

# 小时和日步长热时对夏玉米生育期模拟的影响

余卫东<sup>1,2</sup>, 冯利平<sup>2\*</sup>

(1. 中国气象局/河南省农业气象保障与应用技术重点实验室, 郑州 450003;  
2. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

**摘要:** 热时是模拟和预测作物生育期的重要参数, 而小时步长热时与日步长热时之间存在差异。该研究利用郑州农业气象试验站 2005—2018 年逐小时气温数据和同期夏玉米生育期观测资料, 南阳、获嘉和黄泛区农场 2012—2013 年玉米分期播种生育期资料和逐时气温数据, 选择线性模型、Logistic 模型和 Wang-Engel (WE) 模型 3 种作物生育速率温度响应模型, 结合玉米三基点温度, 分别计算了各模型中夏玉米出苗、拔节、开花和成熟期的小时步长热时和日步长热时的累积值, 比较这 3 种模型的小时步长热时与日步长热时对玉米生育期的模拟效果。结果表明: 在夏玉米生长期, 3 个温度模型的逐日热时整体上表现为日步长热时大于小时步长热时, 气温日变化是造成这种差异的直接原因。日平均气温达到作物生长最适温度附近时, 小时步长热时与日步长热时的日差异最大值可达 9.7 °C·d (线性)、9.1 °C·d (Logistic) 和 7.4 °C·d (WE)。线性模型在拔节期、开花期的日步长热时累积比小时步长热时显著偏多 ( $P < 0.05$ ), Logistic 模型在拔节、开花和成熟期的日步长热时累积也比小时步长热时显著偏多 ( $P < 0.05$ ), 而 WE 模型在各生育期均无显著性差异。在同一温度模型条件下, 日步长热时与小时步长热时的生育期模拟差异不大于 1 d, 生育期时长模拟差异不大于 2 d。小时步长热时没有显著提高夏玉米生育期模拟精度。

**关键词:** 温度; 作物; 模型; 小时; 生育期; 热时; 夏玉米

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.07.016

中图分类号: S513

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2021)-07-0131-09

余卫东, 冯利平. 小时和日步长热时对夏玉米生育期模拟的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(7): 131-139.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.07.016 <http://www.tcsae.org>

Yu Weidong, Feng Liping. Comparison of the simulation effects of summer maize phenology derived from hourly and daily time step thermal units[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(7): 131-139. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.07.016 <http://www.tcsae.org>

## 0 引言

物候期是反映作物生长发育进程的重要标志, 它决定着同化产物向不同器官的分配比例、产量和品质形成以及农田管理的适宜时间<sup>[1-3]</sup>。物候期模拟和预测结果对作物产量的构成与估算精度至关重要, 也直接影响作物模型的模拟效果<sup>[4-5]</sup>。温度是影响作物生长发育速度的关键因子, 作物正常生长不仅需要一定的环境温度, 还需要一定的热量累积才能完成相应的生长周期<sup>[6-7]</sup>, 而发育过程模拟多以热时 (或积温) 作为参数<sup>[8-10]</sup>。由于作物发育速率与温度存在非线性关系, 尤其是在高温条件下, 不同温度响应模型差异明显<sup>[11-13]</sup>, 作物完成某个发育阶段所需的热量累积值并非常数, 导致物候期模拟存在偏差。针对这一不足, 许多学者开展了不同基点温度、不同温度响应模型的比较及其改进工作<sup>[14-15]</sup>。

日平均温度是计算热量累积的基础。常用 4 次定时

观测值或最高、最低温度计算日平均温度。但当昼夜温差较大时, 这两种算法的结果与实际日平均温度存在明显误差<sup>[16]</sup>。不少学者提出了一些改进算法, 诸如三小时等间距平均<sup>[17]</sup>、考虑气温日变化规律的正弦、指数函数法等<sup>[18-19]</sup>, 进一步减少了计算结果与实际日平均气温之间的差异。

随着观测仪器、计算机和通信技术的迅速发展, 气象要素逐小时 (甚至更高频次) 采集和存储变得越来越容易<sup>[20-21]</sup>, 这为精确模拟作物及其生长环境的定量关系提供了有力的数据支撑, 且已经应用于参考作物蒸散发校正<sup>[22-23]</sup>等方面。Purcell<sup>[24]</sup>比较了 2 种线性模型小时步长和日步长在不同温度条件下热量累积的差异, 认为对一年生喜温作物而言, 小时步长的温度资料并没有提高热时的计算精度。蔡冠勋等<sup>[25]</sup>的研究结果表明, 当日平均气温接近水稻生物学下限温度时, 用小时尺度的有效积温预测早稻出苗更为有效。这些研究所用数据仍是基于最高、最低气温的模拟值, 而小时步长热时用于生育期模拟的实证研究尚不多见。不同温度响应模型下小时步长热时与日步长热时存在差异, 与日步长热时相比, 小时步长热时稳定性以及对生育期的模拟精度能否提高等方面仍需要进一步验证。为此, 本研究基于逐小时气温观测数据和同期夏玉米生育期资料, 依据作物发育速率与温度响应关系的 3 种模型, 结合玉米三基点温度参数,

收稿日期: 2020-12-14 修订日期: 2021-03-13

基金项目: 国家重点研发项目 (2016YFD0300201); 中国气象局河南省农业气象保障与应用技术重点实验室项目 (AMF201805)

作者简介: 余卫东, 博士, 正高级工程师, 研究方向为气候资源利用与农业减灾。Email: sqywd@sohu.com

\*通信作者: 冯利平, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为作物系统模拟、资源利用与气候变化。Email: fenglp@cau.edu.cn

分析不同发育阶段的小时步长和日步长热时累积差异规律,分别基于 2 种步长热时模拟夏玉米出苗、拔节、开花和成熟 4 个主要生育期,基于评价指标比较不同步长热时对生育期和生育期时长的模拟效果,以期为提高作物生育期模拟精度提供可靠思路。

## 1 资料与方法

### 1.1 资料来源

选取郑州农业气象试验站 2005—2018 年逐小时气温数据以及同期的夏玉米生育期观测资料。该站土壤为沙壤土,0~50 cm 平均土壤容重 1.46 g/cm<sup>3</sup>,田间持水量

19.2%,凋萎湿度 4.0%,有机质 12.7 g/kg,速效氮 111.3 g/kg,速效磷 45.8 g/kg,速效钾 129.0 g/kg。由于郑州站不同年份夏玉米品种不一致,为了消除品种影响并对比相同热时条件下单一品种和多品种玉米生育期模拟差异,另外选取了南阳、获嘉和黄泛区农场 2012—2013 年的夏玉米单一品种分期播种资料及对应的逐小时气温数据,上述 4 个站点、玉米品种和播种期信息见表 1。由于本研究中夏玉米最早播种期为 5 月 25 日,最晚成熟期为 9 月 28 日。因此,统计分析的气象数据时段为每年的 5 月 21 日—9 月 30 日。选用的夏玉米主要生育期为播种、出苗、拔节、开花和成熟 5 个关键期。

