

北方日光温室长季节番茄茎节生长模拟模型

罗新兰^{1,3}, 李天来^{1,2*}, 仇家奇^{1,2}, 高西宁³, 韩亚东³, 钟岩^{1,2}, 颜阿丹^{1,2}

(1. 辽宁省设施园艺重点实验室, 沈阳 110161; 2. 沈阳农业大学园艺学院, 沈阳 110161;
3. 沈阳农业大学农学院, 沈阳 110161)

摘要:以番茄器官生长发育的生理生态过程为基础,建立了北方日光温室长季节番茄茎节生长模拟模型,它是建立番茄叶片和果实生长模拟模型的基础。供试番茄品种为“卡鲁索”和“卡特琳娜”。确定了模型中的参数如节点最大出现速率等,并对模型进行了验证试验。结果表明:番茄茎节数模拟值与实测值的变化趋势一致,平均相对误差为0.7%~9%。用散点图法验证模拟值与实测值的相关系数达0.9964,截距为-8.8,每平方米模拟值比实测值平均偏低8.8个茎节。表明模型模拟结果较好。

关键词:日光温室,模拟模型,栽培,番茄,茎节数

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2009.08.032

中图分类号: S16

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2009)-8-0174-06

罗新兰, 李天来, 仇家奇, 等. 北方日光温室长季节番茄茎节生长模拟模型[J]. 农业工程学报, 2009, 25(8): 174—179.
Luo Xinlan, Li Tianlai, Qiu Jiaqi, et al. SIMULATION model of stem node growth of tomato in long season cultivation in northern solar greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(8): 174—179. (in Chinese with English abstract)

0 引言

作物生长发育模型作为现代农业专家管理系统的重要基础成为近年来的研究热点之一,尤其是温室作物生长发育模型研究备受关注。目前国外已经建立了温室内环境控制模型和许多作物的生长模型^[1],其中番茄生长发育模型是研究重点之一^[2-4]。中国温室番茄模拟模型也开始进行研究^[5-9],但目前由于占中国温室面积绝大多数的日光温室缺乏系统的环境监测设备,开展作物生长发育模拟模型的研究仍有很多困难,基于日光温室的番茄生长发育模拟模型研究尚缺乏系统研究。番茄叶片和果实个数的形成是在茎节形成的基础上进行模拟的,因此茎节模拟的准确度会直接影响到番茄叶片数和果实数的模拟。本试验采用日光温室番茄长季节栽培方式,研究了番茄生长发育中的重要性状之一——茎节生长模拟模型,以期研究番茄叶片、果实生长模拟模型及温度控制、肥水控制、CO₂施肥及栽培管理方式提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 番茄茎节形成模拟模型的研究方法

一般正常生长发育的番茄植株是由1组连续的合轴

组成,第1个合轴是由8~13个茎节和1个花序组成,其余合轴由4~6个茎节和1个花序组成,1个花序最终可结多至12个果。每个合轴均可通过植株各器官生理参数(叶片、果实、茎节的数量、质量及叶面积指数等)来表征^[10]。这些特征参数属于动态变量,且随着植株的生长发育而连续变化。植株每个合轴称作1个年龄级,其中植株生长是指年龄组内各特征参数变化,植株发育则指年龄级间的转换。

番茄植株茎节数量的变化用茎节的出现和生理发育指数来表示^[11]。新结点出现速率受温度影响,较高浓度的CO₂对新结点出现速率也有一定的调节作用。当新茎节出现时,它的个数、初始质量(g·m⁻²)要加到第1年龄级的相应状态变量中。

1.2 番茄茎节数模拟模型描述

茎节的数量通过年龄级的连续变化而变化,年龄级与茎节的发育速率有关,而茎节的发育速率与环境温度和环境CO₂浓度有关。

根据番茄的生长特点,定植后第 k 天、番茄处于第 i 年龄级时番茄植株茎节的总数量 $N_s(i,k)$ 可以用公式(1)及(2)来描述

$$N_s(i,k) = \sum_{j=1}^i N_s(j,k) \quad (1)$$

$$N_s(j,k) = N_s(j,k-1) + \frac{dN_s(j)}{dt} \quad (2)$$

当 $j=1, k=1$ 时, $N_s(j,k-1)$ 即为定植时番茄第1年龄级的茎节数。

根据Jones J W等的研究^[11]每个年龄级(每1花序为1个年龄级,从植株顶端到上面第1花序为第1年龄级,

收稿日期: 2008-12-18 修订日期: 2009-02-17

基金项目: 国家 863 基金项目(2006AA10Z222); 国家支撑计划项目(2006BAD07B04, 2006BAD04B08-05); 辽宁省教育厅项目(20060766)

