

黄土坡面薄层流产流过程试验研究

刘俊娥¹, 王占礼^{1,2}, 袁 殷¹, 张宽地¹, 高素娟¹, 陈 浩¹

(1. 西北农林科技大学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)

摘 要: 薄层流径流过程是最基本的坡面水文过程, 揭示黄土坡面薄层流产流过程机理对于认识坡面产流理论具有重要意义。试验采用人工模拟降雨试验方法, 对黄土坡面薄层流产流过程进行研究, 取得了如下结果: (1) 坡面薄层流径流率随降雨历时的增长呈增加趋势, 可用幂函数方程很好地描述, 开始产流后的 2~10 min 内增加很快, 以后逐渐趋于平缓、稳定; (2) 不同坡度条件下, 坡面薄层流径流深均随雨强的增大而呈显著增加, 可用线性方程很好地表示; (3) 不同雨强条件下, 坡面薄层流径流深随坡度的变化趋势相似, 皆可用对数线性方程描述; (4) 不同雨强条件下, 薄层流径流深随坡长增大总体呈增加趋势, 可用倒数线性方程描述; (5) 雨强、坡度、坡长对坡面薄层流径流深的综合影响可表述为三元线性经验方程, 其中雨强的影响最大, 坡度和坡长的影响小。

关键词: 黄土坡面; 薄层流; 产流; 雨强; 坡度; 坡长

中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2010)05-0223-05

水是生态环境的重要组成部分, 也是制约黄土高原生态、经济、社会发展的重要限制因子。阐明黄土高原坡面降雨产流过程, 对于该区通过进行坡面径流资源有效调控和水资源高效利用, 治理水土流失、建设生态环境、实现农业及其经济社会的可持续发展具有重要意义。

雨水降落在坡面上, 首先在土壤中入渗, 经过一段时间, 土壤蓄水能力达到饱和, 或降雨强度超过逐渐减小的土壤入渗能力, 就会产生多余的水量, 充满地表的凹坑后, 就会沿坡面流动形成薄层流^[1]。薄层流径流过程是基本的坡面水文过程, 阐明黄土坡面薄层流产流过程, 可为进一步认识黄土坡面水文过程、揭示坡面产流理论奠定重要基础。

很多学者对坡面薄层流产流机理和规律进行了研究。王占礼^[2]等研究了黄土高原裸坡降雨产流的变化过程, 得出了不同因子对径流的影响, 并且得出了各因子和径流之间的关系方程。王万忠^[1]等通过研究子洲径流场的降雨产流得出薄层径流规律。张光辉^[3]通过研究草地的产流, 得出了降雨强度和产流之间的定量关系。王玉宽^[4]等通过研究黄绵土坡面不同降雨产流阶段的产流机制, 得出了产流和其影响因素之间的经验关系。

本文基于黄土高原中部安塞黄绵土条件下的模拟降雨产流试验, 研究黄土坡面薄层流产流过程, 试

图得出薄层流产流对各影响因子的响应关系, 以服务于坡面产流理论的发展及坡面水资源的利用。

1 材料与方法

试验在中科院水利部水土保持研究所进行, 试验土样取自位于黄土高原腹地的陕西省安塞县, 土壤类型为黄绵土。各项试验的前期土壤含水量为 14%, 容重为 1.3 g/cm³。

试验小区宽 40 cm, 深 25 cm, 装土深度为 22 cm, 小区表面采用小木板进行整平。试验坡度分别为 10°、15°、20°、25°和 30°。试验坡长分别为 40、80、120、160 和 200 cm, 使得坡面径流与侵蚀形态控制在产生细沟的薄层流及其侵蚀状态。试验强度分别为 0.80、1.04、1.70、2.475 和 2.835 mm/min。试验降雨共 45 场, 所有试验重复一次, 共 90 场, 各项试验的降雨历时均为 60 min, 整个降雨过程各项试验中, 详细观测产流全过程, 产流开始后开始观测所有项目, 前 15 min 内分别间隔 1、2、3、4、5 min 观测一次, 以后每隔 5 min 观测一次。各次观测分别收集各时段的浑水总量, 测定浑水容量、重量、泥沙密度, 计算得到相应的清水径流量(体积), 将各时段径流量除以小区投影面积, 得到小区坡面各时段径流深, 再除以间隔时间, 就得到小区坡面不同时段平均径流率。

