

‘华红’苹果果肉的流变特性及其主成分分析

杨 玲, 张彩霞, 康国栋, 田 义, 丛佩华

(中国农业科学院果树研究所/农业部园艺作物种质资源利用重点实验室, 辽宁兴城 125100)

摘要:【目的】研究‘华红’苹果果肉在贮藏期间的流变特性(蠕变、松弛)变化规律,并进行流变特性参数间的相关性分析,用流变学方法预测评价果实质地品质,完善苹果果实品质评价体系。【方法】通过对‘华红’苹果果肉蠕变、松弛特性的研究,分别建立四元件 Burger’s 蠕变模型和三元件 Maxwell 应力松弛模型;分析蠕变、松弛参数随贮藏时间的变化规律,进行蠕变、松弛特性参数之间相关性分析,并利用 SPSS 软件进行蠕变、松弛特性主要参数的主成分分析。【结果】在‘华红’苹果贮藏过程中,蠕变特性参数初始弹性系数 E_1 , 延迟弹性系数 E_2 , 黏性系数 η_1 、 η_2 变化规律基本一致,均呈下降趋势,且这些参数间两两都呈极显著正相关;蠕变量呈缓慢上升趋势,与以上 4 个蠕变特性参数呈极显著负相关;延迟时间 τ 也呈缓慢上升趋势,达到最大硬度时做功呈先升高后降低的趋势,这两个蠕变特性参数和以上 5 个蠕变特性参数相关性较差;松弛特性参数零时弹性模量 E_0 、平衡弹性模量 E_∞ 、衰变弹性模量 E_1 、黏滞系数 η 、硬度、应力和总功变化规律基本一致,呈先下降略有升高后下降的变化趋势,且这 7 个松弛特性参数之间都呈极显著正相关。松弛时间 T 与其他 7 个松弛特性参数变化规律不一致,而且与它们相关性较差。运用主成分分析蠕变、松弛特性参数,第一主成分对 10 个变量指标的提取很充分,贡献率为 88.828%。第一主成分‘流变因子’F1 在贮藏过程中随着果实质地变软、食用品质的下降而呈下降趋势。【结论】‘华红’苹果果肉具有压缩黏弹性力学性质,四元件 Burger’s 模型和三元件 Maxwell 模型可以很好地拟合‘华红’苹果蠕变、松弛模型,可表征‘华红’苹果果肉贮藏期间流变力学特性变化规律,反应果肉质地变化状况。

关键词:‘华红’苹果;果肉;流变特性;应力松弛;蠕变;主成分分析

Rheologic Properties of ‘Huahong’ Apple Pulp and Their Principal Component Analysis

YANG Ling, ZHANG Cai-xia, KANG Guo-dong, TIAN Yi, CONG Pei-hua

(Research Institute of Pomology, Chinese Academy of Agricultural Science/Key Laboratory of Fruit Germplasm Resources Utilization, Ministry of Agriculture, Xingcheng 125100, Liaoning)

Abstract:【Objective】An experiment was carried out to study the changes of rheological properties (including stress relaxation property and creep property) of ‘Huahong’ apple pulp during storage, analyze the correlation among rheological parameters, aiming to predict and evaluate ‘Huahong’ apple fruit quality by rheological method, and also improve the fruit quality evaluation system.【Method】Through an experiment on ‘Huahong’ apple pulp’s creep and relaxation properties, creep models including the four components Burger’s model and the three components Maxwell stress relaxation model were established. The changes of stress relaxation and creep parameters during storage were acquired, and the correlation among these parameters were analyzed. The main stress relaxation and creep parameters were analyzed by Principal Component Analysis (PCA) using SPSS software.【Result】The creep parameters of initial elastic coefficient E_1 , delayed elasticity coefficient E_2 , and viscosity coefficient η_1 and η_2 decreased constantly, and there was a significant positive correlation between each two parameters among these ones. The creep value increased slowly, and the creep was significantly and negatively correlated with the above four creep parameters. The

收稿日期: 2014-12-30; 接受日期: 2015-04-30

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划(2013BAD02B01)、国家自然科学基金(31201602)、现代农业产业技术体系建设专项(CARS-28)

联系方式: 杨玲, Tel: 0429-3598121; E-mail: merry515@163.com. 通信作者丛佩华, Tel: 0429-3598103; E-mail: congph@163.com

delay time τ increased slowly, the maximum hardness of work increased first and then decreased, the values of the two parameters had a poor correlation with the other five creep parameters. The variation of relaxation parameters of the elastic modulus E_0 , balance elastic modulus E_e , the decay modulus E_1 , viscosity factor η , hardness, stress and total work decreased first, and then increased slightly and finally decreased, there was a significant positive correlation among these seven parameters. The relaxation time was not consistent with the above seven relaxation parameters and had a poor correlation with them. The creep and relaxation parameters were analyzed by Principal Components Analysis, extract the first principal component of 10 variables was sufficient, and the contribution rate was 88.828%. The first principal component 'rheological factors' F1 decreased with the fruit texture soft and edible quality decreased during storage. 【Conclusion】 The 'Huahong' apple pulp has compression visco elastic mechanical properties. The four elements Burger's model and Maxwell model could be well fitted the creep and relaxation model of 'Huahong' apple. They could be used as a method to characterize the rheological changes of 'Huahong' apple during storage, and could reflect the change of flesh texture.

