

# 缺水条件下植物细胞力学模型研究\*

李青林<sup>1</sup> 毛罕平<sup>1</sup> 李萍萍<sup>1</sup> 顾寄南<sup>2</sup>

(1. 江苏大学现代农业装备与技术省部共建教育部重点实验室, 镇江 212013;

2. 江苏大学机械工程学院, 镇江 212013)

**【摘要】** 为研究单个叶肉细胞在缺水条件下的力学行为, 利用有限元方法(FEA)建立了符合生理学特征的叶肉细胞力学模型——内部充满液体的球形细胞力学模型。根据水分代谢方程, 计算出由于蒸腾作用而产生叶肉细胞膨压变化量, 对单个细胞进行受力分析, 得到细胞壁上任一点的膨压随时间变化的动力学方程, 通过该模型得到膨压改变与单细胞变形之间的关系。仿真结果表明: 在细胞内膨压随时间从 200 kPa 减小到 120 kPa 过程中, 细胞半径从  $3.55 \times 10^{-5}$  m 减小到  $2.42 \times 10^{-5}$  m; 同时可以看出细胞壁的力学性能参数对细胞的变形有明显的影响: 穆尼材料常数  $C_1$  分别取 0.7、1.0、1.5 MPa 时, 细胞在初始膨压 200 kPa 作用下的细胞半径大小分别为  $3.58 \times 10^{-5}$ 、 $3.30 \times 10^{-5}$ 、 $3.13 \times 10^{-5}$  m; 穆尼材料常数  $C_2$  分别取 0.10、0.15、0.20 MPa 时, 细胞在初始膨压 200 kPa 作用下细胞大小分别为  $1.41 \times 10^{-5}$ 、 $1.22 \times 10^{-5}$ 、 $1.10 \times 10^{-5}$  m。

**关键词:** 植物细胞 力学模型 膨压 水分胁迫

**中图分类号:** Q947.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)10-0167-04

## Mechanical Model of Cell in Water Stressed Plant

Li Qinglin<sup>1</sup> Mao Hanping<sup>1</sup> Li Pingping<sup>1</sup> Gu Ji'nan<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education & Jiangsu Province, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China 2. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

### Abstract

A mechanical model of a cell was established by using finite element technique to study mechanical behavior of the cell on condition that the plant was water stressed. Based on the biophysical equation, the change of the turgor pressure in cell caused by transpiration was obtained. Then the dynamics equation of turgor pressure was got. The result showed the relation between the turgor pressure and the deformation of the cell. The results also showed that the radius of the cell decreased from  $3.55 \times 10^{-5}$  m to  $2.42 \times 10^{-5}$  m nonlinearly when the turgor pressure changed from 200 kPa to 120 kPa linearly; and the deformation was influenced by material mechanical parameter of cell wall. The radius of the cell was  $3.58 \times 10^{-5}$  m,  $3.30 \times 10^{-5}$  m,  $3.13 \times 10^{-5}$  m respectively as the Mooney - Rivlin constant ( $C_1$ ) was 0.7 MPa, 1.0 MPa, 1.5 MPa when the turgor pressure was 200 kPa; the radius of the cell was  $1.41 \times 10^{-5}$  m,  $1.22 \times 10^{-5}$  m,  $1.10 \times 10^{-5}$  m. respectively as the Mooney - Rivlin constant ( $C_2$ ) was 0.10 MPa, 0.15 MPa, 0.20 MPa when the turgor pressure was 200 kPa.

**Key words** Plant cell, Mechanical model, Turgor pressure, Water stressed

### 引言

植物缺水较严重时, 茎和叶会产生萎蔫, 主要是

由于缺水时植物细胞膨压下降, 从而使植物组织的刚度减小。由于植物组织具有细胞结构这一特点, 其力学性能与单细胞的力学行为有着密切的联系。

收稿日期: 2011-01-12 修回日期: 2011-03-29

\* 国家自然科学基金资助项目(31071327)和江苏高校优势学科建设工程资助项目(苏财教(2011)8号)

