

纪洪亭, 赵韩伟, 王 勇, 等. 基于数学模型的向日葵穴盘苗生长动态特征分析[J]. 江苏农业学报, 2022, 38( 1 ): 135-142.  
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2022.01.016

## 基于数学模型的向日葵穴盘苗生长动态特征分析

纪洪亭, 赵韩伟, 王 勇, 曾燕楠, 程润东, 王士红, 王庆南, 赵荷娟  
(江苏丘陵地区南京农业科学研究所, 江苏 南京 210046)

**摘要:** 旨在利用数学模型定量分析向日葵穴盘苗生长动态特征, 明确向日葵穴盘苗生长动态变化规律, 为制定合理的苗期管理措施提供理论依据。通过对向日葵穴盘苗生长指标进行连续观测, 用 Weibull 模型和 Logistic 模型对幼苗生长指标与出苗后累积辐热积的关系进行拟合, 进而定量分析生长指标动态特征。结果表明, Weibull 模型和 Logistic 模型能较好地拟合向日葵穴盘苗生长指标随出苗后累积辐热积的动态变化, 拟合方程的决定系数均达到 0.990 以上。利用模型的特征参数将向日葵穴盘苗生长过程分为 3 个时期: 渐增期、快增期、缓增期, 各生长指标在快增期的出现时间为出苗后 4~5 d, 对应累积辐热积为 22.40~27.84 MJ/m<sup>2</sup>, 缓增期出现的时间为出苗后 6~11 d, 对应的累积辐热积为 30.38~46.54 MJ/m<sup>2</sup>。快增期是幼苗生长的关键时期, 尽管幼苗快增期持续时间短, 但快增期幼苗生长速率较大, 其生长量占总生长量比例达 41%~68% (茎粗除外)。根据生长特征参数, 提出了各个时期的关键育苗措施, 确定了向日葵穴盘苗的适宜移栽期和各生长指标参考值。

**关键词:** 向日葵; 穴盘苗; 模拟模型; 生长动态分析

**中图分类号:** S565.5      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4440(2022)01-0135-08

## Analysis on growth dynamic characteristics of sunflower plug seedlings based on mathematical models

JI Hong-ting, ZHAO Han-wei, WANG Yong, ZENG Yan-nan, CHEN Run-dong, WANG Shi-hong, WANG Qing-nan, ZHAO He-juan

(Nanjing Institute of Agricultural Sciences in Jiangsu Hilly Area, Nanjing 210046, China)

**Abstract:** This study aims to quantitatively analyze the dynamic characteristics of growth indexes of sunflower plug seedlings by using mathematical models and to clarify the growth dynamic change regularity of sunflower plug seedlings to provide a theoretical basis for designing reasonable seedling management measures. The growth indexes of sunflower plug seedlings were observed continuously, the relationships between growth indexes and accumulated product of thermal effectiveness and photosynthetically active radiation (PAR) after emergence (TEP) were simulated by Weibull and Logistic equations, and the dynamic characteristics of growth indexes were analyzed quantitatively based on two equations. The results showed that the dynamic change of growth indexes of sunflower plug seedlings with TEP after emergence was well simulated by Weibull and Logistic equations, and the  $R^2$  values of two models were above 0.990. According to characteristic parameters of the Weibull and Logistic models, the growth process of sunflower plug seedlings was divided into three stages: the accelerating growth stage, the rapid growth stage and the slow growth stage. The growth indexes of rapid growth stage occurred in 4–5 days after emergence, and the corresponding TEP was 22.40–27.84 MJ/m<sup>2</sup>. The slow growth stage occurred in 6–11 days after emergence, and the corresponding TEP was 30.38–46.54 MJ/m<sup>2</sup>. The rapid growth stage was the key stage of seedling growth. Although the duration of rapid growth stage was relatively short, the growth rate during rapid growth stage

收稿日期: 2021-05-22

基金项目: 江苏现代农业产业技术体系建设项目 [JATS(2020)013]

作者简介: 纪洪亭 (1987–), 男, 山东青州人, 博士, 助理研究员, 主要从事向日葵遗传育种研究。(E-mail) jihongting2010@126.com

通讯作者: 赵荷娟, (E-mail) zhuzhao603@163.com

was relatively high, and the proportion of the growth quantity to the total growth quantity during rapid growth stage was 41%–68% (except for the stem diameter). According to the growth characteristic parameters, key measures for seedling raising at different growth stages were put forward, and the suitable trans-

planting period and reference value of each growth index were determined.

**Key words:** sunflower; plug seedlings; simulation models; growth dynamic analysis

向日葵属于菊科向日葵属一年生草本植物,根据用途可分为食用型、油用型和观赏型<sup>[1]</sup>。向日葵花朵亮丽,颜色鲜艳,纯朴自然,具有很好的观赏价值<sup>[2]</sup>,已经成为美丽乡村建设的优势作物,在服务现代农业发展、助力乡村振兴中发挥了积极作用<sup>[3]</sup>。为达到最佳的观赏效果,一般将向日葵盛花期安排在国庆假期<sup>[1]</sup>。根据生育期推断,向日葵播种期应在 7 月下旬至 8 月上旬之间<sup>[4]</sup>,此时正处于高温季节,直播导致出苗率低,出苗不齐,而穴盘育苗能提高出苗率,保证出苗整齐,定植后根系活力好,缓苗快,长势一致,大大提升了景观效果<sup>[5]</sup>。

