



# 长江中游七洲弯道段碍航水力指标及 治理措施研究

潘美元, 陈维学, 王江, 魏国正

(长江航道勘察设计院(武汉)有限公司, 湖北 武汉 430040)

**摘要:** 当前将横比降和流压差角作为河道碍航水力指标并且进行相应模型模拟的研究较为匮乏。针对表征七洲弯道碍航横比降、流压差角等水力指标, 基于七洲弯道不同的河床演变工况, 进行碍航水力指标的研究。采用平面二维数学模型模拟分析的方法, 验证指标的适用性和可靠性。基于水力指标研究成果和整治工程实施的可行性, 模拟 F1~F5 工况下所计算得到的横比降和流压差角, 将其与实际调研计算得到的相应指标进行对比。结果表明, F1~F4 工况下能小幅降低横比降(最小为 0.01‰、最大为 0.05‰), 从而改善碍航水域航道条件, F5 工况下改善效果不明显; F1~F4 工况下能小幅降低流压差角(最小为 0.03°、最大为 0.08°), 从而改善碍航水域航道条件, F5 工况下改善不明显。改善碍航水域水流条件的最优方案为 F2 工况方案(上游凸嘴削坡实施护坡+凹口导流堤), 该方案对 S8 断面处行船困难和事故多发水域的改善最优, 能够在一定程度上降低行船阻力, 提升船舶通行的安全性。

**关键词:** 弯道航道; 水力指标; 碍航特性; 航道整治

中图分类号: U617

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)02-0147-09

## Hydraulic indicators affecting navigation and regulation measures for Qizhou Bend in middle reaches of the Yangtze River

PAN Meiyuan, CHEN Weixue, WANG Jiang, WEI Guozheng

(Changjiang Waterway Survey Design and Research Institute (Wuhan) Co., Ltd., Wuhan 430040, China)

**Abstract:** The study on treating transverse slope and flow deflection angle as key navigability-affecting hydraulic parameters, supported by corresponding modeling simulations, remains relatively scarce. On the basis of different riverbed evolution scenarios of Qizhou Bend, a study is conducted on the hydraulic indicators hindering navigation including transverse slope and flow deflection angle, which represent Qizhou Bend hindering navigation. The applicability and reliability of these indicators are verified using a two-dimensional mathematical model for simulation and analysis. The conclusions, derived from research on hydraulic indicators and the feasibility of implementing regulation measures, simulate the transverse slope and flow deflection angle under five different working conditions (F1-F5). These simulated results are compared with field survey data. The results show that conditions F1 - F4 slightly reduces the transverse slope (minimum 0.01‰ and maximum 0.05‰), thereby improving the navigation conditions in the obstructed channel, while the condition F5 shows negligible improvement. Similarly, conditions F1 - F4 slightly reduce the flow deflection angle (minimum 0.03° and maximum 0.08°), enhancing navigation conditions, whereas the condition F5 has minimal effect. The optimal solution for improving the flow conditions in the obstructed waterway is the condition F2 plan (slope cutting and revetment at the upstream convex bank + a diversion dike at the concave bank). This solution provides the best improvement for sailing with difficulty and accident-prone area at cross-section S8, effectively reducing ship resistance to a certain extent and enhancing navigation safety.

**Keywords:** curved channel; hydraulic indicator; navigation obstacle property; channel regulation

收稿日期: 2025-06-11 录用日期: 2025-07-18

作者简介: 潘美元(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事航道工程整治研究工作。

天然河道通常呈现蜿蜒曲折的平面形态。相较于顺直河段,弯道水流在重力与离心力的耦合作用下具有更为复杂的动力结构。在弯道区域,由于横向压力梯度与离心力的不平衡作用,水流会产生明显的横向次生流,这种次生流与纵向主流叠加后形成典型的螺旋流运动。同时,随着弯道曲率半径的增大,离心力效应增强,为维持水流动力平衡,河道横断面将产生水面横比降,表现为凹岸水位升高、凸岸水位降低的水面变形现象。

比降是航道整治工程在勘察设计阶段水文测量的要素之一,主要包括纵比降、横比降和河心比降,反映了江河水力特征,是推算流量及研究水位流量关系的重要资料,也是重载标准船舶适航性能研究、河床泥沙冲刷或淤积分析的重要依据<sup>[1-3]</sup>。

对于河道的横比降,众多学者基于室内试验及实际工程中不同弯曲河道水流运动特性进行了广泛研究。如许光祥等<sup>[4]</sup>以室内水槽研究定床条件下弯道水面横比降沿程分布特性;Yen等<sup>[5]</sup>基于试验讨论动床条件下的水面超高问题;刘焕芳<sup>[6]</sup>基于弯道水面横比降特性,导出弯道水流纵向垂线平均流速的计算公式。

陈相宇<sup>[7]</sup>通过模拟研究发现,船舶在弯道中航行,航道宽度确实影响着船舶的安全通航,但这不是最关键的要素。究其根本原因,安全通航的最关键因素是如何使船舶始终在规定的航道上行驶。如果船舶能够始终稳定安全地在规定航道上行驶,获得正确的导航指令,水上安全事故发生率将大幅减少。控制船舶在弯道航行时的流压差角是使船舶始终在规定的航道上行驶的有效办法。因此,研究船舶在弯道上的流压差角尤为重要。

