

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2014.02.007

变流速比与宽度比条件下分汊河道分层流紊动特性

顾莉^{1,2},袁航²,华祖林^{1,2},王兰兰²,李秋兰²,焦梓楠²

(1. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室,江苏南京 210098;
2. 河海大学环境学院,江苏南京 210098)

摘要:针对目前分汊河道分层流紊动特性研究的空白,通过物理模型试验探索分汊河道温差剪切分层流在不同上下层速度比与汊道宽度比影响下的紊动强度变化规律。结果表明:随着上下层流速比由大变小,汊道分层流发生从分层到混合的转捩。在混合流条件下,支汊沿程断面高紊动区由C形分布转变为倒C形分布,最终全断面紊动分布均匀;随着支汊宽度增大,高紊动区出现的断面位置呈现滞后性,且紊动能量值增大。其他分层流态条件下,强紊动能分布的范围和量值都有所变化。对于交汇口断面,对称汊道在断面中心处掺混剧烈,随着上下层流速比的增大,紊动能量值减小;不对称汊道出口断面紊动强烈区域向较窄的左支汊一侧移动,与岛屿尾尖位置密切相关。

关键词:分汊河道;温差剪切流;紊动强度;流速比;汊道宽度比

中图分类号:TV131.2⁺¹ **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2014)02-0130-07

Turbulence characteristics of stratified flow in braided river with varied velocity ratios and width ratios

GU Li^{1,2}, YUAN Hang², HUA Zulin^{1,2}, WANG Lanlan², LI Qiulan², JIAO Zinan²

(1. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resources Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: At present, few studies have been conducted on turbulence characteristics of stratified flow in braided rivers. In this study, a physical model experiment was carried out to study the variation of the turbulent intensity of thermally stratified shear flow with different velocity ratios of two layers and width ratios of two anabranches. The results show that, as the velocity ratio decreased, the stratified flow in the braided river changed from stratified flow to neutrally stratified flow. As to the neutrally stratified flow, the sectional high-turbulence zone along the anabranches changed from a C-type distribution to an inverse C-type distribution, and the turbulent intensity was mixed well throughout the section in the end. With the increase of the channel width, the section of the high-turbulence zone appeared later, and the quantity of the turbulent intensity increased. Under other conditions of stratified flow, the range and quantity of high turbulent intensity all changed. At the confluence section, the flow in the center of the section was mixed violently in the symmetric braided river. With the increase of the velocity ratio, the quantity of the turbulent intensity decreased. The high turbulent intensity zone moved to the narrowed left anabranch in the non-symmetric braided river, which was associated with the tail position of the mid-bar.

Key words: braided river; thermally stratified shear flow; turbulent intensity; velocity ratio; width ratio of two anabranches

收稿日期: 2013-11-01
基金项目: 水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07103-005);国家自然科学基金(51009048,51379058);“十二五”国家科技支撑计划(2012BAB03B04)
作者简介: 顾莉(1981—),女,江苏盱眙人,副教授,博士,主要从事环境水力学及污染物输移规律研究。E-mail: guliqc@hhu.edu.cn
通信作者: 华祖林,教授。E-mail: zulinhua@hhu.edu.cn

水流在流经分汊河道时会产生分流、转向和汇合,流态十分复杂,呈现强烈的三维紊流特性^[1-2]。当温差剪切分层流流经分汊河道时,其水流结构与紊动特性将更加复杂,会对河道泥沙运动、污染物质运移、河道整治、水工建筑物设计及排污口设计等产生较大的影响。因此,对具有温差剪切分层流的分汊河道水流紊动规律进行深入研究十分必要。前人对紊动能在河道中的分布特征研究主要集中在顺直和弯曲河道中^[3-8],还有少量涉及复式交汇河道^[9]、射流^[10]以及有植物生长水流紊动特性^[11]的研究。关于分汊河道水流紊动方面,只有少量均质流的研究报道。譬如:顾莉等^[2]通过物理模型试验探索了顺直微弯型分汊河道的均质水流紊动特性;王伟峰等^[12]对弯曲分汊河道的紊动特征进行研究,指出汊道分流比对弯曲分汊河道脉动动能的分布影响较大。此外,分层流在顺直和弯曲河道中的水流紊动结构和稳定性方面也有相关报道^[13-15],但是对于温差剪切分层流在分汊河道中的紊动规律尚不清楚,相关研究还未见报道。