作者简介: 李青林, 讲师, 博士生, 主要从事虚拟作物模型研究, E-mail: lql@ujs.edu.cn

通讯作者: 毛罕平, 教授, 博士生导师, 主要从事设施农业系统检测与控制研究, E-mail: maohp@ujs.edu.cn

土壤水分和环境条件的变化会引起植物细胞内部膨压变化,使细胞产生变形,从而引起植物组织变形以及植物植株形态的变化。因此研究膨压变化条件下细胞的变形情况,可为建立水分胁迫条件下植物的形态模型提供理论基础。

植物的结构力学特性取决于其成熟组织,尤其是细胞壁组织<sup>[1]</sup>。国内外对植物细胞力学的研究仍处于探索阶段,该领域中具有奠基性的成果是Pitt建立的苹果果肉薄壁细胞的生物力学模型<sup>[2]</sup>。此后的研究逐步揭示出植物组织的力学性能与单细胞的力学行为、细胞构成组织的几何形式、细胞间联系的微观力学性质有关,而单细胞的力学行为又主要与细胞壁的微观力学性能、细胞膨压、细胞几何性质等诸多因素相关<sup>[3-4]</sup>。目前研究主要集中在单个细胞力学特性的实验研究和单个细胞力学模型的建立。已有研究均在建立植物细胞模型、连接细胞模型得到植物组织的二维和三维模型的基础上进行植物组织的力学行为分析<sup>[5]</sup>。在膨压影响植物组织力学性能研究方面国内仍是空白。

本文旨在建立考虑膨压变化的细胞力学模型,用以模拟不同膨压下细胞的变形。在此基础上研究不同的细胞壁材料对细胞变形的影响。

## 1 细胞力学模型建立

### 1.1 基本假设

植物细胞由细胞壁和细胞膜、液泡等原生质组成。细胞的形状、大小和力学特性因植物种类的不同存在很大的差异,本文在建立细胞力学模型时,以黄瓜叶片的叶肉细胞中海绵组织细胞为研究对象,把细胞看作是由细胞壁和细胞液两部分组成的球形细胞。细胞壁和细胞液的刚度存在很大差异,细胞壁刚度较大,保证了植物组织的刚性结构<sup>[6]</sup>。一般情况下,细胞壁呈现弹性、塑性、粘弹性和时间依存性<sup>[7]</sup>,为了研究方便,本文采用弹性模型来模拟细胞壁。将细胞壁假设为均匀的连续体,并假设细胞壁是各向同性的弹性膜,只能承受张力,不能承受弯曲载荷,叶肉细胞都是薄壁细胞,细胞内压均匀分布。因为细胞壁的厚度相对于细胞大小来说是很小的,因此建立细胞壁的力学模型时采用薄膜理论<sup>[8]</sup>。细胞外环境压力假设为零,细胞内压等于膨压 $P$ 。该膨压由细胞壁来平衡,因此植物缺水时会改变这些细胞的力学特性<sup>[9-10]</sup>。叶片的断面结构如图1所示,本文研究的是叶肉细胞的力学模型。

### 1.2 有限元模型建立和验证方法

植物细胞的形态变化可认为是薄膜加压后的变形,用薄膜理论来描述细胞变形时,必须考虑3类变

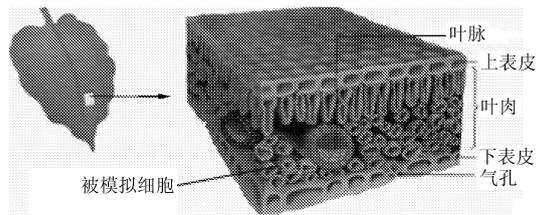


图1 叶片断面结构图

Fig. 1 Cross section structure of leaf

量之间的关系:细胞壁应力 $\sigma$ 、细胞壁应变 $\varepsilon$ 和细胞几何参数(如半径 $r$ 、细胞壁厚度 $\delta$ )。三者之间的关系由如图2所示的3个基本方程来描述:本构方程描述细胞壁材料的力学行为;运动学方程(应变-位移关系)描述细胞表面扩张与细胞形状变化的关系;力平衡方程描述细胞的力平衡情况,对一个植物细胞来说,即膨压产生的法向力和细胞壁的张力平衡<sup>[11-12]</sup>。

