

水流交汇区的水动力学特性数值模拟

刘盛 康 鹏 李 然 魏 娟

(四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室 四川 成都 610065)

摘要 :为开展水流交汇区污染物浓度分布研究 ,进行水流交汇区水动力学特性的数值模拟 ,建立适用于水流交汇区的水气两相流数学模型。模型采用 Weber 试验数据进行验证 ,验证结果表明模型模拟的自由水面、流场与试验结果吻合较好。针对交汇区浓度分布试验的研究需要 ,模拟分析了不同交汇角、流量比和动量比对交汇区水动力学特性的影响。研究结果表明 :分离区的范围随交汇角、流量比和动量比的减小而逐渐缩小直至分离区消失 ,交汇角、流量比和动量比越小 ,交汇口上游水位的壅高及分离区内水位的下降程度越不明显。

关键词 水流交汇区 ;数值模拟 ;两相流 ;交汇角 ;流量比 ;动量比

中图分类号 :TV131.2

文献标志码 :A

文章编号 :1006-7647(2012)04-0014-05

A numerical study on hydrodynamic characteristics of confluence flow //LIU Sheng-yun , KANG Peng , LI Ran , WEI Juan
(State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering , Sichuan University , Chengdu 610065 , China)

Abstract : In order to investigate the characteristics of the pollutant concentration distribution at open-channel confluences , a two-phase flow model was developed to reveal the hydrodynamic characteristics of confluence flows. The model was verified with experimental data from Webber. The numerical results were found to agree with the measured free surface profiles and the flow fields. The effects of the junction angle and the discharge ratio on the hydrodynamic characteristics of confluence zone were numerically investigated. The results indicate that the size of the separation zone decreases with decreasing junction angle and discharge ratio and momentum ratio until the separation zone disappears. The smaller the junction angle and the discharge ratio and momentum ratio are , the less evident the degree of the water-level rise upstream of the confluence zone and the water-level decline in the separation zone.

Key words : flow confluence zone ; numerical simulation ; two-phase flow ; junction angle ; discharge ratio ; momentum ratio

水流交汇现象在环境工程和水利工程等领域广泛存在。水流交汇区的水流流动十分复杂 ,呈现诸多特有的水动力学特性 ,如流动混掺、水面壅高、二次流等 ,这些特性受到很多因素的影响 ,包括交汇口形状、尺寸、河道坡底、交汇角大小、流量比、动量比等。对水流交汇区水动力学特性的研究可以追溯到 20 世纪 40 年代 ,Taylor^[1]最早采用动量方程对交汇角为 45°和 135°的明渠交汇水流进行理论研究 ,得到了上、下游水深比简单的关系式 ;Best^[2]提出了有关交汇口附近流体的分区 ;Webber 等^[3]考虑了阻力的影响 ,通过保角映射的方法提出了水流交汇区的理论水流模式 ;Hsu 等^[4]根据试验结果得到水头损失系数以及和流量比有关的动量修正系数和动能修正系数的拟合表达式 ;茅泽育等^[5-6]建立了考虑干、支流交汇角以及与流量比相关的动量修正系数和动能

修正系数的一维数学模型 ,提出了动量损失系数的理论表达式 ;徐孝平等^[7]将侧槽作为岸边排放口处理 ,运用水深平均 $k-\epsilon$ 流模式、刚盖假定及混合有限分析法 ,较好地模拟了直角交汇河段的流场特性 ;赵升伟等^[8]针对明渠交汇口缓流流动特性 ,分别应用水深平均 H-L 模型及 $k-\epsilon$ 模型对明渠交汇区流动进行模拟 ,并应用实测资料对这 2 种模型进行验证比较 ;刘同宦等^[9]应用三维多普勒流速仪(ADV)研究交汇角为 90°时不同汇流比水流条件下交汇区域的三维水流结构及其脉动特性 ;冯镜洁等^[10]以水槽试验为基础 ,结合数值模拟研究分析了交汇角为 60°和 90°时交汇区的特性 ;吴迪等^[11-13]利用 ADV 对 Y 形交汇口水流的三维水力特性进行模型试验并进行数值分析。

基于水流交汇区浓度分布试验和理论研究 ,本

基金项目 :国家自然科学基金(51179111)

