

不同粒度积温算法对温室黄瓜生育期模拟的比较

陈跃浩, 薛庆禹, 黎贞发, 刘淑梅, 李 春, 官志宏

(天津市气候中心, 天津 300074)

摘 要:基于有效积温法,利用3种不同粒度的温室气温数据,模拟了温室黄瓜的生长发育情况。结果表明:3种积温算法对于黄瓜生育期的模拟均表现出苗期的模拟误差最大,标准误差(RMSE)为12.4 d,采收末期的模拟误差最小,RMSE为1 d。对比3种不同粒度积温算法的模拟效果,日积温法模拟的误差最小,平均误差为-0.6 d;其次是小时积温法,平均误差为-1.8 d;10 min积温模拟的误差最大,为-2.2 d。这说明用有效积温法模拟作物生育期,使用日有效积温来作为模型的输入,其模拟结果较好。另外,3种积温算法在对黄瓜不同生育期的模拟中,除苗期之外,其余各生育期的模拟结果基本一致,无明显差异,定植期误差为5 d和4 d,开花坐果期均为-4 d,采收期均为3 d,采收末期均为1 d。说明有效积温法对于不同粒度的积温敏感性不强,而对于昼夜温度变化比较敏感。

关键词:粒度;积温算法;黄瓜;生育期;模拟

中图分类号:S 642.226.5 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2016)11-0041-05

近年来,随着对作物生理生态机理认知的加深以及计算机技术的高速发展,对于作物生长发育过程的模拟模型已越来越多的得到了应用。作物生长模型是指基于作物生理过程理论,对作物的生长、发育以及产量形成过程进行数学公式化的动态模拟,并通过计算机实现这种模拟的一种用来预测作物生长、发育以及产量的模拟系统^[1-3]。目前,国内外已有学者对作物模型进行了深入的研究。其中较为著名的包括荷兰建立的 Wageningen 系列模型^[4-5],美国建立的 DSSAT 系列模型^[6-9],澳大利亚建立的 APSIM 模型^[10]和以色列建立的 TOMGRO 模型^[11]。而国内也有学者在作物模型的研究方面取得了一定的进展。谢祝捷等^[12]建立了基于有效积温的黄瓜发育速率模型,并对该模型进行了初步验证,证实该模型可预测黄瓜发育进程。李向岭等^[13]建立了不同播期条件下,玉米关键生育期对积温的需求及叶面积系数动态和积温的关系模型。李立昆等^[14]建立了基于有效积温的早春设施厚皮甜瓜果实发育模型。杨再强等^[15]建立了以生理辐射热积(PTEP)为尺度的温室

标准切花菊发育模型,并用独立的试验数据对模型进行了检验。有的学者基于生理发育时间,构建了作物发育模型。张培新等^[16]采用生理发育时间作为定量发育进程的尺度,建立了温室番茄发育模拟模型。袁昌梅等^[17]建立了以生理发育时间为基础的温室甜瓜发育过程模拟模型,并利用不同播期、地点和品种的试验资料对模型进行了检验,证明模拟符合度较好。除此之外,还有学者利用发育单位的正弦指数函数法,并将该方法成功应用于预测植物花期及气候环境变化对植物花期的影响^[18-19]。李萍萍等^[20]也利用正弦指数模型探讨了黄瓜在各个生长阶段发育速率与温度的关系,并得到了较好的模拟效果。

作物生育期的研究实际上就是探讨作物生长发育与环境条件的关系^[21-22],也就是说研究环境条件对于作物发育的影响。在一定程度上,时间尺度更小、更为精细的环境温度条件也就更能细致的反映出其对作物生长发育的影响。然而,目前在这方面的研究尚不多见。基于此,该研究利用3种不同粒度的有效积温数据来模拟温室黄瓜的发育期,探讨不同粒度积温算法对黄瓜生长发育模拟效果的优劣及其影响,以期温室作物模拟模型的选择提供一定的基础依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试黄瓜品种为“津优35”,试验地点位于天津市农业科技创新基地日光温室(东经116.97°,北纬39.43°),具体温室建筑参数见表1。

第一作者简介:陈跃浩(1988-),男,硕士,助理工程师,现主要从事农业气象等研究工作。E-mail:chenyuehao888@163.com.