收稿日期: 2010-02-13

基金项目: 国家自然科学基金项目“黄土坡面细沟侵蚀动力学过程组合小区试验研究”(40971172); 国家 973 计划课题“不同类型区土壤侵蚀过程与机理”(2007CB407201); 中科院知识创新工程重要方向项目课题“多沙粗沙区土壤水蚀机理研究”(KZCX2-YW-442-04); 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室自主研究课题“黄土高原近万年来土壤侵蚀发生演变与趋势预测”(10502-25-3)

作者简介: 刘俊娥(1987—), 女, 山西河曲人, 硕博连读生, 研究方向为土壤侵蚀。E-mail: liujunee20041021@yahoo.com.cn。

通讯作者: 王占礼(1960—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀过程及预报研究。E-mail: zwang0407@163.com。

2 结果与分析

2.1 薄层流径流率随降雨过程的变化

将本文在坡长 80 cm, 坡度 30° 及不同雨强下薄层流径流率随降雨过程变化的试验结果绘制成图 1, 统计分析结果列于表 1。

从图 1 可以看出, 一定坡长、坡度, 不同雨强条件下坡面薄层流径流率随降雨历时的增长呈增大趋势, 在开始产流后 2~10 min 内增加很快, 10 min 后逐渐趋于平缓、稳定。由表 1 可以看出, 不同雨强条件下, 薄层流径流率随降雨历时的变化显著可以用幂函数方程描述, 且相关性好, 相关关系高。

降雨是引起产流的主要动力和能量来源^[5]。降雨开始时, 降雨强度小于土壤的入渗能力, 降雨全部入渗, 因此地表没有径流。随着降雨历时的增长, 表层土壤含水量逐渐增大, 趋于饱和, 入渗能力降低, 而且雨滴打击地表引起击溅侵蚀, 溅起的细颗粒填

充土壤孔隙, 土壤入渗量迅速减少, 当入渗能力小于降雨强度时, 即产生坡面径流, 且径流变化程度较大。随着降雨的继续进行, 则土壤孔隙状况的变化开始降低, 入渗率逐步趋于稳定, 径流率也相应趋于稳定。

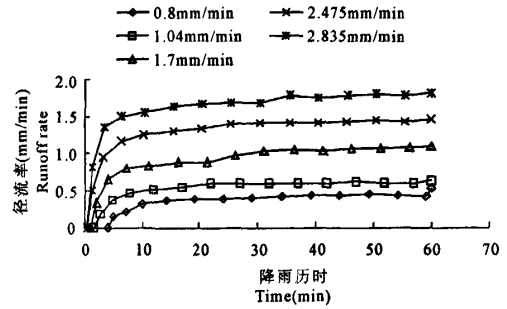


图 1 薄层流径流率随降雨过程的变化

Fig. 1 The variations of runoff with the rainfall process under different intensities

表 1 薄层流径流率随降雨历时的变化

Table 1 Statistical relationship of variations of runoff rate with rainfall duration

坡长 (cm) Slope length	坡度 (°) Slope gradient	雨强 (mm/min) Rainfall intensity	经验方程 Statistical equation	相关系数 Correlated coefficient	显著性水平 Significance level
80	30	0.800	$R = 0.117^{0.36}$	0.91	0.01
80	30	1.040	$R = 0.217^{0.29}$	0.86	0.01
80	30	1.700	$R = 0.377^{0.28}$	0.91	0.01
80	30	2.475	$R = 0.647^{0.22}$	0.89	0.01
80	30	2.835	$R = 0.977^{0.17}$	0.90	0.01

注: R 为薄层流径流率 (mm/min); T 为降雨历时 (min)。

Note: R stands for runoff rate of the sheet flow (mm/min); T stands for rainfall time (min).

2.2 雨强对薄层流径流过程的影响

将坡长 200 cm, 不同坡度条件下薄层流径流深随雨强变化的试验数据绘制成图 2, 统计分析结果见表 2。

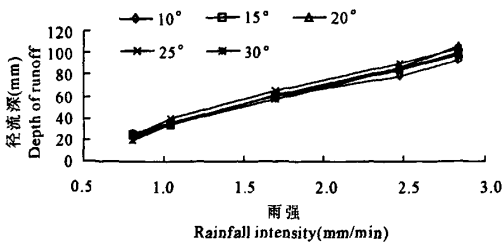


图 2 不同坡度条件下薄层流径流深随雨强的变化

Fig. 2 The variations of the runoff with rainfall intensities under different slope gradients

从图 2 可以看出, 薄层流径流深随雨强的变化呈现很好的线性相关。不同坡度条件下的薄层流径流数据

流深均随雨强的增大呈直线增加, 且不同坡度的径流深变化曲线几乎重叠, 说明雨强对径流深的影响作用远远大于坡度, 坡度对径流深的影响很小。由表 2 可以看出, 一定坡长条件下, 薄层流径流深和雨强之间的关系可以表述为线性方程, 相关系数极高, 且相关关系均高度显著。

