

倒伏植被茎秆粗度对坡面水流特性的影响

刘颖, 张升堂, 王之凯, 李贵宝

(山东科技大学地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590)

摘要:为深入探索植被倒伏条件下水流结构的内在规律,开展植被茎秆直径对坡面水流特性影响的试验研究。试验固定坡度为1.0%,倒伏角度为20°,取茎秆直径为2 mm、3 mm、4 mm进行室内明渠流模拟试验。结果表明:在相同直径条件下,随水深增大,Darcy-Weisbach阻力系数逐渐增大,雷诺数呈线性增大,弗劳德数呈幂函数形式下降;在相同水深条件下,随茎秆直径增大,Darcy-Weisbach阻力系数增大,雷诺数与弗劳德数随之而减小,且当茎秆直径每增加1 mm,阻力系数平均增大33.76%,雷诺数平均减小2.57%,弗劳德数平均减小8.33%。

关键词:茎秆直径;倒伏植被;坡面流;Darcy-Weisbach阻力系数;雷诺数;弗劳德数

中图分类号:TV121;S157 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2020)01-0042-06

Effects of lodging vegetation stem diameter on overland runoff characteristics//LIU Ying, ZHANG Shengtang, WANG Zhikai, LI Guibao (College of Earth Science & Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: In order to deeply explore the internal law of water flow structures under the condition of vegetation lodging, experimental research on the influence of vegetation stem diameter on the characteristics of overland flow was carried out. Indoor open channel flow simulation tests were performed with a fixed slope of 1.0%, a lodging angle of 20°, stem diameters of 2mm, 3mm and 4mm. The results show that the resistance coefficient of Darcy-Weisbach increases gradually with the water depth under the same diameter, the Reynolds number increases linearly, while the Froude number decreases as a power function. Under the same water depth, with the increase of the stem diameter, Darcy-Weisbach resistance coefficient increases, Reynolds number and Froude number decreases respectively. Moreover, if the stem diameter is increased for every 1mm, Darcy-Weisbach resistance coefficient increases 33.76%, Reynolds number and Froude number decreases 2.57% and 8.33% respectively in average.

Key words: stem diameter; lodging vegetation; overland runoff; Darcy-Weisbach resistance coefficient; Reynolds number; Froude number

植被是坡面流系统的重要组成部分之一,植被的存在不仅能够对雨水起到截留作用,增大入渗量,降低地表径流量,还具有增加土壤抗侵蚀力、保持水土的功能^[1-6]。自然界中植被形态多样,茎秆粗度、柔韧性、叶片大小与数量相差甚大,由于自身柔韧性植被在水流中易发生倒伏,这使得原本的水流结构更加复杂,研究更为困难。开展倒伏植被茎秆直径对水流特性影响的研究对还原坡面流真实水流特性、揭示植被倒伏机理,具有重要意义。

自20世纪中叶以来,国内外诸多学者对植被水流问题开展了大量研究^[7-14],研究对象主要为刚性植被^[15-17],研究内容主要为植被茎秆粗度、叶片的

数量及大小、植被密度以及排列方式等方面对水流的影响。如Panigrahi等^[18]选用刚性圆柱杆作为模型植物在室内水槽内进行植被阻水试验,认为在小流域中水流阻力主要取决于植被的高度、密度、分布和类型;余伟伟等^[19]在实验室水槽中进行了不同密度的刚性植物水流试验,并对植物密度与糙率系数的关系进行分析;Kothyari等^[20]分别用直径为4 mm和6.4 mm的圆柱形棒模拟植被进行水槽试验,对超临界水流作用下的大断面边坡进行了研究。对柔性植被研究较少,主要集中在植被倒伏的研究,Shan等^[21]研究柔性植被在弯曲复合河道中对流速的影响,认为水流速度随植被偏转度增大而增加;Busari

基金项目:国家自然科学基金(41471025);山东科技大学研究生科技创新项目(SDKDYC180320)

