

猕猴桃货架期间品质动力学及寿命预测模型

刘婧^{1a}, 史萌^{1a}, 关文强^{1a}, 陈爱强^{1b}, 刘斌^{1b}, 张娜², 陈存坤², 阎瑞香³

(1.天津商业大学 a.生物技术与食品科学学院天津市食品生物技术重点实验室

b.机械工程学院天津市制冷技术重点实验室, 天津 300134;

2.国家农产品保鲜工程技术研究中心 天津市农产品采后生理与贮藏保鲜重点实验室, 天津 300384;

3.天津科技大学 包装与印刷工程学院, 天津 300222)

摘要: **目的** 研究货架期间猕猴桃的品质动力学变化特性与寿命。**方法** 以“秦美”猕猴桃为实验材料, 在温度为 4, 10, 20 °C 下进行货架试验, 测定猕猴桃质量损失率、硬度、可溶性固形物含量、可滴定酸含量、色值 (C^* , L^*) 的变化, 利用 Arrhenius 方程建立相应品质指标的动力学模型, 经恒等变形后得到货架寿命预测加权模型, 并对模型进行验证。**结果** 低温可以明显延缓猕猴桃在货架期间品质的降低, 其品质变化均符合零级动力学方程; 通过对比货架温度和时间对各品质指标的影响可知, 货架时间均大于货架温度; 综合上述品质指标构建的货架寿命预测加权模型, 其相对误差在±10%以内, 精确度较高。**结论** 在温度为 4~20 °C 范围内, 可依据加权模型对猕猴桃的货架寿命进行准确预测。

关键词: 猕猴桃; 品质; 模型; Arrhenius 方程; 寿命预测

中图分类号: TS255.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2019)09-0006-09

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.09.002

Quality Kinetics and Life Prediction Model of Kiwifruit during Shelf Life

LIU Jing^{1a}, SHI Meng^{1a}, GUAN Wen-qiang^{1a}, CHEN Ai-qiang^{1b}, LIU Bin^{1b}, ZHANG Na²,
CHEN Cun-kun², YAN Rui-xiang³

(1a. Tianjin Key Laboratory of Food Biotechnology, School of Biotechnology and Food Sciences b. Tianjin Key Laboratory of Refrigeration Technology, School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China; 2. National Agricultural Product Preservation Engineering Technology Research Center, Tianjin Key Laboratory of Postharvest Physiology and Storage and Preservation of Agricultural Products, Tianjin 300384, China; 3. School of Packaging and Printing Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China)

ABSTRACT: The work aims to study the quality kinetics and lifespan of kiwifruit during shelf life. The shelf test at 4, 10 and 20 °C was carried out with 'Qinmei' kiwifruit as test material, and the changes in mass loss rate, hardness, soluble solid content, titratable acid content, and color values (C^* , L^*) during the period were determined. The Arrhenius equation was used to establish the dynamic model of the corresponding quality index. After the constant deformation, the shelf life prediction weighting model was obtained and the model was verified. Low temperature could significantly delay the quality of kiwifruit during shelf life, and the quality changes were in line with the zero-order kinetic equation. By comparing the influence of shelf temperature and time on various quality indicators, shelf time was more important than shelf tem-

收稿日期: 2019-03-26

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFD0401304-4); 天津市自然科学基金 (18JCQNJC84600); 天津市林果产业技术体系 (ITTFPRS2018009)

作者简介: 刘婧 (1995—), 女, 天津商业大学硕士生, 主攻农产品加工与贮藏。

通信作者: 关文强 (1974—), 男, 博士, 天津商业大学教授, 主要研究方向为农产品加工与贮藏。

perature. The relative error of the shelf life prediction weighting model constructed by combining the above quality indicators was within $\pm 10\%$, and the accuracy was high. In the range of 4~20 °C, the shelf life of kiwifruit can be accurately predicted based on the above model.

KEY WORDS: kiwifruit; quality; model; Arrhenius equation; life prediction

猕猴桃果实质地柔软、酸甜适宜,含有丰富的蛋白质和多种矿物质,Vc 含量高达 100~420 mg/100 g,是其它水果的十几倍甚至几十倍,被誉为“水果 Vc 之王”。同时,猕猴桃还含有大量的膳食纤维和多种氨基酸,可鲜食,可制作果酱或酿酒,具有高营养价值、防癌和保健等作用,深受消费者的喜爱^[1-2]。猕猴桃为呼吸跃变型果实,具有皮薄汁多,采收季节温度较高,对乙烯非常敏感,果实极易变软、腐烂等特点,使其货架寿命大大缩短^[3]。研究猕猴桃的品质动力学变化规律,构建货架寿命预测模型,对于动态监控物流过程中猕猴桃的品质变化,减少流通过程中猕猴桃的经济损失具有重要意义。

食品在物流过程中的品质变化与时间、温度、呼吸作用等具有密切关系,越来越多的数学方程和模型应用到各种农产品的货架寿命预测中,并取得了较好的效果,如 Arrhenius 方程、WLF 方程、 Q_{10} 模型和 WHA 等方法。一些学者对水果^[4-5]、蔬菜^[6-7]、水产品^[8-9]、果酒^[10]的货架寿命预测就使用了上述方法。在猕猴桃的寿命预测方面也有一些成果,顾海宁^[11]等利用 Arrhenius 方程建立了基于质量损失率和 Vc 含量的猕猴桃贮藏期预测模型;胡位歆^[5]以质量损失率为关键指标,利用 Q_{10} 模型建立了猕猴桃贮藏期预测模型。两者针对不同贮藏温度下猕猴桃的采后品质变化,对其贮藏期进行了预测,但对猕猴桃在货架期间的品质动力学变化以及以此为变量的寿命预测却罕有报道。货架温度与贮藏温度不同,猕猴桃在贮藏期间的品质变化小,而在货架期间易发生品质劣变,造成较大损失。文中通过研究不同货架温度(4, 10, 20 °C)下猕猴桃果实品质指标随时间、温度的变化情况,基于 Arrhenius 方程建立相关品质指标的动力学模型,同时对模型中货架温度和时间对各品质指标影响的响应面进行分析,探讨货架温度和时间对各品质指标值的影响规律。将品质动力学模型恒等变形后建