责任作者:黎贞发(1964-),男,本科,研究员级高级工程师,现主要从事设施农业气象等研究工作。E-mail:lzfaaa@126.com.

基金项目:天津市科技计划资助项目(13ZCZDNC00300);科技部公益性行业专项资助项目(GYHY201306039)。

收稿日期:2016-02-15

表 1

温室建筑参数

Table 1

Construction parameters of greenhouse

墙体材料 Wall materials	后墙高 Height of the back wall/m	后墙厚 Thickness of the back wall/cm	侧墙厚 Thickness of the side wall/cm	脊高 Height/m	后屋面仰角 Angle of back roof/(°)	前屋面角 Angle of front roof/(°)	跨度 Span/m	长度 Length/m	温室面积 Area/m ²
砖 Brick	3.7	50.0	50.0	5.3	44.0	32.0	10.0	65.0	650.0

1.2 试验方法

试验采用随机区组设计,分3个播种期,每个播期设置3次重复,播期分别为早播:早于当地春茬常规平均种植播期18 d(2013年1月18日);中播:当地常规平均种植日期(2013年2月5日);晚播:晚于当地常规平均种植日期25 d(2013年3月2日)。同时,在温室中部安装小气候观测站,对气温、湿度、辐射等要素进行平行观测。其中早播和晚播观测数据用于模型建立,中播观测数据用于模型检验。

1.2.1 黄瓜生育阶段的划分 根据黄瓜生物学特性,结合栽培经验及相关文献资料^[23],将黄瓜的整个生长过程划分为5个生育阶段,经试验观测得到各个生育期相应的形态特征,见表2。

1.2.2 黄瓜发育模型的建立 该研究基于有效积温法^[24],采用不同粒度的有效积温,即日有效积温、小时有

效积温和10 min有效积温分别模拟温室黄瓜的生长发育情况。研究发现,用有效积温法虽有一定的局限性,但由于其预测作物发育期具有简单易操作的特点,模型的输入变量只有温度,计算公式简单^[25]。在一定情况下,用有效积温法来预测作物的生育期也不失为行之有效的方法。有效积温法的公式如下:

$$A_d = \sum_{i=n_1}^{n_2} (T_{di} - T_b) \quad (1),$$

$$A_h = \sum_{i=n_1}^{n_2} (T_{hi} - T_b) \quad (2),$$

$$A_m = \sum_{i=n_1}^{n_2} (T_{mi} - T_b) \quad (3),$$

$$T_{di}(T_{hi}, T_{mi}) = \begin{cases} T_b & (T_{di} < T_b) \\ T_{di} & (T_b \leq T_{di} \leq T_m) \\ T_m & (T_{di} > T_m) \end{cases} \quad (4),$$

$$R_i = \frac{(\bar{T} - T_b)}{A} = K(\bar{T} - T_b) \quad (5),$$

式中, n_1, n_2 为某一生育期起始与结束日期; T_{di}, T_{hi}, T_{mi} 分别为生育期内某日平均温度、小时平均温度和10 min平均温度; R_i 为某生育期内的发育速率; \bar{T} 为生育期内平均温度; T_b 为某生育期内发育下限温度; T_m 为某生育期内发育上限温度; K 为常数。根据相关文献资料^[26-28],黄瓜不同生育期的下限和上限温度见表3。

