

# 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

罗新兰<sup>1</sup> 李天来<sup>1\*</sup> 姚运生<sup>2</sup> 刘子英<sup>3</sup> 高丽萍<sup>4</sup>

(<sup>1</sup> 沈阳农业大学园艺学院, 沈阳 110161; <sup>2</sup> 吉林农业科技学院, 吉林 132400; <sup>3</sup> 河北工程学院, 邯郸 057150; <sup>4</sup> 沈阳观象台, 沈阳 110168)

**摘要:** 对冬春季晴天不放风、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 (PAR)、温度、CO<sub>2</sub> 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。结果表明: 晴天不放风情况下, PAR、温度和 CO<sub>2</sub> 浓度日变化模拟较好, 上午番茄单叶光合速率的模拟效果好于下午; 晴天放风情况下, 温度、CO<sub>2</sub> 浓度日变化模拟较好, 但 PAR 的日变化模拟效果一般, 可能与大气的透明系数或温室薄膜透光率的日变化有关, 但光合作用的模拟值与实测值比较一致; 阴天不放风情况下, 温度和 CO<sub>2</sub> 浓度模拟值与实测值趋势一致, 而 PAR 的模拟值与实测值存在较大偏差, 光合速率、PAR 的模拟值趋势同步, 进一步证明了阴天天光强对光合速率的影响非常重要。

**关键词:** 日光温室; 番茄; 气象要素; 光合速率; 模拟模型

中图分类号: S 641.2; S 62 文献标识码: A 文章编号: 0513-353X (2004) 05-0607-06

## Simulation of Diurnal Variation of Weather Factors and Photosynthesis of Individual Tomato Leaves in Greenhouse

Luo Xinlan<sup>1</sup>, Li Tianlai<sup>1\*</sup>, Yao Yunsheng<sup>2</sup>, Liu Ziyong<sup>3</sup>, and Gao Liping<sup>4</sup>

(<sup>1</sup> College of Horticulture, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China; <sup>2</sup> Jilin Agricultural Science and Technology College, Jilin 132400, China; <sup>3</sup> Hebei University of Engineering, Handan 057150; <sup>4</sup> Shenyang Observatory, Shenyang 110168, China)

**Abstract:** The diurnal variation models of photosynthetically active radiation (PAR), air temperature, CO<sub>2</sub> concentration and leaf photosynthesis of tomato in greenhouse was developed under three conditions, fine day and no ventilation, fine day and ventilation, cloudy day and no ventilation in winter and spring. The simulated values were compared with the observed values, and the results showed: On fine day and no ventilation, PAR, air temperature and CO<sub>2</sub> concentration were well simulated, photosynthetic rate was well simulated in the morning. On fine day and ventilation, air temperature and CO<sub>2</sub> concentration were well simulated, but the simulation of PAR did not fit well with the observed values because of the effect of the diurnal variation of radiation transmission coefficient of air or transmittance of film, however, photosynthetic rate was well simulated. On cloudy day and no ventilation, the simulation of air temperature and CO<sub>2</sub> concentration were slightly higher than the observed values. There were some differences between the simulated and observed values of PAR, but the tendency of the simulation values of photosynthetic rate and PAR were the same. The effect of PAR on photosynthetic rate on cloudy day was verified. The research results will be helpful for developing the model of tomato growth and guiding production in greenhouse.

**Key words:** Greenhouse; Tomato; Weather factors; Photosynthesis; Simulation model

近年来国外温室作物生长发育模拟模型的研究发展很快, 涉及番茄、黄瓜、甜椒、茄子以及花椰

收稿日期: 2003-10-11; 修回日期: 2004-02-03

基金项目: 国家 '863' 计划项目 (2001AA247011); 国家 "十五" 重点项目 (2001BA503B06)

\*通讯作者 Author for correspondence (E-mail: tianlai@mail.sy.ln.cn)

菜等<sup>[1~3]</sup>。温室作物模型与大田作物模型相似,包括光合作用模型、作物生长发育模型、干物质积累与分配模型及产量模型等<sup>[4~6]</sup>。我国有关温室作物模拟模型报道很少。随着日光温室作物生产的蓬勃发展,借助日光温室作物生长模拟模型可以帮助人们理解和认识环境因子与生物因子之间的基本规律和量化关系,并对作物生长系统的动态行为和最终产量进行预测,从而对日光温室作物生长和生产系统进行辅助的适时合理调控,这将成为实现日光温室作物高产、优质、高效和持续发展目标的重要措施。作者以番茄为试材,试图从模拟日光温室 PAR、温度、CO<sub>2</sub>浓度日变化着手,进一步模拟日光温室番茄作物单叶光合速率的日变化,为建立日光温室番茄生长发育模拟模型提供依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 模型描述

