

影响坡地降雨产流历时的因子分析^{*}

袁建平¹ 蒋定生¹ 甘淑²

(1 中科院、水利部水土保持研究所 陕西杨陵 712100; 2 浙江大学环境资源学院 杭州 310029)

提 要 运用小型野外便携式人工模拟降雨装置研究了林地、农地、裸地诸因子(坡度、承雨强度、土壤初始含水率、林地植被盖度、枯落层厚度)对产流历时的影响。研究发现,林地影响产流历时的主要因子为承雨强度和植被盖度;农地、裸地则为承雨强度、坡度和土壤初始含水率。建立了不同土地利用方式下影响产流历时的单因子、多因子回归方程。通过方程,由植被盖度、坡度、土壤初始含水率和承雨强度四个易于获得的因子可预测不同土地利用方式下的径流发生时间。地表结皮的形成对产流历时的影响以裸地表现最甚,其次为农地,林地影响不大。

关键词 产流历时 坡地 土壤初始含水率 植被盖度 地表结皮

分类号 《中图法》S344.2 S 157.1 **文献标识码** A

暴雨是引起坡地水土流失的主要原因,对影响坡地降雨起始产流时间(产流历时)的因素进行研究,可为延长坡地降雨产流历时的到来、减轻坡地水土流失及合理配置水土保持措施提供帮助。张光辉^[1]曾研究了草地(沙打旺、草木樨)降雨强度、草地盖度、土壤初始含水率对产流历时的影响,并提出了它们之间的定量关系;石生新^[2]、王玉宽等^[3]研究了裸地降雨强度对产流历时影响的定量关系。而对林地、农地、裸地不同坡度下影响产流历时的因子进行系统研究目前国内少有报道。本文以陕北安塞纸坊沟小流域为例,采用作者研制的用于测定野外坡地入渗产流产沙的小型降雨装置,来寻求产流历时同其主要影响因子坡度、承雨强度(降雨强度与坡度余弦之积)、土壤初始含水率及植被盖度、枯落层厚度之间的定量关系。并且初步探讨了地表结皮对产流历时的影响。我们所采用的降雨装置其工作指标为:降雨高度1.50 m,高度可调,试验区面积为50 cm×30 cm,雨强重复性误差为1.5%~5.5%,降雨均匀度系数为0.92~0.99,模拟雨强为0.4 mm/min~10.0 mm/min。该装置具有体积小,重量轻,价格低廉,野外使用运输方便,用水量少等优点,现将试验情况介绍如下。

1 试验样地的选择

试验于1998—06—09进行,样地布设在纸坊沟小流域(8.27 km²)的峙峪岬(包括林场)、瓦树塌、纸坊村,土壤类型为黄绵土,0 cm~50 cm土层土壤容重为0.85 g/cm³~1.32 g/cm³,平均为1.18 g/cm³。试验样地按照不同土地利用方式可分为林地、农地、裸地。其中林地树种主要为洋槐、柠条、沙棘,林下杂草主要有:草木樨、黄蒿、长茅草、紫花苜蓿等;农地主要作物有:糜子、马铃薯、谷子、小麦、豆子、麻子等。在流域的不同断面(上、中、下游)按照坡向的不同分为阳坡、阴坡;同一坡向又可分为坡顶部、坡中部、坡下部。选取其中重复性较好的24组试验数据作如下分析。

2 影响产流历时(t_p)的单因子分析

2.1 坡度(θ)对产流历时的影响

^{*}国家九五科技攻关项目(96—004—05—12);第一作者博士论文部分内容。

收稿日期:1998—10—27;改回日期:1998—12—14。

坡度是影响产流历时的一个主要因素, 由于黄土高原地形复杂, 千沟万壑, 野外试验时供水困难, 交通运输不便均限制了对这一因素的研究。据蒋定生^[4]对不同坡度下的娄土室内模拟降雨入渗实验表明: 地面开始产流时间与坡度正弦值呈指数关系。

经对林地、农地、裸地实测数据点绘而成的散点(图 1), 运用直线、指数函数、对数函数及幂函数进行拟合, 除农地用幂函数拟合精度较高外, 其它方程拟合其精度均不高, 但是将坡度的正弦值和产流历时之间的关系运用上述四种方法进行拟合, 发现用指数函数进行拟合精度均较高, 所得结果与蒋定生等人室内模拟结果相一致。拟合方程如下

