

文章编号:0253-4339(XXXX)XX-0001-09

doi: 10.12465/issn.0253-4339.20251219001

即食石榴籽粒货架期预测模型建立

杜发隆¹ 孙婉卿¹ 李荣¹ 崔嘉玮¹ 阎瑞香² 胡云峰¹ 胡立武³ 陈君然¹

(1 天津科技大学食品科学与工程学院 天津 300457; 2 天津科技大学轻工科学与工程学院 天津 300457;

3 新疆优产农业科技发展股份有限公司 和田 848300)

摘要 本文以即食石榴籽粒为研究对象,研究其在5、15、25、35℃下的品质变化规律,并采用品质衰变动力学方程对各指标进行了拟合,在此基础上结合Arrhenius方程建立了即食石榴籽粒的货架期预测模型。研究结果表明:花色苷含量对一级动力学模型具有较好的拟合度,拟合精度最高,因此选用花色苷含量为特征指标建立了货架期预测模型,该模型经验证,预测值与实际值的平均绝对误差在10%以内,预测的准确性较高,可有效预测石榴籽粒在5~35℃的货架期,为即食石榴籽粒流通和销售过程中的品质保持提供了理论支持和方法指导。

关键词 鲜食;石榴籽粒;货架温度;货架期预测模型

中图分类号: TS255.3;TB61¹

文献标识码: A

Development of Predictive Models for Shelf-Life of Ready-to-Eat Pomegranate Arils

Du Falong¹ Sun Wanqing¹ Li Rong¹ Cui Jiawei¹ Yan Ruixiang² Hu Yunfeng¹
Hu Liwu³ Chen Junran¹

(1. College of Food Science and Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin, 300457, China; 2. College of Light Industry Science and Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin, 300457, China; 3. Xinjiang Youchan Agricultural Technology Development Co., Ltd., Hotan, 848300, China)

Abstract We investigated the quality changes of ready-to-eat pomegranate arils during storage at 5, 15, 25, and 35 °C. The kinetic parameters of each quality index were fitted using quality degradation kinetic equations, and a shelf life prediction model was developed by integrating the fitting results with the Arrhenius equation. The results demonstrated that the anthocyanin content exhibited an optimal fit with the first-order kinetic model, exhibiting the highest fitting accuracy. A first-order kinetic model with anthocyanin content as the characteristic index was subsequently combined with the Arrhenius equation to construct a shelf-life prediction model. Validation experiments revealed that the mean absolute error between the predicted and actual values was less than 10%, confirming the high accuracy and reliability of the model. This model can effectively predict the shelf life of pomegranate arils over the temperature range of 5–35 °C, providing theoretical support and methodological guidance for quality maintenance during the circulation and marketing of the product.

Keywords ready-to-eat; pomegranate arils; shelf temperatures; shelf life prediction model

石榴中籽粒含量约占整个果实重量的52%,其主要由78%的汁液和22%的果核组成^[1-2]。石榴籽粒汁液部分中含水量高达85%,可溶性固形物占其总质量的10%^[3]。石榴籽粒中可溶性成分主要由葡萄糖和果糖等还原糖组成,此外还含有原花青素、鞣花酸、花青素、黄酮类化合物以及多种酚类化合物等营养物质^[4]。石榴果实因其特殊果实结构,食用过程中不易剥粒,在一定程度上影响了石榴籽粒的商业价值。因此,将石榴剥去外皮及隔膜,开发即食石榴籽粒产品,可有效提升石榴的商业价值。然而,石榴籽

粒由于含水量高、营养丰富,无外皮保护后,易因自身呼吸作用及微生物的生长繁殖,引起产品品质劣变,缩短货架期^[5]。因此,准确预测石榴籽粒的货架期对于后续贮藏和销售至关重要,可以在一定程度上减少石榴籽粒损失。

温度是影响果蔬货架期的重要因素,大多数货架期预测模型均是基于温度参数构建^[6-7]。如Niu Yaoping等^[8]使用Python语言建立了猕猴桃保质期预测程序,并对模型的准确性进行了验证和比较。Shao Yuanyuan等^[9]利用可见光和近红外(visible-

near infrared, Vis-NIR) 高光谱成像技术监测冬枣果实的可溶性固形物含量(total soluble solids, TSS), 并分析了不同成熟阶段的保质期。Zhao Songsong 等^[10] 通过考虑重量损失、多酚氧化酶(polyphenol oxidase, PPO)活性和总菌落数量, 开发了鲜切马铃薯剩余保质期的预测模型。虽然国内外学者在果蔬的货架期预测模型研究方面已取得一定进展, 但主要研究的是整果, 对于高水分、无外皮保护的即食石榴籽粒这类产品的贮藏研究较少。

因此, 本研究以即食石榴籽粒不同贮藏温度下的品质衰变动力学研究为基础, 建立其货架期预测模型。该研究可丰富即食果蔬货架期预测的理论体系, 为同类高水分易腐即食果蔬的货架期预测研究提供方法借鉴, 有助于商家和消费者预测即食石榴籽粒的最佳食用时间, 有效减少产品损耗, 为即食石榴籽粒的流通和销售提供参考。

1 材料与方 法

1.1 材料与试剂

突尼斯软籽甜石榴, 采自河南省荥阳市, 采后 24 h 内运回实验室, 在(4±0.5) °C 冷库中贮藏备用。

2,6-二氯靛酚(分析纯), 上海麦克林生化科技有限公司; 草酸(分析纯), 国药集团化学试剂有限公司; 氯化钾(分析纯), 天津市鼎盛鑫化工有限公司; 乙酸钠(分析纯), 天津博迪化工股份有限公司; 冰乙酸(分析纯), 天津市风船化学试剂科技有限公司; 抗坏血酸钙(食品级), 上海源叶生物有限公司。

