

库尔勒香梨贮藏品质的量化评价方法

王震涛, 兰海鹏, 牛浩, 张宏, 曾勇, 张永成, 刘扬

(塔里木大学机械电气化工程学院, 新疆阿拉尔 843300)

摘要: 本研究旨在探讨温度对库尔勒香梨贮藏品质变化的影响规律, 掌握不同温度贮藏下香梨品质变化状况。以香梨采后实际贮藏条件下的温度 (-1、5、25 °C) 出发, 研究了香梨贮藏过程中主要品质指标随时间-温度的变化情况。并进一步建立品质指标变化动力学模型, 以期对库尔勒香梨贮藏品质进行定量评价。结果表明: 温度显著影响香梨贮藏品质; 不同贮藏温度下库尔勒香梨的果实硬度、可溶性固形物含量、果皮叶绿素含量、相对电导率变化均符合一级反应动力学 ($R^2 > 0.93$); 各品质指标的反应速率常数及温度敏感性符合 Arrhenius 方程, 并基于动力学理论和 Arrhenius 方程构建了库尔勒香梨贮藏品质量化评价模型。经试验验证发现, 贮藏 60 d 后, 品质指标实测值与预测值相关系数 R 均大于 0.97, 平均相对百分比偏差 P 值小于 10%, 说明所建模型能够真实反应香梨的硬度、可溶性固形物含量、果皮叶绿素含量、相对电导率的变化规律, 并证明该模型在不同贮藏温度下预测香梨品质指标变化及货架期的有效性; 研究结果可为库尔勒香梨实际贮藏环境下商品销售、品质评价和货架期预测提供理论依据。

关键词: 库尔勒香梨; 动力学模型; 贮藏品质; 评价方法

文章编号: 1673-9078(2020)05-138-147

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2020.5.019

A Method for the Quantitative Evaluation of Storage Quality of Korla Fragrant Pear

WANG Zhen-tao, LAN Hai-peng, NIU Hao, ZHANG Hong, ZENG Yong, ZHANG Yong-cheng, LIU Yang

(College of Mechanic and Electrical Engineering, Tarim University, Alar 843300, China)

Abstract: The purpose of this study was to investigate the effect of temperature on the changes in storage quality of Korla fragrant pears, and to monitor their quality changes at different temperatures. The changes in main quality indices as a function of time or temperature were examined over a storage at a temperature (-1, 5 or 25 °C) of actual post-harvest storage conditions for pears. A dynamic kinetic model for the changes of quality indices was further established for quantitative evaluation of the storage quality of Korla fragrant pear. The results showed that the temperature affected significantly the storage quality of pears. The changes in fruit firmness, soluble solids content, peel's chlorophyll content and relative electrical conductivity of Korla fragrant pear at different storage temperatures conformed to the first-order reaction kinetics ($R^2 > 0.93$). The reaction rate constants and temperature sensitivity associated with all the quality indices conformed to the Arrhenius equation. A model for the quantitative evaluation of storage quality of Korla fragrant pear based on the kinetic theory and the Arrhenius equation. It was found through experiments that after the storage of 60 days, the correlation coefficients (R) between the measured values and the predicted values of the quality indices were all greater than 0.97, with the average relative percentage deviation (P) smaller than 10%. These results indicated that the established model can reflect truly the changes in the firmness, soluble solids content, peel's chlorophyll content and relative electrical conductivity of fragrant pear. The effectiveness of the model in predicting the changes in quality indices and shelf life of fragrant pear at different storage temperatures was proven. The research results can provide a theoretical basis for commodity sales, quality evaluation and shelf life prediction of Korla fragrant pear under actual environmental conditions of storage.

引文格式:

王震涛, 兰海鹏, 牛浩, 等. 库尔勒香梨贮藏品质的量化评价方法[J]. 现代食品科技, 2020, 36(5): 138-147

WANG Zhen-tao, LAN Hai-peng, NIU Hao, et al. A method for the quantitative evaluation of storage quality of Korla fragrant pear [J].

Modern Food Science and Technology, 2020, 36(5): 138-147

收稿日期: 2019-11-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31160196); 兵团科技特派员创新创业计划项目 (2019CB037); 新疆特色农产品深加工兵团重点实验室开放课题 (AP1905); 塔里木大学校长基金项目 (TDZKCQ201902)

作者简介: 王震涛 (1995-) 男, 硕士, 研究方向: 农产品加工及贮藏

通讯作者: 刘扬 (1990-) 男, 讲师, 研究方向: 农产品加工及贮藏

Key words: Korla fragrant pear; kinetic model; storage quality; evaluation method

库尔勒香梨产于新疆南部,是中国地理标志保护特色林果之一^[1]。目前香梨采后按照商业用途不同主要在冷库、果窖、常温中贮藏^[2],贮藏过程中温度直接影响其物理和生理变化,进而影响香梨贮藏品质及货架期^[3]。传统依据目测、手摸等经验估算贮藏品质,易受个人主观判断的限制^[4],若采用量化评价品质的方法可克服主观判断的不足,也为不同贮藏条件下香梨销售时间决策提供科学依据。因此,研究香梨实际贮藏条件下温度与品质变化关系,探寻贮藏期间品质变化规律,建立品质科学评价方法及预测模型,对香梨销售、货架期决策、贮藏方式确定具有重要的指导意义和理论价值。

香梨贮藏中品质变化是由多种理化反应协同作用的综合体现。在不同贮藏条件下,因其理化反应速率不同,使得香梨品质亦有所差异。近年来,部分学者研究了不同贮藏条件下香梨品质的变化规律。张琦^[5,6]等对以库尔勒香梨为母本培育的新梨七号在常见的冷库、果窖、室内贮藏条件下品质变化的影响规律进行了分析,发现贮藏温度对品质变化有显著影响。兰海鹏^[7]对不同成熟度香梨常温和冰温贮藏下品质变化进行研究,发现常温贮藏与冰温贮藏相比硬度下降趋势更接近于线性变化。宿胜男^[8]对库尔勒香梨采后冷藏与常温贮藏条件下果皮蜡质变化规律进行了研究,发现低温有助于推迟蜡质含量高峰的出现。李学文^[9]发现低温贮藏可抑制香梨硬度的劣化。上述研究表明,不同贮藏条件下温度是影响香梨品质的重要因素。然而,不当的贮藏温度严重影响香梨的商业价值,且关于贮藏温度对香梨品质的系统性研究匮乏,因此亟需开展量化贮藏温度对香梨品质影响规律的研究。