作者简介:刘颖(1992—),女,硕士研究生,主要从事水文学及水资源研究。E-mail: liuying5128@126.com

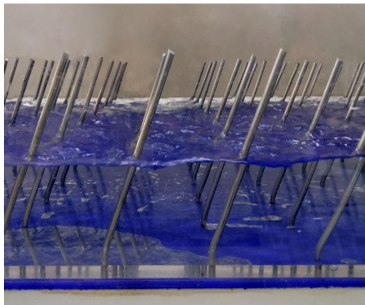
通讯作者:张升堂(1970—),男,教授,博士,主要从事水文学及水资源研究。E-mail: zst0077@163.com

等^[22]对柔性植被倒伏现象进行了实验研究,发现低流速时植被不发生倒伏,随着流速增加植被倒伏角增大,当流速增大到一定程度时,植被弯曲程度基本不再发生变化;Schoelynck 等^[23]认为植被在水流的冲击下会发生倒伏,并变形为流线形来减小阻力。

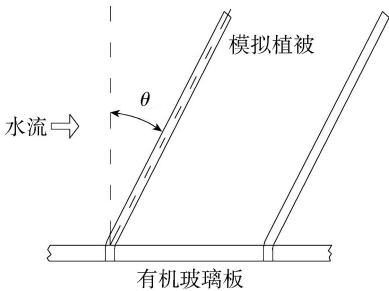
在坡面流研究中,关于植被茎秆粗度的研究较多^[24-26],关于柔性植被倒伏的研究较少^[27-29],且多未进行深入研究。因此结合倒伏现象,有必要对植被茎秆粗度开展进一步研究。本文通过固定坡度和倒伏角度,开展了室内明渠流模拟试验,分析了植物直径、水深与水流阻力、雷诺数、弗劳德数之间的关系。

1 试验装置及方法

在静水中植被处于直立状态,随着水的流动与冲刷植被会顺水流方向发生倾斜,即为倒伏现象,倒伏后的植被与原来直立状态呈一定的倾角,本文将该倾角定义为倒伏角 θ (图1)。试验将刚性的模拟材料弯曲成固定角度来代替处于倒伏状态的柔性植被,避免了柔性植被不易控制的弊端,通过预试验选取高度为10 cm的圆柱体铝棒来模拟真实植被,并选择固定坡度*i*=1.0%、倒伏角度 $\theta=20^\circ$,且茎秆直径*d*=2 mm、3 mm、4 mm进行试验。



(a) 试验照片



(b) 倒伏角定义

图1 植被倒伏示意图

利用宽浅明渠水槽进行试验,试验装置主要由明渠水槽、水箱、水泵、流量控制阀门、平衡管和尾门组成(图2)。明渠水槽断面为矩形,底宽0.4 m、侧壁高0.3 m、总长度5 m。从上游到下游可分为平水段(1 m)、铺设段(3 m)、量水段(1 m)3部分,铺设段内设2个断面(断面1和断面2),间距为1.5 m,且

均设有测压玻璃管以观测断面水位。在试验时水槽底部铺设有机玻璃板,板面钻有小孔来固定铝棒,小孔之间的纵横间距为60 mm×60 mm(图3)。在水槽与水箱之间设有流量控制阀门,流量变化范围为0~0.012 5 m³/s。水槽下方设有千斤顶装置用以调整坡度大小,坡度可变范围为0~3.0%。由于试验用水量较大,为了节约用水,试验装置采用循环系统,装置下方设有回流水箱,试验用水可由水泵从水箱抽至水槽,流经试验铺设区后流回水箱,实现了水流的循环利用。在试验过程中通过调节流量阀门进行变换流量,并同时记录下断面流量*Q*、水位*H*,最后对试验数据进行处理,根据相应公式得出相关水力学参数弗劳德数*Fr*、雷诺数*Re*、阻力系数 λ 。

