DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251004001
引用格式: 高翔, 郑润博, 闫昱辛, 等. 皱皮木瓜叶饮料制作工艺优化及其货架期与抗氧化活性研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(4): 86–99.
GAO X, ZHENG RB, YAN YX, *et al*. Process optimization of *Chaenomeles speciosa* leaf beverage and investigation of its shelf life and antioxidant activity [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(4): 86–99. (in Chinese with English abstract).

皱皮木瓜叶饮料制作工艺优化及其货架期与抗氧化活性研究

高 翔[1,2], 郑润博[1,2], 闫昱辛[1,2], 李 宇[1], 彭诗琴[1], 何美军[1,2*]
(1. 湖北省农业科学院中药材研究所, 恩施 445000; 2. 湖北民族大学生物与食品工程学院, 恩施 445000)

摘 要: 目的 基于模糊数学感官评价法和响应面法优化皱皮木瓜叶饮料制作工艺, 并探究其货架期与抗氧化活性。**方法** 以感官评分为关键指标, 采用模糊数学感官评价法, 结合单因素法、响应面法优化其配方。联合顶空固相微萃-气相色谱-质谱法、电子鼻和电子舌仿生系统分析饮料的风味特征; 并基于化学反应动力学模型结合 Arrhenius 方程预测饮料的货架期。**结果** 获得最佳配方工艺为提取液 60 mL、甜味剂 2 g、*DL*-苹果酸 0.01 g, 在此配方下, 饮料感官评分为 88 分。其滋味丰富, 色泽透亮, 呈现先甜后苦的口感; 共检出 19 种以芳香族化合物为主的挥发性香气物质; 产品稳定性良好, 在 4、25、37 ℃下的货架期分别为 189、146、128 d, 且贮藏期内抗氧化活性稳定。**结论** 该饮料具有良好的风味和抗氧化活性, 为木瓜产业副产物的高值化利用提供了有效方案, 有助于提升产业综合效益。

关键词: 皱皮木瓜叶; 工艺优化; 货架期; 风味特征; 抗氧化活性

Process optimization of *Chaenomeles speciosa* leaf beverage and investigation of its shelf life and antioxidant activity

GAO Xiang[1,2], ZHENG Run-Bo[1,2], YAN Yu-Xin[1,2], LI Yu[1], PENG Shi-Qin[1], HE Mei-Jun[1,2*]
(1. *Institute of Chinese Herbal Medicines*, *Hubei Academy of Agricultural Sciences*, *Enshi* 445000, *China*;
2. *College of Biology and Food Engineering*, *Hubei Minzu University*, *Enshi* 445000, *China*)

ABSTRACT: Objective To optimize the processing of *Chaenomeles speciosa* leaf beverage using fuzzy sensory evaluation and response surface methodology, and investigate its shelf life and antioxidant activity. **Methods** Using sensory scores as the key indicator, the formulation was optimized by fuzzy mathematics sensory evaluation combined with single-factor analysis and response surface methodology. The flavor profile was characterized by headspace solid-phase microextraction coupled with gas chromatography-mass spectrometry, electronic nose, and electronic tongue bionic systems. Furthermore, the beverage's shelf life was predicted based on a chemical reaction kinetics model incorporating the Arrhenius equation. **Results** The optimal formulation of beverage was 60 mL

收稿日期: 2025-10-04
基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项资金项目(CARS-21)
第一作者: 高翔(1999—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为天然产物研究与开发。E-mail: 863385792@qq.com
***通信作者:** 何美军(1974—), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为天然产物研究与开发。E-mail: zx120223016@163.com

extract solution, 2 g sweetener and 0.01 g *DL*-malic acid, achieving a sensory score of 88 points. The beverage exhibited a rich flavor, bright color and a taste profile of initial sweetness followed by bitterness. A total of 19 kinds of volatile aroma compounds were identified, predominantly aromatic compounds. The product exhibited good stability, with a shelf life of 189, 146 and 128 days at 4, 25 and 37 °C. respectively, the antioxidant capacity remained stable during the storage period. **Conclusion** The beverage has good flavor and antioxidant activity, this study provides an effective solution for the value-added utilization of by-products in the *Chaenomeles speciosa* industry, contributing to the enhancement of the industry's overall value.

KEY WORDS: *Chaenomeles speciosa* leaf; process optimization; shelf life; flavor characteristics; antioxidant activity

0　引　言

皱皮木瓜[*Chaenomeles speciosa* (Sweet) Nakai], 别称铁脚梨、木瓜、贴梗海棠等, 为蔷薇科木瓜属植物皱皮木瓜的成熟干燥果实, 皱皮木瓜在我国分布广泛, 主要分布于湖北、安徽等[1]。主产于湖北巴东的皱皮木瓜以其活性成分含量高、品质品相好, 使得巴东皱皮木瓜闻名于世, 于 2023 年被湖北省列为五大特色药材之一[2]。皱皮木瓜具有舒筋活络和胃化湿之功效, 传统用于治疗湿痹拘挛、腰膝关节酸重疼痛、暑湿吐泻、脚气水肿等疾病, 被国家药典委员会列为药食同源植物[3], 现代医学研究表明, 皱皮木瓜中含有丰富的黄酮、多酚、有机酸等活性物质[4], 具有抗氧化、抑菌、降尿酸、抗癌、抗炎[5−7]等多种生物活性。

在食品研发中, 感官评价是评判食品品质的重要指标。然而, 传统感官评价方法主观较强[8]。相比之下, 模糊感官数学评价法能够综合考量各项主观因素, 有效减少实验误差, 从而提高评价的准确性和客观性[9]。另一方面, 化学反应动力学模型常被用于描述食品中的化学反应速率, 可精确反映食品质量变化[10]。由于食品品质对温度高度敏感, Arrhenius 方程常被用来拟合反应速率常数(k)与温度之间的关系, 进而描述食品品质的动态衰减过程。结合化学反应动力学模型与 Arrhenius 方程, 可以更精确地预测食品的货架期[11]。

目前, 针对皱皮木瓜的研究多集中于果实、种子等部位, 而其叶片作为木瓜产业的副产物常被忽视甚至废弃[12], 造成资源利用不充分。前期研究表明, 木瓜叶片中含有丰富的齐墩果酸、熊果酸等活性成分, 具备美白、抗氧化、降尿酸[13]等多种生物活性。此外, HOU 等[14]建立了木瓜叶的酚类物质的提取与鉴定方法, 并发现其提取物可显著抑制直肠癌细胞增殖。在应用方面, 王艳等[15]通过复配富硒茶与栀子花, 研制出木瓜富硒保健茶。王永娟[16]则基于绿茶炒制工艺, 开发出皱皮木瓜叶茶的加工技术。然而, 整体来看, 木瓜叶片在产品开发中的应用仍较为有限。因此, 本研究拟以木瓜叶为原料开发一款新型饮料, 通过系统的研究其理化性质和生物活性, 为木瓜叶资源的高值化利用提供理论依据, 进而提升木瓜产业的综合经济效益。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

1.1.1　材料与试剂

皱皮木瓜叶采摘于湖北省巴东县野三关镇(E:110.336975、N:30.632823), 经何美军博士鉴定为皱皮木瓜叶片。

三氯蔗糖、赤藓糖醇、*DL*-苹果酸(纯度≥99.5%, 深圳一诺食品配料有限公司); 马铃薯葡萄糖琼脂培养基(青岛高科工业园海博生物技术有限公司); 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-trinitrophenylhydrazine, DPPH, 分析纯, 上海源叶生物科技有限公司); NaOH 标准滴定液、磷酸氢二钾、磷酸二氢钾(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司); 铁氰化钾、三氯乙酸、三氯化铁(分析纯, 上海麦克林生化科技有限公司)。

1.1.2　仪器与设备

101-4A 电热鼓风干燥箱(北京永光明医疗仪器厂); FA2004B 电子天平(精度 0.1 mg, 上海佑科仪器仪表有限公司); DFY-1000 中草药磨粉机(温岭市林大机械有限公司); B-20R 台式高速冷冻离心机(德国纳赫特公司); UV1800 型紫外可见分光光度计(日本岛津公司); Infinite-M200PRO 多功能酶标仪(瑞士帝肯公司); SW-CJ-ZFD 型净化工作台(上海索普仪器有限公司); CS-820N 台式分光测色仪(杭州彩菜谱科技有限公司); BOXUN 立式蒸汽灭菌锅(上海博讯实业有限公司); PHS-3E pH 计(上海仪电科学仪器有限公司); MC-CL35W7-001 电磁炉(美的电器有限公司); MQL-61R 振荡培养箱(上海旻泉仪器有限公司); 7890A-5975C 型气质联用仪(美国安捷伦科技有限公司); HP-INNOWAX 色谱柱(30.0 m × 250 μm, 0.25 μm)(美国安捷伦科技有限公司)。

