

温室黄瓜发育期模拟模型的检验

曹元鑫 毕延刚 李娟起 高丽红 曲梅*

(中国农业大学 农学与生物技术学院,北京 100193)

摘要 针对作物生育期研究主要有3种方法:有效积温法、生理发育时间法和正弦指数函数法。试验选取不同温室不同茬口黄瓜的发育期数据和温室环境数据对3种发育期模拟模型方法进行验证。温室黄瓜发育期的预测结果表明,正弦指数函数法预测准确而稳定,回归估计标准误差(RMSE)在0.8~2.4 d之间,以每日平均气温和每小时平均气温为输入值的生理发育时间法 RMSE 值分别在0.8~6.1和0.8~7.0 d,有效积温法1.3~6.2 d。基于以上验证结果,3种模拟预测发育期方法中,正弦指数函数法表现出较好的预测性和较强的机理性,适用于作物发育期的预测。

关键词 黄瓜;发育期;有效积温;正弦指数函数

中图分类号 S 642.2

文章编号 1007-4333(2014)03-0145-09

文献标志码 A

Verification and evaluation of development stage model for greenhouse cucumber

CAO Yuan-xin, BI Yan-gang, LI Juan-qj, GAO Li-hong, QU Mei*

(College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract Accurate simulation of plant development is an important component in crop simulation models since many biochemical actions change with plant development stage. Thus, it is important to find the advantages and disadvantages of each model when applied at different conditions. This study was therefore conducted to evaluate three approaches of thermal time, physiological development time and exponential sine equation for predicting crop development stages. Four greenhouse cucumber (*Cucumis sativus* L.) experiments were carried out in different cropping seasons. The root mean square errors (RMSE) of greenhouse cucumber in initial flowering stage, fruiting stage and mature stage for each approach were 0.8–2.4 days for exponential sine equation (Malo's equation), (T_d) 0.8–6.1 and 0.8–7.0 days (T_h) for physiological development time and 1.3–6.2 days for thermal time (GDD). These results suggest that Malo's equation might be suitable to predict greenhouse cucumber development stages under the environment with a wide range of photoperiods and temperatures.

Key words cucumber; development stage; thermal time; exponential sine equation

准确模拟预测作物发育期是模拟干物质分配、养分的运转、产量及品质的基础^[1],而作物发育期实质上是研究植物生长发育与环境条件的关系^[2-3]。因此,如何依据环境条件准确预测作物的发育时期成为作物生长发育模拟模型的核心内容之一。

已有作物发育期模拟模型较多^[4],但发育期模

型建立方法主要有3种:

1)有效积温法^[5](Thermal time, GDD)。基于有效积温法对作物发育期的预测主要集中于大田作物^[6-9]。近年来, Mohammad N E 等^[10]以各种蔬菜各个发育期的所需的有效积温来确定不同区域各种蔬菜的播种的日历时间。有效积温法预测作物发育

收稿日期:2013-11-20

基金项目:国家自然科学基金项目(61174088);现代农业产业技术体系北京市果类蔬菜创新团队项目(CARS-25-D-04);北京市科技计划项目(D131100000713001)

第一作者:曹元鑫,硕士研究生, E-mail: caoxing130@126.com

通讯作者:曲梅,副教授,主要从事设施园艺环境工程研究。 E-mail: qumei@cau.edu.cn

期是最传统的方法,其最大的优点是模型输入变量只有温度,计算公式简单。

2)生理发育时间法^[11](Physiological development time, PDT)。基于生理时间发育法预测作物发育期综合考虑了光照和温度2个环境因子对作物发育的影响,对大田作物^[12]及现代化连栋温室内的园艺作物^[13-15]发育期预测较为精确,但很少有报道对非完全可控环境是否依然适用生理发育时间法研究作物的发育期。

