

棉花地上部形态模拟模型的建立*

陈 超^{1,2} 潘学标^{1**} 张立祯¹ 庞艳梅^{1,3} 刘琰琰^{1,4}

(1. 中国农业大学资源与环境学院 北京 100193; 2. 四川省气候中心 成都 610072;
3. 北京市门头沟区气象局 北京 102308; 4. 成都信息工程学院大气科学学院 成都 610225)

摘 要 为构建基于生理生态过程的棉花虚拟生长模型,本研究以棉花模型 COTGROW 为基础,利用棉花品种“美棉 33B”的 3 年田间密度试验数据,分析了棉株器官生物量-形态的关系,改进了 COTGROW 模型中的发育和形态发生模块,建立了基于生理生态过程的棉花地上部分形态模拟模型,并利用独立试验数据对模型进行检验。结果表明:模型对棉花地上部各器官形态特征的模拟值和测定值的吻合度较好,棉花株高、主茎节数、果枝数、各果枝果节数、节间长度、节间直径、叶片长度、叶片宽度、叶柄长度、叶柄直径、棉铃长度以及铃直径测定值与模拟值间的相关系数分别为 0.99、0.99、0.99、0.92、0.95、0.93、0.75、0.71、0.81、0.62、0.98 和 0.98,均方根误差分别为 3.85 cm、0.64、0.52、0.66、1.00 cm、0.15 cm、1.58 cm、2.39 cm、2.54 cm、0.05 cm、0.13 cm 和 0.10 cm。本研究建立的棉花地上部形态模拟模型能较准确地模拟棉花地上部分的生长状况,这将为棉花生长虚拟模型的开发奠定基础。

关键词 棉花 地上部分 形态结构 模拟模型

中图分类号: S562 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2012)12-1650-07

Establishment of morphology simulation model for above-ground part of cotton plant

CHEN Chao^{1,2}, PAN Xue-Biao¹, ZHANG Li-Zhen¹, PANG Yan-Mei^{1,3}, LIU Yan-Yan^{1,4}

(1. College of Resources and Environment, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. Sichuan Climatic Center, Chengdu 610072, China; 3. Beijing Mentougou Meteorological Administration, Beijing 102308, China; 4. College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract There are three reasons for the increasing demand of crop models that build plants on the basis of architectural principles and organogenetic processes. The first of these reasons is that realistic concepts of developing new crops need to be guided by such models. The second is that there is an increasing interest in crop phenotypic plasticity based on variable architecture and morphology. The third reason is that engineering of mechanized cropping systems requires information on crop architecture. Functional-structural plant models (FSPM) are the best bridge to connect the function and structure of plant growth and development, which are the tendency of future plant models. FSPM is a digital tool for crop growth regulation and variety design. With regard to studies on cotton cultivation in China, an explanatory model of cotton growth and development (COTGROW) was developed and modified based on the processes of the GOSSYM cotton model. The COTGROW model included meteorological, soil and other environmental conditions and management practices modules. The objective of this study was to construct a virtual growth model of cotton with eco-physiological processes. Field experiments with different densities of cotton cultivar “NuCoTN 33B” were conducted for 2008–2010 in Anyang (36°07'N, 114°22'E) of Henan Province, China. The experiment included five planting densities (plants·m⁻²): 1.5, 3.3, 5.1, 6.9 and 8.7. Plants were sown on 18 April in 2008 (Exp. 2008), 26 April in 2009 (Exp. 2009) and 29 April (Exp. 2010). Each treatment had three replications in a randomized complete block design. Five plants were collected for each replication at the sampling dates. The soil was a sandy clay-loam, previously managed as meadow land. The plots were irrigated and fertilized to avoid

* 国家自然科学基金项目(30971686)、公益性行业(气象)科研专项(GYHY201206022)、中国气象局成都高原气象研究所高原气象开放实验室基金项目(LPM2011012)资助

** 通讯作者: 潘学标(1962—), 男, 博士, 教授, 主要从事生物气候模型与信息系统、气候变化影响评价与农牧业适应技术、旱地农业可持续发展及农牧交错带生态恢复研究。E-mail: panxb@cau.edu.cn

陈超(1982—), 男, 博士, 工程师, 主要从事气象资源与农业减灾、生物气候模型与信息系统研究。E-mail: chenchaol6306@sina.com

