

气雾栽培马铃薯块茎的基本物理特性

于海业^{1,2}, 乔建磊^{1,2}, 肖英奎^{1,2}, 王淑杰^{1,2}, 张艳萍^{1,2}

(1. 吉林大学 生物与农业工程学院, 长春 130022; 2. 吉林大学 工程仿生教育部重点实验室, 长春 130022)

摘要: 对气雾栽培马铃薯块茎进行了压缩破坏和静载蠕变试验, 分析了不同加载方向和不同加载速率对其破裂应力和破裂应变的影响。运用四元件 Burgers 模型对气雾栽培马铃薯块茎的蠕变过程进行了模拟, 探索了其流变特性。压缩破坏试验表明, 气雾栽培马铃薯沿各轴向压缩时的屈服极限和破坏极限均低于土壤栽培的马铃薯, 压缩载荷的加载速率对气雾栽培马铃薯块茎组织的破裂应力影响不大, 但对破裂应变影响较大。此外, 蠕变测试结果表明, 在外荷载作用下气雾栽培马铃薯呈现出明显的黏弹性变形和黏滞流动性。Burgers 模型中的元件参数拟合值可以很好地反映其蠕变特性, 各轴向的模型相关系数均在 0.95 以上。研究结果为减少气雾栽培马铃薯在生产环节的机械损伤提供了理论依据。

关键词: 农业工程; 马铃薯种薯; 气雾栽培; 机械特性; 蠕变; Burgers 模型

中图分类号:S126 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2011)01-0282-06

Physical properties of potato tuber cultured by aeroponics

YU Hai-ye^{1,2}, QIAO Jian-lei^{1,2}, XIAO Ying-kui^{1,2}, WANG Shu-jie^{1,2}, ZHANG Yan-ping^{1,2}

(1. College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. Key Laboratory of Bionic Engineering, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: The compressive and static creep tests were conducted for the aeroponic potato tuber to analyze the effects of loading direction and loading rate on its rupture stress and strain. The creep process of the potato tuber was simulated using 4-element Burgers model to investigate its rheologic behavior. The compressive tests show that the yield limits and the rupture limits under different axial compressions of the aeroponic cultured potato tuber are lower than those of the soil cultured potato tuber with similar size. The effect of loading rate on the rupture stress of the aeroponic potato tuber structure is slight, but on the rupture strain is significant. The creep test results show that the aeroponic potato tuber appears the obvious visco-elastic deformation and the viscous flowability. The fitted values of the element parameters in Burgers model can reflect accurately the rheologic properties of the aeroponic potato tuber, the filling precisions of the model under different axes are higher than 0.95. The obtained results provide a theoretical basis for reducing the mechanical damage of the aeroponic potato tuber in various production links.

Key words: agricultural engineering; seed potato; aeroponic culture; mechanical property; creep; Burgers model

收稿日期:2010-01-12.

基金项目:“863”国家高技术研究发展计划项目(2007AA10Z203);吉林省科技发展计划项目(20090566).

作者简介:于海业(1963-),男,教授,博士生导师.研究方向:农业生物环境测控及植物生理信息检测.

E-mail:haiye@jlu.edu.cn

病虫害是马铃薯田间种植的重大难题,种薯自身携带的细菌和病毒是引发病虫害的一个重要原因^[1-3]。采用气雾栽培(雾培)法生产马铃薯脱毒种薯,改善了植株的生长环境,且避免了土壤中的病菌侵染,具有高产、优质的特点^[4-6],因此被广泛应用。

气雾栽培马铃薯在采摘、运输和贮藏等生产环节都难免受到挤压和碰撞,极易造成种薯品质下降甚至资源浪费,因此探索气雾栽培马铃薯的机械特性具有十分重要的意义。而在气雾栽培过程中马铃薯块茎的膨胀(小薯的生长)不受土壤颗粒的挤压和摩擦影响,这必然会使气雾栽培与土壤栽培的马铃薯之间存在较大的差异。目前关于气雾栽培对马铃薯机械特性影响机理的研究还未见报道,故作者对气雾栽培马铃薯进行了压缩破坏试验和静载蠕变试验,并结合马铃薯块茎的生物学特性初步探讨了气雾栽培马铃薯与土壤栽培马铃薯力学性质的差异,旨在探明气雾栽培马铃薯的机械特性,从而为减少其机械损伤提供理论依据。

