

# 用有理设计方法优选地表滴灌滴头流量合理性分析

管瑶<sup>1,2</sup> 贺兴宏<sup>2</sup> 雷廷武<sup>1\*</sup>

(1. 中国农业大学 水利与土木工程学院, 北京 100083;  
2. 塔里木大学 水利与建筑工程学院, 新疆 阿拉尔 843300)

**摘要** 针对地表滴灌单个滴头下土壤水分入渗过程中地表湿润半径  $r$  和垂直入渗深度  $h$  的随时间变化问题, 采用室内土柱试验方法和有理设计方法, 运用试验数据对  $r$  和  $h$  与入渗时间  $T$  的幂函数方程进行参数估算, 并检验参数间相互约束条件。以粉砂壤土为试验材料, 试验研究不同土壤容重(1.3、1.4、1.5 g/cm<sup>3</sup>)和滴头流量(1、2、4、8 L/h)条件下, 单个滴头灌水时  $r$  及  $h$  随时间变化的规律。结果表明: 1) 随着土壤容重的增大, 土壤饱和容积含水量降低,  $r$  几乎没有变化, 垂直入渗深度  $h$  减小; 2) 采用有理设计方法对入渗参数  $A$ 、 $B$  及幂指数  $C$ 、 $D$  进行估算并检验, 参数间满足相互约束条件, 误差较小, 表明可以根据参数  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  估算值, 及  $r$  和  $h$  与入渗时间  $T$  的幂函数方程, 计算  $r$  和  $h$  随时间的推进过程; 3) 给定灌水量 2 L 时, 滴头流量为 1 L/h, 垂直入渗深度较大, 用有理设计方法计算表明一次灌水持续时间较长, 不能满足田间轮灌的要求, 且易产生深层渗漏; 滴头流量为 8 L/h 时, 地表湿润半径过大, 滴头附近地表产生积水。粉砂壤土采用滴灌时, 4 种滴头流量里, 滴头流量为 2~4 L/h 时最为适宜。用有理设计方法计算  $r$  和  $h$  为滴灌系统优化设计提供了理论参考。

**关键词** 地表滴灌; 滴头流量; 有理设计方法; 湿润锋

**中图分类号** S275.6 **文章编号** 1007-4333(2019)10-0109-09 **文献标志码** A

## Rationality analysis based on a rational design method of emitter discharge optimization

GUAN Yao<sup>1,2</sup>, HE Xinghong<sup>2</sup>, LEI Tingwu<sup>1\*</sup>

(1. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;  
2. College of water Conservation and Architectural Engineering, Tarim University, Alaer 843300, China)

**Abstract** Aiming at problems of the changes the surface wetting radius ( $r$ ) and the vertical infiltration depth ( $h$ ) with time under single dripper in surface drip irrigation, a indoor soil column method and rational design method were conducted. The parameters in the power function equation of  $r$ ,  $h$  and infiltration time ( $T$ ) were estimated based on experimental data, and the mutual constraints among these parameters were tested. In the study, a series of infiltration experiments were conducted with silt loam, including three soil bulk densities (1.3, 1.4 and 1.5 g/cm<sup>3</sup>), and four dripper discharge (1, 2, 4 and 8 L/h). The changing processes with time of wetting radius ( $r$ ) and the vertical infiltration depth ( $h$ ) under single dripper irrigation were recorded. The results showed that: 1) The saturated soil water content and  $h$  decreased with the increasing of the soil bulk density, while the soil bulk density showed little effect on  $r$ . 2) The infiltration parameters ( $A$ ,  $B$ ) and power exponent ( $C$ ,  $D$ ) were estimated and tested by the rational design method, the mutual constraint conditions were satisfied among the parameters, and the error was small. It indicated that the changing process of  $r$  and  $h$  could be calculated based on the power function and the parameters ( $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$ ). 3) For a given irrigation amount of 2 L, the vertical infiltration depth was relatively deeper when the dripper discharge was

收稿日期: 2018-11-27

基金项目: 国家自然科学基金应急管理项目(51541908)

第一作者: 管瑶, 副教授, 博士研究生, 主要从事农业高效节水研究, E-mail: guanyao1206@163.com

通讯作者: 雷廷武, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀和旱地农业研究, E-mail: leitingwu@cau.edu.cn

1 L/h, which could easily resulted in deep percolation. Meanwhile, the duration of one irrigation calculated by rational design method was relatively longer, and it met the requirements of field rotation irrigation; The surface wetting radius was relatively larger when the dripper discharge was 8 L/h, resulting in surface water accumulation near the dripper. In conclusion, the flow rates of 2 and 4 L/h were more suitable for the drip irrigation under silt loam soil condition. This study indicated that the rational design method could be used as a tool for optimal design of drip irrigation system.

