

文章编号: 1007-4929(2007)06-0017-04

膜下滴灌条件下 绿洲棉田土壤水分运动数值模拟

串志强^{1,2}, 方怡向^{1,2}, 盛 钰^{1,3}, 赵成义¹

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 新疆 乌鲁木齐 830011;
2. 中国科学院研究生院, 北京 100039; 3. 中国农业大学, 北京 100094)

摘 要:应用非饱和土壤水运动理论, 建立膜下滴灌条件下土壤水分运动二维数值模拟模型, 研究了田间层状土壤在膜下滴灌条件下土壤水分运动特征。应用不同小区不同灌水处理的实测值与模拟值进行对比, 同时对模型做了精度分析, 结果表明符合精度要求, 这说明所建立的模型能客观地反映实际土壤条件下的水分运动情况。研究结果表明: 土壤剖面 30~40 cm 粘土层使土壤水分运动具有很大的差异, 0~30 cm 变化明显, 而 40 cm 以下土壤水分运动的变化较小。膜下滴灌应该采取灌水量小, 频度大的灌溉模式。

关键词:膜下滴灌、土壤水分运动; 数值模拟; 棉田

中图分类号:S275.6 **文献标识码:**A

Numerical Simulation of Soil Water Movement in Oasis Cotton Field with Drip Irrigation under Mulch

CHUAN Zhi-qiang^{1,2}, FANG Yi-xiang^{1,2}, SHENG Yu^{1,3}, ZHAO Cheng-yi¹

(1. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China; 2. Graduate school, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100039, China; 3. China Agricultural University, Beijing 100094, China)

Abstract: Based on the theory of the movement of unsaturated soil-water, a two-dimensional vertical plane model was developed to simulate soil water movement under drip irrigation under mulch. The soil water movement of stratified soil in the experimental field was calculated under the condition of drip irrigation under mulch. The field test was carried out in Aksu water balance experiment station to verify the numerical simulation results of soil water content in different test field with different irrigation treatment. The result indicated that they had better conformity. Comparing the soil water content of 0~10 cm depth in different time and different location observed by PTM-48(Photosynthesis Transpiration Monitor) with numerical simulation results, it can be found that the numerical simulation results was less than the value of field test, but the changing tendency was agreeable. So the numerical simulation model of soil water movement under the condition of drip irrigation under mulch is acceptable. From the research result, it can be found that the soil water movement was explicitly various in different depth for the clay stratification in 30~40 cm depth. The obvious difference can be seen in 0~30 cm of soil profile, while there is no sharp change below the 40 cm depth. So the irrigation water quantity should be reduced and the irrigation frequency should be increased to enhance the water use efficiency.

Key words: drip irrigation under mulch; soil water movement; numerical simulation; cotton field

膜下滴灌是将覆膜种植与滴灌相结合的一种灌溉技术, 由于覆膜和滴灌的综合效应使田间土壤水分运动具有独特的形式, 以往的研究大多侧重于膜下滴灌不同种植方式和不同滴灌

带铺设方式对作物生长发育以及产量的影响, 而对膜下滴灌条件下土壤水分运动特征方面的研究较少^[1]。

膜下滴灌条件下绿洲棉田土壤水分运动可分为两个过程:

收稿日期:2007-03-07

基金项目:中国科学院知识创新工程性项目(KZCZ2-YW-127)、国家高技术研究发展计划(“863”计划)(2006AA10Z226)和中科院网络台站项目资助。

作者简介:串志强(1980-)男, 硕士研究生, 研究方向为生态与水分过程。

滴灌条件下土壤水分运动和非滴灌条件下土壤水分运动。滴灌条件下土壤水分运动研究大多侧重于室内实验与数值模拟方法的改进,通常情况对滴灌条件下土壤水分运动数值模拟研究的前提假设可分为点源和线源两种,以点源居多^[2~13]。但是在田间相邻滴头的湿润体经常出现相互重叠的情况,该现象势必对点源土壤水分运动规律产生影响,故点源入渗条件下的土壤水分运动变化规律并不能客观地反映点源交汇条件下的土壤水分运动状况。对于线源的假设,滴灌条件下土壤水分运动实测值与模拟值的差异主要表现在初期,产生差异主要对滴水头周围饱和区的确定。而非滴灌条件下的土壤水分运动主要取决于根系吸水、棵间蒸发以及地下水位的变化情况。

本文通过对膜下滴灌条件下绿洲棉田土壤水分运动数值模拟,采用田间实测数据验证,明确膜下滴灌条件下土壤水分运动特征,探寻干旱区绿洲农田的棉花节水灌溉制度以及提高水分利用效率的有效途径。

