

# 深层坑渗灌双灌水器土壤水分入渗数值模拟

张建丰<sup>1</sup> 杨潇<sup>2</sup> 吴叔赢<sup>1</sup> 帖西宁<sup>1</sup> 王瑞<sup>1</sup>

(1. 西安理工大学 水资源研究所, 西安 710048;

2. 陕西省水工程勘察规划研究院, 西安 710003)

**摘要** 为探讨深层坑渗灌双灌水器土壤水分入渗特性,采用 Hydrus-2D 软件,建立深层坑渗灌双灌水器条件下的土壤水分运动模型,并通过机理试验对比分析,推求模型参数。结果表明:水平、垂直向上以及垂直向下 3 个方向湿润锋的拟合结果和实测结果的误差分别为 1.28%,3.73%和 4.04%,观测点土壤含水量拟合结果与实测结果的平均误差为 9.1%,说明所建模型模拟的湿润锋和土壤含水量精度较高。在此基础上,采用该模型分析了湿润体内的土壤水分运动过程,结果表明,随入渗时间的增加,土壤水分运动速度逐渐变慢。

**关键词** 土壤; 深层坑渗灌; 双灌水器; Hydrus-2D; 入渗

中图分类号 O 357.3

文章编号 1007-4333(2013)02-0182-07

文献标志码 A

## Numerical simulation for soil water infiltration under double irrigators of deep pit infiltration

ZHANG Jian-feng<sup>1</sup>, YANG Xiao<sup>2</sup>, WU Shu-ying<sup>1</sup>, TIE Xi-ning<sup>1</sup>, WANG Rui<sup>1</sup>

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

2. Shaanxi Water Engineering Reconnaissance Design Research Institute, Xi'an 710003, China)

**Abstract** In order to discuss the soil water infiltration characteristics of deep pit infiltration irrigation with double irrigators, soil moisture movement model under the condition of double emitters of deep pit infiltration was built with Hydrus-2D software. And the model parameters were calculated by analyzing and comparing with the mechanism test. The results show that: the errors between simulation results and experiment results are 1.28%, 3.73% and 4.04% respectively in horizontal, vertical upward and vertical downward direction of wetting front, and the average error between simulation results and measured results is 9.1% in soil moisture content of observation points, which proved the model has higher precision on simulating wetting front and soil moisture content. Thus, the rationality of the model was corroborated. Moreover, based on the above works, the soil moisture dynamic change regulation of the intersection infiltration of deep pit with double irrigators under the conditions of different infiltration time was obtained by using the model proved above. It is found that the soil water movement speed slow down gradually with the increase of the infiltration time.

**Key words** soil; deep pit infiltration irrigation; double irrigators; Hydrus-2D; infiltration

深层坑渗灌是专门针对极端干旱地区的一种高效节水灌溉方法<sup>[1]</sup>。该方法结合了地面灌溉和地下渗灌的优点,由小管出流灌溉系统给埋设的桶状灌水器输水,使水通过灌水器底部和边壁直接入渗至作物根系生长发达的深层土壤,在保证根系生长发达的地下部分有足够水分的同时也可以有效地减少

地表土层的无效水分蒸发,但该项技术的研究还处于初级阶段<sup>[2-3]</sup>。土壤水分运动的分析是研究农田灌溉技术的基础,准确掌握深层坑渗灌的土壤水分运动变化规律对于促进深层坑渗灌技术的发展具有极其重要的意义。

非饱和土壤水分运动的数学理论基础研究始于

收稿日期: 2012-07-02

基金项目: 国家科技支撑项目(2007BAD38B03); 新疆自治区重大专项(200731136-5)

