

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

杨再强¹, 罗卫红², 陈发棣³, 谢以萍¹, 顾俊杰⁴

(1. 南京信息工程大学, 气象灾害省部共建教育部重点实验室, 南京 210044; 2. 南京农业大学农学院, 南京 210095;
3. 南京农业大学园艺学院, 南京 210095; 4. 上海鲜花港企业有限责任公司, 上海 201303)

摘要: 根据菊花生长对光温的反应, 设计不同品种、不同单株主杆数、不同定植密度和不同定植日期的试验, 构建了以生理辐射积 (Physiological product of thermal effectiveness and PAR, PTEP) 为尺度的温室多杆切花菊的干物质生产与分配预测模型, 并用与建模相独立的试验数据对模型进行了检验。结果表明: 随单位面积杆数增加, 切花菊的单位面积地上干物质产量增加, 单枝切花鲜重减少。所建模型对温室多杆切花菊的单株叶干重、茎干重、花干重和地上部分鲜重的预测值与实际观测值基于 1:1 线的决定系数 (R^2) 分别为: 0.96、0.95、0.82 和 0.97, 回归估计标准误 (RMSE) 分别为: 0.863、1.005、0.201 和 10.190 g·株⁻¹。模型模拟精度较高, 可为温室切花菊栽培密度和保留杆数的优化调控提供理论依据。

关键词: 菊花; 杆数; 密度; 模型; 干物质生产与分配

文章编号: 1000-0933(2009)03-1478-08 中图分类号: S629 文献标识码: A

A photo-thermal based model for predicting the dry matter production and partitioning of multi-stem cut *Chrysanthemum* in greenhouse

YANG Zai-Qiang¹, LUO Wei-Hong², CHEN Fa-Di³, XIE Yi-Ping¹, GU Jun-Jie⁴

1 Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China

2 College of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China

3 College of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China

4 Shanghai Flower Port Co. Ltd, Shanghai 201303, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(3): 1478 ~ 1485.

Abstract: Based on the effects of temperature and radiation on chrysanthemum growth, experiments with different cultivars, different stem number per plant, different planting density and different planting dates were carried out under greenhouse conditions in Shanghai from 2005 to 2006. A concept of physiological product of thermal effectiveness and photosynthetically active radiation (PTEP, MJ m⁻²) was proposed to develop a model with the PTEP as measurement scale for predicting the effect of stem number per area on dry matter production and partitioning of cut chrysanthemum. Independent experimental data were used to validate the model. The results showed that with increase of stem number per area, dry matter production increased but shoot fresh matter production per plant decreased. The model successfully predicted the dry matters of leaf, stem and flower as well as the fresh matter of shoot per plant in cut *Chrysanthemum* with different stem number and planting density. The coefficient of determination (R^2) and root mean squared error (RMSE) based on the 1:1 line for the dry matters of leaf, stem and flower as well as the fresh matter of shoot per plant were 0.96, 0.95, 0.82 and 0.97, and 0.863, 1.005, 0.201, 10.190 g·plant⁻¹, respectively. The model can be used for optimizing light and temperature management for multi stem cut *Chrysanthemum* with different stem number and planting density under greenhouses conditions.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (30771262)

收稿日期: 2008-10-05; **修订日期:** 2008-12-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yzq@nuist.edu.cn

Key Words: *Chrysanthemum morifolium* Ramat; stem number; planting density; model; dry matter production and partitioning

菊花(*Chrysanthemum morifolium* Ramat.)是我国最主要的出口花卉之一^[1]。近年来,许多生产企业采用多杆栽培和增加单位面积密度来提高温室切花菊产量。但随单位面积杆数的增加,切花菊的单杆叶面积和地上部分干物质下降而导致切花菊品质下降。因此,如何在增加单位面积杆数的同时,保证切花品质,实现经济效益最大化,是生产企业急需解决的关键技术问题。而准确预测多杆切花菊的干物质生产与分配,是切花菊生产温室中环境优化调控的前提。

