

交汇角对明渠交汇口污染物输运特性影响的数值模拟分析

徐洁如¹,朱海¹,毛颂平²,武显扬³,王玲玲¹,余真真⁴,王寅⁵

- (1. 河海大学水利水电学院,江苏南京 210098; 2. 上海勘测设计研究院有限公司,上海 200335;
3. 南京林业大学风景园林学院,江苏南京 210037;
4. 黄河水资源保护科学研究院,河南郑州 450004;
5. 江西省水利科学院防灾减灾与水工程安全研究所,江西南昌 330029)

摘要:针对等宽矩形断面明渠交汇口建立三维两相流水力-污染物耦合数学模型,将污染物视作保守物质,不考虑其降解作用。该耦合模型以雷诺应力模型为基础,定量研究不同交汇角工况下交汇口的分离区几何特性及污染物输运规律。计算结果表明:交汇口分离区几何形状、污染物分布特性均存在明显的三维特征,且受交汇角影响;交汇角较大时分离区的几何对称性更强,不同交汇角下断面环流的位置不同,污染物的分布也不同,污染带最大宽度、混合界面宽度均随交汇角的增大而增大;分离区及其上游污染物混合速率随交汇角的增大而加快,在流速恢复区及其下游,混合速率基本不受交汇角影响,其沿程变化符合指数函数关系。

关键词: 交汇水流; 污染物; 交汇角; 数值模拟; 雷诺应力模型

中图分类号: TV133

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2023)05-0023-09

Numerical simulation and analysis of pollutant transport at an open channel confluence under different junction angles //XU Jieru¹, ZHU Hai¹, MAO Songping², WU Xianyang³, WANG Lingling¹, YU Zhenzhen⁴, WANG Yin⁵
(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Shanghai Investigation, Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200335, China; 3. College of Landscape Architecture, Nanjing Forest University, Nanjing 210037, China; 4. Yellow River Water Resources Protection Institute, Zhengzhou 450004, China; 5. Institute of disaster Prevention and Mitigation and Water Engineering Safely, Jiangxi Academy of Water Science and Engineering, Nanchang 330029, China)

Abstract: A three-dimensional (3D) two-phase hydrodynamic-pollutant-coupled mathematical model for an open channel confluence of rectangular cross section with equal width was established. The pollutant was considered conservative and the degradation effect was not taken into account. Based on the Reynolds stress model, the geometric characteristics of separation zone and the pollutant transport laws under different junction angles were quantitatively analyzed. The calculation results show that the geometry of the separation zone and pollutant distribution at the confluence have obvious 3D characteristics and are affected by the junction angles. The geometric symmetry of the separation zone is stronger when junction angle is larger. The pollutant distribution is different because of different locations of the secondary flow under different junction angles. The maximum width of the pollution zone and the width of the mixing interface increase with the junction angle. The mixing rate of pollutants upstream of the separation zone increases with junction angles. Downstream of the velocity recovery zone, the mixing rate is not affected by the junction angles, which has an exponential relation with the downstream distance.

Key words: flow confluence; pollutants; junction angle; numerical simulation; RSM

明渠交汇水流普遍存在于自然界和人工河道中。与顺直明渠不同,明渠交汇口汇集不同方向的

来流,水流顶托效应显著、紊动掺混剧烈,复杂的水动力条件对水流中物质的输运产生重要影响。因

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFC3200403);中国博士后科学基金项目(2022M721426);黄委优秀青年人才科技项目(HQK-202320);黄河水资源保护科学研究院科研专项项目(KYY-KYZX-2022-01)

作者简介:徐洁如(1999—),女,硕士研究生,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail:xjr@hhu.edu.cn

通信作者:王玲玲(1966—),女,教授,博士,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail:wanglingling@hhu.edu.cn

此,明渠交汇口水动力及物质输移规律一直备受国内外学者的关注。

在明渠交汇口水动力特性方面,茅泽育等^[1]将理论分析和物理模型试验结合,研究发现明渠交汇角影响分离区的几何尺寸,但对其平面几何形状的改变不明显,与 Best 等^[2]的水槽试验及刘盛赞等^[3]的水气两相流三维紊流 $k-\varepsilon$ 数学模型研究结论一致;郭维东等^[4]针对 Y 型对称明渠交汇口建立了三维数学模型,得到了不同交汇角工况下分离区长度和宽度与流量比的线性拟合公式;Shakibainia 等^[5]针对干支流宽度比对交汇水流结构的影响开展数值模拟研究,结果表明,随着支流相对宽度的减小,分离区变大,加速区变窄,水面变化加剧。雷诺应力模型(Reynolds stress model, RSM)在交汇水流水动力模拟方面具有广泛的应用,周舟等^[6-8]基于此类模型,结合流体体积(VOF)自由水面捕捉方法,对具有不同交汇角的明渠交汇口进行了数值模拟,研究了交汇角对交汇口壅水特性、流速分布特性、分离区几何特征和位置以及二次流强度的影响,并绘制了分离区的三视图。胥宗强等^[9]采用大涡模拟方法建立了明渠交汇口的三维模型,定量研究了特定流量比条件下交汇角对交汇口下游流向涡以及分离区三维几何特性的影响。已有的针对不同交汇角条件下明渠交汇水流水动力特性的研究表明,分离区的尺寸、形状对交汇水流的顶托效应、下游有效过水宽度及流速分布均具有重要影响,但量化分离区几何特征参数尚不全面,有待进一步研究。在明渠交汇口物质输运方面,魏娟等^[10]采用 RSM 建立水气两相流数学模型,模拟了非等宽明渠交汇流的污染物分布并揭示了其三维特性,定性分析了污染带形状随流量比、交汇角的变化规律;王平等^[11-12]采用动床物理模型分析了清水和浊水在具有不同交汇角明渠中的冲淤特性,得出了减轻高含沙量河流交汇口淤堵程度的最优交汇角;Tang 等^[13]基于 RSM 建立了 90°等宽明渠交汇的三维数学模型,研究发现流量比和床面形态是通过影响剪切层和螺旋流的强弱和位置,进而影响污染物混合的;陈凯霖等^[14-15]建立了非等宽河流交汇物理模型,运用 PIV 技术分别研究了明渠交汇口流速分布和污染物扩散情况随交汇角的变化;张涛^[16]结合室内水槽试验、数值模拟,研究了非等宽河流交汇区的水流结构与污染物输运规律,得出了交汇角、动量比和宽深比与混合速率的函数关系,其结论在对汾河入黄口的实地观测数据中得到了印证。虽然已有学者开展了明渠交汇口污染物输运规律的相关研究,但对于污染物分布特征参数的研究尚不全面,与交汇角间的定量关系

