

马恺阳, 胡新中. 燕麦植物基酸奶生产工艺优化及产品特性 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(18): 184–191. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023100212

MA Kaiyang, HU Xinzong. Production Optimization and Properties Analysis of Oat Plant-based Yogurt[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(18): 184–191. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023100212

· 工艺技术 ·

燕麦植物基酸奶生产工艺优化及产品特性

马恺阳, 胡新中*

(陕西师范大学食品工程与营养科学学院, 陕西西安 710119)

摘要:为进一步拓展燕麦奶产品种类, 开发不含动物原料的燕麦植物基酸奶, 本研究以燕麦全粉为原料, 通过酶解制备燕麦乳, 接种商用发酵剂制备燕麦植物基酸奶, 利用单因素实验和响应面试验进行生产工艺优化, 分析燕麦植物基酸奶产品特性。结果表明, 燕麦植物基酸奶最佳生产工艺参数为: 料液比 1:3.9 (g:mL), 接种量 0.17% (以燕麦全粉添加量为基础), 发酵时间 7 h。在此条件下, 产品感官评分为 86.33 ± 0.58 分, β -葡聚糖含量 (干基) 为 8.37 ± 0.20 mg/100 mL, 酸度、脂肪含量与搅拌型酸奶相比分别降低了 32.1%、15%, 持水力、总固形物含量与搅拌型酸奶相比分别上升了 41%、34.76%。质构和流变测试表明, 该产品内聚性 (0.71 ± 0.00)、弹性 (0.83 ± 0.00)、弹性模量和黏性模量显著高于搅拌型酸奶。经酶解发酵后的燕麦植物基酸奶保留了燕麦的 β -葡聚糖, 具有较好的流变特性, 产品部分理化指标及营养成分高于搅拌型酸奶, 证明工艺优化较为成功。本研究对燕麦植物基酸奶的实际生产具有较高的参考价值, 也为发酵类燕麦饮料的开发提供了新的思路。

关键词: 燕麦植物基酸奶, 燕麦奶, 工艺优化, 质构特性, 流变特性, 营养成分

中图分类号: TS210.4

文献标识码: B

文章编号: 1002-0306(2024)18-0184-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023100212



本文网刊:

Production Optimization and Properties Analysis of Oat Plant-based Yogurt

MA Kaiyang, HU Xinzong*

(College of Food Engineering and Nutritional Science, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

Abstract: To further expand the variety of oat milk products and develop an oat plant-based yogurt (OPY) without animal ingredients, this study used whole oat flour as raw material to prepare oat milk through enzymatic hydrolysis, inoculated with commercial fermentation culture to prepare OPY. The production was optimized using single-factor experiments and response surface methods, and the properties of OPY was analyzed. The results showed that the optimal production parameters for OPY were as follows: solid-liquid ratio was 1:3.9 (g:mL), culture addition ratio was 0.17% (based on the addition ratio of whole oat flour), and fermentation time was 7 hours. Under these conditions, the sensory score of OPY was 86.33 ± 0.58 , the β -glucan content (dry basis) was 8.37 ± 0.20 mg/100 mL. Compared to stirred yogurt (SY), the titratable acidity and fat content of OPY decreased by 32.1% and 15%, respectively. The water holding capacity and total solid content of OPY increased by 41% and 34.76%, respectively. The texture and rheological analysis showed that the cohesiveness (0.71 ± 0.00), springiness (0.83 ± 0.00), elastic modulus and viscosity modulus of OPY were significantly higher than that of SY. After enzymatic hydrolysis and fermentation, OPY retained β -glucan, and had better rheological properties. In addition, several physicochemical indicators and nutritional components of OPY were better than those of SY, indicating that the process optimization had been successful. This study has high reference value for the actual production of OPY, and also provides new ideas for the development of fermented oat beverages.

Key words: oat plant-based yogurt; oat milk; production optimization; texture properties; rheological properties; nutritional components

收稿日期: 2023-10-27

基金项目: 国家现代农业产业技术体系 (CARS-07-E)。

作者简介: 马恺阳 (1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 谷物科学与营养, E-mail: maky3978@163.com。

* 通信作者: 胡新中 (1972-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 谷物科学与营养, E-mail: hxyzhong@126.com。

植物酸奶(plant-based yogurt)是以含有一定蛋白质的植物和(或)其制品为原料,经杀菌、发酵后 pH 值降低,发酵前或发酵后添加或不添加非动物来源配料,得到的植物蛋白饮料产品。作为植物蛋白饮料中的细分领域,植物酸奶具有原料来源广泛、口味多样、营养健康等特点,且在“轻食”“素食”等饮食文化影响下而深受市场关注。与动物酸奶相比,植物酸奶的理化指标、感官评价及质构特性均与其接近,部分营养指标甚至更高^[1]。此外,《2023 中国燕麦奶行业白皮书》中数据显示,生产 1 L 牛奶约消耗 628 L 水、9 m² 土地,排放二氧化碳 3.2 kg(分别是燕麦奶的 13.1 倍、9 倍、3.6 倍),且动物蛋白在人体内转化效率不高(乳制品为 14%)^[2],因此发展植物基食品产业有助于实现食物资源高效利用。同时,可以预见,发展植物基食品有助于减少碳排放,减轻环保压力^[3]。

燕麦植物基酸奶不含动物性原料,作为一种新型植物酸奶,近年来逐渐受到消费者和食品加工企业的关注。然而,与动物酸奶所含的蛋白、脂肪、糖类等营养成分的差异,促使了燕麦植物酸奶的发酵工艺进行优化改进^[4]。燕麦中淀粉含量较高,在加工过程中易于形成黏度较大的胶体,从而影响产品稳定性^[5],所以生产燕麦植物基酸奶需要采用酶解技术降低淀粉含量、提升产品口感;另一方面,燕麦中蛋白含量较低,难以形成类似动物酸奶的稳定蛋白凝胶,组织性较差,但其 β -葡聚糖含量较高,可在一定程度上增加产品粘稠性和适口性^[6]。因此需要从原料处理、菌种选择、发酵方式、发酵时间等角度综合考虑工艺流程,通过工艺优化,可在一定程度上解决产品感官评分较低、质构特性较差的问题。