Key words: 'Huahong' apple; pulp; rheological properties; stress relaxation; creep; principal components analysis

0 引言

【研究意义】‘华红’苹果果实长圆形，高桩，果面鲜红色，果肉肉质细脆，淡黄色，果实酸甜可口，汁液多，风味浓郁，品质上等，并且较耐贮运，果实商品性好^[1-2]，是中国农业科学院果树研究所选育的极有发展前景的优质中晚熟大果型新品种。但在‘华红’苹果的采后贮藏、保鲜、运输和加工过程中，需要适时检测和掌握果实品质的变化规律。食品流变特性是研究食品在外力作用下产生变形和流动及载荷作用的时效，表示的是“应力-应变-时间”之间的关系。有研究表明^[3]，果实的物理特性决定了食品的美味感觉，而果实的流变特性又决定了果实的物理特性，因而果实的品质和流变特性紧密相关。将流变特性与果实组织结构变化、质地联系起来，从流变学角度测定质地品质，完善苹果果实质地品质的评价体系，对苹果的采后贮藏及运输加工具有重要意义。【前人研究进展】果实在采后贮藏过程中进行各种生理代谢活动，果实的品质和流变特性也在不断的变化，通过流变特性的测定可以把握食品品质的变化规律，同时可以提高果实质地品质的检测效率^[4-5]。农业物料大部分是黏弹性塑体，具有黏性和弹性性质。国内外学者利用黏弹性力学理论建立了相对应的流变学理论。Grzanski等^[6]通过对李子黏弹性力学研究，分别建立了蠕变行为的 Kelvin-Voigt 数学模型和松弛行为的 Maxwell 数学模型。李小昱等^[7-8]、孙骊等^[9]分别根据苹果果实的黏弹性力学性质建立了苹果蠕变及松弛过程的数学模型。流变特性是果实的重要物理特性，与其组织结构和质地品质密切相关，因此流变特性参数可以与果实的硬度、脆性、淀粉含量等质地品质联系起来，达到预测果实贮藏性和果实贮藏期间质地品质的目的，为

其贮藏保鲜、运输、加工提供理论依据。Abbott 等^[10-11]研究建立了苹果、番茄果肉压缩模型参数和果实坚实度关系，陈萃仁等^[12-13]通过以草莓、杨梅果实贮藏过程中流变力学特性参数为变量建立回归方程，预测了草莓、杨梅贮藏条件下的屈服应力，从而成功地预测草莓、杨梅贮藏过程中果实的损伤。Ballabio 等^[14]研究用多元均值分析法分析苹果质构和流变特性参数，预测得到了两个新选育栽培品种的果实品质重要特性—脆性。杨晓清^[15]、王芳^[16]等则分别以河套蜜瓜和西瓜的蠕变特性参数为变量预测了贮藏有效时间和贮藏期间果实的质地品质。Lau^[17]、Alvarez^[18-19]、Rizvi^[20]、Stoneham^[21]等对鲜笋、马铃薯等果蔬热处理过程中流变特性和质地的动力学特性进行了研究，为果蔬的热加工工艺提供指导，同时通过流变学的测定和方程的建立使果实质地品质的预测成为可能。因此研究果实的流变特性可以为果蔬生产的各个环节提供数据支持，还可以用于评价其果实品质，具有很重要的现实意义。【本研究切入点】目前对苹果果实贮藏期间流变特性变化规律的研究报道较少^[7-9]，据报道^[3-5]苹果流变特性与果实生化变化和组织结构等密切相关，而通过苹果流变力学特性变化的测定，可以把握果实的品质变化状况。【拟解决的关键问题】研究新品种‘华红’苹果贮藏期间蠕变、松弛特性的变化规律及运用主成分分析法分析流变特性参数，并预测评价贮藏期间果实质地品质，为苹果果实包装、运输、加工乃至贮藏保鲜的各环节工程分析及品质评价提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

‘华红’苹果果实于 2013 年采自辽宁省葫芦岛市

双树乡果园,于果实9成熟时适时采收,选取大小均匀、成熟度相近的‘华红’苹果果实,随机采摘九成果实140个,置于室温下保鲜袋内(没扎口)贮藏,7次试验共从中选取形状相近、无病虫害的果实70个作为试验果。试验环境温度为 $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$,空气相对湿度为 $65\%\pm 5\%$,果实分别在贮藏0、7、14、21、28、35和42 d时分7次取样测试,松弛、蠕变每次分别随机取样5个果实用于质地参数测定。每个果实先切成两半,分别在果实中部切取 $2\text{ cm}\times 2\text{ cm}\times 2\text{ cm}$ 大小共4块果肉,共重复20次。

1.2 果肉流变分析

快速切取果肉置于质构仪(TMS-PRO,美国FTC公司)平板上,然后利用质构仪(Food Technology Corporation)TMS-PRO直径为75 mm圆形探头对苹果果肉进行蠕变、松弛测试。蠕变测试参数为:测试速度 $60\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 、起始力2 N、设定压力10 N、压缩时间30 s。测定参数为做功、位移、时间、压力。松弛测试参数为测试速度 $60\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 、起始力2 N,形变百分量为3%。测定参数为硬度、做功、应力松弛的力、位移、时间、压力。

1.3 数据处理

用Origin统计软件对蠕变、松弛进行非线性回归方程的曲线拟合,并采用Excel2003进行作图,用SPSS17.0软件进行蠕变、松弛参数相关性分析和主成分分析。

1.3.1 ‘华红’苹果果肉蠕变数学模型 据国内外文献报道^[22-23],农业物料的蠕变特性一般可以用伯格斯模型(Burger's Model)表示。它主要由弹性元件、黏性元件和开尔文模型串联而成,可以用来描述黏弹性物质的性质。根据本试验的蠕变特性曲线和所测定的试验数据,苹果的蠕变加载过程选用四元件Burger's模型描述。

加载过程变形 $D(t)$ 随时间 t 变化公式为

$$D(t)=F_0/E_1+F_0\cdot t/\eta_1+F_0\cdot [1-\exp(-t/\tau)]/E_2$$

式中, $D(t)$:变形量(mm); F_0 :定载荷(N); E_1 、 E_2 :弹性系数($\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$); τ :延迟时间(s); $\tau=\eta_2/E_2$; η_1 、 η_2 :黏性系数($\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{mm}^{-1}$); t :时间(s)。

通过以上四元件伯格斯模型(Burger's Model)方程对试验数据进行非线性回归分析(Non-linear Regression Analysis),由统计软件Origin通过换算和计算求得参数常量初始弹性系数 E_1 、延迟弹性系数 E_2 、延迟时间 τ 、黏性系数 η_1 、黏性系数 η_2 ,拟合方程决定系数均在0.991以上,进而确定苹果蠕变模型

