



# 长江上游长寿水道航道整治效果预测

胡见, 张海泉

(长江航运发展研究中心, 湖北 武汉 430014)

**摘要:** 为系统解决长江上游长寿水道因横流、回流、泡漩及滑梁水等不良流态导致的通航安全问题, 采用动床物理模型试验方法对航道整治工程效果进行预测与评估。基于2018年5月—2019年11月天然水沙过程, 完成了模型验证与比尺确定, 建立了高精度水沙物理模型。通过模拟洪、中、枯水期4级特征流量及典型水文年条件, 系统分析了工程实施后水流结构与河床地形的响应。结果表明, 整治后肖家石盘中部流速降低29.9%, 疏浚区流速最大增加34.2%; 左汊斜流与航道夹角由39°减小至4°, 横向流速降幅超过85%, 泡漩及滑梁水等不良流态显著减弱。河床经水文年系列冲刷后趋于稳定, 左汊航槽维持4.5 m设计水深, 航宽由不足110 m拓展至150 m以上, 通航条件明显改善。研究证实, 该工程有效优化了滩险河段的流态与航道尺度, 相关方法和结论可为类似山区航道整治提供理论和技术支撑。

**关键词:** 长寿水道; 航道整治; 物理模型试验; 整治效果预测

中图分类号: U617

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)05-0176-08

## Prediction of navigation regulation effects for Changshou waterway in upper Yangtze River

HU Jian, ZHANG Haiquan

(Yangtze River Shipping Development Research Center, Wuhan 430014, China)

**Abstract:** To systematically address navigation safety issues arising from adverse flow patterns such as cross-flow, recirculating flow, boil vortices, and overtopping flow in the Changshou waterway of the upper Yangtze River, a movable-bed physical model test is conducted to predict and evaluate the effects of the navigation regulation project. Based on the natural flow and sediment processes from May 2018 to November 2019, model calibration and scale determination are completed, and a high-precision flow-sediment physical model is established. To systematically analyze the response of flow structure and riverbed topography after project implementation, simulations are conducted for four characteristic discharges during flood, medium and dry water periods as well as under typical hydrological year conditions. Results indicate that after regulation, the flow velocity in the central part of Xiaojiashipan decreases by 29.9%, and the maximum flow velocity in the dredged area increases by 34.2%. The angle between the oblique flow in the left branch and the navigation channel is reduced from 39° to 4°, the transverse velocity decreases by more than 85%, and the adverse flow patterns such as boil vortices and overtopping flow are significantly weakened. After scouring and adjustment over a sequence of hydrological years, the riverbed tends to be stable. The left branch navigation channel maintains a designed water depth of 4.5 m, and its width is expanded from less than 110 m to more than 150 m, resulting in significantly improved navigation conditions. The study confirms that the project effectively optimizes the flow patterns and channel dimensions in the rapid reach, and the relevant methods and conclusions can provide theoretical and technical support for the regulation of similar mountainous waterways.

**Keywords:** Changshou waterway; navigation regulation; physical model test; regulation effect prediction

收稿日期: 2025-08-14 录用日期: 2025-09-29

作者简介: 胡见(1992—), 男, 工程师, 从事长江航道整治工程的项目质量监督管理工作。

长江航道整治效果预测对保障通航连续性与提升航运效能具有重要理论与应用价值,当前研究主要涵盖4类技术范式:1)基于数学模型模拟的预测方法,如郭琦等<sup>[1]</sup>针对观音背河段碍航问题,建立平面二维水沙耦合模型比选整治方案的水深增益与流场重构效应,周日顺等<sup>[2]</sup>则通过二维水流数值模拟解析牯牛哨滩碍航特性并评估整治方案流态调控效能;2)依托物理模型试验的验证手段,如方佳敏等<sup>[3]</sup>采用动床模型试验优化贵池水道整治方案水力参数,陈玉丹等<sup>[4]</sup>依托比尺物理模型,量化斗笠子急滩丁坝群对流速梯度及能坡的调控机制;3)采用河床演变历史反演与趋势推演,如周成成等<sup>[5]</sup>结合历史地形序列建立碍航因子演化模型,邓晴等<sup>[6]</sup>提出基于断面形态参数的整治效果预判方法;4)实施整治参数敏感性量化分析,如邓晴等<sup>[7]</sup>通过控制变量法测试神背嘴滩顺坝高程增量的水动力响应,揭示水位参数对航深增益的边际贡献。上述体系深度融合水沙动力学机制解析、工程水力学验证、地貌演化规律反演及参数优化理论,显著提升整治工程设计的科学预见性。基于此,本文研究聚焦长江上游长寿水道,采用动床模型的物理模型试验<sup>[8-9]</sup>,系统研究该段整治工程完工后水动力特性变化情况与通航尺度达标率,为复杂山区河流整治提供技术范式。

