

含柔性植被明渠水流水力特性的试验研究

任 珊, 冯民权

(西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘 要: 采用粒子图像测速(PIV)技术对含柔性淹没植被明渠水流的水力特性进行试验研究。利用人造水草模拟天然柔性植被,对不同密度、不同流量条件下含柔性植被明渠恒定均匀流场进行了测量,得到了淹没植被情况下纵向流速、雷诺应力、紊动强度沿垂向分布与曼宁系数的变化情况。试验结果表明:纵向流速的垂向分布可以分为3区,包括自由水面区、中间冠层区和近床面区。自由水面区流速随植被密度增大而增大,中间冠层区与近床面区流速随植被密度增大而减小。雷诺应力与紊动强度的峰值出现在植被冠区顶部附近,并随着植被密度增大而增大。

关键词: 明渠水流;水力特性;柔性植被;植被密度;流速;雷诺应力;紊动强度

中图分类号:TV133.1

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2020)03-0186-07

Experimental study on hydraulic characteristics of open channel with flexible vegetation

REN Shan, FENG Minquan

(State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to understand the hydraulic characteristics of the water flow in open channels with submerged flexible vegetation, experiments were carried out using the particle image velocimetry (PIV) method. The synthetic aquatic vegetation was used in place of natural flexible vegetation, and the constant water flow velocity field of the open channel with this vegetation was measured under different vegetation density and flow conditions, from which the longitudinal velocity, Reynolds stress, turbulence intensity along the vertical distribution and the variation of Manning coefficient were obtained under the condition of submerged vegetation. The test results show that the distribution of the longitudinal velocity can be divided into three zones, which are the free water zone, the middle canopy zone and the near bed zone. The flow velocity in the free water zone increased with the vegetation density, whereas it decreased with the increase of the vegetation density in the middle canopy zone and the near bed zone. The peak values of Reynolds stress and turbulence intensity appeared around the top of the vegetation crown and increased with vegetation density.

Key words: open channel flow; hydraulic characteristics; flexible vegetation; vegetation density; flow velocity; Reynolds stress; turbulence intensity

1 研究背景

水生植被广泛生长于天然河道及湿地中,是水生生态系统的重要组成部分。水生植物吸附水中污染物,能够提高河流的自净能力^[1-2];同时植物也改变了河流阻力和水流结构^[3-4],使河流泥沙输移率减小,促进了河道泥沙淤积^[5-6],有利于减缓水土流

失,稳固岸坡^[7]。

关于植被对明渠水流水力特性的影响,国内外已有不少研究成果。众多研究者在含植被水流纵向流速的垂向分区有着两区^[8-9]与三区^[10-12]的不同观点。两区分区以植被顶端为分界,将纵向水流分为植被区与自由水面。而三分区分为自由水面区、中间冠层区和近床面区。但分界位置没有统一的定

收稿日期:2019-07-15; 修回日期:2019-11-14

基金项目:国家自然科学基金项目(51679191)

作者简介:任珊(1994-),女,陕西咸阳人,硕士研究生,主要研究方向为环境水力学。

通讯作者:冯民权(1964-),男,山西永济人,博士,教授,博士生导师,主要从事水环境模拟与污染控制研究。

义。闫静等^[13]使用 LDV 对含刚性植被明渠水流进行研究,得出非淹没条件下平均流速与流量、渠宽、植被密度有关。刘昭伟等^[14]以灌木为原型建立微分方程,得到了更普适的纵向流速垂向分布的公式。Thokchom 等^[15]使用 ADV 通过水槽试验研究了部分覆盖植被的明渠水流,分析比较了植被与无植被区域的水力特性。吴福生等^[16]选用 PVC 条模拟柔性植被使用标准 PIV 测量并分析得出植物冠层是造成水流紊动耗散的主要原因。Nepf 等^[17]使用 LDA 和 ADV 对淹没植被的明渠水流进行了测量,强调水深对紊流结构的影响,并指出由于植被茎产生的尾流紊流与淹没度(水深与植被高度的比值)密切相关。槐文信等^[18]研究了漂浮植物水流断面的能量传递与平衡机理,得到断面能量损失主要集中在漂浮植被区。武迪等^[19]对苦草斑状植被进行试验研究,研究得出斑状植被对水平流速分布有影响,尾部边缘有涡的产生。Zhao 等^[20]使用大涡模拟模型研究了不连续斑状刚性植被对水流水力特性的影响。

综上所述,目前对含植被水流试验研究大多为遇水流不倒伏的刚性植被并均匀排布,而天然河道中植被多为随水流摆动弯曲的柔性植被,并且分布

形式多样。本试验在前人的研究基础上,选用人造水草模仿天然柔性植被,沿水流方向设置不同代表性断面,利用 PIV 技术瞬时测量二维流场运动信息,研究不同植被密度与流量对含柔性植被水流水力特性的影响,并将 PIV 测量的断面的纵向流速的垂向分布与前人的经验公式进行对比,以期对含柔性植被水流水力特性获得新认识。