现阶段国内外针对燕麦植物基酸奶的研究仍以牛乳为主料,主要集中在将燕麦作为配料加入牛乳中发酵生产酸奶以及如何提高燕麦添加量等方面^[7-8],仅使用燕麦生产纯植物基酸奶的研究较少,且对于燕麦植物基酸奶产品特性研究不多。本研究以燕麦全粉为主要原料生产燕麦植物基酸奶,利用单因素实验和响应面试验得出燕麦植物基酸奶最佳生产工艺参数,并对其理化指标、营养成分、质构和流变特性等进行检测分析,以期对燕麦植物基酸奶的生产提供实践指导,同时为其它谷物原料(小米、高粱等)研发植物酸奶提供一定理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

燕麦全粉 内蒙古西贝汇通农业科技发展有限公司;纯牛奶 内蒙古伊利实业集团股份有限公司;YC-381 直投式发酵剂(嗜热链球菌 *Streptococcus thermophilus*、保加利亚乳杆菌 *Lactobacillus bulgaricus*) 科汉森菌种生物科技公司;食品级耐高温 α -淀粉酶(50000 U/g)、食品级糖化酶(100000 U/g)

河南万邦实业有限公司;MRS 培养基、MC 培养基、VRBA 培养基、孟加拉红琼脂培养基 北京奥

博星生物技术有限责任公司; β -葡聚糖试剂盒 爱尔兰 Megazyme 公司;其它试剂均为国产分析纯 西安晶博生物科技有限公司。

PH-9272 恒温培养箱 上海一恒科学仪器有限公司;XHF-DY 高速分散器 宁波新芝生物科技股份有限公司;超净工作台 山东康瑞鑫净化科技有限公司;FE28 pH 计 瑞士 METTLER TOLEDO 公司;K-375 凯氏定氮仪 瑞士 BUCHI 公司;SCINO ST310 脂肪测定仪 丹麦 FOSS 公司;DV2TLVTJ0 黏度计 美国 Brookfield 公司;XW-80A 涡旋混合器 海门市其林贝尔仪器制造有限公司;L535-1 大容量离心机 湖南湘仪实验室仪器开发有限公司;TX.XT 质构仪 英国 SMS 公司;MCR 302 流变仪 奥地利 Anton Paar 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 工艺流程 燕麦全粉→加水→匀浆→加热糊化→液化→糖化→灭酶(菌)→冷却→接种→发酵→后熟→成品

纯牛奶→均质→灭菌→冷却→接种→发酵→破乳→后熟→成品

1.2.2 生产操作要点 将燕麦全粉按照一定料液比加水充分混匀,在 15000 r/min、1 min 条件下进行 3 次高速匀浆,确保体系分散均匀,得到燕麦乳待用。将其置于 55 ℃ 水浴加热 20 min,使其中淀粉充分糊化。糊化结束后加入燕麦全粉质量 0.1% 的耐高温 α -淀粉酶,于 80 ℃ 下水浴 60 min 进行液化,然后加入 0.1% 的糖化酶,于 60 ℃ 下水浴 70 min 进行糖化,随后升温至 95 ℃ 保持 5 min 进行灭酶(菌),结束后冷却至室温待用。在超净工作台中,加入燕麦全粉质量 0.2% 的直投式发酵剂,在 38 ℃ 恒温培养箱中发酵 8 h,结束后将其置于 4 ℃ 冷藏后熟 12 h,即得到燕麦植物基酸奶成品。

将纯牛奶在 20 MPa 下均质 5 min,进行 85 ℃、15 min 杀菌后冷却至室温,加入浓度为 1 g/L 的直投式发酵剂,在 38 ℃ 恒温培养箱中发酵 8 h,结束后破乳,将其置于 4 ℃ 冷藏后熟 12 h,即得到搅拌型酸奶成品。

1.2.3 燕麦植物基酸奶生产工艺优化单因素实验

按照 1.2.2 中操作要点,设置接种量 0.2%,发酵时间 8 h,发酵温度 38 ℃,考察不同料液比(1:3、1:4、1:5、1:6、1:7)对燕麦植物基酸奶感官评分的影响;设置料液比 1:5、发酵时间 8 h、发酵温度 38 ℃、考察接种量(0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.5%)对燕麦植物基酸奶感官评分的影响;设置料液比 1:5、接种量 0.2%、发酵温度 38 ℃、考察发酵时间(6、7、8、9、10 h)对燕麦植物基酸奶感官评分的影响;设置料液比 1:5、接种量 0.2%、发酵时间 8 h、考察发酵温度(36、38、40、42、44 ℃)对燕麦植物基酸奶感官评分的影响,确定适宜的因素水平。

1.2.4 燕麦植物基酸奶生产工艺优化响应面试验

根据单因素实验结果,选择料液比(A)、接种量(B)、发酵时间(C)3个因素,以感官评分(Y)为响应值,采用 Box-Behnken 原理设计 3 因素 3 水平响应面试验确定燕麦植物基酸奶生产最佳工艺参数。试验因素及水平设置如表 1 所示。

表 1 响应面试验因素及水平设置
Table 1 Factors and levels of response surface design

水平	因素		
	A料液比(g:mL)	B接种量(%)	C发酵时间(h)
-1	1:3	0.1	6
0	1:4	0.2	7
1	1:5	0.3	8

1.2.5 燕麦植物基酸奶感官评定 选择 10 名具有感官评定经验的食品专业人员,参考李喜层等^[9]的方法并做一定改动,对样品进行感官评定,具体标准见表 2。

表 2 燕麦植物基酸奶感官评分标准
Table 2 Standard of sensory evaluation of oat plant-based yogurt

