

基于形态模型的棉花 (*Gossypium hirsutum* L.) 虚拟生长系统研究

周娟, 周治国, 陈兵林, 孟亚利

(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, 南京 210095)

摘要: 【目的】基于棉花形态器官形成过程的定量描述, 模拟棉花三维生长过程, 为虚拟棉作研究提供技术基础。【方法】基于 2005-2006 年棉花品种、播期、氮素、水分和 DPC 化控试验, 将系统分析方法和数学建模技术应用于棉花植株的形态建成, 通过对棉花形态数据的定量分析, 构建了棉花形态建成模型, 主要包括: 主茎叶长宽、主茎叶柄长、主茎节间长粗、果枝叶长宽、果枝叶柄长、果节长粗以及棉铃高度和直径等模型。结合 OpenGL 技术, 在 Visual C++6.0 平台上实现了棉花虚拟生长系统 VGSC (virtual growth system for cotton)。【结果】棉花形态模型采用 Logistic 方程描述各器官尺寸随 GDD (生长度日, $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$)、氮素、水分及 DPC 的动态变化过程, 利用 2006 年的试验数据对模型进行检验, 棉花主茎叶长宽、主茎叶柄长、主茎节间长粗、果枝叶长宽、果枝叶柄长、果节长粗以及棉铃高度和直径的观测值与模拟值的根均方差分别为 0.85、0.82、0.87、0.57、0.086、0.65、0.74、0.8、0.73、0.016、0.36 和 0.4 cm, 模型预测性好。此外, 以 NURBS (non-uniform rational B-spline, 非均匀有理 B 样条) 曲面模拟棉花叶片及棉铃形状, 以圆柱体实现茎(节)可视化表达, 构建的虚拟生长系统主要包括模型库、数据库和人机界面。【结论】用户输入系统所需的相关参数值, 就可较好地模拟显示棉花器官、个体和群体的三维动态生长过程。

关键词: 棉花; 生长度日; 形态模型; 可视化; 系统

Morphogenesis Model-Based Virtual Growth System of Cotton (*Gossypium hirsutum* L.)

ZHOU Juan, ZHOU Zhi-guo, CHEN Bing-lin, MENG Ya-li

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

Abstract: 【Objective】 Modeling dynamics of each organ size in cotton growth process, then a virtual growth system for cotton was implemented to provide a technical basis for research of virtual farming. 【Method】 Based on the potted plant research of cotton variety, sowing date, nitrogen, water and DPC in a summer seasons of 2005 and 2006, with the systematic analysis principle and mathematical modeling technique applied to cotton morphogenesis, a morphological model, which includes several sub-models of leaf, stem, boll, and so on, was developed by the quantitative analyses of experimental data. And a virtual growth system for cotton was implemented with usage of OpenGL for 3D graphic and MFC for graphical user interface. 【Result】 The results showed that the dynamic change of each organ size could be characterized by logistic equation in relation to GDD, nitrogen, water and DPC. The model was validated by the data from 2006, and the mean RMSEs were 0.85, 0.82, 0.87, 0.57, 0.086, 0.65, 0.74, 0.8, 0.73, 0.016, 0.36 and 0.4 cm for main stem leaf length and width, main stem leaf stalk length, main stem internode length and diameter, fruiting branch leaf length and width, fruiting branch leaf stalk length, fruiting node length and diameter, and boll length and width, respectively. Then NURBS was applied to simulate the shape of cotton leaf and boll, internode and petiole were treated as cylinder.

收稿日期: 2009-03-02; 接受日期: 2009-06-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (30771277)

作者简介: 周娟 (1982-), 女, 江苏常州人, 硕士研究生, 研究方向为作物形态虚拟系统研究。通信作者孟亚利 (1964-), 女, 陕西西安人, 副教授, 博士, 研究方向为作物系统模拟研究。Tel/Fax: 025-84396813; E-mail: giscott@njau.edu.cn

Finally, a cotton growth system which comprises of models, database and interface was implemented with OpenGL on the platform of Microsoft Visual C++ 6.0. 【Conclusion】 The system can be used to simulate the real growth process of each organ, individual and group with some inputs.

Key words: cotton; GDD (growing degree days); morphogenesis model; visualization; system

0 引言

【研究意义】虚拟作物是作物生长模拟模型的进一步发展,能获得作物生理生态过程和形态结构的并行过程的共同结果,整个模拟过程可用三维动画模拟作物的生长,并输出作物生理参数及其关系^[1]。近年来,虚拟棉花已成为国内外研究的热点问题,通过对棉花形态的可视化模拟,有助于加深棉花生长机理的研究,使人在更形象生动的环境中研究农业问题。【前人研究进展】目前,虚拟作物的研究主要是在形态模型的基础之上,结合已构建的机理模型,借助计算机编程语言实现作物的可视化模拟,如郭新宇等^[2]、Fournier 等^[3]、Drouet 等^[4]分别采用不同方法对玉米进行三维重构,陈国庆等^[5]基于形态模型实现了小麦的虚拟生长,石春林等^[6]利用 L 系统结合器官几何参数对水稻的形态特征进行可视化表达。棉花具有无限生长习性,器官种类多且结构复杂,国内外学者在其结构功能方面做了一定研究,如 Room 等^[7]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简单模拟;Hanan 等^[8]对该模型进行扩展,将其与 OZCOT^[9]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;Jallas 等^[10]以机理模型 GOSSYM^[11]为基础,通过干物质重计算各器官尺寸大小及角度,采用 OpenGL 技术实现了 COTONS 模型,考虑了不同株型对截光量的影响;杨娟等^[12]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、环境因素和栽培措施等。【本研究切入点】上述研究虽然取得了一定的研究成果,但未能反映棉花形态建成与品种、环境、措施等效应因子之间的关系,因此不能真实有效地虚拟棉花的形态特征以及模拟棉花的生长过程。【拟解决的关键问题】本研究基于棉花品种、播期、氮素、水分和 DPC 化控等试验,通过定量研究棉花形态建成与品种、环境和技术措施之间的动态关系,构建棉花形态模型,并进一步以 VC++6.0 为工作平台,C++为开发语言,采用 OpenGL 技术实现棉花虚拟生长系统。通过简单的人机交互,即可在微机上