1 材料与方 法

1.1 试验设计

试验于2006年4月27~10月12日在中科院阿克苏水平衡试验站(80°45'E,40°27'N)进行,该站海拔1 028 m,属暖温带内陆型气候,多年平均降水量45.7 mm,年日照时数2 950 h,无霜期270 d。土壤为砂性壤土,容重为1.40~1.53 g/cm³。

试验作物为棉花,供试品种为“中棉35”,种植密度为1.95×106株/hm²。整个试验小区面积约0.65 hm²,共设12小区,各小区面积为73.4 m×6.8 m。膜下滴灌种植方式为一膜两带四行,每次分别灌水58.5 m³、54 m³、49.5 m³和44 m³,3个重复。

试验地旁设有一小型自动气象观测站以测定常规气象要素,气象资料于棉花种植后第二天开始记录。从出苗(4月27日)起,每10 d测一次土壤含水率,灌水期间每隔7 d观测一次土壤含水率。在膜下膜间、膜间埋设中子仪测定土壤剖面20~150 cm的土壤含水率,同时对土壤剖面的0~80 cm用烘干法测定其土壤含水率。

1.2 数学模型

将点源交汇条件下滴灌土壤水分运动近似为线源土壤水分运动^[10],其土壤水分运动可简化为垂直于滴灌带的二维土壤水分运动问题,其控制方程为^[11]:

$$c(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} [D(h) \frac{\partial h}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial z} [D(h) \frac{\partial h}{\partial z}] - \frac{\partial K(h)}{\partial z} - s \quad (1)$$

式中: h 为土壤水负压水头,cm; θ 为土壤体积含水率,cm³/cm³; t 为时间,h; z 为垂直距离,cm,向上为正; x 为水平距离,cm; $K(h)$ 为土壤非饱和导水率,cm/h; $D(h)$ 为土壤非饱和扩散率,cm²/h; S 为根系吸水项,cm³/(cm³·h)。

1.2.1 求解土壤水分运动方程的初始条件

$$h(x, z, t) = h_0(x, z)$$

$$0 \leq x \leq X; 0 \leq z \leq H_0, t = 0 \quad (2)$$

式中: $h_0(x, z)$ 为初始土壤负压水头分布,cm; H_0 为初始地下水埋深,cm; X, H_0 分别为模拟计算区域的径向和垂直最大距离,cm。

1.2.2 边界条件

由于膜下滴灌条件下土壤水分运动的对称性,仅研究试验田一个垂直于滴灌带的垂直剖面(Vertical Plane)即可(如图1所示)。

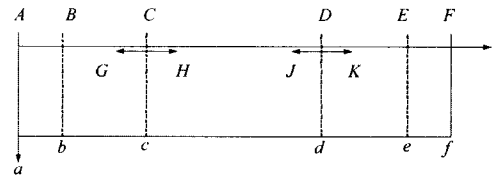


图1 模拟计算流区示意图

(1)AB、EF处为膜间裸地,即上边界垂直方向水流量应等于蒸散强度或降雨入渗强度 $[R(t)]$ 。

$$-D(h) \frac{\partial h}{\partial z} + K(h) = R(t), t > 0, z = 0 \quad (3)$$

式中各变量物理意义同式(1)。

(2)C、D处为滴灌带,即线源,故分别以C、D处为中心的饱和区为恒定流(Constant Flux) q_0 ,即:

$$-D(h) \frac{\partial h}{\partial z} + K(h) = q_0, z = 0 \quad (4)$$

(3)在膜下(BE)除去饱和积水区,由于有覆膜的存在,其上边界为零通量(No Flux)。

(4)Aa、Ff处为对称边界,可看作不透水边界,水通量为零。

(5)af为下边界条件。地下水位变化条件下,设为自由出水边界(Free Drainage),即:

$$\frac{\partial h}{\partial z} = 0, z = H_0, 0 \leq x \leq X \quad (5)$$

2 模型验证与精度分析

2.1 模型参数及根系吸水^[9]

采用土壤传递函数模型(pedotransfer function)得到 van Genuchten 型水力学参数(见表1)。

表1 供试土壤水分特性的VG模型参数

土壤剖面	$\theta_r /$ (cm ³ ·cm ⁻³)	$\theta_s /$ (cm ³ ·cm ⁻³)	$\alpha /$ cm	n	$K_s /$ (cm·h ⁻¹)
0~30	0.035 4	0.446 0	0.014 6	1.471 8	0.713 3
30~40	0.052 2	0.494 0	0.006 2	1.620 1	0.352 9
40~100	0.050 4	0.459 0	0.006 0	1.635 8	0.500 0

