

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.02.012

含滩地交汇河道水动力特性与掺混特征数值模拟

汪晨辉¹, 张汇明²

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学水科学研究院, 江苏 南京 210098)

摘要: 为研究滩地对河道交汇区水动力特性以及物质输移的影响, 建立了含滩地河道交汇区的三维水动力-污染物耦合数值模型, 模拟并分析了不同高度和宽度的滩地对交汇区水流结构及污染物横向掺混的影响。研究表明: 支汊滩地引起的侧向入流垂向动量重分布, 对交汇区的双螺旋流结构, 污染物横向扩散范围以及掺混层的位置、形态特征和宽度等均有显著影响; 支流侧二次流强度和范围随着滩地高度的增加而增大, 滩地展宽使支流侧二次流向左岸偏移、强度增大; 污染物混合程度与二次流密切相关, 二次流的强度、位置和范围均对物质掺混速率有重要的影响, 二次流的强度越高、范围越大、位置越接近掺混层, 污染物掺混速率越快。

关键词: 河道交汇; 二次流; 掺混; 数值模拟; 雷诺应力模型; 滩地

中图分类号: TV133.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2023)02-0089-10

Hydrodynamic and mixing characteristics of river confluence with floodplain

WANG Chenhui¹, ZHANG Huiming²

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Institute of Water Science and Technology, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to study the effect of floodplain on the flow characteristics and pollutant transport of river confluence, a three-dimensional hydrodynamic and pollutant coupled numerical model is established to simulate and analyze the effects of floodplain with different heights and widths on the flow structure and transverse mixing characteristics of pollutants in the confluence in this study. The results show that the vertical momentum redistribution of the lateral inflow, which is caused by the floodplain, has a significant influence on the structure of the twin-helical flow, the transverse advection range of pollutants, and the position, morphological characteristics and width of the mixing layer. The intensity and range of the secondary flow increase with the increase of floodplain height. The widening of the floodplain makes the secondary flow deviate from the left bank and its intensity increases. In addition, the mixing degree of pollutant is closely related to the secondary flow, i. e., the intensity, location and range of secondary flow; the higher intensity, the larger range and the closer position to the mixing layer can result in the faster the material mixing rate.

Key words: river confluence; secondary flow; mixing; numerical simulation; Reynolds stress model; floodplain

滩地是河流常见的组成部分, 淹没时增大了河道的过水断面, 影响了河道中的物质输移以及滩槽间的物质交换^[1]。对于含滩地的交汇河道, 滩地的存在会影响交汇的水动力特征^[2-3]以及两汊水流的掺混过程。如在长江-鄱阳湖交汇区, 鄱阳湖入江水道的左岸有一个高出主槽 10 m 左右、宽度占河道总宽度近一半的滩地, 每年有 6 个月淹没于水下, 这样大面积的滩地会影响长江-鄱阳湖交汇区的水动力特性和物质掺混过程^[4]。

相关学者针对水流交汇区的水动力特性展开了一系列研究。Best^[5]经过大量的室内试验及现场观测, 提出了较为完善的交汇河道水流分区模型, 根据不同的水流特征将交汇区的水流分为 6 个区域, 包括: ①上游交汇角处的停滞区; ②两支水流交界面的剪切层; ③水流偏转区; ④下游内岸侧的分离区; ⑤最大流速区; ⑥水流恢复区。分离区的形成主要是由水流流向偏转造成的。支流交汇后, 水流向下游偏转时在下游拐角

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51779080)

作者简介: 汪晨辉(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事计算水力学研究。E-mail: wangch30@foxmail.com

通信作者: 张汇明(1990—), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事河网模拟与物质输移规律研究。E-mail: hmzhang@hhu.edu.cn

引用本文: 汪晨辉, 张汇明. 含滩地交汇河道水动力特性与掺混特征数值模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(2): 89-98.

WANG Chenhui, ZHANG Huiming. Hydrodynamic and mixing characteristics of river confluence with floodplain[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(2): 89-98.

处与边壁分离,同时,主流由于受到支流的冲击挤压,偏向外岸,致使在交汇区下游内岸一侧形成一个低流速区,即分离区。

现场观测发现,二次流在交汇流中非常常见,如长江-鄱阳湖交汇区在汛期存在两个反向旋转的螺旋流^[6]。二次流是由于两汉来流偏转造成惯性力和压力之间的不平衡产生的^[7],其影响因素主要包括汇流比和河床地形等^[8]。等高河床交汇流的研究表明,流线曲率诱导的二次流增加了河流汇合处的掺混速率^[9]。当支流与主流存在河床高差时,床面高程变化的坡脚处产生的流动分离显著增强了二次流的强度,二次流带动河道底部水流与表层水流掺混,是促进水流快速掺混的重要因素^[10],大幅缩短了河流交汇处下游水流的混合长度^[7]。河床不等高会造成河床处主流的偏转,掺混层向较浅的支流扭曲,导致水流从较深的河道流动到较浅的河道,引起污染物掺混层形态的变化,同时明显提升交汇区污染物掺混速率^[11-12]。

目前河道交汇的水动力特性已经有愈来愈多的研究,但含滩地河道交汇水动力特性方面的研究还少有报道。本文基于RSM紊流模型,针对含滩地90°等宽交汇明渠建立三维数值模型,研究交汇区二次流结构、物质输移扩散过程,进一步探讨滩地形态对交汇区二次流结构和污染物掺混过程的影响,以期增加对含滩地河道交汇水动力特性和污染物输移扩散规律的认识。

1 数值模型

1.1 控制方程

采用基于雷诺时均(RANS)方程的三维两相流模型,其基本控制方程的连续性方程和动量守恒方程分别为

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{u'_i u'_j} \right) + \bar{g}_i \tag{2}$$

采用雷诺应力模型(RSM)封闭雷诺时均N-S方程组。雷诺应力模型通过引入雷诺应力的输运方程求解雷诺应力张量的各分量,避免陷入涡黏性假设的局限,该方法能较好地反映湍流的各向异性特征^[13]。

雷诺应力输运方程如下:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\overline{u'_i u'_j}) + \overline{u_k} \frac{\partial}{\partial x_k} (\overline{u'_i u'_j}) = D_{r,ij} + D_{L,ij} + P_{ij} + \Pi_{ij} + \varepsilon_{ij} \tag{3}$$

