

滴头间距对双点源交汇入渗影响的模拟研究

王维娟¹, 牛文全^{1,2}, 孙艳琦¹, 武 鹏²

(1 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

[摘要] 【目的】研究滴头间距对双点源滴灌土壤水分入渗的影响。【方法】应用 HYDRUS 3D 软件, 在滴头间距分别为 10, 20, 30 和 40 cm 时, 对湿润峰交汇时间、交汇面土壤含水量、湿润峰运移速率和湿润体的形状变化进行模拟研究, 并进行试验验证。【结果】湿润峰交汇时间随着滴头间距的增大呈指数级增加, 湿润峰运移速率与滴头间距之间呈幂函数关系; 随着滴头间距的增加, 湿润体形状依次从 1 个近似半球体向近似半药囊形、半花生壳形及 2 个分离的近似半球体转变, 湿润体内高含水量区域也从 2 个逐渐转化为 1 个。以土壤剖面含水量、湿润峰运移距离及总入渗量为指标进行验证试验, 结果表明, 土壤含水量、湿润峰运移距离及总入渗量的模拟值与实测值均具有较好的一致性。【结论】滴头间距对双点源滴灌土壤水分入渗影响显著, 土壤水分三维数值模拟模型能较准确地反映双点源入渗条件下粘壤土的水分运动规律。

[关键词] 双点源入渗; 滴头间距; 土壤水分运动; 数值模拟

[中图分类号] S152.7; S275.6

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2010)04-0219-07

Simulation study on the effects of dripper spacing on soil water infiltration conditions under surface drip irrigation with two point-source emitter

WANG Wei-juan¹, NIU Wen-quan^{1,2}, SUN Yan-qi¹, WU Peng²

(1 College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objective】Simulation study was done on the effects of dripper spacing on soil water infiltration conditions under surface drip irrigation with two point-source emitter. 【Method】Using HYDRUS 3D software, choosing four kinds of dripper spacings, 10, 20, 30 and 40 cm separately, a simulating study on the soil water content of intersection surface, transport velocity of wetting front and shape change of wetted volume was carried out and the simulation results were tested with field demonstration. 【Result】The time for geomagnetic crossing showed exponential function of increase and migration velocity of wetted volume showed power function of increase with dripper spacing adding. Shape of wetted volume changed successively from an approximate hemispheroid to an approximate hemi anther sac, an approximate hemi peanut shell and two approximate hemispheroid. High moisture content region in wetted volume changed to one from two. And the model by the measurement of soil moisture content, migration distance of water front, and cumulative infiltration in laboratory test was verified. The results showed that the simulation results agreed well with the measurement values. 【Conclusion】The effects of dripper spacing on soil water infiltration conditions under surface drip irrigation with two point-source emitter is remarkable. The three-dimensional model of establishment can reflect the soil water movement of clay loam conditions under surface drip irrigation accurately.

* [收稿日期] 2009-10-13

[基金项目] 国家“863”计划重点项目(2006AA100214)

[作者简介] 王维娟(1984—), 女, 甘肃会宁人, 在读硕士, 主要从事节水灌溉新技术研究。E-mail: wwj442004@163.com

[通信作者] 牛文全(1971—), 男, 甘肃甘谷人, 副教授, 博士, 主要从事灌溉理论与节水技术研究。E-mail: nwq@vip.sina.com

Key words: two point-source emitter; dripper spacing; soil water movement; numerical simulation

滴灌通过频繁、缓慢地施加少量的水浸润作物根部,能够比较精确地在时间和空间上调控土壤水分^[1]。滴灌属于典型的点源入渗,前人对其水分分布、运移规律及湿润体变化进行了大量的研究^[2-7],李久生等^[8]、Skaggs 等^[9]应用 HYDRUS 2D 软件,分别对地表滴灌、地下滴灌入渗及运移进行了模拟研究;张振华等^[10]采用 Brandt 点源入渗柱状流物理模型与非迭代的交替隐式差分法相结合,对滴灌水入渗过程进行了研究。上述研究对明晰滴灌点源入渗条件下,土壤水分分布规律及提高滴灌技术设计水平都具有重要的意义,但对点源滴灌数值模拟的三维问题的研究还很少。本试验在上述研究的基础上,以双点源入渗条件下的土壤水分分布为研究对象,应用 HYDRUS 3D 数值模拟软件进行模拟求解,研究滴头间距对双点源交汇入渗土壤水分分布规律的影响,并对所选模型进行试验验证,以期为进一步阐明滴灌条件下土壤水分分布规律提供理论依据。

