马菲菲, 王华艳, 何代琴, 等. 余甘子果脯在光照贮藏过程中的品质变化规律及货架期预测 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(18): 395−406. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070384
MA Feifei, WANG Huayan, HE Daiqin, et al. Quality Changes and Shelf Life Prediction of *Phyllanthus emblica* L. Preserved Fruit during Light-accelerated Storage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(18): 395−406. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070384

· 贮运保鲜与冷链技术 ·

余甘子果脯在光照贮藏过程中的品质变化规律及货架期预测

马菲菲[1], 王华艳[1], 何代琴[1], 李荣辉[1], 胡　昕[1], 黄钰婷[2], 苏火生[1,*]
（1.云南省农业科学院农产品加工研究所, 云南昆明 650221;
2.元谋艾莱克食品有限责任公司, 云南楚雄 651300）

摘　要: 为探究光照时间对余甘子果脯贮藏品质的影响并建立货架期预测模型，本研究以透明包装袋（TM）和避光包装袋（BG）包装的‘华丰’（HF）和‘野生’（YS）品种余甘子果脯为研究对象，在 25 ℃、2000 lux 光照条件下进行 25 d 的加速贮藏实验，动态监测色泽、质构、化学成分、抗氧化活性及感官评分等 18 项指标变化，结合 Pearson 相关性分析法与化学动力学方程，建立基于关键品质指标的货架期预测模型。结果表明：光照贮藏明显影响余甘子果脯品质，其中 L^*值、b^*值、硬度、弹性、咀嚼性、水分、总酸、总糖、还原糖、抗坏血酸、总酚、黄酮、抗氧化活性及综合感官评分等指标显著降低，而 a^*值、ΔE 值和内聚性等指标显著升高（P<0.05）。避光包装（BG）能有效延缓品质劣变，第 25 d 时，余甘子果脯综合感官评分由高至低依次为 BG-YS>BG-HF>TM-YS>TM-HF。Pearson 相关性分析表明余甘子果脯各品质指标中 L^*值、弹性、抗坏血酸含量与感官评分相关性最高，选择以上 3 个指标可作为预测余甘子果脯货架期的关键指标，其变化规律符合零级动力学方程，建立的货架期模型预测值与实测值相对偏差在 10% 以内，证明该模型准确可信，能够快速可靠地预测余甘子果脯的货架期。

关键词: 余甘子果脯, 光照贮藏, 包装方式, 品质劣变, 相关性分析, 货架期预测
中图分类号: TS255.3　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)18−0395−12
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070384　　本文网刊:

Quality Changes and Shelf Life Prediction of *Phyllanthus emblica* L. Preserved Fruit during Light-accelerated Storage

MA Feifei[1], WANG Huayan[1], HE Daiqin[1], LI Ronghui[1], HU Xin[1], HUANG Yuting[2], SU Huosheng[1,*]
（1.The Institute of Agro-products Processing Science and Technology, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming 650221, China;
2.Yuanmou Alec Food Co., Ltd., Chuxiong 651300, China）

Abstract: To investigate the effects of light exposure on the storage quality of *Phyllanthus emblica* L. preserved fruit and to establish a shelf-life prediction model, this study subjected two varieties, 'Huafeng' (HF) and 'Wild' (YS), packaged in transparent (TM) and light-blocking (BG) packaging bags were used as research objects. Accelerated storage experiments were carried out for 25 days at 25 ℃ and 2000 lux light conditions. Monitor 18 indicators changes, including color, texture, chemical composition, antioxidant activity, and sensory dynamically. Pearson correlation analysis and chemical kinetic modeling were integrated to construct a shelf-life prediction model, enabling the estimation of product stability based on critical quality attributes. The results demonstrated that light exposure significantly accelerated quality deterioration. Notably, the L^* value, b^* value, hardness, elasticity, chewiness, moisture content, total acid, total sugar, reducing sugar, ascorbic acid, total phenols, flavonoids, antioxidant activity, and overall sensory score decreased significantly (P<0.05),

收稿日期: 2025−08−01
基金项目: 现代农产品-科技装备及创新能力提升; 云南省科技特派员（马菲菲）（202204BK090471）。
作者简介: 马菲菲（1988−）, 女, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 农产品加工, E-mail: 469484586@qq.com。
*** 通信作者:** 苏火生（1980−）, 男, 硕士, 副研究员, 研究方向: 农产品加工, E-mail: shs304@163.com。

whereas the a^* value, ΔE value, and cohesiveness increased (P<0.05). Light-blocking (BG) packaging effectively delayed this deterioration. On day 25, the overall sensory scores ranked as follows: BG-YS>BG-HF>TM-YS>TM-HF. Pearson correlation analysis identified L^* value, elasticity, and ascorbic acid content as the indicators most strongly correlated with sensory score. These were selected as key predictors, and their degradation followed zero-order kinetics. The established shelf-life prediction model showed a relative deviation between predicted and actual values of less than 10%, confirming its accuracy and reliability for the rapid assessment of the product's shelf life.

Key words: *Phyllanthus emblica* L. preserved fruit; light-accelerated storage; packaging method; quality deterioration; correlation analysis; shelf life prediction

余甘子(*Phyllanthus emblica* L.)是大戟科叶下珠属的一种药食同源水果[1],国内主要分布于云南、广东、广西、福建等地。目前已经从余甘子中分离鉴定出了 180 余种生物活性物质,主要包括酚酸、黄酮、多糖、生物碱和氨基酸等[2−3]。现代药理学研究表明,余甘子有抑菌[4]、抗炎[5]、抗氧化[6]、抗癌[7]、免疫调节[8]和改善心脏健康[9]等功效。余甘子在果脯[10]、果汁[11−12]、果冻[13]、速溶粉[14]、含片[15]等产品的开发上前景广阔[16]。果脯又称蜜饯,是指果蔬经过糖渍、烘干等工艺制成的表面无糖霜析出且具有透明感的制品[17],是云南地区余甘子的主要加工产品之一。余甘子富含抗坏血酸、多酚、黄酮等光敏化合物,易产生光氧化降解反应。调研发现,部分采用透明包装的余甘子果脯产品在货架期内即出现明显的品质劣变现象,表现为严重的非酶褐变和氧化哈败。但目前该类产品货架期的确定主要基于微生物指标的变化,而忽视了光照等环境因素对产品品质的影响[18]。

光照诱导的食品品质变化是一个不容忽视的因素,对于食品货架期预测、包装设计和消费者满意度至关重要。大量研究证实,光照会导致乳制品产生光氧化异味并造成营养素损失[19−21],引发水果及加工产品褐变[22−24],造成肉类色泽劣变[25−26],并加速含油脂食品的氧化酸败[27−29]等。Tan 等[30]发现光照强度会影响牛奶样品中光氧化生物标志物的含量,明确了光照对乳类产品氧化劣变的驱动作用;Manzocco 等[31]证实了饮料贮藏期间的颜色变化速率与光照强度呈线性正相关,量化了光照对饮料色泽劣变的影响;Chen 等[32]借助 HPLC-MS 技术揭示光照可引发果汁中多酚氧化聚合并生成褐色聚合物,从分子层面阐明了光照导致果汁褐变的机制。以上研究从不同食品品类、不同劣变维度共同证实了光照是驱动食品体系发生品质劣变的关键环境诱因。同时,光氧化速率受光照时间、光照强度、光源类型、波长范围、贮藏温度和食品成分的影响[30]。食品货架陈列区的光照强度普遍处于 300~2000 lux[33],300~500 nm 是食品褐变的关键激发段光线,其中 465 nm 是加速氧化实验的代表性波长[34],以上光照参数可指导光照加速实验条件的设置。针对食品的加速试验,目前应用最广泛的是以温度、湿度和光照加速来预测食品货架寿命[35−36]。化学动力学零级或一级反应广泛用于描述食品品质与贮藏时间的关系,可确定反应速率常数和货架期,通过建立货架期预测模型能快速、方便、准确地进行产品货架期预测。但利等[37]以手撕板鸭为对象,建立了不同贮藏温度下板鸭货架期预测模型,徐文婷等[38]、张喻等[29]建立了澳洲坚果果仁、咸干花生的动力学预测模型。

目前尚无光照对余甘子果脯品质的影响以及货架期预测模型建立方面的研究。鉴于此,本研究以透明(TM)和避光(BG)包装的 2 个品种余甘子果脯为研究对象,在 25 ℃、光照强度为 2000 lux、蓝光波长为 465 nm 的条件下,进行 25 d 的光照加速破坏实验,监测色泽参数、质构特性、化学成分、抗氧化活性和感官品质等 18 项指标的变化趋势,并对品质指标进行 Pearson 相关性分析,确定品质劣变的关键因子;结合化学动力学方程构建余甘子果脯货架期预测模型,以期为余甘子果脯光照贮藏品质控制和货架期预测提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