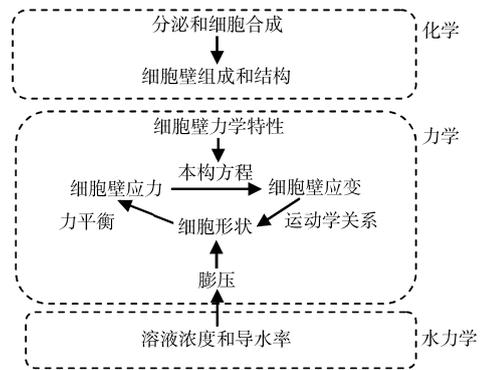


图2 细胞模型的基本力学关系

Fig. 2 Fundamental mechanical relations of cell deformation

本文用有限元方法(ANSYS 11.0)建立球形细胞的有限元模型来模拟膨压作用下细胞的变形情况,采用膜单元来模拟细胞壁。有限元模型包括几何形状、材料属性、载荷参数以及边界条件。为了验证模型的正确性,本文将初始膨压作用下细胞的变形和现有文献结果进行比较。

#### (1) 几何形状和单元选择

本文取细胞半径为 $2.2 \times 10^{-5} \text{ m}$ <sup>[13]</sup>,细胞壁厚度为 $1.25 \times 10^{-6} \text{ m}$ ,选择每个节点有6个自由度的四节点单元对球面(shell181)进行网格划分。

#### (2) 材料属性定义

细胞壁内部具有大量随机排列的细胞纤维,细胞壁呈现出各向同性。因此,用非线性高弹性材料来模拟叶肉细胞细胞壁,取两参数的Mooney-Rivlin模型,其应变能方程为

$$W = C_1(I_1 - 3) + C_2(I_2 - 3) \quad (1)$$

式中  $W$ ——应变能密度

$C_1, C_2$ ——材料Mooney-Rivlin系数,也称穆尼材料常数

$I_1, I_2$ ——第一、二格林应变不变量

材料常数通过实验测定得到,具体方法是避开叶脉取新鲜叶肉样本(0.5 cm × 1 cm),迅速放入福尔马林—醋酸—酒精溶液(FAA)液进行固定,经常规脱水、透明、浸蜡、包埋、切片后在纳米压痕仪上对样本进行单向压缩得到载荷-变形数据,取可靠工作区域内的数据,根据压针面积和切片厚度,计算得到应力-应变数据,然后按文献[14]的方法计算得到细胞壁的材料常数  $C_1, C_2$  分别为 0.792、0.195 MPa。

(3) 边界条件

为了计算方便,采用 1/8 球面进行建模(图 3),在对称边界上施加对称约束。

(4) 载荷参数

为了模拟和预测细胞变形的机理性力学过程,膨压的变化由生物物理方程计算得到。正常生长情况下,细胞壁的扩张可以表示为

$$(dV/dt)_w/V_w = L_p(\Delta P - P) - (dT/dt)_w/V_w \quad (2)$$

$$(dV/dt)_c/V_c = \varphi(P - P_c) + (1/\varepsilon)dP/dt \quad (3)$$

$$E_v = 2(C_1 + C_2)/(1 - 2\nu) \quad (4)$$

式中  $V_w$ ——细胞内水分体积,  $m^3$   $P$ ——压力, Pa

$V_c$ ——细胞体积,  $m^3$   $t$ ——时间, s

$L_p$ ——细胞膜相对导水率, Pa/s

$\Delta P$ ——细胞膜内外压差, Pa

$T$ ——由蒸腾作用损失的水分体积,  $m^3$

$\varphi$ ——不可逆的细胞壁扩张量

$P_c$ ——主膨压, Pa  $\nu$ ——泊松比, 取 0.499

$E_v$ ——体积弹性模量, Pa

式中  $(dV/dt)_w/V_w$  为相对体积蒸腾速率, 根据叶面蒸腾速率, 细胞大小以及细胞的分布计算得到。

因为细胞中水的体积增量等于细胞体积的增量, 所以由式(2)、(3)可得到膨压随时间的变化

$$dP/dt = \varepsilon[L_p(\Delta P - P) - (dV/dt)_w/V_w - \varphi(P - P_c)] \quad (5)$$

