

梨质地变化规律与动力学模型

张 文, 梁怡蕾, 吴晨阳, 杨元萍, 熊双丽
(西南科技大学生命科学与工程学院, 四川 绵阳 621010)

摘 要: 为了研究梨在采后贮藏过程中质地变化规律以对可食用期评估, 实验测定了‘黄金’、‘玉冠’和‘丰水’3个品种梨在贮藏过程中泰勒(Magness-Taylor, MT)硬度、果肉硬度、果肉弹性率和感官总体可接受度的变化, 并建立了质地参数变化的动力学模型。结果表明: MT硬度、果肉硬度、果肉弹性率总体上均随贮藏时间延长逐渐降低, 但果肉弹性率对贮藏时间变化的灵敏性优于MT硬度和果肉硬度, 且果肉弹性率与感官总体可接受度的相关性更强; 采用零级和一级动力学模型、Logistic模型和威布尔模型对各质地参数拟合, 结果均是威布尔模型的拟合结果最佳; 通过威布尔模型和感官评定, 得到‘黄金’、‘玉冠’和‘丰水’梨的MT硬度分别低于14.762、10.411 N和7.255 N, 果肉硬度分别低于8.215、7.438 N和5.181 N, 果肉弹性率分别低于4.571、5.572 N/mm和3.609 N/mm后不具备商品价值, 不建议食用。研究结果可为梨的贮藏和食用提供指导依据。

关键词: 梨; 质地; 动力学; 模型; 可食用期

Kinetic Analysis and Modelling of Changes in the Texture of Pear Fruit during Postharvest Storage

ZHANG Wen, LIANG Yilei, WU Chenyang, YANG Yuanping, XIONG Shuangli
(School of Life Science and Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

Abstract: Three pear varieties (*Pyrus pyrifolia* cv. ‘Whangkeumbae’, ‘Yuguan’, and ‘Hosui’) were used to investigate the textural changes of pear fruit during storage and evaluate their storage lives. Magness-Taylor (MT) firmness, flesh firmness and stiffness were measured by puncture test, and overall acceptability was measured by sensory evaluation. Kinetic models were established for texture parameters of pear fruit. The results showed that MT firmness, flesh firmness and stiffness generally decreased with storage time, and stiffness was more sensitive to storage time than MT firmness and flesh firmness. In addition, stiffness had better correlation with overall acceptability than MT firmness and flesh firmness. The zero-order and first order kinetic models, logistic model and Weibull model were established for each texture parameter. The best results were obtained by the Weibull model. Based on the Weibull model and sensory evaluation, ‘Whangkeumbae’, ‘Yuguan’ and ‘Hosui’ lost commodity value and should not be eaten when their MT firmness were lower than 14.762, 10.411 and 7.255 N, flesh firmness were lower than 8.215, 7.438 and 5.181 N, and stiffness were lower than 4.571, 5.572 and 3.609 N/mm, respectively. These results can provide useful guidance for pear storage and consumption.

Keywords: pear; texture; kinetics; model; storage life

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20180731-385

中图分类号: TS255.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2019)07-0009-06

引文格式:

张文, 梁怡蕾, 吴晨阳, 等. 梨质地变化规律与动力学模型[J]. 食品科学, 2019, 40(7): 9-14. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20180731-385. <http://www.spkx.net.cn>

ZHANG Wen, LIANG Yilei, WU Chenyang, et al. Kinetic analysis and modelling of changes in the texture of pear fruit during postharvest storage[J]. Food Science, 2019, 40(7): 9-14. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20180731-385. <http://www.spkx.net.cn>

果蔬的品质指标主要分为外部品质指标和内部品质指标。外部品质指标包括大小、形状、颜色和质量等,

内部品质指标包括糖度、酸度、质地和营养物质等^[1-2]。其中, 质地是最重要的内部品质指标之一, 是种植户、

收稿日期: 2018-07-31

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(31801625); 四川省科技厅应用基础研究面上项目(2019YJ0444); 四川省教育厅科研项目(18ZB0606)

第一作者简介: 张文(1988—)(ORCID: 0000-0003-4458-8398), 男, 讲师, 博士, 研究方向为农产品/食品品质与安全检测。
E-mail: zhangwayne1988@163.com

经销商和顾客对果蔬成熟度、口感等品质进行判断的重要依据^[3]。国际标准化组织对食品质地的定义是：食品被感觉器官能通过触觉、视觉、听觉、味觉所感受到的所有流变学和结构学上的属性^[4]。根据联合国粮食与农业组织统计数据，我国梨的产量常年居世界第一。梨是一种呼吸跃变型水果，在贮藏过程中会不断软化^[5]，弄清梨的质地变化规律对于采后保存、货架期预测、可食用期评估和品质分级等都具有重要意义。许多发达国家已采用特定的质地分级标准以保证果蔬在抵达消费者手中时具有良好的商品价值。