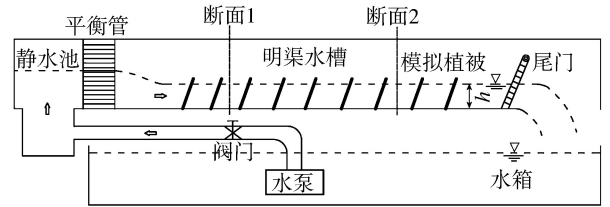


图2 试验装置示意图

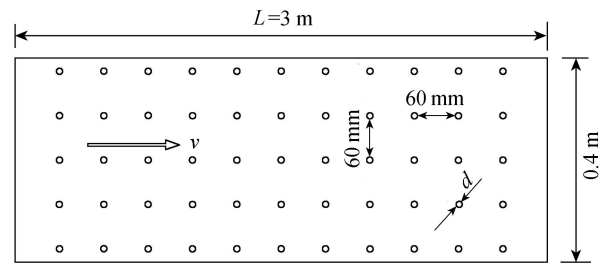


图3 植被布局俯视图

2 试验原理与数据

水流阻力系数反映了地表粗糙程度以及植被对水流的阻滞作用^[30-32]。在坡面流过程中,阻力系数是重要的水动力学参数之一,主要的表达方式有Manning 糙率系数, Darcy-Weisbach 阻力系数以及 Chezy 系数3种^[33-36],由于 Darcy-Weisbach 阻力系数 λ 适用范围较广,所以采用 λ 来表示植被倒伏的水流阻力作用:

$$\lambda = \frac{8J R g}{v^2} \quad (1)$$

式中:*J*为水力坡度;*R*为断面1和断面2的平均水力半径;*g*为重力加速度;*v*为断面1和断面2的平均流速。

流态反映了水流的运动状态,一般通过雷诺数*Re*与弗劳德数*Fr*进行划分。对于明渠流来说,根据雷诺数可把流态划分为层流和紊流,当*Re*<580时,判断水流为层流,当*Re*>6 500时判断为紊流,当580≤*Re*≤6 500时为过渡状态^[37-38];根据

弗劳德数可把水流运动状态划分为急流和缓流,当 $Fr < 1$ 时,判定为缓流,当 $Fr > 1$ 时判定为急流,当 $Fr = 1$ 时则为临界流^[39]。 Re 和 Fr 表达式为

$$Re = \frac{vR}{\nu} \quad (2)$$

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gh}} \quad (3)$$

式中: ν 为运动黏滞系数; h 为断面 1 和断面 2 的平均水深。

在数据处理过程中,为减小误差, h 、 ν 、 R 用断面 1 和断面 2 的平均值表示。在 $i = 1.0\%$ 、 $\theta = 20^\circ$ 的情况下开展试验,测量出模拟植被茎秆 $d = 2 \text{ mm}$ 、 3 mm 、 4 mm 时的水力学参数,计算结果如表 1~3 所示。

表 1 $d = 2 \text{ mm}$ 时的水力参数

组号	h_2/m	Re_2	Fr_2	λ_2
1	0.0068	1675	1.1144	0.0637
2	0.0137	3554	0.8670	0.0864
3	0.0202	5237	0.7390	0.0767
4	0.0283	6431	0.5676	0.0711
5	0.0369	7564	0.4638	0.0766
6	0.0522	9956	0.3846	0.1237
7	0.0584	11051	0.3690	0.1398
8	0.0657	12284	0.3540	0.1549
9	0.0712	13302	0.3468	0.1447
10	0.0828	15355	0.3325	0.1623
11	0.0884	16434	0.3289	0.1495
12	0.0981	18244	0.3228	0.1485

表 2 $d = 3 \text{ mm}$ 时的水力参数

组号	h_3/m	Re_3	Fr_3	λ_3
1	0.0075	1681	1.0139	0.0747
2	0.0133	3228	0.8417	0.0921
3	0.0204	4868	0.6955	0.0870
4	0.0300	6216	0.5169	0.0928
5	0.0385	7385	0.4373	0.1097
6	0.0546	9716	0.3630	0.1698
7	0.0607	10747	0.3510	0.1831
8	0.0682	11899	0.3352	0.2004
9	0.0743	12905	0.3270	0.1909
10	0.0857	14913	0.3176	0.1986
11	0.0913	15826	0.3125	0.1796
12	0.0999	17483	0.3105	0.1895

