

滴灌土壤湿润体影响因素的实验研究

张振华, 蔡焕杰, 郭永昌, 耿宝江  
(西北农林科技大学)

摘 要: 在实验室内模拟研究了不同滴头流量、土壤初始含水率和容重条件下, 粘壤土点源入渗土壤湿润体水平扩散半径和竖直入渗深度的变化规律。实验结果表明: 初始含水率和容重对土壤湿润体特征值有较明显的影响; 在供水量一定的条件下, 滴头流量对点源积水入渗土壤湿润体特征值没有明显影响; 湿润体形状和大小受灌水量的影响比受滴头流量的影响要大。另外对多滴头交汇入渗条件下湿润体特征值进行了初步研究, 结果表明交界面处水分的水平扩散和竖直入渗速率大于点源下的入渗速率, 随着入渗时间的延长湿润体的形状也逐渐由椭球体向平行于毛管的带状分布过渡。

关键词: 滴灌; 土壤湿润体特征值; 点源入渗; 交汇入渗

中图分类号: S275 文献标识码: A 文章编号: 100226819(2002)0220017204

滴灌是当今世界最先进的灌水技术之一。在正确的系统设计和高水平的田间作物水分管理条件下, 滴灌系统能够适时适量地进行灌溉, 在作物的根区创造出适宜的水、肥、气、热条件, 从而获得节水、高产、优质的效果<sup>[1]</sup>。对点源入渗土壤湿润体特征值及其影响因素的研究, 是正确的系统设计和高水平的田间作物水分管理的前提和基础, 国内外学者对该问题已进行了一些研究<sup>[2~5]</sup>。在实际应用中, 相邻滴头的湿润体经常出现相互搭接的情况, 该现象势必对湿润体特征值产生影响, 故点源入渗条件下的湿润体特征值的变化规律不适用于交汇条件下。过去的研究主要集中在点源入渗条件下的砂质土壤, 而对于粘质土壤的点源积水入渗, 特别是多点源交汇入渗及其影响因素的研究很少。

1 材料方法

1.1 供试土壤

本次试验供试土壤为杨凌粘壤土, 土壤机械组成见表 1。试验前将风干土过 0.15 mm 孔径细筛, 按照预定容重(无特殊声明均为 1.13 g/cm<sup>3</sup>)分层装进试验箱内。土壤水分特征曲线采用 Van Genuchten 模式拟合

$$S_e = \frac{H - H_r}{H - H_r} = [1 + (Ah)^n]^{-m}$$

式中  $S_e$ ——有效饱和度;  $h$ ——土壤基质势;  $n$  和  $m$ ——拟合得到的常数, 且  $m = 1 - 1/n$ ;  $A$ ——与土壤特性有关的参数;  $H$ 、 $H_r$  和  $H$ ——分别为土壤含水率、残留含水率和饱和含水率(体积比)。土壤常数及所拟合的参数如表 2 所示<sup>[6]</sup>。

表 1 供试土壤的机械组成

Table 1 Particle size analysis of clay loam

粒径/mm						土壤容重/g · cm <sup>-3</sup>
< 0.15 mm	< 0.125 mm	< 0.105 mm	< 0.101 mm	< 0.1005 mm	< 0.1001 mm	
100	99149	9212	4713	3315	2114	1130

表 2 供试土壤 Van Genuchten 模式土壤水分特征曲线参数

Table 2 Parameters of hydraulic characteristic curve of clay loam by Van Genuchten

脱湿过程					吸湿过程				
H	H	n	A	R	H	H	n	A	R
01460	01107	11282	- 21288	01845	01460	01107	11247	- 51471	01828

1.2 试验系统

整个试验系统由试验土箱和供水系统两部分组成。试验采用矩形土箱, 对于点源入渗取滴灌形成湿润体的 1/4 作为研究对象, 对于交汇入渗取滴灌形成湿润体的 1/2 作为研究对象。为了方便在不同流