1.2 仪器与设备

JA1003N 型电子天平, 上海佑科仪器仪表有限公司; JZ-60 型色差仪, 深圳市金准仪器设备有限公司; PAL-1 型糖度计, 爱宕(ATAGO)科学仪器有限公司; MP522 型 pH 计, 上海三信仪表厂; Synergy HTX 型酶标仪, 美国伯腾仪器有限公司; MJ-180 型恒温培养箱, 上海贺德实验设备有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 即食石榴籽粒处理及贮藏

前期对石榴籽粒的保鲜方法进行了研究, 当抗坏血酸钙质量分数为 0.98%、浸泡时间为 5 min, 氧气浓度为 95%, 高氧处理时间为 1 h 时, 能保持即食石榴籽粒较好的感官品质, 因此本文在前期实验基础上, 先将石榴籽粒置于 0.98% 抗坏血酸钙溶液中浸泡 5 min, 并采用 95% 氧气高氧处理 1 h 的保鲜处理后装入 PET 杯中, 每杯装量为 100 g。随后将处理好的石榴籽粒平均分为 4 组, 分别贮藏于 5、15、25、35 °C 条

件下, 定期测定指标, 直至各贮藏温度下的石榴籽粒到达货架期终点, 每组设置 3 个重复。

1.3.2 石榴籽粒品质指标测定

1) 失重率。

参考 H. S. Helland 等^[11] 的称量法进行测定, 失重率计算式如下:

$$W_L = \frac{W_0 - W_t}{W_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: W_L 为失重率, %; W_0 为石榴籽粒的初始质量, g; W_t 为石榴籽粒贮存时间 t 时的质量, g。

2) 腐烂率。

参考巩多蕊等^[12] 的方法稍加修改, 石榴籽粒腐烂的标准为: 腐烂面积 > 10%, 变色面积 > 20%。腐烂率的计算式为:

$$D_R = \frac{D_0}{D} \times 100\% \quad (2)$$

式中: D_R 为腐烂率, %; D_0 为腐烂石榴籽粒数, 个; D 为果实总数, 个。

1.3.2.3 感官评价

选取 9 名食品专业学生为评定员, 要求小组成员身体健康, 无不良嗜好, 味觉灵敏, 在正式评定前经过培训, 每天分别从外观品质、香气和口感 3 个方面对不同预处理的石榴籽粒进行评价打分, 评价标准如表 1 所示。

1) L^* 值。

参考 Liao Bokai 等^[13] 的方法测定, 采用手持式色差仪测定石榴籽粒表面色泽, 测定其 L^* 值。

表 1 石榴籽粒感官评定标准

Tab.1 Sensory evaluation standard of pomegranate seeds

评价内容	评分标准	分数
外观品质 (30分)	品质完好, 果粒新鲜有光泽, 无褐变腐败	25~30
	品质较好, 果粒光泽轻微暗淡, 无褐变腐败	19~24
	品质一般, 暗淡无光, 有轻微褐变, 无腐败	13~18
	品质较差, 失去光泽, 褐变明显, 轻微腐败	7~12
	腐烂变质严重	0~6
香气 (30分)	果粒香气宜人, 浓郁, 有石榴鲜香味	25~30
	果粒香气寡淡, 有轻微石榴鲜香味	19~24
	果粒有轻微异味	13~18
	果粒异味较浓	7~12
	果粒有严重异味	0~6
口感 (40分)	酸甜可口, 风味突出	31~40
	酸甜淡薄, 风味平淡	21~30
	口感不良, 风味丧失	11~20
	口感苦涩, 风味变坏	0~10

2)可溶性固形物含量(TSS)。

参考R. Khathir等^[14]的方法,使用PAL-1型糖度计进行测定,结果以X%表示。

3)花色苷含量。

参考J. Johnson等^[15]的方法测定,取pH1.0 KCl(0.025 mol/L)缓冲液和pH4.5 CH₃COONa(0.4 mol/L)缓冲液各4.5 mL,分别加入0.5 mL石榴汁,室温下平衡20 min,分别测定2种样品在510 nm和700 nm下的吸光度,按下式计算稀释液吸光值X:

$$X = (X_{510} - X_{700})_{\text{pH1.0}} - (X_{510} - X_{700})_{\text{pH4.5}} \quad (3)$$

式中:(X₅₁₀-X₇₀₀)_{pH1.0}为样品在pH1.0的缓冲液中在510 nm和700 nm波长下的吸光值之差;(X₅₁₀-X₇₀₀)_{pH4.5}为样品在pH4.5的缓冲液中在510 nm和700 nm波长下的吸光值之差。

待测样品中花色苷浓度计算:

$$C = \frac{X \times M_w \times D_f \times 1000}{\varepsilon \times l} \quad (4)$$

式中:C为待测样品中花色苷的摩尔浓度,mg/L;M_w为样品中主要花色苷的摩尔质量,g/mol,M_w=449.2;D_f为稀释因子,取值为10;ε为样品中主要花色苷的摩尔吸收率,L/(mol·cm),ε=26 900。

1.4 石榴籽粒货架期预测动力学模型的建立

1.4.1 品质衰变动力学分析

通常采用零级和一级品质衰变动力学模型来表示食品储存期间的质量劣化程度^[16]。零级和一级模型方程如下:

$$y = y_0 \pm kt \quad (5)$$

$$y = y_0 e^{\pm kt} \quad (6)$$

式中:y₀为特征指标初始值;y为贮藏t天时特征指标值;k为反应速率;t为时间,d。

不同温度下的反应速率常数一般适用于Arrhenius方程,将Arrhenius方程分别代入模型方程中,推导得出零级和一级动力学预测模型方程,如式(7)和式(8)所示。

