

一种改进的土壤水分平衡模式^D

申双和

李胜利

(南京气象学院, 南京 210044)

(湖北省襄樊市气象局, 441000)

提 要

将美国学者 J. T. Ritchie 等研制的作物生长模拟模式(CERES-小麦模式)中的土壤水分平衡子模式应用于我国半干旱地区甘肃省西峰市农业气象试验站固定地块麦地土壤水分的模拟,对原有模式中潜在蒸散、地表蒸发和作物蒸腾加以修正,同时,为增强模式的应用性能,引入一种由作物生育期来估算作物根系最大深度和土壤各层相对根密度的方法。改进后的土壤水分平衡模式取得较好的应用效果,为旱地农田土壤水分管理提供了一种方便、适用的方法。

关键词: CERES-小麦模式 土壤水分平衡 地表蒸发 作物蒸腾 相对根密度

引 言

农田土壤水分状况一直是干旱地区农业生产研究中的重要课题,我国大约有三分之二的耕地面积经常处于缺水状态,限制了作物生长发育,造成丰富的光热资源浪费,其中又有三分之一的灌溉农田由于缺乏科学的水分管理,造成原本紧缺的水分资源大大浪费。当前旱地农业的节水灌溉问题已成为研究热点,但是,节水灌溉必须在充分了解当地水分资源、作物生育过程的水分需求以及农田土壤含水量动态的情况下才能得以实施。其中有关农田土壤水分动态研究方面,国内外已开展了大量研究并取得许多理论与实践成果^[1,2,3],但是这些成果对不同的研究目标有其不同的特点和可适用的范围,如运用数学物理方法虽精度较高,但时间步长较小,所需测定要素容量大,在生产实践中难于应用;运用经验统计方法在某一地区有一定的适用价值,但对气候异常的应变能力弱,适用范围狭窄;利用土壤水分平衡可根据时间尺度确定

其所需的参数,只要对土壤水分各收支项正确处理,就可以在时间步长较大情况下获得所需的模拟效果。就目前而言,这种方法应用较广泛,但是土壤水分状态变量对各分量的敏感性很强,因而,对这些分量的处理要求比较严格。Ritchie 等人(1987)提出的用于作物生长模拟的 CERES 土壤水分平衡模式,综合考虑了农田水分收入、入渗、支出和再分配各个物理过程,具有较强的物理机制,而且所需的气象、作物和土壤参数较少,易于实践中使用。但该模式对潜在蒸散、地表实际蒸发的处理较粗,同时模式中各层土壤的根系密度分布与作物干物质累积有关,因而难以单独用于土壤水分模拟,削弱了其应用性能。本文对该模式做了以下改进:① 引入一种适合于我国西北干旱地区的蒸发力计算公式;② 使用土壤供水系数计算地表蒸发和作物蒸腾;③ 设计一种随作物生育期而动态改变的相对根系密度函数。通过这些修正,将模式应用于甘肃省西峰市农业气象试验站内固定地段

^D 江苏省“青蓝工程”资助项目。

冬小麦土壤水分动态预测。

1 模式结构

土壤水分平衡计算包括水分收入(降水、灌溉)、支出(蒸发和蒸腾)、水分在土壤各层分配(径流、入渗和渗漏)以及重新分配4个主要过程。

1.1 水分收入

进入土壤中的水分由下式计算:

$$P = I + R + M - r \quad (1)$$

式中, P 是土壤水分收入(mm), I 是人工灌溉, R 是降水量, M 是融雪量, r 是径流量。

$$r = \frac{(P_i - 0.2\eta)^2}{(P_i + 0.8\eta)} \quad (2)$$

式中, P_i 是不考虑径流时水分收入总和, η 为水分滞留系数。

$$\eta = \frac{25400}{(\mu - 1)} \quad (3)$$

μ 根据土壤水分状况确定:

$$\mu = \begin{cases} \mu_2 + (\mu_3 - \mu_2)C_d, & C_d \geq 1 \\ \mu_1 + (\mu_2 - \mu_1)C_d, & C_d < 1 \end{cases} \quad (4)$$

