第14卷 第1期
1991 年 3 月

南京气象学院学报
Journal of Nanjing Institute of Meteorology

Vol.14 No.1
Mar. 1991

冬小麦生长发育的模拟模式

张 宇 陶炳炎
（气象科学研究院） （应用气象系）

汤志成
（江苏省气象研究所）

摘要 根据冬小麦生长发育及其与环境条件关系的机理研究，建立了模拟冬小麦发育阶段和各器官生物量变化的动态模式。其中包括3个环境要素子模式，分别计算温度、辐射和水分，5个生物学过程子模式，分别模拟冬小麦的发育、光合、呼吸、同化物分配和叶面积系数。用镇江和海安共8个播期的实测资料对模式进行验证，并对模式进行了初步数值试验应用。

关键词 冬小麦，生长发育，数值试验

作物生长模拟研究对于作物-环境关系的理论研究和农业生产系统的控制、预测，都具有令人鼓舞的发展前景。荷兰、苏联和美国等在这方面做了大量的工作，我国也进行了一些尝试[1]。本文在对环境条件和作物各生理过程进行模拟计算的基础上，建立了冬小麦生长发育的动态模式。

1 模式描述

整个模式包括3个环境要素子模式，分别计算温度、辐射、水分；5个生物学过程子模式，模拟作物的发育、光合、呼吸、同化物分配和叶面积系数。

1.1 温度

考虑到模式应用的方便和计算的准确性，用逐日最高和最低气温计算日平均温度和逐时温度。

$$\overline{T}(t)=[T_M(t)+T_m(t)]/2 \tag{1}$$

$$T(t,\tau)=\begin{cases} T_m(t)+[T_M(t)-T_m(t)]\cdot\sin^2\left[\dfrac{\pi\cdot\tau}{DL(t)+2}\right] & 0\leqslant\tau<\dfrac{DL(t)}{2}+1 \\ T_m(t)+[T_M(t)-T_m(t+1)]\cdot\cos^2\left[\dfrac{\tau-\dfrac{DL(t)}{2}-1}{48-DL(t)-2}\cdot\pi\right] & \dfrac{DL(t)}{2}+1\leqslant\tau<24 \end{cases} \tag{2}$$

收稿日期：1988－12－12

其中t为某天对应的日序，从9月20日算起(下同)，$\overline{T}(t)$、$T_M(t)$和$T_m(t)$分别为日平均、日最高和日最低气温，$T(t,\tau)$为t日、日出后τ小时的气温，DL(t)为可照时数。

1.2 水分

根层土壤的水分平衡方程为

$$W(t)=W(t-1)+PA(t)-ETA(t)+F(t) \qquad (3)$$

其中W(t)为某日t的土壤水分含量，F(t)为某日的地下水分补给量，由于F(t)变化比较复杂，这里近似地假设为零。PA(t)是有效降水量，考虑到群体截留和径流、渗漏的损耗，用下式计算

$$PA(t)=MIN\{MAX[0,P(t)-P'(t)],W_S-W(t-1)\} \qquad (4)$$

其中P'(t)为群体的最大可能截流量，近似地取其值等于叶面积系数，单位为毫米，P(t)为降水量，W_S为土壤田间持水量。

ETA(t)是群体蒸散量，主要由潜在蒸散和土壤水分状况决定。群体蒸散随着土壤水分的减少呈稳高、速降、稳低的变化过程，可用下式计算

$$ETA(t)=\frac{ET(t)}{1+\exp\left\{\frac{a}{ET(t)}+b\cdot[W_s-W(t-1)]\right\}} \qquad (5)$$

其中a、b是常数，ET(t)为潜在蒸散，由大气蒸发力和植被状况决定，参见文献[2]。

$$ET(t)=1.5E_0(t)\cdot\left[1+\frac{1}{1.22LAI(t)^{1.19}}\right]\cdot\left\{1-\exp[-0.412LAI(t)]\right\} \qquad (6)$$

