

棉花地上部形态建成的光温模型

郭银巧^{1,2} 赵传德³ 朱 艳¹ 李存东² 孙红春² 曹卫星^{1,*}

¹ 南京农业大学农学院 / 江苏省信息农业高新技术研究重点实验室, 江苏南京 210095; ² 河北农业大学农学院, 河北保定 071001; ³ 安泰科技股份有限公司, 北京 100081

摘 要: 以不同株型棉花品种为研究对象, 基于“同类相似性”原理, 借助数学建模和统计分析方法, 系统分析光温生态因子对棉花叶片长、宽, 叶柄长、粗, 主茎节间长、粗, 果节长、粗, 蕾铃高、直径等形态指标的影响, 量化温、光因子与棉花各器官形态建成的关系, 构建了基于GDD (growing degree day)和Logistic方程的棉花形态建成光温模型。利用独立的试验数据对模型进行了检验, 结果表明, 棉花主茎叶片的长度和宽度、叶柄长度、主茎节间的长度和粗度、果枝叶片的长度和宽度、叶柄长度、果节的长度和粗度、蕾铃高度和直径的RMSE值分别为0.48、0.65、0.53、0.09、0.02、0.55、0.28、0.23、0.14、0.17、0.20和0.11 cm。显示棉花器官形态指标的模拟值与检验值具有较好的吻合度, 说明模型具有良好的预测性和描述性。

关键词: 棉花; 形态建成; 光温生态模型

Morphogenesis Model with Relation to Light and Temperature Condition for Above-Ground Organs in Cotton

GUO Yin-Qiao^{1,2}, ZHAO Chuan-De⁴, ZHU Yan¹, LI Cun-Dong², SUN Hong-Chun², and CAO Wei-Xing^{1,*}

¹ Jiangsu Key Laboratory for Information Agricultural, College of Agronomy, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; ² College of Agronomy, Agricultural University of Hebei, Baoding 071001, China; ³ Advanced Technology & Materials Co., Ltd, Beijing 100081, China

Abstract: Due to their complexity in the morphological character of multi-branch cotton, it is hard to simulate the morphogenesis of cotton. The objective of the study was to construct a simulation model with morphological characters based on GDD (growing degree day) and Logistic equation. An experiment for model establishment was conducted using two cultivars (Meimian 33B and Jifeng 908) with three repetitions. The length and width of leaf, the length of petiole, the length and diameter of internode, the height and diameter of boll were determined from three-leaf stage to the stationary length of leaf on main stem. The result was as follows: (1) GDD and IGDD were quantified through integrating the quantitative connection of every organ of cotton and the relationship of morphological indices to the effective cumulative temperature, the growing degree day and initial growing degree day of every organ in cotton were quantified. (2) The major influencing factors of temperature and sunlight were quantified. The temperature and sunshine hours effect factor model was constructed using mathematical modeling method, which can be explained and reflected better by effect factor in practice. (3) According to the pot experiment data in the field of Hebei Agriculture University in 2006, through analyzing the effects of temperature and sunshine hours on morphogenesis formation in cotton, potential length and width of different cotton organs were quantified. (4) By quantifying relationship of morphogenesis formation to temperature and sunshine hours, an ecological model of cotton morphogenesis was constructed with the rule of “the same similar”. The model is based on GDD and Logistic equation, which can predict the morphologic indices such as the length and width of leaf, the length of petiole, the length and diameter of internode, the height and diameter of boll. The model was validated with independent dataset from experiment in Nanjing in 2006, the results showed that the RMSEs between simulated and observed value for length and width of leaf on main stem, length of petiole on main stem, length and width of internode on main stem, length and width of leaf on sympodial stem, length of petiole on sympodial stem, length and width of internodes on sympodial stem, boll height and diameter was 0.48, 0.65, 0.53, 0.09, 0.02, 0.55, 0.28, 0.23, 0.14, 0.17, 0.20, and 0.11 cm, respectively, which indicated that the present model has a good performance in predicting the dynamics of each organ size in cotton growth process.

本研究国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2006AA10A303), 国家科技支撑计划项目(2006BDA10A01), 农业部行业专项课题(nyhyzx07-005-05)资助。

* 通讯作者(Corresponding author): 曹卫星, E-mail: caow@njau.edu.cn; Tel: 025-84396565

第一作者联系方式: E-mail: yqg171819@yahoo.com.cn; Tel: 010-82106281 现在工作单位: 北京市中关村南大街12号《中国农业科学》编辑部

Received(收稿日期): 2009-05-12; Accepted(接受日期): 2009-07-21.