实现棉花器官、个体和群体的三维重构与虚拟显示,真实感较强,为虚拟棉作的深入研究奠定了基础。

1 棉花形态模型

1.1 试验设计与测量项目

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,含有机质 $17.8 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、全氮 $0.9 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、碱解氮 $74.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、速效磷 $37.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、速效钾 $91.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。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 5 组试验。

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

试验 2: 播期试验。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 $240 \text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ 是南京地区棉花高产适宜施氮量的研究结果^[13],设置 3 个氮素水平: 0、2.7 和 $5.3 \text{ g N}\cdot\text{pot}^{-1}$ (分别相当于 0、240 和 $480 \text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$)。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 2 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 (相当于大田的 105 g·hm⁻²), 蕾期、开花期、打顶后分别施用 0.167、0.417、0.583 mg/pot (相当于大田的 15、37.5、52.5 g·hm⁻²); 二是不化控。每处理种植 3 盆。

试验 1~5 自棉花出苗开始, 每隔 3 d 测量棉花主茎叶片和果枝叶片的长度、宽度和叶柄长度, 主茎节间和果节的长度与直径, 棉铃高度和直径。直至上述各器官尺寸定长后停止测量。

本试验所用气象资料由南京气象局提供。

1.2 模型的构建

1.2.1 棉花主茎叶片、主茎叶柄、节间的形态模型

棉花主茎叶、主茎叶柄和节间的生长随 GDD 的增长呈 S 型曲线, 可用 Logistic 方程定量描述。利用 2005 年试验资料首先构建无氮素、水分、化控等胁迫条件下棉花分器官的形态模型, 进而综合考虑品种、氮素、水分、化控等因子, 分别构建其效应函数, 实现棉花上述器官形态变化的模拟。模型具体描述为:

$$f = f_{GDD} \times \max(f_N, f_W) \times f_P \quad (1)$$

式中, f 表示棉花某器官 (主茎叶片、主茎叶柄或节间) 实际尺寸大小 (cm); f_{GDD} 表示理想条件下的该器官尺寸大小 (cm); f_N 、 f_W 、 f_P 分别表示氮素、水分、化控因子的效应函数。 f_{GDD} 的计算过程如下:

$$f_{GDD} = L_{\max} \times f_1(\text{pos1}) / (1 + a_1 \times e^{[b_1 \times (\text{GDD} - \text{IniLGDD})]}) \quad (2)$$

$$f_1(\text{pos1}) = c_1 \times \text{pos1}^2 + d_1 \times \text{pos1} + e_1 \quad (3)$$

式中, L_{\max} 表示某器官类型尺寸最大值 (cm); $f_1(\text{pos1})$ 表示主茎叶位 (pos1) 的影响函数; c_1 , d_1 , e_1 , a_1 , b_1 为系数; GDD 表示棉株自播种开始所累积的生长度

$$f_{s3} = \begin{cases} \{-0.05, 0.4, 0.0875, 2.5356, -0.0278\} & (1 \leq \text{pos1} \leq 6) \\ \{-0.009, 0.249, -0.766, 2.5356, -0.0278\} & (\text{pos1} > 6) \end{cases}$$

$$f_{s4} = \begin{cases} \{0.0815, -0.482, 1.09, 5.64, -0.0394\} & (1 \leq \text{pos1} \leq 5) \\ \{-0.009, 0.25, -0.75, 5.64, -0.0394\} & (\text{pos1} > 5) \end{cases}$$

$$f_{s5} = \begin{cases} \{-0.0025, 0.0028, 0.95, 3.3, -0.008\} & (\text{GDD} < 341^\circ\text{C}\cdot\text{d}) \\ \{-0.0025, 0.0028, 0.95, 0.32, -0.008\} & (\text{GDD} \geq 341^\circ\text{C}\cdot\text{d}) \end{cases}$$

