

# 玫瑰红枣酸奶块冻干工艺优化及品质分析

赵永斌<sup>1</sup>, 吴俊颖<sup>2</sup>, 刘亦菲<sup>1</sup>, 钟嘉琰<sup>1</sup>, 孟令旺<sup>1</sup>, 李振华<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>聊城大学东昌学院化学与生物系, 山东 聊城

<sup>2</sup>广州华商学院人工智能学院, 广东 广州

收稿日期: 2025年11月25日; 录用日期: 2025年12月24日; 发布日期: 2025年12月31日

## 摘要

为解决传统冻干酸奶块风味单一、质构稳定性不足的问题, 以鲜牛乳为基料, 引入玫瑰花瓣粉与红枣原浆为功能性辅料, 开展玫瑰红枣冻干酸奶块的冻干工艺优化, 经单因素实验结合响应面法优化参数, 用质构仪测定指标。结果显示, 最优工艺下产品感官评分88.5分, 硬度623.8 gf、脆度591.2 gf, 乳酸菌存活率33.8%, 水分0.96%, 符合食品安全标准, 为功能性冻干乳制品生产提供技术参考。

## 关键词

玫瑰红枣冻干酸奶块, 冻干工艺, 质构特性, 响应面法, 硬度测试

# Optimization of Freeze-Drying Process and Quality Analysis of Rose-Jujube Yogurt Blocks

Yongbin Zhao<sup>1</sup>, Junjie Wu<sup>2</sup>, Yifei Liu<sup>1</sup>, Jialong Zhong<sup>1</sup>, Lingwang Meng<sup>1</sup>, Zhenhua Li<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Chemistry and Biology, Liaocheng University Dongchang College, Liaocheng Shandong

<sup>2</sup>School of Artificial Intelligence, Guangzhou Huashang College, Guangzhou Guangdong

Received: November 25, 2025; accepted: December 24, 2025; published: December 31, 2025

## Abstract

To address the issues of single flavor and insufficient texture stability of traditional freeze-dried yogurt blocks, this study used fresh cow milk as the base material, incorporated rose petal powder and jujube puree as functional additives, and conducted freeze-drying process optimization for rose-jujube freeze-dried yogurt blocks. Single-factor experiments combined with response surface

\*通讯作者。

文章引用: 赵永斌, 吴俊颖, 刘亦菲, 钟嘉琰, 孟令旺, 李振华. 玫瑰红枣酸奶块冻干工艺优化及品质分析[J]. 食品与营养科学, 2026, 15(1): 27-36. DOI: 10.12677/hjfn.2026.151004

methodology were used to optimize the parameters, and a texture analyzer was employed to determine indicators. Results showed that under the optimal process, the product had a sensory score of 88.5 points, hardness of 623.8 gf, crispness of 591.2 gf, lactic acid bacteria survival rate of 33.8%, and moisture content of 0.96%, meeting food safety standards. This study provides technical reference for the industrial production of functional freeze-dried dairy products.

## Keywords

Rose-Jujube Freeze-Dried Yogurt Blocks, Freeze-Drying Process, Texture Properties, Response Surface Methodology, Hardness Test

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

冻干酸奶块是真空冷冻干燥技术与乳制品结合的产物, 凭借营养保留率高、货架期长、便携性强的优势, 成为乳制品消费市场的重要品类[1]。真空冷冻干燥技术通过低温真空环境下物料水分的固态直接升华, 能最大程度保留原料中的活性乳酸菌与风味物质, 较喷雾干燥技术更适用于功能性酸奶块生产[2]。

传统冻干酸奶块多以牛乳、白砂糖为核心原料, 存在风味层次单一、功能属性薄弱的局限, 且冻干工艺参数的随意性易导致产品硬度不均、脆度不足等质构问题[3]。玫瑰富含多酚、黄酮类抗氧化成分, 可赋予产品独特香气与健康功能[4]; 红枣则含有多糖、维生素 C 及矿物质[5], 其甜味特质能中和酸奶奶味并提升营养密度[6]。但玫瑰花瓣粉的纤维结构与红枣原浆的高糖分可能影响酸奶体系冻干特性(如延长冻干时间、破坏质构均匀性), 需通过工艺优化解决该矛盾。

本研究以“原料预处理-发酵-冻干成型”工艺链为基础, 结合质构测试标准, 聚焦冻干工艺环节(预冻、升华干燥、解析干燥)[7], 通过单因素实验与响应面法优化参数, 旨在开发风味协调、质构稳定的玫瑰红枣冻干酸奶块[8], 填补功能性冻干酸奶块在工艺标准化与品质控制方面的研究[9]。

