



## 三峡枢纽典型碍航河段复杂流态分析

梁 锴<sup>1</sup>, 任伯浩<sup>2</sup>, 李明伟<sup>2</sup>, 韩 越<sup>1</sup>

(1. 长江三峡通航管理局, 湖北 宜昌 443000; 2. 哈尔滨工程大学, 黑龙江 哈尔滨 150000)

**摘要:** 石牌弯道航段是长江三峡和葛洲坝两坝间典型的急弯航段, 受复杂河床地形和急弯影响, 流态复杂多变, 特别是汛期, 随着流速和流量增大, 漩水、斜流、剪刀水等不良碍航流态频发, 严重影响船舶通航安全。为降低汛期该航段通航风险, 提升通航率, 本文采用数值模拟与实测数据结合的方式, 首先基于 MIKE21 软件, 建立了该弯道二维数值模型; 然后结合实测数据完成了模型可靠度验证; 最后利用经过验证的数值模型, 分析不同流量下石牌弯道航段流态特点, 理清不同流量下, 漩水、斜流、剪刀水等碍航流态发生概率、位置和规模的变化规律, 可为汛期该航段通航管控和航行安全提供重要参考。

**关键词:** 三峡枢纽河段; 通航安全; 碍航流态; 数值模拟

中图分类号: U612

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)07-0138-07

### Complex flow pattern in typical navigation obstructed region of Three Gorges Project

LIANG Kai<sup>1</sup>, REN Bohao<sup>2</sup>, LI Mingwei<sup>2</sup>, HAN Yue<sup>1</sup>

(1. Three Gorges Navigation Authority, Yichang 443000, China;

2. Harbin Engineering University, Harbin 150000, China)

**Abstract:** The Shipai bend section is a typical sharp bend section between the Three Gorges and Gezhouba dams of the Yangtze River. Affected by the complex riverbed topography and sharp bends, the flow pattern is complex and changeable. Especially in the flood season, with the increase of flow velocity and flow rate, the bad flow patterns such as swirling water, oblique flow and scissors water frequently occur, which seriously affects the safety of ship navigation. In order to reduce the navigation risk of this section in flood season and improve the navigation rate, this paper adopts the combination of numerical simulation and measured data. Firstly, based on MIKE21 software, a two-dimensional numerical model of the curve is established. Then combined with the measured data, the reliability of the model is verified. Finally, the verified numerical model is used to analyze the flow characteristics of Shipai curve section under different flow rates. The variation rules of the occurrence probability, location and scale of navigation-obstructing flow patterns such as swirling water, oblique flow and scissors water under different flow rates are clarified, which provides an important reference for the navigation control and navigation safety of this section during flood season.

**Keywords:** Three Gorges Dam section; navigation safety; obstructing navigation flow pattern; numerical simulation

石牌弯道位于长江上游航道里程 22.5~23.8 km 处, 是三峡—葛洲坝枢纽两坝间著名的急流险滩, 见图 1。汛期大流量条件下, 由于复杂的河床地形

影响, 流量变化幅度较大, 流态变化复杂, 碍航流态较多, 航行条件十分恶劣。据不完全统计, 三峡船闸试通航以来, 由于流速、流态等水流条

收稿日期: 2023-11-06

作者简介: 梁锴 (1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事枢纽航道运行维护管理。

件不利等复杂通航环境, 两坝间河段发生过多起船舶触礁、碰撞、“打不起”等险情事故。因此, 有必要对流速、流态等通航水流条件进行研究, 为动态掌握河道流态和提前预判预警打下基础。

