

# 坡耕地土壤水分入渗影响因素分析

吴发启<sup>1</sup>, 赵西宁<sup>2</sup>, 余 雕<sup>1</sup>

(1.西北农林科技大学, 陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘 要:** 利用人工模拟降雨装置对影响坡耕地土壤入渗的诸因素进行了研究, 发现坡面产流历时与土壤容重、初始含水率、坡度、降雨强度、耕作管理措施呈负相关; 土壤稳渗速率与降雨强度、耕作管理措施呈正相关, 与土壤容重、初始含水率、坡度呈负相关。通过综合因素分析可知, 影响坡面土壤入渗和产流历时的主要因子为土壤物理性质和耕作管理措施。

**关键词:** 坡耕地; 产流历时; 土壤稳渗速率; 影响因素

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2003)01-0016-03

中图分类号: S152.72

## Analysis on Affecting Factors of Soil Infiltration in Slope Farmland

WU Fa-qi<sup>1</sup>, ZHAO Xi-ning<sup>2</sup>, SHE Diao<sup>1</sup>

(1. Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, Shaanxi Province, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, CAS and MWR, Yangling 712100, Shaanxi Province, China)

**Abstract** Using the simulated rainfall methods, the affecting factors of soil infiltration are studied. The results show runoff time has a negative relationship with soil bulk, antecedent soil moisture, slope gradient, rainfall intensity, and different tillage measures; soil steady infiltration rates have a positive relationship with rainfall intensity and tillage measures, and have a negative relationship with soil bulk, antecedent soil moisture, and slope gradient. The major factors which affect soil steady infiltration rates and runoff time are soil physical property and tillage measures according to result of synthetic analysis.

**Keywords** slope farmland; runoff time; soil steady infiltration rate; influential factor

黄土高原坡耕地土壤侵蚀量占到流域总侵蚀量的 50%~60%<sup>[1]</sup>。为开发和更好的利用坡耕地土地资源,治理水土流失,使生态环境能够走上良性循环的发展道路,就必须了解坡耕地土壤入渗规律,增加入渗和土壤蓄水。对坡耕地土壤入渗影响因素进行研究,可为延长坡面产流历时,增加土壤入渗,减少坡耕地水土流失及合理利用土地资源提供科学的理论依据。入渗是一个非常复杂的动态过程,主要受土壤性质、土壤初始含水率、坡度、降雨强度等自然因素和人为因素(水土保持措施)的影响。本文以陕西淳化泥河沟流域坡耕地为例,采用坡面产流历时、土壤稳渗速率 2 个定量指标,来对坡耕地土壤入渗影响因素进行分析。

## 1 研究内容及方法

采用野外便携式人工降雨装置<sup>[10]</sup>进行降雨入渗实验,寻求坡面产流历时、土壤稳渗速率与其影响因子土壤容重、初始含水率、坡度、降雨强度、耕作管理措施等因子之间的定量关系。人工降雨装置降雨面积

1 m×1 m,雨滴降落高度 1.5 m,且可调;降雨量的观测、径流和泥沙的收集均按《水土保持技术规范》要求进行;土壤含水量和容重采用烘干法进行测定。在试验中,坡度参数的设计分别为 5°,10°,15°,20°和 25°;降雨强度参数的设计范围为 0.5~3.0 mm/min;耕作管理措施为等高耕作、人工掏挖、人工锄耕。等高耕作主要是在坡面上沿等高线,垂直于坡面走向,进行横向耕作,形成沟和垄,垄高 10 cm,垄距 33 cm;人工掏挖主要模拟夏闲地翻耕晾晒,均匀掏挖后即可;人工锄耕指用锄头以常规方式对坡耕地进行锄挖。在试验中,均以耕平的直线坡地为对照。选出其中有代表性的 48 组试验数据进行单因素和综合因素作用分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤容重

土壤容重是指单位容积土壤体(包括孔隙)的重量,它反映了土壤坚实度和孔隙度的大小。将实验得

收稿日期: 2002-06-14

资助项目: 黄河基金“坡面措施减水减沙机理研究”(2001-03-01-03)

作者简介: 吴发启(1957-),男(汉族),陕西黄陵人,博导,主要从事土壤侵蚀与水土保持方面的研究。电话(029)7082524; E-mail: wufaqi@263.net