## 2. 材料与方法

### 2.1. 实验材料

牧场鲜牛乳(蛋白质含量 3.2 g/100 mL, 脂肪含量 3.5 g/100 mL, 新疆昌吉牧场提供); 玫瑰花瓣粉(过 80 目筛, 多酚含量 12.5 mg/g, 云南产); 红枣原浆(可溶性固形物 68%, 新疆和田灰枣榨汁过滤制成); 果胶(低甲氧基, 食品级); 白砂糖(食品级); MRS 培养基; 无菌生理盐水; 草酸铵结晶紫染色液; 蕃红复染液; 3%  $\text{H}_2\text{O}_2$  溶液, 均为分析纯。

### 2.2. 玫瑰红枣冻干酸奶块整体工艺流程

鲜牛乳预处理→发酵→辅料混合均质→预冻→真空冷冻干燥→脱模→成品。

关键工艺节点说明: 鲜牛乳预处理: 鲜牛乳 60℃ 预热, 添加 8% 白砂糖搅拌溶解(提前验证白砂糖对发酵的影响), 采用 85℃ 巴氏杀菌 15 min (替代传统高温加热, 减少营养损失), 冷却至 38℃ 备用; 发酵: 接入 5% (v/v) 活化后的乳酸菌粉, 38℃ 恒温发酵 10 h, 至酸奶 pH 降至 4.3~4.5 (确保发酵充分, 为后续冻干提供稳定体系); 辅料混合均质: 向发酵酸奶中加入玫瑰红枣复合辅料(玫瑰花瓣粉 + 红枣原浆)、3%

果胶，采用均质器 2000 r/min 均质 5 min，确保辅料分散均匀，避免冻干后出现结块；预冻：将均质后的混合液倒入 2 cm×2 cm×1 cm 的正方形模具，置于低温冰箱中进行预冻，考察不同预冻温度与时间对冻干效率的影响；真空冷冻干燥：将预冻成型的物料移入真空冷冻干燥机托盘，设置不同冻干温度与真空度[10]，进行升华干燥与解析干燥，监测物料水分变化，确定最佳冻干时间[11]；脱模：冻干结束后，待物料温度回升至室温，脱模即得玫瑰红枣冻干酸奶块成品。

2.3. 单因素实验设计

以产品感官评分(表 1)、硬度、水分含量为评价指标，固定其他条件(发酵温度 38℃、发酵时间 10 h、果胶添加量 3%)，分别考察 4 个冻干相关关键因素的影响：玫瑰红枣复合添加量(A)：设置 1%、3%、5%、7%、9%、11%六个水平(玫瑰花瓣粉：红枣原浆 = 3:7，基于前期预实验确定比例，避免玫瑰香气过浓或红枣甜味掩盖酸奶风味)；预冻温度(B)：设置-9℃、-12℃、-15℃、-18℃、-21℃、-24℃六个水平(考察冰晶形成大小对冻干后质构的影响，冰晶过大易导致产品多孔、硬度降低)；冻干温度(C)：设置-55℃、-50℃、-45℃、-40℃、-35℃、-30℃六个水平(升华干燥阶段温度，影响水分升华速率，温度过高易导致物料融化，过低则延长生产周期) [12]；真空度(D)：设置 5 Pa、10 Pa、15 Pa、20 Pa、25 Pa、30 Pa 六个水平(影响水分升华驱动力，真空度不足易导致升华速率下降，影响产品脆度)。

Table 1. Sensory evaluation standards for freeze-dried rose and red date yogurt cubes

表 1. 玫瑰红枣冻干酸奶块感官评价标准

评价项目	评分标准	分值
外观	色泽均匀(浅粉橙色)，有光泽，无明显裂纹、气泡及杂质，玫瑰花瓣粉分散均匀	0~20
口感	酥脆适中，无粗糙感，入口易化，无粘牙，质构均匀	0~20
香气	乳香、玫瑰清香与红枣甜香协调，无异味(如焦味、涩味)	0~20
滋味	酸甜平衡，酸奶的微酸、红枣的甘甜与玫瑰的淡香融合，无单一风味突出	0~20
组织状态	内部结构紧密均匀，无乳清分离痕迹，无辅料结块	0~20

注：感官评价执行流程：1) 评价员筛选：选取 12 名年龄 20~35 岁、无乳糖不耐受及味觉障碍人员(食品专业从业者 6 名、普通消费者 6 名)；2) 评价员培训：实验前 1 周开展 3 次培训，内容包括熟悉“乳香-玫瑰香-红枣香”风味标准样、质构(酥脆/粗糙)感官锚点，统一评分尺度；3) 评价操作：样品置于白色瓷盘(避光、无异味环境)，评价员间隔 1 m 独立评分，每样品评价后用纯净水漱口，间隔 5 min 评下一样品；4) 数据处理：去除 1 个最高分与 1 个最低分后取平均值，确保数据可靠性。

