

# 农田墒情动态二区模拟模型

朱新国<sup>1,2</sup>, 张展羽<sup>2</sup>, 刘莉<sup>3</sup>

(1. 宁波市农村水利管理处, 宁波 315016; 2. 河海大学水利水电学院, 江苏 210098;  
3. 宿迁市水务局, 宿迁 223800)

**摘要:** 为准确模拟土壤计划湿润层内墒情动态变化, 基于土壤-植物-大气连续体物质能量运动及土壤水动力学的基本理论, 考虑作物根系伸展和吸水特性, 把土壤水分变化土层划分为随作物根系伸展而改变深度的包含主要根系的动态根区和无根系的储水区, 构建了变根区墒情动态二区模型。模型根区深度随着作物根系伸展改变, 以此准确表达土壤计划湿润层内墒情的动态变化; 将储水区的土壤水分作为模型变量, 计算根区下界面水分通量, 由此间接地考虑了深层土壤水分对作物蒸发蒸腾量的影响。将模型拟合误差作为目标函数, 采用自由搜索算法率定模型参数。应用建立的模型进行墒情模拟, 模拟相对误差小于±5%和±10%所占的比例分别为49.09%和94.55%; 经t检验和回归分析表明预测值和实测值相差不大, 具有较好的一致性, 决定系数为0.779, 模型具有较高的模拟精度, 能准确反映计划湿润层内墒情的变化。

**关键词:** 模型, 土壤水分, 动力学, 墒情模拟, 根系伸展

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.04.017

中图分类号: S152.7

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-04-0106-05

朱新国, 张展羽, 刘莉. 农田墒情动态二区模拟模型[J]. 农业工程学报, 2012, 28(4): 106—110.

Zhu Xinguo, Zhang Zhanyu, Liu Li. Dynamic two-zone balance model for simulating soil moisture[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(4): 106—110. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

农田土壤水及其转化是降水、地表水、地下水相互转化过程中的中心环节, 对于水土资源的可持续利用和农业生产的可持续发展有着重大的理论和实践意义。长期以来, 国内外许多专家学者致力于农田土壤水分变化规律<sup>[1-2]</sup>及模拟模型<sup>[3-13]</sup>的研究。农田土壤水分模拟模型主要有机理性模型<sup>[5-7]</sup>和概念性模型<sup>[8]</sup>, 其中概念性模型可分为2类, 第1类以根区土壤含水量为自变量, 未考虑根区下界面的水分通量<sup>[9]</sup>, 第2类模型中引入了根区下界面水分通量<sup>[10-11]</sup>, 郭群善等<sup>[12]</sup>根据土壤水分特征曲线的概念, 引入了1个根区临界土壤储水量参数, 构建了第2类概念性模型, 王仰仁等<sup>[13]</sup>以根区下界面水分通量描述二区之间的水分运移, 参照非饱和土壤水运动达西定律, 在根区下界面水分通量模型中引入了根区土壤水分和储水区土壤水分2个自变量。

本文首次提出了1个新的农田土壤水分概念性模型—墒情动态二区模型, 该模型把农田土壤水分活动区土层划分为2个区, 一个是包含根系的动态根区, 另一个是不包含根系的动态储水区, 各层的深度随作物根系生长而变化。模型以作物根系伸展函数描述根区深度的变化, 以根区下界面水分通量描述二区之间的水分运移, 基于SPAC (soil-plant-atmosphere

continuum) 理论、非饱和土壤水运动达西定律原理, 引入了根区土壤水分和储水区土壤水分两个自变量。在实验的基础上, 应用自由搜索<sup>[14-15]</sup>智能优化算法求解了模型参数, 优化模型对土壤水分动态的模拟和预测精度较高, 能直接反映计划湿润层内墒情的变化, 以期对墒情动态模拟提供了1种新思路, 为灌溉预报和节水灌溉预报的决策提供依据。

## 1 墒情动态二区模型

### 1.1 模型原理

墒情动态二区模型基于土壤-植物-大气连续体水分运动原理和土壤水动力学理论, 根据作物根系活动层与无根系土层中土壤水分运动形态的不同, 把农田土壤剖面分为随作物根系伸展而变化的根区和储水区2部分, 模型结构见图1。

