

## 基于主成分综合评价法对植物基杏仁酸奶配方的优化及其物性学特性的表征

马杰, 张婷, 周芷夷, 张涛, 于俊飞, 孔令明, 李学文, 周建中

### Optimization of Plant-based Almond Yogurt Formulations and Characterization of Their Physical Properties Based on the Principal Component Synthesis Evaluation Approach

MA Jie, ZHANG Ting, ZHOU Zhiyi, ZHANG Tao, YU Junfei, KONG Lingming, LI Xuewen, and ZHOU Jianzhong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023060257>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于主成分小米-小麦混合粉面团流变学特性综合评价

Rheological properties of wheat dough added millet flour based on principal component analysis method

食品工业科技. 2018, 39(7): 35-39 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.07.008>

#### 基于主成分分析和聚类分析综合评价蒸谷米的品质特性

Comprehensive Evaluation of Quality Characteristics of Parboiled Rice Based on Principal Component Analysis and Cluster Analysis

食品工业科技. 2021, 42(7): 258-267 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020050209>

#### 基于主成分分析的芹菜品质评价

Quality Evaluation of Celery Based on Principal Component Analysis

食品工业科技. 2020, 41(3): 308-314,320 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.03.051>

#### 基于主成分分析和聚类分析的百合花瓣品质综合分析与评价

Comprehensive Evaluation of Lily Petal Quality Based on Principal Component Analysis and Cluster Analysis

食品工业科技. 2020, 41(3): 232-238,245 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.03.039>

#### 基于主成分与聚类分析的35个苹果品种多酚综合评价

Comprehensive evaluation of polyphenols from 35 apple varieties based on principal component and cluster analysis

食品工业科技. 2017(08): 139-144 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2017.08.019>

#### 基于主成分分析的不同品种小米品质评价

Quality Evaluation of Different Varieties Millet Based on Principal Components Analysis

食品工业科技. 2019, 40(9): 49-56 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.09.010>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

马杰, 张婷, 周芷夷, 等. 基于主成分综合评价法对植物基杏仁酸奶配方的优化及其物性学特性的表征 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(13): 150–158. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023060257

MA Jie, ZHANG Ting, ZHOU Zhiyi, et al. Optimization of Plant-based Almond Yogurt Formulations and Characterization of Their Physical Properties Based on the Principal Component Synthesis Evaluation Approach[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(13): 150–158. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023060257

· 工艺技术 ·

# 基于主成分综合评价法对植物基杏仁酸奶配方的优化及其物性学特性的表征

马杰, 张婷, 周芷夷, 张涛, 于俊飞, 孔令明, 李学文, 周建中<sup>\*</sup>  
(新疆农业大学食品科学与药学院, 新疆乌鲁木齐 830052)

**摘要:** 本研究旨在优化植物基杏仁酸奶配方, 以提高其品质、增强其储藏稳定性。研究以甜杏仁为主要原料, 添加乳化剂、增浆剂等常规酸奶稳定剂, 通过乳酸发酵制成植物基杏仁酸奶。采用主成分综合评价分析和响应面优化法确定最佳酸奶稳定剂配方, 并对其物性学特性进行研究表征。研究结果表明: 最佳的植物基杏仁酸奶配方为: 酒石酸单双甘油酯添加量 0.4%、羟丙基二淀粉磷酸酯添加量 2.0%、谷氨酰胺转氨酶添加量 0.1%, 综合评分为 0.990, 通过响应面验证后的植物酸奶综合评分与预测结果接近。经调配的植物基酸奶品质及总接受程度显著提升, 复配植物基杏仁酸奶 (MPBAY) 微观颗粒更加饱满, 乳脂分配更加均匀, 质地更加醇厚。此研究为植物基酸奶的开发及植物蛋白胶凝聚集体系研究, 提供了一定研究思路和科学理论价值参考。

**关键词:** 植物基杏仁酸奶, 稳定剂, 主成分, 综合评价分析, 物性学特性

中图分类号: TS252.54

文献标识码: B

文章编号: 1002-0306(2024)13-0150-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023060257

本文网刊:



## Optimization of Plant-based Almond Yogurt Formulations and Characterization of Their Physical Properties Based on the Principal Component Synthesis Evaluation Approach

MA Jie, ZHANG Ting, ZHOU Zhiyi, ZHANG Tao, YU Junfei, KONG Lingming,  
LI Xuewen, ZHOU Jianzhong<sup>\*</sup>

(College of Food Science and Pharmacy, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

**Abstract:** This study aimed to optimize the formula of plant-based almond yogurt to improve its quality and storage stability. Using sweet almonds as the main ingredient and adding conventional yogurt stabilizers such as emulsifiers and thickeners, plant-based almond yogurt was produced through lactic acid fermentation. The optimal stabilizer formula for yogurt was determined using principal component synthesis evaluation analysis and response surface optimization methodology, and the physical properties were characterized. The results showed that the optimal formula for plant-based almond yogurt was 0.4% tartaric acid mono-diglyceride, 2.0% hydroxypropyl distarch phosphate, and 0.1% glutamine transaminase, with a comprehensive score of 0.990. The predicted and verified comprehensive scores of plant-based yogurt were close. The quality and acceptability of the plant-based yogurt significantly improved after adjustment, and the micro-particles of the mixed plant-based almond yogurt (MPBAY) were fuller, the distribution of milk fat was more uniform, and the texture was richer. This study provides a certain research idea and scientific theoretical value reference for the development of plant-based yogurt and the study of plant protein gel aggregation systems.

**Key words:** plant-based almond yogurt; stabilizer; principal component; synthesis evaluation analysis; physical properties

收稿日期: 2023-06-27

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2019YFD 1002300); 新疆农业大学研究生科研创新计划项目 (XJAUGRI2023045)。

作者简介: 马杰 (1997-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 植物蛋白工程, E-mail: mjsci412@sina.com。

\* 通信作者: 周建中 (1979-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 农副产品精深加工及蛋白质工程, E-mail: zjz7978@sina.com。

酸奶是乳酸菌(LAB)发酵风味营养产品,由于其中的蛋白质被降解为氨基酸和小分子量肽<sup>[1]</sup>,更有利于人体消化吸收<sup>[2]</sup>。酸奶因其营养功能价值丰富,一定程度上可防止人体胃肠道感染、降低胆固醇、刺激免疫系统以及稳定肠道菌群,深受人们喜爱<sup>[3]</sup>。同时,由于发酵过程中乳糖被分解,乳糖不耐症人群可食用酸奶而不会出现肠胃胀气、腹泻和其他与此相关的症状<sup>[4]</sup>。近些年,随着人们对美好生活的向往,追求减脂低卡食品,而植物基酸奶不含乳糖、无胆固醇以及富含更多功能营养价值,越来越受到人们的关注<sup>[5]</sup>。截止 2021 年,欧洲和美国都是植物基酸奶的主要生产适销地,欧洲以 38.2% 的最大市场份额位居第一<sup>[6]</sup>,但各国植物酸奶品牌的数量存在显著差异<sup>[7]</sup>。

