

基于流变特性的香梨果实营养成分预测

王佳萍¹, 吴杰^{1,2}, 杨雪梅¹, 余丽娟¹

(1. 石河子大学机械电气工程学院, 新疆石河子 832003)

(2. 教育部绿洲经济作物生产机械化工程研究中心, 新疆石河子 832003)

摘要: 为了实现香梨多种营养成分指标高效且较为准确的检测, 本文采用质构仪对香梨果肉进行了蠕变测试和应力松弛测试, 确定最适合描述香梨果肉蠕变特性和应力松弛特性的流变模型以获取香梨各流变参数, 然后分析流变参数与香梨可溶性固形物含量 SSC、可滴定酸度 TA、固酸比 RTT 的相关性, 并采用逐步多元线性回归法预测香梨这 3 种营养成分指标。研究表明, 香梨果肉的蠕变特性和应力松弛特性分别可采用六元件广义 Kelvin-Voigt 模型和五元件广义 Maxwell 模型精确拟合, 决定系数 R^2 均在 0.95 以上; 两模型都有流变参数与香梨可溶性固形物含量 SSC、可滴定酸度 TA、固酸比 RTT 具有显著相关性 ($p < 0.05$), 所构建的逐步多元线性回归模型也都可以有效预测这 3 种营养成分指标, 预测模型的相关系数 r 均高于 0.7, 所得预测值与实测值间无显著差异。与应力松弛参数构建的预测模型相比, 基于香梨蠕变参数构建的预测其各营养成分指标模型的标准误差 RMSE 较小, 对香梨营养成分指标预测更稳定可靠。

关键词: 库尔勒香梨; 蠕变; 应力松弛; 营养成分; 相关性

文章编号: 1673-9078(2019)01-245-251

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2019.1.035

Prediction of Nutritional Compositions of Korla Pear Flesh Based on Rheological Properties

WANG Jia-ping¹, WU Jie^{1,2}, YANG Xue-mei¹, YU Li-juan¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Shihezi University, Shihezi 832003, China)

(2. Research Center of Oasis Agricultural Mechanization, Ministry of Education, Shihezi 832003, China)

Abstract: To achieve efficient and accurate detection of various nutritional composition indexes of Korla pear flesh, creep-recovery and stress relaxation tests were performed on pear flesh with using a TA-XT *plus* Texture Analyzer. Rheological models which were the fittest for describing Korla pear flesh's creep-recovery and stress relaxation properties were determined, and the rheological parameters of Korla pear flesh were obtained with the models. Then, the correlations between the rheological parameters and soluble solid content (SSC), titratable acidity (TA), solid acid ratio (RTT) of pear flesh were analyzed, and the three nutritional composition indexes were predicted through stepwise multi-linear regression analyses. The results showed that creep-recovery and stress relaxation properties of Korla pear flesh can be best characterized by a generalized Kelvin-Voigt model with six elements and a generalized Maxwell model with five elements respectively, and the coefficients of determination R^2 were higher than 0.95. Partial rheological parameters of the two models were significantly correlated with the SSC, TA and RTT ($p < 0.05$), hence, the constructed stepwise multi-linear regression models could also effectively predict the three nutritional composition indexes. The correlation coefficient r of the prediction models were higher than 0.7, and there was no significant difference between the measured values and the predicted values. The RMSE values of the models for predicating the three nutritional compositions based on creep parameters were smaller than those of the models based on stress-relaxation parameters. Therefore, the models constructed on the basis of creep parameters were more stable and reliable for predicting nutritional compositions of Korla pear flesh.

Key words: Korla pear; creep; stress relaxation; nutritional composition; correlation

库尔勒香梨是国家地理标志产品^[1], 是新疆林果

收稿日期: 2018-09-12

基金项目: 国家自然科学基金地区科学基金项目 (31560476)

作者简介: 王佳萍 (1993-), 女, 研究方向: 农产品品质检测

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

业创汇和果农增收的大宗果品。香梨采后内部品质直接影响其经济价值和市场竞争力, 根据香梨农业部标准规定^[2], 香梨内部品质的等级主要根据可溶性固形物含量 (SSC)、可滴定酸度 (TA)、固酸比 (RTT) 等营养成分进行评估, 目前通常采用手持式糖度计、化学试剂滴定法分别进行检测。由于这些营养成分指

