



# 怒江芒旦滩连续分汊河道 中枯水期碍航特性研究

上官弋非<sup>1</sup>, 何进朝<sup>2,4</sup>, 谢峰<sup>3</sup>, 袁浩<sup>2,4</sup>, 赵江<sup>3</sup>

(1. 重庆交通大学, 河海学院, 重庆 400074; 2. 重庆交通大学, 西南水利水运工程科学研究院, 重庆 402247;  
3. 四川省交通勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610017; 4. 重庆西科水运工程咨询有限公司, 重庆 402247)

**摘要:** 芒旦滩河段是怒江中下游连续出现3个分汊的碍航滩险河段, 水流条件复杂。为研究芒旦滩连续分汊河段碍航特性, 通过平面二维水动力数学模型, 计算中枯水期不同流量对各汊道分流比、水面比降、水深条件和流速分布的影响。计算结果表明, 芒旦滩连续分汊河段天然条件下的碍航特性为水面比降大、水深不足与水流湍急, 且汊道组合  $R_1-L_2-L_3$  水流条件优于汊道组合  $R_1-R_2-L_3$ , 建议开发汊道组合  $R_1-L_2-L_3$  作为航道。研究成果可为芒旦滩整治以及类似的连续分汊河段航道开发提供技术支撑和理论参考。

**关键词:** 连续分汊河道; 数值模拟; 分流比; 流速分布; 碍航特性

中图分类号: U617

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)02-0142-08

## Navigation obstruction characteristics of Mangdantan continuous branching channel of Nujiang River in normal and dry seasons

SHANGGUAN Yifei<sup>1</sup>, HE Jinchao<sup>2,4</sup>, XIE Feng<sup>3</sup>, YUAN Hao<sup>2,4</sup>, ZHAO Jiang<sup>3</sup>

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

2. Southwest Water Conservancy and Water Transport Engineering Research Institute, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 402247, China;

3. Sichuan Communication Surveying&Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610017, China;

4. Chongqing Xike Consultation for Water Transport Co., Ltd., Chongqing 402247, China)

**Abstract:** The Mangdantan channel, consisting of three continuous branches, locates in the middle and lower reaches of the Nujiang River with bad flow condition. To investigate the natural navigation obstruction characteristics in Mangdantan continuous branching channel, the influence of different discharges in normal and dry period on the flow diversion, gradient, water depth condition and current speed distribution are numerically analyzed by the two-dimensional planar hydrodynamic model. The results show that the natural navigation obstruction characteristics include large gradient, insufficient water depth and rapid current speed. In addition, the flow condition in the branches  $R_1-L_2-L_3$  is better than those in the branches  $R_1-R_2-L_3$ , therefore the branches  $R_1-L_2-L_3$  are suggested to be developed as the navigation channel. The research results can provide technical support and theoretical guidance for the regulation of Mangdantan and the channel development of similar continuous branching rivers.

**Keywords:** continuous branching channel; numerical simulation; flow diversion; current speed distribution; navigation obstruction characteristics

分汊河道是一种常见于天然河道中的河流形态<sup>[1]</sup>, 由于其存在地形条件复杂、滩槽演变频繁等

特点, 导致分汊河道水流运动特性复杂<sup>[2-4]</sup>, 对防洪及通航影响极大, 是航道整治工程的研究重点<sup>[5]</sup>。

收稿日期: 2024-05-07

作者简介: 上官弋非 (1999—), 男, 硕士研究生, 从事生态航道理论研究。

通信作者: 谢峰 (1989—), 男, 硕士, 助理工程师, 从事港口航道与海岸工程研究。E-mail: 411636479@qq.com

长期以来,众多学者针对分汊河道水动力特性进行了大量相关研究,主要采用数值模拟<sup>[6-8]</sup>与物理模型试验<sup>[9-11]</sup>的方法。随着计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)的发展,二维水动力数学模型在分汊河道整治工程研究中得到广泛应用<sup>[12-13]</sup>。与模型试验相比,数值模拟方法具有适应性强、模拟周期短、成本较低的优势。田红伟等<sup>[14]</sup>采用二维水流数学模型对湘江大花滩连续弯道分汊河段航道整治措施进行研究;杨忠超等<sup>[15]</sup>采用数值模拟方法对渠江丹溪口分汊河段碍航特性与航道整治方案进行研究;邵锦焯等<sup>[16]</sup>采用二维水动力数学模型对分汊河道的不同治理方案进行数值模拟,得出较好的河道分流计算结果。综上所述,分汊河段相关研究中多采用数值模拟方法,能够取得较为理想的水动力数据,为工程设计提供科学依据。

本文通过建立怒江中下游可通航的连续分汊河段——芒旦滩的二维水动力数学模型,模拟在中枯水期不同流量工况下该河段水流运动特性变化,根据各汊道分流比、水面比降、水深条件和流速分布情况对芒旦滩河段碍航特性进行分析,旨在为相关航道整治工程提供依据。

