

## 加工番茄地上部干物质分配与产量预测模拟模型

王新<sup>1</sup>, 马富裕<sup>1,2</sup>, 刁明<sup>1,2\*</sup>, 樊华<sup>1</sup>,  
崔静<sup>1</sup>, 贾彪<sup>1</sup>, 何海兵<sup>1</sup>, 刘其<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:** 为了探究加工番茄在滴灌栽培条件下地上部干物质分配动态和产量形成过程, 该文通过定量分析加工番茄的生长发育特征, 设置不同品种的播期试验, 构建了基于分配指数(partitioning index, PI)和收获指数(harvest index, HI)的加工番茄地上部干物质分配与产量预测的模拟模型。利用与建模数据相独立的试验资料对模型进行了初步检验, 结果表明, 模型对不同播期、品种的加工番茄各生育期(出苗至开花、开花至坐果、坐果至红熟、红熟至拉秧期)干物质量, 全生育期总干物质量、地上部茎、叶、果干质量的预测结果与1:1直线间的 $R^2$ 分别为0.9754、0.9936、0.9840、0.9713; 0.9856; 0.9595、0.9798、0.9671;  $RMSE$ 和 $RE$ 分别为0.029 t/hm<sup>2</sup>、11.43%; 0.074 t/hm<sup>2</sup>、5.09%; 0.250 t/hm<sup>2</sup>、6.83%; 0.102 t/hm<sup>2</sup>、5.71%; 0.504 t/hm<sup>2</sup>、8.06%; 0.332 t/hm<sup>2</sup>、14.62%; 0.200 t/hm<sup>2</sup>、10.84%; 0.549 t/hm<sup>2</sup>、18.30%。模型对加工番茄产量的预测结果与1:1直线间的 $R^2$ 为0.9658,  $RMSE$ 和 $RE$ 分别为5.806 t/hm<sup>2</sup>、8.07%。该模型对于不同播期、品种的加工番茄干物质分配与产量的预测值与模拟值之间符合度较高, 表明模型具有较好的预测性和适用性。该研究可为滴灌加工番茄精准栽培提供理论参考。

**关键词:** 计算机模拟, 模型, 预测, 滴灌, 加工番茄, 干物质分配, 产量形成

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.22.020

中图分类号: S614.2; S353

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-22-0171-06

王新, 马富裕, 刁明, 等. 加工番茄地上部干物质分配与产量预测模拟模型[J]. 农业工程学报, 2013, 29(22): 171-179.

Wang Xin, Ma Fuyu, Diao Ming, et al. Simulation of shoot dry matter partitioning and yield prediction of processing tomato[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(22): 171-179. (in Chinese with English abstract)

### 0 引言

番茄(*Lycopersicon esculentum*)原产于南美洲, 分有限生长型、半有限生长型和无限生长型, 果皮较薄, 不耐储运, 作为鲜食之用, 保护地或大田栽培需搭架绑蔓, 整枝打杈、去除老叶, 以控制营养生长, 保证产量。加工番茄(*Lycopersicon esculentum* Mill)是普通番茄的一种栽培类型, 主要特点是矮化自封顶, 不搭架不整枝栽培, 一般植株高度在30~90 cm之间, 分枝数多, 匍匐、直立或半直立生长, 花期较集中, 果实多为椭圆形, 比普通栽培番茄略小, 单果质量30~120 g, 果皮比普通栽培

番茄厚, 耐贮藏运输, 主要以制作番茄酱为主。

新疆属典型的荒漠绿洲灌溉农业, 太阳辐射量大, 光照充足, 降雨量小, 蒸发量、昼夜温差大, 有效积温高, 非常有利于加工番茄干物质的积累、可溶性固形物含量的提高和番茄红素的生成, 是世界最适宜种植番茄的区域<sup>[1]</sup>。经过多年的发展, 新疆加工番茄种植面积已达7.3万hm<sup>2</sup>, 年生产能力已突破100万t, 番茄制品产量、出口量已占全国90%以上<sup>[2]</sup>, 是中国重要的加工番茄生产加工基地。

滴灌是20世纪70年代逐步发展起来的一项先进的灌溉技术, 而膜下滴灌技术将灌溉、施肥有机的结合在一起, 方便实现分次施肥, 同时又因是小范围局部控制, 微量灌溉, 水肥渗漏较少, 故可节省化肥施用量, 减轻污染<sup>[3-4]</sup>, 目前新疆加工番茄80%的面积都采用了膜下滴灌技术, 在膜下滴灌条件下, 优化加工番茄栽培管理, 提高资源利用率, 是加工番茄产业发展中需要解决的一个重要问题。

作物模拟技术是优化作物栽培管理的重要手段之一, 其中干物质分配一直是作物模拟模型研究的重要内容。前人关于干物质分配的模拟模型提出了很多理论, 如功能平衡模型、运输-阻力法模型、

收稿日期: 2013-03-17 修订日期: 2013-10-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(31360478)、高校博士点专项科研基金项目(20096518110002)、石河子大学高层次人才项目(RCSX200904)和兵团农业科技攻关项目(2011BA009)资助

作者简介: 王新(1986-), 男, 甘肃武威人, 博士生, 主要研究方向为作物模拟与农业信息技术。石河子 石河子大学农学院, 832003。

Email: wangxin2258434@163.com

\*通信作者: 刁明(1968-), 男, 河南商丘人, 博士, 副教授, 硕士研究生导师, 主要研究方向为作物模拟模型与精准农业。石河子 石河子大学农学院, 832003。Email: diaoming@shzu.edu.cn

源库理论等<sup>[5-7]</sup>。Wolswinkel 等<sup>[8]</sup>指出干物质分配的模拟是基于作物的库强,库强也可以定义为作物各个器官对同化物的潜在需要或积累同化物的潜在能力。Heuvelink<sup>[9]</sup>构建了基于作物器官库强,即作物潜在生长速率的温室番茄干物质分配模型。TOMGROW 和 TOMSIM 模型<sup>[10-11]</sup>中关于温室番茄干物质分配模型都是基于作物的源库理论建立的,其中,TOMGROW 模型需要输入大量的模型参数,大大降低了模型的实用性和广适性;TOMSIM 模型利用固定的茎、叶干质量比率来预测茎、叶干质量,采用果枝出现速率和果实生长周期等来预测果实干质量,但是在不同品种或同一品种不同播期下预测值差异较大,因此,限制了不同品种的产量预测精度。

