

# 蓄水坑灌单坑土壤水分运动模型的有限体积法求解\*

李京玲 孙西欢 马娟娟 李建文 张文杰

(太原理工大学水利科学与工程学院, 太原 030024)

**【摘要】** 基于土壤水分运动的动力学方程,建立了蓄水坑灌单坑土壤水分运动的数学模型及边界条件,利用有限体积法对模型进行了求解。为了验证所建模型的准确性,在室内进行了蓄水单坑水分入渗试验。模拟结果和试验结果的对比表明,土壤湿润锋和含水率的模拟值与实测值吻合较好,说明所建立的蓄水单坑二维土壤水分运动模型是正确的,采用有限体积法求解是可行的。该模型可作为预测蓄水坑灌条件下单坑土壤水分运动的有效工具。

**关键词:** 蓄水坑灌 土壤水分运动 有限体积法 数值模拟

**中图分类号:** S275.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)05-0063-05

## Numerical Simulation for Single Pit Soil Water Movement of Water Storage Pit Irrigation

Li Jingling Sun Xihuan Ma Juanjuan Li Jianwen Zhang Wenjie

(College of Water Resource Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

### Abstract

Based on the theory of soil water dynamic, a simulating model and boundary conditions for the soil water of water storage single pit irrigation were established, and the model was numerically solved by finite volume method. The results showed that good agreement was obtained between simulated and measured wetting front and soil moisture content. It indicated that the mathematic model was correct and the model solving with finite volume method was feasible. It is concluded that the model could be used to implement water transport in soil under the water storage single pit.

**Key words** Water storage pit irrigation, Movement of soil water, Finite volume method, Numerical simulation

### 引言

蓄水坑灌法是在树干周围布设若干个小蓄水坑,通过蓄水坑侧壁入渗,其最大特点是将节水灌溉与水土保持有机地结合在一起,可以有效地解决我国北方山丘区的干旱问题和水土流失问题<sup>[1~4]</sup>。利用蓄水坑进行灌溉时,坑内水头较高且属于变水头入渗,因此其数值模拟计算区域和边界条件具有复杂和特殊性。在蓄水坑灌土壤水分数值模拟方面,文献[5~8]建立了土壤水分运动的数学模型并采用有限差分法进行求解,但所采用的有限差分法对数值解的守恒性难以保证,因此在计算复杂区域

和边界条件时,经常会遇到数值弥散和数值振荡现象。有限体积法作为一种结合有限差分和有限元的计算方法,其积分方程表示的是控制体积的通量平衡,因此方程具有物理意义上的守恒性,在一定程度上能有效地克服数值弥散和数值振荡现象<sup>[9]</sup>。本文采用有限体积法研究蓄水坑灌条件下单坑土壤水分分布和运移问题,以期对蓄水坑灌的进一步研究和制定合理的灌溉方案提供理论依据。

### 1 数学模型

#### 1.1 水分运动的基本方程

在蓄水单坑土壤水分运动过程中,假设各层土

收稿日期:2010-08-10 修回日期:2010-09-10

\* 国家自然科学基金资助项目(50979065)和山西省科技攻关资助项目(2007031069)

作者简介:李京玲,讲师,博士生,主要从事节水灌溉及土壤水动力学研究,E-mail:lijingling33@163.com

通讯作者:孙西欢,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉及土壤水动力学研究,E-mail:sunxihuan@tyut.edu.cn

壤为均质、各向同性、骨架不变形的多孔介质,则坑内的水分入渗可看作以蓄水坑中心为对称轴向四周均匀入渗的过程,即具有轴对称的特点,蓄水坑的入渗可简化为轴对称的二维平面问题。图1为蓄水单坑入渗剖面图,图中  $OA$  为地面,  $O'D'$  为坑内水面,  $C'B'$  为蓄水坑底,  $A'B'$  为蓄水坑壁,  $OA'$  为蓄水坑半径,  $AB$  为右边界,  $CB$  为下边界, 蓄水坑轴线为  $OC$ 。不考虑根系吸水的影响,则在柱坐标下,蓄水单坑土壤水分运动用二维 Richards 方程<sup>[10]</sup>描述为

