

线源入流方法测量土壤入渗性能的田间应用

李鑫^{1,2} 孙淑云³ 武阳^{1,2} 毛丽丽^{1,2} 江培福³ 袁建平³ 张孝⁴ 雷廷武^{1,2,5}

(1. 中国农业大学 水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 现代精细农业系统集成研究 教育部重点实验室, 北京 100083;

3. 水利部综合事业局, 北京 100053; 4. 内蒙古四子王旗水务局, 内蒙古 四子王旗 011800;

5. 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, 陕西 杨凌 712100)

摘要 为分析坡度和土壤环境对土壤入渗性能的影响, 采用线源入流测量法对田间土壤的入渗性能进行试验研究。结果表明: 土壤含水率、坡度一定时, 影响入渗性能的主要因素为土壤容重, 容重较小的土壤的稳定入渗率较大; 土壤容重和含水率一定时, 主要影响因素为坡度, 坡度越大 (< 90°), 稳定入渗率越小。理论入渗量与总入渗量之间的最大相对误差为 8.39%, 表明试验具有较高精度; 水流推进面积、土壤入渗性能与时间均具有较好的幂指数相关关系。此测量方法简单易行、省时省水, 测量装置成本低, 适合于野外田间测量。

关键词 线源入流; 入渗性能; 田间; 模型; 深松

中图分类号 S 152.7

文章编号 1007-4333(2007)04-0080-05

文献标识码 A

Field application of the linear run-on method for soil infiltrability measurement

Li Xin^{1,2}, Sun Shuyun³, Wu Yang^{1,2}, Mao Lili^{1,2}, Jiang Peifu³, Yuan Jianping³, Zhang Xiao⁴, Lei Tingwu^{1,2,5}

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. Modern Precision Agriculture System Integration Research, Key Laboratory of Ministry of Education, Beijing 100083, China;

3. Bureau of Comprehensive Development, Ministry of Water Resources, Beijing 100053, China;

4. Bureau of Water Conservancy, Siziwang County, Inner Mongolia 011800, China;

5. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry Land Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Yangling 712100, China)

Abstract The soil infiltrability is influenced by slopes and soil circumstances in field and the Linear Run-on Method was used to measure soil infiltrability in the field. The measured results indicated that the most influential factor on soil infiltrability was bulk density of soils when water content and slope of soil were constant. The lower the bulk density, the higher the steady soil infiltration rate. When the bulk density and soil water content of soil were constant, higher slope (< 90°) had a lower steady soil infiltration rate. The biggest relative estimation error is 8.39% and the advance of the wetted areas and the infiltrability, as functions of time, fitted exponential expressions. The field applications of the method demonstrated low cost of the equipment, easy and convenient operational characteristics and less water requirement in the field.

Key words linear run-on; infiltrability; field; model; subsoiling

目前, 国内外测定土壤入渗率的方法较多, 常用的有模拟降雨法、双环法、圆盘入渗仪法、稳定通量法及渗透桶法等^[1]。采用喷灌设施进行人工模拟降雨测量入渗产流的装置已有报道^[2-3], 但这类

似的装置受降雨强度的限制, 不适合早期土壤水入渗率很高时进行测量, 且土壤入渗受供水强度限制^[4]。袁建平^[5]研制了一套便于运输的滴头式野外坡地土壤入渗产流的试验装置, 但该装置用水量

收稿日期: 2007-01-24

基金项目: 水利部行政事业性经费资助项目 (1262160600118)

作者简介: 李鑫, 硕士研究生; 雷廷武, 教授, 博士生导师, 通讯作者, 主要从事农业水土研究, E-mail: ddragon @public3. bta. net. cn

较大,不适合在远离水源的野外进行测量。双环入渗仪采用马氏瓶供水,可以满足入渗能力所需的水量,但采用双环入渗仪测量时要求地表基本平整,测定坡面入渗率时需将被测坡面平整^[6]。因此对于野外坡面土壤入渗率的测量,双环入渗仪破坏了坡面的连续性,不能保证土壤的原始性能,使测量的入渗性能精度下降。圆盘渗透仪^[7-9]是一种常见的田间测量土壤导水参数的仪器,使用圆盘渗透仪测量土壤导水参数时相对具有不破坏土样、操作简单和计算结果精确等优点^[10],但圆盘渗透仪价格较贵,测量面积较小,代表性差且存在侧渗进而影响测量精度。2005 年雷廷武等^[11]提出了坡面降雨条件下土壤入渗能力的径流/入渗测量方法,该测量方法很好的描述了土壤降雨入渗性能的变化过程,研究结果表明^[11],应用产流积水法对坡面降雨/径流入渗性能进行测量具有很高的精度,但采用模拟人工降雨的方法需要实现对降雨强度的控制,在野外田间试验中较难实现。2005 年雷廷武等^[12]提出测量土壤入渗性能的线源入流室内研究方法、相应的计算模型及测量系统。该系统采用马氏瓶供水,利用地面径流布水器使水源沿坡面顶部近似线性分布,具体计算模型^[13]如下。