其中LAI(t)为叶面积系数，$E_0(t)$为用小型蒸发皿测定的日蒸发量。由(5)式还可得到土壤饱和时的蒸发量

$$ETM(t)=\frac{ET(t)}{1+\exp\left[\frac{a}{ET(t)}\right]}$$

根据镇江、兴化和昆山1984—1985年小麦生育期间的观测资料，对0—40厘米土层进行模拟计算，用单纯形加速法[3]确定的参数值a＝－0.1127，b＝0.0716，模拟误差如表1。

表1 土壤水分的模拟误差

站名	平均绝对误差(毫米)	平均相对误差(%)
兴化	4.87	2.86
镇江	7.30	4.29
昆山	5.54	3.25

1.3 太阳辐射

群体顶入射辐射强度根 据日照时数与辐射量的对比分析，以可照时数与实照时数之差等于4小时为界限，将天气分为晴天和阴天两类。晴天的可见光强[4]

$$R_c(\beta)=580\cdot\sin\beta \qquad (7)$$

其中β为太阳高度角，光强单位为瓦/米^2，散射光所占比例RAT(β)如表2.

表2　晴天散射可见光强与总可见光强之比随太阳高度角的变化[5]

β	5	15	25	35	45	55	65	75	85
RAT(β)	1.0	0.4138	0.28	0.2124	0.1807	0.1539	0.1401	0.1379	0.1278

因此，晴天的散射辐射$R_{cd}(\beta)$和直接辐射$R_{cs}(\beta)$分别为

$$R_{cd}(\beta)=R_c(\beta)\cdot RAT(\beta) \tag{8}$$

$$R_{cs}(\beta)=R_c(\beta)\cdot[1-RAT(\beta)] \tag{9}$$

阴天仅有散射辐射，根据对南京辐射资料的分析，阴天的散射辐射强度$R_{dd}(\beta)=0.3\cdot R_c(\beta)$. 对于直接辐射，其入射角和方位角由太阳的位置确定，对于散射辐射，采用均一阴天假设，计算不同倾角辐射强度所占的比例$B_u(\beta')$

$$B_u(\beta')=\sin 2\beta' d\beta' \tag{10}$$

其中β′为带倾角，即散射光入射角。某一时刻(太阳高度角为β)散射光在倾角β′的辐射强度为

$$\text{晴天：}\ R_{cd}(\beta,\beta')=B_u(\beta')\cdot R_{cd}(\beta) \tag{11}$$

$$\text{阴天：}\ R_{dd}(\beta,\beta')=B_u(\beta')\cdot R_{dd}(\beta) \tag{12}$$

群体反射率引用高德力安对球形分布群体的计算结果(见表3).

表3　群体反射率RF(β)随入射角的变化

β	5	15	25	35	45	55	65	75	85
RF(β)	0.148	0.12	0.092	0.082	0.072	0.067	0.063	0.061	0.059

阴天反射率为不同倾角的加权平均，即

$$RFD=\sum B_u(\beta')\cdot RF(\beta')=0.078 \tag{13}$$

晴天的群体反射率

$$RFC(\beta)=RAT(\beta)\cdot RF(\beta)+[1-RAT(\beta)]\cdot RF(\beta) \tag{14}$$

群体中的辐射分布

根据比尔定律，辐射在群体中的分布可表示为

$$R=R_0\cdot\exp(-K\cdot F) \tag{15}$$

其中R_0为群体顶部的入射辐射强度(单位同前)，K是计算层的辐射强度，F是某层以上的累积叶面积系数，K是消光系数，根据文献[4]，计算得K值如表4.

