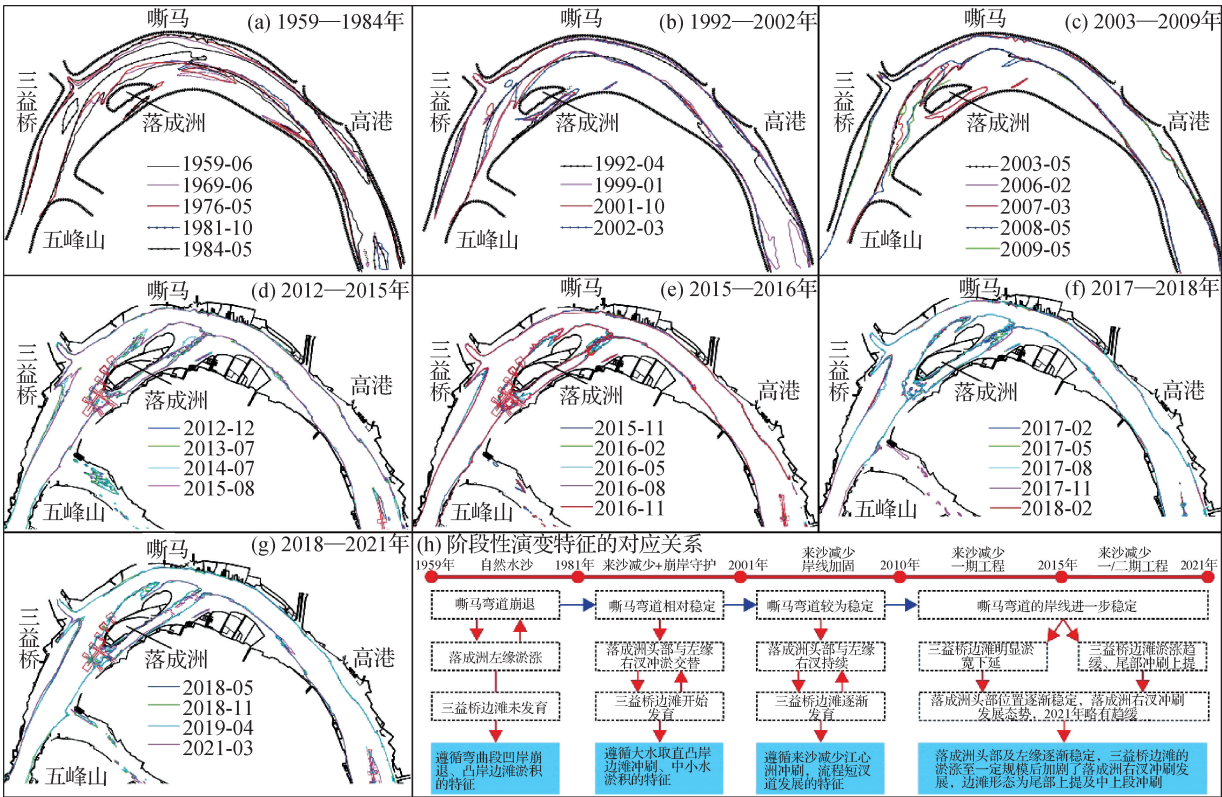


图4 落成洲河段 10.0 m 等深线变化过程

Fig.4 Variation process of 10.0 m isobath of Luochengzhou reach

口段河道宽度,为三益桥边滩淤宽淤长提供了形态发育的空间环境。

(3) 2003—2009 年(图 4(c)),随着落成洲头部与左缘的持续冲刷,为三益桥边滩淤积进一步提供了横向的发展空间,促使三益桥边滩进入了快速淤涨阶段。

(4) 2009—2016 年(图 4(d)—图 4(e)),为抑制落成洲头部与左缘冲刷对航道水深条件的影响,2011—2012 年实施了落成洲洲头护滩工程,初步稳定了落成洲头部位置,三益桥边滩仍处于淤宽下延态势。

(5) 2016—2021 年(图 4(e)—图 4(g)),南京以下深水航道二期工程实施后,落成洲洲头与左缘形态稳定性增强,工程区域对应的三益桥边滩尾部表现为冲刷上提、中段略有淤宽与上段冲刷后退的变化特征。

3.2.2 汉道内洲滩形态演变联动关系

1959—2021 年,三益桥边滩 10.0 m 以浅面积为增大态势,落成洲面积为先增加后减少(分界年份为 1992 年),嘶马弯道面积为先减少后增加且 2010 年以来变化不大,落成洲右汉 10.0 m 以深面积为增大态势(图 5(a))。1959—2008 年落成洲河段洲滩面积变化不大,2010—2016 年面积较 2001—2008 年减少 6.16%,2016—2021 年较 2010—2016 年增幅为 1.89%(图 5(b));二期工程落成洲坝体和护滩带的面积约为 141.7 ha,工程面积增幅高于落成洲面积变化,即航道工程建设有效保护了洲滩的完整性。1959—2001 年,落成洲河段处于准自然状态,上游五峰山弯道形态与出口主流位置稳定,且三益桥边滩一侧岸线相对稳定,尚无三益桥边滩发育的水动力环境;这一时期的落成洲洲体面积与嘶马弯道面积关系($R^2 = 0.81$,图 5(c))高于与三益桥边滩面积关系($R^2 = 0.49$,图 5(d)),即嘶马弯道崩退为落成洲边滩发育提供了横向空间,基本符合弯道段凸岸边滩淤积、凹岸冲刷的演变规律^[27]。2001—2008 年,伴随嘶马弯道岸线守护作用的加强,稳定了左岸侧岸线边界,同时随着三益桥边滩逐渐淤涨,落成洲洲体受流域来沙量减少、三益桥边滩淤积、嘶马弯道边界稳定等综合作用,落成洲洲体 10.0 m 以浅面积为减少态势。2010 年以来,受航道整治一期和二期工程、嘶马弯道守护等综合影响,落成洲洲体面积(不含右汉 10 m 槽面积)未延续 1992—2008 年期间的减少态势(减幅为 16.0%),维持了相对稳定状态(2010—2021 年面积增幅为 4.6%)。由于一期和二期航道工程作用,2010—2021 年三益桥边滩维持了先快速淤涨后小幅减少的变化特点,但落成洲面积并未出现减少,表明航道工程较好地守护了落成洲头部与左缘滩体,使得三益桥边滩演变对落成洲形态影响的显著性降低(嘶马弯道与落成洲面积的相关性 $R^2 = 0.01$,见图 5(c);三益桥边滩与落成洲面积的相关性 $R^2 = 0.11$,见图 5(d))。1959—2021 年期间的 4 个时段,三益桥边滩面积淤涨均会引起落成洲右汉 10.0 m 槽范围扩大,但当三益桥边滩规模较小时(面积小于 385 ha)对右汉 10.0 m 槽范围的影响较小(图 5(e))。2010—2021 年,随着三益桥边滩规模的快速增加,落成洲右汉 10 m 槽范围显著增加且相关性显著增大($R^2 = 0.94$),2018—2019 年右汉 10.0 m 槽范围仍较大且出口为贯通状态,2021 年略有萎缩及出口断开。