立货架寿命预测加权模型,同时采用以感官终点决定的动态品质指标值对猕猴桃的货架寿命进行预测与验证,以期为控制和预测猕猴桃品质提供理论指导。

1 实验

1.1 材料及处理

猕猴桃品种为“秦美”,产自陕西省周至县,于产地冷藏 5 个月后常温汽车运输至天津市王顶堤果蔬批发市场,抵达天津后次日运至实验室,选择大小匀称、色泽均一、无机械损伤、无病虫害、成熟度一致的果实装入 0.08 mm 厚的打孔 PE 保鲜袋(孔径为 1.3 cm),然后封口,并分别置于 4, 10, 20 °C 冷库中,模拟商场猕猴桃放置条件。每种处理做 3 次重复实验,每个重复实验有 6 个果实,其中 3 个用于感官评价,3 个用于测量其他生理指标。另外每个处理组固定取 18 个果实专门用于质量损失率的测定。实验过程中,4 °C 下每隔 6 d, 10 °C 下每隔 4 d, 20 °C 下每隔 2 d 测定果实的各项品质及生理指标。

1.2 仪器与设备

主要仪器与设备:TD2001 电子分析天平,天津市天平仪器有限公司;FHM-5 型果实硬度计,日本竹村;PAL-BX/ACID1 型糖酸折射仪,日本爱拓公司;JYL-C022E 型多功能榨汁机,山东济南九阳电器有限公司;CR-400 型色彩色差计,日本柯尼卡美能达公司。

1.3 方法

1.3.1 感官评价

参考陈永安等^[12]的方法进行感官评价,由 15 位食品专业人士进行感官评分,评定猕猴桃的外观、香气、风味和口感。对猕猴桃的各项指标进行感官评定的标准见表 1。

表 1 猕猴桃感官评价标准
Tab.1 Evaluation standards of kiwifruit sensory quality

质量级别	感官指标及权重			
	外观 (20%)	香气 (20%)	风味 (30%)	口感 (30%)
I	果形端正,果大且均匀	香味浓郁而不腻	香甜	汁多质细,非常爽口
II	果形端正,果较大且均匀	香味较浓	酸甜适中	汁多爽口
III	果形较好,果大小适中	香味较淡或无香味	较淡	一般
IV	果形较差,果较小且不均匀	无香味且气味不好	过酸或有较淡异味	汁较少,果肉较硬
V	果形差,果小且参差不齐	有明显不好气味	有明显异味	果肉、果心发硬

1.3.2 品质指标测定

采用称量法^[13]测定果实质量损失率。在猕猴桃果实赤道附近选取均匀分布的3个点,削去果皮后,用FHM-5型果实硬度计测量果肉的硬度^[14]。用PAL-BX/ACID1型糖酸折射仪检测可溶性固形物含量^[15]。采用酸碱滴定法测定可滴定酸含量^[13]。用CR-400色差计测量猕猴桃两侧果肉的亮度值 L^* 、红度值 a^* 、黄度值 b^* ,并计算鲜艳程度 C^* ^[16],计算如式(1):

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (1)$$

1.4 猕猴桃货架寿命预测模型

1.4.1 动力学模型

果蔬中品质指标 C 的反应动力学大多采用零级反应或一级反应进行描述,其中零级反应模型为:

$$C_t = C_0 + kt \quad (2)$$

式中: t 为货架时间(d); C_t 为货架时间为 t 时的品质指标值; C_0 为品质指标的初始值; k 为化学反应速率常数。

在温度为4, 10, 20℃下得到猕猴桃的相关品质指标值,利用获得的数据作图,确定反应级数,计算反应速率常数,作 $\ln k - 1/T$ 图,依据直线的斜率和截距可分别获得反应活化能 E_a 和指前因子 A 值,带入式(3),得到该反应的Arrhenius方程。

$$k = Ae^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (3)$$

式中: k 为反应速率常数; A 为指前因子; R 为气体常数, $R=8.314 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$; T 为绝对温度(K); E_a 为活化能(J/mol)。

将得到的Arrhenius方程与式(2)相结合,即可获得猕猴桃的品质动力学模型。

1.4.2 货架寿命预测加权模型的建立

对上述得到的品质动力学模型进行恒等变形,求得猕猴桃在不同货架温度下相应品质指标 C 的货架期(W)公式:

$$W = \frac{C - C_0}{Ae^{-\frac{E_a}{RT}}} \quad (4)$$

式中: W 为猕猴桃的货架期(d)。

果蔬的货架寿命与其品质正相关,因此可以通过对其品质的综合评定建立加权货架寿命预测模型。在已经求得单一品质指标货架寿命预测模型的基础上,参照胡位歆^[17]的方法并稍加改进,对猕猴桃货架期间的多项品质指标的不同加权系数进行综合评定,并利用各品质指标的拟合度误差(即回归系数)确定各项品质指标的权重 x_i ,从而建立货架寿命预测加权模型。各指标加权系数 x_i 的计算见式(5):

$$x_i = \frac{X_i}{\sum_{i=1}^n X_i} \quad (5)$$

式中: x_i 为猕猴桃第 i 个品质指标的加权系数; X_i 为猕猴桃的第 i 个品质指标的回归系数。

1.5 数据分析

利用Excel 2010进行数据整理,采用Origin 8.5拟合曲线并绘图,采用Design-expert 8.0绘制响应面图,采用SPSS 16.0对实验数据进行方差分析(取 $P<0.05$)。采用平均相对误差(Relative error, E_R)对预测值和实测值之间的偏差进行分析。 E_R 采用式(6)进行计算:

$$E_R = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|V_e - V_p|}{V_e} \times 100\% \quad (6)$$

