

DOI: 10.16861/j.cnki.zggc.2024.0206

基于有效积温的加工番茄生育期模拟模型

牛博文¹, 庞胜群¹, 韩琼琼¹, 苏新², 任卫新²

(1. 石河子大学农学院·特色果蔬栽培生理与种质资源利用兵团重点实验室 新疆石河子 832003;

2. 民丰县胡杨投资开发建设有限公司 新疆民丰 848500)

摘要: 为确保产品供应的均衡性, 预测作物生育期对农业生产中品种选择和定植期的合理规划至关重要。针对新开发的加工番茄种植基地, 依据加工番茄发育过程对温度的响应特性, 构建了一个基于有效积温的生育期模拟模型, 并通过不同品种、定植期和生态区域的试验数据对该模型进行了验证。研究结果显示, 该模型在多数生育阶段的绝对模拟误差介于 0~6 d, 根均方差小于 4 d, 归一化均方根误差均低于 15%。在现蕾至开花、坐果至定个、定个至红熟这 3 个发育阶段, 模型的模拟精度高, 误差小。整个生育阶段的决定系数(R^2)分别为 0.971 和 0.969, 表明所构建的模型具有良好的预测准确性和广泛的适用性, 能够为农业生产中品种布局和种植期的合理安排提供有力的技术支持。

关键词: 加工番茄; 有效积温; 生育阶段; 模拟模型

中图分类号: S641.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-2871(2025)02-075-07

A simulation model for the growth period of processed tomato based on effective accumulated temperature

NIU Bowen¹, PANG Shengqun¹, HAN Qionqiong¹, SU Xin², REN Weixin²

(1. College of Agriculture, Shihezi University/Key Laboratory of Characteristic Physiology and Germplasm Resources of Fruits and Vegetables, Shihezi 832003, Xinjiang, China; 2. Minfeng Huyang County Investment Development and Construction Co., Ltd., Minfeng 848500, Xinjiang, China)

Abstract: To ensure the balance of product supply, predicting the crop growth period is crucial for the rational arrangement of variety selection and planting period in agricultural production. For newly developed processing tomato planting bases, a growth period simulation model based on effective accumulated temperature was constructed, based on the temperature response characteristics of processing tomato development. The model was tested using experimental data from different varieties, planting periods, and ecological regions. The results showed that the absolute simulation error of the constructed model for most growth stages was concentrated in 0-6 days, with a root mean square deviation less than 4 days and a normalized root mean square error less than 15%. In the three development stages from bud emergence to flowering, fruit setting to fruit development, and fruit development to red ripening, the model showed high simulation accuracy and small errors. The coefficient of determination (R^2) for the entire growth period was 0.971 and 0.969, indicating that the constructed model has good predictive accuracy and broad applicability, providing strong technical support for variety layout and the rational arrangement of planting periods in agricultural production.

Key words: Processed tomato; Effective accumulated temperature; Reproductive stage; Simulation model

我国是世界加工番茄生产和出口大国之一, 新疆是国内最大的加工番茄产区, 产销量占到全国的 90%以上^[1], 作为区域特色优势产业, 在优化种植结构、助力农户增收等方面发挥了积极的作用。新疆加工番茄每年的加工生产时限为 80 d 左右, 而有效的饱和生产时间则更短^[2]。近几年新疆番茄加工企

业不断开辟新的原料基地, 以解决原料供应期短、生产线闲置期过长的问题。如何准确掌握不同品种的成熟期, 实现原料的均衡供应, 是番茄加工企业在新的原料种植区面临的一个关键技术问题。

温度是植物生产重要的环境因子之一, 与生长发育进程密切相关, 其动态变化特征不同程度地影

收稿日期: 2024-03-27; 修回日期: 2024-11-13

基金项目: 新疆生产建设兵团农业攻关项目(2023AA203); 石河子大学科技创新专项(QS2023007)

