

春小麦生长简化模拟模式研究*

王石立 王馥棠

(国家气象局气象科学研究所)

李友文 郭友三

(内蒙古气象局气象科学研究所)

提 要

本文通过数值模拟试验,构建了描述作物光合作用、呼吸作用、叶面积动态变化以及干物质累积与分配等生长过程与气象条件关系的数学方程,在此基础上初步研制了水分、营养满足条件下的春小麦生长简化模拟模型。检验表明,此简化生长模型的模拟效果良好。

一、引 言

作物生长模型模式的研究在荷兰、苏联和美国等已开始多年^[1-3],我国也已开始起步^[4-7]。但目前这类模式大多尚处于理论研究阶段,多数模式需要输入逐日甚至逐时气象资料,其模拟精度固然可望提高,但从资料不易获取、模式不便应用、误差源由复杂等方面考虑,尚有许多工作有待深入研究和完善。

本研究从气象部门的特点与需要出发,以10天为时间步长,选用易于获得的常规气象变量,在田间观测分析和前人工作的基础上,确定描述作物生长过程的数学方程,建立了简化的生长模拟模型。只需有生育期内逐旬有关的气象资料,便可动态地模拟春小麦的生长发育与产量形成过程,模拟效果良好,而计算量却大大减少。因此,建立简化模型可以使模拟类模型能更方便地用于产量预报及气候对农业影响的评价等方面。

二、生长模拟概念与思路方法

植物通过光合作用将太阳能转化为生物量。在此过程中,一方面 CO_2 被同化为糖;另一方面,所产生的糖又部分地消耗于呼吸作用,二者之差即为所储存的干物质。这些干物质按照一定的生物学规律分配到各器官之中。这一不断进行的过程,就是植物生长发育直

本文1990年6月14日收到,8月4日收到修改稿。

* 国家自然科学基金资助项目。

至产量形成的全过程。因此,生长模拟可简略地表述为,以环境因子为输入变量,采用相应的数学模式模拟、再现作物的生长发育和产量形成过程。本研究即从这一思路出发,设计模型结构,并在内蒙气象科学研究所毕克齐试验站进行了4年(1986—1989年)春小麦生长田间动态观测试验。试验田水分充足,肥力适宜,品种为当地高产品种(田间试验详细情况从略)。春小麦生育期内逐旬取样,测定各种生物量(器官鲜重、干重、黄叶重、叶面积、分蘖动态、灌浆速度等)和土壤湿度,结合常规气象观测值,通过资料分析和计算机赋值试验,确定模拟参数,初步建立了一个春小麦生长的简化动态模拟模型。试验表明,模拟效果较好。

作物生长受气象条件、水分、营养供应和病虫害等多种环境因素的影响。作为模拟研究的第一步,本文假定作物生育期内水肥条件适宜,群体内温度、风速分布近似均匀,CO₂供应能满足需要。而各种实际水分和肥料供应条件下的第二、第三层模型的研究将于今后逐步开展并研制。

人所共知,模拟模式中有两种参数,即不随时间而变的数值参数和随作物发育期变化的函数参数^[3]。前者有如维持呼吸率、生长呼吸系数等。限于试验条件,本研究直接引用目前众多研究工作中公认的数值。随植株生长发育过程而改变的函数参数,如分配函数等,则利用田间测定数据,以数值模拟方法,经过试验—反馈—修改等过程,最后加以确定。

模式中用干物质的累积量表示植物的生长,以10天为时间步长。模拟过程采用数值积分方法,将干物质累积量视为状态变量,循环计算,逐旬累积,直至生育期结束。

农业气象的长期研究实践表明,植物干物质的累积与分配等过程与其发育速度密切相关,而后者在很大程度上又与有效积温的多少有关。故本模式不以日历时间为时间变量,而选用“生物学”时间(DVS)为时间变量,即以作物开始生长至开花(和开花至成熟)所需有效积温的多年平均值为基数,各发育时刻的实际有效积温占该基数的比率为时间变量。

春小麦生长的简化模拟分为两部分,即干物质增量和干物质分配的模拟。前者包括光合作用、呼吸作用和叶面积增长动态等基本生理过程的模拟。后者包括干物质分配、转移和籽粒形成等物质和能量动态平衡的模拟。