总入渗量

$$Q = \int_0^{t_1} \int_0^A i(t, A) dA dt \quad (1)$$

其中: t 为入渗时间; t_1 为入渗的总时间; A 为入渗总时间内的湿润锋面积; i 为入渗率。单位时间流量

$$q = \int_0^A i(A, t) dA \quad (2)$$

$$\begin{cases} q_1 & i_1 A_1 \\ q_2 & i_2 A_1 + i_1 A_2 \\ q_3 & i_3 A_1 + i_2 A_2 + i_1 A_3 \\ \dots & \dots \\ q_n & i_n A_1 + i_{n-1} A_2 + \dots + i_1 A_n \end{cases} \quad (3)$$

其中: A_1, A_2, \dots, A_n 为在时段 t_1, t_2, \dots, t_n 增加的湿润的面积; i_1, i_2, \dots, i_n 为不同时刻对应的土壤入渗率

$$i_n = \frac{q_n - \sum_{j=1}^{n-1} i_j A_{n-j+1}}{A_1} \quad n = 1, 2, \dots \quad (4)$$

该试验方法克服了降雨器对入渗初期土壤入渗率很高时不能进行测量,以及双环入渗仪不适合测

量坡地土壤入渗率的问题^[12]。另外,该方法可在不破坏坡面的情况下测量,保持了原始土壤的特性。利用该方法测量土壤入渗性能时,所需要的水量少,克服了试验地点远离水源,取水困难的问题。

本研究拟利用土壤入渗性能的线源入流测量方法,研究不同土壤容重、坡度对地表入渗性能的影响,旨在验证该测量方法在野外田间试验的操作可行性。

1 试验装置及测量方法

试验地点为内蒙古四子王旗北部牧区,位于内蒙古自治区的中部,东经 $110^{\circ}20' \sim 113^{\circ}$, 北纬 $41^{\circ}10' \sim 43^{\circ}22'$ 。为了不破坏被测土壤的质地,保证湿润锋运动方向与坡面方向一致,并有利于湿润锋的记录,用厚 0.5 cm 的 PVC 板将被测土壤隔出宽 20 cm 的一块土体, PVC 板下面埋深 20 cm, 露出地表部分为 5 cm; 试验采用马氏瓶供水, 根据试验地点的降雨强度确定马氏瓶的供水流量, 通过调整马氏瓶出水口与进气口的高差调整供水流量。本试验中设置的流量为 $40 \text{ mm}^3/\text{h}$, 试验过程中用透明胶片纸记录不同时刻的湿润面积。记录时间由秒表控制, 按 1、1、2、2、5、5、10、10、15 和 15 min 的时间间隔安排记录湿润面积变化情况, 测量时间共 66 min。

试验装置见图 1。试验包括 2 部分: 1) 选取坡度为 6 的阴坡和阳坡, 设置深松和对照 2 种处理, 每次试验重复测量 3 次; 2) 土壤容重相同的条件下选取 5 和 12 的阳坡面为坡度因素下的 2 个水平, 每次试验重复测量 3 次(共 18 次)。土壤入渗性能测量前测定土壤参数(表 1)。

