

试验研究

DOI: 10.16626/j.cnki.issn1000-8047.2021.04.004

基于流变特性评价 3 个苹果品种果肉质度*

杨 玲, 丛佩华

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

摘 要 研究了 3 个典型不同质地苹果品种‘嘎拉’‘华月’‘富士’果肉流变特性的差异, 以便为果实采后、贮运、加工提供理论依据。采用质构仪 TMS-PRO 对 3 个品种果实质地进行蠕变和应力松弛试验, 建立苹果果实的蠕变特性四元件伯格斯模型 (Burger's Model) 和应力松弛特性三参数的广义 Maxwell 模型, 对蠕变和松弛参数进行了相关性分析和主成分分析。蠕变和松弛参数货架期变化趋势能够区分不同品种果实的流变特性组织结构差异。‘华月’TPA 果肉硬度在货架期较‘嘎拉’和‘富士’下降最多, 蠕变、松弛特性相关的黏性和弹性参数也都下降最快, ‘嘎拉’次之, ‘富士’下降最慢, 这说明了苹果果肉硬度、弹性、黏性呈正相关。通过 3 个苹果品种蠕变、松弛特性参数的相关性分析和主成分分析也反映了苹果果肉流变特性是弹性因子和黏性因子共同作用。研究结果为苹果贮藏、运输和加工提供数据支持和理论依据。

关键词 苹果; 品种; 果肉; 流变特性; 主成分分析

中图分类号: S661.1 文献标志码: A 文章编号: 1000-8047(2021)04-0014-09

Texture and quality evaluation of three apple cultivars based on rheological properties

YANG Ling, CONG Peihua

(Research Institute of Pomology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Horticultural Crops Germplasm Resources Utilization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Xingcheng, Liaoning 125100)

Abstract The creep and stress relaxation of fruit pulp were measured by texture analyzer TMS-PRO using ‘Gala’, ‘Huayue’ and ‘Fuji’. The creep and stress relaxation of fruit pulp of three apple varieties with different storability were tested during shelf life. The fruits of three apple varieties were harvested at 9 ripening time. By establishing a four-element Burger's model and a generalized Maxwell model with three parameters of stress relaxation, the initial elastic coefficient E_1 , delayed elastic coefficient E_2 , delayed time τ , viscous coefficient η_1 , viscous coefficient η_2 , decay elastic modulus E_1' , equilibrium elastic modulus E_e , zero-time elastic modulus E_0 and relaxation of the creep parameters were obtained. Time T , viscous coefficient η , and through correlation analysis and principal component analysis of creep and relaxation parameters. It is proved that the creep and relaxation parameters can reflect and distinguish the rheological properties of different apple varieties and reveal the difference of microstructure in different apple varieties. Compared with ‘Gala’ and ‘Fuji’, the pulp hardness of ‘Huayue’ TPA decreased the most during the shelf life, and the viscosity and elasticity parameters related to creep and relaxation properties also decreased the fastest, followed by ‘Gala’ and ‘Fuji’, which showed that the hardness, elasticity and viscosity of apple pulp were positively correlated. The correlation between the parameters of relaxation and creep characteristics is different. The principal component analysis (PCA) also showed that the rheological properties of apple pulp was an elastic factor and a viscous factor, and the contribution rate was equal. The results provide data support and theoretical basis for apple storage, transportation and processing.

Key words apple; variety; flesh; rheological characteristics; principal component analysis

流变学是研究果蔬在加载力作用下, 根据应力-应变-时间的函数关系来选用相应的数学模型来

本文于 2020-05-18 收到, 2021-02-25 收到修改稿。

*国家现代农业产业技术体系建设专项 (CARS-28); 国家自然科学基金 (31672116); 中国农业科学院科技创新工程项目。

杨玲电话: 0429-3598212, E-mail: merry515@163.com; 丛佩华为通信作者, 电话: 0429-3598103, E-mail: congph@163.com。

描述^[1-3]。流变学是果蔬感官评价的重要内容, 有可能作为果蔬采后品质的主要参考指标。研究表明, 苹果果实是具有生命的黏弹性体, 在其发育期及采后贮藏过程中进行着各种代谢活动, 内在品质和流变特性具有时效性。当果实受到外载荷力时会表现出固有的流变特性, 运用黏弹性理论可以解释贮运中受压延时损伤等一系列问题, 这些力学特性与果实的内在品质和加工、贮藏特性存在一定的内在联系^[4-5]。

果品在采收、贮藏、运输等各个环节中因机械损伤会造成一些果肉的延迟损伤, 从而引起果肉的黏弹性变和质地的改变, 贮运时不同承载条件可使流变参数发生变化。Fridley 等^[6]运用果实的弹性理论, 使用万能压缩机分析平板压头和柱塞压头对果肉的应力分布和损伤情形的差异。冯能莲^[7-8]、李小昱等^[9-11]、庞玉等^[12]对苹果、马铃薯存储堆积做模拟试验, 测试静载损伤的指标, 分别建立蠕变和应力松弛模型, 进行损伤变化规律分析。Tscheuschner 等^[13]、Abbott 等^[14]则对苹果果肉压缩模型和坚实度进行了评价研究。Wu 等^[15]对番茄硬度和应力松弛特性进行了研究。Zhang 等^[16]通过超声波处理的苹果果胶在相同的频率范围内表现出主要的黏性反应。Aregawi 等^[17]对苹果进行多尺度模型解析脱水过程的动力学以及不同微结构室(细胞间空间、细胞壁、膜和细胞质)对水输送和机械变形的重要性。Hou 等^[18]通过对‘富士’‘金冠’‘乔纳金’果实进行渗透和压缩实验, 分析其与苹果宏观结构的关系。在分析这一关系之前, 通过主成分分析, 将显著不同的形态参数在尺寸上进行了缩小, 证明了其可用于区分不同的苹果品种。

果蔬的应力松弛和蠕变是黏弹性体的 2 个典型的流变特性。不同品种同一时期或是同一品种不同时期都会因果实内部组织结构或物质的不同其流变学参数都会存在着差异。本试验测试了成熟期、耐贮性不同的苹果品种‘嘎拉’‘华月’‘富士’的蠕变和应力松弛, 探讨品种间流变特性差异, 以期预防苹果果实采后贮运时的机械损伤、质地品质的客观评价及快速预测、无损检测等方面提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

