



引江补汉工程实施对汉江航道通航条件的影响

张 芹, 郭 敏

(湖北省交通规划设计院股份有限公司, 湖北 武汉 430051)

摘要: 针对引江补汉工程实施后丹江口—黄家港断面最小通航流量减少而引起水位下降的问题, 进行了汉江丹江口—黄家港河段的综合整治工程研究。采用平面二维水流数学模型对工程河段综合整治工程实施前后的航道通航水流条件进行模拟对比分析。结果表明, 实施综合整治工程可有效改善通航水流条件, 解决了因最小通航流量减少、水位下降导致局部河段通航标准降低的难题, 可为南水北调引江补汉工程实施提供技术支持。

关键词: 引江补汉工程; 综合整治工程; 二维水流数学模型; 通航条件

中图分类号: U617

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)06-0107-07

Impact of implementation of Yangtze River Diversion Project on navigation conditions of Hanjiang River channel

ZHANG Qin, GUO Min

(Hubei Provincial Communication Planning and Design Institute Co., Ltd., Wuhan 430051, China)

Abstract: In view of the decrease of water level caused by the decrease of minimum navigable flow at the Danjiangkou to Huangjiagang section after the implementation of the Yangtze River Diversion Project and Hanjiang River Reinforcement Project, the comprehensive regulation project of Danjiangkou to Huangjiagang section of Hanjiang River is studied. A two-dimensional flow mathematical model is used to simulate and compare the navigation flow conditions of the waterway before and after the implementation of the comprehensive regulation project. The results show that the implementation of comprehensive regulation project can effectively improve the navigation water flow conditions, solve the problem of reducing navigation standards in local river sections due to the reduction of minimum navigation flow and water level, and provide technical support for the implementation of the South-to-North Water Diversion Project.

Keywords: Yangtze River Diversion Project and Hanjiang River Reinforcement Project; comprehensive regulation project; two-dimensional mathematical model of water flow; navigation condition

随着南水北调中线一期工程地区用水需求的进一步增长, 国家规划实施南水北调引江补汉工程。该工程实施后, 丹江口水库的最小下泄流量将由原来的 $490 \text{ m}^3/\text{s}$ 减小至 $278 \sim 320 \text{ m}^3/\text{s}$, 减少的水量将从长江引入汉江, 确保汉江黄家港以下断面的最小流量恢复至 $490 \text{ m}^3/\text{s}$ 。届时, 丹江口大坝—黄家港断面的最小通航流量将减少, 为了解决流量减少引起的水位下降问题, 进行了汉江河段的航道综合整治工程设计。众多学者利用二

维数值模拟方法进行工程对航道通航条件的模拟预测分析, 谢玲等^[1]利用数值模拟对引江补汉工程龙潭溪取水口工程对航道通航条件的影响进行模拟分析; 王华等^[2]利用数值模拟对南京建宁西路过江隧道不同方案、不同水文条件下的河床冲淤变化及趋势进行预测研究; 于广年^[3]运用数学模型对黄河上游典型崩岸碍航河段崩岸前后及不同整治方案下水流条件进行分析; 陈明等^[4]运用数学模型对左江山秀船闸改扩建工程引航道通航

收稿日期: 2023-10-18

作者简介: 张芹 (1978—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事航道工程设计。

水流条件进行分析。本文以南水北调引江补汉工程实施为背景，对工程实施前后的汉江航道通航条件进行模拟，分析工程对航道通航条件的影响。

1 工程概况

引江补汉工程多年平均引江水量 39.0 亿 m^3 ，其中向南水北调中线一期工程总干渠补水 24.9 亿 m^3 ，补充引汉济渭水量 5 亿 m^3 ，向汉江中下游补水 6.1 亿 m^3 ，向工程输水线路沿线补水 3 亿 m^3 。

1.1 总体布置

引江补汉工程总体建设项目包括输水总干线工程和丹江口大坝—黄家港河段综合整治工程两部分。输水总干线引水工程进口位于三峡库区的龙潭溪，出口位于丹江口大坝下游约 5 km 处的安乐河口，输水线路总长约 194.8 km，引水流量 170~212 m^3/s 。综合整治工程包括羊皮滩右汊出水渠、航道整治、河道整治等工程。引江补汉工程总体布置见图 1。

