

【水土保持】

雨强及坡度对黄土区草地坡面水流流速的影响

张琪琳¹, 王占礼^{1,2}, 张庆玮¹, 王栋栋¹, 刘俊娥³

(1.西北农林科技大学 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室 陕西 杨凌 712100;
2.中国科学院 水利部 水土保持研究所 陕西 杨凌 712100;
3.陕西师范大学 地理科学与旅游学院 陕西 西安 710119)

摘 要:黄土区草被覆盖下的坡面水流流速特征研究对于深刻认识该区草地坡面侵蚀动力和科学决策该区水土保持与生态建设具有重要意义。采用草地小区人工模拟降雨试验方法,对黄土区草地坡面水流流速随雨强及坡度的变化特征进行研究,结果表明:①在5个不同雨强及5个不同坡度下,草地坡面流速随降雨历时变化均表现为产流初期流速快速增大,持续一段时间之后转为缓慢增大或保持稳定,且可用幂函数描述;②草地坡面次降雨产流平均流速分别随单一因子雨强、坡度的增大而增大,且皆可用对数函数描述;③草地坡面次降雨产流平均流速随雨强及坡度复合因子的变化可用二元对数函数描述,试验条件下坡度对草地坡面水流平均流速的影响大于雨强的影响。

关键词:草地坡面;流速;雨强;坡度;黄土区

中图分类号: S157.1 文献标志码: A doi: 10.3969/j.issn.1000-1379.2018.04.023

Experiment on Influence of Rainfall Intensity and Slope on Flow Velocity in Loess Area Grassland

ZHANG Qilin¹, WANG Zhanli^{1,2}, ZHANG Qingwei¹, WANG Dongdong¹, LIU June³

(1.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 2.Institute of Soil and Water Conservation of CAS and MWR, Yangling 712100, China; 3.School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

Abstract: The study of flow velocity on grassland slope is of great significance to understand dynamic of erosion deeply and to make scientific decision on soil and water conservation and ecological construction in Loess Plateau. In order to study the variation of flow velocity with rainfall intensity and slope on grassland slope, in the paper, we adopted artificial rainfall experiment to study flow velocity. The results show that: a) under five different rainfall intensities and slopes, variation of flow velocities with time first increase rapidly after becoming increase slowly or stably and relationships between them can be described by the power function equations; b) average runoff velocities on grassland slopes increase with the increase of rainfall intensities and slopes respectively, which can be described by the logarithmic function equation; c) average velocities of grassland slope with rainfall intensities and slopes can be described by the dual logarithmic function equation and in the experiment, the influence of slope on grassland average velocity is greater than the influence of rainfall intensity to the grassland average velocity.

Key words: loess area; grassland slope; flow velocity; rainfall intensity; slope

我国黄土高原是全球水土流失严重地区之一。1999年实施退耕还林还草工程以来,黄土区坡面草本植物迅速繁衍。具有草被覆盖的坡面与裸坡相比,坡面水流流速发生了显著变化,进而深刻影响坡面土壤侵蚀。开展黄土区草地坡面水流流速特征研究,对于该区水土流失治理与生态建设具有重要意义。

水力侵蚀是水流和土壤相互作用的复杂物理过程,水流动力是坡面水力侵蚀发生发展的重要根源,而流速则是体现坡面水流动力学特征的重要指标^[1]。早期学者对坡面流流速研究主要是在裸坡上进行,认为坡度、流量、地表特征和土壤特性等因素都会影响坡面流流速^[2]。M. A. Nearing等^[3]利用侵蚀动床试验,得出流量对坡面薄层水流平均流速影响明显;吴淑芳

等^[4]进行坡面薄层水流水力学特性试验,结果表明随着单宽流量增大,坡面流流速明显增大,二者之间成幂函数关系;张光辉^[5]试验得出,坡面流平均流速与流量和坡度2个因子成二元幂函数关系,且流量是影响坡面流平均流速的主要因子;焦念等^[6]利用陕西安塞黄绵土进行室内模拟降雨试验,得出黄土坡面细沟水

