

用自动盘式吸渗仪测定土壤导水率

王琳芳¹, 樊 军², 王全九^{1,2*}

(1. 西安理工大学水资源研究所, 西安 710048; 2. 西北农林科技大学, 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, 杨凌 712100)

摘 要: 盘式吸渗仪已成为测定田间土壤水力参数的重要工具之一, 自动监测装置的应用将进一步提高试验的精确度并加快试验进程。该文介绍了一种试验装置, 通过连接在储水管上下两端的传感器实时压差监测, 以此确定入渗水量的变化过程, 并通过一系列试验, 对试验装置的可靠性进行了验证, 将试验装置应用到实际测定土壤水力参数中。试验结果表明: 自动监测装置通过测定储水管的压差, 并通过相应关系代换为储水管水位变化来采集试验数据的方法是可靠的。通过与人工读数方法测定的结果对比表明, 其精度可以达到试验要求; 对于本试验土壤, 用自动监测装置采集的数据来确定吸渗率的时间可以控制在 30 s~ 4 min 之间。

关键词: 盘式吸渗仪; 自动监测装置; 时间尺度

中图分类号: S152.7

文献标识码: B

文章编号: 1002-6819(2007)9-0072-04

王琳芳, 樊 军, 王全九. 用自动盘式吸渗仪测定土壤导水率[J]. 农业工程学报, 2007, 23(9): 72- 75.

Wang Linfang, Fan Jun, Wang Quanjie. Measurement of soil conductivity by automated disc tension infiltrometer[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(9): 72- 75. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

田间土壤导水率受诸多因素的影响, 具有很大的空间变异性, 因此, 田间测定需要更多的测定重复, 以获得更真实可靠的试验结果。盘式吸渗仪被广泛应用于田间土壤导水率的测定^[1,2], 并向土壤孔隙性和两区模型参数测定方面拓展^[3,4]。但是由于入渗过程中需要快速准确地读取储水管中的水位, 所以在田间应用中受到一定的限制。土壤导水率计算过程中需要吸渗率 S , 吸渗率 S 的确定对于计算结果的影响十分明显^[5], 而吸渗率主要通过入渗初期的数据来确定, 因而准确的测定试验的入渗过程, 尤其是入渗的前期过程十分重要, 因此, 将安装了自动监测装置的盘式吸渗仪应用到试验过程的监测中, 能够提高试验的精度, 减少人工读数的误差, 并加快试验进程。Ankeny^[6] 等人在 1988 年开发了自动监测的盘式吸渗仪来记录储水管的水位变化, 这个装置使用两个传感器, 分别安装在储水管的上部和底部, 这种装置需要对两个传感器分别进行标定, 且会引起一定的误差。Casey 和 Derby^[7] 等对这一装置进行了改进, 用一个差分传感器代替两个传感器记录入渗过程, 测量的精确度比之前的方法有两个数量级的增大。Schwartz 和 Evett 将 TDR 应用在测量连续入渗过程中, 以反推土壤水力参数, 试验结果表明, 这种方法使限制土壤水分预测的情况得到了改善, 使参数预测更加精确^[8]。本文介绍了一种与 Casey 和 Derby 相似的试验装置, 通过全自动装置加快盘式吸渗仪在田间的测定速度并提高测定

精度, 以更加准确的测定土壤水力参数。

1 试验材料与方法

1.1 试验装置的构成及原理

自动盘式吸渗仪主要由盘式吸渗仪、吸水装置和自动监测装置 3 部分组成, 其中盘式吸渗仪由储水管、吸渗盘、调压管 3 部分组成; 吸水装置由 1 个微型真空泵和供电部分组成, 用于给储水管装满水; 自动监测装置由传感器 (D2A 差分传感器, 日本松下公司) 和数据采集器 (CR200, 美国 Campbellsci 公司) 组成 (图 1)。传感器的上下两个端口分别通过软管与储水管的底部以及储水管顶部的空气连通。将传感器与数据采集器连接, 记录并存储每秒输出的电压数据。储水管上部空气和底部水位的压力之差通过传感器以电压的形式输出, 随着水位的不断下降, 输出电压不断降低, 并且储水管压差与输出电压之间呈线性关系。不同的传感器在不同的条件下压差之间的对应关系不同, 需要通过水位和输出电压之间的关系进行校正^[9]。与 Casey 和 Derby 的仪器装置不同, 本试验所采用的盘式吸渗仪的底盘与储水管直接连接, 减少了二者连接时软管中存在的空气而引起的数据采集的滞后, 同时使用的差分传感器内置放大装置, 结果更精确。

