



# 长江上游分汊河段不同深度水流的 紊动特性研究

张皓峰<sup>1</sup>, 赵聪聪<sup>2</sup>, 王平义<sup>1</sup>, 田野<sup>1</sup>

(1. 重庆交通大学, 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074;

2. 苏交科集团股份有限公司, 江苏南京 210017)

**摘要:** 分汊河段水流的紊动特性对河床冲淤变化和鱼类生境有重要影响, 而关于分汊河段水流紊动特性的水平分布的研究较少。为了厘清分汊河段水流的紊动特性, 以长江上游部分河段为原型, 开展概化模型试验, 并对不同深度水流的 3 个方向(纵向、横向和垂向)的时均流速、紊动强度及紊动能的水平分布特征进行研究。结果表明: 分汊水流在分流和汇流区域有低流速区, 该区域的水流紊动较强。不同深度水流的紊动强弱与滩体水平剖面面积呈正相关关系, 与河床的距离呈负相关关系; 近底水流的强紊动区域较为分散; 上层水流的强紊动区域较为集中。

**关键词:** 分汊河段; 时均流速; 紊动强度; 紊动能

中图分类号: U612

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)02-0131-08

## Turbulent characteristics of water flow at different depths in upper branch of the Yangtze River

ZHANG Haofeng<sup>1</sup>, ZHAO Congcong<sup>2</sup>, WANG Pingyi<sup>1</sup>, TIAN Ye<sup>1</sup>

(1. Chongqing Jiaotong University, National Engineering Technology Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing 400074, China;  
2. JSTI Group, Nanjing 210017, China)

**Abstract:** The turbulent characteristics of the water flow in branch reach has an important influence on the change of the riverbed and the fish habitat, and the existing research on the turbulent characteristics of the horizontal distribution of the water flow in the branch reach is lacking. In order to clarify the turbulent characteristics of water flow in the branch reaches, we take the prototype of the upper reaches of the Yangtze River, carry out the generalized model test, and study distribution characteristics of three directions (longitudinal, transverse and vertical) time average velocity, turbulent strength and turbulent kinetic energy of water flow at different depths. The results show that there are low flow rates in the diversion and confluence area, where the water flow is strong. The turbulent strength of the flow at different depths is positively correlated with the horizontal section area of the beach body and negatively correlated with the distance from the riverbed. The strong turbulent area of the near bottom flow is dispersed. The strong turbulent area of the upper flow is concentrated.

**Keywords:** branch reach; time average velocity; turbulent strength; turbulent kinetic energy

在天然分汊河段中, 流速大、水流紊动强的区域容易冲刷, 而流速慢、水流紊动弱的区域容易淤积。此外, 不同的鱼类对索饵场、产卵场的

水力条件有不同的要求。所以厘清分汊河段不同深度水流的紊动特性对航道冲淤治理和鱼类生境营造都有一定的参考意义。

收稿日期: 2023-06-14

作者简介: 张皓峰 (1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为航道整治。

通讯作者: 王平义 (1964—), 男, 博士, 教授, 研究方向为水力学及河流动力学。E-mail: py-wang@163.com

王云飞<sup>[1]</sup>、许海勇<sup>[2]</sup>、肖庆华等<sup>[3]</sup>对长江中下游分汊河段开展二维水沙数值模拟, 重点研究不同流量、不同区域的断面平均流速分布特征以及变化规律; 于鹏杰等<sup>[4]</sup>以长江下游多分汊河道为基础开展概化模型试验, 研究流速、水动力轴线以及无量纲紊动能, 发现紊动能强度由水面向河底增大, 并在局部出现高紊动能区域; 赵聪聪等<sup>[5]</sup>以天然滩体进行概化模型试验, 研究滩体的流速分布, 发现两汊流速分布具有不对称性, 对不同分汊比下的横向、纵向流速进行分析, 并推导出分流比的公式; 张婕等<sup>[6]</sup>以长江中游武汉天兴洲分汊河段为原型进行物理模型试验, 分析分汊河道近底流速分布特性及水流脉动规律, 发现分流区时均流速沿横向分布均匀, 滩槽交接处相对脉动强度大; 程勇等<sup>[7]</sup>通过模型试验, 分析了30°水角明渠模型中典型断面上的时均流速、环流强度、紊动能强度、紊动能和床面剪切应力分布规律; Bramley等<sup>[8]</sup>给出一种处理黏性不可压缩流体在分支通道中稳定二维流动的数值方法。

为了进一步研究分汊河段不同深度的水流在分流区、汇流区和汊道内的紊动特性, 本文结合已有的研究成果, 通过模型试验对不同深度水流的横向、纵向及垂向的时均流速、紊动强度进行研究, 分析不同深度的水流紊动能的水平分布特征, 总结紊动强弱与滩体水平剖面面积之间的大致规律。

