

定植密度对日光温室甜椒干物质生产与分配影响的模拟研究

刘寿东¹, 杨再强^{1,2,*}, 苏天星¹, 谢以萍¹

(1. 南京信息工程大学, 江苏南京 210044; 2. 中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃兰州 730020)

摘要: 2007年10月—2009年5月, 在中国山东省寿光市日光温室内设计不同定植密度和不同定植日期的甜椒栽培试验, 系统收集温室环境数据和作物生长数据, 分析定植密度对日光温室甜椒干物质生产与分配的影响。结果表明, 定植密度在 2.0—6.7 株·m⁻² 范围内, 不同定植密度处理的甜椒叶面积指数与定植后天数的关系较好地符合 logistic 模型, 收获时最大叶面积指数与定植密度呈线性正相关。研究发现, 不同密度处理的单位面积甜椒生物量与冠层累计截获的光合有效辐射日积分呈线性正相关, 单位面积植株干物质增长率和叶片的干物质分配指数随定植密度增加而增加, 果实的干物质分配指数随密度增加而减少, 茎的干物质分配指数受密度影响不显著。在此基础上, 首先构建甜椒叶面积指数模型和冠层光截获模型, 然后建立以冠层截获的 PAR 日积分为尺度的温室甜椒干物质生产与分配模型, 并利用独立试验数据对模型进行检验, 表明定植密度为 2.0、4.0、6.7 株·m⁻² 的总干重、叶干重、茎干重、果实干重和产量的模拟值与实测值间基于 1:1 线的决定系数 (R^2) 分别为 0.946、0.891、0.945、0.923 和 0.867, 回归估计标准误差 (RMSE) 分别为 51.97 g·m⁻²、3.53 g·株⁻¹、4.72 g·株⁻¹、16.4 g·株⁻¹ 和 910.8 g·m⁻², 说明所建模型的模拟值与实测值有较好符合度, 能够较准确地模拟日光温室甜椒的干物质生产与分配, 模型参数少, 实用性强, 可以为日光温室甜椒产量预测提供决策支持。

关键词: 甜椒; 日光温室; 干物质生产与分配; 模型

Impact of planting density on the dry matter formation and partition in sweet peppers in a solar greenhouse

LIU Shoudong¹, YANG Zaiqiang^{1,2,*}, SU Tianxing¹, XIE Yiping¹

¹ Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, 210044, China

² Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Lanzhou 730020, China

Abstract: Dry matter production and partition are the bases of yield formation of sweet peppers. In order to quantitatively investigate the effects of plant densities on the dry matter production and partition of sweet peppers, a model was developed for the decision support to optimize the crop and environmental management in solar greenhouse. Experiments with different plant densities and planting dates were conducted in a solar greenhouse from November 2007 to May 2009 in Shouguang region of Shandong Province (36°53'N, 118°43'E, 30.2m asl), wherein environmental and plant data were collected and analyzed. Results indicated that there is a logistic relationship between leaf area index (LAI) and the number of days after the planting date of sweet peppers at the plant densities of 2.0—6.7 plants m⁻², and the maximum leaf area index at the harvesting date was relevant to the planting densities. There was a positive linear correlation between the crop biomass per unit area and the daily integral of photosynthetic active radiation (PAR) intercepted by the canopy. The dry matter partition index (DMPI) in leaves (fruits) increased (decreased) with the increasing density, and there was no significant effect of intensity on the stem DMPI. The harvest index related linearly to the corresponding accumulated daily integral canopy-trapped PAR. Therefore, the effects of plant densities on the canopy LAI and the light intercepted by canopy were

基金项目: 公益性行业 (气象) 科研专项资助项目 (GYHY200906023); 中国气象局干旱气象科学研究基金资助项目 (IAM200901); 南京信息工程大学科研基金资助项目 (No. 80127)

收稿日期: 2010-03-12; **修订日期:** 2011-05-05

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

quantified. Then a daily – scale model of solar greenhouse – grown sweet pepper was established to simulate the dry matter production and partition based on the integral PAR. The model was validated according to the independent experimental data and showed good performance. The determination coefficients (R^2) between the simulations and measurements for the dry weight of whole plant, leaves, stems, fruits and yield were 0.946, 0.891, 0.945, 0.923 and 0.867 at the intensity of 2.0, 4.0 and 6.7 plant m^{-2} respectively, with RMSE 51.97 g m^{-2} , 3.53 g plant $^{-1}$, 4.72 g plant $^{-1}$, 16.4 g plant $^{-1}$ and 910.8 g m^{-2} . The precision in dry weight prediction for single-plant leaves was lower than those of stem and fruits, because leaves at lower levels turned yellow and dropped off earlier, which cannot be simulated accurately. Marked by fewer parameters, higher precision and stronger applicability, the model can simulate the dry matter partition and prediction of the crop yield under sufficient water and fertilizer supply, and will provide decision-making support to the photo-temperature control management for sweet peppers in solar greenhouse.

