

文章编号:1007-2284(2021)07-0107-06

植被群河道水流紊动特性研究

米云彤,王丹,蔡瞰,杨克君

(四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室,成都610065)

摘要:在自然界中植被广泛存在,植被群的存在对河道水流结构和冲淤都有较大影响。为探究植被群作用下紊动能分布特性,采用多排对称布置的方式设计2组密度工况,使用PVC圆杆模拟非淹没刚性植被群,通过水槽试验探究大小密度工况下植被群对于紊动能分布特性的影响。试验表明:植被群密度对其上游紊动能分布无明显影响,而下游影响较剧烈;紊动能垂线分布中大密度工况在植被群后方产生更强烈的波动,紊动能峰值较大;紊动能沿程分布中大密度紊动能峰值更大,位置提前;紊动能横断面分中在植被群两侧处紊动能增大,且第二排植被群两侧紊动能明显大于第一排植被群两侧紊动能,植被群下游紊动能断面分布大致呈“M”型分布,紊动能峰值大小与密度呈正相关。通过该试验紊动能研究可为在多排多株植被群相互作用下揭示一定现象以及变化特性并为相关研究提供一定依据。

关键词:河道;植被群;植被群密度;水流特性;紊动能

中图分类号:TV133.1 **文献标识码:**A

米云彤,王丹,蔡瞰,等.植被群河道水流紊动特性研究[J].中国农村水利水电,2021(7):107-112.

MI Y T, WANG D, CAI T, et al. Research on the flow turbulence characteristics of vegetation channels [J]. China Rural Water and Hydropower, 2021(7):107-112.

Research on the Flow Turbulence Characteristics of Vegetation Channels

MI Yun-tong, WANG Dan, CAI Tun, YANG Ke-jun

(State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Vegetation exists widely in nature, the existence of the vegetation of the river flow structure and sediment has great influence for exploring vegetation under the action of turbulent kinetic energy distribution characteristics, using multiple rows of symmetrical layout design working condition of density of two groups, using PVC round rod simulate the submerged vegetation group of rigidity, a flume test probe size density group for the turbulent kinetic energy distribution characteristics of vegetation under the condition of test show that the influence of Vegetation density group had no significant effect on the upstream turbulent kinetic energy distribution, and downstream effect is severe turbulence kinetic energy density condition in vegetation vertical distribution of cuhk rear produce greater volatility, turbulence kinetic energy peak larger turbulent kinetic energy distribution along the cuhk is bigger, turbulence kinetic energy density peak position ahead of the turbulent kinetic energy in vegetation in cross-sectional points on both sides of the turbulent kinetic energy increases, and the second row of vegetation on both sides of the turbulent kinetic energy significantly greater than the first row of vegetation group on both sides of the turbulent kinetic energy, the vegetation of the downstream turbulence kinetic energy profile is roughly M type distribution, turbulence kinetic energy peak size and density were positively correlated The experimental results of turbulent kinetic energy can provide more basis for the related research of vegetation group channels.

Key words: river; group of vegetation; vegetation density; flow characteristics; turbulent kinetic energy

收稿日期:2021-01-08

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC0407302);国家自然科学基金项目(51539007,51979181)。

作者简介:米云彤(1996-),男,硕士研究生,研究方向为水力学及

河流动力学。E-mail:407978505@qq.com。

通讯作者:杨克君(1973-),男,教授,博士生导师,博士,研究方向为水力学及河流动力学。E-mail:yangkejun@163.com。

0 引言

在大自然中,河流众多,伴随着河流的衍生发展稳定,植物的存在也是相生相随的,并且对于河流特性有一定影响。自20世纪初期人们就开始关注含植物河道的水动力特性,并开展了一系列研究,揭示水生植物的阻水特性^[1]。因为阻水特性,生长在河道内的水生植物影响河流流动,它们存在也会改变了流场并具有一定保留沉积物的能力,同时也影响着河水物理、化学和物理性质,特别是河流及河床的水力性质^[2]。如在不同淹没比以及流量条件下,植被附近的泥沙会冲刷并且淤积^[3];如因为植被群的存在,对于植被群周围的水流流速紊动分布造成明显改变^[4]。因此,研究河道里植被水流特性,对于河道整治管理,工程建设管理等至关重要,是水利发展建设中至关重要的一环。