综上,横比降和流压差角是影响船舶通航的重要指标,但是当前将河道的横比降和流压差角作为河道碍航水力指标,并且进行相应的模型模拟的研究较少,本文主要针对横比降和流压差角展开分析。

## 1 工程概况

### 1.1 河道现状

长江主流出七弓岭弯道后,沿右岸而下,在七洲弯道向左岸窑嘴过渡;窑嘴以上的凹岸侧发育有边滩。七洲弯道主要表现为弯顶处弯曲半径不足,同时水流顶冲点下移到窑嘴后,该处水流流态较紊乱,影响船舶航行安全。由于弯道为水流顶冲段,同时该处河岸有凹陷缺口、其上游凹岸倒套发育易形成回流,导致该处流态较紊乱进而碍航。

### 1.2 计算水文条件

根据历史资料并基于实际调研情况,本文共设置包含航道条件易出险情以及航道条件相对较好的流量-水位组合共11组,见表1。

表1 七洲弯道窑嘴凹岸计算水文条件

Tab. 1 Calculation hydrological conditions for Yaozui concave bank of Qizhou Bend

时间	入口流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	洞庭湖支流流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	窑嘴凹岸处水位/m
2020-04-11	10 600	10 500	22.464
2020-06-16	15 400	14 000	24.144
2020-10-17	20 900	12 300	26.564
2016-06-28	24 600	10 700	28.293
2018-07-09	30 700 (通航条件差,未漫滩)	5 190	27.769
2020-08-13	29 000(漫滩)	16 600	30.422
2020-07-19	30 100(漫滩)	19 600	31.084
2020-07-31	32 800(漫滩)	20 800	31.314
2020-07-28	31 100(漫滩)	24 800	31.644
2020-08-21	38 200 (通航条件差,局部漫滩)	11 800	29.724
2020-09-05	50 000(漫滩)	15 000	32.500

### 1.3 碍航水力指标分析

#### 1.3.1 横比降

针对七洲弯道,沿着规划航槽左边线、中轴线以及右边线布设3列11排共33个采样点,布设范围包括七洲弯道及其上下游部分顺直段,见图1。

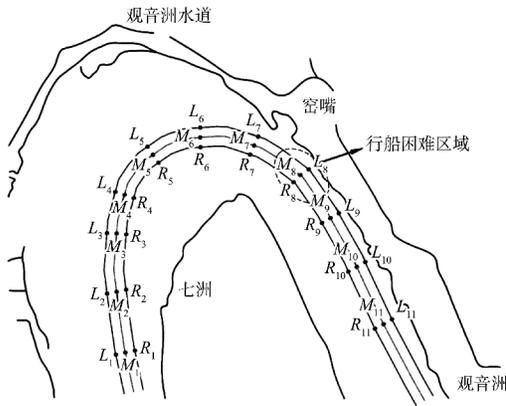


图 1 七洲弯道采样点布设

Fig. 1 Layout of sampling points in Qizhou Bend

水流由直线段进入河湾后, 在重力和离心力的作用下作曲线运动, 凹岸水位升高, 凸岸水位下降, 从而形成了水位横比降, 即河道横断面左右岸水面的高程差与之相应断面的河宽之比, 其计算公式为:

$$t_g = \frac{w_{ll} - w_{lr}}{w_{id}} \quad (1)$$

式中:  $t_g$  为横比降;  $w_{ll}$ 、 $w_{lr}$  为左岸、右岸水位, m;  $w_{id}$  为河道横断面宽度, m。当河道横断面横比降越大时, 对船舶航行越不利。

各采样点横断面处在不同水文条件下的横比降分布情况见图 2。从空间位置来看, S8 横断面处的横比降在各种水文条件下均高于其他断面; 从流量级来看, 30 700 和 38 200  $m^3/s$  流量级下的横比降在各断面均高于其余流量级。因此, 在空间位置和流量级综合影响下, 七洲弯道附近的 S8 横断面在 30 700 和 38 200  $m^3/s$  流量级下的横比降明显增大, 不利于船舶安全航行。该数学模型计算所得横比降数据与调研结果中易发生险情的实际情况相一致, 表明横比降可以作为七洲弯道附近航道碍航条件的水力指标之一<sup>[8]</sup>。

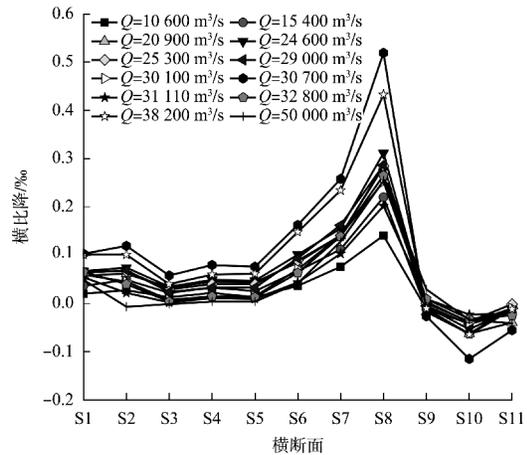


图 2 各采样点横断面在不同水文条件下的横比降变化

Fig. 2 Cross-sectional transverse slope variation at sampling points under different hydrological conditions

