

# 微孔管渗灌时土壤水分运动的有限元模拟及其应用

张书函<sup>1</sup>, 雷廷武<sup>1</sup>, 丁跃元<sup>2</sup>, 许翠平<sup>2</sup>

(1. 中国农业大学; 2 北京市水利科学研究所)

**摘 要:** 为了深入了解新型微孔渗灌管的灌水性能, 提供推广应用渗灌的科学理论和技术依据, 建立了含有第 3 类边界条件的二维微孔管渗灌土壤水分运动的数学模型, 采用有限单元法进行了模拟。检验结果表明模型具有较高的精度。模型的仿真应用结果表明: 供水水压力、土壤初始含水率、渗管的渗水速率等对渗灌效果都有明显影响。供水压力增大渗灌后土壤湿润范围内的平均含水率增大。初始含水率越高, 湿润锋越不明显, 总渗水量越小。随着渗管渗水速率的增大, 渗管周围将出现饱和区, 并存在渗水速率临界值, 该值与土壤初始含水率有关。增加渗管的渗水速率可以提高渗灌的灌水效果。

**关键词:** 渗灌; 土壤水运动; 入渗; 有限元

**中图分类号:** S275.4; S275.6; S152.7

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-2689(2002)04-0001-05

渗灌是近年来最受关注的节水灌水技术之一, 国外对此在理论和实践上都有较多研究<sup>[1~3]</sup>, 国内虽然也有一些研究结果, 但是从总体上看, 渗灌的技术水平状况尚处于初级阶段<sup>[4~6]</sup>。目前较新的一种渗灌灌水器是用废旧轮胎回收的橡胶制成的可沿整个管壁和管长较均匀渗水的微孔渗管。由于管道造价较低, 铺设方便受到使用者的欢迎。但是针对这种渗管的渗灌技术研究更少。因此本文对这种新型微孔渗管的渗水机理进行试验研究, 并通过数学模型进行模拟研究, 为渗灌的推广使用提供理论和技术依据。

## 1 微孔管渗灌的水分入渗机理

### 1.1 微孔渗灌管的水力特性

微孔渗管是用橡胶发泡技术制成一种多孔介质, 具有与土壤相似的特性。管壁具有吸水性和透水性。经过对目前国内出现的几种微孔渗管的测试<sup>[7]</sup>, 发现微孔管管壁的孔隙率可达到 17.3%~22.19%, 渗管吸水达饱和的时间都很长, 单位时间、单位长度渗管所吸收的水量随时间呈减小趋势。

与土壤等多孔介质一样, 可以用导水系数来反映渗灌的透水性, 即单位梯度下通过渗管的渗透速度, 可通过渗透试验测定的渗水速率计算。由于渗管的壁厚  $d$  和内径  $D_n$  已知, 根据达西定律可求得渗灌管的导水系数  $k_g$

$$k_g = \frac{qd}{D_n h} \times 10^{-4} \quad (1)$$

式中  $k_g$ ——渗灌管的导水系数,  $\text{cm}^2/\text{s}$ ;  $q$ ——渗灌管的渗水速率,  $\text{mL}/(\text{m} \cdot \text{min})$ ;  $d$ ——管壁厚,  $\text{mm}$ ;  $h$ ——供水水头,  $\text{m}$ ;  $D_n$ ——渗灌管的内径,  $\text{mm}$ 。根据测试结果<sup>[1]</sup>计算出美国、济源、莱芜和北航生产的渗管在渗水 1 h 后的导水系数分别为:  $1.328 \times 10^{-4}$ 、 $7.028 \times 10^{-4}$ 、 $1.142 \times 10^{-4}$  和  $0.194 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ 。