Key Words: sweet peppers; solar greenhouse; production and partition of dry matter; model

中国甜椒 (*Capsium annuum* L.) 设施栽培面积 16.8 万 hm^2 , 约占设施作物总面积的 13% 左右, 年总产量为 202.2 万 t, 已经成为主要设施蔬菜作物之一^[1]。日光温室是中国北方地区主要农业设施类型, 在冬春季利用日光温室开展甜椒生产可以满足国内外蔬菜市场的需要, 但是准确预测日光温室甜椒产量则是生产企业和农户合理安排甜椒生产、提高经济效益面临的技术难题。干物质生产与分配是甜椒产量和品质形成的物质基础, 在结实前生产和分配到叶片的干物质形成光合叶面积而影响植株的营养生长, 而结实后分配到果实中的干物质直接参与甜椒产量和品质的形成。定植密度是影响温室植株干物质生产与分配、产量和品质形成的主要因素^[2-3], 因此准确模拟不同定植密度对甜椒植株干物质在各器官间分配动态的影响是调节和预测甜椒产量和外观品质的前提。

国内外专家学者已经对黄瓜^[4]、辣椒^[5-7]、番茄^[8-10]、菊花^[11-13]、甘蓝^[14]、玫瑰^[15]等温室作物的干物质生产与分配模型进行了大量研究。已有的研究表明影响作物器官间干物质分配的影响因素主要有定植密度^[16-17]、氮素水平^[18]、饱和水气压差^[6]、昼夜温差^[19]和水分^[20]。中国北方地区冬春季节气温较低, 室外难以种植甜椒, 农户在日光温室内试图通过提高定植密度而增加单位面积产量^[1-2], 但在增加种植密度提高总产量的同时也会降低甜椒的品质, 因此如何确定合理的定植密度是保证甜椒生产经济效益的关键技术。国内外关于现代温室的甜椒干物质分配模拟研究有一些报道^[3,7], 但不同密度对日光温室甜椒干物质分配的影响及模拟研究少见报道。

本研究通过设计日光温室甜椒不同种植密度和不同定植日期栽培试验, 系统地收集日光温室的环境数据和作物数据, 量化不同定植密度对日光温室甜椒干物质生产和分配的影响, 建立一个适合中国北方地区日光温室甜椒干物质生产与分配模型, 为我国北方日光温室甜椒生产种植密度的选择和环境优化调控提供决策支持。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2007 年 10 月—2009 年 5 月在山东省寿光市 (东经 118°43', 北纬 36°53', 海拔 30.2 m) 日光温室内进行。日光温室呈东西走向, 长 60.0 m, 跨度 11.0 m, 脊高 4.0 m, 后墙高 3.8 m, 前墙高 1.0 m。供试材料为山东寿光三元泽农种苗公司提供的甜椒品种 ‘川雄 F19’ (Chuanxiong F19)。定植苗规格为高 15 cm, 叶片 4—6 片; 株行距设计 3 个处理即 1.0 m × 0.5 m (密度为 2.0 株 · m^{-2})、0.5 m × 0.5 m (密度为 4.0 株 · m^{-2})、0.3 m × 0.5 m (密度为 6.7 株 · m^{-2}), 每处理 300 株, 每株留 3 个主蔓。试验为土培, 地膜覆盖, 其它管理措施按常规方法进行。一共分为 3 个试验进行。试验 1 于 2007 年 10 月 18 日定植, 于 2008 年 4 月 22 日收获结束; 试验 2 于 2007 年 11 月 24 日定植, 于 2008 年 5 月 18 日收获结束; 试验 3 于 2008 年 11 月 5 日定植, 2009 年 5 月 19 日收获结束。试验 1 和试验 2 数据用于建立模型, 试验 3 数据用于验证模型。

1.2 测定项目及方法

1.2.1 温室环境数据的获取和消光系数的计算

温室环境数据由数据采集器 (CR-10X, Campbell Scientific, USA) 进行自动采集。采集温室内 1.5m 高度处空气温度和甜椒冠层上方的太阳辐射,采集频率为 1 次/10s,存储每 30min 的平均值。在甜椒不同生长期,用 HD8366 照度计测定不同时期的甜椒冠层上方 1.5m 高度处和冠层内地面 0m 处的光照强度,根据 Lambert-Beer 定律^[4],计算得到冠层消光系数(k)为 0.75。试验期间温室内气温和光合有效辐射见图 1。

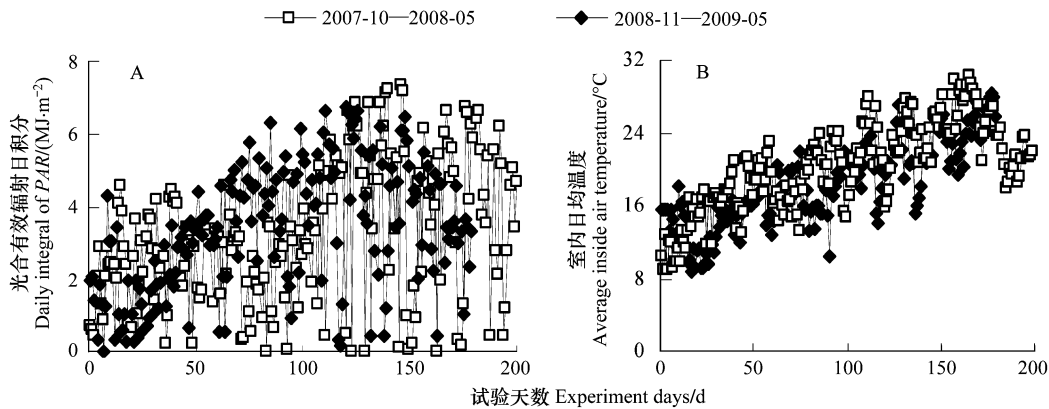


图 1 试验期间温室内气温 (A) 和光合有效辐射 (B)

