

高强度人工降雨条件下影响 入渗速率因素的试验研究

石 生 新

(中国科学院西北水土保持研究所·陕西杨陵·712100)
水利部

提 要

在高强度人工降雨条件下,作者研究了地面坡度、植被覆盖度、降雨强度对土壤入渗速率的影响。结果表明:累积入渗量与坡度成反比;影响累积径流深的临界坡度明显存在。且在本试验条件下,不同时段、不同植被类型的临界坡度在 24° ~ 30° 之间变化;植被覆盖度增加,累积入渗量呈指数增加,随着降雨强度增大,土壤的稳定入渗率有增大的趋势。

关键词: 高强度人工降雨 入渗速率 地面坡度 植被覆盖度 降雨强度

A Testing Study of Factors Affecting Infiltration Rate under Artificial Rainfall with High Intensity

Shi Shengxin

(*The Northwestern Institute of Soil and Water Conservation,
Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources,)
Yangling, Shdanxi 712100*)

Abstract

The author studied the effects of slope gradient of land surface, vegetation cover percentage, rainfall intensity upon infiltration rate into soil under the conditions of artificial rainfall with high intensity. The results showed that the accumulated infiltration water was in inverse proportion to slope gradient, and also, there existed an apparent critical slope gradient affecting the depth of accumulated runoff water. In the case of this test, the critical slope gradient of different time sections and different vegetation types varied between 23.6° - 30.4° . The vegetation cover percentage increased, and the accumulated infiltration water went up exponentially. The steady infiltration rate has an increasent trend with the increasing rain intenacity.

key words artificial rainfall with high intensity slope gradient of land surface
infiltration rate vegetation cover percentage rainfall intensity

黄土高原的水土流失,常由少数几场大暴雨(降雨强度大于 $0.75\text{mm}/\text{min}$)所引起^[1,2]。这里,土壤入渗率的大小起着决定性的作用。某种土壤的入渗率主要受土壤性状、地面坡度、植被覆盖度、降雨强度与降雨量等自然因素和人为因素(如耕作等水土保持措施)的影响^[3]。黄土高原,由于地形破碎、交通闭塞、水源困难等原因,有关土壤入渗速率的试验研究,多采用双

环法^[4,6], 或小面积人工降雨^[6]装置进行, 因而所取得成果, 生产应用还有一定差距。本试验采用的降雨装置, 控制面积较大(超过 10m^2), 降雨强度和雨滴特性与天然降雨相似性较好^[7]因而资料的科学性和可靠性较好, 而且对于洪水预报和土壤侵蚀的预测, 具有指导意义。

本试验在安塞县纸纺沟试区进行, 土壤为黄绵土, 试验期间, 土壤含水量在9%左右。现将自然因素对降水入渗影响的试验研究结果分析如下。

一、试验方法

(一) 试验采用人工降雨法 喷洒器为单项侧喷式, 水泵取水加压, 通过闸阀(压力表示数)和出水孔板控制雨强。雨滴降落高度为2.5m左右。试验小区面积为 $1\text{m} \times 3\text{m}$, 周边设铁皮保护, 降雨区架设风障, 防止雨滴随风飘移。

(二) 观测项目 1. 在植被覆盖度(指空地上植物的覆盖度, 不包括林冠的覆盖度)为70%, 雨强为 $1.3\text{mm}/\text{min}$ 时, 记录地面坡度为 10° 、 15° 、 20° 、 25° 、 30° 的洋槐林中旷地、柠条地出现水洼的时间, 起始产流的时间, 以及不同时刻的产流、产沙量。2. 在雨强为 $1.3\text{mm}/\text{min}$ 、坡度为 25° 时, 记录植被覆盖度50%、60%、70%、80%、90%的洋槐林中旷地出现水洼的时间, 起始产流时间, 以及不同时刻的产流、产沙量。3. 在地面坡度为 25° , 记录雨强为 $0.7\text{mm}/\text{min}$ 、 $1.03\text{mm}/\text{min}$ 时农地(绝对休闲地和植被覆盖度为70%两种)的产流、产沙量。

