

# 新疆棉花亏缺灌溉叶面积指数模拟研究\*

吴立峰<sup>1</sup> 张富仓<sup>1,2</sup> 王海东<sup>1,2</sup> 周罕觅<sup>1,2</sup> 周建伟<sup>3</sup> 梁飞<sup>3</sup>

(1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西杨凌 712100;

3. 新疆农垦科学院农田水利与土壤肥料研究所, 石河子 832000)

**摘要:** 建立了充分灌溉和亏缺灌溉条件下新疆棉花叶面积指数的动态模拟模型。模型以基于 beta 函数的每日热效应为时间尺度, 在考虑土壤水分胁迫效应的基础上, 使用 Logistic 函数的一阶导数描述叶面积指数的变化速率, 叶片衰老过程同样采用 Logistic 函数的一阶导数, 并假设从初花期开始发生。该模型还考虑了土壤水分胁迫和温度对叶片衰老的加速效应。最后使用石河子棉花灌溉试验观测结果对模型进行了参数率定、验证和敏感度分析。验证结果显示: 充分灌水条件下叶面积指数的均方根误差 ( $R_{MSE}$ ) 为  $0.22 \text{ m}^2/\text{m}^2$ , 残差聚集系数 ( $C_{RM}$ ) 为  $-0.01$ ; 20% 和 40% 亏缺灌溉条件下叶面积指数的  $R_{MSE}$  和  $C_{RM}$  分别为  $0.37 \text{ m}^2/\text{m}^2$ 、 $-0.05$  和  $0.23 \text{ m}^2/\text{m}^2$ 、 $0$ 。此外, 叶面积指数的模拟值与实测值间  $R^2$  为  $0.96$ 。说明该模型准确地模拟了新疆棉花叶片全生育期的动态变化过程。敏感度分析结果表明, 在充分灌水条件下, 叶片潜在衰减面积、叶片日最大增加面积和衰减面积、初花期开始时间是影响模型的主要参数。

**关键词:** 棉花 亏缺灌溉 叶面积指数 Logistic 函数 beta 函数 模拟

中图分类号: S562; S311 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2015)01-0249-10

## Simulation of Cotton Leaf Area Index under Deficit Irrigation in Xinjiang

Wu Lifeng<sup>1</sup> Zhang Fucang<sup>1,2</sup> Wang Haidong<sup>1,2</sup> Zhou Hanmi<sup>1,2</sup> Zhou Jianwei<sup>3</sup> Liang Fei<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Area, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

3. Institute of Water and Soil Fertilizer, Xinjiang Academy of Agricultural Reclamation Sciences, Shihezi 832000, China)

**Abstract:** A leaf area index simulation model of cotton was developed under full and deficit irrigation in Xinjiang. The model was based on beta function of daily heat effect as time scales, and the effect of soil water stress was considered. One ordered derivative of the Logistic function was used to describe the changing rate of leaf area index. One ordered derivative of the Logistic function was also used to describe leaf senescence process and assumed that leaf senescence occurred since the early flowering. The acceleration effects of soil water stress and temperature on leaf senescence were also considered in the model. Finally field observations from Shihezi were used for model parameter calibration, evaluation and sensitivity analysis. Evaluation results showed that under the condition of full irrigation the root mean square error ( $R_{MSE}$ ) between simulated and observed leaf area index (LAI) values was  $0.22 \text{ m}^2/\text{m}^2$  and the residual accumulation coefficient ( $C_{RM}$ ) was  $-0.01$ . Under the condition of 20% and 40% deficit irrigation  $R_{MSE}$  and  $C_{RM}$  were  $0.37 \text{ m}^2/\text{m}^2$ ,  $0.05$  and  $0.05 \text{ m}^2/\text{m}^2$ ,  $0$ , respectively. In addition, the

收稿日期: 2014-09-07 修回日期: 2014-10-18

\* 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2011AA100504)、教育部高等学校创新引智计划(111 计划)资助项目(B12007)和高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20130204110030)

作者简介: 吴立峰, 博士生, 主要从事节水灌溉理论与技术研究, E-mail: china.sw@163.com

通讯作者: 张富仓, 教授, 博士生导师, 主要从事节水灌溉理论与技术研究, E-mail: zhangfc@nwsuaf.edu.cn

determination coefficient of linear relationship between simulated and observed LAI was 0.96. Simulation results showed that the model was accurate in describing the dynamic changing process of cotton LAI during the whole growth period in Xinjiang. Sensitivity analysis results showed that under the condition of sufficient water, potential leaf aging area, maximum daily leaf extension area and aging area, early flowering start time were the main parameters affecting the model. The model had a few parameters and it can be used to supply the LAI dynamic information for establishing the Xinjiang cotton growth model and evapotranspiration model.

**Key words:** Cotton Deficit irrigation Leaf area index Logistic function beta function Simulation

## 引言

新疆是我国棉花的主要产区,2013年的种植面积达到167多万 $\text{hm}^2$ ,总产量达350多万t,占全国产棉量一半左右。作物生长模拟模型通过数学模型将作物的生长发育、光合生产、器官建成和产量形成等过程及其所处环境和栽培管理技术体系连接成为一个整体,通过计算机定量计算并进行动态模拟,成为掌握作物生长发育状况、优化种植管理的重要手段<sup>[1]</sup>。精确模拟棉花叶片生长对棉花干物质积累和产量模拟以及耗水量的计算都有重要意义,此外,棉花叶片生长也受新增干物质质量的多少和分配给叶片比例的影响<sup>[2]</sup>。早在20世纪50年代,有学者就开始了叶面积指数(LAI)的研究<sup>[3]</sup>。

国内外许多学者从不同角度建立了棉花的叶面积动态模型。国外主要采用比叶面积<sup>[4-6]</sup>(SLA)方法。SLA方法是叶片单侧面积与干物质质量的比值,可以从叶片干物质的变化来估算叶面积的变化<sup>[2]</sup>。SLA很容易受光温水条件、叶片所处冠层位置、生育阶段的影响<sup>[7-9]</sup>。Tardieu等<sup>[10]</sup>指出,碳积累与叶片扩展并无直接联系,SLA不应该是模型的输入参数而应该是输出结果。国内张立桢等<sup>[11]</sup>采用辐热积(TEP)法建立了棉花模拟模型,张军等<sup>[12]</sup>在辐热积法基础上模拟了冠层的分布情况。潘学标等用SLA方法建立了COTGROW模型<sup>[13]</sup>。张怀志等用叶面积指数与光量子密度和消光系数的关系建立了高产群体适宜叶面积指数模型<sup>[14]</sup>。

尽管国外模型具有系统性、解释性强的优点,但是参数过多、参数需要进行本地化校正这些模型难以在我国大范围推广的主要制约因素。如WOFOST模型和CROPGRO模型模拟LAI分别有82和203个参数,并且其中65和147个参数依赖于干物质积累和物候期<sup>[15-16]</sup>。国内开发的模型具有计算简单、实用性强的优点,但在水分亏缺条件下的叶片研究还不是很充分,特别是在水分亏缺条件下LAI动态变化及其加速衰老模拟方面报道很少。因此,本文建立充分灌溉和亏缺灌溉条件下新疆棉花

