

# 黄土裸坡降雨产流过程试验研究

王占礼, 黄新会, 张振国, 牛振华, 田风霞

(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:** 采用人工模拟降雨试验法对黄土裸坡降雨产流过程进行了研究。结果表明: (1) 坡面径流强度随降雨过程的变化可用对数相关方程进行描述, 10 ~ 15 min 是径流强度随降雨过程变化的转折点; (2) 坡度对坡面径流深的影响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; (3) 坡长对坡面径流深的影响可用对数相关方程进行表述, 80 cm 是径流深随坡长变化的转折点; (4) 雨强对径流深的影响可用线性相关方程进行描述, 雨强与坡度 2 个因子共同作用时, 坡度的作用几乎完全被雨强所掩盖; (5) 坡度、坡长及降雨强度对坡面径流深的综合影响可用多元线性相关方程进行描述, 其中, 降雨强度对坡面径流深的影响远大于坡长及坡度因子。

**关键词:** 黄土裸坡; 降雨; 产流; 坡长; 坡度; 雨强

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2005)04-0001-04

中图分类号: S157.1

## Experimental Study of Runoff Processes on Bare Loess Hillslope

WANG Zhan-li, HUANG Xin-hui, ZHANG Zhen-guo, NIU Zhen-hua, TIAN Feng-xia

(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 District 712100, Shaanxi Province, China)

**Abstract:** With artificial simulation rainfall tests, runoff processes on the bare loess slope are studied and the following results are obtained: (1) Runoff rate varied with rainfall course and could be described with logarithmic equations. Runoff rate didn't change until 10 ~ 15 min after rainfall began; (2) Slope gradient influenced runoff depth and could be described with parabola equations. The critical slope degree was about 25°, above which runoff rate changed its trend; (3) Generally runoff depth changed with slope length and their relations could be described with logarithmic equations and the critical length was 80 cm; (4) Rainfall intensity affected runoff depth much more greatly than slope gradient did and could be described with linear equations. The action of the latter was almost glossed over by that of the former; (5) The integrated impact of the three factors on runoff depth could be expressed using a plural linear function. Rainfall intensity showed much more influential on runoff depth than slope length and gradient.

**Keywords:** bare loess slope; rainfall; runoff yield; slope length; slope gradient; rainfall intensity

土壤侵蚀是危及人类生存与发展的头号环境问题,在我国表现得尤为突出。径流是造成坡面土壤侵蚀的直接动力,一般情况下,坡面土壤侵蚀的强烈程度与坡面径流特征密切相关。因此,坡面径流特征及形成过程、机理等的研究,受到学术界的普遍重视。我国黄土区属于干旱与半干旱地区,一方面水资源短缺,严重制约着当地的农业及经济社会的可持续发展。另一方面,该区降水变率大,往往以暴雨形式降落,不仅造成了该区严重的土壤侵蚀,使土壤质量和土地资源遭受严重破坏,而且有限、宝贵的降水资源也以暴涨暴落的地表径流形式白白流失,并造成当地

及异地的洪水与泥沙灾害。因此,开展黄土区坡面降雨产流过程研究,对于有效调控该区坡地降水径流资源,治理该区水土流失具有重要意义。

王万忠等通过分析研究子洲径流场 33 次降雨产流过程,得到不同类型降雨条件下坡面产流过程中径流的变化规律<sup>[1]</sup>。王玉宽等分析了不同降雨产流阶段的产流机制,讨论了产流与影响因素之间的关系,得出了黄绵土条件下坡面产流过程的经验关系<sup>[2]</sup>。吴发启等对缓坡耕地降雨、入渗与产流之间的关系进行了统计分析,建立了降雨量、降雨历时、平均降雨强度、坡长等与径流模数之间的关式,并给出了产流预

收稿日期:2005-02-02

资助项目:中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX3-SW-422);中国科学院水利部水土保持研究所领域前沿专项经费资助项目(C23013200);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(10501-143)

作者简介:王占礼(1960—),男(汉族),陕西佳县人,博士,研究员,主要从事土壤侵蚀研究。E-mail:zwang@nwsuaf.edu.cn.

