

荸荠压缩特性试验研究

陈子林, 夏俊芳*, 展鹏程
(华中农业大学工学院, 武汉 430070)

摘要: 为获得荸荠的力学性能参数及对荸荠破坏极限的影响, 以荸荠的品种、压缩速率及压缩部位为试验因素, 对荸荠进行正交压缩试验。通过分析其对应的力-位移曲线所得到相应的破坏极限 F_b 、破坏能 U_b 等参数的试验, 得出结果表明, 在相同变形的情况下, 荸荠轴向所承受的载荷大于径向载荷。方差分析发现, 荸荠品种、压缩部位以及荸荠品种和压缩部位之间的交互作用对破坏极限影响极显著, 压缩速率对破坏极限影响显著, 而荸荠品种与压缩速率之间的交互作用对破坏极限影响不显著。

关键词: 荸荠; 压缩特性; 抗压强度

中图分类号: TS255.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2017)01-0171-06

The compression feature research of water chestnut

CHEN Zilin, XIA Junfang, ZHAN Pengcheng
(College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070)

Abstract: In order to obtain the mechanical property parameters of water chestnut and the influence of failure limit to water chestnut, with the water chestnut varieties, the compression rate and the compression parts as test factors, the orthogonal compression test was carried out on the water chestnut. Through the analysis of the force - displacement curve, the corresponding parameters such as failure limit F_b , failure energy U_b were concluded. The results showed that axial load of water chestnut was greater than the radial load under the condition of the same deformation. Variance analysis found that the water chestnut varieties, the compression part and the interaction between the water chestnut varieties and the compression part had a very significant influence on failure limit, the compression rate affected failure limit significantly, but the interaction between the water chestnut varieties and the compression rate did not have a significant influence on failure limit. The research results will provide a theoretical basis to design for water chestnut harvest, transportation, storage, processing equipment and so on.

Key words: water chestnut; compression properties; compressive strength

荸荠, 俗称马蹄。莎草科荸荠属于浅水性宿根草本, 其球茎既可作为蔬菜食用也可作为水果食用, 备受人们的喜爱。因为荸荠球茎含水量高, 皮质软且脆, 所以其在采收、运输、储藏、加工到销售的每一个环节都有可能出现由于彼此间的相互挤压、碰撞而导致表面机械性损伤。压缩特性是荸荠主要物料力学特性之一, 而压缩损伤又是其主要的损伤原因之一, 尤其在采收、储藏、运输等环节表现得更为突出。目前, 国内外尚未见到关于荸荠在压缩试验下的力学特性研究。因此, 通过压缩试验, 研

究其在不同影响条件下的力学特性, 为减少荸荠在上述环节中的损失量和为荸荠采收机研究提供理论依据。

荸荠果实为扁球形的短而肥大的地下茎, 由根状茎先端膨大而成。球茎有明显的节和节间, 节上有退化的鳞片状叶和腋芽, 顶端有 1 个显著的顶芽, 腋芽簇生在顶芽四周。荸荠的组成结构如图 1 所示。鉴于荸荠的扁球形结构特点, 在采收、储藏过程中, 芽下部位和节间更容易受到损伤, 故本试验主要研究荸荠芽下部位和节间的力学特性。

收稿日期: 2016-08-02

基金项目: 公益行业(农业)科研专项经费(201503136), 水稻机械精准种植模式与关键技术集成示范(201203059)和公益行业(农业)科研专项经费(201003007)共同资助。

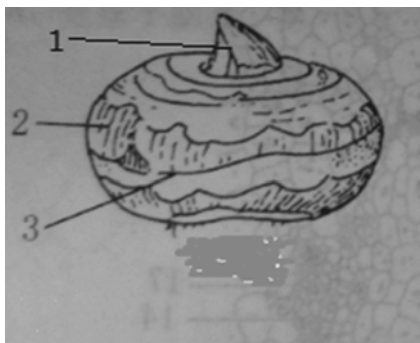
作者简介: 陈子林, 硕士研究生。E-mail: 574872295@qq.com

