坡面侵蚀产沙与水力学特征参数关系模拟

张锐波1,张丽萍2,付兴涛2

(1. 浙江大学城市学院,信息与电气工程学院,杭州 310015;

2. 浙江省农业资源与环境重点研究实验室,浙江大学土水资源与环境研究所,杭州 310058)

摘要:坡面侵蚀产沙主要受坡面径流动态过程的影响,表征坡面径流过程特征是水力学特征参数。为了研究坡面侵蚀产沙与主要水力学特征参数的关系,揭示坡面侵蚀产沙的水动力学机理。采用人工模拟降雨的方式,通过不同坡长和雨强的组合试验,基于跨雨强和跨坡长的综合性分析的思路,应用经典水力学计算和统计拟合相结合的方法,对特定坡度(20°)下,5个坡长(1,2,3,4,5 m)13个降雨强度的试验监测数据进行了分析。结果表明:(1)在设计雨强(0.65~2.0 mm/min)和坡度范围内,坡面径流都属于缓流,雨强<0.7 mm/min都为层流,呈现紊流的最小雨强为1.01 mm/min;(2)坡长对弗汝德数和阻力系数的影响较大,对剪切力、径流深和雷诺数的影响很小,3 m 坡长是坡面径流过程的波动步长,是模拟试验研究坡面径流水动力学参数的最小设计坡长;(3)流速是坡面侵蚀产沙的主要影响参数,剪切力是判断坡面侵蚀产沙强度的综合性指标之一。这些研究结论为实地大范围通过径流量和流速来预测侵蚀产沙的强度提供了简便快速的判断方法。

关键词:侵蚀产沙;水力学参数;试验设计的有效性;模拟降雨试验
中图分类号:S157.1
文献标识码:A
文章编号:1009-2242(2017)05-0081-06
DOI:10.13870/j. cnki. stbcxb. 2017. 05. 013

Research on Relationships Between Sediment Yield and Hydraulics Parameters on Slope

ZHANG Ruibo¹, ZHANG Liping², FU Xingtao²

(1. Department of Information and Electrical Engineering, College of City Zhejiang University, Hangzhou 310015;2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Agricultural Resources and

Environment, Institute of Soil and Water and Environmental Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058)

Abstract: The slope erosion and sediment yield are mainly affected by the dynamic process of slope runoff. The characteristics of slope runoff process are described by hydraulic parameters. The purpose of this paper was to study the relationships between slope erosion and sediment yield and hydraulics parameters, and to reveal the hydrodynamic mechanism of slope erosion and sediment yield through artificial rainfall simulation. The principles of classical hydraulic calculation and statistical fitting were applied for the comprehensive analvsis of runoff and sediment yield process in different rainfall intensities and slope lengths. Five slope lengths (1, 2, 3, 4, 5 m) with 13 rainfall intensities were designed under a specific slope (20°). The conclusions were listed as follows: (1) Within the designed rainfall intensities ($0.65 \sim 2.0 \text{ mm/min}$) and slope (20°), slope surface runoff were slowly, which was laminar flow under rainfall intensity < 0.7 mm/min, the smallest rainfall intensity of turbulent flow occurrence was 1.01 mm/min. (2) The influence of the slope length on the Froude number and resistance coefficient were larger than on the shear stress, runoff depth and Reynolds number. The slope length of 3 m was the step length of slope runoff fluctuation, and was the shortest slope length designed for a simulated experiment of hydrodynamic parameters. (3) The velocity was the main influence parameter of slope surface erosion and sediment yield, and the shear stress was one of comprehensive indicators for estimating the strength of slope surface erosion and sediment yield. The above results provided a simple and rapid judgment method for predicting the intensity of erosion and sediment yield through runoff and flow velocity in wide field.