Keywords: Cotton; Morphogenesis formation; Sunlight and temperature ecological model

由于棉花多分枝形态特征的复杂性以及形态测量数据的难获取性,使得形态建成模拟模型成为棉花作物可视化模拟过程中的薄弱环节^[1-2]。关于作物形态建成的模拟,国内外学者在玉米^[3-4]、棉花^[5-10]、大麦^[11]、小麦^[12-14]、水稻^[15-17]、番茄^[18]等作物上进行了不少的研究。如Hanan等^[6]建立的棉花形态模型;Buch-Sorlin等^[11]以有效积温为驱动变量,构建的冬大麦叶片、叶鞘和节间等器官的形态生长模型。陈国庆等^[13]和谭子辉等^[14]在综合分析小麦各器官和麦穗形态指标随生育进程和环境条件变化规律的基础上构建的小麦各个器官的形态模型和小麦麦穗生长过程的动态模拟模型;石春林等^[15]和常丽英等^[16-17]应用系统分析和数学建模技术,构建的水稻植株形态模型等等。这些模型为本文研究提供了很好的基础,但它们主要是基于特定品种和地区、不同生育时段、不同分类器官的半定量化模拟,尚未细化到单位不同器官、不同叶位、不同节位水平,同时对于品种的基因型效应及光温效应等尚需进一步量化建模。本研究在借鉴前人先进建模理论及小麦、水稻、玉米等作物形态模拟研究过程中形成的方法体系和基本框架,以不同株型品种的棉花试验资料为基础,设定在适宜水、肥条件下,同节位同叶位的不同器官之间存在同伸关系,且同种器官的潜在形态指标相当,之所以表现不同是源于所受光温条件不同所致。基于该“同类相似性”原理^[19],借助数学建模和统计分析方法,在充分分析棉花各生育阶段器官形态发育所需的GDD (growing degree day),及光温生态因子对棉花形态发生影响的基础上,构建了基于Logistic方程的棉花主茎和果枝叶片长度和宽度、叶柄长度、主茎节间和果节长度和直径、棉铃高度和直径的形态建成模型。模型的构建为基于生理生态过程的棉花结构-功能模型的构建及虚拟棉花生长系统的研制奠定了基础。

1 材料与方法

1.1 试验设计

1.1.1 建模试验 于2006年在河北农业大学教学实习基地(河北保定,113°40'~116°20'E,38°10'~40°00'N)进行。试验地前茬为棉花,供试土壤为粘质壤土,含有机质12.84 g kg⁻¹、全氮1.09 g kg⁻¹、碱解氮59.94 mg kg⁻¹、速效磷24.25 mg kg⁻¹、速效钾82.82 mg kg⁻¹。供试品种为美棉33B(紧凑型)和冀丰908(半松散型)。小区面积70 m²,3次重复。4月25日播种,种植密度每公顷5.33万株,株、行距为0.25 m×0.75 m。氮、磷、钾肥施用量分别为187.5 kg hm⁻²(其中基肥112.5 kg hm⁻²、花铃肥75.0 kg hm⁻²)、225.0 kg hm⁻²和112.5 kg hm⁻²,磷钾全部做基肥,其他田间管理同常规高产田。

1.1.2 验证试验 于2006年在南京农业大学卫岗实验站(江苏南京,118°50'E,32°02'N)进行。盆栽试验(盆径60 cm,高55 cm,装土25 kg),供试土壤为黄棕壤土,含有机质15.3 g kg⁻¹、全氮0.8 g kg⁻¹、碱解氮63.47 mg kg⁻¹、速效磷39.97 mg kg⁻¹。以美棉33B为供试品种,4月25日播种,设置3个氮素水平,分别为0、240、480 kg hm⁻²,磷、钾肥用量分别为239 kg hm⁻²、270 kg hm⁻²,每处理12盆(每盆1株),3次重复共36盆,其他田间管理同常规高产田。

1.2 数据获取

两组试验均从棉花三叶期开始,选择5株(验证试验)挂牌跟踪观测,每隔3 d测定一次真叶的长度和宽度、叶柄的长度、主茎各节间的长度和直径、果枝各节间的长度和直径、蕾铃的高和直径。到棉花主茎叶、果枝叶、主茎节间及果节定长后停止测定。

