

垂直线源入渗土壤水分分布特性模拟*

李淑芹 王全九

(西安理工大学水资源研究所, 西安 710048)

【摘要】 基于非饱和土壤水动力学理论,利用 Hydrus-2D 软件分析了垂直线源入渗条件下的土壤水分分布特征。通过试验对比验证,反推出试验土壤的水力参数。结果表明,Hydrus-2D 软件可用于垂直线源入渗土壤水分分布特征的模拟,且精度较好。对不同灌水技术要素条件下的垂直线源入渗土壤水分分布特征进行模拟研究,结果表明,垂直线源入渗条件下,不同质地土壤的湿润体形状差别不大,大小有明显的差别:砂壤土和粘壤土的水平湿润半径分别是砂土的 0.59 和 0.24,垂直湿润深度分别是砂土的 0.42 和 0.31;在不同线源埋深情况下,土壤湿润体的形状和大小差别不大,湿润体的位置有显著的差别,当埋深增加 5cm,砂土、砂壤土、粘壤土的垂直湿润深度分别增加 6%、11.5%、16%;线源长度和直径对土壤水分分布影响较大,其中线源长度主要影响垂直湿润深度,线源直径主要影响水平湿润半径;初始含水率高时,相同断面处的含水率增大;在相同入渗时段内,湿润锋水平运移距离和垂直运移距离随土壤初始含水率的增大而增大。

关键词: 垂直线源入渗 数值模拟 Hydrus-2D

中图分类号: S275.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)03-0051-07

Simulation of Soil Water Distribution under Vertical Line Source Infiltration

Li Shuqin Wang Quanjiu

(Institute of Water Resources, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract

Based on the theory of unsaturated soil water dynamics, the soil water distribution under vertical line source infiltration was analyzed by the software Hydrus-2D. The model was testified by the experiments and soil hydraulic parameters were estimated. The result showed that this model could be used to simulate soil water infiltration characteristics with certain accuracy. The characteristics of water distribution under line source irrigation were simulated concerning different irrigation technique factors. The results showed that, under the condition of line source irrigation, the shape of wetting patterns under different soil textures was similar, and the scale was different: the ratio between the maximum sand loam and clay loam's level wetting radius and sand's were 0.59 and 0.24, the ratios of vertical humid depth were 0.42 and 0.31; on the condition of different line source depth, the shape and scale of wetting patterns were similar, and the positions had great difference, when the depth increased 5 cm, the vertical humid depths of sand, sandy loam and clay loam were increasing by 6%, 11.5%, 16% separately; the length and the diameter of the line source had conspicuous influence on soil water distribution, the length had a major impact on the vertical humid depth, the diameter had a primary influence on horizontal wetting radius; when the initial water content was high, the water content in the same cross-section increased; in the same period of irrigation time, the wetting front distance of level and vertical increased with the increasing of initial water content.

Key words Vertical line source infiltration, Numerical simulation, Hydrus-2D

收稿日期: 2010-04-01 修回日期: 2010-05-26

* 国家科技支撑计划资助项目(2007BAD38B03)和新疆自治区重大专项(200731136-5)

作者简介: 李淑芹,硕士生,主要从事土壤物理研究,E-mail: lishuqin87@sina.com

通讯作者: 王全九,教授,博士生导师,主要从事土壤物理与溶质运移研究,E-mail: wquanjiu@163.com

引言

垂直线源式灌水方法是一种针对果树的新型灌水技术,它是将一定长度的灌水器垂直置入土壤中,通过垂直线源灌水器边壁的出水孔湿润作物根区的土壤。灌水器由塑料管制成,顶部连接供水设备,底部封闭,边壁均匀分布着出水孔。通过调节线源埋深、管径以及管长,能够将水分直接输送到作物的根区,显著减少无效蒸发,提高水分利用效率。目前对垂直线源灌法的研究尚处于初级阶段,由于垂直线源灌的灌水器埋于地下,其土壤水分运动规律无法直接观测,因此进行垂直线单点入渗土壤水分分布特征的数值模拟对于指导垂直线源灌的规划设计有着一定的意义。