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( rK(h) \frac{\partial h}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K(h) \frac{\partial h}{\partial z} \right) - \frac{\partial K(h)}{\partial z} \quad (1)$$

式中  $h$ ——土壤负压水头, cm  
 $\theta$ ——土壤体积含水率,  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$   
 $K(h)$ ——土壤非饱和导水率,  $\text{cm}/\text{min}$   
 $t$ ——时间,  $\text{min}$       $r$ ——径向坐标,  $\text{cm}$   
 $z$ ——地表以下土层深度,  $\text{cm}$

规定  $r$  向右为正,  $z$  向下为正。

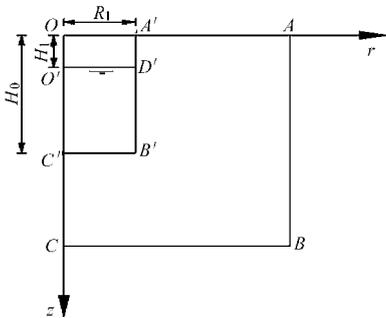


图1 蓄水单坑入渗剖面示意图

Fig.1 Profile of water storage pits irrigation

## 1.2 初始条件和边界条件

### 1.2.1 初始条件

假定土壤初始含水率在所研究区域内分布均匀,则初始条件可表示为

$$h = h_0 \quad (t = 0, 0 \leq r \leq R, 0 \leq z \leq Z) \quad (2)$$

式中  $h_0$ ——土壤初始负压水头,  $\text{cm}$   
 $R$ ——研究区域水平方向最大距离,  $\text{cm}$   
 $Z$ ——研究区域垂直方向最大距离,  $\text{cm}$

### 1.2.2 边界条件

(1) 地表边界  $OA$ , 试验过程中不考虑地表蒸发和降雨, 故其边界为第二类边界, 即

$$\left( -K(h) \frac{\partial h}{\partial z} \right)_n + K(h_n) = 0 \quad (z = 0, t > 0, 0 \leq r \leq R) \quad (3)$$

(2) 右边界  $AB$  和下边界  $CB$ , 由于计算区域较大, 可认为水分无法到达边界, 故边界按第一类边界处理, 即

$$h_c = h_0 \quad (r = R, t > 0, 0 \leq z \leq Z) \quad (4)$$

$$h_s = h_0 \quad (z = Z, t > 0, 0 \leq r \leq R) \quad (5)$$

(3) 边界  $C'C$  和坑壁  $A'D'$ , 根据水分运动的对称性, 且不考虑坑壁的蒸发作用, 其边界水分通量为零, 即

$$\left( -K(h) \frac{\partial h}{\partial r} \right)_w = 0 \quad (r = 0, H_0 \leq z \leq Z; r = R_1, 0 \leq z \leq H_1) \quad (6)$$

式中  $R_1$ ——蓄水坑半径,  $\text{cm}$

$H_1, H_0$ ——坑内水位离地面高度和蓄水坑高度,  $\text{cm}$

(4) 水分的入渗面  $D'B'$ , 在坑中水分入渗阶段, 由于坑内始终存在水头, 故应考虑压力势, 即

$$h_w = h_i \quad (t \geq 0, r = R_1, H_1 \leq z \leq H_0) \quad (7)$$

式中  $h_i$ ——入渗面  $i$  点的压力势,  $\text{cm}$

蓄水单坑水分入渗属于非恒定水头入渗, 随着时间的推移, 入渗水头  $D'$  不断下降, 蓄水坑壁边界所控制的范围也在不断减小, 当坑中水分完全入渗后,  $D'B'$  边界被  $A'D'$  边界所取代。

