

祝焯媛, 赵钢, 王爱莉. 新型燕麦酸奶制作工艺及其理化性质分析 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(15): 184-192. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021100082

ZHU Yeyuan, ZHAO Gang, WANG Aili. Processing Technology of A New Type of Oat Yogurt and Its Physical and Chemical Properties Analysis[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(15): 184-192. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021100082

· 工艺技术 ·

新型燕麦酸奶制作工艺及其理化性质分析

祝焯媛^{1,2}, 赵 钢^{1,2}, 王爱莉^{1,2,*}

(1. 成都大学食品与生物工程学院, 四川成都 610106;

2. 农业部杂粮加工重点实验室, 四川成都 610106)

摘要:以燕麦乳及复原乳为原料, 市售酸奶发酵菌种为发酵剂, 开发一种新型燕麦酸奶。以感官评分及酸度为指标, 通过单因素实验探究燕麦乳与复原乳的复配比、菌种添加量、发酵时间、发酵温度 4 个因素对燕麦酸奶发酵效果的影响。在单因素实验的基础上采用正交试验确定燕麦酸奶的最优发酵工艺, 并对燕麦酸奶的基本理化指标包括蛋白质、脂肪、氨基酸、酸度、pH 进行测定分析, 通过 ABTS 和 DPPH 自由基清除能力分析燕麦酸奶的抗氧化活性, 通过气质联用法测定燕麦酸奶中风味物质。结果表明, 燕麦酸奶的最优发酵工艺为: 燕麦乳/复原乳为 2:1, 发酵菌种接种量为 0.2%, 发酵时间 9 h, 发酵温度 34 ℃。在此工艺条件下制得的燕麦酸奶呈均匀的米白色, 口感酸甜适中, 富含燕麦清香。GC-MS 共检测出燕麦酸奶 36 种香气成分, 主要为酯类、酸类和醛类。与市售酸奶相比, 燕麦酸奶的蛋白质含量与其接近但脂肪含量只有其 60%, 且抗氧化活性及甘氨酸和精氨酸含量显著提高 ($P < 0.05$), 更适合减肥人群食用。

关键词:燕麦, 燕麦乳, 燕麦酸奶, 抗氧化活性, 风味物质, 理化性质

中图分类号: TS252.54

文献标识码: B

文章编号: 1002-0306(2022)15-0184-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021100082

本文网刊:



Processing Technology of A New Type of Oat Yogurt and Its Physical and Chemical Properties Analysis

ZHU Yeyuan^{1,2}, ZHAO Gang^{1,2}, WANG Aili^{1,2,*}

(1. School of Food and Biological Engineering, Chengdu University, Chengdu 610106, China;

2. Key Laboratory of Multigrain Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Chengdu 610106, China)

Abstract: A new type of oat yogurt was developed with oat milk and reconstituted milk as raw materials and commercial yogurt fermentation strains as starter. Sensory score and acidity were served as indexes, the effects of oat milk and reconstituted milk ratio, amount of fermentation strains, fermentation time, and fermentation temperature on the quality of oat yogurt were studied by single factor experiment. Based on the results of single factor experiment, the optimal fermentation process of oat yogurt was determined by orthogonal test. The basic physical and chemical indexes of oat yogurt including protein, fat, amino acid, acidity, pH were analyzed. The antioxidant activity of oat yogurt was evaluated by ABTS and DPPH methods, and the flavor compounds in oat yogurt were determined by GC-MS. The results showed that the optimal fermentation process of oat yogurt was as follows: Oat milk/reconstituted milk was 2:1, the inoculation amount of fermentation bacteria was 0.2%, the fermentation time was 9 hours, and the fermentation temperature was 34 ℃. The oat yogurt produced by optimal fermentation process presented uniform creamy-white, moderate sour and sweet taste and rich in oat fragrance. Thirty-six aroma components of oat yogurt were detected by GC-MS, including esters, acids and aldehydes. Protein content of oat yogurt was close to commercial yogurt, but the fat content of oat yogurt was only 60% of commercial yogurt. In addition, the antioxidant activity and contents of glycine and arginine of oat yogurt were significantly higher than commercial yogurt ($P < 0.05$). Therefore, oat yogurt has higher nutritional value for public, especially for obesity.

收稿日期: 2021-10-13

基金项目: 国家自然科学基金 (32102125); 四川省科技计划项目 (2019YFS0526)。

作者简介: 祝焯媛 (1997-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 杂粮加工, E-mail: zhuyeyuan0403@163.com。

* 通信作者: 王爱莉 (1984-), 女, 博士, 特聘副研究员, 研究方向: 杂粮加工产品和食品感官风味, E-mail: alicewang124@163.com。

Key words: oat; oat milk; oat yogurt; antioxidant activity; flavour compounds; physicochemical properties

燕麦(*Avena sativa* L.)为禾本科燕麦属植物,是人类八大粮食作物之一,是最好的全价营养谷类食品之一。燕麦是一种世界性栽培作物,在中国已有 2100 多年的种植历史^[1]。燕麦的营养价值极高,富含维生素、蛋白质、脂肪酸、膳食纤维、酚酸等多种营养成分,还含有 β -葡聚糖、亚油酸、皂苷、生物碱等多种生物活性成分,其中, β -葡聚糖是公认的具有降血脂功效的成分。此外燕麦还具有抗氧化、降血糖、保护肠胃、促进消化、减肥、增强免疫力、预防心脏病、抗肿瘤等功效^[2-8]。近年来,随着人们对燕麦健康作用的深入认识,燕麦越来越受到消费者的青睐^[9]。

燕麦乳是以燕麦为原料,通过酶解工艺制作而成的一种饮品,其富含蛋白质、维生素等营养成分,营养丰富、口感细腻,富有燕麦的清香。酸奶是以牛乳为原料,加入白糖、发酵剂等物质在一定条件下发酵得到的一种发酵型乳制品^[10]。酸奶在乳制品市场中占有重要地位,具有促消化、人体更易吸收、营养丰富、酸甜可口等优点,有较高的营养和保健价值^[11-14]。酸奶按制作工艺不同可分为凝固型酸奶、搅拌型酸奶和饮用型酸奶^[15]。酸奶中除含有丰富的维生素、矿物质外还含有大量的乳酸及有利于人体肠道健康的活性乳酸菌,可调节肠道微生态,刺激抗体免疫作用,具有潜在的治疗作用^[16]。

燕麦酸奶以燕麦与牛奶为原料发酵制得,兼具燕麦原料与牛奶的营养成分,具有一定的保健功能。现有的燕麦酸奶研究主要集中在将燕麦以燕麦粉或燕麦籽粒的形式直接与其他原料如水果、薯类复配后,加入牛奶中进行酸奶发酵。如紫薯燕麦复合酸奶^[17]、凝固型椰果燕麦酸奶^[18]、燕麦膳食纤维酸奶^[19]等。添加燕麦粉制作的燕麦酸奶中燕麦粉的添加量仅有 3% 左右,缺乏以燕麦为主要原料开发燕麦酸奶的相关研究。以燕麦籽粒及牛奶为原料生产的燕麦酸奶制品虽然增加了消费者对燕麦的咀嚼感体验,但燕麦籽粒在酸奶中存在分布不均匀、产生沉淀、口感较硬、不利于消化等问题,对老人及儿童而言不适宜食用。