林地: $t_p=14.999 e^{-4.397 \sin \theta}$ $(n=9, r=-0.712);$

农地: $t_p=35.3 e^{-4.902 \sin \theta}$ $(n=9, r=-0.848);$

裸地: $t_p=805.919 e^{-9.386 \sin \theta}$ $(n=6, r=-0.910)。$

由方程可知, 随着坡度 θ 的增加, 产流历时 t_p 逐渐缩小, 也即产流时间提前。上述三式中, 林地相关系数最小, 表明林地与农地和裸地相比, 坡度对产流历时的影响较小, 这从比较方程式中常数项系数大小也可发现这个规律, 林地为 14.999 小于农地 35.3 和裸地 805.919。可能的原因是林地与裸地相比, 林地植被覆盖起了关键性的作用, 从而在一定程度上掩盖了坡度对林地产流历时的影响作用。

2.2 承雨强度*i*对产流历时的影响

关于雨强与产流历时的定量关系, 国内外研究较多, 1972 年 Smith 和 Parlange 分别得出定量求解产流历时的方程^[5], 王玉宽等^[3]、石生新^[2]、张光辉^[1]等先后研究了雨强对产流历时影响的定量关系。本文除研究承雨强度与产流历时的关系外, 还对承雨强度的组合因子与产流历时的定量关系进行探讨。

将原始数据点绘成图, 据散点的分布趋势, 对林地、农地、裸地承雨强度与产流历时的关系用幂函数曲线进行拟合(图 2)。回归方程为

林地: $i=3.628 t_p^{-0.428}$
 $(n=9, r=-0.947);$

农地: $i=2.869 t_p^{-0.421}$
 $(n=9, r=-0.885);$

裸地: $i=2.362 t_p^{-0.631}$
 $(n=6, r=-0.968)。$

各方程的相关系数 r 均 > 0.85 表明模型具有较高的精度。模型中的常数项代表了产流历时的发生快慢程度, 其值越大, 表明起始产流时间越长, 土壤渗透能力越强。由于林地模型常数项最大, 为 3.628, 故而林地起始产流时间最长, 农地次之, 裸地起始产流时间最短, 从而更进一步表明无水保措施的裸露坡地是产生水土流失的主要场所, 而林草植被则是保持水土、延缓径流发生的重要保障。模型中的指数项均小于零, 表明无论

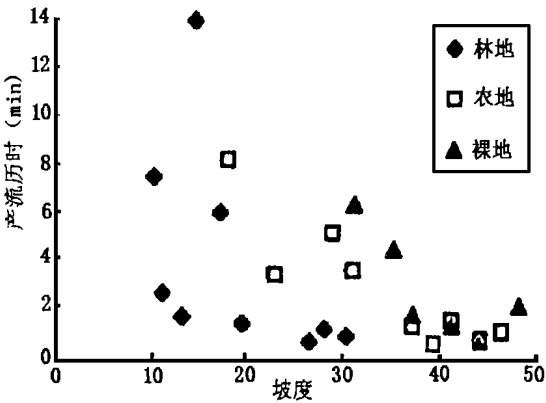


图 1 坡度对产流历时的影响
Fig. 1 The effect between slope and runoff duration

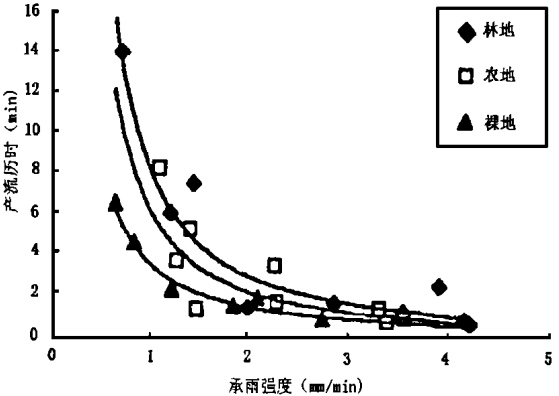


图 2 承雨强度对产流历时的影响
Fig. 2 The effect between rain intensity and runoff duration

是林地、农地还是裸地承雨强度同起始产流时间均呈负相关。此外模型指数项数值大小也在一定程度上反映了产流历时随承雨强度衰减快慢程度。其数值越大, 表明产流历时随雨强增大而衰减越快, 也即产流变化越快。裸地指数项数值最大, 为 0. 631, 表明裸地产流历时随承雨强度的变化而变化最快; 农地指数项数值略小于林地, 可能的原因是由于农地大多采用水平阶、大垄沟等水土保持耕作措施, 在一定程度上改变了微地形, 加强了水分的入渗, 阻缓了产流历程。