表 3 $d = 4 \text{ mm}$ 时的水力参数

组号	h_4/m	Re_4	Fr_4	λ_4
1	0.0078	1570	0.8772	0.0964
2	0.0155	3269	0.6852	0.1119
3	0.0246	4798	0.5247	0.1139
4	0.0334	5992	0.4298	0.1301
5	0.0423	7217	0.3766	0.1637
6	0.0509	8384	0.3433	0.2222
7	0.0648	10610	0.3186	0.2630
8	0.0777	12691	0.3043	0.2791
9	0.0833	13751	0.3032	0.2791
10	0.0892	14685	0.2981	0.2704
11	0.0948	15626	0.2953	0.2736
12	0.1036	17315	0.2947	0.2627

3 试验结果与分析

3.1 茎秆直径对水流阻力的影响

在固定倒伏角度与坡度情况下,植被茎秆直径与水流阻力的关系是研究的重点之一。根据试验数据得到不同直径条件下的 λ 与 h 关系曲线如图 4 所示。对曲线进行横向分析可得出,在同一直径条件下,随着 h 的增大, λ 先逐渐增大,之后增长率减小,逐渐趋于平缓,且趋向于某一常数。这一结论与 Wu 等^[40-41]的研究结果相似。该规律可能是由植被淹没程度决定的,在植被未被淹没时,随 h 的增大,植被淹没程度逐渐增大,阻水面积增大,故而 λ 持续增大;当植被完全被淹没后,随 h 的增大,植被的阻水面积不变,所以 λ 没有变化。对图 4 纵向分析可知,在 h 相同的情况下, d 越大, λ 越大,即 $\lambda_2 < \lambda_3 < \lambda_4$ 。根据差值分析可知, d 每增加 1 mm , λ 就平均增长 33.76% (表 4)。这是由于当处于同一水深时,植被的淹没程度一致,植被茎秆直径就决定了植被阻水面积的大小,所以茎秆直径越大,阻水面积越大,产生的水流阻力也就越大。

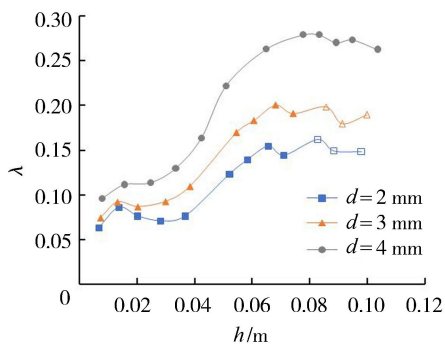


图 4 不同直径条件下 λ 与 h 关系曲线

表 4 不同直径条件下 λ 的差值分析 %

组号	$(\lambda_3 - \lambda_2) / \lambda_2$	$(\lambda_4 - \lambda_3) / \lambda_3$	$(\lambda_4 - \lambda_2) / (2\lambda_2)$
1	17.27	29.05	25.67
2	6.60	21.50	14.76
3	13.43	30.92	24.25
4	30.52	40.19	41.49
5	43.21	49.23	56.85
6	37.27	30.86	39.81
7	30.97	43.64	44.06
8	29.37	39.27	40.09
9	31.93	46.20	46.44
10	22.37	36.15	33.30
11	20.13	52.34	41.51
12	27.61	38.63	38.45

3.2 茎秆直径对流态的影响

在坡面流中,流态是表征水流特性的基本参数,根据雷诺数 Re 和弗劳德数 Fr 可划分为层流、紊流与缓流、急流。由表 1~3 数据绘制不同直径条件下 Re 、 Fr 与 h 的关系曲线如图 5 和图 6 所示。从图 5