国外关于作物干物质生产与分配的模拟的研究较多^[2~9],而关于菊花干物质生产预测模型的研究,主要是针对单杆栽培的多头小菊^[10~14],建立了多头小菊的干物质生产模拟模型^[15,16]。在国内,杨再强等^[17~20]构建了温室单杆栽培的标准切花菊生长发育和品质模拟模型,李向茂等^[21]研究了不同定植密度对单头切花菊‘神马’品质的影响;而关于多杆切花菊干物质生产与分配的模拟研究,尚未见报道。本研究在已有单杆栽培的标准切花菊生长发育与品质预测模型的基础上,定量研究了单位面积不同杆数对多杆切花菊干物质生产与分配的影响,建立了多杆栽培的温室切花菊叶干重、茎干重、花干重和单枝切花菊鲜重的预测模型,旨在为温室切花菊的生产决策和品质调控提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 供试植物

试验于2005年4月~2006年8月在上海市鲜花港企业发展有限公司的GLP(622)内保温式双层连栋大棚进行。试验用苗高6 cm,6片真叶,根系长2 cm。定植后每天夜间(20:00~1:00)用200 J·s⁻¹白炽灯补光5 h。株高达60 cm后一直进行短日处理,每天从17:00到第2天7:00用黑色塑料膜遮光。实验采用土培和滴灌。当花蕾直径达2 cm、舌状花瓣长1.5 cm时收获。

1.2 试验设计

试验1于2005年4~8月进行,供试材料为相对短日型夏菊品种‘优香(Yuuka)’。4月22日定植,种植密度42株每平方米。4月28日摘心,离地面4 cm高处摘心去顶,分别保留1、2和3个侧芽培育单杆、双杆和三杆,使单位面积杆数分别为42、84和126杆每平方米。6月16日开始短日处理,8月5日收获。

试验2于2005年4~7月进行,供试材料为相对短日型夏菊品种‘精云(Jingyun)’。4月6日定植,种植密度64株每平方米,采用单杆栽培。6月20日开始短日处理,7月27日收获。

试验3于2005年5~9月进行,供试材料为‘优香(Yuuka)’。5月20日定植,5月30日摘心,7月12日开始短日处理,9月4日收获。种植密度和摘心方法同试验1。

试验4于2005年7~11月进行,供试材料为绝对短日型秋菊品种‘神马(Jingba)’。8月22日定植,种植密度64株每平方米,单杆栽培。10月10日开始短日处理,11月14日收获。

试验5于2006年5~8月,供试材料为‘优香(Yuuka)’。5月1日定植,5月4日摘心,6月24日开始短日处理,8月24日收获。种植密度和摘心方法同试验1。

上述试验各处理定植200株,试验重复3次。利用试验1和试验2数据建立模型,其余试验用于检验模型。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 温室环境数据的测定

试验期间每天对菊花发育状况进行观测,记录各个生育阶段到达的日期。连栋大棚的环境数据由数据采集器(datalogger, Campbell Scientific CR10X)自动采集,采集项目为温室内1.5 m高处空气温度和菊花冠层上方的太阳辐射,采集频率为10 s,存储每30 min的平均值。

1.3.2 植株干、鲜质量的测定

每处理隔7 d随机取样3株^[22,23],分别测定植株地上部分和各器官鲜质量,在烘箱内105℃杀青5 min,

然后在 85 ℃ 烘干至恒量,称其干质量。各指标的取值均为 3 次重复试验的平均值。

2 模型的构建

2.1 生理辐射热积计算

菊花是典型的短日照植物,在栽培方式一定的条件下,影响菊花干物质生产主要因素是温度、光合有效辐射和日照长度^[17~20],因此生理辐射热积(PTEP)被定义为在日照长度、光合有效辐射和空气日均温度均为最适的条件下,短日菊花完成某发育阶段所需的累积辐射热积^[17,18]。将生理辐射热积(PTEP)作为预测菊花干物质生产的综合光温指标,生理辐射热积可按下列公式计算:

$$DTEP(i) = ((\sum RTE(i,j))/24) \times PAR(i) \quad (1)$$

$$TEP(i) = \sum_{j=m}^n DTEP(i) \quad (2)$$

$$PTEP = \begin{cases} TEP \times BD_1 & PTEP < SD \\ TEP \times RPE \times BD_2 & PTEP \geq SD \end{cases} \quad (3)$$

