

生态河道种植圈对水流水力特性的影响

朱红钧, 赵振兴

(河海大学 环境科学与工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 采用三维超声波多普勒测速仪对河道生态修复中种植圈布设前后的工况量测, 比较了布设种植圈前后的流速分布、紊动强度和雷诺应力的变化. 结果表明, 布设种植圈后, 纵向流速分布波动明显, 相对紊动强度和雷诺应力均略有增加.

关键词: 生态河道; 水力特性; 种植圈; 流速分布; 紊动强度; 雷诺应力

中图分类号: TV133

文献标识码: A

文章编号: 1009-640X(2007)01-0031-05

Influences of cropping loops in ecological river on hydraulic behavior of flow

ZHU Hong-jun, ZHAO Zhen-xing

(College of Environment and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: By using the three-dimension acoustic Doppler velocimeter to measure velocities of flow in an ecological river before and after arrangement of cropping loops, the velocity distribution, turbulence intensity and Reynolds stress before and after arrangement of cropping loops are compared. Results show that the longitudinal velocity distribution fluctuates significantly, and that the relative turbulence intensity and Reynolds stress have a little increase.

Key words: ecological river; hydraulic behavior; cropping loop; velocity distribution; turbulence intensity; Reynolds stress

随着生态河道的发展,在河道岸边植被护坡和河中“植被岛”的出现会改变河道中原先的水流结构,给治理河道带来了新的问题.采用种植圈可框束河道中漂浮水生植物过强的繁殖,控制水生植物的生长范围.但种植圈对河道的水流必定有影响,这是河道生态修复工程必须面对和解决的问题.目前,对河道水流紊动特性的研究工作已有不少^[1-6],本文则通过实验室中的水槽模型试验,利用三维超声波多普勒测速仪对水槽水流进行了多工况量测,从流速分布、紊动强度和雷诺应力等分析种植圈对水流水力特性的影响.

1 试验装置与试验方法

1.1 试验装置

本试验在河海大学水力学及流体力学国家重点实验室的水槽中进行,水槽由PVC塑料板焊接而成.水槽长9.95 m,宽0.98 m,高0.5 m,水槽壁厚1 cm.水槽纵向底坡 $i=0.001$.槽首贮水池的尺寸为1.335 m×0.98 m(长×宽),贮水池由矩形薄壁堰与水槽隔开,池壁设有测压管以测堰上水头.槽内水体通过单向潜水电泵

收稿日期: 2006-07-14

作者简介: 朱红钧(1983-),男,江苏靖江人,主要从事环境流体力学的研究.

可循环使用.沿水槽纵向将铁丝网制成的种植圈(圈高 450 mm)固定在水槽底部,两个种植圈之间用红色鱼网线牵拉,鱼网线的根数和牵拉位置视具体水深而定,本试验用了 3 根鱼网线,它们距水槽底的高度分别为 20、25 和 30 cm(见图 1).铁网格的尺寸为 2.5 cm×2.5 cm,铁丝与鱼网线的直径均为 1 mm.

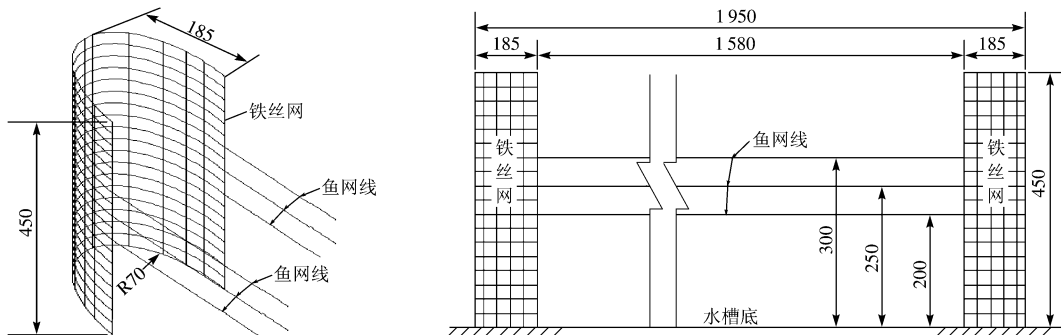


图 1 种植圈(单位:mm)
Fig. 1 Sketch of the cropping loop (unit:mm)

试验采用的单点、高分辨率三维超声波多普勒测速仪(SonTek ADV),其最大的优点是可以测量水流的瞬时流速. ADV 仪器由控制组件、信号处理组件和量测探头组成,ADV 信号及试验数据由专门软件 ADVLAB 进行处理,其结果以 ASC II 码文本文件输出^[7,8].

