

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250110001

引用格式: 杨明磊, 石玉琪, 张余. 来安花红浊汁饮料稳定技术研究及贮藏品质预测模型建立[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(7): 297-305.

YANG ML, SHI YQ, ZHANG C. Research on stability technology and establishment of storage quality prediction model for Laian *Malus asiatica* cloudy juice beverage [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(7): 297-305. (in Chinese with English abstract).

来安花红浊汁饮料稳定技术研究及贮藏品质 预测模型建立

杨明磊¹, 石玉琪¹, 张余^{2*}

(1. 安徽大学生命科学学院, 合肥 230601; 2. 滁州学院生物与食品工程学院, 滁州 239000)

摘要: **目的** 改善来安花红浊汁饮料贮藏稳定性。**方法** 以悬浮稳定性为主要指标, 分析稳定剂组成、超声波和均质辅助处理对果汁饮料稳定性影响。通过贮藏试验, 分析4℃和25℃下浊汁品质指标变化规律并构建模型, 预测其货架期。**结果** 来安花红浊汁的增稳工艺为每100 mL浊汁中添加黄原胶0.05 g和羧甲基纤维素钠0.1 g, 辅助超声波300 W下处理0.5 min, 再经10000 r/min下均质处理1.0 min。在此条件下, 果汁饮料悬浮稳定性从12.21%提高至38.62%。贮藏试验显示, 在4℃、25℃下、贮藏90 d, 综合色差值(ΔE)变化最大, 其次是总酸, 变化较小的是悬浮稳定性和感官。研究发现, 色差、总酸、悬浮稳定性和感官评价等4个品质指标间存在极显著相关性($P < 0.001$)。模型拟合结果显示, 果汁饮料贮藏期间品质指标变化符合一级动力学模型。根据感官评价模型, 预测饮料在4℃和25℃下货架期分别为384.36 d和153.74 d。验证试验结果显示, 模型预测贮藏时间与4℃和25℃下实际时间相对误差很低, 只有4.50%和0.82%。**结论** 黄原胶和羧甲基纤维素钠组成的复合稳定剂, 辅助超声波与均质处理, 可显著提高浑浊型来安花红果汁饮料稳定性。所建模型准确度高, 可用于花红浊汁饮料货架期预测。

关键词: 来安花红; 浊汁饮料; 悬浮稳定性; 品质变化; 货架期预测

Research on stability technology and establishment of storage quality prediction model for Laian *Malus asiatica* cloudy juice beverage

YANG Ming-Lei¹, SHI Yu-Qi¹, ZHANG Cuan^{2*}

(1. School of Life Sciences, Anhui University, Hefei 230601, China;

2. School of Biological Science and Food Engineering, Chuzhou University, Chuzhou 239000, China)

ABSTRACT: Objective To improve the storage stability of Laian *Malus asiatica* cloudy juice beverage. **Methods** Using suspension stability as the main indicator, the effects of stabilizer composition, ultrasound, and homogenization assisted treatment on the stability of fruit juice beverages were analyzed. Through storage

收稿日期: 2025-01-10

基金项目: 2022年滁州市来安县省级农业科技园区科技计划项目(202201)

第一作者: 杨明磊(1998—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为果蔬加工与贮藏。E-mail: 1061237734@qq.com

*通信作者: 张余(1970—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为农副产品深加工。E-mail: zhangchuan2005@126.com

experiments, the changes in quality indicators of cloudy juice at 4 °C and 25 °C were analyzed, and a model was constructed to predict its shelf life. **Results** The stabilization process of Laian *Malus asiatica* cloudy juice was as follows: 0.05 g of xanthan gum and 0.1 g of sodium carboxymethyl cellulose were added to every 100 mL of cloudy juice, assisted by ultrasonic treatment at 300 W for 0.5 min, and then homogenized at 10000 r/min for 1.0 min. Under these conditions, the suspension stability of fruit juice beverages increased from 12.21% to 38.62%. The storage test showed that at 4 °C, 25 °C, and 90 d of storage, the largest change was in comprehensive color difference value (ΔE), followed by total acid, while the smaller changes were in suspension stability and sensory perception. It was found that there was a highly significant correlation ($P < 0.001$) between 4 quality indicators, including ΔE , total acid content, suspension stability, and sensory evaluation. The model fitting results showed that the changes in quality indicators of fruit juice beverages during storage conform to a first-order kinetic model. According to the sensory evaluation model, the predicted shelf life of beverages at 4 °C and 25 °C was 384.36 d and 153.74 d, respectively. The verification test results showed that the relative error between the predicted storage time of the model and the actual time at 4 °C and 25 °C was very low, only 4.50% and 0.82%, respectively. **Conclusion** The stability of Laian *Malus asiatica* cloudy juice beverage can be significantly improved by xanthan gum and sodium carboxymethyl cellulose, assisted with ultrasound and homogenization treatment. The established model has high accuracy and can be used for predicting the shelf life of juice beverages.

KEY WORDS: Laian *Malus asiatica*; cloudy juice beverage; suspension stability; quality change; shelf life prediction

0 引言

花红 (*Malus asiatica*) 也称林檎、沙果, 属蔷薇科 (Rosaceae) 苹果属 (*Malus*)。花红在中国主要分布于内蒙、甘肃、山西、山东、河北、河南等地^[1]。据《中华本草》《本草纲目》记载, 花红具有防暑解渴、消食健胃、生津祛火、清火明目、杀虫解毒等作用^[2-3]。来安花红 (Laian *Malus asiatica*) 是花红变种之一, 其果实颜色艳丽、皮薄肉脆, 为来安县所特有^[1,4]。在《滁州地方志》和清版《来安县志》中均有关于来安花红的记载^[4], 是“安徽四大水果”之一。2016 年获国家地理标志产品称号。