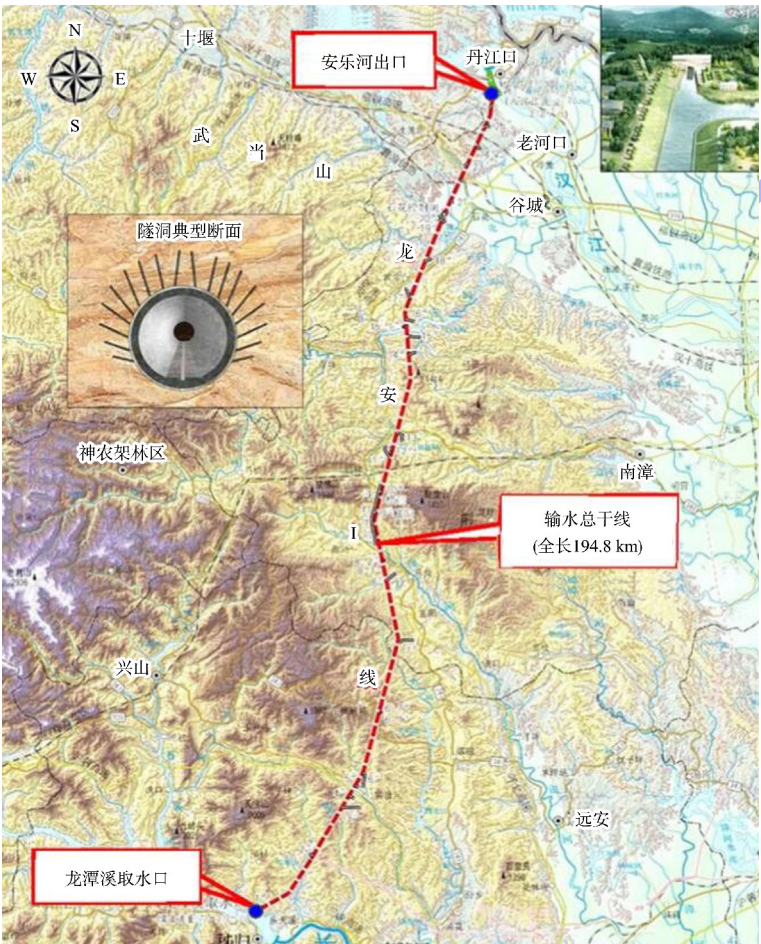


图 1 引江补汉工程总体布置

1.2 出流方案

引江补汉出口出流方案推荐沧浪洲与羊皮滩 2 个出流口，其中沧浪洲出流 80%，出流口距离主航道右边线约 700 m；羊皮滩下口出流 20%，出流口距离主航道右边线约 300 m。

1.3 航道综合整治工程布置方案

航道综合整治遵循固滩护岸、整疏结合、壅高水位、束水归槽等原则，以实现增加航道通航

流量及水深为目的。方案包括：1) 羊皮滩右汊出水渠。疏挖羊皮滩右汊河道，底宽 100.0~160.0 m，底高程 83.5 m；羊皮滩右汊右岸边滩塑造；羊皮滩右汊下出口设置溢流堰，堰顶高程 87.0 m，并在溢流堰顶设置人行通道。2) 航道治理工程。依托步行桥河心岛沿水流方向修建隔流潜堤，长 1 233 m，宽 20~90 m，顶高程 87.5~88.0 m；沧浪洲出水口下沿布置 2 道护底带，护底带左侧 2/3 部分高程

85.5 m, 右侧(沧浪洲出口一侧)1/3 部分高程 86.0 m; 疏浚步行桥附近航槽内、丹江口升船机下引航道口门区, 疏浚底高程 83.8 m。3) 河道整治工程。羊皮滩右缘、头部左缘及尾部等滩形恢

