

基于穿刺法库尔勒香梨果肉脆度评价研究

余丽娟^{1,2}, 吴杰¹, 王倩倩³, 马宏强¹, 王佳萍¹

(1. 石河子大学机械与电气工程学院, 新疆石河子 832000)

(2. 新疆石河子职业技术学院, 新疆石河子 832000) (3. 石河子大学生命科学学院, 新疆石河子 832000)

摘要: 本研究采用二阶微分法和峰值法对不同成熟度库尔勒香梨果肉的穿刺力-变形曲线锯齿度进行度量计算, 结合不同成熟度香梨果肉组织显微组织观察, 分析了锯齿度指数 CI、平均穿刺力 F_{cr} 、结构破裂空间频率 N_{sr} 、结构破裂平均比力 f_{sr} 和脆功 W_c 随香梨贮藏时间的变化规律, 并分析了这 5 个锯齿度度量参数与香梨可溶性固形物含量及含水率的相关性, 比较了对香梨果肉脆度变化的敏感度。研究表明, 不同成熟度香梨果肉穿刺力-变形曲线锯齿度有明显差异, 随着香梨脆度减小, 锯齿度指数 CI、平均穿刺力 F_{cr} 、结构破裂平均比力 f_{sr} 、脆功 W_c 呈逐渐减小趋势, 而结构破裂空间频率 N_{sr} 呈逐渐增大趋势, 这 5 个锯齿度度量参数都与可溶性固形物含量、含水率显著相关, 但是峰值分析法的结构破裂平均比力 f_{sr} 不仅与可溶性固形物含量及含水率的相关系数都很高, 而且对香梨脆度敏感度值最高, 最适宜作为评价香梨果肉脆度的指标。

关键词: 库尔勒香梨; 力-变形曲线; 锯齿度; 脆度

文章编号: 1673-9078(2019)04-237-243

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2019.4.032

Study on Crispness Evaluation for Korla Pear Flesh by Puncture Test

YU Li-juan^{1,2}, WU Jie¹, WANG Qian-qian³, MA Hong-qiang¹, WANG Jia-ping¹

(1. College of Machinery and Electricity Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, China)

(2. Xinjiang Shihezi Vocational Technical College, Shihezi 832000, China)

(3. College of Life Science, Shihezi University, Shihezi 832000, China)

Abstract: In this study, the second order differential (SOD) method and peak method were used to measure the jaggedness of the puncturing force-deformation curves of Korla pear flesh at different maturity stages. The jaggedness index CI, the average puncturing force F_{cr} , the spatial frequency of structural ruptures N_{sr} , the average specific force of structural ruptures f_{sr} and the crispness work W_c with storage time of Korla pear were calculated. The changes of these five parameters during storage time of pear fruit were then analyzed combining with the microstructure observation of flesh tissue of Korla pear. Furthermore, the correlation of the five parameters with jaggedness, soluble solid content and moisture content of Korla pear was analyzed and the sensitivity of these parameters to the crispness change of Korla pear flesh was compared. There were notable differences in observed jaggedness for the puncturing force-deformation curves of Korla pear flesh at different maturity stages. Four parameters including CI, F_{cr} , f_{sr} , W_c , decreased gradually with the decreasing crispness of pear, while the parameter N_{sr} showed a rising trend. The five parameters related to jaggedness were significantly correlated with the content of soluble solids and the moisture content. The average specific force of structural ruptures f_{sr} by peak method had the highest correlation coefficient with the soluble solid content and moisture content. Moreover, it had the highest sensitivity to the crispness changes of Korla pear. Therefore, this parameter is most suitable for evaluating the crispness of Korla pear.

Key words: Korla pear; force-deform curve; jaggedness; crispness

库尔勒香梨香味浓郁, 皮薄肉脆, 是新疆特色果品。口感酥脆是反映香梨品质优良的重要指标之一, 也是香梨产业着力宣传的亮点。近年来香梨种植面积不断扩大, 从宜适生区库尔勒向次宜适生区不断扩展,

收稿日期: 2018-11-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (31860466)

作者简介: 余丽娟 (1983-), 女, 讲师, 研究方向: 农产品品质检测

通讯作者: 吴杰 (1972-), 男, 教授, 研究方向: 农产品品质安全与检测研究

光热水土、园艺水平等变化使香梨脆度这一品质开始出现差异, 耐寒品种的推广以及砧木类型、授粉条件等影响, 酥脆口感较差的粗皮果逐渐增多^[1]。此外, 为减少贮运机械损伤和抢占市场, 酥脆口感不佳的青熟采摘香梨大量上市, 采后贮藏温度、湿度等因素影响以及香梨后熟, 也造成香梨脆度变化^[2]。这一系列情况的发生, 使香梨内部品质良莠不齐问题加剧, 消费者对香梨酥脆口感认可度下降, 香梨声誉受到损害, 价格开始走低^[3]。因此, 有必要对香梨酥脆这一重要

