

冬小麦干旱识别和预测模型研究*

赵艳霞**

王馥棠

裘国旺

(北京大学地球物理系,北京 100871) (中国气象科学研究院,北京 100081)

提 要

将作物生长模式引入冬小麦干旱识别和预测中,充分考虑冬小麦对水分消耗利用的影响和冬小麦对水分的需求以及不同发育期对水分的敏感性,是一种识别和预测干旱的新思路。经验证,该冬小麦干旱识别和预测模型具有较好的识别和预测能力。

关键词: 干旱 识别 预测 模型

引 言

我国季风气候显著,气象灾害频繁。其中干旱因其发生频率高、持续时间长、波及范围大而对国民经济特别是农业生产造成严重不利的影响。因此,及时识别和预测干旱的发生及其干旱的程度,为制定防灾、减灾、救灾决策提供科学依据,尤其对适时适量灌溉、合理用水、节约水资源方面具有重要的指导意义。

目前,常用的干旱识别和预测模型往往以土壤为研究对象,以单一要素如土壤水分、时段内的降水量等为指标,对作物因素考虑得不多,考虑作物的动态变化对水分利用以及土壤水分的影响则更少见。研究表明,农业生产中的干旱可区分为土壤干旱和作物干旱,二者既有区别也有联系,其中作物的生长变化以及不同阶段对水分的利用、需求和敏感性是区别两种干旱的重要因素。本文试以华北地区冬小麦为例,在前人研究基础上,利用试验资料对冬小麦生长发育模式进行简化和改进,建立了考虑水分条件的冬小麦简化生长模式,并尝试在冬小麦干旱识别和预测中运用;另外,改进干旱指标形式,并在前人研究的基础上结合试验资料,建立华北地区冬小麦土壤干旱和作物干旱标准。

1 方法和资料

在前人研究的基础上,利用田间试验资料建立冬小麦生长发育与环境气象条件之间关系的数学模式,即冬小麦生长发育模式。在计算土壤水分和作物需水量时充分考虑作物模式输出的作物生长发育的动态信息,即考虑作物因素的影响,使作物需水量和土壤水分含量等计算结果更加准确,据此计算出干旱指标,然后对照干旱标准,识别或预测干旱

* 本文由国家“九五”科技攻关项目 96-020-01-01 资助。

** 在中国气象科学研究院工作。

2000-01-10 收到,2000-06-13 收到再改稿。

情况。

本研究所用资料取自山东泰安农业气象试验站 1983~1986 年和 1996~1998 年以及郑州农业气象试验站 1996~1998 年共 44 个样本的冬小麦水分试验资料。试验是在人为控制水分条件下进行的。试验场设有大型活动式防雨棚,可控制降水;场地铺有供水管道并装有水表,可定量给试验区灌水;为避免土壤水分在水平方向发生交换,试验区周围设有隔离层。泰安 1984、1985 和 1986 年的试验共设 3 个不同水平的水分控制,其土壤湿度分别为田间持水量的 <40%、40%~55%、55%~80%,另设自然降水区作为对照试验,水分控制分别在拔节至抽穗期和抽穗至成熟期进行;1997 和 1998 年的试验也设 5 个不同水平的水分控制,其土壤湿度分别为田间持水量的 <45%、45%~50%、51%~55%、56%~60%和 60%~80%,水分控制时段为返青至拔节和拔节至抽穗,处理持续的时间分别为 10、20 和 30 d。对于郑州,本研究只使用了对照试验的资料。另外还使用山东临沂、莱阳、菏泽 3 站 1986~1990 年的农业气象情报资料。

建立模型主要使用 1983~1986 年的试验资料,个别参数的确定也参考了 1996~1998 年的试验资料。模型检验则使用了上述全部资料。

2 模型描述

冬小麦干旱识别和预测模型由 3 个子模型组成:冬小麦生长发育子模型、土壤干旱子模型和冬小麦干旱子模型。

2.1 冬小麦生长发育子模型

基于简便实用的目的,只模拟了冬小麦主要发育期、叶面积指数、根深和生物量,对生物量的模拟没有沿用由光合作用合成量减去呼吸作用消耗量然后再进行同化物分配的思路,而是直接通过冬小麦蒸腾消耗的水分导出其合成的生物量。