目前,应用最为广泛的干物质分配模型都是基于作物各器官的分配指数建立的,关于设施作物干物质分配模拟模型研究较多,例如倪纪恒等<sup>[12]</sup>、李永秀等<sup>[13]</sup>基于辐热积(thermal effectiveness and PAR, TEP)构建了温室番茄、黄瓜干物质分配和产量预测的模拟模型,大田作物中,例如:水稻<sup>[14]</sup>、棉花<sup>[15]</sup>、油菜<sup>[16]</sup>等作物的干物质分配模型已有报道,但是,对于滴灌条件下加工番茄干物质分配与产量预测模型鲜有报道。为此,本研究通过设置不同品种的播期试验,采用生理发育时间(PDT)为发育尺度,拟合加工番茄的分配指数并与收获指数相结合来预测滴灌加工番茄地上部干物质分配与产量的形成,以期对滴灌加工番茄的种植栽培提供科学的理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验基本情况

试验分为 3 个部分,试验 I 中播期 SD1\_LG(LG—里格尔 87-5)的数据用于模型的构建,试验 II 中播期 SD1\_LG, SD1\_HB(HB—红霸)、SD2\_LG 和 SD2\_HB 和试验 III 中播期 SD1\_LG, SD1\_SH(SH—石红 9 号)的数据用于模型的检验。试验 I 和试验 II 所用品种为常规早熟品种里格尔 87-5,晚熟杂交品种红霸,试验 III 所用品种为常规早熟品种里格尔 87-5,中晚熟杂交品种石红 9 号。

试验 I 于 2010 年 4 月至 9 月在新疆石河子大学农学院试验站进行。土壤质地为壤土, pH7.5,有机质 17.82 g/kg,全氮 1.24 g/kg,碱解氮 52.38 mg/kg,速效磷 25.88 mg/kg,速效钾 186 mg/kg。设置 2 个播期,分别为 SD1、SD2,于 2010 年 4 月 29 日,5 月 14 日直播大田,SD1\_LG、SD2\_LG;SD1\_HB、SD2\_HB 分别于 8 月 23 日、8 月 30 日;9 月 4 日、9 月 8 日拉秧。

试验 II 于 2011 年 4 月至 9 月在新疆石河子大学农学院试验站进行。土壤质地为壤土, pH7.2,有机质 15.69 g/kg,全氮 1.19 g/kg,碱解氮 47.58 mg/kg,速效磷 22.16 mg/kg,速效钾 173 mg/kg。设置 2 个播期,分别为 SD1、SD2,于 2011 年 4 月 23 日,5 月 7 日直播大田,SD1\_LG、SD2\_LG;SD1\_HB、SD2\_HB 分别于 8 月 18 日、8 月 29 日;9 月 2 日、9 月 6 日拉秧。

试验 III 于 2012 年 4 月至 9 月在新疆石河子大学农学院试验站进行。土壤质地为壤土, pH7.3,有机质 12.69 g/kg,全氮 1.09 g/kg,碱解氮 45.58 mg/kg,速效磷 20.16 mg/kg,速效钾 163 mg/kg。设置 2 个播期,分别为 SD1、SD2,于 2012 年 4 月 20 日,5 月 5 日直播大田,SD1\_LG、SD2\_LG;SD1\_SH、SD2\_SH 分别于 8 月 12 日、8 月 28 日;8 月 22 日、9 月 5 日拉秧。

以上田间试验均采用地膜覆盖,膜下滴灌栽培,小区面积 36 m<sup>2</sup> (3.6 m×10 m),行距 60 cm,株距 30 cm,1 条地膜种植 2 行加工番茄,每个小区共铺设 3 条地膜,各 3 次重复,小区在田间随机排列。磷肥与微肥做基肥一次施入;氮肥:基肥施入 20%,35%作始果肥(第一穗果实直径>2 cm 时),25%在第一次采摘后灌水时施入,20%在第二次采摘后灌水时施入。钾肥:基肥施入 30%,30%作始果肥,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,即 3~4 片真叶时定苗,定苗后及时中耕,生育期共中耕 4 次,喷代森锰锌一次,盛果前期翻秧一次,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>,播种后第一次灌水,灌溉量 750 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>;以后每隔 10 d 灌溉 1 次,灌溉量 450 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>。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 气象数据的获取

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 MicroLite5016P-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、器官干物质质量和产量的测定

利用扫描仪扫描单株叶片并利用 Scion Image 计算叶面积从而得到 LAI。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,果实数,分别称量地上部茎、叶、花、果的鲜质量,在 105℃下烘 15 min 杀青,72℃下烘至恒质量,并称干质量(精确到 0.001 g 的电子天平)计算干物质量,试验 I SD1、

SD2 分别取样 11、10 次, 试验 II SD1、SD2 分别取样 11、10 次, 试验 III SD1、SD2 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内的成熟果实收获, 称质量并计算产量。

#### 1.4 模型的检验

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*) 和相对误差 (relative estimation error, *RE*) 对模拟值与观测值之间的符合程度进行统计分析。*RMSE* 和 *RE* 值越小, 表明模型的预测精度越高。同时利用模拟值与观测值之间 1:1 关系的直线来直观显示模型的拟合度和可靠性。

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

$$RE = \left( \frac{RMSE}{Q_i} \right) \times 100\% \quad (2)$$

式中,  $OBS_i$  为观测值,  $SIM_i$  为模拟值,  $n$  为样本容量,  $RE$  为相对误差,  $Q_i$  为观测值的平均值。

## 2 模型描述

### 2.1 相对热效应 (*RTE*)

温度是影响加工番茄干物质分配的重要因子之一。根据前人研究<sup>[17-18]</sup>, 在昼夜温差较大的地区, 作物的生长发育进程并不随温度的升高而加快, 高温会对作物的生长发育产生迟滞作用。加工番茄对温度的反应表现为非线性, 在最适温度之上与最适温度之下反应不同。描述这一过程的有 Beta 模型、Logistic 函数等<sup>[19]</sup>, 本文采用 3 段线性函数描述加工番茄对温度的反应。

$$RTE(T) = \begin{cases} 0 & (T < T_b) \\ (T - T_b)/(T_{ob} - T_b) & (T_b \leq T < T_{ob}) \\ 1 & (T_{ob} \leq T < T_{ou}) \\ (T_m - T)/(T_m - T_{ou}) & (T_{ou} < T \leq T_m) \\ 0 & (T > T_m) \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $RTE(T)$  为温度为  $T$  时的相对热效应;  $T_b$  为生长下限温度(°C);  $T_m$  为生长上限温度(°C);  $T_{ob}$  为生长最适下限温度(°C);  $T_{ou}$  为生长最适上限温度(°C);  $T$  为日平均温度(°C)。本研究中加工番茄的三基点温度及日长参数见表 1<sup>[20]</sup>。