1.2　实验方法

1.2.1　木瓜叶提取液的制备

工艺流程: 皱皮木瓜叶片→分选、清除杂质→粉碎→热水浸提→离心过滤→皱皮木瓜叶片提取液。

操作要点: 皱皮木瓜叶片清水洗净, 晾干后粉碎过 100 目筛网, 得到木瓜叶碎片。使用清水, 料液比 1:10 (g:mL)条件下, 沸水浸提 30 min, 获得木瓜叶片提取液。将提取液在 3000 r/min 条件下离心 15 min, 离心后的上清液经布氏漏斗(直径 24 cm, 双层滤纸)在 0.1 MPa 负压下抽滤, 得到木瓜叶片提取液, 置于 4 ℃保存备用。

1.2.2 单因素实验

以感官评分为指标, 采用单因素实验研究木瓜叶提取液、甜味剂、*DL*-苹果酸添加量以及赤藓糖醇与三氯蔗糖复配比例对饮料风味的影响, 固定饮料总体积为 100 mL, 实验水平分别选取木瓜叶提取液添加量 50、60、70、80、90 mL; 甜味剂添加量 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 g; 赤藓糖醇与三氯蔗糖复配比例 99.9:0.1、99.8:0.2、99.7:0.3、99.6:0.4、99.5:0.5; *DL*-苹果酸添加量 0.0050、0.0075、0.0100、0.0125、0.0150 g。对饮料配方进行初步优化, 由评定小组进行感官评定, 确定较佳配方比例范围。

1.2.3 响应面优化实验

(1)响应面实验设计

基于单因素实验结果, 木瓜叶提取液添加量(*A*)、甜味剂(*B*)、*DL*-苹果酸添加量(*C*)、为影响因素, 以感官评分(*Y*)为响应指标, 进行 Box-Behnken 响应面实验。响应面实验的因素和水平设计见下表 1。

表 1 木瓜叶饮料响应面因素水平表

Table 1 Response surface factor level table of *Chaenomeles speciosa* leaf beverage

水平	因素		
	A: 木瓜叶提取液添加量/mL	*B*: 甜味剂添加量/g	*C*: *DL*-苹果酸添加量/g
–1	50	2.5	0.0075
0	60	2.0	0.0100
1	70	1.5	0.0125

(2)模糊数学感官评分表

将配制好的木瓜叶饮料倒入试饮杯中, 由评定小组进行感官评定。用模糊数学感官评价法对单因素实验和响应面实验产品进行检验, 见下表 2。

(3)模糊数学感官评价模型的建立

以色泽、口感、气味和组织形态 4 个方面作为评价指标, 并将其表示为 $X=\{x_1, x_2, x_3, x_4\}$, 其中 x_1 表示色泽, x_2 表示口感, x_3 表示气味, x_4 表示组织形态。评价等级表示为 $Y=\{y_1, y_2, y_3, y_4\}$。取评分集的中间值得到相对应的分数, 其中 y_1=优(95); y_2=良(85); y_3=中(75); y_4=差(35)。成立 10 人的专业评审组, 根据综合分析, 通过各指标得出权重集 $Z=\{z_1, z_2, z_3, z_4\}$, 其中 z_1(色泽)=20%, z_2(口感)=50%, z_3(气味)=20%, z_4(组织形态)=10%。

表 2 木瓜叶饮料感官评价标准

Table 2 Sensory evaluation criteria of *Chaenomeles speciosa* leaf beverage

项目权重	优(100~91 分)	良(90~81 分)	中(80~71 分)	差(70~0 分)
色泽(20%)	色泽均匀透亮、澄清, 呈橙红色	色泽较均匀透亮、澄清, 呈浅红色	色泽一般均匀透亮、澄清, 呈红色	色泽暗淡, 且不均匀
口感(50%)	口感轻柔绵密, 酸甜可口; 有木瓜叶特殊的风味(后味略苦)	口感较轻柔绵密, 酸甜基本可口	口感一般, 较甜或较酸	有明显异味, 或酸甜味失调, 苦味严重
气味(20%)	香味协调, 具有木瓜叶特有的清香味	香味一般, 能闻到木瓜叶香气	木瓜叶香气不明显	无清香, 异味较重
组织状态(10%)	澄清透明、稳定性好	稳定性较好, 质地较均匀	稳定性一般、质地均匀性较差	明显浑浊或沉淀

矩阵内每一个元素表示为相同评定等级之和除以人员总数 10, 如下公式(1)。

$$T_g=\begin{Bmatrix} x_1y_1, x_1y_2, x_1y_3, x_1y_4 \\ x_2y_1, x_2y_2, x_2y_3, x_2y_4 \\ x_3y_1, x_3y_2, x_3y_3, x_3y_4 \\ x_4y_1, x_4y_2, x_4y_3, x_4y_4 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

式中: g 为序数, g=1、2、3.....27、28、29, 为 29 个试样的编号; i=1、2、3、4 分别为色泽、口感、气味和组织形态这 4 项感官评价指标; x_iy_1、x_iy_2、x_iy_3、x_iy_4 则分别为第 i 个感官评价指标所得到的票数。

令综合评价结果为 W, 按照标准的模糊综合评判数学模型如公式(2)~(3)。

$$W_g=Z\times T_g=(a_1, a_2, a_3, a_4) \quad (2)$$

$$W_1=(0.20, 0.50, 0.20, 0.10)T_1 \quad (3)$$

由公式(1)、(2)可得 W_1, 由模糊数学感官评价公式表示评分结果, 代入公式(4)计算可得作为第一组的感官评分, 同理可得其他组别感官评分。

$$K_g=W_g\times Y=W_g\times\begin{Bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{Bmatrix} \quad (4)$$

1.2.4 饮料风味特征分析

(1)顶空固相微萃-气相色谱-质谱法检测饮料挥发性成分

准确量取 8 mL 样品于样品瓶中, 加入 2.5 g NaCl 和搅拌磁子, 快速密封。65 ℃, 1000 r/min 搅拌, 预热 15 min 进行样品挥发; 将固相微萃取头置于样品瓶中, 富集 40 min 取出; 富集完成后插入气相色谱-质谱仪进样口, 于 250 ℃解析 3 min, 进样分析。

色谱条件: 色谱柱为 HP-INNOWAX (60 m×250 μm, 0.25 μm); 起始温度 60 ℃保持 5 min, 以 8 ℃/min 的速度升至 100 ℃保持 3 min, 以 8 ℃/min 的速度升至 230 ℃保持 5 min; 气化室温度 250 ℃; 传输线温度 230 ℃; 载气 He; 载气流量 1.0 mL/min; 不分流。

质谱条件: 电子轰击电离源(electron ionization, EI); 电子能量 70 eV; 离子源温度 230 ℃; 四极杆 150 ℃; 扫描模式为全面扫描; 扫描质量范围为 20~500 u。

(2)电子鼻气味分析

准确量取 10 mL 样品, 置于 50 mL 的离心管中, 每个样品量取 3 管, 封口膜封口, 放置 30 min 富集后测试。

电子鼻测定条件: 采用直接顶空吸气法直接将进样针头插入含样品的密封离心管中, 电子鼻进行测定。采样时间为 1 s/组; 传感器自清洗时间为 100 s; 样品进样时间为 5 s; 进样流量为 400 mL/min; 分析采样时间为 100 s。数据取 69~71 s 数据为结果进行汇总与分析。

(3)电子舌滋味分析

饮料样品过滤, 取滤液上机检测, 选择食品 5 味传感器 C00、AE1、CA0、CT0、AAE 测试 4 次, 食品甜味传感器 GL1 测试 5 次。通过“味觉信息的转换过程”将测试的样品的电势值, 去掉第 1 次和最后 1 次循环取中间 3 次平均值作为测试结果。

1.2.5　木瓜叶饮料货架期的预测

(1)木瓜叶饮料高温灭菌处理

将配制好的饮料分别装入均质罐中, 采用高温高压灭菌锅 121 ℃, 20 min 对饮料进行灭菌处理。将处理后的饮料分别置于 4、25、37 ℃培养箱中, 分别于 0、15、30、45、60、75 d 后取样测定。

(2)总酸测定

采用 GB 12456—2021《食品安全国家标准 食品中总酸的测定》中第二法: pH 计电位滴定法测定。

(3) pH 测定

采用 GB 5009.237—2016《食品安全国家标准 食品 pH 值的测定》方法测定饮料 pH。

(4)色度值测定

将饮料置于培养皿中, 以标准白板、黑板进行仪器校正, 用色差仪对饮料的亮度(L^*)、红色值(a^*)和黄色值(b^*)进行测定, 并依据[公式(5)]计算总色差值 ΔE。

$$\Delta E=\sqrt{(L^*-L_0^*)^2+(a^*-a_0^*)^2+(b^*-b_0^*)^2} \quad (5)$$

式中: L_0^*、a_0^*、b_0^*为标准校正值; L^*、a^*、b^*为木瓜叶饮料的亮度、红色值、黄色值。

(5)微生物指标测定

微生物指标测定依据 GB 4789.2—2022《食品安全国家标准 食品微生物学检验菌落总数测定》。

(6)货架期预测模型的建立

以木瓜叶饮料感官评分为关键指标, 根据 Pearson 相关系数确定影响木瓜叶感官评分的关键因子, 采用零级动力学模型[公式(6)]和一级动力学模型[公式(7)]对相关因子进行拟合分析, 根据 R^2 值与拟合结果选择合适的关键因子进行货架期模型的构建与预测。根据动力学模型拟合结果, 建立 Arrhenius 方程[公式(8)], 预测饮料在不同温度环境条件下的货架期。

$$A=A_0-kt \quad (6)$$

$$A=A_0e^{kt} \quad (7)$$

$$\ln k=-\frac{E_0}{RT}+\ln k_0 \quad (8)$$

式中: A 为产品在 t d 时的测定值; A_0 为初始测定值; k_0 为方程指前因子; k 为反应速率常数; t 为贮藏时间; E_a 为反应活化能, kJ/mol; R 为气体常数 8.3144, J/(mol • K); T 为贮藏时的绝对温度, K。

