

文章编号: 0468-155X(2015)04-0059-07

地表粗糙度对坡面流水动力学参数的影响

施明新^{1,3}, 李陶陶¹, 吴秉校², 吴发启²

(1. 西北农林科技大学 水土保持研究所 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学 资源环境学院 陕西 杨凌 712100;

3. 上海勘测设计研究院有限公司 上海 200434)

摘要: 坡面流阻力的研究对于深入认识坡面流水力特性及土壤侵蚀产沙机理具有重要意义。采用变坡试验水槽, 利用定床阻力冲刷试验系统研究了坡面流 Darcy-Weisbach 阻力系数与粗糙度、流量、坡度和水流形态之间的关系。结果表明: 阻力系数随着床面粗糙度的增加呈指数函数增大; 阻力系数随着雷诺数的增加呈幂函数减小, 且随粗糙度的增加; 阻力系数与弗劳德数呈良好幂函数关系, 且粗糙度的影响不显著, 流量为主要影响因素; 人工模拟粗糙度床面下, 阻力系数可由粗糙度、流量和坡度的简单幂函数良好表示, 并且粗糙度为主要影响因素, 流量和坡度的影响相对较小。由因子分析可知, 阻力系数可由粗糙度和弗劳德数良好表示, 经检验该模型可用于计算不同粗糙度坡面薄层水流的阻力系数。

关键词: 坡面流; Darcy-Weisbach 阻力系数; 粗糙度; 水动力学参数

中图分类号: S157.1 文献标识码: A DOI: 10.16239/j.cnki.0468-155x.2015.04.010

坡面流是造成坡面土壤及其母质被破坏、剥蚀、搬运和沉积的关键因素, 研究坡面流阻力规律对进一步认识坡面侵蚀的水动力学机理具有重要意义。坡面流阻力是指水流在沿坡面向下流动过程中所受到的来自水和水槽边壁的摩擦力的阻滞作用和水流内部质点紊动所产生的阻碍水流运动的力的总称^[1]。现阶段对坡面流阻力的研究主要是借助于明渠水流阻力概念和相应的表达方式, 如 Darcy-Weisbach 阻力系数、Chezy 系数和 Manning 糙率系数等。由于 Darcy-Weisbach 阻力系数同时适用于层流和紊流, 具有良好的物理意义且符合量纲一致原则, 因此在坡面流的研究中得到广泛应用。姚文艺^[2]在定床条件下对降雨条件下坡面浅层水流阻力问题进行了探究, 分析了不同水流型态下降雨、坡度和床面粗糙度对 Darcy-Weisbach 阻力系数的影响, 认为阻力系数在层流区和紊流光滑区与床面粗糙度有关, 降雨和坡度对阻力系数也有影响。张科利^[3]认为坡面细沟侵蚀过程中阻力系数大小与水流条件及地面形态密切相关, 坡面坡度对水流阻力大小有着决定性的影响。潘成忠等^[4]通过人工模拟降雨试验, 发现草地坡面的 Darcy-Weisbach 阻力系数随盖度的增大而增大, 且大于裸地坡面相应的阻力系数。Munoz-Carpena 等^[5]也认为植被有增大水流阻力和减缓坡面流流速的作用, 从而削弱水流对坡面的侵蚀。李勉等^[6]通过对不同草被覆盖面积比、不同空间配置和不同放水流量下的坡面一沟坡系统坡面进行室内冲刷试验, 认为草被覆盖和坡度对坡面流阻力大小起着决定性的影响。坡面流阻力特性远比河道水流复杂, 由于坡面流水深极浅, 且受地表随机糙率、雨滴击溅、植被条件、土壤质地和前期水分条件等因子的影响, 流态复杂多变, 流速难以准确观测, 导致水流阻力形式颇为复杂^[7-10]。对于坡面薄层水流, 虽有大量研究成果, 但由于试验条件的不同以及观测方法的各异, 导致各试验的结果差异较大, 坡面流水动力学特性仍存颇多疑问, 水流阻力的变化规律尚无定论。本文采用室内定床阻力冲刷试验, 消除土壤质

