



长江上游泸州段典型滩险航道 通航水深条件研究

王晨芷¹, 王平义^{1,2}, 张皓锋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: 针对长江上游航运需求量大但滩险众多导致水深不足的问题, 进行了长江上游泸州段航道最小通航水深的研究。采用综合历时曲线法和保证率频率法得出该河段设计最小通航流量为 3 396 m³/s; 采用数值模型对冰盘碛、螃蟹碛、瓦窑滩 3 个水道进行模拟, 以 5 个典型滩险断面的水深为依据建立了滩险与通航流量的响应关系, 得出该河段典型滩险断面航宽 110 m 时对应的最小通航水深为 3.39 m, 满足 II 级航道的水深航宽标准, 研究结果可为长江上游泸州段后期的航道建设规划提供支撑, 助力泸州段高等级航道建设。

关键词: 长江上游泸州段; 滩险; 通航水深条件; 数值模拟

中图分类号: U617

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)07-0135-08

Navigable water depth conditions of typical shoal and rapid channels in Luzhou section of upper reaches of the Yangtze River

WANG Chenzhi¹, WANG Pingyi^{1,2}, ZHANG Haofeng¹

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

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

Abstract: In view of the problem that the shipping demand in the upper reaches of the Yangtze River is large but there are many shoals and rapids leading to insufficient water depth, this paper conducts a study on the minimum navigable water depth of the Luzhou section of the upper reaches of the Yangtze River. The minimum designed navigable flow rate for this river section is 3 396 m³/s, which is determined using the comprehensive duration curve method and the guarantee rate frequency method. The numerical model is used to simulate the Bingpanqi, Pangxieqi, and Wayaotan waterways. Based on the water depths of five typical shoal and rapid sections, the response relationship between shoals and rapids and navigable flow is established. It is concluded that when the navigation width of the typical shoal and rapid sections in this river section is 110 m, the corresponding minimum navigable water depth is 3.39 m, which meets the water depth and navigation width standards of Class II waterways. The research results can provide support for the later channel construction planning of the Luzhou section of the upper reaches of the Yangtze River and facilitate the construction of high-grade waterways in the Luzhou section.

Keywords: Luzhou section in upper reaches of the Yangtze River; shoal and rapid; navigable water depth condition; numerical simulation

内河航运具有能耗小、污染轻、效益高、运能大等优势^[1], 是区域发展的重要战略资源^[2]。

近年来长江上游航运量激增, 航道等级迫切需要提升; 经过多年的航道整治建设, 宜宾合江门—

收稿日期: 2024-10-11

作者简介: 王晨芷 (1998—), 女, 硕士研究生, 研究方向为生态航道理论与智能运维。

通信作者: 王平义 (1964—), 男, 博士, 教授, 研究方向为水力学及河流动力学。E-mail: py-wang@163.com

泸州彩溪口河段航道均已提升至 III 级航道及以上。但长江上游滩险众多，泸渝段滩险的主要碍航特征表现为水深不足^[3]，因此研究通航水深条件必不可少。

关于通航水深条件的研究，目前主要集中在设计最低通航水位和通航保证率等问题。在水文条件相对稳定的天然河流中，通常可以根据长系列历史资料直接计算出设计最低通航水位^[4]。然而，随着人类活动的影响，如采砂、航道开挖和枢纽运行等，确定设计最低通航水位变得更加复杂。目前，多种因素影响下的最低通航水位计算问题正受到越来越多的关注。张明等^[5]研究了在枯水位下降背景下，西江径潮流河段的设计最低通航水位计算方法，考虑了航道工程、电站日调节及潮汐的综合影响；冯小香等^[6]探讨了三峡蓄水后长江中游设计最低通航水位的变化；赵江艳等^[7]以澜沧江景洪站为例，研究枯水期非一致性最低通航水位的综合历时曲线法；朱代臣等^[8]提出三峡 175 m 蓄水初期库区河段最低通航水位的计算方法；王永兴等^[9]结合枢纽调度运行方式，建立数学模型得到经济合理的设计最低通航水位。然而目前通过最小通航流量和数值模拟相结合的方式来计算航道通航水深研究较少。

本文以长江上游泸州河段为研究对象，基于前期勘测得到的地形成果，根据推求的设计最小通航流量采用 FLOW-3D 数值进行计算，通过分析该河段上 5 个典型滩险断面的通航水深，得出该河段的最小通航水深，为河段后期的航道建设提供了科学依据。