叶面积指数的模拟方法,并对模拟结果进行评估,以为棉花干物质积累、产量形成和水分动态的模拟提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

#### 1.1.1 试验区概况

试验于2012年和2013年4—10月在新疆农垦科学院节水灌溉试验站进行,该试验站位于石河子市境内,属于温带大陆性干旱气候,无霜期168d,日照时数2770h,大于10℃积温3649℃,棉花生长期(5—10月)年均降水量121mm,2012和2013年降水量分别为62mm和123mm。地下水埋深在15m以下。试验区0~30cm土壤为砂壤土,土壤容重为1.51 $\text{g}/\text{cm}^3$ ,田间持水量0.32 $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ,土壤有机质含量18 $\text{g}/\text{kg}$ ,pH值7.8;30~100cm为粉质粘土,土壤容重1.45 $\text{g}/\text{cm}^3$ ,田间持水量0.36 $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ,有机质含量5 $\text{g}/\text{kg}$ ,pH值8.5。供试棉花为新陆早33号(*Gossypium hirsutum* cv. Xinluzao 33),参照该地区地膜覆盖,矮杆密植,干播湿出的棉花种植模式,播种日期为2012年5月1日和2013年4月27日,采用一膜三带六行滴灌模式,即一膜种植6行棉花,行距依次为20、55、20、55和20cm,膜间裸地宽60cm,株距10cm,小区长度15m,宽度4.6m。

#### 1.1.2 试验处理

试验设3个滴灌灌水量水平( $W_1$ :60% $ET_c$ ,  $W_2$ :80% $ET_c$ ,  $W_3$ :100% $ET_c$ ),各水平重复3次。2012年和2013年3个水平滴灌灌水量分别为291、368、445mm和267、329、392mm。除灌活苗水外,滴灌灌水量根据实测的大田20cm蒸发皿(ADM7型)自由水面蒸发量 $E_p$ 转换为蒸发蒸腾量 $ET_c$ <sup>[17]</sup>得出,其换算式为

$$ET_c = E_p K_{cp} \quad (1)$$

$$K_{cp} = K_p K_c \quad (2)$$

式中  $K_c$ ——作物系数  $K_p$ ——蒸发皿系数

$K_{cp}$ ——蒸发皿作物系数

参照文献[17],在棉花蕾期、花期、铃期、吐絮

期  $K_{cp}$  分别取 0.2、0.4、0.7、0.25, 降雨时对蒸发量进行修正<sup>[17]</sup>, 即

$$\Delta E_p = \frac{0.4P}{K_{cp}} - 0.8P \quad (3)$$

式中  $P$ ——降雨量, mm

$\Delta E_p$ ——修正后蒸发量

全生育期共灌水 9 次。滴灌施肥试验采用 16 mm 内径的内镶式薄壁迷宫滴灌带, 滴头流量为 1.8 L/h, 滴头间距为 30 cm, 每个小区前安置水表和球阀控制灌水量。施肥分 8 次进行, 除灌出苗水外, 每次在灌水中期随水滴施, 采用容量压差式施肥方式, 在生育期内分成等量 8 次施入, 施 N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 总量分别为 350、140、70 kg/hm<sup>2</sup>, 所用肥料为尿素、磷酸二氢铵和氯化钾。

### 1.1.3 测定项目与方法

#### (1) 叶面积指数

在棉花不同生育阶段, 在每个处理的小区随机选取 4 株植株用卷尺测量棉花每片叶片长度 ( $L$ ) 和宽度 ( $W$ ), 计算棉花叶面积指数 LAI<sup>[3]</sup> 为

$$R_{LAI} = \lambda \sum \frac{LW}{A} \quad (4)$$

式中  $\lambda$ ——叶片形状系数, 根据前期与网格法对比新陆早 33 号叶面积形状系数在全生育期介于 0.92 ~ 1.04 ( $n=22$ ), 为计算方便, 本文叶片形状系数统一取 1.0

$A$ ——单株棉花所占土地面积, m<sup>2</sup>

#### (2) 土壤水分

土壤水分测定采用干燥称量法。在每次灌水前、后以及播种前和收获后, 在每个小区膜中、膜间和裸地 3 个位置分别打土钻, 取土 (0 ~ 100 cm, 播前和收获时取 0 ~ 140 cm), 每 10 cm 取一次, 测定土壤含水率, 取 3 个位置平均值作为该层土壤含水率。

#### (3) 根系生长

在每个小区, 棉花盛花期和成铃期分别挖土壤剖面, 用自制长方形容器每隔 10 cm 分层取土块, 每块土体积为 10 cm × 10 cm × 20 cm, 观测最大根系深度。

## 1.2 模型建立

叶面积指数可以被描述成净叶面积与种植密度的函数<sup>[2]</sup>, 用于描述群体水平的叶面积增加和衰减的情况, 其计算式<sup>[2]</sup>为

$$R_{LAI} = 10^{-4} L_{net} P_D \quad (5)$$

式中  $L_{net}$ ——棉花的净叶面积, cm<sup>2</sup>/株

$P_D$ ——棉花群体密度, 株/m<sup>2</sup>

每日净叶面积 ( $L_{net}$ ) 可以描述为第  $i$  日叶面积增加量  $L_{gi}$  与衰减量  $L_{si}$  的差值<sup>[2]</sup>, 即

$$L_{neti} = L_{gi} - L_{si} \quad (6)$$

其中

$$L_{gi} = L_{gi-1} + \frac{dL_g}{di} \quad (7)$$

$$L_{si} = L_{si-1} + \frac{dL_s}{di} \quad (8)$$

式中  $L_{gi-1}$ ——第  $i-1$  日的叶面积增加量, cm<sup>2</sup>/株

$L_{si-1}$ ——第  $i-1$  日的叶面积衰减量, cm<sup>2</sup>/株

$i$ ——时间间隔, 取  $i=1$  d

$\frac{dL_g}{di}$ ——第  $i$  日叶面积日增加速率, cm<sup>2</sup>/(株·d)

$\frac{dL_s}{di}$ ——第  $i$  日叶面积日衰减速率, cm<sup>2</sup>/(株·d)

由于每天叶面积生长还受到积温的影响, 可以将  $\frac{dL_g}{di}$ 、 $\frac{dL_s}{di}$  的分子分母同时乘以  $dx_g$  和  $dx_s$ , 即

$$\frac{dL_g}{di} = \frac{dL_g}{dx_g} \frac{dx_g}{di} \quad (9)$$

$$\frac{dL_s}{di} = \frac{dL_s}{dx_s} \frac{dx_s}{di} \quad (10)$$

式中  $dx_g$ ——叶面积增加的累积  $f(T_g)$  的变化量

$dx_s$ ——叶面积衰减的累积  $f(T_s)$  的变化量

$f(T_g)$ 、 $f(T_s)$ ——温度与叶面积增加量、衰减量的函数, 是 0 ~ 1 的无量纲数值

$x_g$ 、 $x_s$ ——累积的  $f(T_g)$ 、 $f(T_s)$

叶面积增加速率可用 Logistic 曲线<sup>[18]</sup>的一阶导数<sup>[2]</sup>描述。使用 Logistic 曲线的一阶导数描述叶面积增加速率  $\frac{dL_g}{dx_g}$  而不使用 Logistic 曲线模拟  $L_g$  是因

