



交汇角及汇流比对明渠交汇区 水流结构的影响*

姜凯¹, 刘浩², 何进朝^{2,3}, 母德伟^{2,3}, 邱周华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 402247;

3. 重庆西科水运工程咨询有限公司, 重庆 402247)

摘要: 通过 Flow-3D 软件建立明渠交汇水流的三维数学模型, 选择 RNG $k-\varepsilon$ 模型封闭控制方程, 并采用有限体积法进行求解。针对 9 种交汇角 α 和 5 种汇流比 R_q 组合而成的 45 种工况, 进行三维数值模拟, 并分析不同工况下交汇区水流结构的特征。结果表明, 明渠交汇区水流复杂, 中水深截面横向流速最大、分布范围最广, 大交汇角、低汇流比时近表面有负向流速并产生二次环流。交汇角或汇流比减小, 支渠水流对主渠水流的影响降低, 交汇区垂向水流不均匀性变弱。主渠横向流速最大值随交汇角增大或汇流比减小而单调增大, 当 $60^\circ \leq \alpha \leq 70^\circ$ 及 $R_q \approx 0.60$ 时横向流速对交汇区水流结构影响较小。此外, 通过分析垂向流速不均匀性的主要、次要区域及隔离带可以更加直观地了解交汇区水流结构。

关键词: 水流结构; 明渠; 横向流速; 二次环流; 垂向流速不均匀性

中图分类号: U611; TV131

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)09-0132-12

Effects of confluence angle and confluence ratio on flow structure in open channel confluence zone

JIANG Kai¹, LIU Hao², HE Jinchao^{2,3}, MU Dewei^{2,3}, QIU Zhouhua²

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

2. Southwest Research Institute for Hydraulic and Water Transport Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

3. Chongqing Xike Water Transport Engineering Consulting Co., Ltd., Chongqing 400074, China)

Abstract: By selecting the RNG $k-\varepsilon$ model closed control equations, a three-dimensional mathematical model of the open-channel confluent flow is established based on the Flow-3D software, and the finite volume method is used for solving the equations. Three-dimensional numerical simulations are carried out for 45 combined working conditions composed of 9 confluence angles and 5 confluence ratios, and the characteristics of the flow structure in the confluence zone under different working conditions are analyzed. The results show that the flow characteristics in the open-channel confluence zone are complicated. The transverse velocity is the largest and has the widest distribution in the cross section with middle water depth. For large confluence angle and small confluence ratio, there is a negative velocity near the water surface and a secondary circulation flow is generated. With the decrease of the confluence angle or the confluence ratio, the influence of the branch channel flow on the main channel flow is reduced, and the non-uniformity of the vertical flow in the confluence zone becomes weaker. The

收稿日期: 2024-12-16

*基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFC3800505); 重庆市自然科学基金面上项目 (CSTB2022NSCQ-MSX1079); 重庆市教委科学技术研究项目 (KJQN202400706); 重庆交通大学水利水运工程教育部重点实验室开放基金项目 (SLK2023B16); 重庆交通大学内河航道整治技术交通行业重点实验室开放基金项目 (KLIWRE2023B02)

作者简介: 姜凯 (2000—), 男, 硕士研究生, 从事计算水力学方向的研究。

通信作者: 刘浩 (1993—), 男, 博士, 高级工程师, 硕士生导师, 从事计算流体力学方向的研究。

E-mail: linh@cqjtu.edu.cn

maximum value of the transverse velocity in the main channel monotonically increases with the increase of the confluence angle or the decrease of the confluence ratio. When $60^\circ \leq \alpha \leq 70^\circ$ and $R_q \approx 0.60$, the influence of the transverse velocity on the flow structure in the confluence zone is relatively small. Furthermore, by analyzing the main and secondary areas and isolation zones of the vertical velocity non-uniformity, the flow structure in the confluence area can be understood more intuitively.

Keywords: flow structure; open channel; transverse flow velocity; secondary circulation; vertical velocity non-uniformity

无论是在自然河道,还是在人工明渠,干支流交汇问题由来已久。在干支流交汇区域,水流条件复杂,因此,深入研究交汇区域水流流态以及流速分布规律,对水工建筑物的设计、航运发展等具有重要意义。

在交汇明渠的研究历史中, Taylor^[1]首先对交汇角 $\alpha = 45^\circ$ 和 135° 的矩形、等宽平底明渠做研究,首次提出分离区的存在。有学者固定汇流比,把交汇角作为单一变量进行分析研究, Balouchi 等^[2]发现当 $\alpha = 30^\circ$ 时,干支流交汇形成了独特的水动力区域,改变了干流的水动力特性和水位; Schindfessel 等^[3]使用 LES 模型模拟 $\alpha = 90^\circ$ 下不同横截面形状对明渠交汇分离区的影响,结果表明,由于减少局部动量侧向流,非矩形形状的分离区尺寸存在显著差异; Gurram 等^[4]对 $\alpha = 30^\circ$ 、 60° 和 90° 下各种入汇现象进行归纳; 胥宗强等^[5]、王协康等^[6]对不同交汇角下分离区做三维几何特性分析。Weber 等^[7]通过一系列正交水槽测量试验,研究了 $\alpha = 90^\circ$ 的等宽明渠交汇水流在不同流量比入汇条件下交汇区域水流结构、断面二次流; Hsu 等^[8]利用入汇口上下游深泓线的变化确定分离区的位置及水流流经分离区时的收缩量,发现 $\alpha = 90^\circ$ 时不同汇流比下,分离区末端的最大流量收缩处的能量和动量校正系数随着排放比的增加而减小,并且与排放比的倒数线性相关。固定交汇角度,以汇流比为单一变量的研究也有很多^[9-11]。随着研究的深入, Shen 等^[12]针对 5 种交汇角及 7 种汇流比的 35 种工况,研究不同工况下主渠纵向流速、横断面流场、分离区结构等; 周舟等^[13-14]对 3 种汇流比及 7 种交汇角的 21 种工况做交汇区壅水、水深等分析; 薛博升等^[15]对 $\alpha = 30^\circ$ 、 45° 、

60° 下不同汇流比做水流动力轴线等分析; 国内外研究学者^[16-23]同样研究交汇角度与汇流比的耦合影响。除此之外,曾诚等^[24]针对弯道主渠研究了弯道处交汇时断面流速等方面; Rhoads 等^[25]总结了交汇区的水流结构主要受 2 条河流的平面对称性、交汇角、动能比、宽深比和河床平整性等因素的控制。

杨青远等^[26]通过二维数值模拟,发现紊动黏性阻力对交汇水流数值模拟结果影响较大,且二维数值模拟忽略了参数垂向的变化,故本文选择 Flow-3D 软件进行三维数值模拟研究。综上,以往的研究中,学者多以交汇区水深变化、脉动强度、涡量分析、纵向速度为关注点,研究横向流速对交汇区水流结构的影响较少。本文主要研究不同交汇角及汇流比对明渠交汇水流横向流速的影响,并提出一种新方法研究交汇区水流结构,解决三维模拟时不同水位下水流结构互有差异的缺陷。