参考作物蒸散量(ET_0)采用FAO-56所推荐的Penman-Monteith公式计算。作物潜在蒸腾和棵间蒸发量根据实际作物蒸散量和作物叶面积指数来计算。根系吸水项采Feddes函数计算,对于棉花该函数各参数 h_1, h_2, h_3, h_4 分别为-15 cm、-30 cm、-800 cm、-16 000 cm。

2.2 模型求解

利用 Galerkin 有限单元法完成对数学模型的数值求解。将模拟计算区域剖分为三角形单元,横向步长为5 cm;纵向由于水流等变量的梯度较大,故加密网格,0~40 cm步长设为2.5 cm,40~150 cm步长设为5 cm。

2.3 模型检验

2.3.1 不同灌水处理土壤剖面土壤含水率实测值与模拟值的对比

图2为实验田不同灌水处理条件下土壤水分运动数值模拟结果与实测值在膜下、膜间的土壤含水率对比情况。由该图可以看出模拟值和实测值吻合较好,表明所建立的模型能够反映出膜下滴灌条件下土壤水分运动状况,同时可以看出土壤剖面0~30 cm存在误差,实测的膜下土壤水分较模拟值偏小。

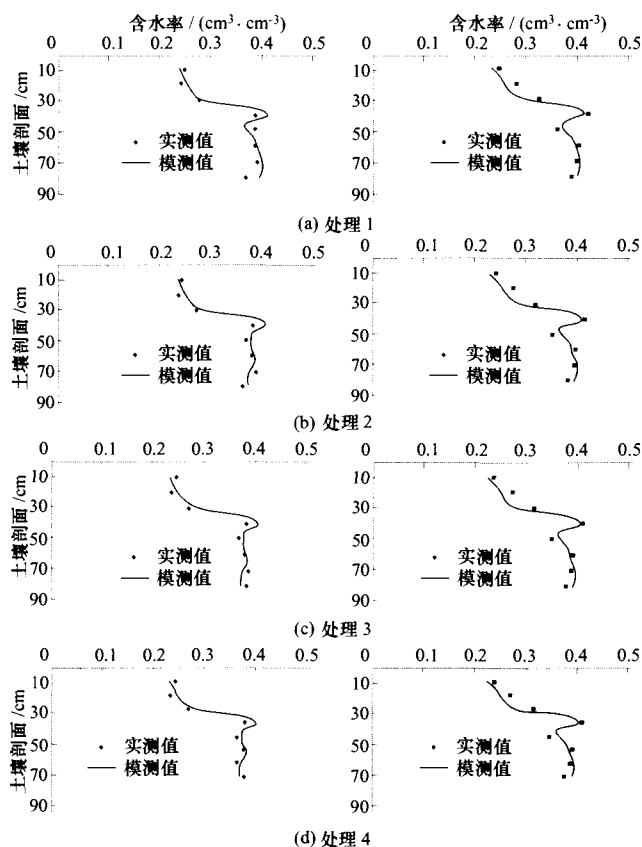


图2 膜下(左列)、膜间(右列)不同灌水量土壤剖面含水率模拟值与实测值比较

2.3.2 精度分析

本文采用4个指标来评价模型预测的精度:①确定性系数;②水量平衡指数;③绝对误差;④相对误差。

取2005年实验数据对模型进行检验,得到膜下滴灌条件下各层土壤含水率与模拟土壤含水率的对比,预测精度见表2。

表2 膜下滴灌条件下土壤水分运动模型检验精度结果

处理	确定性相关系数		水量平衡指数		平均相对误差/%	
	膜下	膜间	膜下	膜间	膜下	膜间
处理一	0.95	0.94	0.89	0.88	4.09	4.55
处理二	0.96	0.97	0.79	0.92	3.86	4.01
处理三	0.94	0.95	0.83	0.90	5.00	3.88
处理四	0.97	0.92	0.87	0.89	4.62	4.67

3 结果与讨论

3.1 不同深度条件下土壤水分变化

由图2可以看出模拟值和实测值吻合较好,表明所建立的

模型能够反映出膜下滴灌条件下土壤水分运动状况。同时可以看出土壤剖面0~30 cm存在误差,实测的膜下的土壤水分较模拟值偏小,可能是因为所设计的灌水量较大,形成的明显积水区域,并覆膜的存在使积水向膜间扩散,而导致膜下实测值偏小,甚至出现膜间土壤水分实测值大于膜下的情况;同理,在膜间0~30 cm的实测值大于模拟值。土壤剖面30~40 cm为粉质粘壤土,对土壤水分运动有一定滞缓作用,不论是膜下、膜间在该剖面的土壤水分都有明显变化。40~80 cm的土壤水分变化受初始土壤含水率的影响较大。

