

玉米生长条件下农田土壤水分
动态预报方法的研究康绍忠^{1,2} 张富仓¹ 梁银丽²

1. 西北农业大学, 陕西杨陵, 712100

2. 中国科学院、水利部水土保持研究所, 陕西杨陵, 712100

S 513.01

A **摘要** 依据理论分析和田间实测资料, 提出了玉米生长条件下农田土壤水分动态预报模型, 论述了模型中参数的测取方法。经初步应用结果表明, 该模型预报玉米地土壤水分动态具有较高的精度。

关键词: 土壤水分, 动态, 预报, 玉米, 根系吸水。

RESEARCH ON THE FORECAST METHOD OF SOIL
WATER DYNAMIC PROCESS IN CORN-LANDKang Shaozhong^{1,2} Zhang Fucang¹ Liang Yinli²

1. Northwestern Agricultural University, Yang Ling, Shaanxi, 712100,

2. Institute of Abstrad Soil and Water Conservasion, Chinese Acadmic Sciences

Abstract Based on the theoretical analysis and the measured data in corn-land, this paper presents a model to forecast soil water dynamic process in corn-land. The model includes three branch systems, they are soil water dynamic process in root zone of corn, dynamic process of water uptake by corn root, and dynamic process of evapotranspiration. The measuring and estimating method of parameters in the model is also described. The result of application shows that the forecast of soil water dynamics and evapotranspiration by using the model has high precision.

Key words: soil water, dynamics, forecast, corn, water uptake by roots.

农田土壤水分动态预报是农业生态学研究的一项重要课题, 准确预报农田土壤水分对于科学制定灌溉方案、有效调控土壤水分, 节约水资源和提高农作物产量等均具有十分重要的意义。关于农田土壤水分预报也有过较多研究^[1~4], 但过去较多侧重于作物根系层平均土壤水分状况的预报, 且大多属于经验性方法。本项研究则从土壤水动力学的角度出发, 建立了一个有玉米生长条件下农田土壤水分预报的模

• 本项研究获得国家自然科学基金和霍英东基金及中国科学院“百人计划”项目的资助。

收稿日期 1995-03-21, 修改稿收到日期, 1996-01-06。

型,反映了玉米田土壤水分变化的物理关系,并把该模型应用于生产实践进行了验证。

1 预报模型的建立

1.1 根区及根区以下土壤水分变化的动力学模式

在忽略田间侧向水流运动时,有玉米根系吸水条件下的土壤水分运动基本方程为:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] - \frac{\partial k(\theta)}{\partial z} - S(z, t) \quad (1)$$

式中: θ 是土壤容积含水率 (cm^3/cm^3); t 是时间 (h); z 是垂直坐标,以土壤表面为参考面,向下为正 (cm); $D(\theta)$ 是土壤水分扩散率 (cm^2/h); $k(\theta)$ 是土壤导水率 (cm/h); $S(z, t)$ 是作物根系吸水率 (l/h),表示单位时间内从单位体积土壤中所吸收的水分子体积,当 z 大于根系伸展深度 z_r 时, $S(z, t) = 0$ 。

对于黄土高原地区,地下水埋深较大,对表土层水分运动无影响。据作者观测在灌溉条件下,一定深度处 ($d = 200 \text{ cm}$) 的土壤含水率近似稳定不变,其定解条件则表示为:

$$\theta(z, t)|_{z=0} = \theta_0(z), \quad (\text{初始条件}) \quad (2a)$$

$$-D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} + K(\theta)|_{z=0} = -E_s(t) + R(t), \quad (\text{上边界条件}) \quad (2b)$$

$$\theta(z, t)|_{z=d} = \theta_0(d), \quad (\text{下边界条件}) \quad (2c)$$

式中: $\theta_0(z)$ 是初始时刻在土壤剖面不同深度处的含水率; $\theta_0(d)$ 是 d 深度处在初始时刻的土壤含水率; $E_s(t)$ 是 t 时刻的裸土土壤蒸发率 (cm/h); $R(t)$ 是灌水或降水时株间土壤表面的入渗率 (cm/h)。