果蔬贮藏期内品质变化规律基本遵循零级、一级反应动力学^[10],通过结合 Arrhenius 方程建立果蔬贮藏品质变化动力学模型,来模拟随时间-温度变化的品质指标变化规律,可将其作为量化评价果蔬货架期品质变化的有效手段^[11]。杨宏顺发现在不同气调贮藏条件下的花椰菜叶绿素含量劣变规律符合一级反应动力学^[12]。王相有等对贮藏过程中双孢蘑菇的硬度与失重率变化进行了研究,所建动力学模型预测结果与试验结果吻合良好^[13]。刘春菊等揭示了速冻莲藕片硬度在不同贮藏温度下的变化规律,发现一级反应动力学模型能准确预测品质指标变化和货架期寿命^[14]。Amodio 对鲜切甜瓜的可溶性固形物含量等品质指标动力学模型进行了研究,发现时间对品质劣变有显著影响^[15]。E. Dermesonluoglu 等建立了冷冻菠菜的叶绿素等品质

指标劣变的动力学模型,并在等温和非等温条件下进行贮藏试验,结果发现该模型能应用于冷冻菠菜冷链的评价和管理^[16]。以上研究表明基于动力学理论建立贮藏温度对品质影响规律的量化评价方法是可行的。然而,目前基于动力学理论的香梨贮藏品质量化评价方法国内外尚未见报道。

本文以库尔勒香梨采后冷库、果窖、常温三种实际贮藏条件下的温度为因素,果皮叶绿素含量、相对电导率、果实硬度、可溶性固形物含量为品质评价指标,基于动力学理论研究贮藏温度对品质劣化的影响,并结合 Arrhenius 方程构建库尔勒香梨贮藏品质量化评价模型,以为不同贮藏温度下香梨品质及货架期的预测提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

供试库尔勒香梨于 2017 年 10 月 5 日采自新疆阿拉尔市 11 团 10 连的常规管理梨园,此地区位于塔克拉玛干沙漠边缘,是南疆优质香梨生产区。当天上午采摘果实大小、颜色相近、无损伤和感染的带果柄香梨为试验样品,果实均重 130 ± 5 g,其高度在 6.4~8.2 cm 之间,采摘后立即运回实验室进行贮藏。香梨平均分为 3 组,每组设 3 个重复,分别置于温度 -1 °C、5 °C、25 °C(实际贮藏中冷库的平均温度为 -1 °C,传统窖藏平均温度为 5 °C,室温均温为 25 °C)相对湿度 $80\% \pm 3\%$ 的恒温恒湿试验箱中贮藏。采收当天测定相关品质指标初始值,随后每隔 5 d 取样测定 1 次,直到香梨开始腐烂变质停止。验证部分香梨于 2018 年 10 月 5 日采自同一果园,处理方式与试验部分香梨完全相同。

1.2 主要仪器设备

分光光度计 T6 新世纪,北京普析通用仪器有限责任公司;通用型果实硬度计 GY-4,杭州托普仪器有限公司;数显电热恒温水浴锅 HH-S6,金坛市医疗仪器厂;高速冷冻离心机 Sorvall ST8,上海凌仪生物科技有限公司;恒温恒湿箱 GDW-010,无锡环威科技有限公司;手持式糖度检测折光仪 HR18-01,德国 KRÜSS 牌。

1.3 贮藏期主要指标测定

1.3.1 硬度的测定

每次取 15 个香梨,使用通用型果实硬度计 GY-4

沿着水果赤道均布的3个点进行测量,用小刀去除该点香梨果皮后,将硬度计垂直对准测量点插入,缓缓进入直至规定标线处,该值自动计算,测量结果取平均值,单位: kg/cm²。

1.3.2 可溶性固形物含量的测定

参照兰海鹏^[4]的方法,将手持式糖度检测折光仪调零后,把去核取汁的样品滴入折光棱镜上测定,结果取均值,单位: %。

1.3.3 果皮叶绿素含量的测定

测定方法参考 NY/T 3082-2017《水果、蔬菜及其制品中叶绿素含量的测定 分光光度法》,略有改动。随机选取3个香梨,用刮皮刀取下薄薄的一层果皮,加入研磨剂磨成匀浆做成样品备用。取1 g 试样加入50 mL 无水乙醇和丙酮的混合液(1:1),封口膜密封后室温下无光环境中静置12 h,过滤后滤液倒入50 mL 容量瓶,用混合液定容至50 mL,测定时以无水乙醇和丙酮混合液为空白溶液,将分光光度调零,分别在645 nm 和663 nm 处测定试液的吸光度值。测定结果取5次试验平均值,按(1)式计算:

$$\omega = \frac{(8.05 \times A_1 + 20.29 \times A_2) \times V}{1000 \times m} \quad (1)$$

式中, ω 为果皮叶绿素含量, mg/g; A_1 为试液在663 nm 处的吸光度值; A_2 为试液在645 nm 处的吸光度值; V 为试液体积, mL; m 为试样质量, g。

1.3.4 相对电导率的测定

参照安瑞丽^[17]的方法,用打孔器对香梨赤道位置打孔,得到香梨果肉组织并制成均一的组织圆片,取被滤纸片吸干水分的2.0 g 样品,放入烧杯,加入50 mL 蒸馏水,在25±1 °C 条件下放置30 min,测得电导率 D_0 ,沸水浴15 min 后快速冷却测得电导率 D_1 ,试验重复3次取平均值,相对电导率 D 用以下公式计算:

$$D/\% = \frac{D_0}{D_1} \times 100 \quad (2)$$

1.4 品质变化动力学模型建立

1.4.1 零级、一级动力学模型与 Arrhenius 方程

为量化库尔勒香梨贮藏品质变化规律,对香梨的果实硬度、可溶性固形物含量、叶绿素含量、相对电导率进行了零级、一级动力学分析,并应用零级和一级动力学模型描述了香梨贮藏期间的品质变化,方程如下:

$$Q_t = Q_0 - kt \quad (3)$$

$$Q_t = Q_0 \exp(-kt) \quad (4)$$

式中, Q_t 为香梨在贮藏时间为 t 时的品质指标值; Q_0 为品质指标初始值; k 为反应速率常数; t 为贮藏时间。对公式(4)

取对数,得:

$$\ln Q_t = \ln Q_0 - kt \quad (5)$$

品质劣变速率与温度的关系通常由 Arrhenius 方程描述^[18]。利用在-1 °C、5 °C、25 °C 贮藏下的库尔勒香梨主要品质指标的数据作图,确定反应活化能,计算反应常数,得到该反应的 Arrhenius 方程。

$$k = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (6)$$

式中, A 为指前因子; R 为通用气体常数; E_a 为试验温度下化学反应的活化能, kJ/mol; T 是绝对温度, K。对式(6)

