

王仰仁, 李松敏, 王文龙, 等. 基于概念模型的麦田土壤水分动态模拟研究[J]. 气象, 2010, 36(12): 102-108.

# 基于概念模型的麦田土壤水分动态模拟研究<sup>\* 1</sup>

王仰仁<sup>1</sup> 李松敏<sup>1</sup> 王文龙<sup>2</sup> 孙新忠<sup>3</sup> 韩娜娜<sup>1</sup>

1 天津农学院水利工程系, 天津 300384

2 山西水利职业技术学院, 运城 030014

3 山西省运城市水利科学研究所, 运城 030014

**提 要:** 农田土壤水分模拟是农业用水管理的重要依据。以根区土体水量平衡方程为依据, 考虑根区下界面水分通量, 构建了农田土壤水分变化模拟模型, 该模型由作物蒸散量模型、根区下界面水分通量模型以及水量平衡方程等组成。采用山西水利职业技术学院试验基地 2007 年和 2008 年 2 个年度冬小麦试验资料, 确定了模型参数。结果表明, 土壤储水量模拟计算值与实测值有较好的一致性, 其相关系数达到 0.9555;  $F$  检验结果达到极显著水平, 所建立的麦田土壤水分动态模型可用于作物蒸散量、根区下界面水分通量和田间土壤水分的模拟计算; 计算精度平均达到 3%~11%。表明该模型可较好地描述农田土壤水分转化过程。

**关键词:** 土壤水分, 蒸散, 水分通量, 根区, 冬小麦

## Simulation of Dynamic Soil Moisture of Winter Wheat Based on Conceptual Model

WANG Yangren<sup>1</sup> LI Songmin<sup>1</sup> WANG Wenlong<sup>2</sup> SUN Xinzhong<sup>3</sup> HAN Nana<sup>1</sup>

1 Department of Water Conservancy Engineering, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300384

2 Shanxi Technical College of Water Conservancy, Yuncheng 030014

3 Yuncheng Water Conservancy Research Institute of Shanxi, Yuncheng 030014

**Abstract:** Simulation of dynamic soil moisture in farmland is the important basis of agricultural water management. Based on the water balance equation of root zone, and taking the lower boundary water flux of root zone into account, a farmland soil moisture simulation model was set up, including crop evapotranspiration model, lower boundary water flux model and water balance equation. The parameters of the model were fixed by the observation data of soil moisture through the winter wheat growing season in the irrigation experimental base of Shanxi Technical College of Water Conservancy in 2007 and 2008. The soil moisture simulated by the model agreed well with the measured ones, the multiple correlation coefficient reached 0.9555; and the  $F$  test reached extremely significance level. The established farmland soil moisture simulation model can be used to calculate crop evapotranspiration, lower boundary water flux in root zone and field soil moisture; and the mean calculation precision can reach 3%—11%. The result shows that the model deals well with the field soil water transform process.

**Key words:** soil moisture, evapotranspiration, water flux, root zone, winter wheat

\* 国家自然科学基金项目(编号:50679055)资助

2009 年 10 月 29 日收稿; 2010 年 4 月 11 日收修定稿

第一作者: 王仰仁, 主要从事灌溉排水新技术研究. Email: wyrf@163.com

## 引 言

农田土壤水分是影响作物生长及产量的重要环境因子,也是分析研究农田水循环的一个重要因素。特别是在农业灌溉用水不足的条件下,准确掌握农田土壤水分变化动态,有助于合理确定作物的灌水时间,提高有限灌溉供水量的利用效率。

农田土壤水分变化动态的分析研究,一直是农业和水利学者们关心的一个重要问题。对此人们已提出了多种分析方法,建立了不同类型的土壤水分变化模拟模型。其中土壤水动力学模型具有严格的理论基础<sup>[1]</sup>,能够给出农田土壤剖面含水量的时空变化特征,是进行土壤水分蒸发、入渗、土壤溶质运移等农田物质能量转化研究的基本依据。但是,在通常情况下人们更多地关心根区或称为根土层土壤水分平均值的变化,为此,许多学者致力于农田土壤水分变化概念性模型的研究<sup>[2-8]</sup>,并由此为水文循环等研究提供依据<sup>[9]</sup>。本文以山西水利职业技术学院试验基地 2007 年和 2008 年冬小麦试验资料分析建立了麦田土壤水分变化模拟模型。