作物生长模拟模型是定量分析作物生长指标动态特征的重要研究工具<sup>[6]</sup>。许多学者建立了幼苗生长模拟模型,并对幼苗生长动态特征进行了定量分析。刘君等<sup>[7]</sup>采用 Logistic 方程对西兰花幼苗株高、茎粗、鲜质量、干质量与生长天数进行拟合,建立了西兰花苗期生长模型,并定量分析了其物候期参数和生长参数。于志民等<sup>[8]</sup>利用 Logistic、Gompertz 模型及其最优组合模型拟合了圆齿野鸦椿幼苗生长动态与生长天数的关系,利用模型推导出的特征参数将圆齿野鸦椿幼苗生长过程划分为出苗期、生长初期、速生期和生长后期,并提出各个时期的关键育苗措施。王纪章等<sup>[9]</sup>考虑了温度对黄瓜生长的影响,构建了基于生长度日的黄瓜穴盘苗生长发育过程模拟模型,定量分析了黄瓜穴盘苗各生育阶段的生长度日参数。温度和光照是影响幼苗生长的重要环境因子。采用生长天数或单一的有效积温来模拟幼苗生长不能充分反映温度热效应和光合有效辐射对幼苗生长的影响<sup>[10]</sup>。李永秀等<sup>[11]</sup>首次提出了综合温度热效应和光合有效辐射的光温指标“辐热积”。倪纪恒等<sup>[12]</sup>认为用辐热积作为衡量黄瓜生长发育过程的时间尺度比有效积温能更精确地反映环境对黄瓜生长状况的影响。明村豪等<sup>[13]</sup>建立了基于辐热积的黄瓜壮苗指数模型,为黄瓜育苗中幼苗健壮程度的预测提供了有效方法。

目前有关基于辐热积的向日葵穴盘苗生长动态模拟模型与特征分析的研究尚未见报道。因此,本研究以观赏向日葵夏日微风穴盘苗为试验材料,通过对向日葵穴盘苗生长指标进行连续观测,分别对穴盘苗全株及各器官干质量和鲜质量、叶面积、叶片相对叶

绿素含量、株高、茎粗、茎粗/株高与累积辐热积进行拟合,并利用推导出的特征参数定量分析向日葵穴盘苗生长动态特征,明确向日葵穴盘苗生长动态规律,以为合理制定向日葵穴盘苗管理措施提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验时间和地点

试验于 2021 年 4 月 9 日-4 月 28 日在江苏丘陵地区南京农业科学研究所实验基地进行。

### 1.2 试验方法

供试向日葵品种为夏日微风,育苗基质采用进口泥炭与蛭石、珍珠岩以 5:1:1(体积比)混合,1 L 基质中加入 6.7 g 高效复合肥(氮、磷、钾含量分别为 15%、15%、15%),混合均匀后装入 72 孔(6×12 孔)长方形塑料育苗盘中。于 2021 年 4 月 9 日播种,第一次取样时间为 2021 年 4 月 16 日(出苗,75%幼苗子叶出土平展<sup>[14]</sup>),第二次取样时间为 2021 年 4 月 20 日,之后每 2 d 取样 1 次,共取样 6 次,每次取样 60 株。

### 1.3 测定指标与方法

每次观测长势一致的向日葵幼苗 60 株。用清水漂洗根部,并用吸水纸将清水吸干,用直尺测量株高、叶片长和叶片宽,用游标卡尺测量茎粗,用叶绿素仪 SPAD-502Plus 测定叶片相对叶绿素含量,待分别称得叶片、茎和根鲜质量后,将幼苗于 75 ℃烘干至恒质量,测定叶片、茎和根干质量。

### 1.4 累积辐热积的计算

辐热积是指相对热效应与光合有效辐射的乘积<sup>[13]</sup>。相对热效应是依据作物生育过程对温度的反应曲线所决定的相对于最适温度的效应因子<sup>[15]</sup>,相对热效应计算公式如下:

$$DRTE_j = \frac{1}{24} \sum_{i=1}^{24} RTE_i$$

$$RTE_i = \begin{cases} 0 & (T \leq T_b) \\ \frac{T - T_b}{T_o - T_b} & (T_b < T < T_o) \\ 1 & (T = T_o) \\ \frac{T_m - T}{T_m - T_o} & (T_o < T < T_m) \\ 0 & (T \geq T_m) \end{cases}$$

式中, $DRTE_j$ 为第  $j$  天的累积热效应, $RTE_i$ 为每小时的热效应, $T$ 为每小时的平均温度( $^{\circ}\text{C}$ ), $T_b$ 为向日葵幼苗生长的下限温度( $^{\circ}\text{C}$ ), $T_o$ 为向日葵幼苗生长的最适温度( $^{\circ}\text{C}$ ), $T_m$ 为向日葵幼苗生长的最高温度( $^{\circ}\text{C}$ ),向日葵苗期生长的下限温度、最适温度、最高温度分别为  $8^{\circ}\text{C}$ 、 $31^{\circ}\text{C}$ 、 $37^{\circ}\text{C}$  [16]。

每日相对辐热积( $DRTEP$ )等于每天相对热效应( $DRTE$ )乘以该天的总光合有效辐射( $PAR$ ),计算公式如下:

$$DRTEP_j = DRTE_j \times PAR_j$$

式中, $DRTEP_j$ 为第  $j$  d 的每日相对辐热积( $\text{MJ}/\text{m}^2$ ), $DRTE_j$ 为第  $j$  d 的每日相对热效应, $PAR$ 为第  $j$  d 的总光合有效辐射( $\text{MJ}/\text{m}^2$ )。

