

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2024.02.001

交汇区水流结构对水温分布特征的影响机理

肖洋^{1,2,3,4,5,6}, 姚晨欣¹, 张涛涛³, 许晨⁷, 夏阳⁸, 刘佳明¹, 顾娟¹

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210098;
3. 苏州科技大学环境科学与工程学院, 江苏 苏州 215009; 4. 河海大学水利部水循环与水动力系统重点实验室, 江苏 南京 210098;
5. 河海大学水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210098; 6. 河海大学水安全与水科学协同创新中心, 江苏 南京 210098;
7. 苏州科技大学地理科学与测绘工程学院, 江苏 苏州 215009; 8. 江西省水利科学院, 江西 南昌 330029)

摘要: 为分析交汇区复杂的水温分布规律及其受水流结构影响的机理, 采用 Fluent 数值模拟软件, 通过改变汇流角和汇流比, 模拟了不同条件下交汇区的时均流场、紊动特性和水温分布, 分析了各工况下交汇区水平面及断面水温分布特征(水温非均匀性指数)和水流结构特征参量(紊动能和涡量)间的关系, 探究了不同水流结构对水温分布的影响机理。结果表明: 水流剪切影响热掺混层的位置, 二次环流影响热掺混层的形态; 汇流角或汇流比越大, 断面非均匀指数越小, 水温掺混越快, 热掺混层随剪切层位置的改变越靠近外岸壁(交汇口对侧壁面), 热掺混层弯曲程度随二次环流强度增大而增大; 紊动能及涡量与断面非均匀指数之间呈现良好的线性关系。

关键词: 河流交汇区; 水温分布特征; 水流结构; 数值模拟

中图分类号: TV147

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2024)02-0001-11

Influence mechanisms of flow structure on water temperature distribution characteristics in junction areas

XIAO Yang^{1,2,3,4,5,6}, YAO Chenxin¹, ZHANG Taotao³, XU Chen⁷, XIA Yang⁸, LIU Jiaming¹, GU Ran¹

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Yangtze Institute for Conservation and Development, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China;

4. Key Laboratory of Water Cycle and Hydrodynamic System, Ministry of Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

5. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210098, China;

6. Cooperative Innovation Center for Water Safety & Hydro Science, Nanjing 210098, China;

7. School of Geography Science and Geomatics Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China;

8. Jiangxi Academy of Water Science and Engineering, Nanchang 330029, China)

Abstract: In order to analyze the complicated water temperature distribution law in the intersection area and the influence mechanism of flow structure on it, the numerical simulation software Fluent was used to simulate the time-mean flow field, turbulence characteristics and water temperature distribution in the river junction area under different conditions by changing the confluence angle and the confluence ratio, and to analyze the relationship between the water temperature distribution characteristics (water temperature non-uniformity index) and the characteristic parameters of the flow structure (turbulence kinetic energy and vorticity) in the intersection area under different working conditions. The influence mechanism of different flow structure on the water temperature distribution was explored. The results show that the flow shear affects the position of the hot mixing layer and the secondary circulation affects the shape of the hot mixing layer. The larger the confluence angle or confluence ratio, the smaller the cross section non-uniformity index and the faster the water temperature mixing. With the change of shear layer location (turbulent kinetic quantization shear), the hot mixing layer is closer to the outer bank wall (intersection to side wall), and the bending degree of the hot mixing layer increases with the increase of secondary circulation strength. It shows a good linear relationship between turbulence kinetic energy and vorticity and section heterogeneity index.

Key words: river junction area; water temperature distribution characteristics; flow structure; numerical simulation

基金项目: 国家自然科学基金长江联合基金项目(U2240209); 江苏省水利科技项目(2021055); 国家自然科学基金面上项目(52379075); 水利部重大科技项目(SKS-2022124)

作者简介: 肖洋(1974—), 男, 教授, 博士, 主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail: Sediment_lab@hhu.edu.cn

引用本文: 肖洋, 姚晨欣, 张涛涛, 等. 交汇区水流结构对水温分布特征的影响机理[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(2): 1-11.

XIAO Yang, YAO Chenxin, ZHANG Taotao, et al. Influence mechanisms of flow structure on water temperature distribution characteristics in junction areas[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2024, 52(2): 1-11.

河流从河源到河口,沿途有不同形式的支流汇入,共同组成河流系统^[1-2]。交汇区是河流系统中水温发生突变的重要节点,交汇区来流温度不同,水流发生相互掺混,水温分布呈现分层现象,形成以热掺混层为边界的水温横向分层^[3-6]。水温的不同分布特征会对水生生物的栖息、繁殖产生重大影响,水温降低不仅会减缓鱼类的新陈代谢,还会减缓其生长发育的速度,推迟繁殖期^[7-8]。如 Mejia 等^[9]通过对 Pend Oreille 河各支流入汇处的沿程水温进行现场监测,发现水温空间异质性大的区域往往成为鲑鱼的主要栖息地。交汇区对下游水温变化起到控制性作用,研究交汇区水温分布特征及其影响因素对于河流生态环境保护具有重要意义^[10-12]。

交汇区在剧烈的紊动扩散和对流扩散作用下形成了复杂的水动力过程,进而引起水温掺混变化^[13-15],水流结构是影响交汇区水温分布的主要因素^[16-18]。交汇区水流结构主要受两汉的平面对称性、汇流角、汇流比、断面形式等因素的影响,改变两汉的汇流角(支流入汇角度)和汇流比(支流流量与干支流总来流量之比)是研究水流结构变化最常见的方法^[19]。目前研究认为交汇区水流结构呈现出明显的分区特征,主要包括:①进入交汇区的水流偏转区;②交汇口下游内岸的分离区;③交汇区上游连接角处流速很小甚至为零的停滞区;④下游河道的最大流速区;⑤水流交汇产生的剪切层;⑥远离交汇区下游的恢复区^[20]。前人对交汇区水流结构与水温分布之间的关系开展了一些研究。Rhoads 等^[21]利用声学多普勒流速剖面仪(acoustic doppler current profiler, ADCP)测量 Wabash 河与其支流 Embarras 河交汇区流场,分析了水温梯度和纵向流速梯度之间的关系,发现热掺混层的位置与水流剪切层相近。Konsoer 等^[22]通过分析 Wabash River 与 White River 交汇区的水温和纵向流速分布发现,在流速分布已基本均匀的断面,水温梯度仍较大,表明水流剪切并不是影响水温掺混的唯一因子。Rhoads 等^[23]发现动量横向通量是促进表层水流掺混的重要因素,同时螺旋流也会对横向动量通量造成影响。已有研究主要从动量或流速的角度探究水流剪切和螺旋流在交汇区的演变过程及水温变化情况,缺乏断面非均匀指数、紊动能和涡量等特征参量间的相关性分析,且在水流结构对水温掺混的影响机理方面认识也不足^[17,24]。

本文基于 Fluent 流体计算软件,运用雷诺应力模型和能量输运模型,通过设置不同的汇流角和汇流比改变交汇区的水流结构,模拟不同水流结构影响下交汇区的温度场变化,明确交汇区的水流结构和水温分布特征,分析交汇区水温断面非均匀指数与紊动能、涡量两个特征参量之间的相关关系,探究交汇区水流结构对水温分布的影响机理。