表 1 站点、作物品种及播种期

Table 1 Information on study sites, crop varieties and sowing dates

站点 Sites	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔 Elevation/m	品种 Variety	播种期 Sowing date
郑州 Zhengzhou	113°39'E	34°43'N	110	新玉 26、郑单 958、浚单 20	05-29—06-09 (2005—2018)
南阳 Nanyang	112°35'E	33°02'N	181	浚单 20	06-03,06-13,06-23 (2012),05-27,06-06,06-15 (2013)
黄泛区农场 Huangfanqu farm	114°24'E	33°45'N	51	浚单 20	06-02,06-12,06-22 (2012),06-02,06-12,06-22 (2013)
获嘉 Huojia	113°40'E	35°16'N	78	浚单 20	05-25,06-04,06-13 (2012),05-29,06-06,06-15 (2013)

### 1.2 数据处理方法

#### 1.2.1 热时计算方法

分别选用线性模型<sup>[5]</sup>、Logistic 模型<sup>[26]</sup>和 Wang-Engel (WE) 模型<sup>[27]</sup>模拟作物生长发育速率对温度的响应。当温度低于基础温度 ( $T_b$ , °C) 或高于最高温度 ( $T_{cd}$ , °C) 时,发育速率为 0; 从  $T_b$  到最适温度 ( $T_{opt}$ , °C), 发育速率从 0 到 1 线性增长 (线性模型) 或非线性增长 (WE 模型和 Logistic 模型); 从  $T_{opt}$  到  $T_{cd}$ , 发育速率线性或非线性下降。参考文献[28], 玉米三基点温度  $T_b=8.0$  °C,  $T_{opt}=30$  °C,  $T_{cd}=40$  °C。

这三种模型如式 (1)~式 (3) 所示:

##### 1) 线性模型<sup>[5]</sup>

$$\begin{cases} f(T)=0 & T < T_b \text{ 或 } T > T_{cd} \\ f(T)=(T-T_b)/(T_{opt}-T_b) & T_b \leq T < T_{opt} \\ f(T)=(T_{cd}-T)/(T_{cd}-T_{opt}) & T_{opt} \leq T \leq T_{cd} \end{cases} \quad (1)$$

##### 2) WE 模型<sup>[28]</sup>

$$\begin{cases} f(T)=0 & T < T_b \text{ 或 } T > T_{cd} \\ f(T)=\frac{2(T-T_b)^\alpha (T_{opt}-T_b)^\alpha - (T-T_b)^{2\alpha}}{(T_{opt}-T_b)^{2\alpha}} & T_b \leq T \leq T_{cd} \\ \alpha = \frac{\ln 2}{\ln((T_{cd}-T_b)/(T_{opt}-T_b))} \end{cases} \quad (2)$$

$\alpha$  为作物对温度的反应系数,由三基点温度确定。

##### 3) Logistic 模型<sup>[27]</sup>

$$\begin{cases} f(T)=0 & T < T_b \text{ 或 } T > T_{cd} \\ f(T)=1/(1+e^{(a-bT)}) & T_b \leq T \leq T_{cd} \end{cases} \quad (3)$$

式 (1)~式 (3) 中  $f(T)$  为日步长或小时步长相对发育速率;  $T$  为对应于日步长或小时步长的日平均气温或逐小时气温, °C;  $a$  和  $b$  是常数,根据本文选定的三基点温度得出,当  $T_b < T \leq T_{opt}$  时  $a=0.34$  和  $b=7.30$ ; 当  $T_{opt} < T \leq T_{cd}$  时  $a=-36.76$  和  $b=-0.92$ 。采用每天 24 时次定时气温的算

术平均值表示日平均气温。

根据以上分析,基于日平均温度的日步长热时 (DTU, °C·d) 和基于逐小时气温计算的热时的日平均值作为小时步长热时 (HTU, °C·d) 为

$$DTU=(T_{opt}-T_b) \cdot f(T) \quad (4)$$

$$HTU = \sum_{i=1}^{24} ((T_{opt}-T_b) \cdot f(T_i)) / 24 \quad (5)$$

#### 1.2.2 日长影响函数

玉米属短日照作物,出苗至开花阶段的发育速率除了受温度影响以外,日长也是影响因素之一。参考郑国清等<sup>[8]</sup>研究结果,采用如下日长影响函数对出苗-开花阶段的热时进行逐日订正。

$$f(D) = e^{(-G(D_L-D_0))} \quad (6)$$

式中  $G$  为品种感光性参数,取值 0.005;  $D_L$  为逐日日长, h;  $D_0$  为临界日长,取值 12.5 h。

#### 1.2.3 生育期数据处理方法

首先把每年的播种、出苗、拔节、开花和成熟期的日期转换为日序 (1 月 1 日日序为 1, 12 月 31 日日序为 365), 然后对相同生育期的日序求平均得到多年平均值。其中郑州站为 14 a 的平均,其余 3 站合并计算 2 a 3 个播期的平均值。

#### 1.2.4 评价方法

用变异系数 ( $C_V$ ) 和极差 ( $R_g$ ) 反映不同时间步长热时年际间的稳定性。用均方根误差 (Root-mean-square Error, RMSE)、标准化均方根误差 (Normalized RMSE, NRMSE) 和平均绝对误差 (Mean Absolute Error, MAE)<sup>[7]</sup> 评价生育期模拟值与观测值之间的差异。

用 SPSS 17.0 进行单因素方差分析,显著性检验采用最小显著法 (Least Significant Different, LSD), 利用 Microsoft Excel 2010 作图。

2 结果与分析

2.1 夏玉米全生育期热时比较

2.1.1 基于三种模型的小时步长热时与日步长热时比较

以郑州站为例，基于日平均气温和逐小时气温分别采用三种模型计算日步长热时和小时步长热时。在不同日平均气温情形下，利用散点图分别比较三种模型 2 种步长热时的差异（图 1）。

由图 1 可知，三种模型计算的日步长热时均大于小

时步长热时。日步长与小时步长的热时差异在日平均气温 30℃ 附近最为明显，二者之间的最大差值分别为 9.7℃·d（线性）、9.1℃·d（Logistic）和 7.4℃·d（WE）。对日步长热时与小时步长热时进行相关分析表明，采用 WE 模型计算得到的 2 种热时相关系数  $r=0.963$ ，RMSE 为 1.42℃·d；而 Logistic 和线性模型的 2 种热时相关系数分别为 0.903 和 0.859，RMSE 都为 2.03℃·d。可见，WE 模型的日步长热时与小时步长热时最为接近。