3)基于发育单位的正弦指数函数法^[16](Exponential sine equation, Malo's equation)。该法成功应用于研究预测植物花期及气候环境变化对植物花期的影响^[17-18],李龙辉等^[19]通过对正弦指数函数的修正,模拟建立了冬小麦发育期的模型,模拟结果表明这种修正的正弦指数函数也能够应用于作物发育期的模拟。但是基于正弦指数函数法研究其他作物的发育期很少见报道,仅李萍萍等^[20]利用此方法对温室水果黄瓜发育期进行模拟。就预测作物种类和适用环境条件而言,很少有相关文献及数据对该模型函数进行检验与评价。

综上所述,对于国内园艺作物生产面积最大的非完全可控温室(塑料大棚和日光温室)环境条件,温室内的气温变化和高温的持续时间较室外和现代化连栋温室表现的更为剧烈,如3月份北京地区塑料大棚内昼夜温差最大可达29.9℃(试验一,2012年3月11日)。在此种环境变化下,这3种发育期模拟方法拟合结果的准确性以及是否适用于这种环境条件都需要大量实测数据验证。因此本研究以主要的温室栽培作物黄瓜为对象,通过不同温室不同茬口黄瓜的试验数据对3种生育期模型进行检验,比较验证3种方法的准确性和普适性,旨在为进一步的推广应用提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

设置3个不同茬口和不同温室的试验,各试验地点是由北京市农业技术推广站评出的北京市黄瓜优质高产种植农户,分为春茬、秋茬和越冬茬3个茬口,试验2供试黄瓜为自根苗,其余均为嫁接苗,接穗为黑籽南瓜(*Cucurbita ficifolia*)。

试验一:春茬试验于2012年2—8月在北京市

大兴区小黄垓村的塑料大棚(覆盖材料为EVA)进行,大棚的长52.5 m、宽11.5 m、高3.3 m。供试黄瓜品种为寒秀3~6,2012年1月18日播种,2月26日定植,行距0.45 m,株距0.30 m。

试验二:春茬试验于2012年4—7月在北京市通州区前疃村的塑料大棚进行(覆盖材料为EVA),大棚的长60.0 m、宽10.5 m、高3.0 m。供试黄瓜品种为北农佳秀,2012年4月16日定植,行距0.60 m,株距0.30 m。

试验三:秋茬试验于2012年7—11月在北京市顺义区小段村的塑料大棚进行(覆盖材料为EVA),大棚的长50.5 m、宽12.5 m、高2.7 m。供试黄瓜品种为北农佳秀,2012年6月25日播种,7月25日定植,行距0.50 m,株距0.30 m。

试验四:冬茬试验于2012年11月—2013年2月在北京市大兴区利市营村的日光温室进行(覆盖材料为PVC),温室的长65 m、跨度11 m、后墙高4 m、脊高5.8 m、后屋面投影0.8 m。供试的黄瓜品种为津优35,2012年10月5日播种,11月5日定植,行距0.60 m,株距0.30 m。

各试验栽培管理按照农户传统经验进行,黄瓜为四叶一心时定植,从定植后开始计算各生育期。

1.2 测试项目与方法

1.2.1 生育期观测

黄瓜的发育可以划分为5个阶段:发芽期、幼苗期、初花期、结果期和采收期(表1)。试验期间观测黄瓜发育情况,并记录到达每个生育期的日期。在观测中,当供试植株的50%以上到达某一生育期,即视为群体到达该生育期。试验中对黄瓜各生育时期的观测是从定植后开始,即初花期、结果期和采收期。

1.2.2 温室环境数据

测试的温室环境数据为温室内的空气温湿度和太阳光合有效辐射光量子流密度,空气温湿度传感器(带防辐射罩)(AV-10TH, AVALONG)距离地面1.5 m处,光合有效辐射光量子流密度传感器(AV-19Q, AVALONG)位于冠层上方。传感器分别位于温室中部两侧,每个测试位置2种传感器各布置一个,空气温湿度和光照数据由数据采集器(Campbell Scientific CR23X、CR10X)自动采集,采集频率为10 s,存储每10 min的平均值。