1 交汇区三维数值模型的建立及验证

1.1 控制方程

本文采用雷诺应力模型闭合雷诺时均方程组,并用流体体积函数法(VOF)处理自由液面,模拟计算交汇区三维水流结构。雷诺应力模型的时均连续方程和雷诺时均方程分别为

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left[\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_i \bar{u}_j) \right] = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_i} (-\rho \overline{u'_i u'_j}) + \rho g_i \quad (2)$$

式中: ρ 为流体密度; $\bar{u}_i$ 为*i*方向的时均流速; x_i 为*i*方向的坐标值, $i=1,2,3$; t 为时间; $\bar{p}$ 为时均压强; μ 为流体动力黏度; $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ 为雷诺应力; $\bar{u}'_i$ 为*i*方向的时均脉动流速; g_i 为*i*方向的重力加速度。

雷诺应力的输运方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \overline{u'_i u'_j}) + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k \overline{u'_i u'_j}) = D_{T,ij} + D_{L,ij} + P_{ij} + G_{ij} + \varphi_{ij} + \varepsilon_{ij} + F_{ij} \quad (3)$$

式中: $\frac{\partial}{\partial t} (\rho \overline{u'_i u'_j})$ 为瞬时项; $\frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k \overline{u'_i u'_j})$ 为对流项; $D_{T,ij}$ 为紊动扩散项; $D_{L,ij}$ 为分子黏性扩散项; P_{ij} 为剪应力产生项; G_{ij} 为浮力产生项; φ_{ij} 为压力应变项; ε_{ij} 为黏性耗散项; F_{ij} 为系统旋转产生项。

式(3)中 $D_{T,ij}$ 、 G_{ij} 、 φ_{ij} 、 ε_{ij} 模块化处理过程中的紊动能 k 和紊动耗散率 ε 的输运方程如下:

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

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{1}{2} (P_{ii} + C_{\varepsilon 3} G_{ii}) \frac{\varepsilon}{k} - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

式中: $C_{\varepsilon 1}$ 、 $C_{\varepsilon 2}$ 、 μ_t 、 σ_k 、 σ_ε 为参数,分别取 1.44、1.92、0.09、0.82、1.0; $C_{\varepsilon 3}$ 为与局部流动方向相关的参数,当主流方向与重力方向平行时取 1,当主流方向与重力方向垂直时取 0; P_{ii} 、 G_{ii} 对于不可压缩流体取 0。

采用上述雷诺应力模型模拟交汇区水流结构,在此基础上,将能量方程^[25]与紊流模型相耦合,研究交汇区水温分布。

1.2 网格划分及边界条件

设计了汇流角分别为 90°、60°、30° 的交汇水槽(图 1),其具体尺寸如下:交汇口上游河道及支汊河道长 1 m,横断面为矩形(断面 A—A'/B—B'),宽 0.3 m、高 0.4 m;交汇口下游河道长 3 m,横断面为矩形(断面 C—C'),宽 0.4 m、高 0.4 m。根据图 2 水流结构分区示意图,选取离交汇口原点分别为 0.4 m、0.8 m 和 1.2 m 的 3 个断面作为后续分析交汇区的特征断面。

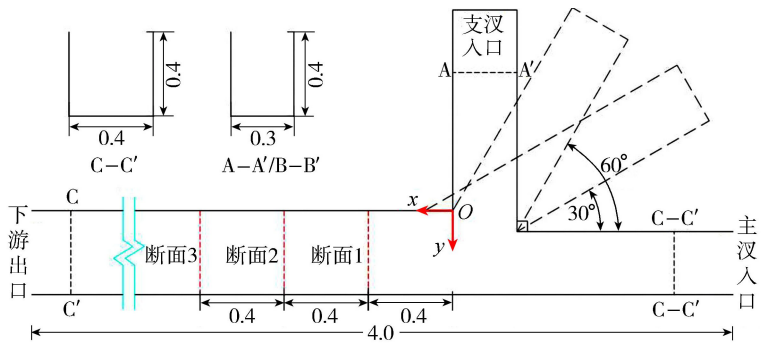


图 1 研究区域示意图(单位:m)

Fig.1 Study area diagram (unit: m)

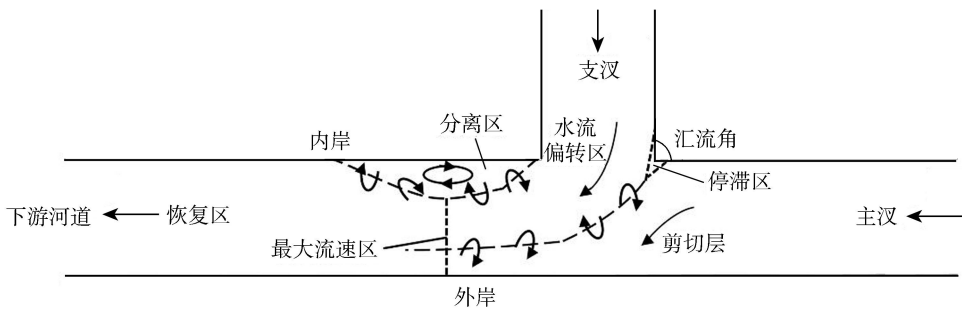


图 2 交汇区水流结构分区示意图

Fig.2 Schematic diagram of flow structure zoning in intersection area

本文模型采用六面体结构化网格,由于交汇区水流结构比上下游河道更为复杂,因而对交汇区网格进行加密,其上下游网格密度逐渐减小,模型网格的划分参照文献[26],网格具体划分如图 3 所示。

进口边界采用压力进口和速度进口,其中,压力进口设定为标准大气压,速度进口的速度大小由入口处流量和横断面面积决定,流速方向垂直于横断面。出口边界采用压力出口和壁面边界,出口压力为标准大气压。进出口边界处的紊动能和紊动耗散率按照经验公式^[27]计算。

壁面边界采用非滑移壁面边界条件,采用非平衡的壁面函数法近似模拟。由于交汇区水流流速较大,高流速区主流方向流速可达约 28 cm/s,水流从交汇口到下游的断面 3 仅需 4 s,而水体与壁面和空气间的热交换是一个较为缓慢的过程。因此,不考虑水流与侧壁面、下壁面和空气之间的热交换。

1.3 网格敏感性分析

本文以 90°汇流角交汇水槽、主汊流量为 9 L/s、支汊流量为 6 L/s 为例,选取 3 种疏密程度的网格进行敏感性分析,网格总数分别为 15.9 万、10.3 万、5.6 万。对 3 种疏密程度的网格分别进行一次交汇模拟,监控交汇区内主流流速方向上 4 个位置($x/w_d=0.08, 0.18, 0.28, 0.38$, w_d 为水槽宽度,取 0.4 m)流速的模拟情况(图 4)。由图 4 可知,模拟的流速结果趋势一致但具体数值存在区别,可见交汇区内流速对网格敏感。总数为 5.6 万的网格计算结果精度欠佳,15.9 万的网格较 10.3 万的网格虽计算精度在一定程度上有所提高,但计算成本增加。为了节约计算资源,提高计算效率,保证计算精度,选取总数为 10.3 万的网格进行后期数