1 研究区滩险概况

本文以长江上游泸州段的冰盘碛、螃蟹碛、瓦窑滩 3 个水道为研究区域，其中各滩险分布见图 1，3 个水道的航道里程分别为 878.0~885.0 km、885.0~892.7 km、892.7~897.0 km，计算河段总长 19 km，河流平均纵比降 0.27‰，为典型的山区河道。研究河段河床大多由基岩、卵石或卵石夹沙组成，边界条件较坚硬^[10]。河道整体呈东北→东南→西南走向的 180°大反弯，具有“弯、浅、险、窄、急”等碍航特征，航道内滩险众多，水流条件复杂。该河段不仅在平面上呈现宽窄不一的山区河流特征，在纵向上也呈现出地势起伏频繁、滩槽相间的特征。河段左右岸深泓最低约为 162 m，最高约为 217 m，相差近 55 m。根据长江上游航道图，统计研究河段典型滩险的特征参数，见表 1。

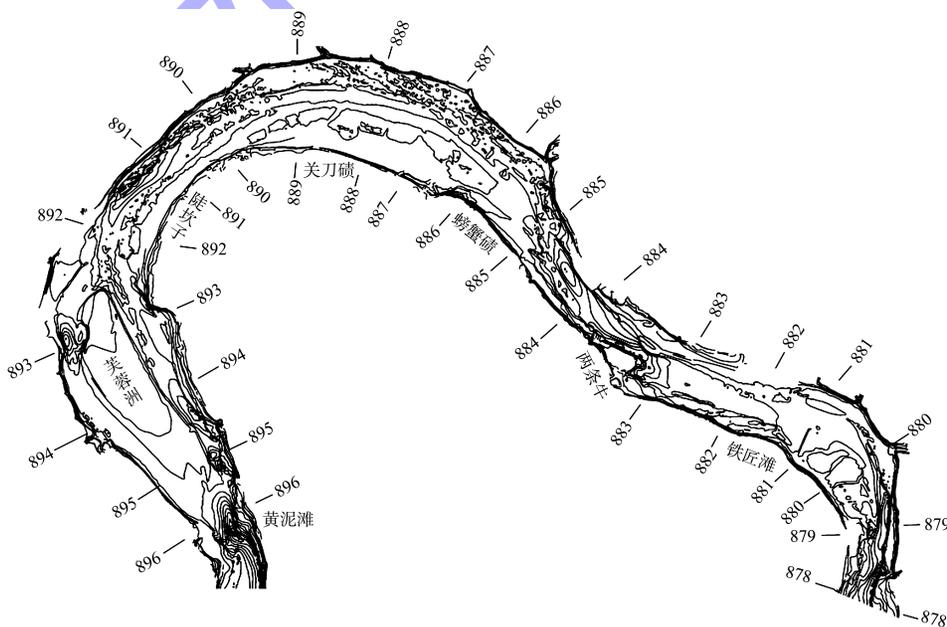


图 1 研究河段河势

Fig. 1 River conditions in study reach

表1 河段滩险概况

Tab. 1 Overview of shoal and rapid sections

航道名称	滩险名称	距宜昌里程/km	滩险类型	滩体最大长度/m	滩体最大宽度/m	滩体最大高度/m
瓦窑滩水道	黄泥滩	896.5	急流滩	570	160	33.0
	陡坎子	891.4	浅滩	1 190	200	22.0
螃蟹碛水道	关刀碛	888.4	浅滩	1 780	510	19.6
	螃蟹碛	887.0	浅滩	1 070	350	9.1
冰盘碛水道	两条牛	883.3	急流滩	460	210	45.0

冰盘碛水道有冲有淤,主要冲刷区域在冰盘碛滩面,深度大多在5 m以上,有些甚至达到10 m以上。淤积主要发生在893.5 km处的两条牛,淤积深度超过5 m。该水道碍航特征为上浅下险,在枯水期时,新路碛将河道分为左右2条支流,主航道水深较浅;与冰盘碛之间的过渡段有1处浅埂,最浅水深约1.8 m。由于冰盘碛碛翅伸入江心,下游出现水流阻滞情况,并在左岸形成横流,导致水位下降时更加汹涌,其左侧还潜藏暗礁如垫舵石。下游左岸也有垫舵石,水流交错复杂,航道曲折狭窄,下行船只易搁浅触礁。