在许多植物性(PB)食品(例如植物基肉等)中,风味是影响消费者可接受性和适销性的重要决定因素<sup>[8]</sup>。而一些研究表明<sup>[9-10]</sup>:在半固体酸奶及植物基酸奶产品中,质地和口感在整体可接受性中拥有至关重要的作用。但植物基质酸奶由于其基质原因较动物发酵乳表现出不均一的质地和稳定性缺陷。为此,诸多研究者做了大量努力:Sirison 等<sup>[11]</sup>研究通过添加蛋白质浓缩物或亲水胶体来加强蛋白质胶凝;Delikanli 等<sup>[12]</sup>研究表明交联酶(微生物谷氨酰胺转移酶, TGS)在脱脂酸奶中可构建紧凑的蛋白网络结构,可以改善低脂酸奶的结构从而减少乳清沉淀并改善质地和流变性。Nehaa 等<sup>[13]</sup>利用花生、燕麦和椰奶研制了一款植物基酸奶并表现出低脱水收缩率及适宜的黏度和流变性与较高的整体可接受性。针对杏仁基质酸奶,研究也表明,增加杏仁蛋白和脂肪含量(分别高达 6% w/v 和 5% w/v),有望改善酸奶质地、增加表观黏度和减少乳清分离<sup>[14]</sup>。然而,与动物乳制品酸奶相比,植物基酸奶质地和流动特性仍然较低<sup>[15-16]</sup>。

本研究旨在探明非乳成分添加剂对植物基杏仁酸奶质构、脱水收缩和持水力的影响及其对杏仁奶和杏仁基质酸奶的粒径大小分布、微观乳脂分布、流变学特性的影响。以期为植物基杏仁酸奶的开发及植物蛋白胶凝系列产品提供一定科学价值与理论指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

小白杏杏仁、蔗糖、葡萄糖 以上均购于新疆乌鲁木齐市华凌市场;乳酸菌发酵剂:保加利亚乳杆菌(*Lactobacillus bulgaricus*, L·b)、嗜热链球菌(*Streptococcus thermophilus*, S·t) 江苏镇江天益生物科技有限公司;双乙酰酒石酸单双甘油酯 河南万邦实业有限公司;羟丙基二淀粉磷酸酯 河南恒瑞带奶粉科技有限公司;谷氨酰胺转氨酶(120 U/g) 泰兴市东圣生物科技有限公司;以上所用材料与试剂均为食品级。

ZYJ-7090 单螺杆榨油机 东莞市方太电器有限公司;FW-100 高速万能粉碎机 北京市永光明医疗仪器有限公司;SF-GL-16A 高速冷冻离心机 上海菲恰尔分析仪器有限公司;dj12-p658 苏泊尔料理机 浙江苏泊尔股份有限公司;AH-100D 纳米均质机 加拿大 ATS 工业系统有限公司;HSX-150 恒温恒湿培养箱 上海申贤恒温设备厂;MCR 302 流变仪 奥地利 Anton Paar 公司;TA.XTplus 物性测定仪 北京微讯超技仪器技术有限公司;Leica TCS SP8 激光共聚焦显微镜 苏州精开仪器设备有限公司;Mastersizer 2000 激光粒度仪 马尔文帕纳科富瑞博国际有限公司。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 植物基杏仁酸奶的制备

1.2.1.1 植物基杏仁酸奶的工艺流程 工艺流程:杏仁预处理→脱脂→磨浆→预煮→均质→调配→二次均质→杀菌→接种→发酵→后熟→冷藏(4 °C)→酸奶

1.2.1.2 操作要点 杏仁预处理:将无机械损伤、无病虫害、无酶褐变的完整的甜杏仁放入沸水中煮 2~3 min,快速捞入冷水中冷却,手工褪皮并滤干水分,待用。

脱脂、磨浆、预煮:将褪皮杏仁放入烘箱 65 °C 干燥 3 h 至水分达 3%~5%,再用单螺杆榨油机进行榨油,收集冷榨副产物杏仁粕,并按料液比 1:10 (g/mL) 浸于去离子水中,加 0.5% 碳酸氢钠浸泡 12 h 再经料理机磨浆后得到杏仁奶,在 80 °C 条件下预煮 10~15 min,去除杏仁奶的涩味,钝化内源酶防止后期产生异味,同时便于后续磨浆等操作,使风味更加浓郁,后经均质机 50 MPa 均质 2 次。

调配、均质:杏仁奶中添加 6% 蔗糖及 2% 葡萄糖以及对应比例的双乙酰酒石酸单双甘油酯、羟丙基二淀粉磷酸酯、谷氨酰胺转氨酶后经均质机 50 MPa 均质 2 次。

杀菌、接种:将杏仁奶置于 90 °C 条件下灭菌 5 min,降至室温后接入 0.6%(w/v) 乳酸菌发酵剂保加利亚乳杆菌、嗜热链球菌(1:1)。

发酵、后熟:接种完成后的杏仁奶混匀后置于恒温培养箱 40±1 °C 发酵 10 h,后置于 4 °C 后熟 24 h 得到植物基杏仁酸奶成品。

1.2.2 不同酸奶样品的制备 杏仁奶(PBAM):杏仁经过预处理后打浆制成杏仁奶即未添加非乳成分稳定添加剂、未经发酵制成的植物杏仁奶。

植物基杏仁酸奶(PBAY):杏仁奶未添加非乳成分稳定添加剂而直接接种发酵、后熟制成的植物基杏仁酸奶。

复配植物基杏仁酸奶(MPBAY):杏仁奶复配添加非乳成分稳定添加剂后接种发酵、后熟制成的复配植物基杏仁酸奶。

### 1.2.3 单因素实验

1.2.3.1 双乙酰酒石酸单双甘油酯(DATEM)添加量的确定 杏仁酸奶发酵剂接种量为 0.6%，羟丙基二淀粉磷酸酯添加量为 0.15%、谷氨酰胺转氨酶添加量为 0.15%，发酵温度为 40±1 ℃，发酵时间为 10 h 下，考察双乙酰酒石酸单双甘油酯添加量 0、0.20%、0.40%、0.60%、0.80% 对杏仁酸奶的质构特性、持水性以及感官评价的影响。

1.2.3.2 羟丙基二淀粉磷酸酯(HPDSP)添加量的确定 杏仁酸奶发酵剂接种量为 0.6%，双乙酰酒石酸单双甘油酯添加量 0.40%，谷氨酰胺转氨酶添加量为 0.15%，发酵温度为 40±1 ℃，发酵时间为 10 h 情况下，考察羟丙基二淀粉磷酸酯添加量 0.5%、1.0%、1.5%、2.0%、2.5% 对杏仁酸奶的质构特性、持水性以及感官评价的影响。

1.2.3.3 谷氨酰胺转氨酶(TG)添加量的确定 杏仁酸奶发酵剂接种量为 0.6%，双乙酰酒石酸单双甘油酯添加量 0.40%，羟丙基二淀粉磷酸酯添加量 0.15%，发酵温度为 40±1 ℃，发酵时间为 10 h 情况下，考察 TG 酶添加量 0.05%、0.10%、0.15%、0.20%、0.25% 对杏仁酸奶的质构特性、持水性以及感官评价的影响。