其中

$$D_{r,ij} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left(C_s \frac{k^2}{\varepsilon} \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_k} \right) \quad D_{L,ij} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\nu \frac{\partial}{\partial x_k} (\overline{u'_i u'_j}) \right) \quad P_{ij} = - \left(\overline{u'_i u'_k} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_k} + \overline{u'_j u'_k} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k} \right)$$
$$\Pi_{ij} = - C_1 \frac{\varepsilon}{k} (\overline{u'_i u'_j} - \frac{2}{3} k \delta_{ij}) - C_2 (P_{ij} - \frac{2}{3} P \delta_{ij}) \quad \varepsilon_{ij} = \frac{2}{3} \delta_{ij} \varepsilon \quad P = \frac{1}{2} P_{ii} \quad k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i}$$

式中: $\bar{u}_i, \bar{u}_j$ 为瞬时流速时均值($i, j=1, 2, 3$ 分别代表 x, y, z 坐标方向); x_i, x_j 为笛卡尔坐标; k 为紊动能; ε 为耗散率; δ_{ij} 为克罗内克函数,其他物理量含义见文献[14-15]。

该方程需联合紊动能和耗散率的输运方程进行求解:

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \frac{1}{2} (P_{ii} + G_{ii}) - \rho \varepsilon \tag{4}$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{u}_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = - C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(C_{\varepsilon} \frac{k}{\varepsilon} \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \tag{5}$$

参照国内外现有关于交汇流数值模拟研究成果^[15],模型参数取值如下: $C_s=0.11, C_1=1.8, C_2=0.60, C_{\varepsilon}=0.15, C_{\varepsilon 1}=1.44, C_{\varepsilon 2}=1.92; i=j$ 时, $\delta_{ij}=1; i \neq j$ 时, $\delta_{ij}=0$ 。

两汉来流污染物质量浓度分布的计算可在水动力计算的基础上,通过增加计算污染物质量浓度变化的组分输运方程来实现。污染物的输移扩散方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial u_i \rho}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left((D_m + D_t) \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \right) \tag{6}$$

$$D_t = \frac{\mu_t}{\rho_w S_{Ct}} \tag{7}$$

式中: ρ 为污染物质量浓度值; D_m 为分子扩散系数,忽略分子扩散,取0; D_t 为湍流扩散有效系数; μ_t 为湍流

黏度; ρ_w 为水的密度; S_{Cl} 为湍流施密特数,通常取值为 $0.7^{[16]}$ 。

采用有限体积法对控制方程进行离散,对于六面体网格这类可以识别唯一上下游网格面的网格,控制方程与污染物输移扩散方程的对流项与扩散项离散格式均采用精度较高的 QUICK 格式。在与流动方向一致的结构网格上,QUICK 格式通常会更加精确。采用 PISO 算法求解压力流速耦合关系^[17],该算法采用测-修正-再修正 3 个步骤,提升了单个迭代步中的收敛速度。利用流体体积法 (VOF) 追踪自由水面,通过计算水相体积分数的连续性方程来实现对两相界面的跟踪。

1.2 计算域及边界

参考 Weber 等^[18]建立的 90° 等宽矩形截面交汇明渠物理试验模型,计算区域如图 1 所示。坐标系原点位于渠道交汇口上游转角渠底处,所有长度均按渠道宽度 W_d 无量纲化, $W_d=0.914\text{ m}$ 。流速按出口平均流速 u_t 无量纲化, $u_t=0.628\text{ m/s}$ 。上游主渠、支渠和下游主渠的流量分别表示为 Q_m 、 Q_b 和 Q_t ,汇流比 q 定义为 Q_m/Q_t , $Q_t=0.170\text{ m}^3/\text{s}$ 。图 1 中 1 号截面位于 $x/W_d=-1$ 处,2 号截面位于 $x/W_d=-2$ 处,以此类推, $A'-A$ 截面位于 $y/W_d=-2$ 处。

数值模型采用的几何尺寸和水力参数与试验相同,主渠与支渠的宽度均为 0.914 m ,高度为 0.5 m 。主渠长度为 $22.85\text{ m}(25W_d)$,支渠长度 $9.14\text{ m}(10W_d)$ 。模型下游出口边界距原点坐标 $15W_d$,尾水水深 H_d 恒定为 0.30 m 。

进口边界分上部压力进口和下部流速进口;出口边界为压力出口,采用静水压强分布,进出口边界紊动能和耗散率按经验公式计算:

$$k = 0.00375u^2 \qquad \varepsilon = \frac{k^{1.5}}{0.4H}$$

(8)

式中: u 为边界流速值; H 为边界水深。

壁面边界采用无滑移标准壁面函数法,忽略粗糙度的影响。

$$u^+ = \begin{cases} y^+ & y^+ > 11.225 \\ \frac{1}{K} \ln(Ey^+) & y^+ < 11.225 \end{cases} \qquad (9)$$

$$y^+ = \frac{\rho \Delta y C_\mu^{\frac{1}{4}} k^{\frac{1}{2}}}{\mu}$$

式中: Δy 为计算点距边壁的距离; u 为计算点的时均流速; μ 为水的动力黏度; E 为经验系数(等于 9.792); K 为卡门常数。

渠底和侧壁边界层网格尺寸为 10 mm ,满足 $30 \leq y^+ \leq 300^{[19]}$,壁面网格其他方向尺寸与全局网格相同。图 2 中模型采用结构化六面体网格,进口段网格 x 方向尺寸为 100 mm , y 方向尺寸为 20 mm , z 方向尺寸为 15 mm ;交汇区域网格 x 方向尺寸为 20 mm , y 方向尺寸为 20 mm , z 方向尺寸为 15 mm ,网格总数为 590975 个。

1.3 网格无关性分析

网格 1 在交汇区域的 x 方向尺寸为 30 mm ,进口段 x 方向尺寸为 200 mm ,网格总数为 252252 个;网格 2 在网格 1 的基础上加密,交汇区域 x 方向尺寸为 20 mm ,进口段 x 方向尺寸为 100 mm ,网格总数为 590975 个;网格 3 进一步加密,交汇区域 x 方向尺寸为 15 mm ,进口段网格尺寸不变,网格总数为 1097460 个。采用均方根误差 (RMSE) 和平均绝对误差 (MAE) 来度量不同网格误差的大小^[20],通过比较流速散布图(图 3)和