收稿日期: 2012-06-04 接受日期: 2012-08-31

nutrient and water limitations to plant growth. Weeds were removed by hand to avoid herbicide effects on the plant growth. No plant disease, pest or stress symptoms were observed. Detailed observations were made on the dimensions and biomass of above-ground plant organs for each phytomer throughout the seasons. Growth stage-specific target files (a description of plant part weight and dimension based on plant topological structure) were established from the measured data. The relationship between biomass and morphology of the above-ground cotton plant parts was analyzed and used to establish a cotton simulation model for above-ground parts. This algorithm improved the development and morphogenesis modules in COTGROW. A preliminary model calibration was carried out using the experimental data for 2008 and 2009, and the model was validated using independent experimental data for 2010. The results showed that the simulated values agreed well with the measured ones. Correlation coefficient (R) and root mean squared error ($RMSE$) between the measured and simulated values of morphological parameters were determined. The determined R for plant height, main stem node number, fruiting branch number, fruiting branch node number, internode length, internode diameter, leaf blade length, leaf blade width, petiole length, petiole diameter, boll length and boll diameter were 0.99, 0.99, 0.99, 0.92, 0.95, 0.93, 0.75, 0.71, 0.81, 0.62, 0.98 and 0.98, respectively. The corresponding determined $RMSE$ for the above parameters were 3.85 cm, 0.64, 0.52, 0.66, 1.00 cm, 0.15 cm, 1.58 cm, 2.39 cm, 2.54 cm, 0.05 cm, 0.13 cm and 0.10 cm, respectively. The results indicated that the model achieved a good performance in simulating the growth processes of the above-ground parts of cotton plant. It was further possible to build a visual plant model from the above model.

Key words Cotton, Above-ground part, Morphology, Simulation model

(Received Jun. 4, 2012; accepted Aug. 31, 2012)

虚拟作物的研究包括形态结构模拟^[1-3]、生理生态过程模拟^[4-6]和形态结构与生理生态过程的耦合 3 个方面。1996 年在芬兰召开的 Functional-Structural Plant Model(FSPM)国际学术研讨会标志着植物功能-结构模型已成为国际上植物形态结构模拟与可视化研究的主流, 如 LIGNUM^[7-9]、GREENLAB^[10]和 L-PEACH 等。目前该方面研究呈现以下趋势: 植物与环境相互作用的生理生态机制探索, 并将生理生态过程与形态结构模型耦合; 冠层与根系耦合虚拟; 虚拟作物平台构建; 虚拟作物技术与作物生长模型、智能化专家系统、虚拟昆虫技术及 3S 和网络(B/S)技术集成与融合^[11]。当前国际上较领先的系统性研究机构包括法国以 de Reffye 为首的 AMAP (Advanced Modeling of Architecture of Plant)植物生长软件系统研究组、加拿大以 Prusinkiewicz 为领导的 Vlab(Virtual Laboratory)、德国 Kurth 领导的研究小组、澳大利亚 CTPM(Centre for Tropical Pest Management)研究中心以及美国、新西兰等的研究机构^[12]等。

近年来, 国内外有关虚拟棉花研究取得了重要进展, 通过棉花植株形态模拟与可视化, 加深了对棉花生长机理的研究。而棉花植株形态特征在棉花可视化模型构建中起着重要作用^[13], 但由于棉花植株具有器官种类多且结构复杂等特点, 国内外学者对其功能-结构方面的研究还处于初步探索阶段。Room 等^[14]以 L-system 为基础建立了 L-Cotton 模型, 但对棉花植株形态特征模拟进行了简化处理; Hanan 等^[15]对 L-Cotton 模型进行了扩展研究, 将其与 OZCOT^[16]模型耦合, 虽较好地解释了棉花形态发生, 但对于形态的细致描述仍然不够; Jallas 等^[17]基于生理生态模型 GOSSYM^[18], 建立了棉株各器官大小、角度和

干物质重间的关系, 并利用 OpenGL 技术构建了 COTONS 模型, 但模型参数较多, 实用性受到一定限制; 杨娟等^[19]以 NURBS 和 VC++6.0 为基础构建了棉花植株可视化系统, 该系统利用实测数据对棉株生长进行模拟, 但未考虑品种、栽培措施和环境因素等的影响; 周娟等^[20]通过定量描述棉花植株形态建成与品种、栽培措施和环境间的动态关系, 建立了棉花植株形态模型, 并利用 OpenGL 技术实现了棉花植株虚拟生长的可视化, 但是该模型缺乏对棉花植株同化作用反馈机制的描述, 需以干物质重对其进行修正, 以提高模型的合理性与准确性。上述研究有的对棉花植株形态特征做了简化处理, 有的机理性不强或实用性受到限制, 还未能真实有效地模拟虚拟棉花植株的形态特征及生长过程。鉴于此, 本研究旨在以基于生理生态的棉花模型 COTGROW 为基础, 通过试验数据分析器官同伸关系, 并修改 COTGROW 模型中的棉花发育与形态发生模块, 构建器官异速生长规则, 着重模拟棉花植株茎、枝、叶、柄和蕾铃等器官的形态特征, 为基于生理生态过程的虚拟棉花形态模型构建奠定基础。

