

温室黄瓜磷素吸收与分配动态模拟*

倪纪恒 毛罕平 赵文兵 马万征

(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)

【摘要】 依据温室黄瓜磷素吸收、分配与温度、辐射的关系,构建了基于辐热积的温室黄瓜磷素吸收与分配模型,并利用与之相独立的试验资料对模型进行了检验。结果表明:模型对温室黄瓜磷素总吸收量的预测结果与1:1直线之间的决定系数为0.91,均方根差为0.04 g/株;根、茎、叶、果实磷素质量分数决定系数分别为0.74、0.65、0.72、0.65,均为根差分别为0.03%、0.04%、0.02%、0.06%。模型对不同季节温室黄瓜磷素吸收量与各器官磷素含量的预测值与实测值较为一致。

关键词: 温室 黄瓜 磷素 吸收 分配 模拟模型

中图分类号: O657.33 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)10-0171-05

Simulation of Phosphorus Uptake and Partitioning in Greenhouse Cucumber

Ni Jiheng Mao Hanping Zhao Wenbing Ma Wanzheng

(Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education & Jiangsu Province, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract

Based on relationship between phosphorus uptake, partitioning, radiation and temperature, a simulation model of greenhouse cucumber phosphorus uptake and partitioning was established. Different experiment data was used to validate the model. The results showed that the coefficients of determination between predicted and measured value based on the 1:1 line were 0.91, 0.74, 0.65, 0.72, 0.65, respectively, and the root mean squared error between the predicted and the measured value was 0.04 g/plant, 0.03%, 0.04%, 0.02%, 0.06%, respectively, for phosphorus uptake, root, stem, leaf and fruit phosphorus content. The model could give satisfactory prediction of phosphorus uptake and root, stem, leaf and fruit phosphorus content of greenhouse cucumber in different seasons.

Key words Greenhouse, Cucumber, Phosphorus, Uptake, Partitioning, Simulation model

引言

黄瓜是我国温室栽培的主要蔬菜作物之一,约占蔬菜栽培面积的60%~70%^[1-2]。磷素是植物体内许多重要有机化合物的组分,又以多种方式参与植物体内各种代谢过程,对作物高产及保持品种的优良特性有明显作用^[3]。目前,我国温室黄瓜栽培中营养液管理采用“肥大水勤”的传统施肥模式,严重影响作物的产量与品质并造成环境污染,进而

影响温室黄瓜生产的经济和生态效益,同时降低了磷素利用效率,不符合现代化农业中高效的要求。因此定量了解温室无土栽培黄瓜对磷素的需求,构建温室黄瓜吸收与分配模型,对温室黄瓜磷素的有效管理具有十分重要的意义。

关于磷素动态模拟模型的研究,国内外已有一些报道,主要集中在作物对磷素的吸收机理模型和土壤中磷素的行为模拟方面。Barber-Cushman模型^[4]是养分吸收模型的典型代表,但模型在应用时

收稿日期:2011-01-27 修回日期:2011-06-15

* 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2008AA10Z204)、江苏省农业装备与智能化高技术研究重点实验室资助项目(BM2009703)、高等学校博士点专项科研基金资助项目(200802990009)和江苏省高校自然科学研究重大项目(10KJA210010)

作者简介:倪纪恒,博士后,主要从事设施模拟与智能决策研究,E-mail: nijiheng@163.com

通讯作者:毛罕平,教授,博士生导师,主要从事农业生物环境与装备研究,E-mail: maohp@ujs.edu.cn

需要的参数多,特别是与根系有关的参数,限制了模型的应用,且不能够模拟磷素在作物植株内部各器官之间的分配。庄恒扬等^[5]采用生理发育时间很好地模拟了小麦中磷素的吸收与分配,而温室黄瓜的磷素吸收与分配研究不多。裴孝伯等^[6-7]研究了不同光温环境对日光温室黄瓜磷素吸收与分配的影响,魏述英等^[8]研究了现代化温室冬春茬黄瓜磷素吸收与分配的特性,但这些研究仅是对温室黄瓜磷素吸收与分配的静态描述,关于温室黄瓜磷素吸收与分配动态模拟的研究,至今尚未见报道。鉴于此,本研究通过定量分析不同光温条件与黄瓜磷素吸收和分配的对应关系,建立基于辐热积^[9-11]的温室黄瓜磷素吸收与分配模型,为设施黄瓜生产的营养液管理提供理论依据。