## 1 试验设计

### 1.1 试验设施

试验主要探究恒定流量下顺直分汊河段的紊动特性。试验在重庆交通大学国家内河航道整治工程技术中心进行, 试验水槽长30 m、宽3 m, 其中试验段长12 m, 模型坡降为0.1‰, 由循环式供水系统供水。流量通过控制水泵控制。通过调整出口处挡水板的倾斜角度控制水深。通过对长江上游部分分汊河段的统计, 结合试验场地, 设计物理模型比尺为: 平面比尺 $\lambda_l=200$ , 垂直比尺 $\lambda_h=60$ , 时间比尺 $\lambda_t=25.8$ , 流量比尺 $\lambda_q=92952$ 。心滩三

维尺寸为: 河宽3.0 m, 滩体长、宽、高分别为5.1、1.2、0.12 m。滩体形态特征见图1。

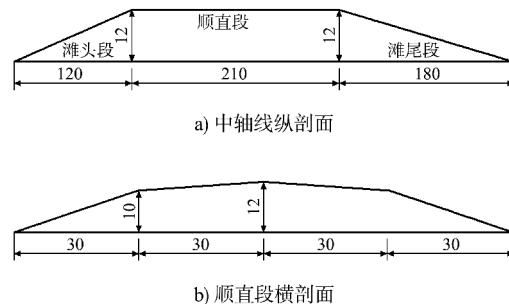


图1 滩体形态特征 (单位: cm)

### 1.2 测量方案

给模型放水30 min且流场稳定后, 进行三维流速的测量。采用声学多普勒测速仪, 采样频率为100 Hz, 采样精度为0.01 cm/s。每个测点采样时间不少于20 s, 至少采样2 000次。测点布置见图2。

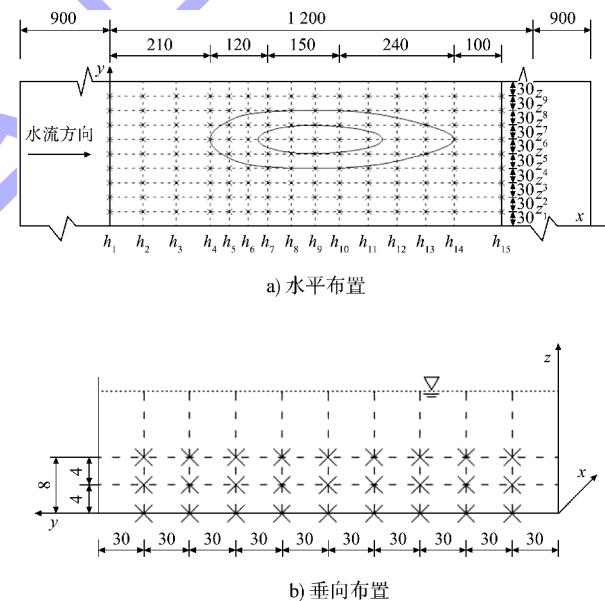


图2 测点布置 (单位: cm)

沿水流流向, 依次取横断面 $h_1 \sim h_{17}$ 。从水槽右边壁开始, 在横断面上每隔0.30 m布置1条垂向测线, 依次记为 $z_1 \sim z_9$ 。每条垂向测线上布置3个测点, 设计高度分别为距槽底高度分别为0、4、8 cm, 但由于测量手段有限, 声学多普勒测速仪测量深度只能达到距槽底1 cm左右处, 所以采用1 cm近似0 cm的数据。

分汊比  $\lambda$  的定义为: 滩体所在河道的支汊水面宽度  $B_1$  与主汊水面宽度  $B_2$  之比<sup>[9]</sup>。试验通过控制滩体中轴线的横坐标从而确定 3 个分汊比为  $\lambda_1=0.90$ 、 $\lambda_2=0.67$ 、 $\lambda_3=0.43$ , 3 个分汊比的滩体中轴线分别为  $z_5(y=1.50 \text{ m})$ 、 $z_6(y=1.80 \text{ m})$ 、 $z_7(y=2.10 \text{ m})$ 。考虑到小分汊比时, 滩体靠近墙壁, 水流紊动特性会受到边壁影响, 大分汊比时, 水流紊动特征不明显, 故本文选择  $\lambda_2=0.67$  为例进行分析。

### 1.3 试验工况

根据长江泥沙公报<sup>[10]</sup>, 对长江上游向家坝、朱沱、寸滩 3 个水文站近 5 年径流流量与多年平均流量进行统计分析, 设计试验工况见表 1。不同水深对流速的大小有影响, 对流速的分布规律没有显著改变, 且在分析滩体槽段不同深度的紊动情况时, 应该选取心滩临界淹没水深, 且紊动特征明显。所以本文选取最大水深、最大流量的工况, 即  $M_9$  工况进行分析。

表 1 试验工况

工况	流量/ ( $\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$ )	计算水位/ cm	实测流速/ ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	计算流速/ ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )
$M_1$		9	19.5	22.2
$M_2$	60	12	14.3	16.7
$M_3$		16	10.3	12.5
$M_4$		9	28.0	33.3
$M_5$	90	12	21.4	25.0
$M_6$		16	15.4	18.8
$M_7$		9	34.9	44.4
$M_8$	120	12	29.3	33.3
$M_9$		16	20.7	25.0