‘华丰’‘野生’余甘子(云南代表性品种) 市售;食品级柠檬酸、抗坏血酸 江苏佰业生物科技有限公司;葡萄糖标准品、抗坏血酸标准品、没食子酸标准品、芦丁标准品(以上标准品纯度≥99%)、2,6-二氯靛酚、福林酚、ABTS$^+$自由基清除率试剂盒、DPPH 自由基清除率试剂盒 北京索莱宝科技有限公司;3,5-二硝基水杨酸、硝酸铝、草酸 天津市风船化学试剂有限公司;蒽酮、邻苯二甲酸氢钾、亚硝酸钠、碳酸钠、盐酸、醋酸、硫酸、偏磷酸 国药集团化学试剂有限公司;氢氧化钠 成都金山化学试剂有限公司;无水乙醇 云南景锐科技有限公司;上述试剂均为分析纯。

MGC-300B 光照培养箱、BWS-5 恒温与水浴锅 上海一恒科学仪器有限公司;LS330 高精度光谱照度检测仪 深圳市林上科技有限公司;16 丝食品级透明、避光包装袋 石家庄喜龙包装有限公司;L3.5TB1 闭环除湿热泵干燥机 广东威而信实业有限公司;ME204 电子分析天平 梅特勒托利多仪器有限公司;BPG-9140A 精密鼓风干燥箱、TGL-16M 冷冻离心机、Multiskan GO 酶标仪 美国赛默飞世尔科技公司;CM-5 台式色差仪 日本柯尼卡美能达公司;TM-Touch 食品质构测定仪 美国 Food Tech-

nology Corporation 公司；FSJ-A03E1 型粉碎机　小浣熊电器有限公司；KQ-700DE 数控超声波清洗器　昆山市超声仪器有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　余甘子果脯制备　工艺流程：原料选择→清洗除杂→去核→杀青→浸糖→烘干→成品。

操作要点：选用成熟度适宜、果形完整、无病虫害、无腐烂及机械损伤的新鲜余甘子；清洗干净进行蒸制处理 5 min，人工或机械去核；取等量水煮沸后投入余甘子，保持微沸状态 2~3 min，杀青后的余甘子立即倒入冷水中冷却至常温；将白砂糖加入水中加热至完全溶解，初始糖液浓度为 40°Brix~50°Brix，余甘子和糖液的比例为 1∶1，渗糖 18~24 h；渗糖后去除表面糖渍，均匀平铺于烘盘上，置于 55~70 ℃ 烘房内烘干，烘干 6~10 h，余甘子果脯最终水分含量为 25%~30%。冷却至室温，采用食品级包装袋包装。余甘子果脯产品的水分和总糖含量均符合 GB/T 10782-2021《蜜饯质量通则》的要求。色泽、质构、水分和感官指标使用完整果脯测定；其余指标用粉碎机粉碎后的粉末样品测定，测定周期为 3 d。

1.2.2　光照加速实验设计　挑选大小、色泽均匀的余甘子果脯，分别采用 0.10 mm 厚 16 丝的透明包装袋和避光包装袋（TM 透光率≥95%，BG 透光率≤5%），统一密封包装（100 g/袋）后，在 25 ℃，相对湿度 50%±5% 条件下，采用光照培养箱模拟货架光照[39]，光源为白色发光二极管（Light Emitting Diode，LED），光照强度 2000 lux，蓝光峰值 465±5 nm，样品距离光源 20 cm，在恒温恒湿条件下进行为期 25 d 的加速破坏试验，每天打乱一次摆放顺序，每 5 d 取一次样进行指标测定。光照加速实验组别设计如表 1 所示，不同光照时间下的累积光照强度如表 2 所示。

表 1　光照加速实验组别设计

Table 1　Group design of light acceleration experiment

组别	包装方式	余甘子果脯品种
TM-HF	透明包装（TM）	华丰余甘子果脯（HF）
TM-YS		野生余甘子果脯（YS）
BG-HF	避光包装（BG）	华丰余甘子果脯（HF）
BG-YS		野生余甘子果脯（YS）

表 2　不同光照时间下的累积光照强度

Table 2　Cumulative light intensity under different light exposure durations

光照时间（d）	光照强度（lux）	累计光照强度（lux·h）
0	2000	0
5		240000
10		480000
15		720000
20		960000
25		1200000

1.2.3　指标测定

1.2.3.1　色泽测定　色泽测定参考胡丽丽等[40] 的方法并加以改进，采用 CM-5 型台式色差仪，测定前用标准白板进行校准，以亮度值 L^*、红绿度值 a^*和黄蓝度值 b^*表示。根据下式计算总色差ΔE，通过比较 ΔE 评价果脯贮藏期间的颜色变化。

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2} \qquad 式（1）$$

式中：ΔE 为余甘子果脯光照贮藏期间的总色差，L_0^*、a_0^*、b_0^*分别为贮藏前余甘子果脯的亮度值、红绿度值、黄蓝度值；L^*、a^*、b^*为贮藏结束时的色值参数。

1.2.3.2　质构测定　质构测定参考牛丽影等[41] 的方法并加以改进，选用 50 mm 圆盘型探头，测试样品选取大小均匀、形态完整的半球形果脯，测定参数设置为检测速度 1.0 mm/s，触发力 1 N，压缩距离 2 mm，形变量 20%。

1.2.3.3　水分含量测定　根据 GB/T 5009.3-2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》测定。

1.2.3.4　总酸含量测定　根据 GB/T 12456-2021《食品安全国家标准 食品中总酸的测定》中所述的酸碱指示剂滴定法测定，结果以柠檬酸计。

1.2.3.5　抗坏血酸含量测定　根据 GB/T 5009.86-2016《食品安全国家标准 食品中抗坏血酸的测定》中的 2,6-二氯靛酚滴定法测定。

1.2.3.6　总糖含量测定　总糖提取参照王丽等[42] 的方法并加以改进，总糖含量测定采用苯酚-硫酸法[43]。称取 1.0 g 样品粉末，加入 10 mL 体积分数 60% 的乙醇溶液，200 W 超声提取 30 min，8000 r/min 离心 15 min，上清液为总糖提取液。取 0.4 mL 上清液，加入 0.4 mL 质量分数为 6% 的苯酚溶液，再加 2.4 mL 浓硫酸溶液，用体积分数 60% 乙醇溶液补足至 4 mL，混合均匀，静置 30 min，于 490 nm 波长处测定吸光度。

1.2.3.7　还原糖含量测定　还原糖提取同 1.2.3.6，还原糖含量测定参照王丽等[42] 的方法并加以改进，采用二硝基水杨酸法。取 1 mL 稀释 50 倍后的提取液，加入 1.5 mL DNS 溶液，沸水浴 7 min 冷却后，于 540 nm 波长处测定吸光度。

1.2.3.8　总酚含量测定　总酚提取参照刘祚祚等[44] 的方法并加以改进，采用福林酚法。称取 1 g 样品粉末，加入 10 mL 体积分数 60% 乙醇溶液，60 ℃、200 W 超声提取 40 min，12000 r/min 离心 15 min，上清液为总酚提取液。总酚含量测定参照 Rambaran[45] 的方法并加以改进，取 0.5 mL 上清液，加入 0.5 mL 1 mol/L 的福林酚溶液，避光反应 6 min 后，再加入 2.5 mL 质量分数为 20% 的 Na_2CO_3 溶液，用体积分数 60% 的乙醇溶液补足至 5 mL，充分混匀后避光静置 90 min，于 760 nm 波长处测定吸光度。

1.2.3.9　黄酮含量测定　黄酮提取同上述总酚提取方法，黄酮含量测定参照陈洪彬等[46] 的方法并加以

改进，以芦丁为标准品，采用亚硝酸钠-硝酸铝法测定。取 0.6 mL 上清液，加入 0.2 mL 质量分数为 5% 的亚硝酸钠溶液和 0.02 mL 质量分数为 10% 的硝酸铝溶液，避光反应 6 min 后，再加入质量分数为 4% 的氢氧化钠溶液和 0.8 mL 体积分数 60% 的乙醇溶液，充分混匀后避光静置 15 min，于 510 nm 波长处测定吸光度。

1.2.3.10 自由基清除率测定 样品制备：取 0.05 g 样品加入 1 mL 提取液，于 40 ℃ 浸提 30 min，再 10000 r/min 离心 10 min，取上清液置于冰上待测。$ABTS^+$自由基清除能力、DPPH 自由基清除能力采用试剂盒测定。

1.2.4 感官评分 由 10 名经验丰富的感官品评员组成感官评定小组，参考熊添等[47] 的评定方法并略作修改，当感官评分低于 60 分时，不再有市售余甘子果脯特征，将其作为余甘子果脯货架期终点，具体评价标准如表 3 所示。从色泽、组织形态、风味和口感 4 个维度对余甘子果脯的品质进行感官评价，结果取平均值。

表 3 余甘子果脯在加速贮藏过程中的感官评分标准
Table 3 Sensory evaluation criteria of *Phyllanthus emblica* L. preserved fruit during accelerated storage