**Keywords** surface drip irrigation; drip discharge; rational design method; wetting front

滴灌以水滴形式通过滴头将灌溉水滴到农田地表, 经过土壤入渗过程逐渐湿润土壤, 滴头出流所湿润的较小土壤范围为植物根系提供可吸收的水分。滴头水流对土壤水分的湿润范围和入渗深度, 是滴灌系统设计中滴头流量选择的关键因素。

国内外关于滴头流量对土壤湿润范围影响的研究较多<sup>[2-6]</sup>。研究表明单个滴头土壤湿润范围或湿润锋形状近似呈半椭球体, 有研究提出用地表湿润直径代替广泛使用的湿润面积比, 进而代替湿润体积比, 进行湿润比设计, 并提出设计湿润比的方法。湿润体体积受滴头流量、灌水时间或灌水量的控制, 随着滴头流量增加, 地表湿润半径增大; 滴头流量增大对垂直入渗深度的影响不明显<sup>[2,6]</sup>。

近年来, 滴灌技术广泛应用于各类粮食作物(如小麦、玉米等)、经济作物(如棉花、枣树、苹果树蔬菜)等的种植, 不同种类作物的根系发育不同, 需水量、需水时间不同, 吸水所需的湿润层深度、湿润面积也不同。滴灌是否有效、及时为植物提供生长所需要的水分, 以保证产量和质量, 均受到滴头出流所湿润土壤范围的影响<sup>[7]</sup>。

本研究拟采用室内土柱试验方法和有理设计方法, 针对地表单个滴头下入渗时地表湿润半径和垂直入渗深度随时间的变化问题, 分析不同容重、不同滴头流量对土壤湿润体的影响。运用试验数据对地表湿润半径和垂直入渗深度与入渗时间的幂函数方程进行参数估算并检验, 从理论上确定适合的滴头流量, 以期对滴灌工程设计优选滴头流量提供理论参考。

## 1 滴灌有理设计方法

有理设计方法, 可根据滴头流量影响下土壤湿润范围确定滴灌水平湿润半径和垂直入渗深度<sup>[1]</sup>。

基本假设: 1) 要求滴头(灌水器)间的距离足够大, 以致各滴头的湿润范围相互不重叠或互不影响; 2) 试验土壤质地均匀, 初始含水量分布均匀; 3) 入渗过程近似符合 Green-Ampt 模型及存在明显的湿润锋, 湿润锋后为湿润区, 湿润区土壤含水量为

饱和含水量, 湿润锋前含水量为土壤初始含水量; 4) 点源入渗条件下, 土壤湿润体形状近似为半椭球体, 坐标中心在滴头下入水点。

已有研究表明, 地表滴灌水分入渗形成的土壤湿润体形状是以滴头下方地表处为圆心, 以垂直方向为对称轴的半椭球体, 任意时刻土壤湿润体二维半椭球体的解析表达式为<sup>[4-13]</sup>:

$$\frac{x^2}{M^2} + \frac{z^2}{N^2} = 1 \quad (1)$$

式中:  $x$  为湿润土壤剖面水平方向湿润距离, cm;  $z$  为湿润土壤剖面垂直方向的入渗深度, cm;  $M$  为水平半轴的长度, cm;  $N$  为垂直半轴的长度, cm。

根据土壤入渗率随时间呈幂指数变化的关系, 在恒定流条件下, 单个滴头所湿润土壤区随时间的变化过程为:

$$x = r = AT^C \quad (2)$$

$$z = h = BT^D \quad (3)$$

式中:  $A$ 、 $B$  为入渗参数,  $C$ 、 $D$  为幂指数;  $T$  为灌水时间, min;  $r$  为滴头下地表湿润半径, cm;  $h$  为滴头下垂直入渗深度, cm。湿润体体积  $V$  用半椭球体体积的计算, 公式为:

$$V = \frac{2}{3}\pi A^2 BT^{2C+D} = 2.0944A^2 BT^{2C+D} \quad (4)$$

入渗深度  $h$  在垂直方向应满足所有灌溉水均在作物有效根区内, 即: 既不发生深层渗漏又要达到一定的计划湿润深度  $H$ , 从而:

$$h \leq H \quad (5)$$

当灌溉的湿润深度  $H$  取最大值时,  $z = H$  代入式(3), 可得  $H = h = BT^D$ 。

水分入渗使土壤湿润体内含水量增加, 根据水量平衡, 灌水量  $Q$  应等于湿润体体积  $V$  与湿润范围内土壤体积分含水量的净增加量  $\Delta\theta$  的积, 即:

$$Q = V\Delta\theta \quad (6)$$

式中:  $q$  为滴头流量, L/h。将式(4)代入式(6), 得:

$$Q = \frac{2}{3}\pi r^2 h \Delta\theta = \frac{2}{3}\pi (AT^C)^2 (BT^D) \Delta\theta = 2.0944A^2 B \Delta\theta T^{2C+D} \quad (7)$$

要保证式(7)等式成立,参数  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  应满足相互约束条件:

$$\begin{cases} q = 2.0944A^2B\Delta\theta \\ T = T^{2C+D} \end{cases}$$

为保证参数约束条件成立,等式两边必须相等,对约束条件进行整理得到:

$$\begin{cases} A^2B = 0.4775 \frac{q}{\Delta\theta} \\ 2C + D = 1 \end{cases} \quad (8)$$