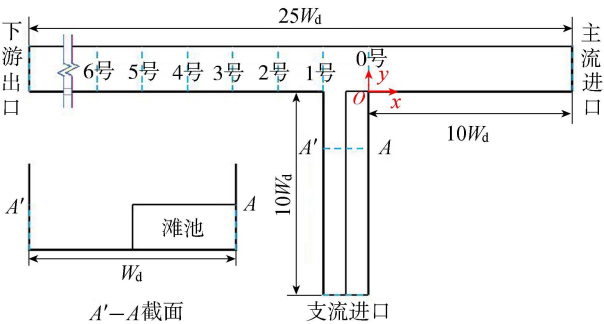


图 1 计算区域示意图

Fig. 1 Schematic map of the computational domain

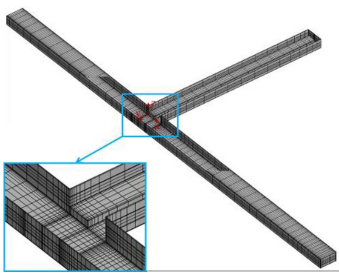


图 2 全局网格示意图

Fig. 2 Schematic map of global grids

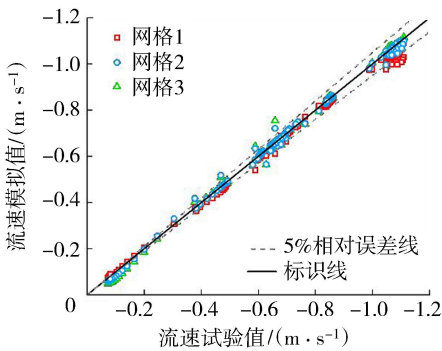


图 3 流速散布图

Fig. 3 Scatter plot of stream wise velocities

不同网格误差(表 1)发现,网格 2 模拟的流速值越接近试验值,均方根误差减小幅度越大;网格 3 模拟的流速值与网格 2 相当,均方根误差变化不大。考虑到节约计算资源、提高计算效率,选取网格 2 为后期数值模拟计算的网格。

1.4 数值模拟工况

为研究滩地形态对交汇区水动力特性和污染物掺混的影响,如表 2 所示。选取 $q=0.6$,设置滩地宽度不变、高度逐渐增加(A1 ~ A4)和滩地高度不变、宽度逐渐增加(B1 ~ B4)8 组工况,其中 A0 为验证工况,滩地相对高度 h^* 和相对宽度 w^* 分别采用 H_d 和 W_d 无量纲化。污染物由支流流入交汇河道,支流污染物质量浓度 $\rho_b=100\text{ mg/L}$ 。设定支汊来流污染物为浓度稳定的保守性污染物,不与其他物质发生化学反应^[21],污染物的输移扩散仅取决于对流扩散和湍流扩散。

2 模型验证

选用 Weber 等^[18]物理试验模型的实测数据作为参照,验证交汇流数值模型的准确性。验证工况为 A0, $q=0.25$ 。

为比较不同紊流模型模拟交汇流的精度,采用常用的 RSM、RNG $k-\varepsilon$ 和 $k-\omega$ 3 种紊流模型分别模拟工况 A0 下的交汇流,将不同紊流模型模拟的水面线(图 4)、交汇口下游测点流速(图 5)与试验数据进行比较,发现各紊流模型均对水面线的模拟较好,能准确模拟水面线交汇前的壅起与交汇区的跌落特征。选取物理试验中 0 号、1 号、2 号和 6 号截面的实测数据验证交汇区流速场,RNG $k-\varepsilon$ 与 $k-\omega$ 紊流模型在 2 号与 6 号截面模拟的流速分布有较大误差,RSM 紊流模型对纵向流速模拟的误差在 1% 以内,相比于其他紊流模型更准确地模拟了交汇流大部分的重要水动力特性,符合实际的流动规律。

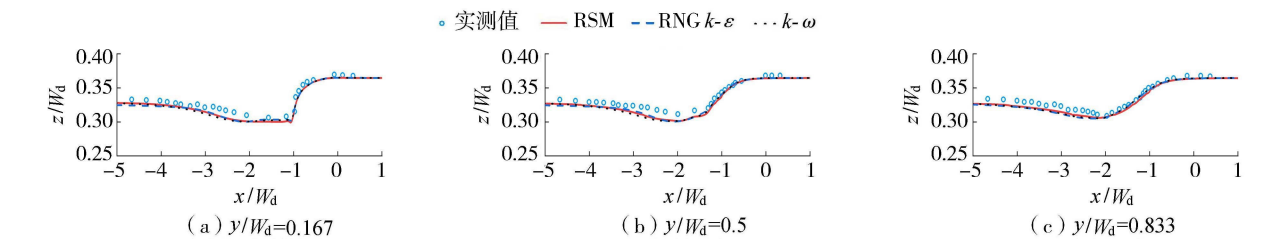


图 4 水面线计算结果对比
Fig. 4 Comparison of calculation results for the water surface line

3 数值模拟结果与分析

3.1 水动力特性

3.1.1 滩地对动量垂向分布的影响

不同滩地尺寸の入流动量分布将会对交汇后的水动力特性产生影响^[22]。为了描述入流动量的特征,对支流宽度平均动量分布曲线进行分析。支流宽度平均动量的计算公式如下:

$$m_s(z) = \int_0^W u(y,z) dy$$

(10)

式中: $u(y,z)$ 为支流纵向流速; W 为渠道宽度。动量按截面平均值 M_s 无量纲化:

$$M_s = [\int_0^h m_s(z) dz]/h$$

(11)

图 6 为不同工况下的垂向动量分布(A'-A 截面),A1 工况(无滩地)动量在 $z/W_d>0.1$ 时变化不大,近水面和近床面的动量差异相对较小。动量分布在滩地高度处有明显的突变,随着滩地高度和宽度的增加,近水

