

地面坡度对降水入渗影响的模拟试验

蒋定生 黄国俊

(中国科学院西北水土保持研究所)

一、问题的提出

土壤渗透性能是土壤重要的物理特性之一。它与天然降水和灌溉水进入土壤以及在土壤中的贮存情况有关。为解决土壤改良和水土保持实际任务的需要,世界各国科学工作者十分重视这一课题的研究。1856年,达西首先确定了水在多孔介质中的运动定律。随后考斯加柯夫、霍顿等人各自根据自己的试验,提出著名的经验公式来描述土壤入渗性能和土壤入渗累积值对时间的依赖关系。近年,菲利普等人又从土水势的观点,以物理学为基础提出各种各样的物理模型和数学模型。但是,这些实验研究均是在下垫面为水平的情况下进行的,对于下垫面在非水平的坡面情况下的入渗规律至今研究甚少。

我国黄土高原由于严重的水土流失,地面千沟万壑,高低起伏不平。据粗略估算,仅在陕甘宁晋的黄土丘陵沟壑区的地面坡度组成中,0—5°的占10%,约1.5万平方公里;6—25°的占58%,约8.9万平方公里;≥25°的占32%,约4.9万平方公里。因此,认识降水在坡面上的入渗规律,对于制订水土保持措施,合理利用土地,弄清水土流失规律,均有十分重要的意义。

我们通过对微型模型的降雨入渗模拟试验,研究了在不同的地面坡度情况下降水的入渗规律。由于试验是在降雨强度大体恒定的一种特殊雨型情况下取得的,所得结果还有待今后进一步深化和验证。

二、试验方法

(一) 试验装置 (图1)

向土壤供水采用人工降雨设备。喷洒器是本所侵蚀室设计的,系折射式单向喷射喷头。喷嘴孔径为6毫米,工作压力0.5公斤/平方厘米。雨滴降落高度2.5米,试验区雨滴平均粒径2毫米,雨点着地角度约65°。下垫面是水平时,降雨强度为1.92毫米/分钟。

盛土槽用有机玻璃制成,长60厘米,宽25厘米,高20厘米,末端有集流槽。底部为两层,上层钻有φ4毫米的小孔,间距3×3厘米,交错排列。水流可经小孔渗入下层,由排水底孔流走。

(二) 土样制备

取塬土母质风干,过1.5×1.5毫米筛孔。

装土时,槽底垫一滤纸,水槽四壁上部涂一薄层钙基黄油,以利槽壁与土壤的结合。水槽中土样稍稍压紧,表面用水准器校平并称重。将盛土水槽置入盛有浅层水的塑料托盘内,借毛细管作用,使土样预先湿润。塑料盘内水深保持3—4厘米左右,浸润16小时。然后将水槽抬出,滤干6小时,称重,将水槽调整到所要求的坡度。

(三) 试验步骤

试验在无风的室内进行。首先用塑料布遮住水槽,调试喷洒器工作压力,待压力稳定后,立

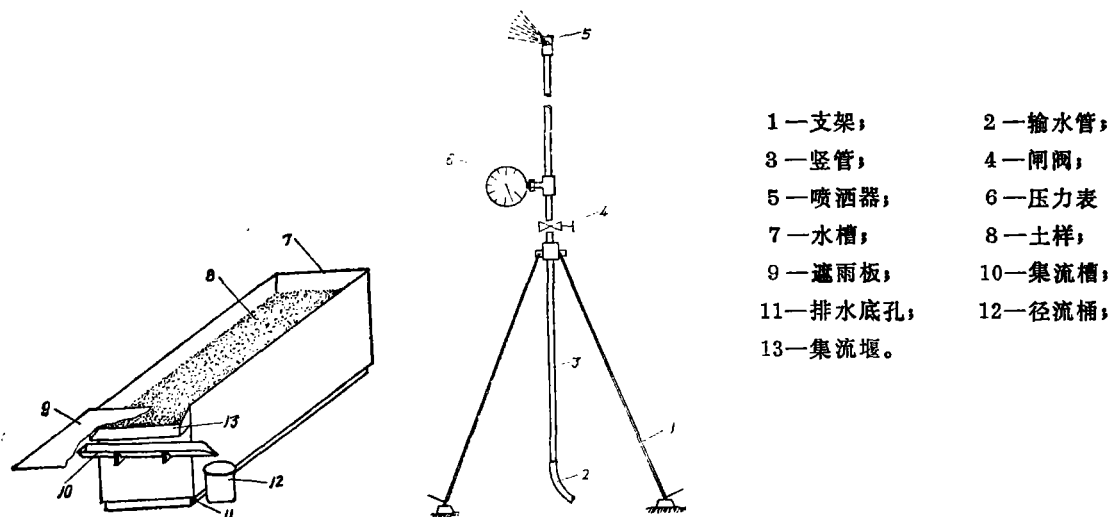


图 1 试验装置示意图

即揭去水槽上的塑料布，开始喷洒，同时用秒表记时。试验中仔细观察水槽出现径流的时间。产流后，每隔一定时间采集一次径流，并用量筒读数。收集径流的时间间隔，开始可以短些，譬如 1 分钟，或者 2 分、3 分，往后每隔 5 分钟收集一次。待渗水速度基本稳定后，即行停止试验。本试验持续时间每次均为 2 小时。