式中: V_e 为试验的实测值; V_p 为模型预测值; N 为实验次数。如果 $E_R<10\%$,则认为该模型的拟合度可以接受。

2 结果与分析

2.1 猕猴桃货架期间品质指标的变化与动力学分析

2.1.1 质量损失率

质量损失率是评价猕猴桃商品价值的重要指标之一,主要由呼吸消耗和水分流失引起^[18]。Peleg^[19]研究表明,质量损失率高于5%会引发果实表皮显著萎蔫,果肉硬度降低,口感变差,食用价值下降。由图1a可知,货架期间猕猴桃的质量损失率均随温度 and 时间的增加而不断增加,温度越高,质量损失率达到5%的时间越短。在20℃,货架期为10d时果实的质量损失率已经达到6.86%,外观出现明显皱缩。在4℃,货架期为24d时果实的质量损失率仅为1.51%,只有在20℃、货架期10d时质量损失率的20%。在10℃和20℃条件下猕猴桃的质量损失率分别在货架期24d和48d时增加至5.84%和5.09%,已超过5%,失去商品价值^[11, 20]。整个货架期间,20℃条件下果实的质量损失率增加速率最大,变化最为明显,说明在较高温度下物质代谢速率快,失水现象更为明显,果实品质下降最快。此外,通过以图1a的斜率为纵坐标,1/T为横坐标作图,计算得到 $E_a=7.22 \times 10^4$, $A=5.22 \times 10^{12}$,由Arrhenius方程可知猕猴桃的质量损失率动力学预测模型为:

$$F_t = 5.22 \times 10^{12} e^{-\frac{8.69 \times 10^3}{T}} \times t \quad (7)$$

依据模型得到货架温度和时间交互作用对猕猴桃质量损失率影响的响应面图,见图1b。其中货架温度和时间($P<0.01$)均显著影响着猕猴桃的质量损失率,对比影响猕猴桃质量损失率的主次因素为货架时间>货架温度。

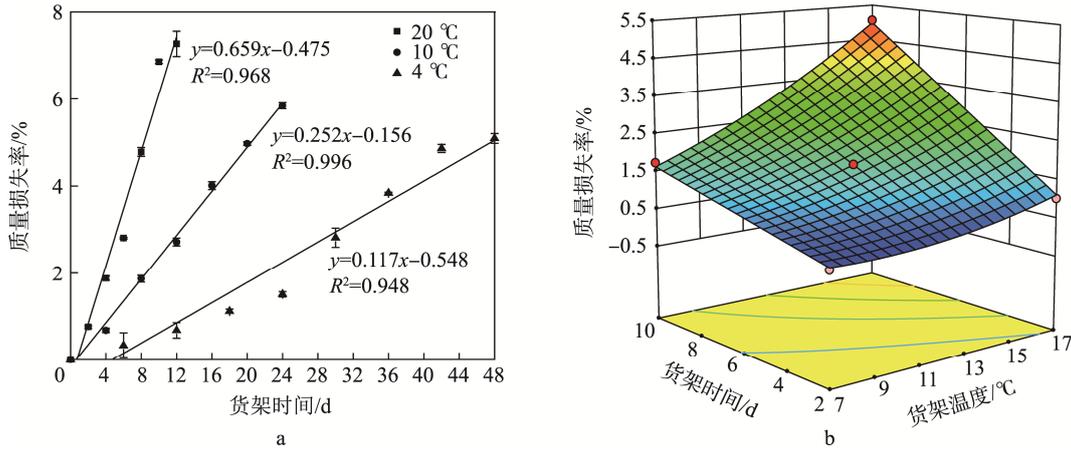


图 1 猕猴桃货架期间质量损失率的变化与动力学模型响应面

Fig.1 Changes in mass loss rate and kinetic model response surface of kiwifruit during shelf life

2.1.2 硬度

猕猴桃为浆果型果实，硬度变化比较明显，对消费者的可接受程度有着非常重要的影响。通常认为，猕猴桃果实的可食用硬度范围为 0.3~1.4 kg/cm²，当硬度低于 0.3 kg/cm² 时，则失去商品价值^[21]。由图 2a 可知，随着温度和货架时间的递增，猕猴桃的硬度均呈逐渐下降趋势。研究表明，这种趋势是由于淀粉降解和果胶物质的转化导致大量细胞壁结构丧失，细胞壁物质降解，细胞发生分离所致^[22]。在货架时间为 12 d，20 °C 下猕猴桃果实的硬度下降速率最快，为 0.273 kg/cm²，已降至货架寿命终点以下。在 10 °C 下次之，为 1.567 kg/cm²，在 4 °C 下效果最好，为 2.155

kg/cm²，显著高于在 10 °C 和 20 °C 下 ($P<0.05$)，说明低温可以有效保持猕猴桃的硬度，延长货架寿命。此外，通过以图 2a 的斜率为纵坐标，1/T 为横坐标作图，计算得到 $E_a=5.82\times 10^4$, $A=-5.34\times 10^9$ ，由 Arrhenius 方程可知猕猴桃的硬度动力学预测模型为：

$$F_t = -5.34 \times 10^9 e^{\frac{-7.00 \times 10^3}{T}} \times t + 2.746 \quad (8)$$

依据模型得到货架温度和时间交互作用对猕猴桃硬度影响的响应面，见图 2b。其中货架温度和时间 ($P<0.01$) 均显著影响着猕猴桃的质量损失率，对比影响猕猴桃硬度的主次因素为货架时间>货架温度。