1 数学模型

1.1 水分运动的基本方程

假定气象因素在液体流动过程中的影响可以忽略,则二维和三维等温均匀达西水流在可变饱和和刚性多孔介质中的水分运动基本方程,均可用修改过的 Richards 方程^[11]表示:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[K \left(K_{ij}^A \frac{\partial h}{\partial x_j} + K_{iz}^A \right) \right] - S. \quad (1)$$

式中: θ 为体积含水率(cm^3/cm^3); t 为时间(min); x_i ($i=1,2$)为空间坐标(cm); K 为非饱和土壤导水率函数(cm/min), $K(h,x,y,z) = K_s(x,y,z)K_r(x,y,z)$,其中 K_s 为饱和水力传导系数(cm/min), K_r 为相对水力传导系数; K_{ij}^A 为无量纲的各向异性张量 K^A 的组成部分; h 为压力水头(cm); S 为根系吸收项。

1.2 初始条件和边界条件

1.2.1 初始条件 滴灌模拟区域为如图 1 所示的长方体,长度为 120 cm,宽度为 100 cm,深度为 50 cm;模拟介质为粘壤土,容重为 1.4 g/cm^3 ,土壤初始负压水头(或土壤初始含水量)均匀分布,其值为 -12 000 cm 水柱(或 0.0434 cm^3/cm^3),由供试土壤的水分特性曲线确定。求解土壤水分运动方程的初始条件为:

$$h(x,y,z,t) = h_0(x,y,z) \begin{cases} 0 \leq x \leq X, \\ 0 \leq y \leq Y, \\ 0 \leq z \leq Z. \end{cases} \quad (2)$$

式中: $h_0(x,y,z)$ 为土壤初始负压水头分布(cm); X 、 Y 及 Z 分别为模拟计算区域径向和垂向的最大距离(cm),本研究中 $X=120$ cm, $Y=100$ cm, $Z=50$ cm。

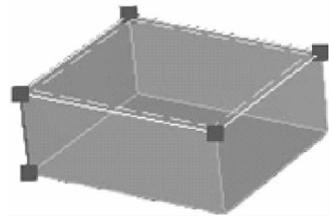


图 1 滴灌模拟区域示意图

Fig. 1 Flow domain of drip irrigation defined by computer simulation

1.2.2 边界条件 边界条件通过现场试验确定。在试验过程中发现,以滴头为中心的土壤边界是一个运动边界,滴灌 20 min 时,滴头处的平均负压水头为 -50 cm 水柱,距滴头 4 cm 的节点平均负压水头为 -500 cm 水柱;当滴灌时间为 20~180 min 时,滴头处平均负压水头为 0(即达到饱和),距滴头 4 cm 的所有节点平均负压水头为 -10 cm 水柱;当滴灌时间为 180~840 min 时,滴头处出现厚度约 0.2 cm 的积水,土壤表面形成以滴头为中心、半径 4 cm 的圆形饱和区域。

由于试验过程中在土槽表面覆盖了一层透明薄膜,故不考虑降雨和蒸发对入渗的影响,其水流通量为 0;土槽的四周和底面均看作不透水边界,水流通量亦为 0。

1.3 数值求解方法

应用 HYDRUS 3D 软件对上述模型进行数值求解。该软件通过对水流区域进行不规则三棱柱或四面体网格剖分,采用 Galerkin 有限元法进行求解;无论在饱和还是在非饱和条件下,对时间的离散均采用隐式差分,采用迭代法将离散后的非线性控制方程组线性化^[12]。由于在滴头附近土壤水势梯度较大,故在此处加密网格,将模拟计算区域剖分为三棱柱单元,三棱柱上下表面三角形边长均为 4 cm,高度从上至下由 2 cm 渐变到 4 cm。为了对湿润体内部的土壤含水量进行验证,设置了 23 个内部观测点,观测点的水平间距为 10 cm,垂直间距为 10