将收集的径流澄清一昼夜，撇去清水，采样烘干计算冲刷量。

三、试验结果与分析

试验是在平均总孔隙 55.35%，平均毛管孔隙 40.74%，平均非毛管孔隙 14.61% 的情况下进行的，结果列于表 1。

表 1 试 验 结 果

地面坡度	容 重 (克/立方厘米)	试前土 壤含水量 (%)	承雨强度 (毫米/分)	开始出现径 流时间(分)	积水入渗阶段入渗速度 与时间关系的经验方程	第一小时入渗 水总量 (毫米)	稳定入渗 速率 (毫米/分钟)	冲刷量 (公斤)
0°	1.18	31.0	1.92	20.33	$Kc = 8.357t^{-0.647}$	69.53	0.38	8.84×10^{-8}
5°	1.15	31.0	1.90	16.50	$Kc = 8.393t^{-0.784}$	55.58	0.33	0.046
10°	1.20	27.2	1.86	16.42	$Kc = 4.479t^{-0.488}$	64.70	0.42	0.095
15°	1.15	31.0	1.88	15.00	$Kc = 3.157t^{-0.470}$	50.96	0.35	0.364
20°	1.17	29.8	1.74	10.42	$Kc = 2.370t^{-0.641}$	29.11	0.26	0.125
25°	1.17	29.0	1.80	11.25	$Kc = 2.116t^{-0.404}$	35.42	0.24	0.133
35°	1.17	29.8	1.50	8.42	$Kc = 1.392t^{-0.687}$	18.22	0.12	0.117

(一) 入渗速率对时间关系的经验模式

等强度下的降雨入渗和充分供水条件下的淹浸入渗（积水型入渗），二者在入渗速率对时间关系上是有区别的。当降雨强度超过土壤入渗性能时，入渗过程就与地表有浅层积水的情况相同，随着时间的延续，土壤入渗性能逐渐减弱，入渗速率最后接近某一常数。如果降雨强度小于

土壤的初期入渗性能，但又大于最终入渗性能，起初时土壤将按小于其潜在入渗性能的速度吸进水分，土壤中将出现的是不饱和条件下的渗流，在这一过程中土壤入渗速率受“通量控制”。鲁宾 (Rubin, 1956) 称这种入渗方式为非积水入渗 (指降雨强度不足以在地表产生积水层的情况) 或积水前的入渗。伊尔霍夫 (Ерхов Н.С. 1971) 称之为“无压入渗”。此后，由于降雨强度仍按同一强度持续下去，而随着土壤入渗性能的减退，土壤表面被水饱和，产生积水和径流，这时入渗过程将按积水条件下的入渗情况进行。这一阶段鲁宾称为“降雨积水入渗”，伊尔霍夫称为“有压入渗”。积水入渗一方面受地表水层压力 (或水层厚度) 制约，另一方面也受土壤吸力情况和导水率情况的制约。

图 2 表示当模型土样表面处在 5° 时，壤土母质的降雨入渗过程。

分析表明，在不同坡度情况下，降雨入渗速率对时间的关系可依如下经验模式表示。

$$K = \begin{cases} i & (0 \leq t \leq t_0) \\ K_0 \cdot \frac{0.0351e^{3.3913(1-\sin\alpha)}}{t^n} & (t > t_0) \end{cases} \quad (1)$$

- 式中：k—土壤入渗速率，毫米/分钟；
 i—土样表面承雨强度，毫米/分钟；
 t—入渗历时，分钟；
 t₀—开始产生径流的时间，分钟；
 k₀—系数，等于 8.357，该值与当土样表面坡度为零时，描述其积水入渗过程的经验方程中的系数相当；
 e—自然对数的底，等于 2.718；
 α—土样表面坡度，度；
 n—指数。本试验中该值介于 0.479—0.734 之间，取其平均值，等于 0.578。

(二) 稳定入渗速率与地面坡度的关系

试验表明，随着坡度的增大，土壤稳定入渗速率减小。这一规律可用下式描述：

$$K_0 = 0.4443 (1 - \sin\alpha)^{1.3162}, r = 0.9144 \quad (2)$$

造成这一现象的原因有二：

其一、坡面上的水层压力 $F = P_0 + rh$ (P_0 —大气压力； r —水的重率； h —水层深度)， F 可以分解为 F_1 和 F_2 两个分力 (图 3 a)。 F_1 使水压入土壤孔隙，为基膜吸力吸引； $F_2 = (P_0 + rh) \sin\alpha$ ，推动水体沿坡下流，形成地面径流，使水进入土壤的机会减少。 F_1 在数值上等于 $(P_0 + rh) \cos\alpha$ ，当 $\alpha = 0^\circ$ 时， $F_1 = F$ ，其值最大，这时水层压力全部变为使水入渗土壤的力，促使入渗速率增大。