尚不明晰。

综上所述,交汇角是影响交汇水流水动力、物质输运的重要因素之一。本文针对明渠交汇流中的保守物质输运问题,基于 RSM 建立明渠交汇流三维水动力-污染物耦合数学模型,旨在研究不同交汇角工况下明渠交汇口分离区的几何特征和交汇口污染物分布,分析交汇角对污染物混合速率的影响,以期为交汇口污染物影响范围划定、水污染责任划分等实际应用问题提供参考。

1 数学模型

1.1 控制方程

本文基于 RSM 建立三维明渠交汇水流水动力-污染物耦合数学模型,模拟交汇流流速及污染物质量浓度分布。水流运动满足质量及动量守恒方程,污染物质量浓度满足物质输运方程。RSM 主要应用在雷诺应力具有各向异性的流动中,对复杂流动的模拟有较大优势,已经在明渠交汇水流的数值模拟方面有所应用。该模型根据时均化法则,不采用涡粘性假设,直接建立并模化雷诺应力的输运方程,并与耗散率 ε 的输运方程联立求解^[17-18]。参照现有研究成果^[6-8,18],模型参数取值分别为: $C_s = 0.11$, $C_1 = 1.8$, $C_2 = 0.60$, $C_\varepsilon = 0.15$, $C_{\varepsilon_1} = 1.44$, $C_{\varepsilon_2} = 1.92$ 。

本文采用质量浓度通量的二阶矩模式封闭物质输运方程^[17-18]。参照现有研究成果^[18],模型参数取值分别为: $C_{s_c} = 0.11$, $C_{1_c} = 3.0$, $C_{2_c} = 0.33$ 。

1.2 数值方法及边界条件

控制方程的离散采用有限体积法,扩散项的离散采用中心差分格式,水动力模块对流项的离散采用 QUICK 格式,污染物模块对流项的离散采用二阶迎风格式。采用 PISO 算法进行压力场和速度场的解耦。

水气交界面的模拟采用流体体积法,定义体积函数 a_w 表示计算网格内水的体积占网格体积的比例,满足如下方程:

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

式中: u_i 为流速; t 为时间; x_i 为笛卡坐标, $i = 1, 2, 3$ 分别代表 x, y, z 坐标方向。对于一个网格,若 $a_w = 1$,则表示该网格被水充满;若 $a_w = 0$,则表示该网格内无水;若 $0 < a_w < 1$,则表示该网格部分含水。通过对 a_w 的迭代求解计算各网格 a_w 的值及其梯度,即可确定计算区域内自由表面的位置。

在明渠床面和侧壁采用无滑移边界条件,顶部采用对称边界。主渠出口的流速、雷诺应力和污染物质量浓度及其通量均采用零梯度边界条件。主、

支渠进口均采用速度边界,主渠出口采用满足静水压力分布的压力边界。根据经验公式^[10],确定入口边界处的湍动能和耗散率值分别为

$$k = 0.00375u^2 \quad (2)$$

$$\varepsilon = k^{1.5}/0.4H \quad (3)$$

式中: u 为断面平均速度; H 为断面水深。

2 模型验证

2.1 水动力模型验证

本文采用 Weber 等^[19-20]的 90°等宽明渠交汇流物理模型试验进行数学模型水动力模块的验证。计算区域(图 1)干支流渠道均为矩形断面,主渠、支渠的长度分别为 $20W$ 和 $10W$ (W 为渠道宽度),渠道适当向上游方向延长以消除边界条件的影响,并得到充分发展的紊流。采用结构化六面体网格剖分计算区域,并在交汇口、渠底、侧壁和水气交接界面附近进行了网格加密,总网格数为 24.6 万个。

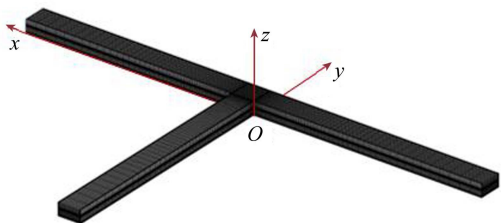


图 1 数学模型计算区域

在验证工况下,流入交汇口的流量比 $q = Q_u/Q_d = 0.75$ (Q_u 为主渠道的入口流量, Q_d 为下游出口流量, $Q_d = 0.17 \text{ m}^3/\text{s}$),尾水水位 $H_0 = 0.31 \text{ m}$,弗劳德数 $Fr = 0.37$,雷诺数 $Re = 186000$ 。数学模型的 Fr 和 Re 与物理试验保持一致,模拟结果以渠道宽度 W 和主渠出口的平均纵向流速 u_0 进行无量纲化处理。经过计算,将纵向断面 $y/W = 0.167$ 处的水面线、横向断面 $x/W = 6$ 处测点流速的物理模型测量值与数学模型计算值进行对比,结果分别见图 2、图 3。结果表明,水面线相对误差为 1.7%,3 个测点的流速相对误差分别为 3.6%、1.4% 和 2.6%,说明本模型模拟获得的交汇口水面线与流速分布与物理模型基本一致,能够比较准确地反映明渠交汇口水动力特性。