分别将零级动力学模型和一级动力学模型与 Arrhenius 方程结合可得到木瓜饮料的货架期预测模型[公式(9)和公式(10)]。

$$t=\frac{A-A_0}{k_0\exp(\frac{-E_a}{RT})} \quad (9)$$

$$t=\frac{\ln\frac{A}{A_0}}{k_0\exp(\frac{-E_a}{RT})} \quad (10)$$

1.2.6　贮藏期间抗氧能力变化

(1) DPPH 自由基清除率测定

参照孙慧茹等[17]的方法稍作改进, 配制浓度为 0.2 mmoL/L 的 DPPH 溶液, 吸取等体积的饮料样品溶液和 DPPH 溶液置于酶标仪中 30 ℃反应 30 min, 517 nm 出测定其吸光值, 按[公式(11)]计算木瓜叶饮料 DPPH 自由基清除率。

$$R/\%=[1-\frac{A_1-A_2}{A_{00}}]\times 100\% \quad (11)$$

式中: R 为 DPPH 自由基清除率, %; A_{00} 为组合物不存在时反应体系 OD 值; A_1 为组合物存在时反应体系 OD 值; A_2 为 0.2 mmol/mL DPPH 自由基溶液不存在时反应体系 OD 值。

(2)总还原力测定

参考袁名远等[18]的方法稍作修改, 将饮料稀释 10 倍, 取各样品提取液 0.25 mL, 依次加入 0.25 mL pH 6.6 的 0.2 mol/L 磷酸缓冲液, 0.25 mL 1%质量分数铁氰化钾溶液, 50 ℃水浴 20 min 后迅速冷却, 加入 0.25 mL 10%质量分数三氯乙酸溶液, 于 3000 r/min 离心 10 min, 取 0.5 mL 上清液, 加入 0.4 mL 蒸馏水及 0.1 mL 0.1%质量分数三氯化铁溶液, 混匀反应 10 min 后于 700 nm 处测定吸光度, 总还原力按公式(12)计算。

$$R=A-A_0' \quad (12)$$

式中: R 为总还原力; A 为反应体系反应后在 700 nm 下的吸光值; A_0'为蒸馏水代替样品在溶液体系中反应后在 700 nm 的吸光值。

1.3 数据处理

所有数据均重复 3 次, 结果为平均值±标准偏差。使用 Design Expert ver 13.0 设计响应面模型; Graphpad Prism 10.1.2 软件进行图表绘制; 采用 SPSS 20.0 软件进行统计学分析, $P<0.05$ 表示差异具有统计学意义。

2 结果与分析

2.1 单因素实验结果

如图 1A 所示, 木瓜叶提取液对木瓜叶饮料感官得分的影响, 随着木瓜叶提取液添加量的增加, 木瓜叶饮料感官得分呈现先上升后逐渐下降的趋势, 当饮料提取液添加量为 60 mL 时, 感官得分最高为 86.00 分。因此, 后续将采用 60 mL 木瓜叶提取液添加量进行后续单因素实验。图 1B 所示在甜味剂添加量达到 2 g 时感官得分最高为 85.05 分, 但是添加量为 2.5 g 时感官评分降低, 这可能是因为甜味剂浓度过高, 导致饮料甜度过大, 与其他滋味产生了拮抗作用引起了饮料口感下降。故选择 2 g 作为甜味剂的添加量进行后续实验。甜味剂复配比例不同, 甜度不同, 由图 1C 所示甜味剂复配比例对感官得分影响较小, 随着甜味剂比例的增加感官评分先增加后下降, 在赤藓糖醇与三氯蔗糖复配比例为 99.7:0.3 时, 感官评分最高达 84.45 分。因此, 后续实验将使用该比例进行复配。食品中的酸味可以对苦味起到中和调节作用, *DL*-苹果酸作为一种新型酸度调节剂, 由图 1D 所示当添加量为 0.01 g 时, 饮料感官得分达到 87.1 分, 随着 *DL*-苹果酸的增加感官评分下降, 这可能是 *DL*-苹果酸浓度过大, 激发了木瓜叶提取液原有的酸涩感, 从而导致口感降低。综上, 通过单因素实验得到各因素的最佳条件为: 木瓜叶提取液 60 mL、甜味剂 2 g(赤藓糖醇:三氯蔗糖=99.7:0.3)、*DL*-苹果酸 0.01 g, 由于甜味剂复配比例对感官评分的影响相对较小, 在后续响应面优化实验中将固定该比例, 并选取木瓜叶提取液添加量、甜味剂总添加量和 *DL*-苹果酸添加量作为 3 个关键变量进行优化设计。

2.2 响应面实验结果

2.2.1 模糊数学感官评价结果

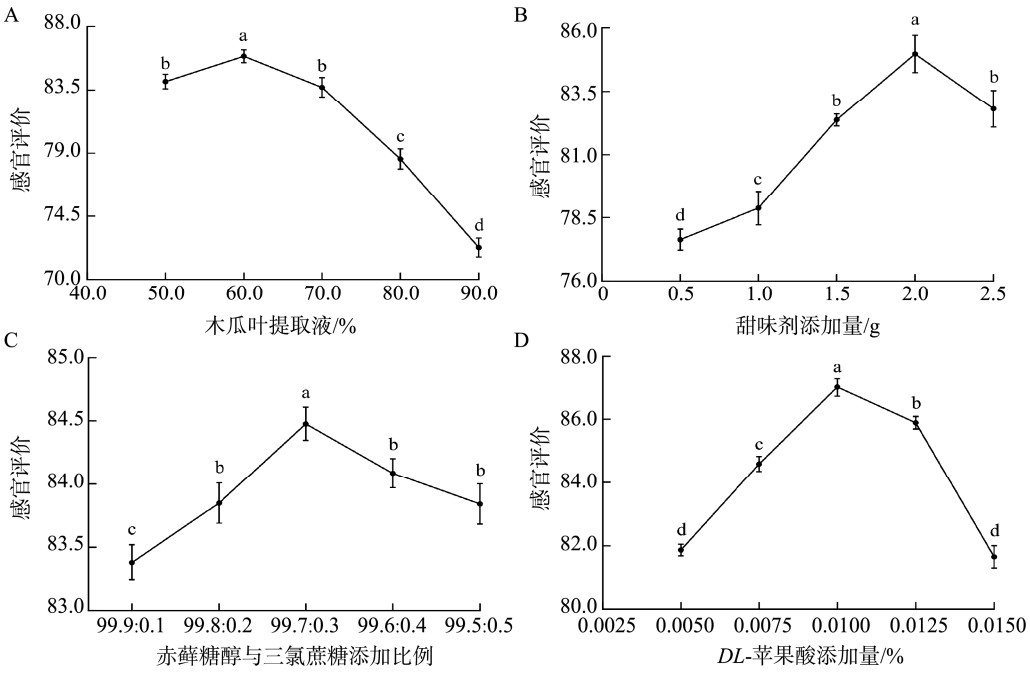
在单因实验结果的基础上, 采用中心组合设计原理进行实验设计, 得到 17 种配方, 邀请 10 名受过专业培训的食品专业学生对 17 种不同配方的木瓜饮料进行优、良、中、差 4 级感官质量等级评定, 感官评价票数见表 3。

根据模糊感官数学评价模型, 得到实验组合 1 号样品的模糊矩阵:

$$T_1=\begin{vmatrix}0.85 & 0.15 & 0 & 0\\ 0.10 & 0.20 & 0.70 & 0\\ 0.40 & 0.45 & 0.15 & 0\\ 0.20 & 0.45 & 0.35 & 0\end{vmatrix}$$

同理依次可得 T_2~T_{17}:

$$T_2=\begin{vmatrix}0.6 & 0.4 & 0 & 0\\ 0 & 0.2 & 0.65 & 0.15\\ 0.3 & 0.6 & 0.10 & 0\\ 0.6 & 0.4 & 0 & 0\end{vmatrix}\quad T_{17}=\begin{vmatrix}0.65 & 0.35 & 0 & 0\\ 0.40 & 0.50 & 0.1 & 0\\ 0.20 & 0.70 & 0.1 & 0\\ 0.50 & 0.40 & 0.1 & 0\end{vmatrix}$$



