

青稞植物基酸奶发酵过程中品质特性及 抗氧化活性的研究

朱煜婷^{1, 2}, 胡一晨¹, 王 蕾¹, 邹 亮^{1*}, 任贵兴^{1, 2*}

(1.成都大学食品与生物工程学院, 成都四川 610106; 2.山西大学生命科学学院, 太原山西 030006)

摘 要: [目的]探究发酵时间对青稞植物基酸奶理化特性、感官品质及抗氧化活性的影响, 以确定最佳发酵工艺。[方法]通过设置不同发酵时间(6、7、8、9、10 h), 系统测定酸奶的pH值、可滴定酸度、持水力、流变特性、总酚含量、抗氧化活性, 并结合感官评价与电子舌分析进行综合评估。[结果]随发酵时间延长, pH持续降低, 可滴定酸度升高, 持水力和流变特性在7 h达到最佳; 总酚含量与体外抗氧化活性(DPPH和ABTS自由基清除率)随发酵时间延长而增强, 10 h时达到最高; 感官评价显示7 h发酵样品色泽、组织状态、风味和口感综合得分最高。[结论]7 h为青稞植物基酸奶的最佳发酵时间, 可兼顾优良的理化特性、抗氧化能力与感官接受度。
关键词: 青稞; 植物基酸奶; 流变特性; 抗氧化活性; 电子舌

文章编号: 1671-4393 (2026) 03-0148-10 DOI:10.12377/1671-4393.26.03.20

Study on Quality Characteristics and Antioxidant Activity during Fermentation of Highland Barley-based Yogurt

ZHU Yuting^{1, 2}, HU Yichen¹, WANG Lei¹, ZOU Liang^{2*}, REN Guixing^{1, 2*}

(1.School of Food and Biological Engineering, Chengdu University, Chengdu Sichuan 610106;
2.School of Life Sciences, Shanxi University, Taiyuan Shanxi 030006)

Abstract: [Objective] To investigate the effects of fermentation time on the physicochemical properties, sensory quality, and antioxidant activity of highland barley-based yogurt, in order to determine the optimal fermentation process.[Method]Different fermentation times (6, 7, 8, 9, 10 h) were set to systematically evaluate the yogurt's

基金项目: 四川省高层次人才引进计划-天府学者项目(2022-17)
作者简介: 朱煜婷(2002-), 女, 山西运城人, 在读硕士, 研究方向为杂粮营养与功能;
胡一晨(1987-), 女, 浙江杭州人, 博士, 教授, 研究方向为食品营养品质评价;
王 蕾(1996-), 女, 湖北武汉人, 博士, 副研究员, 研究方向为杂粮加工与原料高值化利用。
***通信作者:** 邹 亮(1979-), 男, 四川成都人, 博士, 教授, 研究方向为食品营养与加工特性;
任贵兴(1963-), 男, 山西兴县人, 博士, 研究员, 研究方向为杂粮营养与功能。

pH value, titratable acidity, water holding capacity (WHC), rheological properties, total phenolic content, and antioxidant activity. Sensory evaluation and electronic tongue analysis were also conducted for comprehensive assessment. [Result] As fermentation time increased, the pH value continuously decreased, while titratable acidity increased. The WHC and rheological properties reached their optimum at 7 hours. The total phenolic content and in vitro antioxidant activity (DPPH and ABTS radical scavenging rates) increased with fermentation time and peaked at 10 hours. Sensory evaluation showed that the 7 h fermentation sample achieved the highest overall scores in color, texture, flavor, and taste. [Conclusion] The optimal fermentation time for highland barley plant-based yogurt is 7 hours, as it achieves a balance between excellent physicochemical properties, antioxidant capacity, and sensory acceptability.

Keywords: Highland Barley; plant yogurt; rheological properties; antioxidant activity; lectronic tongue

在饮食营养化、健康化与多元化需求的驱动下,消费者对健康美味食品的追求推动了乳制品及相关行业的发展^[1]。植物基酸奶作为传统乳制品的替代品,凭借其零乳糖、零胆固醇的特性,以及富含植物蛋白、膳食纤维及多种功能性成分的优势,成功满足了乳糖不耐受人群、素食者及追求健康生活的消费群体的特殊需求,近年来其全球消费量持续攀升,市场前景广阔^[2]。

青稞 (*Hordeum vulgare* L. var. *nudum*), 禾本科大麦属^[3]。作为青藏高原特有的珍贵裸粒大麦,是一种极具开发潜力的“全谷物”原料^[4]。其 β -葡聚糖含量居谷物之首,富含膳食纤维、维生素、矿物质及多酚类化合物,具有调节血糖血脂、增强免疫力、抗氧化等多种生理功能^[5-8]。然而,青稞的直接食用适口性较差,限制了其广泛应用。因此,通过现代食品加工技术将其转化为高附加值产品是提升其产业价值的关键途径。利用挤压膨化技术制备青稞熟粉,不仅能有效改善冲调性,更能破坏淀粉颗粒结构、促进糊化,为后续微生物发酵提供充足的预制碳源,是一项非常适合青稞深加工的预处理技术^[9, 10]。

