

· 航道及通航建筑物 ·



茅坪河入汇平陆运河汇流方案优化^{*}

袁 浩¹, 夏春华², 刁 伟³

(1. 重庆交通大学, 西南水利水运工程科学研究院, 重庆 400010;
2. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400010; 3. 重庆西科水运工程咨询有限公司, 重庆 400074)

摘要: 天然条件下平陆运河支流茅坪河入汇对运河通航条件有明显影响, 汇流区域存在严重的横流、回流等不利水力现象, 影响通航。针对茅坪河入汇平陆运河汇流区域的通航条件问题, 采用三维数值模拟对不同流量组合下汇流区域的通航水流条件进行研究。结合设计整治方案在通航条件方面存在的不足, 在调顺支流来水、拓宽汇流断面两个方面进行优化。结果表明, 优化后的整治方案效果良好, 改善了运河通航条件, 横向流速、回流流速等水力指标均能达到相应标准的要求。

关键词: 平陆运河; 支流入汇; 横向流速; 数值模拟

中图分类号: U617

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)12-0075-07

Confluence scheme optimization of Maoping River into Pinglu Canal

YUAN Hao¹, XIA Chunhua², DIAO Wei³

(1. Southwest Research Institute for Hydraulic and Water Transport Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400010, China;
2. The College of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400010, China;
3. Chongqing Xike Consultation for Water Transport Co., Ltd., Chongqing 400074, China)

Abstract: The confluence of the Maoping River as a tributary of the Pinglu Canal in natural conditions has a significant influence on the navigation conditions of the canal, and there are severe adverse hydraulic phenomena such as lateral flow and backflow in the confluence area, which affects navigation. Aiming at the navigation conditions of the confluence area of the Maoping River into the Pinglu Canal, this paper adopts three-dimensional numerical simulations to study the navigable flow conditions in this area under different flow combinations. Meanwhile, by combining the shortcomings of the design scheme in navigable conditions, it analyzes two aspects of incoming tributary water adjustment and confluence section widening. The results show that the optimized scheme yields sound results and improves navigable conditions of the canal, and the hydraulic indicators such as lateral flow velocity and return flow velocity can both meet the requirements of the relevant standards.

Keywords: Pinglu Canal; tributary confluence; lateral flow velocity; numerical simulation

天然河流中干支流交汇现象普遍存在, 交汇区域地形条件及水流运动复杂。长期以来, 众多学者基于汇流区水流的运动特点, 研究交汇角、汇流比、入汇区河床高程等因素对入汇区水流运动的影响。刘同宦等^[1-2]通过多组水槽试验对不同汇流比的水流条件下支流入汇区域及其附近的水

面比降变化和时均流速分布特征进行研究, 发现汇流区域流速分布受汇流比和水流形态的双重影响。陈焰明等^[3]根据原型观测数据分析和二维数值模拟计算研究嘉陵江汇流比变化对长江干流河段水流特性的影响规律, 发现随着汇流比增大, 河段水动力轴线呈向右摆动趋势; 在同汇流比下, 干流

收稿日期: 2023-03-21

*基金项目: 国家自然科学基金项目(52109076); 重庆市自然科学基金项目(cstc2021jcyj-msxmX1175)

作者简介: 袁浩(1989—), 男, 博士, 高级工程师, 从事高速水力学和通航水力学研究。

来流越大, 汇流区域受支流影响越小。张琦等^[4]采用数值模拟方法研究在大型河流交汇处不同形态小型支流的水位、流量、紊动能耗散率和床面剪切率等水流特性, 发现支流流量和支流上游河道走向是引起水流特性改变的重要因素。甘富万等^[5]利用Copula 函数-蒙特卡罗模拟方法结合珠江流域西江桂平枢纽对支流入汇口处水利工程防洪设计水位进行研究, 充分考虑干、支流洪水及其与水利工程行洪特性的耦合关系, 得到的防洪设计水位唯一且保证达到防洪标准的要求。王协康等^[6]、周苏芬等^[7]通过数值模拟计算对嘉陵江与长江交汇区在不同干支来流条件下水位、水面比降和床面切应力的变化特性进行研究, 发现支流对主流顶托作用随汇流比的增大而增大, 上游水面比降和床面切应力随汇流比的增大而减小。周华君等^[8]在原型实测资料和模型试验的基础上, 研究干支流汇流比对两江交汇点位置、回流区宽度、合流掺汇区水面坡降的影响。胡朝阳等^[9]采用二维数值模拟分析不同洪水工况下乌龙江河道流量、水位及流速分布特征, 研究大樟溪入汇对乌龙江洪水动力的影响。