1.2 玉米根系吸水模式

根系吸水是农田土壤水分变化的重要影响因素。根据 1988~1990 年玉米生长条件下逐日根系层不同深度土壤含水率的观测资料,采用动态模拟的方法,求出不同条件下根系吸水率在土壤剖面上的分布,考虑根系分布和作物蒸腾对根系吸水的影响,建立了如下玉米根系吸水模式^[5]:

$$S(z, t) = A \cdot ET(t) \cdot e^{-0.7597(z/z_r - 0.2881)^2/z_r} \quad (3)$$

式中: $ET(t)$ 是 t 时刻玉米的实际蒸发蒸腾率 (cm/h); z_r 是玉米根系层深度 (cm); A 是与叶面积指数有关的系数。反映了叶面蒸腾量在总蒸发蒸腾中的比例,依据玉米生育期用实测土壤水分资料借助于水量平衡方程求得的总蒸发蒸腾量和用株间蒸发皿测定的株间土壤蒸发量数据,分析叶面蒸腾量占总蒸发蒸腾量的比例与叶面积指数的关系,得到下式^[5]:

$$A = 1 - e^{-0.4015 LAI} \quad (4)$$

式中: LAI 是玉米冠层叶面积指数。

1.3 玉米蒸发蒸腾模型

玉米蒸发蒸腾采用由气象因素计算的参考作物蒸发蒸腾 ET_0 乘以玉米作物系数和土壤水分修正系数求得,即:

$$ET(t) = k_c(t) \cdot k_w(t) \cdot ET_0(t) \quad (5)$$

式中: $k_c(t)$ 、 $k_w(t)$ 分别是 t 时刻的作物系数和土壤水分修正系数。

1.3.1 参考作物蒸发蒸腾量 参考作物蒸发蒸腾量 $ET_0(t)$ 代表气象因素对 $ET(t)$ 的影响。某阶段内 ET_0 的日平均值采用修正后的彭曼 (Penman) 公式计算,即:

$$ET_0 = \left\{ \frac{P_0}{P} \frac{\Delta}{\gamma} \left[0.75 Q_A \left(a + b \frac{n}{N} \right) - \sigma T_s^4 (0.56 - 0.079 \sqrt{e_a}) (0.1 + 0.9 \frac{n}{N}) \right] \right. \\ \left. + 0.26 (e_s - e_a) (1.0 + cu_2) \right\} / \left(\frac{P_0}{P} \frac{\Delta}{\gamma} + 1.0 \right) \quad (6)$$

式中: σ 是斯蒂芬-玻尔兹曼常数,当计算的 ET_0 用 mm/d 表示时,其值为 2.01×10^{-9} ; n 是实际日照时数 (h); T_s 是绝对气温 ($^{\circ}\text{K}$); e_a 是实际水汽压 (hPa); u_2 是 2 m 高处的风速 (m/s); c 是风速修正系数; e_s 是饱和水汽压; P_0 与 P 分别为海平面的标准大气压和计算地点的实际气压; Δ 是饱和水汽压-温度曲线上的斜率; γ 是湿度计算常数; N 是理论日照时数 (h); Q_A 是理论太阳辐射。

有关参数可通过公式计算,在一定的地理纬度仅需输入风速、日照、水汽压和气温等资料,即可计算

某日的 ET_0 , 由于预报玉米生长条件下农田土壤水分动态需要任一时刻的 $ET_0(t)$, 所以需要对比平均 ET_0 进行分配。根据大量的 $ET_0(t)$ 日变化研究结果表明, 在早 7:00 之前和傍晚 19:00 之后, $ET_0(t)$ 值为零或很小, 可略而不计。因此, 任一时刻的 $ET_0(t)$ 能表示为:

$$ET_0(t) = ET_0 \left| \cos\left(\frac{t-13}{12}\right)\pi \right| / \sum_{i=7}^{19} \left| \cos\left(\frac{i-13}{12}\right)\pi \right|, \quad (7 \leq t \leq 19) \quad (7a)$$