的参数指标。

1.3.2 ‘华红’苹果果肉松弛数学模型 据国内外文献报道^[11,24-27],能分析反映应力松弛曲线的方法有4种,根据本试验的松弛特性曲线和试验数据的拟合,选用三参数的广义Maxwell模型进行数学模型的非线性回归分析(Non-linear Regression Analysis)的曲线拟合。模型方程为:

$$E(t)=E_e+E_1\exp(-t/T)$$

式中, $E(t)$:任意时刻瞬时弹性模量(MPa); E_1 :衰变弹性模量(MPa); E_e :平衡弹性模量(MPa); T :应力松弛时间, $T=\eta/E_1(\text{s})$ 。

在 $t=0$ 时,由上式可得零时弹性模量:

$$E_0=E(t=0)=E_1+E_e$$

通过模型方程对试验数据进行非线性回归分析,由统计软件Origin求出参数常量 E_1 、 E_e 、 E_0 、 T 、 η ,拟合方程决定系数均在0.952以上,进而确定苹果应力松弛特性模型参数。

2 结果

2.1 ‘华红’苹果果肉贮藏期间流变特性变化规律

2.1.1 ‘华红’苹果果肉蠕变特性变化规律 由图1可知,蠕变参数初始弹性系数 E_1 和延迟弹性系数 E_2 变化趋势基本一致,在贮藏过程中变化明显且都呈下降趋势;42 d时分别下降为0 d时的43.47%和50.21%,黏性系数 η_1 、 η_2 均代表果实的黏性,两者受力后都会产生缓慢的变形,黏性系数越大,表明果肉细胞细胞液的流动性差,黏滞阻力大,受力传递速率减弱,受力变形减小。黏性 η_1 和黏性 η_2 两者对蠕变过程中变形的影响不同,由图1可以看出,黏性系数 η_1 、 η_2 值随着贮藏时间的延长,下降趋势一致且变化明显,42 d时比0 d时分别下降了39.83%和44.18%。说明了在‘华红’苹果贮藏过程中,果实质地变软,弹性和抗力都下降。这也验证了蠕变测试可以用来反映‘华红’苹果的质地变化。

如图1所示,延迟时间 τ 反映受试样品蠕变的缓慢程度,延迟时间 τ 随着贮藏时间的延长而缓慢增加,蠕变时的蠕变速度也越来越慢。它与初始弹性系数 E_1 、延迟弹性系数 E_2 、黏性系数 η_1 、 η_2 变化规律相反。随着贮藏时间延长,果肉蠕变达到最大硬度时的做功在前21 d不断增加,35 d后开始下降。蠕变变形量指在保持外载荷不变时,‘华红’苹果果实随时间变化而发生的流动行为(蠕变)的变形量。随着贮藏时间的延长,加载外力时果肉抵抗外力载荷的能力下降,

