

# 有无植物条件下明渠水流紊动特性对比

吕升奇, 唐洪武, 闫 静

( 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098 )

**摘要** : 在可变坡水槽中, 模拟了带枝杈植物对明渠水流的干扰作用, 借助超声多普勒流速仪( ADV ) 测量了不同水深下垂线不同测点的瞬时流速, 计算了各测点的三维时均流速、脉动强度及雷诺应力等紊动参数, 通过与无植物干扰的明渠均匀流紊动特性进行对比, 分析植物对水流紊动参数的影响规律。试验结果表明: 在有植物明渠水流中, 时均流速呈三区分布特征, 脉动强度及雷诺应力均在植物顶部附近出现最大值, 脉动强度明显增大, 在 3 个方向上趋于接近; 可以用植物顶部以上的雷诺应力分布推求摩阻流速。

**关键词** : 水流紊动; 明渠水流; ADV; 流速分布; 有植物明渠

中图分类号: TV133 文献标识码: A 文章编号: 1006-7647(2007)06-0064-05

**Comparison of turbulence characteristics of water flow in open channels with and without vegetations** // LÜ Sheng-qi, TANG Hong-wu, YAN Jing ( *State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China* )

**Abstract** : The interferences of vegetations with forks in water flow in open channels were simulated in a flume with variable slopes. The instantaneous flow velocity at different observation points of different water depths was measured with ADV, and the turbulence parameters, including the 3D mean velocity, the turbulence intensity, and the Reynolds stress, at different observation points were calculated. The comparison of the calculated results with the turbulence characteristics of uniform flow without vegetations shows that, with vegetations in water flow, the distribution of mean velocity could be divided into 3 regions, the maximum turbulence intensity and Reynolds stress occur near the top of vegetations, and the turbulence intensity is greatly increased in 3 directions with almost the same value. It is also concluded that the friction velocity can be obtained by the Reynolds stress distribution above the vegetations.

**Key words** : flow turbulence; water flow in open channel; ADV; flow velocity distribution; vegetated open channel flow

明渠水流中含有水生植物是一种常见而复杂的问题, 水生植物本身种类繁多、形态各异, 其生长高度、密度、干枝叶的刚度都不同程度地干扰着水流紊动结构。美国早在 1926 年就开始了水生植物阻力特性的研究, Cook & Compbell<sup>[1]</sup>, Kouwen 等<sup>[2-3]</sup>及 Petryk 等<sup>[4]</sup>相继根据野外观测资料或水槽试验, 研究了有植物渠道中曼宁系数  $n$  和阻力系数  $C_D$  的确定方法, 可以用于渠道的水量计算和设计。Kouwen 等<sup>[2-3]</sup>, Gourlay<sup>[5]</sup>, Ei-Hakim 等<sup>[6]</sup>及 Carollo 等<sup>[7]</sup>利用水槽试验研究了柔性及刚性植物对水流流速分布影响的规律。我国研究者进行有植物水流特性的研究起步较晚, 黄本胜等<sup>[8]</sup>及石月珍等<sup>[9]</sup>研究了河滩种树对河道行洪影响程度的计算方法, 时铨<sup>[10]</sup>、邱秀云等<sup>[11]</sup>、倪汉根等<sup>[12]</sup>进行了有植物水流的水槽试验, 主要分析水流中植物的阻水特性和纵向流速分

布特性。总结前人的试验, 发现对有植物水流中流速的测量以植物顶部附近及以上部位为主, 而对植物内部区域及近壁面的水流测量很少进行, 对水流紊动特性的分析也以纵向为主, 对横向和垂向的紊动特性很少研究。在有植物水流中, 由于植物对水流的扰动, 水流表现出很强的三维运动特性, 有必要进行三维测量。本文用带枝杈的塑料植物模拟水生植物, 借助超声多普勒流速仪( ADV ) 测量了不同水深下垂线不同测点的瞬时流速, 与无植物干扰的明渠均匀流紊动参数进行对比, 分析有植物水流中三维紊动参数的变化规律。

## 1 明渠均匀流基本理论

### 1.1 流速分布

Kuelegan 等<sup>[13]</sup>提出了宽浅明渠均匀流中纵向流

基金项目: 新世纪优秀人才支持计划项目( NCET-04-0494 )、国家自然科学基金( 50479068 )