1 材料与方法

1.1 试验设计

大田试验于 2008—2010 年在河南省安阳市中国农业科学院棉花研究所东场试验站(36°07'N, 114°22'E)进行, 试验地为砂质壤土, 供试棉花品种为“美棉 33B”。2008—2010 年的播种期分别为 4 月 18 日、4 月 26 日和 4 月 29 日。试验设 5 个密度处理: 1.5 株·m⁻²、3.3 株·m⁻²、5.1 株·m⁻²、6.9 株·m⁻²和 8.7 株·m⁻², 3 次重复, 共 15 个小区, 随机区组排

列。2008 年试验小区行长 13 m, 行距 0.80 m, 每个小区 5 行; 2009 年试验小区行长 16.5 m, 行距 0.80 m, 每个小区 12 行; 2010 年试验小区行长 11 m, 行距 0.80 m, 每个小区 8 行。田间管理按照棉花高产栽培要求进行。

1.2 观测方法

从棉花出苗开始, 每隔 7~10 d 每小区选取长势一致的棉花 5 株, 自下而上按照叶位和节位测定器官形态, 包括: 株高, 主茎节数, 果枝数, 各果枝果节数, 主茎节间和果枝的长度与直径, 主茎叶片和果枝叶片的长度与宽度(叶片长度为中脉的长, 从叶片基部到叶尖, 叶片宽度为垂直于中脉的最大宽度), 叶柄的长度与直径, 棉铃的长度与直径(棉铃长度为从铃基到铃尖的长, 棉铃直径为棉铃横径最大值)。测定后按照器官和节位分离植株, 在 105 °C 下杀青 30 min, 80 °C 烘干至恒重后称量棉株的主茎节间和果节、主茎叶片和果枝叶片、叶柄以及棉铃的干物重。直到棉株各器官的尺寸和重量不再发生变化时停止。

1.3 棉花地上部形态模拟模型的描述

COTGROW 是由潘学标等^[21]在 Gossym 棉花模型基础上, 结合中国棉花栽培研究成果独立开发的融气象、土壤等环境条件和栽培管理措施为一体的棉花生长发育动态解释性模型, 模型考虑了中国棉区普遍采用的常规栽培措施。COTGROW 模型以日为时间步长, 可以模拟不同气候、土壤和栽培管理措施下棉花的生长发育、形态发生、产量形成及生理生态过程; 还可模拟不同土壤水分和氮素状况下棉株对养分的吸收以及棉株器官的氮素变化等。

在 COTGROW 的发育与形态发生模块中, 主要模拟了棉花发育期, 植株根、叶片、节间与茎、果枝和蕾铃等器官的发生、扩展或伸长、脱落等, 由于器官发生主要受温度影响, 器官发育速率用温度函数表达^[22]。但是由于可视化过程需要大量形态学信息, 并结合图形学技术才能真实地显示植株形态, 而现有 COTGROW 模型发育和形态发生模块模拟的形态结构数据, 尚不能完全满足棉株形态结构可视化需求, 缺乏对主茎节和果节直径、棉叶片长度和宽度、叶柄长度和直径、棉铃直径和长度等的模拟。

本研究利用棉花模型 COTGROW 的干物质积累、生长发育、产量形成等模块, 根据可视化要求进行形态发生和形成模块的器官模拟与输出数据的拓展和修改, 并依据田间试验数据, 分析各器官生长规律, 构建棉花地上部器官形态模拟模型, 为进一步的三维可视化奠定基础。

1.4 检验方法

利用 2008 年和 2009 年的试验数据校正模型参

数, 根据校正后参数值对 2010 年棉花生长过程进行模拟。采用均方根误差描述模拟值与实测值间的吻合程度, 检验模型。均方根误差值越小, 模拟值与实测值间的一致性越好, 模型的模拟结果越准确、可靠。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_i - S_i)^2} \quad (1)$$

式中, $RMSE$ 为均方根误差, Q_i 为实测值, S_i 为模拟值, n 为样本数量。

2 结果与分析

2.1 棉花植株节间形态模拟

棉花植株主茎节和果节的生物量、长度的日变化值可由 COTGROW 模型输出, 节间形态可近似地看作圆柱体, 因此可以通过节间长度、节间生物量和节间密度表示节间的截面直径。

