

基于有效积温早春设施厚皮甜瓜果实发育模拟模型

李立昆¹, 李玉红¹, 程智慧¹, 杜军志¹, 司立征²

(1. 西北农林科技大学 园艺学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要 采用相关分析法分别确立了早春设施厚皮甜瓜果实横径、纵径、果实鲜重、干重、果肉厚度、果实含水量与果实发育有效积温的相关关系, 建立最优回归方程。结果表明: 模型能较好地对甜瓜果实横径、纵径、果实鲜重、干重、果肉厚度和果实含水量进行模拟; 模拟值与观测值回归估计标准误差(RMSE)分别为: 0. 6166 cm、0. 5088 cm、5. 874 g、8. 7748 g、0. 1423 cm 和 0. 9529%; 模型对早春设施厚皮甜瓜果实横径、纵径、果实鲜重、干重、果肉厚度和果实含水量的模拟值与实测值符合度较好, 实用性较强。

关键词: 厚皮甜瓜; 果实发育; 有效积温; 模拟模型

中图分类号: S 652. 4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001- 0009(2010)06- 0097- 04

甜瓜喜温耐热, 尤其结果期对温度要求严格, 所需积温占全生育期 40%~ 50% 以上^[1]。有研究表明, 果实的生长速度与温度之间呈很显著的正相关^[2-3], 温室小气候尤其是温度对甜瓜果实发育影响较大。温度对作物生长和果实发育的影响, 已经在许多植物上做过报道, 如贺超兴、齐维强等在基于积温的温室番茄果实发育规律的研究^[9], 但在甜瓜上的报道不多。国外利用有效积温理论对甜瓜的研究有一些报道^[36], Baker 系统研究了温度对甜瓜生长发育与产量的影响, 并建立了简单的模型^[9]; 国内对甜瓜模型的研究多集中在对其生长发育、产量形成以及生育期的模拟预测方面^[78], 但在甜瓜果实发育模拟模型方面的相关研究尚未见报道。早春设施栽培是厚皮甜瓜栽培的主要茬次, 试验依据作物生长发育有效积温恒定的原理^[19], 结合对厚皮甜瓜果实发育的动态观测, 旨在构建基于有效积温的早春厚皮甜瓜果实发育模拟模型, 用以指导温室生产, 为甜瓜果实发育提供理论依据和数据支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料

陕西关中地区早春设施条件下主栽厚皮甜瓜品种

“一品天下 108”、“西甜 208”, 种子购买于杨凌千普种业公司。

1.2 试验方法

于 2008 年 2~ 5 月在陕西杨凌官村进行分期播种试验。供试品种: “一品天下 108”。试验安排 3 个播期, 第一播期依据当地气候条件于 2 月 19 日催芽后播于穴盘, 以后每隔 7 d 播一期。当幼苗长到第 4 片真叶完全展开时定植于简易塑料大棚。栽植密度 1 200 株/ 667 m², 株距 0. 5 m, 行距 1 m。随机区组排列, 3 次重复, 小区面积 10. 05 m²。种植方式为双蔓整枝, 爬地栽培, 孙蔓留瓜, 1 蔓 1 瓜。3 个播期均采用基本相同的栽培管理措施。

验证试验于 2009 年 2~ 6 月在陕西省西安市阎良区西北农林科技大学甜瓜试验示范站进行。品种选择“西甜 208”。2009 年 2 月 18 日播种, 3 月 20 日定植于常规钢架棚(50 m×8 m)。栽植密度为 2 200 株/ 667 m², 株距 0. 4 m, 行距 0. 75 m。种植方式为单蔓整枝, 吊蔓栽培, 1 蔓 1 瓜, 主蔓 24~ 26 节打顶。按照一般生产进行栽培和管理。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 环境数据的获取及处理 环境数据的获取利用河北邯郸仪器有限公司生产的温光湿三位一体小气象站自动采集。频率为 60 min / 次。采集后的温度数据先整理成日平均温度再计算甜瓜的有效积温, 即某生育期积累的有效积温为从播种期到该生育期结束时每日环境平均温度减去 15 所得的期间有效温度的总和^[18]; 利用 EXCEL 和 DPS 软件进行绘图和统计分析。