对于含植被的水流,在国内,顾继一等^[5]通过对水槽实验,研究探讨了淹没度对植被群尾部水流纵向分布的影响及作用机理。惠二青等^[6]通过水槽试验,推导出了水流紊动强度表达式并比较不同类型植被群落之间水流紊动强度垂向分布规律的差异。杨克君等^[7]通过水槽试验,模拟植被发现3个方向的脉动流速基本满足正态分布;横向动量基本上是主槽向滩地传递且交换比垂向动量交换大的规律。焦军丽等^[8]通过水槽实验,发现单株植被群下游紊动能沿程分布呈“波峰-波谷-波峰”分布。景何仿等^[9]通过水槽实验,根据植被疏密程度和排列方式不同进行水槽试验,发现植被区水面坡降、流速大小与植被的排列方式、疏密程度有密切关系。在国外,Chan和Chens^[10]实验研究描述了单株圆形植被群对于水流尾迹中湍流的分布特性,第一个峰值出现在贴片的正后方,湍流强度的第二个峰值出现在不远下游处,与卡门涡街的尾流尺度涡有关。Green^[11]利用二维电磁流速仪(EMCM)测量了单株植物被机其周围的流速和湍流模式。发现在植物上游的水脉冲在下游部分产生湍流,而在横流部分则没有湍流。Zeng等^[12]通过水槽实验,对有限长半刚性植被群的水利特性进行了实验研究和数值模拟,推导了平均速度和雷诺应力调节长度的经验公式,并对数值模拟结果进行了量化。Shi等^[13]在沉积模式上研究考察了颗粒大小、密度和河道流速对位于河道中心的模型植被周围空间沉积模式的影响,观察并提出了3种基本的沉积模式。Liu和Nepf^[14]通过水槽实验,发现了水流和植被之间的相互作用机理并提出了河道流速变化对于沉积的影响。

综上所述,国内外对于含植被水流特性的研究大多集中在单株植被群落分布情况下进行研究,相较而言多株植被的研究较少,而在自然界中植被群大多成群出现,并且因环境及植物

自身性质,它的密度以及植物组间间距等分布特性并非完全分布一致。故本试验将以刚性非淹没植被群为对象,在多排对称植被在变密度分布的明渠条件下,对其紊动能的横向纵向垂向分布的变化规律进行分析。

1 试验概况

本试验是在四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室的水槽进行的,水槽长宽高。槽首设置进水阀门,当水位到达一定高度后水流便由矩形堰跌入静水池,静水池后接效能栅和顺直过渡带。槽尾设置平板闸门及排沙底孔,平板闸门可以在来水时调节开度以达到调节水流高度以获得稳定的均匀流,排沙底孔既可以在来水时调节开度与平板闸门协同调节水流高度以获得稳定的均匀流。对于植被群,采用均匀PVC圆杆拟刚性非淹没植被,直径0.1 cm,长30 cm。本试验在非淹没条件下进行,模拟植被落单株为圆形,圆形植被群落本身直径 D_1 为10 cm。布置在距离槽首4 m处布置处底部打孔的预制板(1.5 m×1.0 m)中,同时为了保证形成均匀流,与水面线的稳定,槽首4 m处到槽尾5 m处均底部均铺有预制板。布置为两排且每排四株圆形植被群落,排列之间植被群落之间间距10 cm。在本试验中,床面条件为定床,水槽坡度为0.1%,水槽出流流量为65.01 L/s,水深为13 cm。

采用单位体积内植被的迎水面积表示植被群落密度 a :

$$a = \frac{4Nd}{\pi D^2} = nd \quad (1)$$

式中: N 为植株数目; d 为单株植被的直径,cm; n 为单位面积植株数目,cm⁻²。

本试验采用多普勒三维流速仪(ADV)测量采集数据,频率设置为50 Hz,采样时间60 s。按顺水流方向为 x 方向正向,水流方向右岸为 y 正向,垂直于水面竖向上方向为 z 正向。具体工况细节见表1。根据植被群分布情况,布置的断面由 $X=-4D$ 至 $X=23D$ 止,总共25个测量断面。同时在植被群上游 $X=-4D$ 至测量断面上 $X=-D$ 靠近,按照0.5D为等差,布置了6个段断面;在植被群两侧,按照植被群的分布在两排植被群两侧分别布置了2条测量断面;在植被群下游,靠近植被群附近布置较多测量断面,原理植被群的附近按照2D为等差布置测量断面,总共17个断面。对于植被群两侧的测量断面,如 $X/D=-1$ 、 $X/D=3$ 和 $X/D=6$ 从中央 $Y=0$ 开始等间距5 cm左右对称布置测点。对于测线并非完全均匀布置,根据植被群位置靠近植被群测线测点布置越密,每条测线上布置3个测点。具体试验布置,如图1所示,圆点即代表测线。

表1 水槽及植被群试验参数设置

Tab.1 Set parameters of water tank and vegetation group

序号	床面条件	平均流速/(cm·s ⁻¹)	D /cm	N	n /cm ⁻²	d /cm	a /cm ⁻²
01	定床	33.3	10	39	0.5	0.4	0.2
02	定床	33.3	10	146	1.5	0.4	0.6