(5) 坑底边界  $C'B'$ , 为了减少水分的深层渗漏, 坑底为不透水, 故其水分通量为零, 即

$$\left( -K(h) \frac{\partial h}{\partial z} + K(h) \right)_n = 0 \quad (t \geq 0, 0 \leq r \leq R_1, z = H_0) \quad (8)$$

## 2 模型求解

### 2.1 计算网格的处理

采用均匀网格将求解区域划分成若干个离散的控制体, 节点的设置采用内节点法, 即节点位于子区域的中心, 这时子区域就是控制容积。图2为计算区域网格划分系统中的一部分,  $P, W, E, N, S$  为节点, 子区域  $w-e-n-s$  为控制体,  $w, e, n, s$  分别取在  $W-P, P-E, N-P, P-S$  的中间点。阴影区域即为节点  $P$  的控制体积, 与节点  $P$  相邻的节点有西侧邻点  $W$ 、东侧邻点  $E$ 、北侧邻点  $N$  和南侧邻点  $S$ 。控制体  $w, ns$  之间的距离分别记为  $\Delta r, \Delta z$ 。节点  $P$  到  $W$  的距离记为  $\delta r_w$ ,  $P, E$  之间的距离为  $\delta r_e$ ,  $N, P$  之间的距离为  $\delta z_n$ ,  $P, S$  之间的距离为  $\delta z_s$ 。

### 2.2 数值离散格式及离散方程

有限体积法的基本思想<sup>[11-12]</sup>是将计算区域划分为一系列不重复的控制容积(控制体), 把变量存在单元的中心, 单元的边界为控制体。通过将待解的微分方程对控制体作积分导出离散方程, 因其严格满足控制体内及整个计算区域的积分守恒, 由此建立的离散格式在计算连续流时可保证无守恒误差。

按照有限体积法的基本思想, 对式(1)在如图2

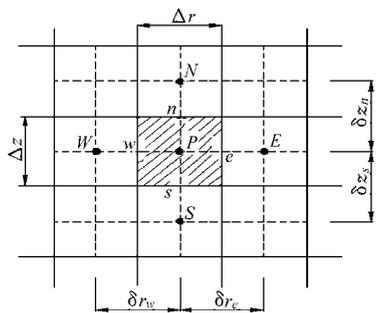


图2 二维网格系统示意图

Fig. 2 Profile of dimension grid system

所示的控制容积  $\Delta V$  和  $\Delta t$  时间间隔内作积分

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_{\Delta V} \frac{\partial \theta}{\partial t} dV dt = \int_t^{t+\Delta t} \int_{\Delta V} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( rK(h) \frac{\partial h}{\partial r} \right) dV dt + \int_t^{t+\Delta t} \int_{\Delta V} \frac{\partial}{\partial z} \left( K(h) \frac{\partial h}{\partial z} \right) dV dt - \int_t^{t+\Delta t} \int_{\Delta V} \frac{\partial K(h)}{\partial z} dV dt \quad (9)$$

利用 Gauss 降维定理, 可得

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_{\Delta V} \frac{\partial \theta}{\partial t} dV dt = \int_t^{t+\Delta t} \int_{\partial V} \frac{1}{r} \left( rK(h) \frac{\partial h}{\partial r} \right) n dF dt + \int_t^{t+\Delta t} \int_{\partial V} \left( K(h) \frac{\partial h}{\partial z} \right) n dF dt - \int_t^{t+\Delta t} \int_{\partial V} K(h) n dF dt \quad (10)$$

式中  $\partial V$ ——该控制容积的总表面积

$dF$ ——体积  $V$  上的微元表面积

$n$ ——控制容积表面外法线方向单位矢量

为了得到式(10)的积分结果, 非稳态项中,  $\theta$  随  $r$  和  $z$  变化的型线取为阶梯式, 对流项和扩散项随时间而变的型线处理为

$$I_t = \int_t^{t+\Delta t} T_p dt = [aT_p^{t+\Delta t} + (1-a)T_p^t] \Delta t \quad (0 \leq a \leq 1) \quad (11)$$