三、干物质增量模拟

1. 光合作用

计算干物质生产的基础是植物的CO₂同化速率。本模式采用de Wit提出,经Goudriaan和Van Laar等人修正后的CO₂同化速率^[8],即根据叶片的CO₂同化与光的反应曲线、作物种类、叶片空间分布及光学特性等因素,计算出不同纬度、不同时间内,水肥条件适宜、完全郁闭(LAI=5)的冠丛在完全晴天和完全阴天条件下CO₂的可能同化率P_{cl}和P_{ov}(kgCO₂/10⁴m²·d)。在此基础上,经内插得到当地各旬的可能同化速率,再根据实际辐射状况对P_{cl}和P_{ov}进行加权订正,求出实际辐射状况下的CO₂同化速率(P_s):

$$P_s = f_{ov} \cdot P_{ov} + (1 - f_{ov}) \cdot P_{cl} \quad (1)$$

其中权重系数f_{ov}可由下式求得:

$$f_{ov} = (S_c - S_a) / 0.8S_c \quad (2)$$

式中, S_c 为晴天总辐射($J/m^2 \cdot d$), S_a 为实测总辐射(单位同 S_c)。

考虑到在作物整个生长过程中, 植株冠丛不是始终处于完全郁闭的状态, 故还需对上述 $LAI = 5$ 假设下得到的同化速率值进行冠丛叶面积动态变化的订正:

$$f_L = 1 - \exp(-K_0 \cdot LAI) \quad (3)$$

式中, f_L 为实际冠丛叶面积的订正系数, LAI 为实际叶面积指数, K_0 为消光系数。作为一级近似, 一般认为群体内消光系数随高度的变化可以忽略不计^[1,9]。

光合作用需要一定的温度条件。关于小麦光合作用的适宜温度, 众说不一, 归纳起来为 $18-25^\circ C$ 之间^[10,11]。另外, 植物光合作用的最高温度一般为 $40-50^\circ C$ ^[10]。鉴于本试验地点通常不会出现上述限制性高温, 因此本模式光合作用的温度影响系数按下式处理:

$$TF = \begin{cases} T/T_0 & T < T_0 \\ 1 & T \geq T_0 \end{cases} \quad (4)$$

式中 T_0 为光合作用适宜温度, T 为实际气温。 T_0 可在一定初始值范围内用计算机赋值试验的方法加以求取。本文取 $T_0 = 20^\circ C$ 。

经上述订正后, 单位时间内的同化产物 P ($kgCH_2O/10^4m^2 \cdot d$) 为:

$$P = A \cdot f_L \cdot TF \cdot P_s \quad (5)$$

式中 A 为 CO_2 与碳水化合物分子量的换算系数。

2. 呼吸作用

植物生长所遵循的一条基本生物学规律是 CO_2 同化产物的一部分将消耗于呼吸作用, 即维持生命机能的维持呼吸和同化产物转化为植物体结构物质时的生长呼吸:

$$R_t = R_M + R_G \quad (6)$$

式中 R_t 为总的呼吸消耗, R_M 和 R_G 分别为维持呼吸与生长呼吸消耗, 可分别按下式计算:

$$R_M = R_{m0} \cdot Q^{(T-T_{m0})/10} \cdot W \quad (7)$$

$$R_G = (1 - CVF)(P - P_M) \quad (8)$$

式中 R_{m0} 为标准温度 ($25^\circ C$) 下单位干重的维持呼吸速率, 本研究参照文献[1]取 R_{m0} 为 $0.015g \cdot CH_2O/g(\text{干物质}) \cdot d$ 。由于温度对维持呼吸起增强作用, 故实际温度下的维持呼吸率应为 R_{m0} 乘以 $Q^{(T-T_{m0})/10}$ 。其中 Q_{10} 为温度影响系数, 一般取 $Q_{10} = 2.0$; T 为实际温度, T_{m0} 为与 R_{m0} 相对应的标准温度。 W 为植株干重 ($kg/10^4m^2$), CVF 表示植物将初级光合产物转化为结构物质的效率, 本研究取 $CVF = 0.7g(\text{干物质})/gCH_2O$ ^[1]。显然, $(1 - CVF)$ 表示转化过程中的能量消耗率, 亦即生长呼吸率。