收稿日期: 2017-11-13

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0402401);国家自然科学基金资助项目(41471230);黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室专项经费资助项目(A314021403-C2)。

作者简介:张琪琳(1991—)男,山西运城人,硕士研究生,研究方向为土壤侵蚀。

通信作者:王占礼(1960—)男,陕西榆林人,教授,博士,博士生导师,主要从事土壤侵蚀过程及预报研究工作。

E-mail: zwang@nwsuaf.edu.cn

流的平均流速是雨强和坡度的函数,且与二者均成正相关关系,可用二元对数方程很好地描述。

随着对草被覆盖条件下侵蚀规律认识不断加深,学者们发现草被覆盖是影响坡面水流流速变化的重要因素之一^[2],因而加快了对草被覆盖条件下的坡面水流流速试验研究。国外学者普罗托季亚科诺夫^[7]最早进行了单宽流量(A)为0.4~9.5 L/s、坡度(S)为0.25%~20.7%的草地坡面水流流速观测试验,分析得到草地坡面水流流速(V)计算公式为 $V = k A^{1/2} S^{3/16}$ (k 为坡面粗糙系数)。国内很多学者对草地植被覆盖下坡面水流流速的变化特征进行了试验研究,如马春艳^[8]通过野外人工放水冲刷试验,得出荒草地坡面平均流速与坡度及流量均成正相关关系,流量是影响荒草地坡面水流流速的主要因子;江忠善等^[9]根据不稳定流理论,总结国内外研究者得出的计算方程,并将方程中流速用单宽流量(q)和坡度(S)表示,换算成统一形式后得到 $V = k q^n S^m$ (k, m, n 为参数)。

国内外学者以往对草地坡面水流流速随流量及坡度的变化特征进行的试验研究较多,而对于草地坡面水流流速随雨强及坡度的变化特征研究则甚少。笔者运用草地小区人工模拟降雨试验方法,研究草地坡面水流流速在不同雨强及坡度下的变化过程及特征,为深入认识草地坡面水蚀动力特征及其侵蚀作用机理提供参考。

1 材料与方 法

本试验在中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室人工模拟降雨大厅中进行。试验采用侧喷式人工降雨设备,降雨高度为16 m,降雨均匀度大于80%^[10-11]。试验采用可移动式变坡度径流小区,通过调节小区下方的升降架,可调节的坡度范围为0°~30°,小区尺寸为80 cm×60 cm×25 cm,底部按10 cm×10 cm间距开孔。

选取陕西省安塞县黄绵土,试验前将土壤进行自然风干并过5 mm筛,试验设计的土壤含水量为14%,土壤容重为1.2 g/cm³。试验之前首先建设裸土小区:在试验小区的底部铺上一层5 cm厚的细沙,然后在细沙上方铺一层透水纱布,模拟坡面在天然条件下的透水情况,最后在透水纱布上分层装填土壤,每层土壤厚5 cm,共4层。之后种草建成草地小区,待草地植被生长稳定后进行降雨试验。

试验草种选用早熟禾,条带状种植,草被覆盖度设计为40%,每场降雨试验之前先用相机对草地小区进行拍照,然后将照片采用Image J软件^[12]分析之后得到准确的草被覆盖度,若与40%差异过大,则对草冠

部分进行修剪,保证降雨试验时草被盖度为40%。

试验设计雨强(I)分别为0.7、1.0、1.5、2.0、2.5 mm/min,同时坡度为7°的试验5场;设计坡度(S)分别为7°、10°、15°、20°、25°,同时雨强为0.7 mm/min的试验5场。设计1个重复,共计18场次试验。

试验每一场降雨时长均为40 min,降雨产流之后的第1 min、第3 min、第6 min各取样观测一次,之后每隔3 min取样一次。试验时,采用高锰酸钾染色法测定水流表面流速,然后根据水流流态确定流速修正系数 α 值^[13],最后计算出坡面水流平均流速。

