

双层刚性植被水流水动力学特性试验研究

喻晋芳, 张潇然, 陈甜甜, 张颖, 赵明登

(武汉大学水利水电学院, 武汉, 430072, Email: mdzhao@whu.edu.cn)

摘要: 在顺直型的矩形玻璃水槽中进行了双层刚性植被水流试验, 采用两种不同高度的木筷模拟直径沿水深方向变化的植被。利用 MicroADV 量测三维瞬时流速, 分析了植被高度、植被密度、排列方式对水流内部结构及纵向时均流速、紊动强度、雷诺应力沿垂向和纵向分布规律的影响。结果表明, 在低淹没度条件下, 水流水动力学特性沿垂向分布规律受植被密度、排列方式影响较大。在高淹没度条件下, 水流水动力学特性在高、低植被后沿垂向分布规律相似, 且受植被密度影响较大, 受排列方式影响很小。不论在何种淹没度下, 紊动强度总存在“纵向紊动强度大于横向紊动强度大于垂向紊动强度”的关系, 且稀疏植被密度下的双层刚性植被水流紊动强度沿纵向分布更均匀。

关键词: 双层刚性植被; 纵向流速; 紊动强度; 雷诺应力; 水槽试验

1 引言

水生植物在保护与修复河流生态环境中发挥着重要作用, 植物的存在改变了水流内部紊动结构特性, 直接影响了河流泥沙和污染物的扩散输移运动。因此在保证航运和行洪的前提下, 合理选择植被类型、合理布置水生植被能有助于解决相关的水环境问题, 对于人工湿地和生态河道建设、河道水环境治理与修复具有重要的实际意义。

国内外许多学者通过物理试验和数学模型两种方法对含单一植被类型的明渠水流进行了大量研究, 主要研究内容包括时均流速、紊动强度、涡量、紊动能、植被阻力等水动力学特性, 取得了丰硕成果。Stone 等^[1]对分别含挺水和淹没刚性圆柱体的水流进行了水槽实验研究, Huthoff 等^[2]、槐文信等^[3,4]、Fischer-Antze 等^[5]对淹没刚性植被水流平均流速沿垂向分布进行了数值研究。Nepf^[6]、Zhang et al.^[7]对挺水植被明渠流动进行了数值研究, 王村^[8]通过水槽实验分别对流经刚性植被和柔性植被的水流紊动特性进行了分析, Nepf 和 Vivoni^[9]、Tsujiimoto 等^[10]等分别对柔性植被水流运动进行了水槽实验和数值模拟研究。Liu 等^[11]利用 LDV 研究了双层刚性植被水流的平均流速和紊动强度分布规律。赵芳等^[12]

基金项目: 国家自然科学基金项目“多层植被作用的水流运动及物质输移规律研究”(51479154)。

基于 PIV 研究了流量、水深和植被排列方式对双层刚性植被水流流速和紊动特性的影响。Abdolahpour et al.^[13]研究了植被柔韧性对水流流动、紊动特性和垂向动量混合的影响。

本文通过矩形水槽实验，采用两种不同高度的木筷模拟直径沿水深方向变化的植被，利用 MicroADV 量测三维瞬时流速，讨论了在高低两种淹没度的水流条件下，植被密度、排列方式对水流纵向流速、紊动强度和雷诺应力沿垂向分布规律的影响，并探究高植被和低植被分别对水流内部结构的影响，分析了其水动力学特性沿纵向分布规律。

2 试验概况

本试验水槽长 20m，宽 1m，高 0.5m。通过槽首的电磁流量计控制流量大小，水流经过蜂窝煤状塑料套管消能后稳定进入水槽，具体试验布置如图 1。水深大小通过尾水闸控制，调整上下游水位差 $\leq 1\text{mm}$ 。采用高度不同的木筷模拟直径沿水深方向变化的高低刚性植被，长木筷长 25cm，短木筷长 16cm，底部直径均为 7.5mm，顶部直径分别为 4mm 和 2.6mm，植被固定于素混凝土板上。