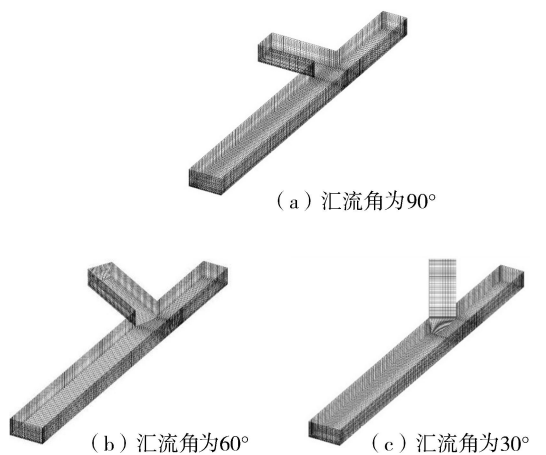


图 3 模型网格划分示意图

Fig.3 Model grid division diagram

值模拟计算,网格 y 方向尺寸为 0.02 m,加密区尺寸为 0.01 m。

1.4 模型验证

选用张汇明^[28]的水槽试验结果进行模型验证,该试验交汇区的尺寸与本文模型一致,选择的试验工况:汇流角为 90°,主汊流量为 9 L/s,支汊流量为 6 L/s。流场中 4 条垂线的流速试验值和模拟值见表 1。由表 1 可知,主流方向流速模拟值和试验值间的差异较小,误差均在 4% 以内。横向流速和垂向流速试验值和模拟值间的差异略大,这是由于横向流速和垂向流速远低于主流方向流速,精准模拟的难度较大,但试验值和模拟值沿垂向的变化趋势基本一致。因此,整体来说,本文建立的交汇流三维数值模型能够较好地模拟交汇区复杂的水流结构。

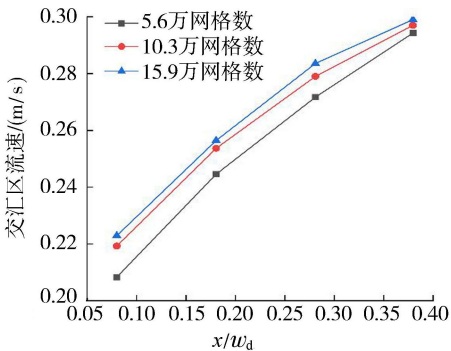


图 4 不同网格流速计算结果

Fig. 4 Velocity calculation results of different grids

表 1 流速模拟结果均值与试验结果均值对比

垂线的 平面坐标	主流方向流速			横向流速			垂向流速		
	试验均值/ (m/s)	模拟均值/ (m/s)	误差/%	试验均值/ (m/s)	模拟均值/ (m/s)	误差/%	试验均值/ (m/s)	模拟均值/ (m/s)	误差/%
(0.08,0.21)	0.241	0.242	0.457	-0.064	-0.080	24.800	-0.011	-0.008	27.434
(0.08,0.31)	0.227	0.227	0.132	-0.002	-0.002	15.000	-0.003	-0.005	37.931
(0.28,0.21)	0.289	0.301	3.967	-0.024	-0.028	14.583	-0.009	0.011	11.702
(0.28,0.31)	0.285	0.286	0.421	0.010	-0.013	31.000	0.004	0.003	25.000

1.5 数值模拟工况设置

本文设置了 3 种汇流角和 2 种汇流比的 6 个工况进行模拟计算,各工况的具体参数见表 2。为了能够显著看出交汇区掺混的形态特征,干支流温度差设置为 10 ℃^[29]。

表 2 数值模拟工况设置

Table 2 Working condition settings of numerical simulations

工况 编号	汇流角/ (°)	流量/(L/s)		汇流比	水温/℃	
		干流	支流		干流	支流
A1	90	6	9	0.6	20	30
A2		9	6	0.4		
B1	60	6	9	0.6		
B2		9	6	0.4		
C1	30	6	9	0.6		
C2		9	6	0.4		

2 计算结果与分析

2.1 交汇区平面水温分布、水流结构特征

2.1.1 水温分布特征

选取交汇区 $z/w_d=0.5$ 水温的平面分布作为特征水平断面,6 个工况下的水温平面分布如图 5 所示。水温较高的支流汇入水温较低的干流后,交汇区出现

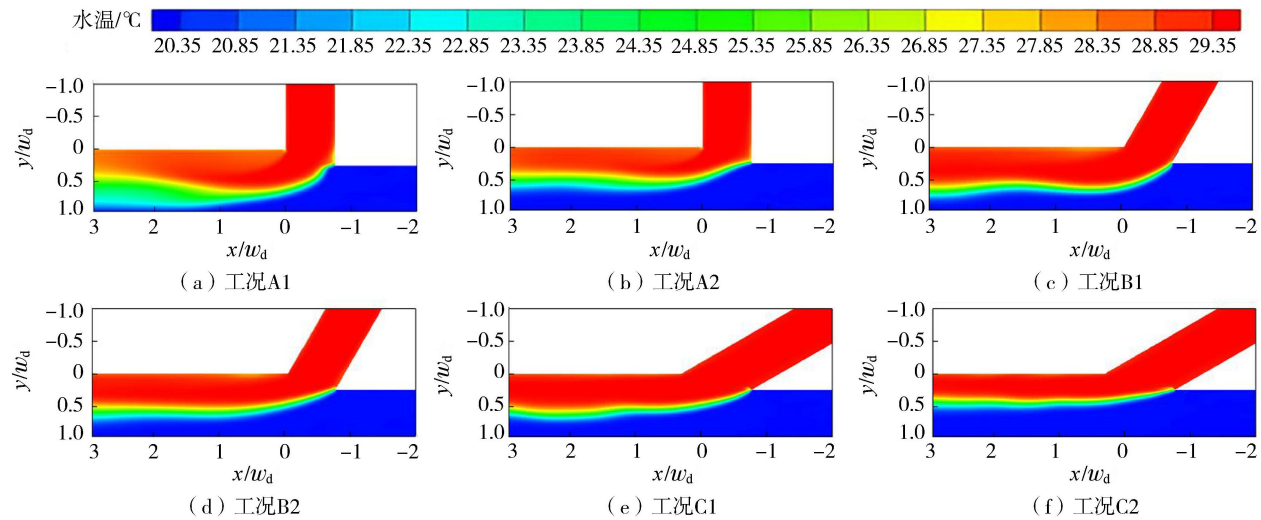


图 5 各工况下交汇区表层水温平面分布

Fig. 5 Plane distribution of surface water temperature in the intersection area under different working conditions

了温度梯度较大的热掺混层(图 5 中绿色区域),该热掺混层起源于交汇口上游交汇尖端处,在向下游发展过程中逐渐变宽,说明随着两汉水流掺混,交汇区水温的横向分布逐渐趋于均匀。汇流角或汇流比越大,表层热掺混层的位置越靠近外岸壁,且表层热掺混层宽度越大,说明支流水温对干流水温影响范围越大,横断面内水温分布越均匀。

2.1.2 水流结构特征

选取汇流角为 90°、汇流比为 0.6 工况下 $z/w_d=0.5$ 处的水平断面为特征面,绘制水平面中的流速场,如图 6 所示。将交汇处的流速场与温度场进行对比分析,可以明显看到热掺混层边界与干支流交汇后水流剪切强烈的区域相近,初步判定水流剪切层的位置和热掺混层的位置相近,水流剪切产生的紊动能是形成热掺混层的一个重要原因。

2.2 交汇区断面水温分布、水流结构特征

2.2.1 不同汇流角下断面水温分布特征

汇流角是影响交汇区水流结构的重要参数。本节通过对比工况 A1、B1 和 C1 交汇区热掺混层形态和位置,分析汇流比为 0.6、汇流角不同的条件下交汇区水温分布特征。图 7 给出了不同汇流角下各断面的水温分布,其中,断面 1、断面 2、断面 3 的位置分别为 $x/w_d=1,2,3$ 。

