



## 桃源枢纽河段通航水流条件数值模拟

王多银<sup>1,2</sup>, 吴穗庆<sup>1</sup>, 段伦良<sup>1,2</sup>, 李国洋<sup>1</sup>, 唐选海<sup>1</sup>, 秦晨曦<sup>1</sup>, 杜文力<sup>1</sup>  
(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:** 针对桃源枢纽船闸存在的碍航问题, 以沅水桃源枢纽二线船闸建设工程为项目依托, 采用二维动力学数值模拟方法对桃源枢纽一周文庙水文站河段通航水流条件进行研究。基于对多工况水深、水位、流速等参数的分析, 进而研究枢纽与坝下航道的通航水流条件和碍航滩段, 并根据滩险问题提出挖槽疏浚等航道整治措施。结果表明: 在现有地形条件下工况1( $Q=217\text{ m}^3/\text{s}$ )和工况2( $Q=380\text{ m}^3/\text{s}$ )在距桃源枢纽0~20 km河段和80~95 km河段碍航问题突出, 当流量大于工况3( $1\ 233\text{ m}^3/\text{s}$ )时满足Ⅲ级航道尺度要求。经数学模型验证, 对碍航滩段进行拟定的挖槽疏浚等措施能够有效改善航道的通航水流条件。

**关键词:** 数值模拟; 通航水流条件; 航道整治

中图分类号: U617

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)01-0136-09

### Numerical simulation of navigation water flow conditions in Taoyuan Hub section

WANG Duoyin<sup>1,2</sup>, WU Suiqing<sup>1</sup>, DUAN Lunliang<sup>1,2</sup>, LI Guoyang<sup>1</sup>, TANG Xuanhai<sup>1</sup>, QIN Chenxi<sup>1</sup>, DU Wenli<sup>1</sup>

(1. Hehai College of Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

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

**Abstract:** To the problem of navigation obstruction in the Taoyuan hub ship lock, this paper takes the construction project of the Taoyuan hub second line ship lock in Yuanshui as the project basis, and uses two-dimensional dynamic numerical simulation method to study the navigable water flow conditions of the river section from Taoyuan Hub to Zhouwenmiao Hydrological Station. Based on the analysis of parameters such as water depth, water level and flow velocity under multiple working conditions, the navigable flow conditions and obstructed beach sections of the hub and downstream waterway are studied, and the channel improvement measures such as trench dredging are proposed according to the beach risk problem. The results show that under the existing terrain conditions, the navigation obstruction problems of working conditions 1 ( $Q=217\text{ m}^3/\text{s}$ ) and 2 ( $Q=380\text{ m}^3/\text{s}$ ) are prominent in the river section 0-20 km and 80-95 km from Taoyuan hub, and when the flow rate is greater than working condition 3 ( $1\ 233\text{ m}^3/\text{s}$ ), it meets the requirements of Class III channel scale. Through mathematical model verification, measures such as trench dredging can effectively improve the navigable water flow conditions of the waterway.

**Keywords:** numerical simulation; navigation water flow condition; waterway regulation

桃源枢纽是规划沅水国家高等级航道最下游一个梯级, 位于桃源县城区双洲分洲尾, 已建500吨级船闸1座, 工程河段航道规划为1000吨级。近年来, 因枢纽坝下河段采砂导致河床下切、水位下降, 枯水期船闸门槛水深严重低于原设计标准, 已无法满足500吨级及以上船舶通航要求。

随着沅水航道运量增加, 船舶大型化, 现有船闸已成为制约沅水下游高等级航道发展的瓶颈, 堵船现象严重。通过桃源枢纽河段通航水流条件数值模拟研究, 系统了解河流水深、水位、流速等参数, 可以对河流水文变化进行全面、科学的分析, 为该河段航道改善措施的提出和工程决策提供可靠

收稿日期: 2024-03-27

作者简介: 王多银(1965—), 男, 硕士, 教授、博导, 研究方向为港航工程等领域结构与介质相互作用。

的科学依据,具有重要的理论价值和指导意义。

研究河流河段通航水流条件时,数值模拟起到了重要作用。研究者<sup>[1-6]</sup>采用二维水动力学数值模拟方法,分析不同水位条件下的航道尺度影响,并提出针对性的维护尺度和流量要求。通过仿真模拟和物理模型试验分析各种优化方案的通航水流条件,以及船闸建设方案对通航条件的影响,提出相应的优化方案。这些研究为提高航道通航安全性和效率提供了重要的理论支持和实验依据。

桃源枢纽是沅水航道的控制性节点,目前通航期远小于设计预期,其下游航道也受到相应影响。二线船闸建成后,桃源枢纽通航期将大幅提高,其下游长河段航道通航期应与之相协调,不能出现桃源枢纽可通航而下游航道无法通航的碍航滩段。此外,船闸灌泄水会在引航道内形成非恒定流,对船舶及船闸本身均产生不利影响。针对以上问题,本文采用全航道一维水流数学模型与二维水流数学模型相结合的方法开展研究,模拟范围为桃源枢纽坝下一周文庙水位站,河道长度约 100 km。首先基于一维水流数学模型分析航