注: 不同的小写字母表示组内具有显著性差异($P<0.05$), 图 5~9 同。

图 1 单因素实验结果

Fig.1 Results of single-factor experimental

表 3　感官评价结果

Table 3　Results of sensory evaluation

实验组合	色泽				口感				气味				组织状态			
	优	良	中	差	优	良	中	差	优	良	中	差	优	良	中	差
1	17	3	0	0	8	6	6	0	8	10	2	0	15	5	0	0
2	16	4	0	0	6	7	7	0	6	12	2	0	16	4	0	0
3	17	3	0	0	5	8	5	2	6	11	3	0	16	4	0	0
4	16	4	0	0	5	8	7	0	7	11	2	0	17	2	1	0
5	17	3	0	0	3	4	11	2	6	11	3	0	17	2	1	0
6	17	3	0	0	1	7	10	2	5	13	2	0	17	3	0	0
7	16	4	0	0	5	7	6	2	4	14	2	0	18	2	0	0
8	16	4	0	0	8	6	5	1	3	15	2	0	17	3	0	0
9	13	7	0	0	2	10	7	1	5	12	3	0	17	3	0	0
10	17	2	1	0	2	9	7	2	6	10	4	0	16	3	1	0
11	16	3	1	0	7	5	8	0	5	13	2	0	16	3	1	0
12	14	6	0	0	0	11	6	0	6	12	2	0	16	3	1	0
13	13	7	0	0	0	8	10	2	4	14	2	0	16	4	0	0
14	13	7	0	0	1	10	8	1	4	13	3	0	17	3	0	0
15	13	7	0	0	3	10	6	1	4	12	4	0	17	3	0	0
16	13	7	0	0	2	10	7	1	4	13	3	0	16	4	0	0
17	13	7	0	0	2	8	8	2	3	15	2	0	18	2	0	0

基于模糊数学感官矩阵和权重集, 可得到实验组合 1 号样品的感官评分: W_1=(0.20, 0.50, 0.20, 0.10), T_1={0.32, 0.265, 0.415, 0}, 同理可得 W_2~W_{17}, 对于 W 中的各变量, 进行优、良、中、差等级赋值 $K_1=W_1\times\begin{Bmatrix}95\\85\\75\\35\end{Bmatrix}$=81.975, 同理可计算出实验组合 K_2~K_{17} 的感官得分见表 4。

2.2.2　模型建立及显著性检验

基于单因素实验结果, 进行三因素三水平响应面考察实验, 结果见表 5。利用 Design-Expert 13 对响应面实验结果进行回归拟合, 得回归方程: Y=88–1.45A+0.5688B+1.05C+0.8688AB+0.9250AC+1.27B–4.76A^2–3.51B^2–1.94C^2。

表 4　配方优化的响应面结果

Table 4　Response surface results for formulation optimization

实验号	A: 木瓜叶提取液添加量/g	B: 甜味剂添加量/g	C: *DL*-苹果酸添加量/g	感官得分
1	60	1.5	0.0125	81.975
2	70	2.0	0.0075	78.100
3	60	2.5	0.0125	85.800
4	50	2.5	0.0100	80.750
5	60	1.5	0.0075	81.850
6	60	2.0	0.0100	86.975
7	70	1.5	0.0100	76.975
8	60	2.5	0.0075	80.600
9	50	2.0	0.0075	82.975
10	70	2.0	0.0125	81.475
11	70	2.5	0.0100	79.700
12	60	2.0	0.0100	87.750
13	50	1.5	0.0100	81.500
14	50	2.0	0.0125	82.650
15	60	2.0	0.0100	88.600
16	60	2.0	0.0100	88.675
17	60	2.0	0.0100	88.000

表 5 响应面回归模型方差分析

Table 5 Analysis of variance of response surface regression model

方差来源	平方和	自由度	均方	*F*	*P*	
模型	220.55	9	24.51	64.76	0.0001**	显著
A	16.89	1	16.89	44.64	0.0003**	
B	2.59	1	2.59	6.84	0.0347*	
C	8.77	1	8.77	23.17	0.0019**	
AB	3.02	1	3.02	7.98	0.0256*	
AC	3.42	1	3.42	9.04	0.0197*	
BC	6.44	1	6.44	17.02	0.0044**	
A^2	95.50	1	95.50	252.37	0.0001**	
B^2	51.76	1	51.76	136.79	0.0001**	
C^2	15.81	1	15.81	41.77	0.0003**	
残差	2.65	7	0.3784			
失拟项	0.7202	3	0.2401	0.4978	0.7034	不显著
纯误差	1.93	4	0.4822			
总离差	223.20	16				

注: *表示差异显著(P<0.05), **表示差异极显著(P<0.01)。

由表 5 可知, 感官评分回归模型显著性检验(P=0.0001<0.01), 说明二次多元回归模型极显著, 感官评分回归模型失拟性检验(P=0.7034>0.05), 说明木瓜叶饮料的感官评分二次回归模型与实际实验失拟项不显著, 表明此模型可用于实验拟合。回归诊断中决定系数 R^2=0.988, 信噪比=23.6527, 表明模型的拟合度和可信度均很高, 可用于木瓜叶饮料的感官评价。综上所述, 回归模型拟合程度良好, 实验误差小, 能够准确地分析木瓜叶饮料感官评分, 具有一定的实践指导意义。由回归系数显著性表明, 在所取因素水平范围内, 3 个因素对木瓜叶饮料感官评分的影响顺序为木瓜叶提取液添加量(*A*)>*DL*-苹果酸添加量(*C*)>甜味剂添加量(*B*), *A*、*B*、*C*、*AB*、*AC*、*BC*、A^2、B^2、C^2 的 *P* 均小于 0.05, 表示对木瓜叶饮料感官得分显著。

2.2.3 响应面实验结果分析

响应面等高线可以直观反映出两因素之间交互作用的强弱, 响应面越陡峭, 等高线越密集说明该因素对实验结果越显著。从图 2 可知木瓜叶饮料感官得分随着木瓜叶提取液、甜味剂、*DL*-苹果酸的变化呈现先上升后降低的趋势, 其中 *BC* 相较于 *AB*、*AC* 来讲更为陡峭, 表明 *BC* 对饮料感官得分影响极显著, 与表中结果一致。

通过响应面法优化木瓜叶饮料的工艺参数, 对最佳饮料工艺参数进行验证实验, 响应面理论预测值为提取物添加量 60 mL、甜味剂添加量 2 g、*DL*-苹果酸添加量 0.01 g, 此条件下感官得分理论值为 88 分, 在此工艺下木瓜叶饮料的感官得分为 88.08 分, 与预测值偏差 0.09%。说明此模型具有良好的拟合性和有效性。

2.3 木瓜叶饮料的风味特征分析

2.3.1 顶空固相微萃/气相色谱-质谱法检测风味物质

利用顶空固相微萃/气相色谱-质谱法, 在木瓜叶饮料中共检测出 19 种挥发性香气化合物, 具体种类如表 6 所示, 这些化合物包括 7 种酯类、2 种醇类、2 种酚类、3 种酮类、3 种烃类、2 种其他物质。其中, 酯类物质主要呈现出复合型果香香气; 芳樟醇作为一种常见香料, 其相对含量为 8.289%, 具有花香、木香并略带青香, 其香味柔和、清新飘逸, 能为饮料提供愉悦的香气特征[19]; 醇类化合物整体有助于使产品香味更显柔和; 烷烃类物质可能源于加工过程中的美拉德反应及脂质降解, 带有清甜香味。总体而言, 木瓜叶饮料的香气特征是由多种挥发性物质以特定浓度共同作用的结果, 部分化合物或因香气阈值较高、或因含量较低, 在感官评价中不易被直接感知。

2.3.2 电子鼻气味分析

电子鼻是模拟人体嗅觉, 对挥发性气味非常敏感, 不同气味的轻微变化就可以通过传感器响应值反映出来, 因此常用于检测和区分复杂的气味信息[20–21]。为了更直观分析木瓜饮料的香气特征, 将样品置于 10 个不同的电子鼻传感器下的响应强度峰值绘成雷达图。如图 3 所示, 其中 W1C、W3C、W5C 3 种传感器对产品响应值较高分别达到了 1.55、1.72、1.49。这 3 种传感器对芳香族化合物较为灵敏, 这说明木瓜叶饮料的香气成分是以芳香族化合物为主, 其他化合物为辅综合作用的结果。