和图 6 可知,在 d 不变条件下,随着沿程 h 的增大, Re 呈线性增大趋势,水流逐步由层流过渡到紊流,这与吴福生^[42] 结论相同。随着 h 的增大, Fr 呈幂函数形式整体下降趋势,且下降速率逐渐减小,最后趋于稳定,水流流态则由急流过渡为缓流。在 h 不变的条件下, Re 与 Fr 皆随 d 的增大而减小,即 $Re_4 < Re_3 < Re_2$; $Fr_4 < Fr_3 < Fr_2$ 。根据 Re 、 Fr 关于 d 的差值分析结果可知(表 5 和表 6),每当 d 增大 1 mm, Re 平均减小 2.57%, Fr 平均减小 8.33%。

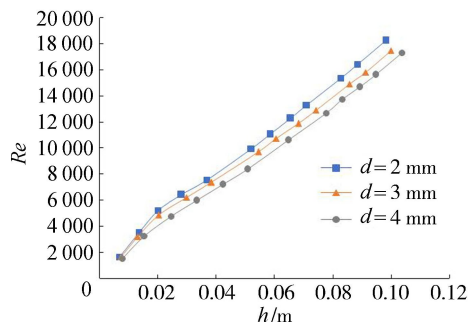


图 5 不同直径条件下 Re 与 h 的关系

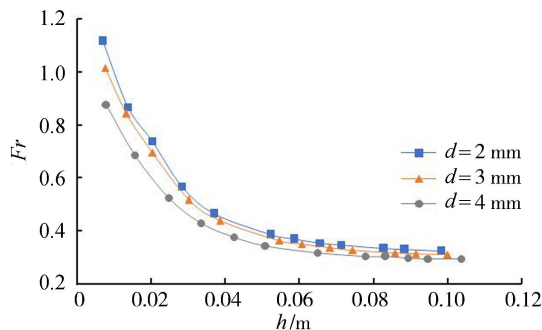


图 6 不同直径条件下 Fr 与 h 的关系

表 5 不同直径条件下 Re 的差值分析 %

组号	$(Re_3 - Re_2) / Re_2$	$(Re_4 - Re_3) / Re_3$	$(Re_4 - Re_2) / (2Re_2)$
1	0.36	-6.60	-3.13
2	-9.17	1.27	-4.01
3	-7.05	-1.44	-4.19
4	-3.34	-3.60	-3.41
5	-2.37	-2.27	-2.29
6	-2.41	-13.71	-7.89
7	-2.75	-1.27	-2.00
8	-3.13	6.66	1.66
9	-2.98	6.56	1.69
10	-2.88	-1.53	-2.18
11	-3.70	-1.26	-2.46
12	-4.17	-0.96	-2.55

在 $d=4$ mm、 $h=0.0068$ m 时, Re 有最小值 1 570, 远大于 580, 所以在试验过程中水流不存在层流状态; 在 $d=2$ mm、 $h=0.0283$ m 时, $Re=6431$, 接近 6 500。据此可判断, 当 $h < 0.0283$ m 时, 水流处于过渡状态; 当 $h > 0.0283$ m 时, 水流处于紊流状态, 且该状态为试验过程的主流状态。在 $d=3$ mm、 $h=0.0075$ m 时, $Fr=1.0139$, 接近 1。据此可判断, 当

表 6 不同直径条件下 Fr 的差值分析 %

组号	$(Fr_3 - Fr_2) / Fr_2$	$(Fr_4 - Fr_3) / Fr_3$	$(Fr_4 - Fr_2) / (2Fr_2)$
1	-9.02	-13.48	-10.64
2	-2.92	-18.59	-10.48
3	-5.89	-24.56	-14.50
4	-8.93	-16.85	-12.14
5	-5.71	-13.88	-9.40
6	-5.62	-5.43	-5.37
7	-4.88	-9.23	-6.83
8	-5.31	-9.22	-7.02
9	-5.71	-7.28	-6.29
10	-4.48	-6.14	-5.17
11	-4.99	-5.50	-5.11
12	-3.81	-5.09	-4.35

$h < 0.0075$ m 时, 仅在 $d=2$ mm 条件下处于急流; 当 $h > 0.0075$ m 时, 水流属于缓流。所以在本试验过程中, 水流大部分处于紊流、缓流状态, 这说明在坡度一定的条件下, 水深是控制水流流态的一个重要因素。

