

## 3种光温指标在模拟设施黄瓜生长发育中的应用与比较

李叶萌,李冉,杨再强

(南京信息工程大学应用气象学院,江苏南京 210044)

**摘要:**2011年9~12月间,以黄瓜“津优1号”(Cucumis sativus linn. cv. Jingyou1)为试材,在南京信息工程大学试验温室进行分批栽培试验,测定温室气象要素和作物数据,分别用活动积温(AAT, Active accumulated temperature)、有效积温(EAT, Effective accumulated temperature)和辐热积(TEP, Thermal effectiveness and photosynthesis active radiation)3种光温指标模拟温室黄瓜植株叶面积、株高和生育期,并利用独立试验数据对各个模型进行验证。结果表明:用辐热积指标分别模拟黄瓜各生育期(出苗期、开花期、坐果期、果实膨大期、成熟期)距播种日期的天数,其相对标准误差(RMSE)分别为0 d, 3 d, 4 d, 5 d, 4 d, 小于活动积温法(1 d, 6 d, 8 d, 11 d, 11 d)和有效积温法(0 d, 4 d, 3 d, 8 d, 10 d)。利用辐热积指标模拟叶面积和株高的相对标准误差(RMSE)分别为43.0 cm<sup>2</sup>和4.3 cm, 决定系数(R<sup>2</sup>)分别为0.98和0.98, 而用活动积温 and 有效积温指标模拟黄瓜单株叶面积的相对标准误差(RMSE)分别为61.3 cm<sup>2</sup>和54.6 cm<sup>2</sup>, 模拟株高的相对标准误差(RMSE)分别为9.8 cm和7.5 cm。比较结果显示利用辐热积指标模拟温室黄瓜生育期、株高和叶面积的精度明显高于活动积温 and 有效积温, 该研究为温室黄瓜生长指标和各生育期的预测以及环境调控提供参考。

**关键词:**黄瓜; 生长发育模拟; 活动积温; 有效积温; 辐热积

**文章编号:**1006-7639(2013)-03-0523-07 doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2013)-03-0523

**中图分类号:**S162.5

**文献标识码:**A

### 引言

黄瓜是我国主要蔬菜作物之一<sup>[1]</sup>。温室黄瓜生长发育与温度和光照条件关系密切,而作物生长发育模拟是环境调控的前提。关于作物模拟模型有较多的报道,de Wit<sup>[2]</sup>首先提出作物生长模拟模型,尔后在各国均得到广泛的发展和运用。作物模拟模型着重对作物生长发育过程及其与环境的关系进行定量描述和预测<sup>[3]</sup>,较为著名的有荷兰建立的 Wageningen 系列模型(包括 ELCROS 模型<sup>[4]</sup>、BACROS 模型<sup>[5]</sup>等)、美国建立的 DSSAT 系列模型(包括 CERES 和 CROPGRO 模型)<sup>[6-9]</sup>,澳大利亚建立的 APSIM 模型<sup>[10]</sup>,和以色列建立的 TOMGRO 模型等,其中 TOMGRO 模型为世界代表性温室作物模型之

一<sup>[11]</sup>,这些作物模型均以温度和光照作为模型的输入因子。中国在借鉴国外作物模型的基础上,也进行了相关研究并取得了一定进展。李建民利用有效积温指标和 Logistic 方程式建立了甜瓜幼苗株高、茎粗、主根长度模型<sup>[12]</sup>;王会军建立了基于积温的温室黄瓜生长模型<sup>[13]</sup>;李向岭等探索了玉米关键生育期对积温的需求及叶面积系数与积温的关系<sup>[14]</sup>;李立昆等建立了基于有效积温的甜瓜果实发育模型<sup>[15]</sup>;李永秀等利用辐热积指标对温室番茄的生长发育模拟模型进行了研究讨论,建立了对番茄叶面积指数、叶干重等的预测模型<sup>[16]</sup>;杨再强等建立了以生理辐热积(PTEP)为尺度的温室标准切花菊发育模型<sup>[17]</sup>。目前作物生长发育模拟归纳起来有3种光温指标:活动积温(AAT, Active accumulated

收稿日期:2013-02-07; 改回日期:2013-04-17

基金项目:南京信息工程大学2012年校实验室开放项目、公益性行业(气象)科研专项(GYHY(QX)201206024和GYHY(QX)201006028)、江苏省科技支撑项目“江苏省设施农业气象灾害预警及防御技术研究”(BE2010734)及江苏高校优势学科建设工程(PAPD)项目共同资助