参数检验满足式(8)给出的约束条件后,根据  $H = BT^D$  计算得出灌水时间  $T$ :

$$T = \frac{H^{\frac{1}{D}}}{B} \quad (9)$$

## 2 材料与方法

### 2.1 试验仪器及组成

试验仪器包括:一个厚度为 8 mm 有机玻璃制成的角度为  $60^\circ$  的正三棱柱体透明土箱;可调节流量的恒流泵(型号为 BT100-01);由内直径为 1 mm 的 8 号针头和直径为 1 cm 的圆形海藻棉构成的点源布水器以及由计算机、数码相机、标定板及软件构成的土壤入渗自动测量系统<sup>[8]</sup>。海藻棉放置在三棱柱一角的供试土壤上,针头插在海藻棉的中间;恒流泵出口流出的水流从针头流到海藻棉上,然后到达供试土壤表面。点源布水器可以避免水流对地表的直接打击作用,从而最大程度上保证了地表土壤的原状性。土箱的侧面固定有透明胶片,用于记录地

表湿润半径  $r$  及垂直入渗深度  $h$  随时间的推进过程。图 1 为点源入渗测量系统设备示意图。

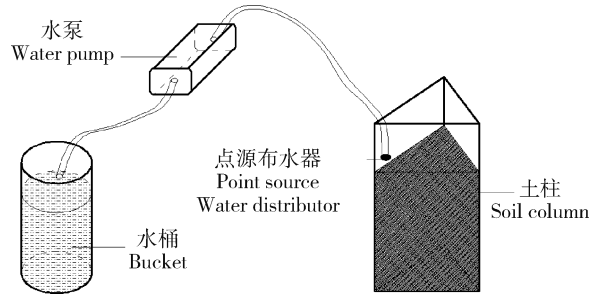


图 1 点源入渗测量系统示意图

Fig. 1 Experimental apparatus of soil infiltration measurement system

### 2.2 试验材料及试验设计

试验采用的土壤为北京市房山区农田耕层土壤。土壤黏粒( $d \leq 0.002$  mm)质量分数为 15%,粉粒( $0.002 \leq d \leq 0.02$  mm)质量分数 50.2%,砂粒( $0.02 \leq d \leq 2$  mm)质量分数 34.8%,按照国际土壤质地分类标准,试验土壤为粉砂壤土。供试土壤自然风干后质量含水量为 2%。

根据原状土容重  $\rho = 1.35$  g/cm<sup>3</sup>,土柱试验中土壤容重设置 3 个水平,分别为 1.3、1.4、1.5 g/cm<sup>3</sup>;滴头流量  $q$  采用等比数列设置 4 个水平,分别为 1、2、4、8 L/h。为了得到全面试验信息,采用全面析因试验设计法,对所选取的试验因素所有水平组合全部实施,共 12 个处理(表 1)。每个处理设 3 个重复,所有处理灌水时间均为 180 min。

表 1 土壤容重和滴头流量对地表湿润半径和垂直入渗深度影响的试验设计方案

Table 1 Experimental design of bulk density and drip discharge for the wetting surface radius and vertical infiltration depths

处理 Treatment	容重/(g/cm <sup>3</sup> ) Bulk density	滴头流量/(L/h) Drip discharge	处理 Treatment	容重/(g/cm <sup>3</sup> ) Bulk density	滴头流量/(L/h) Drip discharge
T1	1.3	1	T7	1.4	4
T2	1.3	2	T8	1.4	8
T3	1.3	4	T9	1.5	1
T4	1.3	8	T10	1.5	2
T5	1.4	1	T11	1.5	4
T6	1.4	2	T12	1.5	8

## 2.3 观测项目及方法

湿润锋地表湿润半径  $r$  及垂直入渗深度  $h$  采用人工进行绘制在透明胶片上。自灌水开始后,用秒表计时,按照一定时间间隔,绘制土壤湿润锋。初始时湿润锋推进较快,以 1 min 为间隔测量。5 min 后,湿润锋推进较慢,以 5 min 为间隔测量。30 min 后以 10 min 为间隔,120 min 后以 20 min 为间隔,测量直至灌水结束。

## 2.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2010 软件和 SPSS 19.0 统计软件对试验数据进行整理作图及统计分析,采用 Grapher 7.0 对参数进行拟合估算。

## 3 结果与分析

### 3.1 土壤结构对湿润范围的影响

在大田种植条件下,由于机械耕作、种植年限及人为扰动等原因,土壤容重是变化的、不均匀的。土壤容重对土壤的蓄水和通气性能、灌溉质量、灌溉效果等有着重要的影响。随着土壤容重的增加,土壤

饱和含水量、饱和导水率、有效含水量减小、凋萎含水量、无效含水量增加<sup>[18]</sup>。

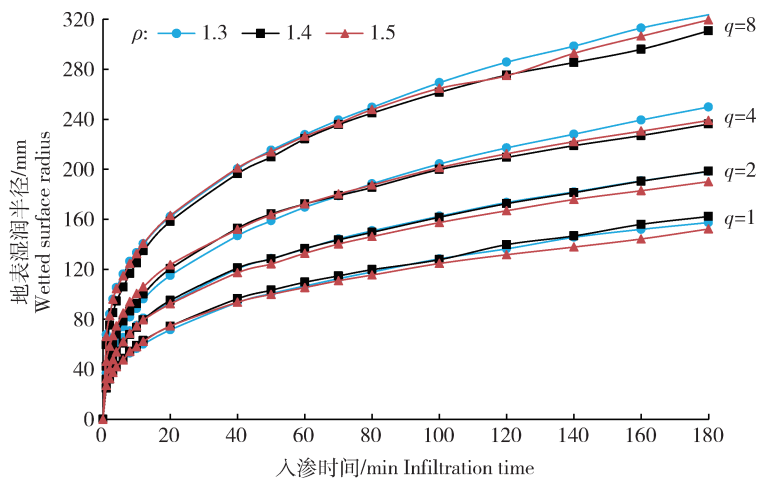
不同土壤容重条件下土壤饱和容积含水量  $\theta_s$  的计算公式为:

$$\theta_s = \frac{2.65 - \rho}{2.65} \times 100$$

式中: $\rho$  为水的密度,  $\text{g}/\text{cm}^3$ , 本研究计算时取  $\rho = 1 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。土壤容重分别为 1.3、1.4、1.5  $\text{g}/\text{cm}^3$  时,土壤饱和容积含水量分别为 50.576、47.17 和 43.4  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 。

由计算得到的土壤饱和容积含水量看出,随着土壤容重的增加,土壤饱和容积含水量降低。说明随着土壤容重的增加,土壤的持水度减小。相同灌水量条件下,容重大的土壤更易产生地表积水。

同一滴头流量下,不同土壤容重地表湿润半径的变化趋势一致(图 2)。地表湿润半径与时间成幂函数的关系,由式(2)确定。随着土壤容重的增大地表湿润半径几乎没变化,说明同一滴头流量下,土壤容重对地表湿润半径的影响不明显。



$q$  为滴头流量,  $\text{L}/\text{h}$ ;  $\rho$  为土壤容重,  $\text{g}/\text{cm}^3$ 。下同。

$q$  represents drip discharge;  $\rho$  represents soil bulk density. The same below.

图 2 不同处理地表湿润半径随时间的变化

Fig. 2 Wetting surface radius as functions of time under different treatments

同一滴头流量下,不同土壤容重,水分垂直入渗深度与入渗时间成幂函数的关系,在有限的时间内,垂直入渗深度随时间的变化可以用式(3)表示。随着土壤容重由 1.3  $\text{g}/\text{cm}^3$  增加到 1.5  $\text{g}/\text{cm}^3$ ,水分垂直入渗深度减小(图 3),产生这种现象的原因是,容重小的土壤增大土壤的入渗和持水能力。

### 3.2 滴头流量对湿润锋推进及湿润体体积的影响

湿润土壤的两点之间存在一定的势能差即为驱动水在土壤中流动的能量。水分进入土壤后,除在重力作用下垂直向下运动,还由于基质势(毛管势)的作用向四周扩散。

#### 3.2.1 滴头流量及灌水量对地表湿润半径的影响

当容重不变,在一定时间段内,地表湿润半径  $r$

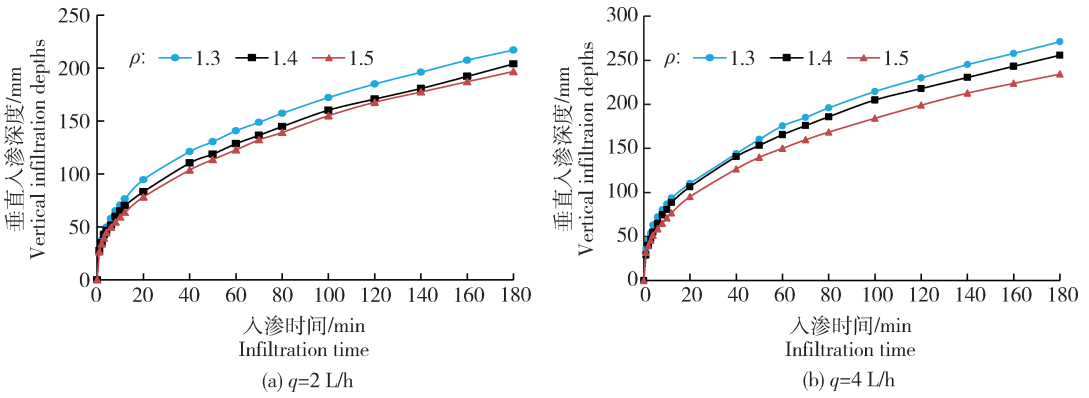


图 3 不同处理垂直入渗深度随时间的变化

Fig. 3 Vertical infiltration depths as functions of time under different treatments

随入渗时间  $T$  和滴头流量  $q$  的变化过程见图 2。由于初始阶段土壤具有较大的入渗性能,土壤基质势起控制作用,重力势作用不明显,故地表湿润半径增加的较快,一定时段以后逐渐变缓。各滴头流量下,由于土壤的入渗能力与供水能力一致处于平衡状态,地面几乎不产生积水。

地表湿润半径  $r$  与灌水时间  $T$  近似呈幂函数的关系,不同容重、不同滴头流量下入渗参数  $A$  和幂指数  $C$  不同,将试验数据用式(2)进行回归分析,得到对应于不同容重、不同滴头流量的参数  $A$ 、 $C$  值及相关系数  $R^2$ (表 2)。

