DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251127004
引用格式: 韦美晴, 黄贵灵, 袁芳, 等. 槐花米糕工艺优化及其货架期模型的建立[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(6): 156–166.
WEI MQ, HUANG GL, YUAN F, *et al*. Optimization of *Sophora japonica* L. rice cake process and establishment of shelf life model [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(6): 156–166. (in Chinese with English abstract).

槐花米糕工艺优化及其货架期模型的建立

韦美晴, 黄贵灵, 袁　芳, 余森艳, 卢珍兰, 王志存*

(广西民族师范学院农业与生物学院, 崇左　532200)

摘　要: 目的　以广西特色槐花(*Sophora japonica* L.)为原料开发一款槐花米糕产品, 通过优化其生产工艺并延长货架期, 建立相应的货架期预测模型。**方法**　采用单因素结合响应面设计试验, 确定了最佳工艺配方, 在此基础上, 添加 2.5 g/kg 丙酸钙作为防腐剂, 经真空包装后分别于 20 ℃和 6 ℃条件下贮藏, 定期测定 pH、感官评分、酸价、水分含量和菌落总数等指标。基于零级反应动力学与 Arrhenius 方程构建货架期模型, 并采用模糊权重法进行综合质量评价。**结果**　槐花米糕最佳工艺配方为大米与面粉比例 2.5:1 (*m*:*m*), 槐花添加量 1.50%, 白糖添加量 15.0%, 酵母添加量 0.75%, 发酵时间 50 min。在 20 ℃与 6 ℃贮藏条件下, 除酸价外, 槐花米糕的货架期预测模型误差均低于 10%, 表明该模型具有较高的准确性。**结论**　本研究成功优化了槐花米糕的生产工艺, 并建立了可靠的货架期预测模型, 为其实际生产与贮藏提供了理论依据。

关键词: 槐花米糕; 工艺优化; 动力学模型; 货架期模型

Optimization of *Sophora japonica* L. rice cake process and establishment of shelf life model

WEI Mei-Qing, HUANG Gui-Ling, YUAN Fang, YU Sen-Yan,
LU Zhen-Lan, WANG Zhi-Cun*

(*College of Agriculture and Biology*, *Guangxi Minzu Normal University*, *Chongzuo* 532200, *China*)

ABSTRACT: Objective　To develop a *Sophora japonica* L. rice cake product using Guangxi-specific *Sophora japonica* L. as the raw material, optimize its production process, extend its shelf life and establish a corresponding shelf life prediction model. **Methods**　Single-factor experiments combined with response surface methodology were employed to determine the optimal formulation. Subsequently, 2.5 g/kg calcium propionate was added as a preservative, and the products were vacuum-packaged and stored at 20 °C and 6 °C, respectively. Periodic measurements were conducted for indicators including pH, sensory score, acid value, moisture content and total viable count. A shelf life model was constructed based on zero-order reaction kinetics and the Arrhenius equation, and comprehensive quality evaluation was performed using the fuzzy weight method**. Results**　The optimal formulation for *Sophora japonica* L. rice cake was determined as follows: Rice-to-flour ratio of 2.5:1 (*m*:*m*), *Sophora japonica* L. addition of 1.50%, sugar content of 15.0%, yeast dosage of 0.75% and fermentation time of 50 min.

收稿日期: 2025-11-27
第一作者: 韦美晴(1998—), 女, 硕士, 主要研究方向为食品加工。E-mail: 1324524612@qq.com
***通信作者:** 王志存(1981—), 男, 硕士, 讲师, 主要研究方向为天然产物加工提取。E-mail: 859128168 @qq.com

Under storage conditions of 20 °C and 6 °C, the prediction errors of the shelf life model were both below 10% except for the acid value, indicating high accuracy of the model. **Conclusion** This study successfully optimize the production process of *Sophora japonica* L. rice cake and establish a reliable shelf life prediction model, providing a theoretical basis for its practical production and storage.

KEY WORDS: *Sophora japonica* L. rice cake; process optimization; kinetic model; shelf life model

0　引　言

槐花(*Sophora japonica* L.)性味微苦, 含有蛋白质、维生素如维生素 C、E、矿物质如 Ca、Fe、Zn、膳食纤维等物质成分, 既是药材也是食品。GONG 等[1]、SHI 等[2]研究发现, 槐花提取物具备抗炎、抗氧化的效能, 可缓解肺部的炎症及氧化应激问题。在食用方面, 有民间小吃槐花粉、槐花粥、槐花蜜等美食, 顾丽雅等[3]将槐花提取物加入中式香肠中, 研究发现槐花提取物可维持香肠在贮藏期间的品质。米糕以普通大米为原料, 把浸泡好的大米磨成细腻的米浆, 加入酵母、白糖进行发酵, 发酵的过程赋予了米糕独特的蓬松口感和微微的酸甜味道[4], 李志鑫等[5]以绿茶粉为原料研制绿茶米糕, 研究发现绿茶的加入能有效提高米糕的抗氧化性及降低其体外消化率。

现阶段市场上的米糕种类匮乏, 营养成分单一, 并且米糕水分含量高、营养成分丰富, 在储藏过程中极易受微生物污染, 导致产品发霉、变质[6]。而槐花多用于制作民间小吃槐花粉、槐花蜜等, 对于槐花的开发利用较少。食品货架期预测模型通过对食品物理化学性质、微生物生长动力学、包装条件等多种因素的综合分析, 可以准确预测食品在不同贮存温度下, 如贮藏时间、环境条件、品质变化等多个因素的货架期期限[7]。CUI 等[8]、MAIMUNAH 等[9]、ZHAO 等[10]利用一级模型描述微生物生长规律, 建立菌落浓度对数和时间等变量的函数关系。

基于此, 本研究将广西特色植物槐花与大米结合, 通过工艺优化制成一款具有地域特色的槐花米糕, 同时对槐花米糕在不同温度贮存下的理化与微生物等特性进行探究, 并建立产品货架期预测模型, 为开发特色植物和槐花米糕的实际贮藏提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　材料与试剂

槐花购于百济堂大药房; 大米、面粉、碳酸钠、白糖、酵母均购于忆冠生活超市。

无水葡萄糖、无水乙醇、氢氧化钾、酚酞、异丙醇、氯化钠(分析纯, 成都市科隆化学品有限公司); 石油醚、邻苯二钾酸氢钾(分析纯, 天津奥普升化工有限公司); 酵母浸出膏(生物试剂, 广东环凯微生物科技有限公司); 琼脂(生物试剂, 上海源叶生物科技有限公司); 胰蛋白胨(生物试剂, 北京奥博星生物技术有限公司)。

1.2　仪器与设备

LQ-C1002 电子天平(精度 0.001 g, 上海瑶新电子有限公司); L18-Y9155 破壁机(九阳股份有限公司); YH-16 醒发箱(广东乐创电器有限公司); C21-WK2102 美的多功能电磁炉(广东美的生活电器制造有限公司); MZB-26 蒸锅(广州美厨智能家居科技股份有限公司); VS5400 真空包装机(东莞市广骏电器有限公司); TMS-Pilot 质构仪(北京盈盛恒泰科技有限责任公司); BCD-240SDPN 冰箱(青岛海尔股份有限公司); JJ224BF 分析天平(精度 0.1 mg, 常熟市双杰测试仪器厂); PH-100 pH 计(上海力辰仪器科技有限公司); HH-S6 数显恒温水浴锅(江苏金怡仪器科技有限公司); GZX-GF101-2-BS-II电热恒温鼓风干燥箱(上海跃进医疗机械有限公司); YXQ.L-70 立式压力蒸汽灭菌锅(鸡西市辰丰医疗器械制造有限公司); SW-CJ-2F 净化工作台(上海沪净医疗机械有限公司); LRH-500A-HSE 恒温恒湿培养箱(广东泰宏君科学仪器股份有限公司)。

