

小管出流环沟灌溉土壤水运动的数值模拟

郑耀泉^① 阎玉民 刘婴谷 李光永 冯绍元

(中国农业大学水利与土木工程学院)

摘要 建立了小管出流环沟灌溉土壤水运动的数学模型和环沟内水流推进模型,并用数值法求解。应用该模型可以确定小管出流环沟灌溉的技术参数。

关键词 小管出流环沟灌溉;土壤水运动;数值模拟

中图分类号 S275.6

Numerical Simulation of Soil Water Movement of Circular Furrow Irrigation With Small Tubes

Zheng Yaoquan Yan Yumin Liu Yinggu Li Guangyong Feng Shaoyuan

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, CAU)

Abstract Circular furrow irrigation with small tube is a newly developed technique in localized irrigation. The mathematical models of soil water movement under circular furrow are developed. Those models are solved with the numerical methods and the computerized simulation model is developed. It can be used to determine the technical parameters of circular furrow irrigation with small tubes.

Key words circular furrow irrigation; soil water movement; numerical simulation

小管出流环沟灌溉是用 $\phi 4$ 塑料小管与插进毛管管壁的 $\phi 4$ 接头连接,把来自输配水管网的有压水以细流(或射流)形式灌进围绕每株果树的环沟内,湿润沟底和两侧土壤的一种灌溉方式。环沟的直径一般为果树树冠的 $2/3$ 。由于灌水器的流道直径比滴灌灌水器流道直径($0.3 \sim 1.2 \text{ mm}$)^[1]大得多,抗堵塞能力大大提高,这种灌溉方式得到了大面积推广应用。笔者在中国农业大学农田水利试验场内进行了小管出流环沟灌溉实型试验,采用12种组合方案,观测环沟灌时沟内水流的推进入渗过程和湿润区内土壤的含水率,获得了大量数据。本文的目的是建立环沟灌土壤水运动数学模型,并进行数值求解,开发一种计算机模拟模型,用来分析并确定小管出流环沟灌溉的技术参数。

1 环沟内土壤水入渗数值模型

1.1 基本假定

1)土壤质地均匀,各向同性,在土壤水入渗和再分布期间不考虑蒸发和根系吸水的影响;

收稿日期:1997-02-21

^①郑耀泉,北京清华东路17号中国农业大学(东校区)55信箱,100083

2) 由于封沟时间很短(一般为 5~15 min), 忽略沿沟线土壤水势梯度的影响; 3) 由于环沟内水流在推进期间水深很小(封沟前为 0.2~2.0 cm, 封沟后为 2.5~4.3 cm), 忽略沟内水深压力的影响。

1.2 数学模型

根据假定 1) 可把果园小管环沟灌溉土壤水运动简化为二维情况。按图 1(a) 所取的坐标系, 原点 o 为环的中心, z 轴垂直向下, r 为环的径向。根据连续性和质量守恒定理, 以及达西定律可导出柱坐标系土壤水运动方程^[2]

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left[D(\eta) \frac{\partial \eta}{\partial r} \right] + \frac{1}{r} D(\eta) \frac{\partial \eta}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left[D(\eta) \frac{\partial \eta}{\partial z} \right] - \frac{\partial K(\eta)}{\partial z} \quad (1)$$

式中: η 为由 z 与 r 组成的平面内任一点土壤的含水率, $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$; $D(\eta)$ 为土壤水扩散率, $\text{cm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$; $K(\eta)$ 为土壤导水率, $\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。根据基本假定, 取入渗期间沟底土壤的含水率为饱和含水率, 由于对称性, 取图 1(b) 为计算区域, 确定方程(1)的定解条件。

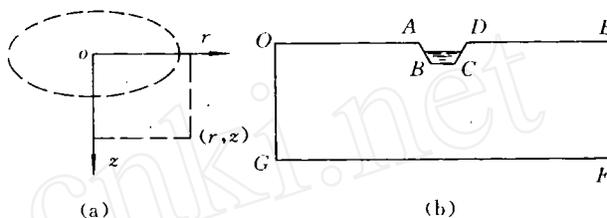


图 1 数学模型的坐标系(a)和计算区域(b)

