

## 不同积温计算方法作物发育期模拟效果比较

吴玉洁<sup>1,2</sup> 叶彩华<sup>3</sup> 姜会飞<sup>2\*</sup> 闫梦玲<sup>2</sup> 倪子璇<sup>2</sup>

(1. 吉林省气象科学研究所, 长春 130062;

2. 中国农业大学 资源与环境学院, 北京 100193;

3. 北京市气候中心, 北京 100089)

**摘要** 为探究不同积温计算方法对作物发育期模拟效果的影响情况,以北京密云冬小麦 1989—2011 年返青-拔节、拔节-抽穗和抽穗-成熟期为例,统计了基于 3 种线性假设的京冬 8 号和不区分品种的冬小麦活动积温及有效积温,对比分析了 6 种积温(GDD)模型和发育时间(DD)模型统计变量的变异系数(CV)及模拟偏差(SD),结果表明:GDD 模型对阶段积温模拟的稳定性较 DD 模型对发育日数的模拟效果更佳;区分品种的变量稳定性相对不分品种的稳定性和模拟效果更好;对比模型有效率(ME)、均方根误差(RMSE)及标准化均方根误差(NRMSE)得出结论:6 种 GDD 模型相对 DD 模型对发育期的模拟效果均达到优秀;分品种的模拟效果较不分品种的模拟更优;同一线性假设中,活动积温比有效积温模拟效果更好;3 种生长假设间,线性假设 B 对发育期模拟效果优于 A 和 C。

**关键词** 积温;生长假设;变异系数;模型有效率;模拟效果

中图分类号 S 16

文章编号 1007-4333(2016)10-0117-10

文献标志码 A

## Comparison of the simulation effect of different growing degree-days calculating methods on crop development processes

WU Yu-jie<sup>1,2</sup>, YE Cai-hua<sup>3</sup>, JIANG Hui-fei<sup>2\*</sup>, YAN Meng-ling<sup>2</sup>, NI Zi-xuan<sup>2</sup>

(1. Institute of Meteorological Sciences of Jilin Province, Changchun 130062, China;

2. College of Resource and Environment, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

3. Beijing Climate Center, Beijing 100089, China)

**Abstract** To explore the impact of methods of calculating growing degree-day on simulation effect of crop development processes, the data from 1989 to 2011 of the 3 developmental phases of Miyun winter wheat including reviving-jointing, jointing-heading and heading-maturity, were analyzed. The active and effective growing degree-days (GDD) were calculated by adapting six calculating methods based on three linear (Linear A, B and C) growth assumptions on single cultivar Jingdong 8 or all cultivars. The stability of coefficient of variation (CV) and simulation deviation (SD) of development days (DD) model and GDD models were analyzed. Results showed that, Simulation effects of GDD models for different developmental phases were excellent compared with DD model; Simulation effect of single cultivar was better than that of all cultivars; The model efficiency (ME), Root-mean-square error (RMSE) and Normalized RMSE (NRMSE) of DD model and GDD models were compared. Results showed that, Simulation effects of 6 GDD models are all excellent compared with DD model; Simulation effect of single cultivar was better than that of all cultivars; Simulation effect of active GDD was better than that of effective GDD for same linear growth assumptions; Simulation effect of developmental process was significantly improved by linear B than that of linear A and C among three linear growth assumptions.

**Keywords** growing degree-days; growth and developmental assumption; coefficient of variation; model efficiency; simulation effect

收稿日期: 2015-11-02

基金项目: 北京市科委专项(Z411100003614052); “十二五”国家科技支撑计划课题(2012BAD20B02); 国家自然科学基金项目(41475104)

第一作者: 吴玉洁, 硕士研究生, E-mail: wyj154@cau.edu.cn

通讯作者: 姜会飞, 副教授, 主要从事农业气象预报和灾害风险分析研究, E-mail: jianghuifei@sohu.com

自20世纪60年代中作物模型始创至今,100多种作物模拟模型已建立,其中美国夏威夷大学开发的农业技术转换决策支持系统(DSSAT)、荷兰Wageningen农业大学开发的SUCROS模型以及澳大利亚的农业生产系统模拟器(APSIM)是目前研究较深入且应用较广泛的作物模型<sup>[1]</sup>。作物发育期模块构建是作物模型重要内容,发育期模拟准确度直接影响作物模型的模拟效果<sup>[2]</sup>。McMaster等<sup>[3]</sup>发现,1735年,Reaumur在研究分析作物生长发育与温度关系时发现作物完成某一发育阶段要求的日均温累积值基本稳定,并创立了积温理论。”郑大玮等<sup>[4]</sup>指出:Houghton等于1923年提出有效温度概念,开始了作物有效温度、生物学零度和有效积温的研究。此后,有效积温广泛应用于作物生长发育预测<sup>[5-6]</sup>、农田水肥管理<sup>[7]</sup>、植物病虫害测报<sup>[8]</sup>和产量预测<sup>[9]</sup>等方面,成为作物模型中不可缺少的变量<sup>[2]</sup>。作物完成发育阶段所需积温恒定的积温理论是作物模型中广泛采用的发育期模拟预测基本原理。

现有研究中,积温大多是以生物生长发育速率对温度反应的两类假设为前提计算的:一是包含1个或2个基点温度的线性假设,二是包含3个或4个基点温度的优化假设<sup>[10]</sup>。不同假设对应不同的积温计算方法,例如:下限1个基点温度<sup>[11-13]</sup>、上下限2个基点温度<sup>[14-15]</sup>、3个基点温度<sup>[16]</sup>和4个基点温度<sup>[17-18]</sup>。郑大玮<sup>[4]</sup>在阐述积温本质时,引用Monteith的观点:认为积温是经过温度有效性订正的生物发育时间进程的一种度量,并用热时间或热力学时间(Thermal time)描述。因此,植物完成某一生育阶段所需要的“热时间(Thermal time)”被定义为生理发育时间<sup>[19-20]</sup>,并逐渐在作物模型中用于替代有效积温成为模拟预测生长发育时间的变量<sup>[21-22]</sup>。