3. 叶面积增长动态

田间观测表明, 抽穗前 (DVS 为 0.9), 春麦的叶面积变化大致经由缓慢增长—迅速增长—缓慢增长的三个阶段, 可采用 Logistic 生长函数予以拟合(图 1):

$$LAI = \frac{L_{max}}{1 + \exp(A + B \cdot DVS)} \quad (DVS < 0.9) \quad (9)$$

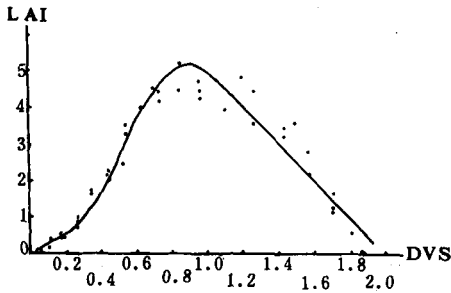


图1 LAI随DVS的变化

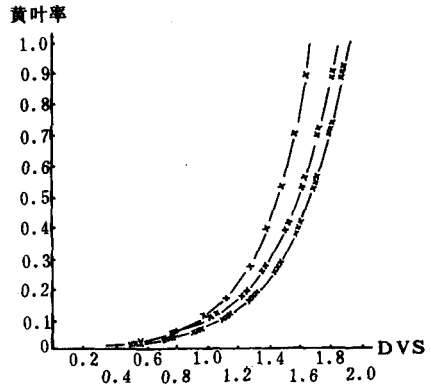


图2 黄叶率随DVS的变化

(×晚播10天 ××适宜播期 ×××早播10天)

根据实测资料,得 $L_{\max}=5.168$, $A=3.7849$, $B=-7.2395$, 方程相关系数 $R=-0.9816$, 剩余标准差 $S=0.264$ 。

抽穗后群体叶面积自然衰亡,叶面积指数迅速下降。配合实际资料,以线性函数拟合效果较好(图1):

$$LAI = 9.7636 - 4.8804 \times DVS \quad (DVS \geq 0.9) \quad (10)$$

相应地, $R=-0.9423$, $S=0.508$ 。

应该指出,由于绿色叶片的生命周期有限,因此枯黄落叶重量的估算是叶面积发育动态模拟中的重要一环。文献[1]仅在作物开花后才考虑叶片的衰老,且假定其枯死率为常数。本研究的田间试验表明,先长成的叶片在冠丛的营养生长阶段中($DVS > 0.4$ 起)即出现少量的枯死。随着时间的推移,黄叶率呈指数型增长,至 DVS 为 1.9 左右(黄熟后期)达到最大。试验观测还发现,营养生长后期($DVS > 0.9$),小麦黄叶率随播期的不同而有较大差异(图2)。这可能是由于不同时期播种的小麦其生长过程所处的气温环境有所不同。营养生长期内出现的高温或低温易导致其后生殖生长进程的加快或延缓,致使植株绿叶过早或推迟枯黄。温度的这一影响可以通过适宜温度条件下的发育过程(以 DVS 表示)进行订正而加以估算^[12]:

$$DR = 0.005231 \times e^{2.7525 \times (DVS - (1-k))} \quad (11)$$

式中, DR 为叶片枯黄率, k 为温度订正系数。

4. 干物质增量模拟

综合上述光合作用,呼吸作用以及叶面积增长动态各子模式,根据物质和能量守恒原理,得出模拟估算植株的干物质增量:

$$\Delta W = CVF \cdot (P - R_M) \quad (12)$$

式中, ΔW 为干物质增量($\text{kg}/10^4\text{m}^2 \cdot \text{d}$),其余同前。

四、干物质分配模拟

作物积累得到的干物质要按一定的比例分配到根、茎、叶及储存器官中去。由于茎和

叶具有暂时储存同化物的能力,故储存器官的形成除来源于当时合成与分配的光合产物外,还可能得益于早先暂时储存于营养器官中而后再转移出来的可塑性物质。因此,作物器官的生长是以同化产物在各器官中的分配与转移为基础的。在以往的研究中,较多的只考虑了分配过程^[1,5],有的也估算了转移过程^[4]。本研究综合考虑了这两种过程,作为近似模拟表述如下:

$$F_i = \frac{\Delta W_i}{\Delta W} \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (13a)$$

