



平陆运河老村河支流入汇段 通航水流条件优化*

梁浩然¹, 袁浩^{1,2}, 胡瑞昌^{1,2}

(1. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074; 2. 重庆交通大学, 西南水利水运工程科学研究院, 重庆 400010)

摘要: 支流入汇会导致主流局部出现横向流速及明显的水位波动, 进而对运河安全通航产生不利影响。天然条件下, 老村河汇入口的局部区域横向流速超过相关通航标准的要求, 严重影响航道航行安全, 因此需要对超标河段进行优化整治。针对汛期泄洪支流对运河通航水流条件的影响, 采用重整化群(RNG) $k-\varepsilon$ 紊流模型开展三维精细数值模拟, 对不同洪水流量组合下汇流区的通航条件进行研究。结果表明, 原设计方案扩宽流速超标河段后, 虽然能有效改善汇流区水流条件, 但部分区域横向流速仍然超标。优化方案同时采用下移衔接段、设置导水挡墙和扩宽河道等措施, 采用优化方案后, 汇流区整体通航条件效果良好, 水流、水位条件均能满足船舶安全通航要求。

关键词: 平陆运河; 通航水流条件; 支流入汇; 三维数值模拟

中图分类号: U617

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)04-0107-07

Optimization of navigational flow conditions in tributary confluence section of Laocun River of Pinglu Canal

LIANG Haoran¹, YUAN Hao^{1,2}, HU Ruichang^{1,2}

(1. The College of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Southwest Water Conservancy and Water Transport Engineering Research Institute, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400010, China)

Abstract: Tributary inflow will result in localized lateral flow in the main steam as well as significant water level fluctuations. Changes in flow conditions can adversely affect the safe navigation of the canal. Under natural conditions, lateral flow velocities at tributary confluences in localized areas exceed the minimum requirements of the navigational criteria, which seriously affect the safe navigation of the waterway. The optimization of the exceeded section of the river is required. In view of impact of flood discharge tributaries on navigable flow conditions in canals during flood season, the renormalization group (RNG) $k-\varepsilon$ turbulence model is adopted to carry out the three-dimensional fine numerical simulations, and navigational conditions in the confluence area under different combinations of flood flows are studied. The results show that although the widening of the channel can effectively improve the flow conditions in the confluence area, the lateral flow velocities in some areas still exceed the standard under the original design scheme. The measures are adopted for the optimized scheme, such as moving down the connecting section, setting up water diversion retaining walls, and widening the river way and etc. When the optimized scheme is applied, the overall navigational conditions in the confluence area are satisfactory, and the flow and water level conditions can meet the requirements for safe navigation of ships.

Keywords: Pinglu Canal; navigational flow condition; tributary inflow; three-dimensional numerical simulation

收稿日期: 2023-08-11

*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: 梁浩然(1998—), 男, 硕士研究生, 从事通航水力学研究。

平陆运河沿线存在众多支流，各支流入汇处存在复杂的水流交汇现象。支流入汇后，特别是汛期泄洪时，汇流区的水流条件明显改变，这可能导致运河内船舶的航行安全受到威胁。因此有必要对不同洪水流量组合下汇流区的水流条件进行深入分析。

在天然河道中，干流和支流交汇区地形条件和水流运动复杂。众多学者^[1-3]对交汇区的水深变化、交汇角、流量比等进行深入研究。天然河道属于明渠，早期研究是针对矩形断面明渠水流交汇^[4]。支流入汇时的水深变化是研究的重点，应用动量方程，能得出水深与流量比的关系式。通过保角变换的方法能够进一步得到汇流区的水流模式^[5]。Mosley^[6]利用自然河工模型，采用 Y 形交汇河段对水沙问题进行研究，发现汇流角及流速比对汇流河段的水流结构及河床地形发展有控制作用；甘富万等^[7]利用 Copula 函数-蒙特卡罗模拟方法对支流汇入口处水利工程的防洪设计水位进行了研究。针对不同实际工程条件下的支流入汇问题，许多学者^[8-12]对不同洪水条件下的流量、水位分布等进行研究，这些成果为水利工程防洪设计、河道流量和水位分布特征等提供有价值的参考。同时，也有多位学者^[13-18]建立二维或三维数学模型，对干、支流交汇河段的水流条件进行详细的计算分析。

