

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.02.027

## 滴灌加工番茄叶面积、干物质生产与积累模拟模型\*

王新<sup>1</sup> 刁明<sup>1,2</sup> 马富裕<sup>1,2</sup> 樊华<sup>1</sup> 崔静<sup>1</sup> 何海兵<sup>1</sup>

(1. 石河子大学农学院, 石河子 832003; 2. 新疆生产建设兵团绿洲生态农业重点实验室, 石河子 832003)

**摘要:** 以生理发育时间为时间尺度,建立了基于生理发育时间(PDT)的加工番茄叶面积指数(LAI)、比叶面积(SLA)模拟模型,并将叶面积指数模型与基于生理生态过程的光合作用和干物质生产模型相结合,构建了滴灌加工番茄干物质生产与积累的模拟模型。结果表明:PDT法对加工番茄叶面积指数(LAI)与1:1直线间的决定系数 $R^2$ 、根均方差(RMSE)和模型效率指数(ME)分别为0.9265、12.87%、0.9724;SLA法模拟叶面积指数的预测结果与1:1直线间的 $R^2$ 、RMSE和ME分别为0.6758、42.24%、0.7124。本模型对加工番茄地上部干物质质量的预测结果与1:1直线间的 $R^2$ 、RMSE和ME分别为0.9903、11.91%、0.9901;而SLA法对加工番茄地上部干物质质量的预测结果与1:1直线间的 $R^2$ 、RMSE和ME分别为0.8956、31.29%、0.7504。与SLA法相比,PDT法在改善加工番茄叶面积指数预测精度的同时亦提高了干物质质量的预测精度。

**关键词:** 加工番茄 滴灌 干物质生产 积累 模拟模型

**中图分类号:** S641.2; S311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)02-0161-08

## 引言

加工番茄全生育期都需要强光照,研究表明<sup>[1]</sup>:光照强度对加工番茄植株和内部生理变化具有显著影响,其产量随光照强度的减弱而降低,光照充分,开花结果正常,产量高;光照不足,植株易徒长,茎节细长,叶片变薄、变浅,易产生落花落果。滴灌技术是干旱区最有效的一种节水灌溉方式。

作物生长模拟模型对作物的生长发育、光合生产、器官建成和产量形成等过程及其与环境和管理技术的体系加以概括,建立数学模型,在计算机上进行定量化的分析和模拟研究,是获取作物生长发育状况的重要手段<sup>[2]</sup>。光合生产与干物质积累是作物生长发育模型的重要组成部分<sup>[3]</sup>。叶片是光合同化产物的主要器官,叶面积指数(LAI)是决定冠层光合作用速率计算准确的重要参数之一。在光合作用驱动的作物生长发育模型中,对冠层光合作用速率的计算首先是计算单叶光合作用速率,然后对叶面积指数进行积分<sup>[4-5]</sup>。目前,模拟作物叶面积的方法主要有有效积温(GDD)<sup>[6-7]</sup>、比叶面积(Specific leaf area, SLA)<sup>[8-11]</sup>、叶长(Leaf length, LL)和叶宽(Leaf width, LW)<sup>[12-13]</sup>、辐热积(Product

of thermal effectiveness and PAR, TEP)<sup>[14-15]</sup>法。关于番茄的叶面积、光合生产与干物质积累模拟的研究多集中在温室番茄方面<sup>[16-17]</sup>。王冀川等<sup>[18]</sup>以生理发育时间(Physiological development time, PDT)为预报变量,以相对化叶面积指数动态数学模型为基础,构建了加工番茄适宜叶面积指数的动态模型。国内学者报道了棉花<sup>[19-21]</sup>、水稻<sup>[22-23]</sup>、小麦<sup>[24-25]</sup>、油菜<sup>[26-27]</sup>、玉米<sup>[28-29]</sup>等作物的叶面积、干物质生产和积累的模拟模型。但是,关于滴灌条件下加工番茄叶面积、干物质生产与积累的模拟模型鲜有报道。本文基于生理发育时间的叶面积指数模型与光合作用和干物质积累模型相结合,构建滴灌加工番茄叶面积、干物质生产与积累的模拟模型。

## 1 材料与方 法

## 1.1 试验设计

试验1、试验2和试验3分别于2010年、2011年和2012年在新疆石河子大学农学院试验站进行。试验区的土壤理化性质和试验设置见表1。

表中“\*”的数据用于模型构建。“\*\*”的数据用于模型检验。

3年试验均采用膜下滴灌栽培,小区面积3.6 m ×

收稿日期:2013-09-12 修回日期:2013-10-19

\* 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20096518110002)、石河子大学高层次人才资助项目(RCSX200904)和兵团农业科技攻关资助项目(2011BA009)

作者简介:王新,博士生,主要从事农业信息技术与精准农业研究,E-mail: wx2011207003@sohu.com

通讯作者:马富裕,教授,博士生导师,主要从事作物水分生理与精准农业研究,E-mail: Mafuyu403@sohu.com

表1 土壤理化性质和试验设置

Tab.1 Soil characteristics and cropping practice in three years (2010, 2011 and 2012)