## 1 模型描述

模型以作物根区土体为研究对象,依据水量平衡方程分析作物蒸散、降水、灌水、深层土壤水分补给以及深层渗漏等对土壤水分变化动态的影响。田间土壤水分变化动态模拟模型主要由作物蒸散模型、根区下界面水分通量模型和根区土壤水量平衡方程组成。

### 1.1 根区水量平衡方程

根区水量包括时段内进入根区的降水量、灌水量、通过根区下界面向根区补给的水量、时段初土壤的储水量、地表径流量,时段内流出根区的水量,包括作物蒸散量、通过根区下界面流出根区的水量、地表径流量以及时段末土壤储水量等,在农田条件下,地表径流量一般较小,常忽略不计。

时段 $[t_0, t_1]$ 内根区土体单元水量平衡方程如下,

$$W_1 - W_0 = \sum P + \sum IR - \int_{t_0}^{t_1} ET dt - \int_{t_0}^{t_1} q dt \quad (1)$$

式中: $W_0$  为时段初( $t_0$ )的土壤储水量,单位:mm; $W_1$  为时段末( $t_1$ )的土壤储水量,单位:mm; $\sum P$  为时段内的降水量,单位:mm; $\sum IR$  为时段内的灌水量,单位:mm; $ET$  为作物蒸散量,单位:mm·d<sup>-1</sup>; $q$  为根区下界面水分通量,向下为正,单位:mm·d<sup>-1</sup>。

### 1.2 作物蒸散模型

作物蒸散量是指作物叶面蒸腾和棵间土壤蒸发量之和。由于田间条件下作物蒸腾和蒸发难以区分,因而常将两者合并计算,称为作物蒸散量。依据根区土壤水分大小可将作物蒸散的计算分为两种情况,一种是充分供水条件下的作物蒸散量的计算,一种是非充分供水条件下的作物蒸散量的计算。用分段函数表示如下<sup>[4]</sup>,

$$ET = \begin{cases} K_c \cdot ET_0 & \theta \geq \theta_j \\ K_\theta \cdot K_c \cdot ET_0 & \theta_{wp} \leq \theta < \theta_j \end{cases} \quad (2)$$

式中: $ET$  为作物蒸散量,单位:mm·d<sup>-1</sup>; $ET_0$  为参考作物蒸散量,单位:mm·d<sup>-1</sup>; $K_c$  为作物系数; $K_\theta$  为土壤水分修正系数。其中参考作物蒸散采用 FAO 1998 年推荐的 FAO Penman-Monteith 公式<sup>[2]</sup>计算,

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (3)$$

式中: $R_n$  为作物冠层顶的净辐射,单位:MJ·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>; $G$  为土壤热流强度,单位:MJ·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>; $T$  为 2 m 高度处的日平均气温,单位:°C; $u_2$  为 2 m 高度处的风速,单位:m·s<sup>-1</sup>; $\gamma$  为湿度计常数,单位:kPa·°C<sup>-1</sup>; $\Delta$  为饱和水汽压—温度曲线斜率,单位:kPa·°C<sup>-1</sup>; $e_s$  为气温为  $T$  时的饱和蒸汽压,单位:kPa; $e_a$  为气温为  $T$  时的实际蒸汽压,单位:kPa;其余符号意义同前。

土壤水分修正系数是根区土壤水分的函数,可用下式计算<sup>[1]</sup>,

$$K_\theta = \begin{cases} 1 & \theta_j \leq \theta \\ \left( \frac{\theta - \theta_{wp}}{\theta_j - \theta_{wp}} \right)^n & \theta_{wp} \leq \theta < \theta_j \\ 0 & \theta < \theta_{wp} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\theta$  为作物根区实际含水率,单位:%(以体积含水率表示,下同); $\theta_{wp}$  为土壤凋萎点含水率,单位:%; $\theta_j$  为蒸散开始受土壤含水量影响时的临界含水量,单位:%,令  $\theta_j = B_j \theta_f$ , $\theta_f$  为作物根区最大田间持水率,单位:%; $B_j$  为与  $\theta_j$  相对应的系数; $n$  为经