1.3 建模与检验

基于“同类相似性”原理,借助数学建模和统计分析方法,以试验支持研究为基础,深入分析不同株型棉花品种各单位器官形态特征随长度日(GDD)和日照时数的时空变化规律及定量算法,建立棉花各器官形态建成光温模型,如不同叶位、不同节位叶片、叶柄、主茎、分枝和蕾铃(以下简称叶、柄、茎、枝、蕾铃)各器官长和宽的增长过程。

采用最小二乘法和试错法确定模型基本参数。棉花全生育期内逐日气象数据(温度和日照时数)来源于保定气象局。模型验证数据来源于南京农业大学农业部南方作物生理生态重点开放实验室。模型检验采用国际上常用的均方根差RMSE (root mean square error)方法,分析模拟值与观测值间的符合度。RMSE值越小,模拟值与观测值之间的一致性越好,模型的模拟结果越准确、可靠。

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

2 模型的构建

试验数据表明,随着GDD的累积,棉花各个器官的增长是一个由慢到快再到慢的伸长过程,符合S型曲线(图1)。基于此规律,参阅相关文献^[20-21]并综合考虑光温生态因子对棉花器官伸长的影响,本研究以Logistic方程为基础,以GDD为驱动变量,对棉花各个器官增长过程进行模拟。

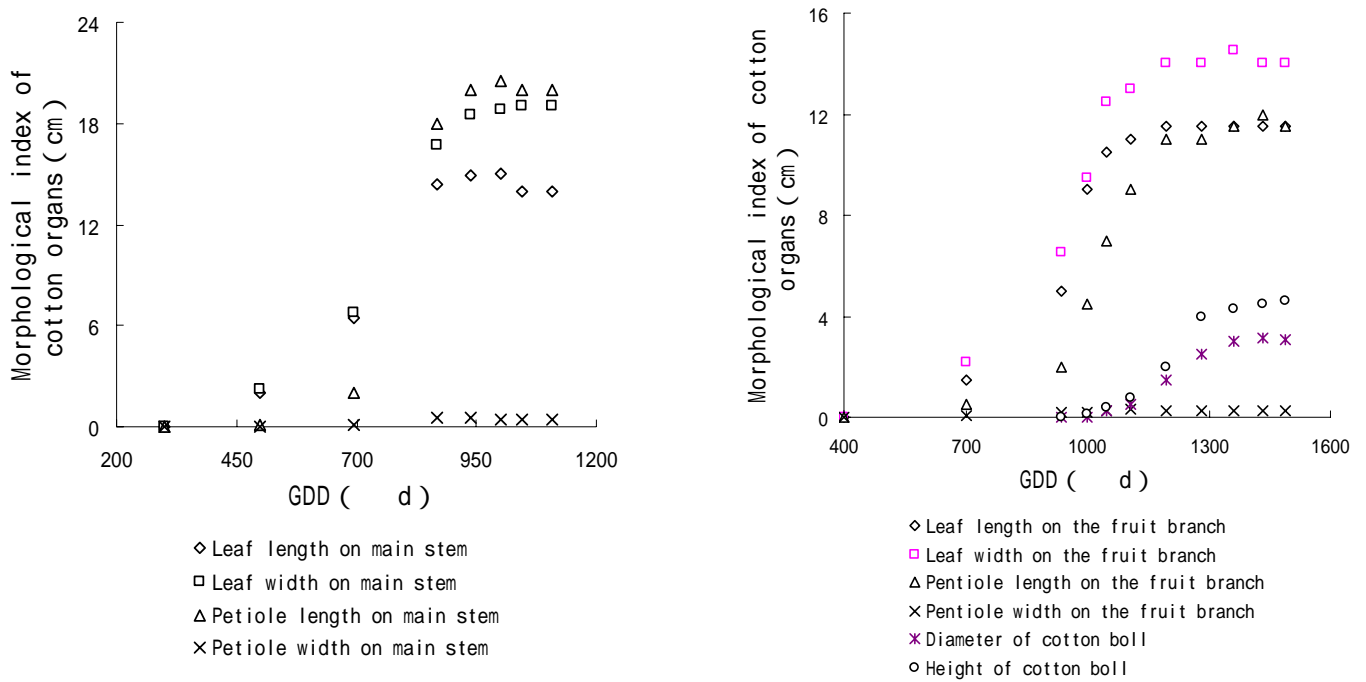


图1 适宜水肥条件下棉花单位器官形态指标随累积GDD的变化动态(n=14)

Fig. 1 Dynamic changes of organ morphogenesis indices in cotton with accumulative GDD under appropriate water and fertilizer conditions (n=14)