土壤/作物 信息	2010年				2011年				2012年			
	1SD1		1SD2		2SD1		2SD2		3SD1		3SD2	
pH值	7.5				7.2				7.3			
有机质/(g·kg <sup>-1</sup> )	17.82				15.69				12.69			
总氮/(g·kg <sup>-1</sup> )	1.24				1.19				1.09			
速效氮/(mg·kg <sup>-1</sup> )	52.38				47.58				45.58			
速效磷/(mg·kg <sup>-1</sup> )	25.88				22.16				20.16			
速效钾/(mg·kg <sup>-1</sup> )	186				173				163			
土壤类型	壤土				壤土				壤土			
前茬作物	小麦				棉花				棉花			
供试品种	87-5*	红霸**	87-5**	红霸**	87-5**	红霸**	87-5**	红霸**	87-5**	石红9**	87-5**	石红9**
播种期	04-29		05-14		04-23		05-07		04-20		05-05	
出苗期	05-10	05-10	05-24	05-24	05-03	05-03	05-17	05-19	04-30	05-01	05-12	05-11
拉秧期	08-23	08-30	09-04	09-08	08-18	08-29	09-02	09-06	08-12	08-28	08-22	09-05
灌溉方式	滴灌				滴灌				滴灌			

10 m,行距 60 cm,株距 30 cm,每 2 行加工番茄覆盖 1 条地膜,每个小区共种植 6 行番茄,各 3 次重复,小区在田间随机排列。磷肥与微肥作基肥 1 次施入;氮肥分 4 次施入,20% 作基肥施入,35% 作始果肥(第 1 穗果实直径大于 2 cm 时)施入,25% 在第 1 次采摘后灌水时施入,20% 在第 2 次采摘后灌水时施入。钾肥分 3 次施入,30% 作基肥施入,30% 作始果肥施入,40% 在第 1 次采摘后灌水时施入。田间管理与当地常规管理相同,盛果前期翻秧 1 次,果实成熟后分次采摘,一般采摘 4 次。全生育期共灌溉 12 次,总灌溉量 5 700 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>,播种后灌第 1 次水,以后每隔 10 d 灌溉 1 次。氮肥为尿素(含 N 46%)、磷肥为重过磷酸钙(含 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 46%)、钾肥为氯化钾(含 K<sub>2</sub>O 50%)。

## 1.2 气象数据获取

各试验所需的气象数据由石河子大学农学院气象站提供,田间小气候条件下的气温数据由 MicroLite 5016P-RH-U 盘型温度记录仪记录,每 30 min 记录一次温度数据。

## 1.3 叶面积、器官干物质量和产量测定

通过扫描仪扫描单株叶片并利用 Scion Image 计算叶面积从而得到叶面积指数。定苗后每隔 7 d 进行破坏性取样,苗期取样 4~5 株,其他生育期 3 株。每次取样后,记录叶片数和果实数,分别称量地上部茎、叶、花、果的鲜质量,在 105℃ 下 15 min 杀青,72℃ 干燥至恒质量,并称干质量(精确到 0.001 g 的电子天平),计算干物质量。试验 1SD1、1SD2 分别取样 11、10 次,试验 2SD1、2SD2 分别取样 11、10 次,试验 3SD1、3SD2 分别取样 9、10 次。提前在每个小区内划定测产区,选取长势均匀一致的 5 株,3 次重复。在果实采收期,每次采收后将测产区

的成熟果实收获称重并计算产量。

## 1.4 光合作用及冠层消光系数测定

在加工番茄各个生育期,利用 LI-6400 型便携式光合仪在正午前后测定功能叶片的光合作用速率。每次测量每个品种选 3 株,每株测上、中、下 3 个叶位的叶片各 2 片(羽状复叶的顶生小叶),每个生育期内选晴天、多云天和阴天各测 1 d。根据测定的数据制作光响应曲线,确定各生育期最大光合作用速率(PLMX)。在开花期、坐果期和成熟期用 LAI-2000 型冠层分析仪测定冠层的消光系数  $k$ ,  $k$  平均值为 0.8。

## 1.5 模型检验

采用常用的模型检验方法,利用观测值与模拟值的根均方差(Root mean square error, RMSE)、模型效率指数(Modelling efficiency indexes, ME)和 1:1 关系的直线图来直观显示模型的拟合度和可靠性。RMSE 越小模拟结果越好<sup>[30]</sup>。ME 值越接近 1,表示模拟值与观测值的符合度越高,ME 值为负值时,表明模拟值与观测值间的变异性较大,符合度较低<sup>[31]</sup>。

$$R_{MSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_{IM_i} - O_{BS_i})^2}{n}} \frac{100}{Q} \quad (1)$$

$$M_E = \frac{\sum_{i=1}^n (O_{BS_i} - Q)^2 - \sum_{i=1}^n (S_{IM_i} - O_{BS_i})^2}{\sum_{i=1}^n (O_{BS_i} - Q)^2} \quad (2)$$