作物暂时性缺水过程一般较短, 忽略该过程中的不可逆扩张, 假设缺水过程中细胞的净吸水量为零, 式(5)变为

$$dP/dt = -E_v(dV/dt)_w/V_w \quad (6)$$

因此膨压随时间的变化关系为

$$P(t) = P_0 - Kt \quad (7)$$

式中  $P_0$ ——初始膨压, 取 200 kPa

$K$ ——常数, 取 0.8 Pa/s

## 2 模型仿真结果

### 2.1 初始膨压下的细胞变形

细胞壁的变形由细胞内部液体对其向外的压力而产生, 当细胞处于初始膨压时, 根据等效原则, 细

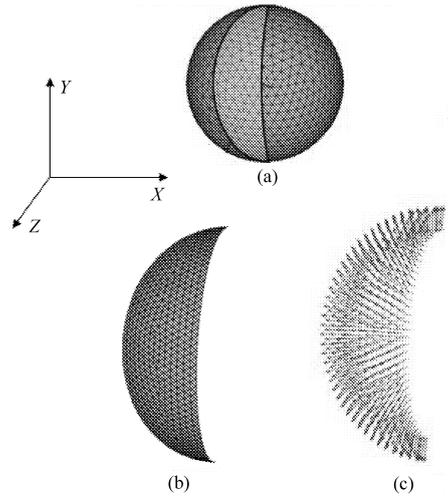


图 3 细胞有限元模型

Fig. 3 Finite element of cell

(a) 完整细胞模型 (b) 1/8 细胞模型 (c) 载荷模型

胞壁受到细胞内部液体对细胞壁的压力, 可以通过施加在细胞壁向外法线方向的均匀分布力来实现, 均匀分布力的大小为初始膨压 200 kPa。整个细胞在初始膨压作用下, 向外膨胀, 根据仿真结果知, 膨胀后的细胞半径为  $3.55 \times 10^{-5}$  m, 这和现有资料的结果相符<sup>[15]</sup>。

### 2.2 膨压减小过程中的细胞变形

由式(6)可知, 膨压由初始膨压 200 kPa 线性减小的过程中, 细胞体积也减小, 细胞壁上任一点的法向位移随时间的变化情况如图 4 所示。由图 4 可以看出, 细胞缺水初期, 在  $0 \sim 1 \times 10^5$  s 时, 细胞的变形较快, 细胞壁上任一点的位移从  $1.35 \times 10^{-5}$  m 减小到  $2.2 \times 10^{-6}$  m, 也就是细胞半径从  $3.55 \times 10^{-5}$  m 减小到  $2.42 \times 10^{-5}$  m。在  $1 \times 10^5 \sim 5 \times 10^5$  s 时, 细胞壁的变形速度较慢, 从细胞壁上任一点的位移  $2.2 \times 10^{-6}$  m 变化到  $1.8 \times 10^{-6}$  m, 也就是细胞半径从  $2.42 \times 10^{-5}$  m 减小到  $2.38 \times 10^{-5}$  m。

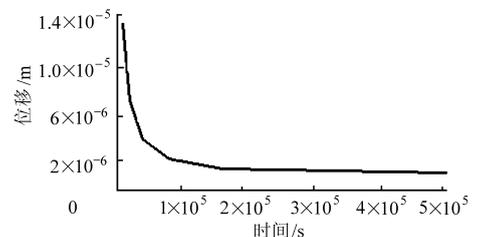


图 4 细胞壁上各点的法向位移随时间的变化情况

Fig. 4 Relationship between normal displacement and time

### 2.3 细胞壁力学特性对细胞变形的影响

不同植物、不同组织细胞壁的力学特性有很大的差异, 在此, 仅改变非线性高弹性材料 Mooney-Rivlin 模型中材料常数  $C_1, C_2$  的值, 来考查细胞的变形情况。  $C_1$  的通常取值范围为 0.7 ~ 2.0 MPa,  $C_2$  的通常取值范围为 0.1 ~ 0.2 MPa<sup>[16]</sup>。