道水位条件,并为二维水流模型提供边界条件;然后基于二维水流数学模型分析整个航道内的水流特性及弯曲段、引航道及水工建筑物附近等局部通航水流条件,评价桃源枢纽坝下航道通航保证率是否与桃源船闸通航保证率相协调,并针对存在的碍航问题提出方案措施,为打通桃源枢纽坝下航道提供技术支撑,旨在为类似工程设计提供参考。

## 1 数学模型建立与验证

### 1.1 模型设置

如图 1 所示,基于水流连续方程和运动方程,建立桃源枢纽—常德下游牛鼻滩河段二维水流数学模型,模型进口位于桃源水文站,将桃源水文站实测流量作为入口边界条件;出口位于周文庙水文站,以周文庙水文站站前水位作为出口边界条件。计算网格划分采用三角形非结构网格,最大网格长度约为 40 m,对弯道附近的网格进行局部加密处理,最小网格长度约为 10 m,计算域内共布置 23.390 0 万个网格,共计 11.988 7 万个节点。

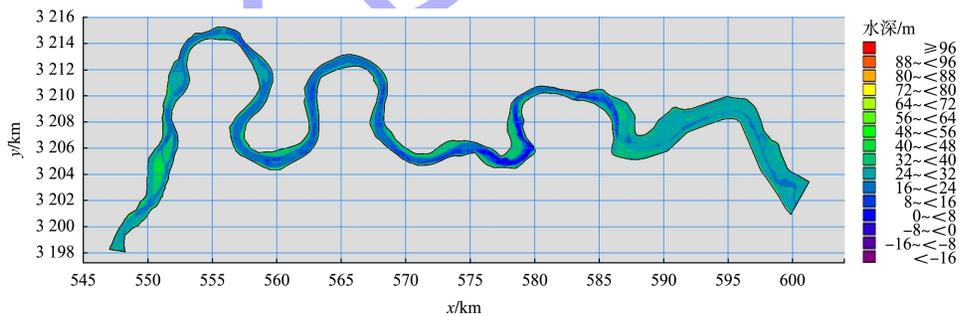


图 1 数学模型计算范围及地形

Fig. 1 Mathematical model calculation range and topography

### 1.2 水面线验证

沅水桃源—汉寿段水文测点布置见图 2。将测点 4、5 的水位模拟值与实测值进行对比,如表 1 所示。从表中可以看出模型与原型实测水位吻合良好,误差均小于  $\pm 0.05$  m,表明数学模型计算水面线与原型水面线吻合较好,符合相关规范要求。

将  $Q=2\ 952\ \text{m}^3/\text{s}$  时测点 4 和 5 流速的模拟值

与实测值进行对比,如图 3 所示。从图中可以看出,

流速的模拟值与实测值吻合度较高,数学模型模拟流速情况良好,符合 JTS/T 231-4—2018《内河航道与港口水流泥沙模拟技术规程》<sup>[7]</sup>的要求,该数学模型能够达到计算要求,且具有较高的精度。



图2 沅水桃源—汉寿段水文测点布置

Fig. 2 Layout of hydrological survey points from Taoyuan to Hanshou section of Yuanshui River

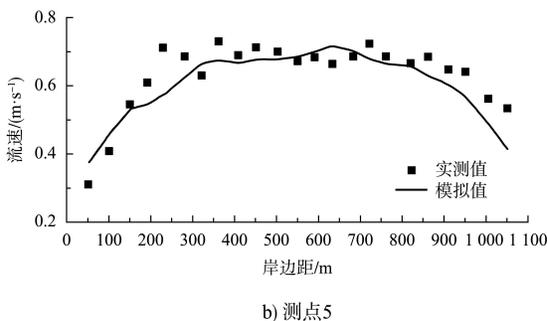
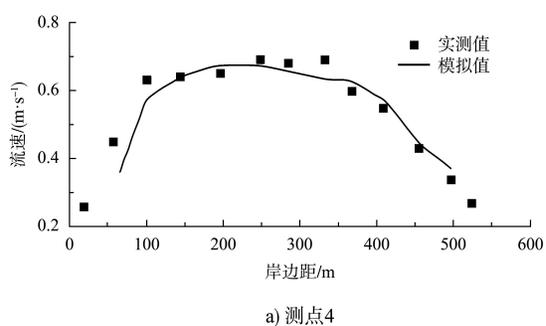


图3 流速实测值与模拟值对比  
Fig. 3 Comparison between measured and simulated flow velocity values

表1 测点4、5水位验证

Tab. 1 Verification of water level at measurement points 4 and 5

流量/( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	水位测点	实测值/m	模拟值/m	差值/m
2 952	4	29.92	29.96	-0.04
	5	29.53	29.53	0.00
632	4	27.56	27.51	0.05
	5	27.40	27.43	-0.03