2 紊动能和流场分析

水流流经植被群后,在植被群后形成尾流区,对于水流特

性有较大的影响。在尾流区内,水流瞬时流速波动并且水流动能耗散,紊动动能增加。一般使用紊动能 TKE 表示其大小。其

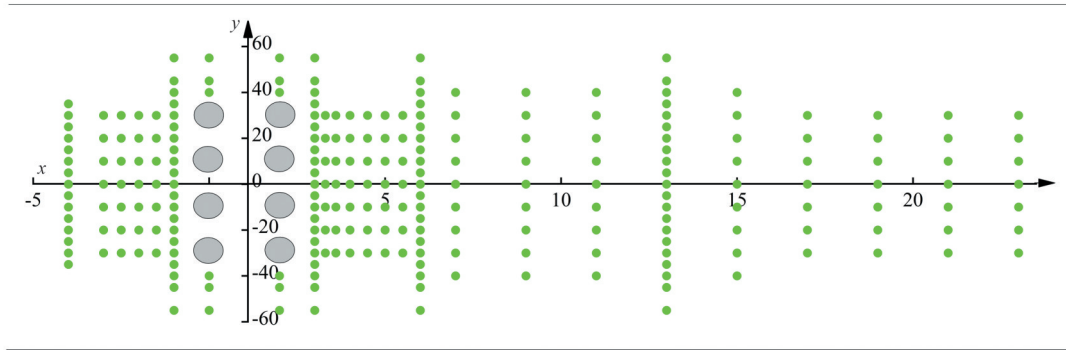


图1 测量断面和测线布置图

Fig.1 Survey section and survey line layout

表达式为:

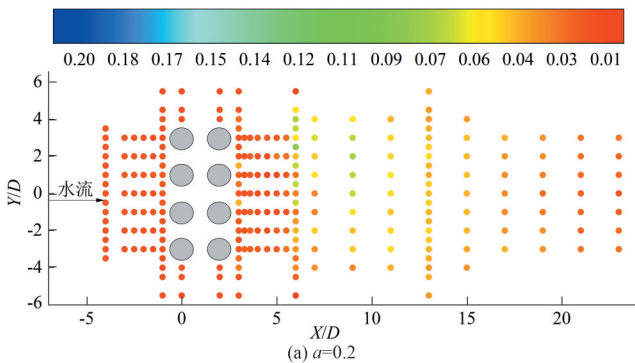
$$TKE = \frac{\mu'^2 + \nu'^2 + \omega'^2}{2} \quad (2)$$

式中: μ' 为纵向脉动流速; ν' 为横向脉动流速; ω' 为垂向脉动流速,cm/s。

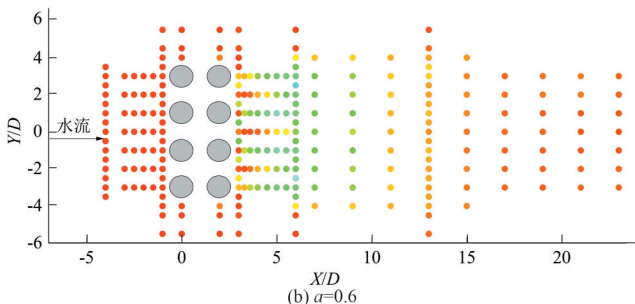
本文所涉及紊动能均选用紊动能与断面平均流速平方的比值 TKE/U_0^2 进行无量纲化处理,取布置图中每条测线0.5倍水深处无量纲紊动能大小进行分析。如图2所示,在植被群多排对称分布的条件下,不管是密度工况 $a=0.2(1/cm^2)$ 还是密度工况 $a=0.6(1/cm^2)$ 的无量紊动能分布图中,在植被群上游的紊动能大小颜色色阶变化并不明显 TKE/U_0^2 的值大小在0.025左右波动但幅度很小,无量纲紊动能变化不大。而在植被群下游,因为植被群的存在会对水流产生绕流作用,使得植被群边缘纵向和横向流速增大,故在植被群的绕流作用下植被群下游的紊动能总体开始出现增大的趋势。在增大的过程中,因为剪切层的作用,沿程水流产生更多的动量交换,并且紊动能出现了峰值。而在峰值产生之后,紊动能又出现整体降低趋势,直至下游此

后紊动能的大小减小至某一稳定值。虽然整体分布大致相同,但通过大小密度的对比不难发现,对于植被群下游的紊动能分布情况,最直观的便是峰值的大小随着密度的变大而变大,位置随着密度变大而提前出现。