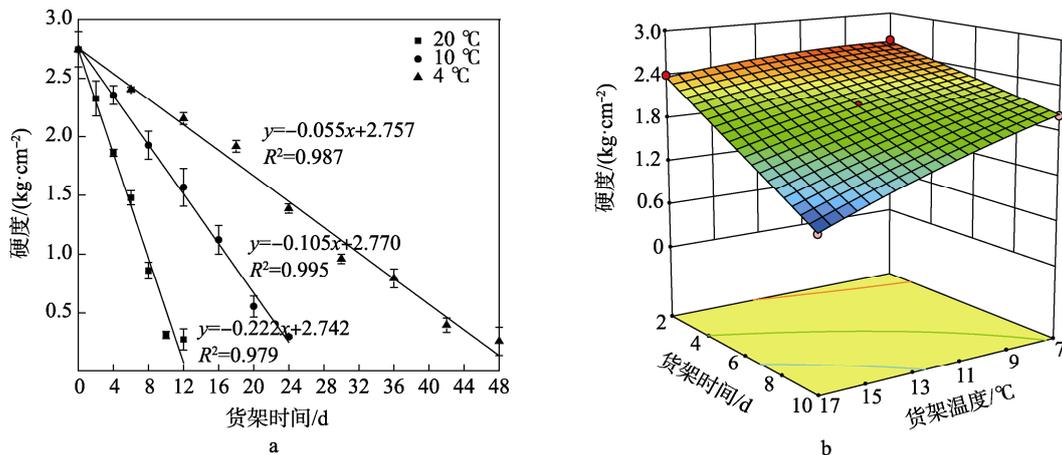


图 2 猕猴桃货架期间硬度的变化与动力学模型响应面

Fig.2 Changes in hardness and kinetic model response surface of kiwifruit during shelf life

2.1.3 可溶性固形物含量

可溶性固形物主要包括糖、酸等可溶性物质，是单糖、双糖、多糖等可溶性糖类的总称，还包括糖、酸、维生素、矿物质等，是衡量猕猴桃果实口感和品质的重要指标^[23]。由图 3a 可知，随着货架时间的增加，淀粉逐渐转化为可溶性糖，果胶物质水解，猕猴

桃果实的可溶性固形物含量呈上升趋势，达到一定峰值后逐渐趋于平缓。在 20 °C 条件下猕猴桃的可溶性固形物含量上升最快，货架期结束时从初始值 11.4% 上升至 15.8%，与之相比在 10 °C 和 4 °C 条件下的猕猴桃可溶性固形物含量上升较为缓慢，分别上升至 14.42% 和 13.67%，可溶性固形物含量总体值和上升

速率均低于 20 °C，可能是由于较低的温度条件抑制了猕猴桃果实中的淀粉降解和后熟速度。此外，通过以图 3a 的斜率为纵坐标，1/T 为横坐标作图，计算得到 $E_a=8.48 \times 10^4$ ， $A=5.40 \times 10^{14}$ ，由 Arrhenius 方程可知猕猴桃的可溶性固形物含量动力学预测模型为：

$$F_t = 5.40 \times 10^{14} e^{\frac{-1.02 \times 10^4}{T}} \times t + 11.4 \quad (9)$$

依据模型得到货架温度和时间交互作用对猕猴桃可溶性固形物含量影响的响应面，见图 3b。其中货架温度和时间 ($P < 0.01$) 均显著影响着猕猴桃的可溶性固形物含量，对比影响猕猴桃可溶性固形物含量的主次因素为货架时间 > 货架温度。

2.1.4 可滴定酸含量

果实的可滴定酸在风味上起着很重要的作用，其含量是衡量果实品质的一个重要指标。猕猴桃在货架期间仍不断地进行新陈代谢，果实内有机酸则作为呼吸底物被不断消耗，此外还有部分有机酸被转化为糖类等其他物质，因此，随着果实的成熟，可滴定酸含量会逐渐下降^[24]。由图 4a 可知，在整个货架期间，

各温度下猕猴桃的可滴定酸含量均逐渐下降，且温度越高，下降速率越快。在 20 °C 时猕猴桃果实的代谢旺盛，可滴定酸含量下降得最快，货架时间为 12 d 时已下降至 1.12%，在 10 °C 和 4 °C 时分别下降至 1.33%，1.46%。此时，在温度 4 °C 下较贮藏前可滴定酸含量仅下降了 4.35%，其下降速率显著低于温度 10 °C 和 20 °C 下 ($P < 0.05$)，这说明低温可以有效延缓猕猴桃可滴定酸含量的下降，使果实保持更好的口感和风味。此外，通过以图 4a 的斜率为纵坐标，1/T 为横坐标作图，计算得到 $E_a=6.19 \times 10^4$ ， $A=-3.83 \times 10^9$ ，由 Arrhenius 方程可知猕猴桃的可滴定酸含量动力学预测模型为：

$$F_t = -3.83 \times 10^9 e^{\frac{-7.44 \times 10^3}{T}} \times t + 1.52 \quad (10)$$

依据模型得到货架温度和时间交互作用对猕猴桃可滴定酸含量影响的响应面，见图 4b。其中货架温度和时间 ($P < 0.01$) 均显著影响着猕猴桃的可滴定酸含量，对比影响猕猴桃可滴定酸含量的主次因素为货架时间 > 货架温度。