2.4. 响应面法工艺优化设计

基于单因素实验结果，选取对产品品质影响显著的 3 个关键参数[13]：玫瑰红枣复合添加量(A: 3%~7%)、预冻温度(B: -21℃~-15℃)、冻干温度(C: -50℃~-40℃)为自变量，以感官评分为响应值(Y)，采用 Box-Behnken 设计(BBD)构建 3 因素 3 水平响应面实验，共 17 个实验组(含 5 次中心点重复)，因素水平编码如表 2 所示。实验数据采用 Design-Expert 13.1 软件进行回归分析，构建二次回归模型，确定最优冻干工艺参数。

2.5. 产品品质检测方法

质构指标测定：探头 P/50，测试前的速度 2 mm/s，测试速度 2 mm/s，测试后速度 10 mm/s，触发力 5 gf，应变 70%，间隔时长 5 s。每个样品选取 3 个均匀部位进行测定，记录硬度(gf，物料发生一定变形所需的最大力)、脆度(gf，物料首次破裂时的力值)、弹性(无单位，物料形变后恢复原状的能力)，取平均值；水分含量测定：参照 GB 5009.3-2016《食品安全国家标准食品中水分的测定》，采用直接干燥法[14]：

**Table 2.** Experimental factors and level coding of Response Surface Methodology (RSM)  
**表 2.** 响应面法实验因素与水平编码

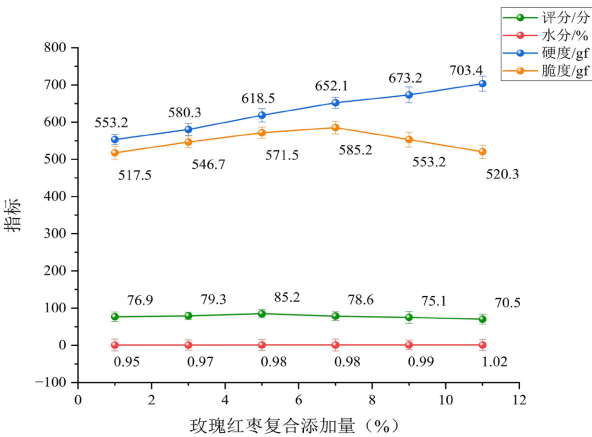
水平	因素		
	A: 玫瑰红枣复合添加量(%)	B: 预冻温度(℃)	C: 冻干温度(℃)
-1	3	-21	-50
0	5	-18	-45
1	7	-15	-40

称取 2.000 g 样品，置于 105℃烘箱中烘干至恒重，计算水分含量(水分含量 = (烘干前质量 - 烘干后质量)/烘干前质量 × 100%)；乳酸菌存活率测定：稀释平板计数法：分别取冻干前发酵酸奶与冻干后成品各 10 g，用无菌生理盐水梯度稀释至 10<sup>-6</sup>~10<sup>-8</sup>，取 0.1 mL 稀释液涂布 MRS 培养基平板，37℃培养 48 h，计数菌落(CFU/g)，存活率 = (冻干后乳酸菌数/冻干前乳酸菌数) × 100%；微生物安全性检测：参照 GB 4789.3-2016《食品安全国家标准食品微生物学检验大肠菌群计数》，采用平板计数法测定大肠杆菌数；蛋白质含量测定[15]：称取 4.000 g 样品，加入 0.4 g 硫酸铜、6 g 硫酸钾及 20 mL 浓硫酸，420℃消解 1 h 至消化液呈透明绿色，冷却后用凯氏定氮仪测定蛋白质含量[16]。