### 1.2 微孔管渗灌的水分入渗机理

微孔管渗灌时, 水分先通过渗管的管壁向外渗透, 然后再通过渗管-土壤界面向周围的土壤中入渗。入渗的速率受控于渗管的透水性和管内外(包括土壤中)的水势梯度, 可用达西定律进行描述。在土壤未饱和时, 渗管壁外土壤的土水势为负值, 渗管内外水势梯度比在空气中的大, 渗水速率也就比在空气中测试的大。随着管壁周围土壤水分的增加, 管内外水势梯度减小, 渗水速率也逐渐减小。渗出的水分在周围土壤水势梯度的作用下, 向周围土壤运动。土壤水分在运动过程中, 向上运动需要克服重力势, 向下运动, 重力势做功, 水平运动重力势不起作用。因此正常情况下, 渗灌过程中渗管周围的湿润范围下方较大, 上方的较小, 左右两侧的湿润范围比下方的小, 但大于上方的。

## 2 微孔管渗管土壤水分运动模型

### 2.1 控制方程

渗灌条件下的土壤水分运动满足 Richards 方程。假定渗灌管的渗水速率沿渗管一致, 土壤水分也沿渗管方向分布均匀, 则渗灌的土壤水分运动可近似看作在渗灌管垂直面上的二维运动。以渗灌管中

收稿日期: 200203204 修订日期: 200205220

基金项目: 北京市科委“九五”重大科技攻关项目(952360100);

北京市科委专项(951504000)资助

作者简介: 张书函, 博士生, 工程师, 北京市海淀区车公庄西路 21 号 北京市水利科学研究所, 100041

心为原点,以水平向右为  $x$  坐标正向,以竖直向下为  $z$  坐标正向建立坐标系。则渗灌条件下以负压水头  $h$  为因变量的土壤水分运动方程为

$$C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ D(h) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ D(h) \frac{\partial h}{\partial z} \right] - \frac{\partial K(h)}{\partial z} \quad (2)$$

式中  $h$ ——以负压水头表示的土壤基质势, cm 水柱;  $C(h)$ ——土壤的比水容,  $\text{cm}^{-1}$ ;  $K(h)$ ——土壤的非饱和导水率,  $\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$ ;  $D(h)$ ——土壤的非饱和扩散率,  $\text{cm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$ ;  $t$ ——时间,  $\text{min}$ 。

## 2.2 定解条件

### 1) 求解区域

在垂直与渗灌管线的平面内,选取渗管周围上至地面、下至灌水不影响深度、两侧取两渗管中间的铅直分界线为求解域,即如图 1 所示的渗管外壁圆  $r_0$  和四边形  $ABCD$  之间的区域。

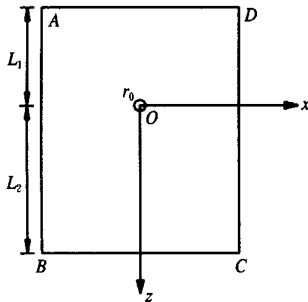


图 1 求解区域示意图

Fig 1 Schematic diagram of solution domain

### 2) 初始条件

初始条件为已知求解区域内的含水率,根据水分特征曲线可以确定相应的吸力水头,因此可表示为

$$h(x, z, 0) = h_0(x, z) \quad (3)$$

### 3) 边界条件

假定土壤均匀且各向同性,由对称性原理,对于  $AB$ 、 $CD$  边界,可看作不透水边界,即有

$$-D(h) \frac{\partial h}{\partial x} \Big|_{x=\pm b} = 0 \quad (4)$$

$$-D(h) \frac{\partial h}{\partial x} \Big|_{x=b} = 0 \quad (5)$$

$BC$  边界可看作第一类边界条件,即

$$h(x, L_2, t) = h_0(x, L_2) \quad (6)$$

对于上边界  $AD$ ,可做已知通量边界处理

$$\left[ -D(h) \frac{\partial h}{\partial z} + K(h) \right] \Big|_{z=L_1} = q_0 \quad (7)$$

式中  $q_0$ ——在没有降雨的情况下主要为土壤蒸发,有降雨时为蒸发与降雨通量之和。

对于  $r_0$  边界,可做第 3 类边界条件处理。设渗管

内的压力水头为  $H$ , 渗管的导水系数为  $k_g$ , 渗管的壁厚为  $d$ , 渗管外的土壤水吸力水头为  $h_c$ , 则渗管的渗水速率为

$$q = k_g \frac{H + h_c}{d} \quad (8)$$

## 2.3 模型的求解

对于上述数学模型采用非均匀有限元划分法求解。在渗灌管周围(水流或水势变化剧烈处)加密有限元网格,在较远处放疏有限元网格。在高 1.0 m、宽 0.8 m 的区域内划分的有限元网格如图 2 所示。时间步长采用预报校正的自动变步长格式,向前和向后的时间差分都采用欧拉格式。

