

燕麦膳食纤维对戚风蛋糕品质特性及抗老化能力的影响

张思怡, 王恒鹏, 吴鹏, 许志诚, 高苏敏, 还传明, 徐安琪, 王继盼, 孟祥忍

Effects of Oat Dietary Fiber on the Quality Characteristics and Anti-aging Ability of Chiffon Cake

ZHANG Siyi, WANG Hengpeng, WU Peng, XU Zhicheng, GAO Sumin, HUAN Chuanming, XU Anqi, WANG Jipan, and MENG Xiangren

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024090110>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

雨生红球藻对戚风蛋糕品质的影响及其虾青素稳定性

Effect of *Haematococcus pluvialis* on Chiffon Cake Quality and Stability of Astaxanthin

食品工业科技. 2022, 43(19): 76-83 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021120269>

马铃薯绿茶无糖戚风蛋糕的研制

Preparation of Potato Green Tea Sugar-free Chiffon Cake

食品工业科技. 2022, 43(14): 155-162 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021090024>

米糠可溶性膳食纤维对馒头抗老化特性的影响

Effect of Rice Bran Soluble Dietary Fiber on the Quality of Chinese Steamed Bread

食品工业科技. 2022, 43(4): 59-64 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021060076>

松花纤维及其与燕麦纤维复配后的理化性质对比

Physicochemical Properties Comparison of Pine Pollen Fiber and Its Fiber after Compounding with Oat Fiber

食品工业科技. 2023, 44(5): 53-59 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022050205>

响应面法优化猴头菇戚风蛋糕配方工艺研究

Optimization of Recipe of *Hericium erinaceus* Chiffon Cake by Response Surface Methodology

食品工业科技. 2023, 44(21): 234-242 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023010037>

不同品种和粒度对米粉糊化特性及米蛋糕品质的影响

Gelatinization Characteristics of Rice Flour with Different Varieties and Particle Sizes and Their Effects on the Quality of Rice Cakes

食品工业科技. 2022, 43(21): 75-82 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022010023>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

张思怡, 王恒鹏, 吴鹏, 等. 燕麦膳食纤维对戚风蛋糕品质特性及抗老化能力的影响 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(17): 134-142. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024090110

ZHANG Siyi, WANG Hengpeng, WU Peng, et al. Effects of Oat Dietary Fiber on the Quality Characteristics and Anti-aging Ability of Chiffon Cake[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(17): 134-142. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024090110

· 研究与探讨 ·

燕麦膳食纤维对戚风蛋糕品质特性及 抗老化能力的影响

张思怡, 王恒鹏, 吴 鹏, 许志诚, 高苏敏, 还传明, 徐安琪, 王继盼, 孟祥忍*
(扬州大学旅游烹饪学院, 江苏扬州 225127)

摘 要: 本研究旨在探究燕麦膳食纤维添加量的适宜区间, 以改善淀粉老化, 同时保持蛋糕品质。将戚风蛋糕加入一定比例的燕麦膳食纤维, 通过面糊密度、成品比容、烘焙损失率、含水量、色差、质构、感官评价等多种指标分析以及运用扫描电镜 (Scanning Electron Microscopy, SEM)、傅里叶变换红外光谱 (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR)、X 射线衍射 (X-ray Diffraction, XRD) 等多种先进技术, 研究燕麦纤维在 0%、3%、6%、9%、12%、15% 六组不同添加比例下对新鲜戚风蛋糕的品质特性和储藏期戚风蛋糕抗老化能力的影响。结果表明: 燕麦纤维添加量为 3%~9% 时, 可改善蛋糕老化现象, 同时保持其品质特性。储藏一周后, 与零添加量样品相比, 添加燕麦纤维的蛋糕芯部焐值与相对结晶度降低, 表明老化程度得到缓解。添加量为 9% 时, 戚风蛋糕面糊密度最低为 0.69 g/mL; 比容最高为 3.56 mL/g, 含水量最高为 45.84%, 且其他品质指标优良。综合比较, 9% 燕麦纤维添加量能显著提升戚风蛋糕品质并有效抑制其储藏期老化。

关键词: 戚风蛋糕, 燕麦纤维, 品质特性, 淀粉老化, 抗老化能力

中图分类号: TS236.9

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)17-0134-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024090110

本文网刊:



Effects of Oat Dietary Fiber on the Quality Characteristics and Anti-aging Ability of Chiffon Cake

ZHANG Siyi, WANG Hengpeng, WU Peng, XU Zhicheng, GAO Sumin, HUAN Chuanming, XU Anqi,
WANG Jipan, MENG Xiangren*

(School of Tourism and Cuisine, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China)

Abstract: This study aimed to explore the appropriate range of oat dietary fiber addition for reducing the degree of starch aging while ensuring the quality of the cake. This study investigated the effects of oat dietary fiber (0%, 3%, 6%, 9%, 12%, 15%) on the quality and anti-aging properties of fresh chiffon cake during storage. Multiple indicators, including batter density, specific volume, baking loss rate, moisture content, color, texture, and sensory evaluation, were analyzed. Advanced techniques such as scanning electron microscopy (SEM), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), and X-ray diffraction (XRD) were employed to characterize the structural and functional changes. Results demonstrated that 3%~9% oat fiber addition effectively mitigated cake staling while preserving its essential quality attributes. After one week of storage, compared to the sample with no additions, there was a decrease in the core enthalpy value and relative crystallinity of the cake added with oat fiber, indicating a reduction in the degree of aging in the chiffon cake. When the addition amount was 9%, the lowest batter density of chiffon cake was 0.69 g/mL, the highest specific volume was 3.56 mL/g, the highest moisture content was 45.84%, and other quality indicators were excellent. According to a comprehensive comparison, the chiffon cake is of the best quality and shows anti-aging ability when the addition of oat fiber is 9%, which effectively improves the aging of chiffon cake during storage.

Key words: chiffon cake; oat fiber; quality characteristics; starch retrogradation; anti-aging ability

收稿日期: 2024-09-09

作者简介: 张思怡 (2000-), 女, 硕士, 研究方向: 工艺优化与营养科学, E-mail: 13218949058@163.com。

* 通信作者: 孟祥忍 (1976-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 动源性食品加工技术, E-mail: xrmeng@yzu.edu.cn。

戚风蛋糕是一种质地绵密、松软可口的烘焙产品,其喜爱者遍布国内外不同年龄层次。但市面上大部分戚风蛋糕是一种高油、高糖的高热量食品^[1],并且营养价值低、不耐存放。因此,研发一款富含膳食纤维,优化营养配比同时兼具抗老化能力的戚风蛋糕成为新的趋势。有研究者,如刘翔等^[2]以蔓越莓为原料制作出了滋味细腻且富含多种营养成分的蔓越莓膳食纤维蛋糕;卢凯玲等^[3]以马蹄为原料创造出低糖、低油脂的戚风蛋糕。