发酵是酸奶制造的核心工艺,而发酵时间则是决定最终产品品质、风味和功能特性的最关键参数之一。它不仅直接调控乳酸菌的产酸代谢、微生物

生长动力学和菌群活力,更深刻影响蛋白质的胶凝程度、产品质构的形成、风味物质的生物合成以及生物活性成分的转化与释放^[11, 12]。发酵不足会导致产品酸度低、质地稀薄、特征风味欠缺;而发酵过度则易产生过强的酸涩味、乳清析出严重、活菌数因过低的pH值环境而衰减等问题^[13]。目前,关于发酵时间对牛乳酸奶品质影响的研究已较为深入,但针对以青稞为原料的植物发酵饮料鲜有报道。马长中等^[14]采用单一乳酸菌LAB005初步证实了乳酸菌发酵青稞饮料的可行性。易晓成等^[15]以青稞酶解液为原料,应用响应面设计法系统优化了益生菌发酵工艺参数,显著提升了产品的酸度及发酵效率。毛海峰等^[16]通过模糊数学评价法和正交试验优化,确定了青稞发酵饮料的最佳工艺参数。Guo等^[17]发现干酪乳杆菌17301发酵能显著提升青稞饮料的多酚、黄酮含量与抗氧化及脂肪酶抑制活性,并丰富其风味化合物谱,有效改善产品功能特性。

本研究以挤压膨化的青稞熟粉为原料,接种商业复合酸奶发酵剂,在37℃下分别进行6、7、8、9、10 h的发酵。通过系统研究不同发酵时间对青稞植物基酸奶的理化指标、抗氧化能力以及感官品质和电子舌味觉轮廓的综合影响,明确青稞植物基酸奶在发酵过程中的品质变化规律,确定其最佳发酵时间。本研究为青稞的高值化精深利用和高品质、

功能性植物基酸奶产品的开发提供坚实的理论依据与数据支持。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

熟化青稞粉，商丘五福正食品有限公司；酸奶发酵剂12菌（嗜热链球菌、保加利亚乳杆菌、长双歧杆菌、乳双歧杆菌、短双歧杆菌、婴儿双歧杆菌、青春双歧杆菌、嗜酸乳杆菌、鼠李糖乳杆菌、罗伊氏乳杆菌、植物乳杆菌、干酪乳杆菌），安琪酵母股份有限公司。

没食子酸、福林酚，上海阿拉丁生化科技股份有限公司；1,1-二苯基-2-三硝基苯肼（DPPH）、2,2'-联氮-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸（ABTS），美国Sigma公司；MC培养基、MRS培养基，北京奥博星生物技术有限公司。试验所用试剂均为分析级。

1.2 仪器与设备

DJM50LA胶磨机、GYB40-10S高压均质机，上海东华高压均质机厂；ST-20A超高温瞬时灭菌机，上海顺仪实验设备有限公司；LK-118SNJ酸奶机，广东乐创电器有限公司；Infinite 200PRO酶标仪，上海新振仪器设备有限公司；FE28 pH计，梅特勒-托利多仪器（上海）有限公司；MCR302流变仪，安东帕（上海）商贸有限公司；SA402B电子舌，日本Insent公司。

1.3 试验方法

1.3.1 青稞植物基酸奶制备

青稞植物基酸奶的工艺流程如图1所示。操作要点包括：

混合：将青稞熟粉与纯净水以1：10的比例混合，再加入7%的白砂糖（以青稞粉质量计），在磁力搅拌器上连续搅拌10 min使其混合均匀；胶磨：将调配好的浆液送入胶磨机进行胶磨处理（循环胶磨3次，每次胶磨5 min）；均质：将胶磨好的浆液送入高压均质机，进行均质处理（30 MPa循环均质1 min，60 MPa循环均质2 min）；杀菌：将均质好的浆液倒入超高温瞬时灭菌机中，100℃进行灭菌5 s，随后在无菌罐装室中进行灌装处理；冷却接

菌：待浆液冷却至40℃左右，加入12菌酸奶发酵剂。加入比例按照青稞蛋白含量计算，1 g酸奶发酵剂可作用35 g青稞蛋白；恒温发酵：利用酸奶机在42℃条件下分别持续发酵6、7、8、9、10 h；冷藏后熟：发酵结束后将酸奶置于4℃冰箱以供后续检测。

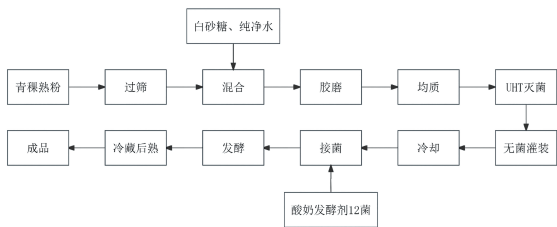


图1 青稞植物基酸奶制备工艺流程

Figure 1 Process Flow for Preparation of Barley-based Yogurt

1.3.2 乳酸菌活菌数测定

乳酸菌为发酵糖类产生乳酸的细菌总称，主要为双歧杆菌属（*Bifidobacterium*）、乳杆菌属（*Lactobacillus*）、嗜热链球菌属（*Streptococcus*），参考《GB 4789.35—2023 食品安全国家标准 食品微生物学检验 乳酸菌检验》对乳酸菌活菌进行计数^[18]。

1.3.3 pH值和可滴定酸度的测定

pH值采用数字式pH计进行检测。取适量酸奶于试吃杯中，用玻璃棒搅拌均匀进行读数。

参考《GB 5009.239—2016 食品安全国家标准 食品酸度的测定》，采用滴定法测定酸奶的可滴定酸度^[19]。取10 g样品，稀释1倍，搅拌均匀后向其中加入2~3滴酚酞指示剂，用标定过的0.1 mol/L NaOH标准溶液进行滴定。达到终点时溶液呈淡粉色，且30 s内不改变。记录消耗的NaOH溶液毫升数，并计算酸度，单位使用吉尔涅尔度（°T）表示。