表 1 黄瓜到达各个生育时期的形态标准

Table 1 Morphologic standard of cucumber at different development stages

生育期 Development stage	发育进程 Development process	形态标准 Morphologic standard
发芽期 Germination	1	播种到第一片真叶出现
幼苗期 Seedling	2	真叶出现到四五片真叶展开
初花期 Initial flowering	3	四五片真叶展开到第一雌花开放
结果期 Fruiting	4	第一雌花开放到第一雌花坐果(果长>12 cm)
采收期 Harvesting	5	第一雌花坐果到采收

2 模型描述

2.1 有效积温法

模型中输入的变量为每小时平均温度。有效积温计算使用张银锁等^[21]推荐的计算方法,公式(1)~(4)所示。

$$A = GDD = \sum_{i=n_1}^{n_2} \Delta T_i \quad (1)$$

$$\Delta T_i = \sum_{h=1}^{24} (T_h - T_b) / 24 \quad (2)$$

$$T_h = \begin{cases} T_b & T_h < T_b \\ T_h & T_b \leq T_h \leq T_m \\ T_m & T_h > T_m \end{cases} \quad (3)$$

$$R_i = \frac{(\bar{T} - T_b)}{A} = K(\bar{T} - T_b) \quad (4)$$

式中: n_1, n_2 为生育期起始与结束日期; ΔT_i 为生育期内某日有效积温; R_i 为某生育期内某天的发育速率; T_h 为每小时平均温度; T_b 为某阶段发育的下限温度; T_m 为某阶段发育的上限温度; K 为常数。每天生长的累计形成累积生长度日, $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ 。

$$RTE(T) = \begin{cases} 0 & (T \leq T_b) \\ (T - T_b) / (T_{ob} - T_b) & (T_b < T < T_{ob}) \\ 1 & (T_{ob} \leq T \leq T_{ou}) \\ (T_m - T) / (T_m - T_{ou}) & (T_{ou} < T \leq T_m) \\ 0 & (T > T_m) \end{cases} \quad (7)$$

2.2 生理发育时间

2.2.1 日平均气温发育期生理发育时间的计算

生理发育时间的计算需要输入温室内的温度,光周期 2 个变量,计算结果通过公式反演即为模型的输出量到达各生育期的日历时间(模拟值)。模型中的参数包括作物到达各生育期的生理发育时间以及各生育期三基点温度、最适日长、临界日长、地理纬度和太阳赤纬等。由于各试验中黄瓜对光周期不敏感,所以简化模型中相关的光照参数,令其每日光周期效应 RPE 取值为 1。公式(5)~(7)为生理发育时间模型的基本建立过程^[4]。

$$PDT = \text{SUM}(\text{RPDE}) \quad (5)$$

$$\text{RPDE} = \begin{cases} RTE & PDT \leq GER \\ RTE \times RPE & GER < PDT < FLO \\ RTE & PDT \geq FLO \end{cases} \quad (6)$$

式中:PDT 为生理发育时间,d;RPDE 为某生育阶段内每日相对生理发育效应;RTE 为某生育阶段内每日相对热效应;RPE 为某生育阶段内每日相对光周期效应;GER 为发芽期所需的生理发育时间,d;FLO 为播种到初花期结束所需的生理发育时间,d。

式中:RTE(T)为日平均温度为 T 时的相对热效应; T_b 为发育下限温度; T_m 为发育上限温度; T_{ob} 为发育最适下限温度; T_{ou} 为发育最适上限温度。根据相关文献资料,黄瓜各生育时期的三基点温度见表2。

2.2.2 每小时平均气温发育期生理发育时间

用日平均温度来计算每日相对热效应,忽略了

$$\text{RTE}(T_h) = \begin{cases} 0 & (T_h \leq T_b) \\ (T_h - T_b)/(T_{ob} - T_b) & (T_b < T_h < T_{ob}) \\ 1 & (T_{ob} \leq T_h \leq T_{ou}) \\ (T_m - T_h)/(T_m - T_{ou}) & (T_{ou} < T_h \leq T_m) \\ 0 & (T_h > T_m) \end{cases} \quad (8)$$

$$\text{RTE}(T) = \sum_{h=1}^{24} \text{RTE}(T_h)/24 \quad (9)$$

式中:RTE(T_h)为每小时相对热效应;RTE(T)为

高(低)温、较大的昼夜温差以及作物在各生育期内昼、夜适宜温度的不同对作物发育速率产生的影响。基于此,以每小时平均温度代替每日平均温度计算每日相对热效应,一定程度上能够更加反映温度对作物发育速率的影响。每日相对热效应计算公式,(8)~(9):