## 1 滩险概况

长江上游长寿水道地处航道里程580~589 km之间,作为川江著名的瓶颈碍航河段,其浅滩群地貌特征显著<sup>[10-11]</sup>。河道中心忠水碛纵向展布,将主槽分割为左右两汉:左汉柴盘子入口航道弯曲半径不足550 m,航行条件局促;右汉王家滩槽宽受限且流速湍急,仅能通行小型船舶,大型船队下行需水位高于1.5 m,上行则需超过2.0 m水位方可通航。在枯水期,主流沿深槽下泄,紧贴象鼻子石梁;深槽水流与忠水碛滩归槽水流汇合后流态复杂,形成扫弯水现象。中水期柴盘子石梁淹没至阻碍通航时,会诱发强度较大的滑梁

水等不良流态。在中水与枯水条件下,船舶下行航行风险显著,构成所谓的“险”段问题。三峡水库蓄水前虽实施过系列整治工程,包括柴盘子顺坝、忠水碛岛尾坝及灶门子丁坝,部分缓解了初期泥沙淤积问题,但随着三峡工程运行,库区回水变动段泥沙重新淤积,与航运船舶大型化趋势形成双重压力。当前,王家滩段在库区消落期呈现水深不足、流态紊乱等复合碍航特征,船舶通行普遍受阻,航运企业对该河段航道升级的需求日益迫切,亟需通过系统性整治工程提升通航保障能力。

## 2 碍航特性

因长寿水道整治需维持单一航槽通航且保留另一汉道天然状态,本文工程选定左槽作为通航通道,重点分析其碍航特性。左汉航道主要呈现弯、险复合问题:柴盘子段因忠水碛挤压象鼻子深槽,导致入口处航道弯曲半径仅约500 m,未达目标尺度要求;枯水期主流沿深槽下行与碛滩归槽水流交汇形成扫弯水,中水期柴盘子石梁淹没时产生强滑梁水,致使中枯水期船舶下行风险较大。

## 3 整治方案

### 3.1 整治思路

基于航道整治目标,统筹考虑工程河段碍航特性、河床演变规律及河势控制与环保要求,制定综合治理策略:采用疏浚炸礁与整治工程协同实施,通过优化航槽布置及整治建筑物结构提升航道尺度,系统发挥建筑物束水导流与抑制泥沙回淤功能,保障整治后的航槽稳定性;同步严格控制忠水碛分汉河道单槽整治后的左右汉分流比变化幅度。

### 3.2 方案设计

整治方案:入口段对肖家石盘、饿狗堆及鳊鱼石等礁石突嘴实施清礁至设计水位以下6 m,同步在肖家石盘深槽修筑W1<sup>#</sup>、W2<sup>#</sup>潜坝(坝顶高程设计水位以下20 m);下段开挖忠水碛左侧碛

至设计水位以下 6 m，并于左槽深槽内布设 W3#~W5#潜坝(坝顶高程设计水位以下 10 m)，通过坝

体结构优化流速流向分布以改善流态，保障疏浚区稳定性，见图 1。

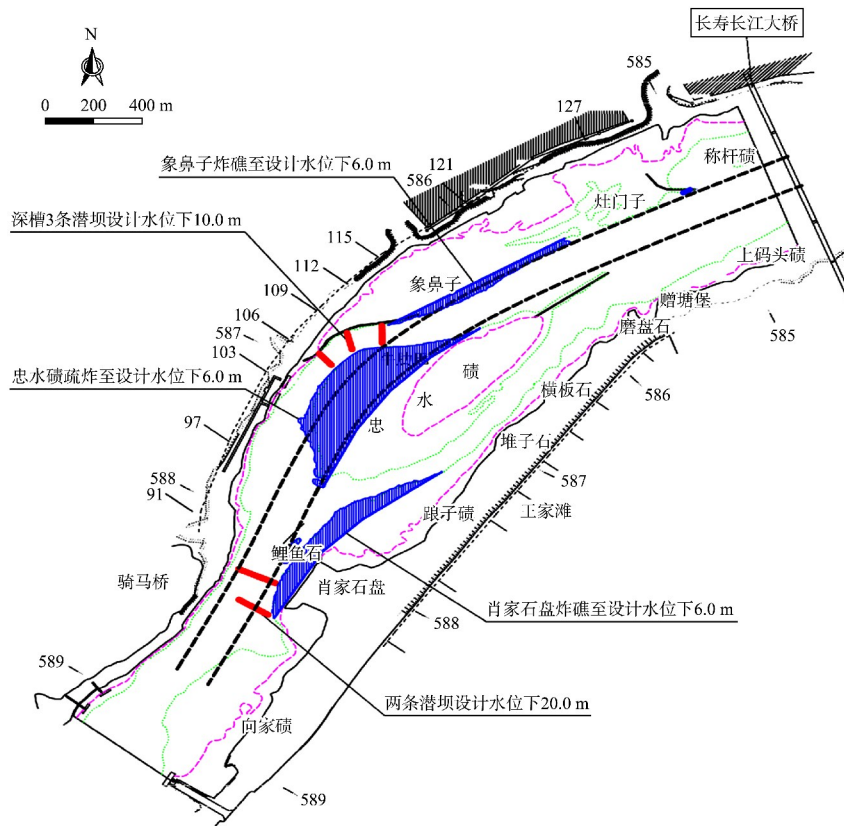


图 1 工程平面布置  
Fig.1 Layout plan of the project

#### 4 整治方案动床模型建立

##### 4.1 模型范围

动床模型范围上起重钢新港码头(航道里程 584.5 km)，下迄长寿长江大桥(航道里程 589.5 km)，模拟河段长 5.0 km，工程区 3 km，工程区上下游各 1 km。