作者简介: 牛博文, 女, 在读硕士研究生, 研究方向为蔬菜遗传育种。E-mail: 3181248868@qq.com

通信作者: 庞胜群, 女, 副教授, 研究方向为加工番茄栽培生理及遗传育种。E-mail: 317574100@qq.com

响着植物的组成结构、器官形态和生理特征^[3]。植物完成某一发育时期,要求一定的温度积累,且需要的积温是相对稳定的。生育期的准确预测是合理安排品种、定植期的前提,也是开发作物生产管理决策系统的基础^[4]。在作物阶段发育的模拟中常用有效积温(growing degree day,简称GDD)作发育尺度^[5]。作物生产中积温理论假定发育速率与气温在发育的上下限温度之间是正相关关系,在大田作物适宜的生长季节内,多数时间温度都处于适宜范围内,用GDD法可以估计大田作物特定的发育阶段^[6]。陈永快等^[7]用Logistic方程基于有效积温构建营养液膜技术栽培小白菜的生长模型,小白菜生长指标模型的决定系数均达0.96以上;在果菜类蔬菜上也有不少利用有效积温法建立植株生长、果实发育动态模拟模型的研究,所建模型预测性均较好^[8-11]。利用GDD法预测温室鲜食番茄发育动态的研究较多,而将发育动态模拟模型应用于大田加工番茄的研究却鲜见报道。

和田地区民丰县从2022年开始试种加工番茄,急需明确熟性不同的品种在民丰县的生育进程,以便合理安排种植期及制定水肥管理方案,实现原料高效生产及均衡供应。笔者采用系统分析方法,综合考虑有效积温及品种差异性的影响,引入品种基本发育因子,利用在当地的试验数据建立基于有效积温预测加工番茄生育进程的动态发育模型,旨在为当地品种选择、合理安排种植期以实现原料的均衡供应提供理论依据和决策支持。

1 材料与方

1.1 材料

供试加工番茄品种石番43和佳义9166,均为已推广种植多年的商业品种,由和田三十八度八农业有限公司提供。

1.2 方法

试验在新疆和田地区民丰县萨勒吾则克乡(I区)、民丰林果基地(II区)、叶亦克乡(III区)3个地点开展。穴盘苗于4叶1心时定植到大田,萨勒吾则克乡于2023年4月9日移栽,民丰林果基地于4月19日移栽,叶亦克乡于4月24日移栽。采用地膜覆盖栽培,一膜两根滴灌带,膜宽120cm,一膜栽植两行,行距配置0.4m+1.1m,株距26~28cm,平均株数3200株·667m²。试验小区面积24m²,3次重复。水肥、病虫害管理同大田生产一致。

其中I区的田间数据用于模型构建,II区、III区的田间数据用于模型验证。从当地气象局获取3个试验地点近地面2m的每日温度数据平均值。

1.3 生育期的观测

移栽成活后根据各生育期相应的形态特征(表1)详细记录各生育期的起始日期,在王冀川等^[12]划分方法的基础上,增加定个期,将加工番茄划分为5个生长发育阶段。

表1 加工番茄生育阶段的划分与物候期的形态指标
Table 1 Classification of growth stage and morphological indicators of phenological stage in processing tomato

物候期 Phenological stage	形态指标 Morphological indicators
定植期 Planting stage	幼苗80%以上达到4叶1心 More than 80% of seedlings reach 4 leaves and 1 heart
现蕾期 Budding stage	田间50%以上幼苗显蕾 More than 50% of seedlings in the field show buds
开花期 Blooming stage	田间50%以上的幼苗第一朵花开放 More than 50% of seedlings in the field have their first flower blooming
坐果期 Fruiting stage	田间50%以上的植株第一个果实直径达到1cm以上 More than 50% of plants in the field have their first fruit with diameter over 1 cm
定个期 Fixed stage	田间50%的植株第一个果实直径前后相差约3cm 50% of the plants in the field have a difference of about 3 cm in the diameter of their first fruit before and after
红熟期 Red ripe stage	田间80%以上的果实达到采收标准 More than 80% of the fruits in the field meet the harvesting standards