收稿日期:2017-03-29

资助项目:国家自然科学基金面上项目(41471221)

第一作者:张锐波(1959—),男,副教授,主要从事地表过程的力学分析和人工模拟降雨设备的技术改进研究。E-mail:zhangrb@zucc.edu.cn 通信作者:张丽萍(1959—),女,博士,教授,博导,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:lpzhang@zju.edu.cn

水力侵蚀是坡面侵蚀产沙的主要外动力,坡面径 流是泥沙的搬运介质,坡面泥沙的起动、搬运和沉积 过程主要受坡面流水动力沿程的变化特征来决定。 关于坡面流和坡面侵蚀产沙水动力特征的研究一直 是坡面侵蚀产沙机理揭示的主要内容,各领域的相关 专家从不同的角度开展了研究,并取得了大量相应的 成果[1-2]。将坡度、雨强和植被覆盖作为变量,采用人 工模拟降雨和变坡水槽放水试验的方法,研究坡面流 水动力学特征方面的成果显著。一般认为坡面流速 随坡度的增大而增大,径流深与坡度呈反比,降雨具 有增大陡坡表层流速效应[3]。水流流型随雨强和坡 度而发生变化,当坡度较缓、雨强较小时,水流宏观上 呈缓流,反之,宏观上多呈急流^[4]。坡面流的水动力 学特性与明渠水流存在较大差异,提出了在坡面水蚀 机理研究过程中应予以充分考虑^[5]。随着雨强的增 大,坡长对流速的影响逐渐减小,流量随着雨强的增 大而增大;相同雨强条件下不同坡度间的流量变化较 小,相同坡度条件下坡面流水深及单宽流量与雨强具 有较好的函数关系[6-7]。上方汇水和降雨强度的增大 使坡沟系统水流雷诺数和弗汝德数呈明显增大,水流 流态由缓流演变为急流,坡面水流阻力系数明显减 小^[8]。草地覆盖度增加将改善坡面流水力学性质,总 体上减小了坡面流速,增加了阻力和粗糙度[9],覆盖 度对坡面流阻力系数的影响大于空间格局对阻力系 数的影响^[10],坡面径流剪切力随覆盖度的提高而减 小[11]。由于植被的黏滞阻力和压差阻力的相互作 用,植被阻力系数随雷诺数的增加而增大,而随弗汝 德数的增加而减小^[12]。下垫面的差异对坡面流水力 学特征的影响很大。在紫色土和红壤地区,坡面径流 剪切力、单位水流功率、过水断面单位能量及水流功 率4个参数与坡面土槽的剥离及分离速度均存在着 明显的线性关系,但二者临界水流功率值不同,紫色 土坡面远远大于红壤坡面[13]。在砒砂岩坡面径流流 速随冲刷流量和坡度的增大而增大,雷诺数随冲刷流 量的增大而增大,而弗汝德数的变化趋势正好相反。 径流阻力系数随压实度增大而减小,随冲刷流量的增 大而增大[14-15]。径流功率是描述风沙区土质和含砾 石工程堆积体土壤侵蚀参数更为合理的因子[16],坡 度对流速的影响大于流量[17]。黄土坡面形态复杂, 坡面细沟浅沟发育,沟间地与沟道的水流特性不同。 细沟内水流流速、雷诺数和弗汝德数一般比细沟间要 大,但阻力系数一般小于细沟间水流阻力系数[18]。 坡面地表一旦产生结皮,影响坡面降水入渗和径流特

82

征,土壤结皮坡面具有较大坡面流流速,较小径流深 度、水流剪切力和水流功率^[19]。坡面水土保持措施 旨在减少径流的侵蚀动力,进而保持水土,针对有水 土保持措施坡面的研究显示,地表状况与流量大小直 接影响着坡面流流态,水流受阻力影响显著增加^[20]。

综上可知,对坡面流水动力特征的研究较多,得出 了不同影响因素设计范围内的变化规律。这些规律大 都是从试验结论的角度和设计的限制条件下进行的探 讨和解释,就其水动力学参数之间规律性差异的数学机 理讨论较少,对坡面流水动力学参数与侵蚀产沙之间相 关性的研究不多。在分析坡面径流侵蚀产沙过程中,这 些坡面流水动力学参数中那些参数的综合性和灵敏度 较高的问题,也没见到相关报道。不同的试验设计规模 也是研究中的主要问题。鉴于此,本研究拟采用人工模 拟降雨的方式,通过不同坡长和雨强的组合试验,应用 经典水力学和相关拟合线性分析的方法,探讨坡面侵蚀 产沙与水力学特征参数的关系,揭示坡面径流侵蚀产 沙的综合判断参数及适宜的试验设计规模。