式中, $DTEP(i)$ 为第*i*天冠层吸收的日总辐射热积($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); $PAR(i)$ 第*i*天总光合有效辐射($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); RPE 为每日光周期效应,由于本试验采用遮光处理,在短日处理阶段光照长度为 10 h,低于菊花最适日长 12.5 h^[24~26],因此 $RPE = 1$; $TEP(i)$ 为菊花从定植到第*i*天的累积辐射热积($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$); $PTEP$ 为菊花定植后的生理辐射热积($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$); BD_1 为短日处理前品种的基本发育因子; BD_2 为短日处理后的基本发育因子; SD 为待定的模型参数, BD_1 、 BD_2 和 SD 参考文献^[20]的取值; $RTE(i,j)$ 为*i*天内第*j*($j = 1 \sim 24$)小时的相对热效应,可根据菊花发育所需的三基点温度和实际温室内气温观测数据,参考文献^[17]计算如下:

$$RTE(T) = \begin{cases} 0 & (T < Tb) \\ (T - Tb)/(Tob - Tb) & (Tb \leq T < Tob) \\ 1 & (Tob \leq T \leq Tou) \\ (Tm - T)/(Tm - Tou) & (Tou < T \leq Tm) \\ 0 & (T > Tm) \end{cases} \quad (4)$$

式中, $RTE(T)$ 为温度为*T*的相对热效应,*T*为每小时的平均温度,*Tb*为菊花生长下限温度,*Tob*为菊花生长最适下限温度,*Tou*为生长最适上限温度,*Tm*为生长上限温度。菊花各生育时期的三基点温度见表 1。

表 1 切花菊各生育时期的三基点温度^[24~26]

Table 1 Minimum, optimum and maximum temperature of different development stages of cut chrysanthemum

生育期 Development stages	最低温度 <i>Tb</i> (℃)	最适下限温度 <i>Tob</i> (℃)	最适上限温度 <i>Tou</i> (℃)	最高温度 <i>Tm</i> (℃)
定植到短日处理	10	20	25	35
短日处理到现蕾	白天 Day	16	20	28
	夜间 Night	18	23	32
现蕾到收获	10	25	35	

定植到短日处理 Planting to the beginning of short day length treatment;短日处理到现蕾 Beginning of Short day length treatment to bud break;现蕾到收获 Bud break to harvesting date;最低温度 The minimum temperature;最适下限温度 The lower optimum temperature;最适上限温度 The upper optimum temperature;最高温度 The maximum temperature

2.2 干物质生产的模拟

利用试验 1、2 的数据,按公式(1)~(4)计算得到切花菊定植后生理辐射热积和实际测得的单位面积地上部分干物质重量(图 1)。图 1 显示,随单位面积杆数增加,菊花单位面积植株地上干物质产量增加。单位面积不同杆数菊花的地上部分干重(DWS)与定植后冠层上方的辐射热积(PTEP)的关系服从指数——线性函数^[16],即菊花干物质积累可分两个阶段:在定植后到冠层封行前,由于植株光照充分,植株地上部分干物质呈现指数增长;在冠层封行后至收获前,冠层截获光合有效辐射不再增加,植株地上部分干物质积累与定植后生

理辐射热积间呈线性关系增长。因此,可用指数——线性模型模拟菊花地上部分干物质积累的全过程:

$$DWS = (C_m/R_m) \times \ln(1 + \exp(R_m \times (PTEP - PTEP_b))) \quad (5)$$

式中, DWS 表示单位面积地上部分干重($g \cdot m^{-2}$), $PTEP$ 表示定植后生理辐射热积($MJ \cdot m^{-2}$), C_m 为线性阶段地上部分干重最大生长速率($g \cdot MJ^{-1}$), R_m 为指数阶段地上部分干重相对最大生长速率($g \cdot g^{-1} (MJ \cdot m^{-2})^{-1}$), $PTEP_b$ 为菊花植株封行时辐射完全被冠层截获的生理辐射热积($MJ \cdot m^{-2}$)。

利用试验 1,2 的数据用 Spss11.0 统计分析软件计算后得到上述模型中的参数 C_m 、 R_m 和 $PTEP_b$ 值,结果表明模型参数 C_m 、 R_m 、 $PTEP_b$ 与单位面积杆数(N)较好地符合线性关系,可用线性方程拟合(表 2),样本数 $n = 34$ 。