1.4 模型检验

模型检验包括两方面,即模型校正和验证。校正是调节模型参数。验证采用国际上常用的观测值与模拟值之间的均方差根(RMSE)对其符合度进行分析,RMSE值越小,模型预测精度越高。用观测值与模拟值之间1:1关系图显示模型拟合度和可靠性。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Op - Sp)^2}{N}} ; \quad (1)$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{A} \times 100\% . \quad (2)$$

式中,Op表示从定植至生育期的某个时期p的实际观测天数(d);Sp为相应的模拟值(d)、N表示样本容量,A表示实际观测值的平均值(d)。

模型的验证根据观测值与模拟值的根均

方差(RMSE)、归一化均方根误差(NRMSE)和1:1直线之间的相关系数 R^2 对观测值与模拟值之间的符合度、可靠性综合分析。RMSE与NRMSE的值越小, R^2 越接近1表示模型预测精度就越高,模拟效果就越好。

1.5 生育期模型构建

有效积温法是指作物完成某一生长周期所需一定量的温度。可用公式进行计算。

$$GDD = \sum_{db}^{da} MEx; \quad (3)$$

$$MEx = \begin{cases} \sum (T_{av} - T_b), & T_b \leq T_{av} \leq T_{max} \\ 0, & T_{av} < T_b \text{ 或 } T_{av} > T_{max} \\ \sum T_{max} - T_b, & T_{av} > T_{max} \end{cases} \quad (4)$$

式中:da、db分别代表各生育期开始、结束时日期, T_{av} 为平均温度, T_b 为生物学下限温度; T_{max} 为生物学上限温度;MEx为基于假设 x 的累积有效积温。下限温度为 10°C ,上限温度为 35°C 。

1.6 数据处理

采用Microsoft Excel2010、SPSS 19.0软件进行数据的汇总、分析,采用Origin 8.0软件作图并进行曲线拟合。

2 结果分析

2.1 参试品种生育期统计

从表2可以看出同一品种在不同生长发育环境下,各发育阶段所需天数不同,不同品种在同一生态区各个发育时期也有差异。石番43在I区从定植至红熟需要123 d,在II区、III区中分别需要110和136 d,不同生态区间成熟期最大相差25 d;

从5个发育阶段看,定植-现蕾所需要的天数在区域间相差不大,最大相差2 d,现蕾至开花发育阶段不同生态区域间相差较大,最大达到11 d,其次是定个-红熟发育阶段区域间最大相差了9 d,坐果-定个最大相差8 d。佳义9166从定植-成熟所需要的天数在不同区域间与石番43表现出相同的趋势,即在III区所需要的天数最多,为125 d,II区需要的天数最短,只需要100 d,I区处于中间,需要108 d,3个区域间成熟期最大相差17 d。佳义9166从定植-现蕾所需要的天数在区域间相差也不大,最大相差了3 d,其他4个发育阶段所需天数区域间差异在6~7 d。3个生态区相比,2个参试品种在III区从定植至红熟所需要时间最长,其次是I区,II区所需时间最短。石番43在3个生态区均比佳义9166晚熟,在I区晚熟15 d,II区晚熟10 d,III区晚熟11 d。

根据I区观测的生育期数据及获取的I区有效积温数据,用公式(3)计算出石番43、佳义9166各生育阶段所需的有效积温,从表3可以看出,石番43定植-红熟所需要有效积温高于佳义9166,其中定植-现蕾、坐果-定个这2个时期,2个参试品种需要的有效积温近似,现蕾-开花、开花-坐果两个发育时期石番43需要的有效积温都远高于佳义9166,在定个-红熟阶段,石番43所用天数为27 d,时间是7月24日至8月22日,佳义9166为22 d,时间为7月10日至8月2日,7月民丰县气温高于8月份,因此佳义9166累计的有效积温高于石番43。以表3数据作为生育期模拟模型和有效积温生育期模拟模型的参数。

