

纯植物基藜麦酸奶发酵工艺优化及其品质研究

王 琪¹, 李倩昱¹, 张 宏², 秦文君³, 蔡 瑾⁴

(1.山西大学生命科学学院, 山西太原 030031; 2.山西五台山天域农业开发有限公司, 山西太原 030027;
3.山西省中医院营养科, 山西太原 030012; 4.山西大学应用化学研究所, 山西太原 030006)

摘 要: [目的]以藜麦浆为主要原料, 采用唾液链球菌嗜热亚种 (*Streptococcus salivarius* subsp. *thermophilus*)、德氏乳杆菌保加利亚亚种 (*Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus*) 发酵制备藜麦酸奶, 并考察其基本性质和抗氧化活性。[方法]在单因素试验(发酵时间、发酵温度、接菌量和白砂糖添加量)的基础上, 通过响应面试验建立最佳发酵工艺。[结果]发酵时间和发酵温度对藜麦酸奶的品质影响极显著 ($P<0.01$), 其酸奶发酵条件为发酵时间8.3 h, 发酵温度43.4 ℃, 接菌量1.2%, 白砂糖添加量4.2%, 在该条件下制得藜麦酸奶理化指标良好, 微生物均达标, DPPH自由基清除率为(73.41 0.91)%, 感官评分为(88.33 1.21)分。[结论]以藜麦为原料进行发酵, 可制得营养价值较高, 并具有抗氧化能力的藜麦酸奶。
关键词: 藜麦; 藜麦酸奶; 工艺优化; 感官评分; 抗氧化活性

文章编号: 1671-4393 (2026) 01-0099-10 DOI:10.12377/1671-4393.26.01.15

Optimization of Fermentation Process and Quality Research of Pure Plant-based Quinoa Yogurt

WANG Qi¹, LI Qianyu¹, ZHANG Hong², QIN Wenjun³, CAI Jin⁴

(1.School of Life Science, Shanxi University, Taiyuan Shanxi 030031; 2.Shanxi Wutai Mountain Tianyu Agricultural Development Co., Ltd., Taiyuan Shanxi 030027; 3.Nutritional Department, Shanxi Traditional Chinese Medical Hospital, Taiyuan Shanxi 030012; 4.Institute of Applied Chemistry, Shanxi University, Taiyuan Shanxi 030006)

Abstract: [Objective]Using quinoa puree as the main raw material, and *Streptococcus salivarius* subsp. *thermophilus* and *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* were simultaneously used to ferment quinoa for the

基金项目: 藜麦酸奶理化指标的测定(企业开发项目)(01130125060114)
作者简介: 王 琪(1982-), 女, 山西忻州人, 博士, 讲师, 研究方向为微生物与功能食品;
李倩昱(2000-), 女, 山西晋城人, 硕士, 研究方向为微生物与功能食品;
张 宏(1971-), 男, 山西忻州人, 本科, 研究方向为农产品加工;
秦文君(1970-), 女, 山西太原人, 硕士, 主任医师, 研究方向为慢病与营养干预;
蔡 瑾(1982-), 女, 山西太原人, 博士, 副教授, 研究方向为食品加工与植物保护。

preparation of quinoa yogurt, and its basic properties and antioxidant activities were investigated.[Method]Based on the single-factor experiments (fermentation time, fermentation temperature, inoculation amount and the addition amount of white granulated sugar), the optimal fermentation process was established through the response surface experiment.[Result]Fermentation time and fermentation temperature had significant effects on the quality of quinoa yogurt ($P<0.01$), the conditions for yogurt fermentation were as follows: the fermentation time was 8.3 h, the fermentation temperature was 43.4 °C, the inoculation amount was 1.2%, the sugar content was 4.2%, the physicochemical indicators of the quinoa yogurt obtained under this condition were good, all the microorganisms met standards, the free radical scavenging rate of DPPH was (73.41 0.91) %, and the sensory evaluation score was (88.33 1.21) points. [Conclusion]By fermenting quinoa as raw material, a quinoa yogurt with high nutritional value and antioxidant capacity could be obtained.

Keywords: quinoa; quinoa yogurt; process optimization; sensory evaluation; antioxidant activity

藜麦 (*Chenopodium quinoa* Willd.)，是一种原生植物，起源于安第斯高原（南美洲）秘鲁^[1]。作为一种无麸质双子叶假谷物，藜麦富含蛋白（12%~20%），含有所有必需氨基酸，超过大多数其他谷物^[1]。此外，藜麦也是维生素^[2]、膳食纤维以及多酚类物质的良好来源，具有独特的营养价值^[3]，如降血糖、降胆固醇、增强免疫力等^[4, 5]。藜麦的种植具有显著发展潜力，其对环境条件适应性强，能够在高海拔及寒冷地区实现成功种植^[6]。目前国内利用藜麦生产的产品主要有藜麦无麸质面包^[7]、藜麦酒^[8]、藜麦醋等^[9]，在酸奶领域的应用尚属空白。