本文建立并验证该航段二维数值模型, 分析该航段在汛期的复杂碍航流态并梳理各流态随流量的变化规律。

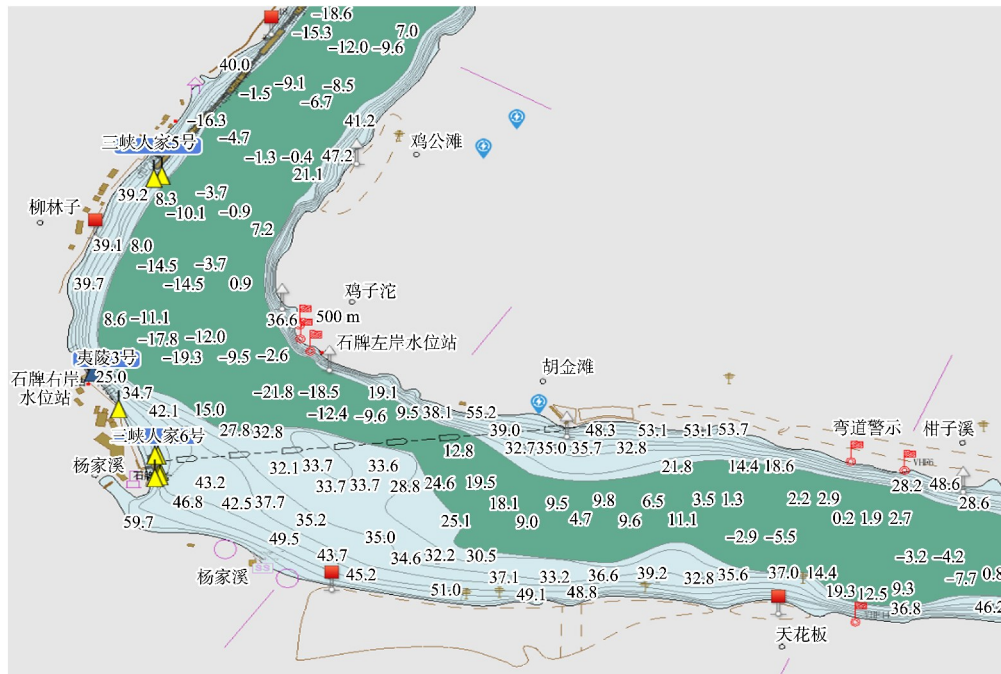


图 1 石碑弯道计算区域河势

在流态分析方面, 学者进行了相关研究, 许鹏等<sup>[1]</sup>针对三峡两坝之间石碑弯道河段的通航能力进行研究, 结果表明在汛期采用“3上1下”过闸方案时航道的通航能力不足, 需要采取措施提高汛期时航道的通航能力; 在横流的流态分析方面, 李骏峰<sup>[2]</sup>针对十八联圩进行洪水演变时的水工模型试验, 得到整体流场和横向流速的变化规律, 可供类似工程进行参考; 在针对河流流态分析和预测方面, 唐英敏等<sup>[3]</sup>基于 MIKE21 软件进行数值模拟, 针对河道渐扩段的沿程水面线, 研究渐扩段的局部水头损失, 结果表明 MIKE21 软件可以有效地减少计算时间, 极大地提高分析效率; 牛新宇<sup>[4]</sup>基于 GIS 系统和 GM 软件, 结合 MIKE21 软件对松花江流凌水域进行水流流态的可视化动态模拟, 实现该水域的流凌演进仿真模拟系统开发; 在急弯河段的研究方面, 李民康<sup>[5]</sup>结合野外实验和数值模拟的方法, 对黄河典型急弯什四份子河段水动力特性进行分析, 得到冰封期河段的

流态特征; 师于杰<sup>[6]</sup>使用三维数值模型对河流上游明渠弯道的横向和纵向流速进行模拟分析, 得出水流对岸壁和床底的冲刷特性, 但其建立的为理想 U 形弯道模型在实际工程中对流态分析的参考价值有限。

上述研究表明, 利用二维水动力模型对河道进行仿真模拟的方法可靠。因此, 为了探明汛期石碑弯道航段复杂流态演变规律, 本文采用 MIKE21 软件, 结合实际资料对石碑弯道的水流流态进行研究, 旨在为汛期通航管控和航行安全提供重要参考。

## 1 MIKE 21 模型建立

由于 MIKE21 软件在河道水流模拟方面的广泛运用, 包含水动力模块、前后处理模块等, 对二维流场具有良好的仿真效果。为模拟因水流作用力引起的流场变化, 本文采用 MIKE21FM 的水动力模块(HD)进行数值模拟, 该模块服从 Boussinesq 和

