

不同种植密度番茄生长行为的结构功能模型模拟^{*}

杨丽丽¹ 王一鸣¹ 康孟珍² 董乔雪¹

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 中国科学院自动化研究所, 北京 100190)

【摘要】 为研究不同密度下温室番茄的生长行为,对结构功能模型 GreenLab 进行改进,在提高拟合度的基础上,获得不同密度下番茄生长参数,通过参数分析将环境与番茄植株生长行为相联系。结果表明密度影响同化物产生与分配,通过外在形态,如出叶速率、叶厚、坐果率等表现,GreenLab 模型可以重建这种生长行为变化。

关键词: 温室 番茄 种植密度 GreenLab 模型 生长行为

中图分类号: S601; S641.2

文献标识码: A

Simulation of Tomato Growth Behavior in Response to Planting-density Based on Functional-structural Model

Yang Lili¹ Wang Yiming¹ Kang Mengzhen² Dong Qiaoxue¹

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract

In order to study the growth behavior of greenhouse tomato with different density, GreenLab, the functional-structural model, was improved. On the basis of improving the degree of fitting, the growth parameter of tomato with different density was obtained. Environment was connected with tomato plant growth behavior through the analysis of the parameter. The results show that the density influences production and distribution of assimilate, which was characterized by the exterior morpha such as leaf appearance rate, leaf thickness, fruit set rate and so on, and GreenLab model can reproduce this feedback relationship.

Key words Greenhouse, Tomato, Planting-density, GreenLab model, Growth behavior

引言

在欧洲、加拿大和中国北方等一些地区,光是影响番茄生长的最主要因素,也是制约其产量的关键因素之一,所以提高光能利用率是进行番茄模型理论研究和实际应用的核心问题^[1]。改变种植密度是改变光能分布的有效途径。现有基于经验的番茄模型建立在一定假设基础之上,虽然能提取一定的植物生长规律,但不能将外在形态结构与内在生理过程及环境变化相联系^[2]。以 TOMGRO (tomato growth model) 为代表的典型机理模型虽然能够反映环境与生长发育的定量关系,但过于复杂^[3]。简

单通用的结构功能模型 GreenLab(青园)则是器官外在形态结构与内在生理过程的统一^[4]。本文通过温室试验,用 GreenLab 模型对试验数据进行模拟及参数拟合,通过试验数据和模型参数对不同种植密度下温室番茄生长行为进行研究。

1 试验

试验在北京市中国农业科学院内的日光温室进行,分春、秋 2 茬进行播种。试验过程无水、肥、病虫害胁迫,温度、湿度和光照数据由以色列生产的 Galileo-LPS 2000 型数据采集器获得。种植密度如表 1 所示。

收稿日期: 2008-10-17 修回日期: 2008-12-02

^{*} 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2008AA10Z218)和国家自然科学基金资助项目(60703043)

作者简介: 杨丽丽, 讲师, 博士生, 主要从事计算机应用、植物生长数字模拟研究, E-mail: llyang@cau.edu.cn

通讯作者: 王一鸣, 教授, 博士生导师, 主要从事传感器检测、数字农业技术研究, E-mail: ym-wang@263.net

表 1 种植密度试验设计

Tab.1 Plant density treatment design

处理分类	株间距/m×m	种植密度/棵·m ⁻²
高密度(D1)	0.3×0.3	11
中高密度(D2)	0.4×0.4	6
中密度(D3)	0.6×0.6	3
低密度(D4)	1.0×1.0	1

由于日光温室南北走向(图 1a), 不同种植密度间局部光照存在梯度, 而标准仪器处于温室中部, 采用在晴天通过便携式仪器规则地分别在 4 个密度区测量, 将其结果与标准仪器对比, 对不同种植密度的局部光照定义了一个修正系数(图 1b)。在光分布相对均匀的 4 个密度种植区中心各取 5 棵样本, 详细记录番茄生长过程中拓扑结构变化。常规测量用于模型输入, 获得如叶片光合作用时间(从出现到枯萎)、各种器官的扩展时间(从出现到体积不再改变)。分别在叶片数为 5、10、15、20、30 时在标志区中随机选取 5 棵植株, 进行破坏性测定, 用 GreenLab 模型计算与破坏性测定相对应的数据, 模型输出用来进行多目标拟合, 从而获得植株生长中的功能性参数、如库大小(汇强)、库活力函数参数、投影面积等, 阶段性叶片厚度也由破坏性测量获得。模型模拟和校验借助于开放源代码的 Scilab 语言开发的软件 GreenScilab 实现。