目前,积温作为作物模型中模拟预测发育进程计时器仍处于主导地位<sup>[5-6]</sup>。阶段积温统计结果因积温计算方法而异,积温计算方法对阶段积温稳定性和发育进程模拟预测效果的影响受到关注<sup>[16]</sup>,有基于不同生长假设对比分析阶段有效积温稳定性<sup>[3,23]</sup>,有基于某种生长假设对比分析阶段活动积温(Active TTS)和有效积温(Effective TTS)的差异<sup>[24]</sup>,有结论指出有效积温相对稳定<sup>[25]</sup>,也有认为活动积温更稳定<sup>[24]</sup>。积温计算方法对作物发育期模拟效果影响的研究尚处于探索初期,综合对比基于多种生长假设的活动积温和有效积温稳定性差异及其

作物发育进程模拟预测效果分析的文献尚未见报道。

本研究以北京市密云农业气象试验站种植的冬小麦为例,基于目前应用较广的3种线性生长假设,统计分析作物发育阶段活动积温和有效积温及其稳定性,探究积温计算方法对发育进程模拟预测效果的影响,旨在为作物模型中优选有效模拟预测作物阶段发育的积温计算方法和提高发育模拟预测准确率提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据资料及其来源

北京市密云农业气象试验站(站号为54416, 40°23'N, 116°52'E, 海拔高度71.6 m)1989—2011年冬小麦发育期观测资料和地面气象站逐日日均温数据。发育期观测资料包括品种、播种期、返青期、拔节期、抽穗期和成熟期。在23年的大田试验中,京冬8号种植13年,京冬3号4年,京冬6号2年,还有丰抗13号、北农2号和京411等4个品种各种植1年。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 3种线性生长假设

在现行科技文献中,普遍使用的作物生长发育速率对温度反应的3种线性生长假设见图1<sup>[10]</sup>:以温度( $T$ )高于生物学下限温度( $T_{base}$ )时生长发育发生为前提,假定在温度等于或低于下限温度时生长发育不发生(即生长发育速率( $R_{gd}$ )等于0.0);当温度高于下限温度时,假设A——生长发育速率随温度的增加而线性增长;假设B——生长发育速率随温度升高而线性增长达到最大值(1.0),此时对应的温度为上限温度( $T_{upper}$ ),当温度高于上限温度后,生长发育就停止(生长发育速率等于0.0);假设C——生长发育速率随温度升高而线性增长达到最大值(1.0)后,随温度的升高而保持恒定不变。

#### 1.2.2 活动积温和有效积温计算方法

综合专家意见和文献<sup>[26-28]</sup>资料分别选取10和30℃为北京冬小麦抽穗-成熟期的下限和上限温度指标<sup>[26]</sup>;返青-拔节期温度指标为下限3℃和上限25℃<sup>[27]</sup>及拔节-抽穗期温度指标为下限8℃和上限28℃<sup>[28]</sup>。

对应线性假设统计连续 $n$  d( $i=1, 2, 3, \dots, n$ ),以 $a_i$ 和 $e_i$ 表示某天的活动温度和有效温度, $A$ 和 $E$ 表示这 $n$  d的活动积温和有效积温,积温计算方法如下:

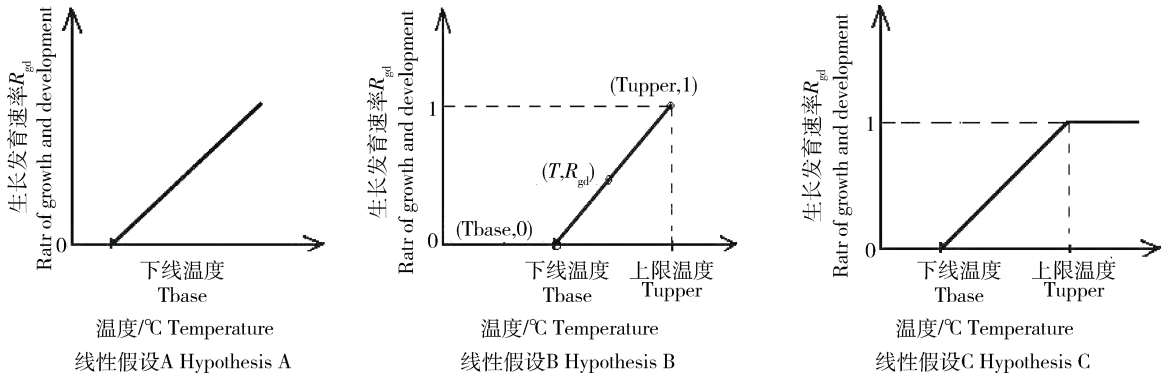


图 1 生长发育速率对温度反应的 3 种线性假设

Fig. 1 Three assumption of response of rate of growth and development to temperature

$$A = \sum_{i=1}^n a_i \quad (1)$$

$$E = \sum_{i=1}^n e_i \quad (2)$$

式中： $t_i$  表示日均温；当天的活动温度  $a_i$  和有效温度  $e_i$  计算方法如下：

1) 对应假设 A，只考虑下限温度 ( $t_b$ ) 一个温度指标时，

$$a_i = \begin{cases} 0 & t_i < t_b \\ t_i & t_i \geq t_b \end{cases} \quad (3)$$

$$e_i = \begin{cases} 0 & t_i < t_b \\ t_i - t_b & t_i \geq t_b \end{cases} \quad (4)$$