2 实验仪器设备、材料和方法

2.1 实验仪器设备

试验用平底有机玻璃水槽,长 7.3 m,宽 0.3 m。进水流量由电磁流量计和电磁调节阀等组成的流量控制系统严格控制,水位通过下游尾门进行控制,稳水装置用于形成稳定的均匀流。利用丹麦 Dantec 公司的 PIV 系统进行数据的测量,PIV 中激光器的功率为 350 W,测量频率 5 Hz。PIV 系统由激光器、摄像机、同步控制器和计算机组成。采用 Beamtech 公司的激光器,Dantec 的相机。选用直径 10 μm、密度 1.1 g/cm³ 的空心玻璃珠做示踪剂。试验装置见图 1(a)。水深通过测针测量,测点布置如图 1(b)所示。

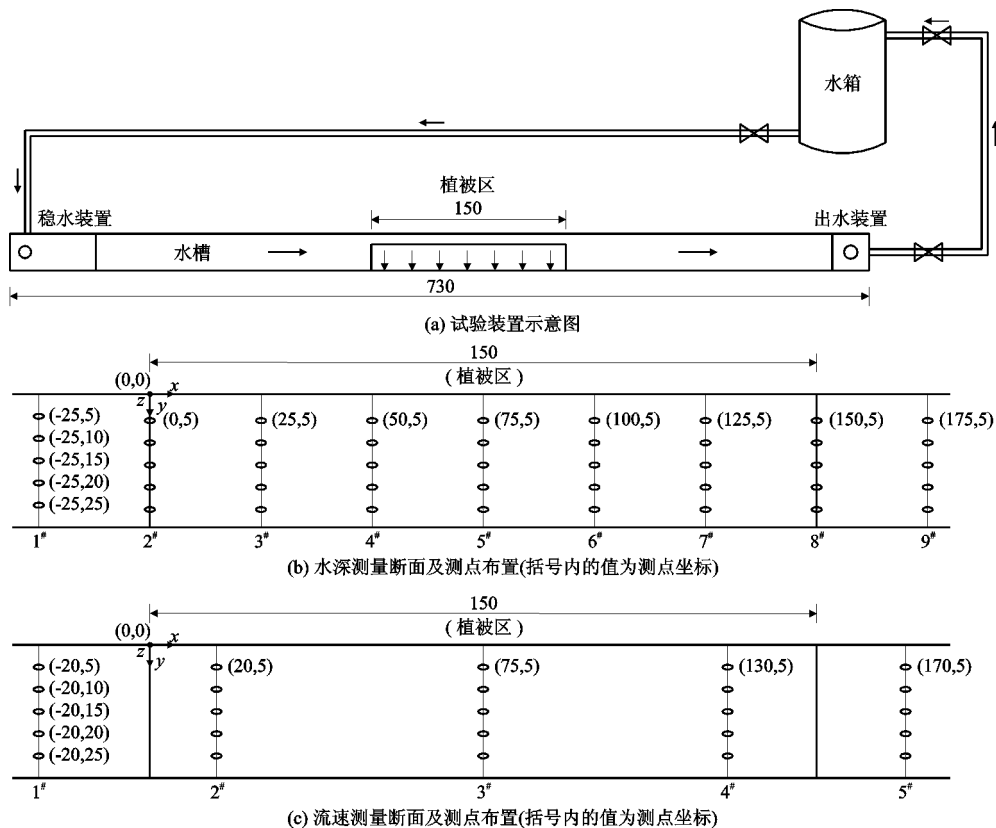


图 1 含柔性植被明渠水流试验装置及测量断面和测点布置(单位:cm)

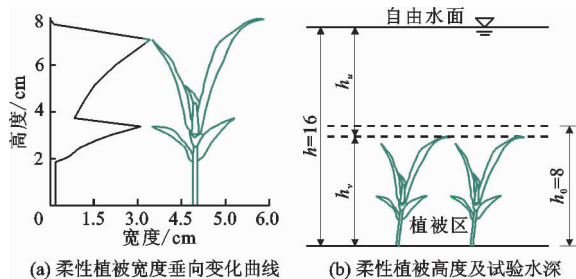
试验的坐标系以植被区起始处左岸槽底为原点 O,水流动方向为 x 轴正向,左岸到右岸为 y 轴正向,

槽底到自由水面为 z 轴正向(见图 1(b))。纵向流速为 u , 横向流速为 v , 垂向流速为 w 。设置 5 个流速测量断面, 每个断面设置 5 个测点, 各测量断面及测点布置如图 1(c) 所示。其中 1[#]、5[#] 断面位于植被区外上下游各 20 cm 处, 用于研究无植被水流的水力特性; 2[#]、4[#] 断面位于植被区边缘 20 cm 处, 用于研究植被区上、下游的水力特性; 3[#] 断面位于植被区中心位置。

2.2 材料和方法

采用柔性人造水草模拟柔性植被, 其具有一定的韧性, 水流流过时, 茎干没有弯曲, 叶片略有摆动, 每株 6 片叶子, 茎干平均高度 1.85 cm, 冠层平均高度 6.15 cm, 冠层直径约 3 cm。柔性植被的高度、宽度及试验水深如图 2 所示。植被固定在有预钻孔的有机玻璃板上, 有机玻璃板尺寸为 150 cm × 30 cm × 2 cm, 见图 3。

试验主要考虑 5 种植被密度布置和 2 种流量, 植被密度分别为 100、80、60、40、20 株/m², 试验流量分别为 15、9 m³/h。不同密度的植被布置如图 4 所示, 具体各试验工况基本物理量参数如表 1 所示。