项目	评分标准	分数(分)
色泽（20分）	黄绿色，色泽均匀，透明，有光泽	15~20
	黄棕色，色泽较均匀，较透明，稍有光泽	10~14
	黄褐色，色泽不均匀，透明度差，略有光泽	5~9
	黑褐色，有杂色，不透明，无光泽	1~4
组织形态（20分）	果肉饱满，表皮完整光滑，无结晶返砂	15~20
	果肉不够饱满，表皮稍有破损，无结晶返砂	10~14
	果肉皱缩不饱满，部分开裂，稍有结晶返砂	5~9
	果肉干缩严重，开裂，有结晶返砂	1~4
风味（30分）	酸甜适中，有余甘子果脯特有的果香味，涩味适中，回甘明显	23~30
	酸甜比稍不协调，余甘子果脯果香味稍淡，涩味稍明显，回甘淡	16~22
	偏酸或偏甜，余甘子果脯果香味淡，涩味明显，稍有异味，无回甘	8~15
	很酸或很甜，无余甘子果脯果香味，涩味很重，有异味，无回甘	1~7
口感（30分）	质地细密，软硬适中，口感好，有弹性、韧性	23~30
	质地稍硬/软，口感较好，稍有弹性、韧性	16~22
	质地较硬/软，口感粗糙，弹性、韧性差	8~15
	质地过硬/软，口感差，无弹性、韧性	1~7

1.2.5 货架期预测 将影响余甘子果脯品质的指标进行 Pearson 相关性分析，得到与感官评分相关系数最高的品质指标，即为贮藏期间影响样品货架期的关键指标[48]，然后利用零级（式 2）和一级（式 3）动力学方程对关键指标进行拟合分析，根据拟合程度，确定反应级数和反应速率常数 k。

$$y_t = y_0 + kt \quad 式（2）$$

$$y_t = y_0 e^{kt} \quad 式（3）$$

式中：t 为贮藏时间（d）；y_0 和 y_t 分别为样品在 0 d 和 t d 的理化指标；k 为反应速率常数。

1.3 数据处理

本实验色泽、质构测定为 5 次平行，其余所有实验均进行 3 次平行，结果为“平均值±标准差”。采用 Excel 2019 软件对数据进行分析，采用 Origin 2021 软件作图。使用 SPSS Statistics 26.0 软件对数据进行显著性和 Pearson 相关性分析，采用 Duncan 多重极差检验比较平均值的差异显著性，显著性水平为 $P<0.05$。

2 结果与分析

2.1 余甘子果脯光照贮藏期间品质变化

2.1.1 色泽指标变化 余甘子果脯中的主要色素是花青素、类胡萝卜素和黄酮类物质，其含有不饱和双键，在光照贮藏过程中易发生氧化和非酶褐变[49−51]。如图 1 所示，余甘子果脯 L^*值、b^*值在光照贮藏期间呈显著下降趋势，a^*值和ΔE 值呈显著上升趋势（$P<0.05$）。第 25 d 时，与初始值相比，TM-HF、TM-YS、BG-HF、BG-YS 4 个样品的 L^*值分别下降 19.29%、21.00%、9.18%、11.26%，b^*值分别下降 23.59%、19.78%、10.78%、13.55%，a^*值分别升高 105.74%、85.09%、50.00%、30.84%，ΔE 值分别升高至 12.28、13.01、5.78、7.25。当ΔE 值≥2 时，表示样品色泽变化明显，ΔE 值升高的原因可能是多酚氧化生成黄色醌类聚合物[39]。综上说明，长时间的光暴露会使不同包装方式、不同品种的余甘子果脯色泽发生明显劣变，且 TM 组褐变程度显著高于 BG 组（$P<0.05$），BG 包装能显著减缓光诱导降解和非酶褐变[52−53]。

2.1.2 质构指标变化 TPA（Texture Profile Analysis）也称全质构分析法，常作为评价食品质地的有效方法[54]。图 2 为贮藏期间余甘子果脯质构变化情况，随着光照时间的延长，余甘子果脯硬度、弹性和咀嚼性较贮藏前均显著下降，内聚性较贮藏前显著上升（$P<0.05$）。第 25 d 时，与初始值相比，TM-HF、TM-YS、BG-HF、BG-YS 4 个样品的硬度分别下降 34.41%、23.27%、17.57%、16.25%，弹性分别下降 36.24%、25.23%、24.21%、10.53%，咀嚼性分别下降 38.34%、34.75%、19.84%、15.47%，内聚性分别升高 32.08%、24.53%、22.11%、22.64%。余甘子果脯在光照贮藏期间的质构变化可能是水分迁移、果胶降解、多酚氧化及光照氧化应激共同作用的结果[55]。综上说明，光照强度对余甘子果脯贮藏期间的质构特性具有显著影响，BG 组样品的硬度、弹性和咀嚼性变化速率显著低于 TM 组（$P<0.05$），BG 包装有利于果脯贮藏期质构品质的维持，且在整个贮藏期间 YS 品种质构稳定性优于 HF 品种。

2.1.3 化学指标变化 随着光照强度的累积，余甘子果脯水分、总酸、总糖和还原糖含量较贮藏前明显下降。如图 3（A）所示，TM-HF、TM-YS、BG-HF、BG-

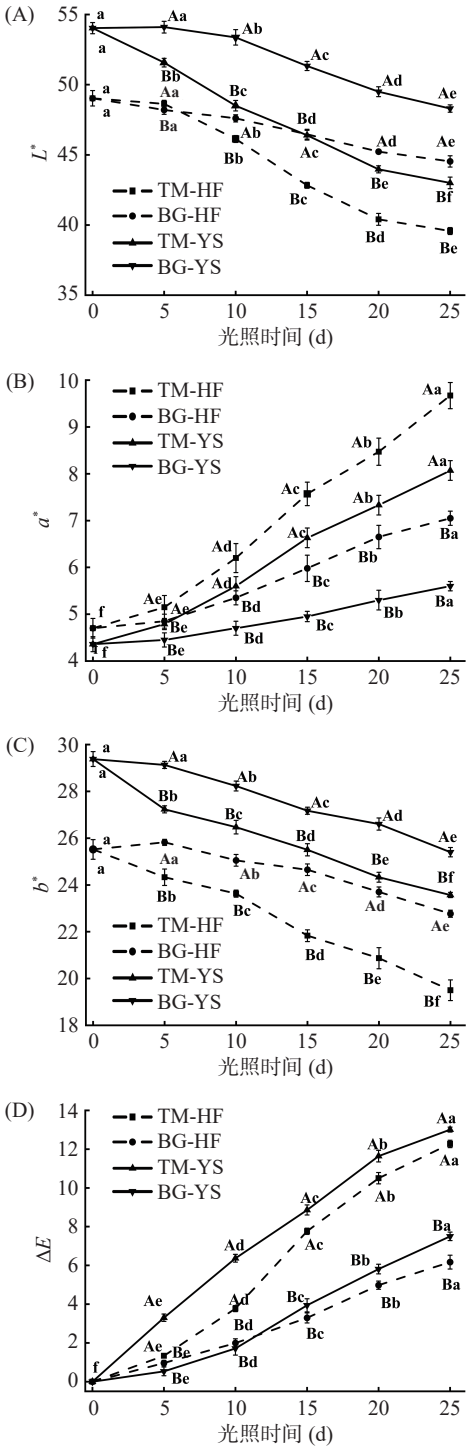


图 1　余甘子果脯贮藏期间色泽变化

Fig.1　Color changes of *Phyllanthus emblica* L. preserved fruit during storage

注: (A) L^*值; (B) a^*值; (C) b^*值; (D) ΔE 值。不同大写字母表示同一光照时间和品种下不同包装方式之间差异显著(P<0.05); 不同小写字母表示同一包装和品种下不同光照时间之间差异显著(P<0.05); 图 2~图 4 同。

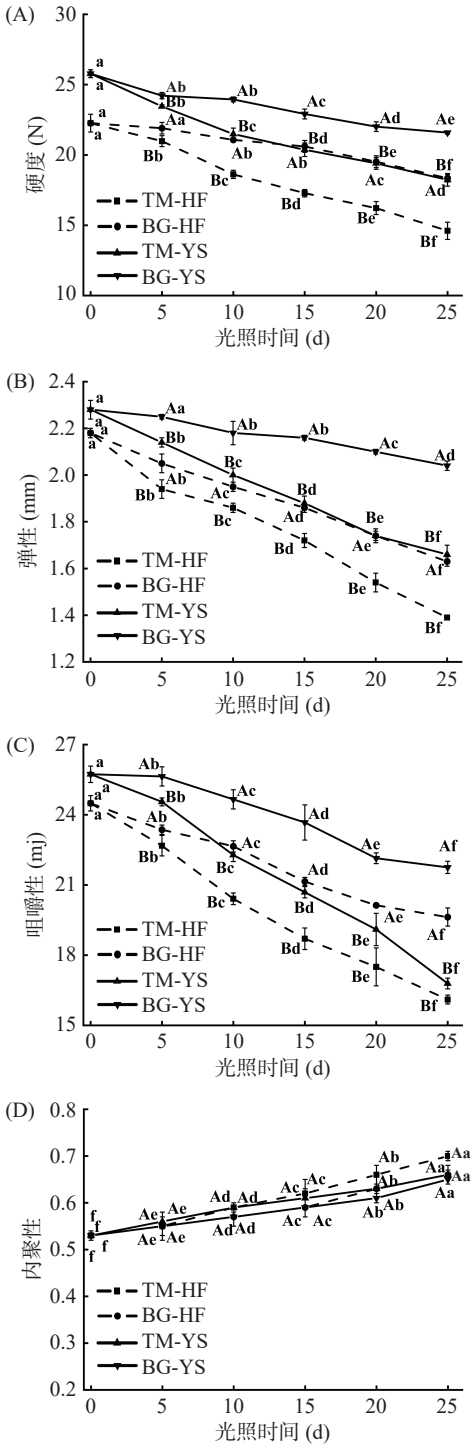


图 2　余甘子果脯贮藏期间质构变化

Fig.2　Changes in texture of *Phyllanthus emblica* L. preserved fruit during storag