式中  $O_{BS_i}$ ——观测值  $S_{IM_i}$ ——模拟值  
 $n$ ——样本数量  $Q$ ——观测值的平均值

所有数据分析均基于 Excel 2003 完成,相关图形均基于 Origin 8.5 和 SigmaPlot 10.0 完成。

## 2 模型建立

### 2.1 生理发育时间计算

生理发育时间又称生理发育日,是一种最适发育环境下的时间尺度<sup>[32]</sup>。每日生理发育时间由每日生理发育效应(RPDE)累积得出,每日生理发育效应则由每日相对热效应(RTE)、相对光周期效应(RPE)及品种的基本发育因子(IDF)共同决定。根据文献[33]及本研究试验数据计算,加工番茄主要生育时期的PDT为:从播种至出苗期4.5 d、开花期35 d、坐果期48 d、红熟期76 d和拉秧期106 d。

### 2.2 叶面积模拟

叶片是作物进行光合作用的重要器官,叶面积动态变化模拟直接影响作物光合作用和干物质累积过程模拟的准确性。本研究采用生理发育时间建立加工番茄单株叶面积动态变化的模拟模型。利用试验1SD1\_LG数据对加工番茄出苗后累积生理发育时间和叶面积( $L_A$ )进行曲线拟合(图1a)即

$$L_A = -217.69 + 15783.76 \exp(-0.5(\ln(t_{PDT}/71.94)/0.274)^2) \quad (R^2 = 0.9708) \quad (3)$$

式中  $L_A$ ——加工番茄单株叶面积,  $\text{cm}^2/\text{株}$   
 $t_{PDT}$ ——出苗后累积生理发育时间, d

根据加工番茄单株叶面积和种植密度可计算出叶面积指数为

$$L_{AI} = \frac{L_A D}{6667000} \quad (4)$$

式中  $D$ ——种植密度,  $\text{株}/\text{m}^2$

根据每个取样日的叶面积和叶干质量可计算出比叶面积

$$S_{LA} = \frac{L_A}{W_L} \quad (5)$$

式中  $W_L$ ——叶干质量,  $\text{t}/\text{hm}^2$

利用试验1SD1\_LG试验数据对每个取样日的比叶面积和出苗后累积的生理发育时间进行曲线拟合,可得到比叶面积与出苗后累积生理发育时间的动态变化关系(图1b)为

$$S_{LA} = 0.0056t_{PDT}^2 - 2.5500t_{PDT} + 486.14 \quad (R^2 = 0.9032) \quad (6)$$

### 2.3 单叶光合速率

以负指数模型来描述单叶的光合作用特征。单叶光合作用—光反应曲线中有2个重要的特征参数:曲线初始斜率 $\varepsilon$ ,即初始的光能利用率;饱和光强时的光合速率,即最大光合速率( $P_{LMX}$ )<sup>[34]</sup>。

$$F_G = P_{LMX} [1 - \exp(-\varepsilon P_{AR}/P_{LMX})] \quad (7)$$

式中  $F_G$ ——单叶光合作用速率,  $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$

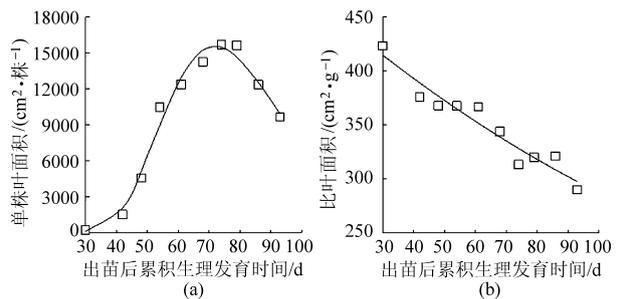


图1 单株叶面积、比叶面积与出苗后累积的生理发育时间的关系

Fig. 1 Relationship between leaf area per plant, specific leaf area and accumulated physiological development time after emergence

$P_{LMX}$ ——单叶最大光合速率,  $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$

$\varepsilon$ ——光转换因子即吸收光的初始利用率,  $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}/(\text{J} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h})$

$P_{AR}$ ——冠层上方的光合有效辐射,  $\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

$\varepsilon$  主要受温度因子的影响,其变化范围在  $10 \sim 40^\circ\text{C}$  之间,数值变化范围在  $0.36 \sim 0.54$  之间,其他环境因子:如植株的生理年龄、叶片含氮量、 $\text{CO}_2$  浓度等对  $\varepsilon$  影响较小,可以不予考虑。