1.3　试验方法

1.3.1　槐花米糕制作工艺

槐花、碳酸钠

↓

大米→浸泡→打浆→混合→发酵→装模→蒸制→冷却→真空包装→成品

↑

面粉、酵母、糖

1.3.2　单因素试验

在槐花米糕基础配方上, 槐花添加量 2.25%、大米/面粉比例 2:1 (*m*:*m*, 下同)、白糖添加量 15.0%、酵母添加量 0.75%、发酵时间 50 min, 固定碳酸钠添加量为 0.25%。经过单个因素试验研究大米/面粉比例(1:1、1.5:1、2:1、2.5:1、3:1,下同)、槐花添加量(0.75%、1.50%、2.25%、3.00%、3.75%)、白糖添加量(10.0%、12.5%、15.0%、17.5%、20.0%)、酵母添加量(0.25%、0.50%、0.75%、1.00%、1.25%)以及发酵时间(40、45、50、55、60 min)对槐花米糕的感官评分和质构的影响。

1.3.3　响应面优化试验

槐花米糕的响应面优化试验因素及水平设定见表 1。

表 1　槐花米糕的响应面优化试验因素及水平

Table 1　Test factors and level of response surface optimization of *Sophora japonica* L. rice cake

水平	*A*: 大米:面粉	*B*: 槐花添加量/%	*C*: 白糖添加量/%
–1	2:1	0.75	12.5
0	2.5:1	1.50	15.0
1	3:1	2.25	17.5

1.3.4 槐花米糕贮藏试验

参照李燮昕等[11]的方法, 槐花米糕用 10 cm×15 cm PE 真空包装装好后分别在 20 ℃、6 ℃条件下贮存 15 d, 每隔 3 d 对槐花米糕的菌落总数、pH、感官指标、酸价、水分含量进行测定。

1.3.5 动力学模型及货架期建立

(1)零级和一级反应动力学模型

零级和一级反应方程是化学反应动力学模型中比较常见反映出食品加工品质指标与贮存时间变化关系的模型[12–13], 其方程式如下式(1)~(2):

$$零级反应方程: A=A_0^{-kt} \quad (1)$$

$$一级反应方程: A=A_0e^{kt} \quad (2)$$

式中: A 为样品品质指标值; A_0 为样品初始品质指标值; k 为样品品质指标变化速率常数; t 为样品的储存时间。

(2) Arrhenius 方程

为了更好地确定食品品质指标随着贮存时间的变化速率常数 k 和热力学温度 T 之间的关联[14–15], 其方程式如下式(3):

$$k=K_0e^{-Ea/RT} \quad (3)$$

式中: k 为样品品质指标变化速率常数; K_0 为指前因子(频率因子); R 为气体常数: 8.314 J/mol·k; T 为热力学温度, ℃; Ea 为表观活化能。

(3)货架期预测模型

将零级和一级反应方程与 Arrhenius 方程结合, 可推导出基于槐花米糕特征指标的零级、一级反应动力学模型, 见公式(4)~(5):

$$零级反应方程: \ SL=\frac{|A_0-A|}{[k_0\exp^{(-Ea/RT)}]} \quad (4)$$

$$一级反应方程: \ SL=\frac{|\ln A_0-\ln A|}{k_0\exp^{(-Ea/RT)}} \quad (5)$$

式中: SL 为货架期; A_0 为样品的初始品质指标值; A 为样品贮藏至第 n 天时的品质指标值; k_0 为指前因子; Ea 为反应的活化能, J/mol; R 为气体常数, 通常取 8.314 J/mol·k; T 为热力学温度, ℃。

(4)货架期预测模型的验证

验证槐花米糕货架期模型采用实测值和预测值相对误差分析, 相对误差按式(6)公式计算。

$$相对误差/\%=\frac{|预测值-实测值|}{实测值}\times 100\% \quad (6)$$

1.3.6 指标测定

(1)感官评价标准

由 8 名具有相关专业知识人员来组成感官评定小组, 严格按照标准进行打分。参照 GB/T 20977—2007《糕点通则》和 GB/T 15682—2008《粮油检验 稻谷、大米蒸煮食用品质感官评价方法》的设计评分标准见表 2。

(2)质构测定

参照 GAO 等[16]和 HE 等[17]的测定方法。选取大小均匀、形态完整的槐花米糕, 测定参数为探头 P25, 量程 250 N, 初始力 0.375 N, 测中速度 100 mm/s, 停留时间 2 s, 压缩变量 60%, 压缩间隔 30 s。

表 2 槐花米糕感官评价标准

Table 2 Sensory evaluation criteria of *Sophora japonica* L. rice cake

评价指标	评分标准	分值
色泽 (25 分)	有光泽, 颜色呈浅黄色或黄绿浅色	21~25
	比较有光泽, 颜色呈黄绿色或黄色	16~20
	无光泽, 颜色发黄变暗	10~15
外观 (25 分)	形状完整, 无凹陷, 质地均匀, 边界完整	21~25
	形状较完整, 有部分无凹陷, 质地较均匀, 边界较完整	16~20
	形状不完整, 有明显无凹陷, 质地不均匀, 边界不完整	10~15
气味 (25 分)	香味强, 有槐花和米糕的香气	21~25
	香味较强, 槐花和米糕的香气较弱	16~20
	香味很弱, 无槐花和米糕的香气	10~15
口感 (25 分)	口感弹性好, 甜度适宜不苦, 爽口不黏牙, 没有颗粒感	21~25
	口感弹性较好, 微苦、微甜或较淡, 不黏牙, 较有颗粒感	16~20
	口感弹性稍差, 过苦、过甜或过淡, 稍黏牙, 颗粒感明显	10~15

(3)理化指标测定

pH 的测定参照 GB 5009.237—2016《食品安全国家标准 食品 pH 值的测定》中的方法测定。水分含量的测定参照 GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》中的干燥直接法测定。酸价的测定按照GB 5009.229—2025《食品安全国家标准 食品中酸价的测定》中的热乙醇指示剂滴定方法测定。

