DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260202003
引用格式: 田春美, 王艳领. 紫薯-桑葚风味酸奶的工艺优化及其品质分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(11): 85–92.
TIAN CM, WANG YL. Process optimization and quality analysis of *Ipomoea batatas-Morus alba* flavored yogurt [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(11): 85–92. (in Chinese with English abstract).

紫薯-桑葚风味酸奶的工艺优化及其品质分析

田春美*, 王艳领

(重庆工贸职业技术学院健康学院, 涪陵 408000)

摘 要: 目的 探究紫薯-桑葚风味酸奶的最佳工艺参数并对其品质进行分析, 开发一种风味独特、品质优良的酸奶。**方法** 首先通过单因素试验和响应面试验, 以黏度、持水力、乳清析出率、酸度、感官评价为指标, 对酸奶的紫薯粉和桑葚汁的配比、白糖添加量、发酵时间等工艺条件进行优化。然后在最优工艺条件下以蛋白质、脂肪、非脂乳固体、酸度、乳酸菌数、霉菌数等指标分析酸奶的品质。**结果** 紫薯-桑葚酸奶的最优工艺参数: 紫薯粉:桑葚汁为 3:5 (*m*:*m*), 白糖添加量为 6%, 发酵时间为 5.0 h, 在此条件下所得酸奶的感官评分为 87.04 分, 与理论预测值 87.32 分基本接近。对该酸奶的品质指标进行分析可知: 蛋白质为 3.4 g/100 g、脂肪为 2.7 g/100 g、非脂乳固体为 9.1 g/100 g、酸度为 65.5°T、乳酸菌数 1.9×10^8 CFU/g、霉菌小于 1.0 CFU/g、致病菌未检出, 质量符合 GB 19302—2025《食品安全国家标准 发酵乳》中的各项指标要求。**结论** 本研究优化了兼具薯香与果香的复合风味酸奶, 为多口味发酵乳的工业化生产提供可行的工艺参数与数据支撑, 对特色果蔬原料深加工及产业链的拓宽具有重要意义。

关键词: 紫薯; 桑葚; 风味酸奶; 工艺优化; 响应面; 品质分析

Process optimization and quality analysis of *Ipomoea batatas-Morus alba* flavored yogurt

TIAN Chun-Mei*, WANG Yan-Ling

(*College of Health*, *Chongqing Industry and Trade Polytechnic*, *Fuling* 408000, *China*)

ABSTRACT: Objective To investigate the optimal processing parameters for *Ipomoea batatas-Morus alba* flavored yogurt, analyze its quality, and develop a yogurt with a unique flavor and excellent quality. **Methods** First, the process conditions—including the ratio of *Ipomoea batatas* powder to *Morus alba* juice, sugar addition, and fermentation time—were optimized through single-factor and response surface experiments, using viscosity, water-holding capacity, whey separation rate, acidity and sensory evaluation as indicators Subsequently, under the optimized process conditions, the quality of the yogurt was analyzed based on indicators such as protein, fat, non-fat milk solids, acidity, lactic acid bacteria count and mold count. **Results** The optimal process parameters for *Ipomoea batatas-Morus alba* yogurt were determined as follows: A *Ipomoea batatas* powder to *Morus alba* juice ratio (*m*:*m*) of 3:5, a sucrose addition of 6% and a fermentation time of 5.0 h. Under these conditions, the sensory score of the resulting

收稿日期: 2026-02-02
基金项目: 重庆工贸职业技术学院自然科学项目(ZR202432)
第一作者/*通信作者: 田春美(1976—), 女, 教授, 主要研究方向为发酵食品加工理论研究与技术开发。E-mail: tianchunmei050@126.com

yogurt was 87.04 points, which was very close to the theoretically predicted value of 87.32 points. Analysis of the quality indicators of this yogurt revealed the following: Protein content of 3.4 g/100 g, fat content of 2.7 g/100 g, non-fat milk solids of 9.1 g/100 g, acidity of 65.5°T, lactic acid bacteria count of 1.9×10^8 CFU/g, mold count<1.0 CFU/g, and no pathogenic bacteria were detected. The quality meets all the requirements specified in GB 19302—2025 *National food safety standard for fermented milk*. **Conclusion** This study optimize a composite-flavored yogurt that combines the aromas of sweet potato and fruit, providing feasible process parameters and data support for the industrial production of multi-flavored fermented milk. It holds significant importance for the deep processing of specialty fruit and vegetable raw materials and the expansion of the industrial chain.