2.3 干物质分配的模拟

在干物质分配的研究中,假定干物质首先在地上部分与地下部分之间进行分配,然后地上部分干物质再向茎、叶、花中分配,各器官干物质分配指数按如下公式计算^[23,27]:

$$PIL_i = DWL_i/DWS_i \quad (6)$$

$$PST_i = DWST_i/DWS_i \quad (7)$$

$$PIF_i = 1 - (PIL_i + PST_i) \quad (8)$$

式中, PIL_i 、 PST_i 、 PIF_i 分别表示第 i 天叶、茎、花的干物质分配指数, DWS_i 、 DWL_i 、 $DWST_i$ 分别表示第 i 天地上部分、叶和茎的干重($g \cdot 株^{-1}$)。

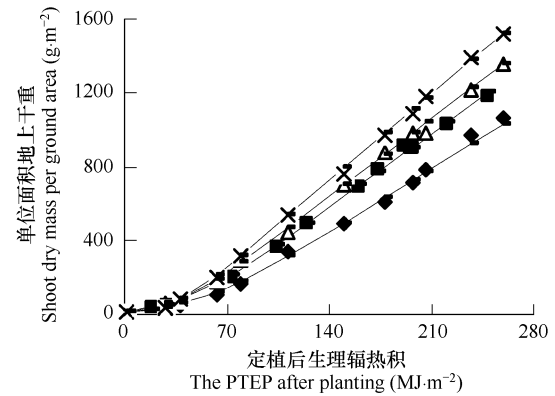


图 1 菊花单位面积地上干重与定植后生理辐射热积的关系

Fig. 1 Relationship of the shoot dry mass per ground to the PTEP after planting

◆42 杆·m⁻² 42 Stems per ground area; ■64 杆·m⁻² 64 Stems per ground area; △84 杆·m⁻² 84 Stems per ground area; ×126 杆·m⁻² 126 Stems per ground area; —拟合曲线 Fitted curve

表 2 模型参数(C_m 、 R_m 和 $PTEP_b$)与单位面积杆数的关系

Table 2 The relationship between the model parameter (C_m , R_m , $PTEP_b$) and the stem numbers per ground area

模型参数 Model parameter	拟合方程 Fitted equation	R^2	se
$C_m (g \cdot MJ^{-1})$	$C_m = 4.470 + 0.018N$	0.914 *	0.310 $g \cdot MJ^{-1}$
$R_m (g \cdot g^{-1} (MJ \cdot m^{-2})^{-1})$	$R_m = 0.0203 + 0.00045N$	0.976 **	0.003 $g \cdot g^{-1} (MJ \cdot m^{-2})^{-1}$
$PTEP_b (MJ \cdot m^{-2})$	$PTEP_b = 59.54 - 0.23N$	0.912 *	3.460 $MJ \cdot m^{-2}$

N 为单位面积杆数 N was the number of stems per ground area; C_m 为线性阶段地上部分干重最大生长速率 C_m was the maximum growth rate of shoot dry matter in linear phase; R_m 为指数阶段地上部分干重相对最大生长速率 R_m was the maximum relative growth rate of shoot dry matter in exponential phase; $PTEP_b$ 为菊花植株封行时辐射完全被冠层截获的生理辐射热积 $PTEP_b$ was the $PTEP$ absorbed by the canopy during canopy development before all radiation is intercepted; * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$

利用试验 1 和试验 2 的数据,按公式(1)~(8)计算得到切花菊定植后的生理辐射热积和实际测得的不同器官的干物质分配指数(图 2)。由图可知,定植后至现蕾前,叶的干物质分配指数随定植后生理辐射热积增加而降低,茎的分配指数逐渐增加。在现蕾后,干物质分配中心逐渐向花转移,而茎和叶的分配指数逐渐降低。利用 F 检验,单位面积不同杆数处理间的同一器官干物质分配指数在 $\alpha = 0.05$ 水平下无显著差异,因此可用下列公式拟合:

$$PIL = 0.437 + 0.150 / (1 + ((PTEP + 26.67)/98.52)^2) \quad n = 58, R^2 = 0.93, se = 0.012 \quad (9)$$

$$PIF = \begin{cases} 0 & PTEP < 180 MJ \cdot m^{-2} \\ 0.1322 - 0.4746 \times \exp(-(PTEP/145.52)) & PTEP \geq 180 MJ \cdot m^{-2} \end{cases} \quad n = 16, R^2 = 0.93, se = 0.012 \quad (10)$$

$$PIST = 1 - PIL - PIF \quad (11)$$

式中, PIL 、 PIF 、 $PIST$ 分别代表叶、花和茎干物质分配指数, $PTEP$ 为定植后生理辐射热积 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$)。