注: 实测流速为试验开始前, 无滩体水槽的平均流速。

### 2 脉动流速与时均流速

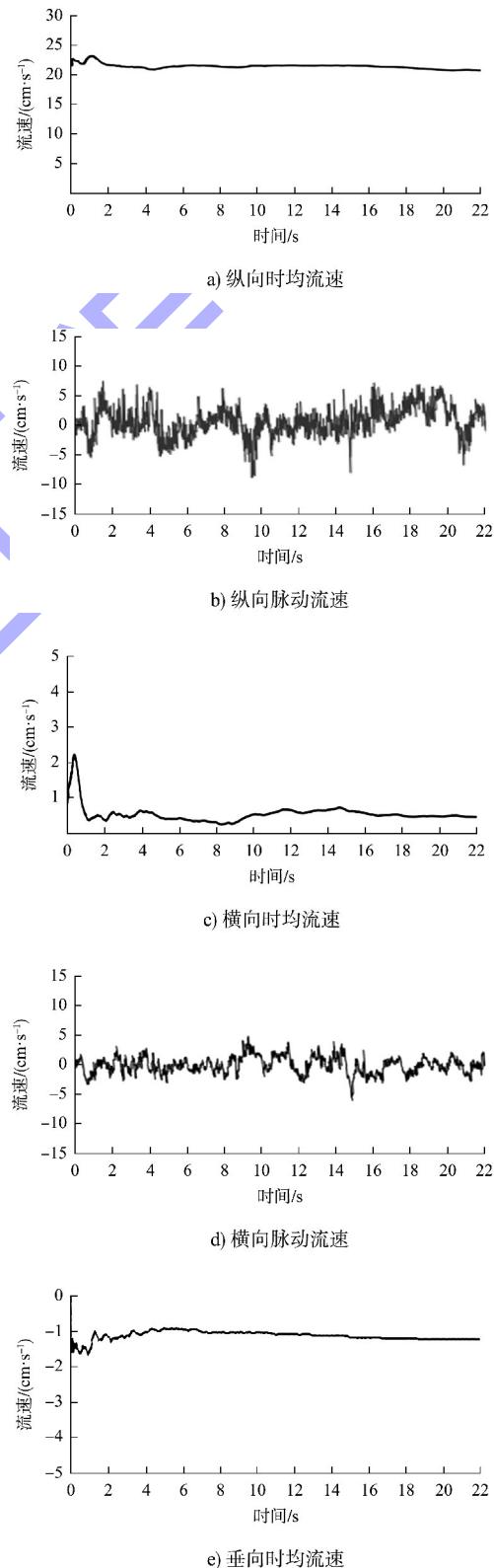
时均流速的分布是分汊河流水力特性的重要指标之一。为了方便描述, 将  $z=0 \text{ cm}$ 、 $z=4 \text{ cm}$ 、 $z=8 \text{ cm}$  不同测深的  $xOy$  平面依次命名为  $\Pi_{z=0}$ 、 $\Pi_{z=4}$  和  $\Pi_{z=8}$ 。

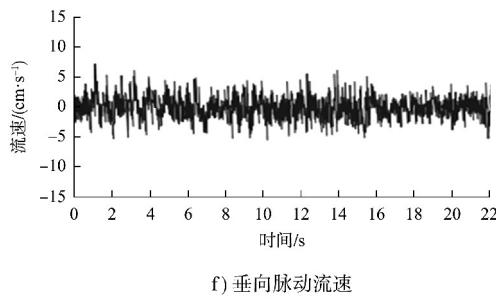
时均流速的计算公式为:

$$u_i = \frac{1}{T} \int_{T_0}^{T_0+T} u'_i dt \quad (1)$$

式中:  $T_0$  为初始时间,  $\text{s}$ ;  $T$  为采样时间,  $\text{s}$ ;  $u'_i$  为  $t$  时刻的瞬时流速,  $\text{cm/s}$ 。 $\bar{u}$ 、 $\bar{v}$ 、 $\bar{w}$  分别为沿流场

方向  $x$ 、垂直流场方向  $y$ 、沿水深方向  $z$  的时均流速, 都可使用式(1)计算。式(1)表明了时均流速受采样时间的影响, 以测点为  $h_3$ 、 $z_2$ 、 $z=4 \text{ cm}$  的交点为例, 时均流速、脉动流速与采样时间的关系见图 3。





f) 垂向脉动流速

图 3 时均流速、脉动流速与时间的关系

当采样时间为 10 s 时, 纵向时均流速逐渐趋于稳定。所以试验采样时间大于 20 s 合理。此外, 横向、垂向的时均流速均不为 0 cm/s, 所以在纵向主流外有二次流的存在。