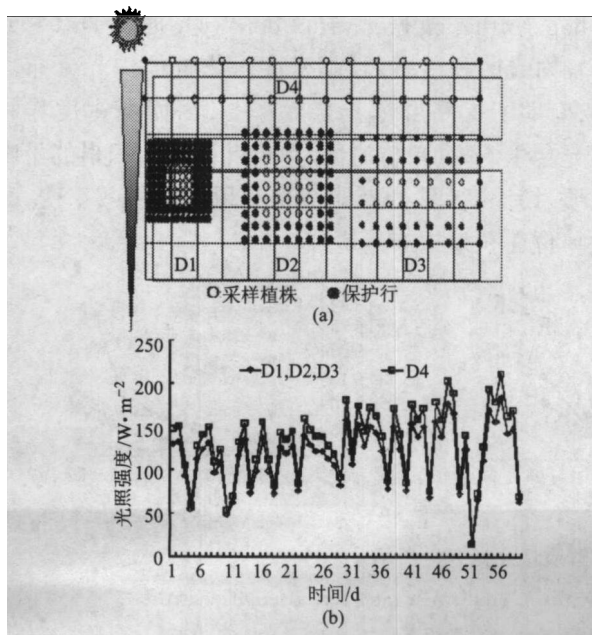


图 1 4 个种植密度植株空间分布及光照强度处理

Fig.1 Plant space distribution in four density and light intensity treatment

(a) 4 个种植密度空间分布 (b) 不同种植密度光照强度

2 GreenLab 模型原理

模型中将主要提供光合产物的器官称为源, 如

叶片; 而消耗光合产物用来自身生长的器官称为库, 如叶片、节间、叶柄、果实、根。其中叶片既是源器官也是库器官, 源器官通过光合作用生产同化物, 库器官凭借自身库大小通过竞争在同一同化物池中获得生长所需能量。这种生物量生产与分配在模型中通过一个循环方程统一在一起, 方程式为

$$\Delta q_o(t, n) = Q(n-1)P_o f_o(t)/D(n) \quad (1)$$

式中 $\Delta q_o(t, n)$ 是生长年龄为 t 的器官 o (叶片、节间、叶柄、果实、根) 在第 n 个生长周期(连续两片叶子出叶间隔时间)增长的生物量, 它由前一周期的生物量生产 $Q(n-1)$ 、器官库的大小 P_o 、器官 t 年龄时库活力的函数值 $f_o(t)$ 及第 n 个生长周期时植株各器官的总需求 $D(n)$ 计算得到。其中

$$Q(n) = \frac{E(n)S_p}{r_1 r_2} \left(1 - \exp\left(-r_2 \frac{S(n)}{S_p}\right) \right) \quad (2)$$

其中 $E(n) = kP_a(n) \quad (3)$

式中 $E(n)$ ——第 n 个生长周期时植株的潜在生长势

$P_a(n)$ ——第 n 个生长周期时潜在蒸腾量 (potential evapo-transpiration, 简称 PET), 与环境因素(光照、湿度、温度)有关

k ——优化系数, 取 0.91

S_p ——单棵植株投影面积

r_1 ——叶片阻抗

r_2 ——因叶片相互覆盖引起的光竞争因子

$S(n)$ ——第 n 个生长周期时植株的总叶面积

$$D(n) = \sum_o P_o \sum_{t=1}^n f_o(t)N_o(n-t+1) \quad (4)$$

式中 $N_o(n-t+1)$ 为第 n 个生长周期时通过有限自动机算法得到的所有生长周期(从 1 到 n)器官数目。其中模型参数 P_o 、 r_1 和 r_2/S_p 通过优化获得。