作者简介: 吕升奇( 1976— ) 男, 河南南阳人, 博士研究生, 从事泥沙输移理论及河流模拟研究。E-mail: cnjlvsq@hhu.edu.cn

速垂线分布的对数型公式：

壁面水力光滑

$$\frac{U}{u_*} = 5.5 + 5.75 \lg \left( \frac{yu_*}{\nu} \right) \quad (1)$$

壁面水力粗糙

$$\frac{U}{u_*} = 8.5 + 5.75 \lg \left( \frac{y}{k_s} \right) \quad (2)$$

式中： $U$  为距床面  $y$  处的时均流速， $u_*$  为摩阻流速， $u_* = \sqrt{gRJ}$ ， $g$  为重力加速度， $R$  为水力半径， $J$  为坡降； $\nu$  为水流运动黏滞系数； $k_s$  为壁面粗糙尺度。

Nezu 等<sup>[14]</sup>研究认为明渠流动中  $\frac{y}{\delta} > 0.2$  部分的纵向流速分布与对数分布存在偏差，建议流速分布公式为

$$\frac{U}{u_*} = \frac{\ln \left( \frac{yu_*}{\nu} \right)}{\kappa} + A + \frac{2\Pi}{\kappa} \sin^2 \left( \frac{y\Pi}{2\delta} \right) \quad (3)$$

式中： $\kappa$  为 Von-Karman 常数； $\delta$  为最大流速对应的水深； $A$  为积分常数； $\Pi$  为 Coles 尾流强度参数。当水流为近似二维流动且壁面水力光滑时，一般有  $\kappa = 0.4$ ， $A = 5.5$ 。当  $\Pi = 0$  时，式(1)和式(3)是等价的。

### 1.2 脉动强度分布

脉动强度是反映水流紊动情况的一个重要参数，纵向脉动强度  $u'$  的计算公式为

$$u' = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (u_i - U)^2} \quad (4)$$

式中： $m$  为测点瞬时流速个数； $u_i$  为测点第  $i$  个纵向瞬时流速。Nezu 等<sup>[14]</sup>总结了光滑床面明渠均匀流的实测资料，提出了计算三维脉动强度分布的经验公式：

$$\frac{u'}{u_*} = D_u \exp \left( -\lambda_u \frac{y}{h} \right) \quad (5)$$

$$\frac{w'}{u_*} = D_w \exp \left( -\lambda_w \frac{y}{h} \right) \quad (6)$$

$$\frac{v'}{u_*} = D_v \exp \left( -\lambda_v \frac{y}{h} \right) \quad (7)$$

式中： $u'$ 、 $w'$ 、 $v'$  分别为水流纵向、横向及垂向的脉动强度； $D_u$ 、 $D_w$ 、 $D_v$ 、 $\lambda_u$ 、 $\lambda_w$ 、 $\lambda_v$  均为试验常数。试验率定结果为： $D_u = 2.30$ ， $D_w = 1.63$ ， $D_v = 1.27$ ， $\lambda_u = \lambda_w = \lambda_v = 1.0$ 。Nezu 等<sup>[14]</sup>利用二维激光多普勒流速仪(LDV)进行流速测量得到： $D_u = 2.26$ ， $D_v = 1.23$ ， $\lambda_u = 0.88$ ， $\lambda_v = 0.67$ 。这两者的结果是相近的。

### 1.3 雷诺应力分布

雷诺应力表现为相邻流层间的切应力<sup>[13]</sup>。由二维明渠均匀流的雷诺方程可得

$$\frac{\tau}{\rho} = -\overline{uv} + \nu \frac{\partial U}{\partial y} = u_*^2 \left( 1 - \frac{y}{h} \right) \quad (8)$$

式中： $\tau$  为总切应力，包括雷诺应力和黏性切应力； $\rho$  为水的密度。在雷诺数较大且已充分发展的紊流区中，通常可以忽略黏性应力，则有

$$-\overline{uv} = u_*^2 \left( 1 - \frac{y}{h} \right) \quad (9)$$

此时， $-\overline{uv}$  与  $y/h$  呈线性关系，根据这一规律可以由实测流速推求  $u_*$ 。

## 2 试验模拟

### 2.1 有植物水流模拟系统

#### 2.1.1 植物模拟

植物茎杆上有两层带枝杈的冠层，冠层内有长约 1.5 cm 的细枝，主茎杆直径约 3 mm，总高度为 5 cm，在水中摆动幅度很小，高度变化可以忽略不计。植物固定于水槽底部的塑料板上，纵向间距和横向间距分别为 10 cm 和 5 cm，分布密度为每平方米 200 棵。

