

温室盆栽金鱼草生长发育的光温热效应模型

陈友根¹, 秦琳琳², 方鹏¹, 王国伟¹, 王冬良^{1*}

(1. 安徽农业大学园艺学院, 合肥 230036; 2. 中国科学技术大学信息科学技术学院自动化系, 合肥 230027)

摘要: 为优化温室盆栽金鱼草光温调控精度, 以‘红姬’品种为研究对象, 通过不同定植期和密度试验, 以辐热积 (Product of thermal effectiveness and PAR, TEP) 为尺度, 建立了温室盆栽金鱼草生长发育的模型, 并用独立试验数据检验了模型预测精度。结果表明, 模型对萌芽期、展叶期、花蕾期和采收期的时间预测符合度较高, 模拟值与实测值基于 1:1 直线间的决定系数 R^2 为 0.95, 回归估计标准误差 RMSE 分别为 1.3、1.7、2.3 和 1.8 d, 预测精度明显高于以有效积温为尺度的发育模型 (RMSE 分别为 2.6、2.5、3.9 和 3.2 d)。模型对株高、茎粗、叶片数、花苞数和干物质量的模拟值与实测值的决定系数 R^2 分别为 0.94、0.92、0.96、0.97 和 0.91, RMSE 分别为 6.9 cm、0.4 cm、5.8、2.2 和 1.27 g·株⁻¹。该研究建立的模型能够较准确地预测温室盆栽金鱼草各生育期出现时间、植株形态和干物质生产的动态。建立的模型参数少且易获取, 且预测精度较高, 可为温室金鱼草生产中种植期、种植密度及环境的优化调控提供理论依据和决策支持。

关键词: 金鱼草; 光合有效辐射; 温度; 生长发育; 模型

中图分类号: S681.9

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2014)04-0690-05

Growth simulation of potted *Antirrhinum majus* in greenhouse based on radiation and thermal effectiveness

CHEN Yougen¹, QIN Linlin², FANG Peng¹, WANG Guowei¹, WANG Dongliang¹

(1. School of Horticulture, Anhui Agricultural University, Hefei 230036;

2. Department of Automation, School of Information Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230027)

Abstract: In order to optimize radiation and temperature conditions inside greenhouse, a model of plant growth and development of *Antirrhinum majus* ‘Hongji’ was developed using production of thermal and PAR (TEP) as a prediction index through adjusting planting date and planting density. Independent experimental data were used to validate the model. The results showed that the model could give satisfactory predictions at four development stages (sprouting, leaf unfolding, flowering and harvesting). Based on the 1:1 correlation line, the coefficient of determination (R^2) between simulated and measured growth stages was 0.95, and the root mean squared errors (RMSE) were 1.3, 1.7, 2.3 and 1.8 days for the four stages, respectively. The model developed in this study made it more accurate in prediction of growth stages than that with GDD -(growing degree days) based model (with RMSE of 2.6, 2.5, 3.9 and 3.2 days, respectively). Based on the 1:1 line, R^2 and RMSE between simulated and measured plant height, diameter of basilar stem, number of leaf, number of flower bud and total biomass production were 0.94, 0.92, 0.96, 0.97, and 0.91 and 6.9 cm, 0.4 cm, 5.8, 2.2, and 1.27 g/plant, respectively. Based on the results of this study, it can be concluded that the developed model can satisfactorily predict variations of the growth stage, plant morphology and biomass production of the potted *Antirrhinum majus*. Hence, it can be used for decision making in precision control of light and temperature and optimizing planting date and density for *Antirrhinum majus* in greenhouse.

Key words: *Antirrhinum majus*; photosynthetically active radiation; temperature, growth and development; simulation model

