

## 棉花茎枝叶形态模型研究

周娟, 姜爽, 陈兵林\*, 周治国\*, 孟亚利

(南京农业大学/江苏省信息农业高技术研究重点实验室, 南京 210095)

**摘要:**在 2005—2006 年盆栽试验基础上, 系统分析了生态因子对棉花主茎叶、果枝叶和主茎节间、果节形态发生的影响, 量化了温度、氮素、水分、化控(DPC)等与棉花各器官形态建成的关系, 构建了基于有效积温(GDD)、以 Logistic 模型为基础的棉花主茎和果枝的叶片长度、宽度、叶柄长度及主茎节间、果节长度和粗度形态发生的动态模型。利用不同氮素水平、不同品种、水分、化控试验资料对模型进行了检验。结果表明, 棉花主茎和果枝的叶片长度和宽度、叶柄长度及主茎节间、果节长度和粗度的模拟值与观察值之间均方差根(RMSE)分别为 0.66 cm、0.87 cm、0.77 cm、0.57 cm、0.77 mm、0.43 cm、0.55 cm、0.43 cm、0.73 cm、0.56 mm, 棉花器官形态发生的模拟值与观测值具有较好的吻合度, 说明模型具有较好的预测性和准确性。

**关键词:**棉花; 主茎叶; 主茎节间; 果枝叶; 果节; 形态模型

**中图分类号:**S562 **文献标识码:**A

**文章编号:**1002-7807(2009)-03-0206-06

## Study of Morphologic Model of Stem, Branch and Leaf in Cotton

ZHOU Juan, JIANG Shuang, CHEN Bing-lin\*, ZHOU Zhi-guo\*, MENG Ya-li

(Nanjing Agricultural University / Hi-Tech Key Laboratory of Information Agriculture, Jiangsu Province, Nanjing 210095, China)

**Abstract:** Based on the potted plant research in 2005—2006, the effects of ecotypic factors on the length of internode of main stem, the length of fruit node, the shape of main stem leaf and sympodial leaf were analyzed. The effects of temperature, nitrogen, water and DPC were quantified on each organ's development. The physiological dynamic simulation model of the length and width of leaves of main stem and fruit branch, the length of leafstalk of main stem, internode of main stem and the length and thickness of fruit node were constructed based on GDD and Logistic model. The model was validated by the data from different nitrogen input levels and varieties, RMSE between simulated and observed values of the length and width of main stem leaves and sympodial leaves, the length of main stem leafstalk, the length of main stem internode and the length and diameter of fruit node were 0.66 cm, 0.87 cm, 0.77 cm, 0.57 cm, 0.77 mm, 0.43 cm, 0.55 cm, 0.43 cm, 0.73 cm, 0.56 mm. The simulated and observed values were inosculated well, which indicated that the prediction veracity of this model was good.

**Key words:** cotton; main stem leaf; length of main stem internode; sympodial leaves; fruit node; morphologic model

国内外对植物形态模型的研究较多。国外较为典型的有 Lindenmayer<sup>[1]</sup>开发的 L 系统, Chen、Watanebe、Takenaka 等<sup>[2-4]</sup>构建的杨树、三维树、

水稻等植物形态模型。在国内, 陈国庆、石春林、郭新宇等<sup>[5-7]</sup>构建了小麦、玉米、水稻等作物叶片、叶鞘、节间及根系的形态模型。

收稿日期: 2007-06-15

作者简介: 周娟(1982-), 女; \* 通讯作者, giscott@njau.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助(30771277)

在棉花形态模型研究方面,国外 Room、Jallas、Hanan 等<sup>[8-10]</sup>将棉花结构模型与棉花生长模型相结合,对棉花叶、茎、枝、铃等各个器官进行形态虚拟研究,虚拟的效果较好。但是,由于棉花具有无限开花结铃习性,现有模型还不能够对棉铃生长位置进行准确定位,不能够在碳、氮供应不足时准确预测棉铃的生长优先顺序。国内对棉花形态模型的研究较少,杨娟等<sup>[11]</sup>构建的棉花叶片、铃、花瓣等个别器官的几何模型,没有考虑环境因子对棉花形态生长的动态过程的影响。

借鉴前人的研究成果,本研究在大量试验基础上,根据棉花主茎叶、果枝叶和主茎节间、果节形态变化随环境影响因子的变化特征,构建以有效积温为驱动变量的棉花器官形态模型,旨在为实现棉花器官形态生长过程的动态虚拟显示提供依据,为实现棉花的虚拟生长奠定基础。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验设计