作者简介:李叶萌(1990-),女,汉族,河北沧州人,本科,研究方向为应用气象. E-mail:774847585@qq.com

通讯作者:杨再强(1967-),男,汉族,四川安岳人,博士生导师,教授,研究方向为设施农业气象灾害. E-mail:yzq@nuist.edu.cn

temperature)、有效积温(EAT, Effective accumulated temperature)和辐热积方法(TEP, Thermal effectiveness and photosynthesis active radiation), 本文通过对设施黄瓜“津优1号”生长发育指标的观测, 利用3种光温指标模拟其生长发育, 通过比较不同模拟方法的模拟精度, 为温室黄瓜生长发育模拟模型的选择提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验于2011年9~12月在南京信息工程大学人工玻璃温室中进行, 温室为东西走向, 长25 m, 宽18 m, 顶高4.5 m, 肩高3.8 m, 基质栽培, 基质为蛭石: 椰糠(体积比为3:1), 利用营养液灌溉, 供试品为“津优1号”(Cucumis sativus linn. cv. Jingyou1), 定植日期分别为2011年9月10日、10月10日、11月10日, 苗木规格为株高20 cm, 叶片数3片。定植株行距1 m×1 m, 常规化管理。

### 1.2 测定项目与方法

试验期间每天对黄瓜发育状况进行观测, 并记录各个生育阶段的起始日期。定植后选取长势相当

的3株进行定株观测记录, 观测每隔5 d进行1次。观测指标包括株高、各节点叶片的叶长和叶宽。其中株高为地面到顶的拉直长度, 株高、叶长和叶宽均采用卷尺测量。

### 1.3 气象要素的测定

试验温室气象数据利用 Watchdog 2000 (Campbell Scientific, USA) 自动采集。仪器采集离地1.5 m的气温、太阳辐射、相对湿度等项目, 采集频率为每10 s 1次, 存储每30 min的平均值。试验期间温室环境气象数据如图1, 2011年9~12月室内的日平均气温由24.2℃下降到12.8℃, 呈波动式下降, 在此期间所达到的最低气温为8.8℃, 最高气温为30.7℃。日总辐射量最大值为9.3 MJ, 最小值为0.3 MJ, 11、12月份比9、10月有所减少。室内日均相对湿度在55%~110%波动, 试验期间相对湿度的变幅有所减小。CO<sub>2</sub>浓度呈上升趋势。