许多学者的研究表明, 支流和干流在交汇区相互顶托, 产生壅水、回流、绕流等不良流态, 流场混乱。同时支流入汇还会增大主流中的横向流速, 形成回流区, 严重影响航运安全。在建的平陆运河工程有多条支流入汇, 部分支流入汇口区域内横向流速较大、回流区发育, 会对航道造成不良影响, 影响航运安全。工程拟对部分支流口进行整治, 使运河流速符合 JTS 180-2—2011《运河通航标准》^[10](简称“《标准》”)的要求。本文对典型支流茅坪河入汇口建立三维水动力学模型, 模拟整治前后汇流区域的流速流场分布, 从而对整治效果做出评价。

1 整治方案

平陆运河位于广西壮族自治区, 是西部陆海新通道骨干工程。该运河起于南宁市横州市西津库区平塘江口, 跨沙坪河与钦江支流旧州江分水

岭, 经钦州市灵山县陆屋镇沿钦江进入北部湾, 全长约 140 km, 按内河 I 级航道标准建设, 可通航 5 000 吨级船舶。由于平陆运河主要通过下挖、疏浚、扩宽原有河道形成, 在各支流口交汇处均有不同程度挖深, 运河修建后原河道沿线支流口与运河底存在较大高差, 且部分干支流汇流区域横向流速和横流范围较大。因此, 各支流口与运河干流的衔接及布置是直接关系运河通航水流条件的重要问题。支流茅坪河入汇口位于平陆运河青年枢纽以上 6 km 处, 于钦江右岸汇入, 汇入角 62°, 支流底高程高出航道底高程 2.4 m。研究河段河势见图 1。平陆运河青年枢纽的上、下游最高通航水位分别为 9.32、6.40 m, 上、下游最低通航水位分别为 8.00、-1.62 m, 正常蓄水位 8.70 m, 航道底高程 1.70 m。天然条件下, 该支流入汇口区域航道内最大横向流速为 0.47 m/s, 大于《标准》规定的 0.3 m/s。工程拟将茅坪河改道于原入汇口下游入汇, 调整支流入汇角度并逐步扩宽支流入汇口, 将支流河床自原泥面高程 8.0 m 放坡至航道底部高程 1.7 m, 在入汇口处设置消力池进一步消能。

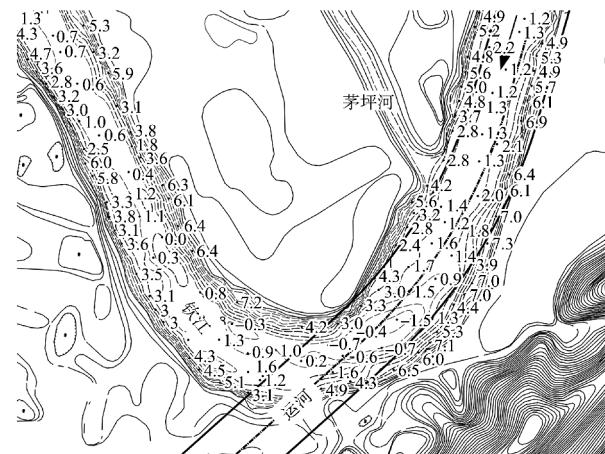


图 1 研究河段河势 (高程: m)

在前期研究中发现, 设计方案中茅坪河入汇口上游衔接段的挑流将水流引导至河心偏右, 于入汇口下游集中斜冲进入运河, 造成了局部横向流速超标。因此本文在原设计的基础上进行优化: 将治理河道入口衔接段下移 80 m, 布置于河宽较宽处; 于衔接段两侧建设长 50 m 喇叭口导水挡

