

黄土坡面产流动态变化过程实验模拟

马春艳¹, 王占礼^{1,2*}, 谭贞学²

(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: 采用模拟降雨试验方法对黄土坡面产流动态变化过程进行研究, 取得了如下结果: (1) 不同雨强条件下, 坡面径流率随降雨过程的动态变化可用对数相关方程描述, 5—10 min 之间径流率随降雨过程的变化幅度较大, 以后变缓, 并趋于基本稳定状态; (2) 不同坡度条件下, 坡面径流深随降雨强度的动态变化可用线性相关方程进行描述, 坡面径流深随降雨强度的增加而急剧增大; (3) 不同雨强条件下, 坡面径流深随坡度的动态变化总体可用抛物线相关方程进行描述, 25°左右是径流深随坡度变化的转折点; (4) 不同雨强条件下, 坡面径流深随坡长的动态变化可用对数相关方程进行描述, 随着雨强的增加, 径流深随坡长的增加明显增大; (5) 坡面径流深随坡度、坡长及降雨强度的动态变化可用多元幂函数相关方程进行描述, 降雨强度对径流深的作用大于坡度及坡长因子。

关键词: 黄土坡面; 产流; 动态变化; 过程; 实验模拟

中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2007)06-0122-04

在黄土高原地区, 蓄水保墒、雨水收集、淤地坝建设等生产和水土流失治理规划等均需要准确、详细的坡面产流资料。以往国内学者多从野外观测角度对黄土高原的降雨产流进行研究。如王万忠^[1]等根据子洲 1963~1969 年 30 多次降雨的产流产沙实测资料, 统计分析了黄土高原沟道降雨产流产沙过程变化的基本特征; 王兴奎^[2]等研究了黄土丘陵区降雨产流产沙特性以及提出相应的治理模式; 肖学年^[3]等从空间变异角度研究了黄土高原小流域水沙变化关系; 王玉宽^[4]等对黄土坡面降雨产流过程机制进行了研究; 王占礼^[5]等研究了黄土高原裸露坡面降雨产流的变化过程。本文采用室内人工模拟降雨试验的方法, 研究不同降雨强度、坡度、坡长等条件下的坡面产流动态变化过程, 试图取得坡面径流深动态变化特征及描述方程, 以满足农业可持续发展及水土保持等生产实践的需求。

1 材料与方法

该研究采用室内人工模拟降雨试验的方法完成。试验土样取自黄土高原腹地的陕西安塞县, 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/m³。试验小区宽 40 cm, 深 25 cm, 装土深度为 22 cm。试验的坡度分别为 10°、15°、20°、25°和 30°, 坡长分别为 0.4、0.8、1.2、1.6 和

2.0 m, 降雨强度为 0.80、1.04、1.70、2.475 和 2.835 mm/min。试验共进行了 45 个场次, 各项试验的降雨历时均为 60 min。各次试验中, 详细观测产流全过程, 开始产流后对所有观测项目前 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。所有试验均重复进行一次。各次观测分别收集各时段的浑水总量, 并通过测定含沙量及泥沙密度, 计算出相应的清水径流。

2 结果与分析

2.1 坡面径流率随降雨过程的动态变化

降雨是引起水力侵蚀产沙的主要能量来源^[6]。在一定的地表条件下, 降雨能量的大小, 不仅直接决定着溅蚀量的高低, 还是影响坡面径流量及径流侵蚀能力的重要因素。本研究采用室内人工模拟降雨, 研究降雨历时 60 min 内径流率随降雨过程的动态变化。

将不同雨强条件下径流率随降雨时间的动态变化试验数据绘制成图 1, 相关分析见表 1。

从表 1 可以看出, 不同降雨强度条件下径流率随降雨过程的变化皆可用对数相关方程描述。通过对图 1 分析, 在相同坡度、坡长, 不同雨强条件下, 坡面径流率随过程的变化整体呈增加趋势。整个降雨过程中, 在开始产流后 5~10 min 之间径流率随过