收稿日期: 2013-12-03

基金项目: 国家自然科学基金青年项目“基于混合逻辑动态系统的温室建模与控制”(31000672)资助。

作者简介: 陈友根, 博士, 副教授。

* 通信作者: 王冬良, 副教授。E-mail: wangdongliang@ahau.edu.cn

金鱼草 (*Antirrhinum majus* L.), 玄参科金鱼草属多年生草本植物, 因品种繁多, 花色丰富, 现已成为多生产者追求的目标。在不同的市场需求阶段, 产品能否按期上市直接影响金鱼草生产的经济效益。花期和外观品质是金鱼草生产按期上市的关键, 而光、温是影响金鱼草花期和外观品质的重要环境因子。目前我国花卉生产中, 主要通过调节种植期和种植密度等传统方法来调控花期与外观品质, 由于各地环境条件的差异, 传统方法普适性不高, 限制了花卉生产中花期与外观品质调控技术的标准化进程。因此, 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。预测不同光温和种植密度条件下金鱼草的花期与外观品质, 对温室金鱼草生产决策和光温优化控制具有理论指导意义和应用价值。

作物生长发育模型是辅助作物生产环境优化调控和栽培管理的有力工具^[1-4]。目前主要依据有效积温法 (GDD)、辐热积法 (TEP) 等方法建立了番茄、甜椒、黄瓜、甜瓜、一品红、菊花、玉米、小麦等^[5-16]多种作物的生长模型。GDD 法模拟光温同步性高的大田作物的生长发育效果较理想, 但在温室作物生产中, 因存在加温 (降温) 等措施使得室内温度与太阳辐射不一定同步, 同时在潜在生长条件下, 温室作物的生长主要受到同化产物供应的影响, 而同化产物的供应取决于温度、光合有效辐射, 用 GDD 法来模拟温室作物生长发育难免产生一定的偏差, TEP 法能综合温度和光辐射的共同效应, 较好地实现温室作物生长发育模拟^[6,13]。因此, 本研究将采用辐热积法来模拟温室金鱼草的生长发育, 通过不同定植期和花盆摆放密度处理的栽培试验, 定量分析光合有效辐射、温度和摆放密度对温室盆栽金鱼草生长发育的影响, 建立温室盆栽金鱼草生长发育动态模拟模型, 为不同季节上市的温室金鱼草生产管理与光温优化调控提供理论依据和决策支持。

1 材料与方法

1.1 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单跨智能温室中进行。温室长 12.2 m, 跨度 8.2 m, 檐高 4.9 m, 脊高 6.2 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。供试金鱼草品种为 ‘红姬’ (*Antirrhinum majus* L. ‘Hongji’)。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), 定期浇灌自配营养液。每部分试验设 3 个摆放密度处理: 17.0、13.0 和 9.0 株·m⁻², 每处理 3 次重复, 每处理各 50 盆, 共 9 个小区, 随机区组设计。

试验 1: 2011 年 8 月 10 日播种育苗, 14 日出苗整齐, 9 月 6 日移栽; 试验 2: 2012 年 2 月 16 日播种育苗, 22 日出苗整齐, 3 月 8 日移栽; 试验 3: 2012 年 8 月 20 日播种育苗, 25 日出苗整齐, 9 月 13 日移栽。

1.2 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、光强、风速、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 (photosynthetically active radiation, PAR, 波长 400~700 nm), 采集频率每 10 s 1 次, 储存每 30 min 的平均值。

1.3 生育期观测

试验期间每天观测金鱼草生长发育状况, 并记录各个发育阶段的起始日期。金鱼草的整个生育阶段可分为萌芽期 (从叶芽出土 1 cm 到 80% 植株第一片叶开始展开)、展叶期 (从第一片叶展开到 80% 植株现蕾)、现蕾期 (从第一个花蕾到 80% 植株花蕾完全露出) 和采收期 (从 80% 植株花蕾开放到开始采收)。

1.4 外观品质观测

从萌芽后开始, 每处理各重复分别选取 5 株挂牌进行定株观测, 每隔 3 d 测量 1 次, 包括株高、茎粗 (从地面往上 3 cm 处的粗度)、叶片数 (统计叶片长度大于 3 cm 的叶片) 和花蕾数。同时, 在不同时期进行全株干重测定。

1.5 植株光合速率与干物质生产计算

叶片光合速率测定及干物质生产的计算在金鱼草生长期, 每个密度处理选 3 株, 用 Li-6400 便携式光合仪在上午 10:00~11:00 间测定植株完全展开的功能叶片 (倒 5 叶) 的光合速率, 并绘制其光响应曲线, 确定叶片最大光合速率 (P_{max}) 为 26.8 kg·hm⁻²·h⁻¹, 初始光能利用率 (ϵ) 为 0.37 kg·hm⁻²·h⁻¹/J·m⁻²·s⁻¹。为方便与基于光合作用的干物质生产模型比较, 同时采用基于光合作用的干物质生产模型对各试验的金鱼草干物质生产进行了计算, 具体计算方法见袁昌梅等^[12]。

