

不同坡度条件下“沙棘植物柔性坝”的阻水效应

张鸿敏, 杨方社, 李浩, 亓潘, 韩琛

(西北大学 城市与环境学院, 陕西 西安 710127)

摘要: [目的] 探讨不同坡度条件下“沙棘植物柔性坝”对水流流速和水深的影响, 并分析和沟床糙率系数的变化及其主要影响参数, 为“沙棘植物柔性坝”这一水土保持生态工程在山区沟道的推广应用提供理论依据。[方法] 基于野外水流试验, 根据试验数据, 运用理论分析的方法, 探讨“沙棘植物柔性坝”对水流的影响及沟道糙率的变化。探讨在不同坡度条件下“沙棘植物柔性坝”对流速变幅值、水深沿程分布的影响, 并对糙率系数的变化进行了分析。[结果] 流速变幅值的大小与沙棘柔性坝坝长、种植密度和床面坡度有关; 在沙棘柔性坝较长的试验床中, 流速变幅值随着坡度的增大而增大; 在沙棘种植密度较大的试验床中, 上游区的雍水深度和糙率系数值随坡度的增大而增大。[结论] “沙棘植物柔性坝”对坝前水流流速有明显的衰减阻滞作用, 其中柔性坝坝长和植物种植密度是影响“沙棘植物柔性坝”阻水效应的主要因素。

关键词: 沙棘植物柔性坝; 床面坡度; 水流流速; 水深; 粗糙率系数

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2017)01-0023-06

中图分类号: S175.1

文献参数: 张鸿敏, 杨方社, 李浩, 等. 不同坡度条件下“沙棘植物柔性坝”的阻水效应[J]. 水土保持通报, 2017, 37(1): 023-028. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2017.01.004; Zhang Hongmin, Yang Fangshe, Li Hao, et al. Water blocking effect of “seabuckthorn plant flexible dam” under different slopes[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(1): 023-028. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2017.01.004

Water Blocking Effect of “Seabuckthorn Plant Flexible Dam” Under Different Slopes

ZHANG Hongmin, YANG Fangshe, LI Hao, QI Pan, HAN Chen

(College of Urban and Environmental Science, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710127, China)

Abstract: [Objective] The objective of the study is to investigate the effect of the seabuckthorn plant flexible dam (SPFD) on the longitudinal distribution of flow velocity and water depth, and to analyze the variation of the roughness coefficient and related influencing factors, thus providing the theoretical support for the application and extension of the SPFD, one of the ecological engineering for soil and water conservation, in the mountainous region. [Methods] We carried out the field flow experiment and used the theoretical analysis to investigate the effect of the SPFD on water flow and the variation of gully roughness coefficient. We also assessed the effect of the SPFD on the longitudinal distribution of flow velocity and water depth, and analyzed the roughness coefficient variation along the pathway direction under the different slopes of the test bed. [Results] The amplitude of flow velocity variation was related to the dam length, the plantation density of the seabuckthorn and the test bed slopes. The flow velocity variation amplitude increased with the increasing slope of the test bed with the longer SPFD. The heap water depth and the roughness coefficient at the upstream zone increased with increasing slope within the test bed with the higher seabuckthorn plant density. [Conclusion] The seabuckthorn plant flexible dam has obvious blocking effect on flow velocity in the front of the dam, and the dam length and the plant density are the main factors affecting the blocking effect of the SPFD.

收稿日期: 2016-04-11

修回日期: 2016-07-01

资助项目: 国家自然科学基金项目“沙棘柔性坝拦沙机理及其拦沙效应优化的试验研究和数值模拟”(51279163)

第一作者: 张鸿敏(1990—), 男(汉族), 青海省民和县人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持和非点源污染治理。E-mail: zhm6903@126.com。

通讯作者: 杨方社(1975—), 男(汉族), 陕西省武功县人, 博士, 教授, 主要从事河流泥沙动力学及生态工程应用研究。E-mail: yangfangshe978@163.com。

Keywords: seabuckthorn plant flexible dam; test bed slope; flow velocity; flow depth; roughness coefficient

随着水土流失和生态环境的恶化,植物措施已经成为拦沙防洪和生态修复的一种重要的技术方法,早在 70 年代,国外一些学者^[1]对植物的高植物树干对水流和泥沙的干扰作用进行了研究;接着一些学者^[2]对树木加糙后的漫滩水流阻力增大等特性、天然植物的护岸、消浪和防洪作用进行了试验研究和分析,认为植物对水流作用的最大效果是极大地降低了植物群内的水流流速。Panigrahi K^[3]选用刚性圆柱杆作为模型植物在室内水槽内进行植物阻水的模拟试验,发现在河道中种植植物能够延缓水流流速,而且还能引起水流能量的损失;Yagci O 等^[4]在实验室水槽中选用不同的挺水植物来研究植物对水流的结构和紊动能特征变化,发现直立状的植物比扁平状的植物有更好的阻水效应;Sadeghi M A 等^[5]运用挺水植物在室内水槽内进行试验,通过试验发现河道中的植物引起水流紊动将进一步加剧水流横向动量转移现象。

