

# 观赏植物生长模拟模型研究进展

谭 美, 王四清\*

(北京林业大学园林学院, 北京 100083)

**摘 要:** 作物生长模型是进行作物生产精确管理及智能决策的有力工具。该文对国内外有关观赏植物生长模拟模型的研究进展进行了概述, 分别从生长模拟(叶面积、光合作用、干物质生产与分配)、发育模拟及品质模拟三方面进行了总结和评述, 最后指出了观赏植物生长模拟模型研究中存在的问题及今后的发展方向。

**关键词:** 观赏植物; 模拟模型; 生长; 发育; 品质

**中图分类号:** S 68

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0513-353X (2010) 09-1523-08

## Advances in Researches on Ornamental Plant Growth Simulation Model

TAN Mei and WANG Si-qing\*

(College of Landscape Architecture, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Crop growth model is a powerful tool in crop production precise management and intelligent decision-making. This paper presented a review on domestic and foreign research progresses of ornamental plant growth simulation model, respectively from the growth simulation (leaf area, photosynthesis, dry matter production and distribution), development simulation and quality simulation three aspects to carry on the summary and discussion, and finally pointed out the problems existing in ornamental plant growth simulation model research and the future development direction.

**Key words:** ornamental plant; simulation model; growth; development; quality

作物生长模拟是以系统分析的原理和计算机模拟的技术来定量描述作物生长、发育、产量形成的过程及其对环境的反应(杨宁和廖桂平, 2002)。作物模拟技术是农业信息技术的重要内容, 它将系统科学和计算机技术引入作物科学, 根据作物生理学和生态学原理, 通过对作物生长发育过程中获得的试验数据加以理论概括和数据抽象, 建立关于作物物候发育、光合生产、器官建成和产量形成等生理过程与环境因子之间关系的动态数学模型(曹宏鑫等, 2003)。

作物生长模拟研究创立于20世纪60年代。从目前总体的发展来看, 各种作物生长模型的开发并不平衡, 如以大田作物(小麦、水稻、玉米)以及一些重要的经济作物(棉花、油菜、大豆等)作为主要的研究对象, 研究相对深入, 模型较为成熟; 而对园艺作物(果树、蔬菜、观赏植物等), 尤其是观赏植物的研究还比较薄弱。另外, 欧洲和美国等一些国家率先对观赏植物生长模拟模型进行了研究, 最初主要是通过建立简单的数学回归模型研究单一环境因子对观赏植物生长发育的影响。

---

**收稿日期:** 2010-04-23; **修回日期:** 2010-08-10

**基金项目:** 国家科技支撑计划项目(2006BAD07B05)

\* 通信作者 Author for correspondence (E-mail: wsiqing@263.net; tanmei25@163.com)

随后瑞典、荷兰、美国、以色列和日本等国家对观赏植物生长模拟也进行了研究,涉及的观赏植物主要有菊花、月季、水仙、百合、一品红等。目前我国有关观赏植物生长模拟模型的研究相对滞后,还处于起步阶段,这方面的研究报道较少。本文对目前国内外观赏植物生长模拟模型研究的发展状况进行分析和总结,以期对观赏植物生长模拟模型的研究和推广应用提供参考。

## 1 观赏植物生长模型研究进展

### 1.1 叶面积模拟

准确模拟叶面积的动态变化直接影响植物光合作用和干物质生产模拟的预测精度。叶面积的大小由出叶速率、叶片伸展速率、叶片伸展持续期及叶片寿命等因素决定 (Marcelis et al., 1998), 影响因素较多, 模拟比较困难。

常用的园艺作物叶面积模拟方法主要有: 积温法 (GDD 法)、比叶面积法 (SLA 法, Specific leaf area) 和辐热积法 (TEP 法)。积温法是将叶面积作为生育期 (积温确定) 的函数来模拟, 该方法对于温光同步的大田作物的叶面积预测准确性较好。比叶面积法是用模拟分配到叶的干样质量乘以比叶面积得到叶面积, 由于比叶面积受水、肥供应状况及作物生育时期的影响很大, 而且测量必须依靠大量破坏性取样, 因此该方法适用性较差。辐热积法是利用叶面积与辐热积 (光温指标) 的关系函数预测叶面积的方法, 综合考虑了温度和光合有效辐射对叶片生长的影响, 克服了积温法和比叶面积法的局限, 对温室作物的叶面积预测效果较好。