2) 对应假设 B，考虑下限温度 ( $t_b$ ) 和上限温度 ( $t_u$ ) 2 个温度指标时，

$$a_i = \begin{cases} 0 & t_i < t_b \\ t_i & t_b \leq t_i < t_u \\ 0 & t_i \geq t_u \end{cases} \quad (5)$$

$$e_i = \begin{cases} 0 & t_i < t_b \\ t_i - t_b & t_b \leq t_i < t_u \\ 0 & t_i \geq t_u \end{cases} \quad (6)$$

3) 对应假设 C，考虑下限温度 ( $t_b$ ) 和上限温度 ( $t_u$ ) 2 个温度指标，

$$a_i = \begin{cases} 0 & t_i < t_b \\ t_i & t_b \leq t_i < t_u \\ t_u & t_i \geq t_u \end{cases} \quad (7)$$

$$e_i = \begin{cases} 0 & t_i < t_b \\ t_i - t_b & t_b \leq t_i < t_u \\ t_u - t_b & t_i \geq t_u \end{cases} \quad (8)$$

### 1.2.3 检验指标

1) 变异系数。变异系数 (Coefficient of variation, CV) 表达样本序列相对离散程度，是标准

差与平均值之比。某变量的变异系数可以反映该要素的年际变化和年际间要素数值的稳定性。其表达式如下：

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{x}} \times 100\% \quad (9)$$

式中：CV 为某变量 (发育阶段持续时间或阶段积温) 的变异系数， $\sigma$  为该变量的均方差， $\bar{x}$  为统计变量样本序列算术平均值。统计变量的变异系数越小，则其稳定性越大。

2) 发育期模拟偏差。以历年阶段发育期模拟值与实测值的偏差绝对值之算术平均值描述发育期模拟偏差 (Simulation deviation)，具体计算方法如下：

$$SD = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - y_i|}{n} \quad (10)$$

式中： $x_i$  和  $y_i$  分别表示历年发育期的实测值和模拟值。这里发育期用阶段时间表示，即从发育初始日期算起到终日为止，阶段持续的时间与发育终止期具有一一对应关系。SD 数值越小表示多年平均模拟效果越好。

3) 相对误差百分率。以样本序列历年阶段发育期模拟值与实测值的偏差绝对值之和与阶段实测值的多年和之比，统计发育期模拟相对误差 (Relative error)，具体计算方法如下：

$$RE = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - y_i|}{\sum_{i=1}^n x_i} \times 100 \quad (11)$$

式中：RE 为相对误差百分率，%；取值范围为  $\geq 0.0$  实数，数值越小表示模拟效果越好。

4) 模型有效率。模型有效率 (Model efficiency) 是国际通用的作物模型中检验相对于发育时间模型

(DD模型)的模拟效果指标,计算方法<sup>[29-30]</sup>如下:

$$ME = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (12)$$

式中:ME为相应积温计算方法对应的积温模型模拟有效率。ME的取值范围小于等于1.0,ME<0表示按该积温模型模拟效果较按发育时间模型模拟效果差;ME=0表示积温模拟效果与按发育时间模型模拟效果相同;ME>0表示按积温模拟效果比按发育时间模型模拟好,且数值越大,表示相对模拟效果越好。

5)均方根误差。均方根误差(Root-mean-square error, RMSE)是国际上作物模型中普遍采用的检验模拟值与观测值偏离程度的统计量<sup>[16,18]</sup>,具体计算方法如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{n}} \quad (13)$$

均方根误差值越大,表示模拟值与观测值偏离越大,即模拟效果越差;反之,均方根误差值越小,表示模拟效果越好。

6)标准化(归一化)均方根误差。标准化均方根误差(Normalized RMSE)是指均方根误差与实际观测多年平均值之比,也是国际上用于作物模型模拟效果模型的统计量,具体计算方法如下:

$$NRMSE = \frac{1}{\bar{x}} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{n}} \quad (14)$$

当NRMSE<0.1时,表示模拟效果优秀;当0.1≤NRMSE<0.2时,表示模拟效果良好;当0.2≤NRMSE<0.3时,表示模拟效果一般;当NRMSE≥0.3时,表示模拟效果较差<sup>[31]</sup>;

## 2 结果与分析

3种线性生长假设分别用A、B和C表示,活动积温用A表示,有效积温用E表示,相应地基于不同线性生长假设计算阶段积温的方法分别用AA、AE、BA、BE、CA和CE表示6种不同的积温模型。发育期模拟值是以相应积温模型统计的阶段积温平均值为标准,从历年发育阶段的上一个发育期为初始日(也可称为发育阶段的初日)开始统计,运用式(1)~式(8),按对应积温模型计算积温,推算阶段积

温达到标准值的时间为发育阶段时间,积温达到标准值的日期即为下一发育期始期(也称为发育阶段的终日)。按阶段发育时间(Developmental days, DD)的多年平均值为标准模拟发育期的方法称为发育时间模型,简称DD模型。

### 2.1 变异系数、模拟偏差和相对误差

利用发育期资料和逐日日均温,按1989—2011年以单一品种京冬8号(分品种)种植的13年和视所有7个品种为一体(不分品种)种植的23年数据,统计历年冬小麦在返青-拔节期、拔节-抽穗期和抽穗-成熟期的以阶段发育时间为DD模型的统计变量和以阶段积温为6种积温模型的统计变量,按式(9)计算不同模型统计变量在各阶段的变异系数;并以历年不同模型统计变量的平均值为标准值按相应模型模拟发育期,按式(10)~(11)计算模拟偏差和相对误差,结果见表1。