作者简介 :刘盛 (1988—)男 ,湖北十堰人 ,硕士研究生 ,主要从事环境水力学研究。E-mail :lsy880402@126.com

通讯作者 :李然 (1968—)女 ,河北无极人 ,教授 ,主要从事环境水力学研究。E-mail :liran@scu.edu.cn

文建立了适用于水流交汇区的水气两相流模型,模拟分析了不同交汇角、流量比以及动量比对交汇区水动力学特性的影响,研究了水流交汇区的水动力学特性。水动力学特性直接影响污染物浓度分布特征,研究可为交汇区污染物浓度扩散研究提供基础数据和参考,对排污口的位置选择以及河道治理等都具有重要的指导意义。

1 交汇区水气两相流数学模型的建立

1.1 模型方程

为模拟交汇区自由水面的水深变化,采用水气两相流三维紊流 $k-\epsilon$ 模型,自由水面的确定采用VOF方法。定义函数 α_w 和 α_a 分别代表计算区域内水和气所占的体积分数,在每个单元中有 $\alpha_w + \alpha_a = 1$ 。水气两相流的数学模型如下:

连续性方程
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程(雷诺方程)
$$\frac{\partial \rho \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho \nu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u'_i u'_j} \right] + \rho \bar{g}_i \quad (2)$$

k 方程
$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}_i k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\rho \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + \rho G_k - \rho \epsilon \quad (3)$$

ϵ 方程
$$\frac{\partial \rho \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}_i \epsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\rho \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + C_{\epsilon 1} \rho \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (4)$$

其中 $G_k = \nu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$ $\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$

式中: ρ 为流体密度 kg/m^3 ; $\bar{u}_i$ 和 $\bar{u}_j$ 分别为 i 和 j 方向上的时均速度 m/s ; $\overline{u'_i u'_j}$ 和 $\overline{u'_j u'_i}$ 分别为 i 和 j 方向上的脉动分量 m/s ; $\bar{p}$ 为时均压力 Pa ; $\bar{g}_i$ 为 i 方向上的时均体积力 m/s^2 ; ν 为分子运动黏性系数 m^2/s ; ν_t 为紊动黏性系数; k 为紊动能; ϵ 为紊动耗散率; σ_k 和 σ_ϵ 分别为 k 方程和 ϵ 方程的紊流 Prandtl 数,分别取值 1.44 和 1.92; G_k 为流速梯度引起的紊动能生成项; $C_{\epsilon 1}$ 和 $C_{\epsilon 2}$ 为经验系数,取值分别为 1.0 和 1.3; C_μ 为经验系数,取值 0.09; $i, j = 1, 2, 3$, 分别代表 x, y, z 这 3 个坐标方向。

1.2 边界条件

a. 进口边界。进口边界条件按流量进口设置,给定水深、流量、紊动特征量 k 和 ϵ 。紊动特征量按式(5)~(6)确定:

$$k = 0.00375 u_0^2 \quad (5)$$

$$\epsilon = \frac{k^{1.5}}{0.4 h_0} \quad (6)$$

式中: u_0 为进口断面平均流速; h_0 为进口处水深。

b. 出口边界。下游出流边界水位较稳定,流动是充分发展的,出口断面上的所有变量(压力除外)沿出口法线的梯度为零,表达式为

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \quad (7)$$

式中: n 为出口断面的法线向量。

c. 壁面边界。在近壁处采用标准壁面函数法得到近壁网格节点的变量值。引入无量纲参数 y^+ 表示距离,设近壁点 p 到壁面的距离为 y_p , 则

$$u_p = \begin{cases} y^+ u_r & y^+ \leq 11.63 \\ \frac{1}{\kappa} \ln(E y^+) u_r & y^+ > 11.63 \end{cases} \quad (8)$$

$$k_p = \frac{u_r^2}{C_\mu} \quad (9)$$

$$\epsilon_p = \frac{u_r^3}{\kappa y_p} \quad (10)$$

其中 $y^+ = \frac{y_p u_r}{\nu}$ $u_r = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$

式中: u_p, k_p, ϵ_p 分别为 p 点的流速、紊动能和紊动耗散率; u_r 为壁面摩擦速度; τ_w 为壁面切应力; κ 和 E 为常数,分别取值 0.42 和 9.8。