表2 不同试验地点参试品种生育期

Table 2 Growth days of tested varieties in different experimental areas

试验区域 Experimental area	品种 Cultivar	定植-现蕾 Planting - Budding	现蕾-开花 Budding- Flowering	开花-坐果 Flowering- Fruiting	坐果-定个 Fruiting-Fixed	定个-红熟 Fixed-Red ripening	定植-红熟 Planting-Red ripening
I区 I area	石番43 Shifan 43	30	29	14	23	27	123
	佳义9166 Jiayi 9166	28	23	13	22	22	108
II区 II area	石番43 Shifan 43	30	18	17	23	22	110
	佳义9166 Jiayi 9166	27	17	14	22	20	100
III区 III area	石番43 Shifan 43	32	23	19	31	31	136
	佳义9166 Jiayi 9166	30	20	20	29	26	125

表3 I区不同品种各生育阶段所需有效积温

Table 3 Effective accumulated temperature required for different varieties and growth stages in I area °C

物候期 Phenological stage	石番 43 Shifan 43	佳义 9166 Jiayi 9166
定植-现蕾 Planting-Budding	187.46	186.78
现蕾-开花 Budding-Flowering	370.74	237.20
开花-坐果 Flowering-Fruiting	286.85	202.18
坐果-定个 Fruiting-Fixed	384.33	377.03
定个-红熟 Fixed location-Red ripening	369.74	426.79
总积温 Total accumulated temperature	1 599.12	1 429.98

2.2 不同生育期模型检验

根据表2中的实测值,结合当地气象温度资料(图1),利用公式(3)和(4)计算出加工番茄每日所需有效积温,再根据完成各生育期所需天数,反演得出达到各物候期的发育持续时间,即为模拟值。用GDD法预测的达到各生育期持续时间的模拟值与实际观测值分别如表2和表4所示。由表4可以看出,20个模拟值中,模拟值与实测值误差较大的出现在III区定植-现蕾期,石番43相差了12d,佳义9166相差了9d,还有4个模拟值与实测值之间相差了5~6d,其他14个模拟值与实测值相差在0~2d,说明用GDD法估算加工番茄生育期可行。

利用II区和III区石番43、佳义9166的5个生长发育时期所需天数对模型进行测试验证。从图2

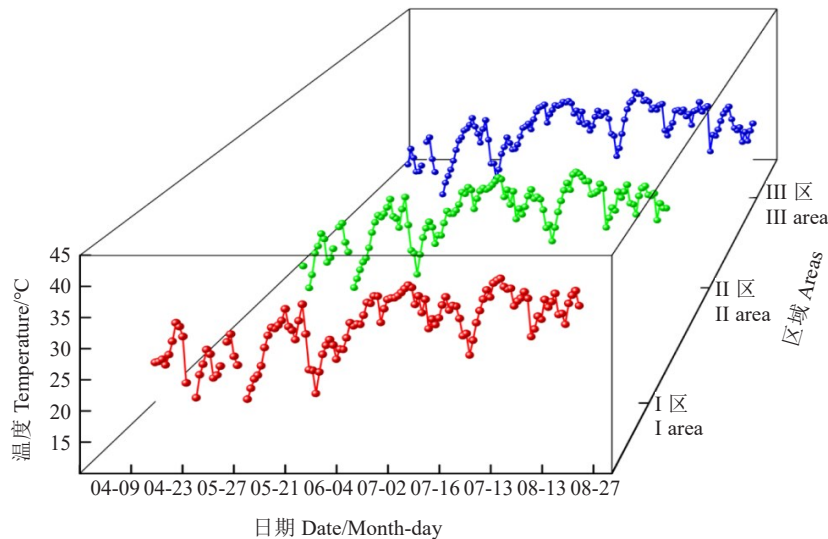
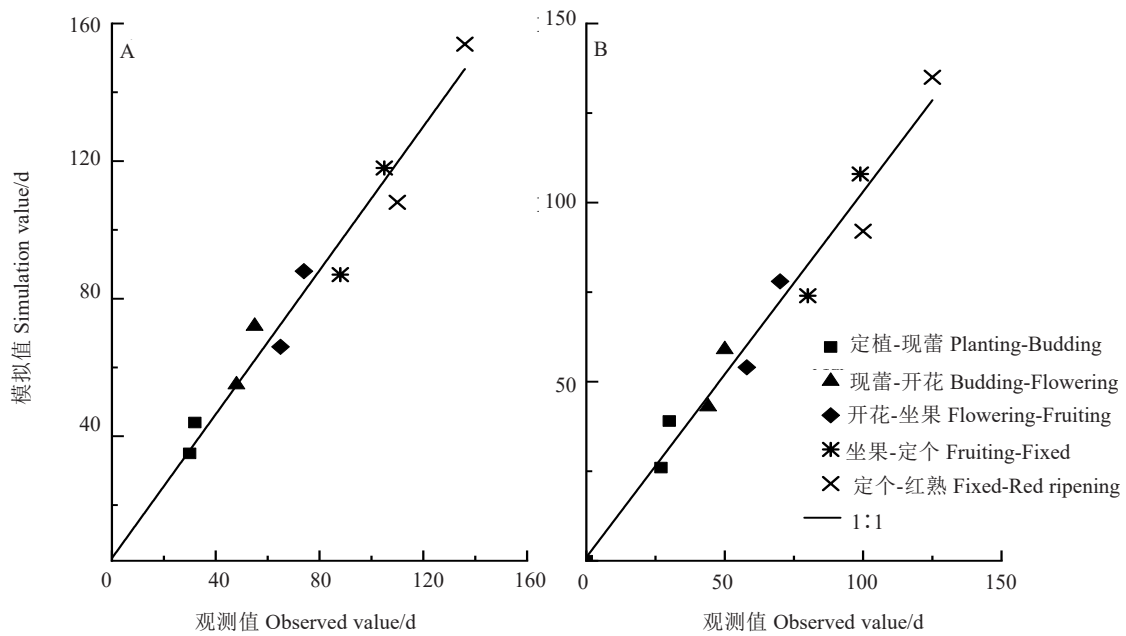


