

地下排水和渗灌条件下麦田土壤水分变化模拟

朱成立,邵孝侯,J.D.Owusu

(河海大学水利水电工程学院,江苏南京 210098)

摘要 :用 Feddes 模型模拟了地下排水和渗灌条件下麦田表层土壤的水分动态变化过程.结果表明 :该模型能敏感地预测渗灌和排降后农田表层土壤的水分动态,求得根系密集层土壤含水量.

关键词 地下排水 ; 渗灌 ; 土壤水分 ; 模拟 ; 麦田

中图分类号 :S275 文献标识码 :A 文章编号 :1000-198X(2000)02-0023-04

农田土壤水分受降雨、灌溉、覆盖、地下水埋深以及作物生长等诸多因素的影响.近年来用数值模拟方法预测农田土壤水分变化受到了农田水利、水文水资源、土壤物理、农学、气象等学科研究人员的重视.本文根据江苏连云港平原稻麦轮作区麦田埋设塑料暗管后原位测定的土壤含水率、有关水分运动参数以及蒸发强度,模拟暗管渗灌和排水条件下表层土壤水分的变化规律,为暗管控制灌溉排水系统的设计提供理论依据.

1 数学模型及边界条件

1.1 数学模型

由于试区土壤呈明显的分层性,模拟时按非均质土考虑.在非均质计算域中,尽管含水量分布不连续,但基质势分布是连续的.因此,剖面上的水分运移可用 h 为变量的 Feddes(1975)方程表示:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{C(h)} \frac{\partial}{\partial Z} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial Z} + 1 \right) \right] - \frac{S(h)}{C(h)} \tag{1}$$

式中: h ——土壤基质势; $K(h)$ ——土壤导水率,在饱和土壤中为渗透系数; $C(h)$ ——土壤容水度,在饱和土壤中为常量,与给水度相等; Z ——垂直坐标,向下为正; t ——时间; $S(h)$ ——作物根系在土壤中的吸水强度.

1.2 参数的确定

1.2.1 饱和导水率的测定

饱和导水率在田间用双套环法^[1]进行了测定.0~20 cm、20~53 cm 和 53~100 cm 分别为 0.200 m/d、0.085 m/d 和 0.180 m/d.还计算了给水度,分别为 0.028、0.016 和 0.021.

1.2.2 非饱和导水率的测定

非饱和导水率 $K(h)$,在野外用定位通量法进行了测定^[2].根据实测资料可拟合成以下形式的关系式:

$$K(h) = K_s \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^n$$

式中: θ_s ——土壤饱和含水量; K_s ——土壤饱和导水率.

灌云试区不同层次土壤非饱和导水率与含水量的关系式为

0 ~ 20 cm
$$K(h) = 0.200 \left(\frac{\theta}{39.67} \right)^{3.921}$$

20 ~ 53 cm
$$K(h) = 0.085 \left(\frac{\theta}{41.57} \right)^{24.21}$$

收稿日期 :1999-07-20
基金项目 江苏省水利动力工程重点开放实验室基金资助项目(K9874);中国博士后基金资助项目(中国博士后基金委员会 1998 第 36 号文);
国家“九五”攻关项目(96-006-02-02).
作者简介 朱成立(1967—),男,江苏宝应人,讲师,硕士,主要从事农田水利工程规划和节水技术研究.