墙, 使水流能够平顺过渡至支流河道并调顺流向。调整后的入汇口布置见图 2。整治后茅坪河入汇口也是运河与原河道分离的岔口, 工程规划基于原河道打造生态小镇旅游区, 对原河道维持现状不进行封堵, 保持同运河正常蓄水位 8.70 m。

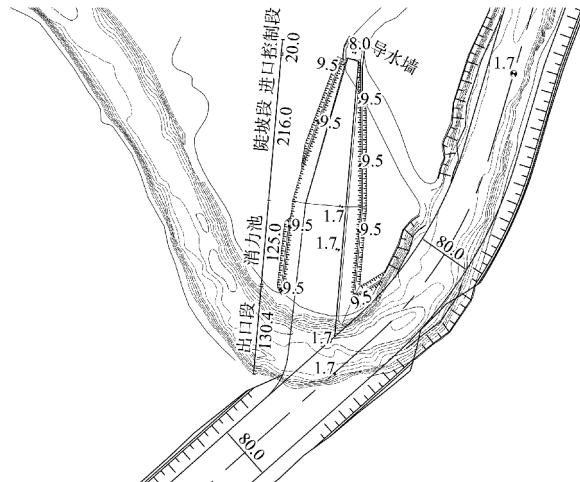


图 2 茅坪河入汇口处理的平面布置 (单位: m)

2 数值模拟

2.1 控制方程

本模型采用的控制方程包括连续性方程、动量方程、紊动能 k 方程和紊动能耗散率 ε 方程, 流体计算边界通过流体体积函数确定。

连续性方程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程为:

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial p}{\partial x_j} \quad (2)$$

k 方程为:

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + G - \rho \varepsilon \quad (3)$$

ε 方程为:

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{\varepsilon 1} G \frac{\varepsilon}{k} - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

式中: t 为时间, s ; x_i 和 x_j 分别为 i 和 j 方向上的坐标; u_i 和 u_j 分别为流体时均流速在 i 和 j 方向上的分量; ρ 为流体密度, kg/m^3 ; μ 为水流黏性系

数; P 为压力, Pa ; μ_t 为紊流黏性系数; σ_k 和 σ_ε 分别为 k 和 ε 所对应的紊流普朗特数, 均取 1.39; G 为平均速度梯度引起的紊动能产生项; $C_{\varepsilon 1}$ 和 $C_{\varepsilon 2}$ 为经验常数, 分别取 1.44 和 1.68。

2.2 模型构建

三维模型根据工程所处河段河势及 2021 年 9 月实测的 1:2 000 航道水深图建立, 计算模型起于入汇口支流上游 0.5 km、运河上游 1.2 km, 止于运河下游 1.2 km。正方体网格边长为 2 m, 网格总数为 439.96 万个。模型的边界条件由进口边界、出口边界和固体壁面边界组成。支流概化模型及计算边界条件见图 3。

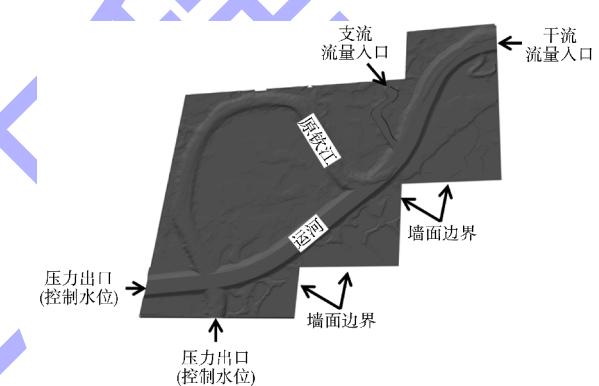


图 3 支流概化模型及边界条件

根据运河运行过程中可能遇到的洪水情况和可研阶段的工程设计, 从实际情况和对通航条件最不利角度出发, 本文选取干流流量 52、810、1 740 m^3/s , 以及支流流量 132、180、230 m^3/s 进行组合, 通过数值模拟探究整治工作对入汇口区域流速流场分布的优化效果, 工况见表 1。

表 1 数值模拟工况

工况	茅坪河流量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	运河流量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	流量类型
1	230	1 740	支流 20 a 一遇洪水 + 干流 5 a 一遇洪水
2	132	810	支流 5 a 一遇洪水 + 干流 2 a 一遇洪水
3	180	810	支流 10 a 一遇洪水 + 干流 2 a 一遇洪水
4	132	52	支流 5 a 一遇洪水 + 干流基流