第一作者: 张建丰, 教授, 主要从事土壤水分运动与灌区自动化等研究, E-mail: jfzhang@mail.xaut.edu.cn

1931 年 Darcy-Richards<sup>[4]</sup> 非饱和土壤水分运动方程成功推导之后。由于非饱和土壤水分运动的基本方程为偏微分方程, 求解极其复杂, 无法获得其精确的解析解, 因此目前大多采用有限差分、有限元和边界元等数值计算方法求出近似解。Hydrus-2D 是由美国农业部盐土实验室于 1991 年开发的一套可以用来模拟不同边界条件下的二维土壤水分入渗和溶质运移的计算机模型。该模型对水流区域进行不规则三角形网络剖分, 采用伽辽金现状有限元法求解 Richards 方程, 运用隐式差分对时间进行离散, 再用迭代法将离散后的非线性控制方程组线性化, 从而求解出定水头、定流量和自由排水等复杂的边界条件的数值解。目前采用 Hydrus 软件进行的研究较多<sup>[5-15]</sup>, 大多应用于水力参数的推求以及土壤水分运动和盐分迁移规律的数值模拟, 就灌溉技术来说多应用于膜孔灌和滴灌。深层坑渗灌灌水器埋设于地表以下, 其土壤水分运动的实时变化过程难以直接观测, 深层坑渗灌的数值模拟研究可有效、快捷、准确地了解该技术条件下的土壤水分运动过程, 有利于技术参数的推求。目前, 仅有李涛<sup>[16]</sup> 采用 Hydrus-2D 软件模拟了不同容重条件下单灌水器的土壤水分状况; 但双灌水器土壤水分运动特性的研究未见报道。深层坑渗灌灌水器的埋设间距是该技术在大田运用中的基本参数之一, 随着灌溉时间的延长, 大田土壤水分入渗必然会由相互独立的单灌水器入渗变为相邻灌水器相互影响的交汇入渗, 单灌水器的入渗规律并不能适用于交汇入渗, 所以研究深层坑渗灌的交汇入渗规律尤为重要。

本研究采用 Hydrus-2D 软件建立深层坑渗灌双灌水器条件下的土壤水分运动模型, 通过与实测数据进行对比, 分析该模型的精度, 并运用该模型预测不同入渗时间条件下, 深层坑渗灌双灌水器交汇入渗的土壤水分分布规律, 以期为深层坑渗灌技术的研究与推广提供理论依据。

### 1 数学模型

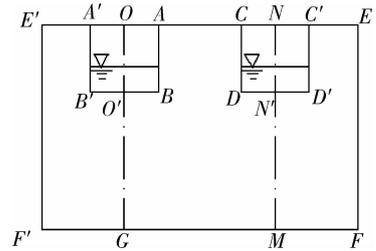
深层坑渗灌的土壤水分运动属于三维点源入渗条件下的土壤水分运动, 具有轴对称性。在此次分析中, 假定土壤均匀且各向同性, 同时将深层坑渗灌的水分运动简化为轴对称条件下的二维土壤入渗问题进行处理。以土壤含水量为因变量的二维 Richards 方程为:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] + \frac{\partial k(\theta)}{\partial z} \quad (1)$$

式中:  $\theta$  为土壤体积含水率,  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ;  $D(\theta)$  为土壤水分扩散率,  $\text{cm}^2/\text{min}$ ;  $K(\theta)$  为非饱和土壤导水率,  $\text{cm}/\text{min}$ ;  $t$  为入渗时间,  $\text{min}$ ;  $x$  为水平坐标, 向右为正,  $\text{cm}$ ;  $z$  为垂向坐标, 向下为正,  $\text{cm}$ 。

### 2 定解条件

二维 Richard 方程描述了土壤水分运动的基本规律, 只有辅以针对某个具体下渗问题的定解条件, 才能形成数学模型, 进而求解出相应条件下的土壤水分运动状态。定解条件包括初始条件和边界条件 2 个方面。为详细描述深层坑渗灌的定解条件, 绘制了深层坑渗灌双灌水器土壤水分入渗剖面图以及求解区域示意图(图 1 和图 2)。