国内学者时钟等^[6]、黄本胜等^[7]运用不同的水力学参数对植物水流的流速特性进行了描述和研究,取得了不少成果。新疆农业大学邱秀云等^[8]在室内利用模型树沙棘,进行了沙棘植物对水流阻滞特性浑水模型试验;拾兵等^[9]在四川大学的高速水力学国家重点实验室内,用羽毛模拟沙棘植物,开展了沙棘植物滞流拦沙机理方面的试验,也取得了不少成果;杨克君等^[10]探讨了不同滩地植物(乔木、灌木和野草)对复式河槽流速分布的影响,发现植物水流流速的垂向分布有一定的影响;李波等^[11]在室内进行了模型试验,研究在岸边布置不同排列方式的挺水植物对水流的影响,发现阻水效果随挺水植物的布置方式不同而不同;闫静等^[12]通过室内试验发现植物非淹没条件下的纵向平均流速可以表示为流量、渠宽、水深和植物密度的函数;惠二青等^[13]在室内水槽种植灌木植被和灌木—草本植被进行试验,发现植被之间水流纵向流速垂向分布近似为双曲线,植被冠层以上流速垂向分布符合幂函数曲线。罗宪等^[14]在室内水槽选用竹签模拟乔木探讨了不同滩地植被密度、植被高度对复式河槽流速分布的影响。张伟等^[15]通过草皮护坡糙率试验发现草皮糙率值的大小与草皮的茎叶大小、植被的韧性、植株的密度和水流流速密切相关。叶一隆等^[16]在实验室玻璃水槽中种植布袋莲来探究该植物对渠槽曼宁系数的影响,通过计算求得覆盖布袋莲之渠槽曼宁系数随着流速变化。

以上这些试验研究都是在室内进行的,大多数选用的是模型树,并非真实的植物,具有一定的局限性,

西安理工大学李怀恩等^[17]应用 PIV (particle image velocimetry) 技术开展了沙棘植物对水流表面流速影响的试验,采用粒子图像跟踪测速技术对水流流速进行试验,但是 PIV 法测得的流速只是沙棘柔性坝表面流速,未能测量水流表面以下的流速,所以在野外进行对水流表面以下流速的测定和研究是有必要的。

河道中种植植物能不仅能降低河床的水沙侵蚀效应来维持河床的稳定性,而且拦截水中的悬浮颗粒物,使得河流水质得到改善^[18]。“沙棘植物柔性坝”和普通混凝土大坝一样具有拦沙蓄水的作用,在小流域沟道中按一定的行距和株距,在垂直于水流方向种植的一排排沙棘植物体。河道中的普通混凝土大坝直接切断了上下游的水力联系,并切断了上下游生物的栖息通道,使之丧失了沟道生态系统的连通性。沙棘柔性坝可减缓沟道水流流速,使泥沙沉积于柔性坝的底部,在沙棘植物根部逐渐形成一个凸起的坝体,以此进一步增强沙棘柔性坝的拦沙效应。而沙棘柔性坝不仅具有透水、自我繁殖、柔性变形与动态生长、自然增高的作用,而且还能贯通上下游动植物的栖息环境、发挥拦沙保水与恢复沟道生态系统的作用^[19]。为了研究在不同坡度条件下“沙棘植物柔性坝”的阻水效应,在野外试验基地,采用 ZLY-I 型智能流速仪来测量水流流速,水深采用最小刻度为 1 mm 的 50 cm 钢尺沿边墙水面线沿程进行测量。根据试验数据,本文拟就“沙棘植物柔性坝”对水流流速以及水深沿程分布的影响进行分析和讨论,并对曼宁糙率系数进行计算和探讨,以期有助于人们对植物滞流拦沙机理的认识,并为“沙棘植物柔性坝”这一拦沙生态工程的推广应用提供理论依据。

1 试验概况和设计

1.1 研究区概况

本次试验是在陕西省宝鸡市眉县首善镇余管营村的野外沙棘试验基地开展的,试验地土壤为黄黏土,土壤有机质含量为 8.18~34.34 g/kg, pH 值范围在 7.15~8.5,属于微碱性土壤。沙棘植物是在 2015 年 3 月栽植的,均采用交错梅花型布置方式进行栽植,种植参数和沙棘植物的平均生长情况如表 1。