收稿日期: 2014-09-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271288)

作者简介: 施明新(1990-) 男, 江西德安人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀方面的研究。E-mail: shimingxinsmx@163.com

通讯作者: 吴发启。E-mail: wufaqi@263.net

地、植被状况、降雨特征等因素的干扰,建立坡面流阻力系数与地表粗糙度、流量、坡度以及水流形态间的定量关系,进一步揭示坡面流阻力的变化规律,为阐述坡面侵蚀的水动力学机理、构建坡面土壤侵蚀过程物理模型提供理论依据。

1 试验设计与测定方法

1.1 试验设计及测定方法

自然条件下的坡面流大多是动床非均匀沿程变量流,并且水流流路多变,分布极不均匀,现阶段利用人工或仪器很难对其进行直接准确的观测。因此,为测定不同地表粗糙度下的坡面流阻力特性,设计以下定床阻力试验方案。

试验水槽:用8mm厚有机玻璃板制作而成,水槽横断面为矩形,长6m,宽1m,深0.3m,边壁及床面光滑,坡度调节范围为 $0^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 。为了重复试验,利用有机玻璃板在水槽纵坡面将其分隔成两个($6\text{m} \times 0.5\text{m} \times 0.3\text{m}$)试验水槽。

供水系统:包括水泵、蓄水池、玻璃转子流量计、消能池、稳流前池、试验水槽段、尾门和循环水廊道等装置。

模拟地表粗糙度的形成:试验分别在有机玻璃床面($d=0$)和人工模拟粗糙度床面($d \neq 0$)进行。对于有机玻璃床面,按照其当量粗糙度(即同样水流条件下与人工模拟粗糙度对水流影响相同时的相应粗糙度)^[11] $d=0.0015 \sim 0.01\text{mm}$ 。人工模拟粗糙度床面的形成步骤为:首先用震动筛筛分自然级配的天然河沙,根据沙粒粒径不同分为 $d=0.5 \sim 1.25$ 、 $1.25 \sim 2.5$ 、 $2.5 \sim 5$ 和 $5 \sim 10\text{mm}$ 五种工况;然后,在床面内壁均匀平整地涂抹一层相当厚度的清漆,将一种工况的沙粒均匀地黏在床面上,形成该种沙粒对应的糙度床面;将后两步重复4次,即得到五种不同糙度的定床床面。

试验设计流量:根据黄土高原多年侵蚀性降雨雨强,设计冲刷流量为0.04、0.08、0.12、0.16、0.20和0.24L/(s·m),相当于雨强0.5、1.0、1.5、2.0、2.5和3.0mm/min。

试验设计坡度:张科利^[6]认为 $f-Re$ 的关系存在临界坡度的问题,其转折坡度大约在 $10^{\circ} \sim 12^{\circ}$ 之间。蒋昌波等^[8]认为随着坡度的增加,坡面流阻力会发生显著变化,甚至在形成机理上发生变化。因此,陡坡条件下坡面流阻力的研究尚存疑颇多,故本研究设计坡度为缓坡条件,共设计6个坡度,分别为 2° 、 4° 、 6° 、 8° 、 10° 和 12° 。

试验设计场次:采用粗糙度、流量和坡度的完全组合试验,共 $5 \times 6 \times 6 = 180$ 场,所有场次均重复一次,共进行360场次冲刷试验。

试验测定方法:试验按水流方向设4个观测断面,各断面间距为1m,距离水槽进水口1m处为第1个观测断面,依次为2、3、4观测断面,观测段分别为1.0~2.0m、2.0~3.0m、3.0~4.0m、4.0~5.0m。每个观测断面按横向左、中、右3个测点来测量水流流速和径流深。