1 试验材料与方法

1.1 材料与仪器

供试马铃薯(*Solanum tuberosum L.*)品种为春薯4号,按照马铃薯整薯播种的标准采收后,分别挑选质量为15 g左右、形状相似、无病虫害、无损伤的两种不同栽培方式(气雾栽培和土壤栽培)的马铃薯用于试验,均属于新鲜幼龄薯。

试验在WDW型微控电子万能试验机上进行。实验装置传感器额定负荷为5 kN,加载速率为0.01~500 mm/min,精度范围为±0.5%,位移分辨率为0.01 mm。试验过程中力传感器信号的采集和处理由主控微机完成。

1.2 试验方法

1.2.1 压缩破坏试验

压缩破坏试验采用平板压头加载^[7-8],包括两个测试项目。

(1)整薯压缩:以完整的马铃薯为压缩对象,分别沿马铃薯的3轴方向进行压缩破坏试验,记马铃薯块茎的脐部与顶点连线方向为x向,块茎径向截面的短轴方向为y向,长轴方向为z向,如图1所示。

(2)圆柱试样压缩:在试验前,分别以块茎的3轴为轴心,利用标准取样器制作直径10 mm、高

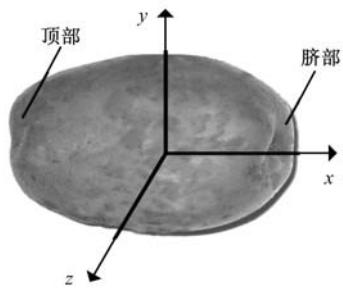


图1 马铃薯块茎3轴方向示意图

Fig. 1 Three axes sketch of potato tuber

12 mm的圆柱形试样,然后对试样进行压缩。压缩过程中,加载速率设置3个水平,分别为2.5、5.0和7.5 mm/min。每组试验重复6次。

1.2.2 静载蠕变试验

为了使蠕变加载的应力分布均匀,试验前先用刀片将块茎各轴向的端部切平,使得加载压头与试样充分接触,以减小机械误差的影响。压头与试样的接触面积通过图像处理对切面处的边缘轮廓进行提取来获得^[9]。初始加载应力设置3个水平,分别为0.05、0.10和0.15 MPa。在每个应力水平下分别从块茎的x轴、y轴和z轴3个方向进行加载,加载时间为120 s。试验过程中蠕变位移信号由传感器采集^[10]。

2 试验结果与分析

2.1 压缩特性

2.1.1 整薯压缩时的力-变形测试曲线分析

图2给出了两种不同栽培方式的马铃薯在加载速率为5 mm/min条件下的压缩力-变形曲线。图2(a)为土壤栽培的马铃薯沿不同方向压缩时的变形曲线,图2(b)为气雾栽培的马铃薯沿不同方向压缩时的变形曲线,图中S_x、S_y和S_z分别为马铃薯块茎在x轴、y轴和z轴方向受压缩时的生物屈服点,B_x、B_y和B_z分别为马铃薯块茎在x轴、y轴和z轴方向受压缩时的破裂点。

在加载的初始阶段,压缩变形量和压缩力近似呈线性关系,该阶段所产生的变形属于弹性变形。当压缩进入屈服阶段后,随着外载的继续增加,马铃薯块茎细胞发生滑移、变形和破裂,并伴随着细胞液的黏滞流动,当施加的载荷达到破坏极限,试样发生宏观结构破坏。