同时为了方便比较,在密度 $a=0.2$ 的小密度工况下,取半水深处纵向时均流速用断面平均流速 U_0 对其进行无量纲化处理。从图3流场分布中,可以看出不同于同工况下的紊动能分布,植被群上游的纵向主流流速在靠近植被群时,因为存在绕流现象,在植被群靠近植被群近处存在一定的减小现象,但是由于横向流速增加,紊动能总体强度不变;在植被群两侧,绕流在植被群两侧通过导致主流流速进一步增大,同时绕流在第二排植被群附近较第一排植被群较强,使得第二排植被群两侧绕流流速略大于第一排植被群,而在这里水体的横向交换减弱,故总的来说紊动能变化也不是很明显;在植被群下游 $X=3D$ 至 $X=7D$ 内,纵向流速出现了明显剧烈的变化,紊动能分布也在此距离内剧烈变化,但是变化持续到 $X=13D$ 附近才趋于稳定。但是也不难发现,紊动能的变化趋势和流场的变化趋势也有着密切的联系,下面将对紊动能各项变化特征进行描述分析。



(a) $a=0.2$



(b) $a=0.6$

图2 无量纲紊动能分布

Fig.2 The dimensionless turbulent kinetic energy distribution

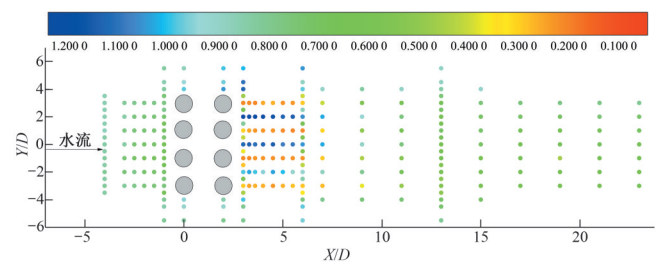


图3 流场分布

Fig.3 The distribution of flow field

2.1 紊动能垂线分布

由于边壁作用与多普勒三维流速仪(ADV)的测量特性影响,无量纲紊动能大小垂线的分布描述选用选用水下9 cm至水下3 cm的测点进行。绘制中心线 $Y=0$ 处各垂线无量纲紊动能的沿程分布,如图4。由图4得知,在0.2与0.6密度工况下的紊动能分布中,不管大密度还是小密度工况,同时单从一条垂线的无量纲紊动能的垂线分布可以很明显地看出,大部分垂线的无量纲紊动能大小近水面处和近底处的大小大致相当,同时向水深中心点不断减小,到达水深中心点的时候又增大至与近水

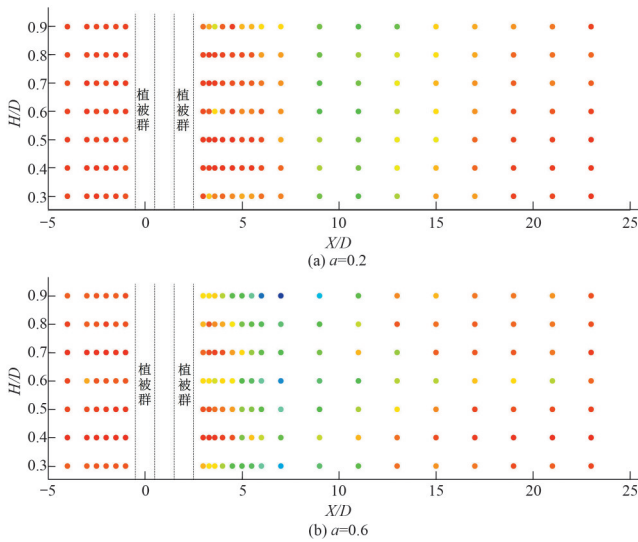


图4 水槽中心截面紊动能纵向分布

Fig.4 Longitudinal distribution of turbulent kinetic energy in the center section of the flume

面处和近底处相当的值,其紊动能垂线呈波动状。就整体而言,由于水体并未受到植被群存在的影响,紊动能大小整体并无明显变化,对于植被群上游的无量纲紊动能大小分布,不管是哪一个密度工况,整体来说较为稳定,在某一较小值左右波动。而在植被群下游,由于绕流作用的影响,可以观察到对于不同垂线,任意高程的无量纲紊动能的大小沿程整体逐渐增大并且达到某一峰值之后,再逐渐递减。而密度梯度对于无量纲紊动能分布的影响来说,将0.2与0.6密度工况进行对比可以发现,虽然植被群上游没有受到植被群作用,紊动能大小差异不大,但是植被群下游大密度工况下无量纲紊动能的颜色、峰值和出现位置较小密度工况都出现了明显变化,特别是在 $X=7D$ 和 $X=9D$ 处最为明显,不难发现紊动能垂线分布波动加剧,导致其同一垂线紊动能大小峰值差距变大。而在峰值出现后之后,

该波动趋势变弱,到末端某处逐渐恢复到未受植被群影响状态。植被群大密度植被群对下游紊动能垂线影响范围最远约为 $21D$ 处,而小密度植被群对下游紊动能垂线影响范围最远约为 $15D$ 处。

