

不同干燥方式山药粉对希腊式酸奶冷藏中品质及抗氧化活性的影响

马荣琨, 张中义, 程上珍

Effects of Yam Powder Produced by Different Drying Ways on the Quality and Antioxidant Activity of Greek Style Yogurt during Refrigeration

MA Rongkun, ZHANG Zhongyi, and CHENG Shangzhen

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024020041>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

去皮对山药粉理化性质和生物活性的影响

Effect of Peeling on Physicochemical Properties and Biological Activity of the Yam Powders

食品工业科技. 2019, 40(19): 18-23 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.19.004>

干燥方法对山药粉性质的影响

Effects of Drying Methods on Properties of Yam Flours

食品工业科技. 2020, 41(4): 62-66,113 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.04.012>

山药粉对面团特性和韧性饼干品质的影响

Effects of Yam Powder on the Properties of Dough and the Quality Characteristics of Biscuits

食品工业科技. 2020, 41(18): 193-198 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.18.031>

韧化处理对山药粉理化性质及结构的影响

Effect of Annealing on the Physicochemical Properties and Structure of Yam Flours

食品工业科技. 2020, 41(23): 20-24 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020020204>

湿热处理对山药粉理化及结构性质的影响

Effect of Heat Moisture Treatment on Physicochemical and Structural Properties of Yam Flour

食品工业科技. 2021, 42(7): 22-26 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020050238>

香蕉花多糖抗氧化活性及稳定性研究

Antioxidant Activity and Stability of Polysaccharide from Banana Flower

食品工业科技. 2024, 45(7): 100-107 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023050330>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

马荣琨, 张中义, 程上珍. 不同干燥方式山药粉对希腊式酸奶冷藏中品质及抗氧化活性的影响 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(2): 200–207. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024020041

MA Rongkun, ZHANG Zhongyi, CHENG Shangzhen. Effects of Yam Powder Produced by Different Drying Ways on the Quality and Antioxidant Activity of Greek Style Yogurt during Refrigeration[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(2): 200–207. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024020041

· 工艺技术 ·

不同干燥方式山药粉对希腊式酸奶冷藏中品质及抗氧化活性的影响

马荣琨^{1,2}, 张中义^{1,2}, 程上珍¹

(1. 郑州科技学院食品科学与工程学院, 河南郑州 450064;

2. 郑州市食品安全快速检测重点实验室, 河南郑州 450064)

摘要: 为研究不同干燥工艺(热风干燥、微波干燥及冷冻干燥)制得的山药粉对希腊式酸奶贮藏期间的品质稳定性和抗氧化活性的影响, 采用这三种山药粉分别替代 2% 的全脂乳粉制作希腊式酸奶, 测定其在 4 °C 贮藏 21 d 过程中的各项指标变化情况。结果表明: 随着贮藏时间的增加, 山药希腊式酸奶的酸度、硬度、内聚性、黏度、乳酸菌活菌数和多酚含量均有所提高, 固形物含量和持水性略有下降, 铁还原能力和 DPPH 自由基清除率基本处于平稳不变状态。与空白对照组相比, 三种山药粉均显著提高了希腊式酸奶的酸度、内聚性、黏度、多酚含量、铁还原能力和 DPPH 自由基清除率 ($P < 0.05$), 持水力和乳酸菌活菌数量有所提高, 总固形物含量显著降低 ($P < 0.05$), 而硬度值在贮藏 14 d 前相对较高, 在 21 d 时山药希腊式酸奶的硬度均低于空白对照组。冷藏过程中三种山药酸奶的固形物含量、硬度、内聚性、黏度等指标存在显著差异 ($P < 0.05$), 其中 Y3 组(冷冻干燥)固形物含量显著高于 Y1(热风干燥)、Y2 组(微波干燥) ($P < 0.05$), 硬度显著低于 Y1、Y2 组 ($P < 0.05$), 酸度、铁还原能力和 DPPH 自由基清除率略高于 Y1、Y2 组; Y3、Y2 组的内聚性和黏度显著高于 Y1 组 ($P < 0.05$)。综合分析可知, 三种山药粉中冷冻干燥山药粉更有利于改善希腊式酸奶品质和抗氧化性能。本研究为山药粉在希腊式酸奶中的应用提供了理论依据。

关键词: 山药粉, 希腊式酸奶, 干燥方式, 冷藏, 稳定性, 抗氧化活性

中图分类号: TS252.54

文献标识码: B

文章编号: 1002-0306(2025)02-0200-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024020041



本文网刊:

Effects of Yam Powder Produced by Different Drying Ways on the Quality and Antioxidant Activity of Greek Style Yogurt during Refrigeration

MA Rongkun^{1,2}, ZHANG Zhongyi^{1,2}, CHENG Shangzhen¹

(1. College of Food Science and Engineering, Zhengzhou Institute of Science and Technology, Zhengzhou 450064, China;

2. Zhengzhou Key Laboratory of Rapid Detection Technology of Food Safety, Zhengzhou 450064, China)

Abstract: To study the effect of yam powder produced by different drying processes (hot air, microwave, and freeze drying) on the quality stability and antioxidant activity of Greek style yogurt during storage, the three types of yam powder were used to replace 2% whole milk powder to make Greek style yogurt, and the changes of various indicators were determined during 21 d of storage at 4 °C. The results showed that with an increase in storage time, the indicators of Greek style yogurt, such as acidity, hardness, cohesion, viscosity, number of lactic acid bacteria, and polyphenol content, increased to some extent, the solid content and water retention decreased slightly, and the iron reduction capacity and 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) radical clearance rate were basically in a stable state. Compared to the blank (control) group, the

收稿日期: 2024-02-19

作者简介: 马荣琨 (1977-), 男, 硕士, 副教授, 研究方向: 发酵乳制品及其功能化, E-mail: mrk770@163.com。

three types of yam powder significantly increased the acidity, cohesion, viscosity, polyphenol content, iron reducing ability, and DPPH radical scavenging rate of Greek style yogurt ($P<0.05$), increased the water holding capacity and lactic acid bacteria count to some extent, but significantly reduced its total solid content ($P<0.05$). However, the hardness value of the yam Greek style yogurt was relatively high before 14 d of storage, and after 21 d of storage was lower than that of the blank (control) group. During refrigeration, the three types of yam yogurt exhibited notable disparities in various indicators, including solid content, hardness, cohesion, and viscosity ($P<0.05$). Notably, the solid content of the Y3 group (freeze drying) was significantly elevated compared to both the Y1 group (hot air drying) and the Y2 group (microwave drying) ($P<0.05$). Conversely, the hardness of the Y3 group was notably lower than that of the Y1 group and Y2 group ($P<0.05$). Furthermore, the Y3 group exhibited slightly superior values in acidity, iron reduction capacity, and DPPH radical clearance rate compared to the Y1 group and Y2 group. The cohesion and viscosity of the Y3 group and Y2 group were significantly greater than those of the Y1 group ($P<0.05$). Based on the comprehensive analysis, among the three types of yam powder, freeze-dried yam powder was more conducive to improving the quality and antioxidant performance of Greek style yogurt. This study would provide a theoretical basis for the application of yam powder in Greek style yogurt.