出的不同土壤容重 ( $\theta = 20\text{ cm}$ )条件下坡面的产流历时和土壤稳渗速率点绘成图 1 从中可知,土壤容重越小,土壤入渗速率越大,产流历时越晚。当土壤容重从  $1.12\text{ g/cm}^3$  增加到  $1.58\text{ g/cm}^3$  时,稳渗速率将从  $0.54\text{ mm/min}$  减小到  $0.26\text{ mm/min}$ ,坡面产流历时将从  $16\text{ min}$  减小到  $3\text{ min}$ 。对其进行拟合分析发现,土壤容重  $\gamma$  与产流历时  $t_p$  和稳渗速率  $i_c$  分别呈指数函数关系。其拟合方程为:

$$t_p = 271.03 e^{-2.7684r} \quad (n = 6, R^2 = 0.9522)$$

$$i_c = 1.7583 e^{-1.2079r} \quad (n = 6, R^2 = 0.9787)$$

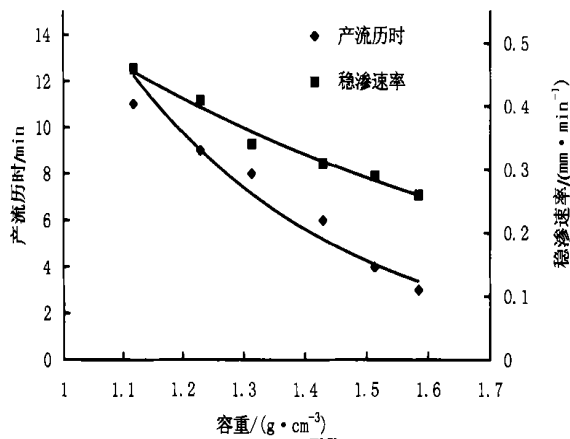


图 1 土壤容重对产流历时和稳渗速率的影响

### 2.2 土壤初始含水率

土壤水分是土壤重要组成物质之一,也是决定土壤水分入渗的一个重要因素。Bodman and Colman (1944年)的研究表明<sup>[2]</sup>,在入渗初期,随着土壤初始含水率的增加,土壤入渗速率减小;随着时间的延续,初始含水率对入渗的影响变小,最终可予忽略<sup>[2]</sup>。贾志军等人研究表明,随着初始含水率的增高,初损值降低,二者成幂函数关系;土壤平均入渗速率与土壤含水率呈负相关的线性关系;随着土壤初始含水率的增高,同一时间内非稳渗阶段的入渗速率迅速降低,趋于稳定入渗速率的时间缩短<sup>[3]</sup>。

将实验得出的不同土壤初始含水率条件下的坡面产流历时和土壤稳渗速率点绘成图 2 可以看出,随着初始含水率的增加,坡面产流历时明显提前,稳渗速率减少,当初始含水率为  $9.98\%$  时,降雨  $14\text{ min}$  坡面开始产流,土壤稳渗速率为  $0.31\text{ mm/min}$ ,当初始含水率增加到  $20.19\%$  时,降雨  $7\text{ min}$  开始产流,土壤稳渗速率为  $0.18\text{ mm/min}$ 。对其进行拟合分析可知,初始含水率  $S$  与坡面产流历时  $t_p$  和土壤稳渗速率  $i_c$  分别呈幂函数关系。拟合方程为:

$$t_p = 171.15 e^{-1.0592} \quad (n = 8, R^2 = 0.9855)$$

$$i_c = 0.7127 e^{-0.3622} \quad (n = 8, R^2 = 0.9487)$$

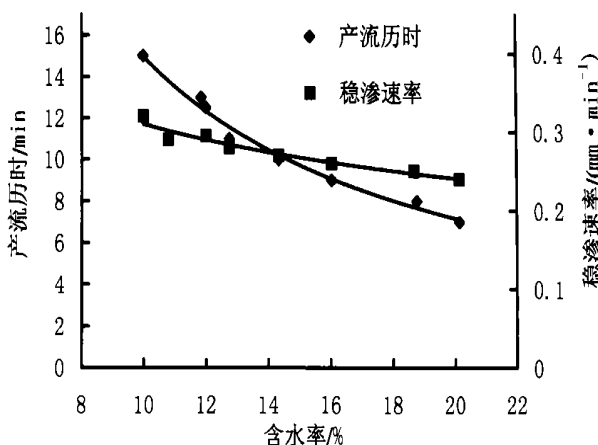


图 2 土壤初始含水率对产流历时和稳渗速率的影响

### 2.3 地面坡度

关于坡度对土壤水分入渗的影响,已有许多研究,由于各自分析方法和试验条件不同,其结果也不尽相同<sup>[4,5]</sup>。以降雨强度为  $1.5\text{ mm/min}$  对坡耕地不同坡度情况下的土壤入渗性能进行分析。