2.2 紊动能纵向分布

图5表示了不同密度工况下,多排对称分布植被群紊动能在0.5倍水深处沿程分布的情况,包括水槽中心线($Y=0$)、第一株植被群中心线($Y=30\text{ cm}$)、第二株植被群中心线($Y=10\text{ cm}$)、第三株植被群中心线($Y=-10\text{ cm}$)和第四株植被群中心线($Y=-30\text{ cm}$)紊动能的沿程分布情况。由图4水深紊动能的纵向分布可以看出,不管是水槽中心线($Y=0$)还是在植被群中线线($Y=10\text{ cm}$, $Y=-10\text{ cm}$, $Y=30\text{ cm}$, $Y=-30\text{ cm}$)上,因为植被群对于上游水流并无影响。无量纲紊动能的沿程分布在植被群上游都是在 $TKE/U_0^2=0.015$ 左右波动的。而在植被群下游,紊动能大小在各密度工况和不同中心线上都出现了最大峰值,由于植被群尾流区不同流速的存在,形成了不同的剪切层,并且随着纵向距离的增加逐渐发展,在某点相遇并发展成为卡门涡街^[10],位置大概对应应在 $X=7D$ 至 $X=9D$ 附近,并在随着离植被群距离的增加,紊动能大小恢复到 $TKE/U_0^2=0.02$ 附近。不难发现随着密度的变大,在水槽中心线($Y/D=0$)、第一株植被群中心线($Y=30\text{ cm}$)、第二株植被群中心线($Y=10\text{ cm}$)、第三株植被群中心线($Y=-10\text{ cm}$)和第四株植被群中心线($Y=-30\text{ cm}$)的无量纲紊动能随着密度变化非常剧烈,两个密度工况分别在在 $X=7D$ 和 $X=9D$ 之前,随着密度的变大,紊动能大小增大且非常迅速,而伴随着沿程距离的增大,随着密度的变大,其衰减速率也较快,导致出现了大密度工况的紊动能较小密度工况紊动能大小要小一些的情况。同时不同密度工况条件下,大密度无量纲紊动能峰值大于小密度无量纲紊动能峰值,同时由于大密度植被群更接近与实心,导致其产生了更强阻水和绕流作用,导致尾流的摆动幅度大幅增加频率加剧,导致卡门涡街提前出现,使得0.6密度工况下的紊动能峰值在较0.2密度工况下的紊动能峰值 $X=9D$ 处,于 $X=$

