

# 日光温室番茄单叶净光合速率模型的温度修正

李天来, 颜阿丹, 罗新兰, 仇家奇, 李东, 姚振坤

(沈阳农业大学, 设施园艺省部共建教育部重点实验室, 辽宁省设施园艺重点实验室, 沈阳 110161)

**摘要:** 番茄单叶净光合速率模型是温室番茄环境调控中的核心模型之一, 而温度修正模型对于正确解析番茄单叶净光合速率模型非常重要。试验根据前人确定的植物单叶净光合速率模型中最大光合速率的温度修正模型, 通过对不同的 CO<sub>2</sub> 浓度、光强和温度条件下日光温室番茄净光合速率的测定, 明确了日光温室番茄最大光合速率的温度修正模型中修正因子 C 的取值公式, 并经拟合检验, 结果表明在不同 CO<sub>2</sub> 浓度、不同光强条件下日光温室番茄最大光合速率下温度修正模型的模拟值与实测值拟合良好, 说明可将这一温度修正模型作为日光温室番茄光合模型的温度影响因子模型应用, 从而使植物单叶净光合速率模型更好地适用于日光温室番茄生产。

**关键词:** 光合作用, 速率, 模型, 温度, 修正, 日光温室, 番茄

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2010.09.045

中图分类号: S16

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2010)-09-0274-06

李天来, 颜阿丹, 罗新兰, 等. 日光温室番茄单叶净光合速率模型的温度修正[J]. 农业工程学报, 2010, 26(9): 274—279.

Li Tianlai, Yan Adan, Luo Xinlan, et al. Temperature modified model for single-leaf net photosynthetic rate of greenhouse tomato[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(9): 274—279. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

作物生长模拟模型是辅助温室作物生产环境优化调控和实现温室作物栽培优化管理的有力工具。目前国外已建立了若干室内环境控制模型和作物生长模型<sup>[1]</sup>, 其中番茄生长发育模型是研究重点之一<sup>[2-4]</sup>。番茄是中国日光温室的主栽作物, 栽培面积和市场销量均居于蔬菜之首<sup>[5]</sup>。近年来中国一些学者已在日光温室番茄生长发育模拟模型方面开展了研究<sup>[6-12]</sup>, 其中孙忠富等<sup>[13]</sup>初步建立了以太阳辐射为基本驱动因子的温室番茄生长发育模拟模型; 侯加林等<sup>[14]</sup>建立了以光合作为基础的温室番茄光合生产动态模拟模型; 倪纪恒等建立了以番茄的发育生理生态过程为基础、以作物生理发育时间为尺度的不同地点、播期和品种条件下温室番茄发育模拟模型; 朱晋宇等<sup>[15]</sup>采用源库生长单位的测定方法, 将经典的单叶同化物生产模型与 GreenLab 模型相结合, 构建了干物质向源库生长单位内茎节、叶片、果实分配的动态模型, 并在越冬茬、早春茬和春夏茬温室番茄生产中进行了验证。然而, 番茄生长发育的原动力是番茄叶片的净光合, 多数作物生长机理性模型也均是以光合作用为驱动的<sup>[16-17]</sup>。因此, 选择好的叶片光合速率模型以及准确确定参数对于优化番茄环境调控和栽培管理尤为重要, 但有关中国日光温室番茄净光合的模拟模型因日光温室缺乏

环境监测设备而至今系统研究尚未完善。

本研究采用日光温室番茄长季节栽培方式, 探讨日光温室番茄单叶净光合速率与主要环境因子的关系。通过测定不同的温度、CO<sub>2</sub> 以及光强组合条件下的番茄叶片净光合速率, 从而建立番茄净光合速率模型中最大光合速率的温度修正模型, 为日光温室的栽培管理提供科学的参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料与处理