‘嘎拉’‘华月’‘富士’苹果果实于 2015 年采自辽宁省葫芦岛市双树乡果园, 于九成熟时采收, 在树冠外围随机采摘大小均匀的果实, 每个品种共使用 140 个果实, 置于保鲜袋内(不扎口), 在温度(20±2)℃, 相对湿度 65%±5%下贮藏(货架期), 分别于 0、5、10、15、20、25 d 取样测试, 松弛、蠕变试验每次各随机取 5 个果实。每个果实切成两半, 在中部切取 2 cm×2 cm×2 cm 大小的果肉 4 块, 1 块为 1 次重复, 共重复 20 次。

1.2 试验方法

(1) 果肉流变分析。利用质构仪 TMS-PRO(美国 FTC 公司生产)直径为 75 mm 的圆形探头测试果肉 TPA、蠕变和应力松弛。TPA 测试参数为: 测前速度 60 mm/min, 测试速度 60 mm/min, 起始力 2 N, 果肉形变 10%, 测定参数为果肉硬度。蠕变和应力松弛测试参数参照杨玲等^[19]设定, 蠕变测定参数为位移、时间、压力, 应力松弛测定参数为力、位移、时间。

(2) 果肉蠕变数学模型。根据果肉蠕变特性曲线和所测定的数据, 蠕变加载过程选用四元件 Burger's 模型描述^[20-23]。该模型是由 1 个开尔文体和 1 个麦克斯韦体组成 1 个四元件模型。四元件 Burger's 模型具有瞬时弹性应变的能力, 同时具有黏性流动和延迟弹性, 这种模型是黏弹性理论中最常见的一种(图 1)。

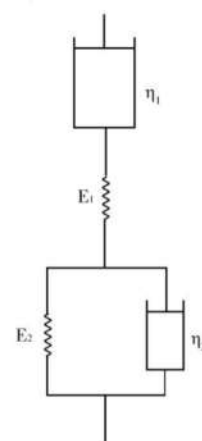


图 1 四元件 Burger's 模型

加载过程变形 $D(t)$ 随时间 t 变化公式为:

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

式中: 变形量 $D(t)$ (mm), 定载荷 F_0 (N), 初始弹性系数 E_1 (N/mm), 延迟弹性系数 E_2 (N/mm), 延迟时间 τ (s), $\tau = \eta_2/E_2$, 黏性系数 η_1 、

η_2 ($N \cdot s \cdot mm^{-1}$), 时间 t (s)。通过四元件伯格斯模型 (Burger's Model) 方程对试验数据由统计软件 SPSS 进行非线性回归分析 (Non-linear Regression Analysis), 通过换算和计算求得各参数, 拟合方程决定系数均在 0.968 以上。

(3) 果肉应力松弛数学模型。根据本试验的松弛特性曲线^[2,24-26], 选用三参数的广义 Maxwell 模型, 由统计软件 SPSS 进行非线性回归分析 (Non-linear Regression Analysis) 的曲线拟合。一般麦克斯韦模型由麦克斯韦模型和 1 个平行的弹簧元件组成, 每个麦克斯韦模型元件包含 1 个弹簧和 1 个阻尼器 (图 2)。

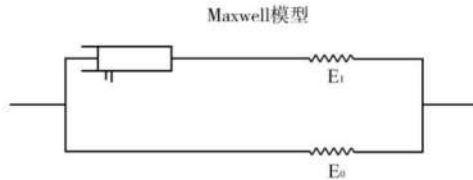


图 2 三元件的 Maxwell 模型

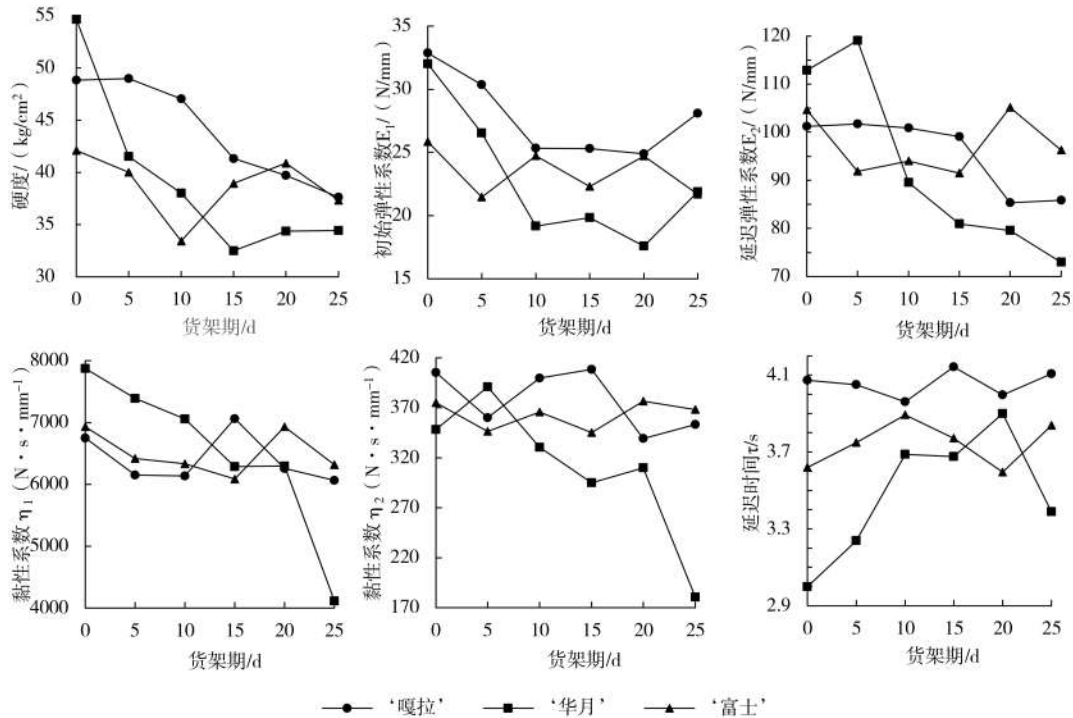


图 3 3 个苹果品种货架期果肉蠕变参数的变化趋势

苹果果肉蠕变模型是典型的四元件伯格斯模型, 初始弹性系数 E_1 即瞬时弹性, 代表了果肉弹性的一部分, 蠕变过程, 受到加载力的瞬间, 瞬时弹性即发挥作用, 产生弹性变形^[21]。0 d 时, '华月'