1 材料与方法

1.1 试验设计

于 2012 年 9 月-2014 年 11 月在浙江大学玻璃温 室内完成人工模拟降雨试验。试验采用木制的径流槽, 其宽 0.5 m,高 0.5 m,长分别为 1,2,3,4,5 m,坡度为 20°,5个径流槽平行排列,降雨试验可同时进行。试验 水温维持在 20 ℃。坡面无植被生长,径流槽下端设置 有边缘高5 cm 的集水槽便于收集径流样品。径流槽填 充的试验用土是浙江省临安市的典型红壤,在原位进行 分层(每层厚度10 cm,共5层)采集,室内对应层位填 充,并保持层位和容重基本相同。人工模拟降雨装置 采用的是中国科学院水土保持研究所研制生产的可 移动、变雨强、压控双向侧喷式小型人工模拟降雨装 置,雨滴降落时的高度为6m。通过调整喷头喷孔直 径的大小和水压来调整雨强,同时在小区的边缘设计 了18个集雨桶来监测降雨的均匀度,要求降雨均匀 度均达到 90%左右。试验雨强设置为 0.65~2.00 mm/min,每场降雨重复3次。每次降雨试验前测定 土壤前期含水量,以保证所有降雨试验土壤前期含水 量相对一致。产流开始以 2 min 为一个时段采集径 流水样,产流时间控制在 30 min,即 15 个时段。坡 面径流断面流速采用染色剂法(KMnO₄)测定。将含 有泥沙的径流样品带回实验室静置 24 h,通过量测 瓶中水的深度和重量得出径流体积和容重,然后倒去

上清液,将泥沙烘干称重(105℃的条件下烘 12 h)得 到泥沙量。统计时 5 个径流槽分别进行。然后分别 计算每场降雨,不同坡长径流槽的总径流量、总产沙 量、平均流速(表1)。

表 1 坡面侵蚀产沙模拟降雨试验测试统计数据

降雨	雨强/	监测			坡长/m		
场次	$(mm \cdot min^{-1})$	项目	1	2	3	4	5
		平均流速	0.040	0.053	0.069	0.080	0.127
1	0.63	总产流量	0.005	0.022	0.011	0.019	0.032
		总产沙量	4.090	134.417	32.579	25.431	210.441
		平均流速	0.023	0.034	0.044	0.057	0.080
2	0.69	总产流量	0.001	0.010	0.014	0.012	0.019
		总产沙量	0.500	41.266	86.496	24.596	81.516
		平均流速	0.033	0.071	0.110	0.120	0.125
3	0.83	总产流量	0.001	0.026	0.034	0.035	0.034
		总产沙量	0.150	247.892	405.211	265.619	257.263
		平均流速	0.030	0.054	0.081	0.099	0.133
4	0.85	总产流量	0.033	0.071	0.110	0.120	0.125
		总产沙量	0.470	95.358	33.999	40.503	465.111
		平均流速	0.035	0.042	0.046	0.048	0.107
5	1.01	总产流量	0.006	0.049	0.039	0.044	0.157
		总产沙量	3.860	805.156	619.502	469.736	7211.529
		平均流速	0.069	0.075	0.091	0.102	0.143
6	1.20	总产流量	0.005	0.045	0.054	0.091	0.098
		总产沙量	4.070	667.667	1429.628	2019.312	2022.656
		平均流速	0.054	0.071	0.083	0.091	0.120
7	1.36	总产流量	0.008	0.033	0.045	0.046	0.081
		总产沙量	12.920	232.690	783.210	212.940	753.060
		平均流速	0.031	0.054	0.085	0.113	0.130
8	1.37	总产流量	0.002	0.039	0.017	0.038	0.159
		总产沙量	0.920	854.545	92.512	396.420	2905.225
		平均流速	0.063	0.103	0.095	0.147	0.180
9	1.54	总产流量	0.012	0.128	0.048	0.100	0.187
		总产沙量	27.920	5233.520	790.594	1968.485	5571.578
		平均流速	0.071	0.094	0.112	0.121	0.165
10	1.68	总产流量	0.006	0.056	0.067	0.090	0.141
		总产沙量	5.600	1053.009	1775.080	995.751	3498.199
		平均流速	0.063	0.076	0.110	0.120	0.136
11	1.75	总产流量	0.006	0.039	0.045	0.069	0.163
		总产沙量	19.480	371.710	773.000	680.435	3574.150
		平均流速	0.033	0.073	0.091	0.122	0.133
12	1.80	总产流量	0.004	0.082	0.034	0.098	0.337
		总产沙量	1.960	3760.939	438.244	2011.941	4321.880
		平均流速	0.099	0.125	0.136	0.126	0.161
13	2.00	总产流量	0.011	0.087	0.064	0.079	1.256
		总产沙量	45.111	2259.183	1784.106	1773.239	5333.053