表 2 黄瓜各个生育期的形态特征

Table 2 Morphologic feature of cucumber at different development stages

温室黄瓜生育时期 Development stage of cucumber in greenhouse	形态特征 Morphologic feature
苗期 Seedling stage	从播种到第2片真叶完全展开
定植期 Transplanting stage	幼苗定植至第1雌花出现大蕾
开花坐果期 Flowering and fruit setting stage	第1雌花出现大蕾至第1个果实达到采收标准
采收期 Harvesting stage	从腰瓜到顶瓜先后大量采收
采收末期 Latest harvesting stage	果实成熟缓慢并出现植株老化及拉秧

表 3

黄瓜各生育期的下限和上限温度

Table 3

Minimum and maximum temperature of cucumber at different development stages

℃

温度 Temperature	苗期 Seedling stage	定植期 Transplanting stage	开花坐果期 Flowering and fruit setting stage	采收期 Harvesting stage	采收末期 Latest harvesting stage
下限温度 Minimum temperature	10	13	14	16	16
上限温度 Maximum temperature	35	40	40	40	40

1.3 项目测定

自定植之日起每隔15 d观测1次,分为定株观测和取样观测。定株观测:每播期选择长势良好的植株15株,测定的植物生态参数主要包括株高、叶片数、茎节数、开花数、结果数等数据。取样观测:每播期各选择长势处于均态的3株黄瓜植株进行取样,要求植株长势正常,分布均匀,避免取样后破坏原有种植密度,观测的项目同定株观测。温室内小气候观测选用DZN1型小气候观测仪,产地为天津市气象仪器厂,温度观测分辨率为±0.2℃,测量范围-40~50℃。

2 结果与分析

2.1 黄瓜各生育阶段温室内气温的比较

由图1可以看出,黄瓜在苗期温室内的温度变化是最大的,其最低温度甚至低于黄瓜发育的下限温度,说明处在苗期的黄瓜受到了一定程度低温的影响。与中播、晚播相比,早播的黄瓜处在低温的时段要长一些,主要是由于受播种时间的影响,中播和晚播的黄瓜分别是在2月上旬和3月上旬,此时温度有所回升,相比处于1月中旬播种的早播黄瓜受低温的影响要轻一些。另外,黄瓜开花坐果期温室内的温度变化幅度较小,基本