其中, 试验 1 中数据用于建模, 试验 2、3 数据用于模型检验。

2 模型构建

2.1 辐热积计算

温度和光辐射是影响植物生长发育最关键的环境因子, 种植密度是影响金鱼草生长和外观品质的重要栽培条件措施之一。本模型采用单株吸收辐热积来量化温度、光照和密度对日光温室盆栽金鱼草生长动态的综合影响。单株吸收辐热积定义为单株吸收的光合有效辐射日总量与日平均相对热效应 (RTE) 的乘积。其算式如下:

$$RTE(i) = (1/24) \sum_{j=1}^{24} RTE(T_j) \quad (1)$$

式中: $RTE(i)$ 为第 i 天的日平均相对热效应, $RTE(T_j)$ 为一天中第 j 小时的相对热效应, T_j 为一天中第 j 小时日光温室内空气温度 ($^{\circ}\text{C}$)。

RTE 指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 比例。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。依据前期试验资料, 温室金鱼草生长下限温度为 10°C , 上限温度为 34°C ; 最适温度上、下限白天分别为 28°C 和 22°C , 夜间分别为 22°C 和 17°C 。

光合有效辐射是太阳总辐射中能被植物光合作用所利用的部分, 可计算为:

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

式中: $PAR(i)$ 为 1 h 内的总光合有效辐射 ($\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$); PAR 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。

每日冠层吸收的辐热积为:

$$DTEP(i) = RTE(i) \times PAR(i) \quad (4)$$

式中: $DTEP(i)$ 为第 i 天冠层吸收的辐热积 ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$); $RTE(i)$ 为第 i 日平均相对热效应; $PAR(i)$ 为第 i 日的总光合有效辐射 ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)。

在一定生长阶段内, 金鱼草单株累积吸收的辐热积为:

$$TEP = \left(\sum_{i=m}^n DTEP(i) \right) / \rho \quad (5)$$

式中: TEP 为一定生长阶段内单株累积吸收的辐热积 ($\text{MJ}\cdot\text{株}^{-1}$), ρ 为种植密度 ($\text{株}\cdot\text{m}^{-2}$)。

2.2 生育期模拟

运用试验 1 的数据, 根据公式(1)~(5)计算金鱼草完成各生育阶段所需的单株吸收辐热积, 萌芽期、展叶期、花蕾期和采收期分别为 0、0.89、1.75 和 $1.33 \text{ MJ}\cdot\text{株}^{-1}$ 。根据温室金鱼草生长下限温度 (10°C) 和试验 1 的数据, 计算得到金鱼草生长过程中完成上述生育阶段所需的有效积温分别为: 316.5、213.4、468.6 和 $227.3^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 。

2.3 外观品质模拟

金鱼草外观品质主要由株高、茎粗、叶片数、花苞数和干物质重量构成。

根据试验 1 数据, 株高与单株吸收辐热积 (TEP) 的关系可用公式(6)描述:

$$H = (C_m / R_m) \ln[1 + \exp(R_m \times TEP)] \quad (6)$$

式中: H 为株高 (cm), C_m 为株高增长速率 ($\text{cm}\cdot\text{MJ}^{-1}\cdot\text{株}^{-1}$), R_m 为相对增长速率 ($\text{cm}\cdot\text{MJ}^{-1}\cdot\text{株}^{-1}$), TEP 为萌芽后单株吸收辐热积 ($\text{MJ}/\text{株}$)。根据试验 1 的数据确定参数 C_m 和 R_m 的值分别为 215.7、8.4 $\text{cm}\cdot\text{MJ}^{-1}\cdot\text{株}^{-1}$ 。