注: 图中 h 为水深, h_0 为未倒伏植被高度, h_v 为倒伏植被高度(随工况变化), h_u 为植被以上水深。

图 2 试验柔性植被高度、宽度及试验水深(单位: cm)

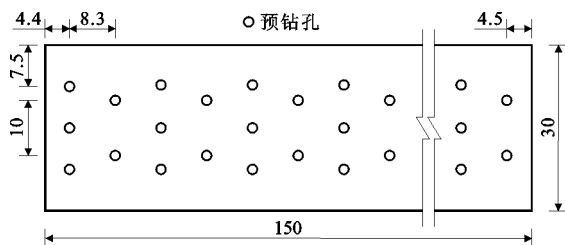


图 3 固定植被的预钻孔有机玻璃板(单位: cm)

3 结果与分析

按照上述试验设计工况进行试验, 试验结果表明, 植物密度与流量的变化对含植被水流的水位、流速、雷诺应力、紊流强度、糙率等均有不同影响。

3.1 含柔性植被明渠水流的水位

根据测量及分析, 相同淹没度时, 不同流量各植被密度下的明渠水深沿程变化情况如图 5 所示。

由图 5 可知, 水位整体趋势为: 由于植被影响, 植被区前部出现壅水, 水位最大值出现在植被区前端。植被区中后段水位沿程下降, 最低水位出现于植被后段, $x = 150$ cm 时植被影响消失。控制流量与水深相同条件下, 植被密度越大则水位壅高越大, 而水深与植被密度相同条件下, 随流量增加水位壅高相应增加。

3.2 含柔性植被明渠水流的流速

以植被在水下倒伏后高度 h_v 作为垂向特征长度, 以 $Q = 9$ m³/h 时的平均流速 $u_0 = 0.052$ m/s 作为特征流速进行无量纲化, 即 $U = u/u_0$, $V = v/u_0$, $W = w/u_0$, $H = h/h_v$ 。

3.2.1 纵向流速分布分析 图 6 为不同流量各植被密度下各观测断面纵向流速的垂向分布。通过试验发现, 水流稳定时(以图 6 中 4[#] 断面为例)流速的垂向分布可分为 3 个区: 自由水面区、中间冠层区和近床面区。自由水面区由植被冠层顶部(1.0 h/h_v) 到自由水面(2.0 h/h_v); 中间冠层区由植被叶片起始处(0.24 h/h_v) 到冠层顶部(1.0 h/h_v); 近床面区由槽底至叶片起始处(0 ~ 0.24 h/h_v)。速度分区与柔性植被的形状相关。

植被区(0 ~ 1.0 h/h_v) 流速分布复杂, 2[#]、3[#] 断面流速波动且呈现“S”型分布, 水流至 4[#] 断面流速趋于稳定, 速度呈现“C”形分布。近床面区(0 ~ 0.24 h/h_v) 流速随高度增高而增加, 分布近似垂线, 因为植物茎干对水流的阻碍较小。中间冠层区(0.24 ~ 1.0 h/h_v) 流速近似对数分布, 并存在拐点。此区域叶片阻流面积最大, 水流受到阻碍后流速减小。自由水面速度呈近似对数分布, 因叶片阻碍, 使水流向上流动且流速增大。自由水面区流速随植被密度增大而增大。

由图 6 可知, 流速随流量增大而增大, 不同流量下纵向流速垂向分布具有相似的规律。 $Q = 15$ m³/h 时 2[#]、3[#] 断面流速略有波动, 至 4[#] 断面流速趋于稳定, $Q = 9$ m³/h 时水历经 3[#] 断面的流速已趋于稳定。

3.2.2 纵向流速分布与经验公式对比分析 将流量 $Q = 15$ m³/h 的 4[#] 断面时均流速与 Chen 等^[11] 给出的经验公式进行对比。其公式为:

$$\frac{u}{u_0} = a + b \times C\left(\frac{h}{h_v}\right) \quad (1)$$

式中: u 为 z 垂直坐标处纵向时均流速, m/s; u_0 为平

均流速($u_0 = 0.087 \text{ m/s}$),m/s; z 为垂直坐标,cm; h_v 是倒伏的植物高度,cm; $C(h/h_v)$ 为 h/h_v 的函数,可以用不同的对数方程表示($\ln x/x, \ln x/x^2, \ln x, x^{0.5} \ln x, x \ln x, x^2 \ln x$, 其中 $x = h/h_v$); a 和 b 为常数。

表 2 为不同植被密度下各分区实测流速与经验公式(1)系数拟合结果,不同的对数方程表示不同斜率的流速分布曲线。

对表 2 中的拟合结果进行分析可知:自由水面区,随着 h/h_v 的变化,对数方程的斜率为 $\ln x/x^2 > \ln x/x > \ln x$ 。由拟合结果知,水流稳定时(4#断面)

不同密度速度与经验公式相关性较好。4#断面自由水面区水流稳定,速度垂向分布呈对数律。随着植物密度增大对数方程斜率增大,自由水面区流速梯度增大。中间冠层区,随着 h/h_v 的变化,对数方程的斜率则是 $x \ln x > x^{0.5} \ln x$ 。由拟合结果知,实测速度与经验公式相关性好。除密度为 $80 \text{ 株}/\text{m}^2$ 外,植被密度增大对数方程斜率增大,中间冠层区流速梯度增大。而近床面区的实测流速,与该经验公式相关性较差。可见,该经验公式在本实验条件下淹没度为 $0.25 \sim 2.0$ 时有较好的适用性。