### 2.2 相对光周期效应 (*RPE*)

光周期效应取决于光周期的长短及作物品种基因型的光周期敏感性。对于冷季作物表现为长日照对发育速率的促进作用, 而暖季作物则表现为短日照对发育速率的促进作用。光照直接影响幼苗的

表 1 研究区加工番茄各发育阶段的温度及日长参数  
Table 1 Parameters of temperature and day length in various development phases of processing tomato in the study area

生育阶段 Development phase	温度参数 Temperature parameter/°C				日长参数 Day length parameter/h		
	$T_b$	$T_{ob}$	$T_{ou}$	$T_m$	$D_{Lb}$	$D_{Lo}$	$D_{Lm}$
播种-出苗 Sowing-Seedling	10	25	30	35			
出苗-开花 Seedling-Flowering	10	25	30	33	5	16	20
开花-坐果 Flowering-Fruit-setting	15	25	30	35	6	16	20
坐果-红熟 Fruit-setting-Maturing	15	25	30	35			
红熟-拉秧 Maturing-Ending date	15	20	30	35			

光合作用, 光照强度弱其幼苗营养状况不良, 不利于花芽的分化和发育, 光照时数 8 h, 着花节位最低, 如延长到 16 h 以上, 不利于番茄幼苗生长<sup>[21]</sup>。因此, 在计算生理发育时间(PDT)时必须量化每日相对光周期效应(*RPE*)对加工番茄生长发育的影响, 取值范围在 0~1 之间。根据 Goudriaan J、朱艳等<sup>[22-23]</sup>的研究, *RPE* 可根据临界日长( $D_{Lb}$ )、最适日长( $D_{Lo}$ )、上限日长( $D_{Lm}$ )和实际日长( $D_L$ )来计算, 计算方法见式 (4)。

$$RPE = \begin{cases} 0 & D_L > D_{Lm} \\ (D_{Lm} - D_L)/(D_{Lm} - D_{Lo}) & D_{Lo} < D_L \leq D_{Lm} \\ (D_L - D_{Lb})/(D_{Lo} - D_{Lb}) & D_{Lb} \leq D_L < D_{Lo} \\ 0 & D_L < D_{Lb} \end{cases} \quad (4)$$

式中, *RPE* 为相对光周期效应;  $D_L$  为实际日长, h;  $D_{Lm}$  为上限日长, h;  $D_{Lo}$  为最适日长, h。

### 2.3 生理发育时间 (*PDT*)

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。影响作物发育的因素主要有温度和光照, 因此, 将对作物发育最适的温光条件下的一天定义为一个生理日, 则到达作物不同的物候期所需的生理发育时间对于同一种作物的同一个基因型品种是固定不变的, 即在任何温光条件下, 特定作物的特定品种完成某一发育阶段的生理日数是恒定不变的。

生理发育时间 *PDT* 由每日相对生理发育效应 *RPDE* 累积得出。根据前人研究<sup>[20]</sup>, 大田栽培条件下加工番茄生理发育时间的计算方法见式 (5) - (7)。

$$PDT = \text{SUM}(RPDE) \quad (5)$$

$$RPDE = \begin{cases} RTE & PDT \leq PDT_E \\ TRE \times RPE & PDT_E < PDT < PDT_F \\ RTE & PDT \geq PDT_F \end{cases} \quad (6)$$

生理发育时间是一个品种特定的遗传参数, 同

一作物的不同基因型的生理发育时间具有差异性, 为了统一不同基因型的生理发育时间, 引入品种基本发育因子 (intrinsic development factor,  $IDF$ ) 来调节生理发育时间累积的速率, 从而使生理发育时间在不同基因型之间恒定不变。

$$PDT = PDT \times IDF \quad (7)$$

式中,  $RPDE$  为每日相对生理发育效应;  $PDT_E$  为完成发芽期所需的生理发育时间,  $d$ ;  $PDT_F$  为从播种到坐果所需的生理发育时间,  $d$ ;  $IDF$  为品种基本发育因子, 一般早熟品种的  $IDF$  在 0.95~1 之间, 中晚熟品种的  $IDF$  在 0.85~0.94 之间, 晚熟品种的  $IDF < 0.85$ 。根据试验数据计算, 本研究中里格尔 87-5 为早熟品种,  $IDF$  为 0.93, 红霸、石红 9 号为中晚熟品种,  $IDF$  为 0.86、0.87。

## 2.4 干物质分配指数的计算

以分配指数定量描述地上部各器官干物质的分配动态。茎、叶、果各器官的干物质分配指数定义为某一时间 (日) 地上部各器官干物质累积量与地上部干物质累积量的比值。利用线性函数、指数函数、logistic 函数等多种函数对地上部各器官干物质分配指数与生理发育时间及影响因子之间的动态关系进行相关与回归分析, 选择最优拟合曲线函数作为干物质分配指数的最终算法<sup>[24]</sup>。

在干物质分配的研究中, 通常假定同化物首先在 地上部与地下部之间进行分配, 之后以地上部分配量为基础, 再进一步向各器官茎、叶、果之间进行分配, 加工番茄主根入土深度可达 1.5 m, 伸展范围可达 2.5 m 且须根较多<sup>[22]</sup>, 加之种植密度大, 精确采集根样误差较大, 因此, 本研究只探讨地上部各器官干物质的分配动态, 地上部各器官分配指数计算方法如下<sup>[25]</sup>:

$$PIS = WS / WSH \quad (8)$$

$$PIL = WL / WSH \quad (9)$$

$$PIF = WF / WSH \quad (10)$$

式中,  $PIS$ 、 $PIL$ 、 $PIF$  分别为加工番茄地上部干物质向茎、叶、果各器官的分配指数;  $WSH$ 、 $WS$ 、 $WL$ 、 $WF$  分别为加工番茄地上部干物质质量、茎干质量、叶干质量和果实干质量,  $t/hm^2$ 。