(1) 发育期

按照农业气象观测规范,冬小麦生长过程中经历出苗、三叶、分蘖等 12 个发育期。本文根据需要只模拟越冬始期、返青期、拔节期、开花期和成熟期 5 个主要发育期。当旬平均温度第一次 <0℃时,将其在旬内做线性内插得出 0℃出现的日期,即确定为越冬始期。当旬平均温度第一次大于 3℃时,用同样方法得出 3℃出现的日期作为返青期。作物发育速度与热量的累积密切相关,本模式以发育所需积温为指标(根据试验资料和品种特性确定),以实际积温(负温度按 0℃计算)占所需积温的比值作为衡量发育速度的变量(D_s)^[1],其值在 0~2 之间,0~1 表示开花前的各发育阶段,1~2 表示开花至成熟的后期各发育阶段。

$$D_s = \begin{cases} \sum T / T_k & \text{(开花前)} \\ (\sum T - T_k) / T_c + 1 & \text{(开花后)} \end{cases}$$

式中, $\sum T$ 为从出苗至某一发育进程的累积温度; T_k 为出苗至开花所需的积温指标; T_c 为从开花至成熟所需的积温指标。

根据试验资料,当 $D_s = 0.65$ 时的日期为拔节期(不同品种 D_s 的取值有所不同), $D_s = 1$ 时的日期为开花期, $D_s = 2$ 时的日期为成熟期。

(2) 叶面积指数 (L)

冬小麦叶面积在冬前和返青后分别经历缓慢增长-迅速增长-缓慢增长-迅速下降4个阶段,前3个阶段可采用 Logistic 生长函数拟合,第4个阶段采用线性函数模拟。水分适宜条件下叶面积指数为:

$$SL(i) = \begin{cases} L_{\max} \times \frac{1}{1 + \text{EXP}(a + b \times D_{si})} & D_s \leq 0.8 \\ c + d \times D_{si} & D_s > 0.8 \end{cases}$$

式中, L_{\max} 为冬前和返青后最大叶面积系数,由品种结合实测资料确定; a 、 b 、 c 、 d 为系数,由模拟得到; i 为旬次。实际水分下叶面积指数为:

$$L_i = L_{i-1} + \Delta L$$

$$\Delta L = \begin{cases} (SL_i - SL_{i-1}) \times F_l & D_s \leq 0.8 \\ (SL_i - SL_{i-1}) \times (1 + (1 - F_l)) & D_s > 0.8 \end{cases}$$

式中, ΔL 为叶面积指数增量; F_l 为水分胁迫对叶面积指数的订正因子^[2]。

(3) 根深 (R_d)

本研究取最大根深为 150 cm,一般开花前后达到最大根深 $R_{d\max}$ 。

$$R_{di} = R_{d(i-1)} + r$$

$$r = g \times T_t$$

式中, R_d 为根系深度; r 为旬根系增长量; g 为根生长率,取 0.12 cm/($^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$)^[3]; T_t 为旬积温。

(4) 生物量 (TD)

蒸腾同化比是用固定单位 CO_2 蒸腾多少水分表示的。当土壤缺水时,部分气孔关闭,同化和蒸腾几乎受到同样程度的影响,比值基本不变^[1,4]。Van Keulen 和 Seligman 的实验证明,蒸腾同化比不随水分胁迫程度的改变而变化。根据这一特点可利用蒸腾同化比将干物质生产与蒸腾联系起来。用时段内的蒸腾量除以蒸腾同化比再乘以单位转换系数得到以碳水化合物表示的光合作用产物,然后用该光合产物减掉维持呼吸消耗,其差值乘以转换效率得到时段内的生物量。干物质增重量 (kg/hm^2) 为:

$$\Delta D_{Wi} = E_g \times (F_{gi} - R_m \times TD_i)$$

$$TD_i = TD_{i-1} + \Delta D_{W(i-1)}$$

$$F_{gi} = k \times T_{ai} / T_{ar}$$

式中, E_g 为碳水化合物转化为结构干物质的比率,取值为 0.7^[1]; F_{gi} 为第 i 旬以碳水化合物表示的同化量 (kg/hm^2); R_m 为维持呼吸速率,取值为 0.015^[1]; TD_{i-1} 、 TD_i 分别为作物到第 $(i-1)$ 、 i 旬的总干物重 (kg/hm^2); T_{ai} 为第 i 旬的蒸腾量 (mm),其计算方法见本文实际蒸散量部分; T_{ar} 为蒸腾与同化比; k 为单位转换系数,等于 $30/44 \times 10^4$ 。