传统发酵乳是以牛羊乳为原料，杀菌后加入乳酸菌发酵而成风味独特的乳制品，具有改善人体肠道微生物平衡、提高人体免疫力等功效^[10]。但随着纯素食主义和乳糖不耐受人群的增多^[11]，国内外学者逐渐将研究重点转向植物基奶代替部分牛乳，并致力于研发植物基发酵乳。我国已推出多种以大豆为原料的植物基发酵乳，但其口感、风味无法达到消费者要求，其市场也无法达到预期。植物基发酵乳是以植物为主要原料，经发酵使pH值降低后制成的乳制品^[12]。这类乳品具有较高的营养价值，其功能特性包括抑菌作用、降低心血管疾病发病风险、抗氧化作用等^[13]。丁雨红等^[14]以沙棘和牛乳为原

料，研制一款复合发酵乳，并探究其抗氧化活性；周勇等^[15]研究沙棘发酵乳的发酵工艺。然而，上述研究均以牛乳为主要基质，仅添加少量植物基成分，目前关于纯植物基发酵乳的研究仍较为缺乏。

因此，本研究选用藜麦为主要原料，选择合适的菌种进行混菌发酵，并通过单因素试验与响应面试验，优化藜麦酸奶发酵工艺并测定其理化指标，为更多营养性植物基发酵乳的研发提供理论和技术参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

藜麦，山西五台山高蛋白品种台藜二号；唾液链球菌嗜热亚种 (*Streptococcus salivarius* subsp. *thermophilus*)、德氏乳杆菌保加利亚亚种 (*Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus*)，丹尼斯克（北京）菌种有限公司；白砂糖（食品级），昆明馋小雅食品有限公司；硼酸、浓硫酸、浓盐酸、无水乙醚、苯酚，国药集团山西有限公司；氢氧化钠、硫酸钾、1，1-二苯基-2-苦基肼（DPPH），天津市永大化学试剂有限公司。试验所用试剂均为分析纯或生化试剂。

1.2 仪器与设备

FW135粉碎机，天津市泰斯特仪器有限公司；

6SD2-4渣浆分离机，河南德丰机械制造有限公司；CS601恒温水浴箱、SPX-250生化培养箱，上海博迅实业有限公司；YXQ-30SII立式压力蒸汽灭菌器，上海博迅医疗生物仪器股份有限公司；JM-50胶体磨、UH-06高压均质机，永联生物科技（上海）有限公司；PR223ZH/E 电子天平，奥豪斯仪器（常州）有限公司；BSC-1304IIA2生物安全柜，苏州安泰空气技术有限公司；BCD-206SM冰箱，青岛海尔股份有限公司；K9860全自动凯氏定氮仪，海能未来技术集团股份有限公司；PHS-320酸度计，成都世纪方舟科技有限公司；P5紫外可见分光光度计，上海美谱达仪器有限公司。

1.3 方法

1.3.1 藜麦酸奶加工工艺及操作要点

- (1) 工艺流程：藜麦浆→调配→均质→灭菌→接菌→发酵→冷藏后熟→藜麦酸奶。
- (2) 藜麦浆制备：挑选品质优良、颗粒饱满、无霉变的藜麦种子，粉碎过筛，与纯净水按照1：4的料液比混合均匀，使用渣浆分离机和胶体磨对其进行破壁磨制，循环5次，制得藜麦浆。
- (3) 均质、灭菌：将制备好的藜麦浆加入白砂糖进行调配，充分搅拌，预热至65℃，于15~20 Mpa压力下均质5 min，在80℃恒温水浴箱中灭菌15 min。
- (4) 接菌：灭菌后快速冷却至43℃，投入适量菌种，搅拌均匀。
- (5) 发酵、冷藏后熟：将接菌后的藜麦浆置于39~47℃的生化培养箱中发酵6~10 h，在4℃条件下后熟24 h，得到成品。

1.3.2 藜麦酸奶发酵工艺优化

(1) 单因素试验

在发酵温度为43℃、接菌量为1.5%、白砂糖添加量为4.5%的条件下，发酵时间设置一系列梯度（6 h、7 h、8 h、9 h、10 h），以酸度值、感官评分作为指标，考察发酵时间对藜麦酸奶品质的影响。

在发酵时间为8 h，接菌量为1.5%，白砂糖添加量为4.5%的条件下，发酵温度设置一系列梯度（39℃、41℃、43℃、45℃、47℃），以酸度

值、感官评分作为指标，考察发酵温度对藜麦酸奶品质的影响。

在发酵时间为8 h，发酵温度为43℃，白砂糖添加量为4.5%的条件下，接菌量（0.5%、1%、1.5%、2%、2.5%）设置一系列梯度，以酸度值、感官评分作为指标，考察接菌量对藜麦酸奶品质的影响。

在发酵时间为8 h，发酵温度为43℃，接菌量为1.5%的条件下，白砂糖添加量设置一系列梯度（0.5%、2.5%、4.5%、6.5%、8.5%），以酸度值、感官评分作为指标，考察白砂糖添加量对藜麦酸奶品质的影响。

(2) 响应面试验

在单因素试验的基础上，利用Design-Expert 13.0软件设计Box-Behnken试验，选择发酵时间、发酵温度、接菌量、白砂糖添加量为自变量，以感官评分为响应值，设计响应面试验，确定酸奶最佳工艺。各因素水平见表1。