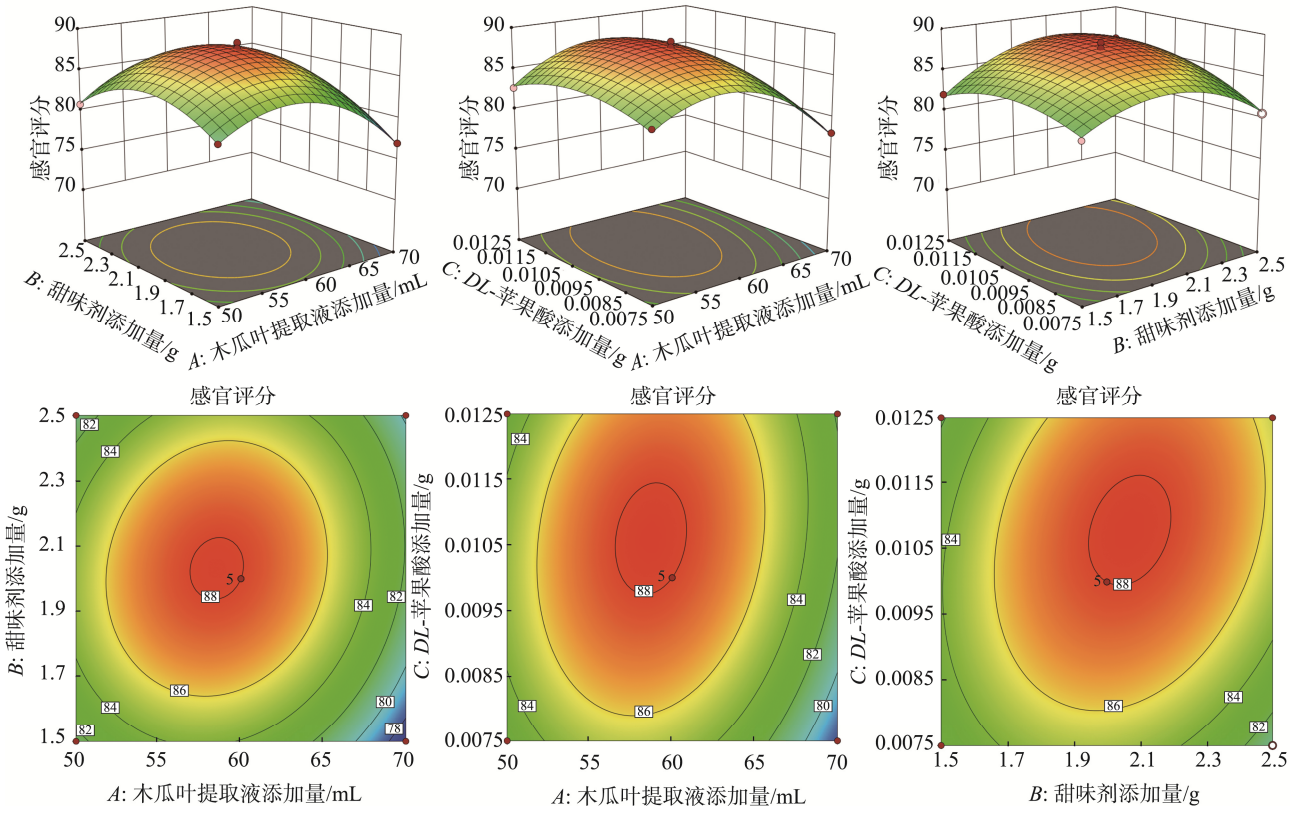


图 2　响应面分析图

Fig.2　Analysis plot of response surface methodology

表 6　木瓜叶饮料挥发性物质组成及含量

Table 6　Composition and content of volatile substances in *Chaenomeles speciosa* leaf beverage

序号	保留时间/min	名称	CSA 号	相对含量/%
1	0.891	2-肼基-2-氧乙酸	515-96-8	6.854
2	1.961	4,6-二叔丁基间苯二酚	5374-06-1	26.58
3	2.444	环丁胺	2516-34-9	2.347
4	2.970	二氯甲烷	75-09-2	1.884
5	3.036	乙醇酸	79-14-1	5.020
6	3.930	光甘草定	59870-68-7	0.738
7	3.954	2-羟基-4-肼基嘧啶	23899-73-2	1.983
8	3.991	2-环己基-2-羟基苯乙酸甲酯	10399-13-0	0.698
9	4.033	香草酸	121-34-6	2.061
10	4.136	1-(4-氟苯基氨基甲酰基)环丙烷羧酸甲酯	1345847-71-3	0.832
11	4.232	N-月桂基吡咯烷酮	2687-96-9	1.156
12	4.275	γ-氨基-环己烷戊酸乙酯	1339568-26-1	0.434
13	6.794	9,10-2-甲基-3-(三甲基甲硅烷基)氧基蒽二酮	91701-15-4	2.667
14	10.516	3,5-双(三甲基甲硅氧基)苯甲酸三甲硅烷基酯	79314-27-5	13.928
15	20.062	芳樟醇	78-70-6	8.289
16	23.005	二炔丙胺	6921-28-4	2.718
17	25.796	2,2,4-三甲基戊二醇异丁酯	6846-50-0	0.971
18	26.394	水杨酸苄酯	118-58-1	1.923
19	33.874	甲基氢辛基膦酸酯	25371-55-5	18.919

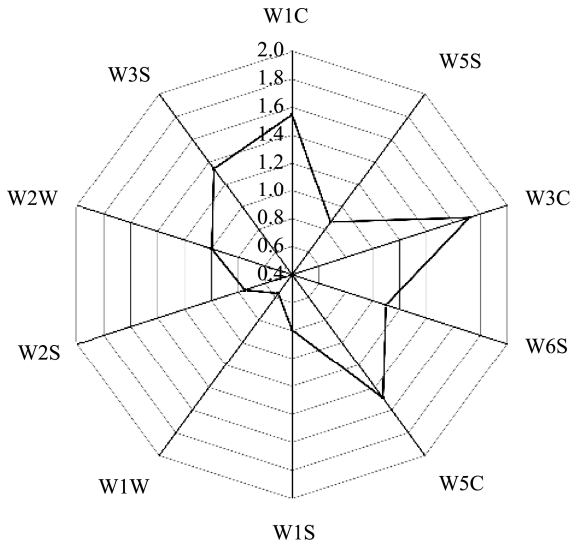


图 3 木瓜叶饮料电子鼻雷达图

Fig.3 Electronic nose radar diagram of *Chaenomeles speciosa* leaf beverage

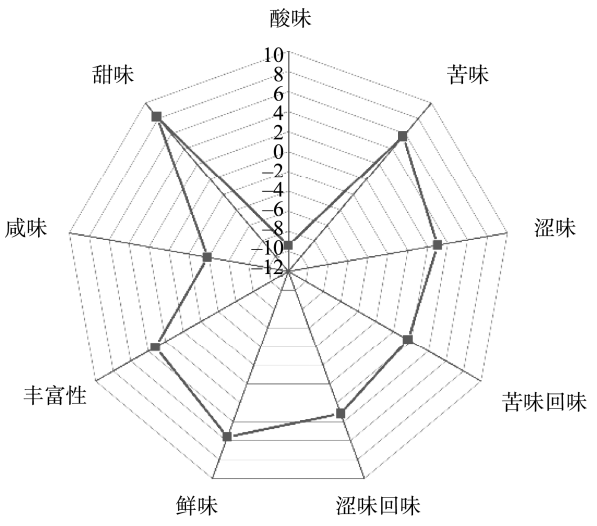


图 4 木瓜叶饮料电子舌雷达图

Fig.4 Electronic tongue radar diagram of *Chaenomeles speciosa* leaf beverage

2.3.3 电子舌滋味分析

电子舌是一种模仿人体舌部味觉的仿生系统，因其可以系统的分析食品中的低挥发性或非挥发性化合物，具有高灵敏、速度快等优点常被用于食品滋味测定特征的测定[22–23]。为了更直观的分析木瓜叶饮料的滋味特征，将产品置于食品五味传感器下根据响应值绘制成雷达图。如图 4 所示，木瓜叶饮料滋味比较丰富，以甜味、苦味、涩味、鲜味为主，其中甜味响应值较大为 8.21，酸味与咸味响应值接近于无味点值；苦味、涩味、鲜味等 3 种滋味的回味响应值较高分别为 1.67、3.14、3.17，这说明 3 种味道在口腔残留程度较高，停留时间较长，因此木瓜叶饮料的口感属于入口甜味较大，后续随着时间推移苦涩味较重，与受试者口感品尝一致。

2.4 木瓜叶饮料货架期预测

2.4.1 木瓜叶饮料贮藏期间总酸与 pH 变化

总酸和 pH 的变化是评价饮料体系稳定的重要指标，他们的变化程度可以影响饮料的品质[24]。在 3 个不同贮藏温度下饮料总酸与pH变化如图5所示，木瓜叶饮料总酸含量随着贮藏时间的增长逐渐变大，不同贮藏温度下总酸的含量增长程度不同，温度越高增长程度越大，由最初的 0.1956、0.1932、0.1980 g/L 增长至 0.3216、0.4476、0.5184 g/L，分别增长 39.17%、56.83%、61.80%。木瓜叶饮料总酸上升的原因可能是因为饮料中的糖类和蛋白质等有机物分解导致饮料中的酸性物质增加[25]，随着温度升高总酸和 pH 的变化速度变快，这可能是因为高温会破坏饮料体系稳定性，导致了氧化分解等反应速度加快，加速了有机大分子物质

