

刘志刚, 徐勤超. 基于辐热积的温室微灌基质栽培生菜生长模拟[J]. 江苏农业学报, 2016, 32(6): 1315-1319.  
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2016.06.019

## 基于辐热积的温室微灌基质栽培生菜生长模拟

刘志刚, 徐勤超

(华中农业大学工学院, 湖北 武汉 430070)

**摘要:** 为探明不同栽培方式对生菜生长的影响, 采用滴灌、微喷灌 2 种灌溉方式和醋糟与草炭复配而成的 4 种栽培基质, 根据生菜对温度和有效光合辐射的响应, 以光温因子-辐热积(TEP)为驱动变量, 建立不同灌溉方式和不同基质配方条件下的温室基质栽培生菜营养生长模拟模型, 模型包括单株生菜叶面积模型、干物质累积模型和单株生菜产量模型。结果显示, 不同灌溉方式下可用同一个模拟模型, 相同灌溉方式下, 不同基质栽培生菜特征值差异不显著( $P>0.05$ ), 可用同一组模型参数来表示。运用重复试验对所建模型进行验证, 滴灌和微喷灌条件下各基质处理的生菜叶面积、干物质和产量预测值与实际值之间的决定系数( $R^2$ )均大于 0.94, RMSE 最大分别为 71.6  $\text{cm}^2$ 、0.32 g、10.67 g, 表明所建立的生菜营养生长模拟模型具有较高的预测精度, 可为温室基质栽培生菜产量预测提供理论依据。

**关键词:** 辐热积; 生菜; 基质; 动态模型;

中图分类号: S636.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-4440(2016)06-1315-05

## A simulation for lettuce growth and development in greenhouse based on product of thermal effectiveness and photosynthetically active radiation

LIU Zhi-gang, XU Qin-chao

(College of Engineering, Huazhong Agriculture University, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** To find out the effect of cultivation methods on vegetable growth and development, the lettuce leaf area, dry matter production and fresh production were studied in four substrates under drip and micro-sprinkler irrigation. Based on the experimental data of the lettuce and the product of thermal effectiveness and PAR to establish the simulation models of leaf area, dry matter production and fresh production. The result indicated that lettuce characters in different substrates were no significantly different ( $P>0.05$ ) under the same irrigation method. These data of repeat test were employed to verify the establishing models. The maximum root mean square error between simulated and observed values of lettuce leaf area, dry matter production and fresh production under drip and micro-sprinkler irrigation were 71.6  $\text{cm}^2$ , 0.32 g and 10.67 g, respectively.

**Key words:** product of thermal effectiveness and PAR; lettuce; substrate; dynamic model

收稿日期: 2015-12-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(51509098); 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(2662015BQ017、2662015BQ051)

作者简介: 刘志刚(1985-), 男, 吉林人, 博士, 讲师, 主要从事农业废弃物资源化利用研究。(E-mail) liuzg@mail.hzau.edu.cn

通讯作者: 徐勤超, (E-mail) hlxcq@mail.hzau.edu.cn

近年来温室基质栽培蔬菜发展迅速<sup>[1-2]</sup>, 与之有关的蔬菜生长模型, 特别是温室小气候集约管理模型研究进展较快<sup>[3-4]</sup>, 常用的蔬菜生长发育模拟方法为有效积温法(GDD)<sup>[5]</sup>, 但在温室作物生产中, 因温室内存在保温设施以及加温和降温措施使室内

温度与太阳辐射不一定同步,且秋冬季温室内昼夜温度变化较大,此时用有效积温法预测作物发育,误差往往较大<sup>[6-7]</sup>,且基质特性和温室灌溉方式对基质水分迁移影响较大,进而影响蔬菜生长发育,而与此相关的作物模型却少见报道。

因此,本研究在借鉴前人先进建模理论及黄瓜和茄子等作物形态模拟研究过程中形成的方法体系和基本框架,设定适宜的水肥,分析单株生菜叶面积、干物质与光温因子-辐热积(*TEP*)之间的关系,借助数学建模和统计分析方法,建立基于不同灌溉方式和不同基质配方的温室基质栽培单株生菜叶面积增长模型、干物质累积动态模型和单株生菜产量模型,并利用重复试验数据对模型进行检验。模型的构建可为中国温室基质栽培生菜产量预测提供依据和数据支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料与试验设计