本文以老村河汇入口河段为基础构建三维水动力数学模型，通过分析入汇区流场分布、水位波动等水流特性探讨不同优化措施对平陆运河通航的影响程度，进而为类似航道设计提供参考。

1 平陆运河干流及支流概况

老村河口处，运河干流通过截弯取直，从原钦江“几”形弯道两端顺直连通。老村河与钦江原河道交汇关系见图 1a)，钦江原河道与运河交汇关系见图 1b)；老村河天然河口河势见图 2。老村河洪水首先进入原钦江河道“几”形弯顶，再从

钦江河道以 48° 夹角斜交汇入运河。老村河口处宽约 20 m，与原钦江河床落差达到 7 m；原钦江汇入口宽约 75 m，与运河干流基本无落差。因老村河口窄、落差大，汛期下泄急流可能对运河通航水流条件有影响。

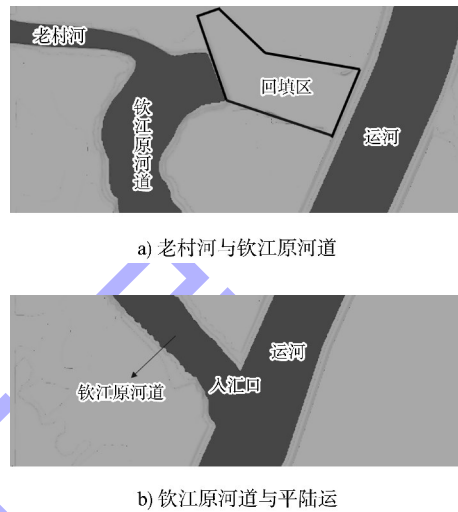


图 1 交汇关系



图 2 老村河天然河口河势

2 数值模拟

2.1 控制方程

本模型采用的控制方程有连续性方程、动量方程、 k 方程和 ϵ 方程等。其中连续性方程为：

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

动量方程为：

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

紊动能 k 方程为：

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (3)$$

紊动能耗散率 ε 方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \cdot \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \cdot \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \quad (4)$$

式中: u_i 、 u_j 分别为 x_i 、 x_j 方向的速度分量; t 为时间; ρ 为密度; μ 为流体黏度; μ_t 为紊动涡黏度; p 为时均压强; G_k 为由平均速度梯度而产生的湍流动能; G_b 为由浮力产生的湍流动能; Y_M 为可压缩湍流中波动膨胀对整体耗散率的影响; α_k 、 α_ε 分别为 k 、 ε 的逆有效普朗特数; S_k 、 S_ε 为用户定义的源项; $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$ 为特征值, 分别取 1.42、1.68、-0.33; R_ε 为附加项; μ_{eff} 为有效黏度, 其值为 μ 与 μ_t 之和。