静水压力假设，基于 Navier-Srokes 方程利用有限体积法求解。

### 1.1 控制方程

描述平面二维水流连续方程为：

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{v})}{\partial y} = hS \quad (1)$$

$$h = \eta + d \quad (2)$$

描述平面二维水流的动量方程为：

$$\frac{\partial(h\bar{u})}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u}^2)}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{v}\bar{u})}{\partial y} = f\bar{v}h - gh \frac{\partial\eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial\rho}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left( \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial(hT_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(hT_{xy})}{\partial y} + hu_s S \quad (3)$$

$$\frac{\partial(h\bar{v})}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{v}^2)}{\partial y} + \frac{\partial(h\bar{u}\bar{v})}{\partial x} = f\bar{u}h - gh \frac{\partial\eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial\rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left( \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial S_{yx}}{\partial x} \right) + \frac{\partial(hT_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(hT_{yy})}{\partial y} + hv_s S \quad (4)$$

$$h\bar{u} = \int_{-d}^{\eta} u dz \quad (5)$$

$$h\bar{v} = \int_{-d}^{\eta} v dz \quad (6)$$

式中： $u$ 、 $v$ 为源汇项的水流流速在  $x$ 、 $y$  方向的分量， $f$ 为科里奥利力系数， $t$ 为时间、 $p_a$ 为大气压强， $\bar{u}$ 、 $\bar{v}$ 为平均流速， $u_s$ 、 $v_s$ 为源项的水流流速， $S$ 为点源的流量， $\rho$ 为水的密度， $d$ 为静水深， $\tau$ 为剪切应力， $\eta$ 为静止水深之上的变化水位， $\rho_0$ 为水的相对密度， $g$ 为重力加速度， $\eta$ 为河底高程， $T$ 为水平黏滞应力项， $S_{xx}$ 、 $S_{xy}$ 、 $S_{yx}$ 、 $S_{yy}$ 为辐射应力分量， $h$ 为总水头。

### 1.2 数值解法

MIKE21FM HD 采用有限体积法进行空间离散，该方法将空间划分为不重复的控制单元，满足动量守恒和质量守恒，并用显性欧拉法进行时间离散。二维浅水方程在笛卡尔坐标系下表示为：

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial(\mathbf{F}'_x - \mathbf{F}^V_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\mathbf{F}'_y - \mathbf{F}^V_y)}{\partial y} = \mathbf{S} \quad (7)$$

式中： $I$ 为无黏性通量， $V$ 为黏性通量， $\mathbf{U}$ 为守恒变量的向量， $\mathbf{F}$ 为通量向量函数， $\mathbf{S}$ 为源项向量。

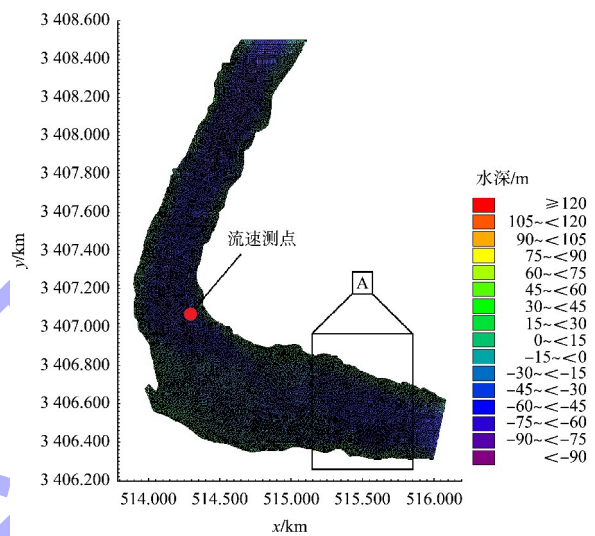
### 1.3 计算工况

三峡成库以来，根据历史统计数据，三峡最大出库流量为 4.92 万  $m^3/s$ ，可将工况按流量从

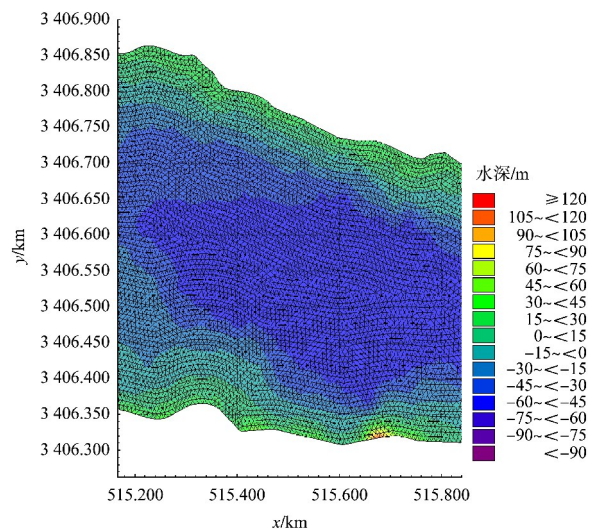
1.00 万~4.00 万  $m^3/s$ ，每隔 0.25 万  $m^3/s$  划分为 1 个工况，并结合实测水位资料得到相应水位。