3.3 三益桥浅滩的碍航机制分析

上下游汉道间连接段特征决定了联动关系强弱,具有阻断上下游联动演变关系的河段称为阻隔性河流^[28-29]。历史时期 1868—1971 年^[22]、近代 1959—2019 年^[30]不论上游镇扬河段(世业洲汉道、征润洲边滩、和畅洲汉道)洲滩形态与河势如何变化,以及出口受五峰山与两岸涉水工程等边界约束,五峰山弯道均维持了形态稳定,即为下游落成洲河段提供了相对稳定的水动力条件。五峰山弯道形态微弯且长度为 7 400 m(大于阻隔性河流最小长度 3 200 m^[28-29]),河相系数为 1.25~1.38(阻隔性河流河相系数不大于 4.0^[28-29]),且出口有节点(五峰山)控制,符合阻隔性河流具有归顺水流的作用与功能。落成洲左汉和右汉长度比值低于 1.5,符合汉长比较小的汉道主支汉格局受入口水动力条件影响的特征^[31],甚至改变汉道发展速率^[32],分析中重点关注落成洲河段水动力轴线的变化。因此,三益桥浅滩碍航因子主要从上游河床供沙、流量过程和进口段水动力轴线、汉道间不均衡冲刷及洲滩形态调整等方面进行分析,并综合分析航道工程作用下浅滩碍航特性的变化。

