

耕作对土壤入渗性能的影响

杨永辉^{1,2}, 赵世伟^{1,*}, 雷廷武³, 吴金水⁴, 刘 汗³, 赵 军¹, 赵勇钢¹

(1. 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;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039; 3. 中国农业大学 水利与土木工程学院 现代精细农业
系统综合研究重点实验室, 北京 100083; 4. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 湖南 长沙 410125)

摘要:耕作影响降雨入渗、径流、土壤侵蚀过程。研究采用新型的坡地降雨条件下土壤入渗能力的径流-入渗-产流测量方法和仪器, 野外观测宁夏南部山区坡耕地与撂荒地土壤入渗性能, 揭示耕作对土壤入渗性能影响的规律。在坡度为 20°、土壤表层含水量 11.3% 的坡地进行测量。采用的降雨强度为: 20, 40, 56 mm·h⁻¹。结果表明, 新型测量方法和仪器可以很好地测量坡面土壤入渗性能的全过程, 并且具有省水、省工、操作方便的特点, 且测量精度高。对比测量结果表明, 坡耕地的初期土壤入渗性能在小雨强条件下略高于撂荒地的入渗性能, 而在大雨强条件下则一直低于撂荒地的入渗性能。随雨强的增大坡耕地的入渗性能急剧减小, 而撂荒地的入渗性能基本不受雨强变化的影响。坡耕地土壤的入渗性能(土壤结构)对降雨强度极为敏感, 而撂荒地具有稳定的土壤结构和入渗性能。在 3 种雨强下, 坡耕地的产流时间均比撂荒地提前。与撂荒地相比, 各种雨强条件下坡耕地的稳定入渗率都较撂荒地明显降低。

关键词:耕作; 土壤入渗性能

文章编号: 1000-0933(2006)05-1624-07 中图分类号: Q143, S154.1, S157 文献标识码: A

Tillage on soil infiltration under simulated rainfall conditionsYANG Yong-Hui^{1,2}, ZHAO Shi-Wei^{1,*}, LEI Ting-Wu³, WU Jin-Shui⁴, LIU Han³, ZHAO Jun¹, ZHAO Yong-Gang¹ (1.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Agriculture on the loess plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China; 3. The Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, College of Hydraulic and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 4. The Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha, Hunan 410125, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(5): 1624 ~ 1630.

Abstract: Tillage affects the processes of infiltration, runoff and soil erosion. A new method and apparatus measured soil infiltration on hill slope under simulated rainfall conditions were used to measure soil infiltration in slope and fallow land at hilly region of southern Ningxia, and to analyze the effect of tillage on soil infiltration. The experimental site was located on a slope of 20° with water content of 11.3% in soil surface layer. Three rainfall intensities were 20, 40, 56 mm h⁻¹. The results indicated that the new method and apparatus measured soil infiltration could be well measured the processes of soil infiltration on slope, with many good qualities such as water-saving, laborsaving, easy operation, and high measuring definition. Compared with fallow land, the initial infiltration rate on tillage slope was higher. However, with high rainfall intensities, the result was reverse. With the increasing of rainfall intensity, the soil infiltration on tillage slope reduced sharply, while fallow land remained unchangeable. Contrast to fallow land, the initial time of producing runoff on tillage slope was shorter, but the steady infiltration rate on slope

基金项目:中国科学院知识创新工程重要方向资助项目(KZCX3-SW-412); 国家“863”资助项目(2002AA6Z3301); 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金资助项目(10501-152)

收稿日期:2005-12-02; **修订日期:**2006-03-10**作者简介:**杨永辉(1978~), 男, 陕西西安人, 硕士生, 主要从事土壤环境效应研究. E-mail: yangyongh@mails.gscas.ac.cn

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: swzhao@ms.iswc.ac.cn

Foundation Item: The project was supported by the Item of Scientific Innovation Engineering of Chinese Academy of Sciences (No. KZCX3-SW-412); “863” Item of China (No. 2002AA6Z3301); the Fund of State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Agriculture on the Loess Plateau

Received date: 2005-12-02; **Accepted date:** 2006-03-10**Biography:** YANG Yong-Hui, Master, mainly engaged in soil environment. E-mail: yangyongh@mails.gscas.ac.cn

tillage is lower.