1.3.4 持水力（WHC）测定

参考Dhakal等^[20]的方法，并略作修改。记录空离心管的质量为 m_1 ，称取20 g酸奶样品记为 m_2 ，7 000 r/min、4℃下离心15 min，倒掉上清液，离心管倒置30 min后立即称重，质量记为 m_3 。WHC计算公式如下所示：

$$WHC = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \times 100\%$$

1.3.5 流变学特性测定

参考Jiao等^[21]的方法，并略作修改。使用PP50平行板夹具，间隙为1 mm，测试温度为25 ℃。在0.1~100 s⁻¹的剪切速率下进行静态剪切扫描测定其表观黏度。数据以逐点、对数方式收集。使用Herschel-Bulkley模型对结果进行拟合，该模型用以下方程表示：

$$\tau = \tau_0 + K \gamma^n$$

其中， τ 是剪应力 (Pa)， τ_0 是屈服应力 (Pa)， K 是稠度系数 (Pa·sⁿ)， γ 是剪切速率 (1/s)， n 是流动指数。

在线性粘弹区域内，保持应变幅值为0.1%，在0.1~1 000 rad/s的角频率下进行动态频率扫描，得到储能模量 G' 和损耗模量 G'' 。

1.3.6 总酚含量测定

参考Li等^[22]的方法，并略作修改。称取10 g酸奶样品置于50 mL离心管中，加入15 mL含0.05 mL浓盐酸的酸化甲醇。首先，在12 000 r/min、4 ℃离心1 min，在-20 ℃静置1 h使蛋白充分沉淀后，在4 ℃、7 000 r/min条件下离心10 min，取上清液用于总酚含量和体外抗氧化活性的测定。

总酚含量的测定如下所示：取1 mL提取物，依次加入0.5 mL福林酚试剂、5 mL蒸馏水和1 mL 95%乙醇，涡旋后室温避光静置5 min。再向试管中加入1 mL 5%的Na₂CO₃溶液 (w/v)，涡旋后室温条件下避光反应避光1 h，于波长725 nm处读取吸光度。同时以没食子酸 (50~100 μg/mL) 为阳性对照绘制标准曲线 ($y=0.0056x+0.025$, $R^2=0.9988$)，结果以没食子酸当量表示。

1.3.7 体外抗氧化活性测定

DPPH自由基清除能力的测定参考蔡翔等^[23]的方法，并略作修改。将0.0079 g DPPH粉末用无水乙醇溶解，定容至100 mL棕色容量瓶，得到0.2 mmol/L的DPPH自由基工作液。将其保存于4 ℃，使用前需从冰箱中取出并置于室温。样品组：1 mL提取物+1 mL工作液；对照组：1 mL提取物+1 mL无水乙醇；空白组：1 mL无水乙醇+1 mL工作液。溶液充分混匀后，

在25 ℃下避光孵育40 min，于波长725 nm处读取吸光度。DPPH自由基清除率的计算公式如下：

$$DPPH \text{ 自由基清除率 } (\%) = \left(1 - \frac{A_s - A_b}{A_c}\right) \times 100\%$$

其中， A_s 样品组的吸光度值， A_b 是对照组的吸光度值， A_c 是空白组的吸光度值。

ABTS自由基清除能力的测定参考蔡翔等^[23]的方法，并略作修改。ABTS自由基阳离子工作液的制备方法如下：首先，配制7 mmol/L ABTS溶液和2.45 mmol/L过硫酸钾溶液，将两种溶液按体积比1:1混合后，在避光条件下反应12~16 h，得到ABTS+自由基储备液。用蒸馏水稀释储备液，直至其波长734 nm处的吸光度达到0.700±0.005，即得ABTS自由基阳离子工作液。对照组：40 L蒸馏水+160 L工作液；样品组：40 L提取物+160 L工作液。将溶液充分混匀后，在25 ℃下避光孵育15 min，于波长734 nm处读取吸光度。ABTS自由基清除率的计算公式如下：

$$ABTS \text{ 自由基清除率 } (\%) = \frac{A_c - A_s}{A_c} \times 100\%$$

其中， A_s 是样品组的吸光度值， A_c 是对照组的吸光度值。

1.3.8 感官评价与描述

根据表1所示的感官评价细则，邀请15位感官评价人员对青稞植物基酸奶的色泽、组织形态、风味、口感四方面进行感官评价。满分100分，结果取其平均值。

1.3.9 电子舌分析

参考Han等^[24]的方法，略作修改。使用电子舌对不同发酵时间的样品进行检测分析，由于样品黏度较高，易附着于电子舌传感器上影响样品的检测结果，因此对样品进行稀释处理。称取30 g酸奶样品，加入去离子水2倍稀释，搅拌均匀后，25 ℃、8 000 r/min离心15 min，使用AAE、CTO、CAO、COO、AE1、GL六种传感器对上清液的9种味觉进行检测分析，每种样品重复检测5次，然后对每个样品的5次重复测量并取平均值用于进一步分析。

表 1 青稞植物基酸奶感官评价细则

Table 1 Sensory Evaluation Criteria for Barley-based Yogurt		
感官指标	评分指标	评分
色泽 (25 分)	色泽不均匀, 光泽度较差	0~10
	色泽较均匀, 光泽度较差	11~20
	色泽均匀, 有光泽	21~25
组织形态 (25 分)	组织粗糙、裂纹、气泡、有颗粒	0~10
	组织粗糙、裂纹、无气泡	11~20
	组织均匀细腻、表面光滑、无气泡	21~25
风味 (25 分)	有明显的不良气味	0~10
	香气不浓, 具有勉强可接受的特殊风味	11~20
	具有发酵香气, 风味纯正浓郁	21~25
口感 (25 分)	无青稞味, 或有杂味	0~10
	青稞味道偏淡, 偏酸或偏甜	11~20
	青稞味道适宜, 酸甜合宜	21~25