图1 3个区域每日平均温度
Fig. 1 Daily average temperature in three areas

表4 加工番茄各生育期模型模拟值与误差

Table 4 Simulated values and errors of models for different growth stages of processing tomato

品种 Cultivar	试验区域 Experimental area	定植-现蕾 Planting-Budding		现蕾-开花 Budding-Flowering		开花-坐果 Flowering-Fruiting		坐果-定个 Fruiting-Fixed		定个-红熟 Fixed location-Red ripening	
		模拟值 Simulation value	误差 Error	模拟值 Simulation value	误差 Error	模拟值 Simulation value	误差 Error	模拟值 Simulation value	误差 Error	模拟值 Simulation value	误差 Error
石番 43 Shifan 43	II区 II area	35	5	20	2	11	-6	21	2	21	-1
	III区 III area	44	12	28	5	16	-3	30	-1	36	5
佳义 9166 Jiayi 9166	II区 II area	26	-1	17	0	11	-3	20	-2	18	-2
	III区 III area	39	9	20	0	19	-1	30	1	27	1



注:图 A 是石番 43 在 II 和 III 区观测值与模拟值比较;图 B 是佳义 9166 在 II 和 III 区观测值与模拟值比较。

Note: Figure A compares the observed values and simulated values of Shifan 43 in areas II and III; Figure B compares the observed values and simulated values of Jiayi 9166 in areas II and III.

图 2 两个加工番茄品种各生育期观测值与模拟值比较

Fig. 2 Comparison of observations and simulated values for different processing tomato varieties at different growth stages