标测定繁琐耗时, 因此目前依然还无法满足香梨多种内部营养成分高效检测的要求。

国内外已有研究发现果实流变特性与其营养成分指标具有相关性, 陆秋君等研究发现番茄应力松弛时间与其糖酸比存在显著负相关^[3], 杨晓清等发现河套蜜瓜的不同蠕变参数与其总糖 TS、可溶性固形物含量、pH 值具有相关性^[4], Afkari-Sayyah 等研究发现苹果蠕变特性参数与其可滴定酸度、可溶性固形物含量显著相关^[5], Nieto 等人研究还发现苹果应力松弛时间与其可溶性固形物含量也显著相关^[6]。在这些研究基础上, 方媛等采用蠕变特性参数构建预测模型对不同贮藏期红富士苹果可溶性固形物含量、可滴定酸度、Vc 含量实现了较准确预测^[7], 随后又研究报道了红富士苹果应力松弛特性参数与其营养成分指标的相关性, 建立了应力松弛参数预测营养成分指标的数学模型^[8]。这些研究表明, 通过压缩测量获得果实的流变特性参数, 是有望实现对果实可溶性固形物含量、可滴定酸度等主要营养成分指标快速检测的。

有关香梨流变特性与其营养成分指标相关性研究鲜有报道, 因此本研究对香梨流变特性进行测试, 分析蠕变特性参数和应力松弛特性参数与香梨果肉可溶性固形物含量 SSC、可滴定酸度 TA、固酸比 RTT 的相关性, 并构建预测这些营养成分指标的数学模型, 为更为高效且较为准确检测香梨多种内部营养成分提供研究基础。

1 材料与方法

1.1 香梨试样制备

香梨采自新疆库尔勒市沙依东园艺场(41.725°N, 86.174°E), 采样期在 2017 年 8~9 月, 保证香梨具有相同成熟度。果样确保无畸形、虫害和损伤, 剔除粗皮果和突顶果, 以减小各果样的生物变异对果肉组织质地的影响, 其物性参数见表 1。香梨采后放置于 -2~0 °C 和相对湿度 85%~95% 的环境冷藏以备用。

表 1 香梨试样基本物性参数

Table 1 Material properties of Korla pear sample

项目	平均值	标准差	变异系数/%
单果质量/g	138.19	16.93	12.31
去皮硬度/(kg/cm ²)	6.98	0.27	11.23
含水率/%	88.20	0.25	0.34
可溶性固形物含量/%	11.53	0.86	7.50
可滴定酸度/%	0.034	0.008	23.16

香梨果样随机分成 10 组, 每组 10 个, 10 组果样常温贮藏, 每隔 3 d 测试一组, 共计 100 个果样。对

于每一个试样, 先流变测试, 后营养成分指标测定。

1.2 香梨果肉流变测试

采用取样器在香梨赤道部近果皮部位制取 6 个试样, 采用专门切样工具, 使试样两端面确保平齐, 试样直径 5 mm, 高度 4 mm, 其中 3 个试样用于蠕变测试, 3 个试样用于应力松弛测试。采用 TA.XT plus 质构仪 (Stable Micro System 公司, 英国) 对香梨圆柱试样进行压缩测试 (见图 1), 压头 P/5 (直径 5 mm)。

蠕变测试时, 为了保证香梨试样变形在线性黏弹性范围内达到最大蠕变量, 预实验确定压缩载荷 2 N, 加载时间 180 s, 卸载时间 180 s, 测前、测中、测后速度均为 1 mm/s, 触发力 0.049 N。

应力松弛测试时, 为保证香梨试样变形在线性黏弹性范围内达到最大弹性度, 预实验确定压缩应变 40%, 加载时间 180 s, 测前速度 1 mm/s, 测中速度 0.5 mm/s, 测后速度 10 mm/s, 触发力 0.049 N。

对于各测试, 为防止试样测试过程发生褐变和失水对其力学特性测试结果造成较大误差, 测试前对圆柱试样与压头非接触的侧面涂抹硅油^[9]。



图 1 香梨果肉流变测试

Fig.1 Rheology test for pear flesh

1.3 营养成分指标测定

香梨果肉可溶性固形物含量采用 PR-101 型手持式糖度计 (ATAGO 公司, 日本) 测量; 可滴定酸度采用 NaOH 标准溶液滴定^[10], 固酸比则为可溶性固形物含量与可滴定酸度的比值。每项指标测试 3 次, 取平均值。

1.4 流变测试数据分析

1.4.1 香梨果肉蠕变模型

本研究分别采用 Burgers 模型^[11] (见图 2a) 和六元件广义 Kelvin-Voigt 模型^[12] (见图 2b) 对香梨果肉蠕变试验数据进行拟合 (见图 2), 模型方程表达式分别为:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{E_0} + \frac{\sigma}{E_1} \left(1 - e^{-t/T_1}\right) + \frac{\sigma}{\eta} t \quad (1)$$