作者简介: 罗新兰(1968—),女,黑龙江省依兰县人,副教授,博士,主要从事应用气象、设施环境科学与工程及作物模拟系统的教学与研究工作。沈阳 辽宁省设施园艺重点实验室, 110161。Email: luoxinlan@tom.com

*通信作者: 李天来(1955—),男,辽宁省绥中县人,教授,博士,博士生导师,从事设施园艺及蔬菜生理生态的教学和研究工作。沈阳 辽宁省设施园艺重点实验室, 110161。Email: ltl@syou.edu.cn

第 1 至第 2 花序间为第 2 年龄级, ……) 茎节数的净变化率按公式 (3) 计算

$$\frac{dN_s(i)}{dt} = \begin{cases} INIT \cdot DENS - r_L(T) \cdot F(C) \cdot N_s(1) & i=1 \\ r_L(T) \cdot F(C) \cdot (N_s(i-1) - N_s(i)) & 1 < i < n \\ 0 & i=n \end{cases} \quad (3)$$

式中: i ——年龄级; $N_s(1)$ ——为第 1 年龄级的每平方米茎节数; n ——植株打尖时的年龄级数; $INIT$ ——新结点的出现速率; $DENS$ ——定植密度, 株·m⁻²; 本研究试验中的定植密度为 5.13 株·m⁻²; 验证试验中密度分别为 3.85、3.34 和 2.85 株·m⁻²。

实际上对于茎节生长而言, 第 2 年龄级以后的茎节数的净变化率均为 0。

当茎节数累积到大于第 1 花序出现时所在的茎节数时 (此参数通常与品种有关), 原来的第 1 年龄级变成第 2 年龄级, 第 1 花序上的茎节处于第 1 年龄级; 此时的第 1 年龄级茎节累积数量大于两花序间的茎节数, 则植株的最上边花序以上为第 1 年龄级, 原来的第 1 年龄级变为第 2 年龄级, 第 2 年龄级变为第 3 年龄级。随着生长发育的进行, 年龄级的变化以此类推。

$r_L(T)$ ——在 CO₂ 浓度为 350 μL/L 时, 某一天 (温度为 T 时) 第 i 年龄级的叶片变成 $i+1$ 年龄级的速度 (1/d)。参考倪纪恒的研究^[6]及试验资料 $r_L(T)$ 可用公式 (4) 表示

$$r_L(T) = \begin{cases} r_{\max} \times \frac{T - T_{\min}}{T_{\text{optd}} - T_{\min}} & T_{\min} < T < T_{\text{optd}} \\ r_{\max} & T_{\text{optd}} \leq T \leq T_{\text{optu}} \\ r_{\max} \times \frac{T_{\max} - T}{T_{\max} - T_{\text{optu}}} & T_{\text{optu}} < T < T_{\max} \end{cases} \quad (4)$$

式中: r_{\max} ——第 i 年龄级的叶片变成 $i+1$ 年龄级的最快速度; T 、 T_{\min} 、 T_{optd} 、 T_{optu} 和 T_{\max} ——分别为当天的日平均气温、番茄植株的最低致死温度、最适温度的下限、最适温度的上限和番茄植株的最高致死温度。

$F(C)$ ——CO₂ 浓度的调节函数, 当 CO₂ 浓度高于或低于 350 μL/L 时它对发育速率可进行调节;