番茄单叶光合作用速率采用最常见的叶片光合速率公式<sup>[7]</sup>:

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

式(1)中  $\alpha$  是叶片光合量子效率,本试验在 CO<sub>2</sub> 400  $\mu\text{L L}^{-1}$ 时测得  $\alpha$  为 0.056,  $I$  为叶片获得的光合有效辐射,  $P_{max}$  为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  $f(T_{leaf})$  的调节<sup>[6]</sup>。  $P_{max} = \alpha \cdot CO_2 \cdot f(T_{leaf})$ , 中  $\alpha$  为 CO<sub>2</sub> 的羧化效率,取值为 0.0664,  $CO_2$  为叶片周围环境中的 CO<sub>2</sub> 浓度,  $f(T_{leaf})$  为叶温对  $P_{max}$  的调节函数<sup>[8]</sup>。  $f(T_{leaf}) = 1 - [(T_{opt} - T_{leaf}) / (T_{opt} - T_{low})]^2$ ,  $T_{opt}$  为光合速率最大时的叶片温度,  $T_{low}$  为光合速率为零时的最低温度。

目前农业科研中使用的光合测定仪器(如 LI-6400 光合测定仪)所测定的光强一般都并非太阳总辐射,而是其中的 PAR 部分。然而,常规气象观测项目中不包括 PAR 的观测,因此只能借助于其它方法对 PAR 进行计算。瞬时 PAR 按下式计算:

$$PAR(t) = a \cdot k \cdot q(t) \quad (2)$$

其中  $a$  为在 400~700 nm 波段,由焦耳(J)向光量子( $\mu\text{mol}$ )的换算系数(约为 4.6),  $k$  为光合有效辐射 PAR 占总辐射  $Q$  的比值,取值在 0.47~0.56<sup>[9]</sup>。  $t$  时刻地面总辐射<sup>[10]</sup>  $Q(t) = (\sin \theta \sin \phi + \cos \theta \cos \phi \cos \omega) \cdot Q_0 / l$  ( $\theta$  为地理纬度,  $\phi$  为太阳赤纬,  $\omega$  为时角 ( $\omega = (t - 12) \times \pi / 12$ ,  $t$  为真太阳时时刻),  $\phi_0$  为日没时角,  $Q_0$  为地面接收到的总辐射。  $Q = r \cdot Q_0$ , 式中  $r$  为晴朗指数,即地面实际总辐射日总量与天文辐射日总量之比,由沈阳观象台多年辐射资料与计算的天文辐射值求得各月的多年平均值;  $Q_0$  为大气上界的天文辐射<sup>[11,12]</sup>。

可见当已知地理纬度、年、月、日的时候就可以计算出当地当日 PAR 的瞬时值。温室透光率取值为 0.55,可以得到温室内 PAR。

根据温室内温度日变化实测值的变化规律可以看出,温室内不加温时揭苫至盖苫的温度变化基本可以看成是一个正弦曲线的半个波,因此温室内白天温度用正弦曲线来表示:

$$T_{air}(t) = T_0 + A_T \cdot \sin[2\pi(t - t_{mor}) / \{4 \times (13 - t_{mor})\}] \quad (3)$$

其中  $T_0$  为温室揭苫前的气温,  $A_T$  为温室白天增温幅度,与天气的阴晴有关,  $t$  为时刻(真太阳时),  $t_{mor}$  为早上揭苫时间,公式中的 13 是温室内的最高温度出现的时刻,正弦曲线的周期为  $4 \times (13 - t_{mor})$ 。晴天放风条件下,当气温高于 30℃ 时开始放风,模拟结果低于 30℃ 时停止放风。根据观测资料可知,叶温一般比气温低 2℃。