### 2.4 冠层光合作用

冠层光合作用是指所有叶片、茎及后期生殖器官的光合作用速率的总和。Goudriaan 等<sup>[35]</sup>研究表明,采用高斯积分法计算每日冠层的光合作用速率可以大大降低计算量。高斯积分法是将叶片冠层分为3层,将每层的瞬时光合作用速率加权求和得出整个冠层瞬时光合作用速率  $F_{CL}$  ( $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ )。根据文献[14-17]计算加工番茄整个冠层瞬时光合作用速率,计算方法综合考虑了单叶最大光合速率、冠层中每一层所吸收的光合有效辐射量 ( $IL[i]$ ,  $\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ )、高斯分层的冠层深度  $LGUSS(i)$ 、冠层消光系数  $k$  和叶面积指数 (LAI) 对冠层瞬时光合作用速率的影响。高斯三点和五点积分法的权重  $W_T$  及距离系数  $D_{IS}$  见表 2<sup>[15]</sup>。每日冠层的总光合量 ( $D_{TGA}$ ,  $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$ ) 可通过对整个冠层的瞬时光合作用速率求和得到,  $\text{CO}_2$  转化为  $\text{CH}_2\text{O}$  的转化效率为 0.6819。

表2 高斯三点和五点积分法的权重  $W_T$  及距离系数  $D_{IS}$

Tab. 2 Gaussian weight and distances for orders of 3 and 5

$i$	1	2	3	4	5
$W_T[i]$	0.278	0.444	0.278		
$W_T[i]$	0.118	0.239	0.284	0.239	0.118
$D_{IS}[i]$	0.113	0.500	0.887		
$D_{IS}[i]$	0.047	0.231	0.500	0.769	0.953

## 2.5 呼吸作用

呼吸作用分为维持呼吸(RM)和生长呼吸(RG)。维持呼吸是指活的有机体维持其现有的生理生化状态所需的能量且维持呼吸的强度与生物量或蛋白质含量呈正比,同时对于温度的影响比较敏感。生长呼吸与植物体的有机质合成、植株的增长及新陈代谢活动有关,它依赖于植株的光合速率,对温度的影响不敏感。根据文献[35]分别计算维持和生长呼吸对光合同化总量的消耗。加工番茄在25℃时的维持呼吸速率 $R_M$ ,本文取值 $0.015 \text{ g/g}^{[36]}$ ,温度对加工番茄维持呼吸的影响根据 Penning de Vries 等<sup>[37]</sup>研究温度每升高 $10^\circ\text{C}$ ,温度系数 $Q_{10}$ 就增加1倍,文中温度系数 $Q_{10}$ 取2.0,生长呼吸系数 $R_G$ 取 $0.39 \text{ g/g}^{[4]}$ 。

## 2.6 干物质积累

干物质增长速率计算公式为

$$\Delta D_w = \frac{D_{TGA} - R_M - R_G}{G} \quad (8)$$

式中  $\Delta D_w$ ——干物质增长速率,  $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$

$G$ ——每生产1 kg干物质所需葡萄糖( $\text{CH}_2\text{O}$ )量,取 $1.40 \text{ kg/kg}^{[36]}$

由初始干物质质量与每日的干物质增长速率,可计算每日的地上部总干物质积累量为

$$B_{IOMASS}(i+1) = B_{IOMASS}(i) + \Delta D_w \quad (9)$$

式中  $B_{IOMASS}(i+1)$ ——第 $i+1$ 天的地上部干物质质量,  $\text{kg}/\text{hm}^2$

$B_{IOMASS}(i)$ ——第 $i$ 天地上部干物质质量,  $\text{kg}/\text{hm}^2$

## 3 模型参数的确定

单叶最大充合速率( $P_{LMX}$ )是光饱和点下的最大光合有效辐射,是光合模型中的一个重要参数,与温度和光照强度密切相关,它的准确测定对提高光合作用模型的精确性十分重要<sup>[38]</sup>。

$$\lim_{P_{AR} \rightarrow \infty} F_c = \lim_{P_{AR} \rightarrow \infty} \frac{\varepsilon P_{LMX} P_{AR}}{P_{LMX} + \varepsilon P_{AR}} = P_{LMX} \quad (10)$$

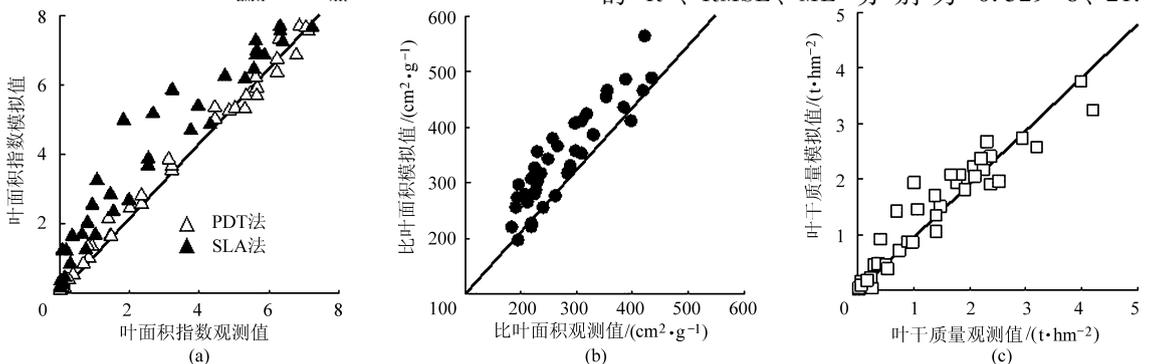


图3 叶面积指数、比叶面积、叶干质量模拟值与观测值的1:1关系图

Fig. 3 1:1 relationship diagram between simulation and observation value of leaf area index, specific leaf area, leaf dry weight