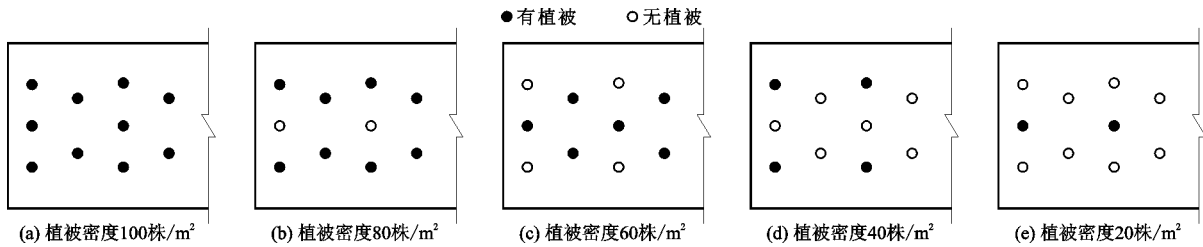


图 4 不同植被密度的植株布置方式

表 1 各试验工况基本物理量参数

工况	植被密度/ (株 · m ⁻²)	流量 Q / (m ³ · h ⁻¹)	水深 h / cm	倒伏植被高度 h_v /cm	淹没度	流速/ (m · s ⁻¹)	雷诺数
1	100	15	16.04	7.8	2.06	0.087	5889.95
2	80	15	16.03	7.8	2.06	0.087	5889.95
3	60	15	16.03	7.8	2.06	0.087	5889.95
4	40	15	16.03	7.8	2.06	0.087	5889.95
5	20	15	16.02	7.8	2.05	0.087	5889.95
6	100	9	16.03	7.9	2.03	0.052	3533.97
7	80	9	16.02	7.9	2.03	0.052	3533.97
8	60	9	16.02	7.9	2.03	0.052	3533.97
9	40	9	16.01	7.9	2.03	0.052	3533.97
10	20	9	16.01	7.9	2.03	0.052	3533.97