节间体积可表示为:

$$V_{\text{stem}}(i, x, y) = \frac{q_{\text{stem}}(i, x, y)}{\rho_{\text{stem}}(i, x, y)} = \frac{1}{4} \times \pi \times dia_{\text{stem}}^2(i, x, y) \times l_{\text{stem}}(i, x, y) \quad (2)$$

式中, $V_{\text{stem}}(i, x, y)$ 是节间体积, cm^3 ; $q_{\text{stem}}(i, x, y)$ 是节间生物量, g ; $\rho_{\text{stem}}(i, x, y)$ 是节间密度, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$; $l_{\text{stem}}(i, x, y)$ 是节间长度, cm ; $dia_{\text{stem}}(i, x, y)$ 是节间截面直径, cm ; i 、 x 、 y 分别表示日序、主茎节位和果枝节位, 当 $y=0$ 时, 则为主茎节间, 下同。

节间的截面直径可表示为:

$$dia_{\text{stem}}(i, x, y) = 2 \times \sqrt{\frac{q_{\text{stem}}(i, x, y)}{l_{\text{stem}}(i, x, y) \times \rho_{\text{stem}}(i, x, y) \times \pi}} \quad (3)$$

表 1 为 2008—2010 年不同种植密度下棉株节间密度的比较。从表 1 可知, 不同处理间棉花节间密度的变化很小, 因此认为, 同一棉花品种植株的节间密度是一个常数值, 可以通过试验测定得到。

表1 2008—2010年种植密度对棉株节间密度(ρ_{stem})的影响
Table 1 Effects of plant densities on cotton internode density (ρ_{stem}) in 2008—2010 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$

年份 Year	种植密度 Plant density ($\text{plants} \cdot \text{m}^{-2}$)					均值±标准差 Mean±SD
	1.5	3.3	5.1	6.9	8.7	
2008	0.31	0.33	0.32	0.34	0.32	0.32±0.01
2009	0.33	0.34	0.32	0.32	0.31	0.33±0.01
2010	0.33	0.31	0.31	0.35	0.33	0.33±0.02

2.2 棉花植株叶片形态模拟

叶片是光合作用的主要器官, 其形态直接关系到冠层光截获效率。COTGROW 模型中可输出棉花叶片生物量和面积的日变化值, 本研究利用模型输出结果和试验数据建立棉叶的长、宽与生物量之间的关系。

图 1 是由试验数据得到的叶片长度和生物量的关系, 由图可知, 叶片长度和生物量间有较好的乘幂关系。因此, 叶片长度与叶片生物量的关系可表示为:

$$l_{\text{leaf}}(i, x, y) = a_{\text{leaf}} \times q_{\text{leaf}}(i, x, y)^{b_{\text{leaf}}} \quad (4)$$

式中: a_{leaf} 、 b_{leaf} 是拟合系数; $l_{\text{leaf}}(i, x, y)$ 是日序为 i 时, 第 x 个主茎节位、第 y 个果枝节位叶片长度, cm; $q_{\text{leaf}}(i, x, y)$ 为叶片生物量, g。

另外, 农学上还常用叶片长度与其最大宽度的乘积乘以系数 λ 计算叶片面积, 因而在模拟出某个叶片的长度和面积后, 叶片最大宽度 $w_{\text{leaf}}(i, x, y)$ 可表示为:

$$w_{\text{leaf}}(i, x, y) = \frac{S_{\text{leaf}}(i, x, y)}{\lambda \times l_{\text{leaf}}(i, x, y)} \quad (5)$$

式中: $S_{\text{leaf}}(i, x, y)$ 是日序为 i 时, 第 x 个主茎节位、第 y 个果枝节位叶片面积; λ 为经验参数。

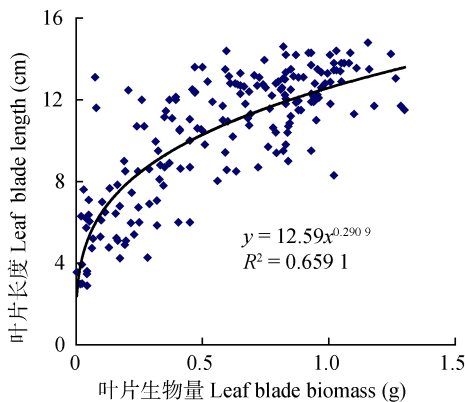


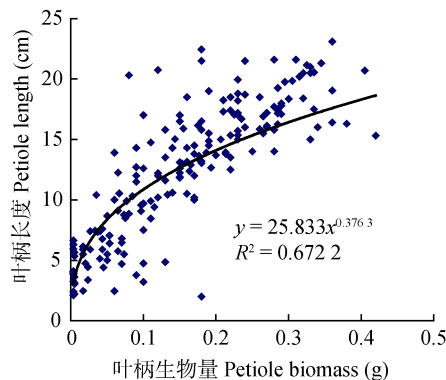
图 1 棉花叶片长度和叶片生物量的关系

Fig. 1 Relationships between leaf blade length and leaf blade biomass of cotton

2.3 棉花植株叶柄形态模拟

COTGROW 模型可输出叶柄重的逐日变化。根据田间观察与测量资料, 假设叶柄形状为圆柱体。

图 2 是叶柄长度与生物量及直径的关系, 由图



可知, 叶柄长度和生物量间有较好的乘幂关系。因此, 叶柄长度和叶柄生物量间的异速生长关系为:

$$l_{\text{petiole}}(i, x, y) = c_{\text{petiole}} \times q_{\text{petiole}}(i, x, y)^{d_{\text{petiole}}} \quad (6)$$

式中: $l_{\text{petiole}}(i, x, y)$ 是叶柄长度, cm; $q_{\text{petiole}}(i, x, y)$ 是叶柄生物量, g; c_{petiole} 、 d_{petiole} 是拟合系数。

由图 2 可知, 叶柄直径和长度间有较好的乘幂关系。叶柄直径和叶柄长度的关系可表示为:

$$\text{dia}_{\text{petiole}}(i, x, y) = a_{\text{petiole}} \times l_{\text{petiole}}(i, x, y)^{b_{\text{petiole}}} \quad (7)$$

式中: $\text{dia}_{\text{petiole}}(i, x, y)$ 是叶柄截面直径, cm; $l_{\text{petiole}}(i, x, y)$ 是叶柄长度, cm; a_{petiole} 、 b_{petiole} 是拟合系数。

2.4 棉铃形态模拟

COTGROW 模型中可以输出棉铃重逐日变化, 假定棉铃的形状为圆锥体, 棉铃体积可表示为:

$$V_{\text{boll}}(i, x, y) = \frac{q_{\text{boll}}(i, x, y)}{\rho_{\text{boll}}(i, x, y)} \\ = \frac{1}{12} \times \pi \times \text{dia}_{\text{boll}}(i, x, y)^2 \times l_{\text{boll}}(i, x, y) \quad (8)$$

式中: $V_{\text{boll}}(i, x, y)$ 是棉铃体积, cm^3 ; $q_{\text{boll}}(i, x, y)$ 是棉铃生物量, g; $\rho_{\text{boll}}(i, x, y)$ 是棉铃密度, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$; $l_{\text{boll}}(i, x, y)$ 是棉铃长度, cm; $\text{dia}_{\text{boll}}(i, x, y)$ 是棉铃直径, cm。

图 3 是棉铃直径与生物量及长度的关系, 由图可以看出, 棉铃直径和生物量间有较好的乘幂关系。因此, 铃直径与铃生物量的关系可表示为:

$$\text{dia}_{\text{boll}}(i, x, y) = a_{\text{boll}} \times q_{\text{boll}}(i, x, y)^{b_{\text{boll}}} \quad (9)$$

式中, a_{boll} 和 b_{boll} 为拟合系数。

由图 3 可知, 铃长度和直径间有较好的线性关系。因此, 棉铃长度与铃直径的关系可表示为:

$$l_{\text{boll}}(i, x, y) = j \times \text{dia}_{\text{boll}}(i, x, y) + k \quad (10)$$

式中, j 、 k 为拟合系数。

2.5 模型检验

利用 2010 年的试验数据对所建棉花形态模型进行检验, 结果表明(图 4), 模型对棉花各器官形态

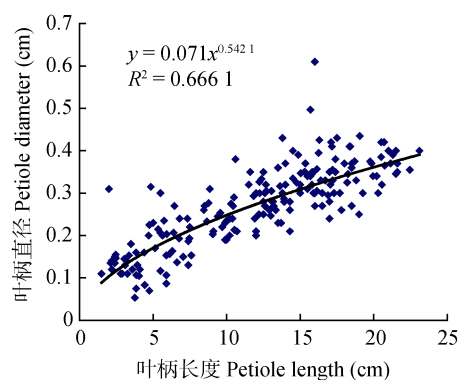


图 2 棉花叶柄长度与叶柄生物量及叶柄直径的关系

Fig. 2 Relationships between petiole biomass, petiole diameter and petiole length of cotton