#### 2.1.2 水槽系统

试验水槽为长 12 m、宽 0.42 m、高 0.7 m 的可变坡玻璃水槽，如图 1 所示。在水槽进水口处设有长 20 cm 的水流矫直机以稳定水流，水槽底部铺光滑的塑料板，板上穿孔用以固定植物，水槽后部设有升降螺杆用以调节水槽底坡、控制尾部旋转尾门的开度从而调节水深。用变频泵控制进口流量，安装在进水管路上的超声波流量计可显示流量大小。

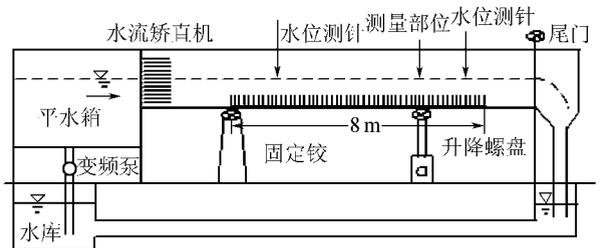


图 1 试验水槽及模拟植物布置示意图

### 2.2 测流系统

水槽内流速用 ADV 进行测量。试验条件下，设置 ADV 的采样体高度为 3 mm，采样个数为 2000，频率为 25 Hz，信号强度在 15 dB 以上，借助 winADV 分析软件统计各种紊动参数。

### 2.3 试验设计

反复调节流量、尾门开度及水槽底坡，直至形成均匀流，大约 2 h 后水流稳定，可以进行流速测量。测量断面距离进水口 8.4 m，测量垂线位于断面中央及左右 2.5 cm 范围内。试验条件及水力要素如表 1 所示。表 1 中， $u_* = \sqrt{gRJ}$ ， $Re = \frac{U_m h}{\nu}$ ， $Fr = \frac{U_m}{(gh)^{0.5}}$ ，其中  $U_m$  为断面平均流速， $\nu$  取  $0.897 \times$

表1 试验条件及水力要素

试验序列	$h/\text{cm}$	$Q/(\text{L}\cdot\text{s}^{-1})$	$i/\%$	$U_m/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	$u_*'/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	$Re/10^4$	$Fr$	含植物情况
E1	15	18.4	0.035	29.21	1.73	2.39	0.241	无
E2	10	12.4	0.320	29.52	4.61	1.87	0.298	有
E3	15	17.9	0.160	28.41	3.70	2.32	0.234	有
E4	20	22.5	0.120	26.79	3.47	2.56	0.191	有
E5	25	29.0	0.110	27.62	3.51	2.95	0.176	有

### 3 试验结果及分析

#### 3.1 无植物条件下明渠水流紊动参数

##### 3.1.1 时均流速分布

纵向流速能很好地与式(3)吻合,其中  $\kappa = 0.4$ ,  $A = 5.5$ , 相对水深  $y/h > 0.2$  时尾流强度参数  $\Pi = 0.1$ 。横向和垂向流速没有明显规律,绝对值很小,横向流速约在  $\pm 0.3 \text{ cm/s}$  内,垂向相对流速约在  $\pm 0.2 \text{ cm/s}$  内,表明横向和垂向上没有明显的时均流动,如图 2(a)所示。