7 月中下旬是来安花红集中成熟期, 此时正值高温高湿季节, 加之该果实极不耐贮藏, 应尽快加工。来安花红鲜果皮薄多汁、酸甜可口、风味浓郁, 出汁率 70% 以上, 非常适合加工果汁^[5]。果汁可分澄清型、浑浊型和悬浮型 3 种, 其中后两种富含营养和膳食纤维, 更益于健康, 更受消费者青睐; 而浑浊型果汁易产生沉淀、褐变等不利结果, 导致其稳定性较差^[6]。同样, 沙果中含有丰富的多酚物质, 如绿原酸、原花青素、表儿茶素等^[7], 这些物质可与果汁中的果胶、淀粉、纤维素等大分子结合, 产生沉淀, 影响果汁稳定性^[6-8]。目前, 浑浊型果汁主要通过添加稳定剂, 如黄原胶、卡拉胶、魔芋胶、果胶、阿拉伯胶、琼脂等来提高其产品稳定性^[9-10]; 也可以借助一些食品加工技术来改善其稳定性, 如高压热处理^[11]、超声波处理^[8]、脉冲磁场处理^[12]、脉冲电场处理^[13]等技术在果汁加工中均有研究。

因此, 本研究以浑浊型来安花红果汁饮料为研究对象, 采用添加稳定剂、辅助超声波和高速均质等技术改善其稳定性。利用不同温度下的短期贮藏试验, 分析果汁品

质特性在不同温度下的变化规律, 并通过数据模拟构建模型, 对其贮藏期和货架期进行预测。通过研究, 为来安花红浊汁的加工与贮藏提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

成熟来安花红鲜果, 2024 年 7 月中下旬采自来安复兴国有林场的来安花红园。

白砂糖、木糖醇(食品级, 南京甘汁园股份有限公司); F60 果葡糖浆(食品级, 上海广禧贸易有限公司); 维生素 C (vitamin C, VC)、黄原胶、羧甲基纤维素钠(sodium carboxymethylcellulose, CMC-Na)(食品级, 河南高宝实业有限公司); 氢氧化钠(分析纯, 国药集团上海试剂公司)。

1.2 主要仪器设备

FA22048 电子分析天平(精度 0.0001 g, 上海越平科学仪器有限公司); EHA-2108A 膳魔师(THERMOS)原汁机[膳魔师(中国)家庭制品有限公司]; NR60CP 色差仪(深圳市三恩时科技有限公司); JY92-IIDN 超声波细胞破碎机(宁波新芝生物科技股份有限公司); BXM-30R 立式压力蒸汽灭菌器(上海博讯实业有限公司医疗设备厂); FJ300-SH 数显高速分散均质机(上海标本模型厂)。

1.3 试验方法

1.3.1 果汁制备

来安花红鲜果榨汁, 果汁经 4 层纱布过滤后, 得到原果汁。经感官评价, 确定原果汁与糖液按 30:70 (V:V) 比例混合时, 果汁饮料感官评价分值最高。将果汁与糖液按比

例混合后,经稳定化处理(添加稳定剂、超声、均质处理)后,灌装、加热杀菌(95 °C、5 min)、冷却,即为来安花红浊汁饮料样品,备用。

试验用糖液配方为白砂糖 50 g、果葡糖浆 60 g、木糖醇 20 g、柠檬酸 0.1 g、VC 0.4 g。将其溶于 1000 mL 水中,备用。稳定剂先溶解于糖液中,然后原果汁与糖液按照比例进行混合。果汁饮料加工工艺流程图如图 1 所示。

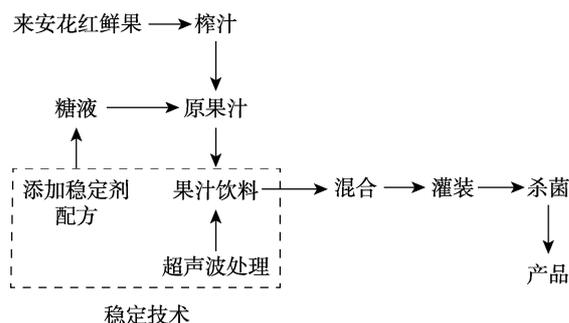


图 1 来安花红果汁饮料加工工艺流程图

Fig.1 Process flow chart of Laian *Malus asiatica* juice beverage

1.3.2 悬浮稳定性测定

参考文献[5]中的方法,取适量果汁样品,经离心(4000 r/min, 15 min)后取上清液,静置 1 h 后,以蒸馏水作对照,比色测定其在 625 nm 处的透光率(T , %)。则果汁悬浮稳定性(suspension stability, SS)按公式(1)计算:

$$SS/\% = \frac{T_0}{T_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中: SS 为样品悬浮稳定性, %; T_0 为样品离心前的透光度, %; T_1 为样品离心后的透光度, %。

1.3.3 色差测定

采用 CIE Lab 色差仪进行测定,色差值分别以 L^* 、 a^* 、 b^* 表示,综合色差值 ΔE 的计算公式(2)如下:

$$\Delta E = \sqrt{(L_1^* - L_0^*)^2 + (a_1^* - a_0^*)^2 + (b_1^* - b_0^*)^2} \quad (2)$$

式中: L_1^* 、 a_1^* 、 b_1^* 分别为待测样品明暗度、红绿值、黄蓝值; L_0^* 、 a_0^* 、 b_0^* 分别为标准样品明暗度、红绿值、黄蓝值。

1.3.4 总酸测定

总酸含量采用 GB 12456—2021《食品安全国家标准食品中总酸的测定》滴定法测定,以苹果酸计。

1.3.5 果汁饮料悬浮稳定性影响因素分析

(1) 稳定剂组成

加入稳定剂,搅拌均匀后,灌装、杀菌、冷却。根据产品 SS,选择适宜的稳定剂组合及其添加量。具体稳定剂及添加量如下:黄原胶添加量(A): 0、0.02、0.04、0.06、0.08、0.10、0.12 g/100 mL;阿拉伯胶添加量(B): 0、0.05、0.10、0.15、0.20、0.25、0.30 g/100 mL;CMC-Na 添加量(C): 0、0.05、0.10、0.15、0.20、0.25、0.30 g/100 mL;稳定剂复配

组合: 0、1/2A+1/2B、1/2B+1/2C、1/2A+1/2C、1/3A+1/3B+1/3C。

(2) 辅助处理

选择超声波和高速均质两种辅助处理方法。先超声处理后,再进行均质处理,利用处理后果汁饮料 SS 结果,选择适宜处理条件。具体因素及水平如下:

①超声时间: 超声功率 200 W, 处理量 200 mL, 超声时间: 0、0.5、1.0、2.0、4.0、6.0 min;