复和湿地营造; 汉江右岸均州大桥上下游 1.15 km 护岸加固。

航道综合整治工程平面布置方案见图 2。

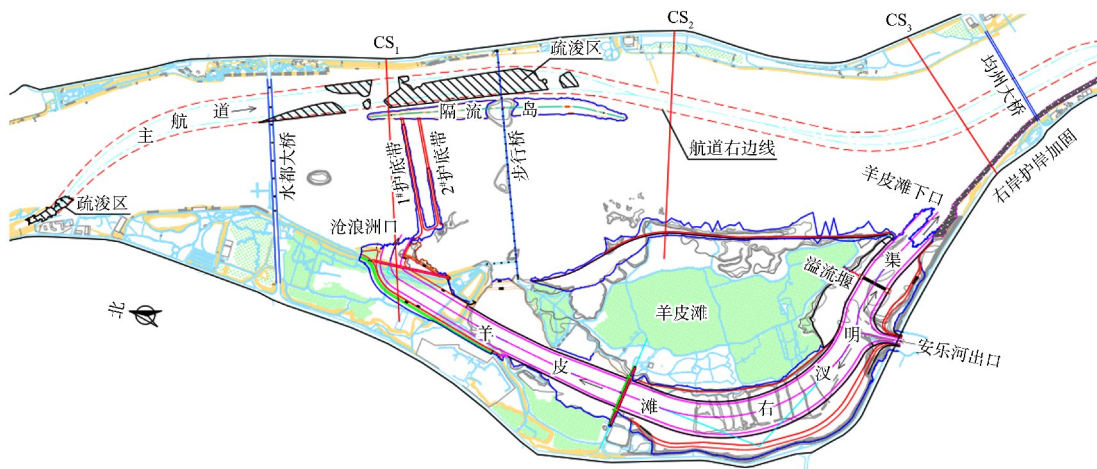


图2 航道综合整治工程平面布置方案

2 平面二维水流数学模型建立

2.1 模型建立

1) 连续方程:

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{1}{C_\xi C_\eta} \left[\frac{\partial (C_\eta H u)}{\partial \xi} + \frac{\partial (C_\xi H v)}{\partial \eta} \right] = 0 \quad (1)$$

2) 运动方程:

$$\frac{\partial (H u)}{\partial t} + \frac{1}{C_\xi C_\eta} \left[\frac{\partial (C_\eta H u u)}{\partial \xi} + \frac{\partial (C_\xi H v u)}{\partial \eta} + H v u \frac{\partial C_\xi}{\partial \eta} - H v^2 \frac{\partial C_\eta}{\partial \xi} \right] = -\frac{g u \sqrt{u^2 + v^2}}{C^2} - \frac{g H \partial Z}{C_\xi \partial \xi} + \frac{1}{C_\xi C_\eta} \cdot \left[\frac{\partial (C_\eta H \sigma_{\xi\xi})}{\partial \xi} + \right. \quad (2)$$

$$\left. \frac{\partial (C_\xi H \sigma_{\eta\xi})}{\partial \eta} + H \sigma_{\xi\eta} \frac{\partial C_\xi}{\partial \eta} - H \sigma_{\eta\eta} \frac{\partial C_\eta}{\partial \xi} \right]$$

$$\frac{\partial (H v)}{\partial t} + \frac{1}{C_\xi C_\eta} \left[\frac{\partial (C_\eta H u v)}{\partial \xi} + \frac{\partial (C_\xi H v v)}{\partial \eta} + H u v \frac{\partial C_\eta}{\partial \xi} - H u^2 \frac{\partial C_\xi}{\partial \eta} \right] = -\frac{g v \sqrt{u^2 + v^2}}{C^2} - \frac{g H \partial Z}{C_\eta \partial \eta} + \frac{1}{C_\xi C_\eta} \cdot \left[\frac{\partial (C_\eta H \sigma_{\xi\eta})}{\partial \xi} + \right. \quad (3)$$

$$\left. \frac{\partial (C_\xi H \sigma_{\eta\eta})}{\partial \eta} + H \sigma_{\eta\xi} \frac{\partial C_\eta}{\partial \xi} - H \sigma_{\xi\xi} \frac{\partial C_\xi}{\partial \eta} \right]$$

$$\frac{\partial (C_\xi H \sigma_{\eta\eta})}{\partial \eta} + H \sigma_{\eta\xi} \frac{\partial C_\eta}{\partial \xi} - H \sigma_{\xi\xi} \frac{\partial C_\xi}{\partial \eta}$$

式中: u 、 v 分别为 ξ 、 η 方向流速分量, Z 为水位, H 为水深, C 为谢才系数, $\sigma_{\xi\xi}$ 、 $\sigma_{\eta\eta}$ 、 $\sigma_{\xi\eta}$ 、 $\sigma_{\eta\xi}$ 为紊动切应力。