微生物测定: 菌落总数参照 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》中的方法测定。

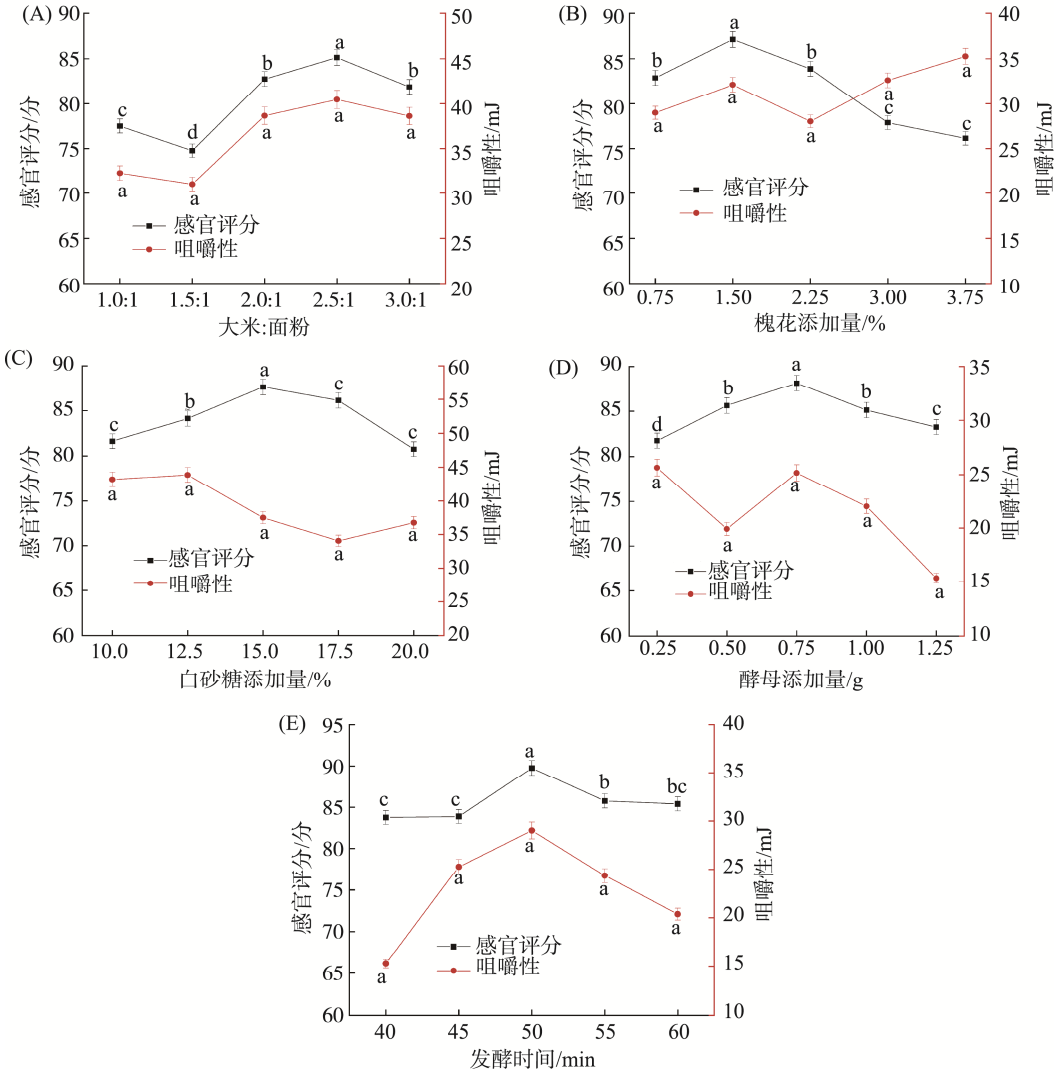
1.4 数据处理

试验数据采用 Design-Expert 13.0、SPSS 25.0 以及 Excel 2024 分析与处理, 采用 Origin 2024 来绘制图表。利用 Arrhenius 方程完成槐花米糕货架寿命期限的构建模型。

2 结果与分析

2.1 单因素试验结果

如图 1 所示, 米糕的咀嚼性受淀粉凝胶强度的影响, 且呈正相关[18]。当大米/面粉比例为 2.5:1 时, 槐花米糕的感官品质综合评分与咀嚼性达到了最大。因此时大米/面粉配比恰到好处, 既保留米香, 又借助面粉起到成型作用。当槐花添加量为 1.50%时, 槐花米糕的感官评价分与咀嚼性相对较高。当白砂糖添加量超出 15.0%时, 因甜味过重遮蔽了槐花米糕的香气及其他风味, 致使槐花米糕的组织



注：不同小写字母表示组内有显著性差异，$P<0.05$；图 4 同。

图 1　单因素试验结果

Fig.1　Results of single-factor experimental

结构出现改变，咀嚼感变差，这跟刘晓媛等[19]开展的研究类似。当槐花米糕感官评分在酵母添加量为 0.75%时，分值达到最大，因酵母发酵产生气体增多，使槐花米糕的气孔增加，质地与结构变得疏松且咀嚼力度变小。当发酵时间为 50 min 时，感官评分和咀嚼性达到最大。此时槐花米糕发酵充分，酵母分解糖类产生的气体，使米糕内部淀粉与蛋白质相互作用形成具有韧性的网络结构且均匀细密的气孔，从而增加咀嚼性[20]。

2.2　响应面回归模型与结果

响应面优化试验的试验架构设计与结果如表 3 所示。利用 Design-Expert 13.0 软件对试验值采取二元回归拟合模型，得到槐花米糕的感官评分的二次多项回归方程为：$Y=90.64-0.6125A-2.07B+0.4625C-0.9500AB+0.5750AC+1.15BC-2.68A^2-4.31B^2-2.08C^2$。

由表 4 可知，回归模型的 F 为 253.80，达到极显著水平（$P<0.0001$），表明模型具有高度统计学意义。失拟项

表 3　槐花米糕的响应面优化试验设计与结果

Table 3　Experimental design and results of response surface optimization for *Sophora japonica* L. rice cake

编号	*A*: 大米:面粉	*B*: 槐花添加量	*C*: 白糖添加量	*Y*: 感官评价/分
1	0	0	0	90.4
2	0	0	0	91.1
3	1	0	–1	84.4
4	0	–1	1	85.8
5	0	0	0	90.8
6	0	1	1	83.8
7	0	0	0	90.6
8	1	0	1	86.3
9	–1	–1	0	85.4
10	0	0	0	90.3
11	0	–1	–1	87.0
12	–1	0	–1	86.6
13	1	–1	0	85.9
14	1	1	0	80.0
15	0	1	–1	80.4
16	–1	1	0	83.3
17	–1	0	1	86.2

表 4 回归模型方差分析

Table 4 Analysis of variance for the regression model

方差来源	平方和	自由度	均方	*F*	*P*	显著性
模型	189.10	9	21.01	253.80	<0.0001	**
A	3.00	1	3.00	36.25	0.0005	**
B	34.44	1	34.44	416.07	<0.0001	**
C	1.71	1	1.71	20.67	0.0026	**
AB	3.61	1	3.61	43.61	0.0003	**
AC	1.32	1	1.32	15.97	0.0052	**
BC	5.29	1	5.29	63.90	<0.0001	**
A^2	30.30	1	30.30	365.98	<0.0001	**
B^2	78.12	1	78.12	943.69	<0.0001	**
C^2	18.26	1	18.26	220.57	<0.0001	**
残差	0.5795	7	0.0828			
失拟项	0.1675	3	0.0558	0.5421	0.6789	
纯误差	0.4120	4	0.1030			
总和	189.68	16				
R^2=0.9969			R^2_{adj}=0.9930			

注:*代表对结果影响显著(P<0.05); **代表对结果影响极显著(P<0.01)。

P=0.6789>0.05，差异不显著，说明模型拟合良好，未观测到明显失拟现象。模型决定系数 R^2=0.9969，调整后决定系数 R^2_{adj}=0.9930，表明该模型实测值与预测值之间具有高度相关性，因此，该模型可较好地反映槐花米糕工艺参数与响应值之间的映射关系，并用于预测最优工艺条件。方差分析结果显示，一次项 *A*、*B*、*C* 对槐花米糕感官综合评分的影响均达到极显著水平(P<0.001)；交互项 *AB*、*AC*、*BC* 及二次项 A^2、B^2、C^2 对感官综合评分的影响亦均为极显著(P<0.001)。根据各因素的显著性及其系数大小，可判断因素对感官评分的影响主次顺序为: *B*>*A*>*C*。

2.3 响应面交互作用分析

具体分析结果如图 2 所示。等高线呈椭圆形表明对应两因素间存在显著交互作用，响应曲面的倾斜程度可直观反映各因素对感官评分的影响强度，曲面越陡峭表明影响越强，越平缓则影响越弱。分析结果显示，随着因素 *A* 与 *B* 的增大，感官综合评分均呈现先上升后下降的趋势，其响应曲面较为陡峭，表明两者对评分的影响较强，对应的等高线呈明显椭圆形，证实 *A* 与 *B* 的交互作用显著；当因素 *A* 与 *C* 同时变化时，感官评分亦呈先增后减趋势，但响应曲面相对平缓，说明二者影响程度较弱，其等高线仍呈椭圆形，表明 *A* 与 *C* 存在显著交互作用；在因素 *B* 与 *C* 的交互中，感官评分表现出明显的先升后降变化，响应曲面陡峭，显示影响较强，且椭圆形等高线进一步说明 *B* 与 *C* 存在显著交互作用。