1.3 数值计算方法

采用有限体积法对通用方程在同位网格上进行离散,源项采用负坡线性化处理,动量方程离散时采用动量插值法,在计算界面流速时引入相邻两点的压力差。采用 PISO^[14] 算法来求解压力、速度的耦合问题。

2 数学模型的验证

采用 Weber 等^[15]的试验结果对本文建立的水气两相流数学模型进行验证。

2.1 Weber 试验简介

Weber 试验在交汇角为 90° 的等宽水槽中进行。干流水槽长 21.95 m, 交汇口上游长 5.49 m, 支流水槽长 3.66 m, 主支流水槽宽度均为 0.91 m, 高度为 0.5 m, 水槽底部为平坡, 干支流水槽上游各设有平流装置, 试验水槽平面示意图如图 1 所示。

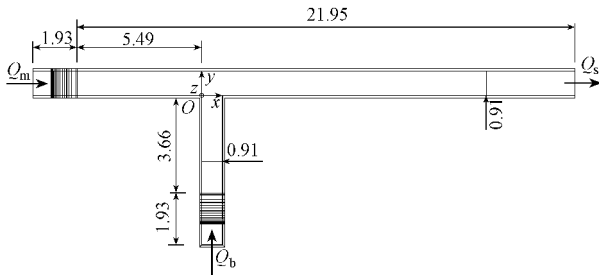


图 1 试验水槽平面示意图(单位:m)

2.2 流场模拟结果的验证

数值模拟中坐标原点位于干支流边界交汇点上游, x 轴方向为干流水槽的流动方向, y 轴方向为支流水槽的流动方向, z 轴方向为垂直向上方向, 见图 1。选取 Weber 试验中 2 组试验的测量结果对数学模型模拟结果进行验证, 第 1 组的干流流量 Q_m 和支流流量 Q_b 分别为 $0.071\text{ m}^3/\text{s}$ 和 $0.099\text{ m}^3/\text{s}$, 第 2 组的 Q_m 和 Q_b 分别为 $0.099\text{ m}^3/\text{s}$ 和 $0.071\text{ m}^3/\text{s}$ 。

图 2 和图 3 分别为第 1 组和第 2 组试验的自由水面高程计算值与试验值的对比。由图 2 和图 3 可知, 水气两相流 VOF 模型模拟计算的自由水面高程与试验结果吻合较好, 能够比较准确地模拟出交汇区的水面变化特征。

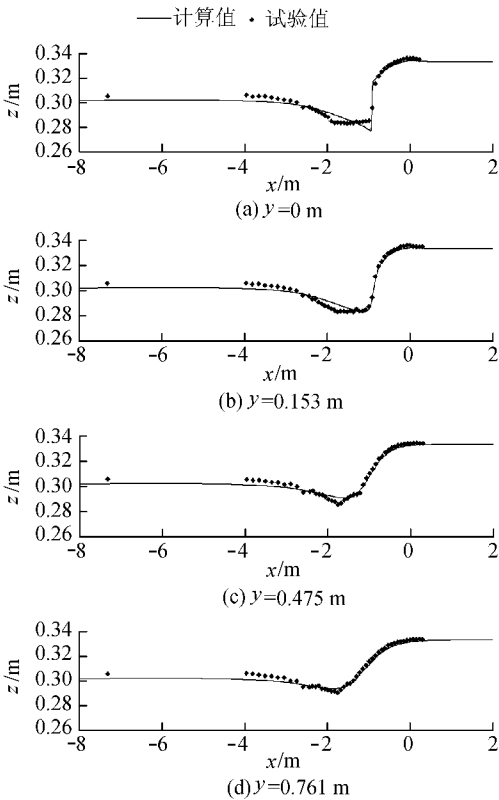


图 2 第 1 组试验自由水面高程计算值与试验值的对比

图 4 为 2 组试验 $z = 0.254\text{ m}$ 水平面的流线分布。从图 4 可以看出, 支流汇入干流后, 流线发生明显偏转, 水流在交汇口下游交汇点处发生分离, 流速减小甚至产生回流, 形成分离区。图 5 为第 2 组试验 $z = 0.254\text{ m}$ 水平面的流速分布数值模拟结果与试验结果的对比。从图 5 可以看出, 流速分布数值模拟结果与试验结果接近, 但数值模拟结果比试验结果略小。