试验流量率定:通过调节玻璃转子流量计阀门控制试验流量,每次试验前后,各率定流量计流量一次,以确保试验的实际流量与设计流量相一致。

1.2 坡面流水动力学参数的确定及计算

开启供水系统,给试验水槽供水,调节流量计阀门,使供水流量达到设计流量值,待观测段水流稳定后开始试验。径流深采用SX40-1型水位测针测定,精度为0.1mm,将各断面实测径流深的均值作为水流的平均径流深。流速用 KMnO_4 染色法测定,实测值为水流的表层流速,采用Abrahams^[12]的修正方法(层流时修正系数为0.67,过渡流为0.7,紊流为0.8),即实测的流速乘以修正系数后的均值为该次试验的平均流速。每次试验在开始和结束时,各记录稳流槽中水银温度计(精度为 0.1°C)示数一次,并用两次数值的平均值作为该次试验的温度,通过经验公式计算运动黏滞系数 ν ,计算式为

$$\nu = 1.775 \times 10^{-6} / (1 + 0.0337t + 0.00022t^2) \quad (1)$$

式中 ν 为运动黏滞系数, m^2/s ; t 为水温度, $^{\circ}\text{C}$ 。阻力系数是径流流态、水流断面特性、床面粗糙程度、水流表面张力系数和水流密度等因素的综合体现,常用Darcy-Weisbach阻力系数 f 来衡量坡面水流运动过程中受到的阻力。计算式为

$$f = 8gRJ/V^2 \quad (2)$$

式中 f 为 Darcy-Weisbach 阻力系数,无量纲; g 为重力加速度, m/s^2 ,取 $g = 9.8 \text{m/s}^2$; R 为水力半径, m ; J 为水力坡度,对于均匀流 $J = i = \sin\theta$, θ 为水槽坡度; V 为平均流速, m/s 。水流型态是表征坡面流水力特性的基本参数,常用雷诺数来判别水流流型,弗劳德数判别水流流态,计算式分别为

$$Re = VR/\nu \quad (3)$$

$$Fr = V/\sqrt{gh} \quad (4)$$

式中 Re 为雷诺数,无量纲; Fr 为弗劳德数,无量纲; h 为坡面流平均径流深, m 。

因坡面薄层水流 $R \approx h$,故常采用以下公式计算

$$Re = Vh/\nu \quad (5)$$

2 结果与分析

2.1 阻力系数与地表粗糙度的关系分析

在试验条件下,坡面流阻力系数在 0.053 ~ 21.139 之间变化。对 180 组试验数据分析可知,五种不同床面粗糙度(由小到大顺序)的水流阻力系数变化范围分别为 0.053 ~ 0.227、0.202 ~ 1.197、0.568 ~ 4.433、1.214 ~ 11.022 和 2.280 ~ 21.139。当粗糙度较小时阻力系数变化范围较小;粗糙度较大时,在不同流量—坡度组合下,阻力系数间的差异越来越显著,说明随着床面粗糙度的增加,阻力系数的变化范围增大。

图 1 表示不同流量和坡度下地表粗糙度对阻力系数的影响。由图 1 可以看出,阻力系数随着粗糙度的增加而增大,其原因是坡面水流在边壁约束力和床面凸起阻碍下克服阻力做功,当流量和坡度相同时,床面粗糙度越大,水流与凸起物碰撞和摩擦的几率越大,且边壁约束力和绕流阻力也越大,所以水流克服阻力做功增加,能量损失增大。能量损失的不断增加直接导致水流流速的减小和径流深的增大,进而导致水流阻力系数不断增大。对试验数据回归分析发现,阻力系数随着床面粗糙度的增加呈指数函数形式增大,表达式为

$$f = 0.232e^{0.560d} \quad R^2 = 0.784 \quad (6)$$

式中 d 为床面粗糙度, mm 。对于均匀沙床面,钱宁等^[13]认为可用平均沙粒粒径表示床面粗糙度

$$d = \frac{d_{\max} + d_{\min}}{2} \quad (7)$$

式中 d_{\max} 为沙粒最大粒径, mm ; d_{\min} 为沙粒最小粒径, mm 。

2.2 阻力系数与流态的关系分析

试验条件下,雷诺数的变化范围为 54.2 ~ 1235.4,弗劳德数的变化范围为 0.11 ~ 4.59。由图 2 可知,随着床面粗糙度的增加,阻力系数不断增大,而在各种糙度床面下,雷诺数始终有大于和小于 500 的数值,说明水流存在层流和紊流两种型态。