Key words: yam powder; Greek style yogurt; drying way; refrigeration; stability; antioxidant activity

希腊式酸奶,也称为浓缩酸奶,具有蛋白质含量高、脂肪和乳糖含量低、质地细腻、风味浓郁等特点^[1],深受国内外消费者喜爱。希腊酸奶的品质受加工技术和相关因素影响^[2-3]。传统的希腊酸奶采用纱布滤出发酵后酸奶中的乳清,以达到浓缩蛋白质的效果,其结构稳定,口感细腻顺滑,但生产效率低下,卫生安全得不到保证,酸奶品质易受到影响。现代的希腊酸奶生产工艺有两种:一种是采用先发酵,然后将大部分乳清分离,常用的方法为膜过滤和离心;另一种是在生产过程中添加蛋白粉和增稠剂的“非滤乳清工艺”^[4]。Uduwerella 等^[5]通过添加乳蛋白浓缩物来控制原料乳的总固体含量,制作的希腊酸奶具有更好的结构特性,并减少了乳清析出。Cota-López 等^[6]研究表明,添加 12.5 g/100 g 变性淀粉可显著降低希腊酸奶的乳清析出,同时增加了酸奶的稠度、硬度和抗性淀粉含量,而接受度上与市售酸奶没有显著差异。Kim 等^[7]在希腊酸奶中添加苹果渣浆后发现,希腊酸奶的抗氧化性能和消费者接受度均有所提高。Xu 等^[8]在发酵前对原料乳进行超声波预处理,改变了乳蛋白的结构特性和结合行为,并增强了发酵和后熟过程中酪蛋白在酸奶凝胶中的保留,减少了酸乳清析出。国内有关希腊式酸奶的研究主要集中于风味方面^[9-11],目前市场上销售的希腊式酸奶品种以原味、果蔬风味、谷物风味等为主,产品种类还不够丰富。

山药(*Dioscorea oppositifolia*),又称淮山、怀山药、山薯等,是一种一年或多年生草本植物的块茎,属于薯蓣科薯蓣属,为药食同源食物^[12]。山药富含淀粉、蛋白质、游离氨基酸、维生素等多种营养成分,并含有多糖、皂苷、尿囊素、多酚、蛋白肽、黄酮类物质等多种活性成分,具有降血糖、降血脂、抗氧化、抗衰老、免疫调节、抗肿瘤、保护神经系统、调节肠道菌群等功能特性^[13]。然而不同干燥工艺在一定程度上均影响着山药的营养成分和功能特性。真空冷冻干燥组山药的抗性淀粉、多糖、薯蓣皂苷、多酚、黄酮等均高于热风干燥组和微波干燥组,特征组分的

保留程度较好,山药微观结构为蜂窝状孔隙且相对平整,细胞较完整地保留了原始结构^[14]。多相态微波干燥工艺则使得山药块在复水性、质构和微观结构方面的性质与冷冻干燥样品相似^[15]。Li 等^[16]研究表明,热风干燥、微波干燥、远红外辐射干燥、真空干燥和微波真空干燥工艺对山药质量影响显著($P<0.05$),其中微波真空干燥山药具有良好的颜色,并保持了其生物活性成分。因此,山药干制品营养成分和功能特性的改变可能进一步影响其在食品中的应用效果。

近年来国内有关山药酸奶的研究主要集中于工艺方面^[17-19],山药酸奶贮藏品质方面的研究仅有山药山楂酸奶^[20],而有关山药希腊式酸奶贮藏品质方面的研究还未见报道。因此,本文将不同干燥工艺的山药粉添加到希腊式酸奶中,对其冷藏期间的品质进行评价,分析不同山药希腊式酸奶之间的理化特性差异,找出最佳的山药粉干燥工艺,为开发山药希腊式酸奶提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

铁棍山药粉 1#山药粉(热风干燥),宁波五仁健康科技有限公司,2#山药粉(微波干燥),杭州花姐食品有限公司,3#山药粉(真空冷冻干燥),西安心善生物科技有限公司,三种山药均产自焦作温县;全脂奶粉 内蒙古伊利实业集团股份有限公司;酪蛋白

四川省维克奇生物科技有限公司;白砂糖 广西梧州乐哈哈食品工业有限公司;嗜热链球菌、保加利亚乳杆菌 西安米先尔生物科技有限公司;MRS 琼脂培养基、MC 琼脂培养基 青岛高科园海博生物技术有限公司;没食子酸、抗坏血酸 上海阿拉丁生化科技股份有限公司;氢氧化钠、氯化钾、甲醇、盐酸、铁氰化钾、氯化铁、硫酸亚铁等 均为分析纯,成都市科龙化工试剂厂;1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH) 上海源叶生物科技有限公司。

XPR226DRQ/AC 电子天平 精度 0.01 g, 上海第二天平仪器厂; JB-13 磁力搅拌器 上海梅香仪器有限公司; GYB40 均质机 北京海天友诚科技有限公司; LDZX-50KBS 立式压力蒸汽灭菌器 上海申安医疗器械厂; DHP-9032 恒温培养箱 武汉格莱莫检测设备有限公司; HHS-21-4 水浴锅 河南沃林仪器设备有限公司; TMS-PRO 质构仪 美国 FTC 公司; NDJ-1C 布氏粘度计 上海微川精密仪器有限公司; HC-LXJ06 离心机 盐城市安信实验仪器有限公司; UV-6800 紫外可见分光光度计 青岛一卓光电科技有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 山药希腊式酸奶的制备 参考冯红霞等^[10]的希腊式酸奶制作方法并做调整, 通过预试验确定了酸奶制作工艺参数, 以达到希腊式酸奶高蛋白质含量的目标。将全脂乳粉、山药粉、白砂糖、酪蛋白按照一定的比例进行称量, 加入一定量蒸馏水后搅拌均匀, 均质(60 ℃, 20 MPa), 于 95 ℃ 杀菌 5 min, 取出冷却至 42 ℃, 接入料液体积 0.5%(w/v)的混合菌种(嗜热链球菌: 保加利亚乳杆菌为 1:1), 混匀后在 42 ℃ 条件下发酵 5.6 h, 将酸奶移至 4 ℃ 的冰箱中分别贮藏 0、7、14 和 21 d, 对酸奶样品进行检测。

希腊式酸奶的工艺参数如下:

C: 将 274 g(13.7%)全脂乳粉、66 g(3.3%)酪蛋白、164 g(8.2%)白砂糖溶于 1496 mL 蒸馏水中, 按照酸奶的制备方法处理。总固体含量为 25%, 蛋白质含量为 5.5%, 作为空白对照组。

Y1、Y2、Y3: 分别采用 1#、2#、3#山药粉替代 2% 的全脂乳粉, 制备希腊式酸奶。

1.2.2 可滴定酸度和总固形物含量的测定 可滴定酸度: 按照 GB 5009.239-2016 测定。总固形物含量: 按照 GB 5413.39-2010 测定。

1.2.3 质构特性测定 将酸奶样品切成 60 mm×60 mm×60 mm 的小方块, 平衡至室温, 使用柱形探头(直径为 25.4 mm), 测前速度和测试速度均为 1 mm/s, 表面触发力为 10 g, 测试距离为 30 mm, 两次压缩间隔为 4.5 s, 平行试验三次, 结果取平均值。

1.2.4 黏度的测定 称取 120 g 酸奶样品置于烧杯中, 测试温度为 4 ℃, 采用 4 号转子, 转速为 20 r/min, 测定时间 30 s, 平行试验三次, 结果取平均值。

1.2.5 持水能力的测定 称量离心管质量 m_0 (g), 称取酸奶样品和离心管总质量 m_1 (g), 以 3000 r/min 离心 20 min, 静置 10 min 后, 去除上清液, 测量剩余物质的总质量 m_2 (g)。平行试验三次, 结果取平均值。按下式计算^[21]:

$$\text{持水力}(\%) = \frac{m_2 - m_0}{m_1 - m_0} \times 100$$

1.2.6 乳酸菌活菌数的测定 依据 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》对冷藏期间酸奶中的保加利亚乳杆菌和嗜热链球菌进行平板计数。

1.2.7 多酚含量的测定 样品提取液的制备: 参考赵永波等^[22]的方法略作修改。取 10 g 希腊式酸奶样品置于 50 mL 离心管中, 加入 15 mL 酸化甲醇(含 0.05 mL 浓盐酸), 于 12000 r/min 离心 1 min, 于 -20 ℃ 静置 1 h, 再 4 ℃、7000 r/min 离心 10 min, 收集上清液备用。参照 Cheng 等^[23]的福林-酚法测定多酚含量, 其结果以没食子酸当量(mg/100 g)表示。

1.2.8 酸奶抗氧化性能的测定

1.2.8.1 铁还原力测定 参考贾亚婷等^[24]的方法略作修改。在 1.0 mL 酸奶样品提取液中分别加入 2.5 mL 0.2 mol/L 磷酸盐缓冲液(pH6.6)和 1% 铁氰化钾溶液, 充分混匀于 50 ℃ 静置 20 min, 冷水迅速冷却至 4 ℃, 然后加入 2.5 mL 10% 三氯乙酸溶液。充分混匀后于 3000 r/min 离心 10 min, 取上清液 1.5 mL, 加入 0.2 mL 0.1% FeCl_3 溶液和 1.0 mL 蒸馏水, 充分混匀后在 700 nm 处测定其吸光度。以硫酸亚铁的抗氧化值作为标准曲线, 结果用硫酸亚铁当量(mg/100 g)表示, 重复测定三次。

1.2.8.2 DPPH 自由基清除率的测定 参考 Du 等^[25]方法测定。取 1.0 mL 酸奶样品提取液, 加入 3.0 mL DPPH 溶液(用甲醇稀释至 30 mg/L), 充分混合均匀, 避光静置 30 min 后, 于 517 nm 测定吸光值。以甲醇为空白对照组, 以抗坏血酸对 DPPH 的清除能力作标准曲线, 结果用抗坏血酸当量(mg/100 g)表示, 重复测定三次。

1.3 数据处理

试验数据均平行测定 3 次, 以平均值±标准差表示, 基础数据统计采用 Excel 2016 软件, 作图采用 Origin8.5 软件, 显著性分析采用 SPSS 18.0 软件(ANOVA 方法, Duncan Test 进行多重比较, $P < 0.05$)完成。

2 结果与分析

2.1 贮藏期间酸奶酸度的变化

由图 1 可知, 随着贮藏时间的增加, 各组酸奶的可滴定酸度均呈现逐渐上升趋势。在贮藏 21 d 时, Y1、Y2 和 Y3 组的可滴定酸度分别为 97°T、102°T 和 107°T, 与 C 组相比显著提高了 19.8%、25.9% 和 32.1%($P < 0.05$)。这表明山药粉的添加对希腊式酸奶的发酵产酸具有促进作用。其原因是山药中含有还原糖^[26], 能够为乳酸菌提供代谢底物, 促进乳酸菌生长, 从而代谢乳糖产酸。另外乳酸菌也能够向体外释放淀粉酶, 将淀粉水解为还原糖^[27], 进一步代谢为乳酸。此现象与李郭浪等^[20]有关山药山楂酸奶贮藏期间的酸度变化存在类似之处。相关研究也发现, 添加多糖或壳聚糖, 酸奶的可滴定酸度有明显增加, 表明发酵过程中乳酸菌利用多糖产生乳酸和其他有机酸^[21,27], 而山药含有多糖成分, 是引起酸奶酸度增

加的原因之一。此外除贮藏 7 d 时 Y1、Y2、Y3 组间可滴定酸度差异显著($P<0.05$)外,其他贮藏时间时差异均不显著($P>0.05$),说明不同干燥工艺的山药粉对希腊式酸奶的可滴定酸度的影响不显著。

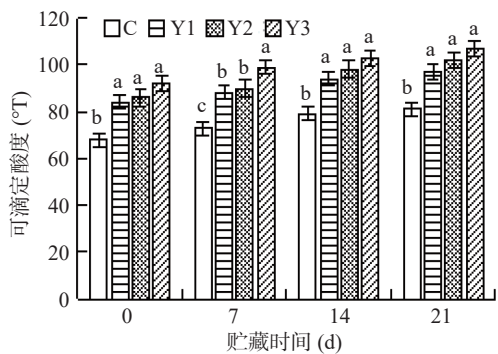


图 1 山药希腊式酸奶贮藏期间的可滴定酸度变化
Fig.1 Change of titratable acidity of yam Greek style yogurt during storage
注: 不同小写字母表示同一贮藏时间,不同酸奶样品组间差异显著($P<0.05$),图 2、图 5~图 7 同。