面与近床面的动量差异越大。

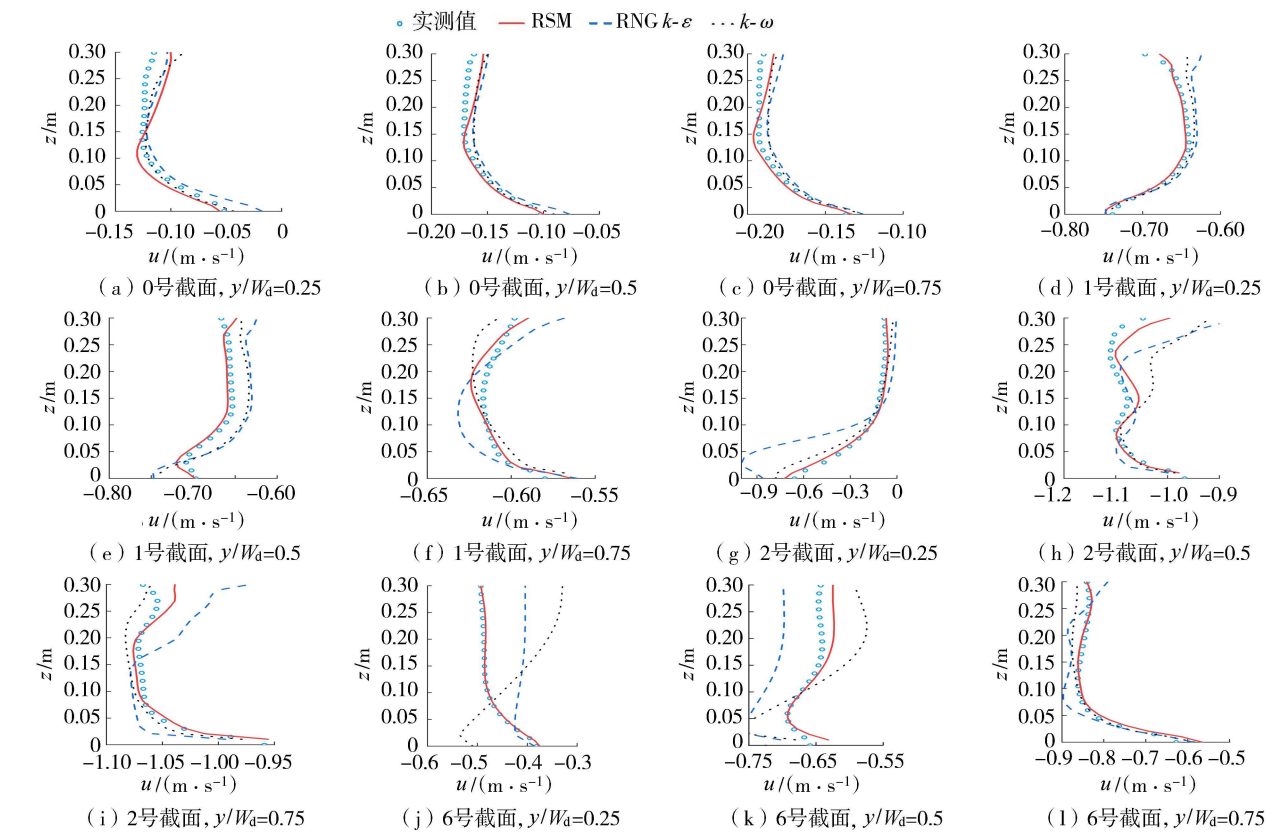


图 5 交汇口下游测点流速剖面对比

Fig.5 Comparison of flow velocity profiles at the downstream measuring points of the confluence

3.1.2 不同滩地高度对交汇区水流结构的影响

支叉滩地的存在对交汇区三维水流结构有明显的影响。不同滩地高度工况下,各截面有相近的纵向流速分布规律。2 号截面左侧存在正的纵向流速,即分离区(分离区边界为零纵向流速等值线,图 7 中用虚线表示),分离区的最大宽度约为 0.18 W_d ,纵向高流速位于截面中右侧;4 号截面分离区消散,流速分布更为均匀(图 7)。

A1 工况下(图 7(a)),2 号截面存在两股左右分布的反向二次流。一股主要由支流水流向下偏转引起,逆时针方向旋转;另一股主要由支流二次流和主渠水流共同作用引起,在分离区底部形成,顺时针方向旋转^[10]。随着水流继续向下游发展,支流侧二次流快速消失,主流侧二次流强度逐渐减小。

随着滩地高度的增加,支流侧二次流强度和范围逐渐增大,二次流中心横向从分离区向渠道中间移动,垂向不断升高。支流近水面的横向动量增加,引起两汊来流偏转增强及支流侧的二次流强度增大,这与矩形倒角截面明渠交汇流中二次流的变化规律相似^[22]。A4 工况下(图 7(d))2 号截面左侧二次流不断发展,挤压了右侧二次流,右侧二次流几近消失。经过分离区(4 号截面),左侧二次流依然存在,底部存在流速较大指向左岸的横向水流。

3.1.3 不同滩地宽度对交汇区水流结构的影响

在不同滩地宽度工况二次流的作用下,近水面流速分布更为均匀,而近床面存在向左侧延伸的高速水流(图 8(c))。B4 工况下(即支流河床整体高于主渠),由于河床高差引起的流动分离,来自主渠的部分水流经截面左侧直接流向下流,这股水流破坏了台阶高度以下分离区的形成,在支叉床面高程以上的区域与上升