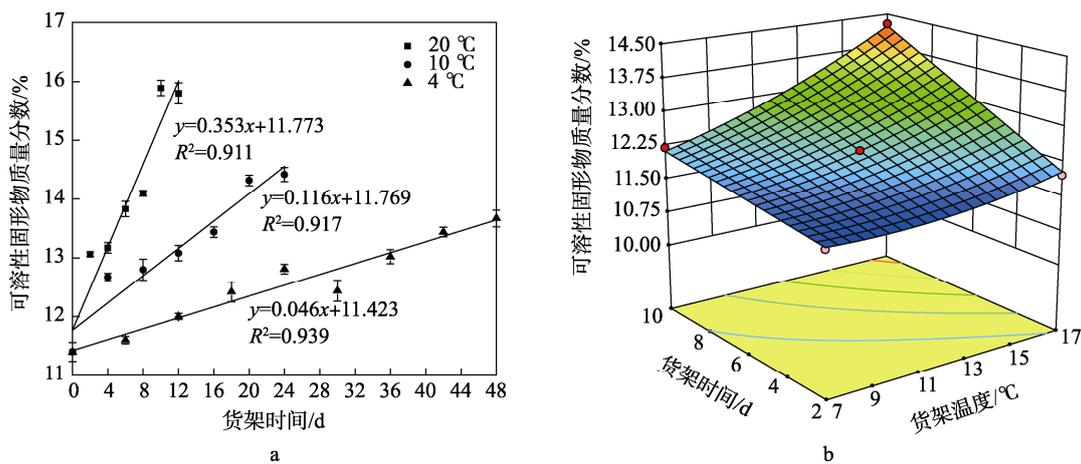


图 3 猕猴桃货架期间可溶性固形物含量的变化与动力学模型响应面

Fig.3 Changes in soluble solids content and kinetic model response surface of kiwifruit during shelf life

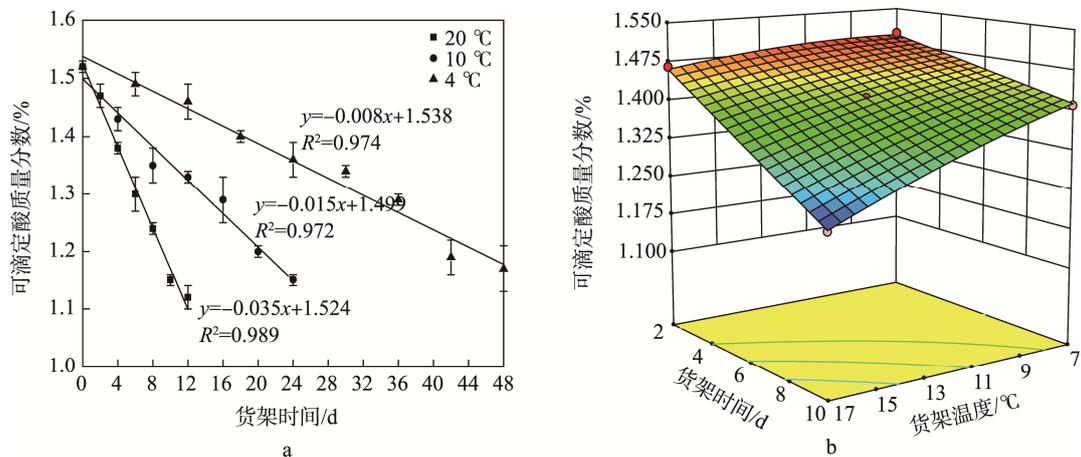


图 4 猕猴桃货架期间可滴定酸含量的变化与动力学模型响应面

Fig.4 Changes in titratable acid content and kinetic model response surface of kiwifruit during shelf life

2.1.5 C*值

猕猴桃在货架期间,果实颜色的变化从另一方面反映了果实的后熟和衰老进程。 C^* 值代表猕猴桃果实的鲜艳程度, C^* 值越大, 果实的颜色越鲜艳。由图 5a 可知, 各货架温度下, 猕猴桃果实 C^* 值和 L^* 值随着时间的延长均呈下降趋势, 说明果实颜色鲜艳程度的下降随着时间延长而逐渐加重。在 20 °C 条件下的 C^* 下降速率明显比在 4, 10 °C 条件下更快, 变化更为明显, 原因可能是高温下失水较多, 色素受到氧化所致。此外, 通过以图 5a 的斜率为纵坐标, $1/T$ 为横坐标作图, 计算得到 $E_a=7.19 \times 10^4$, $A=-2.14 \times 10^{12}$, 由 Arrhenius 方程可知猕猴桃的 C^* 值动力学预测模型为:

$$F_t = -2.14 \times 10^{12} e^{-\frac{8.65 \times 10^3}{T}} \times t + 32 \quad (11)$$

依据模型得到货架温度和时间交互作用对猕猴桃 C^* 值影响的响应面, 见图 5b。其中货架温度和时间 ($P<0.01$) 均显著影响着猕猴桃的 C^* 值, 对

比影响猕猴桃 C^* 值的主次因素为货架时间>货架温度。

2.1.6 L*值

猕猴桃的 L^* 值代表果实的亮暗度, 数值越小表示果肉颜色越暗, 颜色的亮暗度能反映出果实的褐变和成熟衰老情况^[25]。由图 6a 可知, 各贮藏温度下, 猕猴桃 L^* 值随着贮藏时间的延长呈下降趋势, 说明果实颜色亮度变暗的情况随着贮藏时间的延长而加重, 且温度越高, 下降速率越快, 果实的衰老状况越严重。此外, 通过以图 6a 的斜率为纵坐标, $1/T$ 为横坐标作图, 计算得到 $E_a=7.85 \times 10^4$, $A=-6.25 \times 10^{13}$, 由 Arrhenius 方程可知猕猴桃的 L^* 值动力学预测模型为:

$$F_t = -6.25 \times 10^{13} e^{-\frac{9.44 \times 10^3}{T}} \times t + 51.01 \quad (12)$$

依据模型得到货架温度和时间交互作用对猕猴桃 L^* 值影响的响应面, 见图 6b。其中货架温度和时间 ($P<0.01$) 均显著影响着猕猴桃的 L^* 值, 对比影响猕猴桃 L^* 值的主次因素为货架时间>货架温度。

