

# 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\*

赵艳霞 王馥棠

(中国气象科学研究院, 北京 100081)

## 提 要

从土壤-作物-大气连续体(SPAC)的水分循环出发,以冬小麦为例,通过对土壤水分动态和有关作物生长过程的模拟,建立作物水分消耗与干物质积累和产量形成关系的动力-统计模式.经3年试验资料的验证,总干重、籽粒产量和根层土壤水分含量的平均模拟误差分别为6.39%,5.60%和5.45%.发育期、叶面积动态和干物质积累动态的模拟与实测情况吻合也较好.

关键词:土壤-作物-大气连续体(SPAC) 水分循环 作物生产 模拟模式

## 引 言

关于水分与作物的关系,国内外研究均较多<sup>[1,2]</sup>.但与国外相比,我国在水分动态模拟和作物水分利用等研究方面,还有一定差距.一方面,能直接应用于作物生长模拟的土壤水分动态模拟模式涉及较少;另一方面,以往的水分与作物干物质生产关系的模拟研究主要采用两种方法:一是利用全生育期或各发育阶段的水分利用与干物质生产关系的统计模型,这种模型缺乏物理机制,且只能计算出作物最终干物质产量,不能反映出干物质积累的动态变化过程;二是利用水分胁迫下的作物生长模拟模式,这类模式物理机制明确,如模拟了光合、呼吸、生长、干物质分配等,但是一些生理过程的定量模拟尚不精确,且没有直接从水分利用入手,计算较复杂,所需资料也较多.

本文以冬小麦为例,借鉴国内外有关模式,试图从SPAC的水分循环入手,通过比较详细地模拟土壤水分动态变化过程,结合作物生物学特性,确定水分胁迫的影响量和作物水分消耗动态,进而建立作物生长发育、产量形成与环境水分条件相关联的数学模型,定量模拟作物生长动态及其与田间水分动态变化的相互影响关系.所建模式不仅能模拟出干物质的生产和累积过程,还可以避免对一些复杂的作物生长生理过程的模拟计算.最后,根据开花以后的水分胁迫情况和干物质的形成量模拟出最终的籽粒产量.

\* 本文由97-6G-04课题资助.

1996-09-19收到,1996-11-22收到修改稿.

## 1 试验概况

本研究所用资料取自山东泰安农业气象试验站(1983~1986)的冬小麦水分试验资料. 品种是弱冬性的鲁麦 1 号和半冬性的济南 13 号. 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. 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 40% 以下、40%~55%、55%~80%, 另设自然降水区作为对照试验(处理 CK). 3 个水分水平的试验编号分别为 No. 1、No. 2、No. 3, 对照为 No. 4. 上述水分控制在拔节至抽穗期(处理 I)和抽穗至成熟期(处理 II)进行. 土壤湿度的测定采用重量法, 所用仪器是土钻.

## 2 水分循环与作物生产关系模拟模式的建立

本模式由 5 个子模式组成: 发育进程子模式、叶面积动态子模式、水分平衡子模式、水分消耗与干物质生产关系子模式、水分盈亏与籽粒产量关系子模式.

### 2.1 发育进程子模式

本文采用 de Wit 的方法表示发育进程<sup>[3]</sup>:

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

式中,  $\Sigma T$  为从出苗至某一发育进程的累积温度(负温度按 0 计算);  $T_k$  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.

田间试验资料表明, 干旱对发育进程尤其对后期有一定影响, 干旱使作物完成某一发育阶段所需日数缩短, 因此模拟过程中对  $T_k$  和  $T_c$  进行了订正.

### 2.2 叶面积动态子模式

冬小麦的叶面积变化在返青后经历了缓慢增长—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 生长函数予以拟合, 第 4 阶段采用线性函数模拟. 冬前叶面积的变化与返青后的变化趋势相似, 只是变幅较小.