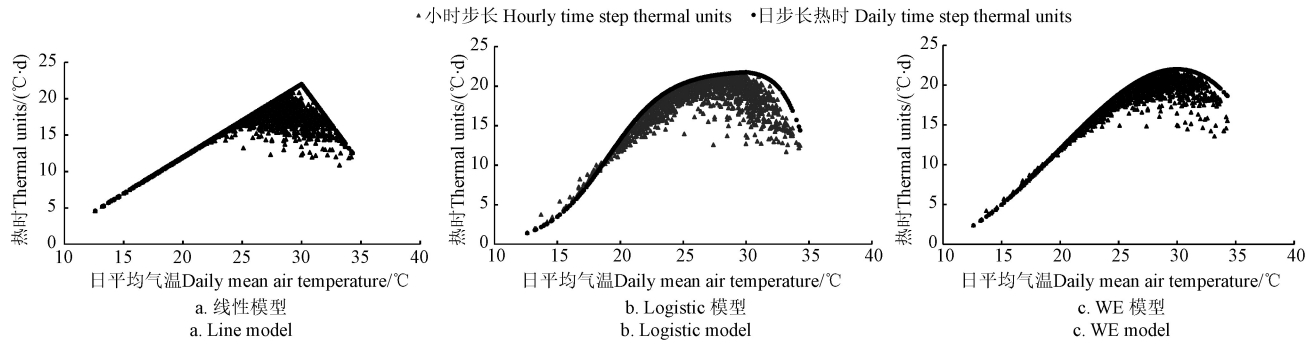


图 1 郑州站小时步长和日步长气温的逐日热时比较

Fig.1 Comparisons of daily thermal units calculated on hourly time step and daily time step of air temperature in Zhengzhou

2.1.2 小时步长热时与日步长热时差异分析

为进一步分析小时步长热时与日步长热时差异的主要分布区间及其差异，将日平均气温以 5℃ 为间隔进行区间划分，统计夏玉米生长期间日平均气温在各区间出现频率，同时计算在该温度范围内日步长热时与小时步长热时差异绝对值的平均值（表 2）。

表 2 郑州站日步长热时和小时步长热时差异分段比较

Table 2 Comparison of daily time step thermal units and hourly time step thermal units in different daily mean temperature ranges in Zhengzhou

日平均气温 Daily mean air temperature/℃	频率 Frequency/%	热时差 Difference of thermal unit/(℃·d)		
		线性 Linear	Logistic	WE
10~15	0.5	<0.1	0.3	0.1
>15~20	6.0	<0.1	0.4	0.1
>20~25	29.5	0.1	1.2	0.4
>25~30	50.1	1.5	1.1	1.1
>30	13.9	2.9	3.6	2.2

2005—2018 年郑州农业气象试验站夏玉米生长期日平均气温 12.6~34.3℃。从表 2 可以看出，近 80% 的日平均气温分布在 20.0~30.0℃ 之间，基于三种模型获得的日步长热时与小时步长热时差异的绝对值 0~1.5℃·d。在日平均气温<20.0℃ 时差异相对较小，基于三种模型获得的二者间差异均不足 1.0℃·d。当日平均气温>30℃，日步长热时与小时步长热时差值增大，基于 3 种模型获得的日步长热时比小时步长热时平均高 2.2~3.6℃·d，出现频率 13.9%。

以 WE 模型的结果为例，选择日步长热时与小时步长热时之差最大和最小的 2 个典型日期，深入分析日步长热时与小时步长热时差值形成的原因（图 2）。采用式（1）~式（3）计算相对发育速率。图 2a 日平均气温为 30.9℃，日最高气温为 40.0℃，日最低气温为 22.0℃，相对发育速率为 0.99，日步长热时为 21.8℃·d。由于气

温存在日变化，21:00—09:00 的气温小于最适温度，相对发育速率在 0.68~1.00 之间；10:00—20:00 逐小时气温大于最适温度，且 12:00—18:00 逐小时气温持续在 35℃ 以上，高温使温度有效性下降，相对发育速率在 0~0.54 之间。该日小时热时累积值为 347.4℃·h，小时步长热时为 14.5℃·d，比日步长热时少 7.4℃·d。图 2b 日平均气温为 25.1℃，日最高气温为 29.9℃，日最低气温为 24.1℃，相对发育速率为 0.86，日步长热时为 19.0℃·d；全天逐小时温度处于基础温度和最适温度之间，相对发育速率处于 0.80~0.93 之间，小时热时累积值为 436.0℃·h，小时步长热时为 18.9℃·d，仅比日步长热时少 0.1℃·d。

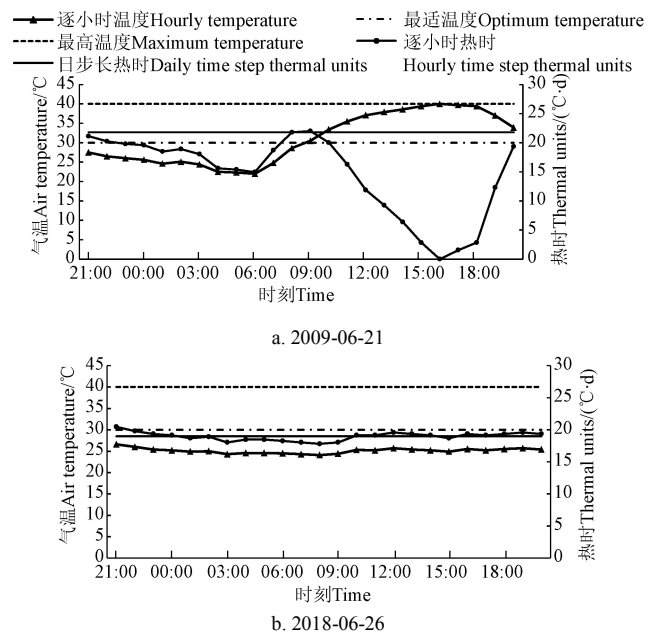


图 2 典型日期的日步长热时与小时步长热时差异

Fig.2 Comparisons of daily time step thermal units and hourly time step thermal units in typical dates

综上,若日平均气温在最适温度附近,当天相对发育速率接近 1,日步长热时接近 22.0 °C·d;由于气温存在日变化,小时气温在最适温度附近波动,尤其是夏玉米生育期内小时气温高于最适温度的频率较大(21.6%),导致相对发育速率下降,从而使日步长热时大于小时步长热时。而当日平均气温在基础温度与最适温度之间,且逐小时气温也多处于该区间时,当日的相对发育速率与逐小时的相对发育速率接近,

因此日步长热时和小时步长热时之间差异较小。

## 2.2 夏玉米各生育期热时模拟

### 2.2.1 夏玉米不同发育阶段热时比较

由于郑州站是多个品种的生育期观测数据,而南阳、获嘉和黄泛区农场 3 站的夏玉米品种相同,为比较品种因素对同步长热时的影响,本研究对郑州站热时单独计算,而对其他 3 站进行合并处理(表 3)。

表 3 不同发育阶段小时和日步长热时比较

Table 3 Comparison of daily time step thermal units and hourly time step thermal units in different growing phases

