

畦灌田面行水流动的模型与模拟

刘洪禄^①

杨培岭

(北京市水利科学研究所) (中国农业大学水利与土木工程学院)

摘要 根据我国地面灌现状提出极限灌水状态和最佳灌水状态及其灌水技术参数的概念。用 Newton-Raphson 法和 Preissman 法求解畦灌田面行水流动的零惯性模型,实现了畦灌田面行水流动的模拟。在此基础上探讨畦灌的行水和入渗机理。用计算机模拟试验方法建立极限灌水定额与灌溉技术参数和畦田规格关系的数学模型,并研究它们对极限灌水定额的影响,进而探讨了灌溉技术参数和畦田规格对灌溉系统性能的影响。提出了适宜畦长和单宽流量的确定方法并给出了其量值。

关键词 畦灌;行水流动;灌水技术参数;数学模拟

中图分类号 S275.3

Study on Model and Simulation of Border Irrigation and Its Application

Liu Honglu

Yang Peiling

(Beijing Hydraulic Research Institute) (College of Water Conservancy and Civil Engineering, CAU)

Abstract The concept of optimal irrigation and the zero-inertia models for border irrigation are suggested. The models are solved with the method of Newton-Raphson and Preissman, and surface-water flow in the field is simulated. The mechanisms of infiltration and advance are verified. The effect of the technique parameters on the performance of irrigation is studied. The fundamental rule and method of determining the technique parameters is put forward and a program for determining parameters and irrigation performance is developed. The results of simulation are verified by field irrigation experiments.

Key words border irrigation; surface-water flow; irrigation technique parameters; mathematics simulation

我国是一个水资源十分缺乏的农业大国,灌溉用水约占工农业用水的 85%,其中 90% 以上的灌溉面积上采用的是传统的地面灌水方法,水量浪费惊人^[1]。70 年代中期以后,节水灌溉新技术(如喷灌、滴灌等)的研究和应用有较大发展,但由于其能耗高、投资大,大面积推广受到限制,地面灌在北京平原地区仍占相当大的比重。虽然地下管道输水技术在北京发展很快,但它只能解决输水过程中的渗漏和蒸发问题。如不解决地面灌水的技术问题,即使输水渠系实现了管道化,人们也掌握了作物需水规律与灌溉制度,田间灌水的浪费现象仍然存在。改进现有地面灌水技术已是当务之急,因此研究地面灌条件下水分的运移规律,并在此基础上确定地面

收稿日期:1997-03-10

①刘洪禄,北京车公庄西路 21 号北京市水利科学研究所,100044

灌水技术参数具有重要的理论与应用价值。

为寻求不同土壤、不同田面条件下地面灌的田间水分运移规律,需要进行多种方案的田间灌水试验,工作量很大,周期很长,许多试验条件用人工难于实现。而利用计算机对试验条件进行模拟,方便灵活,完成一个方案的计算时间也远比田间试验短得多。所以,本研究旨在采用计算机进行数学模拟,研究灌溉条件下田间水分的运移规律,优化灌水技术参数。

1 地面灌溉田面行水流动数学模型

1.1 极限灌水状态与最佳灌水状态概念的提出

在田间灌水过程中,一般根据灌水定额、畦长 L 、土质和坡度 S_0 来确定入畦单宽流量 q_0 。当畦长 L 太大时,由给定的灌水定额($450\sim 600\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$)很难完成灌水,尤其是新耕农田的第1次灌溉;如果将长畦改成短畦,势必造成田间工程和输水渗漏量增加,有效耕地面积减小。因此,农田水利工作者面临的问题是,要么以较大的灌水定额完成灌水,这会造成水量的严重浪费,要么增加工程和输水渗漏损失,甚至减少有效种植面积来按灌水定额完成灌水。据此,笔者在此提出最佳灌水状态和最佳灌水技术参数的概念。地面畦灌的灌水技术参数为单宽流量 q_0 和相应的改口成数 w 。以 $q_0(w)$ 完成某种土壤、田面条件(S_0, L)下的灌水所需要s的最小灌水定额(满足均匀度的要求)称为极限灌水定额,此时的灌水状态称为极限灌水状态。 $q_0(w)$ 不同时极限灌水定额各不相同。在这一系列极限灌水定额中与计划灌水定额最接近的为这种土质和田面条件下的最佳灌水状态,此时对应的 $q_0(w)$ 为最佳灌水技术参数。