试验于 2005—2006 年在南京农业大学卫岗试验站进行,采用盆栽方法。供试土壤为黄棕壤土,耕层土壤 pH 为 7.5,含有有机质 17.8 g·kg<sup>-1</sup>、全氮 0.9 g·kg<sup>-1</sup>、碱解氮 74.6 mg·kg<sup>-1</sup>、速效磷 37.1 mg·kg<sup>-1</sup>、速效钾 91.6 mg·kg<sup>-1</sup>。试验所用盆钵高 55 cm、直径 60 cm,每盆装土 25 kg。土壤经自然风干、粉碎、过筛去杂后装盆,加水沉实。两年试验均于 4 月 25 日播种,出苗后每盆留生长一致的壮苗 1 株,7 月 25 日打顶。其它管理措施按高产栽培要求进行。共设置五组试验:

试验 1:品种试验。以德夏棉 1 号(特早熟品种,用 Dexia-1 表示,生育期 100 d)、美棉 33B(中熟品种,用 Meimian-33B 表示,生育期 120 d)和科棉 1 号(中晚熟品种,用 Kemian-1 表示,生育期 135 d)为供试品种。每品种种植 4 盆。

试验 2:播种期试验。以德夏棉 1 号、美棉 33B 和科棉 1 号为供试品种。设置 4 个(4 月 25 日、5 月 25 日、6 月 10 日和 6 月 22 日)播期,每播期各品种种植 4 盆。

试验 3:氮素试验。以美棉 33B 为供试品种。根据 240 kg·hm<sup>-2</sup> 是南京地区棉花高产适宜施氮量的研究结果<sup>[12]</sup>,设置 3 个氮素水平:0、2.7 和 5.3 g·pot<sup>-1</sup>(分别相当于 0、240 和 480 kg·hm<sup>-2</sup>)。所用氮肥为尿素,均按基肥 50%、花铃肥

50%施入。每处理种植 4 盆。

试验 4:水分试验。以美棉 33B 为供试品种。设置两个水平:一是正常灌水处理,土壤相对含水量(土壤相对含水量=土壤含水量/田间持水量)始终保持在 75%左右;二是花铃期干旱,即 7 月 29 日,将正常灌水的棉株停止灌水使其土壤含水量逐渐自然减少变旱持续 8 d,待棉株出现萎蔫症状时,复水至正常灌水水平直至收获。每处理种植 12 盆。

试验 5:DPC 化控试验。以科棉 1 号为供试品种。设置两个处理:一是全程化控,全生育期使用 DPC 1.17 mg·pot<sup>-1</sup>(相当于大田的 105 g·hm<sup>-2</sup>),蕾期、开花期、打顶后分别施用 0.167、0.417、0.583 mg·pot<sup>-1</sup>(相当于大田的 15、37.5、52.5 g·hm<sup>-2</sup>);二是不化控。每处理种植 3 盆。

两年试验均于 4 月 25 号播种。气象资料来源于试验所在地南京市气象局。

### 1.2 试验方法

试验 1~5 自棉花出苗开始,利用直尺和游标卡尺每 3 d 测量一次各处理棉花主茎叶片和果枝叶片的长度(自中裂片尖端到叶片基部)、宽度(靠近叶片基部占叶长 1/3 处垂直叶长的直线)、叶柄长度、主茎节间和果节长度、粗度,至棉花主茎叶、果枝叶、主茎节间及果节定长后停止测量。

### 1.3 模型检验

采用国际上通用的均方根差(RMSE)<sup>[12]</sup>对模拟值和观察值之间的吻合度进行统计分析,并进行模型验证, RMSE 值越小说明模型的预测精度越高。

$$RMSE = \sqrt{1/n \times \sum_{j=1}^n (S_j - O_j)^2}$$

式中  $n$ 、 $S_j$ 、 $O_j$  分别表示样本数、模拟值、观测值。

## 2 结果与分析

### 2.1 模型的描述

棉花主茎、果枝、主茎叶等器官的形态生长受品种、温度、光照、氮素、水分、化控等因子的影响,在众多生态环境影响因子中温度对棉花形态生长影响较大<sup>[13]</sup>。因此,本研究首先在没有氮素、水分、化控等胁迫的理想条件下,确定了棉花各器官的生长规律与有效积温间的定量关系。2005 年试验表明,随着有效积温的增长,棉花各个器官形态生长都有一个由慢到快再到慢的生长过程,符合 S 型曲线。基于此,本研究以 Logistic 方程为

基础,以有效积温为驱动变量,构建了较理想的棉花茎、枝、叶等各个器官形态模型。再综合考虑氮素、水分、化学调控等因子对棉花器官生长的影响,分别构建了各个影响因子的效应函数。