### 1.4 数据处理

用Microsoft Office Excel软件和matlab软件对原始数据进行处理、画图, 用DPS软件进行模拟。

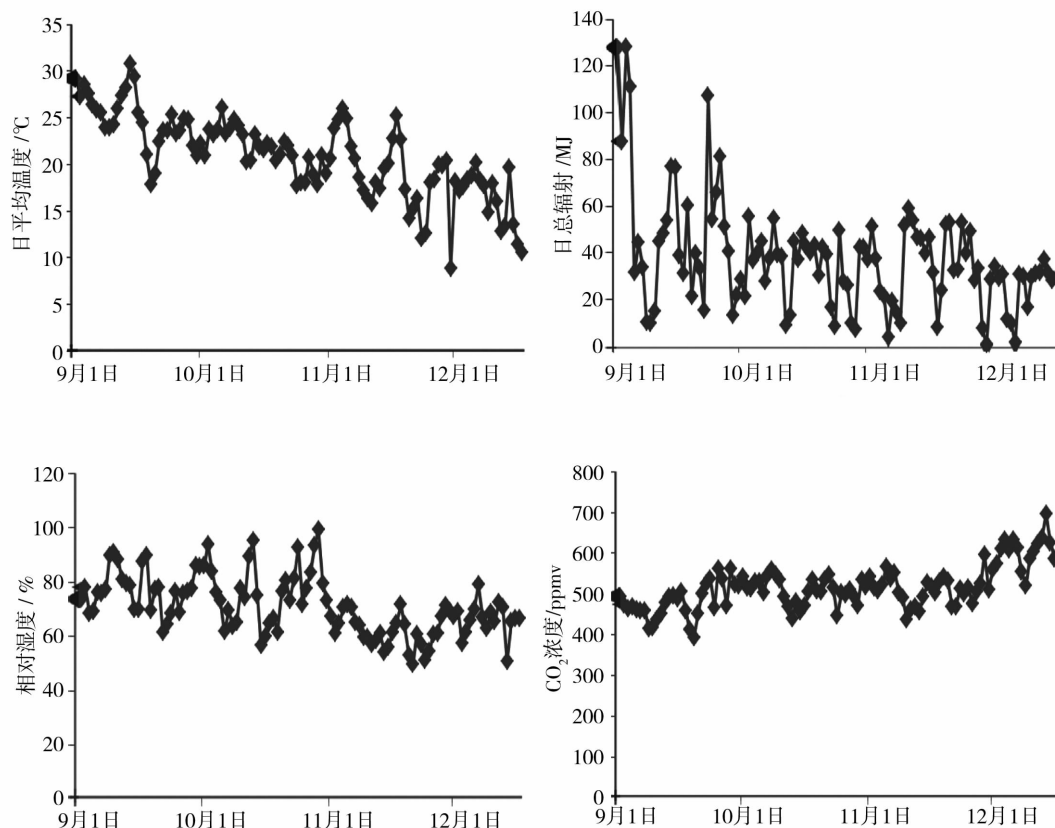


图1 2011年9~12月室内环境指标日变化

Fig. 1 Variation of daily environment index from September to December in 2011

## 2 3种光温指标的计算及模型建立

### 2.1 活动积温、有效积温和辐热积计算

活动积温为某时段内活动温度的总和,有效积温为某时段内有效温度的总和。它们计算公式如下:

$$T_a = \sum_{i=1}^n T_i (T_i > B) \quad (1)$$

$$T_e = \sum_{i=1}^n (T_i - B) \quad (2)$$

$T_a$  为活动积温 ( $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ ),  $T_e$  为有效积温 ( $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ ),  $T_i$  为日平均温度 ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $B$  为下限温度<sup>[18]</sup> ( $^{\circ}\text{C}$ ), 黄瓜下限温度  $B$  值取  $14.7^{\circ}\text{C}$ 。

辐热积定义为热效应与光合有效辐射的乘积<sup>[19]</sup>。热效应由相对热效应累积得出,计算公式如下:

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

式中: $RET(T)$ 为温度为 $T$ 时的相对热效应, $T_b$ 为生长下限温度( $^{\circ}\text{C}$ ), $T_m$ 为生长上限温度( $^{\circ}\text{C}$ ), $T_{ob}$ 为生长的最适温度下限( $^{\circ}\text{C}$ ), $T_{ou}$ 为生长的最适温度上限( $^{\circ}\text{C}$ )。温室黄瓜生长的下限温度为 $10^{\circ}\text{C}$ ,上限温度为 $40^{\circ}\text{C}$ ,最适温度上、下限在白天分别为 $30^{\circ}\text{C}$ 、 $25^{\circ}\text{C}$ ,在夜间分别为 $15^{\circ}\text{C}$ 、 $13^{\circ}\text{C}$ <sup>[20-22]</sup>。

光合有效辐射公式为:

$$PAR = 0.5 Q \quad (4)$$

$$P = \sum_{i=1}^n PAR \quad (5)$$

式中, $Q$ 为到达作物冠层上方的太阳总辐射; $0.5$ 为光合有效辐射在太阳总辐射中所占的比例<sup>[23]</sup>。

累积辐热积  $TEP$  为每日相对辐热积的累积,可用以度量辐射和温度对黄瓜的综合影响,计算方法如下:

$$RTEP = \sum_{i=1}^{24} (REP(i) PAR(i) \times 3600/10^6) \quad (6)$$

式中, $RTEP$ 为每日相对辐热积,单位为 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot$

$\text{d}^{-1}$ ;  $REP(i)$ 为1天内第 $i$ 小时的平均相对热效应;  $PAR(i)$ 为1天内第 $i$ 小时的平均光合有效辐射,单位为 $\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $3600$ 为将1h内的平均光合有效辐射换算成该小时内的总光合有效辐射(单位: $\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ )的单位换算系数; $10^6$ 为将 $\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 换算成 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 的单位换算系数。

$$TEP = \sum RTEP \quad (7)$$

式中, $TEP$ 为黄瓜生长过程中的累积辐热积,单位为 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

### 2.2 黄瓜生育期的划分及拟合

根据黄瓜的生物学特性,结合相关文献资料,可将黄瓜的发育分为6个阶段:播种期、出苗期、开花期、坐果期、果实膨大期和成熟期(表1)。试验期间每日观测黄瓜的发育情况,并记录到达每个生育时期的日期。利用第1批和第2批观测数据,根据公式(1)~(7),计算得到黄瓜到达不同生育阶段的活动积温、有效积温和辐热积(表2)。