试验包含四种不同的布置方式：并列稠密(A)、并列稀疏(B)、交错稠密(C)、交错稀疏(D)，两种水深条件： $16\text{cm} \leq h \leq 25\text{cm}$ ，即 YTTY 代表高植被挺水、低植被淹没的低淹没度条件； $25\text{cm} \leq h \leq 50\text{cm}$ ，即 SY 代表高低植被均淹没的高淹没度条件，共 16 个试验工况。在水槽中心处设置了总长为 5.5m 的植被带，分别在高低植被后设置 3 条测垂线。采用 MicroADV 测得三维瞬时流速，筛得 $\text{COR} \geq 80$ 的 n 个流速数据，并利用 Matlab 软件对其进行时均化处理，再进行无量纲化数据分析，得出结论。

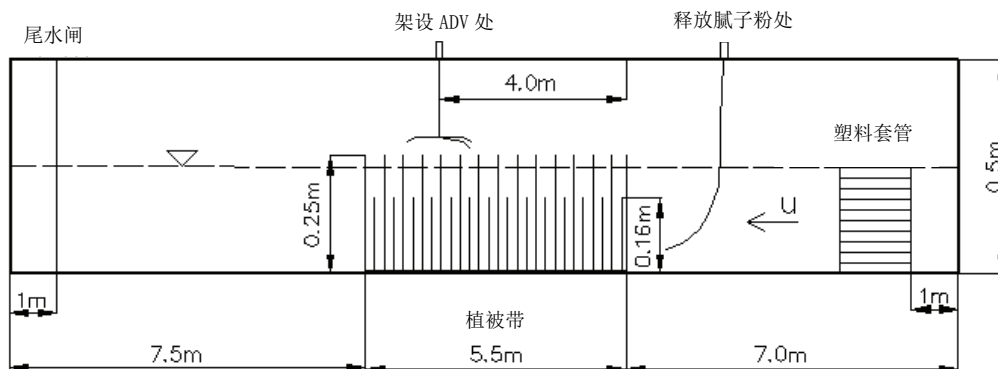


图 1 试验装置示意图

3 分析与讨论

3.1 双层刚性植被对水流纵向流速的影响

低淹没度下的双层刚性植被水流的纵向流速垂向上在低植被层顶部附近至粘性底层的水深范围内大体呈指数曲线。交错稀疏工况下高植被层范围内的纵向流速呈“3”型变化，且高植被后和低植被后的纵向流速变化规律基本一致，纵向流速沿纵向分布均匀。而在另外三种布置方式下，高植被后的纵向流速沿垂向分布相较于低植被后更均匀。并且交错排列下的水流纵向流速沿垂向分布更均匀，低植被层顶部对水流的阻滞作用更为明显，引起纵向流速出现突降；稀疏布置下的水流纵向流速数值更小，且沿纵向分布更均匀，至于接近水面处出现的流速值发生较强的紊动，可以理解为是上层水体与高植被有更充分的空间相互作用，从而产生界面波和水流阻力，引起水流结构发生较强的紊动，且流速减小。

在高淹没度下的双层植被水流，高植被后和低植被后的纵向流速沿垂向分布图相同，均在高植被层和低植被层顶部存在拐点；除接近水面处和黏性底层区以外，纵向流速分布图均收敛于对数曲线，在高植被层顶部附近至接近水面范围内变化梯度最大，低植被层顶部附近至接近渠底范围内变化梯度最小；相同植被密度下的纵向流速分布曲线相同，与排列方式无关；在稠密工况下，接近水面处的流速分布存在拐点，且黏性底层区域较不明显，这是由于植被密度较大引起了水面波动且水流阻力较大的缘故。

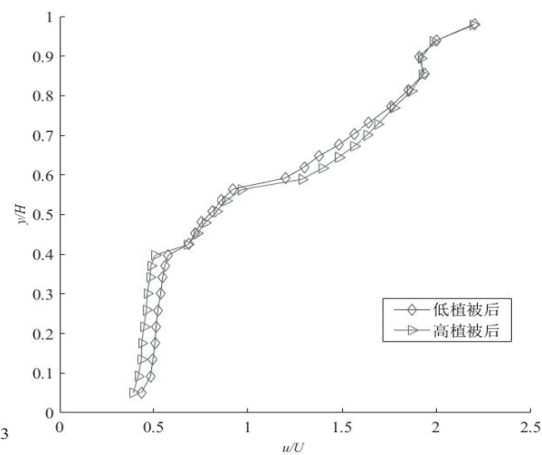
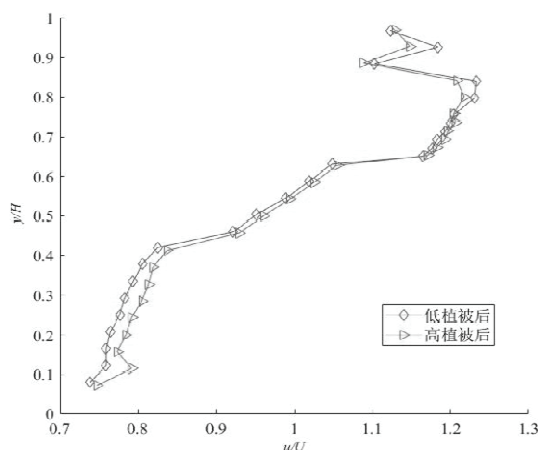