Key words: tillage; soil infiltration capability

坡耕地土壤的降雨入渗性能对于水文过程^[1]、作物水分利用、灌溉管理、土壤侵蚀^[2]等方面的研究和实践非常重要。

土壤的入渗能力与土壤质地、结构、地面坡度、土壤剖面含水量有关,但总是随入渗时间的推移而逐渐降低^[3,4],最终趋于一个常数——稳定入渗率。

降雨入渗率是反映土壤入渗性能的重要指标,实际降雨入渗决定于土壤表面所承接的水量,土壤表面特征及土壤的导水性能。研究表明^[5-7]:降雨和径流的双重作用引起土壤侵蚀,尤其在耕作条件下,土壤结构遭到破坏^[8],其侵蚀土壤对土壤孔隙的填充作用和水流泥沙在地表的沉积作用而形成地表封闭或结皮,导致土壤入渗率降低和地表径流增加,造成水土流失。

坡耕地是黄土高原半干旱地区水土流失的重要来源。在坡耕地占有相当比例的宁南黄土丘陵区,土壤侵蚀及土地退化严重,将耕地进行一定时段的撂荒,可以改善土壤结构,提高土壤入渗性能,减缓土壤侵蚀及水土流失。国内外关于坡耕地和撂荒地土壤入渗性能有一定的研究,但都未能将降雨条件下,决定坡面径流和发生侵蚀的重要原因的土壤前期入渗性能实际过程测定出来^[9]。因此,本文采用新型坡地降雨条件下土壤入渗能力测量方法和仪器^[10]研究坡地土壤降雨入渗性能的变化,尤其是降雨前期的土壤降雨入渗性能的真实变化情况,不仅可以为土壤侵蚀与水土流失过程的研究与防治起到参考和借鉴的作用,也可为水土保持工程措施的修建与配置等提供可靠的数据依据。

本研究的主要目的是:(1)检验新型坡地降雨条件下土壤入渗能力的径流-入渗-产流测量方法和仪器的野外实用性及其优缺点;(2)实际坡耕地和撂荒地土壤入渗性能随时间变化的过程和规律;(3)比较坡耕地和撂荒地土壤入渗性能对不同雨强反应的敏感性,说明耕作对入渗和水土流失的影响机理。

1 研究区概况

研究区位于宁夏彭阳县中北部半干旱区的王洼乡,包括姚岔和姬阳洼两个小流域,东经 106°32'45" ~ 106°33'15",北纬 36°04'30" ~ 36°09'36",总面积 18.5km²。属中温带半干旱梁状丘陵区,年平均温度 6.8℃,年平均降水量为 413.94mm。

2 入渗产流模型及试验方法

2.1 入渗产流模型

入渗能力是土壤表面充分供水的条件下土壤的实际入渗率,初始时土壤的入渗能力很大,要测得此时的土壤入渗能力,必需供给很大的水量。而随着降雨的延续,土壤的入渗能力降低。根据雷廷武提出的产-渗-流法降雨入渗模型^[10]进行降雨入渗研究。

(1)径流推进阶段的入渗率计算模型

$$i(t) = P \left(\frac{x_1 W}{A} + 1 \right) \quad (1)$$

式中, $i(t)$ 为入渗速率(mm/h); W 为入渗面宽度(m); P 为降雨强度(mm/h); x_1 为产流面沿坡面的长度(m); $A(t)$ 为 t 时刻水流在坡面上推进的面积(m²)。

(2)坡面上有出流径流时入渗率的计算模型

$$i(t) = P \left(\frac{x_1 W}{A} + 1 \right) - \frac{q}{A \cos \alpha} \quad (2)$$

式中, $i(t)$ 为入渗速率(mm/h); W 为入渗面宽度(m); P 为降雨强度(mm/h); x_1 为产流面沿坡面的长度(m); $A(t)$ 为 t 时刻水流在坡面上推进的面积(m²); q 为随时间变化的径流流量(L/h); α 为坡面的坡度(°或弧度)。

2.2 材料与方

2.2.1 实验材料 实验地设在固原彭阳王洼水保站的相连接的两个地块(土壤为典型的黄绵土),坡耕地:土豆与谷子连作;撂荒地:撂荒之前与坡耕地种植作物及种植方式相同,撂荒 3a 后生有 1 年生杂草。研究土层为 0~20cm,两块样地的质地基本相同,其颗粒组成见表 1。