3. 实验结果与分析

3.1. 玫瑰红枣复合添加量对产品品质的影响

玫瑰红枣复合添加中，红枣多糖与牛奶蛋白形成氢键增强结构致密性、玫瑰膳食纤维促进细小冰晶形成，但添加量过多时，会因红枣高糖分提高物料黏度或玫瑰纤维分散不完全，导致产品品质下降。由图 1 可知，玫瑰红枣复合添加量对产品感官评分、硬度及水分含量均有显著影响。当添加量为 1%~5%时，感官评分随添加量增加而上升，5%时达到峰值(85.2 分)，此时玫瑰香气淡雅，红枣甜味与酸奶酸味协调，且玫瑰花瓣粉分散均匀，未出现粗糙感；硬度随添加量增加略有上升(从 553.2 gf 升至 618.5 gf)，因红枣原浆中的糖分在冻干后形成晶体，可提升产品结构稳定性；水分含量则维持在 0.95%~1.02%，变化较小。当添加量超过 5%后，感官评分显著下降，7%时降至 78.6 分，主要因玫瑰花瓣粉过量导致口感粗糙，红枣原浆的高糖分使产品甜腻，掩盖酸奶本味；硬度虽继续上升至 652.1 gf，但脆度下降(从 585.2 gf 降至 520.3 gf)，产品出现“硬而不脆”的问题；水分含量无明显变化。综合来看，玫瑰红枣复合添加量的适宜范围为 3%~7%，最佳水平初步确定为 5%。



**Figure 1.** Effect of combined addition amount of rose and red date on product quality  
**图 1.** 玫瑰红枣复合添加量对产品品质的影响

### 3.2. 预冻温度对产品品质的影响

预冻温度通过调控冰晶形态(慢速预冻形成粗大不规则冰晶、快速预冻形成细小均匀冰晶)及物料是否达到玻璃化转变温度,影响酸奶蛋白网络结构与产品质构(硬度、脆度)及水分。由图 2 知:  $-9^{\circ}\text{C}$  降至  $-18^{\circ}\text{C}$  时,感官评分(76.3 $\rightarrow$ 84.8 分)、硬度(550.2 $\rightarrow$ 615.7 gf)、脆度(510.5 $\rightarrow$ 582.3 gf)上升,水分(1.25% $\rightarrow$ 0.98%)下降,因  $-18^{\circ}\text{C}$  冰晶细小均匀,孔隙规则、质构酥脆且水分升华彻底;低于  $-18^{\circ}\text{C}$  ( $-21^{\circ}\text{C}\sim-26^{\circ}\text{C}$ ),感官略降,硬度升高但脆度降低,且预冻时间延长(4 $\rightarrow$ 6、8 h)增加成本。故预冻温度适宜范围为  $-21^{\circ}\text{C}\sim-15^{\circ}\text{C}$ ,最佳水平初步确定为  $-18^{\circ}\text{C}$ 。

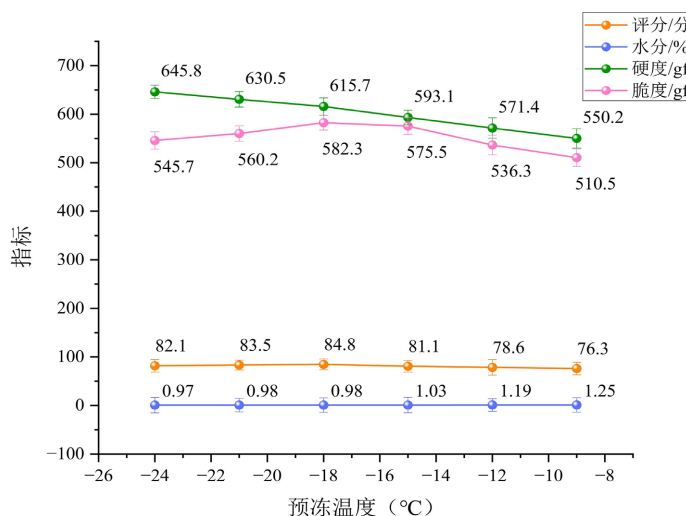


Figure 2. Effect of pre-freezing temperature on product quality  
图 2. 预冻温度对产品品质的影响

### 3.3. 冻干温度对产品品质的影响

冻干温度与真空度通过协同调控冰晶升华的饱和蒸汽压差(热力学驱动力)和传质阻力,平衡水分升华速率与物料稳定性。冻干温度(升华干燥阶段)直接影响水分升华速率与产品活性成分保留(图 3)。当冻干温度从  $-55^{\circ}\text{C}$  升至  $-45^{\circ}\text{C}$  时,感官评分从 80.2 分升至 85.5 分,水分含量从 1.12% 降至 0.96%,乳酸菌存活率从 30.5% 升至 34.2%。这是因为  $-45^{\circ}\text{C}$  时水分升华速率适中,既能保证水分充分去除,又能避免温度过高导致乳酸菌失活;而  $-50^{\circ}\text{C}$  时升华速率过慢,水分残留量高,产品口感偏软。当冻干温度超过  $-45^{\circ}\text{C}$  ( $-40^{\circ}\text{C}\sim-30^{\circ}\text{C}$ ) 时,感官评分显著下降,水分含量虽继续降至 0.85%,但乳酸菌存活率降至 25.1%,且部分样品出现表面融化现象,硬度从 618.5 gf 降至 520.1 gf,脆度显著下降。因此,冻干温度的适宜范围为  $-50^{\circ}\text{C}\sim-40^{\circ}\text{C}$ ,最佳水平初步确定为  $-45^{\circ}\text{C}$ 。

