

渗灌的非饱和土壤水二维流动的探讨

张思聪 惠士博 雷志林 杨诗秀

(清华大学)

摘 要

本文对渗灌条件下的非饱和土壤水二维流动问题进行了探讨。对水平二维流及垂直二维流均进行了重复实验,并建立了相应的非饱和土壤水二维流的数学模型。按有限差分的计算方法求到数学解且与实验结果相符合,验证了该数学模型的可行性。同时应用数学模型对田间渗灌在不同条件下(如不同初始含水量、不同的土质、不同的密实度及不同直径供水管等几个主要因素)的非饱和土壤水二维流进行了模拟计算。根据计算结果分别就上述各影响因素对田间渗灌的非饱和二维流的差异性进行了分析,由此对田间渗灌中若干问题提出初步看法。

渗灌条件下的土壤水运动多属于非饱和流,研究其运动规律,对提高灌溉理论水平,改进灌水技术,指导灌溉工程的规划设计均具有重要意义。本文对简单条件下的田间渗灌非饱和土壤水二维流问题进行了模拟计算,其结果除用实验结果验证外,还作了初步分析。

一、渗灌的非饱和土壤水二维流动的模拟及计算

田间渗灌的土壤水运动属平面问题,由于对称性,故只要研究图 1-1 中 $ABCDEF$ 阴影部分的水分运动。

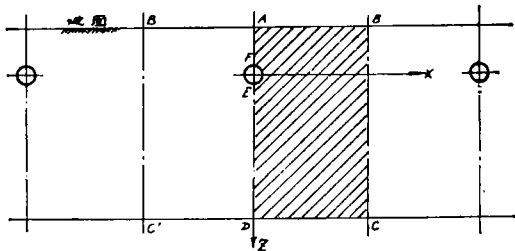


图 1-1 田间渗灌流域示意图

Fig. 1-1 Sectional diagram of subsurface irrigation in the field

在实验室中则采用尺寸为 $80\text{cm} \times 85\text{cm} \times 6\text{cm}$ 的有机玻璃槽装土样来模拟该流域的非饱和流,其实验装置见图 1-2。

对于二维问题,基本方程可表示为:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] - \frac{\partial K(\theta)}{\partial z} \quad (1.1)$$

式中 θ 为体积含水率, $K(\theta)$, $D(\theta)$ 分别为非饱和土壤水的导水率和扩散率。

初始条件及边界条件分别可写成:

$$\theta = \theta_0, \quad t = 0 \quad (1.2)$$

$$\theta = \theta_0 \text{ 沿 } AB, BC \text{ 和 } DC \quad t > 0 \quad (1.3)$$

$$\partial\theta/\partial x = 0 \text{ 沿 } AF, ED, \quad t > 0 \quad (1.4)$$

$$\theta = \theta_b \text{ 沿 } EF \quad t > 0 \quad (1.5)$$

式中 θ_0 为土壤初始含水率, θ_b 为一定值且接近于饱和含水率。

由实验确定, $K(\theta)$, $D(\theta)$ 分别采用下列经验公式计算^[1]:

$$K(\theta) = D_s(\theta/n)^\alpha \quad (1.6)$$

$$D(\theta) = K_s(\theta/n)^\beta \quad (1.7)$$

式中 n 为土壤孔隙度, K_s , D_s , α 和 β 均为由实验测定的经验常数。

本文用交替隐式差分建立非饱和流的差分方程^[1,2], 以 Δx , ΔZ 为等距离步长把平面流域划分成矩形网格 (图 1-3), 又以 Δt 为时间步长将时间划分成 $0, \Delta t, 2\Delta t, \dots, p\Delta t, \dots, n\Delta t$ 。那么对于流域中任一节点 (i, j) 在 $(p+1)\Delta t$ 时刻相应于偏微分方程 (1.1) 的差分方程可写成:

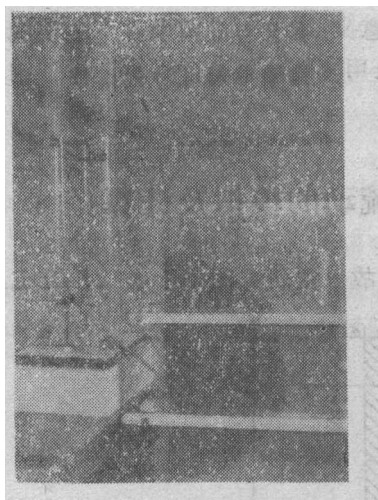


图 1-2 渗灌实验设备

Fig. 1-2 The experiment equipment of subsurface irrigation

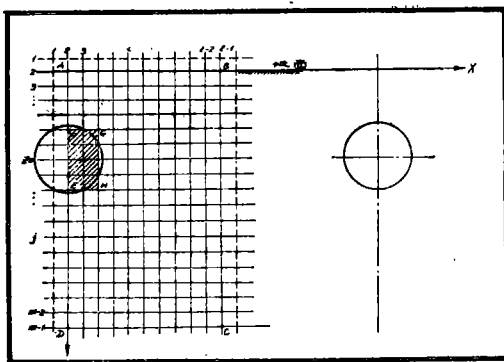


图 1-3 土壤水二维流动计算流域示意图

Fig. 1-3 Calculated diagram of two-dimensional flow in soil of subsurface irrigation

$$\begin{aligned} \frac{\theta_{i,j}^{p+1} - \theta_{i,j}^p}{\Delta t} = & \frac{D_{i+\frac{1}{2},j}^{p+1} \left[\frac{\theta_{i+1,j}^{p+1} - \theta_{i,j}^{p+1}}{\Delta x} \right] - D_{i-\frac{1}{2},j}^{p+1} \left[\frac{\theta_{i,j}^{p+1} - \theta_{i-1,j}^{p+1}}{\Delta x} \right]}{\Delta x} \\ & + \frac{D_{i,j+\frac{1}{2}}^p \left[\frac{\theta_{i,j+1}^p - \theta_{i,j}^p}{\Delta Z} \right] - D_{i,j-\frac{1}{2}}^p \left[\frac{\theta_{i,j}^p - \theta_{i,j-1}^p}{\Delta Z} \right]}{\Delta Z} \\ & - \frac{K_{i,j+1}^p - K_{i,j-1}^p}{2\Delta Z} \end{aligned} \quad (1.8)$$