53 ~ 100 cm

$$K(h) = 0.18 \left(\frac{\theta}{37.92} \right)^{4.521}$$

1.2.3 $\alpha(h)$ 的确定

$\alpha(h)$ 表示某一含水量 θ 时,微小的土壤基质势(dh)变化而引起的土壤含水量的变化($d\theta$)值,它反映了土壤孔隙对水分的调蓄能力.利用压力薄膜仪和张计法测定结果拟合土壤水分特征曲线 $\theta \sim S$ 的关系式,进行求导便可得到 $\alpha(h)$:

$$\alpha(h) = \frac{d\theta}{dh} = - \frac{d\theta}{dS}$$

试区不同层次土壤含水量(θ)和基质吸力(S)之间的关系为

$$0 \sim 20 \text{ cm} \quad \theta = 34.34 S^{-0.878} \quad (df = 5, R^2 = 0.993)$$

$$20 \sim 53 \text{ cm} \quad \theta = 37.21 S^{-0.888} \quad (df = 5, R^2 = 0.992)$$

$$53 \sim 100 \text{ cm} \quad \theta = 34.06 S^{-0.101} \quad (df = 5, R^2 = 0.977)$$

1.2.4 根系吸水速率的选用

应用江苏连云港地区的灌溉试验资料,由彭曼公式计算值并根据试区实测的水面蒸发资料以及冬小麦的生育期,确定出各生育阶段的蒸腾蒸发量,由此估计根系吸水强度.

1.3 边界条件

试验在江苏连云港灌云县平原圩区开展,土壤属粘性潮盐中的脱盐灰低黄粘土,在田间埋设不同间距和埋深的塑料暗管,在小麦生育期实施暗管排水和渗灌.

1.3.1 初始条件

根据小麦田间实际情况,选择降雨后排水过程和渗灌过程的两种初始条件:一种是表层土壤的基质势为 α (饱和);另一种是表层土壤的基质势为 -900 kPa (干燥土壤).即

$$h(Z, 0) = 0 \quad t = 0 \quad l < Z < D \quad (2)$$

$$h(l, 0) = -9 \quad t = 0 \quad Z = l \quad (3)$$

式中 D 为土壤剖面深度.

1.3.2 上边界条件

以表层土壤的水通量作为上边界条件,分入渗和蒸发两种情形:

a. 在入渗条件下

$$-K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial t} + 1 \right) = R(t) \quad (4)$$

b. 在蒸发条件下

$$-K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial t} + 1 \right) = -E(t) \quad (5)$$

式中 $R(t)$ ——入渗强度; $E(t)$ ——蒸发强度.

根据实测数据,当

$$P(t) < 0.2 \text{ m 时} \quad R(t) = P(t) \quad (6)$$

$$P(t) > 0.2 \text{ m 时} \quad R(t) = 0.75 P(t) \quad (7)$$

式中 $P(t)$ 为降雨强度.

1.3.3 下边界条件

Feddes(1975)模型可用许多下边界条件^[3],本文以土壤不透水层深度(D)作为下边界.不透水层深度根据 Hooghoudt 公式计算,得 $D = 1.78 \text{ m}$.因此,该点处的边界条件为

$$\frac{\partial h}{\partial Z} = -1 \Rightarrow q_n = 0 \quad (Z = 0, t > 0) \quad q = -K \left(\frac{\partial h}{\partial Z} + 1 \right) \quad (8)$$

2 方程求解

采用向后差分形式,经整理后式(1)可表示为

$$-\frac{R_1}{C_i^j} K_{i-1/2}^{j+1} h_{i-1}^{j+1} + \left[1 + \frac{R_1}{C_i^j} (K_{i+1/2}^{j+1} + K_{i-1/2}^{j+1}) \right] h_i^{j+1} - \frac{R_1}{C_i^j} K_{i+1/2}^{j+1} K_{i+1/2}^{j+1} = h_i^j + \frac{R_2}{C_i^j} [K_{i+1/2}^{j+1} + K_{i-1/2}^{j+1}] - \frac{S_i^j}{C_i^j} \quad (9)$$

式中 $:K_{i+1/2}^{j+1} = \frac{K_{i+1}^{j+1} - K_i^{j+1}}{2}$; $K_{i-1/2}^{j+1} = \frac{K_i^{j+1} - K_{i-1}^{j+1}}{2}$; $R_1 = \frac{\Delta t}{(\Delta Z)^2}$; $R_2 = \frac{\Delta t}{\Delta Z}$.