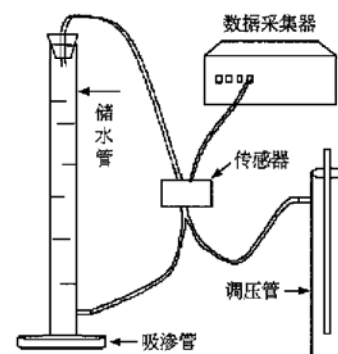


图 1 自动盘式吸渗仪

Fig. 1 Automated disc tension infiltrometer

收稿日期: 2006-09-18 修订日期: 2007-03-17

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (2005CB121103); 中国科学院“百人计划”; 国家自然科学基金 (40601041, 50479065) 资助

作者简介: 王琳芳 (1982-), 女, 江苏徐州人。西安 西安理工大学水资源研究所, 710048。Email: linfang828@yahoo.com.cn

*通讯作者: 王全九 (1964-), 男, 内蒙丰镇人, 研究员, 博士生导师。陕西杨凌西农路 26 号 中国科学院水利部水土保持研究所, 712100。Email: wquanjiu@163.com

1.2 试验材料及方法

本试验土样采用陕西省长武县的黑垆土,土样经风干过1 mm土筛,按照国际土壤质地分类,黑垆土黏粒、粉粒、砂粒含量分别为20.82%、68.67%、8.43%,属于粉砂黏壤。

按照 1.40 g/cm^3 的容重将黑垆土分层装入土箱中,并刮平表层土壤。试验采用盘径为15 cm的盘式吸渗仪,选择-1、-3、-9、-12 cm H_2O 4个负水头,并采取铺砂方式进行试验,接触层厚度为2 mm。自动监测系统可以同时监测采集5个盘式吸渗仪的水位数据,测定时,同时进行5个盘式吸渗仪试验,计算结果取算术平均值。试验开始前,采用烘干法测定土壤的初始含水率(L^3/L^3),试验结束后,取吸渗盘下表层0~1 cm土壤测定最终土壤含水率(L^3/L^3)。

2 结果与分析

2.1 自动测定装置的可靠性验证

首先通过确定储水管水位(H)和输出电压(V)之间的关系对传感器进行标定。随机调整储水管水位到不同的高度,记录该水位下的输出电压,分析两者之间的关系(图2)。

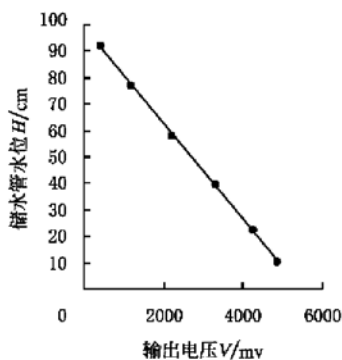


图2 储水管水位与传感器输出电压之间的关系图

Fig. 2 Relationship between water level in the reservoir and voltage output of transducer

由图2可以看出,储水管水位 H 与输出电压 V 之间呈显著的线性相关,其关系表示为

$$H = -0.0181V + 98.904, R^2 = 0.9995 \quad (1)$$

采用 F 检验方法^[10]对试验结果进行显著性,结果表明, ($F = 2286.07$) > ($F_{0.05}(3) = 6.59$),输出电压与储水管水位之间的线性关系显著。

为了验证自动装置的可靠性,对于15 cm盘径,-6 cm H_2O 负水头下的试验,同时采用人工和自动监测装置两种方法采集数据,并且对两种数据采集方式下的试验结果进行对比(图3)。结果显示,对于整个试验过程的监测,人工读数与自动监测得到的结果是一致的,而且自动装置获取了更多的有效数据,特别是在试验开始的时段。

2.2 吸渗率 S 的计算

将自动监测装置应用到盘式吸渗仪的应用中,并缩短数据采集的时间间隔,可以增加试验初期数据的采集量,以精确计算吸渗率 S ,同时可以减少人工读数的误差,测定结果使用稳态方法计算。

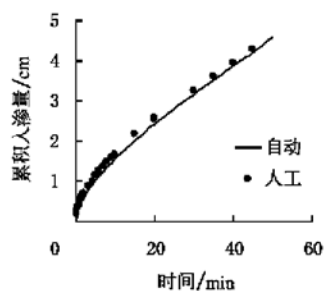


图3 两种方式下累积入渗量随时间变化

Fig. 3 Changes of cumulative infiltration by automated and manual methods with time