该方程中 D 值采用二点式近似如 $D_{i+\frac{1}{2},j}^{p+1} = \frac{D_{i+1,j}^{p+1} + D_{i,j}^{p+1}}{2}$ 余者类推, 最后差分方程可简化成

$$a_{i,j}\theta_{i-1,j}^{p+1} + b_{i,j}\theta_{i,j}^{p+1} + c_{i,j}\theta_{i+1,j}^{p+1} = h_{i,j} \quad (1.9)$$

其中

$$\begin{aligned} a_{i,j} &= R_1[D_{i-1,j}^{p+1} + D_{i,j}^{p+1}] \\ b_{i,j} &= -[1 + R_1(D_{i+1,j}^{p+1} + 2D_{i,j}^{p+1} + D_{i-1,j}^{p+1})] \\ c_{i,j} &= R_1[D_{i+1,j}^{p+1} + D_{i,j}^{p+1}] \\ h_{i,j} &= -R_1(D_{i,j-1}^p + D_{i,j}^p)\theta_{i,j-1}^p + [R_1(D_{i,j-1}^p + 2D_{i,j}^p + D_{i,j+1}^p) - 1]\theta_{i,j}^p \\ &\quad - R_1(D_{i,j}^p + D_{i,j-1}^p)\theta_{i,j+1}^p + R_3(K_{i,j+1}^p - K_{i,j-1}^p) \end{aligned}$$

$$\text{各式中 } R_1 = \frac{\Delta t}{2\Delta X^2} = \frac{\Delta t}{2\Delta Z^2}, R_3 = \frac{\Delta t}{2\Delta Z}$$

同理, 对于流域中任一节点在 $(p+2)\Delta t$ 时刻相应于偏微分方程(1.1)的差分方程亦可写成:

$$a_{i,j}'\theta_{i-1,j}^{p+2} + b_{i,j}'\theta_{i,j}^{p+2} + c_{i,j}'\theta_{i+1,j}^{p+2} = h_{i,j}' \quad (1.10)$$

其中

$$\begin{aligned} a_{i,j}' &= R_1(D_{i-1,j}^{p+2} + D_{i,j}^{p+2}) \\ b_{i,j}' &= -[1 + R_1(D_{i+1,j}^{p+2} + 2D_{i,j}^{p+2} + D_{i-1,j}^{p+2})] \\ c_{i,j}' &= R_1(D_{i+1,j}^{p+2} + D_{i,j}^{p+2}) \\ h_{i,j}' &= -R_1(D_{i,j-1}^{p+1} + D_{i,j}^{p+1})\theta_{i,j-1}^{p+1} + [R_1(D_{i,j-1}^{p+1} + 2D_{i,j}^{p+1} + D_{i,j+1}^{p+1}) - 1]\theta_{i,j}^{p+1} \\ &\quad - R_1(D_{i,j+1}^{p+1} + D_{i,j}^{p+1})\theta_{i,j+1}^{p+1} + R_3(K_{i,j+1}^{p+2} - K_{i,j-1}^{p+2}) \end{aligned}$$

在第一类边界 AB , BC , 和 DC 上, 相应于(1.3)式的差分表达式为:

$$\begin{aligned} \theta_{i,2}^p &= \theta_0, \quad i = 2, 3, \dots, l-1, \quad p > 0 \\ \theta_{i,m-1}^p &= \theta_0, \quad i = 2, 3, \dots, l-1, \quad p > 0 \\ \theta_{l-1,j}^p &= \theta_0, \quad j = 2, 3, \dots, m-1, \quad p > 0 \end{aligned}$$

在供水边界 EF 上, 相应于(1.5)式的差分表达式为:

$$\theta_{2,z_0}^p = \theta_b, \quad p > 0$$

其中 $(2, Z_0)$ 为供水管中心位置的节点号。

在差分方程(1.9)中, 若假定 $p\Delta t$ 为初始时刻, 则相应的 $\theta_{i,j}^p$ 应为已知值, 在 j 行沿 x 方向可依次列出各节点的差分方程, 组成了如下的三对角型矩阵方程:

$$\begin{bmatrix} b_{2,j}(a_{2,j} + c_{2,j}) & & & & & & \\ a_{3,j} & b_{3,j} & c_{3,j} & & & & \\ & a_{4,j} & b_{4,j} & c_{4,j} & & & \\ & & \ddots & \ddots & \ddots & & \\ 0 & & a_{l-3,j} & b_{l-3,j} & c_{l-3,j} & & \\ & & & a_{l-2,j} & b_{l-2,j} & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{2,j} \\ \theta_{3,j} \\ \theta_{4,j} \\ \vdots \\ \theta_{l-3,j} \\ \theta_{l-2,j} \end{bmatrix}^{p+1} = \begin{bmatrix} h_{2,j} \\ h_{3,j} \\ h_{4,j} \\ \vdots \\ h_{l-3,j} \\ h_{l-2,j} - c_{l-2,j}\theta_0 \end{bmatrix} \quad (1.11)$$

$j = 3, 4, 5, \dots, m-2$

若依次解 $j = 3, 4, \dots, m-2$ 的各三对角矩阵方程, 便可求到在 $(p+1)\Delta t$ 时刻所有节点的含水率 $\theta_{i,j}^{p+1}$ 。

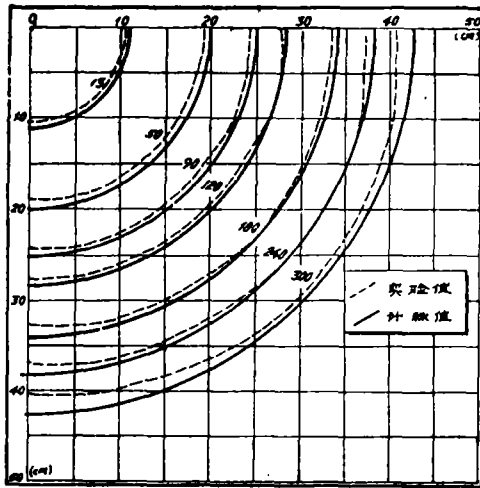


图 1-4a 水平二维流动湿润锋轮廓线

Fig. 1-4a The profiles of wetting front at different time duration for horizontal two-dimensional flow