作物的生长发育与干物质分配受温光条件的共同影响。本研究采用生理发育时间 ( $PDT$ ) 作为预测指标来预测各个器官干物质分配指数随生育时期的变化。利用试验 I 播期 SD1\_LG 数据, 计算加工番茄各个取样日地上部各器官的分配指数和生理发育时间 ( $PDT$ ), 然后对分配指数与生理发育时间 ( $PDT$ ) 的相互关系进行曲线拟合。

加工番茄地上部干物质向茎、叶、果各器官的分配指数与出苗后累积生理发育时间的关系可用

式 (11) - (13) 表示:

$$PIL = 0.1101 + 2.4436 \exp(0.0430 \times PDT) \\ R^2 = 0.9989, SE = 0.0077 \quad (11)$$

$$PIF = \begin{cases} 0 & PDT < 39 \\ -0.7314 + 2.1005 \times \\ (1 - \exp(-0.0106 \times PDT)) & PDT > 39, \\ R^2 = 0.9893, \\ SE = 0.0251 \end{cases} \quad (12)$$

茎分配指数为:

$$PIS = 1 - PIL - PLF \\ R^2 = 0.9686, SE = 0.0212 \quad (13)$$

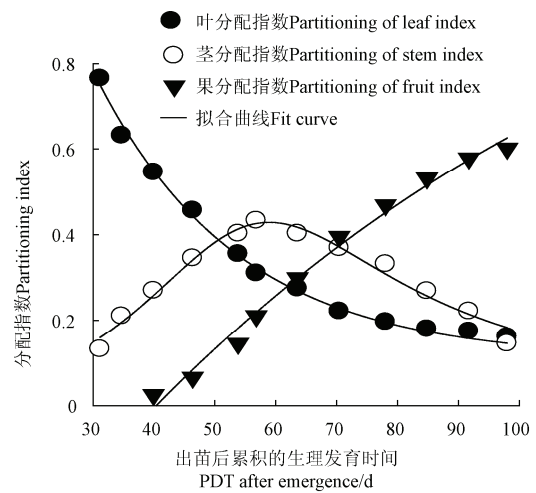


图 1 地上部各器官分配指数与出苗后累积生理发育时间 ( $PDT$ ) 的关系

Fig.1 Relationship between shoot organs partitioning index and accumulated physiological development time after emergence

## 2.5 加工番茄各器官生长的模拟

根据总干质量和分配指数可计算出地上部分各器官的干质量。

$$WS(i) = WSH(i) \times PIS(i) \quad (14)$$

$$WL(i) = WSH(i) \times PIL(i) \quad (15)$$

$$WF(i) = WSH(i) \times PIF(i) \quad (16)$$

式中,  $WS(i)$ 、 $WL(i)$ 、 $WF(i)$  分别为加工番茄第  $i$  天的茎干质量、叶干质量、果实干质量,  $t/hm^2$ ;  $WSH(i)$  为第  $i$  天的地上部干物质质量,  $t/hm^2$ , 由光合生产与干物质积累子模型模拟(另文发表)。

## 2.6 产量的模拟

通过式 (16) 计算出的是所有果实的总干质量, 其中包括已成熟和植株上未成熟果实的干质量, 而加工番茄产量指的是已采收的成熟的果实质量。加工番茄产量的干质量可以通过果干质量与果分配指数的乘积和收获指数求得<sup>[10]</sup>。

收获指数, 又称采收指数 (harvest index,  $HI$ ), 是已收获果实的干质量占果实总干质量的比例。利

用试验 I 播期 SD1\_LG 试验数据确定收获指数(HI)与出苗后累积生理发育时间 (PDT) 之间的相互关系, 可用下式表示:

$$HI=4.8995/[1+\exp(3.6087-1.3751 \times PDT)]^{1/5.6335} \quad (17)$$

$$PDT > 39, R^2=0.9976, SE=0.0176$$

式中, HI 为加工番茄收获指数; PDT>39 为出苗后累积的生理发育时间达到 39 d 后, 加工番茄开始进入坐果期。

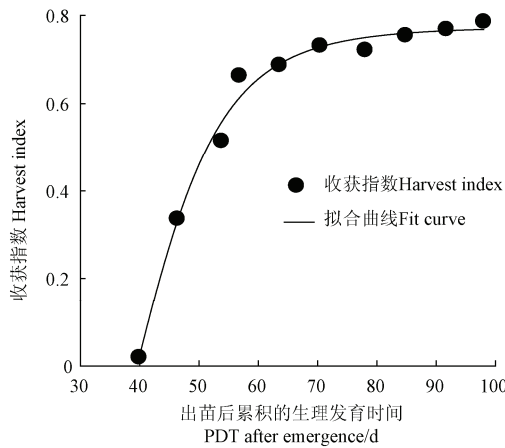


图 2 收获指数与出苗后累积生理发育时间(PDT)的关系  
Fig.2 Relationship between harvest index and accumulated physiological development time after emergence

加工番茄产量干质量可以通过果实干质量与收获指数的乘积求得

$$YD(i)=WF(i) \times HI \quad (18)$$

式中, YD(i)为加工番茄第 i 天产量的干质量, t/hm<sup>2</sup>。

由于加工番茄的产量通常是以果实的鲜质量来计算, 因此, 加工番茄产量可以通过产量的干质量除以果实中干物质含量(dry matter content, DMC)来求得。