为温度和水分供应的波动会直接影响  $\frac{dL_g}{dx_g}$ 。假定累积的  $L_g$  可以被分解为 3 个不同的阶段: 在第 1 阶段营养生长期  $L_g$  成倍的增长; 第 2 阶段  $L_g$  以线性增长, 叶面积增加和衰减速度相对稳定; 第 3 阶段  $L_g$  逐渐递减, 没有新的叶片产生只有叶片逐渐衰减。Logistic 曲线模拟叶面积增加和衰减的计算式<sup>[18]</sup>为

$$L_g = \frac{a_g}{1 + b_g e^{-c_g x_g}} \quad (11)$$

$$L_s = \frac{a_s}{1 + b_s e^{-c_s x_s}} \quad (12)$$

式中  $a_g$ 、 $a_s$ ——叶面积增加、衰减的潜在最大值

$b_g$ 、 $b_s$ ——叶面积增加、衰减的形状因子

$c_g$ 、 $c_s$ ——叶面积增加、衰减的速率常数

Logistic 曲线的一阶导数描述叶面积增加速率的计算式为<sup>[2]</sup>

$$\frac{dL_g}{dx_g} = \frac{a_g b_g c_g \exp(-c_g x_g)}{(1 + b_g \exp(-c_g x_g))^2} f(T_g) f(W_g) \quad (13)$$

$$\text{其中 } b_g = \frac{a_g}{L_{g0}} - 1 \quad (14)$$

$$c_g = \frac{4\Delta L_{gx\max}}{a_g} \quad (15)$$

$$f(T_g) = \begin{cases} \frac{2(T - T_{\min})^\alpha (T_{\text{opt}} - T_{\min})^\alpha - (T - T_{\min})^{2\alpha}}{(T_{\text{opt}} - T_{\min})^{2\alpha}} & (T_{\min} \leq T \leq T_{\max}) \\ 0 & (T < T_{\min} \text{ 或 } T > T_{\max}) \end{cases} \quad (16)$$

$$\text{其中 } \alpha = \frac{\ln 2}{\ln \left( \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\text{opt}} - T_{\min}} \right)}$$

式中  $f(W_g)$ ——水分胁迫函数

$L_{g0}$ ——出苗时叶面积,  $\text{cm}^2/\text{株}$

$\Delta L_{gx\max}$ ——基于  $x_g$  变化量的叶面积增加的最大变化速率,  $\text{cm}^2/(\text{株} \cdot x_g)$

$T$ ——日平均温度,  $^\circ\text{C}$

$T_{\min}$ ——最低温度,  $^\circ\text{C}$

$T_{\text{opt}}$ ——最适温度,  $^\circ\text{C}$

$T_{\max}$ ——最高温度,  $^\circ\text{C}$

$T_{\min}$ 、 $T_{\text{opt}}$ 、 $T_{\max}$  的具体数值见表 1。在第 1 次迭代中,  $L_{g0}$  取  $5 \text{ cm}^2/\text{株}$  [2], 之后其他次迭代中,  $L_{g0}$  由 Logistic 曲线在  $x_g = 0$  的值得出。

表 1 棉花出苗后各生育阶段的温度参数

Tab. 1 Temperature parameters of different growing stages from emergence  $^\circ\text{C}$

生育期	最低温度 $T_{\min}$	最适温度 $T_{\text{opt}}$	最高温度 $T_{\max}$
出苗-现蕾	17	26	35
现蕾-开花	19	28	35
开花-吐絮	15	26	35

水分胁迫函数  $f(W_g)$  参考 AquaCrop 模型的方法 [19-21], 计算步骤为:

(1) 估算每天的平均土壤含水率  $\theta$ : 采用灌水间隔内平均土壤含水率线性插值的办法计算得出。

(2) 计算根系有效深度  $Z$

$$Z = Z_0 + (Z_x - Z_0) \sqrt{\frac{t - t_0}{t_x - t_0}} \quad (17)$$

式中  $Z$ ——某日的根系有效深度, m

$Z_0$ ——出苗后的根系深度, m

$Z_x$ ——最大有效根系深度, m

$t_0$ ——出苗的播后天数, d

$t_x$ ——达到最大有效根系深度的天数, d

$t$ ——播后天数, d  $k$ ——形状系数

根据观测, 最大根系深度在 60%  $ET_c$ 、80%  $ET_c$  和 100%  $ET_c$  处理分别取 0.65、0.8 和 0.9 m, 达到最大根系深度的时间设为播后 90 d。

(3) 计算土壤水分消耗量  $D_r$

$$D_r = 1000(\theta_{FC} - \theta)Z \quad (18)$$

式中  $\theta_{FC}$ ——土壤田间持水率(体积含水率)

(4) 计算总可用水量  $T_{AW}$

$$T_{AW} = 1000(\theta_{FC} - \theta_{WP})Z \quad (19)$$

式中  $\theta_{WP}$ ——凋萎含水率(体积含水率)

(5) 计算土壤水分比例系数  $p$  和相对亏缺量  $S_{rel}$  分别为

$$p = \frac{T_{AW} - D_r}{T_{AW}} = \frac{\theta - \theta_{WP}}{\theta_{FC} - \theta_{WP}} \quad (20)$$

$$S_{rel} = \begin{cases} \frac{p_{upper} - p}{p_{upper} - p_{lower}} & (0.2 \leq p \leq 0.7) \\ 0 & (p > 0.7) \\ 1 & (p < 0.2) \end{cases} \quad (21)$$

式中  $p_{upper}$ 、 $p_{lower}$ ——水分胁迫开始抑制叶面积增加的上限、下限, 分别取 0.7、0.2 [21]

(6) 计算  $f(W_g)$

$$f(W_g) = 1 - \frac{e^{S_{rel}f_s} - 1}{e^{f_s} - 1} \quad (22)$$

式中  $f_s$ ——作物水分胁迫函数曲线的形状系数, 棉花取值为 3 [21]

水分胁迫函数与  $S_{rel}$ 、 $p_{upper}$ 、 $p_{lower}$ 、总可用水量百分比的关系见图 1 [21]。

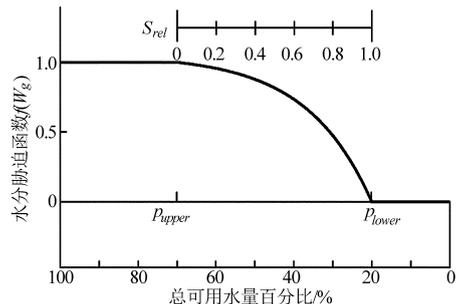


图 1 水分胁迫函数与土壤总储水量的关系  
Fig. 1 Relationship of total available water ( $T_{AW}$ ) and water stress function ( $f(W_g)$ )