本研究以实验室前期开发的燕麦乳为主要原料,加入一定比例的复原牛乳并接种酸奶发酵剂,通过恒温发酵制成燕麦酸奶并对其感官风味及营养成分进行分析测定。本课题旨在丰富燕麦精深加工产品的种类,提高燕麦的综合利用率,为燕麦深加工及新型功能食品的开发提供理论依据和实践经验。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

燕麦米(十月稻田燕麦米) 沈阳信昌粮食贸易有限公司;耐高温 α -淀粉酶(5 万活力,20000 U/mL)、糖化酶(5 万活力,150000 U/g) 河南万邦实业有限

公司;酸奶发酵剂 善恩康生物科技(苏州)有限公司;蒙牛全脂甜奶粉、酸奶 市售;氢氧化钠、石油醚、无水乙醇(均为分析纯) 成都科隆化学品有限公司;牛血清蛋白 南京奥多福尼生物科技有限公司;考马斯亮蓝 G250(BR) 成都科隆化学品有限公司。

FA2204 电子分析天平 力辰科技宁波市鄞州华丰电子仪器厂;MG38CB-AA 美的电烤箱 广东美的厨房电器制造有限公司;RD-700T 荣事达豆浆机 合肥荣事达小家电有限公司;DZKW-S-4 电热恒温水浴锅 北京市永光明医疗仪器有限公司;SZ-1 旋涡混合器 济南瑞莱铂智能科技有限公司;AllegraX-30R 高速冷冻离心机 贝克曼库尔特商贸(中国)有限公司;FiveEasy Plus pH 计 梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;Biotek synergy HTX 酶标仪 BioTek Instruments, Inc 公司;SB-5200DT 超声波清洗机 宁波新芝生物科技股份有限公司;SZT-06A 脂肪测定仪 苏州市天威仪器有限公司;7890A-5975C 气相色谱-质谱联用仪 美国 Agilent 公司;SPME 手柄、65 μm DVB/CAR/PDMS 萃取头 美国 Sigma-Aldrich 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 燕麦酸奶工艺流程及操作要点 燕麦→烘烤→浸泡→糊化→液化→过滤→糖化→燕麦乳→复配(复原乳)→灭菌→接种→发酵→冷藏后熟→燕麦酸奶

1.2.1.1 燕麦乳制备 操作要点^[20-22]:烤箱上下火 180 $^{\circ}\text{C}$,烘烤燕麦米 20 min,烘烤前预热,期间不时翻动燕麦,防止烤焦;烘烤后加入料液比(重量比 g/g) 1:4 的凉开水浸泡 12 h;将浸泡好的原料及凉开水一起用荣事达豆浆机湿豆模式打浆;燕麦浆加入 0.05% 的耐高温 α -淀粉酶,80 $^{\circ}\text{C}$ 水浴 50 min 进行液化。将液化后的燕麦浆过 80 目筛,取滤液加入 0.11% 糖化酶 60 $^{\circ}\text{C}$ 水浴 70 min 进行糖化,得到燕麦乳。

1.2.1.2 燕麦酸奶制备 操作要点:将蒙牛全脂甜奶粉一袋(25 g)加入 160 mL 50 $^{\circ}\text{C}$ 的温开水中,水合 15 min;燕麦乳与复原乳按一定比例混合后 95 $^{\circ}\text{C}$ 、10 min 杀菌,杀灭有害微生物;灭菌后加入发酵剂进行酸奶发酵,将发酵好的燕麦酸奶放入 4 $^{\circ}\text{C}$ 冷藏 12 h。

1.2.2 燕麦酸奶发酵工艺优化

1.2.2.1 燕麦酸奶单因素实验 将燕麦原料打浆后,以 0.05% 淀粉酶,0.11% 糖化酶进行液化、糖化后过滤制得的燕麦乳与复原乳按 1:1 混合接种酸奶发酵剂,在菌种添加量为 0.2%,发酵温度为 37 $^{\circ}\text{C}$,发酵时间为 9 h 的基础上,以感官评价及酸度为指标,考察燕麦乳与复原乳的比例(3:1、2:1、1:1、1:2、1:3)、菌种添加量(0.11%、0.14%、0.17%、0.2%、0.23%)、发酵时间(6、7、8、9、10 h)、发酵温度(31、34、37、

40、43℃)4个因素对发酵效果的影响。

1.2.2.2 燕麦酸奶正交试验 在单因素实验的基础上设计4因素3水平正交试验,以感官评价为指标确定最佳发酵工艺条件,正交试验因素与水平见表1。

表1 正交试验因素与水平
Table 1 Factors and levels of orthogonal test

| 水平 | A配比 燕麦乳:复原乳 | B菌种接种量 (%) | C发酵时间 (h) | D发酵温度 (℃) |
|----|----------------|---------------|--------------|--------------|
| 1 | 1:2 | 0.14 | 7 | 34 |
| 2 | 1:1 | 0.17 | 8 | 37 |
| 3 | 2:1 | 0.20 | 9 | 40 |

1.2.3 燕麦酸奶感官评定 选取20名食品专业相关人员(男女各10人),对其进行相关培训后,按评价标准进行打分,评分标准见表2^[23-24]。

表2 燕麦酸奶感官评分标准
Table 2 Sensory scoring standard of oat yogurt

| 项目 | 评分标准 | 感官评分(分) |
|---------------|-------------------------|---------|
| 色泽 (20分) | 颜色异常 | 0~5 |
| | 色泽不均匀、浅灰色 | 6~10 |
| | 色泽不均匀、呈米白色 | 11~15 |
| | 色泽均匀一致、呈米白色 | 16~20 |
| 组织状态 (30分) | 有杂质、凝乳裂纹、有气泡、乳清析出严重 | 0~5 |
| | 凝乳组织粗糙、有裂纹、有气泡、乳清析出 | 6~10 |
| | 凝乳均匀较细腻、表面光滑、无气泡、少量乳清析出 | 11~20 |
| | 凝乳均匀细腻、表面光滑、无气泡、无乳清析出 | 21~30 |
| 风味 (20分) | 风味异常 | 0~5 |
| | 无燕麦味、仅有酸奶味 | 6~10 |
| | 微弱的燕麦味、纯正的酸奶味 | 11~15 |
| | 浓郁的燕麦味、纯正的酸奶味 | 16~20 |
| 口感 (30分) | 口感异常 | 0~5 |
| | 口感粗糙、有颗粒、酸味过度 | 6~10 |
| | 口感较细腻润滑、酸甜适中 | 11~20 |
| | 口感细腻润滑、酸甜适中 | 21~30 |

1.2.4 燕麦酸奶理化指标

1.2.4.1 燕麦酸奶微生物指标 乳酸菌: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》测定。

大肠杆菌: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》测定。

1.2.4.2 燕麦酸奶基本理化指标测定 酸度:参照GB 5009.239-2016《食品安全国家标准 食品酸度的测定》测定。

pH:本实验采用电位分析法(pH计)对燕麦酸奶的pH测定。

蛋白质含量:采用考马斯亮蓝G-250法,取120 U/mL的牛血清蛋白0.20、0.40、0.60、0.80、1.00 mL加入蒸馏水稀释至1 mL,分别加入5 mL考马斯亮蓝G-250溶液,混均后于(25±1)℃水浴10 min,于595 nm处测定,同时以1 mL蒸馏水做空