2.1 生态效应因子和主要参数的确定

2.1.1 GDD 和 IGDD 的确定 GDD 为逐日累积生长度日,定义为一定时期内高于基点温度的逐日平均温度与发育基点温度之间差值的累积值,其单位是 d。

$$GDD = \sum (T_i - T_{bi}) \quad (1)$$

式中, T_i 为棉花播种后第 i 天的平均温度; T_{bi} 为棉花发育基点温度(取 12)。

棉花各器官(叶、柄、茎、枝和蕾铃)的伸长存在同伸相关。棉花进入蕾期后,主茎叶的发生与其同节位器官(主茎叶柄、节间、果枝)基本上是同步的,相邻两果枝同一节位现蕾间隔一般约 2~4 d,也是相邻两果枝抽出的间隔时间;果枝叶的发生与其同节位器官(果枝叶柄、果节、蕾铃)的发生也基本同步,果枝邻位果节一般间隔 5~7 d(约主茎节间的 2 倍),大体与果枝叶的出叶间隔期相近。据此“器官同伸”原理,由棉花叶片的初始 GDD 市(IGDD)就可以确定所有不同茎枝节位叶、柄、茎、枝和蕾铃的 IGDD。

主茎第 n 节位主茎叶及其同伸器官伸长的 IGDD 值为

$$IGDD(L-n) = 58 + \sum_{i=1}^{n-1} PHYLL_i \quad (n=1, 2, 3 \dots Ln) \quad (2)$$

果枝第 n 节第 m 果节位果枝叶及其同伸器官伸长的 IGDD 值为

$$IGDD(n-L-m) = 58 + \sum_{i=1}^{n-1+2m} PHYLL_i \quad (n=1, 2, 3 \dots Ln; m=0, 1, 2, 3, 4) \quad (3)$$

式中，58 为棉花播种至出苗所需的 GDD， n 为主茎叶位， m 为果枝节位， L 代表叶位，下同。 $PHYLL$ 为叶热间距(d)，即两相邻叶片出叶间隔。

$$PHYLL=DD\times(T_i-T_{bi}) \tag{4}$$

$$DD=26.25-1.6851t_i+0.0303t_i^2 \tag{5}$$

式中， t_i 为不同生育时期的平均温度，DD为等隔期天数。

2.1.2 光温影响因子 棉花各器官的伸长与光照和温度密切相关，温度在 20~30 之间伸长较快，以 25 最为适宜；光照时间以 8~12 h 最为适宜，用分段函数来量化棉花各器官伸长期间光温因子对棉花形态指标的影响。

$$FST=FT\times FS \tag{6}$$

$$FT = \begin{cases} 0 & T_i < 12 \\ \{\sin[(0.091 T_i-1.364)\times\pi/2]\}^{0.25} & 12 \leq T_i \leq 25 \\ \{\sin[(3.889-0.111 T_i)\times\pi/2]\}^{0.25} & 25 < T_i \leq 35 \\ 0 & T_i > 35 \end{cases} \tag{7}$$

$$FS = \begin{cases} 0 & SS < 2 \text{ h} \\ \{\sin[(0.125SS-0.250)\times\pi/2]\}^{0.25} & 2 \text{ h} \leq SS \leq 10 \text{ h} \\ \{\sin[(2.667-0.167SS)\times\pi/2]\}^{0.25} & 10 \text{ h} < SS \leq 16 \text{ h} \\ 0 & SS > 16 \text{ h} \end{cases} \tag{8}$$

式中， FT 为温度影响因子， FS 为日照时数影响因子， FST 为光温互作影响因子， T_i 和 SS 分别是棉花各器官从开始伸长到定长期间的日平均温度()和日照时数(h)。

2.1.3 器官潜在长度 潜在长度是不同类型棉花各器官形态指标在光温水肥供应充分的情况下所能达到的最大长度，设为品种参数。根据 2006 年的试验资料，统计分析每个棉花品种不同叶位、不同节位各器官形态数值与其伸长期间光温影响因子间的比值关系，表明叶位和节位对叶、柄、枝的长和宽(粗)的影响基本一致(表 1)。

表 1 不同棉花品种各器官潜在长度和宽度

Table 1 Potential length and width of organs in different cotton cultivars (cm)