燕麦是一种药食兼用的杂粮作物,其具有的水溶性膳食纤维 β -葡聚糖可以有效抑制胆固醇的吸收,防止脂质氧化、清除自由基、增强记忆力、预防老年痴呆以及维持血糖平衡^[4]。国内外大量研究均表明,燕麦具有抑制糖尿病、调节人体免疫功能、降低肠癌患病率和增强人体抵抗力的功能^[5]。此外,对人体健康大有裨益的脂肪酸在燕麦脂肪总量中占比高达 38.1%~52.0%,可见其显著的保健价值^[6]。近年来,燕麦在全球食品市场的应用持续增长,常见于水果燕麦片、燕麦酸奶等产品。然而,其在烘焙产品,尤其是戚风蛋糕中的应用尚待拓展。燕麦具备显著的抗氧化性能,能有效稳定脂肪,防止氧化变质;同时,其独特的保水能力有助于烘焙制品在长时间储藏中保持新鲜口感与质地^[7],这对提升戚风蛋糕的品质特性和抗老化能力具有显著作用。

本研究拟将 0%、3%、6%、9%、12%、15% 六组不同含量的燕麦膳食纤维添加到戚风蛋糕中,探究不同燕麦纤维添加量对戚风蛋糕的品质特性和抗老化能力的影响,以明确高营养、高质量的燕麦纤维戚风蛋糕合适的添加量,进一步为营养强化的烘焙食品研发提供理论基础与参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

98% 燕麦膳食纤维 陕西瑞茂生物科技有限公司; Q/XXL0009S 蛋糕粉(低筋面粉) 新乡市新良粮油加工有限责任公司; 鲜鸡蛋 市售; 纯牛奶 内蒙古伊利实业集团股份有限公司; 长寿花金胚玉米油 山东三星玉米产业科技有限公司; 百钻绵白糖 安琪酵母股份有限公司; 6°白醋 江苏恒顺醋业股份有限公司。

Royalstar EGK100D 打蛋器 合肥荣事达小家电有限公司; 洁丽仆 1566 锡纸 北京红泰狼国际知识产权代理有限公司; Four MODULABLE M4 SOLEO 烤箱 法国邦佳(BONGARD); 6 寸圆形蛋糕模具、10 寸细尺锯齿刀 阳江市爱厨工贸有限公司; FA2004 电子天平 上海舜宇恒平科学仪器有限公司; CR-400/410 色彩色差计 柯尼卡美能达公司; TA.XTPLUSC 物性分析仪 Stable Micro Systems; GeminiSEM300 场发射扫描电镜 德国 Carl Zeiss; Cary 610/670 显微红外光谱仪 IR 美国 Varian; DSC 8500 差示扫描量热仪 美国 Perkin Elme; D8

Advance 多晶 X 射线衍射仪 德国 Bruker AXS。

1.2 实验方法

1.2.1 基本配方及样品制备

1.2.1.1 基本配方 采用燕麦纤维替代部分低筋小麦粉添加到戚风蛋糕中,燕麦纤维添加量为 0%、3.0%、6.0%、9.0%、12.0%、15.0%(以小麦粉的质量百分含量计算)。戚风蛋糕的基础配方见表 1。

表 1 戚风蛋糕的基本配方
Table 1 Basic recipe of chinnfon cake

原料	含量(g)
蛋清	80
蛋黄	45
低筋小麦粉	55/53.35/51.7/50.05/48.4/46.75
燕麦纤维	0/1.65/3.3/4.95/6.6/8.25
牛奶	35
玉米油	30
白砂糖	40
白醋	4.5

1.2.1.2 样品制备 工艺流程:称料→制备蛋黄糊→打发蛋白→混合→烘烤→冷却脱模。

操作要点:

称料:将低筋面粉、燕麦纤维、糖、油等配料按预设比例进行称量。按照基础配方将燕麦纤维以不同的比例与低筋面粉进行混合,过筛称量。

制备蛋黄糊:在混匀后的面粉和燕麦纤维中依次加入玉米油、牛奶和蛋黄,搅拌均匀至呈现细腻、无颗粒状态。

打发蛋白:先将蛋白与醋混匀,手持电动搅拌器打发 20 s 左右至呈现较大泡沫,再一次性加入白糖,打发 1 min 左右至蛋白糊呈中性大弯钩状。

混合:将打发好的蛋白糊分两到三次加入蛋黄糊中,每次加入后,使用刮刀翻拌均匀,以颜色均匀为标准。

烘烤:混合均匀后装入模具,用牙签划动面糊表面以去掉大气泡,距台面 20 cm 处轻震使气泡排出。放入烤箱,上下火 190 ℃ 烘烤 10 min,取出放至常温。

冷却脱模:蛋糕烤好后,距离台面 20 cm 处轻震以排出热气,倒扣冷却至常温,脱模。

样品处理与贮藏:将制作完成的戚风蛋糕静置 3 h 并编号,以获取评估品质特性的新鲜样品;将冷却后的蛋糕密封并编号,存放于 4 ℃ 冰箱内冷藏一周,用作测试蛋糕抗老化性能的储藏期样品。

1.2.2 燕麦纤维戚风蛋糕品质特性的测定

1.2.2.1 面糊密度的测定 参照刘秉杰等^[8]的方法,选用 50 mL 的烧杯,烧杯净重记为 m_0 ;再装满水测定质量记为 m_1 ;最后装满蛋糕面糊并搅拌均匀后称重记为 m_2 。 $\rho_{\text{水}}$ 为 1 g/mL,按照式(1)计算面糊密度(ρ , g/mL),每个样品平行测定 3 次。

$$\rho_{\text{面糊}}(\text{g/mL}) = \frac{m_2 - m_0}{m_1 - m_0} \times \rho_{\text{水}} \quad \text{式 (1)}$$

式中: $\rho_{\text{面糊}}$ 为戚风蛋糕的面糊密度, g/mL; m_0 为容器的质量, g; m_1 为容器与水的质量, g; m_2 为容器与面糊的质量, g。

1.2.2.2 比容的测定 参照张俊^[9]的方法, 采用小米置换法, 按照式(2)计算戚风蛋糕比容, 每个样品平行测定 3 次。

$$C(\text{mL/g}) = \frac{V}{m} \quad \text{式 (2)}$$

式中: C 为蛋糕比容, mL/g; V 为蛋糕体积, mL; m 为蛋糕质量, g。

1.2.2.3 烘焙损失率的测定 参照王颖等^[10]的方法进行测定, 根据式(3)计算烘焙损失率。每个样品平行测定 3 次。

$$A(\%) = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \quad \text{式 (3)}$$

式中: A 为燕麦蛋糕烘焙损失率, %; m_1 为燕麦蛋糕烘烤前面糊的质量, g; m_2 为燕麦蛋糕烘烤后的质量, g。

1.2.2.4 含水量的测定 按照 GB 5009.3-2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》^[11]中规定的直接干燥法进行测定, 并按照式(4)计算样品的含水量。每个样品平行测定 3 次。

$$X(\%) = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_3} \times 100 \quad \text{式 (4)}$$