在水分适宜情况下, 叶面积系数为:

$$SLAI(i) = \begin{cases} L_{\max} \times \left[ \frac{1}{1 + \exp(a + b \times DVS(i))} \right] & DVS \leq 0.8 \\ c + d \times DVS(i) & DVS > 0.8 \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $L_{\max}$  为最大叶面积系数, 由实测资料确定(本文鲁麦 1 号为 7.0, 济南 13 号为 8.1);  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  为系数, 由模拟得到;  $i$  为旬次.

实际水分条件下, 叶面积系数为:

$$LAI(i) = LAI(i-1) + DLAI \quad (3)$$

$$DLAI = \begin{cases} (SLAI(i) - SLAI(i-1)) \times WSFl & DVS \leq 0.8 \\ (SLAI(i) - SLAI(i-1)) \times [1 + (1 - WSFl)] & DVS > 0.8 \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $DLAI$  为第  $i$  旬叶面积系数增量.  $WSFl$  为水分胁迫对叶面积系数的订正因子.

### 2.3 水分平衡子模式

简化的土壤水分平衡方程为:

$$S(i) = S(i-1) + R(i) + Ie(i) + DMR(i) - Ea(i) - Ta(i) - D(i) - IN(i) \quad (5)$$

式中,  $S(i)$  为旬末根层土壤含水量;  $S(i-1)$  为旬初根层土壤含水量;  $R(i)$  为旬降水量;  $Ie(i)$  为旬有效灌溉量;  $DMR(i)$  为因根生长而进入根层的水量;  $Ea(i)$  为旬土壤实际蒸发量;  $Ta(i)$  为旬作物实际蒸腾量;  $D(i)$  为旬土壤渗漏量;  $IN(i)$  为旬作物冠层截留量; 单位均为 mm.

#### 2.3.1 因根生长而进入根层的水分( $DMR$ )

当以实际根层的水分平衡为研究对象时, 因根生长而进入根层的水量是不可忽视的.

$$DMR(i) = \int_{Zr(i-1)}^{Zr(i)} S_0(Z) dZ \quad (6)$$

$$Zr(i) = Zr_0 + Gr \times \Sigma T(i) \times WSFr \quad (7)$$

式中,  $Zr(i-1)$ 、 $Zr(i)$  分别为第  $(i-1)$ 、 $i$  旬根深(cm);  $S_0(Z)$  为初始土壤水分廓线, 由出苗时各层土壤水分值模拟得到;  $Zr_0$  为初始根深;  $Gr$  为根生长率( $0.12 \text{ cm}/\text{C} \cdot \text{d}^{[2]}$ );  $\Sigma T(i)$  为该旬的积温( $\text{C} \cdot \text{d}$ );  $WSFr$  为水分胁迫对根伸展的订正因子.

#### 2.3.2 实际蒸发( $Ea$ )

本模式中实际蒸发  $Ea$  的计算采用 Brisson 的二阶段推导模式<sup>[4]</sup>. 降水发生后土壤蒸发处于第一阶段, 这时实际蒸发等于潜在蒸发( $Ea = Ep$ ), 直到第一阶段累积的实际蒸发达到某一界限值(由土壤特性决定, 本文取 8 mm)时, 蒸发进入第二阶段. 到下一次降水发生时, 蒸发又回到第一阶段, 第二阶段蒸发的计算公式为:

$$\Sigma Ea = (2f \times \Sigma Ep + f^2)^{1/2} - f \quad (8)$$

$$Ep = ET_0 \times \exp(-\delta \times LAI) \quad (9)$$

式中,  $\Sigma Ea$  和  $\Sigma Ep$  分别为第二阶段的实际蒸发和潜在蒸发;  $f$  是气候条件和土壤质地的函数,  $f = 1/2 \cdot f_c \cdot f_s$ ,  $f_c$  和  $f_s$  分别表示气候和土壤因素<sup>[4]</sup>;  $ET_0$  为标准作物潜在蒸散, 由 Penman 公式求算;  $\delta$  为消光系数, 取 0.5.