## 2 计算成果分析

通过建立桃源枢纽下游—周文庙二维水流数学模型，模拟了桃源枢纽在不同工况下，下游航道内的航道水深、河道水位、水面比降、航槽流速变化情况水流特性，并针对各工况下下游存在束窄、急弯、江心洲等复杂地形河段的流场进行分析，以桃源枢纽坝下位置为控制点，计算各种工况下桃源枢纽—周文庙处的沿程水深、水位、流速的变化情况。

### 2.1 计算工况

本次计算大流量选择20 a一遇、10 a一遇、5 a一遇、2 a一遇对应的流量水位；计算小流量选择了设计最小流量、生态流量、3台/5台/9台发电情况下的流量水位。其中计算工况特征水位组合见表2。通过对历史气象和水文数据的统计分析，得出计算的经典流量，并作为设计标准，确保工程在大多数情况下均能够承受较为严重的水流冲击，增加工程的安全性，提高设计的一致性和可比性。

表2 各工况流量水位组合

Tab. 2 Flow level combination of each condition

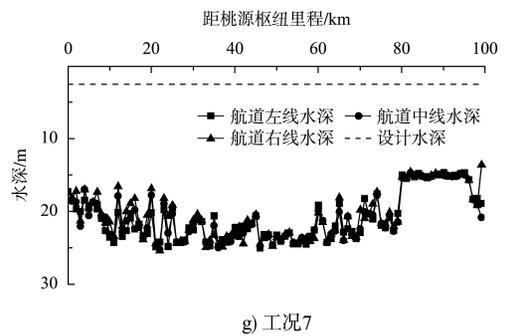
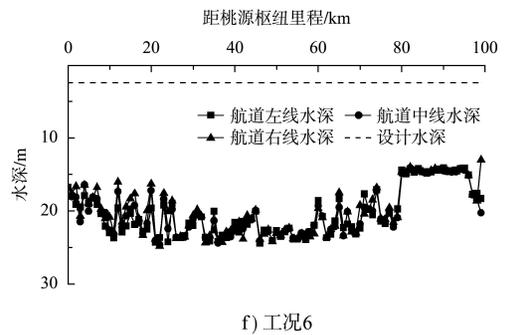
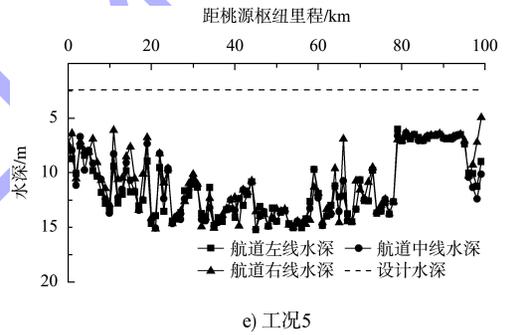
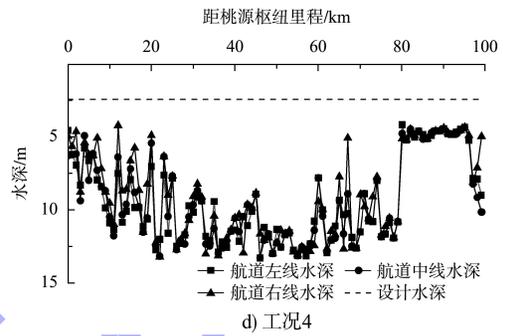
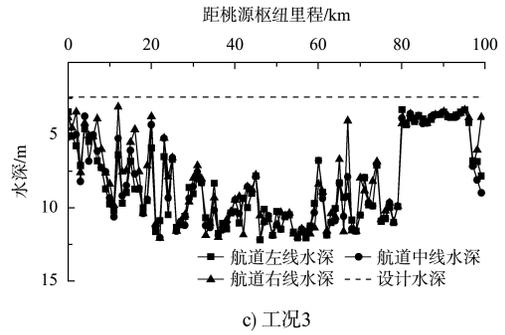
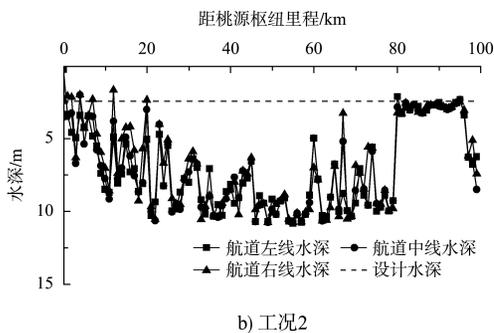
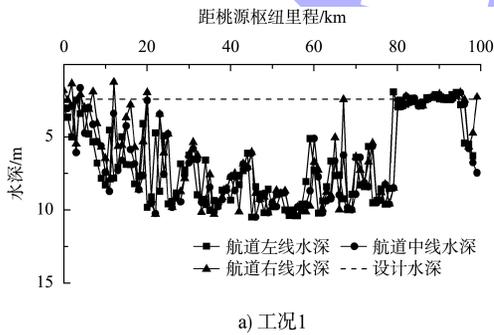
工况编号	流量/( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	桃园水文站水位/m	桃园站模拟值/m	水位差/m	出口水位/m	备注
1	217	27.63	27.65	0.02	25.65	设计最小流量(停机)
2	380	28.09	28.14	0.05	26.38	生态流量
3	1 233	29.75	29.77	0.02	27.18	3台发电
4	2 055	30.80	30.82	0.02	28.34	5台发电
5	3 699	32.52	33.55	0.03	30.61	9台发电
6	19 000	41.63	41.64	0.01	38.27	2a一遇
7	20 400	42.23	42.26	0.04	38.75	5a一遇
8	20 600	42.31	42.35	0.04	38.82	10a一遇
9	22 300	42.99	43.01	0.02	39.38	20a一遇