将不同坡度情况下的坡面产流历时和土壤稳渗速率点绘成图 3,从中可知,随着地面坡度的增大,产流历时提前,稳渗速率降低。当坡度分别为  $5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ$  时,其产流历时分别为  $16, 11, 9, 6, 4\text{ min}$ ; 稳渗速率分别为  $0.29, 0.24, 0.23, 0.22, 0.20\text{ mm/min}$ 。对其分别进行拟合分析发现,坡面产流历时  $t_p$  与坡度  $p$  呈指数函数关系,土壤稳渗速率  $i_c$  与坡度  $p$  呈幂函数关系。拟合方程为:

$$t_p = 23.507 e^{-0.069 \sin p} \quad (n = 5, R^2 = 0.9918)$$

$$i_c = 0.4103 \sin p^{-0.2169} \quad (n = 5, R^2 = 0.9807)$$

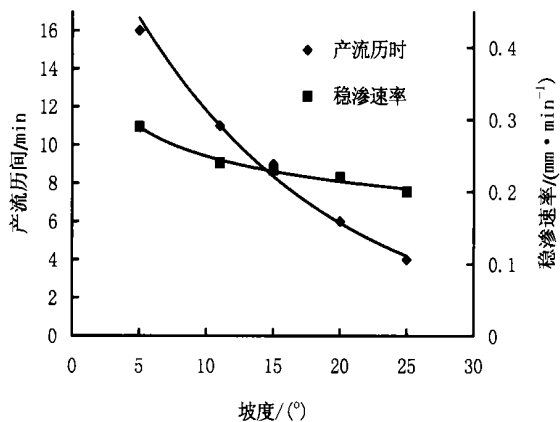


图 3 坡度对产流历时和稳渗速率的影响

造成这一现象的原因主要与坡面上水层的受压情况有关。坡面上的水分入渗主要受大气压力和水层

压力的共同作用,随着坡度的增大,水层沿着坡面方向的力将增大,而垂直坡面的压力将减小。同时由于水体沿坡面移动,使水分进入土壤的机会减少,导致入渗速率的减小,产流历时提前。

## 2.4 降雨强度

降雨强度是影响土壤入渗性能的主要因子之一,不少学者对此已作过研究,但结果也不一致。Rubin (1966年)指出,不同降雨强度下,入渗曲线形式是相同的,并且趋近于同一个极限入渗率,但是它们却不是同一条曲线沿水平方向的位移<sup>[6]</sup>。也有研究结果表明,随着降雨强度增大,土壤稳渗速率有增大的趋势<sup>[7]</sup>。

以坡度为 10° 直线坡为例,将不同降雨强度条件下坡面产流历时和稳渗速率实验结果点绘成图 4,从中可知,随着降雨强度的增加,产流历时提前;稳渗速率增加,对其进行拟合分析发现,坡面产流历时  $t_p$  与降雨强度  $i$  呈指数函数关系,土壤稳渗速率  $i_c$  与降雨强度  $i$  呈幂函数关系。拟合方程为:

$$t_p = 16.249 e^{-0.4825i} \quad (n = 11, R^2 = 0.9767)$$

$$i_c = 0.2107i^{0.1972} \quad (n = 11, R^2 = 0.9889)$$

其原因可能与水体自重力和雨滴打击地表时,对入渗水体产生的冲力有关,水体自重力增加和雨滴打击所产生的冲力对入渗速率的变化起着重要作用,它不仅可以加速入渗水流的速率,也可以使部分静止的毛管水加入到入渗水流中。故随着降雨强度的增大,土壤的稳定入渗率呈增大的趋势。