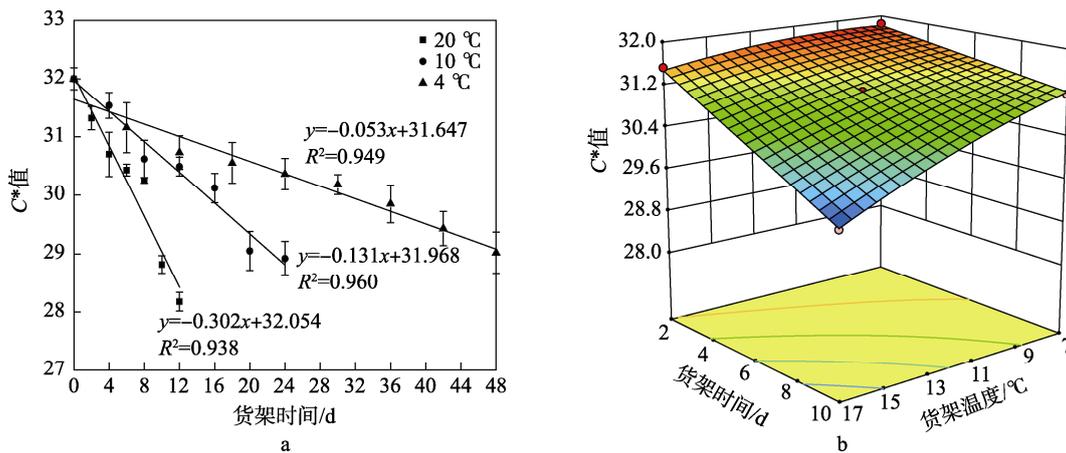


图 5 猕猴桃货架期间 C^* 值的变化与动力学模型响应面

Fig.5 Changes in C^* value and kinetic model response surface of kiwifruit during shelf life

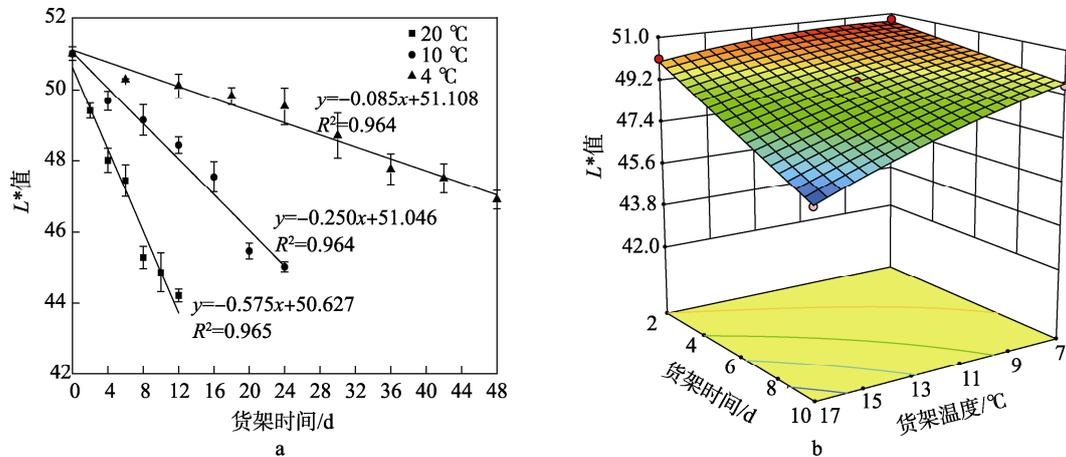


图 6 猕猴桃货架期间 L^* 值的变化与动力学模型响应面

Fig.6 Changes in L^* value and kinetic model response surface of kiwifruit during shelf life

2.2 货架寿命预测加权模型

采用改进后胡位歆^[17]的方法对猕猴桃的品质进行综合评价, 品质综合评价的加权关联度=(1-质量损失率)×0.168+硬度×0.171+可溶性固形物含量×0.160+可滴定酸含量×0.170+C*×0.164+L*×0.167, 从而获得猕猴桃的货架寿命预测加权模型:

$$\begin{aligned}
 W = & \frac{1 - F_{\text{mass}}}{5.22 \times 10^{12} e^{-\frac{8.69 \times 10^3}{T}}} \times 0.168 + \\
 & \frac{F_{\text{hardness}} - 2.746}{-5.34 \times 10^9 e^{-\frac{7.00 \times 10^3}{T}}} \times 0.171 + \\
 & \frac{F_{\text{sugar}} - 11.4}{5.40 \times 10^{14} e^{-\frac{1.02 \times 10^4}{T}}} \times 0.160 + \\
 & \frac{F_{\text{acid}} - 1.52}{-3.83 \times 10^9 e^{-\frac{7.44 \times 10^3}{T}}} \times 0.170 + \\
 & \frac{F_{C^*} - 32}{-2.14 \times 10^{12} e^{-\frac{8.65 \times 10^3}{T}}} \times 0.164 + \\
 & \frac{F_{L^*} - 51.01}{-6.25 \times 10^{13} e^{-\frac{9.44 \times 10^3}{T}}} \times 0.167
 \end{aligned} \tag{13}$$

式中: W 为猕猴桃的货架期 (d)。

2.3 模型的验证

模型在应用时, 必须要注意货架终点值的设定。由于水果的品质指标终点值在行业或国标中没有明确的标准, 因此文中以消费者对产品的接受度作为货架寿命的终点。依据感官评分结果, 综合外观、香气等多方面因素, 确定当感官评分降至 3.5 分时为猕猴桃的货架寿命终点, 各温度下的货架终点时间记为货架寿命实测值。将感官评分为 3.5 时, 各温度的下对应品质指标值带入式 (4) 和 (13), 即得货架寿命预测值。表 2 反映了预测值与实测值的分析比较结果。

由表 2 可知, 基于各品质指标的货架寿命预测值之间有所差距, 其中以质量损失率预测的货架期寿命最为接近实验值, 平均相对误差为 3.47%, 可滴定酸和硬度对应的货架寿命预测模型次之, 平均相对预测误差分别为 5.43% 和 6.25%, 均在 ±10% 以内, 以此 3 种品质指标建立的猕猴桃货架寿命预测模型可准确地预测 4~20 °C 范围内猕猴桃的货架寿命。其他指标的货架寿命预测值和实测值平均相对误差偏大, 所构建模型精确度较低。同时对综合各品质指标构建的货架寿命预测加权模型进行验证, 其平均相对误差为 9.36%, 亦可准确预测猕猴桃的货架寿命。猕猴桃果实品质包括外观品质、风味品质、营养品质等, 它们

