

温室水果黄瓜叶片扩展及干物质再分配动态模拟模型

周 静, 王纪章, 李萍萍, 赵青松

(江苏大学 现代农业装备与技术省部共建教育部重点实验室 江苏 镇江 212013)

摘 要:以荷兰“碧玉”水果黄瓜为试材,建立叶片扩展与累积生长度日之间的关系模型,研究基于器官发育模型的干物质再分配过程,确定了不同植株叶龄、不同位置的叶片获得干物质量模拟模型,并对所构建的干物质再分配模型进行了验证分析。结果表明:叶龄为 4、13 和 20 叶龄器官干物质重模拟值和测量值之间的均方差误差 $RMSE$ 分别为 0.009、0.011 和 0.107,模型模拟结果与试验观测值具有较好的一致性,模型达到了一定的可靠性和准确性。

关键词:温室;黄瓜;叶片扩展;干物质再分配;模型

中图分类号:S 625 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2011)12-0010-04

温室作物生长模型是温室环境精确调控决策的基础,在作物生长模拟过程中,叶片是植株进行光合作用的主要器官,植株单叶面积的扩展直接影响着光合作用的进行,对植株果实产量的形成起着决定性作用,同时温室作物叶片生长状况受环境因子驱动。因此研究水果黄瓜叶片扩展及干物质分配模型,对了解水果黄瓜的生长规律及为温室水果黄瓜高产高效的环境调控提供依据^[1]。

目前在作物同化物分配模型方面主要集中在器官间同化物分配规律的研究^[2-7],而在器官内干物质的再分配规律的研究方面国内开展研究相对较少,如 Prusinkiewicz P 等^[8]提出基于 L 系统理论和欧姆定律原理构建了树木生物量分配的源汇关系模型;宋有洪^[9]对玉米的利用植株拓扑结构模拟同化物在植株各个器官(每个节间、叶片等)中的分配规律;侯加林^[10]提出利用隐含层参数估计方法进行干物质的分配的参数优化;董乔雪等^[11]在建立番茄动态生长的功能模型基础上,从个体和器官的角度出发,研究了生物量在植物体内的生产和分配规律、器官的动态生长规则等。基于前者的研究成果,该试验提出基于器官发育模型的干物质再分配过程模拟,利用器官的扩展模型进行干物质的再分配模拟。

1 材料与方法

1.1 试验材料

以荷兰的“碧玉”水果黄瓜为试材。该品种为全雌性无限生长型,耐热性好,植株长势迅速;主蔓结瓜,瓜长 16~18 cm,单瓜重 100~150 g。在黄瓜栽培管理中,侧枝和卷须全部摘除,植株在第 3 节位以下的花芽都摘除,第 3 节位以上每个节位留 1 个花芽。

1.2 试验方法

试验于镇江市瑞京农业科技示范园 Venlo 型玻璃温室内进行。试验分不同播期 2 次进行。试验 I 播期为 2006 年 10 月初,试验 II 播期为 2007 年 2 月中旬。栽培方式采用袋栽,袋内为珍珠岩和蛭石 3:2 配比的基质。袋子为枕头式,每袋种植 4 株水果黄瓜,株行间距均匀,植株栽培密度为 2.5 株/m²。在黄瓜的整个生长期,按照镇江市农业技术规程中的水果黄瓜设施无土栽培技术规程统一管理。

1.3 数据测定方法

试验期间随机选择 4 株黄瓜作为长期观测的样本。每隔 7 d 左右观测各处理植株器官生长发育情况并测量和记录各生育期内植株器官的形态指标,包含叶片数、叶面积(叶长和叶宽)和打掉老叶数。叶面积用 4 m 钢尺测定。在整个生育期内每隔 1 周左右进行破坏性取样,每次取长势均匀一致的 3 株黄瓜,将植物分解,分别测定每个叶序上叶片鲜重以及叶片叶面积(叶长和叶宽),然后在烤箱中 105℃杀青 20 min 后,继续在 80℃下烘至恒重,分别称量各叶片的干重(精确到 0.01 g)。