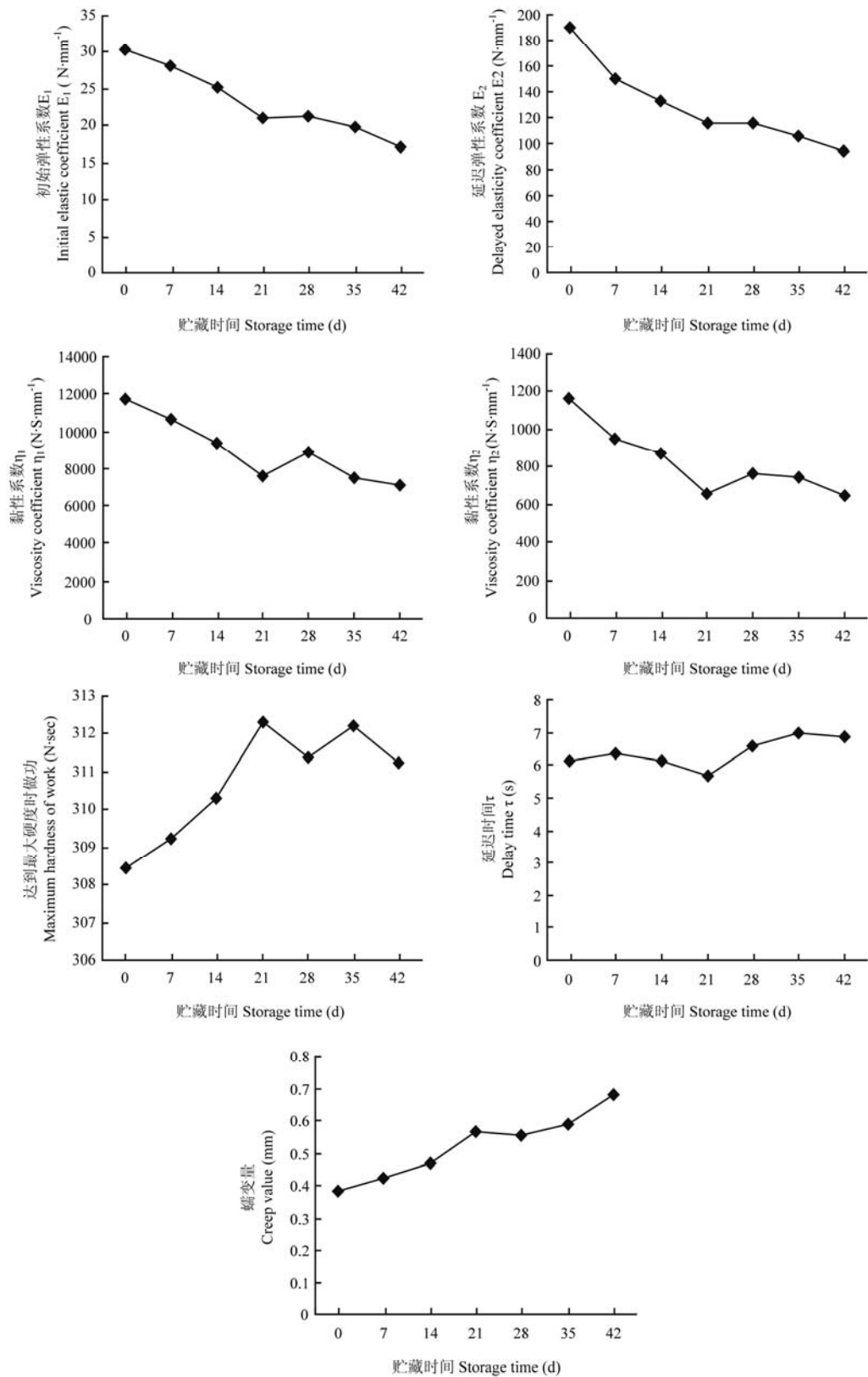


图 1 ‘华红’ 苹果果肉贮藏期间蠕变参数变化趋势

Fig. 1 Trends of creep parameters of ‘Huahong’ apple pulp during storage

果实的黏弹性逐步变差，蠕变量也逐渐增大。蠕变量与初始弹性系数 E_1 、延迟弹性系数 E_2 、黏性系数 η_1 和 η_2 变化规律相反，即蠕变变形量越大，质地越软，初始弹性系数 E_1 、延迟弹性系数 E_2 、黏性系数 η_1 和 η_2 越小。‘华红’苹果果肉的蠕变现象也从客观上反映了果实内部品质的变化。

蠕变指物料在所受力不变时，其应变随时间达到平衡的特性。由表 1 可知，蠕变参数初始弹性系数 E_1 与延迟弹性系数 E_2 呈极显著正相关，说明苹果果实具有弹性固体的特性，黏性系数 η_1 、 η_2 和初

始弹性系数 E_1 、延迟弹性系数 E_2 都呈极显著正相关，说明苹果果实具有液体的性质。延迟时间 τ 与黏性系数 η 、弹性系数 E 呈负相关，但不显著，说明在恒定载荷作用下苹果果实应变达到平衡所需时间在一定程度上受其他 4 个参数影响。蠕变量与初始弹性系数 E_1 、延迟弹性系数 E_2 、黏性系数 η_1 、 η_2 呈极显著负相关，说明蠕变量越大，初始弹性系数 E_1 、延迟弹性系数 E_2 、黏性系数 η_1 、 η_2 越小。也从侧面反映了‘华红’苹果贮藏期间果肉弹性与黏性的变化。

表 1 蠕变各指标之间相关性分析

Table 1 Correlation analysis of indexes of creep tests

因素 Factors	E_1	E_2	τ	η_1	η_2	达到最大硬度时做功 Maximum hardness of work	蠕变量 Creep value
E_1	1						
E_2	0.964**	1					
τ	-0.445	-0.463	1				
η_1	0.973**	0.960**	-0.343	1			
η_2	0.946**	0.971**	-0.240	0.966**	1		
达到最大硬度时做功 Maximum hardness of work	0.206	-0.325	0.162	-0.296	-0.294	1	
蠕变量 Creep value	-0.988**	-0.934**	0.451	-0.953**	-0.914**	0.125	1

**表示在 0.01 水平（双侧）上显著相关； ** indicates significance at 0.01

2.1.2 ‘华红’苹果果肉松弛特性变化规律 应力松弛试验是研究物体材料黏弹性质的重要方法。由图 2 可知，反映果实坚实度的硬度、应力和总功随贮藏时间的延长，0—7 d 变化较为平缓，这与胡小松等^[28]研究果实在呼吸跃变前后果实保持较高硬度相吻合；在 7—14 d 时下降较快，这可能是由于苹果属于呼吸跃变型果实^[29-31]，‘华红’苹果采后呼吸强度和乙烯释放量处于较高水平，在呼吸高峰结束时，硬度、应力和总功等下降较快，14—21 d 时有一定回升，21 d 后可能由于呼吸强度波动和不断增加的乙烯释放量，造成硬度、应力、总功下降较快。

弹性模量 E 一般反映试验物料的弹性性能，它的大小直接反映了其松弛的难易程度，由图 2 可知，平衡弹性模量 E_e 、衰变弹性模量 E_1 、零时弹性模量 E_0 变化趋势基本相同，随着贮藏时间的延长，在 14 d 时下降幅度较大，在 21 d 时，有一定回升，但仍小于 0 d 时的值，此后三者均开始大幅下降，三者 42 d 时比 0 d 时分别下降了 62.27%、53.41%和 70.67%。这 3 个指

标与果肉硬度、应力和总功变化规律相似，充分说明了弹性模量与果实质地逐渐变软紧密相关，说明应力松弛试验可以反映‘华红’苹果质地品质。黏滞系数反映了物料的黏性，随着‘华红’苹果贮藏时间的延长，在 21 d 时有大幅下降，21—35 d 稍有回升，42 d 时有所下降。42 d 时比 0 d 下降了 38.54%。松弛时间是黏性和弹性共同作用的结果，反映了阻尼系数与弹性模量 E 的比值。比值越小，‘华红’果肉表现出较强的弹性和相对较弱的黏性；比值越大，表现出较强的黏性和相对较弱的弹性。松弛时间与其他参数变化趋势不同，松弛时间在 7—14 d 时下降较快，‘华红’果肉表现出较强的弹性；此后持续到 35 d 变化不大，42 d 时有所回升，说明此时‘华红’果肉表现出较强的黏性。

由表 2 可以看出，零时弹性模量 E_0 与平衡弹性模量 E_e 呈极显著正相关，这说明加载至常变形量时物料内部产生的初始应力越大，在应力松弛过程达到平衡后残余的平衡应力越大；零时弹性模量 E_0 与衰变弹