### 1.4 计算范围和网格设置

由于石碑弯道岸线形状不规则，为了提高网格质量，本文采用非结构性三角形网格对计算区域进行划分，网格边长约 8 m。模型的上边界位于龙进溪附近，下边界位于肖洞附近。模型共有 5.686 5 万个网格，其中包括 2.896 4 万个节点，见图 2。



a) 模型整体网格划分



b) 局部A处网格划分

图2 石碑弯道计算区域网格

同时在弯道靠近凸岸处设置 1 处固定测点，分析不同工况下的流速-流量关系。其中测点的坐标为 (514.500 km, 3406.900 km)，采用北京 54 坐标系。

### 1.5 参数设置

由于计算区域包括了干湿交界处, 需要设置恰当的干湿边界以使模型稳定, 因此设置干水深为 0.005 m, 淹没水深为 0.05 m, 湿水深为 0.1 m。为了使整体流场达到较为稳定的平衡状态, 时间步长设置为 60 s。根据实测资料, 河床糙率设置为 0.025~0.032, 是随空间位置变化的值。由于 Smagorinsky 公式简单、高效的特点, 使用 Smagorinsky 公式计算涡黏系数, Smagorinsky 系数设置为 0.28, 风速设置为 1.6 m/s 的西南风。

### 1.6 边界条件

根据划分的工况以及流量和水位的实测资料, 将模型上边界设置为固定流量, 下边界设置相应的水位, 其余边界设置为固壁无滑移边界。

### 1.7 模型验证

为了验证所建立模型的可靠性, 将 MIKE21 数值模型计算结果和固定测点的实测资料中具有代表性的流速进行对比, 并将计算出的典型碍航流态与实际影像资料进行对比分析。其中, 实际影像资料由架设在石碑弯道凸岸的高清摄像头在汛期时拍摄所得, 并从中选取具有典型流态特征的影像资料作为对比参考的对象。

对比模型计算值(图 3)和实测值(表 1), 发现该模型对流场流速的模拟误差最大为 1.00 万 m<sup>3</sup>/s 时的 5.71%, 其余均不超过 ±5% 以内, 满足精度要求。同时对比模型的计算结果与现场流态影像资料(图 4)可看出, 建立的 MIKE21 数值模型计算结果与石碑弯道实际流场状况吻合良好, 模型具有较好的可靠性, 可以进行下一步的计算。

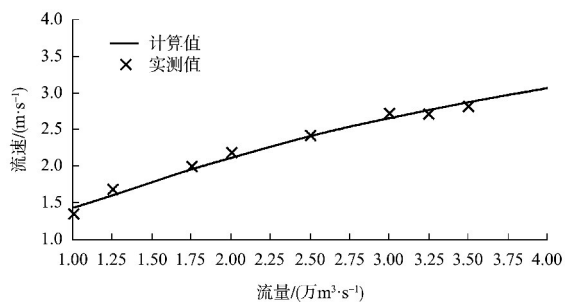


图 3 模型计算值与实测值对比

表 1 流速计算值与实测值的误差

流量/(万 m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	计算值/(m·s <sup>-1</sup> )	实测值/(m·s <sup>-1</sup> )	误差/%
1.00	1.44	1.36	5.71
1.25	1.62	1.69	-4.60
1.50	1.79	-	-
1.75	1.97	2.01	-1.87
2.00	2.13	2.19	-3.10
2.25	2.28	-	-
2.50	2.42	2.43	-0.35
2.75	2.55	-	-
3.00	2.67	2.73	-2.36
3.25	2.78	2.72	1.95
3.50	2.88	2.82	2.14
3.75	2.98	-	-
4.00	3.07	-	-