某日相对热效应,即某日相对热效应由当日每小时相对热效应累加后求平均得出; T_h 为每小时平均温度;其他符号意义同上。

表2 黄瓜各生育期三基点温度

Table 2 Base, optimum and maximum temperature at different development stages of cucumber °C

生育期 Development stage	T_b	$T_{ob} - T_{ou}$		T_m
		夜	昼	
发芽期 Germination	11.5	—	25.0~30.0	35.0
幼苗期 Seedling	10.0**	15.0~18.0	25.0~30.0	40.0*
初花期 Initial flowering	8.0**	15.0~18.0	25.0~30.0	40.0*
结果期 Fruiting	8.0**	18.0~22.0	25.0~29.0	40.0*
采收期 Harvesting	8.0**	18.0~22.0	25.0~29.0	40.0*

注:“—”表示该数值不存在;“*”参考文献[14];“**”的数据源于栽培经验;其他数据参考文献[23]。

Note:“—” Indicates that the value does not exist;“*” Values are based on literature[14];“**” Values are according to cultivation experiences;The other values come from literature[23].

2.3 正弦指数函数

模型计算时需要输入变量为温度,计算结果通过模型中公式反演即为输出变量达到各生育期的时间(模拟值)。模型中的参数与作物本身相关,包括三基点温度、作物的耐热性、作物在某生育阶段的最适温光条件下的最优发育速率。模型中黄瓜的生长发育与温度关系为非线性关系。为了便于计算机模拟,引入了黄瓜发育进程 DVP (Development process, DVP)的概念^[22]。黄瓜发育进程是指黄瓜

发育到某一时刻(以日为单位)、某生育阶段已完成的份额,用一正浮点数表示。试验中黄瓜各生育期的生育进程见表1。DVP为整数表示正好完成该发育阶段,为非整数则表示处于前后2个发育阶段间的进程,该阶段发育完成时DVP=1。模型的基本过程公式(10)~(11)所示^[19]。

$$\text{DVP} = i - 1 + \sum_{n=1}^k R_i n \quad (10)$$

式中: R_i 是作物完成第 i 个生育阶段的发育速率,

$i \in (1, 2, 3, 4, 5)$; k 为第 i 个发育阶段开始到结束所需天数。完成某个发育阶段时 $\sum_{n=1}^k R_i n = 1$, 即得出 DVP, 从而得出黄瓜的发育阶段和某生育期的出现的时间。

$$R = \begin{cases} R_0 \left\{ \sin \left[\pi \left(\frac{T - T_b}{T_m - T_b} \right)^{\log \frac{T_m - T_b}{T_o - T_b}} \right] \right\}^\beta & T_b \leq T \leq T_m \\ 0 & T < T_b \text{ 或 } T > T_m \end{cases} \quad (11)$$

式中: R 为阶段发育速率; R_0 为最适阶段发育速率, 该值表示作物在最适温度下到达某一生育阶段所需时间的倒数 ($1/d$); T 为日平均温度, $^{\circ}C$, T_b 和 T_m 分别是作物生长发育的下限和上限温度, $^{\circ}C$; β 是模

型的参数, β 值越大, 函数曲线的曲率越大, 则曲线越陡。对作物而言, β 表现在温度对其生长发育速率的影响。

3 模型检验与评价

3.1 模型参数的确定

验证用生理发育时间模型、正弦指数函数模型和有效积温模型预测黄瓜生育期的可靠性, 本研究利用试验一的数据建立以上 3 种模型, 试验二和试验三的数据用于模型检验。各试验中黄瓜各个发育期的观测数据见表 3, 试验四中初花期与第一雌花坐果期不连续, 是因为此期间处于连续低温, 栽培管理中采取连续除花, 让植株更多的进行营养生长。