试验研究是揭示土壤水分分布特征的基本方法,但费时费力,而数值模拟具有快速、省时的优点,已逐步成为分析不同条件下水分分布的重要手段之一^[1-4]。而利用计算机进行数值模拟,需要建立合适的数学模型,再进行模拟计算,分析不同情况下的土壤水分运动。Hydrus-2D(Simunek et al, 1999)就是一个可以模拟二维水分运动的计算机模型^[5-8]。本文以 Hydrus-2D 软件为基础,推求土壤水分运动参数,并利用所推求的水力参数计算土壤累积入渗量和含水率剖面,将计算结果与实测结果进行对比,分析该软件推求参数的合理性,以及研究垂直线源灌的土壤水分运动规律,为垂直线源灌的工程设计、运行和管理提供理论依据。

1 数学模型

假定土壤均质、各向同性,垂直线源点源入渗土壤水分运动可作为轴对称的二维入渗问题进行处理^[9]。根据达西定律和质量守恒定律,以含水率为变量的二维 Richards 方程可表述为^[10]

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

式中 θ ——土壤体积含水率, cm^3/cm^3
 $K(\theta)$ ——非饱和土壤导水率, cm/min
 $D(\theta)$ ——土壤水分扩散率, cm^2/min
 z ——垂直坐标,向下为正
 x ——水平坐标

这里不考虑根系吸水速率和土壤蒸发。

考虑到垂直线源土壤水分运动的轴对称特性,选取图 1 所示模拟区域($OABC$ 为求解区域, FE 为线源管壁, GD 为线源中心),即以线源中心 GD 为轴的右半平面区域。以灌水开始时的土壤含水率为初始含水率,即

$$\begin{cases} \theta(x, z, t) = \theta_0(x, z) \\ 0 \leq x \leq X \\ 0 \leq z \leq Z \\ t = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中 $\theta_0(x, z)$ ——初始含水率

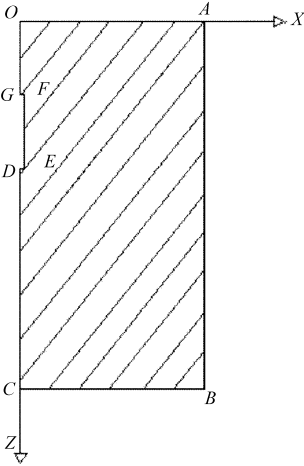


图 1 求解区域示意图

Fig. 1 Sketch of solution area

上边界条件:不考虑土壤蒸发和降雨,地表边界($z = 0$)的表示为

$$\begin{cases} -D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} + K(\theta) = 0 \\ z = 0 \\ t > 0 \end{cases} \quad (3)$$

左边界条件:左边界为垂直线源管壁 FE ,供水开始后很快达到饱和

$$\begin{cases} \theta(0, z, t) = \theta_s \\ z_0 \leq z \leq z_l \\ t > 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中 θ_s ——饱和含水率
 z_0 ——线源上端埋深
 z_l ——线源下端埋深

右边界条件:区域的右边界 AB ,可看作不透水边界,水流量为零

$$\begin{cases} -D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} = 0 \\ x = X \\ 0 \leq z \leq Z \\ t > 0 \end{cases} \quad (5)$$

下边界条件:由于地下水位很深,不受灌水影响,故下边界为零界面

$$\begin{cases} -D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} + K(\theta) = 0 \\ z = Z \\ t > 0 \end{cases} \quad (6)$$

由于 Hydrus-2D 软件可以模拟轴对称的二维土

壤水分运动^[11], 本文利用该软件模拟上述数学模型所描述的土壤水分运动过程。

2 试验材料与方法

2.1 试验材料

试验土样取自新疆吐鲁番鄯善县葡萄园, 经风干后碾碎, 过 2 mm 筛。土壤基本物理性质如表 1 所示, 利用马尔文激光分析仪测定土壤机械组成, 按照国际制标准划分土壤质地。

2.2 试验方法

将风干过筛供试土样按照设计容积密度分层装入长、宽分别为 100 cm、高 60 cm 的土箱, 层间打毛。为了便于观测, 以 1/4 土体作为研究对象, 按设计的埋深将垂直线源灌水器垂直埋入土箱一角。灌水器采用边壁均匀打孔的塑料管, 顶端连接供水水源马