表 1 实验土壤颗粒组成

Table 1 Particle size distribution of the experimental soil

粒径 Size(mm)	1~0.25	0.25~0.05	0.05~0.01	0.01~0.005	0.005~0.001	<0.001	<0.01
所占比例 Percentage	1.253	27.273	56.705	8.336	6.376	0.000	14.712

2.2.2 实验仪器 土壤颗粒组成分析采用 MS2000 激光颗粒分析仪测定。

野外人工模拟降雨试验中,降雨量比降雨的能量更重要,故用小型针头下滴式降雨模拟器。降雨器长 2m,宽 0.55m,雨滴直径在 1~3mm,雨强 20~56mm/h。相应地,降雨器下的坡面分为投影长度为 2m、宽度为 0.15m 的 3 个顺坡条带,代表 3 个重复,产流面和入渗面长度之和为 2m,产流面长度为 1m(见图 1)处于上部,下部为入渗面,长度 1m。

2.2.3 实验方法及观测项目 根据以上降雨器及与之相对应的小区设置,具体实验操作步骤如下:

(1)实验前,将 0.5m³ 的水装进事先准备好的大塑料桶里待降雨时用(0.5m³ 水可满足 56mm/h 的降雨强度,剩下的水能够用于 40mm/h 及 20mm/h 的降雨强度)。

(2)选择比较平整的坡面建立试验小区(利于实验数据的观测及新型测定入渗方法的应用),坡度均为 20°,两种下垫面(坡耕地和撂荒地)。坡面的处理是实验成功的关键也是应用本法测定土壤入渗的必备条件,将选择好的相对平整的坡面上的作物残茬或杂草用剪刀剪掉,仅露出土壤即可,不能破坏土壤的原状性,这样做的目的为:①可以突出土壤本身性质对入渗、产流的影响。②利于径流在坡面上推进时数据的读取。实验为连续两天完成,确保土壤的前期含水量不产生明显差异,使实验条件一致(土壤的前期含水量为 11.3%),减少影响入渗性能的因素。

根据上述实验方法及目的,径流推进过程和累积径流出流量(或流量)的变化是计算入渗率的基础数据。

(1)径流在坡面上推进过程 在土槽的边缘标有刻度标尺。在降雨过程中,每一分钟读一次雨水径流在坡面的推进距离,将所得数据带入式(1),即可计算出该时刻的瞬时入渗速率。

(2)径流出流量随时间的变化过程 在入渗坡面的下方,用有刻度的采样瓶收集径流。在有径流出流的情况下,降雨进行一段时间后,坡面径流推进到达入渗面下端后,产生径流出流。随着土壤入渗能力的降低,出流流量随时间的推移不断增加,当间隔相同时间内径流量相同时,实验停止。试验过程中,记录径流流量随时间的变化过程,从而计算出产流每一刻土壤的入渗速率。

3 结果与分析

3.1 坡耕地翻耕后不同雨强的雨水入渗过程

坡耕地在不同雨强下的水分入渗过程见图 2,可以看出图 2 很好地反映了降雨过程中水分在土壤中的入渗速率变化的全过程,其中 y_1 、 y_2 、 y_3 分别为雨强 20mm/h、40mm/h、56mm/h 的拟合方程,该曲线与土壤水分特