都处在发育的下限温度之上,从而能为黄瓜后期的坐果和采收提供充足的热量条件。采收末期温室内温度的

变化幅度是最小的,各时段温度都处在发育下限和上限温度之间。

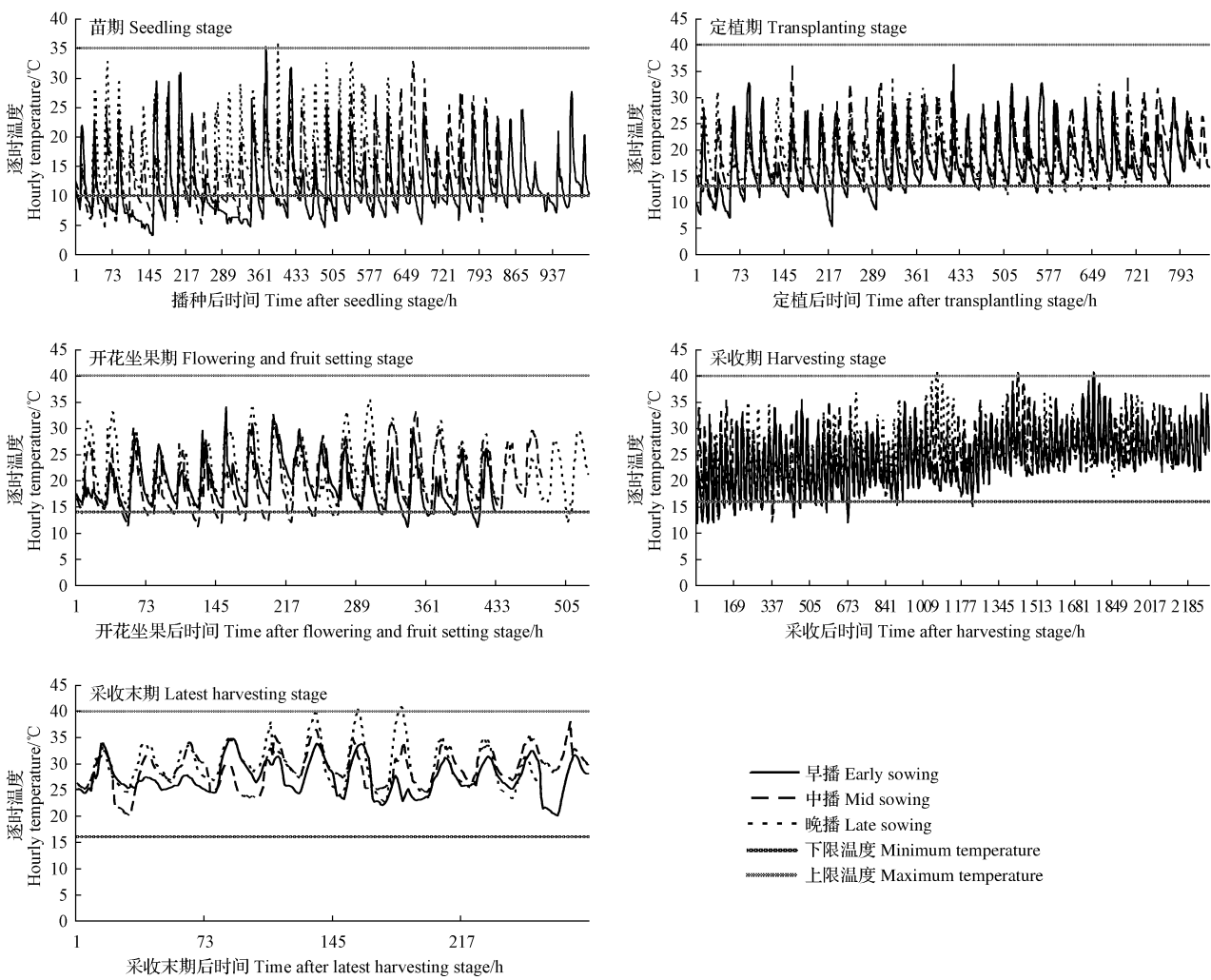


图 1 各生育阶段温室内逐时温度变化

Fig.1 Variation of hourly temperature changes in greenhouse at different development stages

2.2 模拟结果的检验

利用公式(1)~(3),计算出各生育期内的有效积温。为了获得黄瓜在各生育期内的 K 值,将早播和晚播 2 个播期的黄瓜在不同发育阶段的有效积温的平均值作

为黄瓜各生育期的 A 值,利用公式(5)得到黄瓜在不同生育阶段的发育常数 K(表 4)。再利用中播黄瓜的生育期数据来检验模型的模拟结果。

表 4 温室黄瓜在各生育期内不同粒度的有效积温

生育期 Development stage	日积温 Effective accumulated temperature of days/(℃·d)				小时积温 Effective accumulated temperature of hours/(℃·h)				10 min 积温 Effective accumulated temperature of 10 minutes/(℃·10min)			
	早播 Early sowing		晚播 Late sowing		早播 Early sowing		晚播 Late sowing		早播 Early sowing		晚播 Late sowing	
	Average		Average		Average		Average		Average		Average	
	K value		K value		K value		K value		K value		K value	
苗期 Seedling stage	84.12	188.68	136.40	7.33×10^{-3}	2 681.37	4 584.64	3 633.01	6.61×10^{-3}	16 140.00	27 513.36	21 826.68	6.60×10^{-3}
定植期 Transplanting stage	155.60	204.76	180.18	5.55×10^{-3}	3 988.98	4 937.07	4 463.03	5.38×10^{-3}	23 955.56	29 627.90	26 791.73	5.37×10^{-3}
开花坐果期 Flowering and fruit setting stage	100.71	176.07	138.39	7.23×10^{-3}	2 447.57	4 237.71	3 342.64	7.18×10^{-3}	14 693.89	25 436.55	20 065.22	7.18×10^{-3}
采收期 Harvesting stage	775.75	823.88	799.815	1.25×10^{-3}	18 819.31	19 775.2	19 297.26	1.24×10^{-3}	112 937.05	118 652.10	115 794.60	1.24×10^{-3}
采收末期 Latest harvesting stage	137.58	149.90	143.74	6.96×10^{-3}	3 301.86	3 597.72	3 449.79	6.96×10^{-3}	19 811.15	21 586.30	20 698.73	6.96×10^{-3}