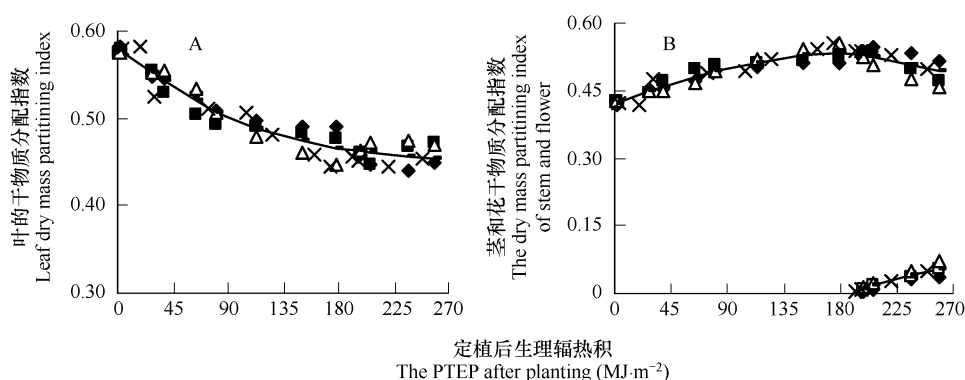


图2 菊花的叶、茎、花的分配指数与定植后生理辐射热积的关系

Fig. 2 Relationship of the dry mass partitioning index of leaf, stem, flower to the PTEP after planting

◆42 秆· m^{-2} 42 Stems per ground area; ■64 秆· m^{-2} 64 Stems per ground area; △84 秆· m^{-2} 84 Stems per ground area; × 126 秆· m^{-2} 126 Stems per ground area; —拟合曲线 Fitted curve

2.4 植株地上部分鲜重与干重关系

利用试验 1、试验 2 的数据,用地上部分干重与鲜重的实测值进行线性回归,得到植株鲜重与干重的回归模型:

$$FWS = 6.884 \times DMS/N \quad n = 32, R^2 = 0.98, SE = 4.36 \text{ g/株} \quad (12)$$

式中, FWS 表示单株地上部分鲜重 (g/株), DMS 表示地上部分干重 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$), N 表示定植密度 ($\text{株}/\text{m}^2$)。

2.5 模型验证

用回归估计标准误 (root mean squared error, $RMSE$)^[18,23] 对模拟值和观测值之间的符合度进行统计分析:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (OBS_i - SIM_i)^2}{n}} \quad (13)$$

式中, OBS_i 为实际观测值, SIM_i 为模型模拟值, n 为样本容量。

3 结果与分析

3.1 叶、茎、花干重的预测结果

利用与建模相对独立的试验 3、4、5 的数据,按公式 (1) ~ (11) 得到单位面积不同秆数植株叶、茎、花干重的预测值 (图 3),预测值与实测值基于 1:1 线的决定系数 (R^2) 分别为:0.96、0.95、0.82。回归估计标准误 ($RMSE$) 分别为:0.863、1.005、0.201 $\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$ 。叶和茎的样本数 (n) 为 48,花的样本数为 16。模型对单株花干重预测精度不如叶干重和茎干重高,是因为菊花现蕾初期,花的干重值较小,为了提高模型预测精度,今后应该加大对花抽样样本数量。

3.2 地上干物质与鲜重的预测结果

利用试验 3、4、5 的数据,按公式 (1) ~ (12) 计算得到切花菊单位面积地上干重 (图 4A) 和单株地上鲜重 (图 4B) 的模型预测值,结果表明随单位面积秆数增加,植株地上部分单位面积干重增加,而单株干重和鲜重减少。模型预测值与实际观测值基于 1:1 线的其决定系数 (R^2) 分别 0.95 和 0.92,回归估计标准误 ($RMSE$) 分别为 94.850 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 10.190 $\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$ 。模型对地上部鲜重的预测精度低于对干重的预测,这是由于模型在计算植株地上部分鲜重时,将鲜重与干重的比值视为常数 (公式 12),而未考虑植株含水率随季节的变化。下一步可建立植株含水率与季节和生育期的关系对该模型进行校正。