零级动力学预测模型方程:

$$y = y_0 - A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)t \quad (7)$$

一级动力学预测模型方程:

$$y = y_0 \exp\left[-A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)t\right] \quad (8)$$

式中:A为Arrhenius因子;E_a为活化能,kJ/mol;R为理想气体常数,为8.314 J/mol·K;T为绝对温度,K。

决定系数R²用于评价零级和一级反应的拟合精度,R²使用式(9)计算。R²越接近于1,货架期预测模型的拟合精度越好。

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (9)$$

式中:n为样本量;y_i为第i个项目的观测值;ȳ为平均值;ŷ_i为第i个项目的估计值。

1.4.2 各指标品质衰变动力学模型的验证

$$P = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|V_e - V_p|}{V_e} \times 100\% \quad (10)$$

式中:V_e为石榴籽粒品质指标的实测值;V_p为石榴籽粒品质指标预测值;N为实验次数。

1.4.3 货架期预测模型的建立

通过皮尔逊分析确定货架期预测的关键品质指标,结合品质衰变动力学模型建立货架期预测模型:

$$S_{L0} = \frac{y_{\text{end}} - y_0}{k_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)} \quad (11)$$

$$S_{L0} = \frac{|\ln y_{\text{end}} - \ln y_0|}{k_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)} \quad (12)$$

式中:S_{L0}为预测货架期,d;y_{end}为石榴籽粒货架期结束时品质指标所对应的数值;y₀为石榴籽粒特征指标初始值;k₀为反应速率;E_a为活化能,kJ/mol。

1.4.4 货架期预测模型的验证

根据式(11)和式(12)的货架期预测模型,计算鲜食石榴籽粒的货架期预测值,比较预测值与实测值,如式(14)所示:

$$Y = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|Q_e - Q_p|}{Q_e} \times 100\% \quad (13)$$

式中:Q_e为石榴籽粒货架期的实测值;Q_p为石榴籽粒货架期预测值。

1.5 统计分析

所有数据均以平均值±标准差表示,每次测量至少重复3次。采用IBM SPSS27.0进行统计分析和方差分析,显著性差异水平设置为P<0.05。

2 结果与分析

2.1 不同温度下石榴籽粒品质的变化

2.1.1 感官评价的变化

感官评价是综合评价果实品质变化的重要指标之一^[17]。石榴籽粒在贮藏期间感官评价的变化如图1所示,随着货架时间的延长,各组石榴籽粒的感官品质均呈下降的趋势(P<0.05)。5℃组感官评分降幅最小,感官分值始终高于其他温度组(P<0.05);15℃和25℃组下降速率相近,组间差异不显著(P>0.05);35℃组石榴籽粒在贮藏3 d后果实褐变、失

水,有异味,其感官评分为46分。本实验以消费者对即食石榴籽粒的接受度作为货架寿命的终点,根据感官评分结果,综合外观品质、香气、口感等多方面的因素,当感官评分达到46分时即达到保质期限值,故将46分作为石榴籽粒的货架期终点^[18]。

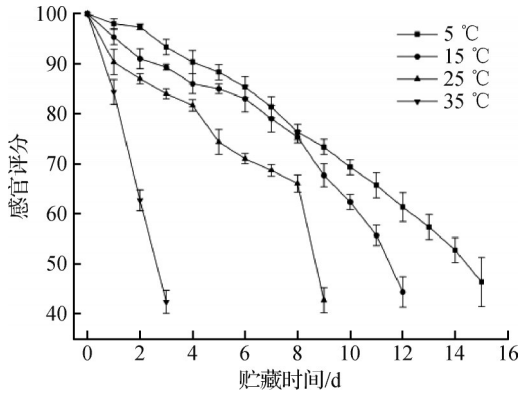


图1 石榴籽粒在贮藏期间感官评价的变化

Fig.1 Change of sensory score of pomegranate seeds during storage

2.1.2 失重率的变化

果实含水量不仅影响石榴籽粒的外观品质,而且决定着果实的生理变化和货架期^[19]。失重率越高,代表石榴籽粒品质的下降速率快,保鲜效果越差^[20]。石榴籽粒在贮藏期间失重率的变化如图2所示,随着贮藏时间的延长,各温度组石榴籽粒的失重率均呈递增趋势,贮藏温度越高,失重率上升速率越快,其中35 °C贮藏温度条件下,石榴籽粒的失重率上升速率最快,贮藏至第3天时达到10.18%。其原因是温度越高,石榴籽粒的蒸腾作用和呼吸作用越剧烈,水分及营养成分损失越高^[21]。

2.1.3 腐烂率的变化

石榴籽粒极易受到病原微生物的浸染,导致组

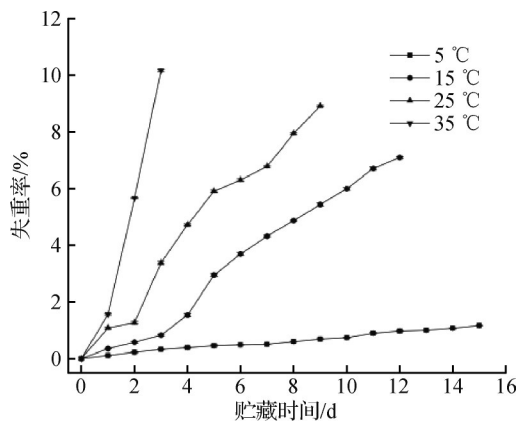


图2 石榴籽粒在贮藏期间失重率的变化

Fig.2 Change of weight loss rate of pomegranate seeds during storage

织软化腐败,因此腐烂率能够直接反映石榴籽粒贮藏期间的外观品质^[22]。石榴籽粒在贮藏期间腐烂率的变化如图3所示,4组石榴籽粒的腐烂率随贮藏时间延长均呈显著上升趋势($P < 0.05$),其中35 °C贮藏条件下,石榴籽粒腐烂率始终最高,第3天时腐烂率达到16.88%,而此时5 °C组仅为1.47%。