表 1 发酵工艺优化 Box-Behnken 试验设计因素水平表
Table 1 Factor Levels of Box-Behnken Experimental Design for Fermentation Process Optimization

水平	因素			
	发酵时间 (h)	发酵温度 (℃)	接菌量 (%)	白砂糖添加量 (%)
-1	7	41	1.0	2.5
0	8	43	1.5	4.5
1	9	45	2.0	6.5

(3) 感官评定

感官评定方法^[16]参考《T/WSJD 12—2020 植物蛋白饮料 植物酸奶》^[17]中关于植物基发酵乳的感官评分标准，对藜麦酸奶进行感官评分。随机选取20名（10男10女）食品专业人员进行专业感官培训，培训合格后对藜麦酸奶进行感官评定，总分为100分。具体标准见表2。

1.3.3 藜麦酸奶品质分析

(1) 理化指标和微生物指标的测定中酸度值参考《GB 5009.239—2016 食品安全国家标准 食品酸度的测定》^[18]中方法进行测定；pH值采用pH计进行测定；蛋白质含量参考《GB 5009.5—2016 食品

表 2 藜麦酸奶感官评分标准

Table 2 Sensory Evaluation Criteria for Quinoa Yogurt		
项目	评分标准	分值（分）
组织状态 （25 分）	组织均匀，无沉淀，允许少量乳清析出	20~25
	组织较均匀，有少量沉淀和乳清析出	15~19
	组织不均匀，有杂质，大量乳清析出	< 15
口感（25 分）	酸甜适中，口味协调	20~25
	略酸或略甜，口感较好	15~19
	过酸或过甜，口味不协调	< 15
香气（25 分）	有藜麦香气，无异味	20~25
	无藜麦香气，无异味	15~19
	无藜麦香气，有异味	< 15
色泽（25 分）	颜色为浅褐色，均匀一致，有光泽	20~25
	颜色不均匀，无光泽	15~19
	颜色异常，无光泽	< 15

安全国家标准 食品中蛋白质的测定》^[19]中方法进行测定；脂肪参考《GB 5009.6—2016 食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》^[20]中方法进行测定；总糖参考Tomáš等^[21]的方法进行测定；微生物参照《GB 4789.18—2010 食品安全国家标准 食品微生物学检验 乳与乳制品检验》^[22]中方法进行测定。

（2）抗氧化活性测定中对藜麦酸奶的DPPH自由基清除能力进行测定，参考Lee等^[23]的方法，并作一定修改。称取抗坏血酸60 mg，定容至1 L容量瓶中，得到60 mg/L的抗坏血酸标准溶液母液，用蒸馏水将母液稀释成不同浓度的抗坏血酸溶液；分别吸取2 mL溶液，向其中加入0.2 mol/L DPPH工作液2 mL，避光反应30 min，并以无水乙醇和超纯水分别作对照组和空白对照，在波长为517 nm处测定吸光度值，绘制标准曲线，所得标准曲线为 $y=0.012x-0.0058$ ， $R^2=0.9977$ 。准确吸取藜麦酸奶样品待测液2 mL，方法同标准曲线，测定吸光度值，自由基清除能力按下面公式计算：

$$\text{DPPH自由基清除率 (\%)} = \frac{A_1 - (A_2 - A_3)}{A_1} \times 100\%$$

式中： A_1 为无水乙醇代替样液测得吸光度值； A_2 为样品待测液吸光度值； A_3 为无水乙醇代替DPPH工作液测得吸光度值。

1.3.4 数据处理

所有试验平行3次，结果以平均值±标准差的形式表示，采用Excel、SPSS 26.0等软件进行单因素分析并检验各因素的差异显著性；采用Design-Expert 13.0软件进行响应面试验，并用origin 2025软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 发酵时间对藜麦酸奶品质的影响

图1展示了发酵时间对藜麦酸奶品质的影响。酸度值和感官评分随发酵时间的延长先升后降，但酸度值影响不显著（ $P>0.05$ ）。原因可能是发酵时间较短使酸奶发酵不完全，产生较少有机酸，组织状态也不稳定；长时间发酵使酸奶发酵过度，酸度较高，影响口感，因此选取发酵时间8 h进行试验。