表1 黄瓜到达各生育时期的形态标准

Tab.1 The morphologic standard of cucumber at different development stages

| 生育时期  | 形态标准            |
|-------|-----------------|
| 播种期   | 种子播种至第1片真叶出现    |
| 出苗期   | 第1片真叶出现至第1朵花开放  |
| 开花期   | 第1朵花开放至第1个果实坐果  |
| 坐果期   | 第1个果实坐果至第1个果实膨大 |
| 果实膨大期 | 第1个果实膨大至第1个果实成熟 |
| 成熟期   | 第1个果实成熟至拉秧      |

表2 黄瓜到达不同生育阶段的活动积温、有效积温和辐热积

Tab.2 The AAT, EAT and TEP of different development stages of cucumber

| 生育期   | 活动积温<br>/( $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ ) | 有效积温<br>/( $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ ) | 辐热积<br>/( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ) |
|-------|--|--|---|
| 播种期   | 0  | 0  | 0   |
| 出苗期   | 132.7  | 51.8   | 5.4   |
| 开花期   | 746.5  | 257.4  | 31.5  |
| 坐果期   | 1126.9   | 334.5  | 44.8  |
| 果实膨大期 | 1409.4   | 397.7  | 65.0  |
| 成熟期   | 1758.3   | 460.4  | 89.0  |

## 2.3 黄瓜生长指标模拟

### 2.3.1 单株叶面积的计算

测定叶片长和叶宽,得到单片叶面积:

$$S_i = 0.58LD \quad (8)$$

$S_i$  为单片叶面积( $\text{cm}^2$ ),  $L$  为叶片长( $\text{cm}$ ),  $D$  为叶宽( $\text{cm}$ )。单株叶面积  $S$  ( $\text{cm}^2$ ) 为各叶片面积和, 计算公式如下:

$$S = \sum_{i=1}^n S_i \quad (9)$$

### 2.3.2 黄瓜株高和叶面积的拟合

利用 Logistic 模型对 3 批黄瓜的以上形态指标分别进行拟合, 建立其与活动积温、有效积温和辐热积的模型, 结果显示(图 2), “津优 1 号” 黄瓜的株高、单株叶面积与活动积温、有效积温和辐热积的变化趋势均符合 Logistic 曲线特征, 以此建立各个指标与活动积温、有效积温和累积辐热积的关系模型:

$$Y = Y_{\max} / [1 + \exp(a + bx)] \quad (10)$$

$Y$  代表黄瓜生长指标,  $x$  为光温指标, 模型参数如表 3。

表 3 黄瓜形态指标的模型参数

Tab. 3 The model parameters of cucumber morphological index

| 形态指标               | 模型     | $Y_{\max}$ | $a$     | $b$     | RMSE  | $R^2$ |
|--------------------|--------|------------|---------|---------|-------|-------|
| 叶面积/ $\text{cm}^2$ | 活动积温法  | 1 031.52   | 6.3649  | -0.0054 | 61.34 | 0.93  |
|                    | 有效积温模型 | 1 031.52   | 10.4394 | -0.0295 | 54.62 | 0.96  |
|                    | 辐热积    | 1 031.52   | 7.3659  | -0.097  | 43.07 | 0.98  |
| 株高/cm              | 活动积温法  | 82.1       | 3.2907  | -0.0027 | 9.83  | 0.95  |
|                    | 有效积温   | 82.1       | 4.2573  | -0.0134 | 7.55  | 0.96  |
|                    | 辐热积    | 82.1       | 3.6614  | -0.0481 | 4.32  | 0.98  |

