

温室盆栽金鱼草叶面积指数形成模拟模型

陈友根¹, 秦琳琳², 王国伟¹, 方鹏¹, 王冬良^{1*}

¹安徽农业大学园艺学院, 合肥230036; ²中国科学技术大学自动化系, 合肥230027

摘要: 以温室中生长的金鱼草品种‘泛美夏粉’为研究对象, 依据盆栽金鱼草叶片生长与光温环境的关系, 构建了适合温室金鱼草叶面积指数模拟模型, 并用独立试验数据对模型进行了检验, 旨在提高温室金鱼草生长和蒸腾模型精度和适用性。结果表明, 金鱼草出叶数与出苗后累积辐射热呈指数函数关系; 叶片长度与出叶后累积辐射热呈负指数函数关系; 金鱼草出叶数、叶片长度和叶面积指数的模拟结果与实测值基于1:1直线间的决定系数 R^2 分别为0.98、0.93、0.99, 其回归估计标准误差 $RMSE$ 分别为2.6、0.33 cm、0.17。本研究建立的模型能够较准确地预测温室盆栽金鱼草叶面积指数动态, 参数少且易获取、实用性强。

关键词: 金鱼草; 光合有效辐射; 温度; 模拟模型; 叶面积指数

Model for Simulating Formation of Leaf Area Index of Pot Planted *Antirrhinum majus* Grown in Greenhouse

CHEN You-Gen¹, QIN Lin-Lin², WANG Guo-Wei¹, FANG Peng¹, WANG Dong-Liang^{1*}

¹College of Horticulture, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; ²Department of Automation, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China

Abstract: In order to optimize the climate management for pot planted *Antirrhinum majus* grown in greenhouse, a model for simulating formation of leaf area index of pot planted *A. majus* ‘Fanmeixiafen’ was structured according to the relation with leaf growth and photo-thermal effect. And independent experimental data were used to validate the model. The results showed that the number of unfolding leaves per plant was a positive exponential function of the product of thermal effectiveness and photosynthetically active radiation (*TEP*) accumulated after emergence, and the length of each leaf was a negative exponential function of the *TEP* accumulated after emergence. Based on the 1:1 line, the coefficient of determination (R^2) and the root mean squared error (*RMSE*) between simulated and measured leaf number, leaf length, and leaf area index (*LAI*) were 0.98, 0.93, 0.99, and 2.6, 0.33 cm, 0.17, respectively. Based on the results obtained in this study, it can be concluded that the model developed can give satisfactory prediction of *LAI* variation of pot planted *A. majus*. Hence, it can be used for decision making for precision control of light and temperature in greenhouse *A. majus* production.

Key words: *Antirrhinum majus*; photosynthetically active radiation; temperature; simulation models; leaf area index

金鱼草(*Antirrhinum majus* L.)为玄参科金鱼草属, 是花坛花境中一种优良的配置植物, 高茎金鱼草常作切花, 矮茎金鱼草常作盆花用, 其独特的用途已深受众多花艺爱好者的喜爱。随着人们对金鱼草需求的急增, 除扩大栽培面积外, 实现周年均衡供应也成为生产者追求的目标。智能温室盆栽金鱼草虽不受季节的限制, 但在不同的市场需求下产品能否如期上市是金鱼草生产效益的关键。准确预测不同光温条件下植株生长发育动态是实现盆栽金鱼草周年均衡供应的前提。

叶片光合作用是植物生物量形成的基础, 叶

面积指数是描述作物群体大小较好的动态指标, 可以反映植物叶面数量、冠层结构变化、植物群落生命活力及其环境效应, 为植物冠层表面物质和能量交换的描述提供结构化的定量信息。作物生长模型是辅助设施作物生产环境优化调控和栽培管理的有力工具。基于光温交互作用的叶面积指数模型是光合作用驱动的作物生长模型(李永秀

收稿 2013-10-30 修定 2013-12-18

资助 国家自然科学基金(31000672)。

* 通讯作者(E-mail: wangdongliang@ahau.edu.cn; Tel: 0551-65786212)。

等2006; 刁明等2008; 袁昌梅等2006)以及冠层蒸腾模型(李永秀等2005)所需的重要信息, 但叶面积的预测仍然是作物生长模型的薄弱环节。因此, 准确模拟叶面积是提高作物生长模型和冠层蒸腾模型预测精度的重要前提之一。