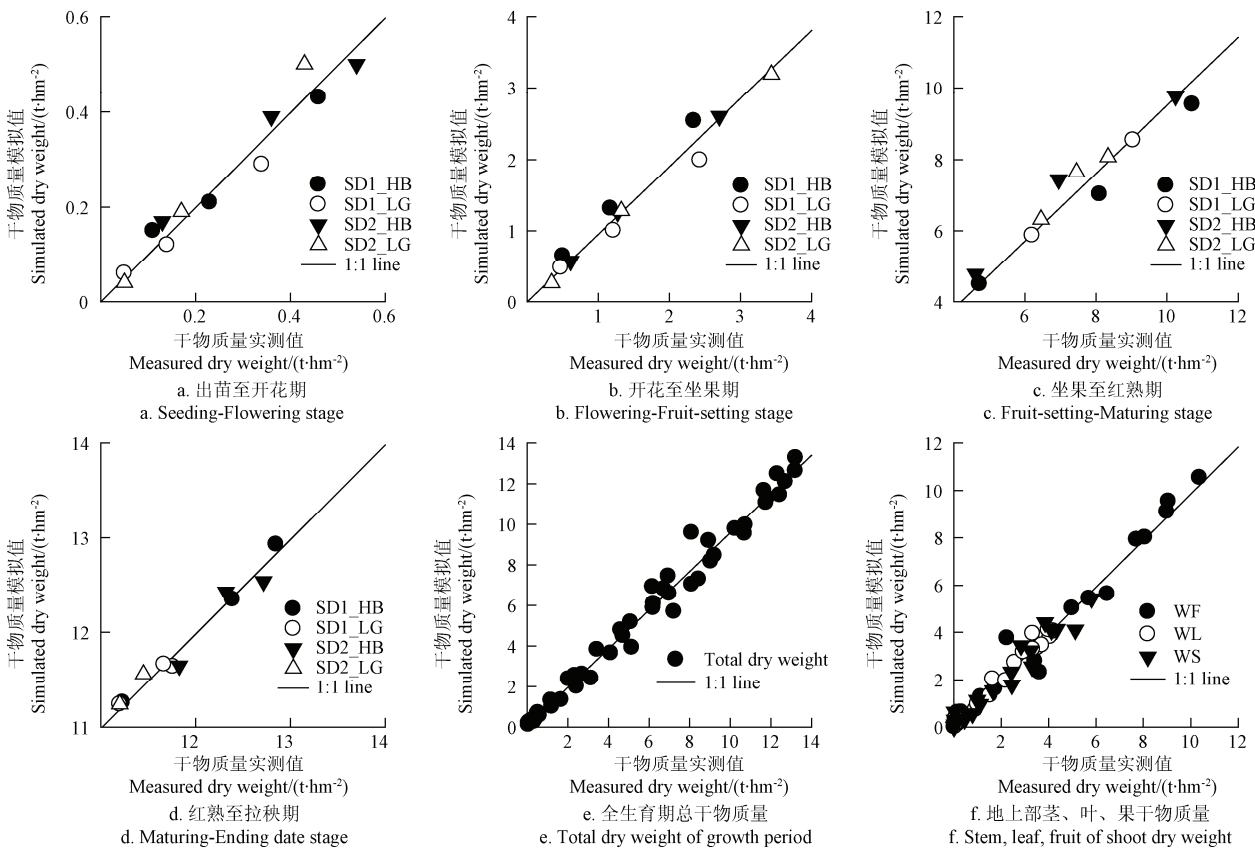
$$Y_{AD}(i)=YD(i)/DMC \quad (19)$$

式中, Y<sub>AD</sub>(i)为加工番茄第 i 天产量, t/hm<sup>2</sup>, 根据前人研究成果, 本文中 DMC 取值 0.05<sup>[26]</sup>。

### 3 结果与分析

#### 3.1 干物质分配的模拟结果

利用大田的温度资料计算出苗后累积的生理发育时间, 再根据式 (3) — (16) 计算出与建模相对独立的试验 II 中播期 SD1\_LG、SD1\_HB 和 SD2\_LG、SD2\_HB 在出苗至开花、开花至坐果、坐果至红熟、红熟至拉秧期各取样日期累积生理发育时间时的干物质量, 全生育期总干物质量(n=52)、茎干质量(n=22)、叶干质量(n=22)、果干质量(n=18), 即为预测值, 并与对应各生育期取样日的实际观测值进行比较, 结果如图 3a—3f 所示。



注: SD1, SD2 表示播期, 分别于 2012 年 4 月 20 日, 5 月 5 日直播大田; LG、HB 分别表示番茄品种里格 87-5 和红霸; SD1\_LG、SD2\_LG; SD1\_HB、SD2\_HB 分别于 8 月 23 日、8 月 30 日; 9 月 4 日、9 月 8 日拉秧。WF、WL、WS 分别表示果、叶、茎的质量。

图 3 加工番茄各生育期干物质量、全生育期总干物质量、地上部各器官干物质量模拟值与实测值的比较(试验 II)  
Fig.3 Comparison of simulated and measured values of different dry weights of processing tomato (Experiment II)

由图3可以看出,模型对不同播期、品种的加工番茄各生育期干物质量、全生育期总干物质量,地上部茎、叶、果干质量的模拟值与实测值符合度较好。基于1:1直线的 $R^2$ 、回归估计标准误 $RMSE$ 及相对误差 $RE$ 对加工番茄各生育期干物质量、全生育期总干物质量及地上部分各个器官干质量的预测值与模拟值之间的符合程度进行检验。模型对加工番茄出苗至开花、开花至坐果、坐果至红熟、红熟至拉秧期干物质量的预测结果与1:1直线间的 $R^2$ 分别为:0.9754、0.9936、0.9840、0.9713; $RMSE$ 和 $RE$ 分别为0.029 t/hm<sup>2</sup>, 11.43%; 0.074 t/hm<sup>2</sup>, 5.09%; 0.250 t/hm<sup>2</sup>, 6.83%; 0.102 t/hm<sup>2</sup>, 5.71% (图3a-3d)。模型对加工番茄全生育期总干物质量、地上部分各器官茎、叶、果干物质量的预测结果与1:1直线间的 $R^2$ 分别为:0.9856, 0.9595, 0.9798, 0.9671; $RMSE$ 和 $RE$ 分别为0.504 t/hm<sup>2</sup>, 8.06%; 0.332 t/hm<sup>2</sup>, 14.62%; 0.200 t/hm<sup>2</sup>, 10.84%; 0.549 t/hm<sup>2</sup>, 18.30% (图3e-3f)。模型对加工番茄开花至坐果期干物质量、果干质量预测误差较其他生育期干物质量大的主要原因是:一方面,本研究中加工番茄进入坐果期的标准是第一穗花坐果后果实果径 $\geq 2$  cm,由于果实果径测量、取样的误差,造成了在开花至坐果期干物质量的预测误差较其他生育期大。另一方面,预测地上部干物质量时本身就会产生一定误差,在模拟地上部果干质量时造成了误差的累积。虽然本模型对加工番茄开花至坐果期干物质量、果干质量较其他生育期和器官干物质量的预测误差大,但总体而言模拟的精确度较高。