不同粗糙度条件下阻力系数与雷诺数的关系见表 1。由表可知,随着粗糙度的增加,雷诺数下降,且取值范围减小,说明粗糙度的增大能够有效降低坡面薄层水流的紊动性。另外,随着粗糙度的增加 f

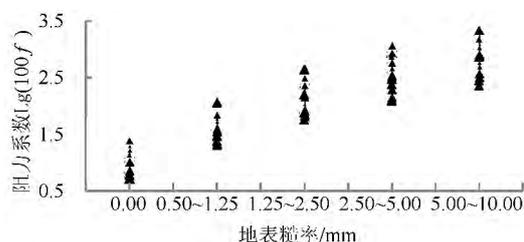


图 1 阻力系数与粗糙度的关系

Fig. 1 Relationship between resistance coefficient and surface roughness

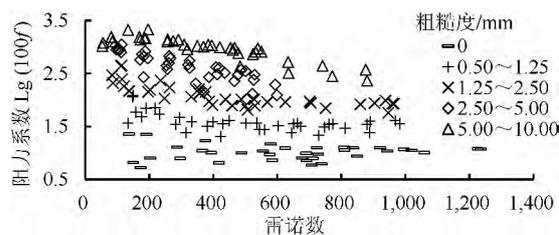


图 2 阻力系数与雷诺数的关系

Fig. 2 Relationship between resistance coefficient and Reynolds number

-Re 之间的相关性呈现出先增大后减小的趋势。然而表 1 中的相关系数整体处于较低水平,特别是当 $d=0.0058\text{mm}$ 时,相关系数仅为 0.001,说明对于不同糙度床面,仅利用水流雷诺数并不能很好地表达其阻力系数。因此,考虑加入粗糙度因子,经回归分析得出关系式为

$$f = 48.183d^{0.519}Re^{-0.609} \quad R^2 = 0.800 \quad (8)$$

式(8)相关系数较大,说明利用粗糙度和雷诺数两个因子能较好地表达坡面薄层水流阻力系数。

表 1 不同糙度下阻力系数与雷诺数的回归关系

Table 1 Multiple regressions between resistance coefficient and Reynolds number under different surface roughness

方程序号	粗糙度/mm	雷诺数变化区间	回归方程	相关系数 R^2
(a)	0.0058	137.0 ~ 1 235.4	$f = 0.114Re^{-0.019}$	0.001
(b)	0.8750	133.8 ~ 982.4	$f = 5.043Re^{-0.427}$	0.430
(c)	1.8750	83.8 ~ 964.3	$f = 36.892Re^{-0.581}$	0.731
(d)	3.7500	95.5 ~ 598.6	$f = 533.780Re^{-0.864}$	0.693
(e)	7.5000	54.2 ~ 881.1	$f = 185.861Re^{-0.525}$	0.509

阻力系数与弗劳德数的关系见图 3,由图可知,床面粗糙度为 0.875mm 和 0.0058mm 时,水流流态为急流,粗糙度为 1.875mm 时,为过渡流,粗糙度为 7.5mm 和 3.75mm 时,为缓流。因此,随着床面粗糙度的增加,弗劳德数逐渐减小,坡面水流由急流过渡为缓流。经回归分析可知,阻力系数与二者间呈良好幂函数关系,关系式为

$$f = 0.958d^{0.180}Fr^{-1.369} \quad R^2 = 0.906 \quad (9)$$

将上式中糙度项剔除后分析得到

$$f = 0.858Fr^{-1.800} \quad R^2 = 0.883 \quad (10)$$

与式(9)相比,式(10)的相关系数仅降低 2.3%,说明床面粗糙度的变化对 $f - Fr$ 关系的影响并不明显。由表 2 可以看出,不同糙度下 $f - Fr$ 关系的相关系数始终处于较低水平,且随着粗糙度的增大,相关系数呈现整体下降趋势,进一步说明粗糙度对 $f - Fr$ 关系没有显著影响。经统计分析后发现 $f - Fr$ 之间的关系主要受流量的影响(表 3),由表可知各流量下水流均存在急流、缓流和过渡流三种流态。随着流量的增加,负相关关系的相关系数呈现微弱降低的趋势,但始终在 0.84 之上。