由表1可知,冬小麦在返青-拔节期、拔节-抽穗期和抽穗-成熟期3个阶段,按京冬8号和不分品种统计得到的阶段年均发育时间分别为40.2、19.4、35.5和39.6、19.9、36.8 d,京冬8号在拔节前发育时间比不分品种的要长0.6 d、拔节后的2个阶段分别短0.5和1.3 d,相差时间仅为阶段发育时间的1.52%、2.51%和3.53%,表明分品种与不分品种的发育时间相差不大;返青-拔节期DD模型统计变量变异系数单一品种比不分品种少1.2%,而拔节后的2个阶段分别多1.38%和0.82%;拔节前单一品种的阶段活动积温变异系数比不分品种的少0.05%,而有效积温则多0.3%,积温模型的变异系数小于DD模型;拔节-抽穗期活动积温变异系数分品种较不分品种多出0.85%,而有效积温少0.1%;在返青-拔节期和拔节-抽穗期,3种线性假设间没有差异;抽穗-成熟期,仅AA和CA积温模型单一品种的变异系数相对于不分品种的多0.15%,其他4个积温模型的变异系数都表现为单一品种比不分品种的少。从7个模型(6个积温模型和DD模型)三阶段的平均情况来看,单一品种的变异系数比不分品种的小,表明分品种比不分品种的统计变量相对稳定。

同时从表1还可以看出,无论分品种还是不分品种,6种积温模型在冬小麦3个发育阶段的模拟偏差和相对误差都比DD模型要小,说明采用这6个积温模型对发育期的模拟效果都比DD模型好;积温模型间,京冬8号在返青-拔节期活动积温和有

表 1 不同模型统计变量变异系数、模拟年均偏差绝对值与相对误差百分率

Table 1 Coefficient of variation, absolute bias and relative error of developmental days among models

发育阶段 Developmental phase	单一品种(京冬 8 号) Single cultivar (Jingdong 8)					不分品种(所有 7 个品种视为整体) All cultivars as an integrated unit				
	年均时间/d Average developmental days	模型 Model	变异 系数/% CV	发育期 模拟 偏差/d SD	相对 误差/% RE	年均时间/d Average developmental days	模型 Model	变异 系数/% CV	发育期 模拟 偏差/d SD	相对 误差/% RE
返青-拔节 Reviving to jointing	40.2	DD	10.36	3.5	8.71	39.6	DD	11.56	3.5	8.84
		AA	11.72	2.3	5.80		AA	11.77	2.4	6.07
		AE	15.10	2.7	6.79		AE	14.80	2.7	6.76
		BA	11.72	2.3	5.80		BA	11.77	2.4	6.07
		BE	15.10	2.7	6.79		BE	14.80	2.7	6.76
		CA	11.72	2.3	5.80		CA	11.77	2.4	6.07
		CE	15.10	2.7	6.79		CE	14.80	2.7	6.76
拔节-抽穗 Jointing to heading	19.4	DD	17.18	2.3	11.86	19.9	DD	15.80	2.4	12.06
		AA	15.30	1.9	9.64		AA	14.45	2.0	9.79
		AE	15.81	1.8	9.48		AE	15.91	2.1	10.69
		BA	15.30	1.9	9.64		BA	14.45	2.0	9.79
		BE	15.81	1.8	9.48		BE	15.91	2.1	10.69
		CA	15.30	1.9	9.64		CA	14.45	2.0	9.79
		CE	15.81	1.8	9.48		CE	15.91	2.1	10.69
抽穗-成熟 Heading to maturity	35.5	DD	9.72	2.5	7.04	36.8	DD	8.90	2.5	6.79
		AA	7.25	1.7	4.81		AA	7.10	1.6	4.29
		AE	6.77	1.3	3.72		AE	8.00	1.6	4.46
		BA	6.76	1.6	4.60		BA	6.88	1.5	4.14
		BE	6.11	1.2	3.43		BE	7.73	1.6	4.27
		CA	7.24	1.7	4.81		CA	7.09	1.6	4.28
		CE	6.74	1.3	3.71		CE	7.99	1.6	4.46

效积温的发育期模拟偏差和相对误差分别为 2.3 和 2.7 d 及 5.80%、6.79%，而不分品种的偏差分别为 2.4 和 2.7 d 及 6.07%、6.76%，表现为分品种比不分品种的差异小，且活动积温模型的模拟效果明显优于有效积温；拔节-抽穗期和抽穗积温模型间模拟偏差和相对误差差异虽然较小，但也表现出分品种的有效积温优于活动积温，而不分品种的则活动积温优于有效积温，这种差异在抽穗-成熟期分品种的表现最明显。

不分品种按 DD 模型模拟 3 个发育期的模拟偏差分别为 3.5、2.4 和 2.5 d，相对误差为 8.84%、12.06% 和 6.79%；按活动积温和有效积温模拟的返青-拔节期、拔节-抽穗期和抽穗-成熟期发育时间绝对偏差平均值分别为 2.4 和 2.7 d、2.0 和 2.1 d、1.5 和 1.6 d；按积温模拟的发育期绝对偏差平均值 2.6、2.1 和 1.6 d，比按 DD 模型的模拟偏差分别少 0.9、0.3 和 0.9 d，三阶段平均偏差少 0.7 d；按积温模拟发育期平均相对误差为 6.44%、10.30% 和

4.30%，比按发育时间模拟的各阶段误差分别少2.4%、1.76%和2.49%，综合3个阶段积温模型相对误差平均比DD模型的少2.22%；按单一品种统计结果，6种积温模型对3个发育期的模拟偏差和相对误差平均值分别为1.9 d和6.68%比DD模型平均值2.8 d和9.20%少0.9 d和2.52%。