白对照,制作标曲。将1 mL样品稀释100倍,加入5 mL考马斯亮蓝G-250溶液并比色测定,代入标曲中($y=0.0016x+0.06$, $R^2=0.9986$)计算未知样品蛋白质浓度。

脂肪:参照GB 5009.6-2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》测定。

氨基酸:参照GB 5009.124-2016《食品安全国家标准 食品中氨基酸的测定》测定。

1.2.5 抗氧化活性分析

1.2.5.1 样品前处理 燕麦米烘干至恒重后粉碎,过60目筛,称取1 g加入9 mL无水乙醇,1200 W,25℃超声提取15 min后室温13000 r/min离心10 min,取上清液至西林瓶中4℃冷藏待测。

燕麦乳、燕麦酸奶、市售酸奶等,称取1 g加入9 mL无水乙醇,SZ-1旋涡混合器旋涡振荡10 s混匀,后续步骤同上。

1.2.5.2 ABTS自由基清除率的测定 取2 mL ABTS测定液,加入1 mL样品离心上清液,混匀后暗反应10 min,在734 nm波长处测吸光值 A_a ;取1 mL无水乙醇与ABTS测定液反应测定吸光值 A_b ^[25-29]。

ABTS自由基清除率计算公式如下:

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

式中: A_a 为ABTS测定液与样品溶液混合液的吸光值; A_b 为ABTS测定液与无水乙醇溶液混合液的吸光值。

1.2.5.3 DPPH自由基清除率的测定 取2 mL DPPH溶液,加入2 mL样品离心上清液,混匀后暗反应30 min,在517 nm波长处测定吸光值 A_a ,取2 mL无水乙醇与DPPH测定液反应测定吸光值 A_b ,2 mL无水乙醇与2 mL样品溶液混匀后测定吸光值 A_c ^[25-29]。

DPPH自由基清除率计算公式如下:

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

式中: A_a 为DPPH测定液与样品溶液混合液的吸光值; A_b 为DPPH测定液与无水乙醇溶液混合液的吸光度值; A_c 为样品溶液与无水乙醇溶液混合液的吸光值。

1.2.6 燕麦酸奶风味物质分析

1.2.6.1 样品准备 称取10 g样品于40 mL顶空瓶中,加入10 mL水、3 g氯化钠和转子,在80℃条件下平衡15 min。将PDMS固相微萃取头插入样品瓶中吸附40 min,再插入气相色谱手动进样口,解吸5 min,使SPME纤维头涂膜吸附的挥发性成分在高温下迅速热解析,即可通过GC-MS进行分析鉴定。

1.2.6.2 仪器条件 采用SPME-GC/MS分析^[30],GC条件:使用HP-5ms弹性毛细管柱(30 m×0.25 mm×

0.25 μm); 程序升温: 柱初温 40 °C, 保持 2 min; 然后以 5 °C/min 升至 160 °C, 保持 1 min; 再以 5 °C/min 升至 260 °C, 保持 5 min; 进样口温度 250 °C; 载气: He, 流量 1.0 mL/min; 解析温度 250 °C, 解吸时间 5 min, 不分流模式进样。

MS 条件: 电离方式为电子电离(electron ionization, EI)源; 电子能量 70 eV; 传输线温度 290 °C; 离子源温度 230 °C; 四极杆温度 170 °C; 扫描方式: 全扫描; 质量扫描范围 m/z: 35~350 amu; 发射电流 34.6 μA; 检测电压 100 V。

1.2.6.3 定性定量方法 定性: 取 C₇~C₃₀ 的正构烷烃, 按样品检测同样方法进行分析。记录每个正构烷烃标准品出峰的保留时间, 采用保留指数的线性升温公式: $RI=100Z+100 \times [tR(x)-tR(Z)]/[tR(Z+1)-tR(Z)]$ 计算各挥发性组分的 RI 值, 式中 x 表示待分析的化合物; Z 表示正构烷烃的碳原子数, 且 $tR(Z) < tR(x) < tR(Z+1)$ 。RI 参考值通过 NIST 质谱库检索。

用计算机携带 Xcalibur 工作站美国国家标准技术研究所(national institute of standards and technology)NIST 08 MS 数据库检索, 人工辅助解析图谱。

定量: 通过面积归一化法求得各种挥发性风味组分在样品中的百分含量。

1.3 数据处理

所有实验均重复 3 次, 采用系统统计软件 SPSS23.0 进行统计分析, 结果以平均值±标准差 ($\bar{x} \pm s$) 表示, 采用 Origin2018 作图。

2 结果与分析

2.1 燕麦酸奶发酵工艺的单因素实验

2.1.1 燕麦乳与复原乳不同配比对燕麦酸奶品质的影响 由图 1 可知, 燕麦乳与复原乳对比对燕麦酸奶品质的影响较大, 直接影响燕麦酸奶的发酵程度。随着复原乳加入比例的提高, 发酵出的燕麦酸奶的酸度逐渐上升, 奶味明显但燕麦风味越来越弱, 感官评分呈先上升后下降的趋势。燕麦乳加入比例的多少直接影响燕麦酸奶中燕麦风味的浓度。但当燕麦乳占比过多, 如燕麦乳: 复原乳为 3:1 时, 酸度仅为 40.97°T 且组织质地稀薄, 感官评分也仅为 40 分。

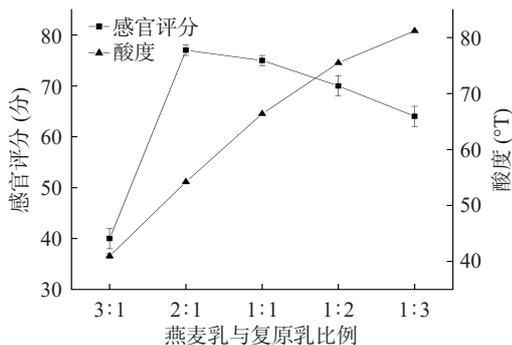


图 1 燕麦乳与复原乳不同对比对燕麦酸奶品质的影响
Fig.1 Effects of different proportions of oat milk and reconstituted milk on the quality of oat yogurt

当燕麦乳和复原乳的比例为 2:1 时, 感官评分最高为 77 分, 此时的燕麦酸奶酸度为 54.21°T, pH 为 4.05, 发酵的酸奶酸度适中且具有燕麦独特的风味, 因此, 适宜复配比选择 2:1 最合适, 选择 2:1、1:1、1:2 三个复配比进行正交试验。

2.1.2 菌种添加量对燕麦酸奶品质的影响 菌种添加量对燕麦酸奶品质的影响结果见图 2。由图 2 可知, 在菌种添加量为 0.11%~0.23% 时, 随着菌种添加量的添加, 牛奶中的乳糖充分发酵成乳酸, 燕麦酸奶的酸度呈递增趋势。在实验中发现, 菌种添加量的对酸度的影响不大, 但当菌种添加量达到 0.23% 时, 燕麦酸奶过于粘稠, 风味不足, 且乳清析出严重。酸奶感官评分先增高再降低, 在菌种添加量为 0.20% 时, 酸度 52.84°T, pH 为 4.08, 感官评分达到最高 77 分。因此, 菌种添加量 0.20% 为最佳, 选择菌种添加量 0.14%、0.17%、0.2% 进行正交试验。