建立模型中所需的各生育期的日最高温度、最低温度、平均温度等气象数据由计算机自控系统监测记载。

第一作者简介:周静(1984),女,河北承德人,硕士,助教,现主要从事设施农业工程的研究工作。E-mail:zhoujing@ujs.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(31071327);江苏省高校基础研究重大资助项目(08KJA210001);江苏省农业科技支撑计划资助项目(BK2010347)。

收稿日期:2011-03-25

2 结果与分析

2.1 叶片扩展模型

2.1.1 叶长和叶宽的平均增长速率模型 经试验数据观察,水果黄瓜叶片生长速率由低到高,到达一定阶段,生长速率逐渐降低,直到为零,此时认为叶片停止生长,叶片长度和宽度方向同时到达最大值。由于叶片生长过程受环境因子影响大,叶片生长相对于最大值与温度之间存在一定非线性关系。图1为叶长(宽)与累积生长度日关系,从图中可看出,叶长(宽)与最大叶长(宽)的比值与累积生长度日之间满足式(1)、(2)曲线规律。

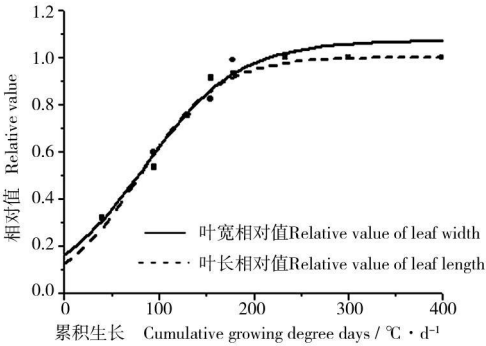


图1 叶长(宽)与累积生长度日关系曲线图
Fig. 1 The relationship of leaf length(width) and cumulative growing degree days

$$\frac{LL_i}{LL_{max}} = \frac{1}{1+EXP(a_L-b_LGDD)} \tag{1},$$

$$\frac{LW_i}{LW_{max}} = \frac{1}{1+EXP(a_W-b_WGDD)} \tag{2},$$

$$GDD = \sum (T_d - T_b), T_d > T_b \tag{3}.$$

式中, LL_i 、 LW_i 分别为叶片长度和宽度, LL_{max} 、 LW_{max} 分别为最大叶片长度和宽度, a_L 、 b_L 、 a_W 、 b_W 为待求参数。 GDD 为该叶序为 i 的叶片从出现至计算当天的累积生长度日, 累计生长度日由式(3)表示^[12-13], T_b 为发育基点温度, 温室水果黄瓜 T_b 取值为 10°C , T_d 是日平均温度。

2.1.2 单叶叶面积扩展模型 单叶叶面积(DLA)采用活体测量法, 按照如下经验公式计算得到^[14]: $DLA = 0.5LL \times LW + 0.25 \times LW^2$, $R^2 = 0.9846$ (4), 单株总叶面积(TLA)则由每天各个单叶面积累积而得: $TLA = \sum DLA_i$ (5)。

2.1.3 模型验证 根据试验I观测数据, 确定黄瓜植株叶片形态参数, 式(1)、(2)中 a_L 、 b_L 、 a_W 、 b_W 的值分别 1.92、0.024、1.80 和 0.023。为利用上述所构建的黄瓜形态模拟模型, 在依据试验II的观测数据和当年的气象数据, 对不同叶龄的黄瓜植株上不同位置的黄瓜叶片器官进行模拟。图2~4 分别表示叶龄为 5、15、20 时的叶片长度、宽度、叶面积模拟结果, 并与试验II的观测数据进行比较。从中可看出, 随着器官所在位置