注:平均流速单位为 m/s;总产流量单位为 m³;总产沙量单位为 g。

1.2 测定指标

根据坡面侵蚀产沙水动力学分析参数要求,需计 算径流深、雷诺数、弗汝德数、阻力系数、坡面径流剪 切力等。计算所用流速是观测断面流速,取每个径流 槽的平均流速。

平均径流深(h):采用每场降雨的总径流量与每 个径流槽的面积换算而得,计算公式:

$$h = \frac{Q}{A} \times 1000 \tag{1}$$

式中:h 为坡面平均径流深(mm);Q 为总径流量(m³);A 为径流槽面积(m²)。

雷诺数(Re):是用来判断坡面薄层水流的流态。
借用明渠水流的判别法,当 Re<500 时水流为层流,
Re>5 000 时为紊流, Re 为 500~5 000 为过渡流。

$$R_e = \frac{vh}{v} \tag{2}$$

$$\nu = \frac{0.01775}{1 + 0.0337t + 0.000221t^2} \tag{3}$$

式中:v为运动黏滞系数(m²/s);v为断面平均流速 (m/s);t为水温(C)。

弗汝德数(Fr):是判断水流的流型流态。当Fr =1时,说明惯性力作用与重力作用相等,水流为临 界流;当Fr>1时,说明惯性力大于重力作用,水流 为急流;当Fr<1时,说明惯性力小于重力作用,水流 流为缓流。计算公式为:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gh}} \tag{4}$$

式中:g为重力加速度(m/s²)。

阻力系数(f):坡面流阻力是指水流在沿坡流动 过程中所受到的来自水土界面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总称。 阻力系数是径流流态、床面粗糙程度、断面特性、水流 密度、雨滴直径和水流表面张力系数等因素的综合体 现。计算公式为:



$$f = \frac{8gh\sin\alpha}{v^2} \tag{5}$$

式中:α为坡度(°)。

径流剪切力(r):是坡面薄层水流在沿坡面梯度 方向运动时,在其运动方向上产生的一个作用力。水 流顺坡向下流动时,径流剪切力破坏土壤原有结构, 分散土壤颗粒,使被剥蚀的土壤颗粒随径流输出坡 面,从而造成水土流失。计算公式为:

$$\tau = \frac{1}{8}\rho f v^2 \tag{6}$$

式中: τ 为径流剪切力(Pa); ρ 为水的容重(kg/m³)。

2 结果与分析

2.1 侵蚀产沙与坡面径流水动力学参数的相关性分析

为了能更好地分析坡面侵蚀产沙的水动力学特征,结合实际坡面汇水面积弧形的地貌形态特点,对表1的13场人工模拟降雨试验数据进行了跨雨强和 跨坡长的综合性分析。根据表1数据及公式(1)~公 式(6)计算,获得了13场不同坡长情况下模拟降雨试 验的主要水动力学参数,并与每场降雨不同坡长的总 产沙量进行了拟合(图1)。