KEY WORDS: *Ipomoea batatas*; *Morus alba*; flavored yogurt; process optimization; response surface; quality analysis

0 引 言

酸奶作为一种营养丰富的发酵乳制品, 因其独特的风味、良好的口感和对肠道健康的潜在益处而广受消费者的青睐[1–2]。随着消费需求的升级, 市场对酸奶的要求已从基础营养供给转向兼具特色风味与优良品质的复合型产品, 开发风味多样、品质稳定的新型酸奶成为乳品工业重要研究方向[3]。

紫薯富含花青素、膳食纤维等成分[4], 色泽天然、营养价值较高, 可作为优质原料用于乳制品加工[5–8]。桑葚为药食同源水果, 含有花色苷、维生素等物质, 风味独特[9–11]。我国紫薯与桑葚资源丰富, 但深加工利用程度较低, 产品多以单一原料制品为主, 高值化应用空间广阔。将二者复配应用于酸奶, 可丰富产品风味、色泽与营养构成, 提升产品综合品质[12–13]。

目前国内外已对紫薯酸奶、桑葚酸奶的加工工艺开展相关研究[14–18], 但紫薯-桑葚复配酸奶的工艺优化与品质分析鲜少见报道。本研究以紫薯、桑葚、牛乳为主要原料, 采用发酵法制备复合风味酸奶, 通过单因素试验与响应面试验优化工艺参数, 并对产品的理化指标、感官品质、质构特性等进行测定, 旨在开发风味独特、品质优良的酸奶, 为特色农产品深加工及复合风味酸奶的工业化生产提供数据支撑与技术参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

紫薯(购自永辉超市, 品种: 紫罗兰 1 号, 产地: 福建省漳州市); 天友纯牛乳(重庆市天友乳业股份有限公司); 桑葚干(购自永辉超市, 品种: 德果一号, 产地: 四川省德昌县); 酸奶发酵剂(含保加利亚乳杆菌、嗜热链球菌, 安琪酵母股份有限公司)。

硫酸钾、氢氧化钠、浓硫酸、盐酸、氨水[分析纯, 重庆川东化工(集团)有限公司]; 硫酸铜、甲基红、溴甲酚绿(分析纯, 重庆博艺化学试剂有限公司); 乙醚、石油醚、无水乙醇、硼酸(分析纯, 成都市科龙化工试剂厂); 孟加拉红培养基(英国 Oxoid 公司); MRS 培养基(德国 Merck 公司)。

1.2 仪器与设备

MS105DU 电子天平(精度 0.01 g, 瑞士梅特勒-托利多国际有限公司); XSR105 电子天平(精度 0.1 mg, 德国赛多利斯科学仪器有限公司); Multiwave 7000 微波消解仪(奥地利安东帕公司); K-370 自动凯氏定氮仪(上海仪电科学仪器股份有限公司); UH-06 实验型高压均质机[永联生物科技(上海)有限公司]; TG-16 医用离心机(四川蜀科仪器有限公司); Brookfield DV-II+型旋转黏度计(广东东南科创科技有限公司); HH 系列恒温水浴锅(上海一恒科学仪器有限公司); LRH-1505 生物培养箱(广东省医疗器械厂); DHG-9240A 电热恒温干燥箱(上海精宏实验设备有限公司); GM 200 高速万能粉碎机(德国飞驰有限公司); LDZX-75KBS 立式压力蒸汽灭菌器(上海申安医疗器械厂)。

1.3 试验方法

1.3.1 工艺流程

纯牛奶→调配(加入白糖、紫薯粉、桑葚汁)→匀浆→预热→均质→灭菌→冷却→接种→发酵→冷藏后熟→成品

1.3.2 关键操作点

(1)桑葚汁的制备。桑葚干挑选、除杂后清洗, 用 20 ℃水浸泡(桑葚与水的质量比为 1:30) 60 min, 用双层纱布过滤取汁备用。

(2)紫薯粉的制备。挑选新鲜紫薯洗净, 在沸水中浸泡 5 min, 去皮, 切成 1 cm 厚小块, 入锅蒸熟, 取出放凉沥干水分, 在 60 ℃下烘干, 冷却, 粉碎, 过 120 目筛, 入干燥密封容器保存。

(3)调配。准确称取 100 g 纯牛乳, 按比例加入一定量的白砂糖、紫薯粉、桑葚汁, 混合均匀。

(4)预热、均质、杀菌。将调配好的乳液预热至 60~70 ℃, 在 16~20 Mpa 下均质处理, 然后采用 85~90 ℃、杀菌 5 min。

(5)接种、发酵。将杀菌后的乳液迅速冷却至 42 ℃左

右, 然后按照比例加入酸奶发酵剂进行发酵。

(6)冷却、后熟。将发酵好的酸奶立即放到 0~4 ℃冰箱, 冷藏后熟。

1.3.3　单因素试验

以 100 g 牛奶, 0.1%酸奶发酵剂为基础, 分别以紫薯粉与桑葚汁的质量配比、白砂糖质量添加量、发酵时间为单因素, 以黏度、持水力、酸度、乳清析出率和感官综合评分为紫薯-桑葚酸奶的评价指标, 探讨各因素的最佳工艺参数。在研究其中一个变量对紫薯-桑葚风味酸奶品质影响时, 控制其他变量不变, 即紫薯粉与桑葚汁的质量配比为 2:4、白砂糖质量添加量为 6%、发酵时间为 5.0 h, 分别研究不同紫薯粉与桑葚汁的质量配比(0:4、1:4、2:4、3:4、4:4)、不同白砂糖质量添加量(4%、5%、6%、7%、8%)、不同发酵时间(3.5、4.0、4.5、5.0、5.5 h)对酸奶品质的影响。

1.3.4　响应面试验

在单因素试验结果的基础上, 选取紫薯粉与桑葚汁的配比、白砂糖添加量、发酵时间为自变量, 感官综合评分为因变量, 利用 Design-Expert 13 软件设计响应面试验, 优化紫薯-桑葚酸奶的工艺, 通过分析和建模确定该酸奶的最优配方, 再进行验证性试验。表 1 为响应面试验因素水平。