验指数,由实测资料分析求得。

作物系数反应了作物生长特性对蒸散的影响,随生育阶段不同而变化。参照 FAO 推荐的分段单值平均作物系数法及其相应的阶段划分方法,将冬小麦生育期划分为初始生长期、快速发育期、生育中期、成熟期等四个时期<sup>[5]</sup>,其中初始生长期包括了苗期、冬前分蘖期和冻融期等三个时期。对快速发育期和成熟期作物系数的变化采用曲线表示,其他两个时期用常数表示。据此本文给出全生育期作物系数的变化过程表达式,

$$K_c = \begin{cases} K_{c_{\min}} & 0 \leq t < t_1 \\ a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 & t_1 \leq t < t_2 \\ K_{c_{\max}} & t_2 \leq t < t_3 \\ b_0 + b_1 t + b_2 t^2 & t_3 \leq t \leq t_4 \end{cases} \quad (5)$$

式中  $K_{c_{\min}}$  为初始生长期的作物系数;  $K_{c_{\max}}$  为生育中期的作物系数;  $t_1, t_2, t_3, t_4$  为与作物系数变化相对应的累积天数,其中  $t_4$  为全生育期生长天数;  $a_0, a_1, a_2, a_3, b_0, b_1, b_2$  为模型参数,其中  $a_0, a_1, a_2, a_3$  和  $b_0, b_1, b_2$  中的 6 个参数可利用作物生长连续性的特点由其他参数求得。

根据作物生长的连续性,在  $t=t_1, t_2, t_3$  处,作物系数分别为  $K_{c_{\min}}, K_{c_{\max}}$  和  $K_{c_{\max}}$ ,且作物系数的曲线应该是光滑的,亦即,三点处的导数应该等于零,  $\left. \frac{dK_c}{dt} \right|_{t=t_1} = 0, \left. \frac{dK_c}{dt} \right|_{t=t_2} = 0, \left. \frac{dK_c}{dt} \right|_{t=t_3} = 0$ 。由这 6 个条件可求得确定待定参数相互关系的 6 个关系式:

$$a_3 = \frac{K_{c_{\max}} - K_{c_{\min}}}{t_2^3 - t_1^3 + 3t_1 t_2 (t_2 - t_1) - 1.5(t_2 - t_1)(t_2 + t_1)^2} \quad (6)$$

$$a_2 = -1.5a_3(t_2 + t_1) \quad (7)$$

$$a_1 = 3t_1 t_2 a_3 \quad (8)$$

$$a_0 = K_{c_{\max}} - a_3 t_2^3 - a_2 t_2^2 - a_1 t_2 \quad (9)$$

$$b_0 = K_{c_{\max}} + b_2 t_3^2 \quad (10)$$

$$b_1 = -2b_2 t_3 \quad (11)$$

由此可见,参数  $a_0, a_1, a_2, a_3$  和  $b_0, b_1$  可由参数  $K_{c_{\min}}, K_{c_{\max}}, t_1, t_2, t_3, b_2$  确定。从而减少待定参数的个数。其中  $t_1, t_2, t_3$  根据 FAO 阶段划分方法确定,对本试区  $t_1 = 140, t_2 = 200, t_3 = 225$  d。因而,作物系数模型的待定参数只有  $K_{c_{\min}}, K_{c_{\max}}$  和  $b_2$  3 个。

### 1.3 根区下界面水分通量模型

根区下界面水分通量是单位时间通过根区下界

面单位面积向上或向下运移的土壤水量。可用下式表示<sup>[6,8]</sup>

$$q = a \left( \frac{W}{W_f} \right)^d (W - W_c) \quad (12)$$

式中:  $a, d$  为待定参数;  $W$  为根区土壤储水量,单位: mm;  $W_f$  为根区土壤田间持水量,单位: mm;  $W_c$  为根区临界土壤储水量,单位: mm; 其中  $W = 10\gamma H\theta, W_f = 10\gamma H\theta_f, W_c = 10\gamma H\theta_c$ ,  $\theta, \theta_f$  和  $\theta_c$  分别为与  $W, W_f$  和  $W_c$  相对应的土壤体积含水率,单位: %;  $H$  为根区深度,单位: m。本文研究中取  $H = 1$  m。