发育阶段 Developmental stages	统计指标 Statistical indicators	郑州站 Zhengzhou						其他站 Other sites					
		DTU <sub>t</sub>	HTU <sub>t</sub>	DTU <sub>l</sub>	HTU <sub>l</sub>	DTU <sub>w</sub>	HTU <sub>w</sub>	DTU <sub>t</sub>	HTU <sub>t</sub>	DTU <sub>l</sub>	HTU <sub>l</sub>	DTU <sub>w</sub>	HTU <sub>w</sub>
播种-出苗 Sowing to emergence	均值 Mean value/(°C·d)	117.1	104.3	130.3	116.7	125.6	115.3	115.2	102.6	129.4	114.9	124.4	113.7
	C <sub>v</sub> /%	21.9	17.3	19.6	17.9	21.3	19.3	22.2	25.1	24.6	24.8	23.0	23.5
	R <sub>g</sub> /(°C·d)	78.2	55.8	97.1	74.6	100.8	82.6	115.4	123.6	149.5	136.2	129.7	125.8
出苗-拔节 Emergence to jointing	均值 Mean value/(°C·d)	519.7	462.7	571.2	518.5	562.6	521.2	567.5	501.1	618.9	564.0	608.3	565.3
	C <sub>v</sub> /%	10.7	12.2	11.6	13.1	10.8	11.3	13.4	11.8	13.7	12.5	13.3	11.9
	R <sub>g</sub> /(°C·d)	194.9	196.1	229.2	226.7	213.9	208.3	316.8	273.6	355.7	320.2	339.4	303.9
拔节-开花 Jointing to flowering	均值 Mean value/(°C·d)	426.0	394.3	468.3	440.4	463.8	442.2	401.3	360.3	433.5	401.7	431.2	407.8
	C <sub>v</sub> /%	8.7	9.7	9.0	9.9	9.1	9.5	10.9	10.3	11.1	10.9	10.6	10.2
	R <sub>g</sub> /(°C·d)	114.0	95.3	118.5	114.2	135.7	120.2	182.0	158.8	205.6	188.1	193.0	180.0
开花-成熟 Flowering to maturity	均值 Mean value/(°C·d)	796.4	757.8	896.7	845.5	861.6	825.7	781.4	737.8	891.9	821.2	847.8	805.9
	C <sub>v</sub> /%	14.5	13.4	14.0	13.0	15.0	14.4	10.1	8.6	8.8	9.0	10.7	10.1
	R <sub>g</sub> /(°C·d)	378.7	343.7	413.8	368.6	430.2	405.6	254.9	207.3	255.9	254.3	316.9	276.0
全生育期 Whole growth period	均值 Mean value/(°C·d)	1 859.2	1 719.1	2 066.5	1 921.1	2 013.6	1 904.4	1 865.4	1 701.8	2 073.7	1 901.8	2 011.7	1 892.7
	C <sub>v</sub> /%	14.0	13.2	13.6	13.5	14.1	13.6	14.2	14.0	14.6	14.3	14.4	13.9
	R <sub>g</sub> /(°C·d)	191.5	172.7	214.7	196.0	220.2	204.2	217.3	190.8	241.7	224.7	244.8	221.4

注: HTU<sub>t</sub>、HTU<sub>l</sub>和 HTU<sub>w</sub>分别表示线性、Logistic 和 WE 模型的小时步长热时, DTU<sub>t</sub>、DTU<sub>l</sub>和 DTU<sub>w</sub>则表示对应的日步长热时,下同。  
Note: HTU<sub>t</sub>, HTU<sub>l</sub> and HTU<sub>w</sub> are hourly thermal-units of line model, Logistic model and WE model, respectively, DTU<sub>t</sub>, DTU<sub>l</sub> and DTU<sub>w</sub> are daily thermal-units of line model, Logistic model and WE model, respectively, the same as below.

基于郑州农业气象试验站 2005—2018 年夏玉米田间观测数据和南阳、获嘉、黄泛区农场 2012—2013 年的分期播种生育期资料,分别统计播种至出苗、拔节、开花和成熟的日步长热时和小时步长热时,并计算其平均值、变异系数和极差。表 3 中郑州站的均值为 14 a 平均,极差为 2005—2018 年中最大值和最小值之间的差异,其他站热时是按相同生育期求算的 3 个站点 2 a 3 个播期的平均值。

从表 3 中可以看出,采用不同模型获得的热时存在差异。无论是郑州站还是其他站,夏玉米各阶段采用 Logistic 模型获得的热时均大于采用 WE 模型获得的热时,而采用线性模型计算的热时最小。

郑州站全生育期小时步长热时累积值比日步长热时偏少 109.2 °C·d (WE)~145.4 °C·d (Logistic),全生育期多年平均值为 102.2 d,平均每日偏少 1 °C·d。其他站全生育期小时步长热时累积值比日步长热时偏少 119.0 °C·d (WE)~171.9 °C·d (Logistic),全生育期平

均值为 102.5 d,平均每日偏少 1.2~1.7 °C·d。

分别对 4 个发育阶段的变异系数和极差求平均,郑州站和其他站 3 种温度模型热时的 C<sub>v</sub>和极差都表现为小时步长热时小于日步长热时,小时步长热时极差的总平均值比日步长热时减少 20.0 °C·d, C<sub>v</sub>下降 0.4 个百分点,这说明小时步长热时的稳定性整体上好于日步长热时。方差分析表明,郑州站和其他站都表现为拔节期和开花期时,线性模型和 Logistic 模型的日步长热时显著高于小时步长热时 ( $P<0.05$ ),成熟期时 Logistic 模型的日步长热时显著高于小时步长热时 ( $P<0.05$ ),而 WE 模型在各生长阶段日步长热时与小时步长热时均无显著差异 ( $P>0.05$ )。

### 2.2.2 夏玉米生育期模拟效果比较

分别统计 3 个夏玉米品种播种-出苗、出苗-拔节、拔节-开花、开花-成熟的日步长热时和小时步长热时累积值(表 4),并以此为参数,以实际播种日期为热时累加开始日期,当累积热时达到某发育阶段所需热时指标时,则认为夏玉米进入该发育阶段。

表 4 日长订正后的不同玉米品种各发育阶段热时

Table 4 Thermal units of different maize varieties in different stages based on day length function

品种 Varieties	播种-出苗 Sowing to emergence		出苗-拔节 Emergence to jointing		拔节-开花 Jointing to flowering		开花-成熟 Flowering to maturity	
	DTU	HTU	DTU	HTU	DTU	HTU	DTU	HTU
	DTU	HTU	DTU	HTU	DTU	HTU	DTU	HTU
郑单 958 ZD958	113.8	104.3	570.7	517.4	444.4	424.2	757.5	728.3
浚单 20 XD20	125.1	112.0	571.5	520.2	428.9	397.0	882.4	830.9
新玉 26 XY26	153.3	138.7	596.6	523.0	447.3	429.6	738.9	706.0