4 结 论

a. 在 d 不变条件下, 随着 h 的增大, λ 先逐渐增大, 之后趋于平缓, 最后趋于某一常数; Re 呈线性增大趋势; Fr 呈幂函数形式整体下降趋势, 且下降速率逐渐减小, 最后趋于稳定。

b. 在 h 不变条件下, d 越大, λ 越大, Re 与 Fr 随 d 的增大而减小。 d 每增大 1 mm, λ 平均增大 33.76%, Re 平均减小 2.57%, Fr 平均减小 8.33%。

参考文献:

- [1] CARROLL C, HALPIN M, BURGER P, et al. The effect of crop type, crop rotation, and tillage practice on runoff and soil loss on a vertisol in central queensland[J]. Australian Journal of Soil Research, 1997, 35(4): 925-939.
- [2] FATTET M, FU Y, GHESTEM M, et al. Effects of vegetation type on soil resistance to erosion: relationship between aggregate stability and shear strength[J]. Catena, 2011, 87(1): 60-69.
- [3] 肖培青, 姚文艺, 申震洲, 等. 植被影响下坡面侵蚀临界水流能量试验研究[J]. 水科学进展, 2011, 22(2): 229-234. (XIAO Peiqing, YAO Wenyi, SHEN Zhenzhou, et al. Experimental study of critical flow energy for slope erosion under the influence of vegetation cover [J]. Advances in Water Science, 2011, 22(2): 229-234. (in Chinese))
- [4] 杨帆, 张宽地, 杨明义, 等. 植被淹没程度对坡面流体力学特性影响[J]. 水科学进展, 2016, 27(6): 832-840. (YANG Fan, ZHANG Kuandi, YANG Mingyi, et al. Experimental study on hydraulic characteristic of submerged degree to flow under vegetation coverage [J]. Advances in Water Science, 2016, 27(6): 832-840. (in