假定棉花第 1 次开花时叶面积开始衰减 [22], 但使用与叶面积增加过程不同的温度加速衰减函数  $f(T_s)$  [2] 和水分胁迫加速衰减函数  $f(W_s)$ , 则用 Logistic 曲线的一阶导数描述叶面积衰减速率的计算式为 [2]

$$\frac{dL_s}{dx_s} = \frac{a_s b_s c_s \exp(-c_s x_s)}{(1 + b_s \exp(-c_s x_s))^2} f(T_s) f(W_s) \quad (23)$$

其中 
$$b_s = \frac{a_s}{L_{s0}} - 1 \quad (24)$$

$$c_s = \frac{4\Delta L_{sxmax}}{a_s} \quad (25)$$

$$f(T_s) = \begin{cases} \frac{T-4}{30-4} & (T > 4) \\ 0 & (T \leq 4) \end{cases} \quad (26)$$

$$f(W_s) = e^{\gamma(p-p_{sen})} \quad (0.7 < p < 1) \quad (27)$$

式中  $\Delta L_{sxmax}$  ——基于  $x_s$  变化量的叶面积衰减的最大变化速率,  $cm^2 / (株 \cdot x_s)$

$\gamma$  ——速率调节系数

$p_{sen}$  ——水分胁迫开始叶片加速衰减土壤水分比例系数

$L_{s0}$  ——开始衰减时的叶面积,  $cm^2 / 株$

在第 1 次迭代中,  $L_{s0}$  取  $6 cm^2 / 株$ , 之后的  $L_{s0}$  由 Logistic 曲线在  $x_s = 0$  的值决定。

### 1.3 模型参数敏感度分析

采用 OTA (1 次只改变 1 个参数) 法<sup>[23]</sup> 对模型参数进行敏感度分析, 每次计算每个参数变化幅度  $\pm 10\%$ , 最大变化幅度  $\pm 60\%$ , 如果超出参数取值范围则调整, 计算相对敏感度  $R_s$  为

$$R_s = \left| \frac{y(r + \Delta r) - y(r)}{y(r)} \frac{r}{\Delta r} \right| \quad (28)$$

式中  $r$  ——模型参数中的某一参数值

$\Delta r$  ——该参数的改变量

$y(r)$ 、 $y(r + \Delta r)$  ——参数改变前、后的模拟输出量

### 1.4 程序开发

使用 Microsoft Visual Studio 2010 作为开发环境, 面向对象语言 C# 进行编程。

### 1.5 统计分析

模拟值与试验观测值进行对比, 计算出均方根误差 ( $R_{MSE}$ ) 和残差聚集系数 ( $C_{RM}$ ), 对模型进行评价。

$$R_{MSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2} \quad (29)$$

$$C_{RM} = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n S_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (30)$$

式中  $n$  ——样本容量  $S_i$  ——模拟值

$O_i$  ——观测值

$R_{MSE}$  和  $C_{RM}$  越小, 表明模拟效果越好。  $R_{MSE}$  和  $C_{RM}$  使用 Excel 计算, 绘图使用 SigmaPlot 10。

## 2 结果与分析

### 2.1 模型参数率定

开花时间取田间观测值, 并转化为累积热效应,

取值  $48.8^\circ C / ^\circ C$ 。采用试错法对 2013 年棉花灌溉试验处理进行模拟和统计分析,  $a_g$ 、 $L_{g0}$ 、 $\Delta L_{gxmax}$  分别设定为  $1720$ 、 $5.90 cm^2 / 株$ ,  $a_s$ 、 $L_{s0}$ 、 $\Delta L_{sxmax}$  分别设定为  $900$ 、 $6$  和  $24 cm^2 / 株$ ,  $\gamma$  取 3。模拟结果如图 2 和图 3 所示, 模型可以比较精确地模拟 2013 年充分灌溉 ( $100\% ET_c$ ) 和亏缺灌溉 ( $60\% ET_c$ 、 $80\% ET_c$ ) 下的 LAI 变化情况。统计结果显示,  $R_{MSE}$  为  $0.06 m^2 / m^2$ ,  $C_{RM}$  为  $-0.01$ , 模拟值与实测值具有极好的相关关系。

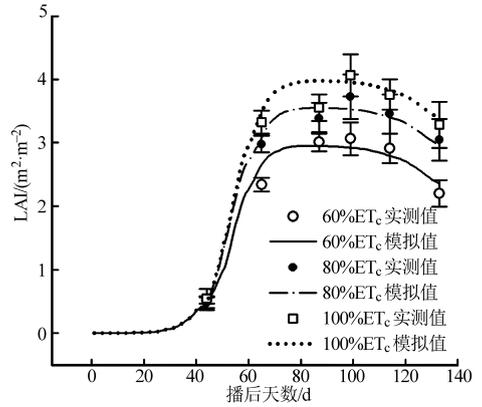


图 2 2013 年棉花生长季 LAI 实测值与模拟值  
Fig. 2 Measured and simulated LAI for 2013 growing season of cotton

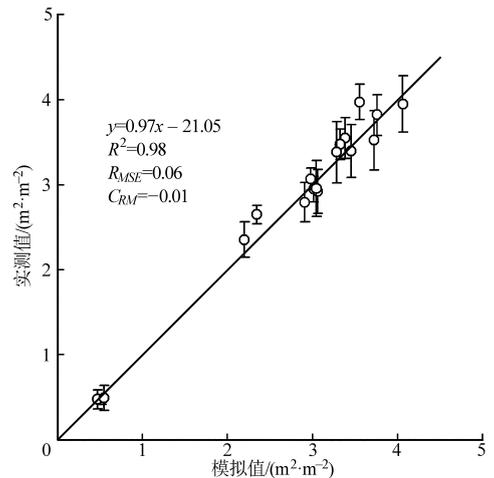


图 3 2013 年棉花生长季 LAI 实测值与模拟值相关关系  
Fig. 3 Measured and simulated LAI with 1:1 line for 2013 growing season of cotton

### 2.2 模型验证

使用 2012 年棉花灌溉试验的 3 个处理对模型进行验证, 结果如图 4 所示。在  $100\% ET_c$  处理下,  $f(W_g)$  仅在偶尔情况下小于 1, 其中播后 80 d 左右  $f(W_g)$  有一次明显的下降, 最低在 0.75 左右, 这是由于该时段棉花蒸腾强度最大, 而灌水周期仍维持在 10 d 左右造成的; 灌水后  $f(W_g)$  立刻恢复到 1 并能维持数日, 最后一次灌水直到收获,  $f(W_g)$  逐渐下降到 0.3 左右 (图 4a)。在  $80\% ET_c$  处理下,  $f(W_g)$

全生育期内有6次明显的下降和上升过程,其中85 d左右下降最剧烈, $f(W_g)$ 最低在0.4左右,也是由于该阶段蒸腾强度大而灌水周期维持在10 d左右造成的,而在灌水后 $f(W_g)$ 只能在1~2 d内维持在1,之后便急剧下降,在最后一次灌水后到收获,