由图1可知,总产沙量随剪切力、雷诺数、平均径

流深、平均流速的增大均呈现出幂函数形式的增长

规律,其相关性都非常显著,其相关系数 R 分别为 0.92,0.94,0.92,0.78。在本试验设计范围内,随坡 长和雨强的变化并不明显。由 65 组数据计算得,雷 诺数<500的层流占到了总数的15.4%,其中雨强 <0.7 mm/min 的雷诺数占到了层流数的 55%,绝大 部分为层流。这一规律与张宽地等[4]和肖培青等[8] 的研究结果相类似。雷诺数>5 000 的紊流占到了 总数的24.6%,坡长为5m的雷诺数占到了紊流数 的 64%,紊流出现的最小雨强为 1.01 mm/min。雷 诺数在 500~5 000 的过渡流达到了总数的 60%。但 是,总产沙量随弗汝德数增大,却呈现出减少的趋势, 并且负相关性系数很小(R=0.29),与王广月等^[21]在 三维土工网护坡坡面流水动力学特性试验研究的结 论一致。阻力系数与总产沙量的关系虽然是正相关, 但相关系数很小(R=0.27)。根据弗汝德数判断流 型流态来讲,所有的65组数据都属于缓流的范畴。

若将坡长考虑进去[22-23],则这些水力学参数与产 沙量关系的规律发生了变化(表 2)。由表 2 可知,剪 切力和径流深与产沙量的乘幂相关性所呈现的规律 一致,而且几乎不受坡长的影响。但是最大值都是呈 现在 3 m 的坡长处。雷诺数与产沙量的乘幂相关性 显著大于流速与产沙量的相关性,但是在3m坡长 处出现了最小值。将弗汝德数分别与坡长 1,2,3,4, 5 m 的不同雨强的总产沙量进行乘幂相关性拟合,其 相关系数分别为 0.28,0.43,0.51,0.56,0.77,明显 呈现出随坡长增加相关性增大的趋势,进一步拟合坡 长与确定系数(弗汝德数与不同坡长产沙量)的相关 性达到了 0.98。同理,将阻力系数分别与坡长 1,2, 3,4,5 m 的不同雨强的总产沙量进行乘幂相关性拟 合,其相关系数分别为 0.28,0.51,0.60,0.70,0.77, 其相关系数随坡长增大的速度更快,坡长与阻力系数 随坡长确定系数的相关性达到了 0.99。由此可见, 坡长在分析弗汝德数和阻力系数对侵蚀产沙作用时 影响明显。

表 2 水力学参数与产沙量乘幂相关性随坡长的	变 (ĸ
------------------------	-----	---

坡长/m	剪切力	径流深	雷诺数	流速	弗汝德数	阻力系数
1	0.9222	0.9218	0.9352	0.6963	0.0784	0.0776
2	0.9602	0.9569	0.8750	0.4785	0.1853	0.2555
3	0.9858	0.9854	0.8455	0.2489	0.2585	0.3555
4	0.9473	0.9455	0.8694	0.3240	0.3133	0.4963
5	0.9194	0.9142	0.9094	0.3868	0.5877	0.5949

2.2 坡面径流水动力学参数对侵蚀产沙的影响分析 水动力学参数计算公式(1)~公式(6)所用的自 变量主要涉及的有流速、径流深、坡度、重力加速度、 动力黏滞系数等,其中设计坡度固定不变为 20°,重 力加速度是常量,动力黏滞系数与水温有关,在本试 验设计中水温控制在 20 ℃不变,由此可见,只有径流 深和流速的相对大小发生变化,影响着剪切力、雷诺数、阻力系数和弗汝德数。

4 个水力学参数对侵蚀产沙的影响所呈现出不同的规律,从公式(2)~公式(6)的式中各物理参数的 关系可推得造成影响差异的内因。在雷诺数计算的 公式(2)中,径流深和流速这两个参数都在分子上,二 者是相乘的关系,是随着径流深和流速的增大而增 大。剪切力计算公式(6)中,剪切力与流速的平方成 正比。而由弗汝德数计算公式(4)中可看出,弗汝德 数的大小变化,取决于流速和径流深开平方的比值。 在本试验的 65 组数据中,弗汝德数值全部为小于 1, 则说明流速小于径流深与重力加速度乘积开平方的 值,即惯性力小于重力。再由阻力系数计算公式(5) 中得知,阻力系数的大小,取决于径流深与流速平方 的比值。