式中: X 为样品中的含水量, %; m_1 为称量瓶及样品的质量, g; m_2 为称量瓶及样品干燥后的质量, g; m_3 为称量瓶的质量, g。

1.2.2.5 色度的测定 对戚风蛋糕进行去表皮处理, 仅保留其中心层, 即蛋糕芯部分。采用色度计测定蛋糕芯的 L^* 、 a^* 、 b^* 值, 每组每个样品平行测定 3 次。

1.2.2.6 质构特性的测定 蛋糕静置并冷却 3 h 后, 利用锯齿刀切割出位于蛋糕中心部分 2.0 cm×2.0 cm×2.0 cm 的立方体样本。采用物性分析仪, 并配备 P/36R 型探头, 对样本进行质地测定。根据文献^[12]确定测前速度为 1 cm/s、测中速度为 2 cm/s、测后速度为 1 cm/s, 压缩比为 40%, 保持时间 3 s。获得燕麦蛋糕芯的硬度、弹性、咀嚼性、回复性的指标结果。每个样品平行测定 3 次。

1.2.2.7 感官评价 当前, 关于戚风蛋糕的感官评价标准在全球范围内尚未形成统一规范。鉴于此, 本研究在遵循 GB/T 24303-2009《粮油检验 小麦粉蛋糕烘焙品质试验 海绵蛋糕法》^[13]的基础上, 进行了适当的调整与改进。以表面状况、内部结构、弹性、口感以及消费者接受度五大关键指标, 作为全面评估燕麦纤维戚风蛋糕品质的重要依据。将蛋糕切成长宽高均为 2.0 cm 的立方体, 邀请 10 位从事烘焙行业或食品专业的参评人员对蛋糕进行感官评价, 取平均分作为最后得分。评价标准见表 2。

表 2 戚风蛋糕品质评定标准

Table 2 Chiffon cake quality assessment standards

指标	得分(分)	评分标准
表面状况 (10分)	8~10	表面光滑无斑点、无环纹、且上部有较大弧度
	5~7	表面略有气泡、环纹、稍有收缩变形, 上部有一定弧度
	0~4	表面有深度环纹、收缩变形且凹陷、上部弧度很小
内部结构 (10分)	8~10	亮黄、淡黄有光泽、气孔较均匀、光滑细腻
	5~7	黄、淡黄色无光泽、气孔略大稍粗糙、不均匀、无坚实部分
	0~4	暗黄、气孔较大且粗糙、底部气孔紧密、有少量坚实部分
弹性 (10分)	8~10	柔软有弹性, 按下去后复原很快
	5~7	柔软较有弹性, 按下去后复原较快
	0~4	柔软性、弹性差, 按下去后很难复原
口感 (10分)	8~10	味纯正、绵软、细腻稍有潮湿感
	5~7	绵软略有坚韧感、稍干
	0~4	松散发干、坚韧、粗糙或较黏牙
接受程度 (10分)	8~10	口感、色泽、甜味、弹性等感官指标与不添加燕麦纤维的原配方蛋糕几乎一致, 完全接受
	5~7	口感、色泽、甜味、弹性等感官指标与不添加燕麦纤维的原配方蛋糕相近, 可以接受
	0~4	口感、色泽、甜味、弹性等感官指标与不添加燕麦纤维的原配方蛋糕相差甚远, 难以接受

1.2.2.8 微观结构的测定 将室温冷却后的蛋糕用锯齿刀切成长宽高分别为 4.0 mm×4.0 mm×4.0 mm 的正方体, 将样本置于含有 4% 多聚甲醛的组织固定液中, 在恒定的 4 ℃ 条件下静置固定 12 h。之后对其进行乙醇梯度脱水处理, 在 CO₂ 临界点干燥并喷金处理后, 使用蔡司场发射扫描电镜在 50×、300×放大倍数条件下观察其内部结构。

1.2.3 燕麦纤维戚风蛋糕抗老化能力的测定

1.2.3.1 蛋糕芯部晶体结构的测定 将样品粉末均匀平铺在带有凹槽的玻璃板上, 放入 X 射线衍射仪中进行测定。X 射线衍射仪的参数设定为: 管流 40 mA, 管压 40 kV, 扫描区域 4°~50°, 扫描速率 2°/min, 步长 0.1°(0.02)。根据式(5)计算样品的相对结晶度。

$$\text{相对结晶度}(\%) = \frac{\text{结晶区面积}}{\text{结晶区面积} + \text{非结晶区面积}} \times 100 \quad \text{式 (5)}$$

1.2.3.2 FTIR 测定 戚风蛋糕的傅里叶变换红外光谱分析采用 KBr 压片法进行。戚风蛋糕样品(储藏一周)经真空冷冻干燥后, 精细研磨并过筛(100 目), 制成样品粉末。与 KBr 粉末按 1:100 比例混合, 红外照射下研磨混匀, 压制透明薄片。将此薄片置于红外光谱仪上, 以空气为背景进行分析。设定测试条件为: 扫描波数范围 400~4000 cm⁻¹, 分辨率 32 cm⁻¹, 波谱收集次数 100 次。

1.2.3.3 蛋糕芯部热力学特性的测定 对样品粉末采用差示扫描量热仪进行热性能测定。以空铝坩埚为参比, 以氮气为载气, 其流速设定为 20 mL/min, 扫描温度设定为 30~200 ℃, 升温速度设定为 10 ℃/

min。记录起始温度(T_0)、峰值温度(T_p)、终止温度(T_c)以及焓变(ΔH)等关键参数。每组样品重复测定 3 次并取平均值作为最终结果。

1.3 数据处理

实验数据至少重复测定 3 次取平均值,结果均以平均值 \pm 标准差表示。用 Origin 2022 绘图,SPSS 24.0 进行显著性分析($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 燕麦纤维对戚风蛋糕品质特性的影响

2.1.1 燕麦纤维对戚风蛋糕面糊密度及比容的影响

面糊密度是影响蛋糕体积的因素之一,面糊密度越低,蛋糕体积越大,品质越好。一般来说,蛋糕糊若密度过高,会使得蛋糕成品内部质地变得紧密而硬实,从而产生不利影响,如口感下降、柔软度减少等^[14-15]。由图 1 可知,燕麦纤维添加比例为 3%~9% 时,面糊密度随着燕麦纤维添加量的增加而下降,此时蛋糕品质提升。这可能是由于燕麦纤维中蛋白质含量较高,有利于蛋糕糊在搅拌过程中气泡的进入和保持^[16]。当添加量为 9% 时,面糊密度降至最低,为 0.69 g/mL,相较于未添加时的密度,降低了 10.39%。当燕麦纤维添加量为 12%、15% 时,面糊密度随着燕麦纤维添加量的增加略有上升,可能是因为较多的燕麦纤维使面糊黏度发生显著变化。面糊黏度对面糊中气泡的流动和结合会造成一定程度的影响,面糊黏度大,蛋白霜气泡难融入蛋黄糊,导致气泡量减少而密度增加^[17]。比容反映蛋糕体积的膨胀程度,会影响蛋糕的外观、口感和组织状态^[18],比容越高,蛋糕品质越好。一般情况下,蛋糕的面糊密度与成品比容呈反比关系。由图 1 可得,随着燕麦纤维添加量的递增,其比容呈现先增后减的变化趋势,符合图中面糊密度先降后升的趋势。加入燕麦纤维后,样品的比容明显提升,而添加量为 9% 时比容达到了相对峰值,较 0% 组从 2.44 mL/g 上升至 3.56 mL/g。而添加量为 12% 与 15% 时,比容又有所降低。这可能是因为燕