当入渗开始时,在很短时间内,入渗过程可简单看作一维入渗,即忽略重力作用和扩散作用^[11],因而入渗过程表示为

$$I = S_0 t^{1/2} \quad (2)$$

式中 $I(L)$ ——累积吸渗量; $t(T)$ ——时间; $S(L/T^{-1/2})$ ——吸渗率。

试验采用15 cm盘径的盘式吸渗仪自动化监测装置,按照式(2)对试验结果进行分析。图4显示了累积入渗量随时间的变化过程;图5显示了累积入渗量随时间的平方根的变化过程。由图4可以看出,用自动监测装置记录的累积入渗量随时间变化呈现明显的幂函数的趋势,由图5可知,随着时间的变化,入渗

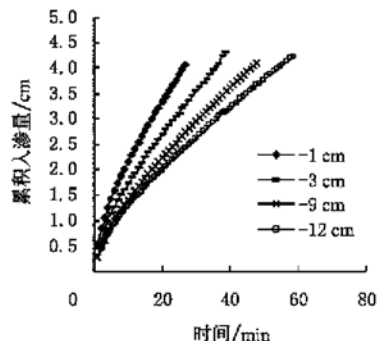


图4 不同负水头下累积入渗量随时间变化

Fig. 4 Changes of cumulative infiltration with time under different negative water heads

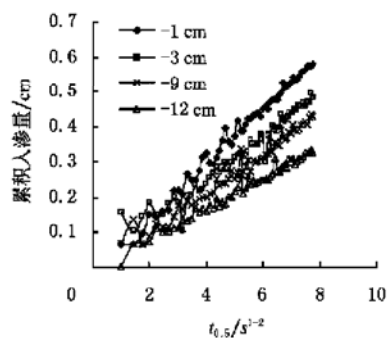


图5 不同负水头下吸渗率变化

Fig. 5 Sorptivity changes under different negative water heads

过程符合短历时内, 累积入渗量与时间的平方根呈现明显的线性关系的规律, 通过自动装置可以获取更准确的 S 值。

2.3 时间尺度的确定

采用盘式吸渗仪测定土壤水力参数时, 吸渗率的测定影响导水率结果的计算, 而试验初期, 可以看作一维入渗的阶段, 其时间间隔的长短尺度把握对吸渗率的确定有直接影响^[12]。为了分析线性阶段时间间隔长短对于吸渗率测定的影响, 用自动监测装置采集的数据, 分别取不同的时间间隔分析吸渗率的变化情况。

White 等人^[12]在 Wooding 方程^[13]的基础上, 提出了

$$K = q - \frac{4bS^2}{\Delta\theta\pi r_d} \quad (3)$$

式中 $K(L/T^1)$ —— 相应负水头下的导水率; $q(L/T^1)$ —— 该负水头下的近似稳定入渗率; $S(L/T^{1/2})$ —— 相应的吸渗率; $r_d(L)$ —— 吸渗仪的盘径; b —— 形状因子, 一般情况下取 $0.55^{[14]}$ 。

Philip 用几何时间尺度(1969)来估计几何形状取代入渗初期一维入渗的时间, 可以表示为

$$t_{geom} = \left(\frac{r\Delta\theta}{S}\right)^2 \quad (4)$$

式中 $t_{geom}(T)$ —— 几何入渗时间; $r(L)$ —— 吸渗仪的盘径; $S(L/T^{1/2})$ —— 相应的吸渗率。实际上, 一维入渗的时间尺度远小于几何时间尺度, Philip 认为确定吸渗率值的时间尺度适合于 $0.12t_{geom}^{[11]}$ 。

用 WS 方法对试验结果进行计算, 在 -1、-3、-9、-12 cm H_2O 4 个负水头下, 分别取不同的时间间隔 t 作为一维入渗的时间尺度来计算相应条件下的吸渗率和导水率, 以及通过式(2)得到的线性关系的相关系数 (R^2), 结果如表 1 所示。其中: 各个负水头下的初始体积含水率 (θ_i) 均为 $0.024 \text{ m}^3/\text{m}^3$; -1、-3、-9、-12 cm H_2O 下的最终体积含水率 (θ_0) 分别为 0.461 、 0.407 、 0.378 、 $0.329 \text{ m}^3/\text{m}^3$; -1、-3、-9、-12 cm H_2O 下的稳定入渗率 (i) 分别为 0.001625 、 0.001289 、 0.001056 、 0.000849 cm/s 。