### 1.3.2 流压差角

近年来, 国内外许多学者为了降低弯曲航道安全事故发生率, 对弯曲航道展开了多项研究, 包括水流条件、弯道宽度等对船舶航行的影响。然而, 控制船舶在弯道航行时的流压差角是保证其沿规定航道行驶的有效手段, 因此, 研究弯曲航道处船舶的流压差角对于保障弯曲河道处的船舶安全通航具有重要意义<sup>[9-10]</sup>。

在推导弯曲航道船舶通行的流压差角时, 需要进行以下数学假设: 1) 将弯曲航道作为圆弧的一部分; 2) 船舶运动被视为恒定运动, 其速度与当前时间无关, 始终按照规定航线行驶; 3) 忽略风对船舶运动的影响; 4) 弯曲航道中环流的运动方向始终与航道中轴线垂直, 见图 3。

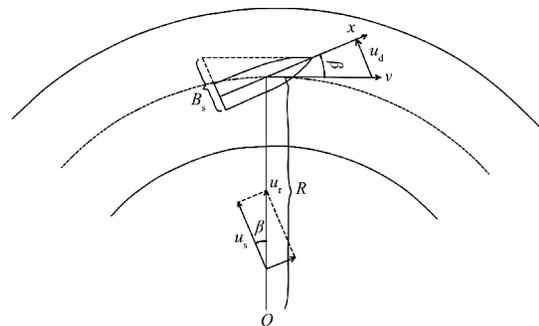


图 3 弯曲航道流压差角

Fig. 3 Flow deflection angle in curved channel

图3中的 $v$ 为船舶的运动速度, $x$ 为船首方向, $\beta$ 为船舶的流压差角, $B_s$ 为船舶弯道航迹带宽度。 $u_s$ 为弯道环流 $u_r$ 的分解分量,该分解分量方向沿 $x$ 的垂直线, $u_r$ 和 $u_s$ 的计算公式为:

$$u_r = 4.8 \sqrt{\frac{H}{R}} u (y - 0.44y^{1.286} - 0.307) \quad (2)$$

$$u_s = u_r \cos\beta \quad (3)$$

式中: $H$ 为弯曲航道的水深, m;  $u$ 为弯曲航道的纵向水流速度, m/s;  $R$ 为航道的曲率半径, m;  $y$ 为相对水深(从河底起算), m。

对于船舶运动,垂直作用在船舶上环流分量 $U_s$ 是驱动船舶横向运动的主要因素,由于环流随着水深而变化,所以环流对船舶横向运动的影响随船舶吃水深度 $d$ 变化,根据式(2)和(3),影响船舶横向运动的平均环流速度 $u_d$ 的计算公式为:

$$u_d = \frac{H}{d} \int_{(H-d)/H}^1 u_s dy = \frac{H \cos\beta}{d} \int_{(H-d)/H}^1 u_r dy \quad (4)$$

式中: $d$ 为船舶吃水深度, m;  $H$ 为水深, m。

通过数学解析运算,可以得到 $u_d$ 的解析解,为:

$$u_d = \frac{uH \cos\beta}{d} \sqrt{\frac{H}{R}} \left[ 0.91 \left( \frac{H-d}{H} \right)^{2.29} + 1.49 \left( \frac{H-d}{H} \right) - 2.4 \left( \frac{H-d}{H} \right)^2 \right] \quad (5)$$

$v$ 和 $u_d$ 之间的关系可以表示为:

$$\sin\beta = \frac{u_d}{v} \quad (6)$$

根据式(5)和(6),可以推导得到:

$$\tan\beta = \frac{uH}{vd} \sqrt{\frac{H}{R}} \left[ 0.91 \left( \frac{H-d}{H} \right)^{2.29} + 1.49 \left( \frac{H-d}{H} \right) - 2.4 \left( \frac{H-d}{H} \right)^2 \right] \quad (7)$$

根据式(7)即可推导出流压差角 $\beta$ 的计算公式,为:

$$\beta = \arctan \left\{ \frac{uH}{vd} \sqrt{\frac{H}{R}} \left[ 0.91 \left( \frac{H-d}{H} \right)^{2.29} + 1.49 \left( \frac{H-d}{H} \right) - 2.4 \left( \frac{H-d}{H} \right)^2 \right] \right\} \quad (8)$$

由式(8)可知,为了保证船舶的安全通航,使船舶能够始终在航道轴线上航行,船舶应该始终保持

流压差角 $\beta$ 航行,同时可知船舶航行流压差角 $\beta$ 与航道曲率半径 $R$ 、水深 $H$ 、弯曲航道纵向流速 $u$ 、船舶吃水深度 $d$ 以及船舶速度 $v$ 密切相关。当船舶航行的流压差角越小时,船舶的航向性能越好,船舶航行越安全。