##### 3.1.2 脉动强度分布

脉动强度分布与 Nezu 等<sup>[14]</sup>总结的经验公式吻合较好,如图 2(b)所示,只是试验常数略有不同。

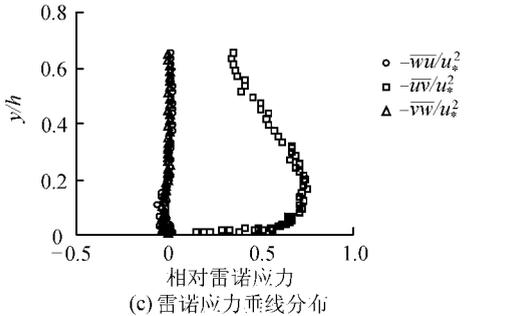
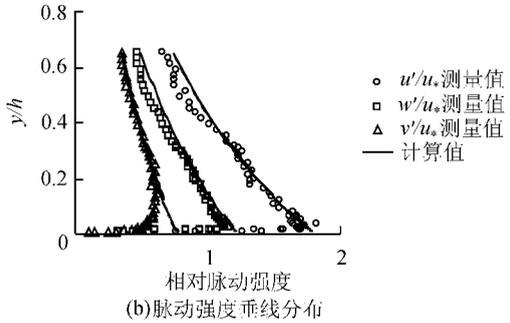
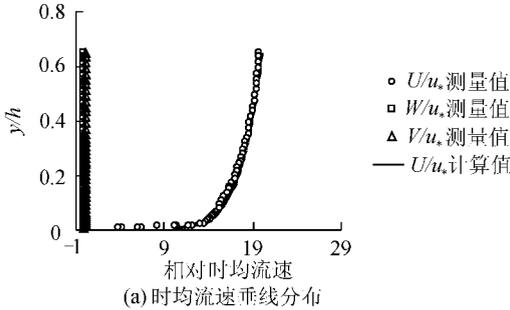


图2 无植物条件下明渠水流紊动参数分布

本次试验参数取值为  $D_u = 2.15, D_w = 1.46, D_v = 0.92, \lambda_u = 1.35, \lambda_w = 1.35, \lambda_v = 1.2$ 。纵向、横向与垂向 3 个方向上的脉动强度比值平均约为  $1:0.68:0.43$ 。

##### 3.1.3 雷诺应力分布

从图 2(c)雷诺应力分布可以看出:  $y/h < 0.16$  时,  $-\overline{wu}/u_*'^2$  随与壁面距离的增加而增大;  $y/h > 0.16$  时,  $-\overline{wu}/u_*'^2$  随水深的增加线性减小。根据  $-\overline{wu}/u_*'^2$  分布推求的床面摩阻流速为  $1.45 \text{ cm/s}$ , 与公式  $u_*' = \sqrt{gRJ}$  的计算结果  $1.73 \text{ cm/s}$  相差不大。另外两个方向上  $-\overline{wu}/u_*'^2$  及  $-\overline{vw}/u_*'^2$  的值相对都很小,绝对值不超过  $0.05$ ,最大值出现在  $y/h = 0.1$  处。

#### 3.2 有植物明渠水流紊动参数

##### 3.2.1 时均流速分布

对有植物明渠水流中研究较多的是纵向流速,许多研究者根据纵向流速的变化情况对流速进行分区<sup>[2-7]</sup>。两区观点认为流速可分为植物层内及植物层以上两个分区;三区观点认为植物层部分还可以划分两个分区,植物层顶部附近以上为第三区。

图 3 中(a)~(c)为有植物水流中纵向、横向及垂向的相对流速分布,图中  $h_p$  为植物高度,  $h_p = 5 \text{ cm}$ ,总水深  $h$  与  $h_p$  的比值为相对淹没度,试验中 4 种水深对应的相对淹没度分别为 2, 3, 4, 5。由图 3(a)可以看出,纵向流速在垂线方向上出现了两个明显的转折,形成了 3 个分区。壁面到  $0.05h_p$  水深为第一分区,流速梯度很大,流速迅速增加;  $0.05h_p$  到  $0.9h_p$  水深为第二分区,这部分仍然在植物区内,流速梯度明显减小,近似呈线性规律;  $0.9h_p$  水深以上为第三分区,流速继续增大,但流速梯度有逐渐减小的趋势,接近于对数分布规律。当相对淹没度不同时,各区流速受植物影响程度不一样。第一分区内,不同的相对淹没度下相对流速相差较小;第二、第三分区内,同一水深处相对淹没度越大相对流速越小。相对于 Kouwen 等<sup>[2-3]</sup>的研究结果,本次试验对近壁面附近的测量较为详细,  $0.05h_p$  水深以下第一区范围内共有 9 个测点,流速受水槽底面影响较大。第二、第三区的流速同 Kouwen 等<sup>[2-3]</sup>及 Stephan 等<sup>[15]</sup>的两区流速分布特点类似,但不完全一样。分析前人的研究成果<sup>[16-20]</sup>,发现流速的分区情况和各区的流速特征很少完全一样,很重要的原因是各研究者所用植物的形态、刚度、高度、分布密度、相对淹没度等不一样。