本文以交汇明渠中的水流为研究对象,将不同交汇角度 α 或汇流比 R_q 作为研究变量,分析不同情况下交汇区横向流速、垂向水流不均匀性等因素,对 9 种交汇角度和 5 种汇流比的 45 种组合工况进行分析。

1 问题描述与验证模型

1.1 模型介绍

考虑平底无比降的明渠,其横断面为矩形,主渠宽 10 m,支渠宽 4 m,支渠与主渠的夹角 α 以 10° 、 20° 、 30° 、 40° 、 50° 、 60° 、 70° 、 80° 、 90° 9 种角度斜接入主渠,支渠入汇前主渠、支渠的长度均为 100 m,支渠入汇后主渠长度为 200 m。固定下游出口处水深为 2 m。主渠入口处

流量为 Q_m ，支渠入口处流量为 Q_l ，固定交汇后总流量 $Q_d = Q_m + Q_l$ 不变，并定义汇流比 $R_q = Q_m / Q_d$ 。以主、支渠上交汇点为坐标原点建立三维直角坐标系，其中 x 轴垂直指向主渠右岸， y 轴沿主渠指向下游方向， z 轴竖直向上。以 $\alpha = 90^\circ$ 为例，交汇明渠三维模型及二维俯视图见图 1。

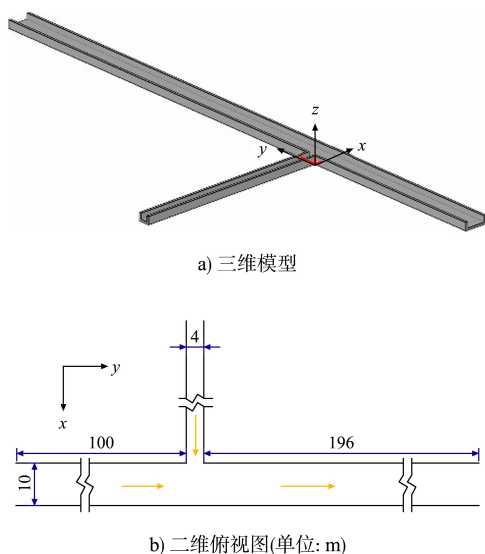


图 1 $\alpha = 90^\circ$ 交汇明渠的三维模型及二维俯视图

Fig. 1 Three-dimensional model and two-dimensional overhead view of an open channel with an intersection angle of $\alpha = 90^\circ$

1.2 控制方程

交汇明渠水流流态十分复杂，本文模拟明渠湍流，假设水为不可压缩流体，根据雷诺平均法， $u_i = \bar{u}_i + u'_i$ ， $p_i = \bar{p} + p'_i$ ，经过时均化处理后得到时均形式的连续性方程和雷诺时均运动方程。考虑流体为不可压缩流动，其张量表达式为：

雷诺方程：

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u'_i u'_j} \right) + F_i \quad (1)$$

$$\text{连续性方程: } \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

式中： u_i 、 u_j 分别为速度在横向和垂向的分量， x_i 、 x_j 分别为坐标轴在横向和垂向的分量； t 为时间； ρ 为液体密度； p 为压强； μ 为分子黏性系数； F_i 为体积力。

湍流数值模拟方法主要包括直接数值模拟、雷诺平均法、大涡模拟和统计平均法等。茅泽育等^[27]选择雷诺平均法中的 $k-\varepsilon$ 模型验证 Weber 等的试验，模拟结果与试验数据相符合，雷诺平均法已经由单一的 $k-\varepsilon$ 模型发展成标准 $k-\varepsilon$ 、RNG $k-\varepsilon$ 和 Realizable $k-\varepsilon$ 3 种模型。本文选择能较为准确解决高应变率湍流问题的 RNG $k-\varepsilon$ 模型，采用 k 、 ε 方程与流体力学基本方程进行联立求解。

k 方程：

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

ε 方程：

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

$$\text{其中: } \mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (6)$$

$$E_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (7)$$

$$C_{1\varepsilon}^* = C_{1\varepsilon} \frac{\eta(-\eta/\eta_0)}{1 + \beta \eta^2} \quad (8)$$

$$\eta = (2E_{ij}E_{ij})^{1/2} \frac{k}{\varepsilon} \quad (9)$$

式中： μ_t 为紊流黏性系数； $\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t$ ； α_k 和 α_ε 分别为 k 和 ε 的紊流普朗特数； G_k 为紊流动能产生项； η_0 为经验常数； β 为液体体积相对压缩值与压强增量之比。模型常数的取值见表 1。

表 1 RNG $k-\varepsilon$ 模型常数取值
Tab. 1 RNG $k-\varepsilon$ model constant values

C_μ	α_k	α_ε	$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	η_0	β
0.084 5	1.39	1.39	1.42	1.68	4.377	0.012

1.3 研究方法

数值模拟方法具有成本低、效率高，能较全面地模拟流场的细节等优势，水动力数值模拟的求解方法主要包括有限差分法 (finite difference method, FDM)、有限单元法 (finite element method,

FEM)和有限体积法(finite volume method, FVM)等,其中有限体积法具有天然守恒性,且计算效率高,因此本文采用有限体积法进行计算。

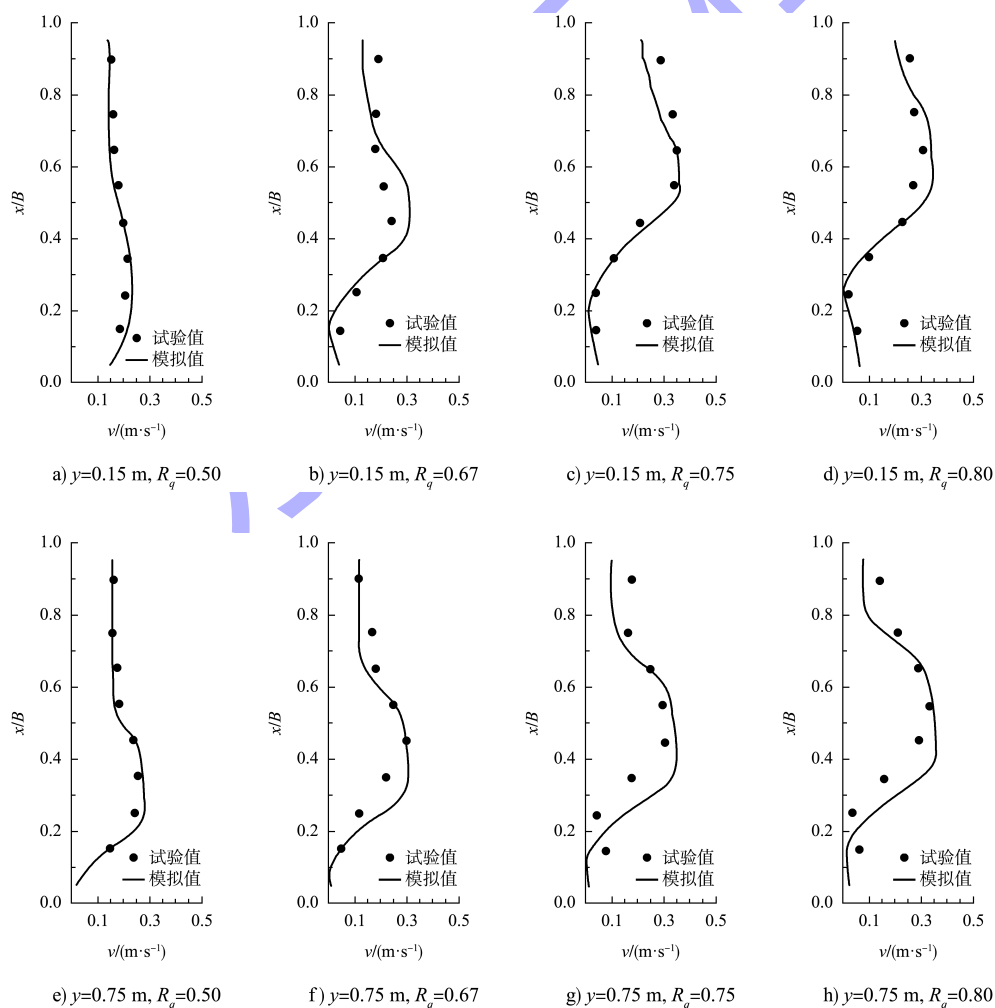
明渠湍流的计算涉及自由液面的捕捉,自由液面的处理方法主要有刚盖假定法、水平集方法、标记网格法和流体体积法(volume of fluid, VOF)等。本文选择VOF法模拟含自由液面的水动力问题,其能够较为准确地模拟流体界面结合与分离的状态,并追踪自由液面的变化情况。