cm。网格划分和观测点的分布如图 2 所示。

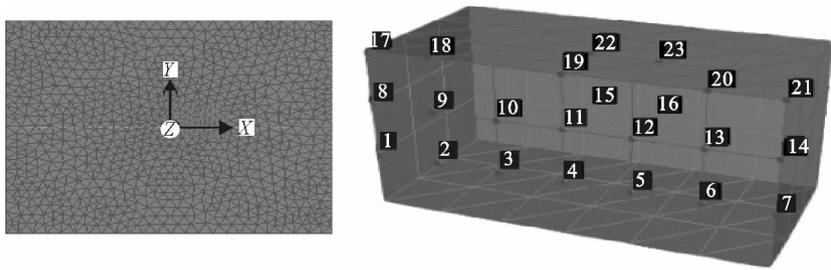


图 2 双点源交汇入渗试验的网格划分及观测点分布示意图

Fig. 2 Flow domain gridding and observation points of intersection test of two point-source emitter

2 测试土样的基本特性及观测指标

2.1 土样的基本特性

供试土样为取自渭河三级阶地的粘壤土,所取土层深度为 0~50 cm。采用美国农业部土壤质地分组方法^[13],测定的土壤机械组成及基本物理参数的值为:粘粒(<0.002 mm)含量为 5.64%,粉粒(0.02~0.002 mm)含量为 32.36%,砂粒(>0.02 mm)含量为 62.0%,土壤容重为 1.4 g/cm³,将土样风干后过 2 mm 筛备用。

土壤水分特性曲线用高速离心机测定,根据 HYDRUS 3D 软件的要求,土壤水分特征曲线参数和非饱和导水率采用 van Genuchten(VG)模型计算^[11]:

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^m}, & h < 0; \\ \theta_s, & h \geq 0. \end{cases} \quad (3)$$

$$K(h) = K_s S_e^l [1 - (1 - S_e^l)^m]^2. \quad (4)$$

式中: θ_r 为土壤残余含水量(cm³/cm³); θ_s 为土壤饱和含水量(cm³/cm³); α 、 n 、 m 为拟合参数,其中 $m = 1 - 1/n$, $n > 1$; h 为土壤负压水头(cm); K_s 为饱和导水率(cm/min); S_e 为有效含量(cm³/cm³); l 为孔隙连通性参数,对大多数土壤而言其值为 0.5^[11]。本研究中,土壤水分特性参数的值为: $\theta_r = 0.035$ 1 cm³/cm³, $\theta_s = 0.678$ 8 cm³/cm³, $\alpha = 0.030$ 8 cm⁻¹, $n = 1.435$ 6, $K_s = 0.052$ cm/min。

2.2 观测指标

分别选择滴头间距为 10, 20, 30 和 40 cm 进行滴灌模拟试验,滴灌时间为 840 min,总灌水量 14.39 L。模拟过程中,记录湿润峰的交汇时间、各个时刻交汇面土壤含水量以及湿润峰的运移距离与形状。

3 模拟结果与分析

3.1 滴头间距对湿润峰交汇时间的影响

对模拟数据分析可知,当滴头间距分别为 10,

20, 30, 40 cm 时,湿润峰交汇时间分别为 20, 60, 300, 570 min,可见湿润峰交汇时间随着滴头间距的增大而剧烈增加,交汇时间与滴头间距的关系可用下式表示:

$$t = a \ln s + b. \quad (5)$$

式中: t 为湿润峰交汇时间(min); s 为滴头间距(cm); a 、 b 为拟合系数。

3.2 滴头间距对交汇面土壤含水量的影响

以地表滴头连线中点的 A 点及距其垂直深度为 10 cm 的 B 点为例,分析交汇面土壤含水量的变化。在模拟过程中记录上述 2 点土壤含水量的变化,并绘制成曲线,结果见图 3。由图 3 可知,当湿润峰发生交汇时,A、B 两点的土壤含水量迅速升高,随着灌溉时间的逐渐延长,其变化趋势趋于平缓;由于交汇时间随滴头间距的增大而剧烈增加,因此 A、B 2 点的土壤含水量均随滴头间距的增大而下降;当滴灌时间相同时,A 点的土壤含水量大于 B 点,而在整个滴灌过程中,随着滴头间距的增大,A、B 2 点土壤含水量的差值呈先增大后减小的变化趋势。说明湿润峰的交汇先从地表发生,然后逐渐向下进行交汇,发生交汇前,地表与下层的土壤含水量相同;发生交汇时,地表土壤的含水量明显大于下层土壤,但随着交汇程度的加剧,地表与下层土壤含水量的差距又逐渐减小。