表 1　响应面试验因素水平表

Table 1　Table of resnonse surface test factor level

水平	因素		
	A: 紫薯粉:桑葚汁(*m*:*m*)	*B*: 白糖添加量/%	*C*: 发酵时间/h
–1	1:4	5	4.5
0	2:4	6	5.0
1	3:4	7	5.5

1.3.5　感官评价

参考 GB 19302—2025《食品安全国家标准 发酵乳》及相关文献[19–21], 制定了适用于紫薯-桑葚复合酸奶的感官评定标准。评价小组由 10 名经过培训的成员构成(男女各 5 人), 依据产品的色泽、风味、组织状态、口感等指标, 对多种配方样品进行感官评分, 具体评分标准见表 2。

1.3.6　黏度的测定

样品黏度采用旋转黏度计测定。测试在室温条件下进行, 选用适配转子, 转速恒定为 6 r/min。测定总时长为 1 min, 每间隔 20 s 记录一次数据, 各样品均重复测试 3 次, 结果取平均值。

1.3.7　持水力的测定

依据参考文献[22–23]所述方法, 首先称量空离心管的质量 m_0 (g), 随后向管内加入定量酸奶样品, 称得此时总质量为 m_1 (g)。在 4 ℃条件下, 以 5000 r/min 离心处理 30 min, 去除上清液, 再次称量沉淀与离心管的总质量 m_2 (g), 持水力按式(1)计算:

$$\text{持水力}/\% = \frac{m_2 - m_0}{m_1 - m_0} \times 100\% \tag{1}$$

1.3.8　乳清析出率的测定

参考文献[24–26]的测定方法并略作修改, 称取约 20 g (W_0)酸奶样品于 50 mL 离心管中, 在 4 ℃、3000 r/min 条件下离心 20 min, 小心移除并称量析出的乳清质量 W_1 (g), 乳清析出率按式(2)计算:

$$\text{乳清析出率}/\% = \frac{W_1}{W_0} \times 100\% \tag{2}$$

1.3.9　理化指标和微生物指标测定

酸度的测定参考 GB 5009.239—2016《食品安全国家标准 食品酸度的测定》; 蛋白质、脂肪、非脂乳固体和微生物指标的测定均参考 GB 19302—2025 规定的方法进行检测。

表 2　紫薯-桑葚酸奶的感官评分标准

Table 2　Table of sensory evaluation criteria for *Ipomoea batatas-Morus alba* yogurt

项目	评分标准		
色泽 (10 分)	色泽均匀, 呈浅紫色 (7~10)	色泽基本均匀, 紫色偏暗 (4~6)	色泽不均匀, 呈暗紫色 (1~3)
风味 (20 分)	紫薯桑葚味浓郁、协调, 风味明显 (15~20)	紫薯桑葚味偏淡且不够协调, 风味较明显(6~14)	紫薯桑葚味不协调, 个别有异味, 风味不明显(0~5)
组织状态 (25 分)	表面光滑, 无或少量乳清析出, 细腻柔和, 黏稠性好, 质地均匀, 无气泡(20~25)	表面较光滑, 有乳清析出, 黏稠性欠佳, 有分层, 少量气泡(10~19)	表面粗糙, 大量乳清析出, 分层明显或有大块颗粒状凝块 (0~9)
口感 (35 分)	酸甜适中, 口感爽滑 (25~35)	酸甜不够协调, 口感略显粗糙, 不柔和, 尚能接受 (10~24)	过酸或者过甜, 口感粗糙, 难以接受 (0~9)
整体接受度 (10 分)	非常喜欢(8~10)	比较喜欢(4~7)	不喜欢(0~3)

1.4 数据处理

采用 Design-Expert 13 软件进行响应面试验设计和统计分析, 试验数据采用 Excel 2025 和 SPSS 25.0 软件进行分析处理。

2 结果与分析

2.1 紫薯粉与桑葚汁配比对酸奶品质的影响

由表 3 可知, 随着紫薯粉占比的提高, 酸奶黏度呈先下降后上升趋势, 在配比为 1:4 (*m*:*m*, 下同)时黏度最低(20.14 Pa・s), 随后逐渐升高, 在配比 4:4 时黏度最高(27.86 Pa・s), 较配比为 1:4 时增幅 38.33%; 酸奶酸度持续下降, 从 0:4 的 67.24°T 降至 4:4 的 61.62°T, 降幅 8.36%。当配比为 2:4 时, 酸奶持水力达最高(58.16%), 乳清析出率达最低(26.12%), 较 0:4 组持水力提升 19.67%、乳清析出率降低 16.42%, 表明该配比可显著提升体系保水能力、抑制乳清分离, 优化质构稳定性。感官评价显示, 2:4 配比得分最高(89.92 分), 较 0:4 组提升 38.27%, 显著优于其他配比(P<0.05), 说明适宜比例可同步改善质构与风味。综合分析, 紫薯粉与桑葚汁配比为 2:4 时, 酸奶整体品质最优。