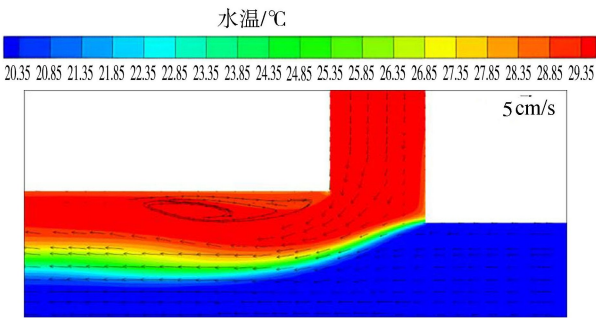


图 6 汇流角为 90°、汇流比为 0.6 工况下
交汇区流速矢量场

Fig.6 Flow velocity vector field in intersection area with
confluence angle of 90° and confluence ratio of 0.6

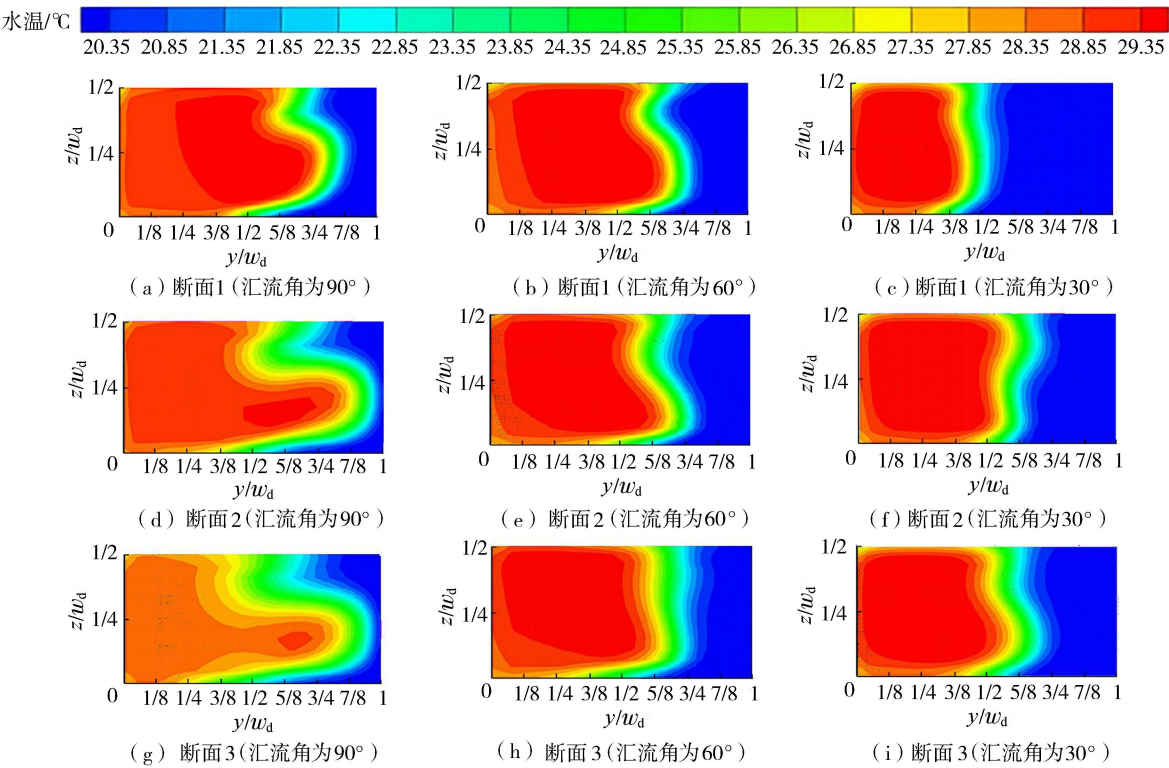


图 7 不同汇流角交汇区水温断面分布

Fig.7 Section distribution of water temperature under different confluence angles

工况 A1 热掺混层(图 7 中绿色区域)呈现明显的上凹下凸形态,说明相比于上层水流($y/w_d=1/4 \sim 1/2$),支流的下层水流($y/w_d=1/10 \sim 1/4$)能够更大程度地侵入主流。床面附近($y/w_d=0 \sim 1/10$)为蓝色干流对红色支流的侵入。以热掺混层最右侧为标准对比各断面热掺混层位置,断面 1 中热掺混层约位于 $y/w_d=7/8$,而断面 2 和断面 3 中热掺混层几乎可达外岸壁($y/w_d=1$),说明热掺混层沿主流方向向外岸壁移动。工况 B1 下热掺混层也呈现上凹下凸形态,但其弯曲程度低于工况 A1。在断面 1~3 中,热掺混层基本位于 $y/w_d=3/4$ 。工况 C1 条件下,热掺混层基本呈垂直。由此可见,汇流角越大,热掺混层的弯曲程度越大,呈现更为明显的上凹下凸形态,且其位置也越靠近外岸壁。

参照 Biron 等^[30] 对交汇区掺混特征的描述,提出采用非均匀指数 σ 描述交汇区内选定断面水温的掺混程度:

$$\sigma = \frac{\sum_{i=1}^n |t_i - t_p|}{\sum_{i=1}^n t_i} \tag{6}$$

其中 $t_p = (t_l Q_l + t_m Q_m)/(Q_l + Q_m)$

式中: t_i 为选定断面内各测点水温; t_p 为混合均匀后的水温; t_l 、 t_m 分别为支流和干流水温; Q_l 、 Q_m 分别为支流和干流流量。

σ 越小说明该断面水温分布越均匀,掺混越趋于完全; σ 沿程变化率越大,说明掺混速率越快。各工况按 σ 从大到小的排序为 C1、B1、A1,按 σ 沿程变化率从大到小排序为 A1、B1、C1,且工况 A1 的掺混速率远高于其他 2 个工况(图 8)。说明汇流角越大,水温非均匀指数越小,水温掺混速率越快。相比于汇流角从 30°(工况 C1)到 60°(工况 B1),从 60°(工况 B1)到 90°(工况 A1)条件下, σ 的变化幅度大得多,说明汇流角越大,角度的变化对水温分布的非均匀性影响越大。

2.2.2 不同汇流比下断面水温分布特征

汇流比是交汇区最基本的水力参数,也是影响交汇区水流结构的重要参数。以断面 2 为典型断面,对比工况 A1 与 A2、工况 B1 与 B2、工况 C1 与 C2 之间交汇区热掺混层的形态和位置,分析不同汇流比条件下交汇区水温分布特征。图 9 为各工况断面 2 的水温分布。

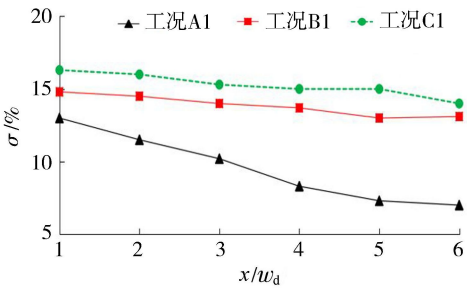


图 8 不同汇流角交汇区水温非均匀指数沿程分布
Fig.8 Nonuniform index of water temperature distributed along the intersection area of different confluence angles

