DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251122001
引用格式: 杨静安, 阳开蓉, 赵进雨, 等. 核桃燕麦咖啡植物基酸奶的工艺优化及营养成分分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(10):314–327.
YANG JA, YANG KR, ZHAO JY, *et al*. Process optimization and nutritional component analysis of walnut-oat-coffee plant-based yogurt [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(10): 314–327. (in Chinese with English abstract).

核桃燕麦咖啡植物基酸奶的工艺优化及营养成分分析

杨静安[1,2], 阳开蓉[1], 赵进雨[1,2], 李 强[1,2], 付晓萍[1,2,3], 李 宏[2], 刘丽静[1,2,3*]

(1. 云南农业大学食品科学技术学院, 昆明 650201; 2. 云南省咖啡现代产业学院, 昆明 650201; 3. 云南省咖啡重点实验室, 昆明 650201)

摘 要: 目的 开发核桃燕麦咖啡植物基酸奶, 并对其基本理化性质以及包括氨基酸和脂肪酸在内的营养成分进行分析。**方法** 以核桃、燕麦和咖啡为主要原料, 通过单因素试验及响应面优化了核桃燕麦咖啡植物基酸奶生产工艺, 在未发酵酸奶基础上对营养成分进行了系统分析。**结果** 当核桃仁添加量为 14%、燕麦粉 9%、咖啡萃取液 8%、稳定剂羧甲基纤维素(carboxymethyl cellulose, CMC) 0.3%时, 在 40 ℃条件下发酵 8 h 后, 所得产品品质最佳。其感官评分达到 85.49 分, 滴定酸度为(62.50±1.04) °T, 蛋白质含量(3.20±0.11) g/100 g, 脂肪含量(3.62±0.13) g/100 g。营养分析表明, 相较于未发酵酸奶, 该产品的氨基酸总量从(225.57±5.17) μg/g 明显提升至(594.29±5.91) μg/g (P<0.05), 同时具有更合理的脂肪酸比例(饱和脂肪酸:单不饱和脂肪酸:多不饱和脂肪酸=1:1.7068:5.9335)。**结论** 本研究优化后的工艺可制备出口感良好、营养丰富的核桃燕麦咖啡植物基酸奶, 其氨基酸含量显著提升, 脂肪酸比例均衡, 为开发兼具良好风味与均衡营养的复合植物基酸奶提供了可行的工艺方案。

关键词: 植物基酸奶; 工艺优化; 感官评价; 氨基酸; 脂肪酸

Process optimization and nutritional component analysis of walnut-oat-coffee plant-based yogurt

YANG Jing-An[1,2], YANG Kai-Rong[1], ZHAO Jin-Yu[1,2], LI Qiang[1,2], FU Xiao-Ping[1,2,3], LI Hong[2], LIU Li-Jing[1,2,3*]

(1. *College of Food Science and Technology*, *Yunnan Agricultural University*, *Kunming* 650201, *China*; 2. *Yunnan College of Coffee Modern Industry*, *Yunnan Agricultural University*, *Kunming* 650201, *China*; 3. *Yunnan Key Laboratory of Coffee*, *Baoshan* 650201, *China*)

ABSTRACT: Objective To develop a plant-based walnut-oat-coffee yogurt, and subsequently analyze its basic physicochemical properties as well as nutritional components including amino acids and fatty acids. **Methods** Taking

收稿日期: 2025-11-22
基金项目: 云南省咖啡重点实验室项目(202449CE340030); 云南省教育厅重大科技成果转化项目(FWCY-ZD2024007); 云南省重大专项(202502AE090034); 云南省咖啡绿色加工与品质调控创新团队项目(202505AS350016)
第一作者: 杨静安(2000—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为咖啡副产物综合利用研究。E-mail: yangjingan_1874@163.com
***通信作者:** 刘丽静(1990—), 女, 博士, 实验师, 主要研究方向为食品发酵工程研究。E-mail: LilyLiuTT@163.com

walnuts, oats and coffee as the main raw materials, the production process of the walnut-oat-coffee plant-based yogurt was optimized through single-factor experiments and response surface methodology and a systematic nutritional analysis was conducted on the unfermented yogurt base. **Results** The optimal exhibited optimal quality when formulated with 14% walnut kernel, 9% oat flour, 8% coffee extract, 0.3% carboxymethyl cellulose (CMC), followed by fermentation at 40 °C for 8 h. The final product exhibited a sensory score of 85.49, titratable acidity of (62.50±1.04) °T, a protein content of (3.20±0.11) g/100 g, and a fat content of (3.62±0.13) g/100 g. Nutritional analysis revealed that, compared to the unfermented base, the total amino acid content of the final product increased significantly from (225.57±5.17) μg/g to (594.29±5.91) μg/g, along with a more balanced fatty acid profile (saturated fatty acids:monounsaturated fatty acids:polyunsaturated fatty acids=1:1.7068:5.9335). **Conclusion** The optimized process in this study produces a walnut-oat-coffee plant-based yogurt with favorable taste and rich nutritional value, characterized by significantly increase amino acid content and a balanced fatty acid profile. This approach provides a feasible processing protocol for developing composite plant-based yogurts that integrate good flavor with balanced nutrition.

KEY WORDS: plant-based yogurt; process optimization; sensory evaluation; amino acids; fatty acids

0　引　言

随着“大食物观”理念的提出与可持续发展需求的日益迫切, 植物基食品因其显著的可持续发展特性而成为产业创新的重要突破口[1]。其中, 植物基酸奶作为增长迅速的品类, 是替代传统乳制品、减少畜牧业环境足迹的有效载体[2]。当前植物基酸奶的品质, 特别是其风味与营养构成的复杂性, 仍是制约其发展的瓶颈。因此, 开发一种在感官品质与营养特性上具有竞争力, 并能体现原料多元化优势的新型植物基酸奶产品, 具有重要的现实意义。

要突破这一瓶颈, 关键在于原料的多元化与科学复配。核桃、燕麦与咖啡的组合为此提供了创新思路。核桃作为一种营养丰富的坚果, 在全球范围内已被公认为一种营养丰富的食物[3], 含有丰富的氨基酸、不饱和脂肪酸、维生素和矿物质等多种营养物质[4], 其含有 17 种氨基酸, 总量为 15.33~20.45 g/100 g[5], 其丰富的不饱和脂肪和多酚, 不仅可以降低患心血管和冠心病的风险、还具有治疗 II 型糖尿病、预防和治疗特定癌症以及缓解与衰老和神经系统疾病相关的症状[6]。燕麦作为一种营养丰富的全谷物资源, 因其突出的营养价值和功能特性而倍受青睐。其富含的 β-葡聚糖可有效降低胆固醇吸收、调节血糖代谢、增强饱腹感并改善肠道菌群, 同时具有免疫调节功能, 在代谢性疾病的膳食干预中具有重要应用价值[7], 且与核桃氨基酸协同可提升发酵体系的氨基酸平衡性与菌种活性[8]。咖啡作为一种广泛消费的功能性饮品, 其富含多种生物活性物质, 包括咖啡因、绿原酸、多酚类化合物以及二萜类物质[9], 流行病学研究表明, 经常喝咖啡与降低患心脏病、帕金森病、糖尿病和几种癌症类型等慢性疾病的风险有关[10]。核桃的浓郁坚果香、燕麦的醇厚谷物味与咖啡的独特风味相互融合, 不仅丰富了酸奶产品的风味谱系, 更拓展了植物基酸奶的创新维度。

近年来, 一些国内外企业开始涉足植物基酸奶市场并打造推出自己的品牌。与传统的动物性酸奶相比, 植物性酸奶来自安全的来源, 具有无胆固醇、无反式脂肪、无乳糖、无过敏原和纤维或低水平过敏原和纤维等优点, 有益于心血管健康、体重管理以及管理乳糖不耐症和牛奶过敏[11]。植物基酸奶具有独特的营养价值和出色的产品安全性, 具有巨大的市场发展潜力。越来越多的研究还表明, 温和的发酵可以改善植物基产品的味道和风味[12–13]。在当今食品领域追求健康、环保、创新和可持续发展的背景下, 核桃燕麦咖啡植物基酸奶作为一种创新产品, 其在研发生产和市场推广上面临着诸多的挑战。

因此, 为把握植物基食品的发展机遇, 更好地落实和促进可持续发展的“大食物观”, 本研究立足于原料多元化策略, 旨在突破现有技术局限, 开发兼具优良感官品质与均衡营养特性的新型植物基酸奶产品。利用响应面设计方法, 通过对核桃燕麦咖啡酸奶的发酵工艺进行优化设计, 深入探讨植物基酸奶发酵过程中的关键因素, 并对其游离氨基酸、脂肪酸等营养成分进行系统研究。这不仅有助于丰富现存市场酸奶的品种, 满足广大消费者对食品多元化的需求, 还能为相关企业的产品研发和生产提供理论支持和参考。

1　材料与方法

1.1　材料、试剂与仪器

去皮核桃仁(森林纪食品厂); 燕麦片(河北西麦有限公司); 咖啡(云南中啡食品有限公司); 白砂糖(云南滇王驿农业科技开发有限公司); YC-381 直投式发酵剂[植物乳杆菌 (*Lactobacillus plantarum*) 、嗜热链球菌 (*Streptococcus thermophiles*)、保加利亚乳杆菌(*Lactobacillus bulgaricus*)](西安米先尔生物科技有限公司)。

