

## 一个作物发育动态理论模型<sup>①</sup>

冯利平<sup>②</sup>

高亮之

(中国农业大学资源与环境学院) (江苏农业科学院)

**摘要** 在分析作物发育特性及作物发育与环境及措施因子关系的基础上,建立了一个作物发育动态的理论模型(CPTM),该模型为乘积形式的指数模型。模型具有较好的解释能力,并适于生育进程的计算机模拟。应用于小麦的发育动态建模,模拟值与实测值非常接近,模拟性能良好。通过确定可控因子函数 $f_{EC}$ 、影响效应值 $E_{E_i}$ 和参数 $k$ 与 $e_i$ ,作物发育的理论模型原则上适应于所有作物。

**关键词** 作物;发育;模型

**分类号** S165.21; S501

## A General Crop Phenological Theory Model

Feng Liping

(College of Resources & Environment Sciences, CAU)

Gao Liangzhi

(Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014)

**Abstract** This paper describes a general crop phenological theory model (CPTM). The model is expressed as a multiply form of exponential functions. It was constructed based on the analysis of crop development feature and its relation to environmental factors. The model has better explanatory capacity and be suitable for simulation of crop development. CPTM can simulate phenological process ideally when being applied for wheat growth. The practical measured and simulated data were very similar. Theoretical speaking, CPTM may be suitable to all crops through the determination of functions for controllable factors, effectiveness values ( $E_{E_i}$ ) and parameters ( $k, e_i$ ).

**Key words** crop; phenology; model

在作物生长发育和产量形成中,生育期的变化最为重要。生育期是预测作物产量的基础。虽然这些年来在生长定量化方面的努力已取得相当成就,但对发育所进行的类似量化的尝试却进展缓慢,在很大程度上仍求助于特征的定性描述<sup>[1]</sup>。

早在18世纪,Reaumur<sup>[2]</sup>就创立了积温学说,又称“度·日法”。这一方法至今仍被广为沿用。积温法的优点是简单易算,但误差往往较大。本世纪以来,Nuttonson<sup>[3]</sup>考虑了温度、日长对发育速度的影响,提出“光热系数”。Brown<sup>[4]</sup>认为作物发育速度与温度呈2次函数曲线关系,提出大豆发育单位(SDU)公式。沈国权<sup>[5]</sup>提出作物发育速度的当量积温公式。上述方法的模拟效果均比积温法为好,但仍然有较大的误差。Robertson<sup>[6]</sup>提出了“生物气象时间尺度(BMTS)”模型。Richie等<sup>[7]</sup>研制的CERES-Wheat模型中小麦发育的模拟以积温法为基础,考虑品种对春化和光周期反应的遗传特性,具有较好的模拟效果。Weir等<sup>[8]</sup>描述的AR-CWHEAT1中的发育模型考虑了小麦发育的光周期、春化反应,但未考虑不同品种对其反应的遗传特性。高亮之等<sup>[9]</sup>提出的“水稻钟”模型,较之从前的一些模型,其精度高,生物学意义明确,已经取得广泛的应用。冯利平等<sup>[10]</sup>在借鉴与吸收“水稻钟”模型和CERES-Wheat模型思

收稿日期: 1998-05-15

①国家自然科学基金资助项目 39600087

②冯利平,北京圆明园西路2号中国农业大学(西校区),100094

想方法的基础上,构建了小麦发育期动态模拟模型(WDSM)。潘铁夫等<sup>[11]</sup>以正态模型为基础,建立了大豆发育动态的正态模型,模拟精度也比传统积温法明显提高。

本研究在国内外有关发育量化研究及已有的作物生物学知识基础上,通过对作物发育特性及作物发育与环境措施因子关系的分析,建立了一个通用作物发育动态理论模型(CPTM)。该模型具有较好的解释能力,并适于生育进程的计算机模拟,可以达到较高精度,便于实际应用。

## 1 作物发育理论模型的建立

作物的全生育期以及各生育阶段长短的差异是品种基因型特性和环境因素综合效应的结果。环境因子可分为肥料、播种深度等可控影响因子和温、光、水等不可控影响因子。在不同的发育阶段其影响因子及其作用又各不相同。据此,作物发育动态的理论模型可表述为:

$$\frac{dM}{dt} = \frac{1}{D} = f_D \cdot f_E \quad (1)$$

式(1)中  $f_D$ 、 $f_E$  函数可分别写作:

$$f_D = \exp(K) \quad (2)$$

$$f_E = f_{EU} \cdot f_{EC} = f_{EU_1} \cdot f_{EU_2} \cdots f_{EU_i} \cdot f_{EC_1} \cdot f_{EC_2} \cdots f_{EC_i} \quad (3)$$

$$\text{其中: } f_{EU_i} = E_{E_i} \quad (4)$$

上述各式中: $D$ ——生育期或生育阶段的日数;