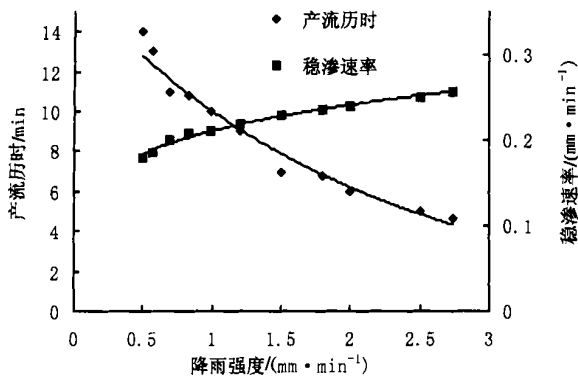


图 4 降雨强度对产流历时和稳渗速率的影响

## 2.5 耕作管理措施

水土保持耕作管理措施,既改变了土壤结构,又改变了坡面微地形,提高了土壤表面糙度,增强了坡面的拦蓄能力<sup>[9]</sup>。表 1 是以坡度为 10° 的坡耕地为例,模拟等高耕作、人工掏挖及人工锄耕几种常见耕作措施,并与同等条件下直线坡进行对比,来反映不同耕作措施对土壤入渗的影响。

表 1 不同耕作措施对土壤稳渗速率的影响

耕作类型	降雨强度 / ( $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ )	坡度 / ( $^{\circ}$ )	稳渗速率 ( $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ )	产流时间 / min
等高耕作	0.7	10	0.38	38
等高耕作	1.5	10	0.40	28
等高耕作	2.0	10	0.41	20
人工掏挖	0.7	10	0.31	18
人工掏挖	1.5	10	0.34	15
人工掏挖	2.0	10	0.35	9
人工锄耕	0.7	10	0.27	16
人工锄耕	1.5	10	0.31	10
人工锄耕	2.0	10	0.31	7
直线坡	0.7	10	0.23	11
直线坡	1.5	10	0.24	7
直线坡	2.0	10	0.26	4

从表 1 可以看出,不同耕作管理措施具有明显增加土壤入渗速率和延缓坡面产流历时的作用,在相同的降雨条件下,等高耕作土壤稳渗速率和产流历时 > 人工掏挖 > 人工锄耕 > 对照直线坡。在中小雨强情况下,这种情况更为显著。这可能与侵蚀过程中黄土“点棱接触侧斜支架式多孔结构”的坍塌<sup>[8]</sup>和雨滴击溅造成的表土密闭有关。

## 2.6 综合因素作用分析

一般情况下,土壤入渗速率的大小是多因子综合作用的结果。为了进一步说明各个因子对土壤入渗速率的影响,对影响土壤入渗的主要因子(土壤容重、土壤初始含水率、地面坡度、降雨强度、耕作管理措施)进行多成分分析。其拟合的回归方程如下:

$$i_c = 0.573T - 0.732r - 0.423\sin p - 0.364s + 0.221i$$

$$(n = 24, R = 0.847)$$

由上式可见,土壤稳渗速率  $i_c$  的变化与土壤容重  $\kappa$ 、坡度  $p$ 、土壤初始含水率  $s$  呈负相关关系;与降雨强度  $i$ 、耕作管理措施  $T$  成正相关关系。同时从其系数变化可以看出,影响土壤入渗因子效用的大小分别为土壤容重  $r$  > 耕作管理措施  $T$  > 坡度  $p$  > 土壤初始含水率  $s$  > 降雨强度  $i$ 。土壤容重的变化反映了土壤物理性质的变化,耕作管理措施的变化在一定程度上反映了土壤物理性质和表面土壤微地形的变化,因而作者认为,改良土壤物理性状和改变表面微地形是增加黄土高原坡耕地土壤入渗,减少水土流失的关键。

(1) 在影响土壤入渗诸因子中,坡面产流历时与土壤容重、坡度、降雨强度呈指数函数关系,与土壤初始含水率呈幂函数关系;土壤稳渗速率与土壤容重呈指数函数关系,与土壤初始含水率、坡度、降雨强度呈幂函数关系。

(下转第 78 页)

施,保护和开发祁连山野生花卉植物资源,使资源得到永续利用。

(1) 建立负责保护和统一协调开发利用的管理机构,制定保护和管理花卉植物资源的条例,制定以保护为基础的发展规划。

(2) 详细调查开发地区野生花卉植物的种类、分布、蕴藏量等,建立技术档案,为制定今后开发的初步方案提供科学的依据。

(3) 进行野生花卉地被植物的引种驯化研究,挖掘当地花卉地被植物的潜力。野生变家植,是扩大资源来源和保护资源的重要措施。植物资源由于受本身生物学特性的限制,数量和产量都有一定的局限。在适宜的土地上栽培繁育,不仅能增加其资源数量,还能使其充分利用优良的生境条件,增加生长量。对开发利用后经济效益好,野生资源分布和贮量较少且易遭破坏的种类进行引种驯化研究,尽早培育出河西地区甚至是我国特有的适应性强,观赏性好的新品种。