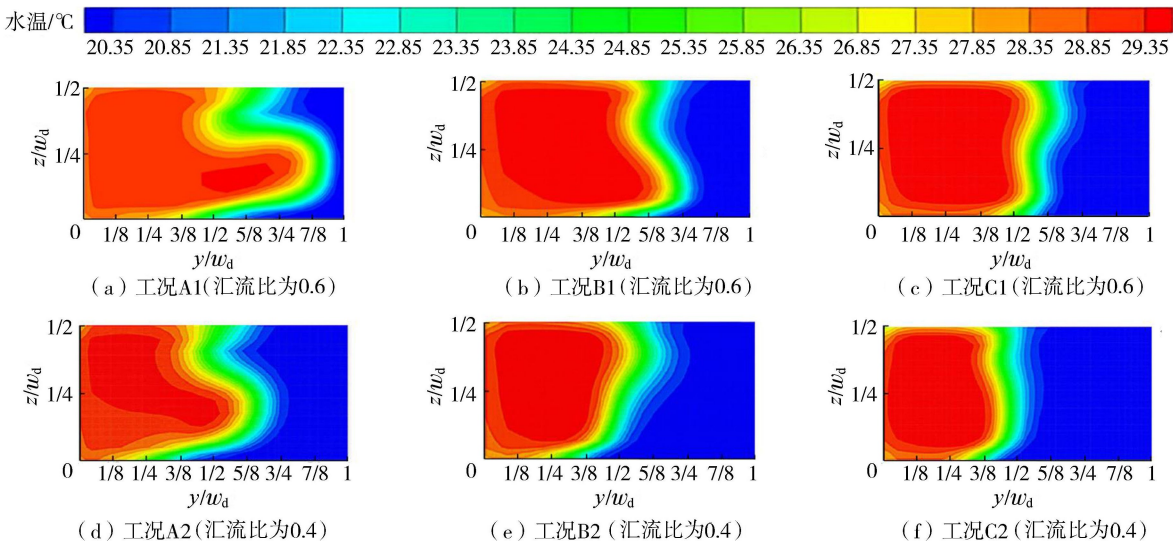


图 9 不同汇流比交汇区水温断面分布

Fig.9 Section distribution of water temperature in intersection area with different confluence ratios

相比于工况 A1、A2 中热掺混层也呈现上凹下凸形态,但弯曲程度更小,且热掺混层的位置从 $y/w_d = 1$ 改变至 $y/w_d = 3/4$,说明热掺混层向内岸壁方向移动。相对于工况 B1、B2 的热掺混层形态发生改变,呈现出向外岸壁倾斜的形态,且热掺混层的位置从 $y/w_d = 3/4$ 改变至 $y/w_d = 5/8$ 。相比于工况 C1、C2 中热掺混层也呈垂直,其位置从 $y/w_d = 5/8$ 改变至 $y/w_d = 1/2$ 。由此可见,汇流比越大,热掺混层的弯曲程度越大,呈现更为明显的上凹下凸形态,且其位置也越靠近外岸壁。

对比工况 A1、A2(图 10(a))可见,在相同断面,工况 A1 的 σ 远低于工况 A2,但两工况 σ 的沿程变化率相似,说明在汇流角一定的条件下,汇流比越大,交汇区各断面的水温非均匀指数越小,水温分布越均匀,水温掺混速率越大。图 10(b)和图 10(c)也出现了相似的规律,且汇流角越小的条件下,不同汇流比之间 σ 的差异越小。说明在汇流角越大的条件下,汇流比的改变对水温分布的影响越大。

2.2.3 不同汇流角下断面水流结构特征

图 11 给出了汇流比为 0.6、汇流角不同的条件下各断面内横向流速-垂向流速矢量场,红色线条代表该

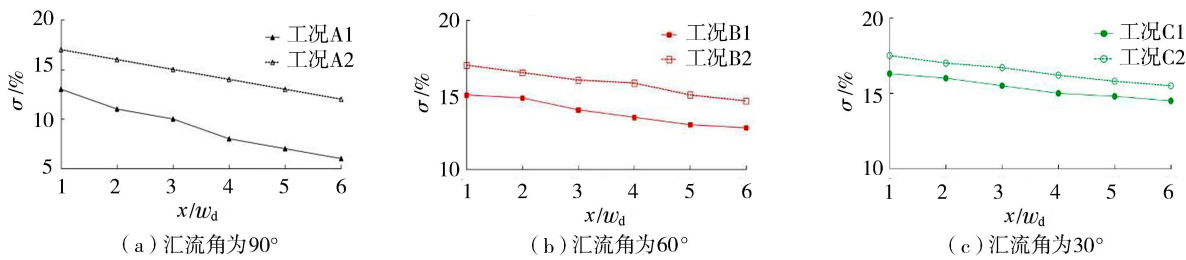


图 10 不同汇流比交汇区水温非均匀指数沿程分布

Fig. 10 Nonuniform index of water temperature distributed along the intersection area of different confluence ratios

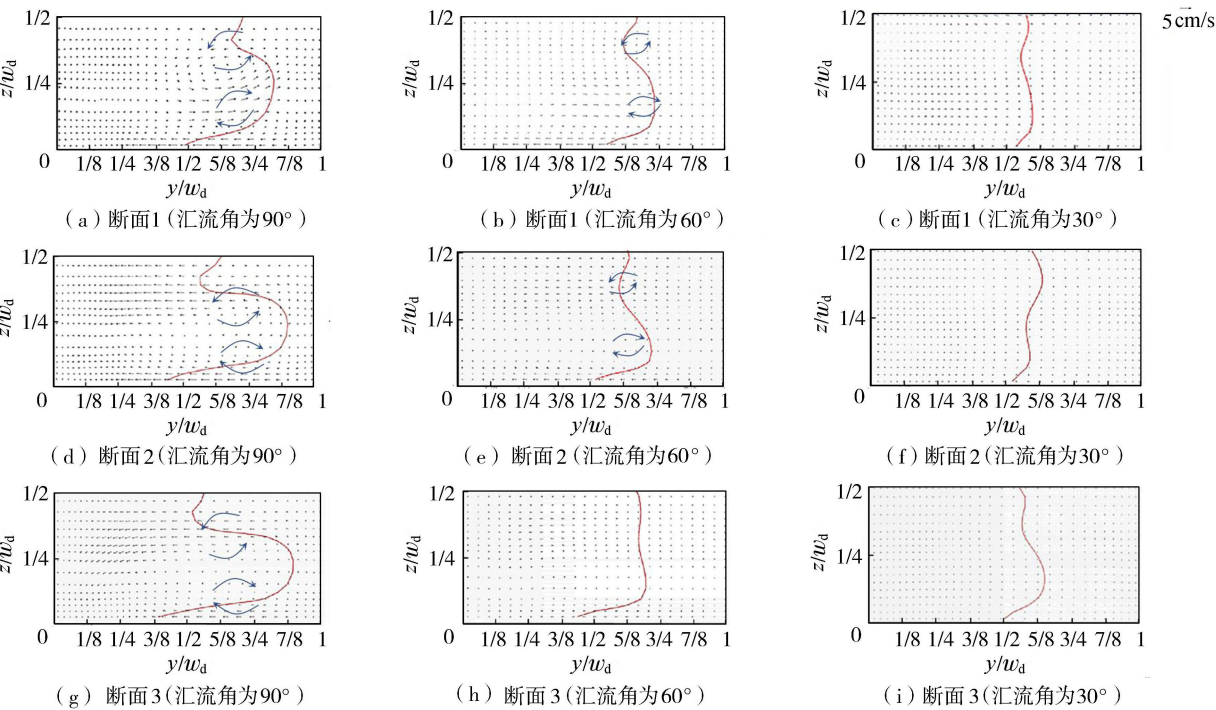


图 11 不同汇流角交汇区各断面横向流速-垂向流速矢量场

Fig. 11 Transverse velocity-vertical velocity vector field in each section of different confluence angles