C_d 和 C_w 分别表示较干和较湿时土壤湿度对径流的影响。

$$C_d = \sum_{i=1}^N \frac{\theta_i - C_i}{S_i - C_i} w_i \quad (5)$$

$$C_w = \sum_{i=1}^N \frac{\theta_i - F_i}{S_i - F_i} w_i \quad (6)$$

式中, N 为总土壤层数, θ 、 S 、 C 和 F 分别为第 i 层土壤容积含水量、饱和持水量、田间持水量和凋萎湿度, w_i 是径流权重系数:

$$w_i = d_i - d_{i-1} \quad (7)$$

$$d_i = 1.016 [1 - \exp(-4.16 \frac{d'_i}{D})] \quad (8)$$

式中, d_i 是第 i 层土壤厚度, d'_i 是第 i 层以上的土壤累积厚度, D 为总土层厚度。式(4)中 μ_1 和 μ_3 根据径流曲线号码 μ_2 确定, 而 μ_2 又与土壤质地和坡度有关, 对本文涉及的坡度为 0~5% 的黄土取 64。

1.2 水分入渗

进入土壤的水分逐层向下入渗, 第一层

的入渗通量为 P , 以下土层根据各层水分状况计算, 某层 i 可再容纳的水分为:

$$h = (S_i - \theta_i) d_i \quad (9)$$

若土层已达饱和, 则水分的饱和入渗通量为:

$$f_s = k(\theta_i - C_i) d_i \quad (10)$$

式中 k 为水分传导系数(d^{-1}), 与土壤渗透性有关, 这里取 0.5。

根据入渗的水分与该层土壤还可容纳的水分计算土壤水分和向下入渗的流量。

① 若该通量小于该层可再容纳的水分则土层未达饱和, 入渗水全部进入该土层, 以下无饱和入渗, 此时该土层含水量为:

$$\theta_i = \theta_i + \frac{q_i}{d_i} \quad (11)$$

式中 θ'_i 为前一天第 i 层土壤含水量, 若 $\theta_i < C_i + 0.03$, 则向下的非饱和入渗通量为 0, 否则, 非饱和入渗通量为:

$$q_{i+1} = k(\theta_i - C_i) d_i \quad (12)$$

式中 q_{i+1} 为自 i 层向 $i+1$ 层的入渗通量, 此时第 i 层土壤水分须减去 q_{i+1} 。

② 若通量大于该层可再容纳的水分, 则向下的水分通量为:

$$q_{i+1} = q_i - h + f_s \quad (13)$$

此时土壤水分为:

$$\theta_i = S_i - \frac{f_s}{d_i} \quad (14)$$

1.3 地表蒸发和作物蒸腾

首先计算潜在蒸散

$$ET_p = K_c E_0 \quad (15)$$

式中 E_0 为水面蒸发量, 作者曾研究水面蒸发的计算方法, 认为伊万诺夫的计算公式^[4]最适合西北干旱地区, 因此这里使用该式计算, K_c 为作物系数, 与作物发育期有关^[5]。

潜在蒸发 E_{sp} 和潜在蒸腾 T_p 分别用下式计算:

$$E_{sp} = \exp(-\alpha \cdot LAI) ET_p \quad (16)$$

$$T_p = (1 - \exp(-\alpha \cdot LAI)) ET_p \quad (17)$$

式中 α 为常数, 取 0.428^[6], LAI 是叶面

积指数,同样根据发育期估算。当土壤水分充足时,实际蒸发和实际蒸腾分别等于潜在蒸发和潜在蒸腾,当水分受限制时,分别用下式计算:

$$E_s = \frac{\ln(100k_w + 1)}{\ln 101} \exp(1 - \alpha \cdot LAI) ET_p \quad (18)$$

$$T = \frac{\ln(100k_w + 1)}{\ln 101} \exp(1 - \alpha \cdot LAI) ET_p \quad (19)$$

式中 k_w 是土壤水分供应系数:

$$k_w = \frac{\theta_i - F_i}{C_i - F_i} \quad (20)$$

实际蒸腾在土壤各层的分配取决于该层根系密度,正如前面所述,由于很难得到实测根密度资料,本文利用作物发育期估算相对根密度的垂直分布^[7]:

$$\frac{dr}{dz} = \frac{\lambda}{H(t)(1 - \exp(-\lambda))} \exp\left(\frac{-\lambda z}{H(t)}\right) \quad (21)$$

式中 r 为某一深度处的相对根密度, $H(t)$ 是在不同生育期根系所达到的深度 (cm), λ 为常数,对小麦取 0.35^[8], $H(t)$ 随时间的变化可用 S 型曲线描述^[9]:

$$H(t) = \frac{H_m}{1 + \exp\left(a - \frac{bt}{t_m}\right)} \quad (22)$$

式中 H_m 是作物一生中根系所能达到的最大深度 (设为 180cm), 是自播种后的日数, t_m 是自播种后根系达到 H_m 深度时的日数 (设为 200 日), a, b 是回归系数,可根据文献^[9]的试验资料确定。