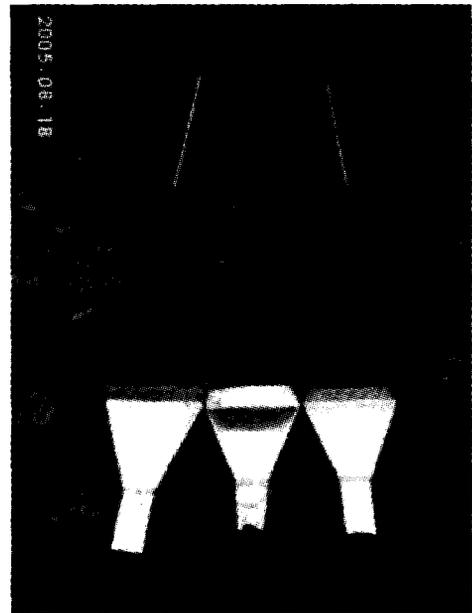


图 1 坡地降雨小区示意图

Fig.1 Schematic system of spot under slope soil surface

征曲线相似,其相关系数分别为 0.9653、0.9385、0.8535,达显著水平。图 2 中曲线的变化趋势的缓急顺序为 56mm/h > 40mm/h > 20mm/h,表明降雨径流在坡面的推进距离随雨强的增大而增大,最终达到恒定的入渗速率(土壤稳渗率),但随雨强的增大其稳渗速率大小顺序为 20mm/h > 40mm/h > 56mm/h,说明坡耕地经翻耕之后,土壤结构遭到破坏,且小雨强对于土壤的打击破坏作用小于大雨强,即雨强越大,雨滴对地表土壤的打击破坏越大,降雨产生的径流携带侵蚀的土壤颗粒会堵塞地表土壤孔隙形成地表封闭或结皮,从而使土壤的降雨入渗速率有所降低^[5,6]。另一方面,较大的降雨强度使得地表土壤颗粒发生崩解,破坏地表土壤结构形成更为细小的颗粒堵塞地表土壤孔隙,减少了入渗,增加地表径流和土壤侵蚀^[11,12]。因此,与大雨强相比小雨强对土壤的打击破坏作用较弱,其土壤稳定入渗率大于大雨强的^[13]。

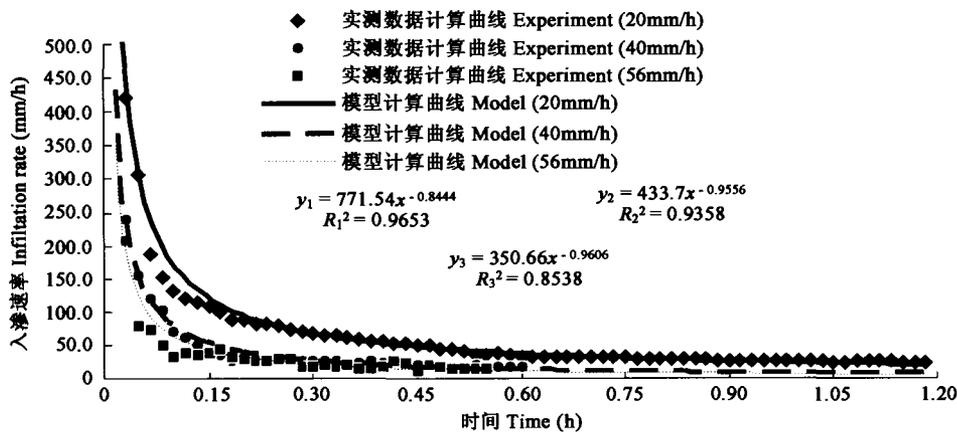


图 2 不同雨强下坡耕地翻耕后土壤入渗性能比较

Fig. 2 Infiltration capability of slope tillage under different rainfall intensity

3.2 撂荒地不同雨强的雨水入渗过程

撂荒地的降雨入渗过程见图 3,可以看出,无论雨强大小,其土壤稳定入渗速率最终为

32mm/h 左右。表明,撂荒地土壤结构较好,在整个降雨入渗过程中,雨强对其土壤的破坏强度基本一样。在降雨初期,入渗速率的变化快慢为 56mm/h > 40mm/h > 20mm/h。由于 20mm/h 的雨强雨量较少,达到稳渗率的时间比 40mm/h 及 56mm/h 要长(2 倍多),说明 20mm/h 雨强在宁南山区构成的土壤侵蚀威胁远远小于 40mm/h 和 56mm/h 雨强。

