

# 土壤水分对作物生长满足程度模拟模型

宇振荣 翟志席

(北京农业大学, 100094)

## A MODEL FOR QUANTIFYING THE SUFFICIENCY OF SOIL WATER REGIME TO THE NORMAL CROP GROWTH

Yu Zhenrong Zhai Zhixi

(Beijing agricultural University, 100094)

**关键词** 作物生长模型, 土壤水分有效性

在确定作物需要的灌溉量及灌溉时间和评价土壤水分有效性方面, 前人已作了大量的工作, 建立了大量的模型, 包括从具有明确物理意义的水动力学模型<sup>[8,10,14]</sup>到水均恒模型<sup>[3,11-13]</sup>。Feyen<sup>[9]</sup>对土壤水分和作物生长的各种模型及其应用作了系统阐述和评价。本文应用系统分析和模拟的基本原理, 提出了一个模拟在作物正常生长情况下根层土壤水分变化和作物实际蒸腾与最大可能蒸腾之比所表示的土壤水分对作物生长满足程度模型。该模型可应用于作物生产力模型中计算光温水生产力和评价土壤水分的有效性。

### 一、土壤水分对作物生长满足程度模拟模型基本原理

#### (一) 土壤水分平衡

假设土壤为均质, 无地下水影响, 土壤水平方向水流忽略不计, 土壤剖面分为土壤表层到实际根深和实际根深到最大根深两层, 则时段末(时间步长为一天)根层内土壤储水量和含水量为:

$$WR(t) = WR(t - dt) + (IM - EA - TR - PERC + WGR); SM(t) = WR(t)/RD(t)$$

式中: WR 为根层土壤贮水量 (cm); SM 为根层土壤水含量 ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ); IM 为地表入渗量 (cm); EA 为裸间土壤实际蒸发量 (cm); TR 为作物蒸腾量 (cm); PERC 为实际根层下边界渗漏重 (cm); RD 为实际根层深度 (cm)。WGR 为根层因根系生长而增加的水量 (cm);

时段末实际根深到最大根深的贮水量和土壤含水量:

$$\begin{aligned} WRM(t) &= WRM(t - dt) + (PERC - LOSS - WGR):BSM(t) \\ &= WRM(t)/(RDM - RD(t)) \end{aligned}$$

式中: WRM 和 BSM 分别为时段末实际根深到最大根深的土壤贮水量 (cm) 和含水量 ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ); LOSS 为最大根深下边界渗漏量 (cm); RDM 为最大根深 (cm);

**(二) 作物需水满足程度、作物发育和根系生长进程**

作物需水满足程度是计算作物生产力最重要的变量,可表示为:

$$\text{Sufficiency} = (\text{TR}/\text{TRM})$$

式中: TR 为作物实际蒸腾量 (cm); TRM 为作物最大可能蒸腾量 (cm)。

本模型采用积温法表示作物发育阶段,为模型中的状态变量,可表示为:

$$\text{DRDS} = (\text{T24H} - \text{T0}) \times \text{dt}/\text{Tsum}; \text{RDS}(t) = \text{RDS}(t - \text{dt}) + \text{DRDS}$$

式中: T24H 为 24 小时日平均温度(°C);T0 为临界温度(°C);Tsum 为作物生育期内所需大于临界温度的有效积温(°C);dt 为时间步长,模型时间步长为一天;RDS 为作物发育阶段,当 RDS > 1 时,模型运行停止。

在时段末实际根深与作物发育阶段 (RDS) 的关系表达式:

若  $\text{RDS} \leq \text{RDS}_{\text{root}}$ , 则

$$\text{RD} = \text{RD}_{\text{int}} + \text{RDS} \times (0.7 \times (\text{RDM} - \text{RD}_{\text{int}})/\text{RDS}_{\text{root}})$$
 否则  $\text{RD} = 0.7 \times \text{RDM}$

式中: RD 为时段末实际根深 cm; RD<sub>int</sub> 为初始根深 (cm); RDM 为最大根深 (cm); RDS<sub>root</sub> 为根系停止生长时的相对发育阶段。初始根深和最大根深: 棉花分别为 5 cm 和 130 cm; 玉米分别为 10cm 和 130cm。根系停止生长时的相对发育阶段: 棉花和玉米分别为 0.87 和 0.70。

**(三) 平衡分量计算**

**1. 降雨和径流**

当降雨量 (PREC) 超过土壤最大入渗量时, 降雨净入渗量 (IM) 等于土壤最大入渗量 (IMMAX), 径流:  $\text{SR} = \text{PREC} - \text{IMMAX}$ ; 否则  $\text{IM} = \text{PREC}$ 。

$$\text{地面最大入渗量}^{[6]}: \text{IMMAX} = \text{SO} \times (1 - \text{SM}/\text{SMO}) \times \text{DT}^{-0.5} + \text{KTA}$$