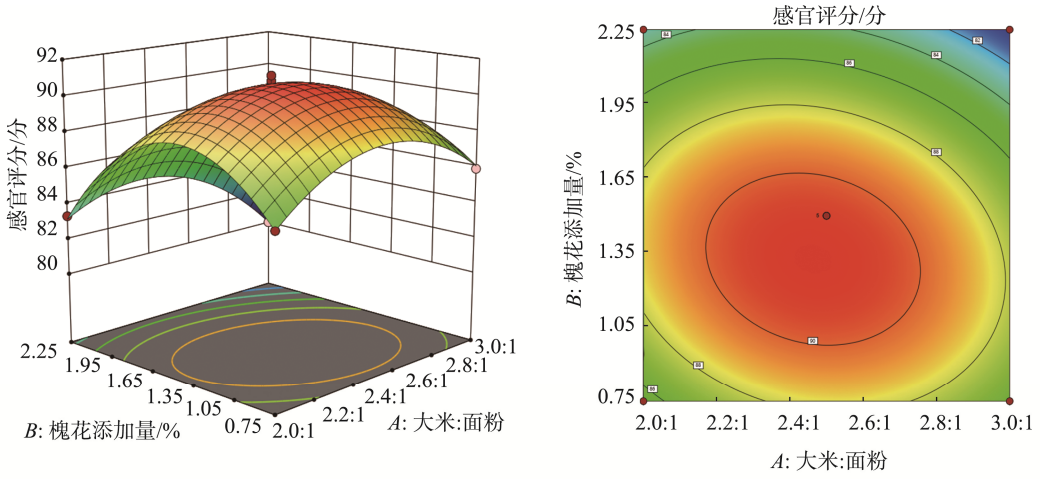


图 2 交互作用响应面图

Fig.2 Response surface diagram of interaction

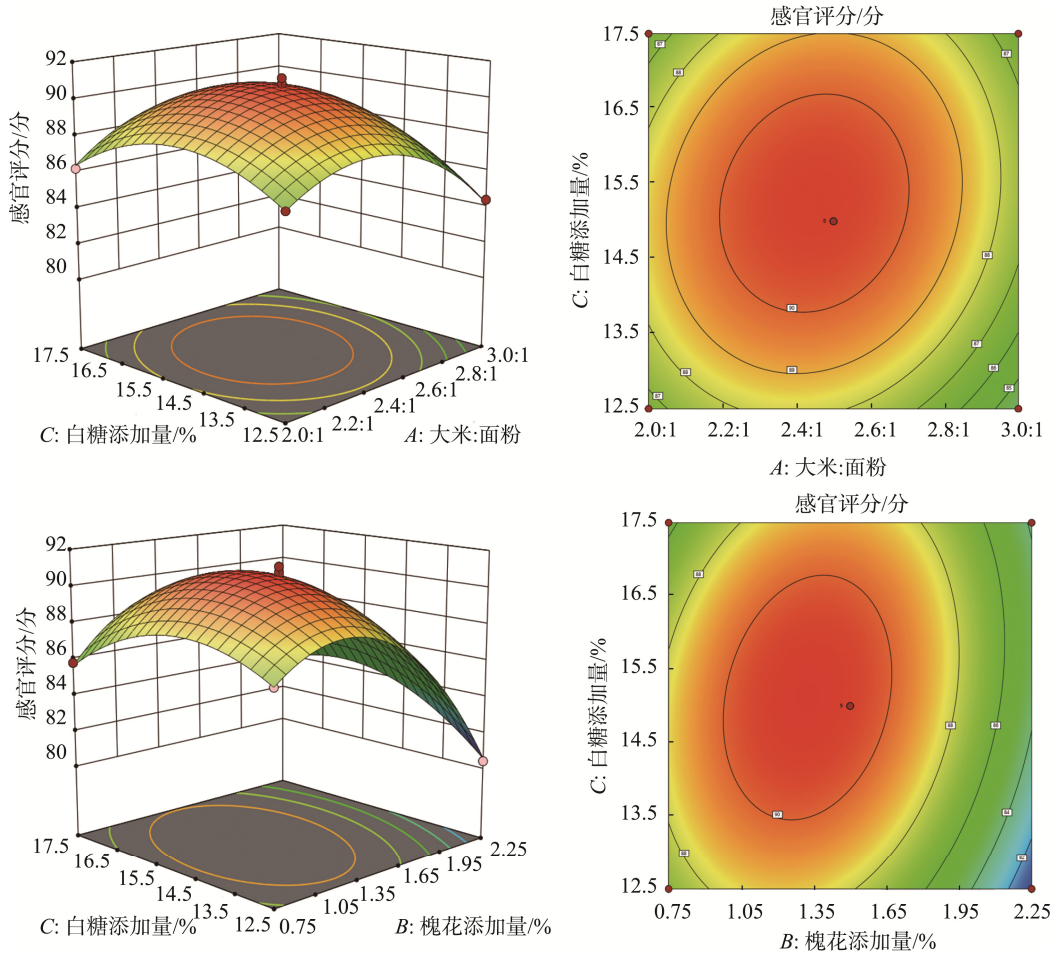


图 2(续)　交互作用响应面图

Fig.2　Response surface diagram of interaction

2.4　槐花米糕质构特性分析

17 组槐花米糕的质构特性测定分析结果见表 5。2 号样品是在所有样品当中各项质量指标位居前列，其感官评分也是最高的。其中与槐花米糕口感显著相关的内聚性、弹性、黏性、咀嚼性 4 项指标皆达到最大数值，分别为 0.467、4.347、7.883、34.507，则硬度较为中平，所以 2 号样品在口感上为最优。鲁丹游等[21]的研究表明槐花米糕的口感与内聚性、弹性、黏性、咀嚼性等有显著的关系，且槐花米糕的口感随着内聚性、弹性、黏性、咀嚼性的增加而更佳。通过质构特性分析，2 号样品于品质上表现最为出色，这与优化工艺参数预测的结果相吻合。

2.5　最佳工艺条件试验验证

利用 Design-Expert 13.0 软件的 Box-Behnken 设计对试验数据进行预测优化，得到槐花米糕制作的工艺配方为：大米/面粉比例为 2.46:1，槐花添加量为 1.33%，白糖添加量为 15.10%，该工艺下槐花米糕感官评分预估值是 90.90 分。结合实际操作情况，选定大米/面粉比例为 2.5:1，槐花添加量为 1.50%，白糖添加量为 15.0%，测定的槐花米糕感官评分为(90.8±0.15)分，该评分与模型预测值相近，表明此模型具有实用性与可靠性。

2.6　槐花米糕感官评价分析

由图 3 可知，综合 8 位评价员的总分来看，分值集中在 90%~92%，平均分值为 90.8%，槐花米糕整体呈现淡黄绿色，色泽透亮，形状完整无凹陷，质地均匀，且自带槐花与大米的清香，口感丰富具有弹性，甜度适中不苦，爽口不黏牙，没有颗粒感，感官品质达到了最佳。

2.7　槐花米糕理化及微生物指标

根据优化工艺配方制成的槐花米糕，冷却至室温后，测定其各项理化指标与微生物指标，结果见表 6，由于添加食用碱，pH 为 7.71±0.035，高于传统米糕 pH 范围 5.5~7.2，但仍符合国家食品生产及添加剂使用要求；水分含量测定值为(37.725±1.720) g/100 g，低于传统米糕适宜水分含量范围 40%~70%(以质量计)，低水分含量更有利于米糕的贮藏；酸价为(0.280±0.001) mg/g，菌落总数小于 5.0×10^3 CFU/mL，均小于国标要求值，说明油脂氧化程度低，微生物污染程度低。