从压缩特性曲线可以看出,对于几何尺寸近似相同的马铃薯来说,土壤栽培马铃薯沿3轴方向压缩时的变形曲线分布相对离散,表明此种马

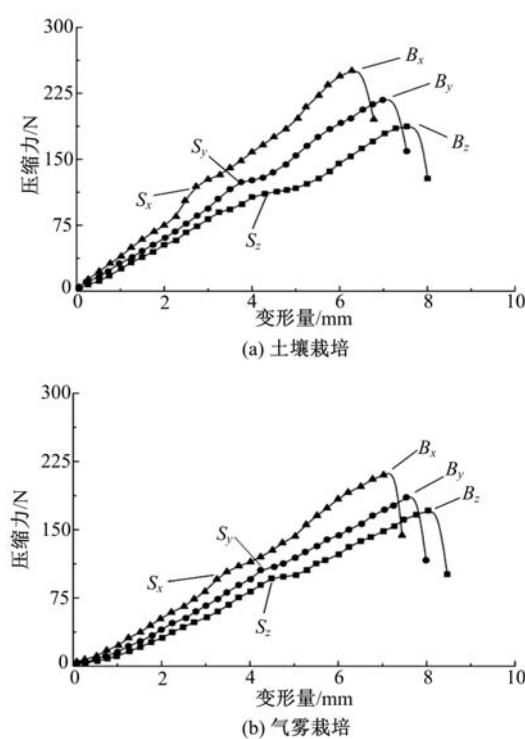


图 2 不同栽培方式的马铃薯块茎沿不同方向压缩时的力-变形曲线

Fig. 2 Force-deformation curves in different orientations of potato tuber by two cultivation methods

铃薯各向的压缩特性差异较大,而气雾栽培马铃薯沿 3 轴方向压缩时的变形曲线比较相似,并且数值差异不大。无论是在 x 轴、 y 轴还是 z 轴方向压缩,气雾栽培马铃薯的生物屈服极限和破坏极限均低于土壤栽培马铃薯。此外,图 2 还表明,加载方向不同,破坏极限也有所不同,两种栽培方式

的马铃薯都是在 x 轴方向压缩时的破坏极限最大,但这只能说明沿该轴向压缩对块茎抵抗外力致使其整体结构发生破坏的能力较强,而在试验中发现,由于块茎脐部的形状特征,使得压缩载荷分布不均匀,当 x 轴方向压缩载荷较小时,块茎的脐部就已经出现局部损伤。

2.1.2 不同加载速率的影响

马铃薯块茎细胞的基本结构由细胞壁和原生质体组成,具有黏性、弹性、收缩和膨胀等流变特性,细胞中的液泡可以使内部产生静压力并作用于细胞壁^[11]。当外界加载速率不同,被压缩的细胞组织会表现出不同程度的破坏,进而使得块茎的宏观结构变形也有所不同。表 1 给出了两种栽培方式的马铃薯块茎组织在不同加载速率条件下的破裂应力值和破裂应变值。

从表 1 中可以发现,在试验所选的加载速率内,随着加载速率的增加,两种马铃薯块茎组织的破裂应力都相应增大,而破裂应变却减小,这主要是由于受压缩的马铃薯块茎进入强化阶段后,细胞内压和细胞壁的张力都显著提高,加载速率较大时,冲击效应较强,被压缩的试样还未来得及产生较大的变形,块茎组织就已经发生破裂。

从表 1 中的试验数据还可以发现,加载速率的变化对气雾栽培马铃薯块茎组织破裂应力影响不大,但对破裂应变影响较大,沿其 x 轴方向表现得最为明显。此外,在相同加载速率下,沿其 y 轴和 z 轴两个方向的块茎组织破裂应变差异不大,而土壤栽培马铃薯沿这两轴方向的块茎组织破裂应变差异明显。

表 1 不同加载速率对破裂应力和破裂应变的影响

Table 1 Effects of different loading rates on rupture stress and rupture strain

加载速率 $/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	加载方向	土壤栽培		气雾栽培	
		破裂应力/MPa	破裂应变/%	破裂应力/MPa	破裂应变/%
2.5	x 轴	1.237±0.131	31.82±1.84	1.103±0.092	34.78±1.22
	y 轴	1.208±0.104	33.09±2.03	1.072±0.087	35.63±1.51
	z 轴	1.143±0.118	35.86±1.95	1.036±0.093	36.26±1.74
5.0	x 轴	1.286±0.136	30.14±1.86	1.136±0.104	31.63±1.37
	y 轴	1.249±0.125	32.18±2.01	1.098±0.097	33.46±1.62
	z 轴	1.183±0.121	34.79±1.98	1.069±0.102	34.89±1.85
7.5	x 轴	1.308±0.204	29.13±2.04	1.167±0.113	29.58±1.56
	y 轴	1.287±0.175	30.38±1.87	1.123±0.106	32.27±1.31
	z 轴	1.219±0.167	32.44±1.93	1.104±0.097	33.86±1.89