#### 2.3.3 实际蒸腾( $Ta$ )

蒸腾是指作物体内的水分通过气孔扩散进入大气的过程, 它既受生物因素的制约, 又受环境因素的制约. 本文实际蒸腾的计算方法参考文献<sup>[5]</sup>.

$$Ta = Tp \times WSFl \quad (10)$$

$$Tp = ETp - Ep \quad (11)$$

$$ETp = \begin{cases} ET_0 & LAI \leq 1.5 \\ ET_0 \times \frac{(K_{\max} - 1) \times LAI + 5 - 1.5 \times K_{\max}}{3.5} & 1.5 < LAI \leq 5.0 \\ ET_0 \times K_{\max} & LAI > 5.0 \end{cases} \quad (12)$$

式中,  $T_p$  为作物潜在蒸腾;  $WSF_t$  为水分胁迫对蒸腾的订正因子;  $ET_p$  为田间潜在蒸散;  $K_{\max}$  为作物最大蒸散系数, 冬小麦为  $1.22^{[6]}$ .

### 2.3.4 截留(IN)

降水发生时, 植株本身截持部分降水, 即截留. 对冬小麦而言, 截留量不大.

$$IN = \min(R, 0.4 \times LAI) \quad (13)$$

### 2.3.5 渗漏(D)

渗漏量根据“蓄满渗漏假定”计算, 即当土壤水分含量大于田间持水量时, 多余的水分为渗漏.

$$D = \max(0, X) \quad (14)$$

$$X = (R - IN) + I_e + S - SFC \quad (15)$$

式中,  $SFC$  为平均田间持水量.

### 2.3.6 水分胁迫因子(WSF)

水分胁迫因子  $WSF$  由下式确定<sup>[7]</sup>:

$$WSF = \begin{cases} 1 & (Sav/Sb) \geq thd \\ \frac{1}{thd} \times \frac{Sav}{Sb} & (Sav/Sb) < thd \end{cases} \quad (16)$$

$$Sav = \min(Sp, Sb) \quad (17)$$

式中,  $Sp$ 、 $Sb$  分别为物理可利用水和生理吸水力(mm);  $thd$  为发生水分胁迫的界限值. 由于同样的水分对作物不同器官的作用不同, 因此, 对叶扩展、根伸展和蒸腾发生水分胁迫的界限值也不同, 分别为 0.75、0.5 和 0.25<sup>[7]</sup>.

(1) 物理可利用水( $Sp$ )即根层土壤所含的可供作物利用的水分.

$$Sp = S - 10 \times (Zr - Zm) \times Sw - 10 \times Zm \times Sr \quad (18)$$

$$Zm = \frac{2.5 \times 10^6 \times \Sigma Ea}{L \times (S_* - Sr)} \times 100 \quad (19)$$

式中,  $Zm$  为表层干土层厚度(cm)<sup>[4]</sup>;  $Sw$  为平均凋萎湿度( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ );  $Sr$  为风干土的含水量( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ), 其值为凋萎湿度的  $1/3^{[3]}$ .  $S_*$  为第二阶段开始时的土壤含水量;  $L$  为蒸发潜热, 其值为  $2.49 \times 10^9 \text{ Jm}^{-3}$ .

(2) 生理吸水力( $Sb$ )是由作物本身状况决定的作物最大可能吸水量:

$$Sb = \int_0^{Zr} F(Z) dZ \quad (20)$$

$$F(Z) = \begin{cases} 100\% \times S_{\max} & Z \leq Zt \\ [100\% - 0.8\% \times (Z - Zt)] \times S_{\max} & Z > Zt \end{cases} \quad (21)$$

式中,  $F(Z)$  为根吸水函数;  $S_{\max}$  为最大可利用水, 其值等于田间持水量与凋萎湿度之差;  $Zt$  为耕作层深度(cm).

上式的物理意义是: 在耕作层内, 作物根系可吸收全部的最大可利用水; 在耕作层以下, 随根深的增加根系的吸水能力以  $0.008/\text{cm}$  的速率下降.