表 5 大米与面粉比例、槐花和白糖的添加量对产品质构及感官品质的影响

Table 5 Effects of ratio of rice to flour, the addition amount of *Sophora japonica* L.and white sugar on the texture and sensory quality of the product

试验编号	硬度 1/N	硬度 2/N	内聚性/Ratio	弹性/mm	黏性/N	咀嚼性/mJ	感官评分/分
1	17.263±6.502^{a}	15.030±5.449^{a}	0.417±0.049^{ab}	3.670±0.185^{ab}	7.150±2.923^{a}	25.927±9.238^{a}	90.4
2	19.013±2.330^{a}	16.413±1.523^{a}	0.467±0.025^{a}	4.347±0.355^{a}	7.883±2.553^{a}	34.507±12.030^{a}	91.1
3	18.090±4.646^{a}	15.953±3.943^{a}	0.407±0.061^{ab}	3.920±0.552^{ab}	7.437±2.770^{a}	29.573±13.094^{a}	84.4
4	15.990±6.351^{a}	13.867±5.090^{a}	0.417±0.015^{ab}	3.753±0.288^{ab}	6.607±2.436^{a}	25.227±10.707^{a}	85.8
5	16.093±7.587^{a}	13.680±6.247^{a}	0.427±0.055^{ab}	4.167±0.497^{ab}	6.697±2.980^{a}	28.600±15.592^{a}	90.8
6	16.677±11.623^{a}	14.263±9.636^{a}	0.410±0.063^{ab}	3.387±1.017^{b}	6.510±4.328^{a}	19.137±7.146^{a}	83.8
7	19.713±3.161^{a}	17.163±2.364^{a}	0.410±0.056^{ab}	4.043±0.410^{ab}	8.113±1.861^{a}	33.047±9.391^{a}	90.6
8	18.387±5.428^{a}	15.940±4.284^{a}	0.387±0.045^{b}	4.003±0.337^{ab}	7.167±2.431^{a}	29.230±12.132^{a}	86.3
9	15.450±7.126^{a}	13.380±5.987^{a}	0.433±0.050^{ab}	4.130±0.151^{ab}	6.530±2.809^{a}	27.017±12.061^{a}	85.4
10	18.887±6.313^{a}	16.180±5.221^{a}	0.407±0.042^{ab}	3.823±0.127^{ab}	7.577±2.462^{a}	28.837±8.963^{a}	90.3
11	18.187±4.811^{a}	16.190±3.300^{a}	0.417±0.032^{ab}	4.117±0.455^{ab}	7.563±1.959^{a}	31.733±11.569^{a}	87.0
12	16.803±5.202^{a}	15.117±4.042^{a}	0.390±0.040^{b}	3.980±0.822^{ab}	7.483±1.460^{a}	30.440±11.640^{a}	86.6
13	16.963±3.400^{a}	15.153±2.273^{a}	0.420±0.061^{ab}	4.307±0.843^{a}	7.090±1.792^{a}	31.490±14.208^{a}	85.9
14	17.590±3.865^{a}	15.127±3.246^{a}	0.400±0.036^{ab}	4.070±0.060^{ab}	6.887±1.768^{a}	28.080±7.566^{a}	80.0
15	13.043±5.989^{a}	11.780±5.565^{a}	0.457±0.015^{ab}	3.723±0.405^{ab}	6.003±2.874^{a}	22.960±12.073^{a}	80.4
16	17.700±6.295^{a}	15.780±5.063^{a}	0.433±0.021^{ab}	3.890±0.486^{ab}	7.663±2.713^{a}	29.223±8.679^{a}	83.3
17	16.850±5.655^{a}	14.840±4.699^{a}	0.407±0.015^{ab}	3.700±0.151^{ab}	6.880±2.323^{a}	25.663±9.285^{a}	86.2

注: 不同小写字母表示有显著性差异, $P<0.05$。

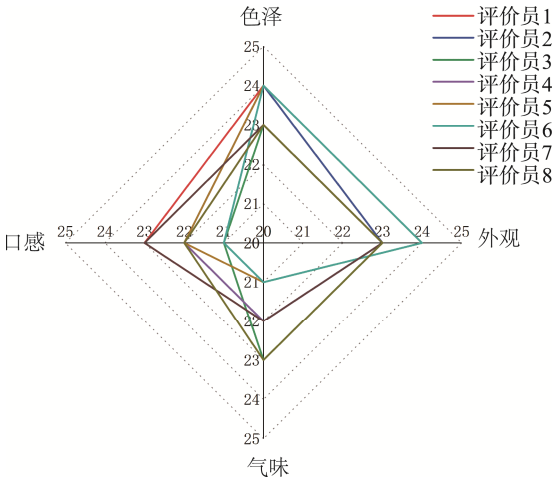


图 3 槐花米糕感官评分雷达图

Fig.3 Radar chart of *Sophora japonica* L. rice cake sensory score

2.8 槐花米糕贮藏期间品质变化

由图 4(A)可知, 在 6 ℃时, 槐花米糕感官评分下降趋势相对 20 ℃较为平缓, 可能是因为温度影响微生物生长与反应速率, 20 ℃利于微生物滋生, 加速米糕变质, 淀粉分子迁移速度快, 淀粉老化等化学反应加快, 导致风味、口感变差, 感官评分急剧下降[22], 贮藏第 9 d 米糕开始发酸, 无法进行后续的感官试验; 而 6 ℃低温抑制微生物繁殖, 减缓水分散失与淀粉老化等反应速度, 米糕品质下降速度变缓, 从感官评分来看, 6 ℃优于 20 ℃。由图 4(B)可知, 在 6 ℃和 20 ℃贮存条件下, 槐花米糕的水分含量随着时间的推移呈现上升趋势, 0~3 d 的水分含量变化小, 第 3~6 d 水分含量显著增加($P<0.05$), 6 ℃贮存条件下, 水分含量在贮存后期上升缓慢。由图 4(C)可知, 槐花米糕在 20 ℃和 6 ℃贮存下随着时间的延长 pH 呈现下降的变化趋势。

表 6 槐花米糕的理化及微生物指标

Table 6 Physical, chemical and microbiological indicators of *Sophora japonica* L. rice cake

测定指标	测定依据	测定值	要求值
pH	GB 5009.237—2016	7.71±0.035	—
水分含量/(g/100 g)	GB 5009.3—2016	37.725±1.720	—
酸价/(mg/g)	GB 5009.229—2016	0.28±0.001	≤5
菌落总数/(CFU/mL)	GB 4789.2—2022	$<5.0\times10^{3}$	$\leqslant1\times10^{5}$

注: —表示国家标准对该指标未作规定。常温(25 ℃)下, pH=7 为中性溶液; pH<7 为酸性溶液, 数值越小酸性越强; pH>7 为碱性溶液, 数值越大碱性越强。

从第 3 d 开始, 6 ℃的 pH 逐渐下降, 20 ℃的 pH 急速下降(P<0.05), 导致槐花米糕 pH 急速下降的主要原因是微生物的代谢活动产生的酸及原料本身的特性[23]。由图 4(D)可知, 在第 6~9 d, 20 ℃贮存下的槐花米糕酸价迅速升高, 而 6 ℃贮存的酸价升高缓慢, 变化趋势与 pH[图 4(C)]一致, 可能是在低温环境下, 微生物的活性和脂肪氧化反应都受到极大抑制[24]。由图 4(E)可知, 20 ℃和 6 ℃时的菌落总数在第 3 d 时显著增多(P<0.05)。在 20 ℃贮存时, 槐花米糕菌落总数急速增加, 在第 3 d, 菌落总数增加了 3.0629 CFU/mL, 在第 9 d 菌落总数激增, 无法计数; 6 ℃时的菌落总数增加缓慢, 第 3 d 仅增加了 0.5518 CFU/mL。说明温度对于微生物的生长具有控制作用, 20 ℃更适合微生物的繁殖, 而低温对微生物的生长有抑制作用, 但长时间的贮存仍会使微生物数量逐渐积累[25]。