* 通信作者: 夏俊芳, 博士, 教授。E-mail: xiajunfang1963@qq.com

1 材料与方法

1.1 材料

我国荸荠种植区域主要分布在湖北、安徽、江苏、浙江、福建、广西和广东等地。截至2006年,武汉市蔬菜科学研究所收集保存荸荠种质资源105份,其中野生资源10份,品系5份,地方品种90份,其中比较有名的地方品种包括桂林荸荠、杭州大红袍、孝感荸荠、庐江荸荠、苏荠和余杭荠等^[1-3]。鉴于华中地区较为有名的是孝感荸荠和庐江荸荠,其种植规模分别达万亩,年产量达万吨以上,且这两个品种口感较好,深受本地人们喜爱,销量较大,具有代表性,因此试验时所选的品种为孝感荸荠和庐江荸荠。测试时选取大小相近、表面无损伤内部无腐烂的新鲜荸荠,试验样品的直径范围为40~55 mm,厚度为21~28 mm,单个去芽整果重量为30~50 g。选用美国FTC公司的TMS-PRO型质构仪,其传感器量程为1000 N,使用直径为6 mm的平顶圆柱压头。



1.芽; 2.节间; 3.节 1.Bud; 2.Internode; 3.Section

图1 荸荠的组成结构

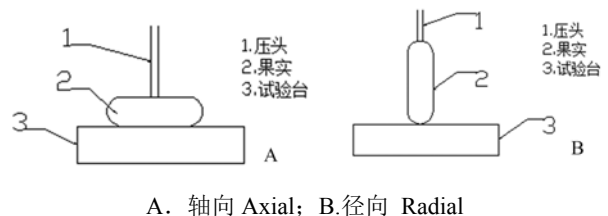
Figure 1 The composition structure of water chestnut

1.2 方法

荸荠属于软质物料,含水率较高,具有明显的粘弹性,荸荠的这一特性与苹果、西瓜等农业物料相似^[4-6]。根据粘弹性体果实受外力时吸收能量的特点,果实不同加载速率下吸收不同的能量,导致果实受损程度不同,因此可将压缩速率作为压缩特性的试验因素。鉴于荸荠果实较脆,易破损,设置目标压缩位移为5 mm,试验终止。通过质构仪的压缩,获得其压缩特性曲线。

压缩速率一般采用 $10\sim 75\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ^[7-8],故本试验采用15、35、55和 $75\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 4种压缩速率。据参考文献^[9]得知,通常对软质物料压缩选取压头直径为物料几何直径的 $1/5\sim 1/10$,故选用直径为6 mm的平顶圆柱压头^[9-11]。荸荠外观近似鼓形,压缩

部位选取轴向(荸荠中心芽生长的部位)和径向(荸荠近似鼓的周面)2个部位。试验完成后,将荸荠切片,测量荸荠的含水率。选用孝感荸荠和庐江荸荠两个压缩品种进行压缩试验,得出两个品种的压缩速率和压缩部位对荸荠的破坏极限和破坏能的差异性。每个品种按照压缩速率不同分为4组,同一压缩速率下包含轴向和径向两个不同的压缩部位,同一试验样品个数为20,试验样品个数总计为320。图2为轴向压缩和径向压缩示意简图。



A. 轴向 Axial; B. 径向 Radial

图2 荸荠压缩示意图

Figure 2 Sketch map for separating water from compressed chestnut

2 结果与分析

2.1 加载速率、受压部位对压缩特性的影响

大多数农业物料在较小载荷作用下具有弹性或线性粘弹性的特点,其压缩试验结果会受到加载速度的影响,因此研究加载速度对荸荠力学特性的影响是必要的。

将荸荠置于试验台上,选用不同的压缩速度对不同部位进行压缩,便可得到一系列的力-位移曲线,以压缩速率为 $15\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$,抽取其中一组压缩曲线分析,如图3所示。

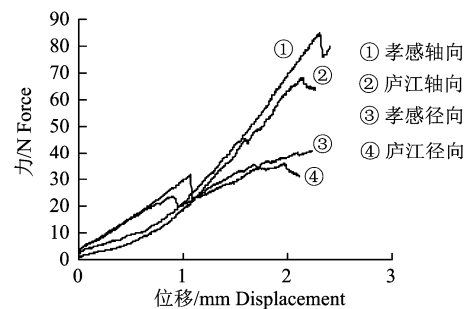


图3 不同品种的力-位移曲线

Figure 3 Force-deformation curve of different varieties

由图3分析可知,两个品种荸荠轴向和径向压缩曲线的趋势分别是一致的。压缩曲线的最高点B称为破坏极限点B,其所对应纵坐标的压力值 F_b 称为破坏极限。压力达到破坏极限时,荸荠表面出现明显压痕,此时果实受到破坏,荸荠果实所吸收的能量称为破坏能。观察径向压缩曲线可以发现:

在加载的初始阶段, 压力随变形的增加近似呈线性关系, 说明此阶段主要发生弹性变形; 随着压力的增加, 弹性变形和塑性变形同时发生; 在加载的最后阶段, 塑性变形是主要的。而观察轴向压缩曲线发现: 压缩曲线无明显的弹性变形阶段, 主要发生塑性变形。

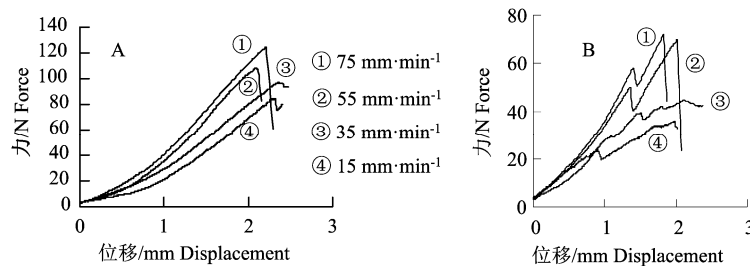
鉴于两个品种压缩曲线趋势基本一致, 现以孝感芥为例, 抽取其中一组曲线进行分析。结果表明 (图 4), 随着压缩速率的逐渐增大, 荸荠果实破坏极限逐渐增大。这是由于随着压缩速度的增加, 细胞内液体的粘性阻尼特性也在不断增强, 导致果实的承载能力不断提高, 在宏观上表现为果实抗压能力的提升^[9]。

由图 4-A 和图 4-B 的比较分析可知, 相同压缩速率下轴向压缩的破坏极限大于径向压缩的破坏极限, 所以荸荠在存储堆放时, 应尽量保证荸荠水平放置, 以减少对荸荠的损伤。

2.2 荸荠果实压缩特性参数的分布规律

因荸荠的生物特性差异大, 同一试验重复 20 次, 根据拉依达检验法剔除其中异常值, 选取合格参数中的 10 个数据取其算术平均值作为试验数据, 得到不同品种荸荠在不同压缩速率、压缩部位下的破坏极限、破坏能的试验值如表 1 所示。

通过对表 1 中的数据分析, 得到不同品种荸荠果实在不同的压缩速率、不同压缩部位下的破坏极限、破坏能的分布规律如图 5 和图 6 所示。



A. 轴向压缩 Axial compression; B. 径向压缩 Radial compression

图 4 不同压缩速率压缩的力-位移曲线

Figure 4 Force-deformation curves under different loading rates

表 1 破坏极限、破坏能的压缩特性参数

Table 1 The feature parameters of failure limit and damage limit

品种 Varieties	压缩部位 Compression part	压缩速率/mm·min ⁻¹ Compression rate	破坏极限/N Failure limit	破坏能/mJ Failure energy
孝感芥 Xiaogan water chestnut	轴向 Axial	15	94.10	102.175
		35	103.01	105.151
		55	109.55	106.375
		75	111.57	108.151
庐山芥 Lujiang water chestnut	径向 Radial	15	49.75	65.447
		35	51.29	69.278
		55	54.77	71.007
		75	55.97	76.573
孝感芥 Xiaogan water chestnut	轴向 Axial	15	77.58	70.334
		35	78.40	73.936
		55	80.63	82.639
		75	81.14	87.579
庐山芥 Lujiang water chestnut	径向 Radial	15	40.05	58.130
		35	42.23	60.691
		55	43.79	61.660
		75	45.07	65.438

由图 5 可以发现, 破坏极限在同一压缩速率下从大到小依次是孝感芥的轴向破坏极限、庐山芥轴向破坏极限、孝感芥径向破坏极限、庐山芥径向破坏极限。以压缩速率为 15 mm·min⁻¹ 为例, 破坏极

限分别是 94.1、77.58、49.75 和 40.05 N。由图 6 中可以发现, 破坏能的大小关系与图 5 中的破坏极限趋势相同。根据以上变化规律, 在实际应用中, 根据不同种类的荸荠压缩特性来选择其加工方案。