图 6 为第 2 组试验 $x = 2.132\text{ m}$ 横断面流速分布的数值模拟结果与试验结果的对比。从图 6 可以看出, 水气两相流模型模拟得到的二次流与试验结果趋势相似, 但速度值及环流中心位置存在一定的差异。分析其原因: 在水流交汇区流动中, 除了由于弯道流动特征引起的第一类二次流外, 同时存在由各向

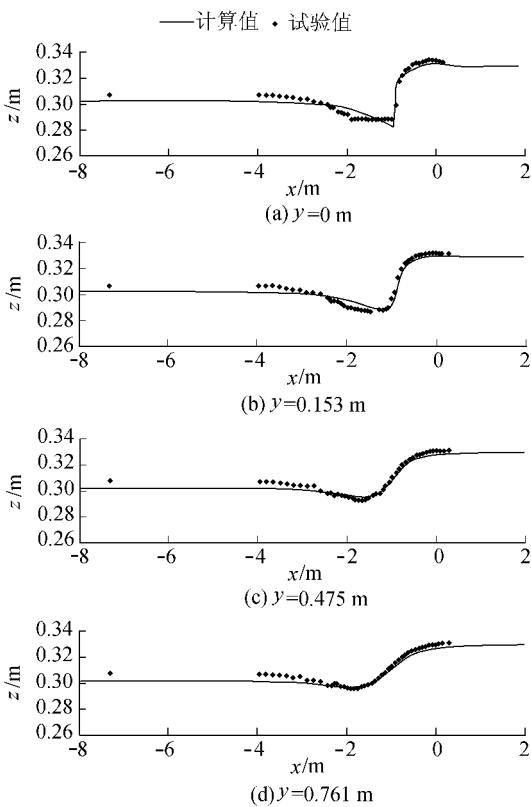


图 3 第 2 组试验自由水面高程计算值与试验值的对比

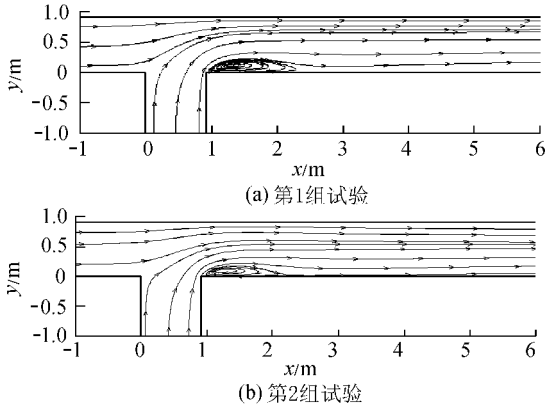


图 4 2 组试验 $z = 0.254\text{ m}$ 水平面的流线分布

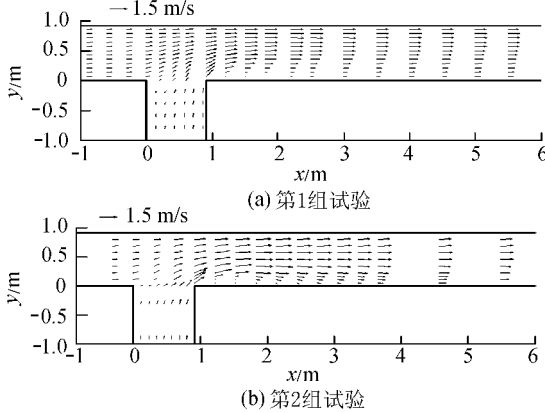


图 5 第 2 组试验 $z = 0.254\text{ m}$ 水平面流速分布

数值模拟结果与试验结果的对比

异性紊动引起的第二类二次流, 而 $k-\epsilon$ 模型本身的各向同性假定导致二次流模拟结果存在一定误差。

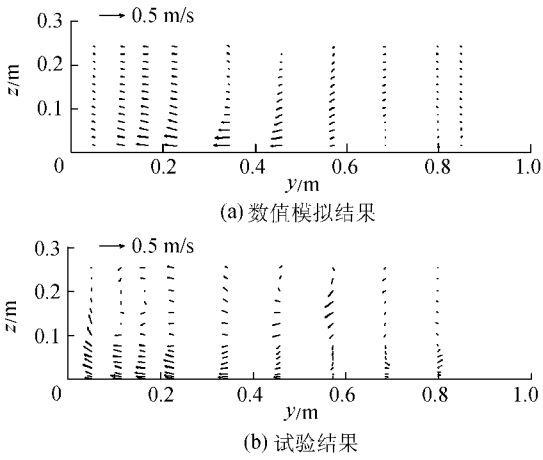


图6 第2组试验 $x = 2.132\text{ m}$ 横断面流速分布的数值模拟结果与试验结果的对比

3 交汇区水动力学特征的数值模拟

3.1 计算模型及工况设置

采用水气两相流数学模型对不同交汇角、流量比和动量比开展数值模拟研究。数值计算模型参考Weber 试验水槽,模型大小略有变化,其中干流长27 m,交汇口上游长6 m,支流长6 m,主支流宽度均为1 m,高度为0.6 m,底部为平坡,坐标原点位于干支流边界交汇点下游。

数值模拟工况见表1,每组工况交汇口下游总流量 Q_s 均为 $0.12\text{ m}^3/\text{s}$ 。