对上边界条件进行差分 ,得

$$q_i = K_{i-1/2} \left[\frac{h_i^{j+1} - h_{i-1}^{j+1}}{\Delta Z} + 1 \right] \tag{10}$$

把 q_i 代入式(9) ,整理后得

$$A_i h_{i-1}^{j+1} + B_i h_i^{j+1} + D_i^{j+1} = F_i \tag{11}$$

其中 $:A_i = -\frac{R_1}{C_i^j} K_{i-1/2}^{j+1}$; $B_i = 1 + \frac{R_1}{C_i^j} (K_{i+1/2}^{j+1} + K_{i-1/2}^{j+1})$; $D_i = -K_{i+1/2}^{j+1} \frac{R_1}{C_i^j}$; $F_i = h_i^j + \frac{R_2}{C_i^j} [K_{i+1/2}^{j+1} - K_{i-1/2}^{j+1}] - \Delta t \frac{S_i^j}{C_i^j}$.

考虑到下边界条件 ,式(8)可写成

$$q_n = -K_{n+1/2} \left[\frac{h_{n+1}^{j+1} - h_n^{j+1}}{\Delta Z} + 1 \right] \tag{12}$$

把式(12)代入式(9)得

$$\left[1 + \frac{R_1}{C_n^j} K_{n-1/2}^{j+1} \right] h_n^{j+1} - \frac{R_1}{C_n^j} K_{n-1/2}^{j+1} h_{n-1}^{j+1} = h_n^j - \frac{R_2}{C_n^j} q_n - \frac{R_2}{C_n^j} K_{n-1/2}^{j+1} - \Delta t \frac{S_n^j}{C_n^j} \tag{13}$$

比较式(13)和式(11)可得

$$A_n = \frac{R_1}{C_n^j} K_{n-1/2}^{j+1} \quad B_n = 1 + \frac{R_1}{C_n^j} K_{n-1/2}^{j+1} \quad D_n = 0 \quad F_n = h_n^j - \frac{R_2}{C_n^j} q_n - \frac{R_2}{C_n^j} K_{n-1/2}^{j+1} - \Delta t \frac{S_n^j}{C_n^j}$$

联立所有参数 ,可得到三角矩阵

$$\begin{bmatrix} B_1 & D_1 & & & \\ A_2 & B_2 & D_2 & & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & \\ & & A_n & B_n & D_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1^j \\ h_2^j \\ \\ h_n^j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \\ F_n \end{bmatrix} \tag{14}$$

上述三角矩阵可用 Thomas 代数法求解 :

令 $Y_1 = \frac{F_1}{B_1}$ (15)

$$B_i = \frac{D_i}{B_i} \quad (i = 1, 2, \dots, n-1) \tag{16}$$

于是 $Y_i = \frac{F_i - A_i Y_{i-1}}{B_i - A_i B_{i-1}} \quad (i = 2, 3, \dots, n)$ (17)

所以有 $h_n^i = Y_n$ (18)

$$h_i^j = Y_i - B_i h_{i+1}^j \quad (i = n-1, n-2, \dots, 1) \tag{19}$$

用 Fortran 语言编写计算程序 ,规定 $\Delta t = 1 \text{ d}$, $\Delta Z = 1 \text{ mm}$,输入 $K(h)$, $\alpha(h)$ 以及蒸发量资料 ,就可计算出试验后连续 6 天的表层土壤基质势和相应的土壤含水量.

3 模拟结果和讨论

表 1 为灌云试区暗管埋深 0.6~0.7 m,间距 15 m 处理 ,当初始条件基质势为 -900 kPa、土壤含水量为 25.01%、渗灌 20 mm 水时连续 6 天的表层土壤含水量和基质势 ,并和实测的土壤含水量进行了比较.从表 1 可以看出 ,土壤含水量的实测值和模拟值非常接近.这说明 ,建立的数学模型和确定的有关参数是合理的.应用该模型 ,可以判断一定的外界气象条件下灌溉后农田水分的变化情况.