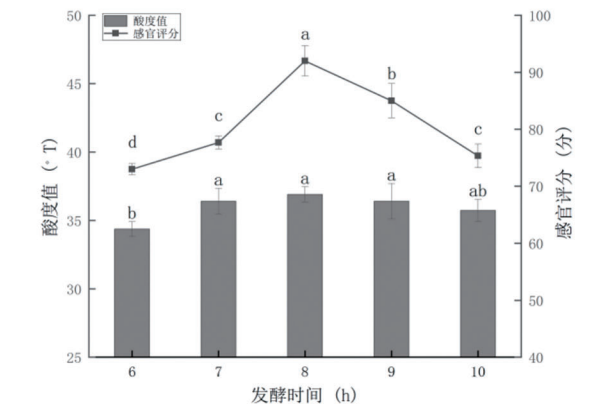


图 1 发酵时间对藜麦酸奶品质的影响

Figure 1 The influence of fermentation time on the quality of quinoa yogurt

注：不同小写字母代表不同样品间存在显著差异，（ $P<0.05$ ）下同

2.2 发酵温度对藜麦酸奶品质的影响

图2展示了发酵温度对藜麦酸奶品质的影响。酸

度值和感官评分随着发酵温度的变化均呈先升后降的趋势，在温度为43℃时达到最大值，且发酵温度超过43℃后，酸奶酸度值和感官评分变化显著（ $P<0.05$ ）。原因可能是温度过低导致菌种的活力提升有限，产酸不足，进而影响风味物质形成；而较高的温度可能导致酸奶发酵过快，不易形成风味物质，从而引起品质下降^[24]，因此选取发酵温度43℃进行试验。

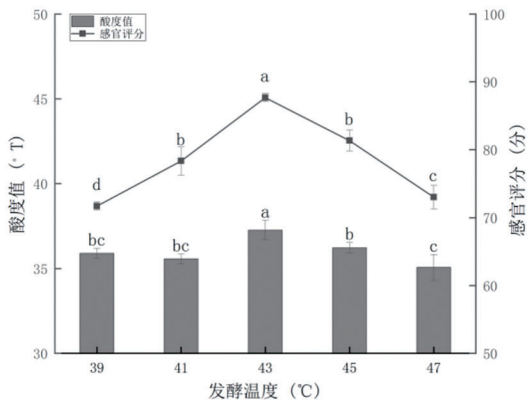


图2 发酵温度对藜麦酸奶品质的影响
Figure 2 The influence of fermentation temperature on the quality of quinoa yogurt

2.3 接菌量对藜麦酸奶品质的影响

图3展示了接菌量对藜麦酸奶品质的影响。酸度值随接菌量的变化呈缓慢上升趋势，但感官评分先升后降，在接菌量为1.5%时感官评分出现最大值（89.67 1.15）分，且变化显著（ $P<0.05$ ）。原因

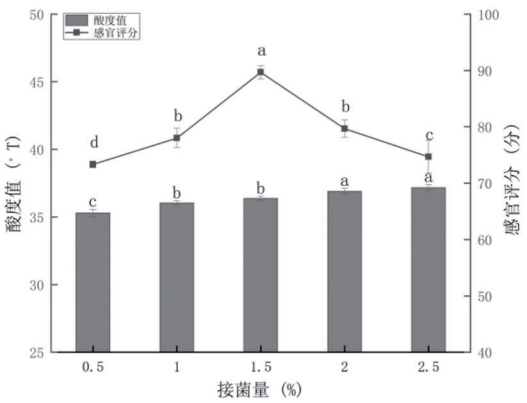


图3 接菌量对藜麦酸奶品质的影响
Figure 3 The influence of inoculation quantity on the quality of quinoa yogurt

可能是接菌量过多导致产酸较多，酸奶酸味明显，口味不协调，因此选取接菌量1.5%进行试验。该趋势与常嘉乐等^[25]研究结果一致。

2.4 白砂糖添加量对藜麦酸奶品质的影响

图4展示了白砂糖添加量对藜麦酸奶品质的影响。随白砂糖添加量的增加，酸度值和感官评分均先升后降，酸度值和感官评分在白砂糖添加量为4.5%时呈现最大值，分别为（38.40 0.87）°T、（87.00 2.00）分，且当白砂糖添加量超过4.5%时，白砂糖添加量对酸度值影响不显著（ $P>0.05$ ）。原因可能是白砂糖添加量较少，为菌种生长提供的碳源较少，导致菌种生长缓慢，口味不协调；白砂糖过多又会使口感过于甜腻，掩盖酸奶独有的藜麦香味，因此选取白砂糖添加量4.5%进行试验。

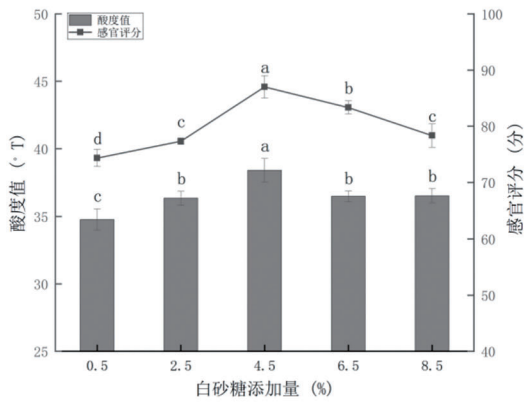


图4 白砂糖添加量对藜麦酸奶品质的影响
Figure 4 The influence of white sugar addition amount on the quality of quinoa yogurt

2.5 藜麦酸奶发酵工艺优化响应面试验

2.5.1 发酵工艺优化Box-Behnken试验

采用Design-Expert 13.0软件设计响应面试验，以发酵时间（A）、发酵温度（B）、接菌量（C）和白砂糖添加量（D）为自变量，感官评分（分）为响应值。Box-Behnken试验设计与结果见表3，方差分析结果表4。