图5是在初始膨压  $P_0 = 200 \text{ kPa}$ 、 $C_2 = 0.2 \text{ MPa}$  时,常数  $C_1$  分别取  $0.7$ 、 $1.0$ 、 $1.5 \text{ MPa}$ ,细胞壁上任一点的法向位移随时间的变化曲线。由图可以看出,细胞变形和时间呈非线性关系,随着时间的增加,细胞壁上各点的位移减小。

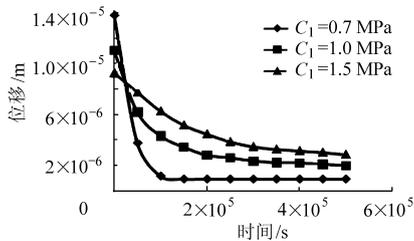


图5 参数  $C_1$  对细胞力学特性的影响

Fig.5 Effect of  $C_1$  on mechanical properties of cell

同时可以看出,细胞膨压减小相同值时, $C_1$  值越大,细胞的变形越小。在时间  $t = 0$ ,也即初始膨压时, $C_1$  分别取  $0.7$ 、 $1.0$ 、 $1.5 \text{ MPa}$ ,细胞壁上任一点的法向位移为分别为  $1.38 \times 10^{-5}$ 、 $1.10 \times 10^{-5}$ 、 $0.93 \times 10^{-5} \text{ m}$ ,也即细胞半径分别为  $3.58 \times 10^{-5}$ 、 $3.30 \times 10^{-5}$ 、 $3.13 \times 10^{-5} \text{ m}$ ;在  $t = 1 \times 10^5 \text{ s}$ ,也即膨压减小到  $120 \text{ kPa}$  时,细胞壁上点的位移分别为  $1.2 \times 10^{-6}$ 、 $4.2 \times 10^{-6}$ 、 $6.3 \times 10^{-6} \text{ m}$ 。这说明参数  $C_1$  越大,细胞壁的刚度越大。

图6是在初始膨压且  $C_1 = 1.0 \text{ MPa}$  时,参数  $C_2$  分别取  $0.10$ 、 $0.15$ 、 $0.20 \text{ MPa}$ ,细胞壁上任一点的法向位移随时间的变化曲线。由图可以看出:细胞膨压减小同值时, $C_2$  值越大,细胞的变形越小。在  $t = 0$ ,也即初始膨压时, $C_2$  分别取  $0.10$ 、 $0.15$ 、 $0.20 \text{ MPa}$ ,

细胞壁上点的位移分别为  $1.41 \times 10^{-5}$ 、 $1.22 \times 10^{-5}$ 、 $1.10 \times 10^{-5} \text{ m}$ ,也即细胞半径分别为  $3.61 \times 10^{-5}$ 、 $3.42 \times 10^{-5}$ 、 $3.30 \times 10^{-5} \text{ m}$ ;在  $t = 1 \times 10^5 \text{ s}$ ,也即膨压减小到  $120 \text{ kPa}$  时,细胞壁上点的位移分别为  $2.2 \times 10^{-6}$ 、 $3.3 \times 10^{-6}$ 、 $4.3 \times 10^{-6} \text{ m}$ 。这说明参数  $C_2$  越大,细胞壁的刚度越大。

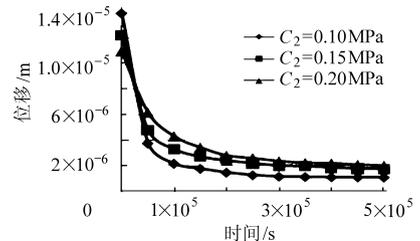


图6 参数  $C_2$  对细胞力学特性的影响

Fig.6 Effect of  $C_2$  on mechanical properties of cell mechanical properties of cell

### 3 结论

(1) 在膨压随时间线性减小的过程中,细胞呈非线性减小,在  $0 \sim 1 \times 10^5 \text{ s}$  时,细胞半径从  $3.58 \times 10^{-5} \text{ m}$  减小到  $2.42 \times 10^{-5} \text{ m}$ ,随着时间的增加细胞变形减缓,在  $5 \times 10^5 \text{ s}$  时,细胞半径大小为  $2.38 \times 10^{-5} \text{ m}$ 。