由表 2 参数  $C$  的估算值可以看出,随着滴头流

量的增大,幂指数  $C < 1$  且随滴头流量增大变化不大,表明当灌水时间  $T \rightarrow \infty$  时,地表湿润半径  $r$  随灌水时间的延长趋近于稳定将不再扩散,即  $dr/dT \rightarrow 0$ 。由参数  $A$  的估算值看出,土壤容重变化对参数  $A$  影响不大。3 种容重条件下,参数  $A$  均随着滴头流量增加而增加,相关系数均达到 0.99,表明地表湿润半径不仅随时间变化,还随滴头流量增大而增大。地表湿润半径与灌水量的关系见图 4。滴头流量  $q$  与入渗时间  $T$  的乘积等于灌水量。用试验数据对地表湿润半径与灌水量之间的关系进行拟合后得到 4 种滴头流量下,地表湿润半径与供水量的关系为幂函数关系:

表 2 不同处理地表湿润半径入渗参数  $A$ 、指数  $C$  及其相关系数

Table 2 Infiltration coefficient  $A$ , exponent  $C$  and correlation coefficient of the wetted surface radius for different treatments

土壤容重/(g/cm <sup>3</sup> ) Bulk density	参数 Parameter	滴头流量/(L/h) Drip discharge			
		1	2	4	8
1.3	$A$	25.813	36.405	44.036	69.047
	$C$	0.346	0.321	0.326	0.293
	$R^2$	0.998	0.997	0.999	0.995
1.4	$A$	25.951	34.015	45.035	59.621
	$C$	0.337	0.343	0.329	0.324
	$R^2$	0.999	0.999	0.990	0.999
1.5	$A$	27.889	35.412	48.582	67.964
	$C$	0.328	0.324	0.301	0.295
	$R^2$	0.998	0.998	0.999	0.999

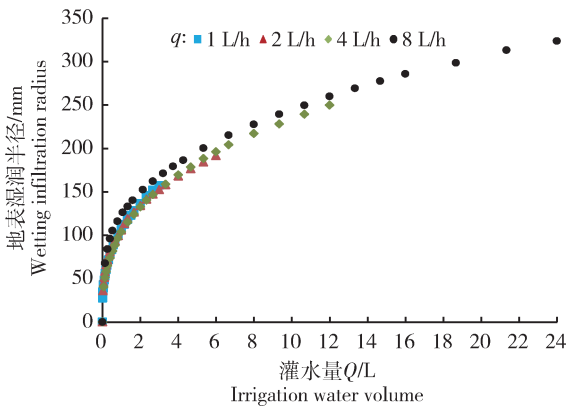


图4 不同滴头流量下地表湿润半径与灌水量的关系

Fig. 4 Relationship between wetting radius and irrigation water volume under drip discharge

$$r = \alpha_0 (Q)^{\beta_0}$$

滴头流量为 1、2、4 L/h 时, 参数  $\alpha_0$  分别为 107.19、107.72、103.66, 幂指数  $\beta_0$  均为 0.35, 表明地表湿润半径不受灌水量影响。滴头流量为 8 L/h 时, 参数  $\alpha_0$  为 121.93, 与滴头流量为 1、2、4 L/h 时相比, 参数  $\alpha_0$  明显增大; 幂指数  $\beta_0$  为 0.31, 与滴头流量为 1、2、4 L/h 时相比, 变化不大, 表明滴头流量为 8 L/h 时, 地表湿润半径受到灌水量一定影响。

### 3.2.2 滴头流量及灌水量对垂直入渗深度的影响

入渗初始阶段, 土壤入渗速率较大, 但入渗率降低的速度很快, 所以土壤湿润深度迅速增大, 土壤湿

润面积迅速增大。经过一定时段后, 入渗降低而垂直湿润深度推进逐渐变缓, 垂直入渗深度  $h$  随入渗时间  $T$  的变化见图 5。

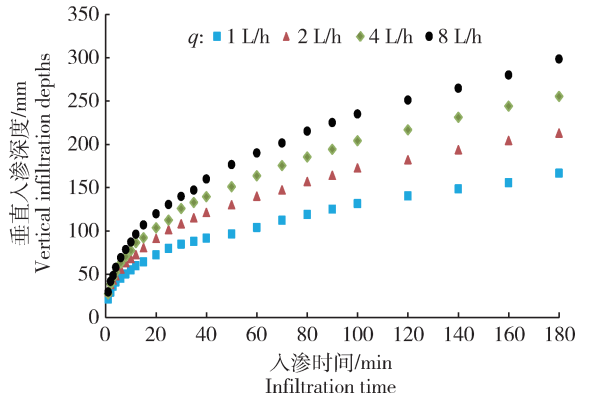


图5 土壤容重为 1.3 g/cm³ 不同滴头流量垂直入渗深度与时间的关系

Fig. 5 Vertical infiltration depths as functions of time under 1.3 g/cm³ bulk density

根据式(3), 土壤垂直入渗深度  $h$  与灌水时间  $T$  成幂函数关系。运用试验数据对幂函数方程中的参数进行拟合估算, 结果见表 3。随着滴头流量增加, 参数  $B$  随着滴头流量的增加而增加, 幂指数  $D$  约为 0.4, 相关系数均大于 0.99。表明垂直入渗深度的大小与入渗时间和滴头流量有关, 垂直入渗深度与灌水量的关系见图 6。