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{E_0} + \frac{\sigma}{E_1} \left(1 - e^{-t/T_1}\right) + \frac{\sigma}{E_2} \left(1 - e^{-t/T_2}\right) + \frac{\sigma}{\eta} t \quad (2)$$

式中: $\varepsilon(t)$: 蠕变时间 t 时对应的应变值, %; t : 加载时间, s; σ : 恒定应力值, Pa; E_0 : 瞬时弹性模量, Pa; E_1, E_2 : 延迟弹性模量, Pa; η : 牛顿液体的黏性系数, Pa·s; η_1, η_2 : Kelvin-Voigt 单元中牛顿液体的黏性系数, Pa·s; T_1, T_2 : 延迟时间, s, $T_1 = \eta_1/E_1$, $T_2 = \eta_2/E_2$ 。

1.4.2 香梨果肉应力松弛模型

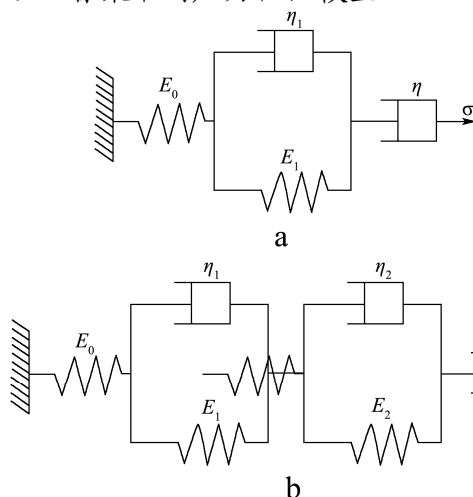


图 2 香梨果肉蠕变力学模型示意图

Fig.2 Mechanical model for creep-recovery response of pear tissue

注: (a)伯格斯模型; (b)六元件广义 Kelvin-Voigt 模型。

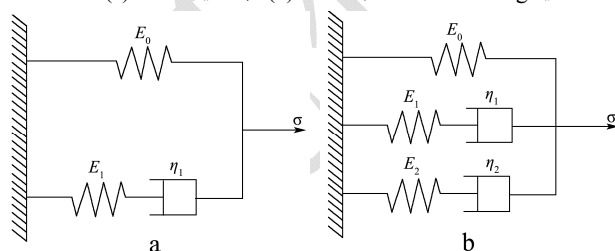


图 3 香梨果肉应力松弛力学模型示意图

Fig.3 Mechanical model for stress relaxation test of pear tissue

注: (a)三元件麦克斯韦模型; (b)五元件广义 Maxwell 模型。

本研究分别采用三元件 Maxwell 模型^[13] (见图 3a) 和五元件广义 Maxwell 模型^[14] (见图 3b) 对香梨果肉应力松弛试验数据进行拟合 (见图 3), 模型方程表达式分别为:

$$\sigma(t) = \varepsilon_0 E_0 + \varepsilon_0 E_1 e^{(-t/T_1)} \quad (3)$$

$$\sigma(t) = \varepsilon_0 E_0 + \varepsilon_0 E_1 e^{(-t/T_1)} + \varepsilon_0 E_2 e^{(-t/T_2)} \quad (4)$$

式中: $\sigma(t)$: 应力松弛时间 t 时对应的应力值, Pa; t : 加载时间, s; ε_0 : 恒定应变值, %; E_0 : 瞬时弹性模量, Pa; E_1, E_2 : 延迟弹性模量, Pa; η_1, η_2 : Maxwell 单元中牛顿液体的黏性系数, Pa·s; T_1, T_2 : 延迟时间, s, $T_1 = \eta_1/E_1$, $T_2 = \eta_2/E_2$ 。

1.5 数据统计分析及香梨营养成分指标预测

模型的构建方法

采用上述流变模型分别对蠕变及应力松弛的试验曲线进行拟合, 以获取相应的流变参数。试验中 100 个果样用来构建营养成分指标预测模型, SPSS 19.0 软件对果样流变特性参数与其营养成分指标的相关性进行分析, 采用相关系数 r 和 p (双尾) 来评估相关性是否显著。采用逐步多元线性回归 (SMLR) 分析, 将各流变参数变量逐个引入如下所示的回归方程进行 F 检验, 剔除显著水平大于 0.05 的变量, 以获得营养成分指标的最佳预测模型。