3) 悬移质不平衡输移方程:

$$\frac{\partial (H S_i)}{\partial t} + \frac{1}{C_\xi C_\eta} \left[\frac{\partial (C_\eta H u S_i)}{\partial \xi} + \frac{\partial (C_\xi H v S_i)}{\partial \eta} \right] = \frac{1}{C_\xi C_\eta} \cdot \left[\frac{\partial (\varepsilon_\xi C_\eta \frac{\partial (H S_i)}{\partial \xi})}{\partial \xi} + \frac{\partial (\varepsilon_\eta C_\xi \frac{\partial (H S_i)}{\partial \eta})}{\partial \eta} \right] + \alpha_i \omega_i (S_i^* - S_i) \quad (4)$$

式中: α_i 为泥沙的含沙量恢复饱和系数, 淤积时取 0.25, 冲刷时取 1.0; ω_i 为第 i 组泥沙的沉速; S_i 为分组粒径含沙量; S_i^* 为分组粒径挟沙力; ε_ξ 、 ε_η 分别为坐标系 ξ 、 η 方向的泥沙扩散系数; σ_s 为常数, $\sigma_s = 1.0$ 。

4) 推移质不平衡输移方程:

$$\frac{\partial (h S_{bL})}{\partial t} + \frac{1}{C_\xi C_\eta} \left[\frac{\partial (C_\eta H u S_{bL})}{\partial \xi} + \frac{\partial (C_\xi H v S_{bL})}{\partial \eta} \right] = \frac{1}{C_\xi C_\eta} \left[\frac{\partial (\varepsilon_\xi C_\eta \frac{\partial (H S_{bL})}{\partial \xi})}{\partial \xi} + \frac{\partial (\varepsilon_\eta C_\xi \frac{\partial (H S_{bL})}{\partial \eta})}{\partial \eta} \right] + \alpha_{bL} \omega_{bL} (S_{bL}^* - S_{bL}) \quad (5)$$

式中: S_{bL}^* 为第 L 组推移质的挟沙能力, S_{bL} 为床面推移层的含沙浓度, α_{bL} 为第 L 组推移质泥沙的恢复饱和系数, $\alpha_{bL} = 1$; ω_{bL} 为推移质的沉速; σ_b 为常数, $\sigma_b = 1.0$ 。

5) 河床变形方程:

$$\rho_{0g} \frac{\partial Z_b}{\partial t} + \frac{1}{C_\xi} \frac{\partial g_{b\xi}}{\partial \xi} + \frac{1}{C_\eta} \frac{\partial g_{b\eta}}{\partial \eta} = \sum_{i=1}^n \alpha_i \omega_i (S_i - S_i^*) \quad (6)$$

式中： $g_{b\bar{\epsilon}}$ 、 $g_{b\eta}$ 为推移质输沙率， γ_0 为淤积物干密度， Z_b 为河底高程。

采用控制体积法离散方程，并利用 SIMPLER 计算程式求解耦合方程。

2.2 模型验证

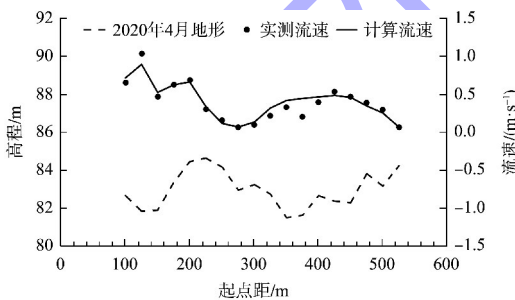
选取 2020 年 4 月实测流量为 $740\text{ m}^3/\text{s}$ 时的工程河段实测水面线、汉道分流比、断面流速分布等进行验证。通过水面线验证(表 1)可知，实测水位与计算水位间的误差在允许范围内，最大差值为 0.04 m ；由汉道分流比验证(表 2)可知，实测与计算差值在 ± 0.1 以内；由断面流速分布验证(图 3)可知，除个别测点外，总体上吻合良好。

