

沙棘植物柔性坝糙率系数的野外水流试验

杨方社^{1,2}, 李怀恩², 曹明明¹

(1. 西北大学 城市与环境学院, 陕西 西安 710069;

2. 西安理工大学 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘 要: 为了研究沙棘植物柔性坝的糙率系数, 在陕西省华县小华山水库沙棘植物柔性坝进行了沙棘植物柔性坝野外水流试验。运用河流泥沙动力学理论推导了沙棘植物柔性坝的糙率估计公式, 并对一定生长长期非淹没流的沙棘植物柔性坝的糙率系数进行了估算。结果表明, 沙棘柔性坝的糙率范围大致介于 0.04 ~ 0.09 的范围内; 并基于野外水流试验数据, 按照河流动力学方法对沙棘植物柔性坝的糙率系数进行了反推计算, 所得结果与用理论公式估计的结果比较吻合, 表明沙棘植物柔性坝糙率理论估计公式可用于对沙棘植物柔性坝的糙率估计, 这对于进一步深入研究沙棘植物柔性坝的拦沙效应与机理具有重要意义。

关键词: 沙棘植物柔性坝; 糙率系数; 植物阻力; 野外试验

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2011)04-0094-05

中图分类号: TV143

Roughness Coefficient of Seabuckthorn Plant Flexible Dam Under Field Water-flow Experiment

YANG Fang-she^{1,2}, LI Hua-en², CAO Ming-ming¹

(1. College of Urban and Environmental Science, Northwest University, Xi'an,

Shaanxi 710069, China; 2. Key Lab for Northwest Water Resources and Eco-environment of Ministry of Education, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: In order to analyze the roughness coefficient of the seabuckthorn plant flexible dam, a field water flow test on the seabuckthorn plant flexible dam was conducted in the seabuckthorn plant flexible dam test base in Xiao-hua-shan Reservoir, Huaxian County, Shaanxi Province. The estimation formula of the seabuckthorn plant flexible dam's roughness coefficient was derived by the river sediment dynamics theory, and the roughness coefficients of the seabuckthorn plant flexible dam were evaluated by the formula under non-submerged flow during some growth stage. The results indicated that the seabuckthorn flexible dam's roughness coefficient was approximately within the range of 0.04~0.09. The roughness coefficient of the seabuckthorn plant flexible dam was inversely deduced and calculated from the field flow test data by the river dynamics method, and it was found that the result was in accord with that calculated by the theory evaluation formula. It was suggested that the theoretic estimation formula could be used to evaluate the roughness coefficient of the seabuckthorn plant flexible dam, and it was of great value to further study the effects and mechanism of the seabuckthorn plant flexible dam on sediment retention.

Keywords: seabuckthorn plant flexible dam; roughness coefficient; plant resistance; field experiment

砒砂岩地区主要集中于晋、陕、蒙接壤区域, 是典型的黄土高原多沙粗沙区, 是黄河中上游泥沙的主要来源区之一。砒砂岩风干后其硬如顽石、遇水则稀如软泥, 不能生长草木植物, 对生态环境危害很大, 当地群众形容其毒性如砒霜, 故俗称砒砂岩。沙棘植物柔

性坝由我国水土保持专家毕慈芬^[1]提出, 是为了治理砒砂岩地区沟道水土流失与恢复生态植被而提出的一种新型生物措施。它是利用沙棘的生物特性, 模拟拦沙蓄水的水库大坝, 在小流域沟道中按一定的行距、株距, 按照一定的种植方式, 在垂直于水流方向种

收稿日期: 2010-11-14

修回日期: 2010-12-22

资助项目: 陕西省自然科学基金项目“流域水沙响应下沙棘柔性坝的设计理论与实验研究”(2010JK5003); 陕西省教育厅自然科学基金项目(2010JK883); 西北大学科研启动项目(oky qf16)

作者简介: 杨方社(1975—), 男(汉族), 陕西省武功县人, 博士, 副教授, 主要从事生态水力学及水土资源与环境方面的研究。E-mail: yangfangshe978@163.com。