式中: IMMAX 为最大入渗速率 (cm/d);SO 为标准吸着率 (cm/d<sup>0.5</sup>); SM 为土壤含水量 (cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>); SMO 为饱和含水量 (cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>); Dt 为时间步长 (1 天);KTA 为土壤质地类型常数。

**2. 土壤水分供应充足时最大土壤蒸发量和最大作物蒸腾量**

假设农田水汽扩散都是以平流形式进行的作物为参照作物, 则实际农田最大可能蒸散为:

$$\text{ETM} = \text{KC} \times \text{ETO}; \text{KC} = \text{Kc}_{\text{ref}} \times \text{TF}$$

式中: Kc<sub>ref</sub> 为参照作物的系数;TF 为涡流系数; KC 为实际农田作物系数; ETM 为农田最大可能蒸散量 (cm/d); ETO 为彭曼条件下的蒸散量 (cm/d), 本模型应用 van Keulen<sup>[12]</sup> 方法计算潜在蒸散。

通过对不同作物的作物系数研究<sup>[4,7]</sup>, 参照作物系数 (Kc<sub>ref</sub>) 和相对发育阶段 (RDS) 的关系可表示为:

$$\text{Kc}_{\text{ref}} = 0.33 + 0.73 \times \text{rds} + 1.93 \times (\text{rds})^2 - 2.33 \times (\text{rds})^3$$

$$\text{水汽扩散涡流系数可表示为: } \text{TF} = 1 + (\text{Kc}_{\text{ref}} - 0.33) \times (\text{TFM} - 1)/0.67$$

式中: TFM 为最大涡流系数, 可应用 Doorenbos<sup>[4]</sup> 所给定的不同作物发育中期时最大作物系数代替。

农田中作物最大可能蒸腾 (TRM) 和土壤最大可能蒸发 (EM) 可表示为:

$$TRM = ET_0 \times TF \times (K_{cref} - 0.33) / 0.67; EM = ET_M - TRM$$

### 3. 实际作物蒸腾和土壤水分蒸发

#### (1) 实际蒸腾

作物实际蒸腾大小不仅取决于由大气潜在蒸发力要求的最大蒸腾速率 (TRM), 而且还取决于由土壤水分和作物特性决定的作物根系吸收土壤水分最大速率 (MUR)。

当 MUR 大于 TRM 时, 实际蒸腾 (TR) 等于 TRM, 否则  $TR = MUR$ 。

通过土壤-根系-作物的稳态水流, 即作物根系吸收水分最大速率可表示为:

$$MUR = (PSI_{leaf} - PSI) / (R_{plant} + R_{root})$$

式中:  $PSI_{leaf}$  为作物临界叶片水吸力 (cm);  $PSI$  为根层土壤基模吸力 (cm);  $R_{plant}$  为作物体内水流阻力 (1/d);  $R_{root}$  为水分进入根系阻力 (1/d);  $MUR$  为根系吸收水分最大速率 (cm/d)。

#### 1) 作物叶片临界水吸力

由上式可知, 当  $MUR$  等于 0 时,  $PSI_{leaf}$  等于  $PSI$ 。Reinds<sup>[5]</sup> 查阅了大量的文献, 给出了在田间条件下玉米, 小麦和棉花叶片临界水吸力分别为 17000, 14000 和 25000 (cm)。

#### 2) 水流阻力 ( $R_{plant} + R_{root}$ )

叶片临界水吸力 ( $PSI_{leaf}$ ) 和植物体内水流阻力相关性很好<sup>[5]</sup>, 可表示为:

$$R_{plant} = 680 + 0.53 \times PSI_{leaf}$$

根系内水流阻力是水分从土壤进入根系所受阻力。它受根系的几何形状和根表面土壤导水率的影响。据前人<sup>[5,7,10]</sup>所提出的计算根系吸收水分模型, 经推导研究, 根表面阻力可表示为:  $R_{root} = 13 / (RD + KPSI)$