°C·d

根据生育期的模拟值和观测值，分别计算 3 种温度模型评价指标（表 5）。表中观测平均值和模拟平均值是以日序表示生育期。从中可以看出，无论是郑州站还是其他站，温度模型相同时，基于日步长热时和小时步长热时的生育期模拟结果非常接近，两类热时对同一生育期模拟的平均值相差均不超过 1 d。按相同热时类型，将所有站点合并求得 4 个生育期模拟的平均值，结果显示基于小时步长热时的 RMSE、NRMSE 和 MAE 分别为 4.3 d、1.98%和 3.5 d，基于日步长热时的对应指标分别为 4.3 d、2.01%和 3.6 d。综上可知，与日步长热时相比，小时步长热时虽然在一定程度提高了对夏玉米生育期的模

拟精度，但提高幅度非常有限（≤1 d）。按照相同温度模型，合并计算 4 个生育期模拟精度的平均值，分析 3 个温度模型之间的差异，可知 RMSE 分别为 3.7 d（WE）、3.9 d（Logistic）和 5.1 d（线性），对应的 NRMSE 分别为 1.66%、1.77%和 2.50%。无论是日步长热时还是小时步长热时，模拟精度总体上都表现为 WE 最高、Logistic 其次、线性模型最低。从不同发育时段来看，各温度模型的模拟误差均随发育进程而增加，成熟期 RMSE、NRMSE 和 MAE 的值都大于开花期、拔节期和出苗期，这可能与生育期模拟误差的累积有关。

表 5 夏玉米生育期模拟比较  
Table 5 Comparison of simulating different developmental stages of summer maize

生育期 Developmental stages	统计指标 Statistical indicators	郑州站 Zhengzhou						其他站 Other sites					
		DTU <sub>t</sub>	HTU <sub>t</sub>	DTU <sub>l</sub>	HTU <sub>l</sub>	DTU <sub>w</sub>	HTU <sub>w</sub>	DTU <sub>t</sub>	HTU <sub>t</sub>	DTU <sub>l</sub>	HTU <sub>l</sub>	DTU <sub>w</sub>	HTU <sub>w</sub>
出苗 Emergence	观测平均值/d	159.6						166.2					
	模拟平均值/d	161.4	161.4	160.5	160.6	160.8	160.6	167.2	167.3	166.3	166.6	166.7	166.6
	RMSE/d	2.1	1.9	1.4	1.4	1.6	1.4	1.8	1.9	1.6	1.6	1.5	1.6
	NRMSE/%	1.32	1.22	0.89	0.85	1.00	0.85	1.08	1.13	0.94	0.98	0.89	0.99
	MAE/d	1.9	1.8	1.1	1.1	1.3	1.1	1.4	1.6	1.0	1.1	1.2	1.2
拔节 Jointing	观测平均值/d	187.0						195.6					
	模拟平均值/d	191.5	192.1	188.2	188.3	188.9	188.3	197.1	197.9	193.8	193.9	194.7	194.0
	RMSE/d	5.3	6.1	3.4	3.8	3.5	3.3	4.3	4.2	4.7	4.1	4.2	3.9
	NRMSE/%	2.85	3.25	1.80	2.03	1.85	1.79	2.21	2.15	2.39	2.08	2.17	2.00
	MAE/d	4.5	5.1	2.6	3.0	2.6	2.6	3.5	3.4	3.8	3.3	3.4	3.1
开花 Flowering	观测平均值/d	209.3						215.9					
	模拟平均值/d	214.6	215.4	209.2	209.4	210.1	209.0	219.1	220.6	214.2	214.2	214.9	213.9
	RMSE/d	5.9	6.8	2.9	3.3	2.5	2.4	6.1	6.4	5.7	5.1	5.1	4.6
	NRMSE/%	2.81	3.23	1.37	1.58	1.20	1.16	2.80	2.95	2.62	2.35	2.35	2.12
	MAE/d	5.3	6.1	2.5	2.6	2.1	1.9	4.9	5.3	4.7	4.2	4.2	3.7
成熟 Maturity	观测平均值/d	255.2						262.4					
	模拟平均值/d	262.6	263.8	250.7	250.7	253.7	251.7	261.8	260.8	257.9	259.1	260.4	259.4
	RMSE/d	8.4	9.4	5.7	5.9	4.4	5.2	7.4	9.2	7.0	6.0	5.5	5.6
	NRMSE/%	3.27	3.68	2.25	2.30	1.73	2.03	2.82	3.50	2.67	2.28	2.09	2.12
	MAE/d	7.4	8.6	4.9	5.2	3.5	4.1	6.2	8.4	5.5	4.9	4.6	4.7

注：RMSE 为均方根误差，NRMSE 为标准化均方根误差，MAE 为平均绝对误差。下同。  
Note: RMSE, root mean square error, NRMSE, normalized RMSE, MAE, mean absolute error. Same as below.

2.2.3 夏玉米生育期时长模拟效果比较

在生育期模拟结果的基础上，进一步分析 3 个温度模型条件下 2 种热时形式对生育期时长模拟效果(表 6)。夏玉米播种-出苗、出苗-拔节、拔节-开花和开花-成熟发育时长郑州站多年平均值分别为 6.6、27.4、22.3 和 45.9 d，而 3 个分期播种站平均值分别为 6.4、29.4、20.3 和 46.4 d，二者之间生育期时长最大差异不大于 2 d，表明郑州站与其余站的生育期时长相差不大。

与生育期模拟结果类似，在相同温度模型条件下，2 种热时对同一发育时长的模拟值也比较接近，二者差值总体上不超过 2 d。按相同热时将所有品种合并求 4 个发育时长模拟的平均值，结果显示基于小时步长热时累积值参数的 RMSE、NRMSE 和 MAE 分别为 3.4 d、15.5%和 2.7 d，

对应小时步长热时的指标分别为 3.4 d、15.6%和 2.8 d。与日步长热时模拟相比，小时步长热时仅使 NRMSE 和 MAE 分别减少 0.1 个百分点和 0.1 d。由此可见小时步长热时是提高夏玉米生育期时长的模拟精度也非常有限。

3 个温度模型对各生育期时长模拟精度总体上 WE 模型最好，其次为 Logistic 模型，最后为线性模型，其 RMSE 分别为 3.1 d（WE）、3.3 d（Logistic）和 3.9 d（线性），对应的 NRMSE 分别为 14.34%（WE）、14.66%（Logistic）和 17.74%（线性）。另外，生育期时长的模拟精度也随发育时段变化，开花-成熟期的误差大于其他时段，该生育期时长模拟值的 RMSE 和 MAE 均高于其余生育期时长，其 RMSE 为 4~10 d，MAE 为 3~10 d，而其余生育期时长的 RMSE 为 1~5 d，MAE 为 1~4 d。