1.2.4 响应面试验 结合单因素实验结果，根据 Box-Behnken 试验设计原理，以 A-双乙酰酒石酸单双甘油酯添加量、B-羟丙基二淀粉磷酸酯添加量、C-TG 酶添加量为变量因素，以植物酸奶质构特性、持水力、感官评分的综合评分结果为响应值，以-1、0、1 分别代表上述各变量的水平值，采用软件 Design Expert V 8.0.6 建立三因素三水平的试验对杏仁植物酸奶添加剂配方进行优化设计，因素及水平编码表见表 1。

表 1 Box-Behnken 试验因素与水平  
Table 1 Factors and levels of Box-Behnken test

因素	水平		
	-1	0	1
A-双乙酰酒石酸单双甘油酯(%)	0.20	0.40	0.60
B-羟丙基二淀粉磷酸酯(%)	1.00	1.50	2.00
C-TG酶(%)	0.10	0.15	0.20

1.2.5 植物基杏仁酸奶质构特性测定 参考 Yang 等<sup>[17]</sup>的方法，并加以修改。使用配备 A/BE-45d 探头的质构仪对所有样品进行分析，测试条件如下：测前速度 1 mm/s，测试速度 1 mm/s，测后速度 10 mm/s，测试应变为 30%，触发力为 10 g。在酸奶稠度模式下测定硬度、稠度和粘度及粘滞指数对杏仁酸奶的质构特性进行评价。

1.2.6 植物基杏仁酸奶持水性能测定 参考 Wang 等<sup>[18]</sup>的方法，称取 10 g 样品置于离心管，以 4000 r/min 离心 15 min，弃去上清液，并将离心管倒扣在滤纸上

静置 10 min，通过公式(1)计算植物基杏仁酸奶的持水性。

$$R = \frac{M_1}{M_2} \times 100 \quad \text{式 (1)}$$

式中：R 为持水性(%)；M<sub>1</sub> 为沉淀及离心管质量(g)；M<sub>2</sub> 为酸奶样品及离心管质量(g)。

1.2.7 植物基杏仁酸奶感官评价 杏仁发酵乳的感官评价标准参考《RHB 104-2020 发酵乳感官评鉴细则》，在此基础上进行优化，做适当调整。感官综合评分由 5 个部分组成，邀请 10 名感官评价人员（由 5 名男性和 5 名女性组成）对发酵乳进行感官评价，结果取平均值。评分标准详见表 2。

表 2 植物基杏仁酸奶感官评分标准

Table 2 Sensory scoring criteria for plant-based almond yogurt

评价指标	评分标准	分值
色泽 (20分)	颜色均一、有光泽、无杂色，呈乳白或浅乳黄色	16~20
	颜色均匀度一般，稍有杂色、呈褐灰色或其他杂色	11~15
	颜色不均匀，有明显色斑点或其他异常颜色	0~10
风味 (25分)	具有浓郁的杏仁乳或坚果发酵乳香气，无异味	21~25
	有淡淡的杏仁乳或坚果发酵乳香气，无异味	11~20
	无杏仁乳或坚果香气，略有其他不良气味	0~10
滋味 (25分)	甜酸比适中、酸甜适口，有杏仁味，无苦涩味	21~25
	略酸或略甜，杏仁味较淡，较淡的苦味和涩味	11~20
	过酸或过甜，略有杏仁味，略有苦味和涩味	0~10
组织 状态(30分)	组织细腻均匀，表面光滑，无乳清析出，具有一定黏性	26~30
	组织较均匀，有少量乳清析出，乳体系发生分离/分层现象	16~25
	组织粗糙，有乳清析出，乳体系发生严重分离/分层现象	0~15

1.2.8 植物基杏仁酸奶流变学特性测定 植物基杏仁酸奶流变学特性测定参考文献 [16,19]，分别称取 20 mL 样品，利用奥地利 Anton Paar MCR 302 系列流变仪，使用转子 CC26.7 配套同轴圆筒 DIN53019& ISO3219，在室温条件下，测定模式为模量测试（振荡模式），测试项目为固定盈弱的频率测试，恒定应力 0.1%，频率变化范围 0.1~100 Hz。

1.2.9 植物基杏仁酸奶粒径大小分布测定 植物基杏仁酸奶粒径特性测定参考文献 [20]。测试方法为湿法测量，分散剂为水。取样品 1 g，使用小型磁力搅拌器在 50 mL 玻璃烧杯中以 15 r/min 进行预分散 20 min。分散剂折射率设定为 1.34，颗粒折射率设定为 1.45。通过在 5 ℃ 下以 1000 r/min 搅拌连续测量 20 次来分析粒度，粒径范围为 0.1~1000 μm。对每个样品进行三次重复。

1.2.10 植物基杏仁酸奶激光共聚焦测定 植物基杏仁酸奶激光共聚焦的测定参考文献 [21] 并加以修改，利用激光共聚焦显微镜观察 4 ℃ 下植物酸奶的微观结构，取 1 mL 酸奶样品于观察皿中，用尼罗红 (0.1 mg/mL 丙酮) 染色脂肪，其激光波长为 488 nm；用尼罗蓝 (0.1 mg/mL 丙酮) 标记蛋白质，其激发波长

为 633 nm, 染料与样品混合后在黑暗环境中孵育 30 min 左右, 并利用 40 倍物镜观察拍照。

1.2.11 主成分分析 对植物基杏仁酸奶品质各指标在 SPSS Statistics 27 进行主成分分析, 得到原始数据的特征值、贡献率及累积贡献率, 对特征值大于 1 的因子, 提取主成分。

1.2.12 植物基杏仁酸奶综合评分 植物酸奶品质综合评分按(2)计算; 各个实验组得综合评分后按式(3)将得到的综合评分 F 进行规范化处理, 分别计算其综合评分 F 和规范化综合评分 Z。

$$F = C_1F_1 + C_2F_2 + C_3F_3 \quad \text{式 (2)}$$

式中: F 为综合评分; F<sub>1</sub>、F<sub>2</sub> 和 F<sub>3</sub> 分别为因子 1、因子 2、因子 3 的得分; C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub>、C<sub>3</sub> 为主成分 1、2、3 对应的方差贡献率。

$$Z = (F - F_{\min}) / (F_{\max} - F_{\min}) \quad \text{式 (3)}$$

式中: Z 为规范化综合评分; F 为综合评分; F<sub>max</sub> 为综合评分最大值; F<sub>min</sub> 为综合评分最小值。

### 1.3 数据处理

使用 SPSS Statistics 27 对数据进行单因素方差分析(ANOVA)及主成分分析(PCA), 其他数据采用 Microsoft Excel 2016 进行处理整理, 每次实验做 3 次平行, 结果表示为: 平均值±标准差(SD)。