迄今为止, 主要有3种方法模拟叶面积指数, 一是GDD法(growing degree day) (Fleisher等2006), 即用统计方法建立叶面积指数与生育期积温的函数来模拟叶面积指数; 二是SLA法(specific leaf area) (Dayan等1993), 即利用作物生长模型模拟的叶干物质量与比叶面积的乘积得到叶面积; 三是TEP法(product of thermal effectiveness and PAR) (刁明等2008; 杨再强等2007), 即采用综合的光温交互指标——辐热积, 来预测作物叶面积随生育期的动态变化。由于TEP法综合考虑了温度和太阳辐射对作物冠层叶面积形成过程的影响, 尤其适合光温同步性不高的设施栽培作物叶面积的模拟预测。国内外利用TEP法模拟生长发育的作物涉及黄瓜(李永秀等2006; 李娟等2003)、甜瓜(何三鹏等2011)、番茄(倪纪恒等2005)、甜椒(刁明等2008)、一品红(张红菊等2009)等, 但还未见温室盆栽金鱼草生长发育模型的研究。为了精确预测温室盆栽金鱼草生长发育, 本研究通过金鱼草不同播期的试验, 采用TEP法建立可以预测温室金鱼草出叶数、叶片长度、单株叶面积及叶面积指数的模拟模型, 以期为温室盆栽金鱼草生产中的光温精准调控提供理论依据与决策支持。

材料与方法

1 试验材料与设计

试验于2011年8月至2012年12月在中国科学技术大学智能温室中进行。温室东西走向, 长12.2 m, 沿南北方向仅一跨, 跨度8.2 m, 檐高4.9 m, 脊高6.2 m, 温室屋脊北侧有一扇天窗, 长12.2 m, 宽0.86 m。温室内加热系统、营养液灌溉系统、幕帘系统、通风系统均实现智能控制。供试金鱼草(*Antirrhinum majus* L.)品种为‘泛美夏粉’。种子繁殖, 穴盘育苗, 定植后移栽至口径15 cm、高13 cm的塑料花盆中, 每盆1株, 栽培基质均为草炭、蛭石和珍珠岩(按3:1:1体积比均匀混合)。随机区组设计, 3次重复, 定期浇灌自配营养液。

试验1: 2011年8~12月, 8月10日播种育苗, 14日出苗整齐, 9月6日移栽90盆。

试验2: 2012年2~7月, 2月16日播种育苗, 22日出苗整齐, 3月8日移栽90盆。

试验3: 2012年8~12月, 8月20日播种育苗, 25日出苗整齐, 9月13日移栽90盆。

2 环境数据的获取

通过基于CAN总线的计算机实时监控监测系统监测和调控温室小气候环境, 该系统包括温湿度、太阳辐射、光照强度、风速风向、雨雪等环境因子测量设备和天窗、遮阳帘、湿帘风机系统、喷淋系统、热风炉等环境因子调控设备。本研究采集项目包括温室内1.5 m高处空气温度和太阳辐射, 太阳辐射乘以转换因子0.5转化为光合有效辐射PAR (photosynthetically active radiation, 波长400~700 nm), 采集频率每10 s一次, 储存每30 min的平均值。

3 叶片数据的获取

不同试验的温室金鱼草在定植后各选生长均匀一致的5株挂牌, 3~5 d进行一次定株观测, 观测项目包括出叶数(叶长>1 cm为出叶)、各叶位的叶长(叶片基部到叶尖长度, 不含叶柄长度)、最大叶长(当叶长增长量连续3次测量都低于0.1 cm, 即认为该叶片已达最大叶长)、摘除老叶。每隔7 d进行破坏性取样, 每次取生长健康均匀一致的3株, 测量所有叶片叶长、叶面积(使用Li-3000叶面积仪测定)。其中, 试验1中数据用于建模, 试验2、3数据用于模型检验。