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_n X_n \quad (5)$$

式中: Y 代表营养成分指标, $X_1 \sim X_n$ 代表流变参数, b_0 为预测模型方程截距, $b_1 \sim b_n$ 为方程回归系数。

通过预测模型的相关系数 r 、标准误差 $RMSE$ 初步判断模型的可靠性, 相关系数 r 越接近 1, 标准误差 $RMSE$ 越小, 则模型越可靠。对实测值和预测模型的预测值进行误差分析和 t 检验, 根据所获得的组间差异分析结果验证营养成分指标预测模型稳定性^[8]。

2 结果与讨论

2.1 香梨流变特性模型的确定

香梨果肉典型蠕变回复曲线和应力松弛曲线分别如图 4 和图 5 所示。对于蠕变曲线, 从表 2 可以看出, 分别采用 Burgers 模型和六元件广义 Kelvin-Voigt 模型对蠕变段进行拟合时, 六元件广义 Kelvin-Voigt 模型的拟合决定系数 R^2 的平均值为 0.992, 变异系数最小, 模型拟合效果最稳定; 对于应力松弛曲线, 分别采用三元件 Maxwell 模型和五元件广义 Maxwell 模型对松弛段进行拟合时, 五元件广义 Maxwell 模型的拟合决定系数 R^2 的平均值为 0.993, 变异系数最小, 模型拟合效果最稳定。因此, 分别采用六元件广义 Kelvin-Voigt 模型和五元件广义 Maxwell 模型拟合的流变参数, 对香梨营养成分指标进行预测研究。

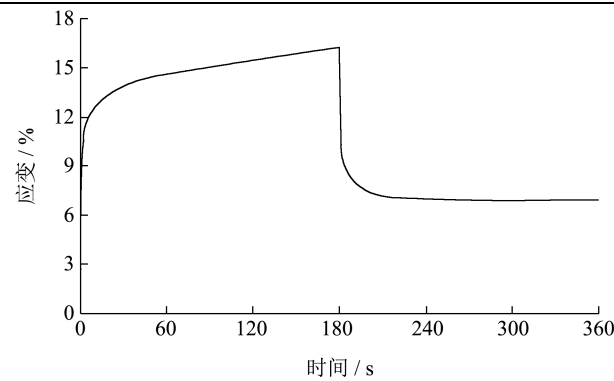


图 4 香梨果肉蠕变回复曲线

Fig.4 Typical creep-recovery curve of pear flesh

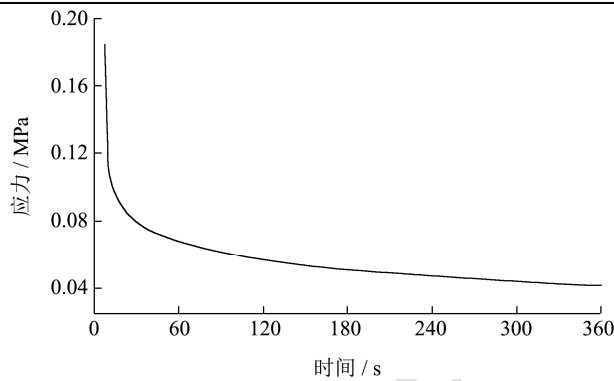


图 5 香梨果肉应力松弛曲线

Fig.5 Typical stress relaxation curve of pear flesh

表 2 蠕变模型和应力松弛模型拟合结果

Table 2 Fitting results of creep and stress relaxation models

流变模型		决定系数 R^2 变幅	决定系数 R^2 均值	变异系数 CV/%
蠕变模型	Burgers 模型	0.923~0.967	0.949	0.976
	六元件广义 Kelvin-Voigt 模型	0.959~0.998	0.992	0.221
应力松弛模型	三元件 Maxwell 模型	0.919~0.975	0.953	1.191
	五元件广义 Maxwell 模型	0.989~0.997	0.993	0.177

表 3 香梨蠕变参数与其营养成分指标相关性分析

Table 3 Correlation analyses between creep parameters and nutritional compositions

项目	E_0	E_1	E_2	η	η_1	η_2	T	T_1	T_2
可溶性固形物含量 SSC/%	0.505	0.807*	0.460	0.882**	0.780*	0.338	0.323	-0.101	-0.159
可滴定酸度 TA/%	-0.509	-0.704	-0.718*	-0.517	-0.514	-0.257	-0.161	0.272	0.417
固酸比 RTT	0.665	0.873**	0.688	0.476	0.635	0.737*	-0.027	-0.329	0.005