## 1 河道概况

芒旦滩河段位于怒江中游,其河道较为顺直,江中分布着3个江心洲,是典型的连续分汊类型山区河道(图1)。芒旦滩河段长约2.2 km,宽400~550 m,河势呈现上下游江面较窄而中游江面较宽,导致河道流速在中游处减缓,上游来沙因水流挟沙力不足而在此落淤,形成自上而下3个首尾顺序相连的江心洲,自上游至下游依次记为江心洲1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>。全河道由3个江心洲分为6处汊道,分别记为:L<sub>1</sub>(江心洲1<sup>#</sup>左汊)、R<sub>1</sub>(江心洲1<sup>#</sup>右汊)、L<sub>2</sub>(江心洲2<sup>#</sup>左汊)、R<sub>2</sub>(江心洲2<sup>#</sup>右汊)、L<sub>3</sub>(江心洲3<sup>#</sup>左汊)、R<sub>3</sub>(江心洲3<sup>#</sup>右汊)。

在3处江心洲中,江心洲1<sup>#</sup>长约900 m,宽约200 m,洲顶高程658~662 m,洲体整体呈狭长形且靠近河道左岸。江心洲2<sup>#</sup>长约680 m,宽约240 m,洲顶高程658~665 m,洲体呈卵形,大致位于河

道中部位置,其洲体右缘与1<sup>#</sup>右缘呈平顺衔接。江心洲3<sup>#</sup>长约650 m,宽约300 m,洲顶高程658~660 m。洲体呈半圆形且整体偏河道右岸,在中洪水期完全淹没。

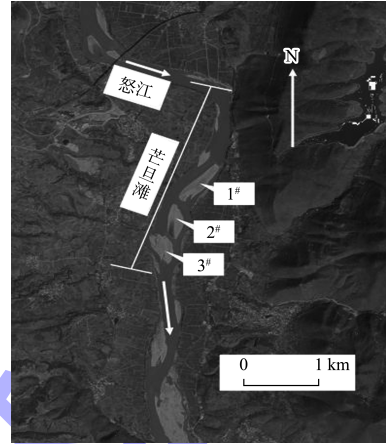


图1 芒旦滩河段河势

Fig. 1 River regime of Mangdantan reach

## 2 模型建立与验证

### 2.1 控制方程

本研究基于三向不可压缩和雷诺值均布的Navier-Stokes方程,并服从Boussinesq假定和静水压力的假定,采用的控制方程主要包括质量守恒方程与x、y方向的动量方程。

1) 质量守恒方程:

$$\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} + \frac{\partial \zeta}{\partial t} = S \quad (1)$$

2) x方向动量方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial P^2}{\partial x h} + \frac{\partial p q}{\partial y h} + g h \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{g p \sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 h^2} - \\ \frac{1}{\rho} \left[ \frac{\partial}{\partial x} (h \tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h \tau_{xy}) \right] - \Omega q - f V V_x + \frac{h}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} p_a = S_{ix} \end{aligned} \quad (2)$$

3) y方向动量方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial q^2}{\partial y h} + \frac{\partial p q}{\partial x h} + g h \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{g q \sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 h^2} - \\ \frac{1}{\rho} \left[ \frac{\partial}{\partial y} (h \tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (h \tau_{xy}) \right] + \Omega p - f V V_y + \frac{h}{\rho} \frac{\partial}{\partial y} p_a = S_{iy} \end{aligned} \quad (3)$$

式中:p为流量在x方向上的通量,m<sup>3</sup>/(s·m),p=uh,其中u为流速在x方向上的分量;q为流

量在  $y$  方向上的通量,  $m^3/(s \cdot m)$ ,  $q = vh$ ,  $v$  为流速在  $y$  方向上的分量;  $\zeta$  为水位,  $m$ ;  $t$  为时间,  $s$ ;  $S$  为源项;  $P$  为压力,  $kg/(m \cdot s^2)$ ;  $g$  为重力加速度,  $m/s^2$ ;  $C$  为柯西阻力系数,  $m^{0.5} s^{-1}$ ;  $h$  为静止水深;  $\rho$  为流体密度,  $kg/m^3$ ;  $\tau_{xx}$ 、 $\tau_{xy}$ 、 $\tau_{yy}$  为各方向上的黏滞应力项;  $\Omega$  为柯氏力系数, 一般取  $\Omega = 0.729 \times 10^{-4} s^{-1}$ ;  $v$  为风速;  $v_x$ 、 $v_y$  分别为风速在  $x$ 、 $y$  方向上的分量;  $S_{ix}$  为源项在  $x$  方向上的分量;  $S_{iy}$  为源项在  $y$  方向上的分量;  $p_a$  为大气压强,  $kPa$ ;  $f$  为科氏力,  $N$ 。

### 2.2 网格划分与边界条件设置

模型模拟对象为芒旦滩连续分汊河段, 为控制模型进出口边界条件, 模型上下边界均位于河道顺直段, 其中模型上边界考虑弯曲河段影响取滩段上游 2.8 km 处, 模型下边界选择在滩段下游 1.0 km 处, 总长 6.0 km。采用二维正三角形网格对模型区域进行划分, 其中河流外边界网格边长为 20 m; 各江心洲处网格局部加密, 加密后网格尺寸为 10 m。网格总数 18.267 5 万个, 节点 9.024 5 万个。计算河段地形插值结果如图 2 所示。设置模型上下游区域为水流边界, 其中上游边界控制模型流量, 下游边界控制模型水位; 模型左右岸及洲滩区域设置为陆地边界; 设置时间步长为 30 s。