3 数值模拟结果及分析

3.1 数值模拟可靠性验证

由于三维水流模型的边界条件主要由二维模型计算结果以及设计洪水工况提供,故采用二维模型对三维水流模型进行验证,计算工况为:支流 20 a 一遇洪水, $Q=230 \text{ m}^3/\text{s}$; 干流运河 5 a 一遇洪水, $Q=1740 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

三维和二维模型计算运河中轴线水位和流速结果见表 2 和图 4。模型出口采用的控制水位是青年枢纽正常蓄水位叠加 5 a 一遇洪水流量下的水位,为 9.63 m。三维与二维模型的水位误差最大为 1.13%, 流速误差最大为 4.98%, 总体上误差较小,说明三维数学模型精度较高,可满足本文数模计算精度的要求。

表 2 三维和二维数值模拟计算水位对比

数值模拟	水位/m					出口水位/m
	距入口 500 m	距入口 1 000 m	距入口 1 500 m	距入口 2 000 m	距入口 2 500 m	
三维	9.83	9.72	9.71	9.71	9.63	9.63
二维	9.90	9.83	9.73	9.64	9.63	9.63

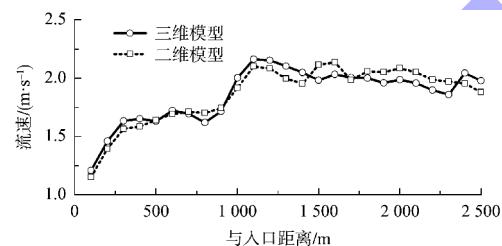


图 4 三维和二维模型计算运河中轴线流速对比

3.2 模拟结果分析

在对茅坪河入汇口进行整治前, 支流来水沿原茅坪河河道汇入, 入汇角 62°。模拟所得整治前汇流区域表面流速分布如图 5、6 所示。由于入汇角较大, 支流茅坪河来水斜冲进入运河, 对汇流区域流速流场影响较大。横向流速于入汇口上游 50~100 m 处即出现明显增大, 至入汇口下游 50 m 处达到最大值。在模拟干流 20 a 一遇洪水+支流 5 a 一遇洪水的工况 1 中, 干流入汇前流速约 1.5 m/s, 茅坪河入汇前流速约 0.8 m/s。由于汇流比较小,

干流流速远大于支流流速, 支流来水汇入主流受阻, 集中于主流右岸流下。此流量组合下入汇后运河内水深约 9.6 m, 高于钦江原河道保持的水深 8.7 m, 部分水流经钦江原河道流下, 由此导致了运河内纵向流速先增后减的现象。入汇区域内最大横向流速出现在入汇口下游 50 m、河心偏右处, 为 0.33 m/s, 超过了《标准》提出的“横向流速不超过 0.3 m/s”的要求。

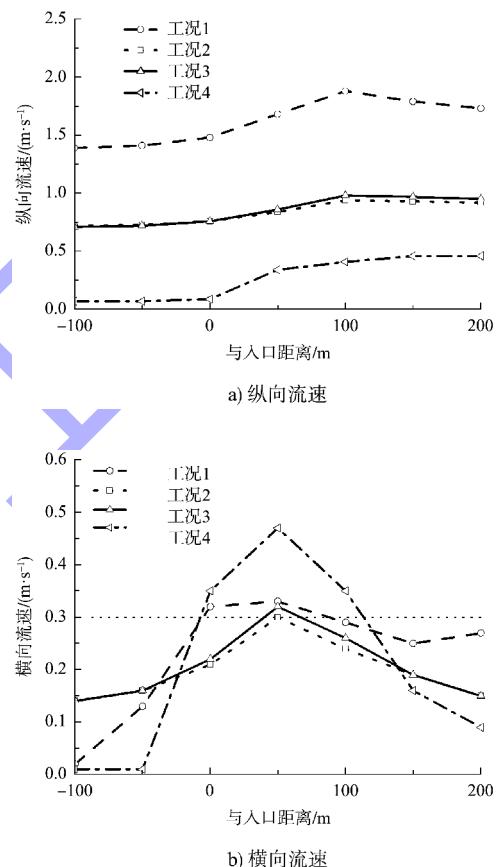
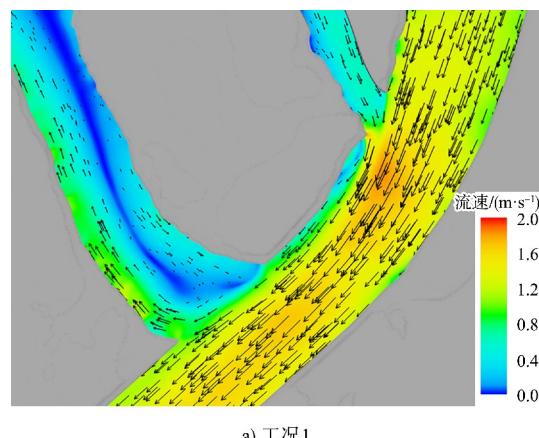