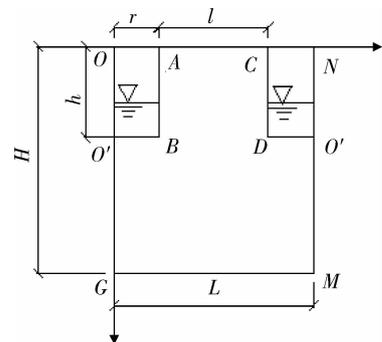


EE' 表示地面; ABB'A' 和 CDD'C' 为深层坑渗灌的 2 个灌水器, E'F' 和 EF 分别为计算土体的左、右边界, FF' 为计算土体的下边界。

Where EE' is natural ground line, ABB'A' and CDD'C' are two irrigators used for Deep Pit Infiltration, E'F' is the left boundary of calculation soil model, accordingly, EF is the right boundary, and FF' is the lower boundary.

图 1 土壤水分入渗剖面图

Fig. 1 Soil water infiltration profiles



AC, GM, O'G 和 N'M 分别为模拟计算区域的上、下、左和右边界。AC, GM, O'G and N'M are respectively the upper boundary and lower boundary, left boundary and right boundary of the simulation area.

图 2 求解区域示意图

Fig. 2 Sketch of solution area

根据深层坑渗灌轴对称的入渗特点,在数值模拟时可将计算区域简化为图2所示的区域。图2中,AC表示2个灌水器的间距 $l$ ,模拟计算区域的上边界为临空面,试验中用塑料薄膜覆盖,故不考虑蒸发的影响。 $GM$ 为模拟区域的下边界,与大气相通。 $O'G$ 为模拟区域的左边界, $N'M$ 为右边界。 $AB$ 和 $CD$ 为灌水器侧面,不透水,其尺寸 $h$ 是灌水器的埋深。 $O'B$ 和 $DN'$ 为灌水器底面,与土壤接触,是水分的入渗界面,其长度是灌水器的半径 $r$ 。

## 2.1 初始条件

假定试验开始时的土壤水分剖面为稳定剖面,计算区域内各点的初始含水量相同,则

$$\theta(x, z, 0) = \theta_0 \quad (0 \leq x \leq L, 0 \leq z \leq H) \quad (2)$$

式中: $\theta_0(x, z)$ 为土壤初始含水量, $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ; $(x, z)$ 为计算点的位置坐标。 $L, H$ 分别为模拟求解区域的径向和垂向最大距离, $\text{cm}$ 。

## 2.2 边界条件

由于模拟求解区域较大,则认为下边界 $GM$ 足够长,入渗的水分不能够到达,因此边界的土壤含水量为初始含水量。 $GM$ 的边界条件为

$$\theta(x, H, t) = \theta_0 \quad (0 \leq x \leq L, t > 0) \quad (3)$$

上边界 $AC$ 不考虑蒸发,灌水器侧面 $AB$ 和 $CD$ 为不透水面, $O'E$ 和 $N'M$ 为对称边界面,水流通量为0,因此这3个界面都可以看作零通量面。 $AC$ 的边界条件为

$$q = -D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} + k(\theta) = 0 \quad (z = 0, t > 0) \quad (4)$$

$AB, CD, O'E$ 和 $N'M$ 的边界条件为

$$q = -D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} = 0 \quad (t > 0) \quad (5)$$

入渗界面 $O'B$ 和 $DN'$ 在入渗过程中存在压力水头,因此可认为 $O'B$ 和 $DN'$ 界面始终处于饱和状态。 $O'B$ 和 $DN'$ 的边界条件为

$$\theta(x, h, t) = \theta_s \quad (0 \leq x \leq r, t > 0) \quad (6)$$

式中 $\theta_s$ 为土壤饱和体积含水量, $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 。

