



澜沧江马台河口滩河段航道整治方案研究

赵志舟^{1,2}, 张倩¹, 姚志豪¹, 王雨婷¹

(1. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074; 2. 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074)

摘要: 马台河口滩河段位于澜沧江糯扎渡水库变动回水区, 河段上游虎跳石滩为礁石窄浅险滩、下游马台河口滩为消落期溪口浅急险滩, 航道整治工程实施前消落期流量较大时马台河口滩消滩综合判数 E 值达到允许值的 2~3 倍, 航道整治的难度较大。为解决此问题, 通过河工物理模型开展下游马台河口滩方案优化试验, 在满足整治目标的同时尽量减小工程引起的上游水位跌落。推荐方案对马台河口滩采取挖槽增加航槽尺度并扩大泄水面积、配合滩下深沱填槽壅水的措施; 上游虎跳石滩通过清障增加航道尺度, 马台河口滩河段的通航条件得到显著改善。在糯扎渡坝前水位较低、大朝山下泄流量较大的工况下, 马台河口滩过滩阻力仍较大, 试验进一步分析了提高坝前运行水位对推荐方案通航条件的影响, 得出适当提高坝前水位可满足船舶过滩要求。

关键词: 航道整治; 变动回水区; 急流滩; 山区河流; 物理模型

中图分类号: U617.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)07-0121-07

Research on channel regulation plan for Matai Estuary Beach reach of Lancang River

ZHAO Zhizhou^{1,2}, ZHANG Qian¹, YAO Zhihao¹, WANG Yuting¹

(1. College of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing 400074, China)

Abstract: The Matai Estuary Beach reach is located in the fluctuating backwater area of the Nuozhadu Reservoir on the Lancang River. Upstream, Hutiaoshi Beach is characterized as a narrow and shallow shoal, while downstream, the Matai Estuary Beach becomes a shallow and swift shoal at the stream mouth during the low-water level. Before the implementation of channel regulation works, the comprehensive criterion E value for the Matai Estuary Beach during high flow periods of the drawdown exceeded the permissible limit by 2–3 times, presenting significant challenges for navigation improvement. To address this issue, optimization trials are conducted for the downstream Matai Estuary Beach using a physical river model, aiming to meet the navigation improvement goals while minimizing upstream water level drops caused by the engineering works. The recommended plan involves dredging to increase the channel dimensions and expanding the discharge area at Matai Estuary Beach, accompanied by backwater measures through filling deep pools beneath the shoal. For the upstream Hujiaoshi Shoal, obstacle clearance is proposed to enhance channel dimensions. These measures have significantly improved the navigation conditions in the Matai Estuary Beach reach. However, under conditions of low water levels in front of the Nuozhadu Dam and high discharge from the Dachaoshan Dam, resistance to navigation at the Matai Estuary Beach remains considerable. The study further analyzes the impact of raising the operational water level in front of the dam on the navigation conditions of the recommended plan, and concludes that appropriately raising the water level in front of the dam could meet the requirements for ships to pass through the shoal.

Keywords: channel regulation; fluctuating backwater area; rapids shoal; mountain river; physical model

收稿日期: 2024-10-12

作者简介: 赵志舟 (1971—), 男, 博士, 副教授, 从事航道整治方向的研究工作。

马台河口滩是糯扎渡库尾河段具有浅、急、险等多种碍航特征的复杂滩险,消落期滩段流速大于 4.5 m/s、纵向比降接近 20‰,流态紊乱,船舶航行十分困难。自 20 世纪 70 年代以来,该河段经过多次整治,通航条件显著改善,目前的维护尺度为 1.9 m×40 m×300 m(水深×直线段宽度×弯曲半径)。根据澜沧江临沧港—244 界碑河段的航道整治工程要求,拟将该河段航道等级提升至内河Ⅳ级,设计航道尺度 2.5 m×50 m×330 m。为满足设计的航道等级要求,须进一步对该滩段进行治理,改善通航条件。