图2 YTYD2 高低植被后纵向流速对比图 图3 SYA2 高低植被后纵向流速对比图

3.2 双层刚性植被对水流紊动强度的影响

在低淹没度条件下，不论在高植被后还是低植被后，八种工况条件下的紊动强度均存在 $T_x > T_y > T_z$ 的规律，且纵向相对紊动强度变幅总是最大，这是由于垂向统计尺度受水深限制，纵向统计尺度受流速影响很大。在高植被后和低植被后的紊动强度沿垂向分布规律不尽相同，高植被处于挺水状态、低植被处于淹没状态，水流结构较为复杂。紊动强度最

大值总位于低植被层顶部至水面区域，该区域存在较强的质量和动量交换，引起的水流紊动较大。

相同植被密度下，并列排列的双层刚性植被水流中高植被后的紊动强度沿垂向分布相比起低植被后更均匀。相同排列方式下，从低植被层顶部至水面处，稀疏工况下相对紊动强度突增并持续增大，而稠密工况下则单调递减，这是因为植被密度较大的情况下植被阻力也较大，而在植被密度较小的情况下，上层水体与高植被有更充分的空间相互作用，从而产生紊流涡，引起水流结构发生较强的紊动；另外，稀疏工况下双层刚性植被水流的紊动强度沿纵向分布更均匀，且植被密度越大，紊动强度最大值约接近低植被层顶部。

在高淹没度条件下，紊动强度最大值位于高植被层顶部附近，且同样存在 $T_x > T_y > T_z$ ， T_x 变幅最大。高植被层顶部以上，紊动强度随水深增大而减小，高植被层顶部以下，紊动强度随水深增大而增大；在低植被层顶部至高植被层顶部范围内，紊动强度大体随水深增大而增大；低植被层顶部以下紊动强度变化梯度相比起该位置以上较小，且 T_y 、 T_z 均呈“J”形半对数分布。稠密布置的并列工况下低植被后的紊动强度沿垂向分布均匀，交错工况下高植被后的紊动强度分布均匀，且并列排列工况低植被后的紊动强度分布与交错排列工况高植被后的变化规律基本一致。在同样排列方式下，稀疏工况下紊动强度分布近似呈“S”形曲线，稠密工况下的紊动强度分布图在靠近水面处均出现一个拐点；在低植被层顶部至高植被层顶部范围内，稠密工况下的紊动强度分布近似呈指数曲线；稀疏植被密度下紊动强度更小，沿纵向分布均匀，并且植被密度越大，紊动强度最大值越接近高植被层顶部。