1.2 试验设施

本试验基地的主要试验设施包括:蓄水池、矩形量水堰、消力池、沙棘柔性坝试验床、排水渠。试验设施的布置见图 1,从机井抽出来的水进入蓄水池,蓄水池长 8 m,宽 4 m,深 1.2 m,试验中,水流从蓄水池流出进入量水堰,从量水堰流出的水流经过引水渠进

入消力池,水流平稳后最后流入试验床内的沙棘柔性坝。5 个试验床,分别设有 5 个独立引水渠和 5 个独立消力池,每个引水渠都有一个闸门,可以任意控制其开和闭。

本试验水流的流速用南京瑞迪高新技术公司的 ZLY-I 型智能流速仪来测定(图 2)。

表 1 沙棘柔性坝交错梅花型种植参数及沙棘生长特性平均值

试验床编号	1	2	3	4	5
排列方式 ($a \times b \times p$)	15×80×9	12×80×6	15×80×6	15×160×5	—
坝长/m	6.4	4.0	4.0	6.4	—
种植数量/棵	77	63	51	43	—
种植密度 (棵·m ⁻²)	4.9	4.0	3.2	2.8	—
试验床面总长/m	13	13	13	13	13
株高/cm	56.6	71.4	55.5	68.0	—
冠幅/cm	25.6	27.2	33.7	34.8	—
基径/cm	7.4	8.3	9.8	9.7	—

注: a 为株距(cm); b 为行距(cm); p 为排数。



图 1 试验设施实物图



图 2 ZLY-I 型智能流速仪

ZLY-I 型智能流速仪可与多个流速传感器相连,仪器自动测量流速传感器叶轮的转速,将叶轮转速自

动储存,并在面板显示屏上显示转速出来。智能流速仪通过串口通信口与电脑连接通讯,只要将流速传感器的流速与转速之间的率定关系输入电脑专用软件的数据文件中,智能流速仪根据电脑的指令将流速传感器的叶轮转速迅速准确的传送到电脑中,由电脑中的相应程序自动记录数据,并根据相应的流速的率定曲线关系式转换为相关的流速形成文本文件。试验所测的流速是指沿横断面方向垂直向下距水流表面 2 cm 深的水流流速。

1.3 水力参数计算

1.3.1 断面平均流速 平均流速是水流强度的主要衡量指标,根据水流的连续性方程,断面垂线平均流速 v 可采用下面公式来进行求解,其计算公式为:

$$v=Q/A \quad (1)$$

$$A=h(a+b)/2 \quad (2)$$

式中: A ——过水断面面积(m²); Q ——试验水流流量(m³/s),本次试验选取的流量为 0.03 m³/s; h ——实测断面平均水深(m),在植物排前 10 cm 处断面两边和中间 3 个点进行测量水深值,然后求取平均值(过水断面是梯形断面); a ——试验床沟道水面宽(m); b ——试验床沟道底宽(m),本次试验取 1.17 m, b 取 1.05 m。

1.3.2 曼宁粗糙系数(n) 曼宁粗糙系数计算公式^[20]为:

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

式中: R ——水力半径(m)近似取断面平均水深 h (m); i ——水力坡度,近似取沟道床坡度。

2 结果与分析

2.1 不同坡度条件下“沙棘植物柔性坝”对水流流速的影响

在试验过程中运用水泵,保持水流流量恒定,且流量值 $Q=0.03$ m³/s,由于沙棘植物柔性坝对坝前水流有明显的阻力效应^[21],为了探讨不同坡度下“沙棘植物柔性坝”对水流流速的影响,在本次试验中距每个沙棘植物排前 10 cm 处作为测流速的试验点来测流速大小,选取的床面坡度分别为 1%、5% 和 10%。

流速仪在断面处测出 8 个点的流速值之后求取平均值,运用公式 $\eta=(v_0-v_i)/v_0$ (v_0 是沟道沿程 30 cm 处的流速平均值, v_i 是第 i 排沙棘植物前的流速平均值)计算出流速变幅值来进行分析不同断面流速的沿程变化情况。图 3 是在不同坡度下各试验床不同断面平均流速变幅值 η 沿程变化状况图。