## 2 结果与分析

### 2.1 单因素实验结果

#### 2.1.1 DATEM 添加量对植物基杏仁酸奶的影响

双乙酰酒石酸单双甘油酯(DATEM)是一种广泛使用的食品乳化剂, 具有乳化、稳定、防老化等作用, 可提高产品乳化性能、防止油水分离<sup>[22]</sup>。由表 3 可知, 随着 DATEM 添加量的增加, 植物酸奶硬度、稠度及持水力均呈显著( $P<0.05$ )下降趋势, 而粘度呈现显著( $P<0.05$ )升高趋势, 感官评分总体呈现先上升后下降

的现象。当添加量为 0.40% 时, 植物酸奶感官评分等水平显著高于未添加及过量添加 DATEM 的植物酸奶( $P<0.05$ ), 此时, 植物酸奶质地变得更加柔软、细腻, 指标分别达到 20.55 g、257.03 g.sec、-16.39 g、-12.02 g.sec、54.45% 及 82.80 分; 而当超过 0.40% 时, 各指标变化差异较 0.40% 添加水平不再显著( $P>0.05$ ), 感官评分也随之下降, 这一结果可能是由于乳化剂的添加量达到一定水平后, 乳化构相体系达到了平衡饱和状态, 而进一步增加乳化剂的含量并不会显著改善乳化体系的质构特性、持水性能, 而当乳化剂的添加量继续增加时, 过多的乳化剂会导致乳状液中形成过厚的凝聚膜, 从而减少构相体系中水分分子的运动自由度, 使其难以保持水分的持水性能<sup>[23]</sup>。此类情况下, 增加乳化剂添加量可能没有具体实际效益, 故综合考虑, 选择 DATEM 添加量为 0.20%、0.40%、0.60% 进行后续实验。

2.1.2 HPDSP 添加量对植物基杏仁酸奶的影响 羟丙基磷酸二淀粉磷酸酯(HPDSP)是一种改性复合淀粉, 其作为稳定剂广泛应用于酸奶的生产<sup>[24]</sup>, HPDSP 还具有良好的粘度、热稳定性、耐酸性和抗剪切能力, 这有助于保持酸奶在不同温度、酸度和剪切力条件下的稳定性。由表 4 可知, 随着 HPDSP 添加量的增加, 植物酸奶的质构特性、持水性能及感官评分均发生显著变化( $P<0.05$ ), 其中硬度、粘滞指数及感官评分呈现先上升后持续下降趋势, 稠度、持水力则呈现显著( $P<0.05$ )升高趋势, 粘度则变化差异不明显。当添加量为 1.50% 时, 植物基杏仁酸奶感官评分达到最大, 品质指标分别达到 79.10 g、1044.63 g.sec、-42.54 g、-46.53 g.sec、57.51%、84.10 分。在实际操作中过量的 HPDSP 引入, 会导致植物酸奶发生严重的溶胀分层现象, 使得成品质地粘稠发泡, 质地粗糙, 总体接受度下降, 这是由于一方面, 过量的淀粉会通过吸水和膨胀来压缩蛋白质基质, 破坏凝胶网络结

表 3 DATEM 添加量对植物基杏仁酸奶质构特性、持水性能及感官评分的影响

Table 3 Effect of DATEM addition on textural properties, water holding capacity and sensory scores of plant-based almond yogurt

DATEM	硬度(g)	稠度(g.sec)	粘度(g)	粘滞指数(g.sec)	持水力(%)	感官评分
0%	33.40±4.55 <sup>a</sup>	343.74±33.29 <sup>ab</sup>	-18.84±2.68 <sup>c</sup>	-14.32±2.60 <sup>c</sup>	63.07±3.64 <sup>a</sup>	73.10±3.54 <sup>c</sup>
0.20%	25.24±1.21 <sup>b</sup>	357.83±28.13 <sup>a</sup>	-15.44±3.07 <sup>b</sup>	-16.50±5.55 <sup>bc</sup>	57.89±1.61 <sup>ab</sup>	75.00±2.79 <sup>bc</sup>
0.40%	20.55±1.14 <sup>c</sup>	257.03±33.29 <sup>c</sup>	-16.39±1.51 <sup>bc</sup>	-12.02±1.07 <sup>ab</sup>	54.45±5.17 <sup>bc</sup>	82.80±4.10 <sup>a</sup>
0.60%	19.07±0.72 <sup>cd</sup>	283.52±84.33 <sup>bc</sup>	-14.81±2.24 <sup>b</sup>	-16.31±16.49 <sup>a</sup>	53.16±2.18 <sup>bc</sup>	76.00±1.76 <sup>b</sup>
0.80%	17.35±0.20 <sup>d</sup>	258.67±11.79 <sup>c</sup>	-11.97±1.57 <sup>a</sup>	-10.92±0.11 <sup>ab</sup>	51.24±0.60 <sup>c</sup>	74.30±1.89 <sup>bc</sup>

注: 同列不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ ), 表 4、表 5 同。

表 4 HPDSP 添加量对植物基杏仁酸奶质构特性、持水性能及感官评分的影响

Table 4 Effect of HPDSP addition on textural properties, water holding capacity and sensory scores of plant-based almond yogurt

HPDSP	硬度(g)	稠度(g.sec)	粘度(g)	粘滞指数(g.sec)	持水力(%)	感官评分
0.50%	60.66±5.48 <sup>d</sup>	816.86±37.39 <sup>d</sup>	-36.13±4.42 <sup>ab</sup>	-44.61±5.27 <sup>b</sup>	51.51±4.78 <sup>b</sup>	75.40±1.43 <sup>bc</sup>
1.00%	103.31±1.93 <sup>a</sup>	900.44±35.02 <sup>c</sup>	-40.48±5.41 <sup>ab</sup>	-32.11±2.78 <sup>a</sup>	54.94±2.83 <sup>ab</sup>	76.70±1.25 <sup>b</sup>
1.50%	79.10±2.93 <sup>b</sup>	1044.63±78.25 <sup>b</sup>	-42.54±4.12 <sup>b</sup>	-46.53±8.25 <sup>b</sup>	57.51±2.78 <sup>ab</sup>	84.10±4.77 <sup>a</sup>
2.00%	69.89±1.91 <sup>c</sup>	1072.55±30.33 <sup>b</sup>	-34.02±6.47 <sup>a</sup>	-47.09±8.31 <sup>b</sup>	60.21±4.26 <sup>a</sup>	72.50±2.01 <sup>d</sup>
2.50%	82.80±4.57 <sup>b</sup>	1264.12±46.72 <sup>a</sup>	-52.53±8.14 <sup>c</sup>	-76.02±97.6 <sup>c</sup>	61.64±4.22 <sup>a</sup>	73.30±1.70 <sup>cd</sup>

构;另一方面,过量淀粉的加入间接降低了蛋白质的相对含量,这也降低凝胶强度,此外,HPDSP 降低了水分的迁移率,使自由水成为结晶水<sup>[25]</sup>,这也解释了 HPDSP 提升植物酸奶持水力性能这一结果,故综合考虑,选择 HPDSP 添加量为 1.00%、1.50%、2.00% 进行后续实验。