##### 4.2 模型设计

在严格遵循几何相似、水流运动相似及泥沙运动相似准则的基础上，综合考虑试验研究目标、场地约束条件以及试验大厅既往河工模型试验经验，确定模型的各项相似比尺。几何相似方面，平面比尺  $\lambda_L = 100$ ，垂直比尺  $\lambda_H = 100$ ；水流运动相似方面，流速比尺  $\lambda_v = 10$ ，糙率比尺  $\lambda_n = 2.15$ ，流量比尺  $\lambda_Q = 100\ 000$ ；泥沙运动相似方面，对于沙质推移质，沉速比尺  $\lambda_\omega = 10$ ，粒径比尺  $\lambda_d =$

1.84~5.53，起动流速比尺  $\lambda_{v,k} = 9.7 \sim 10.5$ ，单宽输沙率比尺  $\lambda_{q, sb} = 570$ ，冲淤时间比尺  $\lambda_{t,1} = 55$ ，输沙量比尺  $\lambda_{w,s} = 3\ 135\ 000$ ；对于卵石推移质及床沙运动，粒径比尺  $\lambda_d = 40$ ，起动流速比尺  $\lambda_{v,k} = 10.2 \sim 10.7$ ，单宽输沙率比尺  $\lambda_{q, sb} = 250$ ，冲淤时间比尺  $\lambda_{t,2} = 95$ ，输沙量比尺  $\lambda_{G,2} = 2\ 376\ 000$ 。河工模型照片见图 2。

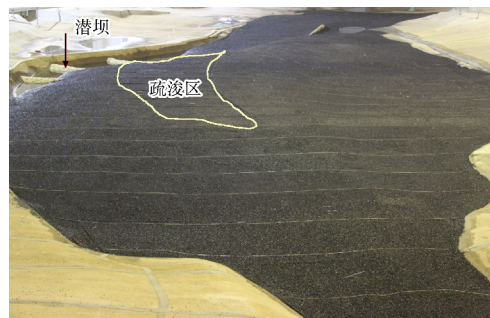


图 2 河工模型  
Fig.2 River engineering model

### 4.3 模型验证

基于 2017 年 11 月实测的 1:2 000 地形图构建初始地形, 通过施放 2018—2019 年实测水沙概化过程, 复演 2019 年 11 月河道地形。验证表明: 模型与原型水面线最大偏差不超过 0.10 m; 断面流速分布规律一致且偏差小于  $\pm 10\%$ ; 泥沙冲淤空间分布及冲淤量特征高度吻合。具体而言, 长寿水道肖家石盘河段以淤积为主, 原型观测淤积量  $8.1 \text{ 万 m}^3$  对应模型值  $7.0 \text{ 万 m}^3$ , 相对误差 14.4%; 忠水碛滩段整体淤积, 原型淤积量  $28.1 \text{ 万 m}^3$  对应模型值  $34.2 \text{ 万 m}^3$ , 相对误差 21.9%。综合表明, 模型设计、泥沙选配及比尺参数具有合理性, 可确保物理相似可靠性。

## 5 整治效果预测

### 5.1 水流条件变化

为评估工程实施后水流条件变化, 试验方案选取洪、中、枯水期 4 级特征流量 ( $5\ 930$ 、 $9\ 012$ 、 $14\ 200$ 、 $21\ 283 \text{ m}^3/\text{s}$ ), 并采用各流量级实际观测最低水位作为试验边界条件, 具体参数为: 设计流量  $5\ 930 \text{ m}^3/\text{s}$  对应长寿站水位  $149.91 \text{ m}$ ; 消落期平均流量  $9\ 012 \text{ m}^3/\text{s}$  对应水位  $151.91 \text{ m}$ ; 消落期最大流量  $14\ 200 \text{ m}^3/\text{s}$  对应水位  $153.91 \text{ m}$ ; 汛期

平均流量  $21\ 283 \text{ m}^3/\text{s}$  对应水位  $155.55 \text{ m}$ 。

#### 5.1.1 分流比变化

工程实施后, 左汉分流比相比工程前增大  $2.2\% \sim 3.7\%$ , 且左汉分流比大于右汉分流比, 见表 1。

表 1 工程后左、右汉分流比变化

Tab. 1 Changes in flow distribution ratios between left and right branches after the project %

类别	$Q=5\ 930 \text{ m}^3/\text{s}$	$Q=9\ 012 \text{ m}^3/\text{s}$	$Q=14\ 200 \text{ m}^3/\text{s}$	$Q=21\ 283 \text{ m}^3/\text{s}$
右汉	工程前	40.2	37.2	33.7
	工程后	37.0	33.5	30.9
	变化值	-3.2	-3.7	-2.8
左汉	工程前	59.8	62.8	66.3
	工程后	63.0	66.5	69.1
	变化值	3.2	3.7	2.8