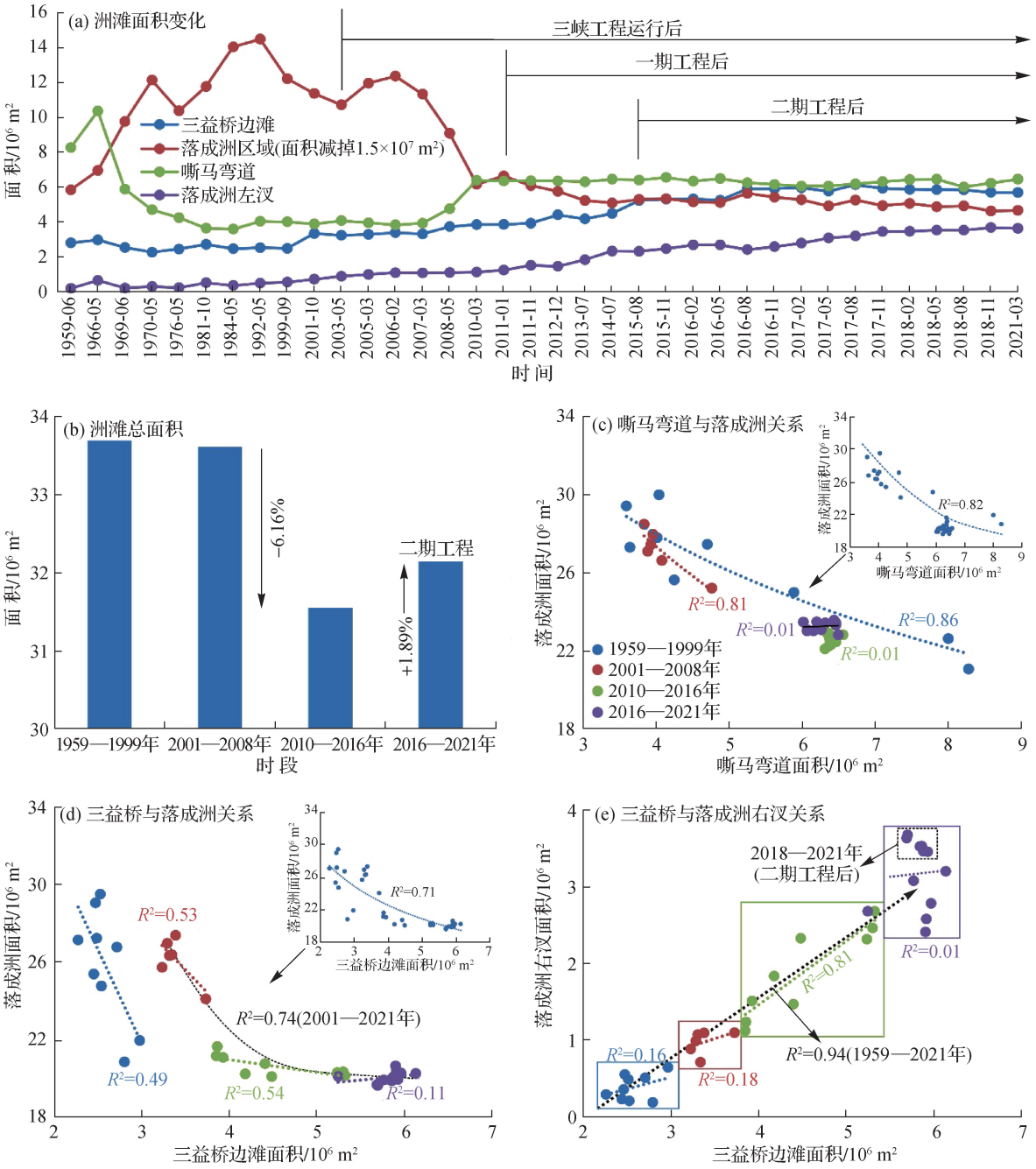


图5 落成洲河段滩群面积与联动演变关系

Fig.5 Relationship between the central bar and beach area of Luochengzhou reach

3.3.1 上游河段河床冲刷供沙对浅滩演变的影响

1976—2002 年, 三益桥浅滩 12.5 m 水深航道条件变幅较大, 大水年碍航程度较大, 12.5 m 槽以断开为主, 对应这一时期上游和畅洲河段河床冲刷供沙量较大是原因之一(图 6)。2003—2011 年, 三益桥浅滩 12.5 m 槽贯通(最大宽度超 500 m), 对应这一时期上游畅洲河段河床冲刷供沙量也为减少态势。2012—2014 年, 三益桥浅滩航道条件较差, 与 2012 年大水以及上游畅洲河段前一时期河床冲刷供沙作用有关。2015—2021 年, 随着二期工程的建设与运行效果逐步发挥, 三益桥边滩尾部冲刷上提, 下浅区航道条件改善, 航宽不足区域已上提至三益桥边滩中上段, 航道宽度仍小于 350 m。其中, 2017 年 8 月三益桥上

浅区 12.5 m 槽宽度仅为 7 m，疏浚船方量为 167.45 万 m³，参考文献[10]的换算关系，换算后的河床方量为 55.8 万 m³(表 3)，这一特征的出现主要与 2017 年中水历时持续天数长有关^[13]。总体而言，近年来上游和畅洲河段河床冲刷强度的减弱使得进入下游河段沙量减少，对三益桥浅滩段航道条件的稳定有利。

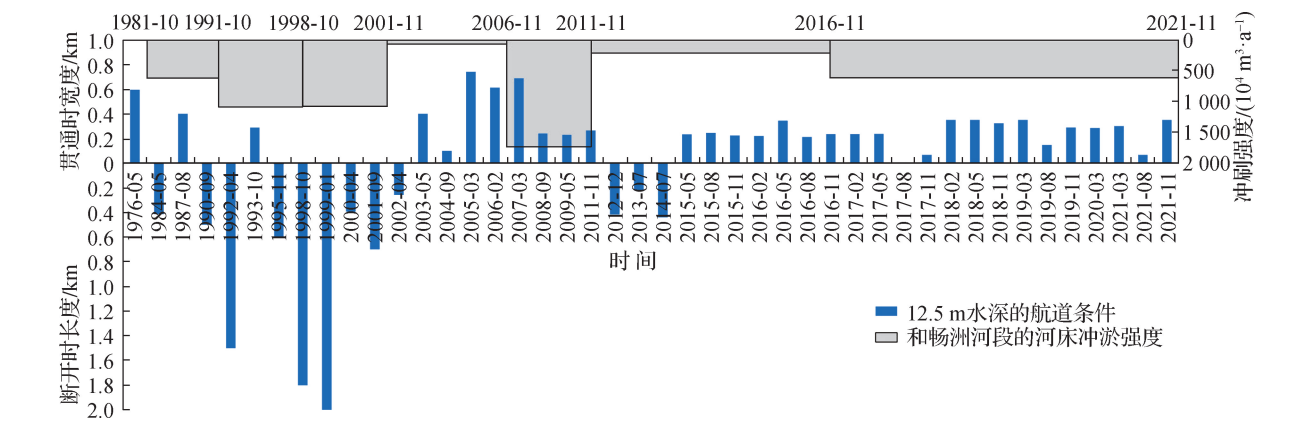


图 6 三益桥浅滩段航道条件与和畅洲河段冲刷强度的关系

Fig. 6 Relation between waterway condition of Sanyiqiao beach and scouring intensity of Hechangzhou reach

表 3 落成洲河段航道疏浚量

Table 3 Waterway dredging amount of Luochengzhou reach

年份	疏浚量/万 m ³	维护水深/m	年份	疏浚量/万 m ³	维护水深/m	年份	疏浚量/万 m ³	维护水深/m
2012 年	65.37	10.5	2016 年	7.07	10.5	2019 年	354.00	12.5
2013 年	108.72	10.5	2017 年	167.45	10.5	2020 年	326.00	12.5
2014 年	332.52	10.5	2018 年	183.00	10.5	2021 年	321.00	12.5
2015 年	42.70	10.5						

3.3.2 水动力条件对浅滩演变的影响

1959 年以来，上游和畅洲河段洲滩形态^[22]、汉道分流关系^[30]均不稳定，会影响出口段进入五峰山弯道的水动力条件。已有研究证实，和畅洲汉道分流关系变化与落成洲汉道分流比无显著的对应关系^[13]，二期工程运行以来的分流关系仍遵循这一变化特征^[33]。因此，本研究重点从五峰山弯道段水动力条件出发，分析出口段动力条件、落成洲河段内水动力环境等变化与三益桥浅滩演变的关系。

2 期航道整治工程的实施稳定了落成洲河段滩槽格局，在一系列岸线控制工程作用下河势边界得到了稳定，选取 2012 年以来水文监测资料分析五峰山弯道、落成洲河段主流摆动特征。2012—2021 年，大通站流量在 15 000~45 000 m³/s 范围变动时(图 7(a))，五峰山弯道出口主流位置均未发生调整，贴近凹岸一侧(图 7(b))，即落成洲河段进流条件因五峰山弯道具有阻隔性河流特征而处于稳定状态；上游水流经五峰山弯道进入落成洲河段后，枯水流量(大通站 $Q < 20\,000\text{ m}^3/\text{s}$)时主流位置与深槽位置基本一致，随着流量增加(大通站 $Q > 40\,000\text{ m}^3/\text{s}$)其主流位置逐渐摆向三益桥边滩(图 7(c))，使得上游河床冲刷的泥沙进入落成洲河段沿三益桥边滩向下游输移；落成洲进口段水流进入左汉后，枯水流量(大通站 $Q < 20\,000\text{ m}^3/\text{s}$)时主流位于河岸右侧，随着流量增加(大通站 $Q > 40\,000\text{ m}^3/\text{s}$)其主流逐渐向落成洲左缘摆动(图 7(d))。上游河段河势与水动力关系等变化经过五峰山弯道的归顺调整，出口进入落成洲河段主流动力轴线基本稳定；主流逐渐进入落成洲左汉时，枯水期和洪水期主流动力轴线存在横向由右向左的摆动特征，上游河段冲刷供给的泥沙进入主流摆动区域引起浅滩淤积或碍航。综上分析认为，上游和畅洲河段水动力调整未影响落成洲河段入流动力条件，落成洲河段内的动力变化遵循弯曲河型水动力特点，年内流量差异越大其水动力轴线横向摆