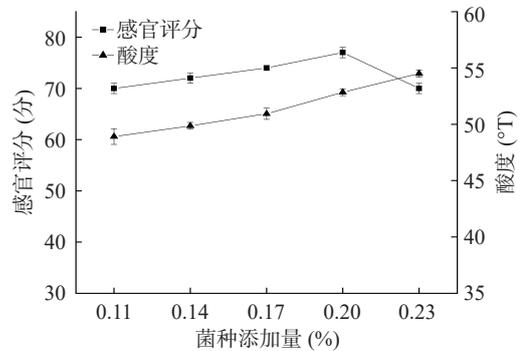


图 2 菌种添加量对燕麦酸奶品质的影响
Fig.2 Effect of strain addition on the quality of oat yogurt

2.1.3 发酵时间对燕麦酸奶品质的影响 由图 3 可知, 随着发酵时间的增加, 燕麦酸奶的酸度逐渐增高, 同时感官评分也呈递增趋势, 燕麦酸奶的感官评分在发酵时间为 9 h 时达到最高, 此时酸度 54.71°T, pH 为 4.04。发酵时间过短时, 燕麦酸奶酸度低, 发酵程度不高, 组织状态没有达到最佳状态, 风味口感不佳。发酵时间为 9 h 时, 燕麦酸奶组织均均匀细腻, 少量乳清析出。发酵时间延长至 10 h, 燕麦酸奶过酸且乳清析出严重, 形成不好的风味, 感官评分极低。因此, 9 h 为最优发酵时间, 选择感官评分较高,

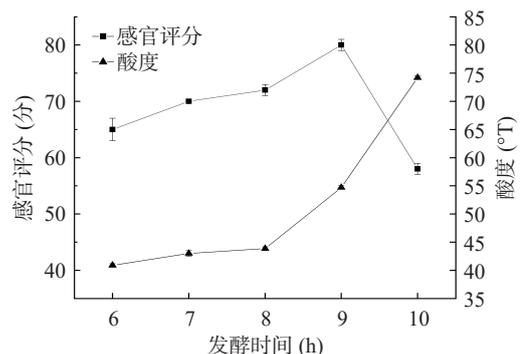


图 3 发酵时间对燕麦酸奶品质的影响
Fig.3 Effect of fermentation time on the quality of oat yogurt

酸度适中的 7、8、9 h 进行正交试验。

2.1.4 发酵温度对燕麦酸奶品质的影响 发酵温度对燕麦酸奶品质的影响见图 4。由图 4 可知,在发酵温度为 34~43 ℃ 区间内,燕麦酸奶酸度呈递增趋势,感官评分先增加再降低,在发酵温度为 37 ℃ 发酵的燕麦酸奶感官评分最高,同时 37 ℃ 也是发酵菌种的最适生长温度。34 和 40 ℃ 时,感官评分相差不大。发酵温度低时,酸奶的风味形成相对缓慢,需要的发酵时间相对较长。发酵温度过高时,发酵速度过快,还没来得及良好的反应形成风味物质,酸奶品质下降。因此,37 ℃ 为燕麦酸奶的最佳发酵温度。

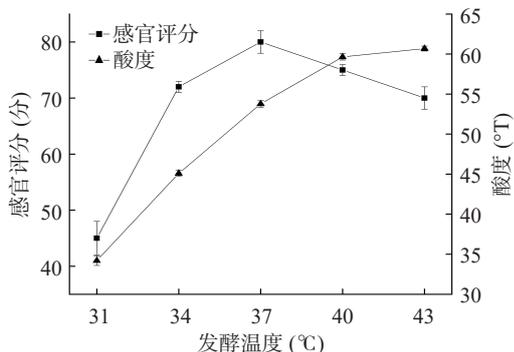


图 4 发酵温度对燕麦酸奶品质的影响

Fig.4 Effect of fermentation temperature on the quality of oat yogurt

2.2 燕麦酸奶制备工艺优化正交试验

燕麦酸奶工艺优化正交试验结果见表 3。由极差分析可知, $R_A > R_B > R_C > R_D$, 影响燕麦酸奶感官评价的主次因素依次为燕麦乳与复原乳的配比、菌种添加量、发酵时间、发酵温度。方差分析结果见表 4, 由表 4 可知,复配比、菌种添加量和发酵时间对试验结果有极显著影响 ($P < 0.01$), 发酵温度对试验结果有显著影响 ($P < 0.05$)。燕麦酸奶工艺条件优化实验的最优方案组合为 $A_3B_3C_3D_1$, 最优工艺条件为: 燕麦乳: 复原乳 2:1; 菌种接种量 0.2%; 发酵时间 9 h; 发酵温度 34 ℃。在此工艺条件下进行燕麦酸奶的制

表 3 正交试验设计及结果

Table 3 The orthogonal test design and results

| 实验号 | A | B | C | D | 感官评分(分) |
|-------|-------|-------|-------|-------|---------|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 67.82 |
| 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 71.43 |
| 3 | 1 | 3 | 3 | 3 | 72.97 |
| 4 | 2 | 1 | 2 | 3 | 68.72 |
| 5 | 2 | 2 | 3 | 1 | 71.51 |
| 6 | 2 | 3 | 1 | 2 | 70.12 |
| 7 | 3 | 1 | 3 | 2 | 73.35 |
| 8 | 3 | 2 | 1 | 3 | 73.06 |
| 9 | 3 | 3 | 2 | 1 | 77.41 |
| k_1 | 70.74 | 69.96 | 70.33 | 72.25 | |
| k_2 | 70.12 | 72.00 | 72.52 | 71.63 | |
| k_3 | 74.61 | 73.50 | 72.61 | 71.58 | |
| R | 4.49 | 3.54 | 2.28 | 0.66 | |

作,经感官评定后,感官评分为 84 分,制得的燕麦酸奶呈米白色,凝乳均匀,口感细腻润滑,酸甜适中,营养丰富,酸奶味纯正,富有燕麦的清香。

表 4 正交试验方差分析结果

Table 4 Variance analysis of orthogonal test results

| 来源 | 平方和 | df | 均方 | F | P值 |
|-----|---------|----|--------|--------|---------|
| A | 104.834 | 2 | 52.417 | 76.104 | 0.000** |
| B | 46.264 | 2 | 23.132 | 33.586 | 0.000** |
| C | 18.776 | 2 | 9.388 | 13.631 | 0.000** |
| D | 5.880 | 2 | 2.940 | 4.269 | 0.030* |
| 误差 | 12.398 | 18 | 0.689 | | |
| 总变异 | 188.152 | 26 | | | |

注: *表示差异显著 ($P < 0.05$); **表示差异极显著 ($P < 0.01$)。

2.3 燕麦酸奶理化指标

2.3.1 微生物指标 燕麦酸奶微生物指标如表 5, 未检测出致病菌。燕麦酸奶微生物指标符合 GB 19302-2010《食品安全国家标准 发酵乳》的要求。

表 5 燕麦酸奶微生物指标

Table 5 Microbial indexes of oat yogurt

| 微生物指标 | 乳酸菌 | 大肠杆菌 |
|-------------|------------------|--------|
| 活菌数(CFU/mL) | $>1 \times 10^6$ | <3.0 |