笔者通过建立物理模型试验,探究在变化的汊道宽度比和上下层流速比条件下分汊河道温差剪切分层流中紊动能的变化规律。对支汊宽度比为0.33、0.50、0.67的汊道中紊动强度沿程分布进行对比分析,同时结合断面纵向流速和二次流结构探讨紊动能变化机制,并对流速比为0.34、0.46、0.68等不同工况下的紊动能分布规律与水流结构进行分析与探索。

1 试验装置

试验在有机玻璃水槽内进行,水槽长11.71 m,主要包括顺直进水段、分汊段和顺直出水段3部分。试验装置平面分布如图1所示。进、出水段水槽均长5 m,断面宽度 $B_0=0.28$ m,进水段在距底0.15 m处设0.003 m厚的玻璃薄板,将水槽分为上下2层,上层引入热水,下层引入冷水,在冷热水的入口处均设置稳流装置,使入流稳定均匀;上层水深4 cm,下层水深15 cm。分汊测量段支汊水槽长1.71 m,左右汊道总宽度 $B_1+B_2=0.4$ m,中心岛位置可以移动,实现不同的汊道宽度比 B^* (定义 $B^*=B_1/(B_1+B_2)$),分汊段上架设ADV测速仪器与高精度温度计等测量设备;出水段尾端安装自动尾门,控制出流水位。分别采用电磁流量计和珠子流量计控制冷、热水流量,利用电阻加热棒对热水箱中的水体加热,使得上层水温度高于下层冷水10℃左右。上下层2股水流在分汊河道的分汊口前方交汇,形成分层流,试验尾水经回水系统排出。

本文主要对分汊河道温差剪切分层流在不同流速比和不同汊道宽度比情况下的紊动能变化规律进行研究。对于对称分汊河道,试验选取流速比 $u_1/u_2=0.34、0.46、0.68$ 共3个工况,见表1工况1、2、3。其次,针对流速比为0.34的混合情形,进一步开展分汊河道宽度比为0.33和0.67的物理模型试验,将其紊动能变

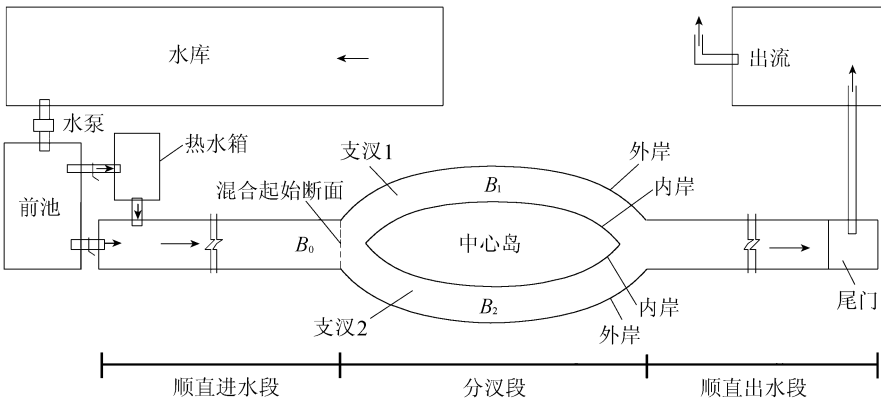


图1 试验装置示意图
Fig. 1 Sketch of experimental setup

表1 试验工况
Table 1 Experimental conditions

工况	B^*	u_1/u_2	热水入流 雷诺数 Re_1	冷水入流 雷诺数 Re_2	初始密度 弗劳德数 F_{D0}	相对密度 $(\rho_2-\rho_1)/\rho_2$
1	0.50	0.34	1 295.52	4 069.18	1.828	0.00159
2	0.50	0.46	1 507.14	3 591.06	1.117	0.00239
3	0.50	0.68	1 371.21	2 149.69	0.861	0.00205
4	0.33	0.34	1 295.52	4 069.18	1.508	0.00235
5	0.67	0.34	1 295.52	4 069.18	1.389	0.00263

化规律与对称汉道进行对比分析,共2个工况,试验工况见表1 工况4、5。为了详细揭示剪切流在分汉河道中的紊动规律,在2条支汉中分别布置7~9个断面,交汇口设1个断面,根据断面宽度不同,设置不等数量的垂线,每条垂线上均布设19个测点。不同宽度比分汉河道模型中断面布置情况见图2。