收稿日期: 2007-03-01

基金项目: 国家 973 计划课题 (2007CB407201); 西北农林科技大学创新团队建设计划 (01140202); 国家自然科学基金重点项目 (40335050); 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金项目 (10501-182)

作者简介: 马春艳 (1983—), 女, 陕西人, 硕士生, 研究方向为土壤侵蚀。E-mail: nldmcy2004@163.com。

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: zwang@nwsuaf.edu.cn。

程的变化幅度较大,以后变缓,雨强越小越平缓,并趋于基本稳定状态。

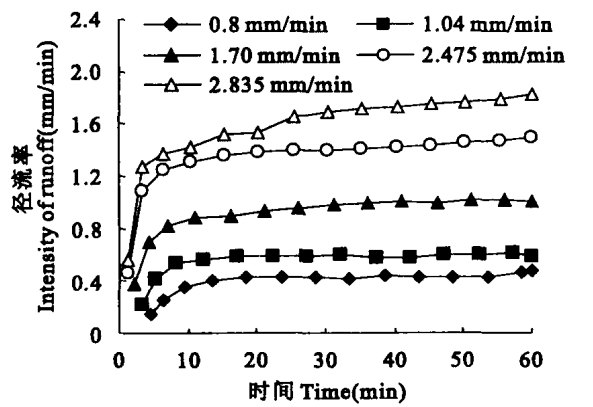


图 1 不同降雨条件下径流率随降雨过程的动态变化

Fig. 1 The dynamic variations of runoff intensity with rainfall processes under different rainfall intensities

表 1 径流率随降雨过程变化的经验方程

Table 1 Experiential equations of runoff intensity variation with rainfall processes

坡长 Slope length (cm)	坡度 Slope gradient (°)	雨强 Rainfall intensity (mm/min)	经验方程 Statistical equation	相关系数 Correlated coefficient
120	15	0.80	$Y = 0.095\ln x + 0.0922$	0.7836
120	15	1.04	$Y = 0.0924\ln x + 0.2609$	0.6815
120	15	1.70	$Y = 0.1571\ln x + 0.4208$	0.8715
120	15	2.475	$Y = 0.2046\ln x + 0.707$	0.7977
120	15	2.835	$Y = 0.2718\ln x + 0.7427$	0.9040

注: Y 为径流率(mm/min); X 为降雨历时(min)。

Note: Y stands for runoff intensity (mm/min); X stands for rainfall time (min).

坡面径流率随降雨过程发生这种变化的根本原因是在降雨初期,地表土壤含水分少,土壤的入渗能力强,地表不产生径流。随着降雨的继续,一方面表层土壤逐渐接近水分饱和,另一方面也出现细颗粒随水向下移动,阻塞孔隙,促进地表径流的形成,从而产生相应的径流率。随着产流的开始,土壤入渗率迅速减小,并逐步趋于稳定,相应的径流率则急剧增加,其后随着降雨的继续进行,也逐步转化为比较稳定的动态变化过程。

2.2 坡面径流深随降雨强度的动态变化

将相同坡长不同坡度条件下,径流深随降雨强度动态变化的试验数据绘制成图 2,相关分析见表 2。

从表 2 可以看出,不同坡度条件下坡面径流深与降雨强度之间的关系皆可用线性相关方程进行描述,且相关性极高。通过对图 2 分析表明,在相同坡长不同坡度的条件下,坡面径流深随降雨强度的增