温室中 CO<sub>2</sub> 浓度的变化有三种方式,一是严冬时晴天不放风情况下,CO<sub>2</sub> 浓度的变化趋势也可以用正弦曲线来描述,CO<sub>2</sub> 浓度的最低点一般出现在 13~14 点;二是晴天放风情况下,放风后 CO<sub>2</sub> 浓度迅速与外界达到平衡;阴天时最低值出现在 15~16 时。白天  $t$  时刻的 CO<sub>2</sub> 浓度按下式进行计算:

$$CO_2(t) = CO_2M - A_{CO_2} \cdot \sin[2\pi(t - t_{CO_2L}) / \{4 \times (t_{CO_2L} - t_{mor})\}] \quad (4)$$

式中  $CO_2M$  为揭苫前 CO<sub>2</sub> 浓度,  $A_{CO_2}$  为 CO<sub>2</sub> 浓度降低的幅度,  $t_{CO_2L}$  为 CO<sub>2</sub> 浓度达到最低点时的时间。

## 1.2 材料与方法

试验在沈阳农业大学园艺系蔬菜基地辽沈 1 型日光温室内进行。供试番茄品种为‘卡鲁索’。2001 年 11 月 2 日播种，12 月 27 日定植，2002 年 7 月 31 日采收结束，留 10 穗果。栽培方法与日光温室长季节高产栽培相同。

试验分别于 2002 年 1 月 8~10 日，2 月 14~15 日，3 月 14~16 日分 3 次进行测定，每次从揭苫开始到盖苫结束测定 2 d，间隔约一个月（根据实际天气情况决定）。试验采用 LF6400 便携式光合作用测定仪同时测量和记录番茄植株单叶光合速率（开放系统方式）、CO<sub>2</sub> 浓度、空气温度、叶温、光量子通量密度（PAR）、时间等，连续观测，每隔 3~5 min 自动采集一次数据。为避免叶室小气候的影响，每 0.5~1 h 换一下夹叶的部位。其中空气温度同时用周记式自动温度仪及普通温度表进行平行观测，以便对光合仪测出的温度进行校正。

测定时选取有代表性的番茄植株，对其上数第 3 果穗的穗下叶进行上述指标实测；同时用公式（1）进行模拟计算，采用 C 语言编程，运行程序后输出值为一天中每隔 5 min 的 PAR、气温、CO<sub>2</sub> 浓度、光合速率。将模拟值与实测值进行对比，从而检验模拟模型的效果。

## 2 结果与分析

### 2.1 冬季晴天不放风条件下的模拟情况

晴天不放风情况下（2002 - 01 - 08）温室内气温、CO<sub>2</sub> 浓度的模拟值与实测值的对比情况见图 1 (a)。由图 1 (a) 可见，尽管室内气温模拟值在阳光比较充足的白天较实测值低 2~3℃，但整体温度模拟值与实测值的变化趋势比较吻合，模拟值与实测值的复相关系数达到 0.9643，F 值为 205.70，达到 0.01 显著水平（表 1）。说明在晴天不放风情况下温室内气温变化可以用公式（3）进行模拟。同时还可看出，从揭苫到盖苫时间内，尽管 CO<sub>2</sub> 降低过程中模拟曲线下降快于实测值，但 CO<sub>2</sub> 模拟值与实测值的复相关系数为 0.9763，F 值为 315.02，达到 0.01 显著水平。说明在晴天不放风情况下从揭苫到盖苫时间温室内 CO<sub>2</sub> 浓度变化可以用公式（4）进行模拟。

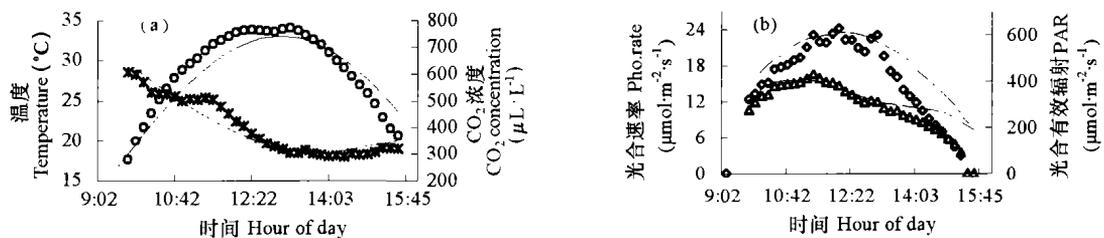


图 1 晴天不放风时室内气温、CO<sub>2</sub>、PAR 与光合速率的模拟值与实测值日变化

观测值：温度；光合速率；×CO<sub>2</sub>；光合有效辐射。模拟值：—温度；--光合速率；—CO<sub>2</sub>；- -光合有效辐射。

Fig. 1 Diurnal variation of simulated and observed of  $T_{air}$ , CO<sub>2</sub>, PAR and photosynthetic rate on fine day and no ventilation in greenhouse

Observed:  $T_{air}$ ; Photosynthesis; ×CO<sub>2</sub>; PAR. Simulated: — $T_{air}$ ; --Photosynthesis; —CO<sub>2</sub>; - -PAR.

