

灌水次数对土壤入渗影响的试验分析

李爱利^{1a,2}, 蔡焕杰¹, 李志军¹

(1. 西北农林科技大学 a. 旱区农业水土工程教育部重点实验室; b. 旱区作物高效用水国家工程实验室, 陕西 杨凌 712100;
2. 兰州大学 资源环境学院, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 利用野外双环入渗仪和 TST-70 室内土壤入渗仪进行入渗试验, 分析室内以 1.35 g/cm^3 容重装土与田间翻耕地在 0、1 和 2 次灌水后的土壤入渗过程, 研究 Kostiakov 入渗模型中各参数随着灌水次数的变化及田间与室内试验中入渗参数的差异性。结果表明: 灌水和室内装土试验均使经验指数 α 有了一定程度的增大。同时, 灌水和装土试验的 Kostiakov 入渗模型中第一个单位时间内平均吸渗速度 i_0 较田间未灌水都有了明显的减小, 经验指数 α 取值范围较有关资料中所给值小。4 种处理中, 一次灌水和室内装土试验的累积入渗量与时间双对数关系拟合很好, 室内试验的误差分析值最小。因此, 在利用 Kostiakov 入渗模型确定灌水技术参数时, 应该考虑适用条件以及灌溉情况。

关键词: 灌水次数; 土壤入渗; Kostiakov 入渗模型

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2012)01-0018-04

Experiment analysis of effect of irrigation times on soil infiltration

LI Aili^{1a,2}, CAI Huanjie¹, LI Zhijun¹

(1a. Key Lab. of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Areas, Ministry of Education,

1b. State Engineering Lab of Efficient Water Use of Grops in Arid Areas, Northwest A&F University, Yangling, 712100, China;

2. School of Resources and Environment, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Infiltration experiments were conducted by using double ring infiltration meter and the TST-70 indoor soil infiltration meter in the field for no irrigation, one irrigation and two irrigation times for soil bulk density of 1.35 g/cm^3 . The parameters of Kostiakov infiltration model were analyzed. The result showed that experience index α increased with irrigation times, and indoor experiment had a bigger α . Simultaneously, the first unit time average infiltrates i_0 in the Kostiakov infiltration model for indoor test and after irrigation had obvious reduction lowpared with no irrigation. The experience index α was less than relative reference. In four treatments, the accumulation infiltration of the one irrigation time and indoor experiment had a good helationship with the time. Therefore, when using the Kostiakov model to determine infiltration parameters for irrigation, the soil condition should be considered.

Key words: irrigation times; soil infiltration, Kostiakov infiltration model

土壤水分入渗是大气降水、土壤水、地表水和地下水相互转化的一个重要环节^[1]。研究表明, 入渗的影响因素可以从土壤含水量、性质、密实度、土壤裂隙、降水、耕作和下垫面等角度来考虑^[2]。灌溉是利用人工干预的方式补充田间土壤水分, 为作物生长创造适宜的土壤水分环境, 促进和保证农业生产持续、高效地发展。传统的利用水重力和毛细管作用灌溉是最古老的, 也是目前应用最广泛、最主要

的灌水方法, 包括畦灌、沟灌、淹灌和漫灌^[4]。土壤灌水后势必会改变土壤含水量和密实度, 同时也会产生一定的土壤裂隙, 进而对入渗速率、累积入渗量等入渗过程产生一定程度的影响, 虽然这方面已有不少相关的入渗模型, 如 Kostiakov 公式、Holton 公式和 Philip 公式等, 但各公式中的参数值由于具有经验性, 在具体研究中仍需进一步确定。对于 Kostiakov 入渗模型, 一般认为^[3], 其经验指数 α 决定于