式中, $f_{s1} \sim f_{s5}$ 分别表示主茎叶长、主茎叶宽、主茎叶柄长、节间长、节间粗模型。

1.2.2 棉花果枝叶、果枝叶柄、果节的形态模型 分析两年试验数据表明, 德夏棉 1 号、科棉 1 号、美棉 33B 的果枝生长始节分别为第 4、第 5 和第 7 主茎节位, 定为品种遗传参数。果枝上各器官的生长过程与主茎叶片相似, 模型具体描述为:

$$f = f_{GDD_f} \times \max(f_N, f_W) \times f_P \quad (9)$$

式中, f 表示棉花某器官 (果枝叶片、果枝叶柄、果

日 ($^\circ\text{C}\cdot\text{d}$); IniLGDD 表示某器官出现所需的 GDD ($^\circ\text{C}\cdot\text{d}$)。

$$\text{IniLGDD} = \text{LGDD} + \sum_{j=1}^{n-1} \text{PHYLL}_j \quad (4)$$

式中, LGDD 表示棉花从播种至主茎叶开始出现所需的生长度日 ($^\circ\text{C}\cdot\text{d}$); PHYLL_j 表示棉花同类器官相继出现所需的生长度日 (即热时间间隔)^[14], 随棉花品种与生育时期的不同而变化。每日有效积温的积累可以表示成 $T_{\text{平均温度}} - T_{\text{临界温度}}$ 。在棉花不同的生育时期有不同值^[14]: 苗期为 12 $^\circ\text{C}$, 蕾期 17 $^\circ\text{C}$, 花铃期 19 $^\circ\text{C}$, 吐絮期 15 $^\circ\text{C}$ 。 f_W 、 f_P 、 f_N 分别由下式计算:

$$f_W = \text{Wa}/\text{Wo} \quad (5)$$

$$f_P = 1 - (1 - e^{(-0.023\text{DPCR})} e^{[-0.023(\text{DADPC}-3)^2]}) \quad (6)$$

$$f_N = (\text{SN} + \text{RFN} \times \text{CURN}) / \text{TNP} \quad (7)$$

式中, Wa 表示土壤实际含水量 (%); Wo 表示土壤最适含水量 (%); DPCR 表示 DPC 施用量 ($\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$); DADPC 表示喷施 DPC 后天数 (d); SN 表示土壤基础供氮量 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$); RFN 表示施氮量 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$); CURN 表示氮肥利用率 (%), 计算方法为:

$$\text{CURN} = (\text{NBY} - \text{NCK}) / \text{RFNO} \quad (8)$$

式中, NBY 和 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 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$); TNP 为高产栽培实际的需氮量 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)。

利用 2005 年试验数据, 确定模型各系数值。为方便起见, 器官形态模型表示为 $f_s = \{c_1, d_1, e_1, a_1, b_1\}$ 。

$$f_{s1} = \{-0.0043, 0.086, 0.57, 4.2, -0.03\}$$

$$f_{s2} = \{-0.0043, 0.086, 0.57, 1.53, -0.02\}$$

节) 实际尺寸大小 (cm); f_{GDD_f} 表示理想条件下该器官尺寸大小 (cm); 其它符号意义同上。 f_{GDD_f} 的计算过程如下:

$$f_{GDD_f} = L_{\max} \times f_2(\text{pos2}) \times f_3(\text{pos3}) / (1 + a_2 \times e^{[b_2 \times (\text{GDD} - \text{IniLGDD})]}) \quad (10)$$

$$f_2(\text{pos2}) = c_2 \times \text{pos2}^2 + d_2 \times \text{pos2} + e_2 \quad (11)$$

$$f_3(\text{pos3}) = c_3 \times \text{pos3}^2 + d_3 \times \text{pos3} + e_3 \quad (12)$$

式中, $f_2(\text{pos2})$ 、 $f_3(\text{pos3})$ 分别表示果枝位 (pos2)、果节位 (pos3) 的影响函数, a_2 、 b_2 、 c_2 、 d_2 、 e_2 、 c_3 、

d_3 、 e_3 为模型系数；其它符号意义同上。

利用 2005 年试验测量数据，确定模型各系数值。为方便起见，器官形态模型表示为 $f_f = \{c_2, d_2, e_2, c_3, d_3, e_3, a_2, b_2\}$ 。本研究所建模型数据如下：

$$f_{f1} = \{-0.0124, 0.188, 0.28, 0.0175, 0.118, 0.865, 6, -0.012\}$$

$$f_{f2} = \{-0.0124, 0.188, 0.28, 0.0175, 0.118, 0.865, 3, -0.01\}$$

$$f_{f3} = \{-0.0124, 0.188, 0.28, 0.0175, 0.118, 0.865, 1.8, -0.0075\}$$

$$f_{f4} = \{-0.0124, 0.188, 0.28, -0.285, 1.885, -0.6, 5, -0.018\}$$

$$f_{f5} = \{-0.0124, 0.188, 0.28, 0.1, -0.7, 1.59, 1.25, -0.08\}$$

$$f_{w_f} = \begin{cases} 0 \\ (\sin [(2.875 \times RWS - 1) \times \pi / 2])^{0.25} \\ (\sin [(4.5 - 5 \times RWS) \times \pi / 2])^{0.25} \end{cases}$$