2.3 土壤初始含水率(w)对产流历时的影响

贾志军等^[9]曾专门研究了土壤初始含水率对坡耕地产流入渗的影响, 并得出初始含水率同产流历时的定量关系, 但是研究仅是在同一种雨强下进行的, 而对于雨强变化时的情形报道很少, 本文除定量研究土壤初始含水率与产流历时的关系外, 还将雨强与初始含水率组合因子对产流历时的影响进行定量研究。

林地、农地、裸地不同初始含水率对产流历时的影响关系如图 3 所示。回归方程为

林地: $w = 11.591 - 0.369 t_p$
($n = 9$ $r = -0.919$)
农地: $w = 13.538 - 0.572 t_p$
($n = 9$ $r = -0.924$)
裸地: $w = 9.124 - 0.583 t_p$
($n = 6$ $r = -0.915$)。

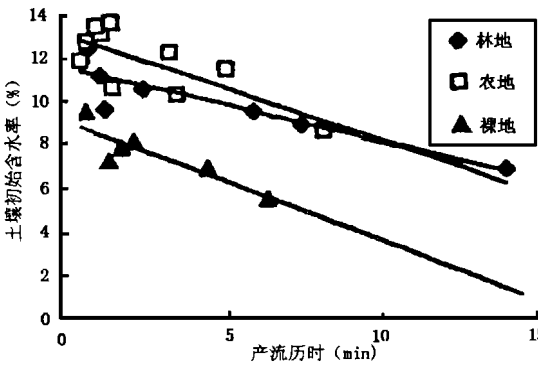


图 3 土壤初始含水率对产流历时的影响
Fig. 3 The effect between initial water content of soil and runoff duration

模型中常数项代表着三种不同土地利用类型土层深度在 0 cm ~ 50 cm 范围内的平均土壤初始含水率的极值, 其大小顺序为: 农地> 林地> 裸地。农地土壤初始含水率之所以大于林地的主要原因是林地植被根系吸水能力强, 造成林地土壤一定深度范围内出现干层现象, 而农地有时还人为接受浇灌, 加之农作物根系吸水能力小于林木根系。裸地由于无任何地被物保护, 其土壤初始含水率最低。一次项系数均小于零, 表明林地、农地、裸地土壤初始含水率均与产流历时呈负相关, 土壤初始含水率越大, 起始产流时间越短。一次

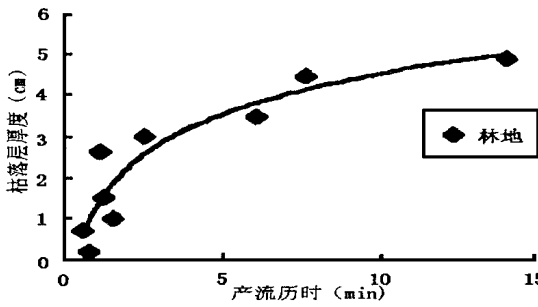


图 4 枯落层厚度对产流历时的影响
Fig. 4 The effect between thickness of leaf-cover layer and runoff duration

项系数数值的大小反映了产流历时随土壤初始含水率变化的快慢程度, 其数值越大, 表明产流历时随土壤初始含水率增大而衰减越快, 也即产流越快。由于一次项系数数值裸地> 农地> 林地, 故而裸地土壤起始产流时间随土壤初始含水率的变化反映最为明显, 即随土壤初始含水率的增加而减小得最快, 农地次之, 林地变化最慢。