当  $a=0$  时, 为完全显式格式; 当  $a=1/2$  时, 为半隐式格式; 当  $a=1$  时, 为完全隐式格式。

由于完全隐格式对时间步长的选取是无条件稳定的, 因此对流项随时间而变的型线采用阶梯隐式, 扩散项采用隐式阶跃式。整理得

$$\theta_p^t - \theta_p^0 = a_w h_w + a_e h_e - a_p h_p + a_n h_n + a_s h_s + b \quad (12)$$

其中  $a_w = K(h_w) \frac{\Delta t}{\Delta r \Delta z}$   $a_e = K(h_e) \frac{\Delta t}{\Delta r \Delta z}$

$$a_p = a_w + a_e + a_n + a_s \quad a_n = K(h_n) \frac{\Delta t}{\Delta r \Delta z}$$

$$a_s = K(h_s) \frac{\Delta t}{\Delta r \Delta z} \quad b = -(K(h_s) - K(h_n)) \frac{\Delta t}{\Delta z}$$

式中  $\theta_p^t, \theta_p^0$ ——计算节点  $P$  的当前时刻和上一时刻的含水率,  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$

式中  $K(h_e), K(h_w), K(h_n), K(h_s)$  不是节点处的值, 由于非饱和和土壤水分对流运动较微弱, 因此各

个方向的非饱和导水率均可采用中心差分格式近似处理, 即

$$\begin{cases} K(h_e) = \frac{K(h_E) + K(h_P)}{2} \\ K(h_w) = \frac{K(h_W) + K(h_P)}{2} \\ K(h_n) = \frac{K(h_N) + K(h_P)}{2} \\ K(h_s) = \frac{K(h_S) + K(h_P)}{2} \end{cases} \quad (13)$$

在求解式(12)的非线性方程组中, 需要通过迭代计算使得非线性方程组转化为线性方程组, 然而迭代计算过程中的水量平衡误差过大通常会导致计算结果难以收敛, 为了减少迭代计算过程中的水量平衡误差, 按照质量守恒的方法将式(12)中的第一项分解成两部分, 即

$$\begin{aligned} \theta_p^t - \theta_p^0 &= \theta_p^{k+1} - \theta_p^k + \theta_p^k - \theta_p^0 = \\ &C(h_p^k) (h_p^{k+1} - h_p^k) + \theta_p^k - \theta_p^0 \end{aligned} \quad (14)$$

式中  $k+1, k$ ——当前迭代和上一次迭代

$C(h_p^k)$ ——比水容量,  $1/\text{cm}$

把式(14)代入式(12), 得到式(1)的最终离散格式

$$\begin{aligned} (C(h_p^k) - a_p) h_p^{k+1} &= a_w h_w^{k+1} + a_e h_e^{k+1} + a_n h_n^{k+1} + \\ &a_s h_s^{k+1} + b + C(h_p^k) h_p^k - (\theta_p^k - \theta_p^0) \end{aligned} \quad (15)$$

### 2.3 坑内水位变化过程的求解

蓄水单坑水分在非恒定入渗过程中, 坑内入渗水头  $D'$  随着时间的推移不断下降, 相应的蓄水坑壁边界条件也会发生变化。根据质量守恒原理, 蓄水坑内减少的水量应等于由坑壁渗入土体的水量。因此有

$$Q - Q_t = \sum_i \sum_n 2\pi R_1 (-(q_r)_n) \Delta t \quad (16)$$

式中  $Q$ ——单坑灌水量,  $\text{cm}^3$

$Q_t$ —— $t$  时刻坑内水量,  $\text{cm}^3$

$(q_r)_n$ ——坑壁边界上节点  $n$  控制的边界段的流量,  $\text{cm}^2/\text{min}$

根据  $r$  方向水分通量和  $t$  时刻坑内水量计算公式, 即可得  $t$  时刻坑内水位为

$$H_t = \frac{1}{\pi R_1^2} \left( Q - \sum_i \sum_n 2\pi R_1 K(h) \frac{h_{P,n} - h_{E,n}}{\Delta r} \Delta t \right) \quad (17)$$