2.3.2 基本理化指标 根据正交试验得出的最佳工艺条件制备出的燕麦酸奶,测定其理化指标,得出结果如表 6 所示,各指标符合 T/WSJD 12-2020《植物蛋白饮料 植物酸奶》的要求。

表 6 燕麦酸奶基本理化指标

Table 6 Basic physical and chemical indexes of oat yogurt

| 基本理化指标 | 蛋白质(g/100 g) | 脂肪(g/100 g) | 酸度(°T) | pH |
|--------|--------------|-------------|--------|------|
| 燕麦酸奶 | 2.39 | 1.51 | 58 | 4.45 |

酸奶蛋白质含量的高低是酸奶质量的一个重要指标,蛋白质含量越高,营养越丰富。研究表明增加植物蛋白的膳食摄入,特别是用植物蛋白替代动物蛋白,尤其是肉蛋白和乳蛋白,可延缓衰老^[31]。本研究同时测定了燕麦米、燕麦乳及市售酸奶的蛋白质含量及脂肪含量,并与燕麦酸奶进行对比,结果见图 5。由图 5 可知,四种样品之间脂肪及蛋白质含量差异显著 ($P < 0.05$),燕麦乳与燕麦米相比,脂肪和蛋白质含量都显著降低 ($P < 0.05$)。在燕麦乳发酵成燕麦酸奶的过程中,由于复原乳的加入,燕麦酸奶中脂肪和蛋白质含量与燕麦乳相比有一定的上升。燕麦酸奶与市售酸奶相比,蛋白质含量只相差 0.31 g/100 g,脂肪含量只有其的 60%。且燕麦酸奶中的糖分完全来源于燕麦乳酶解过程中,淀粉分解出的还原糖,整个发酵过程中未添加任何外源糖分及甜味剂,口感自然,能量较低。

2.3.3 氨基酸含量分析 参照 GB 5009.124-2016《食品安全国家标准 食品中氨基酸的测定》方法测定燕

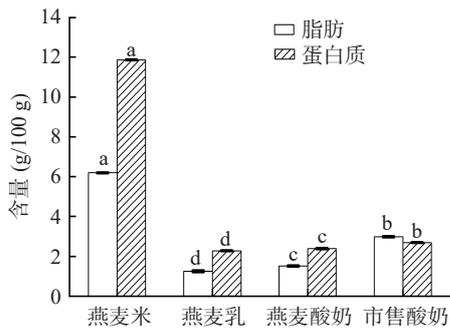


图 5 燕麦米、燕麦乳、燕麦酸奶及市售酸奶之间蛋白质及脂肪含量对比

Fig.5 Comparison of protein and fat content among oat rice, oat milk, oat yogurt and commercial yogurt

注: 不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

燕麦米、燕麦乳、燕麦酸奶及市售酸奶的氨基酸含量, 具体结果见表 7。燕麦酸奶中共检出 16 种氨基酸, 其总含量为 2.01 g/100 g, 比市售酸奶略低。燕麦酸奶的 16 种氨基酸中, 谷氨酸含量最高为 0.48 g/100 g, 甘氨酸与精氨酸含量显著高于市售酸奶($P < 0.05$)。研究表明甘氨酸与精氨酸不仅参加体内多种营养物质的合成和分解代谢, 还具有抗炎、抗氧化和免疫调节的作用。因此, 比起市售酸奶, 燕麦酸奶食用价值更高^[32-33]。

表 7 燕麦米、燕麦乳、燕麦酸奶及市售酸奶之间氨基酸含量对比

Table 7 Comparison of amino acid content among oat rice, oat milk, oat yogurt and commercial yogurt

| 氨基酸种类 | 燕麦米 (g/100 g) | 燕麦乳 (g/100 g) | 燕麦酸奶 (g/100 g) | 市售酸奶 (g/100 g) |
|-------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 天门冬氨酸 | 0.99±0.01 ^a | 0.16±0.00 ^c | 0.17±0.00 ^c | 0.21±0.01 ^b |
| 苏氨酸 | 0.42±0.00 ^a | 0.06±0.00 ^d | 0.08±0.00 ^c | 0.12±0.00 ^b |
| 丝氨酸 | 0.58±0.01 ^a | 0.09±0.00 ^d | 0.10±0.00 ^c | 0.14±0.00 ^b |
| 谷氨酸 | 2.64±0.01 ^a | 0.44±0.00 ^d | 0.48±0.00 ^c | 0.57±0.02 ^b |
| 甘氨酸 | 0.62±0.00 ^a | 0.09±0.00 ^b | 0.08±0.00 ^c | 0.05±0.00 ^d |
| 丙氨酸 | 0.59±0.01 ^a | 0.09±0.00 ^b | 0.09±0.00 ^b | 0.09±0.00 ^b |
| 缬氨酸 | 0.62±0.01 ^a | 0.10±0.00 ^d | 0.12±0.00 ^c | 0.15±0.01 ^b |
| 蛋氨酸 | 0.13±0.01 ^a | 0.02±0.00 ^d | 0.03±0.00 ^c | 0.06±0.00 ^b |
| 异亮氨酸 | 0.47±0.02 ^a | 0.08±0.00 ^c | 0.10±0.00 ^c | 0.13±0.01 ^b |
| 亮氨酸 | 0.92±0.01 ^a | 0.15±0.00 ^d | 0.18±0.00 ^c | 0.25±0.01 ^b |
| 酪氨酸 | 0.40±0.01 ^a | 0.02±0.00 ^d | 0.04±0.00 ^c | 0.11±0.00 ^b |
| 苯丙氨酸 | 0.65±0.02 ^a | 0.10±0.00 ^c | 0.11±0.00 ^c | 0.13±0.00 ^b |
| 赖氨酸 | 0.50±0.00 ^a | 0.07±0.00 ^d | 0.12±0.00 ^c | 0.21±0.01 ^b |
| 组氨酸 | 0.26±0.01 ^a | 0.05±0.00 ^d | 0.06±0.00 ^c | 0.08±0.00 ^b |
| 精氨酸 | 0.89±0.00 ^a | 0.13±0.00 ^b | 0.12±0.00 ^c | 0.09±0.00 ^d |
| 脯氨酸 | 0.58±0.00 ^a | 0.09±0.00 ^d | 0.15±0.00 ^c | 0.29±0.00 ^b |
| 总含量 | 11.26±0.6 ^a | 1.74±0.00 ^c | 2.01±0.00 ^c | 2.68±0.08 ^b |

注: 同行不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

2.4 抗氧化活性分析

燕麦酸奶的抗氧化活性的测定结果见图 6。由图 6 可知, 四种样品中燕麦米的 ABTS 自由基清除率最高, 为 45.30%±0.69%。燕麦酸奶的 DPPH 自由基清除率最高, 为 69.59%±0.15%。且燕麦酸奶的 ABTS 自由基清除率为 43.44%±1.85%, 仅次于燕麦