表4　消光系数随入射角的变化

β	5	15	25	35	45	55	65	75	85
K(β)	2.219	1.118	0.738	0.546	0.444	0.404	0.426	0.503	0.631

散射光的消光系数为不同入射角的加权平均，计算得$K_d=0.51$，亦即阴天的消光系数。晴天的消光系数

$$K_c(\beta)=RAT(\beta)\cdot K_d+[1-RAT(\beta)]\cdot K(\beta) \tag{16}$$

1.4 发育期

考虑到温度对小麦发育的非线性影响及其随发育阶段的变化，用如下函数表示温度对发育的贡献

$$\Delta P[\overline{T}(t)]=\begin{cases}0 & \overline{T}(t)<T_A\\ 1-[\overline{T}(t)-T_B]^2/(T_B-T_A)^2 & T_A\leqslant \overline{T}(t)<T_B\\ 1-[\overline{T}(t)-T_B]^2/(T_B-T_C)^2 & T_B\leqslant \overline{T}(t)<T_C\\ 0 & \overline{T}(t)\geqslant T_C\end{cases} \tag{17}$$

其中T_A、T_B和T_C分别为某一发育阶段的最低、最适和最高温度，植物完成某一发育阶段需要一定的$\sum\Delta P[\overline{T}(t)]$。扬麦4号是强春性品种，日照影响较小，根据兴化县1982—1985年共18期的分期播种资料验证计算，用上述模式计算发育阶段明显优于用日数和一般的积温方法(如表5)。

表5 不同发育阶段的T_A、T_B和T_C及完成各发育阶段所需的日数、$\sum\overline{T}(t)\geqslant 0$和$\sum\Delta P[\overline{T}(t)]$的稳定性

发育阶段＼类别	T_A	T_B	T_C	日数		$\sum\overline{T}(t)_{\geqslant 0}$		$\sum\Delta P[\overline{T}(t)]$	
				均值	变率(%)	均值	变率(%)	均值	变率(%)
播种—出苗	1	20	35	11.8	57.9	152.0	37.2	9.3	27.9
出苗—拔节	1	12	30	126.4	16.9	636.6	14.6	60.7	10.3
拔节—抽穗	6	20	35	35.5	64.2	400.4	19.8	19.1	13.3
抽穗—成熟	10	25	32	41.7	7.7	821.6	15.3	24.1	4.9

1.5 光合作用

作物的光合作用受光、温、水等环境因素及植物自身的影响，可表示为

$$P=P_M\cdot P_T\cdot P_W\cdot P_R\cdot\alpha \tag{18}$$

其中P为某一时刻的实际光合强度，单位为克干物质/米^{2}叶面积/小时，P_M为作物的最大光合强度，P_T、P_W和P_R分别为温度、水分和辐射对光合作用的影响，它们介于0—1之间。α是转换系数。最大光合强度P_M由植物的品种特性和发育阶段等因素决定[6,7]，抽穗前取3.5克二氧化碳/米^{2}叶面积/小时，抽穗后取5.0克二氧化碳/米^{2}叶面积/小时。参考文献[8]，温度对光合作用的影响可简化为

$$P_T[T(t,\tau)]=\begin{cases}0.5 & T(t,\tau)<T_{PA}\\ 0.5\dfrac{1-[T(t,\tau)-T_{PB}]^2}{(T_{PB}-T_{PA})^2}+0.5 & T_{PB}>T(t,\tau)\geqslant T_{PA}\\ 0.5\dfrac{1-[T(t,\tau)-T_{PB}]^2}{(T_{PB}-T_{PC})^2}+0.5 & T_{PC}>T(t,\tau)\geqslant T_{PB}\\ 0.5 & T(t,\tau)\geqslant T_{PC}\end{cases}\tag{19}$$

其中$T(t,\tau)$由(2)式给出，T_{PA}、T_{PB}和T_{PC}为光合作用的最低、最适和最高温度，分别取0℃、25℃和40℃。

叶片的水分平衡主要决定于土壤水分状况和可能蒸发强度。水分对光合作用的影响简化表示为

$$P_W[W(t)]=\begin{cases}0 & W(t)\leqslant W_1\\ [W(t)-W_1]/(W_2-W_1) & W_1<W(t)\leqslant W_2\\ 1 & W_2<W(t)\leqslant W_3\\ 0.5+0.5[W(t)-1]/(W_3-1) & W(t)>W_3\end{cases}\tag{20}$$