### 3.4. 真空度对产品品质的影响

真空度通过提供水分升华驱动力影响冻干效率与产品质构(图 4): 真空度从 5 Pa 升至 10 Pa 时,感官评分从 82.5 分升至 85.3 分,水分含量从 1.05% 降至 0.97%,脆度从 560.2 gf 升至 585.7 gf,因 10 Pa 真空环境适宜,水分升华稳定且产品孔隙均匀;而 5 Pa 真空度过高,易致物料表面结壳,影响内部水分逸出。真空度超 10 Pa (15~30 Pa) 时,感官评分降至 72.8~82.1 分,水分含量升至 1.02%~1.31%,脆度降至 450.3~550.3 gf,因真空度不足导致升华速率下降、水分残留增加,产品口感偏硬。综上,真空度适宜范围为 5~20 Pa,最佳水平初步确定为 10 Pa。



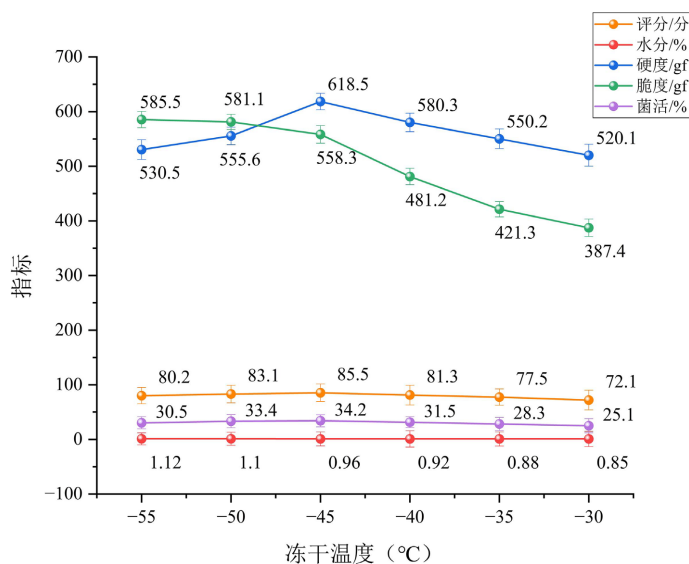


Figure 3. Effect of freeze-drying temperature on product quality

图 3. 冻干温度对产品品质的影响

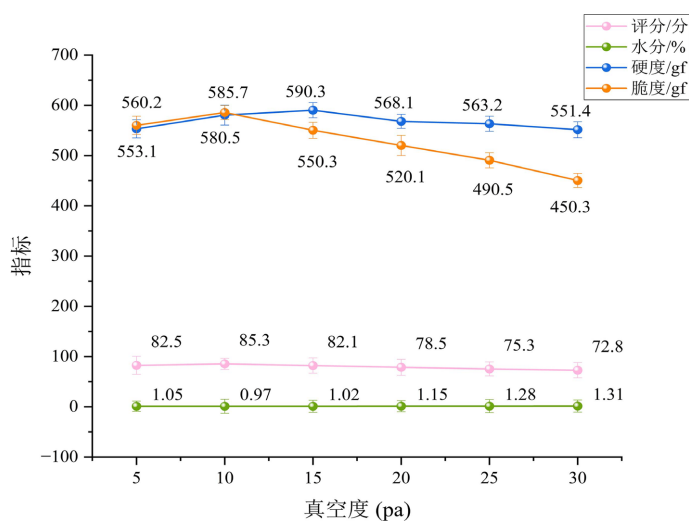


Figure 4. Effect of vacuum degree on product quality

图 4. 真空度对产品品质的影响

### 3.5. 回归模型构建与显著性检验

基于单因素实验结果, 选取玫瑰红枣复合添加量(A)、预冻温度(B)、冻干温度(C)为自变量, 感官评分(Y)为响应值, 进行 Box-Behnken 设计实验, 实验方案与结果如表 3 所示。利用 Design-Expert 13.1 软件对实验数据进行二次回归分析, 得到感官评分与自变量的二次回归方程:

$$Y = 88.42 + 0.4375A + 0.6250B + 0.6625C + 0.1250AB + 0.0500AC + 0.0250BC - 6.51A^2 - 2.14B^2 - 2.96C^2$$

对回归模型进行方差分析(表 4), 结果表明: 模型的 F 值为 184.01,  $P < 0.0001$ , 说明模型极显著; 失拟项的  $P = 0.0734 > 0.05$ , 表明模型无显著失拟现象, 对实验数据的拟合效果良好。模型的决定系数  $R^2 = 0.9958$ , 调整决定系数  $R^2_{Adj} = 0.9904$ , 说明模型可解释 99.04% 的响应值变异, 拟合度优异, 适用于玫瑰红枣冻干酸奶块冻干工艺参数的优化; 同时, 预测决定系数  $R^2_{Pred} = 0.9451$  与调整决定系数的差值小于