## 2.2 主要效应因子函数的确定

**2.2.1 温度。**棉花主茎叶、果枝叶开始平展及主茎节间、果节开始伸长所需的 $\geq 12^{\circ}\text{C}$ 有效积温是不同的,可用下列通式表示:

$$IniLGDD_n = LGDD + \sum_{j=1}^{n-1} PHYLL_j \quad (1)$$

式中  $IniLGDD_n$  表示主茎叶、果枝叶、主茎节间和果节从播种至各器官开始出现所需的有效积温( $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ )。LGDD 表示棉花从播种至主茎叶或果枝叶开始出现所需的有效积温。2005 年试验表明,德夏棉 1 号、科棉 1 号、美棉 33B 各品种第一片真叶开始出现的有效积温相差较小约为  $62^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ ,但果枝叶开始出现的时间不同,分别为 5 月 21、27、29 日,第 1 果节开始生长的有效积温分别为 115、147、159 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ 。计算方法如下:

$$LGDD = \sum_{i=1}^n (t_i - t_0) \quad (2)$$

式中  $n$  表示从出苗至棉花的茎、枝、叶开始出现的天数; $t_i$  表示日均温; $t_0$  表示棉花苗期或蕾期内生长所需最低临界温度值(出苗到现蕾阶段为  $17^{\circ}\text{C}$ ,现蕾到开花阶段为  $19^{\circ}\text{C}$ )<sup>[13]</sup>。

$PHYLL_j$  表示棉花茎、枝、叶相继出现所需的有效积温(热时间间隔),随棉花生育时期的不同而不断变化,本研究采用等隔期<sup>[13]</sup>进行描述,计算方法为:

$$PHYLL_j = DD \times (t_j - t_0) \quad (3)$$

式中  $PHYLL_j$  表示热时间间隔,DD 表示等隔期天数; $t_j$  表示棉花各个生育时期平均温度。

根据 2005 年试验分析,在苗期和蕾期阶段,德夏棉 1 号、科棉 1 号、美棉 33B 茎、枝、叶器官相继出现的时间分别为 2、3、3.5 d,故其所需有效积温不同。由式(2)计算得出从出苗到现蕾阶段每增加一片主茎叶 PHYLL 为 16、24、28 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ ,现蕾到开花阶段每增加一片主茎叶或果枝 PHYLL 为 16、24、28 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ ,开花到盛花阶段每增加一片主茎叶或果枝 PHYLL 为 28、42、49 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ 。

**2.2.2 氮素。**随着施氮量的增加棉花营养生长不断加快,当施氮量超过高产最适施氮量时,棉花各营养器官常表现出肥大。因此,氮素影响因子  $F(N)$  可简单地用下列模型表示<sup>[14]</sup>:

$$F(N) = (SN + RFN \times CURN) / TNP \quad (4)$$

式中  $SN$  为土壤供氮量( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ), $RFN$  为施氮量( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ), $TNP$  为高产要求的需氮量( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ), $CURN$  为氮肥利用率(%)。计算方法为  $CURN = (NBY - NCK) / RFNO$ , $NBY$ 、 $NCK$  分别表示施氮量为  $RFNO$  ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )、不施氮(CK)条件下棉花吸收的氮素( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )。

**2.2.3 水分。**水分影响因子  $F(W)$  可用棉花每天的实际蒸散量  $ETa$  ( $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ )与潜在蒸散量  $ET_0$  ( $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ )的比值表示,由水分平衡模型计算。

$$F(W) = ETa / ET_0 \quad (5)$$

**2.2.4 化控。**试验表明,DPC 处理 3 d 后,叶色开始变深,棉花主茎与果枝的日生长量开始下降,旺长棉株开始平稳生长。处理后 10~15 d 是药效最大作用期,20~25 d 其直接控制主茎、果枝等生长的效应明显减弱。因此,化控影响因子  $F$  (DPC)可用下列模型表示<sup>[15]</sup>:

$$F(DPC) = 1 - DPCL \times EXP[-0.023 (DADPC - 3)^2] \quad (6)$$

$$DPCL = 1 - EXP(-0.023 DPCR) \quad (7)$$

式中  $DADPC$  为喷施 DPC 后天数,系数 0.023 为经验常数。DPCR 为 DPC 施用量( $\text{mg} \cdot \text{盆}^{-1}$ )。

## 2.3 模型的构建

### 2.3.1 棉花主茎叶生长形态模型的构建。

(1)主茎叶片长度。2005 年试验表明,主茎叶片增长的过程是一个由慢到快再到慢的过程,符合 S 型曲线。因此,应用 Logistic 方程来对主茎叶长进行动态模拟,具体描述如下:

$$MSLL = Ll \times Rl / [1 + 4.2 \times EXP(-0.03 (GDD - IniLGDD))] \times MAX(W, N) \times F(DPC) \quad (8)$$