初始条件为

$$\eta = \eta_0, t = 0 \quad (2)$$

边界条件为

$$\frac{\partial \eta}{\partial r} = 0 \quad AB, CD \text{ 段} \quad (3)$$

$$\eta = \eta_0 \quad GF, EF \text{ 段} (0 < t < T) \quad (4)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial r} = 0 \quad OG \text{ 段} \quad (5)$$

$$K(\eta) - D(\eta) \frac{\partial \eta}{\partial z} = 0 \quad OA, DE \text{ 段} \quad (6)$$

$$\eta = \eta_s \quad BC \text{ 段} (0 < t < T_1) \quad (7)$$

$$K(\eta) - D(\eta) \frac{\partial \eta}{\partial z} = 0 \quad BC \text{ 段} (t \geq T_1) \quad (8)$$

式中: η_0 为初始含水率; T 为计算期末时刻, min; T_1 为沟内水入渗完毕时间, min。

2 环沟内水流推进模型

灌溉水通过小管以射流(或细流)形式进入环沟, 由供水点向两侧推进, 经一定时间两侧水流汇合, 即所谓封沟。假定两侧流量和流速相等, 每侧水流推进的距离 $s = \pi R$ (R 为环沟中心圆的半径) 时即封沟。把封沟时间离散为 N 个 Δt 时段, 设进入环沟一侧的流量为 Q , 第 1 时段环沟单位长度入渗量为 I , 则水流在环沟内一侧的推进距离为 Δs_1 。根据基本假定 3), 可取 $\Delta s = Q\Delta t / I$; 第 2 时段末进入环沟一侧的水量为 $2Q\Delta t$, 设在 Δs_1 内 $2\Delta t$ 时间单位长度环沟入渗量为 I_2 , 则在第 2 时段内推进距离 $\Delta s_2 = (2Q\Delta t - I_2\Delta s_1) / I_1, \dots$, 依此类推可得出第 n 时段的推进距

离为

$$\Delta s_n = \frac{nQ\Delta t - I_n\Delta s_1 - I_{n-1}\Delta s_2 - \dots - I_2\Delta s_{n-1}}{I_1} \quad (9)$$

当 $n=N$ 时最末时段水流推进距离为 Δs_N 。

式(9)迭代计算精度条件取

$$|\Delta s_1 + \Delta s_2 + \dots + \Delta s_N - s| \leq \epsilon \quad (10)$$

式中 ϵ 为精度控制值,取 $\epsilon = 5s/100$ 。式(9)和(10)组成环沟内水流推进模型。

3 小管出流环沟灌溉土壤水运动数值模拟

由土壤水运动数学模型(1)~(8)与水流推进模型(9)和(10)相配合,组成小管出流灌溉土壤水运动数值模型,联合求解入渗模型和水流推进模型,即可求得入渗和推进过程。由于方程(1)是非线性的,很难进行解析求解,现采用数值法求解入渗模型。将计算区域离散成边长为 a 的正方格网,如图 2 所示。