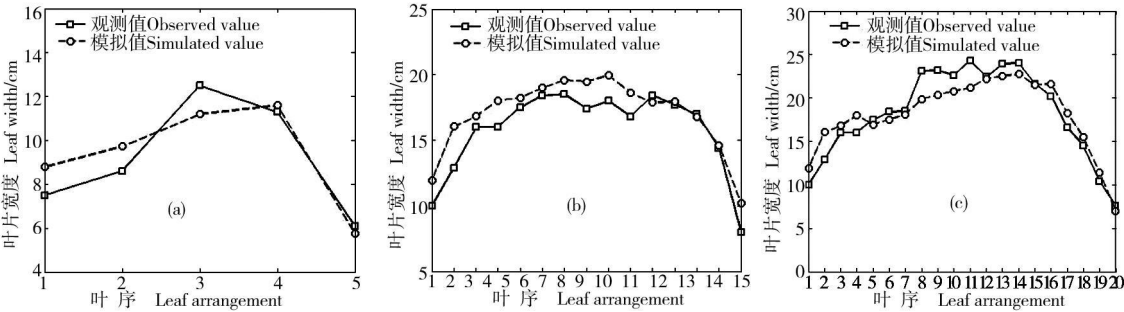


图2 不同叶龄时各叶序叶片长度模拟值和观测值比较
Fig. 2 Comparison of simulated and observed values of leaf length on different leaf age

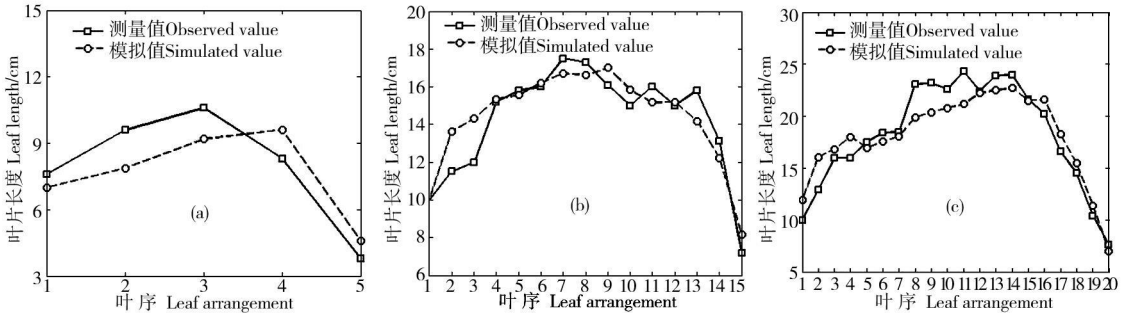


图3 不同叶龄时各叶序叶片宽度模拟值和观测值比较
Fig. 3 Comparison of simulated and observed values of leaf width on different leaf age

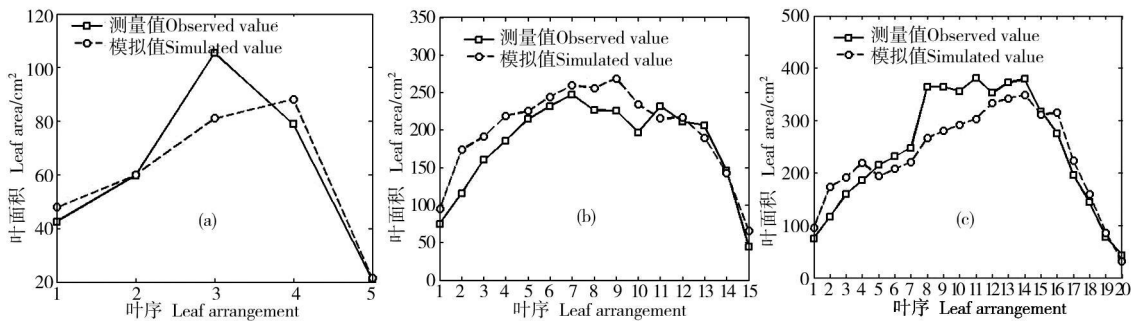


图 4 不同叶龄时各叶序叶面积模拟值和观测值比较

Fig. 3 Comparison of simulated and observed values of leaf area on different leaf age