植的一排排能够透水的沙棘植物体,称之为沙棘植物柔性坝。沙棘植物柔性坝是利用沙棘植物对水流形成的阻力消耗水流的动量和能量,降低水流流速,减小水流剪切力,使泥沙沿程落淤,从而达到拦截沟道泥沙或减缓沟道泥沙下泄的目的。近年来,沙棘植物柔性坝在治理砒砂岩地区的水土流失已初见成效,取得了巨大的成功^[2-3],但是关于沙棘植物柔性坝拦沙机理方面的研究仍显薄弱,目前虽然在室内进行了一些水槽试验^[4-5],对水槽内沙棘植物柔性坝丛内水深和流速的沿程变化进行了一些分析与探讨,但缺乏对沙棘植物柔性坝阻力方面问题的研究,而且试验中用塑料模型树代替沙棘原型树,研究本身就存在变形相似方面的缺陷。因此,沙棘植物的阻力问题是研究沙棘植物柔性坝拦沙机理的基础,具有重要意义。

植物的阻力问题非常复杂,主要表现在植物的糙率系数上,是水力学计算中比较重要的问题,国内外众多学者对不同种类植物的糙率系数进行了研究^[6-14],并取得了一定的研究成果,但是植物的糙率因植物的种类、柔性、韧性与高矮影响较大而有所不同。

本研究在已有的针对不同种类植物阻力问题研究的基础上,基于沙棘植物柔性坝野外水流试验,结合理论分析,对沙棘植物柔性坝的糙率系数进行分析与探讨,从理论上推导了沙棘植物柔性坝的糙率系数计算公式,对沙棘植物柔性坝糙率系数的取值范围进行了分析与讨论,研究结果可对后续采用水沙数学模型模拟研究沙棘植物柔性坝的拦沙效应奠定基础,对

于深入研究沙棘植物柔性坝的拦沙机理也具有重要意义。

1 试验设计

试验在陕西省华县小华山水库左岸坡地的西安理工大学沙棘野外试验基地进行。试验地土壤类型为沙壤土,土壤有机质含量为 4.9~ 6.34%, pH 值范围为 8.16~ 8.23,土壤粒径大于 5 mm 的比例为 1.34%,小于 5 mm 的比例为 98.66%。共设计 4 个沙棘柔性坝试验床,编号为 1[#], 2[#], 3[#], 4[#];沙棘柔性坝均采用沙棘原型树,并以交错的梅花型方式种植(图 1),各坝种植参数见表 1。试验主要观测内容为试验床沿程最大水深及坝前、坝中、坝后流速场的变化。试验前进行沙棘的生长调查,沙棘平均生长情况(表 2)。

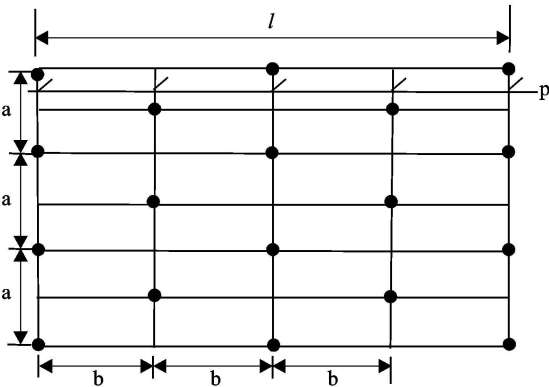


图 1 沙棘交错布置方式
注: a 为株距(cm); b 为行距(cm); P 为排数; l 为坝长(cm)。

表 1 沙棘柔性坝的种植参数

坝 号	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]
排列方式($a \times b \times P$)	30× 100× 5	40× 100× 8	50× 250× 5	30× 150× 8
坝长/ m	4	7	10	10. 5
种植棵数/ 棵	43	52	15	52
种植密度/(棵· m ^{- 2})	3	2	1	2

表 2 沙棘平均生长特性值

坝号	株高/ cm	冠幅/ cm	基径/ cm
1 [#]	64. 8	53. 6	1. 2
2 [#]	76. 1	57. 6	1. 2
3 [#]	42. 2	24. 4	0. 7
4 [#]	51. 3	39. 9	1. 3

1. 1 试验原型树的生理特性

试验床中均种植的是沙棘原型树。沙棘属胡颓子科,与其它灌木一样,具有发达的旁生枝,且在水动

力作用下易发生挠曲变形。沙棘喜光、耐旱又耐涝、耐寒,能忍受零下 50 ℃严寒带和 60 ℃的地面高温,在年降雨量为 200 mm 的干旱地区可以生长,也能耐受季节性积水;对土质要求不严,在 pH 值 9. 5 的碱性土和含盐量达到 1. 1% 的盐碱化土壤上均可较好生长;沙棘根系发达,侧根水平发展可达 10 m 以上,深根土层可达 4 m;根有根瘤,能固空气中的游离氮素;生长迅速,根萌蘖力强,是在号称地球癌症的“砒砂岩”地区保持水土、防治荒漠化的先锋树种^[15]。