#### 5.1.2 流速流态变化

工程实施后, 肖家石盘上游河段流速未发生明显变化。肖家石盘河道中部在潜坝壅水作用下流速有所降低; 左汉深槽受潜坝阻水影响流速减小, 而疏浚区流速呈增大趋势, 同时水流与航道夹角减小, 其下游深槽流速亦略有降低, 整体水流较工程前更为平顺, 流量  $14\ 200 \text{ m}^3/\text{s}$ 、长寿水位  $153.91 \text{ m}$  条件下工程前后流场对比见图 3。

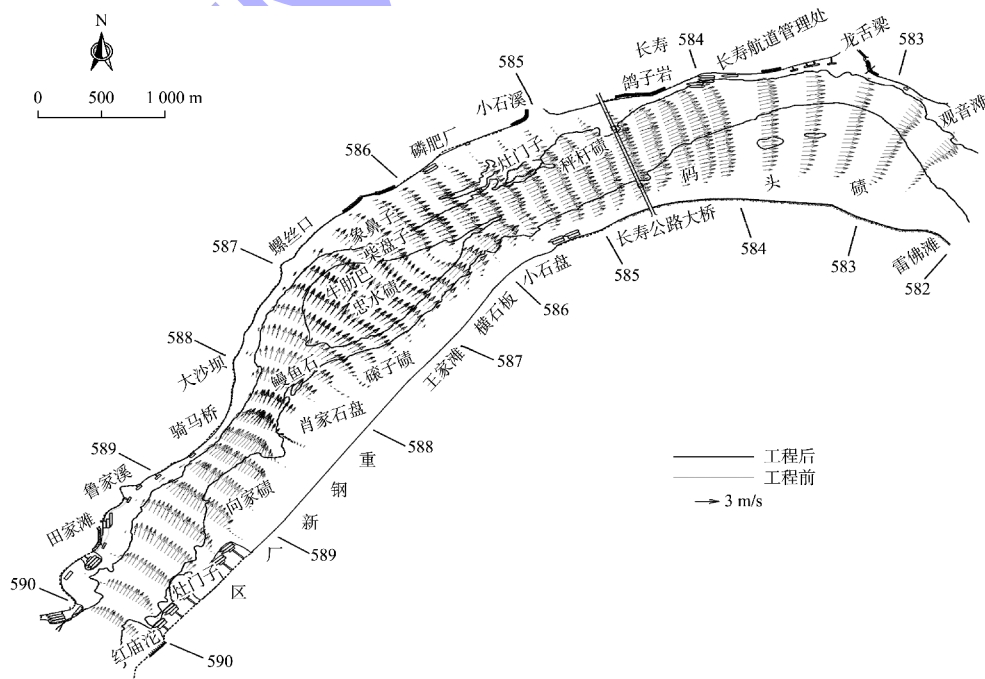


图 3 工程前后流场对比

Fig. 3 Comparison of flow fields before and after the project

1) 下行航道。工程实施后,相比工程前,下行航道流速主要变化在肖家石盘附近、忠水碛碛翅疏浚区及疏浚区与深槽过渡段。枯水流量  $5\,930\text{ m}^3/\text{s}$  时,肖家石盘附近流速由  $0.97\text{ m/s}$  减小至  $0.68\text{ m/s}$ ;疏浚区牛肋巴附近流速由  $1.61\text{ m/s}$  增至  $2.16\text{ m/s}$ ;疏浚区下游深槽流速由  $2.22\text{ m/s}$  减小至  $1.93\text{ m/s}$ ,见图4。

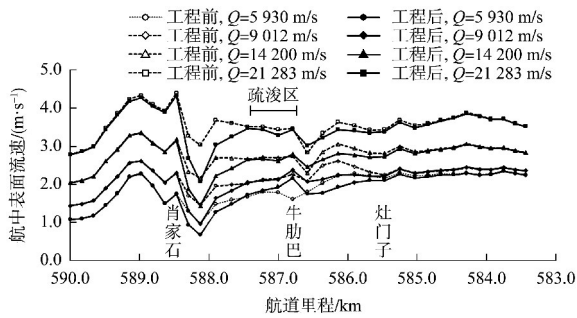


图4 工程前后左汉下行航道航中表面流速沿程变化  
Fig. 4 Along-channel variations of surface flow velocities in the left downstream navigation channel before and after the project

左汉下行航道疏浚区斜流及横向流速减小,水流流态有所改善。工程后,枯水流量  $5\,930\text{ m}^3/\text{s}$  时,向左斜流与航线夹角由  $39^\circ$  调整至  $4^\circ$ ,最大横向流速由  $1.01\text{ m/s}$  减小至  $0.15\text{ m/s}$ ;深槽向右水流与航线夹角由  $20^\circ$  调整至  $10^\circ$ ,最大横向流速由  $0.62\text{ m/s}$  减小至  $0.30\text{ m/s}$ 。忠水碛滩面水流与象鼻子深槽水流之间角度由  $59^\circ$  调整至  $14^\circ$ 。流量  $14\,200\text{ m}^3/\text{s}$  时,向左斜流与航线夹角由  $13^\circ$  调整至  $6^\circ$ ,最大横向流速由  $0.62\text{ m/s}$  减小至  $0.29\text{ m/s}$ ;深槽向右水流与航线夹角由  $8^\circ$  调整至  $2^\circ$ ,最大横向流速由  $0.32\text{ m/s}$  减小至  $0.09\text{ m/s}$ 。忠水碛滩面水流与象鼻子深槽水流之间角度由  $21^\circ$  调整至  $8^\circ$ ,其他河段变化不大,见图5。