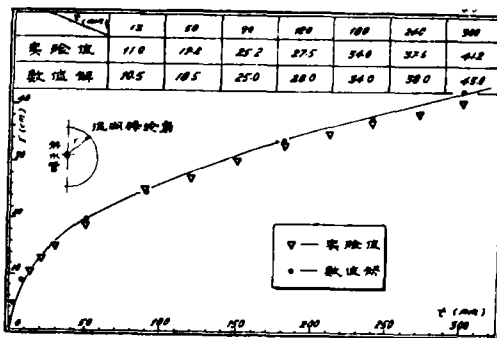


图 1-4b 水平二维流动沿径向运移距离 (湿润锋) 与时间的关系

Fig. 1-4b The radial distances of wetting front versus time for horizontal two-dimensional flow

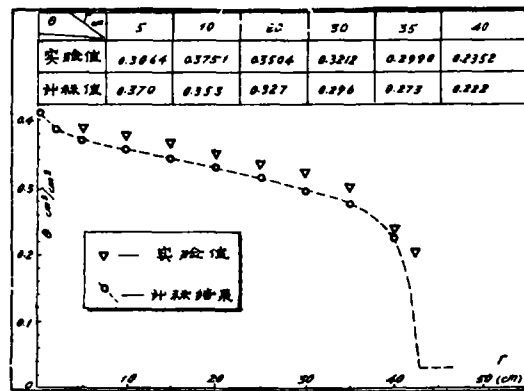


图 1-4c 水平二维流沿径向含水量分布 ($t = 300 \text{ min}$)

Fig. 1-4c Distribution of water content for horizontal two-dimensional flow along the radial direction

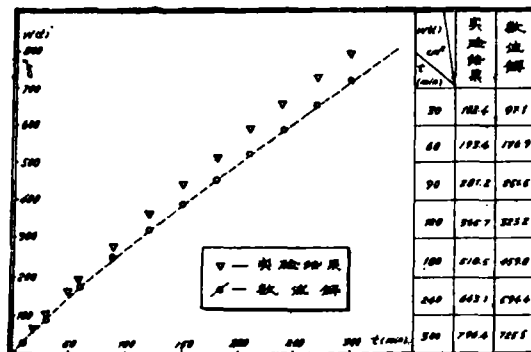


图 1-4d 水平二维流水分入渗量 $W(t)$ 与 t 的关系曲线

Fig. 1-4d Cumulative infiltration $W(t)$ versus time t for horizontal two-dimensional flow

同理由差分方程 (1.10) 及相应的边界条件可列出 i 列沿 Z 方向各节点的差分方程, 组成了如下三对角型矩阵方程:

$$\begin{bmatrix} b_{i,3} & c_{i,3} & & & \\ a_{i,4} & b_{i,4} & c_{i,4} & & \\ & a_{i,5} & b_{i,5} & c_{i,5} & \\ & & \ddots & \ddots & \ddots \\ 0 & a_{i,m-3} & b_{i,m-3} & c_{i,m-3} & \\ & & a_{i,m-2} & b_{i,m-2} & \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_{i,3} \\ \theta_{i,4} \\ \theta_{i,5} \\ \vdots \\ \theta_{i,m-3} \\ \theta_{i,m-2} \end{Bmatrix}_{p+2} = \begin{bmatrix} h_{i,3} - a_{i,3}\theta_0 \\ h_{i,4} \\ h_{i,5} \\ \vdots \\ h_{i,m-3} \\ h_{i,m-2} - c_{i,m-2}\theta_0 \end{bmatrix} \quad (1.12)$$

$i = 3, 4, \dots, l-2$

将 (1.11) 所求得 $\theta_{i,j}^{p+1} (i = 2, 3, \dots, l-2, j = 3, 4, \dots, m-2)$ 作为 $(p+2)\Delta t$ 时段的初始值便可求出流域中所有节点在 $(p+2)\Delta t$ 时刻的含水率。若反复交替使用上述二个三对角型矩阵方程, 就能求出流域中全部节点在各个时段末的含水率直至所规定的时刻为止。为此本文编制了一个 FORTRAN 语言的计算程序在 M-150 计算机上进行计算 (图 3)。

计算中本文系用 $\Delta x = \Delta Z = 1\text{cm}$, 时间步长则采用变步长, 即由初始 $\Delta t = 0.01\text{min}$ 增加至后期 $\Delta t = 4\text{min}$ 。经试算比较, 取值较为合理。

实验用的轻壤土的有关参数经测定分别为: 干容重 $\gamma_d = 1.4\text{g/cm}^3$, 孔隙度 $n = 0.48\text{cm}^3/\text{cm}^3$, 初始含水率 $\theta_0 = 0.03$, 供水边界含水率 θ_b 取 0.41。求 K, D 的经验公式 (1.6)、(1.7) 中的参数经实验测定分别为 $K_s = 1.42, \beta = 10.24, D_s = 278.3, \alpha = 8.05$ 。

在实验过程中除定时记录湿锋在各个方向的运移距离并给出轮廓线外, 还定时记录补给水量。在实验的最末时段要测定出规定点上的含水率。

在非饱和流的数学模拟及实验中, 作者分别对水平二维流及垂直二维流二种情况进行了研究, 以便对数学模型的可靠性进行相互的验证。同时对同一种情况均进行了重复实验, 从多次实验数据看, 实验重现性较好。图 1-4a、b、c、d 分别为水平的非饱和流的各种计算结果与相应的实验数据的比较, 而垂直的非饱和流的各种计算成果与实验数据的比较分别表示在图 1-5a—d 及表 1-1 中。

根据以上各种计算成果与实验数据的对比可以看出在这二种流动中, 无论是湿锋沿各个方向随时间的运移距离, 或是入渗累计量随时间的变化, 或是不同位置上的含水量变化, 其计算值与实验数据均具有良好的一致性, 表明数学模型是可行的。