### 2.1.3 TG 酶添加量对植物基杏仁酸奶的影响

TG 酶,全称转酰胺酶(Transglutaminase),广泛存在于人体、动物、植物和微生物中,是一类天然绿色的食品添加剂,TG 酶可改善食品功能特性,例如溶解度、持水能力(WHC)、乳化能力、发泡、粘度、弹性和凝胶,被广泛应用于食品加工领域<sup>[26]</sup>。由表 5 可知,TG 酶的添加可显著提升植物基酸奶质构特性、持水性能,改善产品感官特性( $P<0.05$ ),这是由于 TG 酶催化植物酸奶体系中蛋白质分子之间的交联化程度,通过形成共价键将它们连接在一起形成联结紧密的蛋白网络结构,从而提升或改变蛋白质的结构和功能特性<sup>[27]</sup>,其中添加量为 0.15% 时,各项品质指标分别达到 250.31 g、2285.64 g.sec、-94.95 g、-88.47 g.sec、61.91%、82.00 分。其中,持水性能提高不再显著( $P>0.05$ ),且在实际成品中会发现,当添加过量的 TG 酶,植物酸奶体系发生严重的结团、凝絮,质地粗糙老化,总体接受度严重下降,这不仅不符合实际需要也无直接的现实效益。故选择 TG 酶用量为 0.10%、0.15%、0.20% 进行后续实验。

## 2.2 响应面-主成分分析试验结果

**2.2.1 植物基杏仁酸奶主成分分析** 利用 SPSS 对表中植物基杏仁酸奶的各指标进行主成分分析,通过 KMO 和 Bartlett 检验可知,  $KMO=0.674>0.60$ , Bartlett 检验显著性为  $P<0.001$ ,非常适合做主成分分析,得到的方差贡献如表 6 所示。由表 6 可知,当抽取 2 个主成分时,方差贡献率分别为 56.56%、29.26%,累积贡献率可达 85.83%,综合了植物基杏仁酸奶的特性的主要信息,且表 6 显示 2 个主成分特征值分别为 3.394、1.756 均大于 1,故抽取的 2 个

主成分可较准确地反映植物基杏仁酸奶总体特征。

为了更加直观地评价植物基杏仁酸奶的稳定剂配方,采用综合评分对主成分得分作进一步处理分析,根据指标在主成分上的载荷量,计算出各指标在不同主成分上的线性组合权重,并利用方差贡献率权重得到综合模型系数,归一化处理得到的酸奶质量评价综合模型,2 个主成分表达式分别为  $F_1$ 、 $F_2$ ,而  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 、 $A_4$ 、 $A_5$ 、 $A_6$  分别代表酸奶的硬度、稠度、粘度、粘滞指数、持水力、感官评价归一化标准值。

$$F_1 = -0.5Z_{A_1} - 0.51Z_{A_2} + 0.52Z_{A_3} + 0.40Z_{A_4} + 0.17Z_{A_5} + 0.17Z_{A_6}$$

$$F_2 = -0.1Z_{A_1} + 0.12Z_{A_2} - 0.09Z_{A_3} - 0.40Z_{A_4} + 0.63Z_{A_5} + 0.65Z_{A_6}$$

$$F = 0.566F_1 + 0.293F_2$$

**2.2.2 响应面试试验设计及结果** 根据主成分分析结果,以规范化后的综合评分  $Z_F$  作为响应面最终响应值,设计  $N=17$  的 Box-Behnken 试验,考察 DATEM、HPDSP、TG 酶添加量三因素的交互作用及最佳配方(表 7)。

对试验进行方差分析,如表 8 所示,模型显著( $P<0.05$ ),失拟项不显著( $P>0.05$ ),模型决定系数  $R^2$  为 0.8384,  $R^2_{adj}$  为 0.6807 说明模型拟合度较好,在误差允许范围,建立的模型具有说服性,模型能够较好地表明各因素与综合评分之间的关系,二次项( $A^2$ 、 $C^2$ )( $P<0.05$ )说明对结果的影响显著,一次项及交互项均未表现出显著性。

综合评价最终响应值与因素的回归方程为:

$$Z_F(\text{规范化综合评分}) = -6.25 + 27.75A + 10.72B - 69.96C + 3.17AB - 53.00AC - 39.30BC - 31.26A^2 - 2.89B^2 + 511.80C^2$$

通过对模型相关计算,最终得到植物基杏仁酸奶最佳稳定剂配方为 DATEM 添加量为 0.451%, HPDSP 添加量为 1.987%, TG 酶添加量为 0.100%,综合评分为 0.559。

表 5 TG 酶添加量对植物基杏仁酸奶质构特性、持水性能及感官评分的影响

Table 5 Effect of TG enzyme addition on textural properties, water holding capacity and sensory scores of plant-based almond yogurt

TG酶	硬度(g)	稠度(g.sec)	粘度(g)	粘滞指数(g.sec)	持水力(%)	感官评分
0.05%	145.66±3.84 <sup>c</sup>	1515.73±26.55 <sup>c</sup>	-51.79±1.15 <sup>c</sup>	-60.58±3.55 <sup>a</sup>	56.82±3.09 <sup>c</sup>	74.60±1.84 <sup>c</sup>
0.10%	196.30±3.32 <sup>d</sup>	1813.81±70.06 <sup>d</sup>	-63.62±9.82 <sup>d</sup>	-72.51±10.03 <sup>b</sup>	59.06±1.82 <sup>bc</sup>	77.50±2.01 <sup>b</sup>
0.15%	250.31±11.57 <sup>c</sup>	2285.64±63.40 <sup>c</sup>	-94.95±6.89 <sup>c</sup>	-88.47±0.67 <sup>c</sup>	61.91±1.18 <sup>ab</sup>	82.00±3.37 <sup>a</sup>
0.20%	381.48±5.44 <sup>b</sup>	3357.60±104.76 <sup>b</sup>	-159.39±3.18 <sup>b</sup>	-146.22±9.69 <sup>d</sup>	62.45±1.32 <sup>ab</sup>	72.90±1.52 <sup>c</sup>
0.25%	539.24±24.50 <sup>a</sup>	4044.22±131.17 <sup>a</sup>	-206.01±15.53 <sup>a</sup>	-156.42±11.36 <sup>d</sup>	63.39±2.56 <sup>a</sup>	70.50±2.55 <sup>d</sup>

表 6 相关成分的特征值及贡献率

Table 6 Characteristic values and contribution rates of related components

成分	初始特征值			提取载荷平方和		
	总计	方差百分比	累积(%)	总计	方差百分比	累积(%)
1	3.394	56.561	56.561	3.394	56.561	56.561
2	1.756	29.264	85.826	1.756	29.264	85.826