2) 上行航道。工程实施后,相比工程前,流速主要变化在肖家石盘、忠水碛碛翅疏浚区及疏浚区与下游深槽过渡段。疏浚区上半段航道流速稍有减小,枯水流量  $5\,930\text{ m}^3/\text{s}$  时,流速由  $2.00\text{ m/s}$  减

至  $1.87\text{ m/s}$ ,疏浚区下半段航道流速稍有增大,牛肋巴流速由  $1.74\text{ m/s}$  增至  $2.12\text{ m/s}$ 。疏浚区与下游深槽过渡段流速减小,流速由  $2.06\text{ m/s}$  减至  $1.52\text{ m/s}$ ;下游深槽流速均有不同程度的减小,见图6。

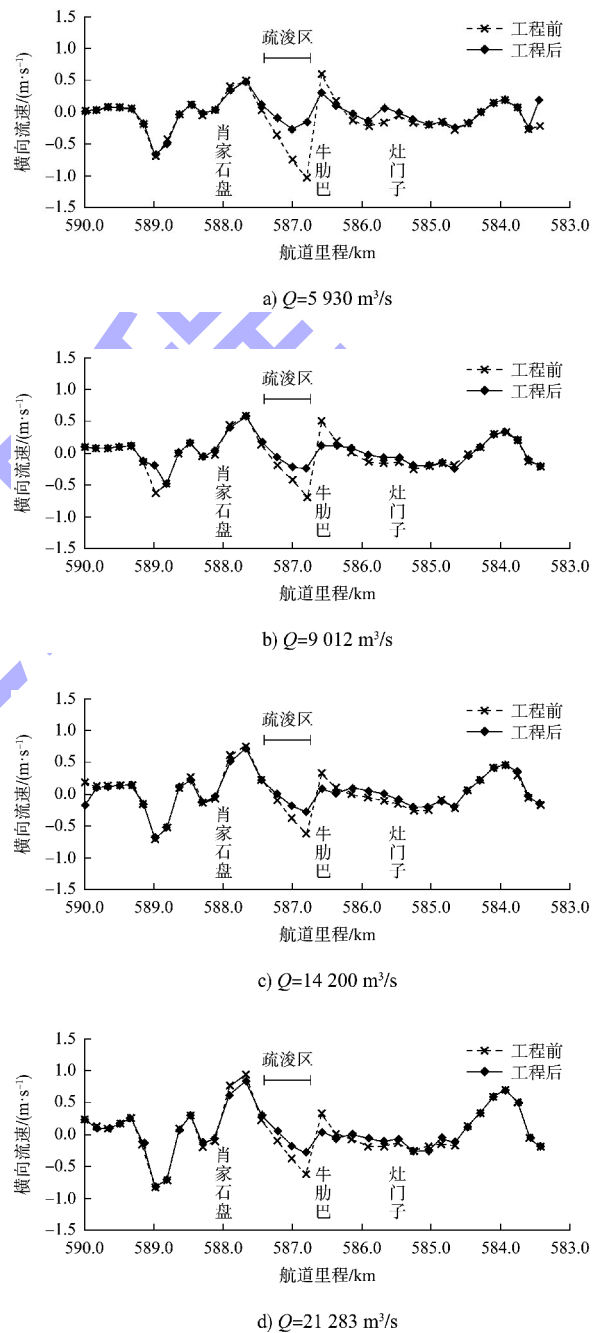


图5 工程前后左汉下行航道航中横向流速沿程变化  
Fig. 5 Along-channel variations of transverse surface velocities in the left downstream navigation channel before and after the project

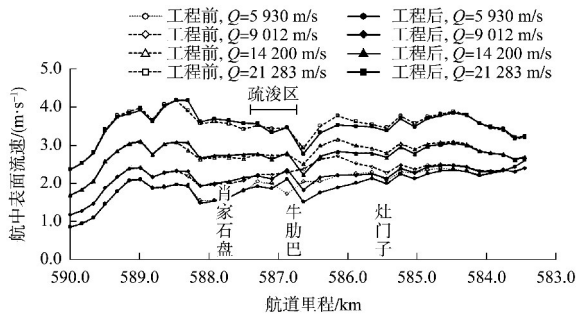
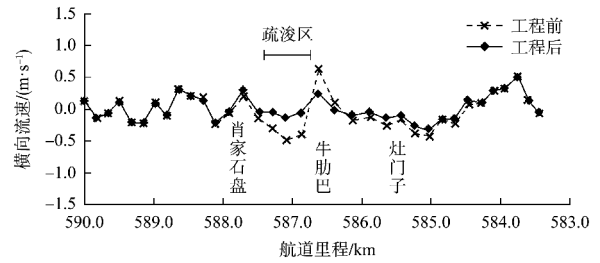
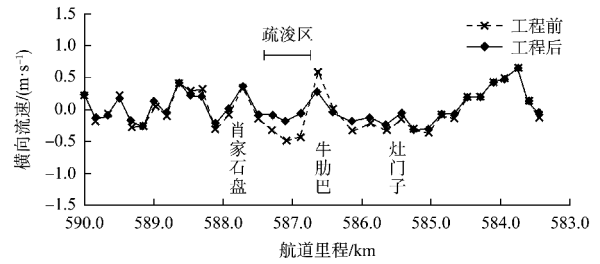