3 结果与分析

3.1 出叶速率

现有模型建立在出叶速率与积温成线性关系的基础上^[5], 试验数据显示植株年龄较小时 4 个种植密度番茄生长速度基本一致, 随年龄增长, 高密度的植株生长速度要快于低密度(图 2a), 这种差异在模型中通过计算每个生长周期的潜在蒸腾量来反映, 考虑温室内作物的蒸腾主要受温室内的太阳净辐射和空气饱和水气压差(VPD)的影响, 本研究采用简化的 FAO-Radiation 等式计算潜在蒸腾量^[6], 设温室内风速为零, 标准大气压温度为 20℃, 对于叶片数 i 的计算, 通过试验数据获得出叶速率与积温的

分段线性关系,同种密度生育前后期、不同密度相同生育期之间线性系数不同。图 2b 为用此方法计算得到的 4 个密度周期潜在蒸腾量结果。

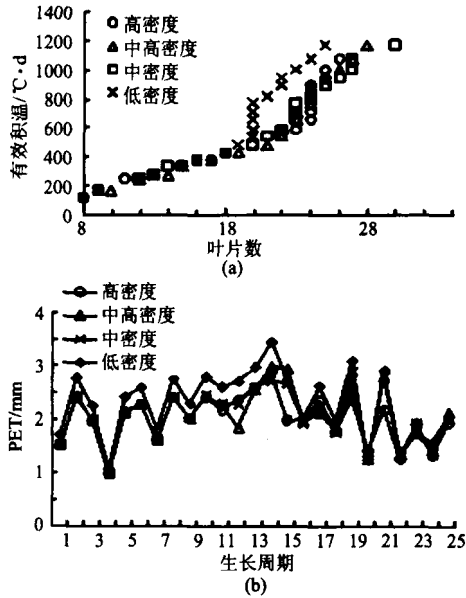


图 2 不同密度出叶速率比较及周期 PET 值
Fig. 2 Leaf appearance rate and cycle PET value for different density

(a) 出叶速率 (b) 周期 PET 值

3.2 叶厚

叶片是植物生长的主要源器官,通过光合作用为其他器官的生长发育提供同化物,因此一棵叶片数为 i 的植株其总叶面积的计算直接决定生物生产量 Q ,参见式(2)。模型中对单片叶片面积的计算采用叶片质量除以叶片厚度,试验数据显示对于不同密度的相同年龄植株,其同一位置的叶片厚度不同,且随年龄增长这种差别增大,如图 3 所示。为反映这种变化本文采用分段插值方法,将植株实际年龄从 1 始按间隔 5 进行分段,由破坏性测量可获得每

段两端点处叶片厚度值(不同密度值不同),段内叶片厚度值通过线性插值获得。以此作为模型输入,与用固定叶片厚度相比提高了模型拟合度(5%~10%)。

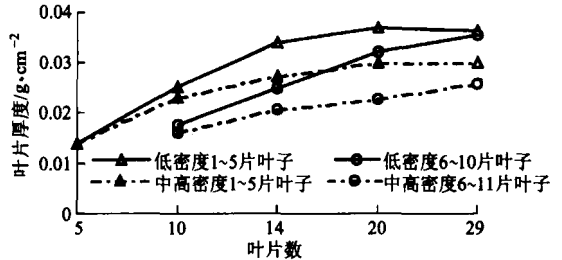


图 3 不同密度叶片厚度随生长年龄变化曲线

Fig. 3 Leaf thickness change with age for different density

3.3 产量

观察不同密度下果穗的初始花芽数基本相同,试验结束时果穗数也大体相同,但单位产量相差很大。分析不同生长阶段的植株试验数据,比较所得的叶面积指数(LAI)值及植株总质量(图 4a, 4b),显示相同积温下高密度植株 LAI 较大。由门司-佐伯光合模式推出高密度下冠层内部平均光强较弱,生物量生产与叶片所获得的光照强度成比例,故高密度单棵植株鲜质量较小。而开花率与营养器官质量正相关^[7],导致单棵高密度植株开花率与坐果率低于低密度,故单株产量下降。低密度下 LAI 低,但漏光多,密植提高了光合光子通量密度 PPFD (photosynthetic photon flux density),提高了散射光与辐射光的利用率,且高密度作物群体内光分布均匀,有助于提高群体光合效率^[8],因而高密度作物的光合生产率(单位时间、单位叶面积所积累的干物质质量)提高(图 4c),即植物利用光能的效率变大,故单位面积植株产量增加。