表 2 猕猴桃在 4, 10, 20 °C 下货架寿命的预测值和实测值

Tab.2 Predicted and observed value of shelf-life of kiwifruit at 4, 10 and 20 °C

项目	贮藏温度/°C	货架期预测值/d	货架期实测值/d	相对误差/%	平均相对误差/%
质量损失率	4	39.08	42	6.95	3.47
	10	20.69	20	3.45	
	20	10	10	0	
硬度	4	41.57	42	1.02	6.25
	10	22.47	20	9.52	
	20	10.82	10	8.20	
可溶性固形物	4	35.19	42	16.21	15.54
	10	24.26	20	21.3	
	20	10.91	10	9.1	
可滴定酸	4	37.34	42	10.88	5.43
	10	20.5	20	2.50	
	20	9.71	10	2.90	
C*值	4	43.93	42	4.60	12.22
	10	26.03	20	30.15	
	20	9.81	10	1.9	
L*值	4	35.52	42	15.43	18.28
	10	27.2	20	36	
	20	9.66	10	3.4	
加权模型	4	38.79	42	9.07	9.36
	10	23.50	20	17.5	
	20	10.15	10	1.5	

之间既相互联系又相互独立, 以单一某方面的品质指标进行货架寿命预测可能会比较精确, 但是不够全面, 通过对猕猴桃各个品质指标赋予相应的加权系数, 建立货架寿命预测加权模型, 可以在考虑各方面品质影响的基础上更加准确全面地对猕猴桃的货架寿命进行预测。

3 结语

1) 在温度 4~20 °C 范围内, 随着货架时间的增加, 猕猴桃的硬度、可滴定酸含量和色值 (C*, L*) 均呈下降趋势, 质量损失率和可溶性固形物含量均呈上升趋势。

2) 猕猴桃各品质指标均符合零级动力学模型, 具有较高的拟合精度 (R²>0.9), 货架温度和时间对各品质指标值的影响均有显著作用, 且货架时间对各品质指标的影响均大于货架温度。

3) 根据质量损失率、硬度、可滴定酸含量确定的货架寿命预测可知, 模型预测值和实测值之间的平均相对误差均不超过 ±10%, 此外, 文中还对以拟合度误差作为权重构建的猕猴桃货架寿命预测加权模

型进行了验证, 其平均相对误差为 9.36%, 说明在掌握了完整的时间和温度参数的前提下, 应用加权模型可对猕猴桃的货架寿命进行更为全面准确的预测。

参考文献:

- [1] 王刚, 王涛, 潘德林, 等. 不同品种猕猴桃果实有机酸组分及含量分析[J]. 农学学报, 2017, 7(12): 81—84.
WANG Gang, WANG Tao, PAN De-lin, et al. Analysis of Organic Acid Components and Contents of Different Varieties of Kiwifruit Fruits[J]. Acta Agricultura Sinica, 2017, 7(12): 81—84.
- [2] 于鹏. 猕猴桃胡萝卜复合果酱的研制[J]. 黑龙江粮食, 2016(3): 40—43.
YU Peng. Development of Kiwi and Carrot Compound Jam[J]. Heilongjiang Food, 2016(3): 40—43.
- [3] 刘欣. 浆果类果品的贮藏技术与方法[J]. 农业科技与装备, 2015(12): 46—47.
LIU Xin. Storage Techniques and Methods of Berry Fruits[J]. Agricultural Science & Technology, 2015(12): 46—47.
- [4] 张秀媛, 何扩, 赵瑞平, 等. 宣化牛奶葡萄贮藏过程中生理品质变化及货架期动力学模型[J]. 食品科学, 2015, 36(10): 254—258.
ZHANG Xiu-yuan, HE Kuo, ZHAO Rui-ping, et al. Physiological Quality Changes and Shelf-life Dynamics Model of Xuanhua Milk Grape During Storage[J]. Food Science, 2015, 36(10): 254—258.
- [5] 胡位歆, 刘东红. 猕猴桃采后品质分析及货架期预测模型的构建[C]// 2015年中国农业工程学会农产品加工及贮藏工程分会学术年会论文集, 2015: 112—113.
HU Wei-xin, LIU Dong-hong. Postharvest Quality Analysis and Shelf Life Prediction Model of Kiwifruit [C]// Proceedings of the Annual Conference of Agricultural Products Processing and Storage Engineering Branch of China Agricultural Engineering Society, 2015: 112—113.
- [6] 王锡海. 基于水分活度和玻璃化转变理论的冻干双孢蘑菇贮藏稳定性的研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2012.
WANG Xi-hai. Study on Storage Stability of Freeze-dried Agaricus Bisporus Based on Water Activity and Glass Transition Theory[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2012.
- [7] 谢晶, 张利平, 高志立, 等. 鸡毛菜的品质动力学分析及货架期预测模型[J]. 食品科学, 2014, 35(10): 268—272.
XIE Jing, ZHANG Li-ping, GAO Zhi-li, et al. Quality Dynamics Analysis and Shelf Life Prediction Model of Chicken Thyme[J]. Food Science, 2014, 35(10): 268—272.
- [8] 吴行印, 谢晶, 王旭. 不同贮藏温度下小黄鱼货架期预测模型的建立和评价[J]. 包装工程, 2016, 37(19): 84—90.
WU Xing-yin, XIE Jing, WANG Xu. Establishment and Evaluation of Shelf Life Prediction Model for Small Yellow Croaker under Different Storage Temperatures[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(19): 84—90.
- [9] 吴奇子, 陈雪, 刘欢, 等. 不同贮藏温度条件下鲈鱼货架期预测模型的构建[J]. 食品科学, 2015, 36(22): 232—236.
WU Qi-zi, CHEN Xue, LIU Huan, et al. Construction of Prediction Model of Carp Shelf Life under Different Storage Temperature Conditions[J]. Food Science, 2015, 36(22): 232—236.
- [10] 李冲, 麻成金, 余佶, 等. 基于感官与理化指标的椪柑果货架期预测模型[J]. 食品与机械, 2017, 33(7): 133—138.
LI Chong, MA Cheng-jin, YU Ji, et al. Prediction Model of Shelf Life of Citrus Fruit Wine Based on Sensory and Physical and Chemical Indicators[J]. Food & Mechanical, 2017, 33(7): 133—138.
- [11] 顾海宁, 李强, 陈晨, 等. 猕猴桃储藏期品质变化研究及预测模型建立[J]. 食品工业, 2014(6): 7—10.
GU Hai-ning, LI Qiang, CHEN Chen, et al. Study on Quality Changes and Predictive Model of Kiwifruit During Storage[J]. Food Industry, 2014(6): 7—10.
- [12] 陈永安, 陈鑫, 刘艳飞, 等. 基于模糊数学的猕猴桃感官评定分析[J]. 食品工业, 2013(10): 129—133.
CHEN Yong-an, CHEN Xin, LIU Yan-fei, et al. Sensory Evaluation of Kiwifruit Based on Fuzzy Mathematics[J]. Food Industry, 2013(10): 129—133.
- [13] 曹建康, 姜微波. 果蔬采后生理生化实验指导[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2007.
CAO Jian-kang, JIANG Wei-bo. Physiological and Biochemical Experiment Guidance of Postharvest Fruits and Vegetables[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007.
- [14] 郭文川, 刘大洋. 猕猴桃膨大果的近红外漫反射光谱无损识别[J]. 农业机械学报, 2014, 45(9): 230—235.
GUO Wen-chuan, LIU Da-yang. Nondestructive Identification of Kiwifruit Expanded Fruit by Near Infrared Diffuse Reflectance Spectroscopy[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2014, 45(9): 230—235.
- [15] 王圣通, 戴泽翰, 鲍敏丽, 等. 健康贡柑和感黄龙病贡柑果实品质比较[J]. 南方农业学报, 2015(8): 1411—1414.
WANG Sheng-tong, DAI Ze-han, BAO Min-li, et al. Comparison of Fruit Quality of Healthy Gonggan and huanglong Diseased Gonggan[J]. South China Journal of Agricultural Sciences, 2015(8): 1411—1414.
- [16] 黄春辉, 葛翠莲, 高洁, 等. 不同类型猕猴桃果实发育过程中内果皮色泽的动态变化[J]. 江西农业大学