综合表1结果分析得出：从阶段积温变异系数来看，不分品种的3个阶段对同一线性生长假设都表现为活动积温比有效积温更稳定，但对单一品种阶段积温相对稳定的在抽穗前为活动积温而抽穗后则为有效积温；从3个发育阶段的平均情况来看，相对于同一线性假设而言，阶段活动积温的变异系数比有效积温小，表现活动积温比有效积温相对更稳定；按积温模拟发育期绝对偏差和相对误差都比按发育时间模拟的小，表明6种积温模型对发育期模

拟效果比DD模型好；运用活动积温模拟的发育期比有效积温模拟的绝对偏差和相对误差小，表明活动积温具有比有效积温更好的模拟效果；对比3种线性生长假设的模拟效果，3种线性假设在返青-拔节期和拔节-抽穗期没有差别，但在抽穗-成熟期表现为线性生长假设B模拟偏差最小和相对误差最小；而在线性假设B中，单一品种表现为线性假设B的有效积温模型的模拟偏差最小(1.2 d)和相对误差最小(3.43%)，不分品种的情况则表现为线性假设B的活动积温模拟效果最好。

## 2.2 模型有效率、均方根误差和归一化均方根误差

根据历年各发育期模拟值与观测值，利用式(12)~(14)分别计算不同积温模型的模型有效率、均方根误差和归一化均方根误差，将统计结果按单一品种和不分品种分阶段对照列于表2。

表2 阶段变量变异系数和积温模型的模型有效率

Table 2 Comparison of CV of variables and SE of model among six models for three phases

发育阶段 Developmental phase	积温模型 GDD model	单一品种(京冬8号) Single cultivar (Jingdong 8)			不分品种(所有7个品种视为整体) All cultivars as an integrated unit		
		模型有效率	均方根误差	归一化均方根误差	积温模型	模型有效率	均方根误差
		ME	RMSE	NRMSE	GDD model	ME	RMSE
返青-拔节 Reviving to jointing	AA	0.47	2.90	0.07	0.57	2.92	0.07
	AE	0.31	3.32	0.08	0.50	3.18	0.08
	BA	0.47	2.90	0.07	0.57	2.92	0.08
	BE	0.31	3.32	0.08	0.50	3.18	0.08
	CA	0.47	2.90	0.07	0.57	2.92	0.08
	CE	0.31	3.32	0.08	0.50	3.18	0.08
拔节-抽穗 Jointing to heading	AA	0.38	2.51	0.13	0.34	2.50	0.13
	AE	0.49	2.29	0.12	0.34	2.51	0.13
	BA	0.38	2.51	0.13	0.34	2.50	0.13
	BE	0.49	2.29	0.12	0.34	2.51	0.13
	CA	0.38	2.51	0.13	0.34	2.50	0.13
	CE	0.49	2.29	0.12	0.34	2.51	0.13
抽穗-成熟 Heading to maturity	AA	0.61	2.07	0.06	0.50	2.27	0.06
	AE	0.72	1.74	0.05	0.44	2.39	0.07
	BA	0.66	1.94	0.05	0.53	2.20	0.06
	BE	0.78	1.57	0.04	0.47	2.32	0.06
	CA	0.61	2.07	0.06	0.50	2.27	0.06
	CE	0.73	1.74	0.05	0.44	2.39	0.06

从表 2 可以看出,对应 6 种积温模型单一品种的模型有效率在返青-拔节期比不分品种的小,而在拔节-抽穗期和抽穗-成熟期则分品种的比不分品种的模型有效率大;统计 3 个阶段 6 种积温模型的模型有效率、均方根误差及其归一化指标平均值,得到单一品种与不分品种分别为 0.50、2.46、0.08 与 0.45、2.62 和 0.09,结果表明分品种比不分品种模拟效果好一些;总体而言,无论分品种还是不分品种,积温模型的模拟效果都达到优秀,且分品种的模拟效果优于不分品种的。

在返青-拔节期和拔节-抽穗期,对应 3 种线性假设的 3 种活动积温模型间的模型有效率和均方根误差相同,表明基于 3 种线性假设的活动积温模型的模拟效果相同;同样 3 种有效积温模型的模拟效果也相同;在返青-拔节期,分品种与不分品种的统计结果都表现出活动积温模型的模拟效果优于有效积温;而在拔节-抽穗期,则表现为有效积温优于活动积温。在抽穗-成熟期,6 种积温模型对单一品种的模拟效果都达到优秀水平,模拟效果排序表现为  $BE > CE > AE > BA > CA = AA$ ,即有效积温优于活动积温,线性假设 B 最优,其次为线性假设 C,线性假设 A 排第三;而对不分品种的模拟效果也都达到优秀水平,模拟效果排序则表现为  $BA > CA = AA > BE > CE = AE$ ,即活动积温优于有效积温,线性假设 B 最优,线性假设 C 和线性假设 A 并列位居其次。

分别求了取 6 种积温模型在 3 个阶段的 ME、RMSE 和 NRMSE 平均值,6 种积温模型 AA、AE、BA、BE、CA 和 CE 的归一化均方根误差都在 0.08~0.09 之间,模拟效果都表现为优秀;对比模型有效率指标,对应 6 种模型分品种的比不分品种都大 0.02~0.09,相应积温模型的模拟效果都表现为分品种比不分品种的大;单一品种的积温模型的模拟效果排序表现为  $BE > CE = AE > BA > CA = AA$ ,即有效积温优于活动积温;不分品种的积温模型的模拟效果排序表现为  $BA > CA = AA > BE > CE = AE$ ,即活动积温优于有效积温;3 种生长假设中以线性假设 B 最好,同时线性假设 C 和线性假设 A 并列位居其次。

### 3 结论与讨论

#### 3.1 结论

通过对北京密云农业气象试验站 1989—2011

年冬小麦单一品种(京冬 8 号)和不分品种的 6 种积温模型和 DD 模型在返青-拔节期、拔节-抽穗期和抽穗-成熟期 3 个发育阶段的阶段积温和发育时间的变异系数、模拟偏差、相对误差和模型有效率等的统计分析,综合得出如下结论:

1)无论对于单一品种还是不分品种的情况,积温模型对发育期的模拟准确率和模拟效果比 DD 模型好,6 种积温模型相对于 DD 模型都达到优秀的模拟效果;积温模型中又以线性生长假设 B 的积温模型效果最好,线性假设 C 和线性假设 A 并列位居其次。

2)从 3 个发育阶段平均情况来看,无论分品种或不分品种,相对于同一线性假设而言,阶段活动积温的变异系数比有效积温小,即阶段活动积温比有效积温相对更稳定;对于同一积温模型而言,分品种的阶段积温稳定性比不分品种的相对较大,模型有效率、模拟偏差、相对误差和均方根误差及其归一化指标表明,单一品种的积温模型对发育期的模拟效果也比不分品种的好。

3)基于线性生长假设 B 的积温模型中,单一品种表现为有效积温模型的模拟效果比活动积温的好,而不分品种的则表现为活动积温模拟效果比有效积温的好。

综上所述,北京市密云农业气象试验站冬小麦发育期模拟效果表明,积温模型比 DD 模型对发育期模拟更准确,该研究结论较他人研究结果一致<sup>[3,12,32]</sup>,也是积温理论创建并作为基本原理在作物模型中广泛使用的原因;积温模型中,单一品种的模拟效果比不分品种的相对较好;同一线性假设中,活动积温模拟效果比有效积温好;3 种线性假设中,以线性假设 B 的模拟效果最好;因此,总体而言,建议在作物发育期模拟时采用基于线性假设 B 的活动积温分品种构建积温模型,即采用 BA 积温模型。

#### 3.2 讨论

1)本研究相对于 3 种线性假设中的同一生长假设来说,阶段活动积温相对于有效积温具有变异系数小、稳定性大和对发育期模拟效果更好的特点。这一结论与文献<sup>[25]</sup>和教材<sup>[33]</sup>中提到的有效积温比活动积温更稳定的说法是矛盾的。而参考大量国内外相关文献<sup>[3,5-7,23,25,29-31,34]</sup>,作物模型基本采用单一有效积温,有效积温比活动积温稳定的结论是缺乏事实依据的。这种主观说法也许源于、低于或等于作物学下限的温度对作物生长发育是无

效的认识。事实上,温度是具有日变化特性的,而统计积温是基于日均温而没有考虑温度的日变化。当发育阶段中某日的日均温等于下限温度时,按有效积温统计则数值为零,而1天中会有一段时间的温度高于日均温,而这一时段对生长发育则是有效的,按活动积温统计该日对生长发育的温度数值就是该日的日均温,是大于零且有积温量值贡献的。另一方面,以温度模拟发育进程的模型只是一个统计模型而已,并不是真正的生物生理过程。因此,建议在作物模型中增加不同积温模型对比,根据研究区域观测数据经过计算和检验,探寻阶段积温相对稳定和模拟效果较好的积温计算方法,便于用户选择和确定适合区域和作物对象的有效模型,以提高发育期模拟准确性和预测效果。

2)作物不同品种基点温度不同<sup>[35]</sup>,界限温度随品种波动较大<sup>[36]</sup>,准确有效的作物品种基点温度是要通过实验和试验获得的。作物模型中不正确的基点温度设定导致不正确的GDD估算,也就影响发育进程的准确模拟和预测<sup>[37]</sup>。本研究由于缺乏试验品种及其在相应发育阶段的基点温度指标,仅根据文献资料对冬小麦各发育阶段的基点温度指标采用的人为设置方法,也无法区分品种间的基点温度差异。这种界限温度的设置可能会导致阶段积温估算失真,从而产生对发育期模拟效果的偏差,也有可能导致模拟结果和结论差错。

3)影响作物发育进程的因素繁多,主要有生物因素和环境因素。前者是内在因素,包括物种及品种类型、生理控制等;后者是外在因素,包括温度、光照、水分和生长调节剂等,其中气温、光照、水分为主要影响因子。影响冬小麦发育期的气象因素很多,在各气象要素中,虽然温度是控制物候期的主导因素,但日长、日照时数和降水量也是影响植物物候期的重要气候因子<sup>[38]</sup>。本研究仅基于积温理论以温度为单一因素模拟发育进程,也可能引起模拟失真而产生偏差和误差。虽然发育期模型中考虑因子及其影响越来越与实际生产更加接近,但很多作物模型还是作为一个研究工具,在生产实际中的有效性和可靠性仍然不足,对指导实践应用还有一段距离。目前的作物发育期模型已经发展到了联合考虑温、光、水、氮的综合系统,但在病虫害、自然灾害等因素对作物发育期的影响考虑较少,而灾害的发生却是影响作物发育期长短及产量的重要因子。因此,深入生长发育与环境因子关系的机理性研究,综合环

境因子中有利条件对生长发育的正面影响和不利条件的危害和负作用,提高发育期模型模拟预测准确率仍然是农业科技工作者的主攻方向。

4)本研究以积温理论为基础,对比3种线性生长假设,假设B模拟效果最好,假设C和假设A次之。仅基于一个下限温度的假设A不如考虑上下限的假设B和C容易理解,因为当温度高于下限并不断升高时,以假设A积温统计也就不断增加,但事实上,作物对温度要求是有一个适宜范围,当温度升高到一定阈值或高于此数值时,温度对生长发育是不起作用的,甚至是有害的;而假设A没有考虑这一点,显然是不够的,因此,建议积温模型尽量不采用假设A。对比假设B和假设C,假设B在温度高于上限时则以温度对生长发育贡献积温值为零计,从生物学角度来说合理的,也是符合作物生理反应的;但对于假设C,当温度高于上限时,就以上限温度值计算,只是剔除了高出上限的温度部分。从植物生理学角度,当温度高于上限时,作物生长发育停止,温度继续升高时反而会产生有害影响。因此,结合作物生理学知识和统计分析结果,建议在作物模型中基于线性假设计算积温时采用线性假设B,同时增加活动积温和有效积温的对比,以便用户根据发育期资料数据的模拟效果选择最优的积温模型以提高作物模型应用有效性。