0.2, 进一步验证模型可靠性; 信噪比(Adeq Precision)为 34.4374 (远大于 4), 表明模型信号充足, 可有效指导工艺优化。

**Table 3.** Experimental scheme and results of Response Surface Methodology (RSM)

**表 3.** 响应面法实验方案与结果

实验号	A	B	C	Y 感官评分
1	-1	-1	0	78.5
2	1	-1	0	79.2
3	-1	1	0	80.1
4	1	1	0	81.3
5	-1	0	-1	77.8
6	1	0	-1	78.5
7	-1	0	1	79.3
8	1	0	1	80.2
9	0	-1	-1	82.5
10	0	1	-1	83.1
11	0	-1	1	83.5
12	0	1	1	84.2
13	0	0	0	88.7
14	0	0	0	88.3
15	0	0	0	88.6
16	0	0	0	88.4
17	0	0	0	88.1

**Table 4.** Analysis of Variance (ANOVA) of regression model

**表 4.** 回归模型方差分析

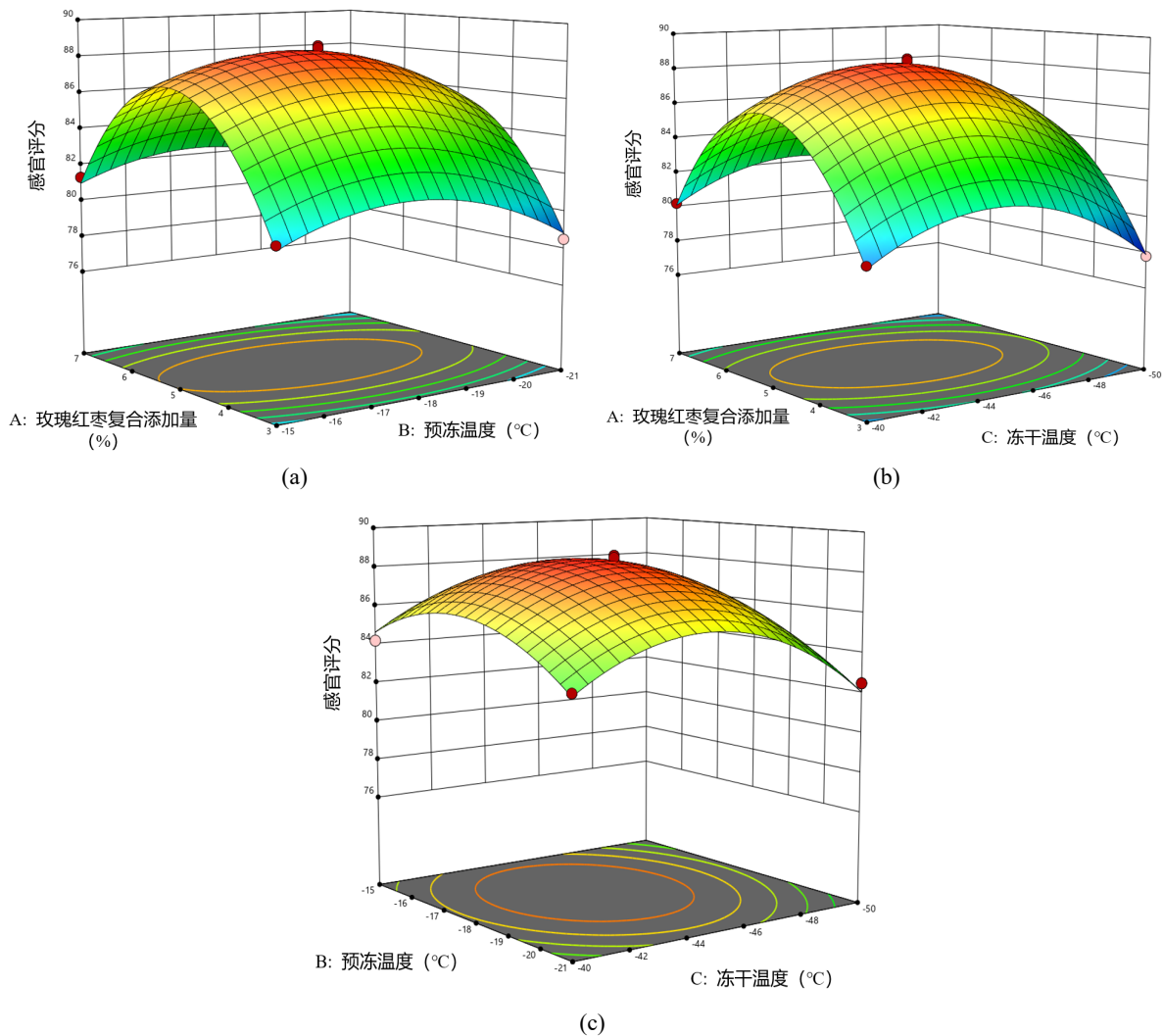
变异来源	平方和	自由度	均方差	F-value	P-value	显著性
模型 model	262.73	9	29.19	184.01	<0.0001	**
A-玫瑰红枣复合添加量	1.53	1	1.53	9.65	0.0172	*
B-预冻温度	3.13	1	3.13	19.7	0.003	**
C-冻干温度	3.51	1	3.51	22.13	0.0022	**
AB	0.0625	1	0.0625	0.394	0.5501	
AC	0.01	1	0.01	0.063	0.809	
BC	0.0025	1	0.0025	0.0158	0.9036	
A <sup>2</sup>	178.44	1	178.44	1124.81	<0.0001	**
B <sup>2</sup>	19.19	1	19.19	120.98	<0.0001	**
C <sup>2</sup>	36.89	1	36.89	232.54	<0.0001	**
残差 residual	1.11	7	0.1586			