根据表3响应面设计方差分析结果，使用Design-Expert 13.0软件对其进行二次回归分析，得到回归方程：

$$Y=90.06+2.85A+1.34B+0.47C-0.63D-1.11AB-1.69AC-2.95AD-0.33BC-0.50BD+2.09CD-5.47A^2-$$

表 3 发酵工艺优化 Box-Behnken 试验设计与结果

Table 3 Box-Behnken Experimental Design and Results for Fermentation Process Optimization

序号	发酵时间（h）	发酵温度（℃）	接菌量（%）	白砂糖添加量（%）	感官评分（分）
1	8	41	1.0	4.5	77.48
2	9	43	1.5	6.5	78.83
3	7	43	1.5	2.5	74.50
4	8	43	2.0	2.5	79.17
5	9	43	1.5	2.5	84.79
6	7	43	2.0	4.5	77.50
7	8	43	1.0	2.5	81.17
8	8	41	2.0	4.5	78.33
9	8	43	2.0	6.5	80.50
10	7	45	1.5	4.5	80.46
11	7	43	1.0	4.5	73.67
12	8	43	1.5	4.5	92.08
13	8	43	1.5	4.5	91.06
14	8	43	1.5	4.5	88.83
15	8	43	1.5	4.5	89.15
16	8	45	1.5	2.5	83.51
17	8	41	1.5	6.5	82.50
18	9	41	1.5	4.5	85.33
19	8	45	1.5	6.5	81.67
20	8	43	1.5	4.5	89.17
21	8	41	1.5	2.5	82.33
22	9	43	1.0	4.5	82.17
23	8	45	2.0	4.5	82.83
24	9	45	1.5	4.5	85.83
25	8	45	1.0	4.5	83.29
26	7	43	1.5	6.5	80.33
27	9	43	2.0	4.5	79.25
28	7	41	1.5	4.5	75.50
29	8	43	1.0	6.5	74.14

2.86B²-6.55C2-4.81D²

由表4的响应面方差分析可知，该模型极显著（ $P<0.000\ 1$ ），失拟项不显著（ $P=0.462\ 3>0.05$ ）， R^2 为0.952 0， R^2_{adj} 为0.904 0，表明该模型预测值与实际值相关度较高；变异系数为0.096 0%，表明各因素方差较小，试验结果稳定。模型的一次项A、B极显著（ $P<0.01$ ）；交互项AC、AD极显著（ $P<0.01$ ），CD显著（ $P<0.05$ ）；二次项A²、B²、C²、D²均极显著（ $P<0.01$ ），4个因素对响应值的影响大小为：A>B>D>C，即发酵时间>发酵温度>白砂糖添加量>接菌量。

2.5.2 各因素交互作用响应面分析

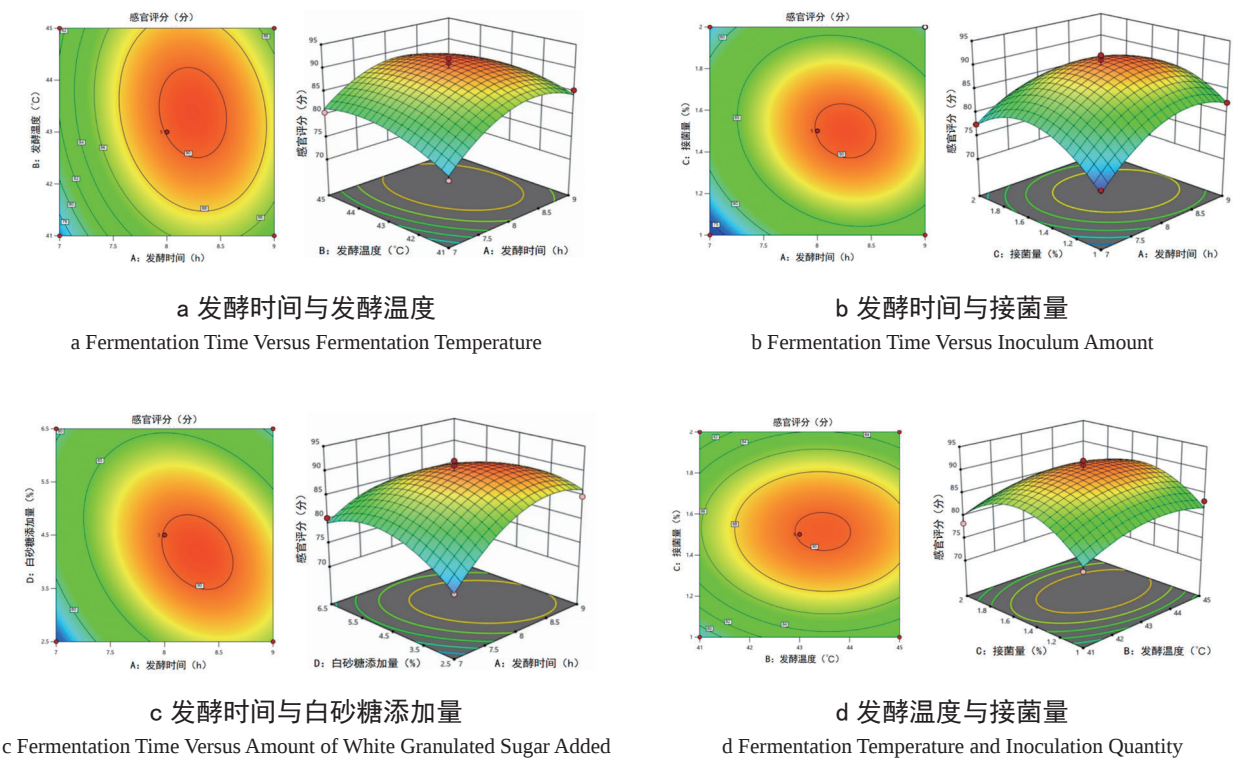
采用Design-Expert 13.0软件绘制响应面的等高线图及3D图（图5）。等高线呈椭圆状，说明两因素之间具有显著影响；等高线呈圆形，则说明因素之间交互作用不显著。3D曲面图中曲面越陡峭，说明两者影响越显著，反之则不显著^[26]。