试验于 2008 年 5 月—2009 年 5 月在沈阳农业大学工厂化高效农业工程技术中心科研基地内进行。供试番茄 (*Lycopersicon esculentum* Mill.) 品种为“辽园多丽”。番茄采用基质穴盘育苗, 当幼苗的第 6 片真叶完全展开时, 将其定植于装有园土: 草炭: 鸡粪=4: 3: 1 的塑料栽培桶中, 植株行距为 80 cm, 株距 25 cm, 共种 200 株, 长季节栽培常规管理。待番茄植株长到第 5 花序第 1 花开花时, 将试验植株移入人工气候室 I 中, 进行适温栽培。人工气候室的面积为 6 m<sup>2</sup>, 采用电热加温, 人工光源, 空调制冷, 自动加湿。6:00 开始升温, 9:00 时达到 25℃ 适温, 保持此温度至 16:00 开始降温, 到 18:00 时降到 18℃, 保持 18℃ 到 23:00, 从 23:00 开始降温, 到次日 2:00 达到 15℃, 调控此温度至 6:00。光照强度设置为: 6:00—9:00 为 400~600 μmol/(m<sup>2</sup>·s), 9:00—16:00 为 1 000~1 100 μmol/(m<sup>2</sup>·s), 16:00—18:00 为 400~600 μmol/(m<sup>2</sup>·s)。湿度控制为 60% 恒湿。次日早 9:00 左右将试验植株放入另一人工气候室中 (人工气候室 II) 进行温度处理, 当人工气候室中温度达到测定温度, 光强设定为 400~600 μmol/(m<sup>2</sup>·s), 湿度控制为 60% 恒湿,

收稿日期: 2010-01-06 修订日期: 2010-06-12

基金项目: 国家“863”基金项目 (2006AA10Z222); 国家支撑计划项目 (2006BAD07B04, 2006BAD04B08-05); 大宗蔬菜产业技术体系项目 (Nycytx-35-gw23)

作者简介: 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, 110866。Email: tianlaili@126.com

将人工气候室 I 中的植株搬进 II 中，让其在人工气候室 II 中进行温度处理 2 h，测定此条件下不同环境组合的番茄叶片净光合速率。在本试验中，温度设定由人工气候室控制，同时测定时光合仪设定温度，光强和 CO<sub>2</sub> 由光合仪提供，本试验使用的是带 CO<sub>2</sub> 注入系统的 LI-6400 光合仪。

本试验在番茄净光合速率测定时，温度分别设定为 15、18、20、23、25、28、30、33、35、38、40、43℃；光强分别设定为 300、400、500、600、700 μmol/(m<sup>2</sup>·s)；CO<sub>2</sub> 浓度分别设定为 300、400、600 μL/L。

### 1.2 检测指标与方法

当温度、CO<sub>2</sub> 一定时，做光响应曲线。做光响应曲线时，最小取值时间设定为 120 s，最大取值时间设定为 240 s。光合仪采用人工光源（LED 红蓝光源）设定，CO<sub>2</sub> 注入采用 CO<sub>2</sub> 小钢瓶。本试验在番茄长至第 5 花序第 1 花开花时，选择生长健壮番茄植株自上向下数第 3 花序下面完好叶片的中部小叶进行测量，共测 3 片叶，即每个处理组合做 3 次重复，结果取平均值。

用于构建温度修正模型所用的数据为：CO<sub>2</sub> 浓度为 400 μL/L 时，测定不同温度、不同光强条件下的净光合速率共 60 个组合。用于检验温度修正模型的数据为：CO<sub>2</sub> 浓度为 300、600 μL/L 时，测定不同温度、不同光强条件下的净光合速率共 120 个组合。

### 1.3 模型的验证方法

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

## 2 结果与分析

### 2.1 温度修正模型的描述

番茄叶片光合速率可以用单位叶面积的光合速率来表示。用于描述植物叶片光合作用对光强和 CO<sub>2</sub> 浓度的响应方程有很多种。本试验中的番茄单叶净光合速率采用最常见的叶片光合速率公式<sup>[18]</sup>。

$$P = \frac{\alpha \cdot I \cdot P_{\max}}{\alpha \cdot I + P_{\max}} \quad (1)$$