Fig. 1 The inside air temperature and PAR during experiment period

1.2.2 作物数据的测定与干物质分配指数的计算

从定植到收获期间每隔 10 d 分别从不同处理的不同小区中取生长相对均匀一致的植株 10 株,测定植株叶面积,同时测定根、茎、叶、果的鲜重和干重。在干物质分配研究中,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、叶以及果实中分配^[9],各器官干物质分配指数按(1)–(5)式计算,即:

$$PIS_i = DMS_i / DMT_i \quad (1)$$

$$PIR_i = 1 - PIS_i \quad (2)$$

$$PIL_i = DML_i / DMS_i \quad (3)$$

$$PTST_i = DMST_i / DMS_i \quad (4)$$

$$PIF_i = 1 - (PIL_i + PIST_i) \quad (5)$$

式中, PIS_i 、 PIR_i 、 PIL_i 、 $PIST_i$ 、 PIF_i 分别表示第 i 天地上部分、根、叶、茎、果实的干物质分配指数; DMS_i 、 DMT_i 、 DML_i 、 $DMST_i$ 分别表示第 i 天地上部分、整株、叶和茎的干重($g \cdot m^{-2}$)。

2 模型构建与参数获取

2.1 叶面积指数模型

利用 2007—2008 年试验 1 和试验 2 的数据,得到不同种植密度甜椒的实际叶面积指数和收获时最大叶面积指数(图 2)。由图可知,甜椒叶面积指数随定植后天数增加而增加。在定植后 45d 内,叶面积指数缓慢增长;在定植后第 45 至 110 天期间,叶面积指数增长速率最大;在定植 135d 后,叶面积指数不再增加。不同定植密度的甜椒叶面积指数与定植以后天数之间关系可以用 logistic 模型精确模拟^[21],即:

$$LAI(i, L) = LAI_{\max} / (1 + \exp(a_0 - a_1 i)) \quad (6)$$

$$LAI_{\max} = 0.2664 \times N + 2.9654 \quad R^2 = 0.99, SE = 0.16 \quad (7)$$

式中, $LAI(i, L)$ 为定植后第 i 天的叶面积指数; $LAI_{\max}$ 为不同密度的甜椒收获时的最大叶面积指数, N 为定植密度(株 $\cdot m^{-2}$)。模型中的参数 a_0 、 a_1 值见表 1。

2.2 冠层吸收的 PAR 日积分模型

在水分、养分充足条件下,温室甜椒生长主要受温度和辐射的共同影响^[1],由于非加温日光温室内温度主要由进入室内的太阳辐射决定,因此可以利用 PAR 日积分^[21-24]作为度量甜椒生长的光温指标。不同密度甜椒冠层在定植后第 i 天所截获的光合有效辐射 $PAR(i, L)$ 与叶面积指数和到达冠层上方的光合有效辐射有关^[25-26],因此定植后第 $i + 1$ 天内冠层所截获光合有效辐射可以由(8)、(9)式计算,即:

$$PAR(i, L) = PAR(i) \times (1 - \text{Exp}(-k \times LAI(i, L))) \tag{8}$$

$$I_{i+1} = \sum_i PAR(i, L) + PAR(i + 1, L) \tag{9}$$

式中, $PAR(i)$ 为第 i 天冠层上方的光合有效辐射日积分 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$); $LAI(i, L)$ 为甜椒定植后第 i 天的叶面积指数,由(6)一(7)式计算得到; k 为冠层消光系数,无量纲; $PAR(i, L)$ 为第 i 天冠层累计截获 PAR 日积分 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$); I_{i+1} 为定植到第 $i + 1$ 天内冠层累计截获 PAR 日积分 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$)。

2.3 干物质生产模型

在定植密度 $2.0\text{--}6.7 \text{ 株} \cdot \text{m}^{-2}$ 的范围内,不同处理的甜椒植株单位面积总干重与冠层累计截获的 PAR 日积分呈线性正相关(图3),可用线性方程进行拟合,即:

$$DMT = R \times I + DMT_0 \tag{10}$$

$$R = 0.319 \times N + 1.573 \quad R^2 = 0.975, SE = 0.024 \tag{11}$$

式中, DMT 为单位面积植株总干重 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$); I 为定植后冠层累计截获 PAR 日积分 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$),可由(8)一(9)式计算得到; R 为单位面积植株干物质增长率 ($\text{g}/\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$),在此为不同定植密度处理下甜椒的光能利用效率,可以看出,定植密度在 $2.0\text{--}6.7 \text{ 株} \cdot \text{m}^{-2}$ 范围内,种植密度越高,光能利用效率就越大; DMT_0 为定植时单位面积植株总干重 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$); N 为定植密度 ($\text{株} \cdot \text{m}^{-2}$)。利用试验1数据,定植密度为 2.0 、 4.0 、 $6.7 \text{ 株} \cdot \text{m}^{-2}$ 的 DMT_0 分别为 6.41 、 24.16 、 $40.39 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