Larsen 和 Hiden (1995) 利用积温法建立了菊花叶面积预测模型。Lee 和 Heuvelink (2003) 建立了光合作用驱动的多头菊叶面积指数预测模型, 通过输入初始叶面积指数、定植密度、日均温度和光合有效辐射等参数来预测定植后任意一天的叶面积指数。此外, 为了更好地模拟受日长影响的温室作物的叶面积, 杨再强等 (2007b) 建立了以生理辐热积为发育尺度的温室标准切花菊叶面积预测模型, 通过输入温室内温度、光合有效辐射和品种参数可以准确地预测肥水供应充足、种植密度适宜的温室标准切花菊叶面积指数。

### 1.2 光合作用模拟

作物光合作用的模拟一般是首先计算单叶总光合作用速率 (可用单叶净光合作用速率加上暗呼吸速率而得到, 暗呼吸速率表示为温度的函数), 再对叶面积指数进行积分得到作物冠层的光合作用速率, 在日出和日落之间对作物冠层光合作用速率进行积分得到作物冠层光合作用日总量。Panagiotis 等 (1995) 提出了盆栽秋海棠光合作用模型, 用双曲线模拟秋海棠在不同生长阶段、不同  $\text{CO}_2$  浓度和不同叶面积下的净光合作用速率, 模拟光密度和  $\text{CO}_2$  浓度对秋海棠光合生产的影响。

### 1.3 干物质生产模拟

关于作物干物质生产的模拟有两种方法: 一是建立干物质生产量与定植后天数的回归模型, 二是建立光合作用驱动的作物生长模型。在光合作用驱动的作物生长模型中, 作物干物质生产的模拟是通过计算作物的光合作用和呼吸作用速率来实现的。

Lee 等 (2002) 建立了通过输入起始叶面积指数、最大叶面积指数、种植密度、平均温度和有效辐射可动态预测定植后任意一天的干物质变化的多头切花菊生长模型。随后又提出了在不同种植密度、季节和光照条件下的切花菊全年生长模型 (Lee et al., 2003), 用指数—线性方程描述菊花地上部分干物质产量与时间的关系。Pronk 等 (2003) 建立了观赏松柏类干物质生产和叶面积指数增长的动态模拟模型 CONGRO, 根据辐射利用率预测地上部分干物质含量。杨再强等 (2007c) 建立

了切花菊干物质质量与定植后累积生理辐射热的关系模型，通过定植期、密度、每天的温度和辐射来预测菊花定植后任意一天的干物质质量。

#### 1.4 干物质分配模拟

主要有 3 种模拟方法：源库理论、功能平衡法和分配系数（分配指数）法。在观赏植物干物质分配模拟研究中常采用分配系数法。该方法建立的模型的机理性虽不如基于“源库”调节理论，但是模型参数容易获取，实用性较强，并且能模拟干物质在地上部分不同器官之间的分配。

Karlsson 和 Heins (1992) 用 Gompertz 曲线描述了多头菊花叶片干物质分配指数与定植后天数的关系。Lee 等 (2002) 用分配系数法模拟温室多头切花菊的干物质分配，结果表明在营养生长期叶的干物质指数达 65%，开花期叶的干物质指数逐渐减少趋近 0，干物质主要向花中分配 (Lee & Heuvelink, 2003)。Dayan 等 (2004) 开发了月季同化物分配模拟模型 ROSGRO，模拟月季各器官干物质分配指数。Gutierrez 等 (2006) 建立了月季花枝干物质生产和分配模型，认为花枝中干物质的增长遵循指数—线性函数，花芽的出现极大地改变了干物质在器官（茎、叶和花芽）间的分配，强调了花芽在决定花枝干物质动态分配所发挥的关键作用。张晓艳等 (2008) 建立了基于分配指数的温室蝴蝶兰干物质分配及产品上市期的模拟模型，对地上部分、根、茎、叶、花梗和花的干样质量进行模拟预测。杨再强等 (2009) 构建了以生理辐射热为尺度的温室标准切花菊的干物质生产与分配预测模型，可准确预测标准切花菊单杆栽培和多杆栽培条件下，定植后任意一天的单株叶、茎、花的干质量和地上部分鲜样质量。