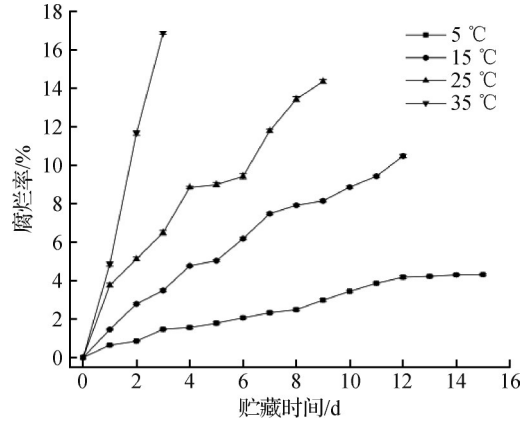


图3 石榴籽粒在贮藏期间腐烂率的变化

Fig.3 Change of decay rate of pomegranate seeds during storage

2.1.4 L^* 值的变化

石榴籽粒的色泽是衡量石榴籽粒感官品质的重要指标。 L^* 值代表石榴籽粒色泽的亮度,石榴籽粒的褐变程度与 L^* 值密切相关, L^* 值越小,说明石榴籽粒褐变程度越大^[23]。石榴籽粒在贮藏期间 L^* 值的变化如图4所示,5、15、25、35 °C贮藏条件下第3天的 L^* 值分别为30.93、30.19、30.05、26.31,其中35 °C组 L^* 值变化幅度最大。

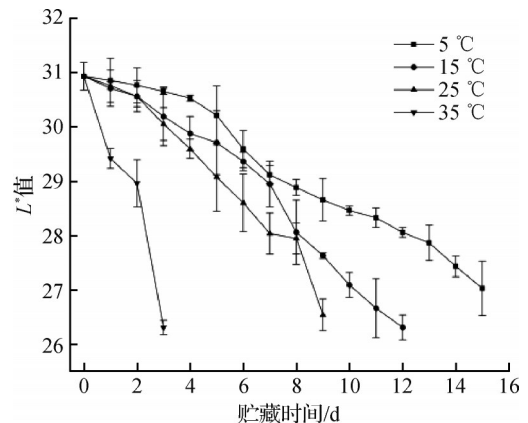


图4 石榴籽粒在贮藏期间 L^* 值的变化

Fig.4 Change of L^* -value of pomegranate seeds during storage

2.1.5 可溶性固形物的变化

可溶性固形物含量是衡量果实品质及风味的重要指标^[24]。石榴籽粒在贮藏期间可溶性固形物含量

的变化如图5所示,在贮藏过程中,石榴籽粒的可溶性固形物含量随贮藏时间的延长呈先上升后下降的趋势:5、15℃这2组峰值出现的时间显著晚于25、35℃这2组($P<0.05$),峰值也显著更高($P<0.05$)。这可能与低温延缓果实衰老相关:可能是刚采摘的石榴籽粒具有较强的生理活性,导致可溶性糖类物质的不断积累,随着贮藏时间的延长,果实衰老加快了营养物质的消耗,其他营养成分的流失以及呼吸作用的分解导致可溶性固形物含量不断下降^[25-26]。

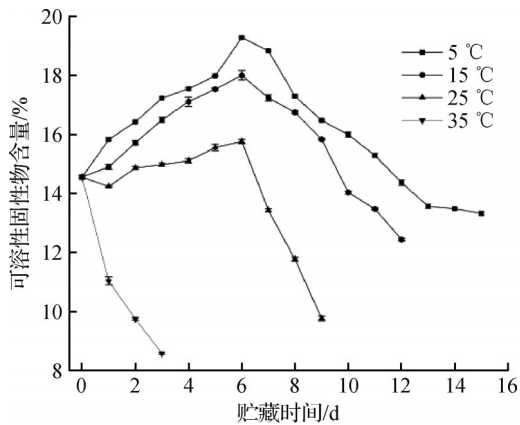


图5 石榴籽粒在贮藏期间可溶性固形物含量的变化

Fig.5 Change of soluble solid content of pomegranate seeds during storage

2.1.6 花色苷含量的变化

石榴籽粒在贮藏期间花色苷含量的变化如图6所示,5、15、25、35℃贮藏条件下第3 d的花色苷含量分别为177.96、171.32、170.21、132.65 mg/L。各温度组间差异显著($P<0.05$),其中35℃组显著低于其他组($P<0.01$)。总体而言,花色苷含量随贮藏时间延长呈显著下降趋势($P<0.05$)。这可能是由于多酚氧化酶的氧化活性随温度升高而增加,加速了石榴籽粒花色苷含量的降低^[27]。