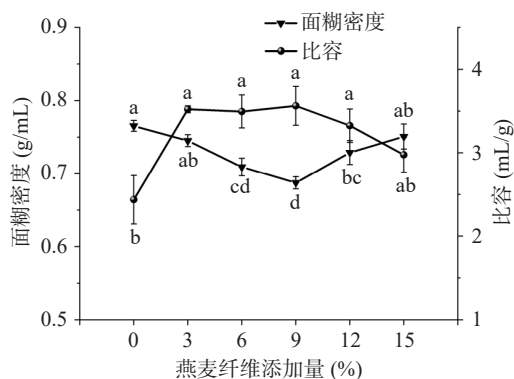


图 1 不同燕麦纤维添加量对面糊密度及成品比容的影响

Fig.1 Effects of different oat fiber addition amounts on batter density and finished product specific volume

注: 不同小写字母代表燕麦纤维添加量不同,其数据差异显著($P<0.05$),图 2~图 3 同。

麦膳食纤维具有很强的吸水性^[19],当添加量过高时,燕麦纤维会吸收过多的水分,导致面糊密度增加,进而影响蛋糕的膨松度,造成比容的减小。

2.1.2 燕麦纤维对戚风蛋糕烘焙损失率的影响 通常来讲,烘焙损失率越高,戚风蛋糕的损耗越大。由图 2 可知,与不含燕麦纤维的样品相比,添加燕麦纤维的蛋糕烘焙损失率显著降低($P<0.05$)。在 3%~12% 的添加量范围内,其烘焙损失率逐步下降;但当添加量达到 15% 时,损失率有所回升。这可能是由于过多的膳食纤维会干扰面糊的水分分布,导致烘焙过程中水分更易流失^[20]。蛋糕的烘焙损失率与失水率密切相关,而水分流失受持水能力影响。蛋糕的持水性可能会受到蛋糕内淀粉和蛋白质与水分子结合状态的影响,从而影响蛋糕的烘焙损失率。总体呈现的下降趋势表明燕麦纤维有助于改善蛋糕的持水性,降低其烘焙损失率。

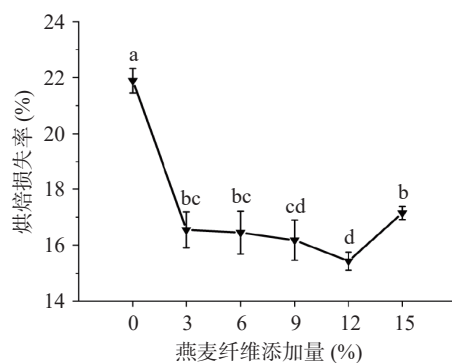


图 2 不同燕麦纤维添加量对戚风蛋糕烘焙损失率的影响

Fig.2 Effects of different oat fiber addition amounts on baking loss rate of chiffon cake

2.1.3 燕麦纤维对戚风蛋糕含水量的影响 戚风蛋糕含水量较充足时,口感柔软细腻,品质较好。由图 3 可知,燕麦纤维添加量为 3%~9% 时,含水量随着燕麦纤维添加量的增加而升高,添加量为 9% 时含水量达到峰值 45.84%,较添加量 0% 组提升了 7.80%。这可能是由于燕麦具有较强的吸水能力和稳定的持水特性,对吸附的水分控制能力强,亲水性能较好,使得自由水不容易再次析出^[21]。当燕麦纤维

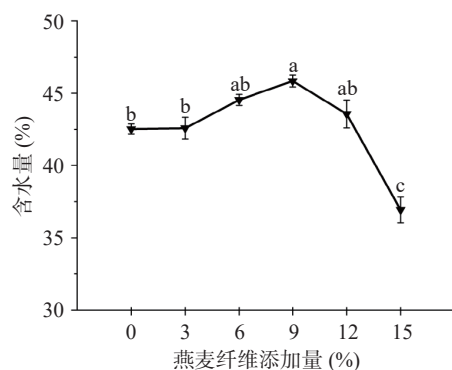


图 3 不同燕麦纤维添加量对戚风蛋糕含水量的影响

Fig.3 Effect of different oat fiber addition amounts on the moisture content of chiffon cake

添加量为 12%、15% 时,含水量随着添加量的增加而降低,这与损失率中过多的膳食纤维会导致烘焙过程中水分更易流失这一推测相符。此时燕麦纤维的吸水能力下降,结合水析出,水的流动性增强^[22]。15% 添加量下的样品含水量显著低于其他组别($P<0.05$),其含水量低于 0% 组,烘焙损失率却比 0% 组低,是因为燕麦纤维在戚风蛋糕制作过程中发挥着多种作用,包括改变面糊结构、影响水分分布和保留、减缓水分迁移等。这些复杂的作用机制可能导致水分含量和烘焙损失率之间的不一致性。

2.1.4 燕麦纤维对戚风蛋糕色度的影响 由表 3 可知,蛋糕的 L^* 值随燕麦纤维添加比例的增加而降低,降低的原因可能是燕麦纤维的原色比小麦粉的颜色深,添加量越高整体亮度越低。当燕麦添加量为 0%~9% 时, a^* 值和 b^* 值随添加量的增加而升高,说明偏红性和偏黄性增加。该现象归因于燕麦纤维自身色泽淡黄并且在烘焙过程中发生焦糖化反应。随着燕麦纤维添加量的增加,蛋糕中蛋白质含量也逐渐增加,促进了美拉德反应,从而产生了深棕色的成分^[23]。当燕麦添加量为 12% 和 15% 时, L^* 值保持下降趋势, a^* 值持续上升,而 b^* 值由原先的上升趋势转变为下降。 b^* 值下降表明蛋糕颜色黄色减少、趋向蓝色,这与燕麦纤维影响蛋糕褐变反应有关。燕麦纤维的增加会提升蛋白质含量,加剧褐变反应的速度和强度^[24]。初期时可能提升 b^* 值,但过量添加可能导致蛋白质与其他成分的相互作用而减少黄色调,增加蓝色调。

表 3 不同燕麦纤维添加量对戚风蛋糕色泽的影响

Table 3 Effect of different oat fiber addition amounts on color of chiffon cake

燕麦纤维添加量(%)	L^*	a^*	b^*
0	91.76±0.40 ^a	-4.98±0.18 ^d	34.59±0.17 ^b
3	90.54±0.30 ^{ab}	-4.59±0.06 ^{cd}	35.64±0.95 ^b
6	88.93±0.41 ^{bc}	-4.39±0.27 ^{bc}	37.58±0.47 ^a
9	88.64±0.36 ^c	-3.91±0.08 ^{ab}	38.90±0.39 ^a
12	86.45±0.75 ^d	-3.58±0.36 ^a	30.78±1.85 ^c
15	85.73±1.74 ^d	-3.44±0.41 ^a	28.38±0.30 ^d