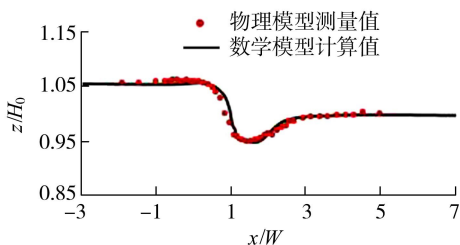


图 2 $y/W = 0.167$ 纵向断面水面线测量值与计算值对比

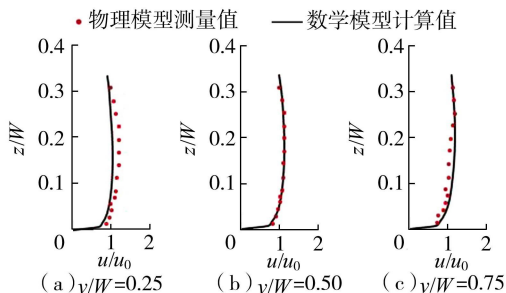


图 3 $x/W = 6$ 处测点流速测量值与计算值对比

2.2 污染物输运模型验证

本文采用陈凯霖^[21]的明渠交汇流物理模型试验进行保守物质输运模块数学模型的验证,不考虑污染物的降解作用。主渠、支渠宽度分别为 W 、 $W/3$,其他几何参数与水动力模块验证所用模型相同,并用 19.2 万个结构化六面体网格划分计算区域。在验证工况下 $q = 0.81$, $Fr = 0.10$, $Re = 6357.79$ 。支流进口污染物质量浓度 ρ_0 为 $2000 \mu\text{g}/\text{L}$,主流进口处无污染物,与物理模型试验保持一致。

图 4 为验证工况下 $y/W = 0.167$ 和 $y/W = 0.5$ 纵断面上 $z/W = 0.427$ 深度处污染物质量浓度的物理模型测量值与数学模型计算值对比,两者分布趋势基本一致,两纵向断面数学模型计算值和物理模型测量值平均误差分别为 6.8%、7.3%,数学模型可以比较准确地模拟明渠交汇口的污染物分布。

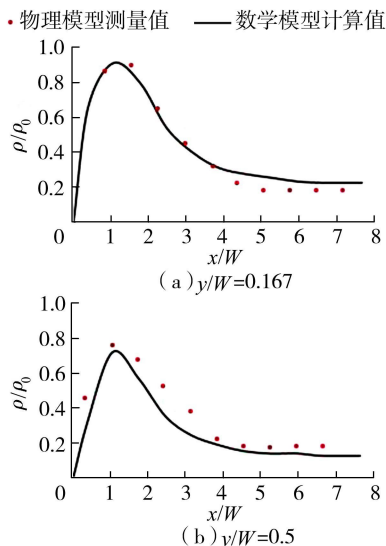


图 4 $z/W = 0.427$ 处污染物质量浓度测量值与计算值对比

3 不同交汇角工况下明渠交汇水流水动力与污染物输运特性

3.1 工况设置

为研究明渠交汇口污染物质量浓度三维分布规律及交汇角对其影响,在水动力模块、污染物输运模块验证成果的基础上,针对 45° 、 60° 、 75° 和 90° 交汇

角建立等宽矩形断面明渠交汇口数学模型,各工况水动力参数均设置为 $Fr = 0.37$ 、 $Re = 186\ 000$ 、 $Q_d = 0.17\ \text{m}^3/\text{s}$,交汇口流量比 $q = 0.75$ 。支渠入口污染物质量浓度 ρ_0 均为 $1\ \mu\text{g}/\text{L}$,主渠入口处无污染物进入计算区域。

3.2 纵向流速分布及分离区三维几何特性

由于支渠水流汇入主流,在明渠交汇口形成了复杂的水动力条件。图5为交汇口下游断面纵向流速 u 的分布,并用主渠出口的平均纵向流速 u_0 进行无量纲化处理。当交汇角较小 ($\theta \leq 45^\circ$) 时,主渠交汇口下游断面纵向流速基本与主渠流向一致,渠道近右岸一侧流速显著大于左岸一侧;当交汇角较大 ($\theta \geq 60^\circ$) 时,主渠交汇口下游断面 ($x/W = 2$) 左岸附近出现与主渠流向相反的区域,且该区域的范围随交汇角的增大而增大。计算各横断面平均纵向流速的沿程变化梯度 $d(\bar{u}/u_0)/dx$ 发现,在不同交汇角工况下,该值均沿程逐渐减小,并在 $x/W > 7$ 时接近0,见图6。

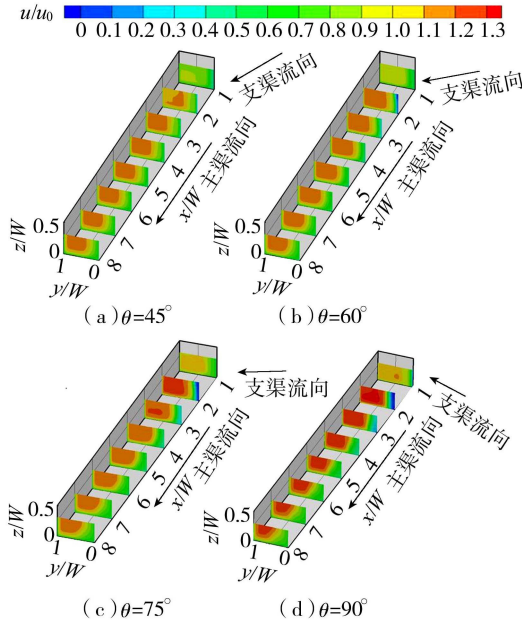


图5 交汇口下游断面纵向流速分布

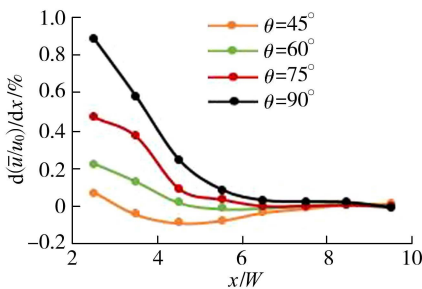


图6 交汇口下游断面平均纵向流速梯度沿程分布

图7为不同交汇角工况下近水面处的纵向流速分布云图和平面流速矢量图(为方便显示,每4个网格显示1个矢量箭头)。不同交汇角工况下流场

存在不同特征:在明渠交汇口处,交汇角决定了支渠水流的偏转角度,交汇角越大,支渠水流流向偏折得越明显、流速沿主渠展向(y 方向)的流速分量越大,对主渠水流的挤压效应越强;在交汇口下游,由于支渠水流对主渠的挤压,形成了分离区、最大流速区、水流恢复区等流动特征区域,交汇角越大,支流侧的分离区尺度越大,对侧最大流速区的收窄效应越明显、流速越大;交汇口下游较远处为水流恢复区,流速的横向梯度沿程减小,即流速在横向上有恢复均匀分布的趋势,交汇角越大,流速分布恢复均匀需要的距离越长。