$INIT$ ——是在当前的温度和 CO₂ 浓度条件下计算出的每株结点出现速率^[3]。

$$INIT = INITRAT \times F_n(T) \times F(C) \quad (5)$$

式中: $INITRAT$ ——单株节点最大出现速率, 要根据各地实际试验资料计算 (节点/天)。

$F_n(T)$ ——温度函数, 当温度超出植物生长发育适宜温度范围时, 该函数可降低节点出现速度; 参考文献^[12], $F_n(T)$ 可以用公式 (6) 表示

$$F_n(T) = \left(\frac{T_{\max} - T}{T_{\max} - T_{\text{opt}}} \right) \left(\frac{T - T_{\min}}{T_{\text{opt}} - T_{\min}} \right)^{\left(\frac{T_{\text{opt}} - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\text{opt}}} \right)} \quad (6)$$

式中 T_{\min} 、 T_{opt} 、 T_{\max} ——分别为番茄生长的最低温度、最适温度和最高温度。

$F(C)$ ——由于 CO₂ 水平高于或低于外界空气中 CO₂ 浓度时节点出现速率的加快或减慢的程度。 $F(C)$ 假设为

CO₂ 浓度的线性函数^[11]

$$F(C) = a + b \cdot C \quad (7)$$

式中: a 、 b ——由试验确定的经验参数; C ——CO₂ 的浓度, μL/L。

1.3 确定番茄茎节模型参数的试验及验证试验

1.3.1 试验材料及调查项目

试验在沈阳农业大学工厂化高效农业工程技术研究中心试验基地的辽沈 I 型日光温室内进行, 试验期间温室内白天 CO₂ 浓度为 280~920 μL/L 之间, 放风前 CO₂ 浓度较高, 放风后在 400 μL/L 左右, 如全天晴天不放风, 中午 CO₂ 浓度可达到 280 μL/L。试验 1~5 的供试番茄品种为荷兰“卡鲁索”; 试验 6 的供试番茄品种为荷兰的“卡特琳娜”。

试验 1 于 1999 年 11 月 1 日播种, 2000 年 1 月 6 日定植; 试验 2 于 2000 年 12 月 4 日播种, 2001 年 3 月 7 日定植 (I); 试验 3 于 2000 年 12 月 19 日播种, 2001 年 3 月 17 日定植 (II); 试验 4 于 2001 年 9 月 27 日播种, 2001 年 11 月 16 日定植 (I); 试验 5 于 2001 年 11 月 2 日播种, 2001 年 12 月 27 日定植 (II)。植株定植株距为 30 cm, 平均行距为 65 cm, 植株密度 5.12 株·m⁻²。

试验 1~5 均在田间选取 10 株有代表性的番茄植株作为活体观测的样本, 每隔 7~15 d 定期观测叶片数、茎节数、果实数。留 10~15 穗果。试验 1~5 用于确定模型中的与当地环境相关的参数——最大节点出现速率。

试验 6 于 2005 年 9 月 13 日播种, 2005 年 11 月 2 日定植, 2006 年 7 月底结束。定植株距分别为 40、46、54 cm, 平均行距为 65 cm, 即定植密度分别为 3.85、3.34 和 2.85 株·m⁻²。在田间不同密度区分别选取 5 株有代表性的番茄植株, 作为活体观测的样本, 每隔 2~3 d 定期观测茎节数、叶片数、果实数。在生长发育期间留 23~25 穗果。试验 6 用于模型验证。

各试验的栽培管理均与一般生产相同。试验 1~5 的温室内日平均气温来源于气象资料模拟模型的输出^[7]。试验 6 中的温室内日平均温度由美国的 HOBO 温湿度自动采集仪实测值计算得出。日平均温室与试验 1~5 中的番茄茎、叶、果数的观测数据结合用以确定番茄发育的最适温度。

1.3.2 节点最大出现速率的计算方法

根据 William A 的方法^[13], 对试验观测资料进行整理并计算节点出现速率。第 2 次观测到第 3 次观测期的节点出现速率, 是由第 1 个和第 3 个观测期之间平均每天的节点出现速率与第 2 个和第 4 个观测期平均每天的节点出现速率之和的平均值求出的。第 1 个到第 2 个观测期节点出现速率由第 1 个和第 3 个观测期之间的平均每天节点出现速率表示, 最后一个观测期与前一个观测期之间的节点出现速率由最后一个观测日和倒数第 3 个观测日之间的平均每天节点出现速率表示。计算出在番茄定植后各个时期的新节点出现速率, 从中选出最大的值作为节点最大出现速率。