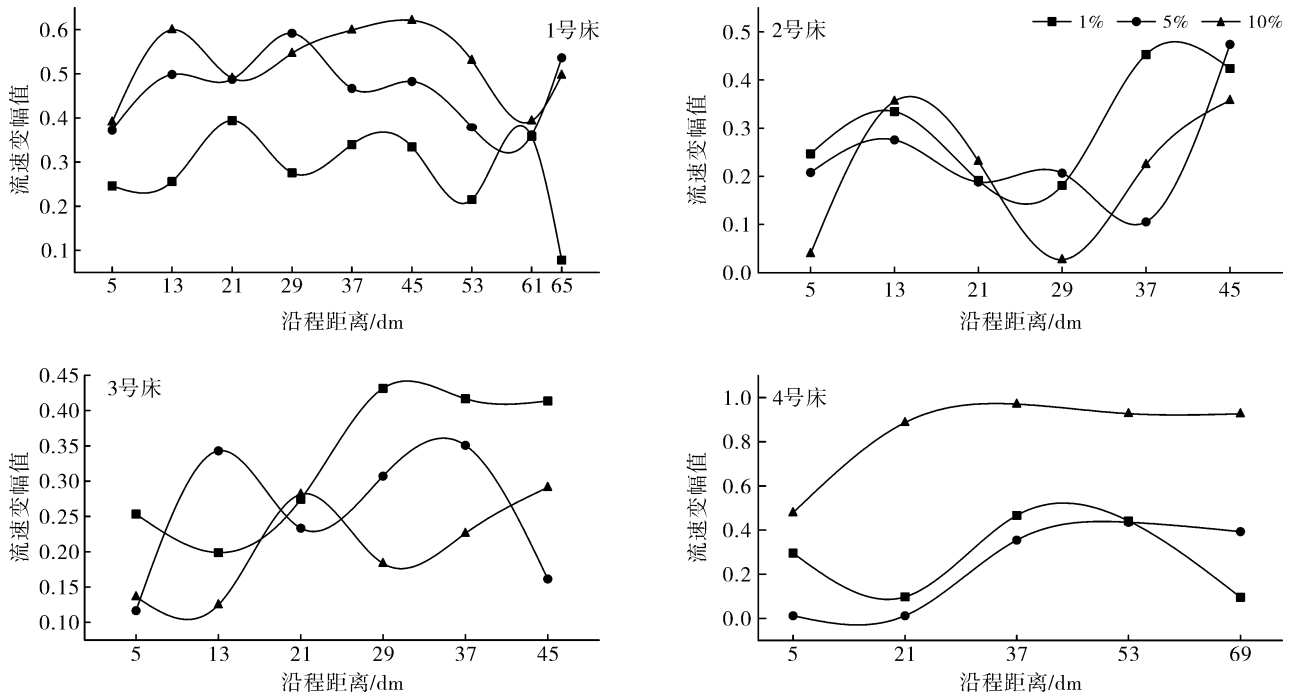


图 3 不同坡度条件下各试验床不同断面平均流速变幅值沿程变化趋势

从图 3 中可以看出,在各排沙棘的作用下,平均流速的变幅值都是大于零的,这说明在各排沙棘的作用下,对沙棘植物排前水流流速的衰减是非常明显的。从 1 号床的流速沿程变化可以看出,在 10% 坡度条件下,其流速衰减效应是最好的,其次是 5%,然后是 1%;流速变幅值在前两排沙棘植物前是增加的,这可以说明在前 2 排沙棘植物的阻挡作用下,流速减小的幅度是比较大的;坡度为 1% 时,在 2.1 m 处的流速变幅值是最大的,即第 3 排沙棘植物前,其变幅值为 0.394,往后的断面的流速变幅值都小于该值,而且有波动现象;坡度为 5% 时,在 2.9 m 处的流速变幅值是最大的,即第 4 排沙棘植物前,其变幅值为 0.592,往后断面的流速变幅值都小于该值,波动幅度比较大;坡度为 10% 时,在 4.5 m 处的流速变幅值是最大的,即第 6 排沙棘植物前,其变幅值为 0.621。由此可以看出,在坝长较长时随着坡度的增大,流速的变幅值也在增大,而且流速变幅值的最大值所对应的断面是沿程往后移动的。