项目	评分标准	得分(分)
色泽 (10分)	颜色均匀,光泽度较高,呈淡黄色	7~10
	颜色均匀,光泽度较低,呈灰白色	4~6
	颜色不均,有大小不一的色斑	0~3
香气 (20分)	燕麦香气浓郁,典型性强,无异香	16~20
	燕麦香气不足,微有异味	11~15
	几乎无燕麦香气,酸味较重,香气不协调	6~10
口感 (30分)	香气异常	0~5
	口感爽滑,无黏腻感,口味适中	20~30
	口感较细腻,较易于食用,口味适中	10~19
组织状态 (40分)	口感粗糙,质地不均,酸味较重	0~9
	组织完整,表面无裂纹,外观黏度适中,无清液析出	30~40
	组织性一般,表面有裂纹,清液析出较少	20~29
	组织较差,表面裂纹较多,有杂质,清液析出较多	10~19
	组织较差,表面粗糙,清液析出严重	0~9

1.2.6 质构特性测定 采用质构仪测定,测定模式为 TPA,探头型号为 A/BE-d35,测定前速率 2.0 mm/s、测定速率 1.0 mm/s、测定后速率 2.0 mm/s、测定位移 20 mm、触发力 1.0 g、数据获取速率 200 pps,记录样品的硬度、内聚性、弹性和胶着性。

1.2.7 流变特性测定

1.2.7.1 静态流变特性测定 取 0.6 mL 样品置于样品台上,刮样后涂抹硅油防止失水。选择 PP 25 平板、狭缝间距 1 mm、初始温度设为 25 ℃、剪切速率从 0.1 s⁻¹ 递增到 100 s⁻¹,记录样品剪切应力随剪切速率的变化情况。

1.2.7.2 动态流变特性测定 设置应变为 1%(预实验确定线性黏弹区),频率从 0.1 Hz 递增到 10 Hz,其余条件同 1.2.7.1,记录样品弹性模量(G')和黏性模

量(G'')随频率的变化情况。

1.2.8 理化指标、营养成分及微生物指标测定

1.2.8.1 理化指标及营养成分测定 pH: 使用 pH 计直接测定;酸度: 参照 GB 5009.239-2016《食品安全国家标准 食品酸度的测定》采用 pH 计法测定;持水力: 参考韩喜艳等^[10]的方法测定;黏度: 参考王维哲等^[11]的方法测定;总固形物: 参照 GB 5413.39-2010《食品安全国家标准 乳和乳制品中非脂乳固体的测定》测定;蛋白质: 参照 GB 5009.5-2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》采用凯氏定氮法测定(F=5.83);脂肪: 参照 GB 5009.6-2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》采用索氏抽提法测定; β -葡聚糖含量: 参考 Zhang 等^[12]的方法利用试剂盒测定。

1.2.8.2 微生物指标测定 乳酸菌数: 参照 GB 4789.35-2016《食品安全国家标准 食品微生物学检验 乳酸菌检验》进行测定;大肠菌群: 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》进行测定;金黄色葡萄球菌: 参照 GB 4789.10-2016《食品安全国家标准 食品微生物学检验 金黄色葡萄球菌检验》进行测定;沙门氏菌: 参照 GB 4789.4-2016《食品安全国家标准 食品微生物学检验 沙门氏菌检验》进行测定;霉菌和酵母: 参照 GB 4789.15-2016《食品安全国家标准 食品微生物学检验 霉菌和酵母计数》进行测定。

1.3 数据处理

所有实验重复 3 次,结果以平均值±标准差表示,使用 SPSS 21 对试验数据进行单因素方差分析($P<0.05$ 为显著);使用 Design Expert 12 进行 Box-Behnken 中心组合响应面试验设计;使用 Origin 2023 进行作图。

2 结果与分析

2.1 燕麦植物基酸奶生产工艺优化单因素实验

2.1.1 不同料液比对燕麦植物基酸奶感官评分的影响 由图 1A 可知,料液比对燕麦植物基酸奶感官评分及酸度影响较大,感官评分随料液比的增大呈现先增大后减小的趋势,酸度随料液比的增大呈稳定降低趋势。当料液比为 1:4 时,酸度为 49.35°T±0.72°T,仅次于料液比为 1:3 时的 64.26°T±0.53°T,但感官评分可达 84.33±2.08 分;当料液比逐渐增大时,酸度随之降低,且感官评分呈下降趋势。这可能是由于当加水量过大时,燕麦植物基酸奶质地较为稀薄、组织状态不佳、无酸奶状特性,从而影响了感官评分。且料液比过大时,燕麦乳较稀,乳酸菌生长不完全,导致酸度下降,影响口感,使得感官评分降低。因此选择料液比为 1:3、1:4、1:5 进行响应面试验。

2.1.2 不同接种量对燕麦植物基酸奶感官评分的影响 由图 1B 可知,当接种量为 0.2% 时,燕麦植物基酸奶感官评分最高,达 82.67±2.52 分,此时酸度为

46.63°T±0.83°T。当接种量较小时, 产酸不足, 燕麦植物基酸奶风味不佳; 当接种量为 0.5% 时, 产酸增加导致酸度过高, 感官评分下降较大。因此, 选择接种量为 0.1%、0.2%、0.3% 进行响应面试验。在当前研究中, 保加利亚乳杆菌和嗜热链球菌是动物酸奶发酵的经典菌种, 二者的搭配可以使酸奶具有良好的质地和口感, 但由于燕麦植物基酸奶中不含乳糖, 其生长会受到一定抑制, 导致酸度低于动物酸奶。对动物酸奶而言, 发酵剂添加量对产品感官品质影

响较大, 植物酸奶亦如此, 有研究表明, 不同比例的多菌种混合发酵剂有利于提升发酵燕麦乳的感官品质和活菌数^[13], 需要根据不同原料特点确定适应的发酵菌种和添加量。