断面内的热掺混层(断面内 t_p 的等值线)。

在工况 A1,断面 1、断面 2 和断面 3 内存在方向相反的两股二次环流,其中,上部的二次环流为逆时针方向,下部的二次环流为顺时针方向,使得水深中部出现一股指向外岸壁的横向流动,这是导致热掺混层呈上凹下凸形态的重要原因。相比于其他工况,工况 A1 中二次环流范围最大,热掺混层弯曲程度最大,水温非均匀指数也就最小。在工况 B1 中,横断面内二次环流的范围低于工况 A1,因而热掺混层的弯曲程度更小。在工况 C1 中,横断面内几乎观察不到二次环流,因而热掺混层呈垂直。由此可见,汇流角越大,二次环流的范围越大,使得热掺混层弯曲程度越大,越靠近外岸壁,水温非均匀指数越小。

2.2.4 不同汇流比下断面水流结构特征

各工况断面 2 横向流速-垂向流速矢量场见图 12。相比于工况 A2,工况 A1 中热掺混层附近二次环流的范围更大,因而工况 A1 的热掺混层弯曲程度更大,水温非均匀指数显著地大于工况 A2(图 12(a))。工况 B1 中二次环流范围略大于工况 B2,因而其热掺混层弯曲程度略大,水温非均匀指数略大于工况 B2(图 12(b))。工况 C1 和工况 C2 中都几乎观察不到二次环流,因而热掺混层均垂直,且水温非均匀指数也更加相近(图 12(c))。由此可见,汇流比越大,二次环流的范围越大,使得热掺混层弯曲程度越大,越靠近外岸壁,且水温非均匀指数越小。汇流角越大,汇流比改变对二次环流的范围的影响越大,因而对水温分布的影响越大。

2.3 交汇区水流结构特征参数对水温分布的影响

2.3.1 紊动能对水温分布特征的影响

剪切层是交汇区内水流发生剪切和动量交换的主要区域,具有流速梯度大、紊动能大的特点^[31],水温在

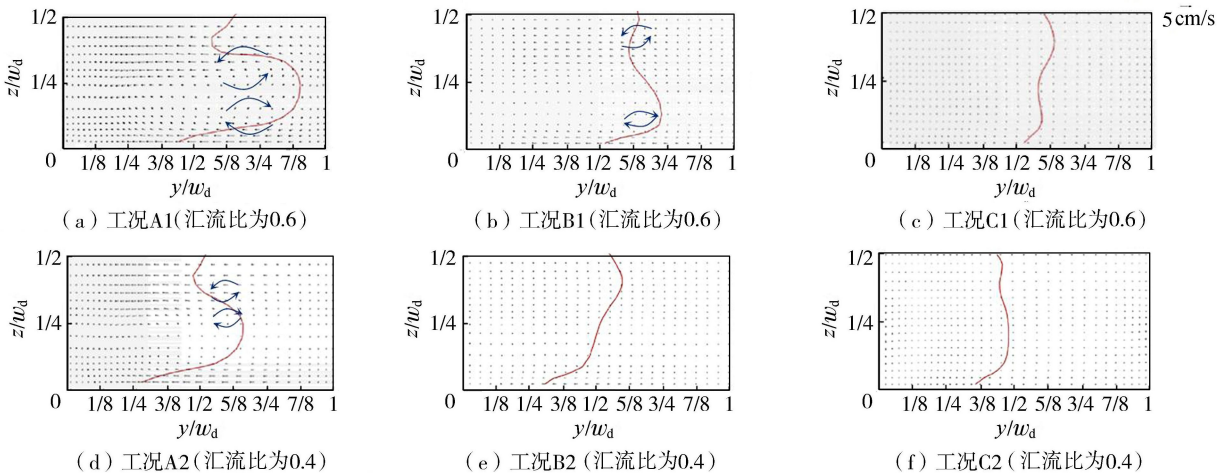


图 12 不同汇流比交汇区横向流速-垂向流速矢量场

Fig. 12 Transverse velocity-vertical velocity vector field in the intersection area with different confluence ratios

该区域能够发生较强的紊动扩散。因此,剪切层的形态、位置和水流的紊动强度对于热掺混层形态、位置和断面非均匀指数会产生较大影响。图 13 给出了 6 个工况中各断面的紊动能分布。在工况 A1 中(图 13(a)),紊动能最大的区域均在内岸壁($y/w_d = 0 \sim 1/2$)附近,这是由于分离区内存在较大的流速梯度,水流剪切强烈^[32]。剪切层位于分离区外侧紊动能较高的区域,其位置约为 $y/w_d = 1/2$,呈现明显的上凹下凸形态。在工况 B1 中(图 13(c)),剪切层位于 $y/w_d = 1/4$,呈现上凹下凸的形态,但弯曲程度低于工况 A1。在工况 C1 中(图 13(e)),剪切层位于 $y/w_d = 1/8$,呈垂直形态。对比工况 A1、B1 和 C1 之间平均紊动能,发现这 3 个工况紊动能由大到小的排序为 A1、B1、C1,而第 2.2.1 节中 3 个工况水温掺混距离排序由小到大为 A1、B1、C1。说明汇流角越大,两汉水流相互剪切作用越强,剪切层越靠近外岸壁,且水温非均匀指数越小。

相比于工况 A1 中剪切层位置($y/w_d = 1/2$),工况 A2 中剪切层位置($y/w_d = 1/4$)更加靠近内岸壁,且剪切层弯曲程度低于工况 A1,平均紊动能也更低。对比工况 B1 与 B2、工况 C1 与 C2 中的剪切层的位置和强度,也发现 B2 和 C2 中剪切层的位置更加靠近内岸壁。各工况之间平均紊动能的关系为工况 A1 大于 A2,工况 B1 大于 B2,工况 C1 大于 C2,且工况 A1 和 A2 之间的平均紊动能差异远大于 B1 与 B2、C1 与 C2。说明汇流比越大,剪切层越靠近外岸壁,且两汉水流相互剪切越强,使得热掺混层越靠近外岸壁,水温非均匀指数越小;汇流角越大,汇流比对剪切层位置和紊动强度的影响越大,对水温分布的影响也就越大。

对比水流剪切层(图 13)和热掺混层(图 7、图 9)的形态和位置发现,剪切层形态与热掺混层相似,但其位置比热掺混层更加靠近内岸壁,两者之间位置的不一致说明两汉水流剪切不是驱动热掺混的唯一因素。

2.3.2 涡量对于水温分布特征的影响

二次环流是促进交汇区两汉水流掺混的重要动力^[23],范围和强度更大的二次环流更能够增大两汉水流之间的物质掺混速率^[33]。水温会随二次环流发生对流扩散,热掺混层的位置、形态和水温非均匀指数受到二次流范围和强度的影响。为分析交汇区各断面二次环流的强度,图 14 给出了各工况中涡量 Ω_x 的沿程分布,涡量 Ω_x 的值越大,说明断面内二次环流越强^[34]。