试验在华中农业大学自控玻璃温室中进行,试验栽培基质为纯醋糟及其与泥炭和蛭石的复配基质(表1),采用基质槽栽培,槽长17.5 m、宽0.8 m、深0.3 m,共进行3季生产试验,供试生菜品种为意大利耐抽蔓生菜,穴盘育苗,生菜5叶时移植到基质栽培槽,栽培密度为1 hm<sup>2</sup> 9.33×10<sup>3</sup>株。采用滴箭滴灌(TD)和微喷灌(TP)2种灌溉方式,滴箭流量为1 L/h,微喷灌流量为6 L/h,微喷灌半径为0.4 m,灌溉时间依据天气情况和基质含水量决定,当0~12 cm深基质含水量低于该基质田间最大持水量50%时进行灌溉<sup>[8]</sup>。试验设4种基质处理,2种灌溉方式,3次重复,各试验处理其他管理措施均相同。

### 1.2 试验方法

1.2.1 叶面积测定 试验期间每7 d从各槽中选取长势一致的生菜3株,然后将叶片放在便携式叶面积测定仪上进行测量,记录叶面积。

1.2.2 产量及干物质质量测定 试验期间每7 d从各槽中选取长势一致的生菜3株,称量地上部分鲜质量,然后在烘箱中105℃杀青20 min,75℃烘干至恒质量,称量干质量(精确到0.01 g)。

1.2.3 温室环境参数测定 试验过程中用温湿度传感器和光量子传感器自动监测温室内环境参数,采集温室内生菜冠层上方的空气温度、湿度和光合有效辐射,采集频率为1 h 1次。

表1 试验基质物理特性

Table 1 Physical properties of substrates

基质	容重 (g/cm <sup>3</sup> )	总孔隙度 (%)	通气孔隙度 (%)	持水孔隙度 (%)
T <sub>1</sub>	0.120	71.5	41.0	30.5
T <sub>2</sub>	0.164	72.8	25.2	47.6
T <sub>3</sub>	0.159	74.1	28.2	45.9
T <sub>4</sub>	0.161	80.1	28.8	51.3

T<sub>1</sub>:醋糟; T<sub>2</sub>:醋糟:泥炭=1:1; T<sub>3</sub>:醋糟:泥炭=3:1; T<sub>4</sub>:醋糟:泥炭:蛭石=2:1:1。

## 2 模型建立及验证

对试验数据分析可知,随着生理辐热积的累计,生菜营养生长阶段地上部分的增长是一个由慢到快的生长过程,综合考虑光温因子对生菜生长的影响,以光温因子-辐热积(*TEP*)为驱动变量,以测定的生菜参数为应变量做散点图<sup>[9]</sup>,并选择指数方程进行回归分析,得到不同灌溉方式、不同光温和不同基质栽培条件下生菜动态生长模型。

### 2.1 生菜叶面积模型

叶面积主要影响植物的光合作用、植株生长和产量形成,由叶片的数量和大小决定。温度和辐射是影响生菜叶片生长的2个重要因子,温度对生菜生长的影响用热效应来表示,辐射对生菜生长的影响用辐射效应来表示<sup>[10]</sup>,在一定栽培条件下,将热效应(*TE*)与光合有效辐射的乘积定义为辐热积(*TEP*)并作为自变量,建立辐热积与生菜单株叶面积的动态关系模型<sup>[7]</sup>。热效应由相对热效应(*RTE*)累积得出。相对热效应(*RTE*)定义为作物在实际温度下生长1 d相当于在最适温度下生长1 d的比例<sup>[6-9]</sup>。温度与相对热效应的关系可用线性函数[公式(1)]描述。

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

式中  $T_b$  为发育下限温度;  $T_m$  为发育上限温度;  $T_{ob}$  为发育最适温度下限;  $T_{ou}$  为发育最适温度上限。根据文献[11]、[12]、[13]中生菜生长发育期知识,本研究设定生菜营养生长阶段的3基点温度见表2。