式中  $H_t$ —— $t$  时刻坑内的水位高度,  $\text{cm}$

## 3 数学模型的验证

### 3.1 材料和方法

试验土样取自山西省太谷县北洮村苹果园, 取

回的土样经风干后过 2 mm 细筛。试验土壤为粉砂壤土,其中砂粒(0.05 ~ 1 mm)占 21%,粉粒(0.005 ~ 0.05)占 70%,粘粒( $\leq 0.005$  mm)占 9%。经测定土壤干容密度为  $1.40 \text{ g/cm}^3$ ,初始含水率为  $0.024 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ,饱和含水率为  $0.486 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。土壤水分特征曲线采用高速恒温离心机法测定,扩散率采用水平土柱吸渗法测定,导水率用比水容量与扩散率的乘积计算,土壤水分特征曲线  $S(\theta) = 0.066\theta^{-4.921}$ ,比水容量  $C(\theta) = 2.405 \times 10^{-7} e^{32.958\theta}$ ,导水率  $K(\theta) = 4.8 \times 10^{-12} e^{62.639\theta}$ 。

为了研究蓄水坑灌条件下单坑土壤水分运动和分布规律,利用自行研制的蓄水坑灌入渗物理模型(图 3)在室内进行蓄水单坑的水分入渗试验。试验土箱采用  $30^\circ$  扇柱体有机玻璃,土箱高 120 cm,半径为 100 cm,蓄水坑设置在其扇形夹角处,蓄水坑的规格为半径 16 cm,坑深 60 cm<sup>[13]</sup>,为了减少水分的深层渗漏,坑底制成不透水层。为了保证装土均匀性,采用每 5 cm 一层分层装填的方法。试验利用带有刻度的截面积为  $30 \text{ cm}^2$  的透明有机玻璃制作的马氏筒进行自动供水,以保证水位恒定。灌水量  $6000 \text{ cm}^3$ 。

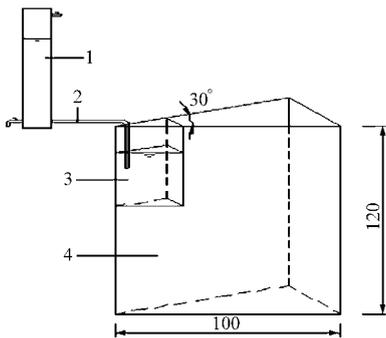


图 3 蓄水坑灌入渗装置

Fig. 3 Equipment for water storage pits infiltration

1. 马氏筒 2. 输水管 3. 水室(蓄水坑) 4. 土箱

开始灌水后,在有机玻璃侧壁观察湿润锋的变化过程。灌水试验结束后,分别于第 1 天、第 3 天、第 5 天、第 7 天用小型土钻进行取土,水平方向按距离蓄水坑中心 20、25、30、40 cm,垂直距离每 10 cm 一层进行取土,直至湿润锋的边缘。土壤含水率用干燥法测定。

### 3.2 模拟结果验证

#### 3.2.1 湿润锋推进情况

图 4 对比了 1、5、12、24 h 土壤径向和垂直湿润距离随时间变化过程的模拟与试验结果。模拟值和观测值均显示,不同时间的二维湿润锋边界形状呈近似“半椭圆状”。从湿润锋的推进速率可看出,试验开始 1 h 内,水平湿润锋推进迅速,水平最大推进速率为  $8.8 \text{ cm/h}$ ,垂直最大推进速率为  $3.95 \text{ cm/h}$ 。

这是因为土壤水分运动的驱动力主要为基质势和重力势,而在入渗初期基质势为主要的驱动力。但由于蓄水坑底为不透水层,因此入渗初期水平方向入渗速度大于垂直方向。随着时间的延长,水平湿润锋推进速度逐渐减小,垂直方向湿润锋开始明显增大,这是由于土壤含水率不断增加,土壤基质势梯度减小,重力势梯度在驱动力中占的比例逐渐增大。