2.2 蠕变特性

2.2.1 本构模型分析

由采集的试验数据可以得到两种栽培方式的马铃薯块茎沿不同方向加载时的蠕变曲线,以加

载应力为 0.05 MPa 时的蠕变曲线为例(见图 3),从曲线自身的变化特点来看,采用分段函数对蠕变曲线进行拟合可以取得较好的拟合效果,但通过这种处理方法所构建的数学模型只能从数量上

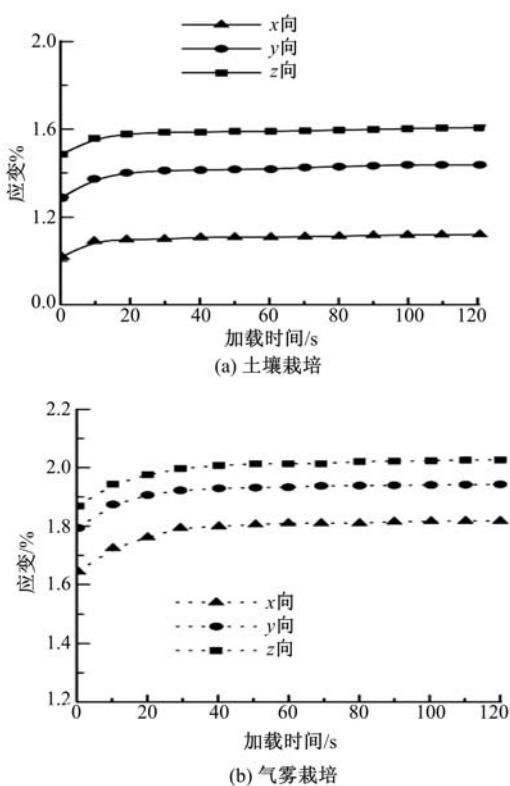


图3 不同栽培方式的马铃薯块茎沿不同方向加载时的蠕变曲线

Fig. 3 Creep curves in different orientations of potato tuber with different cultivation methods

反映马铃薯块茎应变随时间变化的规律,而无法对蠕变过程进行描述和理论解释。本文选用四元件 Burgers 流变力学模型对马铃薯块茎的蠕变过程进行模拟,模型中所包含的元件如图 4 所示,该模型在外荷载作用下同时呈现出瞬时弹性变形、延迟弹性变形和黏滞流动性,可以较充分地描述黏弹性物料的性质。其加载过程中应变 ϵ 随时间 t 变化的关系式为

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_0} + \frac{\sigma_0}{\eta_0} t + \frac{\sigma_0}{E_1} (1 - e^{-t/T_{rd}}) \quad (1)$$

式中: $\epsilon(t)$ 为有效加载过程中 t 时刻对应的应变;

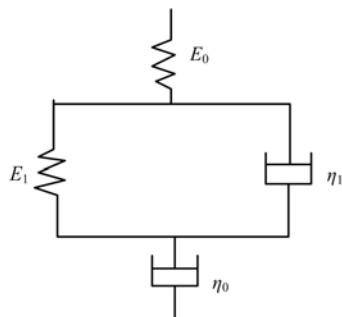


图4 四元件 Burgers 模型示意图

Fig. 4 Four-element Burgers model

σ_0 为加载应力; E_0 为瞬时弹性模量; E_1 为延迟弹性模量; T_{rd} 为延迟时间, $T_{rd} = \eta_0 / E_1$; η_0 为瞬时黏滞系数; η_1 为延迟黏滞系数。

2.2.2 蠕变特性参数提取

为了获取马铃薯块茎蠕变特性的相关参数,将四元件 Burgers 模型加载过程中应变随时间变化的关系式作为拟合目标,把流变方程设为

$$\epsilon(t) = a + bt + c(1 - e^{-dt}) \quad (2)$$

则蠕变特性参数与拟合系数的关系式为

$$E_0 = \frac{\sigma_0}{a}, \eta_0 = \frac{\sigma_0}{b}, E_1 = \frac{\sigma_0}{c}, \eta_1 = \frac{\sigma_0}{cd}$$