表 1 营养液的化学特性及离子质量浓度

Tab. 1 Concentrations and characteristics of main ions in nutrient solution

pH 值	EC /ms·cm ⁻¹	NO ₃ ⁻ + NH ₄ ⁺ /mg·L ⁻¹	H ₂ PO ₄ ⁻ /mg·L ⁻¹	K ⁺ /mg·L ⁻¹	Ca ²⁺ /mg·L ⁻¹	Mg ²⁺ /mg·L ⁻¹	SO ₄ ²⁻ /mg·L ⁻¹
5.6~6.2	2.2	160	94	312	160	48	192

试验 2 于 2010 年 3~7 月进行,2 月 20 日育苗,3 月 5 日移栽,密度为 3.0 株/m²。移栽后采用常规营养液灌溉。各元素离子质量浓度同试验 1。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 作物数据获取

苗期每隔 3 d、其他生育期每隔 7 d,进行破坏性取样,每次取样 3 株。将植株分为根、茎、叶、果实(包括花)4 部分,首先用精度 0.1 g 的电子天平称取各部分鲜质量,然后在 105℃ 下杀青 15 min,再以 80℃ 干燥至恒质量。采用精度 0.001 g 的电子天平称量各部分干质量。用粉碎机分别磨碎各部分干样,过 60 目筛后,用浓 H₂SO₄ + H₂O₂ 消煮,然后利用流动分析仪测定各器官磷素含量。

1.2.2 环境数据获取

温室内温度和辐射由温室自动控制系统自动采集,记录的数据为每小时的平均值。

1.3 模型描述

1.3.1 辐热积计算

温度和辐射直接影响作物的生长发育和磷素的吸收运转。本文采用综合光温指标——辐热积来量化光温条件对黄瓜磷素吸收和运转的影响。辐热积为相对热效应和光合有效辐射的乘积。其计算过程为:首先计算每小时的相对热效应(relative thermal effectiveness,简称 RTE),然后将每小时的相对热效应乘以相应小时内的总光合有效辐射(photosynthetically active radiation,简称 PAR),得到每小时的辐热积

1 材料与方 法

1.1 试验基本情况

试验于 2009 年 10 月~2010 年 7 月在江苏大学 venlo 型试验温室中进行。温室东西走向,长 45 m,跨度 6 m,脊高 3.2 m。温室内加热系统、帘幕系统、通风系统均由计算机自动控制。试验分为 2 个部分,供试黄瓜品种均为津优一号。采用穴盘育苗,两叶一心时移栽,栽培基质为珍珠岩。试验过程中管理措施同常规生产。

试验 1 于 2009 年 10 月~2010 年 1 月进行,10 月 7 日育苗,10 月 21 日移栽,密度为 3.2 株/m²。移栽后采用常规营养液灌溉,营养液采用文献[12]推荐的营养液,其各主要离子质量浓度如表 1 所示。

(hourly product of thermal effectiveness and PAR,简称 HTEP)。将一天内各小时辐热积累加得到日辐热积(daily total product of thermal effectiveness and PAR,简称 DTEP)。某个生育阶段的累积辐热积 T_{TEP} 为该阶段日总辐热积之和。具体计算公式参见文献[11],依据本试验对温室黄瓜的观测数据,达到各生长阶段累积辐热积如表 2 所示。