1.2 田间地面畦灌系统零惯性模型的建立

描述田间地面畦灌系统零惯性模型的基本方程^[1~3]为

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

式中: y 为水深, m ; q 为单宽流量, $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$; I 为入渗速率, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; 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, $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, 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

$$\text{封口} \begin{cases} q_R = 0 \\ y_{01} \leq y_N \leq y_{02} \end{cases}$$

1.3 积分方程的建立

对于行水阶段。在计算区域内采用斜网格^[1],如图1和图2所示,得到如下方程:

左边界单元($k=1$)

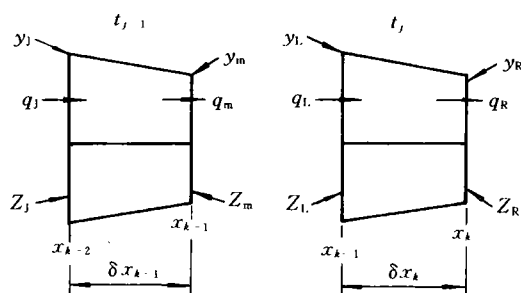


图1 相邻时刻的水体单元示意图

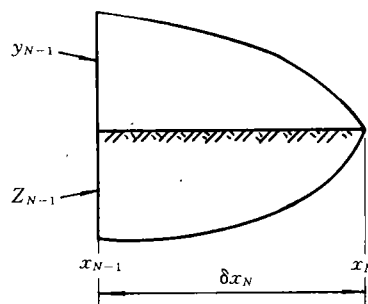


图2 水锋尖处水体的地上和地下剖面

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\delta x_1}{\delta t} [(y_L + Z_L)\varphi + (y_R + Z_R)(1 - \varphi)] = \\ \theta \left\{ q_L - \left[q_R - (y_R + Z_R) \frac{\delta x_1}{\delta t} \right] \right\} + (1 - \theta) \left[(y_m + Z_m) \frac{\delta x_1}{\delta t} \right] \\ y_R - y_L = \delta x_1 \left(S_0 - \varphi \frac{q_R^2 n^2}{y_R^{10/3}} \right) \end{aligned} \right.$$

内部单元 ($1 < k < n$)

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\delta x_k}{\delta t} [(y_L + Z_L)\varphi + (y_R + Z_R) \frac{\delta x_{k-1}}{\delta t} (y_j - Z_j)\varphi + (1 - \varphi)(y_m + Z_m)] = \\ \theta \left\{ q_L - (y_R + Z_R) \frac{\delta x_{k-1}}{\delta t} + \left[q_R - (y_R + Z_R) \frac{\delta S_k}{\delta t} \right] \right\} + \\ (1 - \theta) \left\{ \left[q_l - (y_j + Z_j) \frac{\delta x_{k-1}}{\delta t} \right] - \left[q_m - (y_m + Z_m) \frac{\delta x_k}{\delta t} \right] \right\} \\ y_R - y_L = \delta x_k \left\{ S_0 - \left[\varphi \frac{q_l^2 h^2}{y_L^{10/3}} + (1 - \varphi) \frac{q_R^2 n^2}{y_R^{10/3}} \right] \right\} \end{aligned} \right.$$

右边界单元 ($k = N$)

$$\left\{ \begin{aligned} \left(\frac{y_L}{1 + \beta} + \frac{Z_L}{1 + \alpha} \right) \frac{\delta x_N}{\delta t} + \left(\frac{y_j}{1 + \beta} + \frac{Z_j}{1 + \alpha} \right) \frac{\delta x_{N-1}}{\delta t} = \\ \theta \left[q_L - (y_L + Z_L) \frac{\delta x_N}{\delta t} \right] + (1 - \theta) \left[q_j - (y_j + Z_j) \frac{\delta x_{N-1}}{\delta t} \right] \\ - \frac{\beta y_L}{\delta x_N} = S_0 - \frac{q_L^2 n^2}{y_L^{10/3}} \end{aligned} \right.$$

式中: N 为单元数; α, β 分别为依赖于入渗参数和水流几何形状的形状因子; y_j, q_j 和 Z_j 分别为时刻 t_{j-1} 单元左端的地表水深、流入流量和地下水深; y_m, q_m 和 Z_m 分别为时刻 t_{j-1} 单元右端的地表水深、流出流量和地下水深; y_l, q_l 和 Z_l 分别为时刻 t_j 单元左端的地表水深、流入流量和地下水深; y_R, q_R 和 Z_R 分别为时刻 t_j 单元右端的地表水深、流出流量和地下水深; y_{N-1}, Z_{N-1} 分别是水锋尖单元左端的地表水深和地下水深; $\delta x_{k-1}, \delta x_k$ 和 δx_N 分别为时刻 t_{j-1} 及 t_j 单元和水锋尖单元的长度。