茎粗、叶片数、花苞数与单株吸收辐热积 (TEP) 的关系可用公式(7)描述:

$$Y = Y_{\max} \times [1 - \exp(-r \times TEP / Y_{\max})] + Y_0 \quad (7)$$

式中: Y 为外观指标达到采收时的测量值, 即茎粗 (cm)、叶片数、花苞数; Y_{\max} 为各外观品质指标最大增长量; r 为外观指标的增长速率 ($\text{cm}\cdot\text{MJ}^{-1}\cdot\text{株}^{-1}$); TEP 为各指标从可以测量至采收期间单株吸收辐热积 ($\text{MJ}\cdot\text{株}^{-1}$); Y_0 为各外观指标开始测量时的初始值 (cm)。根据试验 1 数据确定茎粗、叶片数、花苞数的 Y_{\max} 分别为 2.3、0.8 和 4.7; r 分别为 74.6、268.3 和 146.2; Y_0 分别为 0.3 cm 、4 和 1。

干物质重量 (DMT) 与单株吸收辐热积 (TEP) 的关系可用公式(8)描述:

$$DMT = 188.43 \times \exp(TEP/37.66) - 170.27 \quad (8)$$

2.4 模型检验方法

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。

$$RMSE = \sqrt{\sum_{m=1}^n (OBS_m - SIM_m)^2 / n} \quad (9)$$

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。

3 模型检验

3.1 发育期模拟结果

运用试验 2 和试验 3 独立的数据对模型进行检验。依据日光温室内温度和光合有效辐射的数据, 以及金鱼草完成各生育阶段所需的单株吸收辐射积, 可以获得种植后各生育阶段所需的天数即为模拟值。根据公式(1)~(5)计算结果显示(图 1), 萌芽期、展叶期、花蕾期和采收期所需天数的模拟值与观测值间基于 1:1 直线的决定系数 R^2 为 0.95, RMSE 分别为 1.3、1.7、2.3 和 1.8 d; 而用有效积温模型预测的结果与观测值间基于 1:1 直线决定系数 R^2 为 0.86, RMSE 分别为 2.6、2.5、3.9 和 3.2 d。

3.2 株高、茎粗、叶片数与花苞数模拟结果

利用独立试验数据, 根据公式(6)计算金鱼草生长过程中株高变化(图 2A), 模拟值与实测值间基于 1:1 直线的决定系数 R^2 为 0.97, RMSE 为 6.9 cm。

根据公式(7)计算金鱼草生长过程中的茎粗、叶片数和花苞数变化, 模拟值与实测值间基于 1:1 直线的决定系数 R^2 分别为 0.95、0.96 和 0.91, RMSE 分别为 0.4 cm、5.8 和 2.2 (图 2B、2C 和 2D)。

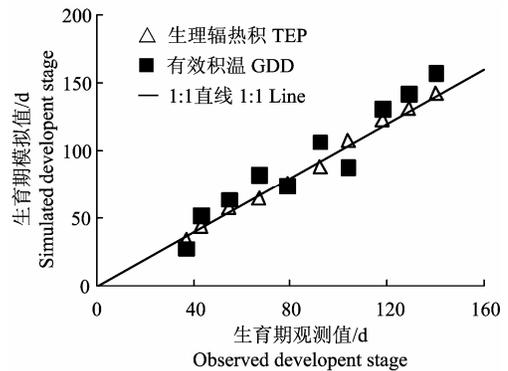


图 1 各发育阶段的天数模拟值与观测值比较

Figure 1 Comparison between simulated and observed days in different development stages

3.3 干物质重量模拟结果

利用与建模相独立的试验数据, 根据公式(8)和基于光合作用干物质生产模型计算出金鱼草生长过程中干物质重量变化, 模拟值与实测值间基于 1:1 直线的决定系数 R^2 为 0.91, RMSE 为 1.27 g·株⁻¹(图 3A)。而通过光合作用的干物质生产模型 R^2 和 RMSE 分别为 0.79, 2.84 g·株⁻¹(图 3B)。