取对数得:

$$\ln k = \ln A - \frac{E_a}{RT} \quad (7)$$

1.4.2 品质指标变化动力学模型构建

基于动力学理论和 Arrhenius 方程建立的果蔬贮藏品质变化动力学模型可以评价预测果蔬贮藏品质变化^[19],量化贮藏品质随时间-温度的变化,使果蔬品质保持在市场接受范围。式(8)为果蔬贮藏期间品质变化的零级动力学模型公式:

$$t = \frac{Q_0 - Q_t}{A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)} \quad (8)$$

式(9)为果蔬贮藏期间品质变化的一级动力学模型公式:

$$t = \frac{\ln Q_0 - \ln Q_t}{A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)} \quad (9)$$

1.4.3 数据分析

本文采用 Excel 与 Origin 2017 处理试验数据并作图,结果以均值±标准差表示。为了验证库尔勒香梨贮藏品质变化动力学模型预测不同贮藏温度下香梨品质的有效性,通过实验值和预测值之间的平均相对百分比偏差 $p(\%)$ 确定,公式如下所示:

$$p(\%) = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|C_{ei} - C_{ci}|}{C_{ei}} \quad (10)$$

其中, N 为数据的个数, C_{ei} 为实验值, C_{ci} 为模型预测值。如果 p 值低于10%,则认为模型是可接受的。

2 结果与讨论

2.1 贮藏温度对库尔勒香梨贮藏品质的影响

库尔勒香梨贮藏期间品质通常通过触感、口感、外观颜色等来判断,本研究挑选了与传统判断方式最密切的几个品质指标来量化香梨贮藏品质,并用相对电导率来表征贮藏期间香梨内部细胞变化。

2.1.1 贮藏温度对库尔勒香梨硬度的影响

果实硬度是鉴别品种特性和品质的重要指标,也是衡量果实耐受贮藏和运输的主要指标。如图1所示,在-1℃、5℃、25℃三种贮藏温度下,库尔勒香梨初始硬度7.91 kg/cm²。-1℃、5℃温度贮藏下的库尔勒香梨在第30 d的硬度分别为7.12 kg/cm²、6.99 kg/cm²。到第60 d时,硬度分别为6.54 kg/cm²、6.12 kg/cm²,两种不同温度下贮藏的库尔勒香梨硬度变化相对一致变化速率相近。从第5 d开始25℃贮藏下的香梨硬度差异开始显现。在第60 d时,硬度下降到4.98 kg/cm²,并部分出现腐烂变质的情况。但不同贮藏温度,香梨硬度均随时间逐渐下降。且贮藏温度越高,香梨硬度下降速率越快。这是因为在采收前,影响果实硬度的细胞壁结构完整,其主要组成成分果胶呈不溶状态^[20,21],而随着贮藏过程的不断推进,半纤维素和果胶组织结构受到破坏并被降解,细胞结构受损^[22,23],香梨质地变软;加之,不同贮藏温度下香梨代谢速率不同,使得软化速度亦有差异,因此导致后期不同贮藏温度下的香梨硬度差异越来越明显。

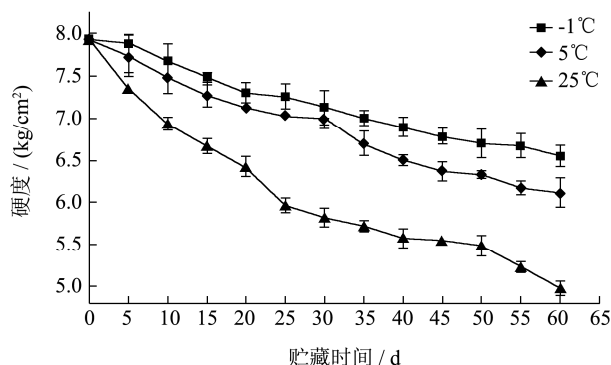


图1 不同贮藏温度下硬度的变化

Fig.1 Changes in fruit firmness at different storage temperatures

2.1.2 贮藏温度对库尔勒香梨可溶性固形物含量的影响

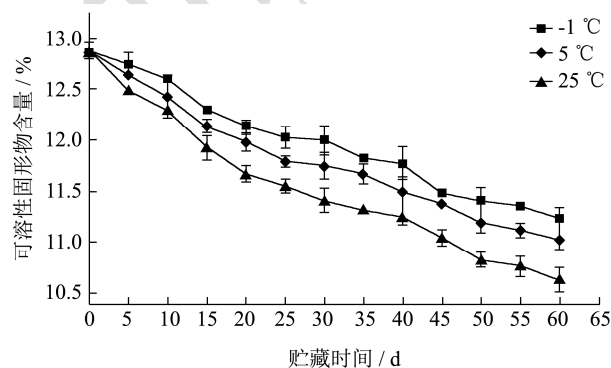


图2 不同贮藏温度下可溶性固形物含量的变化

Fig.2 Changes in soluble solids content at different storage temperatures

可溶性固形物含量是一个组分复杂的香梨品质评价指标,水果的口感受其含量影响很大^[24]。如图2所示, -1℃、5℃、25℃三种贮藏温度下,随着时间的延长,可溶性固形物含量呈波动式下降。可溶性固形物含量由初期的12.87%降低到末期的11.23%、11.03%、10.63%。该趋势与Yu^[25]对库尔勒香梨的研究相似。这是由于采摘时间较晚,贮藏期间香梨呼吸作用消耗糖的速率大于淀粉与果胶在淀粉酶、果胶酶作用下生成可溶性固形物的速率^[26]。另外,从图2中还可看出,可溶性固形物含量下降速率随温度降低而减缓,这表明一定贮藏期内,低温贮藏抑制了可溶性固形物含量变化。

2.1.3 贮藏温度对库尔勒香梨果皮叶绿素含量的影响

果皮外观颜色是消费者判断水果品质的重要依据,其变化深受叶绿素含量的影响。如图3所示,在-1℃、5℃、25℃三种温度下,随着贮藏时间的增加,叶绿素含量下降趋势逐渐减缓。这是因为采摘香梨已处于发育末期,叶绿素含量达到贮藏期峰值。且在不同贮藏温度下,影响叶绿素降解的脱镁叶绿素酶和叶绿素酶的活性不同,叶绿素降解速率随之发生改变。但由于类胡萝卜素等色素依然存在且比例增加,这时果皮颜色逐渐由绿色向黄绿转变^[27-29]。