大而迅速增大,关系曲线几乎能重在一起,掩盖了坡度的作用,说明降雨强度是影响径流深的一个主要因子。

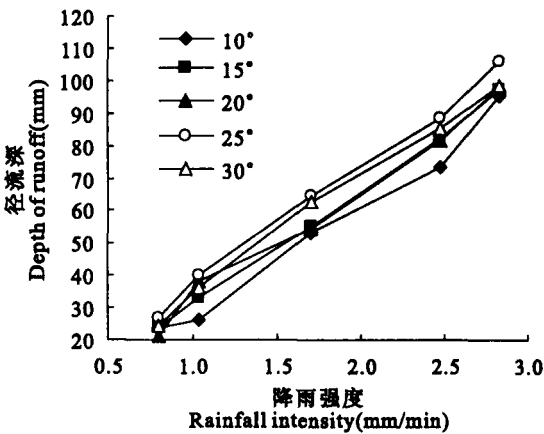


图 2 不同坡度条件下径流深随降雨强度的动态变化

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

表 2 降雨强度对径流深影响的经验方程

Table 2 Experiential equations of effects of rainfall intensity on runoff depth

坡长(cm) Slope length	坡度(°) Slope gradient	经验方程 Statistical equation	相关系数 Correlated coefficient
120	10	$Y = 34.739x - 7.0417$	0.9833
120	15	$Y = 35.484x - 4.5255$	0.9991
120	20	$Y = 35.072x - 3.2916$	0.9872
120	25	$Y = 37.092x - 0.3549$	0.9950
120	30	$Y = 35.59x - 1.4733$	0.9932

注: Y 为径流深(mm); X 为降雨强度(mm/min)。

Note: Y stands for depth of runoff (mm); X stands for rainfall intensity (mm/min).

坡面径流深随降雨强度的增大呈线性关系而迅速增大的根本原因是随着降雨强度的增大,增加了降雨的动能,降雨雨滴动能作用于坡面土壤而做功,产生土粒分散、溅起,造成土壤表层孔隙减少甚至堵塞,引起土壤渗透性下降,利于坡面径流的形成和流动,雨强越大这种作用越明显,加之土壤表面形成结皮使得水流阻力减小,流速加快,这些共同作用的影响导致了径流深度的相应增大。

2.3 坡面径流深随坡度的动态变化

坡度是影响坡面产流的一个重要地形因子,在相同的其他条件下,坡度对坡面产流的大小变化也具有重要作用影响。将采用室内人工模拟降雨试验得到的一定坡长不同降雨强度条件下,坡度对径流深影响试验数据绘制成图 3,相关分析见表 3。

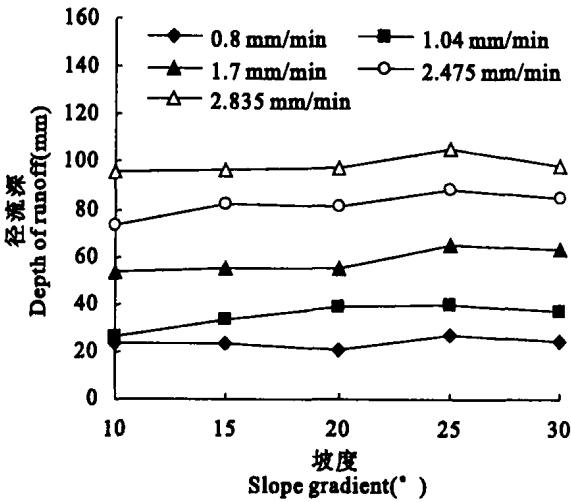


图 3 不同雨强条件下径流深随坡度的动态变化
Fig. 3 The dynamic variations of runoff depth with slope gradients under different rainfall intensities

表 3 坡度对径流深影响的经验方程

Table 3 Experiential equations of effects of slope gradient on runoff depth

坡长 Slope length (cm)	雨强 Rainfall intensity (mm/min)	经验方程 Statistical equation	相关系数 Correlated coefficient
120	0.80	$Y = 0.0067x^2 - 0.1763x + 24.431$	0.1384
120	1.04	$Y = -0.0699x^2 + 3.3468x - 0.5553$	0.9920
120	1.70	$Y = 0.0058x^2 + 0.3524x + 48.587$	0.7636
120	2.475	$Y = -0.0458x^2 + 2.4312x + 54.244$	0.8595
120	2.835	$Y = -0.0284x^2 + 1.4287x + 83.213$	0.4452

注：Y 为径流深(mm)；X 为坡度(°)。

Note: Y stands for depth of runoff (mm); X stands for Slope gradient (°).