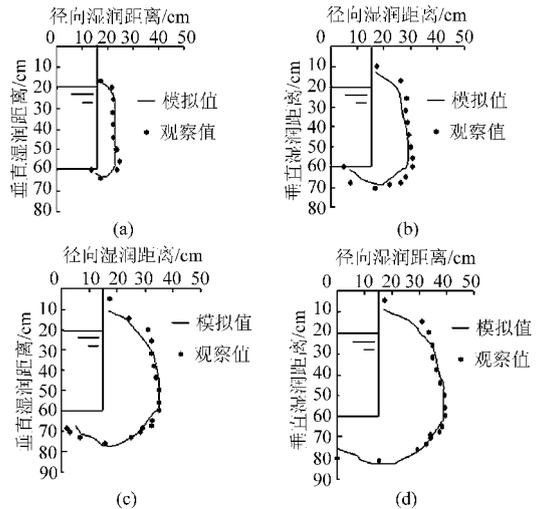


图 4 不同时刻土壤湿润锋推进情况的模拟与试验对比

Fig. 4 Comparison of simulated and measured values of soil wetting front at different time

(a)  $t = 1 \text{ h}$  (b)  $t = 5 \text{ h}$  (c)  $t = 12 \text{ h}$  (d)  $t = 24 \text{ h}$

从湿润锋的模拟值和观测值的对比来看,不同时刻实测湿润锋与模拟湿润锋吻合较好。在湿润体剖面上部和下部点的试验结果略大于数值模拟结果,一方面由于在恒定水位入渗期间,马氏筒的补偿精度不高,造成恒定水位稍偏大;另一方面水室的有机玻璃底部与土体接触较差,水分容易进入水室底部与土体之间的缝隙中。

#### 3.2.2 土壤含水率分布

图 5、6 对比了灌水结束后不同时刻土壤含水率在径向和垂直方向分布的模拟与试验结果。模拟结

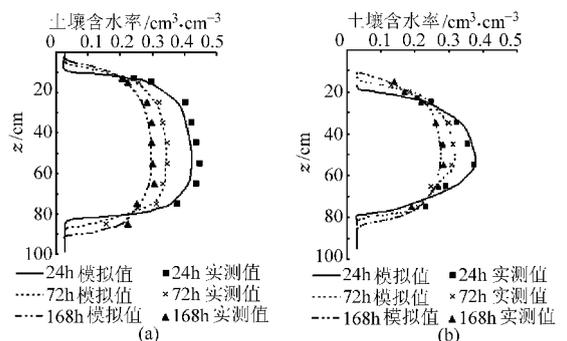


图 5 不同时刻垂直方向土壤含水率分布

模拟与试验结果对比

Fig. 5 Comparison of simulated and measured values of soil water content in vertical direction

(a)  $r = 20 \text{ cm}$  (b)  $r = 30 \text{ cm}$

果和试验结果均显示,灌水结束后,水分进入再分布阶段,随着再分布时间的延长,土壤水分在水平方向和垂直方向继续运移,但水分再分布的速率变缓慢,蓄水坑壁附近的土壤含水率减小,远离蓄水坑壁的土壤含水率增大,湿润范围进一步增大,整个湿润土体内的含水率分布更加均匀。

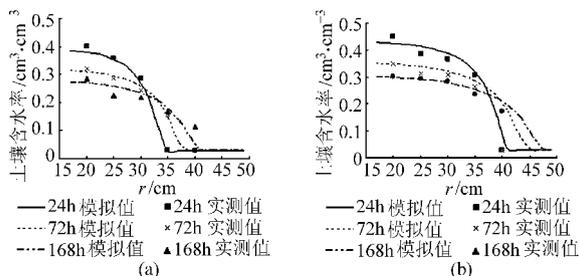


图6 不同时刻水平方向土壤含水率分布  
模拟与试验结果对比

Fig. 6 Comparison of simulated and measured values of soil water content in horizontal direction