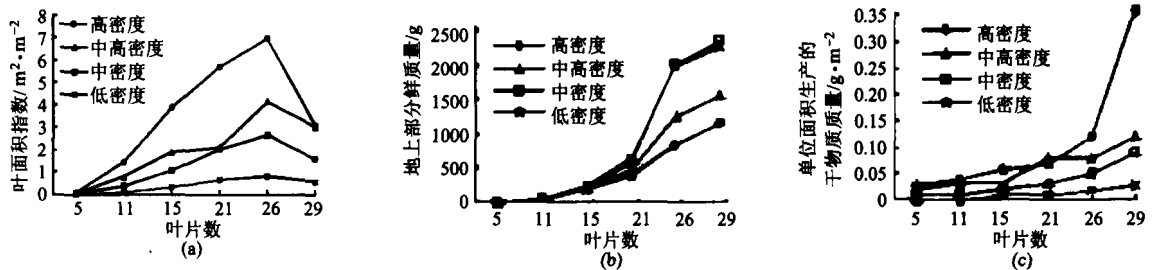


图 4 不同密度 LAI、地上部分鲜质量及光合生产率

Fig. 4 Leaf area index, aerial fresh weight and photosynthetic production rates for different densities

(a) 叶面积指数 (b) 地上鲜质量 (c) 光合生产率

3.4 GreenLab 功能参数

用 GreenScilab 软件对叶片数目相似的 4 个密度植株的数据进行拟合,模拟输出与实测数据接近,图 5 为一棵叶片数目为 29 的高密度植株和一棵叶片数目为 27 的低密度植株拟合效果图。获得一组参数如表 2 所示。

结果显示不同密度下生长的植株坐果发生后,在生物量生产与分配上出现差异,相近年龄下单棵高密度植株生物量生产少于低密度植株,生物量在组织器官间的分配表现出高密度植株的节间、叶柄略大而果实较小,也就是节间、叶柄汇强比率大,而果实汇强比率小,与外在形态结构表现出的高密度