2.2 土壤干旱子模型

首先计算土壤湿度,然后根据土壤湿度确定土壤干旱的等级。本文中,土壤水分的模拟是以实际长根层为对象的,随着根的增长,根层不断加深,直到达到最大根深(本研究取 150 cm)。土壤水分含量可根据简化的土壤水分平衡方程计算得到,其中计算 D_m 和 ETa 两分量时都考虑了作物长势和根深等作物因素。简化的土壤水分平衡方程可表示为:

$$W_i = W_{i-1} + R_i + I_i + D_{mi} - ETa_i - D_i$$

式中 W 为实际根层土壤水分含量; R 为降水量; I 为灌溉量; D_{mi} 为旬内因根生长进入根层的水量,即新增根层的土壤水分含量; ETa 为实际蒸散量; D 为渗漏量。

(1) 因根生长进入根层的水量 (D_m)

假定根层超过田间持水量的水分均渗漏进入潜在长根层,且潜在长根层水分的分布是均匀的,则:

$$D_{mi} = W_{n(i-1)} \times r / D_{n(i-1)}$$

$$W_{ni} = W_{n(i-1)} - D_{mi} + D_{i-1}$$

$$D_{ni} = R_{dmax} - R_{d(i-1)}$$

式中 W_n 潜在长根层尚未长根的土层的总含水量; D_n 为潜在长根层尚未长根的土层厚度; D 为渗漏量。

(2) 实际蒸散量 (ETa)

$$ETa = ET_c \times f(W)$$

$$ET_c = E_0 \times f(L)$$

式中 ET_c 为作物潜在蒸散; E_0 为标准作物潜在蒸散,由 Penman 公式计算; $f(L)$ 为作物影响函数,采用线性函数表示为^[5]:

$$f(L) = 1 + (K_c - 1) \times L_i / L_{max}$$

式中 K_c 为作物处于最大叶面积指数 L_{max} 时的蒸散系数(本文取 1.25)。

$f(W)$ 为土壤水分对蒸散的影响函数,采用得到广泛应用的三基点模式,即:

$$f(W) = \begin{cases} 1 & W_i > W_k \\ (W - W_p) / (W_k - W_p) & W_k \geq W_i \geq W_p \\ 0 & W_i < W_p \end{cases}$$

式中 W 为土壤水分含量; W_k 和 W_p 分别为土壤临界含水量和蒸散等于零时的含水量。

实际蒸腾量 (T_a)

$$T_a = T_p \times F_t = ET_c \times e^{-\delta \times L} \times F_t$$

式中 T_p 为潜在蒸腾量; F_t 为水分胁迫对蒸腾的订正因子^[2]。

(3) 渗漏量 (D)

根据“蓄满渗漏假定”,当土壤水分含量大于田间持水量时多余的水分为渗漏量。

$$D = \text{MAX}(0, (R - Fc + W + I))$$

式中 Fc 为田间持水量。

当获得土壤含水量的值后,根据田间持水量即可得到土壤相对湿度,就可以根据表 1 的标准进行土壤干旱等级的识别或预测。

表 1 土壤干旱标准

土壤相对湿度	> 60 %	50 % ~ 60 %	40 % ~ 50 %	< 40 %
土壤干旱等级	不早	轻旱	中旱	重旱

2.3 作物干旱子模型

作物干旱的识别和预测以旬初土壤水分相对湿度 (W_{i-1}) 和本旬的水分需供比

($ET_c/(R+I)$) 为指标,将作物干旱划分为不旱、轻旱、中旱和重旱 4 个等级。一般地,以土壤相对湿度(W_{i-1}) 80% 作为湿润标准,55% 为作物开始受到水分胁迫影响的指标。旬水分需供比($ET_c/(R+I)$) >1.0 ,表示该旬降水和灌溉不能满足作物生长的需要, ($ET_c/(R+I)$) <1.0 ,表示能满足需要而且还富余。旬初土壤水分相对湿度(W_{i-1}) 可以表明土壤可供作物水分的情况,而本旬的水分需供比($ET_c/(R+I)$) 则表明该旬大气降水和灌溉对作物需水的满足程度,二者结合,综合考虑了土壤、大气和灌溉供水与作物需水的对比关系,因此将其作为作物干旱指标是比较全面的。