品种 Cultivar	器官 Organ	叶长 Leaf length	叶宽 Leaf width	柄长 Petiole length	柄粗 Petiole diameter	节间长 Internode length	节间粗 Internode diameter	铃高 Boll height	铃粗 Boll diameter
美棉 33B Meimian 33B	主茎 Stem	16.15	19.14	20.90	0.45	8.59	1.85	6.2	4.5
冀丰 908 Jifeng 908	果枝 Branch	13.76	15.55	16.14	0.38	17.00	0.88		
冀丰 908 Jifeng 908	主茎 Stem	17.82	20.09	21.23	0.49	8.75	1.95	7.5	5.5
冀丰 908 Jifeng 908	果枝 Branch	16.42	19.26	19.84	0.43	15.50	0.65		

2.2 模型的描述

棉花各器官(叶、柄、茎、枝和蕾铃)的增长过程均是一个由慢到快再到慢的过程，为S型动态增长，用 Logistic方程对其进行动态模拟如下。

$$XY_{n-L-m}(GDD) = \frac{XY_{\max} \times FST}{1 + XYa \times e^{-XYb \times (GDD - IGDD_{n-L-m})}}$$

$$(58 \leq GDD \leq 956 \text{ 或 } FGDD_{n-L-m} \leq GDD \leq 956) \tag{9}$$

式中， $IGDD_{n-L-m}$ 为第 n 茎节 m 果枝节位叶片开始生长的初始GDD值， $58 \leq IGDD_{n-L-m} \leq 956$ ；58，956 分别为播种至出苗和播种至打顶期间所需的GDD；FGDD为初花期GDD(本试验取 732)；参数 $X=L, P, SB$ 或CB时，分别表示器官叶片、叶柄、节间或蕾铃； $Y=L(H)$ 或 $W(D)$ 时分别表示器官形态指标的长(高)或宽(粗)；

XYa 、 XYb 系数不同反映不同器官的变化过程(表 2)。

表 2 棉花各器官形态指标模型参数的校正

Table 2 Verification of model parameters for cotton morphogenesis indices

模型参数 Model parameters	叶片 Leaf		叶柄 Petiole		茎枝 Main stem and fruit branch		蕾铃 Cotton boll	
	长	宽	长	粗	长	粗	高	粗
	Length	Width	Length	Diameter	Length	Diameter	Height	Diameter
XYa	3.47	2.15	6.05	1.57	5.9	1.4	5.6	8.8
XYb	-0.028	-0.029	-0.05	-0.024	-0.016	-0.015	-0.033	-0.03

3 模型的检验

利用南京试验中获取的棉花(美棉33B)1~20主茎叶位和1~3果枝叶位形态数据对所建棉花形态模型进行检验的结果表明,棉花主茎叶片长和宽、主茎叶柄长、主茎节间长和粗,果枝叶片长和宽、果枝叶柄长、果节长和粗、蕾铃高度和直径的RMSE值分别为0.48、0.65、0.53、0.09、0.02、0.55、0.28、0.23、0.14、0.17、0.20和0.11 cm。图2~图7分别为美棉33B主茎和果枝叶片长度和宽度、叶柄长度、主茎节间和果节长度和粗度、棉铃的高度和直径的模拟值($n = 1-20$, $m = 1-3$)与观测值间的1:1关系图。从图可以看出,各器官形态指标观测值和模拟值吻合度较好,变化趋势也比较一致。说明模型预测效果较好。

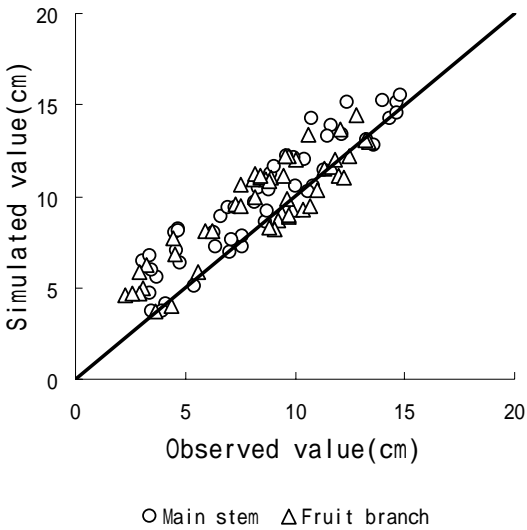


图2 棉花主茎和果枝叶片长度模拟值与观测值比较($n=50$)

Fig. 2 Comparison of simulated with observed values for the leaf length on main stems and fruit branch in cotton