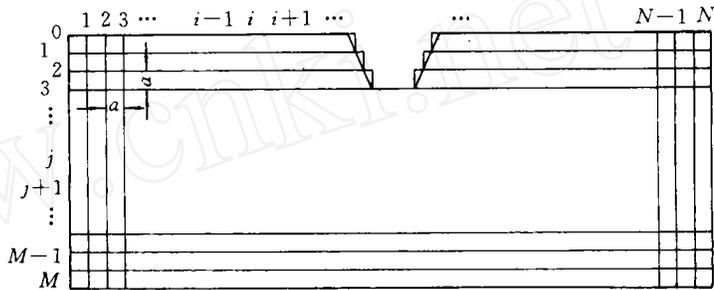


图 2 计算区域的正方格网

这里, $r_i = ia, i = 1, 2, 3, \dots,$

$N; z_j = ja, j = 1, 2, 3, \dots, M$ 。采

用交替隐式差分法(ADI)离散数学模型^[3~5]。

对 z 方向取显式,对 r 方向取隐式时,方程(1)的差分式为

$$\frac{\eta_{i,j}^{n+1} - \eta_{i,j}^n}{t^{n+1} - t^n} = \frac{D_{i+1/2,j}^{n+1}(\eta_{i+1,j}^{n+1} - \eta_{i,j}^{n+1}) - D_{i-1/2,j}^{n+1}(\eta_{i,j}^{n+1} - \eta_{i-1,j}^{n+1})}{a^2} + \frac{D_{i-1/2,j}^{n+1}(\eta_{i,j}^{n+1} - \eta_{i-1,j}^{n+1})}{ia^2} + \frac{D_{i,j+1/2}^n(\eta_{i,j+1}^n - \eta_{i,j}^n) - D_{i,j-1/2}^n(\eta_{i,j}^n - \eta_{i,j-1}^n)}{a^2} - \frac{K_{i,j+1}^n - K_{i,j-1}^n}{2a}$$

令 $R_1 = (t^{n+1} - t^n)/2a^2, R_2 = (t^{n+1} - t^n)/2a$,整理后令

$$A_i = -R_1(D_{i+1,j}^{n+1} + D_{i,j}^{n+1}) + R_2 D_{i,j}^{n+1}/i$$

$$B_i = 1 + R_1(D_{i+1,j}^{n+1} + 2D_{i,j}^{n+1} + D_{i-1,j}^{n+1})$$

$$C_i = -R_1(D_{i+1,j}^{n+1} + D_{i,j}^{n+1}) - R_2 D_{i,j}^{n+1}/i$$

$$H_i = R_1[D_{i,j+1}^n + D_{i,j}^n(\eta_{i,j+1}^n - \eta_{i,j}^n) - D_{i,j-1}^n - D_{i,j}^n(\eta_{i,j}^n - \eta_{i,j-1}^n)] + \eta_{i,j}^n - R_2(K_{i,j+1}^n - K_{i,j-1}^n)$$

边界点:

$$\eta_{0,j}^{n+1} = \eta_{1,j}^n \quad OG \text{ 段}$$

$$\eta_{N,j}^{n+1} = \eta_{N,j}^n \quad EF \text{ 段}$$

$$\eta_{i,j}^{n+1} = \eta_{i-1,j}^{n+1} \quad AB \text{ 段}$$

$$\eta_{i,0}^{n+1} = \eta_{i,1}^{n+1} - \frac{K_{i,0}^{n+1}}{D_{i,0}^{n+1}}a \quad OA, DE \text{ 段}$$

$$\eta_{i,j}^{n+1} = \eta_{i+1,j}^{n+1} \quad CD \text{ 段}$$

$$\eta_{i,j}^{n+1} = \eta_s \quad BC \text{ 段(沟内水全部入渗前)}$$

以上各式形成三对角方程。由于土壤水运动参数为含水率 η 的函数,所以采用迭代法求解。首先以上一时段 η^n 值计算 $D^{n+1(1)}$ 和 $K^{n+1(1)}$ 的预报值,代入方程组求得下一时段的 $\eta^{n+1(1)}$ 值,再以所求的 η 值作为初始值计算 $D^{n+1(2)}$ 和 $K^{n+1(2)}$ 值,求解 $\eta^{n+1(2)}$,如此反复进行 p 次,直到满足精度要求。

迭代要求满足下面条件:

$$\max \left| \frac{\eta_{i,j}^{n+1(p)} - \eta_{i,j}^{n+1(p-1)}}{\eta_{i,j}^{n+1(p-1)}} \right| \leq e, \text{ 取 } e = 0.01$$