注:淹没度为水深与植被高度之比。

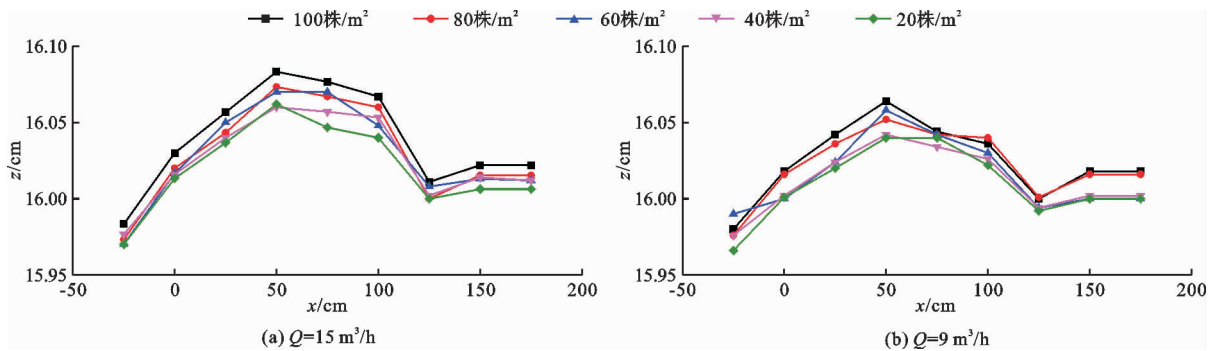


图 5 不同流量各植被密度下的明渠水深沿程变化

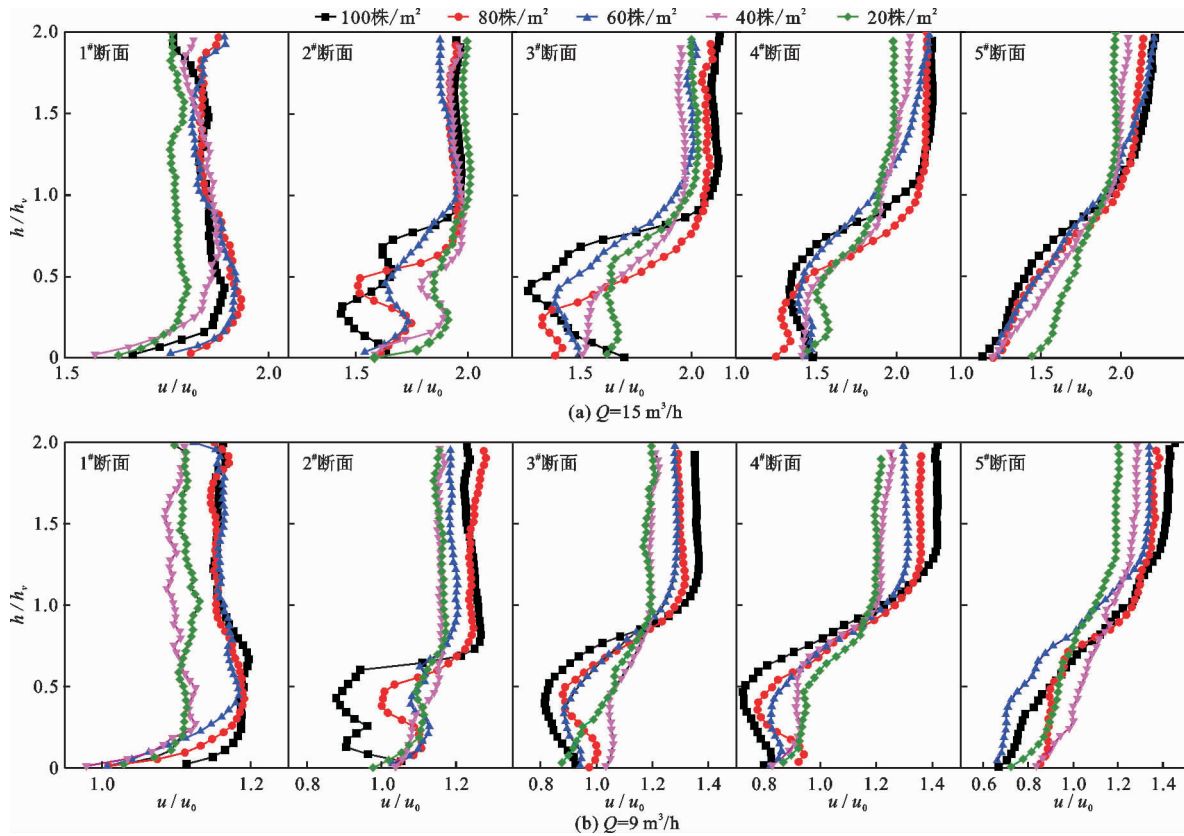


图6 不同流量各植被密度下各观测断面纵向流速的垂向分布

表2 经验公式(1)中的 a 、 b 、 $C(x)$ 的拟合结果

植被分区	植被密度株/m ²	a	b	$C(x)$	R^2
自由水面区	100	1.2401	0.4885	$\ln x/x^2$	0.9839
	80	1.2800	0.1615	$\ln x/x^2$	0.9468
	60	1.1188	0.5614	$\ln x/x$	0.9925
	40	1.1489	0.1644	$\ln x$	0.9701
	20	1.1235	0.2340	$\ln x$	0.9598
中间冠层区	100	1.2572	1.2806	$x \ln x$	0.9848
	80	1.3449	0.8831	$x^{0.5} \ln x$	0.9806
	60	1.1560	0.8686	$x \ln x$	0.9923
	40	1.20055	0.52991	$x^{0.5} \ln x$	0.9543
	20	1.15692	0.39839	$x^{0.5} \ln x$	0.93258
近床面区	100	0.88141	0.73311	$x^2 \ln x$	0.9691
	80	0.68717	-0.13378	$x^{0.5} \ln x$	0.61121
	60	0.84333	-0.0469	$x^{0.5} \ln x$	0.64317
	40	0.83879	-0.05612	$x \ln x$	0.91197
	20	0.81126	-0.41851	$x \ln x$	0.92327

3.3 水流的雷诺应力分布

雷诺应力分布反映了水流脉动造成的动量交换的剧烈程度。雷诺应力 τ 为：

$$\tau = -\overline{\rho u'w'} = -\rho \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u'_i w'_i \quad (2)$$

式中： u' 为 x 方向脉动流速，cm/s； w' 为 z 方向脉动流速，cm/s； ρ 为水的密度，g/cm³； N 为流速组数。

图7为不同流量各植被密度下各观测断面雷诺应力的垂向分布。由图7可知：(1)不同流量雷诺应力具有相似规律，植被区外1#断面的雷诺应力在槽底和水面较小而中部略大，中部因受到植被区冠层顶部剪切力的影响，雷诺应力略有增大。2#、3#、4#断面受叶片影响，雷诺应力在冠层顶部附近增大，水面与槽底方向逐渐减小。5#断面因无植物影响，雷诺应力迅速减小。(2)雷诺应力峰值在 $h/h_v = 0.8 \sim 0.9$ 附近，因为植被冠层顶端附近水质点掺混剧烈，不同水层动量交换最为剧烈。雷诺应力的最大值随密度增大而增大，最大值对应高度随密度增大而升高。(3)植被密度相同时，雷诺应力峰值随流量增大而增大，因流量改变引起流速、水流内部结构的改变，流速越大，柔性植被随流摆动越剧烈，不同水层动量交换也越剧烈。