山区河流库尾河段急流险滩的整治主要采取扩大泄水面积、调整河床形态的整治措施^[1-4],复杂滩险整治方案多采取物理模型试验的研究手

段^[4-9]。通过分析船舶的有效推力与航行阻力之间的平衡关系,可以得出衡量船舶在急滩航行中能否顺利通过的水力指标。通常,这一指标用航道表面流速 u 与相应的允许水面比降 J 的组合进行表达,也可拟合得到 u 和 J 的函数表达式,该函数值 E 通常被称为消滩判数^[10]。许光祥等^[11]提出临界消滩判数 E_c :

$$E_c = u^2 / (2g) + \lambda LJ \quad (1)$$

式中: λ 为船长倍数; L 为船长, m; g 为重力加速度, m/s²。若航道 E 值小于 E_c , 则船舶可自航上滩。

本文基于物理模型试验,在研究马台河口滩河段整治前的水流特性与碍航特征的基础上,通过方案优化试验提出科学合理的整治方案,旨在为山区库尾河段的航道整治研究提供参考依据。

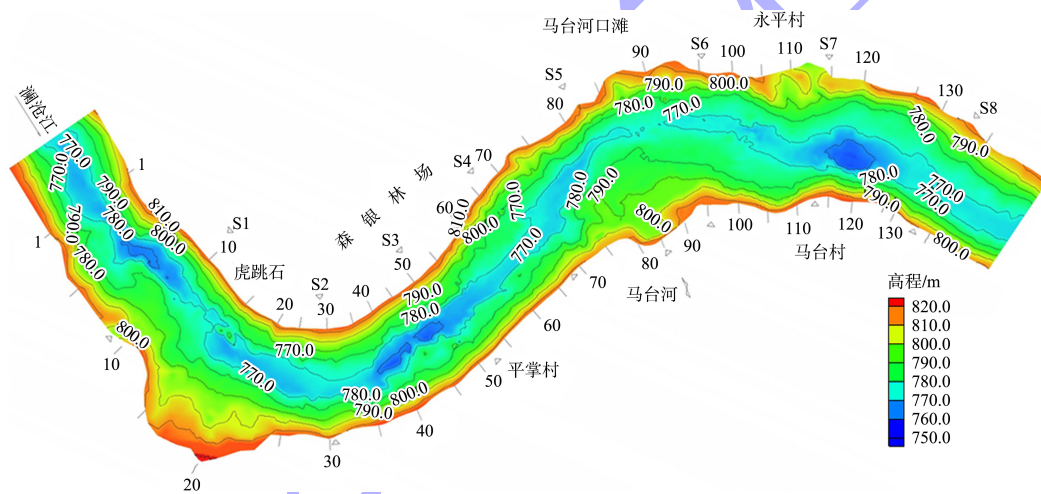


图1 马台河口滩河段河势
Fig. 1 River regime of Matai Estuary Beach reach

1 工程概况

1.1 河段概况

澜沧江马台河口滩位于临沧市马台乡,处于糯扎渡水库变动回水区,距离上游大朝山大坝 35.4 km,通航条件受上游电站出流、下游坝前运行水位的影响。河段平面呈 S 形(图 1),上游虎跳石段弯曲半径约 330 m,弯道中心角 91°,主槽偏右岸,江心有巨大礁石导致航宽不足、流态较差。下游马台河口滩段弯曲半径约 330 m,弯道中心角 85°。右岸马台河口处有大面积冲积扇,与左岸突出形成“卡口”;河床纵向起伏,卡口段平均

河底纵坡达 12‰。消落期流量较大时滩段坡陡流急,存在扫弯水、剪刀水等碍航流态,船舶航行十分危险。

1.2 水文泥沙

1.2.1 水文

大朝山电站 2003 年全部机组投产发电,水库正常蓄水位 899 m、死水位 887 m。糯扎渡电站距大朝山坝址 211 km,水库正常蓄水位 812 m、死水位 765 m,2014 年全部机组投产发电。受大朝山出库流量和糯扎渡坝前水位影响,马台河口滩的水位与流量关系复杂,糯扎渡水库近 10 a 坝前