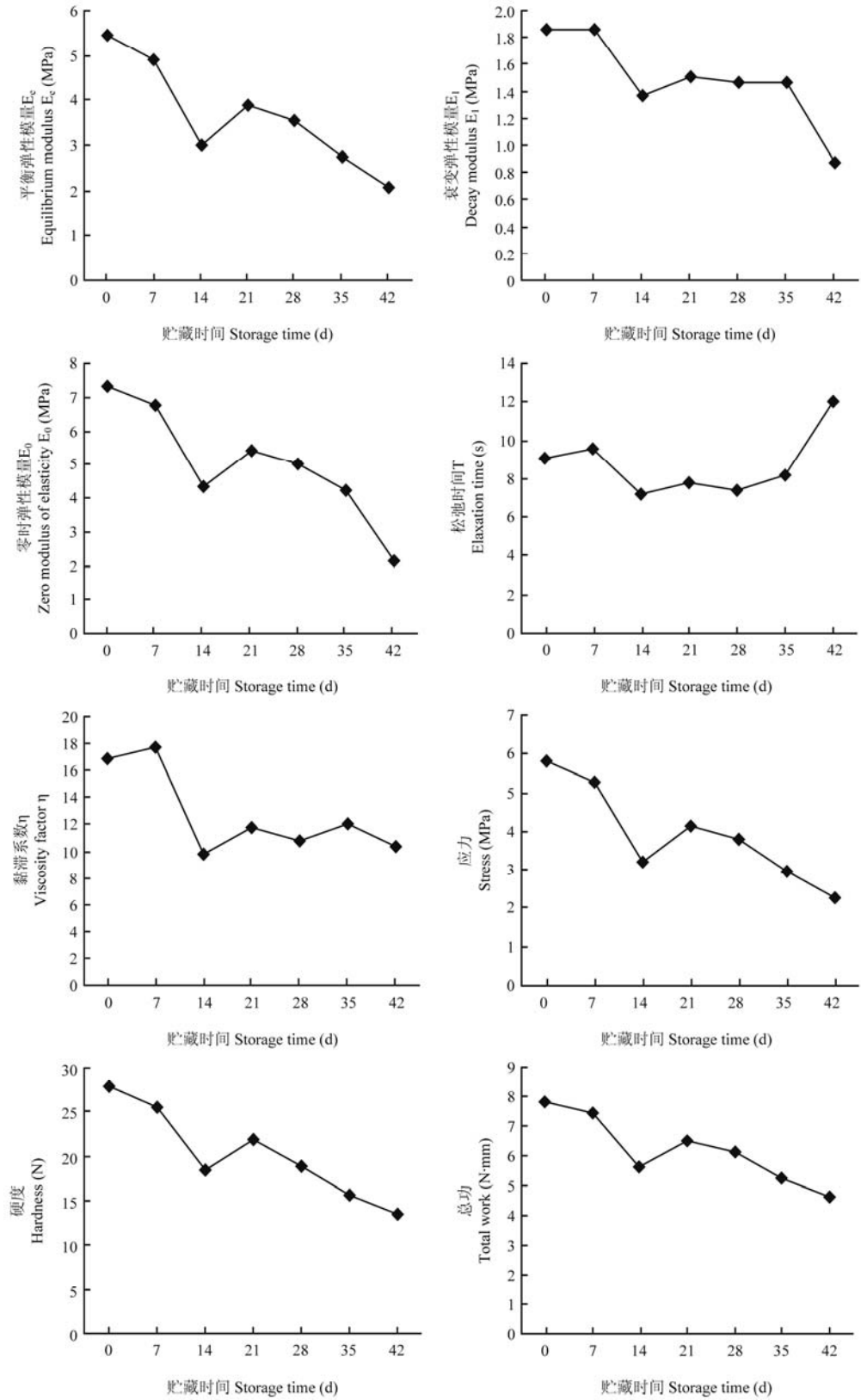


图 2 ‘华红’ 苹果果肉贮藏期间松弛参数变化趋势

Fig. 2 Trends of relaxation parameters of ‘Huahong’ apple pulp during storage

表 2 松弛各指标之间的相关性分析

Table 2 Correlation analysis of indexes of compression-relaxation

因素 Factors	E_c	E_1	E_0	T	η	硬度 Hardness	总功 Total work	应力 Stress
E_c	1							
E_1	0.916**	1						
E_0	0.978**	0.974**	1					
T	-0.178	-0.411	0.351	1				
η	0.863*	0.815*	0.819*	0.192	1			
硬度 Hardness	1	0.915**	0.976**	-0.161	0.874*	1		
总功 Total work	0.991**	0.899**	0.967**	-0.186	0.842*	0.991**	1	
应力 Stress	0.998**	0.911**	0.977**	-0.197	0.846*	0.997**	0.993**	1

** 表示在 0.01 水平（双侧）上显著相关；* 表示在 0.05 水平（双侧）上显著相关

** indicates significance at 0.01; * indicates significance at 0.05

性模量 E_1 呈极显著正相关，说明零时弹性模量越大，松弛过程衰减的越多；平衡弹性模量 E_c 与衰变弹性模量 E_1 呈极显著正相关，说明应力松弛达到平衡后残余的平衡应力越大，松弛衰减的越多。以上 3 个参数两两之间呈极显著正相关也说明了‘华红’苹果果肉具有弹性固体的特性。黏性系数 η 与平衡弹性模量 E_c 、衰变弹性模量 E_1 和零时弹性模量 E_0 呈极显著正相关，说明‘华红’苹果果肉同时也具有液体的特性。果实硬度与松弛总功、变形量呈极显著正相关，而且硬度、总功、蠕变量分别与平衡弹性模量 E_c 、衰变弹性模量 E_1 和零时弹性模量 E_0 呈极显著正相关，与黏性系数呈显著正相关，说明果实硬度越大，松弛所做的压缩功和变形量越大，平衡弹性模量 E_c 、衰变弹性模量 E_1 和零时弹性模量 E_0 也越大，松弛特性各参数可以间接地表明‘华红’苹果果实的质地品质变

化。松弛时间 T 与平衡弹性模量 E_c 、衰变弹性模量 E_1 、零时弹性模量 E_0 、硬度、总功、蠕变量没有显著相关性。

2.2 ‘华红’苹果果肉流变特性参数的主成分分析

对测定的初始弹性系数 E_1 、延迟弹性系数 E_2 、黏性系数 η_1 、黏性系数 η_2 、蠕变量、平衡弹性模量 E_c 、衰变弹性模量 E_1 、零时弹性模量 E_0 、黏滞系数 η 、硬度 10 个指标用 SPSS 软件进行主成分分析（表 3、表 4），由表 3 得出主成分及方差贡献率，第一主成分特征根 8.883，贡献率达到 88.828%，说明这 10 个主成分只需要提取第一个主成分即可。

由表 4 可以看出，第一主成分对 10 个变量指标的信息都提取得很充分。得分系数则反映了各个变量对主成分的影响程度，通过得分系数可以将主成分表示为各个变量的线性组合，由表中的得分系数，可以将