表 1 冬季晴天不放风条件下室内气温、CO<sub>2</sub>、光合有效辐射及番茄单叶光合速率的模拟效果检验

Table 1 Test on simulation effect of weather factors and photosynthetic rate on fine day and no ventilation

因子 Factor	复相关系数 Multiple correlation coefficient ( $R^2$ )	F 值 F value	标准差 Standard error (s)	$F_{0.01}$	截距 Intercept	斜率 Slope
T	0.9643	205.70 **	1.69	5.35	3.009	0.8736
CO <sub>2</sub>	0.9763	315.02 **	33.70		20.754	0.9382
PAR	0.8606	44.26 **	102.7		166.76	0.7429
Pho. rate	0.8844	55.64 **	2.00		5.93	0.5949

室内光合有效辐射、叶片光合速率的模拟值与实测值变化如图 1 (b) 所示。尽管下午温室内的光合有效辐射的模拟误差增大, 致使光合速率模拟值偏大, 但光合有效辐射与光合速率的模拟值与实测值的复相关系数分别为 0.8606 和 0.8844,  $F$  值分别为 44.26 和 55.64, 均达到 0.01 显著水平。说明在晴天不放风情况下室内光合有效辐射、叶片光合速率可用公式 (2) 和公式 (1) 进行模拟。

## 2.2 冬季晴天放风条件下的模拟情况

晴天放风条件下 (2002 - 02 - 14), 室内气温和  $\text{CO}_2$  浓度的模拟值与实测值的对比情况见图 2 (a)。由图 2 (a) 可见, 尽管放风时刻及放风后到闭合风口这段时间的温度模拟有一定误差, 但从全天来看, 温度模拟值与实测值的复相关系数为 0.9636,  $F$  值为 500.81, 达到 0.01 显著水平 (表 2)。说明在冬季晴天放风情况下室内气温变化也可以用公式 (3) 进行模拟 (当气温高于 30 时, 设定为放风时间)。尽管在放风前  $\text{CO}_2$  模拟值明显高于实测值, 但整体  $\text{CO}_2$  模拟值与实测值的复相关系数为 0.9598,  $F$  值为 449.86, 达到 0.01 显著水平 (表 2)。说明在晴天放风情况下从揭苫到盖苫时间室内  $\text{CO}_2$  浓度变化同样可以用公式 (4) 进行模拟 (放风后  $\text{CO}_2$  浓度设定为  $320 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ )。

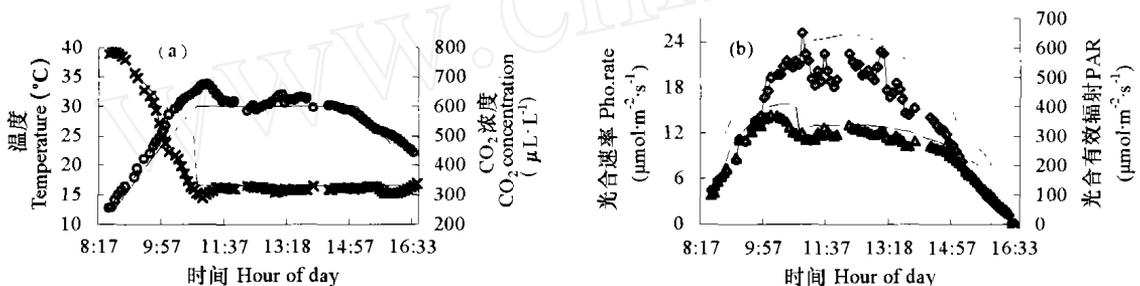


图 2 晴天放风情况下室内气温、 $\text{CO}_2$ 、PAR 和光合速率模拟值与实测值日变化

观测值: 温度; 光合速率;  $\times \text{CO}_2$ ; 光合有效辐射。模拟值: —温度; --光合速率; —  $\text{CO}_2$ ; - - PAR。

Fig. 2 Diurnal variation of simulated and observed of  $T_{\text{air}}$ ,  $\text{CO}_2$ , PAR and photosynthetic rate on fine day and ventilation in greenhouse

Observed:  $T_{\text{air}}$ ; Photosynthesis;  $\times \text{CO}_2$ ; PAR. Simulated: — $T_{\text{air}}$ ; --Photosynthesis; —  $\text{CO}_2$ ; - - PAR.