表 2 温室黄瓜各生长阶段的累积辐热积

Tab. 2 T_{TEP} of different growth stages

生长阶段	累积辐热积 T_{TEP} /MJ·m ⁻²
苗期	16
开花期	90
结果期	100
采收期	114

注:苗期,第 1 片真叶展开;开花期,植株第 6 节开花;结果期,植株第 6 节果实开始生长;采收期,植株第 6 节果实达到采收标准。

1.3.2 磷素总吸收量计算

磷素总吸收量计算式为

$$Q = W_R R_P + W_L L_P + W_S S_P + W_F F_P \quad (1)$$

式中 Q ——磷素总吸收量,g/株

W_R 、 W_L 、 W_S 、 W_F ——根、叶、茎、果实干质量,g/株

R_P 、 L_P 、 S_P 、 F_P ——根、叶、茎、果实磷素质量分数,%

通过试验 2 的数据,磷素总吸收量 Q 与辐热积

T_{TEP} 之间的关系如图 1 所示, 其表达式为

$$Q = a + \frac{b}{1 + e^{\frac{c - T_{TEP}}{d}}} \quad (2)$$

式中 a 、 b 、 c 、 d ——模型参数, 分别取 -0.06 、 0.85 、 231.03 、 67.52

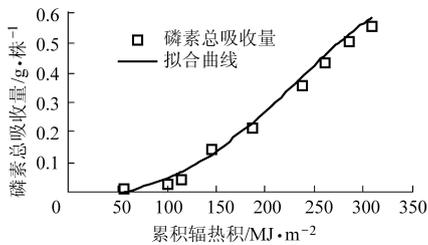


图 1 磷素总吸收量与累积辐热积的关系
Fig. 1 Relationship between total absorbed phosphorus and T_{TEP}

1.3.3 磷素分配指数计算

假设温室黄瓜对磷素的分配依照干物质分配原理, 即作物根系从营养液中吸取磷素后, 首先在根和地上部之间分配, 然后再在天上部各器官之间分配, 则根、地上部、叶、茎、果实的磷素分配指数可以通过下面公式计算

$$P_R = 1 - P_S \quad (3)$$

$$P_S = (W_L L_P + W_S S_P + W_F F_P) / Q \quad (4)$$

$$P_{ST} = 1 - P_L - P_F \quad (5)$$

$$P_L = W_L L_P / (W_L L_P + W_S S_P + W_F F_P) \quad (6)$$

$$P_F = W_S S_P / (W_L L_P + W_S S_P + W_F F_P) \quad (7)$$

式中 P_R 、 P_S 、 P_L 、 P_{ST} 、 P_F ——根、地上部、叶、茎、果实的磷素分配指数

通过试验 2 的数据, 得出地上部和根磷素分配指数与累积辐热积之间的关系如图 2a 所示, 地上部的回归方程为

$$P_S = 1 - P_R = 0.98 - 0.36 e^{\frac{T_{TEP}}{49.37}} \quad (8)$$

式(8)回归检验 $F = 73.71 > F_{0.05}$, 决定系数为 0.95, 标准误差为 0.05, 具有较高的模拟精度。

通过试验 2 的数据, 得出温室黄瓜各器官磷素分配指数与累积辐热积之间的关系如图 2b 所示, 叶和果实的回归方程分别为

$$P_L = \frac{1.23}{1 + \left(\frac{T_{TEP}}{261.86}\right)^{1.59}} - 0.27 \quad (9)$$

$$P_F = \frac{3.76}{1 + \left(\frac{T_{TEP}}{511.98}\right)^{-0.61}} - 1 \quad (10)$$

式(9)回归检验 $F = 15.37 > F_{0.05}$, 决定系数为 0.95, 标准误差为 0.06, 具有较高的模拟精度。式(10)回归检验 $F = 10.13 > F_{0.05}$, 决定系数为 0.95, 标准误差为 0.06, 说明模型具有较高的模拟精度。