运行特征水位见表 1。

表 1 糯扎渡坝前运行水位保证率
Tab. 1 Guarantee rate of operating water level
in front of Nuozhadu Dam

坝前水位/m	保证率 $P/\%$	备注
766.88	99.8	设计枯水年 4 月中旬水位
770.65	96.0	设计枯水年 3 月下旬水位
772.00	90.3	设计枯水年 3 月中下旬水位
773.00	86.8	-
774.00	84.0	设计枯水年 3 月中上旬水位
775.00	79.1	-

1.2.2 泥沙

滩段上游小湾、漫湾、大朝山电站等梯级建成后, 各段入库泥沙逐级减少。汛期(6—10 月)输沙量占全年总量的 90%, 非汛期输沙量很小, 输沙量与流量成正比关系, 年际间表现为丰水丰沙、枯水少沙, 河床组成主要为基岩和卵石。

1.3 航道现状与整治标准

本河段设计船型为 500 吨级驳船, 船型尺度 $56\text{ m}\times 8.8\text{ m}\times 2.0\text{ m}$ (船长 $\times$ 型宽 $\times$ 型深), 航道整治标准为 IV 级, 设计航道尺度 $2.5\text{ m}\times 50\text{ m}\times 330\text{ m}$, 通航保证率 95%, 依据《澜沧江 244 界碑至临沧港 IV 级航道建设项目 500 吨级船舶急滩通航水力指标研究报告》提出的船舶自航上滩水力指标(表 2), 取 λ 为 1.23 倍船长, 经拟合得到 E_c 为 1.02 m。

表 2 500 吨级船舶自航上滩水力指标
Tab. 2 Hydraulic indexes of 500-ton class
ship self-propelled beaching

$J/\%$	0	1	2	3	4	5	6	7	8
$u/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	4.40	4.25	4.10	3.95	3.80	3.65	3.50	3.35	3.20

2 物理模型的建立与验证

2.1 模型设计

物理模型范围为马台河口上游 2.1 km 至下游 2.2 km, 研究河段长约 4.3 km。采用平面比尺 $\lambda_L=60$ 、垂直比尺 $\lambda_H=60$ 的定床清水正态模型。模型采用粒径 19 mm、间距 10 cm 的卵石梅花型间距加糙; 在规划航槽清障区采用平均粒径 10 mm 的砂砾密排加糙。

2.2 模型验证

选取中枯水 $900\text{ m}^3/\text{s}$ 、中洪水 $1\,580\text{ m}^3/\text{s}$ 与

$1\,900\text{ m}^3/\text{s}$ 3 级典型流量进行模型水位、流速验证, 结果表明模型相似性良好, 符合 JTS/T 231-4—2018《内河航道与港口水流泥沙模拟技术规程》河工模型的相似性要求。

2.3 试验流量和工况

试验选取保证率 93% 出库流量 $470\text{ m}^3/\text{s}$ 、保证率 95% 坝前水位 770.65 m 作为设计最低通航水位工况。下游水库低水位运行时, 上游水库下泄流量越大, 滩段水流条件越差。因此, 选取糯扎渡坝前水位为 770.65 m 时大朝山电站特征流量组合作为试验工况(表 3), 表中模型尾门位于马台河口下游约 2.00 km 处。

表 3 试验流量工况和尾门水位
Tab. 3 Test flow conditions and tailgate water level

流量/ $(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$	尾门水位/m	大朝山近 20 a 流量特征
470	772.42	设计最低通航流量
640	773.15	月平均最小流量
900	774.21	1—4 月平均流量
1 320	775.46	多年平均流量
1 900	777.12	主汛期平均流量
2 500	778.58	2014 年丰水年汛期平均流量

3 整治前水流特性与碍航特征分析

3.1 水流特性

3.1.1 水位与比降

按表 3 试验流量工况对工程河段整治前水流特性进行试验。各级流量下水面线变化见图 2, 总体来看上游段比降相对较小, 下游马台河口滩卡口段在 $Q\leq 1\,320\text{ m}^3/\text{s}$ 时水尺 S5-1 与 S5-2 间比降最大, 为 $21.3\text{‰}\sim 28.2\text{‰}$; $Q=1\,900$ 、 $2\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 时水尺 S4-2 与 S5 间比降最大, 分别为 16.97‰ 、 19.20‰ 。