2.2 模型构建

老村河计算模型范围包含了可能对入汇水流条件造成影响的河段。模拟的老村河、运河、原钦江原河道长分别为 0.5、2.4、0.9 km, 概化模型及边界条件见图 3。

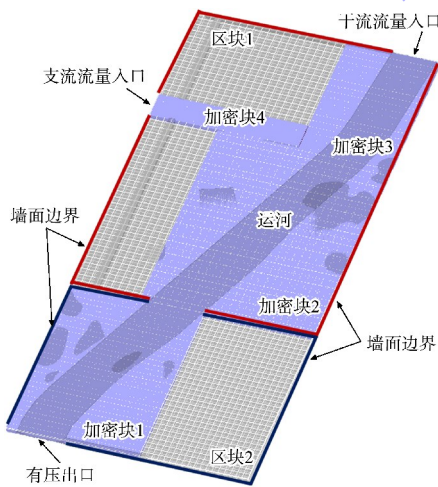


图3 支流概化模型及边界条件

通过对网格敏感性及计算成本的综合考虑, 本文选取 x 、 y 方向网格边长为 2 m, z 方向网格边长为 1 m。计算时网格分为 2 个区块, 区块内有 4 个加密块, 最终计算网格总数为 295.2 万个。

2.3 数值模型工况

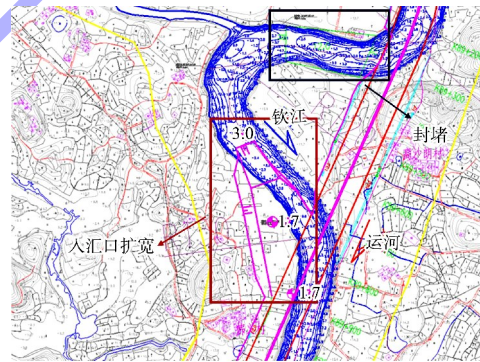
根据《广西暴雨径流查图表》^[19] 中的推理公式

法推求支流的设计洪水。计算得出老村河 10 a、20 a 一遇洪水流量分别为 279、354 m³/s。干流 5 a 一遇洪水为 1 740 m³/s, 无洪水流量为 810 m³/s。数值模拟工况见表 1。

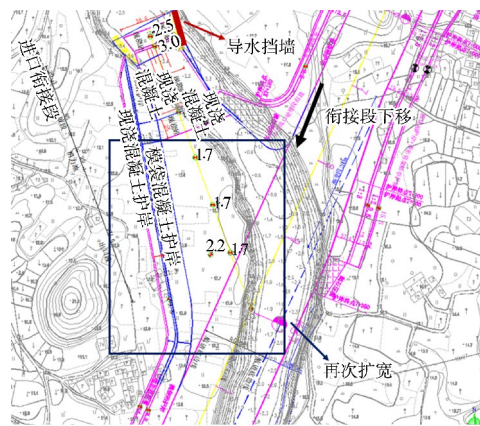
表1 数值模型工况

方案	工况	支流流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	干流流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	措施
天然入汇	N ₁	354	1 740	无
	N ₂	279	810	
原设计方案	D ₁	354	1 740	扩宽原河道
	D ₂	279	810	
优化方案	O ₁	354	1 740	衔接段下移、扩宽原河道、设置导水挡墙
	O ₂	279	810	

其中流量组合 1 为支流发生 20 a 一遇洪水、运河发生 5 a 一遇洪水。流量组合 2 为支流发生 10 a 一遇洪水、运河无洪水。老村河天然河口河势见图 2, 原设计方案与优化方案布置见图 4。



a) 原设计方案(单位: m)