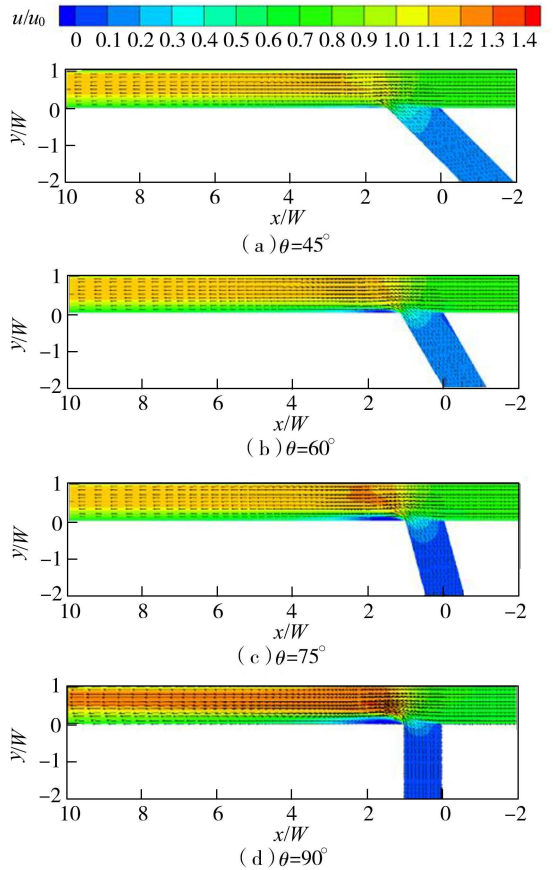


图7 交汇口近水面处 ($z/W = 0.3$) 流速分布

在实际工程中,河道顺主流流速对物质输运有较大影响,通常采用顺主流流速为0的等值线定义分离区的几何边界,这种方法称为等值线法^[22]。等值线法已在分离区的几何特性研究中有应用^[1,8-9],为确保与已有试验结果一致,本文也采用等值线法划定分离区范围,如图8所示。等值线法划定的分离区呈翼形, $\theta = 45^\circ$ 工况未见明显分离区。定义分离区边界线在主渠流向的投影长度为分离区长度 L ,在主渠展向的投影长度为分离区宽度 B ,本文通过改进传统的分离区几何对称系数 R ^[9],使得在评估分离区的几何对称性的同时,也考虑了长度方向中心位置与最大宽度位置的相对关系,改进后的对称系数 R_m 定义如下:

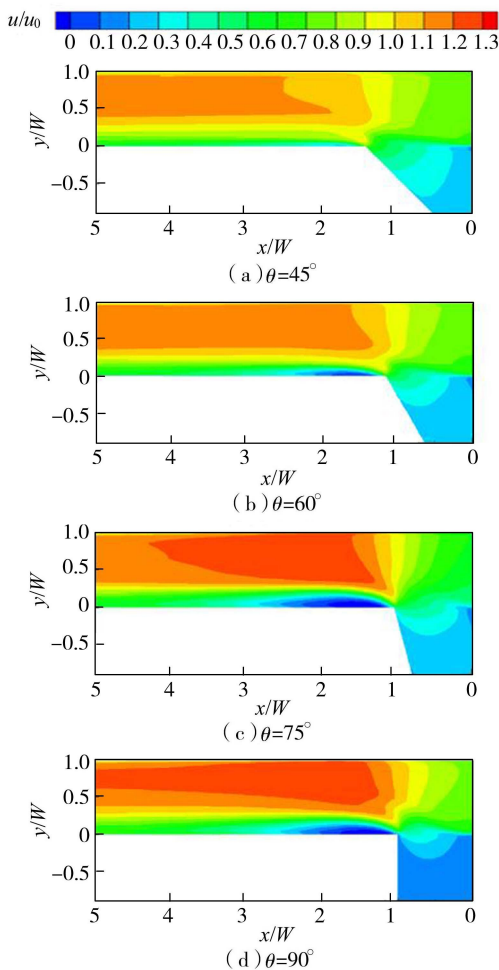


图8 表层水体分离区形状

$$R_m = \exp\{[(x_1 + x_2)/2 - x_B]/L\} \quad (4)$$

式中： x_1 、 x_2 分别为分离区投影与主渠左岸侧壁交点的坐标值； x_B 为分离区最大宽度位置的 x 轴坐标值。改进对称系数的目的是定量表示分离区中心位置和分离区最大宽度位置 x_B 的相对位置关系，若 $R_m = 1$ ，则分离区最大宽度位置与其长度方向中心位置重合，此时可认为其在 x 方向上为几何对称图形；若 $R_m > 1$ ，则分离区最大宽度位置在其长度方向中心位置的下游侧；若 $R_m < 1$ ，则分离区最大宽度位置在其长度方向中心位置的上游侧。

根据前文提到的分离区定义方法，从图7、图8可以得到定性结论：分离区的几何尺寸随着交汇角的增大而增大。在 $\theta = 45^\circ$ 工况下，分离区尺寸太小难以捕捉；在 $\theta = 60^\circ$ 工况下，分离区的绝大部分存在于中上部水体中，下部水体中的分离区同样尺寸极小；在 $\theta = 75^\circ$ 和 $\theta = 90^\circ$ 工况下，均形成了贯穿水体各个深度的分离区，且具有一定的规模。图9为 $\theta = 60^\circ$ 工况下的分离区几何参数。由图9(a)可知，分离区长度 L 在 $z/W \geq 0.05$ 以上随着高度的减小缓慢减小，靠近床面时($z/W \leq 0.05$)，近壁流体受床面摩擦影响导致 L 逐渐增大，并在壁面达到最大值。