1.4 模型的验证方法

采用行为散点图方法来验证模型有效性。即以实测数据作为横坐标，以模拟数据作为纵坐标作散点图，通过判断这些点与直线 $y=x$ ，（即完美的拟和曲线）的位置关系来检验模型的有效性。

2 结果与分析

2.1 模型参数的确定

模型所需要的参数有式 (4) $r_L(T)$ 中的 T_{\min} 、 T_{optd} 、 T_{optu} 和 T_{maxd} ，分别取值为 4.0、28.0、35.0 和 50.0℃^[14-17]；公式 (6) $F_n(T)$ 中的 T_{\min} 、 T_{opt} 、 T_{max} 分别取值为 10.0、28.0 和 45.0℃^[18]；公式 (7) $F(C)$ 中的 a 、 b 分别取值为 0.895 和 0.0003^[19]。这些参数的取得是结合文献中的试验结果确定的。

采用节点最大出现速率的计算方法对试验 1~5 所观测的叶片数随发育进程的变化确定番茄植株单株节点最大出现速率 INTRAT 平均为 0.4071 个节点/天。并对日光温室番茄植株发育的最适温度范围进行验证，与文献中所报道的结果是一致的，即 28~35℃ 是番茄植株发育的最适温度，低于或高于最适温度，发育速度都会降低。编程采用 Vc++ 语言。给定初始变量如定植日期、定植时的茎节数以及每日的日平均温度等后，可运行模型程序。

2.2 番茄茎节形成模拟模型运行结果

番茄茎节形成模拟模型运行结果输出的是自模拟日

开始，每天的每 m^2 上的茎节数。

图 1 绘出了 2000—2002 年的 3 a 共 5 期试验的番茄茎节数实测值与模拟值对比结果。从图中可以看出，二者的趋势一致，基本吻合。在番茄茎节的整个生育期内，茎节形成随时间而不断递增。

图 1a 为试验 1（1999 年 11 月 1 日播种，2000 年 1 月 6 日定植）中番茄茎节数模拟值与实测值随时间的变化。从图中可以看出，茎节数的模拟值与实测值吻合较好，平均相对误差为 9%。

图 1b 为试验 2（2000 年 12 月 4 日播种，2001 年 3 月 7 日定植）中番茄茎节数模拟值与实测值随时间的变化。茎节数的模拟值与实测值平均相对误差为 7%。

图 1c 为试验 3（2000 年 12 月 19 日播种，2001 年 3 月 17 日定植）中番茄茎节数模拟值与实测值随时间的变化。模拟值与实测值平均相对误差为 0.9%。

图 1d 为试验 4（2001 年 9 月 27 日播种，2001 年 11 月 16 日定植）中番茄茎节数模拟值与实测值随时间的变化。茎节数的模拟值低于实测值，平均相对误差较大，为 15.8%。

图 1e 为试验 5（2001 年 11 月 2 日播种，2001 年 12 月 27 日定植）中番茄茎节数模拟值与实测值随时间的变化。茎节数的模拟值与实测值平均相对误差为 1.7%。