3.3 滴头间距对湿润峰运移速率的影响

土壤湿润峰的水平、垂直运移速率均与入渗时间呈幂函数关系,即有:

$$v = \alpha \cdot t^{-\beta}. \quad (6)$$

式中: v 为湿润峰运移速率(cm/min), α 为入渗系数, t 为入渗时间(min), β 为入渗指数。交汇处的水平及垂直湿润峰运移速率拟合公式中的时间 t 从入渗开始算起,不同滴头间距下,根据模拟结果计算的人渗系数 α 和入渗指数 β 如表 1 所示。

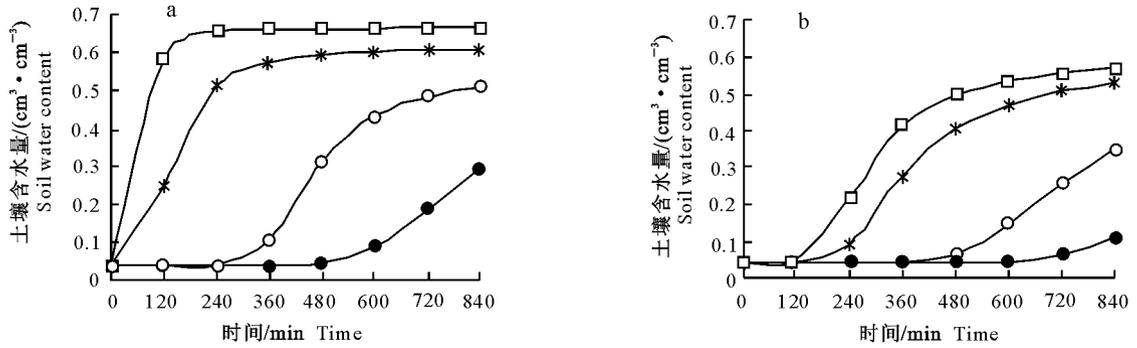


图 3 滴头间距对交汇面土壤含水量的影响

a. 地表滴头连线中点的 A 点; b. 距 A 点垂直深度为 10 cm 的 B 点; -□-. $s=10$ cm; - * -. $s=20$ cm; -○-. $s=30$ cm; -●-. $s=40$ cm

Fig. 3 Effects of dripper spacing to soil moisture content

a. Soil moisture content of center A of both emitter; b. Soil moisture content of B of vertical distance A is 10 cm;

-□-. $s=10$ cm; - * -. $s=20$ cm; -○-. $s=30$ cm; -●-. $s=40$ cm

由表 1 可知,在滴头处,随滴头间距的增加,水平方向入渗系数 α 逐渐增大,入渗指数 β 逐渐减小;垂直方向入渗系数 α 与入渗指数 β 均没有明显的变化规律。在交汇处,随着滴头间距的增加,水平方向与垂直方向入渗系数 α 均呈指数级增大,入渗指数 β 均逐渐减小,但其变化幅度远小于入渗系数 α 。交

汇处入渗系数 α 和入渗指数 β 在水平及垂直方向的变化幅度均明显大于滴头处,这是因为交汇处湿润峰的运移速率主要受滴头间距的影响,滴头间距越小,交汇区域越大,此区域内土壤含水量也越高,而滴头处湿润峰的运移速率几乎不受滴头间距的影响。

表 1 不同滴头间距下土壤水分的入渗系数和入渗指数

Table 1 Soil water infiltration coefficient and infiltration index of different dripper spacings