报模型<sup>[3]</sup>。张光辉曾研究了降雨强度对草地产流的影响,并提出了它们之间的定量关系<sup>[4]</sup>;石生新研究获得了降雨强度对裸地产流历时影响的定量关系<sup>[5]</sup>。本文在陕西安塞黄绵土条件下,采用人工模拟降雨试验的方法,系统研究了不同雨强、坡度、坡长等条件下坡面的降雨产流过程。

## 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/m<sup>3</sup>。试验小区宽 40 cm,深 25 cm,装土深度为 22 cm。试验的坡度为 10°,15°,20°,25°,30°这 5 个不同坡度,坡长为 0.4,0.8,1.2,1.6,2.0 m 这 5 个不同长度,降雨强度为 0.80,1.04,1.70,2.48,2.84 mm/min 这 5 个等级。试验共 65 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 1 次,以后每隔 5 min 观测 1 次。所有试验均重复进行 1 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比重,计算出各种情况下的清水径流。

## 2 结果与分析

### 2.1 坡面径流随降雨过程的变化

坡面径流强度随降雨过程的变化见图 1,相关分析结果为表 1。

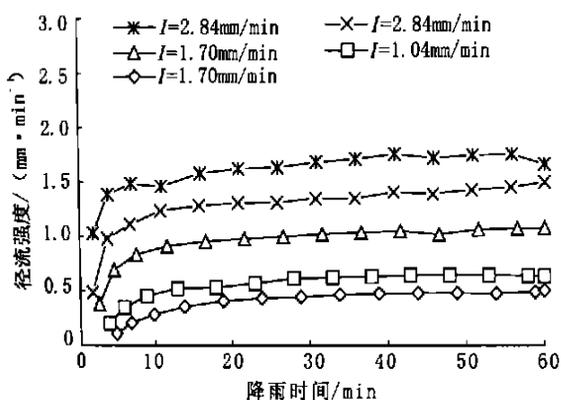


图 1 径流强度随降雨过程的变化

图 1 表明,在相同坡长、坡度及不同雨强条件下,随降雨历时的增长,径流强度总体上均呈现出增大的趋势,在开始产流后的 10~15 min 内增加很快,以后逐步变缓,并基本趋向于稳定。径流强度随降雨过程呈现出这种变化的主要原因是在开始降雨后的短时间内,土壤的入渗能力大于降雨强度,降雨全部渗入

土壤中,地表不产生径流。随着降雨的进行,表层土壤含水量增大,地表土壤受雨滴打击作用及细颗粒物填充土壤孔隙的影响,土壤入渗能力迅速减小至低于降雨强度,坡面开始产流。且径流强度急速增大,大约在降雨持续到 10~15 min 以后,由于土壤含水量及土壤表面孔隙状况的变化开始减小,土壤入渗率大体趋于稳定,径流强度的变化也就趋于缓和。

表 1 径流强度随降雨历时的变化

雨强/ (mm·min <sup>-1</sup> )	统计方程	相关系数
0.80	$J = 0.17 \ln T + 1.66$	0.897
1.04	$J = 0.238 \ln T + 0.58$	0.890
1.70	$J = 0.18 \ln T + 0.38$	0.875
2.48	$J = 0.14 \ln T + 0.10$	0.905
2.84	$J = 0.14 \ln T - 0.05$	0.929

注:坡长为 80 cm,坡度为 20°。

由表 1 知,各种雨强条件下,径流强度随降雨历时的变化均可用对数相关方程描述。

### 2.2 坡度对坡面径流的影响

将实验所得数据点绘成图 2,并对试验所得数据进行分析表明,坡度对坡面径流深的影响总的可通过抛物线相关方程进行描述,分析结果见表 2。

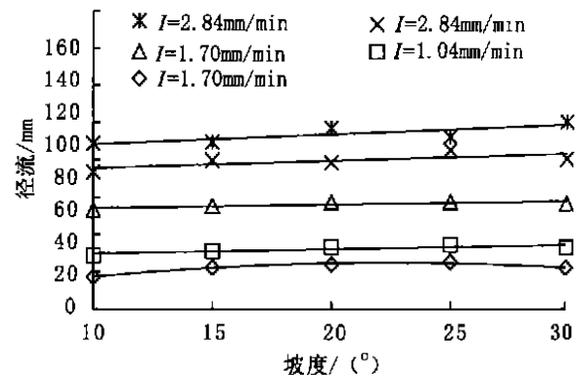


图 2 坡度对径流深的影响

表 2 径流深与坡度之间的关系

雨强/ (mm·min <sup>-1</sup> )	统计方程	相关系数
0.80	$R = 0.562 + 2.167 S - 0.048 S^2$	0.989
1.04	$R = 19.290 + 1.171 S - 0.023 S^2$	0.981
1.70	$R = 44.514 + 1.082 S - 0.022 S^2$	0.995
2.48	$R = 58.291 + 1.933 S - 0.039 S^2$	0.855
2.84	$R = 85.494 + 0.250 S + 0.007 S^2$	0.8347