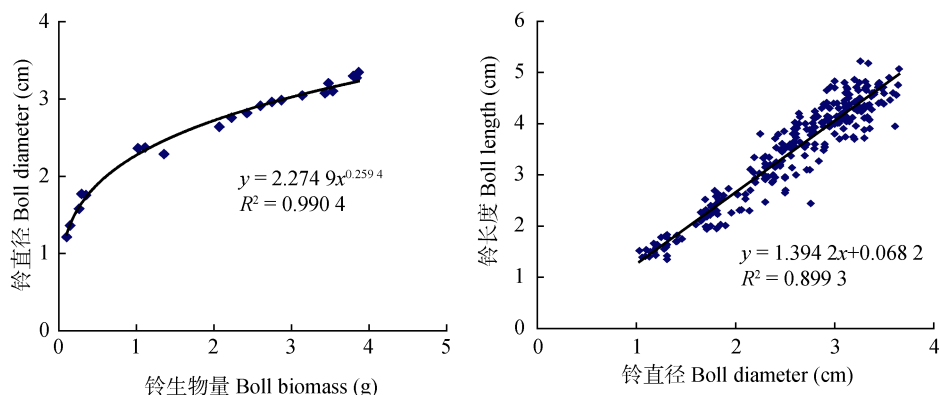


图 3 棉铃直径与铃生物量及铃长度的关系

Fig. 3 Relationships between boll biomass, boll length and boll diameter of cotton

特征的模拟效果总体较好,低密度试验的棉叶形态和棉铃形态模拟结果好于高密度试验,而对其他各形态特征的模拟效果在各密度处理间差异不明显。棉花株高、主茎节数、果枝数、各果枝果节数、节间长度、节间直径、叶片长度、叶片宽度、叶柄长度、叶柄直径、棉铃长度以及铃直径测定值与模拟值间基于 1:1 直线的相关系数 R 分别为 0.99、0.99、0.99、0.92、0.95、0.93、0.75、0.71、0.81、0.62、0.98、0.98, 均方根误差 ($RMSE$) 分别为 3.85 cm($n=50$)、0.64($n=50$)、0.52($n=40$)、0.66($n=80$)、1.00 cm($n=100$)、0.15 cm($n=100$)、1.58 cm($n=500$)、2.39 cm($n=500$)、2.54 cm($n=500$)、0.05 cm($n=500$)、0.13 cm($n=65$)以及 0.10 cm($n=65$)。

3 讨论

为了建立功能-结构棉花模型,需要集成各种技术,构建生长发育模型、形态模型和可视化模型的数据链接体系,使模拟模型与显示模型具备反馈和互动功能,并根据形态显示模型所需要的控制点数据,调整模型模拟项目及结果输出,最终实现棉花生长模型与可视化模型的耦合。由于功能-结构棉花模型的可靠性同时依赖于棉花形态模型和可视化过程的敏感性和准确度,因此,对于棉花形态模拟模型的研究,将为棉花生长虚拟模型的开发奠定基础。本研究的延伸将遵循“生长模型-形态模型-显示模型”的思路,以 COTGROW 模型为基础进行植株拓扑结构和各器官形态特征参数的生成,通过可视化技术显示不同环境条件和密度处理下棉花植株的三维形态,将形态模型模拟结果与可视化模型进行数据链接,实现形态模型与显示模型的一体化模拟。

本研究所利用的 COTGROW 模型主要考虑了中国棉区普遍采用的常规栽培措施,与 Gossym 及国内外的其他棉花模型相比^[16,18],从理论和适用性上都有了较大扩展,在中国棉区将具有更好适用性

和更大应用潜力。本模型较杨娟等^[19]的棉花器官几何模型和周娟等^[20]的棉花虚拟生长系统机理性更强,又因为模型考虑了生物量与形态参数间的关系,模拟的合理性和准确性也有一定提高。

不同品种的棉花植株其形态可能有所差异,本研究在建立和验证棉花模型 COTGROW 的生长发育与形态建成模块时仅用到安阳单点 3 年重复的密度试验数据,而未考虑品种对于建模的影响,但是,模型中建立的生物量-形态的异速生长关系是一个相对稳定的表达,其不会因为品种的变化而改变,而仅是参数值的取值不同。因此,模型在其他品种和地点的应用,尚需进一步多品种多地点的试验资料对模型参数进行校正和检验。

另外,在不同环境条件下,本模型部分生物量-形态关系中参数的稳定性还有待提高,这主要是因为棉花形态结构的复杂性所限,目前建立的生物量-形态关系可能还不能完全准确地反映棉花植株各器官生长规律,实测资料误差也可能影响模型参数估计的准确性。因此,需要有完善的试验数据为依据,才能系统准确描述棉花生长机理,以不断增强模型适用性。