由表 5 可以看出,3 种方法模拟的结果均是苗期的误差最大,采收末期的误差最小,RMSE(标准误差)苗期为 12.4 d,采收末期为 1 d。这反映出气温波动变化较大对于有效积温法模拟结果的影响。相关研究指出^[24],有效积温法预测作物发育存在的问题就是不稳定性不高,这种不稳定主要表现在温室内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如何影响植物的生长速率。由于采收末期温室内气温的波动较小,因此模拟的结果也相对较好。

表 5

不同粒度积温算法模拟结果的比较

Table 5

Variation of simulation results of different granularities accumulated temperature

d

生育期 Development stage	日积温 Effective accumulated temperature of days/($^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$)			小时积温 Effective accumulated temperature of hours/($^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}$)			10 min 积温 Effective accumulated temperature of minutes/($^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{min}$)			标准误差 RMSE
	实测值	模拟值	误差	实测值	模拟值	误差	实测值	模拟值	误差	
	Simulated	Measured	Error	Simulated	Measured	Error	Simulated	Measured	Error	
苗期 Seedling stage	35	43	-8	35	48	-13	35	50	-15	12.4
定植期 Transplanting stage	35	30	5	35	31	4	35	31	4	4.4
开花坐果期 Flowering and fruit setting stage	20	24	-4	20	24	-4	20	24	-4	4.0
采收期 Harvesting stage	91	88	3	91	88	3	91	88	3	3.0
采收末期 Latest harvesting stage	12	11	1	12	11	1	12	11	1	1.0
平均误差 Average error	—	—	-0.6	—	—	-1.8	—	—	-2.2	—

3 结论与讨论

基于有效积温法,利用 3 种不同粒度的有效积温数据,模拟了温室黄瓜的生长发育。通过分析发现,在黄瓜的整个生育期内,苗期温室内气温波动较大,最高温和最低温甚至超出了黄瓜生长发育的上限和下限温度。而由于有效积温法的局限性,对于作物处在发育的最适上下温度之外的时期,难以预测温度对于作物生长的影响。因此,从模拟的结果上可以看到,苗期的模拟误差相对较大,日积温算法的模拟误差为-8 d,小时积温算法的误差为-13 d,10 min 积温算法的误差为-15 d, RMSE 为 12.4 d。而温室内气温波动相对较小的采收末期,模拟结果的误差为最小的 1 d。

3 种不同粒度的积温算法,其模拟结果日积温法模拟的误差最小,平均误差为-0.6 d;其次是小时积温法,平均误差为-1.8 d;10 min 积温模拟的误差最大,为-2.2 d。这说明用有效积温法来模拟作物生育期的时候,使用日有效积温来作为模型的输入,其模拟结果反而更好。从对不同生育期的模拟上来看,3 种粒度的积温算法给出的结果比较一致,均是对于苗期的模拟最差,对于采收末期的模拟最好。与张培新等^[16]的研究结果一致。这是因为由于日光温室调控能力差,温室内温度日变化幅度大,特别是夏季高温和冬季低温很难调控到作物生长发育的适宜温度^[29]。因此,利用有效积温法预测作物生育期在冬、夏季的时候往往误差较大^[30-31]。3 种粒度的积温算法在对于除苗期之外的其余生育期进行模拟时,其结果基本一致,没有表现出来差异,定植期