由表2可知模型是比较可信的,但水量平衡指数较低,分析认为由于所采用的下边界条件为自由排水边界,将下边界水势梯度设为零,土体中只要有向下的水流就认为发生了部分渗漏^[9],所以通过水量平衡指数得到的结果比较低。

由模拟值和实测值表明,40 cm以下土壤含水率变化不明显,这说明膜下滴灌条件下土壤水分运动受地下水影响较小,所采用的下边界条件—自由出水边界(Free Drainage)是比较合适的,其检验结果如表2所示,能够反映出客观实际。

3.2 不同灌水灌水处理条件下土壤水分运动变化

影响膜下滴灌土壤水分运动的主要因素为灌水量、土壤质地以及初始土壤含水率等。

在灌水条件下,由于本文采用的上边界条件为恒定流,所以本文假设了5种边界条件(Constant flux=1,4,6,6,12,24)。由图3可知随着边界条件的变化土壤含水率出现明显变化。

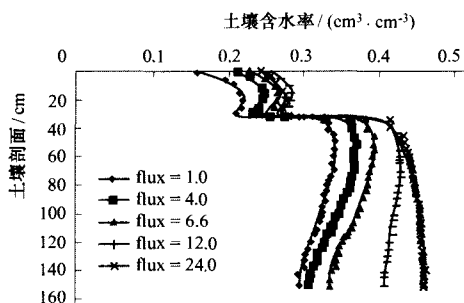


图3 5种边界条件下含水率变化

3.3 不同时间不同地点0~10 cm土壤含水率变化

采用以色列PHYTECH公司研制的仪器PTM-48(Photo-synthesis Transpiration Monitor),自动监测膜下、滴头下和膜间的土壤水分动态变化(即图1中BC的中间位置、C和G)。本文只列出灌水后(6月20~24日)土壤水分实测值和模拟值之间的对比。

将PTM-48实时监测0~10 cm的土壤水分数据与模拟值对比(见图4),其变化规律比较吻合,能够反映客观实际情况。同时看出实测结果比模拟结果偏大,这可能是由于在模型假设边界条件时没有考虑垂直方向上的饱和积水问题,对模拟结果可能产生比较大的误差;在灌溉过程中多孔介质的不均匀性使滴灌形成的饱和区变形或扩大,而导致土壤含水率偏离。

3.4 土壤含水率与棉花根系的关系

棉花毛细根的相对根长密度在0~10 cm大量分布甚至是30~40 cm的10倍左右,由于覆膜的存在使土壤表面温度升高

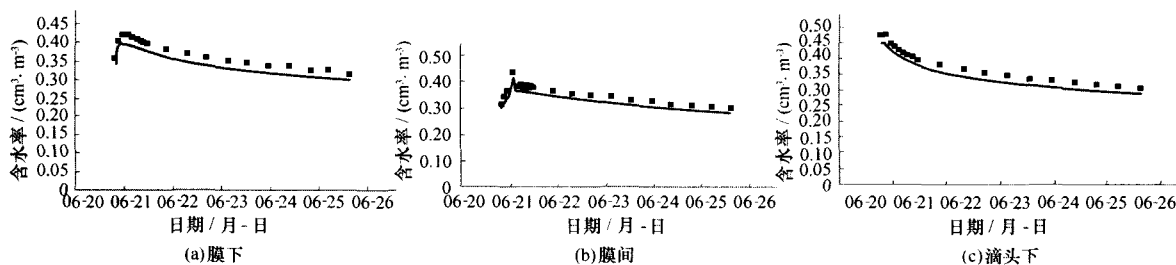


图4 0~10 cm 土壤含水率模拟值与实值的对比

而有利于根系发育;同时,蒸发强烈时受到覆膜阻隔使大量的土壤水分滞留在土壤剖面的0~10 cm,为棉花根系生长提供充足的水热条件。由于在30~40 cm存在粘土层,根系生长明显受阻,相对根长密度显著下降(见图5)。