收稿日期: 2011-06-20; 修回日期: 2011-10-30

基金项目: 西北农林科技大学创新团队支持计划; 国家科技支撑计划课题(2011BAD29B01); 西北农林科技大学大学生创新性实验计划项目资助

作者简介: 李爱利(1987-), 女, 陕西彬县人, 西北农林科技大学本科毕业生, 现兰州大学在读硕士生, 主要从事水资源方面的研究。

通讯作者: 蔡焕杰(1962-), 男, 河北藁城人, 教授, 博导, 主要从事农业节水领域研究。

土壤性质和初始含水量,介于 0.3 ~ 0.8 之间,轻质土壤 α 值小,重质土壤 α 值大;初始含水量愈高, α 值愈小,一般土壤可取 0.5;第一单位时间内土壤渗吸的平均速度 i_0 随着土壤含水量的增大,密实度的增大而减小。但此结论没有详细说明扰动土和非扰动土即室内和田间试验其值之间的差异性及田间灌水对入渗的影响程度。室内试验一般采用统一容重装土,而田间非扰动土其容重有明显的分层现象,同时灌水会影响土壤表面的密实度和含水量,而地表对入渗其关键性的控制作用,从而灌水技术参数的计算出现偏差。为此,本文利用畦灌的方法对田间实行不同次数的灌水,使影响入渗的某些因素发生改变,和采用 1.35 g/cm^3 容重的室内装土试验,分析 Kostiakov 入渗模型中的参数的变异性。

1 实验方法与原理

1.1 试验土壤的处理

田间土壤处理 选取渭河三级阶地上种过玉米后翻耕深度为 20 cm 左右,灌 0、1、2 次水的土壤分别进行入渗试验。灌水方法采用畦灌法,即建立长为 4 m,宽为 3 m 的畦田,进行均匀灌水,每次灌水量为 $750 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。对于零次灌水的试验地直接进行试验,一次灌水的试验地灌水后 10 天进行试验。两次灌水的试验地两次灌水时间间隔同样为 10 天,第二次灌水后 10 天进行试验。试验时间为 2011 年 3 月 10 日至 4 月 28 日,试验期间天气状况良好,没有大量降雨,可以忽略降雨对本次入渗试验产生的影响。试验期间试验区气温为 $12 \sim 21^\circ\text{C}$,两月总水面蒸发量平均为 132 mm。

室内试验处理 测定田间试验区地表以下 20 cm 处土壤容重,采集试验区土样若干,进行烘干磨细,以所测定的容重装土,每两厘米分层装,以使所装土均匀,装土至渗水桶入水口 1 ~ 2 cm 处。

1.2 试验方法

田间试验 实验仪器采用野外双环入渗仪,试验时将内外环打入地表以下 20 cm 左右,使地上部分高度相同。试验期间内外环内始终保持相同水头,以保证内环产生一维入渗,即垂直入渗。同时内环内有有机玻璃环,一方面防止水面蒸发损失,另一方面试验一开始水可以瞬间从有机玻璃环中进入内环,使内环保持与马氏瓶连通器进口相同高度的水头,故试验一开始便能准确地从马氏瓶刻度上记录初始入渗量,记录的试验数据能够较为完整地反映出各种处理下的土壤入渗过程。

室内试验 试验采用 TST-70 土壤入渗仪,渗水桶底部垫一张滤纸后装土,土柱表面同样垫一张滤纸,马氏瓶中灌水至零刻度处,调整马氏瓶高度,使其连通器进气口基本与渗水桶进水口处于同一水平位置,向渗水桶中加水至进水口处,打开马氏瓶进气阀和进水阀,使渗水桶中水面高度与进气阀进口高度相同,即马氏瓶中气泡频率稳定后,开始读数。

1.3 数据记录

试验数据记录的时间间隔为 1 min、2 min、3 min、5 min、10 min,随入渗速度递减记录时间间隔依次增大,直至入渗速度基本不发生变化,表明已达到稳定入渗阶段,即可停止试验,入渗时间为 90 ~ 120 min。每个处理至少进行 3 ~ 4 次试验,选取其中两次数据进行分析,以减少随机因素造成的试验误差。

