

## 波涌灌田面行水流动的数值模拟及其灌水技术

刘洪禄<sup>①</sup> 曾德超<sup>②</sup> 杨培岭 马廷玺

(北京市水利科学研究所) (中国农业大学)

**摘要** 根据连续方程、零惯性的动量方程以及最佳灌水状态概念,建立了描述波涌灌田面行水流动的零惯性模型。用 Newton-Raphson 和 Preissman 法对模型求解实现了波涌灌田面行水流动的模拟,探讨了波涌灌田面入渗和行水机理。用计算机模拟试验的方法,研究了波涌灌灌水技术参数对灌溉系统性能的影响,提出了确定波涌灌灌水技术参数的原则和方法以及连续地面灌灌水技术的改进方案。模拟结果得到商丘田间试验的验证。

**关键词** 波涌灌溉; 间歇供水; 数值模拟; 灌水技术参数

**中图分类号** S 275.3

## Simulation and Technique Parameters of Surge Flow Irrigation

Liu Honglu Zeng Dechao Yang Peiling Ma Tingxi

(Beijing Hydraulic Research Institute) (China Agricultural University)

**Abstract** According to the continuity equation, zero-inertia momentum equation and the concept of optimal irrigation, the zero-inertia models for surge irrigation are developed by the method of Newton-Raphson and Preissman. The surface water flow in the field is simulated. The mechanisms of infiltration and advance are verified. The determining rule and program of the technique parameters are put forward, also the effect of the technique parameters on the performance of irrigation. The improving method of the technique for the conventional surface irrigation is given. The simulation results are proved by field experiments.

**Key words** surge irrigation; intermittent application; simulation; technique parameters

70年代末80年代初,在美国进行了一项新的地面灌水技术即波涌灌溉(surge flow surface irrigation)的研究<sup>[1,2]</sup>,它具有灌水均匀、省水、节能的特点,目前在美国和日本发展很快,得到了广泛的应用。波涌灌溉在我国的应用和推广,必将提高我国的整体灌溉技术水平。

Walker 和 Lee, Walker 和 Humpherys 提出了描述波涌沟灌的运动波模型<sup>[2]</sup>。Izuno 和 Podmore 基于 Clemmens' 描述入渗的 Branch 函数及干沟段、湿沟段和过渡过程,用运动波模型对波涌沟灌进行了模拟<sup>[1]</sup>。此模型受入渗和管理参数的影响较大,而受坡度、糙率和断面水力学参数的影响较小,但是坡度不能太小。用来描述波涌沟灌的还有体积平衡模型(Essnfi)、线性零惯性模型(Oweis)和水动力学模型(Haie)。但是,有的模型不能独立地给出水深和流量,并且模型的适用性也受到某些条件的限制。Wallender 和 Rayej 用非线性零惯性模型来描述波涌沟灌,此模型较体积平衡模型和运动波模型能更为准确地描述波涌灌和连续灌的行水

收稿日期:1997-08-25

①刘洪禄,北京车公庄西路21号北京市水利科学研究所,100044

②曾德超,北京清华东路17号中国农业大学(东校区)1信箱,100083

及退水过程,模型的应用范围也较广<sup>[3]</sup>。笔者用非线性零惯性模型,采用分别描述各供水期入渗过程的方法来描述波涌畦灌的田间土壤水分的运动,获得了比较满意的结果。

## 1 田面行水流动模型与模拟

波涌灌灌水技术参数为供水时间  $t_{on}$ 、供水中断时间  $t_{off}$ 、供水周期  $T$ 、循环率  $r$  和入畦流量  $q_0$ 。对于波涌灌溉,笔者曾提出最佳灌水状态和最佳灌水技术参数的概念<sup>[1]</sup>,这里探讨最佳灌水状态及最佳灌水技术参数的求解。