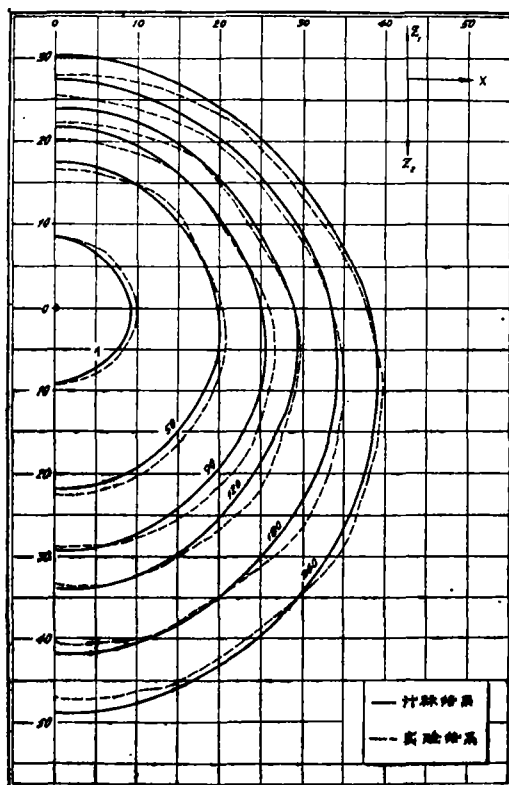
经初步分析, 渗灌条件下的非饱和土壤水运动有如下几点规律性:

1. 不论是水平的或是垂直的二维流动, 其累计入渗量 $W(t)$ 与相应时间关系在双对数坐标系统中均呈一线性关系, 且二种流动下的 $W(t)$ 值也极为接近 (见图 1-6), 故对这二种情况的累计入渗量 $W(t)$ 可归纳出统一的经验公式^[3,4]为:

$$W(t) = ct^\alpha \quad (1.13)$$

式中 c 和 α 均为常数。

2. 从表 1-2 可知, 在垂直二维流动中湿锋沿供水管一侧水平方向运移的最大距离与同一时刻水平二维流动湿锋沿径向的运移距离也是十分相近的。由图 1-7 可知湿锋运移距离 $X_m(t)$ 与时间开方值 $\sqrt{t}$ 呈线性关系, 故对于二种流动的湿锋运移距离 $X_m(t)$, 可归



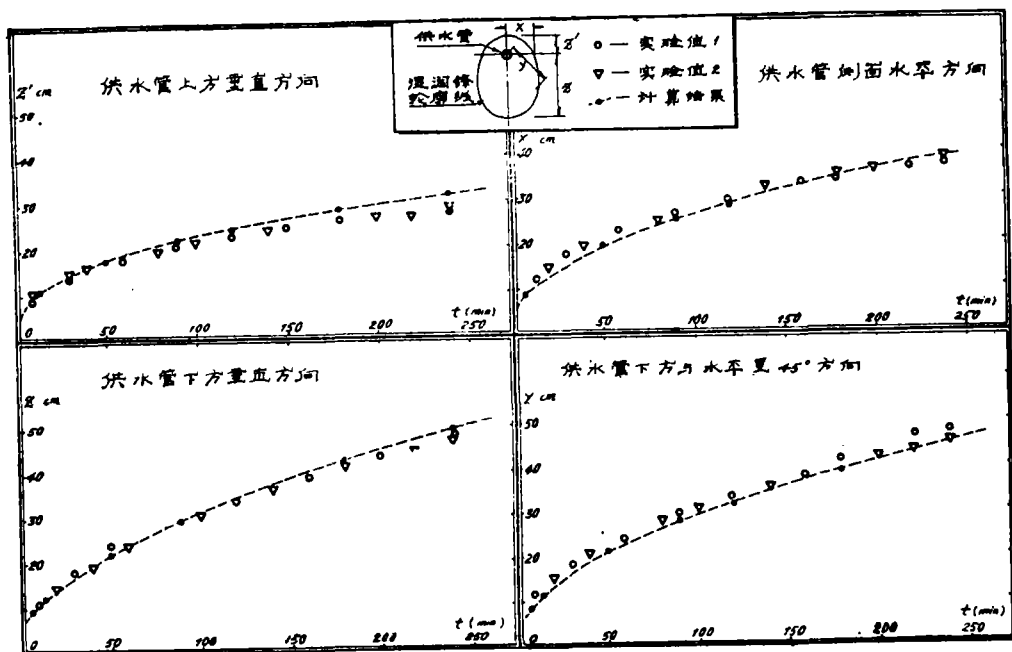


图 1-5c 垂直二维流动中湿润锋运移距离数值解与实验结果的比较

Fig. 1-5c Comparison between the data from numerical calculations and data from experiment for vertical two-dimensional flow

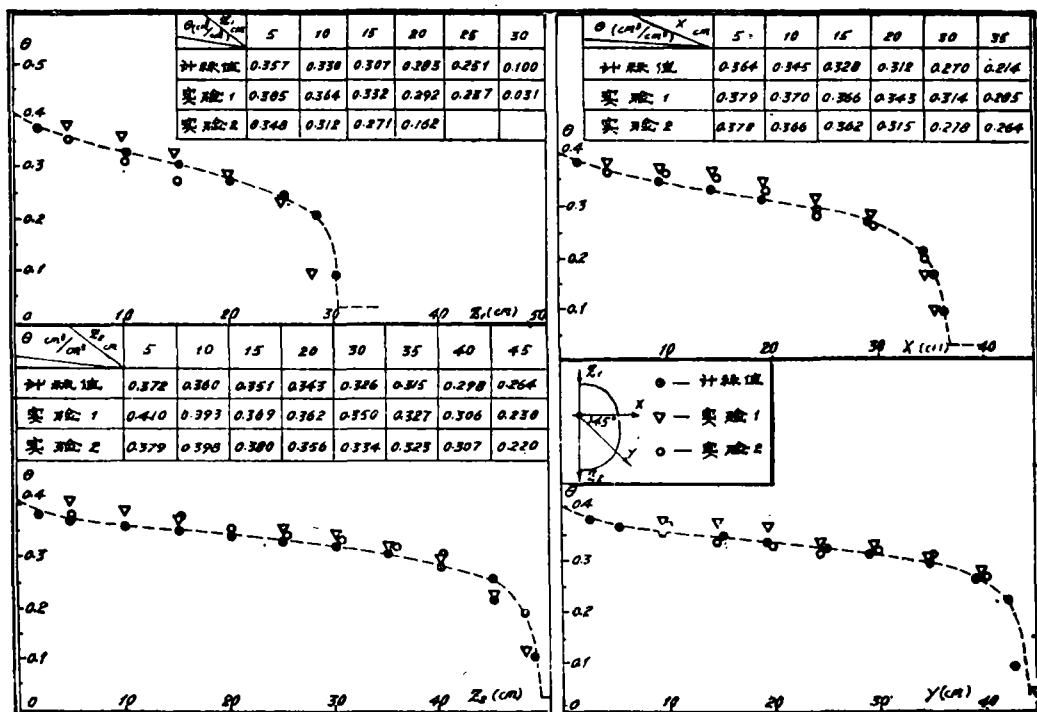
图 1-5d 垂直二维流动中不同方向上的含水量分布($t = 240 \text{ min}$)