采用Excel 2007对试验数据进行处理分析,得出经验方程、决定系数和显著性水平。

2 结果与分析

2.1 草地坡面水流流速随降雨历时变化特征

2.1.1 不同雨强下草地坡面水流流速随降雨历时变化特征

图1为不同雨强下草地坡面水流流速随降雨历时的变化曲线。由图1可知,不同雨强下降雨产流开始阶段草地坡面水流流速不断增大,在产流约20 min之后流速缓慢增大或基本保持稳定。不同雨强下流速随降雨历时变化趋势基本相似,但0.7 mm/min雨强下的流速明显小于其他雨强下的流速,其他雨强下流速值之间的差异较小。

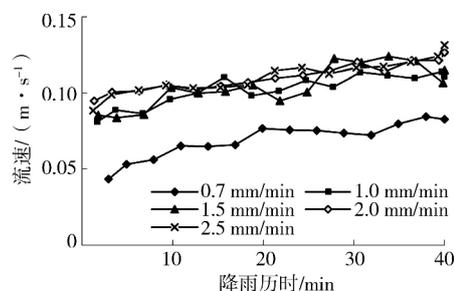


图1 不同雨强下草地坡面流速随降雨历时的变化

不同雨强下的草地坡面降雨产流过程中,在开始降雨后的短时间内,土壤的入渗率较大,降雨全部入渗于土壤中,地表无径流产生。随着降雨继续进行,坡面表层土壤含水量增大,土壤入渗率迅速减小至降雨强度以下时,草地坡面开始产生径流,流量和流速增大较快,在降雨持续20 min左右时,土壤入渗率趋于缓慢减小或稳定变化,草地坡面水流流量及相应的流速呈现为缓慢增大或稳定变化。

表1为不同雨强下草地坡面水流流速随降雨历时变化的拟合方程及检验结果。由表1可知,不同雨强下草地坡面水流流速随降雨历时变化均可用幂函数方程进行描述,决定系数为0.704~0.943,显著性水平皆

为0.01。

表1 不同雨强下草地坡面水流流速随降雨历时变化

雨强/ (mm·min ⁻¹)	坡度/(°)	拟合方程	决定系数	显著性 水平
0.7	7	$V = 0.036t^{0.229}$	0.943	0.01
1.0	7	$V = 0.075t^{0.107}$	0.870	0.01
1.5	7	$V = 0.074t^{0.122}$	0.704	0.01
2.0	7	$V = 0.089t^{0.077}$	0.803	0.01
2.5	7	$V = 0.085t^{0.094}$	0.855	0.01

注: V为流速, m/s; t为时间, min

2.1.2 不同坡度下草地坡面水流流速随降雨历时变化特征

图2为不同坡度下草地坡面水流流速随降雨历时的变化。由图2可知,不同坡度下流速随降雨历时变化趋势与不同雨强下的基本相似,流速随降雨历时延长,刚开始快速增大,一段时间之后基本保持不变。稍有不同的是,不同坡度下坡面水流流速在开始产流大约15 min之后基本保持不变,不同雨强下流速则是在20 min之后趋于平稳的。

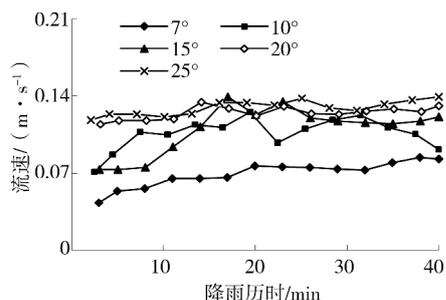


图2 不同坡度下草地坡面流速随降雨历时的变化

表2为不同坡度下草地坡面水流流速随降雨历时变化的拟合方程及检验结果。由表2可知,不同坡度下草地坡面水流流速随降雨历时变化均可用幂函数方程进行描述,相关性较不同雨强下的弱,决定系数为0.420~0.943,显著性水平为0.01~0.10。