1.4 数学模型验证

本文选用薛博升设计的水槽试验结果进行数学模型验证。试验水槽的支槽以 45° 斜接主槽,取主槽、支槽左侧底部边线的交点为原点,出口水位为0.245 m,主槽、支槽进口按照不同汇流比设

置流量,建立相应的三维数学模型。水槽试验采用声学多普勒流速仪(acoustic Doppler velocity, ADV)进行流速收集,并分别在 $y=0.15$ m、 $y=0.75$ m和 $y=1.55$ m处设置3个监测断面,取垂向坐标 $z=0.147$ m处的试验数据验证本文的数值模拟结果,并选择4种汇流比工况($R_q=0.50$ 、 0.67 、 0.75 、 0.80)进行对比。

本文数值模拟结果与文献[15]中水槽试验结果对比见图2,本文数值模拟结果与文献[15]试验结果的均方根误差分析见表2。可以发现,均方根误差值均小于10%,且大部分结果小于5%,本文数值模拟结果与文献[15]中的试验和数值模拟结果误差较小,验证了本文三维数值模型的可靠性,可进行之后的数值模拟研究。



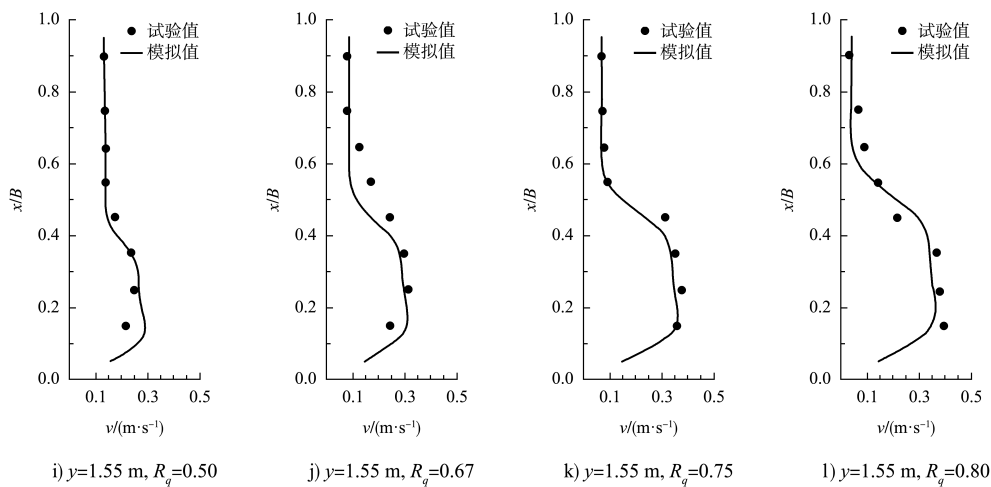


图 2 本文数值模拟结果与文献[15]中试验结果的对比

Fig. 2 Comparison between numerical simulation results in this article and experimental results in reference[15]

表 2 本文数值模拟结果与文献[15]中试验结果的均方根误差分析

Tab. 2 Root mean square error analysis between numerical simulation results in this article and experimental results in reference[15]

监测断面	R_q	均方根误差/%
$y=0.15\text{ m}$	0.50	3.33
	0.67	4.55
	0.75	3.37
	0.80	4.62
$y=0.75\text{ m}$	0.50	2.24
	0.67	5.60
	0.75	8.66
	0.80	7.91
$y=1.55\text{ m}$	0.50	4.12
	0.67	4.77
	0.75	4.64
	0.80	4.08

2 数值模拟结果分析

2.1 边界条件、网格划分及计算工况设置

计算模型边界条件：主渠与支渠进口处设置为速度（流量）入口，主渠下游设置为压力出口，

各结构壁面设置为固壁边界，顶部边界设置为压强边界，并给定压强为 0 以及液体体积分数为 0，水面设置为自由液面。

计算模型主渠长 300 m，支渠长 100 m，整体计算区域较小。由于本次数值模拟软件网格划分的特殊性，每个网格区块只能设置成六面体，为减少网格数量，提高计算效率，将计算域划分为 4 个区块，对每个区块单独划分网格，并对主渠交汇口区域的网格加密一倍。首先对网格进行无关性验证，网格尺寸遵循 $x:y:z=1:1:1$ ，分别设置 0.15、0.25 和 0.35 m 3 种网格。网格无关性验证时，以尾门流速耗损率及计算时间为指标，分析不同网格尺寸下的计算效果，找到比较合适的网格尺寸。以 $\alpha=10^\circ$ 、 $R_q=0.30$ 工况为例，3 种网格尺寸下交汇区域局部尺度见图 3，3 种网格尺寸下的计算数据汇总见表 3。可以看出，网格尺寸越小，模拟相同物理时间段的计算时间越长，但相对误差越小。此外，可以看出 0.15 与 0.25 m 网格下的相对误差差别不大，为提高计算效率，选择 0.25 m 的网格作为本文数值模拟的计算网格。