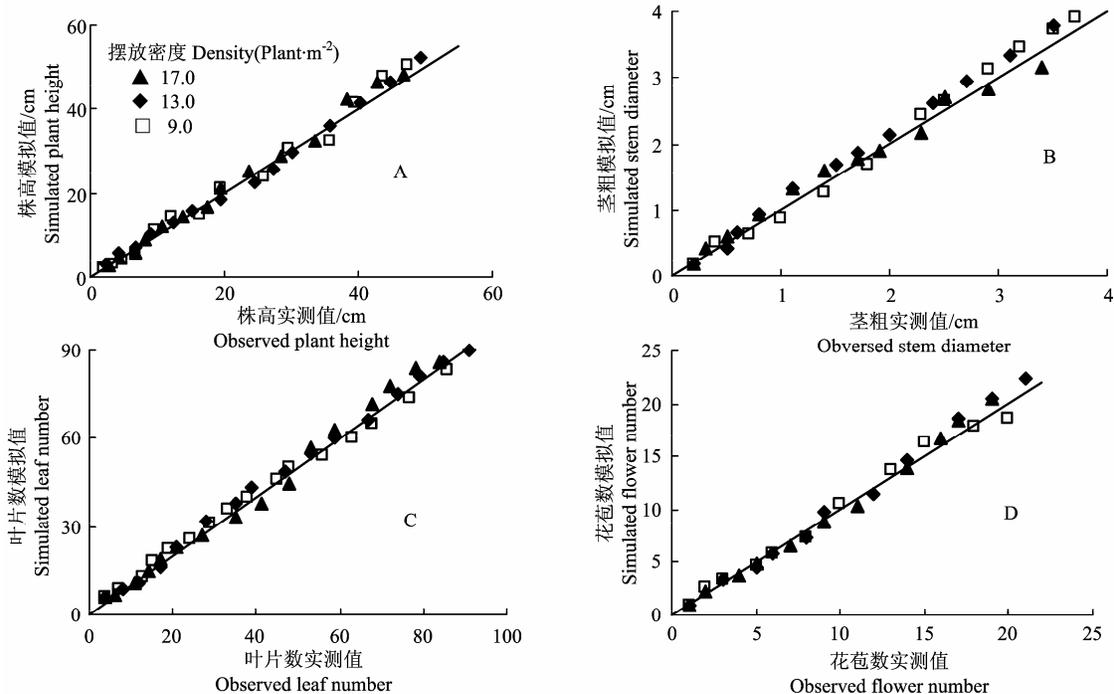


图 2 株高、茎粗、叶片数、花苞数模拟值与实测值比较

Figure 2 Comparison between the simulated and measured plant height, stem diameter, number of leaves and flowers

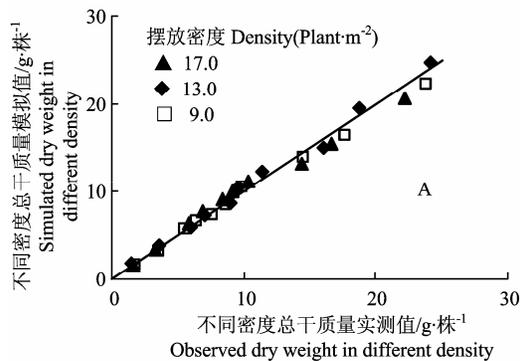
3 小结与讨论

光照和温度是作物生长发育和干物质生产最关

键的环境因子。在大田作物生产中, 由于温度与光照的变化是同步的, 有效积温模型预测大田作物的发育期仍是行之有效的简便方法^[6,13]; 而在温室作

物生产中, 由于温室结构的特殊性, 普遍存在光照和温度不同步现象, 用 GDD 法预测温室作物的发育期误差会比较大。TEP 法综合考虑了温度、光合有效辐射对作物发育的影响, 克服了 GDD 法的局限性, 提高预测精度(图 1)。

基于光合作用的生长模型对温室金鱼草干物质生产进行模拟, 回归标准误差高于 TEP 法(图 3B),



究其原因主要是选定的叶片是植株生长中最理想的叶片, 并且以最大光合速率为参数, 并不代表全株叶片对光能的利用。本研究建立的基于辐热积的干物质生产模型, 只需要确定不同品种基本发育因子和生长最适温度范围, 参数少且容易获取, 计算方法简便, 能够预测不同发育时期器官的干物质生产动态, 具有较强的实用性。