1.2 试验方法

先对未设种植圈的矩形光滑水槽进行测速.然后,对设有种植圈的水槽进行测速.流量为 $Q_1(W_1)$, $Q_2(W_1)$ 和 $Q_3(W_1)$,且 Q_3 条件下另选两个水量 $Q_3(W_2)$ 和 $Q_3(W_3)$,以达到水深的变化.试验工况见表 1.

表 1 试验工况

Tab. 1 Experimental conditions

试 验 组 次	量水堰 水头 / cm	流 量 Q / ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	尾部稳定 断面水深 / cm	断面平 均流速 / ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	水温 / $^{\circ}\text{C}$	气温 / $^{\circ}\text{C}$	雷诺数 Re	佛劳德数 Fr
$Q_1(W_1)$	3.0	0.011 2	23.5	4.86	8	10	5 542	0.0320
$Q_2(W_1)$	2.9	0.010 7	23.5	4.65	8	9	5 300	0.0306
无种植圈矩形水槽 $Q_3(W_1)$	2.8	0.010 2	23.7	4.39	8	9	5 038	0.0288
$Q_3(W_2)$	2.8	0.010 2	25.5	4.08	8	9	4 916	0.0258
$Q_3(W_3)$	2.8	0.010 2	27.0	3.86	10	14	5 130	0.0237
$Q_1(W_1)$	3.0	0.011 2	24.5	4.86	13	18	6 390	0.0320
$Q_2(W_1)$	2.9	0.010 7	24.5	4.55	13	17	6 068	0.0297
有种植圈矩形水槽 $Q_3(W_1)$	2.8	0.010 2	24.5	4.34	13	19	5 784	0.0283
$Q_3(W_2)$	2.8	0.010 2	26.5	4.00	14	15	5 790	0.0251
$Q_3(W_3)$	3.0	0.011 2	27.5	4.86	13	17	5 542	0.0320

水槽内种植圈、测速断面及测速垂线的布置见图 2. 试验选取 3 个流量(Q_1 , Q_2 和 Q_3),其中的 Q_3 又有 2 个水量,共 5 个组次,测量断面垂线流速.测速断面有 5 个,种植区的前、中、后部各选 1 个(断面 1、断面 2 和断面 3),种植区间选取 2 个(断面 4 和断面 5).在 1、2 和 3 断面上选取 3 根测速垂线,由于种植圈的影响,种植区间的断面 4 和断面 5 只选取中间垂线测速.根据试验时的水深确定测速垂线上的测点数(宜每隔 0.8~2.0 cm 选取一个测点).试验中,利用 ADV 测速仪测量不同位置、不同流量、不同水深的瞬时流速,以分析时均流速、紊动强度和雷诺应力的垂向分布.

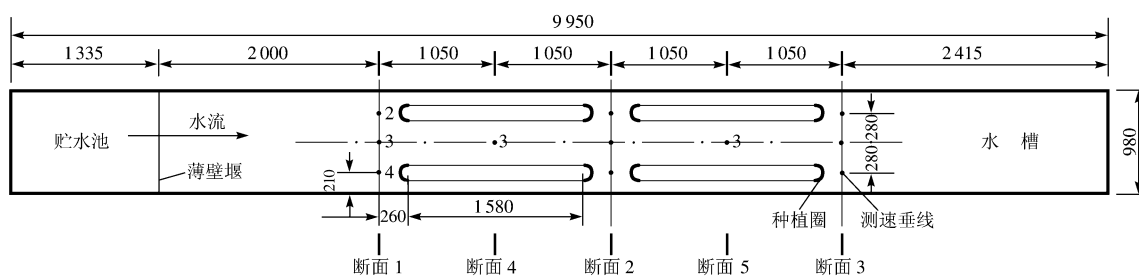


图2 水槽内种植圈、测速断面及测速垂线的布置 (单位: mm)