( $62^{\circ}\text{C} \cdot \text{d} \leq GDD \leq 924^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ )

式中  $MSLL$  表示棉花主茎叶片的长度( $\text{cm}$ ), $Ll$  表示无氮素、水分和 DPC 胁迫下棉花主茎叶片最大长度( $\text{cm}$ ),本试验条件下德夏棉 1 号、美棉 33B、科棉 1 号主茎叶最大长度分别为 12.67、12.51、12.9  $\text{cm}$ ;  $EXP$  表示以  $e$  为底的指数函数; $MAX(W, N)$  表示求  $F(W)$ 、 $F(N)$  影响因子的最大值; $62^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$  表示第一片真叶开始出现的有效积温; $924^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$  表示棉花 7 月 25 日打顶后主茎叶停止生长时的有效积温; $Rl$  表示主茎叶位影响因子。通过分析 2005 年每个品种棉花器官形态数值与其最大值间比值和主茎叶位的关系发现,主茎叶位对主茎叶长和宽的影响基本一致,可通过下式求出:

$$Rl = -0.0043 CP^2 + 0.086 CP + 0.57 \quad (9)$$

式中  $CP$  为棉花主茎叶位。

(2) 主茎叶片宽度。主茎叶片宽度的增长过程和叶长相似,可用下式进行模拟:

$$MSLW = Wlw \times Rl / [1 + 1.53 \text{EXP}(-0.02 (GDD - ImiLGDD))] \times \text{MAX}(W, N) \times F(DPC)$$

$$(62^\circ\text{C} \cdot \text{d} \leq GDD \leq 924^\circ\text{C} \cdot \text{d}) \quad (10)$$

式中  $MSLW$  表示有效积温为  $GDD$  时的主茎叶片宽度(cm);  $Wlw$  表示无氮素、水分和 DPC 胁迫下德夏棉 1 号、美棉 33B、科棉 1 号主茎叶片最大宽度 12.7、14.2、14.8 cm。

(3) 主茎叶柄长度。主茎叶柄长可通过下式描述:

$$MSLsL = Lls \times Rls / \{1 + 2.5356 \text{EXP}(-0.0278 [(GDD - ImiLGDD)])\} \times \text{MAX}(W, N) \times F(DPC)$$

$$(62^\circ\text{C} \cdot \text{d} \leq GDD \leq 924^\circ\text{C} \cdot \text{d}) \quad (11)$$

式中  $MSLsL$  表示有效积温为  $GDD$  时的主茎叶柄长度(cm);  $Lls$  表示无氮素、水分和 DPC 胁迫下德夏棉 1 号、美棉 33B、科棉 1 号主茎叶最大的叶柄长度 13.56、16.69、15.65 cm;  $Rls$  表示主茎叶位影响因子。2005 年试验表明,棉花 1~6 主茎叶及自第 6 主茎叶开始,叶柄长度随着叶位的上升呈现先增长再变短的趋势。因此,可应用分段函数来表示主茎叶柄长度的变化趋势。

$$\begin{cases} Rls = -0.05CP^2 + 0.4CP + 0.0875 (1 \leq CP \leq 6) \\ Rls = -0.009CP^2 + 0.249CP - 0.766 (CP > 6) \end{cases} \quad (12)$$

### 2.3.2 主茎节间伸长形态模型的构建。

(1) 主茎节间长度。主茎节间长度的动态模拟可用下式表示:

$$MSNL = Lmsn \times Rmsnl / \{1 + 5.64 \times 10^{-4} \text{EXP}[-0.0394 \times (GDD - ImiLGDD)]\} \times \text{MAX}(W, N) \times F(DPC)$$

$$(62^\circ\text{C} \cdot \text{d} \leq GDD \leq 924^\circ\text{C} \cdot \text{d}) \quad (13)$$

式中  $MSNL$  表示有效积温为  $GDD$  时的主茎节间长度(cm);  $Lmsn$  表示无氮素、水分和 DPC 胁迫下德夏棉 1 号、美棉 33B、科棉 1 号主茎节间的最大长度 7.27、5.84、6.52 cm;  $Rmsnl$  表示主茎叶位影响因子。2005 年试验表明,棉花主茎节间长度从第 5 张叶片开始随着叶位的上升呈现先增长再变短的趋势,与前 5 个主茎节间长度的变化趋势不同,可用分段函数来表示主茎节间长度的

变化趋势。具体形式描述如下:

$$\begin{cases} Rmsnl = 0.0815 CP^2 - 0.482 CP + 1.09 & (1 \leq CP \leq 5) \\ Rmsnl = -0.009 CP^2 + 0.25 CP - 0.75 & (CP > 5) \end{cases} \quad (14)$$