表 5 两个加工番茄品种生育期模型验证

Table 5 Validation of growth period models for two processed tomato varieties

品种 Cultivar	物候期 Phenological phase	试验区域 Experimental area	R^2	RMSE/d	NRMSE/%
石番 43 Shifan 43	定植-现蕾 Planting-Budding	II 区 II area	0.971	3.32	15.09
		III 区 III area		3.77	13.86
	现蕾-开花 Budding-Flowering	II 区 II area		1.93	8.75
		III 区 III area		1.68	8.42
	开花-坐果 Flowering-Fruiting	II 区 II area		1.02	4.61
		III 区 III area		1.12	5.62
	坐果-定个 Fruiting-Fixed	II 区 II area		1.99	9.03
		III 区 III area		2.01	10.04
	定个-红熟 Fixed-Red ripening	II 区 II area		1.97	8.95
		III 区 III area		1.83	9.15
佳义 9166 Jiayi 9166	定植-现蕾 Planting-Budding	II 区 II area	0.969	2.60	13.02
		III 区 III area		3.48	13.93
	现蕾-开花 Budding-Flowering	II 区 II area		1.68	8.42
		III 区 III area		1.81	7.24
	开花-坐果 Flowering-Fruiting	II 区 II area		1.12	5.62
		III 区 III area		1.71	6.83
	坐果-定个 Fruiting-Fixed	II 区 II area		2.01	10.04
		III 区 III area		2.72	10.87
	定个-红熟 Fixed-Red ripening	II 区 II area		1.83	9.15
		III 区 III area		2.43	9.73

及表5可以看出,GDD法模拟石番43与佳义9166的物候期时观测值与模拟值的1:1直线之间的 R^2 分别为0.971、0.969,呈较好的1:1关系,拟合效果较好。

石番43在II区和III区的5个生长发育阶段的RMSE平均值为3.55、1.80、1.07、2.00、1.90 d, RMSE越小,一致性越好,模型模拟结果越精确可靠;5个生长阶段的NRMSE平均值为14.48%、8.59%、5.11%、9.54%、9.05%,NRMSE平均值均小于15%,说明模型模拟值与观测值之间的误差小。佳义9166的RMSE平均值在3.04、1.75、1.42、2.37、2.13 d。在开花-坐果阶段佳义9166 RMSE最小,为1.02 d模拟效果最优,定植-现蕾阶段, RMSE为3.04 d,模拟效果最差,其他3个阶段模拟效果一般。佳义9166在5个生长发育阶段的NRME也都小于15%,说明模拟效果良好。

3 讨论与结论

近年来有学者利用生理发育时间模拟番茄生育期,但对生理发育时间与日照时数和品种的遗传参数、环境互作等互作效应尚未清晰,当生态区和品种改变时,则会产生较大误差^[13]。而利用有效积温法预测大田作物生育期较为简单和实用,其最大优点是输入变量只有有效积温,计算方便简单。

在现有的研究中,大多数是利用积温来预测作物生育期^[14-15],且在大田作物上应用较多^[16-19]。如Mohammad等^[20]以不同蔬菜各发育期所需的有效积温来确定不同区域间蔬菜的播种日期,Perry等^[21-22]用积温预测黄瓜的收获期,模拟效果均较好。本研究中石番43及佳义9166生育期模拟的NRME均<15%,模拟效果良好。说明用GDD法估计加工番茄的各个发育阶段是可行的。

程陈等^[23]利用番茄、郁金香、茶等多种作物模拟生育期,发现在5个生长发育阶段中,模拟精度最差的为第一阶段播种-出苗阶段。在本研究中也发现,第一个生长阶段即定植-现蕾期模拟误差较大。尤其是III区石番43相差了12 d,佳义9166相差了9 d,这是由于III区海拔较I区高696.2 m,较II区高676.9 m,气候较冷凉,有效积温低,定植后缓苗较慢,表现出有效积温模拟发育速率大于实际生长速率,进而使模型预测时间推后、误差较大。

加工番茄生长的最适宜温度范围较窄,生产过程中处于最适宜温度范围之外的情况比较常见,积温法能够较好地预测温度对加工番茄发育的迟缓

作用,但是很多时候影响发育进程的因子不只是温度,运用积温预测作物发育没有考虑光周期对作物发育的影响^[5]。Raymond^[24]指出计算积温时必须考虑作物光周期因素、水分状况和营养状况等。用积温预测作物的发育时,对感光 and 感温作物,应同时考虑春化、光照等限制因素,才能提高预测精度。

本研究是在两个不同熟性的加工番茄品种和3个生态环境下获得的研究结果,对于其他熟性品种及生态区域还需进一步验证。但本模型的建模思路和方法为建立更具普适性的加工番茄发育模拟模型提供了理论参考。