式中:  $KPSI$  为土壤非饱和导水率 (cm/d)。

#### (2) 实际土壤蒸发

当土壤的蒸发超过土壤的导水率时, 土壤表层含水量下降, 干土层形成开始, 实际蒸发小于最大可能蒸发 (EM)。此时的土壤基模吸力为土壤蒸发临界基模吸力。据不同土壤质地的非饱和导水率和基质吸力的关系公式<sup>[2,5]</sup>, 可计算出土壤蒸发的临界土壤基质吸力。当  $KPSI = EM$  时, 土壤蒸发临界水势为:

$$PSIMUL = ((KO/EM - 1) / KSC)^{1/KSN}$$

式中:  $KO$  为土壤饱和导水率 (cm/d);  $KPSI$  为土壤基模吸力为  $PSI$  时的非饱和导水率 (cm/d);  $EM$  为土壤最大可能蒸发 (cm/d);  $KSC$ 、 $KSN$  为土壤质地经验常数;  $PSIMUL$  为土壤蒸发的临界土壤基模吸力 (cm)。

假设土壤基模吸力低于萎蔫土壤基模吸力 (16000cm), 实际土壤蒸发等于零, 则实际土壤蒸发可表示为:

若  $PSI \leq PSIMUL$ , 则  $EA = EM$

若  $PSIMUL < PSI < 16000$  则  $EA = EM \times (16000 - PSI) / (16000 - PSIMUL)$

若  $PSI \geq 16000$ , 则  $EA = 0$

### 4. 根层下边界土壤水分通量变化

根层下边界水分通量变化有: 当由降水入渗使根层土壤水分含量超过田间持水量,

则超过田间持水量的那一部分水渗入根层以下。但在计算渗漏之前, 需先计算由降水和实际蒸散导致的土壤水分增减:

$$SM(t) = SM(t - dt) + (IM - EA - TR)/RD(t - dt)$$

若  $SM(t) > SMFC$ , 则  $PERC = (SM(t) - SMFC) \times RD(t - dt)$ 。

式中:  $SMFC$  为田间持水量 ( $cm^3/cm^3$ );  $PERC$  为根层下边界土壤水分渗漏 ( $cm/d$ )。同理可求得最大根深下边界渗漏 ( $LOSS$ )。

除此之外, 在给定时段末或下一个时段初根层土壤含水量还应包括由于根系生长, 根层加深层内所增加的土壤水分:

$$WGR = BSM \times (RD(t) - RD(t - dt))$$

式中:  $WGR$  为根层加深层内所增加的土壤水分 ( $cm$ );  $BSM$  为根层下边界到最大根深土壤水分含量 ( $cm$ )。

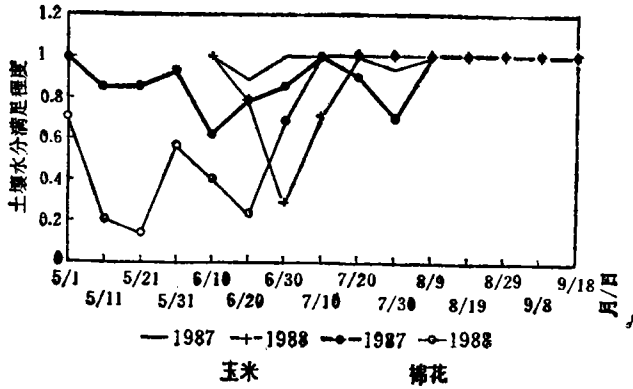


图 1 土壤水分满足程度模拟结果

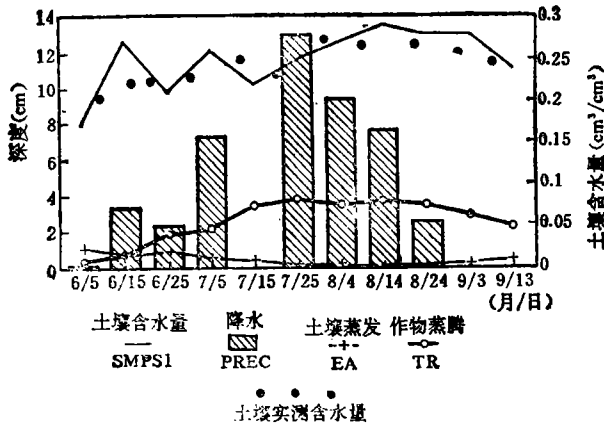


图 2 1987 年玉米地根层土壤含水量模拟值与实测值比较

## 二、模型输入和运行结果

### (一) 模型数据输入

所有的气象数据都可在常规气象站中获得。作物特性参数除文中所给定的数据外,

其它参数也容易获得。土壤参数数据主要是不同土壤质地水分特征曲线和土壤吸力和非饱和导水率关系曲线是模型所必需输入的数据。陆锦文和李韵珠<sup>[2]</sup>对曲周试区不同土壤质地的水分特征曲线进行了测试,并应用间接计算非饱和导水率方法,建立了不同质地土壤水分含量以及土壤基模吸力和非饱和导水率的关系式:

$$PSI = SOA \times (SM/SMO)^{-SOB}; KPSI = KOA \times (SM/SMO)^{KOM}$$

$$KPSI = KO/(1 + KSC \times PSI^{KSN}); SM = SMO \times e^{(LOG(PSI/SOA)/SOB)}$$

式中: SMO 为饱和含水量; SOA、SOB、KOM、KOA、KSC、KSN 为土壤质地经验常数。经对原数据分类和计算,可求出了不同土壤质地有关参数值。

初始条件输入有: 播种时间; 土壤初始含水量 ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ )。

## (二) 模型的检验结果和讨论

在模型的发展过程中,应用黄淮海平原曲周县 1987 和 1988 年气象数据和收集到的有关夏玉米和棉花作物数据以及土壤数据,对模型进行了初步的检验和校正。夏玉米播种时间为 6 月 10 日,棉花播种时间为 5 月 1 日,播种时土壤含水量为 0.21%。模型运行结果见图 1 和图 2。在正常生长情况下,1987 年和 1988 年棉花的需水量分别为 472 和 454mm; 玉米的需水量分别为 337 和 323mm,这与多年观测棉花和夏玉米需水量相吻合<sup>[3]</sup>。从需水满足程度看(图 1),1987 年和 1988 年玉米受到轻微的水分胁迫;棉花在 1987 年和 1988 年都受到不同程度的水分胁迫。与 1987 年比较,1988 年受水分胁迫历时比较短,但强度高,特别是在棉花生长的前期,其主要原因是 1987 年和 1988 年降水分布差异,从而导致了水分胁迫在时间上的差异。这不仅能说明土壤水分对作物生长的满足程度,还能说明在时间上的变化。从夏玉米高产氮磷配比实验的土壤含水量实测值与模拟值比较(图 2),其计算的结果和实测的结果是基本一致的。由此可见,模型的基本原理和过程是可行的。模型与潜在作物生产力模拟模型结合,可模拟水分限制情况下的生产力。在模型校正和检验过程中,由于缺乏完整的数据,故模型的准确度和实践应用还有待于进一步的研究。

## 参 考 文 献

1. 辛德惠,李维炯等,1990: 浅层咸水型盐渍化低产地区综合治理与发展,北京,农业大学出版社。
2. 陆锦文,李韵珠,1986. 非饱和土壤水运动参数及其相关分析。《盐渍土的水盐运动》,第 109—121 页,北京农业大学出版社。
3. 陆锦文等,1991: 土壤水分动态预报。《区域水盐运动预报》第 61—100 页。河北科学技术出版社。
4. Doorenbos, J. et. al., 1979: Crop yield response to water, FAO irrigation and drainage paper. NO. 33. FAO, Rome.
5. Driessen, P. M. 1989: Dynamic land use system analysis, Department of soil science and geology. Wageningen Agri. Univ.
6. Driessen, P. M., 1986: The water balance of soil. In: Modelling of agricultural production: Weather, soil and crops. In: H. van Kuelen & J. Wolf. Simulation Monographs. Pudoc, Wageningen. p. 76—117.
7. Feddes, R. A. and P. E. Rijtema, 1971: Water withdrawal by plant roots. Journal of Hydrology 17: 33—59.
8. Feddes, R. A., Kabat, P. & Zaradny, H., 1978. Simulation of field water use and crop yield. Simulation monograph, Pudoc, Wageningen, p. 189.
9. Feyen, J. 1987: Field validation of Soil Water and crop models In: Feyen, J. Simulation models for cropping systems in relation to water management. Commission of the European Commu-

- nities, Luxemburg, EUR 10869 EN, p. 105—131.
10. Gardner, W. R. 1960: Dynamic aspects of Water availability to plants. *Soil Science*. 89: 63—93.
  11. Keulen, H. van, 1975. Simulation of water use and herbage growth in arid regions. *Simulation monographs*, Pudoc, Wageningen, pp. 176.
  12. Keulen, H. van & J. Wolf (Eds), 1986: *Modelling of agricultural production: wether, soils and crops*. *Simulation Monographs*. Pudoc, Wageningen, pp. 479.
  13. Penning de Vries, F. M. T., D. M. Jansen, H. F. M. Ten Berge & A. Bakema. 1989: *Simulation of ecophysiological process of growth in several annual crops*. *Simulation Monographs*, Pudoc Wageningen, pp. 271.
  14. Rijtema, P. E., 1965: *Soil moisture forecasting*. Nota 513. ICW. Wageningen.
  15. Reinds J. G., 1988: *Calculation of soil water heads below which crop transpiration is reduced because of stomate closure*. Department of soil science and geology. Wageningen Agri. Univ.