各工况的出口水位皆由一维模型模拟得出, 一维模型是基于波动方程或河流流量方程建立的, 具体设置了模型的边界条件、入口流量等数据, 运用数学方法(有限差分法)对模型进行离散化处理, 将河道分割成若干个小段, 对模型进行迭代计算, 根据已知条件和方程, 计算得出每个离散点处的水位。根据模型出口位置的离散点水位, 最后得出整个出口的水位情况。

## 2.2 通航水流条件

### 2.2.1 河道水深

图4为在各个工况下, 引航道口门区一周文庙处的航槽水深沿程变化情况。在流量大于工况3的 $1\ 233\ \text{m}^3/\text{s}$ 时, 整个区域航槽水深均满足设计水深 $2.4\ \text{m}$ 的要求<sup>[8]</sup>, 不存在碍航情况。图4中工况1为设计最小流量下航道水深沿程变化, 在该工况下, 距离引航道口门区 $20\sim 80\ \text{km}$ 区域内的航道水深基本满足设计要求; 在 $0\sim 20\ \text{km}$ 处存在3处江心洲, 设计最小流量下河道水深减落显著, 其中 $0\sim 4\ \text{km}$ 河段区域内的航道水深、 $12\sim 13\ \text{km}$ 和 $19\sim 20\ \text{km}$ 河段区域内的航道右线水深以及 $80\sim 99\ \text{km}$ 河段区域内航道水深均未满足设计水深 $2.4\ \text{m}$ 的要求, 存在碍航情况。



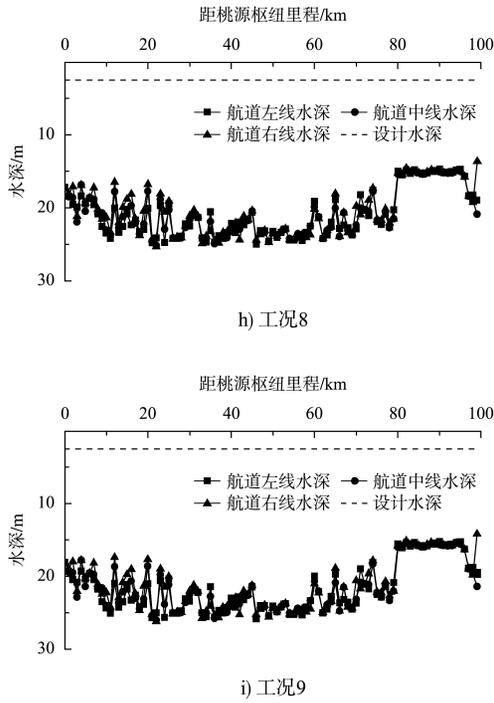


图 4 工况 1~9 沿程水深

Fig. 4 Water depths along distance under conditions 1-9

### 2.2.2 河道水位

将各种工况条件下的航道分为左、中、右线，分别提取沿程水位，图 5 为引航道口门区一周文庙水文站处的沿程水位变化情况。距离引航道口门区 0~3 km 处水位下降较快，受坝下依托江心洲建立的引航道结构以及丁坝影响，导致下游河道弯曲束窄，使得上游水位壅高，在枯水流量下，上游来流受结构影响较大，弯曲段过后，河道顺直变宽，导致水位下降明显；距引航道口门区 3~25 km 处水位下降起伏不定，这种现象的原因是该处河段存在 3 处江心洲，且河道弯曲，宽度变化较大，导致水位在江心洲和弯曲河段水位壅高，水位变化发生波动；距引航道口门区 25~80 km 处水位下降缓慢，是由于枯水流量下该段河道宽度总体变化较小，且没有明显结构物扰流导致；与上游相比，距引航道口门区 80~100 km 处水位下降变化显著，是由于该段存在 2 处江心洲使河道束窄，导致上游水位抬高，下游水位下降更明显。