研究表明,II区加工番茄生育期为108~110 d,可作为早熟生产基地。而I区生育期大概在100~123 d,可作为中熟原料基地。III区在125~136 d,可作为晚熟生产基地。

参试品种受遗传因子影响,生育期不同,石番43较佳义9166生育期长,在当地可作晚熟品种,佳义9166可作中熟品种。

后期为了能够更有效延长加工番茄收获期,可使定植时间相差较大,若定植期集中在一个月,将造成其他时间段没有充分利用。预测加工番茄产量也在农业生产中至关重要,由于本试验时间有限,下一步将会在此基础上对模型进行完善和优化。

参考文献

- [1] 姚宇晨,赵芸,赵抒娜,等.番茄制品的现状与发展趋势分析[J].中国果菜,2021,41(6):144-148.
- [2] 韩雪.新疆中粮屯河番茄加工企业国际市场营销战略研究[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2016.
- [3] 张建华.温度影响新疆地区棉花发育速度的模拟研究[J].南京气象学院学报,1997,20(4):447-452.
- [4] 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.
- [5] 段光俊,赵家松,刘振洋,等.基于有效积温的生菜生长模型的构建[J].北方园艺,2024(6):9-16.
- [6] 刁明.温室甜椒生长发育模拟模型的研究[D].南京:南京农业大学,2008.
- [7] 陈永快,黄语燕,王涛,等.基于有效积温的 NFT 栽培小白菜生长模型[J].江苏农业科学,2020,48(17):229-233.
- [8] HEUVELINK E. Evaluation of a dynamic simulation model for tomato crop growth and development[J]. Annals of Botany, 1999,83(4):413-422.
- [9] 齐维强.积温对日光温室番茄生长发育效应的研究以及模型初探[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2004.
- [10] 徐刚,张昌伟,李德翠,等.温室长季节栽培番茄发育动态模拟模型的研究[J].农业工程学报,2005,21(增刊2):243-246.
- [11] 李立昆,李玉红,程智慧,等.基于有效积温早春设施厚皮甜瓜

- 果实发育模拟模型[J].北方园艺,2010(6):97-100.
- [12] 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.
- [13] 褚金翔.温室番茄生长发育模型建立与参数实验研究[D].北京:中国农业科学院,2008.
- [14] 米娜,姚克敏.我国主要水稻雄性不育系的光温特性研究[J].南京气象学院学报,2005,28(1):108-116.
- [15] 邱新法,曾燕.影响我国冬小麦产量的气象因子研究[J].南京气象学院学报,2000,23(4):575-578.
- [16] RUSSELLE M P, WILHELM W W, OLSON R A, et al. Growth analysis based on degree days 1[J]. Agricultural and Food Sciences, 1984, 24(1):28-32.
- [17] 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.
- [18] KIRBY E J M. Factors affecting rate of leaf emergence in barley and wheat[J]. Crop Science, 1995, 35(1):11-19.
- [19] CROSS H Z, ZUBER M S. Prediction of flowering dates in maize based on different methods of estimating thermal units 1[J]. Agronomy Journal, 1972, 64(3):351-355.
- [20] MOHAMMAD N E, A BDURRAHMAN A A, A BDULLAH A A. An arithmetic method to determine the most suitable planting dates for vegetables[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2013, 90:131-143.
- [21] PERRY K B, WEHNER T C, JOHNSON G L. Comparison of 14 methods to determine heat unit requirements for cucumber harvest[J]. HortScience, 1986, 21(3):419-423.
- [22] PERRY K B, WEHNER T C. Prediction of cucumber harvest date using a heat unit model[J]. HortScience, 1990, 25(4):405-406.
- [23] 程陈,冯利平,薛庆禹,等.日光温室黄瓜生长发育模拟模型[J].应用生态学报,2019,30(10):3491-3500.
- [24] BONHOMME R. Bases and limits to using 'degree day' units[J]. European Journal of Agronomy, 2000, 13(1):1-10.