国内外众多学者对食品品质变化的动力学开展了研究。研究人员通过数学模型理论和计算机技术等建立食品品质变化的动力学模型，从而更好地预测食品货架期，为食品可食用期提供理论依据^[6]。目前，多种形式的动力学模型已应用到食品的品质参数变化和货架期研究中，如零级和一级动力学方程^[7-8]、描述化学基元反应的经典模型Arrhenius方程^[9-10]、描述质量参数的动力学降解过程与时间关系的威布尔模型^[11-12]、以微生物为指标的生长模型^[13-14]等。这些模型较好地预测了食品品质的变化，但是目前针对果蔬质地多是单参数的硬度变化研究，鲜有专门针对果蔬质地多参数变化的动力学模型进行深入研究的报道。

因此，本研究以‘黄金’、‘玉冠’和‘丰水’3个品种梨果实作为研究对象，研究梨的多质地参数的变化规律及其与人实际感官的关系，比较不同动力学模型对质地参数的拟合效果，并评估梨的可食用期，以期对梨的贮藏和食用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

‘黄金’梨 (*Pyrus pyrifolia* cv. ‘Whangkeumbae’)、‘玉冠’梨 (*Pyrus pyrifolia* cv. ‘Yuguan’) 和 ‘丰水’梨 (*Pyrus pyrifolia* cv. ‘Hosui’)，采摘于杭州三水果业有限公司农场。采摘时由经验丰富的果农采摘大小接近、成熟度接近、无损伤和病害的果实。‘黄金’、‘玉冠’和‘丰水’梨的质量分别为 (263.63 ± 12.43) 、 (275.13 ± 15.42) g 和 (262.89 ± 16.39) g。

1.2 仪器与设备

TA-XT2i质构仪 英国Stable Micro Systems公司；
YP502N电子天平 上海精密科学仪器有限公司；
HWS-1500调温调湿箱 宁波赛福实验仪器有限公司。

1.3 方法

1.3.1 原料处理

采摘后果实连同套袋立即运回实验室保存于25℃、

相对湿度60%的调温调湿箱。实验每3 d或4 d进行一次，单次实验每个品种各随机挑选10个左右果实。贮藏过程中根据梨品质变化情况，最终对‘黄金’和‘丰水’梨进行了22 d总计8批次测试，对‘玉冠’梨进行了19 d总计7批次测试。

1.3.2 质地测试方法

采用戳穿实验法^[15-16]：在梨的赤道部位间隔均匀选取3个测试点，每个测试点平整地削去一层薄皮，削皮面积略大于探头顶端面积；测试探头P/5，圆柱形，直径5 mm；测试速率1 mm/s；测试深度8 mm；触发值0.05 N。图1是梨进行穿刺实验后某一典型的“力-位移”曲线。

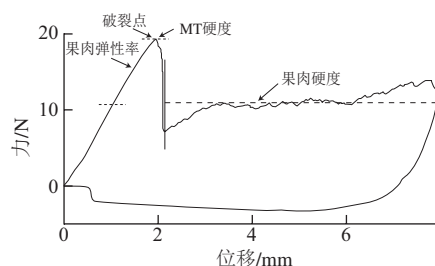


图1 梨典型的“力-位移”曲线

Fig. 1 Typical force-deformation curve of pear fruit

本研究选择穿刺实验中最常用的3个质地指标进行研究，包括：泰勒（Magness-Taylor, MT）硬度，即整个穿刺过程中力的最大值；果肉硬度，即破裂点后力的平均值；果肉弹性率，即破裂点前的斜率。3个测试点的平均值作为样本的质地指标值。由于探头端面 and 样本测试面在开始接触时不可能完全平行接触，两者完全接触前会有一小段过程，所以“力-位移”曲线在初始阶段通常会有一小段缓慢上升再快速上升。因此，采用公式（1）^[17]计算果肉弹性率。

$$\text{果肉弹性率} / (\text{N/mm}) = \frac{F_{\text{rup}} - 60\%F_{\text{rup}}}{d_2 - d_1} \quad (1)$$

式中： F_{rup} 为穿刺破裂点处的力值/N； d_1 为60% F_{rup} 值处对应的位移/mm； d_2 为破裂点力值（ F_{rup} ）处对应的位移/mm。