4 结论

本研究以 COTGROW 棉花模型为基础,以试验资料为依据建立的棉花地上部器官形态模拟模型,主要模拟了棉花植株茎、枝、叶、柄和蕾铃等器官的外形尺寸、位置、日龄和生物量等,这为基于生理生态过程虚拟棉花生长模型构建奠定了良好基础。结果显示,该模型可以较好地模拟棉花地上部器官的形态特征,棉花株高、主茎节数、果枝数、各果枝果节数、节间长度、节间直径、叶片长度、叶片宽度、叶柄长度、叶柄直径、棉铃长度以及铃直径测定值与模拟值间基于 1:1 直线的相关系数 R 分别为 0.99、0.99、0.99、0.92、0.95、0.93、0.75、

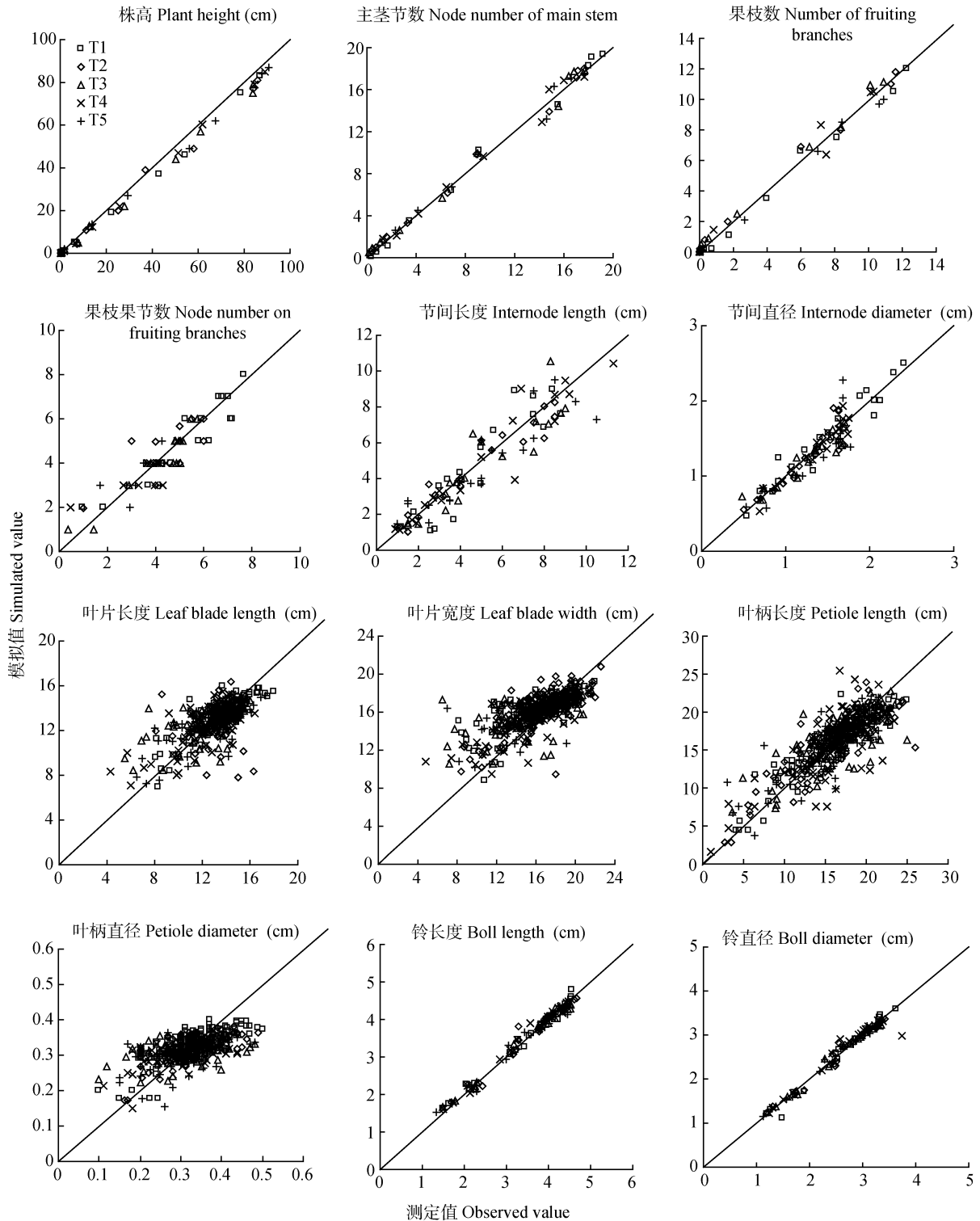


图 4 棉花形态指标测定值与模拟值的比较(图中实线为 1:1 直线)

Fig. 4 Comparison between observed value and simulated value of cotton morphological indices

T1: 1.5 株·m⁻² 1.5 plants·m⁻²; T2: 3.3 株·m⁻² 3.3 plants·m⁻²; T3: 5.1 株·m⁻² 5.1 plants·m⁻²; T4: 6.9 株·m⁻² 6.9 plants·m⁻²; T5: 8.7 株·m⁻² 8.7 plants·m⁻².