二、试验结果与分析

(一) 坡度与累积径流深、累积入渗量的关系 关于坡度与累积径流深、累积入渗量的关系, 前人已有过研究, 由于各自的分析方法和试验条件不同, 其结果也不尽相同^[8,9,10,11], 我们的试验结果表明: 坡长一定时, 不同降雨时段(t)的累积径流深(H)与坡度(a)基本呈二次抛物线关系(见图1和图2)。累积径流深的临界坡度明显存在, 即当坡度增加到一定值时, 累

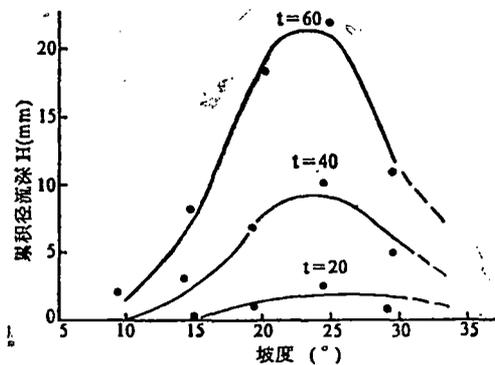
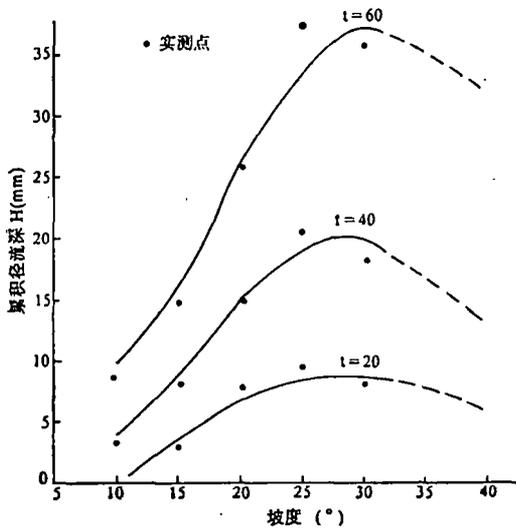


图1 坡度与累积径流深的关系(洋槐林中旷地)

图2 坡度与累积径流深的关系(柠条地)

积径流深反而减少。同一时段累积入渗量随坡度增加而减少, 且坡度较小时, 累积入渗量随坡度的增加, 下降较快, 当坡度增加到临界坡度后, 累积入渗量受坡度的影响不明显, 这与当坡度增加到临界坡度后, 累积径流深随坡度增加而减少的试验结果相一致, 同时时段越长, 累积入渗量

随坡度变化越大。累积径流深、累积入渗量与坡度的这种变化关系, 有学者已从不同角度作过解释^[9,10]。从本试验来看, 累积径流深峰值出现的临界坡度介于 $24^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 之间, 且随植被和下垫面状况而异。据前人研究, 乔木林地, 由于其枯枝落叶, 改变了土壤结构, 增加了土壤的入渗率, 同一时段的累积径流深应低于柠条地。但本试验柠条地的水平阶较洋槐林中旷地的水平阶大而多, 因而表现了文中的试验结果。这充分显示了整地造林措施具有明显的水土保持效益。

图1、图2的关系曲线可用 $y = a_0 + a_1x + a_2x^2$ 函数形式拟合(见表1、表2)。累积入渗量与坡度的变化关系, 我们采用 $\frac{1}{y} = c + \frac{b}{x}$ 双曲线形式描述(见表3、表4)。