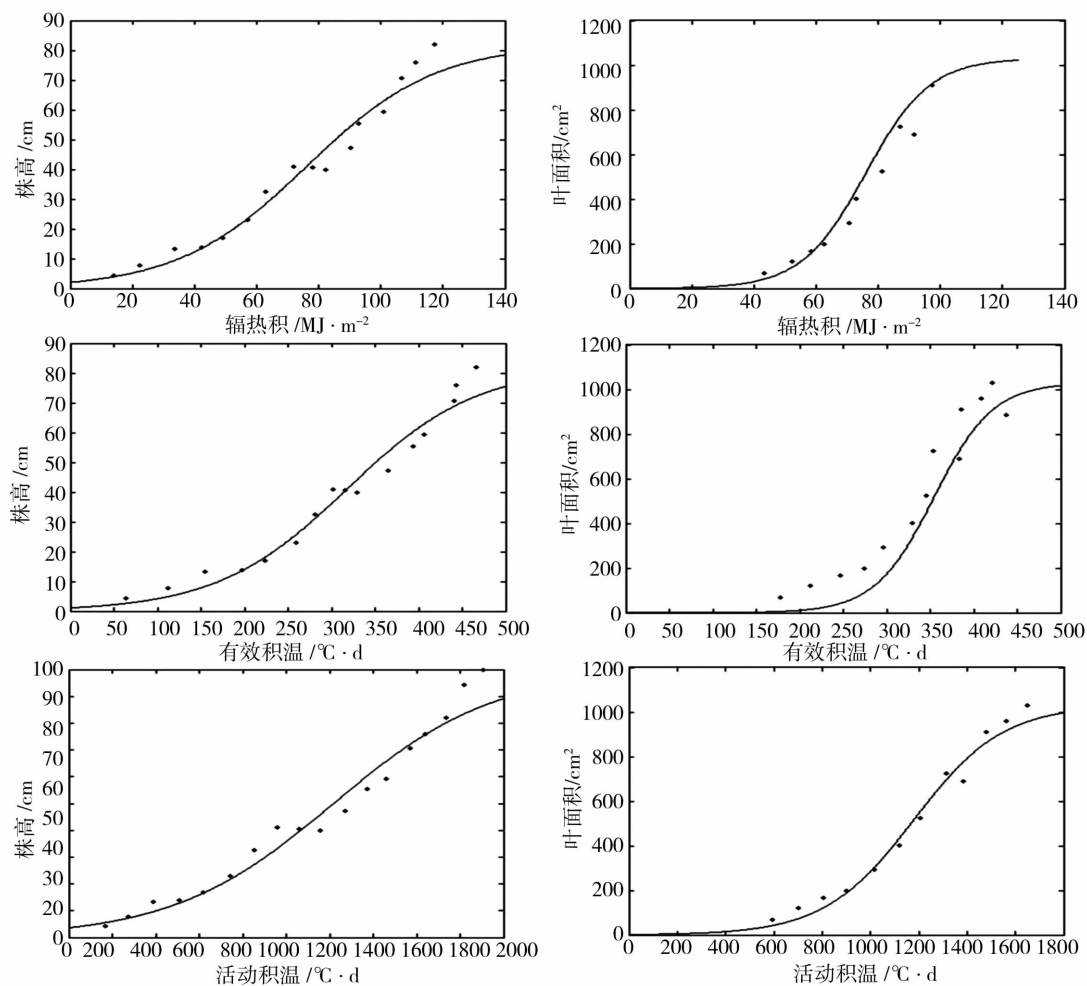


图 2 3 种方法对黄瓜株高、叶面积的拟合

Fig. 2 The cucumber plant length and leaf area simulated by three methods

### 3 模型检验与比较

#### 3.1 黄瓜发育期的检验结果

利用第3批数据,对表2进行检验。首先用上述方法计算出第3批黄瓜各生育期间每天的活动积温、有效积温和累积辐热积。然后利用表2中所确定的各生育期所需的上述3个光温指标,反演得到第3批黄瓜完成各生育期所需的天数即为模拟值。3个方法所获得的模拟值与实测值的比较见图3。利用3种方法预测播种到各生育期所需天数(播种到出苗、开花、坐果、果实膨大、成熟)的模拟值与实测值基于1:1线的RMSE大小关系分别为:辐热积法(0 d,3 d,4 d,5 d,4 d)小于有效积温法(0 d,4 d,3 d,8 d,10 d),有效积温法小于活动积温法(1 d,6 d,8 d,11 d,11 d)。

#### 3.2 黄瓜生长量的检验结果

利用第3批试验数据检验模型,模型检验结果见图4,利用活动积温法、有效积温和辐热积对株高

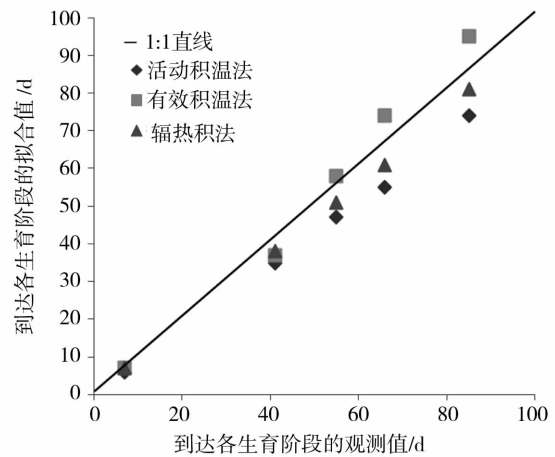


图3 黄瓜从播种到达各生育阶段天数观测值与拟合值的比较  
Fig.3 Comparison between simulated and observed days from seeding to different development stages of cucumber