图 6 工程前后左汉上行航道航中表面流速沿程变化  
Fig. 6 Along-channel variations of surface velocities in the left upstream navigation channel before and after the project

左汉上行航道疏浚区斜流及横向流速减小, 水流流态有所改善。工程后, 枯水流量 5 930 m<sup>3</sup>/s 时, 向左斜流与航线夹角由 26° 调整至向右 0°, 最大横向流速由 0.76 m/s 减小至 0.00 m/s; 深槽向右水流与航线夹角由 22° 调整至 13°, 最大横向流速由 0.77 m/s 减小至 0.34 m/s。忠水碛滩面水流与象鼻子深槽水流之间角度由 48° 调整至 13°。流量 14 200 m<sup>3</sup>/s 时, 向左斜流与航线夹角由 8° 调整至向右 1°, 最大横向流速由 0.39 m/s 减小至 0.05 m/s; 深槽向右水流与航线夹角由 15° 调整至 7°, 最大横向流速由 0.65 m/s 减小至 0.27 m/s。忠水碛滩面水流与象鼻子深槽水流之间角度由 23° 调整至 8°, 其他河段变化不大, 见图 7。



c) Q=14 200 m<sup>3</sup>/s

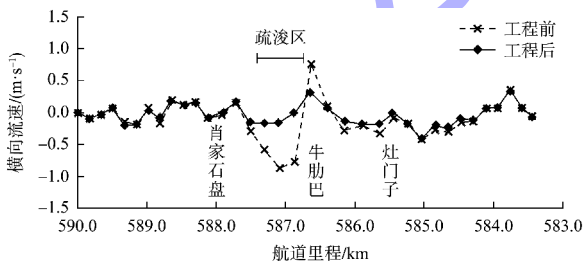


d) Q=21 283 m<sup>3</sup>/s

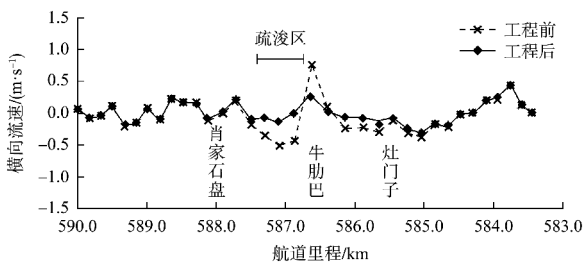
图 7 工程前后左汉上行航道航中横向流速沿程变化  
Fig. 7 Along-channel variations of transverse velocities in the left upstream navigation channel before and after the project

### 5.1.3 上滩能力变化

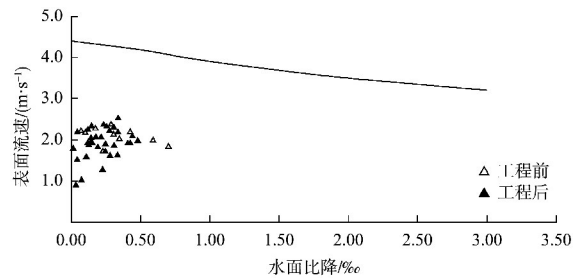
工程实施后, 在 5 930、9 012、14 200 和 21 283 m<sup>3</sup>/s 4 个典型流量级下, 最大上滩指标  $E$  分别对应为 2.6、2.6、3.2、4.4, 其最大值始终低于 4.4, 表明船舶自航上滩要求已基本满足。与工程前相比, 在 9 012 m<sup>3</sup>/s 流量条件下, 上滩能力得到显著改善; 而在 5 930、14 200 和 21 283 m<sup>3</sup>/s 流量级下, 上滩能力亦有一定提升。具体数据及对比情况见图 8。