内部品质进行准确有效检测评价,这对提高香梨等级和商品率、树立品牌和提升市场竞争力都具有重要意义。

目前香梨脆度主要依靠感官评价,不易准确定义和描述,且易受环境、个人喜好及口味等主观因素影响而产生偏差^[4,5]。采用仪器模拟牙齿咀嚼对食品穿刺或压缩测试,是国内外研究广为采用的一种客观评价食品脆度的方法之一。脆性材料力学测试所得力-变形曲线中具有明显不规则锯齿化特征的部分,反映了材料组织内部受载时渐次破裂,其应力骤变现象恰是对材料脆度的指征,然而锯齿化特征曲线的复杂多变,具有不可重现性,难以度量,变化规律难寻,这成为食品脆度准确评价的研究难点。

针对脆性食品穿刺或压缩力-变形曲线的锯齿度测度问题,早期 Mohamed 等计算压缩黄瓜断裂时所做的功与总功之比,用来度量力-变形曲线锯齿度以评价黄瓜脆度,但计算过于复杂^[6]。Peleg 等提出了可度量力-变形曲线锯齿度的规范化无量纲吸引子,对 3 种干腌食品脆度进行评价,但依然存在较大误差^[7]。1998 年,Hecke 等采用峰值力学法提取膨化食品穿刺力-变形曲线的平均穿刺力、结构破裂空间频率、结构破裂平均比力、脆功 4 个参数度量曲线锯齿度,结果表明能够较准确评价膨化食品脆度^[8]。随后,有研究将峰值力学的这几个参数先后应用于谷物^[9]、膨化玉米饼^[10]、苹果渣膨化食品^[11]的脆性评价,也都取得了较好的评价结果。除此之外,堀江秀树等提出了二阶微分法进行黄瓜穿刺力-变形曲线锯齿度的计算和黄瓜脆度评价,研究结果表明计算所得的锯齿度指数能够较准确反映不同黄瓜品种的脆度差异^[12]。于是,这一方

法成功应用于不同成熟度、不同生长阶段黄瓜的脆度变化规律研究及不同品种黄瓜的脆度差异分析^[13,14]。

因此,本研究针对香梨脆度这一重要内部品质指标难以客观准确评价的问题,采用二阶微分法和峰值力学法对不同成熟度香梨果肉的穿刺力-变形曲线的锯齿度进行测量,并提取参数进行香梨脆度评价和脆度变化规律分析,比较这两种方法提取的各参数对脆度变化的敏感性,以探索香梨脆度较为准确定量评价的方法,这对实现更接近消费者口感的香梨内部品质准确分级具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 香梨果肉取样

试样采自新疆库尔勒,剔除畸形、损伤、病害果及突顶果,其基本物性参数见表 1。采后在-2~0℃及相对湿度 85%~95%环境冷藏,待测试样需在室温(23±1)℃条件下回温 24 h。

如图 1 所示,采用专用的切样装置,分别切取 3 个厚度为 15 mm 的试样,确保两切面保持平齐。对试样向阳部位(红晕处)标记。制取的试样分别进行组织显微观察、穿刺测试、可溶性固形物及含水率测定。

表 1 香梨试样的基本物性参数

Table 1 Material properties of Korla pear sample

物性参数	值
质量/g	111.76±18.52
硬度/(N/mm)	8.61±0.43
可溶性固形物含量/°Brix	11.44±0.49
含水率(湿基)/%	88.19±0.52

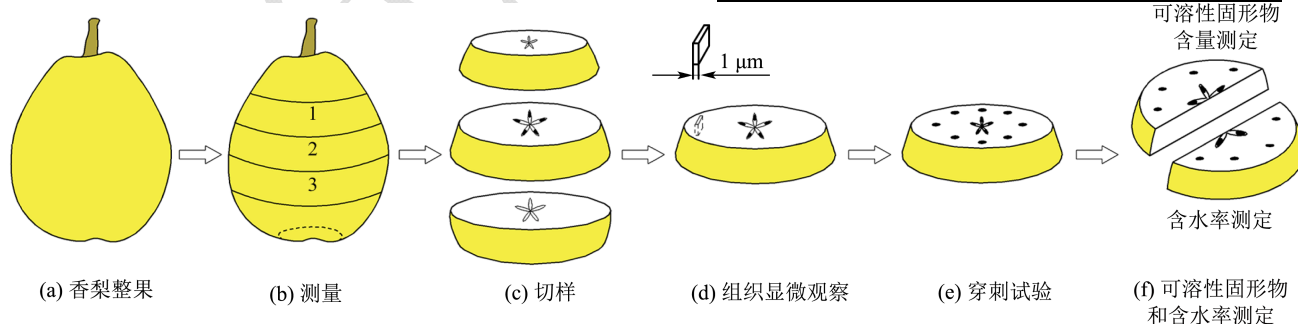


图 1 香梨果肉取样示意图

Fig.1 Diagrammatic sketch of flesh sampling of a Korla pear

1.2 香梨果肉穿刺试验

如图 2 所示,采用 TA.XT Plus 质构仪(英国 Stable Micro System 公司)对香梨切片试样进行穿刺试验。圆柱探头直径 Φ2 mm,穿刺前速度为 1 mm/s,穿刺中速度为 2.5 mm/s,穿刺后速度为 10 mm/s,穿刺深