表2 生菜生长3基点温度

Table 2 The base, optimum and maximum temperatures of lettuce

生育阶段	温度参数(°C)			
	$T_b$	$T_{ob}$	$T_{ou}$	$T_m$
营养生长期	5	15	30	40

温度和辐射对生菜叶面积的影响可用累积辐热积(TEP)来度量,累积辐热积由每日相对辐热积(RTEP)累积而得<sup>[7]</sup>,计算公式为

$$TEP = \sum RTEP \quad (2)$$

$$RTEP = \sum_{i=1}^{24} [(RTE_i \times PAR_i \times 3600) / 10^6] \quad (3)$$

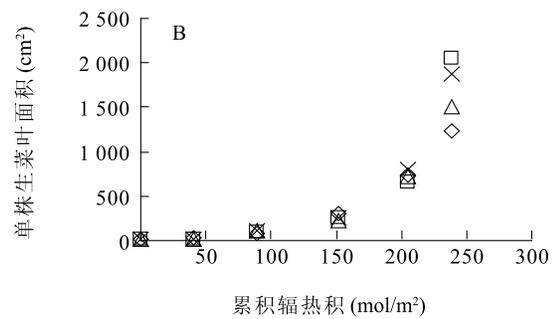
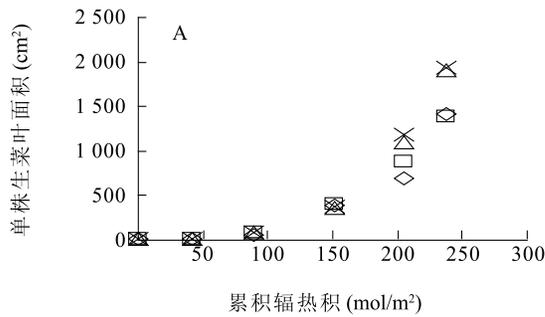
式中 RTEP 为每日相对辐热积[MJ/(m<sup>2</sup>·d)];

$RTE_i$ :第*i*小时内的平均相对热效应; $PAR_i$ :第*i*小时平均光合有效辐射[J/(m<sup>2</sup>·s)];TEP:累积辐热积(MJ/m<sup>2</sup>)。

不同灌溉方式下各基质栽培生菜单株叶面积与累积辐热积之间的关系见图1,定植后生菜单株叶面积与累积辐热积之间呈明显指数函数关系。利用SPSS软件对温室内测得的试验数据进行回归分析,得到不同灌溉方式和不同基质栽培下,以累积辐热积为自变量的生菜单株叶面积模拟模型:

$$LA = ae^{bTEP} \quad (4)$$

式中 LA:生菜单株叶面积(cm<sup>2</sup>);a、b为回归系数。



◇ T1; □ T2; △ T3; × T4

A:微喷灌;B:滴灌。T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub>、T<sub>4</sub>见表1。

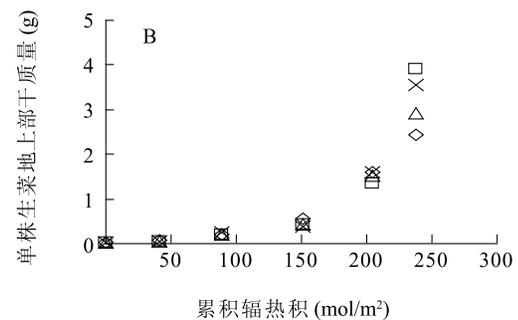
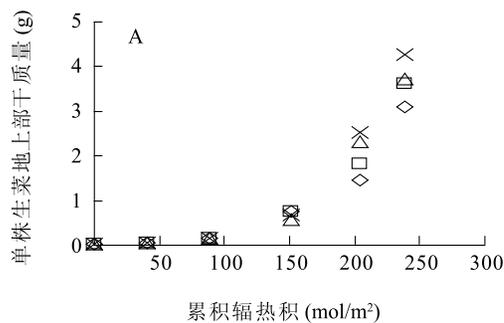
图1 生菜单株叶面积与累积辐热积的关系

Fig.1 Relationship between leaf area per plant and accumulated product of thermal effectiveness and PAR of lettuce

## 2.2 生菜干物质累积模型

利用生菜地上部干质量通过公式(1)~(3)计算得到定植后生菜地上部干质量与累积辐热积拟合曲线(图2),由图2可见,在生菜营养生长阶段,随着累

积辐热积的增加,单株生菜地上部干物质累积呈“慢-快”的变化趋势,故本研究采用指数方程替代机理模型,克服了目前干物质累积机理模型参数较多且过程复杂的缺点,便于温室自动控制应用和实际生产。



◇ T1; □ T2; △ T3; × T4

A:微喷灌;B:滴灌。T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub>、T<sub>4</sub>见表1。

图2 生菜单株地上部干质量与累积辐热积的关系

Fig.2 Relationship between dry weight per plant and accumulated product of thermal effectiveness and PAR of lettuce