1.3.3 感官评定

感官评定由6名（3男3女）经过专门训练的人员构成。每个样本经质构仪测试后，选取完好的部位均分为6部分。感官评定人员评定前用清水漱口，每个样本间隔1 min，评定人员之间独立打分。参考Taniwaki^[18]、李丽娜^[19]等人的方法，评定人员从颜色、组织状态、多汁性和风味等方面对样品的总体可接受度打分，具体评分标准见表1。当总体可接受度等于或低于4分时，认为样本已没有商品价值，不宜食用。

表1 梨感官评价评分标准

Table 1 Criteria for sensory evaluation of pear fruit

评定指标	等级	评分标准	分数
总体可接受度	优良	颜色鲜艳明亮; 口感细腻, 软硬弹性适中, 无粗糙渣感; 果肉饱满多汁; 有较浓厚的香味和甜味, 无异味	8~10
	一般	颜色略暗沉; 口感稍硬或稍软, 弹性较差, 或略带渣感; 果肉汁液量一般; 香味和甜味较弱, 无异味	5~7
	差	颜色暗沉无光泽; 口感过硬或过软, 弹性差, 渣感明显; 果肉汁液量较少; 无香味和甜味, 或有其他异味。	1~4

1.3.4 动力学模型计算

1.3.4.1 零级和一级动力学模型

动力学方程通常用来描述农产品/食品品质随时间变化的关系^[20-22], 具体如公式(2)所示。

$$\frac{dC(t)}{dt} = -kC^m \quad (2)$$

式中: $C(t)$ 为品质参数; t 为时间; k 为速率常数; m 为动力学方程的级数。

从现有研究来看, 现有农产品/食品品质与时间的关系通常符合零级 ($m=0$) 和一级 ($m=1$) 动力学模型^[23]。当 $m=0$ 和 1 时, 对公式(2)积分, 可分别得到常用的零级(式(3))和一级动力学模型(式(4))。

$$C(t) = C_0 - kt \quad (3)$$

$$C(t) = C_0 e^{-kt} \quad (4)$$

式中: $C(t)$ 为品质参数; t 为时间; k 为速率常数; C_0 为拟合常数。

1.3.4.2 Logistic模型

Logistic模型也可用于拟合品质参数随时间变化的参数, 具体如公式(5)所示。

$$C(t) = \frac{c}{1 + ae^{-bt}} \quad (5)$$

式中: $C(t)$ 为品质参数; t 为时间; a 、 b 、 c 为拟合常数。

1.3.4.3 威布尔模型

威布尔模型是从威布尔分布作用上发展起来的, 通常用来描述品质参数的动力学降解过程与时间的关系^[6,11], 如公式(6)所示。

$$C(t) = C_0 \exp\left[-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta\right] \quad (6)$$

式中: $C(t)$ 为品质参数; C_0 为拟合常数; t 为时间; α 为尺度参数; β 为形状参数。

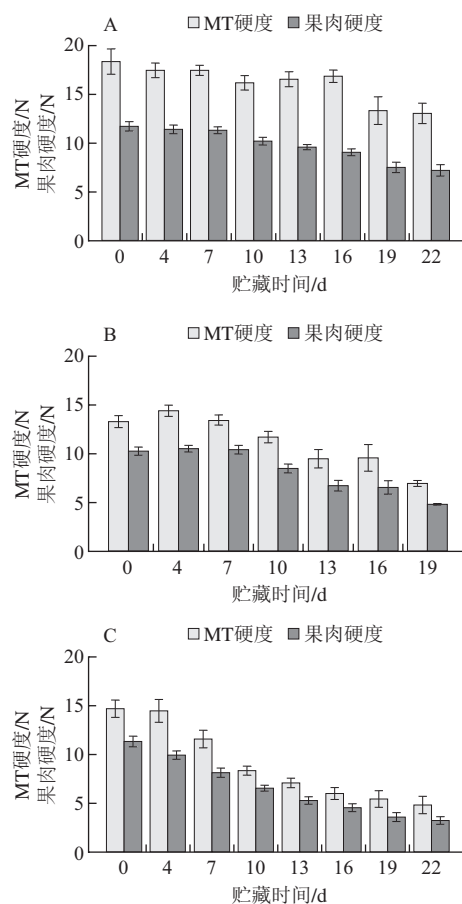
上述模型的拟合优度采用决定系数 (R^2) 和均方根误差 (root mean square error, RMSE) 来评价。

1.4 数据处理

质地指标参数采用软件Texture Exponent 32编写程序提取; 图形绘制和动力学模型计算使用软件Origin 8.5; 其他数据统计使用软件Excel 2010。