度为 8 mm,数据采样频率为 500 Hz。对于每个试样,穿刺接触试样的切面始终为近梗端面,在绕果核中心的 8 个均布位置分别穿刺,每个香梨可得到 24 组力-变形曲线及数据。选取 220 个试样分为 11 组,每组 20 个试样,前 4 次测试每 5 d 一测,后 7 次测试每 4 d 一测。



图2 香梨试样穿刺试验

Fig.2 Puncture test for Korla pear sample

1.3 香梨果肉穿刺力-变形曲线的锯齿度度量方法

1.3.1 二阶微分法

参考堀江秀树等提出的二阶微分方法^[12], 对图3所示的香梨果肉穿刺力-变形曲线中间 2/3 处, 即 2.5~7.6 mm 穿刺深度的数据进行分析, 公式如下所示:

$$D_{2t} = 2 \times F_t (F_{t-1} + F_{t+1})$$

式中: D_{2t} 是 t 时刻的二阶微分值; F_t 是 t 时刻的力值; F_{t-1} 是 t 时刻前 0.002 s 对应的力值; F_{t+1} 是 t 时刻后 0.002 s 对应的力值。

由此香梨力-变形曲线锯齿度指数 CI 可根据下式计算所得:

$$CI = \sum |D_{2t}|$$

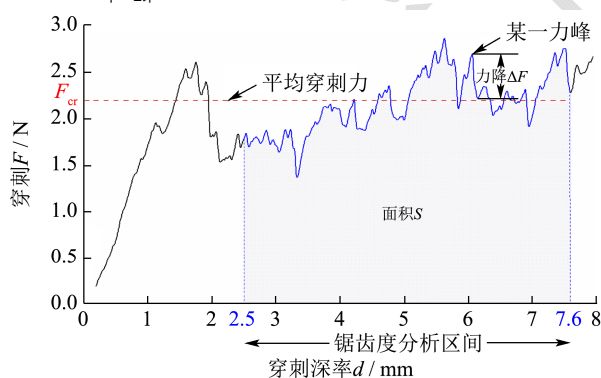


图3 香梨果肉穿刺力-变形曲线

Fig.3 Force-deformation curve of Korla pear flesh in puncture

1.3.2 峰值分析法

参考 Hecke 等^[8]和 Karkle 等^[11]的峰值分析法, 采用下列式对锯齿度分析区间 4 个峰值参数进行计算:

$$F_{cr} = \frac{S}{d}$$

$$N_{sr} = \frac{n}{d}$$

$$f_{sr} = \frac{\sum \Delta F}{n}$$

$$W_c = \frac{F_{cr}}{N_{sr}} = \frac{S}{n}$$

式中: F_{cr} 为平均穿刺力, N; N_{sr} 为结构破裂空间频率, mm^{-1} ; f_{sr} 为结构破裂平均比力, N; W_c 为脆功, N·mm; S 为图3所示力-变形曲线下区域面积, mm^2 ; d 为穿刺深度, mm; n 为总峰数; $\sum \Delta F$ 为各力峰的力降之和, N。

1.4 香梨果肉可溶性固形物含量与含水率测定

采用 PR-101 型手持式糖度计(日本 ATAGO 公司)测量香梨果肉的可溶性固形物含量, 采用电热鼓风干燥箱(上海一恒科学仪器有限公司, 功率 1550 W)对香梨果肉干燥 24 h, 电子天平(上海卓精电子科技有限公司, 精确度 0.0001 g)对干燥前后的香梨果肉称重, 然后计算确定香梨果肉含水率。

1.5 脆度评价参数对果肉脆度的敏感度分析

参考 Macrelli 等^[15]的方法, 根据下式计算各锯齿度度量参数对香梨果肉脆度变化的敏感度:

$$P(\%) = 100 \times \left| \frac{S_i(t_2) - S_i(t_1)}{S_i(t_1)} \right|$$

式中: P 为脆度敏感度; $S_i(t_1)$ 为第 1 组测试的锯齿度度量参数均值; $S_i(t_2)$ 为第 11 组测试的锯齿度度量参数均值。

1.6 果肉组织显微组织观察

香梨试样中取 5 mm×5 mm×5 mm 果肉, 参考文献的方法^[16], 采用 FAA 固定液(70%的乙醇:福尔马林:冰醋酸=95:5:5)进行固定, 用番红-固绿双重染色剂对切片进行染色, 然后在 BX51TR-32FIBGU 型荧光显微镜(OLYMPUS 公司, 日本)下观察拍照。