表 2 不同坡度下阻力系数与弗劳德数的回归关系

Table 2 Multiple regressions between resistance coefficient and Froude number under different slope gradient

方程序号	粗糙度/mm	弗劳德数变化区间	回归方程	相关系数 R^2
(f)	0.0058	1.11 ~ 4.59	$f = 0.175Fr^{-0.519}$	0.329
(g)	0.8750	0.48 ~ 2.29	$f = 0.492Fr^{-0.673}$	0.479
(h)	1.8750	0.25 ~ 1.39	$f = 1.033Fr^{-0.819}$	0.425
(i)	3.7500	0.19 ~ 0.67	$f = 1.972Fr^{-0.926}$	0.191
(j)	7.5000	0.11 ~ 0.43	$f = 3.800Fr^{-0.728}$	0.142

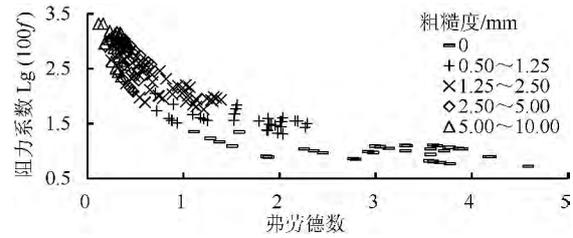


图 3 阻力系数与弗劳德数的关系

Fig. 3 Relationship between resistance coefficient and Froude number

表 3 不同流量下阻力系数与弗劳德数的回归关系及系数变化

Table 3 Multiple regressions between resistance coefficient and Froude number under different discharge

方程序号	流量 $l/(L/(s \cdot m))$	弗劳德数变化区间	回归方程	相关系数 R^2
(k)	0.04	0.11 ~ 4.59	$f = 0.927Fr^{-1.751}$	0.910
(l)	0.08	0.18 ~ 4.20	$f = 0.875Fr^{-1.795}$	0.897
(m)	0.12	0.25 ~ 3.31	$f = 0.857Fr^{-1.816}$	0.877
(n)	0.16	0.30 ~ 3.33	$f = 0.845Fr^{-1.802}$	0.860
(o)	0.20	0.32 ~ 3.57	$f = 0.834Fr^{-1.817}$	0.863
(p)	0.24	0.35 ~ 3.71	$f = 0.830Fr^{-1.799}$	0.849

2.3 同坡度下阻力系数与粗糙度和流量的关系

表 4 表示坡面流阻力系数随粗糙度、流量和坡度的变化。由表 4 可知,坡度相同时,表现为阻力系数随着粗糙度的增大而增大,随着流量的增大而减小的变化规律。通过回归分析发现阻力系数与粗糙度和流量呈幂函数关系,表达式为

$$f = 0.689d^{0.570}q^{-0.506} \quad R^2 = 0.777 \quad (11)$$

将上式中流量项剔除后

$$f = 66.354d^{0.570} \quad R^2 = 0.744 \quad (12)$$

式(12)的相关系数比式(11)仅降低3.3%,说明流量对阻力系数影响很小,粗糙度为主要控制因子。

表4 坡面流阻力系数随粗糙度、流量和坡度的变化

Table 4 Variation of resistance coefficient with roughness, flow discharge and slope gradient