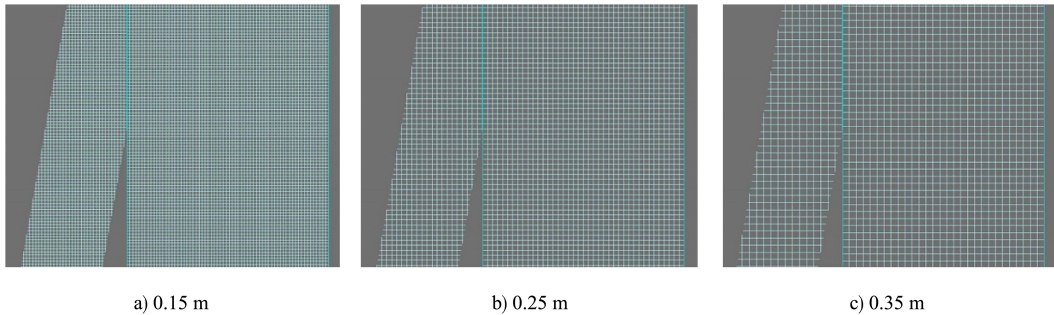


图 3 不同网格尺寸下交汇口局部图

Fig. 3 Local maps of intersections with different grid sizes

表 3 不同网格尺寸下模拟结果

Tab. 3 Simulation results under different grid sizes

网格尺寸/m	网格数目/个	计算时间/h	进口流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	出口流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	流量耗损/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	流量耗损相对误差/%
0.15	2 652 765	36	20	19.957	0.043	0.215
0.25	571 392	5	20	19.895	0.105	0.525
0.35	195 804	1	20	19.209	0.791	3.599

设定上下游初始水体范围, 初始水深 2 m, 总计算时长为 1 500 s, 将时长设置为控制条件。本文主要研究不同交汇角和汇流比对明渠交汇水流水力特性的影响, 将不同交汇角与不同汇流比相

结合做对比研究, 工况设置见表 4。为便于对比不同工况结果, 以下游出口平均速度 v_d 对流速进行无量纲化, $U^* = u/v_d$; 以主渠宽度 W 对尺寸进行无量纲化, $X^* = X/W$, $Y^* = Y/W$, $Z^* = Z/W$ 。

表 4 交汇与汇出计算工况

Tab. 4 Calculation conditions of intersection and export

$\alpha/(^\circ)$										R_q		主渠		支渠		下游尾门	
												$Q_m/(m^3 \cdot s^{-1})$	$v_m/(m \cdot s^{-1})$	$Q_i/(m^3 \cdot s^{-1})$	$v_i/(m \cdot s^{-1})$	$Q_d/(m^3 \cdot s^{-1})$	$v_d/(m \cdot s^{-1})$
10	20	30	40	50	60	70	80	90	0.30			6	0.30	14	1.750	20	1.00
10	20	30	40	50	60	70	80	90	0.45			9	0.45	11	1.375	20	1.00
10	20	30	40	50	60	70	80	90	0.60			12	0.60	8	1.000	20	1.00
10	20	30	40	50	60	70	80	90	0.75			15	0.75	5	0.625	20	1.00
10	20	30	40	50	60	70	80	90	0.90			18	0.90	2	0.250	20	1.00

2.2 交汇区流速分布特征

工况 $\alpha = 90^\circ$ 、 $R_q = 0.30$ 下, $Z^* = 0.01$ (近底面)、 $Z^* = 0.10$ (中面) 和 $Z^* = 0.17$ (近表面) 的横向流速云图及流迹线图见图 4。结合不同水深下迹线与横向流速的分布可以看出, 近底面迹线相对稳定, 横向流速最小, 支渠迹线绕过分离区, 较为平缓地与主渠交汇, 主渠迹线在靠近右岸处与支渠交汇, 流过分离区, 逐渐趋于明渠流态; 中水深截面横向流速最大, 分离区漩涡最强, 支渠以高流速涌入主渠, 完全挤压主渠水流, 主渠迹线被挤压至消失, 主渠下游迹线仍靠近右岸; 近表面主渠右岸出现明显负向流速, 支渠流迹线经

过一段偏转区后急剧左偏, 主渠迹线同样在负流速区域向左偏移, 低水位横向流速为正, 高水位横向流速为负, 形成逆时针环流, 见图 5。

工况 $\alpha = 30^\circ$ 、 $R_q = 0.3$ 情况下, 从 $Y^* = -0.5$ 断面至 $Y^* = 2.5$ 断面的横向流速云图见图 6。可以看出, 在交汇区域 $Y^* = 0.5$ 断面横向流速出现明显变化, 低水深横向流速小, 中高水深横向流速大; 离交汇口越远, 横向流速越小直至接近于 0。横向流速较大的区域在交汇口附近, 而交汇口上游及交汇口下游横向流速基本为 0, 故选择 $Y^* = 0.3$ 断面为研究断面, 分析不同交汇角和汇流比时横向流速对交汇区水流的影响。

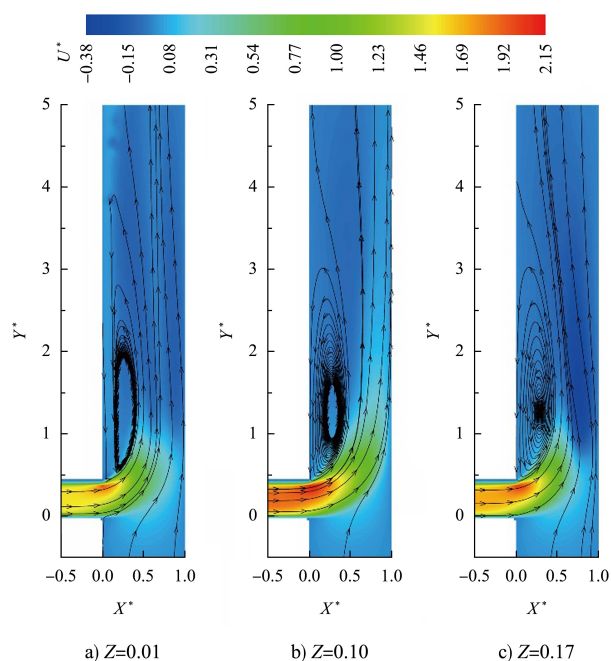
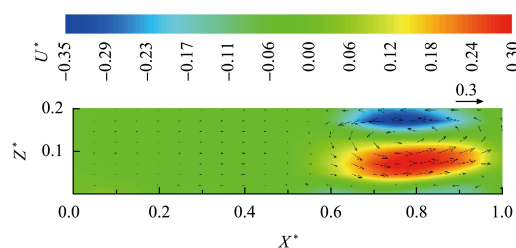
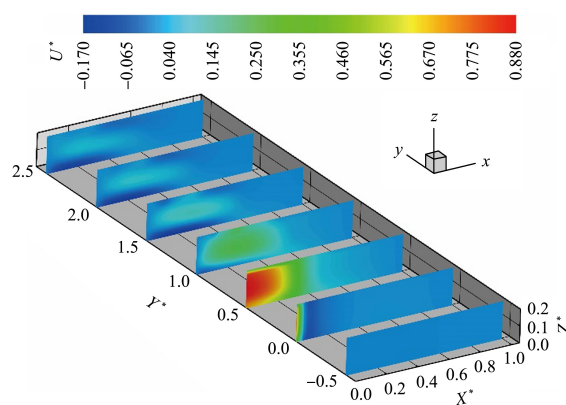