表3 不同处理垂直入渗深度入渗参数  $B$ 、指数  $D$  及其相关系数

Table 3 Infiltration coefficient  $B$ , exponent  $D$  and correlation coefficient of the vertical infiltration depths for different treatments

土壤容重/(g/cm³) Bulk density	参数 Parameter	滴头流量/(L/h) Drip discharge			
		1	2	4	8
1.3	$B$	22.930	28.573	31.323	34.301
	$D$	0.377	0.387	0.409	0.416
	$R^2$	0.998	0.999	0.999	0.999
1.4	$B$	24.166	26.304	37.020	39.580
	$D$	0.394	0.396	0.385	0.382
	$R^2$	0.999	0.997	0.998	0.999
1.5	$B$	22.160	22.244	25.147	33.898
	$D$	0.378	0.423	0.426	0.413
	$R^2$	0.997	0.998	0.999	0.999

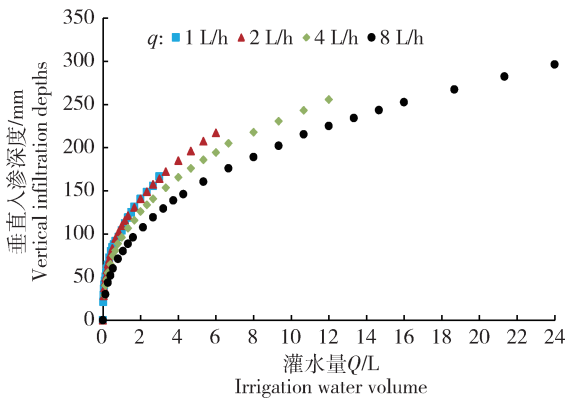


图 6 不同滴头流量垂直入渗深度与灌水量的关系

Fig. 6 Relationship between the vertical advance distance and irrigation water volume under different drip discharge

将不同处理参数  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  的拟合值(表 2 和表 3)代入参数约束条件式(8), 计算得出所有处理约束条件  $A^2B$  与  $0.4775q/\Delta\theta$  之间的相对误差为  $10.24\% \sim 0.4\%$ , 约束条件  $2C+D$  与 1 之间的相对误差为  $7.79\% \sim 1.57\%$ , 误差较小。说明, 粉砂壤土可以用式(2)、(3)计算地表湿润半径及湿润锋垂直入渗深度随时间的推进过程, 且理论与实际具有较好的一致性。

### 3.2.3 滴头流量及灌水量对地表湿润半径的影响

当滴头流量为 1、2、4 L/h 时, 土壤入渗水流垂直入渗深度与地表湿润半径都随着滴头流量的增大而增大, 垂直入渗深度略大于地表湿润半径。与 1、2、4 L/h 相比, 滴头流量为 8 L/h 的地表湿润半径与垂直入渗深度比较结果差别较大, 地表湿润半径大于垂直入渗深度(图 7)。这是由于滴头流量超过 4 L/h, 土壤水分入渗时土壤基质势起控制作用, 因此地表湿润半径增大快于垂直入渗深度。同时表明: 滴头流量大, 土壤水分运动促进水分水平方向上的运动<sup>[19]</sup>。为使单个滴头不产生过大的地表湿润面积, 粉砂壤土设计滴灌系统时滴头流量不宜过大。

### 3.2.4 滴头流量及灌水量对湿润体体积的影响

当灌水量同为 2 L 时, 滴头流量为 1、2、4、8 L/h 时需要的灌水时间分别是 120、60、30、15 min。用手工绘制出土壤湿润锋推进过程, 得出灌水量为 2 L 时的土壤湿润体分布剖面图(图 8)。可以看出, 当灌水量同为 2 L 时, 4 种滴头流量, 滴头流量为 8 L/h 的地表湿润半径最大, 比 1 L/h 时的湿润半径多出 28.5 mm; 滴头流量为 1 L/h 时的垂直湿润深度

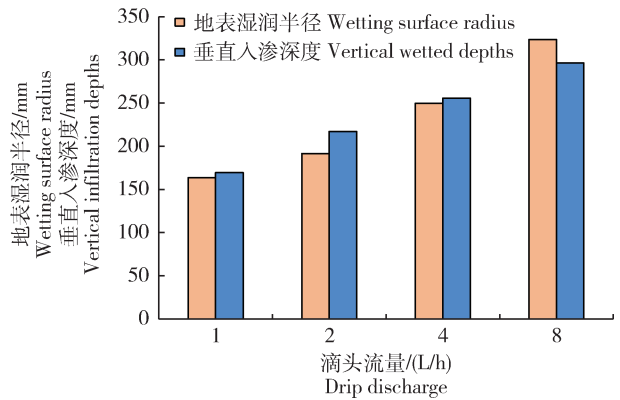


图 7 不同滴头流量垂直入渗深度与地表湿润半径的比较

Fig. 7 Comparisons of the wetting surface radius and the vertical advance distance under different drip discharge