在长江兰叙段和泸渝段航道整治工程中,螃蟹碛水道已进行了炸礁、疏浚、修建整治建筑物等河道治理。该水道的主要碍航特征与冰盘碛水道相同,左岸有卵石堆和裸露基岩,局部区域有淤沙和暗礁伸向江中。右岸有巨大的卵石碛螃蟹碛,其碛翅和碛尾伸入江中。在洪水期,螃蟹碛被淹没,江面宽度超过1 000 m,下游最窄处仅约600 m。由于螃蟹碛地形复杂,水流变得异常紊乱,形成泡漩水等不良流态。沙卵石受泡漩水和主流水流的影响,呈现不规则的沙波运动,形成卵石包,导致河床不平,形成卵石沙波运动滩险。这种运动对航道通航产生了较大影响。

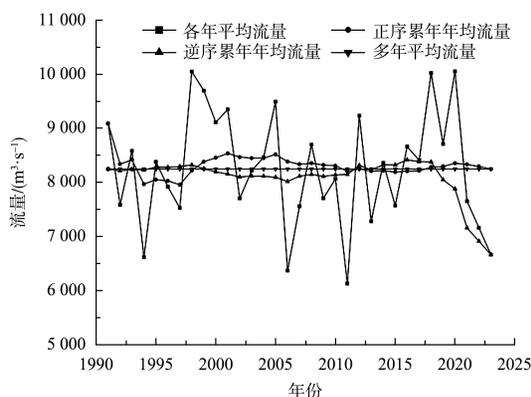
瓦窑滩水道由芙蓉坝卵石碛将水流分为左右两汉,左槽水浅,无法通航;而右槽则为通航航道。在中洪水期,水流经过黄泥滩后,河床被放宽,导致卵石淤积在芙蓉坝上;退水时,未被冲走的卵石形成浅嘴。枯水期,由于地形复杂,水流受到阻碍,形成泡漩水和扫弯水。该水道已进

行过航道整治——于碛脑建设顺坝、采沙坑建设潜坝,但右侧水深和芙蓉坝的淤积仍然存在,导致枯水期水流偏向右岸,航行条件恶化。船只通过滩口时需特别小心,必须与复杂的水流和地形相互作用,以避免船只受阻或碰撞^[11]。

2 水文特性

2.1 年径流量统计

由于该研究河段缺乏连续的水位流量实测资料,本文根据朱沱水文站(航道里程805.9 km)1991—2023年的日水位、流量资料,统计得各年平均流量、正序及逆序累年年均流量以及各年平均水位,见图2。由图2a)可知,1991—2023年各年平均流量最小为6 131 m³/s(2011年),最大为10 053 m³/s(2020年),多年平均为8 246 m³/s,其中向家坝水电站投产运行前多年平均为8 252 m³/s(1991—2012年),运行后多年平均为8 232 m³/s(2013—2023年)。向家坝水电站运行后平均流量较运行前有微小的减少,但变化不大;从正序累年年均流量曲线看,1991—1997年年均流量呈下降趋势,1998年之后有较小的减少,2011年开始趋于稳定在多年平均流量附近。从逆序累年年均流量曲线看,1998年以前基本稳定,2019年之后波动较大并呈现下降趋势。由图2b)可知,年均水位最小为197.89 m(2014年),最大为200.92 m(2005年),多年平均为199.91 m,其中向家坝水电站投产运行前多年平均为200.16 m,运行后多年平均为199.41 m,向家坝水电站投产运行后年均水位明显减小。



a) 流量变化过程

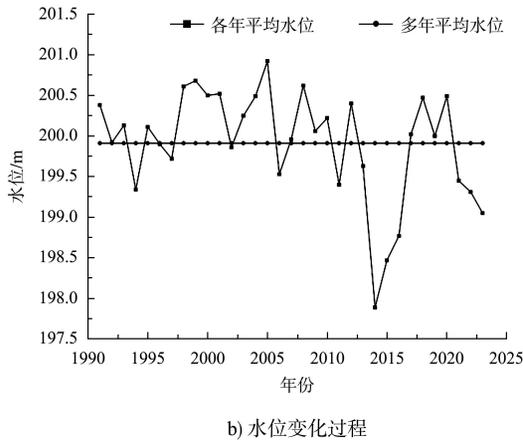


图2 朱沱站流量及水位变化过程

Fig. 2 Flow and water level change process at Zhutuo station

2.2 丰、平、枯时期径流量统计

根据朱沱站日均流量资料统计得到朱沱站1991—2023年丰水期(6—10月)、平水期(5、11月)、枯水期(1—4、12月)平均流量变化过程见图3。由图3可以看出,丰水期朱沱站的平均流量各年变化较大,基本在10 000~16 000 m³/s,向家坝运行后平均流量较运行前有所减少。平水期的平均流量基本在4 000~7 000 m³/s,向家坝运行后与运行前变化趋势基本相同。枯水期向家坝运行前各年的平均流量为2 000~4 000 m³/s,运行后基本稳定在4 500 m³/s,运行后较运行前增长显著。