注: *, **分别表示在 $p<0.05$ 和 $p<0.01$ 水平 (双侧) 上显著相关。表 4 同。

表 4 香梨应力松弛参数与其营养成分指标相关性分析

Table 4 Correlation analyses between stress relaxation parameters and nutritional compositions

项目	E_0	E_1	E_2	η_1	η_2	T_1	T_2
可溶性固形物含量 SSC/%	0.544	0.267	0.697*	-0.283	0.689*	0.021	-0.562
可滴定酸度 TA/%	0.334	0.497	0.672*	0.235	0.645	-0.628	-0.723*
固酸比 RTT	-0.171	-0.410	-0.565	-0.105	-0.530	-0.737*	0.673*

2.2 香梨流变特性参数与其营养成分指标的

相关性

由表 3 可以看出,在采用六元件广义 Kelvin-Voigt 模型拟合得到的各蠕变参数中,对于可溶性固形物含量 SSC,黏性系数 η 与其呈极显著正相关 ($p=0.004<0.01$),延迟弹性模量 E_1 与其呈显著正相关 ($p=0.016<0.05$),两参数与 SSC 都具有强相关性 ($|r|>0.8$);对于可滴定酸 TA,只有延迟弹性模量 E_2 与其呈显著负相关 ($p=0.045$, $0.6<|r|<0.8$);对于固酸比 RTT,延迟弹性模量 E_1 与其呈极显著正相关 ($p=0.005$),具有强相关性 ($|r|>0.8$),黏性系数 η_2 与其呈显著正相关 ($p=0.037$, $0.6<|r|<0.8$)。这表明,

香梨果肉的这 3 项营养指标可以采用六元件广义 Kelvin-Voigt 模型参数进行预测。

由表 4 可以看出,在采用五元件广义 Maxwell 模型拟合得到的各应力松弛参数中,对于可溶性固形物含量 SSC,延迟弹性模量 E_2 ($p=0.037$)、黏性系数 η_2 ($p=0.040$) 与其呈显著正相关 ($0.6<|r|<0.8$);对于可滴定酸 TA,延迟弹性模量 E_2 ($p=0.047$)、延迟时间 T_2 ($p=0.028$) 与其呈显著相关 ($0.6<|r|<0.8$);对于固酸比 RTT,延迟时间 T_1 ($p=0.024$), T_2 ($p=0.047$) 与其呈显著相关 ($0.6<|r|<0.8$)。这表明,香梨果肉的这 3 项营养指标也可以采用五元件广义 Maxwell 模型参数进行预测。

2.3 香梨营养成分指标预测模型的建立

分别以六元件广义 Kelvin-Voigt 模型中 9 个参数和五元件广义 Maxwell 模型中 7 个参数为自变量,营养成分指标为因变量,进行逐步多元线性回归 (SMLR) 分析,获得表 5 所示的预测可溶性固形物含量 SSC、可滴定酸度 TA、固酸比 RTT 的各模型。对于蠕变参数和应力松弛参数分别预测香梨可溶性固形物含量 SSC 和固酸比 RTT 的模型,其相关系数 r 均高于 0.8; 相比较而言,流变参数预测可滴定酸度 TA 的模型相关系数 r 略低,但也都高于 0.7,经显著性检验各模型均具有统计学意义 ($p < 0.05$),都可以有效预测各营养指标。

表 5 流变参数对营养成分指标的逐步多元线性回归分析结果

Table 5 Stepwise multi-linear regression for each nutritional composition indexes based on rheology parameters

流变参数	营养品质指标	预测模型	相关系数 r	决定系数 R^2	P -值	标准误差 RMSE
蠕变参数	可溶性固形物含量 SSC/%	$SSC=10.968+4.313 \times 10^{-7} \eta-0.195 T_1$	0.953	0.908	<0.05	0.174
	可滴定酸度 TA/%	$TA=0.066+2.542 \times 10^{-6} E_2$	0.718	0.515	<0.05	0.002
	固酸比 RTT	$RTT=-553.743+0.011 E_1+0.14 \eta_2$	0.952	0.906	<0.05	22.239
应力松弛参数	可溶性固形物含量 SSC/%	$SSC=-13.404+5.007 \times 10^{-6} E_2+0.420 T_1$	0.952	0.906	<0.05	0.409
	可滴定酸度 TA/%	$TA=0.069-0.015 T_2$	0.723	0.523	<0.05	0.006
	固酸比 RTT	$RTT=-731.768-3.024 \times 10^{-5} \eta_1+27.025 T_1$	0.840	0.706	<0.05	45.051