羧甲基纤维素钠 (sodium carboxymethylcellulose,

CMC)(分析纯, 徐州力源纤维素科技有限公司); 羟丙基二淀粉磷酸酯(分析纯, 杭州普罗星淀粉有限公司); 氢氧化钠(分析纯, 天津市北方天医化学试剂厂); 无水乙醇、磷酸(分析纯, 天津市风船化学试剂科技有限公司); 石油醚(分析纯, 上海晶纯生化科技股份有限公司); 酚酞(分析纯, 天津市北辰方正试剂厂); 碘液(分析纯, 天津市淮北精细化工有限公司); 盐酸(分析纯, 天津市天力化学试剂有限公司); 考马斯亮蓝 G-250 溶液(分析纯, 福州市伯康生物科技有限公司); 牛血清白蛋白(bovine serum albumin, BSA)(分析纯, 天津市华盛化学试剂有限公司); 无菌生理盐水(分析纯, 山东齐都药业有限公司); 平板计数琼脂培养基、煌绿乳糖胆盐肉汤(brilliant green lactose bile broth, BGLB)培养基、结晶紫中性红胆盐琼脂培养基(violet red bile agar, VRBA)(上海博微生物科技有限公司)。

PRX-350C 智能培养箱(宁波赛福实验仪器有限公司); TGL-16M 高速离心机(湘仪集团); JM-L80 胶体磨(海诺尼轻工有限公司); HH-8 恒温水浴锅(上海梅香仪器有限公司); MJ-BL1214A 搅拌机(破壁料理机)(广东美的生活电器制造有限公司); 101-2AB 电热鼓风干燥箱(天津市泰斯特仪器有限公司); UV-5200PC 可见分光光度计(上海元析仪器有限公司); BXM-30R 立式压力蒸汽灭菌锅(上海博讯实业有限公司医疗设备厂); AR224CN 分析天平[精度 0.00001 g, 奥豪斯仪器(常州)有限公司]; EL20 实验室 pH 计[梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司]; Agilent 7890B/5977B 气相色谱-质谱联用系统、CP-Sil 88 色谱柱(100 m×0.25 mm, 0.25 μm)(美国安捷伦公司); Waters ACQUITY UPLC I-Class/Xevo TQ-S micro 超高效液相色谱-串联质谱系统、Waters BEH Ultra C_{18} 色谱柱(100 mm× 2.1 mm, 1.7 μm)(美国 Waters 公司)。

1.2 实验方法

1.2.1 工艺流程

植物基酸奶加工工艺流程如图 1。

1.2.2 操作要点

萃取: 选用中度烘焙咖啡豆, 经研磨机处理至粒度等级 1(细研磨), 按 1:7 (*m*:*V*)的粉水比进行混合后, 热萃取 15 min, 萃取完成后, 使用咖啡滤纸对液体进行过滤, 最终获得澄清无杂质的咖啡萃取液。

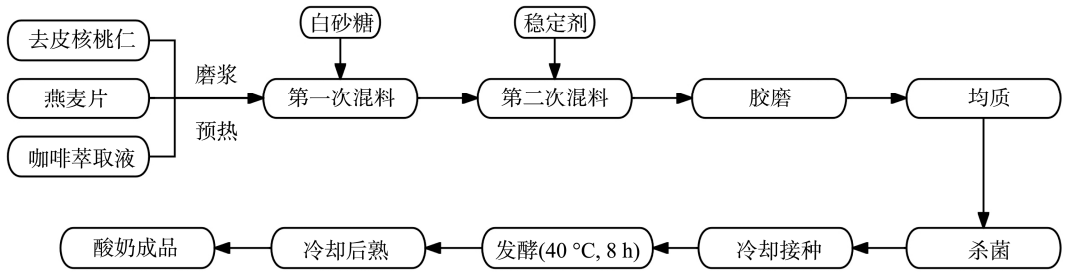


图 1 植物基酸奶加工工艺流程图

Fig.1 Flowchart of the processing technology for plant-based yogurt

磨浆: 在磨浆机中放入核桃仁、燕麦片、咖啡萃取液, 加入适量的纯净水混匀后用打浆机磨浆, 处理至无明显颗粒, 较为细腻即可。

预热混料: 将混合浆预热至 45~50 ℃, 添加白砂糖、羧甲基纤维素、羟甲基二淀粉磷酸酯加入到磨好的混合浆内, 加水定容混匀。

胶磨和均质: 将定容好的混合浆倒入到胶体磨中, 处理 20 min, 然后再 25 MPa 条件下均质 10 min, 以确保物料中水油两相稳定结合。

罐装: 将胶膜与均质好的混合浆用高温杀菌过的瓶子分瓶罐装。

杀菌、冷却: 混合浆采用 95 ℃杀菌 20 min, 可以有效的杀灭有害微生物, 同时较好的保留营养成分和风味, 杀菌结束后冷却至室温待用。

接种、发酵: 向冷却后的混合浆中投入菌种, 搅拌均匀, 接种后在 40 ℃下发酵 8 h。

冷藏后熟: 发酵结束后将混合浆置于 4 ℃冷藏后熟 12 h, 进一步产香和产酸, 即得到核桃燕麦咖啡植物基酸奶成品。

1.2.3 核桃燕麦咖啡植物基酸奶感官评分的测定

参照 RHB 104—2020《发酵乳感官评鉴细则》与 T/WSJD 12—2020《植物蛋白饮料 植物酸奶》的相关要求, 对酸奶的感官品质进行评价。由 5 名经过培训的评价员(2 名男性, 3 名女性)组成。所有评价员均通过基本味觉测试, 并在实验前接受统一培训, 熟悉评分标准与样品特性。经过训练的感官评定人员, 根据核桃燕麦咖啡植物基酸奶的色泽、组织状态、风味口感等指标进行整体评分, 总分为 100 分, 取平均值为最终感官评分。评价标准见表 1。

1.3 植物基酸奶工艺优化研究

1.3.1 单因素实验设计

按照 1.2.2 中操作要点, 设置接种量 1%, 3 种菌种(植物乳杆菌、嗜热链球菌、保加利亚乳杆菌)的比例为 1:1:1

发酵时间 8 h, 发酵温度 40 ℃, 以核桃燕麦咖啡植物基酸奶的感官评分为指标, 考察核桃添加量、燕麦添加、咖啡添加量、稳定剂添加量、发酵时间、对核桃燕麦咖啡植物基酸奶产品感官品质的影响, 确定适宜的因素水平。

表 1　感官品质评分标准

Table 1　Sensory quality scoring criteria

项目	评分标准	评分/分
色泽 (30 分)	色泽均匀一致, 光泽度较高, 呈淡黄色	21~30
	色泽均匀一致, 光泽度较低, 呈灰白色	11~20
	颜色不均匀, 具有异常颜色斑点	0~10
组织状态 (40 分)	组织状态细腻、顺滑、均匀, 良好的黏稠度, 凝固性好, 未分层, 无上清液析出	31~40
	组织状态略有粉感, 有少量气泡出现, 凝固性一般, 出现微分层, 有轻微上清液析出	16~30
	组织状态粗糙, 有大量气泡出现, 未凝固, 分层明显, 有大量上清液析出	0~15
风味口感 (30 分)	具有浓郁的核桃、燕麦、咖啡的香味, 无任何异味, 酸甜可口, 有核桃燕麦咖啡特有的滋味	21~30
	核桃、燕麦、咖啡的香味不明显, 但无异味产生, 略酸或略甜, 无不良滋味	11~20
	无核桃、燕麦、咖啡的香味, 且有异味产生, 过酸或过甜, 有不良滋味	0~10

各因素水平设置依据如下:

核桃添加量(12%、13%、14%、15%、16%): 核桃是蛋白质与风味的主要来源。根据预实验发现, 添加量低于12%时风味寡淡, 高于 16%时则油脂感过强、质地粗糙。

燕麦添加量(7%、8%、9%、10%、11%): 燕麦提供碳水化合物并影响体系稠度。基于预实验确定此梯度, 以平衡发酵稳定性与最终产品的顺滑度。

咖啡添加量(6%、7%、8%、9%、10%): 咖啡贡献特征风味。以市售咖啡风味饮品的常见添加比例范围为参考, 并通过预实验避免添加量过低导致风味不显或过高产生过度苦涩味。

稳定剂(CMC)添加量(0.15%、0.20%、0.25%、0.30%、0.35%): CMC 是一种常用的亲水性胶体, 被广泛用作增稠剂、稳定剂、乳化剂和保水剂[14]。该梯度设置覆盖了食品工业中酸奶稳定剂的常规应用范围, 旨在有效筛选出能保障产品品质的最低有效添加量。

发酵时间(7、8、9、10、11 h): 基于预实验中酸奶 pH 与酸度的动态监测结果, 7 h 前酸度不足, 11 h 后酸度过高且有异味, 故选取此时间窗口以探究发酵终点对酸味、风味及质构的最佳影响。

1.3.2　响应面实验设计

结合单因素实验结果, 选取核桃添加量(*A*)、燕麦添加量(*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 水平响应面实验, 确定核桃燕麦咖啡植物基酸奶生产最佳工艺参数。实验因素及水平设置如表 2 所示。

表 2　响应面实验因素水平

Table 2　Levels of factors for response surface experiment

水平	因素		
	A(核桃添加量)/%	*B*(燕麦添加量)/%	*C*(发酵时间)/h
–1	13	8	7
0	14	9	8
1	15	10	9

1.3.3　理化指标、常规营养成分及微生物指标测定

(1)理化指标及营养成分的测定

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》中的酚酞指示剂法测定; 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》中凯式定氮法测定(*F*=5.565); 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。

(2)微生物指标的测定

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; 菌落总数参照 GB 4789.2—2022《食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数检验》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。

(3)游离氨基酸的测定

氨基酸的测定采用液相色谱-串联质谱法(ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry, UPLC-MS/MS)[15]。

液相色谱条件: 色谱柱为 ACQUITY UPLC BEH C_{18} (2.1 mm×100 mm, 1.7 μm); 进样量 5 μL; 柱温 35 ℃。流动相 A 为含 0.1%甲酸的 50%甲醇水溶液, 流动相 B 为含 0.1%甲酸的 10%甲醇水溶液。梯度洗脱程序设置如下: 0~6.5 min, 流动相 B 比例由 90%线性降至 70%; 6.5~7.0 min, 由 70%降至 0%; 7.0~14.0 min, 维持 0%; 14.0~14.5 min, 由 0%升至 90%; 14.5~17.5 min, 维持 90%。流速在 0~8.0 min 内为 0.3 mL/min, 8.0~17.5 min 内为 0.4 mL/min。