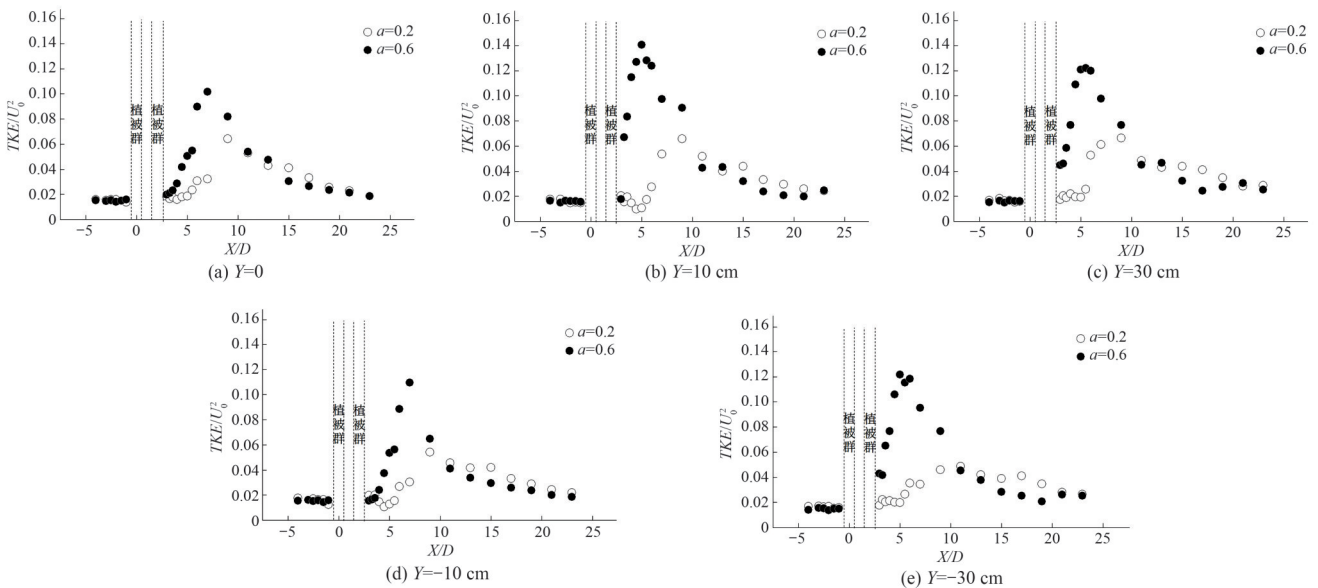


图5 0.5倍水深处紊动能的纵向分布

Fig.5 Longitudinal distribution of turbulent kinetic energy in half water depth

7D 附近提前出现。植被群大密度植被群和小密度植被群对下游紊动能沿程分布中虽然沿程增长衰减率有差别,但是影响范围大致最远均为为 21D 处。特别的需要指出的是,在 0.2 密度工况下,第二株植被群中心(Y=10 cm)和三株植被群中心线(Y=-10 cm)无量纲紊动能出现了两个峰值。第一个峰值出现在 X/D=3.6 处,其出现的原因可能是因此密度工况植被群较为稀疏,来自左右两株植被局部横向流速增大,导致部分绕流的水体与穿插在植被群间的水体在植被群后方相互作用产生大量的小型旋涡,产生了小规模动量交换,水流的动能转化为紊动能。而在第一个峰值短暂的出现后,紊动能迅速减小至波谷 X/D=4 处,随后紊动能大小增加,直到第二个峰值的出现,第二个峰值出现的原因则是与卡门涡街产生有关^[10]。

2.3 紊动能横向分布

不同植被群密度对于不同横断面无量纲紊动能分布影响如图 6。选取植被群上游 X=-D, 植被群中心 X=0D, X=2D 与紊动能沿程分布最大断面 X=6D 与末尾衰减断面 X=13D 作为特征断面,由图 6 可以看出,在植被群上游(X/D=-1)处由于几乎不受植被群落及其密度的影响,紊动能大小都为 $TKE/U_0^2=0.015$ 左右。对于植被群中心断面第一排植被群处(X=0D) TKE/U_0^2 的大小随着与植被群距离的变小而变大,紊动能大小单调递增且其大小与密度呈正相关,这可能是因为大密度工况下植被群更

加接近为实心,导致水体绕流作用增强,在植被群旁横向流速加大,导致其紊动能变大;而在第二排植被群中心,紊动能继续伴随着靠近植被群的位置单调递增,最大增加至 $TKE/U_0^2=0.035$ 左右。单株布置的植被群,在植被群中心断面的横向紊动能分布无明显变化^[8],但两排植被群的存在与相互作用,在第二排植被群后的二次扰流与第一排植被群的第一次绕流相互叠加,产生了更加强烈的动量交换而导致第二排植被群两侧紊动能要稍大于第一排植被群两侧紊动能,同时因为植被群密度的差异,将这个作用放大,使得大小密度下,第一排第二排植被群两侧紊动能紊动能差更大。在植被群下游 X=6D 处可以明显观察到无量纲紊动能的剧烈变化,尤其是在第一株和第四株植被群中心(Y=30 cm, Y=-30 cm)下游附近处出现了拐点值,大小密度工况下均呈现出“M”型分布,这也与图 4 紊动能纵向沿程分布峰值出现位置相对应。而由于密度差异的原因,两者的“M”型分布其最大值和最小值差异也较为明显,大密度工况在此 X/D=6 处与平面、垂线、和纵向紊动能分布相对应,而低密度工况紊动能峰值最大的位置少许靠后且强度也不及此。在植被群下游较远处(X=13D)无量纲紊动能已趋于平稳,植被群和靠近壁处的值分别为 $TKE/U_0^2=0.04$, $TKE/U_0^2=0.02$,通过和之前图 2、3 和图 4 对比,可以看出此时植被群尾流区水流紊动开始衰减至稳定,水流整体结构以趋于稳定,且紊动能与密度梯度的变化无太大相关。