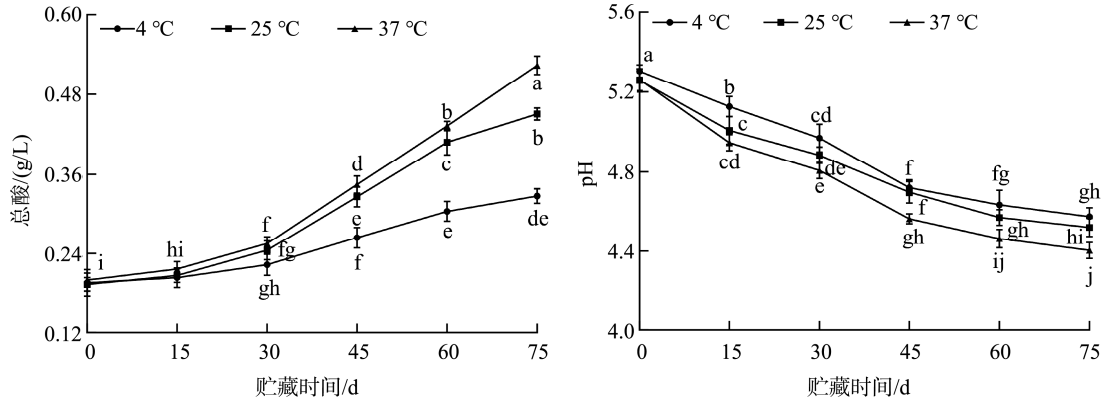


图 5 贮藏温度和贮藏时间对饮料总酸和 pH 的影响

Fig.5 Effects of storage temperature and time on the total acid and pH of beverage

的降解[26]。刘恒等[27]研究了储存时间对复合酵素总酸与 pH 的影响, 研究结果显示了随着温度与时间的变化, 酵素的总酸和 pH 出现了上升和下降趋势, 这与本研究一致。

2.4.2　木瓜叶饮料贮藏期间色度值变化

颜色是食品的重要参数, 食品颜色的好坏直接影响着食品的可接受度, 因此食品的色度变化常作为食品品质分析的重要指标[28]。在不同温度贮存下, 木瓜叶饮料的颜色相关指标如图 6 所示, 随着贮藏时间的增长, 饮料的 L^* 逐渐降低, a^*、b^*均呈现上升趋势。ΔE 代表颜色的变化程度, ΔE 越大代表颜色变化越明显, 随着时间和温度升高情况下 ΔE 变化程度越来越大, 分别为 6.76、10.20、11.50, 这可能是因为饮料在贮藏期间发生了褐变, 且温度越高饮料的褐变程度越大[29]。陈金华等[30]探究了不同贮藏时间和温度下茶饮料的色度值变化得出随着贮藏时间的增大和温度升高, 饮料色度值变化增大, 低温条件下可以降低饮料褐变程度, 减缓饮料颜色变化, 这与本研究结果一致。

2.4.3　木瓜叶饮料贮藏期间微生物指标变化

菌落总数食品品质安全检测的重要指标, 在不同贮藏温度下木瓜叶饮料微生物存活数量如表 7 所示, 随着贮藏时间的增长, 木瓜叶饮料的菌落总数明显增加, 低温条件下的菌落总数低于高温条件下, 这可能是因为低温状态下微生物的生长代谢缓慢导致[31]。

2.4.4　木瓜叶饮料贮藏期间 DPPH 自由基清除率变化

DPPH 自由基在避光条件下具有极强的稳定性[32], 常用来评价样品的抗氧化能力。如图 7 所示, 样品在 3 个温度条件下在贮藏开始时 DPPH 自由基清除率分别为 91.2%、91.4%、91.2%, 这表明木瓜叶饮料具有较高含量的抗氧化物质, 对 DPPH 自由基清除能力较强。随着贮藏时间增长, DPPH 自由基清除率降低至 87.9%、87.8%、88.2%。统计分析表明, 除 0~15 d 外, 其他各贮藏时间点之间的 DPPH 自由基清除率均无显著性差异(P<0.05)。这说明木瓜叶饮料中抗氧化成分较稳定, 能够保持较好的抗氧化能力。

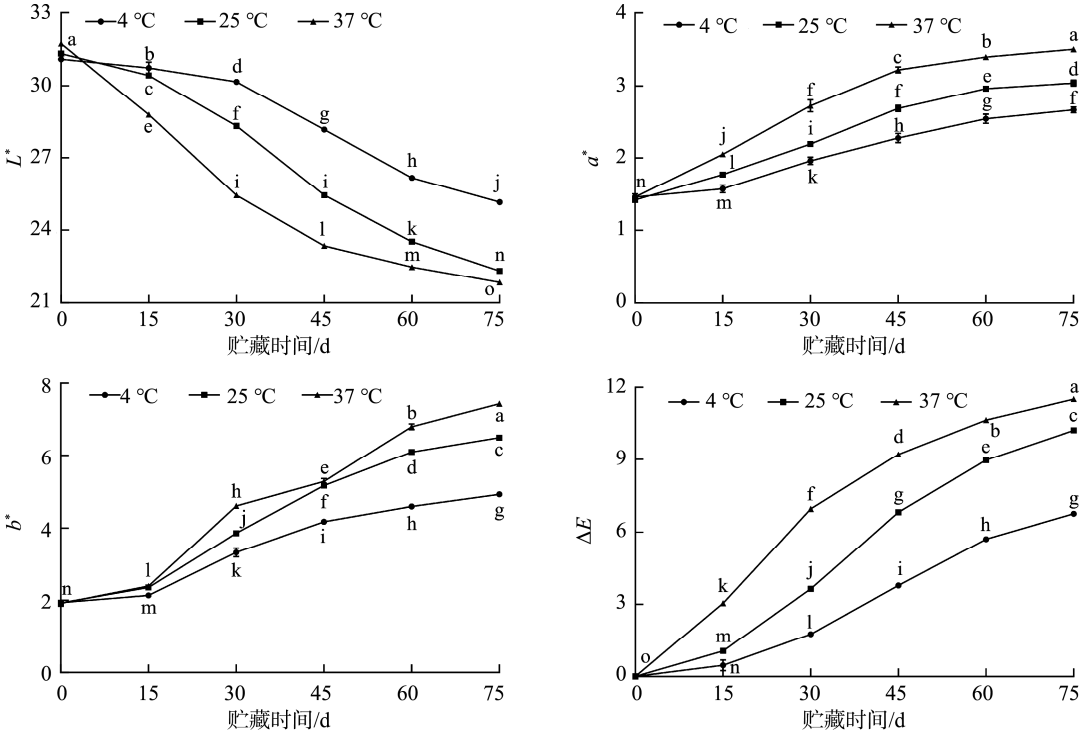


图 6　贮藏温度和贮藏时间对饮料颜色的影响

Fig.6　Effects of storage temperature and time on the color of beverage

表 7　贮藏温度和贮藏时间对饮料微生物存活数量的影响

Table 7　Effects of storage temperature and time on the survival quantity of microorganisms of beverage

测定指标	贮藏温度/℃	贮藏时间/d					
		0	15	30	45	60	70
菌落总数/[lg(CFU/g)]	4	10	2700	4200	5500	5800	6000
	25	10	4800	5600	7000	7800	8000
	37	10	6000	6700	8100	8600	9800

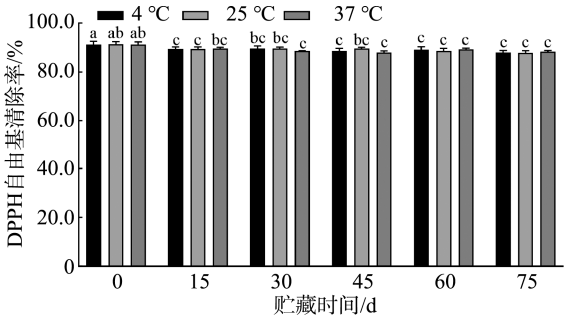


图 7 饮料贮藏过程中的 DPPH 自由基清除率变化

Fig.7 Changes in the DPPH free radical scavenging rate of the beverage during storage

2.4.5 木瓜叶饮料贮藏期间总还原力的变化

总还原力测定可以作为抗氧化物质是否能提供电子的评定指标，抗氧化物质提供电子使得三价铁离子还原为二价铁离子并生成普鲁士蓝，因此还原能力越强生成量越多，吸光度越大。由图 8 可得木瓜饮料在 0 d 时的总还原力与 75 d 时无显著性差异，结果表明木瓜叶饮料在贮藏过程中总还原力趋于稳定，抗氧化活性成分较稳定，具有较好的抗氧化能力。

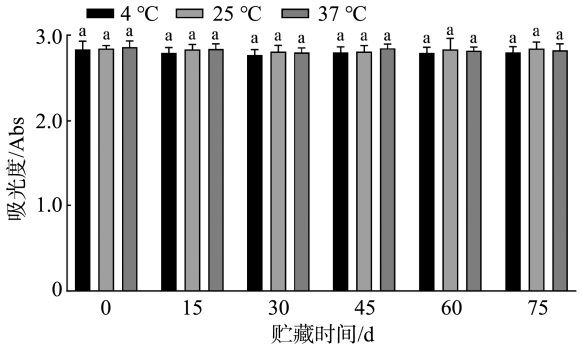


图 8 饮料贮藏过程中总还原力变化

Fig.8 Changes in the total reducing power of the beverage during storage

2.4.6 木瓜叶饮料贮藏期间感官评分的变化

由图 9 可知，饮料的感官评分在贮藏期间呈现下降趋势，并且贮藏温度越高，评分下降的速率越快，表明高温会显著加速饮料感官品质的劣变过程。感官评分随贮藏时间延长显著下降，感官得分分别由 86.55、86.55、86.40 下降至 78.25、75.90、73.75。主要原因可能是由于微生物的繁殖导致饮料产生异味和絮状沉淀，导致饮料的口感和风味发生变化。且饮料在高温贮藏过程中破坏了饮料的色泽，影响了饮料感官的接受程度。