式中：α——叶片光合量子效率，本文中 α 取值为 0.056<sup>[20]</sup>；I——叶片获得的光合有效辐射；P<sub>max</sub>——光饱和水平下的最大光合速率，它是 CO<sub>2</sub> 浓度的函数，且受温度函数 f(T<sub>leaf</sub>) 的调节<sup>[20]</sup>。P<sub>max</sub> 可以用公式 (2) 来表示

$$P_{\max} = P_{\max}(T_{\text{opt}}) \cdot f(T_{\text{leaf}}) \quad (2)$$

P<sub>max</sub>(T<sub>opt</sub>) 为最适温度下某一 CO<sub>2</sub> 浓度以及光饱和条件下的最大光合速率。在本模型中以 CO<sub>2</sub> 为 400 μL/L 时的数据作为建模数据，求出此时的最大光合速率为 16.19 μmol/(m<sup>2</sup>·s)，即在本文中 P<sub>max</sub>(T<sub>opt</sub>) 的取值为 16.19 μmol/(m<sup>2</sup>·s)。f(T<sub>leaf</sub>) 为叶温对 P<sub>max</sub> 的调节函数，参考 Yin X, M.J. Kropff 的研究<sup>[19]</sup> f(T<sub>leaf</sub>) 可以用公式 (3) 表示

$$f(T_{\text{leaf}}) = \left[ \left( \frac{T_{\max} - T}{T_{\max} - T_{\text{opt}}} \right) \left( \frac{T - T_{\min}}{T_{\text{opt}} - T_{\min}} \right) \left( \frac{T_{\text{opt}} - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\text{opt}}} \right)^C \right] \quad (3)$$

式中：T、T<sub>min</sub>、T<sub>opt</sub>、T<sub>max</sub>——番茄生长的环境温度、最低温度、最适温度和最高温度；C——温度修正系数。

根据上述公式，当 C=0.5, C=1, C=2, C=3, C=4 时，此时 f(T<sub>leaf</sub>) 的变化情况如图 1 所示。从图 1 中可知，温度的基本模型随着 C 值的增加，其模型的坡度变陡，变化趋势变大。当 T < T<sub>opt</sub> 时，随着温度的增加，f(T<sub>leaf</sub>) 也随着增加，但增加值越来越小；当 T = T<sub>opt</sub> 时，f(T<sub>leaf</sub>) 达到最大值；当 T > T<sub>opt</sub> 时，随着温度的增加，f(T<sub>leaf</sub>) 也随着减小，但减小值越来越小。根据试验数据可知，当光强为 300~700 μmol/(m<sup>2</sup>·s) 时，f(T<sub>leaf</sub>) 随着温度的升高而升高，当达到最适温度时，又随着温度的升高而降低。在最适温度之前，其上升快速，后期下降缓慢。根据番茄净光合速率的多次拟合，最后确定 C 的取值为公式 (4)

$$C = \frac{T_{\text{opt}}}{T} \quad (4)$$

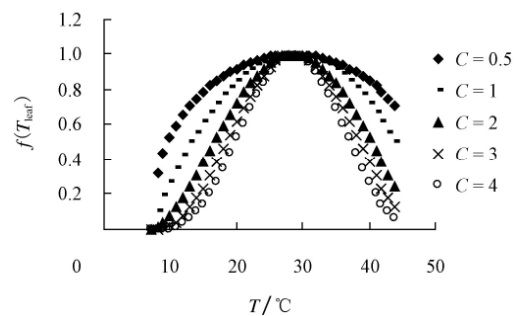


图 1 不同 C 值对 f(T) 的影响  
Fig.1 Effects of f(T) in given C values

### 2.2 温度修正模型的运行

#### 2.2.1 不同 CO<sub>2</sub> 浓度下番茄单叶净光合速率模型中温度修正模型的运行

图 2 表示不同 CO<sub>2</sub> 浓度下日光温室番茄单叶净光合速率模型中温度修正模型的运行结果。模型所需要的参数在公式 (3) 中的 T<sub>min</sub>、T<sub>opt</sub>、T<sub>max</sub> 分别取值为 7、28 和 50℃<sup>[20]</sup>。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，即番茄在 7~50℃ 之间均有净光合速率，其中 24~34℃ 为番茄光合作用适宜温度范围，尤其是 26~32℃ 为最适温度，低于或高于最适温度，发育速度都会降低<sup>[16]</sup>。当 CO<sub>2</sub> 浓度为 400 μL/L 时，此时求出的模拟净光合速率如图 2a 中实线所示，所测得的实测值与模拟曲线拟合良好。当 CO<sub>2</sub> 浓度为 300 μL/L 时，此时的模拟净光合速率如图 2b 中的实线所示，从图中可以看出，实测值与模拟曲线整体趋势一致，虽然因验证时 CO<sub>2</sub> 浓度低于建立模型时 CO<sub>2</sub> 浓度而导致实测值普遍低于模拟曲线，但实测值与模拟曲线拟合良好。当 CO<sub>2</sub> 浓度为 600 μL/L 时，此时求出的模拟净光合速率如图 2c 所示，从图中可以看出，实测值与模拟曲线整体趋势一致，虽然因验证时 CO<sub>2</sub> 浓度高于建立