0.71、0.81、0.62、0.98、0.98, 均方根误差(RMSE)分别为 3.85 cm、0.64、0.52、0.66、1.00 cm、0.15 cm、1.58 cm、2.39 cm、2.54 cm、0.05 cm、0.13 cm 和 0.10 cm。

参考文献

[1] Prusinkiewicz P. Modeling of spatial structure and development of plants: A review[J]. Scientia Horticulturae, 1998,

74(1/2): 113-149

[2] Han J S. Plant simulation based on fusion of L-system and IFS[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2007, 4488: 1091-1098
[3] 周淑秋, 郭新宇, 雷蕾. 黄瓜生长可视化系统的设计与实现[J]. 计算机技术与发展, 2007, 17(1): 227-228, 232
[4] Lacomte A. Carbon allocation among tree organs: A review of basic processes and representation in functional-structural

- tree models[J]. *Annals of Forest Science*, 2000, 57(5): 521–533
- [5] 郑秀琴, 冯利平, 刘荣花. 冬小麦产量形成模拟模型研究[J]. *作物学报*, 2006, 32(2): 260–266
- [6] Eckersten H, Torssell B, Kornher A, et al. Modelling biomass, water and nitrogen in grass ley: Estimation of N uptake parameters[J]. *European Journal of Agronomy*, 2007, 27(1): 89–101
- [7] Perttunen J, Siev Änen R, Nikinmaa E, et al. Lignum: A tree model based on simple structural units[J]. *Annals of Botany*, 1996, 77(1): 87–98
- [8] Perttunen J, Sievänen R, Nikinmaa E. Lignum: A model combining the structure and the functioning of trees[J]. *Ecological Modelling*, 1998, 108(1/3): 189–198
- [9] Perttunen J, Nikinmaa E, Lechowicz M J, et al. Application of the functional-structural tree model Lignum to sugar maple saplings (*Acer saccharum* Marsh) growing in forest gaps[J]. *Annals of Botany*, 2001, 88(3): 471–481
- [10] Guo Y, Ma Y T, Zhan Z G, et al. Parameter optimization and field validation of the functional-structural model GREENLAB for maize[J]. *Annals of Botany*, 2006, 97(2): 217–230
- [11] 曹宏鑫, 石春林, 金之庆. 植物形态结构模拟与可视化研究进展[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(3): 669–677
- [12] 侯如林, 王一鸣, 董乔雪, 等. 虚拟植物生长的研究现状与发展趋势[J]. *农业机械学报*, 2004, 35(3): 159–163
- [13] Room P M, Hanan J S. Virtual cotton: A new tool for research, management and training[C]//*Proceedings of the World Cotton Research Conference-1. Challenging the Future*. Brisbane, Melbourne: CSIRO Australia, 1995: 40–44
- [14] Room P, Hanan J, Prusinkiewicz P. Virtual plants: New perspectives for ecologists, pathologists and agricultural scientists[J]. *Trends in Plant Science*, 1996, 1(1): 33–38
- [15] Hanan J S, Hearn A B. Linking physiological and architectural models of cotton[J]. *Agricultural Systems*, 2003, 75(1): 47–77
- [16] Hearn A B. OZCOT: A simulation model for cotton crop management[J]. *Agricultural Systems*, 1994, 44(3): 257–299
- [17] Jallas E, Martin P, Sequeira R, et al. Virtual COTON®, the firstborn of the next generation of simulation model[C]//Heudin J C. *Virtual Worlds: Second International Conference*. Berlin: Springer-Verlag, 2000: 235–244
- [18] Boone M Y L, Porter D O, McKinion J M. Calibration of GOSSYM: Theory and practice[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 1993, 9(3): 193–203
- [19] 杨娟, 赵明, 潘学标. 基于 NURBS 和 VC++6.0 的棉花生长可视化研究[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(10): 159–162
- [20] 周娟, 周治国, 陈兵林, 等. 基于形态模型的棉花 (*Gossypium hirsutum* L.) 虚拟生长系统研究[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(11): 3843–3851
- [21] 潘学标, 韩湘玲, 石元春. COTGROW: 棉花生长发育模拟模型[J]. *棉花学报*, 1996, 8(4): 180–188
- [22] 潘学标, 韩湘玲, 王延琴, 等. 棉花生长发育模拟模型 COTGROW 的建立: II 发育与形态发生[J]. *棉花学报*, 1999, 11(4): 174–181