Fig. 1-5d Distribution of water content in the various directions for vertical two-dimensional flow ($t = 240 \text{ min}$)

表 1-1 垂直二维流动湿润锋运移距离计算结果与实验结果的比较

Table 1-1 Comparison between the calculated values and the experimental values of distance of wetting front for vertical two-dimensional flow

方向 Distance (cm) Item	供水管上方垂直方向 Vertical direction above the pipe			供水管侧方水平方向 Horizontal direction on one side of the pipe			供水管下方垂直方向 Vertical direction under the pipe		
$t(\text{min})$	计算值	实验值 1	实验值 2	计算值	实验值 1	实验值 2	计算值	实验值 1	实验值 2
1.0	5	—	—	5	—	—	—	—	—
7.0	9	9.5	9.5	9	10	9.5	9.5	9.5	9.5
13.0	11	10	10	12	12.5	13.5	12	12	11.5
50.0	17.5	16.5	17	20	20.5	20.5	22	22.5	22.5
90.0	22	20.0	20.5	25	26	26	29	29	29.5
120.0	24	22.2	22.5	28	29	29	34	33.5	33.5
180.0	28	25.5	25.3	34	33.5	33.5	42	40.5	41
240.0	31	27.5	27.2	38	37.5	37.5	49	46.5	46.5

注：湿润锋运移距离从供水管中心算起，单位为 cm。

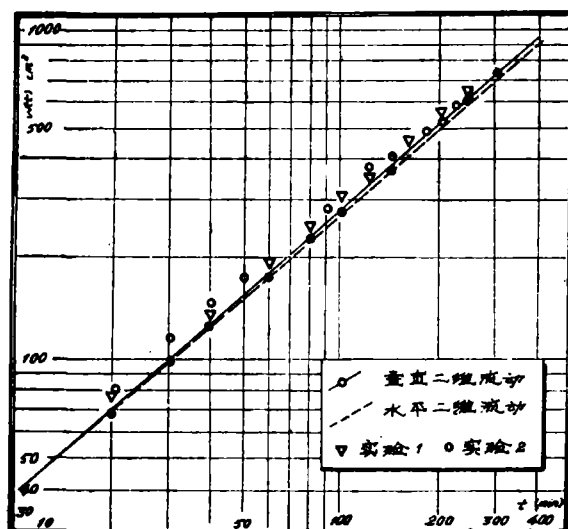


图 1-6 在双对数坐标系中土壤水入渗量 $W(t)$ 与时间 t 的关系曲线

Fig. 1-6 Relationship between cumulative infiltration and time (log-log scale)

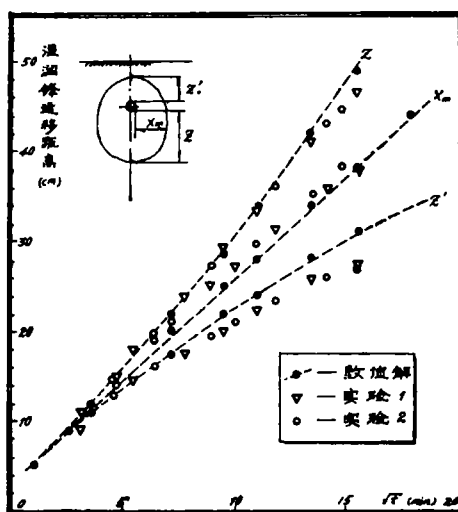


图 1-7 湿润锋运移距离值与 $\sqrt{t}$ 的关系

Fig. 1-7 Relationship between advance distance of wetting front in the different direction and $\sqrt{t}$

纳成如下的计算公式^[3,4]:

$$X_m(t) = A\sqrt{t} + B \quad (1.14)$$

式中 A 和 B 均为常数, 可由实验确定。

3. 在垂直二维流动中, 湿锋沿供水管垂向运移距离 $Z(t)$ (向上或向下) 与相应时间 t 亦存在一定的函数关系, 根据实验数据或计算成果, $Z(t)$ 可归纳成如下的经验公式:

$$Z(t) = \phi\sqrt{t} + \lambda t + \omega \quad (1.15)$$

表 1-2 两种条件下湿锋沿水平向运移距离的对比

Table 1-2 Comparison between the horizontal advance distances of wetting front under two conditions

湿锋运移 距离(cm)	$t(\text{min})$	1	13	50	90	120	180	240
条件								
垂直二维流动		5	12	20	25	28	34	38
水平二维流动		5	11.5	20	25	28.5	34	38.5

注: 湿锋运移距离从供水管中心算起。

式中 ψ 、 λ 、 ω 均为经验常数, 可由实验确定, 当湿锋向上运移, $\lambda < 0$; 而湿锋向下运移, $\lambda > 0$ 。

二、田间渗灌条件下非饱和二维流的数学模拟及分析

田间渗灌条件下的非饱和土壤水运动是十分复杂的, 要模拟其实际运动状况则较为困难, 故本文仅分别对不同土质、不同密实度、不同含水率及不同直径的供水管并在连续供水条件下的非饱和土壤水运动规律作初步探讨。同时对田间条件作了某些简化, 如不考虑表土水分蒸发、降雨入渗及作物吸水等作用。