表1 数值模拟工况

工况	交汇角 $\alpha/(^\circ)$	流量比 q	动量比 p
1	90	0.50	0.25
2	60	0.50	0.25
3	45	0.50	0.25
4	30	0.50	0.25
5	90	0.75	0.56
6	90	0.25	0.06

3.2 网格划分

不同交汇角网格划分的原则基本一致,即对交汇口附近的区域网格加密,而交汇口向上游和下游方向网格均逐渐稀疏;在垂向和横向考虑边壁的影响,对底部及边壁处加密;为了精确求解自由水面位置,对水气两相交界区域的网格加密。以交汇角为 90° 时的模型为例,网格单元总数为26.96万个,最小网格体积为 $5 \times 10^{-6}\text{ m}^3$,最大网格体积为 $3.8 \times 10^{-4}\text{ m}^3$ 。

3.3 交汇角对流场特征的影响

图7为不同交汇角时的水位分布比较。从图7可以看出,在流量比和动量比相同的情况下,交汇角越小,交汇口上游的壅水现象越不明显,上、下游水位差越小,分离区内的水位下降程度及分离区的范

围也越小。

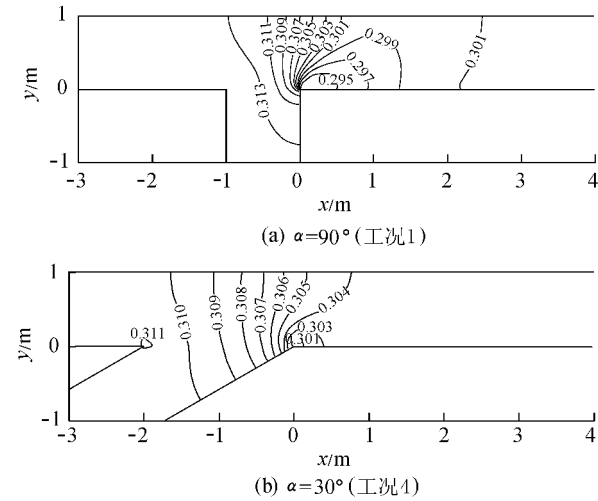


图7 不同交汇角时的水位分布比较 单位:m

图8为不同交汇角时 $z = 0.250\text{ m}$ 水平面流线分布比较。从图8可以看出,在流量比和动量比相同的情况下,交汇角越小,支流对干流的干扰越小。交汇角的大小对分离区的出现及形状影响较大。随着交汇角的减小,支流流线在交汇口下游的偏转程度逐渐变小,分离区的范围逐渐缩小直至完全消失。在交汇角为 45° 时,没有回流现象发生,而在交汇角为 30° 时,分离区已经完全消失,仅在交汇口下游存