氏瓶, 底端封闭, 水分通过灌水器边壁的孔供给土壤。填装土壤时, 先将灌水器固定在土箱一角, 注意灌水器与土箱之间土壤的紧实性, 另外马氏瓶的供水压力不能过大, 以免水从灌水器顶端冒出。为了防止土面蒸发, 在土壤表面用薄膜覆盖。在试验过程中, 按照预定灌水时间进行灌水, 记录马氏瓶的初始高度, 观测开始后, 每 5 min 记录马氏瓶读数, 同时描绘湿润锋曲线, 随着入渗速度的减小, 逐渐增加读数的时间间隔。试验结束后, 利用取土钻, 在土箱边壁及 45°方向, 水平方向间隔 5 cm, 垂直方向间隔 10 cm 取土, 采用烘干法测定土壤含水率, 共做了 3 组试验, 如表 2 所示。为了模拟分析土壤水分分布, 首先根据土壤颗粒组成和土壤容积密度, 利用 Hydrus-2D 软件初步得到试验土样的水分参数, 如表 3 所示。

表 1 土壤基本物理特性
Tab.1 Basic physical properties of soil

土壤类型	颗粒含量/%			风干含水率	饱和含水率
	2 mm ≥ d ≥ 0.02 mm	0.02 mm > d ≥ 0.02 mm	d < 0.002 mm	/cm ³ · cm ⁻³	/cm ³ · cm ⁻³
砂质粘壤土	69.373	22.163	8.464	0.029	0.430

表 2 垂直线源灌试验方案
Tab.2 Test scheme of vertical line source irrigation

试验号	土壤质地	管径/cm	管长/cm	埋深/cm	供水时间/min	容积密度/g · cm ⁻³	初始含水率/cm ³ · cm ⁻³
1	砂质粘壤土	2	20	5	240	1.45	0.03
2	砂质粘壤土	2	30	5	240	1.45	0.03
3	砂质粘壤土	2	40	5	240	1.45	0.03

表 3 试验土壤 van Genuchten 模型参数
Tab.3 van Genuchten model parameters of test soils

土壤质地	滞留含水率	饱和含水率	性状系数		饱和导水率
	θ _r /cm ³ · cm ⁻³	θ _s /cm ³ · cm ⁻³	α	n	k _s /cm · min ⁻¹
砂质粘壤土	0.029	0.430	0.033 6	1.491 0	0.044 638 9

3 结果分析

3.1 数值模拟精度分析

3.1.1 参数推求

利用颗粒分析得到的土壤水分参数, 通过 Hydrus-2D 程序模拟垂直线源入渗情况下土壤分布

状况, 发现模拟结果与试验结果相差较大。这可能是由于仅依据颗粒分析和土壤容积密度不能准确得到土壤水分参数。根据表 2 中试验 1 和 2 观测点含水率以及灌水量的实测值与模拟值差异调整水力参数中的 α、n 和 k_s, 使模拟的土壤水分分布与实际相符, 推求得到土壤水分参数, 如表 4 所示。

表 4 推求得到的试验土壤 van Genuchten 模型参数
Tab.4 Estimating van Genuchten model parameters of test soils

土壤质地	滞留含水率	饱和含水率	性状系数		饱和导水率
	θ _r /cm ³ · cm ⁻³	θ _s /cm ³ · cm ⁻³	α	n	k _s /cm · min ⁻¹
砂质粘壤土	0.029	0.429 925	0.078 6	1.874	0.073

3.1.2 模拟精度分析

利用表 4 中推求的土壤水力参数,对表 2 中试验 3 的土壤水分分布进行模拟。图 2 显示了灌水结束时土壤湿润体水分分布的模拟值和实测值(图中曲线为模拟值,标记点为实测值,土壤含水率均为体积含水率),由于试验结束后取样时间较长,在模拟时考虑 1 h 的水分再分布。比较实际灌水量和模拟灌水量,结果显示管长 20、30、40 cm 的灌水量的模

拟值和实测值之间的相对误差分别为 9.69%、-2.21%、-9.24%,误差均在 10% 以内。含水率分布结果显示,表层以下 10 cm 处误差较大,其他处误差较小。总的来看,模拟结果还是基本能反映垂直线源入渗土壤水分分布规律的,这表明在准确测定土壤水力参数的条件下,所建立的数学模型可用于垂直线源入渗土壤水分分布的模拟计算。