模型时的  $\text{CO}_2$  浓度而导致实测值普遍高于模拟曲线，但 实测值与模拟曲线拟合良好。

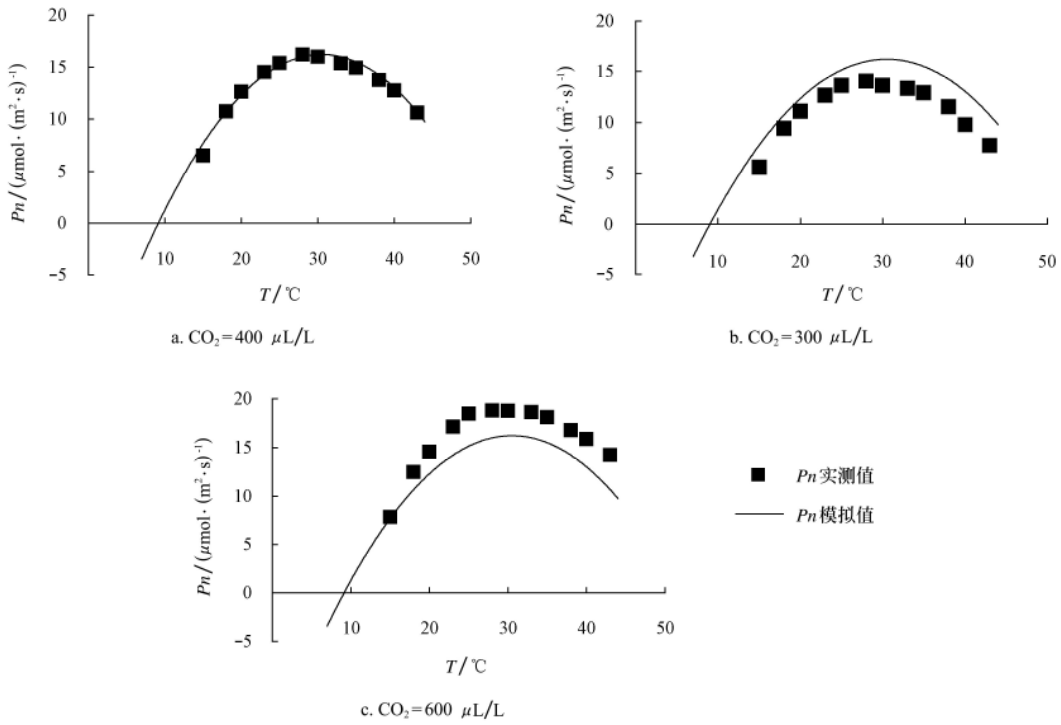


图 2 不同  $\text{CO}_2$  浓度下番茄最大光合速率温度修正模型的运行结果

Fig.2 Comparison of the results of the temperature modified model of the maximum photosynthetic rate of tomato leaves in given  $\text{CO}_2$  concentrations

2.2.2 温度修正模型的运行

图 3 表示当  $\text{CO}_2$  浓度为  $400 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  时，不同光强下番茄单叶净光合速率模型中温度修正模型的运行结果。从图 3 中可看出，在光强和  $\text{CO}_2$  一定的条件下，