从 2 号床和 3 号床的流速沿程变化中可以看出,在 3 个不同坡度下 2 号床流速变幅值的波动起伏现象比 3 号床要大,和 1 号床与 4 号床相比较,2 号床与 3 号床的流速变幅值都比较小,由于 2 号床的沙棘种植密度比 3 号床的要大,2 号床种植的沙棘对水流流速的衰减效应比 3 号床要明显,尤其是在前 2 排沙棘前,第 3 排和第 4 排前的流速变幅值都在减小,往后断面的流速变幅值却在增大,坡度为 1% 时,在 3.7

m 处的流速变幅值是最大的,即第 5 排植物前,其变幅值为 0.453,坡度分别为 5% 和 10% 时,在 4.55 m 处的流速变幅值是最大的,即第 6 排植物前,其变幅值分别为 0.474,0.358。即随着坡度的增加,流速变幅值的最大值所对应的断面是沿程往后移动的。在 3 号床坡度为 1% 时,在 2.9 m 处的流速变幅值是最大的,即第 4 排植物前,其流速变幅值为 0.431,坡度为 5% 时,在 3.7 m 处的流速变幅值是最大的,即第 5 排植物前,其流速变幅值为 0.351,坡度为 10% 时,在 4.5 m 处的流速变幅值是最大的,即最后一排植物前,其流速变幅值为 0.291,也可以看出流速变幅值的最大值所对应的断面是沿程往后移动的。

1 号床和 4 号床相比较,发现 4 号床的流速变幅值沿程波动状况比 1 号床要平缓一些,各断面处的流速的变幅值都大于零,说明各沙棘植物排前的流速都小于初始值 v_0 ,沙棘植物排的阻水效应非常明显;坡度为 1% 时,在 2.1 m 处的流速变幅值是最大的,即第 3 排植物前,其流速变幅值为 0.466;坡度为 5% 时,在 2.9 m 处的流速变幅值是最大的,即第 4 排植物前,其流速变幅值为 0.435;坡度为 10% 时,在 2.1 m 处的流速变幅值是最大的,即第 3 排前,其变幅值为 0.971,这是因为该试验床的最后两排长势不是很好,与前面的沙棘长势相比,后 2 排沙棘的株高都比较矮小,阻水效应也就减弱了;当坡度从 1% 增加到 5% 时,流速变幅值的最大值所对应的断面沿程是往后移动的,而且随着坡度的增大,流速的变幅值也在增大。

2.2 不同坡度条件下“沙棘植物柔性坝”对水深的影响

在本次试验中测量了沙棘植物前的水深,选取的测水深点和测速点一样,都是距沙棘植物排前 10 cm

处,选取断面中间和两边 3 个点进行测量,然后求取平均值。图 4 是在 3 个不同坡度条件下,即 1%,5% 和 10%,恒定流量 $Q=0.03 \text{ m}^3/\text{s}$ 时沙棘植物前水深的沿程变化状况。