$f(W_g)$ 逐渐下降,最低降至0.2以下(图4b)。在60%  $ET_c$ 处理下, $f(W_g)$ 变化比较剧烈,从播后70 d开始, $f(W_g)$ 主要在0.3~0.7之间波动,在最后一次灌水后到收获, $f(W_g)$ 逐渐下降,最低降至0,收获时根区土壤几乎没有水分可供棉花利用(图4c)。

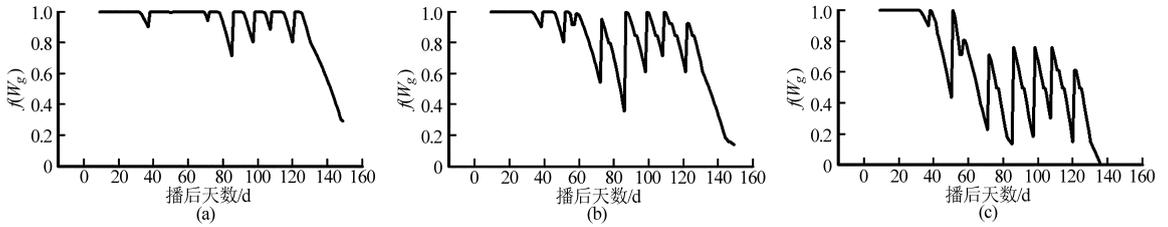


图4 不同灌溉处理2012年棉花生长期 $f(W_g)$

Fig. 4  $f(W_g)$  of different irrigation treatments for 2012 growing season of cotton

(a) 100%  $ET_c$ 处理 (b) 80%  $ET_c$ 处理 (c) 60%  $ET_c$ 处理

图5表明,在播后25 d以内,气温变化比较剧烈,此时棉花叶面积增长比较缓慢。在播后25 d以后模拟的棉花叶面积日最大增加量 LER 明显增大,直到播后55 d左右,由于此时出现了一次降温过程,LER 出现下降,随着温度升高 LER 增加,LER 呈现为双峰曲线。60%  $ET_c$ 和80%  $ET_c$ 处理

的 LER 曲线峰值和宽度都小于 100%  $ET_c$  处理。模拟的叶面积日最大衰减量 LSR 的峰值从大到小依次为 60%  $ET_c$ 、80%  $ET_c$  和 100%  $ET_c$  处理。LSR 曲线与横坐标轴之间的面积可以表示叶面积总衰减量,其值从大到小依次为 60%  $ET_c$ 、80%  $ET_c$  和 100%  $ET_c$  处理。

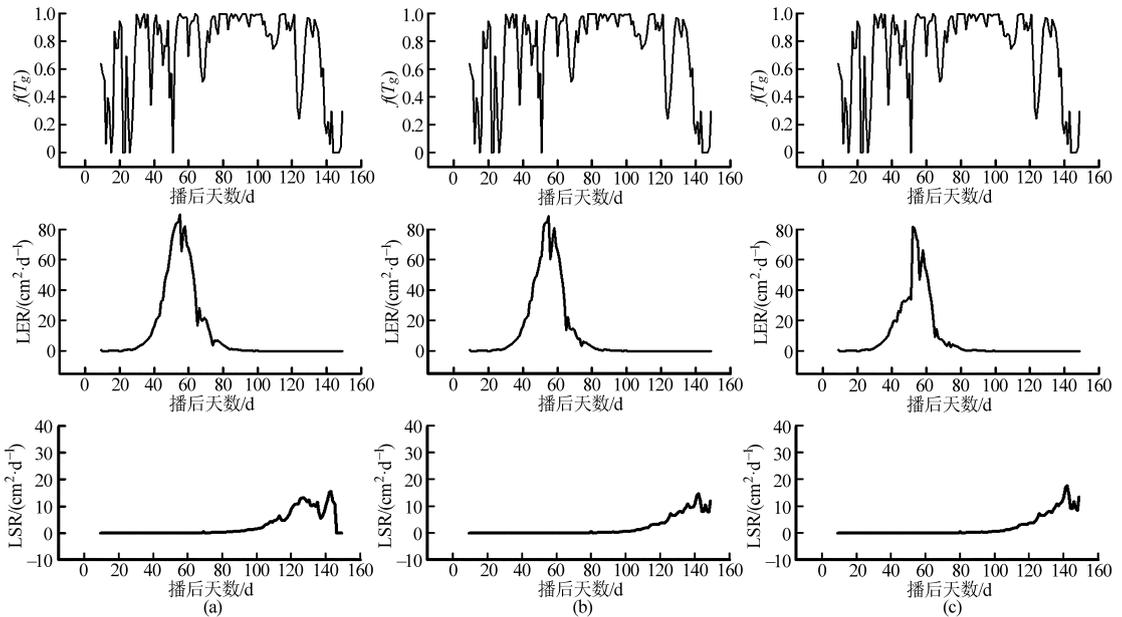


图5 不同灌溉处理2012年棉花生长期 $f(T_g)$ 、叶面积日最大增加量(LER)和叶面积日最大衰减量(LSR)曲线

Fig. 5  $f(T_g)$ , leaf expansion rate (LER) and leaf senescence rate (LSR) of different irrigation treatments

for 2012 growing season of cotton

(a) 100%  $ET_c$ 处理 (b) 80%  $ET_c$ 处理 (c) 60%  $ET_c$ 处理

图6为2012年棉花生长期LAI的模拟值与实测值。100%  $ET_c$ 、80%  $ET_c$ 和60%  $ET_c$ 处理模拟值与实测值的 $R_{MSE}$ 分别为0.22、0.37和0.23  $m^2/m^2$ , $C_{RM}$ 分别为-0.01、-0.05和0。综合3个处理实测值为变量,模拟值为自变量,二者之间呈较好线性相关关系(图7);模拟值与实测值的 $R_{MSE}$ 为0.16  $m^2/m^2$ , $C_{RM}$ 为-0.02。以上结果表明模型整体上很好地模拟了整个生育期LAI的变化, $C_{RM}$ 为负值说明模拟值略

高于实测值,主要是因为60%  $ET_c$ 和80%  $ET_c$ 处理的播后60~80 d,相比实测值,模拟值明显偏大。结合图5可以看出,100%  $ET_c$ 处理的LER更平滑,尤其是播后55 d左右,60%  $ET_c$ 和80%  $ET_c$ 处理LER都有接近垂直的增长,这与现实情况并不相符,造成这种现象的原因是模拟中并没有考虑到水分胁迫的补偿效应<sup>[24]</sup>,即忽略了前期水分胁迫对后期LAI变化的影响。