## 2 观赏植物发育模型研究进展

发育模型就是利用环境因子预测植物发育阶段（如：发芽、花芽分化、开花、收获）的模型。研究观赏植物发育模拟的主要目的在于对花期和采收期的准确预测和调控。常用的发育尺度主要有 3 种：有效积温（Growth degree days, GDD）、生理发育时间（Physiological development time, PDT）和辐射热积（Product of thermal effectiveness and PAR, TEP）(杨再强, 2007)。

有效积温法是应用最广泛的发育模拟方法，常用于花期预测。Johann 和 Josef (2000) 建立了基于积温理论的水仙花发育模型，根据不同海拔的温度预测花期。Fisher 和 Heinrich (2000) 根据积温理论建立了复活节百合花发育模型，通过温室内日均温度预测收获时间和花枝长度。Steininger 等 (2002) 通过热量积累和空气温度模拟预测微型月季发育进程，此后又建立了亚洲百合发育模型 (Steininger & Pasian, 2003)，模拟温度与发育速率之间的关系。Faust 和 Lewis (2005) 建立了新几内亚凤仙和非洲凤仙花芽发育的模型，通过温室内温度预测花期以达到调整上市的目的。迟东明等 (2009) 通过观测并记录月季从萌芽到切花采收期的生长发育时间、积温量、光照强度以及日总量等参数，得出月季生长发育时间和积温量成显著正相关，而积温量与光照强度和光照时数相关不显著，进而推导出了月季采收期周年积温预测模型方程。在光温变化同步的条件下（如大田作物生产），有效积温法是一种较为简便和实用的发育模拟方法，但是由于有效积温法没有考虑光照及高温对发育的影响，因此对于长日植物和短日植物的预测效果差，并且在高温季节预测的结果也不理想。

光照强度对于一些植物的生长发育起着重要的作用。Hiden 和 Larsen (1994) 根据菊花对温度和光照的反应提出了温室多头菊花发育预测模型，用日均温度和日辐射量预测恒温条件下温室多头菊花从短日处理到完全开花所需要的天数。有研究者提出基于温度和光合有效辐射建立的温室多头菊花的发育模型 (Larsen & Hiden, 1995; Larsen & Persson, 1999)，用指数方程描述温度和辐射强

度与最大发育速率的关系, 检验结果表明模型在 18 ~ 24 °C 范围内预测效果较好, 在其它温度范围适用性较差。Snipen 等 (1999) 开发的一品红发育模型可以预测在不同日均温度、光合有效辐射水平和栽种密度条件下的开花时间。Boschi 等 (2004) 根据空气温度和光子通量密度模拟预测白鹤芋的各个发育阶段, 并预测花期。Pramuk 和 Runkle (2005) 根据日均温和日累积光量模拟预测鸡冠花和凤仙花的花期、花芽数量、花朵数、花期干物质含量等。Moccaldi 和 Runkle (2007) 模拟了温度和光合日累积光量对一串红和孔雀草生长和开花的影响, 预测不同温度和日累积光量下的植株干样质量、花期和花朵数等。徐国彬等 (2006) 将热效应与光合有效辐射互作整合, 首次提出了辐热积 (TEP) 的概念, 通过试验发现不同扦插期的温室盆栽一品红完成同一生育期所需的累积辐热积基本一致。辐热积法综合考虑了温度和光合有效辐射对发育的影响, 因此对光周期不敏感的温室作物的预测较为准确。

对于一些植物光周期也是极其重要的影响因素。杨再强等 (2007a) 在辐热积的基础上提出了生理辐热积 (Physiological product of thermal effectiveness sand PAR, PTEP) 的概念, 建立了以生理辐热积为尺度的温室标准切花菊发育模型, 可以预测其现蕾期和收获期。Dai 等 (2008) 研究了生理辐热积与切花菊发育阶段和品质的关系, 建立了从扦插、定植、现蕾到采收的切花菊发育模型。观赏植物多在温室栽培中, 人工加温和降温、遮光和补光措施会使温室内温度与辐射存在不同步的情况, 因此用单一积温指标无法准确预测温室作物的发育进程, 而生理辐热积则综合了温度、光照强度、光周期和基本发育因子对植物发育的共同作用, 克服了积温法和辐热积法的局限, 提高了预测精度。