注:坡长为 80 cm。

从表 2 及图 2 可知,在试验的 3 个小雨强条件下,坡面径流深与坡度之间具有好的抛物线相关性,随着坡度的增大,坡面径流深也相应增加,但在坡度

达到 25 左右以后,径流深反而变小。在试验的 2 个大雨强条件下,坡面径流深与坡度之间的相关性虽然也可用抛物线相关方程进行描述,但相关性不如小雨强条件下的好。

坡度对径流深的影响主要是通过改变坡面径流水体的受力状况以及承雨面积和径流流程而发生作用的。一方面,随着坡度的增加,坡面径流重力在顺坡方向的分力增大,因而坡面流速加快,水流渗入土壤的机会减小,所以径流量增多,径流深增大。另一方面,由于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。这也与以往土壤侵蚀室内试验与野外观测中呈现的临界坡度现象类似<sup>[6-7]</sup>。图 2 中所示的 3 个小雨强条件下 25°~30° 之间径流深的变化特征,是该研究条件下坡度对径流作用的这种规律的更明显的反映。

### 2.3 坡长对坡面径流的影响

不同雨强条件下坡长对坡面径流深影响的试验观测结果为图 3,相关分析结果为表 3。

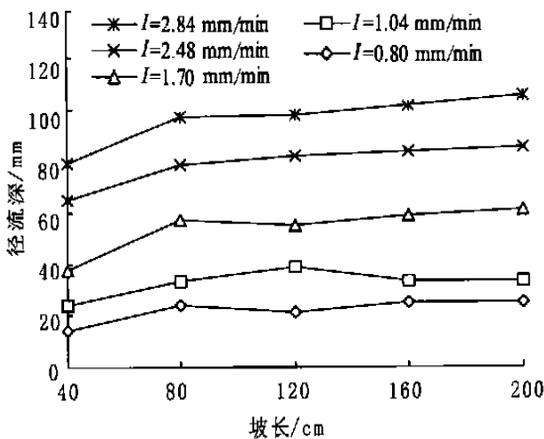


图 3 坡长对径流深的影响

表 3 径流深与坡长之间的关系

雨强/ (mm·min <sup>-1</sup> )	统计方程	相关系数
0.80	$R = 6.418 \ln L - 7.857$	0.866
1.04	$R = 6.012 \ln L + 4.435$	0.715
1.70	$R = 13.273 \ln L - 7.651$	0.902
2.48	$R = 12.338 \ln L + 21.47$	0.969
2.84	$R = 15.134 \ln L - 25.87$	0.960

注:坡度为 20°。

表 3 说明,坡面径流深与坡长之间的关系总的来说可通过对数相关方程进行表述。

图 3 显示,在坡长 40—80 cm 之间,径流深随坡长增大而增加的幅度较大,以后的变化幅度较小,大雨强条件下,略有增大,小雨强条件下基本不变或稍有波动。这表明,在大雨强条件下,坡长对径流深总的来说有正相关关系,而小雨强条件下,它们之间的关系比较复杂。这是因为在小雨强条件下,地表产生的径流本身就小,地表的任何微小变化都能对径流产生较大影响,造成坡面径流深的复杂变化。

### 2.4 雨强对坡面径流深的影响

将不同坡度条件下雨强对坡面径流深影响的试验结果点绘为图 4,并对试验数据进行统计分析,分析结果见表 4。

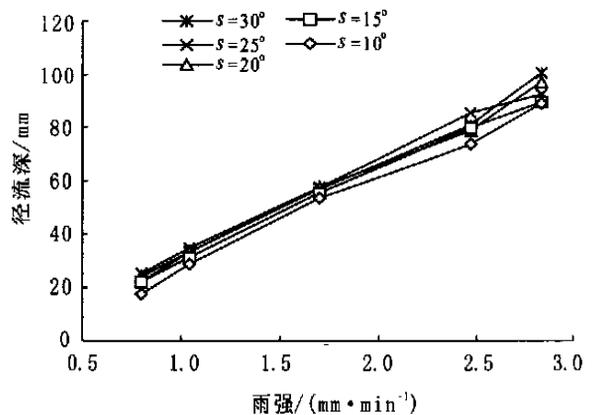


图 4 雨强对径流深的影响

表 4 80 cm 坡长时径流深与雨强之间的关系

坡度/ (°)	统计方程	相关系数
10	$R = 33.647 I - 7.153$	0.993 5
15	$R = 33.197 I - 3.126$	0.997 3
20	$R = 34.385 I - 2.765$	0.993 6
25	$R = 33.643 I - 0.496$	0.996 3
30	$R = 36.706 I - 6.318$	0.993 9