注:同列不同小写字母代表燕麦纤维添加量不同,其数据差异显著($P<0.05$),表4~表7同。

2.1.5 燕麦纤维对戚风蛋糕质构特性的影响 高品质的戚风蛋糕往往展现出较低的硬度和咀嚼性,这是其优良特性的体现。咀嚼性与硬度的相关性较强,其变化趋势在很大程度上与硬度的变化相吻合。由表 4 可知,随着燕麦纤维添加量的增大,蛋糕的硬度和咀嚼性均随之降低。硬化效应是由于淀粉的回生以及淀粉在冷却过程中的重结晶造成的^[25],蛋糕的硬度受淀粉分子老化程度的直接影响^[26]。添加燕麦纤维样品的硬度降低,由此推测一定量的燕麦纤维可优化蛋糕的品质特性。当燕麦纤维添加量为 12% 与 15% 时,其弹性和回复性显著降低($P<0.05$),推测原因因为燕麦纤维添加量超过 12% 时,成品过于绵软,缺

乏应有的膨松度和弹性,呈现塌陷状态且回复性差,影响其相关指标。

表 4 不同燕麦纤维添加量对戚风蛋糕质构特性的影响

Table 4 Effects of different oat fiber addition amounts on the texture characteristics of chiffon cake

燕麦纤维添加量(%)	硬度(gf)	弹性(mm)	咀嚼性(gf)	回复性
0	258.59±23.81 ^a	0.86±0.04 ^{ab}	277.71±36.56 ^a	0.34±0.02 ^{ab}
3	254.58±41.10 ^a	0.96±0.01 ^a	168.57±9.37 ^b	0.37±0.02 ^a
6	253.74±35.70 ^a	0.86±0.03 ^{ab}	148.17±21.80 ^b	0.38±0.01 ^a
9	244.25±28.37 ^{ab}	0.93±0.04 ^a	151.53±16.91 ^b	0.37±0.00 ^a
12	161.23±40.49 ^b	0.77±0.15 ^b	139.87±37.54 ^{bc}	0.33±0.00 ^b
15	163.56±8.38 ^b	0.64±0.08 ^c	93.88±7.61 ^c	0.29±0.03 ^c

2.1.6 燕麦纤维对戚风蛋糕感官评价的影响 邀请 10 位参评人员对 6 组戚风蛋糕进行感官评价,结果如图 4 所示。燕麦纤维添加量为 15% 时在五个维度内的得分均为最小值,这可能与 15% 添加量时燕麦纤维无法完全与面糊混合,烘焙后有严重结块现象有关。3% 与 9% 的口感趋于一致,最接近于 0% 添加量的口感评分。3% 与 9% 添加量的弹柔性评分较高,该结果与质构特性的结果较为符合。燕麦纤维添加量为 0%~9% 时,蛋糕的内部结构差异不大;12% 时出现轻微结块现象,15% 时结块严重,故 12% 与 15% 添加量下的样品内部结构评分较低。添加量为 0% 和 3% 时表面状况评分相近;6% 与 9% 表面状况评分相近;12% 与 15% 表面状况得分下降明显。整体而言,与 0% 添加量相比,3%~9% 添加量下的燕麦纤维戚风蛋糕接受程度较高。

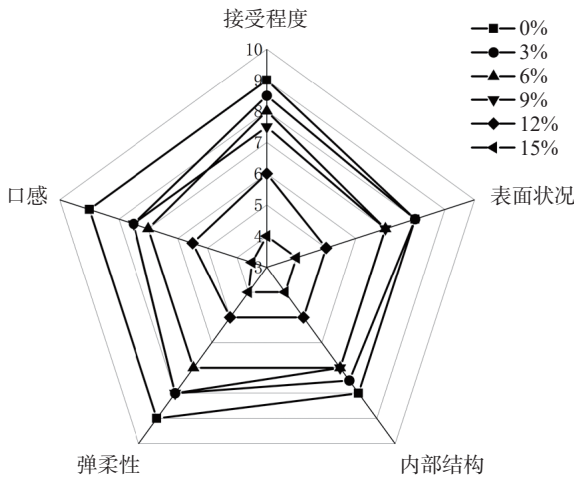


图 4 不同燕麦纤维添加量对戚风蛋糕感官差异的影响
Fig.4 Effects of different oat fiber addition amounts on sensory differences of chiffon cake

2.1.7 燕麦纤维对戚风蛋糕芯部微观结构的影响

图 5 为燕麦纤维不同添加比例下蛋糕芯内部放大 50×及 300×的扫描电镜图。扫描电镜放大倍数为 50×时,与对照组相比,加入不同添加量的燕麦纤维后,蛋糕的孔隙率显著增加,表明加入燕麦纤维后面糊中形成了更多均匀稳定的气泡。可能是燕麦纤维

中的蛋白质使得面糊气泡厚度和刚性增加^[27], 气泡不易消逝, 孔隙存在更多。但添加量达到 12% 及 15% 时, 孔隙过大, 易导致成品坍塌不成形, 从而使其弹性和回复性过低, 这与质构结果相符。在蛋糕碎屑内部结构中, 黑色部分代表气体细胞^[28]。当扫描电镜的放大倍数为 300×时, 可以观察到: 随着燕麦纤维添加量的增多, 蛋糕中的气体细胞数量增加。这一变化趋势与放大 50×时观察到的现象相吻合, 即蛋糕的孔隙随着燕麦纤维添加量的增加而逐渐变大。

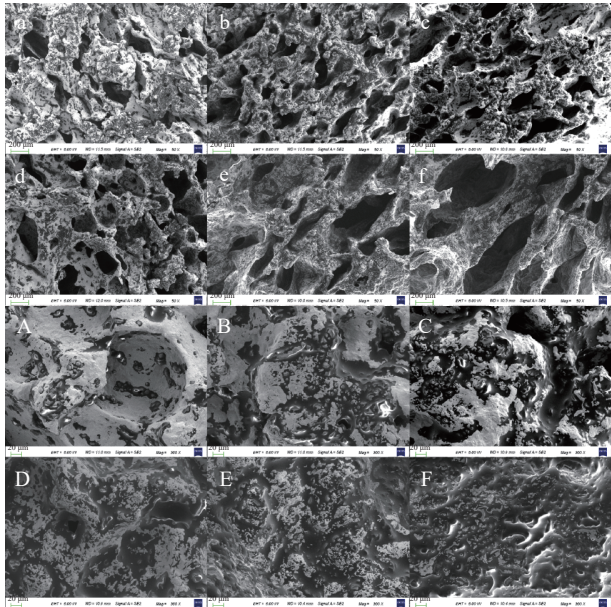


图 5 蛋糕芯的扫描电镜图像
Fig.5 Scanning electron microscopy image of cake core
注: a~f 放大倍数 50×; A~F 放大倍数 300×。