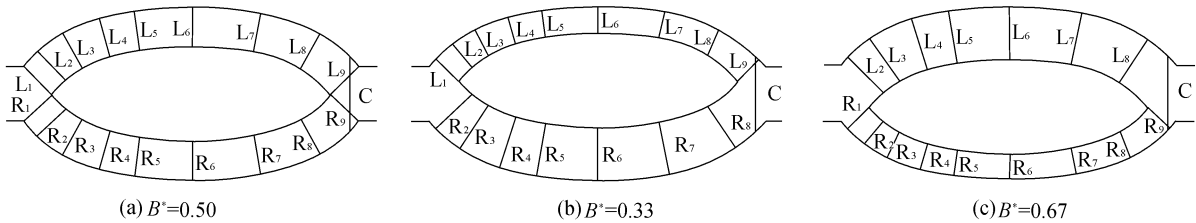


图2 测量段断面布置情况

Fig. 2 Locations of measurement cross-sections

紊流强度通常用紊动能 σ_u 进行表征。利用断面平均流速平方进行无量纲化处理后表示为 σ_u^* 。断面宽度和深度无量纲化处理后表示为 r^* 和 z^* , 分布在 $[0,1]$ 范围内。

2 结果与讨论

2.1 不同分汉宽度比条件下紊动特性

选取流速比为0.34条件下 $B^*=0.33$ 、0.50 和 0.67 工况下左支汉的1、2、4、6断面进行分析,其中 $B^*=0.67$ 工况左支汉1断面由于位置超出支汉范围没有测量,从断面2开始测量。3个工况断面紊动能分布见图3,断面图为面向水流下游方向所视。在 $B^*=0.33$ 工况入口 L_1 断面,冷热水交界处和支汉外岸侧出现了紊动强烈的区域,底部略有增强,断面上高紊动能区域大致呈现C形,故其为C形分布;结合断面 L_1 的纵向流速等值线图进行分析(图4(a)),可知 $B^*=0.33$ 工况 L_1 断面的外岸侧为回流负值区,表层为低流速区,断面的右下角即内岸侧的中部和底部为高流速区,高、低流速过渡区流速梯度大、剪切强、水流紊动剧烈,形成