表 4 表明,坡面径流深与雨强之间的关系可用线性相关方程进行描述,且二者之间的相关性很好。不仅各种坡度条件下的坡面径流深均随着雨强的增大而呈直线增加,且不同坡度条件下的坡面径流深随雨强的变化曲线几乎重叠,说明雨强是影响坡面径流深的一个主要因子,与雨强相比,坡度对径流深的作用小很多,在雨强与坡度 2 个因子共同影响径流深的情况下,坡度的作用几乎完全被雨强所掩盖。

降雨强度在影响坡面产流过程中发挥着极其重要的作用,坡面产流归根到底是降雨强度与入渗率之差。由于试验选取的土壤是一致的,不同雨强降雨产

流试验之间前期土壤入渗性质也是不变的,因而,降雨成为影响径流的最主要因素。雨强增大使雨滴动能增大,降雨对地面的打击力增强,雨滴打击表土形成结皮的能力也增强,同时溅散的土壤颗粒堵塞土壤孔隙,阻滞降雨的入渗,这两者都使降雨入渗作用减弱而产生径流作用增强,地表径流量增加;同时,结皮的形成以及土壤孔隙的填充减小了地面糙率,使径流的流速迅速增加,所有这些作用的叠加,势必造成径流深随雨强的增大而急剧增加。

### 2.5 坡度坡长及雨强对坡面径流深的影响

对不同坡度、坡长及雨强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:

$$R = -19.481 + 0.0797L + 0.318S + 34.766I \quad (1)$$

$$r^2 = 0.96; F = 605.3, F_{0.01}(3,41) = 4.31$$

式中:  $R$ ——坡面径流深(cm);  $L$ ——坡长(cm);  $S$ ——坡度( $^{\circ}$ );  $I$ ——雨强(mm/min)。

检验结果表明,坡度、坡长及降雨强度与坡面径流深之间呈现多元线性相关,且相关关系高度显著。式(1)表明,降雨强度对坡面径流深的影响远大于坡长及坡度因子。在坡长与坡度 2 个因子中,坡度与坡面径流深的关系较坡长密切。

## 3 结 论

采用人工模拟降雨试验的方法对黄土裸坡降雨产流过程进行了研究。

(1) 坡面径流强度随降雨过程的变化可用对数相关方程进行描述,随降雨历时的增长,径流强度呈现增大的趋势,在产流开始后的 10~15 min 内增加很快,以后逐步变缓,并趋向于稳定。

(2) 坡度对坡面径流深的影响可用抛物线相关方程进行描述,在小雨强条件下具有好的相关性,随坡度的增大,坡面径流深相应增加,但在坡度达到 25 左右以后,径流深开始变小。在大雨强条件的关系不及小雨强条件下的好。

(3) 坡长对坡面径流深的影响总的可通过对数相关方程进行表述,在坡长为 40~80 cm 之间,径流深随坡长增大而增加的幅度较大,以后的变化幅度较小,大雨强条件下,略有增大,小雨强条件下基本不变或稍有波动。

(4) 雨强对径流深的影响可用线性相关方程进行描述,且二者之间的相关关系极其显著,在雨强与坡度 2 个因子共同影响径流深的情况下,坡度的作用几乎完全被雨强所掩盖。

(5) 坡度、坡长及降雨强度对坡面径流深的综合影响可用多元线性相关方程进行描述,本试验结果相关关系高度显著。降雨强度对坡面径流深的影响远大于坡长及坡度因子。坡度与坡面径流深的关系较坡长为密切。

由于坡地表面条件对降雨产流具有重要影响作用,因此,采取有效措施增加地面的粗糙程度,增大土壤的入渗率是调控黄土裸坡坡面降雨径流的有效途径之一<sup>[8]</sup>。

### [ 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.
- [3] 吴发启,赵晓光,等. 缓坡耕地降雨、入渗对产流的影响分析[J]. 水土保持研究,2000,7(1):12—17.
- [4] 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.
- [5] 石生新. 高强度人工降雨条件下影响入渗速率因素的试验研究[J]. 水土保持通报,1992,12(2):49—54.
- [6] 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.
- [7] 吴普特,等. 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.
- [8] 朱显谟. 黄土高原的形成与整治对策[J]. 水土保持通报,1991,11(1):1—8.

## 刊 误

本刊 2005 年第 3 期水土保持专家论坛和介绍栏目中,标题中“水土保持专家张冀先生”应更正为“水土保持专家张翼先生”。谨此对本栏目专家及广大作者、读者朋友致歉。

《水土保持通报》编辑部