2 结果与分析

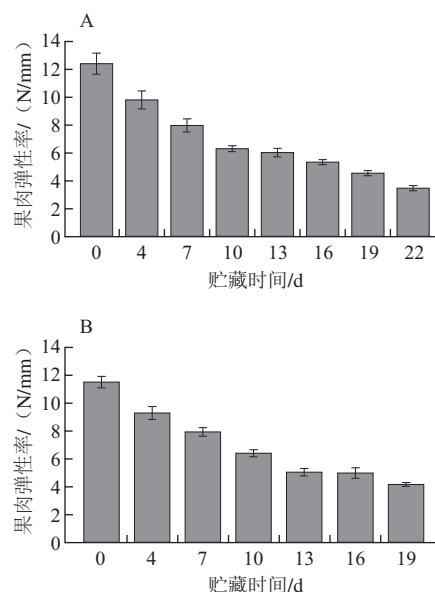
2.1 梨在贮藏过程中质地参数变化规律



A~C.分别为‘黄金’、‘玉冠’、‘丰水’梨。图3同。

图2 梨在贮藏过程中MT硬度和果肉硬度变化过程

Fig. 2 Changes in MT firmness and flesh firmness of pear fruit during storage



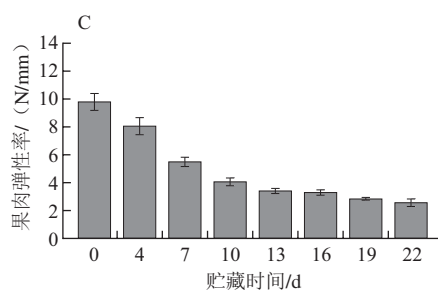


图3 梨在贮藏过程中果肉弹性率变化过程

Fig. 3 Changes in stiffness of pear fruit during storage

如图2、3所示, 3个质地参数在贮藏过程中均呈下降趋势。与贮藏初期相比, 贮藏末期‘黄金’、‘玉冠’和‘丰水’梨的MT硬度分别降低了28.9%、47.7%和67.2%, 果肉硬度分别降低了38.6%、53.3%和71.6%, 果肉弹性率分别降低了71.9%、62.7%和73.6%。其中, 果肉弹性率降低程度最高, 果肉硬度和MT硬度次之, 说明果肉弹性率随贮藏时间变化更灵敏, 更有利于评价梨的新鲜度。

果肉硬度和果肉弹性率均随贮藏时间延长逐渐平稳降低, 而MT硬度的变化较为起伏。3个品种梨的MT硬度在贮藏初期上下波动, 然后大幅降低(‘黄金’梨、‘玉冠’梨、‘丰水’梨分别在19、10、7 d后)。这可能是因为MT硬度主要与细胞壁强度有关, 呼吸跃变型水果在某一跃变峰处细胞壁降解突然加快, 中胶层逐渐降解, 果胶和半纤维素的结构发生改变, 导致果肉组织强度变低, 质地变软^[5,24]。而果肉弹性率同时反映了测试过程中力和位移的变化, 测试结果受细胞壁强度和细胞膨压影响。梨在贮藏过程中不断失水, 细胞膨压不断降低, 导致果肉弹性率的值持续降低^[25-26]。Baritelle等^[27]在研究苹果贮藏过程中质地变化时也曾发现, 当前10 d细胞已经开始失水, 但苹果的MT硬度并没有发生明显变化。

2.2 梨在贮藏过程中感官变化及其与质地相关性

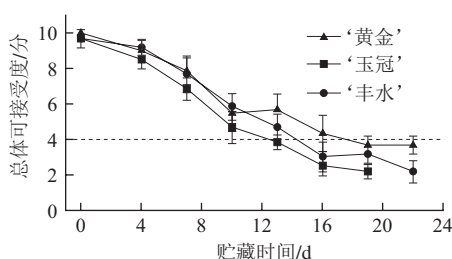


图4 梨在贮藏过程中总体可接受度变化趋势

Fig. 4 Changes in overall sensory acceptability of pear fruit during storage

由图4可知, 总体可接受度呈逐渐降低趋势。3个品种梨的总体可接受度在初始阶段差异不大, 从第10天左右开始差异较明显。这是由于开始阶段各品种梨都处于较新鲜状态, 总体可接受度都较高; 但各品种梨的

代谢过程不同, 果实软化速度有差异, 因此后期感官评定所得的总体接受度差异越来越明显。以总体可接受度4分为临界值, ‘黄金’、‘玉冠’、‘丰水’梨分别在18、13、14 d左右后不具备商品价值, 不推荐食用。‘黄金’梨的货架期长于‘玉冠’和‘丰水’梨, 这可能是受不同品种梨的质地特性影响, 由于‘黄金’梨的质地参数值普遍高于‘玉冠’和‘丰水’梨, 所以在贮藏后期依然还有较优的咀嚼口感。