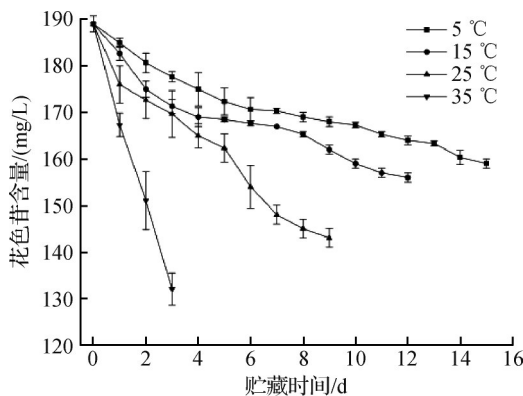


图6 石榴籽粒在贮藏期间花色苷含量的变化

Fig.6 Change of anthocyanin content of pomegranate seeds during storage

由上述指标变化可知,石榴籽粒在贮藏过程中货架期品质的变化并非单一指标作用的结果,而是多个理化指标相互关联、共同驱动的复杂过程。高温首先加剧了石榴籽粒的呼吸与蒸腾作用,使石榴籽粒的水分大量流失,导致其失重率显著升高^[28]。水分散失不仅使得石榴籽粒皱缩、口感变差,还会使其更易受到机械损伤和病原微生物侵染,从而腐烂率升高^[29]。而微生物的生长繁殖进一步分解营养物质,产生不良气味,并加速组织软化,这直接反映为感官评分的迅速下降。同时,高温也会使氧化酶活性升高,导致石榴籽粒发生褐变,在理化指标上体现为 L^* 值的下降^[30]。在该过程中,作为重要酚类物质的花色苷也被氧化降解,不仅使石榴籽粒的褐变加剧,而且削弱了石榴籽粒的抗氧化能力,加速了石榴籽粒品质的衰变^[31]。此外,贮藏期间可溶性固形物的消耗与呼吸底物的减少及风味物质的降解有关^[32],这些因素共同导致了石榴籽粒进入货架期的终点。

2.2 预测模型的建立

2.2.1 各品质指标衰变动力学模型建立

研究表明,零级或一级反应品质衰变动力学模型反映食品品质劣变^[33]。通过对品质指标变化与时间进行线性回归拟合和相关性分析,可得到石榴籽粒在不同贮藏温度条件下品质指标与时间的速率常数 k 以及决定系数 R^2 ,从而通过比较决定系数之和 $\sum R^2$ 确定反应级数, $\sum R^2$ 越大表明动力学模型的拟合效果越好,结果如表2所示^[34]。由表2可知,石榴籽粒可溶性固形物的各级反应动力学模型的 $\sum R^2$ 值均较小,不适合建立动力学模型。失重率、腐烂率、 L^* 值的零级反应动力学模型的 $\sum R^2$ 值分别为3.9092、3.9160、3.8327,均大于各自的一级反应动力学模型 $\sum R^2$ 值。花色苷含量的一级动力学模型的 $\sum R^2$ 值为3.8480,大于零级动力学模型 $\sum R^2$ 值(3.8184)。因此,失重率、腐烂率、 L^* 值的零级动力学模型拟合精度较好,花色苷含量则是一级动力学模型拟合精度较好且拟合精度最高。由此可知,失重率、腐烂率、 L^* 值的零级动力学模型和花色苷含量一级动力学模型均较适合作为货架期预测指标,其中花色苷是石榴籽粒的重要显色物质和主要的功能因子,其与石榴籽粒的品质关联度较高^[35]。因此,选用花色苷含量进行后续货架期预测模型的关键指标。

根据吴洋^[36]的研究,反应速率 k 的温度依赖性可以根据 Arrhenius 方程进行分析。石榴籽粒在贮藏期间花色苷含量的 Arrhenius 方程图如图7所示,花色苷含量的反应速率 $\ln k$ 与 $1/T$ 呈线性关系, $R^2>0.9$,拟合度高,准确性好。

表2 零级和一级动力学模型参数

Tab.2 Zero-order and first-order kinetic model parameters

指标	温度/°C	零级		一级	
		速率常数 k	决定系数 R^2	速率常数 k	决定系数 R^2
失重率	5	0.073 7	0.987 8	0.136 5	0.887 4
	15	0.648 1	0.983 0	0.269 5	0.877 6
	25	1.005 7	0.976 5	0.260 6	0.844 2
	35	3.463 9	0.961 9	0.933 7	0.822 0
	ΣR^2		3.909 2		3.431 2
腐烂率	5	0.295 4	0.978 7	0.127 5	0.909 8
	15	0.823 1	0.978 4	0.151 8	0.870 4
	25	1.450 1	0.962 9	0.158 4	0.941 6
	35	5.745 0	0.996 0	0.622 6	0.947 6
	ΣR^2		3.916 0		3.669 4
L^* 值	5	-0.272 6	0.977 8	-0.009 4	0.977 4
	15	-0.406 2	0.970 0	-0.014 2	0.964 3
	25	-0.464 6	0.961 9	-0.016 0	0.954 0
	35	-1.431 6	0.923 0	-0.050 1	0.913 4
	ΣR^2		3.832 7		3.809 1
可溶性固形物	5	-0.209 0	0.278 0	-0.013 6	0.301 2
	15	-0.162 2	0.136 2	-0.011 4	0.156 0
	25	-0.393 1	0.396 0	-0.031 9	0.413 8
	35	-1.922 0	0.919 3	-0.171 1	0.955 1
	ΣR^2		1.729 5		1.826 1
花色苷含量	5	-1.770 6	0.943 3	-0.010 3	0.953 0
	15	-2.354 4	0.904 9	-0.013 8	0.918 6
	25	-4.890 9	0.973 8	-0.030 1	0.979 1
	35	-18.700 0	0.996 4	-0.117 8	0.997 3
	ΣR^2		3.818 4		3.848 0

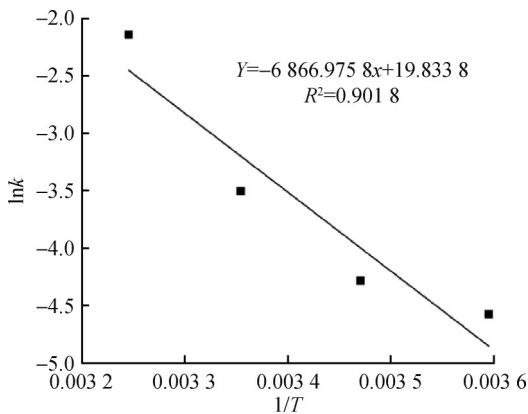


图7 石榴籽粒在贮藏期间花色苷含量的 Arrhenius 方程图
Fig.7 Diagram of Arrhenius equation of anthocyanin content of pomegranate seeds during storage