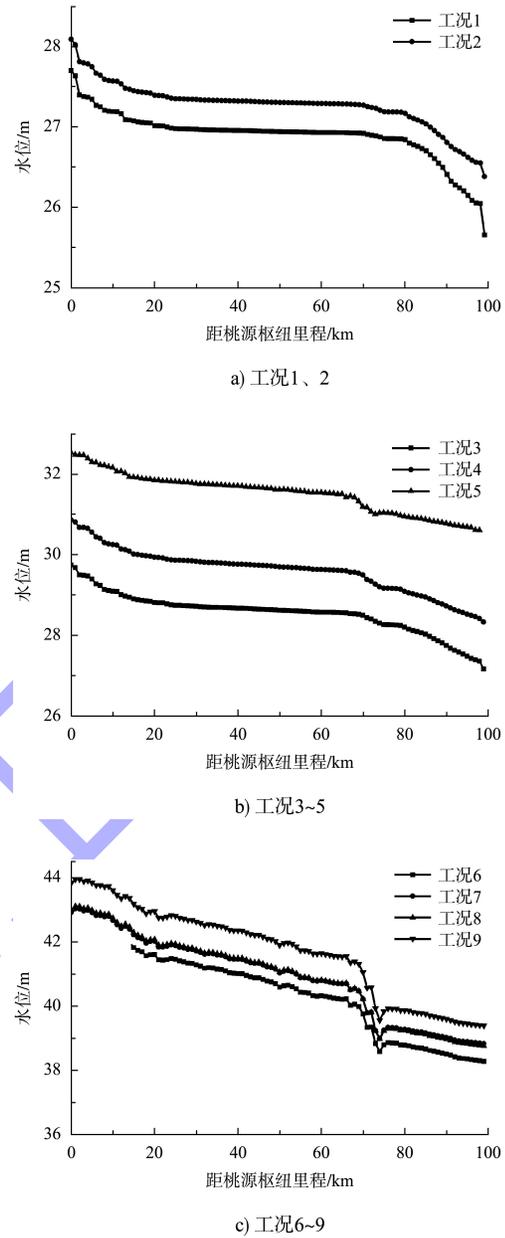
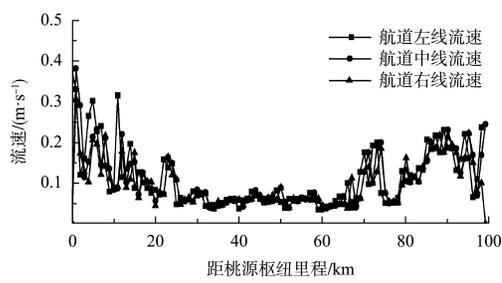


图 5 工况 1~9 沿程水位

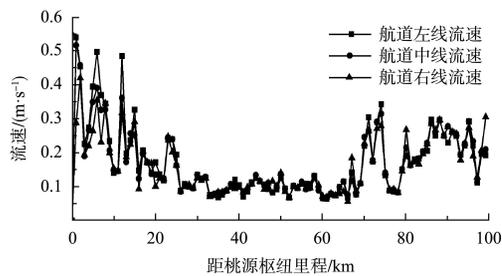
Fig. 5 Water levels along distance under conditions 1-9

### 2.2.3 河道流速

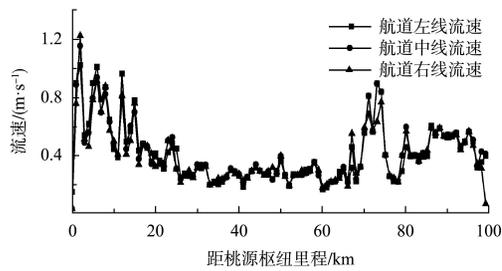
图 6 为各个工况下引航道口门区一周文庙处的航槽平均流速变化情况。0~30 km 河道流速变化明显，原因是该段受多处江心洲以及水中建筑物影响，导致流速波动；30~70 km 处河道流速相对较小；70~100 km 河道流速变化明显，同样受 2 处江心洲影响，使得江心洲上游壅水，束窄处流速增大，下游流速放缓，流速整体呈现先增大后减小、再增大再减小的趋势。