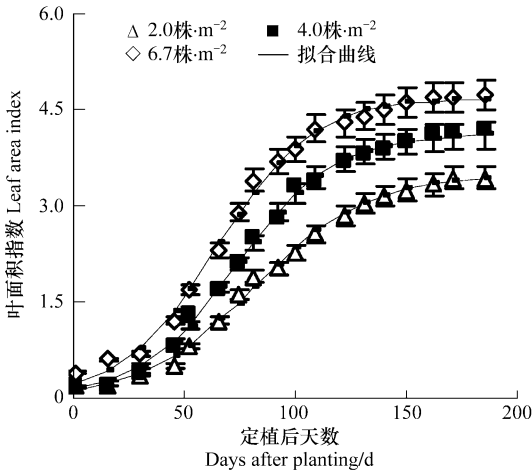


图2 叶面积指数与定植后天数的关系

Fig. 2 Relationship of the leaf area index to the days after planting

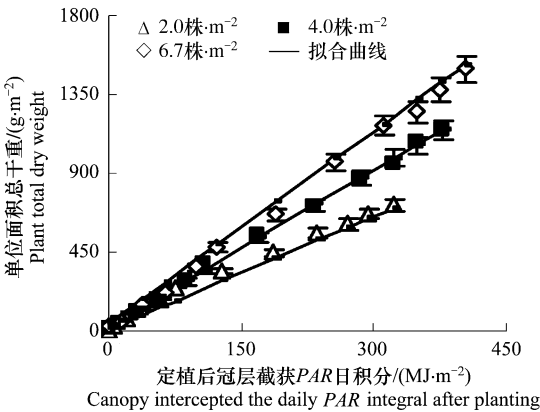


图3 甜椒单位面积总干重与定植后冠层截获光合有效辐射的关系

Fig. 3 Relationships of the biomass production to canopy intercepted PAR integral after planting

2.4 干物质分配指数模型

利用试验1、2的数据,按照(1)一(5)式计算得到不同时期各定植密度处理的植株地上部分、叶、茎和果

实的干物质分配指数,其与冠层截获 PAR 的日积分的关系如图 4a、图 4b、图 4c 和图 4d 所示。从图中可以看出,在封行前植株地上部分干物质分配指数随着冠层截获 PAR 日积分的增加而快速增加,该期间植株生产的干物质主要向地上部分分配,封行后地上部分分配指数不再增加,不同处理的地上分配指数差异不同显著。结实后干物质分配中心向果实转移,叶和茎的分配指数逐渐减少。叶干物质分配指数以 $6.7 \text{ 株} \cdot \text{m}^{-2}$ 最高, $2.0 \text{ 株} \cdot \text{m}^{-2}$ 最低,果实分配指数则随密度增加而降低。不同定植密度对茎的分配指数的影响差异不显著。不同器官的干物质分配指数的拟合方程为:

$$PISH=0.902/(1+\exp(-0.738-0.0588\times I))\quad n=36,R^2=0.962,SE=0.07\tag{12}$$

$$PIST=117.4/(I+202.51)\quad n=36,R^2=0.914,SE=0.06\tag{13}$$

$$PIF=\begin{cases} 0 & I<43.0\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2} \\ PIF_{\max}/(1+(\alpha-\beta\times I)) & I\geq43.0\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2} \end{cases}\quad n=32\tag{14}$$

式中, $PISH$ 、 $PIST$ 、 PIF 分别为地上部分、茎和果实的干物质分配指数; I 表示定植后冠层累计截获 PAR 日积分($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$); $PIF_{\max}$ 为不同密度处理的果实的干物质最大分配指数。模型参数见表 2。

表 2 甜椒果实分配指数模型参数

Table 2 The parameters for fruit dry mass partitioning index simulation model of sweet pepper						
定植密度 Plant density /(株·m ⁻²)	果实最大分配指数 The maximum of fruit dry matter partitioning index	α	β	R^2	SE	
2.0	0.639	2.357	-0.0285	0.984	0.013	
4.0	0.668	2.103	-0.0164	0.990	0.018	
6.7	0.590	2.615	-0.0180	0.976	0.015	