- Chinese))
- [5] 芮孝芳. 对流域水文模型的再认识[J]. 水利水电科技进展,2018,38(2):1-7. (RUI Xiaofang. More discussion of watershed hydrological model[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38 (2) : 1-7. (in Chinese))
- [6] 庾从蓉,段佩怡. 植被过滤带的污染物去除效率研究进展[J]. 水资源保护, 2018, 34 (2) : 68-74. (YU Congrong, DUAN Peiyi. Quantitative research advance on vegetative filter strips for non-point source pollution control[J]. Water Resources Protection, 2018, 34 (2) : 68-74. (in Chinese))
- [7] KOUWEN N, UNNY T E. Flexible roughness in open channels[J]. Journal of the Hydraulics Division, 1973, 99 (5) : 713-728.
- [8] TEMPLE D M. Velocity distribution coefficients for grass-lined channels [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1986, 112(3):193-205.
- [9] 拾兵,付强,曹叔尤. 植物对明渠水流的影响[J]. 西南民族大学学报(自然科学版), 1998(4):354-357. (SHI Bing, FU Qiang, CAO Shuyou. Effects of vegetation on flow of open channel[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 1998 (4) : 354-357. (in Chinese))
- [10] 芮孝芳. 水文学前沿科学问题之我见[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(5):95-102. (RUI Xiaofang. Discussion of some frontier problems in hydrology [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35 (5) : 95-102. (in Chinese))
- [11] 王杰,王妍,许晓梁,等. 坡度对坡面降雨产流规律的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, 45 (4) : 372-376. (WANG Jie, WANG Yan, XU Xiaoliang, et al. Effects of slope gradient on rainfall-runoff generation process [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45 (4) : 372-376. (in Chinese))
- [12] 张小娜,冯杰,邵伟. 不同雨强下植被对坡地产汇流和溶质运移的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2010, 38 (3) : 246-251. (ZHANG Xiaona, FENG Jie, SHAO Wei. Influence of vegetation on overland runoff generation, flow concentration and solute transport under different rainfall intensities [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2010, 38 (3) : 246-251. (in Chinese))
- [13] 张小娜,冯杰,张超,等. 不同雨强下土壤大孔隙对坡面流水动力学参数的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2012, 40(3):264-269. (ZHANG Xiaona, FENG Jie, ZHANG Chao, et al. Influence of soil macropore on hydrodynamic parameters of overland flow with different rainfall intensities [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2012, 40 (3) : 264-269. (in Chinese))
- [14] PU J H, HUSSAIN A, GUO Yakun, et al. Submerged flexible vegetation impact on open channel flow velocity distribution: an analytical modelling study on drag and friction [J]. Water Science and Engineering, 2019, 12 (2) : 121-128.
- [15] HUTHOFF F, AUGUSTIJN D 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.
- [16] 吴福生,姜树海. 柔性植物与刚性植物紊流特性研究 [J]. 水动力学研究与进展, 2008, 23 (2) : 158-165. (WU Fusheng, JIANG Shuhai. Turbulent characteristics in open channel with flexible and rigid vegetation [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2008, 23 (2) : 158-165. (in Chinese))
- [17] NEPF H M. Drag, turbulence, and diffusion in flow through emergent vegetation [J]. Water Resources Research, 1999, 35 (2) : 1985-1986.
- [18] PANIGRAHI K, KHATUA K K. Prediction of velocity distribution in straight channel with rigid vegetation [J]. Aquatic Procedia, 2015 (4) : 819-825.
- [19] 余伟伟,李艳红,喻国良. 含淹没植物的水流阻力试验研究 [J]. 水利水电技术, 2010, 41 (3) : 24-28. (SHE Weiwei, LI Yanhong, YU Guoliang. Experimental study on resistance to flow through submerged vegetation [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2010, 41 (3) : 24-28. (in Chinese))
- [20] KOTHYARI U C, HAYASHI K, HASHIMOTO H. Drag coefficient of unsubmerged rigid vegetation stems in open channel flows [J]. Journal of Hydraulic Research, 2009, 47 (6) : 691-699.
- [21] SHAN Yuqi, LIU Xingnian, YANG Kejun, et al. Analytical model for stage-discharge estimation in meandering compound channels with submerged flexible vegetation [J]. Advances in Water Resources, 2017, 108:170-183.
- [22] BUSARIA O, LI C W. A hydraulic roughness model for submerged flexible vegetation with uncertainty estimation [J]. Journal of Hydro-environment Research, 2015, 9 (2) : 268-280.
- [23] SCHOELYNCK J, MEIRE D, BAL K, et al. Submerged macrophytes avoiding a negative feedback in reaction to hydrodynamic stress [J]. Limnologica-Ecology and Management of Inland Waters, 2013, 43 (5) : 371-380.
- [24] 惠二青,曹广晶,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. (HUI Erqing, CAO Guangjing, HU Xing'e, et al. Analysis on vertical distribution of flow turbulence density through vegetation community [J]. Water Power, 2010, 36 (10) : 3-6. (in Chinese))