收稿日期: 2001210212 修订日期: 2002202202  
基金项目: 国家自然科学基金(50079024)和教育部优秀青年教师资助计划资助项目  
作者简介: 张振华(1971- ), 男, 河北藁城人, 西北农林科技大学在读博士, 陕西杨凌, 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 712100

量下试验,选取了3个不同尺寸的有机玻璃土箱,其规格分别为30 cm×30 cm×30 cm,50 cm×40 cm×40 cm,50 cm×60 cm×60 cm(高×长×宽)。本次试验用马氏瓶供水,在恒定水头下通过调节旋钮开度来控制滴头流量。

113 试验方法和观测内容

将试验土风干过筛,然后按容重分层均匀装土。点源入渗开始后,用秒表计时并定时观测土壤湿润体水平扩散距离、竖直入渗距离随时间的变化过程。并且在有机玻璃箱外壁上定时描出不同时刻所对应的湿润锋形状。每组试验重复3次,取其平均值作为试验结果。上述试验均在西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室内进行。

2 结果分析

211 滴头流量对湿润体特征值的影响

点源入渗的地表水平扩散半径和竖直入渗深度是湿润体的2个特征值,掌握特定土壤条件下不同滴头流量入渗过程中该值与入渗时间的关系,是确定滴灌毛管田间布置方式和滴头间距的重要依据。对粘壤土的点源入渗试验资料分析表明,在土壤容重、初始含水率确定的条件下,土壤湿润体的水平扩散半径和竖直入渗深度均和入渗时间成幂函数关系,且 $R^2$ 均在0.19以上。由图1和图2可看出,二者均随入渗时间的增加而逐渐变大,并且在同一入渗时段内,随流量的增大,湿润体水平扩散半径( $r$ )和竖直入渗深度( $h$ )也相应变大。生产实践中人们更关心灌水量和滴头流量对湿润体特征值的影响,即在相同的灌水定额条件下不同的滴头流量对湿润体特征值的影响规律。对粘壤土的点源积水入渗试验资料分析表明:在其他条件一定的情况下,相同的灌水量对应的湿润体特征值与滴头流量间没有明显的关系,湿润体特征值只受灌水量的影响。该结果与Fletcher和Wilson(1983)以及Roth(1974)对沙土的试验结果一致<sup>[7,8]</sup>。

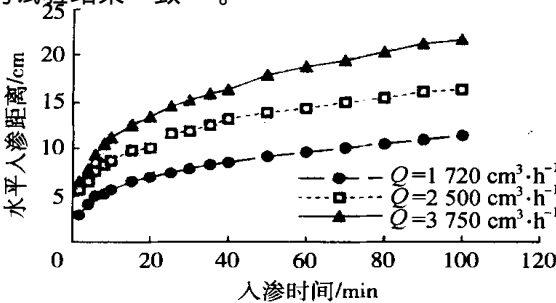


图1 粘壤土湿润体水平半径变化过程

Fig 1 The horizontal wetting front during infiltration

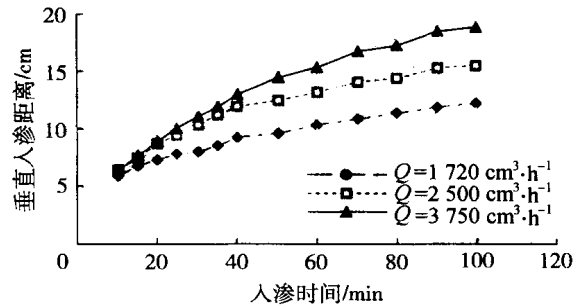


图2 粘壤土湿润体竖直入渗距离变化过程

Fig 2 The vertical wetting front during infiltration

212 土壤容重对湿润体特征值的影响

土壤容重对于土壤的持水和导水特性有着很大的影响,土壤容重的改变势必对滴灌湿润体产生影响<sup>[9]</sup>。对粘壤土的试验表明,在其他条件完全一致的情况下,不同的土壤容重对土壤湿润体有着不同的影响:如图3、4所示,对于同一滴头流量( $Q = 5 000 \text{ cm}^3/\text{h}$ ),在相同的入渗时间内(同一灌水量)大容重土壤的水平扩散距离明显大于小容重的土壤,而其竖直入渗距离则小于小容重土壤。实验表明在大容重土壤表面出现了更大面积的积水,从而加快了水分在地表的扩散,这表明随着土壤容重的增加,水分向横向的分布距离加大。