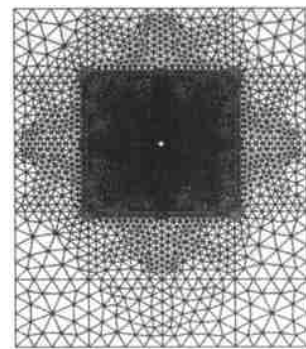


图 2 求解区域内的有限元网络

Fig 2 Finite element mesh in solution domain

## 2.4 模型中参数的确定

### 1) 土壤水分特征曲线

用压力膜法测定了大兴区长子营蔬菜科技示范区 0~30 cm 和 40~60 cm 深度处的土壤水分特征曲线。采用 Harverkamp (Harverkamp, R., 1977) 模型来拟合土壤水分特征曲线。

$$H = H_r + \frac{A(H - H_r)}{A + h^B} \quad (9)$$

式中  $H_r$ ——土壤的饱和含水率和残留含水率;  $A$ 、 $B$ ——表征土壤特性的参数,与土壤质地有关;  $h$ ——土壤吸力。

### 2) 土壤水扩散率

用水平土柱法<sup>[8]</sup>测定了相应深度的非饱和土壤水分扩散率。0~30 cm 深的非饱和土壤水分扩散率为  $D = 0.0003e^{21.682H}$ , 40~60 cm 深度处的非饱和土壤水分扩散率为  $D = 0.000164e^{23.871536H}$ 。

### 3) 非饱和导水率

根据土壤水分特征曲线和非饱和土壤水分扩散率  $D(H)$  可直接推算出非饱和导水率  $K(H)$ <sup>[8]</sup>。按照 HarverKamp 模型拟合出的  $K(H)$  表达式为

$$K(H) = \frac{KA}{A + h^B} \quad (10)$$

式中  $K_s$ ——饱和导水率;  $h$ ——土壤吸力;

A、B —— 拟和参数。

3 模型的检验

3.1 试验装置及土壤

为了检验数值模拟模型, 用土槽进行了物理模型试验。土槽长 80 cm、宽 20 cm、高 100 cm, 前后两面为有机玻璃, 可观察槽内水分的运动。在槽的中心偏上 10 cm 处打孔, 安装渗灌管。槽的前侧以渗灌管孔为中心水平和竖直方向分别间隔 10 cm 打直径 20 mm 的孔, 用橡胶塞塞住, 以便从槽中取土用烘干法测定含水率。槽的后侧在距渗灌管孔 1、2、3、5、7 cm 处打直径 4 mm 的孔, 安装侧压管, 以测定渗灌管程中土壤水压力势。为防止土进入侧压管, 在进口端装有过滤网。

土供土壤为取自长子营示范区的中粉质壤土, 田间持水率  $0.308\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ , 饱和含水率  $0.420\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ , 干容重  $1.42\text{ g}/\text{cm}^3$ 。经风干、过 1 mm 的筛网后按照  $1.42\text{ g}/\text{cm}^3$  的干容重分层填装。渗灌水量的测量采用的恒压供水装置。

3.2 渗灌管在土槽中的渗水速率

采用北航三环公司的渗灌管在土槽中进行了试验, 供水压力 5.0 m, 其渗水速率随时间变化曲线如图 3 所示。渗水速率随渗水时间的增加而减小, 与在空气中测试的规律一致, 只是波动性较大。前 30 min 的平均渗水速率为  $2.09\text{ L}/(\text{h} \cdot \text{m})$ , 整个 210 min 的平均渗水速率为  $1.48\text{ L}/(\text{h} \cdot \text{m})$ , 比在空气中相同供水压力情况下测试的渗水速率结果  $0.7876\text{ L}/(\text{h} \cdot \text{m})$  大。这可能因为土壤比较干燥, 土壤水吸力大, 渗灌管内外的压力差较空气中大, 导致渗水速率增大。这与前面的分析一致。