由图5可知，随着各因素变化，感官评分呈先升后降趋势。由图5a、图5d、图5e可知，3D曲面图均呈先升后降趋势，且感官评分均出现最大值；等高线图虽呈椭圆状但不密集，且曲面图较平缓，说明发酵时间与发酵温度、发酵温度与接菌量、发

表 4 回归模型方差分析
Table 4 Variance Analysis of Regression Model

来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	655.780	14	46.840	19.830 0	< 0.000 1	**
A	97.700	1	97.700	41.370 0	< 0.000 1	**
B	21.650	1	21.650	9.170 0	0.009 0	**
C	2.670	1	2.670	1.130 0	0.305 7	
D	4.690	1	4.690	1.980 0	0.180 7	
AB	4.970	1	4.970	2.110 0	0.168 8	
AC	11.390	1	11.390	4.820 0	0.045 4	**
AD	34.750	1	34.750	14.710 0	0.001 8	**
BC	0.429	1	0.429	0.181 7	0.676 4	
BD	1.010	1	1.010	0.427 7	0.523 7	
CD	17.470	1	17.450	7.400 0	0.016 6	*
A ²	194.130	1	194.130	82.200 0	< 0.000 1	**
B ²	52.990	1	52.990	22.440 0	0.000 3	**
C ²	278.560	1	278.560	117.950 0	< 0.000 1	**
D ²	150.110	1	150.110	63.560 0	< 0.000 1	**
残差	33.060	14	2.360			
失拟项	24.850	10	2.480	1.210 0	0.462 3	
纯误差	8.210	4	2.050			
合计	688.840	28				
R ²	0.952					
C.V.	1.880					

注：*表示对结果影响显著（ $P<0.05$ ）；**表示对结果影响极显著（ $P<0.01$ ）



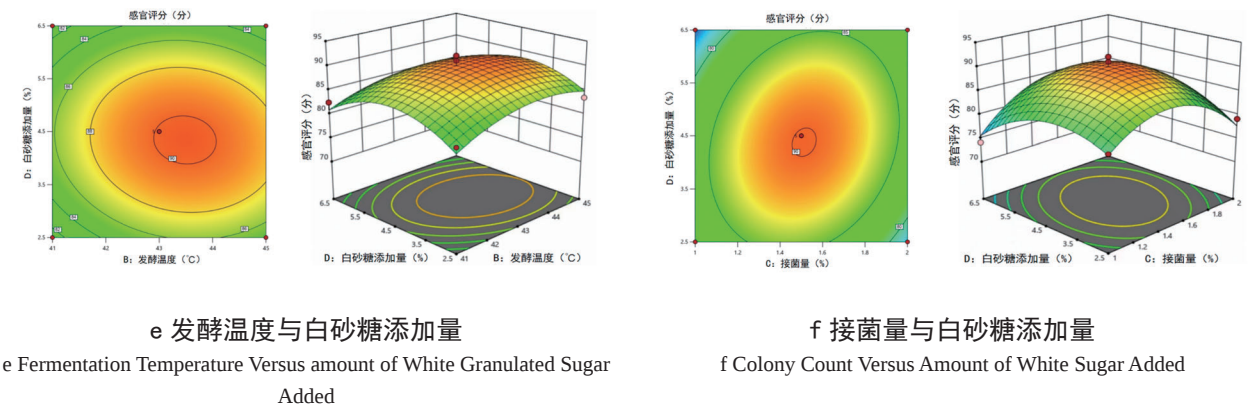


图 5 各因素交互作用对藜麦酸奶品质影响的等高线图及 3D 图

Figure 5 Contour Map and 3D Graph Showing the Influence of the Interaction of Various Factors on the Quality of Quinoa Yogurt

酵温度与白砂糖添加量之间交互作用对感官评分无显著影响。图5b、图5c中等高线图呈椭圆状且曲面陡峭，说明发酵时间与接菌量、发酵时间与白砂糖添加量之间交互作用对感官评分有极显著影响。图5f中等高线图呈椭圆状且曲面较陡峭，说明接菌量与白砂糖添加量之间交互作用对感官评分有显著影响。这一结果与方差分析表中（表4）结果一致。