表2 不同品种梨总体可接受度与质地指标相关性

Table 2 Correlations between overall sensory acceptability and texture of different pear varieties

品种	MT硬度	果肉硬度	果肉弹性率
‘黄金’	0.624**	0.833**	0.878**
‘玉冠’	0.723**	0.645**	0.834**
‘丰水’	0.831**	0.794**	0.824**

注: **极显著相关 ($P < 0.01$)。

由表2可知, 不同品种梨的感官评定参数与质地参数均表现出极显著的相关性 ($P < 0.01$), 说明质构仪测试的结果能够反映人的真实感官, 这与对苹果^[28]、梨^[29]、猕猴桃^[30]等水果的研究结果是一致的, 但现有研究中关于果肉弹性率、果肉硬度与感官评定相关性分析的还较少。另外, 果肉弹性率与总体可接受度的相关系数相较于MT硬度和果肉硬度更高, 表现出与感官指标更优的相关性, 这与果肉弹性率的测试方法有关。果肉弹性率测试受细胞膨压影响, 在果实贮藏过程中持续降低, 与感官总体可接受度变化趋势基本一致; 而MT硬度变化并非连续降低, 不完全符合感官总体可接受度变化趋势。因而, 果肉弹性率的变化规律更符合梨在贮藏过程中品质的变化过程。

2.3 梨质地变化动力学模型

表3 梨质地变化的零级和一级动力学模型结果

Table 3 Results of zero and first order kinetic models for textural variation of pear fruit

品种	质地指标	零级动力学模型				一级动力学模型			
		C_0	k	R^2	RMSE	C_0	k	R^2	RMSE
‘黄金’	MT硬度	18.752	0.227	0.783	0.847 N	18.794	0.014	0.762	0.886 N
	果肉硬度	12.316	0.225	0.946	0.380 N	12.409	0.022	0.916	0.473 N
	果肉弹性率	11.278	0.377	0.939	0.681 N/mm	12.194	0.056	0.987	0.319 N/mm
‘玉冠’	MT硬度	14.904	0.369	0.846	0.981 N	14.947	0.030	0.792	1.139 N
	果肉硬度	11.392	0.319	0.880	0.731 N	11.463	0.036	0.823	0.888 N
	果肉弹性率	10.898	0.388	0.954	0.527 N/mm	11.547	0.056	0.990	0.249 N/mm
‘丰水’	MT硬度	14.870	0.511	0.929	1.000 N	15.872	0.056	0.943	0.896 N
	果肉硬度	11.008	0.389	0.971	0.473 N	11.819	0.059	0.987	0.315 N
	果肉弹性率	8.664	0.326	0.865	0.913 N/mm	9.823	0.072	0.963	0.480 N/mm

如表3所示, 对于‘黄金’梨和‘玉冠’梨, 两种模型相比, 零级动力学模型对MT硬度和果肉硬度的拟合结果更优, 一级动力学模型对果肉弹性率的拟合结果更优; 对于‘丰水’梨, 一级动力学模型拟合结果均优于

零级动力学模型。该拟合结果是由两类动力学模型的特点决定的,零级动力学模型适合用于拟合线性变化的参数,而一级动力学模型更适合用于拟合呈指数规律递增或递减变化的参数。‘黄金’梨和‘玉冠’梨的MT硬度和果肉硬度在贮藏前期,都无明显下降趋势甚至升高,在某一转折点处突然降低;而对于果肉弹性率,3个品种梨均表现出随贮藏时间延长逐渐降低,变化更加平缓,因而一级动力学模型拟合结果更优。果蔬在贮藏过程中理化性质变化十分复杂,很少有简单的线性模型能够准确描述果蔬品质变化过程,因而现有研究结果大多是一级动力学模型优于零级动力学模型,如Giannakourou等^[31]发现VC的损失过程、Nisha等^[32]发现番茄酱颜色变化过程也可以用一级动力学模型描述。

表4 梨质地变化的Logistic模型结果

Table 4 Results of Logistic models for textural variation of pear fruit

品种	质地指标	Logistic模型				
		a	b	c	R ²	RMSE
‘黄金’	MT硬度	-0.980	3.127×10^{-4}	0.376	0.740	0.925 N
	果肉硬度	-0.999	2.372×10^{-5}	0.011	0.879	0.567 N
	果肉弹性率	-0.988	1.150×10^{-3}	0.157	0.981	0.376 N/mm
‘玉冠’	MT硬度	-0.999	3.196×10^{-5}	0.013	0.734	1.288 N
	果肉硬度	-0.995	2.231×10^{-4}	0.058	0.759	1.038 N
	果肉弹性率	-0.998	1.291×10^{-4}	0.018	0.976	0.382 N/mm
‘丰水’	MT硬度	-0.998	1.535×10^{-4}	0.029	0.888	1.253 N
	果肉硬度	-0.997	2.732×10^{-4}	0.036	0.938	0.695 N
	果肉弹性率	-0.993	8.724×10^{-4}	0.070	0.954	0.535 N/mm