将某一生长阶段的相对辐热积进行累加,就得到该生长阶段的累积辐热积( $\text{MJ}/\text{m}^2$ ),计算公式如下:

$$TEP_{j+1} = TEP_j + DRTEP_{j+1}$$

式中, $TEP_j$ 和  $TEP_{j+1}$ 分别为第  $j$  d 和第  $(j+1)$  d 的累积辐热积, $DRTEP_{j+1}$ 为第  $(j+1)$  d 的每日相对辐热积( $\text{MJ}/\text{m}^2$ )。出苗后天数与出苗后累积辐热积的关系如图 1 所示。

1.5 生长指标动态模型的筛选与特征分析

以出苗后累积辐热积为自变量,生长指标为因变量,利用 Origin 软件对各生长指标随出苗后累计辐热

积的动态变化进行拟合,得到模拟较好的模型(Weibull 模型、Logistic 模型、Gompertz 模型、Richards 模型和 MMF 模型),各动态模型的确定系数列于表 1,根据模型的确定系数大小进行模型的筛选。由表 1 可知,Weibull 模型能较好地模拟幼苗干质量、叶片干质量、总叶面积、总叶面积×相对叶绿素含量、幼苗鲜质量、叶片鲜质量、幼苗株高、幼苗茎粗随出苗后累计辐热积的动态变化,模型确定系数均在 0.989 以上。Logistic 模型能较好地模拟茎干质量、根干质量、茎鲜质量、根鲜质量、茎粗/株高随出苗后累计辐热积的动态变化,模型确定系数均在 0.994 以上。

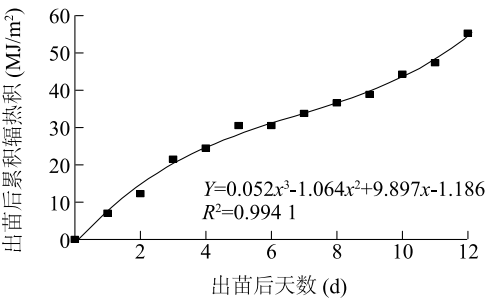


图 1 出苗后天数与出苗后累积辐热积的关系  
Fig.1 Relationship between days after emergence and accumulated product of thermal effectiveness and photosynthetically active radiation ( $PAR$ ) after emergence

表 1 模拟方程确定系数  
Table 1 Coefficients of determination ( $R^2$ ) of simulation models

| 生长指标         | 不同模型的确定系数  |             |             |              |             |        |
|--------------|------------|-------------|-------------|--------------|-------------|--------|
|              | Weibull 模型 | Logistic 模型 | Gompertz 模型 | Ratkowsky 模型 | Richards 模型 | MMF 模型 |
| 幼苗干质量        | 0.998      | 0.998       | 0.952       | 0.964        | 0.983       | 0.935  |
| 叶片干质量        | 0.998      | 0.997       | 0.949       | 0.963        | 0.980       | 0.906  |
| 总叶面积         | 0.999      | —           | 0.996       | 0.998        | 0.998       | 0.895  |
| 总叶面积×相对叶绿素含量 | 1.000      | 0.992       | 0.990       | 0.990        | 1.000       | 0.931  |
| 幼苗鲜质量        | 0.992      | 0.995       | 0.982       | 0.981        | 0.982       | 0.922  |
| 叶片鲜质量        | 0.996      | 0.425       | 0.987       | 0.988        | 0.990       | 0.937  |
| 幼苗株高         | 0.996      | —           | 0.940       | 0.940        | 0.970       | 0.924  |
| 幼苗茎粗         | 0.990      | 0.350       | 0.867       | 0.872        | 0.874       | 0.889  |
| 茎干质量         | 0.929      | 0.998       | 0.866       | 0.878        | 0.930       | 0.841  |
| 根干质量         | —          | 1.000       | 0.966       | 0.980        | 0.999       | 1.000  |
| 茎鲜质量         | 0.946      | 0.998       | 0.882       | 0.920        | 0.954       | 0.877  |
| 根鲜质量         | 0.889      | 1.000       | 0.989       | 0.989        | 0.989       | 0.990  |
| 茎粗/株高        | —          | 0.995       | —           | 0.974        | 0.980       | —      |

对 Weibull 模型和 Logistic 模型求三阶导数,可得方程的特征参数(2 个拐点:  $TEP1$  和  $TEP2$ )(表 2)。利用方程的特征参数将生长指标的动态变化

过程划分为 3 个阶段,  $0 \sim TEP1$  为生长渐增期,  $TEP1 \sim TEP2$  为生长快增期,  $TEP2 \sim TEP_{\max}$  为生长缓增期<sup>[7,17]</sup>。

表 2 Weibull 方程和 Logistic 方程特征参数

Table 2 Characteristic parameters of Weibull and Logistic equations

| 模拟方程  | $TEP1$  | $TEP2$  |
|---|---|---|
| Weibull 方程: $y = a - be^{-cx^d}$                        | $\sqrt{\frac{d}{3(d-1) - \sqrt{9(d-1)^2 - 4(d^2 - 3d + 2)}}}$ | $\sqrt{\frac{d}{3(d-1) + \sqrt{9(d-1)^2 - 4(d^2 - 3d + 2)}}}$ |
| Logistic 方程: $y = \frac{a - a_0}{1 + e^{b - cx}} + a_0$ | $\frac{\ln(2e^b - \sqrt{4e^{2b} - e^{2b}})}{c}$               | $\frac{\ln(2e^b + \sqrt{4e^{2b} - e^{2b}})}{c}$               |