表 2 冬季晴天放风条件下室内气温、 $\text{CO}_2$ 、光合有效辐射及番茄单叶光合速率的模拟效果检验

table 2 Test on simulation effect of weather factors and photosynthetic rate on fine day and ventilation

因子 Factor	复相关系数 Multiple correlation coefficient ( $R^2$ )	$F$ 值 $F$ value	标准差 Standard error ( $s$ )	$F_{0.01}$	截距 Intercept	斜率 Slope
T	0.9636	500.81 **	1.85	4.90	- 0.5201	0.976
$\text{CO}_2$	0.9598	449.86 **	58.10		27.791	1.007
PAR	0.9114	188.85 **	101.03		155.51	0.8277
Pho. rate	0.9388	285.88 **	1.56		1.9222	0.9432

室内 PAR 与叶片光合速率的模拟值与实测值对比情况见图 2 (b)。可以看出, 尽管模拟值数值上整体偏高, 致使光合速率模拟值也偏大, 但全天光合有效辐射及光合速率模拟值与实测值的复相关系数分别为 0.9114 和 0.9388,  $F$  值分别为 188.85 和 285.88, 均达到 0.01 显著水平 (表 2)。说明在晴天不放风情况下室内 PAR、叶片光合速率可用公式 (2) 和公式 (1) 进行模拟。

## 2.3 阴天不放风条件下的模拟情况

阴天不放风时 (2002 - 03 - 14) 室内气温、 $\text{CO}_2$  浓度模拟值与实测值对比情况如图 3 (a) 所示: 虽然可能由于天空云层厚度的变化, 使得室内温度的实测值与模拟值的最高值不一致, 但从整体上看, 温度模拟值与实测值的复相关系数为 0.8715,  $F$  值为 105.77, 达到 0.01 显著水平 (表 3)。说明在阴天不放风情况下室内气温变化同样可以用公式 (3) 进行模拟。同时还可看出, 16 时以前尽管  $\text{CO}_2$  模拟值均低于实测值, 但  $\text{CO}_2$  模拟值与实测值的复相关系数为 0.8719,  $F$  值为 106.16, 达到 0.01 显著水平。说明在阴天不放风情况下从揭苫到盖苫时间室内  $\text{CO}_2$  浓度变化在一定程度上也可以用公式 (4) 进行模拟。

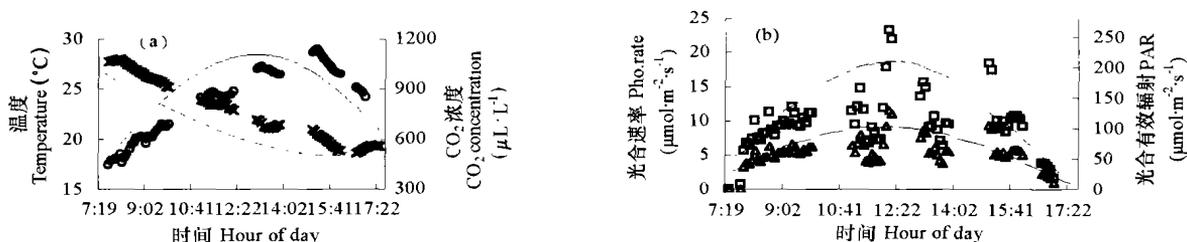


图3 阴天不放风时温室内气温、CO<sub>2</sub>、PAR、光合速率的模拟值与观测值日变化

观测值： 温度； 光合速率； ×CO<sub>2</sub>； 光合有效辐射。模拟值： —温度； --光合速率； — CO<sub>2</sub>； - - 光合有效辐射。

Fig. 3 Diurnal variation of simulated and observed of  $T_{air}$ , CO<sub>2</sub>, PAR and photosynthetic rate on dull day and no ventilation in greenhouse

Observed:  $T_{air}$ ; Photosynthesis; ×CO<sub>2</sub>; PAR. Simulated: — $T_{air}$ ; --Photosynthesis; — CO<sub>2</sub>; - - PAR.