式中: a, b, c, d 为蠕变测试变形曲线的拟合系数。

用 Origin 软件对蠕变测试曲线进行非线性拟合,得到系数 a, b, c, d 的值,然后代入相应的参数关系式,进而求得 E_0, E_1, T_{rd}, η_0 和 η_1 ,结果见表 2。拟合分析结果表明,模型相关系数均在 0.95 以上,说明采用四元件 Burgers 模型来描述马铃薯的蠕变特性是有意义的。

2.2.3 蠕变特性参数分析

E_0 和 E_1 均可以描述物料的弹性变形。 E_0 越小,产生的瞬时变形越大。 E_1 受到 η_1 的制约,加载后随着时间的增加缓慢产生变形,从表 2 中可以发现,气雾栽培马铃薯沿各轴向加载时的 E_0 均小于土壤栽培马铃薯,并且气雾栽培马铃薯沿 y 轴和 z 轴两个方向加载时的 E_0 值相差较小。

η 与马铃薯块茎内部黏性物质的含量有关,瞬时黏滞系数越大,其流动性越差^[12],变形越缓慢。从表 2 中可以看出,加载方向不同,瞬时黏滞系数 η_0 也有所不同,土壤栽培马铃薯沿 x 轴方向加载时的 η_0 值最大,而气雾栽培马铃薯沿 x 轴方向加载时的 η_0 值却最小。出现这一差异的原因可能是:由于气雾栽培马铃薯在生长过程中是处于竖直悬吊的状态,使得块茎的组织力学性质和营养物质运输动力受到影响,从而引起干物质的分布规律发生变化。关于这一原因还有待于进一步研究。

延迟时间受到延迟黏滞系数和延迟弹性模量的共同制约,该参数可以反映蠕变变形的快慢,延迟时间越长,变形越缓慢。从表 2 中可以看出,在相同载荷条件下,气雾栽培马铃薯沿各轴向的延迟时间差异较小,并且各轴向的延迟时间均大于土壤栽培马铃薯,因此在蠕变测试过程中气雾栽培马铃薯的变形持续的时间较长。

从表 2 中还可以看出,随着加载应力的变化,

马铃薯块茎的蠕变特性参数也发生相应的变化。这主要是由于加载应力不同,块茎细胞的变形程度也不同,从而使得细胞内液体的黏性阻尼和膨压也有所不同,因此块茎所表现出的弹性模量和黏性系数也会有所不同。从这一测试结果来看,采用四元件 Burgers 模型来描述马铃薯块茎的蠕

变特性具有一定的灵敏度,但要使得模型理论更加清晰和完善,在进一步的工作中还有必要考虑把植物组织变形和细胞力学理论引入到本构模型中,这对从微观上解释蠕变变形的过程具有重要的意义。

表 2 不同栽培方式的马铃薯沿不同方向加载时的蠕变特性参数值

Table 2 Values of creep parameters of potato tuber in different orientations with different cultivation methods

栽培方式	加载应力 /MPa	加载方向	蠕变特性参数				相关系数
			E_0 /MPa	E_1 /MPa	$\eta_p/(10^5 \text{ MPa} \cdot \text{s})$	$\eta_r/(10^2 \text{ MPa} \cdot \text{s})$	
土壤栽培	0.05	x 轴	4.962	53.690	8.624	1.899	3.53 0.972
		y 轴	3.876	41.751	6.318	3.392	8.12 0.964
		z 轴	3.368	51.427	5.679	3.537	6.87 0.969
	0.10	x 轴	5.161	61.039	9.712	3.472	5.68 0.961
		y 轴	4.036	50.713	7.356	4.724	9.31 0.957
		z 轴	3.689	43.611	4.945	3.520	8.07 0.956
	0.15	x 轴	5.437	59.802	8.632	6.237	10.43 0.971
		y 轴	4.605	51.970	7.165	6.958	13.39 0.953
		z 轴	4.041	42.384	5.428	4.687	11.06 0.958
气雾栽培	0.05	x 轴	3.073	27.638	2.703	3.516	12.72 0.967
		y 轴	2.852	38.570	4.970	4.587	11.89 0.981
		z 轴	2.719	31.874	4.621	4.162	13.05 0.974
	0.10	x 轴	3.377	34.587	3.965	5.651	16.34 0.955
		y 轴	3.163	36.493	5.626	5.492	15.05 0.963
		z 轴	3.072	40.388	6.071	6.369	15.77 0.962
	0.15	x 轴	3.927	42.571	4.217	7.938	18.65 0.981
		y 轴	3.563	35.647	5.783	6.134	17.21 0.964
		z 轴	3.348	37.829	5.962	6.859	18.13 0.952