质谱条件: 采用 Agilent 7890B/5977B 质谱仪, 配备电喷雾离子源(electrospray ionization, ESI), 正离子模式。主要参数设置如下: 鞘气压力为 40 arb, 辅助气压力为 10 arb, 离子喷雾电压为+3000 V, 离子传输管温度为 320 ℃。扫描方式为多反应监测模式。

1.3.4　脂肪酸的测定

脂肪酸的测定采用气相色谱-质谱法(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)[16]。

气相色谱条件: 色谱柱为 CP-Sil 88 (100 m×0.25 mm×0.25 μm), 进样量为 1 μL, 分流比为 10:1, 载气为高纯氦气, 流速为1.0 mL/min, 柱温箱的初始温度为100 ℃, 保持5.0 min, 以 4℃/min 的程序升温至 240 ℃, 保持 15 min。

质谱条件: 采用 Aiglent 公司的四极杆质谱检测系统, 配备电子轰击电离源(electron impact ionization, EI), 电子能量为 70 eV。进样口温度为 260 ℃, 四级杆温度为 150 ℃, 扫描方式为单通道扫描, 质量扫描范围为 *m*/*z* 30~550。扫描方式为选择离子监测(selected ion monitoring, SIM)模式。

脂肪酸及氨基酸定性定量分析: 通过保留时间和峰形信息对不同样品中的化合物质谱峰进行积分校正, 以确保定性和定量分析的准确性。通过比对标准品和苏州帕诺米克生物医药科技有限公司自建数据库对样品中各化合物进行分析鉴定。通过峰面积归一法对得到的各化合物进行相对定量, 计算每种组分的峰面积与峰面积总和的比值, 作为各化合物的相对含量。

1.4 数据处理

每项实验进行 3 次平行重复, 结果以平均值±标准偏差表示, 使用 SPSS 21 对实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 中心组合响应面实验设计; 使用 Origin 2023 进行作图。

2 结果与分析

2.1 核桃燕麦咖啡植物基酸奶生产工艺优化单因素实验

2.1.1 不同核桃添加量对核桃燕麦咖啡植物基酸奶感官评分的影响

将核桃丰富的营养赋予到酸奶中, 同时对酸奶的风味、组织状态等产生影响。由图 2(A)可知, 核桃添加量对核桃燕麦咖啡植物基酸奶感官评分及酸度影响较大, 感官评分随着核桃添加量的增大呈现出先增大后减少的趋势, 酸度随着核桃添加量的增大呈现出稳定上升趋势。当核桃添加量为 14%时, 酸度为(42.50±0.10) °T, 感官评分达到最佳为(85.80±2.68)分, 酸奶质地均匀, 香味协调。当核桃添加量低于 14%时, 酸奶中的核桃味较淡, 缺乏核桃独特的香气, 酸奶质地较为稀薄, 组织状态不佳, 酸奶状特性较差, 从而影响了感官评分。当核桃添加量大于 14%时, 可能会使得酸奶中的核桃在发酵过程中脂肪氧合酶催化不饱和脂肪酸发生过氧化反应从而产生已醛和戊醛等不愉快异味成分, 核桃添加量过高也会导致植物基酸奶中的油脂含量高使酸奶中有厚重的油脂感, 使得感官评分降低。因此选择核桃添加量为 13%、14%、15%进行响应面实验。

2.1.2 不同燕麦添加量对核桃燕麦咖啡植物基酸奶感官评分的影响

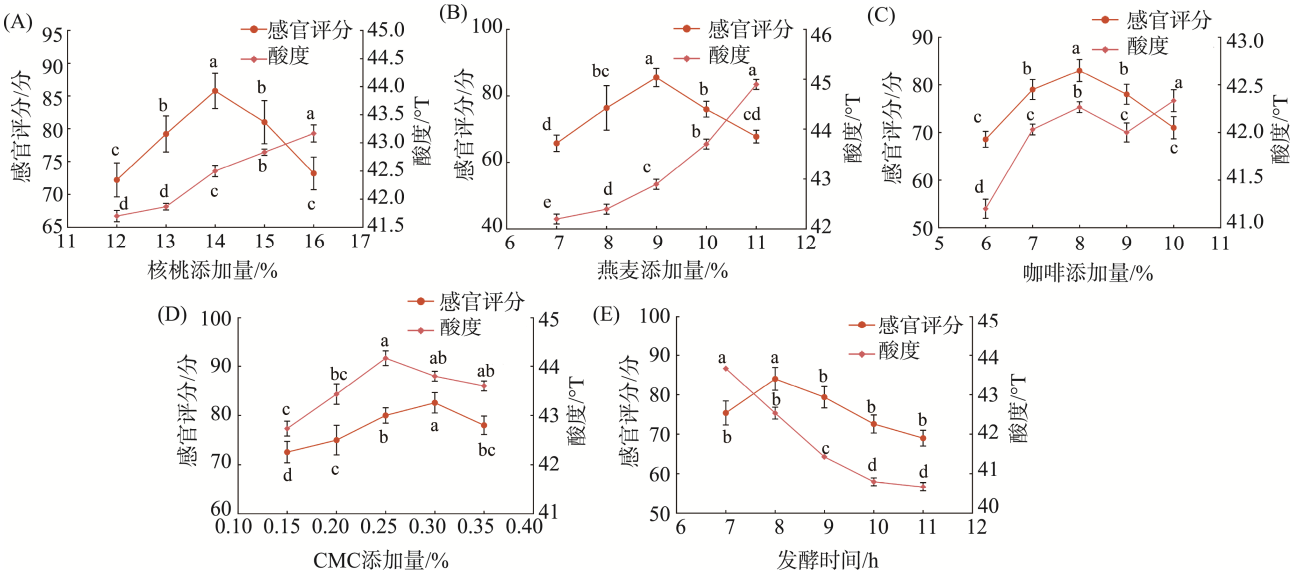
由图 2(B)所示, 可知燕麦添加量对感官评分的影响呈现先上升后下降的趋势, 而酸度呈现逐渐上升的趋势。当燕麦添加量为 9%时, 核桃燕麦咖啡植物基酸奶感官评分最高, 达 (85.60±2.79) 分, 植物基酸奶的酸度为 (42.80±0.20) °T, 此时酸奶中燕麦香气浓郁, 口感浓厚, 质地均匀, 凝固性良好。当燕麦添加量低于 9%时, 植物基酸奶的整体醇厚度和风味不佳, 组织状态较为稀薄, 质地不均匀, 凝固性较差。当燕麦添加量高于 9%时, 燕麦香味掩盖核桃和咖啡的香味, 让植物基酸奶整体风味失去平衡, 且导致了植物基酸奶的酸度上升, 组织状态过于黏稠, 影响力口感, 使得感官评分下降较快。因此选择燕麦添加量为 8%、9%、10%进行响应面实验。

2.1.3 不同咖啡添加量对核桃燕麦植物基酸奶感官评分的影响

由图 2(C)所示可知, 随着咖啡添加量的增加, 核桃燕麦咖啡植物基酸奶的感官评分呈现出先上升后下降的趋势, 而酸度则呈现出先上升又下降再上升的趋势。当咖啡添加量为 8%时, 植物基酸奶的感官评分最高, 到(83.00±2.36)分, 而酸度为(42.3±0.1) °T, 此时植物基酸奶的咖啡香气与核桃、燕麦的香气相协调, 色泽均匀, 口感上也更具有丰富性。当咖啡添加量低于 8%时, 咖啡的香气不突出, 色泽上对整体影响不大, 口感上缺少其特色的咖啡滋味。当咖啡添加量高于 8%时, 咖啡添加量过多, 咖啡香气会掩盖住核桃和燕麦的香气, 色泽上也会变得较深, 口感上植物基酸奶中苦味突出, 使得感官评分下降。因此, 选定咖啡添加量 8%为最适添加量, 并在后续实验中固定此条件。

2.1.4 CMC 添加量对核桃燕麦咖啡植物基酸奶感官评分的影响

由图 2(D)所示可知, 随着 CMC 添加量的逐渐增加, 核桃燕麦咖啡植物基酸奶的感官评分呈现逐渐上升趋势, 在添加 0.30%时达到峰值, 而后开始下降, 其酸度则呈现出先上升后下降的趋势。当 CMC 添加量为 0.30%时, 植物基酸奶的感官评分达到最佳, 为(82.60±2.07)分, 而酸度为(45.60±2.00) °T, 此时植物基酸奶组织结果稳定, 具有一定的凝固性和黏稠度。当 CMC 添加量少于 0.30%时, 植物基酸奶的凝固型较差, 组织整体不佳。当 CMC 添加量多于 0.30%时, 会使得酸奶的结构过于紧实, 质地较硬, 口感不佳, 感官评分下降。CMC 的浓度和电荷密度可以调控大豆酸奶的质地, 改善稳定性和口感。这与任卫文[17]的研究一致, 研究表明随着 CMC 的浓度从 0.1%升高到 1.1%, 大豆酸奶中的无规则卷曲和β-转角的共同含量出现了升高的趋势,使得大豆酸奶中的蛋白质颗粒有了更多的弹性结构。基于感官评分最优结果, 确定 0.30%为 CMC 的最适添加量。在后续的多因素响应面实验中, 将 CMC 添加量固定为 0.30%。



注：同一指标不同字母表示具有显著性差异，$P<0.05$。

图 2　不同单因素对核桃燕麦咖啡植物基酸奶感官评分及酸度的影响

Fig.2　Effects of different single factors on the sensory evaluation and acidity of walnut-oat coffee plant-based yogurt