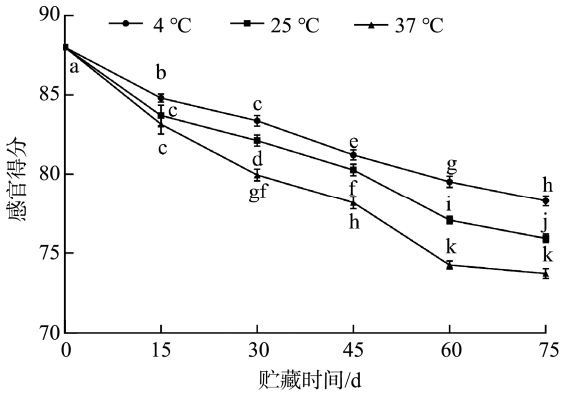


图 9 饮料贮藏过程中感官评分变化

Fig.9 Changes in the sensory score of the beverage during storage

2.4.7 饮料货架期模型的建立

木瓜叶饮料在不同加速温度下的贮藏期间的各指标相关性如表 8 所示，Pearson 相关系数的绝对值越大，说明两者相关性越高。各指标相关性均大于 0.9 达到了显著相关，因此选择 pH、总酸、Δ*E*、菌落总数作为关键品质因子建立货架期模型。

由表 9 可知 pH、总酸、Δ*E*、菌落总数等关键品质因子均符合零级动力学模型，但是拟合模型 R^2 值较低，因此采一级动力学模型对品质因子再次进行拟合得到拟合模型 R^2 均高于零级动力学模型，但 pH、总酸、Δ*E* 关键因子不符合一级动力学模型未成功拟合，因此选择菌落总数作为货架期模型的限制因子。

表 8 饮料在不同贮藏温度下各指标的相关性

Table 8 Correlations among various indices of the beverage under different storage temperatures

温度	指标	感官评分	pH	总酸	L^*	a^*	b^*	Δ*E*	菌落总数
4 ℃	感官评分	1	0.993**	–0.982**	0.976**	–0.991**	–0.980**	–0.989**	–0.934**
	pH		1	–0.962**	0.952**	–0.991**	–0.989**	–0.974**	–0.958**
	总酸			1	–0.999**	0.978**	0.959**	0.998**	0.853*
	L^*				1	–0.967**	–0.945**	–0.995**	–0.837*
	a^*					1	0.996**	0.987**	0.929**
	b^*						1	0.972**	0.937**
	Δ*E*							1	0.877*
	菌落总数								1

表 8(续)

温度	指标	感官评分	pH	总酸	L^*	a^*	b^*	ΔE	菌落总数
25 ℃	感官评分	1	0.981**	–0.972**	0.983**	–0.98**	–0.978**	–0.981**	–0.914**
	pH		1	–0.935**	0.97**	–0.992**	–0.975**	–0.969**	–0.964**
	总酸			1	–0.99**	0.958**	0.975**	0.989**	0.812*
	L^*				1	–0.988**	–0.996**	–1**	–0.87**
	a^*					1	0.994**	0.988**	0.927**
	b^*						1	0.997**	0.883*
	ΔE							1	0.868*
	菌落总数								1
37 ℃	感官评分	1	0.981**	–0.935**	0.978**	–0.979**	–0.988**	–0.987**	–0.914*
	pH		1	–0.902**	0.987**	–0.988**	–0.954**	–0.984**	–0.955**
	总酸			1	–0.874**	0.877**	0.949**	0.905**	0.777**
	L^*				1	–1	–0.966**	–0.997**	–0.941**
	a^*					1	0.966**	0.997**	0.937**
	b^*						1	0.984**	0.86*
	ΔE							1	0.918**
	菌落总数								1

注: *表示差异显著(P<0.05), **表示差异极显著(P<0.01)。

表 9　木瓜叶饮料在不同温度下 pH、总酸、Δ*E*、菌落总数的动力学模型参数

Table 9　Kinetic model parameters of pH, total acid, Δ*E* and total colonies of *Chaenomeles speciosa* leaf beverage at different temperatures

指标	温度	零级		一级	
		k	R^2	k	R^2
pH	4	–0.01000	0.97025	0.00912	0.98687
	25	–0.01029	0.95852	0.01736	0.99336
	37	–0.00954	0.97310	N	N
总酸	4	0.00200	0.92179	N	N
	25	0.00372	0.95748	N	N
	37	0.00446	0.94269	–0.01928	0.98882
Δ*E*	4	0.10700	0.94812	N	N
	25	0.14662	0.97811	N	N
	37	0.15230	0.95191	0.01699	0.98783
菌落总数	4	77.23810	0.86574	0.03635	0.99671
	25	95.90476	0.81526	0.04819	0.98221
	37	110.76190	0.80159	0.05355	0.96806

注: N 表示方程未拟合。

菌落总数的 Arrhenius 方程及 E_a、k_0 值见表 10, 对木瓜叶饮料在 4、25、37 ℃温度下贮藏的菌落总数进行回归拟合分析, 得到线性回归方程、拟合系数 R^2; 线性方程拟合系数 $R^2 \geqslant 0.99$; 拟合度高, 具有较好的可靠性和稳定性; 通过计算得到木瓜叶饮料菌落总数的活化能 E_a、指前因子 k_0 值, 将上述参数代入 Arrhenius 方程中可得预测模型[公式(13)]。

$$t = \frac{\ln \frac{A}{10}}{k_0} \times \exp \frac{-E_a}{RT} \tag{13}$$

2.4.8　木瓜叶饮料货架期模型的预测与评价

木瓜叶饮料的保质期判断如下: 将产品各放置在 4、25 和 37 ℃条件下保存, 直至木瓜叶饮料菌落总数指标高于国标限定 10^4 为木瓜叶饮料的货架期。由表 11 可知, 产品在 4、25、37 ℃条件下的货架期的预测值和实测值, 两

者的相对误差小于 10%, 预测模型可靠、有效。

表 10 菌落总数的 Arrhenius 方程及 E_a、k_0 值
Table 10 Arrhenius equation and E_a and k_0 values for the total number of colonies

指标	回归方程	R^2	E_a/(KJ/mol)	K_0/(KJ/mol)
菌落总数	$\ln k=-1201.96/T+\ln k_0$	0.995	8496.98	1.46

表 11 不同贮藏温度下饮料货架期预测值和实测值
Table 11 Predicted and measured values of beverage shelf life at different storage temperatures

指标	贮藏温度/℃	货架期预测值/d	货架期实测值/d	相对误差/%
菌落总数	4	189	195	3.2
	25	146	152	3.9
	37	128	120	6.3

3 结 论

本研究以木瓜叶为原料, 感官评分为指标对饮料制作工艺进行优化, 响应面实验设计表明各因素对木瓜叶饮料影响大小依次为提取液添加量(*A*)>*DL*-苹果酸添加量(*C*)>甜味剂添加量(*B*), 饮料最佳配方为木瓜叶提取液添加量 60 mL、甜味剂添加量 2 g、*DL*-苹果酸添加量 0.01 g, 此条件下最高得分为 88.08 分。风味分析结果表明, 在木瓜叶饮料中共鉴定出 19 种挥发性风味物质, 其香气轮廓以芳香族化合物为主。滋味分析显示, 饮料的味觉特征表现为甜、苦、涩、鲜并存, 且回味以苦味和涩味为主导, 因而形成了入口清甜、后味回甘(苦涩)的独特层次感。基于 Arrhenius 方程构建的货架期模型显示, 在 4、25、37 ℃储存条件下木瓜叶饮料保质期分别为 189、146、128 d, 且在储存期间木瓜叶饮料能够保持较好的抗氧化能力。综上所述, 木瓜叶饮料的研制不仅为木瓜叶的资源化利用提供了新思路, 也为提升整个木瓜产业的资源利用率, 促进副产物的高值化利用开辟了新方向。

参考文献

[1] 中国科学院《中国植物志》编辑委员会. 中国植物志[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
Flora of China Editorial Committee of Chinese Academy of Sciences. Flora of China [M]. Beijing: Science Press; St. Louis: Missouri Botanical Garden Press, 1992.

[2] 王青云. 湖北实施“十大楚药”良种工程[J]. 中医药管理杂志, 2021, 29(18): 119.
WANG QY. Hubei to implement the “Ten chu herbal medicines” seed project [J]. Journal of Traditional Chinese Medicine Management, 2021, 29(18): 119.

[3] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典: 第一部[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2020.
Chinese Pharmacopoeia Commission. Pharmacopoeia of the People’s Republic of China: Volume I [M]. Beijing: China Medical Science Press, 2020.

[4] YAO LL, ZHU SY, HU ZY, *et al*. Anti- Inflammatory constituents from *Chaenomeles speciosa* [J]. Natural Product Communications, 2020, 15(3): 1–5.