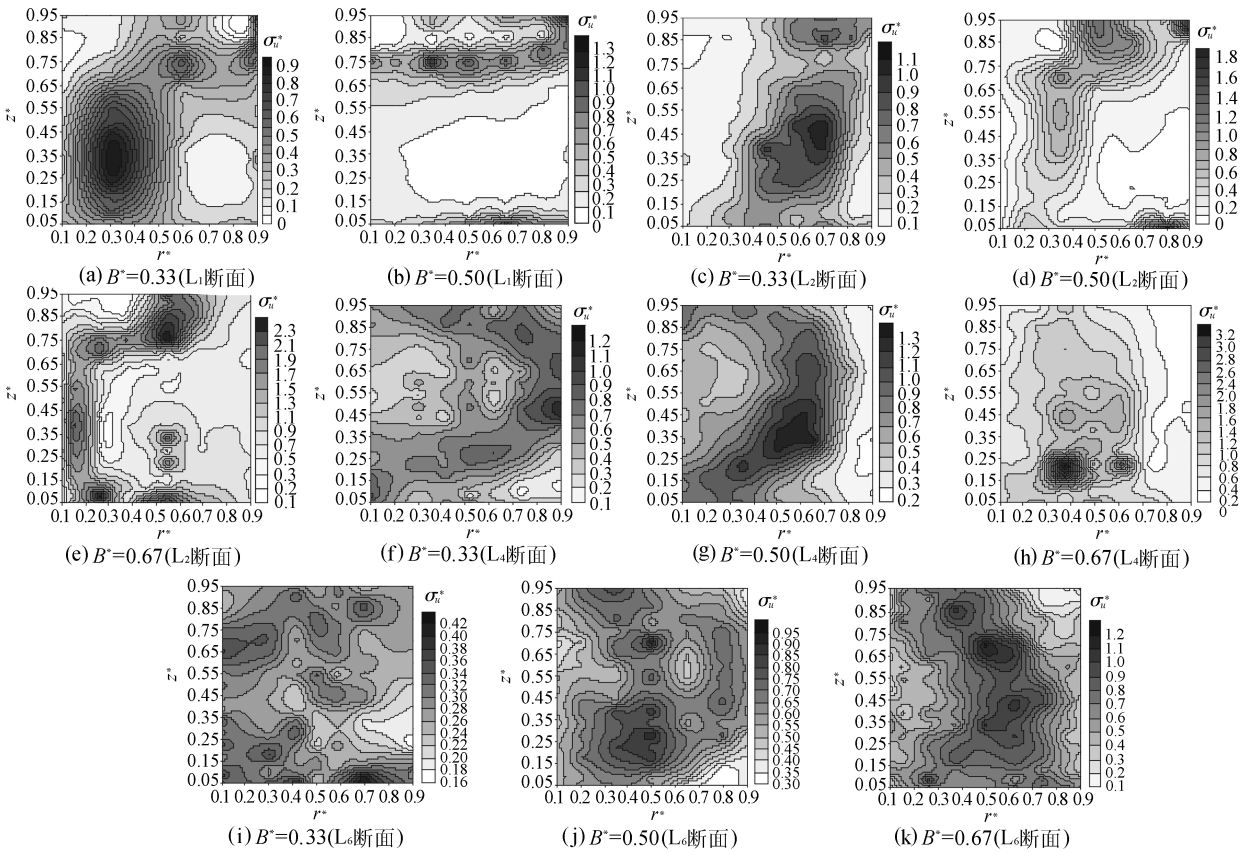


图3 不同汉道宽度比条件下断面紊动能分布特征

Fig. 3 Distributions of sectional turbulent intensities with different width ratios of two anabranches

了紊动能高值区。 $B^* = 0.50$ 工况 L_1 断面只在冷热水交界层出现了紊动强烈区域,底部紊动能也有所增大,但是外岸侧未出现高值区。

水流经过 L_2 断面时, $B^* = 0.33$ 工况上下层交界处流速差异减小,紊动能下降,但在断面河宽中心处出现了高紊动区,主要由于此时在外岸侧回流区最宽处扩展到断面 40% 河宽附近(图 4(b)),内岸侧为高速流动区,2 个区域过渡地带紊动强烈,正好位于断面河宽中心处,此时 $B^* = 0.50$ 和 $B^* = 0.67$ 工况的 L_2 断面紊动能高值区开始出现 C 形分布,相对于 $B^* = 0.33$ 工况其具有滞后性,主要原因是回流区在不同宽度支汊中出现的位置具有滞后性所致。

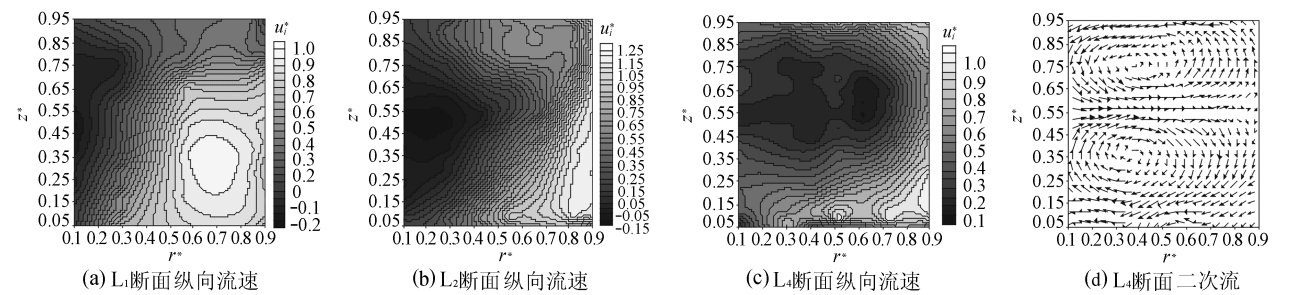


图 4 $B^* = 0.33$ 工况断面的纵向流速和断面二次流分布

Fig. 4 Distributions of longitudinal velocity and secondary current when $B^* = 0.33$