4 讨论与结论

前人常用有效积温法^[2]和光合作用驱动的作物生长模型^[4,28]模拟作物的干物质生产。有效积温法是利

用植株干物质积累量与有效积温的关系函数进行模拟^[29],但该方法只考虑了温度单一因素对作物生长发育的影响,适合于温光同步条件下的大田作物生长预测。而菊花是典型的短日照植物,植株的生长发育受温度、光照和日照长度共同影响,在温室栽培中,由于人工加温和降温使室内温光不同步,应用有效积温法预测干物质生产会产生较大误差^[23,27],本研究提出的基于生理辐射积指标较好综合了温度、光照和日长的作用,建立基于生理辐射积为尺度的干物质生产模型,克服了有效积温法在温室应用中存在的缺陷。光合作用驱动的作物生长模型是最为常见的机理模型^[28,30],但光合作用驱动的生长模型的精确预测需要准确测定作物不同发育时期植株的最大光合速率(Pg_{max})和光能初始利用率(ϵ),而这两个参数的测定需要较昂贵的仪器,在生产中应用受到限制。同时光合作用驱动的作物生长模型只能预测作物的潜在生产力水平,而在现实生产条件

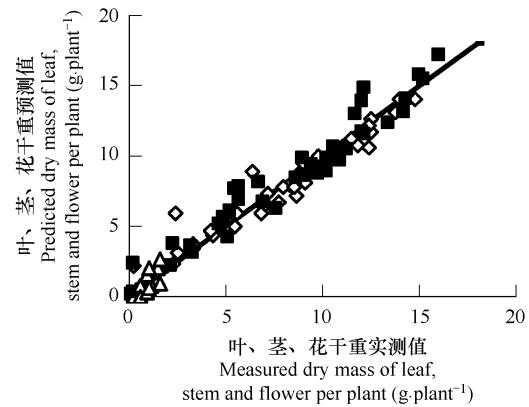


图3 菊花叶、茎、花的干物质预测值与实际观测值的比较

Fig.3 Comparison between the predicted and measured the dry mass of leaf, stem and flower per plant

叶干重 Leaf dry mass; ■ 茎干重 Stem dry mass; △ 花干重 Flower dry mass; — 1:1 Line

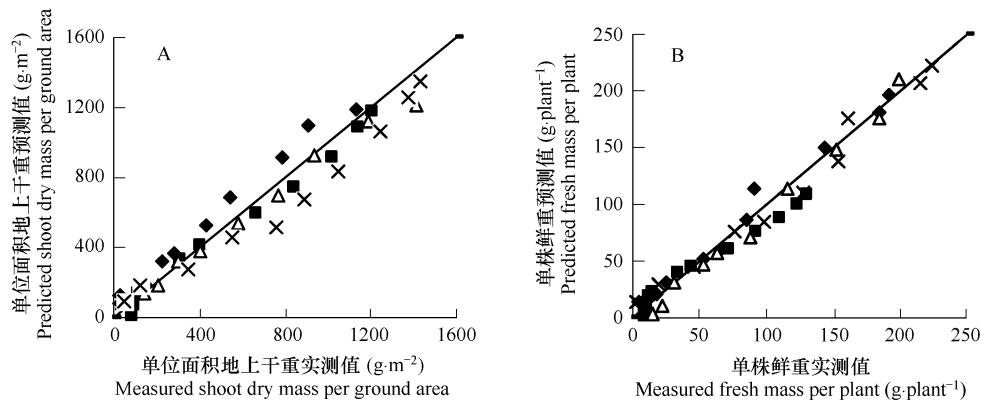


图4 单位面积地上部分干重、单株地上部分鲜重的预测值与实际观测值的比较

Fig.4 Comparison between the simulated and measured the shoot dry mass per ground area and the fresh weight per plant

◆42 杆·m⁻² 42 Stems per ground area; ■64 杆·m⁻² 64 Stems per ground area; △84 杆·m⁻² 84 Stems per ground area; × 126 杆·m⁻² 126 Stems per ground area; — 1:1 Line

下,始终存在水分和养分胁迫,从而使干物质生产的预测值高于实际观测值^[22,23]。本研究建立的菊花干物质生产模型,利用指数——线性模型模拟植株干物质生产过程,模型参数较少,容易获取,模型计算方法简便,便于在生产中应用。

Carvalho SMP 和 Schouten RE 等研究表明^[13,14],在栽培方式一定条件下,多头小菊的干物质积累除了受空气平均温度和光合有效辐射影响外,还受昼夜温差的影响。由于现有文献未见昼夜温差对单头多杆切花菊干物质积累和分配的影响,为了减少模型参数,在本研究的模型中未考虑昼夜温差因素对菊花生长的影响。