## 2.1 纵向时均流速分布

不同测深平面的纵向时均流速分布如图 4 所示。

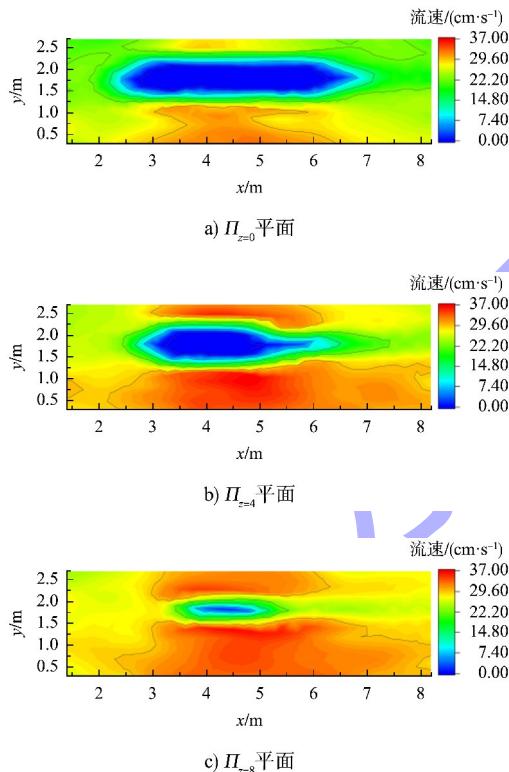
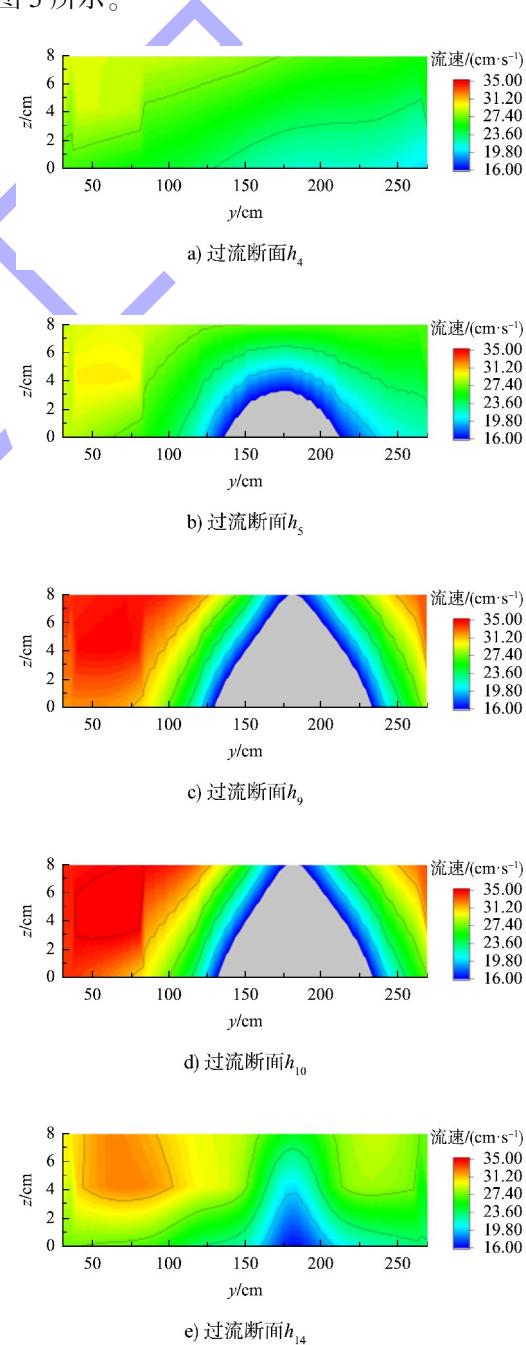


图 4 不同测深下纵向时均流速的水平分布

$\Pi_{z=0}$ 、 $\Pi_{z=4}$  和  $\Pi_{z=8}$  平面的分布规律较为一致, 即上游无滩体河段的纵向流速小于汊道。在滩头滩尾处, 有明显的低流速区域, 分布在坝体中轴线附近。 $\Pi_{z=0}$  的低流速区的流速小于 21 cm/s, 小于两侧高速水流(流速大于 25 cm/s)。低流速区和高流速区的水流流速都沿  $z$  轴正方向增大。滩前低流速区的形状与滩头相似, 面积略大于滩头尺

寸, 在垂向的分布趋势是沿着  $z$  轴正方向变小。滩后低流速区宽度沿流程变窄, 面积垂向变化趋势是沿  $z$  轴正方向变小。其原因是随着滩体面积变小, 水流在滩后的混掺区域逐渐增大, 两汊水流在滩尾向滩体中轴线汇聚, 使得低流速区的流速变大。

为了分析纵向流速在过流断面的分布, 分别选取滩前过流断面  $\Pi_{x=h_4}$ 、 $\Pi_{x=h_5}$ , 滩体顺直段过流断面  $\Pi_{x=h_9}$ 、 $\Pi_{x=h_{10}}$ , 滩后过流断面  $\Pi_{x=h_{14}}$ 、 $\Pi_{x=h_{15}}$ , 分别进行分析。纵向流速在各个过流断面的分布如图 5 所示。