$y$  为生长指标,  $x$  为累积辐热积,  $a$  表示最大生长量,  $c$  表示生长速率,  $b, d, a_0$  为常数。

## 1.6 统计分析

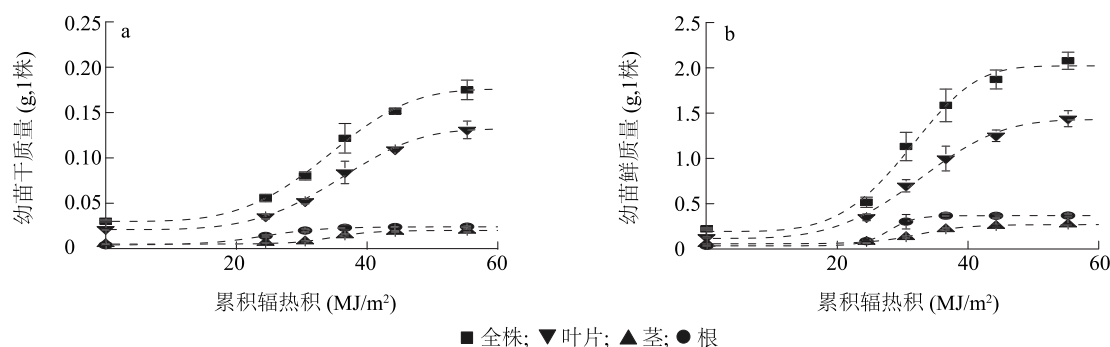
采用 Excel 进行数据整理, 采用 Origin 软件进行方程拟合与作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 向日葵穴盘苗干质量和鲜质量积累动态变化

图 2 为向日葵出苗后幼苗干质量和幼苗鲜质量积累动态变化。由图 2 可知, 随着出苗后累积辐热积的增加, 向日葵幼苗干质量和幼苗鲜质量增长呈“慢-快-慢”的“S”形曲线变化, 幼苗干质量和幼苗鲜质量开始

增长缓慢, 中期增长迅速, 之后增长缓慢。在出苗后累积辐热积为  $55 \text{ MJ/m}^2$  时, 单株向日葵穴盘苗幼苗干质量和幼苗鲜质量分别为  $0.175 \text{ g}$  和  $2.078 \text{ g}$ 。叶片干质量、叶片鲜质量、茎干质量、茎鲜质量的变化趋势与幼苗干质量和幼苗鲜质量的变化趋势基本一致。在出苗后累积辐热积为  $55 \text{ MJ/m}^2$  时, 单株向日葵穴盘苗叶片干质量、茎干质量分别为  $0.131 \text{ g}$ 、 $0.020 \text{ g}$ , 单株向日葵穴盘苗叶片鲜质量、茎鲜质量分别为  $1.438 \text{ g}$ 、 $0.271 \text{ g}$ 。在出苗后累积辐热积为  $36 \text{ MJ/m}^2$  时, 向日葵穴盘苗根干质量和根鲜质量变化较小。



a: 幼苗干质量; b: 幼苗鲜质量。

图 2 向日葵穴盘苗干质量和幼苗鲜质量积累动态变化

Fig.2 Dynamic changes of dry weight and fresh weight of sunflower plug seedlings

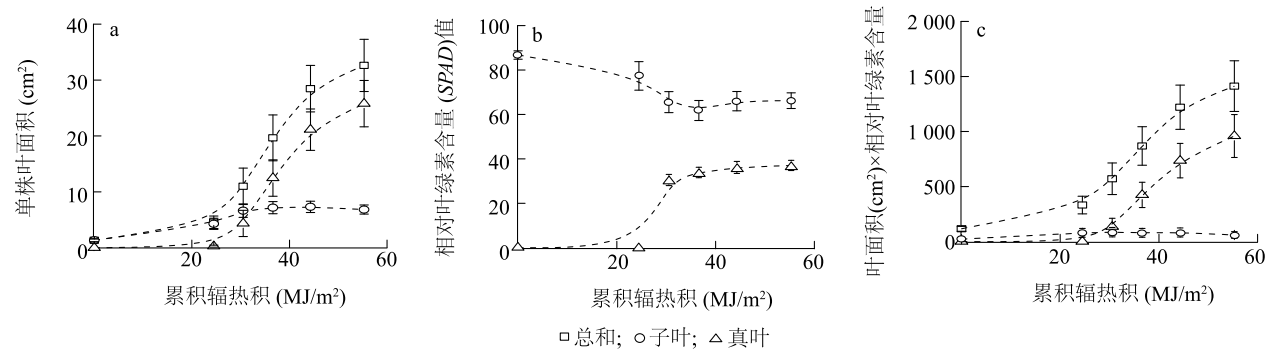
### 2.2 向日葵穴盘苗叶片生长指标的动态变化

图 3 为向日葵穴盘苗出苗后叶片生长指标的动态变化。由图 3 可知, 向日葵穴盘苗总叶面积(子叶叶面积与真叶叶面积的和)和总叶面积×相对叶绿素含量变化趋势基本一致, 均随出苗后累积辐热积的变化呈“S”形增长趋势。子叶叶面积和子叶叶面积×子叶相对叶绿素含量在出苗后累积辐热积为  $0 \sim 24 \text{ MJ/m}^2$  时缓慢增加, 在出苗后累