番茄净光合速率随着温度的升高而升高，当净光合速率达到最大值时又会下降。净光合速率的模拟值与实测值拟合良好。说明温度修正模型运行结果较好。

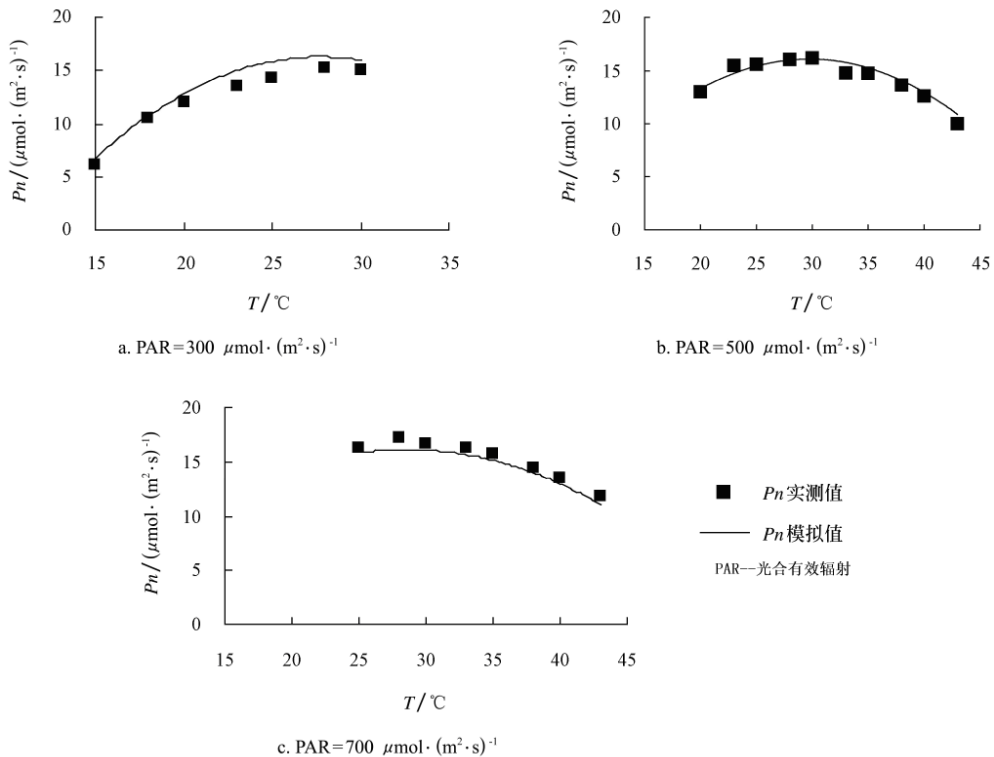


图 3 不同光强下番茄最大光合速率温度修正模型的运行结果

Fig.3 Comparison of the results of the modify model of the maximum photosynthetic rate of tomato leaves in given light intensity

### 2.3 温度修正模型的检验

图4表示不同CO<sub>2</sub>条件下番茄单叶净光合速率模型中温度修正模型检验,其中虚线为 $y=x$ 。从图4a、b、c 3幅图的模拟看,当CO<sub>2</sub>浓度为400 μL/L时模拟的实测曲线与 $y=x$ 完美拟合,曲线趋于重合,而当CO<sub>2</sub>浓度为300 μL/L时,实测值都低于模拟曲线,但实测曲线平行于 $y=x$ (模拟曲线),这主要是由于本试验中建模所用的

CO<sub>2</sub>浓度为400 μL/L,而当CO<sub>2</sub>浓度降低时,其最大净光合速率也随着降低引起的。实测曲线平行于模拟曲线并且实测值较集中,说明拟合良好。当CO<sub>2</sub>浓度为600 μL/L时,实测值都高于模拟曲线,但实测曲线平行于 $y=x$ (完全拟合曲线),这主要是由于CO<sub>2</sub>浓度不同引起的,即CO<sub>2</sub>浓度升高时,其最大净光合速率也随着升高。实测曲线平行于模拟曲线且实测值较集中,说明拟合良好。