(2) 在相同膨压作用下,细胞壁力学常数  $C_1$  大,细胞变形较小,反之,细胞壁力学常数  $C_1$  小,细胞变形较大。由此可知, $C_1$  越大,细胞刚度越大,细胞变形不容易,反之亦然。 $C_2$  情况同  $C_1$ 。

### 参 考 文 献

- Geitmann A, Joseph K H O. Mechanics and modeling of plant cell growth[J]. Trends in Plant Science, 2009, 14(9): 467 ~ 477.
- Pitt R E. Models for rheology and statical strength of uniformly stressed vegetative tissue[J]. Transactions of the ASAE, 1982, 25(1): 1776 ~ 1784.
- Otger Campas, Mahadevan L. Shape and dynamics of tip-growing cells[J]. Current Biology, 2009, 19(24): 2102 ~ 2107.
- Geitmann A. Mechanical modeling and structural analysis of the primary plant cell wall[J]. Current Opinion in Plant Biology, 2010, 13(6): 693 ~ 699.
- Tancrède A, Joseph G. Mechanical analysis of the strains generated by water tension in plant stems. part I: stress transmission from the water to the cell walls[J]. Tree Physiology, 2007, 27(11): 1505 ~ 1516.
- Burgert, Fratzl P. The plant cell wall acts as a sophisticated mechanical device[C]. Annual Meeting of the Society for Integrative and Comparative Biology, 2009: 98 ~ 106.
- Köhler L, Spatz H C. Micromechanics of plant tissues beyond the linear-elastic range[J]. Planta, 2002, 251(1): 33 ~ 40.
- Dumais J, Shaw S L, Steele C R, et al. An anisotropic-viscoplastic model of plant cell morphogenesis by tip growth[J]. The International Journal of Developmental Biology, 2006, 50(2 ~ 3): 209 ~ 223.
- Smith A E, Moxham K E, Middelberg A P J. On uniquely determining cell-wall material properties with the compression experiment[J]. Chemical Engineering Science, 1998, 53(23): 3913 ~ 3922.
- Wu H I, Spence R D, Sharpe P J. Cell wall elasticity: I. a critique of the bulk elastic modulus approach and an analysis using polymer elastic principles[J]. Plant Cell Environ, 1985, 8(8): 563 ~ 570.