积辐热积为  $24 \sim 30 \text{ MJ/m}^2$  时快速增加, 之后变化不大。真叶叶面积和真叶叶面积×真叶相对叶绿素含量在出苗后累积辐热积为  $30 \sim 55 \text{ MJ/m}^2$  时呈增加趋势。子叶相对叶绿素含量随出苗后累积辐热积增加呈下降趋势, 出苗时子叶相对叶绿素含量最大, 当出苗后累积辐热积在  $30 \sim 55 \text{ MJ/m}^2$  时, 子叶相对叶绿素含量变化较小。真叶相对叶绿素含量随出苗后累积辐热积增加逐渐增大, 当出苗后



累积辐热积达  $55 \text{ MJ/m}^2$  时,真叶相对叶绿素含量 达到最大值。



a:单株叶面积;b:相对叶绿素含量;c:叶面积×相对叶绿素含量。

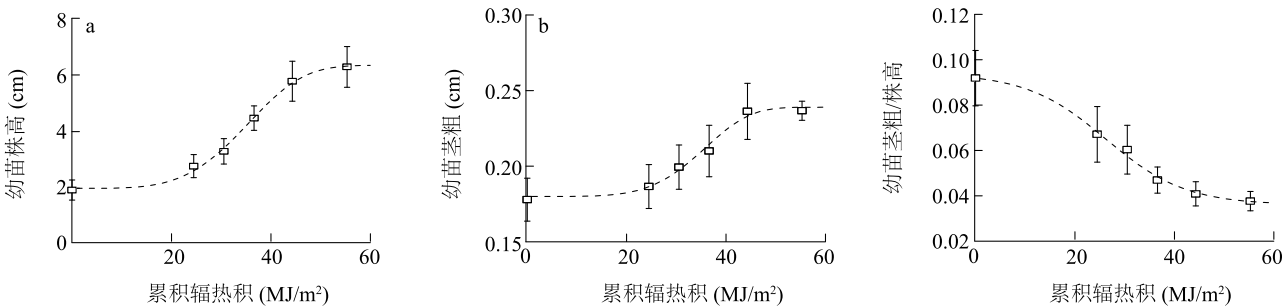
图3 向日葵穴盘苗叶片生长指标的动态变化

Fig.3 Dynamic changes of leaf growth indexes of sunflower plug seedlings

### 2.3 向日葵穴盘苗株高和茎粗指标动态变化

图4为向日葵穴盘幼苗株高、幼苗茎粗和幼苗茎粗/株高的动态变化。由图4可知,向日葵幼苗株高和茎粗随出苗后累积辐热积增加逐渐增大,当出苗后累积辐热积为  $55 \text{ MJ/m}^2$  时,株高和茎粗分别为

6.280 cm 和 0.237 cm。茎粗/株高随出苗后累积辐热积增加呈“S”形下降趋势,出苗时茎粗/株高最大,之后逐渐下降,当出苗后累积辐热积达  $55 \text{ MJ/m}^2$  时,茎粗/株高为 0.038。



a:幼苗株高;b:幼苗茎粗;c:幼苗茎粗/株高。

图4 向日葵穴盘苗株高和茎粗的动态变化

Fig.4 Dynamic changes of plant height and stem diameter of sunflower plug seedlings

### 2.4 向日葵穴盘苗生长指标动态模拟与特征分析

以出苗后累积辐热积为自变量,生长指标为因变量,分别建立向日葵穴盘苗各生长指标的 Weibull 模型和 Logistic 模型(表3),将 Weibull 模型和 Logistic 方程求三阶导数,可求得各指标生长动态过程的特征参数,根据特征参数可将向日葵穴盘苗生长过程划分为渐增期、快增期、缓增期(表4),进而对不同生长阶段的指标生长量和平均生长速率进行分析(表5、表6)。由表3可知,2个模型  $R^2$  为 0.990~1.000,说明利用 Weibull 模型和 Logistic 模型模拟向日葵穴盘苗生长指标的动态变化过程是可行的。

对特征参数的分析结果(表4)表明,茎干质量在快增期时的累积辐热积最大,其值为  $30.65$

$\text{MJ/m}^2$ ,根干质量在快增期时的累积辐热积最小,其值为  $18.49 \text{ MJ/m}^2$ ,表明茎干质量进入快增期的时间迟,而根干质量进入快增期的时间最早。其余指标在累积辐热积为  $22.40 \sim 27.84 \text{ MJ/m}^2$  时进入快增期。从快增期结束时的累积辐热积来看,根干质量和根鲜质量的累积辐热积相对较小,其值分别为  $30.38 \text{ MJ/m}^2$  和  $30.40 \text{ MJ/m}^2$ ,其余指标在快增期结束时的累积辐热积为  $37.29 \sim 46.54 \text{ MJ/m}^2$ 。从不同生长阶段的累积辐热积来看,各指标在不同阶段的累积辐热积表现为渐增期>快增期>缓增期。从各生长指标快增期累积辐热积来看,茎干质量、茎鲜质量、根干质量、根鲜质量在快增期的累积辐热积较小。