降雨是影响薄层流径流的最主要因素, 坡面产流归根到底是降雨量与入渗量之差。由于不同雨强降雨产流试验的下垫面土壤是一定的, 土壤原来的人渗性质在不同雨强降雨产流试验之间基本是不变的, 因而产流的多少必然与雨强的大小基本相对应。雨强增大, 则雨滴对地面的打击力增强, 溅散的土粒堵塞土壤孔隙, 影响土壤的入渗能力, 因此地表的径流量增加, 同时, 雨强增大, 雨滴打击表土形成结皮的能力增强, 使得地面糙率减小, 地表径流流速增加, 所有这些作用造成薄层流径流深随雨强的增大而增加。

表 2 薄层流径流深随雨强的变化

Table 2 Statistical relationship of variations of runoff depth with rainfall intensities

坡长(cm) Slope length	坡度(°) Slope gradient	经验方程 Statistical equation	相关系数 Correlated coefficient	显著性水平 Significance level
200	10	$R = 0.27 + 32.53I$	0.99	0.01
200	15	$R = -0.88 + 34.66I$	0.999	0.01
200	20	$R = -5.86 + 38.34I$	0.997	0.01
200	25	$R = -1.99 + 37.34I$	0.997	0.01
200	30	$R = -7.34 + 37.45I$	0.998	0.01

注: R 为薄层流径流深(mm); I 为雨强(mm/min)。

Note: R stands for runoff depth of the sheet flow(mm); I stands for rainfall intensity(mm/min).

2.3 坡度对薄层流径流过程的影响

坡度是影响薄层流产流的重要因素,对降雨产生的净雨量、薄层流径流水深、薄层流流速和薄层流切应力都有显著影响。刘青泉^[6]等通过理论推导认为,一般情况下,径流深随坡度的增大而减小。

将坡长 200 cm,不同雨强条件下薄层流径流深随坡度变化的试验数据绘制成图 3,统计分析结果列于表 3。

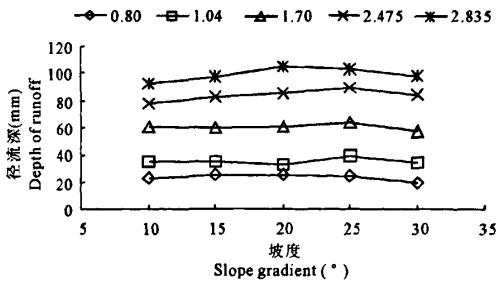


图 3 不同雨强条件下薄层流径流深随坡度的变化

Fig.3 The variations of the runoff with slope gradients under different rainfall intensities

从图 3 可以看出,不同坡度条件下薄层流径流深(也即,单位投影面积上的径流量)随坡度的增加是增加的,但在坡度达到 20°-25°以后,薄层流径流深随坡度的增加是减小的。由表 3 可以看出,薄层流径流深与坡度之间的关系可用对数线性方程加以描述,相关系数极高,且相关关系高度显著。

坡度对薄层流径流深的影响主要是通过改变坡面薄层径流水体的受力状况以及承雨面积和薄层径流流程而发生作用的。随着坡度的增加,薄层径流重力在顺坡方向的分力增大,因而薄层流速加快,水流渗入土壤的机会减小,所以径流量增多,径流深增大。在一定的投影坡长条件下,随着坡度的不断增大,坡面的斜长也不断增长,不仅单位斜面面积上雨滴的数量不断变稀,而且径流流程增长还使水流渗入土壤的机会增多。由于实际的径流是发生在斜坡面上的,当坡度增大到一定程度时,坡度增大径流的作用已不能抵消由于斜面面积增大,雨滴数量变稀和径流流程增长导致的减小坡面径流的功效,因此径流深反而开始减小。不同学者^[7-11]通过野外试验都发现径流产沙存在临界坡度现象。

表 3 薄层流径流深随坡度的变化

Table 3 Statistical relationship of variations of runoff depth with slope gradients

坡长(cm) Slope length	雨强(mm/min) Rainfall intensity	经验方程 Statistical equation	相关系数 Correlated coefficient	显著性水平 Significance level
200	0.800	$R = 21.8852 \ln \frac{S}{S-5} + 17.992$	0.99	0.01
200	1.040	$R = -6.9189 \ln \frac{S}{S-5} + 37.600$	0.9995	0.01
200	1.700	$R = 0.7635 \ln \frac{S}{S-5} + 60.9577$	0.9998	0.01
200	2.475	$R = -14.3456 \ln \frac{S}{S-5} + 89.8113$	0.99	0.01
200	2.835	$R = -5.2211 \ln \frac{S}{S-5} + 103.2388$	0.99	0.01

注: R 为薄层流径流深(mm); S 为坡度(°)。

Note: R stands for runoff depth of the sheet flow(mm); S stands for slope gradient(°).