比 8 L/h 的垂直入渗深度多出 35 mm。表明, 相同灌水量条件下, 滴头流量大, 地表湿润半径大; 滴头流量小, 土壤需要的灌水时间长, 土壤重力势对土壤水分入渗起主要控制作用, 土壤水分垂直运动深度增加。

由式(6)计算可得, 4 种滴头流量下 1 L/h 的湿润体体积最大, 2、4、8 L/h 的湿润体体积近似相等, 1 L/h 的湿润体体积比 2、4、8 L/h 的湿润体体积多出 10%。说明, 相同灌水量条件下, 滴头流量对湿润体体积的影响不大, 但滴头流量小, 土壤垂直入渗深度大, 易产生深层渗漏。

所有处理实测  $A$ 、 $B$  值计算得到湿润体体积与估算的  $A$ 、 $B$  值计算得到湿润体体积相比, 相对误差均小于 5.54%。证明用椭圆方程拟合粉砂壤土湿润体形状具有较高的精度。

### 3.3 误差分析

采用水量平衡原理对灌水量进行相对误差分析。通过比较总灌水量  $Q_1$  与土壤湿润体体积含水量的总增量  $Q_2$ , 即可计算得到试验的相对误差。

当滴头流量为  $q$  时, 总灌水量为  $Q_1 = q \cdot T$ , 同时, 土壤湿润体体积含水量的总增量  $Q_2 = \Delta\theta V$ , 因此, 水量平衡误差计算公式为:

$$\delta = \left| \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \right| \times 100\%$$

将灌溉 180 min 时的总供水量和土壤湿润体体积含水量的总增量进行误差比较, 所有处理误差范围为  $3.4\% \sim 10.69\%$ 。由此可知, 湿润体体积与土壤含水量净增量的积计算的灌水量  $Q_2$  不稳定, 存在波动范围, 计算值均小于供水量  $Q_1$ 。

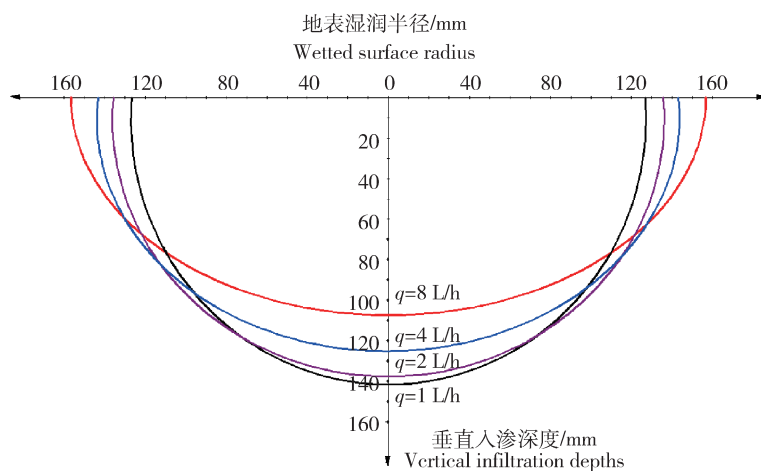


图8 灌水量为2 L时土壤水量分布剖面示意图

Fig. 8 Soil water distribution profile of the same irrigation water volume 2 L

## 4 结论

1) 随着土壤容重的增加, 土壤持水度减小。

2) 同一滴头流量下, 不同土壤容重地表湿润半径的变化趋势一致, 地表湿润半径与时间成幂函数的关系; 土壤容重对地表湿润半径的影响不明显; 垂直入渗深度随着土壤容重的增加而略有减小。

3) 湿润体水平和垂直扩散距离均与时间有显著的幂函数关系。当滴头流量为1 L/h时, 水分在垂直方向入渗较深, 湿润体体积略大于其他滴头流量的湿润体体积; 当滴头流量为8 L/h时, 地表湿润半径较大, 但计算得到的湿润体体积与滴头流量为2、4 L/h的湿润体体积相比变化不大。

4) 对粉砂壤土采用滴灌有理设计方法, 能够直接计算单个滴头下地表湿润半径及湿润锋垂直入渗深度, 且理论与实际具有较好的一致性。

## 参考文献 References

[1] 李明思, 康绍忠, 孙海燕. 点源滴灌滴头流量与湿润体关系研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(4): 32-35  
Li M S, Kang S Z, Sun H Y. Relationships between dripper discharge and soil wetting pattern for drip irrigation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(4): 32-35 (in Chinese)

[2] Nakayama F S, Bucks D S. Trickle irrigation for crop production: Design, operation and management[M]. New York, *Soil and Tillage Research*, 1986: 191-192

[3] 赵颖娜, 汪有科, 马理辉, 黎朋红, 段雪松, 张陆军. 不同流量对滴灌土壤湿润体特征的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28

(4): 30-34

Zhao Y N, Wang Y K, Ma L H, Li P H, Duan X S, Zhang L J. Study on effects of different dripper discharge on wetting soil characteristic of drip irrigation[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2010, 28(4): 30-34 (in Chinese)

[4] 张振华, 蔡焕杰, 郭永昌, 耿宝江. 滴灌土壤湿润体影响因素的实验研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(2): 17-20