根区临界储水量  $W_c$  是估算根区下界面水分通量的一个重要参数,由式(12)可见,当根区土壤储水量  $W$  大于临界储水量  $W_c$  时,根区下界面水分通量方向向下,当根区土壤储水量小于临界储水量时,根区下界面水分通量方向向上,当  $W = W_c$  时,通量为零。临界储水量  $W_c$  主要与地下水埋深有关,理论上,可利用土壤水分特征曲线确定临界储水量与地下水埋深的关系,

$$W_c = a_c L_w^{b_c} \quad (13)$$

式中,  $W_c$  的单位为 mm,地下水埋深  $L_w$  单位为 m,  $a_c, b_c$  为待定参数。考虑本试区土壤质地,取  $a_c = 385.11, b_c = -0.172$ <sup>[5]</sup>。若地下水埋深较深( $L_w > 5$ ),  $W_c$  可取为常数。

## 2 材料与方法

### 2.1 模型参数辨识方法

采用最小二乘法进行参数辨识。设选择一组土壤水分观测值  $[W_{11}, W_{21}]$ ,  $W_{11}$  和  $W_{21}$  分别为某一时段  $[t_1, t_2]$  初和末的土壤储水量,假定一组参数,用式(1)至式(13)从时段初开始逐日计算,直到计算出时段末的土壤储水量  $\hat{W}_{21}$ ,与时段末实测的土壤储水量  $W_{21}$  比较,可求得误差  $\hat{W}_{21} - W_{21}$ ,如此进行,选出第 2 组、第 3 组、……、第  $k$  组土壤储水量  $[W_{12}, W_{22}], [W_{13}, W_{23}], \dots, [W_{1k}, W_{2k}]$ ,同样利用式(1)至式(13)可求得相应土壤储水量实测值与计算值的误差。这里时段初是指播种日,因而各时段初始土壤储水量均指播种时的土壤储水量。假设有  $L$  个处理,其中第 1 个处理全生育期测试土壤水分  $K_1 + 1$  次,则该处理有  $K_1$  组土壤储水量,第  $L$  个处理全生育期测试土壤水分  $K_L + 1$  次,则该处理有  $K_L$  组土壤储水量。 $L$  个处理共有  $m = K_1 + K_2 + \dots + K_L$

组土壤储水量。利用最小二乘法,即使得误差平方和  $SS$  最小,

$$SS = \min \sum_{i=1}^m (\hat{W}_{2i} - W_{2i})^2 \quad (14)$$

式中: $i$  为时段编号,下脚标 2 表示时段末,即  $W_{2i}$  和  $\hat{W}_{2i}$  为第  $i$  个时段实测的土壤储水量和计算的土壤储水量; $m$  为时段总数。根据最小二乘法原理,参数优选目标是使实测的土壤储水量与模型计算的土壤储水量误差最小。由于式(14)的非线性特性,参数优选不能采用解析法,必须采用非线性优化方法。本文采用坐标轮换法<sup>[10]</sup>及 Excel 软件提供的规划求解工具进行参数优化。

## 2.2 资料及其测试方法

试验区位于山西省南部的运城市盐湖区,34°48'27"N、110°41'23"E,海拔 370 m。年平均降雨量 559.3 mm,年平均日照时数 2247.4 h,年平均气温 13.6 °C,全年无霜期 208 d 左右。试验区土壤属于中壤土,土壤有机质为 10.39 g·kg<sup>-1</sup>,全氮量为 0.5 g·kg<sup>-1</sup>,全磷为 0.5 g·kg<sup>-1</sup>。0~100 cm 和 100~160 cm 土层的土壤容重均为 1.45 g·cm<sup>-3</sup>,田间持水率为 22%(占干土重的%),地下水埋深大于 6 m。