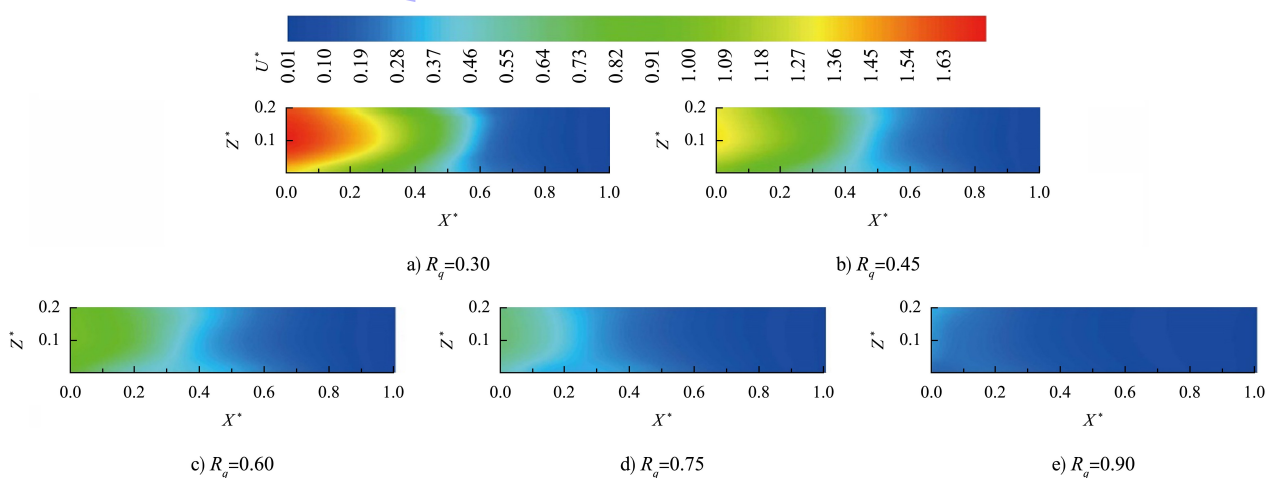
图4 横向流速云图及流迹线

Fig. 4 Transverse velocity nephograms and flow trajectory

图5 $Y^*=1.5$ 断面横向流速云图及矢量图Fig. 5 Nephogram and vector diagram of transverse flow velocity at section $Y^*=1.5$ 图6 $Y^*=-0.5$ 断面至 $Y^*=2.5$ 断面横向流速云图Fig. 6 Nephogram of transverse flow velocity from section $Y^*=-0.5$ to section $Y^*=2.5$

2.3 汇流比和交汇角对交汇区横向流速分布的影响

交汇角 $\alpha=70^\circ$ 时不同汇流比下交汇口 $Y^*=0.3$ 断面的横向速度云图见图7。从 $R_q=0.3$ 到 $R_q=0.9$ ，随着汇流比的增大，即主渠流量的增大， $Y^*=0.3$ 断面横向流速逐渐减弱。从图7可以看出，近底面横向流速最小，随着水深的增加， U^* 在中水深达到最大值，然后逐渐减少直至表面， $R_q=0.3$ 时横向流速在 $X^*=0.6$ 附近有明显的下降，说明 $\alpha=70^\circ$ 下最大横向流速影响的范围占据主渠左侧，随着汇流比的增加横向流速影响范围逐渐缩小，主渠右侧受到的影响可忽略不计。

图7 $\alpha=70^\circ$ 时不同汇流比下交汇口 $Y^*=0.3$ 断面横向流速云图Fig. 7 Nephogram of transverse flow velocity at intersection section $Y^*=0.3$ with different confluence ratios when $\alpha=70^\circ$

汇流比 $R_q = 0.60$ 时不同交汇角度下交汇口 $Y^* = 0.3$ 断面的横向速度云图见图 8。当 $\alpha = 10^\circ$, 横向流速小于 0.1, 此时交汇口区域不受横向流速

的影响, 主渠对支渠影响甚微; 随着交汇角度增大, 横向流速的范围和大小均随之增大, 主渠不受横向流速影响的区域则被压缩。

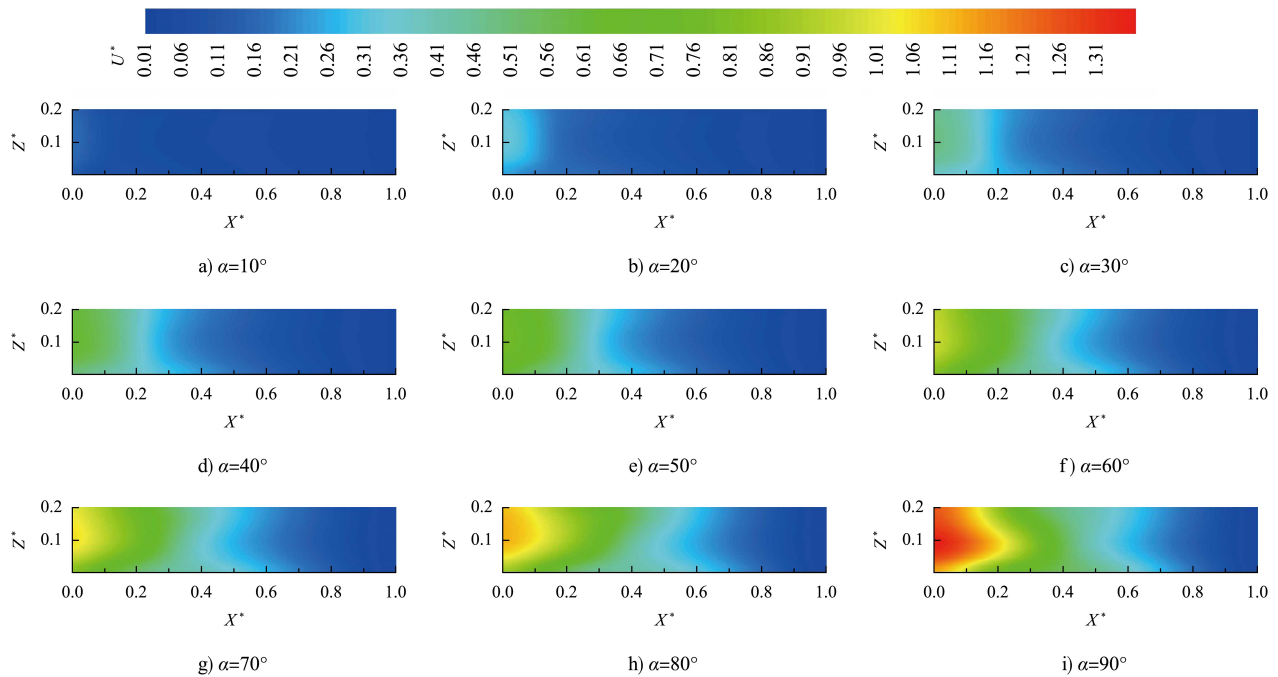


图 8 $R_q = 0.60$ 时不同交汇角度下交汇口 $Y^* = 0.3$ 断面横向流速云图

Fig. 8 Nephogram of transverse flow velocity at intersection section $Y^* = 0.3$ with different intersection angles when $R_q = 0.60$