Zhang Z H, Cai H J, Guo Y C, Geng B J. Experimental study on factors effecting soil wetted volume of clay loam under drip irrigation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2002, 18(2): 17-20 (in Chinese)

[5] 张振华, 蔡焕杰, 杨润亚. 地表滴灌土壤湿润体特征值的经验解[J]. 土壤学报, 2004, 41(6): 870-875

Zhang Z H, Cai H J, Yang R Y. An empirical solution of characteristic values of wetted solum under surface drip irrigation[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(6): 870-875 (in Chinese)

[6] 李道西, 代小平, 冯江, 雷宏军, 柴红敏. 滴头流量和灌水量对滴灌土壤水分运动的影响[J]. 节水灌溉, 2012(2): 13-15

Li D X, Dai X P, Feng J, Lei H J, Cai H M. Effect of emitter discharge and irrigation amount on soil water movement under drip irrigation[J]. *Water Saving Irrigation*, 2012(2): 13-15 (in Chinese)

[7] 肖娟, 雷廷武, 李光永. 水质及流量对盐碱土滴灌湿润锋运移影响的室内试验研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(2): 88-91

Xiao J, Lei T W, Li G Y. Laboratory experiment study on the effects of water quality and emitter discharge on wetted soil geometry and volume[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(2): 88-91 (in Chinese)

[8] 雷廷武, 郑耀泉, 聂光镛. 滴灌湿润比的有理设计方法及应用[J]. 农业工程学报, 1992, 8(1): 23-34

Lei T W, Zheng Y Q, Nie G Y. A rational design method for wetted percentage of trickler irrigation and its applications[J].



- Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 1992,8(1):23-34 (in Chinese)
- [9] 张雅楠,黄兴法,毛丽丽,刘汗.土壤入渗性能自动测量系统原理与应用研究[J].农业工程学报,2007,23(4):99-104  
Zhang Y N, Huang X F, Mao L L, Liu H. Principle of the automatic system for measuring soil infiltrability and its application[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007,23(4):99-104 (in Chinese)
- [10] 陈帅,毛小敏.地表滴灌条件下土壤湿润体运移量化表征[J].农业机械学报,2018,49(8):285-292  
Chen S, Mao X M. Quantification of soil wetted volume development under surface drip irrigation[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018,49(8):285-292 (in Chinese)
- [11] 张志刚,李宏,李疆,武钰,王真真,刘帮.地表滴灌条件下滴头流量对土壤水分入渗过程的影响[J].干旱地区农业研究,2014,32(4):53-58,84  
Zhang Z G, Li H, Li J, Wu Y, Wang Z Z, Liu B. Effects of different drip discharge on soil water infiltration under drip irrigation[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2014,32(4):53-58,84 (in Chinese)
- [12] Nakayama F S, Bucks D. *Trickle Irrigation for Crop Production-Design, Operation and Management* [M]. New York:Elsevier Science,1986
- [13] 周青云,王仰仁.半干旱区滴头流量对土壤水分变化影响的研究[J].天津农学院学报,2010,17(1):14-18  
Zhou Q Y, Wang Y R. Research on effect of different dripper discharges on soil moisture in semi-arid region[J]. *Journal of Tianjin Agricultural University*, 2010,17(1):14-18 (in Chinese)
- [14] 王允喜,李明思,蓝明菊.膜下滴灌土壤湿润区对田间棉花根系分布及植株生长的影响[J].农业工程学报,2011,27(8):31-38  
Wang Y X, Li M S, Lan M J. Effect of soil wetting pattern on cotton-root distribution and plant growth under plastic mulched drip irrigation in field[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011,27(8):31-38 (in Chinese)
- [15] 刘晓英,杨振刚,王天俊.滴灌条件下土壤水分运动规律的研究[J].水利学报,1990(1):11-22  
Liu X Y, Yang Z G, Wang T J. Study on water movement under trickle irrigation[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1990(1):11-22 (in Chinese)
- [16] 汪志荣,王文焰,王全九,张建丰.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  
Wang Z R, Wang W Y, Wang Q J, Zhang J F. Experimental study on soil water movement from a point source[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2000(6):39-44 (in Chinese)
- [17] 贾运岗,张富仓,李培岭.大田滴灌条件下土壤水分运移规律的试验研究[J].灌溉排水学报,2007,26(6):15-18  
Jia Y G, Zhang F C, Li P L. Experimental research of soil water transport under drip irrigation[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2007,26(6):15-18 (in Chinese)
- [18] 陈祯.土壤容重变化与土壤水分状况和土壤水分检测的关系研究[J].节水灌溉,2010(12):47-50  
Chen Z. Research on relationships between soil bulk density change and soil water regime as well as soil water monitoring [J]. *Water Saving Irrigation*, 2010(12):47-50 (in Chinese)
- [19] 管瑶,雷廷武,刘芳芳,董月群.土壤点源入渗自动测量系统监测滴头下土壤湿润过程[J].农业工程学报,2016,32(14):1-7  
Guan Y, Lei T W, Liu F F, Dong Y Q. Measurement of wetting process of soil under dripper with automatic system for point source infiltration[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016,32(14):1-7 (in Chinese)

责任编辑:刘迎春