不同深度根系吸水强度与根系密度有关,表示为:

$$S(z, t) = T \frac{dr}{dz} \quad (23)$$

从第 i 层到第 $i + 1$ 层土壤中根系吸水强度则为:

$$\int_{z_i}^{z_{i+1}} S(z, t) dz = T \int_{z_i}^{z_{i+1}} dr \quad (24)$$

1.4 土壤水分再分配

由于土壤各层水分收支不均,各土层湿度有差异,从而在相邻两层之间水分将通过扩散进行重新分配,其计算方法是

$$\Psi_i = \eta_i \frac{\theta_{i+1} - F_{i+1} - (\theta_i - F_i)}{0.5(d_i + d_{i+1})} \quad (25)$$

式中 Ψ_i 为从 $i + 1$ 层扩散的水分通量 (向上扩散为正), η_i 为水分扩散系数,它与含水量有关:

$$\eta_i = 0.88 \exp\left[35.4 \frac{(\theta_i - F_i) + (\theta_{i+1} - F_{i+1})}{2}\right] \quad (26)$$

在式(24)、(25)中规定 $\theta_i - F_i$ 不得小于 0, η_i 不大于 50。在计算各层间水分扩散后须重新计算各层土壤水分 (第 i 层加上 Ψ_i , 第 $i + 1$ 层减去 Ψ_i)。

2 模式计算流程

模型计算由 C 语言编制程序并在微机上运行,其计算流程见图 1。

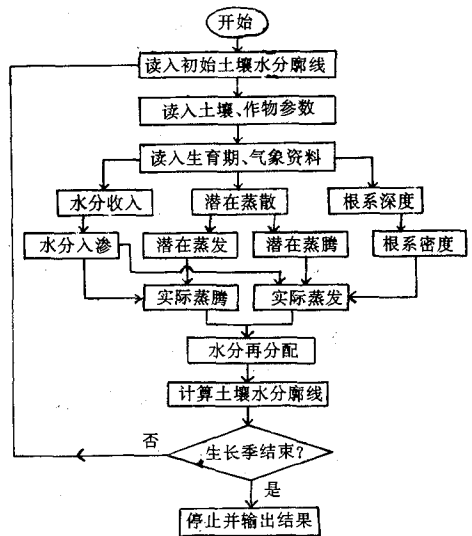


图 1 模型简化计算流程

3 模式应用实例

3.1 自然概况与资料来源

模型应用选择地处甘肃省东部地区的西峰农业气象试验站内冬小麦地固定试验地段,当地气候属半湿润~半干旱过渡地带,平均年降水量 500mm 左右,而小麦生育期间(9月~6月)平均年降水量仅 350mm 左右,降水年际间的变率大,作物产量的波动性很大,高产年份可达 4755kg/hm²,低产年份只有 2355kg/hm²。该地年平均农田潜在蒸散量为 800mm 以上,水分年亏缺量达 300mm,而冬小麦生育期内水分短缺 200mm 左右,说明当地小麦生产中存在的主要问题是水分不足。试验地段土壤上层为中壤土,下层为重壤土,种植的冬小麦品种是阿勃,土壤水分测定资料取自 1989 年和 1990 年 3~7 月,一般每旬逢 8 进行,遇降水时,降水前后各加测一次,测定深度从地表开始,每隔 10cm 测定一次,最大测定深度为 200cm,但 100~200cm 之间每月逢 8 观测一次。同期气象资料为该站逐日常规观测值,土壤水文物理特征值为专门测定,深度间隔与土壤水分观测一致。

3.2 结果评价

模型的模拟时间步长为 1 天,从 3 月 8 日开始至 7 月 28 日结束,主要对应冬小麦返青(3月 10 日左右)至成熟(7月 10 日前)生育期,应用年份为 1989~1992 年,深度间隔为 10cm,从地表开始直到 200cm 范围内。所有在模式中的待定参数均由 1989 年的资料进行模拟获得,再将这些参数应用于其他年份,预测土壤水分变化。

为简便起见,这里仅绘出 1991 年土壤水分廓线模拟情况,从图上看,模拟值与实测值有很好的-一致性,模式反映了实际土壤水分动态变化,结合附表可以看出,上层效果比下层差,这是由于上层土壤水分变化迅速,同时地表蒸发的处理比较复杂,有待进一步改进。当然,实测土壤水分资料未加任何处理,

部分测值显然不符合实际情况,如在未有降水发生时,上层土壤水分却有明显增加,从而使误差变得很大。尽管如此,预测效果仍能满足为制定田间土壤水分管理措施的需要,说明本文提出的模式及其参量的处理是可行的。