- [25] 惠二青,江春波. 植被群落之间水流流速垂向分布计算方法[J]. 水力发电学报,2011,30(1):84-88. (HUI Erqing, JIANG Chunbo. A calculation method of flow velocity vertical distribution among vegetation community [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2011,30(1):84-88. (in Chinese))
- [26] 陈正兵,江春波,张帝,等. 圆形植被群的水流与阻力研究[J]. 四川大学学报(工程科学版),2012,44(增刊2):233-236. (CHEN Zhengbing, JIANG Chunbo, ZHANG Di, et al. Exit velocity and drag coefficient of circular vegetation patch[J]. Journal of Sichuan University (Engineering science edition), 2012, 44 (Sup2): 233-236. (in Chinese))
- [27] VELASCO D, BATEMAN A, REDONDO J M, et al. An open channel flow experimental and theoretical study of resistance and turbulent characterization over flexible vegetated linings [J]. Flow Turbulence & Combustion, 2003,70(1/2/3/4):69-88.
- [28] 胡旭跃,李冬,曾光明,等. 植物高度非均匀性对明渠床面糙率影响的试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2008,35(6):67-71. (HU Xuyue, LI Dong, ZENG Guangming, et al. Experimental study on the resistance characteristics of non-uniformity vegetation height in open channels [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences),2008,35(6):67-71. (in Chinese))
- [29] 槐文信,韩杰,曾玉红,等. 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. (HUAI Wenxin, HAN Jie, ZENG Yuhong, et al. Experimental study on hydraulic behaviors of steady uniform flow in open channel with submerged flexible vegetation[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2009,40(7):791-797. (in Chinese))
- [30] BARROS A P, COLELLO J D. Surface roughness for shallow overland flow on crushed stone surfaces [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2001,127(1):38-52.
- [31] WANG Xiekang, YAN Xufeng, ZHOU Sufen, et al. Longitudinal variations of hydraulic characteristics of overland flow with different roughness [J]. Journal of Hydrodynamics,2014,26(1):66-74.
- [32] ZHANG Shengtang, ZHANG Jingzhou, LIU Yuanchen, et al. The effects of vegetation distribution pattern on overland flow [J]. Water & Environment Journal,2018,32:392-403.
- [33] ROUHIPOUR H, ROSE C W, YU B, et al. Roughness coefficients and velocity estimation in well-inundated sheetand rilled overland flow without strongly eroding bed forms [J]. Earth Surface Processes and Landforms,1999,24(3):233-245.
- [34] SMITH M W, COX N J, BRACKEN L J. Applying flow resistance equations to overland flows [J]. Progress in Physical Geography,2007,31(4):363-387.
- [35] HOGARTH W L, PARLANGE J Y, ROSE C W, et al. Interpolation between Darcy-Weisbach and Darcy for laminar and turbulent flows [J]. Advances in Water Resources,2005,28(10):1028-1031.
- [36] 何文学,魏恩甲,李茶青. 明渠水流阻力系数计算公式分析与比较[J]. 长江科学院院报,2002,19(2):15-18. (HE Wenxue, WEI Enjia, LI Chaqing. Analysis and comparison of calculating fomulas about resistance coefficient of open-channel flow [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2002,19(2):15-18. (in Chinese))
- [37] 詹昊,李万平,方秦汉,等. 不同雷诺数下圆柱绕流仿真计算[J]. 武汉理工大学学报,2008,30(12):129-132. (ZHAN Hao, LI Wanping, FANG Qinhan, et al. Numerical simulation of the flow around a circular cylinder at varies Reynolds number [J]. Journal of Wuhan University of Technology,2008,30(12):129-132. (in Chinese))
- [38] 张宽地,王光谦,吕宏兴,等. 坡面浅层明流流态界定方法之商榷[J]. 实验流体力学,2011,25(4):67-73. (ZHANG Kuandi, WANG Guangqian, LYU Hongxing, et al. Experimental research on airfoil-shaped flow flume [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics,2011,25(4):67-73. (in Chinese))
- [39] 杨玲霞,高珊珊,仇军,等. 明渠均匀流弗劳德数随水深变化的变化规律[J]. 水电能源科学,2016,34(11):109-112. (YANG Lingxia, GAO Shanshan, QIU Jun, et al. Variation law of Fr number with depth of water in open channel uniform flow [J]. Water Resources and Power,2016,34(11):109-112. (in Chinese))
- [40] WU Fuchun, SHEN H W, CHOU Yiju. Variation of roughness coefficients for unsubmerged and submerged vegetation [J]. Journal of Hydraulic Engineering,1999,125(9):934-942.
- [41] WILSON C A M E. Flow resistance models for flexible submerged vegetation [J]. Journal of Hydrology,2007,342(3):213-222.
- [42] 吴福生. 河道漫滩及湿地上淹没柔性植物水流的紊流特性[J]. 水利学报,2007,38(11):1301-1305. (WU Fusheng. Turbulent characteristics of flow on floodplains and wetlands with flexible vegetations [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2007,38(11):1301-1305. (in Chinese))

(收稿日期:2018-12-04 编辑:郑孝宇)