2.4 不同工况下最大横向流速的变化

不同汇流比情况下主渠内最大横向流速 $U_{\max}^*$ 随交汇角度的变化曲线见图 9。可以明显看出, 随着交汇角度的增加, 交汇区最大横向流速逐渐增大; 而随着汇流比的减小, 即随着支渠流量的增大, 交汇区最大横向流速亦逐渐增大。这说明交汇角度和汇流比对交汇区的横向流速均有着显著的影响, 交汇角增大或汇流比减小, 主渠内最大横向流速均单调递增。

为探究不同交汇角及汇流比情况下主渠最大横向流速的变化, 研究了最大横向流速随交汇角度或汇流比变化而变化的幅度。各汇流比下最大横向流速随交汇角度增加而增长的趋势, 且增长幅度逐渐放缓, 见表 5, 可以发现, $50^\circ \sim 60^\circ$ 和 $70^\circ \sim 80^\circ$ 最大横向流速增幅最大, 在 15% 左右; 其次为 $60^\circ \sim 70^\circ$ 区间; 虽然 $80^\circ \sim 90^\circ$ 区间增幅最小, 但此区间横向流速已达到最大值, 主渠受到的影响最大。各交汇角下最大横向流速随汇流比降低

而增加的趋势, 且增幅逐渐降低, 见表 6, 可以发现, R_q 在 $0.90 \sim 0.75$ 时最大横向流速较小, 但此时平均增幅最大; 而 R_q 在 $0.75 \sim 0.60$ 及 $0.60 \sim 0.45$ 时增幅明显下降, 且此时最大横向流速未达到最大; R_q 在 $0.45 \sim 0.30$ 时增幅虽然最小, 但最大横向流速已达到最大。

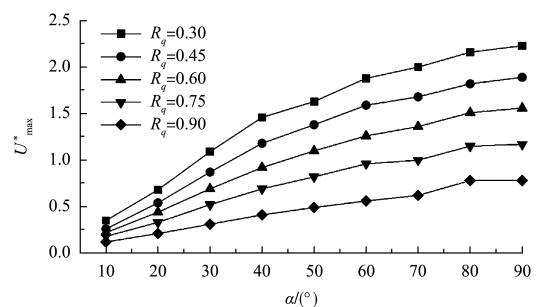


图 9 不同汇流比下主渠内最大横向流速随交汇角度的变化曲线

Fig. 9 Variation curves of maximum transverse flow velocity in the main channel with confluence angle under different confluence ratios

表 5 最大横向流速随交汇角度变化的平均幅度

Tab. 5 Average amplitude of the maximum transverse flow velocity changing with the intersection angle

交汇角/(°)	10~20	20~30	30~40	40~50	50~60	60~70	70~80	80~90
增幅/%	92.06	56.68	33.57	17.30	15.29	6.97	13.63	2.43

表 6 最大横向流速随汇流比变化的平均幅度

Tab. 6 Average amplitude of the maximum transverse flow velocity changing with the confluence ratio

汇流比	0.90~0.75	0.75~0.60	0.60~0.45	0.45~0.30
增幅/%	37.34	24.16	19.02	18.16

2.5 交汇区垂向流速不均匀性分析

平面上各点处垂向流速的不均匀性可以用垂向上不同点平均流速的标准方差 χ 表示,其值越大说明垂向流速分布越不均匀。 χ 可用下式计算:

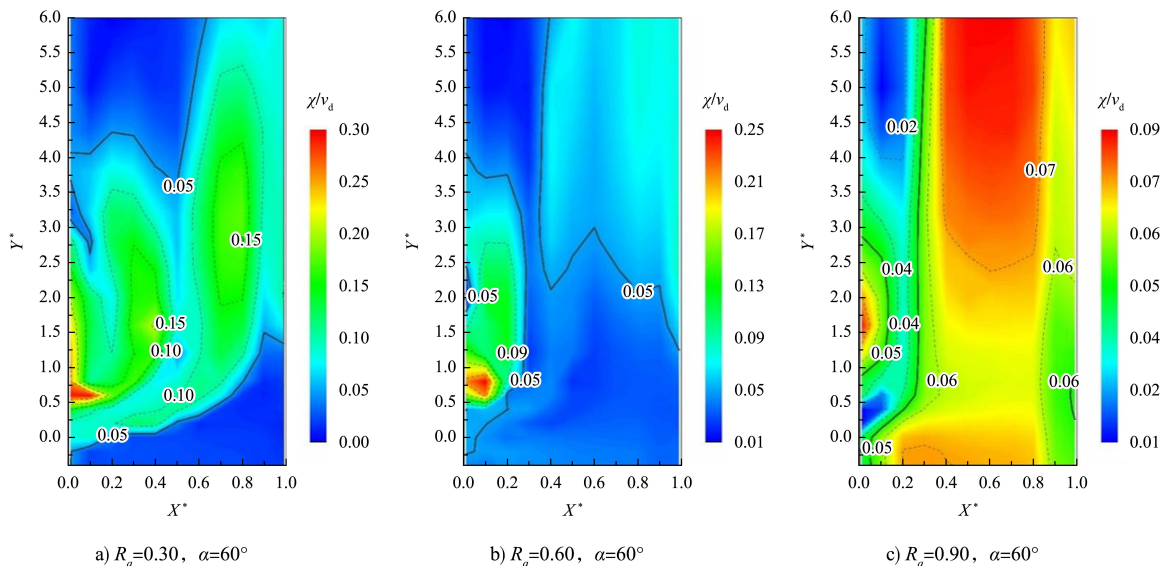
$$\chi = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (v_j - \bar{v})^2} \quad (10)$$

式中: m 为测线的测点数; v_j 为竖直方向第 j 个测点的流速; $\bar{v}$ 为该测线的垂向平均流速。

为获得垂向流速不均匀分布情况,对主渠选取 $Y^* = -0.4 \sim 6.0$ 区间断面,沿 X 轴每隔1 m设置11条垂向侧线,每条侧线均匀分布20个测点,以下游尾门处速度 v_d 对 χ 做无量纲处理,得到图10。图10a)为 $\alpha = 60^\circ$ 时3种不同汇流比下交汇区水流垂向流速不均匀分布,图10b)为 $R_q = 0.60$ 时3种不同交汇角下交汇区水流垂向流速不均匀分布,以 $\chi/v_d = 0.05$ 为界限,将水流垂向不均匀区域分为2块,交汇口 $\chi/v_d > 0.05$ 的区域为主要

区域,主渠下游右岸 $\chi/v_d > 0.05$ 的区域为次要区域,两区域被低不均匀系数带隔离。支渠水流进入主渠,水流方向受主渠水流挤压受到偏转,形成漩涡,垂向间流速产生偏差,最终形成交汇区水流垂向不均匀主要区域;主渠下游受二次环流影响而产生水流垂向不均匀次要区域;两者之间的低不均匀分布带即为剪切层。