其中W_1为萎蔫系数，W_2和W_3相当于最适土壤水分含量的下限和上限，取$W_1=0.10+0.02\cdot ETM(t)$，$W_3=0.85+0.02\cdot ETM(t)$，考虑到小麦抽穗前后对水分要求的差别，抽穗前取$W_2=0.60+0.02ETM(t)$，抽穗后$W_2=0.50+0.02ETM(t)$。

光-光合作用反应曲线取

$$P_R(R)=A\cdot R/(1+A\cdot R)\tag{21}$$

其中R为群体中某层的辐射强度，A为光合强度达到最大值的一半时对应光强的倒数，取$A=0.015$米^2/瓦，将(15)式代入(21)式并对F从0—LAI积分，得到整个群体光合强度占最大光合强度之比

$$P_R(R_0)=\frac{1}{K}\ln\frac{A\cdot R_0+1}{A\cdot R_0\exp(-K\cdot LAI)+1}\tag{22}$$

转换系数α表示由光合作用固定的CO_2向碳水化合物(CH_2O)的转化，将其分子量相比得$\alpha=68\%$。

1.6　呼吸作用

植物的呼吸作用包括生长呼吸和维持呼吸两部分，根据文献[5]

$$R_{eg}=0.3P\tag{23}$$

$$R_{em}(t)=R_{em0}\cdot Q_{10}^{[0.1\bar{T}(t)-2.5]}\cdot W_D(t)\tag{24}$$

其中R_{eg}为生长呼吸，P为光合强度；$R_{em}(t)$为维持呼吸，R_{em0}是维持呼吸系数，取0.05/天，Q_{10}为温度系数，取1.35。

1.7 同化物分配

目前计算同化物在各器官间的分配比例还比较困难，这里采用如图1的简化模型。其中RL和SE为直线，LS为椭圆的一部分，它们的方程均可由两个参数决定。如图中所示，某天t_1各器官同化物的分配比例由落在各区线段的长度F_R、F_L和F_S决定(FE=0)

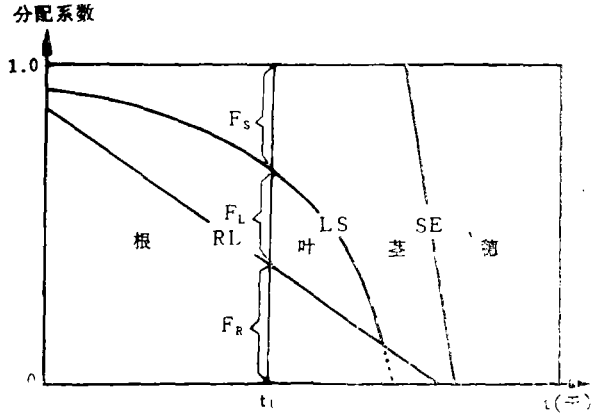

图1 同化物在不同器官间的分配模型

1.8 叶面积系数

叶面积系数可表示为叶干重与比叶面积之积，比叶面积由统计方程计算

出苗—孕穗 $RLAI(t)=[28886.2-35.92\cdot t+815.78\overline{T}_{10}(t)]\times10^{-6}$ (25)

孕穗—成熟 $RLAI(t)=[35364.9-55.48t-62.30D(t)]\times10^{-6}$ (26)

其中$\overline{T}_{10}(t)$为t日前10天的平均气温，D(t)为从抽穗起算的日数，比叶面积单位为 米^{2}叶面积/克干叶重

2 模式的结构

整个模式的结构如图2，由光合作用和呼吸作用之差决定的逐日净同化量，经分配得到根、茎、叶和穗各器官的干重。呼吸作用由生长呼吸和维持呼吸决定。影响光合作用的因子有辐射、温度、水分、发育阶段和叶面积系数，土壤水分含量由有效降水和蒸散决定。