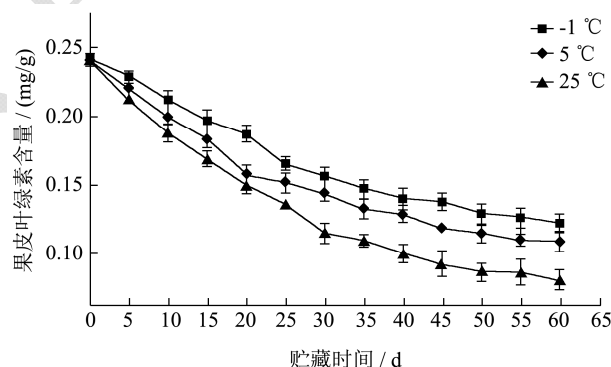


图3 不同贮藏温度下果皮叶绿素含量的变化

Fig.3 Changes of the chlorophyll content in peel under different storage temperatures

2.1.4 贮藏温度对库尔勒香梨相对电导率的影响

相对电导率是衡量果实细胞衰老和损伤程度的重要指标^[30]。如图4所示,在-1℃、5℃、25℃三种贮藏温度下,香梨相对电导率随着贮藏时间的延长呈递增趋势。且温度的增加促进了相对电导率变化,这与吴琼^[31]、安瑞丽^[17]在猕猴桃与伽师瓜的研究结果相同。这是由于贮藏时间的增加,果实不断衰老,清除自由基能力不断退化,在膜脂过氧化、活性氧代谢失调等因素的共同作用下,库尔勒香梨细胞膜完整性受损,膜透性增加,电解质大量渗出^[32-34],最终导致库

尔勒香梨品质从细胞层面开始劣化,相对电导率升高。

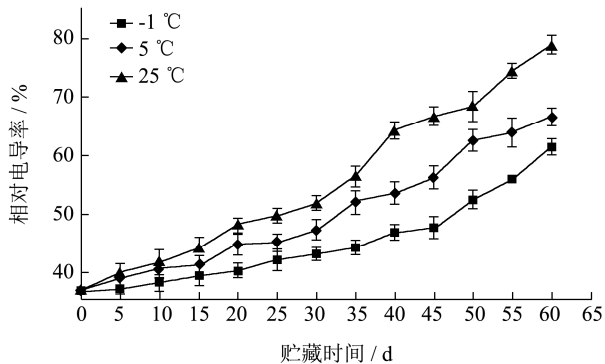


图4 不同贮藏温度下相对电导率的变化

Fig.4 Changes in the relative conductivity at different storage temperatures

2.2 库尔勒香梨贮藏品质指标变化动力学模型的建立

2.2.1 库尔勒香梨贮藏品质的变化速率及反应级数

为量化不同贮藏温度下库尔勒香梨品质变化规律,得到精准易行的贮藏品质变化规律模型。假设本试验库尔勒香梨贮藏过程中各品质指标变化符合零级或一级反应动力学。根据试验数据由式(3)或式(5)计算库尔勒香梨各品质指标在相应反应级数下的反应

速率常数 K ,与零级、一级动力学模型拟合确定决定系数 R^2 。结果如表1所示,随着贮藏温度的升高,反应速率常数 K 增加,品质劣变的速度加快,表明温度对香梨贮藏品质变化有显著影响。接下来由决定系数 R^2 和均方根误差 $RMSE$ 推断反应级数,决定系数 R^2 越高、均方根误差 $RMSE$ 越小说明拟合程度越好,在不同贮藏温度下果实硬度、可溶性固形物含量、果皮叶绿素含量、相对电导率与零级、一级反应的拟合都比较好 ($R^2>0.9$),但在各贮藏环境下一级反应决定系数 R^2 均比零级反应高,均方根误差 $RMSE$ 则均更小。因此,在不同温度贮藏过程中果实硬度、可溶性固形物含量、果皮叶绿素含量、相对电导率变化更符合一级反应。

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。果蔬在贮藏过程中理化性质变化十分复杂,简单的线性模型较少能够准确描述果蔬品质变化过程,如 Hashim N^[35]等研究香蕉冷害后叶绿素的变化,Thomas knebel 等^[36]发现苹果汁贮藏过程中花青素的降解过程,Samaniego-Esguerra^[37]报道洋葱干中硫亚硫酸酯的损失,王盼^[38]对失重率、褐变强度、pH 等指标在香菇贮藏中的变化,均满足一级动力学模型。

表1 不同贮藏温度下库尔勒香梨品质指标的零级和一级反应速率常数、均方根误差及决定系数

Table 1 Reaction rate constant, root mean square error and determination coefficient of zero and first order reaction of Korla fragrant pear quality at different storage temperatures

指标	贮藏温度	零级反应			一级反应		
		速率常数 K	均方根误差/RMSE	决定系数 R^2	速率常数 K	均方根误差/RMSE	决定系数 R^2
硬度	-1 °C	0.0234	0.0664	0.9776	0.0033	0.0569	0.9835
	5 °C	0.0300	0.0779	0.9812	0.0044	0.0658	0.9865
	25 °C	0.4296	0.2321	0.9230	0.0072	0.1909	0.9480
可溶性固形物	-1 °C	0.0273	0.0751	0.9788	0.0023	0.0693	0.9819
	5 °C	0.0295	0.0956	0.9709	0.0025	0.0863	0.9763
	25 °C	0.0347	0.1367	0.9575	0.0030	0.1235	0.9653
果皮叶绿素	-1 °C	0.0020	0.0092	0.9443	0.0126	0.0056	0.9796
	5 °C	0.0022	0.0121	0.9175	0.0148	0.0074	0.9694
	25 °C	0.0026	0.0145	0.9186	0.0207	0.0064	0.9846
相对电导率	-1 °C	-0.0037	0.0230	0.9010	-0.0086	0.0185	0.9363
	5 °C	-0.0051	0.0168	0.9695	-0.0103	0.0114	0.9861
	25 °C	-0.0070	0.0190	0.9792	-0.0127	0.0126	0.9909

2.2.2 库尔勒香梨品质变化反应的活化能

以上研究结果表明在不同温度贮藏过程中果实硬度、可溶性固形物含量、果皮叶绿素含量、相对电导

率变化更符合一级动力学模型。因此选择式(7)结合表1数据,由反应速率常数的对数 $\ln K$ 和贮藏温度的倒数 $1/T$ 作图5,进行线性拟合后获得库尔勒香梨贮