表3 阴天不放风条件下温室内气温、CO<sub>2</sub>、光合有效辐射及番茄单叶光合速率的模拟效果检验

Table 3 Test on simulation effect of weather factors and photosynthetic rate on dull day and no ventilation

因子 Factor	复相关系数 Multiple correlation coefficient ( $R^2$ )	F 值 F value	标准差 Standard error (s)	$F_{0.01}$	截距 Intercept	斜率 Slope
T	0.8715	105.77 **	2.33	4.95	7.3906	0.7344
CO <sub>2</sub>	0.8719	106.16 **	126.86		0.7383	0.8561
PAR	0.6229	21.24 **	58.22		34.694	0.7688
Pho. rate	0.6937	31.07 **	2.23		1.6698	0.7932

阴天不放风条件下温室内 PAR 和光合速率模拟值与实测值的对比情况见图 3 (b)。可以看出，虽然因为阴天的云量、云厚的变化使 PAR 及光合速率的模拟结果都不理想，但全天的 PAR 及光合速率的模拟值与实测值的复相关系数分别为 0.6229 和 0.6937，F 值分别为 21.24 和 31.07，因为样本数量很大，仍然达到了 0.01 显著水平（表 3）。可见在阴天不放风情况下，温室内光合有效辐射、叶片光合速率在一定程度上仍可用公式 (2) 和公式 (1) 进行模拟。

### 3 结论与讨论

使用本文中的对温室内温度、CO<sub>2</sub>浓度、光合有效辐射的日变化及叶片光合速率的模拟公式，各气象因子及光合速率的模拟结果经与实测值检验，均达到了 0.01 的显著水平，模拟结果得出以下结论：晴天不放风情况下，PAR、温度和 CO<sub>2</sub> 浓度日变化的模拟较好，上午光合作用的模拟效果较好；晴天放风情况下，温度、CO<sub>2</sub> 浓度日变化模拟的较好，但 PAR 的日变化模拟效果一般，可能与大气的透明系数或温室薄膜的透光率的日变化有关，但光合作用的模拟值与实测值比较一致；阴天不放风情况下，温度和 CO<sub>2</sub> 浓度模拟值与实测值趋势一致，而 PAR 的模拟值与实测值存在较大偏差，光合速率、PAR 的模拟值趋势同步，进一步证明了阴天光强对光合速率的影响是非常重要的。

由于光合作用机理复杂，光合作用模拟有很大难度。在光合作用模拟的试验研究中，有的只进行光合速率的测量，如甘肃农业大学姜华认为燕麦叶片净光合速率日变化呈双峰型<sup>[13]</sup>；或者用 PAR 及光合速率实测值拟合情况来研究光合速率日变化的类型，如河南牛立元认为出现光合午休的小麦品种可能是由空气相对湿度过低、叶片持水力较小，失水较多，导致气孔部分关闭所致<sup>[14]</sup>；沈阳农业大学郭泳观测到番茄净光合速率日变化呈双峰曲线，但中午时的“午休现象”不明显<sup>[15]</sup>；山东农业大学刘克长等人测定的日光温室黄瓜叶片的光合速率日变化晴天呈双峰型，阴天则呈单峰型<sup>[16]</sup>。本文实测光合速率日变化无论是晴天还是阴天都是单峰型。芬兰的 Hari Pertti 在单叶光合作用模拟模型中介绍了 3 种模拟模型，通过与实测值对比，认为对各个模型来说排列优劣是不可能的，因为在不同的环境条件下各个模型模拟结果不同，但复相关系数在 0.34~0.97 之间<sup>[17]</sup>，本文模拟结果检验时复相关系数在 0.69~0.94 之间。对比不同时期各气象因子及光合速率模拟值与实测值的截距和斜率（表 1、