4 次试验茎节数的模拟值与实测值平均相对误差为 6.15%。

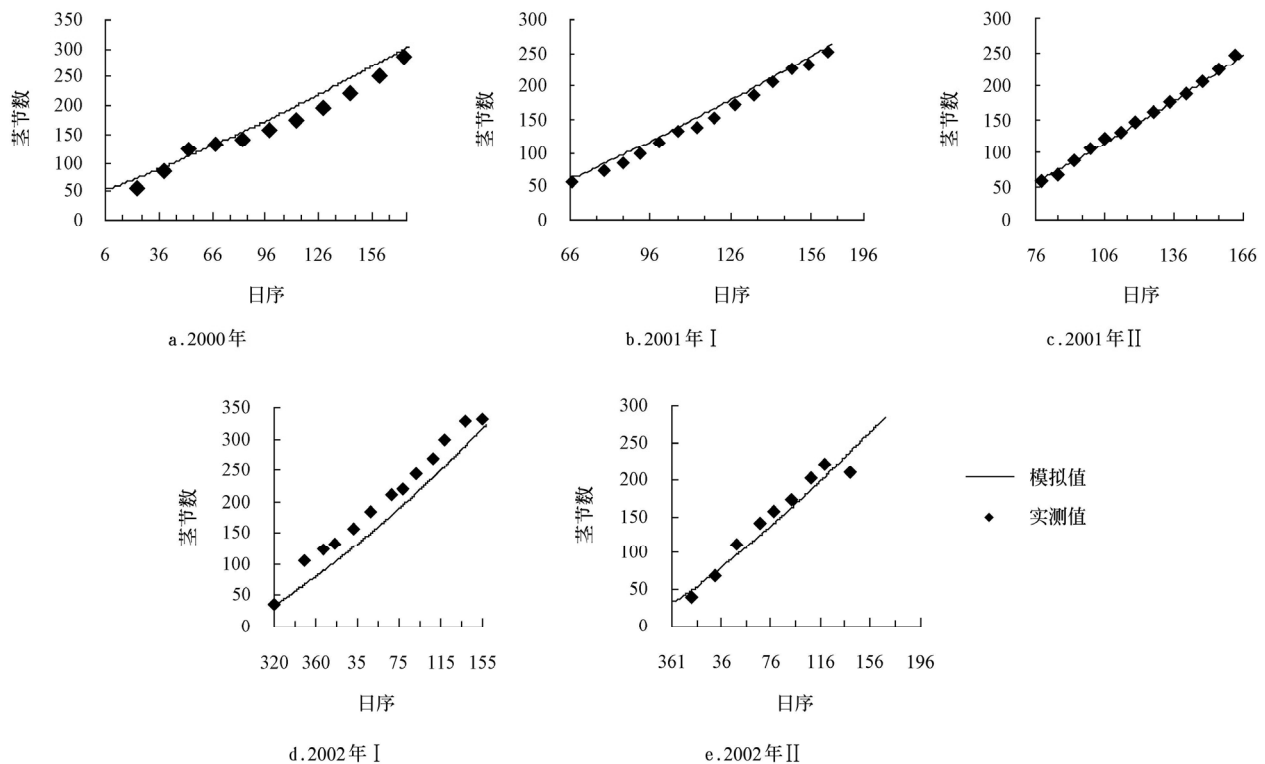


图 1 不同年份番茄茎节形成的模拟值与观测值随时间的变化

Fig.1 Simulated and measured number of stem nodes history at tomato plant in given years

2.3 番茄茎节形成模拟模型的检验

利用试验 6(2005 年 11 月 1 日至 2006 年 7 月 30 日，

该试验数据没有参与参数确定)中不同株距(40、46、54 cm)的番茄茎节数实测值对模型的模拟值进行验证，

二者随时间的变化如图 2a~c 所示。从图中可见番茄茎节数模拟值与实测值的变化趋势一致, 二者基本吻合, 平均相对误差分别为 0.7%、3.1% 和 4.6%。茎节数的模拟值与验证试验中实测值吻合很好。

把试验 6 的模拟结果与实测结果用 1:1 作图法进行检验, 如图 2d 所示。试验 6 的同一播期 3 个密度的试验茎节数模拟值与实测值的 R^2 为 0.9964, 截距为 -8.8, 表明每平米模拟值比实测值平均偏低 8.8 个茎节。