表 3 各试验黄瓜各生育期的观测日期

Table 3 Observed data for different cucumber development stages

试验 Experiment	初花期 Initial flowering	结果期 Fruiting	采收期 Harvesting
试验一 Experiment 1	2012-02-27—2012-03-24	2012-03-25—2012-03-27	2012-03-28—2012-03-31
试验二 Experiment 2	2012-04-17—2012-05-10	2012-05-11—2012-05-12	2012-05-13—2012-05-16
试验三 Experiment 3	2012-07-26—2012-08-17	2012-08-18—2012-08-20	2012-08-21—2012-08-24
试验四 Experiment 4	2012-11-06—2012-12-07	2013-01-05—2012-01-10	2013-01-11—2012-01-26

利用试验一中的试验观测数据和表 2 中黄瓜各个生育期的发育三基点温度建立各发育模型, 计算

得到黄瓜各生育期参数见表 4 和 5。

表 4 正弦指数函数模型中黄瓜各生育期参数值

Table 4 Parameters of exponential sine equation in each cucumber development stages

参数 Parameter	初花期 Initial flowering	结果期 Fruiting	采收期 Harvesting	计算过程 Calculation
R_0	0.044 0	0.372 7	0.265 0	R_0 和 β 利用统计软件
β	0.606 6	0.495 0	0.860 9	ORIGIN6.0 输入模型函数多次优化得出
R_2	0.918 3	0.485 0	0.987 3	

表 5 不同模型的建模值(试验一)

Table 5 Values of different models in each cucumber development stages (Experiment 1)

建模方法 Method	生育期/d Development stage			计算过程 Calculation
	初花期 Initial flowering	结果期 Fruiting	采收期 Harvesting	
生理发育时间(T_d) PDT	14	2	3	公式(5)~(7)
生理发育时间(T_b) PDT	14	2	3	公式(5)~(6)、(8)~(9)
有效积温/ $(^{\circ}C \cdot d)$ GDD	247	39	47	公式(1)~(3)

3.2 3种模型验证结果与分析

根据试验的观测资料和温度资料,按照各种模型的不同建模方法计算出黄瓜各发育期持续

的时间,即为模拟值。用不同模型预测的各生育期持续时间的模拟值与实际观测值的比较分别见表6。

表6 不同模型完成各生育期所需时间的模拟值、观测值及预测误差(观测值-模拟值)

Table 6 Simulated and observed durations of different development stages and their prediction errors (observed-simulated) based on three diverse models

指标 Index		初花期 Initial flowering			结果期 Fruiting			采收期 Harvesting		
		模拟值	观测值	误差	模拟值	观测值	误差	模拟值	观测值	误差
		Simulated	Observed	Error	Simulated	Observed	Error	Simulated	Observed	Error
试验二 Experiment 2	有效积温 GDD	20	24	+4	3	2	-1	4	4	0
	生理发育 时间(T_d) PDT	19	24	+5	2	2	0	3	4	+1
	生理发育 时间(T_h) PDT	20	24	+4	3	2	-1	4	4	0
	正弦指数 Malo's equation	25	24	-1	3	2	-1	5	4	-1
试验三 Experiment 3	有效积温 GDD	13	23	+10	2	3	+1	3	4	+1
	生理发育 时间(T_d) PDT	14	23	+9	2	3	+1	3	4	+1
	生理发育 时间(T_h) PDT	20	23	+3	3	3	0	3	4	+1
	正弦指数 Malo's equation	24	23	-1	3	3	0	4	4	0
试验四 Experiment 4	有效积温 GDD	31	32	+1	11	6	-5	14	16	+2
	生理发育 时间(T_d) PDT	30	32	+2	12	6	-6	16	16	0
	生理发育 时间(T_h) PDT	21	32	+11	5	6	+1	15	16	+1
	正弦指数 Malo's equation	31	32	+1	5	6	+1	12	16	+4

注: T_d 为日平均温度; T_h 为每小时平均温度。

Note: T_d is the daily mean temperature, T_h is the mean temperature per hour.