## 3 模拟结果验证

### 3.1 验证材料及方法

双灌水器交汇入渗装置主要包含试验土箱、灌水器 and 马氏瓶3个部分(图3)。试验土箱的侧面由

5 mm厚的钢化玻璃制成,底面为3 mm厚的多孔钢板,钢板上间隔5 cm均匀打孔,孔径2 mm,土箱尺寸为 $50 \text{ cm} \times 60 \text{ cm} \times 80 \text{ cm}$ ,和 $30 \text{ cm} \times 40 \text{ cm} \times 60 \text{ cm}$ 2种。深层坑渗灌灌水器采用带底的1/4有机玻璃圆管模拟,其形状类似于深层坑渗灌一个完整灌水器的1/4。马氏瓶为试验系统的恒定水头供水装置,由8 mm厚的有机玻璃制成,瓶身带有精度为1 mm的刻度尺,其内径为 $50 \text{ mm} \times 60 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$ 。

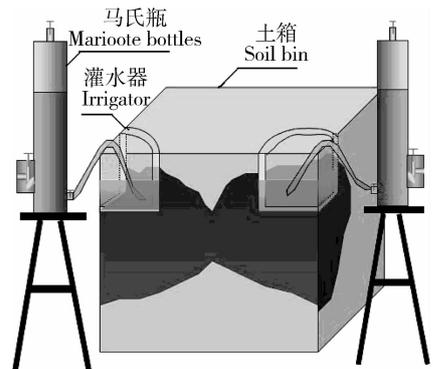


图3 双灌水器入渗装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of double irrigation infiltration test device

试验采用西安砂壤土,土样的颗粒粒径组成见表1所示。开始之前,首先将风干后的土样粉碎,过2 mm的筛,根据设计容重 $1.40 \text{ g}/\text{cm}^3$ ,按每5 cm分层将土样装入试验土箱,将土夯实,然后将灌水器用强力胶粘结在土箱的一角,埋深20 cm,利用内径5 mm的橡皮软管将马氏瓶与土箱中的灌水器连接。入渗过程中,记录马氏瓶读数,用记号笔画出不同时间的湿润锋,以便得到累积入渗量和湿润锋随时间的变化规律,记录时间间隔先密后疏。在入渗结束后,在水平间隔10 cm,垂直间隔10 cm的点上用土钻取样,然后用烘干法测定土壤含水量,得到灌水结束时湿润体内的土壤含水量分布状况。试验以双灌水器的布设间距为影响因子,其他条件均保持一致,其中:土壤容重为 $1.40 \text{ g}/\text{cm}^3$ ,初始含水率0.03%;所选用的灌水器管径为10 cm,埋深20 cm,底面开孔,开孔率4.68%,试验水头保持3 cm。试验设计双灌水器的间距分别为10、20、30和40 cm,共4组,记为试验1,2,3,4;以间距20 cm的1组试验数据进行模拟计算,其余3组用来参数率定。每组试验重复3次。

表 1 试验土壤颗粒粒径组成

Table 1 Soil particle size distribution of the test

粒径/mm	<0.002	<0.005	<0.010	<0.020	<0.050	<0.100	<0.200	<0.250	<0.500	<2.000
Particle diameter										
质量分数/%	4.170	8.460	14.210	26.470	58.290	88.290	96.190	97.020	98.990	100.000
Mass fraction										

### 3.2 模型参数推求

在进行模拟计算之前,必须要确定模型中的参数。采用 Hydrus-2D 软件模拟土壤水分运动首先要确定土壤水分特征曲线和非饱和导水率以及 6 个土壤的基本参数。分别包括滞留含水量  $\theta_r$ 、饱和含水量  $\theta_s$ 、饱和导水率  $K_s$  以及表示土壤物理特性 3 个参数  $\alpha$ 、 $n$ 、 $l$ 。滞留含水量  $\theta_r$  与饱和含水量  $\theta_s$  分别取风干土壤和饱和土壤采用烘干法测定,其中,  $\theta_r = 0.03 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ,  $\theta_s = 0.3928 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。饱和导水率  $K_s$  采用定水头法用渗透仪测定,取  $K_s = 0.01086 \text{ cm/min}$ 。土壤水分特征曲线采用 van Genuchten-Mualem 模型<sup>[17-18]</sup>(VG-M 模型)描述的表达式为