表 6 夏玉米各生育期时长模拟比较

Table 6 Comparison of simulating different growing phases of summer maize

发育阶段 Developmental stages	统计指标 Statistical indicators	郑州站 Zhengzhou						其他站 Other sites					
		DTU <sub>t</sub>	HTU <sub>t</sub>	DTU <sub>t</sub>	HTU <sub>t</sub>	DTU <sub>w</sub>	HTU <sub>w</sub>	DTU <sub>t</sub>	HTU <sub>t</sub>	DTU <sub>t</sub>	HTU <sub>t</sub>	DTU <sub>w</sub>	HTU <sub>w</sub>
播种-出苗 Sowing to emergence	观测平均值/d	6.6						6.4					
	模拟平均值/d	8.3	8.4	7.4	7.6	7.7	7.6	7.4	7.5	6.5	6.7	6.9	6.8
	RMSE/d	2.1	1.9	1.4	1.4	1.6	1.4	1.8	1.9	1.6	1.6	1.5	1.6
	NRMSE/%	31.82	28.79	21.21	21.21	24.24	21.21	28.13	29.69	25.00	25.00	23.44	25.00
	MAE/d	1.9	1.8	1.1	1.1	1.3	1.1	1.4	1.6	1.0	1.1	1.2	1.2
出苗-拔节 Emergence to jointing	观测平均值/d	27.4						29.4					
	模拟平均值/d	30.1	30.6	27.7	27.6	28.1	27.6	29.9	30.6	27.5	27.4	28	27.4
	RMSE/d	3.8	3.9	3.2	3.3	2.9	3.0	3.7	3.6	4.2	4.1	4.0	3.9
	NRMSE/%	13.87	14.23	11.68	12.04	10.58	10.95	12.59	12.24	14.29	13.95	13.61	13.27
	MAE/d	2.8	3.2	2.5	2.7	2.1	2.3	2.9	2.5	3.3	3.1	3.2	3.0
拔节-开花 Jointing to flowering	观测平均值/d	22.3						20.3					
	模拟平均值/d	23.1	23.4	21.0	21.1	21.1	20.7	22.0	22.7	20.4	20.3	20.2	19.9
	RMSE/d	2.0	2.3	2.3	2.2	2.4	2.5	2.8	2.9	2.2	2.2	2.0	2.1
	NRMSE/%	8.97	10.31	10.31	9.87	10.76	11.21	13.79	14.29	10.84	10.84	9.85	10.34
	MAE/d	1.5	1.7	1.9	2.0	2.0	2.1	2.2	2.3	1.7	1.7	1.6	1.6
开花-成熟 Flowering to maturity	观测平均值/d	45.9						46.4					
	模拟平均值/d	48.1	48.4	41.5	41.4	43.6	42.7	42.7	40.2	43.7	44.9	45.5	45.5
	RMSE/d	4.9	4.8	6.1	6.2	5.5	5.4	10.1	10.3	5.2	4.8	5.0	4.8
	NRMSE/%	10.68	10.46	13.29	13.51	11.98	11.85	21.77	22.20	11.21	10.34	10.78	10.34
	MAE/d	4.3	4.3	4.7	4.0	4.0	4.1	9.5	9.6	4.2	3.7	4.1	3.8

### 3 讨 论

依据作物发育速率与温度响应关系的线性模型、Logistic 模型和 WE 模型,结合玉米三基点温度参数,分别计算并对比分析了 3 个模型的小时步长热时和日步长热时差异规律。研究表明,在夏玉米生长期,总体上小时步长热时小于等于日步长热。当日平均气温处于基础温度与最适温度之间,小时步长热时与日步长热之间差值随气温升高而增大;日平均气温大于最适温度时,小时步长热时与日步长热差值随气温升高而逐渐减小,这与 Cesaraccio 等<sup>[29]</sup>和 Purcell<sup>[24]</sup>研究结论相同。通过分析典型日期逐小时热时,表明气温日变化是造成二者差异的直接原因。即日平均气温接近基点温度时,气温的波动会出现大于和小于基点温度的时段,导致逐小时相对发育速率与当日相对发育速率之间的差异,从而引起日步长热和小时步长热时之间的差异。日平均气温在最适温度附近时,二者之间最大差值分别可达 9.7 °C·d (线性)、9.1 °C·d (Logistic) 和 7.4 °C·d (WE)。

与线性模型相比,非线性模型更好地反映了作物生长对温度的响应关系<sup>[4,13]</sup>。本文对夏玉米生育期和生育期时长的模拟效果显示,无论是日步长热还是小时步长热时,模拟精度总体上都表现为 WE 模型最好,其次为 Logistic 模型,最后为线性模型。3 个温度模型的小时步长热时与日步长热时相关性分析也表明 WE 模型中二者相关性最好, $r=0.963$ ,RMSE=1.42 °C·d; Logistic 模型  $r=0.903$ ,线性模型  $r=0.859$ ,RMSE 都为 2.03 °C·d。线性模型在拔节期、开花期的日步长热比小时步长热时显著

偏多 ( $P<0.05$ ) ; Logistic 模型在拔节、开花和成熟期的日步长热均比小时步长热时显著偏多 ( $P<0.05$ ) , 而 WE 模型在各生育期均无显著性差异。

逐小时气温资料并没有显著提高夏玉米生育期模拟精度。基于 3 个品种 2 种热时指标对夏玉米生育期及生育期时长进行模拟,虽然小时步长热时在  $C_v$ 、 $R_g$ 、RMSE、NRMSE 和 MAE 等方面低于日步长热时,但在同一温度模型条件下,2 种热时对生育期的模拟最大差异不超过 1 d,对生育期时长的模拟最大差异小于 2 d,2 种热时对生育期的模拟效果并没有明显差异。虽然线性和 Logistic 模型的日步长热时与小时步长热时在拔节期和开花期存在显著性差异,但当以各自热时作为参数进行生育期模拟时,参数的差异性在一定程度上抵消了热时的差异性,因此对各生育期及其时长的模拟没有表现出明显区别。Purcell<sup>[24]</sup>也认为对于喜温作物而言,夏季的小时步长热时和日步长热相差无几,小时步长温度并不能提高诸如甜瓜、大豆等作物发育进程预测精度。另外,在相同条件下,郑州站与其他站在生育期和生育时长的模拟评价指标比较方面,都没有表现出一致性的规律,说明品种差异不是影响本次夏玉米生育期模拟精度的主导因素。

小时步长热时和日步长热时对夏玉米生育期和生育时长的模拟精度随发育进程下降。这可能与成熟期观测值的稳定性差有关。玉米成熟期及开花-成熟期时长观测值的变异系数分别为 2.2%和 13.7%,极差分别为 17 和 21 d,明显高于其他生育时段。其次,作物发育进程不仅由热量单位决定,还受温度强度的影响。当平均温度较高时,完成该发育进程需要累积更多的热量<sup>[13]</sup>。另外,温