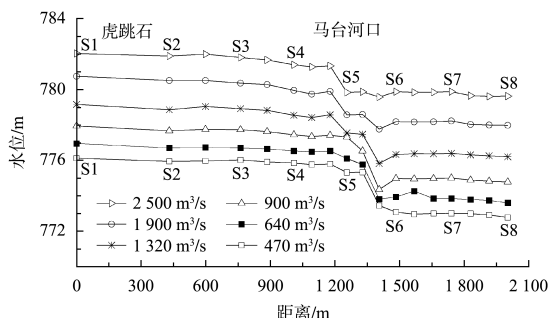


图 2 整治前各级流量下水面线变化
Fig. 2 Water surface line variation
under different flow rates before regulation

3.1.2 流速分布

进口段虎跳石滩段流速小于 2 m/s、马台河口滩段多年平均流量 $1\,320\text{ m}^3/\text{s}$ 时,工程河段的流速分布见图 3,断面 65~69 附近流速最大, $Q=1\,320$ 、 $2\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 时主流最大流速分别为 2.79、

3.25 m/s。下游弯道段从断面 74 开始河槽逐渐束窄,右岸溪口堆积体与左岸礁石岩盘对峙形成卡口,该处有明显的剪刀水、跌水出现,流急水浅伴随有明显激浪,主流冲击江心礁石与岸侧突出石梁,水流十分紊乱。

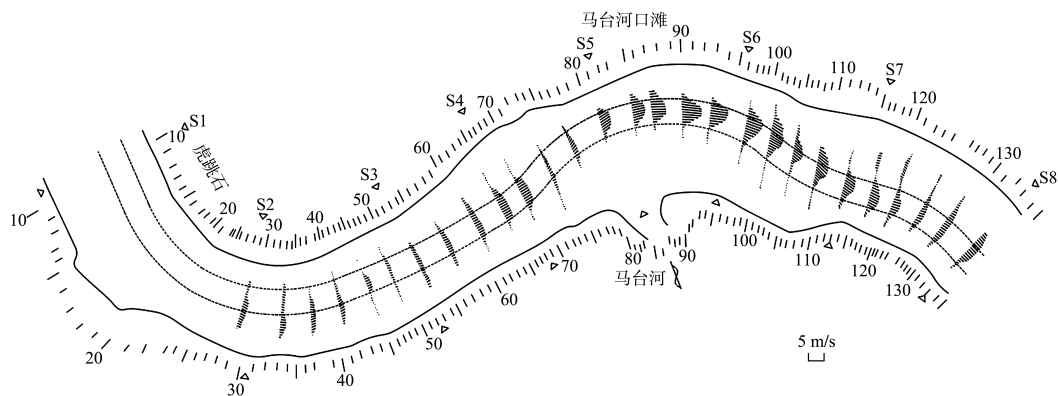


图 3 马台河口滩河段整治前流速分布 ($Q=1\,320\text{ m}^3/\text{s}$)

Fig. 3 Velocity distribution of Matai Estuary Beach reach before regulation ($Q=1\,320\text{ m}^3/\text{s}$)

3.2 碍航特征

3.2.1 航道尺度不足

虎跳石段江心有大礁石导致航深、航宽不足;下游段马台河口滩卡口处枯水河宽仅约 50 m,两岸侧水深浅、航宽不足,弯道段出口断面处左岸有凸嘴伸出,枯水时出露导致航宽不足。

3.2.2 通航水流条件差

马台河口滩段上行航线各断面的 E 值沿程变化见图 4,进口段、出口段的流速与比降均较小,满足船舶自航上滩的要求;中间卡口段消落期各级流量下的 E 值均明显大于 1.02 m,船舶难以自航上滩,多年平均流量 $1\,320\text{ m}^3/\text{s}$ 时的 E 值为 3.06 m、滩情最汹。此外,滩段存在扫弯水、剪刀水、跌水、激浪等碍航流态。