$$\begin{cases} \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[ \frac{1}{1 + (ah)^n} \right]^m \\ K(h) = k_s S_e^l [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\alpha$ 、 $n$ 、 $m$ 、 $l$  均为拟合参数,  $m = 1 - 1/n$ ,  $S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$ , 通常  $l = 0.5$ ,  $n > 1$ 。参数  $\alpha$ 、 $n$ 、 $l$  根据土壤颗粒分析数据,采用 Hydrus-2D 内部嵌套的 ROSETTA 模块估算,  $\alpha = 0.0075$ ,  $n = 1.5915$ ,  $l = 0.5$ 。

在 Hydrus-2D 程序的 Parameters 主菜单中输入根据室内测定以及由 van Genuchten 模型计算出的试验土壤参数以及迭代规则和时间步长。然后,

利用 Edit Transport Domain Geometry 菜单中的 GEOMETRY 模块,绘制出模拟计算的二维区域。其次,从 Generate Finite Element Mesh 菜单中调用 Meshgen2D 模块将绘制的计算区域离散成不规则的三角形网格。最后选取 Domain and Boundary Parameters 菜单中 BOUNDARY 模块设定计算区域的初始条件,并根据前文中分析结果设置出边界条件,选取观测点后,即可得到土壤水分的分布及其随时间的变化过程。

将运行的结果与试验 1、试验 3 和试验 4 的结果进行对比分析发现,二者差异很大。这是因为,尽管 van Genuchten-Mualem 模型能够简便地得到土壤含水量范围内的导水特性,但这些值是经统计分析得出,虽然具有一定代表性,但也只是某些近似的平均参数值,并不能完全准确地代表试验土壤的参数。并且,模拟计算的假定条件为试验土壤质地均匀,各向同性,但在实际室内试验中,装土的过程总是无法确保土样的完全均匀和各向同性。这两方面的原因导致了模拟结果与实测结果的差异性,可采用对土壤参数  $\alpha$  和  $n$  进行修正的方法来减小差异。

本研究采用灌水器间隔分别为 10、30 和 40 cm 的 3 个试验中的湿润锋运移规律、湿润锋交汇时间和含水量分布状况的分析结果,进行土壤参数  $\alpha$  和  $n$  的率定,最终对比分析出与实测数据相符的参数(表 2)。

表 2 率定的试验土壤 Van Genuchten 模型参数

Table 2 Calibrated Van Genuchten model parameter of test soil

土壤容重/(g/cm <sup>3</sup> ) Soil bulk density	$\theta_r/(cm^3/cm^3)$	$\theta_s/(cm^3/cm^3)$	$\alpha$	$n$	$K_s/(cm/min)$	$l$
1.40	0.03	0.3928	0.0081	1.1304	0.01086	0.5

注:  $\theta_r$  为滞留含水量;  $\theta_s$  为饱和含水量;  $K_s$  为饱和导水率;  $\alpha$ 、 $n$ 、 $l$  为拟合参数。

Note:  $\theta_r$  is retention water content;  $\theta_s$  is saturated water content;  $K_s$  is saturated hydraulic conductivity;  $\alpha$ 、 $n$ 、 $l$  are simulated parameters.