识别和预测冬小麦干旱的标准是在前人试验和研究的基础上^[6,7,8],结合水分试验资料和计算机模拟确定的。考虑到冬小麦对水分的敏感性,即不同发育阶段对水分的要求不同,也就是说,相同的水分条件,如果所处的发育阶段不同,其干旱的程度也不一样。一般来说,越冬前和拔节-灌浆期对水分要求相对较高,而越冬和返青期以及成熟前期对水分要求较低。所以,根据发育阶段的不同,采用不同的干旱标准。表 2 为越冬前和拔节-灌浆期的作物干旱标准,越冬和返青期以及成熟前期的干旱标准值应略低于表 2 (本研究取低于 10%)。

表 2 越冬前和拔节-灌浆期的冬小麦干旱标准

干旱等级	指标要素	指标值			
不旱	W_{i-1}	>0.8	$0.8 \sim 0.7$	$0.7 \sim 0.55$	<0.55
	$ET_c/(R+I)$		<1.5	<1.0	<0.7
轻旱	W_{i-1}	$0.8 \sim 0.7$	$0.7 \sim 0.55$	$0.55 \sim 0.4$	<0.4
	$ET_c/(R+I)$	>1.5	$2.5 \sim 1.0$	$1.0 \sim 0.7$	<0.7
中旱	W_{i-1}	$0.7 \sim 0.55$	$0.55 \sim 0.4$		<0.4
	$ET_c/(R+I)$	$4.0 \sim 2.5$	$2.0 \sim 1.0$	$1.0 \sim 0.7$	
重旱	W_{i-1}	$0.7 \sim 0.55$	$0.55 \sim 0.4$		<0.4
	$ET_c/(R+I)$	>4.0	>2.0	>1.0	

例如,如果计算得出 W_{i-1} 和 $ET_c/(R+I)$ 分别为 0.60 和 0.8,根据表 2,应为不旱;若分别为 0.60 和 1.5,则为轻旱。依此类推。

3 模型的检验

从模型描述中可以看出,各模式之间是互相连接嵌套的,这就要求各部分的模拟都要有较好的准确性才能保证最后干旱指标计算的准确性。因此,首先对主要发育期、叶面积指数、干物重和土壤水分的模拟效果进行检验,然后对干旱的识别效果进行检验,最后对干旱预测能力进行检验。

3.1 主要发育期、叶面积指数、干物重和土壤水分的模拟效果检验

用泰安 1983~1986 年和 1996~1998 年以及郑州 1996~1998 年共 44 个样本的冬小麦水分试验资料进行检验,结果是主要发育期的误差平均为 3 天,最大的相差 5 天;叶面积指数和干物重的模拟趋势与实际情况吻合的较好,最终总干物重的相对误差平均为 6.56%;土壤水分的模拟趋势与实际情况基本一致,但个别旬次的误差稍大,这主要是因为本模式是以旬为时间步长的,对日降水反映不敏感,而某天的降水对实测值却有比较大的影响,土壤水分模拟的相对误差平均为 7.72%,模拟误差在 10% 以内的占 80%,误差分布见表 3。限于篇幅,本文只给出泰安 1996~1997 年拔节期土壤湿度为 51%~55% 持续 30 天处理的模拟与实测曲线图,见图 1(a, b, c)。