不同, 其形态大小也发生着一定的变化, 植株中部叶片长度、宽度、叶面积基本都比植株上下两部分的大。此外, 叶片形态也在发生着有序的变化, 这均表明模型模拟结果与黄瓜植株的形态结构变化规律一致。对不同叶龄的黄瓜叶片形态的模拟值、观测值之间的相关性 (Rsq 和 $Sigf$)、均方根误差 ($RMSE$) 进行了分析比较, 统计结果 (表 1)。由表 1 可知, 叶龄为 15 和 20 的叶片几何形态模拟值和观测值之间的相关系数 Rsq 均大于 0.920, 其显著性概率均为 0, 在 1% 水平上差异显著。叶龄为 5 的叶片形态模拟值和观测值之间的相关系数 Rsq 在 0.865 以上, 其显著性概率均小于 0.03, 在 5% 水平上差异显著。此外, 模拟值和观测值之间的均方根误差 $RMSE$ 表明, 随着叶龄的增大, 相应的 $RMSE$ 也在提高, 但是与相应的形态观测值之间相比, 其误差百分率依然很小。通过上述分析, 表明模型模拟结果与试验观测值基本一致, 模型达到一定的可靠性和准确性。

表 1 不同叶龄时叶片形态模拟值与观测值比较

Table 1 Comparison of simulated and observed values of leaf morphology on different leaf age

叶龄 Leaf age	形态指标 Morphology value	Rsq	$Sigf$	$RMSE/cm$
5	叶片宽度 Leaf width	0.925	0.024	0.915
	叶片长度 Leaf length h	0.865	0.029	1.237
	叶面积 Leaf area	0.919	0.014	11.899
10	叶片宽度 Leaf width	0.948	0.000	1.555
	叶片长度 Leaf length h	0.926	0.000	1.086
	叶面积 Leaf area	0.938	0.000	27.689
15	叶片宽度 Leaf width	0.947	0.000	1.756
	叶片长度 Leaf length h	0.934	0.000	1.537
	叶面积 Leaf area	0.938	0.000	44.180

2.2 器官扩展的干物质再分配模型

2.2.1 模型描述 器官对同化物需求水平随着器官生长年龄的增长不断变化。植株进行同化物的初分配后, 同类型的器官同化物按照叶序顺序进行再分配, 外在表现为器官的扩展和新器官的生成。为了表示黄瓜植株在一定年龄特定叶序位置上的同种器官扩展速率, 定义同化物再分配指数 (β)。再分配指数 $\beta_j(i)$ 是衡量植株在干物质分配过程中, 叶序位置为 i 类型为 j 的器官干重占植株上该器官总干重的比例。这里 $\beta_j(i)$ 值用下式表示:

$$\beta_j(i) = \frac{OS V_i}{\sum_{i=1}^j OS V_i} \quad (6),$$

其中, $OS V_i$ —叶序位置为 i 类型为 j 的器官形态值, $j=s, l, f$, 即分别表示节间、叶片和果实, 器官的形态值包括节间体积、叶片的叶面积、果实体积。

试验以叶片干物质再分配过程为重点进行分析。叶片干物质再分配指数 $\beta_l(i)$ 是叶龄和累积生长度日的函数。定义叶序位置为 i 上叶片的干物质重 $W_l(i)$ 表示如下:

$$W_l(i) = W_l \times \beta_l(i) \quad (7),$$

式中, W_l 为水果黄瓜植株上叶片器官总干重。

2.2.2 模型参数确定与验证 利用上述建立的叶片扩展模拟模型, 输入试验气象资料数据, 计算得出叶龄为 4、13、20 植株上不同叶序上叶片的叶面积和植株总叶面积, 将叶片形态模拟值 (图 5), 带入 (6) 式中, 计算得出干物质再分配指数 $\beta_l(i)$ 。利用式 (7) 可计算得出试验观测数据不同叶龄时各叶序叶片干重模拟值, 将