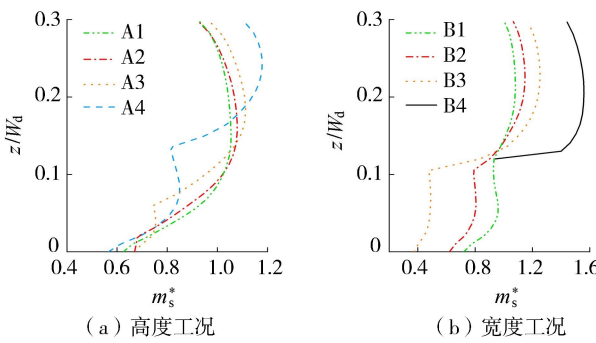


图 6 宽度平均动量分布

Fig.6 Distribution of streamwise momentum averaged over the width

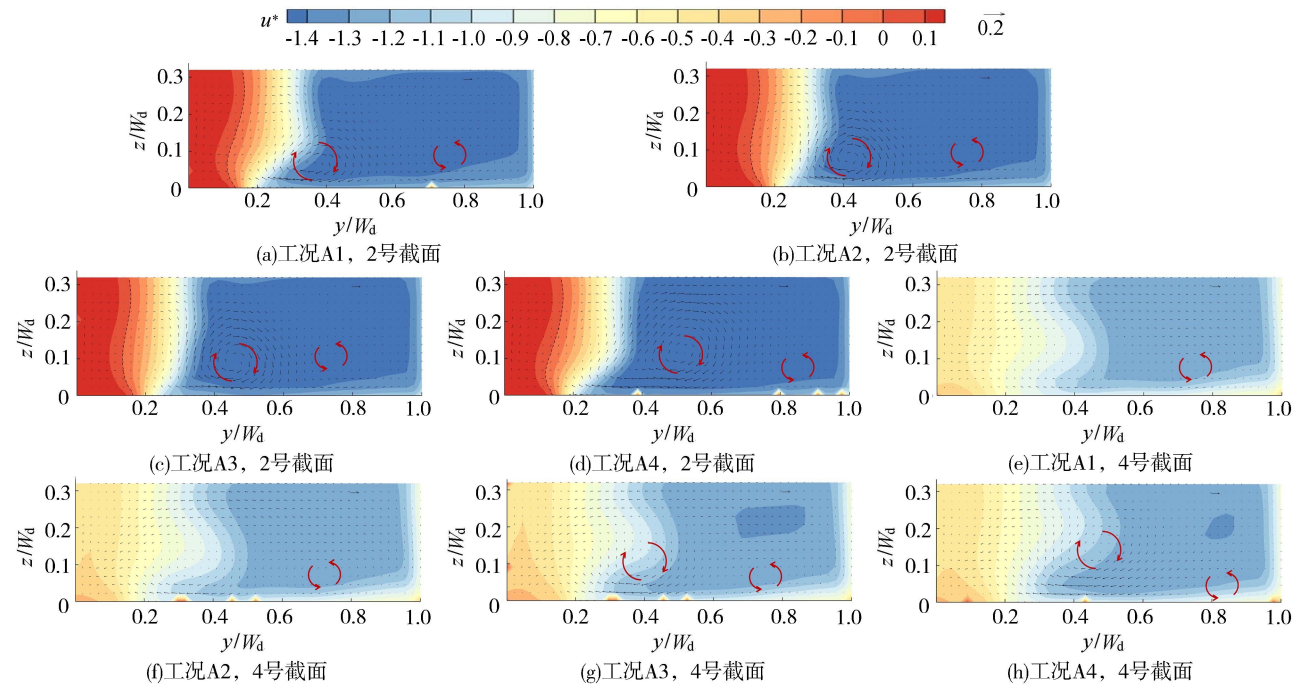


图 7 高度工况纵向流速 u^* 分布

Fig. 7 Distribution of the longitudinal streamwise velocity u^* with different heights

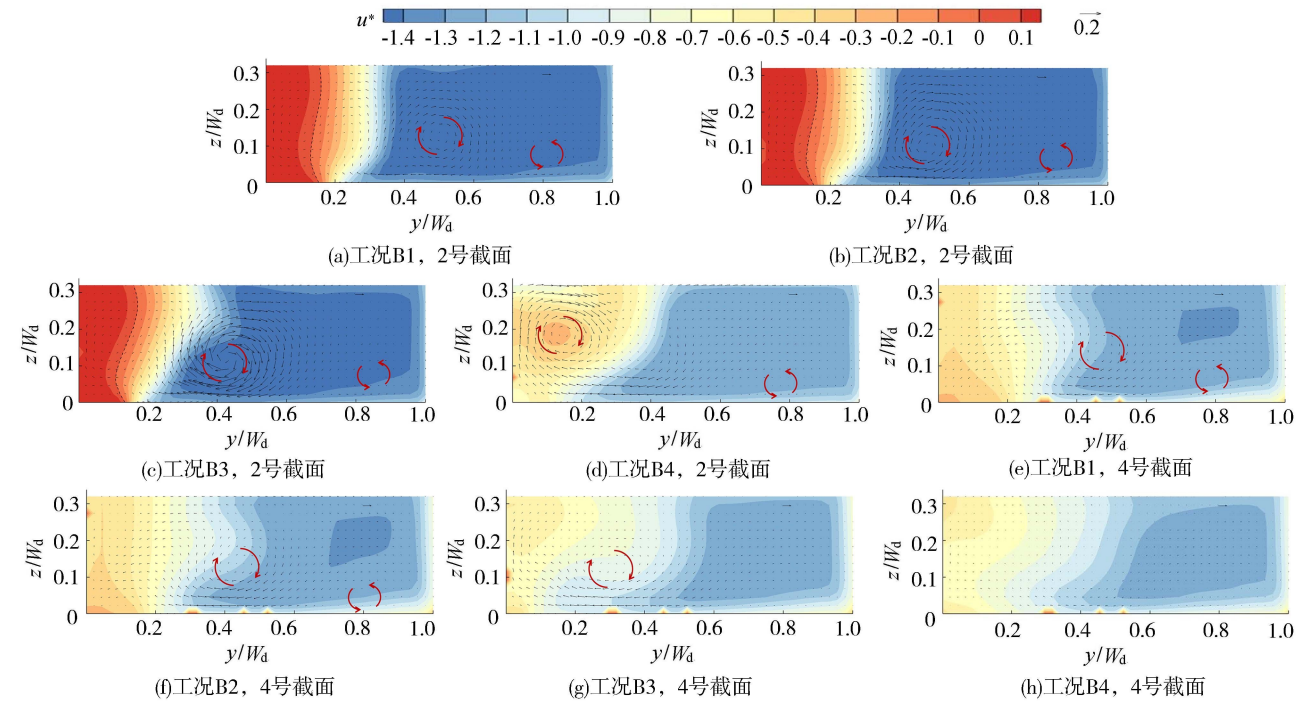


图 8 宽度工况纵向流速 u^* 分布

Fig. 8 Distribution of the longitudinal streamwise velocity u^* with different widths

水流相互作用,分离区从左岸边缘脱离^[23]。2 号截面分离区已经消失(图 8(d)),说明分离区长度不足 1 倍 W_d 。由于河床附近分离区的快速消失,交汇水流没有经过收缩截面。