b) 优化方案

图4 原设计方案与优化方案布置

2.4 数值模拟可靠性分析

2.4.1 流速测点布置

为了对流速定量分析, 本文对汇入口处局部河段的表面流速进行统计, 各检测点布置见图5。

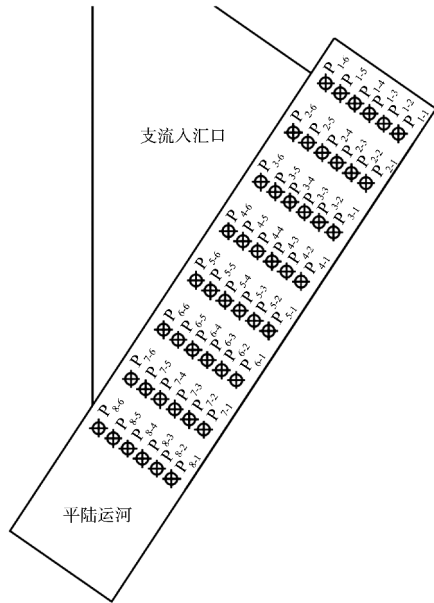


图5 流速测点布置

2.4.2 水位验证

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预想洪水工况提供, 因此本文主要将三维与二维数学模型计算结果进行验证。三维数学模型计算时选择 N_1 工况进行验证, 即支流发生 20 a 一遇洪水、运河发生 5 a 一遇洪水, 二维数学模型计算时, 选取同样工况。 $P_2 \sim P_7$ 共 6 排测点的平均水位验证结果见表 2。

表2 测点断面平均水位验证结果

测点 (排)	平均水位/m			相对 误差/%
	三维模型	二维模型	差值	
P_2	9.62	9.59	0.03	0.03
P_3	10.44	10.38	0.06	0.05
P_4	10.32	10.23	0.09	0.09
P_5	9.66	9.59	0.07	0.07
P_6	9.59	9.56	0.03	0.03
P_7	9.54	9.49	0.05	0.05

由表2可知, 各断面平均水位差在 0.03~0.09 m, 相对误差在 0.3%~0.9%, 故水位验证的结果较好。

2.4.3 流速分布验证

根据模拟结果, 对两种数学模型下 $P_{1-3} \sim P_{8-3}$ 断

面的纵向和横向流速进行比较验证, 结果见图6。可以看出, 两种模型的计算结果基本相同, 最大相差不超过 5% (4.6%), 说明三维数学模型的准确性和有效性能够满足数值模拟计算的精度要求。