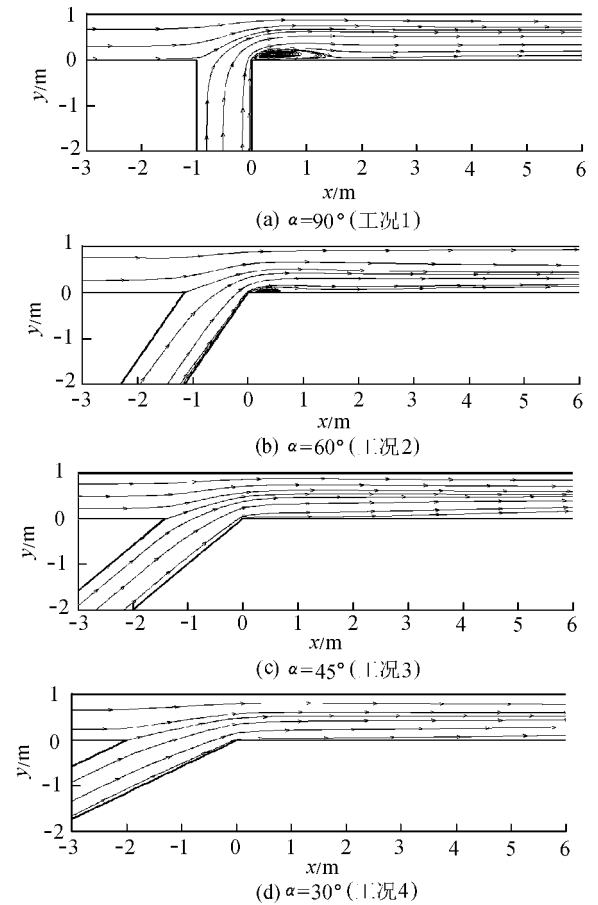


图8 不同交汇角时 $z = 0.250\text{ m}$ 水平面流线分布比较

在流线弯曲现象。

3.4 流量比和动量比对流场特征的影响

图 9 为不同流量比和动量比时的水位分布比较。从图 9 可以看出,在交汇角一定的情况下,流量比和动量比越小,上游的壅水现象越不明显,上、下游水位差越小,分离区内的水位下降程度及分离区的范围也越小。

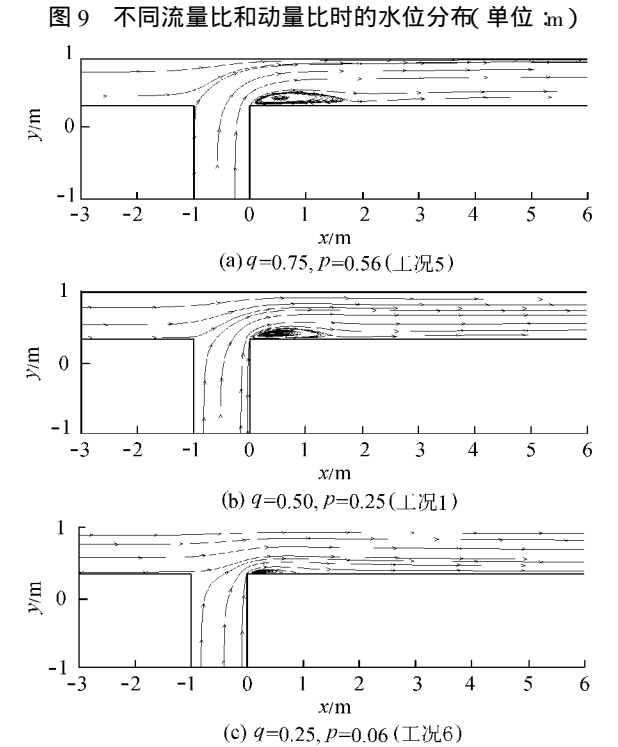
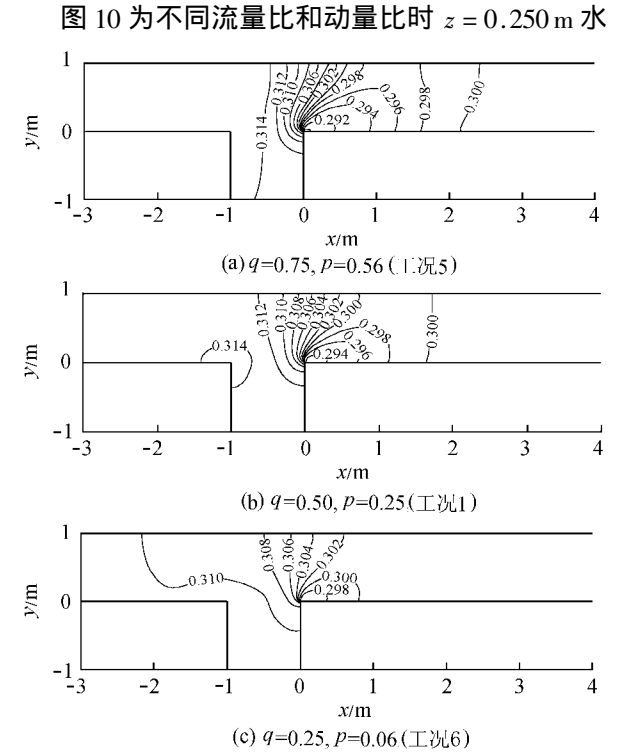