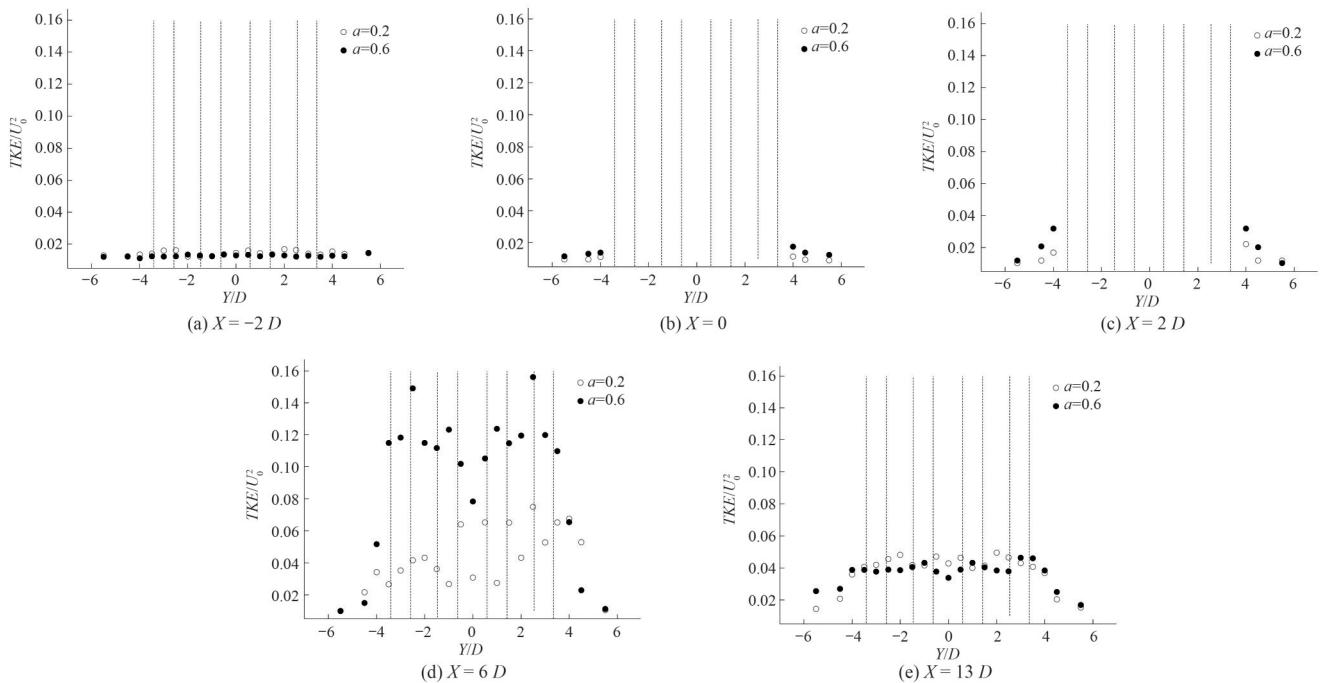


图 6 不同断面紊动能横向分布

Fig.6 Transverse distribution of turbulence kinetic energy at different sections

3 结论

(1) 紊动能的垂线分布总体遵循呈近水面处、近底处和 0.5 倍水深处较大,中间部分大小逐渐向两头靠拢,呈波动趋势,且

这个趋势随着密度增大而增大,表现为在植被尾流区同一垂线紊动能最大值最小值差距变大。

(2) 在紊动能沿程分布中,植被群对于上游的紊动能无明显影响,而对于下游的紊动能影响较大。大小密度的差异明显

影响了植被群尾流区水流紊动强度,紊动能峰值出现位置及其强度大小,同时大密度工况下紊动能的增加衰减速率都要远远大于小密度工况下的增加衰减速率。

(3)在紊动能横断面分布中,植被群对于上游断面无明显影响。在两排植被群中心断面,越靠近植被群的位置,其紊动能越大且与密度呈正相关,同时因绕流作用使第一株植被群绕流与第二株植被群两侧水流在第二株植被群水流两侧叠加导致这个效果被放大。在植被群下游尾流区,大小密度工况紊动能断面分布在植被群后方均出现两个峰值,呈“M”型分布,但由于密度差异导致其峰值大小差异明显,与密度梯度呈正相关。

□

参考文献:

- [1] ZENG L, CHEN G Q, WU Z, et al. Flow distribution and environmental dispersivity in a tidal wetland channel of rectangular cross-section [J]. *Communications in Nonlinear Science & Numerical Simulation*, 2012, 17(11): 4 192-4 209.
- [2] GURNELL, ANGELA. Plants as river system engineers [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2014, 39(1): 4-25.
- [3] KIM H S, KIMURA I, SHIMIZU Y. Bed morphological changes around a finite patch of vegetation [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2015, 40(3): 375-388.
- [4] CHEN Z, ORTIZ A, ZONG L, et al. The wake structure behind a porous obstruction and its implications for deposition near a finite patch of emergent vegetation [J]. *Water Resources Research*, 2012, 48(9).