2.1.3 不同发酵时间对燕麦植物基酸奶感官评分的影响 不同发酵时间对燕麦植物基酸奶感官评分及酸度的影响如图 1C 所示。其中, 当发酵时间为 7 h 时, 感官评分最高, 为 77.00±1.00 分, 此时酸度为 51.06°T±0.53°T, 与发酵 8 h 相比, 酸度无明显差异, 但感官评分增加较大。当发酵时间为 9 h 时, 燕麦植物基酸奶开始分层, 并伴随出现上清析出现象; 发酵时间延长至 10 h 时, 燕麦植物基酸奶分层严重且上清析出较多, 酸度为 57.46°T±0.64°T, 提示已经过度发酵, 严重影响了产品感官评分。因此, 选择发酵时间 6、7、8 h 进行响应面试验。大量研究已表明, 过长的发酵时间可能会延长产品酸化进程, 导致碳水化合物被转化为乳酸和其他有机酸, 使产品感官评分降低^[14-16]。

2.1.4 不同发酵温度对燕麦植物基酸奶感官评分的影响 由图 1D 可知, 燕麦植物基酸奶的感官评分在发酵温度为 38 °C 时达到最高的 74.33±2.08 分, 此时酸度为 50.28°T±0.63°T。李思宁等^[17]指出, 温度变化对酸奶感官、质构影响不大, 实际生产中允许温度小范围波动, 且发酵温度与发酵时间对燕麦植物基酸奶感官评分及酸度影响类似。因此, 将燕麦植物基酸奶发酵温度固定为 38 °C 进行后续实验。

2.2 燕麦植物基酸奶工艺优化响应面试验

2.2.1 响应面试验结果与分析 根据单因素实验结果, 基于 Box-Behnken 原理, 选取了对燕麦植物基酸奶感官评分影响较大的料液比(A)、接种量(B)、发酵时间(C)3 个因素, 进行 3 因素 3 水平响应面试验, 对燕麦植物基酸奶生产工艺进行优化, 结果见表 3。

表 3 燕麦植物基酸奶工艺优化响应面试验结果

Table 3 Response surface test results for optimization of oat plant-based yogurt

实验号	A料液比	B接种量	C发酵时间	Y感官评分(分)
1	-1	-1	0	75.18±2.11
2	1	-1	0	68.43±1.65
3	-1	1	0	71.27±1.52
4	1	1	0	69.08±1.54
5	-1	0	-1	74.75±1.28
6	1	0	-1	63.33±2.43
7	-1	0	1	72.00±1.55
8	1	0	1	71.17±1.34
9	0	-1	-1	80.83±1.34
10	0	1	-1	74.67±2.05
11	0	-1	1	82.50±1.71
12	0	1	1	77.92±1.34
13	0	0	0	87.00±1.29
14	0	0	0	86.08±1.37
15	0	0	0	87.33±0.94
16	0	0	0	85.83±0.69
17	0	0	0	86.07±0.91

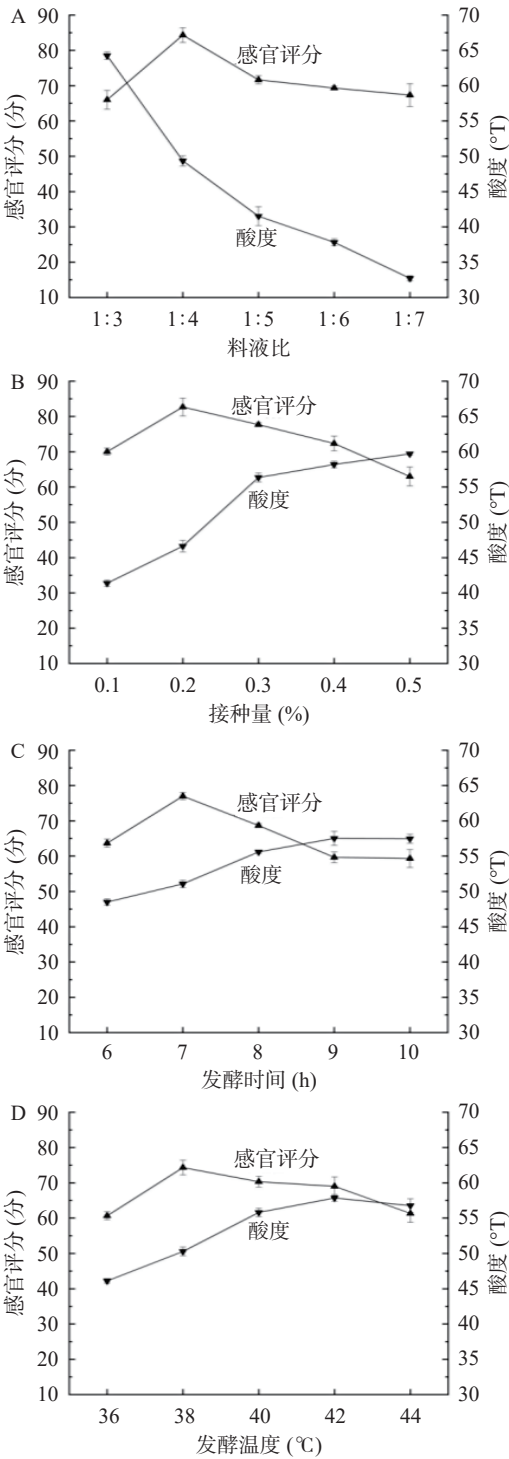


图 1 不同单因素对燕麦植物基酸奶感官评分及酸度的影响
Fig.1 Effects of different single factors on sensory scores and titratable acidity of oat plant-based yogurt

表4 回归模型方差分析表

Table 4 Analysis of variance of regression model

方差来源	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
模型	912.55	9	101.39	70.21	<0.0001	**
A	56.13	1	56.13	38.87	0.0004	**
B	24.50	1	24.50	16.97	0.0045	**
C	12.53	1	12.53	8.67	0.0216	*
AB	5.20	1	5.20	3.60	0.0996	
AC	28.04	1	28.04	19.41	0.0031	**
BC	0.6241	1	0.6241	0.4322	0.5319	
A ²	613.38	1	613.38	424.75	<0.0001	**
B ²	48.74	1	48.74	33.75	0.0007	**
C ²	70.08	1	70.08	48.53	0.0002	**
残差	10.11	7	1.44			
失拟项	8.37	3	2.79	6.40	0.0524	
纯误差	1.74	4	0.4355			
总方差	922.66	16				
R ²	0.9890					
Adj R ²	0.9750					