随着滩地宽度的增加,左侧二次流强度增大,二次流中心从 $y/W_d=0.51 \sim 0.4$ 往左侧移动(图 8(a)(b)(c)),位于分离区右侧,右侧的二次流几近消失。侧向压力梯度对二次流的形成和发展有重要的作用,Bradbrook 等^[7]在研究中指出,受横向压力梯度和压力梯度垂向角度的影响,截面左侧形成强烈的二次流。从本文计算结果可看出,随着滩地宽度的增大,在 $x/W_d=-1.05$ 截面侧向压力梯度缓慢增加(301.9 ~ 313.1 Pa/m),

其中,在支流河床整体高于主渠(B4)工况中,横向压力梯度出现突增(378.5 Pa/m)。二次流在横向压力梯度增大的影响下逐渐增强,首先坡脚处的流动分离使得左岸近床面形成负压区,在左岸形成了较强的上升流,近床面惯性力小的水流在侧向压力梯度的作用下向左岸流动,引起左侧二次流增强,二次流位于靠左岸的位置(图 8(d))。

3.2 污染物掺混

3.2.1 滩地对掺混层位置的影响

不同工况下,污染物在河道交汇处的浓度分布存在明显不同的特征。掺混层能够反映被污染水体在河道交汇处横向扩散范围的变化,是交汇区污染物输移特征的重要指标。掺混层的位置采用污染物平均质量浓度 ρ_p 来表示:

$$\rho_p = \frac{\rho_b \rho_b + \rho_m \rho_m}{Q_b + Q_m}$$

(12)

式中 ρ_b 、 ρ_m 分别为支流和主渠的污染物质量浓度。工况设计中污染物仅由支流流入,所以将 ρ_b 无量纲化为 ρ^* ,掺混层位置即为 $\rho^* = \rho_p / \rho_b = 0.4$ 的等值线。

A1 工况下,2 号截面掺混层位于 $y/W_d = 0.6$ (图 9(a)),当滩地高度为 0.25 时,近水面掺混层向右岸微微移动,底部掺混层向左岸扭曲,随着滩地高度增加至 0.5,近水面支流入射动量更大,掺混层大幅向右岸倾斜,在左侧顺时针方向旋转的二次流作用下,掺混层在底部向左岸大幅扭曲。滩地宽度的增加也使得近水面掺混层向右岸移动,移动距离相对于滩地高度工况较小,掺混层底部有相似的扭曲。

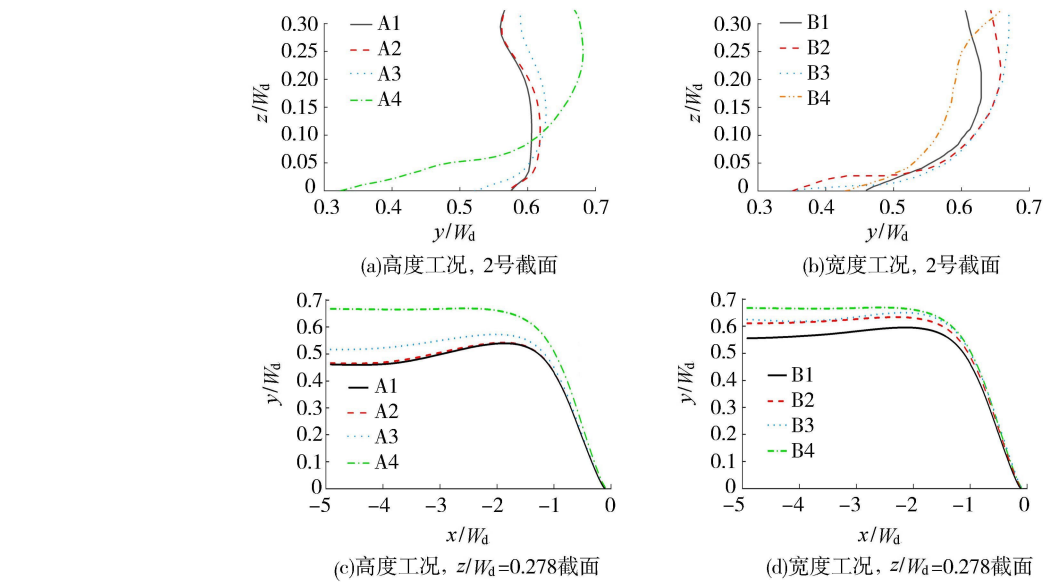


图 9 掺混层位置

Fig.9 Position of the mixing layer

3.2.2 滩地对污染物掺混均匀程度的影响

图 10 和图 11 为高度与宽度工况污染物质量浓度分布,截面污染物无量纲化质量浓度 $\rho^* = 0$ 表示主渠水流的浓度, $\rho^* = 1$ 表示支流水流的浓度,虚线表示掺混层位置($\rho^* = 0.4$)。将 ρ^* 的均方根定义为不均匀系数 σ 。 σ 越小表示混合越均匀,当 $\sigma = 0$ 时表示完全混合。 σ 沿程的斜率表示掺混速率,斜率越大,表明掺混速率越快。 σ 表达式如下:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^n (\rho_n - \bar{\rho})^2 \right]}$$

(13)

式中: ρ_n 为截面第 n 个计算点(计算点在截面做均布处理)的 ρ^* ; $\bar{\rho}$ 为截面平均质量浓度。

2 号截面掺混层厚度^[24]与渠道宽度相比较窄,随着滩地高度增加、范围逐渐增大的二次流不断向右移动,掺混层不再垂直于床面,底部向支流扭曲并逐渐倾斜,底部横向展宽增大,两汉来流混合得更加均匀(图 10)。