$$ET_0(t) = 0, \quad (t < 7, t > 19) \quad (7b)$$

式中: ET_0 是每日的参考作物蒸发蒸腾量(mm/d), $ET_0(t)$ 是一日中 t 时刻的参考作物蒸发蒸腾速率(mm/h)。

1.3.2 作物系数 $k_c(t)$ $k_c(t)$ 是玉米本身生物学特性的反映, 它与作物种类、品种、生育期和生长状况等有关。根据作者研究结果表明, $k_c(t)$ 与水文年份关系不密切, 与产量水平有一定的关系, 对于同一作物在一定区域范围内较稳定, 依据陕西省关中西部地区三站多年充分供水条件下不同阶段的实测玉米蒸发蒸腾量和用彭曼公式计算的相应阶段的参考作物蒸发蒸腾量, 计算不同阶段的作物系数 $k_c(t)$, 结果表明, 在玉米播种后其值逐渐增大, 在生长盛期 $k_c(t)$ 达到最大值, 然后逐渐下降, 但下降比上升缓慢, 这是因为玉米收获时, 仍有一定的绿色叶面积存在, 仍维持有一定的蒸发蒸腾所致。经回归分析得^[2]:

$$k_c(t) = 0.5737 + 0.0186 J_d - 0.0001 J_d^2 \quad (8)$$

式中: J_d 是玉米播种后的天数; $k_c(t)$ 是第 J_d 天的作物系数, 由于 k_c 在一日内变化极小, 因此能把第 J_d 天内任一模拟时段的 k_c 取为日平均值。

1.3.3 土壤水分修正系数 $k_w(t)$ Thornthwaite 与 Mather 曾认为土壤水分修正系数在田间持水量 θ_f 与凋萎系数 θ_{wp} 之间线性减小, 原苏联阿尔巴捷夫也提出了类似的方法。鹿洁忠曾应用这种方法对农田水平衡和干旱的计算预报问题进行了研究, 取得了较满意的结果。为了应用方便 $k_w(t)$ 可近似认为是相对有效含水率的线性函数, 即:

$$\begin{cases} k_w(t) = \frac{\theta(t) - \theta_{wp}}{\theta_f - \theta_{wp}} & (\theta(t) < \theta_f) \\ k_w(t) = 1.0 & (\theta(t) \geq \theta_f) \end{cases} \quad (9a)$$

$$\quad (9b)$$

式中: $\theta(t)$ 是 t 时刻的 1.0 m 土层内的平均含水量; θ_f 与 θ_{wp} 分别是田间持水量和凋萎系数。

根据上述过程即可确定玉米的实际蒸发蒸腾量 $ET(t)$, 于是裸间土壤蒸发率 $E_s(t)$ 为:

$$E_s(t) = ET(t) - A \cdot ET(t) = (1 - A)ET(t) \quad (10)$$

以上通过 3 个子模型, 把土壤、作物、大气有机的连系在一起, 构成一个相互联系, 相互反馈的土壤-植物-大气系统(SPAC)。通过此模型的运行, 即可进行玉米生长条件下的农田土壤水分动态预报。

1.4 模型中有关参量的测取与计算

1.4.1 土壤水分运动参数 作者预报的是西北农业大学灌溉试验站玉米田的土壤水分动态。该地土壤为武功壤土, 质地为中壤, 土壤剖面具有明显的层状结构, 50 cm 以上为耕层, 50 cm 以下为母质层。用水平土柱入渗法分层测定土壤水分扩散率 $D(\theta)$, 用压力膜测定不同层次土壤的水分特征曲线, 由 $D(\theta)$ 和土壤水分特征曲线的测定结果, 推得土壤的导水率 $k(\theta)$, 其结果为:

$$\begin{cases} D(\theta) = 0.146 e^{14.097 \theta} & (0 \sim 50 \text{ cm 土层}) \\ D(\theta) = 0.079 e^{16.443 \theta} & (51 \sim 220 \text{ cm 土层}) \end{cases} \quad (11a)$$