模型中作物根系活动区域土层被视为1个根区整体系统, 输入项有降水量、灌水量、因根系层增加而增加的水量以及根区下界面水分通量; 输出项为作物蒸发蒸腾量。无根系土层输入项为储水区下界面水分通量; 输出项为因储水区减少而减少的水量和根区下界面水分通量。模型中根区增长取决于作物根系生长, 作物根系不同生育期根系所达到的深度, 随作物生育期改变。

在时段 $[0, t]$  ( $t$ 以天计), 根区土壤水量平衡方程

$$10H_{1t}\theta_{1t} = 10H_{10}\theta_{10} + q_1 \cdot t + P_e + 10\Delta H_t\theta_{20} + I - ET \cdot t \quad (1)$$

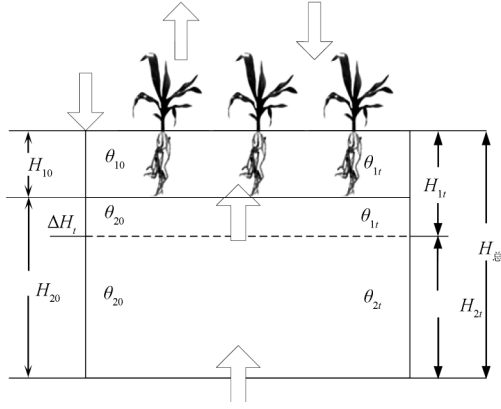
储水区水量平衡方程如下

$$10H_{2t}\theta_{2t} = 10H_{20}\theta_{20} + q_2 \cdot t - 10\Delta H_t\theta_{20} - q_1 \cdot t \quad (2)$$

收稿日期: 2011-06-17 修订日期: 2011-12-13

基金项目: 农业部公益性行业科研经费项目 (200903001-05)

作者简介: 朱新国 (1982—), 男, 江苏泰兴人, 工程师, 博士, 主要从事农业水土方面的研究。宁波 宁波市农村水利管理处, 315016。



注:  $\theta_{10}$  和  $\theta_{1t}$  分别为时段初和时段末根区土壤含水率 (以体积含水率表示,  $\text{m}^3/\text{m}^3$ , 下同);  $t$  为时间, d;  $\theta_{20}$  和  $\theta_{2t}$  分别为储水区时段初和末的土壤含水率;  $H_{10}$  和  $H_{1t}$  分别为时段初和时段末根区土层厚度, cm;  $\Delta H_1$  为时段根区增加的厚度 (相当于时段根系增长), cm;  $H_{20}$  和  $H_{2t}$  分别为时段初和时段末储水区土层厚度, cm;  $\Delta H_1 \theta_2$  代表时段内增加的根区土层的土壤含水量, cm, 但是时段末增加的根区土层的土壤含水量是不知道的, 这里假设其值与时段初储水区的土壤含水率相同。取时段  $t=1$  d 时,  $P_e$  和  $I$  分别为日有效降水量和灌水定额, mm;  $q_1$  为根区下界面日水分通量, mm/d, 向上为正;  $q_2$  为储水区下界面日水分通量, mm/d, 向上为正;  $ET$  为作物蒸发蒸腾量, mm/d。图 1 中根区和储水区总深度为  $H_s$ , cm。

图 1 土壤水平衡示意图

Fig.1 Schematic presentation of components of soil water balance model

#### 1.1.1 根区下界面水分通量 $q_1$

本研究中通过简化非饱和土壤水运动达西定律获得根区下界面水分通量, 非饱和土壤水运动达西定律如下式

$$q_1 = D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} - K(\theta) \quad (3)$$

式中,  $\theta$  为根区下界面处的土壤含水率;  $D(\theta)$  为非饱和土壤水扩散率,  $\text{mm}^2/\text{d}$ ;  $K(\theta)$  为非饱和土壤导水率,  $\text{mm}/\text{d}$ ;  $z$  为土壤水的高度, mm。根据已有的旱作田间土壤水分测试结果和相关计算, 正常灌溉条件下, 根区下界面处的  $K(\theta) < 10^{-1} \text{ mm}/\text{d}$ , 且小于  $D(\theta) \left| \frac{\partial \theta}{\partial z} \right|$ , 2 者的比值介于

$10^{-1} \sim 10^{-3}$  之间<sup>[13]</sup>, 本研究建立的概念性模型中忽略  $K(\theta)$ 。根区下界面处土壤水分变化较小,  $D(\theta)$  随土壤水分变化的