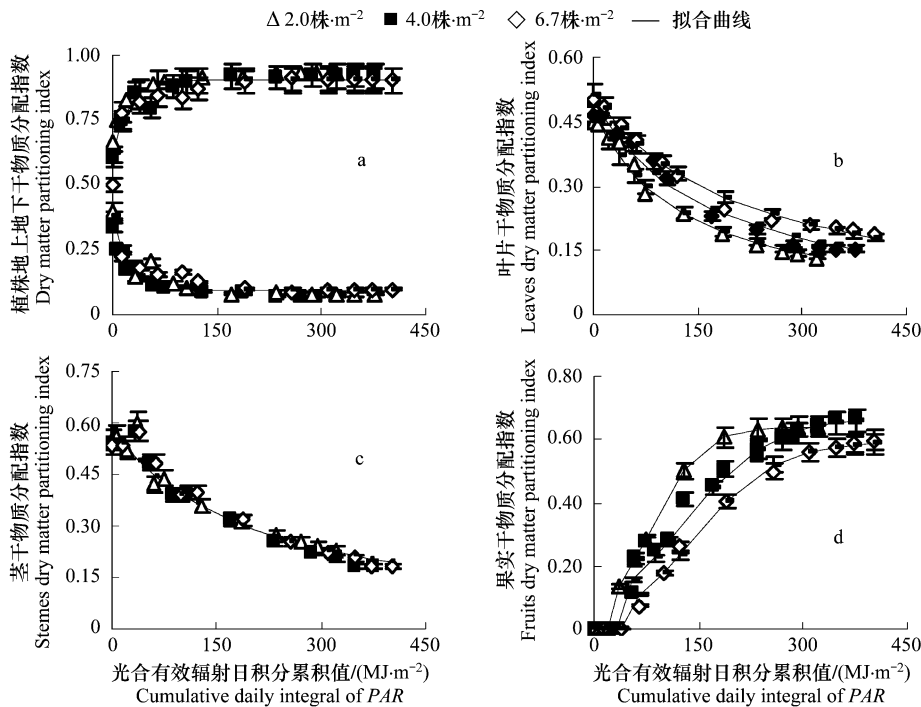


图 4 甜椒干物质分配指数与冠层截获光合有效辐射的关系

Fig. 4 The relationships of the dry mass partitioning index to canopy absorbed the PAR integral after planting

2.5 果实采收指数模型

将已采收果实累积干重占采收果实累积总干重的比例定义为果实采收指数。利用试验 1、2 的数据计算

得到各定植密度处理甜椒的采收指数,结果表明不同处理采收指数与冠层累计截获 PAR 日积分呈线性关系(图 5),可用线性方程进行拟合,即:

$$Hi = 0.221621 + 0.00148 \times I \quad R^2 = 0.89, SE = 0.02, n = 24 \quad (15)$$

式中, Hi 为采收指数, I 为表示定植后冠层累计吸收 PAR 日积分 ($MJ \cdot m^{-2}$)。

3 模型检验

3.1 模型检验方法

用回归估计标准误差 ($RMSE$) 对模拟值和观测值之间的符合度进行统计检验,即:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (OBS_i - SIM_i)^2}{n}} \quad (16)$$

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

3.2 单位面积总干重和各器官干重模拟结果的检验

利用 2008 年 11 月—2009 年 5 月的试验(试验 3)的数据,用公式(6)—(11)计算得到甜椒单位面积总干重模拟值(图 6 a);由(1)—(5)、(12)—(14)式计算得到单株叶干重(图 6 b)、茎干重(图 6 c)和果实干重(图 6 d)的模拟值;可见模拟值与实测值之间存在显著线性

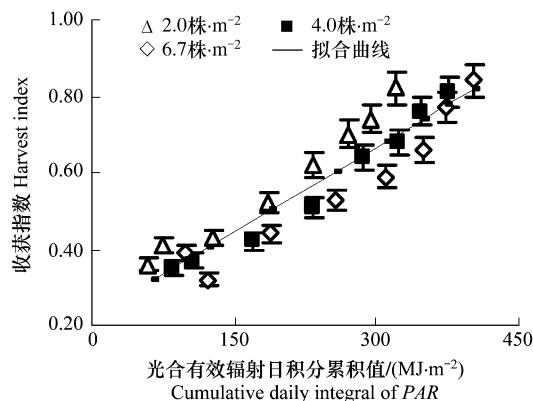


图 5 甜椒果实收获指数与定植后冠层截获的光合有效辐射的关系

Fig. 5 The relationship between the harvest index of sweet pepper fruit and the daily PAR integral after planting