由图9(b)可知，分离区宽度 B 总体呈现上大下小的特征，在水面和床面附近随水深的变化较小，在水体中部变化较明显。 $\theta = 60^\circ$ 时， L 、 B 总体上均随着水深的增加而减小，直至 $z/W \approx 0.13$ 处减小到0。由图9(c)可知，分离区宽长比 B/L 随高度增大而增大，仅在近水面($z/W \geq 0.31$)处有小幅减小，即分离区在近床面处更狭长。除下部水体，交汇角越大，分离区宽长比也越大，可能与壁面摩擦有关。另外，陈凯霖^[21]的研究中提到，支渠中靠近床面的水流与主渠流向夹角比表面小，因此下部水体分离区比中上部更为狭长。由图9(d)可知，床面和自由水面附近分离区最大宽度位置偏向中心位置的上游侧，中部水体分离区最大宽度位置偏向中心位置的下游侧。同一水平位置上，交汇角的增大会造成分离区最大宽度位置向其中心位置的上游侧移动，总体来说， $\theta = 90^\circ$ 工况下各水平面的分离区对称系数 R_m 更接近1，在 x 轴方向上的对称性更强。

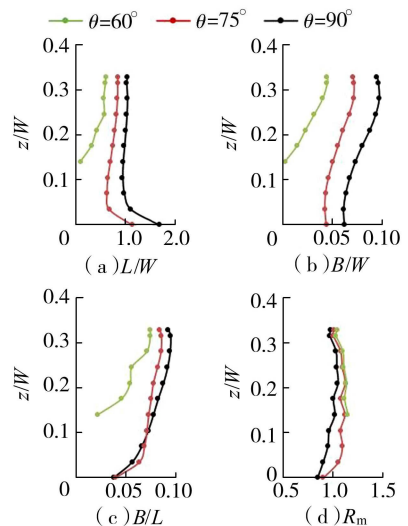


图9 交汇口分离区几何参数特征

以上分析与曾诚等^[8-9]的研究结论一致，当交汇角越大，分离区尺寸越大，沿长度方向的中心位置越偏向下游。分离区的存在显著影响了明渠的水流结构，如使局部流速减小、甚至出现回流，占据主渠交汇口下游的有效过水断面、使主渠水流被迫收窄和加速等。不同交汇角工况下，分离区几何尺寸和形状上的差异对交汇口污染物运输的影响不可忽视。

3.3 污染物质量浓度三维分布

在交汇水流中，污染物质量浓度分布受水动力影响呈现明显的三维特征。图10分别展示了交汇角为 45° 、 60° 、 75° 和 90° 时支流污染物进入主渠后下游各横断面的污染物质量浓度分布。支流高浓度污染物进入主渠后，部分聚集在支渠侧，部分随着支流的初始动能冲向主渠右岸，沿主渠横向断面形成明显的质量浓度梯度；污染物质量浓度等值线在靠近

交汇口处($x/W > 1$)总体保持垂直,垂向上变化不明显,仅在底层略向右岸凸出;随着干支流的进一步掺混,在远离交汇口的下游区域,质量浓度等值线逐渐发生倾斜、扭曲,下部水体中污染物质量浓度等值线的凸出更加明显,出现了垂向质量浓度梯度。交汇口下游下部水体污染物质量浓度等值线的凸出与断面环流有密切联系。

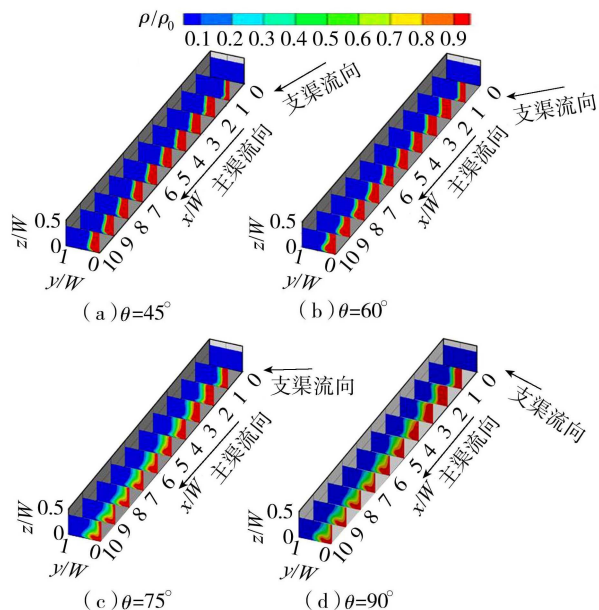


图 10 交汇口下游横断面污染物质量浓度分布

图 11 为主渠 $x/W = 8$ 断面流速矢量和污染物质量浓度分布。由图 11 可见,在不同交汇角工况下主渠交汇口下游均形成了逆时针的断面环流,靠近渠道左岸的污染物在二次流的作用下向底层水体输运,下层污染物向右岸方向输运,上层污染物向左岸方向输运;质量浓度等值线在水体底层向右岸倾斜,在水体上部靠近左岸。在靠近渠道底面位置,受壁面摩擦阻力的影响污染物输运受阻,横向输运距离较小。随着交汇角变大,断面环流的位置由断面左侧、下侧向中部移动,使得质量浓度等值线倾斜、扭曲的程度更大,混合层的宽度越宽。

3.4 污染物质量浓度横向输运特性

不同交汇角工况下交汇区污染物横向输运特性不同。图 12 为不同交汇角工况下交汇口表层水体的污染物质量浓度分布,定义 $5\% \rho_0$ 质量浓度等值线为污染带边界^[23],污染物质量浓度大于 $5\% \rho_0$ 的区域称为污染带,其最大宽度为 b 。模拟结果表明,污染带最大宽度随着交汇角的增大逐渐变宽。符合陈凯霖^[21]的研究中交汇角越小污染带越狭长的结论,与前文中分离区的几何形状变化规律也一致,说明分离区具有引起污染物滞留的效应。当 $\theta \geq 75^\circ$ 时,分离区回流现象明显,挟带部分污染物沿主渠流向的反向运动,使高污染物质量浓度区域($\rho/\rho_0 \geq$