L_4 断面 $B^* = 0.33$ 的紊动能分布呈现倒 C 形分布,主要在断面的内岸侧和上下层区域紊动强烈,由 L_4 断面的纵向流速等值线(4(c))可知,在断面中心区域靠近外岸侧有一个低速流动区域,在断面的内岸侧以及断面的表层和底部区域流速较大,流速梯度密集的区域呈现倒 C 形,与紊动能高值区位置吻合一致。该断面流速与紊动能分布是在其环流结构驱动下形成的,由图 4(d)可知 L_4 断面存在上下 2 个反向环流,2 个环流在断面中心水深附近相交形成稳定的水平流场,将外岸侧的低流速输运到断面中心,同时内岸侧高流速被 2 个环流分别输移到断面的表层与底层,由此形成倒 C 形分布流速梯度密集区与紊动能高值区。 $B^* = 0.50$ 工况也初步形成倒 C 形分布,但是强紊动区相较于 $B^* = 0.33$ 工况还未输移至内岸,略有滞后; $B^* = 0.67$ 工况紊动强烈区域主要分布在断面中心,分布特征类似 $B^* = 0.33$ 工况的 L_2 断面,由于分离区范围扩大至断面中心附近,因此滞后性明显。

在弯道顶点断面 L_6 , $B^* = 0.33$ 工况全断面紊动能分布基本均匀,整体量值减小,紊动强度减弱显著; $B^* = 0.50$ 对称支汊, L_6 断面仍呈现倒 C 形分布,且紊动强烈区域已到达内岸侧,此时 $B^* = 0.67$ 工况倒 C 形分布也已形成,但其紊动强烈区域并没有完全到达支汊内岸侧,同 $B^* = 0.50$ 工况的 L_4 断面,最宽处位于 80% 河宽附近。根据试验结果,支汊后半段 3 个工况在全断面的紊动强度继续减小,分布更加均匀。

由断面紊动能分布图(图 5)可以明显地看出,对于不同分汊宽度比的支汊,支汊由窄至宽的过程中沿程变化的规律具有相似性,但在汊道变宽过程中紊动能的整体量值逐渐增强。 $B^* = 0.33$ 、0.50 和 0.67 工况的断面紊动能量值之比, L_4 断面为 0.9 : 1 : 2.46, L_6 断面为 0.44 : 1 : 1.26。同时,还有一个十分重要的特征,即紊动能分布规律具有滞后性。在 $B^* = 0.33$ 左支汊 C 形分布形成断面为 L_1 断面, $B^* = 0.50$ 和 $B^* = 0.67$ 条件下左支汊 C 形分布形成断面为 L_2 断面。 $B^* = 0.33$ 和 $B^* = 0.67$ 左支汊倒 C 形分布形成断面由 L_4 变为 L_6 , $B^* = 0.50$ 工况介于两者之间。可以看出,在整个变化过程中, C 形分布和倒 C 形分布的滞后性始终存在,主要是由分离区出现的位置以及长度决定的。

2.2 不同流速比条件下紊动特性

不同流速比工况之间紊动能分布也有所差异,选取 3 种流速比工况的 L_4 、 L_5 断面进行紊动能分布的对比分析(图 5)。在流速比为 0.34 的工况 1 断面分布中可以看出,紊动能的倒 C 形分布在 L_4 断面完全形成,且在 L_5 断面倒 C 形分布也存在,同时紊动强烈区域不断向断面内岸侧移动,在移动的过程中紊动强度逐渐减小。而对于工况 2, L_4 、 L_5 断面的紊动能分布特征显著不同,特别是在 L_5 断面,紊动能分布主要由断面左下至右上形成斜带状分布,由于 L_5 断面的纵向流速在断面的左上区域为低流速区,右下区域为高流速区,低、高流速区的过渡区剪切强、流速梯度大,也呈现出斜带状分布。工况 3 的倒 C 形分布没有工况 1 明显,在 L_4 至 L_5 断面的变化过程中,紊动强烈区域具有逐渐向内岸侧移动的趋势,紊动强度峰值下降。随着流速比