1.4 Kostiakov 入渗模型^[3]

Kostiakov 入渗模型如下:

$$i_t = i_1 t^{-\alpha} \quad (1)$$

式中: i_t 为任一时间的入渗速度, mm/min; i_1 为第一时间末的入渗速度, mm/min; t 为入渗时间, min; α 为经验指数。

根据式(1),可得累积入渗量 I 与时间的关系:

$$\begin{aligned} I &= \int_0^t i_t dt = \int_0^t i_1 t^{-\alpha} dt \\ &= \frac{i_1}{1-\alpha} t^{1-\alpha} = i_0 t^{1-\alpha} \end{aligned} \quad (2)$$

将上式进行转化,对左右取双对数后变为:

$$\lg I = \lg i_0 + (1-\alpha) \lg t \quad (3)$$

式中: I 为累积入渗量,即某次灌水定额, mm; i_0 为第一个单位时间内土壤渗吸的平均速度, mm/min; 其他字母含义如式(1)所示。

本次试验利用变换后的式(3)来分析渭河三级阶地土壤不同处理对 Kostiakov 入渗模型中参数 i_0 和 α 的影响情况。

2 实验结果与分析

2.1 不同灌水次数下的土壤入渗特征

图 1 为室内装土和田间不同灌水次数下两次试验的土壤入渗速度与时间关系线。由图 1 可知,室内试验稳定入渗速度接近 0.8 mm/min ;田间零次灌水土壤的稳定入渗速度接近于 3 mm/min ;一次灌水土壤的稳定入渗速度接近 0.7 mm/min ;两次灌水土壤的稳定入渗速度接近 0.5 mm/min 。即可得室内试验的入渗速度和田间零次灌水的试验数据相差很大,而与灌水后的入渗速度较为接近,灌水后的土壤

入渗速度大幅度减小,但一次和两次灌水的入渗速度变化不大。

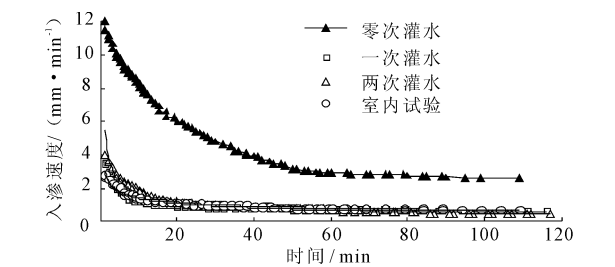


图1 室内扰动土和田间不同灌水次数下的土壤入渗速度与时间关系线

对以上数据进行分析及通过实验期间的观察,翻耕后未灌水时土壤前期含水量小,表土疏松,空隙大,导致入渗强度很大。而灌水后的表层土壤密实度增加,使初始入渗速度大幅度下降。从一次和两次灌水的入渗速度曲线可以看出,灌两次水的初始入渗速度大于灌一次水的入渗速度,其原因主要是灌两次水产生的地表裂缝宽度较大,条数较多,入渗开始阶段进入缝隙的水量较多,从图1可以较为明显地看出20 min之前两次灌水土壤的入渗速度大

于一次灌水的入渗速度。随着时间推移,两种处理的土壤入渗速度在35 min左右发生交叉,两次灌水的入渗速度逐渐小于一次灌水入渗速度,两次灌水的土壤稳定入渗率小于一次灌水的土壤稳定入渗率,分析原因主要是灌水次数增加,土壤的密实程度增加,导致入渗速度减小。

室内装土试验数据与田间未灌水试验数据相差较大,而与灌一次水实验数据较接近,分析原因主要是室内装土采用的容重大致上是田间平均容重,即采用地表以下20 cm左右处测定的容重(1.35 g/cm^3),其大于地表容重,而地表对入渗起关键性的控制作用,所以其入渗速度较田间小。灌水后增加土壤密实度,通过比较一次灌水的稳定入渗率与室内试验的稳定入渗率,可推知对田间翻耕后的土壤灌一次水后其地表容重大致与室内装土容重相同。