此外,目前的作物模型采用考虑三基点或四基点的优化生长假设的研究也已较为常见<sup>[10,16-18]</sup>,而本研究仅从基于下限和上下限的线性生长假设的积温模型进行发育期模拟效果比较分析,缺乏优化生长假设的统计分析,基于线性假设B与优化假设的积温模型的模拟效果对比分析是有待深入研究的课题,还有待进一步探究。

## 参 考 文 献

- [1] 张均华,刘建立,张佳宝.作物模型研究进展[J].土壤,2012,44(1):1-9  
Zhang J H, Liu J L, Zhang J B. Advances on crop models[J]. Soils, 2012, 44(1): 1-9 (in Chinese)
- [2] 冯利平,高亮之,金之庆,马新明.小麦发育期动态模拟模型的研究[J].作物学报,1997,23(4):418-424  
Feng L P, Gao L Z, Jin Z Q, Ma X M. Studies on the simulation models for wheat phenology [J]. Acta Agronomica Sinica, 1997, 23(4): 418-424 (in Chinese)
- [3] McMaster G S, Wilhelm W W. Growing degree-days: One equation, two interpretations [J]. Agricultural and Forest



- Meteorology, 1997, 87(4): 291-300
- [4] 郑大玮, 孙忠富. 关于积温一词及其度量单位科学性问题的讨论[J]. 中国农业气象, 2010, 31(2): 165-169  
Zheng D W, Sun Z F. Discussion scientificness problem of accumulated temperature and its unit[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2010, 31(2): 165-169 (in Chinese)
- [5] McMaster G S, LeCain D R, Morgan J A, Li A G, Hendrix D L. Elevated CO<sub>2</sub> increases wheat CER, leaf and tiller development, and shoot and root growth[J]. *Agronomy & Crop Science*, 1999, 183(2): 119-128
- [6] Sacks W J, Kucharik C J. Crop management and phenology trends in the U S corn belt: Impacts on yields, evapotranspiration and energy balance[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(7): 882-894
- [7] Griffin T S, Honeycutt C W. Using growing degree days to predict nitrogen availability from livestock manures[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(5): 1876-1882
- [8] 陈若麓, 蔡立正, 程遐年, 丁宗泽, 吴中林. 褐飞虱种群动态的研究 I. 温度、食料条件对种群增长的影响[J]. 南京农业大学学报, 1986(3): 23-33  
Chen R C, Qi L Z, Cheng X N, Ding Z Z, WU Z L. Studies on the population dynamics of brown planthopper *Nilaparvata lugens* stal I: Effects of temperature and diet conditions on the growth of experimental population[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 1986(3): 23-33 (in Chinese)
- [9] Girma K, Holtz S L, Arnall D B, Fultz L M, Hanks T L, Lawles K D, Mack C J, Owen K W, Reed S D, Santillano J, Walsh O, White M J, Raun W R. Weather, fertilizer, previous year yield and fertilizer levels affect ensuing year grain yield and fertilizer response of winter wheat[J]. *Agronomy Journal*, 2007, 99(6): 1607-614
- [10] 姜会飞, 温德永. 基于线性生长假设利用极端温度计算日积温的方法[J]. 中国农业大学学报, 2013, 18(1): 82-87  
Jiang H F, Wen D Y. Methods of calculating growing degree-day based on LR assumption and daily extreme temperatures [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2013, 18(1): 82-87 (in Chinese)
- [11] Russelle M P, Wilhelm W W, Olson R A, Power J F. Growth analysis based on degree days[J]. *Crop Science*, 1984, 24: 28-32
- [12] McMaster G S, Wilhelm W W, Palic D B, Porter J R, Jamieson P D. Spring wheat leaf appearance and temperature: Extending the paradigm[J]. *Annals of Botany*, 2003, 91(6): 697-705
- [13] Sanderson M A, Moore K J. Switchgrass morphological development predicted from day of the year or degree day models[J]. *Agronomy Journal*, 1999, 91(4): 732-734
- [14] Williams M M, Lindquist J L. Influence of planting date and weed interference on sweet corn growth and development[J]. *Agronomy Journal*, 2007, 99(4): 1066-1072
- [15] Raes D, Steduto P, Hsiao T C, Fereres E. AquaCrop the FAO crop model to simulate yield response to water; II Main algorithms and software description[J]. *Agronomy Journal*, 2009, 101(3): 438-447
- [16] Aiken R M. Applying thermal time scales to sunflower development[J]. *Agronomy Journal*, 2005, 97(3): 746-754
- [17] Vinocur M G, Ritchie J T. Maize leaf development biases caused by Air-apex temperature differences [J]. *Agronomy Journal*, 2001, 93(4): 767-772
- [18] McMaster G S, White J W, Hunt L A, Jamieson P D, Dhillon S, Ortiz-Monasterio J I. Simulating the influence of vernalization, photoperiod and optimum temperature on wheat developmental rates[J]. *Annals of Botany*, 2008, 102(4): 561-569
- [19] 刘铁梅, 曹卫星, 罗卫红. 小麦抽穗后生理发育时间的计算与生育期的预测[J]. 麦类作物学报, 2000, 20(3): 29-34  
Liu T M, Cao W X, Luo W H. Calculation of physiological development time and prediction of development stages after heading[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2000, 20(3): 29-34 (in Chinese)
- [20] 倪纪恒, 罗卫红, 李永秀, 戴剑锋, 金亮, 徐国彬, 陈永山, 韩利, 郇翔, 陈春宏, 卜崇兴. 温室番茄发育模拟模型研究[J]. 中国农业科学, 2005, 38(6): 1219-1225  
Ni J H, Luo W H, Li Y X, Dai J F, Jin L, Xu G B, Han L, Tai X, Chen C H, Bu C X. Simulation of the development of tomato in greenhouse[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(6): 1219-1225 (in Chinese)
- [21] 张立祯, 曹卫星, 张思平, 罗卫红. 基于生理发育时间的棉花生育期模拟模型[J]. 棉花学报, 2003, 15(2): 97-103  
Zhang L Z, Cao W X, Zhang S P, Luo W H. Simulation model for cotton development stages based on physiological development time[J]. *Cotton Science*, 2003, 15(2): 97-103 (in Chinese)
- [22] 李存东, 曹卫星. 小麦阶段发育的生理生态特征评述[J]. 南京农业大学学报, 1997, 20(2): 17-21  
Li C D, Cao W X. A Review on eco-physiological characterization of wheat phasic development[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 1997, 20(2): 17-21 (in Chinese)
- [23] Araya A, Habtu S, Hadgu K M, Kebede A, Dejene T. Test of AquaCrop model in simulating biomass and yield of water deficient and irrigated barley [J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(11): 1838-1846
- [24] 肖静, 李楠, 姜会飞. 作物发育期积温计算方法及其稳定性[J]. 气象研究与应用, 2010, 31(2): 64-67  
Xiao J, Li N, Jiang H F. Calculation and stability of accumulated temperatures in the growing season of winter wheat [J]. *Journal of Meteorological Research and Application*, 2010, 31(2): 64-67 (in Chinese)
- [25] 徐善玲, 黄兴国, 黄琼. 浅谈作物积温的稳定性及其预报的准确性[J]. 江西气象科技, 2005, 28(3): 34-35  
Xu S L, Huang X G, Huang Q. The discussion of accumulated temperatures in stability and accuracy of forecasting [J]. *Jiangxi Meteorological Science and Technology*, 2005, 28(3):