2.4 香梨营养成分指标预测模型的验证

由表 6 可看出,当显著水平 $\alpha=0.05$, $df=99$ 时, $t_{0.05,99}=1.984$,基于香梨蠕变参数和应力松弛参数分别构建的 SSC、TA、RTT 的各预测模型 t 检验值均小于 $t_{0.05,99}$,表明各模型预测值与实测值之间无显著差异。

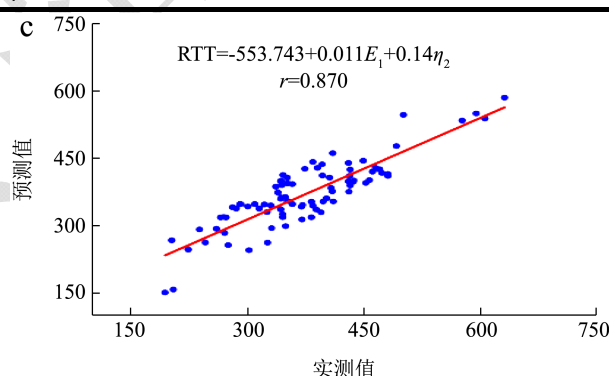
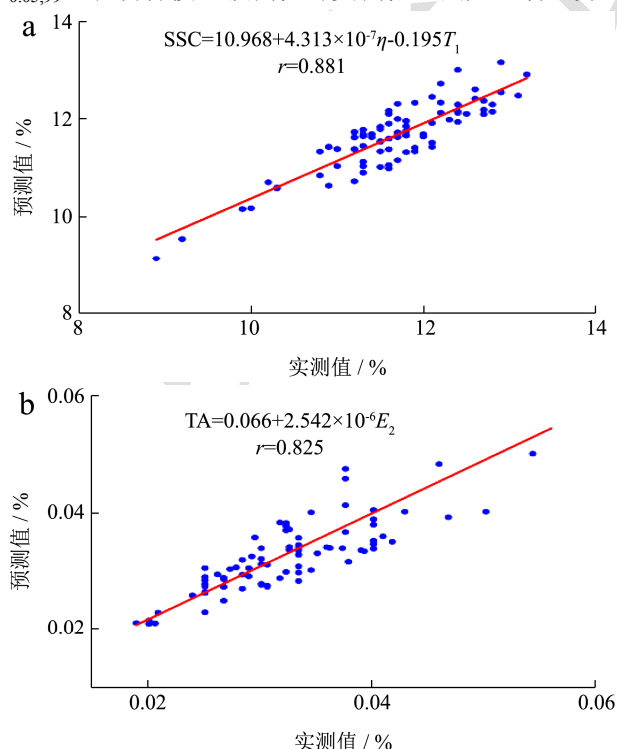


图 6 香梨不同营养成分指标的预测值与实测值的相关性

Fig.6 Correlation between predicted values and measured values of different nutritional composition indexes of pear

注: (a)可溶性固形物含量; (b)可滴定酸度; (c)固酸比。

由图 6 可知,当采用蠕变参数预测香梨可溶性固形物含量 SSC、可滴定酸度 TA、固酸比 RTT 时,其相应预测模型所得预测值与实测值之间的相关系数分别为 0.881、0.825、0.870,有极强的相关性 ($r > 0.8$); 同样,图 7 所示的应力松弛参数预测香梨可溶性固形物含量 SSC、可滴定酸度 TA、固酸比 RTT 预测模型所得预测值与实测值之间的相关系数分别为 0.877、0.805、0.853,也有极强的相关性 ($r > 0.8$),模型的预测精度较高。由此表明,采用蠕变参数和应力松弛参数构建的模型都能取得对营养指标较好的预测效果。但是从表 6 结果比较可以看出,基于蠕变参数构建的

各预测模型的预测值与实测值的差异平均值、标准差及标准误均小于基于应力松弛参数构建的模型，决定系数 R^2 也都分别高于应力松弛参数构建的相应模型，

因此进一步表明，基于蠕变参数构建预测模型能够更准确预测这 3 种营养成分指标。

表 6 营养成分指标预测模型的检验结果

Table 6 The t-test results of predictive equations each nutritional composition indexes

预测模型	实测值-预测值	组间差异			t 检验值	自由度 df	决定系数 R^2
		平均值	标准差	标准误			
蠕变参数 预测模型	可溶性固形物含量 SSC/%	0.331	0.171	0.055	0.319	99	0.773
	可滴定酸度 TA/%	0.003	0.003	0.003	0.361	99	0.681
	固酸比 RTT	38.480	18.367	1.969	0.371	99	0.757
应力松弛参数 预测模型	可溶性固形物含量 SSC/%	1.722	1.345	0.135	0.945	99	0.769
	可滴定酸度 TA/%	0.004	0.004	0.004	0.362	99	0.648
	固酸比 RTT	42.771	22.829	2.294	0.323	99	0.727