图 5 整治前汇流区域最大纵向、横向流速



a) 工况1

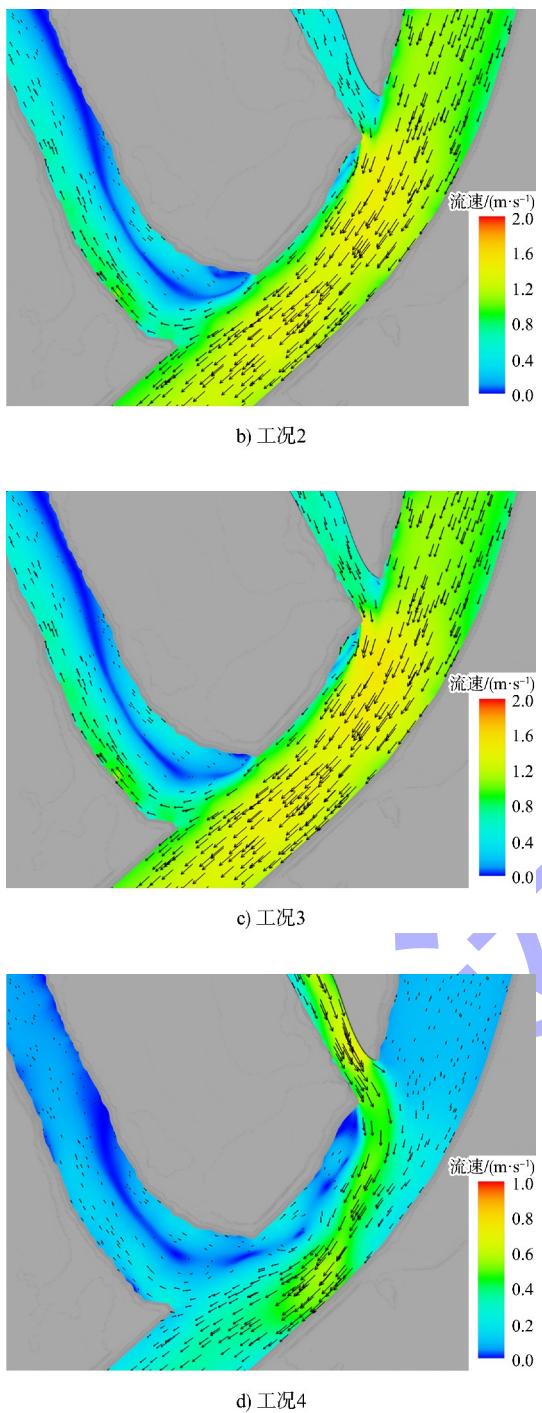


图 6 整治前汇流区域表面流速分布

工况 2~4 中, 随着汇流比增大, 支流入汇对运河流态扰动明显。工况 2 和 3 中入汇口区域最大横向流速均出现在入汇口下游 50 m 处, 分别为 0.32 和 0.30 m/s, 超过了《标准》提出的横向流速要求, 但超标幅度不大。汇流比最大的工况 4 中, 干流在基流流量下基本为静水状态, 支流茅坪河入汇前流速约为 0.5 m/s。由于干流流量小于支流