4 辐热积计算

温度和光照是影响植物叶片生长最重要的环境因子, 叶片出生和伸展速率主要由温度热效应TE (thermal effectiveness)和PAR决定。辐热积(TEP)为相对热效应与光合有效辐射的乘积, 研究表明(李永秀等2005; 袁昌梅等2006)采用TEP法能更好地模拟叶面积指数动态变化。因此, 本文采用TEP法对温室金鱼草的叶片进行模拟, 通过计算金鱼草在出苗后的逐日TEP得到累积TEP, 模型以累积TEP来量化金鱼草的出叶数、叶片长度和衰老叶数的关系, 进而计算叶面积指数。其算式如下:

$$TEP = \sum_{i=m}^n (DTEP) \quad (1)$$

式中, TEP 表示一定生长阶段内金鱼草累积辐热积($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$), $DTEP$ 为每日辐热积($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$), 其由相对热效应 RTE (relative thermal effectiveness)和光合有效辐射计算得到。

RTE 定义为作物在实际温度条件下生长1 d相当于在最适宜温度条件下生长1 d的比例。温度与相对热效应的关系可以用三段线形函数描述(李永秀等2006; 刁明等2008), 即在生长下限温度与最适下限温度之间, 相对热效应随着温度的升高而线性增加; 在最适下限温度与最适上限温度之间, RTE 保持最大值1; 在最适上限温度和生长上限温度之间, 相对热效应随着温度的升高而线性下降。计算方法如下:

$$RTE(T)=\begin{cases} 0 & (T < T_b) \\ (T-T_b)/(T_{ob}-T_b) & (T_b \leq T < T_{ob}) \\ 1 & (T_{ob} \leq T \leq T_{ou}) \\ (T_m-T)/(T_m-T_{ou}) & (T_{ou} < T \leq T_m) \\ 0 & (T > T_m) \end{cases} \quad (2)$$

式中, $RTE(T)$ 表示温度为 T 时的相对热效应; T_b 为生长下限温度, T_m 为生长上限温度, T_{ob} 为生长的最适温度下限, T_{ou} 为生长的最适温度上限。温室金鱼草生长三基点温度见表1。

表1 金鱼草不同生育期的最低、最适和最高温度

Table 1 Minimum, optimum and maximum temperatures of *A. majus* at different development stages

生育期	日/夜	最低温度/°C	最适温度/°C	最高温度/°C
苗期	白天	14	25~28	34
	夜间	12	19~23	34
生长期	白天	10	25~28	35
	夜间	10	17~22	35
开花期	白天	10	25~28	35
	夜间	10	17~22	35

PAR 是太阳总辐射中能被植物光合作用所利用的部分, 其公式为:

$$PAR=0.5 \times Q \quad (3)$$

式中, PAR 为1 h内的总光合有效辐射($\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$); Q 为1 h内太阳总辐射($\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$); 0.5是太阳总辐射转换为光合有效辐射的转换系数。

则每日辐热积计算为:

$$DTEP(i) = \sum_{j=1}^{24} \left(\frac{RTE(i,j)}{24} \right) \times PAR(i) \quad (4)$$

式中, $DTEP(i)$ 为第 i 日的辐热积($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$); $RTE(i,j)$ 为第 i 日第 j 小时的相对热效应; $PAR(i)$ 为第 i 日的总光合有效辐射($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)。

5 实际叶面积指数的计算

出苗后任意一天的实际单株叶面积的公式为:

$$LA = \sum_{i=1}^N (0.27 \times L_i^2) - \sum_{i=1}^{N_0} (0.27 \times L_{imax}^2) \quad (5)$$

式中, LA 为出苗后的单株叶面积(cm^2); i 为叶序; N 为展开叶数; L_i 为第 i 叶的叶长(cm); L_{imax} 为第 i 叶的最大叶长(cm); N_0 为摘除的老叶数。

叶面积指数计算公式如下:

$$LAI=LA \times d / 10\ 000 \quad (6)$$

式中, LAI 为叶面积指数; d 为花盆摆放密度($\text{株}\cdot\text{m}^{-2}$); 10 000为从 cm^2 到 m^2 的单位换算系数。

6 模型验证

采用检验模型时常用回归估计标准误差 $RMSE$ (root mean squared error)对模拟值与实测值之间的符合度进行分析。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^n (OBS_m - SIM_m)^2}{n}} \quad (7)$$