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

方差分析见表4, 各因素间交互作用对燕麦植物基酸奶感官评分的影响如图2所示。

利用 Design Expert 12 软件对所得数据进行多元回归拟合, 得到的二次回归方程为:

$$Y=86.46-2.65A-1.75B+1.25C+1.14AB+2.65AC+0.3950BC-12.07A^2-3.40B^2-4.08C^2$$

由表4可知, 该模型极显著($P<0.0001$)且失拟项不显著($P>0.05$), 表明该模型拟合度较高, 预测结果可靠。模型决定系数 $R^2=0.9890$, $R_{Adj}^2=0.9750$, 说明模型拟合良好, 误差较小, 与真实值之间匹配性较高, 可用于燕麦植物基酸奶生产工艺优化。响应值的变异系数 $CV=1.56\%$, 说明试验精确度与重复性较好, 可信度强。

由表4中 P 值可知, 一次项中 A、B 对结果影响极显著($P<0.01$), C 对结果影响显著($P<0.05$)。交互项中 AC 对结果影响极显著($P<0.01$), 其它项对结果影响不显著。二次项中 A^2 、 B^2 、 C^2 均对结果影响极显著($P<0.05$)。由 F 值可知, 不同因素对燕麦植物基酸奶感官评分影响情况为: A(料液比) $>$ B(接种量) $>$ C(发酵时间)。响应面试验结果表明, 料液比对燕麦植物基酸奶感官评分影响最大, 且料液比和发酵时间的交互作用对燕麦植物基酸奶影响也最大。Jaeger 等^[18]指出, 基于对动物酸奶的体验, 植物酸奶光滑的质地可增加消费者的喜好程度。因此, 适当的料液比可以赋予燕麦植物基酸奶类似动物酸奶的质地, 从而提高感官评分。

2.2.2 响应面优化结果与验证试验 利用 Design Expert 12 软件得出燕麦植物基酸奶生产最优工艺参数为料液比 1:3.89, 接种量 0.17%, 发酵时间 7.10 h, 此时预测感官评分值为 86.91 分。为便于实际操作, 将生产参数调整为料液比 1:3.9, 接种量 0.17%, 发酵时间 7 h, 并进行 3 次平行验证试验, 得到的燕麦

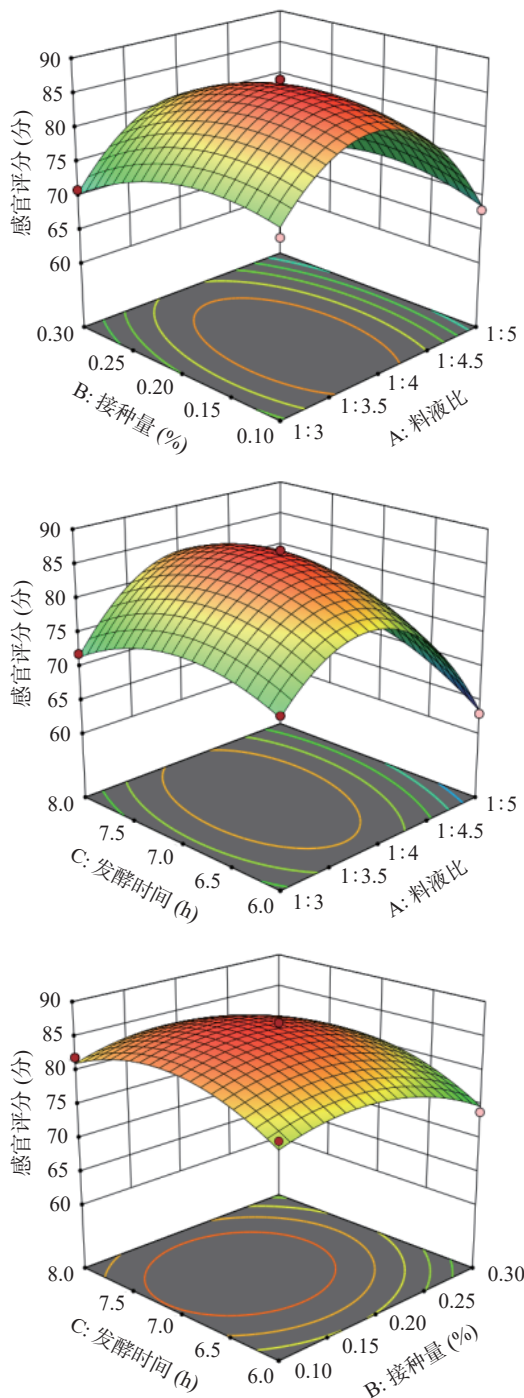


图2 各因素间交互作用对燕麦植物基酸奶感官评分影响的响应面图

Fig.2 Response surface plots for the interaction effects among factors on sensory scores of oat plant-based yogurt

植物基酸奶体系均一、质量稳定, 其感官评分实际值为 86.33 ± 0.58 分, 与预测值较为接近, 证明该模型应用性良好。

2.3 燕麦植物基酸奶质构特性

根据 Akgun 等^[19]的描述, 选择评价酸奶的典型质构指标, 即硬度(第一次压缩时最大力值, 直接反映口感的指标)、弹性(变形后恢复原始形状的速度)、内聚性(第一次压缩变形后与第二次压缩变形后的相对抵抗能力, 描述内部结合的强度)、胶着性(半固体食品分解为可吞咽状态所需的力)进行探究。