表 3 土壤水分模拟误差分布

模拟误差(%)	0~2	2~4	4~6	6~8	8~10	>10
占百分比(%)	15	29	12	14	11	20

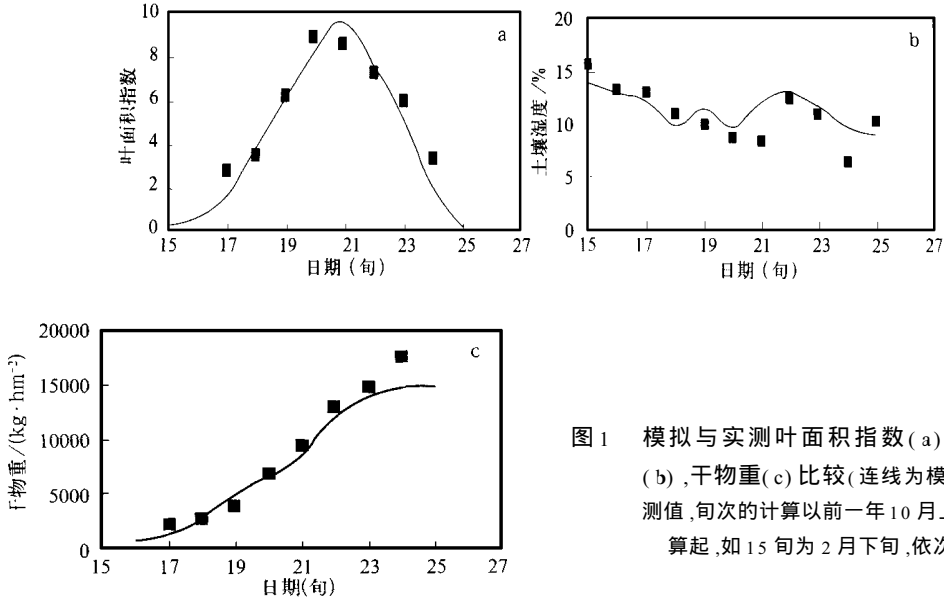


图 1 模拟与实测叶面积指数(a),土壤湿度(b),干物重(c)比较(连线为模拟线,■为实测值,旬次的计算以前一年10月上旬为第1旬算起,如15旬为2月下旬,依次类推)

3.2 作物干旱识别效果检验

将山东省临沂、莱阳、菏泽3个站点1985~1990年的气象和其它有关资料代入模型,将计算得出的逐旬作物干旱情况与实际情况进行对比,结果在327个旬中计算得出的作物干旱等级与实际干旱等级完全相同的占67%,为相邻等级的占29%,即两者共占96%,其它的仅占4%,因此我们认为该模型的干旱识别效果是比较好的。

另外,从检验结果还可以看出,土壤干旱和作物干旱发生等级并不一致,尤其是作物需水比较敏感的拔节期和抽穗开花期,作物干旱等级大多高于土壤干旱等级,说明以往常土壤干旱情况判定作物干旱情况并以此为依据进行水分管理是不能满足作物需要的;相反,在越冬期和成熟期土壤干旱等级常高于作物干旱等级,若仍以土壤干旱情况为依据进行水分管理,将造成一定程度的水资源浪费。因此,将农业干旱区分为土壤干旱和作物干旱,并以作物干旱为标准进行水分管理更加科学。

3.3 模型预测能力检验

为了检验模型对干旱的预测能力,本文将郑州1991年数值天气预报模式预报的天气资料代入模型进行计算,然后与使用实测天气资料计算的结果进行比较(见图2)。从图2可以看出,使用两种资料模拟,其结果吻合得很好,也就是说,尽管目前数值天气预报的逐日值还存在比较大的误差,但其旬平均值已经能够满足该模型的需要,说明使用该模型进行干旱预测具有现实可操作性和良好的应用前景。两种土壤湿度结果吻合稍差,是因为在数值天气模式预报的气象要素中,降水的预报误差相对较大的缘故。

从检验效果看,该模型成功地与数值天气模式预报的天气资料结合,这样就可以改变以往使用气候资料或统计模式做干旱预测缺乏针对性的弊端,根据未来的天气条件作干旱预测,才能真正体现预测的意义。