式中，PN 表示铃期棉株实际平均含氮率 (%)； PN_0 表示铃期棉株最适含氮率 (%)；RWS 表示花铃期土壤平均含水量 (%)。

利用 2005 年试验测量的棉铃高度、直径数据，确定模型系数。为方便起见，器官形态模型表示为 $f_b = \{c_2, d_2, e_2, c_3, d_3, e_3, a_2, b_2\}$ 。

$$f_{b1} = \{-0.0025, 0.036, 0.8, 0.022, 0.118, 0.86, 1.2, -0.0088\}$$

$$f_{b2} = \{-0.0025, 0.036, 0.8, 0.022, 0.118, 0.86, 1.12, -0.012\}$$

式中， f_{b1} 、 f_{b2} 分别表示棉铃高度、直径模型。

1.3 模型验证

利用 2006 年试验数据对上述棉花形态模型进行检验的结果表明（图 1），模型对棉花各器官的形态数据具有较好的预测性，棉花主茎叶片长宽、主茎叶柄长、主茎节间长粗、果枝叶片长宽、果枝叶柄长、果节长粗以及棉铃高度、直径模拟值与观察值间的根均方差（RMSE）分别为 0.85 cm（n=117）、0.82 cm（n=117）、0.87 cm（n=120）、0.57 cm（n=117）、0.086 cm（n=117）、0.65 cm（n=98）、0.74 cm（n=107）、0.8 cm（n=107）、0.73 cm（n=130）、0.016 cm（n=130）、0.36 cm（n=110）、0.4 cm（n=110），模型预测结果准确，效果较好。

2 棉花器官几何造型

式中， $f_{f1} \sim f_{f5}$ 分别表示果枝叶长、果枝叶宽、果枝叶柄长、果节长、果节粗模型。

1.2.3 棉铃形态模型 分析两年试验表明，德夏棉 1 号、科棉 1 号、美棉 33B 的棉铃起始生长时间不同，所需的 GDD 分别为 455、513 和 526℃·d，生长过程与果节相似。模型具体描述为：

$$f = f_{GDD_f} \times \min(f_{N_f}, f_{w_f}) \quad (13)$$

$$f = f_{GDD_f} \times \max(f_{N_f}, f_{w_f}) \quad (14)$$

公式（13）、（14）分别表示棉铃高度模型、棉铃直径模型（未考虑化控因子影响）， f_{GDD_f} 形式与式（10）相同， f_{N_f} 、 f_{w_f} 分别表示氮素、水分的效应函数：

$$f_{N_f} = \sqrt{1 - |(PN - PN_0) / PN_0|} \quad (15)$$

(RWS < 35% 或 RWS > 90%)

(35% ≤ RWS ≤ 70%)

(70% < RWS ≤ 90%)

(16)

2.1 叶片

叶形态特征的可视化主要包括叶片伸展与叶色的虚拟显示，棉花叶片主要有 3 种形状（第 1、2 片主茎叶有 1 个裂片，第 3、4 片主茎叶以及果枝叶有 3 个裂片，第 5 片及以上主茎叶有 5 个裂片）。本研究基于拍摄的叶片照片，选取第 2、4、10 片主茎叶照片为典型的图片，利用 photoshop7.0 勾勒出能够反映叶片轮廓的控制点，借助 NURBS 曲面^[15]模拟叶片形状，然后以 GDD 为主线，以叶片形态模型为基本算法，计算出叶片实际尺寸，再结合已绘制图形进行缩放变形。图 2 分别为美棉 33B 的第 2、4、10 片主茎叶的有效积温达 80℃·d 时的虚拟显示结果。

2.2 茎（节）和棉铃

茎（节）的特点是外表呈柱状，可利用二次曲面—圆柱体来构建其形态显示模型（图 3）。以柱体的长度和上下底面的直径分别表示茎（节）的长和粗，其取值可通过所建立的棉花节间形态模型（棉花果节形态模型）来获得，将形态模型模拟的茎（节）长和粗数据转化为显示模型中各点的坐标，然后选择合适的绘制模式进行绘制，实现茎（节）形态的可视化输出。

棉铃绘制方法与叶片相似，绘制过程稍有差异，首先以 NURBS 曲面绘制出 1/4 形状的铃形，然后经 3 次 90° 旋转，得到完整的棉铃（图 3）。在此过程中，需要准确控制棉铃最顶端以及最宽处的点坐标，以反映实际的铃长和铃宽，棉铃长宽的取值可通过棉铃形