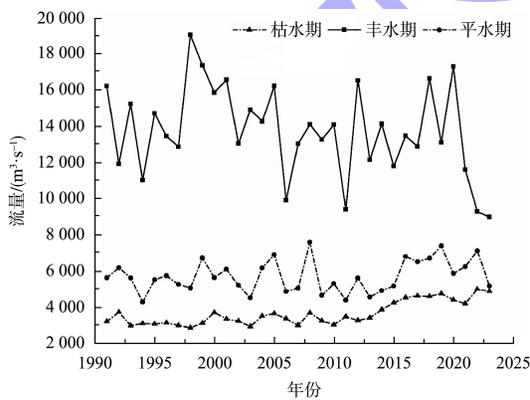


图3 1991—2023年朱沱站丰、平、枯时期平均流量变化过程

Fig. 3 Average flow change process of Zhutuo station during the abundant, normal, and dry periods from 1991 to 2023

2.3 设计最小通航流量的推求

对于设计最小通航流量的研究, JTS 145—2015《港口与航道水文规范》^[12]中通过水文站的流

量和水位的统计分析可得到天然河道的最小设计通航流量; 吴文凤等^[13]通过分析枢纽联合调度可能增加的流量, 采用数值模拟计算得到航道整治的设计最小通航流量。

本文根据朱沱水文站的实测流量, 通过综合历时曲线法、保证率频率法推求研究河段的设计最小通航流量。

2.3.1 综合历时曲线法

综合历时曲线法是通过多年日均水位进行保证率计算, 然后根据给定的保证率设计最低通航水位的方法。类比采用此方法推求设计最小通航流量, 统计1991—2023年、2013—2023年(向家坝运行后)朱沱站日均流量并进行保证率计算, 绘制的综合历时曲线见图4。

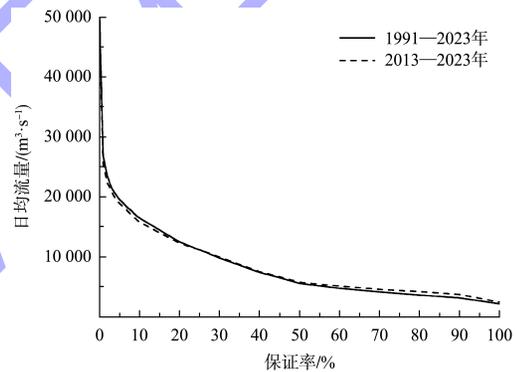


图4 朱沱站综合历时曲线

Fig. 4 Composite time curve of Zhutuo station

宜宾合江门—泸州彩溪口河段目前的航道等级为III级, 通航保证率取98%^[14], 1991—2023年对应的流量为2 610 m³/s, 2013—2023年对应的流量为3 150 m³/s。

2.3.2 保证率频率法

保证率频率法是在保证率的基础上增加频率概念, 将指定保证率相对应的流量看做随机变量并进行频率分析, 然后在累计频率曲线上求出指定频率下的流量, 作为设计流量。首先, 根据朱沱站1991—2023年流量资料绘制出保证率98%的流量经验频率曲线, 见图5a); 其次, 根据式(1)、(2)计算参数C_v、C_s并用频率适线软件配线得到朱沱站理论频率曲线, 见图5b); 最后, 从理论累计频率曲线上查出频率20%(5a重现期)、

保证率 98% 的流量为 3 257 m³/s (1991—2023 年)、3 641 m³/s (2013—2023 年), 与朱沱站枯水期平均流量基本保持一致。