比如安徽庐江荸荠比较适合直接切片深加工，以便减少加工机械的能耗，而孝感荸荠由于其抵抗损伤的能力比较强，更适合于运输、储藏。

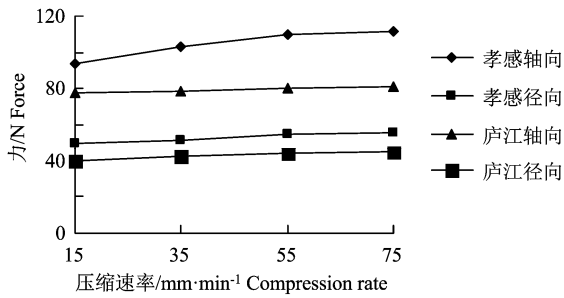


图 5 破坏极限的分布规律

Figure 5 The distribution of the failure limit

2.3 正交试验分析

为了研究各试验因素对荸荠果实破坏极限的影响，以荸荠的品种、压缩速率及压缩部位为试验因素，进行正交压缩试验。设计正交试验表，由于荸荠的压缩速率(A)、品种(B)和压缩部位(C)等因素的水平分别为4、2和2，其中压缩速率1、2、3和4分别代表速率为15、35、55和75 mm·min⁻¹，品种1、2分别代表孝感荠、庐江荠，压缩部位1、2分别代表轴向和径向。故可以选用混合水平正交试验表L₁₆(4¹×2¹²)。

对三因素混合水平正交试验表进行方差分析，

得表3。

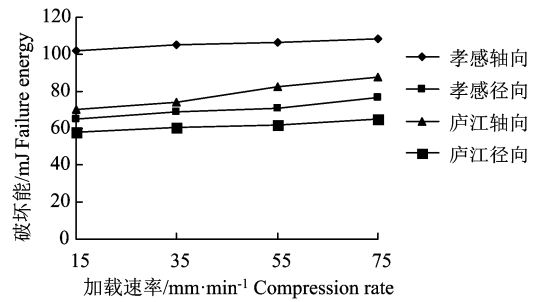


图 6 破坏能的分布规律

Figure 6 The distribution of the damage limit

由表3可知，荸荠品种、压缩部位以及荸荠品种和压缩部位之间的交互作用对破坏极限呈极显著性差异(P<0.01)，压缩速率对破坏极限呈显著性差异(P<0.05)，而荸荠品种与压缩速率之间的交互作用对破坏极限不显著。

2.4 荸荠压缩曲线的拟合

荸荠果实的破坏极限将为采收、运输、贮藏、加工等相关机械的设计提供理论依据。运用偏最小二乘法，采用Matlab软件对破坏能进行计算，并利用Excel软件对荸荠载荷一位移曲线进行曲线拟合，以获得定量的方程式来描述其压缩曲线的特征。其拟合曲线的表达式为：

$$Fb = a_0x^n + a_1x^{n-1} + a_2x^{n-2} + \dots + a_{n-1}x + a_n \quad (1)$$

表 2 3 因素混合水平正交试验

Table 2 The orthogonal experiment of mixed levels of three factors

试验号 Test No.	A	B	A×B		C	A×C		B×C		空列 Vacant column				破坏极限/N Failure limit
	(1)	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
	列号	Column												
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	94.10
2	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	49.75
3	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	77.58
4	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	40.05
5	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	103.01
6	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	51.29
7	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1	78.40
8	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2	42.23
9	3	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	109.55
10	3	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	54.77
11	3	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	80.63
12	3	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2	43.79
13	4	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	111.57
14	4	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	55.97
15	4	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2	81.14
16	4	2	1	1	2	2	1	1	2	1	2	2	1	45.07