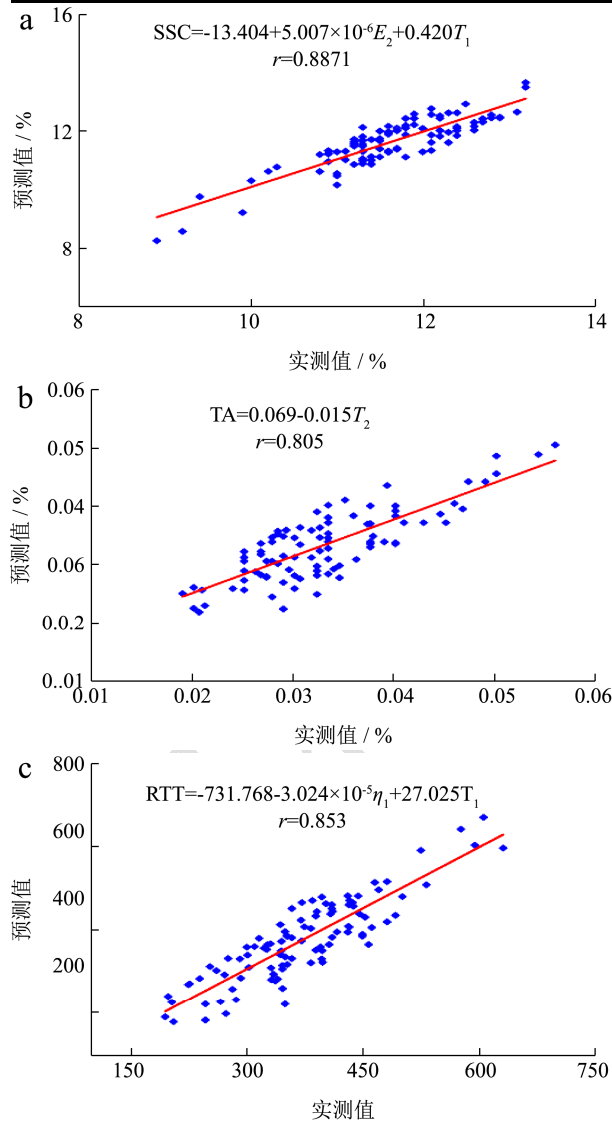


图 7 香梨不同营养成分指标的预测值与实测值的相关性

Fig.7 Correlation between predicted values and measured values of different nutritional composition indexes of pear

注：(a)可溶性固形物含量；(b)可滴定酸度；(c)固酸比。

3 结论

3.1 六元件广义 Kelvin-Voigt 模型可以更好的描述香梨果肉蠕变特性，五元件广义 Maxwell 模型可以更好的描述香梨果肉应力松弛行为。两模型都有部分流变参数与香梨可溶性固形物含量 SSC、可滴定酸度 TA、固酸比 RTT 具有显著相关性。

3.2 采用逐步多元线性回归数学模型，香梨蠕变参数和应力松弛参数都可以有效预测香梨可溶性固形物含量 SSC、可滴定酸度 TA、固酸比 RTT，但基于蠕变参数更适于预测香梨的这 3 种营养成分指标。

致谢

感谢石河子大学机械电气工程学院张若宇教授为本研究提供测试条件，同时感谢超技仪器公司黄灿锐工程师对本研究流变测试提供技术支持和试验指导。

参考文献

[1] GB/T 19859-2005,地理标志产品库尔勒香梨[S]
GB/T 19859-2005, Product of geographical indication-Kuerle fragrant pear [S]

[2] NY/T585-2002,库尔勒香梨[S]
NY/T585-2002, Kurle fragrant pear [S]

[3] 陆秋君,王俊,何喜玲.常温贮藏中番茄应力松弛特性试验[J].农业机械学报,2005,36(7):77-80,88
LU Qiu-jun, WANG Jun, HE Xi-ling. Experimental study on intact tomato's stress-relaxation during storing at normal temperature [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2005, 36(7): 77-80, 88