## 2.4 作物水分消耗与干物质生产关系子模式

衡量作物的水分利用状况常用作物蒸散或蒸腾单位水分所生产的干物质表示. 但这

两个指标受环境条件影响较大,具有一定的不稳定性.蒸腾与同化比是用固定单位  $\text{CO}_2$  蒸腾多少水分表示的,其值取决于植物类型、气孔行为(有调节还是无调节).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<sup>[8]</sup>.根据这一特点,可利用“蒸腾同化比”将作物生产与蒸腾联系起来,干物质增重量( $\text{kg}/\text{hm}^2$ )为:

$$\Delta DW(i) = E_g \times (F_g(i) - R_m \times TDW(i)) \quad (22)$$

$$TDW(i) = TDW(i-1) + \Delta DW(i) \quad (23)$$

$$F_g(i) = k \times Ta(i)/TAR(i) \quad (24)$$

式中,  $E_g$  为碳水化合物转化为结构干物质的比率,取值为  $0.7^{[3]}$ ;  $F_g(i)$  为第  $i$  旬以碳水化合物表示的同化量( $\text{kg}/\text{hm}^2$ );  $R_m$  为维持呼吸速率,取值为  $0.015^{[3]}$ ;  $TDW(i-1)$ 、 $TDW(i)$  分别为作物到第  $(i-1)$ 、 $i$  旬的总干物重( $\text{kg}/\text{hm}^2$ );  $Ta(i)$  为第  $i$  旬的蒸腾量( $\text{mm}$ );  $TAR(i)$  为蒸腾与同化比;  $k$  为单位转换系数,等于  $(30/44) \times 10^4$ .

### 2.5 水分盈亏与作物籽粒产量关系子模式

籽粒产量由两部分组成:一部分是开花以后的同化合成物,另一部分由开花前形成的根、茎、叶等器官的可塑性同化物转移而来,即:

$$W_z = W_a + W_b \quad (25)$$

式中,  $W_z$  为最终籽粒产量;  $W_a$  为开花到成熟期间形成的总干物重,可直接模拟得到;  $W_b$  为开花前形成的可塑性同化物而后逐渐转移到籽粒中的干物重,它与开花后的水分盈亏密切相关.

$$\frac{W_b}{W_z} = f(W_{SFb}) \quad (26)$$

式中,  $W_{SFb}$  为开花后的水分盈亏因子;  $f(W_{SFb})$  为  $W_{SFb}$  的函数,由试验资料拟合得到.本研究所用资料的计算结果是前期合成的干物质转移到籽粒中的量,占最终产量最大的是  $44\%$ ,最小的是  $8\%$ .

根据(25)、(26)两式,得

$$W_z = \frac{W_a}{1 - f(W_{SFb})} \quad (27)$$

## 3 模式的有效性检验和模拟结果分析

为了检验模式的有效性,对 1983~1986 年 3 年冬小麦水分试验共 32 个样本进行了计算.由于篇幅所限,本文仅给出鲁麦 1 号 1984~1985 年(CK)No. 4 的模拟与实测结果(见图 1(a、b、c)).

### 3.1 发育期的模拟

发育期的模拟结果体现出水分条件不同,发育进程也不一样的特点,与实测值所反映的一致,模拟结果是比较理想的,开花期最多差 4 天,成熟期差 2 天(表 1).

### 3.2 叶面积动态的模拟

图 1(a)为模拟与实测叶面积动态变化曲线.总体看来,两者的变化趋势是一致的.其差异主要与没有考虑群体密度和越冬死苗率因素有关.