为了分析径流深与流速对4个水力学参数与侵 蚀产沙关系的影响,可将径流深与总产沙量的拟合 式,与流速与总产沙量的拟合式进行联解,得出:

$$\frac{v}{h} = 4.97 S^{3.11}$$
 (7)

式中:S为场降雨总产沙量(g)。

由公式(7)推得,当总产沙量≥0.6时,等式右边 是一个永远大于1的值,说明流速对坡面侵蚀产沙的 作用要大于径流深。当总产沙量<0.6时,等式右边 是一个小于1的值。但在本试验的65组总产沙量中 只有2个数据<0.6,其他的数据均大于1。由此可 知,在缓流的范畴内,流速对水动力学参数与总产沙 量的关系远远的大于径流深。

2.3 坡面侵蚀产沙的多要素综合影响

由公式(7)分析可知,基于本研究的试验设计背景,流速是坡面侵蚀产沙主要的水动力学要素。在不同的坡长和不同的雨强作用下,流速变化的规律不同(图 2)。



图 2 平均流速随雨强与坡长的变化规律

由图 2 可知,平均流速随雨强的增加而增加,5 个坡长的直线趋势拟合变化规律几乎一致,其斜率的 值和相关系数相近。平均流速与坡长的关系,虽然, 其绝对值随着坡长的增加也呈现出增加趋势,但是, 在等距离变坡长的设计中,水力学各要素并非呈等差 值增加。在坡长 2,3,4 m时,随雨强的增加,流速的 增加几乎是围绕 0.01 m/s等值在增加,但是在 4,5 m时,随雨强的增加,流速的增加速率是围绕 0.03 m/s在增加。由此可推得,坡面径流的流速具有波动 性,在 3 m坡长的附近,流速随雨强的增加是相对稳 定的。从水文学和水力学的理论来分析,坡面径流的 流速不仅与降雨强度有关,与坡面的汇流面积也关系 密切^[24]。坡面径流的汇流过程还与坡面径流含沙 量、泥沙的起动、泥沙的沿程沉积有关,当径流中含沙 量大于挟沙能力时,流速就会减缓,泥沙就会沉积。 当泥沙沉积后的短时间内,径流含沙量减少,径流的 流速加大。进而可知,坡面径流侵蚀产沙存在一个随 泥沙起动—搬运—沉积过程的波动步长。

为了说明流速和径流深以及试验设计的自变要 素雨强和坡长对侵蚀产沙的综合影响,用 SPSS 20.0 进行了回归分析,得回归模型:

S=9845.9v+10.902h+182.644L+462.225I-1339.927 R=0.7333 (8) 式中:S为总产沙量(g);v为平均流速(m/s);L为坡 长(m);h为径流深(mm);I为雨强(mm/min)。

模型的方差表明 F 统计量对应的 p 值为 0.000, 远小于 0.01,则说明该模型整体是显著的,其拟合度 相对较好。

3 结论

(1)就坡长对水动力学参数与总产沙量的关系而 言,在小雨强时,坡长对坡面径流的流态影响不明显, 紊流出现的最小雨强为1.01 mm/min。坡长对弗汝 德数和阻力系数的影响较大。剪切力和径流深受坡 长的影响很小。流速是坡面侵蚀产沙的主要影响参 数,是坡面侵蚀产沙强度判断的敏感性指标。

(2)由不同坡长各水力学参数与产沙量的相关性分 析可知,剪切力和径流深与产沙量相关系数的最大值, 雷诺数和平均流速相关系数的最小值,都出现在3m坡 长处。流速随雨强的变化规律在3m坡长附近趋势比 较稳定,可推得3m坡长是坡面径流过程波动的步长, 是模拟试验研究水动力学参数的最小设计坡长。

(3)在研究坡面径流水动力学特征参数与侵蚀产 沙过程时,剪切力是判断坡面侵蚀产沙强度的综合性 指标之一。这一研究结论为实地大范围通过径流量 和流速来预测侵蚀产沙的强度提供了简便快速的判 断方法。

参考文献:

- [1] 田凯,李小青,鲁帆,等.坡面流侵蚀水动力学特性研究 综述[J].中国水土保持,2010(4):44-45.
- [2] 翟娟,卢晓宁,熊东红.土壤侵蚀径流水动力学特性及其 影响因素的研究进展[J].安全与环境工程,2012,19

(5):1-9.