模型方程为:

$$E(t) = E_e + E_i' \exp(-t/T)$$

式中, 任意时刻瞬时弹性模量 $E(t)$ (mPa), 衰变弹性模量 E_i' (MPa), 平衡弹性模量 E_e (MPa), 应力松弛时间 T , $T = \eta/E_i'$ (s); 阻尼体黏滞系数 ($N \times s/mm$) $\eta = T \times E_i'$ 。在 $t=0$ 时, 零时弹性模量 $E_0 = E(t=0) = E_i' + E_e$ 。由统计软件 SPSS 对试验数据进行非线性回归分析, 求出参数常量 E_i' 、 E_e 、 E_0 、 T 、 η , 拟合方程决定系数均在 0.934 以上。

2 结果与分析

2.1 3 个苹果品种果实货架期流变特性参数变化趋势

2.1.1 蠕变特性参数的变化

据 TPA 测试结果, 0 d, '华月' 果肉硬度最高, 为 54.65 N, '嘎拉' 次之, 为 48.84 N, '富士' 为 42.10 N。在货架期, '华月' 果肉硬度下降最快, 相比 0 d, 25 d 后下降了 36.97%, '嘎拉' 下降了 22.97%, '富士' 仅下降了 11.36% (图 3)。

和 '嘎拉' 初始弹性系数差别不大, 分别为 32.01 N/mm 和 32.88 N/mm, '富士' 最小, 为 25.85 N/mm。'嘎拉' 初始弹性系数 E_1 大体呈下降趋势, 到 20 d 时下降了 24.31%; '华月' 变化趋势和 '嘎拉' 相

似, 到 20 d 时下降了 45.03%, 在 25 d 时稍有升高, 这可能是由于早熟苹果品种不耐贮, 货架期不溶性淀粉、果胶、纤维素等物质降解变成可溶性, 细胞膨压发生变化, 导致果肉细胞抗弹性的能力有所增加; 而耐贮的‘富士’下降幅度较小。这说明初始弹性系数即加力瞬间弹性与果肉硬度呈正相关。延迟弹性系数 E_2 反映了果肉在蠕变过程中弹性变化的缓慢程度。货架期 0 d, ‘华月’ E_2 高于 ‘嘎拉’ ‘富士’, 果肉细胞弹性最好。在货架期, ‘嘎拉’ ‘华月’ E_2 呈逐渐下降趋势, 25 d 比 0 d 分别下降了 15.14% 和 35.31%, 而 ‘富士’ E_2 则呈缓慢降低趋势, 下降了 8.0% (图 3)。

随着蠕变加载时间的延长, 果肉产生黏性流动变形, 其中一部分是由麦克斯韦体内的独立黏性产生的变形, 卸载后变形不能恢复, 也就是黏性系数。‘华月’ ‘嘎拉’ η_1 在货架期 25 d 分别下降了 47.72% 和 10.15%, ‘富士’ η_1 下降了 8.87%。另一部分变形是开尔文体内的黏性与延迟弹性共同作用, 此部分变形黏性系数 η_2 与延迟弹性系数 E_2 相互制约。在 0 d 时, ‘嘎拉’ η_2 最大, 为 405.16 N/mm, ‘富士’ 次之, 为 375.03 N/mm, ‘华月’ 最小, 为 348.34 N/mm。在货架期 25 d, ‘华月’ η_2 大幅下降, ‘嘎拉’ ‘富士’ 缓慢下降。延迟时间 τ 则反映受试

样品蠕变的快慢程度, ‘华月’ ‘富士’ τ 都有不同程度的升高, ‘嘎拉’ τ 变化不大。在货架期, ‘华月’ 蠕变量明显增大, ‘嘎拉’ 和 ‘富士’ 没有明显的变化 (图 3)。

2.1.2 应力松弛特性参数的变化

应力松弛是在线性黏弹性范围内的小变形试验, 不使应试物果蔬产生机械损伤, 能够反映其细胞的微观结构特征^[2,25-26]。在应力松弛试验时, 果肉突然应变到一定程度并保持恒定变形量, 获得初始应力载荷 σ_0 , 之后逐渐衰减至平衡应力 σ_e , 初始应力与平衡应力的差值称为衰变应力 σ_1 ($\sigma_1 = \sigma_0 - \sigma_e$), 对应的应力松弛模型上的弹性模量称为衰变弹性模量 E_1 ^[21]。从图 4 可以看出, 0 d 时, ‘嘎拉’ E_1 最大, 为 3.59 mPa; ‘华月’ 次之, 为 3.03 mPa; ‘富士’ 最小, 为 2.87 mPa, 说明 ‘嘎拉’ 衰变应力值即初始应力与平衡应力差值最大, ‘富士’ 则最小。在货架期 25 d 时, ‘华月’ E_1 下降了 39.18%, ‘嘎拉’ 下降了 18.23%, ‘富士’ 下降了 16.74%。这也与 TPA 果肉硬度的下降值相对应, 说明果肉衰变弹性模量 E_1 与 TPA 果肉硬度下降趋势呈正比。实际果肉即使在松弛很长时间以后, 果肉中的应力并没有完全消失, 仍残留一些平衡应力 σ_e , 体现在应力松弛流变学模型元件上的弹性模量 E_e 。平衡弹