流量, 支流的水动力对汇流区域的影响大于干流的水动力对汇流区域的影响, 支流对干流造成强烈的挤压, 汇合后主流偏向左岸流下。在支流流速的影响下, 汇流区域及下游形成一个较大的高流速区, 该高流速区由运河右岸逐渐转移至左岸, 使下游运河内纵向流速增大至 0.40 m/s, 最大横向流速达到了 0.47 m/s, 超标横流范围长 110 m、宽 35 m, 无法满足《标准》规定的横向流速要求。

由于在工况 4 中的流量组合下运河受支流影响最大, 因此选取工况 4 入汇口下游断面分析其断面流速流场分布, 如图 7 所示。可以看出, 支流来水集中于河心偏左流下, 于断面左侧形成高流速带。断面右侧分离区内存在低流速带, 区内水流为逆主流方向, 形成回流现象。高流速带与低流速带分界线在运河航道内, 二者较大的流速差和相反的水流方向会对通航造成不利影响。

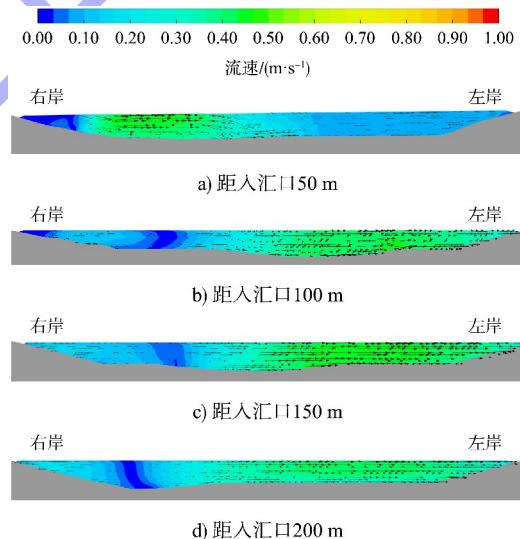


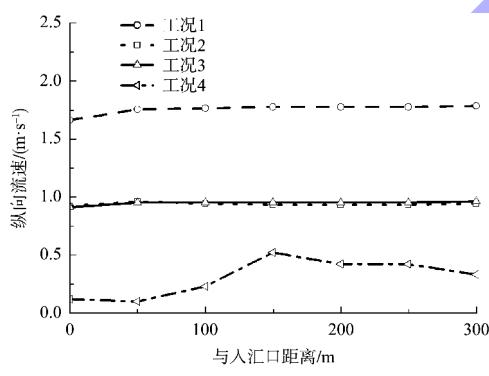
图 7 整治前工况 4 入汇口下游各断面流速分布

天然条件下支流茅坪河大角度入汇, 由于流线在交汇处出现了较大的弯曲, 支流受附壁效应和主流挤压的影响向运河左岸弯曲, 在 4 个工况中均于入汇口下游右岸边壁处形成了回流区。工况 1~3 中干流流量大于支流流量, 干流的水动力在汇流区域内仍占据主导作用, 虽然回流流速最大达到了 0.8 m/s, 超过了《标准》提出的“回流流速不超过 0.4 m/s”的要求, 但回流区位于运河边

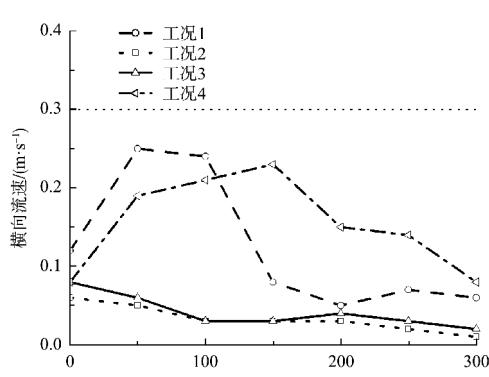
壁处且范围不大。工况 4 中虽然产生了较大范围的回流区，但回流流速较小，符合《标准》提出的回流速度要求。