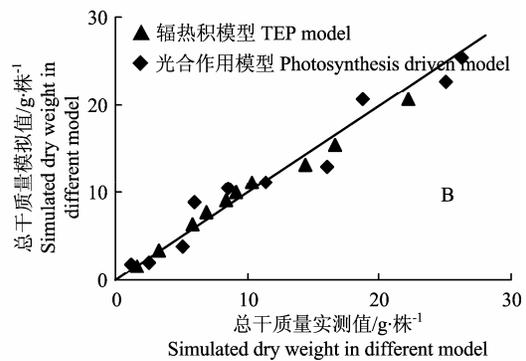


图 3 干物质重量模拟值与实测值比较

Figure 3 Comparison between the simulated and measured dry weight of biomass production

外观品质调控是观赏植物生产管理的重要内容。肥水条件是影响温室金鱼草外观品质的重要环境因子。虽然本研究建立的模型是在无肥水胁迫条件下温室金鱼草生长发育模型, 但可为今后建立不同肥水条件下金鱼草生长发育模型提供研究思路, 从而实现温室盆栽金鱼草肥水的精准调控奠定基础。

此外, 由于受到研究条件的限制, 本研究是以冠层上方 1.5 m 处的温光环境数据建立的模型, 由于温室内水平方向上的温光分布往往不均匀, 特别是不同摆放密度下植株冠层内温度和光照更不相同。今后研究应加强对冠层内吸收的温度和光照数据进行采集, 进一步提高模型的预测精度。

参考文献:

- [1] Gijzen H, Heuvelink E, Challa H. HORTISM: A model for greenhouse crops and greenhouse climate[J]. *Acta Horticulturae*, 1998, 456: 441-450.
- [2] Fleishera D H, Shillitob R M, Timlina D J. Approaches to modeling potato leaf appearance rate[J]. *Agronomy Journal*, 2006, 98: 522-528.
- [3] 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 Systems*, 1993, 43: 145-161.
- [4] 李永秀, 罗卫红, 倪纪恒, 等. 基于辐射和温度热效应的温室水果黄瓜叶面积模型[J]. *植物生态学报*, 2006, 30(5): 861-867.
- [5] 倪纪恒, 罗卫红, 李永秀, 等. 温室番茄叶面积与干物质生产的模拟[J]. *中国农业科学*, 2005, 38(8): 1629-1635.
- [6] 刁明, 戴剑锋, 罗卫红, 等. 温室甜椒叶面积指数形成模拟模型[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(10): 2277-2283.
- [7] 何三鹏, 常丽英, 崔冲, 等. 水分对温室网纹甜瓜叶面积指数影响的模拟[J]. *上海交通大学学报: 农业科学版*, 2011, 29(3): 69-75.
- [8] 李娟, 郭世荣, 罗卫红. 温室黄瓜光合生产与干物质积累模拟模型[J]. *农业工程学报*, 2003, 19(4): 241-244.
- [9] 李永秀, 罗卫红, 倪纪恒, 等. 用辐热积法模拟温室黄瓜叶面积、光合速率与干物质产量[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(12): 131-136.
- [10] 杨再强, 罗卫红, 陈发棣, 等. 温室标准切花菊干物质生产和分配模型[J]. *中国农业科学*, 2007, 40(9): 2028-2035.
- [11] 袁昌梅, 罗卫红, 张生飞, 等. 网纹甜瓜叶面积与光合生产模拟模型研究[J]. *南京农业大学学报*, 2006, 29(1): 7-12.
- [12] 袁昌梅, 罗卫红, 邵翔, 等. 温室网纹甜瓜干物质分配、产量形成与采收期模拟研究[J]. *中国农业科学*, 2006, 39(2): 353-360.
- [13] 张红菊, 戴剑锋, 罗卫红, 等. 温室盆栽一品红生长发育模拟模型[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(11): 241-247.
- [14] Lizaso J I, Batchelo W D, Westgate M E. A leaf area model to simulate cultivar-specific expansion and senescence of maize leaves [J]. *Field Crops Research*, 2003, 80: 1-17.
- [15] 王康, 沈荣开, 覃奇志. 不同水分、氮素条件下夏玉米生长的动态模拟[J]. *灌溉排水学报*, 2003, 22(2): 9-12.
- [16] 刘铁梅, 曹卫星, 罗卫红, 等. 小麦器官间干物质分配动态的定量模拟[J]. *麦类作物学报*, 2001, 21(1): 25-31.