2.4 坡长对薄层流径流过程的影响

将在 25° 坡度及不同雨强条件下薄层流径流深随坡长变化的试验数据绘制成图 4, 统计分析结果列于表 4。

由图 4 可以看出, 薄层流径流深随坡长增大总体呈增加趋势, 在坡长 40~80 cm 之间, 薄层流径流深随坡长的增加而增加的幅度较大, 在 80~120 cm 时, 变化幅度较小, 大于 120 cm 时, 趋于平稳, 基本不变。在小雨强 0.8 mm/min 条件下, 坡长大于 80 cm 以后, 薄层流径流深的变化就基本不变或少有波动。表 4 说明, 薄层流径流深的倒数和坡长的倒数之间可以用线性方程描述, 相关系数较高。

随坡长的增加, 汇流作用汇集了较多的径流, 相应侵蚀也增加, 而径流中的泥沙增多进一步使下坡位土壤空隙的被填充堵塞, 减弱入渗, 增加产流, 综

合作用的结果必然使得坡面薄层流径流深随坡长增大总体呈增加趋势。

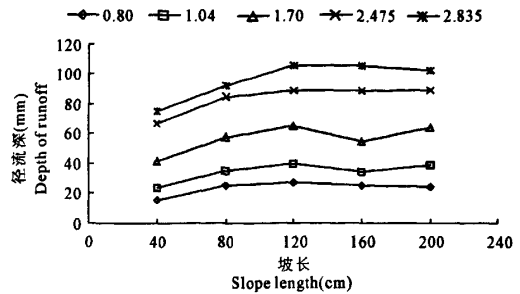


图 4 不同雨强条件下薄层流径流深随坡长的变化

Fig. 4 The variations of runoff with slope lengths under different rainfall intensities

表 4 薄层流径流深随坡长的变化

Table 4 Statistical relationship of variation of runoff depth with slope length

坡度(°) Slope gradient	雨强(mm/min) Rainfall intensity	经验方程 Statistical equation	相关系数 Correlated coefficient	显著性水平 Significance level
25	0.800	$1/R = 0.029 + 1.33/L$	0.91	0.05
25	1.040	$1/R = 0.021 + 0.81/L$	0.94	0.05
25	1.700	$1/R = 0.013 + 0.39/L$	0.91	0.05
25	2.475	$1/R = 0.0098 + 0.20/L$	0.97	0.01
25	2.835	$1/R = 0.0082 + 0.20/L$	0.98	0.01

注: R 为薄层流径流深(mm); L 为坡长(cm)。

Note: R stands for runoff depth of the sheet flow(mm); L stands for slope length(cm).

2.5 坡度、坡长及雨强对坡面薄层流径流过程影响

对不同雨强、坡度、坡长组合条件下坡面薄层流径流深变化过程的试验结果进行多元统计分析, 得出如下经验方程:

$$R = 35.5149I + 0.2386S + 0.0698L - 19.6975$$

$$(R = 0.9824, \text{Sig} = 0.01, F = 378.7386 > F_{3,41}^{0.01} \approx 4.31)$$

式中, R 为薄层流径流深(mm); I 为降雨强度(mm/min); S 为坡度(°); L 为坡长(cm)。

分析结果表明, 坡面薄层流径流深随雨强、坡度、坡长的变化可用三元线性方程很好的描述, 经验方程的多元相关系数很高, 且相关关系高度显著。

上式表明, 不同雨强, 坡度, 坡长条件下薄层流径流深的变化可用雨强, 坡度和坡长的三元线性方程很好地表述, 经验方程的多元相关系数很高, 且相关关系高度显著。雨强对径流的影响最大, 其次是坡度, 坡长对径流的影响最小。

3 结论与讨论

采用人工模拟降雨试验的方法对黄土坡面薄层

流产流过程进行了研究, 取得了如下结果:

1) 薄层流径流径流率随降雨过程的变化可用幂函数方程进行描述, 随降雨历时的增长, 径流率呈现增大的趋势, 在开始产流后 2~10 min 内增加很快, 10 min 后逐渐趋于平缓、稳定。