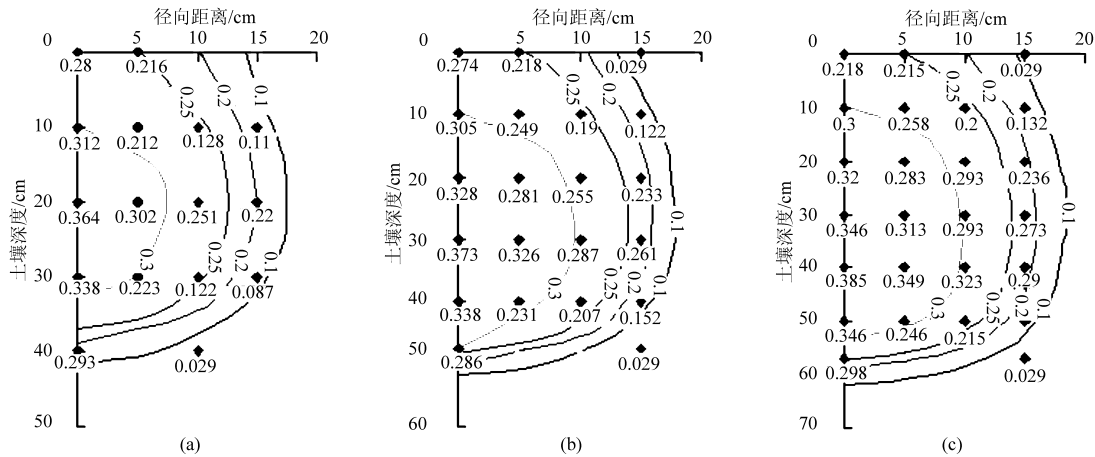


图 2 不同线源长度土壤湿润体水分分布模拟值与实测值对比

Fig. 2 Comparison of simulation and experimental values of soil pattern moisture distribution under different tube lengths

(a) 管长 20 cm (b) 管长 30 cm (c) 管长 40 cm

3.2 主要影响因素对土壤水分分布特性影响分析

选取 3 种质地土壤(砂土、砂壤土、粘壤土),对线源埋深、长度、直径、初始含水率等因素对土壤水

分分布的影响进行模拟分析。为了便于分析,3 种质地土壤水力参数选自 Hydrus 模型,参数如表 5 所示。

表 5 3 种不同质地土壤水力参数

Tab. 5 Soil hydraulic parameters of three different textures soil

土壤质地	滞留含水率 $\theta_r/\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$	饱和含水率 $\theta_s/\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$	性状系数		饱和导水率 $k_s/\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$
			α	n	
砂土	0.045	0.43	0.014 5	2.68	0.495 000 0
砂壤土	0.065	0.41	0.075 0	1.89	0.073 680 6
粘壤土	0.095	0.41	0.019 0	1.56	0.004 333 3

3.2.1 土壤质地

为了分析土壤质地对水分分布的影响,对线源长度 20 cm,线源直径 2 cm,线源埋深 5 cm,灌水 4 h,土壤初始含水率 $0.1 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 情况下,砂土、砂壤土、粘壤土的土壤水分分布进行模拟计算,模拟结果如图 3 所示。

如图 3 所示,3 种质地情况下土壤湿润体在形状方面差别不大,均为围绕线源的椭球形,但在大小方面有明显的差别:土壤质地越重,湿润体越小。灌水结束后,砂壤土和粘壤土的水平最大湿润半径(湿润体最宽处距管中心的长度)分别是砂土的 0.59 和 0.24;砂壤土和粘壤土的垂直湿润深度分别为砂土的 0.42 和 0.31。这是由于砂土毛细作用相

对较弱,重力对土壤水的下渗起到主要作用。相反地,对于中、重质土壤,土壤的持水作用较大,导致水分扩散在所有方向上都较为均匀。

3.2.2 线源埋深

对土壤质地为砂壤土,线源长度 20 cm,线源直径 2 cm,灌水 4 h,初始含水率 $0.1 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$,埋深 5、10、15 cm 情况下土壤水分分布进行了模拟,结果如图 4 所示。