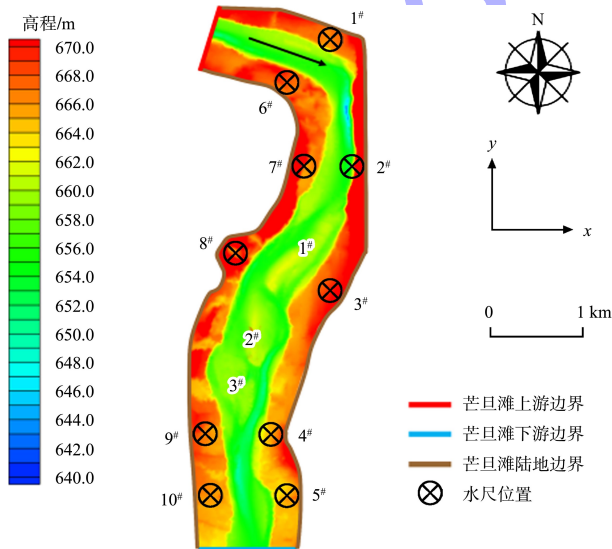


图 2 研究河段地形高程云图

Fig. 2 Elevation contour map of studied reach

### 2.3 数学模型验证

为确保数值模拟结果的准确性, 选取枯水期  $Q = 446 m^3/s$  与中水期  $Q = 1\ 950 m^3/s$  两级流量开展模型水位验证, 对模型糙率进行分段率定, 验证结果见表 1。结果表明, 模型各水尺水位误差为  $-0.04 \sim 0.05 m$ , 数学模型水位沿程变化趋势与原型基本一致, 满足 JTS/T 231—2021《水运工程模拟试验技术规范》<sup>[17]</sup> 对山区河流模型水位误差的要求。率定各河段糙率取值在  $0.02 \sim 0.04$ 。可见本研究建立的平面二维水流数学模型精度较高, 满足数模计算精度要求。

表 1 水位验证  
Tab. 1 Water level verification

时期	流量/ ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	位置	水尺 编号	实测 水位/m	模型 水位/m	差值/ m
枯水期	446	左岸	1#	658.78	658.74	-0.04
			2#	658.69	658.72	0.03
			3#	657.44	657.45	-0.01
			4#	656.27	656.32	0.05
			5#	656.21	656.21	0
		右岸	6#	658.77	658.74	-0.03
			7#	658.60	658.65	0.05
			8#	658.09	658.10	0.01
			9#	656.28	656.32	0.04
			10#	656.28	656.27	-0.01
中水期	1 950	左岸	1#	660.87	660.84	-0.03
			2#	660.29	660.33	0.04
			3#	659.70	659.72	0.02
			4#	658.50	658.48	-0.02
			5#	658.23	658.23	0
		右岸	6#	660.67	660.65	-0.02
			7#	660.37	660.39	0.02
			8#	659.79	659.80	0.01
			9#	658.50	658.48	-0.02
			10#	658.25	658.23	-0.02

### 3 模拟结果分析

#### 3.1 工况选取

根据芒旦滩河段多年水位-流量关系(图 3), 结合芒旦滩中枯水碍航的实际情况选取多年平均流量以下 10 级流量开展研究, 探讨不同流量条件下芒旦滩分汊河道碍航特性, 各工况见表 2。

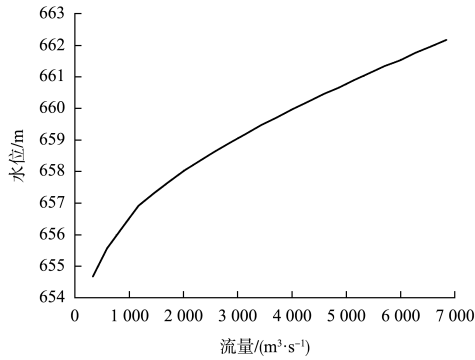


图 3 模型出口边界水位-流量关系曲线

Fig. 3 Relationship between water level and flow at outlet boundary of model

表 2 二维数值模拟工况

Tab. 2 Conditions of two-dimensional numerical simulation

工况	进口流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	出口水位/m	备注
1	414	655.58	95%保证率水位
2	500	655.65	
3	600	655.91	
4	700	656.15	
5	800	656.36	
6	900	656.58	
7	1 000	656.84	
8	1 200	657.22	
9	1 400	657.47	
10	1 690	657.67	多年平均流量