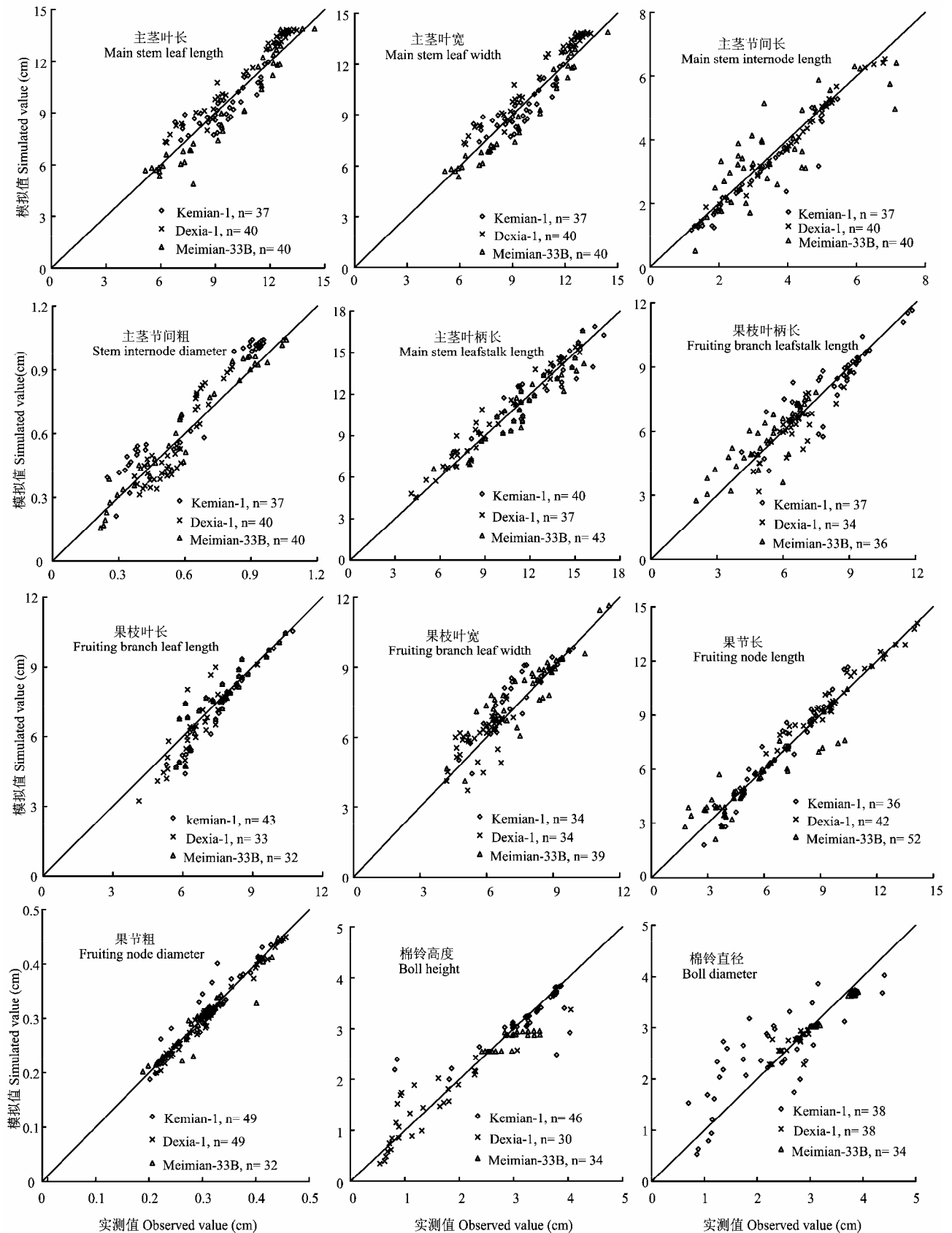


图 1 棉花形态指标模拟值与实测值的比较 (2006)

Fig. 1 Comparison between simulated value and observed value of cotton morphogenesis indices in 2006

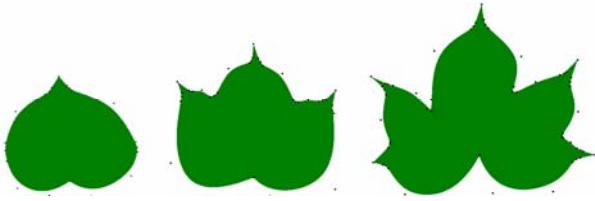


图 2 用 NURBS 模拟的棉花叶片及一些描述叶轮廓的控制点
 Fig. 2 Cotton leaf simulated by NURBS and controlled by some points fitted to its outline



图 3 棉花节间与棉铃的可视化造型
 Fig. 3 Virtualization of cotton internode and cotton boll

态模型来获得。

2.3 棉株拓扑结构

在完成棉花器官形态特征可视化的基础上，依据不同时期所拍摄的棉株图像提取拓扑信息。本研究将相邻叶片的水平夹角(真叶绕主茎或主枝旋转的角度)设置为 135°，垂直方向(叶柄与主茎或主枝的夹角)设置 3 个定值，分别为 15° (GDD₀ ≤ 50°C·d)、40° (50°C·d < GDD₀ < 140°C·d) 以及 70° (GDD₀ ≥ 140°C·d)，其中 GDD₀ = GDD - IniLGDD，在此基础上利用函数 rand()产生随机因子，在[-15°, 15°]范围内波动。

3 系统设计

3.1 系统结构

棉花可视化的实现是指棉花形态结构特征在计算机上的显示与虚拟表达，即以不同器官之间的拓扑关系和形态模型为基础，实现棉花可视化的生长过程。本系统主要用给定的参数和模型，通过计算机模拟出棉花静态及动态的三维形态。其系统结构如图 4 所示。

系统由参数输入、模型计算、存储系统、结果输出等部分组成。通过人机交互修改各影响因子参数值，然后调用形态模型为可视化模型提供形态特征参数，最后将结果以文本数据或图像的形式输出。

3.1.1 数据库 数据库中存在有品种数据、土壤数据、气象数据、棉花形态特征参数最大值以及初始化的最优栽培参数值，用户即可在不输入任何数据的情况下点击按钮直接实现棉花的虚拟生长，也可根据实际情况，修改品种、土壤和气象参数值进行模拟。此外，系统还能对数据库中品种参数等进行扩充，以实现不同地区、不同品种的显示需求。