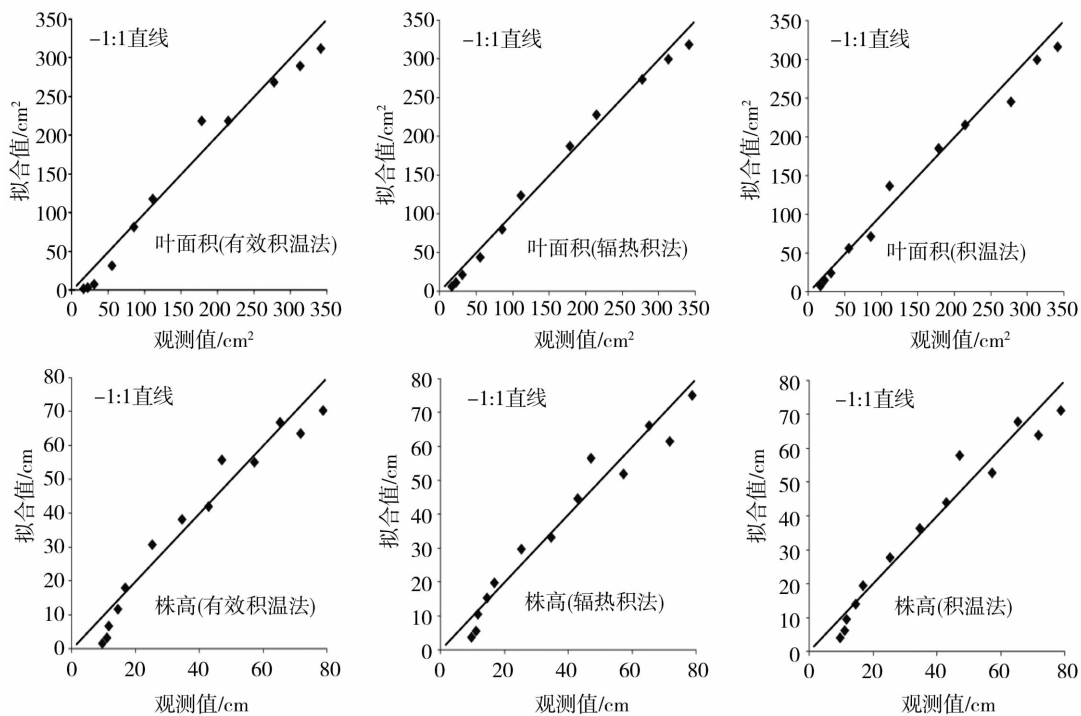


图4 株高和叶面积观测值与拟合值的比较  
Fig.4 Comparison between observed and simulated leaf area and plant length by three methods

拟合值与实测值基于1:1线的RMSE分别为11.0 cm、7.8 cm、4.5 cm,  $R^2$ 分别为:0.93、0.95、0.97,对叶面积拟合RMSE分别为78.5 cm<sup>2</sup>、61.9 cm<sup>2</sup>、54.5 cm<sup>2</sup>,  $R^2$ 分别为:0.92、0.96、0.98,模拟结果表明辐热积模拟精度明显高于活动积温法和有效积温。

### 4 结论与讨论

对作物生长发育目前常见用于度量设施作物生长发育的光温指标主要有活动积温、有效积温和辐热积。其中,活动积温和有效积温仅用温度度量作物生长发育,在露地作物生产中,温度变化与太阳辐

射的变化基本同步,而在温室作物生产中,由于设施的保温和加温,温度与太阳辐射二者变化不一定同

步<sup>[24-27]</sup>。累积辐热积为表征温度与辐射综合作用的指标。3种模拟方法的比较结果见表4。

表4 基于活动积温、有效积温和辐热积3种指标的模拟方法的比较  
Tab.4 The comparison of simulated methods based on AAT, EAT and TEP

| 模拟方法  | 输入参数          | 步长   | 适用范围            | 优缺点                     |
|-------|---------------|------|-----------------|-------------------------|
| 活动积温法 | 日均气温          | 24 h | 大田作物            | 计算简便,但积温的稳定性较差,未考虑辐射影响  |
| 有效积温法 | 日均气温          | 24 h | 大田作物            | 计算简便,考虑了生物学零度,但未考虑辐射的影响 |
| 辐热积法  | 每日平均温度、光合有效辐射 | 1 h  | 温室作物及对温光敏感的大田作物 | 综合考虑了温度和辐射,更具适用性,但计算繁琐  |