### 3.2 产量的预测结果

利用式(20) - (22)计算与建立模型相对独立的试验II中播期SD1\_LG、SD1\_HB; SD2\_LG、SD2\_HB和试验III中播期SD1\_LG、SD1\_SH从开始采收到拉秧,即累积生理发育时间在72~96 d期间对应取样日期的模拟产量( $n=18$ ),并与实测产量进行比较,结果如图4所示。

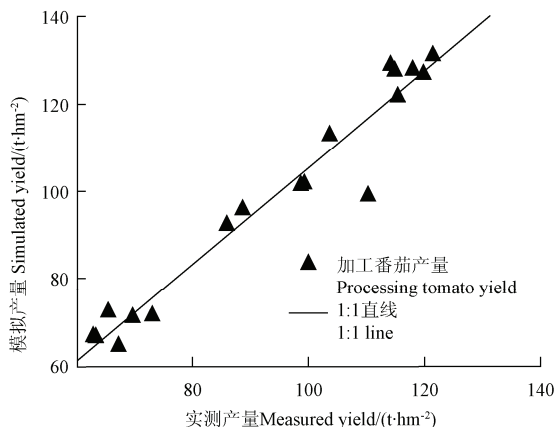


图4 加工番茄产量模拟值与实测值的比较(试验II-III)

Fig.4 Relationship between measured and simulated yield of processing tomato (Experiment II-III)

模型对加工番茄产量的预测结果与1:1直线间的 $R^2$ 、根均方差 $RMSE$ 及相对误差 $RE$ 分别为0.9658、5.806 t/hm<sup>2</sup>、8.07%。从图4可以看出,模型能较好的预测加工番茄的产量。

本模型对不同播期、品种的滴灌加工番茄干物质分配和产量模拟预测的检验结果(图3、4)表明,本模型对不同播期、品种加工番茄地上部干物质分配和产量预测结果与实测值符合度均较高。

## 4 讨论

现有许多作物生长模型都是基于分配系数来预测干物质的分配,根据前人研究,分配系数规律性差,对于环境因子的变化极为敏感,并且受到取样时间、植株大小的影响,从而使模型的预测精度大大降低。肖深根等<sup>[27-28]</sup>基于源库理论及TOMSIM模型对温室番茄干物质分配进行研究,利用打叉,叶片修剪等措施人为的调节番茄营养生长与生殖生长的平衡,适用于温室鲜食番茄干物质分配和产量的预测;朱晋宇等<sup>[29]</sup>构建了基于源库生长单位的温室番茄干物质生产-分配模拟模型,该模型根据单个器官尺度测定的生物量的形态数据反求描述植株生物量生产和分配的隐含参数值,虽然参数容易获取,但模型的适应广度具有一定的局限性,且在模型参数的计算过程中未能量化高温对温室番茄生长发育的迟滞作用。Mary M. Peet等<sup>[30]</sup>研究表明,日均温从25℃上升到29℃,番茄果实质量、果实数量,果实中种子的含量,干物质累积速率均显著降低,对番茄生长发育的影响严重。

加工番茄大田种植,具有自封顶、不整枝、不搭架的特点,开花至坐果期营养生长与生殖生长两旺,同化物在营养器官与生殖器官之间的再分配变异性很大。其干物质分配主要受生育进程和同化产物积累量的影响,生育期主要受相对热效应的影响,而同化产物积累量的多少主要受光照的影响。本模型利用日长时数量化了光周期对滴灌加工番茄生育进程的影响,基于光合生产与干物质积累模型计算干物质积累量,既考虑了热效应对加工番茄生育进程的影响,又考虑了对同化物积累的影响;采用具有明确生物学意义的生理发育时间(PDT)拟合分配指数(PI)和收获指数(HI),预测加工番茄地上部干物质分配和产量的形成;利用品种基本发育因子量化了不同品种、播期的加工番茄完成某一生育阶段的生理发育时间,减少了繁琐参数的输入和模型实用性不强的局限性,大大提高了模型的预测精度。

虽然本研究构建的加工番茄地上部干物质分配与产量预测模型对不同品种、播期的加工番茄地

上部干物质分配动态与产量具有较好的预测性与实用性,但是,本模型是在无水分限制、最优氮素条件下建立的。Ding Kuhn<sup>[31]</sup>指出干物质分配模型需考虑植株 N 素供应水平对干物质分配的影响。氮素如何调节加工番茄地上部各器官干物质分配以及各器官中氮分配,需要在今后的研究当中进一步明确,同时模型还需要在不同生态地点进行验证,以提高模型的广适性与稳定性。

## 5 结 论

本文利用 3 a 大田试验,基于生理发育时间(PDT)拟合分配指数(PI)和收获指数(HI),预测加工番茄地上部干物质分配和产量的形成,并对模型进行了检验,结果表明,模型对不同播期、品种的加工番茄各生育期(出苗至开花、开花至坐果、坐果至红熟、红熟至拉秧期)干物质量,全生育期总干物质量、地上部茎、叶、果干质量的预测结果与 1:1 直线间的  $R^2$  分别为 0.9754、0.9936、0.9840、0.9713; 0.9856; 0.9595、0.9798、0.9671;  $RMSE$  和  $RE$  分别为 0.029 t/hm<sup>2</sup>、11.43%; 0.074 t/hm<sup>2</sup>、5.09%; 0.250 t/hm<sup>2</sup>、6.83%; 0.102 t/hm<sup>2</sup>、5.71%; 0.504 t/hm<sup>2</sup>、8.06%; 0.332 t/hm<sup>2</sup>、14.62%; 0.200 t/hm<sup>2</sup>、10.84%; 0.549 t/hm<sup>2</sup>、18.30%。模型对加工番茄产量的预测结果与 1:1 直线间的  $R^2$  为 0.9658,  $RMSE$  和  $RE$  分别为 5.806 t/hm<sup>2</sup>、8.07%。