2.2 白糖添加量对酸奶品质的影响

由表 4 可知, 随着白糖添加量增加, 酸奶黏度持续上升, 从 4%的 22.69 Pa・s 升至 8%的 30.12 Pa・s, 整体增幅达 32.75%; 持水力先升高后下降, 白糖添加量在 4%~7%间从 49.90%升至 56.05%(增幅 12.32%), 当添加量增至 8%时, 持水力下降至 51.72%, 较 7%下降 7.73%; 乳清析出率先下降后上升, 白糖添加量 6%时降至最低 24.00%(较 4%下降 36.15%), 表明该条件下酸奶体系对水分的束缚能力最强、稳定性最佳, 当添加量增至 8%时又上升至 38.23%, 较 6%上升 59.29%, 酸奶稳定性显著下降(P<0.05); 酸度先升后降, 白糖添加量 7%时酸度达最高 67.29°T, 当添加量增至 8%时又下降至 61.52°T。感官评分显示, 白糖添加量为 6% 时得分最高(90.12 分), 随后逐渐下降, 7%添加量时评分(89.41 分)与 6%无显著差异(P>0.05), 8%添加量时评分降至 71.78 分, 较 6%下降 20.35%, 这说明适量的白糖添加可有效协调酸奶的甜度、风味与质地, 获得最佳的感官接受度, 而过量添加白糖则会导致酸奶甜度过高, 整体可接受度大幅下降。综合分析, 白糖添加量为 6%时, 酸奶黏度适宜、持水性佳、稳定性高、感官品质最优, 为最佳添加量。

2.3 发酵时间对酸奶品质的影响

由表 5 可知, 随着发酵时间增加, 酸奶黏度呈先升后降趋势, 黏度从发酵 3.5 h 的 19.13 Pa・s 升至 5.0 h 的 27.09 Pa・s(增幅 41.61%), 5.5 h 又降至 23.63 Pa・s; 持水性在发酵 4.5 h 达到峰值(57.16%), 较发酵 3.5 h 提升 11.58%, 随后随发酵时间延长逐渐下降, 5.5 h 降至 50.35%; 乳清析出率整体呈先降后升趋势, 发酵 5.0 h 时降至最低(26.10%), 较发酵 3.5 h 下降 22.74%, 表明该条件下酸奶体系保水能力最强、稳定性最佳, 5.5 h 回升至 32.92%, 稳定性明显下降; 酸度随发酵时间延长持续上升, 从 3.5 h 的 62.66°T 升至 5.5 h 的 68.24°T, 整体增幅 8.90%。感官评分随发酵时间延长呈先升后降趋势, 发酵 5.0 h 达到最高分(91.23 分), 较发酵 3.5 h 提升 26.43%; 当发酵时间进一步延长至 5.5 h 时, 黏度、持水力显著降低(P<0.05), 乳清析出率回升, 酸度过高, 感官评分明显下降。综合分析, 发酵时间为 5.0 h 时, 酸奶的质构、稳定性与感官品质达到理想状态, 为最优发酵时间。

表 3 紫薯粉与桑葚汁的配比对酸奶品质的影响

Table 3 Effects of *Ipomoea batatas* powder to *Morus alba* juice ratio on yogurt quality

紫薯粉:桑葚汁(*m*:*m*)	黏度/(Pa・s)	持水力/%	乳清析出率/%	酸度/°T	感官评分/分
0:4	21.72±1.65^{b}	48.60±1.01^{e}	31.25±1.33^{a}	67.24±0.31^{a}	65.03±0.17^{e}
1:4	20.14±2.24^{b}	51.15±1.03^{d}	30.56±2.05^{a}	66.19±1.08^{b}	74.36±0.20^{d}
2:4	23.99±2.35^{a}	58.16±1.31^{a}	26.12±0.46^{b}	65.04±0.42^{c}	89.92±0.25^{a}
3:4	24.53±3.01^{a}	53.37±1.22^{b}	27.63±1.92^{b}	63.96±0.34^{c}	83.78±0.16^{b}
4:4	27.86±1.86^{c}	57.31±1.01^{a}	29.41±2.13^{a}	61.62±0.25^{d}	76.24±0.20^{c}

注: 同列数据不同小写字母表示差异显著, P<0.05, 下同。

表 4 白糖添加量对酸奶品质的影响

Table 4 Effects of added sugar on yogurt quality

白糖添加量/%	黏度/(Pa・s)	持水力/%	乳清析出率/%	酸度/°T	感官评分/分
4	22.69±1.68^{d}	49.90±1.21^{b}	37.59±1.01^{a}	62.81±1.25^{b}	74.54±0.85^{c}
5	24.34±1.76^{c}	53.84±1.41^{a}	36.10±1.85^{a}	64.75±1.46^{ab}	82.63±0.72^{b}
6	25.87±2.04^{bc}	55.98±1.05^{a}	24.00±0.92^{c}	65.04±1.32^{a}	90.12±0.24^{a}
7	26.90±2.23^{ab}	56.05±2.04^{a}	30.62±0.81^{b}	67.29±1.28^{a}	89.41±0.96^{a}
8	30.12±1.56^{a}	51.72±2.07^{b}	38.23±1.68^{a}	61.52±1.35^{b}	71.78±1.28^{c}