$$FT_i = \frac{\Delta W_i}{W_i} \quad (i = 2, 3) \quad (13b)$$

(13a)式中, $i = 1, 2, 3, 4$,分别表示根、茎、叶和储存器官(穗)。 F_i 为某器官的同化物分配函数,其大小取决于作物发育阶段 DVS 。 ΔW_i 为某器官生长增量, ΔW 为植株总增量。开花后 $F_4 = 1, F_1 = F_2 = F_3 = 0$ 。(13b)式中, $i = 2, 3$,即茎和叶。 FT_i 为茎、叶向储存器官的转移系数, ΔW_i 为茎、叶生长增量(负值), W_i 为茎、叶已有的干物重量。同化物转移只发生在作物的一定发育阶段,此时光合产物已停止向茎、叶分配;而茎、叶中原有的可塑性物质却逐渐地部分地向储存器官转移。转移系数的大小与茎、叶本身已有的质量有关,且随 DVS 而变。储存器官的生长增量为分配的实时光合产物与茎或叶(或同时)转移量两部分之和:

$$\Delta W_4 = F_4 \cdot \Delta W + \sum_{i=2}^3 FT_i \cdot W_i \quad (14)$$

田间试验资料表明,当 $DVS > 0.9$ (抽穗期开始)叶片的部分储存物质开始向外转移;在 $DVS > 1.2$ 时,茎部开始出现转移,数量大于叶的转移。图3为干物质分配函数图(其余从略)。

五、结果与讨论

1. 将纬度及作物初始生物量输入计算机,再依次输入各旬平均气温和总辐射量,便可得到各旬及全生育期的总干物重、各器官干物重(包括由穗重换算得出的籽粒产量,见表1)以及叶面积指数等项模拟值。从1986—1988年各期次的试验结果看,各旬总干物重模拟值与实测值相关较好。各期次旬总干物重模拟的平均相对误差为13.4%,最终总干物重模拟的平均相对误差为9.2%。试以1989年的一期独立样本进行模拟检验为例,旬总干物重模拟的平均相对误差为10.6%,生长末期总干物重模拟相对误差为7.4%。因此可以认为,模拟效果是比较好的(图4、图5)。无论是拟合还是检验,本简化模型基本上都能反映出干物质累积过程的变化趋势。

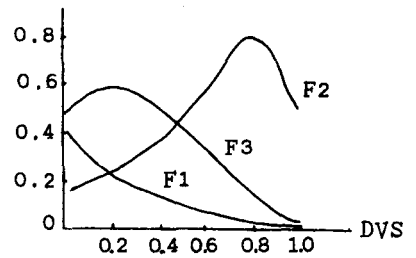


图3 干物质分配函数图

F_1 根分配函数

F_2 茎分配函数

F_3 叶分配函数

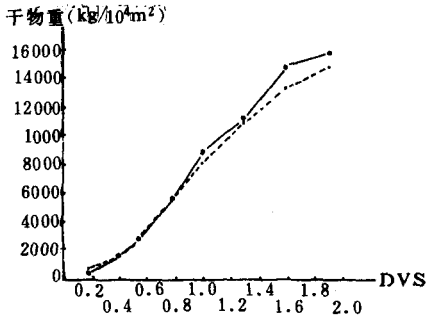


图 4 总干物重模拟曲线(1989年)
(实线为实测值,虚线为模拟值)

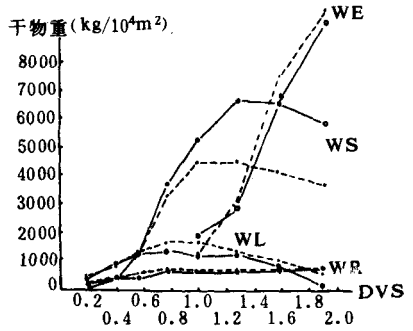


图 5 各器官干物重模拟曲线(1989年)
(WR 根重 WS 茎重 WL 叶重 WE 穗重
实线为实测值 虚线为模拟值)