结合 Arrhenius 方程进一步建立了适于 5~35 °C 温度区间的石榴籽粒花色苷含量的品质衰变动力学模型:

$$H = H_0 \exp \left[-4.11 \times 10^8 \exp \left(-\frac{6866.9758}{T} \right) t \right] \quad (14)$$

式中: H 代表放置时间为 t 时, 石榴籽粒的花色苷含量; H_0 代表石榴籽粒的初始花色苷含量。

将建立的石榴籽粒货架期预测模型方程对石榴籽粒 4 种温度下贮藏期间进行预测, 将预测值和货架期的真实值进行对比, 验证结果如表 3 所示。花色苷含量的预测值与实测值的平均绝对误差均小于 10%, 具有较好的拟合效果^[37]。

表3 不同贮藏温度下石榴籽粒花色苷含量的预测值与实测值对比

Tab.3 Comparison of predicted and measured values of anthocyanin content in pomegranate seeds at different storage temperatures

贮藏温度/°C	预测值	实测值	绝对误差/%	平均绝对误差/%
5	168.14	159	5.75	
15	151.61	156	2.81	
25	130.00	143	9.09	7.05
35	145.91	132	10.54	

2.2.2 石榴籽粒货架期预测模型的建立与验证

感官品质是消费者判断食品货架期终点的最主要指标, 但其判断具有一定的主观性^[38]。因此, 拟选用可量化测定指标花色苷含量对其进行替代, 将其与感官指标进行了 Pearson 相关性分析, 结果如表 4 所示。在各个贮藏温度下, 花色苷含量均与感官评价具有极显著的相关性 ($P < 0.01$), 均值为 0.942。因此, 花色苷含量均可作为预测石榴籽粒货架期预测模型的特征指标。

将特征指标所对应的构建模型的参数活化能 E_a 和指前因子 A 代入式 (12) 中, 得到如下石榴籽粒货架

表4 感官评价与花色苷含量之间的皮尔逊系数相关性分析
Tab.4 Pearson correlation analysis between sensory evaluation and anthocyanin content

贮藏温度/°C	皮尔逊系数
5	0.942**
15	0.907**
25	0.925**
35	0.993**
均值	0.942**

注: **表示在 0.01 水平显著相关。

期预测方程:

$$S_{L\text{花色苷含量}} = \frac{|\ln y_{\text{end}} - \ln 189|}{4.11 \times 10^8 \exp\left(-\frac{6866.9758}{T}\right)} \quad (15)$$

根据 2.1.1 的结果,石榴籽粒感官评价最低接受限值为 46 分,测定此时测定石榴籽粒花色苷含量的具体值为 X,将其作为货架期终点的临界值。随机选取 5~35 °C 区间内的 X °C 下贮藏的石榴籽粒的货架期预测真实测定值和预测值进行验证,计算二者的相对误差从而判定模型的准确度,结果如表 5 所示。由表 5 可知,各温度下货架期预测模型的平均绝对误差低于 10%,表明该模型的预测精度较高,可以较准确地预测即食石榴籽粒在 5~35 °C 的货架期。

表 5 不同贮藏温度下石榴籽粒货架期预测模型的精度评价
Tab.5 Accuracy evaluation of the shelf life prediction model of pomegranate seeds at different storage temperatures

贮藏温度/°C	预测值/d	实测值/d	绝对误差/%	平均绝对误差/%
5	22.16	21.0	5.52	7.38
15	10.23	11.0	7.00	
25	4.60	5.0	8.00	
35	2.18	2.0	9.00	

3 结论

本文研究了采用抗坏血酸钙和高氧保鲜的方法处理预包装即食石榴籽粒,研究了经过该处理后的预包装石榴籽粒在 5~35 °C 温度区间内的品质衰变动力学模型及货架期预测模型,得到了如下结论:

1) 在各温度贮藏条件下,石榴籽粒的失重率和腐烂率均随贮藏时间延长而增加, L^* 值、可溶性固形物含量和花色苷含量则减少。

2) 经对比分析,花色苷含量的一级反应动力学模型合精度最高,因此选用花色苷含量作为货架期预测关键指标建立了货架期预测模型,经验证该模型平均绝对误差小于 10%,拟合精度较高。利用此模型可以较为准确地预测 5~35 °C 贮藏温度下石榴籽粒的货架期,减少即食石榴籽粒在流通和销售过程中的损失。

基于本货架期预测模型的预测精度,可将其集成至仓储或运输智能系统,实现预包装鲜食石榴籽粒货架期的可视化监控,为库存周转、销售区间划定提供量化依据。然而,本文仅研究了特定贮藏温度下石榴籽粒的指标变化,而未探讨湿度、光照等环境因素的影响,可能会影响模型的适用性和预测准确

性,后续将针对湿度、光照等环境因素对该模型进行深入研究。

本文受天津市科技计划项目(24ZYCGSN01330);新疆维吾尔自治区重点研发任务专项(2022B02030);天津市林果现代农业产业技术体系项目(ITTHRS2021000);天津市科技计划项目(25YDTPJC00730)资助。(The project was supported by Tianjin Science and Technology Program Project (No. 24ZYCGSN01330), Key R&D Task Special Project of Xinjiang Uygur Autonomous Region (No. 2022B02030), Tianjin Modern Agriculture Industry Technology System Project for Forestry and Fruit (No. ITTHRS2021000), Tianjin Science and Technology Program Project (No. 25YDTPJC00730).)