表 5　发酵时间对酸奶品质的影响

Table 5　Effects of fermentation time on yogurt quality

发酵时间/h	黏度/(Pa • s)	持水力/%	乳清析出率/%	酸度/°T	感官评分/分
3.5	19.13±1.58^{d}	51.23±1.21^{c}	33.78±2.14^{a}	62.66±1.23^{d}	72.16±0.35^{d}
4.0	21.82±1.72^{c}	54.64±1.01^{b}	31.49±2.36^{ab}	64.56±1.55^{c}	81.85±0.54^{c}
4.5	25.91±1.46^{b}	57.16±1.32^{a}	28.23±1.98^{bc}	65.28±1.24^{bc}	89.52±0.48^{b}
5.0	27.09±2.25^{a}	54.78±1.41^{b}	26.10±1.77^{c}	66.46±1.68^{b}	91.23±0.62^{a}
5.5	23.63±2.74^{bc}	50.35±1.45^{c}	32.92±1.42^{a}	68.24±0.92^{a}	83.74±0.86^{c}

2.4　响应面优化试验结果及分析

2.4.1　响应面回归模型的建立与分析

为优化紫薯-桑葚酸奶的工艺参数, 依据 Box-Behnken 设计原理, 设计分别以紫薯粉:桑葚汁(*A*)、白糖添加量(*B*)、发酵时间(*C*)为考察因素, 以感官评分(*Y*)为响应值进行分析, 试验设计及结果见表 6。通过响应面试验得出的回归模型为: $Y=86.70+3.15A-1.06B-0.94C+0.28AB+0.25AC+0.53BC-4.59A^2-4.20B^2-2.74C^2$

响应面试验的方差分析结果见表 7 所示, 回归模型的 $P<0.0001$, 说明回归模型达极显著水平; 失拟项检验的 $P=0.1975>0.05$, 失拟项检验不显著, 表明此模型成立, 能够利用这个模型来预测紫薯-桑葚酸奶该工艺条件对感官评分的影响。其中一次项 *A*、*B*、*C* 和二次项 A^2、B^2、C^2 均极显著($P<0.01$); 交互项 *AB*、*AC*、*BC* 均不显著($P>0.05$)。比较表 7 中 *F* 可知, 3 个因素对紫薯-桑葚酸奶工艺品质的影响顺序为 *A*>*B*>*C*, 模型的信噪比为 35.297>4, 表明该模型的可信度高, 具有一定参考价值。通过响应面优化分析, 得到紫薯-桑葚酸奶的最佳工艺参数为: 紫薯粉:桑葚汁为 3:5 (*m*:*m*), 白糖添加量为 5.96%, 发酵时间为 4.96 h, 制作的紫薯-桑葚酸奶感官评分预测值为 87.32 分。

2.4.2　两因素交互作用分析

为进一步考察两两因素对紫薯-桑葚酸奶感官评分的影响, 采用 Design-Expert 13 软件分别做两两因素的响应面 3D 图和等高线图, 如图 1 所示。根据响应面 3D 图曲面坡

表 6　响应面试验设计及结果表

Table 6　Table of response surface design and results

试验号	*A*: 紫薯粉:桑葚汁	*B*: 白糖添加量	*C*: 发酵时间	感官评分/分
1	–1	–1	0	75.63
2	1	–1	0	82.08
3	–1	1	0	73.19
4	1	1	0	80.75
5	–1	0	–1	77.76
6	1	0	–1	82.85
7	–1	0	1	75.4
8	1	0	1	81.5
9	0	–1	–1	82.42
10	0	1	–1	79.02
11	0	–1	1	79.45
12	0	1	1	78.17
13	0	0	0	86.17
14	0	0	0	86.78
15	0	0	0	86.78
16	0	0	0	86.56
17	0	0	0	87.22

表 7　响应面试验回归方程的方差分析表

Table 7　Table ofanalysis of variance of the regression equation for the response surface test

方差来源	平方和	自由度	均方	*F*	*P*	显著性
模型	313.09	9	34.79	144.71	<0.0001	**
A	79.38	1	79.38	330.21	<0.0001	**
B	8.93	1	8.93	37.13	0.0005	**
C	7.09	1	7.09	29.48	0.0010	**
AB	0.31	1	0.31	1.28	0.2949	
AC	0.26	1	0.26	1.06	0.3373	
BC	1.12	1	1.12	4.67	0.0674	
A^2	88.65	1	88.65	368.77	<0.0001	**
B^2	74.31	1	74.31	309.11	<0.0001	**
C^2	31.52	1	31.52	131.11	<0.0001	**
残差	1.68	7	0.24			
失拟项	1.10	3	0.37	2.51	0.1975	
纯误差	0.58	4	0.15			
总和	314.77	16				
	R^2=0.9947		R^2_{Adj}=0.9878		信噪比=35.297	