3.3 撂荒地与坡耕地降雨入渗性能比较

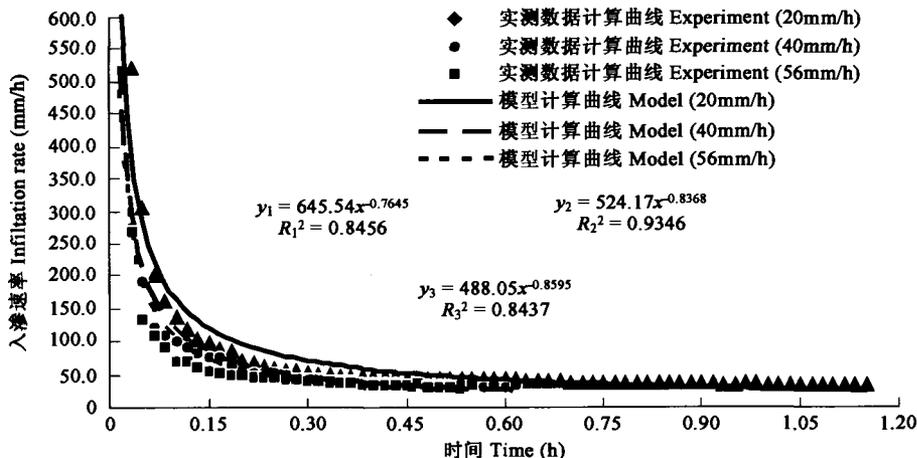


图 3 不同雨强下撂荒地地土壤入渗性能比较

Fig. 3 Infiltration capability of fallow under different rainfall intensity

从表2中可以看出,随着雨强的增大,坡耕地与撂荒地的产流时间、入渗率稳定时间及次降雨过程中的产流总量都增大,其中撂荒地的产流时间虽比坡耕地长,但其产流量还是远小于坡耕地,平均产流量是坡耕地的71%。在3种雨强下,坡耕地的产流时间均比撂荒地提前,而达到稳定入渗率的时间撂荒地比坡耕地长。

表2 坡耕地与撂荒地不同雨强的产流时间等比较

Table 2 Different time of run off between slope tillage and fallow under different rainfall intension

项目 Item	20mm/h		40mm/h		56mm/h	
	坡耕地 Slope tillage	撂荒地 fallow	坡耕地 Slope tillage	撂荒地 fallow	坡耕地 Slope tillage	撂荒地 fallow
产流时间 Runoff time (min)	32.4	41.0	6.4	9.4	4.0	8.2
达到稳渗率的时间 Steady infiltration time (min)	54.0	64.0	29.0	31.0	17.0	20.5
开始产流到达稳渗率时的总产流量 Total runoff amount (ml)	1052.0	315.0	3679.0	2660.0	6138.0	4745.0

从图4(为实际测得折线图)中可看出,坡耕地的初期土壤入渗性能在小雨强条件下略高于撂荒地的入渗性能,而在大雨强条件下则一直低于撂荒地的入渗性能。随雨强的增大,土壤结构的破坏程度增强^[14],坡耕地的入渗性能急剧减小,且而撂荒地的入渗性能基本不受雨强变化的影响。坡耕地土壤的入渗性能对降雨强度极为敏感,而撂荒地具有稳定的土壤结构和入渗性能。与撂荒地相比,各种雨强条件下坡耕地的稳定入渗率都较撂荒地明显降低,最低值仅为撂荒地的60%。表明耕作破坏了土壤结构,易使表层土壤产生结皮,降低土壤入渗速率,导致径流量增大,土壤侵蚀加剧。

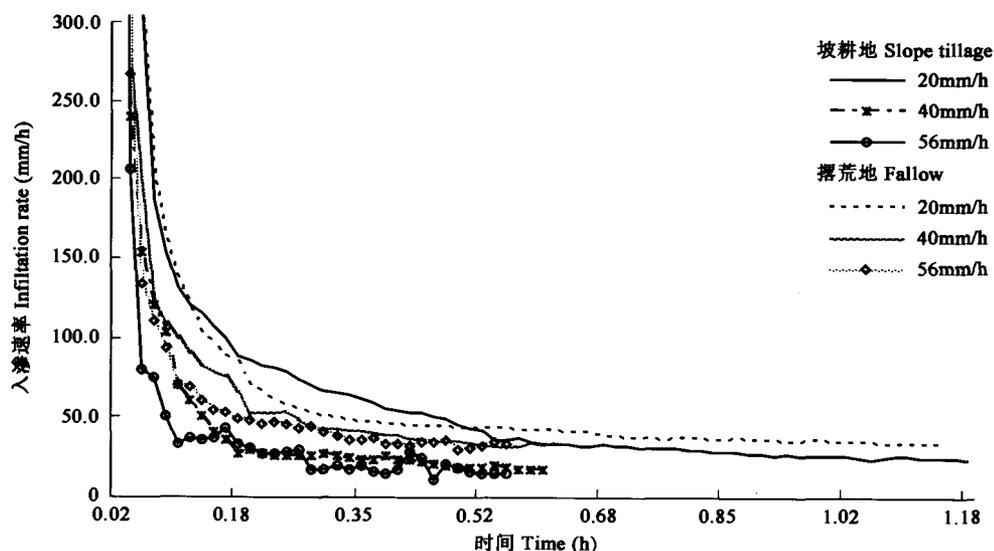


图4 坡耕地与撂荒地不同雨强下入渗性能比较

Fig. 4 Infiltration of slope tillage and fallow under different rainfall intension