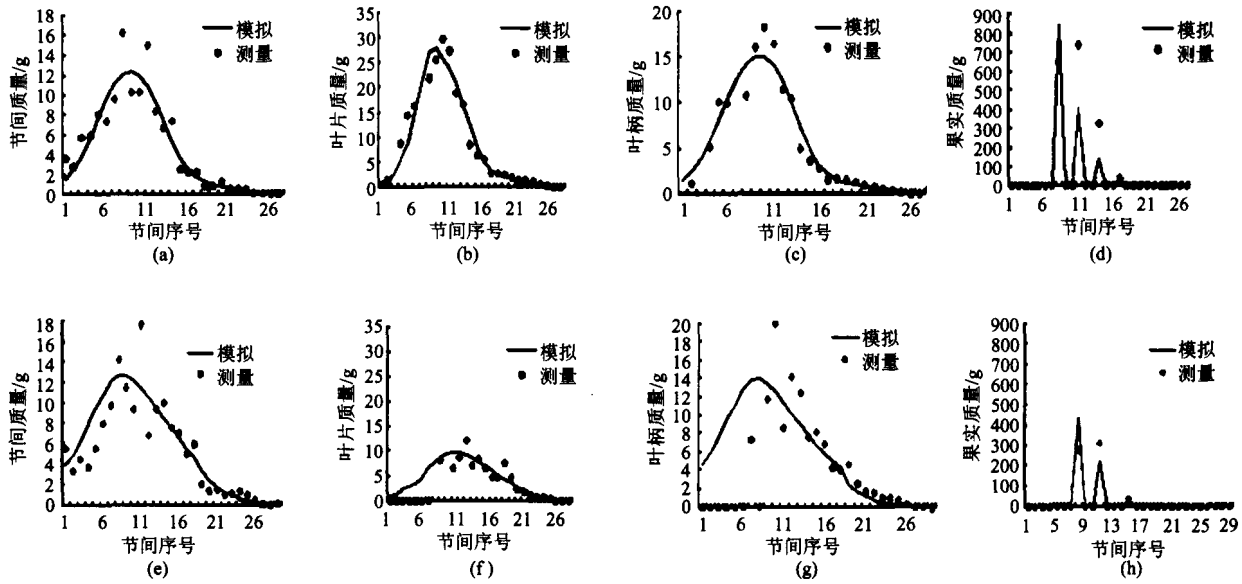


图 5 D1 与 D4 密度植株拟合结果

Fig. 5 Fitting results on organs for a D1 and D4 plant

(a) D1 节间 (b) D1 叶片 (c) D1 叶柄 (d) D1 果实 (e) D4 节间 (f) D4 叶片 (g) D4 叶柄 (h) D4 果实

表 2 不同密度植株拟合参数比较

Tab.2 Comparison of model parameter values for different density plants

拟合参数	密度级			
	D1	D2	D3	D4
节间汇强比率	0.96	0.79	0.62	0.42
叶柄汇强比率	1.07	0.75	0.48	0.57
果实汇强比率	15	17	19	30
投影面积 S_p/cm^2	1 000	1 365	1 580	2 878

植株节间较长、果实较小相一致。从模型角度解释了栽培密度对番茄植物学性状的影响。结合图 4, 可以进一步解释栽培密度对番茄产量的影响。

S_p 的计算影响生长周期的生物量生产。在密植情况下, 参数 $S_p = d_1 d_2$ (d_1 为株距, d_2 为行距), 近似等于密度的倒数, 而对于低中密度, 根据密度来确定则是不正确的。表 2 说明相近年龄下随密度增大 S_p 变小, 这与高密度植株叶片之间遮挡程度大于低密度相一致, 同时 S_p 随年龄增长变大(未列出), 这与实际看到的投影面积随叶片数目增多而变大相一致, 最后 S_p 趋于稳定值, 且这个值对于中低密度要小于密度的倒数。通过对不同生长阶段植株进行拟合, 获得参数 S_p 的动态变化规律, 最终将其引入模型, 弥补了模型最初作为个体植株模拟的缺陷, 真实地反映了群体生长对个体生长的影响。

4 结束语

对简单通用的结构功能模型 GreenLab 进行了番茄试验校准研究, 将番茄叶片的出现速率受密度的影响引入到模型中, 减小统一线性关系所带来的拟合误差。对模型参数叶片厚度本文采用分段差值方法反应其随生长年龄及密度的改变, 提高了模型精确度。结果表明基于结构功能模型 GreenLab 开发的软件 GreenScilab 可以很好地实现不同密度下番茄生长模拟, 在一定程度上验证了环境通过生理生态功能对形态结构的反馈作用。在器官生物量拟合较好的基础上, 通过对比不同密度下模型参数解释了密度对同化物生产与分配的影响, 特别是果实汇强的梯度说明了密度对果实个体在共有生物量池中竞争能力的影响, 而基于器官类别定义汇强的 TOMGRO 模型和基于整穗果实定义汇强的 TOMSIM 模型不能反映这种变化, 为后期基于 GreenLab 对番茄进行密度产量优化研究提供依据。

随生长周期增长, 密度差别表现增强, 模型参数汇强比率和投影面积的变化反映了这一点。动态的模型参数才能反映密度影响的动态变化, 为增强模型在密度优化方面的作用, 将受光影响的参数由稳定值替换为环境变量的经验函数, 通过更多试验数据建立参数对环境变量的反应曲线是 GreenLab 模型未来发展方向。