由图 4 可知,3 种埋深情况下土壤湿润体在形状和大小等方面差别不大,湿润圈分布的位置存在显著差异:随着埋深的下移土壤湿润圈同步下移,湿润部分内固定点的土壤含水率也呈下移趋势;随着埋深下移,表土湿润程度也同步减小。当线源埋深

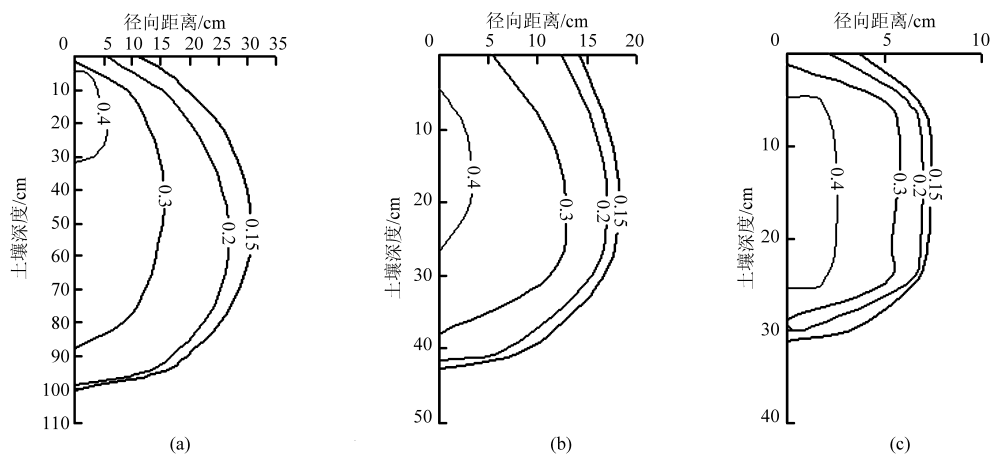


图 3 土壤质地对垂直线源点源入渗土壤水分分布的影响

Fig. Effects of different soil textures on soil moisture distribution under vertical line source irrigation

(a) 砂土 (b) 砂壤土 (c) 粘壤土

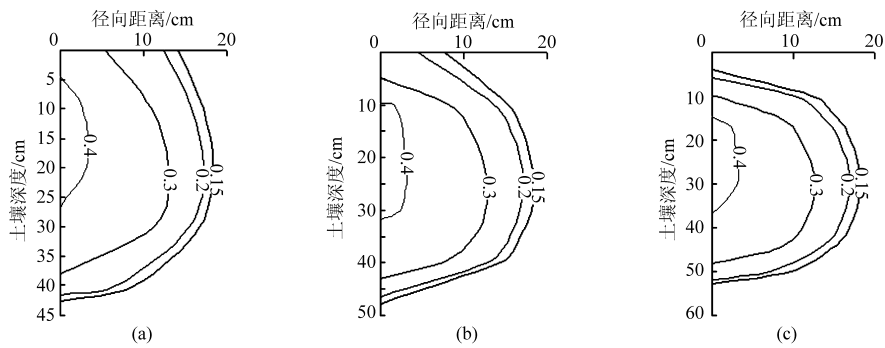


图 4 不同埋深对垂直线源点源入渗土壤水分分布的影响

Fig.4 Effects of soil water distributing on different tube depths under vertical line source irrigation

(a) 埋深 5 cm (b) 埋深 10 cm (c) 埋深 15 cm

为 5 cm 和 10 cm 时,湿润圈顶部均在地表,这样会造成土壤水分的无效蒸发,降低土壤水分利用效率;线源埋深为 15 cm 时,湿润圈顶部位于地表下 4 cm,土体最深湿润深度接近地表以下 53 cm。综合砂土、粘壤土在上述埋深情况的模拟结果显示:砂土在埋深为 15 cm 时,湿润圈顶部也位于地表以下 4 cm,粘壤土在埋深 10 cm 时的湿润体已经达到地表以下 3.6 cm;当埋深增加 5 cm 时,3 种质地土壤水平最大湿润半径基本不变,砂土、砂壤土、粘壤土的垂直湿润深度分别增加 6%、11.5%、16%,这表明线源埋深主要影响土壤水分在垂直方向的湿润深度,而且土壤质地越重,影响程度也越大。