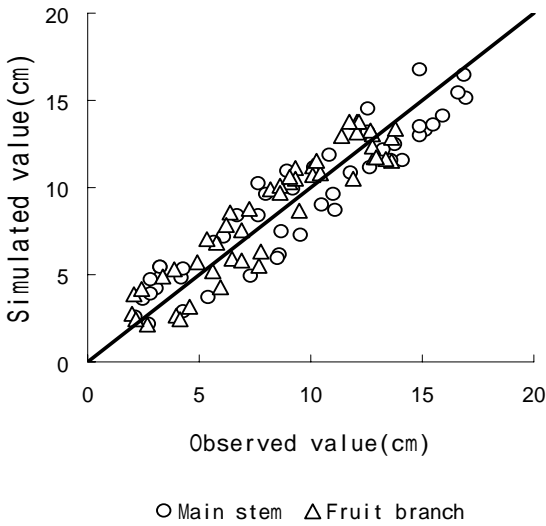


图3 棉花主茎和果枝叶片宽度模拟值与观测值比较($n=50$)

Fig. 3 Comparison of simulated with observed values for the leaf width on main stems and fruit branch in cotton

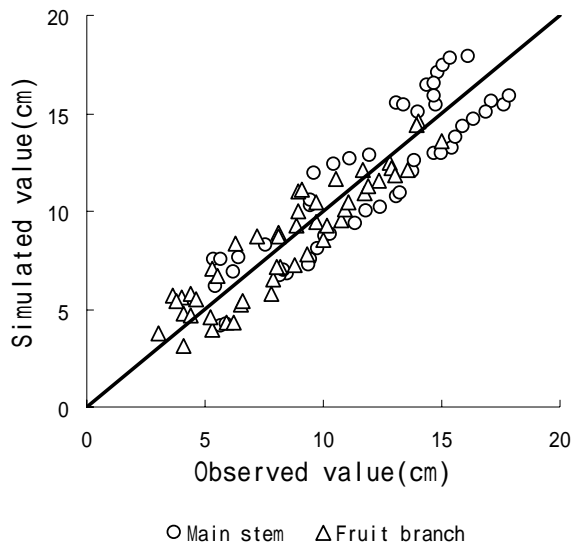


图4 棉花主茎和果枝叶柄长度模拟值与观测值比较(N=50)

Fig. 4 Comparison of simulated with observed values for the petiole length on main stems and fruit branch in cotton

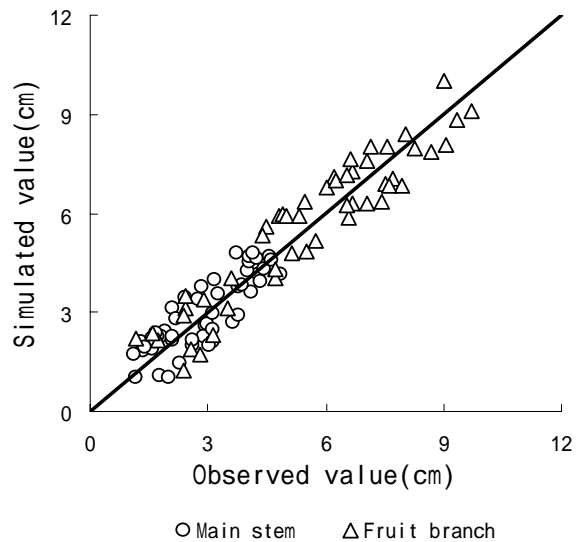


图5 棉花主茎和果枝节间长度模拟值与观测值比较(N=50)

Fig. 5 Comparison of simulated with observed values for the internode length on main stems and fruit branch in cotton

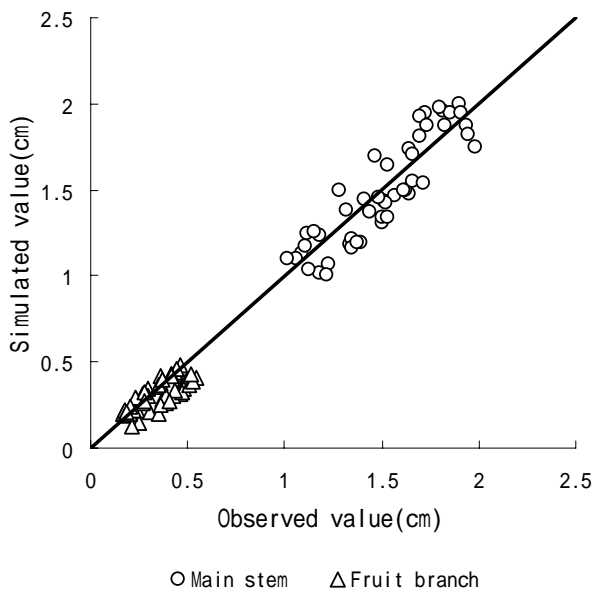


图6 棉花主茎和果枝节间粗模拟值与观测值的比较(N=50)