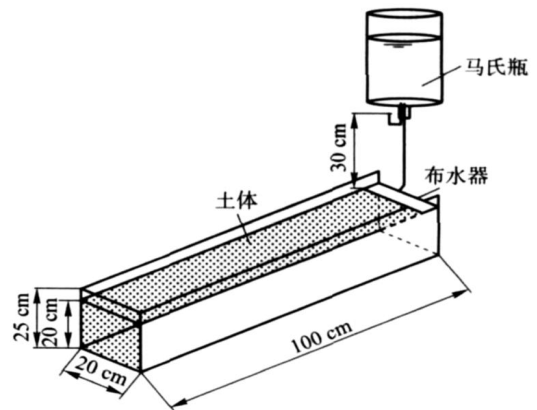


图 1 线源入流测量法试验装置模型

Fig. 1 Experimental apparatus for infiltrability measurement

表1 土壤入渗性能测量前的土壤参数

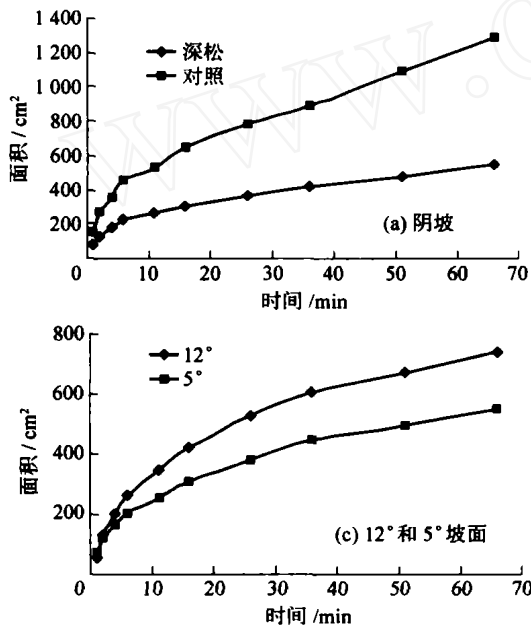
Table 1 Soil parameters before infiltrability measuring

参数	阴坡		阳坡		坡面	
	深松	对照	深松	对照	5°	12°
含水率/%	3.46	2.91	3.91	4.10	5.94	6.24
容重/(g/cm ³)	1.42	1.62	1.44	1.68	1.46	1.49

2 试验结果与分析

2.1 试验结果

利用 CAD 软件计算各个时段的湿润面积,得到



不同处理、不同坡度下平均湿润面积随时间的变化关系(图2)。试验得到的湿润面积与时间具有很好的幂指数相关关系(表2),拟合方程为

$$A = at^b \quad (5)$$

其中: a 、 b 为拟合参数。由表2可见 $b < 1$,表明当时间 t 趋于无穷时, A 对 t 的导数为0,即 A 值经时间的推移将趋于稳定。

根据式(5)计算得到每个5 min时段内增加的湿润面积的数值解;将该数值解代入式(4)计算各时刻的入渗率 i 并求其平均值,得到不同处理、不同坡度下入渗率随时间的变化关系(图3)。由图3可以

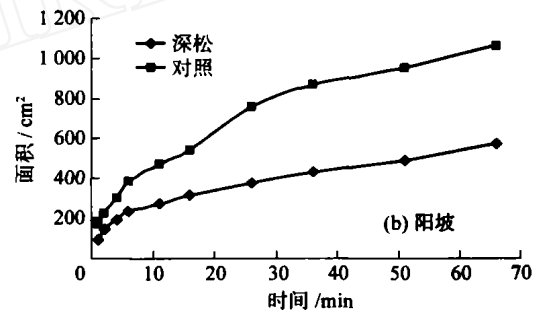


图2 不同处理、不同坡度下平均湿润面积与时间的关系

Fig. 2 Changes of the average wetted area with time under different treatments and slopes

表2 湿润面积和入渗率随时间变化的拟合参数

Table 2 Parameters of wetted area and infiltrability changes with time

因素	处理	湿润面积拟合参数			入渗率拟合参数		
		a	b	R^2	m	n	R^2
阴坡	深松	9 289.6	0.428 6	0.982 2	507.78	-0.546 8	0.996 4
	对照	17 964	0.468 1	0.985 8	260.24	-0.592 7	0.996 4
阳坡	深松	10 651	0.396 9	0.992 9	421.28	-0.488 8	0.997 5
	对照	16 844	0.444 1	0.966 3	275.01	-0.563 5	0.996 8
坡度	12°	7 824.7	0.575 6	0.959 7	716.47	-0.831 8	0.989 1
	5°	8 215.8	0.468 5	0.992 1	457.92	-0.545 3	0.998 5
拟合关系		$A = at^b$			$i = mt^n$		