式中, OBS_m 为实测值; SIM_m 为模拟值; m 为样本序号; n 为样本容量。 $RMSE$ 值越小, 表明模拟值与观测值间的偏差越小, 模型的预测精度越高。

7 数据处理

采用Sigmaplot 10.0图形与数据分析软件进行试验数据的曲线拟合与统计分析。

实验结果

1 金鱼草叶面积模型建立

金鱼草叶面积的形成过程包括叶片展开、生长伸长和衰老, 金鱼草出苗后任意一天的绿色叶面积为所有展开叶面积减去所有衰老叶面积。其中, 展开叶面积由金鱼草出苗后的所有叶片展开数和各叶片的生长长度计算所得, 衰老叶面积由出苗后衰老叶片数和模拟出的各衰老叶片的最大长度计算得出。

1.1 单株展开叶片数模拟

对单株展开叶数与出苗后累积TEP进行数据拟合(图1), 得到金鱼草展开叶数与TEP的关系:

$$N=64.11/\{1+\exp[(80.53-TEP)/35.38]\} \quad (8)$$

$$(R^2=0.9776, SE=1.3, n=26)$$

式中, N 为植株上已展开的叶片数。

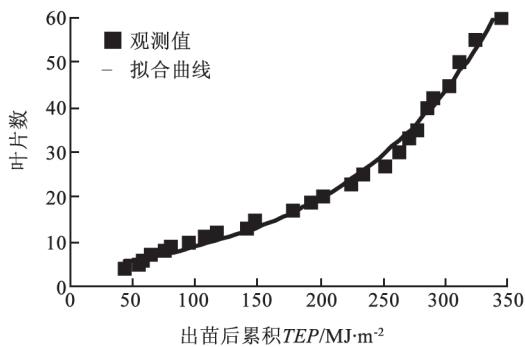


图1 展开叶数与出苗后累积TEP的关系

Fig.1 Relationship between numbers of leaves unfolding and TEP after emergence

1.2 叶片伸长长度模拟

运用非线性最小二乘法对单株叶片伸长长度与该叶片展开后累积TEP数据进行拟合(图2), 得到金鱼草叶片伸长长度与叶片展开后累积TEP的关系:

$$L_i=L_{imax}[1-\exp(-k_i \times TEP_i/L_{imax})]+1 \quad (9)$$

式中, i 为叶序; L_i 为第 i 片叶的长度(cm); L_{imax} 是第 i 片叶的最大叶长(cm); TEP_i 为第 i 片叶展开后的累积辐热积($MJ \cdot m^{-2}$); k_i 为无量纲参数, 是控制曲线的斜率; 1表示叶片长度达到1 cm时才记为该叶

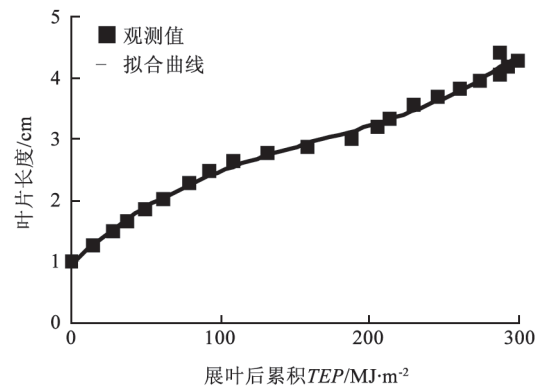


图2 叶片长度与展叶后累积TEP的关系

Fig.2 Relationship between length of leaf and TEP after unfolding

序的叶片出叶。

对金鱼草出苗后各叶片的 L_{imax} 和 k_i 值进行拟合(图3), 得到 L_{imax} 和 k_i 与叶序的关系式:

$$L_{imax} = \begin{cases} 7.63 \times \exp(i/8.2) - 3.28 & (i \leq 16, R^2=0.9623, SE=0.38, n=16) \\ 26.14 \times \exp(-i/7.93) + 2.87 & (i > 16, R^2=0.8735, SE=0.17, n=14) \end{cases} \quad (10)$$

$$k_i = \begin{cases} 0.047 \times \exp(i/2.81) - 0.023 & (i \leq 16, R^2=0.9478, SE=0.008, n=16) \\ 0.113 \times \exp(-i/8.96) + 0.19 & (i > 16, R^2=0.7279, SE=0.02, n=14) \end{cases} \quad (11)$$