幅度也较小, 可近似地以  $k_1 \left[ \frac{\theta_{10} H_{10} + \theta_{20} H_{20}}{H_{10} + H_{20}} \right]$  表示  $D(\theta)$ ,

以  $\frac{\theta_{20} - \theta_{10}}{(H_{10} + H_{20})/2}$  表示  $\frac{\partial \theta}{\partial z}$ , 最后可得根区下界面水分通量的表达式

$$q_1 = k_1 \left[ \frac{\theta_{10} H_{10} + \theta_{20} H_{20}}{H_{10} + H_{20}} \right] \cdot \left[ \frac{\theta_{20} - \theta_{10}}{(H_{10} + H_{20})/2} \right] \quad (4)$$

式中:  $k_1$  为待定参数, 描述根区下界面水分通量。

#### 1.1.2 储水区下界面水分通量 $q_2$

参照式 (4) 可写出  $q_2$  计算公式如下

$$q_2 = k_2' \left[ \frac{\theta_{20} H_{20} + \theta_{30} H_3}{H_{20} + H_3} \right] \cdot \left[ \frac{\theta_{30} - \theta_{20}}{(H_{20} + H_3)/2} \right] \quad (5)$$

式中,  $H_3$  为储水区以下的深层土壤的厚度, cm;  $\theta_{30}$  为储

水区以下的深层土壤的含水率;  $k_2'$  为储水区下界面水分通量参数; 其余符号意义同上。本模型中忽略深层土壤水分变化对作物蒸发蒸腾的影响, 即式 (5) 中取  $\theta_{30} = \theta_{c2}$ ,  $H_3 = 0$ , 同时令  $k_2 = 2k_2' / H_{20}$ , 可得

$$q_2 = k_2 \theta_{20} (\theta_{c2} - \theta_{20}) \quad (6)$$

式中,  $k_2$  为待定参数。由式 (6) 可知,  $\theta_{c2}$  一定程度上反映了深层土壤水分对作物蒸发蒸腾的影响, 可称为储水区的临界土壤水分, 其值依地下水埋深而定。当地下水埋深较浅 ( $\leq 5 \text{ m}$ ) 时, 储水区的临界土壤水分随地下水埋深的增加而减小<sup>[16]</sup>, 可应用土壤水分特征曲线求得<sup>[12]</sup>; 若地下水埋深较深 ( $> 5 \text{ m}$ ), 该值可近似地取为某一常数。已有的研究结果和实验站长期实测的土壤水分数据分析结果表明  $\theta_{c2}$  变化于田间持水量  $\theta_f$  的 70%~80% 之间, 因此本研究取  $\theta_{c2} = 0.75\theta_f$ 。

#### 1.1.3 有效降水量 $P_e$

本研究中有有效降水量  $P_e$  使用如下经验方法估算

$$P_e = \alpha' \cdot P \quad (7)$$

式中,  $\alpha'$  为降水入渗系数;  $P$  为降水量, mm;  $\alpha'$  参考下列数值

$$\alpha' = \begin{cases} 0 & P < 5 \text{ mm} \\ 0.8 \sim 1 & 5 \text{ mm} \leq P \leq 50 \text{ mm} \\ 0.7 \sim 0.8 & P > 50 \text{ mm} \end{cases} \quad (8)$$

#### 1.1.4 作物蒸发蒸腾量 $ET$

本文所建立的墒情动态二区平衡模型中, 作物蒸发蒸腾量实时预报可采用下式作为基本模型

$$ET = K_s \cdot K_c \cdot ET_0 \quad (9)$$

式中,  $ET_0$  为参考作物蒸发蒸腾量, mm;  $K_c$  为作物系数;  $K_s$  为土壤水分修正系数。

在不同生育期作物系数  $K_c$  不同, FAO 建议将作物的生育期划分为初期、发育期、中期和后期 4 个阶段<sup>[17]</sup>, 由田间作物的实际生长状况, 确定其各生长发育期及其长度, 各个生育期对应一个  $K_c$  值。考虑到作物系数  $K_c$  的不确定性, 本研究中  $K_c$  作为待定参数。