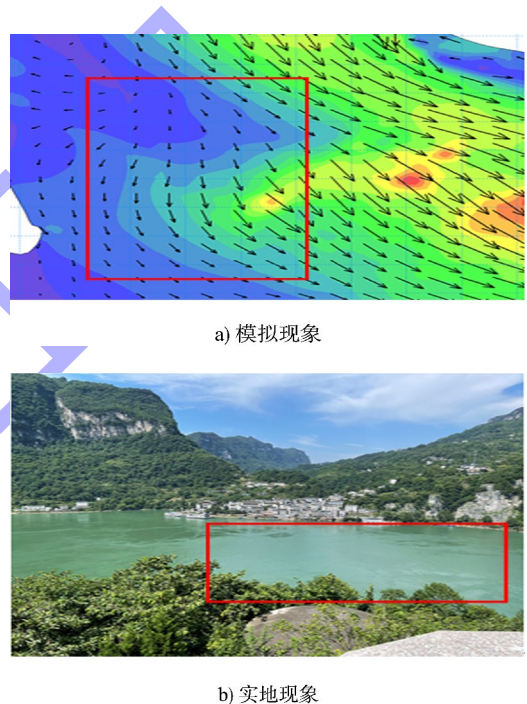
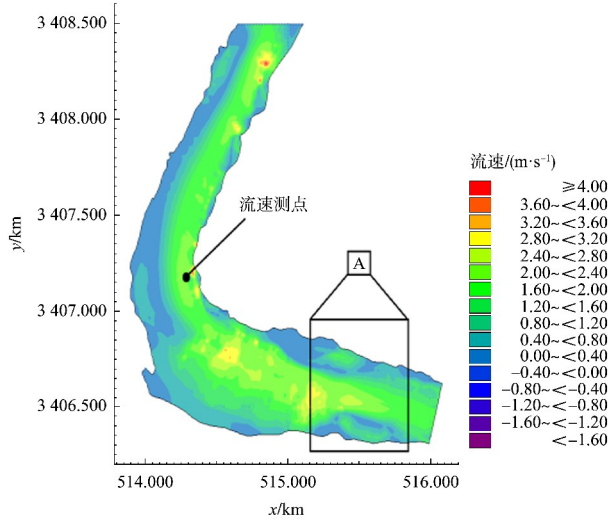


图 4 斜流现象模拟结果与实际现象

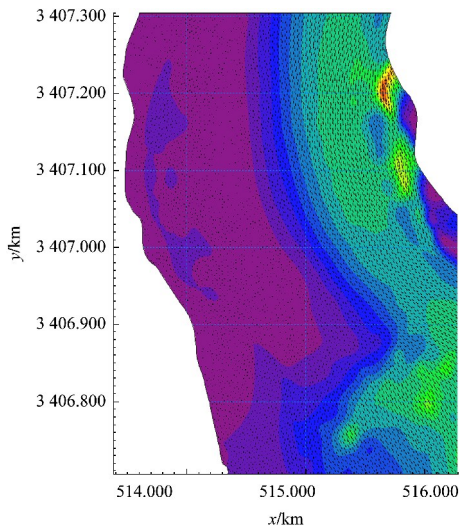
## 2 不良流态发生规律

本次仿真设计 13 个工况, 并在其同一坐标点处设置固定测点, 利用 MIKE21FM HD 模块计算整体的流场分布, 并得到测点的流速数据, 图 5 为在 1.75 万 m<sup>3</sup>/s 下的流场计算结果。

通过对比分析可以看出, 在柳子林—杨家溪河段的凹岸侧存在较为明显的斜流现象, 且在流量较大时有发展为扫弯水的趋势(图 4)。类似的, 在鸡子沱—胡金滩区域存在较多大型的漩水区域, 并伴随有泡漩现象, 在柳子林—明月阁区段的西岸存在大范围的回流现象, 在泔子溪—天花板河段中游存在剪刀水现象。