2.2 Kostikov 入渗模型参数的分析

图2为室内扰动土和田间不同灌水次数下两次试验的累积入渗量与时间的双对数关系曲线。从图2可以求得经验指数 α 和第一个单位时间内土壤渗吸的平均速度 i_0 ,结果如表1所示。

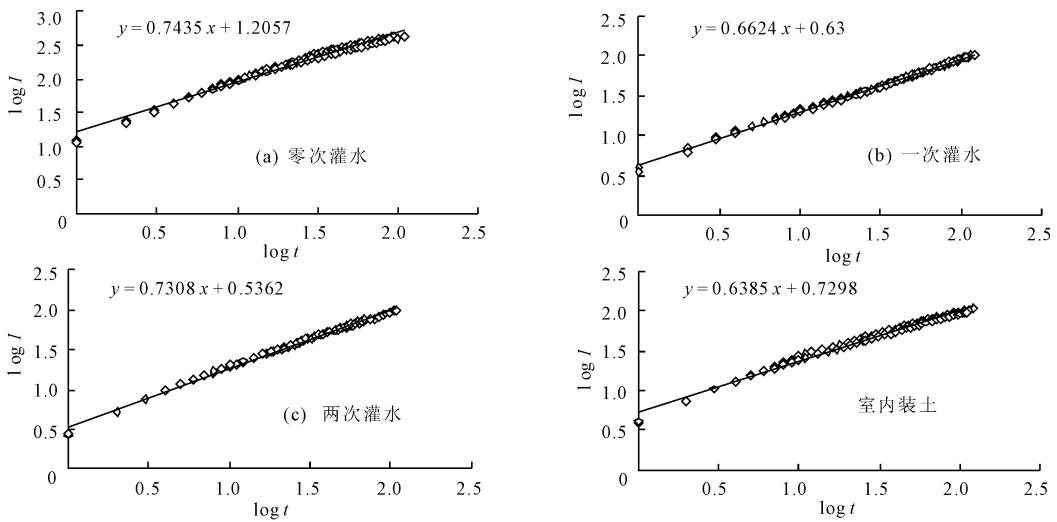


图2 室内装土和田间不同灌水次数下的累积入渗量与时间双对数关系线

表1 室内扰动土和田间不同灌水次数土壤入渗的Kostiakov 公式参数及相关系数				mm/min
试验处理	经验指数 α	第一个单位时间 l 内土壤的渗吸平均速度 i_0	相关系数 r	
零次灌水	0.26	16.06	0.992*	
一次灌水	0.34	4.27	0.999*	
两次灌水	0.36	5.37	0.994*	
室内试验	0.27	3.44	0.998*	

注:“*”表示通过0.01置信水平检验。

结合图2和表1分析,考虑到经验指数 α 决定于土壤性质和初始含水量,未灌水时土壤容重小,含水量低,经验指数 α 值较小,不同次数灌水后 α 均明显的增大,而室内试验的 α 值稍大于田间未灌水时的 α 值,主要是室内试验装土容重较田间地表大,即其容重较大所致。两次灌水的 α 值略高于一次灌水的 α 值,根据土壤性质和初始含水量对 α 的影响情况可以推知,两次灌水和一次灌水相比,使土壤容重增大,进而导致 α 值略有增大,故灌水对 α 值有较为显著的影响。从表1中可以看出,经验指数介于0.2

~0.4 之间,与文献[3]的结论存在一些差异。未灌水的田间试验与室内试验的土壤入渗指数相差不大,而第一个单位时间内土壤的渗吸平均速度相差较大,灌水 1 次和 2 次后土壤入渗指数和第一个单位时间内土壤的渗吸平均速度的差异已经不大,因此在实际应用中对土壤入渗参数的确定应该区分是否有灌水和农田的耕作情况,需进行一定的修正,而不应采用统一的入渗参数,否则对灌水技术参数影响很大。