1.4 数据处理

所有试验重复3次, 结果以“平均值±标准差”表示。采用SPSS 26中的Duncan's多重比较进行显著性分析, $P<0.05$ 表示具有统计学意义。

2 结果与讨论

2.1 发酵时间对青稞植物基酸奶 pH 值及可滴定酸度的影响

pH值和可滴定酸度是评价食品酸味与品质的关键指标, 两者从不同角度反映产品的酸特性及其对

质量的影响。其中, pH值可用于评估食品中微生物生长的潜力, 而可滴定酸度则能更准确地预测有机酸对风味的贡献程度。《T/WSJD 12—2020 植物蛋白饮料 植物酸奶》行业标准中规定植物酸奶pH值 ≤ 4.5 , 酸度 $\leq 30\text{ }^{\circ}\text{T}^{[25]}$ 。

pH值和可滴定酸度主要受乳酸菌发酵的影响。如图2所示, 随发酵时间延长, 青稞酸奶的pH值显著($P<0.05$)降低, 而可滴定酸度显著($P<0.05$)升高。这种变化主要归因于发酵过程中乳酸菌利用青稞基质中的碳水化合物, 通过发酵途径不断产生有机酸(主要是乳酸)^[26]。同时, 发酵8 h后, pH值出现显著下降(从4.29降至4.17), 同时可滴定酸度大幅上升(从38.57 $^{\circ}\text{T}$ 升至43.10 $^{\circ}\text{T}$), 表明该阶段乳酸菌代谢旺盛、产酸速率达到高峰。

2.2 发酵时间对青稞植物基酸奶活菌数的影响

如图3所示, 青稞植物基酸奶的乳酸菌活菌数均高于 1×10^6 CFU/mL, 符合T/WSJD 12—2020的规定^[25]。在6~10 h的发酵过程中, 乳酸菌活菌数从7.76 lg (CFU/mL)显著($P<0.05$)增长至8.15 lg (CFU/mL), 呈现出典型的微生物对数生长趋势。这一增长阶段与pH值的持续下降和可滴定酸度的显著上升密切相关, 表明乳酸菌代谢旺盛, 持续利用青稞基质中的碳水化合物发酵产酸。

2.3 发酵时间对青稞植物基酸奶 WHC 的影响

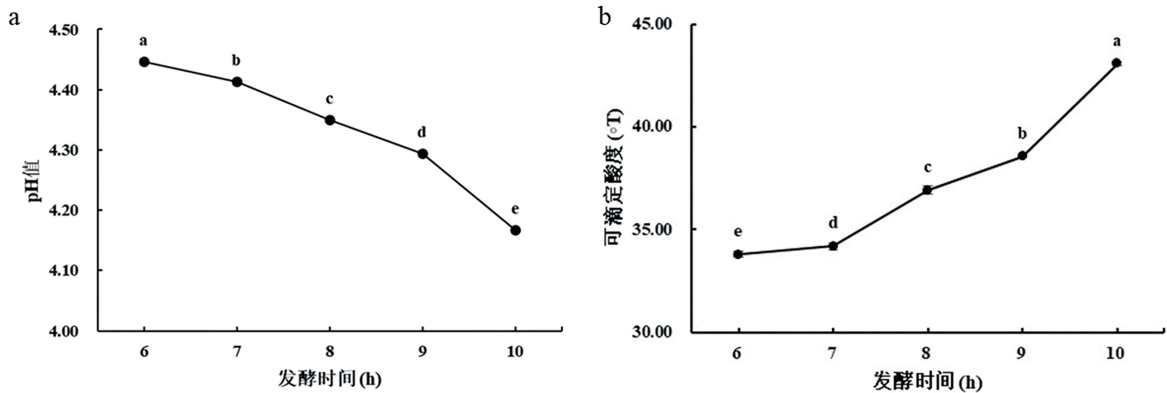


图 2 发酵时间对青稞植物基酸奶 pH 值 (a) 及可滴定酸度 (b) 的影响
Figure 2 Effect of Fermentation Time on pH Value (a) and Titratable Acidity (b) of Barley-based Yogurt

注: 不同的小写字母表示不同样品中存在显著差异 ($P<0.05$), 下同

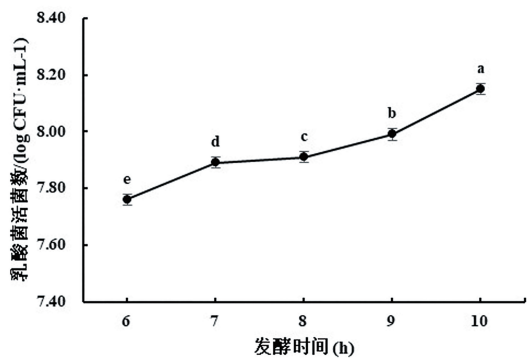


图 3 发酵时间对青稞植物基酸奶乳酸菌活菌数的影响

Figure 3 The Effect of Fermentation Time on the Live Bacterial Count of Barley-based Yogurt

WHC是指酸奶在重力或外力（如离心、加热、压力等）作用下保持水分的能力，是评价酸奶结构稳定性的关键指标，直接影响产品的保质期和消费者接受度^[27]。如图4所示，青稞植物基酸奶的WHC随发酵时间延长呈先上升后下降的趋势。发酵时间为7 h时，青稞酸奶的WHC最高，达25.268%。这可能与蛋白质凝胶网络的形成有关。乳酸菌代谢产酸促青稞使蛋白质分子逐渐脱稳、交联并形成致密而均匀的三维网状结构，从而能够有效截留水分^[28]。而当发酵时间超过7 h后，WHC开始下降，其原因可能与过度酸积累有关。持续产生的有机酸导致蛋白质胶束过度收缩、结构收紧，部分包裹的水分被排出，从而降低体系的持水性能。