2.9　槐花米糕的货架期模型的建立

2.9.1　槐花米糕在不同贮藏温度下的品质变动动力学模型参数

食品在加工和贮存过程中, 根据槐花米糕的质量测定值进行方程拟合, 测定其速率常数和回归系数, 大部分食品质量变动契合零级或一级反应模式相适应[26]。根据各指标的规律变化, 将 20 ℃和 6 ℃(转化为热力学温度即 293 K、279 K)贮存条件下测得的感官评分、水分含量、pH、酸价、菌落总数等进行拟合。从表 7 中可知, 每一温度下理化指标的回归系数都在 0.85 以上, 说明都被证实为理想的拟合度[27]。所有方程的回归系数 R^2 均在 0.80~0.99 范围内, 其中 R^2 代表了方程的拟合程度, R^2 越大表示模型越好[28]。

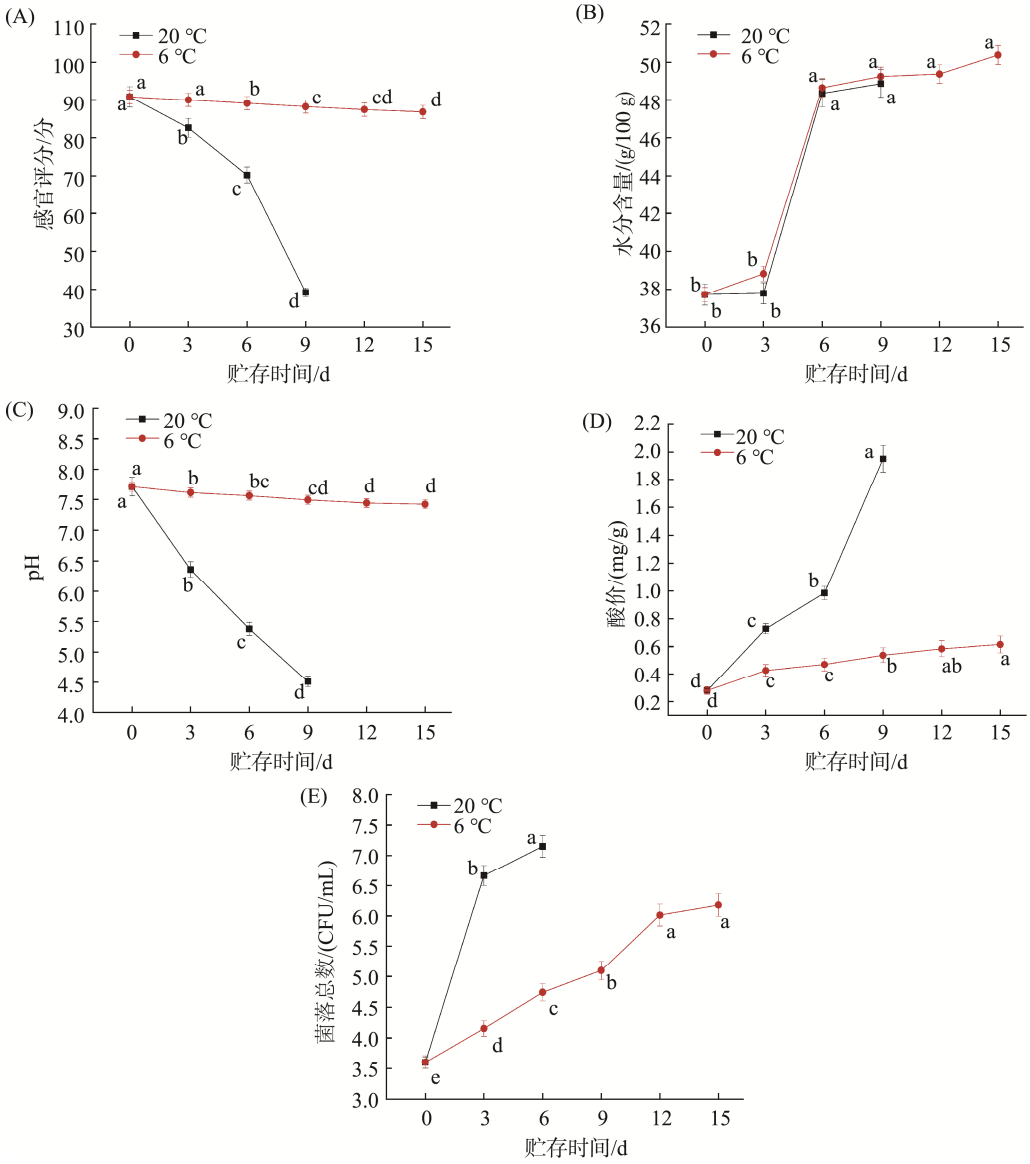


图 4　槐花米糕在不同贮藏温度下品质指标变化

Fig.4　Quality index changes of *Sophora japonica* L. rice cake at different storage temperatures

表 7 槐花米糕在不同贮藏温度下的品质变动动力学模型参数

Table 7 Dynamic model parameters of quality variation of *Sophora japonica* L. rice cake at different storage temperatures

指标	温度/K	零级				一级			
		回归方程	速率常数	回归系数	$\sum R^2$	回归方程	速率常数	回归系数	$\sum R^2$
感官评分/分	279	Y=–0.2743X+90.757	–0.2743	0.9941	1.9026	Y=90.768$e^{-0.003X}$	–0.0030	0.9948	1.8284
	293	Y=–5.5567X+95.73	–5.5567	0.9085		Y=100.71$e^{-0.089X}$	–0.0890	0.8336	
水分含量/(g/100 g)	279	Y=0.9092X+38.879	0.9092	0.7780	1.5986	Y=38.836$e^{-0.0207X}$	0.0207	0.7709	1.5907
	293	Y=1.466X+36.584	1.4660	0.8206		Y=36.746$e^{-0.0341X}$	0.0341	0.8198	
pH	279	Y=–0.0193X+7.6833	–0.0193	0.9638	1.9530	Y=7.6838$e^{-0.003X}$	–0.0030	0.9657	1.9648
	293	Y=–0.3527X+7.577	–0.3527	0.9892		Y=7.6659$e^{-0.059X}$	–0.0590	0.9991	
酸价/(mg/g)	279	Y=0.0211X+0.3271	0.0211	0.9328	1.8609	Y=0.3286$e^{0.0478X}$	0.0478	0.8796	1.8426
	293	Y=0.1758X+0.195	0.1758	0.9281		Y=0.3152$e^{0.2044X}$	0.2044	0.9630	
菌落总数/(lg CFU/mL)	279	Y=0.1792X+3.6204	0.1792	0.9814	1.8318	Y=3.6955$e^{0.0370X}$	0.0370	0.9699	1.7444
	293	Y=0.5913X+4.0317	0.5913	0.8504		Y=3.9447$e^{0.1143X}$	0.1143	0.7745	

基于本次试验数据中，除 pH 外，零级反应方程回归系数 $\sum R^2$ 较高于一级反应方程回归系数 $\sum R^2$。说明了槐花米糕的保质期在趋势上更贴近零级化学反应动力学方程，这也与刘政权等[29]的研究结果相似。