$M$ ——生育期或生育阶段内的发育进程,完成时  $M=1$ ;

$dM/dt$ ——生育期或生育阶段内的发育速度,用完成其生育所需天数的倒数( $1/D$ )表示;

$f_D$ ——基本发育函数;

$k$ ——基本发育系数(basic development coefficient),它由品种自身的遗传特性决定。 $k$ 值大,说明该品种发育速度快,是早熟品种; $k$ 值小,说明该品种发育迟缓,表现晚熟;

$f_E$ ——环境因子影响函数;

$f_{EC}$ ——肥料、播种深度等可控栽培措施因子影响函数,其形式为各具体因子  $i$  影响函数的乘积;

$f_{EU}$ ——温、光、水等不可控环境因子影响函数,其形式亦为各具体因子  $i$  影响函数的乘积;

$E_{E_i}$ ——环境因子  $i$  对发育的影响效应值,其值在  $0 \sim 1$  间,可根据作物发育对环境因子的反应情况来确定;

$e_i$ ——环境因子反应特性遗传系数(genetic environmental coefficient),简称环境因子系数,反映该品种在该发育阶段内对该因子反应的敏感性。

关于模型参数的确定,其初值可利用实际资料通过最小二乘法求出,再经适当调试得到参数终值<sup>[12]</sup>。

为便于叙述,把上述作物发育的理论模型(1)称作 CPTM(crop phenological theory model)。通过确定函数  $f_{EC}$ 、影响效应值  $E_{E_i}$ 、参数  $k$  和  $e_i$ ,作物发育的理论模型(1)原则上适用于所有作物。

## 2 个例

以小麦为例。温度和光照是影响小麦发育进程的主要因子,且不同的发育阶段其作用大小

各不相同。根据上述作物发育的理论模型,小麦发育模型可表述为:

$$\frac{dM}{dt} = \frac{1}{D} = f_D \cdot f_E = f_D \cdot f_T \cdot f_P = \exp(K) \cdot (E_T)^p \cdot (E_P)^q \quad (5)$$

式中:  $f_T$ ——温度效应函数;

$E_T$ ——温度效应因子,反映温度对小麦发育的非线性影响;

$p$ ——温度反应特性遗传系数(genetic thermal coefficient),简称温度系数,反映该品种在某发育阶段内对温度反应的敏感性;

$f_P$ ——光周期效应函数;

$E_P$ ——光周期效应因子;

$q$ ——光周期反应特性遗传系数(genetic photoperiod coefficient),简称光周期系数,反映该品种在某发育阶段内对光周期反应的敏感性,其他各符号含义与前述相同。

式(5)中的  $E_T$  由下式确定:

$$E_T = \begin{cases} (T_i - T_{br}) / (T_{opi} - T_{br}) & T_{br} < T_i \leq T_{opi} \\ (T_{mi} - T_i) / (T_{mi} - T_{opi}) & T_{opi} < T_i < T_{mi} \\ 0 & T_i \leq T_{br}, T_i \geq T_{mi} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $T_i$ ——第  $i$  生育阶段内的平均气温( $^{\circ}\text{C}$ );

$T_{br}$ ——该生育阶段内小麦发育的下限温度;

$T_{mi}$ ——该生育阶段内小麦发育的上限温度;

$T_{opi}$ ——该生育阶段内小麦发育的最适温度。

由于在自然条件下高温对多数作物发育速度的抑制作用较为少见,且最适温度往往有一个幅度,在这个幅度范围内,发育速度均达最大值,此时,  $E_T$  可表达为下述简化形式:

$$E_T = \frac{T_i - T_{br}}{T_{opi} - T_{br}} \quad (7)$$

且当:  $T_i < T_{br}$  时,  $T_i = T_{br}$ ;  $T_i > T_{opi}$  时,  $T_i = T_{opi}$ 。

在春化阶段的  $E_T$  为  $E_v$ , 称春化效应因子  $E_v$  (vernalization effectiveness), 表示小麦在春化作用期间每日获得的春化程度, 其值在 0~1 之间。  $E_v$  由下式确定:

$$E_v = \begin{cases} (T_v - T_{vb}) / (T_{vop1} - T_{vb}) & T_{vb} < T_v \leq T_{vop1} \\ 1.0 & T_{vop1} < T_v \leq T_{vop2} \\ (T_{vm} - T_v) / (T_{vm} - T_{vop2}) & T_{vop2} < T_v < T_{vm} \\ 0 & T_v \leq T_{vb}, T_v \geq T_{vm} \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $T_v$ ——春化阶段内的平均气温( $^{\circ}\text{C}$ );

$T_{vb}, T_{vm}$ ——分别为可春化下限温度和可春化上限温度;