1.2 试验设施

本次试验设施主要包括:蓄水池、消力池、沙棘柔性坝试验床。试验床沙棘柔性坝平面布置及尺寸如图 2 所示,流速测量采用粒子图像测速技术(PIV)法测定。

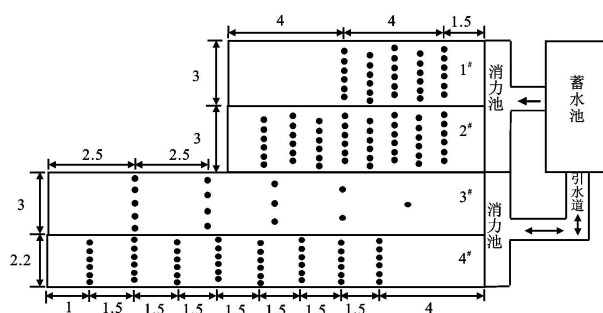


图 2 试验床布置图

注:长度单位为 m。

1.3 试验方法

蓄水池的水流通过消力池平稳地流入沙棘柔性坝试验床,蓄水池进口流量通过矩形闸门按照泄流曲线人工控制,使试验床内水流为恒定非淹没流流态。将试验床从进水口起算每隔 0.5 m 设置一个监测断面,直至坝尾。试验中,水深采用 50 cm 钢尺沿边墙的水面线沿程进行测量。流速测量采用先进的粒子图像测速技术(PIV)法测,PIV 法的优点是可实现无接触测量,不会干扰流场,能够测量瞬时流速场,在多领域得到了广泛应用^[16]。试验中采用的数码摄像机频率为 30 帧/s,本试验所采集的图像为间隔 3 帧采集 1 帧,示踪粒子为反光性能良好并与水的密度相当的粒径大约为 6 mm 的近似圆形特种硬质塑料,能够沉浮于水中。试验完成后运用计算机软件分析所采集的图像,计算出植物丛内的水流流速场数据,并用 Visual Fortran 语言编程提取出断面平均流速,对于提取的断面平均流速采用流体力学一维总流连续方程($V = Q/A$, Q 为实测流量; A 为各断面实测过水面积)检验。

2 沙棘柔性坝糙率系数估计与分析

2.1 沙棘柔性坝糙率系数计算

沙棘植物柔性坝的水流阻力主要是由总边界阻力、沙棘柔性坝植物阻力构成。需要说明的是,试验地沙棘植物坝龄为 4~5 a,枝繁叶茂,平均高度约 1.1~1.3 m,故水流流经时,相对柔性坝高度而言,只是水深比较浅的非淹没流。设水流所受总阻力为 f ,总边界阻力为 f_1 ,沙棘柔性坝植物阻力为 f_2 ,则有:

$$f = f_1 + f_2 \quad (1)$$

令总边界剪切力为 τ_{01} ,沙粒剪切力为 τ_{01} ,沙波

形体剪切力为 τ'_{01} ,则有:

$$\tau_{01} = \tau_{01} + \tau'_{01} \quad (2)$$

沙棘柔性坝植物每一排阻力为:

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho V^2 A_v \quad (3)$$

式中: C_D ——植物阻力系数,一般与植物的形状系数 D/L 与水流雷诺数 Re 有关,即 $C_D = f(D/L, Re)$,一般要通过试验来确定; ρ ——水的密度; V ——平均流速; A_v ——一排沙棘植物在垂直于水流方向的投影总面积。