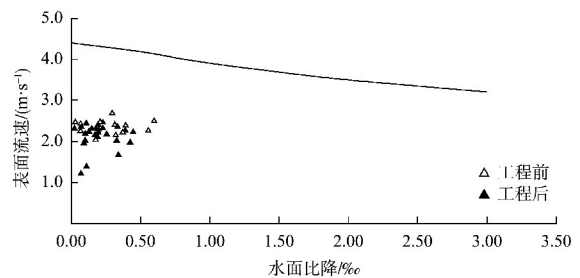
a) Q=5 930 m<sup>3</sup>/s



b) Q=9 012 m<sup>3</sup>/s



a) Q=5 930 m<sup>3</sup>/s



b) Q=9 012 m<sup>3</sup>/s

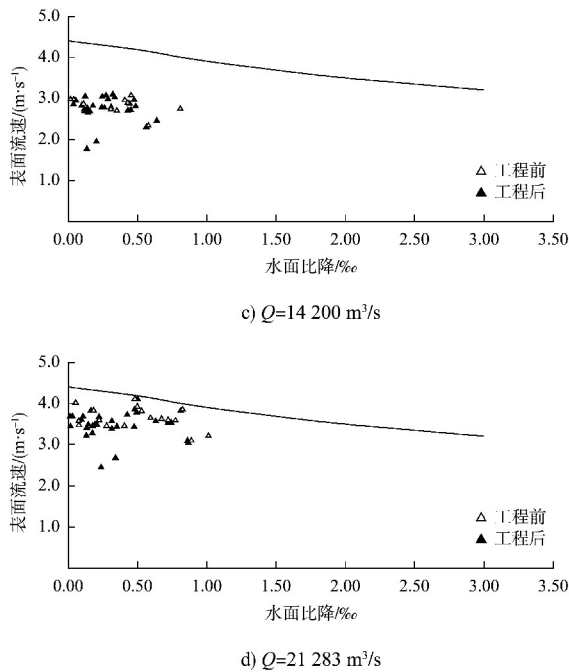


图 8 工程前后左汉上行航道上滩水力能力与上滩指标  
 Fig. 8 Hydraulic capacity and shoal passing indicators for the left upstream navigation channel before and after the project

### 5.2 航道条件变化

长寿水道水文年选取需综合考量上游建库对水沙条件的改变、三峡水库调度方式及河段既有工程影响。三峡工程自 2003 年蓄水运行，2008 年起实施 145~175 m 调度方案；向家坝与溪洛渡水电站分别于 2012、2013 年下闸蓄水。系列水文年则需覆盖大水大沙年、中水中沙年与小水少沙年，系列水文年为 2012—2015 年连续 4 个水文年。

#### 5.2.1 地形冲淤变化

系列水文年后长寿水道河床呈现普遍冲刷趋势，其中向家碛滩段冲刷范围显著扩展，冲淤变幅普遍控制在 0.5 m 以内；肖家石盘前沿区域维持微弱冲刷态势，其出口段则出现淤积现象，航道内部局部淤积厚度达 0.5~1.0 m，但因该河段水深条件优越，微量淤积未对航道通航能力构成实质性影响；忠水碛滩段整体以微弱淤积为主，碛滩区局部淤厚达 1.0~1.5 m，左汉航道牛肋巴附近形成 0.5~1.0 m 淤积带，右汉河道基本保持微淤状态；左汉下游深槽呈现冲淤交替特征，冲淤幅度普遍不超过 0.5 m，唯灶门子周边出现 1.0~1.5 m 的局部淤积体，需重点关注其航道维护需求，见图 9。

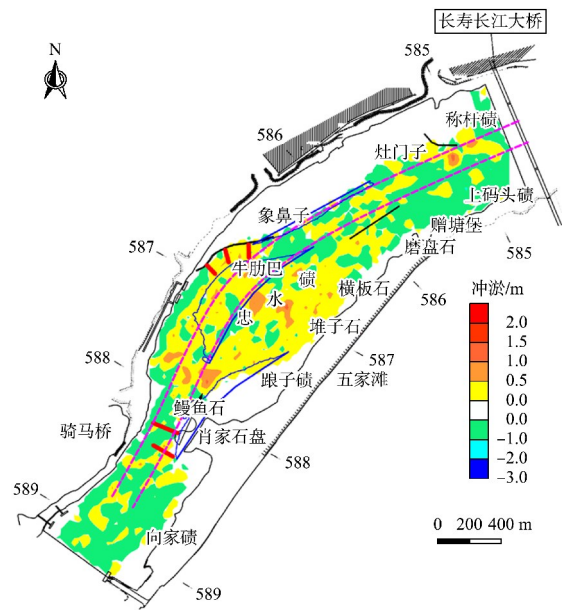


图 9 工程后系列水文年后河床冲淤  
 Fig. 9 Riverbed erosion and deposition after a series of hydrological years after the project

#### 5.2.2 航道条件

经系列水文年作用后，左汉疏浚区呈现微冲刷态势，年度淤积量约 3.6 万 m<sup>3</sup>，疏浚区持续维持 4.5 m 设计水深；上下航道 4.5 m 等深线全线贯通，航宽满足 150 m 通航标准，向家碛邻近河床呈现冲刷态势有效拓展航槽，航宽基本稳定于 150 m 设计宽度，表明整治工程显著优化了水道通航效能，见图 10。

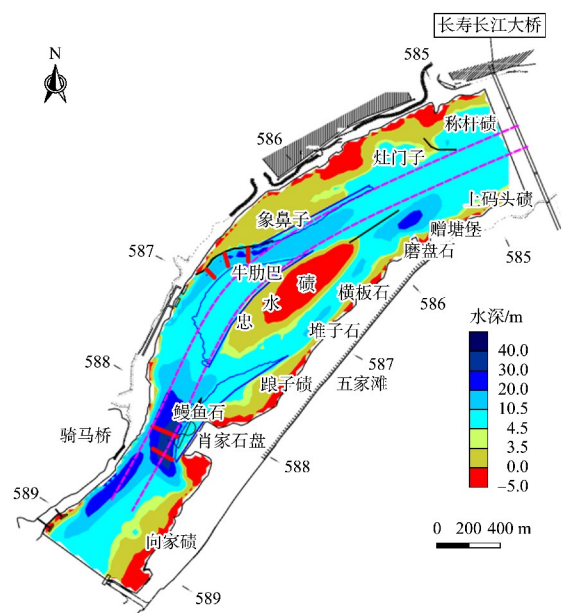


图 10 工程后系列水文年后水深  
 Fig. 10 Water depth after a series of hydrological years after the project