综上所述,本河段上游段虎跳石滩为枯水窄槽浅滩,下游段马台河口滩为库尾消落期溪口浅急险滩。

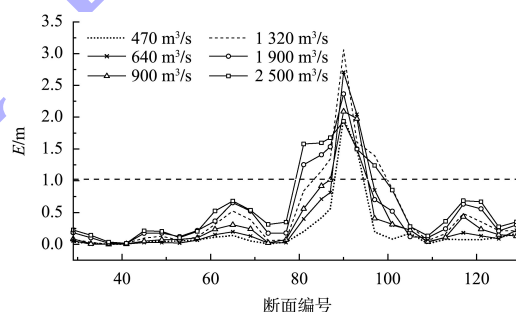


图 4 整治前航线 E 值沿程分布

Fig. 4 Distribution of E values along route before regulation

4 整治方案研究

4.1 方案 1

4.1.1 方案布置

方案 1 为初步整治设计方案,包括进口段虎跳石滩清障与下游段马台河口滩整治两部分,平面布置见图 5。一般相邻多滩整治先研究下游关键滩段整治措施、再统筹各滩相互影响后确定整治方案^[12]。考虑到下游段清障会导致上游虎跳石滩水位跌落,因此模型试验方案 1 仅布置下游段马

台河口滩的整治措施: 1) 对枯水航槽内不满足设计最低通航水位下 3.00 m 的块石和江心礁石进行清理, 开挖航槽以满足航道尺度要求; 2) 清障的同时增大有效泄水面积, 清障区槽底纵向坡度为 4‰。

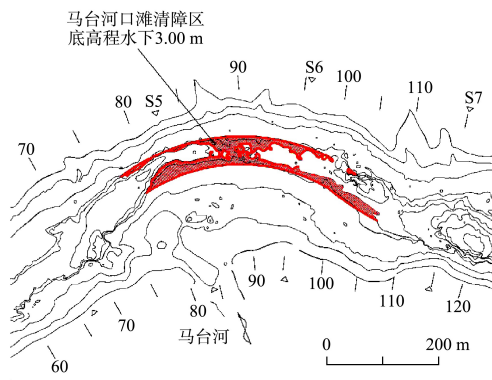


图5 方案1平面布置
Fig. 5 Plane layout of Plan 1

4.1.2 整治效果分析

1) 整治后航道宽 50 m, 最小弯曲半径 330 m, 最小航深 2.50 m, 满足航道尺度要求。

2) 整治后引起上游水尺跌落, 设计流量 470 m³/s 工况下进口 S1 水尺水位跌落 1.13 m, S2 至 S5-1 水尺河段跌落 1.60~1.80 m(图 6)。各级流量下卡口段水面纵坡比降减缓, 但在中洪水流量时比降仍大于 12‰。

3) 扫弯水、剪刀水减弱, 流态较整治前有明显改善。但在断面 74~82 处河槽横向收缩明显, 河宽仍与方案前相当, 斜流仍较强。与整治前最大 E 值相比有显著减小, $Q=2\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 时 E 值由 1.98 m 减小为 1.30 m(图 7), 中洪水流量工况下船舶上滩仍存在一定难度。

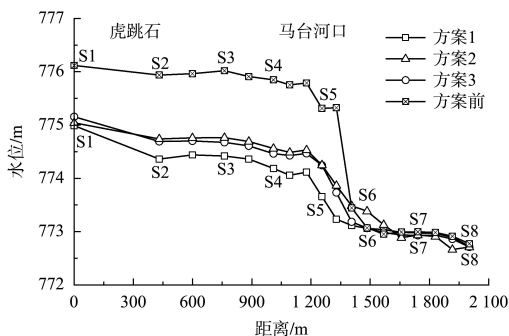


图6 470 m³/s 流量下各方案水面线变化
Fig. 6 Water surface line variations for each plan under a flow of 470 m³/s