1.3.2 果实发育数据的获取 于授粉期开始对生长一致的雌花统一授粉, 授粉后对已确定坐果雌花进行挂牌

第一作者简介: 李立昆(1983), 男, 甘肃兰州人, 在读硕士, 现从事蔬菜栽培生理生态研究工作。

通讯作者: 李玉红(1973), 女, 副教授, 硕士生导师, 现从事蔬菜栽培生理生态科研与教学工作。E-mail: liyuhong73@126.com。

基金项目: “十一·五”国家科技支撑资助项目(2007BAD79B04-06)。

收稿日期: 2009- 12- 20

标记。此后每隔 5 d 用游标卡尺对果实纵横径进行测量; 果实鲜重、干重、果肉厚度系对果实每隔 5 d 进行破坏性取样, 每次随机取 3 个果实。采下后先用精度为 0.01 g 的天平称量果实鲜重; 然后平均切开 2 半, 用游标卡尺测量果腔大小, 计算果肉厚度; 另一半于 105 °C 烘箱中杀青 30 min, 于 75 °C 下烘至恒重, 称重, 换算全果干重; 计算果实含水量。

1.4 模型描述

试验采用常用的生长度日法^[8], 即用实际环境条件下, 完成某一生育阶段所经历的累积有效积温值(Effective accumulated temperature, EAT)来表示。

生长度日的表示方法: $EAT = \sum_{i=1}^n (T_i - T_b)(1)$ 。

式中: n — 某生育阶段总天数(d); T_i — 第 i 天日平均温度(°C); T_b — 设施甜瓜果实生长下限温度。

为了方便在模型中描述, 分别用 FD 表示果实横径, FLD 表示果实纵径, FW 表示果实鲜重, FDW 表示果实干重, PT 表示果肉厚度, FWC 表示果实含水量。

1.5 模型验证

用回归估计标准误差(Root Mean Square Error, RMSE) 对模拟值和实测值之间的符合度进行统计分析^[9]。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (OBS_i - SIM_i)^2}{n}} \quad (2)。$$

式中: OBS_{*i*}— 实测值; SIM_{*i*}— 模型模拟值; n — 样本容量。RMSE 值越小, 表明模拟值与实测值的一致性越好, 模拟值与实测值之间的偏差越小, 即模型的模拟结果越准确、可靠。因此, RMSE 能够很好的反映模型的预测精度。

2 结果与分析

2.1 甜瓜果实发育过程模拟

2.1.1 甜瓜果实纵横径、纵径与有效积温的相关关系建立 将 2008 年 3~ 6 月果实横径、纵径测量数据按测定间隔累积有效积温绘制成图(图 1, 2)。结果表明, 果实横径、纵径的动态变化与有效积温的关系均符合一次线性函数关系。相关系数分别达到 0.9565 和 0.9411。得出甜瓜果实横径、纵径与果实发育阶段有效积温回归关系为:

$$FD = 0.05 \times EAT - 9.3619 \quad R^2 = 0.9565 \quad (3);$$

$$FLD = 0.0525 \times EAT - 9.3264 \quad R^2 = 0.9411 \quad (4)。$$

2.1.2 甜瓜果实鲜重、干重与有效积温的相关关系建立 将 2008 年 3~ 6 月果实鲜重、干重测定数据按测定间

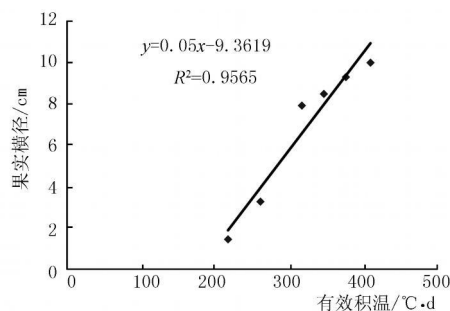


图1 果实横径和有效积温关系图

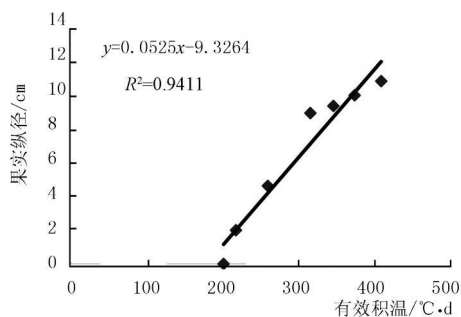


图2 果实纵径和有效积温关系图

隔累积有效积温绘制成图(图 3, 4)。可知, 果实鲜重、干重的动态变化与有效积温的关系均符合二次多项式函数关系。相关系数分别达到 0.9939 和 0.9924。得出甜瓜果实鲜重、干重与果实发育阶段有效积温回归关系为:

$$FW = 0.0151 \times EAT^2 - 6.1331 \times EAT + 617.47 \quad R^2 = 0.9939 \quad (5);$$

$$FDW = 0.0028 \times EAT^2 - 1.3444 \times EAT + 161.24 \quad R^2 = 0.9924 \quad (6)。$$

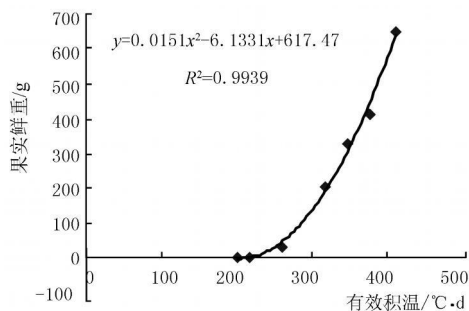


图3 果实鲜重和有效积温关系图

2.1.3 甜瓜果肉厚度、果实含水量与有效积温的相关关系建立 将 2008 年 3~ 6 月果肉厚度、果实含水量测定数据按测定间隔累积有效积温绘制成图(图 5, 6)。果肉厚度和果实含水量的动态变化与有效积温的关系均符

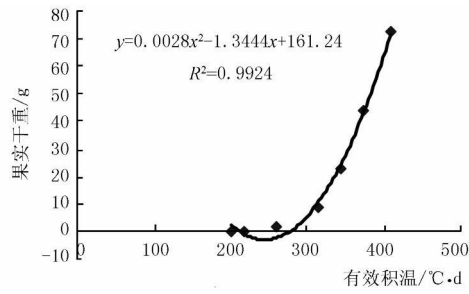


图4 果实干重和有效积温关系图

合对数函数关系。相关系数分别达到 $R^2 = 0.9892$ 和 0.9004 。得出甜瓜果肉厚度、果实含水量与果实发育阶段有效积温回归关系为:

$$PT = 3.613 \times \ln(EAT) - 19.185$$
$$R^2 = 0.9892 \tag{7};$$

$$FWC = -13.296 \times \ln(EAT) + 168.35$$
$$R^2 = 0.9004 \tag{8}。$$

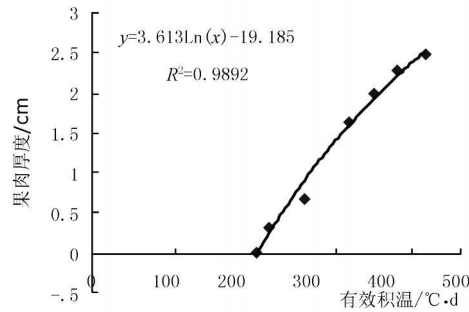


图5 果实厚度和有效积温关系图

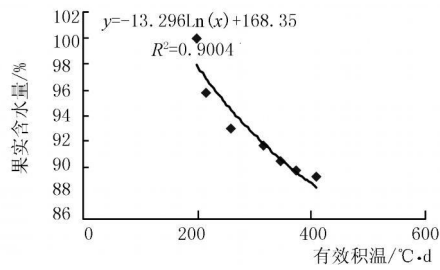


图6 果实含水量和有效积温关系图

2.2 模型验证

利用与建模相对独立的试验数据对模型进行检验。首先依据“西甜 208”果实发育阶段的有效积温, 根据公式(3)~ (8), 反演计算出“西甜 208”果实的纵横径、鲜重、干重、果肉厚度及果实含水量, 即为模拟值。然后对果实发育的模拟值与与实际观测值进行 1: 1 作图。从观测值与模拟值所反映出来的线性关系可以看出, 模拟值与观测值具有较好的一致性, 显示了较为平行的变化趋