a) 整体流场



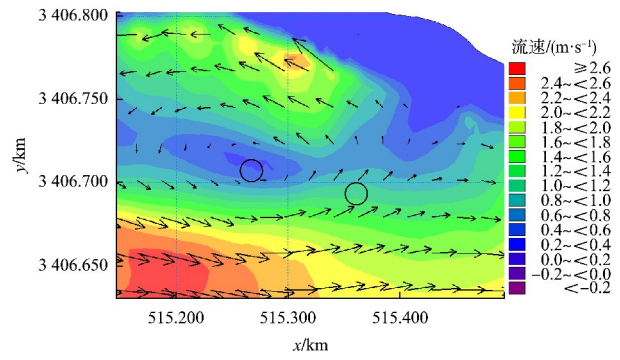
b) 局部A处流场

图5 流量为 1.75 万  $m^3/s$  时的流场分布

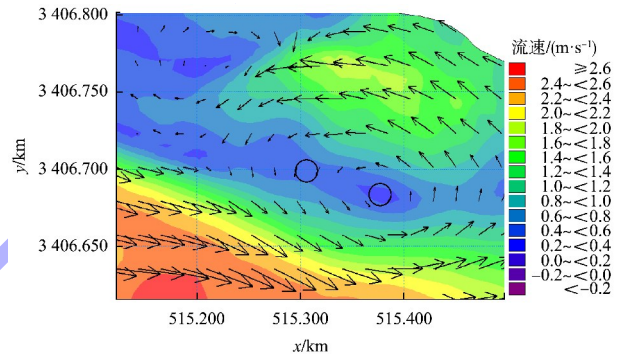
### 2.1 漩水流态规律

在漩水现象中，从整体流场分布(图5)可以看出，该现象广泛存在于弯道下游两岸区域，以鸡子沱—胡金滩河段为例，该位置处存在1处较大范围的漩水，其尺度在不同流量下变化较小，约为150 m×300 m。从1.00 万  $m^3/s$  流量开始，随着流量增大该处漩水的中心逐渐向下游偏移，见图6，当流量增加时，计算旋转中心相对的位移，发现在流量大于1.75 万  $m^3/s$  时，中心相对位移显著降低，旋转中心逐渐稳定在一个位置，同时最大流速也不断增加，见表2。其中流速相对于流量的变化率与中心相对位移均为相对值，主要反映

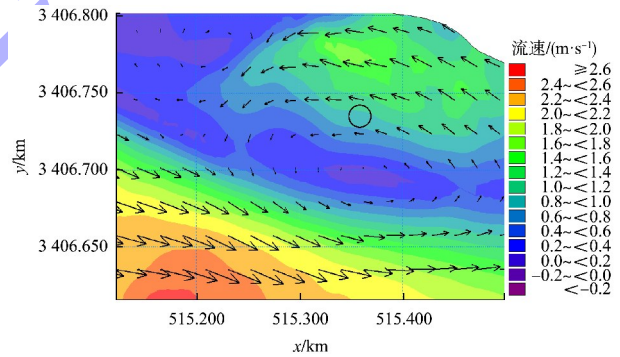
漩水的流速和位置随流速的变化规律。



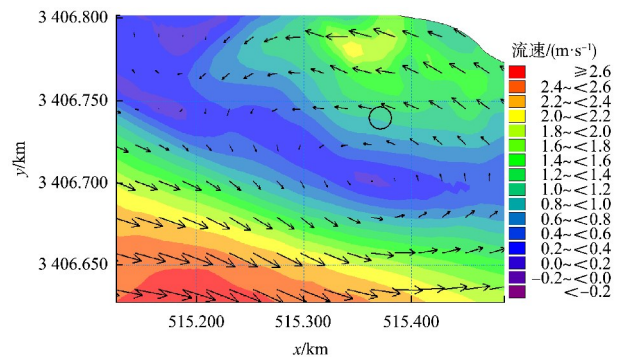
a) 1.00 万  $m^3/s$



b) 1.75 万  $m^3/s$



c) 3.00 万  $m^3/s$



d) 4.00 万  $m^3/s$

图6 不同流量下游水现象模拟结果及其旋转中心位置变化趋势

表 2 不同流量下典型漩水的最大流速和位置变化

流量/(万 m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	典型漩水最大流速/(m·s <sup>-1</sup> )	流速相对于流量的变化率/%	中心位置坐标(x,y)	中心相对位移/%
1.00	1.58	-	(515.273 km,3 406.710 km)	-
1.75	1.80	0.004 4	(515.356 km,3 406.688 km)	0.002 6
3.00	2.16	0.002 9	(515.359 km,3 406.695 km)	0.000 6
4.00	2.65	0.004 9	(515.353 km,3 406.705 km)	0.001 2