当光合有效辐射趋于饱和时,即在光饱和点时的最大光合速率,根据文献资料和本研究数据测定加工番茄功能叶片的光合作用—光响应曲线,根据图2可计算得到, $P_{LMX}$ 为 $25.24 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ , $\varepsilon$ 为 $0.45 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}/(\text{J} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h})$ 。

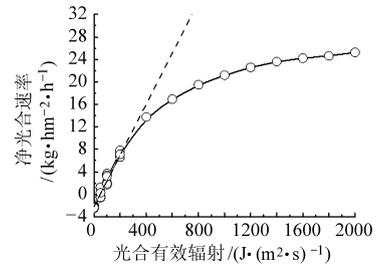


图2 加工番茄同化 $\text{CO}_2$ 的净光合速率( $F_c$ )与光合有效辐射( $P_{AR}$ )的关系

Fig. 2 Relationship of processing tomato between leaf net photosynthetic rate and photosynthetic active radiation

## 4 结果与分析

### 4.1 叶面积指数、比叶面积和叶干质量模拟结果

利用大田气象资料,根据式(3)~(6)计算出与建模数据相独立的试验1SD2\_LG、1SD2\_HB、2SD1\_LG、2SD1\_HB出苗后至成熟期任意一天的 $L_{AI}$ ,并与SLA法模拟结果进行比较,结果如图3a( $n=80$ )所示,本模型对 $LAI$ 预测结果与1:1直线间的 $R^2$ 、RMSE、ME分别为0.9265、12.87%、0.9724;而用SLA法模拟叶面积指数预测结果与1:1直线间的 $R^2$ 、RMSE、ME分别为0.6758、42.24%、0.7124。以上分析结果表明:采用生理发育时间预测加工番茄出苗至成熟期任意一天的 $L_{AI}$ 结果较比叶面积法更精确。

图3b( $n=40$ )和3c( $n=40$ )是利用试验1SD2\_LG、1SD2\_HB、2SD1\_LG、2SD1\_HB的数据对用试验1SD1\_LG数据所建立的比叶面积和叶干质量模拟模型的检验结果。比叶面积模拟结果与1:1直线间的 $R^2$ 、RMSE、ME分别为0.5298、21.80%、

-0.089。叶干质量模拟结果与1:1直线间的 $R^2$ 、RMSE、ME分别为0.8056、25.39%、0.9051。采用比叶面积法预测加工番茄叶面积指数误差较大的原因:比叶面积的估算过程会产生一定的误差;比叶面积模型中叶干质量是由光合生产模型计算得出的,因此,在模拟叶干重时也会产生一定的误差。由于以上两者误差的相互作用,在模拟过程中形成了误差的累积,导致叶面积指数的模拟值与观测值差异较大(图3a)。

#### 4.2 地上部干物重模拟结果

根据式(3)~(6)计算出的LAI作为光合作用与干物质积累模型的输入值,计算与建模数据相独立的模型检验试验出苗至成熟期任意一天的地上部干物重( $n=164$ ),并与SLA法模拟叶面积指数的光合作用和干物质生产模型模拟结果进行比较(图4)。由图4可看出,本模型对加工番茄地上部干物质量预测精度显著高于SLA法的预测精度,PDT、SLA法对加工番茄地上部干物质量的预测结果与1:1直线间的 $R^2$ 、RMSE、ME分别为0.9903、11.91%、0.9901;0.8956、31.29%、0.7504。与SLA法相比本模型采用PDT法在提高叶面积指数预测精度的同时亦提高了对加工番茄干物质量的预测精度。

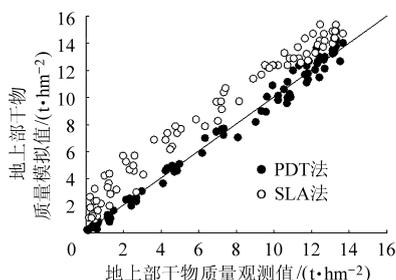


图4 地上部干物质量模拟值与观测值的1:1关系图(试验1~3)

Fig. 4 1:1 relationship diagram between simulation and observation value of shoot dry weight (Exp 1~3)

## 5 讨论

本研究对PDT和比叶面积SLA法对加工番茄叶面积指数进行预测(图3a),SLA法的预测误差远远大于PDT法,原因主要是:SLA在生育期内对水肥供应状况及年际环境因子极为敏感,因此,预测的叶面积指数误差较大。加工番茄在生育期内营养生长与生殖生长并进时间长,尤其是坐果期植株长势旺盛,叶片数较多,叶片之间相互隐蔽给比叶面积的预测造成很大的误差,进而对叶面积和叶面积指数的预测造成误差。SLA法预测叶面积指数的过程中

会产生一定的误差,将叶面积指数作为参数值代入光合作用和干物质积累模型中时造成误差的累积,因此,SLA法预测地上部干物质量的结果与PDT法之间差异较为显著(图4)。