2.3 Kostiakov 入渗模型参数验证

利用该实验所求得的模型参数值(表 1)计算各时刻的入渗速度,将计算的该时刻入渗速度与另外一组实测数据进行比较,分析其计算值与实验值之间的偏离程度。表中相对误差值均较小,大部分在 15% 以内,特别是室内试验误差基本上在 10% 以内,但田间零次灌水后的误差相对较大,说明用该模型对此试验的模拟较为合理,所求得的参数值也较为准确。其误差分析如表 2 所示。

表 2 模型参数对入渗速度拟合的分析								min, %
入渗 时间	两次灌水误差分析		一次灌水误差分析		零次灌水误差分析		室内试验误差分析	
	$i_{实} - i_{计}$	相对误差	$i_{实} - i_{计}$	相对误差	$i_{实} - i_{计}$	相对误差	$i_{实} - i_{计}$	相对误差
1	0.59	14.70	0.21	6.96	-2.10	-21.46	0.23	8.31
5	0.25	11.45	-0.10	-6.24	-0.15	-1.91	0.35	17.64
10	0.10	6.16	0.05	4.08	0.38	5.44	0.05	3.76
15	0.01	1.11	-0.14	-14.46	0.74	11.20	0.00	0.12
20	-0.08	-7.52	-0.15	-17.88	1.07	16.39	0.03	2.45
25	-0.11	-11.22	0.00	0.28	1.09	17.46	-0.03	-3.33
30	-0.11	-12.83	-0.02	-2.70	1.49	23.25	0.02	1.64
35	-0.08	-9.34	-0.01	-1.21	1.49	23.98	-0.02	-1.78
40	-0.08	-9.55	-0.04	-5.68	1.58	25.81	-0.04	-4.02
45	-0.04	-5.01	-0.01	-1.43	1.72	28.05	-0.04	-5.14
50	-0.03	-3.76	0.01	0.82	1.59	26.95	-0.05	-5.47
55	-0.04	-5.83	-0.04	-5.95	1.63	27.96	-0.04	-5.49
60	-0.08	-11.89	-0.01	-1.94	1.62	28.31	-0.05	-5.83
65	-0.13	-19.58	0.06	8.20	1.59	28.34	-0.06	-7.64
70	-0.17	-29.37	0.09	11.17	1.59	28.73	-0.04	-5.51
75	0.04	7.60	0.03	4.57	1.54	28.51	-0.02	-2.41

表 2 中 $i_{实}$ 表示试验中实际测定某时刻的入渗速度, $i_{计}$ 表示利用公式 1 进行计算所得的某时刻的入渗速度, $i_{实} - i_{计}$ 即表示试验测定入渗速度与计算值之差,相对误差表示误差值与实测入渗速度比值的百分数。从表中可以看出,室内试验的误差最小,零次灌水的试验误差相对较大,其误差来源有实验中的误差和数据的处理中误差,当然也在一定程度上说明了该模型在应用中需要考虑其适用性。

3 结 语

- (1)灌水会增加土壤的密实程度,降低了稳定入渗速率,室内采用统一容重装土与田间分层容重的土壤入渗试验所测得参数值存在一定差异。
- (2)Kostiakov 入渗模型中经验指数 α 受灌水的影响显著,室内与田间试验其值存在一定差异,且 α

- 取值范围大致为 0.2 ~ 0.4,与传统认为的 $\alpha = 0.3 \sim 0.8$ 以及一般土壤的 0.5 取值的结论存在差异。
- (3)灌水与不灌水对 Kostiakov 入渗模型中参数产生了明显影响,渗透性也有明显差异,所以对模型应用时,应该考虑土壤有无灌水和模型参数的取得是田间试验还是室内试验测定值,对其进行相应的修正,已制定合理的灌水技术参数。

参考文献:

[1] 李 卓,吴普特,冯 浩,等. 容重对土壤水分入渗能力影响模拟试验[J]. 农业工程学报,2009,25(6):40-45.

[2] 余海铭,樊贵盛. 影响土壤入渗能力的剖面因素研究[J]. 太原理工大学学报,2009,40(3):307-322.

[3] 汪志农. 灌溉排水工程学(第二版)[M]. 北京:中国农业出版社,2010. 3.