在田间渗灌过程中, 随历时加长湿锋将会运移至土壤表层及流域中的对称线 (即图 1-1 中 AB 和 BC), 故与前述的边界处理方法不同, 考虑到 AB 为对称线, 在表土 AB 上又不考虑蒸发及入渗等作用, 故 BC , AB 均为水流通量为零的第二类边界, 当相应于流域 $ABCDEF$ 中 (见图 1-3) 的非饱和流定解问题可表示为:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial X} \left[D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial X} \right] + \frac{\partial}{\partial Z} \left[D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial Z} \right] - \frac{\partial K(\theta)}{\partial Z} \quad (2.1a)$$

$$\theta = \theta_0 \quad t = 0 \quad (2.1b)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial X} = 0 \quad \text{沿 } AF, ED \text{ 及 } BC \quad t > 0 \quad (2.1c)$$

$$-D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial Z} + K(\theta) = 0 \quad \text{沿 } AB \quad t > 0 \quad (2.1d)$$

$$\theta = \theta_0 \quad \text{沿 } DC \quad t > 0 \quad (2.1e)$$

$$\theta = \theta_0 \quad \text{沿 } FGHE \quad t > 0 \quad (2.1f)$$

除 BC 和 AB 的边界条件处理不同外, 该定解问题的相应的差分近似前述内容。

BC 的边界条件的差分近似可表示为:

$$\theta_{i-2,j}^p = \theta_{i,j}^p \quad j = 2, 3, \dots, m-2, \quad p > 0 \quad (2.2)$$

而相应于 AB 的边界条件的差分表达式可写成:

$$\theta_{i,1}^p = \theta_{i,3}^p - \frac{\Delta Z}{D_{i,2}^p} (K_{i,3}^p + K_{i,1}^p) \quad (2.3)$$

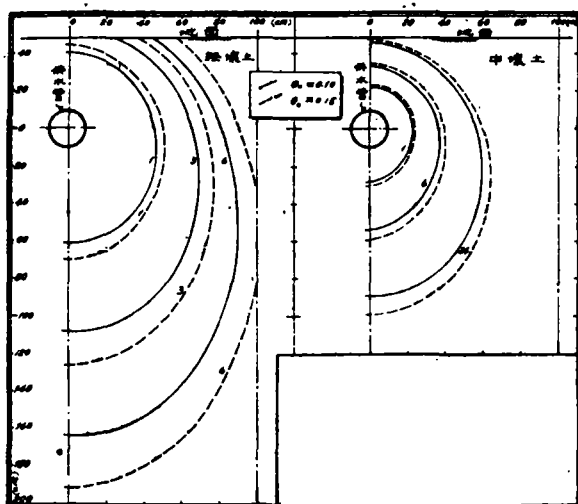
$$i = 2, 3, 4, \dots, l-1 \quad p > 0$$

采用前述类似的计算方法, 同样可以求到湿锋沿各个方向运移距离、累计入渗量与时间的关系, 以及在任一时刻流域中各节点的含水率。从模拟计算的成果看, 土壤水累计入

渗量随时间的变化规律及湿润锋沿三个方向的运移规律基本上与渗灌的非饱和土壤水二维流动模拟分析结果相类似。

现就不同土质、不同密实度、不同初始含水率及不同直径供水管等几个因素对渗灌过程中的水分运动的影响作一初步分析：

1. 土壤初始含水率的影响：分别在轻壤土和中壤土中取 $\theta_0 = 0.10$ 和 0.15 的两种不同初始含水率进行了模拟计算。图 2-1 是根据计算成果绘制的湿锋轮廓图。由图可见在连续供水条件下，在湿土中任一时刻不同方向的湿锋运移速度要比在干土中快，说明土壤初始含水率对湿锋运移快慢是影响因素之一，同时由图可见在砂性土中初始含水率对湿锋运移的影响作用更为显著。



注：线旁数字为相应的时间(小时)

图 2-1 在不同初始含水量 θ_0 条件下土壤水湿润锋轮廓的比较

Fig. 2-1 Comparison between two profiles of wetting front under different initial soil water contents

表 2-1 不同质地土壤的计算结果比较

Table 2-1 Comparison of calculated values in two kinds of soil

时间(天) Time (day)	入渗量 (cm ²) Cumulative infiltration		湿锋沿水平方向运移的距离 (cm) Advance of wetting front in horizontal direction	
	轻壤土	中壤土	轻壤土	中壤土
1	11610	1548	173	50
2	21097	2510	242	68

根据计算成果可以发现进入湿土中水量略少于同一时刻进入干土中的水量，但差异并不大。可见初始含水量的小幅度变化对入渗量影响并不大，而对湿锋运移快慢则有较显著影响。

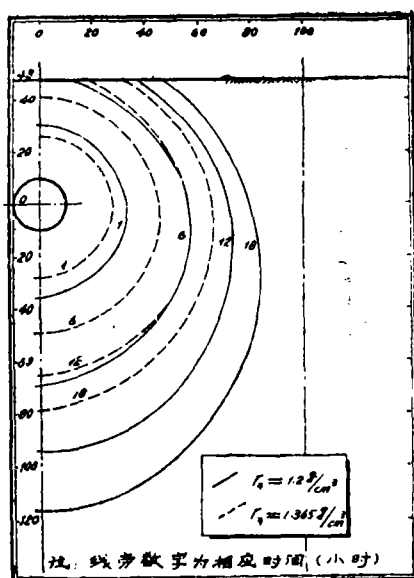


图 2-2 不同干容重条件下中壤土中湿润锋轮廓的比较

Fig. 2-2 Comparison of advance of wetting front in medium loam with different dry densities