### 3.2 分流比

研究河段不同流量等级下 3 个江心洲洲头处左右汊道分流比模拟结果见表 3, 各汊道分流比变化如图 4 所示。由表可知, 对于江心洲 1<sup>#</sup>, 当流量从 414 m<sup>3</sup>/s 增大至 1 690 m<sup>3</sup>/s 时, L<sub>1</sub> 分流比由 1.73% 增大至 13.46%, R<sub>1</sub> 分流比由 98.27% 减小至 86.54%, 可见汊道 R<sub>1</sub> 在多年平均流量以下均为江心洲 1<sup>#</sup> 的主汊。对于江心洲 2<sup>#</sup>, 当流量从 414 m<sup>3</sup>/s 增大至 1 690 m<sup>3</sup>/s 时, L<sub>2</sub> 分流比由 76.24% 减小至 51.54%, R<sub>2</sub> 分流比由 23.76% 增大至 48.46%。随着流量增大汊道 L<sub>2</sub> 与汊道 R<sub>2</sub> 分流比逐渐趋近, 汊道 L<sub>2</sub> 在多年平均流量以下时为江心洲 2<sup>#</sup> 的主汊。对于江心洲 3<sup>#</sup>, 当流量从 414 m<sup>3</sup>/s 增大 1 690 m<sup>3</sup>/s 时, L<sub>3</sub> 分流比由 98.67% 减小至 58.50%,

R<sub>3</sub> 分流比由 1.33% 增大至 41.50%, 汊道 L<sub>3</sub> 在多年平均流量以下为江心洲 3<sup>#</sup> 的主汊。

表 3 不同流量下各汊道分流比计算结果

Tab. 3 Calculation results of flow diversion of each branch under different discharges

流量/ (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	分流比/%					
	L <sub>1</sub>	R <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	R <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	R <sub>3</sub>
414	1.73	98.27	76.24	23.76	98.67	1.33
500	1.88	98.12	73.59	26.41	92.33	7.67
600	2.73	97.27	70.83	29.17	85.69	14.31
700	3.86	96.14	68.94	31.06	81.21	18.79
800	5.66	94.34	66.50	33.50	74.49	25.51
900	6.58	93.42	65.72	34.28	71.77	28.23
1 000	8.21	91.79	63.54	36.46	68.69	31.31
1 200	10.00	90.00	61.52	38.48	65.64	34.36
1 400	11.81	88.19	58.47	41.53	63.41	36.59
1 690	13.46	86.54	51.54	48.46	58.50	41.50

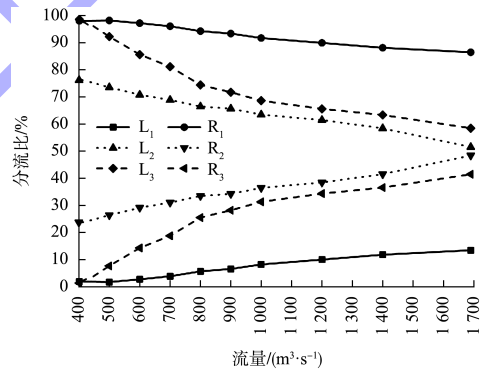


图 4 研究河段各汊道分流比变化

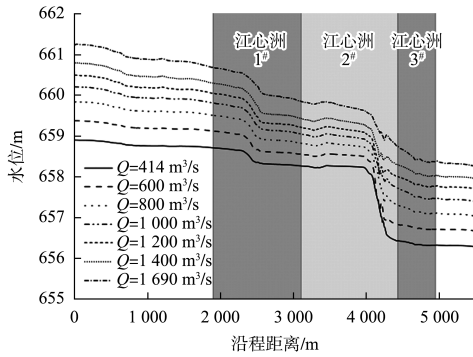
Fig. 4 Changes of discharge ratio of each branch

由不同流量下各汊道分流比计算结果可知, 芒且滩河段在中枯水期主汊为: 江心洲 1<sup>#</sup> 右汊 R<sub>1</sub>、江心洲 2<sup>#</sup> 左汊 L<sub>2</sub>、江心洲 3<sup>#</sup> 左汊 L<sub>3</sub>。江心洲 2<sup>#</sup> 右汊 R<sub>2</sub> 随着流量增加有发展成为主汊的可能。汊道组合 R<sub>1</sub>-L<sub>2</sub>-L<sub>3</sub> 和 R<sub>1</sub>-R<sub>2</sub>-L<sub>3</sub> 是研究河段的主要流路组合。

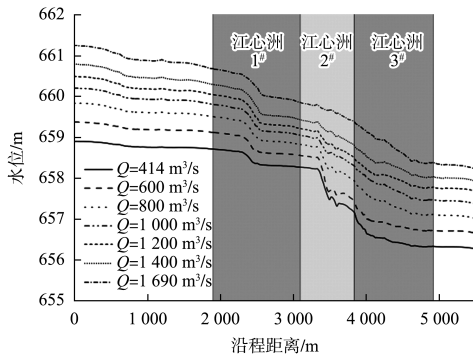
### 3.3 水面比降

本节仅分析 R<sub>1</sub>-L<sub>2</sub>-L<sub>3</sub> 和 R<sub>1</sub>-R<sub>2</sub>-L<sub>3</sub> 汊道组合在不同流量下沿程比降变化。2 组汊道沿程水面线如图 5 所示, 2 组汊道沿程比降如图 6 所示。