度是影响夏玉米发育速度的主导因素, 其次是日长。虽然土壤水分、日较差等对发育速度也有影响, 但效果有限。马玉平等<sup>[13]</sup>研究认为土壤水分对玉米抽雄后的发育进程影响不明显, 经水分订正后生育期模拟的绝对偏差下降不足 0.1 d。

本文 3 个温度模型中, 玉米的基点温度不随生育期变化。也有学者在模拟玉米生育期时选用最低、最适下限、最适上限和最高 4 个温度指标<sup>[5]</sup>, 或不同生长阶段用不同的基点温度<sup>[30]</sup>, 参数变化是否影响小时步长热时对生育期的模拟精度还需要验证。此外, 本文夏玉米生育期内日平均气温都高于基础温度 (8 °C), 基础附近小时步长热时与日步长热时之间的差异并没有显现。而其他作物如冬小麦生育期内日平均气温小于基础温度 (0 °C) 和大于最适温度 (25 °C) 的情形都会出现, 理论上小时步长热时与日步长热时的差异在基础温度和最适温度附近都会增加<sup>[25]</sup>。因此, 不同作物、不同区域之间小时步长热时与日步长热时的差异性还需要在今后的工作中进一步探索。

#### 4 结 论

在夏玉米生长期, 3 种温度模型总体上表现为日步长热时大于小时步长热时, 二者差异主要分布在最适温度附近, 气温日变化是造成差异的直接原因。线性模型中拔节、开花期的日步长热时累积值比小时步长热时显著偏多 ( $P < 0.05$ ); Logistic 模型中除出苗期外, 日步长热时均比小时步长热时显著偏多 ( $P < 0.05$ ), 而 WE 模型在各生育期均无显著差异。4 站综合分析, 全生育期内日步长热时比小时步长热时平均每天偏多 1.1~1.7 °C·d。与日步长热时相比, 小时步长热时的极差和变异系数减少, 说明其稳定性大于日步长热时。3 种模型对生育期和生育期长度的模拟精度总体上表现为 WE 模型最好, 其次为 Logistic 模型, 最后为线性模型, 但同一温度模型, 日步长热时和小时步长热时累积值对生育期的模拟最大差异不超过 1 d, 对生育期时长的模拟最大差异小于 2 d, 小时步长热时并没有显著提高夏玉米生育期模拟精度。

#### [参 考 文 献]

- [1] Soltani A, Sinclair T S. A comparison of four wheat model with respect to robustness and transparency: Simulation in a temperature, sub-humid environment[J]. *Field Crops Research*, 2015, 175: 37-46.
- [2] Haghverdi A, Washington-Allen R A, Leib B G. Prediction of cotton lint yield from phenology of crop indices using artificial neural networks[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018, 152: 186-197.
- [3] Tobias J, Ulf B, Henning K. A variable thermal of the double ridge to flag leaf emergence phase improves the predictive quality of a CERES-Wheat type phenology model[J]. *Computer and Electronics in Agriculture*, 2012, 89: 62-69.
- [4] Wang N, Wang E, Wang J, et al. Modelling maize phenology, biomass growth and yield under contrasting temperature conditions[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 250-251: 319-329.
- [5] Soltani A, Sinclair T R. *Modeling Physiology of Crop Development, Growth and Yield*[M]. Wallingford, UK: CABI Publishing, 2012.
- [6] Wu L, Feng L, Zhang Y, et al. Comparison of five wheat models simulating phenology under different sowing dates and varieties[J]. *Agronomy Journal*, 2017, 109(4): 1280-1293.
- [7] 李蕊, 郭建平. 东北春玉米积温模型的改进与比较[J]. *应用气象学报*, 2017, 28(6): 678-689.  
Li Rui, Guo Jianping. Improvement and comparison of the accumulated temperature model of Northeast spring maize[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2017, 28(6): 678-689. (in Chinese with English abstract)
- [8] 郑国清, 高亮之. 玉米发育期动态模拟模型[J]. *江苏农业学报*, 2000, 16(1): 15-21.  
Zheng Guoqing, Gao Liangzhi. Simulation model of maize phenology[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Science*, 2000, 16(1): 15-21. (in Chinese with English abstract)
- [9] 苏李君, 刘云鹤, 王全九. 基于有效积温的中国水稻生长模型的构建[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(1): 162-174.  
Su Lijun, Liu Yunhe, Wang Quanjiu. Rice growth model in China based on growing degree days[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering Transactions of the CSAE*, 2020, 36(1): 162-174. (in Chinese with English abstract)
- [10] Liu L L, Wallach D, Li J, et al. Uncertain in wheat phenology simulation induced by cultivar parameterization under climate warming[J]. *European Journal of Agronomy*, 2018, 94: 46-53.
- [11] Wang N, Wang J, Wang E, et al. Increased uncertainty in simulated maize phenology with more frequent supra-optimal temperature under climate warming[J]. *European Journal of Agronomy*, 2015, 71: 19-33.
- [12] Lizaso J I, Ruiz-Ramos M, Rodrihuez L, et al. Impact of high temperature in maize: Phenology and yield components[J]. *Field Crops Research*, 2018, 216: 129-140.
- [13] 马玉平, 张黎, 孙琳丽, 等. 持续性温强和土壤水分对玉米发育进程的影响及其模拟[J]. *中国农学通报*, 2015, 31(3): 16-193.