藏品质变化的 Arrhenius 曲线，并由曲线斜率计算 $E_a^{[39]}$ 。

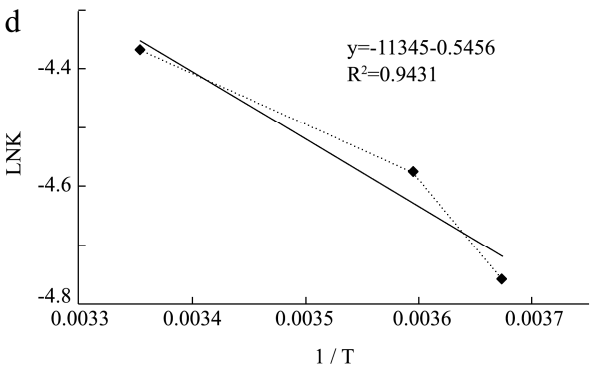
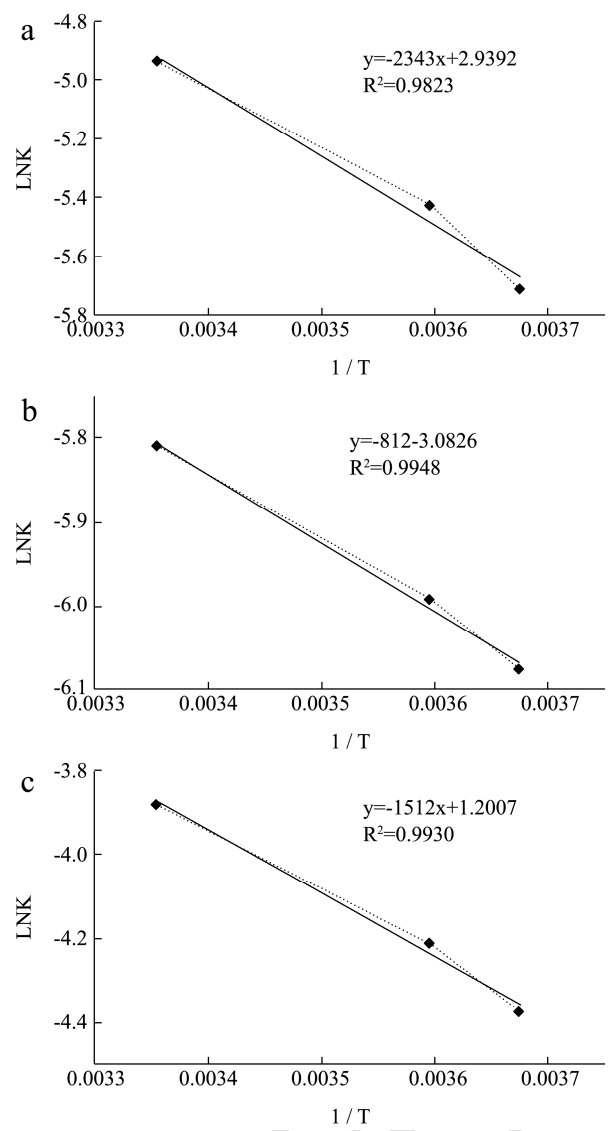


图5 库尔勒香梨品质变化的 Arrhenius 图

Fig.5 Arrhenius plots for change of Korla fragrant pear quality

注：(a)硬度；(b)可溶性固形物含量；(c)果皮叶绿素含量；(d)相对电导率。

活化能 E_a 反应了香梨品质劣变过程中发生的化学反应所需要从外部环境中吸收的热量，对库尔勒香梨贮藏中温度选择与控制有着重要意义。相关研究表明当 $E_a < 42 \text{ kJ/mol}$ ，反应容易进行且反应速率较大^[40]。从表2可以看出，在香梨贮藏过程中反应速率最大的为可溶性固性物含量，表明该指标易发生变化^[41]，其次为相对电导率、果皮叶绿素含量、硬度。活化能也反应了品质变化对温度的敏感性，活化能越小，温度增加对品质变化的敏感性越小，由此推断出香梨贮藏过程中可溶性固形物含量的温度敏感性较小，硬度的温度敏感性相对较大。接下来将活化能 E_a ，指前因子 A 带入式(9)，得到了库尔勒香梨贮藏品质指标变化动力学模型，如表2所示。通过该方程可以根据不同贮藏温度下香梨贮藏品质初始值与贮藏时间了解某时间香梨贮藏品质，也可根据香梨不同商业用途，以商业品质最低限值计算出贮藏时间，确定香梨的货架期。

表2 库尔勒香梨贮藏过程品质降解动力学模型

Table 2 Quality degradation kinetics model of Korla fragrant pear during storage

指标	贮藏温度	指前因子 A	活化能 E_a /(kJ/mol)	预测模型
硬度	-1 °C	18.90	19.48	$t = \frac{1nQ_0 - 1nQ_t}{18.90 \exp\left(\frac{-2.34 \times 10^3}{T}\right)}$
	5 °C			
	25 °C			
可溶性固形物含量	-1 °C	0.05	6.75	$t = \frac{1nQ_0 - 1nQ_t}{0.05 \exp\left(\frac{-8.12 \times 10^2}{T}\right)}$
	5 °C			
	25 °C			
果皮叶绿素含量	-1 °C	3.32	12.57	$t = \frac{1nQ_0 - 1nQ_t}{3.32 \exp\left(\frac{-1.51 \times 10^3}{T}\right)}$
	5 °C			
	25 °C			
相对电导率	-1 °C	0.58	9.44	$t = \frac{1nQ_t - 1nQ_0}{0.58 \exp\left(\frac{-1.14 \times 10^3}{T}\right)}$
	5 °C			
	25 °C			