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

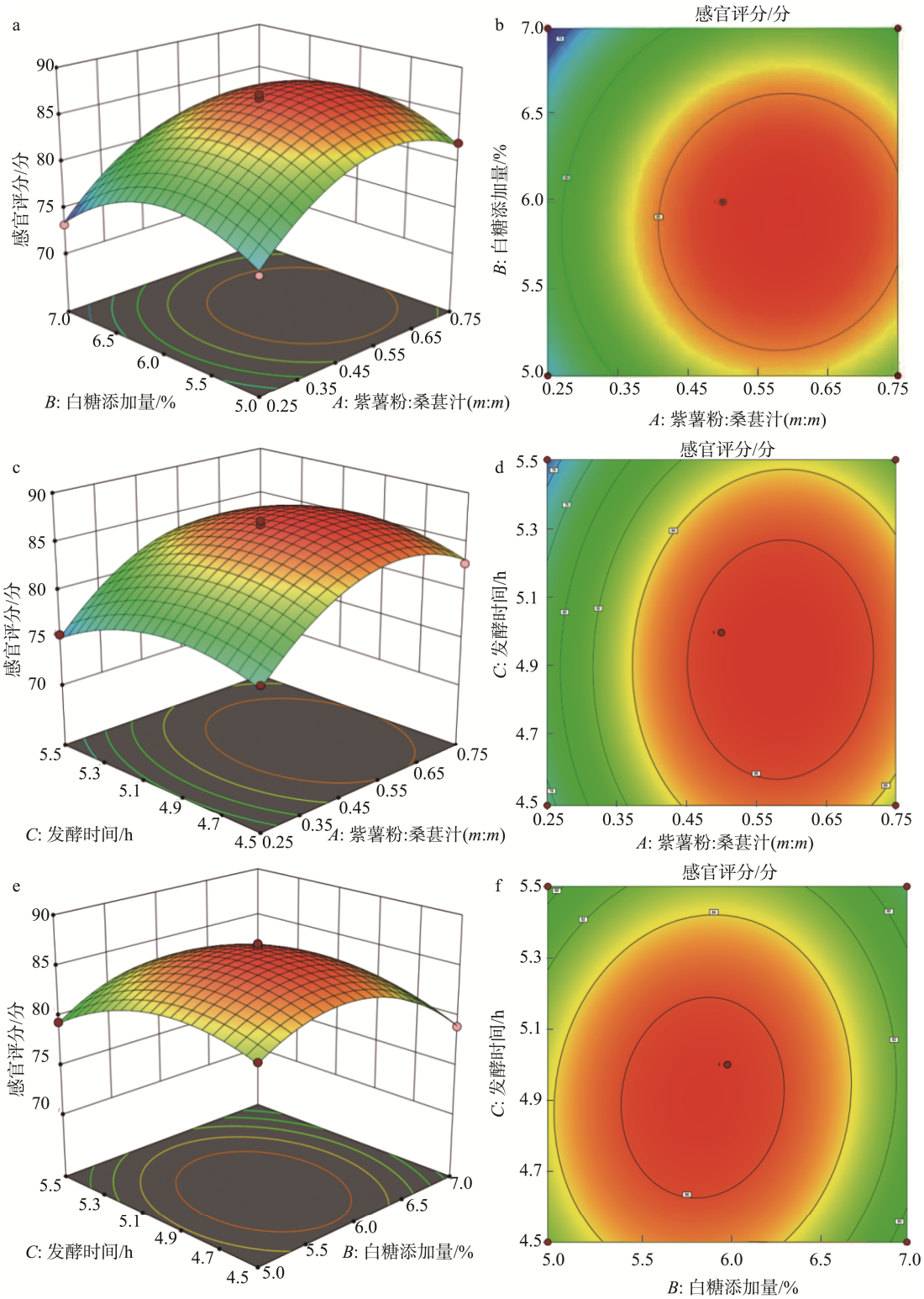


图 1 响应面图

Fig.1 Respond the surface cloud chart

度越陡峭、等高线越接近于椭圆形或扁平状，表明两因素的交互作用越显著；响应面 3D 图曲面坡度越平缓、等高线越接近于圆形，表明两因素交互作用越不显著[27–30]。由图 1 可知，响应面 3D 图均是开口向下，呈凸面，曲面坡度陡峭程度排序为图(e)>图(a)>图(c)，等高线图中椭圆程度排序为图(f)>图(b)>图(d)，即两两因素交互作用的显著程度为 *BC*>*AB*>*AC*，均接近于圆形，说明各因素之间的交互作用很小，均与回归模型方差分析所显示的交互作用显著

性结果一致。

2.4.3　工艺条件优化及验证试验

结合响应面分析和实际操作的可行性, 将最终试验优化的紫薯-桑葚酸奶工艺条件调整为紫薯粉:桑葚汁为 3:5 (*m*:*m*), 白糖添加量为 6%, 发酵时间为 5.0 h。以此工艺做 3 组平行试验, 得到紫薯-桑葚酸奶的平均感官评分为 87.04 分, 与理论预测值 87.32 分相近, 说明该模型拟合效果良好, 能较准确识别最佳工艺参数, 并对紫薯-桑葚酸奶的整体感官评分做出有效预测, 验证了模型的预测有效性与实践指导意义。

2.5　理化指标及微生物指标检测结果

由表 8 可知, 利用最优工艺进行紫薯-桑葚酸奶的制作, 测定该酸奶的理化指标及微生物指标结果分别是: 蛋白质为 3.4 g/100 g、脂肪为 2.7 g/100 g、非脂乳固体为 9.1 g/100 g、酸度为 65.5°T、乳酸菌数 1.9×10^8 CFU/g、霉菌小于 1.0 CFU/g、致病菌未检出, 质量符合 GB 19302—2025 要求。