通过对活动积温、有效积温和辐热积3种指标对黄瓜生长发育模拟精度的比较,表明辐热积法模拟温室黄瓜植株的模拟精度较高,而活动积温指标虽然考虑了对作物生长发育不起作用的生物学零度,但无法排除部分低于生物学零度的无效温度,使积温的稳定性较差,因此拟合精度低于其它2种方法。有效积温指标可排除无效温度,克服活动积温法稳定性差的不足,改善了模拟的精度。活动积温法和有效积温法的方法计算方便,且能够正确反映温度对作物的影响,以前都用于研究作物发育,现为研究生长模拟提供了新思路。但由于二者只考虑温度因素对作物的影响,其建立的模型在模拟黄瓜生长发育时存在一定误差。辐热积法综合考虑了温度和光合有效辐射对黄瓜生长发育的影响,克服了前2种方法的局限性,对温室黄瓜植株的模拟精度较高,并且更具机理性与实用性,但同时存在计算相对繁琐、需要测定作物不同发育阶段作物的3基点温度等不足。活动积温和有效积温方法仅输入日均气温就可预测黄瓜生长指标,适合大田温光同步环境的作物生长发育模拟,而辐热积法需要输入每日平均温度、光合有效辐射,对温室温光不同步的环境较为适用。

3种方法在模拟黄瓜生长发育时,均没有考虑土壤肥力条件和水分等因素,而水肥条件是影响作物生长的主要因素之一<sup>[28]</sup>。任何作物,其正常的生长发育均受光、温、水等条件的综合影响,此3种条件配置不当,将严重影响作物正常生长及产量<sup>[29]</sup>。本研究是在水肥供应充足的条件下建立的黄瓜生长发育模型,因此模型在其它不同肥水条件下的应用尚需进一步的检验。除此之外,温度对模型影响的探讨未考虑地温,研究表明地温对作物发育有着重

要影响<sup>[30]</sup>,且本研究仅用冬季温室黄瓜数据,对其他季节是否有同样结论也待进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] 侯锋,李淑菊. 我国黄瓜育种研究进展与展望[J]. 中国农业科学,2000,33(3):100-102.
- [2] de Wit CT. Photosynthesis of Leaf Canopies[R]. Wageningen, The Netherlands;PUDOC,1965.
- [3] 姚桃峰,王润元,王燕. 中国小麦生长模拟模型研究概述[J]. 干旱气象,2009,27(1):66-72.
- [4] de Wit CT, Brouwer R, Penning de Vries FWT. The simulation of photosynthetic systems[A]. Setlik I. Prediction and Management of Photosynthetic Productivity[C]. Wageningen,The Netherlands;PUDOC, 1970,47-70.
- [5] de Wit C T. Simulation of assimilation, respiration and transpiration of crops[M]. New York;Wiley, 1978.
- [6] Jones C A, Kiniry J R, Dyke P. T. CERES - Maize: A Simulation Model of Maize Growth and Development [M]. College Station: Texas A & M University Press,1986.
- [7] Ritchie J T, Alocijia E C, Uehara G. IBSNAT/CERES Rice Model [J]. Agrotechnology Transfer,1986,3:1-5.
- [8] Ritchie J R, Otter S. Description and performance of CERES - Wheat: a user - oriented wheat yield model [J]. ARS - United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service, 1985,159-175.
- [9] Hoogenboom G, Jones J W, Boote K J. Modeling growth, development, and yield of grain legumes using SOYGRO, PNUTGRO, and BEANGRO:A review [J]. Trans ASAE, 1992, 35 (6):2043-2056.
- [10] McCown R L, Hammer G L, Hargreaves J N G, et al. APSIM: a novel software system for model development, model testing and simulation in agricultural systems research [J]. Agricultural systems, 1996,50(3):255-271.
- [11] 陈杰. 中国温室作物模型研究状况[J]. 中国农机化. 2012, (2):29-32.
- [12] 李建民. 温室厚皮甜瓜幼苗生长模型与生态生理变化规律研究