从表 3 可以看出，一定坡长不同降雨条件下坡面径流深与坡度之间的关系总体可用抛物线相关方程进行描述，大部分雨强条件下相关性较好，但在雨强 0.8 mm/min 条件下难以用相关性较好的方程拟合。通过对图 3 分析，在坡度 10°~25°，坡面径流深总的随坡度的增大而增大，但增加趋势比较平缓。在坡度 15°~20°，坡面径流深随着坡度的增加而略有降低。在坡度 20°~25°，径流深随着坡度的增加而增加，但是 25°以后，径流深出现下降趋势，径流深开始减少。

坡面径流深随坡度的动态变化总体表现为抛物线相关关系的根本原因在于随着坡度的增大，径流在坡面停留的时间相对减少，流速加快，土壤入渗量减小，从而增加了径流量，故此径流深会有所增加。但径流深随坡度的增加是有一定极限的，当坡度大

于某一临界后，对于一定投影坡长的坡面，继续随坡度的增大及承雨面积的增加，单位承雨面积上降雨量减小，径流流程增长，使得水流有更长的时间渗入土壤，因此径流深反而开始减小。如图 3 所示，坡面径流深随坡度动态变化的临界坡度在 25°左右。我国许多学者通过室内外观测实验以及从理论上研究也都证实了产流与侵蚀产沙临界坡度的存在^[7~9]，陈法扬^[10]的研究表明，18°~25°是土壤冲刷剧增的坡度范围，当坡度大于 25°以后，土壤冲刷随坡度变陡而减少。吴普特^[11]的试验研究则认为，只有在雨滴击溅动力不可忽略的情况下，才有临界坡度的存在，其值大致在 22°~30°之间。

2.4 坡面径流深随坡长的动态变化

坡长与坡度一样，也是影响坡面径流与水流侵蚀产沙过程的重要地貌因素之一^[12]。径流沿坡长向下流动汇集不仅造成坡面水资源的损失，其集聚的能量还往往导致严重的土壤流失，采用室内人工模拟降雨试验研究在一定坡度不同降雨条件下，坡长对径流深影响的规律，对于调控坡面径流与侵蚀具有重要作用。将试验数据绘制成图 4，相关分析见表 4。

从表 4 可以看出，一定坡度不同降雨条件下坡面径流深与坡长之间的关系皆可用对数相关方程进行描述。通过对图 4 分析，在坡度一定的条件下，随着坡长的增加，径流深也呈增加趋势。从图 4 及表 4 还可看出，在小雨强时，径流深随坡长动态变化的斜率较小，随着雨强的增加，径流深随坡长变化相关方程中的回归系数明显增大，反映动态变化的斜率明显增大，说明坡长对产流的增强效应随着降雨强度的增加而增大。

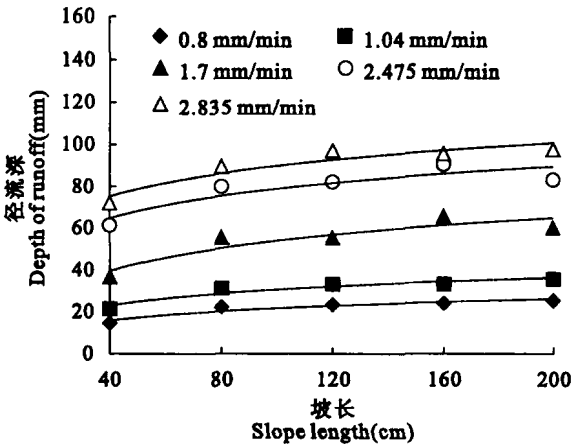


图 4 不同雨强条件下径流深随坡长的动态变化

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

表 4 坡长对径流深影响的经验方程
Table 4 Experiential equations of effects of
slope lengths on runoff depth