$K_s$  作为一个反映作物所受水分胁迫的综合性指标, 其大小与土壤因素、作物因素、气象因素有关。本文采用如下模式来确定土壤水分修正系数

$$K_s = \begin{cases} 1 & \theta_{10} \geq \theta_j \\ \frac{\theta_{10} - \theta_{wp}}{\theta_j - \theta_{wp}} & \theta_{wp} < \theta_{10} < \theta_j \\ 0 & \theta_{10} \leq \theta_{wp} \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $\theta_{wp}$  为根区土壤凋萎含水率,  $\theta_j$  为开始限制作物蒸发蒸腾时的根区临界土壤含水率, 这里取  $\theta_j = \beta' \theta_f$ , 其中  $\theta_f$  为根区土壤的田间持水量,  $\beta'$  为常数,  $0 < \beta' < 1$ 。本研究中  $\beta'$  为待定参数。

#### 1.1.5 根区土层厚度 $H_1$ 和储水区土层厚度 $H_2$

根区土层厚度  $H_1$  随根系深度变化, 不同生育期作物根系所达到的深度  $H_1(t)$  随时间的变化可用正弦曲线

描述<sup>[18]</sup>

$$H_1(t) = H_m \left[ 0.5 + 0.5 \sin \left\{ 3.03 \left( \frac{t}{t_m} \right) - 1.47 \right\} \right] \quad (11)$$

式中,  $H_m$  是作物一生中根系所能达到的最大深度, cm;  $t$  是自播种后的时间, d;  $t_m$  是自播种后根系达到  $H_m$  深度时的时间, d。储水区深度  $H_2(t) = H_{\text{总}} - H_1(t)$ 。

## 1.2 模型参数

模型中参数有  $k_1$ 、 $k_2$ 、作物系数  $K_c$  和  $\beta$ , 根据冬小麦、夏玉米生育期划分, 综合考虑田间套种以及收获到播种之间的间隙期等因素, 分阶段计算模型参数。对每一阶段, 以  $\theta_{1i}(i, j)$  和  $\theta_{2i}(i, j)$  分别表示观测点  $i$  第  $j$  次根区和储水区土壤含水率的实测值,  $\hat{\theta}_{1i}(i, j)$  和  $\hat{\theta}_{2i}(i, j)$  分别表示观测点  $i$  第  $j$  次根区和储水区土壤含水率的模拟计算值。采用最小二乘法确定各个阶段的模型参数, 目标函数如下

$$Q_{1,l} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m [\theta_{1i}(i, j) - \hat{\theta}_{1i}(i, j)]^2 \quad (12)$$

$$Q_{2,l} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m [\theta_{2i}(i, j) - \hat{\theta}_{2i}(i, j)]^2 \quad (13)$$

$$Q_l = \min(Q_{1,l} + Q_{2,l}) \quad (14)$$

式中,  $Q_{1,l}$  和  $Q_{2,l}$  分别表示作物第  $l$  个生育期内根区和储水区模拟计算的土壤含水率与实测土壤含水率之差的平方和,  $l=1, 2, 3, 4$ ;  $Q_l$  为总残差平方和;  $i$  为土壤含水率观测点编号;  $j$  为土壤含水率测定次数编号;  $n, m$  分别为观测点个数和测定次数。模型参数使用自由搜索算法求解。

## 2 模型建立

### 2.1 田间试验资料

田间实验在山东桓台进行, 长期实验和实验数据分析结果表明: 桓台地区年内 3—11 月土壤水分及逐日  $ET_0$  的变化剧烈, 且  $ET_0$  较大。12 月至翌年 2 月为冬季, 土壤体积含水率变化较小。为提高模型的预测精度及实用性, 本文选取涵盖主要作物生育期的 3—11 月为研究时段。实验站内田间监测的冬小麦根系最大伸展深度均值为 1.0 m、夏玉米为 0.8 m; 地下水水位分别为 11.96 和 11.98 m, 不考虑深层地下水对作物根系层内土壤水分的影响; 田间监测的 100—120 cm 深度土层的体积含水率全年内变化幅度较小 (变化于田间持水量的 70%~80% 之间), 均值约为田持的 75%。因此本文建立的墒情动态二区模型中根区和储水区总深度取值为 1.2 m。