2.1.5　不同发酵时间对核桃燕麦咖啡植物基酸奶感官评分的影响

发酵过程中由于微生物会持续的产香产酸影响酸奶的质地和风味，所以不同发酵时间对核桃燕麦咖啡植物基酸奶感官评分及酸度的影响如图 2(E)所示可知。随着发酵时间的增加，感官评分呈现先上升后下降的趋势，而酸度呈现逐渐下降的趋势。其中，当发酵时间为 8 h 时，植物基酸奶感官评分最高，为(84.00±1.30)分，此时酸度为(42.50±1.50) °T。当发酵时间小于 8 h 时，发酵不完全缺少酸味，植物基酸奶中的风味物质也未能完全释放，质地不够凝固。当发酵时间超过 8 h,植物基酸奶则会出现过度发酵现象，酸度较低，酸味变重，植物基酸奶开始出现分层，并伴随着乳清析出现象，影响了感官品质，从而使感官评分逐渐降低。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[18–19]。因此，选定感官评分最高的 8 h 为中心点，并选取 7、8、9 h 3 个发酵时间进行后续响应面实验。

2.2　核桃燕麦咖啡植物基酸奶工艺优化响应面实验

2.2.1　响应面实验结果与分析

根据单因素实验的结果，按照 Box-Behnken 的中心组合设计原理，选取了对核桃燕麦咖啡植物基酸奶影响较大的 3 个因素核桃添加量(A)、燕麦添加量(B)、发酵时间(C)为考察因素，以感官评分为评价指标，设计进行 3 因素 3 水平响应面实验，对核桃燕麦咖啡植物基酸奶的生产工艺进行优化，响应面实验方案和结果见表 3；方差分析见表 4。

表 3　核桃燕麦咖啡植物基酸奶工艺优化响应面实验结果

Table 3　Results of response surface methodology experiments for process optimization of walnut-oat-coffee plant-based yogurt

实验号	A: 核桃添加量/%	B: 燕麦添加量/%	C: 发酵时间/h	感官评分/分
1	–1	–1	0	75.2
2	1	–1	0	76.0
3	–1	1	0	76.4
4	1	1	0	77.8
5	–1	0	–1	75.6
6	1	0	–1	77.4
7	–1	0	1	78.0
8	1	0	1	76.2
9	0	–1	–1	79.2
10	0	1	–1	78.8
11	0	–1	1	80.4
12	0	1	1	80.8
13	0	0	0	84.8
14	0	0	0	85.2
15	0	0	0	85.2
16	0	0	0	85.6
17	0	0	0	85.8

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：$Y=85.32+0.2750A+0.3750B+0.5500C+0.1500AB-0.9000AC+0.2000BC-5.99A^2-2.98B^2-2.53C^2$。由表 4 可知，该模型极显著($P<0.01$)，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 $R^2=0.9885$，$R_{adj}^2=0.9737$，说明模型拟合

表 4 回归模型方差分析表

Table 4 Analysis of variance table for the regression model

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P	显著性
模型	243.41	9	27.05	66.71	<0.0001	**
A	0.605	1	0.605	1.49	0.2614	
B	1.13	1	1.13	2.77	0.1397	
C	2.42	1	2.24	5.97	0.0446	*
AB	0.09	1	0.09	0.222	0.6519	
AC	3.24	1	3.24	7.99	0.0255	*
BC	0.16	1	0.16	0.3946	0.5498	
A^2	150.82	1	150.82	372.01	<0.0001	**
B^2	37.52	1	37.52	92.54	<0.0001	**
C^2	27.06	1	27.06	66.74	<0.0001	**
残差	2.84	7	0.4054			
失拟项	2.23	3	0.7433	4.89	0.0796	
纯误差	0.608	4	0.152			
总方差	246.25	16				
R^2	0.9885					
R_{adj}^2	0.9737					

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)。

良好, 误差较小, 与真实值之间匹配性较高, 可用于核桃燕麦咖啡植物基酸奶生产工艺优化。响应值的变异系数 0.7969%, 说明实验精确度与重复性较好, 可信度强。由表 4 中 P 可知, 一次项中发酵时间(C)、交互项 AC 对感官评分影响显著(P<0.05), 二次项 A^2、B^2、C^2 对感官评分影响极显著(P<0.01)。由 F 可知, 影响植物基酸奶发酵的工艺条件因素为发酵时间>燕麦添加量>核桃添加量。JAEGER 等[20]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, 适当的发酵时间可以赋予核桃燕麦咖啡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实验

利用 Design Expert 12 软件得出核桃燕麦植物基酸奶生产最佳工艺参数为核桃添加量 14.02%, 燕麦添加量 9.07%, 发酵时间 8 h, 此时预测感官评分值为 85.32 分。为了方便实际过程操作, 将生产参数调整为核桃添加量 14%, 燕麦添加量 9%, 发酵时间 8 h, 在此条件下并进行 3 次平行验证实验, 得到的植物基酸奶产品颜色呈现为淡黄色, 酸奶组织状态良好, 无乳清析出, 酸甜可口, 质量稳定, 最终感官评分实际值为 85.49 分, 与模型预测值较为接近, 证明响应面优化的核桃燕麦咖啡植物基酸奶发酵工艺切实可行。各因素间交互作用对核桃燕麦咖啡植物基酸奶感官评分的影响如图 3 所示。

2.3 核桃燕麦咖啡植物基酸奶理化指标及微生物指标

由表 5 可以看出, 最佳工艺下制得的核桃燕麦咖啡植物基酸奶的蛋白质含量为(3.20±0.11) g/100 g, 脂肪含量为(3.62±0.13) g/100 g, 酸度为(62.5±1.04) °T。核桃燕麦咖啡植物基酸奶的理化指标符合标准 T/WSJD 12—2020 的相关要求, 产品蛋白质含量比市面上所售的部分复合植物基酸奶丰富; 其脂肪含量与部分含高脂肪的植物基酸奶相比, 较为适宜减脂期的人群食用; 产品的酸度在最佳食用酸度范围之间且符合规定要求, 其口感风味尝起来酸甜可口; 产品的 pH 也在合理范围内符合标准要求。且经过测定得出, 核桃燕麦咖啡植物基酸奶的各项微生物指标均符合标准 T/WSJD 12—2020 的相关要求规定, 肠杆菌、霉菌和酵母菌未检出, 符合食品安全性要求, 是一款营养丰富、安全健康的纯植物基酸奶产品。

2.4 核桃燕麦咖啡植物基酸奶与搅拌型酸奶游离氨基酸对比研究

2.4.1 核桃燕麦咖啡植物基酸奶与搅拌型酸奶游离氨基酸种类与含量对比分析

核桃燕麦咖啡植物基酸奶和搅拌型酸奶的游离氨基酸含量和比例如表 6 所示。核桃燕麦咖啡植物基酸奶种类有 24 种, 总量为(594.29±5.91) μg/g, 而搅拌型酸奶的游离

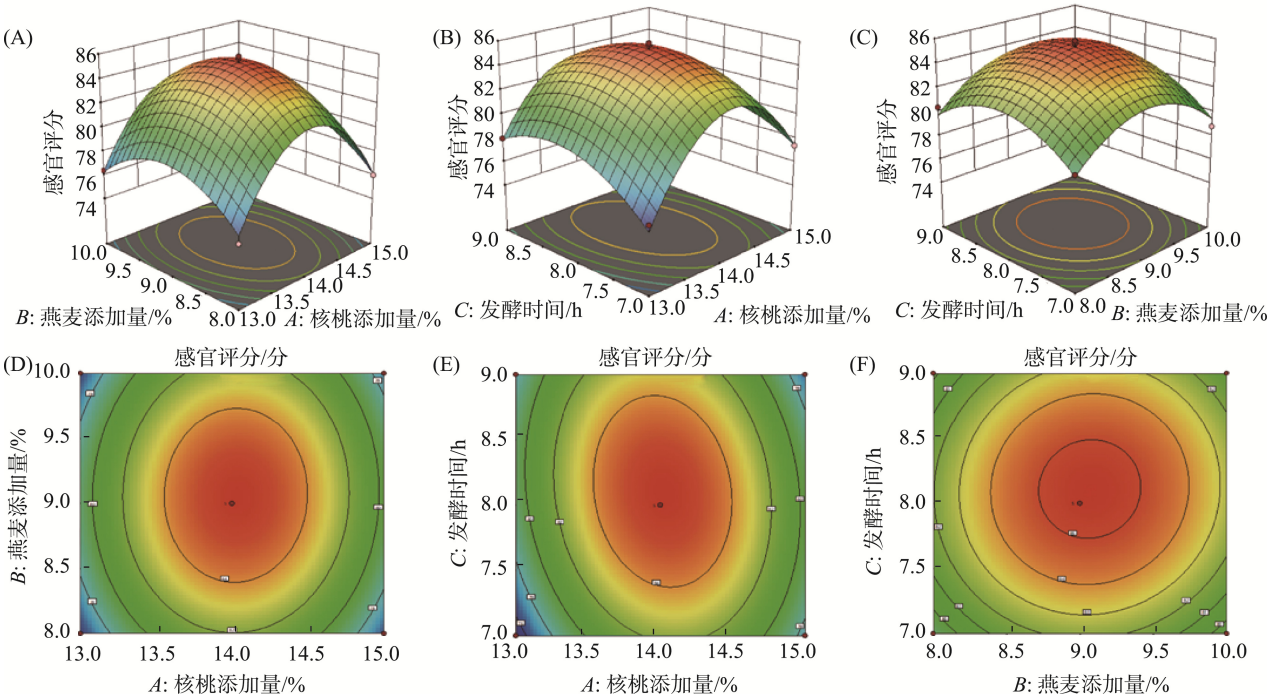


图 3　各因素间交互作用对核桃燕麦咖啡植物基酸奶感官评分影响的响应面图

Fig.3　Response surface plots showing the interactive effects of various factors on the sensory score of walnut-oat-coffee plant-based yogurt

表 5　核桃燕麦咖啡植物基酸奶理化指标及微生物指标

Table 5　Physicochemical and microbiological indicators of walnut-oat-coffee plant-based yogurt