滴头间距/cm Dripper spacing	滴头处 The place of emitter				交汇处 The place of intersection			
	水平方向 Horizontal direction		垂直方向 Vertical direction		水平方向 Horizontal direction		垂直方向 Vertical direction	
	α	β	α	β	α	β	α	β
10	3.440	-0.864	4.063	-0.889	25.949	-1.206	8.397	-0.985
20	9.997	-1.096	3.219	-0.836	57.078	-1.292	8.493	-0.977
30	11.134	-1.094	7.994	-1.004	4×10^6	-2.942	5.695	-1.197
40	12.097	-1.114	7.163	-0.974	2×10^{22}	-8.429	2×10^{27}	-1.013

3.4 滴头间距对湿润体形状的影响

本研究以灌溉 420 和 840 min 时的湿润体形状作为分析对象。灌溉 420, 840 min 时,地表及沿 2 个滴头连线垂直剖面的湿润体形状见图 4。由图 4 可知,当滴头间距从 40 cm 逐渐减小到 10 cm 时,湿润体形状逐渐从 2 个相互分离的较小近似半球体,逐渐变成半花生壳形状、半药囊形,直至变成一个较大的近似半球体,湿润体内土壤含水量分布也逐渐从 2 个高值点中心,变成一个含水量较高的区域。

由图 4 还可知,当灌溉时间为 420 min 时,湿润体水平长度大于垂直长度,即随着灌溉时间的推进,湿润体体积逐渐增大,原来相分离的近似半球体逐渐增大、交汇,高含水量区域的体积也逐渐增大,湿润体水平、垂直长度逐渐趋于一致,滴灌结束时(840 min)湿润体垂直距离略大于水平距离。

4 验证试验

4.1 试验方法与装置

为了验证所建立的数值模拟模型,用试验土箱进行物理模型试验。整个试验装置由试验土箱和供水系统两部分组成。试验土箱用厚度为 10 mm 的钢板制成,土箱规格为 120 cm \times 100 cm \times 70 cm (长 \times 宽 \times 高)。

试验时,将风干过筛的供试土样按照设定容重 (1.4 g/cm^3) 分层填土,压实至所需厚度,层间打毛;用自制水箱供水,供水滴头采用医用注射针头模拟,在恒定水头下通过小滑轮调节滴头流量,初始流量为 0.6 L/h,滴头位于土箱的正中心,试验装置示意图见图 5。