如表4所示, Logistic模型对果肉弹性率的拟合结果较优,而对于MT硬度和果肉硬度的拟合结果一般,这与一级动力学模型拟合结果相似,原因与对表3的分析相同。但是,对于3个品种梨的质地指标, Logistic模型的拟合结果均略差于一级动力学模型。

表5 梨质地变化的威布尔模型结果

Table 5 Results of Weibull models for textural variation of pear fruit

品种	质地指标	威布尔模型				RMSE
		C ₀	α	β	R ²	
‘黄金’	MT硬度	17.762	33.218	2.754	0.848	0.708 N
	果肉硬度	11.774	31.622	1.814	0.982	0.218 N
	果肉弹性率	12.451	17.957	0.882	0.990	0.271 N/mm
‘玉冠’	MT硬度	13.983	22.551	2.232	0.936	0.630 N
	果肉硬度	10.658	20.980	2.153	0.953	0.460 N
	果肉弹性率	11.588	17.968	0.975	0.990	0.247 N/mm
‘丰水’	MT硬度	15.299	17.610	1.277	0.959	0.756 N
	果肉硬度	11.483	16.955	1.193	0.995	0.200 N
	果肉弹性率	9.966	13.763	0.913	0.965	0.465 N/mm

如表5所示,与前述零级动力学模型、一级动力学模型和Logistic模型结果相比,对3个品种梨的任意一项质地指标,均是威布尔模型拟合结果更优。结果表明威布尔模型用于描述梨质地变化具有很好的通用性,这与Terasaki等^[12]研究猕猴桃软化过程、Amodio等^[22]研究甜瓜

的主要品质降解过程建议用威布尔模型结果是一致的。这可能是由于威布尔模型中同时兼顾了参数的线性和非线性变化,能够很好地应用于农产品品质变化描述,如微生物生长、抗氧化剂变化、VC和VB₂含量降低、褐变等^[33]。威布尔模型对MT硬度、果肉硬度和果肉弹性率的R²分别为0.848~0.959、0.953~0.995和0.965~0.990, RMSE分别为0.630~0.756、0.200~0.460 N和0.247~0.465 N/mm。

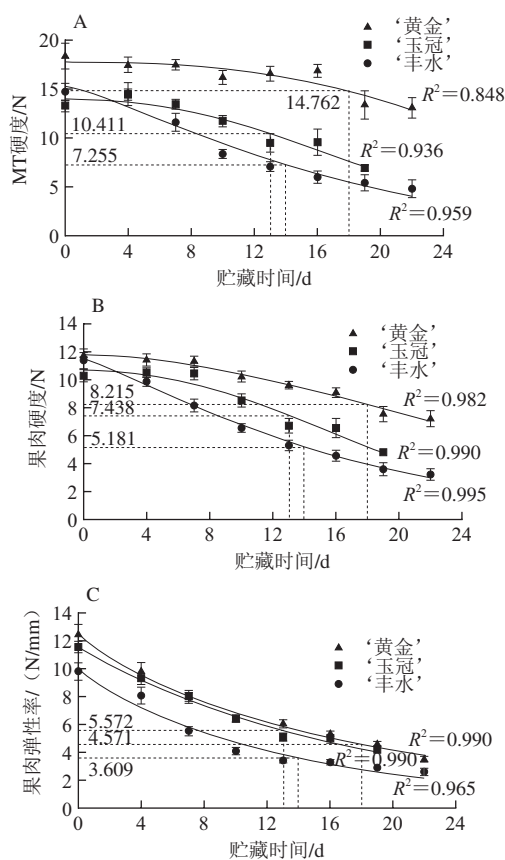


图5 不同品种梨MT硬度(A)、果肉硬度(B)、果肉弹性率(C)的威布尔模型拟合曲线

Fig. 5 Fitting curves for MT firmness (A), flesh firmness (B) and stiffness (C) of different pear varieties obtained by the Weibull model