2.4 枯落层厚度(h)对林地产流历时的影响

林地中聚集的枯枝落叶通过土壤中动物和微生物的活动, 进行分解, 增加土壤有机质含量, 而土壤中的有机质具有良好的胶结作用, 能将分散的土壤颗粒胶结成大团体, 提高土壤的抗蚀能力、增加土壤的孔隙度, 有利于降水入渗, 减少土壤侵蚀, 阻延产流历时的到来, 因此, 林地枯落层具有良好的水土保持作用。据枯落层厚度与产流历时散点分布趋势图 4, 用对数函数拟合方程为

$$h = 1.503 \ln t_p + 1.146 \quad (n = 9, r = 0.932)$$

2.5 植被盖度(*V*)对林地产流历时的影响

林地由于植被的保护作用, 使得其产流历时的变化情况较之农地、裸地要复杂得多。将林地植被盖度与产流历时原始数据点绘成图 5。据各散点的分布趋势, 用对数函数进行拟合, 所得回归方程为

$$V=16.22\ln t_p+56.55 \quad (n=9, r=0.920)$$

由于受降雨装置的限制, 此处的植被盖度仅指近地表草灌的盖度。由方程可知, 植被盖度与产流历时呈正相关, 即产流历时随植被盖度的增加而延长, 从而表明坡地减轻水土流失的重要措施之一是增加近地表植被的覆盖。

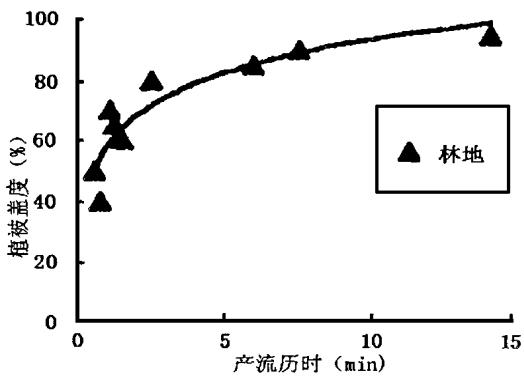


图 5 植被盖度对产流历时的影响

Fig. 5 The effect between vegetation cover degree and runoff duration

3 影响产流历时的多因子分析

一般情况下, 影响产流历时的各因子间是相互作用的, 根据产流历时与诸影响因子间的主成分分析得出, 林地影响产流历时的主要因子为承雨强度和植被盖度; 农地、裸地其三因子均被选入。拟合的回归方程如下

林地: $t_p=13.678i^{-0.891}\ln 0.022V \quad (n=9, r=0.935);$

农地: $t_p=3.573wi^{-1.181}e^{-3.839\sin\theta} \quad (n=9, r=0.911);$

裸地: $t_p=3.531wi^{-1.269}e^{-3.216\sin\theta} \quad (n=9, r=0.946)。$

据上述方程可知, 通过植被盖度、坡度、土壤初始含水量三个易于测定的因子, 再由不同降雨强度可预测不同土地利用情况下的径流产生时间, 为合理配置各种水土保持措施, 延长径流发生时间, 强化降水就地入渗, 减少土壤流失, 提供一定的理论和技术指导。

4 地表结皮的形成对产流历时的影响

地表结皮(击实层)的形成阻塞了土壤孔隙, 使土壤变得愈加紧实, 造成土壤入渗速率减小, 地表产流提前。由于结皮对产流历时的影响难以量化, 本文仅就林地、农地、裸地地表结皮形成前后产流历时的变化情况作一比较(表 1)。

由表 1 可知, 无论是林地、农地还是裸地, 地表结皮形成后, 起始产流时间均提前, 其中林地变化幅度不大, 农地有较大变化, 裸地变化最为明显, 究其原因可解释如下: 林地由于存在枯枝落叶层, 在一定程度上阻挠了结皮的形成, 因此对于林地而言, 由于枯枝落叶层的作用, 结皮形成不明显, 而且枯枝落叶层越厚, 结皮层越不明显, 甚至有时看不到结皮层的形成。裸地地表无任何覆盖, 一次暴雨后地表很容易形成击实层, 故而使土壤变得愈加紧实, 促使产流时间

表 1 地表结皮形成前后产流历时比较¹⁾

Table. 1 Comparison of runoff duration before and after surface crust forming

土地利用方式	结皮形成前 产流历时(min)	结皮形成后 产流历时(min)	<i>T</i> _后 / <i>T</i> _前
林地	12	11.4	0.95
农地	9.4	6.8	0.72
裸地	5.1	1.7	0.33