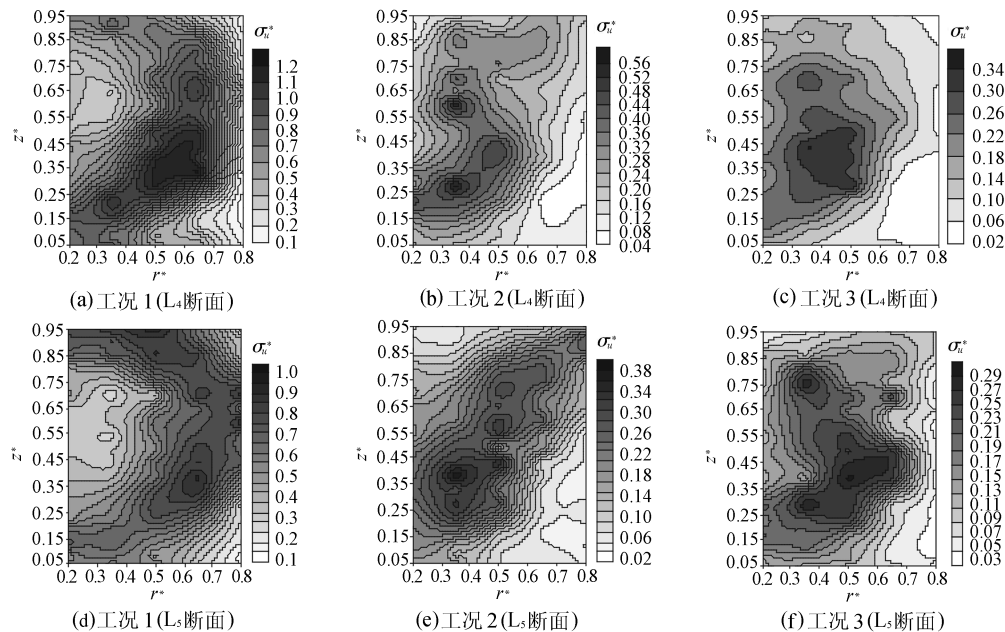


图 5 不同流速比条件下对称汊道部分断面紊动能分布特征

Fig. 5 Distributions of sectional turbulent intensities with different velocity ratios in symmetric braided river

的增大,紊动能值逐渐减小,紊动能最大量值之比 L_4 断面为 $1.2 : 0.5 : 0.3$, L_5 断面为 $1.0 : 0.38 : 0.29$ 。

2.3 交汇口紊动特性对比分析

对于不同工况下分汊河道交汇口断面的紊动特性也进行了对比分析,0.34 流速比的工况 1 和 0.68 流速比的工况 3 交汇口断面的紊动能分布见图 6。由图 6 可知,对称汊道即 $B^* = 0.50$ 的不同流速比工况下,交汇口断面的紊动分布特征整体规律具有相似性,在断面中心河宽位置的整个水深上紊动均较为强烈,断面近左岸和右岸区域紊动较小,主要是由于水流运动到支汊后半段时已经在全断面紊动分布均匀且紊动强度较小,交汇口两支汊合并,水流相互撞击掺混,在出口断面中心位置紊动能增强明显。但是,随着流速比的增大,可以看到交汇口断面整体紊动能量值的减小。

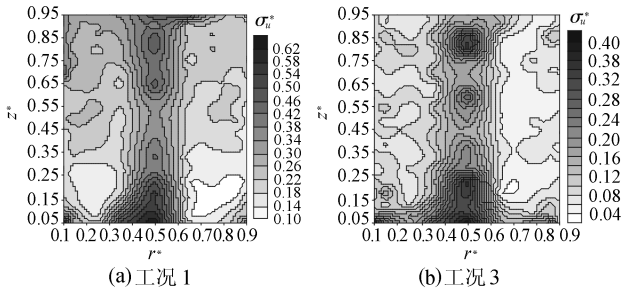


图 6 工况 1 和工况 3 的交汇口断面紊动功能分布

Fig. 6 Turbulent intensity distribution at confluent section under conditions 1 and 3

对于 $B^* = 0.33$ 的分汊河道,交汇口断面的紊动能分布特征与汊道对称的工况 1 紊动能分布有着较大的不同,图 7 为 $B^* = 0.33$ 工况下交汇口断面紊动能分布、纵向流速等值线和断面二次流。从图 7 中可以看出,对于 $B^* = 0.33$ 工况下,交汇口断面的紊动强烈区域转移到了断面的左岸侧 0.2 倍河宽处,且上层水体紊动更为强烈。结合 0.33 宽度比的纵向流速等值线可以

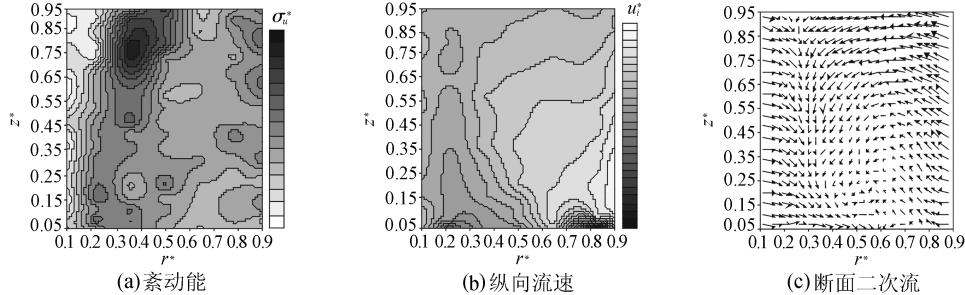


图 7 工况 4 交汇断面紊动能、纵向流速和断面二次流分布

Fig. 7 Distributions of turbulent intensity, longitudinal velocity, and secondary current at confluent section under condition 4