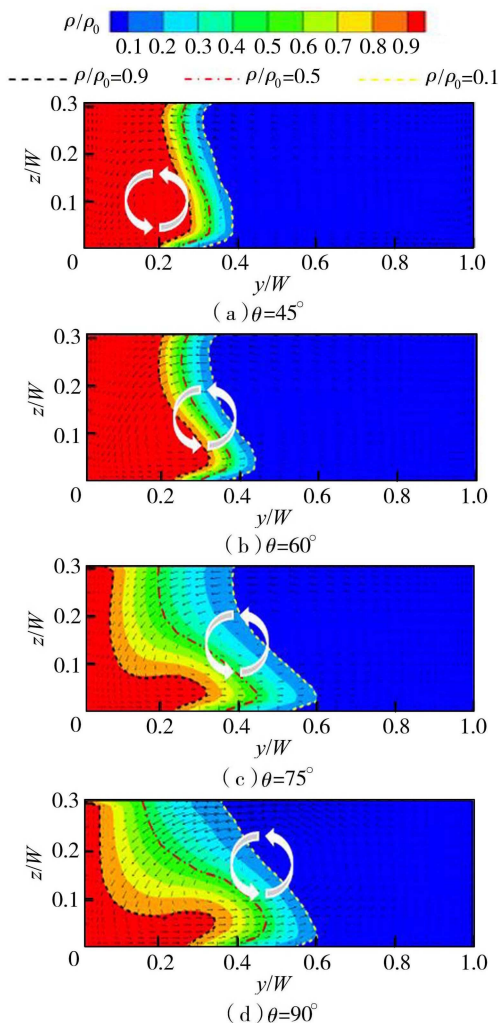


图 11 主渠 $x/W = 8$ 断面流速矢量和污染物质量浓度分布

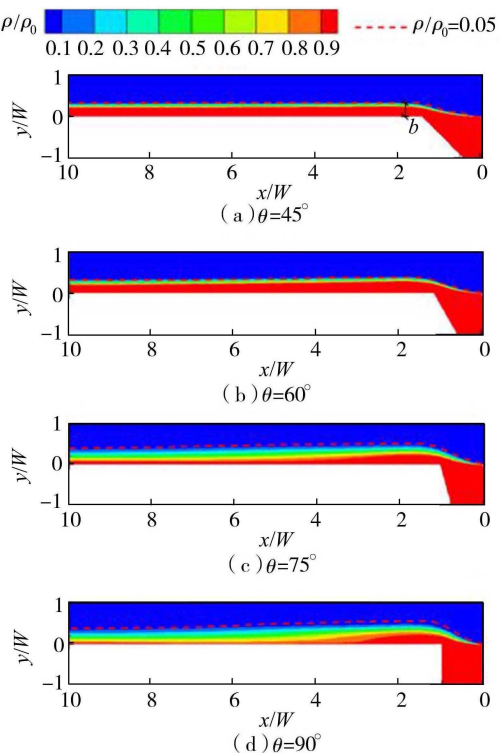


图 12 交汇口表层水体污染物质量浓度分布

0.9)在分离区附近显著加宽,随后在其下游收窄,但污染带最大宽度 b 在下游沿程基本不变,如图 12 (c)(d)所示。在其他水平面上,不同交汇角对污染物横向输运距离的影响也表现出相似的规律。图 13 为不同水深处污染带宽度 b/W 与交汇角的关系曲线。计算结果表明,越靠近水面,污染带宽度 b/W 越大,且在不同深度处 b/W 均随着交汇角的增大而增大,增大的幅度与交汇角有密切关系。当 $45^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$ 和 $75^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ 时, b/W 随交汇角增大的幅度较小;当 $60^\circ < \theta < 75^\circ$ 时, b/W 随交汇角增大的幅度较大。这说明交汇角在 60° 到 75° 之间时, b/W 对交汇角的变化较为敏感。污染物混合界面^[23] 定义为 10% 质量浓度等值线与 90% 质量浓度等值线包围区域(见图 11)。计算结果表明,不同交汇角工况下无量纲化的污染物混合界面宽度 b_{mi}/W 沿程变化曲线呈现相似的变化趋势,即随着干支流的混合,混合界面宽度沿程逐渐增大;交汇角越大,同一位置上的污染物混合界面宽度越大(见图 14)。这与张涛^[16]、陈凯霖^[21] 的试验研究结果基本一致。

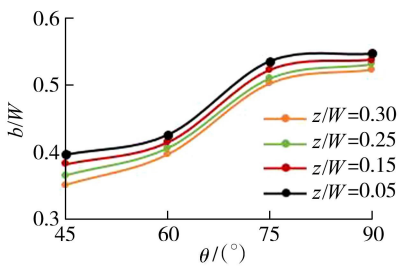


图 13 不同水深处污染带宽度与交汇角的关系

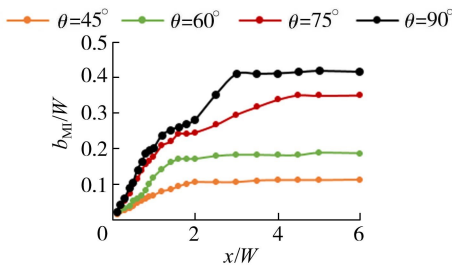


图 14 近水面处混合界面宽度沿程变化

不同交汇角工况下污染物质量浓度横向输运特性具有显著差异的主要原因是,在流量比相同时,交汇角差异使支渠来流动量在主渠横向上的分量不同,主渠交汇口下游形成了尺寸不一的流动特征区域。其中分离区流速显著下降,出现回流现象,使污染物容易在该区域滞留;分离区和流动加速区之间流速差大,存在剪切层,对污染物的横向输运起到抑制作用;流速恢复区流速分布逐渐趋于均匀,污染物质量浓度的横向梯度逐渐减小。