2.2 燕麦纤维对戚风蛋糕抗老化能力的影响

2.2.1 燕麦纤维对戚风蛋糕储藏一周后芯部晶体结构的影响 对戚风蛋糕中淀粉的晶体结构进行研究可以探究燕麦纤维对戚风蛋糕储藏稳定性的影响。燕麦纤维中的 β -葡聚糖能够增加面团黏度, 阻碍淀粉颗粒重结晶, 从而降低淀粉结晶度。而淀粉结晶度影响老化程度, 淀粉结晶度越高, 老化速率越快。因为高结晶度提供更多有序区域, 这些区域为淀粉分子提供更多结晶核心, 从而促进老化过程中分子重排, 造成其老化程度更高^[29]。一般情况下, 淀粉结晶度低, 则曲线平缓。如图 6, 随着燕麦纤维添加量的增加, 曲线趋于平缓, 由此可知燕麦纤维对于淀粉老化有一定改善, 但具体抗老化程度需要通过结晶度进一步判断。表 5 说明了燕麦纤维 0% 添加量与其他五组添加量下的戚风蛋糕芯部淀粉相对结晶度。与 0% 添加量相比, 其他五组的相对结晶度整体呈现先下降后上升的趋势。当添加量为 9% 时相对结晶度最低, 由 20.66% 减小至 18.44%, 减小率达 10.75%。添加量为 3%~9% 时, 随着添加量的增大, 相对结晶度减小, 说明淀粉的晶体结构逐渐被破坏。但添加量达到 12% 与 15% 时, 相对结晶度回升, 这可能是因

为燕麦纤维未完全溶解, 面糊呈饱和状态, 成熟的蛋糕样品中有较大的固体颗粒。

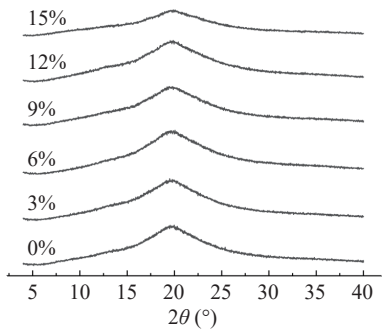


图 6 不同燕麦纤维添加量下戚风蛋糕的 X 射线衍射图谱
Fig.6 X-ray diffraction patterns of chiffon cake with different amounts of oat fiber added

表 5 不同燕麦纤维添加量对储藏期戚风蛋糕相对结晶度的影响

Table 5 Effects of different oat fiber addition amounts on relative crystallinity of chiffon cake during storage

燕麦纤维添加量(%)	相对结晶度(%)
0	20.66±0.49 ^a
3	19.30±0.58 ^{bc}
6	18.68±0.37 ^c
9	18.44±0.71 ^c
12	20.68±0.51 ^a
15	20.28±0.36 ^{ab}

2.2.2 燕麦纤维对戚风蛋糕储藏一周后羟基的影响

观察图 7 发现, 不同添加量的燕麦纤维并未在红外光谱图中引起显著的差异性变化, 也未催生新的化学基团形成, 但是对共存体系中的淀粉晶体结构及其吸收峰的强度产生了不同程度的调节效应。红外光谱中, 位于 1047 cm^{-1} 和 1022 cm^{-1} 的吸收峰分别对应淀粉颗粒中的晶态区域(或称有序区域)的特征谱带和非晶态区域(即无定形区域)的特征谱带, 这两处峰值能够反映出淀粉颗粒内部结构的有序与无序状态^[30]。某些振动对混合系统内聚合物的结构变化以

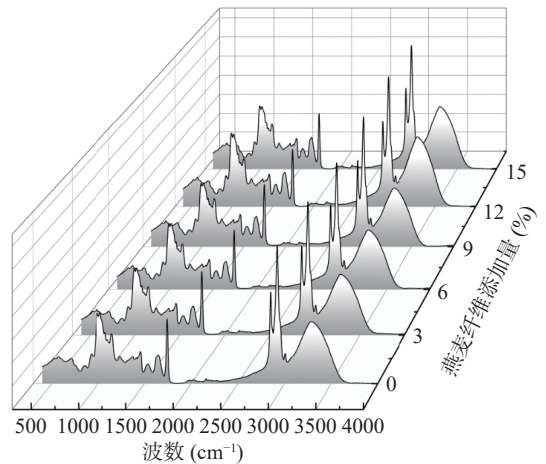


图 7 不同燕麦纤维添加量对戚风蛋糕羟基的影响
Fig.7 Effect of different oat fiber addition amounts on hydroxyl groups in chiffon cake

及淀粉与水结合(即水合作用)的过程表现出显著的敏感性,在 995 cm^{-1} 处的吸收峰对水分敏感^[31]。 1047 cm^{-1} 与 1022 cm^{-1} 两个波数下吸光度的比值是衡量淀粉分子中有序晶体区域相对含量的一个指标,常用于评估淀粉在短时间内结晶程度的变化^[32-33]。而 995 cm^{-1} 与 1022 cm^{-1} 波数下吸光度的比值反映的是淀粉分子内部双螺旋结构组织状态中的晶体特性。

观察表 6 发现,不同比例的燕麦纤维添加到戚风蛋糕中, $1047\text{ cm}^{-1}/1022\text{ cm}^{-1}$ 的比率均小于 0% 添加量组, $995\text{ cm}^{-1}/1022\text{ cm}^{-1}$ 的比率整体呈上升趋势,不同的添加量下增减幅度存在差异。当燕麦纤维添加量为 12% 时, $1047\text{ cm}^{-1}/1022\text{ cm}^{-1}$ 的比率最小。推测此时淀粉颗粒中的有序晶体区域正逐步被破坏,导致其双螺旋结构变得松散不紧密。这一变化与相对结晶度检测所揭示的结果相吻合,进一步印证了晶体结构原有的排列状态在逐渐瓦解。淀粉颗粒的双螺旋结构及晶体区域的瓦解可以促进水分与淀粉分子的有效接触,整个体系便能够吸纳并保留更多的水分,从而提升水分含量。这种变化增加了淀粉分子的活动性和自由度,可能延缓其重新排列和结晶,在一定程度上能够抑制淀粉老化^[34]。当添加量达到 15% 时,观察到 $1047\text{ cm}^{-1}/1022\text{ cm}^{-1}$ 的比率略微上升,这表明淀粉颗粒内的有序结晶区域有所增加;同时, $995\text{ cm}^{-1}/1022\text{ cm}^{-1}$ 的比率下降,推测淀粉发生重结晶现象,表明此添加量下淀粉颗粒老化程度提升。

表 6 不同燕麦纤维添加量下蛋糕芯部淀粉颗粒的峰强比
Table 6 Peak intensity ratio of starch granules in cake core with different oat fiber addition amounts