表1 洋槐林中旷地坡度与累积径流深的关系

时 段	拟 合 模 型	极 值	显 著 性 检 验
t = 20	$H = -15.18 + 1.67\alpha - 0.03\alpha^2$	d = 28.9°	R复 = 0.91 F0.1水平显著
t = 40	$H = -32.75 + 3.72\alpha - 0.07\alpha^2$	d = 28.4°	R复 = 0.85 F0.1水平显著
t = 60	$H = -46.88 + 5.54\alpha - 0.09\alpha^2$	d = 30.4°	R复 = 0.92 F0.1水平显著
下垫面状况描述	小区内宽50cm, 中心深5cm的水平阶一个, 枯枝落叶层厚2cm左右(不均匀)小区约50%的面积有枯枝落叶覆盖。小区内以长毛草, 甘青针芽, 铁杆蒿, 阿狼等植物为主。		

表2 柠条地坡度与累积径流深的关系

时 段	拟 合 模 型	极 值	显 著 性 检 验
t = 20	$H = -11.80 + 1.07\alpha - 0.02\alpha^2$	$\alpha = 26^{\circ}$	R复 = 0.79 F0.25水平显著
t = 40	$H = -42.42 + 4.37\alpha - 0.09\alpha^2$	$\alpha = 24^{\circ}$	R复 = 0.84 F0.1水平显著
t = 60	$H = -95.22 + 10.10\alpha - 0.22\alpha^2$	$\alpha = 23.6^{\circ}$	R复 = 0.90 F0.1水平显著
下垫面状况描述	小区内宽60cm, 中心深8cm水平阶两个, 小区内以柠条为主, 其覆盖度为80%左右。		

表3 洋槐林小旷地坡度与累积入渗量的关系

时 段	拟 合 模 型	相 关 系 数	下 垫 面 描 述
t = 20	$F = \alpha / (0.07\alpha - 0.35)$	-0.89	下垫面状况及试验条件同表1
t = 40	$F = \alpha / (0.05\alpha - 0.31)$	-0.90	
t = 60	$F = \alpha / (0.04\alpha - 0.25)$	-0.90	

表4 柠条地坡度与累积入渗量的关系

时 段	拟 合 模 型	相 关 系 数	下 垫 面 描 述
t = 20	$F = \alpha / (0.05\alpha - 0.12)$	-0.82	下垫面状况及试验条件同表2
t = 40	$F = \alpha / (0.03\alpha - 0.12)$	-0.86	
t = 60	$F = \alpha / (0.02\alpha - 0.10)$	-0.81	

(二) 植被覆盖度与累积入渗量的关系 从图3的试验结果可知:随着植被覆盖度增加,累积入渗量几乎成直线增加,这充分说明植被在水土保持方面的显著作用。并随着时段的增长,累积入渗量受植被覆盖度的影响增大。同时,随着时段的加长,同一植被覆盖度下,累积入渗量增加的幅度变小。这主要是由于产流初期,坡面坑洼的拦蓄作用和植被的截留作用都较大,坡面只有局部产流。随着时段的加长,坡面坑洼被水填满或冲毁,形成坡面漫流,这时植被覆盖度的作用相对就突出了。

图3这种关系我们采用 $y = ae^{bx}$ 形式来描述,其相关性较好,相关系数大于0.86(见表5)

(三) 降雨强度对土壤入渗速率的影响 降雨强度对土壤入渗速率的影响,不少学者已作过研究,但结果不太一致^[12,13,14]。本试验为了研究降雨强度对土壤入渗速率的影响,在绝对休闲地和普种谷子