②超声功率: 超声时间 0.5 min, 处理量 200 mL, 超声功率: 100、200、300、400、500 W;

③高速均质转速: 高速均质时间 0.5 min、处理量 200 mL, 高速均质转速: 0、8000、10000、12000、14000、16000 r/min;

④高速均质时间: 处理量 200 mL、高速均质转速 10000 r/min, 高速均质时间: 0、0.5、1.0、2.0、3.0、4.0 min。

1.3.6 贮藏期间果汁品质指标变化

参考文献[13]中方法,稍做改变。经前期稳定化处理的果汁饮料,分别放置于 4 °C、25 °C 下连续贮藏 90 d,每隔 10 d 测定一次果汁饮料的品质指标: 如综合色差(ΔE)、总酸、总糖、SS、感官评价等。

1.3.7 指标间相关性分析

根据贮藏试验数据,采用皮尔逊(Pearson)相关性分析对果汁饮料品质指标间相关性进行分析。

1.3.8 品质指标预测模型建立

参考文献[14—16]中的方法,稍有改变。具体如下:

(1)品质变化反应速率常数确定: 以各品质指标的 $\ln Y$ 对贮藏时间进行线性拟合,根据所得方程,计算反应速率常数 k 和决定系数 R^2 ,选择适宜的动力学模型。

(2)品质指标预测模型建立及验证: 根据拟合结果,选择不同的模型方程。零级反应模型方程如公式(3)所示:

$$Y = Y_0 - kt \quad (3)$$

式中: Y 为品质指标测定值; Y_0 为品质指标初始测定值; k 为速率常数; t 为贮藏时间, d。

一级反应模型方程如公式(4)所示:

$$Y = Y_0 e^{-kt} \quad (4)$$

1.4 数据处理

采用 Excel 2016 和 Origin 2024 数据处理软件对数据进行分析并绘制图表,使用 Duncan 新复极差法进行多重比较。所有样品重复测定 3 次,以平均值±标准偏差表示最终结果。

2 结果与分析

2.1 果汁饮料增稳技术优化

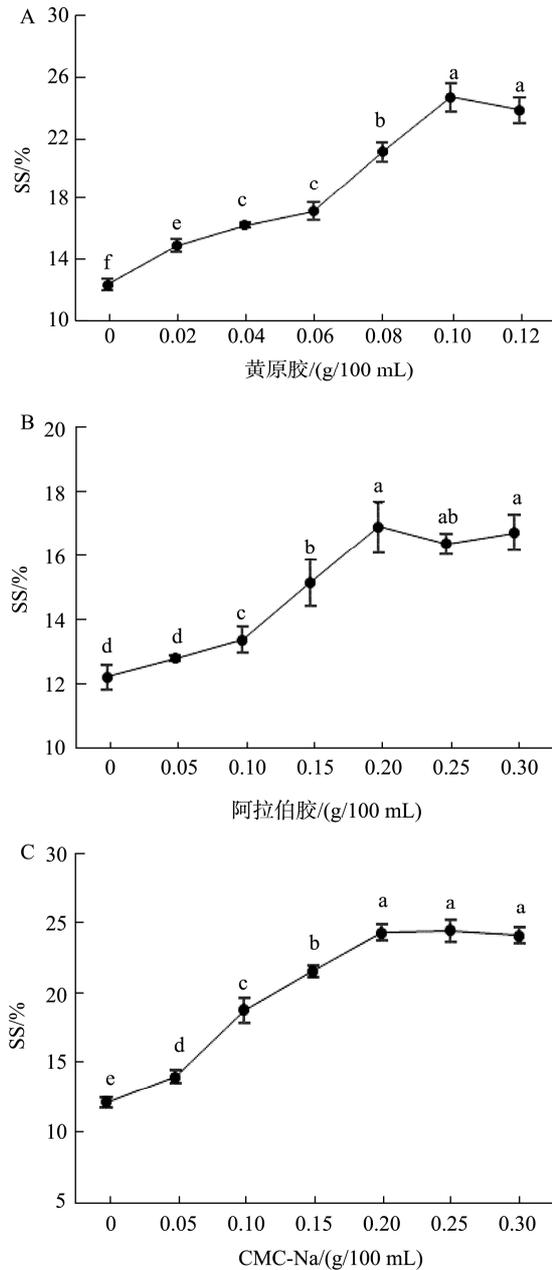
所得花红浊汁的 SS 只有 12.21%, 在室温下静置 3 d,即产生明显的沉淀。因此,必须进行稳定化处理。目前,添加稳定剂是稳定果汁的最常见方法,此外,还有一些辅助技

术,如超声波处理、均质、微波处理等^[6,8-9]。

2.1.1 添加稳定剂的确定

(1) 单一稳定剂

随添加量增加,果汁饮料 SS 均呈现明显增加趋势($P<0.05$),当黄原胶、阿拉伯胶和 CMC-Na 的添加量分别为 0.10、0.20 和 0.20 g/100 mL 时,相应 SS 值达到最高,分别为 24.72%、16.91%和 24.36%,果汁 SS 分别增加了 102.46%、38.49%和 99.51%(图 2)。结果表明,黄原胶和



注:不同小写字母表示差异显著($P<0.05$),相同小写字母表示差异不显著($P>0.05$),图3同。

图2 稳定剂添加量对饮料 SS 的影响

Fig.2 Effects of stabilizer dosage on the SS of cloudy juice beverages

CMC-Na 的增稳效果显著,阿拉伯胶较差。该结果与 3 种稳定剂本身的分子结构和功能性质有关,如黄原胶良好的水溶性、热及酸碱稳定性^[17-18],而阿拉伯胶在水中溶解速度慢且溶解度较低(50%左右)^[19],CMC-Na 的特点是在较低温度下(小于 80 °C)易溶于水,易形成高黏度溶液^[20]。

(2) 稳定剂复配

表 1 结果显示,上述 3 种稳定剂复配使用时,果汁饮料 SS 明显高于其相同用量的单独使用效果($P<0.05$),说明黄原胶、阿拉伯胶和 CMC-Na 3 种稳定剂因分子结构的不同,在稳定果汁饮料方面存在一定的互补作用^[21]。其中,稳定性较好的组合有: 1/2A+1/2C、1/2A+1/2B 和 1/3A+1/3B+1/3C 等 3 个,SS 分别为 32.54%、29.30%和 29.05%(表 1)。因此,选择其中 SS 值最高的 1/2A+1/2C 组合,其配方为:每 100 mL 果汁饮料中添加黄原胶 0.05 g 和 0.10 g CMC-Na,可使果汁饮料稳定性提高至 32.54%,显著高于单一稳定剂($P<0.05$)。