[5] 尹凯, 高慧媛, 李行诺, 等. 皱皮木瓜的化学成分[J]. 沈阳药科大学学报, 2006(12): 760-763.
YI K, GAO HY, LI XN, *et al*. Chemical constituents of *Chaenomeles speciosa* (sweet) nakai [J]. Journal of Shenyang Pharmaceutical University, 2006(12): 760–763.

[6] HUANG DD, JIANG SG, DU ZN, *et al*. Analgesic and anti-arthritic activities of polysaccharides in *Chaenomeles speciosa* [J]. Frontiers in Pharmacology, 2022, 13: 744915.

[7] HOU MY, SHI JC, LIN CY, *et al*. Ultrasound-assisted extraction of triterpenoids from *Chaenomeles speciosa* leaves: Process optimization, adsorptive enrichment, chemical profiling, and protection against ulcerative colitis [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2024, 111: 107136.

[8] MENG XT, YE DD, PAN Y, *et al*. Optimisation of not-from-concentrate Goji juice processing using fuzzy mathematics and response surface methodology and its quality assessment [J]. Applied Sciences, 2024, 14(18): 8393.

[9] 沙芮, 丁洁, 陈静, 等. 模糊数学感官评价法优化桑叶速溶固体茶配方[J]. 食品工业科技, 2022, 43(11): 200–207.
SHA R, DING J, CHEN J, *et al.* Optimization of Mulberry leaf instant solid tea formula by fuzzy mathematics sensory evaluation method [J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(11): 200–207.

[10] ZHAO SS, HAN XY, LIU B, *et al*. Shelf-life prediction model of fresh-cut potato at different storage temperatures [J]. Journal of Food Engineering, 2022, 317: 110867.

[11] 董浩, 郑诗伟, 崔方超, 等. 水产品货架期质量预测模型的研究进展[J]. 渔业研究, 2024, 46(5): 547–562.
DONG H, ZHENG SW, CUI FC, *et al.* Recent advances in shelf life prediction models for monitoring aquatic product quality [J]. Journal of Fisheries Research, 2024, 46(5): 547–562.

[12] 王婷婷, 林健, 屈鹏飞, 等. 巴东皱皮木瓜发育及主要成分的变化分析[J]. 防护林科技, 2021(1): 6–9.
WANG TT, LIN J, QU PF, *et al.* Change regularities of active components from fresh fruit of *Chaenomeles speciosa* during fruit development [J]. Protection Forest Science and Technology, 2021(1): 6–9.

[13] 郑润博, 冉亚兰, 彭诗琴, 等. 皱皮木瓜叶提取物降尿酸及美白活性[J]. 天然产物研究与开发, 2025, 37(9): 1715–1723.
ZHENG RB, RAN YL, PENG SQ, *et al.* Whitening and uric acid-lowering activities of *Chaenomeles speciosa* (sweet) nakai leaf extract [J]. Natural Product Research and Development, 2025, 37(9): 1715–1723.

[14] HOU MY, LIN CY, ZHU L, *et al.* Phenolics from *Chaenomeles speciosa* leaves: Ionic liquid-based ultrasound-assisted extraction, adsorptive purification, UPLC–QqQ–MS/MS quantification, and bioactivity assessment [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2025, 114: 107282.

[15] 王艳, 张峥婧, 王汉屏. 木瓜富硒保健茶的工艺研究[J]. 陕西农业科学, 2025, 56(3): 49–50, 140.
WANG Y, ZHANG ZJ, WANG HP. Processing technology for

selenium-enriched *Chaenomeles speciosa* health tea [J]. Shanxi Journal of Agricultural Sciences, 2025, 56(3): 49–50, 140.

[16] 王永娟. 临沂市皱皮木瓜叶茶加工工艺技术初报[J]. 山东林业科技, 2015, 45(2): 85–87.
WANG YJ. A preliminary study on the processing technology of *Chaenomeles speciosa* leaf tea in Linyi City [J]. Shandong Forestry Science and Technology, 2015, 45(2): 85–87.

[17] 孙慧茹, 谭生权, 方昕悦, 等. 恩施地区三种重楼属植物活性成分与抗氧化活性研究[J]. 湖北农业科学, 2022, 61(12): 67–71.
SUN HR, TAN SQ, FANG XY, *et al.* Study on the active components and antioxidant activity of three *Paris* plants in Enshi [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2022, 61(12): 67–71.

[18] 袁名远, 赵苓云, 吴丽雯, 等. 粉葛愈伤组织不同极性提取物生物活性与功能成分分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(13): 239–248.
YUAN MY, ZHAO LY, WU LW, *et al.* Analysis of bioactivity and functional components of different polar extracts from callus of *Pueraria thomsonii* [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(13): 239–248.

[19] CHEN LL, NING FJ, ZHAO L, *et al*. Quality assessment of royal jelly based on physicochemical properties and flavor profiles using HS-SPME-GC/MS combined with electronic nose and electronic tongue analyses [J]. Food Chemistry, 2023, 403: 134392.

[20] 高小妹, 隋勇, 祝振洲, 等. 乳酸菌发酵对米乳品质、风味和抗氧化活性的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(4): 127–135.
GAO XM, SUI Y, ZHU ZZ, *et al.* Effect of lactic acid bacteria fermentation on quality, flavour and antioxidant activity of rice milk [J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(4): 127–135.

[21] 周大宇, 门雨薇, 金子灿, 等. 植物乳杆菌发酵对富硒发芽糙小米饮料风味特征的影响[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(3): 52–58.
ZHOU DY, MEN YW, JIN ZC, *et al.* Effect of *Lactobacillus* plantarum fermentation on flavor characteristics of selenium-rich sprouted brown millet beverage [J]. Food Research and Development, 2024, 45(3): 52–58.

[22] 辛光斌, 许玉娟, 李聪, 等. 基于 GC-MS、电子鼻和电子舌分析火腿肠贮藏期间的风味变化[J]. 食品工业科技, 2025, 46(9): 295–306.
XIN GB, XU YJ, LI C, *et al.* Exploration of the evolution of flavor profiles in ham sausage during storage based on GC-MS, electronic nose and electronic tongue [J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(9): 295–306.

[23] LU L, HU ZQ, HU XQ, *et al*. Electronic tongue and electronic nose for food quality and safety [J]. Food Research International, 2022, 162: 112214.

[24] 周鑫, 马宁, 王鑫, 等. 植物蛋白发酵肉在发酵和贮藏过程中的营养品质变化[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(17): 86–94.
ZHOU X, MA N, WANG X, *et al.* Changes in nutritional quality of fermented plant-protein meat during fermentation and storage [J]. Food Research and Development, 2024, 45(17): 86–94.

[25] KÖRZENDÖRFER A, HINRICHS J. Manufacture of high-protein yogurt without generating acid whey-impact of the final pH and the application of power ultrasound on texture properties [J]. International Dairy Journal, 2019, 99: 104541.

[26] SINGH SP, RISHAV K, SINGH KS, *et al*. Unraveling the effect of storage duration on antioxidant properties, physicochemical and sensorial parameters of ready to serve Kinnow-amla beverages [J]. Applied Food Research, 2022, 2(1): 100057.

[27] 刘恒, 范柳萍, 张涛, 等. 复合酵素的贮藏稳定性及货架期研究[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(1): 59–66.
LIU H, FAN LP, ZHANG T, *et al*. Storage stability and shelf-life of complex Jiaosu [J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(1): 59-66.

[28] 李雪铭. 饮料行业不容小觑的助力——天然色素[J]. 酒·饮料技术装备, 2022(6): 81–83.
LI XM. A powerful ally in the beverage industry: Natural pigments [J]. Brew & Beverage Technology and Equipment, 2022(6): 81–83.

[29] 张锐, 郎春田, 陈玉成, 等. 沙棘复合饮料在贮藏中非酶褐变机理研究[J]. 食品研究与开发, 2015, 36(6): 105–109.
ZHANG R, LANG CT, CHEN YC, *et al.* Research on nonenzymatic browning of compound beverage *Seabuckthorn*, red jujube, carrot and peanut during storage [J]. Food Research and Development, 2015, 36(6): 105–109.

[30] 陈金华, 王英姿, 黄建安. 不同贮藏温度对茶饮料品质的影响研究[J]. 中国茶叶加工, 2020(4): 60–68.
CHEN JH, WANG YZ, HUANG JAN. Effect of different storage temperatures on the quality of tea beverages [J]. China Tea Processing, 2020(4): 60–68.

[31] 沈旺旺, 高振洪, 樊沁昕, 等. 温度对自热食品理化指标影响及其货架期预测方法[J]. 包装工程, 2021, 42(9): 141–151.
SHEN WW, GAO ZH, FAN QX, *et al*. Impact of temperature on physical and chemical properties of self-heating food and its shelf life prediction estimation [J]. Packaging Engineering, 2021, 42(9): 141–151.

[32] BAN QF, LIU ZF, YU CW, *et al*. Physiochemical, rheological, microstructural, and antioxidant properties of yogurt using monk fruit extract as a sweetener [J]. Journal of Dairy Science, 2020, 103(11): 10006–10014.

(责任编辑: 韩晓红　冯东慧)