### 3.3 模拟结果分析

利用表 2 中的土壤基本参数,采用 Hydrus-2D

程序建立灌水器间距为 20 cm 的计算模型,设置出前文中分析的初始条件和边界条件,模拟试验 2 的

土壤水分入渗规律。

### 3.3.1 湿润锋的模拟精度分析

由模拟结果(图4)可知,在灌水器间距为20 cm条件下,湿润锋在入渗后480~510 min交汇,在实际室内试验中,湿润锋交汇时间为入渗后的498 min,在模拟的交汇时间范围之内。根据模拟结果的湿润锋运移过程,绘制了湿润锋的模拟值与实测值的对比图(图4)。可以看出,由实测试验率定的参数对灌水器间距20 cm模拟值与实测值基本吻

合。水平湿润锋、垂直向下湿润锋以及垂直向上湿润锋的拟合结果和实测结果的误差分别为1.28%、3.73%和4.04%,均在5%之内;相关系数分别为0.985 5、0.952 0和0.9919,取显著性水平 $\alpha=0.01$ ,3个方向湿润锋模拟结果的相关系数均大于临界相关系数0.606,表明拟合结果与实测结果的相关性及其显著。这说明建立的模型和率定的参数符合实际试验的结果,能够良好地模拟交汇入渗的湿润峰运移过程。

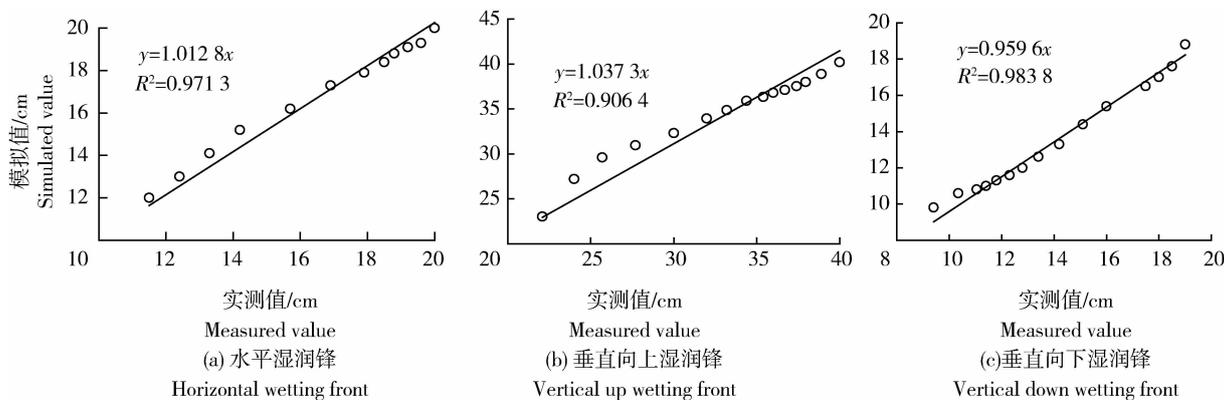


图4 湿润锋模拟值与实测值关系图

Fig. 4 Relationship of measured and simulated values of wetting front

### 3.3.2 土壤含水量的模拟精度分析

在试验结束时(入渗15 h)在观测点通过土钻取土用烘干法测量了土壤含水量。根据模型计算区

域内选取观测点的土壤含水量模拟计算结果,与实测土壤含水量数据进行比较。表3列出了相同坐标条件下模拟值与实测值的土壤含水量及相对误差。

表3 土壤含水量实测值与模拟值对比

Table 3 Comparison of the experimental and simulation values of water content

水平距离/cm Horizontal depth	垂直深度/cm Vertical distance	实测含水量/% Measured water content	模拟含水量/% Simulated water content	相对误差/% Relative error	平均相对误差/% Average relative error
0	20	35.82	37.56	4.86	
0	30	33.23	35.35	6.38	9.40
0	40	8.25	6.38	16.97	
10	10	7.34	5.84	20.44	
10	20	35.21	37.78	7.30	10.85
10	30	33.52	35.13	4.80	
20	20	18.54	17.7	4.53	4.53
30	10	6.86	5.53	19.39	
30	20	36.23	37.78	4.28	10.59
30	30	33.25	35.94	8.09	
40	20	36.13	37.23	3.04	
40	30	33.56	35.46	5.66	10.12
40	40	8.91	6.98	21.66	