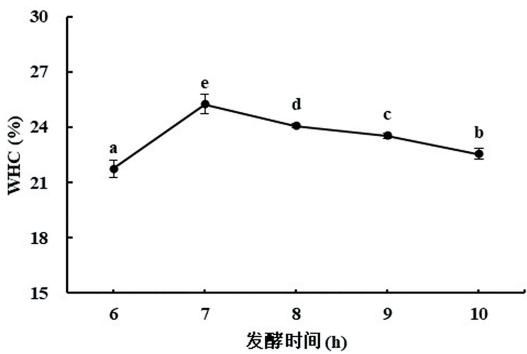


图 4 发酵时间对青稞植物基酸奶 WHC 的影响

Figure 4 The Effect of Fermentation Time on the Water Holding Capacity of Barley-based Yogurt

2.4 发酵时间对青稞植物基酸奶流变学特性的影响

表观黏度是决定酸奶感官品质与消费者接受度的关键流变学参数之一。如图5a所示，所有青稞植物基酸奶样品均表现出典型的非牛顿流体行为，其表观黏度随剪切速率增大而显著下降，呈现剪切稀化特性。该现象可能源于剪切作用下蛋白质三维网络结构的可逆性破坏，以及蛋白质聚集体和油滴等微粒沿流动方向的定向排列^[21]。与此同时，发酵时间对表观黏度具有显著影响。发酵时间为7 h和8 h的青稞植物基酸奶样品能有效地包裹住水相。发酵时间为6 h的样品由于发酵不足，乳酸菌产酸量和蛋白质凝胶网络尚未充分形成而黏度较低。而发酵时间为9 h和10 h的样品由于过度发酵产酸从而破坏了原本稳定的三维网络结构，使黏度显著降低。Sha等^[29]报道过度酸化会导致蛋白酶活性增加，导致蛋白网络结构发生水解、疏松甚至断裂，进而破坏体系的稳定性。

储能模量（G'）和损耗模量（G''）也是表征青稞植物基酸奶流变特性的关键参数。G'为弹性模量，用于衡量酸奶的类固体行为，其值越大，表明样品受到外力时弹性越强、变形越小，能量储存能力越高。G''为黏性模量，反映酸奶的类流体行为，其值越大，则能量损耗越多、流动性越差，表明体系更具黏性阻力^[21]。如图5c和5d所示，在0.1~1 000 rad/s的频率扫描范围内，所有样品的G'和G''均随频率的增加呈现上升趋势。且发酵时间为7 h的样品G'和G''最高，进一步证明样品在此发酵条件下形成了更致密、更稳定的凝胶网络结构。最值得注意的是，在所有样品中，唯有发酵时间为7 h的样品G''始终高于G'，黏性成分占主导地位，表现出类流体的行为。

采用Herschel-Bulkley模型对青稞植物基酸奶的流变学参数进行分析。如表2所示，所有样品的R²值均大于0.95，表明Herschel-Bulkley模型能够很好地拟合青稞植物基酸奶的流变特性。屈服应力 τ_0 随着发酵时间的延长呈现先上升后下降的趋势。 τ_0 越大，表明样品开始流动所需的剪切力就越大，其抗剪切

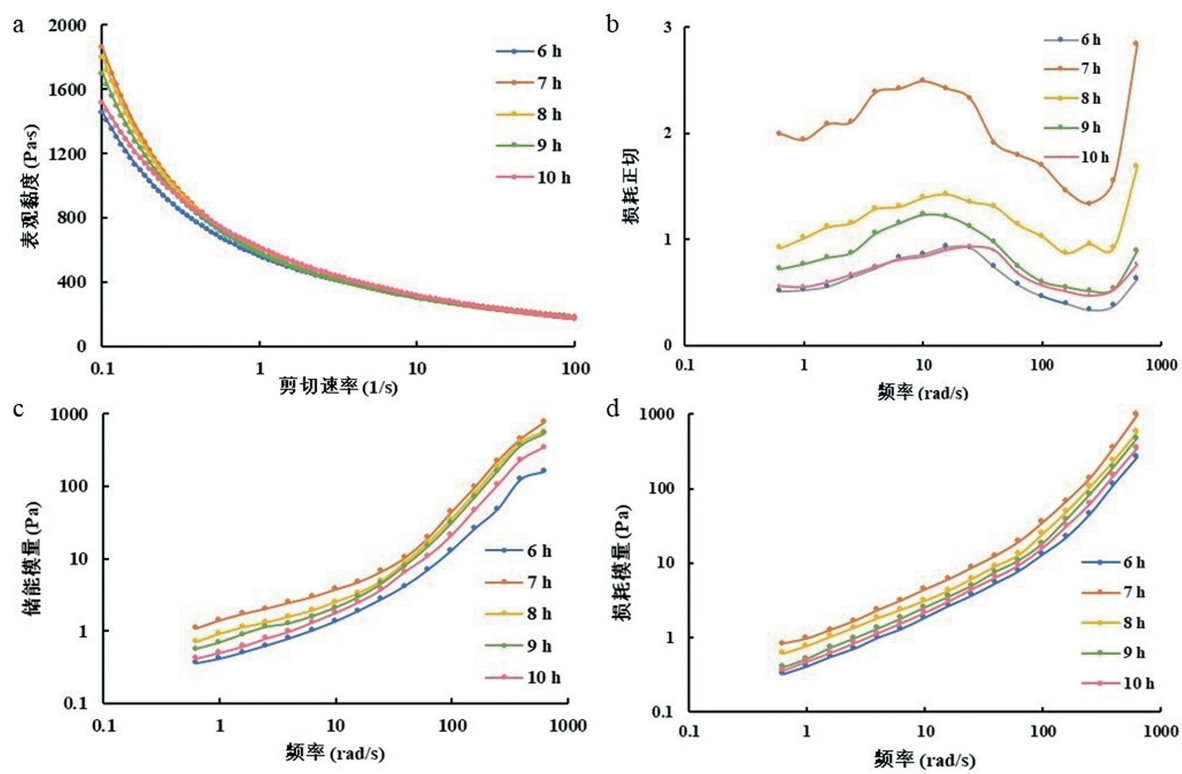


图 5 发酵时间对青稞植物基酸奶流变学特性的影响
Figure 5 The Effect of Fermentation Time on the Rheological Properties of Barley-based Yogurt