燕麦纤维添加量(%)	$1047\text{ cm}^{-1}/1022\text{ cm}^{-1}$	$995\text{ cm}^{-1}/1022\text{ cm}^{-1}$
0	0.92 ± 0.01^a	0.98 ± 0.02^{bc}
3	0.89 ± 0.01^b	0.97 ± 0.00^c
6	0.91 ± 0.01^a	0.99 ± 0.00^b
9	0.89 ± 0.01^b	0.99 ± 0.01^b
12	0.87 ± 0.00^c	1.01 ± 0.00^a
15	0.88 ± 0.00^{bc}	1.00 ± 0.01^a

2.2.3 燕麦纤维对戚风蛋糕储藏一周后芯部老化焓变的影响 热力学特性研究基于糊化温度、焓值等反映面制品中淀粉的变化,这些变化与原料种类、淀粉含量、水分含量等因素密切相关^[35]。糊化温度(T_o 、 T_p 和 T_c)能够揭示微晶结构特性及淀粉颗粒的结晶化程度,而焓值(ΔH)则代表了支链淀粉微晶中双螺旋结构被破坏或丧失的程度^[36]。含燕麦纤维样品在冷藏储藏一周后,其焓值较对照组样品呈下降趋势,表明燕麦纤维有利于抑制戚风蛋糕在储藏期间的淀粉老化现象。由表 7 可知,六组样品的起始温度(T_o)均处在 $40\sim50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,峰值温度(T_p)基本处在 $80\sim90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,仅 12% 组相差较大。这可能是由于燕麦纤维中的蛋白质和淀粉在加热过程中会经历结构变化,这些变化会影响蛋糕的热特性^[37]。热处理

后,燕麦球蛋白的二级结构和三级结构遭到破坏,稳定性降低^[37],出现误差。DSC 曲线出现吸热峰则表示淀粉发生老化,且淀粉的老化程度与吸热峰的大小呈正比^[38];淀粉被完全糊化之后其吸热峰便不会出现。由图 8 可知,随着燕麦纤维添加量增多,吸热峰趋于平缓,进一步说明燕麦纤维具有抗淀粉老化特性。

表 7 不同燕麦纤维添加量对戚风蛋糕储藏期热力学性质的影响

Table 7 Effects of different oat fiber addition amounts on thermodynamic characteristics of chiffon cake during storage

燕麦纤维添加量(%)	$T_o(^{\circ}\text{C})$	$T_p(^{\circ}\text{C})$	$T_c(^{\circ}\text{C})$	$\Delta H(\text{J/g})$
0	46.64 ± 0.45^b	82.65 ± 0.43^d	112.04 ± 0.45^f	110.85 ± 0.66^a
3	49.74 ± 0.78^a	81.94 ± 1.00^d	118.98 ± 0.27^e	108.31 ± 0.39^b
6	43.84 ± 0.30^d	80.21 ± 0.68^e	124.80 ± 0.26^b	101.46 ± 0.54^c
9	42.47 ± 0.74^e	85.21 ± 0.51^c	121.50 ± 0.47^c	92.86 ± 0.41^d
12	45.31 ± 0.53^c	101.03 ± 0.63^a	120.41 ± 0.73^d	92.23 ± 0.44^d
15	42.75 ± 0.37^{de}	89.20 ± 0.58^b	128.13 ± 0.46^a	90.17 ± 0.34^e

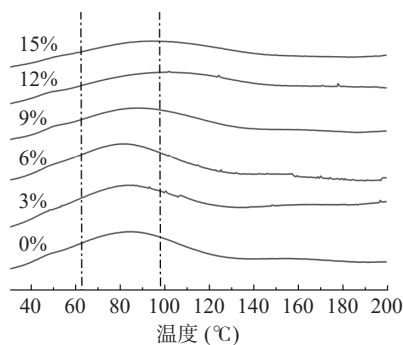


图 8 不同燕麦纤维添加量下戚风蛋糕的吸热峰图谱
Fig.8 Endothermic peak spectra of chiffon cake with different amounts of oat fiber added

3 结论

本文探究了不同燕麦膳食纤维添加量对戚风蛋糕品质特性及抗老化能力的影响。根据质构、烘焙损失率、微观等指标表明,燕麦纤维添加量为 3%、6%、9% 时,戚风蛋糕的品质特性有所改善。但添加量超过 12% 时,含水量及感官等部分指标显著恶化,对蛋糕品质产生较大负面影响。通过对储藏期样品进行羟基结构分析、蛋糕芯部老化焓变与芯部晶体结构分析,进一步证实了燕麦纤维有助于提升戚风蛋糕的抗老化能力。综合发现,燕麦纤维添加量处于 3%~9% 时能在保障蛋糕品质特性的前提下改善老化。当燕麦纤维添加量为 9% 时,戚风蛋糕的综合品质较高且兼具抗老化能力,满足大部分消费者饮食习惯与健康需求的同时,有效改善戚风蛋糕储藏期老化的问题。