在 13 个观测点中,相对误差大于 10% 的观测点有 4 个,占总观测点的 30.77%。此 4 个观测点的模拟值小于实测值,其位置均靠近湿润锋。这是因为在湿润锋边界附近,土壤含水量的变化较大,在试验过程中实测点的位置若稍有偏差则很容易造成实测结果大于真实值,而土钻法测量土壤含水量的缺点即取样点的选择容易有偏差。并且由于湿润锋附近处的土壤含水量值较小,其测量值产生细微的偏差,就会产生较大的相对误差。

其余观测点位于湿润体的内部,相对误差均在 10% 以下,表明湿润体内部观测点的模拟精度大于湿润锋边界处的观测点。从表 3 中还可以看出,模拟值都大于实测值,这是因为用土钻法取土所测的土壤含水量具有滞后性,计算得到的实测值实际上是在经过一段时间的土壤水分再分布之后的土壤含水量,小于真实值而导致。所有观测点的平均误差为 9.1%,均在 10% 以内,这可以从整体上说明模拟值与实测值的误差较小,精度较高。同时,也表明建立的模型和率定的参数符合实际试验的要求,能够良好地模拟交汇入渗的土壤水分分布状况。

### 3.3.3 土壤含水量分布随入渗时间变化规律的预测

根据上文的分析结果,可以认为建立的数学模型能够良好地应用于的双灌水器条件下的土壤水分入渗的模拟和预测。由此,可以利用所建模型对土壤水分分布随入渗时间的变化状况进行分析。分别选取入渗时间为 15、360、840 和 1 080 min 时刻的土壤体积含水量分布图,列出了不同时间深层坑渗灌双灌水器在入渗过程中的土壤含水量分布情况(图 5)。可以看出,在越靠近灌水器的位置,土壤含水量越大,越靠近湿润锋的区域,土壤含水量越小,无论是在交汇前或者交汇后,靠近灌水器的大部分区域的土壤体积含水量均大于 25%,靠近湿润锋区域的土壤含水量则迅速降低至初始含水量,进而显现出土壤干湿交界面。此外,在入渗初期,土壤水分运动较快,随着入渗时间延长,湿润锋运移速度减小,土壤水分运动变慢。在 2 个灌水器的湿润锋交汇面上,土壤含水量分布较小,交汇面积随着入渗时间的延长而增加,越靠近中间交汇面中间的位置,土壤含水量越大,越靠近交汇面的上下湿润锋的位置,土壤含水量越小。

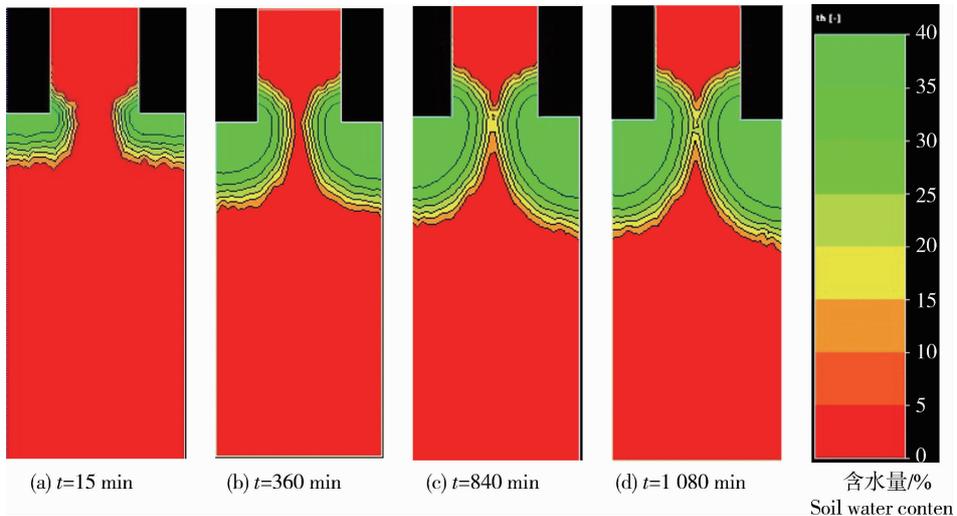


图 5 不同时刻土壤含水量的分布

Fig. 5 Distribution of soil water content at different times

## 4 结 论

本研究采用 Hydrus-2D 程序,对深层坑渗灌双灌水器交汇入渗条件下的土壤水分运动进行了数值模拟,建立了双灌水器交汇入渗的土壤水分运动数学模型,验证了所建模型的精度,表明 Hydrus-2D