表 1 稳定剂不同组合对油汁 SS 的影响

Table 1 Effects of different combinations of stabilizers on the SS value of cloudy juice beverages

稳定剂种类	稳定剂用量/(g/100 mL)	SS/%
无添加(CK)	0	12.21±0.38 ^f
黄原胶(A)	0.10	24.71±0.96 ^d
阿拉伯胶(B)	0.20	16.91±0.80 ^e
CMC-Na (C)	0.20	24.36±0.59 ^d
1/2A +1/2B	0.05+0.10	29.30±0.19 ^b
1/2B +1/2C	0.10+0.10	26.01±0.47 ^c
1/2A +1/2C	0.05+0.10	32.54±0.55 ^a
1/3A +1/3B +1/3C	0.03+0.07 +0.07	29.05±0.29 ^b

注:同列不同小写字母表示存在显著差异($P<0.05$),表 2 同。

2.1.2 辅助稳定技术优化

(1) 超声时间优化

如图 3A 所示,在超声功率 200 W,处理 0~6 min,随时间延长,果汁稳定性显著增加在 0.5 min 时达到最高(34.23%);继续延长处理时间,SS 显著降低($P<0.05$),6 min 时降至最低 18.54%。说明短时超声处理有利于果汁饮料稳定。超声波处理可能会破坏黄原胶分子的三级棒状螺旋结构,或其分子主链结构和侧链结构发生裂解^[22-23],从而无法维持溶液稳定性。KANG 等^[22]研究发现,超声波处理可显著降低黄原胶的相对分子量,使其从 3.0×10^7 Da 降至 1.4×10^6 Da,显著降低黄原胶的表观黏度。因此,本研究选择经 0.5 min 短时间超声波处理,果汁饮料 SS 增加到 34.23%,增加 5.19%。

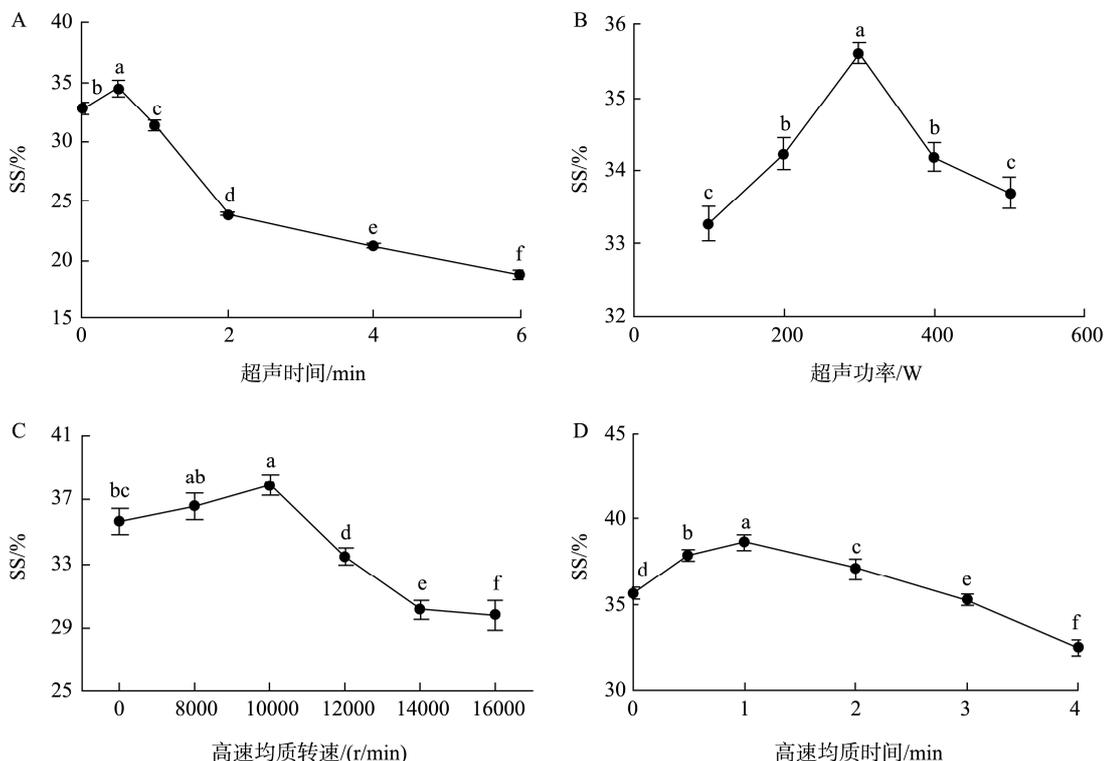


图 3 超声波和均质处理对果汁饮料 SS 的影响

Fig.3 Effects of ultrasonic and homogenization treatment on the SS of fruit juice beverages

(2) 超声功率优化

图 3B 结果显示, 在 100~500 W 范围内, 处理 0.5 min, 在 300 W 时的 SS 最高, 达到 35.61%, 继续增加功率, 果汁 SS 明显降低。因此, 试验选择超声处理条件为 300 W 处理 0.5 min。

(3) 高速均质转速优化

图 3C 结果显示, 在高速均质时间 0.5 min 时, 随着剪切速度的增加, SS 呈先缓慢增加, 随后又快速降低的趋势, 在高速剪切速度 10000 r/min 时, SS 达到最高(37.85%)。因此, 均质的适宜转速应为 10000 r/min。

(4) 高速均质时间优化

图 3D 结果显示, 随高速均质时间延长, 果汁饮料 SS 呈增加趋势, 到 1.0 min 时 SS 达到最高(38.62%), 此后, 随时间延长, 果汁饮料 SS 明显降低。因此, 适宜的均质时间应为 1.0 min。浑浊型果汁中, 果肉颗粒大小对其稳定性影响很大^[24]。均质主要通过通过对饮料中果肉颗粒的高速剪切, 使其变得更加细小, 同是能够与其他组分均匀分散来改善果汁的稳定性。但过度的剪切也会破坏稳定剂的分子结构, 而使溶液失稳^[25-26]。