2、3) 可以看出:晴天放风情况下温度模拟值与实测值比较其截距最小,斜率最接近1;晴天CO<sub>2</sub>及PAR模拟值的截距大于阴天的,但斜率也更接近于1;光合速率以晴天不放风条件下模拟效果最好。晴天上午温度模拟值较实测值低2~3 [图1(a)和图2(a)],可能受叶室本身小的温室效应影响。而CO<sub>2</sub>浓度模拟曲线下降的较快,而实测CO<sub>2</sub>浓度是缓慢减小的,可能与当时温室中操作人员较多有关[图1(a)和图2(a)]。因此认为本文中的温度和CO<sub>2</sub>浓度模拟值可能更接近于温室内的实际值。下午光合速率误差大的原因可能是由于温室透光率按常数计算,PAR下午模拟值偏高所致。

本文中气象要素模型基本能反映出温室内气象要素的日变化,光合作用模型中包括了光、温、CO<sub>2</sub>浓度3个因子,可用于研究环境条件与番茄生产的关系。光合模型中没能考虑到气孔、蒸腾、相对湿度及植物本身的生物钟等因素,对作物的光合作用的某些生理特性不能够响应。公式(3)和(4)是没有考虑作物的影响,只适用于冬季长季节栽培番茄的日光温室中。可能作物生长状况和土壤肥力水平不同,公式(4)里的参数还要根据实际情况修正。

#### 参考文献:

- Bertin N, Heuvelink E. Dry-matter production in tomato crop: comparison of two simulation models. *Journal of Horticultural Science*, 1993, 68: 995~1011
- Olesen J E, Grevsen K. A simulation model of climate effects on plant productivity and variability in cauliflower. *Scientia Horticulturae*, 2000, 83: 83~107
- Marcelis L F M. Simulation of biomass allocation in greenhouse crops—a review. *Acta Horticulturae*, 1993, 328: 49~67
- Dayan E, Van Keulen H, Jones J W, et al. Development, calibration and validation of a greenhouse tomato growth model: 1. Description of the model. *Agricultural Systems*, 1993, 43: 145~163
- Gary C, Jones J W, Longuenesse J J. Modelling daily changes in specific leaf area of tomato: the contribution of the leaf assimilate pool. *Acta Horticulturae*, 1991, 328: 205~210
- Jones J W, Dayan E, Allen L H, et al. A dynamic tomato growth and yield model. *Transactions of the ASAE*, 1991, 34 (2): 663~672
- 金之庆, 高亮之. 农业中的数学模型. 北京: 农业出版社, 1991. 148~151
- Tadashi Takakura, Wei Fang. *Climate Under Cover*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2002. 85~165
- 牛文元, 周允华, 张翼主编. 农田生态系统能量物质交换. 北京: 气象出版社, 1987. 115~122
- 刘建栋, 金之庆. 光合有效辐射日变化过程的数值模拟. *江苏农业学报*, 1999, 15 (3): 136~140
- 王炳忠. 太阳能中天文参数的计算. *太阳能*, 1999, (2): 8~10
- 刘建栋. FAO生产潜力模型中基本参数的修正. *自然资源学报*, 2001, 3: 240~247
- 姜华, 毕玉芬. 燕麦叶片光合日变化初探. *草地科学*, 2002, 1: 34~37
- 牛立元, 茹振钢, 刘明久. 小麦光合作用日变化及光合潜势评价方法研究. *麦类作物学报*, 2002, 22 (2): 51~54
- 郭泳, 李天来. 环境因素对番茄单叶净光合速率的影响. *沈阳农业大学学报*, 1998, (4), 29 (2): 127~131
- 刘克长, 张继祥, 任宗兴. 日光温室气象条件的观测研究. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 2001, 32 (1): 50~54
- Hari Pertti, Makela A, Korpilahti E, et al. Optimal control of gas exchange. *Tree Physiol.*, 1986, 2 (3): 169~175

#### 新书推荐

## 《中国果树志 杏卷》

《中国果树志 杏卷》由全国71个单位80余名专家历时23年的编撰,2003年12月终于问世了。这是世界首部系统研究杏树的科技专著,全书共114万字,彩图300幅,专述了中国杏树的起源、传播、演化、栽培历史、地理分布和生产现状,以及杏树的生物学特性、栽培技术要点、贮藏与加工技术等,全书共记载描述和评价了杏的品种资源1643个,充分反应了我国杏属资源的多样性和开发利用的潜力。

(张加延)

购书者请汇款(165元,含邮费)至:北京中关村南大街12号,

中国农科院蔬菜花卉所《园艺学报》编辑部,邮编100081。