1.7 数据统计分析

采用 SPSS 19.0 软件对试验数据进行方差分析($\alpha=0.05$), 并采用 Duncan 多重比较检验差异显著性。

2 结果与讨论

2.1 不同成熟度香梨果肉显微组织观察分析

香梨常温贮藏过程, 青熟(第 1 d)、中间成熟(第 20 d)和黄熟(第 45 d) 3 种不同成熟度的香梨果肉显微组织观察结果如图 4 所示。由图 4a 可以看出, 青熟期香梨果肉细胞饱满, 细胞壁完好, 结构致密, 细胞

间隙较小,表明该阶段的香梨果肉细胞膨压相对最大,细胞壁强度较高,因此图 5a 所示的果肉穿刺力-变形曲线具有力峰尖细且波幅大的特征,反映了青熟期香梨果肉具有较高硬脆性;当香梨果肉处于中熟期时,如图 4b 所示,细胞失水开始萎缩,胞间隙增大,细胞膨压有明显下降,其穿刺力-变形曲线锯齿化趋于平缓,波幅变小且力峰短宽,但总峰数有明显增多(见图 5b),这是该成熟阶段果肉开始软化而导致脆度下降的表现;至黄熟期,香梨果肉细胞间的细胞壁解离,大多细胞形状已不完整,细胞壁解离,图 5c 所示的穿刺力-变形曲线锯齿状已不明显,曲线趋于平滑,力峰数多但波幅却很小,这指示了香梨果肉组织已经疏松,果肉脆度也降至很低。

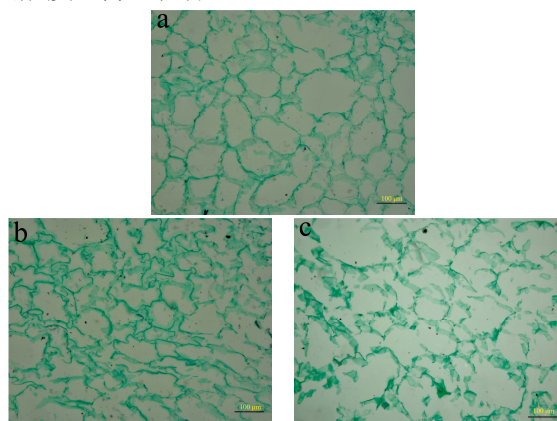


图4 不同成熟度香梨果肉的显微组织图

Fig.4 Light microscopy images of parenchyma tissue of Korla pear at different maturity stages

注: a: 青熟; b: 中熟; c: 黄熟。下图 5、6 同。

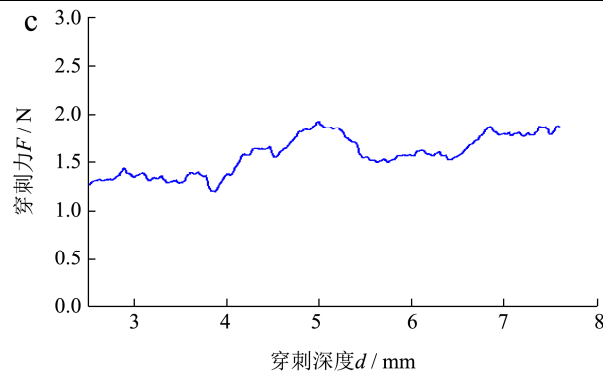
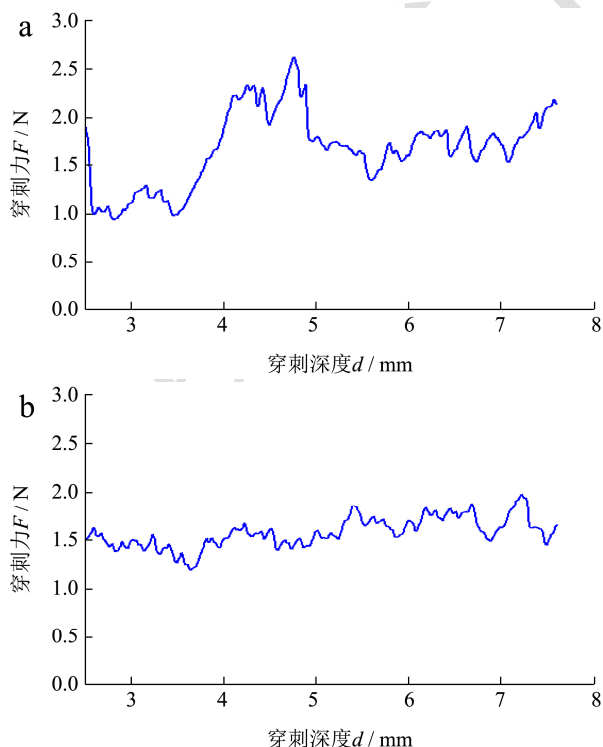


图5 三种成熟度香梨果肉典型穿刺力-变形曲线

Fig.5 Typical puncture force-deformation curves of Korla pear flesh at three maturity stages