3.2.3 线源长度

在土壤质地为砂壤土,线源埋深 15 cm,线源直径 2 cm,灌水 4 h,土壤初始含水率 $0.1\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 情况下,对线源长度分别为 20、30、40 cm 的土壤水分分布进行模拟计算,模拟结果图 5 所示。

由图 5 可以看出,3 种不同线源长度湿润体形状基本不变,而且线源的变化主要影响土壤的垂直湿润深度,随着线源长度的增加,粘壤土的水平最大湿润半径基本不变。以线源长度 20 cm 为基准,线

源长度至 30 cm 时,砂土和砂壤土的水平最大湿润半径分别增加 6.4% 和 3.7%,3 种土壤的垂直湿润深度分别增加 17.1%、19.2% 和 27.6%;线源长度增加至 40 cm 时,砂土和砂壤土的水平最大湿润半径分别增加 11.3% 和 5%,3 种土壤的垂直湿润深度分别增加 21.7%、38% 和 56%。

3.2.4 线源直径

在土壤质地为砂壤土,线源埋深 15 cm,线源长度 20 cm,灌水 4 h,土壤初始含水率 $0.1\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 情况下,对线源直径 2、3、4 cm 的土壤水分分布进行模拟计算,模拟结果如图 6 所示。

由图 6 可以看出,随着线源直径的增大,相同位置处的土壤含水率也逐渐增大;以线源直径 2 cm 为基准,综合分析了砂土、砂壤土、粘壤土的土壤湿润体特征参数的变化的情况,结果如表 6 所示。由此可见,线源直径的增加对砂土和砂壤土的最大水平和垂直湿润深度影响都比较明显,质地较重的土壤,对最大水平湿润半径的影响较垂直湿润深度大,且垂直湿润深度的增加幅度比线源直径增加幅度小。

3.2.5 初始含水率

图 7 显示了初始含水率分别为 0.1、0.15、

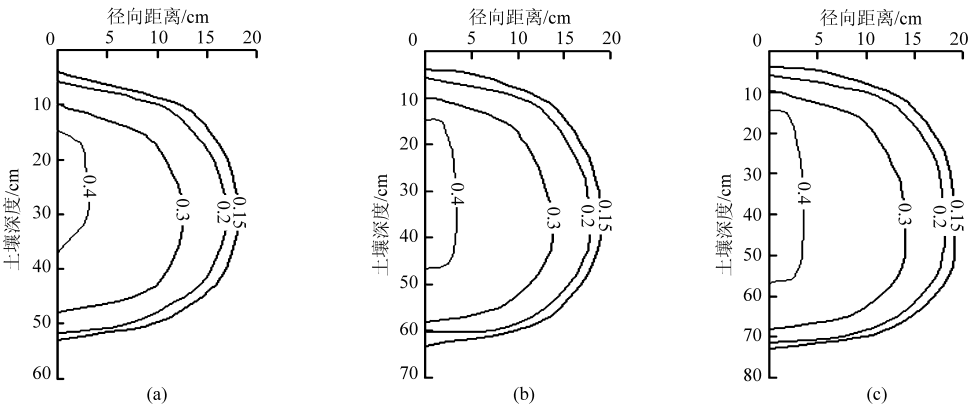


图 5 不同线源长度对垂直线源点源入渗土壤水分分布的影响

Fig. 5 Effects of different tube lengths on soil pattern under vertical line source irrigation