看出,断面左侧对应流速低的左支汊,断面的右侧为较高流速的右支汊,宽度不同的左右支汊水流在出口断面交汇后掺混区具有一定的流速差异,形成较大流速梯度,水流紊动强烈。同时,结合交汇断面的二次流可以看到,两股水流在岛尖下游对撞后由表层向底部运动,垂向紊动显著增强,可见汊道交汇口断面紊动能分布与汊道宽度密切相关。

3 结 语

通过建立物理试验模型,探究了在变宽度比和流速比条件下分汊河道中分层流紊动能的变化规律。对于不同汊道宽度比,支汊由窄至宽的过程中,沿程断面的变化规律具有相似性,紊动能高值区主要分布在上下层冷热水交界面,以及分离区与高流速过渡带等流速梯度变化显著区域,因此沿程断面的紊动强度高值区首先呈现 C 形分布,之后变化形成倒 C 形分布,在支汊后半段全断面逐渐均匀分布。但是断面上 C 形与倒 C 形高值区出现的断面位置随汊道由窄至宽具有滞后性,且紊动能的整体量值呈增强趋势。

对于不同流速比的紊动能分布特征,差异主要在分布的范围和量值上,随着流速比的增大,紊动程度不断减弱,流速比为 0.46 条件下并没有出现明显的倒 C 形分布,弯顶前断面高紊动区呈现了斜带状分布特征,弯顶断面则在断面 1/2 水深附近水流紊动强烈。

对于交汇口的紊动特征,对称汊道在不同流速比的工况下断面分布特征基本相似,只在紊动强度量值上有所不同,随着流速比的增大,紊动程度呈减小趋势。不对称汊道条件下,交汇口断面紊动能强烈区域向更窄的左支汊一侧移动,二次流的掺混位置和纵向流速的高流速梯度区均在断面近左岸侧,与紊动能强烈区相吻合。

参考文献:

[1] 顾莉,华祖林,褚克坚,等. 分汊型河道水流运动特性和污染物输移规律研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(5): 88-94. (GU Li, HUA Zulin, CHU Kejian, et al. Advances in flow characteristics and pollutant transport laws in braided rivers[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31(5): 88-94. (in Chinese))

[2] 顾莉,华祖林,褚克坚,等. 顺直微弯型分汊河道水流的紊动特性试验研究[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2011, 39(5): 475-481. (GU Li, HUA Zulin, CHU Kejian, et al. Experimental study on turbulence characteristics of flow in straight or slightly curved braided rivers[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2011, 39(5): 475-481. (in Chinese))

[3] 卢金友,徐海涛,姚仕明. 天然河道水流紊动特性分析[J]. 水利学报, 2005, 36(9): 1029-1034. (LU Jinyou, XU Haitao, YAO Shiming. Turbulent characteristics of flow in river[J]. Journal of Hydraylic Engineering, 2005, 36(9): 1029-1034. (in Chinese))

[4] BLANCKAERT K, VRIEND H J D. Turbulence structure in sharp open-channel bends[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2005, 536: 27-48.

[5] 邓安军,陈立,林鹏,等. 紊动强度沿垂线分布规律的分析[J]. 泥沙研究, 2001(5): 33-36. (DENG Anjun, CHEN Li, LING Peng, et al. Analyses on distribution rule of turbulence intensity along depth [J]. Journal of Sediment Research, 2001(5): 33-36. (in Chinese))

[6] 高杨,吕宏兴,于佳. 明渠壁面粗糙度突增对紊流流速及紊动强度影响的试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2011(1): 97-99. (GAO Yang, LYU Hongxing, YU Jia. Experimental research on sudden rising of wall roughness in open channels on the effect of turbulent velocity and turbulence intensity[J]. China Rural Water and Hydropower, 2011(1): 97-99. (in Chinese))