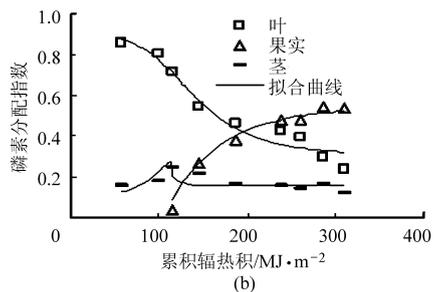
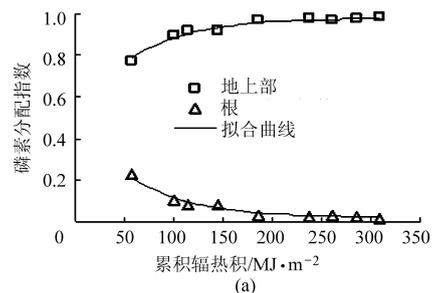


图 2 磷素分配指数与累积辐热积的关系
Fig. 2 Relationship between phosphorus distribution index and T_{TEP}

1.3.4 磷素总吸收量预测

$$Q(i) = a + \frac{b}{1 + e^{\frac{c - T_{TEP}(i)}{d}}} \quad (11)$$

式中 $Q(i)$ ——第 i 天单株黄瓜磷素总吸收量

$T_{TEP}(i)$ ——第 i 天累积辐热积

1.3.5 各器官磷素质量分数预测

$$R_p(i) = (Q(i) P_R(i) / W_R(i)) \times 100\% \quad (12)$$

$$S_T(i) = (Q(i) P_S(i) P_{ST}(i) / W_{ST}(i)) \times 100\% \quad (13)$$

$$L_p(i) = (Q(i) P_S(i) P_L(i) / W_L(i)) \times 100\% \quad (14)$$

$$F_p(i) = (Q(i) P_S(i) P_F(i) / W_F(i)) \times 100\% \quad (15)$$

式中 $R_p(i)$ ——第 i 天根的磷素质量分数

$S_T(i)$ ——第 i 天茎的磷素质量分数

$L_p(i)$ ——第 i 天叶的磷素质量分数

$F_p(i)$ ——第 i 天果实的磷素质量分数

$P_R(i)$ ——第 i 天根的磷素分配指数

$P_S(i)$ ——第 i 天地上部的磷素分配指数

$P_{ST}(i)$ ——第 i 天茎的磷素分配指数

$P_L(i)$ ——第 i 天叶的磷素分配指数

$P_F(i)$ ——第 i 天果实的磷素分配指数

$W_R(i)$ ——第 i 天根的干质量

$W_{ST}(i)$ ——第 i 天茎的干质量

$W_L(i)$ ——第 i 天叶的干质量

$W_F(i)$ ——第 i 天果实的干质量

各器官干质量是通过温室黄瓜干物质生产模型^[13]和干物质分配模型^[14]计算得出(由于温室黄

瓜干物质生产模型和温室黄瓜干物质分配模型预测出的各器官干质量的单位是 kg/hm^2 , 在使用中除以温室黄瓜种植密度, 将其转换为 $\text{g}/\text{株}$ 。

1.4 模型检验方法

采用均方根误差 R_{MSE} 对模型进行检验。 R_{MSE} 越小, 表明模拟值与实测值间的偏差越小, 模拟精度越高。

$$R_{\text{MSE}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{n}} \quad (16)$$

式中 O_i 为实测值, 即实测温室黄瓜磷素总吸收量和各器官磷素质量分数; S_i 为模型模拟值, 即模拟温室黄瓜磷素总吸收量和各器官磷素质量分数; n 为样本容量。

2 结果与分析

2.1 磷素总吸收量模拟结果

利用温室内的温度和辐射资料, 首先依据文献[11]计算出试验1的累积辐热积, 然后根据式(2)计算出与建模数据(试验2)相独立的试验1中黄瓜在任意一天的磷素总吸收量并与实测值进行比较(图3)。结果表明: 模型预测值、实测值与1:1直线之间的决定系数 R^2 为0.91, 均方根误差 R_{MSE} 为0.04 $\text{g}/\text{株}$, 可很好地预测温室黄瓜单株磷素总吸收量。