项目	检测方法	国家标准	测定结果	结果
蛋白质/(g/100 g)	GB 5009.5—2016	≥2.5	3.20±0.11	合格
脂肪/(g/100 g)	GB 5009.6—2016	-	3.62±0.13	合格
酸度/°T	GB 5009.239—2016	≥30.0	62.50±1.04	合格
pH	GB 5009.36	≤4.5	4.20±0.09	合格
菌落总数/(CFU/g)	GB 4789.2—2022	-	-	合格
大肠杆菌/(CFU/g)	GB 4789.3—2016	≤5.0	未检出	合格
霉菌/(CFU/g)	GB 4789.15—2016	≤20.0	未检出	合格
酵母菌/(CFU/g)	GB 4789.15—2016	≤20.0	未检出	合格

注: -表示该样品中目标物未检出或未进行相关规定。

氨基酸种类有 24 种，总量为(225.57±5.17) μg/g。两种酸奶的游离氨基酸种类相似，但含量存在差异。核桃燕麦咖啡植物基酸奶的必需氨基酸总量为(143.27±0.80) μg/g，占核桃燕麦咖啡植物基酸奶总游离氨基酸的 24.11%，而搅拌型酸奶的必需氨基酸总量为(71.94±1.41) μg/g，占搅拌型酸奶总游离氨基酸的 31.89%。谷氨酰胺是核桃燕麦咖啡植物基酸奶和搅拌型酸奶中都是的主要游离氨基酸，含量分别为(170.34±1.34) μg/g、(85.73±2.27) μg/g。说明两种酸奶营养价值高，是优质的蛋白源，且核桃燕麦咖啡植物基酸的总氨基酸含量及必需氨基酸总含量均高于传统搅拌型酸奶，这预示着其可能提供更丰富的必需氨基酸来，营养价值更高。

蛋白质是通过一定数量的氨基酸脱水缩合而形成的具有一定功能特性的生物大分子，氨基酸的种类及数量影响蛋白质的结构、功能和营养价值[21]。水解氨基酸多处于结合状态，对风味影响不大；而游离氨基酸含量较少，主要是用于参与风味物质的形成。天冬氨酸和谷氨酸能对食品的鲜味产生影响，而甘氨酸、丙氨酸、丝氨酸、苏氨酸和脯氨酸主要是跟食品的甜味相关，酪氨酸和苯丙氨酸作为芳香类氨基酸主要参与食品的油脂气息的形成[22]。由表 7 可知，核桃燕麦咖啡植物基酸奶的鲜味氨基酸含量(315.29±3.30) μg/g，甜味氨基酸含量(9.23±0.23) μg/g，分别高于搅拌型酸奶的(102.24±2.44) μg/g 和(7.77±0.20) μg/g。核桃燕麦植物基酸奶的芳香类氨基酸含量(38.81±0.25) μg/g，高于搅拌型酸奶的(1.65±0.03) μg/g。

表 6 核桃燕麦咖啡植物基酸奶和搅拌型酸奶的游离氨基酸的含量和比例

Table 6 Content and proportion of free amino acid between walnut-oat-coffee plant-based yogurt and stirred yogur

氨基酸名称	核桃燕麦咖啡植物基酸奶		搅拌型酸奶	
	含量/(μg/g)	占总氨基酸的质量分数/%	含量/(μg/g)	占总氨基酸的质量分数/%
组氨酸*	3.29±0.31	0.55	2.64±0.26	1.17
精氨酸*	64.85±0.33	10.91	66.00±1.21	29.26
天冬酰胺	76.19±1.21	12.82	13.86±0.16	6.15
4-羟基-*L*-脯氨酸	0.72±0.03	0.12	0.60±0.02	0.27
谷氨酰胺	170.34±1.34	28.66	85.73±2.27	38.01
丝氨酸	12.33±0.15	2.07	1.33±0.03	0.59
甘氨酸	28.06±0.28	4.72	1.46±0.25	0.65
天冬氨酸	29.10±0.20	4.90	1.42±0.04	0.63
L-瓜氨酸	2.35±0.06	0.40	3.18±0.08	1.41
谷氨酸	39.65±0.58	6.67	1.23±0.02	0.54
苏氨酸	12.9±0.10	2.17	2.43±0.07	1.08
丙氨酸	27.94±0.73	4.70	4.00±0.10	1.77
γ-氨基丁酸	1.61±0.03	0.27	1.91±0.06	0.85
脯氨酸	1.95±0.03	0.33	1.60±0.04	0.71
L-鸟氨酸	2.25±0.04	0.38	3.05±0.10	1.35
D-2-氨基丁酸	0.40±0.01	0.07	0.05±0.00	0.02
赖氨酸*	5.19±0.1	0.87	0.39±0.01	0.17
胱氨酸	ND	0.00	ND	0.00
酪氨酸	13.18±0.11	2.22	0.17±0.00	0.07
蛋氨酸*	4.02±0.06	0.68	0.21±0.00	0.09
缬氨酸*	13.80±0.19	2.32	0.18±0.01	0.08
异亮氨酸*	9.07±0.15	1.53	0.16±0.00	0.07
亮氨酸*	17.44±0.20	2.93	0.87±0.02	0.39
苯丙氨酸*	14.42±0.06	2.43	0.41±0.01	0.18
色氨酸*	11.21±0.10	1.89	1.08±0.03	0.48
∑必需氨基酸	143.27±0.80	24.11	71.94±1.41	31.89
∑非必需氨基酸	451.01±5.14	75.89	153.63±3.80	68.11
∑氨基酸	594.29±5.91	100.00	225.57±5.17	100.00

注: 结果为 3 个平行样品的平均值±标准偏差; ND 表示未检出; *为必需氨基酸。

表 7 核桃燕麦咖啡植物基酸奶与搅拌型酸奶中呈味氨基酸的含量和比例

Table 7 Content and proportion of flavor amino acids in walnut-oat-coffee plant-based yogurt and stirred yogurt

氨基酸功能	核桃燕麦咖啡植物基酸奶		搅拌型酸奶	
	含量/(μg/g)	占总氨基酸的质量分数/%	含量/(μg/g)	占总氨基酸的质量分数/%
鲜味氨基酸	315.29±3.30	53.05	102.24±2.44	45.32
甜味氨基酸	9.23±0.23	1.56	7.77±0.20	3.44
芳香类氨基酸	38.81±0.25	6.53	1.65±0.03	0.73

2.4.2 核桃燕麦咖啡植物基酸奶与搅拌型酸奶游离氨基酸相关性与差异性分析

如图 4(A)和 4(B)所示, 通过相关性热图和 Z-score 标准化分析相结合的方法, 系统考察了搅拌型酸奶与核桃燕麦咖啡植物基酸奶之间游离氨基酸谱的差异特征及其内在代谢关联。相关性热图分析进一步揭示了氨基酸代谢网络的复杂互作关系, 值得关注的是: 尿素循环相关代谢物(*L*-瓜氨酸、*L*-鸟氨酸和精氨酸)之间呈现高度正相关(r>0.8,

P<0.05)。这一紧密的共变关系表明，在酸奶的发酵或储存过程中，这些代谢物的转化可能受共同的生化途径(如精氨酸代谢通路)调控；同时，包括 γ-氨基丁酸在内的多个氨基酸之间也存在强正相关(r>0.7，P<0.05)，这提示在该食品基质中，它们的积累可能源自相似的前体或受到相似的工艺条件影响。脯氨酸与多数氨基酸呈现显著负相关(r<–0.6，P<0.05)，这种独特的代谢模式可能与其作为渗透压调节剂的特殊功能相关。Z-score 分析结果表明，核桃燕麦咖啡植物基酸奶中呈现显著上调(P<0.05)的氨基酸包括：色氨酸、蛋氨酸、γ-氨基丁酸和 4-羟基脯氨酸，这种氨基酸谱的重塑与本研究使用的复合发酵剂中特定菌株的代谢特性密切相关。特别是 γ-氨基丁酸的显著积累(Z-score>0)与谷氨酸的显著消耗(Z-score<–50)形成了鲜明对比，这主要归因于发酵剂中植物乳杆菌(*Lactobacillus plantarum*)的代谢活动。已有大量研究证实，植物乳杆菌具有高活性的谷氨酸脱羧酶(glutamate decarboxylase, GAD)，能高效催化底物中的谷氨酸脱羧转化为 γ-氨基丁酸[23]，此外，发酵剂中的保加利亚乳杆菌和嗜热链球菌作为典型的乳酸菌，其细胞壁蛋白酶系统可将核桃与燕麦蛋白降解为游离氨基酸，为 γ-氨基丁酸等次级代谢产物的合成提供了充足的前体底物[24]。总体而言，这些上调氨基酸的模式反映了 YC-381 复合发酵剂中不同菌株(植物乳杆菌、嗜热链球菌、保加利亚乳杆菌)代谢途径的特异性激活与协同；而谷氨酸和天冬氨酸等酸性氨基酸的显著下调(Z-score<–50)则可能部分归因于它们作为前体被大量消耗(谷氨酸用于合成 γ-氨基丁酸)，这进一步印证了发酵过程中能量与氮代谢途径在特定菌株驱动下的重编程。

2.5　核桃燕麦咖啡植物基酸奶和搅拌型酸奶脂肪酸比较分析

2.5.1　核桃燕麦咖啡植物基酸奶和搅拌型酸奶的脂肪酸的种类及相对含量分析

由表 8 可知，在本研究检测的脂肪酸范围，两种酸奶的脂肪酸种类相同，主要以短链脂肪酸形式存在。两种酸奶脂肪酸含量的总体趋势基本一致，含量最多的均为多不饱和脂肪酸，在核桃燕麦咖啡植物基酸奶中所占比例为 68.6165%，高于搅拌型酸奶的 67.3683%；其次是单不饱和脂肪酸，核桃燕麦咖啡植物基酸奶的含量为 19.7376%，低于搅拌型酸奶的 21.3180%；含量最低的均是饱和脂肪酸，核桃燕麦咖啡植物基酸奶的含量为 11.5642%，高于搅拌型酸奶的 11.3137%。两种酸奶脂肪酸含量存在差异主要是受品种、地域、胎次、饲料等因素的影响。3 大类脂肪酸的比值可用于评价脂肪酸营养价值，根据联合国粮食及农业组织的推荐，3 大类脂肪酸含量一致时的脂肪酸最为合理，营养价值最高[25]。由表 8 可知，核桃燕麦咖啡植物基酸奶 3 大类脂肪酸的比值(1:1.7068:5.9335)，比搅拌型酸奶比值(1:1.8843:5.9545)更为接近推荐的比例，说明核桃燕麦咖啡植物基酸奶的脂肪酸组成比搅拌型酸奶更为均衡，营养价值更高。如表 8 所示，短链脂肪酸在本次检验中种类较多但含量较少，中链脂肪酸具有良好的消化吸收特性，能为人体快速提供能量，可用于治疗脂质吸收障碍、吸收不良综合征、胰腺功能不全、胆囊紊乱、肠胃炎、糖尿病等疾病[26]。