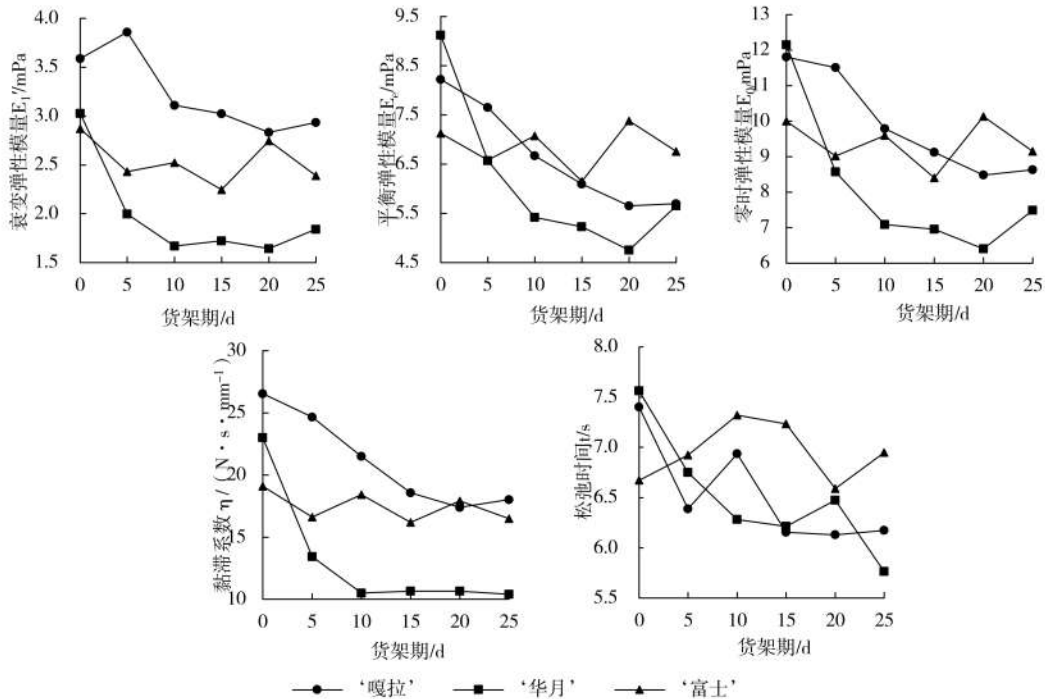


图 4 3 个苹果品种果肉货架期松弛流变参数的变化趋势

性模量 E_c 值越大, 生物组织细胞壁的弹性越强。在 0 d 时, ‘华月’ E_c 值最大, 为 9.12 mPa; ‘嘎拉’ 次之, 为 8.22 mPa; ‘富士’ 最小, 为 7.13 mPa。说明 ‘华月’ 刚采下时细胞壁弹性最好。货架期 25 d 时, 3 个品种 E_c 变化趋势与衰变弹性模量 E_t 变化趋势相似, 都呈下降趋势, ‘华月’ 下降了 38.05%, ‘嘎拉’ 下降了 30.67%, ‘富士’ 下降了 5.19%。这说明货架期 ‘华月’ 和 ‘嘎拉’ 果肉细胞壁弹性降低较快, ‘富士’ 保持较好。加载至常变形量保持不变, 应力松弛过程开始时 $t=0$ 时刻的瞬时弹性模量 E_0 为零时弹性模量。0 d 时, ‘华月’ E_0 最高, 为 12.15 mPa; 其次是 ‘嘎拉’, 为 11.81 mPa; ‘富士’ 最小, 为 9.99 mPa。货架期 ‘嘎拉’ E_0 下降幅度最大, 达 38.33%, ‘富士’ 下降幅度最小。

应力松弛黏性元件阻尼器的黏性系数 η , 为与物料中液体黏度有关的常量。0 d 时, ‘嘎拉’ 黏滞系数最大, 为 $26.53 \text{ N}\cdot\text{s}\cdot\text{mm}^{-1}$, 即果肉细胞黏度最大, ‘华月’ 次之, ‘富士’ 最小。在货架期, ‘华月’ 黏滞系数下降幅度最大, 达 54.83%, ‘嘎拉’ 下降

了 32.11%, ‘富士’ 下降了 13.64% (图 4)。

松弛时间表示应力松弛到起始应力 σ_0 的 $1/e$ 倍时所需要的时间, 是黏性和弹性行为共同作用的结果。0 d 时, ‘华月’ 松弛时间 T_s 最大, 为 7.56 s; ‘嘎拉’ 次之, 为 7.40 s; ‘富士’ 则最小, 为 6.67 s。在货架期 25 d 时, ‘华月’ T_s 下降了 23.80%, ‘嘎拉’ 下降了 16.58%, ‘富士’ 略有升高, 变化不大。

2.2 3 个苹果品种果实流变特性参数相关性分析

从表 1 可以看出, ‘嘎拉’ 果肉初始弹性系数 E_1 与衰变弹性模量 E_t' 呈极显著正相关, 相关系数为 0.986; 与平衡弹性模量 E_c 、零时弹性模量 E_0 、黏滞系数 η 呈显著相关, 相关系数为 0.889、0.932、0.883。零时弹性模量 E_0 与衰变弹性模量 E_t' 和平衡弹性模量 E_c 呈极显著正相关, 相关系数分别为 0.995 和 0.994; 衰变弹性模量 E_t' 与平衡弹性模量 E_c 呈显著相关, 相关系数为 0.916。黏滞系数 η 与衰变弹性模量 E_t' 呈极显著正相关, 相关系数为 0.914; 与平衡弹性模量 E_c 、零时弹性模量 E_0 呈极显著正相关, 相关系数分别为 0.996 和 0.990。

表 1 ‘嘎拉’ 果肉蠕变、应力松弛特性参数相关性

	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	衰变弹性 模量 E_t'	平衡弹性 模量 E_c	零时弹性 模量 E_0	松弛时间 T_s	黏滞系数 η
初始弹性系数 E_1	1									
延迟弹性系数 E_2	0.614	1								
延迟时间 τ	0.064	-0.011	1							
黏性系数 η_1	0.017	0.377	0.590	1						
黏性系数 η_2	0.091	0.759	0.211	0.687	1					
衰变弹性模量 E_t'	0.986**	0.718	0.031	0.021	0.202	1				
平衡弹性模量 E_c	0.889*	0.779	-0.053	0.178	0.441	0.916*	1			
零时弹性模量 E_0	0.932*	0.776	-0.030	0.137	0.382	0.995**	0.994**	1		
松弛时间 T_s	0.426	0.602	-0.286	0.153	0.607	0.483	0.780	0.710	1	
黏滞系数 η	0.883*	0.762	-0.098	0.102	0.413	0.914**	0.996**	0.990**	0.795	1