幅越大,不利于浅滩区域水动力的稳定。

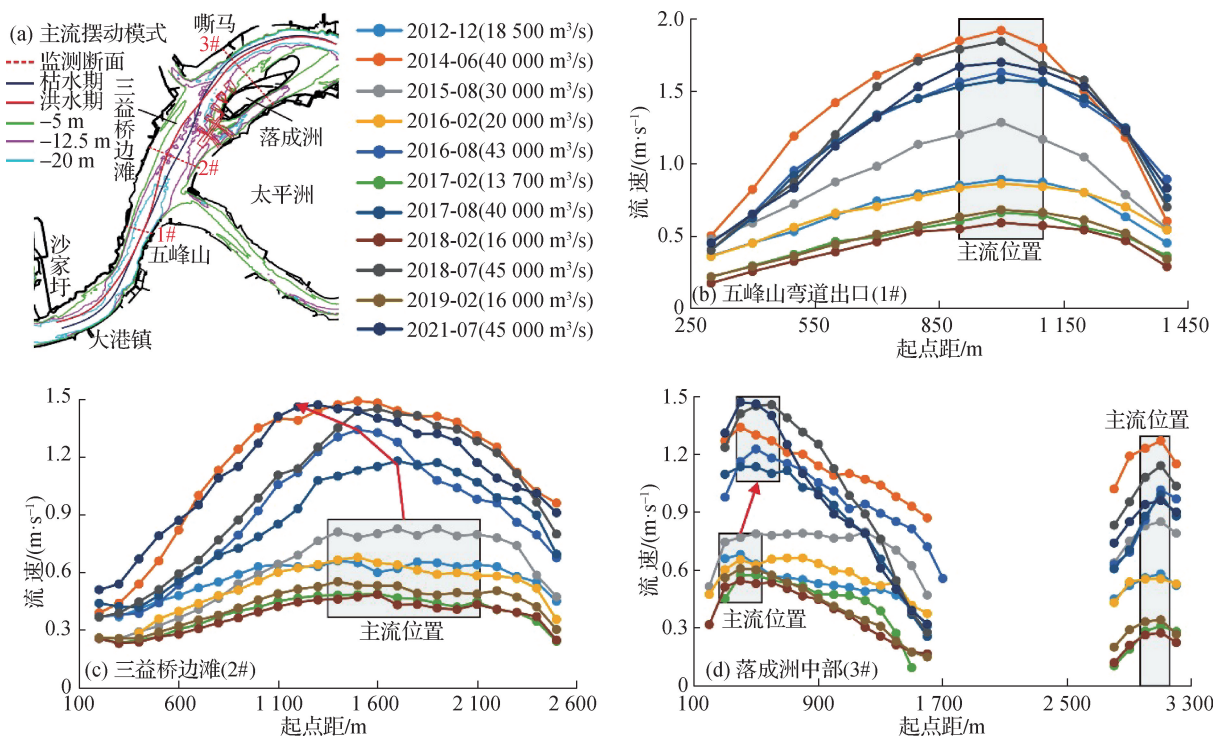


图7 五峰山弯道—落成洲河段流速分布与主流变化

Fig. 7 Velocity distribution and mainstream variation of Wufengshan to Luochengzhou reach

从三益桥边滩、落成洲代表断面的流速分布特征可以得到,当大通站流量 $Q < 20\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时主流位置基本稳定, $Q > 40\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时主流摆动范围显著增加。因此,对于三益桥边滩、落成洲左汊而言,流量过程不稳定系数(μ)定义如下:

$$\mu = \frac{T_1}{T_2} \quad (8)$$

式中: T_1 为大通站流量 $Q < 20\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 的天数; T_2 为大通站流量 $Q > 40\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 的天数。

冲积型河流演变具有一定滞后性^[34-35],长江中下游河床冲淤与水文过程响应年份一般为3~5 a^[34]。为便于研究选取5 a作为参照时段,绘制大通站 $Q < 20\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $20\,000\text{ m}^3/\text{s} \leq Q \leq 40\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 和 $Q > 40\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 的5 a年平均天数变化图(图8)。当大通站流量过程不稳定系数处于增加并达到最大时,对应的三益桥浅滩12.5 m等深线以断开为主。同时注意到,2016—2021年的流量过程不稳定系数较大,但12.5 m等深线为贯通或存在零星浅包,这说明已建的一期和二期航道整治工程效果得到了充分发挥,达到了改善三益桥下浅区航道条件的目的。

3.3.3 汊道间冲淤不均衡对浅滩演变的影响

1984—2021年,落成洲右汊冲刷发展,引起右汊分流比相对增加(图9),一定程度减弱了左汊主航道水动力强度,不利于主航道12.5 m水深航道条件的稳定。三峡工程运行后的2002—2011年,落成洲左汊的冲刷强度显著高于蓄水前的1967—2002年和航道工程后的2011—2022年。主要原因有:①三峡工程运行后,汛期流域来沙量和悬沙浓度显著降低,受河道形态作用的中洪水期水流进入右汊,不饱和水流加速了右汊冲刷态势;②三益桥边滩的淤宽与下延,引起水流摆向右岸侧并相对增强了落成洲头部及右汊的冲刷动力,为落成洲右汊的冲刷提供了动力环境。