本研究在已有单杆标准切花菊生长发育模拟模型^[17~20]基础上,通过不同品种、密度、杆数和定植期的试验,建立了以生理辐射积为尺度的标准切花菊干物质生产和分配预测模型。模型通过输入温室内辐射、空气平均温度,可准确预测温室切花菊单杆栽培和多杆栽培条件下,定植后任意一天的叶、茎、花等器官干物质产量和单株地上部分鲜重。本模型适合肥水充足条件下,长江中下游地区温室单头切花菊的单杆和多杆栽培。该模型在其它地区的应用时,需进一步试验并对模型参数进行修正。

References:

- [1] Sun B W, Yang J S, Wang L X. The cultivation technology of year round production in cut chrysanthemum. *Northern Horticulture*, 2008, (6): 122—126.
- [2] Soltani A, Ghassemi-Golezani K, Khoie F R, *et al.* A simple model for chickpea growth and yield. *Field Crops Research*, 1999, 62:213—224.
- [3] Setiyono T D, Weiss A, Specht J E, *et al.* Leaf area index simulation in soybean grown under near-optimal conditions. *Field Crops Research*, 2008, 108: 82—92.
- [4] Connor D J, Fereres E. A dynamic model of crop growth and partitioning of biomass. *Field Crops Research*, 1999, 63: 139—157.
- [5] Asseng S, Jamieson P D, Kimball B, *et al.* Simulated wheat growth affected by rising temperature, increased water deficit and elevated atmospheric CO₂. *Field Crops Research*, 2004, 85:85—102.
- [6] Bonato O, Schulthess F, Baumgartner J. Simulation model for maize crop growth based on acquisition and allocation processes for carbohydrate and nitrogen. *Ecological Modelling*, 1999, 124: 11—28.
- [7] Liu D L, Bull T A. Simulation of biomass and sugar accumulation in sugarcane using a process-based model. *Ecological Modelling*, 2001, 144: 181—211.
- [8] Matloobi M, Baille A, Gonzalez-Real M M, *et al.* Effects of sink removal on leaf photosynthetic attributes of rose flower shoots (*Rosa hybrida* L., cv. Dallas). *Scientia Horticulturae*, 2008, 118: 321—327.
- [9] Kim S H, Niedziela J C E, Nelson P V, *et al.* Growth and development of *Lilium longiflorum* ‘Nellie White’ during bulb production under controlled environments. II. Effects of shifting day/night temperature regimes on scale bulblets. *Scientia Horticulturae*, 2007, 112: 95—98.
- [10] Larsen R U, Persson L. Modelling flower development in greenhouse chrysanthemum cultivars in relation to temperature and response group. *Scientia Horticulturae*, 1999, 80: 73—89.
- [11] Lee J H, Heuvelink E. Simulation of leaf area development based on dry matter partitioning and specific leaf area for cut chrysanthemum. *Annals of Botany*, 2003, 91: 319—327.
- [12] Nothnagel M, Kosiba A, Larsen R U. Predicting the effect of irradiance and temperature on the flower diameter of greenhouse grown *Chrysanthemum*. *Scientia Horticulturae*, 2004, 99: 319—329.
- [13] Carvalho S M P, Heuvelink E, Cascais R, *et al.* Effect of day and night temperature on internode and stem length in *Chrysanthemum*: Is everything explained by DIF? *Annals of Botany*, 2002, 90: 111—118.
- [14] Schouten R E, Carvalho S M P, Heuvelink E, *et al.* Modelling of temperature-controlled internode elongation applied to *Chrysanthemum*. *Annals of Botany*, 2002, 90: 353—359.
- [15] Larsen R U, Hiden C. Predicting leaf unfolding in flower induces shoots of greenhouse grown chrysanthemum. *Scientia Horticulturae*, 1995, 63: 225—239.
- [16] Lee J H, Goudriaan J, Challa H. Using the expolinear growth equation for modelling crop growth in year-round cut chrysanthemum. *Annals of Botany*, 2003, 92: 697—708.
- [17] Yang Z Q, Luo W H, Chen F D, *et al.* A photo-thermal based model for predicting the quality of standard cut *Chrysanthemum* produced in greenhouse. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(4): 877—882.
- [18] Yang Z Q, Luo W H, Chen F D, *et al.* Simulation of development and prediction of harvest date of standard cut *Chrysanthemum* in greenhouse. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(6): 1229—1235.
- [19] Yang Z Q, Luo W H, Chen F D, *et al.* Simulation of dry matter production and partitioning of standard cut *Chrysanthemum* in greenhouse. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(9): 2028—2035.
- [20] Yang Z Q, Dai J F, Luo W H, *et al.* Effects of stem numbers per ground area on the quality of standard cut chrysanthemum morifolium in greenhouse: simulation model. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(3): 575—582.
- [21] Li X M, Dai J F, Luo W H, *et al.* Effects of planting density and date on the external quality of greenhouse single-flower cut chrysanthemum. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(5): 1055—1060.
- [22] Yuan C M, Luo W H, Tai X, *et al.* Simulation of dry matter partitioning, yield formation and fruit harvest date of greenhouse muskmelon. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(2): 353—360.
- [23] Ni J H, Luo W H, Li Y X, *et al.* Simulation of leaf area and dry matter production in greenhouse tomato. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(8): 1629—1635.
- [24] Zhang N Y. *Chrysanthemum*. In: Zhang N Y. *Chrysanthemum*. Fuzhou: Fujian Technology Press, 2000. 18—20.
- [25] Li Q Z, Ma H X, Yu G H. *Chrysanthemum*. In: Li Q Z, Ma H X, Yu G H. *Chrysanthemum*. Nanjing: Jiangsu Technology Press, 2000. 17—18.