模型对于不同播期、品种的加工番茄干物质分配与产量的预测值与模拟值之间符合度较高,表明模型具有较好的预测性和适用性。

### [参 考 文 献]

- [1] 崔金霞, 庞胜群, 刘慧英, 等. 绿洲地区加工番茄生态适应性初步分析[J]. 河北农业科学, 2008, 12(2): 27—29.  
Cui Jinxia, Pang Shengqun, Liu Huiying, et al. Primary analysis on ecological adapt ability of process tomato in oasis regions[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2008, 12(2): 27—29. (in Chinese with English abstract)
- [2] 吴奇锋, 李燕. 浅析新疆绿洲番茄产业的现状及发展对策[J]. 北方园艺, 2010(23): 188—190.  
Wu Qifeng, Li Yan. Preliminary analysis on current situation and countermeasures of tomato industry in Xinjiang Oasis[J]. Northern Horticulture, 2010(23): 188—190. (in Chinese with English abstract)
- [3] 张学军, 赵营, 陈晓群, 等. 氮肥施用量对设施番茄氮素利用及土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 累积的影响[J]. 生态学报, 2007, 27(9): 3761—3768.  
Zhang Xuejun, Zhao Ying, Chen Xiaoqun, et al. Nitrogen fertilizer effects on N recovery and residual soil NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N for greenhouse grown tomato[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(9): 3761—3768. (in Chinese with English abstract)
- [4] 徐飞鹏, 李云开, 任树梅, 等. 新疆棉花膜下滴灌技术的应用与发展的思考[J]. 农业工程学报, 2003, 19(1): 25—27.  
Xu Feipeng, Li Yunkai, Ren Shumei, et al. Investigation and discussion of drip irrigation under mulch in Xinjiang Uygur Autonomous Region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2003, 19(1): 25—27. (in Chinese with English abstract)
- [5] Marcelis L F M. A simulation model for dry matter partitioning in cucumber[J]. Annals of Botany, 1994, 74(1): 43—52.
- [6] Thornley John H M. Modeling shoot: root relation: the only way forward?[J]. Annals of Botany, 1998, 81(2): 165—171.
- [7] Reynolds J F, Chen J L. Modeling whole-plant allocation in relation to carbon and nitrogen supply: coordination versus optimization[J]. Plant and soil, 1997, 185(1): 65—74.
- [8] Wolswinkel P. Phloem unloading and turgor-sensitive transport: factors involved in sink control of assimilate partitioning[J]. Physiological Plantarum, 1985, 65(3): 331—339.
- [9] Heuvelink E. Dry matter partitioning in a tomato plant: One common assimilate pool[J]. Journal of Experimental Botany, 1995, 46(8): 1025—1033.
- [10] Jones J W, Dayan E, Allen L H, et al. A dynamic tomato growth and yield model (TOMGRO)[J]. Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers, 1991, 34(2): 663—672.
- [11] Heuvelink E. Tomato growth and yield: Quantitative analysis and synthesis[J]. PHD Dissertation. The Netherlands: Wageningen Agriculture University, 1996.
- [12] 倪纪恒, 罗卫红, 李永秀, 等. 温室番茄干物质分配与产量的模拟分析[J]. 应用生态学报, 2006, 17(5): 811—816.  
Ni Jiheng, Luo Weihong, Li Yongxiu, et al. Simulation of greenhouse tomato dry matter partitioning and yield prediction[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(5): 811—816. (in Chinese with English abstract)
- [13] 李永秀, 罗卫红, 倪纪恒, 等. 温室黄瓜干物质分配与产量预测模拟模型初步研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(2): 116—121.  
Li Yongxiu, Luo Weihong, Ni Jiheng, et al. Simulation of dry matter partitioning and yield prediction in greenhouse cucumber[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2006, 22(2): 116—121. (in Chinese with English abstract)
- [14] 常丽英, 汤亮, 曹卫星, 等. 水稻地上部单位器官物质分配过程的定量模拟[J]. 中国农业科学, 2008, 41(4): 986—993.  
Chang Liying, Tang Liang, Cao Weixing, et al. Quantitative simulation on dry matter partitioning dynamics of unit organs in Aboveground rice[J]. Scientia