米。从燕麦乳到燕麦酸奶两种自由基的清除率均成上升趋势, 说明发酵有可能提高产品的抗氧化性, 燕麦酸奶表现出较高的自由基清除率, 具有良好的抗氧化活性。

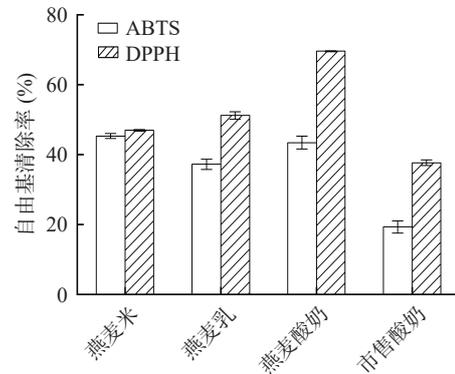


图 6 燕麦米、燕麦乳、燕麦酸奶及市售酸奶之间 ABTS 及 DPPH 自由基清除率对比

Fig.6 Comparison of ABTS and DPPH free radical scavenging rates among oat rice, oat milk, oat yogurt and commercial yogurt

2.5 燕麦酸奶风味物质分析

燕麦酸奶的风味物质种类丰富, 其特征风味是酮、酸、醛、醇、酯、烃等综合作用的结果。燕麦酸奶中各类挥发性成分种类及所占的相对含量如表 8 所示。共检测出 36 种香气成分, 其中包括 10 种酯类、8 种酸类、7 种醛类、2 种烃类、4 种酮类、2 种内酯、1 种酚类化合物、2 种其他化合物, 含量分别为 10.15%、61.12%、13.01%、3.17%、4.88%、1.15%、0.66%、2.2%。对燕麦酸奶风味贡献最大的是酸类化合物, 酸类会赋予酸奶在滋味上的爽口感及气味上的典型清爽香气。其中稀释后呈水果香气的正辛酸含量高达 28.07%。含量超过 1.5% 的组分还有: 干奶酪味的正己酸 (12.71%)、蜜蜡花香味的壬醛 (4.90%)、浓厚水果香味的正辛醛 (4.61%)、椰香味的邻苯二甲酸二乙酯 (4.21%)、月桂油、茶叶香的十二烷酸 (3.03%)、脂肪及椰子香的壬酸 (2.13%)、似花香味的右旋萜二烯 (2.11%)、苦杏仁味的苯甲醛 (1.51%)。市售酸奶的香气成分约为 20~40 种, 主要香气成分为乙醛和双乙酯^[34-36]。与市售酸奶相比, 燕麦酸奶中首次发现邻苯二甲酸二乙酯、苯甲醛、右旋萜二烯等挥发性成分, 此类挥发性组分赋予了燕麦酸奶独特的风味。

3 结论

本研究在酶解工艺制成的燕麦乳基础上, 与复原乳进行一定比例的复配并接种酸奶菌种恒温发酵, 开发出一种新型的燕麦酸奶。研究以感官评分和酸度为指标进行单因素及正交试验, 结果表明燕麦酸奶的最优发酵工艺条件为燕麦乳/复原乳 2:1, 菌种接种量为 0.2%, 发酵时间 9 h, 发酵温度 34 °C。此工艺条件下制得的燕麦酸奶呈米白色, 口感适中, 营养丰富, 富有燕麦的清香。用燕麦乳代替传统牛乳发酵制成的燕麦酸奶, 其蛋白质含量与市售酸奶相差不

表8 燕麦酸奶中主要风味物质种类及含量
Table 8 Types and contents of main flavor substances in oat yogurt

| 编号 | 组分 | 保留指数 | | 峰面积百分比(%) | 呈现风味 |
|----|-----------------|-------|-------|-----------|------------------------------|
| | | RI计算值 | RI参考值 | | |
| 1 | 2-甲基四氢呋喃-3-酮 | 801 | 809 | 1.25 | 老姆酒及面包风味 ^[37] |
| 2 | 甲基戊基甲酮 | 892 | 891 | 1.25 | 香蕉香及轻微药香 ^[38] |
| 3 | 2-壬酮 | 1089 | 1092 | 1.13 | 芸香气, 玫瑰、茶样风味 ^[38] |
| 4 | 甲基壬基甲酮 | 1294 | 1294 | 1.25 | 芸香油脂蜡香, 兼柑橘香 ^[39] |
| 5 | 2,2,4,6,6-五甲基庚烷 | 981 | 991 | 1.06 | 栗香绿茶 ^[40] |
| 6 | 右旋萜二烯 | 1018 | 1030 | 2.11 | 似花香气味 ^[41] |
| 7 | 正庚醛 | 902 | 901 | 0.68 | 刺激性果香 ^[39] |
| 8 | 苯甲醛 | 956 | 962 | 1.51 | 苦杏仁气味 ^[39] |
| 9 | 正辛醛 | 994 | 1003 | 4.61 | 浓厚果子味 ^[39] |
| 10 | 反-2-辛烯醛 | 1053 | 1080 | 0.29 | 青叶香气 ^[42] |
| 11 | 壬醛 | 1101 | 1104 | 4.90 | 蜜蜡花香 ^[38] |
| 12 | 癸醛 | 1201 | 1206 | 0.60 | 稀释后呈柑橘皮气味 ^[38] |
| 13 | 十一醛 | 1308 | 1307 | 0.42 | 玫瑰香气 ^[39] |
| 14 | 丙位己内酯 | 1365 | 1323 | 0.63 | 香豆素样香味 ^[38] |
| 15 | 丁位十二内酯 | 1712 | 1719 | 0.52 | 略有苦味 ^[43] |
| 16 | 戊二酸二甲酯 | 1137 | 1135 | 1.25 | — |
| 17 | 己二酸二甲酯 | 1244 | 1243 | 0.34 | — |
| 18 | 十二酸甲酯 | 1525 | 1526 | 1.11 | 花香 ^[39] |
| 19 | 邻苯二甲酸二乙酯 | 1595 | 1594 | 4.21 | 椰香 ^[39] |
| 20 | 十四酸甲酯 | 1727 | 1725 | 0.45 | 蜂蜜和鸢尾样香气 ^[38] |
| 21 | (Z)-十六烯酸甲酯 | 1899 | 1898 | 0.29 | — |
| 22 | 十六酸甲酯 | 1923 | 1926 | 1.46 | — |
| 23 | 油酸甲酯 | 2092 | 2091 | 0.41 | 略有臭味 ^[39] |
| 24 | 十八碳酸甲酯 | 2116 | 2128 | 0.16 | 略有臭味 ^[39] |
| 25 | 己二酸二异辛酯 | 2393 | 2398 | 0.47 | — |
| 26 | 正己酸 | 1004 | 990 | 12.71 | 乳酪气味 ^[39] |
| 27 | 正庚酸 | 1093 | 1078 | 0.92 | 油脂气味 ^[38] |
| 28 | 正辛酸 | 1195 | 1180 | 28.07 | 微弱的水果酸味 ^[38] |
| 29 | 壬酸 | 1283 | 1273 | 2.13 | 脂肪及椰子香味 ^[38] |
| 30 | 正癸酸 | 1382 | 1373 | 10.66 | 略有不愉快气味 ^[39] |
| 31 | 十二烷酸 | 1570 | 1568 | 3.03 | 月桂油、茶叶香气味 ^[39] |
| 32 | 十四酸 | 1269 | 1768 | 0.73 | 微弱的蜡香及奶香 ^[39] |
| 33 | 十六烷酸 | 1968 | 1968 | 2.87 | 几乎无味 ^[39] |
| 34 | 4-乙烯基-2-甲氧基苯酚 | 1318 | 1317 | 0.66 | — |
| 35 | 1,6-己内酰胺 | 1257 | 1259 | 1.30 | — |
| 36 | 2-正戊基呋喃 | 984 | 993 | 0.90 | 水果香气 ^[38] |