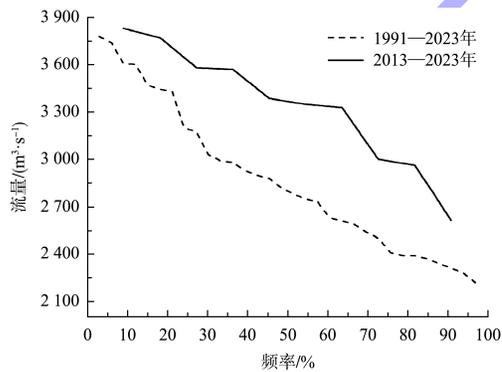
由于向家坝水电站的调蓄作用使得运行前后的流量变化差距较大, 使用综合历时曲线法和保证率频率法得到的 1991—2023 年长序列值较实际偏小, 因此推求设计最小通航流量应采取向家坝运行后的系列值则较实际更为准确。结合 2 种方法的 2013—2023 系列值均值 3 396 m³/s 作为本次模拟的设计最小通航流量。

$$C_v = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (K_i - 1)^2} \quad (1)$$

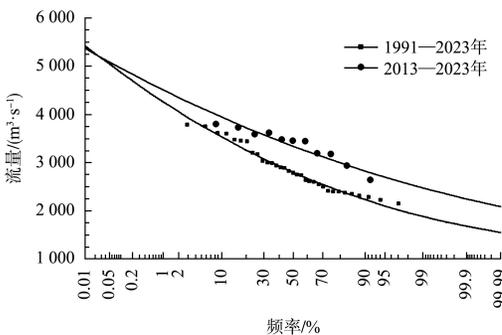
$$C_s = \frac{\sum_{i=1}^n (K_i - 1)^3}{(n-3) C_v^3} \quad (2)$$

式中: n 为序列的年份数; K_i 为模比系数, 即第 i 年的实际观测值与该序列多年平均值的比值;

C_v 为变差系数; C_s 为偏态系数。



a) 经验频率曲线



b) 理论频率曲线

图 5 朱沱站保证率 98% 流量频率曲线

Fig. 5 Discharge frequency curve for 98% guarantee rate at Zhutuo station

3 模型介绍

3.1 数学模型

本文模拟选用 2016 年实测河道地形资料, 对 3 个水道中的 5 个典型滩险分别进行模拟。由于模拟的对象主要为典型的滩险, 因此在保证计算准确的基础上取 3 个水道的部分区域作为本次模拟的计算区域, 计算区域范围见图 6。

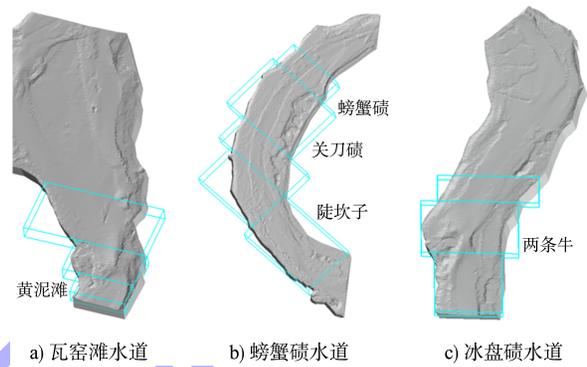


图 6 河道地形

Fig. 6 River topographic

本次模拟使用 Topo2STL 工具进行建模, 采用 FLOW-3D 中的 Viscosity and Turbulence 模型和 Gravity and Noni-inertial Reference Frame 模型进行数值模拟, 其中控制方程包括连续性方程和动量方程。

连续性方程:

$$\frac{\partial}{\partial x}(uA_x) + \frac{\partial}{\partial y}(vA_y) + \frac{\partial}{\partial z}(wA_z) = 0 \quad (3)$$

动量方程:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x \quad (4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y \quad (5)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z \quad (6)$$

式中: u 、 v 、 w 分别为 x 、 y 、 z 的速度分量; A_x 、

A_y 、 A_z 分别为 x 、 y 、 z 的面积分数； ρ 为液体的密度； p 为压力； V_F 为体积分数； G_x 、 G_y 、 G_z 分别为物体分别在 x 、 y 、 z 方向上的重力加速度； f_x 、 f_y 、 f_z 分别为 3 个方向的黏滞加速度。

3.2 边界条件

在数值模拟过程中，河道底部和左右岸均设为壁面边界 W ；进口采用流量边界 Q ，流量设为最小通航流量 $3\ 396\ \text{m}^3/\text{s}$ ；出口采用自由出流边界 O ；网格顶部选择压力边界 P ；2 个网格的连接处采用对称边界 S 。模型部分边界见图 7。