需要输入的资料有：

地理和土壤因子：地理纬度、田间持水量、土壤容重和初始土壤水分含量；

气象因子：日最高、最低气温，逐日降水量和日照时数，小型蒸发皿测定的逐日蒸

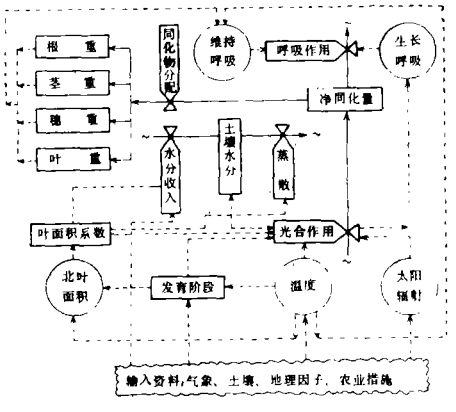

图2 模式的结构图 方框表示状态变量，阀门表示状态变量的变化过程，圆框表示中间变量

发量；

作物因子和耕作措施：播种期和初始生物量等。

3　模式的验证和应用

3.1　模式的验证

于1984—1985年在镇江和昆山对扬麦4号进行分期播种试验，每隔10天播种一次，各播4次。观测的项目有密度、叶龄、发育期、各器官生物量和叶面积系数等。

由于同化物在各器官间的分配难于预先给定，所以采用单纯形加速法确定同化物分配参数。叶面积系数先采用实测值，模拟误差情况如表6。地上生物总量和茎重的误差较小，而穗和叶的误差较大，如图3所示，各量的变化趋势与实测值比较接近。图中叶面积系数用实测值，TOTAL为地上部分总干重，EAR、STEM和LEAF分别表示穗、茎和叶的生物量。根的变化趋势及数值与叶重很接近，没有画出。*表示地上部分生物量实测值，茎用s表示，其余用·，图中叶面积系数变换为1000+LAI×100。

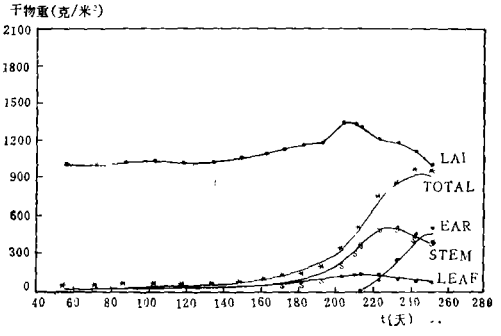

图3　镇江第2播期的模拟情况

表6　模拟的平均相对误差(%)(叶面积系数为实测值)

站　名	播　期	地上总重	叶　重	茎　重	穗	平　均
镇　江	1	14.11	20.68	15.17	19.89	17.46
	2	9.05	7.47	12.60	11.25	10.09
	3	12.08	27.60	14.18	13.87	16.93
	4	16.45	16.01	11.87	25.67	17.50
海　安	1	11.53	20.68	7.86	25.07	16.28
	2	23.26	25.23	29.00	12.11	22.40
	3	14.54	14.53	13.71	32.52	18.73
	4	14.65	16.07	20.66	28.03	19.85
平　均	—	14.46	18.51	15.63	21.03	—

将叶面积子模式加入进行模拟，误差有所增加，如图4所示。图中叶面积系数由叶面积系数子模式计算，其他说明同图3。

3.2　模式的初步应用

苗情好坏对小麦的整个物质生产过程有很大影响。假设苗期植株的生物量分别为实际对照(镇江第2播期)的3倍和1/2，表示不同的苗情，其他条件不变，利用模式分别进行数值模拟试验，其结果如图5所示，地上部分总干重分别增加了40%和降低了