表 3 向日葵穴盘苗生长指标动态模型方程参数

Table 3 Parameters of dynamic simulation models of growth indexes of sunflower plug seedlings

| 模拟方程  | 生长指标         | 方程参数    |         |                       |       | $R^2$ |
|---|--------------|---------|---------|-----------------------|-------|-------|
|   |              | $a$     | $a_0$   | $b$                   | $c$   |       |
| $y = a - be^{-cx^d}$<br>(Weibull 模型)                | 幼苗干质量        | 0.176   | 0.146   | $7.93 \times 10^{-7}$ | 3.878 | 0.998 |
|   | 叶片干质量        | 0.132   | 0.111   | $2.44 \times 10^{-7}$ | 4.157 | 0.998 |
|   | 总叶面积         | 16.280  | 15.725  | $4.31 \times 10^{-8}$ | 4.672 | 0.999 |
|   | 总叶面积×相对叶绿素含量 | 715.590 | 656.880 | $6.43 \times 10^{-7}$ | 3.917 | 1.000 |
|   | 幼苗鲜质量        | 2.021   | 1.827   | $2.29 \times 10^{-7}$ | 4.344 | 0.992 |
|   | 叶片鲜质量        | 1.430   | 1.313   | $1.40 \times 10^{-6}$ | 3.765 | 0.996 |
|   | 幼苗株高         | 6.342   | 4.345   | $1.88 \times 10^{-7}$ | 4.259 | 0.996 |
| $y = \frac{a-a_0}{1+e^{b-cx}} + b$<br>(Logistic 模型) | 幼苗茎粗         | 0.239   | 0.059   | $1.18 \times 10^{-8}$ | 5.033 | 0.990 |
|   | 茎干质量         | 0.020   | 0.005   | 11.106                | 0.319 | 0.998 |
|   | 根干质量         | 0.024   | 0.004   | 5.414                 | 0.222 | 1.000 |
|   | 茎鲜质量         | 0.269   | 0.058   | 8.985                 | 0.276 | 0.998 |
|   | 根鲜质量         | 0.368   | 0.035   | 14.248                | 0.512 | 1.000 |
|   | 茎粗/株高        | 0.036   | 0.094   | 3.279                 | 0.125 | 0.995 |
|   |              |         |         |                       |       |       |

$a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $a_0$  见表 2 注。

表 4 向日葵穴盘苗不同生长时期的累积辐热积

Table 4 Accumulated product of thermal effectiveness and photosynthetically active radiation (PAR) during different growth stages of sunflower plug seedlings

| 生长指标        | 特征参数 (MJ/m <sup>2</sup> ) |       | 累积辐热积 (MJ/m <sup>2</sup> ) |       |       |
|-------------|---------------------------|-------|----------------------------|-------|-------|
|             | TEP1                      | TEP2  | 渐增期                        | 快增期   | 缓增期   |
| 幼苗干质量       | 23.88                     | 45.04 | 23.88                      | 21.16 | 10.26 |
| 叶片干质量       | 26.09                     | 46.54 | 26.09                      | 20.45 | 8.76  |
| 茎干质量        | 30.65                     | 38.90 | 30.65                      | 8.25  | 16.40 |
| 根干质量        | 18.49                     | 30.38 | 18.49                      | 11.89 | 24.92 |
| 单株叶面积       | 26.98                     | 44.42 | 26.98                      | 17.44 | 10.88 |
| 叶面积×相对叶绿素含量 | 24.48                     | 45.76 | 24.48                      | 21.29 | 9.53  |
| 幼苗鲜质量       | 23.22                     | 40.11 | 23.22                      | 16.89 | 15.19 |
| 叶片鲜质量       | 22.40                     | 43.34 | 22.40                      | 20.95 | 11.96 |
| 茎鲜质量        | 27.76                     | 37.29 | 27.76                      | 9.53  | 18.01 |
| 根鲜质量        | 25.25                     | 30.40 | 25.25                      | 5.14  | 24.90 |
| 幼苗株高        | 25.79                     | 45.18 | 25.79                      | 19.39 | 10.12 |
| 幼苗茎粗        | 27.84                     | 43.88 | 27.84                      | 16.03 | 11.42 |

TEP1: 拐点 1; TEP2: 拐点 2。

从各指标不同生长阶段生长量和占比(表 5)来看,幼苗茎粗表现为渐增期>快增期>缓增期,缓增期的幼苗茎粗生长量占总生长量的 80.08%,茎干质量和幼苗株高在快增期的生长量占总生长量的比例与渐增期差异不大,但明显大于缓增期,其余生长

指标在不同生长阶段的生长速率和生长量均为快增期大于渐增期和缓增期。

### 3 讨论

植物生长模拟模型是辅助植物生产环境优化调控和实现作物栽培管理优化与标准化的有力工具<sup>[18-20]</sup>。有关幼苗生长模拟模型的研究在西兰花<sup>[7,21]</sup>、黄瓜<sup>[12-13]</sup>、甜瓜<sup>[10]</sup>等作物上已有许多报道,而针对向日葵穴盘苗的研究尚未见涉及。本研究中,向日葵穴盘苗不同生长指标的动态变化规律基本一致,符合“S”形生长曲线。常用的用于描述“S”形生长动态的模型有 Weibull 模型、Logistic 模型、Gompertz 模型、Richards 模型、MMF 模型等<sup>[6-7,17,22]</sup>。Richards 模型在出苗后累积辐热积为 0 时,生长指标初始值趋于 0,这与生长指标初始值>0 不相符;Gompertz 模型和 MMF 模型模拟效果较差,而 Weibull 模型、Logistic 模型在出苗后累积辐热积为 0 时,生长指标初始值均>0,与实际情况相符,且 Weibull 模型和 Logistic 模型的决定系数分别在 0.990 以上和 0.995 以上。因此,Weibull 模型和 Logistic 模型较适合模拟向日葵穴盘苗生长指标与出苗后累积辐热积的动态关系。本研究中所建模型采用辐热积作为模拟生长指标的时间尺度,克服了以往研究未考虑光温因子<sup>[7-8]</sup>或仅考虑温度因子对幼苗生长的影响<sup>[9]</sup>。