式(10)和(11)分别用分段函数模拟了金鱼草

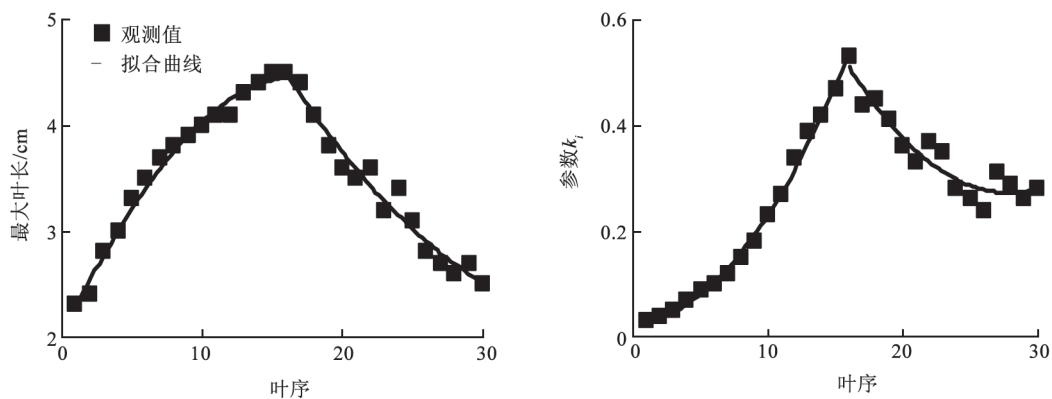


图3 最大叶长(L_{imax})和参数 k_i 与叶序的关系

Fig.3 Relationship between L_{imax} , k_i and leaf order

L_{imax} 和 k_i 与叶序的关系。从第16叶开始分2段,是因为当叶位达到16后,金鱼草植株开始现蕾,同化物开始向花蕾转移,可供叶片生长的光合产物减少,因此最大叶长的增长速度随叶位的增加而开始下降。因此, L_{imax} 和 k_i 在第16叶前后有变化。

1.3 叶面积与叶长的关系

根据建模数据,得到金鱼草叶面积与叶长的关系:

$$AL_i = 0.27 \times L_i^2 \quad (R^2 = 0.9532, SE = 0.36, n = 38) \quad (12)$$

式中, AL_i 为第*i*片叶的叶面积(cm^2); L_i 为第*i*片叶的叶长(cm)。

1.4 衰老叶面积模型

金鱼草叶片的衰老从低叶位依次向上,叶片被摘除时已经扩展至最大叶长,依据建模数据对衰老叶片数与出苗后累积TEP的关系进行拟合(图4)。

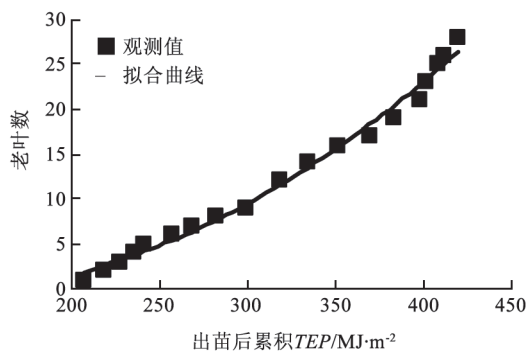


图4 被摘除的老叶数与出苗后累积TEP的关系

Fig.4 Relationship between number of old leaves removed and TEP after emergence

$$N_o = \begin{cases} 0 & TEP \leq 206.38 \\ 87.4 - 13.67 \times \exp(-TEP/281.3) & TEP > 206.38 \end{cases} \quad (R^2 = 0.8873, SE = 2.6, n = 18) \quad (13)$$