对于积水阶段。在计算区域内采用矩形网格^[1], 得到如下方程:

上边界单元 ($k = 1$)

$$\begin{cases} \frac{\delta x_1}{\delta t} [(y_L + Z_L)\varphi + (y_R + Z_R)(1 - \varphi)] = \\ \theta \left\{ q_L - \left[q_R - (y_R + Z_R) \frac{\delta x_1}{\delta t} \right] \right\} + (1 - \theta)(y_m + Z_m) \frac{\delta x_1}{\delta t} \\ y_R - y_L = \delta x_1 \left[S_0 - \varphi \frac{q_L^2 n^2}{y_L^{10/3}} + (1 - \varphi) \frac{q_R^2 n^2}{y_R^{10/3}} \right] \end{cases}$$

内部单元(1 < k < n)

$$\begin{cases} \frac{\delta x_k}{\delta t} [\varphi(y_L + Z_L - y_j - Z_j) + (1 - \varphi)(y_R + Z_R - y_m - Z_m)] = \\ \theta(q_L - q_k) + (1 - \theta)(q_j - q_m) \\ y_R - y_L = \delta x_k \left\{ S_0 - \left[\varphi \frac{q_L^2 n^2}{y_L^{10/3}} + (1 - \varphi) \frac{q_R^2 n^2}{y_R^{10/3}} \right] \right\} \end{cases}$$

下边界单元(k = N)

$$\begin{cases} \frac{\delta x_N}{\delta t} [\varphi(y_L + Z_L - y_j - Z_j) + (1 - \varphi)(y_R + Z_R - y_m - Z_m)] = \\ \theta(q_L - q_R) + (1 - \theta)(q_j - q_m) \\ y_R - y_L = \delta x_N \left\{ S_0 - \left[\varphi \frac{q_L^2 n^2}{y_L^{10/3}} + (1 - \varphi) \frac{q_R^2 n^2}{y_R^{10/3}} \right] \right\} \end{cases}$$

消水段网格的划分和积分方程的建立与积水段相同。退水段与积水段相同,所不同的是此
 时上边界单元随时间下移,下边界单元也有可能上移,计算单元逐渐减少。

1.4 方程的线性化及求解方法

这里采用 Newton-Raphson 方法对上述方程进行线性化。

对于第 1 时间步长。令 $P_1 = q_L t_1 - \delta x_1 [y_L / (1 + \beta) + Z_L / (1 + \alpha)]$, $R_1 = -\beta y_L / \delta x_1 - S_0 + q_L^2 n^2 / y_L^{10/3}$, 则

$$\delta y_L = \frac{P_1 (\partial R_1 / \partial \delta x_1) - R_1 (\partial P_1 / \partial \delta x_1)}{(\partial P_1 / \partial \delta x_1) (\partial R_1 / \partial y_L) - (\partial R_1 / \partial \delta x_1) (\partial P_1 / \partial y_L)}$$

$$\delta \delta x_1 = \frac{R_1 (\partial P_1 / \partial y_L) - P_1 (\partial R_1 / \partial y_L)}{(\partial P_1 / \partial \delta x_1) (\partial R_1 / \partial y_L) - (\partial R_1 / \partial \delta x_1) (\partial P_1 / \partial y_L)}$$

当 $y_L^{n+1} = y_L^n + \delta y_L^n$, $\delta x_1^{n+1} = \delta x_1^n + \delta \delta x_1^n$ 使 $P_1 \approx 0, R_1 \approx 0$ (满足精度要求) 时, 即得到 y_L 和 δx_1 。