对 r 方向取显式,对 z 方向取隐式时,方程(1)的差分式为

$$\frac{\eta_{i,j}^{n+1} - \eta_{i,j}^n}{t^{n+1} - t^n} = \frac{D_{i+1/2,j}^n (\eta_{i+1,j}^n - \eta_{i,j}^n) - D_{i-1/2,j}^n (\eta_{i,j}^n - \eta_{i-1,j}^n)}{a^2} + \frac{D_{i,j}^n (\eta_{i+1,j}^n - \eta_{i-1,j}^n)}{ia \cdot 2a} + \frac{D_{i,j+1/2}^{n+1} (\eta_{i,j+1}^{n+1} - \eta_{i,j}^{n+1}) - D_{i,j-1/2}^{n+1} (\eta_{i,j}^{n+1} - \eta_{i,j-1}^{n+1})}{a^2} + \frac{K_{i,j+1}^{n+1} - K_{i,j-1}^{n+1}}{2a}$$

整理后令

$$A_j = -R_1 (D_{i,j-1}^{n+1} + D_{i,j}^{n+1})$$

$$B_j = 1 + R_1 (D_{i,j+1}^{n+1} + 2D_{i,j}^{n+1} + D_{i,j-1}^{n+1})$$

$$C_j = -R_1 (D_{i,j}^{n+1} + D_{i,j+1}^{n+1})$$

$$H_j = \eta_{i,j}^n + R_1 [D_{i+1,j}^n + D_{i,j}^n (\eta_{i+1,j}^n - \eta_{i,j}^n) - (D_{i-1,j}^n + D_{i,j}^n) (\eta_{i,j}^n - \eta_{i-1,j}^n)] + R_2 D_{i,j}^n (\eta_{i+1,j}^n - \eta_{i-1,j}^n) / i - R_2 (K_{i,j+1}^{n+1} + K_{i,j-1}^{n+1})$$

边界点:

$$\eta_{0,j}^{n+1} = \eta_{1,j}^n \quad OG \text{ 段}$$

$$\eta_{N,j}^{n+1} = \eta_{N,j}^n \quad EF \text{ 段}$$

$$\eta_{i,j}^{n+1} = \eta_{i-1,j}^{n+1} \quad AB \text{ 段}$$

$$\eta_{i,0}^{n+1} = \eta_{i,1}^{n+1} - \frac{K_{i,0}^{n+1}}{D_{i,0}^{n+1}} a \quad OA, DE \text{ 段}$$

$$\eta_{i,j}^{n+1} = \eta_{i+1,j}^{n+1} \quad CD \text{ 段}$$

$$\eta_{i,j}^{n+1} = \eta_s \quad BC \text{ 段(沟内水全部入渗前)}$$

$$\eta_{i,j}^{n+1} = \eta_0 \quad FG \text{ 段}$$

上面模型中边界点的处理是指水流封沟前,沟内水深按零处理,沟底 BC 的土壤含水率为饱和含水率。

在灌水停止后沟内水深逐渐减小,当沟内水深为零以后,沟底边界按下式处理:

$$\eta_{i,j}^{n+1} = \eta_{i,j+1}^{n+1} - \frac{K_{i,j}^{n+1}}{D_{i,j}^{n+1}} a$$

在灌水过程中随着灌水时间的增加在沟的附近会产生一饱和区,饱和区会随着灌水时间的增加而增大。在进行数值计算时,以饱和区的边界作为计算边界,在每一时段结束后检查出饱和边界,并以此边界作为下一时段的边界。

4 模型检验与应用

利用实测资料与模拟计算结果相比较,对所建模型的可靠性进行检验。土壤水运动参数如下:

$$D(\eta) = 0.00052 \exp[10.111(\eta/\eta_s)]$$

$$K(\eta) = 0.06(\eta/\eta_s)^{9.909}$$

表 1 示出 3 种试验工况(环沟直径 2.5 m,上宽 0.2 m,下宽 0.05 m,沟深 0.15 m,入沟流量分别为 220,180,130 L)的水流封沟时间。