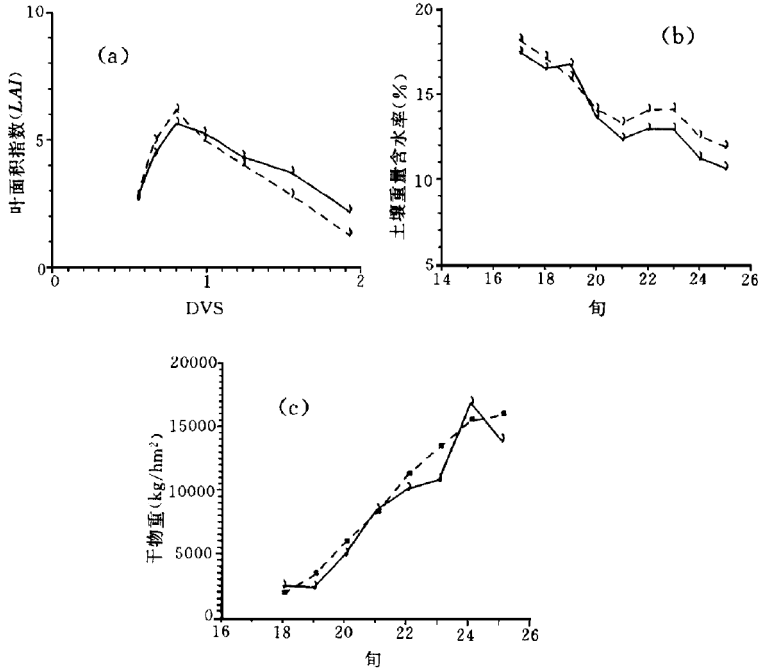


图 1 叶面积指数(a)、土壤水分含量(b)及干物重(c)的模拟(虚线)与实测(实线)值

Fig.1 The dynamic variation curves for modelling (dashed line) and measuring (solid line) of (a) leaf area index (b) soil water content and (c) dry matter weight

表 1 主要发育期模拟值与实测值比较(日/月)

Table 1 Comparison between simulated and observed values in main development stages (date/month)

		鲁麦 1 号				济南 13 号			
		No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
开花	模拟	11/5	11/5	11/5	11/5	10/5	11/5	11/5	11/5
	实测	9/5	9/5	11/5	10/5	7/5	7/5	10/5	9/5
成熟	模拟	7/6	8/6	8/6	8/6	5/6	6/6	9/6	6/6
	实测	6/6	6/6	10/6	8/6	5/6	5/6	9/6	7/6

\* 由于篇幅所限,只给出 1983~1984 年的情况

### 3.3 土壤水分含量动态的模拟

图 1(b)为模拟与实测土壤水分含量(0~100 cm)的动态变化曲线。从图可清楚地看到,除个别旬外,模拟值与实测值吻合得相当好,个别不吻合的点主要是因为本模式以旬为时间步长,没有考虑具体的灌溉和降水日期,即模式中旬初灌溉或降水与旬末灌溉或降水对模拟结果的影响是相同的,而对实测结果来说差别却较大。

土壤水分含量的模拟误差最大为 8.77%,最小的仅有 2.26%。3 年总的平均误差为 5.45%(见表 2)。从不同水分含量的误差来说, No. 1 和 No. 2 因实测结果受降水或灌溉

的影响比较小,所以误差相应较小,这再次证明了图1(b)中的不吻合点是由于时间步长较长,没考虑降水和灌溉日期所致.总的来看,这一模拟结果能够充分证明该水分平衡模式是一个既简单又可靠的计算土壤水分动态变化的方法.

表2 模拟的土壤水分含量误差(%)

Table 2 Relative simulation errors of soil water content(%)

	处理 I			处理 II			CK	平均
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	
1983~1984	3.92	3.57	8.54				6.97	5.75
1984~1985	6.85	2.26	8.77	3.95	4.34	4.36	7.09	5.37
1985~1986	3.83	6.06		5.52	4.12		8.00	5.50
平均	4.87	3.96	8.66	4.74	4.23	4.36	7.35	5.45

### 3.4 干物重的模拟

图1(c)为模拟与实测干物重动态变化曲线.曲线大致表现出3个区段:缓慢生长、准线性生长和生长停滞3个阶段.模拟值与实测值的变化趋势一致.32个样本的模拟平均误差为6.39%(见表3)

### 3.5 籽粒产量的模拟

籽粒产量的模拟误差平均为5.60%(见表3).若以总干物重乘以经济系数(小麦通常取0.35、0.40和0.45)计算籽粒产量,则平均误差分别为10.9%、8.7%和16.4%.