因此, 花红浊汁饮料的辅助增稳条件为: 超声波 300 W 下处理 0.5 min, 再经 10000 r/min 下均质处理 1.0 min。在此条件下, 果汁饮料的 SS 为 38.62%。与辅助处理前的 32.54% 相比, 稳定性提高了 18.68%。

2.2 贮藏期间花红浊汁品质指标变化

CIE Lab 色差评价系统中的总色差(ΔE)是评估待测样品与标准样品间颜色差异程度的重要指标。各行业对产品色差范围的要求差异很大, 且目前国际上尚未制定统一的色差范围标准。一般认为, $\Delta E \leq 2$ 的色差是人视觉可接受范围, $2 < \Delta E \leq 4$ 时, 样品间的颜色变化可明显察觉, $\Delta E > 4$ 时, 颜色变化非常明显, 会超出大部分消费者的可接受限值^[27]。表 2 结果显示, 在 4 °C、25 °C 下贮藏 90 d 花红浊汁饮料, 其色差 ΔE 值随贮藏时间延长, 呈现明显增加趋势, 至 90 d 时, ΔE 值分别从 0.82 (4 °C) 和 1.05 (25 °C) 增加至 2.32 和 4.51, 分别增加了 1.83 倍和 3.30 倍。与贮藏前相比, 颜色已经发生较明显的变化, 尤其是 25 °C 下样品, 总色差达 4.51, 可能会超过消费者可接受程度。导致果汁色差加深的主要原因可能与样品中的多酚物质、多酚氧化酶、氧气等因素有关^[7,12]。

贮藏期间, 果汁样品中总酸含量呈缓慢的增加趋势。在 4 °C、25 °C 下贮藏 90 d, 总酸从初始的 1.95 g/L 分别增加至 2.12 g/L 和 2.34 g/L, 分别增加了 8.72% 和 20.00%。总酸含量的增加可能是部分 VC 发生降解所致^[28]。果汁 SS 指标变化呈降低趋势, 在 4 °C、25 °C 下贮藏 90 d, 从初始值 38.62% 分别降至 37.24% 和 33.17%, 分别降低了 3.57% 和 14.11%。感官评价结果显示, 在 4 °C、25 °C 下贮藏 90 d, 贮藏期间果汁样品

表 2 不同贮藏温度下花红油汁品质指标变化
Table 2 Changes in quality index of Laian *Malus asiatica* cloudy juice at different storage temperatures

时间/d	ΔE		总酸/(g/L)		SS/%		感官评分	
	4 °C	25 °C	4 °C	25 °C	4 °C	25 °C	4 °C	25 °C
0	-	-	1.95±0.01 ^a	1.95±0.01 ^a	38.62±0.21 ^a	38.62±0.18 ^a	9.52±0.12 ^a	9.52±0.12 ^a
10	0.82±0.02 ^a	1.05±0.03 ^a	1.96±0.02 ^a	1.97±0.01 ^a	38.59±0.18 ^a	38.33±0.16 ^{ab}	9.51±0.14 ^a	9.43±0.11 ^{ab}
20	0.86±0.01 ^b	1.32±0.01 ^b	1.97±0.02 ^{ab}	2.01±0.01 ^b	38.55±0.19 ^a	37.86±0.15 ^b	9.48±0.12 ^a	9.31±0.14 ^{bc}
30	0.90±0.02 ^c	1.56±0.02 ^c	1.99±0.01 ^b	2.05±0.02 ^c	38.47±0.17 ^{ab}	37.21±0.17 ^c	9.44±0.14 ^a	9.17±0.13 ^{cd}
40	0.94±0.02 ^c	1.87±0.03 ^d	2.01±0.02 ^{bc}	2.09±0.02 ^c	38.31±0.18 ^{bc}	36.78±0.14 ^d	9.38±0.15 ^a	9.01±0.12 ^{de}
50	1.07±0.02 ^d	2.42±0.03 ^e	2.03±0.02 ^{cd}	2.13±0.02 ^d	38.12±0.10 ^{cd}	36.25±0.18 ^c	9.31±0.11 ^{ab}	8.84±0.12 ^{ef}
60	1.23±0.03 ^e	3.08±0.04 ^f	2.05±0.02 ^{de}	2.19±0.01 ^e	37.91±0.15 ^{de}	35.79±0.14 ^f	9.22±0.11 ^{bc}	8.65±0.10 ^{fg}
70	1.47±0.02 ^f	3.46±0.03 ^g	2.06±0.01 ^{ef}	2.25±0.01 ^f	37.72±0.16 ^{ef}	35.01±0.17 ^g	9.12±0.14 ^{cd}	8.47±0.08 ^{gh}
80	1.64±0.02 ^g	3.82±0.02 ^h	2.09±0.01 ^g	2.29±0.01 ^g	37.41±0.17 ^{fg}	34.32±0.18 ^h	8.96±0.11 ^{de}	8.25±0.12 ^h
90	2.32±0.02 ^h	4.51±0.04 ⁱ	2.12±0.01 ^h	2.34±0.01 ^h	37.24±0.16 ^g	33.17±0.14 ⁱ	8.83±0.12 ^{ef}	7.94±0.11 ⁱ

注: -代表无数值。

的感官评分从 9.52 分别降低至 8.83 和 7.94, 分别降低了 7.25% 和 16.60%。总之, 不同温度下的花红油汁饮料每个品质指标的变化趋势都基本一致, 其中 4 °C 下的变化幅度明显小于 25 °C。4 个品质指标中, 变化最大的是 ΔE , 其次是总酸, 变化较小的是 SS 和感官评价。

2.3 品质指标间相关性分析

表 3 是花红油汁饮料各品质指标间的皮尔逊相关性分析结果。结果显示, 贮藏期间、果汁饮料的 ΔE 、总酸、SS 和感官评价等指标间存在极显著相关性 ($P < 0.001$)。其中, 25 °C 下相关系数普遍比 4 °C 下的高, 感官评价与其他 3 个品质指标间均存在很高的相关性。感官评价是食品最重要的品质指标, 也是影响消费者购买食品的最有效指标^[29]。因此, 可通过构建贮藏期间感官评价变化模型, 并赋予其贮藏期终止值, 来推测食品的货架期。