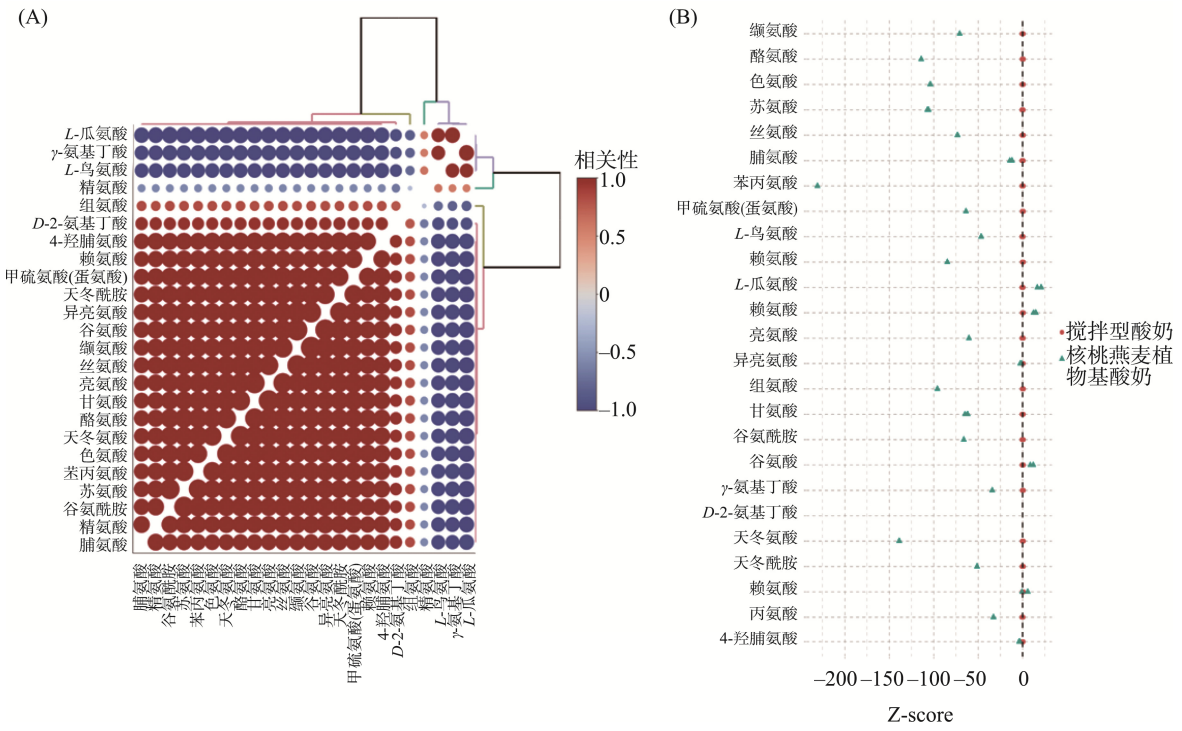


图 4　核桃燕麦咖啡植物基酸奶与搅拌型酸奶游离氨基酸相关性热图(A)与 Z-score 图(B)

Fig.4　Correlation heatmap (A) and Z-score distribution (B) of free amino acids in walnut-oat-coffee plant-based yogurt versus stirred yogurt

表 8 核桃燕麦咖啡植物基酸奶和搅拌型酸奶的脂肪酸的含量及比例

Table 8 Content and proportion of fatty acids in walnut-oat-coffee plant-based yogurt and stirred yogurt

脂肪酸名称	简式	核桃燕麦咖啡植物基酸奶		搅拌型酸奶	
		含量/(μg/g)	占总脂肪酸的质量分数/%	含量/(μg/g)	占总脂肪酸的质量分数/%
短链脂肪酸					
乙酸	C_2:0	1.8421±0.0633	2.2771	1.7703±0.0231	2.2816
丙酸	C_3:0	0.0387±0.0016	0.0503	0.0391±0.0004	0.0480
丁酸	C_4:0	0.0628±0.0003	0.1102	0.0856±0.0023	0.0777
异丁酸		0.0012±0.0000	0.0024	0.0019±0.0001	0.0015
戊酸	C_5:0	0.0089±0.0007	0.0034	0.0027±0.0002	0.0110
异戊酸		0.0002±0.0001	0.0005	0.0004±0.0000	0.0003
异己酸		0.0023±0.0001	0.0053	0.0042±0.0006	0.0028
中链脂肪酸					
癸酸(羊蜡酸)	C_{10}:0	0.2587±0.0186	0.3204	0.2926±0.0186	0.3764
十二烷酸(月桂酸)	C_{12}:0	0.0032±0.0001	0.0040	0.0034±0.0002	0.0043
长链脂肪酸					
十四烷酸(肉豆蔻酸)	C_{14}:0	0.0229±0.0003	0.0283	0.0227±0.0005	0.0291
十五烷酸	C_{15}:0	0.0087±0.0005	0.0108	0.0091±0.0004	0.0117
十六烷酸(棕榈酸)	C_{16}:0	5.2437±0.0724	6.4947	4.9357±0.3147	6.3486
十七烷酸	C_{17}:0	0.0314±0.0012	0.0389	0.0274±0.0005	0.0352
十八烷酸(硬脂酸)	C_{18}:0	1.7405±0.0293	2.1557	1.5316±0.0291	1.9700
二十烷酸(花生酸)	C_{20}:0	0.0506±0.0011	0.0626	0.0488±0.0036	0.0628
二十二烷酸	C_{22}:0	0.0132±0.0001	0.0164	0.0130±0.0003	0.0167
二十三烷酸	C_{23}:0	0.0035±0.0000	0.0044	0.0029±0.0000	0.0038
二十四烷酸	C_{24}:0	0.0043±0.0002	0.0053	0.0044±0.0003	0.0056
顺-9-十六碳酸烯酸(棕榈油酸)	C_{16}:1	0.0493±0.0004	0.0610	0.0505±0.0025	0.0650
顺式-10-十七碳烯酸	C_{17}:1	0.0158±0.0001	0.0196	0.0132±0.0005	0.0170
顺-9-十八碳烯酸(油酸)	C_{18}:1n9c	15.7214±0.1521	19.4718	16.33071.0807	21.0054
顺-11-二十碳烯酸(鳕油酸)	C_{20}:1	0.1202±0.0005	0.1489	0.1482±0.0026	0.1906
顺-13-二十二碳烯酸	C_{22}:1n9	0.0295±0.0005	0.0365	0.0311±0.0002	0.0400
顺,顺-9,12-十八碳二烯酸(亚油酸)	C_{18}:2n6c	46.0436±0.5132	57.0277	43.5103±2.7666	55.9654
顺,顺,顺-6,9,12-十八碳三烯酸(γ-亚麻酸)	C_{18}:3n6	0.0231±0.0004	0.0286	0.0304±0.0006	0.0391
顺,顺,顺-9,12,15-十八碳三烯酸(α-亚麻酸)	C_{18}:3n3	9.3102±0.1469	11.5312	8.8101±0.5028	11.3321
11,14-二十碳二烯酸	C_{20}:2	0.0237±0.0002	0.0293	0.0248±0.0003	0.0319
总饱和脂肪酸		9.3369±0.9829	11.5642	8.7959±0.5916	11.3137
总单不饱和脂肪酸		15.9361±0.2616	19.7376	16.5737±1.8802	21.3180
总多不饱和脂肪酸		55.4006±1.3140	68.6165	52.3756±4.0000	67.3683
总饱和脂肪酸:总单不饱和脂肪酸:总多不饱和脂肪酸		1:1.7068:5.9335		1:1.8843:5.9545	

此外，中链脂肪酸还能在调节肠道菌群、维持体液和电解质平衡中发挥作用[27]。由表 8 可知两种酸奶检测出的中链脂肪酸有两种，分别是癸酸(C_{10}:0)和月桂酸(C_{12}:0)。癸酸具有难闻的脂肪酸臭味，是公认的羊乳膻味主要贡献物质。核桃燕麦咖啡植物基酸奶的癸酸含量为 0.3204%，低于搅拌型酸奶的 0.3764%。月桂酸可通过门静脉直接吸收，能促进脂肪的吸收，特别是对脂肪吸收障碍人群的更为有益[28]。核桃燕麦咖啡植物基酸奶的月桂酸含量为 0.0040%，低于搅拌型酸奶的 0.0043%。两种酸奶的长链脂肪酸分布相似，是构成脂肪酸的主体。两种酸奶的长链饱和脂肪酸