注: **表示在 $P < 0.01$ 水平上显著相关; *表示在 $P < 0.05$ 水平上显著相关。下表同。

从表 2 可以看出, ‘华月’ 果肉的蠕变初始弹性系数 E_1 与松弛衰变弹性模量 E_t' 、平衡弹性模量 E_c 、零时弹性模量 E_0 呈极显著正相关, 相关系数分别为 0.937、0.972 和 0.966。黏性系数 η_1 与黏性系数 η_2 呈极显著正相关, 相关系数为 0.949。衰变弹性模量 E_t' 与平衡弹性模量 E_c 、零时弹性模量 E_0 、黏滞系数 η 呈极显著正相关, 相关系数分别为 0.985、0.992、0.990; 与松弛时间 T_s 呈显著正相关, 相关系数为 0.851。平衡弹性模量 E_c 与零时弹性模量 E_0 、黏滞系数 η 呈极显著正相关, 相关系数分别

为 0.999 和 0.974; 与松弛时间 T_s 呈显著正相关, 相关系数为 0.845。零时弹性模量 E_0 与松弛时间 T_s 呈极显著正相关, 相关系数为 0.849; 与黏滞系数 η 呈极显著正相关, 相关系数为 0.980。松弛时间 T_s 与黏滞系数 η 呈极显著正相关, 相关系数为 0.915。

从表 3 可以看出, ‘富士’ 蠕变初始弹性系数 E_1 与松弛衰变弹性模量 E_t' 、零时弹性模量 E_0 呈显著正相关, 相关系数分别为 0.851 和 0.817。延迟弹性系数 E_2 与黏性系数 η_1 、松弛衰变弹性模量 E_t' 、呈极显著正相关, 相关系数分别为 0.939、0.911;

表 2 ‘华月’果肉蠕变、应力松弛特性参数相关性

	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	衰变弹性 模量 E_1'	平衡弹性 模量 E_e	零时弹性 模量 E_0	松弛时间 T_r	黏滞系数 η
初始弹性系数 E_1	1									
延迟弹性系数 E_2	0.804	1								
延迟时间 τ	-0.510	-0.059	1							
黏性系数 η_1	0.496	0.807	0.462	1						
黏性系数 η_2	0.384	0.822*	0.519	0.949**	1					
衰变弹性模量 E_1'	0.937**	0.653	-0.410	0.499	0.035	1				
平衡弹性模量 E_e	0.972**	0.743	-0.434	0.545	0.374	0.985**	1			
零时弹性模量 E_0	0.966**	0.723	-0.429	0.535	0.358	0.992**	0.999**	1		
松弛时间 T_r	0.792	0.808	0.075	0.838*	0.718	0.851*	0.845*	0.849**	1	
黏滞系数 η	0.915*	0.697	-0.281	0.605	0.417	0.990**	0.974**	0.980**	0.915**	1

与黏性系数 η_2 、零时弹性模量 E_0 呈显著正相关, 相关系数分别为 0.875、0.872。延迟时间 τ 与黏性系数 η_1 呈显著负相关, 相关系数为 -0.834; 与松弛时间 T_r 呈显著正相关, 相关系数为 0.881。‘富士’果肉蠕变的快慢程度与果肉细胞黏性呈反比, 与黏性和弹性共同作用的松弛时间也有相关性, 即果肉细胞黏性越好, 蠕变时间越短, 细胞黏性越不好, 蠕变时间越长, 果肉黏性越好。黏性系数 η_1 与松弛衰变弹性模量 E_1' 呈极显著正相关, 相关系数为 0.962; 与平衡弹性模量 E_e 、零时弹性模量 E_0 呈显

著正相关, 相关系数分别为 0.827、0.902; 与松弛时间 T_r 呈显著负相关, 相关系数为 -0.885。这说明了‘富士’果肉弹性大, 黏性也大; 弹性下降, 则黏性也下降。衰变弹性模量 E_1' 与平衡弹性模量 E_e 、零时弹性模量 E_0 呈显著正相关, 相关系数分别为 0.862 和 0.939, 果肉初始弹性与果肉细胞 $t=0$ 时瞬时弹性和果肉细胞平衡弹性都有相关性。黏滞系数 η 与蠕变初始弹性系数 E_1 呈极显著正相关, 相关系数为 0.995; 与衰变弹性模量 E_1' 、零时弹性模量 E_0 呈显著正相关, 相关系数分别为 0.885 和 0.862。

表 3 ‘富士’果肉蠕变、应力松弛特性参数相关性

	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	衰变弹性 模量 E_1'	平衡弹性 模量 E_e	零时弹性 模量 E_0	松弛时间 T_r	黏滞系数 η
初始弹性系数 E_1	1									
延迟弹性系数 E_2	0.738	1								
延迟时间 τ	-0.456	-0.787	1							
黏性系数 η_1	0.714	0.939**	-0.834*	1						
黏性系数 η_2	0.729	0.875*	-0.392	0.759	1					
衰变弹性模量 E_1'	0.851*	0.911**	-0.709	0.962**	0.805	1				
平衡弹性模量 E_e	0.759	0.809	-0.419	0.827*	0.903*	0.862*	1			
零时弹性模量 E_0	0.817*	0.872*	-0.536	0.902*	0.897*	0.939*	0.983*	1		
松弛时间 T_r	-0.337	-0.844*	0.881*	-0.885*	-0.585	-0.743	-0.581	-0.658	1	
黏滞系数 η	0.995**	0.694	-0.370	0.731	0.736	0.885*	0.807	0.862*	-0.348	1

‘嘎拉’‘华月’‘富士’3 个品种的蠕变和松弛参数指标间相关性表明, 初始弹性系数 E_1 都与衰变弹性模量 E_1' 、零时弹性模量 E_0 呈显著正相关; 衰变弹性模量 E_1' 与平衡弹性模量 E_e 、零时弹性模量 E_0 呈显著正相关; 黏滞系数 η 与初始弹性系数 E_1 、衰变弹性模量 E_1' 、零时弹性模量 E_0 呈显著正相关。以上说明 3 种苹果果肉在蠕变、松弛过程中初始弹性与零时瞬时弹性紧密相关, 松弛初始弹性与平衡