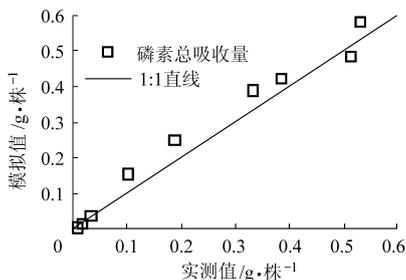


图3 磷素总吸收量实测值与模拟值的比较

Fig.3 Comparison between simulated and measured total absorbed phosphorus

2.2 各器官磷素质量分数模拟结果

利用温室内部温度和辐射资料, 计算出试验1的温室黄瓜的累积辐热积, 然后利用式(2)~(17)计算出与建模数据(试验2)相独立的试验1的各器官磷素质量分数, 并与实测值进行比较。结果表明: 模型对根、茎、叶、果实磷素质量分数实测值与模拟值之间符合较好。根磷素含量 R^2 为0.74, R_{MSE} 为0.03%; 茎磷素含量 R^2 为0.65, R_{MSE} 为0.04%; 叶磷素含量 R^2 为0.72, R_{MSE} 为0.02%; 果实磷素含量 R^2 为0.65, R_{MSE} 为0.06%。

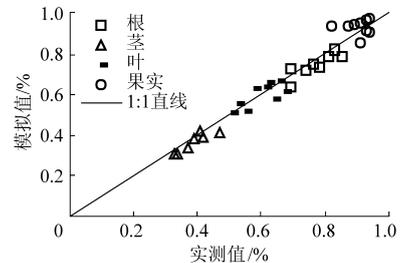


图4 各器官磷素含量实测值与模拟值的比较

Fig.4 Comparison between simulated and measured phosphorus content of root, stem, leaf and fruit

3 结束语

温室黄瓜对磷素的吸收主要取决于作物的生长速率, 作物的生长速率主要受温度和辐射的影响。本文采用综合温度和辐射的指标——累积辐热积, 动态的预测了温室黄瓜对磷素的吸收量和各个器官的磷素含量。同 Barber - Cushman 相比, 本模型具有参数少、预测精度高、普适性和实用性强的特点, 可以为温室黄瓜营养液管理提供理论依据和决策支持。本研究建立的模型适合水肥供应充足的黄瓜作物磷素吸收与分配和辐热积关系的定量分析, 模型在其他类型的黄瓜品种和地点的适用性还需要进一步多品种和多地点的试验资料来校正和检验。

参 考 文 献

- 1 陈树人, 肖伟中, 朱云开, 等. 土壤养分和小麦产量空间变异性与相关性分析[J]. 农业机械学报, 2008, 39(10): 140~143.
Chen Shuren, Xiao Weizhong, Zhu Yunkai, et al. Spatial variability and correlation of soil nutrient and wheat yield [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(10): 140~143. (in Chinese)
- 2 吴才聪, 马成林, 张书慧, 等. 基于GIS的精确农业合理采样与施肥间距研究[J]. 农业机械学报, 2004, 35(2): 80~83.
Wu Caicong, Ma Chenglin, Zhang Shuhui, et al. Research on reasonable distances of soil sampling and fertilizing based on GIS in precision agriculture [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(2): 80~83. (in Chinese)
- 3 林芬芳, 丁晓东, 付志鹏, 等. 基于互信息理论的水稻磷素营养高光谱诊断[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(9): 2467~2470.
Lin Fenfang, Ding Xiaodong, Fu Zhipeng, et al. Application of mutual information to variable selection in diagnosis of phosphorus nutrition in rice [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(9): 2467~2470. (in Chinese)
- 4 Mccaskill M R, Blain G T. A model of S P and N uptake by a perennial pasture I. model structure [J]. Fertilizer Research, 1990, 22: 161~172.

- 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.