2.2 贮藏期间酸奶总固形物含量的变化

由表 1 可知,在 4 ℃ 贮藏过程中,四组样品的总固形物含量均呈现下降趋势,这可能与乳酸菌对蛋白质的代谢有关,在代谢过程中乳酸菌能够释放蛋白酶,将酪蛋白分解成能够被人体消化吸收的多肽和氨基酸^[28]。与 C 组相比,Y1、Y2、Y3 组总固形物含量均显著降低($P<0.05$),这是因为山药粉的固形物含量低于全脂乳粉,山药中益生成分多糖、低聚糖引起乳酸菌数量快速增殖,从而加速了山药希腊式酸奶总固形物的消耗。此外,除贮藏初期,其他各贮藏阶段 Y1、Y2、Y3 组之间的总固形物含量差异显著($P<0.05$),表明山药粉的干燥工艺对酸奶总固形物含量存在显著影响。贮藏 21 d 时 Y3 组固形物含量显著高于 Y1 组和 Y2 组($P<0.05$),表明冷冻干燥山药粉有利于酸奶品质的保持,这可能由于其较高的酸度抑制乳酸菌继续快速发酵所致。

表 1 贮藏期间山药希腊式酸奶的固形物含量变化(g/100 g)
Table 1 Changes of solid content of yam Greek style yogurt during storage (g/100 g)

组别	贮藏时间(d)			
	0	7	14	21
C	25.21±0.04 ^a	24.55±0.03 ^a	24.16±0.01 ^a	24.00±0.04 ^a
Y1	25.13±0.02 ^b	24.30±0.01 ^b	23.89±0.03 ^c	22.69±0.05 ^d
Y2	25.04±0.04 ^c	24.13±0.01 ^c	24.02±0.02 ^b	23.54±0.01 ^c
Y3	25.08±0.03 ^c	24.34±0.05 ^b	23.61±0.04 ^d	23.74±0.03 ^b

注: 同列不同字母表示组间存在显著性差异($P<0.05$),表 2~表 3 同。

2.3 贮藏期间酸奶质构特性的变化

2.3.1 硬度 酸奶硬度受贮藏时间影响较为明显。由表 2 可知,各组酸奶硬度随着贮藏时间延长而增加,这是酸化过程中酪蛋白发生凝聚所致。在第 7 d 和 14 d 时,C 组酸奶硬度显著低于 Y1、Y2、Y3 组

($P<0.05$),其原因可能是山药粉促进乳酸菌快速增殖产酸,快速酸化使得蛋白质被锁定到一个更分散的结构中,其密度可能更高,凝胶网络硬度更大^[29]。贮藏 21 d 时,C 组酸奶硬度达到 208.58 ± 0.04 g,Y1、Y2、Y3 组酸奶硬度则处于 197.00 ± 0.08 g 以下,且差异显著($P<0.05$),这表明山药粉的添加能够一定程度上抑制酸奶硬度的过度增加,可能是在酸奶凝胶形成过程中,多糖与酪蛋白之间存在相互排斥的作用^[30],导致山药多糖和酪蛋白之间的聚集作用减弱;另外,Y1、Y2、Y3 组固形物含量降低也可能是引起凝胶结构紧密程度降低的原因之一。Y3 组酸奶的硬度一直处于三组山药酸奶中最低值,这可能是因为相对于其他两种干燥方式,冷冻干燥对山药多糖结构的影响较小。因此,在酸奶贮藏初期,山药对酸奶硬度的增加具有促进作用,但在贮藏末期却减缓了酸奶硬度的提升,其中冷冻干燥山药粉的减缓程度最大。

表 2 贮藏期间山药希腊式酸奶的硬度变化(g)
Table 2 Hardness changes of yam Greek style yogurt during storage (g)

组别	贮藏时间(d)			
	0	7	14	21
C	126.71±0.16 ^a	140.91±0.32 ^d	170.24±0.04 ^d	208.58±0.04 ^a
Y1	124.30±0.29 ^b	161.74±0.08 ^a	187.81±0.13 ^a	197.00±0.08 ^b
Y2	120.40±0.06 ^c	153.90±0.11 ^b	176.30±0.24 ^b	187.36±0.12 ^c
Y3	118.11±0.23 ^d	149.40±0.05 ^c	170.84±0.07 ^c	178.55±0.01 ^d

2.3.2 内聚性 由表 3 可知,山药粉的添加和贮藏时间均可影响酸奶的内聚性。在贮藏过程中,Y1、Y2、Y3 组酸奶的内聚性均高于 C 组,且随着酸奶贮藏时间的增加,其内聚性呈现升高趋势。Y1、Y2、Y3 组的总固形物含量低于 C 组(不足 0.3%),蛋白质含量增加不足 0.2%,认为酸奶内聚性的增加是由山药粉所引起,而非总蛋白质含量的增加或总固体含量的下降造成的。周勇等^[31]研究发现,适量添加沙棘多糖能够提高酸奶凝胶的内聚性,可能是由多糖引起酪蛋白聚集所致,同时多糖与蛋白质的相互作用也存在密切关系。山药粉与沙棘多糖对酸奶内聚性的影响具有相似性。因此,山药粉在一定程度上影响着酸奶的内聚性,且其多糖成分可能是引起内聚性提高的重要因素。

表 3 贮藏期间山药希腊式酸奶的内聚性变化
Table 3 Changes of cohesion of yam Greek style yogurt during storage

组别	贮藏时间(d)			
	0	7	14	21
C	0.42±0.002 ^c	0.43±0.001 ^b	0.43±0.005 ^a	0.44±0.021 ^c
Y1	0.44±0.003 ^b	0.45±0.013 ^b	0.47±0.033 ^a	0.48±0.001 ^b
Y2	0.46±0.009 ^a	0.47±0.002 ^b	0.49±0.056 ^a	0.51±0.014 ^a
Y3	0.47±0.001 ^a	0.49±0.005 ^a	0.51±0.015 ^a	0.52±0.003 ^a

2.4 贮藏期间山药希腊式酸奶黏度的变化

由图2可知,在贮藏过程中各组酸奶的黏度整体呈上升趋势,贮藏21 d时Y1、Y2、Y3组酸奶黏度显著高于C组($P<0.05$)。黏度是衡量酸奶品质的一个重要指标,主要受乳蛋白含量的影响,其中酪蛋白的聚集和凝胶结构能够显著影响酸奶的黏度^[32-33]。Y1、Y2、Y3组的蛋白质含量高于C组是引起这三组酸奶黏度相对较高的原因之一。此外,山药中多糖也会对酸奶的黏度产生影响。文献^[34-36]表明多糖类物质能够改善酸奶黏稠度和品质,有利于酸奶凝胶结构的稳定^[34-36]。在不同贮藏时间,Y1、Y2、Y3组酸奶的黏度差异不同,其中第7 d和第14 d三组间存在显著差异($P<0.05$),但第21 d时无显著差异($P>0.05$),这表明在不同贮藏时间山药粉的不同干燥工艺对酸奶黏度影响存在差异。因此,山药粉的添加有利于提高酸奶的黏度,且山药粉的不同干燥工艺对酸奶黏度的影响存在贮藏时间上的差异。