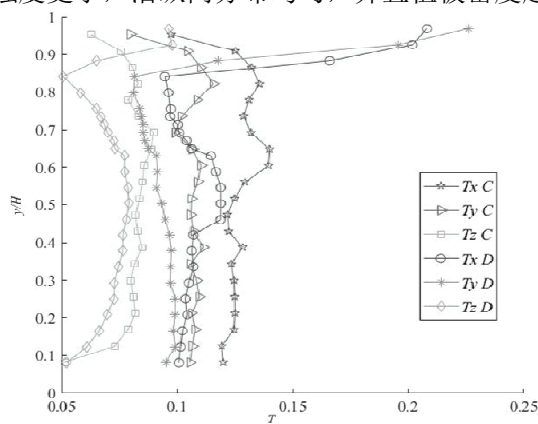


图4 低淹没度下交错工况低植被后紊动强度

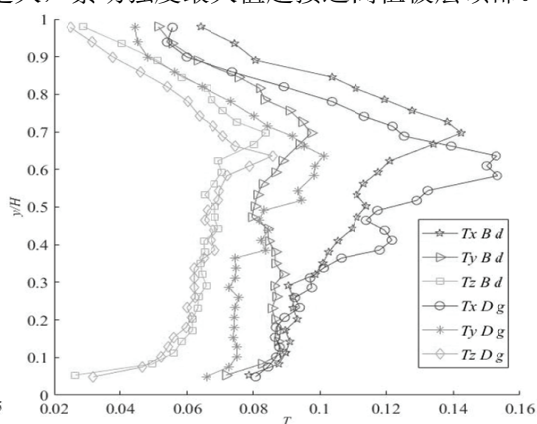


图5 高淹没度下稀疏工况植被后紊动强度

3.3 双层刚性植被对水流雷诺应力的影响

在低淹没度条件下，不论何种工况，双层刚性植被水流中高植被后和低植被后三向雷诺应力均存在以下关系： $S_x > S_z > S_y$ ，且在稠密植被布置下三者均在低植被层顶部以上单调递减且在水面处趋于 0，这是因为受到高植被产生的阻力的影响，而在稀疏工况下由于高植被后具有充分的空间发展紊流涡，在低植被层顶部以上存在较强的质量交换，雷诺应力值较大。另外在相同排列方式下，稠密布置的植被水流中 S_y 和 S_z 相较于稀疏工况更为

接近，稀疏布置下纵向雷诺应力沿纵向分布更为均匀；同在稀疏工况下，并列排列方式下在高植被后分布更均匀，交错排列方式下双层植被水流的三向雷诺应力在低植被后分布更均匀。在高淹没度条件下，在各种工况条件下垂向雷诺应力 S_z 均在高植被层顶部附近取到最大值，在低植被层顶部附近存在一个拐点。相同排列方式下，稀疏布置植被水流中三维雷诺应力较小，且沿垂向分布更均匀；并且在高植被层顶部至水面处，稠密布置下垂向雷诺应力沿垂向分布存在极小值点，稀疏工况下则呈单调递减。

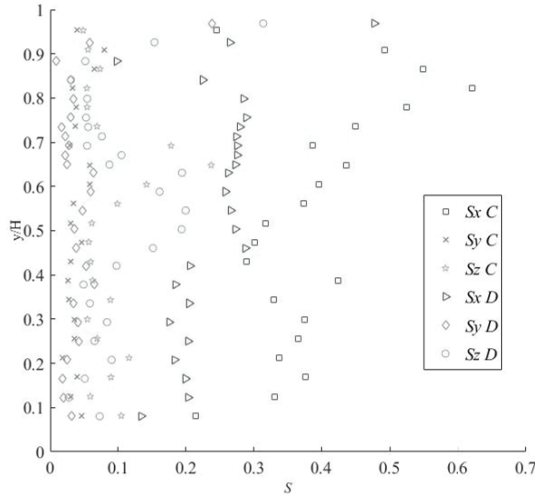


图6 低淹没度下交错工况低植被后雷诺应力

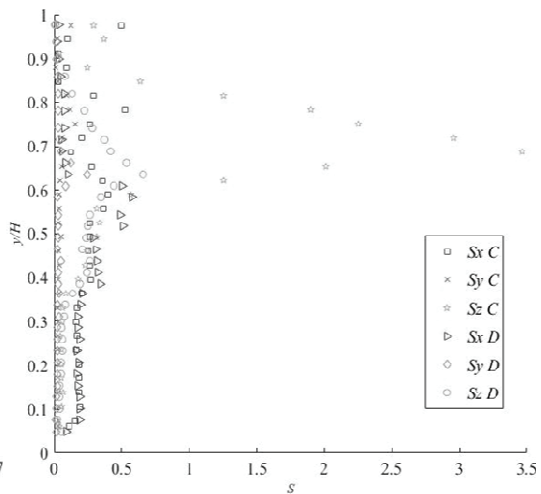


图7 高淹没度下交错工况高植被后雷诺应力

4 结论

本文通过试验探讨了双层刚性植被水流在高低两种淹没度条件下，植被密度、排列方式对植被水流水动力学特性规律的影响，结果表明：在低淹没度条件下，水流水动力学特性沿垂向和纵向分布规律受植被密度、排列方式影响较大。在高淹没度条件下，水流水动力学特性沿垂向分布在高、低植被后分布规律相似，且受植被密度影响较大，受排列方式影响很小。不论何种淹没度，总存在“纵向紊动强度大于横向紊动强度大于垂向紊动强度”的关系，且稀疏植被密度下的双层刚性植被水流紊动强度沿纵向分布更均匀。