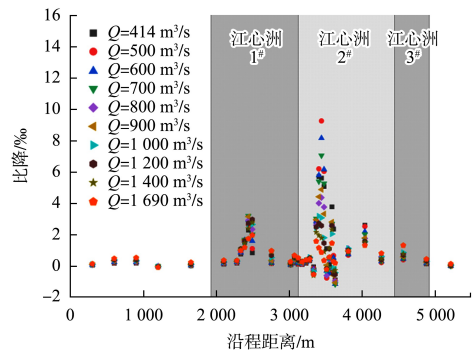
a) R<sub>1</sub>-L<sub>2</sub>-L<sub>3</sub>河段



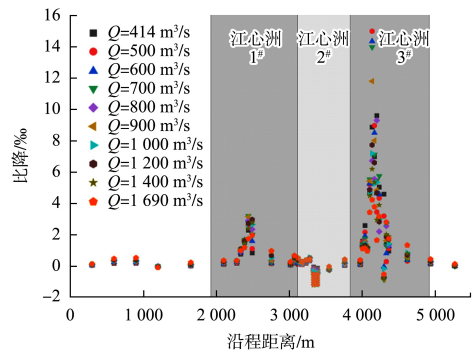
b) R<sub>1</sub>-R<sub>2</sub>-L<sub>3</sub>河段

图5 两河段沿程水面线

Fig. 5 Water surface of two reaches



a) R<sub>1</sub>-L<sub>2</sub>-L<sub>3</sub>河段



b) R<sub>1</sub>-R<sub>2</sub>-L<sub>3</sub>河段

图6 两河段沿程比降

Fig. 6 Gradient of two reaches

结果表明,芒旦滩全河段在各流量下平均比降在 0.54‰~0.59‰,其中汉道组 R<sub>1</sub>-L<sub>2</sub>-L<sub>3</sub> 中汉道 L<sub>2</sub> 入口、汉道组 R<sub>1</sub>-R<sub>2</sub>-L<sub>3</sub> 中汉道 L<sub>3</sub> 入口处存在较大比降。当  $Q \leq 800 \text{ m}^3/\text{s}$  时,汉道 L<sub>2</sub> 入口处最大比降在 4.00‰~9.28‰,  $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$  时达到比降最大值 9.28‰;当  $Q > 800 \text{ m}^3/\text{s}$  时,弯道处最大局部比降随流量增大而逐渐减小至 2‰以内。受江心洲 2# 洲头影响,汉道 L<sub>2</sub> 入口中存在 -1.08‰~-0.81‰ 的负比降。当  $Q \leq 900 \text{ m}^3/\text{s}$  时,汉道 L<sub>3</sub> 入口处最大比降在 9.31‰~14.99‰,其中当  $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$  时最大比降为 14.99‰;当  $Q > 900 \text{ m}^3/\text{s}$  时,弯道处最大局部比降随流量增大至 1690  $\text{m}^3/\text{s}$  而比降减小至 4.25‰。受江心洲 3# 洲头影响,汉道 L<sub>3</sub> 入口处存在 -0.75‰~-0.50‰ 的负比降。

### 3.4 水深条件

芒旦滩河段按照 VI 级航道标准建设,航道尺寸为 1.2 m×30 m×180 m(水深×宽度×弯曲半径)。各级流量下芒旦滩河段水深分布如图 7 所示。

由图 7 可知,当  $Q$  在 414~800  $\text{m}^3/\text{s}$  时,汉道 L<sub>2</sub> 中部存在最小水深为 0.6~0.8 m 的区域,不满足水深 1.2 m 的要求;汉道 L<sub>2</sub> 入口处弯曲半径由  $Q = 414 \text{ m}^3/\text{s}$  时的 150 m 增加至  $Q = 800 \text{ m}^3/\text{s}$  时的 170 m,均不满足弯曲半径 180 m 的要求;汉道 L<sub>3</sub> 入口处水深在 0.8~1.0 m,不满足水深 1.2 m 的要求。各级流量下汉道 R<sub>1</sub> 中满足水深 1.2 m 区域的宽度在 80 m 以上,汉道 L<sub>3</sub> 中满足水深 1.2 m 区域的宽度在 75 m 以上,均满足航宽 30 m 要求。

当  $Q$  在 800~1690  $\text{m}^3/\text{s}$  时,各汉道水深逐渐增加,汉道 L<sub>2</sub> 中部水深大于 1.2 m 区域宽度达到 70 m 以上,满足船宽 30 m 的要求;汉道 L<sub>2</sub> 入口处水深大于 1.2 m 宽度为 75~150 m,同时弯曲半径增加至 188 m 以上,满足弯曲半径 180 m 的要求;汉道 L<sub>3</sub> 入口处水深大于 1.2 m 区域宽度达到 45 m 以上,满足航宽 30 m 要求。