坡度		粗糙度 d		单宽流量 $q/(L/(s \cdot m))$					坡度		粗糙度 d		单宽流量 $q/(L/(s \cdot m))$				
$/\circ$	$/mm$	0.04	0.08	0.12	0.16	0.2	0.24	$/\circ$	$/mm$	0.04	0.08	0.12	0.16	0.2	0.24		
2	0.000	0.227	0.170	0.147	0.123	0.079	0.080	8	0.000	0.053	0.101	0.124	0.113	0.087	0.120		
	0.875	1.197	0.534	0.387	0.364	0.321	0.358		0.875	0.473	0.349	0.274	0.310	0.304	0.292		
	1.875	4.433	1.700	0.939	0.777	0.771	0.768		1.875	2.448	1.407	1.146	1.015	0.860	0.868		
	3.750	7.921	2.657	2.025	1.416	1.295	1.214		3.750	8.834	6.567	4.898	3.977	3.239	2.978		
	7.500	21.139	9.077	4.301	3.196	2.793	2.280		7.500	12.502	13.585	13.492	10.917	9.424	8.012		
4	0.000	0.222	0.110	0.100	0.093	0.073	0.072	10	0.000	0.080	0.079	0.127	0.125	0.109	0.101		
	0.875	1.119	0.700	0.463	0.382	0.404	0.359		0.875	0.581	0.339	0.271	0.344	0.345	0.393		
	1.875	4.359	2.302	1.306	1.003	1.021	0.905		1.875	2.070	1.556	1.407	0.895	0.815	0.836		
	3.750	10.568	6.013	3.765	2.667	2.266	1.939		3.750	8.798	7.215	6.016	4.565	4.000	3.452		
	7.500	20.975	10.932	7.506	5.220	4.392	3.707		7.500	11.796	14.781	12.790	10.563	9.537	8.062		
6	0.000	0.066	0.065	0.098	0.094	0.059	0.062	12	0.000	0.128	0.109	0.125	0.117	0.111	0.118		
	0.875	0.359	0.240	0.202	0.237	0.213	0.239		0.875	0.687	0.318	0.347	0.348	0.402	0.356		
	1.875	1.812	1.063	0.793	0.649	0.692	0.568		1.875	2.903	1.462	1.581	0.925	0.961	0.857		
	3.750	8.836	5.635	4.413	3.027	2.938	2.391		3.750	11.022	8.167	6.699	5.469	4.150	3.739		
	7.500	15.330	15.204	12.426	9.948	8.695	7.241		7.500	10.252	14.431	13.595	10.429	9.746	9.202		

2.4 同流量下阻力系数与粗糙度和坡度的关系

同样,由表4可知,流量相同时,阻力系数随着粗糙度和坡度的增加均表现为增大的趋势。通过回归分析发现阻力系数与粗糙度和坡度呈幂函数关系,表达式为

$$f = 92.666d^{0.570}S^{0.148} \quad R^2 = 0.747 \quad (13)$$

式(12)与式(13)的相关系数相比仅仅降低0.3%,说明坡度对阻力系数的影响很小,粗糙度为主要控制因子。由以上分析可知,阻力系数与粗糙度、流量和坡度三者间的关系可表达为

$$f = 0.961d^{0.570}q^{-0.506}S^{0.148} \quad R^2 = 0.780 \quad (14)$$

式(14)的相关系数较小,说明阻力系数并不能被很好表达。进一步分析发现,在光滑床面条件下,阻力系数随流量和坡度的变化并不明显,说明此时流量和坡度不能作为阻力系数的表达因子。因此,将光滑床面剔除,对人工模拟粗糙度床面下的阻力系数与粗糙度、流量和坡度进行回归分析可得

$$f = 111.163d^{1.512}q^{-0.604}S^{0.204} \quad R^2 = 0.932 \quad (15)$$

再将流量和坡度项分别剔除,发现相关系数仅下降7.7%和0.9%,可表示为

$$f = 1.638 \times 10^4 d^{1.512} \quad R^2 = 0.846 \quad (16)$$

上式说明,对于人工模拟粗糙度床面的阻力系数主要由床面粗糙度控制,并且可以由粗糙度的简单幂函数良好表示,而流量和坡度对阻力系数的影响相对较小。

2.5 人工粗糙度床面阻力系数的模拟

由以上分析可知,在人工模拟粗糙度床面条件下,坡面流阻力系数 f 主要受地表粗糙度、流量、雷诺数和弗劳德数等因子的影响,可表示为

$$f = \beta(d, q, Re, Fr) \quad (17)$$

利用180组试验数据,将阻力系数与上述四个因子进行回归分析,得到以下方程式

$$f = 146.790d^{0.188}q^{0.170}Re^{-0.367}Fr^{-1.233} \quad R^2 = 0.913 \quad (18)$$