式中, N_o 为摘除的老叶数,出苗后当累积TEP>206.38 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 时,叶片开始衰老,此时开始摘除老叶。通过公式(10)、(12)和(13),得到金鱼草衰老叶面积的计算公式:

$$AL_o = \sum_{i=1}^{N_o} (0.27 \times L_{imax}^2) \quad (14)$$

式中, AL_o 为摘除老叶的总面积(cm^2); N_o 为摘除的老叶数。

2 模型验证

采用t检验对曲线拟合方程计算值与实测值间的相关显著性进行了检验,显示图1~4和公式(8)、(10)~(13)中的曲线拟值与实测值间的相关性均达显著水平($\alpha = 0.05$)。其中,公式(8)、(12)和(10)~(11)第16叶(现蕾前)曲线拟合值与实测值间的相关性达极显著水平($\alpha = 0.01$)。

利用与建模数据相独立的试验2和3的数据对模型进行检验。根据公式(6)~(14),计算出不同金鱼草品种的展开叶片数、单叶叶长、单株叶面积与叶面积指数LAI,并与实测结果进行比较。金鱼草展开叶片数、叶长、叶面积指数的模拟结果与实测值基于1:1直线的决定系数(R^2)分别为0.98、0.93、0.99,其回归估计标准误RMSE分别为2.6、0.33 cm 、0.17 (图5)。因此,本研究建立的金鱼草叶面积指数模型对不同播期叶片展开数、单叶长度和叶面积指数的预测精度较高。

讨论

叶面积指数是决定光合作用模型预测结果精确与否的最重要作物参数。已有的作物生长模型多采用SLA法来预测叶面积指数(Macelis等1998),但气象因素和肥水供应等对SLA的影响较大,并且用户需要多次破坏性取样才能准确获取SLA,这些因素限制了SLA模型的实际应用。在大田作物生产中,由于温度的变化与太阳辐射的变化基本同步,用GDD法来模拟叶面积具有一定的准确性。如Lizaso等(2003)采用GDD法模拟了玉米单个叶片的扩展、伸长与衰老,建立了一个简单通用的叶面积模型,改善了原有叶面积模型的预测精度。但是,温室作物生产中,光温不同步现象比较普遍,并且叶面积随着生育期库源关系的改变而呈现较大变化。在番茄、黄瓜和网纹甜瓜作物叶面积模拟方面的研究结果表明,与传统的GDD法和SLA法相比,TEP法可显著提高作物叶面积指数的预测精度(李永秀等2006;袁昌梅等2006;倪纪恒等2005)。因此,本研究综合了温度和太阳辐射对金鱼草叶片出叶数和叶片长度的影响,利用TEP法,通过拟合金鱼草叶片展开数、叶片的伸长以及最大叶长与叶序的关系,模拟了叶面积指数的形成过程。由于在试验温室中,金鱼草在第16叶

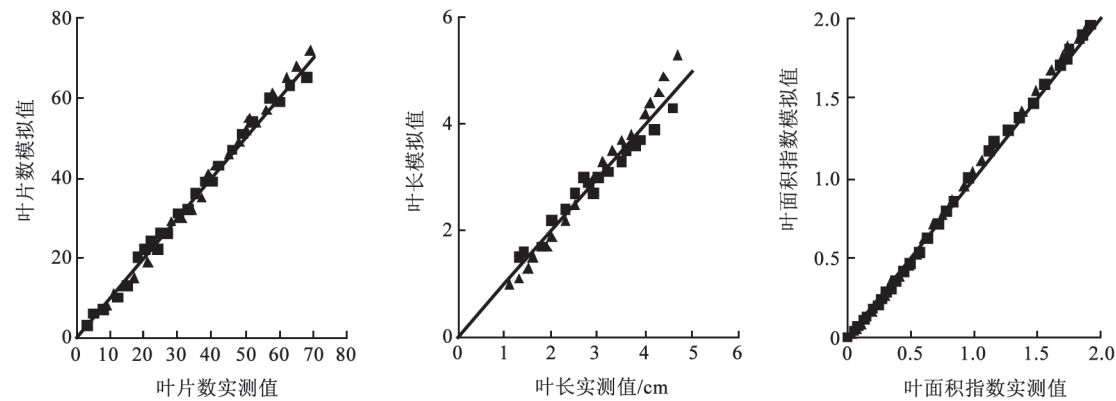


图5 试验2和试验3中叶数、叶长和叶面积指数模拟值与实测值的比较

Fig.5 Comparison between simulated and observed values of unfolding leaf number, leaf length and leaf area index in experiment 2 and 3