2.5.3 藜麦酸奶最佳发酵工艺条件的验证

利用响应面软件预测回归方程，得到最优工艺为：发酵时间8.3 h，发酵温度43.4 ℃，接菌量1.2%，白砂糖添加量4.2%，在此工艺下藜麦酸奶感官评分为（88.33 1.21）分，与预测值（88.182 分）接近，验证模型的可靠性。在此工艺下发酵的酸奶组织均匀、色泽一致、酸甜适中，是一款具有开发价值的植物基酸奶。

2.6 藜麦酸奶品质分析

2.6.1 理化指标

藜麦酸奶各项理化指标分析结果表现较好（表5）。因植物基酸奶尚属新兴产品，相关法规尚未完善。《GB 19302—2010 食品安全国家标准 发酵乳》^[16]主要适用于以动物源性原料制成的发酵乳制品，其

要求并不适用于植物基酸奶。因此，本研究参考中国卫生监督协会发布的《T/WSJD 12—2020 植物蛋白饮料 植物酸奶》^[17]中标准，各项理化指标均符合该标准要求。

2.6.2 微生物指标

藜麦酸奶乳酸菌总数 4.54×10^8 CFU/g，未检出大肠杆菌、金黄色葡萄球菌等致病菌，所有指标均符合GB 4789.18—2010^[22]中要求。

2.6.3 抗氧化活性研究

DPPH自由基清除率是衡量抗氧化活性的重要指标。检测发现，藜麦酸奶的DPPH自由基清除率为（73.41 0.91）%，远高于马佳慧等^[27]研究中花生酸奶复合乳（25.07%）和鹰嘴豆红枣酸奶（34%）^[28]的DPPH自由基清除率，因此具有较好的抗氧化活性。这可能因为藜麦富含多酚类物质等抗氧化剂，可中和自由基，使其具有抗氧化活性^[29]。

3 讨论与结论

本研究在单因素试验和响应面试验的基础上，得到藜麦酸奶最优工艺条件为：发酵时间8.3 h，发酵温度43.4 ℃，接菌量1.2%，白砂糖添加量4.2%。

表 5 藜麦酸奶理化指标分析结果

Table 5 Analysis Results of Physicochemical Indicators of Quinoa Yogurt

理化指标	蛋白质（%）	脂肪（%）	糖分（mg/g）	酸度值（ T）	pH 值
藜麦酸奶	3.60±0.01	2.08±0.02	17.76±1.17	38.63±0.45	4.43±0.01

由此制得藜麦酸奶理化指标良好,微生物指标均达标。相比大豆酸奶^[30],此款酸奶蛋白质含量和乳酸菌数更高,营养价值更丰富,并具有较强的抗氧化活性。这可能是因为藜麦富含多糖、总酚等活性物质,且酚类物质以结合态为主^[31],菌株发酵产生的多酚氧化酶等有助于水解结合酚,使其变成游离状态,从而提高DPPH自由基清除率^[32]。

当前,针对纯植物基藜麦酸奶的研究相对匮乏,其制作工艺尚不完善,这在一定程度上影响了藜麦酸奶的品质。而对工艺进行优化,正是提升该产品品质的关键所在。传统酸奶发酵一般采用单一菌种,现代工艺研究可朝着混菌发酵的方向转变,借助乳酸菌与酵母菌的协同效应,改善酸奶的风味和质地,同时生成更多有益物质增强产品的健康功效。此外,可使用山梨醇、甘露醇、木糖醇等代糖替代蔗糖,用以制备无糖藜麦酸奶,既能规避蔗糖带来的健康风险,又能维持良好的发酵效果,进而满足更多人群的需求。随着消费者对健康需求的日益增长,可在藜麦酸奶中添加更多天然植物成分,如枸杞、核桃、红枣等,不仅能增强其营养价值,还能使口味更加丰富多样。这些策略不仅有助于提高发酵效率,还能降低生产成本,为藜麦酸奶的工业化生产提供可行的途径。产品创新不应仅局限于口味和营养方面,还可拓展至包装和营销等领域。例如,推出便携式包装,着重宣传藜麦作为“超级谷物”的健康功能,以此吸引更多年轻消费者以及追求健康的群体,为藜麦酸奶在功能性食品市场的开发与应用开辟新的方向。