### 3 观赏植物外观品质模拟模型研究进展

#### 3.1 叶片数模拟

叶片数是观赏植物重要的外观品质, 在栽培方式一定的情况下, 影响植株的出叶和展叶的主要因素有温度和光照。目前对观赏植物的出叶模拟报道较少, 一般用数学方程描述出叶数与定植时间和温度的关系。菊花的展叶数与日平均温度呈线性相关, 叶片数在花芽形成前随定植后天数呈 S 曲线增长, 花芽分化后不再出叶 (Karlsson & Heins, 1992)。多头菊的展叶数与定植后天数的关系可用逻辑斯蒂方程描述 (Larsen & Hiden, 1995)。徐国彬等 (2006) 以辐热积为光温指标, 对不同扦插期一品红研究发现主茎上净增加叶片数、侧枝叶片数、苞片数与辐热积均呈线性关系。

#### 3.2 株高模拟

植株的最终高度由节间数量和节间长度共同决定。在已有的研究中对观赏植物株高的模拟目前主要采用经验回归模型描述。Heinrich 和 Patricia (1990) 根据空气和基质温度预测盆栽百合茎高度和叶生长数量。Larsen 和 Gertsson (1992) 用温度和日总辐射预测菊花茎和侧枝生长速度。Heuvelink 等 (1998) 的研究表明节间数在开花前与日均温度呈正相关, 在开花后节间数不再增加, 节间长度受光照强度和温度影响。Schouten 等 (2002) 建立的菊花节间生长模拟模型, 模拟了温差对节间伸长的影响。Carvalho 等 (2002) 用白天和夜间的平均温度预测菊花的最终节间长度和高度, 经检验该模型在 18 ~ 24 °C 温度范围内预测效果好; 之后根据长日照持续时间和温度对节间数量和平均节间长度的影响来预测切花菊的株高 (Carvalho & Heuvelink, 2004); 还建立了盆栽长寿花生长和品质模型, 对不同温度和光通量密度条件下长寿花的株高进行动态模拟预测 (Carvalho et al., 2006)。Eveleens-Clark 等 (2004) 根据节间数量和平均节间长度对不同温度和播种时间条件下长寿花的株高

进行模拟预测。徐国彬等(2006)的研究结果表明一品红标准化株高净增量(株高净增量/扦插苗初始叶面积)与光合有效辐射呈幂函数关系。

### 3.3 花的品质指标模拟

花径、花质量、花枝长度和花的数量等是评价花的外观品质的重要指标。目前对观赏植物花的品质模拟研究报道较少,观赏植物品质模型应用于实际生产的很少,仅有少数模型用来预测鲜切花产量和花径大小。

Larsen 和 Hiden (1995)认为夏季菊花的鲜样质量大于冬季,花的数量与花芽分化初期光照水平关系密切,光照愈强,花的数量越多。Carvalho 和 Heuvelink (2004)根据单株地上部分总鲜样质量预测切花菊除花蕾外的单株花朵数。Eveleens-Clark 等(2004)对长寿花花头数量进行了模拟预测,并根据光合有效辐射截获和光能利用率模拟预测地上部分总干样质量,认为花头数和地上部分总干样质量呈正线性关系。Nothnagl 等(2004)用温室内温度和光合有效辐射预测菊花花头直径,将花头直径与温度和辐射的关系在破蕾前和破蕾后分别用线性函数和 monomolecular 函数模拟。Shamasundaran 和 Venugopalan (2006)提出了月季采前产量预测统计模拟模型,用回归技术预测月季产量。基于生理辐射热建立的温室标准切花菊品质预测模型,对温室标准切花菊的展叶数、单株叶面积、株高、茎粗、节间长和花径进行了模拟预测(杨再强 等,2007d; Dai et al., 2008)。

## 4 存在问题和发展方向

目前对观赏植物的生长模拟研究主要借鉴大田作物和蔬菜作物模拟模型研究的成果和方法,但还存在一些问题正待解决。

(1) 研究内容主要集中在发育模拟、花期预测、叶面积模拟、干物质的生产与分配模拟、品质模拟等方面,但在光截获、光合作用、呼吸作用、器官的建成和产量的形成等方面的模拟还比较薄弱,尤其是呼吸作用的模拟部分最为薄弱,因为呼吸作用一般分为生长呼吸和维持呼吸,机理比较复杂,模型以经验公式为主。另一方面,研究涉及到的观赏植物种类也较少,很多观赏植物生长模拟模型的研究还是空白,因此具有广阔的研究前景。