[4] 杨晓清,王春光,李佳宁.河套蜜瓜机械特性及其与硬度和

- 糖度关系的试验[J].农机化研究,2007,7:131-135
- YANG Xiao-qing, WANG Chun-guang, LI Jia-ning. Research on the relationship between mechanical properties and stiffness refractive sugar concentration of Hetao muskmelon under compressing [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007, 7: 131-135
- [5] Sayyah A H A, Esmailpour B. Apple firmness measurement based on visco-elastic properties [J]. Journal of Food Agriculture and Environment, 2008, 6(2): 276-279
- [6] Nieto A B, Vicente S, Hodara K, et al. Osmotic dehydration of apple: Influence of sugar and water activity on tissue structure, rheological properties and water mobility [J]. Journal of Food Engineering, 2013, 119(1): 104-114
- [7] 方媛,赵武奇,张清安,等.‘红富士’苹果蠕变特性与果实品质的相关分析[J].中国农业科学,2016,49(4):717-726
- FANG Yuan, ZHAO Wu-qi, ZHANG Qing-an, et al. The correlation analysis between quality and creep property of ‘Fuji’ apple [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(4): 717-726
- [8] Zhao W, Fang Y, Zhang Q A, et al. Correlation analysis between chemical or texture attributes and stress relaxation properties of ‘Fuji’ apple [J]. Postharvest Biology and Technology, 2017, 129: 45-51
- [9] 吴杰,郭康权,顾蓉,等.库尔勒香梨不同膨压水平下的动态粘弹特性[J].农业机械学报,2010,41(9):113-117
- WU Jie, GUO Kang-quan, GU Rong, et al. Turgor effects on dynamic viscoelasticity of Korla pear tissue [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(9): 113-117
- [10] GB/T 12456-2008,食品中总酸的测定[S]
- GB/T 12456-2008, Determination of total acid in foods [S]
- [11] 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 Fang. Study on compressive and creep characteristics of watermelon [D]. Huhehaote: Inner Mongolia Agricultural University, 2008
- [12] Martínez V Y, Nieto A B, Castro M A, et al. Viscoelastic characteristics of Granny Smith apple during glucose osmotic dehydration [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 83(3): 394-403
- [13] 刘建志,杨晓清,杜亚楠.振动作用对蜜瓜应力松弛特性及采后延迟损伤的影响[J].内蒙古农业大学学报:自然科学版,2017,38(3):58-65
- LIU Jian-zhi, YANG Xiao-qing, DU Ya-nan. The change of delayed damage and stress relaxation properties of postharvest muskmelons based on the effect of vibration [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University: Natural science edition, 2017, 38(3): 58-65
- [14] 蒋志林,陈燕,谈建豪,等.荔枝应力松弛特性及其损伤的试验研究[J].现代食品科技,2015,31(5):96-101
- JIANG Zhi-lin, CHEN Yan, TAN Jian-hao, et al. Experimental study on stress relaxation characteristics and associated damage of litchi [J]. Modern Food Science and Technology, 2015, 31(5): 96-101

(上接第 120 页)

- [23] Alzorqi I, Sudheer S, Lu T J, et al. Ultrasonically extracted β -D-glucan from artificially cultivated mushroom, characteristic properties and antioxidant activity [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2017, 35: 531-540
- [24] 邝婷婷,王宇,王张,等.藏药蔓菁膏抗缺氧作用的量-效/毒关系及质量标准研究[J].中国中药杂志,2016,41(4):597-602
- KUANG Ting-ting, WANG Yu, WANG Zhang, et al. Studies on dosage-efficacy /toxicity relationship of anti-hypoxia effects and quality standard of Tibetan medicine brassicea radix extract [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2016, 41(4): 597-602
- [25] Minh Hien Hoang, Ji-Young Kim, et al. Antioxidative, hypolipidemic, and anti-inflammatory activities of sulfated polysaccharides from *Monostroma nitidum* [J]. Food Sci. Biotechnol, 2015, 24(1): 199-205
- [26] Ruthes A C, Rattmann Y D, Malquevicz O S M, et al. *Agaricus bisporus* fucogalactan: Structural characterization and pharmacological approaches [J]. Carbohydrate Polymers, 2013, 92(1): 184-191
- [27] Rankin E B, Giaccia A J. Hypoxic control of metastasis [J]. Science. 2016, 352: 175-180
- [28] Zhang H, Li W J, Xie M Y, et al. Structural characterization of a novel bioactive polysaccharide from *Canoderma atrum* [J]. Carbohydrate Polymers, 2012, 88(3): 1047-1054
- [29] Li Hong Ji, Chen Hai Yan, Fan Lin Lin, et al. *In vitro* antioxidant activities of the polysaccharides and anti-hypoxic activity in mice from the edible mushroom *A. bisporus* (Lange) Sing [J]. Chaidam. Molecules. 2015, 20: 17775-17788