现取包含 3 排沙棘植物丛在内的一流段为植物柔性坝代表段(断面概化为梯形),设其长度为 ΔL ,宽度为 B ,假设为均匀流流况,由于 ΔL 较小且水深较小,可忽略进口断面与出口断面形心处的动水压强差。设流段中植物的行距为 D_y ,株距为 D_x ,则树木的排数为 $n = (\Delta L/D_y + 1)$,每排的平均棵数为 $n_i = B/D_x$,则共有 $j = n_i \times n = (\Delta L/D_y + 1) \times B/D_x$ 棵,设每棵树木在水中的淹没体积为 T_{vi} ,流段中所有树木在水中的淹没体积为 $\sum_{i=1}^j T_{vi}$,定义树木在水中的淹没体积比为 f_v ,则 $f_v = \sum_{i=1}^j T_{vi} / (A \Delta L)$,显然,当行距或株距减小时,植物密度将增大,淹没体积比将增大。那么作用于该流段的所有外力处于平衡状态为:

$$\gamma A \Delta L (1 - f_v) i_0 = f = f_1 + f_2 =$$

$$\tau_{01} \times \Delta L + \frac{1}{2} C_D \rho V^2 \sum_{i=1}^n A_{vi} \quad (4)$$

式中: i_0 ——沟床比降; γ ——水的容重; A ——过流面积; x ——沟道湿周; n ——沙棘植物排数; A_{vi} ——第 i 排沙棘植物的流向投影面积。此外,公式左边项是重力沿水流方向的分量,右边第一项是作用底床与边壁的阻力,第 2 项是植物所形成的阻力。

从河流泥沙动力学理论可知,公式(2)中的沙粒剪力 τ_{01} 可利用 Darcy-Weisbach 摩擦系数公式来计算,而 Darcy-Weisbach 摩擦系数可由 Moody diagram 图以床沙代表粒径(d_{65})对水力半径(R)的比值与雷诺数($Re = 4VR/\nu$, ν 为水的运动黏滞系数)为参数可求出。总边界剪切力 τ_{01} 可利用水的容重 γ 、沟床水力半径 R 及能量比降 J 来表示:

$$\tau_{01} = \gamma R J \quad (5)$$

将公式(5)代入公式(4),则得:

$$\gamma A \Delta L (1 - f_v) i_0 = \gamma R J \times \Delta L + \frac{1}{2} C_D \rho V^2 \sum_{i=1}^n A_{vi} \quad (6)$$

其中, i_0 及 J 可利用曼宁公式分别表达:

$$i_0 = \frac{n^2 V^2}{R^{4/3}} \quad (7)$$

$$J = \frac{n_0^2 V^2}{R^{4/3}} \tag{8}$$

公式(7)中 n 为沙棘植物柔性坝坝段的曼宁糙率, 公式(8)中 n_0 为非植物坝段的曼宁糙率, 即未种植沙棘植物坝时的原始床面糙率, 视床面实际粗糙情况而定。将公式(7—8)分别代入(6)式中, 整理后则有:

$$(1 - f_v)n^2 = n_0^2 + \frac{1}{2g} C_D \frac{\sum_{i=1}^n A_{v_i}}{A \Delta L} R^{4/3} \tag{9}$$

则:

$$n = n_0 \sqrt{\frac{1}{1 - f_v} \left(1 + \frac{1}{2gn_0^2} C_D \frac{\sum_{i=1}^n A_{v_i}}{A \Delta L} R^{4/3} \right)} \tag{10}$$

令 $\rho_v = \frac{\sum_{i=1}^n A_{v_i}}{A \Delta L}$, 表示单位沟长流段的平均植物密度, 则公式(9—10)可简化为:

$$(1 - f_v)n^2 = n_0^2 + \frac{1}{2g} C_D \rho_v R^{4/3} \tag{11}$$

$$n = n_0 \sqrt{\frac{1}{1 - f_v} \left(1 + \frac{1}{2gn_0^2} C_D \rho_v R^{4/3} \right)} \tag{12}$$

公式(12)可用来估算沙棘植物在某一种植方式下(不同行距、株距)的糙率, 表明沙棘植物柔性坝段的曼宁糙率系数与床面平均植物密度、淹没体积比及水力半径有关。但是, 对于不同种类的植物, 其植物密度也随着水深而有不同的变化, 淹没体积比也会发生变化。比如, 乔木的枝叶集中于树冠, 只有当水深接触及树冠时, 植物密度及淹没体积比才可能明显变大; 灌木由于较矮, 其枝叶则较均匀的分布于整个灌木高度, 所以植物密度会随水深的增大而略微变化。公式(12)中非植物坝段(未种植植物的原始床面)的糙率系数 n_0 视床底和边壁的粗糙状况来估计, 可参见文献[17]中提供的不同类型不同粗糙床面的糙率取值表; 植物的阻力系数 C_D , 根据 His 和 Nath 等^[10-12]的试验结果, 一般可近似取值为 1.0。淹没体积比随水深的变化关系则与植物的种类及树冠距床面的高度及树冠的形状及枝叶的密度等因素有关, 一般要据实测资料来估计。还需指出, 植物区的水流一