2.9.2 以化学反应为基础的品质动力学模型建立

由零级反应模型与 Arrhenius 方程结合，依据样品处于不同温度当中贮存时地品质指标地约束以及时间的判定，从而对产品货架期进行理论预测，构建感官评分、水分含量、pH、酸价与菌落总数随贮存温度变化的动力学模型，将其反应常数 k 结合 Arrhenius 方程进行计算，得到这 5 个考量指标变化速率常数 k 和温度 T 之间地关系,将方程左右两边同时取对数，可得 ln$k$ 和 1/T 之间的线性关系，具体如表 8 所示。通过线性回归方程，可以得出不同温度贮存下槐花米糕的感官评分、水分含量、pH、酸价及菌落总数的指前因子 k_0 与活化能 Ea，代入 1.3.5 的式(4)中，可得模型 $SL_{感官评分}$、$SL_{水分含量}$、SL_{pH}、$SL_{酸价}$和 $SL_{菌落总数}$。

2.9.3 槐花米糕货架期模型验证与评价

如表 9 所示。随着贮存时间的增长，5 个指标的槐花米糕货架期逐渐缩短，从各指标相对误差排序为：pH<菌落总数<感官评分<水分含量<酸价。其中，感官评分、水分含量、pH、菌落总数 4 个指标的槐花米糕货架寿命的实际值与预测值的误差均小于 10%，低于数值模拟所要求的 15%，这表明该模型准确度较好。

2.9.4 槐花米糕的加权模型

利用赖路等[30]、刘婧等[31]研究的模糊权重法，确定产品贮存时期各质量指标的差异加权系数，进而得出质量综合评价的加权关联度公式=$SL_{感官评分}$×0.20 + $SL_{水分含量}$×0.20 + SL_{pH}×0.20 + $SL_{酸价}$×0.20 + $SL_{菌落总数}$×0.20，式中 As、Aw、Ap、Av、At 分别表示感官评价、水分含量、pH、酸价、菌落总数 5 个指标达到终点时的测定值这款产品与质量的变化有着明显的正相关的情况，因此可以建立一个货架期加权模型。

表 8 槐花米糕在不同贮藏温度下品质指标温度反应速率的对应关系

Table 8 Corresponding relationship of quality indicators and temperature reaction rates of *Sophora japonica* L. rice cake under different storage temperatures

指标	温度/K	1000/T	k	ln$k$	回归方程
感官评分	279	3.584	0.2743	–1.2935	Y=61.6709–17.5671X
	293	3.413	5.5567	1.7150	
水分含量	279	3.584	0.9092	–0.0952	Y=9.9030–2.7895X
	293	3.413	1.4660	0.3825	
pH	279	3.584	0.0193	–3.9477	Y=56.8606–16.9655X
	293	3.413	0.3527	–1.0421	
酸价	279	3.584	0.0294	–3.5268	Y=33.9009–10.4423X
	293	3.413	0.1758	–1.7384	
菌落总数	279	3.584	0.1792	–1.7193	Y=23.2657–6.9708X
	293	3.413	0.5913	–0.5254	

$$SL=\left[\frac{|90.8-As|}{\exp\left(-\frac{17567.1}{T}\right)+61.6709}\right]\times0.20+\left[\frac{|37.73-Aw|}{\exp\left(-\frac{2789.5}{T}\right)+9.9030}\right]\times$$
$$0.20+\left[\frac{|7.71-Ap|}{\exp\left(-\frac{16965.5}{T}\right)+56.8606}\right]\times0.20+\left[\frac{|0.28-Av|}{\exp\left(-\frac{10442.3}{T}\right)+33.9009}\right]\times$$
$$0.20+\left[\frac{|3.60-At|}{\exp\left(-\frac{6970.8}{T}\right)+23.2657}\right]\times0.20$$

表 9　槐花米糕货架期各项指标预测结果

Table 9　Preast results of shelf life of *Sophora japonica* L. rice cake

品质指标	贮藏温度/K	货架期预测值/d	货架期实测值/d	相对误差/%
感官评分	279	14.54	15	5.315
	293	9.68	9	
水分含量	279	13.94	15	7.035
	293	8.37	9	
pH	279	15.26	15	1.085
	293	9.04	9	
酸价	279	11.45	15	14.55
	293	9.49	9	
菌落总数	279	14.33	15	2.735
	293	6.06	6	

3　结　论

通过单因素与响应面试验, 得到槐花米糕的最优配方: 大米/面粉比例为 2.5:1、槐花 1.5%、白糖 15%、酵母 0.75%、食用碱 0.25%、发酵时间 50 min; 相对贮藏温度 20 ℃, 在贮存温度 6 ℃中, 槐花米糕的感官品质、pH、酸价及水分含量下降趋势得到显著遏制, 菌落总数亦显著降低, 各项指标的变化规律与零级反应方程相契合。基于槐花米糕贮存试验结果, 利用零级反应方程结合 Arrhenius 方程与权重模糊法建立槐花米糕的货架期寿命预测模型及其品质综合评价的加权关联度公式。通过验证试验结果表明, 建立的 5 种槐花米糕货架期模型中, $SL_{感官评分}$、$SL_{水分含量}$、SL_{pH}及 $SL_{菌落总数}$展现出良好的准确度及模型相对误差低于 10%, 其品质综合评价的加权关联度公式=$SL_{感官评分}\times0.20+SL_{水分含量}\times0.20+SL_{pH}\times0.20+SL_{酸价}\times0.20+SL_{菌落总数}\times0.20$。说明此模型能够有效地预测槐花米糕在 6 ℃与 20 ℃的货架期期限。综上所述, 基于零级动力学与 Arrhenius 方程构建了多指标货架期预测模型, 且在恒定温度 6 ℃和 20 ℃下显示出良好预测精度, 为槐花米糕的标准化生产与货架期预测提供了理论依据。后续还可以探讨不同包装对槐花米糕贮藏期限的影响。

参考文献

[1] GONG YH, FAN LP, WANG L, *et al*. *Flos sophorae* Immaturus: Phytochemistry, bioactivities, and its potential applications [J]. Food Reviews International, 2023, 39(6): 3185–3203.

[2] SHI P, LIAO JJ, DUAN T, *et al*. Chemical composition and pharmacological properties of *Flos sophorae* immaturus, *Flos sophorae* and *Fructus sophorae*: A review [J]. Journal of Future Foods, 2023, 3(4): 330–339.

[3] 顾丽雅, 刘静, 刘明, 等. 药食同源槐花提取工艺的优化及其对中式香肠食用品质的影响[J]. 中国调味品, 2025, 50(10): 70–79.
GU LY, LIU J, LIU M, *et al*. Optimization of the extraction process of *Sophora japonica* L. with medicinal and edible properties and its impact on the quality of Chinese sausage food [J]. China Condiments, 2020, 50(10): 70–79.

[4] 柏芸, 熊善柏, 王欢欢, 等. 传统发酵食品米发糕生产工艺的革新与现代化[J]. 粮食与食品工业, 2009, 16(5): 4–6.
BAI Y, XIONG SB, WANG HH, *et al*. Innovation and modernization of the production process of traditional fermented food rice cake [J]. Grain and Food Industry, 2009, 16(5): 4–6.

[5] 李志鑫, 徐雪野, 张新振, 等. 绿茶米糕研制及其品质分析[J]. 食品工业科技, 2024, 45(3): 171–178.
LI ZX, XV XY, ZHANG XZ, *et al*. Development and quality analysis of green tea rice cake [J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(3): 171–178.