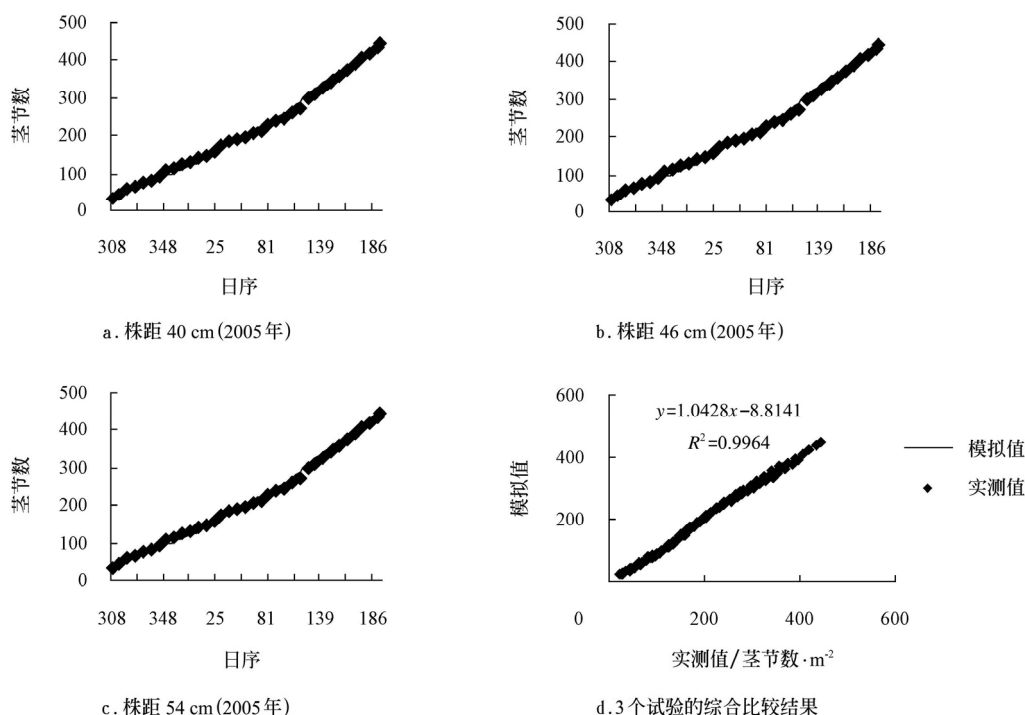


图 2 不同密度番茄茎节形成的实测值与模拟值的比较

Fig.2 Comparison of measured and simulated value of tomato stem node number in given densities

3 结论与讨论

本文确定了番茄茎节形成的数学模拟模型中的主要参数节点最大出现速率。用实验资料与温度资料进行对比, 对番茄发育的最适温度进行了确认。使模型得以本地化。经试验资料初步拟合检验, 茎节数模拟结果与实测值基本吻合, 整体趋势较好。采用 3 a 5 个播期相同密度的试验数确定了模型中所需的参数。用 1 a 内 3 个密度的试验数据进行模型验证, 茎节数模拟值与实测值的 R^2 为 0.9964。拟合检验较为成功, 说明模式性能较好, 为叶片数和果实数的模拟奠定了基础。

实际的番茄生产系统是比较复杂的, 应包括许多的生态因子, 这些因子都直接或间接地影响作物的生长发育, 但有些因子起着主导作用如光、温、水等, 本文中并没有单独考虑光照的影响, 因为北方的日光温室内的温室与光照关系十分密切。不仅番茄茎节、叶片、果实数的变化本身受温度、 CO_2 浓度、光照水平的影响, 而且干物质在果实和营养体间的分配也会影响叶、果的数量变化, 但对茎节数量的变化影响很小。因为我们的研究目的是为了环境控制, 因此需要的是一个相对简单又能描述出温室环境下番茄生长以及产量的变化。本文建立的番茄茎节的形成模型是复杂的作物生产系统的一种简化而稳定的表现形式, 其可靠性经过长期不断的试验资料

加以检验和修正, 将会逐步得到完善。对试验 1~5 的田间试验进行模拟时采用的温室内气温是根据温室外辐射、最高气温、最低气温、日较差这些常规气象资料用不同季节的统计模型计算得出的, 有一定地域性限制, 验证试验中采用了实际监测的温室内温度作为驱动因子, 拟合检验比较成功, 也间接说明使用这一温度模型没有影响本模型的精度。

试验没有进行 CO_2 浓度的处理。因北方日光温室冬季绝大部分时间仍然需要放风, 白天揭苫后到盖苫前 CO_2 浓度平均值的变化幅度不大^[20], 在程序中假设 CO_2 浓度为 $400 \mu\text{L/L}$, 此时 CO_2 浓度对节点出现速率的影响系数近似于 1。如果 CO_2 浓度达到 $2\ 000 \mu\text{L/L}$ 时它的影响系数近似为 1.5。而实际不施 CO_2 气肥时白天大部分时间是处在 $400 \mu\text{L/L}$ 左右。这一假设对模拟的结果可能不会有影响。如果在温室中有效增施 CO_2 , 会抑制番茄株高、茎粗、节间长度的增长, 有利于干物质向果实分配, 提高产量和品质^[21]。但 CO_2 浓度对番茄茎节点出现速率的影响, 还有待于进一步在试验中证实。