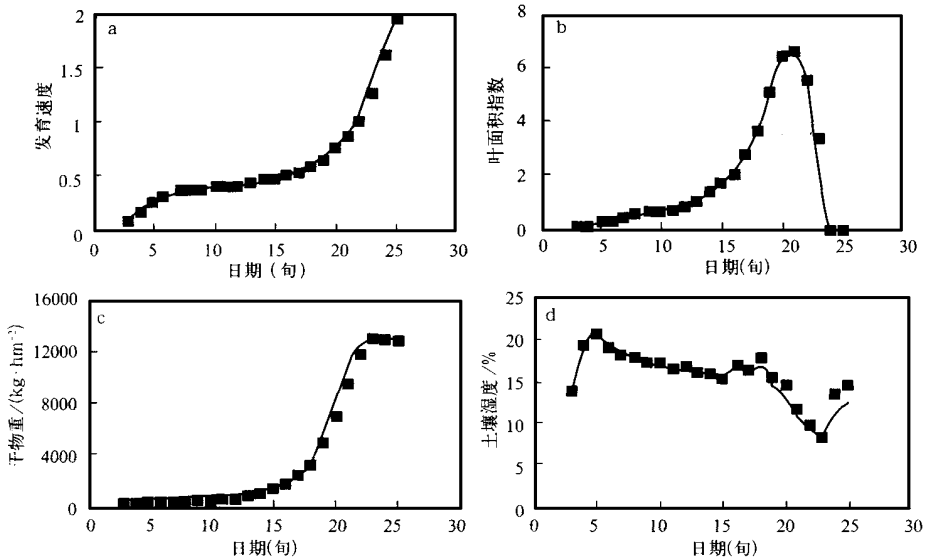


图2 使用两种天气资料模拟结果比较,发育速度比较(a) 叶面积指数比较(b) 干物重比较(c) 土壤湿度比较(d) (注:图中连线为使用数值天气模式预报的天气资料计算的结果,■为使用实测天气资料计算的结果。旬次的计算说明同图1。由于预报的气象资料只有1991年3~5月的,故3月份以前也就是15旬以前使用的都是实测气象资料)

4 结语和讨论

(1) 本文试以华北地区冬小麦为例,在前人研究冬小麦生长模式的基础上,利用试验资料进行简化和改进,建立了考虑水分条件的冬小麦简化生长模式。经检验,冬小麦生长模式对主要发育期模拟误差平均为3天,干物重的模拟误差平均为6.56%,土壤水分的模拟误差为7.72%,干旱的识别和预测效果良好。

(2) 改进作物干旱指标形式,以旬初土壤水分和该旬的水分需供比作为干旱指标,并在前人试验研究的基础上结合本研究的试验资料和计算机模拟技术,建立了华北地区冬小麦土壤干旱和作物干旱指标系统。但由于缺乏作物生理生化方面的试验资料,确定干旱指标系统时对作物干旱生理的考虑较少,有待今后作进一步探讨。

(3) 用于模型预测能力检验的资料较少,今后对该检验取得的良好结果还需做进一步验证。

致谢:向提供试验资料的山东省泰安农业气象试验站吴乃元高级工程师和河南省气象局朱自玺研究员、赵国强副研究员及邓天宏等同志表示衷心的感谢。

参考文献

- 1 Van Keulen H, Wolf J. 农业生产模型 - 气候、土壤和作物. 杨守春等译. 北京:中国农业科技出版社,1990.
- 2 赵艳霞,王馥棠. 土壤 - 作物 - 大气连续体水分循环与作物生产关系的模拟模式研究. 应用气象学报,1997,8(4): 427~436.

- 3 Cordero I, Graham A G. Forecasting wheat yields use a water budgeting model. *Aust. J. Agri. Res.*, 1989, **40**:715 ~ 728.
- 4 彭宁德, 弗里斯著. 几种一年生作物的生态生理过程. 朱德峰, 程式华等译. 北京: 中国农业科技出版社, 1991. 140 ~ 142.
- 5 王树森, 邓根云. 地膜覆盖下土壤水分效应的模拟研究. 华北农学报, 1990, **5**(1): 46 ~ 50.
- 6 裴步祥. 蒸发和蒸散的测定与计算. 北京: 气象出版社, 1989.
- 7 华北平原作物水分胁迫与干旱研究课题组. 作物水分胁迫与干旱研究. 郑州: 河南科学技术出版社, 1991.
- 8 陈端生, 龚绍先. 农业气象灾害. 北京: 北京农业大学出版社, 1991.

A STUDY OF ASSESSING AND FORECASTING MODELS OF DROUGHT IN AGRICULTURE

Zhao Yanxia

(*Department of Geophysics, Peking University, Beijing 100871*)

Wang Futang Qiu Guowang

(*Chinese Academy of Meteorological Science, Beijing 100081*)

Abstract

A growth model is used in assessing and forecasting drought in order to emphasize the crop's effects on water consumption and crop's demand and sensitivity to water in different developmental stages. The verification indicates that the assessing and forecasting model of winter wheat drought is satisfactory.

Key words: Drought Assessing Forecasting Model