[6] 赵琴, 李清清, 褚佳玥, 等. 我国传统糕点产业现状及问题[J]. 食品工业, 2018, 39(8): 247–251.
ZHAO Q, LI QQ, CHU JY, *et al*. Current situation and problems of traditional pastry industry in China [J]. Food Industry, 2018, 39(8): 247–251.

[7] LOPRIORE M, MANZOCCO L, CALLIGARIS S, *et al*. Comparison of classical kinetic and Bayesian approaches for predicting food shelf life by accelerated testing: The case of biobased coffee capsules [J]. Journal of Food Engineering, 2026, 403: 112733.

[8] CUI FC, ZHENG SW, WANG DF, *et al*. Recent advances in shelf life prediction models for monitoring food quality [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2023, 22(2): 1257–1284.

[9] MAIMUNAH AM, NORHASHILA H, SAMSUZANA AA, *et al*. Shelf life prediction and kinetics of quality changes in pineapple (*Ananas comosus*) varieties at different storage temperatures [J]. Horticulturae, 2022, 8(11): 992.

[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] 李燮昕, 杨佩菊, 罗昊. 俄色发糕的贮藏品质分析及货架期预测模型的建立[J]. 食品科技, 2022, 47(9): 144–150.
LI XX, YANG PJ, LUO H. Analysis of storage quality and establishment of shelf life prediction model for russian steamed rice cake [J]. Food Science and Technology, 2022, 47(9): 144–150.

[12] 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.

XV WT, FU JR, MA SX, *et al*. Prediction of storage quality and shelf life of macadamia nuts kernels with different packaging and storage temperatures [J]. Food Science, 2024, 45(16): 232–243.

[13] XING WM, LIU WL, LI HM, *et al*. Development of predictive models for shelf-life of sweet cherry under different storage temperatures [J]. LWT, 2025, 217: 117442.

[14] YI CP, ZHANG SJ, QIANG NN, *et al*. Modeling the rehydration kinetics of dried rice noodles based on Peleg and Arrhenius equations and qualities maintenance [J]. LWT, 2025, 223: 117783.

[15] LIU J, ZHENG SS, TIAN Y, *et al*. Effects of Trametes versicolor fermented *Rosa roxburghii* Tratt and *Coix* seed complex on the physicochemical properties, microstructure, and shelf-life prediction of yogurt [J]. LWT, 2025, 229: 118190.

[16] GAO C, LI Y, PAN QF, *et al*. Analysis of the key aroma volatile compounds in rice bran during storage and processing via HS-SPME GC/MS [J]. Journal of Cereal Science, 2021(prepublish): 103178.

[17] HE L, CHEN YH, ZHANG HT, *et al*. Isolation and identification of *Lactobacillus* and yeast species and their effect on the quality of fermented rice cakes [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2022, 77: 102984.

[18] 李倩云, 陈召桂, 王丹丽, 等. 即食米糕品质提升及储藏特性研究[J]. 中国粮油学报, 2025, 40(4): 160–169.
LI QY, CHEN ZG, WANG DL, *et al*. Research on quality improvement and storage characteristics of instant rice cake [J]. Journal of Cereals, Oils and Foodstuffs, 2025, 40(4): 160–169.

[19] 刘晓媛, 孙鹤, 夏南. 发酵米糕的配方优化及品质分析[J]. 粮食加工, 2023, 48(4): 46–51, 108.
LIU XY, SUN H, XIA N. Formula optimization and quality analysis of fermented rice cake [J]. Grain Processing, 2023, 48(4): 46–51, 108.

[20] 苏盼盼, 乔靖玥, 张宇, 等. 面团发酵中淀粉水合能力变化对馒头品质的影响[J]. 轻工学报, 2025, 40(4): 60–68.
SU PP, QIAO JY, ZHANG Y, *et al*. The influence of starch hydration capacity changes during dough fermentation on the quality of steamed buns [J]. Journal of Light Industry, 2025, 40(4): 60–68.

[21] 鲁丹游, 马忠梅, 张怀予, 等. 复合型枸杞果糕配方优化与抗氧化能力的评价[J]. 食品工业科技, 2020, 41(14): 140–147.
LU DY, MA ZM, ZHANG HY, *et al*. Formula optimization and antioxidant capacity evaluation of compound Goji berry cake [J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(14): 140–147.

[22] 吴怡萱, 钟梅芳, 王清华, 等. 米制糕点老化及改良技术的研究进展[J/OL]. 食品工业科技, 1-19. [2026-02-06]. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.202506356
WU YX, ZHONG MF, WANG QH, *et al*. Research progress on aging and improvement techniques of rice-based pastries [J/OL]. Science and Technology of Food Industry, 1-19. [2026-02-06]. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.202506356

[23] 张聪男, 王康, 陈正行, 等. 射频处理对鲜湿糙米米线品质及贮藏稳定性的影响[J]. 中国食品学报, 2020, 20(11): 193–200.
ZHANG CN, WANG K, CHEN ZX, *et al*. The effect of radio frequency treatment on the quality and storage stability of fresh wet brown rice noodles [J]. Chinese Journal of Food Science and Technology, 2020, 20(11): 193–200.

[24] 张吉雯, 付晓艳, 朱刘宁, 等. “剩菜盲盒”面包品质与安全性在不同储存条件与交互效应影响下的实证分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(22): 265–273.
ZHANG JW, FU XY, ZHU LN, *et al*. “Empirical analysis of the quality and safety of ‘Leftover Food Box’ bread under different storage conditions and their interaction effects” [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(22): 265–273.

[25] 刘芝平, 肖欢, 许亚斌, 等. 米糕的加工工艺与辐照保质研究[J]. 农产品加工, 2020(4): 38–40.
LIU ZP, XIAO H, XV YB, *et al*. Research on processing technology and irradiation preservation of rice cake [J]. Journal of Agricultural Products Processing, 2020(4): 38–40.

[26] 潘俊娴, 潘春飞, 苗幼珺, 等. 茶多酚素饼贮藏品质研究及货架期预测[J]. 中国茶叶加工, 2023(1): 22–30, 35.
PAN JX, PAN CF, MIAO YJ, *et al*. Research on storage quality and shelf life prediction of tea polyphenol cake [J]. China Tea Processing, 2023(1): 22–30, 35.

[27] 王晓彬. 云南开远鲜湿米线品质变化及控制技术研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2019.
WANG XB. Research on quality changes and control technology of fresh and wet rice noodles in Kaiyuan, Yunnan [D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2019.

[28] 丁婷, 李婷婷, 励建荣, 等. 冷藏三文鱼片微生物生长动力学模型适用性分析及货架期模型的建立[J]. 中国食品学报, 2015, 15(5): 63–73.
DING T, LI TT, LI JR, *et al*. Applicability analysis of microbial growth kinetics model for refrigerated salmon fillets and establishment of shelf life model [J]. Chinese Journal of Food Science and Technology, 2015, 15(5): 63–73.

[29] 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 ZQ, ZHANG H, WANG HF, *et al*. Quality changes and shelf life prediction of matcha at different storage temperatures [J]. Food Science, 2020, 41(3): 198–204.

[30] 赖路, 李燮昕, 王宇, 等. 柠檬金耳羹货架期预测模型的建立[J]. 食品科技, 2020, 45(1): 69–77.
LAI L, LI XX, WANG Y, *et al*. Establishment of shelf life prediction model for lemon golden ear soup [J]. Food Science and Technology, 2020, 45(1): 69–77.

[31] 刘婧, 史萌, 关文强, 等. 猕猴桃货架期间品质动力学及寿命预测模型[J]. 包装工程, 2019, 40(9): 6–14.
LIU J, SHI M, GUAN WQ, *et al*. Quality dynamics and life prediction model of kiwifruit during shelf life [J]. Packaging Engineering, 2019, 40(9): 6–14.

(责任编辑: 蔡世佳 冯东慧)