$$\quad (11b)$$

$$\begin{cases} k(\theta) = 1.371 \times 10^{-3} e^{-9.643 \theta} (1 + 0.021 e^{24.626 \theta}) & (0 \sim 50 \text{ cm 土层}) \\ k(\theta) = 7.960 \times 10^{-2} e^{-9.742 \theta} (1 + 0.018 e^{26.185 \theta}) & (51 \sim 220 \text{ cm 土层}) \end{cases} \quad (12a)$$

$$\quad (12b)$$

式中: θ 是容积含水率(cm^3/cm^3); $D(\theta)$ 意义同前, (cm^2/h); $k(\theta)$ 的单位是 cm/h 。

1.4.2 玉米根系伸展深度 z_r z_r 与灌水方式、前期土壤水分条件以及生育期内的供水状况等许多因素有关, 变化关系复杂, 尚难直接用理论公式计算, 在田间条件下需对其进行简化。根据不同时期玉米根系伸展深度 Z_r 的实测资料分析, 在地面灌溉条件下, 玉米根系伸展深度 Z_r 可用下述经验公式近似表示:

$$z_r = -0.6389 + 0.9742 J_d \quad (13)$$

式中：符号意义同前。

1.4.3 株间土壤表面入渗率 $R(t)$ 在黄土高原地区，降水时的入渗基本上近似无积水入渗，其入渗率 $R(t)$ 与冠层截留后到达棵间的降水强度 $P_s(t)$ 相等，而 $P_s(t)$ 与降水强度 $P(t)$ 和叶面积指数 LAI 有关，采用下式计算：

$$\begin{cases} P_s(t) = P(t) - 0.092 LAI \cdot P(t)^{[0.63 - 0.0085(P(t) - 1.0)]} & (P(t) > 17 \text{ mm/d}) & (14 \text{ a}) \\ P_s(t) = P(t) - 0.225 LAI & (P(t) \leq 17 \text{ mm/d}) & (14 \text{ b}) \end{cases}$$

2 玉米田水分动态预报模型的求解方法

2.1 根区及根区以下土壤水分变化动力学模式的求解

式(1)是非线性、非齐次的偏微分方程，只能用数值方法求其近似解。本文采用有限差分法求解。将区域 $(0 \leq z \leq d, 0 \leq t \leq T)$ 按矩形方式进行剖分，深度结点编号为 $i(i=0, 1, 2, \dots, n)$ ，步长为 Δz ；时间结点编号为 $j(j=0, 1, 2, \dots, m)$ ，步长为 Δt 。因显式差分格式其稳定性和收敛程度在很大程度上决定了时间步长和深度步长的大小。隐式差分格式对于时间步长和深度步长都是无条件稳定，故采用隐式差分格式，列差分方程如下：

$$\frac{\theta_i^{j+1} - \theta_i^j}{\Delta t} = \frac{D_{i-1/2}^{j+1}(\theta_{i+1}^{j+1} - \theta_i^{j+1}) - D_{i-1/2}^{j+1}(\theta_i^{j+1} - \theta_{i-1}^{j+1})}{(\Delta z)^2} - \frac{k_{i+1}^{j+1} - k_i^{j+1}}{2(\Delta z)} - S_i^{j+1/2} \quad (15)$$

经化简整理得：

$$a_i \theta_{i-1}^{j+1} + b_i \theta_i^{j+1} + c_i \theta_{i+1}^{j+1} = h_i \quad (16)$$

式中：

$$a_i = \frac{\Delta t}{(\Delta z)^2} D_{i-1/2}^{j+1} \quad (17 \text{ a})$$

$$b_i = 1 + \frac{\Delta t}{(\Delta z)^2} (D_{i-1/2}^{j+1} + D_{i+1/2}^{j+1}) \quad (17 \text{ b})$$

$$c_i = \frac{\Delta t}{(\Delta z)^2} D_{i+1/2}^{j+1} \quad (17 \text{ c})$$

$$h_i = \theta_i^j - \frac{\Delta t}{2(\Delta z)} (k_{i+1}^{j+1} - k_i^{j+1}) - \Delta t S_i^{j+1/2} \quad (17 \text{ d})$$