(2) 大多数模型都是在没有肥水限制的潜在生产条件下建立的,没有考虑不同水分和氮素水平对观赏植物生长发育及外观品质的影响,限制了模型在温室作物氮素和水分优化管理方面的应用。近年来,已经开始有这方面的研究报道,如氮素对日光温室独本菊‘神马’干物质分配(米晓洁 等,2009)和外观品质(丁琪峰 等,2009)影响的模拟模型,水分对日光温室独本菊生长动态影响的模拟(周艳宝 等,2008)和外观品质的模拟(周艳宝 等,2009)。这些研究为实现对有肥水限制条件下的观赏植物生长模拟提供了借鉴和参考,但这方面的模拟研究还比较薄弱,是今后进一步研究的重点。

(3) 现有的模型都是在特定的地区、温室类型、定植密度、品种以及土壤类型上建立的,模型不具有普适性。今后还需要进一步用不同定植密度、不同类型品种、不同地点的试验研究资料对模型参数进行校正和检验,提高模型的实用性和适应性,使之在其它条件下也能应用。

(4) 现有的模型是根据环境检测设备获取的环境数据建立的,而中国大多数温室内没有环境检测设备,因此,进一步将现有模型与可以根据室外气象要素测定设施内光温状况的小气候模型相结合,会使模型更为实用方便。

(5) 目前的研究都停留在建立数学模型上,而没有进一步用计算机编程开发出可应用于生产的温室生产智能化操作与管理软件,以便让生产者能对温室环境和肥水管理进行精确有效地控制,从

而提高经济效益。因此, 加大科研力度开发基于作物生产模拟模型的温室生产智能化操作与管理软件及观赏植物生产决策支持系统已成为今后的研究方向。

## References

- Boschi C, Di Benedetto A, Pasian C. 2004. Prediction of developmental events on *Spathiphyllum floribundum* Schott 'Petite' based on air thermal units. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, 79 (5): 776–782.
- Cao Hong-xin, Dong Yu-hong, Sun Li-rong, Wang Fa-hong, Zhang Li-min, Xu Jian-hua, Gao Liang-zhi. 2003. Researches for application of crop simulation technology in wheat cultivation. *Scientia Agricultura Sinica*, 36 (3): 342–348. (in Chinese)
- 曹宏鑫, 董玉红, 孙立荣, 王法宏, 张立民, 徐建华, 高亮之. 2003. 作物模拟技术在小麦栽培中应用的研究. *中国农业科学*, 36 (3): 342–348.
- Carvalho S M P, Eveleens-Clark B, Bakker M J, Heuvelink E. 2006. Improving product quality and timing of Kalanchoe: Model development and validation. *Acta Horticulturae*, 718: 655–662.
- Carvalho S M P, Heuvelink E, van Kooten O. 2002. Effect of light intensity, plant density and flower bud removal on the flower size and number in cut chrysanthemum. *Acta Horticulturae*, 593: 33–38.
- Carvalho S M P, Heuvelink E. 2004. Modelling external quality of cut chrysanthemum: Achievements and limitations. *Acta Horticulturae*, 654: 287–294.
- Chi Dong-ming, Guo Peng-zhong, Yue Ling. 2009. Study on prediction model of accumulated temperature of rose at harvest time. *Liaoning Agricultural Sciences*, 2: 42–44. (in Chinese)
- 迟东明, 果朋忠, 岳 玲. 2009. 月季采收期周年积温预测模型的研究. *辽宁农业科学*, 2: 42–44.
- Dai J F, Luo W H, Yang Z Q. 2008. A photo-thermal model for predicting development and quality of standard cut chrysanthemum in greenhouses. *Acta Horticulturae*, 801 (2): 1423–1430.