[7] 刘月琴,万艳春. 弯道水流紊动强度[J]. 华南理工大学学报:自然科学版, 2003, 31(12): 89-93. (LIU Yueqin, WAN Yanchun. Turbulence intensity of bend flow[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2003, 31(12): 89-93. (in Chinese))

[8] 王连接,王虹,邵学军,等. 连续弯道水流紊动特性试验装置设计[J]. 实验技术与管理, 2010, 87(10): 87-90. (WANG Lianjie, WANG Hong, SHAO Xuejun, et al. Layout of flume experiment for turbulence measurements in consecutive bends[J]. Experimental Technology and Management, 2010, 87(10): 87-90. (in Chinese))

[9] 吴迪,孙可明,郭维东. 复式交汇河道水流紊动特性分析[J]. 沈阳农业大学学报, 2009, 40(1): 76-79. (WU Di, SUN Keming, GUO Weidong. Turbulent characteristics of water flow at junction of compound channel[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2009, 40(1): 76-79. (in Chinese))

[10] 李志伟,钱忠东,槐文信. 径向射流紊动特性分析[J]. 武汉大学学报:工学版, 2009, 42(6): 691-694. (LI Zhiwei,

QIAN Zhongdong, HUAI Wenxin. Analysis of turbulent behavior of radial jet[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2009, 42(6): 691-694. (in Chinese))

[11] 吕升奇,唐洪武,闫静. 有无植物条件下明渠水流紊动特性对比[J]. 水利水电科技进展, 2007, 27(6): 64-68. (LYU Shengqi, TANG Hongwu, YAN Jing. Comparison of turbulence characteristics of water flow in open channels with and without vegetation[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2007, 27(6): 64-68. (in Chinese))

[12] 王伟峰,王平义,郑惊涛,等. 弯曲分汊河道水流紊动特性研究[J]. 水运工程, 2009(4): 118-122. (WANG Weifeng, WANG Pingyi, ZHENG Jingtao, et al. Distribution of turbulent characteristics of flow in bending braided channel[J]. Port & Waterway Engineering, 2009(4): 118-122. (in Chinese))

[13] 金海生. 温度分层剪切流的试验和数学模型研究[J]. 河海大学学报:自然科学版, 1991, 19(4): 59-67. (JIN Haisheng. Experiment and mathematical model of temperature stratified shear flows[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 1991, 19(4): 59-67. (in Chinese))

[14] 华祖林,褚克坚,邢领航. 强弯条件下分层流运动特性试验研究[J]. 水科学进展, 2005, 16(2): 203-209. (HUA Zulin, CHU Kejian, XING Linghang. Laboratory investigation of stratified flows in strongly curved flumes[J]. Advances in Water Science, 2005, 16(2): 203-209. (in Chinese))

[15] 褚克坚,华祖林,王惠民,等. 45°弯段明渠剪切分层流稳定性分析试验研究[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2004, 32(6): 640-643. (CHU Kejian, HUA Zulin, WANG Huimin, et al. Experimental investigation on stability of stratified shear flows in open channel with a bending angle of 45°[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2004, 32(6): 640-643. (in Chinese))

· 简讯 ·

河海大学主持的国家自然科学基金重大项目
“变化环境下工程水文计算的理论与方法”开展中期评估

2014年3月10-11日,由河海大学主持的国家自然科学基金重大项目“变化环境下工程水文计算的理论与方法”中期评估会在清华大学召开。会上,项目首席科学家河海大学陈喜教授汇报了项目实施以来取得的重要研究成果,清华大学、武汉大学、西安理工大学、华北电力大学、河海大学5个课题承担单位的负责人分别报告了课题研究进展及下一阶段的工作重点。“变化环境下工程水文计算的理论与方法”项目开展2年多来,在水文过程对环境变化的响应机理、水文极值时空分布的演变规律、非一致性水文系列概率分析理论以及不确定性评估方法方面取得了一系列重要研究成果,共发表学术论文206篇,其中SCI论文108篇、水文水资源领域国际顶尖学术刊物论文30余篇。项目组成员获得省部级奖6项,入选国家自然科学基金委杰出青年基金、优秀青年基金等人才计划6名。来自国家自然科学基金委工程材料学部、河海大学、清华大学、武汉大学等单位和科研院所的30余位专家参加会议。评估会议由张建云院士和王光谦院士主持。

(本刊编辑部供稿)