参 考 文 献

- 1 Stone B.M., Shen H.T..Hydraulic resistance of flow in channels with cylindrical roughness[J]. Journal of the Hydraulic engineering-asce, 2002,128(5):500-506.
- 2 Huthoff F., AugustijnD.C.M.,Hulscher S.J.M.H..Analytical solution of the depth - averaged flow velocity in case of submerged rigid cylindrical vegetation[J]. Water Resources Research, 2007,43(6):129-148.
- 3 Huai W.X., Zeng Y.H., Xu Z.G., Yang Z.H.Three-layer model for vertical velocity distribution in open channel flow with submerged rigid vegetation[J]. Advances in Water Resources, 2009,32(4):487-492.

- 4 槐文信, 韩杰, 曾玉红, 安翔. 基于掺长理论的淹没柔性植被水流流速分布研究 [J]. Applied Mathematics and mechanics, 2009,3:325-332.
- 5 Fischer-Antze T., Stoesser T., Bates P., Olsen N.R.B.. 3D numerical modelling of open-channel flow with submerged vegetation[J]. Journal of Hydraulic Research/De Recherches Hydrauliques, 2001,39(3):303-310.
- 6 H. M. Nepf. Drag, turbulence, and diffusion in flow through emergent vegetation[J]. Water resources research, 1999,35(2):479-489.
- 7 Zhang J.X., Liang D.F., Fan X., Liu H.. Detached eddy simulation of flow through a circular patch of free-surface-piercing cylinders[J]. Advances in Water Resources, 2019, 123: 96-108.
- 8 王村. 有植被的河道水流试验研究[D]. 河海大学, 2003.
- 9 Nepf H.M., Vivoni E.R.. Flow structure in depth-limited, vegetated flow[J]. Journal of geophysical research-oceans, 2000, 105(12):28547-28557.
- 10 Tsujimoto T., Kitamura T.. A model for flow over flexible vegetation-covered bed[J]. International Water Resources Engineering Conference, 1998, 556-561.
- 11 Liu D., Diplas P., Hodges C. C., Fairbanks J.D.. Hydrodynamics of flow through double layer rigid vegetation[J]. 40th Binghamton Geomorphology Symposium, 2010, 116(3-4):286-296.
- 12 赵芳, 槐文信, 胡阳, 王伟杰. 双层刚性植被明渠水流特性实验研究 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2015, (1):85-90.
- 13 Abdolhahpour M., Ghisalberti M., McMahon K., Lavery P.S.. The impact of flexibility on flow, turbulence, and vertical mixing in coastal canopies[J]. Limnology And Oceanography, 2018, 63(6):2777-2792.

Experimental study on the hydrodynamic characteristics in open channel flow with double-layer rigid vegetation

YU Jin-fang, ZHANG Xiao-ran, CHEN Tian-tian, ZHANG Ying, ZHAO Ming-deng
(School of Water Resources and Hydropower, Wuhan University, Wuhan, 430072.
Email: mdzhao@whu.edu.cn)

Abstract: Experiment of open channel flow with double-layer rigid vegetation was carried out in a rectangular straight glass sink. Two kinds of wood chopsticks with different heights were used to simulate the vegetation whose diameter changes along the water depth direction. The three-dimensional instantaneous velocities were measured by MicroADV. After the effects of vegetation height, vegetation density and arrangement on the internal structure of the flow and the longitudinal velocity, turbulence intensity and Reynolds stress along the vertical and longitudinal distribution were analyzed, the results show that under the condition of low submergence, the hydrodynamics of the flow along the vertical and longitudinal direction were greatly affected by vegetation density and arrangement. And under the condition of high submergence, the hydrodynamic characteristics of the flow are similarly distributed along the vertical distribution in the high and low vegetation, and are affected by the vegetation density, which is little affected by the arrangement. Regardless of the submergence degree, there is always a relationship between the turbulence intensity “longitudinal turbulence intensity is greater than the lateral turbulence intensity than the vertical turbulence intensity”, and the turbulent intensity of the double-layer rigid vegetation under sparse vegetation density is more evenly distributed along the longitudinal direction.

Key words: Double-layer Rigid Vegetation; Longitudinal Velocity; Turbulence Intensity; Reynolds Stress; Flume experiment