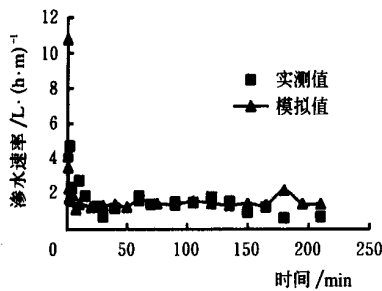


图 3 模拟与实测渗水速率的比较

Fig 3 Comparison of simulated infiltration rate with measured one

比较图 3 中模拟与实际测定的渗水速率变化过程, 可见模拟值与实测值之间很接近, 而且变化规律也基本一致。只是实测的初期渗水速率较模拟的大, 这是因为模拟采用的渗灌管的导水率为固定值, 而渗管实际的导水率在刚开始时比较大<sup>[7]</sup>。

3.3 累计渗水量

土槽实验渗水结束时的累计渗水量为 1162 mL, 模拟所得的结束时的累计渗水量为 1056 mL, 比实际渗水量少 106 mL, 误差为 9.1%, 表明模型的精度较高。

3.4 渗水湿润锋的动态

以湿润锋与渗灌管之间的径距表示湿润锋的位置。将土槽实验渗水与模拟结果的水平与垂直方向的湿润峰位置取平均值进行比较, 如图 4 所示。从图中可见在渗水结束之前模拟值比实测值小, 在渗水结束时的模拟值与实测值相同, 前 30 min 模拟值与实测值差别较大, 30 min 后模拟值与实测值的差别很小, 平均误差为 0.15 cm, 整个过程的误差平均只有 0.38 cm, 说明模拟结果是可靠的。前 30 min 误差较大的原因可能是渗管在渗水初期的导水性高, 在模拟时采用的是平均渗水速率, 比初期实际的渗水速率小。

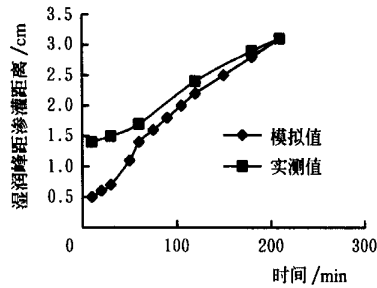


图 4 模拟与实测湿润锋动态比较

Fig 4 Comparison of simulated wetting front movement with measured one

从上面分析可见, 本模型所计算的渗水速率、累计渗水量和渗润锋推进结果都与实测值比较接近, 表明所提出的微孔管渗灌条件下的土壤水分运移模型, 对渗灌时的渗水速率、渗水量、土壤水分动态变化的预测都具有较高的精度, 模型能较好地反映实际入渗情况。

4 模型的仿真应用

4.1 供水压力对渗灌效果的影响

利用上述模型进行了不同供水压力时渗灌的模拟。渗水后渗管下方的土壤水分分布如图 5 所示。供水压力水头  $H$  为 5、10、20 和 30 m 时, 湿润锋的距离分别为 2.2、3.1、4.7 和 5.1 cm, 湿润范围随压力的增高而增大。湿润范围内的含水率也随压力增高而增大, 供水压力水头为 5、10、20 和 30 m 时, 湿润锋以内的平均含水率分别为  $0.333$ 、 $0.349$ 、 $0.354$  和  $0.377\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ , 都在田间持水量与饱和含水率之间。可见供水压力对渗灌效果有明显影响。

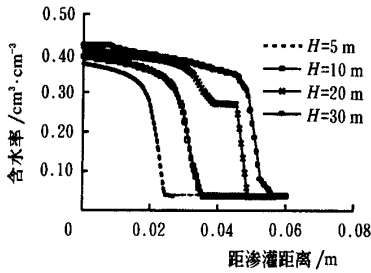


图5 不同供水压力渗水后的土壤水分分布  
Fig. 5 Soil water distribution after infiltration under different pressures