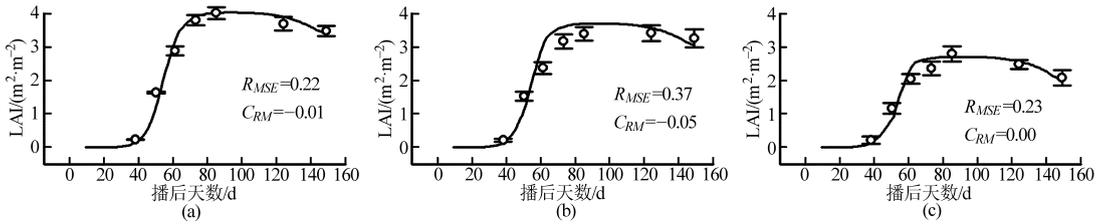


图 6 2012 年棉花生长季 LAI 模拟值与实测值

Fig. 6 Simulated and measured LAI for 2012 growing season of cotton

(a) 100% ET<sub>c</sub> 处理 (b) 80% ET<sub>c</sub> 处理 (c) 60% ET<sub>c</sub> 处理

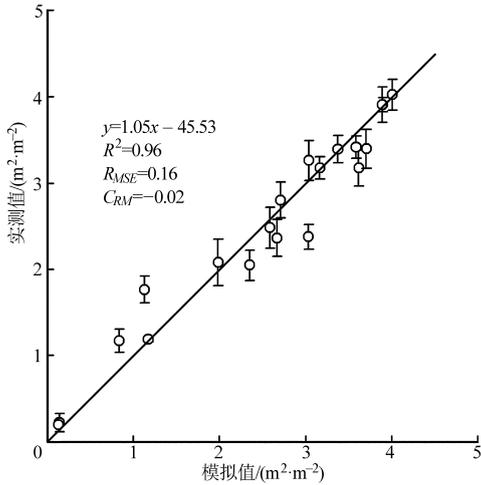


图 7 2012 年棉花生长季 LAI 实测值与模拟值相关关系

Fig. 7 Measured and simulated LAI with 1:1 line for 2012 growing season of cotton

### 2.3 模型参数敏感度分析

叶面积增加的 Logistic 函数参数 ( $a_g$ 、 $b_g$ 、 $c_g$ ) 变化对 LAI 的影响如图 8a ~ 8c 和表 2 所示。以 2012 年 100% ET<sub>c</sub> 处理为对照, 各参数变化对 LAI 的影响表现为  $a_g > c_g > b_g$ 。增加  $a_g$  会使快速增长期来得更晚, 获得更大的  $R_{LAI_{max}}$ , 稍小的  $L_{g0}$  和  $\Delta L_{gx_{max}}$ ; 反之,

减小  $a_g$ 、 $b_g$  会得到相反的结果。 $b_g$  和  $c_g$  的变化不会改变  $R_{LAI_{max}}$  的值, 增加  $b_g$  使快速增长期来得稍晚,  $L_{g0}$  明显下降; 减小  $b_g$  会得到相反的结果。增加  $c_g$  会使快速增长期来得更早,  $L_{g0}$  和  $\Delta L_{gx_{max}}$  更大。叶面积衰减的 Logistic 函数参数 ( $a_s$ 、 $b_s$ 、 $c_s$ ) 变化对 LAI 的影响如图 8d ~ 8f 所示。总体上, 各参数对 LAI 变化的影响表现为  $c_s > b_s > a_s$ 。增加  $a_s$  会使 LAI 后期下降更少,  $L_{s0}$  和  $\Delta L_{sx_{max}}$  明显下降; 减少  $a_s$  会使 LAI 后期下降更剧烈,  $L_{s0}$  和  $\Delta L_{sx_{max}}$  明显增大。减少  $b_s$  会比增加相同比例的  $b_s$  影响更大, 其中增加  $b_s$  会使 LAI 后期稍稍下降,  $L_{s0}$  和  $\Delta L_{sx_{max}}$  略有降低; 减少  $b_s$  会使 LAI 后期下降更快,  $L_{s0}$  和  $\Delta L_{sx_{max}}$  也明显增加。增加  $c_s$  会比减少相同比例的  $c_s$  影响更大, 其中增加  $c_s$  会使 LAI 后期略有下降,  $L_{s0}$  和  $\Delta L_{sx_{max}}$  明显增大; 减少  $c_s$  会使 LAI 后期急剧下降,  $L_{s0}$  和  $\Delta L_{sx_{max}}$  明显减小。

表 3 表明,  $\Delta L_{gx_{max}}$  对  $R_{LAI_{max}}$  影响最大, 相对敏感度为 1.278 2。其余参数对  $R_{LAI_{max}}$  影响不大。 $\Delta L_{gx_{max}}$  和  $T_{s0}$  对  $T_{LAI_{max}}$  的相对敏感度均超过了 1, 表现为参数  $\Delta L_{gx_{max}}$  和  $T_{s0}$  从减少 60% 变化到增加 60%,  $T_{LAI_{max}}$  从延后 20% 左右的天数变化到提前 40% 以上的天

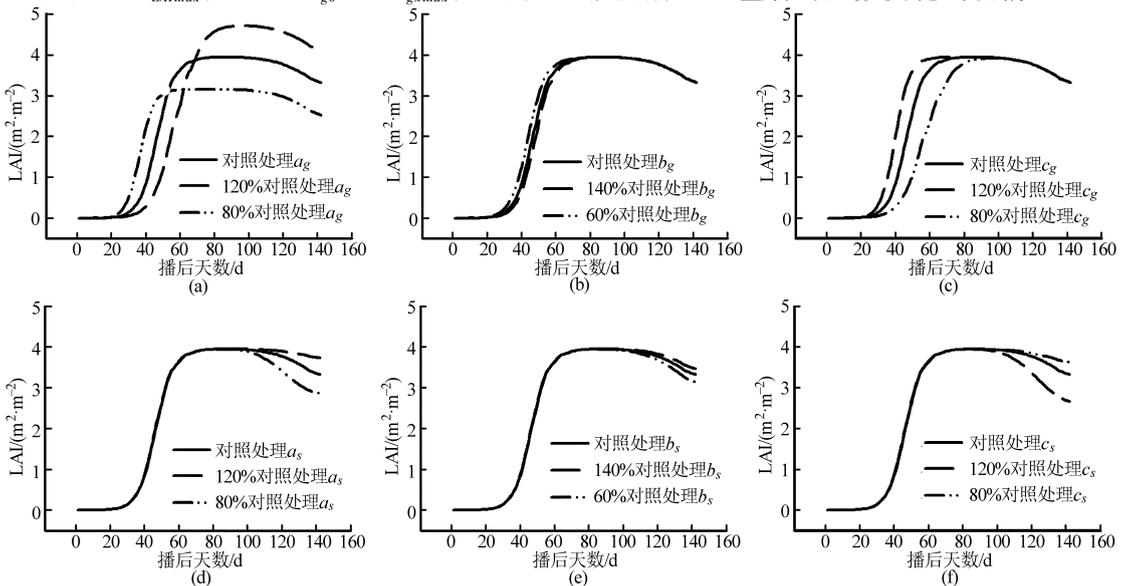


图 8 调整 Logistic 函数参数对叶面积指数的影响 (对照为 2012 年 100% ET<sub>c</sub> 处理)

Fig. 8 Simulated LAI as affected by modifying of Logistic equation parameters (control was 100% ET<sub>c</sub> treatment in 2012)

(a)  $a_g$  (b)  $b_g$  (c)  $c_g$  (d)  $a_s$  (e)  $b_s$  (f)  $c_s$

表2 调整 Logistic 函数参数对叶面积相关参数的影响

Tab.2 Simulated parameters related to LAI as affected by modifying of Logistic equation parameters