提出的以加工番茄出苗后累积生理发育时间PDT来预测叶面积,有效克服了SLA法的局限性和不稳定性,改善了叶面积指数的预测精度,从而提高了干物质量的预测精度,为准确预测加工番茄产量奠定了基础。植株的出叶,伸展和衰老速率均受光照和温度的影响,在叶面积指数模型中应充分考虑出叶、伸展和衰老对叶面积指数的影响。加工番茄叶片为羽状复叶,分指数较多,精确量化出叶和伸展速率较为困难,随着生育进程的推进,加工番茄下部叶片逐渐衰老、脱落,光合作用速率降低,维持呼吸速率增强的同时存在同化物的生产与消耗,因此,尚需在今后试验中进一步深入研究温度和光照对加工番茄叶片的出生、伸展和衰老速率的影响,提高本模型中叶面积指数模型的普适性和精确性。本研究所构建的模型参数均是在正常大气 $\text{CO}_2$ 浓度( $3.40 \times 10^{-4}$ )及水肥供应充足条件下确定的,因此,模型是否亦适用在不同的 $\text{CO}_2$ 浓度及水肥供应条件下还需要进一步进行验证。叶面积和叶面积指数随生育期的动态变化受种植密度和植株整枝方等影响较大,加工番茄采用不搭架、不整枝的大田栽培模式,因此本研究所确定的叶面积和叶面积指数模型参数是否亦可在不同种植密度和整枝方式上应用还有待进一步试验确定。

## 6 结论

(1)采用生理发育时间建立了加工番茄单株叶面积预测模型,并利用与建模试验相独立的试验数据对模型进行检验,结果表明:基于生理发育时间的加工番茄叶面积指数模型的预测精度显著高于比叶面积模型的预测精度。

(2)将基于生理发育时间的叶面积指数模型与基于生理生态过程的光合作用和干物质生产模型相结合,构建了滴灌加工番茄干物质生产与积累的模拟模型。本模型对加工番茄地上部干物质量的预测精度显著高于比叶面积法,在改善叶面积预测精度的同时提高了干物质量的预测精度。

(3)采用生理发育时间作为加工番茄叶面积指数、干物质生产和积累的预测指标,克服了比叶面积法稳定性差,参数不易获取的缺点和局限性,不仅改善了叶面积指数的预测精度,而且提高了干物质生产和积累的预测精度。