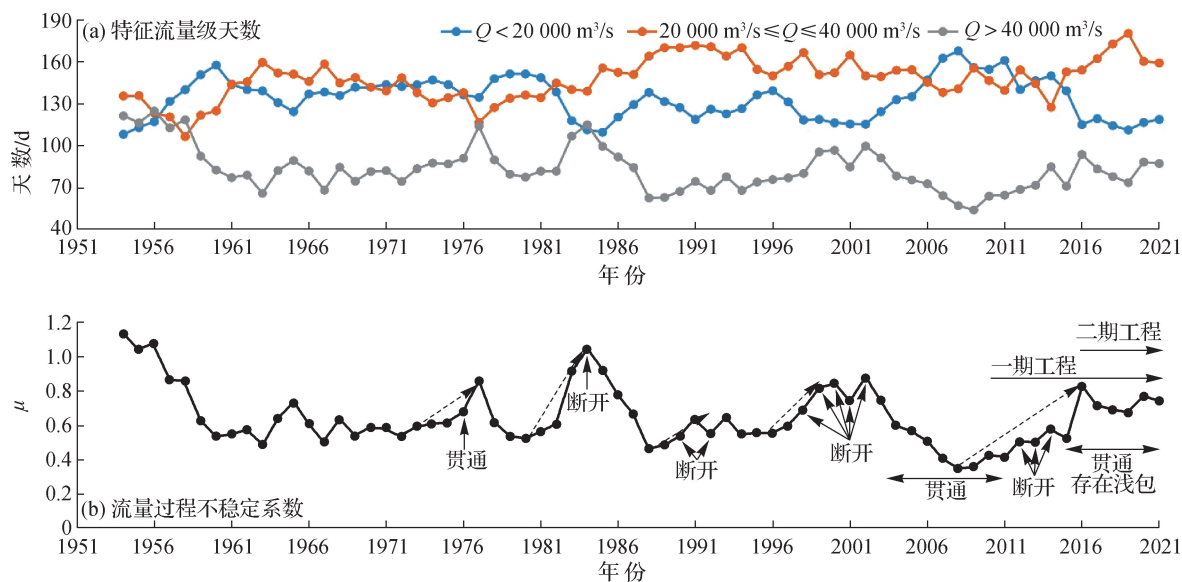


图 8 大通站特征流量级天数的特征变化

Fig. 8 Characteristic changes of days of characteristic flow level at Datong station

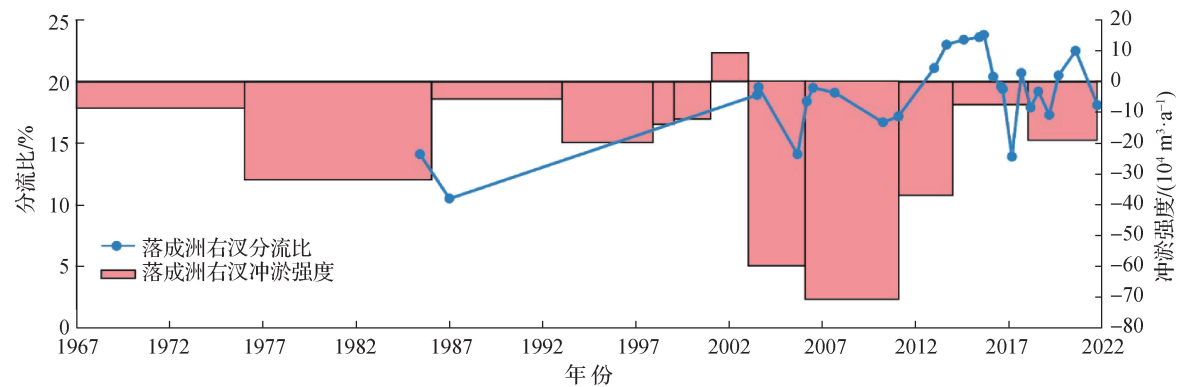


图 9 落成洲河段右汉冲刷量与右汉分流比关系

Fig. 9 Relationship between the scouring amount of right branch and the diverting ratio of Luochengzhou reach

3.3.4 洲滩形态演变关系对浅滩演变的影响

1959—1999 年(图 10),落成洲河段进口段和左汉进口段因河道形态展宽后水动力相对减弱易形成泥沙淤积体;这一时期嘶马弯道崩退引起落成洲淤积,落成洲左汉的上下深槽错开,河槽内水深不足 12.5 m 且碍航程度大。2001—2010 年(图 10),流域悬移质来沙量显著减少,河床发生悬移质冲刷并改善了三益桥浅滩段航道条件,上游河段冲刷供给的泥沙进入落成洲进口放宽段后沿凹岸侧(左岸)输移,为三益桥边滩发育提供了沙源(10.0 m 以浅面积由 334.15 ha 增加至 372.98 ha,增幅为 11.6%,图 5(a)),这一时期落成洲面积减幅为 8.6%。2011—2016 年(图 10),因落成洲头部航道整治工程的实施其左缘初步稳定,三益桥边滩仍延续淤涨态势(10.0 m 以浅面积由 385.00 ha 增加至 532.50 ha,增幅为 38.3%,图 5(a)),对应落成洲面积减少 4.8%;2016—2021 年(图 10),南京以下 12.5 m 深水航道二期工程实施,受上游和畅洲河段河床冲刷供沙的影响,虽然三益桥边滩仍出现了小幅淤积但尾部冲刷上提(2016 年 10.0 m 以浅面积由 524.61 ha 增加至 2021 年的 569.00 ha,增幅为 8.5%,图 5(a)),对应落成洲面积减少 2.2%。2016—2021 年,由于 2 期航道工程作用使得放宽段的落成洲洲头位置逐渐上提,水深不足 12.5 m 或航道宽度不足 350 m 的区域上提并形成碍航的上浅区。