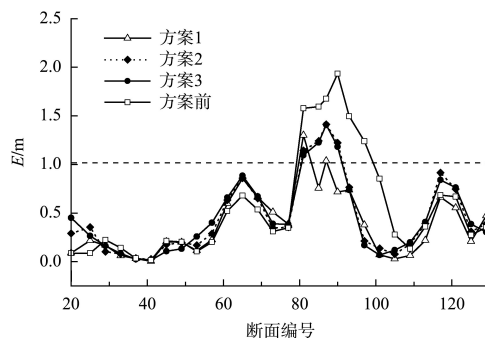


图7 2 500 m³/s 流量下各方案 E 值变化
Fig. 7 Variation of E values for each plan under a flow of 2,500 m³/s

4.2 方案2

4.2.1 方案布置

方案 2 的平面布置见图 8, 整治措施为: 1) 为减小方案 1 引起的上游水位跌落, 除左侧上游段清障区不变外, 其余马台河口滩清障区底高程由方案 1 的水下 3.00 m 调整为水下 2.50 m; 2) 将卡口段向右扩挖, 减小河槽横向收缩引起的挑流影响。

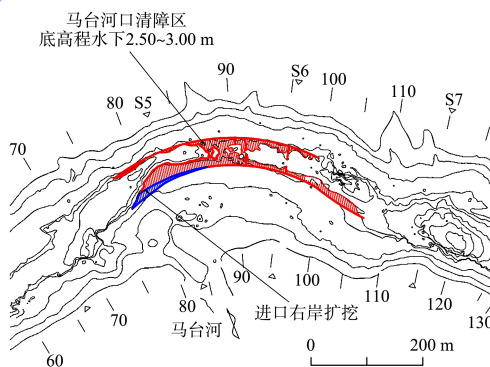


图8 方案2平面布置
Fig. 8 Plane layout of Plan 2

4.2.2 整治效果分析

1) 滩段上游水位跌落值较方案 1 减小(图 6), 流量 470 m³/s 工况下最小航深为 2.40 m, 卡口段 S4-2 与 S5-2 水尺间落差由方案 1 的 1.04 m 减小为 0.92 m。流量 1 320 m³/s 时落差较方案 1 减小 0.02~0.05 m。卡口段纵向比降较方案 1 有所减小, 流量 1 320、2 500 m³/s 工况下最大纵向比降分别为 8.82‰、8.69‰。

2) 流量 1 320 m³/s 时右岸侧斜流明显减弱, $Q=2\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 时 E 最大值为 1.44 m, 仍不能满足

自航上滩要求(图 7)。

4.3 方案 3

4.3.1 方案布置

方案 3 的平面布置见图 9，整治措施为：
1) 下游滩段滩下壅水措施下游弯曲段的出口左岸

侧深沱河床底高程 760~765 m，方案 3 将该深沱河床回填至水下 3.20 m，起到壅高上游水位、改善出口区局部流态的作用。2) 对进口虎跳石滩段的浅区进行清障，底高程为设计流量 470 m³/s 水位工况下 2.70 m。