#### 2.1.1 土壤水分资料

土壤水分用 TDR (时域反射仪, time domain reflectometry) 测量, 测定深度 0—120 cm, 每隔 20 cm 为一层, 每 5 d 测一次。在每个生育期的起始点加测, 降水及灌水前后加测。在实验站 75 个观测点中随机挑选 4 个观测点的观测数据用于模型的建立。气象资料取自本

站地面气象观测站观测值, 土壤水分常数和体积质量由该站测得。TDR 测量得到的是的各层的平均土壤体积含水率, 认为该层内土壤体积含水率均匀分布, 以求得其他点或深度的平均体积含水率。

#### 2.1.2 根区深度的确定

2007 年—2008 年在实验站测定了冬小麦和夏玉米生育期根系伸展深度。用式 (11) 的根系伸展曲线模拟冬小麦和夏玉米生育期根系伸展, 模型中设定冬小麦根系自播种后 195 d 达到最大深度  $H_m=100$  cm, 夏玉米播种后 121 d 达到最大深度 80 cm。根系伸展实测值与式 (11) 正弦曲线模拟值比较见图 2 和图 3。

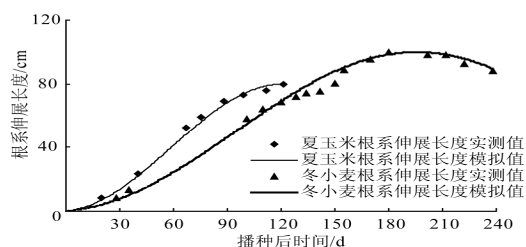


图 2 冬小麦和夏玉米根系伸展长度模拟值与实测值

Fig.2 Observed and predicted root depth of the winter wheat and summer corn

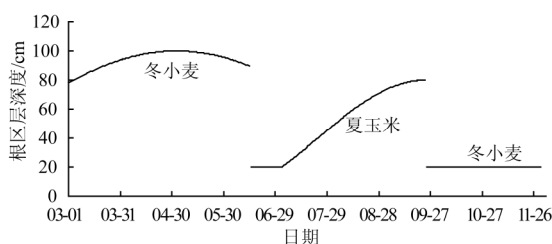


图 3 2008 年逐日根区深度曲线

Fig.3 Daily curve of root zone depth in 2008

从图 2 可以看出, 模拟值与实测值有很好的 consistency, 模型反映了实际根系伸展的动态变化趋势, 可将根系生长正弦曲线模型应用到二区模型中, 模拟根系层随时间的动态变化。

在作物生长初期, 土层深度  $H_l$  一般采用 20~40 cm, 本研究的模型中取  $H_l=20$  cm。实验站冬小麦和夏玉米为套种, 2008 年 5 月 26 日播种夏玉米, 6 月 14 日收获冬小麦, 这期间根系层深度按照小麦的根系层深度计算。冬小麦收获后计算玉米根系伸展长度, 确定根区深度, 小于 20 cm 时取值为 20 cm。模型计算过程从 2008 年 3 月 1 日开始, 2008 年 11 月 30 日结束。2008 年 9 月 24 日夏玉米收获后到 2008 年 10 月 11 日冬小麦播种这段时期, 田间无作物, 根区深度按照 20 cm 计算。模拟的 2008 年逐日根区深度变化过程见图 3。2009 年的根区深度按照同样的方法计算。

#### 2.1.3 模拟时段的划分

冬小麦和夏玉米的生育期划分为 4 个阶段, 各生育阶段的长度见表 1。

表 1 冬小麦和夏玉米各生育阶段长度

Table 1 Duration of each growth stage of winter wheat and summer corn

| 作物  | 年份        | 播种日期       | 全生育期 | 初期阶段 | 发育阶段 | 中期阶段 | 后期阶段 |
|-----|-----------|------------|------|------|------|------|------|
| 冬小麦 | 2007-2008 | 2007-10-20 | 238  | 130  | 50   | 40   | 18   |
|     | 2008-2009 | 2008-10-11 | 231  | 130  | 50   | 40   | 11   |
| 夏玉米 | 2008      | 2008-5-26  | 121  | 20   | 40   | 30   | 31   |
|     | 2009      | 2009-5-26  | 109  | 20   | 40   | 30   | 19   |