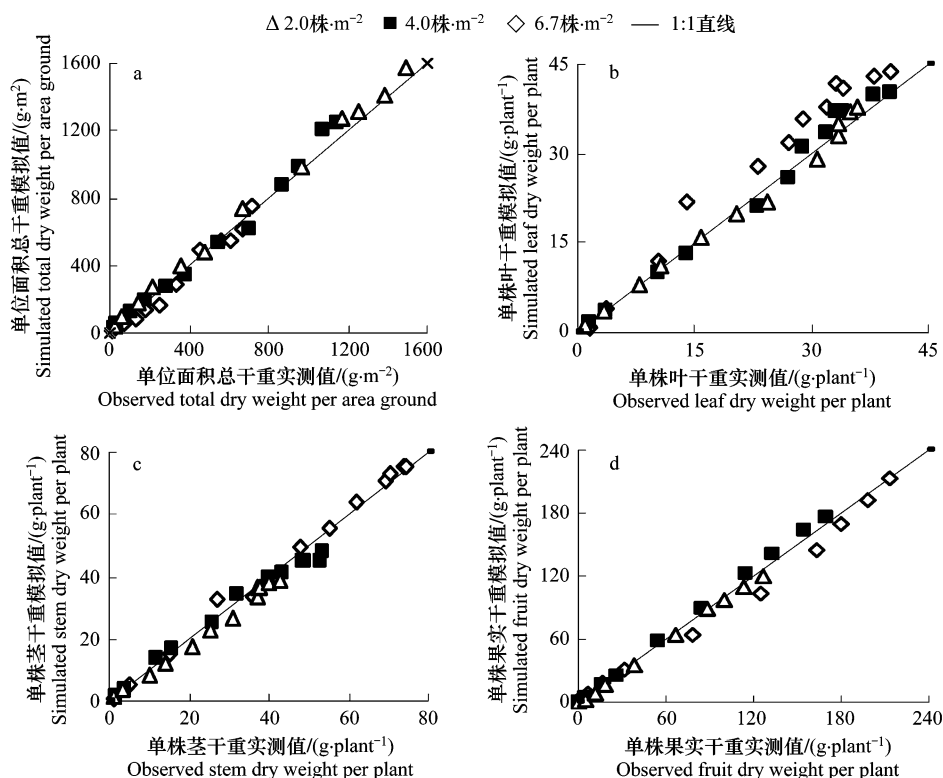


图 6 比较甜椒总干重(a), 叶干重(b), 茎干重(c)和果实干重(d)的模拟值与实测值

Fig. 6 Comparison between the simulated and measured biomass production (a), dry weight of leaf (b) and stem (c) and fruit dry weight (d)

相关关系。统计结果表明,模型对甜椒总干重、叶干重、茎干重和果实干重的模拟值与实测值基于 1:1 线间的决定系数(R^2)分别为 0.946、0.891、0.945 和 0.923,回归估计标准误差($RMSE$)分别为 $51.97\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $3.53\text{ g}\cdot\text{株}^{-1}$ 、 $4.72\text{ g}\cdot\text{株}^{-1}$ 和 $16.4\text{ g}\cdot\text{株}^{-1}$ 。结果表明模型对单株叶干重的模拟精度不如茎和果实高,主要是因为甜椒植株下层老叶容易脱落,无法准确测定脱落叶片的干物质所致。

3.3 甜椒产量模拟结果的检验

根据试验 3 的数据,按(12)、(14)、(15)式计算出不同定植密度处理的甜椒任意一天的产量模拟值,与产量实测值进行比较(图 7),结果表明模型能够较好模拟日光温室甜椒的产量,其模拟值与观测值基于 1:1 线间的决定系数(R^2)为 0.867,回归估计标准误差($RMSE$)为 $910.8\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 。模型对定植密度 2.0、4.0、6.7 株 $\cdot\text{m}^{-2}$ 的处理的产量相对模拟误差分别为:22.8%、15.4% 和 18.3%。模型对产量模拟精度不如总干重和器官干重精度高,主要是因为建模时为了减少模型参数,不同种植密度处理的果实收获指数采用同一个方程模拟(公式(15)),实际上不同的种植密度处理,植株果实的收获指数存在一定差异。为了提高模型精度,今后可对不同种植密度处理果实的收获指数分别进行模拟。

4 讨论与结论

Bakker 等^[6]研究认为,当叶面积指数为 3.0 时,理论上即可截获 90% 的光合有效辐射,当叶面积指数高于 3.0 时,再增加总叶面积对植株光合作用和干物质积累贡献不大。本研究不同密度处理的叶面积指数均大于 3.0,并观测到定植密度为 4.0 株 $\cdot\text{m}^{-2}$ 处理的植株单位面积总干重比 2.0 株 $\cdot\text{m}^{-2}$ 处理的增加了 37.4%,6.7 株 $\cdot\text{m}^{-2}$ 处理的单位面积总干重比 4.0 株 $\cdot\text{m}^{-2}$ 处理的增加了 23.4% (图 3),这是由于试验材料属于无限生长型甜椒品种,使用了吊绳栽培方式,使冠层截获太阳辐射能力增强,从而使叶面积指数大于 3.0 以后植株总干重仍在增加。定植密度超过 4.0 株 $\cdot\text{m}^{-2}$ (叶面积指数大于 3.5) 后,由于叶片间相互遮阴,植株呼吸消耗增加,致使单位面积植株的干物质增加幅度减小。

有研究表明种植密度是影响植株不同器官间干物质分配指数^[28]和产量^[29]的主要因素,本研究表明不同种植密度处理的地上部分和茎的干物质分配指数差异不明显。在 2.0—6.7 株 $\cdot\text{m}^{-2}$ 的密度范围内,随密度的增加,干物质向叶片分配比例增加,向果实分配比例减少,因此,定植密度的增加对单位面积果实总产量增加幅度的影响并不显著,种植密度为 4.0 株 $\cdot\text{m}^{-2}$ 的产量最高。