图 10 不同流量比和动量比时 $z = 0.250\text{ m}$ 水平面流线分布比较

平面流线分布比较。从图 10 可以看出,在交汇角一定的情况下,不同流量比和动量比工况下形成的分离区形状相似,随着支流、干流的流量比和动量比减小,支流对干流的干扰程度逐渐降低,形成的分离区形状和尺寸逐渐变小。

4 结 语

本文建立的水气两相流模型较好地模拟了交汇区的自由水面和流场内部特征。数值模拟研究结果表明:交汇角、流量比和动量比越小,支流对干流的干扰越小,交汇口上游水位的壅高及分离区内水位下降程度越不明显;在流量比和动量比一定的情况下,随着交汇角的减小,分离区的范围逐渐缩小直至分离区消失;在交汇角一定的情况下,随着流量比和动量比的减小,分离区的形状和尺寸逐渐变小。

水体的水动力学条件是污染物迁移、转化的基本背景条件。本文开展的水流交汇区水动力学特性研究,可以为水流交汇区污染物浓度扩散研究提供基础数据和参考,但由于水流交汇区水流结构的复杂性,与数值模拟本身的局限性,本文建立的水气两相流数学模型尚不够完善,水气两相流模拟结果与实际情况存在一定的差异,因此对本文数学模型进行更广泛的验证和完善是今后值得进一步研究的问题。

参考文献:

[1] TAYLOR J L. Flow characteristics at rectangular open-channel junction[J]. Trans ,1944 ,109 :893-902.

[2] BEST J L. Flow dynamics at river channel confluences : implications for sediment transport and bed morphology[C]// Recent Developments in Fluvial Sedimentology. Tulsa :Society of Economic Paleontologists and Mineralogists ,1987.

[3] WEBBER N B ,GREATER C A. An investigation of flow behavior at the junction of rectangle channels[J]. Proc Inst Engrs ,1966 ,34(8) :321-334.

[3] WEBBER N B ,GREATER C A. An investigation of flow behavior at the junction of rectangle channels[J]. Proc Inst Engrs ,1966 ,34(8) :321-334.

[4] HSU C C ,WU F J ,LEE W J. Flow at 90° equal-width open channel junction[J]. Journal of Hydraulic Engineering ,1998 ,124(2) :186-191.

[5] 茅泽育,罗旸,赵升伟,等.等宽明渠交汇口水流一维数学模型[J].水利学报,2004 ,35(8) :26-32.

[6] 茅泽育,赵升伟,罗旸,等.明渠交汇口水流分离区研究[J].水科学进展,2005 ,16(1) :7-13.

[7] 徐孝平,彭文启,李炜.直角交汇河段流场特性分析[J].水利学报,1993 ,24(2) :22-31.

(下转第 22 页)

验证结果表明,该方法可根据不同要求估计出不同置信水平下的河流水质参数,在计算过程中具有一定的稳定性、可靠性和灵活性,是分析河流水团示踪试验数据、确定河流水质参数的一种有效途径。

参考文献：

[1] 常文婷,王冠韩,龙喜.基于平面二维水质模型的潮汐河污染源反演[J].水资源保护,2010,26(6):5-8.
[2] 邹海明,蒋良富,李粉茹.2004 年淮河流域水质状况和聚类分析[J].水资源保护,2007,23(1):60-62.
[3] 芮孝芳.水文学原理[M].北京:中国水利水电出版社,2004:370-372.
[4] 郭建青,温季.示踪实验确定河流纵向弥散系数的直线图解法[J].环境科学,1990,11(2):24-27.
[5] 顾莉,华祖林,何伟,等.河流污染物纵向离散系数确定的演算优化法[J].水利学报,2006,38(12):1421-1425.
[6] 郭建青,李彦,王洪胜,等.确定河流水质参数的抛物方程