- Agricultura Sinica, 2008, 41(4): 986—993. (in Chinese with English abstract)
- [15] 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 with English abstract)
- [16] 汤亮, 朱艳, 鞠昌华, 等. 油菜地上部干物质分配与产量形成模拟模型[J]. 应用生态学报, 2007, 18(3): 526—530.  
Tang Liang, Zhu Yan, Ju Changhua, et al. Dynamic simulation on shoot dry matter partitioning and yield formation of rapeseed[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(3): 526—530. (in Chinese with English abstract)
- [17] 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 Aihuang, 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 with English abstract)
- [18] 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 Jialing, Wang Yining, 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 with English abstract)
- [19] 张立祯, 曹卫星, 张思平, 等. 基于生理发育时间的棉花生育期模拟模型[J]. 棉花学报, 2003, 15(2): 97—103.  
Zhang Lizhen, Cao Weixing, Zhang Siping, et al. Simulation model for cotton development stages based on physiological development Time[J]. Cotton Science, 2003, 15(2): 97—103. (in Chinese with English abstract)
- [20] 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): 1544—1550.  
Wang Jichuan, Ma Fuyu, Fen 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): 1544—1550. (in Chinese with English abstract)
- [21] 王荣栋, 曹连莆, 张旺锋, 等. 作物高产理论与实践[M]. 中国农业出版社, 2007: 232—234.  
Wang Rongdong, Cao LianPu, Zhang Wangfeng, et al. Theory and practice of crop high yield[M]. China Agricultural Publishing House, 2007: 233—234. (in Chinese with English abstract)
- [22] 朱艳, 曹卫星, 戴廷波, 等. 小麦目标产量设计及适宜品种选择的动态知识模型[J]. 应用生态学报, 2004, 15(2): 231—236.  
Zhu Yan, Cao Weixing, Dai Tingbo, et al. A dynamic knowledge model for wheat target yield design and variety selection[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(2): 231—236. (in Chinese with English abstract)
- [23] Goudriaan J, Van Laar H H. Modelling potential crop growth processes: textbook with exercises[M]. Springer, 1994.
- [24] 孟亚利, 曹卫星, 柳新伟, 等. 水稻地上部干物质分配动态模拟的初步研究[J]. 作物学报, 2004, 30(4): 376—381.  
Meng Yali, Cao Weixing, Liu Xinwei, et al. A preliminary study of simulation on shoot dry matter partitioning in rice[J]. Acta Agronomica Sinica, 2004, 30(4): 376—381. (in Chinese with English abstract)
- [25] Heuvelink E. Dry matter partitioning in tomato: validation of a dynamic simulation model[J]. Annals of Botany, 1996, 77(1): 71—80.
- [26] De Koning A N M. Growth of tomato crop: Measurement for model validation[J]. Act a Hort. 1993, 328: 141—146.
- [27] 肖深根, 周朴华, Ep Heuvelink, 等. 基于库调节的温室番茄干物质生产与分配[J]. 热带作物学报, 2005, 24(4): 24—27.  
Xiao Shengen, Zhou Puhua, Ep Heuvelink, et al. Study on the production and distribution of dry matter based on sink regulation in greenhouse tomato[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2005, 24(4): 24—27. (in Chinese with English abstract)
- [28] 肖深根, 周朴华, Ep Heuvelink, 等. 日光室番茄同步叶片修剪对干物质生产和分配影响的模拟分析[J]. 中国农业科学, 2006, 39(10): 2154—2158.  
Xiao Shengen, Zhou Puhua, Ep Heuvelink, et al. Simulation analysis of the effects of dry matter production and partitioning in greenhouse tomato synchronous leaf pruning[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2006, 39(10): 2154—2158. (in Chinese with English abstract)
- [29] 朱晋宇, 温祥珍, 李亚灵, 等. 基于源库生长单位的温室番茄干物质生产-分配模拟[J]. 生态学报, 2009, 29(12): 6527—6533.  
Zhu Jinyu, Wen Xiangzhen, Li Yaling, et al. Simulation of dry matter production and partitioning based on source-sink growth unit in greenhouse tomato[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(12): 6527—6533. (in Chinese with English abstract)
- [30] Peet M M, Willit D, Gardner R, et al. Response of ovule development and post-pollen production processes in male-sterile tomato to chronic sub acute high temperature stress[J]. Journal of Experimental Botany, 1997, 48(1): 101—111.
- [31] Michael Dingkuhn. Modelling concepts for the phenotypic plasticity of dry matter and nitrogen partitioning in rice [J]. Agricultural Systems, 1996, 52(2): 383—397.



## Simulation of shoot dry matter partitioning and yield prediction of processing tomato

Wang Xin<sup>1</sup>, Ma Fuyu<sup>1,2</sup>, Diao Ming<sup>1,2\*</sup>, Fan Hua<sup>1</sup>, Cui Jing<sup>1</sup>, Jia Biao<sup>1</sup>, He Haibing<sup>1</sup>, Liu Qi<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:** At present, Xinjiang produces about 90% of total processing tomato production in China, and which has become the most important and the largest producer of processing tomatoes in China. Light, heat, water, and soil are the vital components of special ecological factors, ensuring high quality, high yield, and high efficiency of processing tomatoes in Xinjiang. Compared with traditional furrow irrigation, one of the new irrigation strategies of crop production is drip irrigation. The introduction of drip irrigation in Xinjiang has provided the means to increase crop production and water use efficiency. When drip irrigation was used to grow processing tomatoes in Xinjiang, its yield and quality far exceeded the average level in China. However, no previous studies have examined the development and dry matter partitioning of Xinjiang's drip irrigated processing tomatoes. Simulation models of crop growth and production provide a widely accepted tool for assessing agricultural production opportunities in different agro-ecological zones in response to weather and management. Thus, the aim of the present study was to develop model for the growth and production of drip irrigated processing tomatoes in Xinjiang.

Field experiments were conducted in three subsequent years in Shihezi, Xinjiang, China. The relationships between the partitioning indexes of organ dry matter and physiological development time (*PDT*) were systematically studied with the experiment of different sowing dates and varieties. And simulation models for shoot dry matter partitioning and yield in drip irrigated processing tomato were developed based on a partitioning index (*PI*) and a harvest index (*HI*) in which the *PI* of leaves and *the HI* were the functions of *PDT*, which were also altered by relative thermal effectiveness (*RTE*), relative photoperiod effectiveness (*RPE*), and intrinsic development factor (*IDF*). Model validation with three years of weather and independent crop growth data showed that the growth and yield of processing tomatoes are simulated satisfactorily.  $R^2$ , root mean square error (*RMSE*) and relative estimation error (*RE*) of simulated and observed dry matter under four different growing stages (emergence to flowering, flowering to fruit-setting, fruit-setting to maturing, and maturing to ending date), total dry weight of whole growth period, stem dry weight, leaf dry weight, and fruit dry weight were 0.9754, 0.029t/hm<sup>2</sup>, 11.43%; 0.9936, 0.074t/hm<sup>2</sup>, 5.09%; 0.9840, 0.250t/hm<sup>2</sup>, 6.83%; 0.9713, 0.102t/hm<sup>2</sup>, 5.71%; 0.9940, 0.504t/hm<sup>2</sup>, 8.06%; 0.9629, 0.332t/hm<sup>2</sup>, 14.62%; 0.9828, 0.200t/hm<sup>2</sup>, 10.84%; 0.9585, 0.549t/hm<sup>2</sup>, and 18.30%. The  $R^2$ , *RMSE*, and *RE* between the predicted and the measured yield based on the 1:1 line were 0.9658, 5.806t/hm<sup>2</sup>, and 8.07%, respectively, which indicated that the model could predict well the dynamic accumulation of dry matter in different organs under diverse conditions of a drip irrigated processing tomato. We concluded that this model provide a tool to assess development, growth and production of processing tomatoes in various ecological zones in response to temperature and incoming radiation.

**Key words:** computer simulation, models, forecasting, drip irrigation, processing tomato, dry matter partitioning, yield formation

(责任编辑: 信世强)