(a) 线源长度 20 cm (b) 线源长度 30 cm (c) 线源长度 40 cm

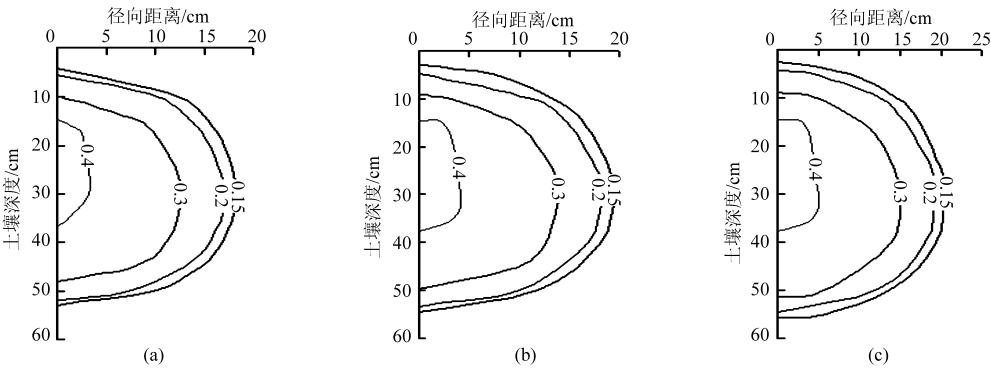


图 6 不同线源直径对垂直线源点源入渗土壤水分分布的影响

Fig. 6 Effects of different tube diameters on soil pattern under vertical line source irrigation

(a) 线源直径 2 cm (b) 线源直径 3 cm (c) 线源直径 4 cm

表 6 线源直径对土壤湿润体特征参数的影响				
Tab. 6 Effect of different tube diameters on the characteristic parameters of soil water pattern				
土壤 质地	水平最大湿润半径		垂直湿润深度相对	
	相对增加量/%		增加量/%	
	线源直径 3 cm	线源直径 4 cm	线源直径 3 cm	线源直径 4 cm
砂土	5.1	9.9	7.3	12.8
砂壤土	6.7	11.7	3.0	5.3
粘壤土	10.3	20.7	1.1	1.6

0.2 cm³/cm³,线源埋深 15 cm,线源直径 2 cm,线源长度 20 cm,灌水 4 h 的垂直线源点源入渗砂壤土的土壤水分分布模拟结果。由图可以看出:对于同一种土壤,在灌水时间相同时,土壤初始含水率大,则相同断面处的含水率增大,湿润范围也增大。这似乎与初始含水率越小,基质势越大,推动湿润锋运移的驱动力越大相矛盾。但实际上,驱动力大并不意味着速率就大,因土壤初始含水率越低,需要填充土壤孔隙的累积水量就越多,从而延缓了湿润锋的推进。初始含水率对土壤湿润体特征参数影响如表 7

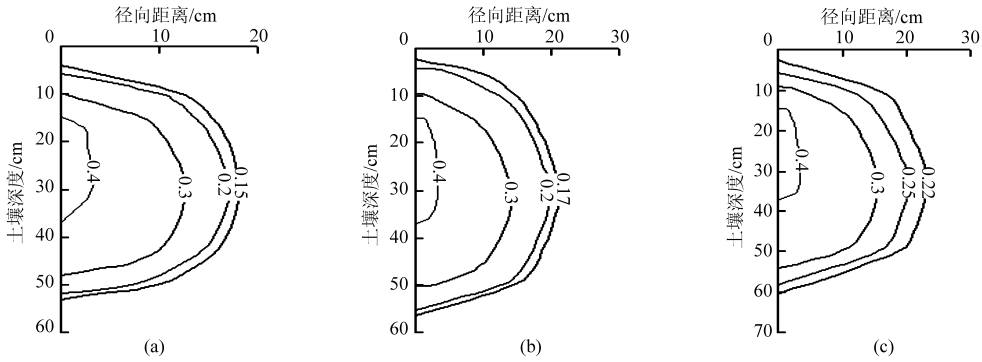


图 7 不同初始含水率对垂直线源入渗土壤水分分布影响

Fig. 7 Effects of different initial water contents on soil pattern under vertical line source irrigation

(a) 0.1 cm³/cm³ (b) 0.15 cm³/cm³ (c) 0.2 cm³/cm³

所示。

表 7 初始含水率对土壤湿润体特征参数的影响
Tab.7 Effect of different tube diameters on the characteristic parameters of soil water pattern

土壤 质地	水平最大湿润半径		垂直湿润深度相对	
	相对增加量/%		增加量/%	
	初始含水率 0. 15 cm ³ /cm ³	初始含水率 0. 2 cm ³ /cm ³	初始含水率 0. 15 cm ³ /cm ³	初始含水率 0. 2 cm ³ /cm ³
砂土	17. 0	22. 4	18. 3	45. 0
砂壤土	14. 8	27. 1	6. 4	14. 2
粘壤土	9. 1	15. 0	0. 8	1. 0