表 1 3 种试验工况的水流封沟时间

试验方案	实测值	计算值	误差/%
1	5.0	5.22	4.3
2	6.0	6.57	9.6
3	11.5	12.21	6.2

图 3(a)为 3 种试验工况灌水结束时环沟中心地表以下不同深度土壤含水率的实测值与计算值的对比图,可以看出在土壤剖面顶部含水率实测值小于计算值,下部则实测值大于计算值,而且偏离较大。其原因可能是模拟计算初始土壤含水率采用全剖面含水率的平均值,而实际土壤含水率是上部较低,下部较高。图 3(b)为 3 种试验工况的入渗量与时间关系的实测值与计算值的对比图。

上述试验结果表明,计算值与实测值之间虽有一定误差,但在可接受的范围内,故可以认为所建模型具有相当的可靠性。

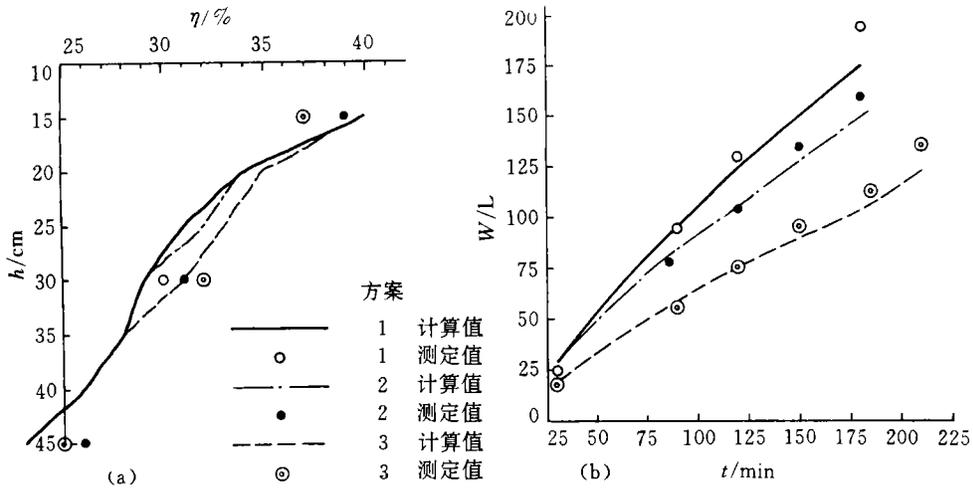


图 3 深度 h 与土壤含水率 η (a)和入渗量 W 与时间 t (b)关系的实测值与计算值

应用所建立的数值模型可以计算确定小管环沟灌的技术参数(沟的规格、入沟流量和灌水时间等)。

北京昌平南部乡何营村果园果树株行距为 3 m×5 m,田间持水量为 30.4%,饱和导水率为 0.06 cm·min⁻¹,果园土壤 80 cm 以下为卵石,确定小管环沟灌溉技术要素。

计划湿润层 60 cm,沟深 10 cm,沟底宽度 8 cm,土壤含水率上限取为田间持水量,下限取为田间持水量的 60%,环沟直径取为树冠直径的 2/3 即 2 m。计算得小管入沟流量为 145 L·

h^{-1} ,封沟时间为 9.3 min,一次灌溉时间为 1.94 h。

5 结束语

根据土壤水动力学原理和质量守恒定理,建立了小管出流环沟灌溉土壤水入渗数学模型和环沟内水流推进模型。采用 ADI 差分法对入渗模型进行离散,与环沟内水流推进模型进行联合数值求解,检验结果表明模型相当可靠。所建立的数值模型已用于果园滴灌和小管出流环沟灌溉土壤水分运动规律的分析和管理参数的确定。

参 考 文 献

- 1 傅琳,董文楚,郑耀泉.微灌工程技术指南.北京:水利出版社,1987.11~12
- 2 雷志栋,杨诗秀,谢森传.土壤水动力学.北京:清华大学出版社,1988.44~48
- 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.水利学报,1990(1):11~21
- 4 雷廷武.微灌果园的SPACE系统模拟研究及其应用:[学位论文].北京:北京农业工程大学,1988
- 5 Andrea N A,Tariq N K,Scott H. Soil-water distribution under trickle source. J Irri Drain Engi,1993,119(3):484~500