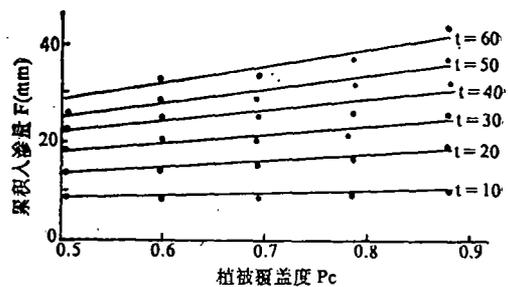


图3 植被覆盖度与累积入渗量的关系

表5 植被覆盖度与累积入渗的关系

时 段	拟 合 模 型	相 关 系 数	下 垫 面 状 况 描 述
t = 10	$F = 7.11e^{0.36Pc}$	0.92	试验在洋槐林中旷地进行,小区内枯枝落叶层厚2cm左右,不均匀,约占小区面积的50%有枯枝落叶覆盖,小区内以甘青针茅,长茅草、铁杆蒿等植物为主。
t = 20	$F = 9.71e^{0.70Pc}$	0.97	
t = 30	$F = 12.78e^{0.72Pc}$	0.90	
t = 40	$F = 15.23e^{0.78Pc}$	0.86	
t = 50	$F = 16.94e^{0.86Pc}$	0.87	
t = 60	$F = 18.28e^{0.94Pc}$	0.90	

地分别进行了雨强为0.7mm/min和1.03mm/min的人工降雨试验。试验结果(如图4、图5)表明:随着降雨强度的增大,土壤的稳定入渗率增大。究其原因,我们可以从入渗水体的

受力情况分析，土壤孔隙中的水流在其运动过程中主要受四种力的作用：（1）水体自重力；（2）土壤水分毛管势产生的吸力；（3）地表水层的压力；（4）雨滴打击地表时，对入渗

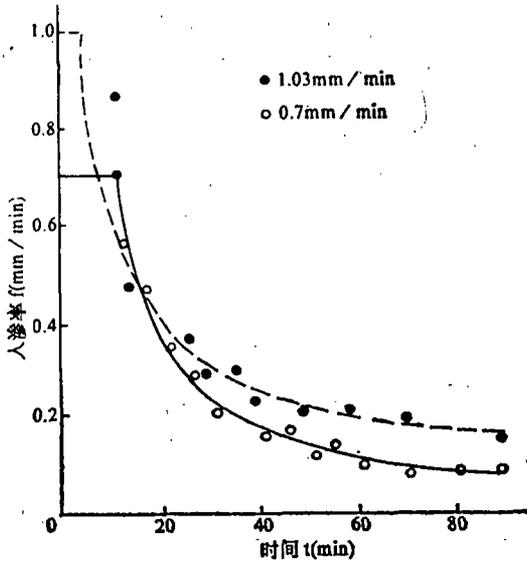


图 4 不同雨强下的 f-t 关系（绝对休闲地）

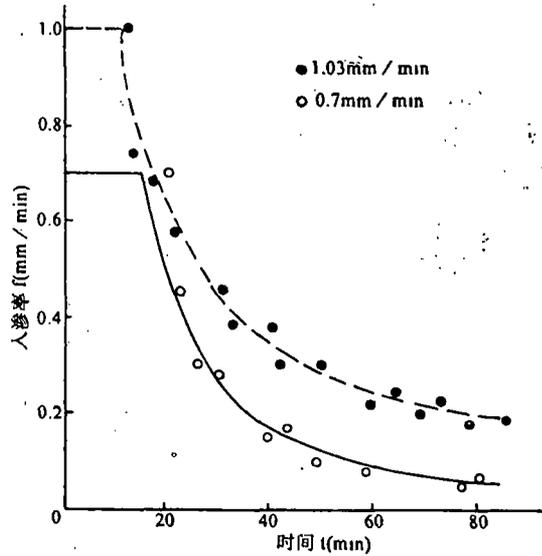


图 5 不同雨强下的 f-t 关系（普种谷子地）

水体产生的冲力。上述四种力的作用范围和方式不同，在入渗率达到稳定时，它们的重要性也不同。稳定入渗水流的主要通道是土壤中较大的非毛管孔隙和部分毛管孔隙，一般认为此时的毛管吸力作用已不明显，主要是其它三种力的作用。其中，雨滴的打击所产生的冲力对入渗速率的变化起着重要的作用；它不仅加速入渗水流的运动速度，也可以使部分静止的毛管水加入到入渗水流中。故降雨强度越大，土壤的稳定入渗率越大。