注: A 为湿润面积, i 为入渗率, t 为入渗时间, a 、 b 、 m 和 n 为拟合参数。

看出,测量结果很好的表达了入渗率随时间的变化规律:在入渗过程初始阶段,土壤具有很高的入渗性

能,随着时间的推移,土壤入渗性能迅速降低,当入渗进行一段时间后,入渗率稳定在一个比较固定的

水平上,即土壤的稳定入渗率。拟合得到的土壤入渗性能与时间具有很好的幂函数相关关系(表 2)

利用水量平衡原理进行相对误差分析,比较由入渗曲线(图 3)计算得到的理论水量与实际供水量的差异。首先由土壤入渗率及对应的时段计算该时段不同位置的累积入渗量,然后求出整个坡面上的累积入渗量的总和,得到整个入渗过程中的入渗水

量,即理论入渗总水量 Q_1 。将理论入渗水量与试验中马氏瓶记录的总供水量 Q_2 相比较得到试验的相对误差:总的入渗量 $Q_1 = \int_0^{t_g} \int_0^A i(t, A) dA dt$; 马氏瓶供水量 $Q_2 = qt_g$, 其中 q 为马氏瓶供水流量, mm/min, t_g 为总供水时间, min。则试验相对误差

$$= \left| \frac{Q_2 - Q_1}{Q_2} \right| \times 100\% \quad (6)$$

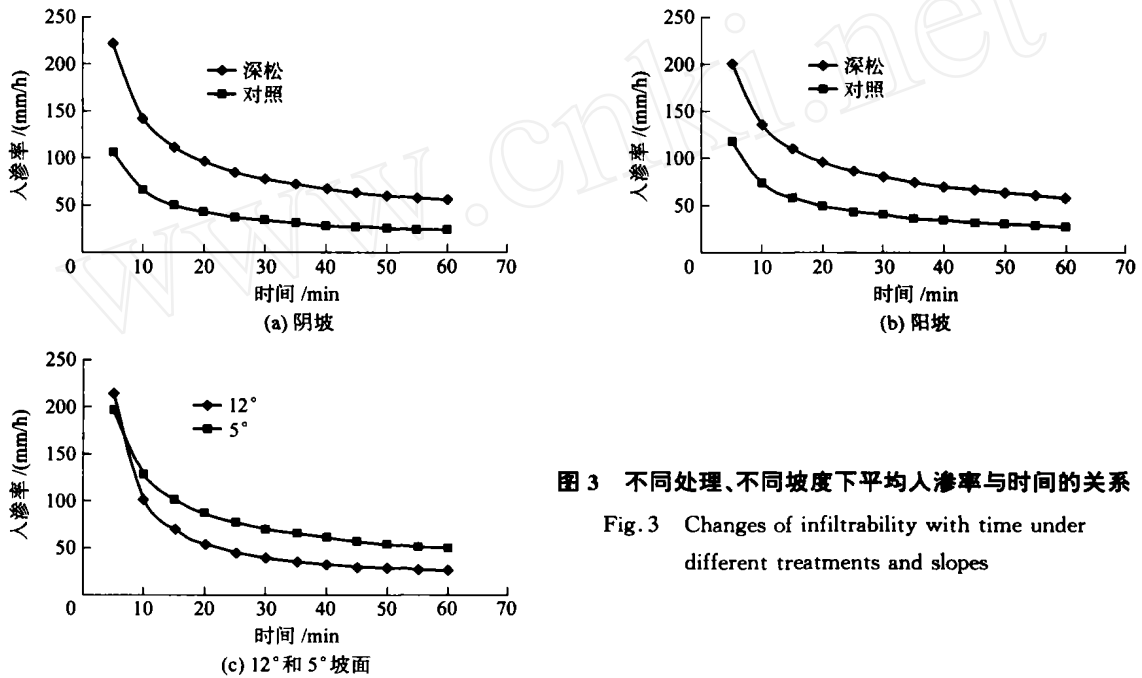


图 3 不同处理、不同坡度下平均入渗率与时间的关系

Fig. 3 Changes of infiltrability with time under different treatments and slopes

利用式(6)计算得到的相对误差分别为:阴坡深松 5.97%, 阴坡对照 7.53%; 阳坡深松 8.39%, 阳坡对照 6.96%; 5°坡面 7.66%, 12°坡面 8.24%。