表 1 水面线验证

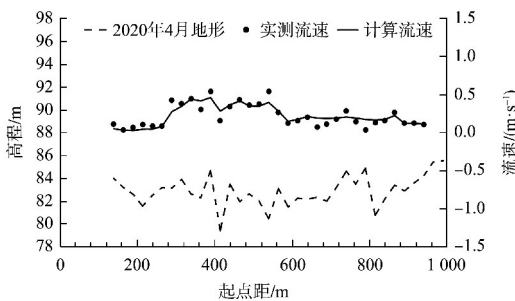
测点位置	实测值/m	计算值/m	差值/m
王家营(三)	87.12	87.14	0.02
2-1#右	86.88	86.92	0.04
2-2#右	86.75	86.78	0.03
黄家港(二)	86.72	86.76	0.04

表 2 汉道分流比验证

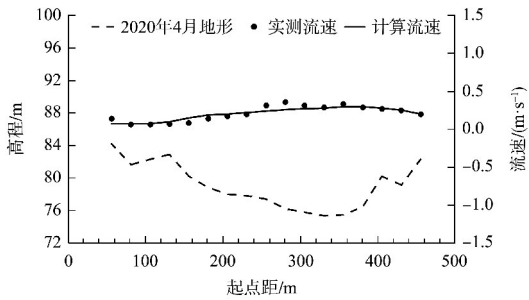
位置	实测分流比/%	计算分流比/%	差值/%
羊皮滩右汉	1.0	1.1	0.1
羊皮滩左汉	99.0	98.9	-0.1



a) CS₁水文断面



b) CS₂水文断面



c) CS₃水文断面

图 3 断面流速分布验证

3 引江补汉综合整治工程对航道通航条件的影响分析

3.1 计算条件

根据引江补汉工程运行原则，选取对航道通航最不利的计算工况，见表 3。考虑到本河段属于山区砂卵石河段，工程前、后的糙率变化较小，故工程后糙率系数取与工程前一致，即 $0.029 \sim 0.045$ 。但由于丹江口水库下泄水流冲刷河床的影响，坝下河段河床仍存在可能粗化的趋势。

表 3 计算工况

时段		丹江口下泄 流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	安乐河补水 流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	王甫洲坝前 水位/m
	枯水期			
	工程前	490	0	85.48
	工程后	278	212	85.48

3.2 影响分析

3.2.1 对最小通航流量的影响

引江补汉工程实施前，丹江口水库最小下泄流量为 $490\text{ m}^3/\text{s}$ ，其中步行桥所在河段左侧航道内的最小通航流量为 $318\text{ m}^3/\text{s}$ 。引江补汉工程实施后，丹江口坝下一沧浪洲口段的最小通航流量为 $278\text{ m}^3/\text{s}$ ；沧浪洲口—羊皮滩下口段的最小通航流量为 $321\text{ m}^3/\text{s}$ ；羊皮滩下口以下河段最小通航流量为 $490\text{ m}^3/\text{s}$ 。

由此可知，引江补汉工程实施后，对最小通航流量的影响主要位于丹江口—羊皮滩下口段，该段通航流量总体减小；羊皮滩下口以下河段的最小通航流量与工程前一致。

3.2.2 对水位的影响

引江补汉工程实施前，丹江口升船机下引航道口门—黄家港断面的设计水位为 $86.10 \sim 86.64\text{ m}$ 。引江补汉工程实施后，该河段水位总体呈下降变

化趋势,且下降幅度从上至下沿程减小,最大水位降幅位于丹江口升船机下引航道口门,下降值为0.06 m。总体来说,工程实施对工程河段的水位影响较小。引江补汉工程前后工程河段沿程水位及变化见表4。

表4 引江补汉工程前后工程河段沿程水位及变化

测点	断面位置	航道里程/km	工程前水位/m	工程后水位/m	水位变化值/m
1	丹江口升船机下引航道口门	0	86.64	86.58	-0.06
2	-	0.6	86.64	86.58	-0.06
3	水都大桥	1.2	86.62	86.57	-0.05
4	-	1.8	86.50	86.49	-0.01
5	步行桥	2.3	86.28	86.31	0.03
6	-	2.9	86.20	86.19	-0.01
7	羊皮滩	3.6	86.15	86.14	-0.01
8	-	4.3	86.12	86.12	0
9	黄家港	5.0	86.10	86.10	0