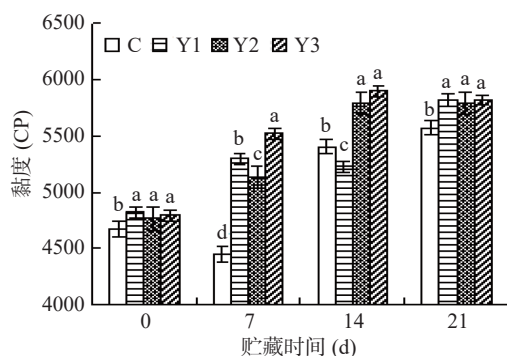


图2 贮藏期间山药希腊式酸奶的黏度变化
Fig.2 Viscosity changes of yam Greek style yogurt during storage

2.5 贮藏期间山药希腊式酸奶持水能力的变化

贮藏时间和山药粉对酸奶的持水性均产生较明显影响。由图3可知,贮藏期间Y1、Y2、Y3组酸奶的持水力均明显高于C组,这可能是山药粉中蛋白质和多糖成分所致。随着蛋白质含量的增加,酸奶中酪蛋白凝胶空间结构束缚的水分增加,即酪蛋白与水之间的结合能力增强,从而表现出较高的持水能力。

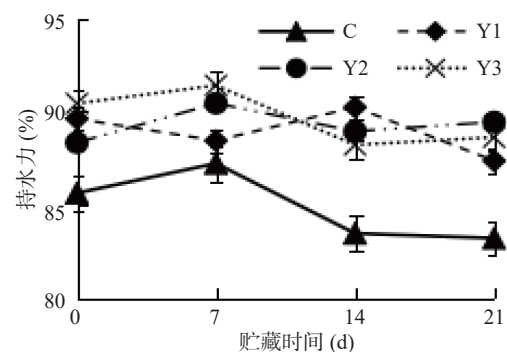


图3 贮藏期间山药希腊式酸奶的持水能力变化

Fig.3 Changes in water holding capacity of yam Greek style yogurt during storage

力^[33,37]。相关研究指出多糖类物质和淀粉的糊化作用与提高酸奶的持水性密切相关^[21,34-35]。此外,随着贮藏时间的延长,各组酸奶的持水能力整体上略有降低,但是Y1、Y2、Y3组降低的趋势不同,说明山药粉的干燥工艺对酸奶的持水能力有着一定的影响,仍需进一步深入研究。

2.6 贮藏期间酸奶中乳酸菌活菌数的变化

由图4可知,贮藏期间Y1、Y2、Y3组酸奶中保加利亚乳杆菌数量相对于C组较为平稳,总体数量有所上升,嗜热链球菌数量整体呈现波浪形上升趋势,而C组的保加利亚乳杆菌、嗜热链球菌数量则总体有所降低。其原因可能是山药中的益生成分如低聚糖、多糖、薯蓣皂苷元等对乳酸菌的生长起到了促进作用^[38]。另外,在酶的作用下,将山药中大分子糖类物质转化成小分子糖类物质,从而促进乳酸菌的生长繁殖。图4A显示C组保加利亚乳杆菌数量呈先降后升趋势,而图4B显示C组嗜热链球菌数量呈先升后降趋势,这可能是因为贮藏前期酸奶中嗜热链球菌与保加利亚乳杆菌存在竞争关系,未达到平衡状态,也可能与从发酵到贮藏过程中温度的骤降有关。贮藏后期C组嗜热链球菌数量明显降低,原因可能是营养物质的消耗并且与保加利亚乳杆菌维持在相互平衡的状态所致,这也能够合理的解释C组保加利亚乳杆菌数量变化情况。

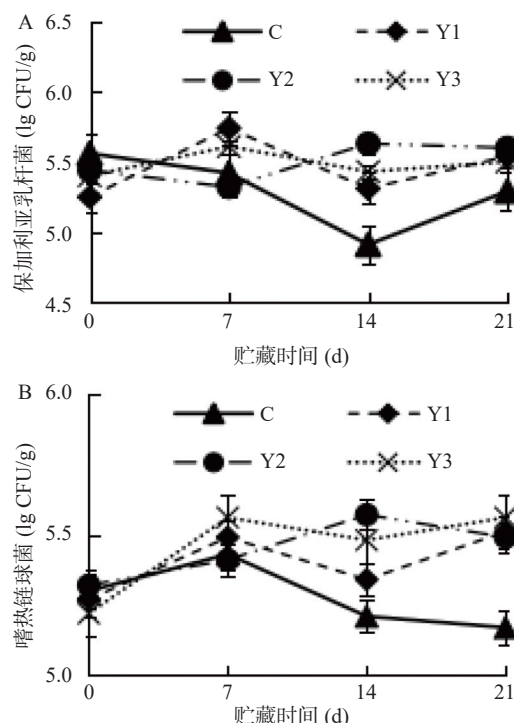


图4 贮藏期间山药希腊式酸奶中保加利亚乳杆菌(A)和嗜热链球菌(B)活菌数量变化

Fig.4 Changes in live *Lactobacillus bulgaricus* (A) and *Streptococcus thermophilus* (B) number of yam Greek style yogurt during storage

2.7 贮藏期间酸奶中多酚含量的变化

贮藏时间和山药粉对酸奶多酚含量均产生一定

影响。由图 5 可知,在贮藏期间 C 组多酚含量增加较快,而 Y1、Y2、Y3 组多酚含量增加较慢,但总量显著高于 C 组($P<0.05$)。乳酸菌发酵有助于总酚含量的提高^[39],这可能与乳蛋白和山药中的蛋白质、多糖等成分,经酶解导致酸奶中多肽、氨基酸和多酚等小分子物质含量增加有关。山药中益生成分促进乳酸菌的生长繁殖^[38],乳酸菌的分解代谢作用同时也加剧了多酚类物质的降解和转化^[40],这可能是山药酸奶中多酚含量维持平缓增加的主要原因。