Fig. 6 Comparison of simulated with observed values for the internode diameter on main stems and fruit branch in cotton

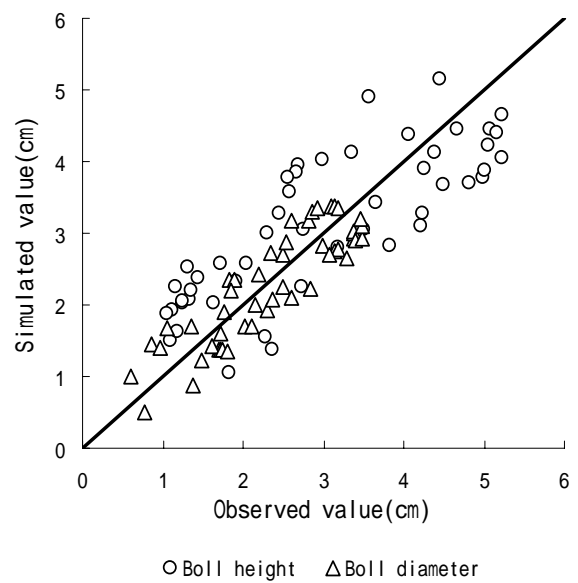


图7 棉花棉铃高度和直径模拟值与观测值的比较(N=50)

Fig. 7 Comparison of simulated with observed values for the height and diameter of cotton boll

4 讨论

棉花具有无限生长习性，器官种类多且结构复杂，与玉米^[3-4]、大麦^[11]、小麦^[12-14]、水稻^[15-17]等作物相比，前人对棉花形态结构模拟研究相对薄弱。如Room等^[6]基于开放式L系统构建的L-Cotton模型，对棉花的形态特征进行了简单模拟；Hanan等^[7]对该模型进行扩展，将其与OZCOT相结合，虽然能对形态的发生(尤其是棉铃的生长)有较好的解释，但对形态的描述不够细致，且该方法缺少试验数据的验证；杨娟等^[8]基于NURBS和VC++6.0建立了棉花可视化系统，该系统以实际测量数据进行模拟，但未考虑品种特性和光温环境因子，因此不能真实有效地模拟棉花的形态特征以及棉花的生长过程。

本研究基于“同类相似性”原理，借助数学建模和统计分析方法，以不同株型品种为试验资料，在定

量分析棉花各生育阶段单位器官形态发育所需的GDD、光温生态因子等对棉花形态发生影响的基础上,构建了基于Logistic方程的棉花叶片长和宽、叶柄长和粗、主茎节间和果节长和粗、棉铃高度和直径的形态发生模型。利用独立的试验资料对所建模型进行检验,结果表明,模拟值与检验值之间的RMSE值均较小,显示模型对棉花叶、柄、茎、枝和铃增长动态具有较好的描述性和预测性,从而为棉花虚拟生长系统的开发奠定了可靠基础。与已有的模型相比^[3-17],该模型不仅具有良好的动态性、解释性和可靠性,而且简洁、系统,具有良好的生物学意义。

由于棉花植株形态建成过程的复杂性和可塑性,本文没有引入水分和氮素等环境因子的影响,建模的某些假设还不能完全代表棉花器官形态增长的实际情况,实测资料的误差也可能影响了模型参数估计的准确性。模型尚需要进一步利用不同水肥生产条件下的多点多品种试验资料进行验证和测试,以不断增强其适用性。

5 结论

以不同株型品种为试验资料,在量化分析棉花各生育阶段单位器官形态发育所需 GDD 的基础上,确定了棉花各器官伸长的热时间间隔,并以此预测了棉花各个器官在不同生育阶段相继出现所需的初始GDD(即 IGDD);最后基于“同类相似性”原理,建立了可定量描述棉花各单位器官形态指标与光温环境因子定量关系的棉花形态建成光温模型。