由表6可以看出,用有效积温预测黄瓜完成各生育期所需的时间,通过模拟值与观测值的回归估计标准误差RMSE(Root mean squared errors, RMSE)在初花期、结瓜期和采收期分别为6.2、3.0和1.3 d。用有效积温法预测温室黄瓜生育期时,试验二和试验三的初花期预测误差较大,试验二预测初花期提前4 day,试验三初花期提前了10 d。这是因为试验二中黄瓜的初花期阶段,定植10 d以后温室内日平均温度在19~27℃之间,比定植时(15.3~22.1℃)明显提高(图1(a)~(b)),表现出有效积温模拟发育速率高于实际生长速率,进而使模型预测、时间提前,在试验三中这种高温(温室内日平均温度21~30℃)导致的预测黄瓜初花期提前

更为明显。这表明有效积温法在气温较高时使预测发育期提前,其原因为有效积温法在一定温度范围内能给出相对接近实际发育速率的值,一旦温度超出这个范围预测速率与实际发育速率产生较大误差。但在试验四中,该模型预测初花期相对试验二和试验三预测误差最小,主要可能的原因是此阶段环境温度变化剧烈(图1(c)),短时期内高温和低温带来模拟速率与实际速率的误差相互抵消最终结果则相对准确。有效积温法中低温对黄瓜发育期的影响表现较为明显的是在试验四中预测黄瓜结果期阶段,此阶段温室内日平均温度最低7.6℃,最高14.4℃,低温使得模型模拟速率小于实际生长速率,结果导致预测生育期延后。

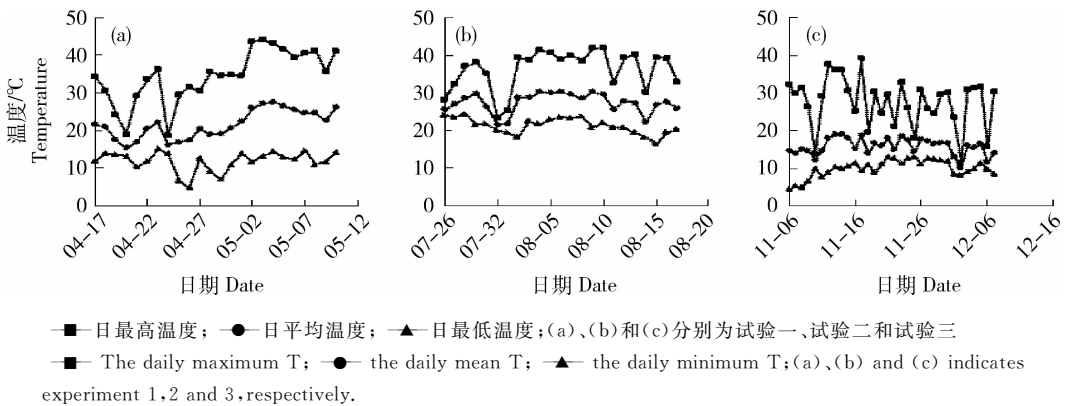


图1 各试验初花期每日温度

Fig. 1 Daily temperature (T) at initial flowering stage for each experiment

以每日平均温度(T_d)和每小时平均温度(T_h)带入的生理发育时间法对完成各生育期所需时间的预测误差区间分别为-6~9 d, -1~11 d。试验三中生理发育时间 T_d 与 T_h 的最大误差分别为9和3 d, 2种计算方法中模拟值均比实测值提前,但 T_h 的计算更接近实测值。这是因为试验三黄瓜生长气温较高,日平均温度接近黄瓜温度的最适值,进而生理发育时间计算得到的黄瓜每日发育实际速率小于模型模拟速率,修正后的生理发育时间划分昼夜不同适宜温度,并且以每小时平均温度计算每日相对热效应,一定程度上降低了高温对黄瓜发育的影响。但在试验四中,以 T_h 计算的生理发育时间在预测黄瓜出花期时出现了最大误差预测生育期提前11 d,并且在整个试验四发育期预测中都表现出预测提前,这说明此种计算不能反应低温对植物发育速率的影响。 T_d 和 T_h 计算的生理发育时间预测黄瓜各生育期的 R_{MSE} 在初花期、结瓜期和采收期分别