表 3 主成分列表及方差贡献率

Table 3 List of principle components, percentage of variance, cumulative percentage

主成分 Component	特征根 Total	变异贡献率 Percentage of Variance	累积贡献率 Cumulative percentage
1	8.883	88.828	88.828
2	0.603	6.028	94.856
3	0.278	2.781	97.638
4	0.139	1.390	99.028
5	0.063	0.629	99.656
6	0.034	0.344	100.000
7	1.347E-16	1.347E-15	100.000
8	9.770E-18	9.770E-17	100.000
9	-8.685E-17	-8.685E-16	100.000
10	-2.734E-16	-2.734E-15	100.000

表 4 因子负荷矩阵和得分系数矩阵

Table 4 Component matrix and score coefficient matrix

指标变量 Index variable	因子负荷 Factor loading	得分系数 Score coefficient
初始弹性系数 E_1 Initial elastic coefficient E_1	0.971	0.109
延迟弹性系数 E_2 Delayed elasticity coefficient E_2	0.961	0.108
黏性系数 η_1 Viscosity coefficient η_1	0.954	0.107
黏性系数 η_2 Viscosity coefficient η_2	0.921	0.104
蠕变量 Creep value	0.959	-0.108
平衡弹性模量 E_e The equilibrium modulus E_e	0.959	0.108
衰变弹性模量 E_1 The decay modulus E_1	0.917	0.103
零时弹性模量 E_0 Zero modulus of elasticity E_0	0.953	0.107
黏滞系数 η Viscosity factor η	0.860	0.097
硬度 Hardness	0.963	0.108

提取的第一主成分表示为:

第一主成分 $Z_1=0.109Z$ (初始弹性系数 E_1) + 0.108 Z (延迟弹性系数 E_2) + 0.107 Z (黏性系数 η_1) + 0.104 Z (黏性系数 η_2) -0.108 Z (蠕变量) + 0.108 Z (平衡弹性模量 E_e) + 0.103 Z (衰变弹性模量 E_1) + 0.107 Z (零时弹性模量 E_0) + 0.097 Z (黏滞系数 η) + 0.108 Z (硬度)

如图 3 所示,果实的‘流变因子’F1 随着贮藏时间的延长呈下降趋势,在前 14 d,‘流变因子’下降速度较快,14 d 后,下降速度开始减慢,但也呈下降趋势,此时‘华红’苹果果实质地变软,食用品质也大大降低了。

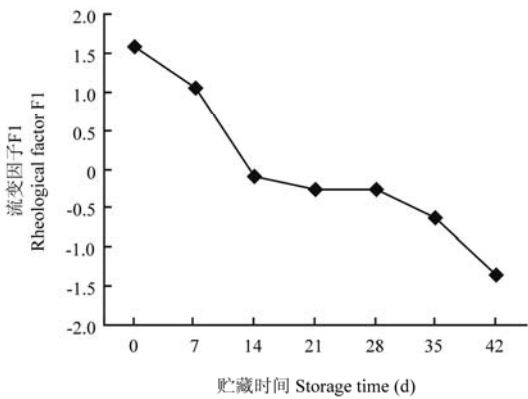


图 3 ‘华红’苹果果肉在贮藏期间“流变因子”F1 的变化趋势

Fig. 3 Trends of ‘rheological factorF1’ of ‘Huahong’ apple pulp during storage

3 讨论

植物细胞中的细胞质使生物体具有流变特性,细胞液作用于细胞壁产生膨压,它与细胞壁的弹性结合起来构成了生物组织黏弹特性。所以黏弹特性是物体本身固有特性^[32-35]。‘华红’苹果蠕变、松弛特性应力随时间变化规律研究表明:‘华红’苹果果肉具有良好的压缩黏弹性力学性质,属于黏弹性材料。‘华红’苹果果肉蠕变参数初始弹性系数 E_1 、延迟弹性系数 E_2 和黏性系数 η_1 、黏性系数 η_2 在贮藏过程中都呈下降趋势,这与吴洪华等^[36]研究梨贮藏期间三参数变化趋势相似。而与桃^[37]的蠕变参数在 6—12d 后有大幅升高,甚至高于 0d 时参数值,而后又大幅下降的波状变化趋势稍有差别,这可能是由于桃^[37]具有两个呼吸高峰和乙烯释放高峰,而苹果在采后贮藏过程中只有一个呼吸高峰和乙烯释放量高峰造成的。‘华红’苹果果肉松弛参数平衡弹性模量 E_e 、衰变弹性模量 E_1 、黏滞系数 η 随着贮藏时间延长而降低,这与陆秋君等^[24]研究番茄应力松弛三参数变化规律相似。本研究松弛时间 T 先大幅下降后变化平缓并在 28 d 后有所升高,与桃^[37]、番茄^[24]等的松弛时间变化趋势不同,这可能与‘华红’苹果果肉在贮藏后期表现出特有的黏性有关,其相关性有待进一步研究。以上综合说明了‘华红’苹果蠕变、松弛的变化趋势与果实贮藏过程中质地变软,弹性和抗力下降是同步的。

相关研究表明^[3-5],影响流变力学性质的因素有食品的化学成分、分子间和分子内结合力以及组织结构等。苹果在采后贮藏过程中进行着各种生理代谢活动,

果肉细胞结构随之发生变化, 苹果果肉细胞间隙不断增大, 微纤维丝间果胶和纤维素物质溶解, 细胞壁变薄, 细胞变圆且趋于分散, 从而引起细胞液渗流和果胶质的变化, 使果实细胞膨压降低, 果肉的黏弹性降低, 果肉质地变软^[38-40]。本试验中蠕变参数随着‘华红’贮藏过程中果实质地的变软而逐渐增大; 同时果实硬度下降, 松弛所需应力和总功也都呈下降趋势, 综合以上可以看出果实在贮藏过程中蠕变、松弛参数的变化与果实内部组织状态和微观结构紧密相关, 其相关性有待进一步研究。