### 1.1 田间土壤水分运动基本方程

由质量守恒(连续)方程和动量守恒方程得到描述畦灌田间行水流动的零惯性基本方程<sup>[1]</sup>

$$\begin{cases} \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} + I = 0 \\ \frac{\partial y}{\partial x} = S_0 - S_f \end{cases}$$

式中: $y$  为水深,  $m$ ;  $q$  为单宽流量,  $m^2 \cdot s^{-1}$ ;  $I$  为入渗速度,  $m \cdot s^{-1}$ ;  $t$  为灌水时间,  $s$ ;  $S_0$  为坡度;  $S_f$  为水阻系数,用 Manning 方程表示为  $S_f = Q^2 n^2 / A^2 R^{4/3}$ ,其中  $Q$  为入畦流量,  $m^3 \cdot s^{-1}$ ,  $n$  为 Manning 系数,  $A$  为过水断面面积,  $m^2$ ,  $R$  为水力半径,  $m$ 。

上边界条件为  $\begin{cases} \text{停止供水前} & q_L = q_0 \\ \text{停止供水后} & q_L = 0 \end{cases}$

下边界条件为 封口  $\begin{cases} q_R = 0 \\ y_{01} \leq y_N \leq y_{02} \end{cases}$

为方便,仍分行水阶段、积水阶段、消水段和退水段来建立积分方程,用 Newton-Raphaon 和 Preissman 法对模型求解<sup>[1,4,5]</sup>。

### 1.2 参数的选择

由于波涌灌溉存在着不同的供水期,对于某一个特定点的土壤,各个供水期具有不同的入渗特征和行水特性——糙率值;而对于不同点的土壤,同一供水期内各点的入渗特性和行水特性也可能不同。这就是说,与连续灌相比,波涌灌的田间入渗和行水具有某些特殊性和复杂性,因而应根据各点的过水次数确定各点的入渗特征参数和糙率的取值<sup>[1]</sup>。

### 1.3 模型的验证

由图 1 可以看出,在第 2 次供水段后期行水的计算值与实测值的误差较大,其原因是第 1 次行水后期湿润土壤的波涌灌效果较上游段小,行水速度比计算值小,从而导致后期计算行水速度快。造成二者行水曲线局部差异的另一原因是土地的平整度,局部坡度微小变化会影响到行水。总的来说,计算值与实测值大部分吻合较好,计算值基本上反映了实际灌水条件下的行水状况,该模型可以用来对行水进行预测。

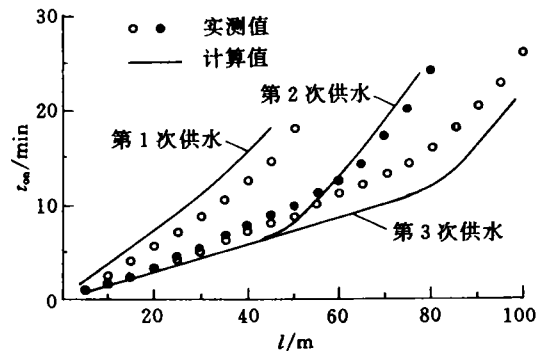


图 1  $q_0 = 4 L(s \cdot m)^{-1}$  时的行水曲线  
( $l$  为行水距离,下同)

### 2 波涌灌溉的田面行水和人渗机理

在波涌灌溉中,已湿润土壤的结构发生了变化<sup>[1]</sup>,形成了表面密实层。在后续供水时,这部分土壤的行水和入渗的水力学特征参数发生了变化,进而影响着灌溉水的行水和入渗特征,以及灌溉水在田间的分配。