1)表中数据均为两次测定之平均值, 是在承雨强度为 1.0 mm/min, 坡度约为 20°时测得的

明显提前。此外据作者野外试验观测, 裸地地表击实层的形成并非百害而无一益, 作者比较了裸地地表结皮形成前后一次暴雨 10 min 的产沙量, 结果发现存在结皮的裸地产沙量小于未形成结皮的裸地, 究其原因, 作者认为由于结皮的形成, 造成地表更加紧实, 而未形成结皮的裸地土壤疏松, 在雨滴击溅作用下, 松软的土壤首先飞溅, 而击溅有结皮的紧实土壤需要更多的能量, 从而造成需要更多的时间来破坏土壤的紧实结构, 这样就出现无结皮的土壤其产流时间晚, 但产流的同时泥沙开始产生; 而含有结皮的土壤其产流时间早, 但其产沙时间却明显滞后于产流时间。

5 结 语

- 1. 在影响产流历时诸因子中, 坡度与之呈指数函数关系; 承雨强度、枯落层厚度与之呈幂函数关系; 土壤初始含水率与其呈线性负相关; 植被盖度与林地产流历时呈对数正相关。
- 2 结皮是影响产流历时不可忽视的一个重要因素, 其中林地结皮形成前后对产流历时的影响远小于农地和裸地。
- 3 通过对影响产流历时的复合因子的综合分析得出, 林地影响产流历时的主导因素是承雨强度和植被盖度。根据承雨强度、植被盖度、土壤初始含水量、坡度四个因子可预测不同土地利用情况下的径流发生时间。

参 考 文 献

1 张光辉. 黄土丘陵区人工草地盖度对产流影响的研究(硕士论文), 水土保持研究所, 1995
2 石生新. 水土保持措施强化降水入渗的试验研究(硕士论文), 水土保持研究所, 1992
3 王玉宽, 王占礼, 周配华. 黄土高原坡面降雨产流过程的试验分析. 水土保持学报, 1991, (2): 25~31
4 蒋定生, 黄国俊. 地面坡地对降水入渗影响的模拟试验. 水土保持通报, 1984, (4): 10~13
5 周国逸, 潘淮伟. 林地土壤的降雨入渗规律. 水土保持学报, 1990, (2): 79~83
6 贾志军, 王贵平, 李俊义等. 土壤含水率对坡耕地产流入渗影响的研究. 中国水土保持, 1987, (9): 25~27

第一作者简介 袁建平, 男, 27 岁。1993 年毕业于西北林学院水保系, 获学士学位, 1996 年获西北林学院硕士学位, 同年 9 月考入中科院、水利部水土保持研究所攻读博士学位。已发表论文 6 篇(第一作者), 参编专著两部(其中一部将于 1999 年出版)。主要研究方向为土壤侵蚀与水土保持。

FACTORS AFFECTING RAINFALL-RUNOFF
DURATION ON SLOPING LAND

YUAN Jian-ping¹ JIANG Ding-sheng¹ GAN Shu²

(¹ Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences
& Ministry of Water Conservancy, Yangling District, Shaanxi Province, 712100;
² College of Environment & Resources, Zhejiang University Hangzhou 310029)

Abstract The effects between runoff duration and factors of forestland, farmland and bareland, such as slope, rain intensity, initial water content of soil, vegetation cover degree and forest litter thickness were studied in the paper, using a set of small field artificial simulated rainfall device. The results showed that the main factors affecting runoff duration were rain intensity and vegetation cover degree in the forestland, rain intensity, slope and initial water content of soil in the farmland and bareland. We made equations between single factor and runoff duration in the different land uses, moreover, we got the equations between fixed factors and runoff duration based on the data from field simulated rainfall experiment, which are:

forestland:	$t_p=13.678 i^{-0.891} \ln 0.022 V$	$n=9, r=0.935;$
farmland:	$t_p=3.573 w i^{-3.839 \sin \theta}$	$n=9, r=0.911;$
bareland:	$t_p=3.531 w i^{-1.269} e^{-3.216 \sin \theta}$	$n=6, r=0.946.$

Through four factors attained easily, which were vegetation coverdegree, slope, initial water content of soil and rain intensity, we can predict the time runoff beginning in the different land uses, therefore we can offer helps through them for disposing rationally different measures of soil and water conservation, intensifying rainfall penetration more, reducing soil loss.

The effect between surface crust and runoff duration is the most in the bareland, and is the least in the forestland.

Key words rainfall-runoff duration, sloping land, initial water content of soil, vegetation cover degree, surface crust