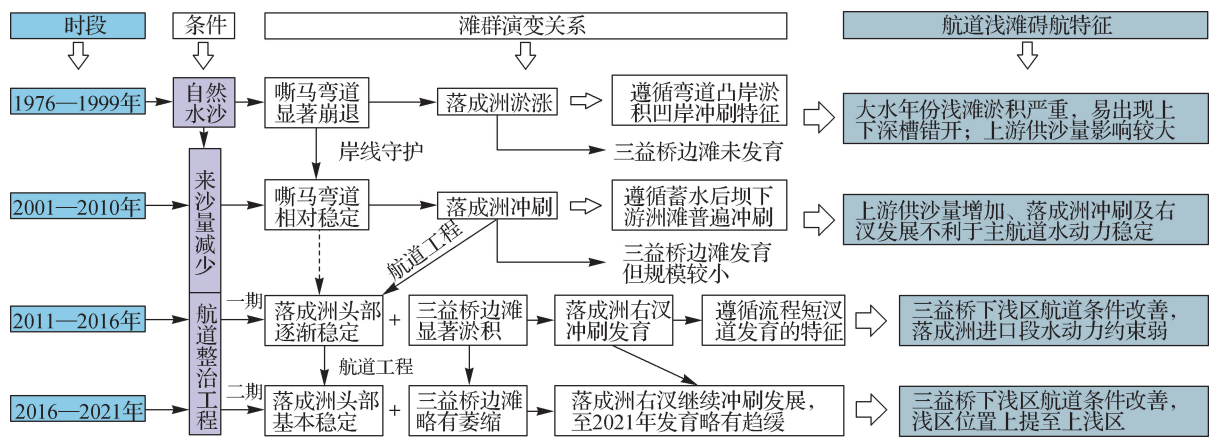


图 10 落成洲河段滩体演变与航道条件关系

Fig. 10 Relationship between central bar and beach variation and waterway conditions of Luochengzhou reach

在一期和二期航道整治工程实施后, 稳定了落成洲头部与左缘的洲滩边界, 三益桥下浅区 12.5 m 水深航道条件得到改善; 二期工程完工运行以来, 落成洲右汊仍延续了冲刷发展态势、三益桥边滩中上段略有冲刷, 一定程度减弱了已建工程上游区域的水动力条件, 不利于 12.5 m 水深航道条件的维持或畅通。南京以下 12.5 m 深水航道后续完善工程论证中, 建议落成洲头部已建工程上延、限制落成洲右汊冲刷发展、稳定岸线边界等工程措施, 以增强三益桥上浅区水动力条件为目的, 并实现达到改善航道水深条件的目标。同时, 在后续完善工程方案研究中, 需充分考虑落成洲洲头锚地、左汊中部渡口等外部环境的制约关系。

4 结 论

通过 1959—2021 年落成洲河段洲滩变形、河床冲淤、浅滩演变等综合分析, 明确了边心滩演变的联动关系, 识别了上游河床冲刷供沙、水动力条件、汊道间不均衡冲刷、洲滩形态、航道工程等对浅滩演变的驱动机制。取得的主要结论为:

- (1) 三峡工程运行前, 落成洲河段嘶马弯道崩退引起落成洲左缘淤积, 此时的三益桥边滩未发育, 即嘶马弯道崩退是洲滩联动演变的主因; 三峡工程运行后至航道整治工程前, 流域来沙减少使得落成洲河段洲滩整体为冲刷态势, 为三益桥边滩淤涨提供了发育空间, 逐渐淤涨的三益桥边滩与水沙条件共同作用使得落成洲左缘冲刷及和右汊处于冲刷态势, 即三益桥边滩形态变化逐渐由被动淤涨转为洲滩联动演变的主因; 随着航道整治工程的运行, 落成洲河段滩群间联动演变关系减弱, 面积减少态势得到有效控制。
- (2) 1981—2010 年, 三益桥边滩淤涨、落成洲洲头与左缘冲刷等决定着落成洲河段浅滩形态及碍航程度; 2011—2015 年, 三益桥边滩面积显著增加, 落成洲左缘边界相对稳定, 三益桥浅滩 12.5 m 槽由断开转为贯通; 2016—2021 年, 三益桥边滩尾部受二期工程作用冲刷上提, 流域来水过程不利于三益桥浅区航道条件的稳定, 但航道工程仍使得下浅区航道条件显著改善。
- (3) 二期工程运行以来, 三益桥边滩小幅萎缩、落成洲右汊持续冲刷以及不利水文条件等综合作用下, 落成洲河段三益桥碍航浅滩段位置上提, 建议后续完善工程中采用稳定洲滩边界与限制右汊冲刷发展的工程措施, 并关注落成洲洲头锚地、左汊中部渡口等外部环境的影响。

参考文献:

[1] DETHIER E N, RENSHAW C E, MAGILLIGAN F J. Rapid changes to global river suspended sediment flux by humans[J]. Science, 2022, 376(6600): 1447-1452.

[2] 姚仕明, 王洪杨, 毛北平. 长江中游城汊河段推移质输沙率计算公式[J]. 水科学进展, 2017, 28(3): 329-337. (YAO S M, WANG H Y, MAO B P. Research on bed-load transport formula in the Cheng-Han reach of the Middle Yangtze River[J].