由于七洲弯道航道等级为II级,可通航2000吨级内河船舶组成的船队,因此,选取船舶吃水深度 $d$ 为3 m,并确定船舶速度 $v$ 为10 km/h,船舶理想航线沿规划航槽中轴线方向。通过提取规划航槽中轴线处各采样点的纵向流速 $u$ 、水深 $H$ 、弯曲半径 $R$ ,根据式(8)计算获得不同计算水文条件下规划航槽中轴线处的流压差角,见图4。

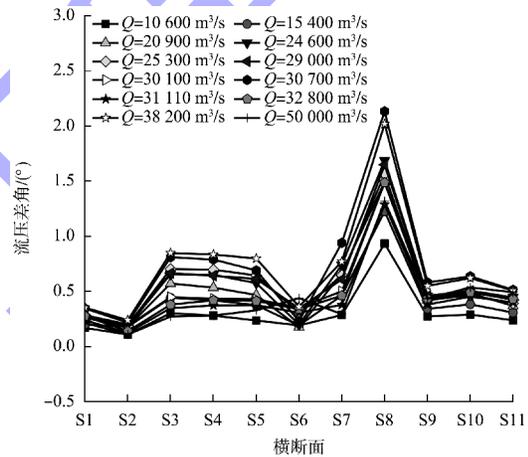


图4 各采样点横断面在不同水文条件下的流压差角变化  
Fig. 4 Variation of flow deflection angle at cross-sectional sampling points under different hydrological conditions

从空间位置看,S8横断面处的流压差角在各流量级下均高于其他横断面;从流量级看,30700和38200 m<sup>3</sup>/s流量级下的流压差角在各横断面均高于其余流量级。因此,在空间位置和流量级的综合影响下,七洲弯道附近的S8横断面处在30700和38200 m<sup>3</sup>/s流量级下流压差角较大,不利于船舶安全航行。这与调研结果中船舶航行困难的位置和流量级具有较好的一致性,表明流压差角可以作为窑嘴附近航道碍航条件的水力指标之一。

综上所述,为确定能够真实反映影响船舶通航安全的碍航指标,本文设置12组水文计算条件,模拟七洲弯道附近的水流情况,分析横比降以及流压差角在表征七洲弯道碍航特性中的适用

性。结果显示, 横比降和流压差角在较不利水文条件(来流大于  $30\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ , 下游水位较低) 以及对对应位置(6 号红浮附近水域 S8 断面) 的计算结果均对船舶通行存在较大的影响, 能够较好地识别碍航流量级下的碍航位置, 均可以作为窑嘴附近航道碍航条件的水力指标<sup>[11]</sup>。

## 2 窑嘴河道演变工况方案

### 2.1 研究工况

前期研究提出了窑嘴河道碍航时对应的水力指标变化情况, 本文拟结合窑嘴河道演变特点, 采用数学模型分析在各种极端演变场景下的河道水流变化趋势, 为窑嘴河道整治工程方案提供依据。具体方案包括上游串沟封堵、扩大以及岸线崩退等工况, 见表 2; 计算水文条件见表 3。

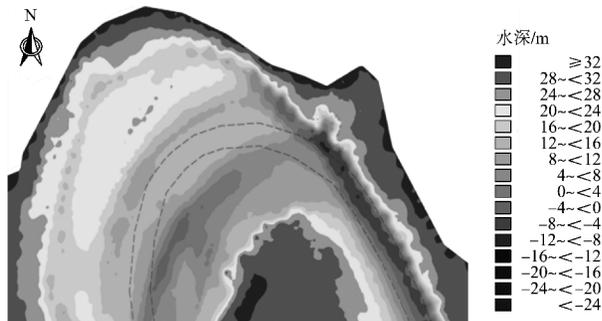
表 2 窑嘴河道认识性试验工况

工况	工况 1(BT)	工况 2(WS)	工况 3(KD)
特征	弯顶岸线崩退 200 m	北边串沟萎缩	北边串沟面积扩大 1 倍, 且冲刷深度增加 3 m

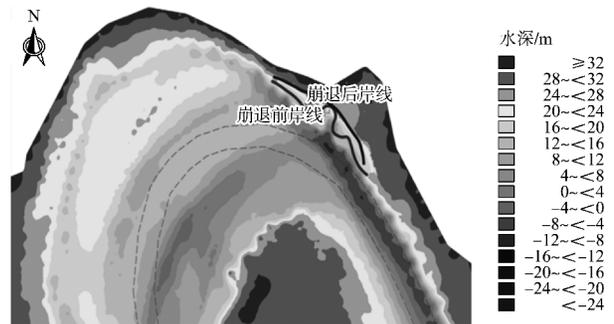
表 3 计算水文条件

宜昌流量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	洞庭湖支流 流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	窑嘴凹岸处 水位/m
30 700	5 190	27.769
29 000	16 600	29.529