试验作物为冬小麦,设置 4 个小区试验处理,见表 1 处理 1 至处理 4。每个处理设 3 个重复,且 3 个重复相邻布置,小区面积 66 m<sup>2</sup>,小区之间不设隔离区,整个试区周边须设置保护区。同时设置 3 个大田对照处理,见表 1 处理 5 至处理 7。采用畦灌,畦幅规格:3.3 m×20 m=66 m<sup>2</sup>。管道输水灌溉,水表量水。

表 1 试验处理设计  
Table 1 Design of experiments

处理 编号	处理内容	灌水/mm	
		次数	灌溉定额
1	中等灌水,灌水时间为冬水、拔节水和灌浆水	3	225
2	灌水次数较处理 1 减少 1 次(拔节水)	2	150
3	灌水次数较处理 1 增加 1 次(抽穗水)	4	300
4	不灌水	0	0
5	中等灌水,灌水时间为冬水、拔节水和抽穗水。	3	225
6	中等灌水,拔节水较处理 5 推后 15 天,其余灌水同处理 5	3	225
7	中等灌水,抽穗水较处理 5 推后 15 天,其余灌水同处理 5	3	225

用中子仪测试土壤水分,从地表开始,每 20 cm 一层,直到 160 cm。测试时间为播种、收获、灌水前后,以及重要的生育期等。2006—2007 年和 2007—2008 年二个年度试验期间共测试土壤含水率 117 次。其中 2007 年度于 2006 年 10 月 11 日播种,于 2007 年 5 月 28 日收获;2008 年度试验于 2007 年 10 月 16 日播种,于 2008 年 5 月 29 日收获,两个年度均采用邯邯 6172 品种。施肥水平同当地农户。实际灌水时间,2007 年度冬水为 1 月 18 日,拔节水为 3 月 23 日,抽穗水为 4 月 22 日,灌浆水 5 月 5 日;2008 年度冬水为 12 月 20 日,拔节水为 3 月 28 日,抽穗水为 4 月 22 日,灌浆水 5 月 6 日。

## 3 结果分析

### 3.1 待定参数初始值的确定及参数优化结果

由式(1)~(13)可知,麦田土壤水分动态模拟模型的待定参数有 14 个,其中需要优化确定的参数有 8 个(表 2)。待定参数  $a, d, W_c, n, B_j$  初始值的确定参照王仰仁等的研究<sup>[6]</sup>, $K_{cmin}, K_{cmax}, t_1, t_2, t_3$  的确定参照段爱旺等的研究<sup>[5]</sup>,结果见表 2。对于根区临界储水量  $W_c$ ,由于地下水埋深较大,在参数优选过程中取为常数,参照式(12),初始值取  $385 \times 6^{-0.172} = 282$  mm。在灌溉条件下,冬小麦根区深度取 1 m。参数优选结果见表 2。由式(5)~(10)可求得  $a_0 = 27.4717, a_1 = -0.5012, a_2 = 3.04 \times 10^{-3}, a_3 = -5.97 \times 10^{-6}, b_0 = -12.0973, b_1 = 0.1184$ 。

表 2 冬小麦田间水分转化模型参数优选结果

Table 2 Model parameters of field soil water transformation for winter wheat

待定参数	初始值	优选值
$a$	0.065	0.5917
$d$	3.37	12.9241
$W_c/mm$	282	259.8
$K_{cmin}$	0.60	0.5742
$K_{cmax}$	1.14	1.2185
$b_2$	-0.01	-2.63E-04
$n$	0.5	1.0
$B_j$	0.5	0.6988
SS		15646.5
标准误 $\sigma/mm$		11.87
相关系数 $R$		0.9555
$F$ 值		139.56