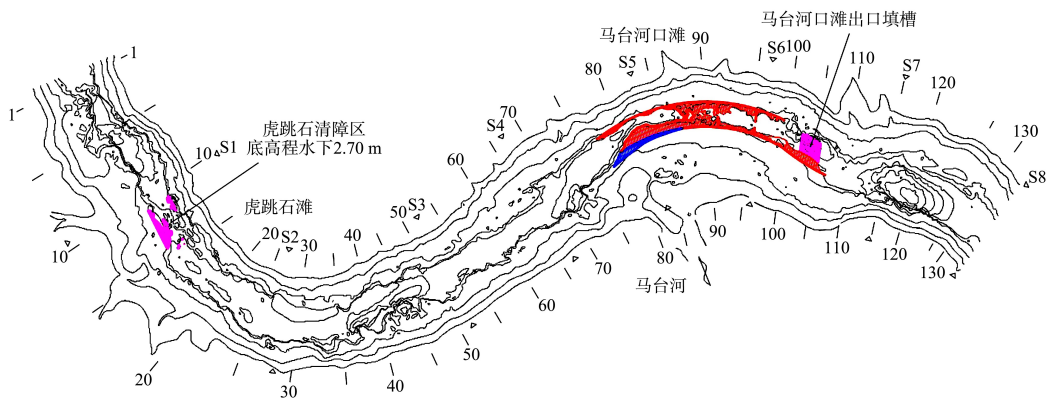


图 9 方案 3 平面布置
Fig. 9 Plane layout of Plan 3

4.3.2 整治效果分析

1) 马台河口滩整治效果。填槽区航深 3.20 m，其余位置最小航深 2.45 m，基本满足航道尺度要求。填槽后在消落期中枯水流量下水位差减小 0.13~0.34 m，方案 2 在中枯水流量 470、900 m³/s

时 S5-1 ~ S5-2 水尺区段比降分别为 7.02‰、8.50‰，方案 3 减小至 5.29‰、7.10‰(图 6)。中枯水流量时滩段流速较方案 2 减缓，中洪水流量下流速分布与方案 2 接近，多年平均流量 1 320 m³/s 时工程河段的流速见图 10。

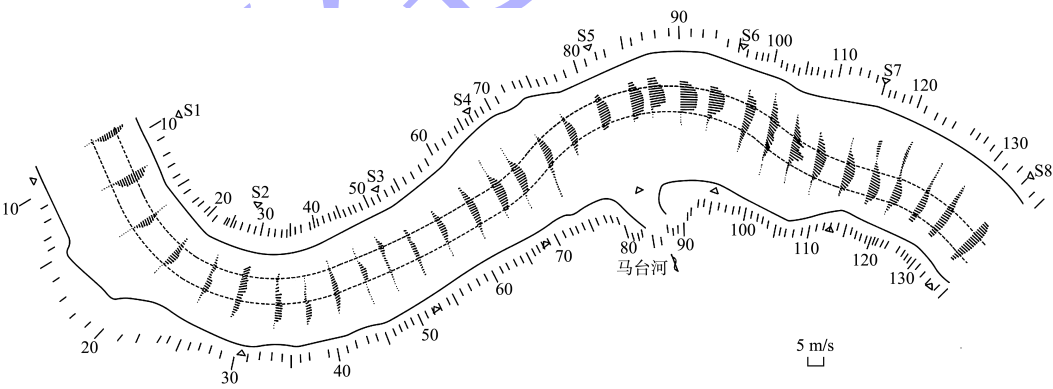


图 10 马台河口滩河段方案 3 流速分布 (Q=1 320 m³/s)
Fig. 10 Velocity distribution of Plan 3 in Matai Estuary Beach reach (Q=1,320 m³/s)

中枯水流量时 E 值明显减小，基本满足自航上滩的要求。Q≥1 320 m³/s 时滩段航行阻力仍然与方案 2 相近，方案 3 最大 E 值为 1.48 m，船舶过滩仍存在一定困难(图 7)。

2) 上游虎跳石滩整治效果。清障后虎跳石清障区航道满足航道尺度要求。整治后各级流量下

进口段水流较为平顺，满足过滩能力要求。

4.4 不同坝前运行水位对方案 3 通航条件的影响

上述整治方案试验是在坝前水位 770.65 m(保证率 96%)低水运行时、不同大朝山下泄流量工况条件下进行的，推荐方案 3 中洪水流量下过滩阻力仍较大，有必要进一步分析不同坝前运行水位

对方案3通航条件的影响。

多年平均流量 $1\,320\text{ m}^3/\text{s}$ 时,坝前水位由 770.65 m 升高至 774.00 m (保证率 84%) 工况时,卡口段水位差减小 $0.38\sim 0.41\text{ m}$,卡口段最大比降由 8.17% 减小为 5.16% ; E 最大值由 1.45 m 减小为 1.04 m ,基本满足过滩能力要求。此流量下坝前水位低于 774.00 m 的天数保证率为 9%,提高坝前水位对通航保证率影响不大。