表 1 不同负水头下各个时间段吸渗率及导水率

Table 1 Sortivity and hydraulic conductivity with different time scale under different negative water heads

负水头 /cm H_2O		时间尺度/s					
		30	60	90	120	180	240
- 1	$S/\text{cm} \cdot \text{s}^{-1/2}$	7.47×10^{-2}	7.51×10^{-2}	7.60×10^{-2}	7.69×10^{-2}	7.83×10^{-2}	7.95×10^{-2}
	$K/\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	4.33×10^{-4}	4.20×10^{-4}	3.91×10^{-4}	3.61×10^{-4}	3.15×10^{-4}	2.74×10^{-4}
	R^2	0.9589	0.9874	0.9921	0.9935	0.9941	0.9938
- 3	$S/\text{cm} \cdot \text{s}^{-1/2}$	6.16×10^{-2}	6.17×10^{-2}	6.26×10^{-2}	6.31×10^{-2}	6.40×10^{-2}	6.48×10^{-2}
	$K/\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	3.64×10^{-4}	3.61×10^{-4}	3.33×10^{-4}	3.18×10^{-4}	2.90×10^{-4}	2.65×10^{-4}
	R^2	0.8171	0.9491	0.9768	0.9865	0.9928	0.9939
- 9	$S/\text{cm} \cdot \text{s}^{-1/2}$	5.33×10^{-2}	5.40×10^{-2}	5.51×10^{-2}	5.56×10^{-2}	5.64×10^{-2}	5.71×10^{-2}
	$K/\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	3.06×10^{-4}	2.86×10^{-4}	2.55×10^{-4}	2.40×10^{-4}	2.16×10^{-4}	1.95×10^{-4}
	R^2	0.9175	0.9726	0.983	0.9892	0.9935	0.9945
- 12	$S/\text{cm} \cdot \text{s}^{-1/2}$	4.55×10^{-2}	4.50×10^{-2}	4.49×10^{-2}	4.53×10^{-2}	4.60×10^{-2}	4.67×10^{-2}
	$K/\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	2.14×10^{-4}	2.27×10^{-4}	2.30×10^{-4}	2.19×10^{-4}	2.00×10^{-4}	1.80×10^{-4}
	R^2	0.8074	0.9568	0.9755	0.9854	0.9912	0.9926

根据计算 S 的时间尺度对试验结果进行分析, 取 4 min 之内的数据进行分析, 结果表明, -1、-3、-9 和 -12 cm H_2O 负水头下, 随时间尺度的放大, 计算得到的吸渗率逐渐增加, 相应负水头下的导水率逐渐减小, 变化均在同一个数量级内(图 6)。

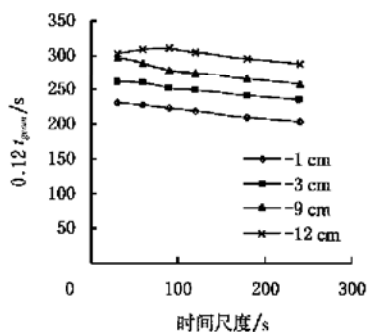


图 6 时间尺度的确定

Fig. 6 Determination of the time scale

同时由图 6 可以看出, 对于本试验采用的土壤, 在不同负压条件下, 采取不同的时间尺度, 其真正的一维入渗的时间段均在 4 min 左右。所以, 对于本试验采用的土壤, 用自动监测装置采集的数据进行结果分析时, 可以取 30 s~4 min 之内的任一时间作为确定吸渗率的时间尺度。

2.4 不同时间尺度吸渗率与导水率关系

对于盘式吸渗仪, 按照 WS 方法, 可以通过确定吸渗率的值, 进一步确定相应条件下的土壤导水率。相应条件下的吸渗率与导水率之间呈幂函数关系^[15], 可以表示为

$$K = as^b \quad (5)$$

式中 K, s —— 分别为相应负水头下的导水率和吸渗率; a, b —— 系数。由于取用不同的时间尺度, 对 s 的测定结果有一定影响, 所以不同时间尺度下的 K 和 s 的关系也会有所变化(表 2)。

由表 2 可以看出, 随着取用时间尺度的变大, 系数 a 和 b 均呈现逐渐减小的趋势, 其相关性也逐渐降低, 因此, 时间尺度的扩大会造成吸渗率结果测定精度的降低。

表2 不同时间尺度下吸渗率与导水率关系

Table 2 Relationships between hydraulic conductivity and sorptivity under different time scale