- Dayan E, Presnov E, Fuchs M. 2004. Prediction and calculation of morphological characteristics and distribution of assimilates in the ROSGRO model. *Mathematics and Computers in Simulation*, 65: 101–116.
- Ding Qi-feng, Dai Jian-feng, Luo Wei-hong, Mi Xiao-jie, Chen Yong-shan, Zhao Chun-jiang, Qiao Xiao-jun, Liu Ke-xin. 2009. Simulating the effects of nitrogen on external quality indices of standard cutting chrysanthemum 'Shenma' in solar greenhouse. *Scientia Agricultura Sinica*, 42 (1): 363–369. (in Chinese)
- 丁琪峰, 戴剑锋, 罗卫红, 米晓洁, 陈永山, 赵春江, 乔晓军, 刘克信. 2009. 氮素对日光温室独本菊 '神马' 外观品质影响的模拟. *中国农业科学*, 42 (1): 363–369.
- Eveleens-Clark B, Carvalho S M P, Heuvelink E. 2004. A conceptual dynamic model for external quality in Kalanchoe. *Acta Horticulturae*, 654: 263–269.
- Faust J E, Lewis K P. 2005. Modeling flower bud development of *Impatiens hawkeri* and *I-walleriana*. *HortScience*, 40 (4): 1013.
- Fisher P R, Heinrich L J. 2000. Variability in flower development of Easter lily (*Lilium longiflorum* Thunb.): Model and decision-support system. *Computational and Electronics in Agriculture*, 26: 53–64.
- Gutierrez Colomer R P, Gonzalez-Real M M, Baille A. 2006. Dry matter production and partitioning in rose (*Rosa hybrida*) flower shoots. *Scientia Horticulturae*, 107 (3): 284–291.
- Heinrich J L, Patricia C. 1990. Modeling stem elongation and leaf unfolding of Easter lily during greenhouse forcing. *Scientia Horticulturae*, 44: 149–162.
- Heuvelink E, van Meeteren U, Chang L N, Fancello G, Lee J H. 1998. The influence of temperature, photoperiod and plant density on external quality of cut chrysanthemum. Brussels, Belgium: XXV International Horticultural Congress: 314.
- Hidden C, Larsen R U. 1994. Predicting flower development in greenhouse grown chrysanthemum. *Scientia Horticulturae*, 58: 123–138.
- Johann B, Josef H. 2000. The use of phenology models in plant conservation programmes: The establishment of the earliest cutting date for the wild daffodil *Narcissus radiiflorus*. *Biological Conservation*, 93: 155–161.
- Karlsson M G, Heins R D. 1992. Chrysanthemum dry matter partitioning pattern along irradiance and temperature gradients. *Canadian Journal of Plant Science*, 72: 307–316.