注：a-表观黏度；b-损耗正切；c-储能模量G'；d-损耗模量G''

表 2 发酵时间对青稞植物基酸奶流变学参数的影响					
Table 2 The Effect of Fermentation Time on Rheological Parameters of Barley-based Yogurt					
参数	6 h	7 h	8 h	9 h	10 h
τ_0 (Pa)	0.049 ± 0.006^c	0.127 ± 0.004^a	0.099 ± 0.003^b	0.087 ± 0.007^c	0.063 ± 0.005^d
K (Pa·s ⁿ)	0.50 ± 0.06^b	0.60 ± 0.01^a	0.50 ± 0.03^b	0.50 ± 0.01^b	0.48 ± 0.03^b
n	0.78 ± 0.02^a	0.68 ± 0.04^b	0.74 ± 0.02^{ab}	0.75 ± 0.01^a	0.77 ± 0.05^a
R ²	0.9999	0.9911	0.9999	0.9999	0.9986

注：数据表示为平均值±标准差；不同的小写字母表示不同样品中存在显著差异（ $P<0.05$ ）；流变测试温度为25℃，剪切速率范围为0.1-100 s⁻¹，所有样品Herschel-Bulkley模型拟合R²值均大于0.95，表明该模型拟合良好

能力就越强。此外，稠度系数K值越大，流变指数n值越小，表明酸奶的稠度越高^[30]。发酵时间为7 h的青稞植物基酸奶 τ_0 和K最大，n最小，说明其稠度最高，结构最为致密。

2.5 发酵时间对青稞植物基酸奶总酚含量的影响

多酚是青稞中的主要功能成分。如图6所示，随发酵时间延长，青稞植物基酸奶中总酚含量呈显著上升（ $P<0.05$ ）。总酚含量的增加可能源于

游离酚类物质的积累，而结合酚类含量并未显著变化。陶燕勤等^[31]研究表明微生物发酵有助于提高青稞酒糟中酚类化合物的丰富度和含量。这主要是由于发酵过程中微生物代谢分泌的酶类可分解大分子酚类并改变体系酸碱环境，促使与蛋白、脂肪等基质结合的结合酚释放，转化为生物可利用性更高的游离酚，从而显著提升总酚含量^[32]。

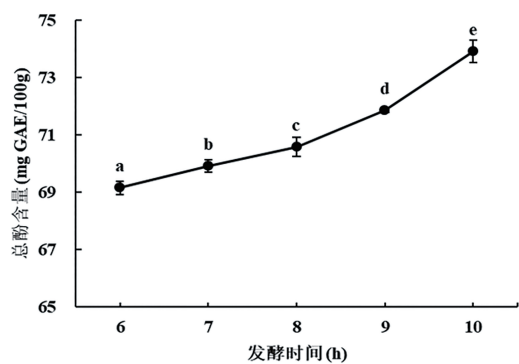


图 6 发酵时间对青稞植物基酸奶多酚含量的影响
Figure 6 The Effect of Fermentation Time on the Polyphenol Content of Barley-based Yogurt

2. 6 发酵时间对青稞植物基酸奶抗氧化活性的影响

在本研究中，采用DPPH和ABTS两种不同的测定方法来评估不同发酵时间下青稞植物基酸奶的抗氧化活性。如图7所示，随发酵时间延长，青稞植物基酸奶的DPPH和ABTS自由基清除率均呈现逐渐上升的趋势。发酵时间为10 h的样品表现出最高的抗氧化能力，其DPPH自由基清除率达81.54%，ABTS自由基清除率增至43.00%，表明延长发酵时间有助于显著提升青稞植物基酸奶的抗氧化活性。根据邵彤等^[33]研究表明，在乳酸菌发酵过程中，生成了传递质子的化合物，进而增强了其对自由基的清除能力。

2. 7 发酵时间对青稞植物基酸奶电子舌分析结果的影响

采用电子舌对不同发酵时间青稞植物基酸奶的

味觉轮廓分析结果如图8所示。雷达图显示，不同发酵时间样品在咸味、涩味及鲜味维度上响应值接近，无显著差异，而酸味、苦味和甜味则存在显著变化。其中，发酵时间为7 h的样品呈现出独特的味觉特征，其酸味响应值最低，而苦味与甜味响应值最高。苦味的增强可能与微生物代谢产生的某些苦味肽、氨基酸或酚类物质的积累有关^[34]。而甜味的增加则可能源于乳酸菌对碳水化合物的分解生成小分子糖类或糖醇类物质。总的来说，7 h的发酵时间在青稞植物基酸奶风味形成中处于一个关键窗口

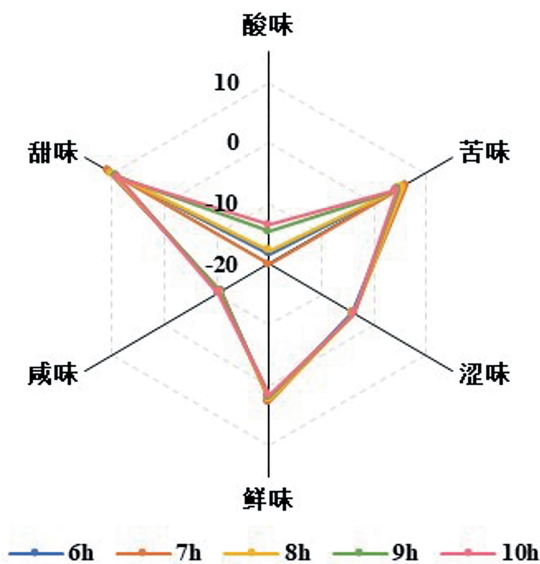


图 8 发酵时间对青稞植物基酸奶电子舌分析结果的影响
Figure 8 The Effect of Fermentation Time on the Electronic Tongue Analysis Results of Barley-based Yogurt