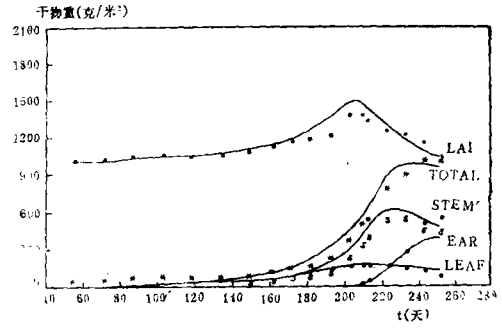

图4 镇江第2播期的模拟结果

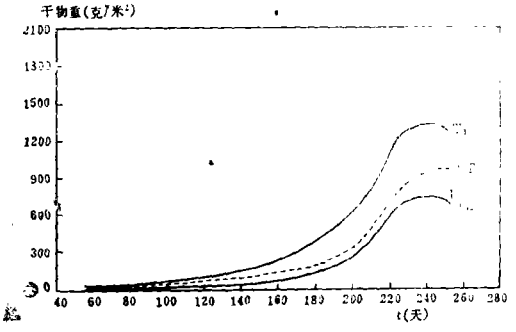

图5 不同苗情的模拟结果

20%。图中ST为对照的地上部分生物量，T_{01}为对照苗情干重的3倍，T_{02}为其1/2。

日照对于江苏省小麦生产有很大影响。假设在小麦生育期间全部为晴天，而温度、降水、蒸发等条件不变，当然这种情况在现实中是不会出现的，这里仅作为数值试验的假定条件来估计辐射的单独作用。如图6所示，地上部分干物重增加了约70%。图中虚线为对照值，实线为假设条件下的模拟值。

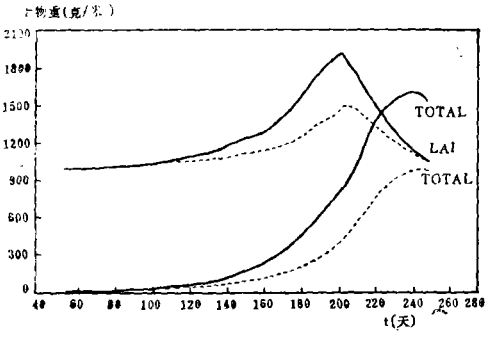

图6 全晴天情况下的模拟结果

4 讨 论

本模式在对环境条件和作物各生物学过程进行模拟计算的基础上，在计算机上再现了小麦生长发育的主要过程。但由于作物-环境系统的复杂性，仍存在一些不足。首先模式没有考虑土壤营养状况的作用，对各要素的考虑也比较粗略，如微气候环境、生理、生化过程等。同化物分配和叶面积系数子模式，也只是对实际的模仿，缺乏机理性的考虑，这样就影响到模式的准确性和普适性，这些问题还有待进一步研究解决。

参 考 文 献

1 张宇，赵四强。气象，1989；15(8)；57—60

2 [苏]西罗坚科 Ó П，袁碧培译。农业生态系统的水-热状况和产量的数学模拟，北京：气象出版社，1991；21—30

3 范鸣玉，张莹。最优化技术基础，北京：清华大学出版社，1986；162—165

4 [荷]高德力安 J。作物微气象学：模拟研究。北京：科学出版社，1986；5—34

5 CT de Wit et al. Simulation of Assimulation, Respiration and Transpiration. Wageningen: Centre for Agricultural Publishing and Documentation, 1978; 47—53

6 Van Keulen H, Wolf J. Modelling of Agricultural Production: Weather, Soil and Crops, Wageningen: Centre for Agricultural Publishing and Documentation, 1986; 112—140

7 焦德茂。江苏农业科学，1983；12；12—15

[日]户苅义次主编；薛德榕译．作物光合作用与物质生产．北京：科学出版社，1979：41—46

A SIMULATION MODEL FOR THE GROWTH AND DEVELOPMENT OF WINTER WHEAT

Zhang Yu
(Research Institute of Meteorological Science, State Meteorological Administration)

Tao Bingyan
(Department of Applied Meteorology)

Tang Zhicheng
(Meteorological Research Institute, Jiangsu Province)

Abstract Based on the mechanism of crop growth and development, a dynamic model is established to simulate the development stages of winter wheat and the biomass of each organ. The model contains three environmental submodels for calculating temperature, radiation and water, and five biological submodles for simulating phenology, photosynthesis, respiration, assimilation product distribution and leaf area index. The validity and applicability of the model are given.

Key words winter wheat, growth and development, dynamic model