以上表明,耕地与土地撂荒之间对于土壤的入渗性能(就土壤本身)的区别相当明显,坡耕地经过一定时间的撂荒之后,土地得到了一定恢复,土壤结构在不受人力的作用下得到了一定的改善,入渗性能提高,土壤的抗侵蚀能力增强^[15]。

3.4 测量方法精度分析

按照潘英华^[16]的方法分析了测量精度。具体做法如下:首先,根据坡面上各点计算得到的人渗率随时间的变化过程,用数值积分方法得到了坡面上各点的累积入渗量。而后,在坡面上对各点的累积入渗量进行积分,得到坡面上总入渗量的计算值。将径流量和计算入渗量相加得到计算降雨量与对应时间内实际降雨量比较,计算得到了计算降雨量与实际降雨量之间的误差。计算公式为:

$$\delta = \left| \frac{Q_0 - Q}{Q_0} \right| \times 100\% \quad (3)$$

式中, δ 为计算入渗量和实际降雨量的相对误差, %; Q_0 为实际降雨量, m^3 ; Q 为计算降雨量, m^3 。计算结果见表 3。

从表 3 的结果可以看出, 各次降雨的精确度都在误差范围内, 且小雨强比大雨强的精确度高。说明新型的坡地降雨条件下土壤入渗能力的径流-入渗-产流测量方法应用于野外实验的真实可靠性。

表 3 测量方法精度分析

Table 3 The estimation errors of the measurement

	雨强 Rainfall intension (mm/h)	实际降雨量 Actual rainfall amount(L)	径流量 Runoff amount (L)	计算入渗量 Counting infiltration amount(L)	计算降雨量 Counting rainfall amount (L)	误差 Error (%)
坡耕地 Slope tillage	20	3.96	1.052	2.85	3.90	1.44
	40	5.91	3.679	2.05	5.73	3.16
	56	8.40	6.131	1.97	8.10	3.53
撂荒地 fallow	20	3.00	0.32	2.66	2.97	1.00
	40	6.00	3.141	2.66	5.80	3.40
	56	8.40	4.375	3.75	8.13	3.27

4 结论

本文采用的降雨水分入渗模型和配套的降雨设备, 对降雨过程中的水分入渗及径流情况进行野外实地测定与模拟, 对开始降雨积水及达到稳定入渗速率的土壤水分入渗的全过程进行了测定。从降雨入渗率所表现出来的趋势来看, 积水前, 在降雨初期的很短时间内, 降雨入渗率发生急剧变化, 随时间延长, 这种变化的趋势逐渐变缓; 积水后, 降雨入渗率变化更为缓慢, 整个过程已接近一条曲线。因此, 如果依照传统的方法, 在实验过程中采用径流收集法来测定降雨入渗性能, 由于在数据处理过程中得到的只是降雨入渗的平均值, 就有可能错过了降雨入渗曲线前端数据急剧变化的阶段, 开始时的瞬间入渗速率值就无法得到。证明径流-入渗-产流方法测定的土壤入渗性能比其他测定方法具有优越性。考虑到野外实验的可操作性, 该法的另一个优越性为: 省水, 0.5 方水就可以满足 56mm/h、40mm/h、20mm/h 雨强的降雨, 最多只需要 4 个人就可以完成整个实验, 受风的影响很小。与其他野外模拟降雨实验相比可实施性很强。

在相同土壤前期含水量条件下(11.3%), 坡耕地与撂荒地相比, 坡耕地的土壤入渗性能小于撂荒地。坡耕地的初期土壤入渗性能在小雨强条件下略高于撂荒地的人渗性能, 而在大雨强条件下则一直低于撂荒地的人渗性能。随雨强的增大坡耕地的人渗性能急剧减小, 而撂荒地的人渗性能基本不受雨强变化的影响。坡耕地土壤的人渗性能对降雨强度极为敏感, 而撂荒地具有稳定的土壤结构和入渗性能。与撂荒地相比, 各种雨强条件下坡耕地的稳定入渗率都较撂荒地明显降低。表明耕作破坏了土壤结构, 易使表层土壤产生结皮, 降低土壤入渗速率, 导致径流量增大, 土壤侵蚀加剧。而坡耕地经过撂荒之后, 土地得到了一定恢复, 土壤结构有了一定的改善, 比坡耕地有利于降雨水分的人渗, 降低径流流量, 减缓土壤侵蚀。在广阔的宁南山区应该将耕地进行撂荒, 将撂荒地与耕地进行合理调配, 撂荒与种植交叉进行, 这样即满足了人的粮食需求, 又可以在一定范围内, 减缓耕作导致的水土流失的程度。