3 香梨贮藏品质评价方法验证及应用

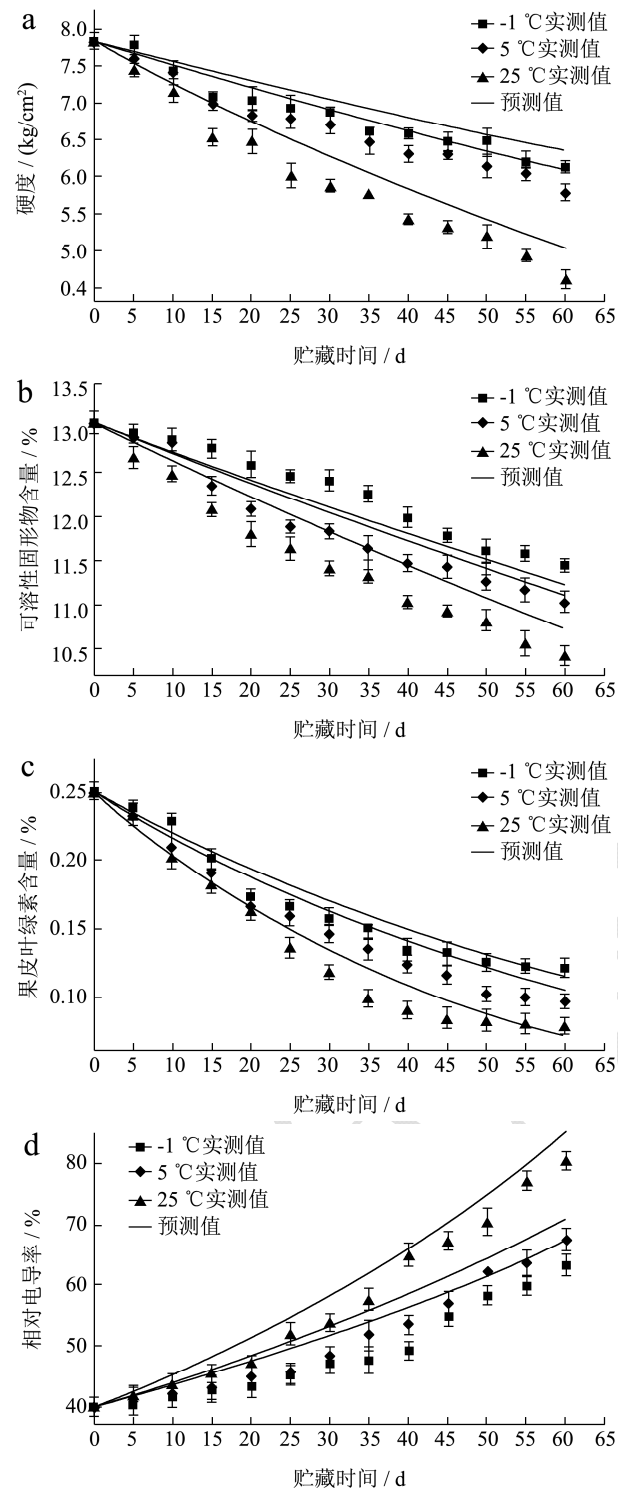


图6 不同贮藏温度下香梨品质预测值和实测值之间的关系
Fig.6 Relationship between predicted and measured values of quality of Korla fragrant pear at different storage temperatures

注：(a)硬度；(b)可溶性固形物含量；(c)果皮叶绿素含量；(d)相对电导率。

供验证库尔勒香梨于2018年10月5日采自上一

年试验组来源梨园，处理方式完全相同。此时库尔勒香梨初始硬度 7.83 kg/cm^2 、可溶性固形物含量 13.06%、果皮叶绿素含量 0.2512 mg/g 、相对电导率 39.78%。不同贮藏温度下库尔勒香梨的硬度、可溶性固形物含量、果皮叶绿素含量、相对电导率实测值与预测模型所得预测值关系如图6所示。对其进行相关性分析，由表3可知在不同贮藏温度下库尔勒香梨的硬度、可溶性固形物含量、果皮叶绿素含量、相对电导率实测值和预测值之间的相关系数均大于0.97，试验值与拟合的模型相关性较好，说明库尔勒香梨贮藏品质指标变化动力学模型能够真实的反应香梨的硬度、可溶性固形物含量、果皮叶绿素含量、相对电导率的变化规律。

为验证贮藏品质变化动力学模型预测香梨品质变化的有效性，计算了其平均相对百分比偏差 $P(\%)$ ，结果如表3所示，可以看出：库尔勒香梨的硬度、可溶性固形物含量、果皮叶绿素含量、相对电导率对模型的验证 P 值在 1.39%~9.37%，考虑到劣化反应的复杂性和产品的固有变异性， P 值低于 10%模型符合要求^[42]，足以用于预测特定的目标。即在不同贮藏温度下，库尔勒香梨硬度、可溶性固形物含量、果皮叶绿素含量、相对电导率的动力学模型均可行。

表3 不同贮藏温度下库尔勒香梨品质劣变动力学模型验证

Table 3 Verification of quality degradation kinetic models of

Korla fragrant pear during storage			
指标	贮藏条件	P 值	相关系数 R
硬度	冷库 (-1 °C)	3.00	0.9803
	果窖 (5 °C)	3.44	0.9862
	常温 (25 °C)	5.23	0.9912
可溶性固形物含量	冷库 (-1 °C)	1.42	0.9902
	果窖 (5 °C)	1.39	0.9834
	常温 (25 °C)	2.69	0.9915
果皮叶绿素含量	冷库 (-1 °C)	5.51	0.9812
	果窖 (5 °C)	9.37	0.9939
	常温 (25 °C)	8.41	0.9890
相对电导率	冷库 (-1 °C)	7.89	0.9791
	果窖 (5 °C)	6.30	0.9890
	常温 (25 °C)	4.89	0.9958

Vicent^[43]研究表明，动力学理论结合 Arrhenius 方程可有效反映苹果组织在冷冻贮藏过程中随温度波动的变化。Jian Lyu^[44]发现所建品质指标动力学模型可准确反映不同贮藏温度(4、25、37 °C)下 a^* 和 b^* 值的变化、 V_C 的降解以及 A_{420} 、 L^* 和 5-HMF 的变化。本文借助于动力学理论研究贮藏温度对品质劣化的影响，并结合 Arrhenius 方程构建的香梨贮藏品质评价模型，

可用来量化评价贮藏期间香梨品质变化,完成不同贮藏温度下时间和品质指标间的相互预测。但在实际应用中具有一定的地域局限性,因不同地域的库尔勒香梨贮藏品质虽有相同的变化规律,但香梨品质阈值不同。如有学者测得 SSC 含量阈值为 14.91%^[4]、13.77%^[25]等,因此该方法在实际贮藏条件下应用时首先要进行试验标定,方可指导香梨的贮藏与销售。

4 结论

4.1 本文以库尔勒香梨在冷库、果窖、常温三种实际贮藏条件下的温度为参考,探寻不同贮藏温度对果实硬度、可溶性固形物含量、果皮叶绿素含量、相对电导率的影响规律。经试验发现香梨贮藏品质受温度影响显著,且低温有效的减缓了品质劣变速率。通过对各品质指标应用零级、一级动力学模型进行拟合分析,发现均是一级动力学模型拟合优度最佳,其决定系数 $R^2 > 0.93$ 。