Fig. 2 Location of the cropping loops, velocity sections and velocity lines in the flume (unit: mm)

2 流速分析

2.1 时均流速与采样时长关系

根据 ADV 测速仪的性能,本试验中超声波发射频率调节为 50 Hz,故采集到的数据不是瞬时值,而是所设定的 $\Delta t=0.02$ s 范围内采样的平均值,本文将该值近似视为瞬时值. 时均流速

$$U = \frac{1}{t} \int_{T_0}^{T_0+t} \tilde{U}(T) dT$$

其中: $\tilde{U}(T)$ 为 T 时刻的瞬时流速; T_0 为初始时刻; t 为采样时间.

可见,时均流速与采样时长有关,采样时长不同,对应的时均流速也有所不同. 以流量 $Q1$ 为例,有、无种植圈时断面 1 垂线 3 的时均流速与采样时长的关系见图 3(其中的测速点相对水深 $Y = y/h$, y 为测点水深; h 为水槽水深). 可见,采样时长小于某一临界值时,时均流速波动很大,只有大于该临界值后,波动才会变缓,并趋于一常值. 本试验中的临界值约为 25 s,故选择采样时长为 30 s,每个测点瞬时流速的均值为时均流速,其在 x, y 和 z 三个方向的分量分别为 u, v 和 w .

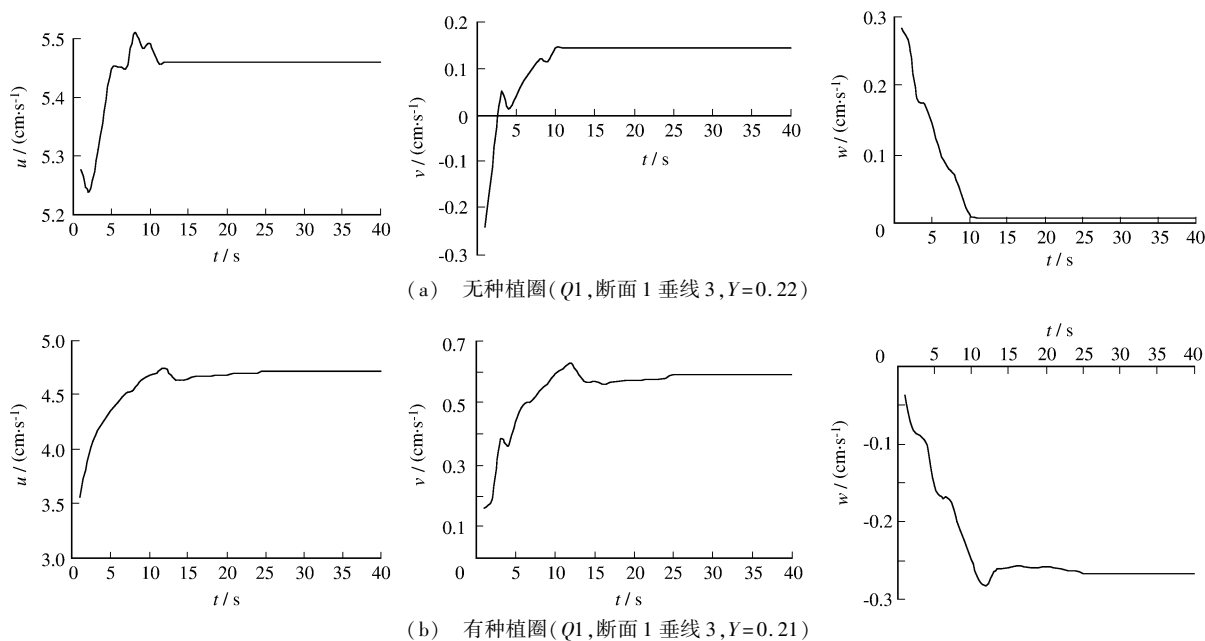


图3 时均流速随采样时长变化

Fig. 3 Variation of the average velocity with the measuring time

2.2 时均流速垂线分布

流量 $Q1$ 条件下、有种植圈时,断面 1 的时均流速沿垂向分布见图 4. 可见,横向和垂向流速较小,且左右

波动较小,流速大致在0值附近徘徊;纵向流速整体上随测点相对水深 Y 的增加而增大,但左右波动明显,主要是受种植圈(铁丝网)的影响,每隔约2.5 cm(恰为铁丝网格的间距)流速就会出现回跌.垂线2、4的纵向流速比垂线3小,水槽中间的过流流速比两边稍快;垂线2、4的横向、垂向流速变幅均大于垂线3,这是因为水槽边壁的粘滞和拖曳作用,造成水流在横向和垂向有细微的能量交换,从而产生一定的流速.