表 8　紫薯-桑葚酸奶的理化指标及微生物指标检测结果

Table 8　Physical and chemical properties and microbiological indicator testing results of *Ipomoea batatas-Morus alba* yogurt

检测项目	标准要求	检测结果
蛋白质/(g/100 g)	≥2.3	3.4
脂肪/(g/100 g)	≥2.5	2.7
非脂乳固体/(g/100 g)	无要求	9.1
酸度/°T	≥60.0	65.5
乳酸菌数/(CFU/g)	$\geqslant1.0\times10^6$	1.9×10^8
霉菌/(CFU/g)	≤30	<1
致病菌/(CFU/g)	不得检出	未检出

3　结　论

本研究以紫薯、桑葚、牛乳为主要原料, 通过单因素试验和响应面优化, 得到紫薯-桑葚风味酸奶的最佳工艺条件为: 紫薯粉:桑葚汁为 3:5 (*m*:*m*), 白糖添加量 6%, 发酵时间 5.0 h, 此时感官评分为 87.04 分, 理化及微生物指标均符合 GB 19302—2025。

一款兼具天然薯香与果香的复合风味酸奶, 既满足了当前酸奶市场对风味多样化、品质优良化的消费需求, 又能在当前品类趋同、缺乏创新的乳制品市场中形成差异化竞争优势, 为复合风味酸奶的工业化生产提供可行的工艺参数与数据支撑, 具有一定的实际应用与推广价值。该研究提升了紫薯与桑葚的深加工利用率, 为特色农产品的增值转化提供了可行路径, 拓展了果蔬原料在乳制品中的应用。后续将进一步探究不同发酵菌株对产品风味与质构的影响, 优化产品的贮藏稳定性, 延长货架期。

参考文献

[1] 郑民, 杜晶晶, 陆毅, 等. 功能性酸奶的应用研究进展[J]. 现代食品, 2022, 28(13): 48–50.
ZHENG M, DU JJ, LU Y, *et al*. Application and research progress of functional yogurt [J]. Modern Food, 2022, 28(13): 48–50.

[2] 杨行, 尹庆贺, 王莉, 等. 市售酸奶与传统酸奶传代发酵性能的比较研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(5): 308–314.
YANG H, YIN QH, WANG L, *et al*. Comparative study on continuous subculture performance of market yogurt and traditional yogurt [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(5): 308–314.

[3] SUN-WATERHOUSE D. The development of fruit-based functional foods targeting the health and wellness market: A review [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2011, 46(5): 899–920.

[4] GONG S, YANG C, ZHANG J, *et al*. Study on the interaction mechanism of purple potato anthocyanins with casein and whey protein [J]. Food Hydrocolloids, 2021(111): 106223.

[5] LI A, XIAO R, HE S, *et al*. Research advances of *Ipomoea batatas* anthocyanins: Extraction, identification, stability, bioactivity, application, and biotransformation [J]. Molecules, 2019, 24(21): 3816.

[6] LIU H, ZHOU K, JIANG H, *et al*. Current advances in anthocyanins: Structure, bioactivity and human health [J]. Journal of Food & Nutrition Research, 2021, 60(3): 203.

[7] 曹桢. 紫薯乳酸发酵汁工艺优化及品质特性研究[D]. 重庆: 西南大学, 2022.
CAO Z. Study on technological optimization and quality characteristics of purple potato lactic acid fermented juice [D]. Chongqing: Southwest University, 2022.

[8] YUN D, WU Y, YONG H, *et al*. Recent advances in *Ipomoea batatas* anthocyanins: Extraction, isolation, functional properties and applications in biopolymer-based smart packaging [J]. Foods, 2024, 13(21): 3485.

[9] 李乳姝, 侯力天, 李若晗, 等. 桑葚酒生物活性成分及香气品质研究进展[J]. 食品工业科技, 2024, 45(7): 328–334.
LI RS, HOU LT, LI RH, *et al*. Research progress on bioactive components and aroma quality of *Morus alba* wine [J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(7): 328–334.

[10] HU Z, SU Y, JIA J, *et al*. *Morus alba*-nutritional value, health benefits, and its applications in food, biomaterials, and medicine: A systematic review with bibliometric analysis [J]. Natural Product Communications, 2025, 20(1). https://doi.org/10.1177/1934578X251314698

[11] HAO J, LU M, LI J, *et al*. Advances in the study of vascular protective effects and molecular mechanisms of *Morus alba* [J]. Food Reviews International, 2025, 41(2): 418–438.

[12] RASHWAN AK, KARIM N, XU Y, *et al*. Chemical composition, quality attributes and antioxidant activity of stirred-type yogurt enriched with *Melastoma dodecandrum* Lour fruit powder [J]. Food & Function, 2022, 13(3): 1579–1592.

[13] ALI MA, KAMAL MM, RAHMAN MH, *et al*. Functional dairy products as a source of bioactive peptides and probiotics: Current trends and future prospectives [J]. Journal of Food Science and Technology, 2022, 59(4): 1263–1279.

[14] 李轲, 辛向鸽, 马川兰. 紫薯低糖凝固型酸乳的研制及花青苷稳定性

研究[J]. 农产品加工, 2024(19): 19–22, 25.
LI K, XIN XG, MA CL. Development of low sugar yoghurt of purple potato and study on the stability of anthocyanin [J]. Farm Products Processing, 2024(19): 19–22, 25.