- Advances in Water Science, 2017, 28(3): 329-337. (in Chinese))
- [3] YANG Y P, ZHENG J H, ZHANG M J, et al. Sandy riverbed shoal under anthropogenic activities: the sandy reach of the Yangtze River, China[J]. Journal of Hydrology, 2021, 603: 126861.
- [4] 李少希, 杨云平, 张华庆, 等. 三峡工程运行前后的长江中游河段冲淤变化(1975—2017 年)[J]. 湖泊科学, 2021, 33(5): 1520-1531. (LI S X, YANG Y P, ZHANG H Q, et al. The scouring and siltation in river channels of the middle reaches of the Yangtze River (1975—2017) before/after the Three Gorges Project[J]. Journal of Lake Sciences, 2021, 33(5): 1520-1531. (in Chinese))
- [5] YANG Y P, ZHENG J H, ZHANG W, et al. Quantitative relationship between channels and bars in a tidal reach of the Lower Yangtze River: implications for river management[J]. Journal of Geographical Sciences, 2021, 31(12): 1837-1851.
- [6] 杨云平, 李明, 刘万利, 等. 长江荆江河段滩槽演变与航道水深资源提升关系[J]. 水科学进展, 2022, 33(2): 240-252. (YANG Y P, LI M, LIU W L, et al. Study on the relationship between beach trough evolution and navigation obstruction characteristics in Jingjiang reach of the Yangtze River[J]. Advances in Water Science, 2022, 33(2): 240-252. (in Chinese))
- [7] 赵维阳, 杨云平, 张华庆, 等. 三峡大坝下游近坝段沙质河床形态调整及洲滩联动演变关系[J]. 水科学进展, 2020, 31(6): 862-874. (ZHAO W Y, YANG Y P, ZHANG H Q, et al. Adjustment patterns and causes of the morphology of sandy riverbed downstream of the Three Gorges Dam[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(6): 862-874. (in Chinese))
- [8] 许全喜, 董炳江, 张为. 2020 年长江中下游干流河道冲淤变化特点及分析[J]. 人民长江, 2021, 52(12): 1-8. (XU Q X, DONG B J, ZHANG W. Characteristics and analysis on scouring and silting changes in main stream of middle and lower reaches of Changjiang River in 2020[J]. Yangtze River, 2021, 52(12): 1-8. (in Chinese))
- [9] 朱玲玲, 罗龙洪, 曹双. 三峡水库蓄水后大通至江阴河段河床冲淤变化分析[J]. 江苏水利, 2022(10): 58-62. (ZHU L L, LUO L H, CAO S. Analysis of riverbed scouring and silting in Datong Jiangyin reach after the impoundment of the Three Gorges Reservoir[J]. Jiangsu Water Resources, 2022(10): 58-62. (in Chinese))
- [10] LIU X Q, LI M T, CHEN J, et al. Natural and reservoir-induced channel changes in the Yangtze River tidal reach[J]. Journal of Hydrology, 2022, 605: 127398.
- [11] MEI X F, DAI Z J, DARBY S E et al. Landward shifts of the maximum accretion zone in the tidal reach of the Changjiang Estuary following construction of the Three Gorges Dam[J]. Journal of Hydrology, 2021, 592: 125789.
- [12] XIE Q C, YANG J, STAFFAN LUNDSTRÖM T. Sediment and morphological changes along Yangtze River's 500 km between Datong and Xuliujing before and after Three Gorges Dam commissioning[J]. Scientific Reports, 2021, 11: 13662.
- [13] 杨云平, 郑金海, 张明进, 等. 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[J]. 水科学进展, 2020, 31(4): 502-513. (YANG Y P, ZHENG J H, ZHANG M J, et al. Driving mechanism of Sanyiqiao point bar and shoal evolution in fluctuation segment of tidal current limit in lower reaches of Yangtze River[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(4): 502-513. (in Chinese))
- [14] 杜德军, 王晓俊, 夏云峰, 等. 靖江边滩演变水动力特性分析[J]. 水运工程, 2021(4): 75-80. (DU D J, WANG X J, XIA Y F, et al. Hydrodynamic characteristics of Jingjiang beach evolution[J]. Port & Waterway Engineering, 2021(4): 75-80. (in Chinese))
- [15] 沈淇, 王巍, 顾峰峰. 长江下游江阴-福姜沙弯曲与分汊过渡河段边滩演变研究[J]. 泥沙研究, 2020, 45(2): 23-30. (SHEN Q, WANG W, GU F F. Fluvial processes of the point bar at the transition area between meander Jiangying reach and bifurcated Fujiang shoal reach[J]. Journal of Sediment Research, 2020, 45(2): 23-30. (in Chinese))
- [16] 唐金武, 由星莹, 侯卫国, 等. 长江下游马鞍山河段演变趋势分析[J]. 泥沙研究, 2015(1): 30-35. (TANG J W, YOU X Y, HOU W G, et al. Fluvial processes trend of Ma'an Shan reach in Lower Yangtze River[J]. Journal of Sediment Research, 2015(1): 30-35. (in Chinese))
- [17] HU Y, CAO M X, MA A X, et al. An analysis of the periodic evolution of the Jingjiang sandbank in the tidal reach of the Yangtze River[J]. Water, 2020, 12(6): 1652.
- [18] WEN Y C, XIA Y F, DU D J, et al. Study of Jingjiang beach morphodynamics in the tidal reach of the Yangtze River[J]. Water, 2022, 14(7): 1109.
- [19] 张宏千, 张明进, 郑金海. 长江下游口岸直水道河床演变和碍航成因分析[J]. 水道港口, 2015, 36(6): 542-549. (ZHANG H Q, ZHANG M J, ZHENG J H. Bed evolution characteristics and navigation obstructing mechanisms of the Kou'an straight reach of the Yangtze River[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2015, 36(6): 542-549. (in Chinese))
- [20] 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. Nu-