- Ma Yuping, Zhang Li, Sun Linli, et al. Effect of continuous temperature and soil moisture on development process of maize and its simulation[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(3): 186-193. (in Chinese with English abstract)
- [14] 姜会飞, 郭勇, 张玉莹, 等. 不同下限基点温度对积温模型模拟效果的影响[J]. 中国农业大学学报, 2018, 23(5): 131-141.
- Jiang Huiwei, Guo Yong, Zhang Yuying, et al. Impact of base temperature on the growing degree-day and simulation effect of GDD model[J]. Journal of China Agricultural University, 2018, 23(5): 131-141. (in Chinese with English abstract)
- [15] Ceglar A, van der Wijngaart R, de Wit A, et al. Improving WOFOST model to simulated winter wheat phenology in Europe: Evaluation and effects on yield[J]. Agricultural System, 2019, 168: 168-180.
- [16] 叶芝菡, 谢云, 刘宝元. 日平均气温的两种计算方法比较[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2002, 38(3): 421-426.
- Ye Zhihan, Xie Yun, Liu Baoyuan. A comparison of mean daily temperature calculated by two methods[J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 2002, 38(3): 421-426. (in Chinese with English abstract)
- [17] 曹卫星. 数字农作技术[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 162-167.
- [18] Weiss A, Hays C J. Calculating daily mean air temperature by different methods: Implication from a non-linear algorithm[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2005, 128: 57-65.
- [19] Willian J R, Frank G Z, Ann J S, et al. Evaluation of several degree-day estimation methods in California climates[J]. International Journal of Biometeorol, 1999, 42: 169-176.
- [20] 宋连春, 李伟. 综合气象观测系统的发展[J]. 气象, 2008, 34(8): 3-9.
- Song Lianchun, Li Wei. The development of integrated meteorological observation system[J]. Meteorological Monthly, 2008, 34(8): 3-9. (in Chinese with English abstract)
- [21] 张雪芬, 薛红喜, 孙涵, 等. 自动农业气象观测系统功能与设计[J]. 应用气象学报, 2012, 23(1): 105-112.
- Zhang Xuefen, Xue Hongxi, Sun Han, et al. Function and designing of automatic observing system for Agro-meteorology[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2012, 23(1): 105-112. (in Chinese with English abstract)
- [22] Ji X, Chen J, Zhao W, et al. Comparison of hourly and daily Penman-Monteith grass- and alfalfa-reference evapotranspiration equations and crop coefficients for maize under arid climatic conditions[J]. Agricultural Water Management, 2017, 192: 1-11.
- [23] Perera K, Western A W, Nawarathna B, et al. Comparison of hourly and daily reference crop evapotranspiration equations across seasons and climate zones in Australia[J]. Agricultural Water Management, 2015, 148: 84-96.
- [24] Purcell L C. Comparison of thermal units derived from daily and hourly temperatures[J]. Crop Science, 2003, 43(5): 1874-1879.
- [25] 蔡冠勋, 姚俊萌, 段里成, 等. 小时尺度有效积温在水稻出苗期预测中的应用[J]. 气象与减灾研究, 2019, 42(3): 231-235.
- Cai Guanxun, Yao Junmeng, Duan Licheng, et al. Application of hourly-scale effective accumulated temperature in emergence date prediction[J]. Meteorology and Disaster Reduction Research, 2019, 42(3): 231-235. (in Chinese with English abstract)
- [26] 雷涛, 郭向红, 毕远杰. 基于 Logistic 模型的番茄生长特性研究[J]. 节水灌溉, 2020(10): 10-14.
- Lei Tao, Guo Xianghong, Bi Yuanjie, et al. Study on tomato growth characteristics based on Logistic model[J]. Water Saving Irrigation, 2020(10): 10-14. (in Chinese with English abstract)
- [27] Streck N A, Weiss A, Xue Q, et al. Improving predictions of development stages in winter wheat: A modified Wang and Engel model[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2003, 115: 139-150.
- [28] 冯秀藻, 陶炳炎. 农业气象学原理[M]. 北京: 气象出版社, 1991: 87.
- [29] Cesaraccio C, Spano D, Duce P, et al. An improved model for determining degree-day values from daily temperature data[J]. International Journal of Biometeorology, 2001, 45(4): 161-169.
- [30] 栾青, 郭建平, 马雅丽, 等. 基于线性生长假设的作物积温模型稳定性比较[J]. 中国农业气象, 2020, 41(11): 695-706.
- Luan Qing, Guo Jianping, Ma Yali, et al. Comparison of model's stability about integrated temperature based on linear hypotheses[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2020, 41(11): 695-706. (in Chinese with English abstract)



## Comparison of the simulation effects of summer maize phenology derived from hourly and daily time step thermal units

Yu Weidong<sup>1,2</sup>, Feng Liping<sup>2\*</sup>

(1. Henan Provincial Key Laboratory of Agrometeorological Safeguard and Applied Technique, China Meteorological Administration, Zhengzhou 450003, China; 2. College of Resources & Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

**Abstract:** Thermal-unit accumulation is commonly used to simulate crop phenology, because the crop growth rate depends mainly on the temperature in farmland. However, there is a great difference of thermal units that are derived from hourly and daily temperature, due to the diurnal variation of temperature. Therefore, this study aims to compare the simulation effects of two thermal units on crop phenology. The phenological data of summer maize and hourly temperature at four sites were collected from Zhengzhou, Nanyang, Huojia, and Huangfanqu Farm. The field experimental data in Zhengzhou ranged from 2005 to 2018, while the data at other sites was accessible for a period from 2012 to 2013. Three models of crop phenological rate in response to temperature were selected to simulate summer maize phenology, including linear, logistic, and Wang-Engel (WE) model. Subsequently, three cardinal temperatures of summer maize (the base, optimum, and the maximum temperature), the accumulations of the Hourly Thermal Units (HTU), and Daily Thermal Units (DTU) were calculated in different phenological stages. The effects of two thermal units on summer maize phenology were compared for different models and phenological stages, including emergency, jointing, flowering, and maturity stage. Specifically, the model performance was evaluated using statistical indicators, such as variable coefficient, the difference between maximum and minimum ( $R_g$ ), absolute root mean squared error (RMSE), normalized root mean squared error (NRMSE), and absolute bias (ABS) between simulated and measured values. The statistical indicators in phenological stages were also compared in the daily and hourly thermal units. The results showed that the DTU of the three models were all greater than HTU during the growing stage of summer maize, due directly to the diurnal variation of temperature. The maximum daily difference between DTU and HTU reached  $9.7^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$  (Linear model),  $9.1^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$  (Logistic model), and  $7.4^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$  (WE model), respectively, when the daily average temperature was close to the optimum temperature for crop growth. Moreover, the correlation between HTU and DTU was the strongest in WE model ( $R^2 = 0.927$ ), followed by the logistic model ( $R^2 = 0.816$ ), and the linear model ( $R^2 = 0.738$ ). The mean variable coefficient of HTU accumulation was 0.4%, smaller than those of DTU accumulation over the whole phenological period, indicating that HTU had higher stability than DTU. Furthermore, the DTU accumulation in the linear model was significantly greater ( $P < 0.05$ ) than HTU accumulation at jointing and flowing stages, while the DTU accumulation in the Logistic model was also greater ( $P < 0.05$ ) than HTU accumulation at jointing, flowing, and maturity stages. Nevertheless, there was no significant difference between DTU and HTU accumulation at each phenological stage in the WE model. The simulation of both DTU and HTU showed higher accuracy in the WE model than that in the Logistic model, followed by the linear model at phenological stages and intervals. The accuracies of three temperature models varied in the crop phenology with the root mean square error of 3.7 d, 3.9 d, and 5.1 d, and the NRMSE of 1.66%, 1.77% and 2.50% in the WE, Logistic and Linear models, respectively. In the term of accuracy differences at phenological intervals, the RMSE was 3.1, 3.3, and 3.9 d, and the normalized the root mean square error was 14.34%, 14.66%, and 17.74% in the WE, Logistic and Linear models, respectively. With the same temperature model, the differences between DTU and HTU accumulation were no more than 1 d at a phenological stage, and 2 d in the phenological interval. The data demonstrated that there was little difference in thermal unit accumulation derived from hourly temperature and daily temperature for summer maize. Namely, there was no significant improvement in simulation accuracy of phenological stages with shorter time steps in HTU.

**Keywords:** temperature; crop; models; hour; phenology; thermal units; summer maize