### 3.2 拟合精度检验

采用标准误差( $\sigma$ )、复相关系数( $R$ )和模拟计算

值与实测值散点图(图 1)对拟合精度进行评价,采用  $F$  检验法对拟合模型进行检验,相应的计算公式见式(15)~(16),其计算结果见表 2。由表 2 可见土壤储水量模拟计算值与实测值的复相关系数  $R$  达到 0.9555,  $F=139.56 > F_{0.001}=3.55$ , 表示模拟值与实测值有较好的一致性,所建立的麦田土壤水分动态模拟模型达到极显著水平,可用于麦田土壤水分变化动态的模拟计算。其标准误差为 11.87 mm, 占土壤储水量的 3%~11%。

$$\sigma = \sqrt{\frac{SS}{m-p-1}} \quad (15)$$

$$R^2 = 1 - \frac{SS}{ST} \quad (16)$$

式中  $ST$  为总平方和,  $ST = \sum_{i=1}^m (W_i - \bar{W})^2$ ,  $\bar{W} =$

$\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m W_i$ ;  $p$  为待定参数的个数,其余符号意义同前。

由图 1 可见,(1)模拟计算值与实测值拟合直线非常接近于通过原点的 45° 直线,表明参数优选结果是较好的;(2)但是,在土壤储水量较小时拟合误差相对较大,其原因有待进一步研究。

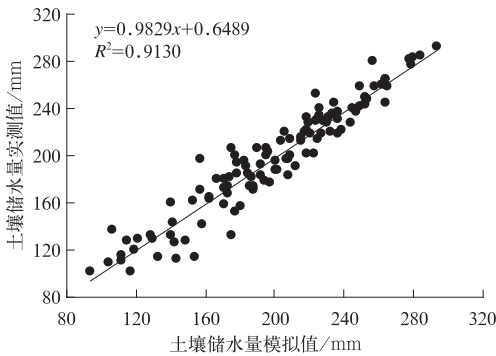


图 1 冬小麦根区土壤储水量模拟计算值与实测值比较散点图

Fig. 1 Relationship between measured and simulated soil moisture storage of root zone for winter wheat

### 3.3 独立样本精度检验

为了检验上述模型及其参数的合理性,图 2 给出了本试区同期大田试验(试验小区面积为 334 m<sup>2</sup>)处理土壤水分模拟值和实测值比较的散点图。由图 2 可见,大田试验处理模拟计算的土壤储水量与实测的土壤储水量非常接近。但是,在土壤含水量较小时预测误差较大,其原因有待进一步研究。

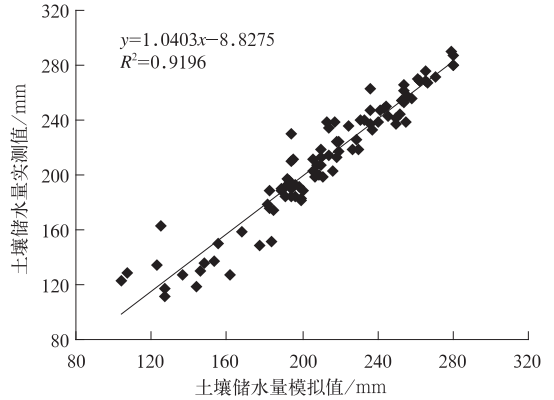


图 2 大田试验冬小麦根区土壤储水量模拟值与实测值比较散点图

Fig. 2 Relationship between measured and simulated soil moisture storage of root zone for winter wheat under field scale experiment

### 3.4 土壤水分修正系数的变化过程

图 3 以 2008 年度试验中中等灌水(处理 1)和不灌水(处理 4)为例,给出了冬小麦全生育期土壤水分修正系数随时间的变化过程。由图可见,(1)灌水处理的土壤水分较高,土壤水分修正系数保持了较大值,不灌水的处理则呈现持续减小的趋势,表明作物生长处于水分胁迫状态;(2)在同样灌水定额条件下,前期灌水可维持较长时间使得土壤水分修正系数等于 1,后期则维持时间较短,主要原因是冬小麦前期耗水强度较小,后期耗水强度较大,表明后期灌水时间间隔不宜过长,以保证作物尽可能少地遭受水分胁迫。