续表

失拟项 lack of fit	0.8825	3	0.2942	5.16	0.0734
纯误差 pure error	0.228	4	0.057		
总变异 cor total	263.84	16			

### 3.6. 因素交互作用分析

通过响应面三维图与等高线图分析各因素间的交互作用。等高线的形状反映交互作用的强弱，圆形表示交互作用弱，椭圆形表示交互作用强。由图 5 可知，玫瑰红枣复合添加量(A)与预冻温度(B)的等高线呈椭圆形，表明二者交互作用显著，与方差分析结果一致。当玫瑰红枣复合添加量为 5%、预冻温度为 $-18^{\circ}\text{C}$ 时，响应面达到峰值，感官评分最高；若玫瑰红枣添加量过高( $>7\%$ )，即使预冻温度适宜，感官评分也会因风味失衡而下降；若预冻温度过高( $>-15^{\circ}\text{C}$ )，则会因冰晶过大导致产品质构变差，抵消玫瑰红枣的风味优势。



**Figure 5.** Response surface plots of interactions among each response  
**图 5.** 各响应交互作用响应面图



3.7. 最优工艺参数验证

通过 Design-Expert 13.1 软件求解回归方程，得到玫瑰红枣冻干酸奶块的最优冻干工艺参数：玫瑰红枣复合添加量 5.21%、预冻温度-17.5℃、冻干温度-45.2℃。结合实际生产操作便利性，调整工艺参数为：玫瑰红枣复合添加量 5%(玫瑰花瓣粉 1.5%+ 红枣原浆 3.5%)、预冻温度-18℃、预冻时间 4 h、冻干温度-45℃、真空度 10 Pa、冻干时间 12 h。在此条件下进行 3 次平行验证实验，测得产品感官评分平均值为 88.4 分，与模型预测值(88.7 分)的相对误差仅 0.34%，表明模型预测可靠，最优工艺参数可行。

3.8. 最优工艺下产品品质指标测定结果

在最优冻干工艺参数下制得的玫瑰红枣冻干酸奶块，品质表现良好。由表 5 可知质构方面，硬度 623.8 gf、脆度 591.2 gf、弹性 0.52，均在传统酸奶块质构指标合理范围内，且硬度与脆度比值近 1.06，口感酥脆适中；理化上，水分含量 0.96%，符合相关标准，蛋白质含量 4.8 g/100 g，高于市售普通冻干酸奶块；微生物指标里，乳酸菌存活率 33.8%，接近传统冻干酸奶块，乳酸菌数达  $3.3 \times 10^7$  CFU/g，符合标准，大肠杆菌未检出；感官上，外观均匀呈浅粉橙色，玫瑰花瓣粉分散好，口感酥脆无粗糙感，香气协调、滋味酸甜平衡，综合评分 88.5 分，优于传统冻干酸奶块。