(2) 主茎节间粗度。主茎节间粗的增长变化比较缓慢。根据 2005 年试验资料,通过对各个品种棉花节间粗度增长变化与有效积温关系的统计分析表明,德夏棉 1 号、美棉 33B、科棉 1 号有效积温达到  $341^\circ\text{C} \cdot \text{d}$  时(3 个品种间差异很小,本文取其分界点),主茎节间粗度开始出现一个明显增粗的过程。因此,可应用分段函数来动态模拟主茎节间粗的动态变化过程。

$$\begin{cases} MSND = MSMd \times Rmsnd / \{1 + 3.3 \text{EXP}[-0.008 (GDD - ImiLGDD)]\} \times \text{MAX}(W, N) \times F(DPC) & (62^\circ\text{C} \cdot \text{d} \leq GDD \leq 341^\circ\text{C} \cdot \text{d}) \end{cases}$$

$$\begin{cases} MSND = MSMd \times Rmsnd / \{1 + 0.32 \text{EXP}[-0.008 (GDD - ImiLGDD)]\} \times \text{MAX}(W, N) \times F(DPC) & (342^\circ\text{C} \cdot \text{d} \leq GDD \leq 924^\circ\text{C} \cdot \text{d}) \end{cases} \quad (15)$$

式中  $MSND$  表示有效积温为  $GDD$  时的主茎节间粗度(cm);  $MSMd$  表示无氮素、水分和 DPC 胁迫下德夏棉 1 号、美棉 33B、科棉 1 号主茎节间的最大粗度分别为 1.10、1.10、1.12 cm;  $Rmsnd$  表示主茎叶位影响因子。可通过下式求出:

$$Rmsnd = -0.0025CP^2 + 0.0028CP + 0.95 \quad (1 \leq CP \leq 20) \quad (16)$$

2.3.3 果枝叶生长形态模型的构建。试验表明,德夏棉 1 号、科棉 1 号、美棉 33B 3 个品种果枝始节分别为 4、5、7,可计算出 3 个品种果枝始长时刻的有效积温( $BGDD$ )分别为 115、147、159 $^\circ\text{C} \cdot \text{d}$ 。

(1) 果枝叶片长度。果枝叶片的生长过程类似于主茎叶,但果节位也是影响其生长的重要因素。因此,其模型形式稍不同于主茎叶长或叶宽。第一果节果枝叶长模型描述如下:

$$FBLL = FLl \times FRl / \{1 + 6 \text{EXP}[-0.012 (GDD - ImiLGDD)]\} \times \text{MAX}(W, N) \times F(DPC) \times FL(BGDD \leq GDD) \quad (17)$$

式中  $FBLL$  表示棉花果枝叶片的长度(cm);  $FLl$  表示无氮素、水分和 DPC 胁迫下棉花果枝叶片最大长度(cm),本试验条件下德夏棉 1 号、美棉 33B、科棉 1 号果枝叶最大长度分别为 10.72、

14.15、13.6 cm;  $FRl$  表示果枝位影响因子, 2005年试验表明, 果枝位( $TP$ )对果枝叶片的长、宽、叶柄长的影响基本一致。

$$FRl = -0.0124TP^2 + 0.188TP + 0.28 \quad (18)$$

$FL$  表示果节位影响因子, 研究表明, 同一果枝 1~4 果节果枝叶的生长变化规律基本一致, 随着果节位( $BP$ )的增加果枝叶片长度、宽度、叶柄长度呈现递减趋势。具体形式描述如下:

$$FL = 0.0175BP^2 + 0.118BP + 0.865 \quad (19)$$

(2) 果枝叶片宽度。第一果节果枝叶片宽度的增长过程描述如下:

$$FBLW = FBlw \times FRl / \{1 + 3 \exp[-0.01(GDD - IniLGDD)]\} \times MAX(W, N) \times F(DPC) \times FL \quad (BGDD \leq GDD) \quad (20)$$

式中  $FBLW$  表示有效积温为  $GDD$  时的果枝叶片宽度(cm);  $FBlw$  表示无氮素、水分和 DPC 胁迫下德夏棉 1 号、美棉 33B、科棉 1 号果枝叶片最大宽度 10.65、11.7、11.05 cm。

(3) 果枝叶柄长度。果枝叶柄的增长也是一个由慢到快再到慢的过程, 可通过下式描述:

$$FBLSL = FBLLs \times FRl / \{1 + 1.8 \exp[-0.0075(GDD - IniLGDD)]\} \times MAX(W, N) \times F(DPC) \times FL \quad (BGDD \leq GDD) \quad (21)$$