利用 SPSS 软件对温室内测得的试验数据进行回归分析,得到不同灌溉方式和基质栽培下,以累积辐射热积为自变量的生菜单株干物质动态累积模型:

$$DW = ce^{dTEP} \quad (5)$$

式中  $DW$ : 单株生菜地上部干质量;  $c$ 、 $d$ : 回归系数。

### 2.3 生菜产量模型

对于生菜而言,其产量即鲜质量,根据生菜营养生长阶段地上部含水量基本恒定原则,以及生菜干质量与鲜质量的关系(图3),可通过公式(6)模拟生菜产量。

$$Yield = DW/0.03 \quad (6)$$

式中,  $Yield$ : 生菜产量;  $DW$ : 生菜模拟干质量。

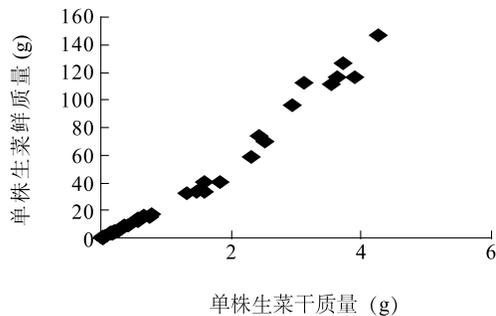


图3 生菜单株干质量与鲜质量的关系

Fig. 3 Relationship between dry weight and fresh weight per plant of lettuce

### 2.4 模型参数确定

试验每次采样的生菜叶面积和干质量均存在一定差异,这主要是由栽培基质和灌溉方式不同引起的,灌溉方式是通过影响模型参数来影响模型的,并不影响生菜正常生长规律和模型结构,因此,滴灌和微喷灌情况下可以用同一个预测模型<sup>[14]</sup>。对不同采样期的生菜叶面积和干质量进行方差分析,发现同一灌溉方式下,最小的  $P$  值均大于 0.05 (表3),没有显著差异,可以忽略基质配方对模型参数的影响,该情况下生菜生长可用同一组模型参数来表示。

将4种基质、2种灌溉方式下获得的生菜不同生长时期干质量和辐射热积按公式(4)和(5)拟合得到模型参数(表4)。

表3 方差分析  $P$  值

Table 3  $P$  values of analysis of variance

灌溉方式	$P$ 值	
	叶面积	干质量
滴灌	0.996	0.992
微喷灌	0.973	0.980

表4 叶面积和干质量模型参数

Table 4 Model parameters of leaf area and dry weight

灌溉方式	叶面积参数		干质量参数	
	$a$	$b$	$c$	$d$
滴灌	10.740	0.021	0.024	0.020
微喷灌	9.738	0.022	0.020	0.022

### 2.5 模型验证

采用国际上模型检验常用的统计方法(回归估计标准误差,  $RMSE$ )对模拟值与观察值之间的符合度进行统计分析。 $RMSE$  值越小,表明模拟值与实际值的一致性越好,模型的模拟结果越精确可靠<sup>[15]</sup>。

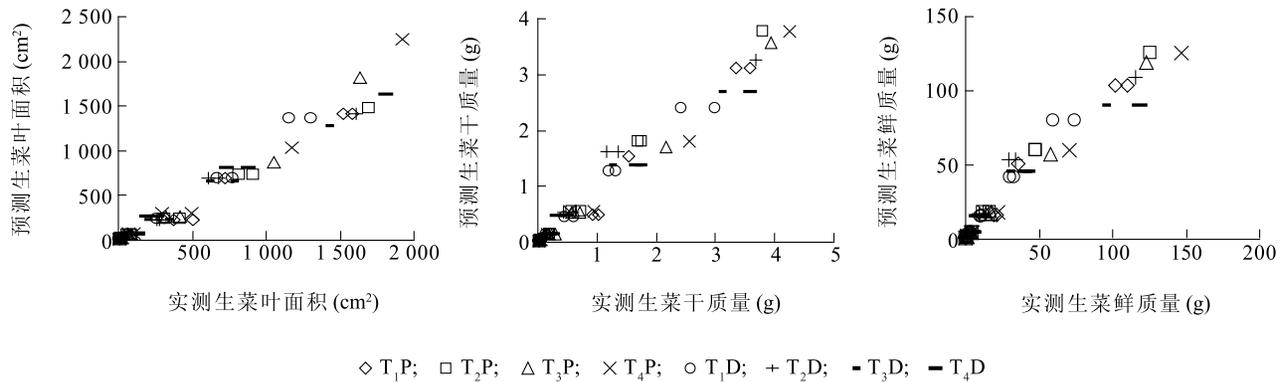
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (OBS_i - SIM_i)^2}{n}} \quad (7)$$