实验站冬小麦夏玉米套种，冬小麦生育期的后期阶段和夏玉米生育期的初期阶段重合，将这 2 个阶段合为 1 个阶段处理，表 2 中的第 3 阶段序号与之对应。依据作物生育阶段的长度，在年度内将 3—11 月划分为 7 个阶段，3 月 1 日冬小麦处于发育阶段，将夏玉米收获到冬小麦播种这段时间纳入夏玉米后期阶段，基于自由搜索算法<sup>[14-15]</sup>分别求解各个阶段的模型参数。

## 2.2 模型求解

用 2008 年 3 月 1 日—2008 年 11 月 30 日的数据对模型参数进行率定。模拟计算过程中，以各阶段起点的实测土壤含水率作为模拟计算的初始值，根据逐日降水量、灌水量和参考作物蒸发蒸腾量（由 Penman-Monteith 公式计算）资料，逐日模拟计算，可求得计算期内逐日的根区土层内的含水量，进而求得各生育期的公式（14）中的总残差平方和。根据前述自由搜索算法的建模步骤，求解出模型中的参数，见表 2。

表 2 模型参数求解结果

Table 2 Solving results of model parameters

| 阶段序号 | 日期<br>(2008 年) | 作物       | $k_1$  | $k_2$  | $B'$   | $K_c$  |
|------|----------------|----------|--------|--------|--------|--------|
| 1    | 03-01~04-06    | 小麦       | 1.3873 | 0.3476 | 0.7455 | 0.4734 |
| 2    | 04-06~05-26    | 小麦       | 1.1582 | 0.3011 | 0.5647 | 1.3057 |
| 3    | 05-26~06-15    | 小麦<br>玉米 | 1.2886 | 0.3522 | 0.5819 | 1.5935 |
| 4    | 06-15~07-25    | 玉米       | 1.3526 | 0.5126 | 0.5287 | 1.5125 |
| 5    | 07-25~08-24    | 玉米       | 1.5887 | 0.3438 | 0.4993 | 1.4776 |
| 6    | 08-24~09-24    | 玉米       | 1.0310 | 0.4210 | 0.6375 | 0.6892 |
| 7    | 09-24~11-30    | 小麦       | 1.6925 | 0.2453 | 0.5013 | 0.2301 |

注： $k_1$  为待定参数，描述根区下界面水分通量； $k_2$  为式（6）中待定参数； $\beta$  为式（10）中待定参数； $K_c$  为作物系数。

采用墒情动态二区模型对 2009 年 3 月 1 日—2009 年 11 月 30 日期间的根系层土壤体积含水率进行动态模拟，模型模拟结果见图 4。从图 4 可以看出，动态二区模型模拟的墒情变化趋势和实测的墒情变化趋势一致；据统计，模型模拟的预误差值大部分在  $\pm 10\%$  的上下限以内，49.09% 的模拟结果相对误差小于  $\pm 5\%$ 、94.55% 的模拟结果相对误差小于  $\pm 10\%$ 。通过分析预测值和实测值相关关系可以看出预测值和实测值具有较好的相关性，决定系数为 0.779（图 5），经  $t$  检验其显著水平计值为 0.47，大于 0.05，预测值和实测值没有显著差异，说明模型具有较高的精度。