式中  $FBLSL$  为有效积温为  $GDD$  时的果枝叶柄的长度(cm);  $FBLLs$  表示无氮素、水分和 DPC 影响下德夏棉 1 号、美棉 33B、科棉 1 号果枝叶最大的叶柄长度分别为 10.6、11.55、11.40 cm, 为品种参数。

**2.3.4 棉花果节伸长形态模型的构建。**(1) 果节长度。第一果节长度的动态模拟可用下式表示:

$$FBNL = FBMl \times FRl / \{1 + 5 \exp[-0.018(GDD - IniLGDD)]\} \times MAX(W, N) \times F(DPC) \times FN \quad (BGDD \leq GDD) \quad (22)$$

式中  $FBNL$  为有效积温为  $GDD$  时的果节长度(cm);  $FBMl$  表示无氮素、水分和 DPC 胁迫下德夏棉 1 号、美棉 33B、科棉 1 号果节的最大长度 7.9、12.95、14.15 cm;  $FN$  表示果节影响因子, 研究表明, 果枝 1~4 果节随果节位的增加果节长度呈先减少后增加趋势, 其描述如下:

$$FN = -0.285BP^2 + 1.885BP - 0.6 \quad (23)$$

式中  $BP$  表示果节位。

(2) 果节粗度。棉花第一果节粗度的动态模拟可用下式表示:

$$FBND = FBNd \times FRl / \{1 + 1.25 \exp[-0.08(GDD - IniLGDD)]\} \times MAX(W, N) \times F(DPC) \times FBHH \quad (BGDD \leq GDD) \quad (24)$$

式中  $FBND$  表示有效积温为  $GDD$  时的主茎节间粗度(cm);  $FBNd$  表示无氮素、水分和 DPC 胁迫下德夏棉 1 号、美棉 33B、科棉 1 号主茎节间的最大粗度 0.45、0.48、0.51 cm;  $FBHH$  表示果节位影响因子, 研究表明, 果枝 1~4 果节随着果节位的增加果节粗度呈现减少趋势, 具体形式描述如下:

$$FBHH = 0.1BP^2 - 0.7BP + 1.59 \quad (25)$$

## 2.4 模型的检验

利用 2006 年科棉 1 号、德夏棉 1 号、美棉 33B 三个品种、水分、化控、氮素盆栽试验中测定的棉花 1~20 主茎叶位和 1~14 果枝叶位形态资料数据对上述棉花形态模型进行检验。检验结果表明, 棉花主茎叶片长度、宽度、叶柄长、主茎节间和果枝叶片长度、宽度、叶柄长及果节长度、粗度的 RMSE 值分别为 0.66 cm ( $n=118$ )、0.87 cm ( $n=118$ )、0.77 cm ( $n=118$ )、0.57 cm ( $n=111$ )、0.77 mm ( $n=111$ )、0.43 cm ( $n=107$ )、0.55 cm ( $n=107$ )、0.43 cm ( $n=107$ )、0.73 cm ( $n=130$ )、0.56 mm ( $n=130$ )。从模拟值与观察值间的 1:1 关系图(图 1)可以看出, 模型预测效果较好。