- [26] Xiong J H. Chrysanthemum. Shanghai: Shanghai Technology Press, 1998. 22—38.
- [27] Meng Y L, Cao W X, Liu X W, *et al.* Dynamic Simulation on Photosynthetic Production and Dry Matter, Accumulation in Rice. *Journal of Biomathematics*, 2004, 19(2):200—212.
- [28] Marcelis L F M, Heuvelink E, Goudriaan J. Modelling biomass production and yield of horticultural crops: A review. *Scientia Horticulture*, 1998, 74: 83—111.
- [29] Lu Z L, Xu S J, Zhuang H Y. Characteristics of the Beta function for nonlinear effects of temperature on crop phenological development. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(8): 3737—374.
- [30] Marcelis L F M, Gijzen H. Evaluation under commercial conditions of a model of prediction of the yield and quality of cucumber fruits. *Scientia Horticulturae*, 1998, 76:171—181.

参考文献:

- [1] 孙宝文, 杨际双, 王丽霞. 切花菊周年生产栽培技术. *北方园艺*, 2008, (6): 122~126.
- [17] 杨再强, 罗卫红, 陈发棣, 等. 基于光温的温室标准切花菊外观品质预测模型的研究. *应用生态学报*, 2007, 18(4): 877~882.
- [18] 杨再强, 罗卫红, 陈发棣, 等. 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*, 2007, 40(6): 1229~1235.
- [19] 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. *中国农业科学*, 2007, 40(9): 2028~2035.
- [20] 杨再强, 戴剑锋, 罗卫红, 等. 单位面积杆数对温室标准切花菊外观品质影响的预测模型. *应用生态学报*, 2008, 19(3): 575~582.
- [21] 李向茂, 戴剑锋, 罗卫红, 等. 定植期和定植密度对温室单头切花菊外观品质的影响. *应用生态学报*, 2007, 18(5): 1055~1060.
- [22] 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. *中国农业科学*, 2006, 39(2): 353~360.
- [23] 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. *中国农业科学*, 2005, 38(8): 1629~1635.
- [24] 张源能. 菊花. 见: 张源能编著. 菊花福州: 福建科学技术出版社, 2000. 18~20.
- [25] 李情中, 马鸿翔, 余桂红. 菊花. 见: 李情中, 马鸿翔, 余桂红编著. 菊花. 南京: 江苏科学技术出版社, 2000. 17~18.
- [26] 熊济华. 菊花. 上海: 上海科学技术出版社, 1998. 22~38.
- [27] 孟亚利, 曹卫星, 柳新伟, 等. 水稻光合生产与干物质累积的动态模拟. *生物数学学报*, 2004, 19(2): 200~212.
- [29] 吕贞龙, 徐寿军, 庄恒扬. 作物发育温度非线性效应 Beta 模型的特征分析. *生态学报*, 2008, 28(8): 3737~374.