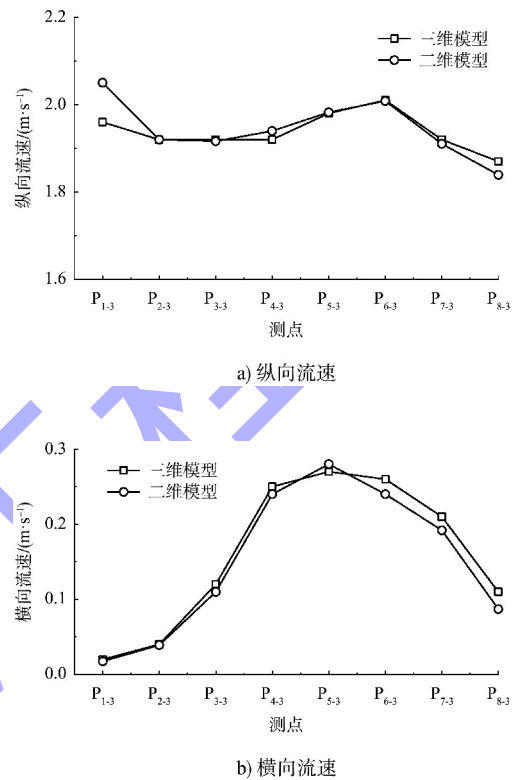


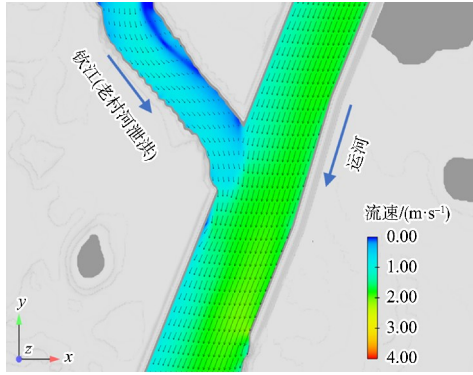
图6 流速验证结果

3 结果与分析

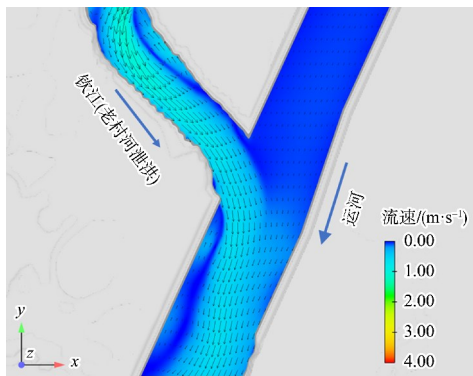
3.1 天然入汇结果分析

天然入汇时支流汇入口流场云图见图7。可以看出, 在 N_1 工况下, 洪水在支流内下泄流速约为 1.5 m/s。洪水流经钦江河段时, 河宽和水深均明显增加, 过流面积显著扩大, 水流得到扩散, 其流速迅速减小、水流流态整体较为平顺, 流速分布呈现出河心流速大、近岸流速小的特征; 相较于 N_1 工况, N_2 工况干流水位更低, 对支流入汇起到的顶托作用减弱, 支流下泄水流对运河流态的扰动相较 N_1 工况更大。

由图7b)可看出, 支流入汇后形成宽约 30 m、长约 180 m 的主流带。由图8可知, 汇入口处主流带横向流速较高、影响范围较广。

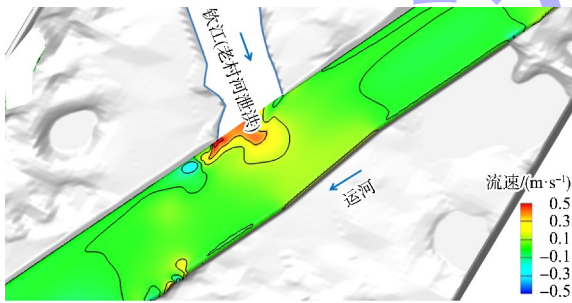


a) N_1 工况

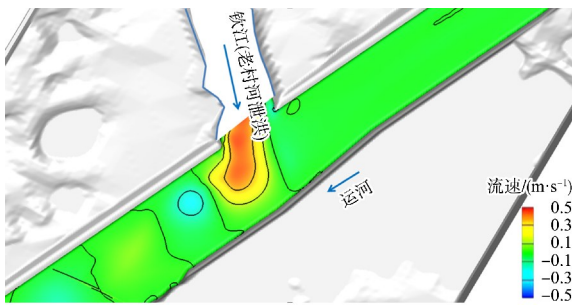


b) N_2 工况

图7 天然入汇时支流汇入口流场云图



a) N_1 工况



b) N_2 工况

图8 天然入汇时支流汇入口横向流速云图

天然入汇时, 分离面清晰可见, N_1 工况下运河内垂直方向横向流速明显天然条件下, 汇入口

$P_{1-3}-P_{8-3}$ 、 $P_{1-4}-P_{8-4}$ 、 $P_{1-5}-P_{8-5}$ 、 $P_{1-6}-P_{8-6}$ 4 个断面的横向流速见图9。结果表明, 天然条件下, 汇入口部分测点流速超出 JTS 180-2—2011《运河通航标准》^[20] 提出的要求, 因此需要对流速超标的运河段进行加宽。

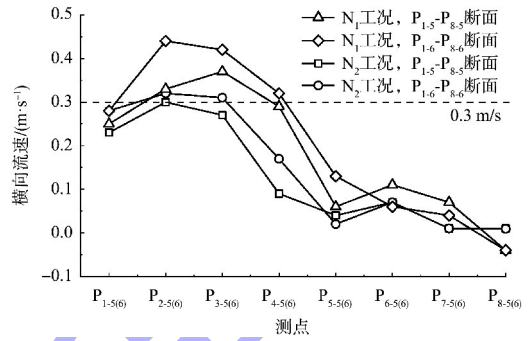
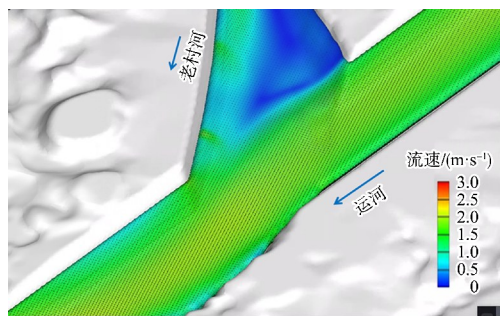