$T_{vop1}, T_{vop2}$ ——分别为最适春化下限温度和最适春化上限温度。

在春化阶段, 温度系数  $p$  用  $p_v$  表示, 称春化反应特性遗传系数(genetic vernalization coefficient), 简称春化系数。它反映品种在这一发育阶段内对春化反应的敏感性。

$E_P$  则由下式确定:

$$E_P = \frac{PL_i - PL_{br}}{PL_{opi} - PL_{br}} \quad (9)$$

且当:  $PL_i < PL_{br}$  时,  $PL_i = PL_{br}$ ;  $PL_i > PL_{opi}$  时  $PL_i = PL_{opi}$ 。

式(9)中： $PL_{\text{a}}$ ——生育阶段内的平均光长(t/h)； $PL_{\text{opr}}$ ——生育阶段内的最适光长；

$PL_{\text{br}}$ ——生育阶段内的临界光长。

以上各式中的  $T_{\text{br}}$ ,  $T_{\text{opr}}$ ,  $T_{\text{vop1}}$ ,  $T_{\text{vop2}}$ ,  $T_{\text{vb}}$ ,  $T_{\text{vm}}$ ,  $PL_{\text{opr}}$  及  $PL_{\text{br}}$  可综合参考有关文献资料进行确定。

上述小麦发育模型经适当变换可用作小麦发育进程的模拟,称作 WDSM(wheat development simulation model)。

WDSM 模型经我国 7 大麦区 19 个代表性地点的资料验证,不同类型多个品种的平均误差均在 1 周之内,绝大多数地点在 2~4 d。与传统的积温法相比,它的模拟精度有了相当大的提高,与 CERES-Wheat 中的发育期模型相比,其模拟精度也有所提高<sup>[10]</sup>。

### 3 结论与讨论

①本研究在分析作物发育特性及作物发育与环境措施因子关系的基础上,建立了一个通用作物发育动态理论模型(CPTM)。由于模型从作物发育与环境因子关系的一般原理出发,具有普遍意义。因而,通过确定环境效应因子及有关参数,原则上适应于其它的所有作物。

②作物发育理论模型(CPTM)具有较好的解释能力,并适于生育进程的计算机模拟。模型采用乘积的形式,是一种对因子间存在互补作用的较理想的量的表达方式,可较好地处理发育与环境变量之间的数量关系。

③对于水分、养分等因子的影响效应函数,可采取类似温度效应函数的形式得到。为简化问题,在小麦发育模型的个例中, $E_{\text{E}}$ 的确定采用线性求算的方法,如采用曲线求算的方法,更接近实际。总之,对于影响效应函数与环境因子影响效应值  $E_{\text{E}}$ 的确定,可根据具体问题特点,采用相应的形式,这样可进一步提高模型的模拟精度。

### 参 考 文 献

- 1 法朗士 J,索恩利 J H M[英]著. 金之庆,高亮之主译. 农业中的数学模型——农业及与之有关科学若干问题的数量研究. 北京:农业出版社, 1991
- 2 de Reamur R A F. Article in Paris memoirs. Academies Sciences, 1735. In: Abbe C. A First Report on the Relations Between Climates and Crops. Weather Bureau Bull. No. 342, U. S. Department of Agriculture, 1905, 168
- 3 Nuttonson M Y. Some preliminary observations of phenological data as a tool in the study of photoperiodic and thermal requirements of various plant material——Vernalization and Photoperiodism. A Symposium, Waltham, Mass, Chronica Botanica, 1948, 129~143
- 4 Brown D M, Chapman L J. Soybean ecology: I. Development temperature-moisture relationship from field studies. Agron J, 1960, 52, 496~499
- 5 沈国权. 当量积温及其应用. 气象, 1981, (7): 23~25
- 6 Robertson W G. Development of simplified agroclimatic procedures for assessing temperature effects on crop development. In: Slatyer R O, ed. Plant Response to Climatic Factors. Paris: Unesco, 1973, 327~343
- 7 Ritchie J T. CERES-Wheat Book Draft #1 (unpublished). 1988
- 8 Weir A H, Bragg P L, Porter J R, Rayner J H. A winter wheat crop simulation model without water or nutrient limitations. J Agric Sci Camb, 1984, 102: 371~382
- 9 高亮之, 金之庆等. 水稻栽培计算机模拟优化决策系统. 北京: 中国农业出版社, 1992
- 10 冯利平, 高亮之等. 小麦发育期动态模拟模型的研究. 作物学报, 1997, 23(4): 418~424
- 11 潘铁夫, 张德荣等. 中国大豆发育动态的计算机模型. 中国农业气象, 1993, 14(4): 1~7
- 12 冯利平. 小麦生长发育模拟模型(WHEATSM)的研究. [博士论文]. 南京农业大学, 1995