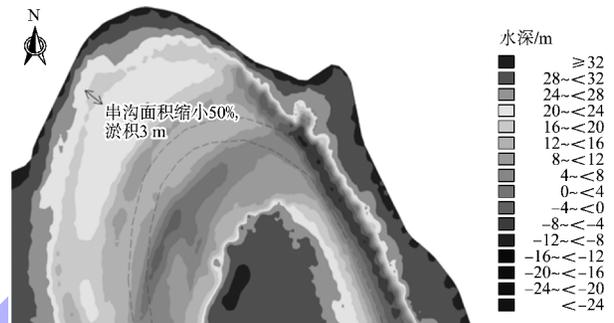
天然条件下窑嘴河道的地形见图 5a), 数学模型针对工况 1~3 的地形处理方式见图 5b)~d), 同时开展不同流量级下各工况的水流流态模拟分析, 主要包括窑嘴附近各断面横比降和流压差角的变化情况。



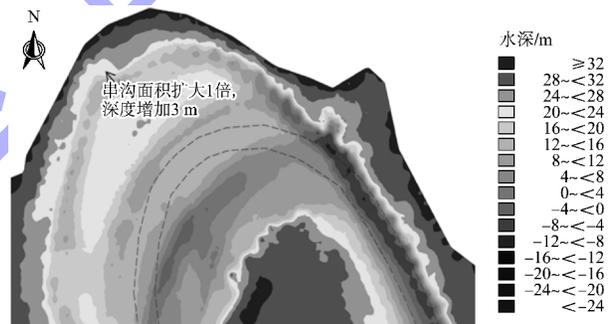
a) 天然条件



b) 岸线崩退



c) 串沟萎缩



d) 串沟发展

图 5 窑嘴弯道不同工况下地形概化图

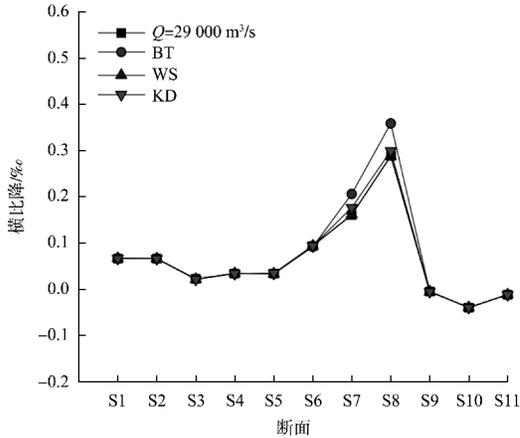
Fig. 5 Generalized topographic map of Yaozui bend section under different working conditions

### 2.2 碍航水力指标分析

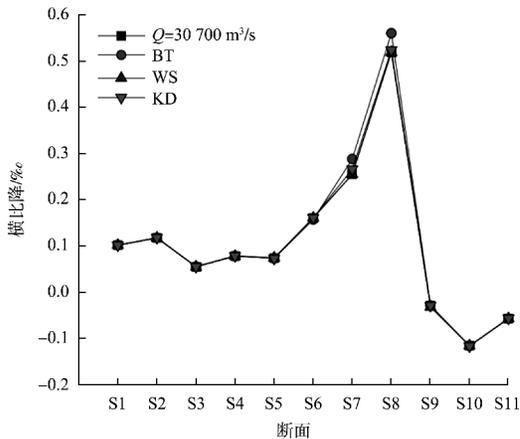
#### 2.2.1 横比降

岸线崩退、串沟萎缩和串沟发展 3 种工况在  $29\ 000$  和  $30\ 700\ \text{m}^3/\text{s}$  流量级下各个断面工程前后的横比降变化情况见图 6。可以看出, 在两种流量级下, 行船困难 S8 断面处区域, 岸线崩退后横比降达到最大值  $0.07\%$ ; 同时, 该处在岸线未崩塌前横比降就已处于较大状态, 岸线崩退后会导致该处的通航条件进一步恶化, 增加船舶通行事故的潜在风险。串沟萎缩对于 S8 断面的横比降影响

较小，基本无明显变化，串沟发展则会小幅增加 S8 断面横比降，增幅最大仅为 0.02‰。



a) Q=29 000 m³/s



b) Q=30 700 m³/s

图 6 各采样点断面处不同工况的横比降分布

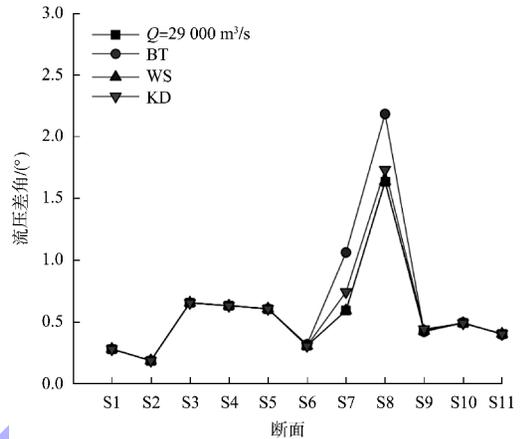
Fig. 6 Transverse slope distribution at different working conditions for cross sections of various sampling points