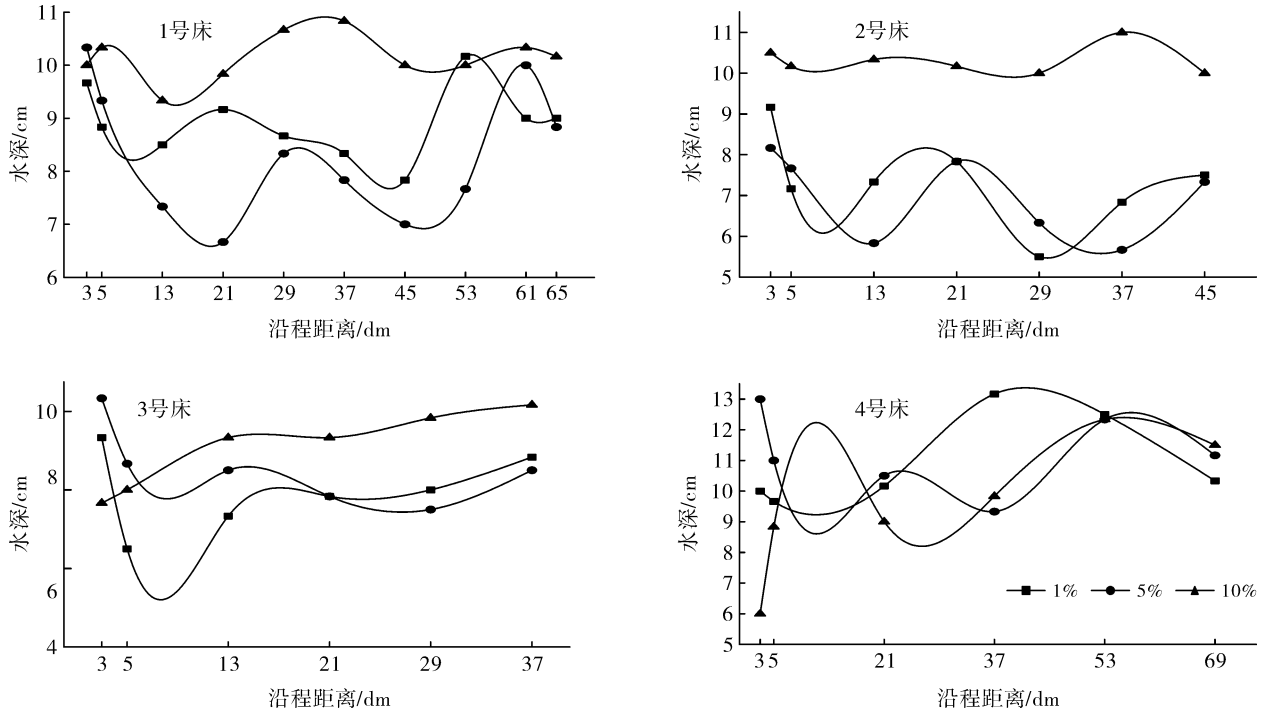


图 4 不同坡度条件下各试验床不同断面水深沿程变化率系数的变化规律

从图 4 中可以看出,4 个试验床中的水深 h 沿程变化大致都呈波浪形,入口处的前两排沙棘植物前的水深迅速减小,然后缓慢增加;随着的坡度的增大,上游区雍水深度在增加,这在 1 号和 2 号床中表现的比较明显,1 号床和 4 号床相比较,1 号床的上游区雍水深度明显比 4 号床大,同样,2 号床的上游区雍水深度明显比 3 号床大,这说明在坡度较大,沙棘柔性坝的坝长相同的条件下,沙棘植物的种植密度越大,上游区雍水深度越大。从图中还可以看出,当坡度为 1% 时,水深的沿程分布有很大的波动起伏现象,尤其在 1 号,2 号床中,当坡度为 5% 时,水深的沿程分布也有波动起伏现象,但是没有 1% 坡度那样明显,当坡度为 10% 时,水深的波动起伏状况趋于平缓,这说明在沙棘植物种植密度较大的试验床中,水深的波动起伏是随着坡度的增大而减小的。

2.3 不同坡度条件下沙棘沟道床的曼宁糙率系数

河道中的植物对水流的阻水效应机理是非常复杂的,其主要表现在植物的糙率系数上^[22],这是水力学计算过程中比较重要的问题;植物的糙率系数不是一个常数,而是随着植物的类型、生长状况、密度以及水流的深度和流速等不同而变化。在本次试验过程

中运用水泵,保持流量恒定,通过计算得出的雷诺数大于 2 300,说明试验为紊流;由于试验床中水流水深沿程是变化的,其底坡线、水面线、总水头线彼此是不平行的,可以说明试验本身就是非均匀流;在计算和分析糙率系数时,用每两个相邻断面的监测数据来计算该两个断面之间的沙棘排的糙率,因为紧密相邻的两个断面之间的距离较小,为了探讨沙棘排的糙率系数,把相邻两个断面之间的水流近似当做均匀流处理,从而可用曼宁公式进行计算。通过测得的数据和利用公式(1),(2),(3)将糙率系数进行计算和分析,表 2 是通过计算得出的 4 个试验床的糙率系数值。

表 2 中的数据是在 4 个试验床内不同断面处通过公式计算求得的,在 1 号沟道床中选取沿程 0.5, 2.1,3.7,5.3 和 6.9 m 这 5 个断面,在其他 3 个试验床中选取沿程 3 个断面,通过公式计算出的沙棘柔性坝糙率系数的范围大致介于 0.03~0.32,这与叶一隆等^[16]的研究结果比较接近,即当河道中种植有布袋莲时,根据水流流速的不同,布袋莲的曼宁糙率系数的范围为 0.026~0.416。

表 2 各个试验床不同坡度条件下计算出的糙率系数值

试验床 编号	坡度/ %	不同沿积断面的糙率系数					
		0.5/m	2.1/m	3.7/m	5.3/m	6.9/m	平均值
1	1	0.065	0.069	0.059	0.082	0.067	0.068
	5	0.159	0.091	0.119	0.114	0.145	0.126
	10	0.266	0.245	0.288	0.252	0.259	0.262
2	1	0.046	0.053	0.042	—	—	0.047
	5	0.114	0.119	0.069	—	—	0.101
	10	0.259	0.259	0.296	—	—	0.271
3	1	0.039	0.053	0.065	—	—	0.052
	5	0.140	0.119	0.136	—	—	0.132
	10	0.174	0.225	0.259	—	—	0.219
4	1	0.075	—	0.126	—	0.084	0.095
	5	0.209	—	0.119	—	0.214	0.194
	10	0.205	—	0.245	—	0.318	0.256