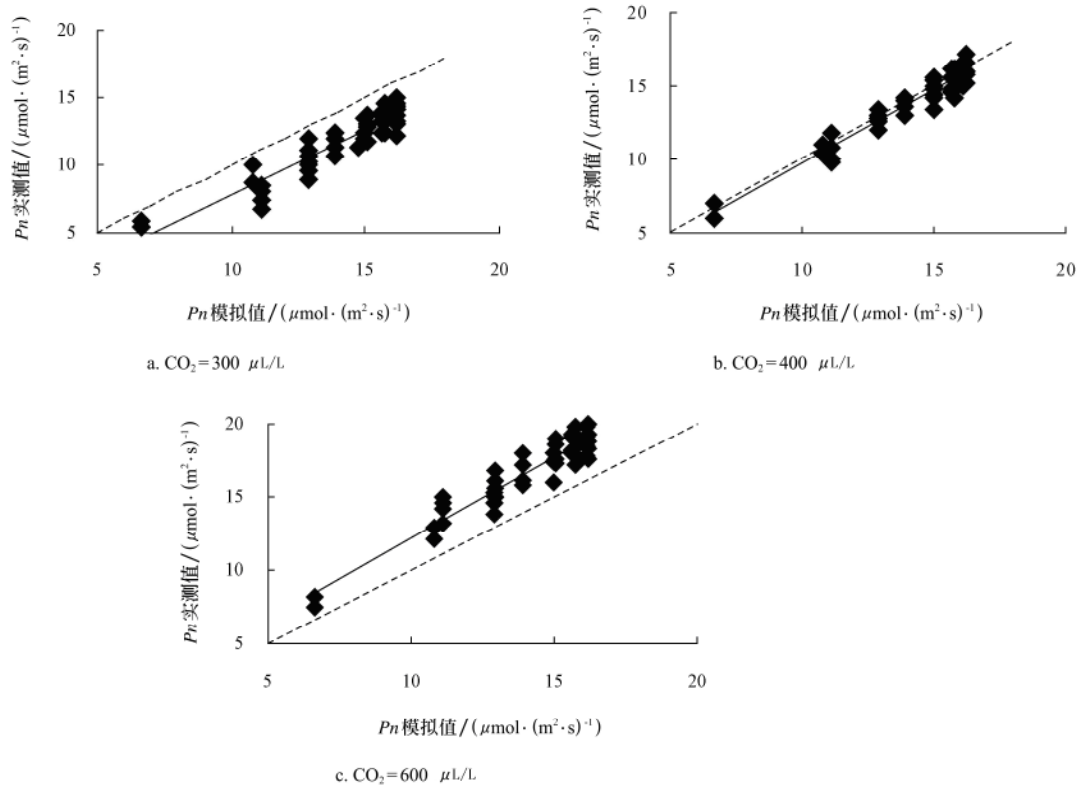


图4 不同CO<sub>2</sub>浓度下番茄最大净光合速率的实测值与模拟值的比较

Fig.4 Comparison of measured and simulated value of tomato leaves maximum photosynthetic rate in different CO<sub>2</sub> concentration

### 3 结论

1) 通过对不同CO<sub>2</sub>浓度、不同光强、不同温度条件下日光温室番茄单叶净光合速率的测定,结合前人的模型,确定了番茄单叶净光合速率模型中最大光合速率的温度修正模型,并明确了番茄光合速率模型修正因子C的取值公式。

2) 通过不同CO<sub>2</sub>浓度条件下日光温室番茄最大光合速率温度修正模型的运行,结果表明,当CO<sub>2</sub>浓度为400 μL/L时,模型的实测值与模拟值拟合良好;当CO<sub>2</sub>浓度为300 μL/L时,实测值较模拟值偏低,但总体趋势一致;当CO<sub>2</sub>浓度为600 μL/L时,实测值较模拟值偏高,但总体趋势一致。运行结果出现偏移主要是由于CO<sub>2</sub>浓度不同引起的。

3) 通过不同光强下日光温室番茄最大光合速率温度修正模型的运行,结果表明:当光强分别为300、500、700 μmol/(m<sup>2</sup>·s)时,温度修正模型的模拟值与实测值拟合良好。