表 3 花红油汁饮料品质指标间相关性分析

Table 3 Correlation analysis between quality index of Laian *Malus asiatica* cloudy juice beverage

温度 /°C	品质指标	贮藏时间 /d	ΔE	总酸/(g/L)	SS/%
4	ΔE	0.94035**			
	总酸/(g/L)	0.99187**	0.92818**		
	SS/%	-0.97121**	-0.90607**	-0.98763**	
	感官评分	-0.96016**	-0.90927**	-0.98242**	0.99612**
25	ΔE	0.99146**			
	总酸/(g/L)	0.99516**	0.98652**		
	SS/%	-0.98933**	-0.98211**	-0.99406**	
	感官评分	-0.98976**	-0.98424**	-0.99593**	0.99871**

注: **表示相关指标间存在极显著相关 ($P < 0.001$)。

2.4 品质指标与贮藏时间的线性拟合

研究表明, 食品品质变化一般遵循零级和一级动力学模型^[14,30]。对一级动力学模型(4)两边求自然对数, 则得到公式(5):

$$Y = Y_0 e^{kt} \quad (4)$$

$$\ln Y = \ln Y_0 + kt \quad (5)$$

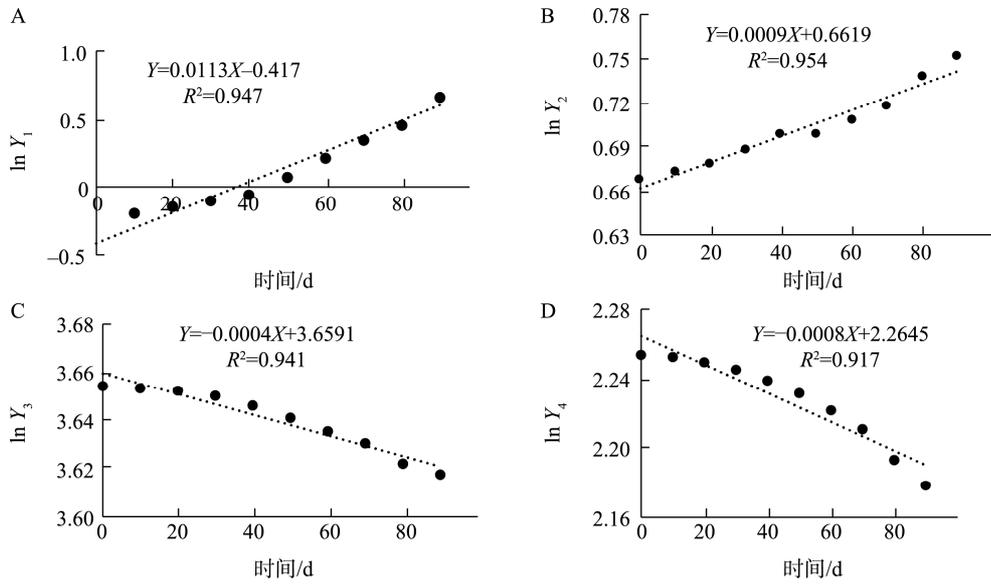
式中: Y 为贮藏 t 后的数据值; Y_0 为初始值; k 为反应速率常数; t 为贮藏时间, d。

根据表 2 中试验结果, 以 $\ln Y$ 对 t 做线性拟合, 得到 4 °C 和 25 °C 下各品质指标变化的反应速率常数 k , 决定系数 R^2 和动力学模型, 结果分别见图 4、图 5 和表 4。结果显示, 各品质指标 ($\ln Y$) 与贮藏时间 (d) 间均呈现显著相关性, 其中 25 °C 下的相关性更高。说明来安花红油汁饮料贮藏期间的品质指标变化符合一级动力学模型。

如果汁在 4 °C 和 25 °C 下所得感官评价动力学模型为例, 设置其货架期终止值为 7 分, 将其带入模型, 计算贮藏时间 t , 分别为 384.36 d 和 153.74 d。为验证该模型的预测准确度, 可将表 2 中 90 d 时的感官评价实际测定值 (8.83 和 7.94) 带入公式(6)和(7)中, 得到预测贮藏时间分别为: 94.05 d 和 90.74 d。计算结果如表 5 所示, 模型预测贮藏时间与 4 °C 和 25 °C 下实际贮藏时间非常接近, 相对误差分别为 4.50% 和 0.82%, 说明该模型准确度较高, 尤其是对 25 °C 下样品的预测, 相对误差只有 0.82%。此外, 利用该模型预测货架期可用于产品加工过程中的质量控制。

$$4 \text{ °C 下: } \ln Y = \ln 9.52 - 0.0008t \quad (6)$$

$$25 \text{ °C 下: } \ln Y = \ln 9.52 - 0.002t \quad (7)$$



注: 图中 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 、 Y_4 分别为 ΔE 、总酸、SS、感官评价, 下同。