由图10a)可以看出,随着汇流比的增大,不均匀系数逐渐减小,说明当主渠流量占比大时交汇区水流相对稳定。 $R_q = 0.30$ 时 $\chi/v_d > 0.05$ 的区域横贯主渠,能够明显看到2条剪切层,支渠水流流经区域显而易见; $R_q = 0.60$ 时不均匀系数最大值下降不大,但不均匀范围有明显缩小;分离区的垂向不均匀主要区域也随着汇流比的增大而减小。由图10b)可以看出,当 $\alpha = 30^\circ$ 时,由于交汇角度小,没有产生分离区,故垂向不均匀主要区域消失,剪切层更靠近交汇口;随着交汇角的增大,垂向流速不均匀主要区域逐渐增大,剪切层逐渐远离交汇口。可见,在不同工况下,水流垂向流速不均匀分布可以明显地反应交汇区的水流结构特征,相比二维数值模拟更加真实,也避免了不同水位下交汇区水流结构的差异,是一种更加准确的分析手段。



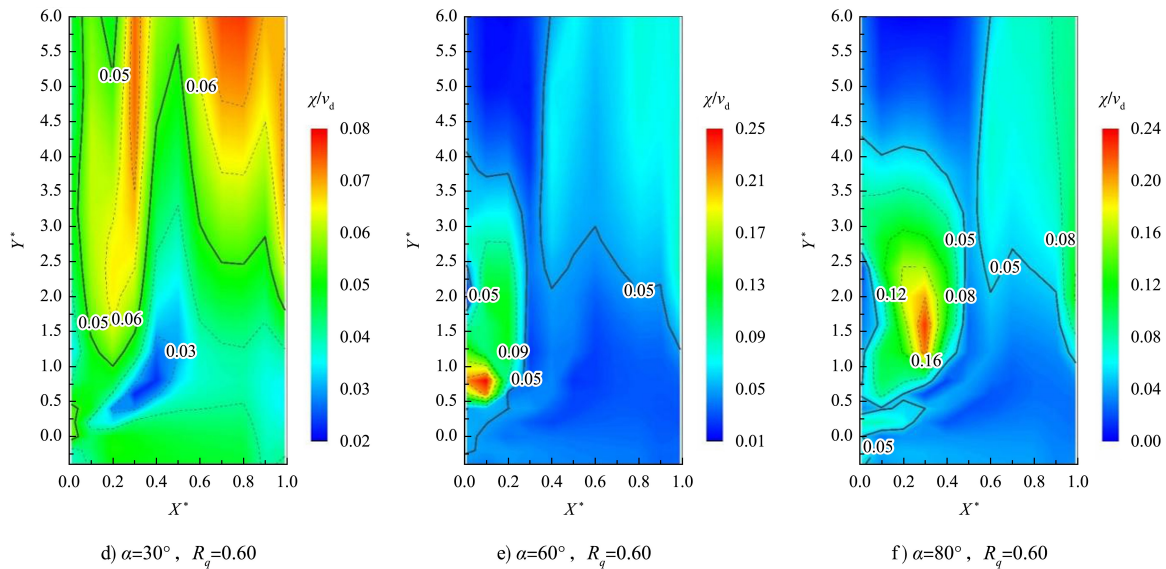


图10 不同汇流比和交汇角下交汇区垂向流速分布

Fig. 10 Vertical flow velocity distribution in confluence zone under different confluence ratios and intersection angles

3 结论

1) 明渠交汇区水流横向流速的三维特性明显,不同水深的截面横向流速大小、范围均不相同,中水深截面横向流速最大、范围最广,近表面与近底面相对较小。在大交汇角、低汇流比时($\alpha=90^\circ$ 、 $R_q=0.30$),在近表面形成负向流速,会产生二次环流。

2) 在交汇口区域,横向流速的影响范围随着汇流比的增大、或者交汇角的减小而缩小,支渠水流对主渠水流的影响降低,主渠水流垂向流速不均匀性减小。

3) 主渠内横向流速最大值随着交汇角增大或者汇流比减小,均呈现单调递增的趋势。当交汇角在 $60^\circ\sim 70^\circ$ 及汇流比在0.60左右时,主渠内最大横向流速的增幅较小,且未达到最大值,对交汇区水流的影响较小。

4) 提出一种分析交汇区水流结构新视角,交汇区垂向流速不均匀主要区域为分离区,垂向流速不均匀次要区域为二次环流区,两者间隔离带为剪切层,剪切层中间为支渠水流通带。

参考文献:

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

[2] BALOUCHI B, SHAFAI-BEJESTAN M, RUTHER N, et al. Experimental investigation of flow pattern over a fully developed bed at a 60° river confluence in large floods[J]. Acta geophysica, 2022, 70(5): 2283-2296.

[3] SCHINDFESSEL L, CREËLLE S, DE MULDER T. How different cross-sectional shapes influence the separation zone of an open-channel confluence [J]. Journal of hydraulic engineering, 2017, 143(9): 04017036.

[4] GURRAM S K, KARKI K S, HAGER W H. Subcritical junction flow[J]. Journal of hydraulic engineering, 1997, 123(5): 447-455.

[5] 胥宗强,魏炳乾,薛博升,等.明渠交汇口分离区三维几何特性的大涡模拟研究[J].应用力学学报,2021,38(1):409-417.

XU Z Q, WEI B Q, XUE B S, et al. Investigation of three-dimensional geometry of separation zone at open-channel junctions by large eddy simulation[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2021, 38(1): 409-417.

[6] 王协康,王宪业,卢伟真,等.明渠水流交汇区流动特征试验研究[J].四川大学学报(工程科学版),2006,38(2):1-5.

WANG X K, WANG X Y, LU W Z, et al. Experimental study on flow structure at open channel confluences[J]. Journal of Sichuan University (engineering science edition), 2006, 38(2): 1-5.