综合上述结果,本研究中番茄单叶净光合速率模型

中最大光合速率的温度修正模型可作为日光温室番茄光合模型的一个温度影响子模型来应用。

### 4 讨论

作物光合作用是一个复杂的过程,它既受作物本身遗传及叶龄等内在因素的控制,也受光照、温度、CO<sub>2</sub>浓度、湿度、土壤营养等外在环境因素的影响<sup>[21]</sup>。因此研究作物光合作用模拟模型,除了考虑作物种类、品种和叶龄以外,需要考虑各种环境因素的影响。应该说,影响作物光合作用的各种环境因素均具有同等的重要作用,然而,正常温室作物栽培条件下,由于土壤营养及水分比较容易接受常规人工调控,而温度、光照及CO<sub>2</sub>浓度的调控需要较高的投入,同时需要有日变化,调控难度相对较大,因此,研究温室作物光合作用模拟模型多假定在土壤营养及水分适宜条件下研究温度、光照及CO<sub>2</sub>浓度等环境与作物光合作用的关系<sup>[21]</sup>。本研究解析的番茄单叶净光合速率模型中最大光合速率的温度修正模型,只是解析的番茄单叶净光合速率模型的问题之一,其他环境修正模型尚需进一步研究确定。

关于番茄单叶净光合速率模型, 主要有负指数模型<sup>[22]</sup>、直角双曲线方程<sup>[23]</sup>等。本研究采用的

$$P = \frac{\alpha \cdot I \cdot P_{\max}}{\alpha \cdot I + P_{\max}}$$
模型是目前最常用的模型, 这个模型的主要

特点是番茄单叶光合作用主要受光合有效辐射的影响, 同时  $P_{\max}$  为光饱和水平下的最大光合速率, 它是  $\text{CO}_2$  浓度的函数, 且受温度函数  $f(T_{\text{leaf}})$  的调节, 因此较适合日光温室番茄单叶净光合速率建模。有关番茄单叶净光合速率模型解析研究, 罗新兰等对冬春季节晴天不放风、晴天放风、阴天不放风 3 种情况下日光温室内光合有效辐射、温度、 $\text{CO}_2$  浓度和番茄单叶光合速率日变化进行模拟, 并将其模拟结果与实测结果进行对比; 郭泳等<sup>[24]</sup>论述了环境与番茄净光合速率间的关系及番茄净光合速率的日变化规律, 但这些研究均缺乏对环境因素影响的修正。本研究根据试验数据并结合前人的文献资料确定了番茄光合速率模型中最大光合速率的温度修正模型, 并通过对不同  $\text{CO}_2$  浓度、不同光强、不同温度条件下日光温室番茄净光合速率的测定, 确定了修正因子  $C$  的取值公式, 同时在不同  $\text{CO}_2$  浓度、不同光强条件下进行了验证, 证实了番茄最大光合速率的温度修正模型的模拟值与实测值拟合良好。说明这一温度修正模型可作为番茄单叶净光合速率模型的一个温度影响子模型来应用。

本研究采用的叶片为番茄植株长至第 5 花序时自上而下数第 3 花序下面叶片, 这种叶片的叶龄正处于功能叶片阶段, 可代表植株生长的正常叶片平均水平, 但并不是所有叶片均符合这一温度修正。同时, 本研究采用的番茄品种为中国广泛应用的粉色大型果普通栽培番茄品种; 而且  $\text{CO}_2$  浓度采用接近室外空气中  $\text{CO}_2$  浓度的  $400\mu\text{L/L}$ , 肥水管理适宜以及无病虫害, 因此, 本模型仅适合上述限定条件应用, 其他条件下的修正模型还有待于进一步研究。

#### [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(1/2): 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]. *Amer Soc Hort Sci*, 1986, 111(1): 11—16.
- [5] 张光星, 王靖华. 番茄无公害生产技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003.
- [6] 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)
- [7] 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)
- [8] 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, 2005.  
Luo Xinlan. Study on Simulation Model of Growth Development and Dry Matter Product of Tomato in Solar Greenhouse[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2005. (in Chinese with English abstract)
- [9] 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)
- [10] 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)
- [11] 徐刚, 张昌伟, 李德翠, 等. 温室番茄光合生产和干物质积累模型的建立[J]. *内蒙古农业大学学报*, 2007, 28(3): 171—176.  
Xu Gang, Zhang Changwei, Li Decui, et al. Simulation of photosynthesis and dry matter production in greenhouse tomato[J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University: Natural Science Edition*, 2007, 28(3): 171—176. (in Chinese with English abstract)
- [12] 徐刚, 张昌伟, 李德翠, 等. 温室长季节栽培番茄发育动态模拟模型的研究[J]. *农业工程学报*, 2005, 21: 243—246.  
Xu Gang, Zhang Changwei, Li Decui, et al. Developmental stage simulation model for long-term tomato growing in greenhouse[J]. *Transactions of the CSAE*, 2005, 21: 243—246. (in Chinese with English abstract)
- [13] 孙忠富, 陈人杰. 温室番茄动态模拟技术与模拟系统[C]//设施园艺专题研讨会论文集, 2001, 10: 1—89.
- [14] 侯加林. 温室番茄生长发育模拟模型的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2005.  
Hou Jialin. Study on Model to Greenhouse Tomato Growth and Development[D]. Beijing: Chinese Agricultural University, 2005. (in Chinese with English abstract)
- [15] 朱晋宇, 温祥珍, 李亚灵. 基于源库生长单位的温室番茄干物质生产—分配模拟[J]. *生态学报*, 2009, 29(12): 6527—6533.  
Zhu Jinyu, Wen Xiangzhen, Li Yaling. Simulation of dry matter production and partitioning based on source-sink