中含量最高的均为顺，顺-9,12-十八碳二烯酸（亚油酸）(C_{18}:2n6c)，核桃燕麦咖啡植物基酸奶的亚油酸含量为57.0277%，高于搅拌型酸奶的 55.9654%，是一种必需脂肪酸，被誉为“血管清道夫”，可降低血液中的胆固醇、甘油三酯、低密度脂蛋白的含量，维持血脂的代谢平衡[29]。其次是油酸(C_{18}:1n9c)，核桃燕麦咖啡植物基酸奶的含量为19.4718%，低于搅拌型酸奶的 21.0054%，属于长链单不饱和脂肪酸，可有效减少血液中有害的低密度胆固醇浓度，降低冠心病的发生概率[30]；硬脂酸(C_{18}:0)容易在小肠中形成皂化物，不易被消化吸收[31]，核桃燕麦咖啡植物基酸奶的含量为 2.1557%，高于搅拌型酸奶的 1.9700%。此外亚油酸还与长期血糖控制和胰岛素抵抗之间存在关联，有预防II 型糖尿病的作用[32]。综上所述，羊酸奶的脂肪酸在营养均衡、消化吸收、降低胆固醇、预防心脑血管疾病、预防II 型糖尿病等比牛酸奶更具优势。

2.5.2　核桃燕麦咖啡植物基酸奶与搅拌型酸奶短链脂肪酸相关性与差异性分析

本研究通过多维度分析技术对两组样本的短链脂肪酸代谢谱进行了深入解析，揭示了复杂的微生物-宿主共代谢特征。如图 5，从 Z-score 标准化分布来看，支链短链脂肪酸在样本组呈现整体上调趋势，这种显著富集现象可能源于核桃燕麦植物基酸奶特有的蛋白质分解菌群(如梭菌属、拟杆菌属)对支链氨基酸的活跃降解；宿主-微生物组互作导致的 α-酮酸脱羧酶通路激活[33−34]。相比之下，直链脂肪酸丁酸(C_4:0)显著降低(P<0.05)，这一变化表明，在该植物基酸奶的发酵体系中，丁酸的生物合成或积累过程受到了抑制，可能与产丁酸菌(如 *Faecalibacterium prausnitzii*)的丰度下降或代谢抑制有关，但此推测需后续微生物群落分析加以验证。相关性网络分析展现了更精细的代谢调控关系，异戊酸与异丁酸形成强正相关簇(r≈0.82，P=0.0032)，这与已知的微生物支链脂肪酸合成途径(由乙酰-辅酶 A 经 α-酮酸中间体转化)高度一致。特别值得注意的是，丁酸与戊酸表现出极强的负相关(r=–0.91，P=0.0018)，乙酸(C_2:0)与丙酸(C_3:0)的中度正相关(r=0.67)则提示糖酵解途径的相对稳定。

2.5.3　核桃燕麦咖啡植物基酸奶与搅拌型酸奶中长链脂肪酸相关性与差异性分析

本研究通过对中长链脂肪酸的系统分析，揭示了搅拌型酸奶与核桃燕麦咖啡植物基酸奶之间显著的代谢差异及其深层次的生物学意义。如图 6(A)和 6(B)所示，在中链脂肪酸(C10:0~C14:0)方面，搅拌型酸奶表现出显著下调(Z<–10，P<0.05)，这一现象可能源于脂蛋白脂肪酶活性抑制、过氧化物酶体 β 氧化减弱或肝脏脂质新生减少，虽然其与目标变量的相关性较弱(|r|<0.3)，但提示其可能主要作为能量代谢底物而非调控分子发挥作用。而在长链脂肪酸(C16:0~C24:0)中，本研究观察到更为复杂的代谢特征：饱和长链脂肪酸(如 C_{16}:0、C_{18}:0)保持稳定，可能主要维持膜结构完整性；单不饱和长链脂肪酸(如 C_{18}:1n9c)呈现中度上调(Z=3~5)，反映 SCD1 酶活性增强；特别值得注意的是多不饱和脂肪酸的差异化表现于 n-6 系列中的 C_{18}:3n6

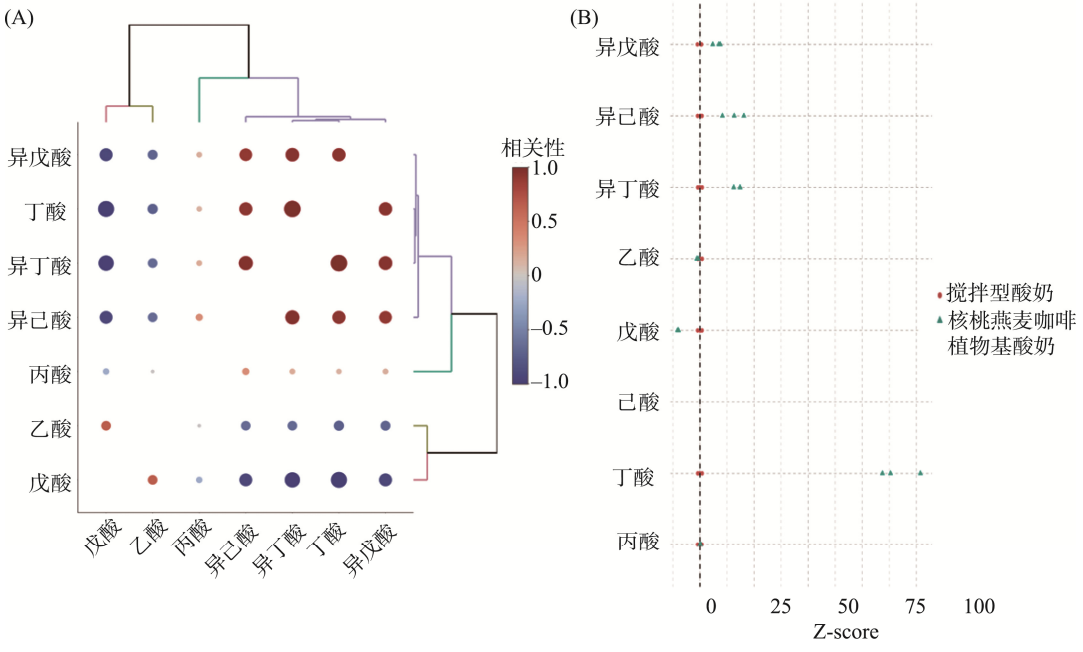


图 5　核桃燕麦咖啡植物基酸奶与搅拌型酸奶短链脂肪酸相关性热图(A)与 Z-score 标准化分布(B)

Fig.5　Correlation heatmap (A) and Z-score normalized distribution (B) of short-chain fatty acids in walnut-oat-coffee plant-based yogurt and stirred yogurt

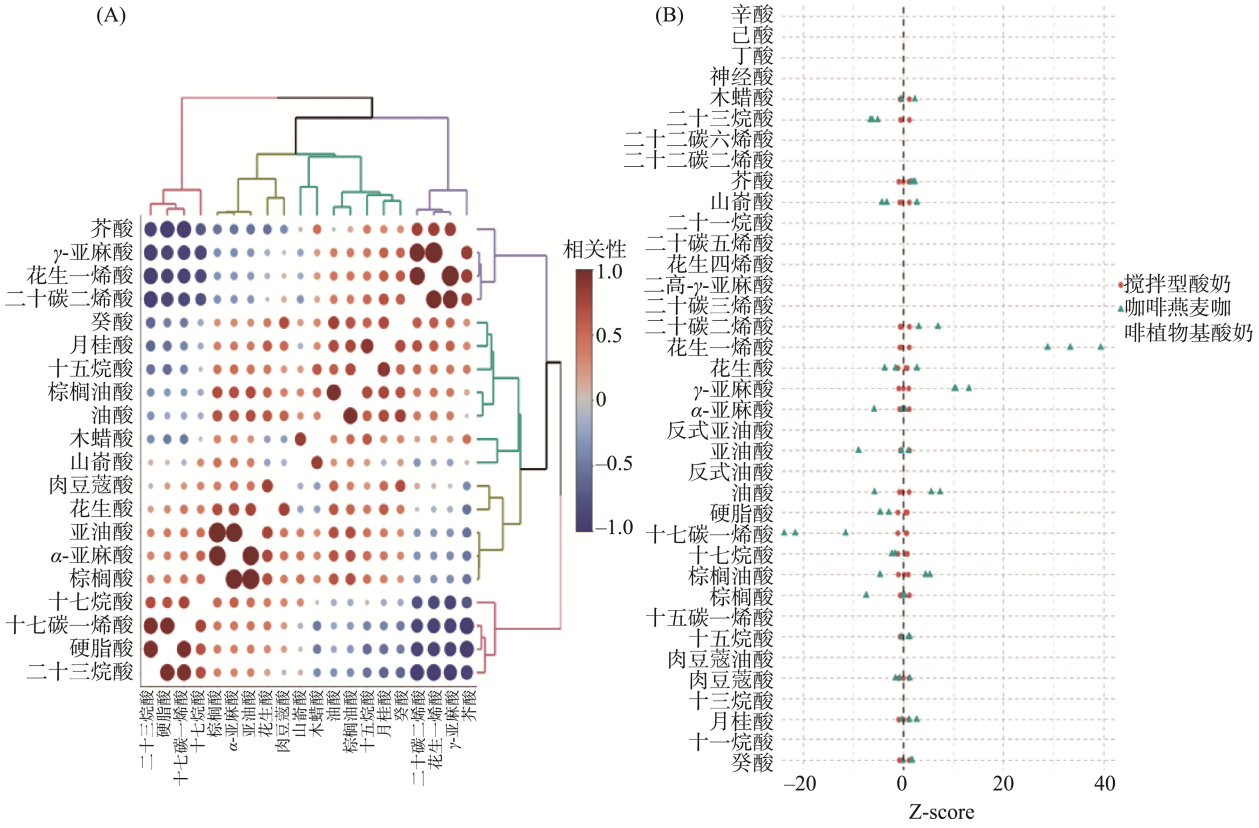


图 6 核桃燕麦咖啡植物基酸奶与搅拌型酸奶中长链脂肪酸相关性热图(A)与 Z-score 标准化分布(B)

Fig.6 Correlation heatmap (A) and Z-score normalized distribution (B) of long-chain fatty acids in walnut-oat-coffee plant-based yogurt and stirred yogurt

(γ-亚麻酸)显示出显著负相关(r=–0.5)，而 n-3 系列(如 α-亚麻酸 C_{18}:3n3 和二十碳五烯酸 C_{20}:5n3)则显著上调(Z=8-12)，这种 n-3/n-6 比例的改变可能通过影响类二十烷酸代谢来调控炎症反应。关键代谢节点分析显示，搅拌型酸奶中 C_{16}:1/C_{16}:0 比值升高表明去饱和作用增强，花生四烯酸与二十碳五烯酸比值降低提示抗炎微环境形成，而二十二碳六烯酸(C_{22}:6n3)水平的显著提升(Z≈10, P<0.05)可能改善神经元功能。

3 结 论

本研究以核桃、燕麦、咖啡为主要原料，系统研究发酵条件对酸奶品质的影响，结合响应面实验筛选出最佳工艺参数为：核桃仁添加量 14%、燕麦添加量 9%、咖啡萃取液添加量 8%、CMC 添加量 0.3%、在 40 ℃下发酵时间 8 h，且发酵时间对产品感官评价影响最大，其次是燕麦添加量和核桃添加量。在此工艺条件下，生产的核桃燕麦咖啡植物基酸奶风味独特、色泽均匀、稀稠适宜，具有咖啡独特的风味，且产品安全健康，符合相关标准要求。另外，核桃燕麦咖啡植物基酸奶的游离氨基酸含量以及脂肪酸含量相较于搅拌型酸奶更为均衡，营养价值更高。因此，开发核桃燕麦咖啡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。

参考文献

[1] 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.
China Food Science and Technology Society Plant-based Food Branch. Scientific consensus on plant-based foods (2022 edition) [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(10): 450−457.