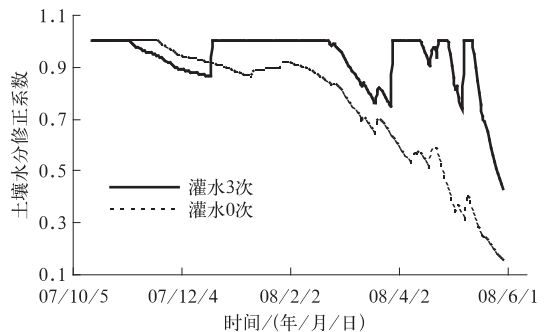


图 3 2008 年度灌水 3 次和灌水 0 次处理土壤水分修正系数变化过程

Fig. 3 Variation of modified coefficient of soil moisture between 3 irrigation times and no irrigation in 2008

### 3.5 根区下界面水分通量变化过程

图 4 仍以 2008 年度试验中中等灌水(处理 1)和

不灌水(处理 4)为例,给出了冬小麦全生育期根区下界面水分通量随时间的变化过程。由图可见,(1)不灌水处理除初期因土壤水较高产生向下的水分通量外,整个生育期根区下界面水分通量均为负值,表明有深层水分向根区补给;(2)对于灌水处理,尽管 3 次灌水的灌水定额相同,但是只在第一次灌水和第二次灌水后出现了两次向下的水分运移过程,第一次水分运移过程由 2007 年 12 月 21 日(灌水后)开始,一直持续到 2008 年 1 月 9 日,其中最大的水分通量达到  $13 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ,累计向下运移的水量达  $31.0 \text{ mm}$ ;第二次水分运移过程由 2008 年 3 月 29 日开始,到 2008 年 4 月 2 日结束,其中最大的水分通量达到  $1.62 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ,累计向下运移的水量达  $3.3 \text{ mm}$ ;第 3 次灌水,不仅没有产生向下的水分通量,而且增大了向上的水分通量(由灌水前的  $0.012 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$  增大到  $0.292 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ )。主要原因是 3 次灌水前的土壤储水量(从前到后依次为  $228 \text{ mm}$ 、 $207 \text{ mm}$ 、 $166 \text{ mm}$ )不同。

由此可见,依据土壤水分选择合适的灌水时间,可显著减小向深层运移的水量,提高用水效率;(3)在冬小麦生长期,除因灌水会造成短时间向下的水分运移过程外,绝大部分时间的根区下界面水分通量均呈现向上的运移过程,主要原因是冬小麦生长期降水量小,耗水强度大。

表 3 是 2 个年度冬小麦全生育期田间水分转化结果和产量。其中产量、灌水量和播前土壤含水率为实测值,蒸散量和水分通量为模拟计算值。分析计算表明,2 个年度冬小麦生长期降水量非常接近,2007 年度为  $102 \text{ mm}$ ,2008 年度为  $106 \text{ mm}$ ;参考作物的蒸散量有一定差异,其中 2007 年度为  $588 \text{ mm}$ ,2008 年度为  $565 \text{ mm}$ 。由表 3 可见,(1)在同等供水条件下,2007 年度冬小麦蒸散量均小于 2008 年度的值,其中一个重要原因是 2007 年度播种时的土壤含水率较低,相应的产量也较低。表明播前土壤含水量对作物产量和蒸散量有较大影响;(2)二个年度均有向上的根区下界面水分通量,且 2008 年度的值大于 2007 年度,主要原因是 2008 年度深层土壤含水量较大,播种时  $100 \sim 160 \text{ cm}$  土层的含水率较 2007 年度平均高  $6.0\%$ 。

### 3.6 产量与作物蒸散量的关系

作物产量与全生育期蒸散量有非常好的一致性(见表 3),即产量随蒸散量的增加而增大。图 5 是以相对值给出的相对产量与相对蒸散量关系,其中纵坐标相对产量是以年度内最大产量为分母,横坐标以相应的最大蒸散量做分母求得相对蒸散量。由图可见,相对产量与相对蒸散量呈现二次抛物线关系,其复相关系数( $R^2$ )到达  $0.9972$ 。表明模拟计算的蒸散量能够较好地反映水分对作物产量的影响。