以上各式 $i=1, 2, 3, \dots, n-1$ 。对于上边界结点 $i=0$ ，在地表边界处棵间蒸发率已知的条件下，由式(2 b)再补充一个差分方程， $\partial\theta/\partial z$ 取向前差分，则得：

$$D_0^{j+1} \frac{\theta_0^{j+1} - \theta_0^j}{\Delta z} + k_0^{j+1} = -E_0^{j+1/2} + R^{j+1/2} \quad (18)$$

亦可简写为：

$$b_0 \theta_0^{j+1} + c_0 \theta_1^{j+1} = h_0 \quad (19)$$

其中：

$$b_0 = D_0^{j+1} / \Delta z \quad (20 \text{ a})$$

$$c_0 = -b_0 \quad (20 \text{ b})$$

$$h_0 = -E_0^{j+1/2} + R^{j+1/2} - k_0^{j+1} \quad (20 \text{ c})$$

因此，要根据时段初已知的土壤含水率分布和上、下边界条件求时段末各结点的土壤含水量。必须联立求解如下代数方程： $[A][\theta] = [H]$ 。该方程中系数矩阵 $[A]$ 仅在主对角线及相邻两侧对角线上有非零元素，是三对角的，采用追赶法求解。在求解时土壤水分扩散率 $D_{i+1/2}^{j+1}$ 与 $D_{i-1/2}^{j+1}$ 在空间上取上下两结点参数值的几何平均值，即：

$$D_{i+1/2}^{j+1} = (D_i^{j+1} \cdot D_{i+1}^{j+1})^{1/2} \quad (21 \text{ a})$$

$$D_{i-1/2}^{j+1} = (D_i^{j+1} \cdot D_{i-1}^{j+1})^{1/2} \quad (21 \text{ b})$$

2.2 根系吸水模式的求解

求解根区土壤水分变化动力学模式时，根区吸水率 $S_i^{j+1/2}$ 是输入项。由式(3)离散可得：

$$S_i^{j+1/2} = A(J_d)ET^{j+1/2} \cdot e^{-0.7775(i-1)\Delta z/2 + J_d^{j+1/2} - 0.2821)^2 / Z_r(J_d)} \quad (22)$$

式中: $i=0, 1, 2, \dots, n$; $A(J_d)$ 与 $Z_r(J_d)$ 是与播后天数 J_d 有关的; $ET^{j+1/2}$ 是从 j 到 $j+1$ 时段内的平均蒸发蒸腾速率。由此即可求得 $S_i^{j+1/2}$ 。

2.3 玉米蒸发蒸腾模型的求解

$$ET^{j+1/2} = k_w^{j+1/2} \cdot k_c^{j+1/2} \cdot ET_b^{j+1/2} \quad (23)$$

其中:

$$\begin{cases} ET_{0j}^{j+1/2} = ET_c \left| \cos\left(\frac{j-13}{12}\right)\pi \right| / \left| \sum_{j=7}^{19} \cos\left(\frac{j-13}{12}\right)\pi \right| & (7 \leq t \leq 19) \end{cases} \quad (24 a)$$

$$\begin{cases} ET_b^{j+1/2} = 0 & (t < 7, t > 19) \end{cases} \quad (24 b)$$

$$\begin{cases} k_w^{j+1/2} = \left[\frac{1}{11} \sum_{i=1}^{11} (\theta_i^{j+1} - \theta_{wp}) \right] / (\theta_f - \theta_{wp}) \end{cases} \quad (24 c)$$