注: “—”表示暂未查到该物质的呈现风味。

大,但抗氧化活性与甘氨酸和精氨酸含量显著提高($P<0.05$),脂肪减少40%,燕麦酸奶更适合减肥人群食用,且制作成本较低。燕麦酸奶中的风味物质主要来源为酸类、酯类和醛类化合物,其中,赋予燕麦酸奶独特风味的特征香气为正辛酸(水果香)、邻苯二甲酸二乙酯(椰香味)、苯甲醛(苦杏仁、樱桃及坚果味)、右旋萜二烯(花香、柑橘香)。燕麦酸奶风味独特、营养丰富,有极大的食用价值及经济效益。燕麦酸奶的研制也为丰富市场上酸奶的种类,燕麦精深加工产品及新型功能食品的开发提供理论依据和实践经验。

参考文献

[1] 吴斌,郑殿升,严威凯,等.燕麦分子育种研究进展[J].植物遗传资源学报,2019,20(3):485-495. [WU B, ZHENG D S,

YAN W K, et al. Advances in molecular breeding of oats[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2019, 20(3): 485-495.]

[2] 田西,代以琴,杨梅,等.燕麦化学成分及其生物活性研究进展[J].食品工业科技,2020,41(11):353-362,368. [TIAN X, DAI Y Q, YANG M, et al. Research progress on chemical constituents and biological activities of oats[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(11): 353-362, 368.]

[3] BUTT M S, TAHIR-NADEEM M, KHAN M K I, et al. Oat: Unique among the cereals[J]. Eur J Nutr, 2008, 47(2): 68-79.

[4] QI B, YAN L, LU W, et al. Improving free, conjugated, and bound phenolic fractions in fermented oats (*Avena sativa* L.) with *Monascus anka* and their antioxidant activity[J]. Journal of Functional Foods, 2017, 32: 185-194.

[5] ANDERSON J W, STORY L, SIELING B, et al. Hypocholes-

- terolemic effects of oat-bran or bean intake for hypercholesterolemic men[J]. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 1984, 40(6): 1146–1150.
- [6] 张慧娟, 黄莲燕, 尹梦, 等. 燕麦多肽降血糖功能的研究[J]. 食品工业科技, 2017, 38(10): 360–363, 384. [ZHANG H J, HUANG L Y, YIN M, et al. Research on hypoglycemic function of oat peptides[J]. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 2017, 38(10): 360–363, 384.]
- [7] DEEPAK M, SHEWETA B, KHATKAR B S. Development of functional yoghurt via soluble fiber fortification utilizing enzymatically hydrolyzed guar gum[J]. *Food Bioscience*, 2016, 14: 28–33.
- [8] XIA Z, CHOLEWA J M, DARDEVET D, et al. Effects of oat protein supplementation on skeletal muscle damage, inflammation and performance recovery following downhill running in untrained collegiate men[J]. *Food & Function*, 2018, 9(9): 4720–4729.
- [9] ZIMONJA O, SVIHUS B. Effects of processing of wheat or oats starch on physical pellet quality and nutritional value for broilers[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2008, 149(3): 287–297.
- [10] 罗璠, 杨丽雪, 魏婕, 等. 不同原料乳对发酵酸奶品质的影响[J]. 西南民族大学学报(自然科学版), 2018, 44(1): 14–18. [LUO F, YANG L X, WEI J, et al. Effect of different raw milks on the quality of fermented yogurt[J]. *Journal of Southwest University for Nationalities (Natural Science Edition)*, 2018, 44(1): 14–18.]
- [11] GONZÁLEZ-GARCÍA S, CASTANHEIRA É G, CLÁUDIA DIAS A, et al. Environmental life cycle assessment of a dairy product: The yoghurt[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2013, 18(4): 796–811.
- [12] IRMA S R, WORAPOT S. Effects of fermentation and storage on bioactive activities in milks and yoghurts[J]. *Procedia Chemistry*, 2016, 18: 53–62.
- [13] ADOLFSSON O, MEYDANI S N, RUSSELL R M. Yogurt and gut function[J]. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 2004, 80(2): 245–256.
- [14] 田其英. 酸奶的研究进展[J]. 食品与发酵科技, 2013, 49(1): 91–94. [TIAN Q Y. Research Progress of the yogurt[J]. *Food and Fermentation Technology*, 2013, 49(1): 91–94.]
- [15] 许彪, 张冬洁, 李洪亮, 等. 酸奶发展的研究进展[J]. 农产品加工, 2019(12): 87–89. [XU M, ZHANG D J, LI H L, et al. Progress in research of active material from yoghurt[J]. *Farm Products Processing*, 2019(12): 87–89.]
- [16] 赵红, 庄亚飞, 鲁珊, 等. 酸奶、益生菌与肿瘤[J]. 肿瘤代谢与营养电子杂志, 2016, 3(3): 195–199. [ZHAO H, ZHUANG Y F, LU S, et al. Yogurt, probiotics and cancer[J]. *Electronic Journal of Metabolism and Nutrition of Cancer*, 2016, 3(3): 195–199.]
- [17] 袁云霞, 关随霞, 孙军杰, 等. 紫薯燕麦复合酸奶的研制[J]. 食品工业, 2020, 41(8): 86–90. [YUAN Y X, GUAN S X, SUN J J, et al. Development of purple potato and oat composite yoghurt[J]. *The Food Industry*, 2020, 41(8): 86–90.]
- [18] 陈亚蓝, 侯贺丽, 张华华, 等. 凝固型椰果燕麦酸奶的工艺研究[J]. 中国乳业, 2020(6): 75–79. [CHEN Y L, HOU H L, ZHANG H H, et al. Study on processing technology of set yogurt with coconut and oat[J]. *China Dairy*, 2020(6): 75–79.]
- [19] 王丽爽, 赵秀红. 燕麦膳食纤维酸奶的研制[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(3): 91–95. [WANG L S, ZHAO X H. Repara-tion of the dietary fiber oat yogurt[J]. *Food Research and Develop-ment*, 2017, 38(3): 91–95.]
- [20] 徐玉霞. 燕麦充气发酵饮料的研制[J]. 中国乳业, 2003(10): 26–27. [XU Y X. Development of an effervescent, fermented oat beverage[J]. *Journal of Zhengzhou College of Animal Hus-bandry Engineering*, 2003(10): 26–27.]
- [21] 王少君, 郭晓蒙, 马挺军. 燕麦浆的酶解工艺研究及感官评价分析[J]. 饮料工业, 2018, 21(3): 19–22. [WANG S J, GUO X M, MA T J. Study on enzymatic hydrolysis of oat pulp and its sensory evaluation[J]. *Beverage Industry*, 2018, 21(3): 19–22.]
- [22] 孟凡欢. 燕麦品种及成分对燕麦乳稳定性的影响[D]. 天津: 天津科技大学, 2017. [MENG F H. Effects of oat varieties and components on the stability of oat milk[D]. Tianjin: Tianjin Uni-versity of Science and Technology.]
- [23] 肖付刚, 刘巧红, 吴凡. 燕麦粉凝固型酸奶的研制[J]. 食品研究与开发, 2013(5): 38–40. [XIAO F G, LIU Q H, WU F. Pro-cessing of solidified yogurt adding with oat flour[J]. *Food Re-search and Development*, 2013(5): 38–40.]
- [24] 于楠楠, 张文莉, 戴晓娟, 等. 燕麦红茶酸奶加工工艺的研究[J]. 中国食品添加剂, 2019, 30(12): 125–130. [YU N N, ZHANG W L, DAI X J, et al. Study on processing of oats black tea yogurt[J]. *China Food Additives*, 2019, 30(12): 125–130.]
- [25] YU X, YANG M, DONG J L, et al. Comparative analysis of the antioxidant capacities and phenolic compounds of oat and buck-wheat vinegars during production processes[J]. *Journal of Food Sci-ence*, 2018, 83(3): 844.
- [26] 王荣荣, 张小雨, 张娇娇, 等. 燕麦苹果复合果醋发酵工艺优化及其抗氧化活性[J]. 中国酿造, 2019, 38(7): 145–150. [WANG R R, ZHANG X Y, ZHANG J J, et al. Optimiza-tion of fermentation process and antioxidant activity of oat-apple com-pound fruit vinegar[J]. *China Brewing*, 2019, 38(7): 145–150.]
- [27] 马佳慧. 发芽花生酸奶的研制及其抗氧化活性的研究[D]. 沈阳: 沈阳师范大学, 2020. [MA J H. Study on the development and antioxidant activity of sprouted peanut yogurt[D]. Shenyang: Shenyang Normal University, 2020.]
- [28] CHEICKNA D, HUI Z, CAMEL L, et al. *In-vitro* fermenta-tion by human fecal bacteria and bile salts binding capacity of phys-ical modified defatted rice bran dietary fiber[J]. *Food and Nutrition Sciences*, 2014, 5(12): 1114–1120.
- [29] 徐艳, 史田田. 紫薯葛根酸奶发酵工艺优化及其抗氧化性研究[J]. 中国酿造, 2018(6): 188–192. [XU Y, SHI T T. Fer-mentation technology and antioxidant activity of yogurt with purple potato and *Pueraria lobata*[J]. *China Brewing*, 2018(6): 188–192.]
- [30] CHUAN C, HYUN K J, SANG C K, et al. Determination of bioactive compounds in fermented soybean products using GC/MS and further investigation of correlation of their bioactivities[J]. *Journal of Chromatography B*, 2012, 880: 42–49.
- [31] ORTOLÁ R, STRUIJK E A, GARCÍA-ESQUINAS E, et al. Changes in dietary intake of animal and vegetable protein and un-healthy aging[J]. *The American Journal of Medicine*, 2020, 133(2): 231–239.