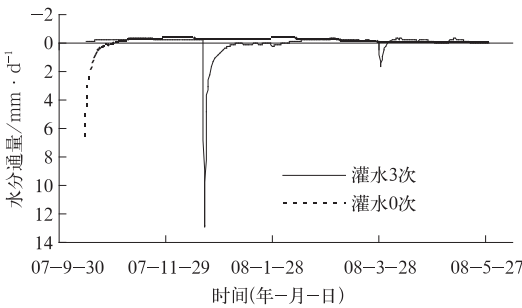


图 4 2008 年度灌水 3 次和灌水 0 次处理根区下界面水分通量变化过程

Fig. 4 Variation of water flux through bottom of root zone between 3 irrigation times and no irrigation in 2008

表 3 冬小麦田间水分转化及其与产量的关系

Table 3 Field water transformation and its relationship with yield for winter wheat

试验年度	处理名称	灌水量/mm	播种时土壤水分/%		产量/ $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$	蒸散量/mm	水分通量(向下为正)/ $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$		
			0~1.0 m	1.0~1.6 m			$q$	$q$	合计
2007	1	225	19.1	17.3	3.152	401	26.0	-29.1	-3.1
	2	150	18.6	15.7	2.702	348	0	-27.5	-27.5
	3	300	17.4	17.5	3.362	455	18.3	-28.3	-10.0
	4	0	21.5	18.7	0.863	248	0	-24.7	-24.7
2008	1	225	25.8	22.8	4.803	464	22.9	-36.6	-13.6
	2	150	28.4	23.5	4.098	387	40.1	-27.2	12.9
	3	300	26.4	21.0	5.139	519	65.5	-35.4	30.0
	4	0	29.3	27.8	2.229	311	16.4	-34.1	-17.7

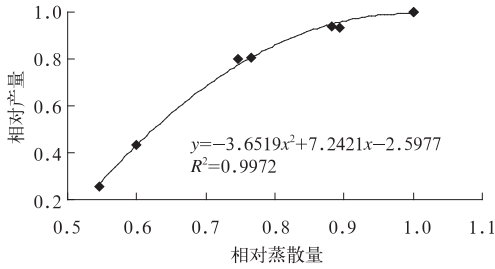


图 5 产量与作物蒸散量的关系

Fig. 5 Relationship between evapotranspiration and yield for winter wheat

## 4 小 结

(1) 土壤储水量模拟计算值与实测值有较好的一致性,拟合精度和预测精度均较高,其模拟计算值和实测值的相关系数达到 0.95 以上,所建立的麦田土壤水分变化模拟模型可用于田间土壤水分的模拟计算,计算精度平均可达到 3%~11%;

(2) 该模型较好地反映了农田土壤水分转化过程,以及降水、蒸发和深层土壤水分对作物蒸散及产量的影响;

(3) 模拟计算的蒸散量能够较好地反映水分对

作物产量的影响。

## 参考文献

- [1] 雷志栋,杨诗秀,谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京:清华大学出版社,1988:282-303.
- [2] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration guidelines for computing water requirements[J]. FAO Irrigation and Drainage Paper 56,1998:161-173.
- [3] 祝新建,王新红,张红卫,等. 河南省获嘉县农田水分供需特征及秸秆覆盖效果分析[J]. 气象, 2009,35(9):98-103.
- [4] 康绍忠,刘晓明,熊运章. 土壤-植物-大气连续体水分传输理论及其应用[M]. 北京:水利电力出版社,1994:131-137.
- [5] 段爱旺,孙景生,刘钰,等. 北方地区主要农作物灌溉用水定额[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2004:52-80.
- [6] 王仰仁,孙小平. 供水不足条件下作物蒸散量的计算[A]. 山西农业节水理论与作物高效用水模式[M]. 北京:中国科学技术出版社,2003:65-95.
- [7] 王仰仁,孙书洪,叶澜涛,等. 农田土壤水分二区模型的研究[J]. 水利学报,2009,40(8):904-909.
- [8] 尚松浩,毛晓敏,雷志栋. 土壤水分动态模拟模型及其应用[M]. 北京:科学出版社,2009:24-38.
- [9] 夏智宏,周月华,许红梅. 基于 SWAT 模型的汉江流域径流模拟[J]. 气象, 2009,35(9):59-67.
- [10] 尚松浩. 水资源系统分析方法及应用[M]. 北京:清华大学出版社,2006:80-88.