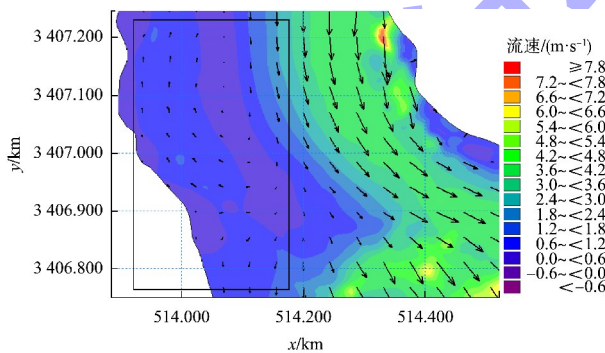
注: 流速相对于流量的变化率=不同流量级下的流速差/流量差。

### 2.2 回流流态规律

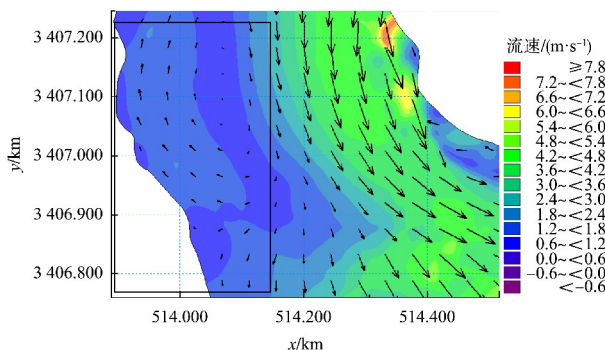
对于回流现象,在弯道前半段西岸侧有一大范围回流区(图 7),流量变化时其覆盖范围和发生位置基本不变,而随着流量增大,其流速也逐渐增加,但速度变化率较低流量时有所降低,同时对比表 1、3 可知,该回流的流速始终显著低于主流区域。

表 3 不同流量下大范围回流的最高流速和位置变化

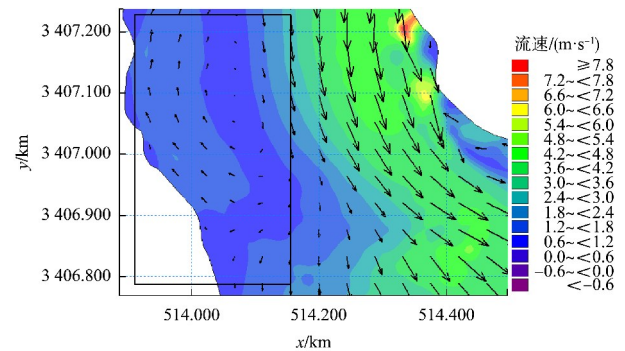
流量/(万 m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	回流最大流速/(m·s <sup>-1</sup> )	速度变化率/%
1.00	0.43	-
2.00	0.82	90.70
3.00	0.97	18.29
4.00	1.34	38.14