弹性和零时弹性也紧密相关, 果肉在货架期黏性流动性与初始弹性和零时瞬时弹性也紧密相关。总之, 加载力瞬间的苹果果肉弹性与加载力平衡过程中弹性、瞬时弹性之间都存在紧密联系, 且果肉弹性与黏性也存在相关性。

2.3 3 个苹果品种果肉流变参数主成分分析

对 3 个苹果品种果肉松弛和蠕变试验的特性参数指标进行主成分分析, ‘嘎拉’‘华月’‘富士’

主成分的累积贡献率分别达到了 92.279%、94.792% 和 92.137%, 包含了大部分的原始数据信息(表 4)。

表 4 3 个苹果品种果肉特性参数指标主成分的特征向量、特征值、贡献率及累计贡献率

	‘嘎拉’			‘华月’		‘富士’	
	主成分 1	主成分 2	主成分 3	主成分 1	主成分 2	主成分 1	主成分 2
初始弹性系数 E_i	-0.033	-0.330	0.384	0.132	-0.123	0.107	0.291
延迟弹性系数 E_2	0.161	0.041	0.076	0.122	0.116	0.122	-0.132
延迟时间 τ	-0.004	0.188	0.570	-0.029	0.394	-0.091	0.464
黏性系数 η_1	0.057	0.374	0.220	0.104	0.282	0.123	-0.167
黏性系数 η_2	0.115	0.293	-0.012	0.085	0.326	0.112	0.159
衰变弹性模量 E_1'	0.154	-0.190	0.196	0.131	-0.126	0.125	0.010
平衡弹性模量 E_e	0.178	-0.077	0.011	0.135	-0.112	0.116	0.183
零时弹性模量 E_0	0.174	-0.110	0.063	0.134	-0.116	0.123	0.128
松弛时间 T_s	0.150	0.055	-0.330	0.132	0.099	-0.098	0.450
黏滞系数 η	0.176	-0.101	-0.014	0.135	-0.068	0.107	0.332
	5.478	2.277	1.473	7.130	1.394	7.851	1.363
	54.781	22.770	14.727	71.298	23.495	78.509	13.628
	54.781	77.550	92.279	71.298	94.792	78.509	92.137

由表 4 主成分分析因子得分函数和图 5 中各原始指标与因子 1、2、3 相关系数的旋转示意图, 可以看出: ‘华月’ 第一主成分相关系数较大的是初始弹性系数 E_i 、延迟弹性系数 E_2 、黏性系数 η_1 、衰变弹性模量 E_1' 、平衡弹性模量 E_e 、零时弹性模量

E_0 、松弛时间 T_s 、黏滞系数 η , 第二主成分相关系数较大的是延迟弹性系数 E_2 、延迟时间 τ 、黏性系数 η_1 、黏性系数 η_2 , 负相关系数较大的是初始弹性系数 E_i 、衰变弹性模量 E_1' 、平衡弹性模量 E_e 、零时弹性模量 E_0 。

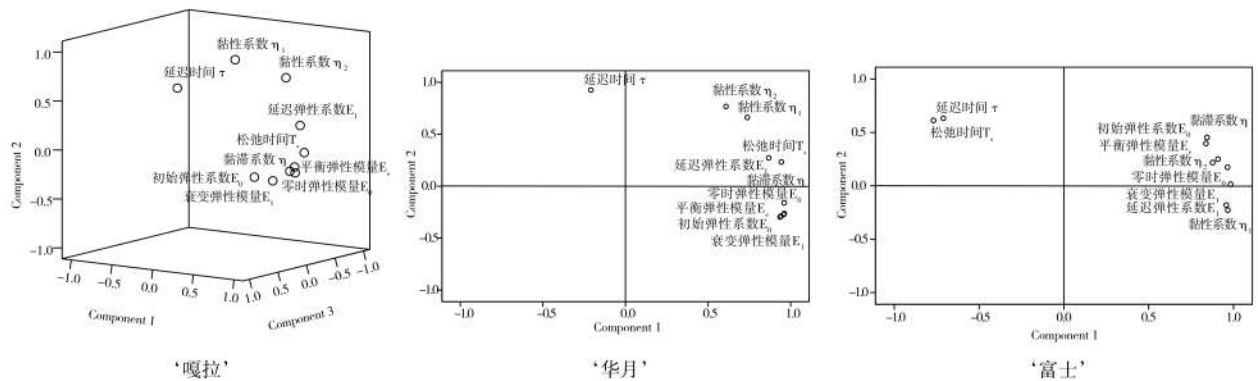


图 5 3 个苹果品种因子负荷图

‘嘎拉’ 第一主成分对应的特征向量中相关系数较大的是延迟弹性系数 E_2 、黏性系数 η_2 、衰变弹性模量 E_1' 、平衡弹性模量 E_e 、零时弹性模量 E_0 、松弛时间 T_s 、黏滞系数 η ; 第二主成分相关系数较大的是延迟时间 τ 、黏性系数 η_1 、黏性系数 η_2 , 负相关系数较大的是初始弹性系数 E_i 、衰变弹性模量 E_1' ; 第三主成分相关系数较大的是初始弹性系数 E_i 、延迟时间 τ 、黏性系数 η_1 、衰变弹性模量 E_1' , 负相关系数较大的是松弛时间 T_s 。

‘富士’ 第一主成分相关系数较大的是延迟弹

性系数 E_2 、黏性系数 η_1 、黏性系数 η_2 、衰变弹性模量 E_1' 、平衡弹性模量 E_e 、零时弹性模量 E_0 ; 第二主成分相关系数较大的是初始弹性系数 E_i 、延迟时间 τ 、黏性系数 η_2 、平衡弹性模量 E_e 、松弛时间 T_s 、黏滞系数 η ; 负相关系数较大的是延迟弹性系数 E_2 、黏性系数 η_1 。

分析结果表明, 3 个苹果品种因子 1 累计方差贡献率和载荷高于其他因子, 能综合反映各主要质地指标。3 个苹果品种果肉都具有黏弹性, 从果肉黏性因子贡献率和弹性因子贡献率可以看出, 苹果