## 4 模式的温度灵敏度试验分析

考虑到温度是模式中的主要参数之一,也是目前气候变化所考虑的主要因素,本文只进行了模式的温度灵敏度的试验分析.

假定冬小麦的整个生育期中,各旬平均气温分别在常年值的基础上升高和降低1℃和2℃,并假定作物品种适应温度的变化,各生育期长短不随温度的变化而改变,即生育期不变,则计算结果可反映气候变化对冬小麦产量及水分利用的可能影响(见表4).

从表中看出,如果生育期不变,则温度升高,总的蒸散略有增加,但产量却下降了.从拔节前、后蒸散的变化看,拔节前的蒸散明显增加,即前期消耗的水分较多;拔节后,

表3 模拟总干重、籽粒产量与实测总干重、籽粒产量的误差(%)

Table 3 Relative simulation errors of total dry matter weight and grain yield

年份	处理	No.	鲁麦1号		济南13号		
			总干重	籽粒重	总干重	籽粒重	
1983~1984	I	1	21.53	5.61	0.28	-2.16	
		2	14.75	4.88	-3.95	-8.34	
		3	-7.47	-6.64	-11.92	-0.60	
	CK	4	-7.07	-3.67	-5.64	-10.65	
		I	1	11.84	8.65	1.83	2.88
			2	11.65	-3.51	1.92	-3.12
3	-6.72		2.59	-7.08	8.14		
1984~1985	II	1	-5.70	0.73	-11.66	-7.72	
		2	14.12	1.34	6.13	-0.27	
		3	5.77	-9.35	9.52	-2.65	
	CK	4	5.27	-6.10	0.51	-4.24	
		I	1	3.87	6.24	-0.34	1.57
			2	4.91	24.54	0.33	-0.80
3	-5.44		6.68	4.51	8.69		
1985~1986	II	2	1.09	-2.17	-5.85	3.50	
		4	-2.53	-9.17	-3.22	-11.96	

表 4 气候变化(只考虑温度)对冬小麦产量及水分利用的可能影响(%)

Table 5 The potential impacts of climate change (temperature) on the winter wheat yield and soil water availability

温度变化 ( $^{\circ}\text{C}$ )	产量 变化	拔节前 蒸散变化	拔节后 蒸散变化	总蒸发 变化	总蒸腾 变化	总蒸散 变化
-2	+5.2	-30.7	+7.5	-29.3	+7.4	-6.9
-1	+5.9	-16.4	+6.3	-19.9	+7.5	-5.8
+1	-7.0	+17.8	-7.3	+19.7	-8.2	+2.2
+2	-16.1	+34.3	-8.7	+39.1	-18.3	+4.6

虽然热量仍很充足,但因水分相对减少,蒸散减少了,而干物质的积累主要是在拔节后.从总的蒸发和总的蒸腾来看,温度升高,蒸发显著增加,蒸腾减少,即总蒸散的增加,主要是因蒸发的增加而增加的,而与作物生产直接相关的是蒸腾.以上分析在某种程度上可以说明,温度升高后,即使生育期不变,蒸散将有所增加,但如果仍是目前的水分状况,产量仍然是下降的.另外,温度降低  $1^{\circ}\text{C}$  和  $2^{\circ}\text{C}$  时产量增加幅度接近,这可能与降低  $2^{\circ}\text{C}$  时热量不足的作用比较显著有关.

值得一提的是,上述计算分析均没有考虑升高温度和降低温度之后越冬条件的好坏对冬小麦密度及生理等方面的影响.另外,温度变化后,肯定会引起其它环境条件的变化,但这里都作了假定不变的处理.所以,上述结果并不能完全代表气候变化后的真正情形.