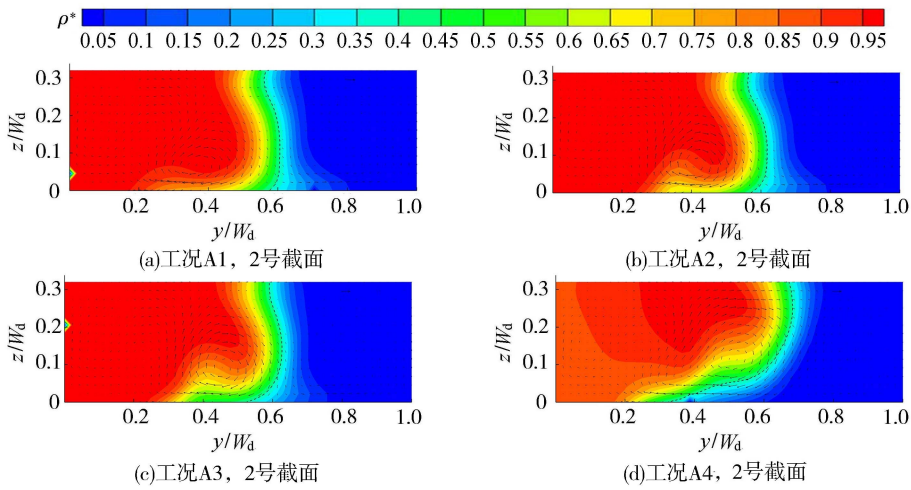


图 10 高度工况污染物质量浓度分布

Fig. 10 Contour of pollutant concentration in cases with different heights

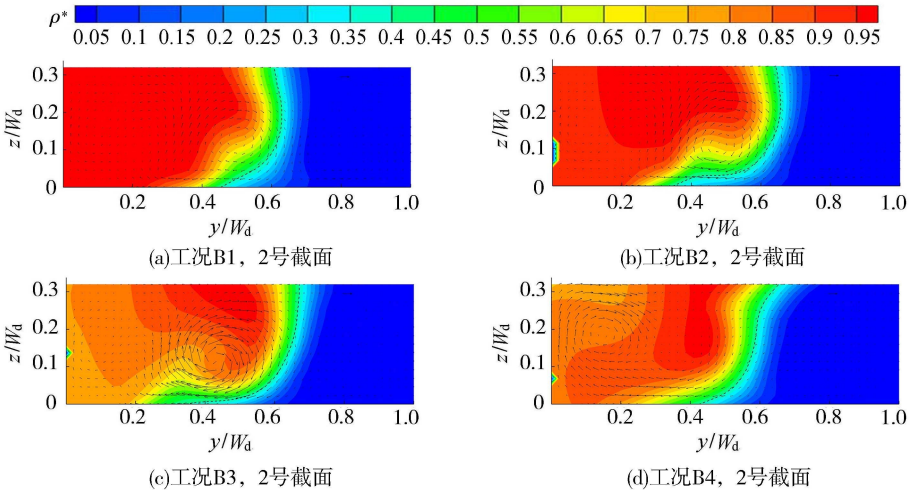


图 11 宽度工况污染物质量浓度分布

Fig. 11 Contour of pollutant concentration in cases with different widths

当滩地宽度改变时,左侧二次流处于掺混层中(图 11),二次流强度随着滩地宽度的增加而增大,两汊来流通过二次流充分地混合。B4 工况(即支流河床整体高于主渠)下,2 号截面低污染物质量浓度的水流经左岸较强的上升流到达水面(图 11(d)),此时的二次流处于渠道左岸,这样的变化使得该二次流几乎位于支流来流中并快速消散,减少了对流作用对两汊来流掺混的促进作用。

图 12 中不同滩地高度和宽度工况的混合程度从大到小排序如下:A4、A3、A2、A1;B3、B2、B4、B1,两汊

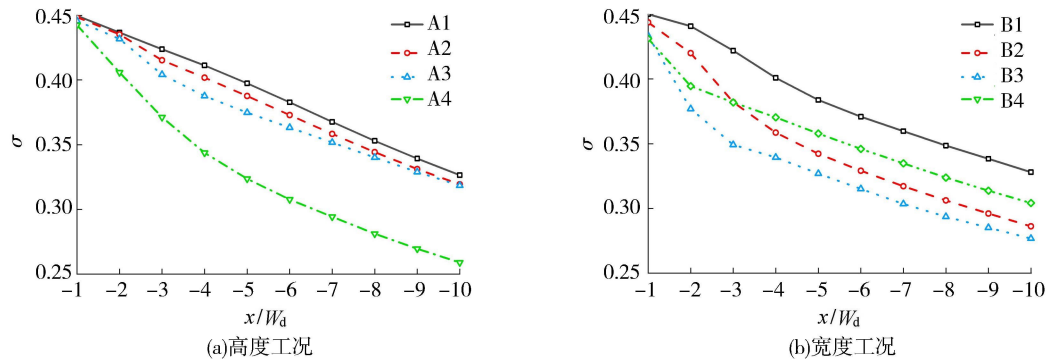


图 12 不同工况混合程度沿程变化

Fig. 12 Changes of mixing rate for different cases

来流污染物混合程度随滩地高度的增加而增大,当 $h^*=0\sim0.25$ 时,沿程掺混速率保持在一个相对稳定的值,当 h^* 增大为 0.5 时,交汇区混合程度增大的幅度更大。当滩地更宽且支流不完全高于主渠时,两汊来流的混合程度最大;当支流完全高于主渠时,混合程度仅高于无滩地工况。Biron 等^[25]通过实验室水槽试验表明,交汇流河床高差极大地促进了汇流附近的掺混,考虑到该试验水槽 $W_d/H=0.94$,较小的宽深比限制了二次流的横向发展。由此可见,宽深比也是影响交汇流掺混的重要因素。

污染物的输移扩散取决于分子扩散、对流作用和湍流扩散,由于分子扩散较为缓慢,本文忽略其影响。支流滩地引起的二次流强度、范围与位置的改变充分发挥了对流作用对污染物掺混的影响^[26],在交汇近区滩地高度和宽度的增加对掺混速率的提升作用相当大。然而经过较长的距离,二次流逐渐式微,混合主要依靠湍流扩散的作用,沿程掺混速率趋近于常数,滩地的相对影响逐渐减小。

4 结 论

- a. 交汇流垂向动量分布影响掺混层的位置、形态特征和宽度。随着支流垂向动量差异的增大,近水面处的掺混层距支流侧越远,近床面处的掺混层离支流侧越近,掺混层更加倾斜和扭曲。
- b. 90°交汇明渠存在支干流两侧分布的双螺旋流结构,其中支流侧二次流强度和范围随滩地高度的增加而增大;随滩地宽度的增加,支流侧二次流向左岸偏移,二次流强度增大。
- c. 污染物混合速率与二次流密切相关,二次流的强度、位置和范围在靠近交汇处对增强掺混起着关键的控制作用。在掺混程度最高的工况中($h^*=0.5, w^*=0.75$),二次流的强度越高、范围越大、位置越接近于掺混层,越能充分发挥对流作用对掺混程度的提高。
- d. 在交汇下游较长的距离,二次流逐渐式微,掺混主要依靠湍流扩散的作用,滩地的相对影响逐渐减小。

参考文献:

[1] KNIGHT D W, DEMETRIOU J D. Flood plain and main channel flow interaction[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1983, 109(8): 1073-1092.