般为非均匀流, 处于阻力平方区, 公式(12)是在均匀流流况的假定下推导出来的, 因此, 在应用于植物区非均匀流时, 还应加以修正, 乘以修正系数 α , α 则与植物种类、淹没于水下部分植物形状、植物平均密度、沟床粗糙程度等多因素有关, 实际的做法是通过实测资料反复调试以取得较为合适的值。

2.2 沙棘植物柔性坝糙率系数估计

沙棘植物柔性坝的阻力受植物密度、淹没体积比及流速大小等有关。因此, 根据试验中的生态调查结果, 给公式(12)中各参数以合理的取值, 可以估计沙棘柔性坝的糙率系数, 结合野外水流试验成果率定出的沙棘柔性坝的糙率系数, 再参考国内试验研究的类似成果, 则可给出沙棘柔性坝的糙率系数范围, 以供进行沙棘柔性坝拦沙效应的模拟研究时使用。表 3 是根据公式(12)估计的沙棘柔性坝的糙率系数取值范围, 由于 3[#] 试验床的种植方式比较特殊, 因此未对 3[#] 床进行估计。

根据前述华县野外水流试验结果, 选取几组实测水深与流量, 以反推求得沙棘柔性坝的糙率系数(表 4)。

2.3 沙棘植物柔性坝糙率系数的讨论

从表 3 可以看出, 由公式(12)估算出来的沙棘柔性坝糙率系数的范围大致介于 0.04~0.083; 从表 4 可看出, 根据华县野外水流试验的几组实测水深流量资料反推出的沙棘柔性坝糙率的范围大致处于 0.04~0.09 的范围内, 这表明两种方法的结果是非常接近的。这与 Ramser^[6]的研究结论比较接近, 即当河渠中植有柳树时, 根据柳树的种植密度及水深的不同, 柳树的曼宁糙率系数大致介于 0.056~0.072 的范围内; 与张玮^[14]研究所得的加筋天然草皮糙率范围大致处于 0.04~0.08 范围内的结论也比较接近, 由于沙棘植物柔性坝的根系很发达, 具有固结地表土壤、增大地表土壤抗冲力的作用^[18], 沙棘植物柔性坝在地表土壤中的根系相当于给沟床草木植被起到了加“筋”的作用。这些都表明在初期进行沙棘柔性坝的有关水力学计算时, 根据沙棘柔性坝的生长情况用公式(12)来估计沙棘植物柔性坝的糙率是可行的。

表 3 计算得到的沙棘柔性坝糙率系数范围

坝号	n_0	h/m	$A \Delta L/\text{m}^3$	淹没深/ m	投影面积/ m^2	ρ_v	R/m	n
1 [#]	0.03~0.06	0.1~0.4	1.2~4.8	0.1~0.4	0.192~0.768	0.16	0.1~0.4	0.042~0.083
2 [#]	0.03~0.06	0.1~0.4	2.1~8.4	0.1~0.4	0.345~1.383	0.16	0.1~0.4	0.041~0.082
4 [#]	0.03~0.06	0.1~0.4	2.3~9.2	0.1~0.4	0.291~1.165	0.13	0.1~0.4	0.040~0.079

注: 沙棘基径计算值均为 0.04 m; C_D 近似取为 1.0; h 为水深; $A \Delta L$ 为断面过水量; n_0 为糙率系数; ρ_v 为单位沟长流段的平均植物密度; R 为水力半径; n 为糙率。

表 4 根据实测资料推求的沙棘柔性坝糙率系数

坝号	n	h_c/m	R/m	$C/(\text{m}^{1/2}\cdot\text{s}^{-1})$	J	$V_c/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$Q_c/(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$	$Q_R/(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$	时间
1 [#]	0.044	0.10	0.094	15.318	0.005	0.332	0.099	0.100	200609
	0.049	0.12	0.111	14.150	0.005	0.334	0.120	0.120	
2 [#]	0.074	0.09	0.085	8.959	0.020	0.369	0.100	0.100	200609
	0.078	0.12	0.111	8.889	0.020	0.419	0.151	0.150	
	0.088	0.10	0.094	7.659	0.020	0.332	0.099	0.100	200611
	0.085	0.11	0.102	8.048	0.020	0.364	0.120	0.120	
	0.064	0.09	0.085	10.359	0.010	0.302	0.060	0.060	200609
4 [#]	0.051	0.12	0.111	13.595	0.010	0.453	0.120	0.120	200611
	0.078	0.14	0.128	9.102	0.010	0.326	0.100	0.100	200709
	0.081	0.16	0.145	8.944	0.010	0.340	0.120	0.120	