通过不同试验床对比发现,在沙棘种植密度较大的试验床中,不同断面的糙率系数值沿程变化幅度比较大,尤其是在 1 号床中,坡度为 10% 时沿程变化幅度较明显,最大值为 0.288,在 3.7 m 处,最小值为 0.245,在 2.1 m 处,平均值为 0.262;坡度为 5% 时,糙率系数值的最小值为 0.091,在 2.1 m 处,这是由于该处往后的沙棘长势不是很好,有缺苗的现象,未能及时补苗造成的;坡度为 1% 时只有微小的波动,由此可以看出随着坡度的增大,糙率系数值的变化幅度越大。

通过 4 个表的数据对比发现,在大坡度条件下计算得出的糙率系数值较大,这在 1 号和 2 号床中表现的比较明显,主要由于 1 号和 2 号床中种植的沙棘密度较大,坡度较大时测得的沙棘植物排前的水深较深,使得沟道内的水流能够充分接触沙棘的树枝和叶子,对水流的阻力进一步增大,由此导致在较大坡度下试验床的糙率系数较大。

3 讨论和结论

(1) 在“沙棘植物柔性坝”的作用下,每个沙棘植物排前的平均流速的变幅值都大于零,“沙棘植物柔性坝”对水流流速有非常明显的衰减作用,流速变幅值的沿程变化呈先增大,后减小,然后再增大这样一个趋势。随着坡度的增大,植物排前平均流速变幅值的最大值所对应的断面是沿程往后移动的,表明植物排前的平均流速的最小值所对应的断面是沿程往后移动的。

(2) 在坝长较长的条件下,坡度越大,植物排前流速的变幅值就越大,说明在坝长较长的沟道试验床中,当坡度较大时“沙棘植物柔性坝”对的水流流速有

非常良好的衰减作用;流速的变幅值的不同主要是由于柔性坝坝长、种植密度和床面坡度等因素造成的。

(3) 坡度越小,沙棘植物排前的水深沿程波动状况比较明显,坡度越大,植物排前的水深沿程波动状况趋于平缓;在沙棘植物种植密度较大的试验床中,上游区雍水深度较大,而且随坡度的增大而增大,这说明植物排前雍水深度的不同主要是由于沙棘植物的种植密度和床面坡度造成的。

(4) 沙棘植物的种植密度是影响沟道床糙率系数的主要参数,由于在坡度和种植密度较大的试验床中的植物排前雍水深度较深,使得水流能充分接触沙棘的树枝和叶子,阻水效应进一步增大,由此可以说明糙率系数随坡度的增大而增大。

(5) 为了降低河床的水沙侵蚀效应,建议在坡度较大的河道中种植植物尽量增加其柔性坝坝长,若经济状况还能允许,还可以增大植物的种植密度,这样不仅能维持河床的稳定性,而且还能有效地拦截水流中的泥沙。

[参 考 文 献]

- [1] Ming R H, Shen H W. Effect of tall vegetations on flow and sediment[J]. Journal of the Hydraulics Division, 1973,99(5):793-814.
- [2] Pasche E, Rouvé G. Overbank flow with vegetatively roughened flood plains[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1985,111(9):1262-1278.
- [3] Panigrahi K, Khatua K K. Prediction of velocity distribution in straight channel with rigid vegetation [J]. Aquatic Procedia, 2015(4):819-825.
- [4] Yagci O, Tschiesche U, Kaldasli M S. The role of different forms of natural riparian vegetation on turbulence and kinetic energy characteristics [J]. Advances in Water Resources, 2010,33(5):601-614.
- [5] Sadeghi M A, Bajestan M S, Saneie M. Experimental investigation on flow velocity variation in compound channel with non submerged rigid vegetation in flood plain[J]. World Applied Science Journal, 2010,9(5):489-493.
- [6] 时钟,李艳红.含植物河流平均流速分布的实验研究[J].上海交通大学学报,2003,37(8):1254-1260.
- [7] 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:A辑,1999,14(4):468-474.
- [8] 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.
- [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,1998,24(4):354-357.