[2] 闫毓,袁赛瑜,唐洪武,等. 上海蕴南水利控制片河网水动力再造[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(4): 329-334. (YAN Yu, YUAN Saiyu, TANG Hongwu, et al. Hydrodynamic reconstruction of Wennan river network in Shanghai City[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(4): 329-334. (in Chinese))

[3] 王玲玲,姜兆宇,韩建军,等. 长江浦口段江滩复绿对河道行洪能力的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(4): 316-321. (WANG Lingling, JIANG Zhaoyu, HAN Jianjun, et al. Influence of environmental remediation project on the discharge capacity of the Pukou section of the Yangtze River[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(4): 316-321. (in Chinese))

[4] 唐洪武,黄淑君,袁赛瑜,等. 长江-鄱阳湖交汇处三维水流结构研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(2): 128-135. (TANG Hongwu, HUANG Shujun, YUAN Saiyu, et al. Three-dimensional flow structure at the confluence zone of Yangtze River and Poyang Lake[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(2): 128-135. (in Chinese))

[5] BEST J L. Flow dynamics and sediment transport at river channel confluences[D]. London: University of London, 1985.

[6] YUAN Saiyu, TANG Hongwu, LI Kun, et al. Hydrodynamics, sediment transport and morphological features at the confluence between the Yangtze River and the Poyang Lake[J]. Water Resources Research, 2021, 57(3): e2020WR028284.

[7] BRADBROOK K F, LANE S N, RICHARDS K S, et al. Role of bed discordance at asymmetrical river confluences[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 127(5): 351-368.

[8] TANG Hongwu, ZHANG Huiming, YUAN Saiyu. Hydrodynamics and contaminant transport on a degraded bed at a 90-degree channel confluence[J]. Environmental Fluid Mechanics, 2018, 18(2): 443-463.

[9] LANE S N, PARSONS D R, BEST J L, et al. Cause of rapid mixing at a junction of two large rivers: Río Paraná and Río Paraguay, Argentina[J]. Journal of Geophysical Research, 2008, 113: F02019.

[10] RHOADS B L, SUKHODOLOV A N. Lateral momentum flux and the spatial evolution of flow with in a confluence mixing interface[J]. Water Resources Research, 2008, 40: W08440.

[11] 顾莉,赵欣欣,戴波,等. 汇流比对 U 形弯曲交汇河道中污染物离散系数的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018, 46(3): 189-195. (GU Li, ZHAO Xinxin, DAI Bo, et al. The influence of discharge ratio on the pollutant dispersion coefficient in

- the U-shaped confluent curved river[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018, 46(3): 189-195. (in Chinese))
- [12] 毛颂平, 朱海, 王玲玲, 等. 90°等宽明渠交汇水流污染物混合规律数值模拟[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(3): 64-69. (MAO Songping, ZHU Hai, WANG Lingling, et al. Numerical simulation on pollutant mixing law at a 90° open-channel confluence of equal width[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(3): 64-69. (in Chinese))
- [13] MOHAMMADIAN A. Review and comparison of numerical simulations of secondary flow in river confluences[J]. Water, 2021, 13(14): 1917.
- [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 Zhou, ZENG Cheng, ZHOU Jie, et al. Numerical simulation of backwater characteristics at equal-width open-channel confluences[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(4): 347-353. (in Chinese))
- [15] 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 Cheng, CHEN Chen, ZHOU Zhou, 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. (in Chinese))
- [16] GUALTIERI C, BOMBARDELLI F A. Parameterization of the turbulent Schmidt number in the numerical simulation of turbulent open channel flows[C] // XXXV IAHR Congress. Beijing: IAHR, 2013: 14735.
- [17] HUANG J, WEBER L J, LAI Y G. Three-dimensional numerical study of flows in open-channel junctions[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 128(3): 268-280.
- [18] 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.
- [19] KEYLOCK C J, CONSTANTINESCU G, HARDY R J. The application of computational fluid dynamics to natural river channels: Eddy resolving versus mean flow approaches[J]. Geomorphology, 2012, 179(1): 1-20.
- [20] 高丽莎, 高程程, 汪涛. 基于精细化河网水动力模型的长宁区除涝能力评估[J]. 水资源保护, 2021, 37(5): 62-67. (GAO Lisha, GAO Chengcheng, WANG Tao. Assessment of waterlogging control capacity in Changning District based on refined river network hydrodynamic model[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(5): 62-67. (in Chinese))
- [21] 陈志琦, 逢勇, 张倩, 等. 基于水动力数值模拟的罗源湾水体交换周期及纳潮量计算[J]. 水资源保护, 2022, 38(3): 125-130. (CHEN Zhiqi, PANG Yong, ZHANG Qian, et al. Calculation of water body exchange period and tidal prism in Luoyuan Bay based on hydrodynamic simulation[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(3): 125-130. (in Chinese))
- [22] SCHINDFESSEL L, CREËLLE S, MULDER T D. How different cross-sectional shapes influence the separation zone of an open-channel confluence[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 143(9): 04017036.
- [23] BIRON P, ROY A G, BEST J L. Turbulent flow structure at concordant and discordant open-channel confluences[J]. Experiments in Fluids, 1996, 21(6): 437-446.
- [24] CREËLLE S, SCHINDFESSEL L, MULDER T D. Effect of bed roughness on the mixing layers in a 90° asymmetrical confluence [C] // E-proceedings of the 36th IAHR World Congress. Beijing: IAHR, 2015: 2661-2671.
- [25] BIRON P M, RAMAMURTHY A S, HAN S. Three-dimensional numerical modeling of mixing at river confluences[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 130(3): 243-253.
- [26] LYUBIMOVA T P, LEPIKHIN A P, PARSHAKOVA Y N, et al. A numerical study of the influence of channel-scale secondary circulation on mixing processes downstream of river junctions[J]. Water, 2020, 12(11): 2969.

(收稿日期: 2022-04-10 编辑: 胡新宇)