[7] WEBER L J, SCHUMATE E D, MAWER N. Experiments

- on flow at a 90° open-channel junction [J]. Journal of hydraulic engineering, 2001, 127(5): 340-350.
- [8] 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.
- [9] YUAN S Y, TANG H W, XIAO Y, et al. Turbulent flow structure at a 90-degree open channel confluence: Accounting for the distortion of the shear layer[J]. Journal of hydro-environment research, 2016, 12(9): 130-147.
- [10] 王冰洁, 周苏芬, 王海周, 等. 明渠干支河流直角交汇区整流方法探讨[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2015, 47(S1): 7-12.
- WANG B J, ZHOU S F, WANG H Z, et al. Regulation method in right-angled river confluence [J]. Journal of Sichuan University (engineering science edition), 2015, 47(S1): 7-12.
- [11] 刘同窑, 郭炜, 王协康, 等. 入汇角为 30° 时交汇区水流结构试验研究[J]. 长江科学院院报, 2007, 24(4): 75-78.
- LIU T H, GUO W, WANG X K, et al. Experimental study on flow characteristics of open channel confluence at junction angle 30° [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2007, 24(4): 75-78.
- [12] SHEN X, LI R, CAI H J, et al. Characteristics of secondary flow and separation zone with different junction angle and flow ratio at river confluences [J]. Journal of hydrology, 2022, 614: 128537.
- [13] 周舟, 曾诚, 周婕, 等. 等宽明渠交汇口流速分布特性数值模拟[J]. 水利水运工程学报, 2020(1): 32-39.
- ZHOU Z, ZENG C, ZHOU J, et al. Numerical investigation on distribution characteristics of velocities at equal-width open-channel confluences [J]. Hydro-science and engineering, 2020(1): 32-39.
- [14] 周舟, 曾诚, 周婕, 等. 等宽明渠交汇口壅水特性数值模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(4): 347-353.
- ZHOU Z, ZENG C, ZHOU J, et al. Numerical simulation of backwater characteristics at equal-width open-channel confluences [J]. Journal of Hohai University (natural science), 2020, 48(4): 347-353.
- [15] 薛博升, 魏炳乾, 王非, 等. 汇流比和入汇角对明渠交汇水流特性影响的对比研究[J]. 应用力学学报, 2019, 36(3): 658-665, 762-763.
- XUE B S, WEI B Q, WANG F, et al. A comparative study of the influence of confluence ratio and tributary angle on flow state of an open channel [J]. Chinese journal of applied mechanics, 2019, 36(3): 658-665, 762-763.
- [16] 周舟, 曾诚, 周婕, 等. 等宽明渠交汇口流速分布特性数值模拟[J]. 水利水运工程学报, 2020(1): 32-39.
- ZHOU Z, ZENG C, ZHOU J, et al. Numerical investigation on distribution characteristics of velocities at equal-width open-channel confluences [J]. Hydro-science and engineering, 2020(1): 32-39.
- [17] 兰波, 汪勇. 干支流交汇水面形态特征分析[J]. 重庆交通学院学报, 1997, 16(4): 109-114.
- LAN B, WANG Y. Experimental study on water surface characteristics at the junction [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (natural science), 1997, 16(4): 109-114.
- [18] 冯镜洁, 李然, 王协康, 等. 河流交汇分离区特性研究[J]. 水动力学研究与进展(A 辑), 2009, 24(3): 320-325.
- FENG J J, LI R, WANG X K, et al. Study on characteristics of separation zone at river confluence [J]. Journal of hydrodynamics (Ser. A), 2009, 24(3): 320-325.
- [19] 吴菲, 刘瑞芬, 白凤朋, 等. 交汇角和流量比对于支流交汇区水流结构影响模拟研究[J]. 中国农村水利水电, 2024(4): 15-23.
- WU F, LIU R F, BAI F P, et al. Study on the influence of intersection angles and confluence ratios on the flow structure in the intersection area of main and branch rivers [J]. China rural water and hydropower, 2024(4): 15-23.
- [20] 吴菲, 白凤朋, 陈雪妮, 等. 明槽支流交汇区水动力特性 PIV 试验研究[J]. 水电能源科学, 2023, 41(11): 111-115.
- WU F, BAI F P, CHEN X N, et al. Experimental study on hydrodynamic characteristics of open channel tributary intersection area based on PIV technology [J]. Water Resources and Power, 2023, 41(11): 111-115.
- [21] 曾诚, 陈辰, 周舟, 等. 明渠交汇流分离区形态及二次流强度分析[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(2): 50-55.
- ZENG C, CHEN C, ZHOU Z, et al. Analysis on separation zone shape and secondary current intensity in

- open-channel combining flows[J]. Advances in science and technology of water resources, 2022, 42(2): 50-55.
- [22] 陈雪妮, 杨中华, 尹炜, 等. 弱混合条件下支流入汇口水力特性数值模拟[J]. 中国农村水利水电, 2023(8): 120-127, 134.
- CHEN X N, YANG Z H, YIN W, et al. Numerical simulation of hydraulic characteristics of tributary confluence under weak mixing conditions[J]. China rural water and hydropower, 2023(8): 120-127, 134.
- [23] 刘盛赞, 康鹏, 李然, 等. 水流交汇区的水动力学特性数值模拟[J]. 水利水电科技进展, 2012, 32(4): 14-18, 22.
- LIU S Y, KANG P, LI R, et al. A numerical study on hydrodynamic characteristics of confluence flow [J]. Advances in science and technology of water resources, 2012, 32(4): 14-18, 22.
- [24] 曾诚, 尹雨然, 陈辰, 等. 明渠弯道交汇口水动力特性数值模拟[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(2): 9-15, 38.
- ZENG C, YIN Y R, CHEN C, et al. Numerical simulation of hydrodynamicsof open-channel confluences with bend flow [J]. Advances in science and technology of water resources, 2023, 43(2): 9-15, 38.
- [25] RHOADS B L, JOHNSON K K. Three-dimensional flow structure, morphodynamics, suspended sediment, and thermal mixing at an asymmetrical river confluence of a straight tributary and curving main channel [J]. Geomorphology, 2018, 323(12): 51-69.
- [26] 杨青远, 周苏芬, 卢伟真, 等. 明渠交汇水流阻力对平面二维数值模拟的影响[J]. 水科学进展, 2012, 23(2): 236-242.
- YANG Q Y, ZHOU S F, LU W Z, et al. Influence of additional resistances on numerical simulation of 2D flow at river channel confluences [J]. Advances in water science, 2012, 23(2): 236-242.
- [27] 茅泽育, 赵雪峰, 许昕, 等. 交汇水流三维数值模型[J]. 科学技术与工程, 2007, 7(5): 800-805.
- MAO Z Y, ZHAO X F, XU X, et al. 3D numerical model for confluence flow [J]. Science technology and engineering, 2007, 7(5): 800-805.
- (本文编辑 王传瑜)

(上接第 131 页)

- [11] 重庆交通大学. 三峡—葛洲坝两坝间莲沱段航道整治工程物理模型试验研究报告[R]. 重庆: 重庆交通大学, 2013.
- Chongqing Jiaotong University. Physical model test research report of the waterway regulation project at Liantuo section between two dams of Three-Gorges and Gezhouba [R]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2013.
- [12] 交通运输部天津水运工程科学研究所. 三峡—葛洲坝两坝间莲沱段航道整治工程物理模型试验研究报告[R]. 天津: 交通运输部天津水运工程科学研究所, 2014.
- Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, MOT. Physical model test research report of the waterway regulation project at Liantuo section between two dams of Three-Gorges and Gezhouba [R]. Tianjin: Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, MOT, 2014.
- [13] 交通运输部长江航务管理局. 三峡—葛洲坝水利枢纽通航调度规程(2022年修订版)[A]. 武汉: 交通运输部长江航务管理局, 2022.
- Changjiang River Administration of Navigation Affairs, MOT. Navigation and dispatch regulations for Three Gorges-Gezhouba water conservancy hub(revised edition 2022) [A]. Wuhan: Changjiang River Administration of Navigation Affairs, MOT, 2022.
- [14] 交通运输部天津水运工程科学研究所. 三峡—葛洲坝两坝间莲沱段航道整治工程工程可行性研究报告[R]. 天津: 交通运输部天津水运工程科学研究所, 2014.
- Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, MOT. Feasibility study report of the waterway regulation project at Liantuo section between two dams of Three Gorges and Gezhouba [R]. Tianjin: Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, MOT, 2014.
- (本文编辑 王传瑜)