由表 1 和表 2 可以看出, 蠕变参数之间、松弛参数之间相关性较高, 可能会有共线性问题, 起支配作用。本试验选用主成分分析将蠕变、松弛参数多个变量综合为 10 个指标, 最终用提取的第一主成分来描述‘华红’苹果果肉在贮藏过程中的流变特性变化规律, ‘华红’苹果‘流变因子’F1 随着贮藏时间的延长呈下降趋势, 这与吴洪华^[36]研究梨在贮藏期的‘流变因子’的变化趋势相似。因此, ‘流变因子’能够反映‘华红’苹果果实贮藏期的质地品质变化。

4 结论

通过对‘华红’苹果果肉蠕变、松弛压缩试验, 建立了松弛三元件 Maxwell 模型和蠕变四元件 Burger's 模型。‘华红’苹果果肉流变参数的变化间接地反映了其贮藏期间质地品质的变化, 可以为快速无损检测苹果果肉品质提供理论依据。

References

- [1] 满书铎, 牛健哲, 丛佩华, 秦贺兰. 苹果晚熟新品种“华红”的选育. 中国果树, 1999(1): 13-14.
Man S D, Niu J Z, Cong P H, Qin H L. Breeding of late maturing varieties of ‘Huahong’ apple. *China fruits*, 1999(1): 13-14. (in Chinese)
- [2] 贾晓辉, 夏玉静, 王文辉, 佟伟, 姜云, 王志华. 采收成熟度结合 1-MCP 对苹果采后品质和生理效应的影响. 中国食品学报, 2014, 14(8): 197-203.
Jia X H, Xia Y J, Wang W H, Tong W, Jiang Y, Wang Z H. Effects of harvest maturity combined with 1-MCP on quality of postharvest apple and physiological. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2014, 14(8): 197-203. (in Chinese)
- [3] 周宇英, 唐伟强. 食品流变特性研究的进展. 粮油加工与食品机械, 2001, 8: 7-9.
Zhou Y Y, Tang W Q. Progress in the study of rheological properties of food. *Food and Machinery*, 2001, 8: 7-9. (in Chinese)
- [4] 李瀚茹, 潘君拯. 农业流变学导论. 北京: 中国农业出版社, 1990.
Li H R, Pan J C. *Introduction to Agricultural Rheology*. Beijing: China Agriculture Press, 1990. (in Chinese)
- [5] 李里特. 食品物性学. 北京: 中国农业出版社, 2001.
Li L T. *Physical Properties of Foods*. Beijing: Chinese Agricultural Press, 2001. (in Chinese)
- [6] Grzemska P, Bohdziewicz J. Rheological properties of fruit of the selected cultivars of plum. *Inżynieria Rolnicza*, 2012, 137(2): 45-55.
- [7] 李小昱, 王为, 孙骊, 冯国华. 苹果流变特性的研究 I 蠕变特性的试验与研究. 西北农业大学学报, 1991, 19(3): 70-74.
Li X Y, Wang W, Sun L, Feng G H. A study on rheological characteristics of apple I. testing creep properties. *Acta University Agricultural Borcali-occidentalis*, 1991, 19(3): 70-74. (in Chinese)
- [8] 李小昱, 王为, 孙骊, 冯国华. 苹果流变特性的研究 II. 松弛特性的试验与研究. 西北农业大学学报, 1991, 19(4): 103-106.
Li X Y, Wang W, Sun L, Feng G H. A study on rheological characteristics of apple II. Experiments of apple relaxation properties. *Acta University Agricultural Borcali-occidentalis*, 1991, 19(4): 103-106. (in Chinese)
- [9] 孙骊, 鞠建伟, 吴克爽, 仇农学. 苹果贮存的接触面积和蠕变特性. 西北农业大学学报, 1996, 24(1): 104-106.
Sun L, Ju J W, Wu J S, Qiu N X. The contact area and the creep properties of apple storage. *The Journal of Northwest Agriculture University*, 1996, 24(1): 104-106. (in Chinese)
- [10] Abbott J A, Affeldt H A, Li L D. Firmness measurement of stored ‘delicious’ apples by sensory method, Mangess-Taylor, and sonic propagation. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 1992, 117(4): 590.
- [11] Wu T X, Abbot J A. Firmness and force relaxation characteristics of tomatoes stored intact or as slices. *Postharvest Biology and Technology*, 2002, 24: 59-68.
- [12] 陈萃仁, 应铁进, 朱宇平, 钱冬梅. 草莓果实的流变特性及其在贮藏过程中的变化规律. 浙江农业大学学报, 1994, 20(2): 160-164.
Chen C R, Ying T J, Zhu Y P, Qing D M. Study on rheologic properties of the strawberry flesh and their changes during storage. *Journal of Zhe-jiang Agricultural University*, 1994, 20(2): 160-164. (in Chinese)
- [13] 陈萃仁, 应铁进, 钱冬梅. 杨梅果实的力学特性及其贮藏过程中变化规律的试验研究. 食品科学, 1994, 10: 56-60.
Chen C R, Ying T J, Qian D M. Experimental study on mechanical characteristics and changes of Chinese bayberry fruit during storage. *Food Science*, 1994, 10: 56-60. (in Chinese)