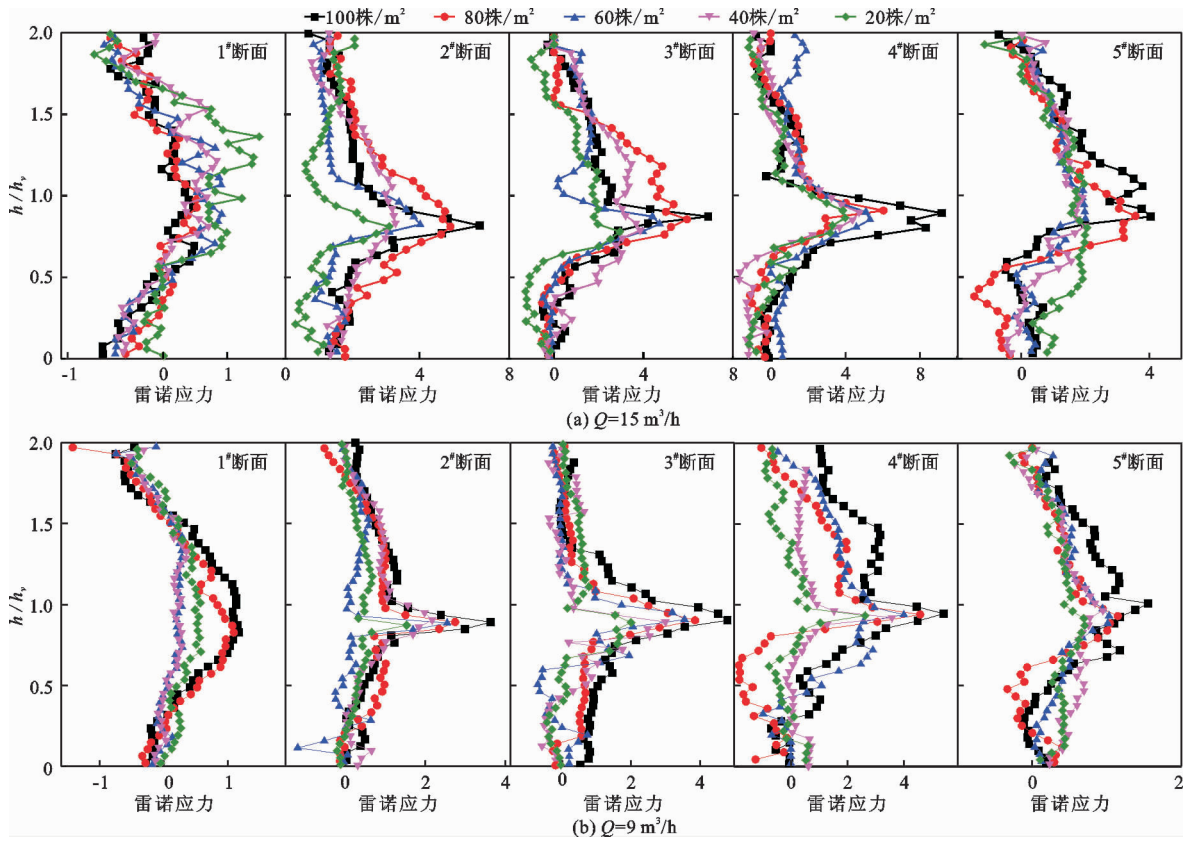


图 7 不同流量各植被密度下各观测断面雷诺应力的垂向分布

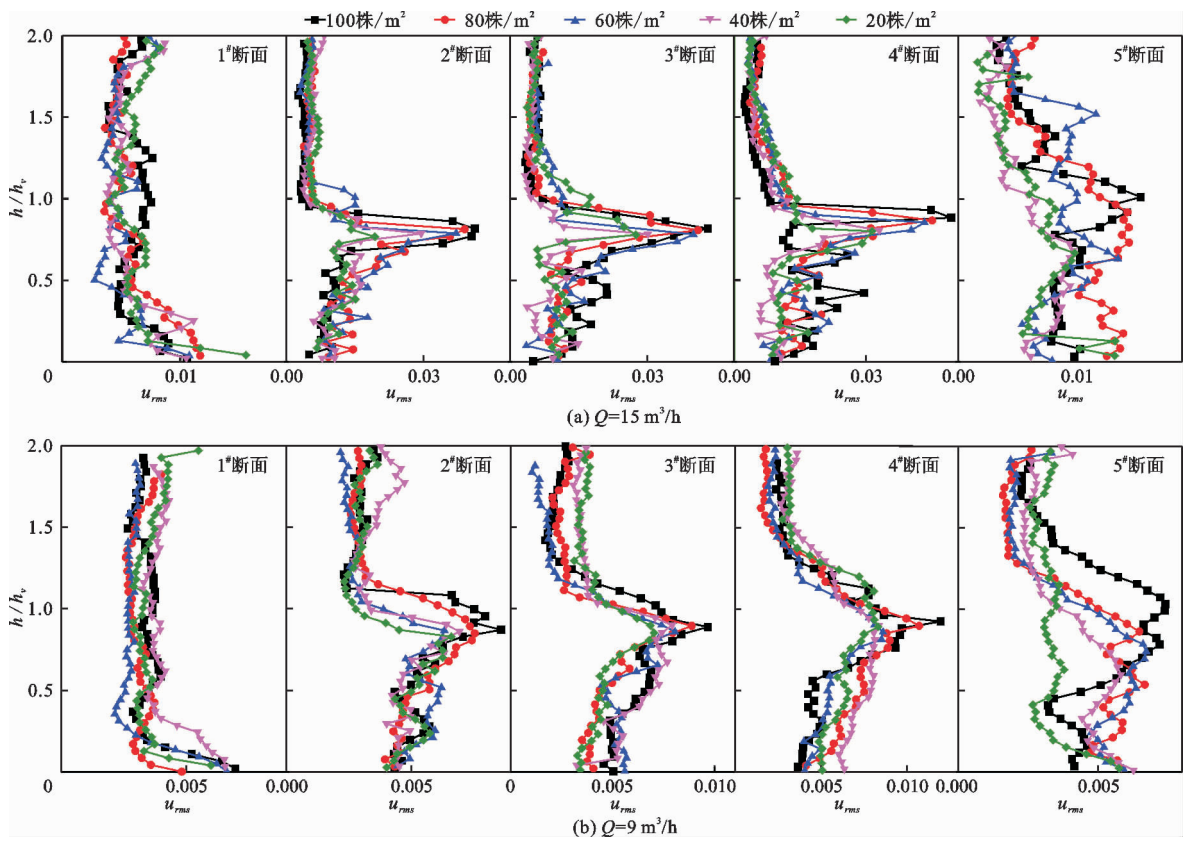


图 8 不同流量各植被密度下各观测断面紊动强度的垂向分布

3.4 水流的紊动强度分布

紊动强度反映流速脉动强弱程度。用脉动流速的均方根表示:

$$u_{rms} = \sqrt{u'^2} \quad (3)$$

式中: $u' = u - \bar{u}$ 为脉动流速, m/s; \bar{u} 为时均纵向流速, m/s; u 为纵向流速, m/s; $\bar{u'}$ 为 u'^2 的统计平均值。

图8为不同流量各植被密度下各观测断面紊动强度的垂向分布。由图8可知:(1)无植被1#断面紊动强度较小,槽底紊动强度较大是由于槽底粗糙度的影响。2#、3#、4#断面受叶片影响,紊动强度从槽底向上逐渐增大,在冠区顶部附近达到峰值。由冠层顶部到自由水面紊动强度逐渐减少。最大值位于 h/h_v 为 0.8~0.9 附近。无植被5#断面紊动强度减小。(2)紊动强度随植被密度增大而增大,因为植被随水流摆动改变水流紊动掺混,植被密度越大水流紊动掺混越剧烈。不同植被密度紊流强度分布相似,紊流强度峰值对应高度随密度增加而增高。(3)相同植被密度下,增大流量紊动强度及其峰值随之增大,由于流速随流量而增大,流速增大使植被随流摆动增强,植被冠层附近紊动掺混更剧烈。

3.5 柔性植被对糙率的影响

曼宁系数可反映明渠的粗糙情况。曼宁系数的计算公式为:

$$n = \frac{1}{v} R^{2/3} J^{1/2} \quad (4)$$

$$J = (z_1 - z_2 + \frac{v_1^2}{2g} - \frac{v_2^2}{2g})/L \quad (5)$$

式中: n 为曼宁系数; v 为断面流速, m/s; R 为水力半径, m; g 为重力加速度, m/s^2 ; J 为水力坡降; z_1 、 z_2 分别为上、下游断面水位, m; v_1 、 v_2 分别为上、下游断面流速, m/s; L 为上游至下游断面间的距离, m。

图9为不同流量下曼宁系数随植被密度的变化曲线,由图9可知,曼宁系数随植被密度增大逐渐增加,而随植被密度增大,曼宁系数的增幅略有减少。相同水深、植被密度条件下,流量增加曼宁系数略有增大。

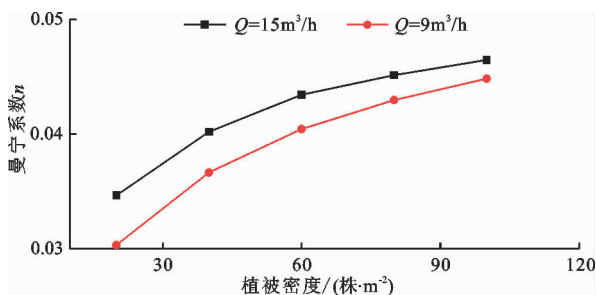


图9 不同流量下曼宁系数随植被密度的变化曲线

4 结论

(1)可将含淹没柔性植被水流流速分布分成3个区,分别为自由水面区(1.0~2.0 h/h_v)、中间冠层区(0.24~1.0 h/h_v)和近床面区(0~0.24 h/h_v)。自由水面区流速符合对数律。中间冠层区与近床面区流速分布复杂,在植被区起始处流速呈“S”形分布。水流到植被区末端呈“C”形分布。

(2)自由水面区流速随植被密度增大而增大,中间冠层区与近床面区流速随植被密度减小而增大。因为大量叶片与茎干阻碍了水流流动,减小了中间冠层区与近床面区的流速,增大了自由水面区流速。

(3)含柔性植被水流的雷诺应力与紊动强度在中间冠层区明显增大,水流紊动掺混剧烈。在冠区顶部附近雷诺应力和紊动强度达到峰值,向水面与槽底方向逐渐减小,雷诺应力和紊动强度峰值随植被密度增大而增大。

(4)随植被密度增加,曼宁系数逐渐增加而增幅逐渐减小。相同水深、植被密度条件下,流量增加曼宁系数略有增大。

参考文献:

- [1] 梁开明,章家恩,赵本良,等. 河流生态护岸研究进展综述[J]. 热带地理,2014,34(1):116-122+129.
- [2] GHISALBERTI M, NEPF H. Mass transport in vegetated shear flows[J]. Environmental Fluid Mechanics, 2005,5(6):527-551.
- [3] 王村,王超. 含挺水植物和沉水植物水流紊动特性[J]. 水科学进展,2010,21(6):816-822.
- [4] WANG Hao, TANG Hongwu, ZHAO Hanqing, et al. Incipient motion of sediment in presence of submerged flexible vegetation[J]. Water Science & Engineering, 2015,8(1):63-67.
- [5] HARVEY J W, SCHAFFRANEK R W, NOE G B, et al. Hydroecological factors governing surface water flow on a low-gradient floodplain[J]. Water Resources Research, 2009,45(3):274-293.
- [6] LIU Chao, NEPF H. Sediment deposition within and around a finite patch of model vegetation over a range of channel velocity[J]. Water Resources Research, 2016, 52(1):600-612.
- [7] ZENG Li, CHEN Guoqian, WU Zi, 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):4192-4209.