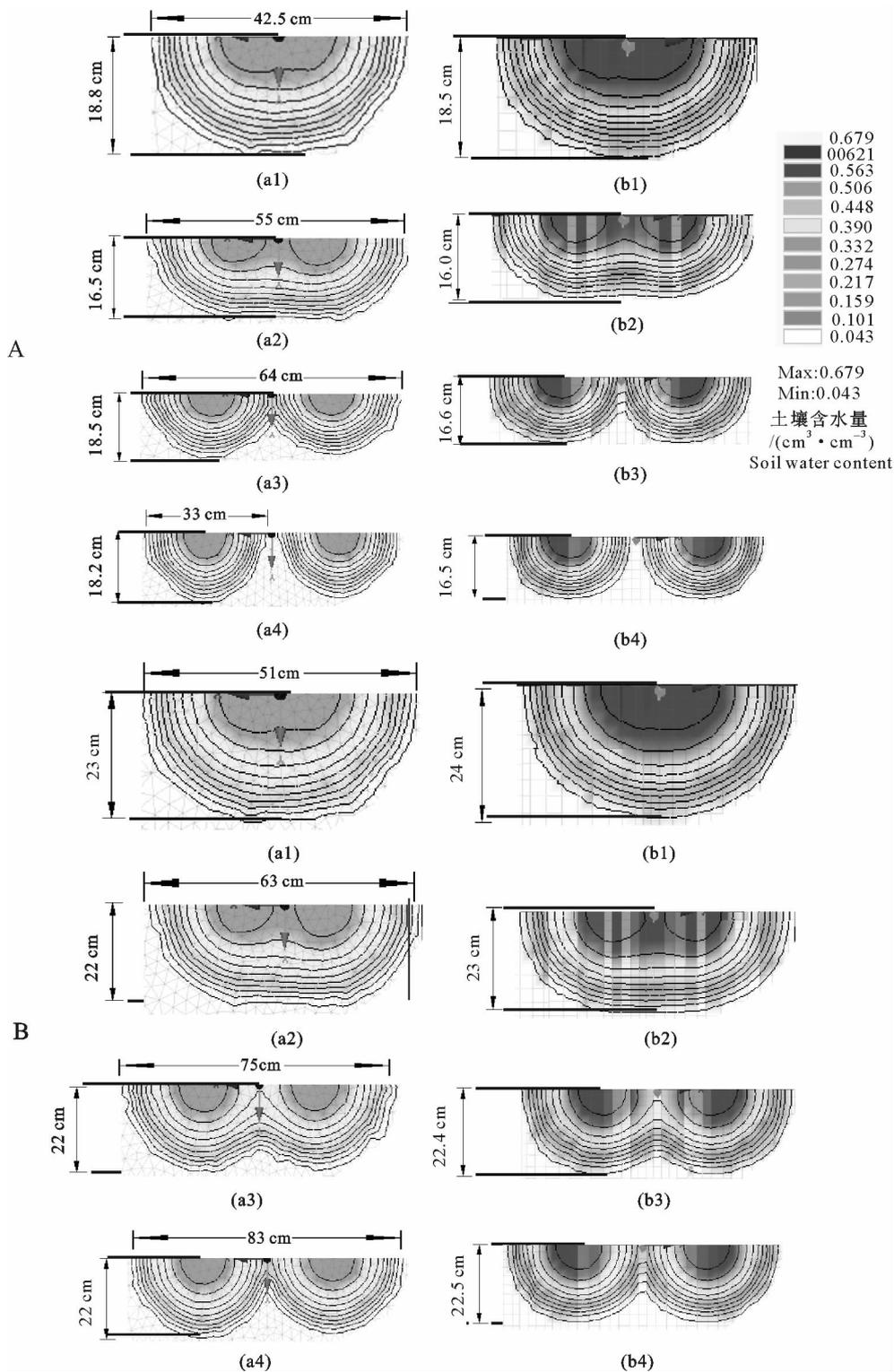


图 4 滴灌 420 min (A)和 840 min (B)时湿润体的形状

a1~a4. 分别代表滴头间距为 10,20,30 和 40 cm 时,土壤表面水平方向土壤含水量的分布(截取两滴头连线的一侧);
 b1~b4. 分别代表滴头间距为 10,20,30 和 40 cm 时,沿两滴头连线垂直方向土壤含水量的分布

Fig. 4 Wetted volume of 420 min (A) and 840 min (B)

a1-a4. Showed soil moisture content of horizontal direction of soil surface of emitter distance is 10,20,30 and 40 cm, respectively(intercept one side of both emitter); b1-b4. Showed soil moisture content of vertical distance of the beeline along both emitter of emitter distance is 10,20,30 and 40 cm, respectively

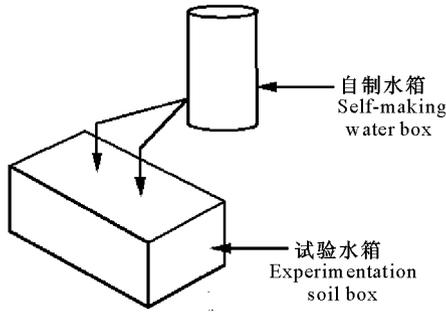


图 5 双点源滴灌物理模型的试验装置示意图

Fig. 5 Test equipment of physical model for two point source surface drip irrigation