研究表明:波涌灌溉第 1 供水期的行水和入渗性能与常规连续灌溉相同。在第 2 供水期,水流经过已湿润土壤时行水速度加快,入渗速度下降;当水流达到未湿润土壤时,其行水和入渗特征相当于连续供水(见图 2)。在第 3 及以后供水期,对于已湿润的土壤,水流的入渗速度较小,流速较大。当然,行水和入渗特征还受到湿润次数的影响。波涌灌溉各供水段的土壤水分是分段入渗的,如图 3 所示。其土壤水分入渗剖面与常规连续灌的比较见图 4,它示出流量相同时波涌灌 4 次完成灌水与连续灌的水分分布。可见波涌灌比连续灌灌水均匀,同时行水距离长。

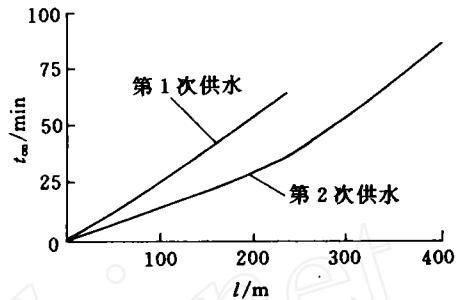


图 2 砂壤土波涌灌的行水曲线 ( $q_0 = 4 \text{ L}(\text{m}\cdot\text{s})^{-1}$ )

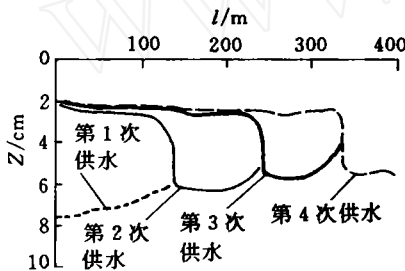


图 3 砂壤土 4 次供水的土壤水入渗纵剖面分布(Z 为入渗量,下同)

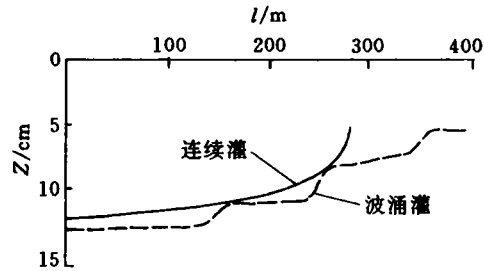


图 4  $q_0 = 4 \text{ L}(\text{m}\cdot\text{s})^{-1}$  时波涌灌( $n_{\text{off}} = 4$ )与连续灌的入渗纵剖面分布

波涌灌溉过程中表面密实层的形成除降低糙率、减小入渗速度外,还使表面贮水容量减小,从而增加了行水速度和行水距离。在田间灌水过程中,一定厚度的土层其水分达到饱和后才开始行水,即先达到表面贮水容量才行水。贮水容量一般为  $11 \sim 33 \text{ mm}$ <sup>[6]</sup>。对于耕作后的第 1 次灌水,通常是犁底层以上部分先饱和,然后行水,这时表面贮存容量很大,可以达到  $50 \text{ mm}$  左右<sup>[1]</sup>。当水的深度小于这个值时,行水以水平入渗的形式进行,行水速度很小或者行水停止。对于波涌灌溉,由于表面形成了密实层,贮水容量很小,这样,波涌灌溉就具有以较大的行水速度、较长的行水距离行水的潜力。

### 3 波涌灌溉系统性能分析

能为土壤提供适合作物生长的水分,同时蒸发、跑水、深层渗漏损失最小的灌溉系统可视为优化的灌溉系统。这里提出用分布均匀度  $u_d$ 、灌水效率  $\eta_a$ 、深层渗漏比  $r_{dp}$  和尾水损失比  $r_{tw}$  作为性能指标来描述波涌灌溉系统的性能<sup>[1]</sup>。