参数	处理	$L_{g0}$	$\Delta L_{gxmax}$	参数	处理	$L_{s0}$	$\Delta L_{sxmax}$
$a_g$	对照处理	0.74	89.7	$a_s$	对照处理	0.65	13.9
	120% 对照处理	0.60	87.7		120% 对照处理	0.53	6.9
	80% 对照处理	0.96	88.5		80% 对照处理	0.84	18.8
$b_g$	对照处理	0.74	89.7	$b_s$	对照处理	0.65	13.9
	140% 对照处理	0.53	88.3		140% 对照处理	0.46	13.1
	60 对照处理	1.23	87.8		60 对照处理	1.07	15.1
$c_g$	对照处理	0.74	89.7	$c_s$	对照处理	0.65	13.9
	120% 对照处理	0.92	104.2		120% 对照处理	0.82	21.2
	80% 对照处理	0.58	70.8		80% 对照处理	0.51	7.2

注:对照为 2012 年 100% ET<sub>c</sub> 处理。

数。 $\Delta L_{sxmax}$  对  $T_{LAImax}$  影响的相对敏感度为 0.382 4, 表现为参数  $\Delta L_{sxmax}$  从减少 60% 变化到增加 60%,  $T_{LAImax}$  从延后 5% 天数变化到提前 10% 左右天数(图 9)。

表3 模型校准所用参数的相对敏感度

Tab.3 Model parameters calibration of relative sensitivity

参数	$L_{g0}$	$L_{s0}$	$T_{g0}$	$\Delta L_{gxmax}$	$\Delta L_{sxmax}$	$T_{s0}$
$R_{LAImax}$	0.000 4	0.000 1	0.004 9	1.278 2	0.002 1	0.148 0
$T_{LAImax}$	0.117 6	0.117 6	0.073 5	1.500 0	0.382 4	1.118 0

注:对照为 2012 年 100% ET<sub>c</sub> 处理。 $T_{g0}$  为叶面积开始增加时间, d;  $T_{s0}$  为叶面积开始衰减时间, d。

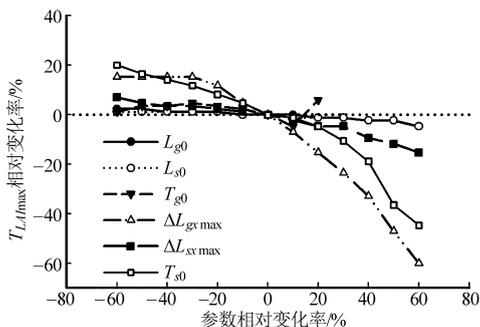


图9 关键参数变化时最大叶面积指数出现时间的变化

Fig.9 Simulated  $T_{LAImax}$  as affected by changes in key parameters associated with leaf expansion and senescence

### 3 讨论

Chapman 等<sup>[24]</sup>最早使用 Logistic 函数的一阶导数描述了向日葵叶面积增加与衰减过程, Setiyono 等<sup>[2]</sup>把种植密度与 Logistic 函数的参数进行回归分析,建立了充分供水条件下大豆的叶面积动态模型,并把输入参数减少到 2 个,但其研究并没有评估不同水分亏缺程度对 LAI 的影响。本研究考虑了不同水分亏缺对 LAI 的影响,借鉴 AquaCrop 模型中的水分敏感指数计算方法模拟了充分灌溉和亏缺灌溉下棉花的 LAI 动态变化。

本模型建立的前提是假设温度和水分是叶片发

育和衰老的关键驱动因素。在新疆地区气候干燥少雨,光照资源丰富,光周期效应会影响初花时间,但不是影响棉花叶面积发育和衰老的主要因素。因此,本模型的适用范围是仅受温度和水分胁迫的环境下棉花叶片生长和衰老过程。

在基于 Logistic 函数一阶导数的叶面积指数模型中,充分供水条件下,模型需要确定的参数有 7 个,  $b_g$  和  $b_s$  可以通过公式计算得出,通过敏感度分析发现其对模拟结果的影响很小,可以不做校正。张怀志等<sup>[15]</sup>建立模型模拟的石河子地区高产适宜  $R_{LAImax}$  为 3.76 ~ 4, 与本研究中实测的充分灌水处理  $R_{LAImax} = 4.06$  非常接近,而本模型中通过校正调参得到的  $a_g$  在当前种植密度下换算成  $R_{LAImax}$  为 4.04。在没有水分胁迫作用或者作用较轻时,模型只剩下 4 个参数 ( $\Delta L_{gxmax}$ 、 $a_s$ 、 $\Delta L_{sxmax}$ 、 $T_{s0}$ ) 需要校正,这 4 个参数都具有明确的生物学意义,可以通过观测获得;在水分胁迫作用比较严重时,可以参考 AquaCrop 模型棉花的缺省值或本地化参数。

叶片衰老是植物发育过程中的正常生命现象,具有重要的生物学意义<sup>[25]</sup>。然而在作物模型中,这一过程往往没有受到足够的重视。衰老过程中伴随着水解化合物的大量重组,并将它们运输到新生组织或者籽粒中<sup>[26]</sup>。叶片衰老主要受叶龄的影响,此外还受到干旱、温度等因素的影响<sup>[27-29]</sup>。水分胁迫会增加叶片细胞内脱落酸(ABA)的浓度,ABA 会影响细胞膜的透性,加速叶片衰老。文汉等<sup>[30]</sup>和石岩等<sup>[31]</sup>分别研究了干旱对水稻和小麦旗叶衰老的影响,认为干旱将引起植物产生一系列变化,加速叶片衰老。然而不同程度的水分亏缺与叶片衰老的定量研究结果还未见报道。本研究根据经验公式描述了水分胁迫加速叶片衰老的过程(式(27)),当  $p$  值达到  $p_{sen}$  时,叶片开始加速衰老,随着  $p$  值的提高,叶片衰老速度加快,叶片衰老的速度由参数  $\gamma$  控制。由于观测结果有限,该计算式是否可以准确描述叶片

衰老过程以及参数值的选取还有待进一步的研究。

由于本模型中要用到根系深度信息来计算  $f(W_g)$  和  $f(W_s)$ , 而在同样的土壤含水量条件下根系深度随土壤类型的变化会有很大差异。因此, 本研究所建立的模型在其他土壤条件下的应用可能会有很大的局限性, 今后会在土壤质地对根系生长的影响方面加以改进。

## 4 结论

(1) 统计分析显示, 本模型能够较准确地预测在充分和亏缺灌溉下 LAI 的动态变化。在 100%  $ET_c$ 、80%  $ET_c$  和 60%  $ET_c$  下, 利用 2012 年棉花生长季 LAI 对模型进行了验证, 模拟值与实测值之间的  $R_{MSE}$  分别为 0.22、0.37 和 0.23  $m^2/m^2$ ,  $C_{RM}$  分别为