(a)  $z=25\text{ cm}$  (b)  $z=55\text{ cm}$

由不同时刻垂直方向土壤含水率在不同时间的分布曲线可以看出,灌水结束后,水平方向在距蓄水坑中心0~30 cm的范围内第24小时土壤含水率在 $0.321\sim 0.213\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 变化,再分布168 h后,湿润体土壤含水率最小的也在 $0.139\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 左右,明显

高于土壤初始含水率 $0.024\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。湿润体内土壤含水率在长时间内可以保持较高,可见,蓄水坑灌具有较好的保水、节水效果。

从模拟和试验结果的对比可以看出,在水平方向剖面 and 垂直方向剖面的模拟值和实测值有较好的一致性,相对误差范围在 $-4.9\%\sim 5.2\%$ ,平均误差不超过10%,模拟值和实测值吻合较好。

## 4 结论

(1)在土壤水分入渗初期,水平湿润锋推进速率大于垂直方向,随着时间的延长,垂直方向湿润锋有明显增大。湿润体呈近似“半椭圆状”。灌水结束后,随着时间推进,土壤水分继续向水平方向和垂直方向运移,实现土壤水分再分布,湿润体内最大含水率逐渐减小,整个湿润土体内的含水率分布更加均匀。

(2)从模拟和实测湿润锋、含水率的比较可以看出,模拟与实测结果比较吻合,湿润锋和含水率最大相对误差不超过10%,数值计算所产生的误差较小,符合实际工作的要求,说明基于土壤水分运动学方程,建立的蓄水坑灌条件下单坑土壤水分运动模型是正确的,采用有限体积法进行求解是可行的。

## 参 考 文 献

- 孙西欢. 蓄水坑灌法及其水土保持作用[J]. 水土保持学报, 2002, 16(3): 130~131.  
Sun Xihuan. Water storage pit irrigation and its functions of soil and water conservation [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2002, 16 (3): 130~131. (in Chinese)
- Sun Xihuan. Effect of water storage pit irrigation on soil and water conservation [C]//Proceedings 12th ISCO Conference vol. II, Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 367~369.
- 马娟娟, 孙西欢, 李占斌. 蓄水坑灌降雨径流的产汇流特性研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(4): 57~59.  
Ma Juanjuan, Sun Xihuan, Li Zhanbin. Study on characteristic of run off producing rain and sink flow in pit irrigation [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(4): 57~59. (in Chinese)
- 郭向红, 孙西欢, 马娟娟. 降雨灌溉蒸发条件下苹果园土壤水分运动数值模拟[J]. 农业机械学报, 2009, 40(11): 68~73.  
Guo Xianghong, Sun Xihuan, Ma Juanjuan. Numerical simulation for root zone soil moisture movement of apple orchard under rainfall-irrigation-evaporation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(11): 68~73. (in Chinese)
- 郭文华, 孙西欢. 蓄水单坑非均质土土壤水运动的数值模拟[J]. 太原理工大学学报, 2002, 33(2): 214~218.  
Guo Wenhua, Sun Xihuan. Numerical simulation on soil moisture movement of non-homogeneous soil in single water storage pit [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2002, 33(2): 214~218. (in Chinese)
- 栗岩峰, 马娟娟, 孙西欢, 等. 蓄水单坑均质土土壤水分运动的数值模拟[J]. 山西农业大学学报, 2002, 22(2): 165~169.  
Li Yanfeng, Ma Juanjuan, Sun Xihuan, et al. Numerical simulation on homogeneous soil moisture movement in single water storage pit [J]. Journal of Shanxi Agricultural University, 2002, 22(2): 165~169. (in Chinese)
- 马娟娟, 孙西欢, 李占斌. 单坑变水头入渗条件下均质土壤水分运动的数值模拟[J]. 农业工程学报, 2006, 22(6): 205~207.  
Ma Juanjuan, Sun Xihuan, Li Zhanbin. Numerical simulation of homogenous soil moisture movement under varying-head infiltration of single water storage pit [J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(6): 205~207. (in Chinese)