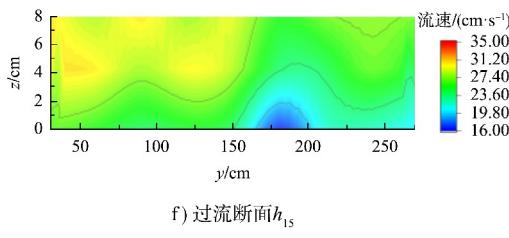
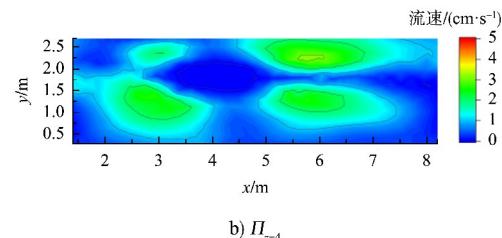
f) 过流断面  $h_{15}$ b)  $\Pi_{z=4}$ 

图5 纵向流速在不同过流断面的分布

水流流经断面  $h_4$ , 即无滩体槽段时, 纵向流速分布均匀。过流断面  $h_5$  处是滩头扩张槽段, 此时主汊水流的纵向流速显著加快。这是由于滩体挤压, 导致过流断面面积变小。在滩体顺直段, 如图 5c)、d) 的过流断面  $h_4$ 、 $h_5$  所示, 主汊纵向流速进一步增大, 最高达到 35 cm/s。水流流出滩体段后, 先后流经断面  $h_{14}$ 、 $h_{15}$ 。这时从主汊和副汊流出的水流流速逐渐变小, 滩后低流速区面积逐渐变小, 纵向流速在过流断面的分布逐渐趋于均匀。在各个过流断面, 纵向时均流速均有随着  $z$  坐标的增大而增大的分布规律。

## 2.2 横向时均流速分布

在内河航道里, 横向流速会导致船舶横向偏离航线, 形成漂角。在通航条件不佳的情况下, 存在较大的安全隐患。不同水深的横向流速的水平分布见图 6。在不同水深处, 滩头滩尾区域均有明显的横向水流, 该区域横向流速大于 1.2 cm/s。在水平面上分析, 横向流速在滩头分流处逐渐变大, 在两支汊入口区域均出现极大值(流速大于 2.0 cm/s), 进入支汊后横向流速变小, 最小值小于 1.0 cm/s。随后在支汊靠近滩尾区域, 横向流速再次变大并出现极大值, 随后进入滩尾汇流区域, 横向流速逐渐变小。在不同测深平面, 滩头附近的横向流速均略大于滩尾。

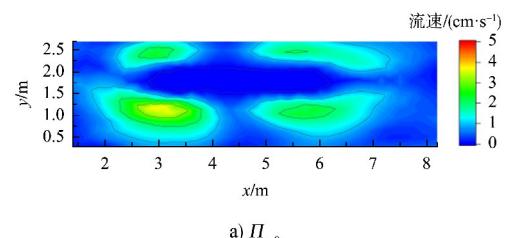
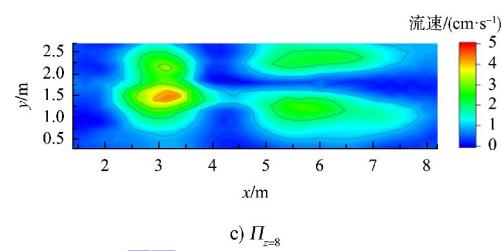
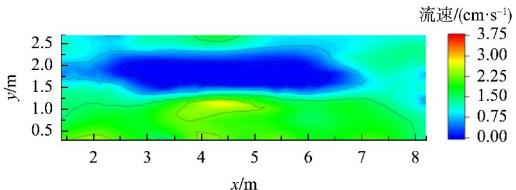
a)  $\Pi_{z=0}$ c)  $\Pi_{z=8}$ 

图6 横向时均流速在不同水深的分布

## 2.3 垂向时均流速分布

不同测深的垂向时均流速的水平分布见图 7。在  $\Pi_{z=0}$ , 右侧主汊的垂向流速(大于 2.25 cm/s)大于左汊(小于 2.0 cm/s), 说明水流在右汊受槽底阻力影响大于左汊。左右两汊的滩体扩张区和滩体收缩区的垂向流速, 略小于滩体竖直段。在水平面  $\Pi_{z=4}$ , 左汊出现明显的垂向流速(大于 3.0 cm/s), 数值显著大于右汊(小于 2.0 cm/s)。并且在上游及下游的无滩体槽段, 水流垂向流速明显大于  $\Pi_{z=0}$ 。这说明水流在这一深度时, 上下上层水流与下层水流混掺强烈。 $\Pi_{z=8}$  中, 由于滩体所占面积小于  $\Pi_{z=0}$ 、 $\Pi_{z=4}$ , 垂向流速在水平面的分布相对更均匀。在不同测深平面中, 垂向流速的最大值均出现在滩体的顺直段, 这与纵向时均流速的水平分布规律有一定的相似性。垂向流速在滩前滩后也存在低流速区, 这个区域的面积沿  $z$  轴正方向减小。