注: (A)硬度; (B)弹性; (C)咀嚼性; (D)内聚性。

YS 4 个样品的水分含量分别下降 3.23%、3.70%、1.91%、3.16%, 组间无显著性差异(P>0.05)。受到光解、氧化和美拉德等加速复杂反应网络的影响, 贮藏过程中总酸、总糖和还原糖呈现同时下降趋势(P<0.05), TM 组样品总酸、总糖和还原糖下降速率显著高于 BG 组(P<0.05)。如图 3(B)所示, 第 25 d 时, 与初始值相比, TM-HF、TM-YS、BG-HF、BG-YS 4 个样品的总酸含量分别下降 37.97%、40.28%、34.55%、28.07%, YS 品种总酸含量下降速率高于 HF 品种, 可能是 YS 品种中的有机酸(如柠檬酸、苹果酸、酒石酸)更丰富, 对光线和温度更敏感[56]。如图 3(C)和图 3(D)所示, TM-HF、TM-YS、BG-HF、BG-YS 4 个样品的总糖含量分别下降 49.03%、41.06%、10.74%、7.61%; 还原糖含量分别下降

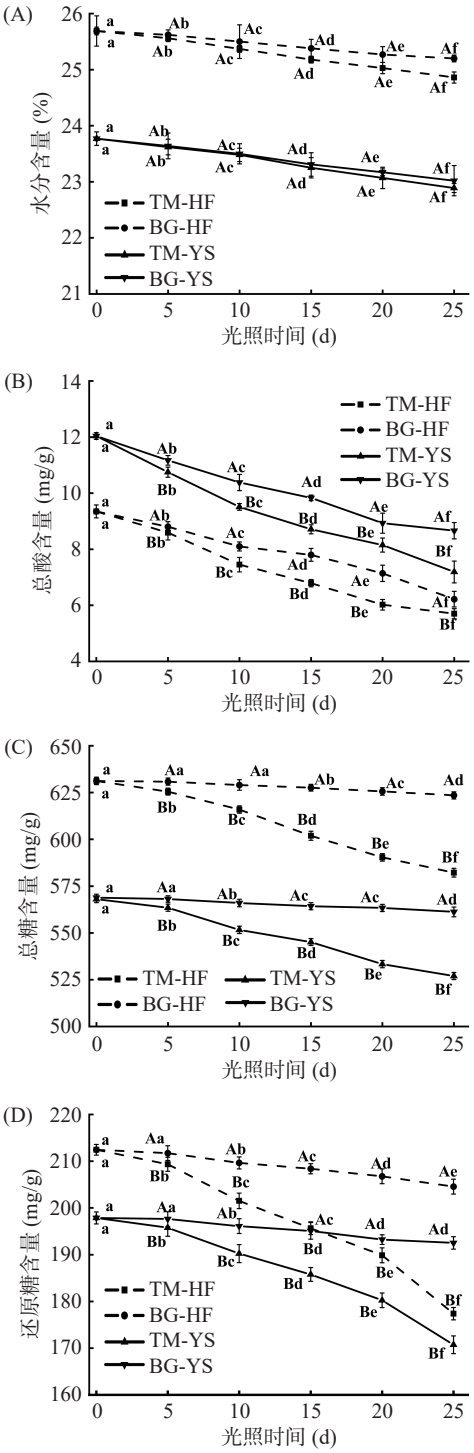


图 3 余甘子果脯贮藏期间理化指标变化

Fig.3 Changes of physical and chemical indexes of *Phyllanthus emblica* L. preserved fruit during storage

注:(A)水分;(B)总酸;(C)总糖;(D)还原糖。

19.27%、15.59%、3.72%、2.70%, TM 包装样品的总糖和还原糖的下降速率是 BG 包装的 4~7 倍, 可能是余甘子果脯中的蔗糖会通过光解自氧化和光敏氧化途径先分解成葡萄糖和果糖, 再进一步产生如 5-羟甲基糠醛、2-糠醛等糖降解产物, 从而导致贮藏期间糖含量损失, 同时伴随产品颜色加深[57]。在贮藏过程中, BG 包装有利于余甘子果脯糖酸含量的维持。

2.1.4 抗氧化活性变化 水果中的抗坏血酸、总酚、黄酮含量不仅影响其贮藏加工特性和抗氧化能力[58−59], 还直接或间接参与非酶褐变反应[60−61], 且该类物质在高温、光照或氧气存在的情况下均会加速降解[62]。随着光照时间的延长, 余甘子果脯中抗坏血酸、总酚、黄酮、ABTS$^+$自由基清除能力和 DPPH 自由基清除能力较贮藏前均显著下降(P<0.05)。如

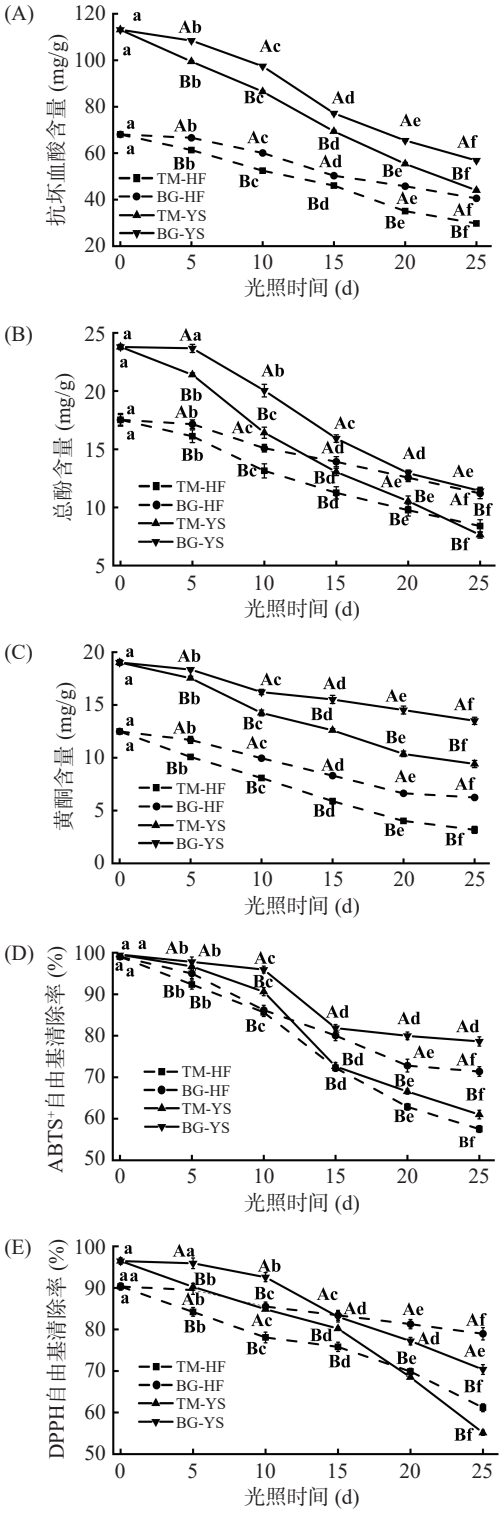


图 4 余甘子果脯贮藏期间活性物质及抗氧化活性的变化

Fig.4 Changes in bioactive compounds and antioxidant activity of *Phyllanthus emblica* L. preserved fruit during storage

注:(A)抗坏血酸;(B)总酚;(C)黄酮;(D)ABTS$^+$自由基清除率;(E)DPPH 自由基清除率。

图 4(A)所示，第 25 d 时，与初始值相比，TM-HF、TM-YS、BG-HF、BG-YS 4 个样品的抗坏血酸含量分别下降 56.25%、61.10%、40.37%、49.73%。抗坏血酸氧化后产生 H_2O_2 及醛类，进而氧化有机酸、触发美拉德反应，最终又消耗总酸与总糖，此外余甘子果脯的高酚、低 pH 特性会显著加速该进程，呈现出抗坏血酸-总酸-总糖同时下降的趋势[63]。