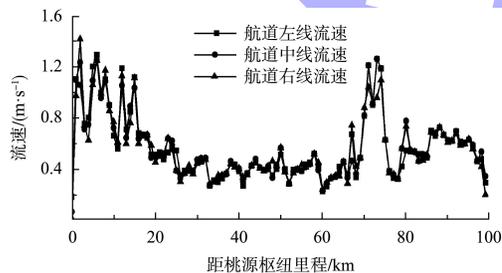
a) 工况1



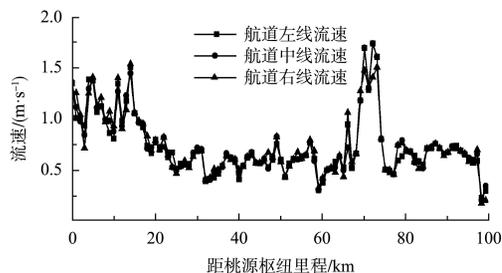
b) 工况2



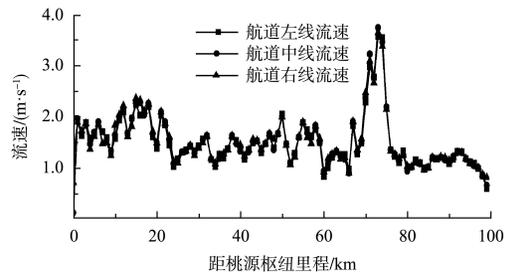
c) 工况3



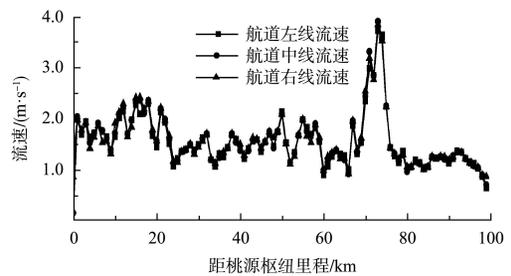
d) 工况4



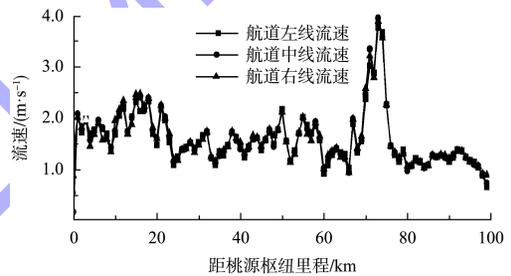
e) 工况5



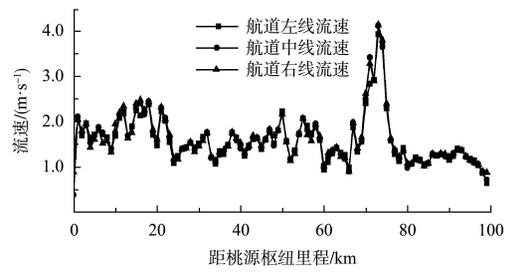
f) 工况6



g) 工况7



h) 工况8



i) 工况9

图 6 工况 1~9 沿程流速

Fig. 6 Flow velocities along distance under conditions 1~9

### 3 滩险分析

本工程设计航道等级为Ⅲ级航道, 根据 GB 50139—2014《内河通航标准》<sup>[8]</sup>, 设计最低通航水位的计算标准取保证率 98%, 桃源枢纽建成后其保证率水位为 27.62 m, 最小设计水深为 2.4 m。

根据最小设计流量为  $217 \text{ m}^3/\text{s}$  的桃源枢纽—周文庙二维水流数学模型结果：坝下  $0\sim 2 \text{ km}$  处，中间流速大于两岸的流速，使得大量泥沙向两岸淤积，而船闸口门区附近位于河道侧边，易出现碍航滩段；坝下  $4 \text{ km}$  附近，由于江心洲分流且河道突然拓宽，导致该河段流速降低，挟沙能力减小，部分航道水深不足进而影响通航；坝下  $8\sim 9 \text{ km}$  处，存在江心洲，使得下游河道束窄，上游水位壅高，进一步减缓流速，挟沙能力减弱，使得该河段在枯水流量下产生多处淤积，水深不满足通航要求；坝下  $12\sim 13 \text{ km}$  处，由于上游江心洲的存在，使得此处河道相较上游放宽，且位于弯曲过渡段，单宽流量减小，平均流速降低，河水挟沙能力减弱，易形成碍航滩险；坝下  $19\sim 20 \text{ km}$  处，河道变宽，流速放缓，泥沙淤积；坝下  $80\sim 99 \text{ km}$ ，下游存在接近  $90^\circ$  的弯曲河段，水流对于岸坡的冲击较为剧烈，因此河水夹杂着大量泥沙向下游流动，而下游碍航河道比较直且河道宽度较宽，使得水流流速降低，挟沙能力也降低，因此弯道处被冲刷的泥沙在该处易于沉积，导致弯道上游在枯水期可能出现滩险碍航；最下游河道宽浅、河床散乱，没有明显的边滩和深槽，并存在多处河道分叉，导致水流分成多股且水深小，形成滩险碍航。

## 4 整治措施及效果

### 4.1 整治措施

目前国内外工程已提出多种改善通航水流条件的工程措施<sup>[9-13]</sup>，如优化航线，开挖与调整凸岸岸线等措施。结合国内多个工程实践，充分考虑河段上游桃源枢纽运行情况，采取相应的措施使滩险满足Ⅲ级航道通航标准，最后通过理论计算和建立数学模型分析该整治方案的整治效果。