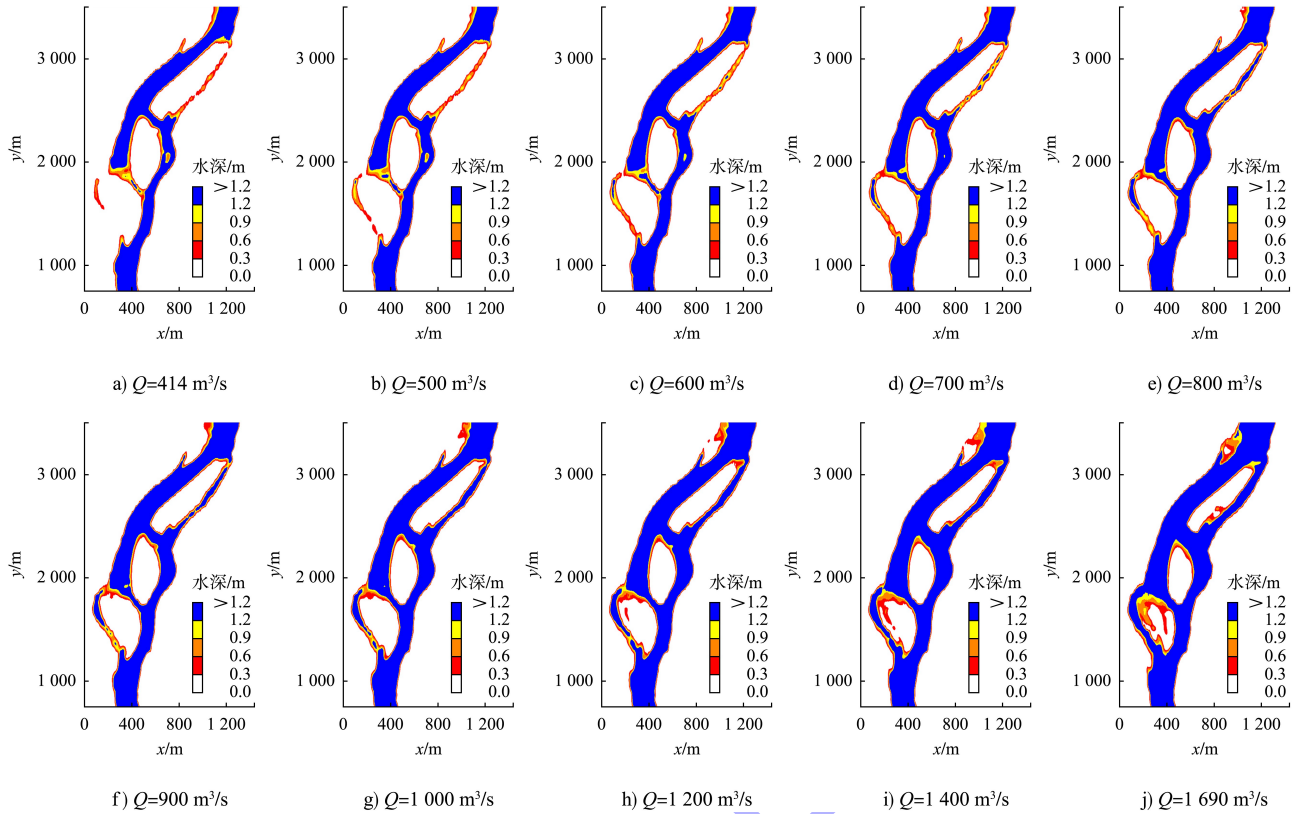


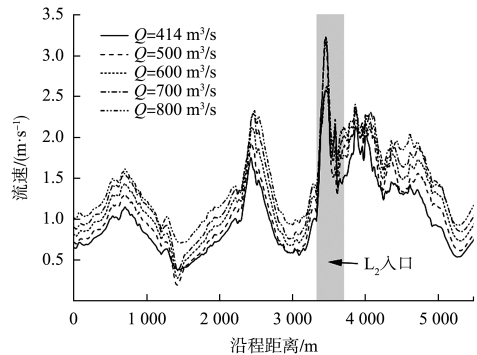
图 7 不同流量下研究河段水深分布

Fig. 7 Depth distribution of studied reach under different flow conditions

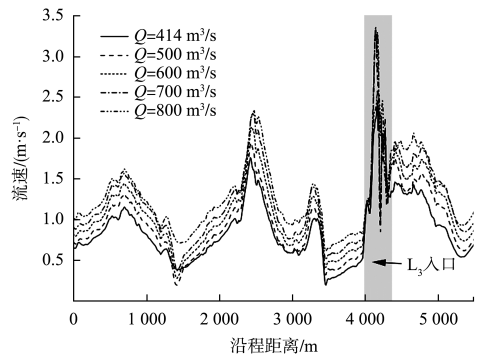
综上所述, 当  $Q \leq 800 \text{ m}^3/\text{s}$  时, 汉道  $L_2$  中部、汉道  $L_2$  入口与汉道  $L_3$  入口存在水深不足 1.2 m 的区域, 不能满足航宽与弯曲半径的要求, 为碍航区域。当  $Q > 800 \text{ m}^3/\text{s}$  时, 研究河段水深条件满足 VI 级航道设计标准。