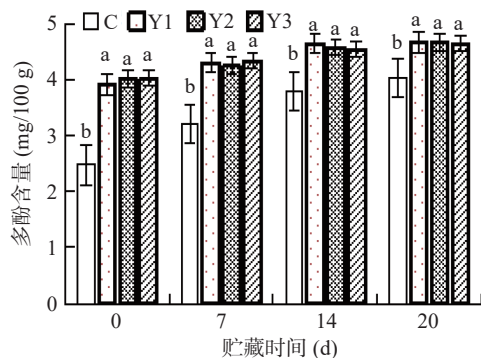


图 5 贮藏期间山药希腊式酸奶的多酚含量变化

Fig.5 Changes in polyphenol content of yam Greek style yogurt during storage

2.8 贮藏期间酸奶的抗氧化性变化

2.8.1 铁还原能力的变化 由图 6 可知,贮藏期间各组酸奶的铁还原能力基本处于稳定水平,相对于 C 组, Y1、Y2、Y3 组的铁还原能力显著提高($P<0.05$),且在贮藏 21 d 时平均提高 $47.07\%\pm 3.49\%$,而 Y1、Y2、Y3 组间铁还原力差异并不显著($P>0.05$)。这可能与山药酸奶中多酚、糖蛋白和多糖等抗氧化成分有关。多酚具有一定的抗氧化能力^[41],多酚优先与酪蛋白结合而非乳清蛋白,其非共价相互作用导致蛋白质结构发生变化,乳蛋白的存在使得多酚的抗氧化能力得到增强^[42]。山药糖蛋白具有一定的还原能力,对 H_2O_2 、 $O_2^{\cdot-}$ 、 $OH^{\cdot}$ 、DPPH 自由基有一定的清除能力,对脂质体的过氧化具有抑制作用^[43]。Gao 等^[44]的研究结果类似,发现香菇糖蛋白含有丰

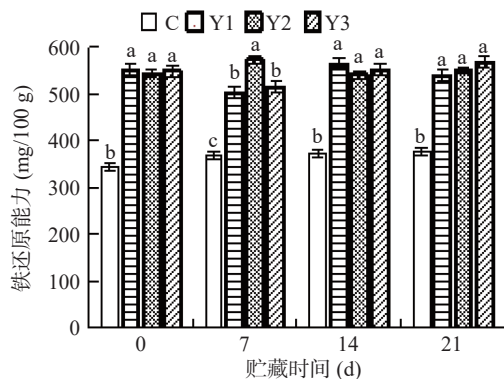


图 6 贮藏期间山药希腊式酸奶的铁还原能力变化

Fig.6 Changes in iron reduction capacity of yam Greek style yogurt during storage

富的疏水性氨基酸和单糖,可提高糖蛋白对金属离子的螯合作用,有效提高其抗氧化能力。文献 [45–46] 表明山药多糖的结构决定其活性,山药多糖分子质量是影响其还原能力和抗氧化能力重要因素,分子质量较低时具有更好的抗氧化能力。其他多糖如山楂叶多糖^[21]、苹果渣多糖^[27]、蒲公英多糖及其衍生物^[47]等在酸奶及乳制品中均表现出较强的抗氧化性能。此外,在贮藏过程中蛋白质分解成多肽和氨基酸,其中包括一些具有抗氧化能力的活性肽,能够提高和维持酸奶在贮藏过程中的抗氧化能力。

2.8.2 DPPH 自由基清除能力的变化 由图 7 可知,贮藏期间 Y1、Y2、Y3 组酸奶的 DPPH 自由基清除率均显著高于 C 组($P<0.05$)。其原因与 2.8.1 中铁还原能力相同。Y1、Y2、Y3 组 DPPH 自由基清除率在 7 d 时有所降低,之后增加并趋于稳定,这可能是因为其中乳酸菌数量增加较多,导致多酚、多糖类活性物质被消耗,随后经过酶对大分子物质的分解,多酚、多糖类活性物质含量增加所致。C 组 DPPH 自由基清除率随贮藏时间增加而呈先升后降趋势,其原因可能与发酵过程中产生的抗氧化活性物质有关,随后这些抗氧化活性物质逐渐被消耗以致有所降低。贮藏 21 d 时 Y3 组 DPPH 自由基清除率显著高于 Y1 和 Y2($P<0.05$),这可能与冷冻干燥对山药粉的活性物质破坏程度较小有关。

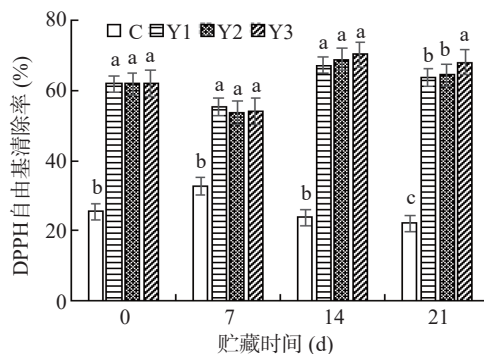


图 7 贮藏期间山药希腊式酸奶的 DPPH 自由基清除能力变化

Fig.7 Changes in DPPH free radical scavenging activity of yam Greek style yogurt during storage

3 结论

本研究表明,随着酸奶贮藏时间的增加,除了固形物含量和持水力降低、抗氧化性指标保持基本不变之外,酸奶的其他品质指标均有所提高。山药因含有低聚糖、多酚、多糖等活性物质或益生元成分,在酸奶贮藏期间能促进乳酸菌继续生长繁殖而数量增加,从而使得希腊式酸奶继续发酵,添加山药粉显著提高了酸奶的酸度、硬度和内聚性($P<0.05$),同时也提高了希腊式酸奶的黏度、持水力、多酚含量、铁还原能力和 DPPH 自由基清除率,明显改善了希腊式酸奶的抗氧化性能。相反,山药粉显著降低了希腊式酸奶的固形物含量($P<0.05$)。不同干燥工艺使得山

药粉中活性物质保留情况不同,进而导致冷藏期间三种山药酸奶之间的固形物含量、硬度、内聚性、黏度等指标均存在显著差异($P<0.05$),其中Y3组固形物含量显著高于Y1、Y2组($P<0.05$),硬度则显著低于Y1、Y2组($P<0.05$),酸度、铁还原能力和DPPH自由基清除率略高于Y1、Y2组;Y3、Y2组的内聚性和黏度显著高于Y1组($P<0.05$)。综合以上结果表明冷冻干燥工艺有效保留了山药的活性物质,从而更好地改善了山药希腊式酸奶的部分品质指标和抗氧化性。这对于山药粉在希腊式酸奶中的应用提供了重要的理论依据。不同干燥工艺对山药粉的活性成分、营养成分及微观结构的影响状况,进一步对山药酸奶的微观结构和流变学特性如何影响,还有待进一步深入研究,以便为山药在酸奶中的应用提供更为完善的科学依据。