(下转第 33 页)

- 分循环平衡特征[J]. 农业工程学报, 2006, 22(1): 58-64.
- [5] 张丽娟, 毕淑芹, 袁丽金, 等. 不同土地利用方式土壤侵蚀与养分流失的模拟试验[J]. 林业科学, 2007, 43(S1): 17-21.
- [6] 高杨, 宋付朋, 马富亮, 等. 模拟降雨条件下 3 种类型土壤氮磷钾养分流失量的比较[J]. 水土保持学报, 2011, 25(2): 15-19.
- [7] 杨丽霞, 杨桂山, 苑韶峰, 等. 不同施肥水平下太湖流域典型蔬菜地土壤磷素径流特征[J]. 中国环境科学, 2007, 27(4): 518-523.
- [8] Smith K A, Jackson D R, Pepper T. Nutrient losses by surface runoff following the application of organic manures to arable land: Nitrogen[J]. Environmental pollution, 2001, 112(1): 41-51.
- [9] 王辉, 王全九, 邵明安. 人工降雨条件下黄土坡面养分随径流迁移试验[J]. 农业工程学报, 2006, 22(6): 39-44.
- [10] 林超文, 陈一兵, 黄晶晶, 等. 不同耕作方式和雨强对紫色土养分流失的影响[J]. 中国农业科学, 2007, 40(10): 2241-2249.
- [11] 孙飞达, 蒋志荣, 王立. 不同降雨强度下农地的产流产沙研究[J]. 甘肃科学学报, 2005, 17(1): 53-56.
- [12] 徐向舟, 刘大庆, 张洪武, 等. 室内人工模拟降雨试验研究[J]. 北京林业大学学报, 2006, 28(5): 52-58.
- [13] 李广, 黄高宝. 模拟降雨与水土流失试验研究[J]. 农业系统科学与综合研究, 2008, 24(4): 443-445.
- [14] 汪兴中, 蔡庆华, 李凤清, 等. 南水北调中线水源区溪流生态系统健康评价[J]. 生态学杂志, 2010, 29(10): 2086-2090.
- [15] 白丹, 王玮, 孙健, 等. 南水北调中线水源区水土保持生态建设探析[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 2010, 40(2): 348-350.
- [16] 尹炜, 史志华, 雷阿林. 丹江口水库水环境问题分析研究[J]. 人民长江, 2011, 42(13): 90-94.
- [17] 蔡崇法, 丁树文, 史志华, 等. GIS 支持下三峡库区典型小流域土壤养分流失量预测[J]. 水土保持学报, 2001, 15(1): 9-12.
- [18] 余雕, 吴发启. 坡耕地侵蚀泥沙养分富集规律研究[J]. 西北林学院学报, 2007, 22(3): 29-31.
- [19] 马琨, 王兆骞, 陈欣, 等. 不同雨强条件下红壤坡地养分流失特征研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16(3): 16-19.
- [20] 郭树宏, 王菲凤, 吴春山, 等. 山仔水库典型样地次降雨径流过程磷流失特征研究[J]. 安全与环境学报, 2009, 9(3): 95-99.
- [21] 余长洪, 李就好, 陈凯, 等. 强降雨条件下砖红壤坡面产流产沙过程研究[J]. 水土保持学报, 2015, 29(2): 7-10, 54.

(上接第 28 页)

- [10] 杨克君, 刘兴年, 曹叔尤, 等. 植被作用下的复式河槽流速分布特性[J]. 力学学报, 2006, 38(2): 246-250.
- [11] 李波, 柏青, 李春生, 等. 植物柔性坝布置方式对水流的影响[J]. 水电能源科学, 2014, 32(3): 118-121.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 罗宪, 房春艳, 单钰淇, 等. 植物特性对复式河槽流速分布影响的试验研究[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2010, 29(3): 466-469.
- [15] 张玮, 钟春欣, 应翰海. 草皮护坡水力糙率试验研究[J]. 水科学进展, 2007, 18(4): 483-489.
- [16] 叶一隆, 朱家民, 陈智谋. 布袋莲对渠槽曼宁系数之影响[J]. 水利学报, 2005, 36(9): 1127-1132.
- [17] 李怀恩, 杨方社, 张日俊, 等. 沙棘柔性坝对水流影响的野外试验研究[J]. 水力发电学报, 2009, 28(1): 124-129.
- [18] Wang Chao, Zheng Shasha, Wang Peifang, et al. Interactions between vegetation, water flow and sediment transport: A review[J]. Journal of Hydrodynamics: Ser. B, 2015, 27(1): 24-37.
- [19] 杨方社, 李怀恩, 曹明明, 等. 基于 PIV 技术的沙棘柔性坝影响下水流表面流速沿程变化特性试验分析[J]. 试验流体力学, 2011, 25(1): 59-64.
- [20] 李大美. 水力学[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2004.
- [21] 杨方社, 李怀恩, 杨寅群, 等. 沙棘植物对水流表面流速横向分布影响的 PIV 野外试验[J]. 水力发电学报, 2011, 30(3): 132-137.
- [22] 杨方社, 李怀恩, 曹明明. 沙棘植物柔性坝糙率系数的野外水流试验[J]. 水土保持通报, 2011, 34(4): 94-98.