从 3 种粒度的积温算法的模拟结果来看,日积温法模拟的误差最小,平均误差为-0.6 d;其次是小时积温法,平均误差为-1.8 d;10 min 积温模拟的误差最大,为-2.2 d。在使用有效积温法对作物生育期进行模拟的时候,对于时间尺度更小、更能充分反映温室内昼夜温度变化的小时积温和 10 min 积温,其最后的模拟结果并没有出现好于日积温模拟的情况。这也在一定程度上说明,用有效积温法模拟作物生育期的时候,使用日有效积温来作为模型的输入,其模拟结果更好。

误差为 5 d 和 4 d,开花坐果期为-4 d,采收期为 3 d,采收末期为 1 d。这说明有效积温法对于不同粒度的积温敏感性不强,而对于昼夜温度变化比较敏感,模拟结果产生影响。

该研究在一定程度上反映出了不同粒度积温算法对于温室黄瓜生育期模拟的影响,但是在实际生产中作物还受到品种遗传特性、温室结构、灌水施肥等因素的影响,要进一步提高模型对温室黄瓜生长发育期的预测精度,需要考虑或排除这些因素的影响。除此之外,还需采用其它作物模型来对温室黄瓜生育期进行模拟,综合比较不同模型模拟结果的优劣,在提高模拟精度的同时进一步探究不同粒度积温对黄瓜生育期模拟的效果。关于作物模型在不同地区不同温室结构的普适性也有待于验证。

参考文献

- [1] CURRY R B. Dynamic simulation of plant growth. I. Development of a model[J]. ASAE Trans, 1971, 14(5): 946-959.
- [2] MONTIETH J L. The quest for balance in modeling[J]. Agronomy Journal, 1996, 88: 695-697.
- [3] SINCLAIR T R, SELIGMAN N G. Crop modeling: from infancy to maturity[J]. Agronomy Journal, 1996, 88: 698-704.
- [4] de WIT C T, BROUWER R, PENNING de VRIES F W T. The simulation of photosynthetic systems[C]//Setlik I. Prediction and management of photosynthetic productivity. Wageningen, The Netherlands: PUDOC, 1970: 47-70.
- [5] de WIT C T. Simulation of assimilation, respiration and transpiration of crops[M]. New York: Wiley, 1978.
- [6] JONES C A, KINIRY J R, DYKE P T. CERES-Maize: A simulation

model of maize growth and development[M]. College Station: Texas A & M University Press, 1986.

[7] RITCHIE J T, ALOCJIA E C, UEHARA G. IBSNAT/CERES rice model[J]. Agrotechnology Transfer, 1986, 3: 1-5.

[8] RITCHIE J R, OTTER S. Description and performance of CERES-Wheat: a user-oriented wheat yield model[J]. ARS-United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service, 1985: 159-175.

[9] HOOGENBOOM G, JONES J W, BOOTE K J. Modeling growth, development, and yield of grain legumes using SOYGRO, PNUTGRO, and BEANGRO: A review[J]. Trans ASAE, 1992, 35(6): 2043-2056.

[10] MCCOWN R L, HAMMER G L, HARGREAVES J N G, et al. APSIM: a novel software system for model development, model testing and simulation in agricultural systems research[J]. Agricultural Systems, 1996, 50(3): 255-271.

[11] 陈杰. 中国温室作物模型研究状况[J]. 中国农机化, 2012(2): 29-32.

[12] 谢祝捷, 陈春宏, 赵京音. 自控温室黄瓜生长发育动态及基于有效积温的发育模型研究[J]. 上海农业学报, 2007, 23(2): 46-49.

[13] 李向岭, 赵明, 李从峰, 等. 玉米叶面积系数动态特征及其积温模型的建立[J]. 作物学报, 2011, 37(2): 321-330.