4.2 在试验参数范围内,提出了基于贮藏品质变化规律的库尔勒香梨品质量化评价方法。应用动力学理论结合 Arrhenius 方程建立了库尔勒香梨贮藏品质指标变化动力学模型。经试验验证,不同贮藏温度下库尔勒香梨的硬度、可溶性固形物含量、果皮叶绿素含量、相对电导率实测值与预测模型所得预测值相关系数 $R > 0.97$,平均相对百分比偏差 P 值小于 10%。证明该方法可完成不同贮藏温度下库尔勒香梨果实硬度、可溶性固形物含量、果皮叶绿素含量、相对电导率指标变化及货架期预测。并与其他水果不同贮藏温度下品质量化评价方法提供参考。

参考文献

- [1] 新疆维吾尔自治区统计局.新疆统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2017:322-327
XIN Jiang Statistical Yearbook [M]. Beijing: China Statistical Publishing House, 2017: 322-327
- [2] 李兰婷.不同采收贮藏方式对‘新梨7号’果实品质、果皮结构的影响[D].阿拉尔:塔里木大学,2017:2-6
LI Lan-ting. Effects of different harvest and storage methods on fruit quality and pericarp structure of ‘Xinli NO.7’ [D]. Alaer: Tarim University, 2017: 2-6
- [3] 刘娟,吴伟杰,邵海燕,等.贮藏温度对鲜切火龙果品质及微生物的影响[J].中国食品学报,2017,17(10):168-175
LIU Juan, WU Wei-jie, HAO Hai-yan, et al. Effects of different storage temperatures on quality and microorganism of fresh-cut pitaya [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2017, 17(10): 168-175
- [4] 兰海鹏,贾富国,唐玉荣,等.库尔勒香梨成熟度量化评价方法[J].农业工程学报,2015,31(5):325-330
LAN Hai-peng, JIA Fu-guo, TANG Yu-rong, et al. Quantity evaluation method of maturity for Korla fragrant pear [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(5): 325-330
- [5] Zhang Q, Duan H J, Jiang X. Relationship between storage environment and fruit quality of a pear cultivar Xinli No.7 at different picking time [J]. Agricultural Science & Technology, 2017, 18(9): 1675-1679, 1690
- [6] 张琦,姜喜,段黄金.不同贮藏方式对梨果皮组织结构的影响[J].果树学报,2016,33(S1):175-179
ZHANG Qi, JIANG Xi, DUAN Huang-jin. Effects of different storage methods on the structure of pear skin tissue [J]. Journal of Fruit Science, 2016, 33(S1): 175-179
- [7] 兰海鹏.库尔勒香梨成熟特征表达及评价方法[D].哈尔滨:东北农业大学,2017
LAN Hai-peng. Research on maturity characteristics and maturity evaluation of Korla fragrant pear [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2017
- [8] 宿胜男,赵文启,陈国刚,等.库尔勒香梨表皮蜡质化学组分的变化与其贮藏品质的关系[J].食品科学,2018,39(17):200-205
SHU Sheng-nan, ZHAO Wen-qi, CHEN Guo-gang, et al. Relationship between variation in chemical components in epicuticular wax of Korla fragrant pear and its storage quality [J]. Journal of Food Science and Technology, 2018, 39(17): 200-205
- [9] 李学文,张辉,逢焕明,等.库尔勒香梨采后特征品质的研究[J].中国农学通报,2010,26(15):100-102
LI Xue-wen, ZHANG Hui, PANG Huan-ming, et al. Study on characteristic quality of postharvest fragrant pears [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(15): 100-102
- [10] Labuza T P, Shapero M. Prediction of nutrient losses [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 1978, 2(2): 91-99
- [11] 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.
HU Wei-xin, DING Tian, LIU Dong-hong. Application of kinetic modeling of food quality changes during storage [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2017, 17(5): 161-167
- [12] 杨宏顺,冯国平,李云飞.嫩茎花椰菜在不同气调贮藏下叶绿素和维生素 C 的降解及活化能研究[J].农业工程学报,2004(4):172-175

- YANG Hong-shun, FENG Guo-ping, LI Yun-fei. Contents and apparent activation energies of chlorophyll and ascorbic acid of broccoli under controlled atmosphere storage [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2004, 4: 172-175
- [13] 王相友,朱继英,李霞.双孢蘑菇采后贮藏品质预测模型[J].农业机械学报,2010,41(6):103-107,112
- WANG Xiang-you, ZHU Ji-ying, LI Xia. Predictive mathematical model for storage quality of *Agaricus bisporus* [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(6): 103-107, 112
- [14] 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
- LIU Chun-ju, QIAN Min, SONG Jiang-feng, et al. Establishment of dynamic model for quality change in frozen lotus root slices during storage [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(6): 301-308
- [15] Amodio M L, Derossi 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, 44(1): 38-45
- [16] Dermesonluoglu E, Katsaros G, Tsevdou M, et al. Kinetic study of quality indices and shelf life modelling of frozen spinach under dynamic conditions of the cold chain [J]. Journal of Food Engineering, 2015, 148: 13-23
- [17] 安瑞丽,王斌,魏长庆,等.不同贮藏温度对采后伽师瓜果实冷害及品质的影响[J].食品科学,2018,39(9):196-201
- AN Rui-li, WANG Bin, WEI Chang-qing, et al. Effect of storage temperature on chilling injury and quality of jiashi melon [J]. Journal of Food Science and Technology, 2018, 39(9): 196-201
- [18] Jian L, Liu X, Bi J, et al. Kinetic modelling of non-enzymatic browning and changes of physio-chemical parameters of peach juice during storage [J]. Journal of Food Science & Technology, 2018, 55(3): 1003
- [19] 于滨,王喜波.鸡蛋贮藏过程中品质变化的动力学模型[J].农业工程学报,2012,28(15):276-280
- YU Bin, WANG Xi-bo. Kinetics of quality change for eggs during storage [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(15): 276-280
- [20] 赵洪卫,韩东海,宋曙辉,等.小型西瓜果实成熟度表征因子筛选[J].农业工程学报,2012,28(17):281-286
- ZHAO Hong-wei, HAN Dong-hai, SONG Shu-hui, et al. Screening of maturity characterization factors for mini watermelon fruit [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(17): 281-286
- [21] 关军锋,马智宏.苹果果实软化与果胶含量、质膜透性和钙溶性的关系[J].果树学报,2001,1:11-14
- GUAN Jun-feng, MA Zhi-hong. Apple fruit softening in relation to pectin content, permeability of cell membrane and calcium form [J]. Journal of Fruit Science, 2001, 18(1): 11-14
- [22] Hong S, Kim M, Park S, et al. Changes in contents of soluble sugars, organic acids, and the fruit taste of early season pear cultivars during maturation [J]. Journal of the Korean Society for Horticultural Science, 1998, 39(4): 408-411
- [23] 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(406): 2281-2290
- [24] 孙通,应义斌,刘魁武,等.梨可溶性固形物含量的在线近红外光谱检测[J].光谱学与光谱分析,2008,28(11):2536-2539
- SUN Tong, YING Yi-bin, LIU Kui-wu, et al. Online detection of soluble solids content of pear by near infrared transmission spectrum [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008, 28(11): 2536-2539
- [25] Yu X, Lu H, Wu D. Development of deep learning method for predicting firmness and soluble solid content of postharvest Korla fragrant pear using Vis/NIR hyper spectral reflectance imaging [J]. Postharvest Biology and Technology, 2018, 141: 39-49
- [26] 唐霞,张明,马俊莲,等.适宜贮藏温度保持鲜食无花果品质[J].农业工程学报,2015,31(12):282-287
- TANG Xia, ZHANG Ming, MA Jun-lian, et al. Appropriate stored temperature to maintain quality of fresh figs fruits [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(12): 282-287
- [27] 张丽,罗海波,姜丽,等.果实成熟衰老过程中蛋白质组学研究进展[J].植物生理学报,2011,47(9):861-871
- ZHANG Li, LUO Hai-bo, JIANG Li, et al. Advances in proteomics related to fruit ripening and senescence [J]. Plant Physiology Journal, 2011, 47(9): 861-871
- [28] 周慧娟,乔勇进,张绍铃,等.不同成熟度大团蜜露水蜜桃货架期间品质与代谢差异性研究[J].果树学报,2010,27(2):244-250
- ZHOU Hui-juan, QIAO Yong-jin, ZHANG Shao-ling, et al. Study on the effects of different maturity on the fruit shelf-qualities and difference in metabolism of Datuanmili honey peach cultivar [J]. Journal of Fruit Science, 2010,