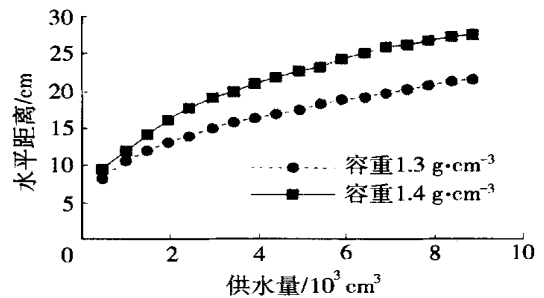


图3 土壤容重对水平扩散入渗的影响

Fig 3 The effect of bulk density on horizontal wetting front

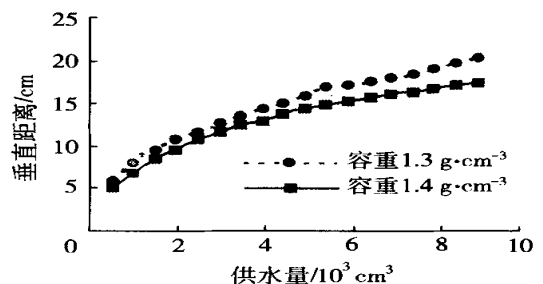


图4 土壤容重对水分竖直入渗的影响

Fig 4 The effect of bulk density on vertical wetting front

213 水平扩散半径与竖直入渗距离的比值的变化规律

如果已知水平扩散距离和竖直入渗深度之间的函数关系, 便可利用易得到的湿润体水平扩散半径( $r$ )推求出湿润体的形状。图 5 是点源入渗下土壤湿润体水平距离与竖直距离的比值和时间的关系曲线。经过拟合二者符合幂函数关系,  $R^2$  均在 0.19 以上。由图 5 可知, 较小滴头流量在入渗的初始阶段比值小于较大流量。无论是大滴头流量还是小滴头流量, 湿润体水平半径和竖直距离的比值随着时间的增大都逐渐变小, 这说明随着灌水历时的增加, 湿润体垂直入渗速率逐渐大于水平扩散速率。当入渗时间超过 100 min 以后, 两个滴头下的比值基本相同。形成这种现象的原因是: 在入渗的初始阶段湿润锋处的基质势梯度远远高于重力势梯度, 因此水平和竖直方向上入渗速率基本一致, 但由于入渗初始阶段的入渗面积较小, 滴头流量大于土壤的入渗吸收能力, 在滴头下方形成了地表积水, 从而表现为水平扩散速率大于竖直入渗速率。随着灌水历时的增加, 润湿体内土壤含水率逐渐增大, 水势梯度急剧变小, 此时重力势的作用相对增大, 导致竖直入渗速率高于水平扩散速率。

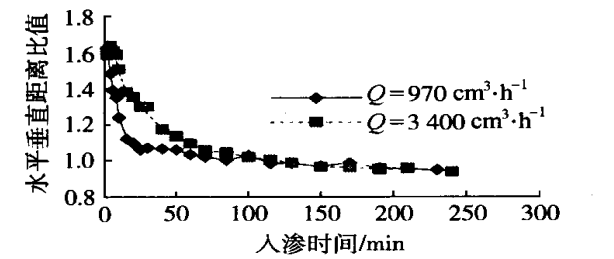


图 5 水平与竖直入渗距离比值变化过程  
Fig 5 The ratio of horizontal wetting front to vertical wetting front