[14] 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发育模拟模型[J]. 北方园艺, 2010(6): 97-100.

[15] 杨再强, 罗卫红, 陈发棣, 等. 温室标准切花菊发育模拟与收获期预测模型研究[J]. 中国农业科学, 2007, 40(6): 1229-1235.

[16] 张培新, 贺超兴, 张志斌, 等. 基于生理发育时间的日光温室番茄发育模拟模型[J]. 中国农业气象, 2006, 27(4): 314-317.

[17] 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.

[18] LIANCOURT P, LAURA A S, BAZARTSEREN B, et al. Vulnerability of the northern Mongolian steppe to climate change: Insights from flower

production and phenology[J]. Ecology, 2012, 93: 815-824.

[19] CHRISTOPH R, PETER P. Land use affects flowering time: Seasonal and genetic differentiation in the grassland plant Scabiosa Columbaria[J]. Evolutionary Ecology, 2009, 23(5): 753-764.

[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, 2009, 30(4): 325-329.

[21] 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.

[22] 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.

[23] 唐卫东, 李萍萍, 卢章平, 等. 现代温室黄瓜发育动态模型研究[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(21): 6421-6422.

[24] 曹元鑫, 毕延刚, 李娟起, 等. 温室黄瓜发育期模拟模型的检验[J]. 中国农业大学学报, 2014, 19(3): 145-153.

[25] 倪纪恒, 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.

[26] 时小红, 高申军, 徐迅超. 水果型黄瓜高产栽培技术[J]. 河南农业科学, 2002, 1(1): 36.

[27] 王莹, 刘书亭, 杨振山, 等. 荷兰微型黄瓜日光温室秋冬茬栽培技术[J]. 中国蔬菜, 2004, 1(1): 49-50.

[28] 张振贤. 蔬菜栽培学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2003: 142-143.

[29] 陈双臣, 贺超兴, 张志斌. 适合塑料大棚番茄越夏长季节高产栽培品种特性比较[J]. 华北农学报, 2003, 18(增): 81-85.

[30] 严美春, 曹卫星, 李存东, 等. 小麦发育过程及生育期机理模型的检验和评价[J]. 中国农业科学, 2000, 33(2): 43-50.

[31] 张立桢, 曹卫星, 张思平, 等. 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.

Comparison of Effective Accumulated Temperature of Different Granularities in Simulating Development Stage of Cucumber in Greenhouse

CHEN Yuechao, XUE Qingyu, LI Zhenfa, LIU Shumei, LI Chun, GONG Zhihong
(Tianjin Climate Center, Tianjin 300074)

Abstract: According to the effective accumulated temperature (EAT) method, the growth and development of cucumber was simulated based on three different granularities temperature data in greenhouse. The results showed that the simulation error of seedling stage was maximum, the root mean square error (RMSE) was 12.4 days, the error of latest harvesting stage was minimum, RMSE was 1 days. Comparison of effective accumulated temperature of different granularity in simulating, the simulated error of effective accumulated temperature of days was minimum, the average error was -0.6 days; the effective accumulated temperature of hours was -1.8 days; the simulated error of effective accumulated temperature of 10 minutes was maximum, the average error was -2.2 days. This showed that the method of effective accumulated temperature was simulated in development stage of crops, the effective accumulated temperature of days was used of simulating in development stage of crops, the simulation result was better. In addition, three granularities of effective accumulated temperature were simulated in different development stages of cucumber, the simulation results of the development stages were basically identical except seedling stage, no obvious difference was showed. The error of transplanting stage was 5 days and 4 days, the flowering and fruit setting stage was -4 days, the harvesting stage was 3 days, and the latest harvesting stage was 1 days. Therefore, the method of effective accumulated temperature was not sensitive to different granularities accumulated temperature, and it was sensitive to change of diurnal temperature.

Keywords: granularity; effective accumulated temperature; cucumber; development stage; simulation