a)  $\Pi_{z=0}$

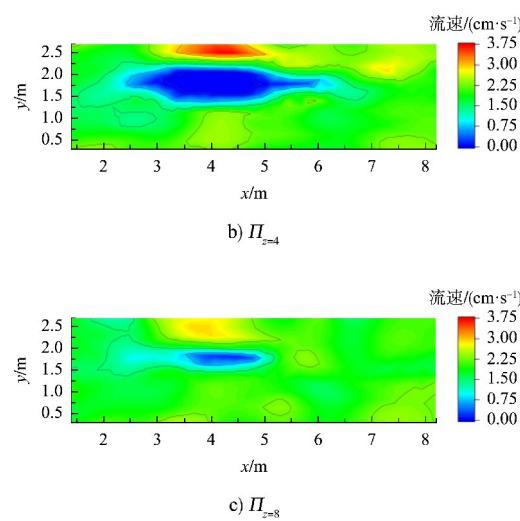


图 7 垂向时均流速在不同水深的分布

### 3 紊动特性分析

#### 3.1 紊动强度分布

水流的紊动特性可从动能梯度、流速梯度、弗劳德数、紊动强度、紊动能等指标进行分析。本文选取紊动强度、紊动能对分汊水流的紊动情况进行研究。

紊动强度是流场内任意一点脉动流速的二阶中心矩，是反映水流中流速脉动强弱程度的一个基本特征值。 $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的紊动强度分别用以下公式计算：

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_u = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (u_i - \bar{u})^2}{N}} \\ \sigma_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (v_i - \bar{v})^2}{N}} \\ \sigma_w = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (w_i - \bar{w})^2}{N}} \end{array} \right. \quad (2)$$

式中： $\sigma_u$ 、 $\sigma_v$ 、 $\sigma_w$  分别为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的紊动强度， $\text{cm/s}$ ； $u_i$ 、 $v_i$ 、 $w_i$  分别为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的瞬时流速， $\text{cm/s}$ ； $N$  为选取样本的总数量。

在分汊比  $\lambda_2 = 0.67$ 、工况  $M_9$  条件下，不同测深的纵向紊动强度在流场内的分布如图 8 所示。纵向强紊动区域呈斑块状分布，在滩体周围及滩后汇流区域紊动较为强烈。在  $\Pi_{z=0}$ ，无滩体槽段滩体中轴线靠近右汊的区域出现一个紊动强度略

大，数值为  $3 \sim 4 \text{ cm/s}$  的区域。这是由于少部分水流冲向滩体后由于重力作用向上游回流，与正常水流碰撞，从而形成较强的紊动。由于滩体的存在改变了过流断面的同时也改变了河床阻力，使得底层水流在进入支汊后，纵向主流的紊动逐渐剧烈，并在滩体顺直段和滩尾收缩段达到极大值。 $\Pi_{z=4}$  和  $\Pi_{z=8}$  的中层水流的紊动强度相对较弱，绝大部分区域紊动强度在  $2 \sim 3 \text{ cm/s}$ ，但会出现紊动强度在  $4 \sim 5 \text{ cm/s}$  的小部分区域。这些高紊动强度的区域分布在滩头和滩尾附近。沿水深的总体变化趋势为：越靠近床面，水流紊动强烈的区域越分散，紊动强度数值相对较小；越靠近水面，紊动强烈的区域越集中，紊动强度数值越大。

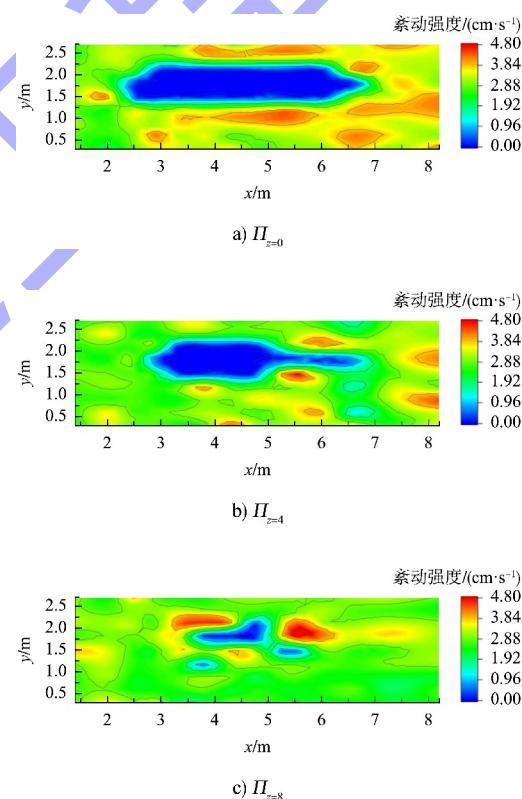


图 8 纵向紊动强度水平分布

相同条件下，不同测深的横向紊动强度在流场内的水平分布如图 9 所示。横向紊动流速在  $\Pi_{z=0}$  和  $\Pi_{z=4}$  分布比较均匀，总体分布在  $0.88 \sim 1.70 \text{ cm/s}$ 。在  $\Pi_{z=8}$  的左汊和滩后区域出现较为强烈的紊动，达到  $2.2 \text{ cm/s}$ 。在  $\Pi_{z=0}$ ， $h_3$  断面出现了紊动强度为  $1.32 \sim 1.76 \text{ cm/s}$  的区域，而紊动强度大小相同的区域在  $\Pi_{z=4}$  仅出现在滩尾及下游区