势。直线的斜率均接近于 1, 截距大部分接近于 0。相关系数均接近于 1(表 1)。甜瓜果实横径、纵径、果实干重、鲜重、果肉厚度和果实含水量的模拟值与实测值之间的回归估计标准误分别为: 0.6166 cm、0.5088 cm、5.874 g、8.7748 g、0.1423 cm 和 0.9529%, 说明模型可较准确的模拟基于有效积温的甜瓜果实相关生长发育进程。

表1 甜瓜果实发育模拟值与实测值比较

模拟项目	模拟值与观测值 相关函数式	相关系数	实测值	模拟值	误差	RSME
果实横径	$y = 1.0685x - 0.4219$	$R^2 = 0.9727$	5.87	5.62	0.25	0.61
果实纵径	$y = 1.1743x - 1.0196$	$R^2 = 0.9443$	7.50	7.40	0.10	0.50
果实干重	$y = 1.1388x - 0.7368$	$R^2 = 0.9968$	26.30	30.68	4.38	5.87
果实鲜重	$y = 1.0119x + 0.337$	$R^2 = 0.9965$	267.90	270.32	2.42	8.77
果肉厚度	$y = 1.0226x - 0.0585$	$R^2 = 0.9728$	1.57	1.54	0.03	0.14
果实含水量	$y = 1.2341x - 21.198$	$R^2 = 0.9426$	92.25	92.65	0.40	0.95

3 结论与讨论

近年来, 对甜瓜的模拟模型研究多集中在其生长发育、干物质分配、产量形成等方面^[2,4,7,8], 而对其与关键生境因子如环境温度相关关系研究鲜有报道。试验研究甜瓜果实发育与其相应阶段有效积温的关系表明, 甜瓜果实生长发育阶段的有效积温与果实纵横径、果实鲜重、干重及果实含水量有一定的相关关系, 与果实纵横径呈一次线性函数关系; 与果实鲜重、干重呈二次抛物线函数关系; 与果肉厚度、果实含水量呈对数函数关系。

采用有效积温建模, 比较简单易算, 在作物生产中环境温度处于作物最适宜温度时(此时作物发育与温度呈线性关系), 有效积温法不仅能准确预测作物的发育速率, 而且具有简单易操作的特点^[7]。如施泽平等^[8]建立了基于生长度日的温室甜瓜发育模拟模型; 吴孔明等^[10]建立了棉花生育的积温模拟模型; 张立祯、曹卫星等^[11]建立了基于生理发育时间的棉花生育期模拟模型; 谢祝捷等^[12]建立了基于有效积温的温室黄瓜生长发育模拟模型。试验基于有效积温对早春设施厚皮甜瓜果实发育进程进行了模拟。陕西地区早春甜瓜均在 3 月中旬左右定植于设施条件下, 在此期间温室 10 cm 地温稳定在 15℃以上, 环境最低温度不低于 13℃; 在早春设施条件下, 根据设施温度自动记录仪的记载数据, 甜瓜生长发育的温度均在最适温度之内。因此该试验中甜瓜生长发育的环境温度基本均在最适温度范围内, 符合有效积温对作物生长发育的模拟原则。

试验利用不同播期数据建模, 已考虑了温度对甜瓜果实发育的影响因素。同时利用不同品种、不同地域试验数据对模型进行验证, 这又提高了模型的普适性。模型检验结果表明, 模型能较好地模拟甜瓜果实横径、纵径、果实鲜重、干重、果肉厚度和果实含水量。模拟值与

观测值的回归估计标准误差(RMSE) 分别为: 0.6166 cm、0.5088 cm、5.874 g、8.7748 g、0.1423 cm 和0.9529%。因此所建回归模型能较好的模拟甜瓜果实发育相关进程。