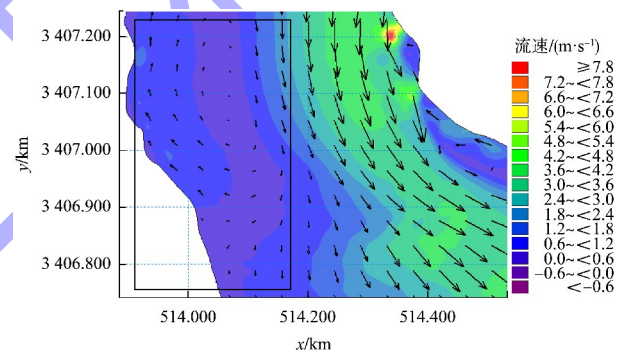
a) 1.00万m<sup>3</sup>/s



b) 2.00万m<sup>3</sup>/s



c) 3.00万m<sup>3</sup>/s

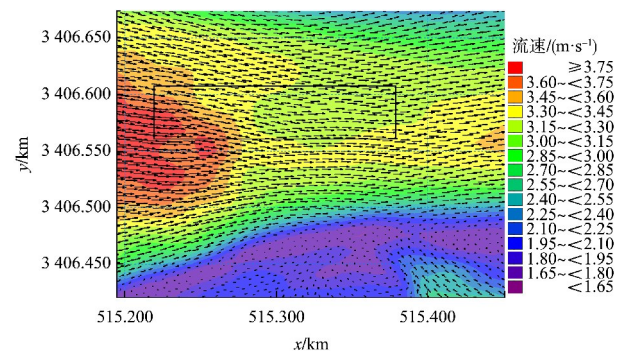


d) 4.00万m<sup>3</sup>/s

图 7 不同流量下回流现象模拟结果及其范围变化趋势

### 2.3 剪刀水流态规律

对于剪刀水现象,其发生的位置固定位于泔子溪一天花板河段的中游区域(图 8),且影响范围基本不变,随流量增大,剪刀水的流速也随之增大,见表 4。



a) 1.00万m<sup>3</sup>/s

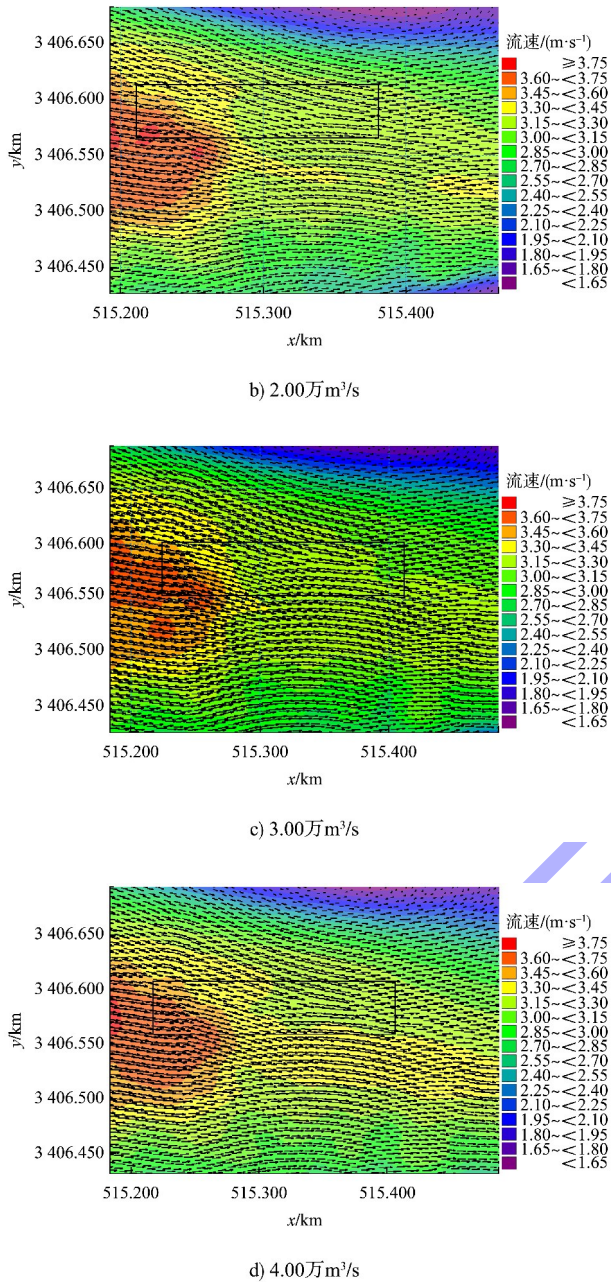


图8 不同流量下剪刀水现象模拟结果及其范围变化趋势

表4 不同流量下剪刀水的最大流速和位置变化

流量/( $10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	剪刀水最大流速/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	速度变化率/%
1.00	1.75	-
2.00	2.33	33.14
3.00	2.79	19.74
4.00	3.41	22.22

### 2.4 汛期流态

综合不同流量下对不同碍航流态的分析,得出汛期时不同碍航流态随流量变化发生的数量变化规律,可看出漩水发生数量随流量增大而增加,

而回流、剪刀水和斜流则保持不变,见表5。当流量增大时,以上水力现象的强度增大,具体表现为数量增加,范围扩张和流速增大,并且在汛期时的河道通航条件将急剧恶化,此时通航存在一定的安全风险。

以上分析结果说明,利用 MIKE21 软件建立模型并进行二维水动力数值模拟,可以有效模拟现实中的河道流态变化,在实际通航过程中可参考该模型的计算结果进行碍航流态的识别和规避。

表5 不同流量下不同碍航流态的发生数量

流量/ ( $10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	碍航流态种类及发生数量/处			
	漩水	回流	剪刀水	斜流
1.00	5	1	1	1
1.25	6	1	1	1
1.50	6	1	1	1
1.75	6	1	1	1
2.00	7	1	1	1
2.25	7	1	1	1
2.50	7	1	1	1
2.75	7	1	1	1
3.00	7	1	1	1
3.25	8	1	1	1
3.50	8	1	1	1
3.75	8	1	1	1
4.00	8	1	1	1

### 3 结论

1) 不同碍航流态的发生概率随流量变化而变化的规律并不相同,其中漩水的发生概率随流量变化而增加,而斜流、回流和剪刀水的发生概率则在流量变化时保持不变。

2) 在碍航流态的发生位置变化方面,漩水的发生位置随流量的增大而逐渐向下游偏移,且在流量大于  $1.75 \text{ 万 m}^3/\text{s}$  时逐渐固定,而回流、斜流和剪刀水的发生位置则在流量变化时基本保持不变。

3) 在碍航流态的影响范围方面,当流量增大时,漩水、回流、斜流和剪刀水的影响范围基本保持不变,但各碍航流态的最大流速则均随流量增大而增加。

(下转第164页)