表 7 Box-Behnken 试验设计及结果

Table 7 Box-Behnken experimental design and result

试验号	DATEM(%)	HPDSP(%)	TG酶(%)	硬度(g)	稠度(g.sec)	粘度(g)	粘滞指数(g.sec)	持水力(%)	感官评分	Z <sub>F</sub>
1	0.40	1.00	0.10	62.04	698.98	-37.1	-36.10	62.75	79.60	0.47
2	0.40	1.50	0.15	43.92	601.57	-24.81	-25.87	54.42	75.70	-0.01
3	0.60	1.50	0.20	71.14	793.62	-29.05	-20.64	58.26	80.10	-0.10
4	0.40	1.00	0.20	46.45	764.89	-27.30	-38.96	62.45	93.00	2.50
5	0.20	2.00	0.15	87.93	890.90	-42.25	-17.59	44.22	66.30	-4.00
6	0.40	1.50	0.15	64.31	847.72	-40.89	-52.71	63.97	87.90	1.20
7	0.60	2.00	0.15	120.92	1283.68	-68.24	-76.27	57.64	74.70	-3.25
8	0.20	1.50	0.10	57.21	836.71	-43.67	-53.94	56.57	84.90	-0.25
9	0.40	1.50	0.15	64.31	847.72	-40.89	-52.71	60.98	82.50	0.44
10	0.60	1.00	0.15	74.29	839.42	-37.18	-37.94	60.55	81.00	0.07
11	0.40	1.50	0.15	67.92	907.69	-40.02	-45.28	63.89	82.10	0.82
12	0.40	2.00	0.20	92.67	1143.05	-53.97	-55.15	63.45	73.10	-0.67
13	0.20	1.00	0.15	42.07	597.04	-22.16	-16.33	65.15	68.40	0.59
14	0.20	1.50	0.20	53.48	750.98	-33.58	-45.16	62.83	87.10	1.43
15	0.60	1.50	0.10	59.21	856.09	-40.62	-57.50	57.08	85.60	0.34
16	0.40	1.50	0.15	67.92	907.69	-40.02	-45.28	58.26	83.30	-0.82
17	0.40	2.00	0.10	67.73	878.79	-37.46	-49.27	62.45	90.20	1.23

表 8 Box-Behnken 试验回归模型及方差分析

Table 8 Box-Behnken experimental regression model and ANOVA

方差来源	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
模型	34.01	9	3.78	4.04	0.0397	*
A-DATEM	3.66	1	3.66	3.91	0.0886	
B-HPDSP	2.41	1	2.41	2.57	0.1527	
C-TG酶	1.03	1	1.03	1.10	0.3299	
AB	0.4032	1	0.4032	0.4307	0.5326	
AC	1.12	1	1.12	1.20	0.3095	
BC	3.86	1	3.86	4.12	0.0818	
A <sup>2</sup>	6.58	1	6.58	7.03	0.0328	*
B <sup>2</sup>	2.20	1	2.20	2.35	0.1691	
C <sup>2</sup>	6.89	1	6.89	7.36	0.0300	*
残差	6.55	7	0.9362			
失拟项	4.11	3	1.37	2.24	0.2262	NS
净误差	2.45	4	0.6118			
总变异	40.56	16				
R <sup>2</sup>			0.8384			
R <sup>2</sup> <sub>adj</sub>			0.6807			

注: \*表示差异显著  $P<0.05$ ; \*\*表示差异极显著  $P<0.01$ ; NS 表示差异不显著 ( $P>0.05$ )。

**2.2.3 响应面优化结果验证** 按照实际操作需要, 在响应面优化基础上, 调整最佳稳定剂配方为 DATEM 添加量为 0.4%, HPDSP 添加量为 2.0%, TG 酶添加量为 0.1%, 进行验证实验, 最终得到植物酸奶综合评分为 0.990, 该得分下, 植物基杏仁酸奶品质较佳, 质构性能良好, 接受度明显提升, 感官评分结果达到最高, 该结果与响应面模拟预测综合评分接近, 因此, 认为该模型能准确预测植物酸奶的最佳稳定剂配方。

### 2.3 植物基杏仁酸奶流变学特性、粒径分布及微观结构的表征

**2.3.1 植物基杏仁酸奶频率扫描动态流变学分析** 频率扫描动态流变仪是分析样品的储能模量(弹性性质)和损耗模量(黏性性质)的一种重要手段, 频率扫描就是通过改变振荡频率来分析物质的弹性和黏性的情况<sup>[28]</sup>, 如图 1 所示为杏仁奶(PBAM)、植物基杏

仁酸奶(PBAY)、复配植物基杏仁酸奶(MPBAY)频率扫描的表观粘度、剪切应力、储能模量(G')和损耗模量(G")的变化表征图。

由图 1 可知, PBAM、PBAY、MPBAY 随频率增加表观粘度出现下降趋势, 而剪切应力呈现上升趋势, 它们的大小关系始终为 MPBAY>PBAY>PBAM; 一般而言, G'>G"表示体系为凝胶体系, G'<G"表示体系为溶胶体系, G'/G"越大表示体系流动性越佳。如图 1 所示, 它们的 G'均大于 G", 并且 G'及 G"均为 MPBAY>PBAY>PBAM, 表明它们的构相体系均为凝胶体系, 而随着频率的增加, 三者的 G'和 G"整体呈现出缓慢上升状态, 这一结果与 Kamal-Eldin 等<sup>[29]</sup>研究一致。