坡度 Slope gradient (°)	雨强 Rainfall intensity (mm/min)	经验方程 Statistical equation	相关系数 Correlated coefficient
15	0.80	$Y = 6.4461\ln(x) - 7.9470$	0.9036
15	1.04	$Y = 8.2983\ln(x) - 7.6412$	0.9061
15	1.70	$Y = 15.834\ln(x) - 18.909$	0.8402
15	2.475	$Y = 15.367\ln(x) + 8.0372$	0.8081
15	2.835	$Y = 15.947\ln(x) + 16.258$	0.8875

注: Y 为径流深(mm); X 为坡长(cm)。
Note: Y stands for depth of runoff (mm); X stands for slope length (cm).

随坡长的增加, 不仅由于汇流作用汇集产生了相应较多的径流, 而且径流携带的泥沙也较多, 进一步强化了对下坡土壤空隙的填充堵塞作用, 使得入渗在下坡相应减弱, 而产流相应增大, 所以长坡条件下的径流深就比短坡条件下的大。由于随雨强的增大, 不仅径流汇集的更多, 径流携带泥沙对下坡土壤空隙的填充作用也更加突出, 所以下坡产流也就更多, 这样大雨强条件下长坡径流深就比短坡大的更明显。另外, 汇流量增大后流速必然加快, 也在一定程度上强化了坡长的水文增强效应。

2.5 坡面径流深随坡度、坡长及雨强的动态变化

通过对不同坡度、坡长及降雨强度条件下的全部试验观测数据进行统计分析, 得到下列经验方程:

$$R = 1.6428 L^{1.3131} S^{1.1832} I^{3.0207} \tag{1}$$

式中: R 为坡面径流深(mm); L 为坡长(cm); S 为坡度(°); I 为降雨强度(mm/min)。
($r^2 = 0.9796$; $F = 656.5636 > F_{0.01}(3, 41) \approx 4.31$)

模拟与检验结果表明, 坡面径流深随坡度、坡长及降雨强度的动态变化表现为多元幂函数关系, 相关关系高度显著。式(1)表明, 降雨强度对径流深的影响大于坡度及坡长因子。坡度与坡长两个因子对径流深的影响基本相当, 坡长的影响稍大于坡度。

3 结 论

1) 不同降雨强度条件下, 径流率随降雨过程的动态变化可用对数相关方程描述。整个降雨过程中, 在开始产流后 5~10 min 之间径流率随降雨过程的变化幅度较大, 以后变缓, 雨强越小越平缓, 并

趋向于基本稳定状态。
2) 不同坡度条件下, 坡面径流深随降雨强度的动态变化可用线性相关方程进行描述。降雨强度是影响坡面径流深的一个主要因子, 坡面径流深随降雨强度的增大而迅速增大。
3) 不同雨强条件下, 坡面径流深随坡度的动态变化总体可用抛物线相关方程进行描述。在坡度 10°~25°之间, 坡面径流深随坡度的增大而增大, 但增加趋势比较平缓, 25°是一个临界坡度, 25°以后坡面径流深随坡度的增大开始减少。
4) 不同雨强条件下, 坡面径流深随坡长的动态变化可用对数相关方程进行描述。小雨强条件下, 径流深随坡长动态变化较小, 随着雨强的增加, 径流深随坡长的增加明显增大。
5) 坡面径流深随坡度、坡长及降雨强度的动态变化可用多元幂函数方程描述, 降雨强度对径流深的影响大于坡度及坡长因子, 坡度与坡长两个因子对径流深的影响基本相当, 坡长的影响稍大于坡度。

参 考 文 献:

[1] 王万忠, 焦菊英. 黄土高原沟道降雨产流产沙过程变化的统计分析[J]. 水土保持通报, 1996, 16(6): 12—18.
[2] 王兴奎, 徐世涛, 李丹勋, 等. 黄土丘陵沟壑区降雨产流产沙特性及治理模式[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2001, 41(8): 107—109.
[3] 肖学年, 崔灵周, 李占斌. 黄土高原小流域水沙关系空间变异研究[J]. 水土保持研究, 2004, 11(2): 140—142.
[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] 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.
[6] 姚文艺, 汤立群, 等. 水力侵蚀产沙过程及模拟[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2001. 23—28.
[7] 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.
[8] 陈永宗. 黄土高原现代侵蚀与治理[M]. 北京: 科学出版社, 1988. 80—94.
[9] 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.
[10] 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.
[11] 吴普特. 动力水蚀实验研究[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1997.
[12] 孔亚平, 张科利, 唐克丽. 坡长对侵蚀产沙过程影响的模拟研究[J]. 水土保持学报, 2001, 15(2): 17—20.

Effects of sprinkler irrigation on soil nitrate-N distribution and nitrogen uptake of winter wheat under the field conditions

SUN Ze-qiang^{1,2}, KANG Yue-hu¹, LIU Hai-jun¹

(1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;
2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The effects of sprinkler irrigation on soil nitrate-N distribution and nitrogen uptake of winter wheat were analyzed through two-year field experiments. The control treatment was traditional surface irrigation(border irrigation). The experimental results indicate that the peak of soil nitrate-N transports shallowly and distributes mainly within upper 40 cm soil layers where most roots of winter wheat distribute under sprinkler irrigation compared with under surface irrigation. In the sublayer of root zone of winter wheat, soil nitrate-N cumulates under surface irrigation in various degrees compared with under sprinkler irrigation. The accumulation of soil nitrate-N leached are 8.68 kg/hm² and 7.70 kg/hm² under surface irrigation in 2003 and 2004, respectively. The accumulation of soil nitrate-N leached under sprinkler irrigation is very small, about less than 3% of surface irrigation conditions. The amount of nitrogen uptake by winter wheat under sprinkler irrigation is 235.7 kg/hm² and 161.7 kg/hm² in two years, 7.0 kg/hm² and 34.7 kg/hm² higher than that under surface irrigation, respectively. Sprinkler irrigation has the promoting effects on nitrogen uptake by winter wheat in the later period. The difference of nitrogen uptake by winter wheat during different growing periods between each year under sprinkler irrigation is all smaller than that under surface irrigation.

Keywords: sprinkler irrigation; winter wheat; soil NO₃⁻-N; plant nitrogen uptake

(上接第 125 页)

Experimental modelling of runoff dynamic processes on loess hillslope

MA Chun-yan¹, WANG Zhan-li^{1,2}, TAN Zhen-xue²

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

Abstract: Based on simulated rainfall experiment, the processes of runoff dynamic variation on the loess hillslope was studied and the following results were obtained. (1) Slope runoff intensity varied with rainfall time and it could be described with logarithmic equation. Runoff intensity changed greatly between 5~10 min after rainfall began, then it changed slowly and tended to be steady; (2) Effect of rainfall intensity on slope runoff depth could be described with linear equations. Runoff depth rapidly increased with increase of rainfall intensity; (3) Effect of slope gradient on slope runoff depth could be described with parabola equations. The critical slope gradient was about 25°; (4) Effect of slope length on slope runoff depth could be described with logarithmic equations. With increase of rainfall intensities, slope runoff depth significantly increased under slope length; (5) The integrated impact of the three factors on slope runoff depth could be described with a power equation. The result showed effect of rainfall intensity on slope runoff depth was more important than slope length and slope gradient.

Keywords: loess hillslope; runoff; dynamic variation; processes; experimental modelling