- 学报, 2014(3): 501—506.
- HUANG Chun-hui, GE Cui-lian, GAO Jie, et al. Dynamic Changes of Endocarp Color during Fruit Development of Different Types of Kiwifruit[J]. Journal of Jiangxi Agricultural University, 2014(3): 501—506.
- [17] 胡位歆, 丁甜, 刘东红. 草莓采后货架期预测模型的构建[J]. 中国食品学报, 2017(3): 186—193.
- HU Wei-xin, DING Tian, LIU Dong-hong. Construction of Predictive Model of Postharvest Strawberry Shelf Life[J]. Chinese Journal of Food Science, 2017, 17(3): 186—193.
- [18] SARMA R R, JHALEGAR M J, JHA S K, et al. Genotypic Variation in Total Phenolics, Antioxidant Activity, Enzymatic Activity and Quality Attributes Among Kiwifruit Cultivars[J]. Journal of Plant Biochemistry & Biotechnology, 2015, 24(1): 114—119.
- [19] PELEG K. Produce Handling, Packaging and Distribution[M]. Connecticut: The AVI Publishing Company Inc, 1985.
- [20] YONG-SEO PARK. Storability of Fresh-cut Kiwifruit Slices Influenced by Storage Temperature[J]. Journal of the Korean Society for Horticultural Science, 2002, 43(6): 728—732.
- [21] CATRIN S G, MATICH A J, MARSH K B, et al. (Methylsulfanyl)alkanoate Ester Biosynthesis in Actinidia Chinensis Kiwifruit and Changes during Cold Storage[J]. Phytochemistry, 2010, 71(7): 742—750.
- [22] 李圆圆, 罗安伟, 李琳, 等. 采前氯吡脞处理对‘秦美’猕猴桃贮藏期间果实硬度及细胞壁降解的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(21): 280—285.
- LI Yuan-yuan, LUO An-wei, LI Lin, et al. Effects of Pre-harvest Clopidogrel Treatment on Fruit Firmness and Cell Wall Degradation During Storage of 'Qinmei' Kiwifruit[J]. Food Science, 2018, 39(21): 280—285.
- [23] 李莉, 刘仁林. 赣南纽荷尔脐橙果实生长与主要营养物质积累动态[J]. 经济林研究, 2018, 36(2): 43—48.
- LI Li, LIU Ren-lin. Dynamics of Fruit Growth and Main Nutrient Accumulation in Newhall Navel Orange in Southern Fujian[J]. Economic Forest Research, 2018, 36(2): 43—48.
- [24] LAMIKANRA O, CHEN J C, BANKS D, et al. Biochemical and Microbial Changes During the Storage of Minimally Processed Cantaloupe[J]. J Agric Food Chem, 2000, 48(12): 5955—5961.
- [25] 张伟. 不同化学处理对黄花梨和猕猴桃果实的保鲜效果研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2014.
- ZHANG Wei. Study on the Fresh-keeping Effect of Different Chemical Treatments on the Fruits of Huanghua Pear and Kiwifruit[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Commerce and Industry, 2014.