4.2 土壤初始含水率的影响

图6显示了不同初始含水率对渗灌210 min后土壤水分分布的影响。从图中可以看出,初始含水率越高,湿润锋越不明显。初始含水率越大相同渗水时间内湿润锋推进的距离也越大,湿润的面积也越多。但是随着初始含水率的增加总的渗水量呈减小趋势,减小幅度不大。这是主要由于初始含水率越大湿润峰处的土壤导水率越大,湿润峰运移的速度也越快;同时初始含水率增大土壤可储水的空间减少,总渗水量也减少。

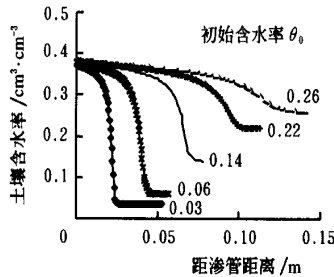


图6 不同初始含水率渗水后土壤水分分布  
Fig. 6 Soil water distribution after infiltration with different initial soil water contents

4.3 渗灌管透水性能的影响

采用初始含水率为0.036 cm³/cm³,改变渗管的透水性能进行模拟,将透水性能增加1~9倍。结果表明,随着渗灌管渗水速率q的增加,湿润锋距渗灌管的水平距离y也增加,两者之间呈幂函数关系,回归关系式为 $y = 2.5016q^{0.406}$ ,相关系数0.9977。渗灌管的透水性不同,渗水后土壤的含水率分布也不同。从图7中可以看出,渗管渗水速率越大,灌水后湿润土壤中的含水率也越高。当渗水速率增加到4.73 L/(h·m)时,渗管周围的土壤开始出现饱和。当渗水速率增加到7.88 L/(h·m)时,饱和区域能够扩展到距渗管1.5 cm处。饱和区域内的土壤水分存在压力势。由此可见,要提高渗灌的土壤湿润范围和湿润程度,应当增加渗管的渗水速率。

4.4 田间渗灌情况的模拟

据测定,温室蔬菜正常生长过程中土壤水分

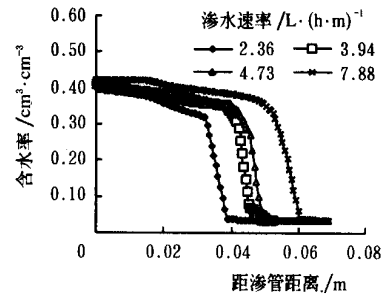


图7 不同渗管渗水速率渗水后的含水率分布  
Fig. 7 Soil water distribution after infiltration for different penetrability of porous pipe

的最低值为0.20 cm³/cm³,施肥过滤后的压力一般在5~7 m水头,因此采用0.20 cm³/cm³的初始含水率和5 m的供水压力水头,对田间不同渗水性能渗管灌水的情况进行了模拟。结果显示,当渗管的渗水速率为3.94 L/(h·m)时,灌水210 min后,水平方向的湿润半径将大于15 cm;当渗水速率为8.66 L/(h·m)时,灌水后水平湿润半径可达21 cm。表明,增加渗管的渗水速率可增加灌水效果。该渗管渗水后不同再分布时间的水平方向的土壤水分分布如图8所示,可见再分布8.5、24和48 h后的湿润锋位置都在20 cm附近。表明,渗灌后水平方向湿润范围受再分布时间的影响较弱。

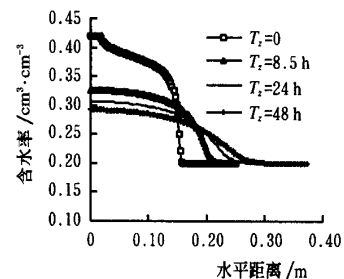


图8 不同再分布时间水平向的水分分布  
Fig. 8 Soil water redistribution at different time after infiltration