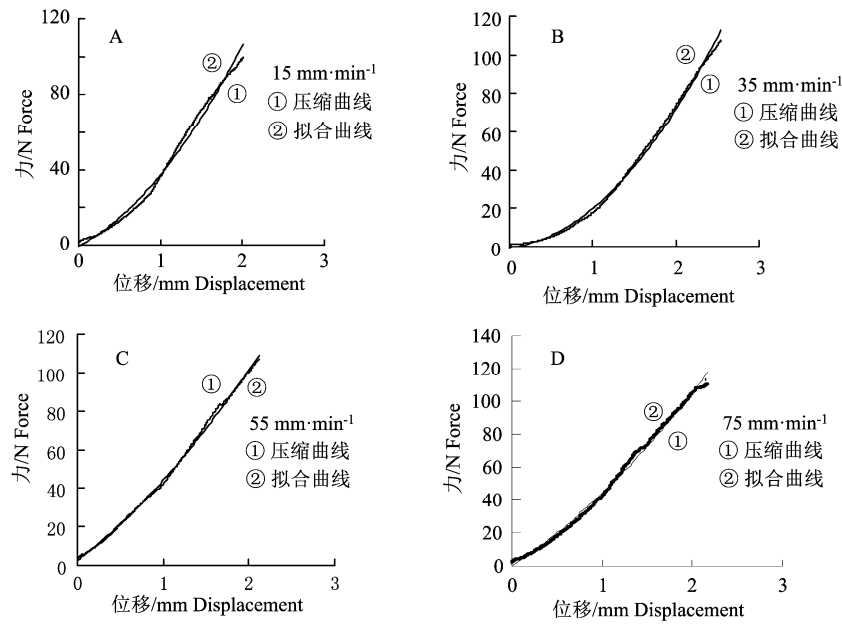


图 7 不同压缩速率下轴向破坏极限的拟合曲线

Figure 7 The fitting curves of axial limit under the different compression rates

表 3 方差分析

Table 3 The analysis of variance

变异来源 Source of variation	平方和 SS Sum of squares	自由度 df Degrees of freedom	均方 MS Mean square	F 值 F Values of F	显著性 Significance	临界值 Critical value
A	158.46	3	52.82	7.92	*	$F_{0.05}(3,6)=4.7571$
B	1244.68	1	1244.68	186.55	**	$F_{0.01}(3,6)=9.7795$
A×B	35.66	3	11.89	1.78		$F_{0.05}(1,6)=5.9874$
C	7790.71	1	7790.71	1167.64	**	$F_{0.01}(1,6)=13.745$
B×C	223.8	1	223.802	33.54	**	
A×C	15.94	3	5.31			
空列 Vacant column	24.09	3	8.03			
合并后误差 Combined error	40.03	6	6.67			
总变异 Total variation	9493.34	15				

注：“**”表示相关性极显著，单侧显著性检验概率 $P < 0.01$ ；“*”表示相关性显著，单侧显著性检验概率 $P < 0.05$ 。

Note: “**” stands for (single side) extremely significantly correlated at the 0.01 level, “*” express a (single side) significantly correlated at the 0.05 level.

表 4 径向破坏极限的拟合系数和破坏能

Table 4 The fitting coefficient and damage energy of radial failure limit

品种 Varieties	加载速率 /mm·min ⁻¹ Loading rate	拟合方程 Fitting equation $Fb=a_0x^5+a_1x^4+a_2x^3+a_3x^2+a_4x+a_5$							R^2	Δl /mm	破坏能/mJ Failure energy	
		a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	理论值 Theoretical value			实测值 Measured value	
孝感芥 Xiaogan	15	-3.0072	24.648	-64.531	65.585	1.3725	3.0731	0.9851	2.2648	66.09	66.56	
	35	3.021	-19.363	43	-37.204	27.939	2.095	0.9959	2.6171	69.50	69.45	
water chestnut	55	-0.5238	4.8386	-15.089	14.093	17.656	2.117	0.9801	3.0238	79.54	79.52	
	75	-3.0887	23.454	-62.532	67.759	-5.898	3.9952	0.9837	3.0435	96.06	96.13	
庐江芥 Lujiang	15	-18.188	83.525	-127.77	67.384	13.758	3.5006	0.9942	1.9617	42.41	42.63	
	35	1.5877	-8.9727	16.704	-12.517	19.224	1.463	0.9984	2.286	43.51	43.77	
water chestnut	55	2.6027	-22.706	69.568	-88.037	53.817	0.466	0.9845	2.7614	63.00	63.18	
	75	-0.3606	2.8685	-7.1732	4.8812	14.136	2.4691	0.9841	3.3931	81.92	81.92	

表 5 轴向破坏极限的拟合系数和破坏能
Table 5 The fitting coefficient and damage energy of axial failure limit

品种 Varieties	加载速率 /mm·min ⁻¹ Loading rate	拟合方程 Fitting equation $Fb=a_0x^2+a_1x+a_2$				$\Delta l/\text{mm}$	破坏能/mJ Failure energy	
		a_0	a_1	a_2	R^2		理论值	实测值
							Theoretical value	Measured value
孝感茅 Xiaogan water chestnut	15	15.264	22.719	-0.5757	0.9927	2.0056	85.59	85.65
	35	15.73	4.5599	-0.4406	0.9975	2.5426	99.81	99.62
	55	7.976	33.551	2.5371	0.9986	2.1155	105.61	105.50
	75	8.6233	35.318	0.205	0.9964	2.1695	112.91	112.57
庐江茅 Lujiang Water chestnut	15	16.173	-12.04	5.0143	0.9898	2.6855	74.46	75.39
	35	6.5082	23.72	-0.7429	0.9972	2.3161	88.85	89.23
	55	7.4556	15.802	-3.1995	0.9881	2.656	93.80	93.18
	75	2.8422	31.908	0.9522	0.9934	2.3684	104.33	104.88