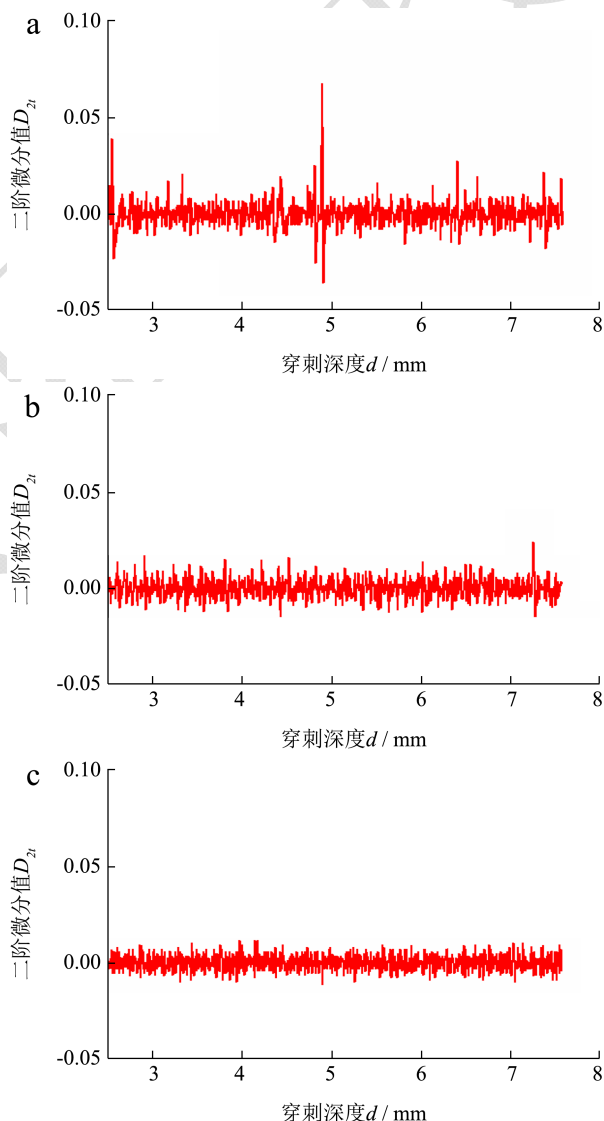


图6 三种成熟度香梨果肉穿刺力-变形曲线二阶微分图

Fig.6 Second-order differential graphs of puncture force-deformation curves of Korla pear flesh at three maturity stages

2.2 香梨果肉穿刺力-变形曲线锯齿度不同度

量参数随香梨脆度的变化

2.2.1 基于二阶微分法的锯齿度指数随香梨脆度的变化

从图6可以看出, 香梨青熟、中熟和黄熟3种成熟度果肉的穿刺力-变形曲线二阶微分图在形状上存在明显差异。二阶微分值 D_{2t} 反映了香梨果肉在穿刺过程中发生在微观尺度上的果肉组织渐次断裂发生的频次及力降, 当香梨成熟度提高时, 二阶微分值 D_{2t} 的变化幅度变小, 力峰处二阶微分值的减小尤其明显, 果肉质地越软, 二阶微分值在穿刺深度上的绝对值总和, 即锯齿度指数 CI 越小, 这一结果与堀江秀树等(2004)及 Yoshioka 等(2009)对不同品种黄瓜果肉穿刺力-变形曲线计算所得的二阶微分值及其锯齿度指数 CI 变化规律是一致的^[12,13]。如图7所示, 随着贮藏时间增加, 香梨果肉脆度不断下降, 其锯齿度指数 CI 呈明显下降趋势, 表现出前期变化较快后期变化趋缓的特征。除了中间 10 d 变化不明显之外, 在前 15 d 和后 15 d 都有显著减小, 这进一步表明锯齿度指数 CI 是可以评价香梨果肉的脆度差异和变化的。