以初始含水率 0. 1 cm³/cm³为基准,分析 3 种质地土壤(砂土、砂壤土、粘壤土)的模拟结果,可以看出,土壤质地越重,初始含水率的变化对土壤湿润圈的影响越小;随着初始含水率增加幅度的增大,砂土和砂壤土垂直湿润深度增加的幅度较水平最大湿润半径增加的幅度大,而粘壤土则正好相反。

4 结束语

利用 Hydrus-2D 软件建立了垂直线源入渗土壤水分运动模型,进行了数值模拟,并根据室内试验反推出试验土壤的水分参数,与室内试验对比表明,所建模型可反映垂直线源入渗土壤水分分布规律。利

用 Hydrus-2D 软件模拟研究了 3 种质地土壤(砂土、砂壤土、粘壤土)条件下,不同灌水技术要素对土壤水分分布的影响,结果显示,3 种质地情况下土壤湿润体形状差别不大,大小有明显的差别:土壤质地越重,湿润体越小,砂壤土和粘壤土的水平最大湿润半径分别是砂土的 0. 59 和 0. 24,砂壤土和粘壤土的垂直湿润深度分别为砂土的 0. 42 和 0. 31;不同线源埋深情况下,土壤湿润体的形状和大小差别不大,湿润体的位置有显著差别,而且土壤质地越重,差别越显著;线源长度和线源直径对土壤水分分布影响很大,其中线源长度主要影响垂直湿润深度,线源直径主要影响水平湿润半径,而且土壤质地越重,影响也越明显;初始含水率高时,相同断面处的含水率增大,在相同入渗时段内,湿润锋水平运移距离和垂直运移距离随土壤初始含水率的增大而增大,土壤质地越重,增加量越小,另外,随着含水率增加幅度的变大,砂土和砂壤土垂直湿润深度的增加幅度较水平最大湿润半径增加的幅度大,粘壤土则正好相反。因此在田间垂直线源灌布设时,不仅可以 根据实际的土壤类型和根系分布进行模拟,简单快速地了解土壤水分的分布特征,进而指导田间布设方式的设计,提高水分的利用效率,而且可以预测土壤的动态变化,指导田间的灌溉,这对垂直线源灌的推广应用有一定的意义。

参 考 文 献

1 康银红,马孝义,李娟,等. 黄土高原重力式地下滴灌水分运动模型与分区参数研究[J]. 农业机械学报,2008,39(3): 90 ~ 95.

2 范严伟,马孝义,王波雷,等. 膜孔灌土壤湿润体水分分布与入渗特性数值模拟[J]. 农业机械学报,2008,39(11):35 ~ 41.

3 Thomas A W. Steadys infiltration from line source buried in soil [J]. Transactions of the ASAE, 1974, 17(1):125 ~ 128, 133.

4 Warrick A W, Lomen D O, Amoozegar-Fard A. Lineaized moisture flow with root extraction for 3 dimensional, steady conditions [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1980, 44(5):911 ~ 914.

5 李道西,罗金耀. 地下滴灌土壤水分运动数值模拟[J]. 节水灌溉,2004(4):4 ~ 7.

Li Daoxi, Luo Jinyao. Numerical simulation of soil-water movement in subsurface drip irrigation [J]. Water Save Irrigation, 2004(4):4 ~ 7. (in Chinese)

6 Bristow K L, Cote C M, Thorburn P J, et al. Soil wetting and solute transport in trickle irrigation systems [C] // 6th International Micro-irrigation Congress: Micro-irrigation Technology for Developing Agriculture, South Africa, 2000.

7 Skaggs T H, Trout T J, Simunek J, et al. Comparison of HYDRUS-2D simulations of drip irrigation with experimental observations [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2004, 130(4):304 ~ 310.

8 池宝亮,黄学芳,张冬梅,等. 点源地下滴灌土壤水分运动数值模拟及验证[J]. 农业工程学报,2005,21(3):56 ~ 59.

9 雷志栋,杨诗秀,谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京:清华大学出版社,1998:34 ~ 51.

10 许迪,李益农,程先军,等. 田间节水灌溉新技术研究与应用[M]. 北京:中国农业出版社,2002:41 ~ 65.

11 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.

Li Hong. Experiments and numerical simulations of soil-water movement in subsurface drip irrigation[D]. Wuhan:Wuhan University, 2005. (in Chinese)