3.2.3 对航宽、水深的影响

引江补汉工程实施前,丹江口下引航道出口处不满足规划Ⅲ级航道2.4 m水深要求^[5-6],2.4 m深槽中断长140 m;水都大桥至步行桥段主航道内2.4 m深槽虽上下贯通,但约有800 m长范围不满足规划Ⅲ级航道的90 m航宽要求,最小宽度仅40 m,位于步行桥下游约200 m处,该处设计航槽内最小水深约0.8 m。引江补汉工程实施后,原水深、航宽不足的区域水深、航宽均能满足规划Ⅲ级航道的尺度要求,其中满足2.4 m水深的最小航宽达92 m。工程前后工程河段的2.4 m深槽分布见图4。但随着运行时间的推移,丹江口升船机下引航道口门及桥区疏浚区域泥沙有所回淤,尤其是丹江口升船机下引航道口门的2.4 m航深线萎缩下移。

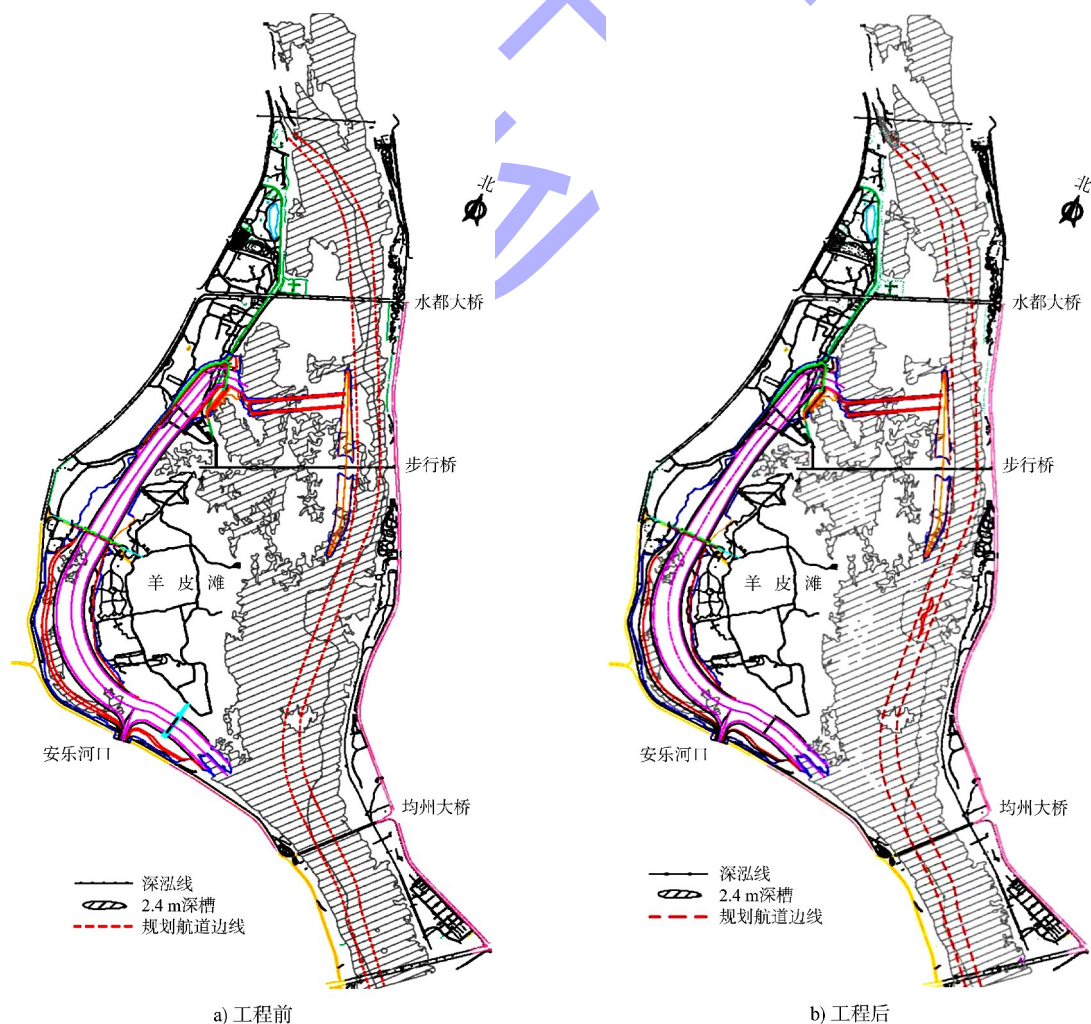


图4 工程前后工程河段2.4 m深槽分布

3.2.4 对流速、流向的影响

引江补汉工程实施前,丹江口升船机下引航道口门—水都大桥段规划航道水域范围内的水流流速在 $0.15 \sim 0.55 \text{ m/s}$; 水都大桥—步行桥段规划航道水域范围内的水流流速在 $0.31 \sim 1.38 \text{ m/s}$, 水流流向与航道轴线的夹角最大为 35° , 最大横向流速为 0.47 m/s ; 步行桥—黄家港段规划航道水域范围内的水流流速在 $0.12 \sim 1.09 \text{ m/s}$ 。工程前工程河段流场见图 5。