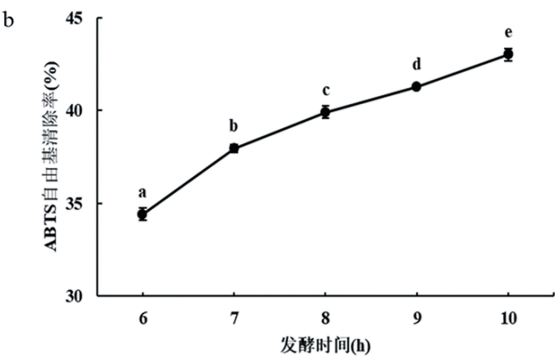
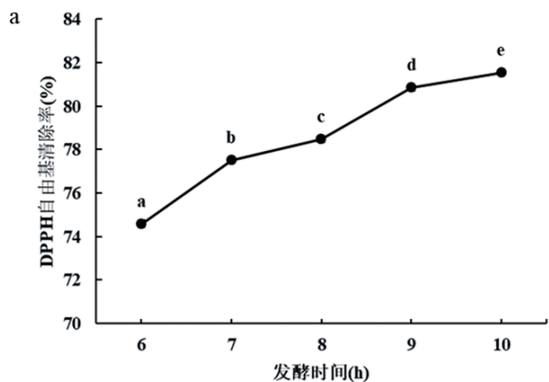


图 7 发酵时间对青稞植物基酸奶抗氧化活性的影响
Figure 7 he Effect of Fermentation Time on the Antioxidant Activity of Barley-based Yogurt

期，此时各类风味物质达到特定平衡，或更易被消费者接受。

2.8 发酵时间对青稞植物基酸奶感官品质的影响

如图9所示，不同发酵时间对青稞植物基酸奶的感官品质有显著影响。发酵时间为7 h的样品在色泽、组织形态、风味及口感4个方面的评分均最高，表现出最优的整体接受度。在组织形态方面，由于最高的表观黏度、最高的持水力以及最完整的蛋白质凝胶网络结构，三者共同保障了青稞植物基酸奶细腻、稳定且不易分层的质地。风味方面的突出表现则与电子舌分析结果高度吻合，即最低的酸味响应值与最高的甜味响应值，暗示微生物代谢在此阶段产生了良好的风味平衡，降低了酸刺激的同时提升了甜味感知。综上所述，7 h的发酵时间通过优化产品流变特性与风味轮廓，显著提升了青稞植物基酸奶的整体感官品质。

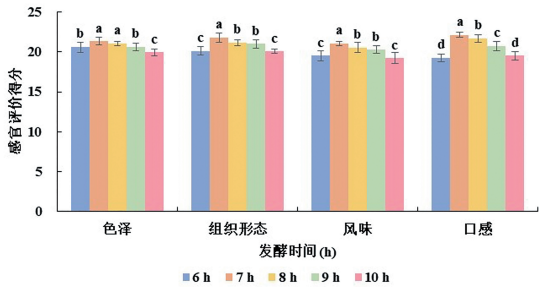


图 9 发酵时间对青稞植物基酸奶感官品质的影响
Figure 9 The Effect of Fermentation Time on the Sensory Quality of Barley-based Yogurt

注：不同的小写字母表示不同样品中存在显著差异 ($P<0.05$)

3 讨论

本研究开发的青稞植物基酸奶不仅契合植物基饮食趋势，还为乳糖不耐受人群及素食者提供了新型健康选择。然而，本研究选用商业12菌型酸奶发酵剂，难以明确单一菌株对青稞基质发酵的特异性作用。未来可进一步筛选适配青稞基质的优良单一菌株，提升产品品质的靶向性。并结合代谢组学技术解析发酵过程中风味物质与功能成分的转化路径，明确风味与活性的形成机制。此外，可添加

益生元复配开发合生元型植物基酸奶，丰富产品品类，推动青稞全谷物的高值化精深利用。

4 结论

本研究通过系统探究不同发酵时间（6~10 h）对青稞植物基酸奶品质的影响，明确7 h为最优发酵时间。该条件下酸奶持水力、表观黏度、屈服应力、动态模量及感官综合评价均达到最佳，蛋白质凝胶网络结构最为完整，且在电子舌分析中表现出良好的风味平衡性。尽管总酚含量与抗氧化活性随发酵时间延长持续增强，并在10 h达到最高，但综合考虑产品质地、风味与接受度，7 h发酵可在维持良好功能活性的基础上最大程度优化食用品质。该研究不仅为青稞植物基酸奶的工艺优化提供了关键参数，也为全谷物高值化利用与功能性植物酸奶产品开发奠定了坚实的理论与技术基础。

参考文献

[1] Yao D, Sun L C, Zhang L J, et al.Emulsion Structural Remodeling in Milk and Its Gelling Products: A Review[J]. Gels, 2024, 10 (10) : 671.

[2] 杨华平, 石晴芳, 葛戴和.植物酸奶的研制现状与展望[J].中国食品工业, 2025 (3) : 127-129.

[3] 扎西穷达, 巴桑琼达, 次仁卓嘎, 等.青稞活性成分与功能作用研究进展[J].食品质量安全学报, 2024, 15 (23) : 256-262.

[4] 刘露.超微粉碎对青稞粉营养、理化特性的影响及其应用研究[D].郑州: 河南工业大学, 2023.