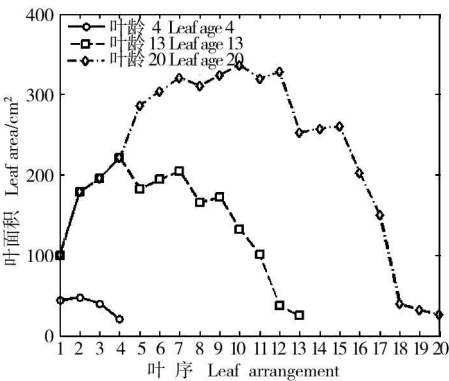


图 5 不同叶龄时各叶序叶面积模拟值

Fig. 5 Simulated values of leaf area on different leaf age

模拟值和试验测量值之间进行比较, 其结果见图 6。从图 6 中可看出, 随着器官所在植株位置的不同, 其干重也在发生着一定的变化, 叶片干重主要集中在植株的中部, 随着植株年龄的增长, 各叶序位置上的叶干重也在有序地发生着变化, 模型模拟值和黄瓜植株干物质分配变化规律基本一致。对不同植株年龄时的叶片器官干物质重的测量值和模拟值之间的相关性和均方

差误差 *RMSE* 进行了分析和比较,统计结果如下:植株叶龄为 4、13 和 20 时的叶片干重的模拟值和观测值之间的相关系数平方和值分别为 0.991、0.906 和 0.971;叶龄为 4 显著性的概率为 0.009,叶龄 13 和 20 的值均为 0,说明叶片器官干物质重的测量值和模拟值总体上在 1%水平上差异显著;此外,植株叶龄为 4、13 和

20 叶片器官干物质重模拟值和测量值之间的均方差误差 *RMSE* 分别为 0.009、0.011 和 0.107, *RMSE* 随着植株年龄的增长而增大,但是与其相应的测量值相比,其误差百分率依然很小。通过上述分析,表明模型模拟结果与试验观测值具有较好的一致性,模型达到了一定的可靠性和准确性。

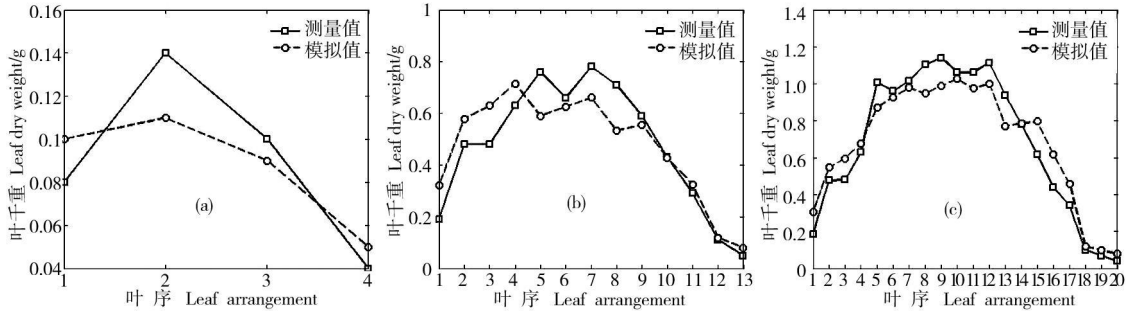


图 6 不同叶龄时各叶序叶片干重模拟值和观测值比较

Fig. 6 Comparison of simulated and observed values of leaf dry weight on different leaf age