超标横向流速和回流流速会使船舶偏离预定航线，有发生甩尾、碰撞引航建筑物和过往船舶的风险^[11]，因而对其进行整治是有必要的。

对支流入汇口整治后，入汇口断面扩大，河道宽度和深度均显著增加，且支流入汇角减小至 40°，支流水流入汇更为平顺。整治后汇流区域表面流速分布如图 8、9 所示。工况 1 中，支流茅坪河入汇受阻，支流来水经钦江原河道流下，支流对主流流速流场分布影响很小，汇流区域最大横向流速为 0.25 m/s。由于汛期运河流量较大，入汇前运河内纵向流速已达到 1.67 m/s，由整治后茅坪河入汇引起的纵向流速增幅约 0.10 m/s，支流入汇对纵向流速影响很小，不存在通航条件的明显恶化。

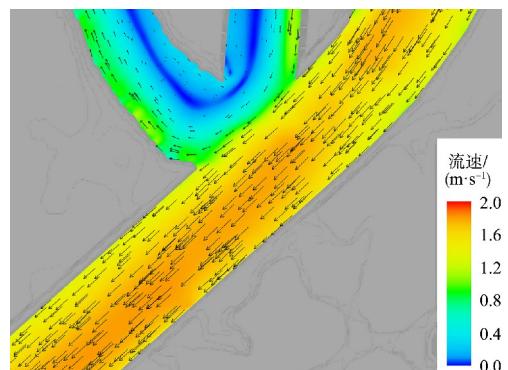


a) 纵向流速

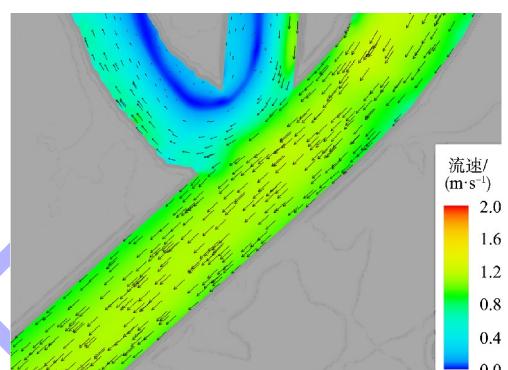


b) 横向流速

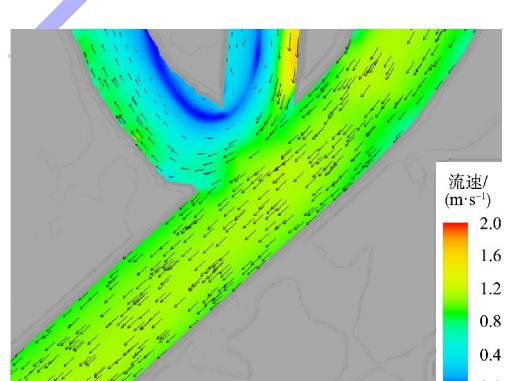
图 8 整治后汇流区域最大纵向、横向流速



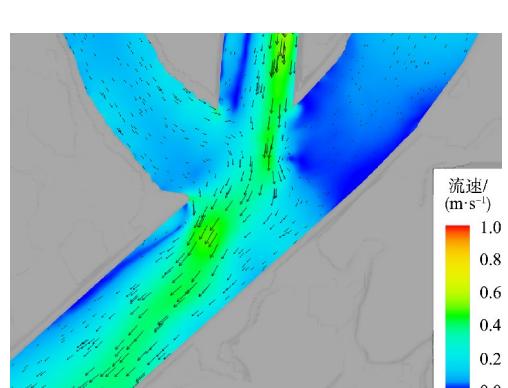
a) 工况1



b) 工况2



c) 工况3



d) 工况4

图 9 整治后各工况汇流区域流速分布

工况 2、3 中, 部分支流来水仍经钦江原河道流下, 运河向钦江原河道的右向分流与支流的左向入汇相抵消, 运河内纵向流速和横向流速变化幅度不大。汇流比最大的工况 4 中, 支流的水动力对汇流区域的影响大于干流的水动力对汇流区域的影响。但由于整治工作使茅坪河入汇口过流面积增大, 支流水流能够较为平顺地汇入运河, 且衔接段两侧建设的喇叭口导水挡墙使水流能够平顺过渡至支流河道并调顺流向, 下泄洪水能够在河口全断面充分扩散、均匀出流, 入汇口下游水流流态较整治前有明显改善。支流入汇带来的高流速区内流速随水流扩散迅速衰减, 入汇口下游各断面上流速分布较整治前更为均匀, 如图 10 所示。