- Larsen R U , Gertsson U. 1992. Model analysis of shoot elongation in *Chrysanthemum × morifolium*. *Scientia Horticulturae* , 49 : 277 – 289.
- Larsen R U , Hiden C. 1995. Predicting leaf unfolding in flower induced shoots of greenhouse grow chrysanthemum. *Scientia Horticulturae* , 63 : 225 – 239.
- Larsen R U , Persson L. 1999. Modelling flower development in greenhouse chrysanthemum cultivars in relation to temperature and response group. *Scientia Horticulturae* , 80 : 73 – 89.
- Lee J H , Goudriaan J , Challa H. 2003. Using the expolinear growth equation for modelling crop growth in year-round cut chrysanthemum. *Annals of Botany* , 92 (5) : 697 – 708.
- Lee J H , Heuvelink E , Challa H. 2002. Effects of planting date and plant density on crop growth in cut chrysanthemum. *Journal of Horticulture Science and Biotechnology* , 77 : 238 – 247.
- Lee J H , Heuvelink E. 2003. Simulation of leaf area development based on dry matter partitioning specific leaf area for cut chrysanthemum. *Annals of Botany* , 91 : 319 – 327.
- Marcelis L F M , Heuvelink E , Goudriaan J. 1998. Modelling biomass production and yield of horticultural crops : A review. *Scientia Horticulturae* , 74 : 83 – 111.
- Mi Xiao-jie , Dai Jian-feng , Luo Wei-hong , Ding Qi-feng , Chen Yong-shan , Zhao Chun-jiang , Qiao Xiao-jun , Liu Ke-xin. 2009. Quantifying the effects of nitrogen on dry matter partitioning of standard cut chrysanthemum ‘ Shenma ’ in solar greenhouse. *Journal of Plant Ecology* , 33 (1) : 108 – 117. (in Chinese)
- 米晓洁 , 戴剑锋 , 罗卫红 , 丁琪峰 , 陈永山 , 赵春江 , 乔晓军 , 刘克信. 2009. 氮素对日光温室独本菊品种 ‘ 神马 ’ 干物质分配影响的模拟. *植物生态学报* , 33 (1) : 108 – 117.
- Moccaldi L A , Runkle E S. 2007. Modeling the effects of temperature and photosynthetic daily light integral on growth and flowering of *Salvia splendens* and *Tagetes patula*. *Journal of the American Society for Horticultural Science* , 132 (3) : 283 – 288.
- Nothnagl M , Kosiba A , Larsen R U. 2004. Predicting the effect of irradiance and temperature on the flower diameter of greenhouse grown *Chrysanthemum*. *Scientia Horticulturae* , 99 (3 – 4) : 319 – 329.
- Panagiotis G , Maria B , Alain B. 1995. Net photosynthesis response to light and air CO<sub>2</sub> concentration of *Begonia × hiemalis* : Whole plant measurements and modeling. *Scientia Horticulturae* , 63 (1 – 2) : 83 – 100.
- Pramuk L A , Runkle E S. 2005. Modeling growth and development of celosia and impatiens in response to temperature and photosynthetic daily light integral. *Journal of the American Society for Horticultural Science* , 130 (6) : 813 – 818.
- Pronk A A , Heuvelink E , Challa H. 2003. Dry mass production and leaf area development of field-grown ornamental conifers : Measurements and simulation. *Agricultural Systems* , 78 (3) : 337 – 353.
- Schouten R E , Carvalho S M P , Heuvelink E , van Kooten O. 2002. Modelling of temperature-controlled internode elongation applied to *Chrysanthemum*. *Annals of Botany* , 90 : 353 – 359.
- Shamasundaran K S , Venugopalan R. 2006. Statistical modelling for pre-harvest forecast : An illustration with rose. *Journal of Horticultural Sciences* , 1 (1) : 68 – 70.
- Snipen L G , Moe R , Soreng J. 1999. Influence of potential growth factors in predicting time to flowering in poinsettia ( *Euphorbia pulcherrima* ) . *Scientia Horticulturae* , 81 : 345 – 359.
- Steininger J , Pasian C C. 2003. Prediction of development of asiatic lilies based on air temperature and thermal units. *HortScience* , 38 (6) : 1100 – 1103.
- Steininger J , Pasian C C , Lieth J H. 2002. Extension of a thermal unit model to represent nonlinearities in temperature response of miniature rose development. *Journal of the American Society for Horticultural Science* , 127 (3) : 349 – 354.
- Xu Guo-bin , Luo Wei-hong , Chen Fa-di , Li Yong-xiu , Wei You-gang , Chen Dong. 2006. Effects of temperature and solar radiation on *Euphorbia pulcherrima* development and main quality indices. *Acta Horticulturae Sinica* , 33 (1) : 168 – 171. (in Chinese)
- 徐国彬 , 罗卫红 , 陈发棣 , 李永秀 , 魏猷刚 , 陈 冬. 2006. 温度和辐射对一品红发育及主要品质指标的影响. *园艺学报* , 33 (1) : 168 – 171.
- Yang Ning , Liao Gui-ping. 2002. Research advance on crop growth simulation. *Crop Research* , 5 : 255 – 257. (in Chinese)
- 杨 宁 , 廖桂平. 2002. 作物生长模拟研究进展. *作物研究* , 5 : 255 – 257.