3.1.2 模型库 模型库是系统的核心部分，提供本系统运行所需的算法支持。包括主茎叶片形态子模型、主茎叶柄形态子模型、主茎节间形态子模型、果枝叶片形态子模型、果枝叶柄形态子模型、果节形态子模型和棉铃形态子模型。其中叶片形态子模型包括叶片长宽和叶型、茎叶夹角等形态结构建成的模拟，主茎节间与果节形态子模型包括节长、节粗变化过程的模拟，棉铃形态子模型包括铃长与直径变化过程的模拟。

3.1.3 人机交互界面 系统以 Windows 为界面，通

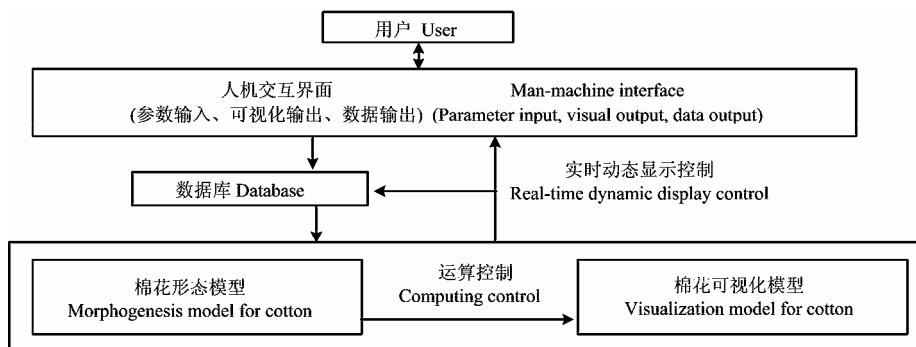


图 4 系统结构图

Fig. 4 Framework of the system

过下拉式菜单、工具条、图形及控制面板等方式与用户进行交互，只需输入相关的品种、土壤、气象和栽培信息参数值或通过简单的鼠标操作借助系统提供的初始化数值即可完成操作过程。模型模拟结果包括棉株形态建成过程的可视化，以及形态特征数据的输出。

3.2 系统功能

棉花虚拟生长系统是一个功能综合软件系统，其主要的功能是棉花器官级的三维可视化展示以及植株、群体级显示，用户不但可以输入具有农学意义的参数，以控制器官、单株的三维几何造型，还能设置具体显示规格如群体的株数等。具体输出结果包括：

- (1) 棉花形态特征参数及可视化
- (2) 棉株可视化
 - a. 主茎、主茎叶片、主茎叶柄；
 - b. 主茎、果枝叶片、果枝叶柄、果节；
 - c. 主茎、果节、棉铃；
 - d. 单株。
- (3) 群体动态生长及多视角观察

3 个模块即相互独立又有一定的关联。其中单个器官显示模块通过对参数的设定可改变器官的形态。棉株个体由单个器官根据拓扑关系进行拼接而得，而群体又是由多个棉株个体组成。

此外，系统设有数据管理及帮助模块，其中数据管理主要是对数据库中基础数据进行维护（添加、修改、删除）和查询，帮助模块主要提供系统的使用说明文档，指导用户正确操作与使用系统。同时，提供系统的开发研制单位与版权说明。

4 系统的实现

本研究采用 Access2003 数据库，以 Visual C++6.0 为开发环境，利用 C++和 OpenGL 图形处理技术，实现了交互式的棉花虚拟生长系统。

考虑到实际显示需求，构建系统时，分别定义了单器官类和器官组合类，其中器官组合类中以涉及到的器官作为成员对象。单器官类包括：抽象类 COrgan 以及由其派生的主茎叶类、主茎叶柄类、主茎节间类、果枝叶类、果枝叶柄类、果节类和棉铃类，器官组合类包括：主茎叶与主茎叶柄类、果枝叶与果枝叶柄类、果枝叶类（以果枝叶与果枝叶柄类、果节类、棉铃类为成员对象）。每一类数据都封装了数据获取 GetData()、模型计算 Size()以及图形显示 Draw()的成员函数。

系统设置 3 个控制面板：“器官可视化”、“棉

株可视化”以及“数据管理”，分别控制器官、棉株的显示以及数据库内容的维护。具体实现时，用户根据实际需求，调用相应面板完成操作。图 5 为“棉株可视化”面板完成的群体显示结果。

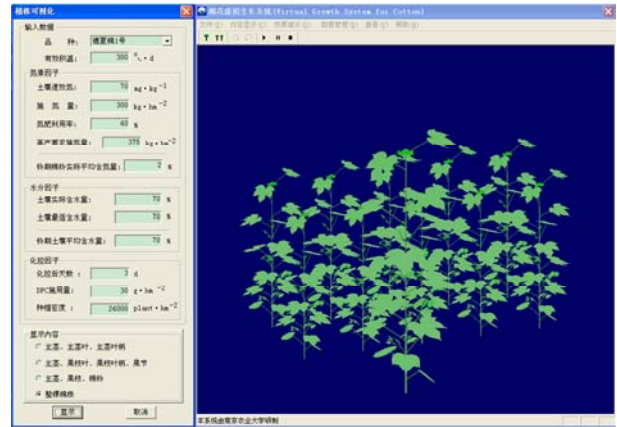
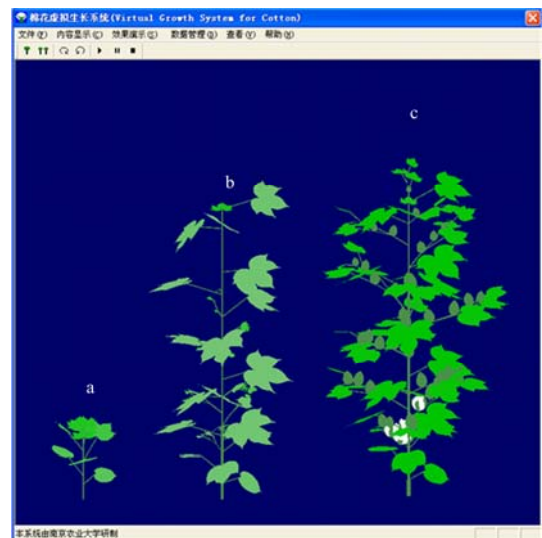