### 2.2.2 流压差角

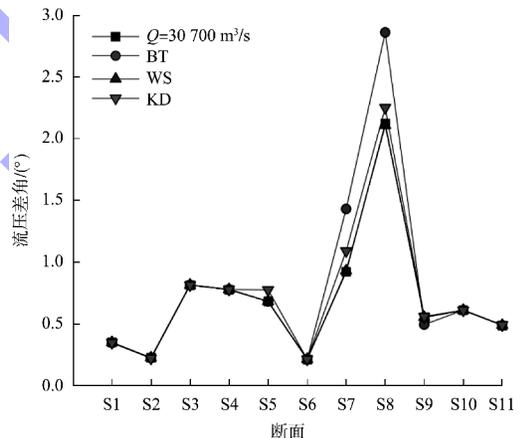
岸线崩退、串沟萎缩以及串沟发展 3 种工况在 29 000 和 30 700 m³/s 流量级下各采样点断面工程前后的流压差角变化情况见图 7。可以看出，岸线崩退后 S8 断面的流压差角有较为明显的增加，增幅最大可达 0.74°，会显著增加该区域船舶的航行难度；串沟萎缩对于 S8 断面的流压差角无明显影响，串沟发展会小幅增加 S8 断面行船困难区域的流压差角。

平面二维数学模型结果表明，串沟萎缩对于横比降和流压差角无明显影响，串沟发展对于横比降和流压差角会有一定增大，但增幅极小。而

岸线崩退则会导致 S8 断面处航行水域的航道条件明显变差，横比降进一步增加；同时，流压差角也有较为明显的增加，因此若不对岸线崩退不利工况加以控制，会进一步恶化该区域的通航条件，增加船舶通行风险。



a) Q=29 000 m³/s



b) Q=30 700 m³/s

图 7 各采样点断面处两级流量下不同工况的流压差角分布

Fig. 7 Distribution of flow deflection angle at different working conditions under two-stage flow rates for cross sections of various sampling points

## 3 治理措施研究

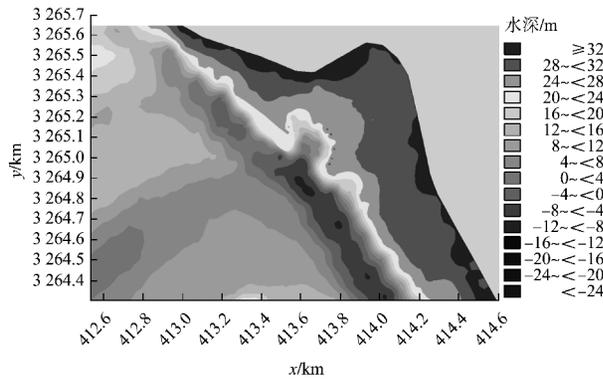
### 3.1 计算工况

基于第 2 节的研究结果并结合工程实施可行性和便利性以及改善航道通航条件的需求，本文整治工程设置研究工况见表 4，并进行整治效果分析。

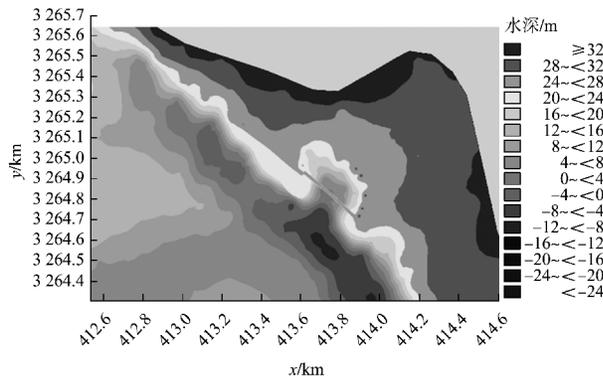
计算水文条件采用最不利上游来流流量 30 700 m³/s 组合洞庭湖支流流量 5 190 m³/s，下游水位取 28.769 m。数学模型针对工况 F1~F5 的地形处理方式见图 8。

表 4 窑嘴河道数学模型试验工况  
Tab. 4 Working conditions of mathematical model test for Yaozui Waterway

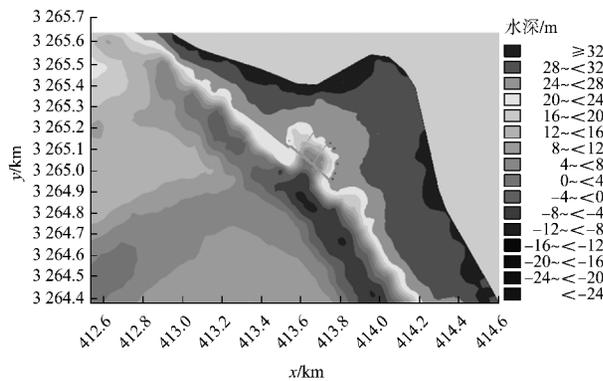
工况	工程措施
F1	上游凸嘴削坡实施护坡
F2	上游凸嘴削坡实施护坡+凹口导流堤
F3	上游凸嘴削坡实施护坡+凹口导流堤+凹陷处格坝
F4	上游凸嘴削坡实施护坡+凹口平顺导堤+凹陷处回填
F5	串沟封堵