表 5 向日葵穴盘苗不同生长阶段指标生长量  
Table 5 Growth quantity of growth indexes of sunflower plug seedlings at different growth stages

| 生长指标                              | 渐增期             | 快增期             | 缓增期            |
|-----------------------------------|-----------------|-----------------|----------------|
| 幼苗干质量(g)                          | 0.053(30.36%)   | 0.104(58.97%)   | 0.019(10.67%)  |
| 叶片干质量(g)                          | 0.040(30.26%)   | 0.078(59.32%)   | 0.014(10.42%)  |
| 茎干质量(g)                           | 0.008(42.88%)   | 0.008(41.82%)   | 0.003(15.31%)  |
| 根干质量(g)                           | 0.008(33.01%)   | 0.012(49.04%)   | 0.004(17.95%)  |
| 总叶面积(g)                           | 3.524(21.65%)   | 10.922(67.09%)  | 1.834(11.27%)  |
| 叶面积(cm <sup>2</sup> )×<br>相对叶绿素含量 | 165.380(23.11%) | 466.230(65.15%) | 83.980(11.74%) |
| 幼苗鲜质量(g)                          | 0.520(25.74%)   | 1.280(63.33%)   | 0.221(10.93%)  |
| 叶片鲜质量(g)                          | 0.321(22.44%)   | 0.937(65.54%)   | 0.172(12.02%)  |
| 茎鲜质量(g)                           | 0.103(38.15%)   | 0.122(45.28%)   | 0.045(16.57%)  |
| 根鲜质量(g)                           | 0.106(28.66%)   | 0.192(52.23%)   | 0.070(19.12%)  |
| 幼苗株高(cm)                          | 2.760(43.52%)   | 3.051(48.12%)   | 0.531(8.37%)   |
| 幼苗茎粗(cm)                          | 0.191(80.08%)   | 0.041(17.12%)   | 0.007(2.80%)   |

括号内数据表示占总生长量的比例(%)。

表 6 向日葵穴盘苗不同生长阶段的平均生长速率  
Table 6 Average growth rate of growth indexes of sunflower plug seedlings at different growth stages

| 生长指标            | 平均生长速率 [mg/MJ·m <sup>2</sup> ] |       |       |
|-----------------|--------------------------------|-------|-------|
|                 | 渐增期                            | 快增期   | 缓增期   |
| 幼苗干质量           | 2.23                           | 4.90  | 1.83  |
| 叶片干质量           | 1.53                           | 3.82  | 1.57  |
| 茎干质量            | 0.28                           | 1.00  | 0.70  |
| 根干质量            | 0.43                           | 0.99  | 0.49  |
| 总叶面积            | 0.13                           | 0.63  | 0.17  |
| 叶面积×相对<br>叶绿素含量 | 6.76                           | 21.90 | 8.81  |
| 幼苗鲜质量           | 22.40                          | 75.79 | 14.54 |
| 叶片鲜质量           | 14.33                          | 44.73 | 14.37 |
| 茎鲜质量            | 3.70                           | 12.78 | 8.17  |
| 根鲜质量            | 4.18                           | 37.38 | 7.06  |
| 幼苗株高            | 1.07                           | 1.57  | 0.52  |
| 幼苗茎粗            | 0.07                           | 0.03  | 0.01  |

通过求解模拟方程的特征参数,可对向日葵穴盘苗生长动态特征进行定量分析<sup>[6]</sup>。根据方程特征参数将向日葵穴盘苗出苗后的生长过程分为渐增期、快增期和缓增期,比实际观测法更确切并更易操作<sup>[6]</sup>。本研究结果表明,各指标在出苗后累积辐热

积为22.40~27.84 MJ/m<sup>2</sup>(出苗后4~5 d)时陆续进入快增期,多数生长指标在累积辐热积为37.29~46.54 MJ/m<sup>2</sup>(出苗后9~11 d)时陆续进入缓增期,尽管幼苗快增期持续时间短,但快增期生长指标积累速率较大,快增期生长量占总生长量比例达41%~68%(茎粗除外)。根干质量在累积辐热积为18.49 MJ/m<sup>2</sup>(出苗后3 d)时进入快增期,在累积辐热积为30.38 MJ/m<sup>2</sup>(出苗后6 d)时进入缓增期,这表明根干质量的快速积累过程早于其他生长指标。因此在苗期管理上,幼苗缓增期应适当控水,以促进幼苗根系生长,幼苗生长快增期应加强肥水管理,创造幼苗快速生长的适宜条件,以延长快增期,增加快增期生长量,提高快增期生长量占总生长量的比例。缓增期各个指标的生长速率逐渐下降,其间应适量浇水,防止幼苗徒长,进行炼苗以提高幼苗抗逆性<sup>[7-8]</sup>。