由以上过程, 输入有关参数即可预测蒸发或入渗条件下玉米田的水分动态过程。

3 模型的应用与预报结果分析

用该模型预报了西北农业大学灌溉试验站 1990 年至 1992 年玉米地的土壤水分动态过程。1990-07-24~08-27, 共 34 d。1991-07-24~08-12, 共 20 d。1992-07-08~08-22, 共 46 d。预报时分别取时间步长 $\Delta t = 1$ h, 0.5 h 和 2 h, 结果表明 Δt 变化对预报结果的精度无明显的影响, 但 Δt 变小则计算所花费的机时增加。从预报日变化的需要和节省机时考虑, 取 $\Delta t = 1$ h, $\Delta z = 10$ cm。预报的土壤水分剖面深度 $d = 220$ cm。为了检验该模型的预报精度, 作者对玉米田土壤水分时空分布的预测结果与实测结果进行了比较, 逐一计算不同时刻不同深度处土壤含水率预测值与实测值的绝对误差, 并计算不同时刻整个土壤剖面上的平均绝对误差, 采用的计算式为:

$$\delta = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\theta_{vi} - \theta_{wi})^2 / n} \quad (25)$$

式中: θ_{vi} 是第 i 深度结点土壤含水率的模拟值; θ_{wi} 是第 i 深度结点土壤含水率的实测值; δ 是某时刻土壤剖面上的平均绝对误差, 计算 δ 时上边界结点的数据未统计在内, 因为 $z=0$ 这种理想状态的实测含水率是很难得到的。

经统计, 在不同时间玉米田高水分区和中水分区的预测值与实测值的平均绝对误差 δ 如表 1 所示。从表 1 可看出, 预报值与实测值的绝对误差在 1990 年高水分区平均为 $0.178 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, 相当于重量含水

表 1 玉米田土壤含水率预报值与实测值间的平均绝对误差 δ

Table 1 The absolute error of the predicted soil water content in summer corn growing season during 1990~1992

1990 年 $\delta(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$			1991 年 $\delta(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$			1992 年 $\delta(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$		
日期 Date	高水分 ¹⁾ 处理	中水分 ²⁾ 处理	日期 Date	高水分 处理	中水分 处理	日期 Date	高水分 处理	中水分 处理
07-25	0.0213	0.0168	07-25	0.0208	0.0197	07-11	0.0195	0.0286
07-26	0.0119	0.0186	08-03	0.0144	0.0232	07-16	0.0202	0.0193
07-27	0.0199	0.0195	08-04	0.0218	0.0219	07-19	0.0277	0.0184
07-28	0.0244	0.0222	08-05	0.0418	0.0361	07-23	0.0398	0.0384
08-25	0.0107	0.0135	08-12	0.0312	0.0341	07-27	0.0385	0.0417
08-26	0.0137	0.0152				08-05	0.0402	0.0342
08-27	0.0157	0.0189				08-14	0.0376	0.0177
						08-22	0.0304	0.0316
平均	0.0178	0.0178	平均	0.026	0.027	平均	0.0317	0.0287

1. High moisture treatment 2. Medium moisture treatment

率为 1.24%；中水分区平均也为 $0.0178 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。高水分区最大误差为 $0.0244 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ，相当于重量含水率为 1.69%；中水分区最大误差为 $0.0222 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ，相当于重量含水率为 1.54%。在 1991 年高水分区平均误差为 $0.26 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ，相当于重量含水率为 1.80%；中水分区平均误差为 $0.027 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ，相当于重量含水率为 1.86%。1992 年高水分区平均误差为 $0.0317 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ，相当于重量含水率为 2.20%；中水分区平均误差为 $0.0287 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ，相当于重量含水率为 1.99%。因此，预报值与实测值相差较小。为了分析预报值与实测值在剖面上的分布差异，还选择 1992 年玉米田中水分处理 4 个不同深度的土壤含水率预报值与实测值绘出了其变化过程线，如图 1 所示。从图 1 可看出，不同深度的土壤含水率预报值也较为接近其实测值。

此外，作者还比较了预报期间内玉米蒸发蒸腾量预报值与实测值，在 1990-07-24~08-27 共 34 d 内的预报值为 139.42 mm，由实测土壤含水率分布依据水量平衡法得到的实测值为 159.37 mm，其相对误差为 -12.52%；1991-07-25~08-12 的蒸发蒸腾量预报值为 74.16 mm，实测值为 86.24 mm，其相对误差为 -14.00%；1992-07-08~08-22 内的预报值为 152.88 mm，实测值为 180.76 mm，其相对误差为 15.42%。