域, 这说明  $\Pi_{z=0}$  的水流在滩前  $h_3$  断面开始就受到了滩体的影响, 而在  $\Pi_{z=4}$  的水流受到的滩体作用较小。

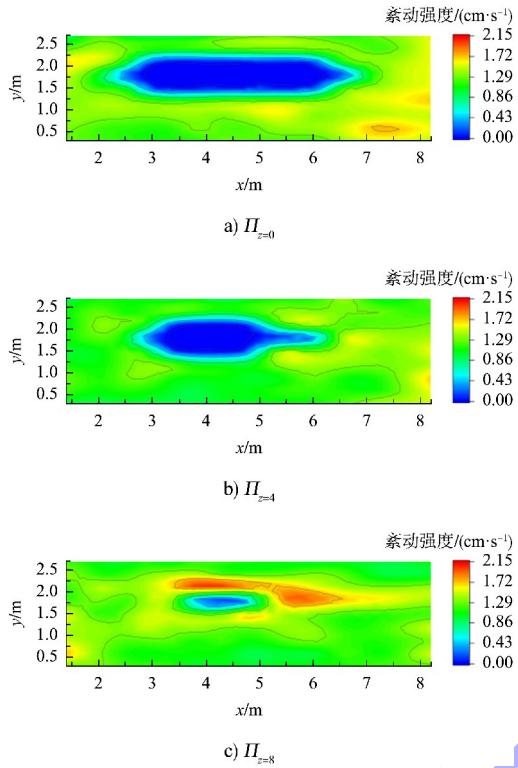


图9 横向紊动强度水平分布

垂向紊动强度的分布规律与纵向紊动强度的分布规律大体相似, 数值上略有不同, 如图10所示。在  $\Pi_{z=0}$ , 垂向紊动强度为  $1.47 \sim 2.45 \text{ cm/s}$ 。这说明由于滩体的作用, 水流的垂向紊动也较为剧烈。 $\Pi_{z=4}$  的水流在左右汊道滩尾段区域, 由于受到滩体高程变化的影响, 出现了明显的垂向紊动。

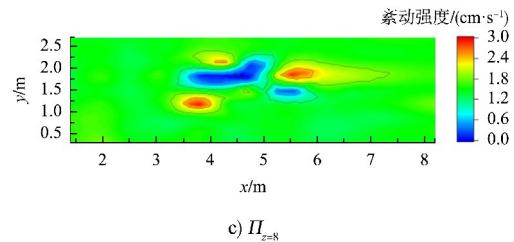
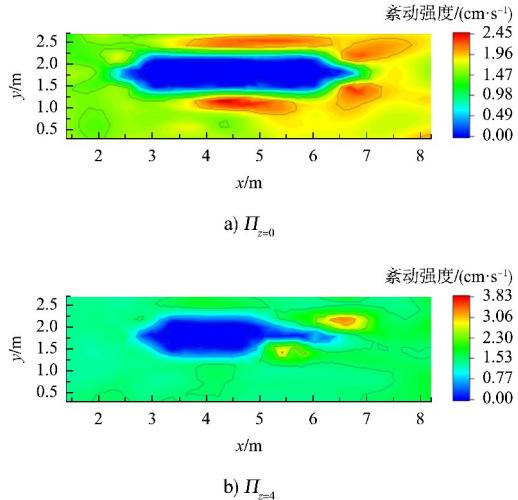


图10 纵向紊动强度分布

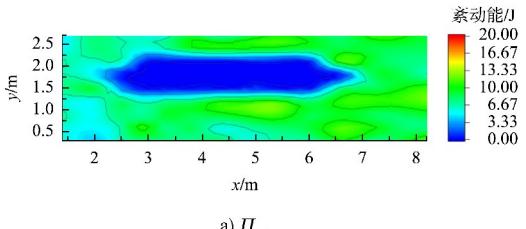
### 3.2 紊动能分布

紊动能是表征单位质量的水体具有的总动能, 是表示湍流紊动大小的重要物理量, 对物质扩散、泥沙输移和鱼类产卵场的研究有重要意义。紊动能的公式为:

$$T' = \frac{1}{2} (\sigma_u^2 + \sigma_v^2 + \sigma_w^2) \quad (3)$$

式中:  $T'$  为紊动能,  $J$ 。

分汊比  $\lambda_2 = 0.67$ 、工况  $M_9$  下不同测深的紊动能分布见图11。与  $\Pi_{z=0}$  的紊动强度分布相似, 滩前左右两汊的入口处, 出现了紊动能略大的区域, 在滩前分流区及滩后的紊动能分布比  $\Pi_{z=4}$  和  $\Pi_{z=8}$  更均匀, 数值更大。右侧主汊的紊动能在  $0 \text{ cm}$  测深处最大, 随着  $z$  值增大, 不同平面的平均紊动能逐渐变小。但  $\Pi_{z=4}$  和  $\Pi_{z=8}$  出现了紊动能较大的区域, 这些区域分布在滩尾和滩后段。对于黏性底层, 水流受到河床的黏性剪切力和由于滩体存在所产生的紊动剪切力的作用, 紊动能较大。随着  $z$  值增大, 水流远离河床, 受到来自下层的黏滞剪切力减小, 同时滩体水截面所占面积减小, 滩体扰流作用减小从而使得紊流切应力减小。这两个原因都使得水流的紊动能减小。对比不同分汊比、不同流量下不同测深的紊动能分布, 均满足上述规律。