5 结论

采用第3类边界条件对微孔管渗灌建立了二维土壤水分运动的数学模型,采用有限单元法进行了模拟,检验结果表明,模型能够较好地模拟渗灌管渗水速率、渗水量和土壤水分的动态变化,具有较高的精度,能够反映实际情况。利用该模型进行渗灌的仿真应用研究结果表明:(1)供水水压对渗灌效果有明显影响,相同情况下,土壤湿润范围随供水压力的增大而扩大,湿润锋内的平均含水率也随供水压力的增高而增大。(2)土壤初始含水率对渗灌结果有明显影响。初始含水率越高,湿润锋越不明显,相同渗水时间内湿润锋推进的距离也越大,湿润的面积也

越大。(3) 渗灌管的渗水速率对灌水效果的影响明显。随着渗灌管渗水速率的增加, 湿润锋距渗灌管的距离也增加, 两者之间呈幂函数关系。随着渗管渗水速率的增大, 渗水后湿润土壤中的含水率也越高, 增加到某一临界值时, 渗管周围开始出现饱和区。该临界值与土壤初始含水率有关系, 初始含水率大时, 临界值小, 初始含水率小时临界值大。因此, 实际渗灌时, 应当选用渗水速率较高的渗管, 在土壤不很干时灌水, 缩短灌水周期, 还可以适当提高供水压力, 以增加灌水效果, 使作物根区保持适宜的水分, 促进作物生长。

#### [参 考 文 献]

- [1] Pitts D J, Clark G A. Comparison of drip irrigation to subirrigation for tomato production in southwest florida[J]. *Applied Engineering in Agriculture* 1991, 7(1): 177~ 184
- [2] Philip J R. Effects of root and subirrigation depth on

evaporation and percolation losses[J]. *Soil Science Society of American Journal*, 1991, 55(6): 1520~ 1523

- [3] Detar W R, Phene C J, Clark D A. Subsurface drip vs furrow irrigation: 4 years of continuous cotton on sandy soil[A]. In: 1994 Proceedings Beltwide cotton conference [C], Jan 5~ 8 Saint Diego California, U S A, 1994 542~ 545
- [4] 岳 兵. 渗灌技术存在的问题与建议[J]. *灌溉排水*, 1997, 16(2): 40~ 44
- [5] 张树森, 雷勤明. 日光温室蔬菜渗灌技术研究[J]. *灌溉排水*, 1994, 13(2): 30~ 32
- [6] 张思聪, 惠士博, 雷志栋等. 渗灌的非饱和土壤水二维流动探讨[J]. *土壤学报*, 1985, 22(3): 209~ 222
- [7] 张书函, 穆金元, 王继民等. 新型微孔渗灌管渗水性能初步试验研究[J]. *灌溉排水*, 1998 57~ 60
- [8] 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, 1987.

## Finite Element Modeling of Soil Water Movement Under Subsurface Irrigation With Porous Pipe and Its Application

Zhang Shuhan<sup>1</sup>, Lei Tingwu<sup>1</sup>, Ding Yaoyuan<sup>2</sup>, Xu Cuiping<sup>2</sup>

(1. College of Hydraulic and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. Beijing Hydraulic Research Institute, Beijing 100044, China)

**Abstract:** In order to acquire more scientific theories and technical basis of subsurface irrigation with porous pipes for widespread use, it is very necessary to deeply study irrigation performance of the new kind of porous pipe. A two dimension soil water movement model with boundary of the third type was built to simulate infiltration of subsurface irrigation. Finite element method (FEM) was used to solve this model. Results of tests show that precision of the model is high. Application of the model indicates that effect of subsurface irrigation is influenced evidently by pressure of water supply, initial soil water content, penetration rate of porous pipe. With increase of water pressure, wetting range at the end of irrigation will enlarge, and average water content within the range will become higher. The higher the initial soil water content, the more inconspicuous the wetting front, and the less the total amount of infiltration. If infiltration rate of porous pipe was larger than a threshold value, a saturated zone around porous pipe would form. The threshold value is related to the initial soil water content. By increasing infiltration rate of porous pipe, effect of subsurface irrigation will be improved.

**Key words:** subsurface irrigation; soil water movement; infiltration; finite element method