214 初始含水率对土壤湿润体特征值的影响

对于不饱和土壤而言, 不同的土壤含水率对应不同的非饱和导水率, 从而对滴灌的水分入渗过程产生影响。图 6 是在同一土壤容重( $113 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )、同一流量下( $Q = 1420 \text{ cm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )和不同的初始含水率(湿润土的重量含水率为 713%, 风干土壤的重量含水率为 413%)条件下粘壤土的入渗过程。由图 6 可知: 在不同的初始含水率条件下, 湿润体的水平和竖直入渗距离与入渗时间均符合幂函数关系, 初始含水率对于土壤湿润体有着明显的影响, 对于同一种土壤而言在其他条件一致的情况下, 初始含水率大的土壤水分渗透扩散大于初始含水率小的土壤, 在相同的入渗时间内其土壤湿润体也较大。出现上述

结果的原因一方面在于二者导水率存在差异, 即含水率大的土壤导水率高而初始含水率小的土壤导水率低; 另一方面在于二者土壤储水能力之间存在差异, 含水率大的土壤储水能力相应地小于初始含水率小的土壤。

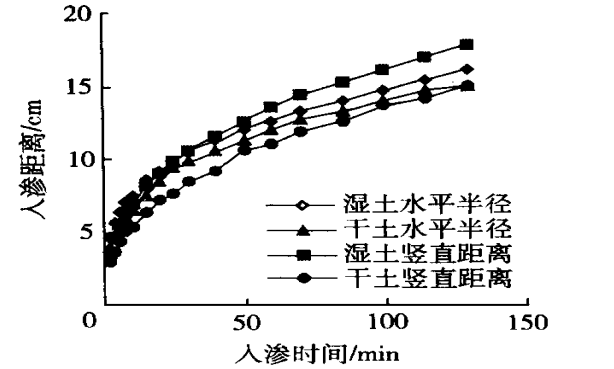


图 6 初始含水率对湿润体的影响  
Fig 6 Effect of initial soil moisture on wetted volume

215 交汇入渗条件下湿润体特征值的变化规律

在生产实践中滴灌多用于条播作物, 其毛管间距较大, 而滴头间距相对较小, 相邻滴头的湿润体经常出现相互搭接的情况<sup>[10]</sup>。该现象势必对湿润体特征值产生影响, 单滴头条件下的湿润体特征值的变化规律不适用于交汇条件下, 因此对多滴头交汇入渗的研究有着重要的意义。考虑到大田作物滴灌带的常用规格, 本次研究的滴头间距设定为 30 cm。在入渗初始阶段湿润体之间没有交汇时, 其湿润体的变化规律跟单滴头完全一致, 这里不再赘述。当湿润体开始搭接时, 由于试验中滴头的流量采用同一值, 故在湿润体的交汇剖面上没有土壤水分相互渗透。水分在界面处汇集而加大了在该处水平扩散和垂直入渗速率, 试验结果表明, 湿润体界面处水分的水平扩散和垂直入渗速率远远大于同一时间滴头下的速率(图 7), 随着入渗时间的延长湿润体形状也逐渐由椭球体向平行于毛管的带状分布过渡。

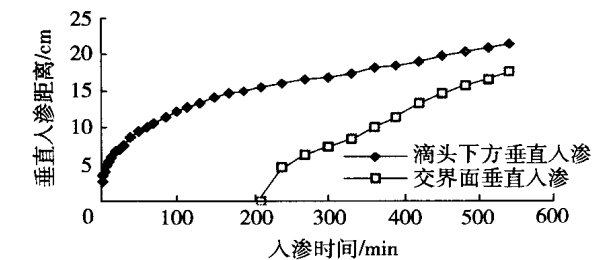


图 7 多源交汇垂直入渗过程  
Fig 7 The vertical wetting front during interfered infiltration

### 3 结果与讨论

本文在点源和多滴头交汇入渗两种条件下,通过对粘壤土湿润体特征值随入渗时间的变化规律、相同灌水量情况下滴头流量对湿润体的影响、水平扩散距离和垂直入渗距离的比值随入渗时间的变化规律以及不同初始含水率、土壤容重对滴灌土壤湿润体影响的研究,得到以下结果:

1) 点源滴灌湿润体水平扩散半径和竖直入渗距离均随着入渗时间的增大而增大,并且与时间成幂函数关系,  $R^2$  均在 0.19 以上。在地表积水条件下,相同灌水量所对应的湿润体特征值与滴头流量没有明显的关系,湿润体特征值只受灌水量影响——该结果至少在试验所用滴头流量范围内成立。

2) 点源滴灌湿润体水平距离与垂直距离的比值随时间的增大而减小,并且成幂函数关系,  $R^2$  在 0.19 以上。

3) 土壤容重和初始含水率对点源滴灌湿润体特征值有较明显的影响:在其他条件一定的情况下,在相同入渗时间内,大容重土壤的水平扩散距离明显大于小容重的土壤,而其垂直入渗距离则小于低容重土壤;在相同的入渗时间内其土壤湿润体也较大。

4) 多滴头交汇入渗条件下,湿润体交界面处水分的水平扩散和垂直入渗速率大于同一时间的滴头下的速率,随着入渗时间的延长湿润体的形状也逐渐由椭球体向平行与毛管的带状分布过渡。

#### [参 考 文 献]

- [1] Meshkat M, R C Warner, S R Workman  
Evaporation reduction potential in an undisturbed soil

irrigated with surface drip and sand tube irrigation  
Trans of the ASAE [J] 2000, 43(1): 79~ 86

- [2] 汪志荣,王文焰,王全九等 点源入渗土壤水分运动规律实验研究[J] 水利学报, 2000, (6): 39~ 44
- [3] 吕殿青,王全九,王文焰 滴灌条件下土壤水盐运移特性的研究现状[J] 水科学进展, 2001, 12(1): 107~ 111
- [4] 刘晓英等 滴灌条件下土壤水分运动规律的研究[J] 水利学报, 1990, (1): 11~ 21
- [5] Levin I, Van Rooyen P G, and Van Rooyen F C. The effect of discharge rate and intermittent water application by point2source irrigation on the soil moisture distribution pattern [J] Soil Sci Soc Am, 1979, 43: 8~ 16
- [6] 康绍忠,梁银丽,蔡焕杰 旱区水2土2作物关系及其最优调控原理[M] 北京: 中国农业出版社, 1998
- [7] Flether Am strong C and T V Wilson Computer modle for moisture distribution in straified soils under a trick source[J] Trans of the ASAE 1983, 26: 1704 ~ 1709
- [8] Roth R L. Soil moisture distribution and wetting pattern from a point source Proocedings of the second international drip irrigation congress San Diego, CA, 1974
- [9] Gmbs F A and B P Warkentin The effect of bulk density and initial water content on infiltration in clay soil samples[J] Soil Sci Soc Am, 1972, 36: 720~ 724
- [10] 李光永,曾德超 滴灌土壤湿润体特征值的数值算法[J] 水利学报, 1997, (7): 1~ 6

致谢: 本试验得到了旱区农业水土工程教育部重点实验室张富仓和李志军老师的大力支持和帮助,特此致谢!

## Experimental Study on Factors Effecting Soil Wetted Volume of Clay Loam Under Drip Irrigation

Zhang Zhenhua, Cai Huanjie, Guo Yongchang, Geng Baojiang

(The Key Laboratory of Agriculture Soil and Water Engineering, Northw esten Science and Technology University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, China)

**Abstract** A series of experiments about the effect of discharge rate, soil bulk density and initial soil water content on soil wetted volume of clay loam soil were carried out in laboratory. The experiment result showed that soil bulk density and initial soil water content significantly affected the soil wetted volume; while the discharge rate did not. The shape and size of the wetted volume were more effected by the amount of water applied than that by the discharge rate. In case of interfered infiltration, the infiltration rate at interface was quicker than that in point source infiltration, and the soil wetted pattern on soil surface became a strip shape, which paralleled to the lateral

**Key words:** drip irrigation; character value of soil wetted volume; point source infiltration; interfered infiltration