(4) 利用林区丰富野生花卉植物资源进行杂交育种,以培养出观赏价值高、适应性强、成本低、市场竞争能力强的新品种,占领林区鲜花、切花市场,以满足人们的需求。

(5) 成立野生花卉植物资源开发公司,负责花卉植物资源的试验栽培、引种驯化、品种筛选、技术推广、生产销售、信息收集及技术引进工作,使林区花卉资源开发利用成为一项新兴产业。

#### 4.2 保持生态平衡,防止水土流失

野生花卉资源的开发和利用,包括野生花卉植物的人工栽培和作为种质资源的利用 2 个方面。在引种

驯化过程中,应注意以下事项。

(1) 必须注意保持生态平衡,防止水土流失。以人工栽培的形式引种时,只能少量间断移植,切不可成片大量滥采乱挖。

(2) 保证移植引种的野生花卉植株种类和数量适当,注重引种后的栽培技术,特别是繁殖技术和研究工作,通过人工繁殖来扩大种群数量,从而避免野生种群灭绝。

(3) 引种时,要根据所引野生花卉植物的生态环境,选择适宜的移栽环境和条件。

(4) 选择生长健壮,无病虫害,应用品质明显的植株。

(5) 引种繁殖方式要视所引野生花卉植物的生殖特性和引种量而定,可采用种繁、分株、分根、移栽、扦插和嫁接等方法,建议使用种子繁殖。

(6) 野生花卉植物适应性强,可作为种质资源培育新的花卉品种。

#### [参 考 文 献]

- [1] 刘金荣,谢晓蓉.河西走廊生态环境特征与可持续农业发展对策[J].农业发展与未来,2001,18(3): 38-39.
- [2] 阎树文.试论祁连山自然保护区建设与开发的特点和重要性[A].见:甘肃省祁连山国家级自然保护区建设发展研讨会专集[C].1989.34-35.
- [3] 牛得水.农业生物学研究与农业持续发展[M].北京:科学出版社,1997.309-310.
- [4] 李明森.藏北高原草地资源合理利用[J].自然资源学报,2000,15(4): 335-339.
- [5] 贾志军,王贵平,李俊义,等.土壤含水率对坡耕地产流影响的研究[J].山西水土保持科技,1990(4): 25-27.
- [6] 陈浩.坡度影响地面产流、产沙过程的试验研究[M].黄河泥沙来源及侵蚀产沙机理文集.北京:气象出版社,1988.17-19.
- [7] 蒋定生,黄国俊.地面坡度对降雨入渗影响的模拟试验[J].水土保持通报,1984(4),10-13.
- [8] Rubin J. Theory of rainfall uptake by soil initially drier than their field capacity and its applications[J]. Water Resour. Res., 1966, 2(4): 739-749.
- [9] 王玉宽,王占礼,周佩华.黄土高原坡地降雨产流过程的实验分析[J].水土保持学报,1991,5(2): 25-31.
- [10] 朱显谟,田积莹.强化黄土高原土壤渗透性及抗冲性的研究[J].水土保持学报,1993,7(3): 1-7.
- [11] 吴发启,赵晓光,刘余正.缓坡耕地侵蚀环境及动力机制分析[M].西安:陕西科学技术出版社,2001.57-71.
- [12] 袁建平.坡耕地降雨入渗试验装置的研究[J].水土保持通报,1999,19(1): 24-27.

(上接第 18 页)

(2) 不同水土保持耕作措施强化降水入渗效用不同,等高耕作作用最为显著,其次是人工掏挖和人工锄耕。在相同的降雨条件下,等高耕作土壤稳渗速率和产流历时 > 人工掏挖 > 人工锄耕 > 对照直线坡。在中小雨强情况下,这种效果更为显著。

(3) 对影响土壤入渗的多因子综合分析得出,土壤物理性质和耕作管理措施对土壤入渗影响效用最大,因而改良土壤物理性质和改变表面微地形是增加黄土高原坡耕地土壤入渗,减少水土流失的关键。

#### [参 考 文 献]

- [1] 中国科学院黄土高原综合科学考察队.中国黄土高原地区坡度分级数据集[M].北京:海洋出版社,1990.
- [2] Bodman G B, Colman E A. Moisture and energy condition during down-ward entry of water into soil[J]. Soil Sci. Soc. A. M. J., 1944, 8(2): 166-182.