主汛期平均流量 $1\,900\text{ m}^3/\text{s}$ 时坝前水位由 770.65 m 升高至 774.50 m (保证率 80%) 工况时,卡口段水位差减小 0.16 m ,卡口段最大比降由 7.02% 减小为 6.77% ; E 最大值由 1.39 m 减小为 1.19 m ,航行阻力有一定减小。此流量下坝前水位低于 774.50 m 的天数保证率为 15%,提高坝前水位对通航保证率有一定的影响。

5 结论

1) 工程河段上游段虎跳石滩为枯水窄槽浅滩,下游段马台河口滩为库尾消落期溪口浅危险滩。

2) 马台河口滩采取挖槽增加航槽尺度、扩大泄水面积并配合滩下深沱填槽的整治措施;虎跳石滩采取清障增加航道尺度的措施,推荐方案实施后研究河段的通航条件得到显著改善。

3) 推荐方案在坝前水位 770.65 m 的中洪水流量工况下过滩阻力仍较大,试验进一步分析了提高坝前运行水位对推荐方案通航条件的影响。坝前水位适当提高时可满足船舶过滩要求。

参考文献:

- [1] 刘天云. 三峡库尾礁石子急滩成因分析及航道整治[J]. 水运工程, 2019(10): 86-92, 129.
LIU T Y. Analysis of navigation hindering characteristics and channel regulation of rapids of Jiaoshizi in the Three Gorges tail of water reservoir [J]. Port & waterway engineering, 2019(10): 86-92, 129.
- [2] 苏丽. 三峡变动回水区广阳坝河段河床演变及整治方案[J]. 水运工程, 2023(4): 149-154.
SU L. Riverbed evolution and waterway regulation scheme of Guangyangba reach in fluctuating backwater area of the

Three Gorges Reservoir[J]. Port & waterway engineering, 2023(4): 149-154.

- [3] 周家俞, 徐奎, 黄成林. 山区河流枢纽库尾河段航道整治模型试验研究[J]. 水运工程, 2018(10): 143-147.
ZHOU J Y, XU K, HUANG C L. Model experimental study on waterway regulation in the tail reach of the mountainous river hub [J]. Port & waterway engineering, 2018 (10): 143-147.
- [4] 雷雅文, 高亚军. 长江上游肖家石盘航道整治方案研究[J]. 人民长江, 2019, 50(S1): 9-14.
LEI Y W, GAO Y J. Study on navigation channel planning and regulation schemes of Xiaojiashipan reaches of Upper Yangtze River[J]. Yangtze River, 2019, 50(S1): 9-14.
- [5] 李顺超, 王斐, 章日红. 黄河银川段贺兰滩群航道整治方案研究[J]. 水道港口, 2016, 37(4): 411-415, 438.
LI S C, WANG F, ZHANG R H. Experimental study on channel regulation of Helan beach groups of Yinchuan section in the Yellow River[J]. Journal of waterway and harbor, 2016, 37(4): 411-415, 438.
- [6] 王鑫, 江涛, 杨燕华, 等. 大藤峡坝下两江汇流口段航道整治试验研究[J]. 水道港口, 2021, 42(4): 485-491.
WANG X, JIANG T, YANG Y H, et al. Experimental study on the estuary channel reach improvement below the Datengxia project [J]. Journal of waterway and harbor, 2021, 42(4): 485-491.
- [7] 张波, 张秀芹, 李一兵, 等. 安康枢纽回水变动区重点碍航浅滩航道整治研究[J]. 水道港口, 2010, 31(3): 210-214.
ZHANG B, ZHANG X Q, LI Y B, et al. Study on waterway regulation of main navigation-obstructing shoal at fluctuating backwater area in Ankang Hydro-junction[J]. Journal of waterway and harbor, 2010, 31(3): 210-214.
- [8] 李顺超, 李欢. 山区河流弯曲分汉型河段航道整治方案[J]. 水运工程, 2023(S1): 34-42.
LI S C, LI H. Channel regulation scheme of bending braided reaches in mountainous rivers [J]. Port & waterway engineering, 2023(S1): 34-42.
- [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.

(下转第 171 页)