-0.01、-0.05 和 0; 综合 3 个处理拟合的回归曲线决定系数为 0.96。

(2) 模拟结果显示, 在亏缺灌溉条件下, LAI 快速增长阶段的模拟值与实测值相比, 播后 55 ~ 80 d 模拟值偏大, 这是由于本研究中并未考虑到亏缺灌溉的后效应的影响, 即亏水后复水 LAI 增长采取了完全补偿的增长量模拟。

(3) 相对敏感度分析(参数值在  $\pm 60\%$  内变化)结果显示, 叶面积指数日最大增长量 ( $\Delta L_{gmax}$ ) 是最大叶面积指数及其出现时间的主要影响因素, 此外, 叶面积开始衰减时间 ( $T_{d0}$ ) 和叶面积日最大衰老量 ( $\Delta L_{gmax}$ ) 对最大叶面积指数的出现时间也有明显的影响。

## 参 考 文 献

- 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.
- Setiyono T D, Weiss A, Specht J E, et al. Leaf area index simulation in soybean grown under near-optimal conditions[J]. Field Crops Research, 2008, 108(1): 82 - 92.
- Watson D J. Comparative physiological studies in the growth of field crops. I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years[J]. Annals of Botany, 1947, 47(11): 41 - 76.
- Boote K J, Jones J W, Hoogenboom G, et al. Plant growth and partitioning model[M]//Jones J W, Hoogenboom G, Wilkens P W, et al. Decision Support System for Agrotechnology Transfer Version 4.0; Crop Model Documentation. Honolulu, Hawaii: University of Hawaii, 2003: 100 - 102.
- Supit I, Van der Groot E. Updated system description of the WOFOST crop growth simulation model as implemented in the crop growth monitoring system applied by the European Commission[M]. Heelsum, The Netherlands: Treemail Publisher, 2003.
- Rishi P Singh, P V Vara Prasad, K Sunita, et al. Influence of high temperature and breeding for heat tolerance in cotton: a review[J]. Advances in Agronomy, 2007, 93: 313 - 385.
- Gunn S, Farrar J F, Collis B E, et al. Specific leaf weight in barley: individual leaves versus whole plants[J]. New Phytologist, 1999, 143(1): 45 - 51.
- Marcelis L F M, Heuvelink E, Goudriaan J. Modelling biomass production and yield of horticultural crops: a review[J]. Scientia Horticulturae, 1998, 74(1 - 2): 83 - 111.
- 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)
- Tardieu F, Granier C, Muller B. Modeling leaf expansion in a fluctuating environment: are changes in specific leaf area a consequence of changes in expansion rate? [J]. New Phytologist, 1999, 143(1): 33 - 43.
- 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)
- 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)
- 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)
- 张怀志, 曹卫星, 周治国, 等. 棉花适宜叶面积指数的动态知识模型[J]. 棉花学报, 2003, 15(3): 151 - 154.
- Zhang Huaizhi, Cao Weixing, Zhou Zhiguo, et al. A dynamic knowledge model for optimal LAI in cotton[J]. Cotton Science, 2003, 15(3): 151 - 154. (in Chinese)
- Boogard H L, van Diepen C A, Rotter R P, et al. User's guide for the WOFOST 7.1 crop growth simulation model and WOFOST control center 1.5. technical document 52[R]. Wageningen, the Netherlands: DLO Winand Staring Centre, 1998.

- 16 Boote K J, Jones J W, Hoogenboom G. Simulation of crop growth: CROPGRO model[M]//Peart R M, Curry R B. Agricultural Systems Modeling and Simulation. New York Marcel Dekker, Inc., 1998;651 - 692.
- 17 张寄阳,段爱旺,申孝军,等. 基于蒸发量的膜下滴灌棉花灌溉预警装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2010,41(9): 56 - 59, 89.  
Zhang Jiyang, Duan Aiwang, Shen Xiaojun, et al. Design and experiment of scheduling irrigation device based on pan evaporation for drip-irrigated cotton under plastic mulch[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(9): 56 - 59, 89. (in Chinese)
- 18 Milthorpe F L, Moorby J. An introduction to crop physiology[M]. New York: Cambridge University Press,1980.
- 19 Steduto P, Hsiao T C, Raes D, et al. AquaCrop—The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles[J]. Agronomy Journal, 2009, 101(3): 426 - 437.
- 20 Raes D, Steduto P, Hsiao T C, et al. AquaCrop version 4.0, chapter 3 calculation procedures[R]. Rome, Italy: FAO, Land and Water Division, 2009.
- 21 Farahani H J, Izzi G, Oweis T Y. Parameterization and evaluation of the AquaCrop model for full and deficit irrigated cotton[J]. Agronomy Journal, 2009, 101(3), 469 - 476.
- 22 Burke J J, Kalt-Tores W, Swafford J, et al. Studies on genetic male-sterile soybeans. III. The initiation of monocarpic senescence[J]. Plant Physiology, 1984,75(4): 1058 - 1063.
- 23 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京:高等教育出版社,2002.
- 24 Chapman S C, Graeme L, Hammer L, et al. A sunflower simulation model: I. Model development[J]. Agronomy Journal, 1993, 85(3): 725 - 735.
- 25 李晴,朱玉贤. 植物衰老的研究进展及其在分子育种中的应用[J]. 分子植物育种,2003,1(3):289 - 296.  
Li Qing, Zhu Yuxian. The progress of plant senescence research and plant molecular breeding [J]. Molecular Plant Breeding, 2003,1(3):289 - 296. (in Chinese)
- 26 Nam H G. The molecular genetic analysis of leaf senescence[J]. Current Opinion in Biotechnology, 1997, 8(2): 200 - 207.
- 27 赵丽英,邓西平,山仑. 水分亏缺下作物补偿效应类型及机制研究概述[J]. 应用生态学报,2004,15(3):523 - 526.  
Zhao Liying, Deng Xiping, Shan Lun. A review on types and mechanisms of compensation effect of crops under water deficit[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(3): 523 - 526. (in Chinese)
- 28 Rainer Messmer, Yvan Fracheboud, Marianne Bänziger, et al. Drought stress and tropical maize: QTLs for leaf greenness, plant senescence, and root capacitance[J]. Field Crops Research, 2011,124(1): 93 - 103.
- 29 Junwhan Kim, Jiyoung Shon, Chung-Kuen Lee, et al. Relationship between grain filling duration and leaf senescence of temperate rice under high temperature[J]. Field Crops Research, 2011, 122(3):207 - 213.
- 30 文汉,聂凡. 干旱对水稻抽穗后旗叶衰老和产量构成因子的影响[J]. 安徽农业大学学报,2000,27(2): 135 - 137.  
Wen Han, Nie Fan. Effects of drought on senescence of flag leaf and yield factors in rice[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2000, 27(2): 135 - 137. (in Chinese)
- 31 石岩,于振文,位东斌,等. 土壤水分胁迫对小麦根系与旗叶衰老的影响[J]. 西北植物学报,1998,19(2):196 - 201.  
Shi Yan, Yu Zhenwen, Wei Dongbin, et al. Effects of soil water stress on the senescence of root system and flag leaves in wheat[J]. Acta Botanica Boreali, 1998, 19(2): 196 - 201. (in Chinese)