图 4 在 4 °C 下果汁饮料品质指标的变化规律

Fig.4 Variation pattern of quality index of juice beverages at 4 °C

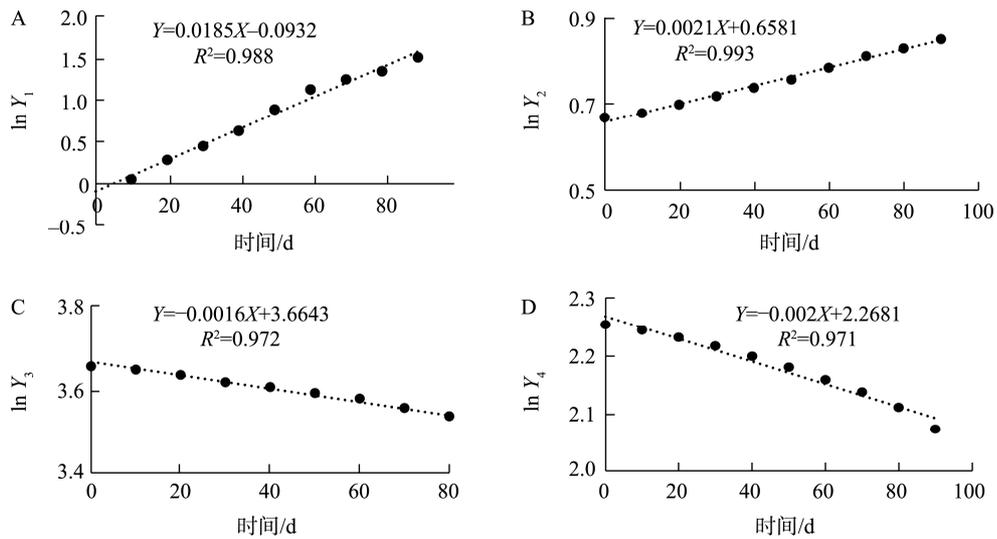


图 5 在 25 °C 下果汁饮料品质指标的变化规律

Fig.5 Variation pattern of quality index of juice beverages at 25 °C

表 4 花红油汁品质指标变化动力学模型

Table 4 Dynamic model of quality index changes in Laian *Malus asiatica* cloudy juice beverages

品质指标	4 °C			25 °C		
	Y_0	k	R^2	Y_0	k	R^2
ΔE	0.82	0.0113	0.947	0.82	0.0185	0.988
总酸	1.95	0.0009	0.954	1.95	0.0021	0.993
SS	38.62	-0.0004	0.941	38.62	-0.0016	0.972
感官评价	9.52	-0.0008	0.917	9.52	-0.0020	0.971

表 5 果汁饮料感官评价一级动力学模型的货架期预测及贮藏期验证

Table 5 Shelf life prediction and storage period verification of first-order dynamic model for sensory evaluation of fruit juice beverages

温度/°C	贮藏时间/d	预测贮藏时间/d	相对误差/%	预测货架期/d
4	90	94.05	4.50	384.36
25	90	90.74	0.82	153.74

3 结论

结果表明, 未经稳定化处理的来安花红浊汁饮料, 其 SS 仅 12.21%, 通过添加稳定剂、辅助超声波和均质化处理可显著提高其稳定性。具体增稳工艺为: 每 100 mL 浊汁中添加黄原胶 0.05 g 和 CMC-Na 0.1 g, 辅助超声波 300 W 下处理 0.5 min, 再经 10000 r/min 下均质处理 1.0 min。在此条件下, 果汁饮料的 SS 提高至 38.62%。在 4 °C、25 °C 下、为期 90 d 的贮藏试验期间, 浊汁饮料的总色差、总酸、SS 和感官评价等 4 个品质指标均发生明显变化。不同温度下各品质指标的变化趋势都基本一致, 其中 4 °C 下的变化幅度明显小于 25 °C。4 个品质指标中, 变化最大的是 ΔE , 其次是总酸, 变化较小的是 SS 和感官评价。 ΔE 的增加幅度较大, 具体原因还有待后续研究。

皮尔逊相关性分析结果显示, 贮藏期间, 果汁饮料的 ΔE 、总酸、SS 和感官评价等指标间存在显著相关性 ($P < 0.001$)。一级动力学模型拟合结果显示, 来安花红浊汁饮料贮藏期间品质指标变化符合一级动力学模型。根据感官评价模型, 预测饮料在 4 °C 和 25 °C 下的货架期分别为 384.36 d 和 153.74 d。此外, 模型预测贮藏时间与 4 °C 和 25 °C 下实际贮藏时间非常接近, 相对误差分别为 4.50% 和 0.82%。说明该模型准确度较高, 可用于产品货架期预测。此外, 25 °C 下预测的货架期偏短的主要原因也需要进一步分析。本研究未涉及果汁贮藏期间微生物和内源酶指标的变化, 将在后续研究中给予关注。

参考文献

- [1] 金乐忠. 来安花红品种特性及发展状况[J]. 园艺与种苗, 2019, 39(4): 61–62.
JIN LZ. Variety characteristics and development status of *Malus asiatica* [J]. Horticulture & Seed, 2019, 39(4): 61–62.
- [2] 国家中医药管理局中华本草编委会. 中华本草[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1999.
Chinese Materia Medica Editorial Committee of the State Administration of Traditional Chinese Medicine. Chinese materia medica [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1999.
- [3] 李时珍. 本草纲目[M]. 北京: 人民卫生出版社, 1978.
LI SZ. Compendium of materia medica [M]. Beijing: People's Health Publishing House, 1978.
- [4] 万莹. 来安花红茎段组织培养研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2015.
WAN Y. Study on the tissue culture of *Malus asiatica* [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2015.
- [5] 张志祥, 戚涛, 陈志宏, 等. 来安花红果实品质分析与综合评价[J]. 中国野生植物资源, 2024, 43(9): 36–41, 48.
ZHANG ZX, QI T, CHEN ZH, et al. Quality analysis and comprehensive evaluation of Laian *Malus asiatica* fruit [J]. Chinese Wild Plant Resources, 2024, 43(9): 36–41, 48.
- [6] WITHOUCK H, MACHTELD VB, BOEYKENS A. Stabilization of cloudy apple juice by adding ecologically obtained extract of residual apples [J]. European Food Research and Technology, 2021, 247: 1209–1219.
- [7] 廉晓芯, 朱若楠, 吴洪钦, 等. 沙果多酚的提取及组成分析[J]. 生物质化学工程, 2022, 56(3): 29–34.
LIAN XX, ZHU RN, WU HQ, et al. Extraction and composition analysis of polyphenols from *Malus asiatica* Nakai [J]. Biomass Chemical Engineering, 2022, 56(3): 29–34.
- [8] 蔡天. 控温超声辅助酶解对苹果浊汁稳定性及风味的影响[D]. 锦州: 渤海大学, 2021.
CAI T. Effect of temperature-controlled ultrasound-assisted enzymatic hydrolysis on stability and flavor of cloudy apple Juice [D]. Jinzhou: Bohai University, 2021.
- [9] WELLALA CKD, BI JF, LIU X, et al. Effect of high pressure homogenization on mixed juice stability, rheology, physicochemical properties and microorganism reduction [J]. Journal of Food Science and Technology, 2020, 57(5): 1944–1953.
- [10] 刘鑫, 朱丹, 魏文毅, 等. 沙棘浑浊果汁稳定性的研究[J]. 中国酿造, 2018, 37(6): 136–139.
LIU X, ZHU D, WEI WY, et al. Research on the stability of turbid sea buckthorn juice [J]. China Brewing, 2018, 37(6): 136–139.
- [11] YI J, KEBEDE TB, DANG HND, et al. Quality change during high pressure processing and thermal processing of cloudy apple juice [J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 75: 85–92.
- [12] QIAN JY, CHEN SB, HUO SH, et al. Impact of pulsed magnetic field treatment on enzymatic inactivation and quality of cloudy apple juice [J]. Journal of Food Science and Technology, 2021, 58(8): 2982–2991.
- [13] ZIAIFAR AM, DEZYANI A, MOKHTARI Z, et al. Response surface optimization of pulsed electric field processed kiwi-carrot juice: Enzyme inactivation and evaluation of physicochemical and nutritional properties [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2024, 18: 489–499.
- [14] 高振鹏, 孟掉琴, 王瑜, 等. 益生菌发酵苹果浊汁贮存期品质分析与货架期预测模型[J]. 农业机械学报, 2020, 51(9): 311–318.
GAO ZP, MENG DQ, WANG Y, et al. Composition change and shelf life prediction model of probiotic fermented cloudy apple juice [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(9): 311–318.
- [15] 孟掉琴. 益生菌发酵苹果浊汁研制及货架期预测[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
MENG DQ. Development of shelf life prediction of fermented cloudy apple juice by probiotics [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2019.
- [16] 林炎娟, 周丹蓉, 方智振, 等. 温度对李果实采后品质的影响及货架期