## 5 结论与讨论

(1) 本文从土壤-作物-大气系统的水分循环出发,通过模拟农田水分的动态变化过程,并结合作物的生物学特性和生长模式,建立了作物生产和水分消耗关系的模拟模式.该模式既有一定的机理性,又对一些复杂的生理过程的模拟进行了简化处理,属动力-统计模式.

(2) 利用 3 年的试验资料对模式做了验证,结果表明,总干物重、籽粒产量和土壤水分含量的模拟平均误差分别为 6.39%、5.60% 和 5.45%. 对叶面积系数、干物质积累的动态变化的模拟效果也较好.主要发育期的模拟中,成熟期的模拟比开花期要好.

(3) 通过参数灵敏度分析,得出在其它条件不变的情况下,温度升高,冬小麦生育期缩短,产量下降.假定作物品种能适应温度的变化而保持生育期不变,则在目前的水分条件下,温度升高  $1^{\circ}\text{C}$  和  $2^{\circ}\text{C}$ ,产量将下降 7.0% 和 16.1%; 温度降低  $1^{\circ}\text{C}$  和  $2^{\circ}\text{C}$ ,产量可提高 5.9% 和 5.2%.

(4) 本模式可用于土壤水分预报、产量预测、气候变化对农业、作物水分利用及水资源的影响评价等方面,具有广阔的应用前景和实用价值.

(5) 土壤-作物-大气系统内的变化过程、转换机制是非常复杂的.本模式是在一些简化和假定的基础上建立的,系初步结果,不少环节尚需作进一步改进和验证.此外,有关群体密度、越冬状况、气孔开闭等对作物生产的可能影响以及水分消耗与作物生产



的转化机制等均有待于今后进一步研究。

### 参考文献

- 1 Tanner C B & Sinclair T R. Efficient water use in crop production. In: Sinclair T R, Jordan W R & Taylor H M. ed. Limitation to efficient water use in crop production. Madison: *Amer. Soc. of Agron.*, 1983.
- 2 Cordery I & Graham A G. Forecasting wheat yields use a water budgeting model. *Aust. J. Agri. Res.*, 1989, **40**: 715~728.
- 3 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.
- 4 Brisson N & Perrier A. A semiempirical model of bare soil evaporation for crop simulation models. *Water Resour. Res.*, 1991, **27**(5): 719~727.
- 5 Al-Kaisi M, Brun L J & Enz J W. Transpiration and evapotranspiration from maize as related to leaf area index. *Agric. For. Meteorol.*, 1989, **48**: 111~116.
- 6 “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: 河南科技出版社, 1991. 106~110.
- 7 Brisson N, Seguin B & Bertuzzi P. Agrometeorological soil water balance for crop simulation models. *Agric. For. Meteorol.*, 1992, **59**: 267~287.
- 8 彭宁德弗里斯等著. 几种一年生作物生长的生态生理过程. 朱德峰, 程式华等译. 北京: 中国农业科技出版社, 1991. 140~142.

## MODELLING OF THE RELATIONSHIP BETWEEN WATER CIRCULATION IN THE SOIL-PLANT-ATMOSPHERE CONTINUUM SYSTEM AND CROP PRODUCTION

Zhao Yanxia      Wang Futang

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

### Abstract

A dynamic-statistical model which shows interactions between crop water consumption, biomass production and yield formation has been established based on the simulation of soil water dynamic evolution and some processes of winter wheat growth and development. Through the verification in three years by using the field data, the mean simulated errors for the total weight of dry matter, grain yield and soil water content are 6.39%, 5.60% and 5.45%, respectively. In addition, the simulations about developmental stages, the leaf area index, the process of dry matter accumulation etc. are close to the observed data.

**Key words:** Soil-plant-atmosphere continuum (SPAC)    Water circulation    Crop production    Model