由图 14 可知, Ω_x 沿程逐渐降低,且变化梯度也逐渐降低,说明二次环流的强度沿程逐渐减小,这是由于随着两汉水流逐渐掺混均匀,流动方向趋于一致,支流对主流的影响减弱。不同汇流角工况之间 Ω_x 由大到小排序为 A1、B1、C1;不同汇流比工况之间 Ω_x 的关系为 A1 大于 A2、B1 大于 B2、C1 大于 C2,且工况 A1 和 A2 之间差异远大于工况 B1 与 B2,工况 B1 与 B2 之间的差异大于工况 C1 与 C2。由此可见,汇流角或汇流比的增大均使二次环流强度增大,进而减小水温非均匀指数;汇流角越大,汇流比对二次环流强度的影响也越大。

2.3.3 紊动能、涡量与断面非均匀指数的响应关系

为进一步探究水温分布特征和水流结构特征参数的关系,选取断面非均匀指数表征交汇区水温分布的均匀程度;参考张涛^[17]研究交汇角等参数与混合度的定量关系时的交汇角无量纲化的处理方法,将紊动能和涡量分别用测量断面中的最大值进行无量纲化,即用 $k' = k/k_{\max}$, $\Omega_x' = \Omega_x/\Omega_{x_{\max}}$ 表征水流剪切和断面二次环流作用。对每个工况截取交汇区沿程 6 个断面(断面位置分别为 $x/w_d = 1, 2, 3, 4, 5, 6$)共 36 组数据进行

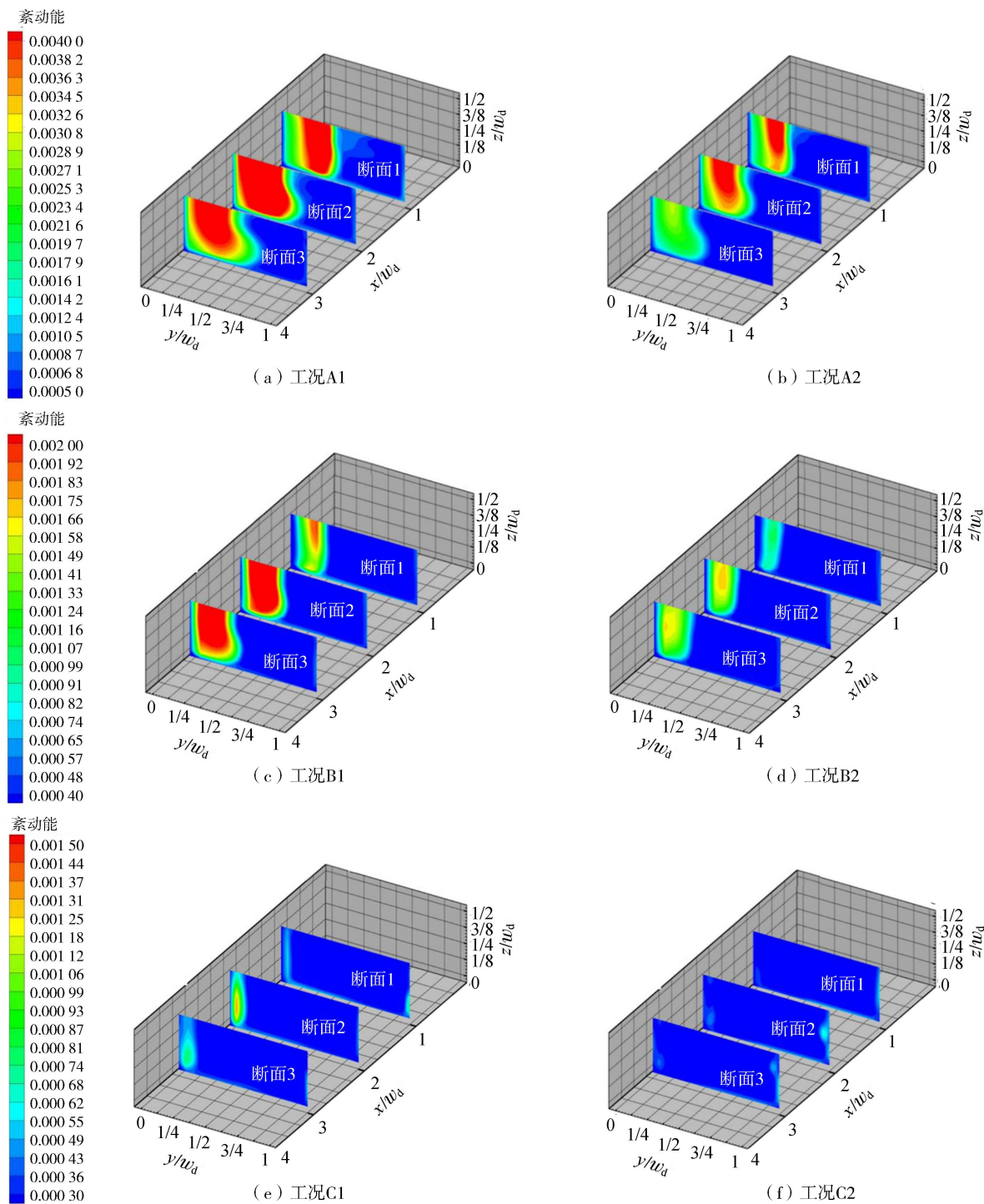


图 13 不同工况中各断面紊动能分布

Fig. 13 Distribution of turbulent kinetic energy in each section under different working conditions

多元线性回归分析,得出非均匀指数表达式:

$$\sigma = 0.159 + 0.055\Omega x' - 0.086k' \tag{7}$$

式(7)的显著性检验 p 值为 0.009 小于 0.010,拟合优度 R^2 为 0.912。通过式(7)得到断面非均匀指数计算值,计算值与实际值间的均方根误差为 0.021 (图 15),误差很小,通过检验。表明式(7)拟合效果良好,能够较好地反映紊动能、涡量与断面非均匀指数的响应关系。式(7)表明断面非均匀指数与涡量呈正相关关系,与紊动能呈负相关关系,且涡量变化对断面非均匀指数的影响比紊动能变化对非均匀指数的影响小。水温掺混特征的改变受紊动能也就是水流剪切作用的影响比较大,水流剪切对水温掺混起主导作用,断面二次环流作用为辅。式(7)得到的结论与第 2.3.1 节和第 2.3.2 节得到的结论一致。

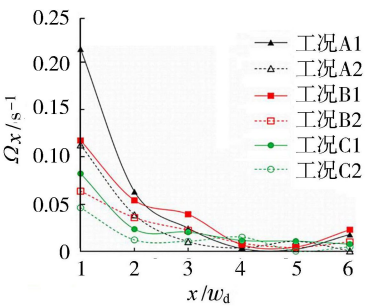


图 14 各工况涡量沿程分布

Fig. 14 Vorticity distributed along the way under different working conditions

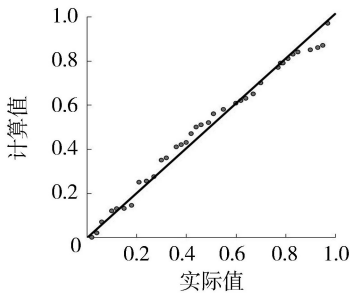


图 15 断面非均匀指数实际值与计算值散点分布

Fig. 15 Scatter diagram of actual and calculated values of cross-section nonuniform index

3 结 论

- a. 水流结构中水流剪切作用影响热掺混层的位置;断面二次环流作用影响热掺混层的形态。
- b. 汇流角或汇流比越大,热掺混层随剪切层位置的变化更靠向外岸(交汇口对侧壁面),二次环流的范围和强度越大,热掺混层弯曲程度越大。
- c. 紊动能及涡量与断面非均匀指数之间呈现良好的线性关系,在本文的交汇条件下推荐的函数表达式为 $\sigma=0.159+0.055\Omega x'-0.086k'$ 。

参考文献:

[1] BRIDGE J S,DIEMER J A. Quantitative interpretation of an evolving ancient river system[J]. Sedimentology,1983,30(5):599-623.