- 27(2): 244-250
- [29] 贾晓辉,王文辉,佟伟,等.自发气调包装对库尔勒香梨采后生理及贮藏品质的影响[J].中国农业科学,2016,49(24): 4785-4796
- JIA Xiao-hui, WANG Wen-hui, DONG Wei, et al. Effect of modified atmosphere packaging on postharvest physiology and quality of 'Korla Xiangli' pears during storage [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(24): 4785-4796
- [30] 范林林,高丽朴,左进华,等.外源硝普钠处理对茄子贮藏过程中品质的影响[J].食品科学,2015,36(22):222-226
- FAN Lin-lin, GAO Li-po, ZUO Jin-hua, et al. Effect of exogenous sodium nitroprusside treatment on eggplant quality during storage [J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 36(22): 222-226
- [31] 吴琼,周然.冷藏温度对振动胁迫下猕猴桃细胞膜脂氧化及活性氧成分的影响[J].食品工业科技,2019,40(8):234-240
- WU Qiong, ZHOU Ran. Effect of cold temperature on membrane lipid oxidation and active oxygen species of kiwifruit under vibratory stress [J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(8): 234-240
- [32] Kashaninejad M, Mortazavi A, Safekordi A, et al. Some physical properties of pistachio (*Pistacia vera* L.) nut and its kernel [J]. Journal of Food Engineering, 2006, 7(2): 30-38
- [33] Zhou R, Zhang G, Hu Y, et al. Reductions in flesh discolouration and internal morphological changes in Nanhui peaches (*Prunus persica* (L.) Batsch, cv. Nanhui) by electrolysed water and 1- methylcyclopropene treatment during refrigerated storage [J]. Food Chemistry, 2012, 135(3): 985-992
- [34] Sun J, Li C, Prasad K N, et al. Membrane deterioration, enzymatic browning and oxidative stress in fresh fruits of three litchi cultivars during six-day storage [J]. Scientia Horticulturae, 2012, 148: 97-103
- [35] Hashim N, Janius R B, Baranyai L, et al. Kinetic model for colour changes in bananas during the appearance of chilling injury symptoms [J]. Food and Bioprocess Technology, 2012, 5(8): 2952-2963
- [36] Knebel T, Braun P, Dietrich H. Degradation kinetics of anthocyanins and polyphenols during storage of red apple juice produced from red-fleshed apples [J]. European Food Research and Technology, 2018
- [37] Samaniegoesguerra C M, Boag I F, Robertson G L. Kinetics of quality deterioration in dried onions and green beans as a function of temperature and water activity [J]. Lebensmittel Wissenschaft und Technologie, 1991, 24, 53-58
- [38] 王盼,张坤生,任云霞.香菇贮存中品质变化动力学模型及货架期的预测[J].食品工业科技,2012,20:313-316
- WANG Pan, ZHANG Kun-sheng, REN Yun-xia. Kinetic model of quality change and prediction of the shelf-life of stored mushroom [J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 20: 313-316
- [39] Teng S S, Chen B H. Formation of pyrochlorophylls and their derivatives in spinach leaves during heating [J]. Food Chemistry, 1999, 65(3): 367-373
- [40] 史亚歌,刘拉平,岳田利,等.冷熏三文鱼单增李斯特菌热灭菌规律及其品质变化动力学研究[J].现代食品科技,2015, 31(6):156-163
- SHI Ya-ge, LIU La-ping, YUE Tian-li, et al. Thermal sterilization of *Listeria monocytogenes* and kinetics of quality changes in cold smoked salmon [J]. Modern Food Science and Technology, 2015, 31(6): 156-163
- [41] 王梦泽,薛少平,王佳,等.草莓浑浊汁维生素 C 降解动力学模型[J].农业工程学报,2010,26(3):353-357
- WANG Meng-ze, XUE Shao-ping, WANG Jia, et al. Thermal degradation dynamic model of vitamin C in cloudy strawberry juice during storage [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(3): 353-357
- [42] Kaymak-ertekin F, Gedik A. Kinetic modelling of quality deterioration in onions during drying and storage [J]. Journal of Food Engineering, 2005, 68(4): 443-453
- [43] Vicent V, Ndoye F T, Verboven P, et al. Quality changes kinetics of apple tissue during frozen storage with temperature fluctuations [J]. International Journal of Refrigeration, 2018: S0140700718301816
- [44] Lyu J, Liu X, Bi J, et al. Kinetic modelling of non-enzymatic browning and changes of physio-chemical parameters of peach juice during storage [J]. Journal of Food Science and Technology -Mysore-, 2018, 55(2): 1003-1009