## 参 考 文 献

- 1 俞树龙,王健,杨晓光,等. 新疆加工番茄适生种植气候区划[J]. 中国农业气象,2005,26(4):268-271.  
Yu Shulong, Wang Jian, Yang Xiaoguang, et al. Climate division of suitable planting area of processing tomato in Xinjiang[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2005, 26(4): 268-271. (in Chinese)
- 2 曹卫星,罗卫红. 作物系统模拟及智能管理[M]. 北京:高等教育出版社,2003.
- 3 汤亮,朱艳,孙小芳,等. 油菜光合作用与干物质积累的动态模拟模型[J]. 作物学报,2007,33(2):189-195.  
Tang Liang, Zhu Yan, Sun Xiaofang, et al. Dynamic simulation model for photosynthesis and dry matter accumulation in rapeseed [J]. Acta Agronomica Sinica, 2007, 33(2):189-195. (in Chinese)
- 4 Heuvelink E. Dry matter production in a tomato crop: measurements and simulation [J]. Annals of Botany, 1995, 75(4): 369-379.
- 5 Begonia G B, Begonia M T. Plant photosynthetic production as controlled by leaf growth, phenology, and behavior [J]. Photosynthetica, 2007, 45(3): 321-333.
- 6 黄冲平,王爱华,胡秉民,等. 作物生长温度效应的非线性模型及其比较研究[J]. 生物数学学报,2004,19(4):481-486.  
Huang Chongping, Wang Aihua, Hu Bingmin, et al. Study temperature drive nonlinear models of crop growth and their application [J]. Journal of Biomathematics, 2004, 19(4): 481-486. (in Chinese)
- 7 侯加林,王一鸣,徐云,等. 番茄生长发育非线性模拟模型[J]. 农业机械学报,2006,37(3):80-84.  
Hou Jialin, Wang Yiming, Xu Yun, et al. Simulation model of tomato growth [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(3): 80-84. (in Chinese)
- 8 Dayan E, van Keulen H, Jones J W, et al. Development, calibration and validation of a greenhouse tomato growth model: I. Description of the model [J]. Agricultural Systems, 1993, 43(2): 145-163.
- 9 Heuvelink E. Tomato growth and yield: quantitative analysis and synthesis [M]. Wageningen: Landbouuniversiteit te Wageningen, 1996.
- 10 Heuvelink E, Marcelis L F M. Influence of assimilate supply on leaf formation in sweet pepper and tomato [J]. Journal of Horticultural Science, 1996, 71(3): 405-414.
- 11 Gijzen H, Heuvelink E, Challa H, et al. A model for greenhouse crops and greenhouse climate [M] // Marcelis L F M. II Modelling plant growth, environmental control and farm management in protected cultivation, ISHS Acta Horticulturae 456, 1997: 441-450.
- 12 Rouphael Y, Mouneimne A H, Ismail A, et al. Modeling individual leaf area of rose (*Rosa hybrida* L.) based on leaf length and width measurement [J]. Photosynthetica, 2010, 48(1): 9-15.
- 13 陈秀娟,陈卫平,糜林,等. 南方草莓叶面积计算方法的研究[J]. 中国农学通报,2009,25(14):190-193.  
Chen Xiujuan, Chen Weiping, Mi Lin, et al. On regressive estimation for leaf area of strawberry [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(14): 190-193. (in Chinese)
- 14 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.  
Li Yongxiu, Luo Weihong, Ni Jiheng, et al. Simulation of greenhouse cucumber leaf area based on radiation and thermal effectiveness [J]. Journal of Plant Ecology, 2006, 30(5): 861-867. (in Chinese)
- 15 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.  
Diao Ming, Dai Jianfeng, Luo Weihong, et al. Simulation model on the formation of greenhouse sweet pepper leaf area index [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(10): 2277-2283. (in Chinese)
- 16 Marcelis L F M. Effects of sink demand on photosynthesis in cucumber [J]. Journal of Experimental Botany, 1991, 42(11): 1387-1392.
- 17 Marcelis L F M. Simulation of biomass allocation in greenhouse crops—a review [C] // International Workshop on Greenhouse Crop Models, 1991, 328: 49-68.
- 18 王冀川,马富裕,冯胜利,等. 加工番茄叶面积指数动态的知识模型研究[J]. 石河子大学学报:自然科学版,2008,26(1): 36-40.  
Wang Jichuan, Ma Fuyu, Feng Shengli, et al. Studies on dynamic knowledge model for design of leaf area index in processing tomato [J]. Journal of Shihezi University: Natural Science, 2008, 26(1): 36-40. (in Chinese)
- 19 潘学标,韩湘玲,董占山,等. 棉花生长发育模拟模型 COTGROW 的建立 I 光合作用和干物质生产与分配[J]. 棉花学报, 1997,9(3):132-141.  
Pan Xuebiao, Han Xiangling, Dong Zhanshan, et al. Developed on cotton growth and development model COTGROW I photosynthesis and dry matter production and distribution [J]. Cotton Science, 1997, 9(3): 132-141. (in Chinese)
- 20 张立祯,曹卫星,张思平,等. 棉花光合生产与干物质积累过程的模拟[J]. 棉花学报,2003,15(3):138-145.  
Zhang Lizhen, Cao Weixing, Zhang Siping, et al. A process model of photosynthetic production and dry matter accumulation in