- 34-35 (in Chinese)
- [26] 马焕香,武文安,赵洪山,郝茂生,于传策. 冬小麦抽穗扬花期低温的影响[J]. 山东气象, 2002(9):35-36  
Ma H X, Wu W A, Zhao H S, Hao M S, Yu C C. The influence of low temperature on winter wheat in heading and flowering period [J]. *Journal of Shandong Meteorology*, 2002(9):35-36 (in Chinese)
- [27] 徐腊梅. 石河子地区春季低温对冬小麦生长影响分析[C]//第26届中国气象学会年会农业气象防灾减灾与粮食安全分会场论文集. 北京:中国气象学会, 2009:756-760  
Xu L M. The analysis of the influence of low temperature in spring on winter wheat growth in Shihezi of China[C]. In: The Proceedings from the 26<sup>th</sup> China Meteorological Society Annual Meeting of Agricultural Meteorological Disaster Prevention and Mitigation and Food Security Meeting Venue. Beijing: Chinese Meteorological Society, 2009:756-760 (in Chinese)
- [28] Porter J R, Gawith M. Temperatures and the growth and development of wheat: A review [J]. *European Journal of Agronomy*, 1999, 10(1):23-36
- [29] Pagani V, Francone C, Wang Z M, Qiu L, Bregaglio S, Acutis M, Confalonieri R. Evaluation of WARM for different establishment techniques in Jiangsu (China) [J]. *European Journal of Agronomy*, 2014, 59:78-85
- [30] Wang J, Wang E L, Feng L P, Yin H, Yu W D. Phenological trends of winter wheat in response to varietal and temperature changes in the North China Plain [J]. *Field Crops Research*, 2013, 144:135-144
- [31] Soler C M T, Sentelhas P U, Hoogenboom G. Application of the CSM-CERES-Maize model for planting date evaluation and yield forecasting for maize grown off-season in a subtropical environment [J]. *European Journal Agronomy*, 2007, 27(2/3/4):165-177
- [32] Rao S C, Coleman S W, Volesky J D. Yield and quality of wheat, triticale, and elytricum forage in the southern plains [J]. *Crop Science*, 2000, 40(5):1308-1312
- [33] 段若溪,姜会飞. 农业气象学 [M]. 北京:气象出版社, 2013  
Duan R X, Jiang H F. *Agrometeorology* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2013 (in Chinese)
- [34] 贾慧芬. 作物发育期有效积温累积速度预报方法的研究 [J]. 沈阳农业大学学报, 1992, 23(专辑):81-87  
Jia Huifen. Forecasting the development period of rice crop according to the accumulation speed of effective temperature [J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 1992, 23 (A1):84-87 (in Chinese)
- [35] John R. Porter, Megan Gawith, Temperatures and the growth and development of wheat: A review [J]. *European Journal of Agronomy*, 1999 (10):23-36
- [36] Raymundo R, Asseng S, Cammarano D, Quiroz R. Potato, sweet potato, and yam models for climate change: A review [J]. *Field Crops Research*, 2014, 166:173-185
- [37] Moreno L S B, Pedreira C G S, Boote K J, Alves R R. Base temperature determination of tropical *Panicum* spp grasses and its effects on degree-day-based models [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, 186:26-33
- [38] 林文,同延安,杨宪龙,路永莉,蒋冲. 陕西冬小麦物候期对气候特征响应研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2013(8):27  
Lin W, Tong Y A, Yang X L, Lu Y L, Jiang C. The research on climate response of winter wheat in Shanxi province in phenological phase [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2013(8):27 (in Chinese)

责任编辑:苏燕