[2] DAVIES B R,WALKER K F. The ecology of river systems[J]. Journal of the North American Benthological Society,1987,6(4):288-289.

[3] 侯伟芬,俞成根,陈小庆. 舟山渔场的水温分布特征分析[J]. 宁波大学学报(理工版),2013,26(3):31-34. (HOU Weifen, YU Chenggen, CHEN Xiaoqing. Temperature distribution in Zhoushan fishing ground[J]. Journal of Ningbo University (Science and Technology Edition), 2013, 26(3): 31-34. (in Chinese))

[4] 纪道斌,成再强,龙良红,等. 三峡水库不同运行期库首水温分层特性及生态效应[J]. 水资源保护,2022,38(3):34-42. (JI Daobin, CHENG Zaiqiang, LONG Lianghong, et al. Characteristics of thermal stratification in head area of Three Gorges Reservoir and ecological effects in different operation periods [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(3): 34-42. (in Chinese))

[5] 赵林林,朱广伟,陈元芳,等. 太湖水体水温垂向分层特征及其影响因素[J]. 水科学进展,2011,22(6):844-850. (ZHAO Linlin, ZHU Guangwei, CHEN Yuanfang, et al. Thermal stratification and its influence factors in a large-sized and shallow Lake Taihu[J]. Advances in Water Science, 2011, 22(6): 844-850. (in Chinese))

[6] 徐火清,赵红红,吴义军. 金沙江下游主要支流对干流水温的影响[J]. 水利水电科技进展,2023,43(1):22-28. (XU Huoqing, ZHAO Honghong, WU Yijun. Influence of main tributaries on water temperature of main stream in lower Jinsha River [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(1): 22-28. (in Chinese))

[7] 余文公,夏自强,于国荣,等. 三峡水库水温变化及其对中华鲟繁殖的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2007,35(1):92-95. (YU Wengong, XIA Ziqiang, YU Guorong, et al. Water temperature variation in Three Gorges Reservoir and its influences on procreation of Chinese sturgeon [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2007, 35(1): 92-95. (in Chinese))

[8] 王康,肖洋,毛劲乔,等. 水温变化影响下金沙江下游典型鱼类繁殖期研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,52(2):50-55. (WANG Kang, XIAO Yang, MAO Jinqiao, et al. Study on the spawning period of typical fish in the lower reaches of Jinsha River under the influence of water temperature change [J]. Journal of Hohai University (Natural Science), 2023, 52(2): 50-55. (in Chinese))

[9] MEJIA F H, TORGERSEN C E, BERNTSEN E K, et al. Longitudinal, lateral, vertical, and temporal thermal heterogeneity in a large impounded river: implications for cold-water refuges[J]. Remote Sensing, 2020, 12: 1386.

[10] VAN VLIET M T H, FRANSSEN W H P, YEARSLEY J R, et al. Global river discharge and water temperature under climate

change[J]. *Global Environmental Change*,2013,23(2):450-464.

[11] 彭依云,洪迎新,刘东升,等. 罗梭江鱼类替代生境量化评价[J]. *水资源保护*,2022,38(2):190-196. (PENG Yiyun,HONG Yingxin,LIU Dongsheng, et al. Quantitative evaluation of fish alternative habitats in the Luosuo River[J]. *Water Resources Protection*,2022,38(2):190-196. (in Chinese))

[12] ARNOLD L, Gordon, Brazil-Malvinas confluence-1984[J]. *Oceanographic Research Papers*, 1989,36(3):359-384.

[13] KUMAR A. Bulk properties and flow structures in turbulent flows[D]. San Francisco:UC Santa Cruz,2023.

[14] STEINER O S,BOUFFARD D,WÜEST A. Convection-diffusion competition within mixed layers of stratified natural waters[J]. *Geophysical Research Letters*,2019,46(22):13199-13208.

[15] BEST J L,REID I. Separation zone at open-channel junctions[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*,1984,110(11):1588-1594.

[16] SHAKIBAINIA A,ZARRATI A R,TABATABAI M R M. Three-dimensional numerical study of flow structure in channel confluences[J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*,2010,37:772-781.

[17] 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.

[18] 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))

[19] 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))

[20] BEST J L. Flow dynamics at river channel confluences: implications for sediment transport and bed morphology[J]. *Special Publications*,1987,39:27-35.

[21] 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: 51-69.

[22] KONSÖER K M,RHOADS B L. Spatial-temporal structure of mixing interface turbulence at two large river confluences [J]. *Environmental Fluid Mechanics*,2014,14(5):1043-1070.

[23] 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*,2008,44(8):552-568.

[24] LUO H,FYTANIDIS K D,SCHMIDT R A, et al. Comparative 1D and 3D numerical investigation of open-channel junction flows and energy losses[J]. *Advances in Water Resources*,2018,117:120-139.

[25] 朱明远,宋剑鹏,吴艳. 基于 Fluent 的冬季渠道水温数值模拟分析[J]. *中国水运(下半月)*,2017,17(6):108-110. (ZHU Mingyuan,SONG Jianpeng,WU Yan. Numerical Simulation analysis of channel water temperature in winter based on Fluent[J]. *China Water Transport (Second half)*,2017,17(6):108-110. (in Chinese))

[26] TANG H W,ZHANG H M,YUAN S Y. Hydrodynamics and contaminant transport on a degraded bed at a 90-degree channel confluence[J]. *Environmental Fluid Mechanics*. 2018,18:443-463.

[27] 王福军. 计算流体力学分析:CFD 软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004.

[28] 张汇明. 河道交汇处水沙运动及污染物输移特征研究[D]. 南京:河海大学,2019.

[29] GREER G,CARLSON S,Thompson S. Evaluating definitions of salmonid thermal refugia using in situ measurements in the Eel River, Northern California[J]. *Ecohydrology*,2019,12:e2101.

[30] 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.

[31] YUAN S Y,TANG H W,XIAO Y, et al. Water flow and sediment transport at open-channel confluences: an experimental study [J]. *Journal of Hydraulic Research*,56(3):333-350.

[32] YANG Q Y,WANG X Y,LU W Z, et al. Experimental study on characteristics of separation zone in confluence zones in rivers [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*,2009,14(2):166-171.

[33] XU L,YUAN S Y,TANG H W, et al. Mixing dynamics at the large confluence between the Yangze River and Poyang Lake[J]. *Water Resource Research*,2022,58(11).

[34] 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]. *Progress in Water Resources and Hydropower Science and Technology*,2022,42(2):50-55. (in Chinese))