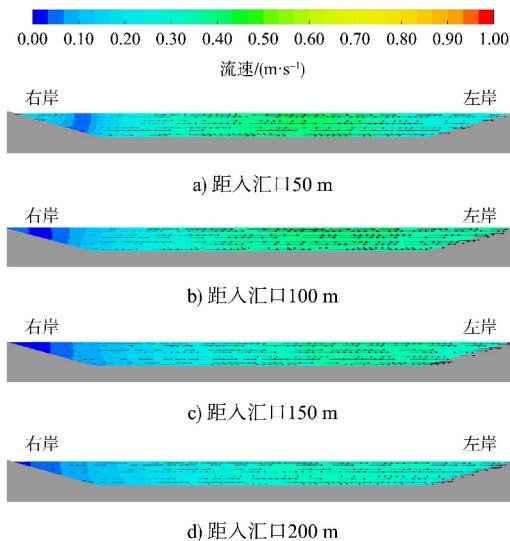


图 10 整治后工况 4 各断面水深流速分布

采用优化方案对支流入汇口进行整治后, 整体上支流入汇对运河通航水流条件影响有限, 4 个工况中出现的最大横向流速由 0.47 m/s 减小至 0.25 m/s , 仅在工况 4 中出现了流速较小、范围较小的回流区。整治后运河内横向、回流流速均符合《标准》要求。

4 结论

1) 天然条件下支流茅坪河入汇平陆运河会造成运河航道内横向流速超标、回流区发育且航道

内流速分布不均, 其原因是茅坪河入汇角度较大, 水流大角度斜冲进入运河。

- 2) 依优化方案对入汇口整治后, 支流茅坪河与运河衔接顺畅, 支流来水进入运河内得以迅速扩散, 支流入汇对运河通航条件的影响大幅减小。
- 3) 在模拟较大洪水流量组合的工况 1 中, 运河航道内纵向流速超过《标准》提出的“不宜大于 1 m/s ”要求, 但该情况的出现是由于运河内洪水引起的, 实际上该工况流量组合下支流茅坪河入汇对运河航道内纵向流速变化影响有限。

参考文献:

- [1] 刘同宦, 郭炜, 詹磊. 90°支流入汇区域时均流速分布特征试验研究[J]. 水科学进展, 2009, 20(4): 485-489.
- [2] 刘同宦, 郭炜, 詹磊, 等. 主支汇流比对交汇区域水流脉动特性影响试验[J]. 水利水电科技进展, 2009, 29(3): 6-8, 40.
- [3] 陈焰明, 吴蔚. 嘉陵江入汇对长江干流水流特性的影响研究[J]. 水利水电技术, 2015, 46(9): 5-9.
- [4] 张琦, 丁全林, 钱乐乐, 等. 交汇口支流水动力特性数值模拟研究[J]. 人民长江, 2017, 48(11): 101-106.
- [5] 甘富万, 黄宇明, 张华国, 等. 河流支流入汇口处水利工程防洪设计水位研究: 以珠江流域西江桂平航运枢纽为例[J]. 湖泊科学, 2020, 32(1): 198-206.
- [6] 王协康, 周苏芬, 叶龙, 等. 长江与嘉陵江交汇区水流结构的数值模拟[J]. 水科学进展, 2015, 26(3): 372-377.
- [7] 周苏芬, 叶龙, 刘兴年, 等. 嘉陵江与长江交汇水流顶托效应特性研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2014, 46(S1): 7-11.
- [8] 周华君, 王绍成. 长江嘉陵江交汇口水力特征研究[J]. 水运工程, 1994(12): 24-29.
- [9] 胡朝阳, 王新强, 许立, 等. 大樟溪入汇对乌龙江洪水水动力影响研究[J]. 水利水电技术, 2020, 51(3): 73-81.
- [10] 交通运输部天津水运工程科学研究所. 运河通航标准: JTS 180-2—2011 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [11] 李文浩. 船闸引航道口门区回流对船舶航行影响研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2021.

(本文编辑 王璁)