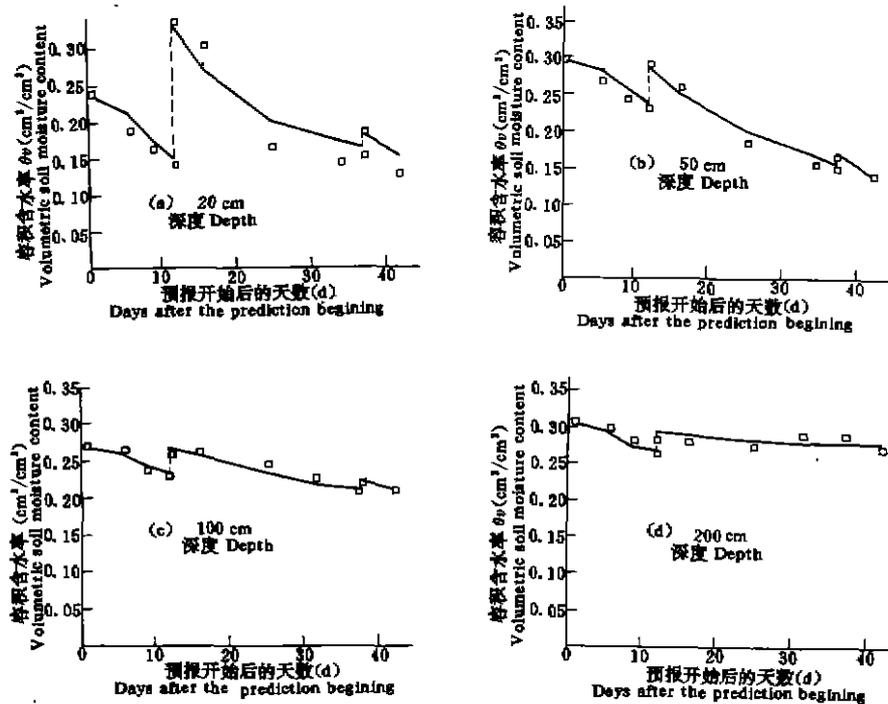


图 1 1992 年玉米田不同深度土壤含水率预报值(线)与实测值(点)的比较

Fig. 1 Comparison of the predicted soil moisture content (line) at different depth with the measured data (point) of summer corn land in 1992

本文提出的玉米田土壤水分动态预报模型综合考虑了土壤、作物和大气连续系统中的水分传输进程，能较好的揭示其水分变化的物理关系，因此，用于土壤水分预报具有一定的精度保证。但是本文的预报模式是在一定地区和作物条件下建立的，其参数不能直接套用，应用该模式时应根据具体地区和作物条件确定当地适用的参数，这样才能保证其精度。

参 考 文 献

- 1 康绍忠, 熊运章. 干旱缺水条件下麦田蒸散量的计算方法. 地理学报, 1990, 45(4): 475~483
- 2 康绍忠等. 陕西省作物需水量及分区灌溉模式. 北京: 水利电力出版社, 1992. 51~58
- 3 鹿洁忠. 农田水分平衡和干旱的计算预报. 北京农业大学学报, 1982, 2(8): 69~75
- 4 刘作新等. 辽西地区农田水分状况的研究 1. 旱地作物的水分平衡估算及其调控. 应用生态学报, 1992, 3(1): 20~27
- 5 刘晓明, 康绍忠, 韦 忠. 夏玉米根系吸水模式的研究. 西北水资源与水工程, 1991, 2(2): 32~36
- 6 康绍忠, 张富仓. 作物叶面蒸腾与棵间蒸发分摊系数的计算方法. 水科学进展, 1995, 4(4): 285~289
- 7 Novak V. Estimation of soil-water extraction patters by roots. *Agric. Water Management*, 1987. 12: 271~278
- 8 Feddes R.A. *et al.* Field test of a modified numerical model for water uptake by root systems. *Water Resources Res.* 1974, 10: 1199~1206