横向和垂向流速也有与纵向流速分布类似的分区现象。第一区为壁面到  $0.05h_p$  水深,这一部分的

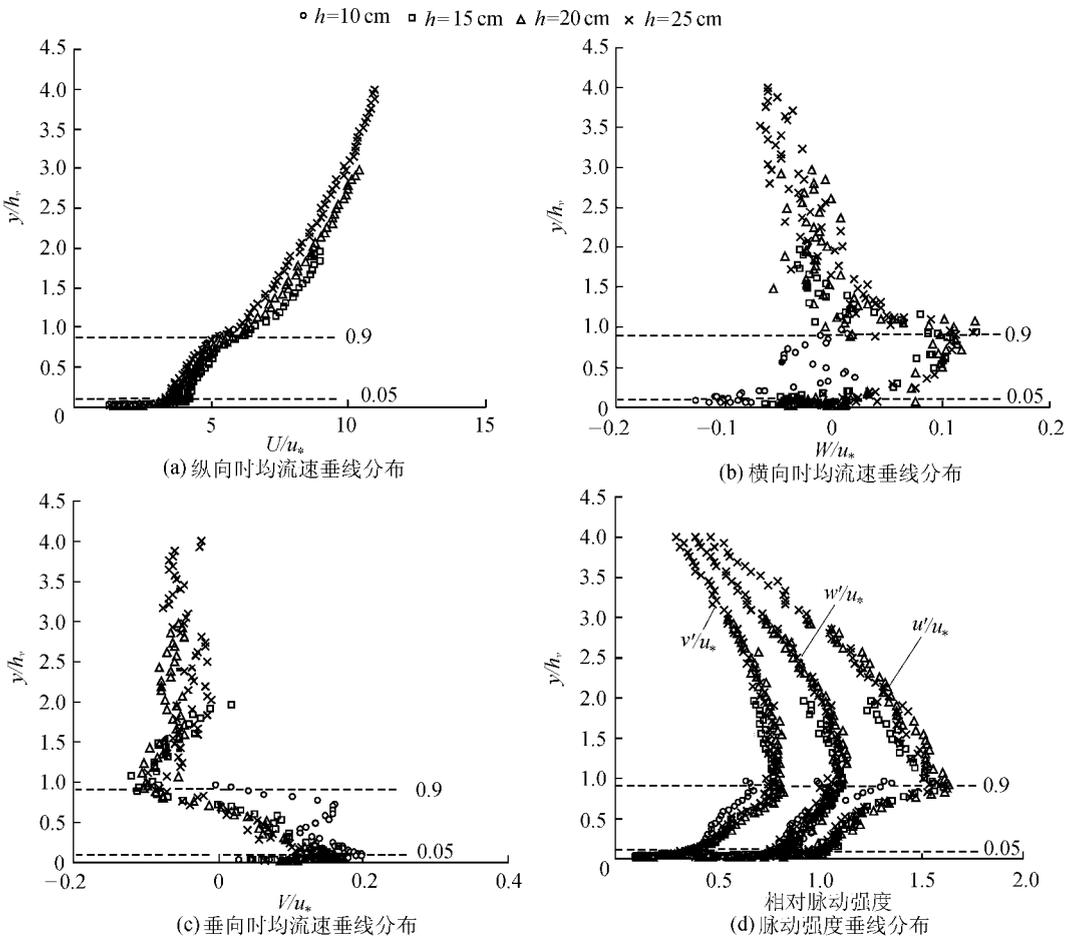


图3 有植物水流中流速及脉动强度分布

流速绝对值较小,第二区为  $0.05h_v$  到  $0.9h_v$  水深,流速梯度较大,横向和垂向流速在这一范围变化较大,横向流速最大为  $0.48 \text{ cm/s}$ ,垂向流速最大为  $0.43 \text{ cm/s}$ ;第三区在  $0.9h_v$  水深以上,流速梯度减小,分布逐渐趋向均匀。相对于流量相差不大的无植物明渠情况, $0.9h_v$  水深附近的横向及垂向流速显著增大,将对水体在横向及垂向的掺混和扩散起到重要作用。