综上结果表明, 经调配的植物基杏仁酸奶的体系凝胶程度强于植物基酸奶, 植物基酸奶凝胶化强于杏仁奶。

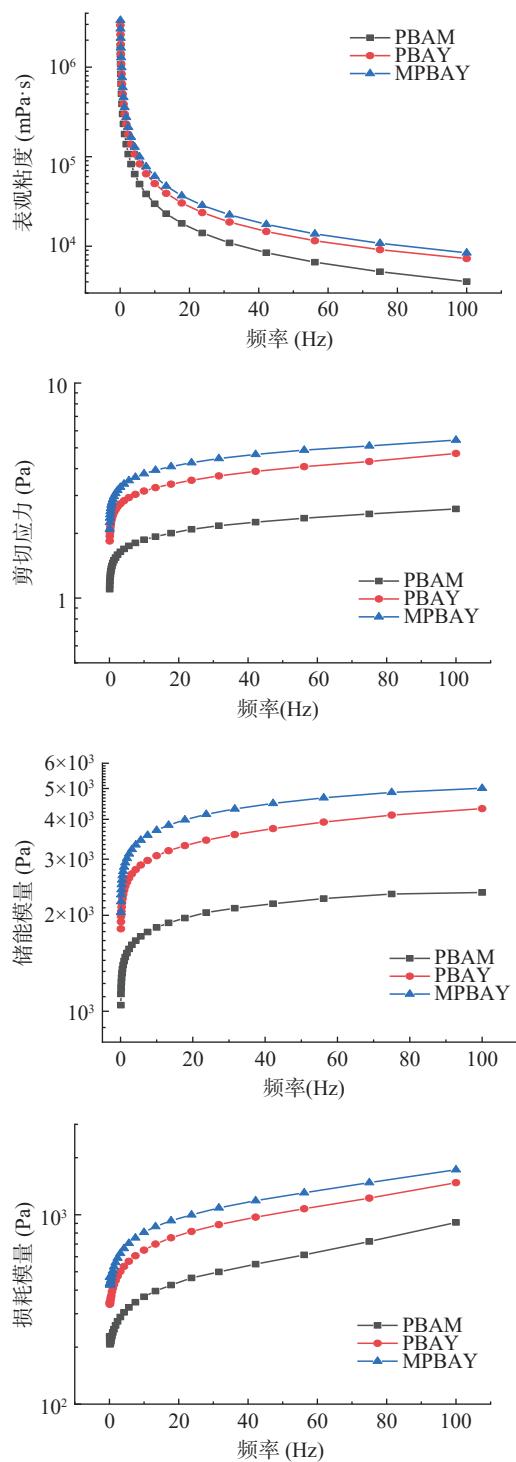


图 1 植物基杏仁酸奶频率扫描动态流变学分析

Fig.1 Plant-based almond yogurt frequency scanning dynamic rheological analysis

2.3.2 植物基杏仁酸奶微观粒径大小分布及微观形貌表征 植物基杏仁奶经乳酸发酵、辅以调配等系列加工操作,在宏观层面表现为体系更加粘稠,质地更加醇厚,而在微观角度而言,是各种大分子物质的迁移桥联变化。图 2 为植物基杏仁酸奶微观粒径大小分布图,由图可知, PBAY 较 PBAM 粒径表现为更大,分布范围更广,而 MPBAY 的粒径相对于 PBAY 与 PBAM 而言微观粒径范围更窄,且集中,这是由于乳酸发酵联合稳定剂的共同作用下,导致植物基杏仁

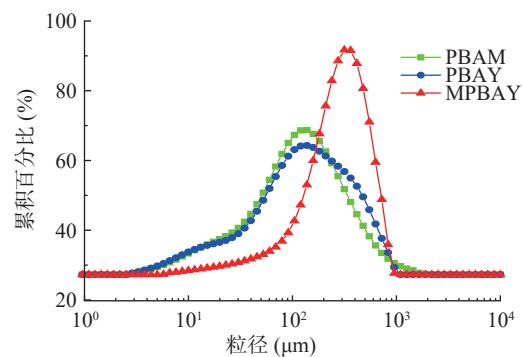


图 2 植物基杏仁酸奶微观粒径大小分布表征

Fig.2 Microscopic particle size distribution of plant-based almond yogurt

酸奶蛋白质分子发生溶胀-聚集包裹的微观聚集体,这一点对应了激光共聚焦的表征情况(图 3),其中蛋白质为绿色,脂肪球为红色,乳酸发酵及稳定剂的联合使用对微观结构影响很大。

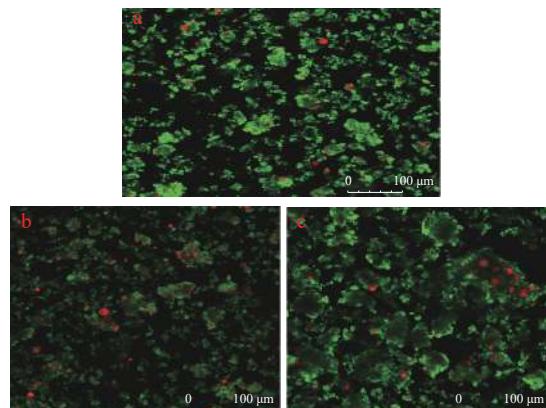


图 3 植物基杏仁酸奶微观形貌表征图(CLSM 图)

Fig.3 Microscopic characterization of plant-based almond yogurt (CLSM diagram)

注: (a)PBAM; (b)PBAY; (c)MPBAY; 其中蛋白质为绿色, 脂肪球为红色。

由图 3 可得, PBAM 及 PBAY 酸奶表现出单一多孔片状纹理,形成不连续相的蛋白质-脂肪简单聚集体,且排列不连贯,一些微凝胶体是完全分离的,微凝胶聚集体分解成更小的片段,显示出“撕裂”的结构。这对应了 PBAM 及 PBAY 酸奶口感、质地组织粗糙,有乳清析出,乳体系发生严重分离/分层的现象,而 MPBAY 酸奶表现出聚集体致密连贯,表明微凝胶聚集体颗粒的体积分数明显增加,联合加工操作强化了整体内聚力的结构,形成更紧凑的微凝胶聚集体,这也解释了 MPBAY 酸奶口感、组织细腻均匀,表面光滑,无乳清析出,具有一定黏性,持水性显著增强的特点。

### 3 讨论与结论

植物基酸奶由于其原料特殊性缘故,其凝胶性能远不及动物乳发酵凝结形成的凝胶强度大,故考虑非动物源性添加剂以提高植物基酸奶的凝胶强度,研究发现:随着 DATEM 添加量的增加,植物酸奶硬度、稠度及持水力均呈显著下降( $P<0.05$ )趋势,而粘

度显著升高( $P<0.05$ )。当添加量为 0.40% 时, 植物酸奶硬度、稠度及持水力水平显著低于( $P<0.05$ )未添加 DATEM 的植物酸奶, 植物酸奶质地变得更加柔软细腻, 这是由于 DATEM 是具有较好性能的乳化剂, 能防老化、防止油水分层、直观改变酸奶质地的细腻度, 这一表现与 Ziar 等<sup>[30]</sup>研究结果相似; 羟丙基二淀粉磷酸酯是广泛应用于酸奶生产的具有抗剪切、耐酸能力的增稠剂, 由于 HPDSP 的引入, 使得酸奶成品质地粘稠, 总体接受度发生改变, 物性学特性也有效提升, 另一方面, 过量淀粉的加入间接降低了蛋白质的相对含量, 这也降低其凝胶强度, 此外, HPDSP 降低了水分的迁移率, 使自由水成为结晶水, 这也解释了 HPDSP 提升植物酸奶持水力性能的原因, 这一结果与 Samantha 等<sup>[31]</sup>研究一致; 谷氨酰胺转氨酶的添加可有效催化植物酸奶体系中蛋白质分子之间的交联化, 通过形成共价键将它们连接在一起形成联结紧密的蛋白网络结构, 从而提升或改变蛋白质的结构和功能特性, 这有效提升其质构特性、流变学特性, 与 Akal 等<sup>[32]</sup>研究相似。

以常规酸奶稳定剂双乙酰酒石酸单双甘油酯、羟丙基二淀粉磷酸酯、谷氨酰胺转氨酶添加量为变量, 以质构特性、持水性能、感官评价为评价指标, 利用单因素实验和主成分-响应面优化法确定最佳工艺配方为: 双乙酰酒石酸单双甘油酯添加量 0.4%、羟丙基二淀粉磷酸酯添加量 2.0%、谷氨酰胺转氨酶添加量为 0.1%, 综合评分为 0.990; 对植物基杏仁酸奶流变学特性及微观结构进行表征及分析, 研究发现, 相比于植物奶和未经调配的植物酸奶, 调配改良的植物基杏仁酸奶品质特性发生显著变化、并得到一定提升。研究结果为植物酸奶的开发提供新路径及一定科学价值, 同时, 能进一步提升新疆杏产业加工及产业升级, 促进产业集群发展。