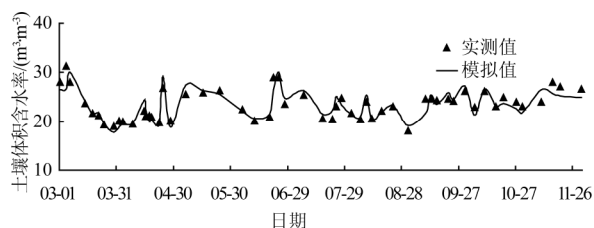


图 4 2009 年动态根区墒情模拟效果

Fig.4 Observed and simulated soil water content in active root zone in 2009

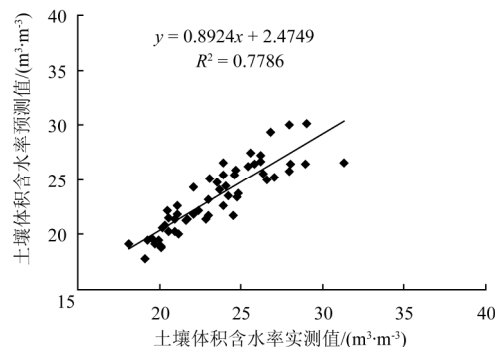


图 5 土壤体积含水率实测值与预测值相关关系

Fig.5 Correlation between observed and predicted data of soil moisture content

## 3 结 论

基于土壤-植物-大气连续体物质能量运动原理以及土壤水动力学理论，构建了变根区层墒情动态二区模型。模型把农田土壤水分变化层分为包含根系的动态根区和无根系的动态储水区，根区和储水区深度随作物根系伸展而变化，由此实质性地考虑了根区变化及其下界面水分通量。模型模拟的土壤水分状况准确地反映了土壤计划湿润层内墒情的动态变化。基于改进的自由搜索算法求解了动态二区模型中的参数，计算简单，精度较高。应用建立的模型对试验站 2009 年墒情进行模拟，模型模拟的预误差值大部分在  $\pm 10\%$  的上下限以内，49.09% 的模拟结果相对误差小于  $\pm 5\%$ 、94.55% 的模拟结果相对误差小于  $\pm 10\%$ 。预测值和实测值相关分析的决定系数为 0.779，显著水平计值为 0.47，表明模型的模拟精度较高，能准确地模拟墒情的动态变化趋势，可以作为灌溉预报和节水灌溉预报决策的依据。

## [参 考 文 献]

- [1] 张磊, 张晓煜, 卫建国, 等. 宁南山区不同种植体系土壤水分变化规律[J]. 农业工程学报, 2010, 26(13): 104—108. Zhang Lei, Zhang Xiaoyu, Wei Jianguo, et al. Soil moisture distribution in different cultivating systems in mountainous area of south Ningxia Hui Autonomous Region[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(Supp.1): 104—108. (in Chinese with English abstract)
- [2] 齐丽彬, 樊军, 邵明安, 等. 紫花苜蓿不同根系分布模式的土壤水分模拟和验证[J]. 农业工程学报, 2009, 25(4): 24—29. Qi Libin, Fan Jun, Shao Ming'an, et al. Simulation and verification of soil moisture of root distribution functions for alfalfa[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(4): 24—29. (in Chinese with English abstract)