[5] 邢晓婷, 孙辉, 刘建奎, 等.青稞营养特性与加工品质研究进展[J].中国食物与营养, 2023, 29 (6) : 40-44.

[6] 范雨婷, 王可心, 张海霞, 等.发芽青稞营养成分及功能特性研究进展[J].食品工业科技, 2025, 46 (2) : 403-411.

[7] 王芳, 马银花, 祁存英, 等.青稞品质及其环境因子影响研究进展[J].食品研究与开发, 2025, 46 (2) : 217-224.

[8] 王昕慧, 刘娟, 李俏, 等.大麦/青稞β-葡聚糖研究进展[J].应用与环境生物学报, 2024, 30 (6) : 1176-1188.

[9] Zhang Z, Zhu M, Xing B, et al.Effects of extrusion on structural properties, physicochemical properties and in vitro starch digestibility of Tartary buckwheat flour[J].Food Hydrocolloids, 2023 (135) : 108197.

[10] Zhang D, Zhang Y, Pan X, et al.Effect of extrusion on the structural and flavor properties of oat flours[J].Journal of Cereal

- Science, 2023 (113): 103742.
- [11] 蒋雯杰, 叶箭, 成林, 等. 乳酸菌发酵植物基饮料中营养物质及风味物质的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2026, 52 (1): 376-386.
- [12] 石琳, 贾玮, 张荣, 等. 酸奶滋味特征感知、形成过程与分析评价方法研究进展[J]. 食品工业科技, 2025, 46 (9): 445-455.
- [13] Wen L, Yang L, Chen C, et al. Applications of multi-omics techniques to unravel the fermentation process and the flavor formation mechanism in fermented foods[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2024, 64 (23): 8367-8383.
- [14] 马长中, 辜雪冬, 罗章. 乳酸菌发酵青稞饮料的研制[J]. 西藏科技, 2011 (9): 6-9.
- [15] 易晓成, 万萍, 白娜. 响应面法优化益生菌发酵青稞饮料工艺[J]. 中国酿造, 2018, 37 (1): 116-120.
- [16] 毛海峰, 鲁瑶, 张艳珍, 等. 基于模糊数学法评价青稞发酵饮料的工艺研究[J]. 酿酒, 2023, 50 (5): 66-71.
- [17] Guo W, Chen M, Cui S, et al. Effects of Lactocaseibacillus casei fermentation on the bioactive compounds, volatile and non-volatile compounds, and physiological properties of barley beverage[J]. Food Bioscience, 2023 (53): 102695.
- [18] 国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. GB4789.35—2023 食品安全国家标准 食品微生物学检验 乳酸菌检验[S].
- [19] 国家卫生和计划生育委员会. GB5009.239—2016 食品安全国家标准 食品酸度的测定[S].
- [20] Dhakal D, Kumar G, Devkota L, et al. The choice of probiotics affects the rheological, structural, and sensory attributes of lupin-oat-based yoghurt[J]. Food Hydrocolloids, 2024 (156): 110353.
- [21] Jiao B, Wu B, Fu W, et al. Effect of roasting and high-pressure homogenization on texture, rheology, and microstructure of walnut yogurt[J]. Food Chemistry: X, 2023 (20): 101017.
- [22] Li K, Duan Z, Zhang J, et al. Growth kinetics, metabolomics changes, and antioxidant activity of probiotics in fermented highland barley-based yogurt[J]. Food Science and Technology, 2023 (173): 114239.
- [23] 蔡翔, 胡桂萍, 曹红妹, 等. 桑葚酸奶发酵贮藏过程中活性成分和抗氧化活性变化特征[J]. 中国乳品工业, 2023, 51 (3): 41-45.
- [24] Han Y, Jin X, Zhang Z, et al. Characterization of pectin with different structural features and its effects on Yogurt quality[J]. Food Science and Technology, 2025 (229): 118236.
- [25] 中国卫生监督协会. T/WSJD 12-2020 植物蛋白饮料 植物酸奶[S].
- [26] 尤旭升, 李兴江, 叶剑, 等. 乳酸菌发酵砀山酥梨汁差异代谢物的鉴定及其关键代谢途径研究[J]. 食品工业科技, 2026, 47 (7): 1-10.
- [27] Rashwan A K, Osman A I, Chen W. Natural nutraceuticals for enhancing yogurt properties: a review[J]. Environmental Chemistry Letters, 2023, 21 (3): 1907-1931.
- [28] 王紫涵, 李岳星, 蔡勇建, 等. 白芸豆提取物对凝固型酸奶品质的影响[J]. 食品与机械, 2025, 41 (6): 211-216.
- [29] Sha H Y, Wang Q Q, Li Z J. Comparison of the effect of exopolysaccharide-producing lactic acid bacteria from sourdough on dough characteristics and steamed bread quality[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2023, 58 (1): 378-386.
- [30] Sözeri Atik D, Öztürk H İ, Akın N. Perspectives on the yogurt rheology[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 263 (Pt 2): 130428.
- [31] 陶燕勤, 罗毅皓, 孙万成, 等. 青稞酒糟多酚的提取鉴定及其生物活性比较分析[J]. 现代食品科技, 2023, 39 (4): 231-238.
- [32] Li J, Ye F, Zhou Y, et al. Tailoring the composition, antioxidant activity, and prebiotic potential of apple peel by *Aspergillus oryzae* fermentation[J]. Food Chemistry: X, 2024 (21): 101134.
- [33] 邵彤, 方海田, 刘慧燕. 红枣酵素酸奶储藏稳定性及其体外抗氧化活性研究[J]. 食品与发酵工业, 2026, 52 (2): 165-173.
- [34] Zhao C J, Schieber A, Gänzle M G. Formation of taste-active amino acids, amino acid derivatives and peptides in food fermentations—A review[J]. Food Research International, 2016, 89 (Pt 1): 39-47.