© 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 ] SHI M, MICHAEL L M, XU G Q, et al. The effects of supplementation with blueberry, cyanidin-3-O- $\beta$ -glucoside, yoghurt and its peptides on obesity and related comorbidities in a diet-induced obese mouse model[J]. *Functional Foods*, 2019, 56(1): 92–101.
- [ 2 ] DIEZ-OZAETA I, ASTIAZARAN O J. Fermented foods: An update on evidence-based health benefits and future perspectives[J]. *Food Research International*, 2022, 156(4): 111133.
- [ 3 ] DING R, LIU Y, YANG S, et al. High-throughput sequencing provides new insights into the roles and implications of core microbiota present in pasteurized milk[J]. *Food Research International*, 2020, 137(1): 109586.
- [ 4 ] JESKE S, ZANNINI E, ARENDT E K. Past, present and future: The strength of plant-based dairy substitutes based on gluten-free raw materials[J]. *Food Research International*, 2018, 110: 42–51.
- [ 5 ] ROMULO A. Food processing technologies aspects on plant-based milk manufacturing: Review[J]. *Earth and Environmental Science*, 2022, 1059(1): 12064.
- [ 6 ] GORAL T. State of the industry report[J]. *Journal-American Water Works Association*, 2022, 96(12): 60–72.
- [ 7 ] WANG Y Q, TUCCILLO F, LAMPI A M, et al. Flavor challenges in extruded plant-based meat alternatives: A review[J]. *Food Science and Food Safety*, 2022, 21(3): 2898–2929.
- [ 8 ] BERNAT N. Vegetable milks and their fermented derivative products[J]. *Food Studies*, 2014, 3(1): 10–20.
- [ 9 ] GREIS M, SAINIO T, KATINA K, et al. Dynamic texture perception in plant-based yogurt alternatives: Identifying temporal drivers of liking by TDS[J]. *Food Quality and Preference*, 2020, 86: 104019.
- [ 10 ] MON T M, PON T E, CODA R, et al. Plant-based alternatives to yogurt: State-of-the-art and perspectives of new biotechnological challenges[J]. *Foods*, 2021, 10(2): 316.
- [ 11 ] SIRISON J, ISHII T, MATSUMIYA K, et al. Tuning of rheological behavior of soybean lipophilic protein-stabilized emulsions[J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 141(6): 108–145.
- [ 12 ] DELIKANLI B, OZCAN T. Improving the textural properties of yogurt fortified with milk proteins[J]. *Food Processing and Preservation*, 2017, 41(5): 1745–4549.
- [ 13 ] NEHAA B, SABITHA V, MATHUSHREE R, et al. Development of plant-based yogurt[J]. *Foods and Raw Materials*, 2022, 10(2): 274–282.
- [ 14 ] ZHAO J, BHANDARI B, GAIANI C, et al. Physicochemical and microstructural properties of fermentation-induced almond emulsion-filled gels with varying concentrations of protein, fat and sugar contents[J]. *Current Research in Food Science*, 2021, 4: 577–587.
- [ 15 ] NGUYEN P T M, KRAVCHUK O, BHANDARI B, et al. Effect of different hydrocolloids on texture, rheology, tribology and sensory perception of texture and mouthfeel of low-fat pot-set yogurt[J]. *Food Hydrocolloids*, 2017, 72(8): 90–104.
- [ 16 ] GILBERT A, RIOUX L E, ST-GELAIS D, et al. Studying stirred yogurt microstructure using optical microscopy: How smoothing temperature and storage time affect microgel size related to syneresis[J]. *Journal of Dairy Science*, 2020, 103(3): 2139–2152.
- [ 17 ] YANG M, LI N, TONG L, et al. Comparison of physicochemical properties and volatile flavor compounds of pea protein and mung bean protein-based yogurt[J]. *LWT*, 2021, 152(1): 112390.
- [ 18 ] WANG C, YIN H, ZHAO Y, et al. Optimization of high hydrostatic pressure treatments on soybean protein isolate to improve its functionality and evaluation of its application in yogurt[J]. *Foods*, 2021, 10(3): 667.
- [ 19 ] KÖRZENDÖRFER A, TEMME P, SCHLÜCKER E, et al. Vibration-induced particle formation during yogurt fermentation—Effect of frequency and amplitude[J]. *Journal of Dairy Science*, 2018, 101(5): 3866–3877.
- [ 20 ] LI H L, WU X Y, YANG L, et al. Study on optimization of long shelf life yogurt stabilizer[J]. *China Dairy Industry*, 2015, 43(9): 57–60.
- [ 21 ] JAMSHIDI A, SHABANPOUR B, POURASHOURI P, et al. Optimization of encapsulation of fish protein hydrolysate and fish oil in W1/O/W2 double emulsion: Evaluation of sensory quality of fortified yogurt[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2019, 43(9): e14063.
- [ 22 ] BETUL Y, PEDRO J G M, ANN-DORIT M S, et al. Enrich-

- ment of mayonnaise with a high fat fish oil-in-water emulsion stabilized with modified DATEM C14 enhances oxidative stability[J]. *Food Chemistry*, 2020, 341(Pt 2): 128141.
- [ 23 ] ZHANG X X, MAO M, ZHANG S T, et al. Investigation of the changes in gelation properties of hydroxypropyl distarch phosphate-surimi gel under different gelation-freezing treatments[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2023, 103(15): 7877–7887.
- [ 24 ] CUI B, TAN C, LU Y, et al. The interaction between casein and hydroxypropyl distarch phosphate (HPDSP) in yoghurt system [J]. *Food Hydrocolloids*, 2014, 37: 111–115.
- [ 25 ] MI J, ZHAO X, HUANG P, et al. Effect of hydroxypropyl distarch phosphate on the physicochemical characteristics and structure of shrimp myofibrillar protein[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 125: 107417.
- [ 26 ] AKBARI M, RAZAVI S H, KIELISZEK M. Recent advances in microbial transglutaminase biosynthesis and its application in the food industry[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 110: 458–469.
- [ 27 ] ZIARNO M, ZAREBA D. The effect of the addition of microbial transglutaminase before the fermentation process on the quality characteristics of three types of yogurt[J]. *Food Science and Biotechnology*, 2020, 29(1): 109–119.
- [ 28 ] JIANG Ping, TAN Bin, GONG Xuemei, et al. Study on the effect of freeze-thaw on the stability and rheological properties of red bean pulp concentrate[J]. *Cereals, Oils and Food Science and Technology*, 2021, 29(2): 166–172.
- [ 29 ] KAMAL-ELDIN A, ALHAMMADI A, GHARSALLAOUI A, et al. Physicochemical, rheological, and micro-structural properties of yogurts produced from mixtures of camel and bovine milks[J]. *NFS Journal*, 2020, 19: 26–33.
- [ 30 ] ZIAR H, RIAZI A. Polysorbate 80 improves the adhesion and survival of yogurt starters with cholesterol uptake abilities[J]. *Biological Sciences*, 2022, 29(8): 103367.
- [ 31 ] SAMANTHA F M, LUIS M, HUGO E A. Polymers sensory and biological potential of encapsulated common bean protein hydrolysates incorporated in a greek-style yogurt matrix[J]. *Polymers*, 2022, 14(5): 854.
- [ 32 ] AKAL C, KOÇAK C, KANCA N. Utilization of reconstituted whey powder and microbial transglutaminase in Ayran (drinking yogurt) production[J]. *Food Technology and Biotechnology*, 2022, 60(2): 253–265.