3 小结

该试验通过观测数据建立了基于积累生长度日的温室黄瓜叶片扩展规律的模型,并提出基于叶片扩展规律模型的叶片同化物在各叶片之间的再分配模型。通过试验数据进行了模型的验证表明,叶片器官干物质重的测量值和模拟值在 1%水平上差异显著;叶龄为 4、13 和 20 模拟误差 *RMSE* 分别为 0.009、0.011 和 0.107,实现了叶片干物质再分配的模拟。同已建立的作物干物质分配模型相比,该试验建立的模型特点是将器官扩展与干物质分配结合,以温室黄瓜叶片器官扩展为基础模拟了干物质重的变化动态,从而构建了以生长度日为基础的温室黄瓜叶片生长模拟模型。模型具有较好的预测性,同时具有参数少、易确定、简便实用的特点。

参考文献

[1] 高丽红, 关秋竹, 陈青云. 不同水果型黄瓜品种日光温室春季栽培的适应性研究[J]. 农村实用工程技术, 2004(1): 39-41.
[2] Marcelis L F M. Simulation of biomass allocation in greenhouse crops: a review [J]. Acta Horticulture, 1993, 328(1): 49-67.
[3] 李萍萍, 夏志军, 胡永光. 利用 Delphi 开发温室黄瓜生长动态模拟系统[J]. 江苏大学学报, 2003, 24(4): 13-1.
[4] 李永秀, 罗卫红, 倪纪恒 等. 温室黄瓜干物质分配与产量预测模

拟模型初步研究[J]. 农业工程学报, 2006 22(2): 116-121.
[5] 李娟, 郭世荣, 罗卫红. 温室黄瓜光合生产与干物质积累模拟模型[J]. 农业工程学报, 2003, 19(4): 241-244.
[6] 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.
[7] 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.
[8] Prusinkiewicz P, Allen M, Escobar-Gutierrez A, et al. Numerical methods for transport-resistance source-sink allocation models [A]. Proceedings of the Frontis Workshop on Functional-Structural Plant Modelling in Crop Production, Springer, 2007.
[9] 宋有洪, 郭焱, 李保国, 等. 基于植株拓扑结构的生物量分配的玉米虚拟模型[J]. 生态学报, 2003 23(11): 2334-2341.
[10] 侯加林, 王一鸣, 展志刚, 等. 基于改进型非线性最小二乘法的作物模型隐含参数估计[J]. 农业机械学报, 2005, 36(5): 75-79.
[11] 董乔雪, 王一鸣, 番茄的结构-功能模型II: 基于器官水平的功能模型与验证研究[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(1): 122-126.
[12] Semin AKINCI Kazim ABAK. Determination of a suitable formula for the calculation of sum growing degree days in cucumber [J]. Acta Horticulture, 1999, 492: 273-280.
[13] 唐卫东, 李萍萍, 卢章平. 现代温室黄瓜发育动态模型研究[J]. 安徽农业科学, 2007, 21: 6421-6422.
[14] 张亚红, 陈端生, 黄晚华. 日光温室黄瓜群体结构参数及群体内辐射分布分析[J]. 农业工程学报, 2003, 19(1): 172-176.

Dynamic Simulation Model of Leaf Expansion and Dry Matter Redistribution of Fruit Cucumber in Greenhouse

ZHOU Jing, WANG Ji-zhang, LI Ping-ping, ZHAO Qing-song

(Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education and Jiangsu Province, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013)

Abstract: ‘Biyu’ fruit cucumber from the Netherlands was used as experimental material in this study. The relation model of leaf expansion and cumulate growing days was established for research of process of dry matter redistribution based on organ development model. Dry mater simulation model of leaves in different ages and positions was achieved, analyzed and validated. The results showed that unbiased variance error *RMSE* of stimulation value of leaf organ dry matter weight and measured value for the leaf age of 4, 13 and 30 was respectively 0.009, 0.011 and 0.107. The stimulated results were consistent with the actual measured value. Therefore, we can tell that the model achieved a certain reliability and accuracy.

Key words: greenhouse; cucumber; leaf expansion; dry matter redistribution; model