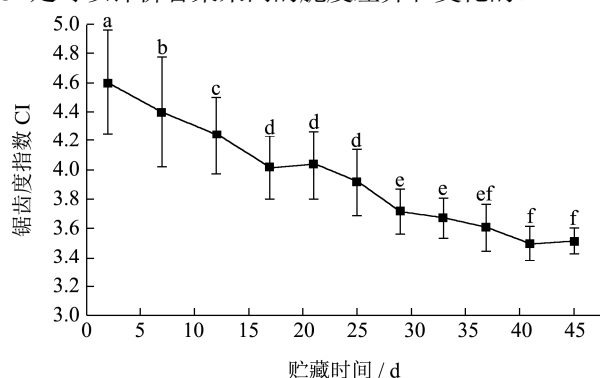


图7 锯齿度指数 CI 随着香梨贮藏时间的变化

Fig.7 Change of jaggedness index CI of Korla pear during storage

注: 相同字母表示差异不显著 ($p>0.05$), 不同字母表示差异显著 ($p<0.05$)。

2.2.2 基于峰值分析法的锯齿度度量各参数随香梨脆度的变化

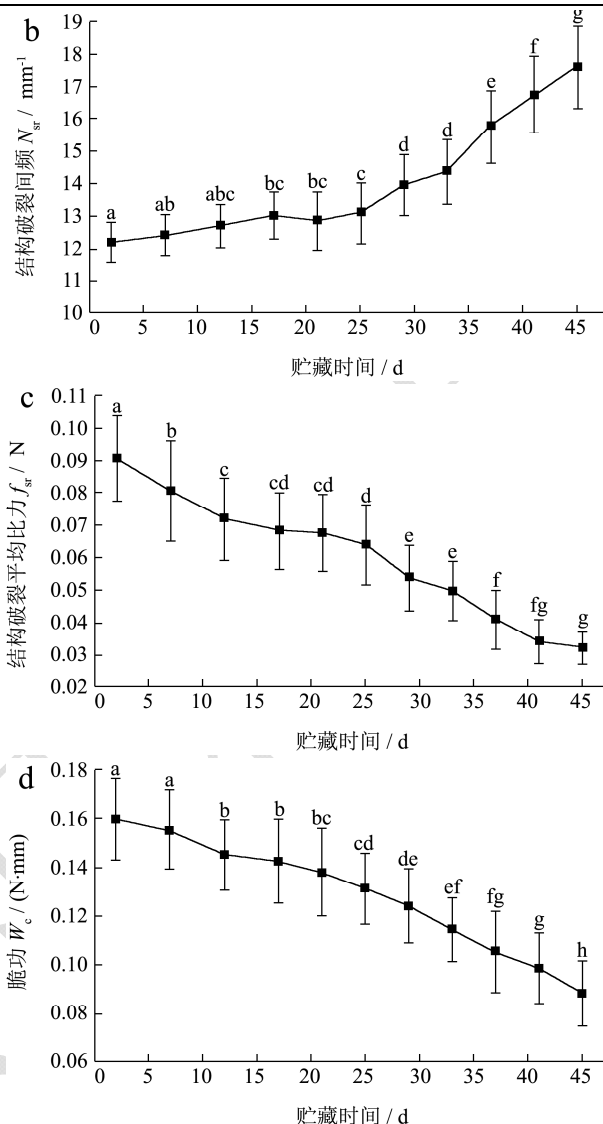
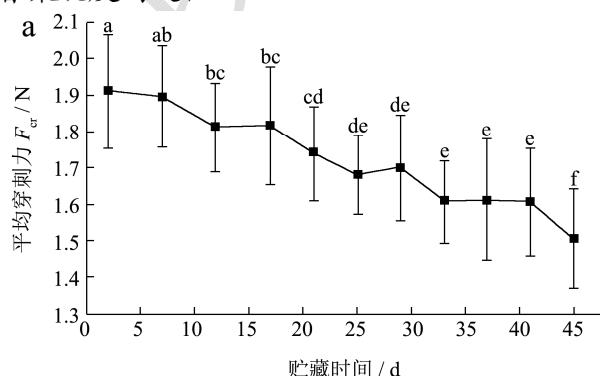


图8 峰值参数随着香梨贮藏时间的变化

Fig.8 Changes of force peak parameters of Korla pear during storage

注: a: 平均穿刺力 F_{st} ; b: 结构破裂空间频率 N_{st} ; c: 结构破裂平均比力 f_{st} ; d: 脆功 W_c 。相同字母代表差异不显著 ($p>0.05$), 不同字母代表差异显著 ($p<0.05$)。

结构破裂空间频率 N_{st} 反映单位穿刺深度内力峰的数量, 随香梨贮藏时间增加脆度下降, 总峰数 n 逐渐增多, N_{st} 随之增大, 因此结构破裂空间频率 N_{st} 呈升高趋势 (见图 8b); 结构破裂平均比力 f_{st} 反映波峰的平均力降 ΔF , 随香梨贮藏时间增加, 力降代数和 $\sum \Delta F$ 逐渐减小而波峰数量逐渐增加, 因此波峰的平均力降 ΔF 逐渐减小, 结构破裂平均比力 f_{st} 呈减小趋势 (见图 8c); 脆功 W_c 反映平均到每个波峰的曲线下面积 S , 随香梨贮藏时间增加, 曲线下面积 S 逐渐减小而总峰数 n 逐渐增多, 因此脆功 W_c 呈减小趋势 (见图 8d)。这表明成熟度越高的香梨受力变形发生组织断裂所需的力和做功都越小。