表 1 春小麦产量模拟值与实测值对照表

年份与期次	实测总干重 (kg/10 ⁴ m ²)	模拟总干重 (kg/10 ⁴ m ²)	相对误差 (%)	实测产量 (kg/10 ⁴ m ²)	模拟产量 (kg/10 ⁴ m ²)	相对误差 (%)
1988.7	14074.5	13617.9	3.2	6583.5	6568.5	2.2
1988.2	12861.9	13631.6	5.9	6922.5	6568.5	5.1
1988.3	15771.6	13624.2	12.4	7662.0	6562.5	14.4
1988.4	15525.6	13153.4	15.2	7591.5	6028.5	20.6
1988.5	12926.7	12231.6	5.4	6873.0	5373.0	21.8
1987.2	19383.1	15263.5	13.0	9570.0	6955.5	27.3
1986.2	/	14466.1	/	6589.5	6870.0	4.3
1989.3	15650.5	14498.2	7.4	8302.5	6730.5	18.9

2. 本研究仅仅是建立春小麦生长简化模拟模型的第一步,即仅考虑辐射和温度两个因素,这显然有一定欠缺;加之为便于应用,所取时间步长较大,以及田间长势不够均匀和取样误差等原因,模拟结果势必存在一定误差,如表 1 所示。

模拟结果表明,各旬总干重增量的模拟与实际观测值相当接近,但发育后期干物质的分配,尤其是同化物转移部分以及随之产生的茎、穗干重的模拟值则存在一定误差。这可能是由于这些函数关系的建立是以实测资料为基础的,而取样误差和试验年数有限必将直接影响模拟效果。但总体上看,这一简化模拟模型仍不失其能较好地反映作物干物质累积随时间变化规律的能力,而从其所需资料较少,计算量小,以及便于业务应用等方面看,则更具有明显的长处。这有力地说明用简化模型模拟作物生长动态的思路和方法是可行的。

3. 毋庸置疑,作为一个完整的作物生长动态模型,理应考虑各种影响因素和过程,诸如实际水分和营养状况对作物生长影响的模拟等,这些将在今后的研究中进一步改进和完善。

参考文献

- [1] 王馥棠,王石立等译,植物生长与作物生产的模拟,102—155,科学出版社,1988年。
- [2] Keulen, H. Van, et al., Modelling of agricultural production weather, soil and crops, PUDOC Netherlands, 1986.
- [3] Сиротенко, О. Д., 裴碧梧译,农业生态系统的水—热状况和产量的数学模拟,98—139,气象出版社,1985年。
- [4] 冯定原,夏海峰,水稻生长和产量形成的数值模拟,南京气象学院学报,10,2,210—211,1987。
- [5] 黄策,王天铎,水稻群体物质生产过程的计算机模拟,作物学报,12,1,1—8,1986。
- [6] 詹习武,水稻生长和产量形成的数值模拟研究,南京气象学院学报,12,2,137—145,1989。
- [7] 黄耀,高亮之,金之庆,水稻计算机模拟模型及其应用之三,水稻群体光合生产的动态模拟模型,中国农业气象,10,4,10—15,1989。
- [8] Goudriaan, J. and Van Laar, H. H., Calculation of daily totals of the gross CO₂ assimilation of leaf canopies, *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 26, 416—425, 1978.
- [9] 殷宏章等,水稻田的群体结构与光能利用,实验生物学报,6(8),243—261,1959。
- [10] 北京农业大学农业气象教研组,农业气象学,53—57,科学出版社,1982年。
- [11] 中国科学院植物研究所光合作用研究室编辑,农业科学参考资料,光合作用,47,科学出版社,1981年。
- [12] 王馥棠,李友文,王石立等,春小麦黄叶率发生规律及其模拟模式的研究,应用气象学报,1,3,1990。

A STUDY ON SIMPLIFIED SIMULATION MODEL OF THE SPRING WHEAT GROWTH

Wang Shili Wang Futang

(Academy of Meteorological Science)

Li Youwen Guo Yousan

(Meteorological Institute of Inner Mongolia
Autonomous Region)

Abstract

There is a close relationship between crop growth, development and yield formation and weather environmental conditions.

In this paper, the mathematical equations describing micro-growth processes of crops (such as photosynthesis, respiration, leaf area growth, accumulation and distribution of dry matter and so on) have been established on the basis of the field experiments, laboratorial analysis and computer's modelling tests with time interval of ten-days for several years (1986—1989). It is a preliminary simplified simulation model of spring wheat growth under the optimal water and nutrient conditions. The field experiments show that simulation results of this simplified model are satisfactory.