- 5 庄恒扬, 曹卫星, 刘传松. 作物磷素养分的动态模拟[J]. 生态学杂志, 2005, 24(3): 335 ~ 338.  
Zhuang Hengyang, Cao Weixing, Liu Chuansong. Dynamic simulation of phosphorus nutrient in crop-soil system [J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(3): 335 ~ 338. (in Chinese)
- 6 裴孝伯, 张福漫, 王柳. 不同光温环境对日光温室黄瓜氮磷钾吸收分配的影响[J]. 中国农业科学, 2002, 35(12): 1 510 ~ 1 513.  
Pei Xiaobo, Zhang Fuman, Wang Liu. Effect of light and temperature on uptake and distribution of nitrogen, phosphorus and potassium of solar greenhouse cucumber[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2002, 35(12): 1 510 ~ 1 513. (in Chinese)
- 7 裴孝伯, 张福漫, 高丽红, 等. 不同季节日光温室黄瓜氮磷钾吸收规律的研究[J]. 安徽农业大学学报, 2002, 29(1): 68 ~ 73.  
Pei Xiaobo, Zhang Fuman, Gao Lihong, et al. Study on uptake of N P K of solar greenhouse cucumber in different seasons [J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2002, 29(1): 68 ~ 73. (in Chinese)
- 8 魏述英, 吴震, 裴孝伯, 等. 现代温室冬春茬黄瓜矿质元素吸收与分配特性研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(4): 651 ~ 657.  
Wei Shuying, Wu Zhen, Pei Xiaobo, et al. Mineral elements absorption and distribution of winter-spring cucumber in modern greenhouse[J]. Plant Nutrient and Fertilizer Science, 2007, 13(4): 651 ~ 657. (in Chinese)
- 9 倪纪恒, 陈学好, 陈春宏, 等. 用辐热积法模拟温室黄瓜果实生长[J]. 农业工程学报, 2009, 25(5): 192 ~ 196.  
Ni Jiheng, Chen Xuehao, Chen Chunhong, et al. Simulation of cucumber fruit growth in greenhouse based on production of thermal effectiveness and photosynthesis active radiation [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(5): 192 ~ 196. (in Chinese)
- 10 倪纪恒, 罗卫红, 李永秀, 等. 温室番茄干物质分配与产量的模拟分析[J]. 应用生态学报, 2006, 17(5): 811 ~ 816.  
Ni Jiheng, Luo Weihong, Li Yongxiu, et al. Simulation of greenhouse tomato dry matter partitioning and yield prediction [J]. Journal of Applied Ecology, 2006, 17(5): 811 ~ 816. (in Chinese)
- 11 倪纪恒, 罗卫红, 李永秀, 等. 温室番茄叶面积与干物质生产的模拟[J]. 中国农业科学, 2005, 38(8): 1 629 ~ 1 635.  
Ni Jiheng, Luo Weihong, Li Yongxiu, et al. Simulation of leaf area and dry matter production in greenhouse tomato [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2005, 38(8): 1 629 ~ 1 635. (in Chinese)
- 12 陈永山, 戴剑锋, 罗卫红, 等. 叶片氮浓度对温室黄瓜花后叶片最大宗光合速率影响的模拟[J]. 农业工程学报, 2008, 24(7): 13 ~ 19.  
Chen Yongshan, Dai Jianfeng, Luo Weihong, et al. Quantifying the effects of leaf nitrogen concentration on the maximum leaf gross photosynthesis rate of greenhouse cucumber under different radiation and temperature conditions after flowering [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(7): 13 ~ 19. (in Chinese)
- 13 李永秀, 罗卫红, 倪纪恒, 等. 用辐热积法模拟温室黄瓜叶面积、光合速率与干物质产量[J]. 农业工程学报, 2005, 21(12): 131 ~ 136.
- 14 李永秀, 罗卫红, 倪纪恒, 等. 温室黄瓜干物质分配与产量预测模拟模型初步研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(2): 116 ~ 121.  
Li Yongxiu, Luo Weihong, Ni Jiheng, et al. Simulation of dry matter partitioning and yield prediction in greenhouse cucumber [J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(2): 116 ~ 121. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 170 页)

- 11 Boyer J S. Cell wall biosynthesis and the molecular mechanism of plant enlargement [J]. Functional Plant Biology, 2009, 36(5): 383 ~ 394.
- 12 Pierre F, Orlando G, Youssef C. Finite element model of polar growth in pollen tubes [J]. The Plant Cell, 2010, 22(8): 2 579 ~ 2 593.
- 13 魏珉, 邢禹贤, 王秀峰, 等. CO<sub>2</sub> 富集对黄瓜叶片显微和亚显微结构的影响 [J]. 园艺学报, 2002, 29(1): 30 ~ 34.  
Wei Min, Xing Yuxian, Wang Xiufeng, et al. Effects of CO<sub>2</sub> enrichment on the microstructure and ultrastructure of leaves in cucumber [J]. Acta Horticulture Sinica, 2002, 29(1): 30 ~ 34. (in Chinese)
- 14 郑明军, 王文静, 陈政南, 等. Mooney - Rivlin 模型力学性能常数的确定 [J]. 橡胶工业, 2003, 50(8): 462 ~ 465.  
Zheng Mingjun, Wang Wenjing, Chen Zhengnan, et al. Determination for mechanical constants of Mooney - Rivlin model [J]. Rubber Industry, 2003, 50(8): 462 ~ 465. (in Chinese)
- 15 Wang Rong, Jiao Qunying, Wei Deqiang. Mechanical response of single plant cell to cell poking [J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2006, 48(6): 700 ~ 705.
- 16 Zhu H X, Melrose J R. A mechanics model for the compression of plant and vegetative tissues [J]. Journal of Theoretical Biology, 2003, 221(1): 89 ~ 101.