时间尺度/s	<i>a</i>	<i>b</i>	相关系数 R^2
30	0.0167	1.3899	0.9473
60	0.0104	1.2278	0.9783
90	0.0061	1.0651	0.9402
120	0.0049	1.0134	0.9221
180	0.0042	1.0000	0.8839
240	0.0027	0.8823	0.8511

3 结 论

1) 自动监测装置通过测定储水管的压差,自动记录并存储盘式入渗仪的入渗过程,用自动监测装置采集的数据来确定吸渗率的时间可以控制在 30 s~4 min 之间,试验结果表明可以获得更为准确的吸渗率 S 值,进而提高土壤入渗率的测定精度。

2) 自动盘式入渗仪可以同时进行多点测定,储水管实现了自动充水,大大提高了测定速度,可以更快速、准确地用于田间土壤导水率的测定。

[参 考 文 献]

- [1] Logsdon S D, Jaynes D B. Spatial variability of hydraulic conductivity in a cultivated field at different times[J]. Soil Sci Soc Am J, 1996, 60: 703– 709.
- [2] Angulo-Jaramillo R, Moreno F, Clothier B E, et al. Seasonal variation of hydraulic properties of soils measured using a tension disk infiltrometer[J]. Soil Sci Soc Am J, 1997, 61(1): 27– 32.
- [3] Cameira M R, Fernando R M, Pereira L S. Soil macropore dynamics affected by tillage and irrigation for a silt loam alluvial soil in southern Portugal[J]. Soil Tillage Res, 2003, 70: 131– 140.
- [4] Okom E A, White R E, Heng L K. Field measured mobile water fraction for soils of contrasting texture[J]. Aust J Soil Res, 2000, 38: 1131– 42.
- [5] Minasny B, McBratney A B. Estimation of sorptivity from disc-permeameter measurements[J]. Geoderma, 2000, 95: 305– 324.
- [6] Ankeny M D, Kaspar T C, Horton R. Design for an automated tension infiltrometer[J]. Soil Sci Soc Am J, 1988, 52: 893– 896.
- [7] Casey F X M, Derby N E. Improved design for an automated tension infiltrometer[J]. Soil Sci Soc Am J, 2002, 66: 64– 67.
- [8] Schwart R C, Evett S R. Conjunctive use of tension infiltrometry and Time-Domain Reflectometry for inverse estimation of soil hydraulic properties[J]. Vadose Zone Journal, 2003, 2: 530– 538.
- [9] Smiles D E, Knight J H, Perroux K M. Absorption of water by soil: The effect of a surface crust[J]. Soil Sci Soc Am J, 1982, 46: 476– 481.
- [10] 周玉珠, 姜奉华. 实验数据的一元线性回归分析及其显著性检验[J]. 大学物理实验, 2001, 14(4): 43– 46.
- [11] Philip J R. Theory of infiltration[J]. Adv Hydrosci, 1969, 5: 215– 296.
- [12] White I Sully M J. Macroscopic and microscopic capillary length and time scales from field infiltration [J]. Water Resource Research, 1987, 23: 1514– 1522.
- [13] Wooding R A. Steady infiltration from large shallow circular pond [J]. Water Resour Res, 1968, 4: 1259– 1273.
- [14] Smettem K R J, Clothier B E. Measuring unsaturated sorptivity and hydraulic conductivity using multi-disc permeameters [J]. J Soil Sci, 1989, 40: 563– 568.
- [15] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988: 30– 131.

Measurement of soil conductivity by automated disc tension infiltrometer

Wang Linfang¹, Fan Jun², Wang Quanjiu^{1,2*}

(1. Institute of Water Resources, Xi'an University of technology, Xi'an 710048, China;

2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China)

Abstract: Disc tension infiltrometer has been an important method for measuring the soil hydraulic parameters, and the application of auto mechanism can improve the precision meanwhile. The automation of disc tension infiltrometer was developed. Pressure transducer was used to record the changes of water level. The automation of disc tension infiltrometer was proved to be credible through indoor experiments and was applied to measure soil hydraulic parameters. Results show that pressure difference in the reservoir measured by auto mechanism is replaced by the change of water level in the reservoir to observe the experimental data. The method is feasible. Compared with the result measured by reading manually, the accuracy of automated disc tension infiltrometer reaches the test requirement. The time scale of determining the sorptivity can be set to 30 second to 4 minutes for the experimental soil.

Key words: disc infiltrometer; auto mechanism; time scale