## 6 结论

1) 动床模型试验结果表明,整治工程实施后,航道内不良流态得到显著改善,整体水流结构趋于平顺化,同时航道水深条件亦得到显著改善,达到了预期的航道整治效果。

2) 长寿水道王家滩河段的碍航问题主要由航道弯曲半径不足及水流结构紊乱所致。整治效果预测结果证实,基于上述碍航特征提出的航道整治思路科学合理,所确定的整治建筑物布置位置与清礁区域选择恰当有效。

3) 建议在工程实施后,加强对灶门子附近航道水沙条件与地形变化的监测。如观测到航道条件出现不利演变或产生新的碍航问题,应及时采取必要的维护措施,以确保航道满足通航标准要求。

## 参考文献:

- [1] 郭琦, 虞筱葭, 张文江. 长江上游观音背滩航道整治方案[J]. 水运工程, 2024(3): 126-132.  
GUO Q, TUO Y J, ZHANG W J. Regulation schemes of Guanyinbei beach in upper reaches of the Yangtze River [J]. Port & waterway engineering, 2024 (3): 126-132.
- [2] 周日顺, 黄振祥, 王涛, 等. 松花江牯牛哨滩河段航道整治方案比选[J]. 水运工程, 2024(4): 119-125, 182.  
ZHOU R S, HUANG Z X, WANG T, et al. Comparison and selection of waterway regulation scheme for Mangniushao reach in Songhua River [J]. Port & waterway engineering, 2024(4): 119-125, 182.
- [3] 方佳敏, 田栋. 长江下游贵池水道航道治理工程方案[J]. 水运工程, 2022(1): 144-149.  
FANG J M, TIAN D. Waterway regulation scheme for Guichi waterway in the lower reach of the Yangtze River[J]. Port & waterway engineering, 2022(1): 144-149.
- [4] 陈玉丹, 官坤明. 长江上游卵石急滩整治方法研究[J]. 中国水运, 2017, 17(1): 199-201.  
CHEN Y D, GUAN K M. Study on regulation methods of pebble rapids in the upper reaches of the Yangtze River[J]. China water transport, 2017, 17(1): 199-201.
- [5] 周成成, 熊小元, 童凡, 等. 长江中游燕子窝水道航道整治工程设计[J]. 水运工程, 2016(5): 82-87, 104.  
ZHOU C C, XIONG X Y, TONG F, et al. Yanziwo waterway improvement engineering design in the middle reach of the Yangtze River[J]. Port & waterway engineering, 2016(5): 82-87, 104.
- [6] 邓晴, 林钰丰. 长江上游二级航道弯曲分汊浅滩的整治参数研究[J]. 科技风, 2017(7): 129.  
DENG Q, LIN Y F. Study on regulation parameters of curved bifurcated shoal in the upper reaches of the Yangtze River[J]. Technology wind, 2017(7): 129.
- [7] 邓晴, 赵志舟, 张小龙. 长江上游神背嘴滩Ⅱ级航道整治方案研究[J]. 中国水运(下半月), 2017(5): 160-163.  
DENG Q, ZHAO Z Z, ZHANG X L. Study on regulation scheme of Shenbeizuitan Ⅱ channel in the upper reaches of the Yangtze River [J]. China water transport (the second half of the month), 2017(5): 160-163.
- [8] 赵志舟, 张倩, 姚志豪, 等. 澜沧江马台河口滩河段航道整治方案研究[J]. 水运工程, 2025(7): 121-127, 171.  
ZHAO Z Z, ZHANG Q, YAO Z H, et al. Research on channel regulation plan for Matai Estuary Beach reach of Lancang River [J]. Port & waterway engineering, 2025(7): 121-127, 171.
- [9] 刘长波, 朱玉君, 吴双, 等. 长江上游老虎梁险滩航道整治模型试验研究[J]. 水运工程, 2023(9): 126-132, 157.  
LIU C B, ZHU Y J, WU S, et al. Model tests of channel regulation of Laohuliang Beach in Upper Yangtze River[J]. Port & waterway engineering, 2023(9): 126-132, 157.
- [10] 李德华. 长江上游典型分汊河段航道整治效果分析: 以王家滩河段为例[J]. 人民长江, 2017, 48(S2): 22-27.  
LI D H. Effect analysis of channel regulation in typical branched reaches of the upper Yangtze River: taking wangjiatan reach as an example [J]. Yangtze River, 2017, 48(S2): 22-27.
- [11] 周倩倩, 杨胜发, 邓懿. 王家滩航道整治方案数学模型研究[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(2): 1-4, 10.  
ZHOU Q Q, YANG S F, DENG Y. Study on waterway regulation for wangjiatan by mathematical model [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2015, 32(2): 1-4, 10.

(本文编辑 王传瑜)