在已有园艺作物如向日葵^[27]、番茄^[4]、辣椒^[6]、甜椒^[7]的干物质生产与分配机理模型中,均考虑了温度、辐射两个因子对作物生长的影响,由于模型输入参数多,在实际生产中难以获取,从而限制了机理模型在生产中的应用。本研究建立的日光温室甜椒干物质分配模型,利用冠层截获 PAR 日积分作为模型的光温指标,主要因为在中国北方地区日光温室是非加温温室,室内温度变化与进入室内的太阳辐射日积分密切相关,加之在甜椒栽培期间(11 月至翌年 5 月),室内温度在甜椒最适生长温度($10\text{--}28^\circ\text{C}$) 范围内波动^[1],因此,以 PAR 日积分作为模型的光温指标可大大简化模型参数,增加模型的实用性。

本研究以冠层截获 PAR 日积分为尺度,构建了温室甜椒干物质生产与分配动态模拟模型。模型通过输入日光温室内的太阳总辐射,可以模拟从定植到收获期内任意一天甜椒各器官的干物质分配动态和果实产量。模型输入参数少,实用性较强,可以为日光温室甜椒生产的环境调控提供决策支持。本模型适用于肥水充足条件下的日光温室甜椒干物质分配模拟及产量预测,在其它肥水条件和栽培方式的温室中应用需要进一步调整模型参数。

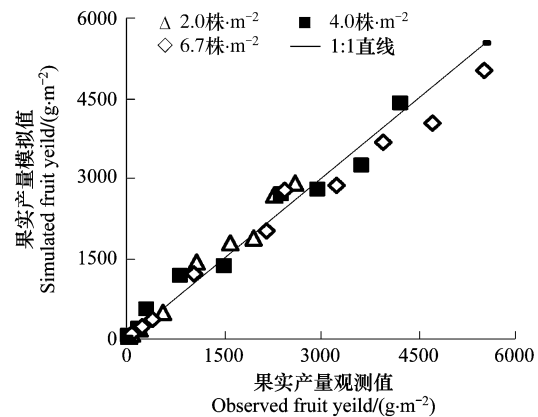


表 7 甜椒单位面积产量模拟值与观测值的比较

Fig. 7 Comparisons between the simulated and measured sweet pepper fruit yield

References:

- [1] Diao M, Dai J F, Luo W H, Yuan C M, Bu C X, Xian K M, Zhang S F, Xu R. Simulation model on the formation of greenhouse sweet pepper leaf area index. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(10): 2277-2283.
- [2] Zhang Z B. Effect of different pruned methods on biomass production and distribution and yield fluctuation of greenhouse sweet pepper. China Vegetables, 1999, 6: 14-18.
- [3] Vieira M I, Melo-Abreu J P, Ferreira M E, Monteiro A A. Dry matter and area partitioning, radiation interception and radiation-use efficiency in open-field bell pepper. Scientia Horticulturae, 2009, 121: 404-409.
- [4] Marcelis L F M, Heuvelink E, Goudriaan J. Modelling biomass production and yield of horticultural crops: a review. Scientia Horticulturae, 1998, 74: 83-111.
- [5] Gonz lez-Rea M M, Liu H Q, Baille A. Influence of fruit sink strength on the distribution of leaf photosynthetic traits in fruit-bearing shoots of pepper plants (*Capsicum annuum* L.). Environmental and Experimental Botany, 2009, 66: 195-202.
- [6] Bakker J C. The effects of air humidity on flowering, fruit set, seed set and fruit growth of glasshouse sweet pepper (*Capsicum annuum* L.). Scientia Horticulturae, 1989, 40: 1-8.
- [7] Nielsen T H, Bjarke V. Distribution of dry matter in sweet pepper plants (*Capsicum annuum* L.) during the juvenile and generative growth phases. Scientia Horticulturae, 1988, 35: 179-187.
- [8] Heuvelink E. Effect of plant density on biomass allocation to the fruits in tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). Scientia Horticulturae, 1995, 64: 193-201.
- [9] Ni J H, Luo W H, Li Y X, Dai J F, Jin L, Xu G B, Chen Y S, Chen C C, Pu C X, Xu G. Simulation of leaf area and dry matter production in greenhouse tomato. Scientia Agricultura Sinica, 2005, 38(8): 1629-1635.
- [10] Christos D. Dry matter, nitrogen and phosphorus accumulation, partitioning and remobilization as affected by N and P fertilization and source sink relations. European Journal of Agronomy, 2009, 30: 129-139.
- [11] Lee J H, Huvelink E. Simulation of leaf area development based on dry matter partitioning specific leaf area for cut chrysanthemum. Annals of Botany, 2003, 91: 319-327.
- [12] Yang Z Q, Luo W H, Chen F D, Gu J J, Li X M, Ding Q F, Zhao C B, Lu Y F. Simulation of dry matter production and partitioning of standard cut chrysanthemum in greenhouse. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(9): 2028-2035.
- [13] Yang Z Q, Luo W H, Chen F D, Xie Y P, Gu J J. A Photo-thermal based model for predicting the dry matter production and partitioning of multi-stem Cut Chrysanthemum in Greenhouse. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(3): 1479-1485.
- [14] Kage H, Kochler M, St tzel H. Root growth and dry matter partitioning of cauliflower under drought stress conditions: measurement and simulation. European Journal of Agronomy, 2004, 20(4): 379-394.
- [15] Gutierrez C R P, Gonzalez-Real M M, Baille A. Dry matter production and partitioning in rose (*Rosa hybrida*) flower shoots. Scientia Horticulturae, 2006, 107: 284-291.
- [16] Salazar M R, Jones J W, Chaves B, Cooman A. A model for the potential production and dry matter distribution of Cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.). Scientia Horticulturae, 2008, 115: 142-148.
- [17] Yuan C M, Luo W H, Tai X, Zhang S F, Jin L, Chen Y S, Bu C X. Xu G. Simulation of dry matter partitioning, yield formation and fruit harvest date of greenhouse muskmelon. Scientia Agricultura Sinica, 2006, 39(2): 353-360.
- [18] Sui F G, Lu Y Y, Inanaga S J. Effect of the nitrogen nutrition on fruit growth and development of sweet pepper. Plant Nutrition and Fertilizing Science, 2004, 10(5): 499-503.
- [19] Li G J, Benoit F, Ceustermans F. Influence of day and night temperature on the growth, development and yield of greenhouse sweet paper. Journal of Zhejiang University, 2004, 30: 487-491.
- [20] Shi L, Zhen J S, Fu A Y, Liu H Y. Effects of Different Water Treatments on Growth of Sweet Pepper. Xinjiang Agricultural Sciences, 2008, 45(6): 1085-1089.
- [21] 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.
- [22] Peter A J, Margaret G M. Dynamics of growth and yield component of bell peppers (*Capsicum annum* L.) covers and population density responses to row. Scientia Horticulturae, 1995, 62: 153-164.
- [23] Kage H, Stu tzel H. A simple empirical model for predicting development and dry matter partitioning in cauliflower (*Brassica oleracea* L. botrytis). Scientia Horticulturae, 1999, 80: 19-38.