注： n 为率定的糙率； h_c 为实测水深； R 为水力半径； C 为谢才系数； J 为比降； V_c 为计算流速； Q_c 为计算流量； Q_R 为实测流量。

3 结 语

本研究对沙棘植物柔性坝的阻力问题进行了分析与探讨,推导了沙棘植物柔性坝的糙率系数估计公式,并对沙棘植物柔性坝的糙率系数范围进行了理论估计。并基于沙棘植物柔性坝野外水流试验数据,对沙棘植物柔性坝糙率系数范围用河流动力学方法进行了反推计算,所得结果与用理论公式估计的结果比较吻合。综合对比分析与讨论后,认为沙棘植物柔性坝的糙率范围基本处于 0.04~ 0.09 的范围内,为后续利用水沙数学模型研究沙棘植物柔性坝的拦沙效应奠定基础。应该指出的是,沙棘柔性坝的糙率随沙棘的生长及水深与流速的大小等因素的变化而会发生一定的变化,因为天然河渠中植物的糙率与植物的种类、生长特性、淹没状态及水深与流速等因素有关,但是在短期内可以近似认为其处于某一个范围内。鉴于植物问题的复杂性,今后,还需要通过大量室内试验、野外试验乃至天然沟道沙棘植物柔性坝原型试验,进一步深入分析与研究沙棘植物的阻力与糙率问题。

[参 考 文 献]

[1] 毕慈芬,王富贵,李桂芬. 砒砂岩地区沟道植物“柔性坝”拦沙试验[J]. 泥沙研究, 2003, 4(2): 14-25.

[2] 杨方社,李怀恩,毕慈芬. 砒砂岩地区沙棘“柔性坝”拦沙与生态效应试验研究[J]. 水土保持通报, 2007, 27(1): 102-104.

[3] 李怀恩,同新奇,等. 沙棘“柔性坝”对土壤水分调控作用的试验研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(11): 69-73.

[4] 程艳,李森. 河渠种树水流特性试验研究[J]. 新疆农业大学学报, 2003, 26(2): 59-64.

[5] 邱秀云,阿不都外力. 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.

[6] Ramser C E. Flow of water in drainage channels[J]. Technical Bulletin, 1929, 179: 581-587.

[7] Ree W O. Retardation coefficients for row crops in diversion Terraces[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 1958(1): 7880-7883.

[8] Chow V T. Open-channel Hydraulics[M]. New York: McGraw-Hill Book Co., Inc., 1959.

[9] Fathi-Maghadam M, Kouwen N. Nonrigid, nonsubmerged, vegetative roughness on floodplains[J]. Journal of Hydrualic Engineering. 1997, 123(1): 51-57.

[10] His G, Nath J H. Wind drag within simulated forest canopy field[J]. Technical Report Prepared for U. S. Army Materials Command, 1968, 28(20): 43-65.

[11] Hoerner S F. Fluid Dynamic Drag[M]. New York: Hoerner Fluid Dynamics, 1965.

[12] Petryk S. Drag on cylinders in open channel flow[D]. Colorado State University, 1969.

[13] Wilson C. Flow resistance models for flexible submerged vegetation[J]. Journal of Hydrology, 2007, 342: 213-222.

[14] 张玮,钟春欣. 草皮护坡水力糙率实验研究[J]. 水科学进展, 2007, 18(4): 483-489.

[15] 李宗孝,李伯文. 沙棘研究及其生态建设思考[J]. 中国基础科学, 2004(6): 40-44.

[16] 许联锋,陈刚. 气液两相流动粒子成像测速技术(PIV)研究进展[J]. 水力发电学报, 2004, 23(6): 103-107.

[17] 吴持恭. 水力学[M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2008.

[18] 陈云明,刘国彬,徐炳成. 黄土丘陵区人工沙棘林水土保持作用机理及效益[J]. 应用生态学报, 2005, 16(4): 595-599.