如图 4(B)所示，第 25 d 时，与初始值相比，TM-HF、TM-YS、BG-HF、BG-YS 4 个样品的总酚含量分别下降 52.08%、67.89%、36.11%、52.07%，胡丽丽[64] 在草莓果脯中得出了相似的结果，因为酚类物质具有光不稳定性，与美拉德反应产生的物质结合生成其他衍生物，导致总酚含量降低[22]。Chen 等[32] 证实 465 nm 波长的蓝光因具备更高光子能量，可高效激发多酚共轭体系生成半醌自由基，使果汁中多酚氧化速率提高 3.2 倍，本研究中余甘子果脯在 2000 lux 白光(含 465 nm 蓝光峰值)下贮藏 25 d 后，TM-YS 样品总酚损失率高达 67.89%，与该机制高度吻合。野生余甘子中富含鞣花酸、单宁，有更多酚羟基[3]，其 O-H 键更易被蓝光断裂，所以 YS 品种的酚类损失率高于 HF 品种，酚羟基作为光敏位点，在光照下更易生成醌类褐变产物，这解释了上文 YS 品种在光照下褐变速率更快，ΔE 值升幅高于 HF 的现象。如图 4(C)所示，第 25 d 时，与初始值相比，TM-HF、TM-YS、BG-HF、BG-YS 4 个样品的黄酮含量分别下降 74.64%、50.53%、50.08%、29.02%，黄酮类物质通过提供氢原子或电子，淬灭光照过程中产生的大量活性氧自由基(Reactive Oxygen Species，ROS)，使 ROS 还原成稳定分子，而黄酮物质自身则被氧化为醌类或其他非活性产物[65]。

用 $ABTS^+$自由基和 DPPH 自由基清除能力来评估余甘子果脯的抗氧化能力，自由基清除率越高，其抗氧化能力越强。如图 4(D)和图 4(E)所示，第 25 d 时，与初始值相比，TM-HF、TM-YS、BG-HF、BG-YS 4 个样品的 $ABTS^+$自由基清除率分别下降 41.51%、38.51%、27.65%、20.90%，DPPH 自由基清除率分别下降 29.17%、37.31%、11.37%、26.08%。Zhang 等[66]和 Das 等[67] 发现余甘子干制品在光照贮藏过程中抗氧化能力下降主要是因为光敏性物质氧化降解，非酶褐变加剧，加速了酚羟基的氧化和类黄酮的异构化，导致电子供体能力减弱，自由基清除能力降低。综上所述，BG 材料的紫外-可见光阻隔功能，通过切断 400~500 nm 关键激发波段光线，降低活性氧生成率，显著延缓余甘子果脯中活性物质含量的损失，抑制抗氧化活性的下降(P<0.05)。

2.1.5　感官评分变化　感官评分是评价食品品质最直观的一项指标[68]，余甘子果脯贮藏过程中的感官评分如图 5 所示，随着光照时间的延长，余甘子果脯的感官品质明显降低，并且 TM 组分数下降速率明显快于 BG 组。持续的光照使余甘子果脯发生了氧化劣变、非酶褐变和组织结构变化，使果脯失去了原有的色泽、形态、口感和风味，感官评分下降。第 25 d 时，余甘子果脯感官总分由高至低依次为 BG-YS>BG-HF>TM-YS>TM-HF，YS 品种感官总分始终高于 HF 品种。

2.2　余甘子果脯货架期预测模型的建立

2.2.1　Pearson 相关性分析　参考刘政权等[48] 的方法对余甘子果脯的品质指标进行 Pearson 相关性分析，Pearson 相关系数可以衡量定距变量之间的线性关系以筛选最佳表征指标。如图 6A~图 6D，在 0~25 d 光照贮藏期间 TM-HF、BG-HF、TM-YS、BG-YS 4 组样品的感官评分与品质指标之间均存在显著

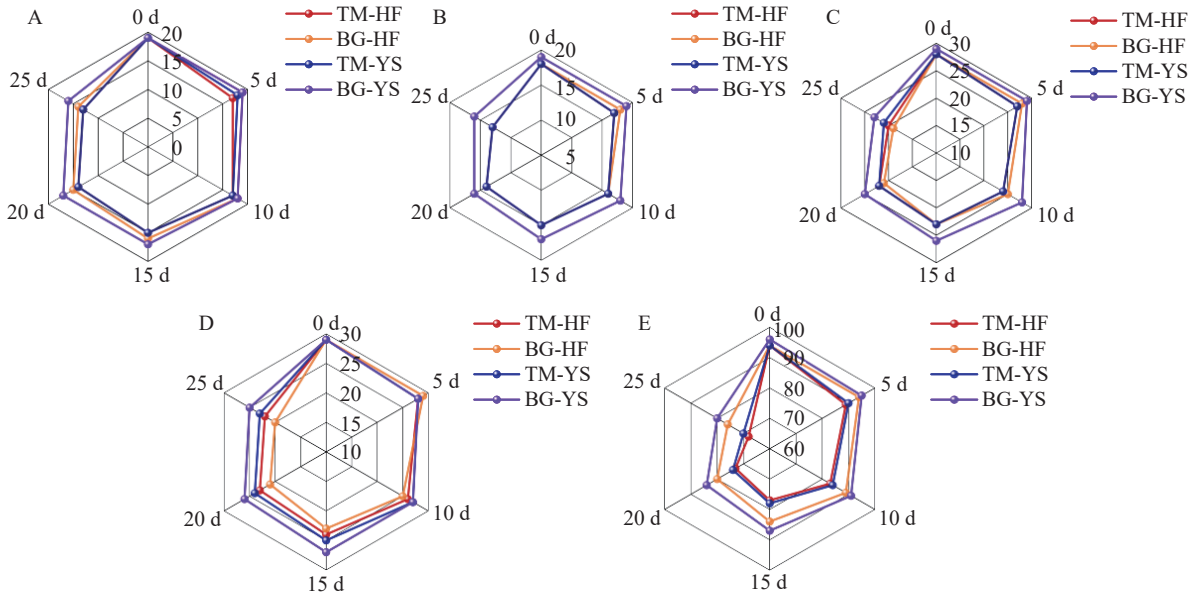


图 5　贮藏期间余甘子果脯感官评分变化

Fig.5　Changes in sensory score of *Phyllanthus emblica* L. preserved fruit during storage

注：A. 色泽；B. 组织形态；C. 口感；D. 风味；E. 感官总分。

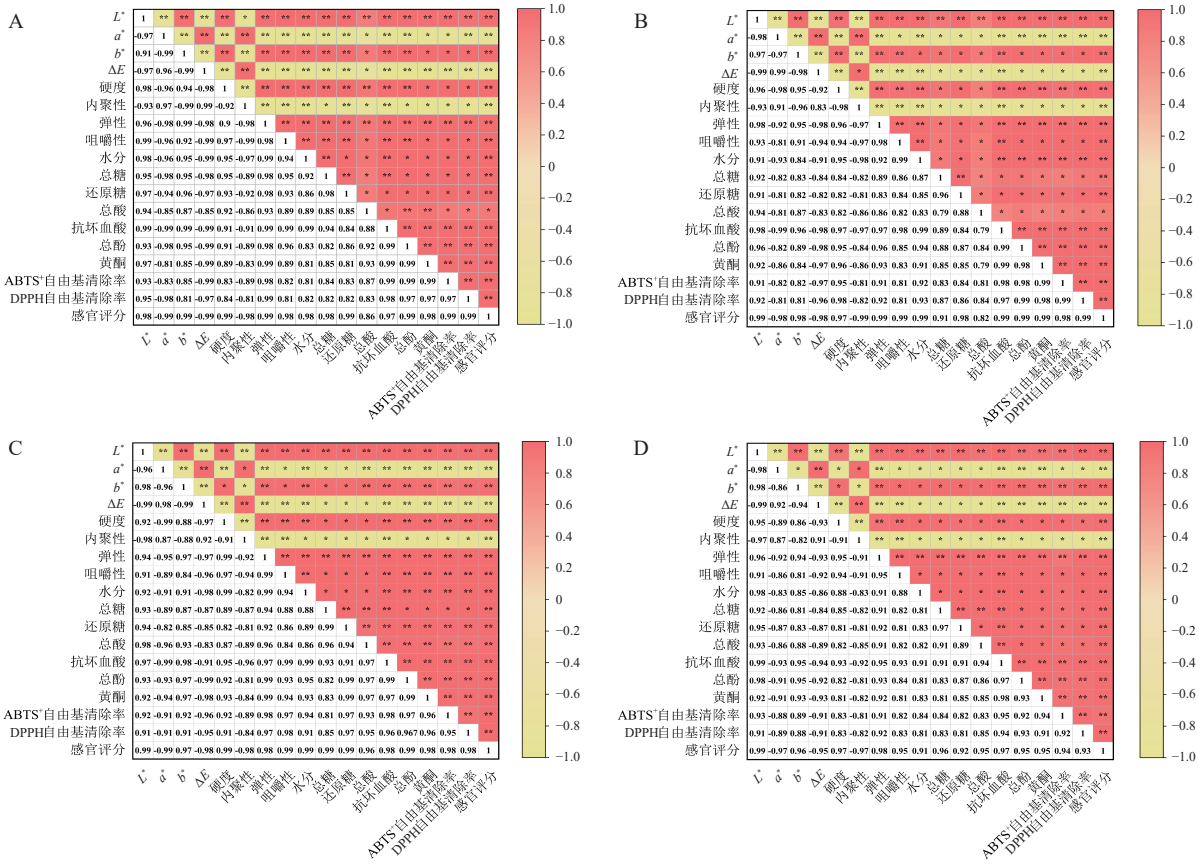


图 6　余甘子果脯贮藏期间理化指标和感官评分相关性分析

Fig.6　Correlation analysis of physicochemical indexes and sensory scores of *Phyllanthus emblica* L. preserved fruit during storage