### 3.2.2 脉动强度分布

图3(d)显示了3个方向的脉动强度分布特征,由于植物区的扰动作用,3个方向上的脉动强度均明显增强,分布形式也发生明显变化,总体上也可分为3个分区。壁面到  $0.05h_v$  水深为第一分区,梯度很大,3个方向的脉动强度迅速增加; $0.05h_v$  到  $0.9h_v$  水深为第二分区,脉动强度继续增加,梯度明显减小,在  $0.9h_v$  水深处脉动强度达到最大; $0.9h_v$  水深以上为第三分区,脉动强度逐渐减小。3个方向的脉动强度以纵向脉动强度最大,垂向最小,相对淹没度为5时,纵向、横向及垂向的脉动强度平均比值约为  $1:0.76:0.52$ ,同无植物条件下  $1:0.68:0.43$  相比,有植物情况下3个方向的脉动强度平均值趋于接近。

### 3.2.3 雷诺应力分布

雷诺应力受植物影响的情况如图4所示,3个方向的雷诺应力均在  $0.9h_v$  水深处发生突变,出现最大值,从  $0.9h_v$  水深到水槽底部和到自由水面雷诺应力均减小,近壁面接近于零。相对于  $-\overline{uw}/u_*^2$ ,  $-\overline{vw}/u_*^2$  及  $-\overline{wv}/u_*^2$  的绝对值很小,分布较为均匀。同无植物水流条件下相比,  $-\overline{uw}/u_*^2$  在  $0.9h_v$  水深以上部分的线性规律更为显著。

试验条件下,当水深为  $10 \text{ cm}$ ,  $15 \text{ cm}$ ,  $20 \text{ cm}$  及  $25 \text{ cm}$  时,根据雷诺应力分布推求的床面摩擦流速分别为  $4.59 \text{ cm/s}$ ,  $3.65 \text{ cm/s}$ ,  $3.41 \text{ cm/s}$ ,  $3.53 \text{ cm/s}$ , 公式  $u_* = \sqrt{gRJ}$  的计算结果分别为  $4.61 \text{ cm/s}$ ,  $3.71 \text{ cm/s}$ ,  $3.47 \text{ cm/s}$ ,  $3.51 \text{ cm/s}$ , 两种方法的计算结果非常接近,说明在有植物水流中,虽然流速分布和雷诺应力发生了很大变化,用雷诺应力的分布来推求床面摩擦流速仍然是可行的,本文中的摩擦流速采用后者计算。

## 4 结论

本文分析了明渠均匀流的基本理论,利用 ADV 进行了无植物及有植物明渠水流中不同水深下的三维流速测量,对比分析了两种水流条件下时均流速、

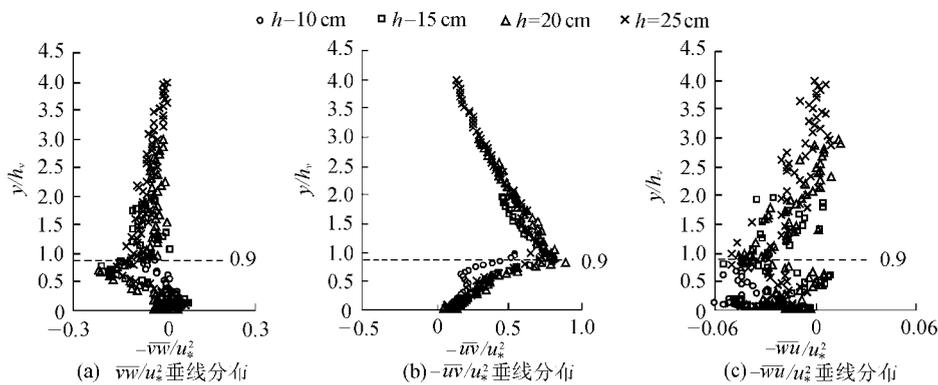


图4 有植物水流中雷诺应力分布

脉动强度及雷诺应力垂线分布变化情况,取得了以下主要结论:

a. 有植物明渠水流三维时均流速沿垂线可分为3个分区:第一分区在近壁面,范围很小,流速梯度很大;第二分区在植物区 $0.9h_v$ 水深以下;第三分区在 $0.9h_v$ 以上。结合前人的研究成果,流速分区的界限和各区的流速特征同植物的形态、刚度、分布密度、相对淹没度和水流情况等有关。