果肉质地是兼具有黏性和弹性的, 且贡献率均等。

3 讨 论

‘华月’果肉延迟弹性系数 E_2 、平衡弹性模量 E_e 、零时弹性模量 E_0 、松弛时间 T_s 在货架 0 d 时值最高, 说明‘华月’在 0 d 时在 3 个品种中弹性最好。就货架期间 3 个苹果品种果肉蠕变和应力松弛参数的变化来看, TPA 果肉硬度, 蠕变参数初始弹性系数 E_1 、 E_2 , 黏性系数 η_1 、 η_2 , 应力松弛参数弹性模量 E_1' 、 E_e 、 E_0 都呈下降趋势, 这与吴洪华^[26]研究梨蠕变、松弛参数变化趋势一致。但是, 货架期中晚熟品种‘华月’以上参数都比早熟品种‘嘎拉’下降得多, 这说明以上参数采后 0 d 时的值与货架期值没有相关性, 也与‘华月’比‘嘎拉’耐贮不一致, 这可能由于在特定的温度、湿度下, 25 d 内‘嘎拉’果肉质地可能比耐贮的‘华月’下降慢, 也可能与‘嘎拉’和‘华月’的果肉内部组织结构存在相关性, 也与质地相关降解酶 β -Gal、PG、PL 等基因调控差异有关, 这有待进一步验证。

不同苹果品种果肉蠕变、应力松弛参数之间相关性是不同的。‘嘎拉’果肉蠕变参数之间相关性较差, 初始弹性系数 E_1 与应力松弛参数衰变弹性模量 E_1' 、平衡弹性模量 E_e 、零时弹性模量 E_0 呈显著正相关, 3 个苹果品种松弛参数衰变弹性模量 E_1' 、平衡弹性模量 E_e 、零时弹性模量 E_0 、黏滞系数 η 之间都呈显著正相关。杨玲等^[19]研究表明, 苹果品种‘华红’果肉蠕变参数之间初始弹性系数 E_1 与延迟弹性系数 E_2 , 黏性系数 η_1 、 η_2 存在显著正相关, 松弛参数之间也存在显著正相关。谢军海^[27]研究认为, 4 个鲜枣品种应力松弛参数呈正相关。这验证了不同品种蠕变参数之间的相关性存在差异, 松弛参数弹性模量之间则存在显著正相关。在货架期, ‘华月’果肉蠕变参数初始弹性系数 E_1 、延迟弹性系数 E_2 、黏性系数 η_1 、黏性系数 η_2 、延迟时间 τ 、松弛参数衰变弹性模量 E_1' 、平衡弹性模量 E_e 、零时弹性模量 E_0 、松弛时间 T_s 、黏滞系数 η 在 3 个苹果品种中下降最多, ‘嘎拉’次之, ‘富士’下降最少。这说明了黏弹性好的品种, 果实质地品质也好。

从主成分分析来看, 3 个苹果品种果肉黏性因子和弹性因子对果肉质地的贡献率是均等的, 同时兼具有黏性和弹性。而王菊霞等^[28]研究认为, ‘丹霞’‘红富士’‘新红星’等 3 个苹果品种果皮弹性因

子贡献率均大于黏性因子, 果皮质地偏重于弹性。苹果果肉质地和果皮流变学质地存在不同。

4 结 论

3 个熟期和耐贮性均不同的苹果品种‘嘎拉’（早熟品种）、‘华月’（中晚熟品种）、‘富士’（晚熟品种）果实货架期 TPA 果肉硬度与蠕变参数初始弹性系数 E_1 、延迟弹性系数 E_2 , 应力松弛参数衰变弹性模量 E_1' 、平衡弹性模量 E_e 、零时弹性模量 E_0 与黏滞系数 η 变化趋势相似, 说明 3 个苹果品种果肉硬度与流变特性黏弹性参数在一定程度上有一定相关性, 能代表不同熟期苹果品种的果肉质地性状。‘嘎拉’‘华月’刚采摘时果肉流变特性参数均高于‘富士’, 说明‘嘎拉’‘华月’也有较好的品质, 较耐运输, 但是在货架期果肉流变参数比‘富士’下降幅度大, 品质下降也较快, 在贮运过程中需要控制环境温湿度; 这也揭示了流变特性参数与果实质地品质紧密相关, 也说明了果肉采摘初期的流变特性与贮运过程中的变化相关性不大。通过相关性分析和主成分分析确定了评价 3 个苹果品种流变特性主要参数, ‘富士’果肉蠕变、松弛参数各参数间相关性程度较‘嘎拉’‘华月’高, 但 3 个苹果品种果肉质地特性都是属于黏性、弹性均等的。这为苹果质地品质无损检测、预测、贮运提供了数据支持。

参考文献

- [1] H.A 巴勒斯, J.H 赫顿, K.瓦尔特斯. 流变学导论. 北京: 中国石化出版社, 1992.
- [2] 李里特. 食品物性学. 北京: 中国农业出版社, 2001: 235-241.
- [3] 江体乾. 工业流变学. 北京: 化学工业出版社, 1995.
- [4] 陈克复. 食品流变学及其测量. 北京: 轻工出版社, 1989.
- [5] 赵学笃. 农业物性学. 北京: 机械工业出版社, 1987.
- [6] Fridley R B, Bradley R A, Rumsey J W. Some aspects of elastic behavior of selected fruits. Transactions of the ASAE, 1968, 11(1): 46-49.
- [7] 冯能莲. 苹果在静载作用下的变形规律. 安徽农业大学学报, 1995, 22(5): 168-172.
- [8] 冯能莲. 苹果在静载作用下的损伤规律. 安徽农业大学学报, 1996, 23(1): 55-58.
- [9] 李小昱, 王 为. 苹果压缩特性的研究. 西北农业大学学报, 1997, 26(2): 107-110.
- [10] 李小昱, 朱俊平, 王 为. 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.
- [11] 李小昱, 王 为. 苹果机械损伤应力松弛特性的研究. 农业机械学