© The Author(s) 2025. 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] 武波波, 刘文筱, 张伟丽. 希腊式酸奶的研制[J]. 乳业科学与技术, 2012, 35(4): 25-28. [WU B B, LIU W Y, ZHANG W L. Preparation of Greek yogurt[J]. Journal Dairy Science and Technology, 2012, 35(4): 25-28.]
- [2] LANGE I, MLEKO S, TOMCZYŃSKA-MLEKO M, et al. Technology and factors influencing Greek-style yogurt-A review [J]. Ukrainian Food Journal, 2020, 9(1): 7-35.
- [3] GYAWALI R, FENG X, CHEN Y P, et al. A review of factors influencing the quality and sensory evaluation techniques applied to Greek yogurt[J]. Journal of dairy research, 2022, 89(2): 1-7.
- [4] 杨郁荪, 郑华杰, 王新, 等. 高蛋白酸奶的生产工艺与开发现状[J]. 中国乳品工业, 2019(9): 32-34, 38. [YANG Y H, ZHENG H J, WANG X, et al. Production technology and development status of high-protein yoghurt[J]. China Dairy Industry, 2019(9): 32-34, 38.]
- [5] UDUWERELLA G, CHANDRAPALA J, VASILJEVIC T. Minimising generation of acid whey during Greek yoghurt manufacturing[J]. Journal of Dairy Research, 2017, 84(3): 346-354.
- [6] COTA-LÓPEZ R, VELAZQUEZ G, MÉNDEZ-MONTEALVO G, et al. Effect of adding high concentrations of retrograded starch with different amylose content on the physicochemical properties and sensory attributes of Greek-style yogurt[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 241: 124501.
- [7] KIM J, KIM M, CHOI I. Physicochemical characteristics, antioxidant properties and consumer acceptance of Greek yogurt fortified with apple pomace syrup[J]. Foods, 2023, 12(9): 1856.
- [8] XU K, SILVA M, CHANDRAPALA J. Sonication as a pre-processing step to alter acid whey generation during Greek yoghurt manufacture[J]. Journal of Dairy Research, 2023, 90(2): 182-185.
- [9] 苏蔚莹, 蔡舒轶, 薛雯婧, 等. 果味希腊酸奶工艺研究[J]. 安徽农学通报, 2018, 24(2): 95-97, 124. [SU W Y, CAI S Y, XUE W J, et al. Study on the process of fruity Greek yogurt[J]. Anhui Agriculture Science Bulletin, 2018, 24(2): 95-97, 124.]
- [10] 冯红霞, 李凯, 韩跃军, 等. 百合希腊式酸奶的研制及其抗氧化活性研究[J]. 中国乳品工业, 2020, 48(9): 58-61. [FENG H X, LI K, HAN Y J, et al. Development of lily Greek yogurt and its antioxidant activity[J]. China Dairy Industry, 2020, 48(9): 58-61.]
- [11] 马荣琨, 李望铭. 奇亚籽希腊式酸奶的工艺优化研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(2): 388-394. [MA R K, LI W M. Study on process optimization of Chia seed Greek-style yogurt[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2022, 13(2): 388-394.]
- [12] 陈阳, 马丽娜, 李金贵, 等. 8份不同地区山药资源营养成分比较分析[J]. 福建农业科技, 2020(9): 35-38. [CHEN Y, MA L N, LI J G, et al. Comparative analysis on nutritional components of 8 Chinese yam resources in different regions[J]. Fujian Agricultural Science and Technology, 2020(9): 35-38.]
- [13] EPPING J, LAIBACH N. An underutilized orphan tuber crop-Chinese yam: A review[J]. Planta, 2020, 252(4): 58.
- [14] 鲁佩杰. 加工方式对山药干制品特征组分的影响研究[D]. 济南: 济南大学, 2023. [LU P J. Effects of processing methods on characteristic components of dried Chinese yam products[D]. Ji'nan: University of Jinan, 2023.]
- [15] REN X, LI L L, CHEN J L, et al. Drying characteristics and quality of Chinese yam by multiphase microwave drying based on fractal theory[J]. Drying Technology, 2022, 40(15): 3310-3323.
- [16] LI Q M, XIA L, WANG F, et al. Comparison of different drying methods on Chinese yam: Changes in physicochemical properties, bioactive components, antioxidant properties and microstructure[J]. International Journal of Food Engineering, 2020, 16(9): 20200009.
- [17] 李嘉瑜, 焦佳音, 魏诗婷, 等. 响应面法优化黄精铁棍山药酸奶工艺研究[J]. 浙江农业科学, 2024, 65(2): 413-419. [LI J Y, JIAO J Y, WEI S T, et al. Optimization of yogurt preparation process of *Polygonatum sibiricum* and *Dioscorea polystachya* Turczaninow. cv. Tiegun using response surface methodology[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2024, 65(2): 413-419.]
- [18] 于造辉, 王殿夫, 周禾, 等. 山药山楂酸奶加工工艺及其品质测定[J]. 中国调味品, 2023, 48(12): 140-143. [YU Z H, WANG D F, ZHOU H, et al. Processing technology and quality determination of yam and hawthorn yogurt[J]. China Condiment, 2023, 48(12): 140-143.]
- [19] 关随霞, 李爱江, 李道敏. 怀山药大枣酸奶加工工艺研究[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(12): 169-173. [GUAN S X, LI A J, LI D M. Processing technology of huai yam-jujube yogurt[J]. Food Research and Development, 2019, 40(12): 169-173.]
- [20] 李郭浪, 刘静, 李霞, 等. 山药山楂酸奶的贮藏品质及胃肠液环境下的抗氧化性[J]. 中国酿造, 2021, 40(5): 124-128. [LI G L, LIU J, LI X, et al. Storage quality of yam and hawthorn yogurt and its antioxidation in simulated gastrointestinal fluid[J]. China Brewing, 2021, 40(5): 124-128.]
- [21] 赵岩岩, 赵圣明, 李帅, 等. 山楂叶多糖对发酵乳品质及抗氧化活性的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(2): 73-79. [ZHAO Y Y, ZHAO S M, LI S, et al. Effect of polysaccharides from hawthorn leaves on the quality and antioxidant activity of fermented milk[J]. Food Science, 2020, 41(2): 73-79.]
- [22] 赵永波, 杜玲玲, 刘璐, 等. 贮藏及消化对蓝莓酸奶中酚类物质稳定性及抗氧化活性影响[J]. 食品科学, 2018, 39(9): 53-59. [ZHAO Y B, DU L L, LIU L, et al. Stability of phenolic compounds and antioxidant activity of blueberry incorporated in yogurt during storage and *in vitro* digestion[J]. Food Science, 2018, 39(9): 53-59.]
- [23] CHENG Y, QUAN W, QU T, et al. Effects of 60 Co-irradiation