试验误差主要受野外气象条件、人为记录读数等的影响。例如,当风向与坡向方向一致时,湿润锋运动速度加快,湿润面积增大,所计算得到的入渗率比实际入渗率小;反之,当风向与坡向方向相反时,计算得到的入渗率比实际入渗率大。雷廷武等^[12]利用线源入流方法进行室内试验时,分析得到的相对误差为 6.1%,具有较高的精度;通过式(6)计算得到的最小误差是阴坡深松的 5.97%,将线源入流测量方法应用到野外测量田间土壤入渗率也具有较高的精度。

2.2 结果分析

牧区土地深松后,土壤容重明显下降,阴坡和阳坡经过深松后的土壤入渗性能与对照相比差别较大,阴坡深松后,土壤容重下降 0.2 g/cm³,入渗 1 h 深松的入渗率比对照高 134.8%;阳坡深松后,土壤

容重下降 0.24 g/cm³,入渗 1 h 深松的入渗率比对照高 106.6%。所以,深松处理有利于提高土壤的储水能力,增加土壤水的利用效率。

坡度为 5°和 12°的 2 个坡面的土壤含水率和土壤容重的差别不大,所以影响入渗性能的主要因素是坡度,入渗 1 h, 5°坡面的入渗率比 12°坡面的高 99.80%,主要原因是湿润锋在坡度较大坡面上的运动速度较快,湿润面积变大,造成土壤的入渗性能降低;所以在小于 90°的坡面上,坡度越大,土壤入渗性能越小。与室内试验得到的相对误差相比,野外试验也具有较高的精度。

3 结 论

1) 坡度相同,土壤容重差别较大时,影响土壤入渗性能的因素主要是土壤容重,容重小的土壤,其稳定入渗率大;土壤容重和含水率相同时,影响土壤入渗性能的主要因素是坡度的大小,在小于 90°的坡面上,坡度越大的坡面,土壤稳定入渗率越小。

2) 土壤入渗性能的线源入流测量方法应用于野外试验时,方法简便,装置简易,试验材料价格便宜,相对误差分析结果表明试验精度较高。

3) 水流推进面积、土壤入渗性能与时间均具有较好的幂指数相关关系,确定系数均在 0.95 以上,试验效果好。

参 考 文 献

- [1] 刘汗,雷廷武,潘英华,等. 产流积水法测量坡地降雨入渗动态过程及其精度估计[J]. 农业工程学报, 2006, 22(9): 6-10
- [2] Klute A. Methods of soil analysis[C] Bouwer H. Intake Rate: Cylinder Infiltrometer Monograph Am. Soc Agron: Madison W I, 1986: 825-843
- [3] Ogden C B, Van H M, Schindelbeck R R. Miniature rain simulator for measurement of infiltration and runoff [J]. Soil Sci Soc Am J, 1997 (61): 1041-1043
- [4] 雷廷武,潘英华,刘汗,等. 产流积水法测量降雨侵蚀影响下坡地土壤入渗性能[J]. 农业工程学报, 2006, 22(8): 7-11
- [5] 袁建平,蒋定生,文妙霞. 坡地土壤降雨入渗试验装置研究[J]. 水土保持通报, 1999, 19(1): 24-27
- [6] 王文焰,张建丰. 田间土壤入渗试验装置的研究[J]. 水土保持学报, 1991, 5(4): 38-44
- [7] Ankeny M D, Ahmed M, Kasper T C, et al. Simple field method for determining unsaturated hydraulic conductivity[J]. Soil Science Soc Am J, 1991, 55: 467-470
- [8] Smettem K R J, Clothier B E. Measuring unsaturated sorptivity and hydraulic conductivity using multiple disc parameters[J]. J Soil Science, 1989, 40: 563-568
- [9] White I, Sully M J. Macroscopic and microscopic capillary length and time scales from field infiltration[J]. Water Resource Research, 1987, 23: 1514-1522
- [10] 皱朝望,张仁铎,薛绪掌. 基于圆盘渗透仪常用计算模型比较和分析[J]. 灌溉排水学报, 2005, 24(6): 27-34
- [11] 雷廷武,刘汗,潘英华,等. 坡地土壤降雨入渗性能的径流-入流-产流测量方法与模型[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2005, 35(12): 1180-1186
- [12] 雷廷武,毛丽丽,李鑫,等. 土壤入渗性能的性能的线源入流测量方法研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(1): 1-5
- [13] 毛丽丽. 土壤入渗性能的线源入流测量方法研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2005