[2] 郭顺堂, 徐婧婷. 植物基乳产业的发展趋势与技术创新[J]. 食品科学技术学报, 2024, 42(2): 1−9.
GUO ST, XU JT. Development trend and technological innovation of plant-based dairy industry [J]. Journal of Food Science and Technology, 2024, 42(2): 1−9.

[3] ZHANG Y, KAN H, CHEN S, *et al*. Comparison of phenolic compounds extracted from *Diaphragma juglandis* fructus, walnut pellicle, and flowers of *Juglans regia* using methanol, ultrasonic wave, and enzyme assisted-extraction [J]. Food Chemistry, 2020, 321: 126672.

[4] SÁNCHEZ-GONZÁLEZ C, CIUDAD CJ, NOÉ V, *et al*. Health benefits of walnut polyphenols: An exploration beyond their lipid profile. [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2015, 57(16): 3373−3383.

[5] 郝苑汝, 陈芮蝶, 翟梅枝. 不同品种核桃氨基酸组成及营养价值评价[J]. 食品工业科技, 2025, 46(16): 281−290.
HAO YR, CHEN RD, ZHAI MZ. Amino acid composition and nutritional value evaluation of different walnut varieties [J]. Science and Technology

of Food Industry, 2025, 46(16): 281−290.

[6] NI Z, ZHANG Y, CHEN S, *et al*. Exploration of walnut components and their association with health effects [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2021, 62(19): 5113−5129.

[7] 唐凝. 燕麦的营养成分与保健效用[J]. 现代食品, 2021(11): 140−142.
TANG N. Nutritional components and health benefits of oats [J]. Modern Food, 2021(11): 140−142.

[8] 梁莹, 崔炳群, 张素娟. 燕麦*β*-葡聚糖在发酵酸奶中的应用[J]. 中国食品添加剂, 2011(1): 178−181.
LIANG Y, CUI BQ, ZHANG SJ. Application of oat *β*-glucan in fermented yogurt [J]. China Food Additives, 2011(1): 178−181.

[9] HU GL, WANG X, ZHANG L, *et al*. The sources and mechanisms of bioactive ingredients in coffee [J]. Food & Function, 2019, 10(6): 3113−3126.

[10] CARTER P, YUAN S, KAR S, *et al*. Coffee consumption and cancer risk: A Mendelian randomisation study [J]. Clinical Nutrition, 2022, 41(10): 2113−2123.

[11] WENHAN L, XILEI P, JINKUI S, *et al*. Effect of *Lactobacillus plantarum* on functional characteristics and flavor profile of fermented walnut milk [J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 160: 113254.

[12] HENCHION M, HAYES M, MULLEN A, *et al*. Future protein supply and demand: Strategies and factors influencing a sustainable equilibrium [J]. Foods, 2017, 6(7): 53.

[13] 徐广新, 杨仁琴, 周炜, 等. 响应面法优化桂花酒酿酸奶制备工艺[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(23): 145−151.
XU GX, YANG RQ, ZHOU W, *et al*. Optimization of preparation process of osmanthus yoghurt with fermented glutinous rice by response surface methodology [J]. Journal of·Food Safety & Quality. 2024, 15(23): 145−151.

[14] SIONEK B, SZYDŁOWSKA A, KÜÇÜKGÖZ K, *et al*. Traditional and new microorganisms in lactic acid fermentation of food [J]. Fermentation, 2023, 9(12): 1019.

[15] THIELE B, HUPERT M, SANTIAGO-SCHÜBEL B, *et al*. Direct analysis of underivatized amino acids in plant extracts by LC-MS/MS (improved method) [J]. Methods in Molecular Biology, 2019, 2030: 403–414.

[16] BECCARIA M, FRANCHINA FA, NASIR M, *et al*. Investigation of mycobacteria fatty acid profile using different ionization energies in GC-MS [J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2018, 410: 7987−7996.

[17] 任卫文. 基于流变学和摩擦学研究羧甲基纤维素对大豆酸奶口感的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2024.
REN WW. Study on the effect of carboxymethyl cellulose on the taste of soy yogurt based on rheology and tribology [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2024.

[18] 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 JAO, CHEN XJ, DENG YW, *et al*. Process optimization and antioxidant activity of compound lactic acid bacteria black rice fermented milk [J]. Cereals & Oils, 2023, 36(7): 114−118.

[19] 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. Development and process optimization of low-GI rice fermented milk [J]. China Dairy Industry, 2022, 50(11): 58−64.

[20] JAEGER SR, CARDELLO AV, 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.

[21] 李文斐, 张磊, 宋宇轩, 等. 绵羊、山羊和牛乳的营养成分比较分析[J]. 食品工业科技, 2020, 41(24): 286−291.
LI WF, ZHANG L, SONG YX, *et al*. Comparative analysis of nutritional components in sheep, goat and cow milk [J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(24): 286−291.

[22] 王卉, 洋洋, 乌有娜, 等. 酸马奶片的营养成分分析与评价[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(15): 224−230.
WANG H, YANG Y, WU YN, *et al*. Analysis and evaluation of nutritional components in fermented mare's milk tablets [J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(15): 224−230.

[23] TAJABADI N, BARADARAN A, EBRAHIMPOUR A, *et al*. Overexpression and optimization of glutamate decarboxylase in *Lactobacillus plantarum* Taj-Apis 362 for high gamma-aminobutyric acid production [J]. Microbial Biotechnology, 2015, 8(4): 623−632.

[24] HOU D, TANG J, FENG Q, *et al*. Gamma-aminobutyric acid (GABA): A comprehensive review of dietary sources, enrichment technologies, processing effects, health benefits, and its applications [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2023, 64(24): 8852−8874

[25] 陈倩倩, 王金荣, 王朋, 等. 中链脂肪酸的生物学功能及其在动物生产中的应用研究进展[J]. 中国畜牧杂志, 2022, 58(2): 41−47.
CHEN QQ, WANG JR, WANG P, *et al*. Biological functions of medium-chain fatty acids and their application in animal production: A research progress [J]. Chinese Journal of Animal Science, 2022, 58(2): 41−47.

[26] 张磊, 刘晓瑞, 李文斐, 等. 东佛里生绵羊奶的常规营养成分和脂肪酸分析[J]. 家畜生态学报, 2021, 42(7): 24−27.
ZHANG L, LIU XR, LI WF, *et al*. Analysis of conventional nutrients and fatty acids in East Friesian sheep milk [J]. Journal of Domestic Animal Ecology, 2021, 42(7): 24−27.

[27] 高伟, 吕登宇, 苗利娟, 等. 高油酸花生品种脂肪及脂肪酸积累动态分析[J]. 中国油料作物学报, 2023, 45(3): 629−636.
GAO W, LV DY, MIAO LJ, *et al*. Dynamic analysis of fat and fatty acid accumulation in high-oleic acid peanut varieties [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2023, 45(3): 629−636.

[28] ZHANG G, SUN J, YANG J, *et al*. Unlocking the mystery of Tibetan yak butter and its byproducts: Processing, physicochemical characteristics, functional benefits, and applications [J]. Trends in Food Science & Technology, 2024, 147: 104484.

[29] MARANGONI F, AGOSTONI C, BORGHI C, *et al*. Dietary linoleic acid and human health: Focus on cardiovascular and cardiometabolic effects [J]. Atherosclerosis, 2020, 292: 90−98.

[30] TERRY AR, HAY N. Emerging targets in lipid metabolism for cancer therapy [J]. Trends in Pharmacological Sciences, 2024, 45(6): 537−551.

[31] KESER G, OZCAN T. Cross-over fermentation dynamics and proteomic properties of acid gels with indigenous *Lactobacillus* spp. isolated from cheeses [J]. Food Microbiology, 2024, 128: 104700.

[32] YOON S, AHN D, HWANG JY, *et al*. Linoleic acid exerts antidiabetic effects by inhibiting protein tyrosine phosphatases associated with insulin resistance[J]. Journal of Functional Foods, 2021, 83: 104532.

[33] FAN N, FUSCO JL, ROSENBERG DW. Antioxidant and anti-inflammatory properties of walnut constituents: Focus on personalized cancer prevention and the microbiome [J]. Antioxidants, 2023, 12(5): 982.

[34] JEON SH, SEONG HJ, KIM H, *et al*. Improvement of Branched-chain amino acid production by isolated high-producing protease from *Bacillus amyloliquefaciens* NY130 on isolated soy/whey proteins and their muscle cell protection [J]. Food Chemistry, 2024, 450: 139327.

(责任编辑：韩晓红　蔡世佳)