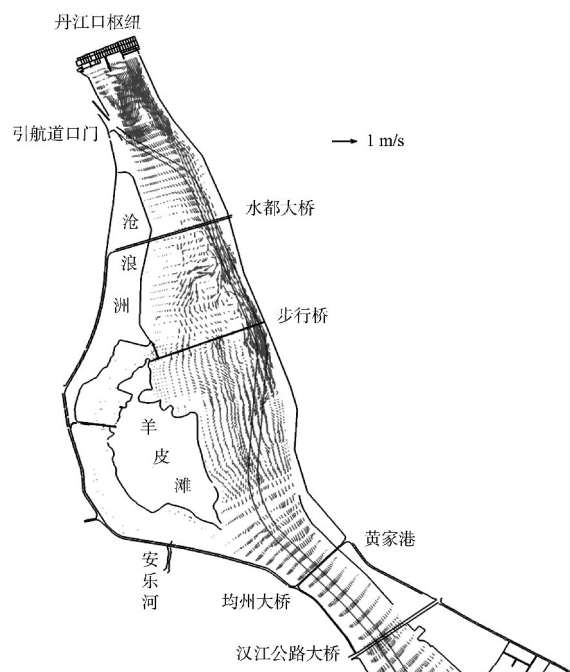


图 5 工程前工程河段流场

引江补汉工程实施后,丹江口升船机下引航道口门—水都大桥段的规划航道水域范围内的水流流速普遍小于 0.38 m/s , 丹江口升船机下引航道口门及连接段最大流速约 0.15 m/s , 水都大桥附近最大流速约 0.38 m/s ; 水都大桥—步行桥段的最大流速约 1.02 m/s , 水流整体较为平顺, 水流流向与航道轴线的最大夹角为 12° , 最大横向流速为 0.15 m/s ; 步行桥—隔流岛尾部段规划航道水域范围内的水流流速相对较大, 在 $0.40 \sim 1.01 \text{ m/s}$, 水流流向与航道轴线的最大夹角达 30° , 最大横向流速为 0.28 m/s ; 隔流岛尾部—黄家港段规划航道水域范围内的水流流速基本在 0.40 m/s 以内,

水流流向与航道轴线夹角较小。

规划航道外侧的隔流岛头部因沧浪洲口出流部分绕过隔流岛头部进入主航道, 在隔流岛头部将产生横流, 根据模拟计算, 在隔流岛头部上游约 60 m 范围内产生较大横流, 局部横向最大流速达 0.26 m/s (位于规划航道外侧约 70 m)。

从水流流向变化情况看, 工程前后工程河段规划航道范围内的流向变化较小。流向变化较大处主要位于沧浪洲出口附近, 工程前水流流向自上游流向下游, 工程后形成自右向左的水流。工程后沧浪洲出口河段局部流场见图 6。

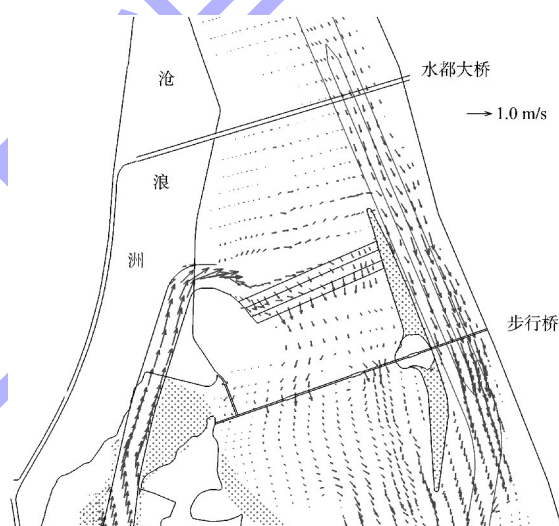


图 6 工程后沧浪洲出口河段局部流场

3.2.5 对河床演变的影响

以工程河段 2020 年 4 月实测地形作为初始地形, 典型年选取丹江口大坝加高后的 2011 年 (大水大沙年); 系列年选取 2011—2019 年共 9 a 的连续水沙过程, 其中既包含 2011 大水大沙年, 也有 2017 中水中沙年、2019 中水小沙年, 其余均为小水小沙年。