- [D]. 杨凌:西北农林科技大学,2006.
- [13] 王会军. 温室黄瓜生长发育模拟模型研究[D]. 北京:中国农业出版社,2004.
- [14] 李向岭,赵明,李从峰,等. 玉米叶面积系数动态特征及其积温模型的建立[J]. 作物学报,2011,37(2):321-330.
- [15] 李立昆,李玉红,程智慧,等. 基于有效积温早春设施厚皮甜瓜果实发育模拟模型[J]. 北方园艺,2010(6):97-100.
- [16] 李永秀,景元书. 温室番茄生长发育模拟模型的验证[J]. 浙江农业科学,2007(3):252-254.
- [17] 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[J]. 中国农业科学,2007,40(6):1229-1235.
- [18] 高亮之著. 农业模型学基础[M]. 香港:天马图书出版社,2004,113-114.
- [19] 李永秀,罗卫红,倪纪恒,等. 用辐射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,2005,12(21):131-136.
- [20] 吴兴国,张真和,凌云昕,等. 黄瓜周年生产配套技术[M]. 北京:中国农业出版社,2000.
- [21] 尚庆茂,高丽红,王怀松,等. 黄瓜无公害生产技术[M]. 北京:中国农业出版社,2003.
- [22] 陶正平,荣明杰,尹凯丹,等. 黄瓜产业配套栽培技术[M]. 北京:中国农业出版社,2002.
- [23] Goudriaan J, Van Laar H H. Modeling potential crop growth processes;textbook with exercises[M]. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1994.
- [24] Li G J, Benoit F, Ceustermans N. Influence of day and night temperature on the growth, development and yield of greenhouse sweet pepper[J]. Journal of Zhejiang University,2004,30(5):487-491.
- [25] Turc O, Lecoer J. Leaf primordium initiation and expanded leaf production are coordinated through similar response to air temperature in Pea(*Pisum sativum* L.)[J]. Annals of Botany,1997,80(3):265-273.
- [26] 明村豪,蒋芳玲,王广龙,等. 黄瓜壮苗指标与辐射积关系的模拟模型[J]. 农业工程学报,2012,28(9):109-113.
- [27] Marcelis L F M, Heuvelink E, Goudriaan J. Modelling biomass production and yield of horticultural crops: a review[J]. Scientia Horticulturae, 1998,74(1):83-111.
- [28] 李凤霞,袁海燕,严秀华,等. 宁夏灌区水稻不同灌溉量植株高度的气候生态研究[J]. 干旱气象,2005,23(3):62-64.
- [29] 姚晓红,李侠. 气候变暖对天水市川灌地玉米生长发育的影响及对策研究[J]. 干旱气象,2006,24(3):57-61.
- [30] 费晓玲,丁春兰. 甘肃黄土高原地温与冬小麦发育期的关系分析[J]. 干旱气象,2009,27(2):148-151.

## Application and Comparison of Three Temperature and Light Indexes in Simulating Growth and Development of Cucumber in Greenhouse

LI Yemeng, LI Ran, YANG Zaiqiang

(College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** From September to December in 2011, the experiments on Jinyou No. 1 cucumber in different seedtime were conducted in the greenhouse in Nanjing University of Information Science and Technology. Models of cucumber growth and development in greenhouse based on active accumulated temperature (AAT), effective accumulated temperature (EAT) and thermal effectiveness and photosynthesis active radiation (TEP) were developed through mensurating meteorological elements and crop data, and the models were further verified by independent test data. The results show that the root mean squared error (RMSE) based on TEP from seeding stage to sprouting, blooming, bearing fruits, fruits expanding and autumn stage were 0 d, 3 d, 4 d, 5 d and 4 d, respectively, which were lower than those simulated by the model based on AAT (1 d, 6 d, 8 d, 11 d and 11 d, respectively) and the model based on EAT (RMSE is 0 d, 4 d, 3 d, 8 d and 10 d, respectively). The root mean squared error (RMSE) between the simulated and measured values of leaf area and plant length based on TEP were 43.0 cm<sup>2</sup> and 4.3 cm, and the determined coefficient (R<sup>2</sup>) were 0.98 and 0.98. The RMSE between the simulated and measured values of leaf area and plant length based on AAT and EAT were 61.3 cm<sup>2</sup> and 54.6 cm<sup>2</sup>, 9.8 cm and 7.5 cm. The comparative results show that the simulation precision of growing stage, plant height, leaf area of greenhouse cucumber based on TEP was obviously higher than that based on AAT and EAT. This study gives the prediction of greenhouse cucumber growth index and the growth period, and also supplies a reference to optimizing environment control.

**Key words:** cucumber; growth and development simulation; AAT; EAT; TEP