桃源水电站地理位置特殊，库区属低矮丘陵地区，两岸为沅水河流冲积堆积阶地，河中江心

洲发育，河床普遍沉积砂卵砾石，两岸以不连续发育冲积堆积Ⅰ级阶地为主，由砂卵砾石及砂质黏土、粉土组成，因此可多采用挖槽疏浚的方式进行航道整治。本河段江心洲较多，碍航特征多为滩险水深不足，具体整治措施包括：1) 坝下  $0\sim 2 \text{ km}$  和  $4 \text{ km}$  附近：进行开挖疏浚，以增加水深及保证航道宽度，确保船舶航行安全。航道的设计航宽为  $70 \text{ m}$ ，设计水深为  $2.4 \text{ m}$ ，按  $1:2.5$  的挖槽边坡对不满足航深的部分进行疏浚，最大挖槽深度大约为  $1.5 \text{ m}$ ，主要挖槽区域靠近航道右侧，从而达到扩大水深和航道宽度的目的。2) 坝下  $8\sim 9 \text{ km}$  处：江心洲上游入口处采取扩宽航道的方式进行处理，将两岸的航道加宽，加大上下游连通处流量，该方案既调节了江心洲上游水位壅高问题，又拓宽了下游航道。对江心洲下游出口处进行疏浚，最大挖槽深度约为  $0.8 \text{ m}$ ，疏浚长度约为  $1 \text{ km}$ ，使水深大于设计水深  $2.4 \text{ m}$ ，保证枯水期通航。3) 坝下  $12\sim 13 \text{ km}$  处：河道中间有 1 处江心洲，分流导致航道右线水深不足，对航深不足区域进行挖槽疏浚，挖槽最大深度约为  $1.5 \text{ m}$ ，长度约为  $1 \text{ km}$ ，挖槽区域靠近航道右侧。4) 坝下  $19\sim 20 \text{ km}$  处：由于河道加宽，导致航道部分水深不足，航道冲刷力不够，且桃源枢纽附近主要为航道右线水深不足，选择在航道右侧浅区修建丁坝来束窄河宽进而壅高水位，增大航槽冲刷力度。5) 坝下  $80\sim 99 \text{ km}$  处：下游安彭加洲—周文庙水文站  $20 \text{ km}$  河段由于河道拓宽，水流分散导致水深不足，且河段长、区域多，通过疏浚的方式进行整治，加深航槽，基本沿程进行疏挖。

### 4.2 整治效果

利用已验证的二维水流数学模型，按上述整治思路，根据拟定的整治原则和各碍航段的具体情况，对航深不足区域主要采取挖槽疏浚的方式进行航道整治，并构建整治后的数学模型，通过数学模拟结果分析其整治效果，见图 7。

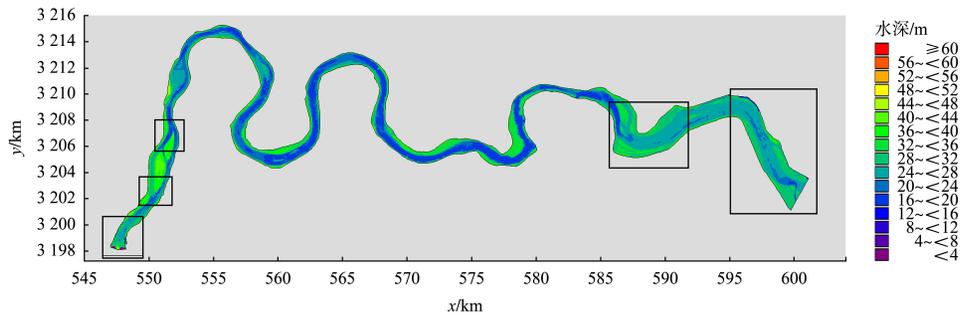


图 7 整治后航道地形高程

Fig. 7 Topographic elevation of waterway after regulation

#### 4.2.1 整治前后航道水深对比

图 8 为上游桃源水文站流量为  $217 \text{ m}^3/\text{s}$ 、周文庙水位控制在  $26.73 \text{ m}$  情况下, 工程实施带来的航道水深变化情况。由图可见, 整治后坝下河段水深条件良好, 坝下  $0 \sim 20 \text{ km}$  最小水深均超过  $2.56 \text{ m}$ ; 坝下  $80 \sim 99 \text{ km}$  河段航道最小水深均超过  $2.67 \text{ m}$ 。按照初步整治方案, 该河段最小水深均满足  $2.4 \text{ m}$  设计水深要求, 相比未整治之前, 通航条件得到改善。

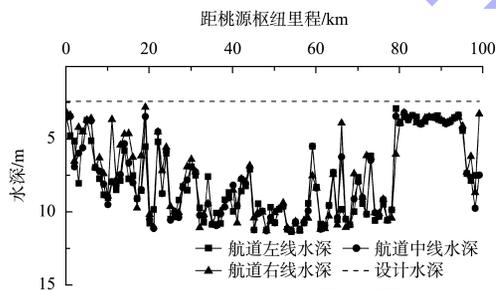


图 8 整治后工况 1 沿程水深

Fig. 8 Water depth along distance under condition 1 after regulation

#### 4.2.2 整治前后航道流速对比

图 9 为桃源枢纽坝下流量为  $217 \text{ m}^3/\text{s}$ 、周文庙水位控制在  $26.73 \text{ m}$  情况下, 整治前后的航道流速变化情况。

通过对整治前后航道平均流速对比得出, 整治前后的航道整体流速变化相差不大, 航道整体

流速情况比整治前略小, 导致水流挟沙能力降低, 易造成泥沙淤积, 需要定期清淤, 或者在泥沙淤积易形成滩险处筑坝束水, 增大流速。但整治后航道流速整体波动起伏较小, 比整治前更稳定, 航道内流态更好。