### 3.5 流速分布

根据水面比降与水深结果可知, 当  $Q \leq 800 \text{ m}^3/\text{s}$  时芒旦滩河段存在明显碍航河段。分别提取流量  $Q \leq 800 \text{ m}^3/\text{s}$  的 5 种工况下汉道组合  $R_1-L_2-L_3$  与  $R_1-R_2-L_3$  的沿程流速, 各流量工况下流速分布见图 8。结果表明, 对于  $R_1-L_2-L_3$  组合, 流速最大值出现在汉道  $L_2$  入口处, 当  $Q = 600 \text{ m}^3/\text{s}$  时最大流速达到  $3.23 \text{ m/s}$ , 随着流量增大至  $800 \text{ m}^3/\text{s}$ , 最大流速减小至  $2.74 \text{ m/s}$ ; 对于  $R_1-R_2-L_3$  组合, 流速最大值出现在汉道  $L_3$  入口处, 当  $Q = 600 \text{ m}^3/\text{s}$  时最大流速达到  $3.34 \text{ m/s}$ , 随着流量增大至  $Q = 800 \text{ m}^3/\text{s}$ , 最大流速减小至  $2.59 \text{ m/s}$ 。



a)  $R_1-L_2-L_3$  河段



b)  $R_1-R_2-L_3$  河段

图 8 两河段沿程流速变化

Fig. 8 Current speed of two reaches

### 3.6 流速分布

消滩指数  $X_u$  是反映船舶操纵难度的重要指标,用以判别船舶上滩能力,能够体现水流速度、比降和船舶尺度之间的综合效应。计算公式为:

$$X_u = C_U \frac{U^2}{2gL} + C_J J \quad (4)$$

式中:  $U$  为表面流速;  $J$  为比降;  $C_U$ 、 $C_J$  为系数,根据试算结果<sup>[18]</sup>分别取 31.446 5、39.996 9;  $L$  为设计船长。芒旦滩河段设计代表船型为 300 kW 的 100 吨级单机驳船,设计船长 32 m。将各参数代入公式得:

$$X_u = 0.05U^2 + 39.996 9J \quad (5)$$

当  $X_u < 1$  时满足消滩条件,设计代表船舶可自航上滩。代入汉道组合  $R_1-L_2-L_3$  与  $R_1-R_2-L_3$  的沿程流速与比降数据计算,结果见图 9。结果表明,对于  $R_1-L_2-L_3$  组合,沿程消滩指数均满足设计船舶自航上滩要求,随着流量的增大,沿程消滩指数略有增大,最大值出现在汉道  $L_2$  入口处,当  $Q=500 \text{ m}^3/\text{s}$  时达到 0.86,当  $Q=800 \text{ m}^3/\text{s}$  时则减小至 0.49,水流条件更利于船舶自航上滩。对于  $R_1-R_2-L_3$  组合,在汉道  $L_3$  入口处消滩指数不满足要求, $Q$  在  $500 \sim 700 \text{ m}^3/\text{s}$  时  $X_u$  为  $1.04 \sim 1.06$ ,设计船舶无法自航上滩。

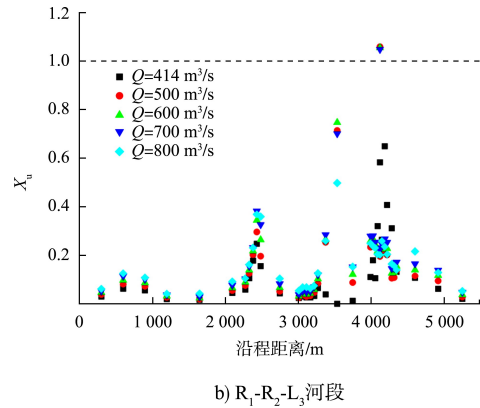
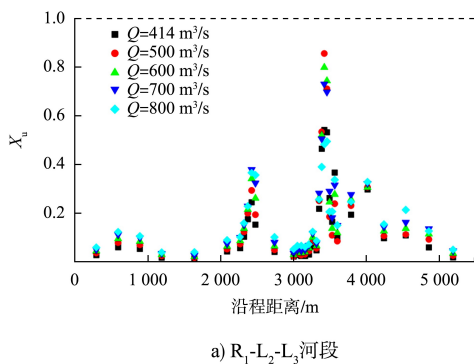


图 9 两河段沿程消滩指数

Fig. 9 Rapids abating index of two reaches

### 4 结语

1) 为分析芒旦滩分汉河道在中枯水期碍航特性,采用二维水动力数学模型对天然条件下河道水流结构进行了数值模拟计算,对其分流比、水面比降、水深条件和流速分布进行了深入分析。

2) 芒旦滩河段中,江心洲 1# 右汉  $R_1$  在多年平均流量以下的分流比均大于 80%,为明显的主汉;江心洲 2# 在多年平均流量以下的主汉为左汉  $L_2$ ,随着流量增大左汉  $L_2$  分流比逐渐减小至 51.54%,左右汉道分流比逐渐接近;江心洲 3# 在多年平均流量以下的主汉为左汉  $L_3$ 。