致谢: 感谢南京农业大学周治国教授和中国农业大学张立桢研究员对本文模型的构建所提供的指导和帮助。

References

- [1] Room P M, Hanan J S. Virtual cotton: A new tool for research, management and training. Proceedings of the world Cotton Research Conference-1. Challenging the Future. Brisbane, Melbourne: CSIRO Australia, 1995. pp 40-44
- [2] Marcelis L F M, Heuvelink E, Goudriaan J. Modelling biomass production and yield of horticultural crops: A review. *Sci Hort*, 1998, 74: 83-111
- [3] Fournier C, Andrieu B A. 3D architectural and process-based model of maize development. *Ann Bot*, 1998, 81: 233-250
- [4] Song Y-H(宋有洪), Guo Y(郭焱), Li B-G(李保国), de Reffye P. Virtual maize model II plant morphological constructing based on organ biomass accumulation. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 2003, 23(12): 2579-2586 (in Chinese with English abstract)
- [5] de Reffye P, Blaise F, Chemouny S. Calibration of hydraulic growth model on the architecture of cotton plants. *Agronomie*, 1999, 19: 265-280
- [6] Room P M, Hanan J S, Prusinkiewicz P. Virtual plants: New perspectives for pcologists, pathologists and pgricultural scientists. *Trends Plant Sci*, 1996, 1: 33-38
- [7] Hanan J S, Hearn A B. Linking physiological and architectural models of cotton. *Agric Syst*, 2003, 75: 47-77
- [8] Yang J(杨娟), Zhao M(赵明), Pan X-B(潘学标). Visualization of cotton growth based on NURBS and VC++ 6.0. *Trans CSAE* (农业工程学报), 2006, 22(10): 159-162 (in Chinese with English abstract)
- [9] Zhang L-Z(张立桢). A Process-Based Simulation Model for Cotton Growth and Development. PhD Dissertation of Nanjing Agricultural University, 2003 (in Chinese with English abstract)
- [10] Zhang W-P(张吴平), Li B-G(李保国). Three-dimensional model simulating development and growth of cotton root system. *J Syst Simulat* (系统仿真学报), 2006, 18(z1): 283-286 (in Chinese with English abstract)
- [11] Buch-Sorlin G H. L-System Model of the Vegetative Growth of Winter Barley. In: Polani D, Kim J, Martinetz T, eds. Fifth German Workshop on Artificial Life. Berlin: Akademische Verlagsgesellschaft Aka GmbH, 2000. pp 53-64
- [12] Zhang Z-G(展志刚), Wang Y-M(王一鸣), de Reffye P. Morphological architecture-based growth model of winter wheat. *Trans CSAE* (农业工程学报), 2001, 17(5): 6-11 (in Chinese with English abstract)
- [13] Chen G-Q(陈国庆). Study on morphogenesis model and virtual system of wheat. MS Dissertation of Shangdong Agricultural University, 2004 (in Chinese with English abstract)
- [14] Tan Z-H(谭子辉), Zhu Y(朱艳), Yao X(姚霞), Tian Y-C(田永超), Liu X-J(刘小军), Cao W-X(曹卫星). Modeling spike growth dynamics in winter wheat. *J Triticeae Crops* (麦类作物学报), 2006, 26(4): 93-97 (in Chinese with English abstract)
- [15] Shi C-L(石春林), Jin Z-Q(金之庆), Cao W-X(曹卫星). An elementary study on virtual growth of rice plant. *Jiangsu J Agric Sci* (江苏农业学报), 2006, 22(2): 105-108 (in Chinese with English abstract)
- [16] Chang L-Y(常丽英), Gu D-X(顾东祥), Zhang W-Y(张文宇), Yang J(杨杰), Cao W-X(曹卫星), Zhu Y(朱艳). A simulation model of leaf elongation

process in rice. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2008, 34(2): 311–317 (in Chinese with English abstract)

- [17] Chang L-Y(常丽英), Tang L(汤亮), Gu D-X(顾东祥), Yang J(杨杰), Cao W-X(曹卫星), Zhu Y(朱艳). A process-based simulation model of leaf sheath and internode elongation dynamics in rice. *J Nanjing Agric Univ* (南京农业大学学报), 2008, 31(3): 19–25 (in Chinese with English abstract)
- [18] Dong Q-X(董乔雪), Wang Y-M(王一鸣), Barczi J F, He C-X(贺超兴). Estimation method for model parameters of tomato morphological architecture by multi-targets plant fitting. *Trans CSAE* (农业工程学报), 2007, 15(1): 122–126 (in Chinese with English abstract)
- [19] Zhang G-J(张光鉴). Theory of Similarity (相似论). Jiangsu: Jiangsu Science and Technology Press, 1992 (in Chinese)
- [20] Institute of Cotton of The Chinese Academy of Agricultural Sciences (中国农业科学院棉花研究所主编). Cotton Cultivation in China (中国棉花栽培学). Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1983 (in Chinese)
- [21] Yu Z-W(于振文). Crop Cultivation (for Species) (作物栽培学各论). Beijing: China Agriculture Press, 2003 (in Chinese)