在 2.2.2 所述最优条件下,燕麦植物基酸奶与搅拌型酸奶质构特性对比如表 5 所示。由表 5 可知,燕麦植物基酸奶的硬度 (17.00 ± 0.52 g) 和胶着性 (12.85 ± 0.38 g) 较低,但弹性 (0.83 ± 0.00) 和内聚性 (0.71 ± 0.00) 显著高于搅拌型酸奶。导致燕麦植物基酸奶硬度较低的原因可能是由于酸化的植物蛋白会导致弱凝胶的形成和相分离,且蛋白结构的不同也可能使形成凝胶的硬度不同,因此除添加外源性蛋白外,植物酸奶的凝胶硬度普遍较低^[20-22]。Yin 等^[23]指出,燕麦蛋白与牛奶酪蛋白的结构差异,可能也会导致燕麦植物基酸奶与牛奶酸奶之间的质构特性差异,因此可以通过热处理、均质化、酶解等预处理手段促进燕麦蛋白凝胶形成,从而提高燕麦植物酸奶质构特性。但仍需注意的是,由于燕麦中蛋白含量较低,所以除预处理之外,还可以通过在加工中添加胶凝剂或增稠剂等功能性成分,诱导燕麦蛋白形成凝胶网络结构^[24],以提高其质构特性。总体而言,燕麦植物基酸奶具有较好的质构特性,与搅拌型酸奶接近,体现出良好的发展前景。

表 5 燕麦植物基酸奶与搅拌型酸奶质构特性对比

Table 5 Comparison of texture properties between oat plant-based yogurt and stirred yogurt

指标	燕麦植物基酸奶	搅拌型酸奶
硬度(g)	17.00±0.52 ^a	22.24±0.08 ^b
内聚性	0.71±0.00 ^b	0.61±0.01 ^a
弹性	0.83±0.00 ^b	0.74±0.01 ^a
胶着性(g)	12.85±0.38 ^a	13.67±0.21 ^b

注: 同一行不同字母表示差异显著($P<0.05$), 表6同。

2.4 燕麦植物基酸奶流变特性

2.4.1 燕麦植物基酸奶静态流变特性 如图 3A 所示,两种样品的剪切应力均随剪切速率的增大而增大,体现出典型的剪切稀化性(假塑性),即两种样品均为非牛顿流体^[25]。在剪切速率相同时,燕麦植物基酸奶的剪切应力显著高于搅拌型酸奶,在剪切结束时达到 31.08 ± 0.07 Pa,该结果也与质构测试中内聚性对应,证明燕麦植物基酸奶具有更高的抗剪切能力,品质更稳定。这可能是由于燕麦植物基酸奶中的淀粉、蛋白等大分子物质通过氢键相互作用,增强了混合体系的凝胶网络结构,从而提高了产品剪切应力^[26]。

2.4.2 燕麦植物基酸奶动态流变特性 如图 3B 所示,在扫描范围内,燕麦植物基酸奶的 G' 始终高于 G'' ,且都随频率的增大而增大,体现出较好的弹性主导的类固体特性,是一种典型的弱凝胶结构。与搅拌型酸奶相比,燕麦植物基酸奶的 G' (105.20 ± 0.96 Pa) 和 G'' (50.73 ± 0.52 Pa) 均更高,证明燕麦植物基酸奶具有更致密的凝胶网络结构。燕麦植物基酸奶是由淀粉、蛋白、 β -葡聚糖等大分子物质构成的混合体系,其中分子相互作用可能会提高产品的流变特性。

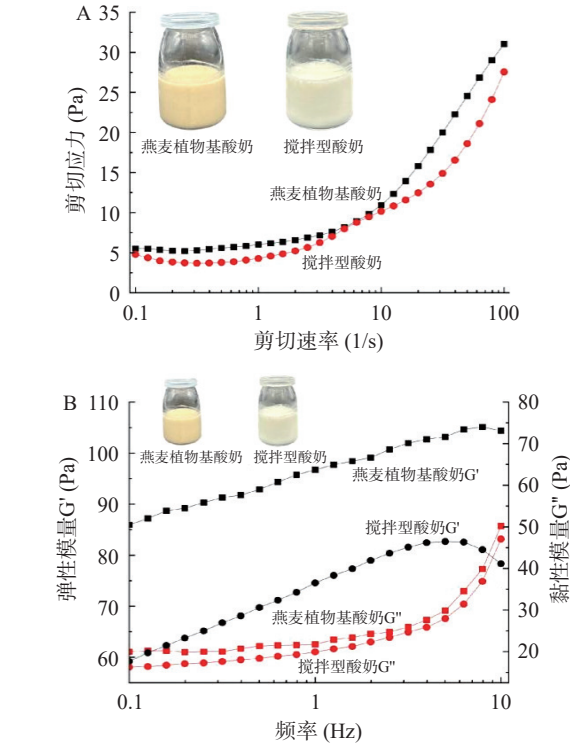


图 3 燕麦植物基酸奶与搅拌型酸奶流变特性对比

Fig.3 Comparison of rheological properties between oat plant-based yogurt and stirred yogurt

张晶等^[27]研究发现,一定量的燕麦 β -葡聚糖会与淀粉分子链之间发生相互缠绕,增强复合体系的三维网络结构,以增加复合体系的黏弹性,促进产品弹性固体性质的提升。

2.5 燕麦植物基酸奶理化指标、营养成分及微生物指标

2.5.1 燕麦植物基酸奶理化指标及营养成分 在 2.2.2 中所述的最优条件下,测定燕麦植物基酸奶理化指标及营养成分,并与搅拌型酸奶进行对比,结果如表 6 所示。在理化指标方面,燕麦植物基酸奶的酸度比搅拌型酸奶降低了 32.1%,在不添加蔗糖的情况下表现出比搅拌型酸奶更易于接受的酸味,产品具有酸奶的风味和口感,且在黏度与搅拌型酸奶差异不显著的情况下,燕麦植物基酸奶的持水力提高了 41%,表明其具有更好的组织特性。在营养成分

表 6 燕麦植物基酸奶与搅拌型酸奶理化指标及营养成分对比

Table 6 Comparison of physicochemical indicators and nutritional components between oat plant-based yogurt and stirred yogurt