- cotton [J]. *Cotton Science*, 2003, 15(3): 138 - 145. (in Chinese)
- 21 张军, 王一鸣, 毛文华, 等. 棉花冠层叶面积的模拟[J]. *农业机械学报*, 2007, 38(6): 117 - 120.  
Zhang Jun, Wang Yiming, Mao Wenhua, et al. Dynamic simulation of leaf area in cotton canopy [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2007, 38(6): 117 - 120. (in Chinese)
- 22 孟亚利, 曹卫星, 柳新伟, 等. 水稻光合生产与干物质积累的动态模拟[J]. *生物数学学报*, 2004, 19(2): 205 - 212.  
Meng Yali, Cao Weixing, Liu Xinwei, et al. Simulation model for photosynthesis and dry matter accumulation in rice [J]. *Journal of Biomathematics*, 2004, 19(2): 205 - 212. (in Chinese)
- 23 孙成明, 庄恒扬, 杨连新, 等. FACE 水稻叶面积指数的模拟研究[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(3): 1 003 - 1 007.  
Sun Chengming, Zhuang Hengyang, Yang Lianxin, et al. Simulation study of leaf area index in FACE rice [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(3): 1 003 - 1 007. (in Chinese)
- 24 郑有飞, 颜景义. 小麦作物光合生产模拟研究[J]. *南京气象学院学报*, 1995, 18(4): 567 - 571.  
Zheng Youfei, Yan Jingyi. Numerical study of wheat photosynthetic production [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 1995, 18(4): 567 - 571. (in Chinese)
- 25 刘铁梅, 曹卫星, 罗卫红, 等. 小麦叶面积指数的模拟模型研究[J]. *麦类作物学报*, 2001, 21(2): 38 - 41.  
Liu Tiemei, Cao Weixing, Luo Weihong, et al. Simulation on leaf area index in wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2001, 21(2): 38 - 41. (in Chinese)
- 26 Tang Liang, Zhu Yan. Simulation model for photosynthetic production in oilseed rape [J]. *Pedosphere*, 2009, 19(6): 700 - 710.
- 27 汤亮, 朱艳, 严定春, 等. 冬油菜适宜绿色面积指数动态设计的知识模型[J]. *南京农业大学学报*, 2005, 28(3): 11 - 15.  
Tang Liang, Zhu Yan, Yan Dingchun, et al. A knowledge model for design of green area index dynamics in winter rapeseed [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2005, 28(3): 11 - 15. (in Chinese)
- 28 郑国清, 张曙光, 段韶芬, 等. 玉米光合生产与产量形成模拟模型[J]. *农业系统科学与综合研究*, 2004, 20(2): 193 - 197.  
Zheng Guoqing, Zhang Shuguang, Duan Shaofen, et al. Simulation models of the photosynthetic production and yield formation in maize [J]. *System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture*, 2004, 20(2): 193 - 197. (in Chinese)
- 29 王玲, 谢德体, 刘海隆, 等. 玉米叶面积指数的普适增长模型[J]. *西南农业大学学报: 自然科学版*, 2004, 26(3): 303 - 311.  
Wang Ling, Xie Deti, Liu Hailong, et al. A universal growth model for maize leaf area index [J]. *Journal of Southwest Agricultural University: Natural Science*, 2004, 26(3): 303 - 311. (in Chinese)
- 30 Jamieson P D, Porter J R, Wilson D R. A test of the computer simulation model ARCWHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand [J]. *Field Crops Research*, 1991, 27(4): 337 - 350.
- 31 Loague K, Green R E. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models; overview and application [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 1991, 7(1): 51 - 73.
- 32 倪纪恒, 罗卫红, 李永秀, 等. 温室番茄发育模拟模型研究[J]. *中国农业科学*, 2005, 38(6): 1 219 - 1 225.  
Ni Jiheng, Luo Weihong, Li Yongxiu, et al. Simulation of the development of tomato in greenhouse [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(6): 1 219 - 1 225. (in Chinese)
- 33 王冀川, 马富裕, 冯胜利, 等. 基于生理发育时间的加工番茄生育期模拟模型[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(7): 1 544 - 1 550.  
Wang Jichuan, Ma Fuyu, Feng Shengli, et al. Simulation model for the development stages of processing tomato based on physiological development time [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(7): 1 544 - 1 550. (in Chinese)
- 34 Goudriaan J. Some techniques in dynamic simulation[M]//Penning de Vries F W T, van Laar H H. *Simulation of plant growth and crop production, simulation monographs*. Wageningen: Pudoc Wageningen, 1982: 66 - 84.
- 35 Goudriaan J, de Ruiter H E. Plants growth in response to CO<sub>2</sub> enrichment, at two levels of nitrogen and phosphorus supply. 1. Dry matter, leaf area and development [J]. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 1983, 31(2): 157 - 169.
- 36 Heuvelink E. Dry matter partitioning in tomato: validation of a dynamic simulation model [J]. *Annals of Botany*, 1996, 77(1): 71 - 80.
- 37 Penning de Vries F W T, Jansen D M, ten Berge H, et al. A simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops [M]. Wageningen, Netherlands: PUDOC, 1989.
- 38 李娟, 施泽平, 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 - 245.  
Li Juan, Shi Zeping, Luo Weihong. Simulation model for photosynthesis and dry matter accumulation in greenhouse cucumber [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2003, 19(4): 241 - 245. (in Chinese)

## Simulation of Leaf Area, Dry Matter Production and Accumulation of Processing Tomato with Drip Irrigation

Wang Xin<sup>1</sup> Diao Ming<sup>1,2</sup> Ma Fuyu<sup>1,2</sup> Fan Hua<sup>1</sup> Cui Jing<sup>1</sup> He Haibing<sup>1</sup>

(1. College of Agriculture, Shihezi University, Shihezi 832003, China

2. The Key Laboratory of Oasis Ecology Agricultural, Xinjiang Production and Construction Group, Shihezi 832003, China)

**Abstract:** The leaf area index (LAI) and specific leaf area (SLA) simulation model of processing tomato with drip irrigation were developed based on the accumulated physiological development time after emergence (PDT). Then a simulation of leaf area, dry matter production and accumulation of processing tomato with drip irrigation was developed based on physiological and ecological processes of photosynthesis and dry matter production simulation model. The results showed that when using the model based on PDT, the coefficient of determination ( $R^2$ ), root mean squared error (RMSE) and modelling efficiency indexes (ME) between simulated and measured leaf area index based on the 1:1 line were 0.926 5, 12.87% and 0.972 4, respectively. However, when using the model based on SLA, the  $R^2$ , RMSE and ME between simulated and measured LAI based on the 1:1 line were 0.675 8, 42.24%, and 0.712 4, respectively. When using the model based on PDT, the  $R^2$ , RMSE and ME between simulated and measured aboveground dry matter weight based on the 1:1 line were 0.990 3, 11.91% and 0.990 1, respectively. However, when using the model based on SLA, the  $R^2$ , RMSE and ME between simulated and measured aboveground dry matter weight based on the 1:1 line were 0.895 6, 31.29% and 0.750 4, respectively. Compared with the SLA method, PDT method to improve the processing tomato leaf area index prediction accuracy while also improving the prediction accuracy of the aboveground dry matter weight.

**Key words:** Processing tomato Drip irrigation Dry matter production Accumulation Simulation model