如图5所示,根据2.2节感官评定的结果,‘黄金’、‘玉冠’和‘丰水’梨分别在18、13和14 d后不建议食用,再结合拟合得到的威布尔模型,计算出‘黄金’、‘玉冠’和‘丰水’梨的MT硬度分别低于14.762、10.411 N和7.255 N,果肉硬度分别低于8.215、7.438 N和5.181 N,果肉弹性率分别低于4.571、5.572 N/mm和3.609 N/mm后不具备商品价值,不建议食用。同时发现,不同品种梨的MT硬度和果肉硬度变化规律差异较大,可食用期的判别临界值差异也较大;而不同品种梨的果肉弹性率变化规律非常近似,且可食用期的判别临界值差异也较小,因此果肉弹性率对判断不同品种梨的可食用期具有更好的通用性。

3 结 论

本实验研究了‘黄金’、‘玉冠’和‘丰水’梨在贮藏过程中多质地参数(MT硬度、果肉硬度和果肉弹性率)和感官品质变化规律,并用零级和一级动力学模型、Logistic模型和威布尔模型对质地参数拟合。果肉弹性率对贮藏时间变化的灵敏性优于MT硬度和果肉硬度,且果肉弹性率与感官总体可接受度的相关性也更高;对于3个质地参数的动力学模型拟合,均是威布尔模型的拟合结果最佳;同时结合感官评定和威布尔模型,得出了3个品种梨是否具备商品价值的质地参数临界值,且果肉弹性率用于判断不同品种梨的可食用期具有更好的通用性。

基于以上研究结果,梨的质地特性变化规律可以用威布尔模型来表达,且果肉弹性率是一个可较好评价梨质地的指标,该研究结果可以为梨在贮藏过程中的质地变化状况进行预测和可食用期的评估,也可以为梨的品质分级分选、深精加工等提供理论参考。

参考文献:

- [1] ALI M M, HASHIM N, BEJO S K, et al. Rapid and nondestructive techniques for internal and external quality evaluation of watermelons: a review[J]. *Scientia Horticulturae*, 2017, 225: 689-699. DOI:10.1016/j.scienta.2017.08.012.
- [2] XIE L J, WANG A C, XU H R, et al. Applications of near-infrared systems for quality evaluation of fruits: a review[J]. *Transactions of the ASABE*, 2016, 59(2): 399-419. DOI:10.13031/trans.59.10655.
- [3] 李里特. 食品物性学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001: 74.
- [4] 李洪浩, 陈季旺. 水果与蔬菜的质地[J]. *食品研究与开发*, 1997, 18(1): 61-62.
- [5] HIWASA K, NAKANO R, HASHIMOTO A, et al. European, Chinese and Japanese pear fruits exhibit differential softening characteristics during ripening[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2004, 55: 2281-2290. DOI:10.1093/jxb/erh250.
- [6] 胡位歆, 丁甜, 刘东红. 贮藏过程中食品品质变化动力学模型的应用[J]. *中国食品学报*, 2017, 17(5): 161-167. DOI:10.16429/j.1009-7848.2017.05.021.
- [7] 谢晶, 张利平, 苏辉, 等. 上海青蔬菜的品质变化动力学模型及货架期预测[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(15): 271-278. DOI:10.3969/j.issn.1002-6819.2013.15.033.
- [8] SHI C, LU H, CUI J Y, et al. Study on the predictive models of the quality of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) filets stored under variable temperature conditions[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2014, 38(1): 356-363. DOI:10.1111/j.1745-4549.2012.00783.x.
- [9] GIANNAKOUREOU M C, TAOUKIS P S. Kinetic modelling of vitamin C loss in frozen green vegetables under variable storage conditions[J]. *Food Chemistry*, 2003, 83(1): 33-41. DOI:10.1016/S0308-8146(03)00033-5.
- [10] ZHANG L N, LI X, LU W, et al. Quality predictive models of grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) at different temperatures during storage[J]. *Food Control*, 2011, 22(8): 1197-1202. DOI:10.1016/j.foodcont.2011.01.017.
- [11] OLIVEIRA F, SOUSA-GALLAGHER M J, MAHAJAN P V, et al. Development of shelf-life kinetic model for modified atmosphere packaging of fresh sliced mushrooms[J]. *Journal of Food Engineering*, 2012, 111(2): 466-473. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2012.01.013.
- [12] TERASAKI S, SAKURAI N, KUROKI S, et al. A new descriptive method for fruit firmness changes with various softening patterns of kiwifruit[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2013, 86: 85-90. DOI:10.1016/j.postharvbio.2013.06.009.
- [13] GIL M M, MILLER F A, BRANDÃO T R S, et al. On the use of the Gompertz model to predict microbial thermal inactivation under isothermal and non-isothermal conditions[J]. *Food Engineering Reviews*, 2011, 3(1): 17-25. DOI:10.1007/s12393-010-9032-2.
- [14] MYTILINAIOS I, SALIH M, SCHOFIELD H K, et al. Growth curve prediction from optical density data[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2012, 154(3): 169-176. DOI:10.1016/j.jfoodmicro.2011.12.035.
- [15] 屠康, 马龙, 潘秀娟. 敲击振动无损检测3种梨果实品质参数的研究[J]. *安徽农业大学学报*, 2005(1): 50-53. DOI:10.13610/j.cnki.1672-352x.2005.01.013.
- [16] 王加华, 陈卓, 李振茹, 等. 洋梨硬度的便携式可见/近红外漫透射检测技术[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(11): 129-133. DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.11.025.
- [17] 潘秀娟, 屠康. 红富士苹果采后品质变化的破坏与非破坏检测研究[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2004, 32(9): 38-42; 46. DOI:10.3321/j.issn.1671-9387.2004.09.009.
- [18] TANIWAKI M, HANADA T, TOHRO M, et al. Non-destructive determination of the optimum eating ripeness of pears and their texture measurements using acoustical vibration techniques[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2009, 51(3): 305-310. DOI:10.1016/j.postharvbio.2008.08.004.
- [19] 李丽娜, 赵武奇, 曾祥源, 等. 苹果的质构与感官评定相关性研究[J]. *食品与机械*, 2017, 33(6): 37-41; 45. DOI:10.13652/j.issn.1003-5788.2017.06.008.
- [20] ZANONI B, PAGLIARINI E, GALLI A, et al. Shelf-life prediction of fresh blood orange juice[J]. *Journal of Food Engineering*, 2005, 70(4): 512-517. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2004.10.019.
- [21] 刘春菊, 钱旻, 宋江峰, 等. 速冻莲藕片贮藏过程中品质变化动力学模型[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(6): 301-308. DOI:10.11975/j.issn.1002-6819.2017.06.039.
- [22] AMODIO M L, DEROSI A, COLELLI G. Modeling sensorial and nutritional changes to better define quality and shelf-life of fresh-cut melons[J]. *Journal of Agricultural Engineering*, 2013, 43(4): 38-45. DOI:10.4081/jae.2013.e6.
- [23] 钟金锋, 覃小丽, 郑炯. 竹笋热处理过程中颜色变化的动力学模型[J]. *食品科学*, 2014, 35(19): 101-105. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201419021.
- [24] CHO H T, COSGROVE D J. Altered expression of expansin modulates leaf growth and pedicel abscission in *Arabidopsis thaliana*[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2000, 97(17): 9783-9788. DOI:10.1073/pnas.160276997.
- [25] SIRISOMBOON P, TANAKA M, FUJITA S, et al. Relationship between the texture and pectin constituents of Japanese pear[J]. *Journal of Texture Studies*, 2000, 31(6): 679-690. DOI:10.1111/j.1745-4603.2000.tb01028.x.
- [26] HERTOGE M L A T M, BEN-ARIE R, RÓTH E, et al. Humidity and temperature effects on invasive and non-invasive firmness measures[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2004, 33(1): 79-91. DOI:10.1016/j.postharvbio.2004.01.005.
- [27] BARITELLE A L, HYDE G M, FELLMAN J K, et al. Using 1-MCP to inhibit the influence of ripening on impact properties of pear and apple tissue[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2001, 23(2): 153-160.
- [28] 李丽娜, 赵武奇, 曾祥源, 等. 苹果的质构与感官评定相关性研究[J]. *食品与机械*, 2017, 33(6): 37-41; 45. DOI:10.13652/j.issn.1003-5788.2017.06.008.
- [29] CHAUVIN M A, ROSS C F, PITTS M, et al. Relationship between instrumental and sensory determination of apple and pear texture[J]. *Journal of Food Quality*, 2010, 33(2): 181-198. DOI:10.1111/j.1745-4557.2010.00292.x.
- [30] 张杨, 梁怡蕾, 潘琦雯, 等. 猕猴桃感官评定与质地剖面分析的相关性[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(16): 243-247; 252. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2018.16.043.
- [31] GIANNAKOUREOU M C, TAOUKIS P S. Kinetic modelling of vitamin C loss in frozen green vegetables under variable storage conditions[J]. *Food Chemistry*, 2003, 83(1): 33-41. DOI:10.1016/S0308-8146(03)00033-5.
- [32] NISHA P, SINGHAL R S, PANDIT A B. Kinetic modelling of colour degradation in tomato puree (*Lycopersicon esculentum* L.)[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2011, 4(5): 781-787. DOI:10.1007/s11947-009-0300-1.
- [33] 胡位歆, 金王平, 刘东红. 生鲜食品品质(货架寿命)预测模型的建立方法[J]. *中国食物与营养*, 2014, 20(5): 45-49. DOI:10.3969/j.issn.1006-9577.2014.05.013.