试验过程中,采用土壤水分测试系统定时观测土壤含水量的变化(每 1 min 采集 1 次数据),土壤水分测试系统由探针传感器和多参量数据采集器 2

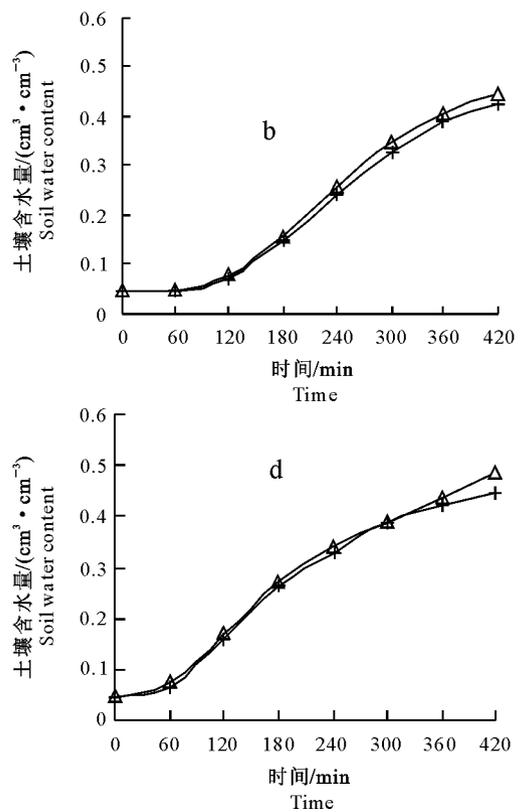
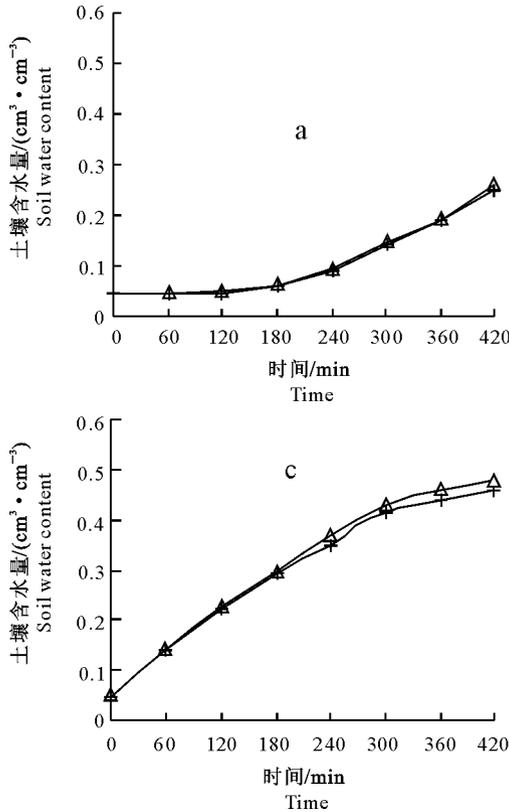


图 6 不同观测点土壤含水量模拟值与实测值的比较

a~d. 分别为观测点 11,12,19,23;-△-. 模拟值,-+--. 实测值

Fig. 6 Comparison between simulated and measured values of soil moisture content of observation points

a-d. Observation points 11,12,19,23, respectively;-△-. Simulated value,-+--. Measured value

4.3 湿润峰运移距离的验证

对滴灌 30, 60, 120, 180, 240, 300, 360 和 420 min 时湿润峰运移距离的实测值与模拟值进行比较,结果如表 2 所示。表 2 中,偏差率=(实测值-模拟值)/实测值 $\times 100\%$;由于试验条件的限制,本研究只记录了滴灌 240,420 min 时湿润峰的垂直运

部分组成,探针的布置与模拟观测点的布置相同(图 2)。定时观察记录累积入渗量及水平方向上湿润峰的变化情况,试验过程中,同时观测并记录土壤表面湿润峰随时间的变化情况,滴灌 420 min 后,停止供水。之后沿滴头中心剖开湿润体,记录以两滴头连线为轴线的垂直剖面中湿润峰的最终运移距离。

4.2 土壤含水量的验证

为了验证模型,选择了土壤含水量变化较明显、距滴头较近的 11,12,19 和 23 4 个观测点,土壤含水量的实测值和模拟值随灌溉时间变化的结果见图 6。由图 6 可知,土壤含水量的模拟值较实测值略大,但基本吻合,模拟值与实测值的误差不大于 10%,表明模拟计算结果具有较高的精度,模拟模型能较好地反映滴灌过程中土壤水分的实际分布状况。

移距离。从表 2 可以看出,土壤水平及垂直方向湿润峰运移距离的模拟值和实测值差异均较小,偏差率为-7.41%~2.44%,表明模拟值与实测值吻合较好,模拟试验能够较好地反映双点源入渗时湿润峰的实际运移距离。

表 2 滴头处湿润峰运移距离模拟值与实测值的比较

Table 2 Comparison between simulated and measured values of migration direction of wetting front