模型有效性验证所使用的数据是独立于确定模型参数时所用的试验数据的。因此该模型的研究方法以及结果可以作为研究日光温室番茄叶片数和果实数量模拟模型的参考。

模型的构建是在假设肥水管理适宜以及无病虫害时

番茄生长仅受气象条件影响的情形。本试验在实际生产中不可避免出现管理不善和病虫害等因素,但这些因素得到及时调整和有效控制,从田间试验中可看出番茄茎节数几乎不会受到影响,但叶片和果实数会受影响。

[参 考 文 献]

- [1] Gary C, Jones J W, Tchamitchian M. Crop modeling in horticulture: state of the art[J]. *Scientia Hort*, 1998, 74(1/2): 3—20.
- [2] Santos J R A, Gomez A A, Rosario T L. A model to predict the yield of determinate tomatoes[J]. *Scientia Horticulturae*, 1992, 50: 89—105.
- [3] Jones J W, Dayan E, Van Keulen H. Modeling tomato growth for optimizing greenhouse temperatures and carbon dioxide concentrations[J]. *Acta horticulture*, 1989, 248: 285—294.
- [4] Wolf S, Ruddic J, Marani A. Predicting harvesting date of processing tomatoes by a simulation model[J]. *J Amer Soc Hort Sci*, 1986, 111(1): 11—16.
- [5] 孙忠富, 陈人杰. 温室作物模型与环境控制管理研究[J]. *中国生态农业学报*, 2003, 11(4): 1—2.
Sun Zhongfu, Chen Renjie. Greenhouse crop model and environmental control and management[J]. *Chinese Journal of Eco—Agriculture*, 2003, 11(4): 1—2. (in Chinese with English abstract)
- [6] 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.
Ni Jiheng, Luo Weihong, Li Yongxiu, et al. Simulation of the development of tomato in greenhouse[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(6): 1219—1225. (in Chinese with English abstract)
- [7] 罗新兰. 日光温室番茄生长发育及干物质生产模拟模型的研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学园艺学院, 2005: 41—51.
Luo Xinlan. Studies on simulation model of growth development and dry matter product of tomato in solar greenhouse[D]. Shenyang: College of Horticulture of Shenyang Agricultural University, 2005: 41—51. (in Chinese with English abstract)
- [8] 罗新兰, 李天来, 姚运生, 等. 日光温室气象要素及番茄单叶光合速率日变化模拟的研究[J]. *园艺学报*, 2004, 31(5): 607—612
Luo Xinlan, Li Tianlai, Yao Yunsheng, et al. Simulation of diurnal variation of weather factors and photosynthesis of individual tomato leaves in greenhouse[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2004, 31(5): 607—612. (in Chinese with English abstract)
- [9] 孙忠富, 陈人杰. 温室番茄生长发育动态模型与计算机模拟系统初探[J]. *中国生态农业学报*, 2003, 11(2): 84—88.
Sun Zhongfu, Chen Renjie. A preliminary study on the dynamic model and computer simulation system of greenhouse tomato growth[J]. *Chinese Journal of Eco—Agriculture*, 2003, 11(2): 84—88. (in Chinese with English abstract)
- [10] Dayan E, Van Keulen H, Jones J W. Development, calibration and validation of a greenhouse tomato growth model: I Description of the model[J]. *Agricultural System*, 1993, 43(2): 145—163.
- [11] Jones J W, Dayan E, Allen L H, et al. A dynamic tomato growth and yield model(TOMGRO)[J]. *Trans of ASAE*, 1991, 34(2): 663—672.
- [12] Yin Xinyou, Kropff M J, McLaren G, et al. A nonlinear model for crop development as a function of temperature[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1995, 77(1/2): 1—16.
- [13] William A. Avoiding bias in calculations of relative growth rate[J]. *Annals of Botany*, 2002, 90: 37—42.
- [14] 胡文海, 喻景权. 低温弱光对番茄植株生长发育及生理功能的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2003, 11(3): 55—57.
Hu Wenhai, Yu Jingquan. Effects of low temperature and low light on the growth, development and physiological functions of tomato plants[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2003, 11(3): 55—57. (in Chinese with English abstract)
- [15] Hansen L D, Mohammee Afzal, Breidenbach R W, et al. High- and low-temperature limits to growth of tomato cells[J]. *Planta*, 1994, 195(1): 1—9.
- [16] 丁兆堂, 卢育华, 徐坤. 环境因子对番茄光合特性的影响[J]. *山东农业大学学报: 自然科学版*, 2003, 34(3): 356—360.
Ding Zhaotang, Lu Yuhua, Xu Kun. Effects of environmental factors on the photosynthetic characteristics of tomatoes[J]. *Journal of Shandong Agricultural University: Natural Science*, 2003, 34(3): 356—360. (in Chinese with English abstract)
- [17] 马光恕, 廉华. 设施内环境要素的变化规律及对蔬菜生长发育的影响[J]. *黑龙江八一农垦大学学报*, 2002, 14(3): 16—20.
Ma Guangshu, Lian Hua. The change laws of the environmental factors and its effects on vegetable development in facilities[J]. *Journal of Heilongjiang August First Land Reclamation University*, 2002, 14(3): 16—20. (in Chinese with English abstract)
- [18] 日本农业渔村文化协会. 北京农业大学译. 蔬菜生物生理学基础[M]. 北京: 农业出版社, 1985: 124—128.
- [19] Dayan E, Van Keulen H, Jones J W. Development, calibration and validation of a greenhouse tomato growth model II Field calibration and validation[J]. *Agri Sys*, 1993, 43: 165—183.
- [20] 杨延杰, 郭泳, 孙晓荣, 等. 番茄长季节栽培日光室内CO₂浓度变化的分析[J]. *沈阳农业大学学报*, 2000, 31(1): 82—85.
Yang Yanjie, Guo Yong, Sun Xiaorong, et al. Analysis of CO₂ concentration change of long—season tomato cultivation in solar greenhouse[J]. *Jourml of Shcnyang Agricultural University*, 2000, 31(1): 82—85. (in Chinese with English abstract)
- [21] 邹春蕾, 吴凤芝, 刘守伟. 高浓度CO₂对番茄生长发育及光合作用的影响[J]. *中国蔬菜*, 2008, (11): 14—17.
Zou Chunlei, Wu Fengzhi, Liu Shouwei. Effect of elevated CO₂ concentration on growth, development and photosynthesis of tomato[J]. *China Vegetables*, 2008, (11): 14—17. (in Chinese with English abstract)