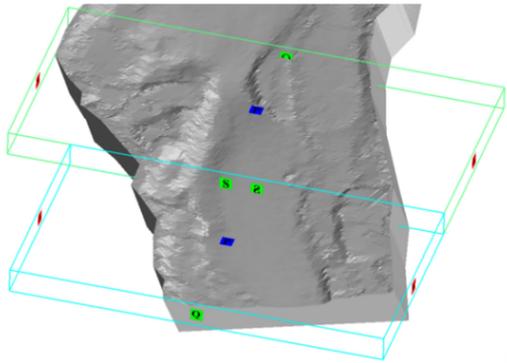


图 7 部分边界
Fig. 7 Partial boundary

3.3 网格划分

本次模拟采用多网格区块进行连接，调整网格区块的大小以适应河道地形。一般在 FLOW-3D 计算时网格划分越密计算效果越好，但由于计算机的计算能力有限以及本次模拟无需精细的流场结果，在确保计算收敛及有一定的精确度，将计算网格尺寸设置为 $15\ \text{m} \times 10\ \text{m} \times 5\ \text{m}$ (长×宽×高)，局部网格划分见图 8。

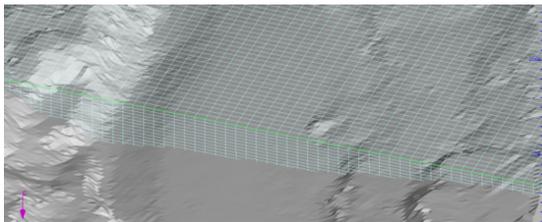


图 8 局部网格
Fig. 8 Local grid

3.4 模型糙率

根据朱代臣等^[15]对长江干线泸渝段河床糙率取值的研究，本研究在 $0.030 \sim 0.045$ 取值范围中选取 $n = 0.038$ 进行数值模拟。由于 FLOW-3D 使用表面粗糙度来表示糙率，计算时需将曼宁糙率换算为表面粗糙度，换算公式为：

$$k = 3.720\ 67 D_h \exp\left(\frac{-0.103\ 252 D_h^{1/6}}{n}\right) \quad (7)$$

式中： k 为表面粗糙度； D_h 为水力直径； n 为曼宁糙率。

3.5 模型验证

在模拟的 3 个水道中各选取 1 个滩体(黄泥滩、陡坎子、两条牛)进行模型验证，利用滩体对应里程的实测水位作为模拟工况，模拟该河段滩体断面的流量并与对应的实测流量进行对比，见表 2。经分析，模拟流量与实测流量趋于一致，相对误差在 $\pm 15\%$ 以内，说明模拟效果良好。

表 2 模型验证
Tab. 2 Model validation

滩险名称	距宜昌里程/km	实测水位/m	实测流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	模拟流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	相对误差/%
黄泥滩	896.5	229.46	20 291	21 911.14	7.98
		219.52	2 230	2 132.54	4.37
		228.03	20 291	19 820.71	2.32
陡坎子	891.4	225.21	12 100	13 851.11	14.47
		219.22	2 230	2 364.03	6.01
		226.64	20 291	20 111.82	0.88
两条牛	883.3	223.77	12 100	11 552.63	4.52
		217.79	2 230	2 281.27	2.30

4 水深分析

根据《四川省内河航运发展规划(2023—2035 年)》，宜宾合江门—泸州彩溪口河段目前的航道等级为 III 级，到 2035 年的发展规划要求提升该段航道等级为 I 级。依据 JTS 180-4—2020《长江干线通航标准》^[16]，长江干线航道尺度见表 3。

表 3 长江干线航道尺度

Tab. 3 Channel scale of the Yangtze River mainline

航道等级	内河船舶吨级 DWT/t	航道水深/m	直线段宽度 (双线航道)/m	弯曲半径/m
I-1	-	12.5	350~500	1 050~1 200
I-2	15 000	9.0~10.5	300~500	1 050~1 200
I-3	10 000	6.0~8.0	200~350	1 050~1 200
I-4	7 000	4.5~6.0	180~300	1 050~1 200
I-5	5 000	4.0~4.5	150~250	950~1 050
I-6	3 000	3.5~4.0	135~250	950~1 050
II	2 000	3.0~3.5	100~190	750~1 000
III	1 000	2.4~3.0	80~110	560

分析模拟的 5 个滩体断面水深见图 9。黄泥滩横断面呈 V 形, 由于其特殊的河床形态, 使其形成很大的横比降从而出现回流、泡漩、剪刀水、滑梁水等不良流态, 对船舶航行造成极大的威胁。陡坎子、两条牛 2 个滩体横断面呈 U 形, 是典型山区河流浅滩的横断面形态, 由于黄泥滩、两条牛为急流险滩, 导致其伴有深槽使断面束水, 通航水深变大。关刀碛及螃蟹碛 2 个滩险断面, 由于滩险局部淤沙导致地形起伏较大, 主航槽通航水深较小, 航宽基本达到 II 级航道标准。