- Yang Zai-qiang. 2007. Simulation model on development , growth and quality for greenhouse standard cut chrysanthemum [Ph. D. Dissertation]. Nanjing : Nanjing Agricultural University. (in Chinese)
- 杨再强. 2007. 温室标准切花菊生长发育和品质模拟模型的研究 [博士论文]. 南京 : 南京农业大学.
- Yang Zai-qiang , Luo Wei-hong , Chen Fa-di , Gu Jun-jie , Li Xiang-mao , Ding Qi-feng , Zhao Cai-biao , Lu Ya-fan. 2007a. A simulation model for predicting the development stage and harvesting date of standard cut chrysanthemum in greenhouse. *Scientia Agricultura Sinica* , 40 (6) : 1229 – 1235. (in Chinese)
- 杨再强 , 罗卫红 , 陈发棣 , 顾俊杰 , 李向茂 , 丁琪峰 , 赵才标 , 陆亚凡. 2007a. 温室标准切花菊发育模拟与收获期预测模型研究. *中国农业科学* , 40 (6) : 1229 – 1235.
- Yang Zai-qiang , Luo Wei-hong , Chen Fa-di , Gu Jun-jie , Li Xiang-mao , Ding Qi-feng , Zhao Cai-biao , Lu Ya-fan. 2007b. Predicting the leaf area of standard cut chrysanthemum in greenhouse. *Scientia Agricultura Sinica* , 40 (11) : 2569 – 2574. (in Chinese)
- 杨再强 , 罗卫红 , 陈发棣 , 顾俊杰 , 李向茂 , 丁琪峰 , 赵才标 , 陆亚凡. 2007b. 温室标准切花菊叶面积预测模型研究. *中国农业科学* , 40 (11) : 2569 – 2574.
- Yang Zai-qiang , Luo Wei-hong , Chen Fa-di , Gu Jun-jie , Li Xiang-mao , Ding Qi-feng , Zhao Cai-biao , Lu Ya-fan. 2007c. Simulation of dry matter production and partitioning of standard cut chrysanthemum in greenhouse. *Scientia Agricultura Sinica* , 40 (9) : 2028 – 2035. (in Chinese)
- 杨再强 , 罗卫红 , 陈发棣 , 顾俊杰 , 李向茂 , 丁琪峰 , 赵才标 , 陆亚凡. 2007c. 温室标准切花菊干物质生产与分配模型. *中国农业科学* , 40 (9) : 2028 – 2035.
- Yang Zai-qiang , Luo Wei-hong , Chen Fa-di , Gu Jun-jie , Li Xiang-mao , Ding Qi-feng , Zhao Cai-biao , Lu Ya-fan. 2007d. Quality prediction model of greenhouse standard cut chrysanthemum based on light-temperature effect. *Chinese Journal of Applied Ecology* , 18 (4) : 877 – 882. (in Chinese)
- 杨再强 , 罗卫红 , 陈发棣 , 顾俊杰 , 李向茂 , 丁琪峰 , 赵才标 , 陆亚凡. 2007d. 基于光温的温室标准切花菊品质预测模型. *应用生态学报* , 18 (4) : 877 – 882.
- Yang Zai-qiang , Luo Wei-hong , Chen Fa-di , Xie Yi-ping , Gu Jun-jie. 2009. A photo-thermal based model for predicting the dry matter production and partitioning of multi-stem cut *Chrysanthemum* in greenhouse. *Acta Ecologica Sinica* , 29 (3) : 1478 – 1485. (in Chinese)
- 杨再强 , 罗卫红 , 陈发棣 , 谢以萍 , 顾俊杰. 2009. 基于光温的温室多杆切花菊干物质生产与分配的预测模型. *生态学报* , 29 (3) : 1478 – 1485.
- Zhang Xiao-yan , Liu Feng , Wang Feng-yun , Liu Shu-yun , Feng Wen-jie , Shang Ming-hua , Zhu Jian-hua. 2008. Simulation of dry matter partitioning and marketing date of greenhouse *Phalaenopsis aphrodita* Rchb. F. flower. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* , 16 (6) : 1453 – 1457. (in Chinese)
- 张晓艳 , 刘 锋 , 王风云 , 刘淑云 , 封文杰 , 尚明华 , 朱建华. 2008. 温室蝴蝶兰干物质分配及产品上市期模拟研究. *中国生态农业学报* , 16 (6) : 1453 – 1457.
- Zhou Yan-bao , Dai Jian-feng , Lin Lu , Luo Wei-hong , Zhao Chun-jiang , Qiao Xiao-jun , Liu Ke-xin. 2008. Quantifying the effects of water on growth dynamics of standard cut chrysanthemum in solar greenhouse. *Transactions of the CSAE* , 24 (11) : 176 – 182. (in Chinese)
- 周艳宝 , 戴剑锋 , 林 禄 , 罗卫红 , 赵春江 , 乔晓军 , 刘克信. 2008. 水分对日光温室独本菊生长动态影响的模拟. *农业工程学报* , 24 (11) : 176 – 182.
- Zhou Yan-bao , Dai Jian-feng , Lin Lu , Luo Wei-hong , Zhao Chun-jiang , Qiao Xiao-jun , Liu Ke-xin. 2009. Simulation of the effects of water on external quality of standard cut chrysanthemum in solar greenhouse. *Transactions of the CSAE* , 25 (6) : 204 – 209. (in Chinese)
- 周艳宝 , 戴剑锋 , 林 禄 , 罗卫红 , 赵春江 , 乔晓军 , 刘克信. 2009. 水分对日光温室独本菊外观品质影响的模拟. *农业工程学报* , 25 (6) : 204 – 209.