参 考 文 献

1 孙忠富, 陈人杰. 温室作物模型研究基本理论与技术方法的探讨[J]. 中国农业科学, 2002, 35(3):320~324.
Sun Zhongfu, Chen Renjie. Preliminary investigation on theoretical principles and technical methods of greenhouse crop model[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2002, 35(3):320~324. (in Chinese)

- 2 齐维强,张志斌,邹志荣.基于积温的日光温室番茄生长发育规律研究[J].华中农业大学学报,2004,35(z2):53~57.
Qi Weiqiang, Zhang Zhibin, Zou Zhirong. Research of tomato's growth rule based on accumulation temperature in greenhouse[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2004, 35(z2):53~57. (in Chinese)
- 3 伍德林,毛罕平,李萍萍.我国设施园艺作物生长模型研究进展[J].长江蔬菜,2007(2):36~40.
Wu Delin, Mao Hanping, Li Pingping. Progress on the growth model of horticultural crops in greenhouse in China[J]. Journal of Changjiang Vegetables, 2007(2):36~40. (in Chinese)
- 4 董乔雪.基于准确光辐射传输的番茄生长结构功能模型研究[D].北京:中国农业大学,2006.
Dong Qiaoxue. Study on structural-functional model of tomato growth based on accurate radiation transfer[D]. Beijing: China Agricultural University, 2006. (in Chinese)
- 5 Heuvelink E. Tomatos[M]. Wallingford, UK: CABI Publishing, 2005.
- 6 Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements[M]. Rome FAO Irrigation and Drainage, 1998.
- 7 De Koning A N M. Development and dry matter distribution in glasshouse tomato: a quantitative approach [D]. Netherlands: Wageningen Agricultural University, 1994.
- 8 Papadopoulos A P, Pararajasingham S. The influence of plant spacing on light interception and use in greenhouse tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.): a review[J]. Scientia Horticulturae, 1997, 69(1~2): 1~29.
- 9 杨丽丽,王一鸣,康孟珍,等.基于修正 logistic 模型的番茄单个果实生长规律模拟[J].农业机械学报,2008,39(11): 81~84.
Yang Lili, Wang Yiming, Kang Mengzhen, et al. Simulation of tomato fruit individual growth rule based on revised logistic model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(11):81~84. (in Chinese)

~~~~~

(上接第155页)

- 17 周亚军,殷涌光,刘微,等.含水果颗粒液态食品物料通电加热速度与温度场研究[J].农业机械学报,2004,35(5): 136~139.  
Zhou Yajun, Yin Yongguang, Liu Wei, et al. Relationship between ohmic heating rate and temperature distribution of liquor food containing fruit particulates[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(5):136~139. (in Chinese)
- 18 周亚军,殷涌光,王淑杰,等.食品欧姆加热技术的原理及研究进展[J].吉林大学学报:工学版,2004,34(2):324~329.  
Zhou Yajun, Yin Yongguang, Wang Shujie, et al. Mechanism and research progress of food ohmic heating technology[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2004, 34(2): 324~329. (in Chinese)
- 19 周亚军,殷涌光,于庆宇,等.含颗粒液态食品通电加热加工特性及影响因子[J].食品与发酵工业,2003,29(7):75~78.  
Zhou Yajun, Yin Yongguang, Yu Qingyu, et al. Processing technique of ohmic heating of liquor foods containing particulates and its influencing factors[J]. Food and Fermentation Industries, 2003, 29(7):75~78. (in Chinese)
- 20 殷涌光,周亚军,玄哲浩,等.液态食品通电加热速度与电导率的关系[J].食品与发酵工业,2003,29(12):13~16.  
Yin Yongguang, Zhou Yajun, Xuan Zhehao, et al. Study on relationship between ohmic heating rate and conductivity for liquor food[J]. Food and Fermentation Industries, 2003, 29(12):13~16. (in Chinese)
- 21 周亚军,闫琳娜,殷涌光,等.含水果颗粒液态食品物料通电加热温度场研究[J].农业工程学报,2005,21(5):159~162.  
Zhou Yajun, Yan Linna, Yin Yongguang, et al. Ohmic heating temperature field of liquid food materials with fruit granule [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(5):159~162. (in Chinese)