注: A. TM-HF; B. BG-HF; C. TM-YS; D. BG-YS。**表示在 0.01 水平(双尾)相关性极显著; *表示在 0.05 水平(双尾)相关性显著。

相关性, 不同组别理化指标与感官评分之间的相关系数均大于 0.80, 说明指标之间的相关性较好, 除 a^*值、ΔE 值、内聚性与感官评分之间呈负相关关系外, 其他指标与感官评分之间均呈正相关关系。不同组别余甘子果脯的 L^*值、弹性、抗坏血酸含量与感官评分之间的相关性较其他指标更高, 且均呈极显著正相关关系(P<0.01)。TM-HF 组 L^*值、弹性、抗坏血酸含量与感官评分相关系数分别为: 0.98、0.99、0.97; BG-HF 组分别为: 0.99、0.99、0.99; TM-YS 组分别为: 0.99、0.98、0.98; BG-YS 组分别为: 0.99、0.98、0.97。在光照贮藏过程中, 余甘子果脯的抗坏血酸含量与 L^*值、弹性呈极显著正相关关系(P<0.01), 抗坏血酸的降解反应程度和速率是影响产品亮度和色泽变化的关键因素, 弹性变化影响产品的组织结构和质地特性, 从而反映出其口感变化。因此, 下文选用 L^*值、弹性和抗坏血酸含量 3 个指标作为余甘子果脯光照加速贮藏期间品质评价和货架期预测模型的关键指标。同时, 根据前期实验结果, 当余甘子果脯感官评分低于 60 分时不再有市售特征, 将其作为货架期终点。检测不同组别余甘子果脯的 L^*值、弹性、抗坏血酸含量临界值, TM-HF 组分别为 32.35、0.63 mm、15.20 mg/g; BG-HF 组分别为 30.11、0.51 mm、13.23 mg/g; TM-YS组分别为 33.32、0.77 mm、20.21 mg/g; BG-YS 组分别为 29.29、0.63 mm、19.82 mg/g。

2.2.2　反应级数的确定　食品加工和贮藏过程中, 大多数的品质指标变化都遵循零级或一级化学动力学方程[69]。现以 L^*值、弹性和抗坏血酸含量作为光照贮藏期间品质劣变动力学的关键指标, 用零级反应式和一级反应式对其变化趋势进行回归拟合分析, 可得到相应的线性回归方程、反应速率常数 k 和决定系数 R^2, R^2 越大, 则说明动力学模型的拟合度越高。由表 4 可知, 不同组别余甘子果脯的 L^*值、弹性和抗坏血酸含量的零级动力学模型 R^2 均大于 0.96, 拟合度优于一级动力学模型, 说明余甘子果脯光照贮藏品质变化更符合零级动力学模型。

2.2.3　余甘子果脯货架期预测　根据零级反应动力学模型得到各个组别和指标下的 k, 根据货架终点时 L^*值、弹性、抗坏血酸含量临界值, 将各临界值带入零级方程中, 得到如表 5 所示的预测值及实测值。研究表明, 货架期预测误差在 10% 以内具有良好的精确度[70]。因此, 本实验以 L^*值、弹性、抗坏血酸含量为指标所建立的货架期预测模型具有较好的可靠性, 能够有效预测不同包装方式下余甘子果脯的货架期。Zhang 等[34] 表明, 透光率≤5% 的避光包装可阻断 400~500 nm 高能量蓝光, BG 包装能明显延缓

表 4　余甘子果脯贮藏过程中品质变化动力学模型参数

Table 4　Parameters of the kinetic model for quality change of *Phyllanthus emblica* L. preserved fruit during storage

指标	组别	零级方程			一级方程		
		回归方程	k	R^2	回归方程	k	R^2
L^*值	TM-HF	y=−0.3784t+51.97	0.3784	0.9628	$y=52.489e^{-0.0490t}$	0.5439	0.9597
	BG-HF	y=−0.1800t+50.10	0.1800	0.9894	$y=50.191e^{-0.0200t}$	0.4760	0.9877
	TM-YS	y=−0.4572t+56.18	0.4572	0.9800	$y=56.676e^{-0.0490t}$	0.3346	0.9880
	BG-YS	y=−0.2452t+56.48	0.2452	0.9623	$y=56.679e^{-0.0260t}$	0.6377	0.9457
弹性	TM-HF	y=−0.0316t+2.30	0.0316	0.9874	$y=2.371e^{-0.0860t}$	0.0860	0.9849
	BG-HF	y=−0.0200t+2.28	0.0200	0.9978	$y=2.310e^{-0.0570t}$	0.0570	0.9966
	TM-YS	y=−0.0224t+2.35	0.0224	0.9938	$y=2.389e^{-0.0610t}$	0.0610	0.9917
	BG-YS	y=−0.0096t+2.34	0.0096	0.9841	$y=2.341e^{-0.0220t}$	0.0220	0.9820
抗坏血酸	TM-HF	y=−1.5308t+76.50	1.5308	0.9942	$y=84.806e^{-0.1700t}$	0.1700	0.9773
	BG-HF	y=−1.0988t+76.21	1.0988	0.9720	$y=80.029e^{-0.1110t}$	0.1110	0.9570
	TM-YS	y=−2.7656t+127.46	2.7656	0.9976	$y=144.600e^{-0.1910t}$	0.1910	0.9817
	BG-YS	y=−2.2508t+127.41	2.2508	0.9905	$y=137.830e^{-0.1440t}$	0.1440	0.9718

表 5　不同包装方式下余甘子果脯各品质指标的货架期预测值及实测值

Table 5　Shelf life predicted and measured value of various quality indicators for *Phyllanthus emblica* L. preserved fruit under different packaging methods

品质指标	组别	预测值(d)	实测值(d)	相对误差(%)
L^*值	TM-HF	52	48	7.92
	BG-HF	111	103	7.76
	TM-YS	50	46	8.29
	BG-YS	110	101	8.94
弹性	TM-HF	53	49	7.74
	BG-HF	89	84	5.99
	TM-YS	71	65	8.97
	BG-YS	178	166	7.55
抗坏血酸	TM-HF	40	37	7.85
	BG-HF	57	54	7.09
	TM-YS	39	36	7.31
	BG-YS	48	45	7.24

L^*值和弹性的下降。以 L^*值为评判指标，BG-HF 和 BG-YS 的预测货架期分别延长至 111 d、110 d；以弹性为评判指标，BG-HF 和 BG-YS 的预测货架期分别延长至 89 d、178 d。对抗坏血酸的保护相对较弱，BG-HF 和 BG-YS 的预测货架期分别延长至 57 d、48 d，抗坏血酸是水溶性小分子，更易通过核黄素介导的 ROS 光敏反应降解，所以需结合抗氧化剂协同保护。该研究结合货架期模型验证了避光包装对光敏性果脯的保护效果。

3　结论

不同包装方式的余甘子果脯在光照加速贮藏条件下品质指标变化的研究结果表明，随着光照时间的延长，余甘子果脯的水分降低，果脯的 L^*值、b^*值、硬度、弹性、咀嚼性、总酸、总糖、还原糖、抗坏血酸、总酚、黄酮、$ABTS^+$自由基清除能力、DPPH 自由基清除能力、感官评分指标显著下降（$P<0.05$），a^*值、ΔE 值和内聚性显著上升（$P<0.05$）。感官评分与品质指标之间均存在显著相关性，不同组别理化指标与感官评分之间的相关系数均大于 0.80。其中 L^*值、弹性、抗坏血酸含量与感官评分之间的相关性较其他指标更高，且均呈正极显著相关（$P<0.01$），可作为余甘子果脯光照加速贮藏期间品质评价和货架期预测模型的关键指标，基于关键指标构建的零级动力学模型，预测货架期误差<10%，模型可靠，避光包装有利于余甘子果脯各项指标的维持，延缓品质劣变，显著延长了货架期。YS 品种初始品质及全程感官评分均优于 HF 品种，但由于 YS 品种更高的初始酚类与有机酸含量，其酚类损失率高于 HF 品种。本研究对不同包装形式和不同品种的余甘子果脯在光照加速贮藏条件下的品质变化规律进行了研究，为企业选择合适的包装方式、贮藏条件以及货架期预测提供了理论依据和参考借鉴。考虑到不同品质指标的衰减特异性，未来可通过加权线性回归或偏最小二乘回归模型构建综合品质模型，进一步实现多指标的统一预测。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] GUL M, LIU Z W, RABAIL R, et al. Functional and nutraceutical significance of amla (*Phyllanthus emblica* L.): A review[J]. Antioxidants, 2022, 11(5): 1−15.

[2] KAPOOR M P, SUZUKI K, DEREK T, et al. Clinical evaluation of *Emblica officinalis* Gaertn (Amla) in healthy human subjects: Health benefits and safety results from a randomized, double-blind, crossover placebo-controlled study[J]. Contemporary Clinical Trials Communications, 2020, 17: 1−10.

[3] YAN X Y, LI Q J, JING L, et al. Current advances on the phytochemical composition, pharmacologic effects, toxicology, and product development of *Phyllanthus* fructus[J]. Frontiers in Pharmacology, 2022, 13: 1−28.