前后开始现蕾,影响了同化产物向叶片的供应,叶片生长速率明显降低。与李永秀等(2006)建立的温室黄瓜叶面积模型相比,本模型利用负指数方程模拟了叶片的伸长,尽可能地规避生长中心的转移对叶片伸长的影响,因此,更具有鲁棒性和生物学意义。

本研究以TEP法建立的金鱼草叶面积指数模拟模型,不仅克服了SDD法没有考虑太阳辐射对叶片生长的影响、SLA法模型稳定性不够及参数不易获取的缺点和局限,而且通过对叶面积指数组成成分的模拟,改善了叶面积指数的模拟精度,从而提高了模型的机理性和实用性。可根据金鱼草生长的三基点温度、出苗日期及温室内空气温度、光照等数据,依据此模型模拟预测金鱼草出苗后任意一天的叶面积指数,简化了模型的输入。但是除了温度和光照外,肥水条件和种植密度也是影响植株叶面积生长的主要因子。本模型适合无肥水限制条件下,种植密度适宜($18 \text{盆} \cdot \text{m}^{-2}$)的温室金鱼草植株叶面积的预测,模型在其他肥水条件和种植密度下的应用尚需进行校正和检验;此外,对其他类型金鱼草品种和不同地点的适用性方面还需进一步的研究。

参考文献

刁明,戴剑锋,罗卫红,袁昌梅,卜崇兴,鲜开梅,张生飞,徐蕊(2008). 温室甜椒叶面积指数形成模拟模型. 应用生态学报, 19 (10): 2277~2283

何三鹏,常丽英,崔冲,黄丹枫(2011). 水分对温室网纹甜瓜叶面积指数影响的模拟. 上海交通大学学报(农业科学版), 29 (3): 69~75

李娟,郭世荣,罗卫红(2003). 温室黄瓜光合生产与干物质积累模拟模型. 农业工程学报, 19 (4): 241~244

李永秀,罗卫红,倪纪恒,陈永山,徐国彬,金亮,戴剑锋,陈春宏(2005). 用辐射积分法模拟温室黄瓜叶面积、光合速率与干物质产量. 农业工程学报, 21 (12): 131~136

李永秀,罗卫红,倪纪恒,陈永山,徐国彬,金亮,戴剑锋,陈春宏,卜崇兴(2006). 基于辐射和温度热效应的温室水果黄瓜叶面积模型. 植物生态学报, 30 (5): 861~867

倪纪恒,罗卫红,李永秀,戴剑锋,金亮,徐国彬,陈永山,陈春宏,卜崇兴,徐刚(2005). 温室番茄叶面积与干物质生产的模拟. 中国农业科学, 38 (8): 1629~1635

杨再强,罗卫红,陈发棣,顾俊杰,李向茂,丁琪峰,赵才标,陆亚凡(2007). 温室标准切花菊干物质生产和分配模型. 中国农业科学, 40 (9): 2028~2035

袁昌梅,罗卫红,张生飞,金亮,倪纪恒,陈永山,戴剑锋,卜崇兴,徐刚(2006). 温室网纹甜瓜叶面积与光合生产模拟模型研究. 南京农业大学学报, 29 (1): 7~12

张红菊,戴剑锋,罗卫红,庄克明,魏猷刚,章鸥(2009). 温室盆栽一品红生长发育模拟模型. 农业工程学报, 25 (11): 241~247

Dayan E, van Keulen H, Jones JW, Zipori I, Shmuel D, Challa H (1993). Development, calibration and validation of a greenhouse tomato growth model: I. Description of the model. Agric Syst, 43: 145~163

Fleisher DH, Shillito RM, Timlin DJ, Kim SH, Reddy VR (2006). Approaches to modeling potato leaf appearance rate. Agron J, 98: 522~528

Lizaso JI, Batchelor WD, Westgate ME (2003). A leaf area model to simulate cultivar-specific expansion and senescence of maize leaves. Field Crops Res, 80: 1~17

Macelis LFM, Heuvelink E, Goudriaan J (1998). Modelling biomass production and yield of horticultural crops: a review. Sci Hortic, 74: 83~111