- 9 Corwin D L, Lesch S M. Characterizing soil spatial variability with apparent soil electrical conductivity part II. Case study [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2005, 46(1~3): 135~152.
- 10 Corwin D L, Lesch S M. Characterizing soil spatial variability with apparent soil electrical conductivity part I. Survey protocols[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2005, 46(1~3): 103~133.
- 11 姚荣江,杨劲松,赵秀芳,等. 滩涂土壤电磁感应仪与方差四叉树法采样布局研究[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(7): 174~180.  
Yao Rongjiang, Yang Jingsong, Zhao Xiufang, et al. Application of electromagnetic induction (EM38) and variance quad-tree (VQT) method on spatial sampling scheme in coastal saline region [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(7): 174~180. (in Chinese)
- 12 刘广明,杨劲松,鞠茂森,等. 电磁感应土地测量技术及其在农业领域的应用[J]. *土壤*, 2003, 35(1): 27~29.  
Liu Guangming, Yang Jingsong, Ju Maosen, et al. Technology of chorometry using electromagnetic induction and its application in agriculture[J]. *Soils*, 2003, 35(1): 27~29. (in Chinese)
- 13 鞠茂森,戴伟如,聂杰,等. 移动式电磁感应土地性质测定系统[J]. *水利水电技术*, 2002, 33(4): 48~50.
- 14 Corwin D L, Lesch S M. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2005, 46(1~3): 11~43.
- 15 Carroll Z L, Oliver M A. Exploring the spatial relations between soil physical properties and apparent electrical conductivity [J]. *Geoderma*, 2005, 128(3~4): 354~374.
- 16 Sudduth K A, Drummond S T, Kitchen N R. Accuracy issues in electromagnetic induction sensing of soil electrical conductivity for precision agriculture[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2001, 31(3): 239~264.
- 17 Lesch S M, Corwin D L, Robinson D A. Apparent soil electrical conductivity mapping as an agricultural management tool in arid zone soils[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2005, 46(1~3): 351~378.
- 18 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- 19 苑小勇,黄元仿,高如泰,等. 北京市平谷区农用地土壤有机质空间变异特征[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(2): 70~76.
- 20 姚荣江,杨劲松,刘广明,等. 黄河三角洲地区典型地块土壤盐分空间变异特征研究[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(6): 61~66.  
Yao Rongjiang, Yang Jingsong, Liu Guangming, et al. Spatial variability of soil salinity in characteristic field of the Yellow River Delta[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(6): 61~66. (in Chinese)

(上接第 67 页)

- 8 马娟娟,孙西欢,郭向红,等. 蓄水多坑入渗条件下土壤水分运动建模与试验[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(3): 46~51.  
Ma Juanjuan, Sun Xihuan, Guo Xianghong, et al. Numerical simulation on soil water movement under water storage pits irrigation [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(3): 46~51. (in Chinese)
- 9 吕岁菊,乔英,刘国林. 一维非饱和土壤溶质运移的有限体积法数值模拟[J]. *水土保持研究*, 2008, 15(4): 33~36.  
Lü Suiju, Qiao Ying, Liu Guolin. Numerical simulation for one-dimensional unsaturated soil solute transport [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2008, 15(4): 33~36. (in Chinese)
- 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 Versteeg H K, Malalasekera W. An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method [M]. Longman; Prentice Hall Press, 1995: 85~154.
- 12 陶文铨. 数值传热学[M]. 北京:高等教育出版社, 2001.
- 13 孙西欢,马娟娟,周青云,等. 蓄水坑灌法技术要素初探[J]. *沈阳农业大学学报*, 2004, 35(5): 405~407.  
Sun Xihuan, Ma Juanjuan, Zhou Qingyun, et al. A preliminary research on the technical elements of water storage pit irrigation method [J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2004, 35(5): 405~407. (in Chinese)