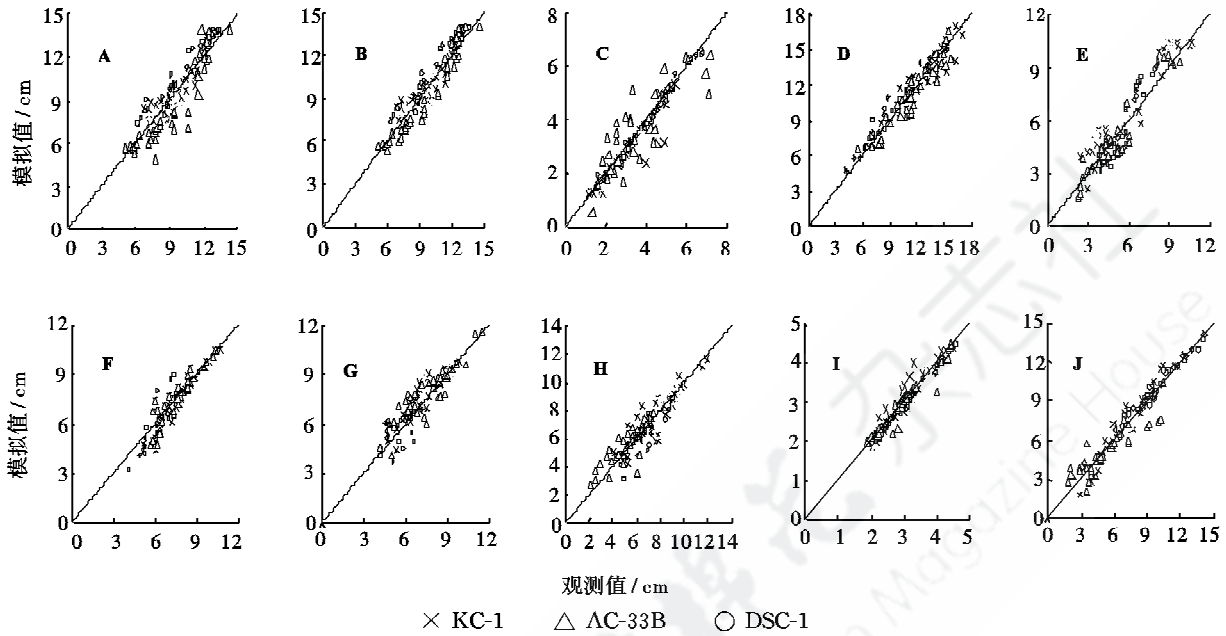
## 3 小结

本文在充分分析棉花各生育阶段各个器官形态生长所需的有效积温、氮素、水分、化调等对棉花形态发生影响的基础上, 构建了基于 Logistic 模型的棉花主茎和果枝叶长、叶宽、叶柄长及主茎节间和果节长度、粗度的形态发生模型。检验结果表明, 模拟值与观察值之间的 RMSE 值均较小, 说明模拟结果具有较好的精确度。该模型较 Room, Jallas, Hanan 等<sup>[8-10]</sup>建立的形态模型具较好的广适性和预测性, 较杨娟等<sup>[11]</sup>建立的棉花器官几何模型机理性和动态性更强。棉花形态模型的研制也为棉花虚拟生长系统的开发奠定了理论基础。

由于棉叶有卵圆形、三裂、五裂等多种复杂形

状,本研究构建的棉叶主脉长度形态模型,并不能描述棉叶裂脉长度及其各裂脉间的夹角,因此也就不能准确描述棉花叶片的几何形状;另外,叶柄

长度形态模型的构建也未反映出叶柄与叶片基部连接处的弧度。上述模型存在的问题将在今后的试验研究中得到进一步的完善和提高。



A 主茎叶片长度(n=118),B 主茎叶片宽度 (n=118),C 主茎叶柄长度(n=118),D 主茎节间长度 (n=111),E 主茎节间粗度 (n=111),F 果枝叶片长度 (n=107),G 果枝叶片宽度(n=107),H 果枝叶柄长度(n=107),I 果枝果节长度(n=130),J 果枝果节粗度(n=130)。

图 1 棉花各器官的模拟值与观察值间的比较  
Fig. 1 Comparison of simulated with observed values

参考文献:

[1] LINDENMAYER A. Mathematical models for cellular interactions in development[J]. *J Theoretical Biology*, 1968, 18(3): 280-315.

[2] CHEN S G, Impens I, Ceulemans R. Measurement of gap fraction of fractal generated canopies using digitalized image analysis [J]. *A F Meteorology*, 1993, 65: 245-259.

[3] WATANABE T, Room P M, Hanan J S. Virtual rice: simulating the development of plant architecture [C]. *International Rice Research Notes*, 2001, 26 (2): 60-62.

[4] TAKENAKA A. A simulation model of tree architecture development base don growth response to local-light environment [J]. *Journal of Plant Research*, 1994, 10(7): 321-330.

[5] 陈国庆. 小麦形态建成模型及虚拟小麦研究[D]. 济南: 山东农业大学, 2004.  
CHEN Guo-qing. Studies on simulation and visualization of morphogenesis in wheat [D]. Ji'nan; Shan-

dong Agriculture University, 2004.

[6] 石春林, 金之庆, 曹卫星. 水稻植株的虚拟生长[J]. *江苏农业学报*, 2006, 22(2): 105-108.  
SHI Chun-lin, Jin Zhi-qing, Cao Wei-xing. An elementary study on virtual growth of rice plant [J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Science*, 2006, 22 (2): 105-108.

[7] 郭新宇, 赵春江, 刘 洋, 等. 基于生长模型的玉米三维可视化研究[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(3): 121-125.  
GUO Xin-yu, Zhao Chun-jiang, Liu Yang, et al. Three-dimensional visualization of maize based on growth models [J]. *Transactions of the CASE*, 2007, 23(3): 121-125.

[8] ROOM P M, Hanan J S. Virtual cotton: a new tool for research, management and training [C]//Constable G A. *Proceedings of the world cotton research conference-1: challenging the future*. Brisbane, Melbourne; CSIRO Australia, 1995: 40-44.