将上式中流量和雷诺数两项剔除后分析发现,阻力系数与地表粗糙度和水流弗劳德数呈良好幂函数关系,可表示为

$$f = 3.313d^{0.180}Fr^{-1.369} \quad R^2 = 0.906 \quad (19)$$

与式(18)比较,式(19)的相关系数仅降低0.7%,说明流量和雷诺数在模拟关系式中对阻力系数的影响很小,床面粗糙度和弗劳德数两个因子能够很好地表达坡面水流阻力系数的变化特征。

利用 Nash-Sutcliffe 效率系数(NSE)检验坡面薄层水流阻力系数计算模型公式(19)的模拟效果,计算方法为

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{mean})^2} \quad (20)$$

式中 Y_i^{obs} 为阻力系数的实测值; Y_i^{sim} 为阻力系数的模拟值; Y_i^{mean} 为实测阻力系数的算数平均值。NSE 反映模拟值与实测值之间的拟合程度 $NSE \leq 1$ 。当 NSE 在 0~1 之间变化,表明模拟结果可接受,且 NSE 值越接近于 1,说明模型的模拟效果越好,精度越高,如果 $NSE < 0$,表明模型模拟效果极差,模拟结果不如观测平均值。经计算得出的 NSE 达到 0.704,说明模型模拟效果较好,因此公式(19)可作为计算人工粗糙床面条件下薄层水流阻力系数的模型。

3 结论

采用变坡试验水槽,在粗糙度(0~10mm)、单宽流量(0.04~0.24L/(s·m))和坡度(0°~12°)范围内,深入探讨并定量模拟了不同人工模拟粗糙度床面下的坡面薄层水流阻力规律。试验结果如下:

(1) 试验条件下,粗糙度较小时,阻力系数变化范围小,但随着粗糙度的增加,阻力系数的变化范围不断增大。 $f-d$ 之间呈指数正相关关系($f = 0.232e^{0.560d}$, $R^2 = 0.784$),说明床面粗糙度的增大使阻力系数不断增加,水流克服阻力做功及能量损失增大,水流能量降低,对坡面的剪切应力相应减小,侵蚀力减弱,对减小坡面土壤侵蚀有积极作用。

(2) 雷诺数随着粗糙度的增加而减小,且取值范围也随之缩减,说明粗糙度的增大能够有效降低坡面水流的紊动性,而且阻力系数与粗糙度和雷诺数之间呈幂函数关系($f = 48.183d^{0.519}Re^{-0.609}$, $R^2 = 0.800$)。随着粗糙度的增加,弗劳德数逐渐减小,水流流态由急流转变为过渡流,再过渡为缓流。 $f-Fr$ 呈现良好负向幂函数关系($f = 0.858Fr^{-1.800}$, $R^2 = 0.883$),并且粗糙度对其负相关关系没有显著影响,流量为主要影响因子。

(3) 阻力系数随着粗糙度和坡度的增加而增大,随着流量增加而减小。在光滑床面条件下,流量和坡度对阻力系数的影响很小,不能很好地表达阻力规律。而对于人工模拟粗糙度床面,阻力系数与粗糙度、流量和坡度间良好呈幂函数关系($f = 111.163d^{1.512}q^{-0.604}S^{0.204}$, $R^2 = 0.932$),且粗糙度为主要控制因素,流量和坡度的影响较小。

(4) 坡面流阻力系数与粗糙度、流量、雷诺数和弗劳德数等因子呈良好幂函数关系($f = 146.790d^{0.188}q^{0.170}Re^{-0.367}Fr^{-1.233}$, $R^2 = 0.913$),进一步分析发现仅利用粗糙度和弗劳德数两个因子可以很好地表达阻力系数的变化特征,表达式为 $f = 3.313d^{0.180}Fr^{-1.369}$, $R^2 = 0.906$ 。经 Nash-Sutcliffe 效率系数检验后发现模型模拟效果较好($NSE = 0.704$),说明该模型可用于计算不同粗糙度床面条件坡面薄层水流的阻力系数。