- [3] 潘成忠,上官周平.降雨和坡度对坡面流水动力学参数的影响[J].应用基础与工程科学学报,2009,17(6):843-851.
- [4] 张宽地,王光谦,吕宏兴,等.模拟降雨条件下坡面流水 动力学特性研究[J].水科学进展,2012,23(2):229-235.
- [5] 朱智勇,解建仓,李占斌,等. 坡面径流侵蚀产沙机理试验研究[J]. 水土保持学报,2011,25(5):1-7.
- [6] 赵小娥,魏琳,曹叔尤,等.强降雨条件下坡面流的水动力学 特性研究[J].水土保持学报,2009,23(6):45-47,107.
- [7] Fu X T, Zhang L P, Wu X Y, et al. Dynamic simulation on hydraulic characteristic values of overland flow[J]. Water Resources, 2012, 39(4):474-480.
- [8] 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.
- [9] 李毅,邵明安.草地覆盖坡面流水动力参数的室内降雨 试验[J].农业工程学报,2008,24(10):1-5.
- [10] 杨坪坪,张会兰,王云琦,等. 植被覆盖度与空间格局对 坡面流水动力学特性的影响[J].水土保持学报,2016, 30(2):26-33.
- [11] 吴卿,杨春霞,甄斌.草被覆盖对坡面径流剪切力影响 的试验研究[J].人民黄河,2008,32(8):96-99.
- [12] 杨帆,张宽地,杨明义,等. 植物茎秆影响坡面径流水动 力学特性研究[J]. 泥沙研究,2016(4):22-26.
- [13] 丁文峰.紫色土和红壤坡面径流分离速度与水动力学 参数关系研究[J]. 泥沙研究,2010(6):16-22.
- [14] 苏涛,张兴昌. 砒砂岩陡坡面径流水动力学特征[J]. 水 土保持学报,2012.26(1):17-21.
- [15] 苏涛,张兴昌. EN-1 对砒砂岩固化土坡面径流水动力 学特征的影响[J]. 农业机械学报,2011,42(11):68-75.
- [16] 康宏亮,王文龙,薛智德.北方风沙区砾石对堆积体坡 面径流及侵蚀特征的影响[J].农业工程学报,2016,32 (3):125-134.
- [17] 李永红,牛耀彬,王正中,等.工程堆积体坡面径流水动 力学参数及其相互关系[J].农业工程学报,2015,31 (22):83-88.
- [18] 王龙生,蔡强国,蔡崇法,等.黄土坡面细沟与细沟间水 流水动力学特性研究[J]. 泥沙研究,2013(6):44-52.
- [19] 韩珍,王小燕,李馨欣.碎石含量影响下紫色土坡面径 流流速变化过程及土壤侵蚀的阶段性[J].中国农业大 学学报,2016,21(10):102-108.
- [20] 吴淑芳,吴普特,原立峰.坡面径流调控薄层水流水力 学特性试验[J].农业工程学报,2010,26(3):14-19.
- [21] 王广月,杜广生,王云,等.三维土工网护坡坡面流水动 力学特性试验研究[J].水动力学研究与进展,2015,30 (4):406-411.
- [22] 付兴涛,张丽萍. 坡长对红壤侵蚀影响人工降雨模拟研究 [J]. 应用基础与工程科学学报,2015,23(3):474-483.
- [23] 付兴涛,张丽萍. 红壤丘陵区坡长对作物覆盖坡耕地土 壤侵蚀的影响[J]. 农业工程学报,2014,30(5):90-98.
- [24] 汪晓勇,郑粉莉,张新和.上方汇流对黄土坡面侵蚀一搬运 过程的影响[J].中国水土保持科学,2009,7(2):7-11.