[4] BEGUM M A, HOSSAIN R, JAIN D, et al. Recent insights into the antimicrobial properties of *Phyllanthus emblica* L.: A comprehensive review of wonder berry[J]. Chemistry & Biodiversity, 2024, 21(9): 1−5.

[5] LI W, ZHU H W, CHEN Y J, et al. Bioactivity-guided isola-

tion of anti-inflammatory components from *Phyllanthus emblica*[J]. Food Science & Nutrition, 2020, 8(6): 1−10.
[6] WU N, PAN Y, LIU Q, et al. Protective benefits and mechanisms of *Phyllanthus emblica* Linn. on aging induced by oxidative stress: A systematic review[J]. Food & Medicine Homology, 2025, 2(2): 1−14.
[7] KUMNERDKHONKAEN P, SAENGLEE S, ASGAR M A, et al. Antiproliferative activities and phenolic acid content of water and ethanolic extracts of the powdered formula of *Houttuynia cordata* Thunb fermented broth and *Phyllanthus emblica* Linn. fruit[J]. BioMed Central Complementary and Alternative Medicine, 2018, 18: 1−12.
[8] SAINI R, SHARMA N, OLADEJI O S, et al. Traditional uses, bioactive composition, pharmacology, and toxicology of *Phyllanthus emblica* fruits: A comprehensive review[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2022, 282: 1−18.
[9] GANTAIT S, MAHANTA M, BERA S, et al. Advances in the biotechnology of *Emblica officinalis* Gaertn. syn. *Phyllanthus emblica* L: A nutraceutical-rich fruit tree with multifaceted ethnomedicinal uses[J]. Biotech, 2021, 11(2): 62.
[10] 何代琴, 李荣辉, 胡昕, 等. 滇橄榄果脯无硫护色工艺优化研究[J]. 食品科技, 2023, 48(4): 104−109. [HE D Q, LI R H, HU X, et al. Optimization of sulfur-free color preserving process for Yunnan Olive preserved fruit[J]. Food Science and Technology, 2023, 48(4): 104−109.]
[11] AFARI S, SHIEKH K A, MISHRA D K, et al. Combined effects of clarifying agents improve physicochemical, microbial, and sensorial qualities of fresh Indian Gooseberry (*Phyllanthus emblica* L.) juice during refrigerated storage[J]. Foods, 2024, 13(2): 1−13.
[12] 徐涓, 张雯雯, 李凯, 等. 高温蒸汽处理对余甘子果汁贮藏期间的品质影响及褐变行为解析[J]. 食品科学, 2019, 40(23): 246−252. [XU J, ZHANG W W, LI K, et al. Effect of high temperature steam treatment on the quality and browning behavior of *Phyllanthus emblica* juice during storage[J]. Food Science, 2019, 40(23): 246−252.]
[13] 王建超, 陈志峰, 郭林榕. 余甘子果冻加工工艺[J]. 东南园艺, 2018, 6(6): 35−37. [WANG J C, CHEN Z F, GUO L R. Processing technology of *Phyllanthus emblica* jelly[J]. Southeast Horticulture, 2018, 6(6): 35−37.]
[14] 杨洪元, 蒋向军. 酶解生产鲜余甘子速溶粉加工工艺研究[J]. 食品科技, 2012, 37(7): 112−115. [YANG H Y, JIANG X J. Study on the processing technology of enzymatic hydrolysis of fresh *Phyllanthus emblica* instant powder[J]. Food Science and Technology, 2012, 37(7): 112−115.]
[15] 杜刚, 曾程, 余鹏, 等. 响应面分析法优化余甘子含片配方[J]. 食品与机械, 2011, 27(1): 140−142. [DU G, ZENG C, YU P, et al. Optimization of the formulation of *Phyllanthus emblica* buccal tablets by response surface methodology[J]. Food and Machinery, 2011, 27(1): 140−142.]
[16] RUHELA G, DHAMA P, SHANKER K, et al. Exploration of metabolomics of *Phyllanthus emblica*: From ayurveda food to modern perspectives in quality control[J]. Food Chemistry Advances, 2023, 3: 1−10.
[17] 黄宁, 陈潇荷, 杨冉, 等. 果脯加工工艺及其品质变化机制研究进展[J]. 农产品加工, 2025(2): 98−105. [HUANG N, CHEN X H, YANG R, et al. Research progress on processing technology and quality change mechanism of preserved fruit[J]. Agricultural Products Processing, 2025(2): 98−105.]
[18] LU B Y, ZHAO Y J. Photooxidation of phytochemicals in food and control: A review[J]. Annals of the New York Academy of Sciences, 2017, 1398(1): 72−82.
[19] WOLD J P, VEBERG A, LUNDBY F, et al. Influence of storage time and color of light on photooxidation in cheese: A study based on sensory analysis and fluorescence spectroscopy[J]. International Dairy Journal, 2006, 16(10): 1218−1226.
[20] MENG F, WANG J, HAN Z, et al. Effect of the light intensity and packaging materials on the photooxidation and volatile compounds in milk[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2023, 120: 1−10.
[21] SCIENCE D O F, TECHNOLOGY V P I, STATE UNIVERSITY B, et al. Efficacy of light-protective additive packaging in protecting milk freshness in a retail dairy case with LED lighting at different light intensities[J]. Food Research International, 2018, 114: 1−9.
[22] SIMÃO R DA S, MORAES J O DE, LOPES J B, et al. Survival analysis to predict how color influences the shelf life of strawberry leather[J]. Foods, 2022, 11(2): 1−13.
[23] HASHIZUME M, GORDON M H, MOTTRAM D S. Light-induced off-flavor development in cloudy apple juice[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2007, 55(22): 9177−9182.
[24] ARENA E, RIZZO V, LICCIARDELLO F, et al. Effects of light exposure, bottle color and storage temperature on the quality of *Malvasia delle* Lipari sweet wine[J]. Foods, 2021, 10(8): 1−14.
[25] MARCINKOWSKA-LESIAK M, POŁAWSKA E, STELMASIAK A, et al. Quality of pork loin stored under different light intensities[J]. CYTA-Journal of Food, 2017, 15(3): 336−343.
[26] SUMAN S P, JOSEPH P. Myoglobin chemistry and meat color[J]. Annual Review of Food Science and Technology, 2013, 4(1): 79−99.
[27] CHOE E, MIN D B. Mechanisms and factors for edible oil oxidation[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2006, 5(4): 169−186.
[28] DUTA D E, CULETU A, MOHAN G. Sensory and physicochemical changes in gluten-free oat biscuits stored under different packaging and light conditions[J]. Journal of Food Science and Technology, 2019, 56(8): 3823−3835.
[29] 张喻, 邱展英, 许秋桐. 不同包装方式对咸干花生储藏品质的影响[J]. 中国粮油学报, 2023, 38(10): 15−21. [ZHANG Y, QIU Z Y, XU Q T. Effects of different packaging methods on storage quality of salty and dry peanuts[J]. Chinese Journal of Cereals and Oils, 2023, 38(10): 15−21.]
[30] TAN D, MA A, WANG S, et al. Effects of the oxygen content and light intensity on milk photooxidation using untargeted metabolomic analysis[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2021, 69(26): 7488−7497.
[31] MANZOCCO L, KRAVINA G, CALLIGARIS S, et al. Shelf life modeling of photosensitive food: The case of colored beverages [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2008, 56(13): 5158−5164.
[32] CHEN X, WANG T, LI H, et al. Light-induced oxidation of polyphenols in fruit juices[J]. Food Chemistry, 2023, 408: 135226.
[33] HEISING J K, MATTHIJS D, BARTELS P V, et al. Monitoring the quality of perishable foods: Opportunities for intelligent packaging[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2014, 54(5): 645−654.
[34] ZHANG Y, JIANG W. Effective strategies to enhance ultraviolet barrier ability in biodegradable polymer-based film coatings for fruit and vegetable packaging[J]. Trends in Food Science &