式中  $OBS_i$  为实际观测值;  $SIM_i$  为模型预测值;  $n$  为样本容量。

通过对试验数据分析可知,各基质栽培处理生菜生长后期叶面积和干质量差异较大,为提高模型预测准确度,分别采用重复试验资料对各模型进行检验,结果表明,滴灌和微喷灌条件下各基质处理的生菜叶面积、干物质和产量的预测值与实际值之间相关性较好,变化趋势一致(图4),基于 1:1 直线的决定系数 ( $R^2$ ) 均大于 0.94,  $RMSE$  最大分别为 71.6  $cm^2$ 、0.32 g、10.67 g,说明该模型预测效果较好。

## 3 讨论

本研究根据不同的灌溉方式和不同基质栽培生菜的生长发育情况,建立了以光温因子-辐射热积 ( $TEP$ ) 为变量的生菜叶面积、生菜鲜质量和生菜干质量模拟模型。滴灌和微喷灌情况下可以用同一个预测模型。同一灌溉方式下,不同采样期的生菜叶面积和干质量的方差分析结果表明可以忽略基质配



T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub>、T<sub>4</sub>同表1。P表示喷灌;D表示滴灌。

图4 生菜叶面积、干质量和鲜质量预测值和实际值关系

Fig. 4 Relationship between simulated and measured leaf area, dry weight and fresh weight of lettuce

方对模型参数的影响。重复试验结果表明,滴灌和微喷灌条件下各基质处理的生菜叶面积、干物质和产量预测值与实际值之间的决定系数( $R^2$ )均大于0.94, RMSE最大分别为71.6 cm<sup>2</sup>、0.32 g、10.67 g,模型能较好地预测生菜营养生长阶段的生长情况。

由于本研究试验条件限制,尚未考虑水肥条件和栽培管理措施对温室生菜生长的影响,以后需在模型中加入水肥亏缺函数和管理措施影响因子,进一步提高模型的预测精度和普遍适用性。

参考文献:

[1] 李萍萍,李冬生. 温室生态经济系统分析[M]. 北京:科学出版社,2011.  
 [2] MICHAEL R, HEINRICH L. Soilless culture theory and practice [M]. London:Elsevier Science, 2008:6-7.  
 [3] 高志奎,高荣孚,何俊萍,等. 日光温室茄子光合的数学模型模拟研究[J]. 河北农业大学学报, 2005,28(2):44-47.  
 [4] 李楠,薛晓萍,张继波,等. 日光温室黄瓜低温冷害预警模型构建技术研究[J]. 山东农业科学,2015,47(9):106-111.  
 [5] 徐刚,张昌伟,李德翠,等. 温室长季节栽培番茄发育动态模拟模型的研究[J]. 农业工程学报,2005,21(S):243-246.

[6] 刘淑云,古卫刚,封文杰,等. 基于生理发育时间的日光温室茄子发育模拟模型[J]. 生物数学学报,2010,25(4):751-757.  
 [7] 李永秀,罗卫红,倪纪恒,等. 用辐热积法模拟温室黄瓜叶面积、光合速率与干物质产量[J]. 农业工程学报,2005,21(12):131-135.  
 [8] 刘志刚,王纪章,徐云峰,等. 基质配方和灌溉方式对生菜根系和产量的影响[J]. 农业机械学报,2014,45(2):56-160.  
 [9] 李青林,毛罕平,李萍萍. 黄瓜地上部分形态-光温相应模拟模型[J]. 农业工程学报,2011,27(9):122-127.  
 [10] 杨再强,黄海静,金志凤,等. 基于光温效应的杨梅生育期模型的建立与验证[J]. 园艺学报,2011,38(7):1259-1266.  
 [11] 严妍. 温度和光周期对水培生菜生长的影响及生长模型初探[D]. 武汉:华中农业大学,2008.  
 [12] 张蕊. 水培生菜栽培技术[J]. 北方园艺,2011(19):53-54.  
 [13] BURNS I G. Derivation of a dynamic model of the kinetics of nitrogen uptake throughout the growth of lettuce; calibration and validation[J]. Journal of Plant Nutrition,2008,31(8):1440-1460.  
 [14] 刘志刚,王纪章,徐云峰,等. 不同灌溉方式生菜根系生长模型研究[J]. 农业机械学报,2014,45(4):284-288.  
 [15] 胡立勇,刘铁梅,郑小林,等. 油菜发育过程及生育期机理模型的研究[J]. 中国油料作物学报,2004,2(2):51-55.

(责任编辑:陈海霞)