a)  $\Pi_{z=0}$

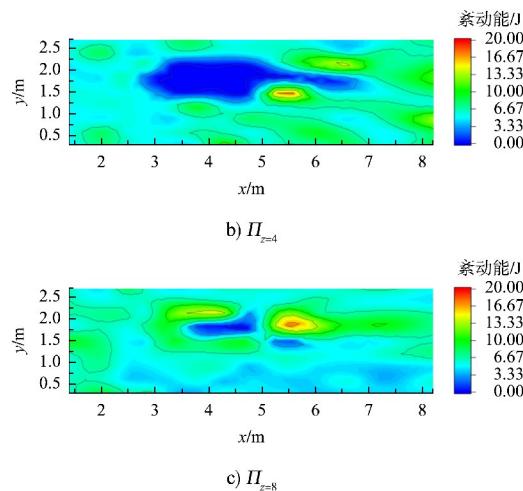


图 11 不同深度的紊动能分布

#### 4 结论

1) 在不同水深平面, 纵向时均流速的水平分布从大到小依次为主汊、支汊、无滩体河段, 且由于滩体的扰流, 在滩头滩尾都出现低流速区域。此外, 纵向流速还出现了横向和垂向流速, 说明由于滩体的影响, 水流出现除了主流之外的二次流。横向流速主要分布在滩头的分流区和滩尾的汇流区, 垂向流速分布规律类似于纵向流速。

2) 从紊动强度与紊动能的分布情况可以看出, 水流沿不同方向紊动都在近底处最大, 随着水深减小, 水流受到河床黏滞力减小, 紊动逐渐变弱。但在不同测深处, 滩头滩尾的低流速区, 均出现了紊动强度较大的区域。

3) 综合时均流速与紊动分析可以看出, 分汊河段某一深度的水流紊动强弱与滩体水平剖面面积呈正相关关系, 即滩体剖面面积越大, 紊动越强,

反之越弱; 与距河床的距离呈负相关关系, 即该层水流离河床近, 紊动越强, 反之越弱。

4) 此外, 本文没有考虑水流在不同方向紊动的相关性, 实际上水流在不同方向的紊动总是彼此影响的, 后续将做进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] 王云飞. 分汊型河流在不同洪峰流量下的水流特性研究[J]. 中国水能及电气化, 2018(5): 23-27.
- [2] 许海勇. 弯曲分汊河道水沙运动及河床演变二维数值模拟[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2016.
- [3] 肖庆华, 岳志远, 刘怀汉, 等. 长江下游二维浅水非恒定流数值模拟[J]. 水力发电学报, 2013, 32(5): 115-121.
- [4] 于鹏杰, 文杰, 谈广鸣, 等. 多分汊河型水流结构概化模型试验研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2020, 53(5): 385-393.
- [5] 赵聪聪, 王平义, 王梅力, 等. 不同分汊比下分汊河道水流规律试验研究[J]. 水运工程, 2022(5): 84-90.
- [6] 张婕, 王平义, 胡杰龙, 等. 分汊河道近底水流特性试验研究[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(8): 3297-3303.
- [7] 程勇, 王文娥, 胡明宇, 等. 30°分水角明渠水流紊动特性试验研究[J]. 水科学进展, 2022, 33(4): 638-647.
- [8] BRAMLEY J S, DENNIS S C R. The numerical solution of two-dimensional flow in a branching channel [J]. Computers & fluids, 1984, 12(4): 339-355.
- [9] 袁俊. 近底脉动流速变幅对河道地形变化影响研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2016.
- [10] 水利部长江水利委员会. 长江泥沙公报[M]. 武汉: 长江出版社, 2023.

(本文编辑 王璁)

(上接第 85 页)

- [12] 南京水利科学研究院, 天津水运工程科学研究所. 船闸输水系统设计规范: JTJ 306—2001 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [13] 宁武, 李君, 宣国祥, 等. 柳江红花二线船闸输水系统布置与水力学模型试验研究[J]. 水运工程, 2017(10): 154-159.
- [14] 南京水利科学研究院. 柳江红花水利枢纽二线船闸工程下游水位调整后的输水系统布置及水力学模型试验研究报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2019.
- [15] 陈明, 梁应辰, 宣国祥, 等. 船闸输水过程三维水力特

性动态仿真研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2013, 28(5): 559-565.

- [16] CHEN M, ZHOU X S, LI R M, et al. Energy dissipation characteristics of an in-chamber longitudinal culvert system with three-layer side ports designed for a large-scale lock with 60m water head[J]. Engineering review, 2023, 43: 1-16.
- [17] 须清华. 船闸输水系统的水工模型缩尺影响[J]. 水利水运科学研究, 1985(4): 1-8.

(本文编辑 王传瑜)