- merical calculation and influence of inflow from Huaihe River on deepwater channel regulation effect of Kou'an zhi waterway[J]. Port & Waterway Engineering, 2016(3): 1-9. (in Chinese))
- [21] 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))
- [22] 杨霄. 1570—1971 年长江镇扬河段江心沙洲的演变过程及原因分析[J]. 地理学报, 2020, 75(7): 1512-1522. (YANG X. Evolution processes of the sandbanks in the Zhenjiang—Yangzhou reach of the Yangtze River and their driving forces (from 1570 to 1971)[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(7): 1512-1522. (in Chinese))
- [23] 刘小斌, 林木松, 李振青. 长江下游镇扬河段河道演变及整治研究[J]. 长江科学院院报, 2011, 28(11): 1-9. (LIU X B, LIN M S, LI Z Q. Channel evolution and regulation of Zhenjiang—Yangzhou reach of the Lower Yangtze River[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2011, 28(11): 1-9. (in Chinese))
- [24] 杨芳丽. 和畅洲段分流比及河槽容积与航道条件关系研究[J]. 人民长江, 2015, 46(17): 10-14. (YANG F L. Study on relationship of diversion ratio, channel capacity and waterway condition of Hechangzhou waterway[J]. Yangtze River, 2015, 46(17): 10-14. (in Chinese))
- [25] 付桂. 长江南京以下 12.5 m 深水航道治理工程口岸直水道整治工程效果对比分析[J]. 水道港口, 2020, 41(5): 564-570. (FU G. Comparative analysis on the effect of Kouanzhi waterway regulation project of 12.5 m deepwater channel project in the Yangtze River below Nanjing[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2020, 41(5): 564-570. (in Chinese))
- [26] 曲红玲, 张冉, 马洪亮. 长江南京以下 12.5 m 深水航道治理工程落成洲河段整治效果[J]. 水运工程, 2021(1): 150-155. (QU H L, ZHANG R, MA H L. Regulation effect of Luochengzhou waterway of 12.5 m deepwater channel of the Yangtze River below Nanjing[J]. Port & Waterway Engineering, 2021(1): 150-155. (in Chinese))
- [27] 朱玲玲, 许全喜, 熊明. 三峡水库蓄水后下荆江急弯河道凸冲凹淤成因[J]. 水科学进展, 2017, 28(2): 193-202. (ZHU L L, XU Q X, XIONG M. Fluvial processes of meandering channels in the Lower Jingjiang River reach after the impoundment of Three Gorges Reservoir[J]. Advances in Water Science, 2017, 28(2): 193-202. (in Chinese))
- [28] 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.
- [29] 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))
- [30] 方娟娟, 付菁, 杨云平, 等. 长江下游仪征河段汉道分流属性及航道滩槽演变机制[J]. 湖泊科学, 2022, 34(4): 1335-1346. (FANG J J, FU J, YANG Y P, et al. Diversion attribute of the branch channels and shoal-channel evolution mechanism in the Yizheng section of the lower reaches of the Yangtze River[J]. Journal of Lake Sciences, 2022, 34(4): 1335-1346. (in Chinese))
- [31] 刘亚, 郑力, 姚仕明, 等. 分汊河道主支汊交替主导因子的转换模拟[J]. 水科学进展, 2020, 31(3): 348-355. (LIU Y, ZHENG L, YAO S M, et al. Simulation of dominant factors transforming on major-minor branches alternation in anabranching rivers[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(3): 348-355. (in Chinese))
- [32] 韩剑桥, 张为, 袁晶, 等. 三峡水库下游分汊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, ZHANG W, 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))
- [33] 史常乐, 钱嘉伟, 王炎良. 长江下游镇扬河段和畅洲汉道阶段演变特性分析[J]. 水利水电快报, 2022, 43(4): 46-53. (SHI C L, QIAN J W, WANG Y L. Analysis of staged evolution characteristics of Hechangzhou branch of Zhenyang reach in lower reach of Yangtze River[J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 2022, 43(4): 46-53. (in Chinese))
- [34] 吴保生. 冲积河流平滩流量的滞后响应模型[J]. 水利学报, 2008, 39(6): 680-687. (WU B S. Delayed response model for bankfull discharge of alluvial rivers[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(6): 680-687. (in Chinese))
- [35] 景唤, 钟德钰, 张红武, 等. 河流过程的累积现象和随机模型[J]. 地理学报, 2020, 75(5): 1079-1094. (JING H, ZHONG D Y, ZHANG H W, et al. The accumulation phenomenon and stochastic model in fluvial processes[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(5): 1079-1094. (in Chinese))

Linkage relationship of beach/central bar and waterway shoal obstruction mechanism in Luochengzhou reach of the lower reaches of Yangtze River*

YANG Yunping^{1,2}, ZHANG Xiabo², ZHENG Jinhai², ZHU Lingling³, WANG Jianjun¹,
FANG Juanjuan⁴, WEI Wen⁵

(1. *Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Ministry of Transport, Tianjin 300456, China*; 2. *Hohai University, Nanjing 210098, China*; 3. *Bureau of Hydrology Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China*;
4. *Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430019, China*; 5. *School of Marine Science and Technology Sun Yat-sen University, Zhongshan 528406, China*)

Abstract: There is a strong correlation between waterway shoal evolution and boundary shoal morphology adjustment. Combining with effects of unbalanced channel scouring and distribution, scouring and sediment supply of upper reaches, these make waterway shoal obstruction mechanism more complicated. In this study, the Luochengzhou reach in the tidal reach of Yangtze River is taken as the object. By analyzing the morphology of the shoal, the characteristics of riverbed scouring and deposition, the hydrodynamic environment and the navigation-obstructing characteristics of the central bar and beach during 1959—2021, we clarified the linkage relationship between the evolution of the central bar and beach the waterway shoal, and the scouring and sediment supply of the upstream riverbed and its influence mechanism on the evolution of the waterway shoal. Since 1981, the Yangzhong reach where the Luochengzhou reach is located has changed from siltation to continuous scouring since 1991. The scouring amount of the low-water channel from 1981 to 2021 is $3.97 \times 10^8 \text{ m}^3$, accounting for 95.9% of the flood channel scouring volume; before the operation of the Three Gorges Project, the collapse of Sima bend area, the siltation of the left margin of Luochengzhou, and the undeveloped of the Sanyiqiao beach are the chief reasons for the collapse of Sima bend area. After the operation of the Three Gorges Project and before the implementation of the waterway regulation works, the decrease of sediment inflow caused the overall erosion of the shore, and the scouring of Luochengzhou provided the development space for the Sanyiqiao beach, the gradually silted Sanyiqiao beach and the runoff and sediment conditions jointly led to the development of the scouring of Luochengzhou and the right branch, that is, the change of the shape of the Sanyiqiao beach gradually changed from passive siltation to the main cause of the intertidal evolution. During 1981—2010, the sedimentation of Sanyiqiao beach, the erosion of the head and left edge of the Luochengzhou reach determined the degree of navigation obstruction of Sanyiqiao beach. Due to the riverbed scouring caused by the reduction of sediment inflow in the basin, the degree of navigation obstruction is weakened. From 2011 to 2021, the left edge boundary of the Luochengzhou is gradually stabilized and the waterway conditions in the lower shallow area are improved. At the same time, the area of the Sanyiqiao beach is changed from siltation to small scouring, and the navigation obstruction position is gradually raised to form the upper shallow area. Since the implementation of the second phase of the project, the changes in the basin inflow process conditions, Sanyiqiao beach scouring and the relative development of the right branch of Luochengzhou are still not conducive to the stability of the waterway conditions of the foreshore section of the Luochengzhou reach. It is suggested that engineering measures to stabilize the boundary of the shoal and limit the scouring development of the right branch should be taken in the subsequent improvement of the project.

Key words: central bar and beach deformation; waterway conditions; waterway shoal evolution; driving mechanism; Luochengzhou reach; lower reach of Yangtze River

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52279066; No. U2240206).