- 预测模型建立[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(20): 6748–6754.
- LIN YJ, ZHOU DR, FANG ZZ, *et al.* Effects of storage temperature on the postharvest quality of *Prunus salicina* Lindl. and establishment of shelf life prediction model [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2022, 13(20): 6748–6754.
- [17] 步营, 郭佳奇, 朱文慧, 等. 亲水胶体在易食食品中的应用研究进展[J]. 中国食品学报, 2024, 24(11): 448–458.
- BU Y, GUO JQ, ZHU WH, *et al.* The application of hydrophilic colloid in dysphagia food [J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2024, 24(11): 448–458.
- [18] 杨旭. 浑浊型光皮木瓜果汁的稳定性研究[J]. 食品工业科技, 2021, 42(8): 194–198.
- YANG X. Research on the stability of *Chaenomeles sinensis* (Thouin) koehne cloudy juice [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(8): 194–198.
- [19] 杨镕, 臧一字, 吴鹏, 等. 多糖类食品胶体的功能特性及其在食品加工中的应用研究进展[J]. 食品科学, 2024, 45(5): 283–292.
- YANG R, ZANG YY, WU P, *et al.* Research progress on functional properties of polysaccharide-based food colloids and their application in food processing [J]. *Food Science*, 2024, 45(5): 283–292.
- [20] 晏群山, 危培, 彭瑞, 等. 羧甲基纤维素钠的精细合成及其混合体系的流变性能[J]. 武汉大学学报(理学版), 2023, 69(3): 331–339.
- YAN QS, WEI P, PENG R, *et al.* Fine synthesis of sodium carboxymethyl cellulose and rheological properties of its mixed system [J]. *Journal of Wuhan University (Natural Science Edition)*, 2023, 69(3): 331–339.
- [21] 陈永浩, 李季昕, 冯丽丹, 等. 沙棘、梨混合果汁配方研发及稳定剂配比优化[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(16): 141–147.
- CHEN YH, LI JX, FENG LD, *et al.* Study on formula of sea-buckthorn and pear mixed juice and optimization of proportion of stabilizer [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46(16): 141–147.
- [22] KANG J, YUE HX, LI XX, *et al.* Structural, rheological and functional properties of ultrasonic treated xanthan gums [J]. *International Journal of Bbiological Macromolecules*, 2023, 246: 1–14.
- [23] 岳红霞. 不同分子结构的黄原胶对冷冻面团特性的影响[D]. 天津: 天津科技大学, 2023.
- YUE HX. Effects of xanthan gum with the different molecular structure on properties of frozen dough [D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2023.
- [24] ZHU DS, SHEN YS, WEI LW, *et al.* Effect of particle size on the stability and flavor of cloudy apple juice [J]. *Food Chemistry*, 2020, 328: 1–8.
- [25] 骆靓芸. 超声和剪切联合超临界 CO₂ 法制备姜黄素脂质体[J]. 生物化工, 2022, 8(1): 83–86.
- LUO JY. Preparation of curcumin liposome using ultrasound and high-speed shear coupling to supercritical CO₂ method [J]. *Biological Chemical Engineering*, 2022, 8(1): 83–86.
- [26] 牛涵. 杜仲籽油—苹果汁饮料制备及贮藏品质研究[D]. 郑州: 郑州轻工业大学, 2022.
- NIU H. Study on preparation and pstorage puality of *Eucommia ulmoides* seed oil-apple juice beverage [D]. Zhenzhou: Zhengzhou University of Light Industry, 2022.
- [27] 尚晓宇, 黄敏, 公绪平, 等. 印刷样品的可接受色差优化计算研究[J/OL]. 光学学报, 1-18. [2024-11-19]. <https://link.cnki.net/urlid/31.1252.O4.20241118.1500.094>
- SHANG XY, HUANG M, GONG XP, *et al.* Optimization and calculation on acceptable color difference for printed samples [J/OL]. *Acta Optica Sinica*, 1-18. [2024-11-19]. <https://link.cnki.net/urlid/31.1252.O4.20241118.1500.094>
- [28] WIBOWO S, ESSEL EA, DE-MAN S, *et al.* Comparing the impact of high pressure, pulsed electric field and thermal pasteurization on quality attributes of cloudy apple juice using targeted and untargeted analyses [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2019, 54: 64–77.
- [29] MCILVEEN H, ARMSTRONG G. Opportunities for integrating sensory evaluation into consumer studies [J]. *Journal of Sensory Studies*, 1998, 22(4): 241–247.
- [30] KAR S, SUTAR PP. Shelf life prediction of dried garlic powder under accelerated storage conditions [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2023, 60(3): 996–1005.

(责任编辑: 安香玉 韩晓红)