Technology, 2023, 139: 104139.
［35］ SINGH T K, CADWALLADER K R. The shelf life of foods: An overview[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2003, 1-21.
［36］ 秦求思, 李思敏, 孟粉, 等. 基于鲜度的动力学模型预测鹰爪虾剩余货架期[J]. 中国食品学报, 2021, 21(7): 259−266. ［QIN Q S, LI S M, MENG F, et al. Prediction of the remaining shelf life of Eagle Claw shrimp based on the dynamic model of freshness[J]. Chinese Journal of Food Science, 2021, 21(7): 259−266.］
［37］ 但利, 何丽, 刁尚鹏, 等. 基于挥发性盐基氮的动力学模型预测板鸭干货架期[J]. 食品科学, 2025, 46(11): 302−309. ［DAN L, HE L, DIAO S P, et al. Prediction of shelf life of dried salted duck based on kinetic model of volatile basic nitrogen[J]. Food Science, 2025, 46(11): 302−309.］
［38］ 徐文婷, 付镓榕, 马尚玄, 等. 不同包装和贮藏温度的澳洲坚果果仁贮藏品质及货架期预测[J]. 食品科学, 2024, 45(16): 232−243. ［XU W T, FU J R, MA S X, et al. Storage quality and shelf life prediction of macadamia nuts at different packaging and storage temperatures[J]. Food Science, 2024, 45(16): 232−243.］
［39］ SONKAR N, RAJORIYA D, CHETANA R, et al. Effect of cultivars, pretreatment, and drying on physicochemical properties of Amla (*Emblica* officinalis) gratings[J]. Journal of Food Science and Technology, 2020, 57(3): 980−992.
［40］ 胡丽丽, 牛丽影, 李大婧, 等. 质构仪探头选择及样品处理对草莓脯 TPA 测定结果的影响[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(5): 170−176. ［HU L L, NIU L Y, LI D J, et al. Effects of probe selection and sample treatment of the texture analyzer on TPA determination results of preserved strawberry[J]. Food Research and Development, 2022, 43(5): 170−176.］
［41］ 牛丽影, 万玉炜, 李大婧, 等. 不同品种紫薯的质构特征比较[J]. 现代食品科技, 2020, 36(7): 96−104. ［NIU L Y, WAN Y W, LI D J, et al. Comparison of texture characteristics of different varieties of purple sweet potato[J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(7): 96−104.］
［42］ 王丽, 孙艳, 汤晓娟, 等. 3 种豆豉总糖、还原糖、多酚及抗氧化活性比较[J]. 粮食科技与经济, 2023, 48(3): 93−97. ［WANG L, SUN Y, TANG X J, et al. Comparison of total sugar, reducing sugar, polyphenols, and antioxidant activity in three kinds of Douchi[J]. Food Science Technology and Economy, 2023, 48(3): 93−97.］
［43］ DUBOIS M, GILLES K A, HAMILTON J K, et al. Colorimetric method for determination of sugars and related substances[J]. Anal Chem, 2002, 28(3): 350−356.
［44］ 刘祚祚, 赵雪竹, 蒲慧, 等. 滇橄榄不同采摘期果实品质的变化规律[J]. 食品工业科技, 2022, 43(6): 293−301. ［LIU Z Z, ZHAO X Z, PU H, et al. Dynamic quality changes of *Phyllanthus emblica* L. in different picking periods[J]. Food Industry Science and Technology, 2022, 43(6): 293−301.］
［45］ RAMBARAN T F. Chemical and sensory characterisation of two *Rubus rosifolius* (red raspberry) varieties[J]. International Journal of Food Science, 2020: 1-8.
［46］ 陈洪彬, 郑金水, 蔡英卿, 等. 紫苏叶中总黄酮的超声波辅助提取工艺优化[J]. 食品与机械, 2014, 30(5): 232−236. ［CHEN H B, ZHENG J S, CAI Y Q, et al. Optimization of ultrasonic assisted extraction of total flavonoids from perilla leaves[J]. Food and Machinery, 2014, 30(5): 232−236.］
［47］ 熊添, 张梦琦, 蔡芳, 等. 植物乳杆菌发酵紫甘薯果脯的制备工艺优化及品质评价[J]. 食品工业科技, 2026, 47(1): 262-269. ［XIONG T, ZHANG M Q, CAI F, et al. Preparation process optimization and quality evaluation of purple sweet potato preserved fruit fermented by *Lactobacillus plantarum*[J]. Food Industry Science and Technology, 2026, 47(1): 262-269.］
［48］ 刘政权, 张惠, 王会芳, 等. 不同贮藏温度下抹茶品质变化及其货架期预测[J]. 食品科学, 2020, 41(3): 198−204. ［LIU Z Q, ZHANG H, WANG H F, et al. Quality changes and predictive modeling of shelf life of Matcha stored at different temperatures[J]. Food Science, 2020, 41(3): 198−204.］
［49］ 李文瀚, 刘紫韫, 李喜宏, 等. 不同包装方式对鲜切秦冠苹果贮藏品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(15): 97−101. ［LI W H, LIU Z K, LI X H, et al. Effects of different packaging methods on storage quality of fresh-cut Qinguan apple[J]. Food Research and Development, 2019, 40(15): 97−101.］
［50］ RANI P R, CHELLADURAI V, JAYAS D S, et al. Storage studies on pinto beans under different moisture contents and temperature regimes[J]. Journal of Stored Products Research, 2013, 52: 78−85.
［51］ DU M, AHN D. Effects of antioxidants and packaging on lipid and cholesterol oxidation and color changes of irradiated egg yolk powder[J]. Journal of Food Science, 2000, 65(4): 625−629.
［52］ SILVA F, RODRIGUES C, FERNANDES V, et al. Impact of UV-Absorbing nanoparticles on the shelf life of dried fruits[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2022, 35: 101025.
［53］ 杜娟, 廖新福, 杨军, 等. 不同包装方式对常温贮藏哈密瓜冻干脆片品质的影响[J]. 北方园艺, 2014(18): 142−146. ［DU J, LIAO X F, YANG J, et al. Effects of different packaging methods on the quality of Hami melon freeze-dried chips stored at room temperature[J]. Northern Horticulture, 2014(18): 142−146.］
［54］ 张影全, 惠滢, 张波, 等. 不同干燥条件下挂面烹饪特性比较分析[J]. 现代食品科技, 2021, 37(1): 164−171,275. ［ZHANG Y Q, HUI Y, ZHANG B, et al. Comparative analysis of cooking characteristics of dried noodles under different drying conditions[J]. Modern Food Technology, 2021, 37(1): 164−171,275].］
［55］ 何茸茸, 牛丽影, 李大婧, 等. 草莓脯恒温与分阶烘干过程中水分迁移特性与品质比较[J]. 食品工业科技, 2023, 44(16): 51−58. ［HE R R, NIU L Y, LI D J, et al. Moisture distribution and migration of preserved strawberries during hot air drying at constant and gradient temperature[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(16): 51−58.］
［56］ KOUTCHMA T, POPOVIĆ V, ROS-POLSKI V, et al. Effects of ultraviolet light and high-pressure processing on quality and health-related constituents of fresh juice products[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2016.
［57］ SPARACIO A, CAGGIA E, LANZA P, et al. Influence of Saccharomyces UV arum on volatile acidity, aromatic and sensory profile of malvasia delle lipari wine[J]. Food Microbiology[J], 2018, 74: 106−114.
［58］ 涂美艳, 廖明安, 陈栋, 等. 猕猴桃果实发育期主要生理指标变化规律及与果肉颜色的相关性[J]. 西南农业学报, 2022, 35(9): 2144−2153. ［TU M Y, LIAO M A, CHEN D, et al. Changes of main physiological indexes during kiwifruit development and their correlation with flesh color[J]. Southwest Agricultural Journal, 2022, 35(9): 2144−2153.］
［59］ 朱莉莉, 魏骊霏, 杨芳, 等. 蜜枣在烘制过程中褐变相关因素分析[J]. 食品工业科技, 2021, 42(10): 55−61. ［ZHU L L, WEI L F, YANG F, et al. Analysis on browning-related factors of jujube during baking[J]. Food Industry Science and Technology, 2021, 42(10): 55−61.］
［60］ DIBANDA R F, AKDOWA E P, TONGWA Q M. Effect of

microwave blanching on antioxidant activity, phenolic compounds and browning behaviour of some fruit peelings[J]. Food Chemistry, 2020, 302: 1−6.

[61] ZHANG X, TAO N, WANG X, et al. The colorants, antioxidants, and toxicants from nonenzymatic browning reactions and the impacts of dietary polyphenols on their thermal formation[J]. Food & function, 2015, 6(2): 345−355.

[62] 刘静. 红枣浓缩汁加工和贮藏过程中非酶褐变的研究[D]. 西安: 西北大学, 2011. [LIU J. Non-enzymatic browning of jujube juice concentrate during processing and storage[D]. Xi'an: Northwest University, 2011.]

[63] LI W, ZHANG X Y, CHEN R, et al. HPLC fingerprint analysis of *Phyllanthus emblica* ethanol extract and its antioxidant and anti-inflammatory properties[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2020, 254: 112740.

[64] 胡丽丽. 草莓果脯加工及贮藏过程中品质变化研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2022. [HU L L. Study on quality changes of preserved strawberry during processing and storage[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2022.]

[65] KUMAR A, SINGH S, VIKRAM P, et al. Impact of storage conditions on stability of bioactive compounds in emblic fruit preserves[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2020, 44(12): 14937.

[66] ZHANG Y, WANG S, CHEN X, et al. Effect of light exposure on the antioxidant capacity of amla (*Phyllanthus emblica* L.) dried products[J]. Food Chemistry, 2017, 228: 455−462.

[67] DAS A B, GOUD V V. Photo-degradation kinetics of antioxidants in *Phyllanthus emblica* fruit powder during storage[J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 111: 189−196.

[68] ZHANG W, LUO Z W, WANG A, et al. Kinetic models applied to quality change and shelf life prediction of kiwifruits[J]. LWT, 2021, 138: 1−6.

[69] 王璋, 许时婴, 汤坚. 食品化学[M]. 北京: 中国轻工业出版社(3 版), 2020: 402-403. [WANG Z, XU S Y, TANG J. Food Chemistry[M]. Beijing: China Light Industry Press (3rd Edition), 2020: 402-403.]

[70] 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.