平均穿刺力 F_{cr} 反映了单位穿刺深度内力-变形曲线下的面积大小,由图 8a 可以看出,随贮藏时间增加而香梨脆度下降,平均穿刺力 F_{cr} 呈减小趋势,但总体下降趋势不是很明显,有两个贮藏时间段, F_{cr} 值的变化不显著。与之相比,尽管脆功 W_c 也与穿刺力-变形曲线下的面积有关,但却直接反映了穿刺过程果肉组织多次断裂总体做功和用力大小,由图 8d 可以看出它随着香梨脆度下降有较快的线性减小趋势,能够更稳定反映香梨脆度变化的规律。如图 8c 所示,结构破裂平均比力 f_{sr} 随着贮藏时间增长也明显减小,表现出与脆功 W_c 较为一致的稳定减小趋势,这与 Hecke 等 (1998) 和 Karkle 等 (2012) 关于膨化食品不同脆度评价分析的结果基本一致^[8,11]。结构破裂空间频率 N_{sr} 反映单位穿刺深度内力峰数量,与 F_{cr} 、 W_c 、 f_{sr} 这 3 个峰值参数值随脆度变化趋势不同,其值随着香梨果肉脆度下降反而增大,但在贮藏前 20 d 缓慢增大,在随后 25 d 发生快速增大。由这 4 个峰值参数随香梨脆度变化的比较分析来看, W_c 、 f_{sr} 、 N_{sr} 这 3 个峰值参数可以较好表征香梨果肉脆度变化,尤其是脆功 W_c 和

结构破裂平均比力 f_{sr} 能够更明显地反映脆度的差异。

2.3 香梨可溶性固形物含量及含水率与其穿

刺力-变形曲线锯齿度度量各参数的相关性

香梨在贮藏时间会继续后熟,在多聚半乳糖醛酸酶与纤维素酶的共同参与下,果肉薄壁细胞中胶层的果胶物质和纤维素逐渐水解,果肉细胞壁中不溶于水的原果胶转变成可溶性果胶,果肉中可溶性固形物含量逐渐增多^[17],含水率逐渐下降,这是引起香梨脆性质地变化的理化内因。由表 2 可知,可溶性固形物含量与香梨果肉穿刺力-变形曲线的锯齿度度量参数均有极其显著相关性,其中与结构破裂平均比力 f_{sr} 的相关系数最高,达到了 -0.927。除锯齿度指数 CI 和平均穿刺力 F_{cr} 与含水率显著相关外,其余锯齿度度量参数与含水率都具有极显著相关性。这进一步表明,香梨果肉穿刺力-变形曲线的锯齿度度量参数与决定其脆度的可溶性固形物含量及含水率的关系都很密切,是有助于实现香梨脆度的有效评价。

表 2 锯齿度度量参数与其他品质指标的相关性系数

项目	CI	F_{cr}/N	N_{sr}/mm^{-1}	f_{sr}/N	$W_c/(N \cdot mm)$
可溶性固形物含量	-0.913**	-0.853**	0.836**	-0.927**	-0.886**
含水率	0.705*	0.665*	-0.758**	0.755**	0.738**

注: **代表极显著相关 ($p < 0.01$), *代表显著相关 ($p < 0.05$)。

2.4 锯齿度度量参数随脆度变化的敏感度分

析

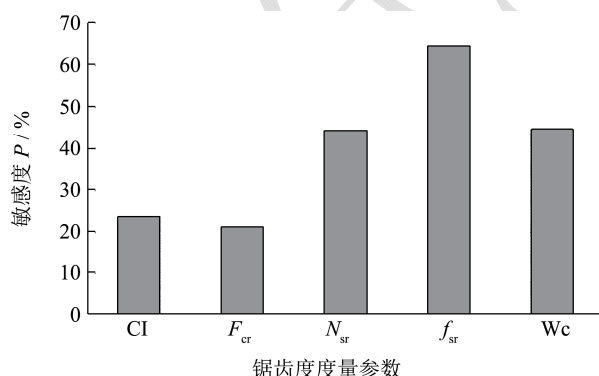


图 9 锯齿度度量参数对香梨果肉脆度的敏感度比较

Fig.9 Comparison of sensitivity of jaggedness parameters for evaluation of the crispness of Korla pear flesh

由图 9 可知,当香梨果肉脆度随贮藏时间逐渐变化时,对于二阶微分法测得的锯齿度度量参数 CI 以及峰值分析法测得的果肉平均穿刺力 F_{cr} 对香梨果肉脆度变化敏感性都较低,其敏感度值都较低,分别为

23.68%和 21.17%。分析原因是,果肉含水率变化对细胞膨压影响较大,直接表现出果肉质地的差异,虽然锯齿度指数 CI 和平均穿刺力 F_{cr} 与含水率都有相关性,但相关系数都较低。相比较而言,峰值分析法测得的结构破裂空间频率 N_{sr} 、脆功 W_c 和结构破裂平均比力 f_{sr} 对果肉脆度变化具有相对较高的敏感性,这也与这 3 个参数与香梨果肉可溶性固形物含量和含水率都具有极显著相关性有密切关系。在这 3 个锯齿度度量参数中, N_{sr} 和 W_c 的脆度敏感度值较为接近,是 CI 和 F_{cr} 2 个参数脆度敏感度值的近 2 倍,分别为 44.39%和 44.71%,而结构破裂平均比力 f_{sr} 对果肉脆度最为敏感,其敏感度值远高于其他参数的脆度敏感度值,达到了 64.5%,这不仅说明结构破裂平均比力 f_{sr} 最适宜评价香梨脆度,而且也充分表明峰值分析法优于二阶微分法。