(下转第199页)

- regression optimized by multi-strategy artificial fish swarm algorithm[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, 83:425-436.
- [10] BONALDIP, FANELIM, GIUSEPPTI G. Displacement fore-casting for concrete dams via deterministic mathematical models[J]. *International Water Power & Dam Construction*, 1977, 29(9):143-148.
- [11] 吴中如,陈继禹,范树乎. 用反演分析法推求连拱坝混凝土的力学参数和断裂韧度[J]. *大坝观测与土工测试*, 1986(1):3-11.
- [12] 苏怀智,李季,吴中如. 大坝及岩基物理力学参数优化反演分析研究[J]. *水利学报*, 2007, 38(S1):129-134.
- [13] 龚晓雯,顾冲时. 基于改进粒子群算法的水口重力坝坝体参数反演[J]. *水电能源科学*, 2010, 28(2):72-74+77.
- [14] 魏博文,徐镇凯,李火坤,等. 基于GA-APSO混合罚模型的混凝土坝力学参数优化反演[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2015, 46(11):4211-4217.
- [15] HADI S, RIGOBERTO B. Emerging artificial intelligence methods in structural engineering[J]. *Engineering Structures*, 2018, 171:170-189.
- [16] SUN Pengming, BAO Tengfei, GU Chongshi, et al. Parameter sensitivity and inversion analysis of a concrete faced rock-fill dam based on HS-BPNN algorithm[J]. *Science China*, 2016, 59(9):1442.
- [17] ZHUANG D Y, MA K, TANG C A, et al. Mechanical parameter inversion in tunnel engineering using support vector regression optimized by multi-strategy artificial fish swarm algorithm[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, 83:425-436.
- [18] 刘健. 大坝安全监测资料分析中软计算方法的应用研究[D]. 天津:天津大学, 2005.
- [19] MIRJALILI S, LEWIS A. The whale optimization algorithm[J]. *Advances in Engineering Software*, 2016, 95:51-67.
- [20] 张冬冬. 混凝土重力坝材料参数反演方法研究[D]. 大连:大连理工大学, 2014.
- [21] GOLDBOGEN J A, FRIEDLAENDER A S, CALAMBOKIDIS J, et al. Integrative approaches to the study of baleen whale diving behavior, feeding performance, and foraging ecology[J]. *Bioscience*, 2013, 63(2):90-100.
- [22] 张永,陈锋. 一种改进的鲸鱼优化算法[J]. *计算机工程*, 2018, 44(3):208-213+219.

(上接第192页)

- [8] 槐文信,韩杰,曾玉红. 淹没柔性植被明渠恒定水流水力特性的试验研究[J]. *水利学报*, 2009, 40(7):791-797.
- [9] 惠二青,江春波,潘应旺. 植被覆盖的河道水流纵向流速垂向分布[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2009, 49(6):834-837.
- [10] CAROLLO F G, FERRO V, TERMINI D. Flow velocity measurements in vegetated channels[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2002, 128(7):664-673.
- [11] CHEN S C, KUO Y M, LI Y H, et al. Flow characteristics within different configurations of submerged flexible vegetation[J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 398(1-2):124-134.
- [12] YI Liping, WANG Ying, ANIM D O, et al. Flow characteristics in different densities of submerged flexible vegetation from an open-channel flume study of artificial plants[J]. *Geomorphology*, 2014, 204:314-324.
- [13] 闫静,唐洪武,田志军,等. 植物对明渠流速分布影响的试验研究[J]. *水利水运工程学报*, 2011(4):138-142.
- [14] 刘昭伟,陈永灿,朱德军,等. 灌木植被水流的流速垂向分布[J]. *水力发电学报*, 2011, 30(6):237-241.
- [15] THOKCHOM B D, ANURAG S, BIMLESH K. Flow characteristics in a partly vegetated channel with emergent vegetation and seepage[J]. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 2019, 19(1):93-108.
- [16] 吴福生,姜树海,周杰,等. 河漫滩湿地淹没柔性植物水流涡量场研究[J]. *水利学报*, 2010, 41(12):1469-1475.
- [17] NEPF H M, VIVONI E R. Flow structure in depth-limited, vegetated flow[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2000, 105(C12):28547-28558.
- [18] 槐文信,钟娅,杨中华. 明渠漂浮植被水流内部能量损失和传递规律研究[J]. *水利学报*, 2018, 49(4):397-403+418.
- [19] 武迪,赖建武,张英豪,等. 苦草对明渠水流运动特征影响的试验[J]. *水电能源科学*, 2014, 32(2):110-113+174.
- [20] ZHAO Fang, HUAI Wenxin. Hydrodynamics of discontinuous rigid submerged vegetation patches in open-channel flow[J]. *Journal of Hydro-environment Research*, 2016, 12:148-160.