- [24] Gary C, Jones J W, Tehamitchian M M. Crop modelling in horticulture: state of the art. *Scientia Horticulturae*, 1998, 74: 3-20.
- [25] Meng Y L, Cao W X, Liu X W, Zhou Z G, Pan J. Dynamic simulation on photosynthetic production and dry matter, accumulation in rice. *Journal of Biomathematics*, 2004, 19(2): 205-212.
- [26] Heuvelink E. Dry matter partitioning in tomato: validation of a dynamic simulation model. *Annals of Botany*, 1996, 77: 71-80.
- [27] Villalobos F J, Sadras V O, Soriano A, Fereres E. Planting density effects on dry matter partitioning and productivity of sun flower hybrids. *Field Crops Research*, 1994, 36(1): 1-11.
- [28] Brahim K, Dennis T R, David A D. Growth and yield characteristics of *Lesquerella fendleri* as a function of plant density. *Industrial Crops and Products*, 1998, 9: 63-71.
- [29] Dong H Z, Li W J, Tang W, Li Z H, Zhang D M, Niu Y H. Yield, quality and leaf senescence of cotton grown at varying planting dates and plant densities in the Yellow River Valley of China. *Field Crops Research*, 2006, 98: 106-115.

参考文献:

- [1] 刁明, 戴剑锋, 罗卫红, 袁昌梅, 卜崇兴, 鲜开梅, 张生飞, 徐蕊. 温室甜椒叶面积指数形成模拟模型. *应用生态学报*, 2008, 19(10): 2277-2283.
- [2] 张志斌. 不同整枝方式对温室甜椒干物质生产与分配及产量波动的影响. *中国蔬菜*, 1999, (6): 14-18.
- [9] 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. 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.
- [12] 杨再强, 罗卫红, 陈发棣, 顾俊杰, 李向茂, 丁琪峰, 赵才标, 陆亚凡. 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.
- [13] 杨再强, 罗卫红, 陈发棣, 谢以萍, 顾俊杰. 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*, 2009, 29(3): 1479-1485.
- [17] 袁昌梅, 罗卫红, 邵翔, 张生飞, 金亮, 陈永山, 卜崇兴, 徐刚. 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.
- [18] 隋方功, 吕银燕, 稻永醇二. 氮素营养对甜椒果实生长发育的影响. *植物营养与肥料学报*, 2004, 10(5): 499-503.
- [19] 李国景, Benoit F, Ceustermans F. 昼夜温度对温室甜椒植株生长发育和产量的影响. *浙江大学学报*, 2004, 30: 487-491.
- [20] 石磊, 郑金生, 付爱飞, 刘慧英. 不同水分处理对甜椒生长的影响. *新疆农业科学*, 2008, 45(6): 1085-1089.
- [25] 孟亚利, 曹卫星, 柳新伟, 周治国, 潘洁. 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): 205-212.