3 结 论

(1) 压缩破坏试验表明,气雾栽培马铃薯沿各轴向压缩时的生物屈服极限和破坏极限均低于土壤栽培马铃薯。

(2) 压缩载荷的加载速率对气雾栽培马铃薯块茎组织的破裂应力影响不大,但对破裂应变影响较大,其中 x 轴方向表现得最为明显。

(3) 气雾栽培马铃薯和土壤栽培马铃薯在外荷载作用下都表现出明显的黏弹性变形和黏滞流动性,其蠕变过程均可采用四元件 Burgers 模型来模拟,模型相关系数均在 0.95 以上,但元件参数的拟合结果存在较大差异。与土壤栽培的马铃薯相比较,气雾栽培马铃薯各轴向的瞬时弹性模量和瞬时黏滞系数均较小,而蠕变的延迟时间较大,并且气雾栽培马铃薯沿 y 轴、z 轴方向的蠕变特性差异不明显。

参考文献:

[1] 阎文昭, 张勇飞. 马铃薯病毒及其防治 [M]. 北京:

中国农业科技出版社, 2001.

[2] Robert P L. Relative effects of biological amendments and crop rotations on soil microbial communities and soilborne diseases of potato [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40(6): 1341-1351.

[3] 肖雅, 何长征, 聂先舟, 等. 马铃薯病毒防治策略 [J]. 中国马铃薯, 2008, 22(2): 106-110.
Xiao Ya, He Chang-zheng, Nie Xian-zhou, et al. Prevention strategy for the virus disease of potato [J]. Journal of Chinese Potato, 2008, 22(2): 106-110.

[4] 杨元军, 孙慧生, 王培伦, 等. 马铃薯脱毒小薯气雾栽培结薯特点及增产效果 [J]. 园艺学报, 2002, 29(4): 333-336.

Yang Yuan-jun, Sun Hui-sheng, Wang Pei-lun, et al. Features of potato tuberization and effect of minituber yield increase from invitro virus-free plantlets by aeroponics [J]. Acta Horticulturae Sinica, 2002, 29(4): 333-336.

[5] Ritter E, Angulo B, Riga P, et al. Comparison of hydroponic and aeroponic cultivation systems for the production of potato minitubers [J]. Potato

- Research, 2001, 44(2): 127-135.
- [6] Imma F, Angel M. Potato minituber production using aeroponics: effect of plant density and harvesting intervals[J]. American Journal of Potato Research, 2006, 83(1):47-53.
- [7] 徐树来, 张守勤. 高压处理蒜薹力学特性的研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(5):202-205.
Xu Shu-lai, Zhang Shou-qin. Mechanical characteristics of garlic-stem after high pressure processing [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2002, 18(5):202-205.
- [8] Braga G C, Couto S M, Hara T, et al. Mechanical behavior of macadamia nut under compression loading[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1999, 72(3):239-245.
- [9] 李波, 刘东华, 梁光明, 等. 一种计算任意形状封闭区域面积的新方法[J]. 国防科技大学学报, 2002, 24(4):61-64.
- Li Bo, Liu Dong-hua, Liang Guang-ming, et al. A new algorithm for calculating the area of arbitrary enclosed shape[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2002, 24(4):61-64.
- [10] 聂毓琴, 马洪顺, 韩志武. 薇菜压缩应力松弛与蠕变力学特性研究[J]. 农业机械学报, 2005, 36(4): 89-91.
Nie Yu-qin, Ma Hong-shun, Han Zhi-wu. Research on stress relaxation and creep mechanics behaviors of *Osmunda Cinnamomea* [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2005, 36(4):89-91.
- [11] Wang Rong, Jiao Qun-ying, Wei De-qiang. Mechanical response of single plant cells to cell poking: a numerical simulation model[J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2006, 48(6):700-705.
- [12] 周祖锷. 农业物料学[M]. 北京:农业出版社, 1994.