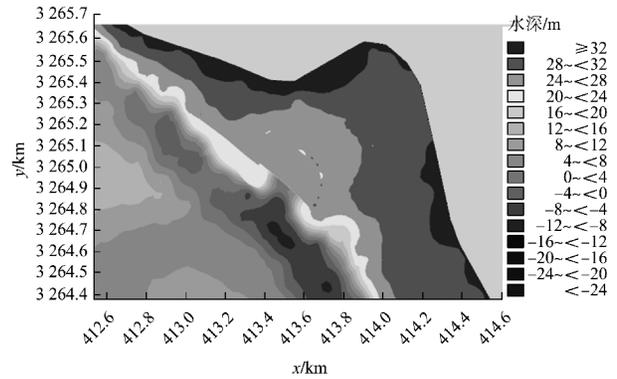
a) 工况F1



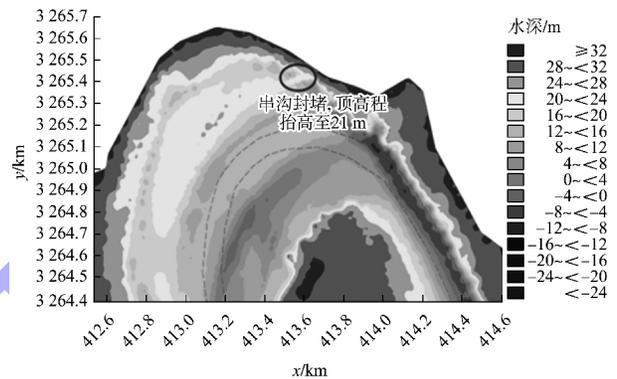
b) 工况F2



c) 工况F3



d) 工况F4



e) 工况F5

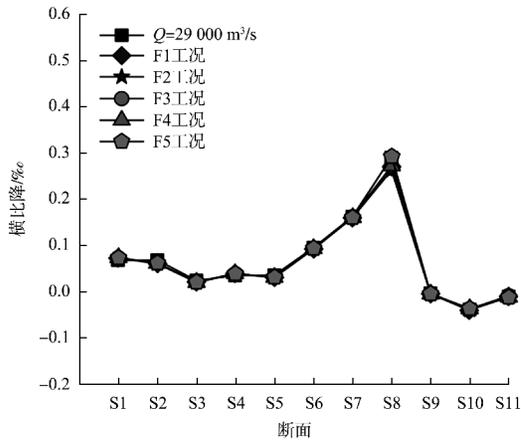
图 8 各工况地形处理方式

Fig. 8 Topographic treatment methods for each working condition

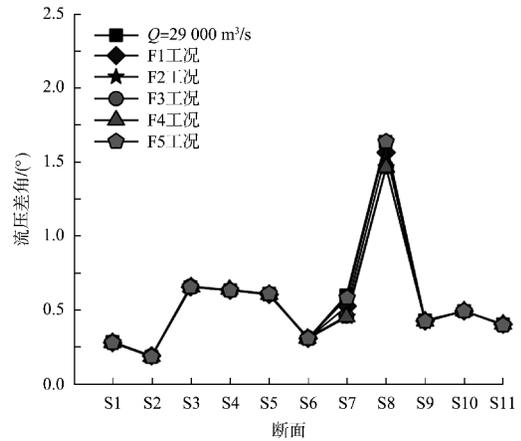
### 3.2 碍航水力指标分析

#### 3.2.1 横比降

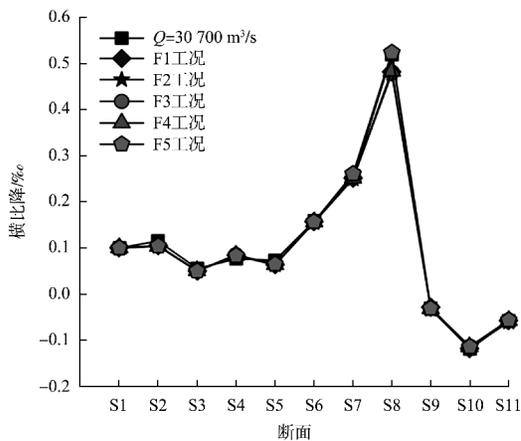
两个流量级下各采样点断面处各工况的横比降分布和变化情况见图 9。可以看出, 针对岸坡防治的 4 种工况 (F1 ~ F5) 方案实施后, 重点碍航区域 S8 断面附近的横比降均有小幅降低 (最小为 0.01‰, 最大为 0.05‰), 表明岸坡防护后能够小幅改善碍航水域的航道条件; 而串沟封堵后 S8 断面附近的横比降无明显变化, 相较串沟发展带来的不利影响, 这说明串沟封堵能够保持航道条件不进一步恶化, 但无法提升现有航道的水流条件。



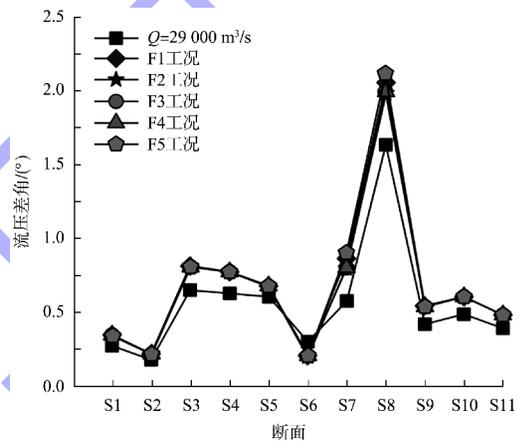
a) Q=29 000 m³/s



a) Q=29 000 m³/s



b) Q=30 700 m³/s



b) Q=30 700 m³/s

图9 各采样点断面处两级流量下各工况的横比降分布  
Fig.9 Transverse slope distribution of every working condition under two flow rates at section of each sampling point