图 4、图 5 的关系我们分别采用霍顿（Horton）入渗方程和方正三等提出的入渗方程^[4]拟合，结果发现对入渗能力在初期下降较快的绝对休闲地，采用方正三等提出的入渗方程，相关性更好，其相关系数达 0.99，对于有植被保护的普种谷子农地，采用霍顿（Horton）入渗方程相关性更好，相关系数达 0.97 以上（见表 6、表 7）

表 6 不同雨强下绝对休闲地的 f-t 关系

雨 强 (mm/min)	拟 合 模 型	相关系数	下 垫 面 描 述
i = 0.7	$\begin{cases} f > 0.7 & t \leq 12 \\ f = 0.07 + 96.9t^{-1.007}, & t > 12 \end{cases}$	-0.99	绝对休闲地与普种谷子地布设在同一试验地。
i = 1.03	$\begin{cases} f > 1.03 & t \leq 9 \\ f = 0.15 + 26.9t^{-1.55}, & t > 9 \end{cases}$	-0.99	

三、结 语

- （一）影响累积径流深的临界坡度明显存在，但不同土壤、不同植被，其临界值不同。
- （二）不同时段累积入渗量随着坡度的增加，呈双曲线关系下降，但小于临界坡度时，坡

表7 不同雨强下普种谷子农地的 $f-t$ 关系

雨强 (mm/min)	拟合模型	相关系数	下垫面描述
$i = 0.7$	$\begin{cases} f > 0.7 & t \leq 13 \\ f = 0.05 + 1.28e^{-0.054t}, & t > 13 \end{cases}$	-0.97	普种谷子秆高90cm, 苗密度为2900株/亩、覆盖度为70%。
$i = 1.03$	$\begin{cases} f > 1.03 & t \leq 12 \\ f = 0.17 + 1.73e^{-0.057t}, & t > 12 \end{cases}$	-0.98	

度对累积入渗量的影响程度较大。

(三) 不同时间段的累积入渗量随植被覆盖度的增加呈指数增加, 且随着降雨历时的增长, 累积入渗量受植被覆盖度的影响增大。

(四) 土壤的稳定入渗率随着降雨强度的增大而增大。

参 考 文 献

- [1] 张汉雄. 黄土高原的暴雨特性及其分布规律. 《地理学报》, 1983年, 第4期
- [2] 周佩华等. 黄土高原侵蚀暴雨标准. 《水土保持通报》, 1987年, 第1期
- [3] 蒋定生等. 黄土高原坡耕地水土保持措施效益评价试验研究. 《水土保持学报》, 1990年, 第2期
- [4] 方正三等. 《黄河中游黄土高原梯田的调查研究》. 北京: 科学出版社, 1958年
- [5] 蒋定生等. 黄土高原土壤入渗速率的研究. 《土壤学报》, 第1986年, 第4期
- [6] 杨艳生等. 侵蚀土壤地表径流和土壤渗透的研究. 《土壤学报》, 1984年, 第2期
- [7] 陈文亮. 国内外人工模拟降雨装置综述. 《水土保持学报》, 1990年, 第1期
- [8] 蒋定生等. 地面坡度对降雨入渗影响的模拟试验. 《水土保持通报》, 1984年, 第4期
- [9] 郭继志. 关于坡度与径流量和冲刷量关系的探讨. 《黄河建设》, 1958年, 第3期
- [10] 陈浩等. 坡度影响地面产流、产沙过程的试验研究. 《黄河粗泥沙来源及侵蚀产沙机理文集》, 北京: 气象出版社, 1988年
- [11] 范世香等. 地面坡度对地表径流影响的实验研究. 《水土保持通报》, 1991年, 第4期
- [12] 周国逸等. 林地土壤的降雨入渗规律. 《水土保持学报》, 1990年, 第2期
- [13] Aken AO, Yen B C. Effect of rain intensity on infiltration and surface runoff rates. 1984, J. HYd. DiV. ASCE. 107 (HY4) : 324-331
- [14] Ander C E Son, Shahghasemi E, Johnson H P. Modeling infiltration on Crop-land, including raindrop impact Effects, 1982 Trans. ASAE, 24(5) : 332-340