Simulation model of stem node growth of tomato in long season cultivation in northern solar greenhouse

Luo Xinlan^{1,3}, Li Tianlai^{1,2✉}, Qiu Jiaqi^{1,2}, Gao Xining³, Han Yadong³, Zhong Yan^{1,2}, Yan Adan^{1,2}

(1. Key Laboratory of Protected Horticulture of Liaoning province, Shenyang 110161, China;

2. College of Horticulture of Shenyang Agriculture University, Shenyang 110161, China;

3. College of Agronomy of Shenyang Agriculture University, Shenyang 110161, China)

Abstract: A simulation model of stem growth of tomato in long season cultivation in solar greenhouse was developed based on the Ecophysiological Processes of tomato organ. The foundation on which Simulation Model of leaves and fruit of Tomato would be built was the simulation model of stem segments. The varieties were Caruso and Carter Linna applied to long season cultivation in solar greenhouse. Some parameters such as maximum rate of node initiation were calculated or given. The results showed that the simulated and observed data of tomato stem were agreeable and the average relative error was 0.7%–9%. The correlation coefficients between simulated and observed data were 0.9964 and intercept was -8.8 in scatter chart, which meant the simulated data was lower than the observed data by 8.8. So the model has good performance.

Key words: solar greenhouse, simulation models, cultivation; tomato, numbers of stem nodes