为6.1、3.5和0.8及7.0、0.8和0.8 d。

使用正弦指数函数法模拟值与观测值的 R_{MSE} 在所测的3个生育期的值分别为1.0、0.8和2.4 d,预测的误差区间在-1~4 d,基本接近试验中黄瓜生育期到达的实际日期。此模型在预测黄瓜发育期时准确性之所以较其他模型精确,是由于在不同的发育期有着不同的参数,发育速率对温度的反应都是非线性的,这种温度与作物发育的非线性方程与作物的绝大多数生理生化过程相符合^[24]。另外设置步长为1的发育进程,使各阶段每日平均温度计算出的每日发育速率精确到小数点后4位,精确度较高。

4 结论与讨论

罗卫红^[25]研究认为有效积温在发育的最适下限温度与最适上限温度范围内会给出相对接近实际值发育速率,但试验二初花期日均温为15.3~27.5

℃之间、试验三为 20.5~30.3℃之间,参考黄瓜生育期最适温度(表2)有效积温预测生育期均较实际观测值提前,鉴于此,有效积温法线性的温度适用范围是否为最适下限与最适上限温度还有待于进一步研究。通常温度与植物生长之间的相互关系是通过酶与温度之间关系演化过来的,而有效积温法在预测发育速率与三基点温度的线性关系,这种线性关系明显不符合酶反应的规律。Raymond Bonhomme^[26]在研究有效积温法的使用时,就其缺陷及非线性化后产生的诸多问题进行深入讨论,多数非线性化面临主要问题就是函数使用的复杂性及适用的范围较小。有效积温法预测作物发育存在的最大缺陷就是不稳定问题,这种不稳定主要表现在温室气温变化剧烈的时期,此时无法预知有效积温预测生育期是提前或延后,其原因是无法得知高温与低温怎样影响植物的生长速率。

利用 T_h 计算的生理发育时间作为发育尺度,在温室室内气温较高的季节降低了预测误差,从而比有效积温法更准确地预测温室黄瓜的生育期。但就日光温室和塑料大棚而言,在平均温度较低时(由昼夜温差引起的),以 T_h 计算的生理发育时间会极大的提前预测值,即此种气象条件下,不适合应用以 T_h 计算生理发育时间。其次在最终计算生理发育日结果时,四舍五入精确到整数“d”时,使该方法的准确性在一定程度上受到限制。另外计算每日热效应时,假定黄瓜的发育速率与温度线性相关,这种线性关系与事实存在差异,未来可以考虑如何引入发育速率的非线性函数,使生理发育时间在计算非可控环境更加精确。

正弦指数函数的非线性动态描述作物发育速率与温度之间的关系,以及各个发育期内参数 R_0 和 β 取值的不同,相对于其他 2 种模型更能精确反映作物的生长速率,模型模拟值也更加接近实际值。正弦指数函数模型在预测正常生长作物较为准确,没有考虑其他非温度因素对植物生长发育速度的影响。

综上所述,在高温季节利用 T_h 计算的生理发育时间预测黄瓜各发育期比使用 T_a 准确。在温度变化较为剧烈的环境下,作物某个发育期内高温、低温之间在短期时间内互相变化一定程度上可以抵消有效积温和生理发育时间预测的实时误差,从而使最终模拟结果接近实测值,但模拟值随着不同的温度环境变化表现出模拟值不稳定性,即预测提前或