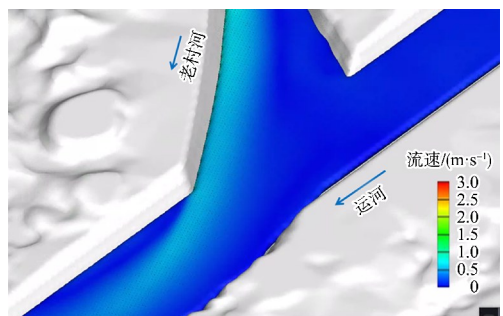
图9 天然入汇时特征断面横向流速分布

3.2 原设计方案结果分析

原设计方案下, 支流汇入口附近流场分布见图10。可以看出, 各工况下, 运河内水流流态整体较为平顺。经过治理后, 汛期下泄水流以 35° 夹角斜交入汇。随着入汇夹角的减小, 其对运河水流条件的影响也明显减小。



a) D_1 工况



b) D_2 工况

图10 原设计方案的支流汇入口流场云图

原设计方案对汇入口断面的扩大、入汇方向的调顺,导致运河内水流的横向运动明显减小(图 11)。但仍一定程度上受到支流入汇的影响。两个工况下统计河段 $P_{1.5}$ - $P_{8.5}$ 、 $P_{1.6}$ - $P_{8.6}$ 特征断面的横向流速分布见图 12。整治后,大部分测点的横向流速有所减小,但部分测点流速仍超出 JTS 180-2—2011《运河通航标准》的要求。其中 $P_{5.6}$ 测点横向流速最大,达到 0.37 m/s。这说明测点 $P_{4.6}$ ~ $P_{7.6}$ 所在水域显著受到老村河汇入及河口左岸的挑流影响,其横向流速大于附近测点。但总体超标的幅度和范围均不大,超标区域仅长 50 m、宽约 30 m。