- [3] 王学春, 李军, 方新宇, 等. 半干旱区草粮轮作田土壤水分恢复效应[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 81—88.  
Wang Xuechun, Li Jun, Fang Xinyu, et al. Restoration of soil water in alfalfa-grain crop rotation fields on semi-arid region [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(1): 81—88. (in Chinese with English abstract)
- [4] 刘昭, 周艳莲, 居为民, 等. 基于 BEPS 生态模型模拟农田土壤水分动态[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 67—72.  
Liu Zhao, Zhou Yanlian, Ju Weimin, et al. Simulation of soil water content in farm lands with the BEPS ecological model[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(3): 67—72. (in Chinese with English abstract)
- [5] 王学春, 李军, 郝明德. 长武旱塬草粮轮作田土壤水分可持续利用模式模拟[J]. 农业工程学报, 2011, 27(13): 257—266.  
Wang Xuechun, Li Jun, Hao Mingde. Simulation of sustainable use of soil water in dry land for alfalfa-grain rotation system at Changwu arid-plateau of China[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(Supp.11): 257—266. (in Chinese with English abstract)
- [6] Lai C T, Katul G. The dynamic role of root-water uptake in coupling potential to actual transpiration[J]. Advances in Water Resources, 2000, 23(4): 427—439.
- [7] Jia Xibin, Kang Ersi, Chen Rensheng, et al. A mathematical model for simulating water balances in cropped sandy soil with conventional flood irrigation applied[J]. Agricultural Water Management, 2007, 87(3): 337—346.
- [8] 尚松浩. 土壤水分模拟与墒情预报模型研究进展[J]. 沈阳农业大学学报, 2004, 35(5/6): 455—458.  
Shang Songhao. Advances in soil moisture simulation and forecasting models[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2004, 35(5/6): 455—458. (in Chinese with English abstract)
- [9] 王仰仁, 孙小平. 供水不足条件下作物蒸发蒸腾量的计算[C]//山西农业节水理论与作物高效用水模式. 北京: 中国科学技术出版社, 2003: 65—95.  
Wang Yangren, Sun Xiaoping. Calculation of crop evapotranspiration under the conditions of water shortage[C]//Agricultural Water Theory and Efficient Water Use in Crop at Shanxi. Beijing: China Science and Technology Press, 2003: 65—95. (in Chinese with English abstract)
- [10] Chopart J L, Vauclin M. Water balance estimation model: field test and sensitivity analysis[J]. Soil Science Society of American Journal, 1990, 54(5): 1377—1384.
- [11] Tosio Cho, Maaharu Kuroda. Soil moisture management and evaluation of water saving irrigation on farm[C] // Symposium R.2. International Commission on Irrigation and Drainage. Thirteen Congress, Rabat, 1987: 19—40.
- [12] 郭群善, 雷志栋, 杨诗秀. 作物生长条件下田间土壤水量平衡计算的研究[J]. 水利学报, 1997(增刊): 35—38.  
Guo Qunshan, Lei Zhidong, Yang Shixiu. Study on the method of soil water balance calculation under the crop condition[J]. Journal of Hydraulic Engineering. 1997, (Supplement): 35—38. (in Chinese with English abstract)
- [13] 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.  
Wang Yangren, Sun Shuhong, Ye Lantao, et al. Two-zone model for simulating field soil moisture[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(8): 904—909. (in Chinese with English abstract)
- [14] 王斌, 张展羽, 张国华, 等. 一种新的优化灌溉制度算法—自由搜索[J]. 水科学进展, 2008, 19(5): 736—741.  
Wang Bin, Zhang Zhanyu, Zhang Guohua, et al. Free search: A novel algorithm for optimizing irrigation schedule[J]. Advances in Water Sciences, 2008, 19(5): 736—741. (in Chinese with English abstract)
- [15] 王斌, 张展羽, 张国华, 等. 基于自由搜索的灌区优化配水模型研究[J]. 水利学报, 2008, 39(11): 1239—1243.  
Wang Bin, Zhang Zhanyu, Zhang Guohua, et al. Optimized water rationing model based on Free Search for irrigation district [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(11): 1239—1243. (in Chinese with English abstract)
- [16] 刘钰. 灌溉制度模拟[C]//农业持续发展的农田水土管理研究. 北京: 中国水利水电出版社, 2000: 154—182.  
Liu Yu. Simulation of the irrigation system[C] // Agricultural Water Management for Sustainable Development of Farmland. Beijing: China Science and Technology Press, 2000: 154—182. (in Chinese with English abstract)
- [17] 陈凤, 蔡焕杰, 王健, 等. 杨凌地区冬小麦和夏玉米蒸发蒸腾和作物系数的确定[J]. 农业工程学报, 2006, 22(5): 191—193.  
Chen Feng, Cai Huanjie, Wang Jian, et al. Estimation of evapotranspiration and crop coefficient s of winter wheat and summer maize in Yang ling Zone[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(5): 191—193. (in Chinese with English abstract)
- [18] Panigrahi B, Sudhindra N Panda. Field test of a soil water balance simulation model[J]. Agricultural Water Management, 2003, 58(3): 223—240.

## Dynamic two-zone balance model for simulating soil moisture

Zhu Xinguo<sup>1,2</sup>, Zhang Zhanyu<sup>2</sup>, Liu Li<sup>3</sup>

(1. Ningbo Rural Water Management Division, Ningbo 315000, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China. 3. Suqian Water Affairs Bureau, Suqian 223800, China)

**Abstract:** Based on the soil-plant-atmosphere continuum and soil water dynamics theory, considering crop root extension and root water uptake, a dynamic two-zone model was built, which divided the soil moisture changing layer into two zones, namely, the active root zone and moisture storage zone. In the active root zone, the variation of the dynamic soil moisture with the depth change of crop root zone was described. In the moisture storage zone, the water flux on lower boundary of the root zone which indirectly has effects on crop evapo-transpiration was analyzed. Using the soil moisture of the storage zone as the model variable, the simulation fitting error as objective function, the optimization model parameters were solved using Free Search method. A comparison between the simulation results of the dynamic two-zone model and the observed values showed that the proportion of relative errors less than  $\pm 5\%$  is of 49.09% and  $\pm 10\%$  of 94.55% respectively. The t test indicated that the predicted values and the observed values had good consistency. The regression analysis indicated that their correlation coefficient was 0.779. These results show that the model has a high simulative precision.

**Key words:** models, soil moisture, dynamics, soil moisture prediction, root extension