参考文献

- [1] Manzanilla-Valdez M L M, Boesch C, Orfila C, et al. Unveiling the nutritional spectrum: A comprehensive analysis of protein quality and antinutritional factors in three varieties of quinoa (*Chenopodium quinoa* Wild) [J]. Food Chemistry: X, 2024, 24: 101814.
- [2] Abdelshafy A M, Rashwan A K, Osman A I. Potential food applications and biological activities of fermented quinoa: A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2024, 144: 104339.
- [3] 郭安然. 基于藜麦营养及功能成分的健康食品研发[J]. 中国食品工业, 2024 (4): 138-140.
- [4] Zhou S, Liu X, Cui Y, et al. Molecular investigation of soybean protein for improving the stability of quinoa (*Chenopodium quinoa* willd.) milk substitute[J]. Food Chemistry, 2024, 461: 140829.
- [5] Qin Y, Yang J, Zhang Q, et al. Future directions of quinoa research and innovation[J]. Journal of Agricultural Biotechnology, 2024, 13 (4): 14-17.
- [6] Yang C, Zhu X, Liu W, et al. Quantitative analysis of the phenolic compounds and antioxidant activities of six quinoa seed grains with different colors[J]. Food Science & Technology, 2024, 203: 116384.
- [7] Vicente A, Villanueva M, Caballero P A, et al. Microwave treatment enhances the physical and sensory quality of quinoa-enriched gluten-free bread[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 155: 110244.
- [8] Jeon E B, Song M G, Kim S H, et al. Quality characteristics and antioxidant activities of Korean traditional rice and quinoa - based wine “Makgeolli” [J]. Cereal Chemistry, 2022, 100 (2): 473-483.
- [9] 杨发荣, 黄杰, 魏玉明, 等. 藜麦生物学特性及应用[J]. 草业科学, 2017, 34 (3): 607-613.
- [10] 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.
- [11] 张彤. 植物基发酵乳的机遇与挑战[J]. 乳品与人类, 2023 (4): 24-28.
- [12] 马晓艳, 万霞, 陈亚淑, 等. 植物基发酵乳的研究和应用进展[J]. 食品科学, 2024, 45 (20): 320-335.
- [13] Liu Y Y, Huang K, Zhang Y, et al. Manufacture and characterization of a novel dairy-free quinoa yogurt fermented by modified commercial starter with *Weissella con fusa* [J]. Food Chemistry: X, 2023, 19: 100823.
- [14] 丁雨红, 剧柠, 李亚凤, 等. 益生菌复合发酵沙棘酸奶的工艺优化及其体外抗氧化活性研究[J]. 农业科学研究, 2024, 45 (3): 62-69.
- [15] 周勇, 闫素平, 李珊, 等. 沙棘酸奶发酵工艺优化及其对功能性成分的影响[J]. 现代食品, 2024, 30 (12): 199-201.
- [16] 中华人民共和国卫生部. GB 19302—2010 食品安全国家标准 发酵乳[S].
- [17] 中国卫生监督协会. T/WSJD 12—2020 植物蛋白饮料 植物酸奶[S].
- [18] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.239—2016, 食品安全国家标准 食品酸度的测定[S].
- [19] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. GB 5009.5—2016, 食品安全国家标准 食品

中蛋白质的测定[S].

[20] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局.GB 5009.6—2016, 食品安全国家标准 食品中脂肪的测定[S].

[21] Tomas Z, Petra O, Maria S, et al.Determination of storage (starch/glycogen) and total saccharides content in algae and cyanobacteria by a phenol-sulfuric acid meth-od[J].Bio-protocol, 2018, 8 (15): e2966.

[22] 中华人民共和国卫生部.GB 4789.18—2010 食品安全国家标准 食品微生物学检验 乳与乳制品检验[S].

[23] Lee J H, Hwang C E, Cho E J, et al.Improvement of nutritional components and in vitro antioxidative properties of soy-powder yogurts using *Lactobacillus plantarum*[J].Journal of Food and Drug Analysis, 2018, 26 (3): 1054-1065.

[24] 杨露西, 李强, 邓由飞, 等.藜麦酸奶工艺及其品质研究[J].中国酿造, 2019, 38 (9): 201-206.

[25] 常嘉乐, 张婷, 袁亚宏, 等.藜麦酸奶混菌发酵工艺优化及品质与风味评价[J].食品工业科技, 2021, 42 (18): 197-208.

[26] 王琪, 李根, 刘鹏帆, 等.短乳杆菌M-10产胞外多糖的发酵工艺优化[J].中国酿造, 2024, 43 (6): 162-167.

[27] 马佳慧, 于淼, 付欣, 等.高抗氧化性发芽花生酸奶的制备工艺研究[J].辽宁农业科学, 2019 (6): 23-26.

[28] 房丹丹, 秦晓艳, 刘璐萍, 等.响应面法优化鹰嘴豆红枣凝固型酸奶的工艺研究[J].粮食与油脂, 2022, 35 (8): 82-88.

[29] 郑妮, 王嘉毅, 刘咸筠.杂粮酸奶加工技术及营养价值的研究进展[J].农产品加工, 2024 (20): 82-87, 97.

[30] 杨洁茹, 陈顺心, 邓毅浩, 等.大豆植物基酸奶的研制[J].粮食与食品工业, 2022, 29 (6): 15-19.

[31] Zannini E, Jeske S, Lynch K M, et al.Development of novel quinoa-based yoghurt fermented with dextran producer *Weissella cibaria MG1*[J].International Journal of Food Microbiology, 2018, 268, 19-26.

[32] Li C, Dai T, Chen J, et al.Protein-polyphenol functional ingredients: The foaming properties of lactoferrin are enhanced by forming complexes with procyanidin[J].Food Chemistry, 2021, 339, 128145.