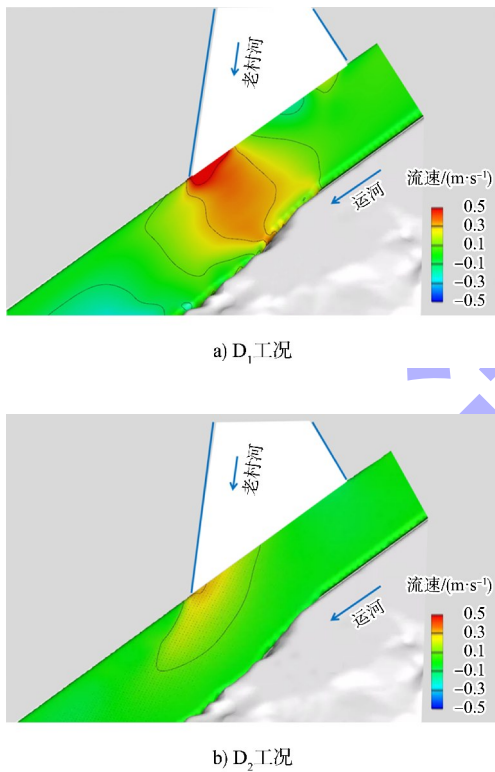


图 11 原设计方案的支流汇入口横向流速云图

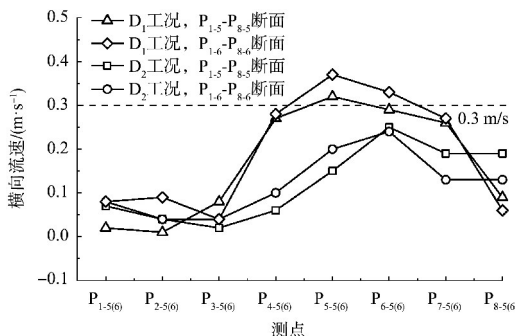


图 12 设计方案特征断面横向流速分布

3.3 优化方案流场分析

优化方案的支流汇入口流场云图见图 13。可以看出,支流治理的入口衔接段优化后,挑流现象得到改善,水流不再集中从河口右侧出流。下泄洪水更为均匀顺畅,流速有所减小。扩宽的出口段增大了水流的过流面积,并且河口处拦沙坎发挥了消散水能的作用,使入汇水流速度再次放缓。

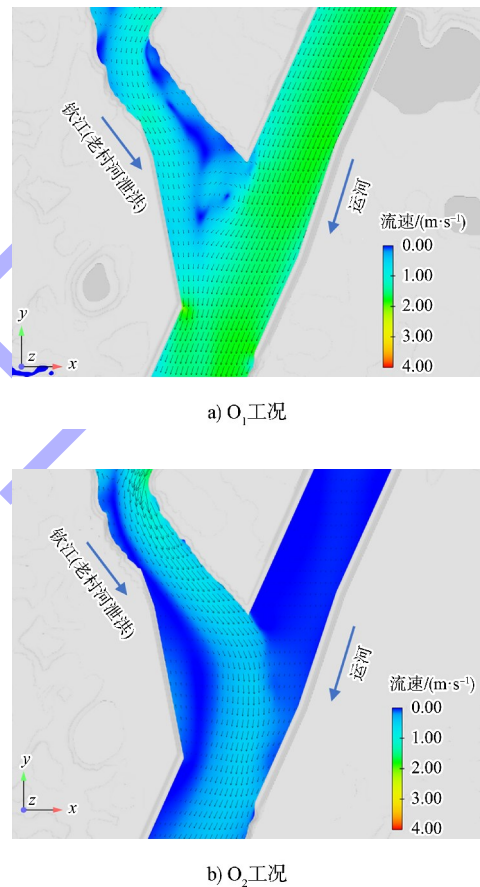


图 13 优化方案的支流汇入口流场云图

O_1 工况下,汇入口处形成回流区,水深、流速在运河中变化较大。同时,该工况下汇入口附近存在流速加速区。汇入口处的回流作用范围较大,几乎占到汇入口断面长度的一半以上,但没有明显影响运河的横向流速分布。运河汇入口处弧形区域流速被改变,但整体流速分布较为稳定。 O_2 工况下,汇入口处的回流区不明显,但一定程度上改变了运河右岸的流速分布。优化方案下,支流对干流横向流速的影响明显减小(图 14), O_1 工况

下横流入汇后虽然一定程度上使干流横向流速增加, 但总体均不超过 0.3 m/s; O_2 工况下, 干流受支流入汇影响的影响更小, 几乎没有超过 0.2 m/s (图 15)。