时间/min Time	水平运移距离 Horizontal distance			垂直运移距离 Vertical distance		
	实测值/cm Measured value	模拟值/cm Simulation value	偏差率/% Deviation rate	实测值/cm Measured value	模拟值/cm Simulation value	偏差率/% Deviation rate
30	18.2	18	2.44	—	—	—
60	19.8	20	-2.04	—	—	—
120	21.3	21.5	-1.77	—	—	—
180	22.5	23	-4.00	—	—	—
240	23.5	24.5	-7.41	10	10	0
300	24.5	25.5	-6.90	—	—	—
360	25.8	26	-1.27	—	—	—
420	27.2	27.5	-1.74	17	18	-5.88

4.4 总灌水量的验证

本试验共滴灌 420 min, 实际总灌水量为 6.5 L。模拟计算结束后, 根据进入模拟区域的水分体积与该时刻的入渗速率, 得到总灌水量为 6.084 L, 与实测值的相对误差为 6.4%, 差异较小。

5 结 论

应用 HYDRUS 3D 软件研究了滴头间距对粘壤土双点源滴灌土壤水分入渗的影响, 并进行了试验验证, 结果表明:

(1) 随着滴头间距的增大, 双点源滴灌时湿润峰交汇时间呈指数级增加, 交汇面土壤含水量逐渐变小。

(2) 交汇区域内湿润峰的运移速率与入渗时间呈幂函数关系, 交汇处湿润峰的运移速率受滴头间距的影响比较明显, 而滴头处湿润峰的运移速率几乎不受滴头间距的影响。

(3) 随着滴头间距的增加, 湿润体形状依次从 1 个近似半球体, 向近似半药囊形、半花生壳形及 2 个分离的近似半球体转变, 湿润体内高含水量区域也从 2 个逐渐转化为 1 个, 滴灌结束时(840 min)湿润体的垂直距离略大于水平距离。

(4) 应用土壤剖面含水量、湿润峰运移距离和总灌水量等指标对模拟结果进行了试验验证, 结果表明, 模拟结果与实测值吻合较好, 说明 HYDRUS 3D 软件及相关模型能较准确地反映双点源入渗条件下粘壤土的水分运动规律。

[参考文献]

[1] 张振华, 蔡焕杰, 郭永昌, 等. 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, et al. Experimental study on factors effecting soil wetted volume of clay loam under drip irriga-

tion [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2002, 18(2): 17-20. (in Chinese)

- [2] 李晓斌, 孙海燕. 不同土壤质地的滴灌点源入渗规律研究 [J]. 科学技术与工程, 2008, 8(15): 4292-4295.
Li X B, Sun H Y. Experimental research about point source drip irrigation infiltration under different soil texture [J]. Science Technology and Engineering, 2008, 8(15): 4292-4295. (in Chinese)
- [3] 刘雪芹, 范兴科, 马 甜. 滴灌条件下砂壤土水分运动规律研究 [J]. 灌溉排水学报, 2006, 25(3): 56-59.
Liu X Q, Fan X K, Ma T. The laws of soil water movement under the drip irrigation [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2006, 25(3): 56-59. (in Chinese)
- [4] 李就好, 谭 颖, 张志斌, 等. 滴灌条件下砖红壤水分运动试验研究 [J]. 农业工程学报, 2005, 21(6): 36-39.
Li J H, Tan Y, Zhang Z B, et al. Experimental study on water movement of latosol under drip irrigation [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(6): 36-39. (in Chinese)
- [5] 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)
- [6] 张振华, 蔡焕杰, 杨润亚, 等. 间歇供水对点源入渗土壤湿润体及水分分布的影响 [J]. 灌溉排水学报, 2004, 23(4): 29-31.
Zhang Z H, Cai H J, Yang R Y, et al. The influence of intermittent water application by point source on wetted soil volume and soil water distribution [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2004, 23(4): 29-31. (in Chinese)
- [7] 孙海燕, 李明思, 王振华, 等. 滴灌点源入渗湿润锋影响因子的研究 [J]. 灌溉排水学报, 2004, 23(3): 14-16.
Sun H Y, Li M S, Wang Z H. Influence factors on soil wetting front under point drip irrigation [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2004, 23(3): 14-16. (in Chinese)