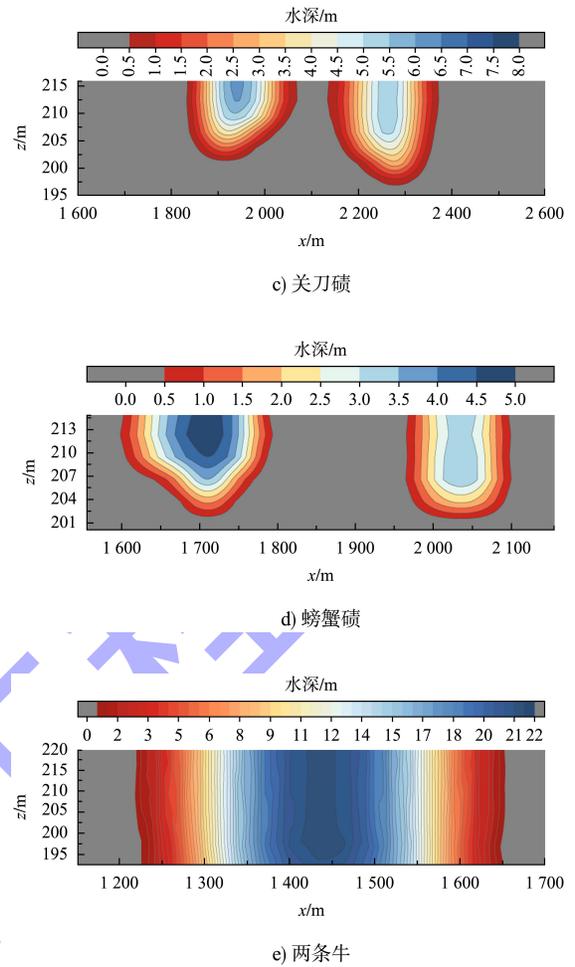
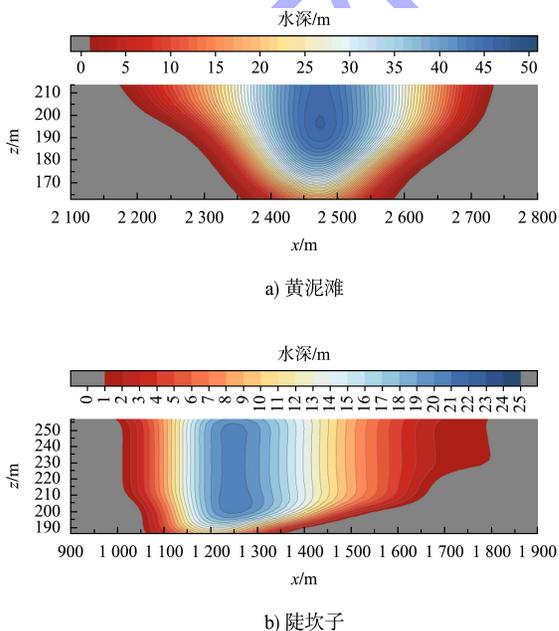


图 9 断面水深

Fig. 9 Water depth of cross-section

经过模拟计算可得 5 个滩体断面的水深及航宽, 见表 4。由于各滩险地形条件不同, 各断面水深及航宽也出现很大差异。由表 4 可知, 黄泥滩、两条牛断面的水深较大, 可满足 I 级航道水深标准; 陡坎子、螃蟹碛断面的水深较小, 刚好满足 II 级航道要求。因此, 5 个滩体断面的水深及航宽均满足 II 级航道标准, 两条牛及黄泥滩满足 I 级航道标准。陡坎子相较于螃蟹碛滩体最大宽度较小, 断面水深基本相同的情况下航宽则变大; 浅滩中关刀碛滩体宽度最大, 因而航宽最小; 2 个急流滩由于整体较小且急流滩附近河道冲刷较大使得水深及航宽均较大。综合考虑得出研究河段航宽 110 m 对应最低通航水深为 3.39 m。