表2 不同坡度下草地坡面水流流速随降雨历时的拟合方程

雨强/ (mm·min ⁻¹)	坡度/(°)	拟合方程	决定系数	显著性水平
0.7	7	$V = 0.036t^{0.229}$	0.943	0.01
0.7	10	$V = 0.075t^{0.117}$	0.420	0.10
0.7	15	$V = 0.055t^{0.234}$	0.705	0.01
0.7	20	$V = 0.110t^{0.042}$	0.504	0.10
0.7	25	$V = 0.113t^{0.047}$	0.652	0.01

2.2 雨强对草地坡面次降雨产流平均流速的影响

图3为草地坡面次降雨产流平均流速随雨强的变化。由图3可知,雨强从0.7 mm/min增大至1.0 mm/min,草地坡面平均流速显著增大,约增大0.04 m/s;雨强继续增大到2.5 mm/min时,流速增幅很小,各雨强下草地坡

面平均流速的变化范围为0.06~0.12 m/s。试验条件下草地坡面平均流速随雨强增大而增大的关系可用对数函数进行描述(决定系数 $R^2 = 0.747$, 显著性水平 $P < 0.1$):

$$V = 0.029 \ln I + 0.090$$

式中: V为草地坡面次降雨产流平均流速, m/s; I为雨强, mm/min。

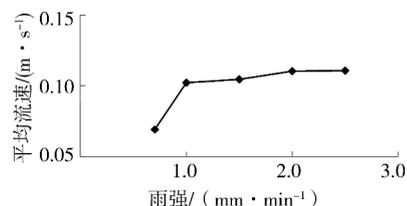


图3 草地坡面平均流速与雨强关系曲线

草地坡面水流平均流速随雨强增大而增大,原因是在同一坡度下,随着雨强增大,草地坡面径流量随之增大,径流所受沿顺坡方向的分力增大,使得流速增大。由图3可知,雨强从0.7 mm/min增大至1.0 mm/min时,平均流速增大0.04 m/s;雨强从1.0 mm/min增大至2.5 mm/min时,平均流速增大0.02 m/s。在小雨强下,草地坡面水流的动力小,水流分离土壤能力弱,坡面较为平整,坡面阻力较小,水流直接顺坡流下,因此当流量增大时,坡面流速快速增大。而在大雨强下,草地坡面水流动力较大,分离土壤能力增强,坡面被冲刷得凹凸不平,坡面阻力增大,使坡面水流动力被大量消耗,从而导致流速增大缓慢。

2.3 坡度对草地坡面次降雨产流平均流速的影响

图4为草地坡面次降雨产流平均流速随坡度的变化。由图4可知,坡度从7°增大至10°时,草地坡面平均流速显著增大,继续增大至25°时,平均流速增幅明显减小,试验条件下流速变化范围为0.06~0.14 m/s。草地坡面平均流速随坡度增大而增大的变化关系可用对数函数进行描述:

$$V = 0.043 \ln S + 0.007 \quad (R^2 = 0.893, P < 0.05)$$

式中: S为坡度(°)。

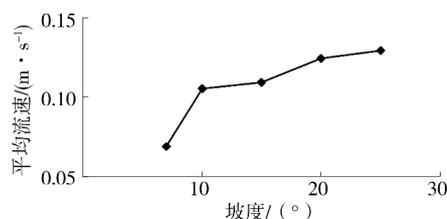


图4 坡度对草地坡面平均流速的影响

草地坡面水流平均流速随坡度增大而增大,原因是在同一雨强下,随着坡度增大,草地坡面径流所受沿顺坡方向的分力增大,使流速随之增大。

2.4 雨强及坡度复合因子对草地坡面流速的影响

二元回归统计分析表明,试验条件下草地坡面平均流速与雨强及坡度复合因子成正相关关系,其关系可用二元对数函数进行描述:

$$V = 0.018 + 0.025 \ln I + 0.038 \ln S$$

$$(R^2 = 0.819, P < 0.01)$$

由式中雨强和坡度因子系数可知,试验条件下坡度对草地坡面水流平均流速的影响大于雨强的,这与焦念等^[6]的试验研究结果一致。焦念等人研究所得决定系数为0.90,高于本研究的,原因是其试验在裸土坡面上进行,在试验条件确定后,试验中只有雨强和坡度2个因子是变化的,其他因素基本不变;而本研究的试验是在草地坡面上进行的,除了雨强和坡度2个主要影响因子外,草被本身带来的不确定性会影响坡面水流流速^[14],最终导致本试验条件下得到的方程相关性降低。

3 结 论

(1) 在试验条件下,不同雨强草地坡面水流流速随降雨历时的变化特征相似,皆表现为产流刚开始时快速增大,产流约20 min之后转为缓慢增大或基本稳定。

(2) 在试验条件下,不同坡度草地坡面水流流速随降雨历时变化特征表现为产流刚开始时快速增大,产流约15 min之后转为缓慢增大或基本稳定,可用幂函数描述其随降雨历时的变化。

(3) 草地坡面次降雨产流平均流速与雨强、坡度单一因子均成正相关关系,均可用对数函数描述。雨强从0.7 mm/min增大至2.5 mm/min时,平均流速变化范围为0.06~0.12 m/s;坡度从7°增大至25°时,平均流速变化范围为0.06~0.14 m/s。

(4) 草地坡面次降雨产流平均流速与雨强及坡度2个复合因子成正相关关系,可用二元对数函数描述。试验条件下,坡度对草地坡面次降雨产流平均流速的影响大于雨强的。

受试验条件的限制,未进行草地植被自身属性对流速影响的相关试验,而这些因素会不同程度地影响流速。因此,在今后的研究工作中,应进一步开展草地坡面草被种类、覆盖度、草地植被茎秆、草地落叶层及草地根系形态等对坡面水流流速影响的试验研究。

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] 李勉,姚文艺,陈江南,等.草被覆盖对坡面流流速影响的人工模拟试验研究[J].农业工程学报,2005,21(12):43-47.
- [3] NEARING M A, SIMANTON J R, NORTON L D, et al. Soil Erosion by Surface Water Flow on a Stony, Semiarid Hillslope [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1999, 24(8): 677-686.
- [4] 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.
- [5] 张光辉.坡面薄层流水动力学特性的实验研究[J].水科学进展,2002,13(2):159-165.
- [6] 焦念,王占礼,刘俊娥,等.黄土坡面细沟水流流速试验研究[J].水土保持通报,2012,32(5):117-121.
- [7] 普罗托季亚科诺夫.地面径流现代理论基础:水流与渗流的研究[M].北京:人民铁道出版社,1958:30-60.
- [8] 马春艳.黄河班多水电站工程区主要地类坡面侵蚀动力学过程试验研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2009:29-33.
- [9] 江忠善,宋文经.坡面流速的试验研究[J].中国科学院西北水土保持研究所集刊,1988,1(7):46-52.
- [10] 郑粉莉,赵军.人工模拟降雨大厅及模拟降雨设备简介[J].水土保持研究,2004,11(4):177-178.
- [11] 陈文亮,王占礼.人工模拟降雨特性的试验研究[J].水土保持通报,1991,11(2):55-62.
- [12] 孙水发,董方敏. Image J 图像处理与实践[M].北京:国防工业出版社,2013:181-195.
- [13] 胡世雄,靳长兴.坡面流与坡面侵蚀动力过程研究的最新进展[J].地理研究,1998,17(3):326-335.
- [14] 易婷,张光辉,王兵,等.退耕草地近地表层特征对坡面流流速的影响[J].山地学报,2015,33(4):434-440.

【责任编辑 张华兴】