3.5 污染物质量浓度纵向输运特性

不同交汇角工况下交汇口下游各横断面污染物

平均质量浓度 $\bar{\rho}$ 的沿程变化见图 15。由于污染物从支渠汇入主渠,交汇口处断面污染物平均质量浓度逐渐增大,各工况均在交汇口支渠下游顶点断面附近达到理论平均值。交汇角越大,交汇口上游顶点所在断面($x/W=0$)污染物平均质量浓度越小,原因可能是位于交汇口上游顶点支渠侧的停滞区面积随交汇角的增大而增大^[16],使附近的污染物质量浓度通量减小。另外,由于支流动量和交汇口上下游顶点距离的差异,交汇角越大,断面污染物平均质量浓度达到最大值所需距离越短,断面污染物平均质量浓度的纵向梯度越大。

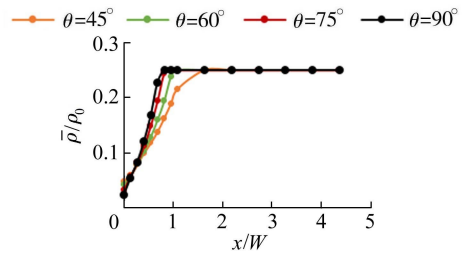


图 15 交汇口下游断面污染物平均质量浓度沿程变化

本文采用完全混合偏差 δ 和断面标准差 σ 相结合的方式量化给定断面的污染物混合程度^[24]。完全混合偏差可定量表示网格质量浓度值 ρ_i 与完全混合后的理论质量浓度值 ρ_p 间的偏差^[25]。理论质量浓度与完全混合偏差的计算公式如下:

$$\rho_p = \frac{\rho_m Q_m + \rho_t Q_t}{Q_m + Q_t} \quad (5)$$

$$\delta_i = \frac{\rho_i - \rho_p}{\rho_p} \times 100\% \quad (6)$$

式中: Q_m 、 Q_t 分别为主流和支流中的流量; ρ_m 、 ρ_t 分别为主流和支流中的污染物质量浓度。本文计算工况下 $\rho_p=0.25$, $\delta_i=300\%$ 和 $\delta_i=-100\%$ 分别表示该网格中的水为完全未混合的支渠污水和干流清水, $\delta_i=0\%$ 表示经完全混合的水。图 16 为交汇口下游一系列断面上完全混合偏差极值 δ_{\min} 和 δ_{\max} 的统计数据,结果表明,随着污染物从支流进入干流, δ_{\max} 沿程先升高后下降, δ_{\min} 持续升高,两者约在 $x/W=1$ 断面下游逐渐靠近并趋向于 0;在计算区域出口断面 ($x/W=10$) 上污染物质量浓度的差距已经很小,但 δ_{\max} 和 δ_{\min} 的绝对值均稍大于 10%,尚未达到完全混合的标准^[25]。

污染物质量浓度标准差 σ 可定量表示给定断面上污染物质量浓度差异。标准差越接近 0,代表该断面污染物质量浓度的差异越小,污染物分布越均匀、混合越充分。图 17 为不同交汇角工况下交汇口下游断面标准的沿程分布。由图 17 可见,不同交汇角工况下,标准差的沿程变化呈现相似的变化规

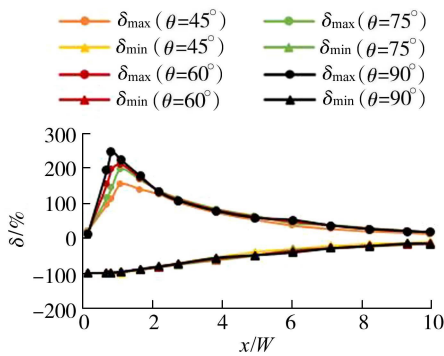


图 16 交汇口下游污染物质量浓度完全混合偏差极值沿程变化

律:在交汇口上游顶点断面($x/W=0$), σ 较小但不为零,且随交汇角的增大而减小;随着污染物进入干流, σ 沿程增大,并在 $x/W=1$ 断面附近达到峰值,峰值随交汇角的增大而增大,其位置随交汇角增大有向上游移动的趋势,这与坐标原点定义在交汇口上游顶点,故下游顶点的 x 坐标随交汇角的增大而减小有关;最后 σ 沿程逐渐减小并趋于 0。根据统计,在计算区域出口($x/W=10$)处各工况的 σ 已小于 0.03,此时,污染物已经进行了一定程度的混合,同一断面污染物质量浓度差距较小。

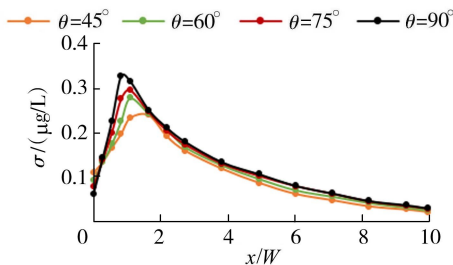


图 17 交汇口下游污染物质量浓度标准差沿程变化

污染物的混合速率可用断面标准差沿程梯度的绝对值 $|\Delta\sigma/\Delta x|$ 定量表示^[24]。支流污染物完全汇入主渠后,统计各工况沿程断面的混合速率,如图 18 所示。结果表明,混合速率沿程减小,数量级在 10^{-2} 以下,与 Ramón 等^[24] 的研究结果一致。交汇角的大小仅能影响分离区及其上游有限范围的混合速率,在 $0 < x/W < 2.5$ 范围内,污染物混合速率随交汇角的增大而加快;远离交汇口后,混合速率对交汇角的变化敏感性降低,不同交汇角工况下的污染