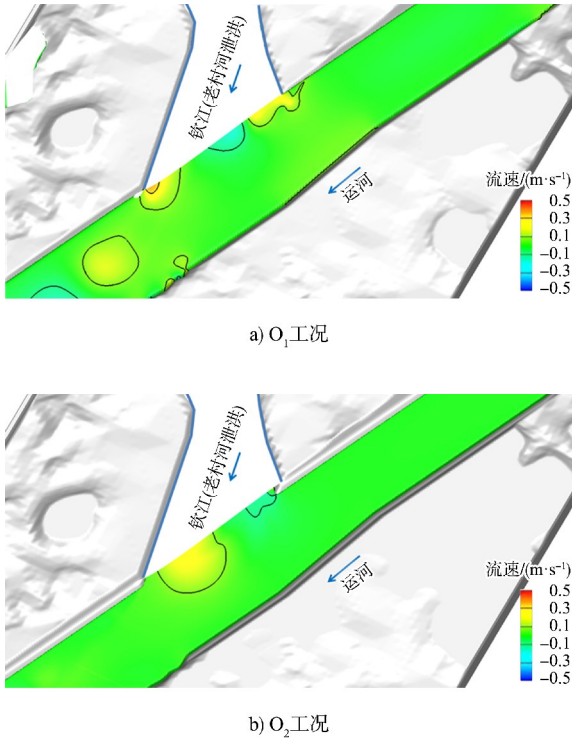


图 14 优化方案的支流汇入口横向流速云图

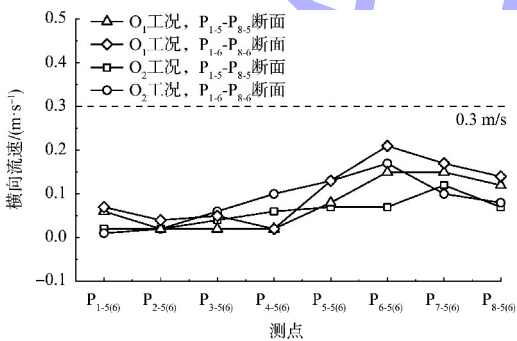


图 15 优化方案特征断面横向流速分布

入汇口处垂直断面流速云图见图 16。可以看出, 支流入汇时, 支流右岸存在一个表面和底部均匀分布、环流中心靠近支流右岸的环流。当支流进入运河后, 虽然支流与主流相互顶托, 但环流的结构稳定, 水流的三维特性明显。底部环流面积稍大于表面环流面积, 但环流整体对分离面运河侧流速的影响基本相同, 且分离面运河侧的

流速分布受到环流的影响较小。

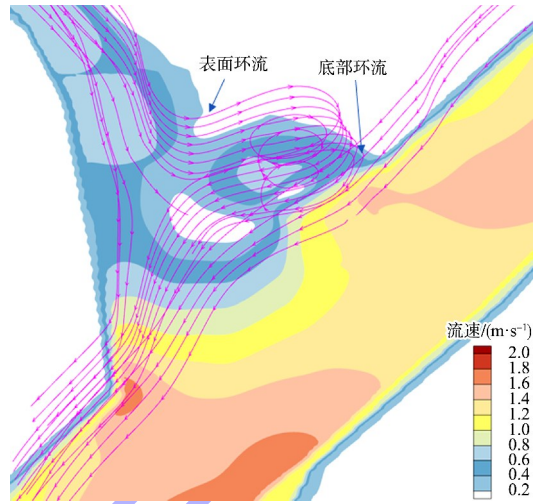


图 16 入汇口处垂直断面流速云图

4 结论

- 1) 扩宽河道虽然能减小汇入口流速, 但在汇入区会形成回流区。单纯扩宽河道不能达到运河通航水流的要求时, 采用横向导水墙和下移衔接段等方法能有效减小运河横向流速。
- 2) 整治后可明显看出存在流速加速区, 但该加速区对运河的整体横向流速影响很小, 并且其影响范围也不如回流区。
- 3) 汇入口主流带流速高、水深大。通过设置导水挡墙和合理布置衔接段以及扩宽河道, 可使流场分布更均匀、水深变化更平稳。

参考文献:

[1] BEST J L, REID I. Separation zone at open-channel junctions [J]. Journal of hydraulic engineering, 1984, 110(11): 1588-1594.

[2] GAUDET J M, ROY A G. Effect of bed morphology on flow mixing length at river confluences [J]. Nature, 1995, 373(78): 138-139.

[3] HSU C C, WU F S, LEE W J. Flow at 90 equal-width open-channel junction [J]. Journal of hydraulic engineering, 1998, 124(2): 186-191.

[4] TAYLOR E H. Flow characteristics at rectangular open-channel junctions [J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1944, 109(1): 893-902.

(下转第 137 页)