延后。在模拟计算温室黄瓜的各个发育期中,正弦指数函数法模拟精确度高且稳定,适宜用于温室黄瓜发育期的预测。

参 考 文 献

- [1] 王冀川,马富裕,冯胜利,等. 基于生理发育时间的加工番茄生育期模拟模型[J]. 应用生态学报,2008,19(7):1544-1550
- [2] 张学霞,葛全胜,郑景云. 北京地区气候变化和植被的关系-基于遥感数据和物候资料的分析[J]. 植物生态学报,2004,28(4):499-506
- [3] 王小兰. 兰州市区 16 种树木春季物候期观测[J]. 甘肃林业科技,2005,31(3):74-75
- [4] 李永秀,罗卫红. 温室蔬菜生长发育模型研究进展[J]. 农业工程学报,2008,24(1):307-312
- [5] Gregory S M, Wilhelm W W. Growing degree-days: One equation, two interpretations [J]. Agricultural and Forest Meteorology,1997,87:291-300
- [6] Russelle M P, Wilhelm W, Olson R A, et al. Growth analysis based on degree-days [A]. Publications from USDA-ARS / UNL Faculty,1984
- [7] Davidson H R, Campbell C A. The effect of temperature, moisture and nitrogen on the rate of development of spring wheat as measured by degree days [J]. Canadian Journal of Plant Science,1983,63(4):833-846
- [8] Kirby E J M. Factors affecting rate of leaf emergence in barley and wheat[J]. Crop Science,1995,35(1):11-19
- [9] Crossand H Z, Zuber M S. Prediction of flowering dates in maize based on different methods of estimating thermal units [J]. Agronomy Journal,1972,64 (3):351-355
- [10] Mohammad N E, Abdurrahman A A, Abdullah A A. An arithmetic method to determine the most suitable planting dates for vegetables [J]. Computers and Electronics in Agriculture,2013,90:131-143
- [11] Enli Wang, Thomas Engel. Simulation of Phenological Development of Wheat Crops[J]. Agricultural Systems,1998,58(1):1-24
- [12] 孟亚利,曹卫星,周治国,等. 基于生长过程的水稻阶段发育与物候期模拟模型[J]. 中国农业科学,2003,36(11):1362-1367
- [13] 倪继恒,罗卫红,李永秀,等. 温室番茄发育模拟模型研究[J]. 中国农业科学,2005,38(6):1219-1225
- [14] 李永秀,罗卫红,倪继恒,等. 温室黄瓜发育模拟模型的研究[J]. 南京气象学院报,2008,31(2):257-263
- [15] 袁昌梅,罗卫红,张生飞,等. 温室网纹甜瓜发育模拟模型研究[J]. 园艺学报,2005,32 (2):262-267
- [16] Malo J E. Modeling unimodal flowering phenology with exponential sine equations[J]. Functional Ecology,2002,16:413-418
- [17] Liancourt Pierre, Laura A Spence, Bazartseren Boldgiv, et al. Vulnerability of the northern Mongolian steppe to climate

- change: Insights from flower production and phenology[J]. Ecology, 2012, 93: 815-824
- [18] Christoph Reisch, Peter Poschlod. Land use affects flowering time: Seasonal and genetic differentiation in the grassland plant *Scabiosa columbaria*[J]. Evolutionary Ecology, 2009, 23(5): 753-764
- [19] Longhui li, Gregory S. M, Qiang Yu, et al. Simulating winter wheat development response to temperature: Modifying Malo's exponential sine equation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 63(2): 274-281
- [20] 李萍萍, 周静, 王纪章, 等. 温室黄瓜生育期预测的正弦指数模型[J]. 江苏大学学报, 2005, 32(2): 262-267
- [21] 张银锁, 宇振荣, Driessen P M. 夏玉米植株及叶片生长发育热量需求的实验与模拟研究[J]. 应用生态学报, 2001, 12(4): 561-565
- [22] 侯加林, 王一鸣, 徐云, 等. 番茄生长发育非线性模拟模型[J]. 农业机械学报, 2006, 37(3): 80-83
- [23] 张振贤. 蔬菜栽培学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2003: 142-143
- [24] Streck N A, Paula F L M, Bisognin D A, et al. Simulating the development of field grown potato (*Solanum tuberosum* L)[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2007, 142: 1-11
- [25] 罗卫红. 温室作物生长模型与专家系统[M]. 北京: 中国农业出版社, 2008: 22-30
- [26] Raymond Bonhomme. Bases and limits to using 'degree. day' units [J]. European Journal of Agronomy, 2000, 13(1): 1-10

责任编辑: 王燕华