表4 滩体断面水深及航宽

Tab.4 Water depth and channel width of shoal cross-section

滩体名称	水深/m	航宽/m
黄泥滩	7.07	465
陡坎子	3.37	540
关刀碛	5.51	100
螃蟹碛	3.39	110
两条牛	6.58	269

5 结语

1) 根据朱沱水文站 1991—2023 年的日流量资料, 通过综合历时曲线法、保证率频率法 2 种方法推求出研究河段最低通航流量为 $3\ 396\ \text{m}^3/\text{s}$ 。

2) 采用 FLOW-3D 模型建立滩险与通航流量的响应关系, 分析 5 个典型滩险, 以此得出航宽 110 m 对应最低通航水深为 3.39 m。

3) 经模拟结果分析, 5 个滩体断面的水深及航宽均满足 II 级航道要求的航深及航宽, 两条牛及黄泥滩断面满足 I 级航道标准。该研究结果为泸州河段后期的航道建设提供了科学依据。

参考文献:

- [1] 李天宏, 丁瑶, 倪晋仁, 等. 长江中游荆江河段生态航道评价研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2017, 25(2): 221-234.
LI T H, DING Y, NI J R, et al. Ecological waterway assessment of the Jingjiang River reach [J]. Journal of basic science and engineering, 2017, 25(2): 221-234.
- [2] 严登华, 窦鹏, 崔保山, 等. 内河生态航道建设理论框架及关键问题[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2018, 54(6): 755-763.
YAN D H, DOU P, CUI B S, et al. Theoretical framework and key issues in ecological inland waterway construction [J]. Journal of Beijing Normal University (natural science), 2018, 54(6): 755-763.
- [3] 毕方全, 李晶. 长江上游泸渝段航道整治研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2008, 27(3): 467-469.
BI F Q, LI J. Study on waterway regulation at upstream reach of the Yangtze River [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (natural science), 2008, 27(3): 467-469.
- [4] 王秀英, 李义天. 长江中下游设计最低通航水位变化分析[J]. 水运工程, 2004(11): 70-74.
WANG X Y, LI Y T. Variation of design lowest navigable

water level in middle and lower reach of the Yangtze River [J]. Port & waterway engineering, 2004 (11): 70-74.

- [5] 张明, 冯小香, 彭伟, 等. 西江界首至肇庆河段航道设计最低通航水位研究[J]. 水运工程, 2018(4): 104-109.
ZHANG M, FENG X X, PENG W, et al. Study on design lowest navigable stage of Xijiang River channel in river section from Jieshou to Zhaoqing [J]. Port & waterway engineering, 2018(4): 104-109.
- [6] 冯小香, 张明. 三峡蓄水后长江中游设计最低通航水位预报[J]. 水道港口, 2017, 38(1): 49-53.
FENG X X, ZHANG M. Prediction of the design lowest navigable stage in the middle reaches of Yangtze River after Three Gorges Reservoir impoundment [J]. Journal of waterway and harbor, 2017, 38(1): 49-53.
- [7] 赵江艳, 谢平, 桑燕芳, 等. 枯水期非一致性最低通航水位的综合历时曲线设计法[J]. 应用生态学报, 2018, 29(4): 1079-1088.
ZHAO J Y, XIE P, SANG Y F, et al. Synthetic duration curve method for the design of the lowest navigable water level with inconsistent characters in dry seasons [J]. Chinese journal of applied ecology, 2018, 29 (4): 1079-1088.
- [8] 朱代臣, 余俊华, 樊书刚. 三峡库区(175m 运用初期)设计最低通航水位计算方法研究[J]. 水道港口, 2014, 35(2): 171-174.
ZHU D C, SHE J H, FAN S G. Computational method of designed lowest navigable stage for the Three Gorges Reservoir (175 m earlyperiod) [J]. Journal of waterway and harbor, 2014, 35(2): 171-174.
- [9] 王永兴, 张明, 覃昌佩, 等. 柳江 II 级航道设计最低通航水位推求[J]. 水道港口, 2022, 43(4): 489-493.
WANG Y X, ZHANG M, QIN C P, et al. Calculation of design lowest navigable water level of Liujiang River Class II channel project [J]. Journal of waterway and harbor, 2022, 43(4): 489-493.
- [10] 杜思材. 长江上游螃蟹碛河床演变及其整治思路研究[J]. 人民长江, 2017, 48(S1): 26-29.
DU S C. Study on the evolution and remediation strategies of Pangxieqi riverbed in the upper reaches of Yangtze River [J]. Yangtze River, 2017, 48(S1): 26-29.

(下转第 206 页)