图 5 棉株群体生长效果图
Fig. 5 Render result of cotton colony growth

棉株动态生长过程主要是借助 VC 提供的 OnTimer()函数完成。分别绘制各器官在几个形状变化明显阶段的图形样本，通过改变尺寸、调整空间位置和方向构造棉株图形。图 6 为棉株在苗期、蕾期和铃期的三维图形。



a: 苗期; b: 蕾期; c: 铃期 a: Seedling stage; b: Bud stage; c: Boll stage

图 6 棉株动态生长效果图
Fig. 6 Render result of cotton growth

5 讨论

虚拟作物的研究从研究方向来看, 主要包括形态结构的模拟^[16-18]、生理生态过程方面的模拟^[19-21]以及生理生态过程与形态结构的耦合。其中生理生态与形态结构的耦合是目前虚拟作物研究的主流趋势, 国内外均有相关学者进行研究^[22-23]。与玉米^[2]、小麦^[5]、水稻^[6]等作物相比, 棉花结构复杂且叶片形状多样化, 模拟研究存在一定的难度。本研究构建了以 GDD 为驱动变量的棉花形态模型, 反映棉花形态特征参数与主要影响因子之间的关系, 该模型较 Room、Jallas、Hanan 等^[7-10]建立的形态模型具有较好的广适性和预测性, 较杨娟等^[12]建立的棉花器官几何模型机理性和动态性更强。

与三角面片^[10]及 Bezier 曲面^[5]相比, 用 NURBS 曲面建立的叶片虚拟显示模型更易于描述棉花叶片边缘的形态特征。本研究利用圆柱体来构建茎(节)的形态, 与棉花形态模型结合, 较好地实现了茎(节)生长过程的可视化表达。棉花形态模型的引入增加了系统运行结果的可靠性与科学性, 且该形态模型的构建直接以 GDD 为主线, 获取各器官尺寸大小, 从而避免了破坏性取样, 但是该模型不能反映作物同化作用的反馈机制, 因此需要进一步以干物质重对其进行修正, 以提高模型的准确性、合理性。

本研究在缺少机理模型的情况下, 以棉株图像为基础, 结合试验观察, 采用统计分析的方法获取了棉株生长过程中各器官角度变化值。该方法在分析作物拓扑结构时具有一定的可行性^[24]。此外, 将机理模型与 L-系统等数学方法相结合, 也可以解决植株各器官间的角度问题, 但会直接导致计算的复杂性, 所以对于形体不是很高大, 且机理研究较详细的作物, 完全可以不借助 L-系统对拓扑结构进行描述, 只需在程序设计过程中加入相关角度值, 就能很好地模拟作物的三维形态。

棉花叶片不仅形态特征复杂, 还具有极其丰富的叶表面纹理细节, 前人研究主要采用纹理贴图、粒子系统^[25]等方法进行模拟显示, 增加了计算量。本文为提高显示速度, 未考虑叶表面具体的纹理细节, 因此, 形象逼真的棉花可视化表达将是今后进一步研究的内容。

6 结论

通过对试验数据的统计分析和前人研究成果的总

结提炼, 构建了棉花形态模型, 并以 Visual C++6.0 为开发平台, C++为开发语言, 借助 OpenGL 函数库, 初步实现了棉花器官、个体以及群体的三维可视化生长显示。系统结构设计合理, 各组成部分单独设计实现, 通过特定接口进行关联, 方便系统的升级和完善。系统运行稳定, 真实感较强, 为虚拟棉作的进一步研究奠定了基础。