指标	燕麦植物基酸奶	搅拌型酸奶
pH	4.04±0.01 ^a	4.25±0.01 ^b
酸度(°T)	53.06±0.83 ^a	78.15±0.22 ^b
持水力(%)	67.65±0.01 ^b	47.98±0.01 ^a
黏度(mPa·s)	3150±40.82 ^a	3140±45.46 ^a
总固形物(g/100 g)	23.92±0.62 ^b	17.75±0.09 ^a
蛋白质(g/100 g)	2.61±0.09 ^a	3.00±0.00 ^b
脂肪(g/100 g)	3.06±0.12 ^a	3.60±0.00 ^b
β -葡聚糖(mg/100 mL)	8.37±0.20	—

注: “—”表示未检出。

方面,燕麦植物基酸奶蛋白质(2.61 ± 0.09 g/100 g)和脂肪(3.06 ± 0.12 g/100 g)含量均高于王鑫媛等^[28]制作的发酵燕麦乳,可能是由于本研究以燕麦粉为原料,而制粉前的炒制工艺会提高燕麦粉的蛋白质和脂肪含量^[29]。总体来看,与质构结果类似,燕麦植物基酸奶等发酵类燕麦饮料由于蛋白质含量较低,因此难以形成凝固型酸奶,但其脂肪含量较高,且含有一定量的淀粉,可以帮助产品形成稳定、充实的凝胶结构,另外燕麦中的 β -葡聚糖吸水性较强,易与淀粉、蛋白等大分子物质络合形成凝胶^[30],故而可以发挥内源性胶凝剂作用,对提升燕麦植物基酸奶的黏度、持水力等理化指标作出贡献。

2.5.2 燕麦植物基酸奶微生物指标 燕麦植物基酸奶的微生物指标测定结果如表7所示。由表7可知燕麦植物基酸奶乳酸菌数为 2.21×10^7 CFU/g,大肠杆菌和致病菌均未检出,符合团体标准 T/WSJD 12—2020《植物蛋白饮料 植物酸奶》中对微生物限量和乳酸菌数的要求,产品安全稳定、活菌数高,有利于改善肠道微生态,提高人体免疫力。

表7 燕麦植物基酸奶微生物指标

Table 7 Microbiological indicators of oat plant-based yogurt

项目	测定值(CFU/g)	要求值(CFU/g)
乳酸菌数	$(2.21\pm 0.03)\times 10^7$	$\geq 1\times 10^6$
大肠菌群	—	m=1, M=5
金黄色葡萄球菌	—	m=0/25, M=不得检出
沙门氏菌	—	m=0/25, M=不得检出
霉菌	—	≤ 20
酵母	—	≤ 20

注:“—”表示未检出;“m”表示微生物指标可接受水平的限量值;“M”表示微生物指标的最高安全限量值。

3 结论

本研究得出燕麦植物基酸奶最佳生产工艺参数为料液比 1:3.9(g:mL),接种量 0.17%(以燕麦全粉添加量为基础),发酵时间 7 h,且料液比对产品感官评分影响最大,其次是接种量和发酵时间。在此工艺条件下,生产的燕麦植物基酸奶均一稳定、稀稠适宜、口感爽滑,具有燕麦独特的风味,且产品安全健康,符合相关标准要求。另外,燕麦植物基酸奶内聚性和弹性较高,是具有剪切稀化(假塑)性的非牛顿流体。因此,开发燕麦植物基酸奶可满足消费者日益增长的植物酸奶摄入需求,促进了植物酸奶市场的发展,同时也为燕麦精深加工、提高附加值提供了新的思路和理论依据。

© The Author(s) 2024. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

[1] NADIA G, LORETO A M, JAMES A O. Composition, Physicochemical and sensorial properties of commercial plant-based

yogurts[J]. *Foods*, 2020, 9(3): 252.

[2] 中国食品科学技术学会植物基食品分会. 植物基食品的科学共识(2022年版)[J]. *中国食品学报*, 2022, 22(10): 450–457.

[Plant-based Foods Society of the Chinese Institute of Food Science and Technology. Scientific consensus on plant-based foods (2022)[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2022, 22(10): 450–457.]

[3] POORE J, NEMECEK T. Reducing food's environmental impacts through producers and consumers[J]. *Science*, 2018, 360(6392): 987–992.

[4] YU Q, QIAN J Q, GUO Y H, et al. Applicable strains, processing techniques and health benefits of fermented oat beverages: a review[J]. *Foods*, 2023, 12(8): 1708.

[5] 张慧云,李丽华,王楠,等. 燕麦在乳制品中的应用及其研究进展[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(1): 342–346. [ZHANG H Y, LI L H, WANG N, et al. Application and research progress of oat in dairy products[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2018, 39(1): 342–346.]

[6] 龚玉圆,冯媛,王晓龙,等. 加工方式对燕麦制品营养成分及功能特性的影响[J]. *中国粮油学报*, 2020, 35(9): 21–27. [GONG Y Y, FENG Y, WANG X L, et al. Effect of processing methods on nutritional components and functional characteristics of oat products[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2020, 35(9): 21–27.]

[7] 徐云凤,张盼盼,郭卫平,等. 燕麦菊粉风味发酵乳的研制及品质分析[J]. *食品研究与开发*, 2023, 44(8): 131–136. [XU Y F, ZHANG P P, GUO W P, et al. Development and quality analysis oat-inulin flavored fermented milk[J]. *Food research and development*, 2023, 44(8): 131–136.]

[8] 王悦,陶亮,杨传辉,等. 核桃燕麦发酵酸奶工艺条件研究[J]. *中国食品添加剂*, 2023, 34(1): 10–19. [WANG Y, TAO L, YANG C H, et al. Optimization of processing conditions of fermented yogurt with walnut and oat[J]. *Chinese Food Additives*, 2023, 34(1): 10–19.]

[9] 李喜层,夏君霞,赵慧博,等. 发酵核桃乳的稳定剂复配配方优化及香气成分分析[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(10): 203–210.

[LI X C, XIA J X, ZHAO H B, et al. Optimization of formulation stabilizer and analysis of volatile component in fermented walnut milk[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(10): 203–210.]