### 3.1 波涌灌土壤性能变化指标、波涌灌效果指标与波涌灌灌溉系统性能指标的关系

$k_s$  是波涌灌过程中形成的土壤表面密实层的饱和导水率,是描述波涌灌土壤性能变化的指标。从土壤性能变化角度上说波涌灌效果越好, $k_s$  值越小,表面密实层对后续供水入渗的阻力越大,后续供水入渗速度  $v$  越小,即  $v/v_0$  越小,从而从入渗速度来看波涌灌效果越好。波涌灌效果的增强( $v/v_0$  值变小)使后续供水的入渗速度降低,相应地入渗量减小,灌水结束时最终入渗水分的纵向剖面分布将更加均匀,灌溉系统性能改善。这就是说,描述波涌灌土壤性能变化指标  $k_s$  和描述波涌灌效果指标  $v/v_0$  与灌溉系统性能指标是统一的:波涌灌效果明显,灌溉系统性能就好,灌水均匀;反之,灌溉系统性能改善小,灌水均匀度变差。

### 3.2 灌水技术参数对灌溉系统性能影响的模拟试验

影响灌溉系统性能的因素很多,有些条件不是所能控制的,有的即使可以控制,也是不经济的;因此这里只考虑灌水技术参数的影响。对于波涌灌,供水次数、供水流量和供水时间是重要参数,但是当供水次数一定时,供水流量与供水时间是相互制约的,其中一个确定另一个也就确定;所以选择供水次数  $n_w$  和供水流量  $q_0$  为试验因子,采用计算机模拟试验的方法来研究波涌灌灌溉系统的性能。被试土壤为砂壤土,畦长 400 m,坡度 0.1%。试验结果与分析如下。

1) 供水次数  $n_w$  影响着完成灌水的需水量,一般  $n_w=3$  时,完成灌水的用水量最少, $n_w$  太大或过小都使用水量增加。一般来说,供水流量  $q_0$  增大使完成灌水的需水量减小,尤其是当  $n_w=2$  时;但是在实际灌水中, $q_0$  值不能太大,否则会造成土壤冲刷,并容易跑水。

2)  $q_0$  对灌水均匀度  $u_d$  有一定的影响,但影响不是很大。 $n_w$  对  $u_d$  的影响较大, $n_w=2$  或 4 比  $n_w=3$  时  $u_d$  值较优。

3) 灌水效率  $\eta_a$  取决于作物根系活动层的贮存水量,而根系活动层的深度取决于作物种类和生长期;因此  $\eta_a$  是作物种类和生长期的函数。本程序模拟的是裸地土壤水分运动(当然有作物时只需在糙率上修正即可),假定计划湿润层深度为 500 mm。 $q_0$  对  $\eta_a$  的影响较小,但  $n_w$  对  $\eta_a$  的影响较大,一般以  $n_w=2$  完成灌水为好。随着  $n_w$  值的增大, $\eta_a$  有减小的趋势。

4) 深层渗漏比  $r_{dp}$  受流量  $q_0$  的影响较小,但它受供水次数  $n_w$  的影响较大。随着  $n_w$  值的增大, $r_{dp}$  有增大的趋势,从减小深层渗漏的角度上说,以  $n_w=2$  完成灌水为好。

总之,波涌灌灌溉系统的性能受供水流量  $q_0$  和完成供水次数  $n_w$  的直接影响。

## 4 波涌灌灌水技术参数的确定

### 4.1 原则

1) 循环率  $r$  与波涌灌设备有关,一般取  $r=1/2, 1/3, 1/4$ 。在保证能形成表面密实层的前提下, $r$  可尽量取较大值。在实际灌水中,只要水流充分消退即可,因此取  $r=1/2$  或  $1/3$ 。

2) 供水次数  $n_w$  影响着灌溉系统的用水量。一般来说,如果设计灌水定额较小,则可取  $n_w=3$ ;如果设计灌水量较大,灌水长度较小,则可取  $n_w=2$ ;如果灌水长度较大,则可取  $n_w=4$ 。