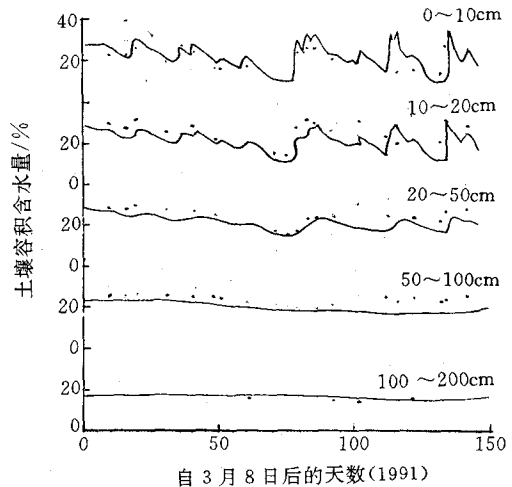


图 2 土壤水分动态模拟值与实测值

附表 各层土壤水分模拟、预测误差/%

土壤层次 /cm	1989 年 (模拟)	1990 年 (预测)	1991 年 (预测)	1992 年 (预测)	平均
0~10	22.1	25.1	25.2	17.9	22.6
10~20	16.9	12.7	11.3	17.2	14.5
20~50	10.9	10.3	12.9	9.1	10.8
50~100	6.3	9.0	15.3	13.1	9.4
100~200	5.5	8.4	4.3	6.6	6.2
加权平均	7.91	9.89	9.74	9.70	8.93

4 结语

农田土壤水分受大气、土壤和作物综合影响,难以十分精确地加以模拟和预测,而 CERES 土壤水分平衡模式充分考虑了土壤水分的供求关系和物理机制,利用经验统计方法对各过程涉及的参数进行适当估计,敏感性高。但敏感性高有时又可能是模式误差

较大的主要原因,因为对模式中某一参数的处理稍有不慎,其精度可能大大降低。本文所设计的对 CERES 小麦模式中水分循环分量的处理使得该模式能直接应用于实际田间水分管理。这里所做的工作是一种尝试,从模拟和预测效果来看,这种尝试是成功的。当然,模拟和预测误差除来源于土壤水分本身测值外,相当一部分应当是由模式中参数处理不精确性产生的,因此,如能借助于实际测定对诸如地表蒸发、根密度分布、作物系数等进行更精确的处理将会使模式取得更好的效果,这方面工作必须在仪器设备的支持下才能开展,也是作者今后进一步努力的方向。

参考文献

1 郑剑飞,范嘉泉. 土壤水分系统动态模拟. 北京农业大学学报,1984(4):493~500.
2 申双和,周英. 农田土壤水分预测模式应用研究. 南京

气象学院学报,15(4):540~549.

3 Jeevananda Reedy, S., A simple method of estimating the soil water balance, *Agricultural Meteorology*, 1983,28:1~7.
4 欧阳海,郑步忠,王雪娥,简为民著. 农业气候学. 北京:气象出版社,1990:202~218.
5 王道龙. 作物系数及其影响因子的初步研究. 北京农业大学学报,1986,12:211~218.
6 Jensen, M. E., A report prepared by the Technical Committee on Irrigation Water Requirements of the Irrigation and Drainage Division of ASCE, 1973
7 Novak, V., Sanojan, M. G., and Arakeljan, A. A., Estimation of soil-water extraction patterns by roots. *Agricultural Water Management*, 1987,12(4):271~278.
8 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. 北京:水利电力出版社,1994:88~96.
9 申双和,金龙,周英,张谋草. 农田土壤水分实用模式初探. *气象科学*,1997,16(3):240~248.

An Improved Model for Soil Water Balance

Shen Shuanghe

(Nanjing Institute of Meteorology, Nanjing 210044)

Li Shengli

(Xiangfan Meteorological Bureau, Hubei Province 441000)

Abstract

A water balance sub-model of crop growth model, CERES wheat model, which was established originally by American scientist J. T. Ritchie et al., was applied to simulate soil moisture of a fixed winter wheat plot at the Xifeng Agrometeorological Experimental Station, Gansu Province, located in semi-arid zone. Corrections were made to estimate potential evapotranspiration, soil surface evaporation, crop transpiration, and root density and maximum rooting depth. Both the density and depth were represented as two functions of crop developmental stages respectively. The improvement achieved good results in soil moisture prediction and may provide a convenient and practical method for management of cropped soil moisture in arid or semi-arid zone.

Key Words: CERES-wheat model soil water balance soil surface evaporation transpiration relative root density