- tion and superfine grinding wall disruption pretreatment on phenolic compounds in pine (*Pinus yunnanensis*) pollen and its antioxidant and α -glucosidase-inhibiting activities[J]. *Food Chemistry*, 2021, 345: 128808.
- [24] 贾亚婷,郭艳梅,蔡逸,等.不同菌种发酵乳品质与抗氧化能力研究[J].*中国乳品工业*,2017,45(9):22-25. [JIA Y T, GUO Y M, CAI Y, et al. Research of quality and antioxidant capacity for fermented milk with different strains[J]. *China Dairy Industry*, 2017, 45(9): 22-25.]
- [25] DU H X, WANG X P, YANG H G, et al. Changes of phenolic profile and antioxidant activity during cold storage of functional flavored yogurt supplemented with mulberry pomace[J]. *Food Control*, 2022, 132: 108554.
- [26] SANTOS R A D, RODRIGUES R D L, LIMA M B D D, et al. Influence of aqueous yam extract and goat milk casein powder on the characteristics of goat Greek-style yogurt[J]. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 2022, 27: 214-221.
- [27] 王正荣,吴鹏,田小磊,等.苹果渣粗多糖对发酵乳品质及抗氧化活性的影响[J].*食品工业科技*,2023,44(6):66-73. [WANG Z R, WU P, TIAN X L, et al. Effect of apple pomace crude polysaccharide on the quality and antioxidant activity of fermented milk[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(6): 66-73.]
- [28] 王娜,夏秀华,李晶,等.发酵乳制品风味形成机制及优化控制研究进展[J].*中国乳品工业*,2024,52(3):43-50. [WANG N, XIA X H, LI J, et al. Research progress on flavor formation mechanism and optimal control of fermented dairy products[J]. *China Dairy Industry*, 2024, 52(3): 43-50.]
- [29] HORNE D S. Chapter 6-Casein micelle structure and stability. In BOLAND M, SINGH H (Eds.). *Milk proteins from expression to food*[M]. (Third Edition) New York: Academic Press, 2020, 213-250.
- [30] ZHAO J L, MA CH M, ZHAO X H, et al. Effects of yam (*Dioscorea opposita* Thunb.) juice on fermentation and textural attributes of set-style skimmed yoghurt[J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2021, 15(3): 2220-2230.
- [31] 周勇,李伟,彭祺菲,等.沙棘多糖对发酵乳凝胶特性的影响及沙棘多糖酸奶工艺优化[J].*中国乳品工业*,2020,48(7):26-31. [ZHOU Y, LI W, PENG Z F, et al. Effect of seabuckthorn polysaccharide on properties of fermented milk gel and optimization of seabuckthorn polysaccharide yogurt process[J]. *China Dairy Industry*, 2020, 48(7): 26-31.]
- [32] SÖZERI ATIK D, ÖZTÜRK H İ, AKIN N. Perspectives on the yogurt rheology[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 263(Pt 2): 130428.
- [33] LESME H, RANNOU C, FAMELART M, et al. Yogurts enriched with milk proteins: Texture properties, aroma release and sensory perception[J]. *Trends in Food Science and Technology*, 2020, 98: 140-149.
- [34] 王新,张居典,邵景海,等.胞外多糖对酸奶稳定性的研究[J].*中国乳业*,2021(9):125-129. [WANG X, ZHANG J D, SHAO J H, et al. Study on the stability of yogurt by exopolysaccharide[J]. *China Dairy*, 2021(9): 125-129.]
- [35] 卢玉容,郭秀兰,唐仁勇,等.银耳多糖对低脂酸奶发酵、质构及感官品质的影响[J].*食品工业科技*,2019,40(10):73-77. [LU Y R, GUO X L, TANG R Y, et al. Effects of tremella polysaccharides on the fermentation, textural and sensory quality of low-fat yogurt[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019, 40(10): 73-77.]
- [36] 程欣玥,孙小茜,石静静,等.增稠剂促进酸奶凝胶的机理及应用研究进展[J].*食品与发酵工业*,2022,48(21):325-332. [CHENG X Y, SUN X Q, SHI J J, et al. Research progress on the mechanism and application of yogurt gelation promoted by thickener[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2022, 48(21): 325-332.]
- [37] LI J C, GUO M R. Effects of polymerized whey proteins on consistency and water holding properties of goat's milk yogurt[J]. *Journal of Food Science*, 2006, 71(1): C34-C38.
- [38] 刘露,张雁,邓媛元,等.山药低聚糖体外调节乳酸菌生长的作用[J].*中国食品学报*,2017,17(10):37-43. [LIU L, ZHANG Y, DENG Y Y, et al. Regulation functions to lactobacillus *in vitro* by oligosaccharides from Chinese yam[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2017, 17(10): 37-43.]
- [39] ZHANG J G, HUANG X D, CHENG J H, et al. Effect of *Lactobacillus* (*L. acidophilus* NCIB1899, *L. casei* CRL 431, *L. paracasei* LP33) fermentation on free and bound polyphenolic, antioxidant activities in three *Chenopodium quinoa* cultivars[J]. *Journal of food science*, 2023, 88(6): 2679-2692.
- [40] GAUR G, GÄNZLE M G. Conversion of (poly)phenolic compounds in food fermentations by lactic acid bacteria: Novel insights into metabolic pathways and functional metabolites[J]. *Current Research in Food Science*, 2023, 6: 100448.
- [41] HANO C, TUNG M UNNITHUM D. Plant polyphenols, more than just simple natural antioxidants: Oxidative stress, aging and age-related diseases[J]. *Medicines*, 2020, 7(5): 26.
- [42] MAO T, AKSHIT F, MATIWALAGE I, et al. Preferential binding of polyphenols in blackcurrant extracts with milk proteins and the effects on the bioaccessibility and antioxidant activity of polyphenols[J]. *Foods*, 2024, 13(4): 515.
- [43] 孙宇婧,韩涛,李丽萍,等.山药糖蛋白体外抗氧化活性研究[J].*园艺学报*,2010,37(6):1009-1014. [SUN Y J, HAN T, LI L P, et al. Antioxidant activity *in vitro* of glycoprotein from Chinese yam[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2010, 37(6): 1009-1014.]
- [44] GAO J Y, LI X, JIA S T, et al. Structural characterization and antioxidant activity of a glycoprotein isolated from shiitake mushrooms[J]. *Food Bioscience*, 2023, 53(1): 102608.
- [45] 李想,何荧珠,李龙,等.山药多糖构效关系及产业应用[J].*食品科技*,2023,48(11):184-191. [LI X, HE Y Z, LI L, et al. Structure-activity relationship and industrial application of Chinese yam polysaccharides[J]. *Food Science and Technology*, 2023, 48(11): 184-191.]
- [46] OUYANG J, WANG F, LI W J, et al. Structure characterization of polysaccharide from Chinese yam (*Dioscorea opposita* Thunb.) and its growth-promoting effects on *streptococcus thermophilus*[J]. *Foods*, 2021, 10(11): 2698.
- [47] HAN Y J, LI L Y, WEI F M, et al. Dandelion polysaccharides improve the emulsifying properties and antioxidant capacities of emulsions stabilized by whey protein isolate[J]. *Food Chemistry: X*, 2024, 21: 101218.