其二、进入土壤孔隙中的水流在重力和毛管吸力的合力 F_0 作用下运动。但 F_0 可以分解为 F_{01} 和 F_{02} 。前者与土壤表面垂直，使水向下运动； F_{02} 与土壤表面平行，使水横向移动，一部分使土壤表层饱和，阻滞雨水入渗，有的即沿孔隙出露地表，变为径流。这些都会导致土壤稳定入渗

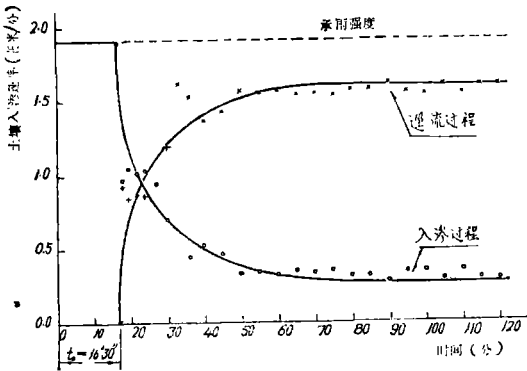


图 2 坡度为 5° 时，降雨入渗过程线和径流过程线

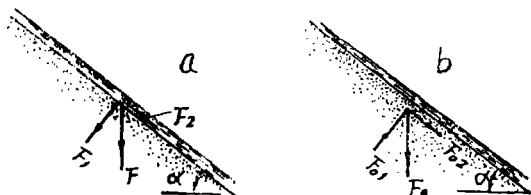


图3 坡面上水层压力与土壤基模吸力分解示意图。

速率减小。

(三) 开始产流时间与坡度的关系

地面开始产流时间与坡度呈指数关系，即

$$t_0 = 4.453e^{1.508(1-\sin\alpha)} \quad (3)$$

这就表明，随着地面坡度的增大，将提早产生径流，因而入渗水量减小。在野

外，地貌类型各式各样，坡度千差万别，天然降水在坡面上的分配规律也就存在差异。人们在利用土地时，应该考虑这一特点，并且创造微地形，譬如修筑水平梯田、区田圳田、水平沟种植等措施，以平缓地面坡度，增加入渗水量。

(四) 降雨强度和承雨强度

通常所谓降雨强度，可以理解为在地面为水平时，在单位时间内单位面积上所降的水量。而在倾角为 α 的坡面上，假若这时降雨的雨点粒径、分布密度、降落速度仍和平地一样不变（亦即相当于喷洒器在工作压力、喷嘴孔径、支架高度不变情况下的降雨），应该认为二者的降雨强度 i 相等。但是由于地形的变化，承受降水的面积比水平时为小，这时坡面上实际承受的降雨强度变小了，若称这种强度为承雨强度，其值则等于在水平面上的降雨强度 i 与坡面倾角余弦的乘积，亦即 $i_a = i \cos \alpha$ 。图4为承雨强度随坡度而变化的情况，实测值与计算值（曲线）甚相吻合。

(五) 冲刷量与坡度的关系

图5是冲刷量随坡度变化的试验结果。可以看出，在所试验的雨型和降雨结构情况下，在 $0-25^\circ$ 范围以内，冲刷量随坡度的变陡而增加。起初，增长速率为 0.0074 公斤/度，往后逐渐减慢，至 20° 时，递增速率降为 0.0016 公斤/度。当地面坡度超过 25° 时，冲刷量反而呈下降趋势。

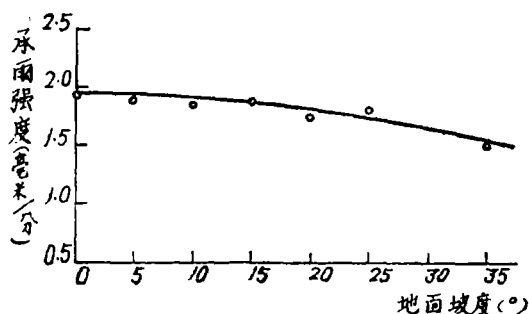


图4 承雨强度随坡度而变化。

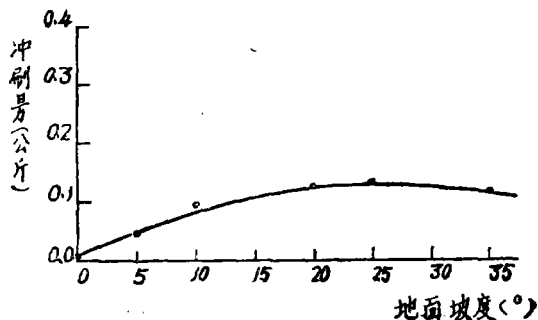


图5 冲刷量与坡度的关系

四、讨论

1、本试验是用扰动土在雨型和降雨结构为恒定的情况下进行的，属于定性的研究。所得结果与实际情况肯定会有出入。今后应该采集原状土，选取与天然降雨相类似的常见雨型（并变强度）和结构（雨滴粒径和分布密度）进行模拟试验，这就更有实际意义。

2、试验结果表明，随着坡度的增加，承雨强度降低，首60分钟入渗水量减少，地面径流增加，稳定入渗速率减小。今后应该在野外进行定位观测试验，验证降水在坡面上的这种分配规律，为合理利用丘陵山区土地提供科学依据。