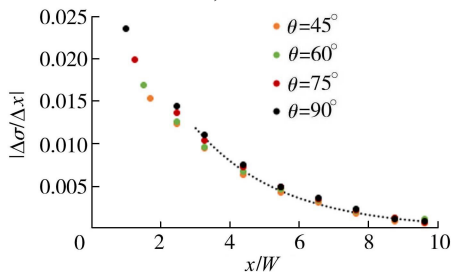


图 18 交汇口下游污染物混合速率沿程变化

物混合速率趋近。当水流进入流速恢复区及其下游 ($2.5 < x/W < 10$) 时,污染物混合速率与距交汇口上游顶点距离 x 之间存在以下指数函数关系:

$$|\Delta\sigma/\Delta x| = 0.039\exp(-0.3995x/W) \quad (2.5 < x/W < 10, R^2 = 0.9278) \quad (7)$$

4 结论

a. 较小交汇角工况下分离区中上部更狭长,较大交汇角工况下分离区下部更狭长;由改进的对称系数量化结果,较大交汇角工况下分离区几何对称性更强,且会引起分离区最宽位置向上游偏移。

b. 交汇口下游断面污染物质量浓度水平方向存在明显梯度,在交汇口下游逐渐形成垂向质量浓度梯度,污染物质量浓度分布存在显著三维特性;不同交汇角工况下交汇口下游产生断面环流的位置不同,导致污染物空间分布存在显著差异。

c. 交汇角越大,污染带最大宽度越大,混合界面宽度增大;分离区及其上游污染物混合速率随交汇角的增大而增强,在流速恢复区及其下游,混合速率基本不受交汇角影响,其沿程变化规律符合指数函数关系。

参考文献:

- [1] 茅泽育,赵升伟,罗昇,等.明渠交汇口水流分离区研究[J].水科学进展,2005,16(1):7-12. (MAO Zeyu, ZHAO Shengwei, LUO Sheng, et al. Study on the separation zone in open-channel junction[J]. Advances in Water Science,2005,16(1):7-12. (in Chinese))
- [2] BEST J L, REID I. Separation zone at open-channel junctions[J]. Journal of Hydraulic Engineering,1984,110(11):1588-1594.
- [3] 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. (LIU Shengyun, KANG Peng, LI Ran, 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. (in Chinese))
- [4] 郭维东,梁岳,冯亚辉,等.Y型明渠交汇水流分离区的数值分析[J].水利水电科技进展,2007,27(6):49-52. (GUO Weidong, LIANG Yue, FENG Yahui, et al. Numerical analysis of flow separation zone at junctions of Y-shaped open channels [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2007,27(6):49-52. (in Chinese))
- [5] SHAKIBAINIA A, TABATABAI M R M, ZARRATI A R. Three-dimensional numerical study of flow structure in channel confluences [J]. Canadian Journal of Civil Engineering,2010,37(5):772-781.

- [6] 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))
- [7] 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. (ZENG Cheng, YIN Yuran, CHEN Chen, et al. Numerical simulation of hydrodynamics of open-channel confluences with bend flow [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43 (2): 9-15. (in Chinese))
- [8] 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))
- [9] 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 Zongqiang, WEI Bingqian, XUE Bosheng, 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. (in Chinese))
- [10] 魏娟,李然,康鹏,等.水流交汇区污染物输移扩散特性[J].水科学进展,2012,23(6):822-828. (WEI Juan, LI Ran, KANG Peng, et al. Study on transportation and diffusion characteristics of contaminants at flow confluence [J]. Advances in Water Science, 2012, 23 (6): 822-828. (in Chinese))
- [11] 王平,胡恬,郭秀吉,等.交汇角度对黄河上游高含沙交汇区淤堵影响的试验研究[J].工程科学与技术,2017,49(3):44-53. (WANG Ping, HU Tian, GUO Xiuji, et al. Experimental study of influence of confluence angle on sandbars at river confluence with hyperconcentrated tributary flow [J]. Advanced Engineering Sciences, 2017, 49 (3): 44-53. (in Chinese))
- [12] ZHANG Yuanfeng, WANG Ping, WU Baosheng, et al. An experimental study of fluvial processes at asymmetrical river confluences with hyperconcentrated tributary flows [J]. Geomorphology, 2015, 230: 26-36.
- [13] TANG Hongyu, 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.
- [14] 陈凯霖,冯民权,张涛,等.明槽交汇区污染物浓度场分布规律研究[J].水力发电学报,2019,38(10):86-100. (CHEN Kailin, FENG Minquan, ZHANG Tao, et al. Study on distribution of pollutant concentrations in intersection of open channel [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019, 38 (10): 86-100. (in Chinese))
- [15] 陈凯霖,冯民权,张涛.基于PIV技术的明槽交汇区流场试验研究[J].水力发电学报,2018,37(11):43-55. (CHEN Kailin, FENG Minquan, ZHANG Tao. Experimental study on open-channel flow confluence based on PIV technology [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37 (11): 43-55. (in Chinese))
- [16] 张涛.非对称型河流交汇区水流结构与污染物输运规律研究[D].西安:西安理工大学,2021.
- [17] 王玲玲,朱海.工程紊流数值模拟方法及应用[M].北京:科学出版社,2019.
- [18] 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))
- [19] 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.
- [20] HUANG Jianchun, 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.
- [21] 陈凯霖.明槽交汇区水动力特性与污染物浓度场试验研究[D].西安:西安理工大学,2019.
- [22] 王协康,杨青远,卢伟真,等.交汇水流分离区特征研究[J].四川大学学报(工程科学版),2008,40(6):1-6. (WANG Xiekang, YANG Qingyuan, LU Weizhen, et al. Study on characteristics of separation zone in confluence river [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2008, 40 (6): 1-6. (in Chinese))
- [23] 华祖林.环境水力学[M].北京:科学出版社,2020.
- [24] RAMÓN C L, ARMENGOL J, DOLZ J, et al. Mixing dynamics at the confluence of two large rivers undergoing weak density variations [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2014, 119 (4): 2386-2402.
- [25] GAUDETJ M, ROY A G. Effect of bed morphology on flow mixing length at river confluences [J]. Nature, 1995, 373 (6510): 138-139.

(收稿日期:2022-10-28 编辑:俞云利)