- [32] 杜瑞平, 张兴夫, 高氏, 等. 甘氨酸的免疫调节作用及其分子机制[J]. *动物营养学报*, 2015, 27(3): 663-670. [DU R P, ZHANG X F, GAO M, et al. Immunomodulatory effects of glycine and Its molecular mechanism[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2015, 27(3): 663-670.]
- [33] 张硕, 窦秀静. 精氨酸的营养生理功能及其对动物免疫调节作用的分析[J]. *中国动物保健*, 2021, 23(8): 96-97. [ZHANG S, DOU X J. Nutritional physiological function of arginine and its effect on animal immune regulation[J]. *China Animal Health*, 2021, 23(8): 96-97.]
- [34] 杨露西, 李强, 邓由飞, 等. 藜麦酸奶工艺及其品质研究[J]. *中国酿造*, 2019, 38(9): 201-206. [YANG L X, LI Q, DENG Y F, et al. Processing technology and quality of quinoa yoghurt[J]. *China Brewing*, 2019, 38(9): 201-206.]
- [35] 李广富, 陈伟, 范路平, 等. 灵芝功能成分酸奶营养品质与风味物质分析[J]. *食品科学*, 2015, 36(10): 168-173. [LI G F, CHEN W, FAN L P, et al. Nutritional quality and aroma components in yogurt supplemented with functional components of *Ganoderma lucidum*[J]. *Food Science*, 2015, 36(10): 168-173.]
- [36] 李彤, 彭珍, 熊涛. 乳酸菌发酵对复合豆乳饮料营养成分、香气成分及抗氧化活性的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2018, 44(4): 111-118. [LI T, PENG Z, XIONG T. Effects of lactic acid bacteria on nutritional components, aroma components and antioxidant activity of compound soybean milk[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2018, 44(4): 111-118.]
- [37] 刘晓庚, 陈优生. 香料 2-甲基四氢呋喃-3-酮的合成研究[J]. *食品科学*, 2005(5): 165-167. [LI X G, CHENG Y S. Study on synthesis of 2-Methyltetrahydrofuran-3-one from ethyl lactate and methyl acrylate[J]. *Food Science*, 2005(5): 165-167.]
- [38] 许戈文, 李布青, 邓超群, 等. 合成香料产品技术手册[M]. 北京: 中国商业出版社, 1996. [XU G W, LI B Q, DENG C Q, et al. Technical manual of synthetic flavor products[M]. Beijing: China Business Press, 1996.]
- [39] 马世昌, 杨子超, 张力楠, 等. 化学物质辞典[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1999. [MA S C, YANG Z C, ZHANG L N, et al. Dictionary of chemical substances[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1999.]
- [40] 尹洪旭, 杨艳芹, 姚月凤, 等. 粟香绿茶香气萃取方法优化及其芳香成分分析[J]. *茶叶科学*, 2018, 38(5): 518-526. [YIN H J, YANG Y Q, YAO Y F, et al. Optimization of aroma extraction and aroma component analysis on chestnut-like green tea[J]. *Journal of Tea Science*, 2018, 38(5): 518-526.]
- [41] 王文通, 江汉美, 轩菲洋. HS-SPME-GC-MS 分析莲须、莲子心挥发性成分[J]. *湖北农业科学*, 2020, 59(3): 137-140. [WANG W T, JIANG H M, XUAN F Y. Analysis of volatile components in *Nelumbinis stamen* and *Nelumbinis plumula* by HS-SPME-GC-MS[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2020, 59(3): 137-140.]
- [42] 叶剑峰, 陈恩治, 金涛. 反-2-辛烯醛的合成[J]. *香料香精化妆品*, 2004(3): 3-4, 20. [YE J F, CHEN E H, JIN T. Synthesis of trans-2-octenal[J]. *Flavour Fragrance Cosmetics*, 2004(3): 3-4, 20.]
- [43] 沈晓君, 张玉锋, 王媛媛, 等. 椰子脆片挥发性成分分析[J]. *食品工业*, 2020, 41(3): 327-331. [SHEN X J, ZHANG Y F, WANG Y Y, et al. Analysis of volatile compounds in coconut chips[J]. *The Food Industry*, 2020, 41(3): 327-331.]