Table 5. Quality indicators of freeze-dried rose and red date yogurt cubes under the optimal process  
表 5. 最优工艺下玫瑰红枣冻干酸奶块品质指标

指标类型	具体指标	测定结果	标准要求
质构指标	硬度(gf)	623.8	-
	脆度(gf)	591.2	-
	弹性	0.52	-
理化指标	水分含量(%)	0.96	≤6
	蛋白质含量(g/100 g)	4.8	-
微生物指标	乳酸菌存活率(%)	33.8	-
	乳酸菌数(CFU/g)	$3.3 \times 10^7$	≥10 <sup>6</sup>
	大肠杆菌(CFU/g)	未检出	≤100
感官指标	综合评分	88.5	-

4. 结论

本研究以玫瑰红枣复合添加量、预冻温度、冻干温度为自变量，感官评分为响应值，结合真空度单因素实验，经 Box-Behnken 设计与响应面分析优化玫瑰红枣冻干酸奶块冻干工艺。结果表明，建立的二次回归模型极显著( $P < 0.0001$ )，拟合度优异( $R^2 = 0.9958$ )，可有效预测感官评分；单因素实验显示真空度 10 Pa 时产品表现最佳。最终确定最优工艺参数为：玫瑰红枣复合添加量 5%(玫瑰花瓣粉 1.5%+ 红枣原浆 3.5%)、预冻温度-18℃、预冻时间 4 h、冻干温度-45℃、真空度 10 Pa、冻干时间 12 h。验证实验中，产品感官评分平均值为 88.4 分，与预测值相对误差仅 0.34%，表明模型可靠、工艺可行，可为其工业化生产提供技术依据。

基金项目

聊城大学东昌学院大学生创新创业训练计划项目(2025DCA01)。

## 参考文献

- [1] 胡志远, 郭婉雪, 胥家康, 等. 响应面法优化蜂蜜胡萝卜酸奶发酵工艺研究[J]. 粮食与食品工业, 2025, 32(2): 36-41, 49.
- [2] 倪明龙, 任雅清, 郑嘉城, 等. 柚子粉的喷雾干燥法制备及复合柚子茶粉配方工艺优化[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(4): 234-242.
- [3] 吴冉, 白宇涵, 马航, 等. 预处理方法及联用技术在果蔬真空冷冻干燥中的应用研究进展[J]. 现代食品, 2024, 30(13): 48-55.
- [4] 闫帅. 玫瑰多糖的提取纯化、结构表征、生物活性及应用研究进展[J]. 食品与机械, 2024, 40(10): 236-242.
- [5] 彭玲, 赵云, 焦文佳, 等. 红枣雪梨汁复合奶啤的研制[J]. 食品工业, 2017, 38(4): 67-72.
- [6] 于振林, 刘亚琼, 陈雪洋, 等. 响应面优化白地霉果胶酶液化红枣浆工艺[J]. 食品工业, 2018, 39(2): 3-8.
- [7] 史德芳, 范秀芝, 殷朝敏, 等. 基于能耗分析的真空冷冻干燥食用菌汤块制备中试[J]. 农业工程学报, 2021, 37(10): 253-260.
- [8] 邹少强. 正交实验优化冻干酸奶块配方及其品质分析[J]. 福建轻纺, 2023(6): 12-15.
- [9] 杨钧, 卢珍兰, 韦科创, 等. 响应面法优化石斛花奇亚籽酸奶果冻发酵工艺研究[J]. 粮食与食品工业, 2025, 32(4): 35-41, 49.
- [10] 彭润玲, 王威, 韦妍, 等. 真空冷冻干燥猕猴桃粉工艺的研究[J]. 真空, 2023, 60(2): 20-25.
- [11] 许铭珊. 鲜参入药生脉冻干口崩片的制备及其质量评价研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京中医药大学, 2023.
- [12] 韩天宇. 谷物杂粮冻干代餐粥的研制[D]: [硕士学位论文]. 泰安: 山东农业大学, 2023.
- [13] 左秀凤, 梁会会, 周豫飞, 等. 挤压工艺参数对速煮重组米食用品质的影响[J]. 中国粮油学报, 2018, 33(8): 81-86.
- [14] 杨智博, 谭小琴, 周才琼. 渝黔地区细菌发酵型豆豉食用安全性及风味特点比较分析[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(5): 124-133.
- [15] 蒋源渊. 低温饮用型酸奶的开发研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 西南大学, 2020.
- [16] 金根娣, 马武生, 刘俊. 凯氏定氮法测定吡拉西坦含量的研究[J]. 扬州职业大学学报, 2019, 23(1): 26-29.