3 结论

3.1 随着香梨贮藏期的脆度减小,香梨果肉穿刺力-变形曲线的锯齿度度量参数 CI、平均穿刺力 F_{cr} 、结构破裂平均比力 f_{sr} 、脆功 W_c 均呈减小趋势,而香梨果

肉结构破裂空间频率 N_{sr} 则呈增大趋势。

3.2 香梨果肉穿刺力-变形曲线的锯齿度指数 CI 、平均穿刺力 F_{cr} 、结构破裂平均比力 f_{sr} 、脆功 W_c 、结构破裂空间频率 N_{sr} 都与香梨可溶性固形物含量、含水率有相关性, 其中结构破裂平均比力 f_{sr} 、脆功 W_c 、结构破裂空间频率 N_{sr} 与可溶性固形物含量、含水率具有极显著相关性。

3.3 对香梨果肉脆度评价时, 峰值法优于二阶微分法, 其中峰值法测得的结构破裂平均比力 f_{sr} 对脆度敏感度值最高, 远高于其余锯齿度度量参数, 最适宜作为评价香梨果肉脆度的指标。

参考文献

- [1] 李慧民. 化学药剂处理克服库尔勒香梨自交不亲和性及影响香梨品质因素研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2008
LI Hui-min. Studies on overcoming self-incompatibility use chemical treatment and related factors of fruit quality in Korla fragrant pear [D]. Shihezi: Shihezi University, 2008
- [2] 吴洪华. 梨的流变特性及其质地评价研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2005
WU Hong-hua. Studies on rheological properties and texture evaluation of pear [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2005
- [3] Chauvin M A, Younce F, Ross C, et al. Standard scales for crispness, crackliness and crunchiness in dry and wet foods: Relationship with acoustical determinations [J]. Journal of Texture Studies, 2008, 39(4): 345-368
- [4] Paula V, Ana S, Susanam F. Methodological developments in crispness assessment: Effects of cooking method on the crispness of crusted foods [J]. LWT-Food Science and Technology, 2008, 41(7): 1252-1259
- [5] 刘洋. 基于断裂声音信号的胡萝卜质地评价研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016
LIU Yang. Carrot texture evaluation based on fracture acoustic signal [D]. Changchun: Jilin University, 2016
- [6] Mohamed A A A, Jowitt R, Brennan J G. Instrumental and sensory evaluation of crispness: I-In friable foods [J]. Journal of Food Engineering, 1982, 1(1): 55-75
- [7] Peleg M. Do irregular stress-strain relationships of crunchy foods have regular periodicities? [J]. Journal of Texture Studies, 1993, 24(2): 215-227
- [8] Hecke E V, Allaf K, Bouvier J M. Texture and structure of crispy-puffed food products part II: Mechanical properties in puncture [J]. Journal of Texture Studies, 1998, 29(6): 617-632
- [9] Pamies B V, Roudaut G, Dacremont C, et al. Understanding the texture of low moisture cereal products: mechanical and sensory measurements of crispness [J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 2000, 80(11): 1679-1685
- [10] Agbisit R, Alavi S, Cheng E, et al. Relationships between microstructure and mechanical properties of cellular cornstarch extrudates [J]. Journal of Texture Studies, 2007, 38(2): 199-219
- [11] Karkle E L, Alavi S, Dogan H. Cellular architecture and its relationship with mechanical properties in expanded extrudates containing apple pomace [J]. Food Research International, 2012, 46(1): 10-21
- [12] Horie H, Ito H, Ippoushi K, Azuma K, Igarashi I. Evaluation of the physical quality of the mesocarp of cucumber fruit [J]. The Japanese Society for Horticultural Science, 2004, 3(4): 425-428
- [13] Yoshioka Y, Horie H, Sugiyama M, et al. Quantifying cucumber fruit crispness by mechanical measurement [J]. Japanese Journal of Breeding, 2009, 59(2): 139-147
- [14] Shimomura K, Horie H, Sugiyama M, et al. Quantitative evaluation of cucumber fruit texture and shape traits reveals extensive diversity and differentiation [J]. Scientia Horticulturae, 2016, 199: 133-141
- [15] Macrelli E, Romani A, Paganelli R P et al. Piezoelectric transducers for real-time evaluation of fruit firmness. Part I: Theory and development of acoustic techniques [J]. Sensors & Actuators A: Physical, 2013, 201(10): 487-496
- [16] 王艳芳, 叶滔, 刘昊, 等. 不同发育时期苹果果实组织石蜡切片制作探究[J]. 果树学报, 2014, 31(5): 973-976
WANG Yan-fang, YE Zi, LIU Hao, et al. Studies of paraffin section manufacture for apple fruits in different development stages [J]. Journal of Fruit Science, 2014, 31(5): 973-976
- [17] 董建华. 油梨果软化过程中几种酶活性的变化[J]. 热带农业科学, 1989, 4: 81-87
DONG Jian-hua. Changes of several enzyme activities during fruit softening of *Persea americana* mill [J]. Tropical Agricultural Science, 1989, 4: 81-87