- [14] Ballabio D, Consonni V, Costa F. Relationships between apple texture and rheological parameters by means of multivariate analysis. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2012, 111(1): 28-33.
- [15] 杨晓清. 河套蜜瓜流变特性及储运损伤控制的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2006.
- Yang X Q. The rheological properties of melon and transportation damage control[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2006. (in Chinese)
- [16] 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.
- Wang F. Study on compression and creep characteristics of watermelon[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2008. (in Chinese)
- [17] Dijkink B H, Langelaan H C. Milling properties of peas in relation to texture analysis. Part II effect of pea genotype. *Journal of Food Engineering*, 2002, 51: 105-111.
- [18] Lau M H, Tang J, Swanson B G. Kinetics of textural and color changes in green asparagus during thermal treatments. *Journal of Food Engineering*, 2001, 45: 231-236.
- [19] Alvarez M D, Canet W L. A comparison of various the rheological properties for modeling the kinetics of thermal softening of potato tissue (c v. Monalisa) by water cooking and pressure steaming. *International Journal of Food Science and Technology*, 2002, 37: 41-55.
- [20] Alvarez M D, Canet W, Tortosa M E. Kinetics of thermal softening of potato tissue (cv. Monalisa) by water heating. *Europe Food Research Technology*, 2001, 212(5): 588-596.
- [21] Rizvi A F, Tong C H. Fractional conversion for determining texture degradation kinetics of vegetables. *Journal of Food Science*, 1997, 62(1): 1-6.
- [22] 李小昱, 朱俊平, 王为, 王耀忠. 苹果蠕变特性与静载损伤机理的研究. 西北农业大学学报, 1997, 25(6): 64-68.
- Li X Y, Zhu J P, Wang W, Wang Yao Z. Study on creep properties of apple and static damage mechanism. *Journal of Northwest Agriculture University*, 1997, 25(6): 64-68. (in Chinese)
- [23] Cenkov S, Biclew J, Britton M G. A single kernel creep and recovery test. *Transactions of the ASAE*, 1991, 34(4): 2484-2490.
- [24] 陆秋君, 王俊, 何喜玲. 常温贮藏中番茄应力松弛特性试验. 农业机械学报, 2005, 36(7): 77-88.
- Lu Q J, Wang J, He X L. Experimental study on intact tomato's stress-relaxation during storing at normal temperature. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2005, 36(7): 77-88. (in Chinese)
- [25] Nussinovitch A, Peleg A. A modified maxwell and a nonexponential model for characterization of the stress relaxation of agar and alginate gels. *Journal of Food Science*, 1989, 54(4): 1013-1016.
- [26] Tang J M. Characterization of gellan gels using stress relaxation. *Journal of Food Engineering*, 1998, 38: 279-295.
- [27] Herrero A M. Stress relaxation test for monitoring post mortem textural changes of ice-stored cod. *Journal of Food Science*, 2004, 69(4): 178-182.
- [28] 胡小松, 丁双阳. 桃采后呼吸和乙烯释放规律及多效唑的影响. 北京农业大学学报, 1993, 19: 53-60.
- Hu X S, Ding S Y. The rule of respiration and ethylene release of postharvest peach and the effect of paclobutrazol. *Journal of Beijing Agriculture University*, 1993, 19: 53-60. (in Chinese)
- [29] 张新华, 杨洪强, 李富军. 苹果果实超弱发光、乙烯释放和呼吸跃变对 1-MCP 的响应. 中国食品学报, 2006, 6(2): 63-66.
- Zhang X H, Yang H Q, Li F J. The response of the ultra weak luminescence fruit, ethylene release and respiration climacteric of apple to 1-MCP. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2006, 6(2): 63-66. (in Chinese)
- [30] 唐海波. '红香脆'与'新世界'苹果贮藏期间相关生理指标变化的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2008.
- Tang H B. Study on physiological index change of 'Xinshijie' and 'Hongxiangcui' apple during storage time[D]. Yangling: Northwest Agricultural and Forest University, 2008. (in Chinese)
- [31] 张锋, 龚新明, 马书尚, 张继澍, 关军锋. 1-MCP 和贮藏温度对秦阳苹果采后生理与品质的影响. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2009, 37(10): 115-124.
- Zhang F, Gong X M, Ma S S, Zhang J S, Guan J F. Effect of 1-MCP storage and temperature on the quality and postharvest physiology of Qinyang Apple. *Journal of Northwest A&F University: National Science Edition*, 2009, 37(10): 115-124. (in Chinese)
- [32] 赵学笃, 陈远生, 张守勤. 农业物料学. 北京: 机械工业出版社, 1987: 20-54.
- Zhao X D, Chen Y S, Zhang S Q. *Agricultural Material Science*. Beijing: China Machine Press, 1987: 20-54. (in Chinese)
- [33] 李里特. 食品物性学. 北京: 中国农业出版社, 2001: 235-241.
- Li L T. *Physical Properties of Foods*. Beijing: China Agriculture Press, 2001: 235-241. (in Chinese)
- [34] 黄邦彦, 杨谦. 果蔬采后生理与储藏保鲜. 北京: 中国农业出版社, 1988.
- Huang B Y, Yang Q. *Postharvest Physiology and Storage of Fruits and Vegetables*. Beijing: China Agriculture Press, 1988. (in Chinese)

- [35] 任仲博, 饶景萍. 果品蔬菜储藏运销学. 西安: 陕西科学技术出版社, 1999.
- Ren Z B, Rao J P. *Storage of fruits and vegetables*. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1999. (in Chinese)
- [36] 吴洪华. 梨的流变特性及其质地评价研究[D]. 南京: 江苏大学, 2005.
- Wu H H. Studies on rheological properties and texture evaluation of pear[D]. Nanjing: Jiangsu University, 2005. (in Chinese)
- [37] 何喜玲. 不同预处理对果蔬贮藏中物理机械特性的影响研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- He X L. Studies of different treatments on mechanical property of fruit and vegetables during their storage[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005. (in Chinese)
- [38] 魏建梅. 苹果果实质地品质发育及采后调控的生理和分子基础[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2009.
- Wei J M. Study on physiological and molecular mechanism of fruit texture development and post-harvest regulation of apple [D]. Yangling: Northwest Agricultural and Forest University, 2009. (in Chinese)
- [39] 张鹏龙, 陈复生, 杨宏顺, 李里特, 宫保文, 王留留. 果实成熟软化过程中细胞壁降解研究进展. 食品科技, 2010, 35(11): 62-66.
- Zhang P L, Chen F S, Yang H S, Li L T, Gong B W, Wang L L. Research advances on cell wall disassembly in fruit ripening and softening. *Food Technology*, 2010, 35(11): 62-66. (in Chinese)
- [40] 李宏建, 刘志, 王宏, 徐贵轩, 宋哲, 何明莉, 张春波. 苹果果实组织结构与果实失重率和硬度变化的关系. 果树学报, 2013, 30(5): 753-758.
- Li H J, Liu Z, Wang H, Xu G X, Song Z, He M L, Zhang C B. Study on the relationship between tissue structure and firmness, weight-lose rate of apple. *Journal of Fruit Science*, 2013, 30(5): 753-758. (in Chinese)

(责任编辑 赵伶俐)