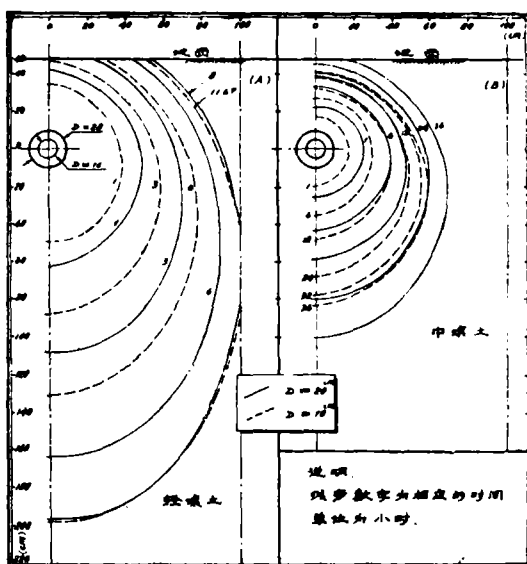


图 2-3 在不同直径供水管条件下湿润锋轮廓的比较

Fig. 2-3 Profiles of advance of wetting front under the water supply from the pipes with different diameters

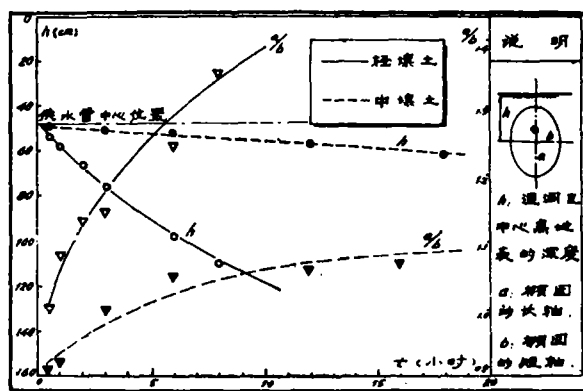


图 2-4 湿润区中心位置 h 及椭圆形状系数 a/b 与时间 t 的关系

Fig. 2-4 Relationship between center of wetting region and shape factor of ellipse to time

2. 土壤密实度的影响: 为了对同一种质地不同密实度土壤中水分运动进行比较, 选择干容重分别为 1.2 g/cm^3 和 1.365 g/cm^3 的两种中壤土进行入渗模拟计算。从计算数据可知, 在疏松土壤中水分入渗量要比在密实土壤中大得多, 若以第三天末累计入渗量作比较相差可达二倍左右。而湿锋在任一时刻任一方向运移速度在疏松土壤中亦比在密实土壤中快得多(图 2-2)。可见土壤密实度不同对水分入渗多少及水分运移快慢均有较大影响。

3. 不同直径供水管对水分入渗过程的影响: 以直径等于 10cm 和 20cm 两种不同大小的供水管分别在二种土壤中模拟计算。从计算数据可明显看出, 无论何种土壤, 管径愈大, 水分入渗量亦愈多, 直径由 10cm 加大至 20cm, 累计入渗水量则可以增加 42—47%, 说明

加大供水管直径将有利于水分的人渗。

由图 2-3 可知管径不同对湿润锋运移快慢影响也是十分显著的, 无疑采用大管供水将会加快水分运移。

4. 不同质地土壤对水分入渗的影响: 表 2-1 是根据计算成果列出的湿锋运移及入渗量在二种土壤中的对比。由此可见, 在轻壤土中湿锋运移速度要比在中壤土中快三倍半左右, 若以第二天末入渗量作比较, 轻壤土中的入渗量为中壤土的八倍多, 说明不同土质对入渗过程影响较大。

水分在砂性土中运移速度虽然较快, 但必须看到, 土壤剖面上椭圆状湿润区中心点随时间推移而迅速下降, 且椭圆长短轴之比 (a/b) 亦很快增大, 但在中壤土中则相对变化较缓(图 2-4), 这说明水分在砂性土中受重力影响要比在壤土中显著得多。

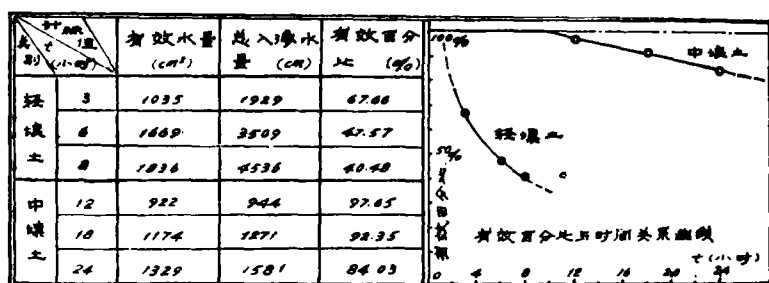


图 2-5 有效百分比与时间关系曲线

Fig. 2-5 Relationship between efficiency percentage and time

从水分被作物吸收并得到有效利用角度考虑, 不希望水分过多地渗入到土壤深层而造成渗漏损失, 若假定地表以下一米深度内的土壤剖面中的水量能被作物吸收称为有效水量, 而一米深度以下的水量看成对作物吸收无效称之为无效水量。有效水量与土壤剖面上总水量的比值称为有效百分比。图 2-5 所示即根据某时刻土壤剖面上含水率分布 (计算值) 所求到的这几个量。由此可知, 在较短时间内 (约 1.5 小时), 轻壤土中有效百分比数便开始迅速减少, 而在中壤土中则经历较长时间 (约 10 小时) 有效百分比数才开始减少且递减缓慢。说明水分在砂性土中受重力作用大而下移迅速, 将造成较多深层渗漏损失。

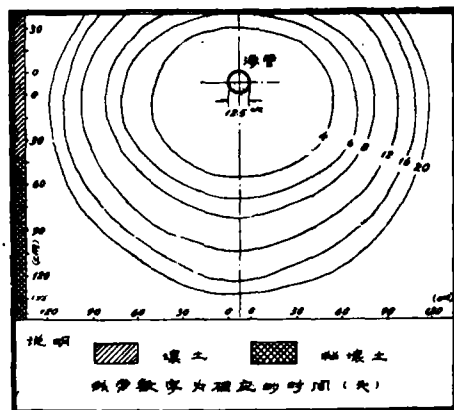


图 2-6 山西万荣县瓦管渗透湿润线(1978 年实测, 选自“渗灌技术”一文)