References

- [1] 宋有洪, 贾文涛, 郭 焱, 李保国. 虚拟作物研究进展. 计算机与农业, 2000, (6): 6-8.
Song Y H, Jia W T, Guo Y, Li B G. A review virtual crop research. *Computer and Agriculture*, 2000, (6): 6-8. (in Chinese)
- [2] 郭新宇, 赵春江, 刘 洋, 秦向阳, 邓旭阳, 孙广宇. 基于生长模型的玉米三维可视化研究. 农业工程学报, 2007, 23(3): 121-125.
Guo X Y, Zhao C J, Liu Y, Qin X Y, Deng X Y, Sun G Y. Three-dimensional visualization of maize based on growth models. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(3): 121-125. (in Chinese)
- [3] Fournier C, Andrieu B. A 3D architectural and process-based model of maize development. *Annals of Botany*, 1998, 81: 233-250.
- [4] Drouet J L, Pagès L. GRAAL: a model of growth, architecture and carbon allocation during the vegetative phase of the whole maize plant model description and parameterization. *Ecological Modelling*, 2003, 165: 147-173.
- [5] 陈国庆, 朱 艳, 刘 惠, 曹卫星. 基于形态模型的小麦器官和单株虚拟生长系统研究. 农业工程学报, 2007, 23(3): 126-130.
Chen G Q, Zhu Y, Liu H, Cao W X. Morphogenesis model-based virtual growth system for organs and plant of wheat. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(3): 126-130. (in Chinese)
- [6] 石春林, 金之庆, 曹卫星. 水稻植株的虚拟生长. 江苏农业学报, 2006, 22(2): 105-108.
Shi C L, Jin Z Q, Cao W X. An elementary study on virtual growth of rice plant. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2006, 22(2): 105-108. (in Chinese)
- [7] Room P M, Hanan J S, Prusinkiewicz P. Virtual plants: new perspectives for ecologists, pathologists and agricultural scientists. *Trends in Plant Science*, 1996, 1: 33-38.
- [8] Hanan J S, Hearn A B. Linking physiological and architectural models of cotton. *Agricultural Systems*, 2003, 75: 47-77.
- [9] Hearn A B. OZCOT: A simulation model for cotton crop management. *Agricultural Systems*, 1994, 44: 257-299.

- [10] Jallas E, Martin P, Sequeira R, Turner S. Virtual COTON®, the firstborn of the next generation of simulation model //Heudin J C(ed.). *Virtual Worlds: Second International Conference*. Berlin : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2000: 235-244.
- [11] Boone M Y L, Porter D O, McKinion J M. Calibration of GOSSYM: theory and practice. *Computers and Electronics in Agriculture*, 1993, 9: 193-203.
- [12] 杨 娟, 赵 明, 潘学标. 基于NURBS和VC++6.0的棉花生长可视化研究. *农业工程学报*, 2006, 22(10): 159-162.
Yang J, Zhao M, Pan X B. Visualization of cotton growth based on NURBS and VC++ 6.0. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(10): 159-162. (in Chinese)
- [13] 薛晓萍, 周治国, 张丽娟, 王以琳, 郭文琦, 陈兵林. 棉花花后临界氮浓度稀释模型的建立及在施氮量调控中的应用. *生态学报*, 2006, 26(6): 1781-1791.
Xue X P, Zhou Z G, Zhang L J, Wang Y L, Guo W Q, Chen B L. Development and application of critical nitrogen concentration dilution model for cotton after flowering. *Acta Ecological Sinica*, 2006, 26(6): 1781-1791. (in Chinese)
- [14] 中国农业科学院棉花研究所. 中国棉花栽培学. 上海: 上海科学技术出版社, 1983.
Cotton Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences. *Cotton Planting Knowledge of China*. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1983. (in Chinese)
- [15] 薛晓滨. 基于NURBS的工程可视化建模技术. *计算机应用*, 2003, 23(5): 115-117.
Xue X B. Technology of 3D modeling in engineering visualization on NURBS. *Computer Applications*, 2003, 23(5): 115-117. (in Chinese)
- [16] Prusinkiewicz P. Modeling of spatial structure and development of plants: a review. *Scientia Horticulturae*, 1998, 74: 113-149.
- [17] Han J. Plant simulation based on fusion of L-system and IFS. *Lecture Notes in Computer Science*, 2007, 4488: 1091-1098.
- [18] 周淑秋, 郭新宇, 雷 蕾. 黄瓜生长可视化系统的设计与实现. *计算机技术与发展*, 2007, 14(1): 227-229.
Zhou S Q, Guo X Y, Lei L. Design and realization of cucumber growing visualization system. *Computer Technology and Development*, 2007, 14(1): 227-229. (in Chinese)
- [19] Lacointe A. Carbon allocation among tree organs: a review of basic processes and representation in functional-structural tree models. *Annals of Forest Science*, 2000, 57: 521-533.
- [20] 郑秀琴, 冯利平, 刘荣花. 冬小麦产量形成模拟模型研究. *作物学报*, 2006, 32(2): 260-266.
Zheng X Q, Feng L P, Liu R H. A simulation model for yield components and final yield in winter wheat. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(2): 260-266. (in Chinese)
- [21] Eckersten H, Torssell B, Kornher A, Boström U. Modeling biomass, water and nitrogen in grass ley: Estimation of N uptake parameters. *European Journal of Agronomy*, 2007, 27: 89-101.
- [22] Hanan J. Virtual plants-integrating architectural and physiological models. *Environmental Modelling & Software*, 1997, 12(1): 35-42.
- [23] Yan H P, Kang M Z, de Reffye P, Dingkuhn M. A dynamic, architectural plant model simulating resource-dependent growth. *Annals of Botany*, 2004, 93: 591-602.
- [24] Moulia B, Fournier M, Guitard D. Mechanics and form of the maize leaf: in vivo qualification of flexural behaviour. *Journal of Materials Science*, 1994, 29: 2359-2366.
- [25] 雷 蕾, 郭新宇, 周淑秋. 基于粒子系统思想的叶片纹理构造. *计算机工程与应用*, 2004, 36: 218-219.
Lei L, Guo X Y, Zhou S Q. Construction of leaf veins based particle system. *Computer Engineering and Applications*, 2004, 36: 218-219. (in Chinese)