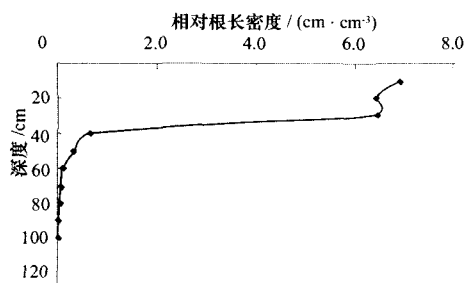


图5 相对根长密度随土壤剖面的分布

由于30~40 cm粘土层的存在使土壤水运动以及土壤剖面含水率分布状况具有独特的形式,并对棉花根系生长及空间分布产生很大影响。灌水时对土壤水的下渗有很大的滞缓作用,并使根系生长受阻,导致根系主要集中在土壤剖面0~30 cm。

0~10 cm根系发育使根系吸水能力大大增加,但在模拟过程中这种情况不能很好的表达出来,因为在根系吸水项所考虑的只有根系的空间分布,并没有考虑相对根长密度,尤其是没有对毛细根做足够的分析,这样有可能造成比较大的偏差。棉花生长初期(7月3日),棉花的根系发育范围垂直方向为0~20 cm,水平方向距根最大为25 cm。在此期间,在灌水时应水量小,频度加大,这样既能满足根系吸水的要求又能提高根系吸水水分利用效率。

4 结 语

所采用的二维垂直剖面模型及边界条件能够很好模拟膜下滴灌条件下土壤水分运动状况。

粘土层对土壤水分及棉花根系生长影响显著。由于粘土层的存在使土壤水分运动分为两部分:0~30 cm变化明显区,40~80 cm变化微弱区;棉花的生长受粘土层制约,90%以上的根系(尤其是毛细根)分布在垂直剖面0~30 cm。

本地区膜下滴灌的灌溉模式应该采用减小灌溉量,增加灌溉频度,这样既能达到满足棉花需水又能提高灌溉用水的利用效率的目的。

参考文献:

[1] 蔡焕杰,邵光成,张振华. 荒漠气候区膜下滴灌棉花需水量和灌溉

制度的试验研究[J]. 水利学报, 2002, (11): 119-123.

- [2] 李光永,曾德超,段中锁,等. 地理点源滴灌土壤水分运动规律的研究[J]. 农业工程学报, 1996, 12(3): 66-71.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 吕殿青,王全九,王文焰. 滴灌条件下土壤水盐转移特性的研究现状[J]. 水科学进展, 2001, 12(1): 107-112.
- [7] 许迪,程先军. 地下滴灌土壤水运动和溶质运移的数学模型及验证[J]. 农业工程学报, 2001, 17(6): 1-4.
- [8] 胡克林,肖新华,李保国. 不同类型下边界条件对模拟灌溉农田水分渗漏的影响[J]. 水科学进展, 2006, 17(5): 665-670.
- [9] 冯绍元,丁跃元,曾向辉. 温室滴灌线源土壤水分运动数值模拟[J]. 水利学报, 2001, (2): 56-59.
- [10] 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, 1988.
- [11] 史文娟,沈冰,汪志荣,等. 层状土壤中砂层层位对潜水蒸发的影响[J]. 干旱区地理, 2006, 29(2): 282-286.
- [12] 赵成义. 作物根系吸水特性研究进展[J]. 中国农业气象, 2004, 25(2): 39-46.
- [13] 许迪. 典型经验根系吸水函数的田间模拟检验及评价[J]. 农业工程学报, 1997, 13(3): 37-42.
- [14] Simunek J, Sejna M, Genuchten M Th van. The HYDRUS-2D software package for simulating the two-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media [M]. California: U. S. salinity laboratory, Agricultural research service. U. S. Department of agriculture, Riverside, 1999.
- [15] 王红雨. 节水灌溉条件下宁夏银北灌区地下水动态研究[J]. 中国农村水利水电, 2006, (2).
- [16] 周和平,徐小波,兰玉军. 膜下滴灌条件下土壤水盐运移研究综述[J]. 节水灌溉, 2006, (4): 8-10.
- [17] 王振华,吕德生,温新明,等. 地下滴灌对棉花生理性状及产量影响的研究[J]. 节水灌溉, 2006, (4): 11-13.
- [18] 李红,罗金耀. 地下滴灌条件下土壤水分研究概况[J]. 节水灌溉, 2005, (3): 26-28.
- [19] 李旌胜,李光永,张琼. 澳大利亚棉花地下滴灌技术[J]. 中国农村水利水电, 2005, (1): 62-64.
- [20] 张振华,蔡焕杰,杨润亚. 基于CWSI和实际耗水量的膜下滴灌作物需水量研究[J]. 中国农村水利水电, 2005, (3): 4-6.