- growth unit in greenhouse tomato[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(12): 6527—6533. (in Chinese with English abstract)
- [16] Hogo Challa, Ep Heuvelink. Photosynthesis driven crop growth models for greenhouse cultivation: advances and bottle-necks[J]. *Acta Horticulturae*, 1996, 417: 9—22.
- [17] Marcelis L F M, Heuvelink E, Goudriaan J. Modelling biomass production and yield of horticultural crops a review[J]. *Scientia Horticulturae*, 1998, 74: 83—111.
- [18] 金之庆, 高亮之. 农业中的数学模型[M]. 北京: 气象出版社, 1987: 115—122.
- [19] Yin X, 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): 1—16.
- [20] 侯加林, 王一鸣, 徐云, 等. 番茄生长发育非线性模拟模型[J]. *农业机械学报*, 2006, 37(3): 80—83.  
Hou Jialin, Wang Yiming, Xu Yun, et al. Simulation model of tomato growth[J]. *Transactions of the CSAM*, 2006, 37(3): 80—83. (in Chinese with English abstract)
- [21] 王忠. 植物生理学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [22] Goudriaan J. A simple and fast numerical method for the computation of daily totals of crop photosynthesis[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1986, 38(1/2/3): 249—254.
- [23] Jones J W, Dayan E, Allen L H, et al. A dynamic tomato growth and yield model[J]. *Transactions of the ASAE*, 1991, 34(2): 663—672.
- [24] 郭泳, 李天来, 黄广学, 等. 环境因素对番茄单叶净光合速率的影响[J]. *沈阳农业大学学报*, 1998, 29(2): 127—131.  
Guo Yong, Li Tianlai, Huang Guangxue, et al. Effect of environment factors on the net photosynthesis rate of tomato leaf blade[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 1998, 29(2): 127—131. (in Chinese with English abstract)

## Temperature modified model for single-leaf net photosynthetic rate of greenhouse tomato

Li Tianlai, Yan Adan, Luo Xinlan, Qiu Jiaqi, Li Dong, Yao Zhenkun

(Key Laboratory of Protected Horticulture of Liaoning province, College of Horticulture of Shenyang Agriculture University, College of Agronomy of Shenyang Agriculture University, Shenyang 110866, China)

**Abstract:** Environmental factors modified model has an important role for single-leaf net photosynthetic rate of greenhouse tomato in environmental regulation. Based on experimental data and prediction literature, fundamental temperature modified model for the maximum photosynthetic rate of greenhouse tomato in single-leaf net photosynthetic rate was developed. Through the net photosynthetic rate in the different CO<sub>2</sub> concentrations, different light intensity, and different temperature, a part of the data used to determine the parameters in the model, other of the data used to test the model results. The results, which were determined by the value of the correction factor C formula and by the fit test, showed that the simulated and observed data of net photosynthetic rate of the tomato leaf simulation model fitted well. This model could be as a sub-model of the photosynthetic simulation model of tomato in greenhouse, so that the photosynthetic model of tomatoes tends to be perfect. Single-leaf net photosynthetic rate of plant model is better suited for greenhouse tomato production.

**Key words:** photosynthesis, speed, model, temperature, modified, greenhouse, tomato