表 2 为初始条件土壤基质势等于 0 时田间降雨后土壤含水量的变化情况.分析表 2 可知 :雨后 1 d ,土壤仍饱和 ;雨后 1~4 d ,蒸发量大于降雨量 ,土壤表层含水量逐渐减少 ;雨后 5 d ,当降雨超过蒸发时 ,土壤又饱和 ;雨后 6 d ,当蒸发超过降雨时 ,土壤基质势和含水量又急剧下降 ,同时土壤含水量的实测值和模拟值非常吻合.这证明 ,该数学模型较好地模拟和预测了土壤水分的运动.

表 1 试区灌后表层数值模拟与实测土壤含水量

Table 1 Calculated and measured surface soil moisture contents after irrigation

灌溉后 天数 /d	基质势 模拟值 /kPa	土壤含水量 模拟值 /%	土壤含水量 实测值 /%	土壤含水量 (灌溉 + 降雨) - 蒸发 /m
1	- 65	35.81	34.3	0.152
2	- 564	29.50	29.2	- 0.050
3	- 585	29.40	28.3	- 0.025
4	- 611	29.29	27.2	- 0.021
5	- 327	30.94	28.8	0.045
6	- 829	28.52	26.2	- 0.052

表 2 试区雨后表层数值模拟与实测土壤含水量

Table 2 Calculated and measured surface soil moisture contents after rain

灌溉后 天数 /d	基质势 模拟值 /kPa	土壤含水量 模拟值 /%	土壤含水量 实测值 /%	降雨 - 蒸发 /m
1	0	46.60	45.8	- 0.45 × 10 ⁻²
2	- 121	33.77	34.8	- 0.50 × 10 ⁻¹
3	- 148	33.18	32.5	- 0.25 × 10 ⁻¹
4	- 173	32.74	32.2	- 0.22 × 10 ⁻¹
5	0	46.60	46.2	0.45 × 10 ⁻¹
6	- 336	30.88	32.9	- 0.52 × 10 ⁻¹

4 结 语

在田间试验观测和室内测定的基础上 ,应用非饱和土壤水分运动原理 ,建立了塑料暗管排降和渗灌条件下土壤水分运动的 Feddes 模型 .结果表明 ,该模型能较好地预测一定外界气象条件下灌溉排水后麦田表层土壤水分的变化过程 ,对江苏淮北稻麦轮作区小麦实施节水灌溉和麦田降渍有一定的指导意义 .

参考文献 :

[1] 邵孝侯 .长江下游低洼圩区三麦塑料暗管降渍技术与模式研究 [D] [博士学位论文].南京 :南京农业大学 ,1996 .
[2] 周维博 .降雨入渗和蒸发条件下野外层状土壤水分运动的数值模拟 [J].水利学报 ,1991 (9) 32 ~ 36 .
[3] 任理 ,李春友 ,李韵珠 .层状粘性土壤水分动态新模型的应用 [J].中国农业大学学报 ,1998 , 11 (1) 57 ~ 62 .

Simulation of Soil Moisture Fluctuation in Winter Wheat Fields
under Subdrainage and Seepage Irrigation

ZHU Cheng-li , SHAO Xiao-hou , J.D.Owusu

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering , Hohai Univ . ,Nanjing 210098 ,China)

Abstract Numerical simulation of surface soil moisture status in winter wheat fields under subdrainage and seepage irrigation is conducted based on the Feddes model. The results show that the model could predict surface soil moisture dynamic fluctuation in the fields after seepage irrigation and subdrainage. Soil moisture of root accumulating layers obtained by the model could be used to guide irrigation and subdrainage for winter wheats in the North Huai River area of Jiangsu province .

Key words subdrainage ;seepage irrigation ;soil moisture ;simulation ;winter wheat fields