郝水源等<sup>[23]</sup>研究认为,向日葵穴盘育苗期应控制在15~20 d,移栽过晚影响发育易形成小老苗。本研究中,多数生长指标在快增期结束时的累积辐热积在37.29~46.54 MJ/m<sup>2</sup>(出苗后9~11 d),对应的育苗期为16~18 d,根据向日葵穴盘苗生长模型特征参数,确定夏日微风穴盘苗适宜移栽期和各生长指标参考值,可为观赏向日葵夏日微风穴盘苗移栽提供一定的参考标准。本研究中向日葵穴盘苗生长模型仅考虑了温度和光合有效辐射的效应,而幼苗生长可能受多种因素的影响,如水分<sup>[24]</sup>、肥料<sup>[25]</sup>、穴盘规格<sup>[26]</sup>等,此外品种遗传因素对模型的预测性影响较大<sup>[23]</sup>,而本模型未考虑品种特性。因此在今后的研究中,应尽可能考虑更多影响因子,使模型能够准确地模拟不同影响因子对向日葵穴盘苗生长的影响。

参考文献:

[1] 宋良红,郭欢欢,侯少培,等. 观赏向日葵观赏价值评价体系的建立[J]. 河南科学,2015,33(6):934-937.  
[2] 中华农业科教基金会. 农业物种及文化传承[M]. 北京:中国农业出版社,2016:78.  
[3] 魏忠芬,奉 斌,李慧琳,等. 贵州观赏向日葵种质资源的挖掘与创新利用[J]. 贵州农业科学,2019,47(10):1-4,172.  
[4] 曾燕楠,王 勇,程润东,等. 保水剂在向日葵夏季高温育苗中的应用[J]. 浙江农业科学,2020,61(2):254-257,261.  
[5] 靳文东. 打造合理的向日葵主题园[J]. 中国花卉园艺,2019(4):34-35.  
[6] 李艳大,汤 亮,陈青春,等. 水稻地上部干物质积累动态的定

- 量模拟[J]. 应用生态学报, 2010, 21(6): 1504-1510.
- [7] 刘 君, 朱良其, 黑银秀, 等. 西兰花苗期生长模型的拟合和分析[J]. 浙江农业学报, 2016, 28(12): 2040-2046.
- [8] 于志民, 康文娟, 涂淑萍. 基于 Logistic、Gompertz 模型的圆齿野鸦椿幼苗生长模拟与分析[J]. 江西农业大学学报, 2017, 39(6): 1187-1195.
- [9] 王纪章, 赵青松, 李萍萍. 黄瓜穴盘苗生长过程及壮苗指数模型[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(9): 138-140.
- [10] 李建明, 邹志荣. 温度、光辐射及水分对温室甜瓜幼苗干物质积累与分配的影响及其模拟模型[J]. 应用生态学报, 2007, 18(12): 2715-2721.
- [11] 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, 21(12): 131-136.
- [12] 倪纪恒, 陈学好, 陈春宏, 等. 用辐射积法模拟温室黄瓜果实生长[J]. 农业工程学报, 2009, 25(5): 192-196.
- [13] 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.
- [14] 严兴初. 向日葵种质资源描述规范和数据标准[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006: 60.
- [15] 曹卫星, 朱 艳, 汤 亮, 等. 数字农作技术[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 164.
- [16] 苟 芳, 张立祯, 董宛麟, 等. 向日葵和马铃薯间作的生育期模拟模型[J]. 应用生态学报, 2012, 23(10): 2773-2778.
- [17] 纪洪亭, 冯跃华, 何腾兵, 等. 超级杂交稻群体干物质和养分积累动态模型与特征分析[J]. 中国农业科学, 2012, 45(18): 3709-3720.
- [18] 文 磊, 谭 美, 王四清. 大花蕙兰营养生长期植株生长与辐射积关系的模拟模型研究[J]. 园艺学报, 2014, 41(5): 1001-1008.
- [19] 陈永快, 黄语燕, 王 涛, 等. 基于有效积温的 NFT 栽培小白菜生长模型[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(17): 229-233.
- [20] 姚文静, 王 茹, 林树燕, 等. 翠竹实生苗生长发育规律及构件生物量模型拟合研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2020, 44(6): 103-110.
- [21] 刘伟明, 汪恩国, 何道根, 等. 西兰花穴盘育苗幼苗生长动态及其数学模型研究[J]. 农学报, 2012, 2(2): 46-53.
- [22] 沈 杰. 不同耐密性烤烟的密植效应及物质积累规律研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2017.
- [23] 郝水源, 李林虎, 李国强, 等. 向日葵穴盘育苗移栽技术: CN105123252A[P]. 2015-12-09.
- [24] 李建明, 邹志荣, 王忠红, 等. 甜瓜苗期温度与水稻驱动生长发育模拟模型的建立与验证[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2006, 34(8): 130-138.
- [25] 纪洪亭, 王 勇, 曾燕楠, 等. 基于主成分分析评价不同类型肥料对向日葵穴盘苗素质的影响[J]. 中国农学通报, 2020, 36(29): 100-106.
- [26] 闫联帮, 赵 瑞, 陈俊琴, 等. 苗龄和营养面积对甘蓝穴盘苗生长发育及品质的影响[J]. 西北农业学报, 2013, 22(6): 127-130.

(责任编辑: 陈海霞)