Fig. 2-6 Advance of wetting front in the fields of Wanrong, Shanxi

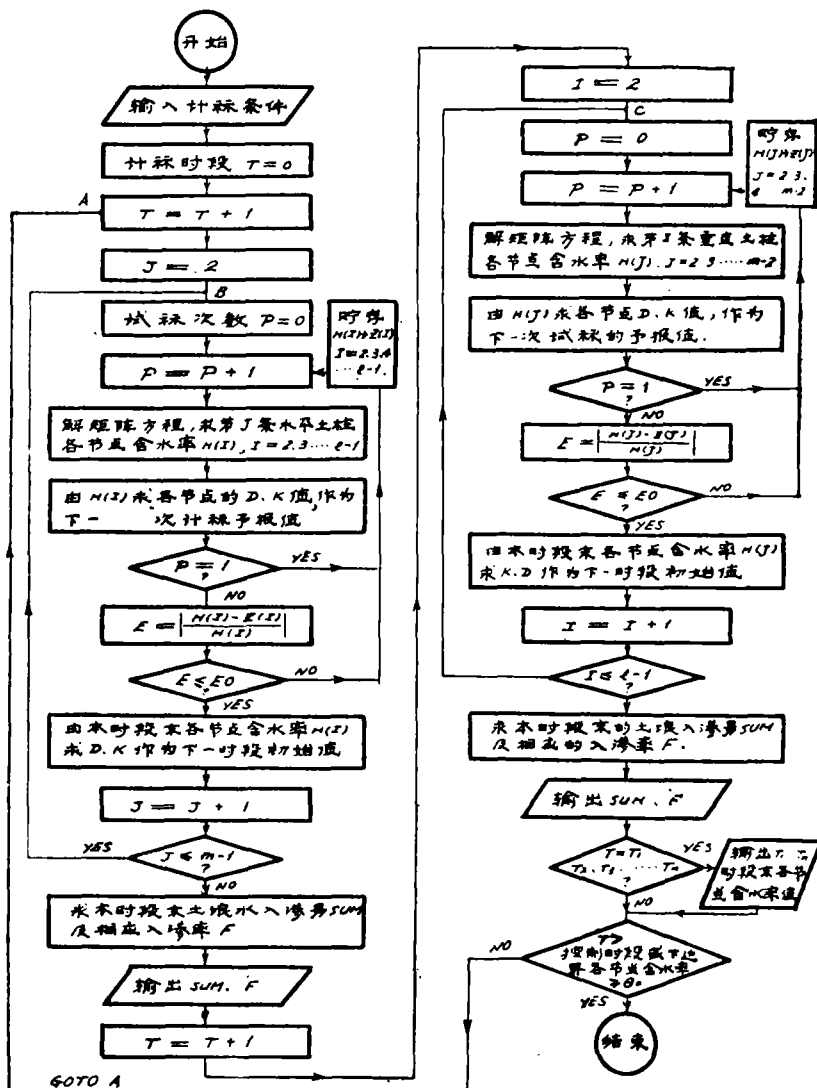


图3 非饱和土壤水二维流动计算程序框图

Fig. 3 Flow chart for the FORTRAN computer program of two-dimensional flow in unsaturated soil

但从山西省万荣县王显公社田间渗灌实测湿锋剖面看(图2-6)由于土壤剖面上45cm深度以下为粘壤土,水分分布则较为合理,深层渗漏损失亦较少。可见在耕层下部若存在一粘性土层,无疑将阻碍水分下移,克服深层渗漏损失过多的问题,而成为适合于渗灌的较为理想的土壤剖面。

三、结 束 语

本文根据非饱和土壤水运动理论对田间渗灌条件下的非饱和二维流进行了模拟实验,并建立相应的数学模型。水平的和垂直的非饱和二维流的计算结果与实验数据有良好的-致性,表明所建立的数学模型是可行的。

根据对不同条件下田间渗灌的模拟计算结果的分析,对田间渗灌实际应用提出以下几点初步看法:

(1) 在均质土中进行渗灌,若从水分在土壤剖面上合理分布及减少深层渗漏损失角度进行评价,壤土的渗灌效果比砂性土为好。但在砂性土耕层下部若存在一隔水土层,亦能得到较好的渗灌效果。

(2) 由于水分在疏松土壤中运移相对较快,故在田间渗灌中可采用使表土耕作层保持疏松或加大耕犁深度等措施,促使水分向表土运移以利于作物吸收并减少深层渗漏损失。

(3) 土壤初始含水率大则水分运移相对加快,故为了缩短水分从供水管壁运移至两管中间地带所需的时间以便及时向作物输水,除采用缩短供水管间距或加大供水管径等工程措施外,对于渗灌亦可适当提高灌溉时的田间含水率下限值并采用小水勤灌的灌水方法来加快水分运移。

本文所建立的非饱和土壤水二维流动数学模型仅适用于一定的简化条件,对于更复杂的田间实际条件及在更长时间内的非饱和二维流的规律有待进一步探讨。

参 考 文 献

- [1] 雷志栋、杨诗秀, 1982: 非饱和土壤水二维流动的数值计算。土壤学报, 第 19 卷 2 期, 141—153 页。
- [2] 李恩羊, 1982: 渗灌条件下土壤水分运算的数学模拟。水利学报, 第 4 期, 1—10 页。
- [3] Daniel Hillel, 1980: Application of Soil Physics. New York Academic Prese.
- [4] Sdkik Toksoz, Don Kirkham and Baumann, E. R., 1965: Two-dimensional infiltration and wetting front. ASCE, 91: 65—79.

STUDY ON TWO-DIMENSIONAL FLOW OF WATER IN UNSATURATED SOIL UNDER SUBSURFACE IRRIGATION

Zhang Sicong, Hui Shibo, Lei Zhidong and Yang Shixiu
(Qinghua University)

Summary

The horizontal two-dimensional flow and vertical two-dimensional flow were tested in the laboratory and their mathematical models were developed respectively. The results obtained from numerical calculations with the finite difference method well agreed with those obtained from experiment. This shows that the mathematical models are applicable.

The two-dimensional unsaturated flow in the soil under subsurface irrigation was simulated with the model under different conditions such as various initial water content in soil, various kinds of soil, different compaction and water supply pipes with different diameters. On the basis of the data from calculation, the influences of various factors on two-dimensional unsaturated flow of the soil under subsurface irrigation are analyzed and some views about reasonable management of subsurface irrigation are recommended.