[10] 韩喜艳,宋菲,赵松林,等. 椰子植物酸奶制备工艺优化研究[J]. *食品研究与开发*, 2021, 42(20): 55–62. [HAN X Y, SONG F, ZHAO S L, et al. Study on optimization of preparation process of coconut plant-based yoghurt[J]. *Food Research and Development*, 2021, 42(20): 55–62.]

[11] 王维哲,任荣,惠媛媛,等. 自主筛选的植物乳杆菌对酸羊乳品质与功能特性的影响[J]. *乳业科学与技术*, 2022, 45(3): 1–8. [WANG W Z, REN R, HUI Y Y, et al. Effects of *Lactobacillus plantarum* isolated in our laboratory on the quality and functional properties of goat milk yogurt[J]. *Journal of Dairy Science and Technology*, 2022, 45(3): 1–8.]

[12] ZHANG Kailong, LI Xiaoping, MA Zhen, et al. Solvent retention capacity of oat flour: Relationship with oat β -glucan content and molecular weight[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 93: 19–23.

[13] MOHAMMAD S, SHARAREH H, LATIFEH A. Microbial and sensory evaluation of probiotic yoghurt supplemented with cereal/pseudo-cereal grains and legumes[J]. *International Journal of Dairy Technology*, 2018, 71: 141–148.

[14] 于江傲,陈晓静,邓艳文,等. 复配乳酸菌黑米发酵乳工艺优

- 化及抗氧化活性研究[J]. *粮食与油脂*, 2023, 36(7): 114–118.
- [YU J A, CHEN X J, DENG Y W, et al. Process optimization and antioxidant activity of black rice fermented milk mixed with lactic acid bacteria[J]. *Cereals & Oils*, 2023, 36(7): 114–118.]
- [15] YANKEY S, MENSAH E O, ANKAR-BREWOO G M, et al. Optimized fermentation conditions for dragon fruit yogurt[J]. *Food and Humanity*, 2023, 1: 343–348.
- [16] 赵晓. 低 GI 大米发酵乳的研制及工艺优化[J]. *中国乳品工业*, 2022, 50(11): 58–64. [ZHAO X. Study on process and the optimization of low GI rice fermented milk[J]. *China Dairy Industry*, 2022, 50(11): 58–64.]
- [17] 李思宁, 唐善虎, 胡洋, 等. 发酵温度波动对酸奶感官、质构和风味特性的影响[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(4): 82–87. [LI S N, TANG S H, HU Y, et al. Effects of fermentation temperature fluctuation on sensory, texture and flavor characteristics of yogurt[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2018, 39(4): 82–87.]
- [18] JAEGER S R, CARDELLO A V, JIN D, et al. Consumer perception of plant-based yoghurt: Sensory drivers of liking and emotional, holistic and conceptual associations[J]. *Food Research International*, 2023, 167: 112666.
- [19] AKGUN A, YAZICI F, GULEC H A. Effect of reduced fat content on the physicochemical and microbiological properties of buffalo milk yoghurt[J]. *LWT*, 2016, 74: 521–527.
- [20] 姜文锐, 李秋艳, 盛文洋, 等. 乳酸菌发酵对四种杂豆蛋白凝胶及消化特性的影响[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(1): 19–27. [JIANG W K, LI Q Y, SHENG W Y, et al. The effects of lactic acid bacteria fermentation on protein gelation and gastrointestinal digestive characteristics from four pulses[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(1): 19–27.]
- [21] ZANG W, PAN X Y, ZHANG Y Y, et al. Mechanistic insights into gel formation of egg-based yoghurt: The dynamic changes in physicochemical properties, microstructure, and intermolecular interactions during fermentation[J]. *Food Research International*, 2023, 172: 113097.
- [22] KLOST M, GIMÉNEZ-RIBES G, DRUSCH S. Enzymatic hydrolysis of pea protein: Interactions and protein fractions involved in fermentation induced gels and their influence on rheological properties[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 105: 105793.
- [23] YIN X Y, LI J X, ZHU L, et al. Advances in the formation mechanism of set-type plant-based yogurt gel: A review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2023: 1–20.
- [24] BRÜCKNER-GÜHMANN M, BENTHIN A, DRUSCH S. Enrichment of yoghurt with oat protein fractions: Structure formation, textural properties and sensory evaluation[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 86: 146–153.
- [25] 刘文会, 陈海华, 王雨生. 海藻酸钠和刺槐豆胶对小麦淀粉流变学及质构性质的影响[J]. *粮油食品科技*, 2022, 30(5): 149–157. [LIU W H, CHEN H H, WANG Y S. Effects of sodium alginate and locust bean gum on rheological and texture properties of wheat starch[J]. *Science and Technology of Cereals, Oils and Foods*, 2022, 30(5): 149–157.]
- [26] KAUR P, KAUR K, BASHA S J, et al. Current trends in the preparation, characterization and applications of oat starch-A review[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 212: 172–181.
- [27] 张晶, 张美莉. β -葡聚糖对燕麦淀粉凝胶特性及老化的影响[J]. *中国食品学报*, 2021, 21(8): 91–101. [ZHANG J, ZHANG M L. Effects of β -Glucan on gel properties and retrogradation of oat starch[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2021, 21(8): 91–101.]
- [28] 王鑫媛, 卢海强, 谷新晰, 等. 干酪乳杆菌纯种发酵燕麦乳工艺及其产品质量分析[J]. *中国食品学报*, 2021, 21(1): 126–134. [WANG X Y, LU H Q, GU X X, et al. Technology of oat milk fermentation by *Lactobacillus casei* and product quality analysis[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2021, 21(1): 126–134.]
- [29] 董锐, 贺婷, 胡新中, 等. 不同炒制时间对燕麦粉理化特性及货架期的影响[J]. *中国粮油学报*, 2023, 38(4): 59–66. [DONG R, HE T, HU X Z, et al. Effect of different stir-frying time on the physical and chemical properties and shelf life of oat flour[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2023, 38(4): 59–66.]
- [30] CUI Yanmin, HAN Xuedong, HUANG xin, et al. Effects of different sources of β -glucan on pasting, gelation, and digestive properties of pea starch[J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 135: 108172.