参考文献

- [1] Nazoori F, ZamaniBrahamabadi E, Mirdehghan S H, et al. Extending the shelf life of pomegranate (*Punica granatum* L.) by GABA coating application[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2020, 14(5): 2760-2772.
- [2] 郭珊珊. 石榴中类单宁的分离纯化、结构及活性研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2007. (Guo Shanshan. Study of tannins in pomegranate extracts[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2007.)
- [3] Palma A, Continella A, La Malfa S, et al. Overall quality of ready-to-eat pomegranate arils processed from cold stored fruit [J]. Postharvest Biology and Technology, 2015, 109: 1-9.
- [4] Alsataf S, Başıyigit B, Karaaslan M. Multivariate analyses of the antioxidant, antidiabetic, antimicrobial activity of pomegranate tissues with respect to pomegranate juice[J]. Waste and Biomass Valorization, 2021, 12(11): 5909-5921.
- [5] Bhatia K, Asrey R. Minimal processing of pomegranates (*Punica granatum* L.)—a review on processing, quality, and shelf life [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2019, 43(12): e14281.
- [6] Einarsson H. Evaluation of a predictive model for the shelf life of cod (*Gadus morhua*) fillets stored in two different atmospheres at varying temperatures [J]. International Journal of Food Microbiology, 1994, 24(1/2): 93-102.
- [7] Limbo S, Torri L, Sinelli N, et al. Evaluation and predictive modeling of shelf life of minced beef stored in high-oxygen modified atmosphere packaging at different temperatures [J]. Meat Science, 2010, 84(1): 129-136.
- [8] Niu Yaoxing, Ye Lixia, Shi Yubing, et al. Development of shelf-life prediction models and programs for 'Xuxiang' kiwifruit stored at different temperatures [J]. Postharvest Biology and Technology, 2025, 223: 113428.

- [9] Shao Yuanyuan, Ji Shengheng, Xuan Guantao, et al. Soluble solids content monitoring and shelf life analysis of winter jujube at different maturity stages by Vis-NIR hyperspectral imaging [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2024, 210: 112773.
- [10] Zhao Songsong, Han Xinyi, Liu Bin, et al. Shelf-life prediction model of fresh-cut potato at different storage temperatures [J]. *Journal of Food Engineering*, 2022, 317: 110867.
- [11] Helland H S, Leufvén A, Bengtsson G B, et al. Storage of fresh-cut Swede and turnip: effect of temperature, including sub-zero temperature, and packaging material on sensory attributes, sugars and glucosinolates [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2016, 111: 370–379.
- [12] 巩多蕊, 杨莉玲, 钱龙, 等. 模拟冷链运输处理对杏果实货架期品质的影响[J]. *保鲜与加工*, 2022, 22(10): 10–16. (Gong Duorui, Yang Liling, Qian Long, et al. Effects of simulated cold chain transportation treatments on shelf-life qualities of apricot fruits [J]. *Storage and Process*, 2022, 22(10): 10–16.)
- [13] Liao Bokai, Goh A P, Lio C I, et al. Kinetic models applied to quality change and shelf-life prediction of fresh-cut pineapple in food cold chain [J]. *Food Chemistry*, 2024, 437: 137803.
- [14] Khathir R, Yuliana R, Agustina R, et al. The shelf-life prediction of sweet orange based on its total soluble solid by using Arrhenius and Q 10 approach [J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, 506: 012058.
- [15] Johnson J, Collins T, Walsh K, et al. Solvent extractions and spectrophotometric protocols for measuring the total anthocyanin, phenols and antioxidant content in plums [J]. *Chemical Papers*, 2020, 74(12): 4481–4492.
- [16] Xing Shaohua, Liu Lu, Zhang Xiru, et al. A mathematical model to predict the color change of fresh dough sheets under fluctuation temperatures [J]. *Lwt*, 2022, 162: 113447.
- [17] Salinas-Hernández R M, González-Aguilar G A, Tiznado-Hernández M E. Utilization of physicochemical variables developed from changes in sensory attributes and consumer acceptability to predict the shelf life of fresh-cut mango fruit [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2015, 52(1): 63–77.
- [18] 潘爱娟. 甘薯-金针菇脆片工艺优化及货架期模型预测 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2025. (Pan Aijuan. Process optimization and shelf life model prediction of sweet potato-*Flammulina velutipes* crisps [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2025.)
- [19] 杨慧敏, 郑兴婵, 刘中深, 等. 蓝莓货架期PKO-CNN-BiLSTM-AT 预测模型[J]. *食品科学*, 2025, 46(17): 271–282. (Yang Huimin, Zheng Xingchan, Liu Zhongshen, et al. Predictive modeling for the determination of blueberry shelf-life based on combination of pied kingfisher optimizer, convolutional neural network, bidirectional long short-term memory and attention mechanism [J]. *Food Science*, 2025, 46(17): 271–282.)
- [20] 范新光, 梁畅畅, 郭风军, 等. 近冰温冷藏过程中果蔬采后生理品质变化的研究现状[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(18): 270–276. (Fan Xinguang, Liang Changchang, Guo Fengjun, et al. Research process on postharvest physiological changes of fruits and vegetables during near freezing point storage [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2019, 45(18): 270–276.)
- [21] 刘莉, 陈华, 廖宏钰, 等. 不同处理方式对鲜切马铃薯保鲜效果的影响[J]. *食品研究与开发*, 2025, 46(6): 74–81. (Liu Li, Chen Hua, Liao Hongyu, et al. Fresh-keeping effects of different treatments on fresh-cut potatoes [J]. *Food Research and Development*, 2025, 46(6): 74–81.)
- [22] 集贤, 王泽彬, 高元惠, 等. 二氧化氯对‘克瑞森无核’葡萄贮藏品质的影响[J]. *保鲜与加工*, 2025, 25(2): 30–37. (Ji Xian, Wang Zebin, Gao Yuanhui, et al. Effects of chlorine dioxide on the storage quality of ‘crimson seedless’ Grapes [J]. *Storage and Process*, 2025, 25(2): 30–37.)
- [23] 王森. 超声波对石榴果实品质的影响及基于代谢组解析褐变机理[D]. 郑州: 河南农业大学, 2023. (Wang Sen. Effect of ultrasound on pomegranate fruit quality and analyzing browning mechanism based on metabolome [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2023.)
- [24] 郭晓恬, 张丽芬, 陈复生, 等. 真空协同氯化钙和抗坏血酸浸渍对杨梅品质的影响及货架期预测模型的构建 [J]. *河南工业大学学报(自然科学版)*, 2025, 46(4): 77–87. (Guo Xiaotian, Zhang Lifen, Chen Fusheng, et al. Quality change and shelf life prediction model of impregnating bayberry by vacuum combined with CaCl₂ and Vc treatment [J]. *Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition)*, 2025, 46(4): 77–87.)
- [25] 樊爱萍, 曾丽萍, 孟金明, 等. 高压静电场结合自发气调对低温冷藏下蒙自石榴的保鲜效果研究[J]. *食品研究与开发*, 2021, 42(8): 56–61. (Fan Aiping, Zeng Liping, Meng Jinming, et al. Effect of high-voltage electrostatic field combined with modified atmosphere conditions on preservation of Mengzi pomegranate under cold storage [J]. *Food Research and Development*, 2021, 42(8): 56–61.)
- [26] Sierra N M, Londoño A, Gómez J M, et al. Evaluation and