程序能良好地模拟深层坑渗灌双灌水器的土壤水分入渗过程。利用该模型对不同入渗时间土壤含水量在交汇湿润体内的分布状况进行了分析,得到了双灌水器土壤水分分布随时间的变化规律:土壤水分运动速度随入渗时间的延长而逐渐变慢,而湿润锋交汇面积随着入渗时间的延长而增加。

## 参 考 文 献

- [1] 张建丰,李涛,张江辉,等. 极端干旱区成龄葡萄深层坑渗灌溉技术研究[J]. 灌溉排水学报,2011,30(1):69-71
- [2] 李涛,张建丰,程慧娟,等. 深层坑渗灌田间单点入渗湿润锋分布特性及拟合模型研究[J]. 干旱地区农业研究,2010,28(4):36-39
- [3] 李涛,张建丰,杨艳芬,等. 土壤容重对深层坑渗灌入渗特性影响的试验研究[J]. 中国农业大学学报,2010,15(6):89-94
- [4] Richards L A. Capillary Conduction of liquids through porous mediums[J]. Physics,1931,1,318-333
- [5] 范严伟. 膜孔灌溉入渗特性的数值模拟研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2008
- [6] 李红. 地下滴灌条件下土壤水分运动试验及数值模拟[D]. 武汉:武汉大学,2005
- [7] 李道西,彭世彰. 地下滴灌灌水设计参数对土壤水分分布影响的计算机模拟[J]. 沈阳农业大学学报,2004,35(5-6):507-509
- [8] 孙美,毛晓敏,陈剑,等. 夹砂层状土条件下渠道渗漏的室内试验和数值模拟[J]. 农业工程学报,2010,26(8):33-38
- [9] 汤英,徐利岗,张红玲,等. HYDRUS-1D/2D在土壤水分入渗过程模拟中的应用[J]. 安徽农业科学,2011,39(36):22390-22393
- [10] 席本野,贾黎明,王焯,等. 地下滴灌条件下三倍体毛白杨根区土壤水分动态模拟[J]. 应用生态学报,2011,22(1):21-28
- [11] 查元源,周发超,杨金忠. 一种由土壤剖面含水率估算土壤水利参数的方法[J]. 水利学报,2011,42(8):83-91
- [12] 张化,王静爱,张峰,等. HYDRUS-2D模型对海冰水灌溉情景下水盐迁移的模拟[J]. 资源科学,2011,33(2):377-342
- [13] 马增辉,韩雾昌,解建仓,等. 基于 Hydrus3D的陕西卤泊滩水盐运移建模方法研究[J]. 陕西农业科学,2011(1):62-65
- [14] 郝芳华,孙雯,曾阿妍,等. HYDRUS-1D模型对河套灌区不同灌施情景下氮素迁移的模拟[J]. 环境科学学报,2008,28(5):853-858
- [15] 孟江丽,董新光,周金龙,等. HYDRUS模型在干旱区灌溉与土壤盐化关系研究中的应用[J]. 新疆农业大学学报,2004,27(1):45-49
- [16] 李涛,张建丰,张江辉. 不同容重条件下深层坑渗灌土壤水分运动的数值模拟[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2011,4:227-234
- [17] Van Genuchten M T. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. Soil Science Society of America Journal,1980. 44(5):p. 892-898
- [18] Mualem Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media[J]. Water Resources Research,1976,12(3):513-522

责任编辑:刘迎春