近似拟和法[J].水利水电科技进展,2005,25(2):11-14.
[7] 郭建青,王洪胜,李云峰.确定河流纵向离散系数的相关系数极值法[J].水科学进展,2000,11(4):387-391.
[8] 马洪波,崔柏林,常文娟.改进的 BP 网络模型在确定河流纵向离散系数中的应用[J].水电能源科学,2010,28(9):19-21.
[9] 郭建青,李彦,王洪胜,等.粒子群优化算法在确定河流水质参数中的应用[J].水利水电科技进展,2007,27(6):1-5.
[10] 顾莉,华祖林.天然河流纵向离散系数确定方法的研究进展[J].水利水电科技进展,2007,27(2):85-89.
[11] BREE R M, METIN M O, GEORGE F P. Transmissivity and storage coefficient estimation by coupling the Cooper-Jacob method and modified fuzzy last-quares regression[J]. Journal of Hydrology, 2008, 353: 267-274.
[12] 杨纶标,高英仪.模糊数学原理及应用[M].3 版.广州:华南理工大学出版社,2002:162-170.

(收稿日期:2011-12-01 编辑:骆超)

(上接第 9 页)

[4] 霍艾迪,康相武,张广军,等.基于 MODIS 数据的毛乌素沙地土壤水分模型的建立[J].干旱地区农业研究,2010,28(4):19-23.
[5] 扎西央宗,杨秀海,边巴次仁,等.基于 TVDI 的西藏地区旱情遥感监测[J].气象科技,2010,38(4):495-499.
[6] 王文种,张友静.半干旱区旱情监测指数应用分析[J].地球信息科学,2008,10(2):273-278.
[7] 宋春桥,游松财,刘高焕,等.基于 TVDI 的藏北地区土壤湿度空间格局[J].地理科学进展,2011,30(5):569-576.
[8] 康为民,罗宇翔,向红琼,等.贵州卡斯特山区的 NDVI-Ts 特征及其干旱监测应用研究[J].气象,2010,36(10):78-83.
[9] 陈晨,刘媛媛,王文种,等.基于温度植被干旱指数的三花间流域旱情监测[J].东北水利水电,2008,26(2):32-34.
[10] MORAN M S, CLARKE T R, INOUE Y. Estimating crop water deficit using the relation between surface air temperature and

spectral vegetation index[J]. Remote Sensing of Environment, 1994, 49: 246-263.
[11] NEMANI R R, RUNNING S W. Estimation of regional surface resistance to evapotranspiration from NDVI and thermal IR/VHRR data[J]. Journal of Applied Meteorology, 1989, 28(4):276-284.
[12] GOETZ S J. Multisensor analysis of NDVI, surface temperature and biophysical variables at a mixed grassland site[J]. International Journal of Remote Sensing, 1997, 18(15):71-94.
[13] 柳钦火,辛景峰,辛晓洲,等.基于地表温度和植被指数的农业干旱遥感监测方法[J].科技导报,2007,25(6):12-17.
[14] 姚春生.使用 MODIS 数据反演土壤水分研究[D].北京:中国科学院研究生院,2003.
[15] 范辽生,姜纪红,盛晖,等.利用温度植被干旱指数(TVDI)方法反演杭州伏旱期土壤水分[J].中国农业气象,2009,30(2):230-234.

(收稿日期:2011-12-09 编辑:熊水斌)

(上接第 18 页)

[8] 赵升伟,茅泽育,罗旰,等.等宽明渠交汇水流数值计算[J].河海大学学报:自然科学版,2005,33(5):494-499.
[9] 刘同宦,郭炜.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):6-9.
[10] 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):321-325.
[11] 吴迪,郭维东,刘卓也.复式断面河道“Y”型交汇河口水流水力特性[J].水利水电科技进展,2007,27(3):21-23.

[12] 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):50-52.
[13] 郭维东,王晓刚,曹继文,等.“Y”型汇流口水流水力特性试验研究[J].水电能源科学,2005,23(3):53-56.
[14] 王福军.计算流体动力学分析:CFD 软件原理与应用[M].北京:清华大学出版社,2004:87-91.
[15] 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.

(收稿日期:2011-12-26 编辑:骆超)