对于第 2 及以后的时间步长。首先改变连续方程和动量方程的积分形式, 使方程的右端为
 零, 然后令 P_1 和 R_1 分别等于连续方程及动量方程左端的值。将 P_1 和 R_1 以 Taylor 级数展开,
 令 $P_1^{n+1} = R_1^{n+1} = 0$, 有

$$\begin{cases} \left(\frac{\partial P_1}{\partial y_L} \right)^n \delta y_L + \left(\frac{\partial P_1}{\partial q_L} \right)^n \delta q_L + \left(\frac{\partial P_1}{\partial y_R} \right)^n \delta y_R + \left(\frac{\partial P_1}{\partial q_R} \right)^n \delta q_R = -P_1^n & (1a) \\ \left(\frac{\partial R_1}{\partial y_L} \right)^n \delta y_L + \left(\frac{\partial R_1}{\partial y_L} \right)^n \delta y_L + \left(\frac{\partial R_1}{\partial q_L} \right)^n \delta y_R + \left(\frac{\partial R_1}{\partial q_R} \right)^n \delta q_R = -R_1^n & (1b) \end{cases}$$

为方便起见, 在每 j 个单元上, 方程(1a)和(1b)用下式表示:

$$\begin{cases} A_j \delta y_{j-1} + B_j \delta q_{j-1} + C_j \delta y_j + D_j \delta q_j = -P_{1j} & (2a) \\ E_j \delta y_{j-1} + F_j \delta q_{j-1} + G_j \delta y_j + H_j \delta q_j = -R_{1j} & (2b) \end{cases} \quad j=1, 2, \dots, N$$

对每一个单元都写出方程(2a)和(2b)的形式, 最终形成如下结构矩阵:

溉。土质对灌溉过程及结果影响很大(见图 4):透水性强的土壤,行水速度慢,灌溉用水量大;相反,行水速度快,灌溉用水量小。这样,在灌水实践中可能存在这样的问题:砂性土灌溉用水量过大,水的浪费大;粘性土灌溉用水量过小,不能满足作物的需水要求。

2.2 灌水技术参数对行水特征的影响

如图 5 所示,灌水技术参数 q_0 对行水和入渗特征的影响较大,随着 q_0 的增大,行水速度加快,灌水时间缩短,完成灌溉的用水量减少;反之,则灌水时间长,灌溉用水量增大。

2.3 畦田长度对行水和入渗特征的影响

如图 6 所示,畦长 L 对灌水质量影响很大,随着 L 的增大,灌水时间增加,灌溉用水量增大。随着 L 的进一步增大,在计划灌水定额情况下,甚至可能无法完成灌水——畦尾部无水。

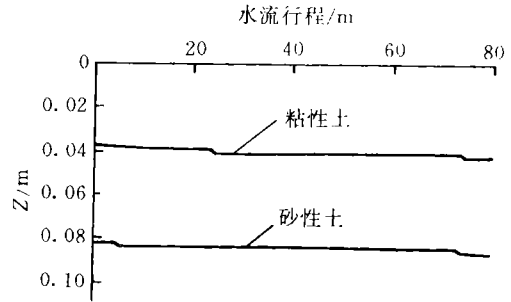


图 4 不同土质的入渗剖面 ($q_0=4 L(s \cdot m)^{-1}$)

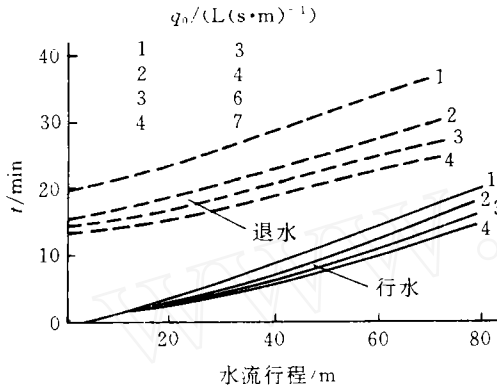


图 5 q_0 对行水和退水曲线的影响 ($S_0=1/1\ 000$)

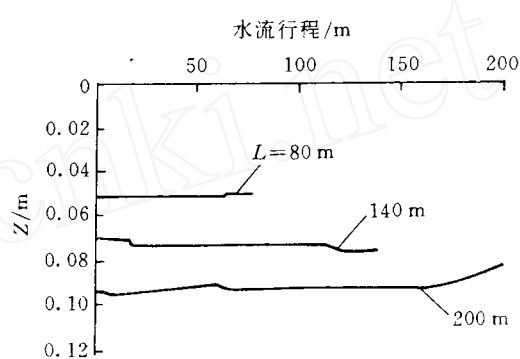


图 6 不同畦长的入渗剖面 ($q_0=3 L(s \cdot m)^{-1}$)