破坏能是破坏极限点B(如图4)对应的变形 Δl 、变形曲线与横坐标围成的面积,用积分公式表示为:

$$Ub = \int_0^{\Delta l} Fb dx = \int_0^{\Delta l} (a_0 x^n + a_1 x^{n-1} + a_2 x^{n-2} + \dots + a_{n-1} x + a_n) dx \quad (2)$$

式中: x 为对应的变形, mm; Fb 为破坏极限, N; Ub 为破坏能, mJ。

荸荠果实的轴向破坏极限曲线采用二次多项式进行拟合,而径向破坏极限曲线采用五次多项式进行拟合,决定系数 R^2 在0.98以上。图7中的A~D是在不同压缩速率下孝感荸荠轴向破坏极限的拟合曲线,其他拟合曲线表达式见表4和表5。

对表4和表5中的理论值和实测值进行系统误差的检验,设 $d_0=0$, $\alpha=0.05$,构造统计量

$$t = \frac{\bar{d} - d_0}{s_d} \sqrt{n} \quad (3)$$

式中: \bar{d} 为成对测定值之差的算术平均值; S_d 为 n 对试验值之差值得样本标准差。

经过计算得表4和表5中的 t 值分别为-2.27和-0.46。因为 $|t| < t_{\alpha/2}(t_{0.025}(7)) = 2.365$, 这说明理论值与实测值之间不存在显著的系统误差,经过曲线拟合所得到的方程符合要求,能够用来描述压缩曲线的特征。另外,从方程的阶数来看,在决定系数为0.98以上的条件下,荸荠轴向破坏极限采用二次多项式方程拟合,而径向破坏极限采用五次多项式方程拟合,说明其轴向和径向的机械特性存在显著性差异,通过曲线拟合所得到的方程式可以定量的描述荸荠在不同品种、压缩速率、压缩部位的压缩特性差异。

3 讨论

试验结果证实荸荠轴向果实抵抗破坏能力高于径向果实抵抗破坏能力。因此,在储藏、运输中荸荠应该尽量水平放置。

加载速度对荸荠力学特性的影响显著,随着压缩速率的逐渐增大,荸荠果实的破坏极限和破坏能逐渐增大。

荸荠品种、压缩部位以及荸荠品种和压缩部位之间的交互作用对破坏极限呈极显著性差异($P < 0.01$),压缩速率对破坏极限呈显著性差异($P < 0.05$),而荸荠品种与压缩速率之间的交互作用对破坏极限不显著。

通过对压缩曲线进行拟合所得到的多项式方程,可以定量的说明荸荠在不同品种、压缩速率、压缩部位的压缩特性差异。

参考文献:

- [1] 李峰,柯卫东,刘义满. 荸荠研究进展[J]. 长江蔬菜, 2006(8): 39-43.
- [2] 赵有为. 中国水生蔬菜[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999.
- [3] 孔庆东. 中国水生蔬菜品种资源[M]. 北京: 中国农业出版社, 2004.
- [4] 王海. 荸荠质构特性及其抑菌物质的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2007.
- [5] 王芳. 西瓜压缩及蠕变特性的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2008.
- [6] 李小昱, 王为. 苹果压缩特性的研究[J]. 西北农业大学学报, 1998, 26(2): 107-110.
- [7] AYDIN C. Physical properties of almond nut and kernel[J]. J Food Eng, 2003, 60(3): 315-320.
- [8] 王丽丽. 梨果实压缩特性与品质特性关系的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2009.
- [9] 吴德光, 蒋小明. 农产品压缩试验研究及其应用(I)-压缩试验方法[J]. 云南农业大学学报, 1990, 5(3): 171-176.
- [10] MOHSENIN N N. Physical properties of plant and animal material: structure, physical characteristics and mechanical properties[M]. New York: Gordon and Breach Science Publisher, 1970.
- [11] 周祖镔. 农业物科学[M]. 北京: 农业出版社, 1994: 40-50.