流量 $Q1$ 条件下,有、无种植圈时断面1的垂线3流速分布比较见图5.可见,种植圈对横向和垂向流速的影响不大,流速仍是在0值附近徘徊;纵向流速分布的变化较明显,但其均值沿垂线变化趋势和无种植圈时较一致.因此,种植圈对河道水流会有影响.

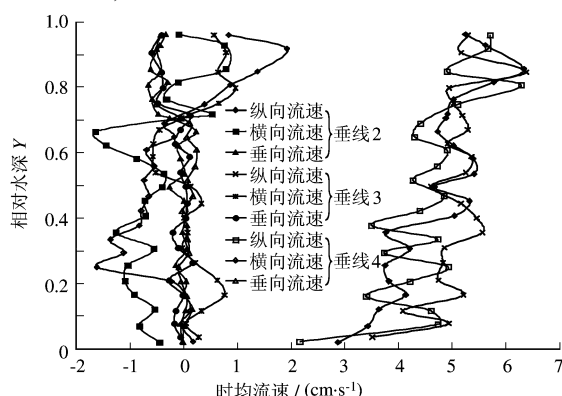


图4 有种植圈时断面1上3根垂线的时均流速分布($Q1$)

Fig. 4 Distribution of the average velocity of three velocity lines on #1 section with cropping loops ($Q1$)

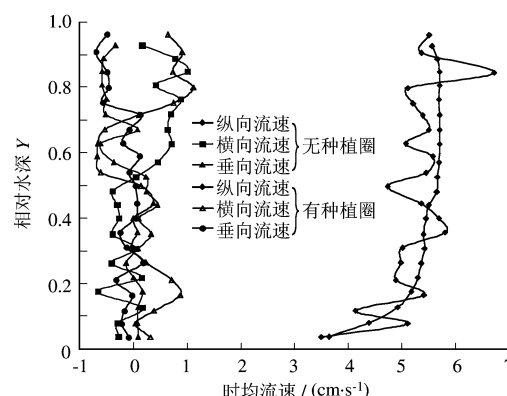


图5 有、无种植圈时均流速分布比较($Q1$, 断面1的垂线3)

Fig. 5 Comparison of the average velocity distribution with and without cropping loops ($Q1$, #3 line, #1 section)

3 相对紊动强度分布

本次试验中各工况的水流均为紊流状态.水流的紊动强度 $\sigma_{u_i} = \sqrt{u_i'^2}$ (u_i' 为脉动流速),紊动强度与相应

断面时均流速之比为水流的相对紊动强度 $T = \sqrt{u_i'^2} / \bar{u}$ ($\bar{u}$ 为时均流速,本文取整条垂线的时均流速).

有、无种植圈时断面2垂线3纵向相对紊动强度的比较见图6.可见,纵向相对紊动强度 T 集中在0.2~0.4范围内,垂线平均值约为0.3.种植圈对相对紊动强度的影响不大,只是垂线平均值略有增加,增幅小于0.05.布置种植圈后,相对紊动强度的分布范围大于布置前.当相对水深 $Y > 0.6$ 后,相对紊动强度快速增加.由于试验工况是紊流状态,水面有波动现象,越接近水面相对紊动强度也就越大,相对水深 Y 约为0.9时,相对紊动强度出现极值.