3) 对比汉道组合  $R_1-L_2-L_3$  与  $R_1-R_2-L_3$  的水面比降、水深条件与流速分布可知,当流量在  $414 \sim 900 \text{ m}^3/\text{s}$  时,  $R_1-R_2-L_3$  组合在汉道  $L_3$  入口处比降最大值为  $9.31\% \sim 14.99\%$ ,水深不满足 1.2 m 要求,消滩指数最大值为 1.05,不满足船舶自航上滩要求,明显碍航;  $R_1-L_2-L_3$  组合在汉道  $L_2$  入口处比降最大值在  $4.00\% \sim 9.28\%$ ,虽然消滩指数小于 1,但不满足弯曲半径要求,且  $Q \leq 800 \text{ m}^3/\text{s}$  时水深不足 1.2 m,船舶上滩依然困难。

4) 芒旦滩和  $R_1-L_2-L_3$ 、 $R_1-R_2-L_3$  是研究河段的主要流路组合,均具有开发成为航道的潜力,但存在枯水期水深不足、航道弯曲、水流湍急等碍航问题,均需采用工程措施加以改善。

## 参考文献:

- [1] LEOPOLD L B, WOLMAN M G. River channel patterns[M]// Rivers and river terraces. London: Palgrave Macmillan UK, 1970: 197-237.
- [2] 姚仕明, 余文畴, 董耀华. 分汊河道水沙运动特性及其对河道演变的影响[J]. 长江科学院院报, 2003, 20(1): 7-9, 16.  
YAO S M, YU W C, DONG Y H. Characteristics of water flow and sediment motion in braided river and their effects on fluvial evolution [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2003, 20(1): 7-9, 16.
- [3] 姚仕明, 张超, 王龙, 等. 分汊河道水流运动特性研究[J]. 水力发电学报, 2006, 25(3): 49-52, 57.  
YAO S M, ZHANG C, WANG L, et al. Study on the characteristics of flow movement in branching river [J]. Journal of hydroelectric engineering, 2006, 25 (3): 49-52, 57.
- [4] BERTOLDI W, TUBINO M. River bifurcations: Experimental observations on equilibrium configurations [J]. Water resources research, 2007, 43(10): W1043.
- [5] 刘晓芳, 黄河清, 邓彩云. 江心洲平衡形态水动力条件的理论分析[J]. 水科学进展, 2014, 25(4): 477-483.  
LIU X F, HUANG H X, DENG C Y. A theoretical investigation of the hydrodynamic conditions for equilibrium island morphology in anabranching rivers [J]. Advances in water science, 2014, 25(4): 477-483.
- [6] 余新明, 谈广鸣, 赵连军, 等. 天然分汊河道平面二维水流泥沙数值模拟研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2007, 39(1): 33-37.  
YU X M, TAN G M, ZHAO L J, et al. Planer 2-D flow and sediment numerical modeling of branching river [J]. Journal of Sichuan University (Engineering science edition), 2007, 39(1): 33-37.
- [7] 吴昌洪, 姚瑶. 基于平面二维数值模拟的长江世业洲分汊河道水流特性研究[J]. 广西水利水电, 2020(2): 8-17.  
WU C H, YAO Y. Study of flow characteristics of Shiyezhou braided river of Yangtze River section based on two-dimensional numerical simulation [J]. Guangxi water resources & hydropower engineering, 2020(2): 8-17.
- [8] 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.
- [9] 黄遥, 张建宝, 周勤, 等. 新开航槽对山区弯曲分汊河道水沙输移的影响[J]. 水运工程, 2021(9): 93-100.  
HUANG Y, ZHANG J B, ZHOU Q, et al. Effect of newly-developed channel on water and sediment transport in curved and branched rivers in mountainous areas[J]. Port & waterway engineering, 2021(9): 93-100.
- [10] 李顺超, 李欢. 山区河流弯曲分汊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.
- [11] 成佳慧, 李润祥, 闫晓楠, 等. 复式分汊河道流速分布及河床冲淤特性[J]. 水利规划与设计, 2023(8): 132-137.  
CHENG J H, LI S X, YAN X N, et al. Velocity distribution and scouring and deposition characteristics of multiple branching channels [J]. Water resources planning and design, 2023(8): 132-137.
- [12] 杨胜发, 赵志舟, 杨斌. 汉道水流数值模拟[J]. 重庆交通大学学报, 2002, 21(1): 116-120.  
YANG S F, ZHAO Z Z, YANG B. Numerical modeling of branch stream [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2002, 21(1): 116-120.
- [13] 程勇. 明渠分汊区水流紊动特性及冲淤规律研究[D]. 西北农林科技大学, 2023.  
CHENG Y. Study on the turbulence characteristics and siltation pattern of water flow in the branching area of open channels[D]. Northwest A&F University, 2023.
- [14] 田红伟, 官志鑫, 易振宇, 等. 湘江大花滩航道整治方案优化及效果数值研究[J]. 水运工程, 2021(11): 127-133.  
TIAN H W, GUAN Z X, YI Z Y, et al. Numerical study of waterway regulation optimization and effect of Dahuatan shoal in the Xiangjiang River [J]. Port & waterway engineering, 2021(11): 127-133.