3 灌溉系统性能分析

3.1 灌溉效率和灌水均匀度

为说明灌溉系统的性能,引入了灌溉效率和灌水均匀度概念。用分布均匀度 u_d 、灌水效率 η_a 、深层渗漏比 r_{dp} 、尾水损失比 r_{tw} 和水量储存效率 η_s 来描述灌溉系统的性能^[1,2]。考虑到我国地面灌现状,将极限灌水状态的概念引入灌溉系统性能的分析中。

3.2 灌水技术参数对灌溉系统性能的影响

通过对地面灌入渗和行水机理的分析,可以看出影响灌溉系统性能的因素很多,其中有些不是人所能控制的,有的即使可以控制,但也不经济;因此,只考虑灌水技术参数和畦田规格的影响,这也正是研究并寻求最优灌水技术的必要性。另外,供水时间也是重要因素,而供水流量和供水时间是相互制约的,确定其中一个即可。在此,选择畦田长度 L 和单宽流量 q_0 为试验因子,用计算机模拟的方法研究灌溉系统的性能。

被试土壤为砂壤土和粘壤土,坡度为 1/1 000。

试验按二因子二次回归正交设计结构矩阵安排^[1],得如下关系式:

$$Y = b_0 + \sum_{j=1}^p b_j x_j + \sum_{i < j} b_{ij} x_i x_j + \sum_{j=1}^p b_{jj} x_j^2$$

Y 取极限灌水定额 $M_L / (\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2})$ 。

3.2.1 单宽流量 q_0 和畦长 L 对极限灌水定额 M_L 的影响 q_0 的增大一般来说使 M_L 减小。 M_L 一般随着 L 的增大而增大。在实际灌水中,计划灌水定额 M_p 可能与 M_L 不同,但会影响灌溉系统的性能。如果 $M_p < M_L$,则 u_a 差(没完成灌水),或虽完成灌水,但深层渗漏增大, η_a 降低;如果 $M_p > M_L$,则易形成尾水损失, η_a 降低;因此需确定合适的 q_0 和 L 值,使 M_L 与通常的灌水定额相近,进而调整 q_0 使 M_L 与 M_p 相符。

3.2.2 适宜畦长 L 与灌水技术参数 q_0 或改口成数 w 的确定 根据数值分析,用计算机模拟试验的方法得到如下结果:北京地区主要灌溉作物——冬小麦,灌水定额为 $600 \sim 900 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$,纵坡为 1/1 000,适宜畦长粘壤土取 $120 \sim 150 \text{ m}$,砂壤土取 $60 \sim 80 \text{ m}$ 。考虑到田间实际情况,适宜畦长应适当缩短。单宽流量为 $3 \sim 3.5 \text{ L}(\text{s} \cdot \text{m})^{-1}$,改口成数为 $0.90 \sim 0.95$ 。研究结果得到赵卫^[4]和胡树森^{①②}的验证。

4 结 论

提出了极限灌水状态和最佳灌水状态及其灌水技术参数的概念。用 Newton-Raphson 法和 Preissman 法求解畦灌田面行水流动的零惯性模型,实现了畦灌田面行水流动的模拟。在此基础上探讨了畦灌的行水和入渗机理,用计算机模拟试验的方法建立了极限灌水定额与灌水技术参数关系的数学模型,并研究了灌水技术参数对极限灌水定额的影响,进而探讨了灌水技术参数对灌溉系统性能的影响。提出了确定适宜的畦长和单宽流量的方法,研究结果是:对于粘壤土,畦长为 $120 \sim 150 \text{ m}$,对于砂壤土,畦长为 $60 \sim 80 \text{ m}$;单宽流量为 $3.0 \sim 3.5 \text{ L}(\text{s} \cdot \text{m})^{-1}$,改口成数为 $0.90 \sim 0.95$ 。

参 考 文 献

- 1 刘洪禄. 波涌灌溉机理及其灌水技术的研究:[学位论文]. 北京:北京农业工程大学,1993. 1~6, 53~81
- 2 Walker W R, Skogerboe G V. Surface Irrigation: Theory and Practice. New Jersey: Prentice-Hall Inc, Utah State University, 1987. 289~344
- 3 Elliott R L, Walker W R, Skogerboe G V. Zero-inertia modeling of furrow irrigation advance. ASAE J Irrig Drain Div, 1982, 108(IR3): 179~195
- 4 赵 卫. 畦灌水流的零惯性模型及其应用:[学位论文]. 北京:清华大学,1990. 59~71

①胡树森. 密云西田各庄灌区灌溉试验资料. 1989

②胡树森. 小麦地面灌水技术试验研究与应用总结. 1987