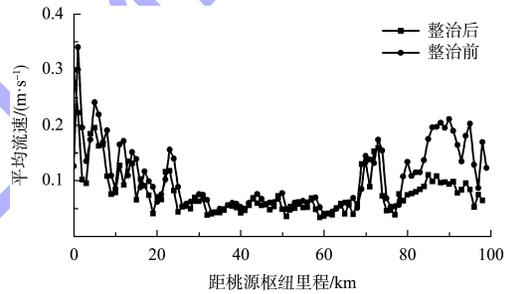


图 9 整治前后平均流速对比

Fig. 9 Comparison of average flow velocities before and after regulation

#### 4.2.3 整治后航道水流条件分析

分析滩险航道水流条件时, 研究重点针对各工况最不利条件下的流场进行分析, 并结合测点布置, 统计各测点在各工况条件下的最大纵、横向流速, 见表 3。其中  $Q=217 \text{ m}^3/\text{s}$  工况下,  $0 \sim 20 \text{ km}$  河段纵向流速为  $0.05 \sim 0.25 \text{ m/s}$ , 横向流速为  $-0.03 \sim 0.17 \text{ m/s}$ ;  $80 \sim 99 \text{ km}$  河段纵向流速为  $0.04 \sim 0.12 \text{ m/s}$ , 横向流速为  $0.01 \sim 0.10 \text{ m/s}$ , 从表 3 可见, 上述河段纵、横向流速大小基本满足水流条件要求。

表3 整治区域流速

Tab. 3 Flow velocity in regulation area

距枢纽坝下里程/km	纵向流速/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	横向流速/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )
1	0.25	0.00
2	0.21	0.17
3	0.08	0.08
4	0.09	0.07
5	0.17	0.04
6	0.18	0.08
7	0.15	0.07
8	0.16	0.07
9	0.11	0.03
10	0.07	-0.01
11	0.08	-0.03
12	0.12	0.00
13	0.07	0.05
14	0.13	0.06
15	0.13	0.02
16	0.06	-0.02
17	0.07	0.03
18	0.06	0.08
19	0.05	0.09
20	0.05	0.07
81	0.05	0.07
82	0.07	0.08
83	0.08	0.08
84	0.06	0.08
85	0.09	0.07
86	0.12	0.10
87	0.09	0.09
88	0.07	0.10
89	0.07	0.09
90	0.07	0.10
91	0.09	0.07
92	0.07	0.04
93	0.08	0.03
94	0.09	0.02
95	0.07	0.04
96	0.04	0.05
97	0.07	0.05
98	0.05	0.01

## 5 结论

1) 使用非结构化网格建立桃源枢纽坝下一周文庙的二维水流数学模型,经验证模型与实测结果吻合良好,该数学模型能较好地模拟引航道内通航水流条件。

2) 在现有地形下,工况1( $Q=217\text{ m}^3/\text{s}$ )和工况2( $Q=380\text{ m}^3/\text{s}$ )通航条件较差,部分航段不满足Ⅲ级航道水深要求,在流量大于工况3( $1\ 233\text{ m}^3/\text{s}$ )

时,整个区域航槽水深均满足设计水深2.4 m的要求,不存在碍航情况。

3) 经数学模型验证,通过拟定的挖槽疏浚等整治措施,碍航河段整治后水深均可达到设计标准2.4 m以上,流速将更加稳定,整体流态优于之前,疏浚效果显著。

## 参考文献:

- [1] 李忠勇,马倩,高桂景,等.嘉陵江草街—河口段航道通航条件及补水需求分析[J].水运工程,2022(7):132-139.
- [2] 杨忠超,魏涛涛,黄秋杰.麻石船闸改扩建工程下引航道优化布置数值模拟[J].水运工程,2018(5):127-131,144.
- [3] 姜楚,赵建钧,辜晋德.青田水利枢纽通航水流条件试验研究[J].水利水运工程学报,2014(2):74-80.
- [4] 苏莹,付菁,张春泽,等.北江清远枢纽三线船闸通航水流条件及优化措施[J].水运工程,2022(6):150-157,189.
- [5] 张信伟,刘哲,张明,等.富池复线船闸与长江连接段通航条件试验研究[J].水运工程,2022(11):152-159.
- [6] 杨亚男,周世良,王云莉,等.平陆运河新坪水支流汇入口河段通航水流条件优化试验研究[J/OL].长江科学院院报.[2024-03-11][2024-03-15]<https://link.cnki.net/urlid/42.1171.TV.20240311.1047.004>.
- [7] 交通运输部天津水运工程科学研究所.内河航道与港口水流泥沙模拟技术规程:JTS/T231-4—2018[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2018.
- [8] 长江航道局.内河通航标准:GB 50139—2014[S].北京:中国计划出版社,2014.
- [9] 陈辉,刘志雄,江耀祖.引航道通航水流条件数值模拟[J].水利水运工程学报,2012(4):13-18.
- [10] 赵家强,于广年.韩江东溪船闸通航水流条件优化试验研究[J].水运工程,2019(10):134-140.
- [11] 吴霜.白石窑下游复杂洲滩引航道口门区通航水流条件及改善措施研究[D].重庆交通大学,2022.
- [12] 谢凌峰,罗敬思.北江航道整治工程及效果分析[J].水运工程,2002(8):49-53.
- [13] 张绪进,程小龙,王云莉.北江白石窑水利枢纽下游引航道通航水力学试验研究[J].水运工程,2014(3):119-124,150.

(本文编辑 赵娟)