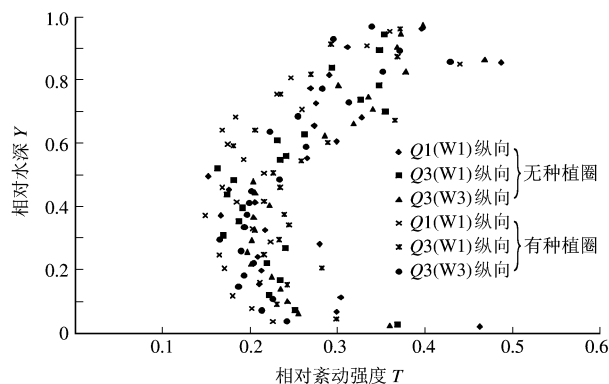


图6 有、无种植圈时纵向相对紊动强度比较(断面2垂线3)

Fig. 6 Comparison of the longitudinal relative turbulence intensity with and without cropping loops (#3 line, #2 section)

4 雷诺应力分布

雷诺应力 $\tau_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j}$ (ρ 为水的密度), 是由紊动水团的交换在流层之间产生的剪切应力^[2], 也表示由于紊动引起的平均动量流. 本文将对 $\tau'_{ij} = \tau_{ij}/\rho$ 进行研究.

有、无种植圈时断面2垂线3的雷诺应力 τ'_{ij} 沿垂线分布比较见图7. 可见, 雷诺应力的最大值出现在水槽底部(最大可达 $0.003\ 00\ \text{m}^2/\text{s}^2$), 最小值则在近水面(只有 $0.000\ 47\ \text{m}^2/\text{s}^2$). 布设种植圈后, 纵向雷诺应力有微小增加, 垂线均值增幅约为 $0.000\ 10\ \text{m}^2/\text{s}^2$ 左右, 其沿垂线的波动比无种植圈时大. 由图7还可见, 雷诺应力分布与流量和水量的大小有关, 由于流量和水量的变化直接改变了水深, 从而也改变了水流的内部结构, 同一垂线相同高度的雷诺应力也就不同, 随着流量的减小或水量的增大, 雷诺应力垂线分布平均值将变小.

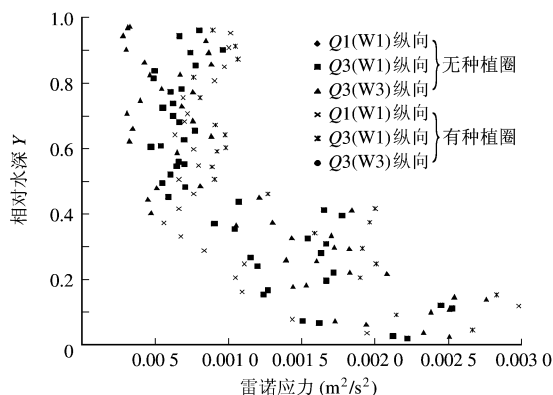


图7 有、无种植圈时纵向雷诺应力比较(断面2垂线3)

Fig.7 Comparison of the longitudinal Reynolds stress with and without cropping loops (#3 line, #2 section)

5 结 语

- (1) 流速采样要达到一定的时长, 才能保证时均流速稳定, 本试验中采样时长为 30 s;
- (2) 纵向时均流速分布波动明显, 种植圈后端的时均流速偏低;
- (3) 种植圈对相对紊动强度的影响不明显, 只是垂线平均值略有增加;
- (4) 水槽底部雷诺应力大、近水面处小, 布设种植圈后, 纵向雷诺应力有微小增加, 沿垂线的波动比无种植圈时大.

参 考 文 献:

- [1] 董曾南, 陈长植, 李新宇. 明槽均匀紊流的水力特性[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 1994, 9(1): 8-22.
- [2] 卢金友, 徐海涛, 姚仕明. 天然感潮河道水流紊动特性分析[J]. 海洋工程, 2005, 23(3): 70-77.
- [3] 刘艾明, 徐海涛, 卢金友. 矩形水槽紊动特性分析[J]. 长江科学院院报, 2006, 23(1): 12-15.
- [4] 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.
- [5] 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, 36(10): 1263-1268.
- [6] 焦志洋, 拾兵, 朱玉伟, 等. 复式河道滩地植物对水流紊动结构影响的试验研究[J]. 海洋湖沼通报, 2006, (1): 28-36.
- [7] 北京大学特赛流动测量研究中心(译). 声学多普勒流速仪(ADV)的工作原理[R]. 北京: 北京大学, 2000.
- [8] 华明, 唐洪武. ADV技术测量圆射流流场紊动特性试验[J]. 水利水运科学研究, 2000, (3): 18-21.