2) 不同坡度条件下薄层流径流深均随雨强的增大呈直线增加, 二者之间的关系可以用线性关系方程很好地描述。不同坡度条件下薄层流径流深变化曲线几乎重叠, 说明雨强对径流深的影响作用远远大于坡度。

3) 不同雨强条件下, 坡度对薄层流径流深的影响可用对数线性方程描述, 径流深随坡度的增加而增加。

4) 不同雨强条件下, 薄层流径流深随坡长增大总体呈增加趋势, 在坡长 40~80 cm 之间, 薄层流径流深随坡长的增加而增加的幅度较大, 在 80~120 cm 时, 变化幅度较小, 大于 120 cm 时, 趋于平稳, 基本不变。在小雨强 0.8 mm/min 条件下, 坡长大于 80 cm 以后, 薄层流径流深的变化就基本不变

或少有波动。薄层流径流深随坡长的变化可用倒数线性方程描述。

5) 坡面薄层流径流深随雨强、坡度、坡长变化的经验方程可表述为三元线性方程。降雨强度对薄层流径流深影响最大,坡度和坡长对其的影响小。

坡面薄层流是坡面流的重要形式,坡面薄层流产流过程是最基本的坡面水文过程。研究坡面薄层流产流过程对于认识坡面流产流理论具有重要意义。本文只在微小区条件下对坡面薄层流产流过程进行了研究,试验中也只考虑了影响产流的3个因子及5个等级水平的设计。全面认识薄层流径流过程还需在更多的不同条件下进行更全面、细致的试验及分析研究。

参考文献:

- [1] 王万忠,焦菊英.黄土高原坡面降雨产流产沙过程变化的统计分析[J].水土保持通报,1996,16(5):21—28.
- [2] 王占礼,黄新会,张振国,等.黄土裸坡降雨产流过程试验研究[J].水土保持通报,2005,25(4):1—4.
- [3] 张光辉,梁一民.黄土丘陵区人工草地产流起始时间研究[J].水土保持学报,1995,9(3):78—83.
- [4] 王玉宽,王占礼,周佩华.黄土高原坡面降雨产流过程的试验分析[J].水土保持学报,1991,5(2):25—28.
- [5] 姚文艺,汤立群.水力侵蚀产沙过程及模拟[M].郑州:黄河水利出版社,2001:23—28.
- [6] 刘青泉,陈力,李家春.坡度对坡面土壤侵蚀的影响分析[J].应用数学和力学,2001,22(5):449—457.
- [7] 陈永宗,景可,蔡强国.黄土高原现代侵蚀与治理[M].北京:科学出版社,1988:80—94.
- [8] 吴普特,周佩华.地表坡度与薄层水流侵蚀关系的研究[J].水土保持通报,1993,13(3):1—5.
- [9] 胡世雄,靳长兴.坡面土壤侵蚀临界坡度问题的理论与实验研究[J].地理学报,1999,54(4):347—356.
- [10] 郑粉莉.发生细沟侵蚀的临界坡长与坡度[J].中国水土保持,1989,(8):23—24.
- [11] 陈法扬.不同坡度对土壤冲刷量试验[J].中国水土保持,1985,(2):24—30.

Experimental study on runoff dynamic processes on loess hillslope

LIU Jun-e¹, WANG Zhan-Li^{1,2}, YUAN Yin¹, ZHANG Kuan-di¹, GAO Su-juan¹, CHEN Hao¹

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The runoff process of the sheet flow is the basic hydrologic process on the hillslope, and to reveal the mechanism of the runoff of the sheet flow is important for the understanding of the runoff theory on hillslope. With artificial simulation rainfall tests, runoff processes of the sheet flow on loess hillslope were studied and the following results were obtained: (1) The runoff rates varied with rainfall duration and their relationship could be described with power function. Runoff increased while rainfall duration increased, and the change was large in the first 2 ~ 10 minutes; after 10 minutes it trended to steady. (2) Under different slope gradients, runoff depth on the slope increased with rainfall intensities linearly, and the relationship could be described by linear equation. (3) Under different rainfall intensities, runoff depth on the slope varied similarly with soil gradients and could be described by log-linear equation. (4) Under different rainfall intensities, the relationship of the runoff depth and slope length could be described with reciprocal-linear equation. (5) The runoff depth statistical equations could be described by multiple linear equations, and rainfall intensity affected erosion modulus most greatly, followed by slope gradient and slope length.

Keywords: Loess slope; sheet flow; runoff; rainfall intensity; slope gradient; slope length