借鉴前人研究结果^[2-8], 课题组还将利用不同品种、不同季节、不同播期试验数据对模型进行全面验证, 以提高模型的精确性。其它影响甜瓜果实发育的关键生境因子, 如光照、水分、施肥水平等对甜瓜品质形成也有重要的调控作用。今后还需要深入研究甜瓜果实发育与其它关键生境因子的关系, 系统探索调节甜瓜果实发育的影响因子, 努力实现人为控制甜瓜果实发育的形成过程。

参考文献

- [1] 李佳文, 张愚, 蒋先明, 等. 蔬菜栽培学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 247-248.
- [2] Jennis S, Stewart K A, Bourgeois G, et al. Predicting yield and time to maturity of muskmelons from weather and crop observations[J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 1998, 123(2): 195-201.
- [3] Pardossi A, Giacom P, Malorgio F, et al. The influence of growing season on fruit yield and quality of greenhouse melon (*Cucumis melo* L.) grown in nutrient film technique in an editerranean climate[J]. Journal of Horticultural Science and Biotechnology, 2000, 75(4): 488-493.
- [4] Ivarra L, Flores J, Carlos J. Growth and yield of muskmelon in response to plastic mulch and row covers[J]. Scientia Horticulturae, 2001, 87(5): 615-621.
- [5] Onsinejad R, Abak K. Determinations of a suitable formula for the calculation of sum growing degree days in water melon (*Citrullus lanatus*) (Thumb.) Mansf)[J]. Acta Horticulturae, 1999, 492: 297-302.

- [6] Baker D N. GOSSYM: A Simulator of cotton Crop dynamics. In: Computers Applied to the Management of Large-Scale Agricultural Enterprises. Proc VSA-VSSR Seminar, Moscow, KiShinev, 1976: 109-123.
- [7] 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(02): 262-267.
- [8] 施泽平, 郭世荣, 康云艳, 等. 基于生长度日的温室甜瓜发育模拟模型的研究[J]. 南京农业大学学报, 2005, 28(2): 129-132.
- [9] 贺超兴, 齐维强, 张志斌. 基于积温的温室番茄果实发育规律研究[D]. 中国农业科学研究院, 2004: 285-291.
- [10] 吴孔明, 刘孝纯. 棉花生育的积温模型[J]. 华北农学报, 1996, 11(2): 74-80.
- [11] 张立祯, 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.
- [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] 李永秀, 罗卫红, 等. 温室黄瓜生育期模拟模型的研究[J]. 南京气象学院学报, 2008, 32(2): 31-38.
- [14] 刘辉. 新疆特早熟棉花生长发育动态与有效积温关系研究[J]. 安徽农学通报, 2009, 15(3): 123-124.
- [15] 倪纪恒, 罗卫红, 李永秀, 等. 温室番茄叶面积与干物质生产的模拟[J]. 中国农业科学, 2005, 38(8): 1629-1635.
- [16] 任鹤麒, 王瑞芳, 等. 番茄果实膨大与气象条件的关系[J]. 中国农业气象, 1995, 16(6): 7-18.
- [17] 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]. 西北农林科技大学, 2004.
- [18] 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.
- [19] 马瑞霞, 刘文成, 魏志华. 厚皮甜瓜日光温室早春高效栽培[J]. 上海蔬菜, 2003(6): 32.

Simulation Model of Muskmelon Fruit Development in Early Spring Protected Cultivation Based on Effected Accumulated Temperature

LI Likun¹, LI Yuhong¹, CHENG Zhihui¹, DU Junzhi¹, SI Lizhen²

(1. College of Horticulture, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100; 2. College of Resource and Environment, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: Using correlation analysis methods respectively definite the correlativity between the process of melon's fruit development on diameter, longitudinal diameter, fruit weight, fruit dry weight, pulp thickness, fruit water content and the effected accumulated temperature and establish the optimal regression equation in early spring. The models were validated by different areas and different varieties. The results showed predicted results were agreed well with the actual ones. RMSE for fruit diameter, fruit longitudinal diameter, fruit weight, fruit dry weight, pulp thickness, fruit water content were 0.6166, 0.5088, 5.874, 8.7748, 0.1423 cm and 0.9529% respectively. The established models were applicable and could provide theoretical basis and decision support for the melon's quality formation in early spring.

Key words: muskmelon; fruit development; effected accumulated temperature; stimulation model