b. 植物区的存在使水流中纵向、横向及垂向的脉动强度最大值均出现在 $0.9h_v$ 水深处。同流速分布一样,脉动强度也呈现3个分区,与无植物条件下的明渠水流相比,随着水深的增加,3个方向的脉动强度趋于接近。

c. 3个方向的雷诺应力均在 $0.9h_v$ 水深处发生转折。相对于无植物条件下的明渠水流, $-\overline{w'u'}/u_*^2$ 在 $0.9h_v$ 水深以上部分线性规律更为显著。根据 $-\overline{w'u'}/u_*^2$ 分布规律推求摩阻流速同公式 $u_* = \sqrt{gRJ}$ 的计算结果非常接近,这表明在有植物水流中,仍可用雷诺应力的实测分布推求床面的摩阻流速。

#### 参考文献:

[1] 吴福生,姜树海.含植物明渠的水动力学研究进展[C]//刘恒,贾金生.中国水利学会第二届青年科技论坛论文集.郑州:黄河水利出版社,2005:330-338.

[2] KOUWEN N, UNNY T E, HILL H M. Flow retardance in vegetated channels[J]. Journal of the Irrigation and Drainage Division, 1969, 95( IR2 ): 329-342.

[3] KOUWEN N, LI R M, SIMONS D B. Flow resistance in vegetated waterway[J]. Trans. ASCE, 1981, 24( 3 ): 684-698.

[4] PETRYK S, BOSMAJIAN G. Analysis of flow through vegetation[J]. Journal of the Hydraulics Division, 1975, 101( HY7 ): 871-884.

[5] GOURLAY M R. Discussion of 'flow resistance in vegetated channels' by Kouwen N et al[J]. Journal of the Irrigation and Drainage Division, 1970, 96( IR3 ): 351-357.

[6] EL-HAKIM O, SALMA M M. Velocity distribution inside and

above branched flexible roughness[J]. Journal of the Irrigation and Drainage Engineering, 1992, 118( 6 ): 914-927.

[7] CAROLLO F G, FERRO V, TERMINI D. Flow velocity measurements in vegetated channels[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 128( 7 ): 664-673.

[8] 黄本胜,赖冠文,邱静,等.河滩种树对行洪影响试验研究[J].水动力学研究与进展,1999,14( 4 ): 468-474.

[9] 石月珍,黄本胜,周著.滩地种树的复式断面河渠水流归槽长度计算[J].水利水运工程学报,2003( 4 ): 53-56.

[10] 时钟.海岸盐沼植物单向恒定水流流速剖面[J].泥沙研究,1997,2( 9 ): 82-88.

[11] 邱秀云,阿不都外力,程艳,等.植物'柔性坝'对水流影响的试验研究[J].水利水电技术,2003,34( 9 ): 62-65.

[12] 倪汉根,顾峰峰.湿地非淹没芦苇水流阻力的试验研究[J].水动力学研究与进展,2005,20( 2 ): 167-173.

[13] 王兴奎,邵学军,王光谦,等.河流动力学[M].北京:科学出版社,2004:65-73.

[14] NEZU I, NAKAGAWA H. Turbulence in open-channel flows[M]. Rotterdam: A. A. Balkeman Publishers, 1993: 12-28.

[15] STEPHAN U, GUTKNECHT D. Hydraulic resistance of submerged flexible vegetation[J]. Journal of Hydrology, 2002, 269: 27-43.

[16] NEPF H M. Vertical secondary flows in submerged plant-like array[J]. Limnology and Oceanography, 1999, 44( 4 ): 1072-1080.

[17] NEPF H M, VIVONI E R. Flow structure in depth-limited vegetated flow[J]. Journal of Geophysical Research, 2000, 105( C12 ): 28547-28557.

[18] JAMES C S, BIRKHEAD A L, JORDANOVA A A, et al. Flow resistance of emergent vegetation[J]. Journal of Hydraulic Research, 2004, 42: 390-398.

[19] LEE J K, ROIG L C, JENTER H L, et al. Drag coefficients for modeling flow through emergent vegetation in the Florida Everglades[J]. Ecological Engineering, 2004, 22: 237-248.

[20] DITTRICH A, KOLL K. Velocity field and resistance of flow over rough surfaces with large and small relative submergence[J]. International Journal of Sediment Research, 1997, 12( 3 ): 21-33.

(收稿日期:2007-07-15 编辑:骆超)