References:

- [1] Singh V P. Mode of watershed hydrologic system. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 2000.
- [2] Jiang D S. Modl of soil erosion and fathering about Loess Plateau. Beijing: China WaterPower Press, 1997.
- [3] Hillel D. Environmental Soil Physics, New York: Academic Press, 1998.
- [4] Scott H Don. Soil Physics. Ames: Iowa State University Press, 2000.
- [5] Helalia A M, Letey J, Graham, R C. Crust formation and clay migration effects on infiltration rate. Soil Sci Soc Am J, 1988, 52:251 ~ 255.
- [6] Morin J, Van Winkel J. The effect of raindrop impact and sheet erosion on infiltration rate and crust formation. Soil Sci Am J, 1996, 60:1223 ~ 1227.

- [7] Levy G J, Levin J, Shainberg I. Seal formation and interrill soil erosion. *Soil Sci Soc Am J*, 1994, 58:203 ~ 209.
- [8] Chen Q B, Qi S, Su L D. Land degradation of slope fields in hilly and gully areas of Loess Plateau. *Bulletin of Soil and Water Conservation*. 2004,24(1): 12 ~ 15.
- [9] Wu F Q, Zhao X N, Cui W F. Comparative study on determining methods of soil Infiltration of slope farmland. *Bulletin of Soil and Water Conservation*. 2003,23(3):39 ~ 41.
- [10] Lei T W, Liu H, Pan Y H, *et al.* Run off-on-out method and models for soil infiltrability on hill-slope under rainfall conditions. *Science in China Series D: Earth Sciences*. 2005,35(12):1180 ~ 1186.
- [11] Mamedov A I, Levy G J, Shainberg I, *et al.* Wetting rate and soil texture effect on infiltration rate and runoff. *Aust J Soil Res*, 2001, 36: 1293 ~ 1305.
- [12] Levy G J, Levin I, Shainberg. Prewetting rate and aging effect on seal formation and interrill soil erosion. *Soil Sci*, 1997, 162: 131 ~ 139.
- [13] Abu-awwad A M. Water infiltration and redistribution within soils affected by a surface crust. *Journal of Arid Environments*, 1997, 37:231 ~ 242.
- [14] Michael J, Singer, Yves Le Bissonnais. Importance of surface sealing in the erosion of some soils from a Mediterranean climate. *Geomorphology*, 1998.79 ~ 85.
- [15] Wang X Y, Gao H W, Du B, *et al.* Conservation tillage effect on runoff and infiltration under simulated rainfall. *Bulletin of soil and water conservation*. 2000,20(3): 23 ~ 25, 62.
- [16] Pan Y H. Study on the impacts of physiochemical regulation on soil water movement. Dissertation for Doctoral Degree, Submitted to Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry. Yangling, Shaanxi, China, 2004.

参考文献:

- [1] 辛格著. 赵卫民,等译. 水文系统流域模拟. 郑州:黄河水利出版社,2000.
- [2] 蒋定生. 黄土高原水土流失与治理模式. 北京:中国水利水电出版社,1997.
- [8] 陈奇伯,齐实,孙立达,等. 黄土丘陵区坡耕地土地退化研究. *水土保持通报*,2004,24(1):12 ~ 15.
- [9] 吴发启,赵西宁,崔卫芳. 坡耕地土壤水分入渗测试方法对比研究. *水土保持通报*,2003,23(3):39 ~ 41.
- [10] 雷廷武,刘汗,潘英华,等. 坡地土壤降雨入渗性能的径流-入渗-产流测量方法与模拟. *中国科学 D辑地球科学*,2005,35(12):1180 ~ 1186.
- [15] 王晓燕,高焕文,杜兵,等. 用人工模拟降雨研究保护性耕作下的地表径流与水分入渗. *水土保持通报*,2000,20(3):23 ~ 25,62.
- [16] 潘英华. 物理化学调控对土壤水分运动特性的影响研究[博士学位论文]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2004年6月.