[15] 周紫洁, 杜传来, 翟立公, 等. 模糊数学感官评价法优化紫薯酸奶加工工艺[J]. 保鲜与加工, 2021, 21(10): 87–94.
ZHOU ZJ, DU CL, ZHAI LG, *et al*. Optimization on processing technology of purple potato yogurt by fuzzy mathematics sensory evaluation method [J]. Storage and Process, 2021, 21(10): 87–94.

[16] 谢芳, 谭志华, 唐艳, 等. 桑葚水牛乳酸奶的工艺研究[J]. 中国奶牛, 2024, 3: 46–49.
XIE F, TAN ZH, TANG Y, *et al*. Study on the production process of *Morus alba* and buffalo milk yogurt [J]. Chinese Dairy Cows, 2024, 3: 46–49.

[17] 黄玉莹, 吴敏, 吴一章, 等. 桑葚花色苷酸奶发酵条件优化及品质分析[J]. 中国酿造, 2024, 43(1): 190–196.
HUANG YY, WU M, WU YZ, *et al*. Fermentation conditions optimization and quality analysis of *Morus alba* anthocyanins yogurt [J]. China Brewing, 2024, 43(1): 190–196.

[18] 付路静, 宗鸿, 彭彦彦. 桑葚魔芋酸奶的研制[J]. 农产品加工, 2024(2): 16–20.
FU LJ, ZONG H, PENG YY. Development of *Morus alba* Konjac yogurt [J]. Farm Products Processing, 2024(2): 16–20.

[19] 倪丹, 李宁, 张海斌, 等. 褐色饮用型酸奶的研制[J]. 中国乳品工业, 2017, 45(5): 56–58.
NI D, LI N, ZHANG HB, *et al*. Development of brown drinking yoghurt [J]. China Dairy Industry, 2017, 45(5): 56–58.

[20] 田春美, 王艳领, 刘琳琳, 等. 芒果-紫苏油功能性风味酸奶的工艺优化及品质测定[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(13): 318–326.
TIAN CM, WANG YL, LIU LL, *et al*. Process optmization and quality determination of mango-perillaoil functional flavored yogurt [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(13): 318–326.

[21] 张珍林, 陈科, 程微微, 等. 基于模糊数学法和定量描述分析优化甘薯皮多酚酸奶发酵与灭菌条件工艺[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(18): 232–239.
ZHANG ZL, CHEN K, CHENG WW, *et al*. Optimization of fermentation and sterilization conditions for sweet potato peel polyphenol yogurt via fuzzy mathematical approach and quantitative descriptive analysis [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(18): 232–239.

[22] 来凤堂, 彭春波, 崔晓, 等. 复合稳定剂在猕猴桃酸奶中的应用研究[J]. 中国食品添加剂, 2021, 32(8): 84–89.
LAI FT, PENG CB, CUI X, *et al*. Study on application of compound stabilizer in kiwifruit yogurt [J]. China Food Additives, 2021, 32(8): 84–89.

[23] 成谦益. 微冻及复合保鲜涂膜液对乌鳢品质的影响[D]. 上海: 上海海洋大学, 2025.
CHENG QY. Effects of superchilling and composite preservation coating solution on the quality of *Channa argus* [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2025.

[24] WANG R, ZHANG M, MUJUMDAR AS. Effects of sweet potato puree addition on the physicochemical, rheological and sensory properties of set-type yogurt [J]. LWT-Food Science and Technology, 2021(147): 111590.

[25] SHAH NP, OLIVEIRA JC. Yogurt in health and disease prevention [M]. London: Academic Press, 2017.

[26] ZISU MB, SHAH NP. Rheological properties and microstructure of yogurt as influenced by probiotics and exopolysaccharides [J]. Journal of Food Science, 2005, 70(4): M152–M157.

[27] 徐广新, 杨仁琴, 吴连萍, 等. 响应面法优化蛹虫草酸奶发酵工艺[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(4): 1307–1312.
XU GX, YANG RQ, WU LP, *et al*. Optimization of fermentation process of *Cordyceps militaris* yoghurt byresponse surface methodology [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(4): 1307–1312.

[28] 翟丽丽, 由大鹏. 响应面法优化黑木耳多糖酸奶工艺[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(21): 7111–7117.
ZHAI LL, YOU DP. Optimization process of *Auricularia auricula* polysaccharide yoghurt byresponse surface method [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(21): 7111–7117.

[29] 陈娟, 何维彬, 吕常旭, 等. 赤藓糖醇玫瑰花风味酸奶的研制[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(6): 1959–1965.
CHEN J, HE WB, LV CX, *et al.* Preparation of erythritol rose flavored yogurt [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(6): 1959–1965.

[30] 任倩倩, 高鹏, 马致静, 等. 响应面法优化超声辅助提取北柴胡黄酮工艺及抗氧化活性[J]. 北方园艺, 2023(5): 93–100.
REN QQ, GAO P, MA ZY, *et al.* Optimization of ultrasonic assisted extraction flavonoids from*bupleurum chinense* by response surface methodology and its antioxidant activity [J]. Northern Horticulture, 2023(5): 93–100.

(责任编辑: 蔡世佳 韩晓红)