1) 典型年的河床冲淤变化。引江补汉工程实施后, 从典型年末主航道冲淤变化来看, 丹江口升船机下引航道口门—水都大桥段航槽微淤, 平均淤积幅度 0.5 m 左右; 水都大桥—步行桥段航槽以冲刷为主, 冲刷幅度一般为 $1.0 \sim 1.5 \text{ m}$; 步行桥—黄家港段航槽有冲有淤, 淤积比较明显的

区域基本在原采砂坑附近,最大淤积幅度 1.5 m 左右。

从典型年末羊皮滩右汉冲淤变化来看,由于引江补汉工程实施后右汉过流量显著增加,整个羊皮滩右汉普遍处于冲刷状态,平均冲刷幅度为 0.5~1.0 m,由于流速减小,右汉冲起的床沙在沧浪洲口段将在护底前产生淤积。

从典型年末羊皮滩滩体冲淤变化来看,羊皮滩滩体两侧经过抛填和守护后,呈现微淤的趋势,淤积幅度在 0.5m 以内,可见引江补汉工程有利于促进羊皮滩滩体的稳定。

2) 系列年的河床冲淤变化。引江补汉工程实施后的系列年第 1 年末,丹江口升船机下引航道口门浅区水深达到 2.45 m,步行桥浅区段 2.4 m 水深对应的最小航宽可达 92 m,2 个浅区及其余航段航道条件满足规划Ⅲ级航道尺度要求。

系列年第 1 年之后均为小水小沙年或中水中沙年,河床冲淤变化较小,全河段航道条件变化不大,仅丹江口升船机下引航道口门在系列年第 9 年末相对于第 1 年末淤积了 0.22 m,淤积后水深 2.23 m,略有不足,可进行适当疏浚和维护。

总体而言,引江补汉工程实施后河床冲淤变化主要集中在工程区附近,且变化幅度有限,工程实施对整体河势和航槽的稳定性不会产生明显的不利影响。

4 结论

1) 利用 2016 年 12 月、2020 年 4 月实测地形和水位、断面流速观测资料,结合工程河段的水文泥沙实测资料对建立的二维水流数学模型

进行了率定和验证,结果良好,符合相关规定要求。

2) 选取对通航条件最不利的枯水期丹江口水库最小下泄流量由现状 490 m³/s 减少为 278 m³/s、引江补汉安乐河补水 212 m³/s 的工况进行工程实施前后的通航水流条件分析,以及河床演变的趋势预测模拟分析,结果表明,工程前后工程河段的航道条件有一定变化,但幅度较小,且工程后的航道条件能够满足规划的Ⅲ级航道尺度要求,且工程实施不会改变工程河段的总体河势变化。

3) 工程实施后,丹江口水库最小下泄流量虽有所减少,但随着出口溢流堰的壅水抬高、隔流岛束水归槽、护底带挑流等措施的实施,达到了增加主航道通航流量、抬高水位的目的,从而使工程前后的水位变化较小。

参考文献:

- [1] 谢玲,刘明月.引江补汉工程龙潭溪取水口工程对航道通航条件的影响研究[J].中国水运(航道科技),2021(3):31-34.
- [2] 王华,曹双,于洋,等.南京河段拟建过江隧道河段河床冲刷数值模拟[J].水运工程,2019(11):67-73.
- [3] 于广年.黄河上游典型崩岸碍航河段航道整治[J].水运工程,2021(11):111-115,158.
- [4] 陈明,李初民,王多银,等.左江山秀船闸改扩建工程引航道通航水流条件[J].水运工程,2021(11):66-73.
- [5] 湖北省发展与改革委员会,湖北省交通厅.湖北省内河航运发展规划(2002—2020)[R].武汉:湖北省人民政府,2005.
- [6] 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.

(本文编辑 王传瑜)