参考文献:

- [1] 肖培青,郑粉莉,姚文艺. 坡沟系统坡面径流流态及水力学参数特征研究[J]. 水科学进展, 2009, 20(2): 236-240.
- [2] 姚文艺. 坡面流阻力规律试验研究[J]. 泥沙研究, 1996(1): 74-82.
- [3] 张科利. 黄土坡面细沟侵蚀中的水流阻力规律研究[J]. 人民黄河, 1998, 20(8): 13-15.
- [4] 潘成忠,上官周平. 牧草对坡面侵蚀动力参数的影响[J]. 水利学报, 2005, 36(3): 371-377.
- [5] Munoz-Carpena R, Parsons J E. A design procedure for vegetative filter strips using VFSMOD-W [J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 2005, 47(6): 1933-1941.
- [6] 李勉,姚文艺,陈江南,等. 草被覆盖下坡面一沟坡系统坡面流阻力变化特征试验研究[J]. 水利学报, 2007, 38(1): 112-119.

- [7] 蒋昌波 隆院男 胡世雄 等. 坡面流阻力研究进展 [J]. 水利学报 2012 43(2): 189 – 197.
- [8] 曹颖 张光辉 唐科明 等. 地表模拟覆盖率对坡面流阻力的影响 [J]. 水土保持学报 2010 24(4): 86 – 89.
- [9] Li G. Preliminary study of the interference of surface objects and rainfall in overland flow resistance [J]. *Catena* 2009 , 78(2): 154 – 158.
- [10] Dunkerley D. Flow threads in surface run-off: Implications for the assessment of flow properties and friction coefficients in soil erosion and hydraulics investigations [J]. *Earth Surface Processes and Landforms* 2004 29(8): 1011 – 1026.
- [11] 左东启. 模型试验的理论和方法 [M]. 北京: 水利电力出版社 ,1984.
- [12] Li G ,Abrahams A D ,Atkinson J F. Correction factors in the determination of mean velocity of overland flow [J]. *Earth surface Processes and Landforms* ,1998 21(6): 509 – 515.
- [13] 钱宁 万兆惠. 泥沙运动力学 [M]. 北京: 科学出版社 2003.

Influences of surface roughness on overland flow hydraulic characteristics

SHI Ming-xin^{1 3} , LI Tao-tao¹ , WU Bing-xiao² , WU Fa-qi²

(1. *Institute of Soil and Water Conservation , Northwest A&F University ,Yangling 712100 ,China;*

2. College of Resources and Environment Sciences ,Northwest A&F University ,Yangling 712100 ,China;

3. Shanghai Investigation , Design & Research Institute CO. Shanghai 200434 , China)

Abstract: Exploring overland flow resistance is important for understanding the flow hydraulic characteristics , soil erosion and mechanism of sediment yield on sloping land. This study systemically discussed the relationship between Darcy–Weisbach resistance coefficient of overland flow and surface roughness , discharge , slope gradient as well as flow pattern through the fixed-bed model test. Results showed: with the simulated surface roughness increasing , the resistance coefficient exponentially increased. The relationship between resistance coefficient and Reynolds number was negative , which firstly increased and then decreased with surface roughness increasing. The relationship between resistance coefficient and Froude number presented a power function; moreover , surface roughness is an insignificant factor and discharge is the dominant influence. Under the bed with artificial simulation of surface roughness , resistance coefficient could expressed by surface roughness、discharge and slope with a simple power function. Resistance coefficient was significantly affected by surface roughness , but less affected by discharge and slope. Resistance coefficient could expressed well by surface roughness and Froude number based on all influence factors by factor analysis , this formula can be used to predict the resistance coefficient of overland flow with different surface roughness.

Key words: overland flow; Darcy–Weisbach resistance coefficient; surface roughness; hydrodynamic parameter
(责任编辑: 陈绪坚、刘 峡)