(上接第106页) 大于雨季,干季河道水流量较小,稀释能力较弱。鱼塘水监测点Y2的氮磷浓度也表现为干季大于雨季。

(4)金龟河试区不同土地利用下氮磷排放浓度总体表现为养殖场>鱼塘>果林>稻田。控制流域的农业氮磷面源污染,一方面要合理施用化肥农药,改进耕作技术减少水肥流失;另一方面更要加强畜禽养殖和水产养殖废水排放的管理和治理。

□

参考文献:

- [1] LIU R, XU F, ZHANG P. Identifying non-point source critical source areas based on multifactors at a basin scale with SWAT [J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 533: 379-388.
- [2] 刘庄, 晁建颖, 张丽. 中国非点源污染负荷计算研究现状与存在问题 [J]. *水科学进展*, 2015, 26(3): 432-442.
- [3] 曹高明, 杜强, 宫辉力, 等. 非点源污染研究综述 [J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2011: 35-40.
- [4] 何悦, 漆雁斌, 汤建强, 等. 中国粮食生产化肥利用效率的区域差异与收敛性分析 [J]. *江苏农业学报*, 2019, 35(3): 729-735.
- [5] 张颂心. 国外畜禽养殖面源污染: 管控模式、典型经验和现实启示 [J]. *黑龙江畜牧兽医*, 2020(22): 14-18.
- [6] 代俊峰, 全秋慧, 方荣杰, 等. 漓江流域上游非点源污染负荷估算 [J]. *水利水电科技进展*, 2017, 37(5): 57-63.

- [5] 顾继一, 李峰, 黄胜, 等. 不同淹没度下植被群尾部流速与紊动能纵向分布 [J]. *中国农村水利水电*, 2018(1): 124-127.
- [6] 惠二青, 曹广品, 胡兴娥, 等. 植被群落之间水流紊动强度垂向分布规律探讨 [J]. *水力发电*, 2010, 36(10): 3-6.
- [7] 杨克君, 刘兴年, 曹叔尤, 等. 植被作用下的复式河槽漫滩水流紊动特性 [J]. *水利学报*, 2005(10): 1 263-1 268.
- [8] 焦军丽, 王丹, 李文奇, 等. 植被群密度对河道水流紊动特性影响的试验研究 [J]. *水力发电学报*, 2018, 37(12): 75-84.
- [9] 景何仿, 张凯, 杨程, 等. 非淹没挺水植被水流特性试验研究 [J]. *水力发电*, 2017, 43(12): 105-108.
- [10] CHEN S C, CHAN H C, LI Y H. Observations on flow and local scour around submerged flexible vegetation [J]. *Advances in Water Resources*, 2012, 43(10): 28-37.
- [11] GREEN J C. Velocity and turbulence distribution around lotic macrophytes [J]. *Aquatic Ecology*, 2005, 39(1): 1-10.
- [12] ZENG C, LI C W. Measurements and modeling of open-channel flows with finite semi-rigid vegetation patches [J]. *Environmental Fluid Mechanics*, 2014, 14(1): 113-134.
- [13] SHI Y, JIANG B H, NEPH H M. Influence of particle size and density, and channel velocity on the deposition patterns around a circular patch of model emergent vegetation [J]. *Water Resources Research*, 2016, 52(2).
- [14] LIU C, NEPH H M. Sediment deposition within and around a finite patch of model vegetation over a range of channel velocity [J]. *Water Resources Research*, 2016, 52(1): 243-250.

- [7] 郭攀, 李新建. 漓江典型小流域农田面源污染治理技术及应用 [J]. *水电能源科学*, 2017, 35(9): 49-52, 89.
- [8] 俞陈文灵, 代俊峰, 张帅普, 等. 漓江中上游小流域土壤和底泥氮磷含量分布 [J]. *环境工程*, 2019, 37(1): 6-10, 28.
- [9] 徐保利, 代俊峰, 俞陈文灵, 等. 漓江流域氮磷排放对水肥管理和下垫面属性变化的响应 [J]. *农业工程学报*, 2020, 36(2): 245-254.
- [10] 杨丽雅, 夏源. 漓江支流小流域的非点源污染分析及削减策略 [J]. *桂林理工大学学报*, 2017(1): 177-181.
- [11] 谢晓琳, 代俊峰, 俞陈文灵, 等. 漓江中上游会仙小流域水系氮磷浓度时空特征 [J]. *中国农村水利水电*, 2019(5): 71-76.
- [12] 童晓霞, 崔远来, 史伟达. 降雨对灌区农业面源污染影响规律的分式模拟 [J]. *中国农村水利水电*, 2010(9): 33-35.
- [13] 王琼, 姜德娟, 于靖. 小清河流域氮磷时空特征及影响因素的空间与多元统计分析 [J]. *生态与农村环境学报*, 2015, 31(2): 137-145.
- [14] 卓泉龙, 林罗敏, 王进. 广州流溪河氮磷浓度的季节变化和空间分布特征 [J]. *生态学杂志*, 2018, 37(10): 235-244.
- [15] 黄金良, 黄亚玲, 李青生. 流域水质时空分布特征及其影响因素初析 [J]. *环境科学*, 2012, 33(4): 1 098-1 110.
- [16] 徐兵兵, 卢峰, 黄清辉. 东苕溪水体氮、磷形态分析及其空间差异性 [J]. *中国环境科学*, 2016, 36(4): 1 181-1 188.