图10 各采样点断面处各工况的流压差角分布  
Fig.10 Distribution of flow deflection angle under every working condition at section of each sampling point

### 3.2.2 流压差角

各流量级下各采样点断面处各工况的流压差角分布和变化见图10。可以看出，S8断面附近水域的流压差角在针对岸坡崩退防治的F1~F4工况实施后相较于工程前有小幅降低(最小为0.03°、最大为0.08°)，其中F2~F4工况对于流压差角的改善效果优于F1工况，而F2工况相较F3、F4工况流压差角略微有所降低，降幅约为0.01°，表明F2工况的岸坡防护工程在S8断面处流压差角改善效果最优，能够在一定程度上减小行船阻力，有利于船舶通航。串沟封堵后碍航水域流压差角没有明显变化。

### 4 结论

- 1) 横比降及流压差角在表征窑嘴弯道碍航特性中的适用性较好，均可作为窑嘴附近航道碍航条件的水力指标。
- 2) 本文利用平面二维数学模型进行窑嘴河道5种建设方案的工况模拟，并统计各断面的横比降和流压差角的变化情况。结果表明，串沟封堵方案仅能维持现有碍航水域航道条件。岸线崩退会进一步恶化S8断面区域的通航条件，增加船舶通行风险。
- 3) 4种岸线崩退防护工程(工况F1~F4)实施后，在S8断面行船困难区域，横比降和流压差角均有一定幅度的改善。总体而言，F2工况(上游凸嘴削坡实施护坡+凹口导流堤)对于S8断面处行

船困难和事故多发水域的改善效果相对其他工程措施最优,能够在一定程度上降低行船阻力,提升船舶通行的安全性。

#### 参考文献:

- [1] 王柱,江木春.右江航道整治工程河段比降观测方法探讨[J].水运工程,2024(1):144-148.  
WANG Z,JIANG M C. Observation method of river section gradient in the Youjiang River waterway regulation project [J]. Port & waterway engineering, 2024(1): 144-148.
- [2] 水运工程水文观测规范:JTS 132—2015[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.  
Specifications of hydrometry for port and waterway engineering: JTS 132-2015[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2015.
- [3] 江福才.弯曲航道中安全航速模型的建立及应用[J].武汉交通科技大学学报,1999,23(2):89-91.  
JIANG F C. Establishment and application of safe speed's model in winding channels [J]. Journal of Wuhan Transportation University, 1999, 23(2): 89-91.
- [4] 许光祥,童思陈,钟亮.弯道水面横比降沿程分布特性研究[J].水力发电学报,2009,28(4):114-118.  
XU G X, TONG S C, ZHONG L. Study on the longitudinal distribution of water surface transverse slope in curved conduits [J]. Journal of hydroelectric engineering, 2009, 28(4): 114-118.
- [5] YEN C L, YEN B C. Water surface configuration in channel bends [J]. Journal of the hydraulics division, 1971, 97(2): 303-321.
- [6] 刘焕芳.弯道自由水面形状的研究[J].水利学报,1990(4):46-50.  
LIU H F. Research on free surface profile in channel bends [J]. Journal of hydraulic engineering, 1990(4): 46-50.
- [7] 陈相宇.内河弯道水流特性及安全通航对策研究[D].舟山:浙江海洋大学,2020.  
CHEN X Y. Research on flow characteristics and safe navigation of inland river bend [D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2020.
- [8] 高毅,丁天明,淦学甄,等.一种船舶弯道航行中流压差角的确定设备:CN209142352U[P].2019-07-23.  
GAO Y, DING T M, GAN X Z, et al. An equipment for determining the drift angle of a ship during curved channel navigation: CN209142352U[P]. 2019-07-23.
- [9] 邓年生,王炳奇.弯曲航道平面尺度研究[J].水运工程,2004(2):74-78.  
DENG N S, WANG B Q. A study on plane dimension of curved waterway [J]. Port & waterway engineering, 2004(2): 74-78.
- [10] 王家宏.一种船舶弯道航行中流压差角的确定方法:CN107544499A[P].2018-01-05.  
WANG J H. A method for determining the flow drift angle of a vessel navigating in a bend: CN107544499A [P]. 2018-01-05.
- [11] 刘玉玲,刘哲.弯道水流数值模拟研究[J].应用力学学报,2007,24(2):310-312.  
LIU Y L, LIU Z. Numerical simulation to flows in curved channels [J]. Chinese journal of applied mechanics, 2007, 24(2): 310-312.

(本文编辑 王聰)

## 著作权授权声明

本刊已许可《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司、北京万方数据股份有限公司、重庆维普资讯有限公司、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司等以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。本刊支付的稿酬已包含上述公司著作权使用费,所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明。

《水运工程》编辑部