- 报, 1997, 28 (S1): 66-70.
- [12] 庞玉, 胡婷, 付志一. 马铃薯流变参数确定及堆积情况的有限元模拟. 农机化研究, 2004 (6): 74-76.
- [13] Tscheuschner H D, Doan D. Modelling of mechanical properties of apple flesh under compressive load. *Journal of Food Engineering*, 1988, 8(3): 173-186.
- [14] Abbott J A, Affeldt H A, Liljedahl L A. Firmness measurement of stored 'Delicious' apples by sensory methods, magness-taylor, and sonic transmission. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 1992, 117(4): 590-595.
- [15] Wu T, Abbott J A. Firmness and force relaxation characteristics of tomatoes stored intact or as slices. *Postharvest Biology & Technology*, 2002, 24(1): 59-68.
- [16] Zhang L, Ye X, Ding T, et al. Ultrasound effects on the degradation kinetics, structure and rheological properties of apple pectin. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2013, 20(1): 222-231.
- [17] Aregawi W A, Abera M K, Fanta S W, et al. Prediction of water loss and viscoelastic deformation of apple tissue using a multiscale model. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2014, 26(46): 464111 (10pp).
- [18] Hou J, Sun Y, Chen F, et al. Analysis of microstructures and macrottextures for different apple cultivars based on parenchyma morphology. *Microscopy Research & Technique*, 2016, 79(4): 304-312.
- [19] 杨玲, 张彩霞, 康国栋, 等. '华红'苹果果肉的流变特性及其主成分分析. *中国农业科学*, 2015, 48 (12): 2417-2427.
- [20] Cenkov S, Biclew J, Britton M G. A single kernel creep and recovery test. *Trans ASAE*, 1991, 34(6): 2484-2490.
- [21] Nussinovitch A, Peleg M, Normand M D. 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.
- [22] 藏楠. 马铃薯蠕变特性的研究与仿真. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2006.
- [23] 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, 178 (10): 56-60.
- [24] Tang J, Tung M A, Zeng Y. Characterization of gellan gels using stress relaxation. *Journal of Food Engineering*, 1998, 38(3): 279-295.
- [25] 郭文斌. 马铃薯压缩、应力松弛特性与淀粉含量相关性的研究. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2009.
- [26] 吴洪华. 梨的流变特性及其质地评价研究. 南京: 江苏大学, 2005.
- [27] 谢军海. 鲜枣压缩及流变特性研究与仿真分析. 兰州: 甘肃农业大学, 2017.
- [28] 王菊霞, 崔清亮, 李红波, 等. 基于流变特性的不同品种苹果果皮质地评价. *农业工程学报*, 2016, 32 (21): 305-314.
- [29] Stern R A. The photosynthesis inhibitor metamitron is an effective fruitlet thinner for 'Gala' apple in the warm climate of Israel. *Scientia Horticulturae*, 2014, 178: 163-167.
- [30] Greene D W. Use of metamitron alone and in combination with 6-benzyladenine for thinning apples. *Acta Horticulturae*, 2014, 1042: 167-172.
- [31] Stopar M. Comparison of the most frequently used thinning compounds for the thinning of Jonagold, Elstar and Golden Delicious apples. *Res Rep Biot fac UL-Agriculture*, 2000, 75(1): 89-94.
- [32] 张建国, 姬延伟. 果树化学疏花疏果技术综述续. *河北果树*, 2004 (3): 2-4.
- [33] Deckers T, Schoofs H, Verjans W. Looking for solutions for chemical fruit thinning on apple. *Acta Horticulturae*, 2010, 884: 237-243.
- [34] 冯建灿, 郑先波, 李继东, 等. 果树化学疏花疏果的研究现状与展望. *经济林研究*, 2011, 29 (4): 116-121.
- [35] Reginato G, Osorio H, Navarrete J. A single metamitron spray thinner 'Brookfield Gala' apples as effectively as a program of treatments based on NAA, carbaryl and BA. *Acta Horticulturae*, 2014, 1058: 397-404.
- [36] Meland M, Birken E. Ethephon as a blossom and fruitlet thinner affects crop load, fruit weight and fruit quality of the European plum cultivar 'Jubileum'. *Acta Hort*, 2010, 884: 315-322.
- [37] 孟玉平, 曹秋芬, 横田清. 两种疏花剂对苹果授粉受精过程的影响. *园艺学报*, 2003, 30 (4): 384-388.
- [38] 巩峻豪, 陈一宁, 车琴琴, 等. 苹果矮砧集约栽培化学疏花疏果技术集成与应用. *烟台果树*, 2020 (1): 1-4.

(上接第7页)

效应. *西北农业学报*, 2018, 27 (3): 378-383.

- [14] Deyton D E, Sams C E, Windham M E. Management of powdery mildew on overing dogwood with soy bean oil. *HortScience*, 2000, 35: 390.
- [15] 王来平, 杨鲁光, 王景波, 等. 嘎拉、富士苹果化学疏花疏果试验. *落叶果树*, 2018, 50 (2): 21-23.
- [16] 里程辉, 刘志, 王宏, 等. 不同化学疏花剂对岳帅苹果疏花疏果及果实品质的影响. *江苏农业科学*, 2014, 42 (11): 180-182.
- [17] 薛晓敏, 王金政, 王贵平, 等. 苹果化学疏花疏果剂应用技术规范(试行). *落叶果树*, 2016 (6): 57-58.
- [18] Greene D W. Effects of repeated yearly application of chemical thinners on 'McIntosh' apples. *HortScience*, 2005, 40(2): 401-403.
- [19] Fallahi E, Kiester M J, Fallahi B, et al. Influence of potentially new post-bloom thinners on apple fruit thinning. *Acta Horticulturae*, 2014, 1042: 183-188.
- [20] 薛晓敏, 王金政, 路超. 红富士苹果化学药剂疏花疏果试验. *山东农业科学*, 2010 (11): 79-81.
- [21] Stopar M. Thinning of 'Gala' and 'Golden Delicious' apples with BA, NAA and their combinations. *Journal of Central European Agriculture*, 2002, 3(1): 399-403.
- [22] Lafer G. Effects of chemical thinning with metamitron on fruit set, yield and fruit quality of 'Elstar'. *Acta Horticulturae*, 2010, 884: 531-36.
- [23] Basak A. Efficiency of fruitlet thinning in apple "Gala Must" by use of metamitron and artificial shading. *Journal of Fruit and Ornamental Plant Research*, 2011, 19: 51-62.
- [24] Brunner P. Impact of metamitron as a thinning compound on apple plants.