- modeling of changes in shelf life, firmness and color of 'Hass' avocado depending on storage temperature [J]. Food Science and Technology International, 2019, 25 (5): 370–384.
- [27] Conte A, Scrocco C, Brescia I, et al. Packaging strategies to prolong the shelf life of minimally processed lampascioni (*Muscari comosum*) [J]. Journal of Food Engineering, 2009, 90(2): 199–206.
- [28] 刘佳. 生物保鲜联合气调保鲜对巨峰葡萄贮藏品质的影响及货架期预测模型的建立[D]. 通辽: 内蒙古民族大学, 2025. (Liu Jia. The influence of biological preservation combined with modified atmosphere preservation on the storage quality of kyoho grapes and establishment of shelf life prediction model [D]. Tongliao: Inner Mongolia University for the Nationalities, 2025.)
- [29] 梁晓曼. 软枣猕猴桃贮藏品质评价及货架期预测模型构建[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2024. (Liang Xiaoman. Evaluation of storage quality and construction of shelf life prediction model of actinidia arguta [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2024.)
- [30] Zhang Chi, Zhou Pengcheng, Mei Jun, et al. Effects of different pre-cooling methods on the shelf life and quality of sweet corn (*Zea mays* L.) [J]. Plants, 2023, 12(12): 2370.
- [31] 付晨青, 郭潇潇, 刘徐冬雨, 等. 贮藏温度对鲜食紫苏采后品质的影响及货架期预测模型的构建[J]. 北方园艺, 2024(2): 86–93. (Fu Chenqing, Guo Xiaoxiao, Liu Xudongyu, et al. Effects of storage temperature on postharvest quality of perilla frutescens for fresh-eating and establishment of shelf-life prediction model [J]. Northern Horticulture, 2024(2): 86–93.)
- [32] 王海丹, 普红梅, 杨芳, 等. 不同贮藏温度下油麦菜品质变化及其货架期预测[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(15): 38–47. (Wang Haidan, Pu Hongmei, Yang Fang, et al. Quality changes and predictive modeling of shelf life of lactuca sativa stored at different temperatures [J]. Food Research and Development, 2022, 43(15): 38–47.)
- [33] 全瑞冉. 低温气调贮藏对‘突尼斯软籽’石榴果实品质的影响及机理分析[D]. 郑州: 河南农业大学, 2023. (Tong Ruiran. The effect and mechanism analysis of 'Tunisia' pomegranate fruit quality during controlled atmosphere at cold storage [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2023.)
- [34] Alighourchi H, Barzegar M, Abbasi S. Effect of gamma irradiation on the stability of anthocyanins and shelf-life of various pomegranate juices [J]. Food Chemistry, 2008, 110(4): 1036–1040.
- [35] Fan Panhui, Huber D J, Su Zihan, et al. Effect of postharvest spray of apple polyphenols on the quality of fresh-cut red pitaya fruit during shelf life [J]. Food Chemistry, 2018, 243: 19–25.
- [36] 吴洋. 金玉兰菜自发气调保鲜效果及货架期预测研究[D]. 天津: 天津商业大学, 2022. (Wu Yang. Study on preservation effect of modified atmosphere packaging and shelf life prediction for *Cichorium intybus* L. var. foliosum hegi [D]. Tianjin: Tianjin University of Commerce, 2022.)
- [37] 曲颖超. 蓝莓货架期预测模型的构建及指示标签的研制与应用研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2024. (Qu Yingchao. Study on the construction of the shelf life prediction model of blueberry and the development and application of indicator label [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2024.)
- [38] 王杰, 索慧敏, 韩育梅. 温度对鲜切马铃薯品质影响及货架期预测模型的建立[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(8): 94–101. (Wang Jie, Suo Huimin, Han Yumei. Influence of temperature on quality of fresh-cut potatoes and the establishment of shelf-life prediction model [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2022, 37(8): 94–101.)

通信作者简介

陈君然, 男, 副教授, 13821195771, E-mail: junran2876@126.com。研究方向: 农产品加工贮藏方面的研究。

About the corresponding author

Chen Junran, male, associate professor, 86–13821195771, E-mail: junran2876@126.com. Research fields: agricultural product processing and storage.

(责任编辑: 田甜)