3) 入畦单宽流量  $q_0$  的确定首先要考虑水源出水情况和水源控制灌溉面积,然后将灌溉面积积分成若干组进行波涌灌溉。

4) 供水时间  $t_{on}$  可根据  $q_0$  和  $n_w$  由计算程序求得。

5) 供水中断时间  $t_{off}$  可根据供水时间  $t_{on}$  和循环率  $r$  确定,但是必须保证地表形成密实层。

## 4.2 步骤

1) 根据土壤的机械组成和体积密度查表确定表面密实层的饱和导水率  $k_s$  [1]。

2) 根据  $k_s$ , 土壤水分运动参数  $D(\eta_w)$ ,  $K(\eta_w)$ ,  $\tau(\eta_w)$  以及土壤体积密度, 利用各供水段土壤入渗特征参数求解程序, 求取各供水期土壤入渗特征参数  $k(I)$ ,  $\alpha(I)$  [1]。

3) 输入特征参数  $k(I)$  和  $\alpha(I)$ , 完成供水次数  $n_w$ , 田面条件  $S_0$  和  $L$ , 灌水参数  $q_0(t_{on})$ , 表面糙率  $n(I)$ , 用波涌灌溉系统模拟及波涌灌灌水技术参数  $t_{on}(q_0)$  的求解程序求得灌水技术参数  $t_{on}(q_0)$  和灌溉系统性能指标用水量、均匀度和灌溉效率等。

## 5 传统连续灌水系统的改进

进行波涌灌溉, 实际是对传统的灌水系统进行改进。对于已有管道输水系统的灌溉系统, 在田间管道系统上增加一个间歇阀 (surge valve) 和自动控制器, 即可使之成为一个自动化的波涌灌溉系统。这种系统投资不大, 也便于使用。如果要构成一个简易的波涌灌溉系统, 只需在田间管道系统上增加一个间歇阀, 此时需人工进行控制。对于没有管道输水系统的灌溉系统, 在经济条件较好的井灌区, 可以建立一套波涌灌溉系统。其投资较大, 但是自动化程度高, 并可根据要求直接实现。对于经济条件相对较差, 又有地面输水系统的灌区, 可以直接利用输水系统, 田间采用人工改口方式, 实现波涌灌。这种波涌灌溉系统几乎不用投资, 只需对灌水管员进行培训。

## 6 结 语

根据质量守恒方程和零惯性动量守恒方程及最佳灌水状态的概念建立了描述传统连续灌和波涌灌田面行水流动的零惯性模型。用 Newton-Raphson 法和 Preissman 法对模型进行求解, 实现了波涌灌田面行水流动的模拟。用 FORTRAN77 语言编写了求解波涌灌灌水技术参数及灌溉系统性能的计算程序, 实现了波涌灌灌水技术参数的直接确定。用计算机模拟波涌灌行水和入渗, 探讨了波涌灌的节水机理, 并用计算机模拟试验的方法研究了波涌灌技术参数对灌溉系统性能的影响, 提出了波涌灌灌水技术参数的确定原则和方法, 以及传统地面灌技术的改进方案。

## 参 考 文 献

- 1 刘洪禄. 波涌灌溉机理及其灌水技术的研究:[博士学位论文]. 北京:北京农业工程大学, 1993
- 2 Walker W R, Skogerboe G V. Surface Irrigation-Theory and Practice. Utah State University, PRENTICE-HALL, INC, Englewood Cliffs, New Jersey 07632, 1987. 212~234
- 3 Wallender W W, Rayej M. Zero-inertia surge model with wet-dry advance. Trans of The ASAE, 1985, 28(5):1530~1534
- 4 Clemmens A J, Fangmeier D D. Border-irrigation hydraulics with zero inertia. J of The Irrig and Drain Division of The ASCE, 1978(IR3):337~341
- 5 Strelkoff T. Algebraic computation of flow in border irrigation. J of The Irrig and Drain Division, 1977 (IR3):357~377
- 6 Gayle G A, Skaggs R W. Surface Storage on Bedded Cultivated Lands. Trans of The ASAE, 1978, 21: 101~109