- WANG Yi-lian, Si Sheng-yun, Wang Zhong-xin, et al. Influence of tebufenozide on progeny population of *Spodoptera exigua*[J]. Acta Phytophylacica Sinica 2006, 33(2):193-196.
- [14] TRISYONO A, Chippendale G M. Effect of the ecdysone agonists, RH-2485 and tebufenozide, on the Southwestern corn Borer, *Diatraea grandiosella*[J]. Pesticide Science, 1998, 53 (2):177-185.
- [15] SETH R K, Kaur J J, Rao D K, et al. Effects of larval exposure to sublethal concentrations of the ecdysteroid agonists RH-5849 and tebufenozide (RH-5992) on male reproductive physiology in *Spodoptera litura* [J]. Journal of Insect Physiology, 2004, 50:505-517.
- [16] CHATON P F, Ravanel P, Meyran J C, et al. The toxicological effects and bioaccumulation of fipronil in larvae of the mosquito *Aedes aegypti* in aqueous medium[J]. Pesticide Biochemistry and Physiology, 2001, 69(3):183-188.
- [17] 李晓涛, 黄青春, 唐振华, 等. 氟虫腈对二化螟生长发育的影响及对解毒酶的诱导效应[J]. 农药学学报, 2006, 8(3):250-254.
- LI Xiao-tao, Huang Qing-chun, Tang Zhen-hua, et al. Effects of fipronil on larval development and the induction to detoxification enzyme activity of *Chilo suppressalis*[J]. Chinese Journal of Pesticide Science, 2006, 8(3):250-254.
- [18] 梁沛, 夏冰, 石泰, 等. 阿维菌素和高效氯氟菊酯亚致死剂量对小菜蛾谷胱甘肽 S-转移酶的影响[J]. 中国农业大学学报, 2003, 8(3):65-68.
- LIANG Pei, Xia Bing, Shi Tai, et al. Effect of sublethal doses of abamectin and  $\beta$ -cypermethrin on glutathione S-transferases in diamondback moth *Plutella xylostella* (L.)[J]. Journal of China Agricultural University, 2003, 8(3):65-68.
- [19] RUMPF S, Hetzel F, Frampton C. Lacewings (Neuroptera: Hemerobiidae and Chrysopidae) and integrated pest management; enzyme activity as biomarker of sublethal insecticide exposure[J]. Journal of Economic Entomology, 1997, 90 (1):102-108.
- [20] 高希武, 董向丽, 郑炳宗, 等. 棉铃虫的谷胱甘肽-S-转移酶(GSTs):杀虫剂和植物次生物质的诱导与GSTs对杀虫剂的代谢[J]. 昆虫学报, 1997, 40(2):122-127.
- GAO Xi-wu, Dong Xiang-li, Zheng Bing-zong, et al. Glutathione S-transferase (GSTs) of *Helicoverpa armigera*: induction of insecticides and plant allelochemicals and metabolism of insecticides[J]. Acta Entomologica Sinica, 1997, 40(2):122-127. ●
- 
- ◁211……(周娟, 等)棉花茎枝叶形态模型研究
- [9] JALLAS E, Martin P, Sequeira R, et al. Virtual cottons, the firstborn of the next generation of simulation model [J]. Virtual World, 2000, 235-244.
- [10] HANAN J S, Heam A B. Linking physiological and architectural models of cotton [J]. Agricultural System, 2003, 75:47-77.
- [11] 杨娟, 赵明, 潘学标. 基于 NURBS 曲面的棉花器官建模[J]. 计算机工程与应用, 2005, 41(30):185-188.
- YANG Juan, Zhao Ming, Pan Xue-biao. Simulation of cotton organs based on NURBS [J]. Computer Engineering and Applications, 2005, 41(30):185-188.
- [12] 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, 44-47.
- CAO Wei-xing, Luo Wei-hong. Crop system simulation and intelligent management [M]. Beijing: Higher Education Press, 2003, 44-47.
- [13] 中国农业科学院棉花研究所. 中国棉花栽培学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1983.
- Cotton Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences. Cotton cultivation in China [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1983.
- [14] 高亮之. 农业模型学基础[M]. 香港: 天马图书有限公司, 2004: 93-102.
- GAO Liang-zhi. Foundation of agricultural modeling science [M]. Hongkong: Tianma Book Ltd Co. Press, 2004: 93-102.
- [15] 潘学标. COTGROW: 棉花生长发育模拟模型[J]. 棉花学报, 1996, 8(4): 180-188.
- PAN Xue-biao. COTGROW: cotton growth and development simulation model [J]. Cotton Science, 1996, 8(4): 180-188. ●