参考文献

- [1] SCHIRMER M, JEKLE M, ARENDT E, et al. Physico chemical interactions of poly dextrose for sucrose replacement in pound cake[J]. *Food Research International*, 2012, 48(1): 291–298.
- [2] 刘翔,董善富. 蔓越莓膳食纤维蛋糕的研制[J]. 农产品加工, 2020(23): 17–19. [LIU X, DONG S F. The development of cranberry dietary fiber cake[J]. *Farm Products Processing*, 2020(23): 17–19.]
- [3] 卢凯玲,崔娜,韦靓,等. 响应面法优化马蹄戚风蛋糕工艺的研究[J]. 现代食品, 2020(22): 112–117. [LU K L, CUI N, WEI L, et al. Study on water chestnut chiffon cake technology by response surface methodology[J]. *Modern Food*, 2020(22): 112–117.]
- [4] 李贞. 燕麦蛋糕加工工艺及烘焙品质探讨[J]. 食品安全导刊, 2018(6): 136. [LI Z. Discussion on the processing technology and baking quality of oatmeal cake[J]. *China Food Safety*, 2018(6): 136.]
- [5] SHAVETA H K, KAUR S, SHARMA V, et al. Hulless barley: A new era of research for food purposes[J]. *Journal of Cereal Research*, 2019(11): 114–124.
- [6] 纪雨婷. 燕麦蛋糕加工工艺及烘焙品质探究[J]. 食品安全导刊, 2021(11): 42–43. [JI Y T. Study on the processing technology and baking quality of oatmeal cake[J]. *China Food Safety*, 2021(11): 42–43.]
- [7] PREMI M, SHARMA H K. Effect of drumstick leaves powder on the rheological, micro-structural and physico-functional properties of sponge cake and batter[J]. *Journal of Food Measurement & Characterization*, 2018(12): 11–21.
- [8] 刘秉杰,杨炳坤,徐阳,等. 酸乳海绵蛋糕的品质研究[J]. 食品科技, 2019, 44(6): 150–155. [LIU B J, YANG B K, XU Y, et al. Study on the quality of yogurt sponge cake[J]. *Food Science and Technology*, 2019, 44(6): 150–155.]
- [9] 张俊. 发芽对高粱性质的影响及其在无麸质蛋糕中的应用[D]. 成都: 西华大学, 2021. [ZHANG J. Effect of germination on sorghum properties and its application in gluten-free cake[D]. Chengdu: Xihua University, 2021.]
- [10] 王颖,李明娟,张雅媛,等. 木薯全粉对蛋糕品质及其质构特性的影响[J]. 食品与机械, 2017, 33(10): 179–183, 189. [WANG Y, LI M J, ZHANG Y Y, et al. Effect of the cassava flour on the qualities and texture characteristics of cake[J]. *Food & Machinery*, 2017, 33(10): 179–183, 189.]
- [11] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.3-2016 食品安全国家标准 食品中水分的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. GB 5009.3-2016 National food safety standards-Determination of moisture in foods[S]. Beijing: China Standards Press, 2016.]
- [12] 唐梦琦. 三种功能糖对戚风蛋糕的品质特性及抗老化机制的影响[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2021. [TANG M Q. Effects of three functional sugars on the quality characteristics and anti-aging mechanism of Chiffon cake[D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2021.]
- [13] 国家粮食局科学研究院, 农业部谷物及制品质量监督检验测试中心(北京). GB/T 24303-2009 粮油检验 小麦粉蛋糕烘焙品质试验 海绵蛋糕法[S]. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2009. [Academy of Grain Science and Technology, Quality Supervision and Inspection and Testing Center for Grains and Products of the Ministry of Agriculture (Beijing). GB/T 24303-2009 Inspection of grain and oils-Method for cake-making of wheat flour-Sponge cake[S]. Beijing: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, 2009.]
- [14] 桂艳艳. 南瓜粉对面粉及其蛋糕品质的影响[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2019. [GUI Y Y. Effect of pumpkin powder on wheat flour and cake qualities[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2019.]
- [15] JIA C L, HUANG W N, JI L, et al. Improvement of hydrocolloid characteristics added to angelfood cake by modifying the thermal and physical properties of frozen batter[J]. *Food Hydrocolloids*, 2014, 41: 227–232.
- [16] YILDIZ E, GUNER S, SUMNU G, et al. Monitoring the effects of ingredients and baking methods on quality of gluten free cakes by time domain (TD) NMR relaxometry[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2018, 11(10): 1923–1933.
- [17] 王雪. 亲水胶体对 Par-baking 戚风蛋糕品质的影响研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018. [WANG X. The effect of hydrocolloids on the quality of par-baking chiffon cake[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.]
- [18] 王晓瑞. 米粉对蛋糕品质的影响及米粉蛋糕品质改良研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2020. [WANG X R. The effect of rice on the quality of cake and rice cake quality improvement research[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2020.]
- [19] 温瑞雪,宋伟,罗卓婷,等. 不同加工处理方式对燕麦营养成分影响的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(4): 295–303. [WEN R X, SONG W, LUO Z T, et al. Research progress on effects of different processing methods on nutritional components of oats[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2023, 49(4): 295–303.]
- [20] HUANG Z, WANG J J, CHEN Y, et al. Effect of water-soluble dietary fiber resistant dextrin on flour and bread qualities[J]. *Food Chemistry*, 2020, 317: 126452.
- [21] GULARTE M A, HERA E D L, GÓMEZ M, et al. Effect of different fibers on batter and gluten-free layer cake properties[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2012, 48(2): 209–214.
- [22] LUO S J, YAN X D, FU Y T, et al. The quality of gluten-free bread made of brown rice flour prepared by low temperature impact mill[J]. *Food Chemistry*, 2021, 348: 129032.
- [23] BOZDOĞAN N, KUMCUOĞLU S, TAVMAN S. Investigation of the effects of using quinoa flour on gluten free cake batters and cake properties[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2019, 56(2): 683–694.
- [24] ARDESHIR A, FAZELI F, KHORSHIDIAN N, et al. Physicochemical, antioxidant, and sensory characteristics of sponge cake fortified with quinoa flour, oolong, and white tea powder[J]. *Journal of Food Quality*, 2024, 2024(1): 6086158.
- [25] DÍAZ RAMÍREZ M, CALDERÓN DOMÍNGUEZ G, DE LA PAZSALGADO CRUZ M, et al. Sponge cake microstructure, starch retrogradation and quality changes during frozen storage[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2016, 51(8): 1744–1753.
- [26] 闫国圆. 食品研究中质构仪的运用分析[J]. 食品安全导刊, 2016(6): 56–57. [YAN Y Y. Analysis of the application of texture analyzer in food research[J]. *China Food Safety*, 2016(6): 56–57.]
- [27] ASLAN TÜRKER D, GÖKSEL SARAÇ M, DOĞAN M. Development of gluten-free cake for mulatons: The role of tapioca & potato starch and quinoa in the rheological, textural and powder

- flow properties[J]. *European Food Research and Technology*, 2023, 249(3): 675–684.
- [28] CASTANHA N, CHALLOIS S, GRENIER D, et al. Multi-photon microscopy is a nondestructive label-free approach to investigate the 3D structure of gas cell walls in bread dough[J]. *Sci Rep*, 2023, 13(1): 13971.
- [29] 洪静, 郭婉雪, 郑学玲, 等. 不同加工方式的淀粉质食品老化的影响因素和延缓老化方法的研究进展[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2023, 44(2): 127–133. [HONG J, GUO W X, ZHENG X L, et al. Research progress on influencing factors and delaying aging of starchy food with different processing methods[J]. *Journal of Henan University of Technology of China (Natural Science Edition)*, 2023, 44(2): 127–133.]
- [30] 任静, 刘刚, 欧全宏, 等. 淀粉的红外光谱及其二维相关红外光谱的分析鉴定[J]. *中国农学通报*, 2015, 31(17): 58–64. [REN J, LIU G, OU Q H, et al. Starch discrimination with fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) and two-dimensional correlation infrared spectroscopy (2D-IR)[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 31(17): 58–64.]
- [31] 刘霞, 黄雅萍, 卢旭, 等. 抗性淀粉的结构性质与功能关系研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(18): 279–286. [LIU X, HUANG Y P, LU X, et al. Advances in structural properties and its correlation with physiological functions of resistant starch[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46(18): 279–286.]
- [32] 詹冬玲, 任玉雪, 闵伟红, 等. 面包老化机理及其分析技术的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2013, 34(3): 353–355. [ZHAN D L, REN Y X, MIN W H, et al. Research progress in the bread aging mechanism and analysis techniques[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2013, 34(3): 353–355.]
- [33] RUBENS P, SNAUWAERT J, HEREMANS K, et al. *In situ* observation of pressure induced gelation of starches studied with FTIR in the diamond anvil cell[J]. *Carbohydrate Polymers*, 1999, 39(3): 231–235.
- [34] 闫喜梅, 胡新中, 李俊俊, 等. 水分含量对燕麦淀粉糊化老化特性影响的研究[J]. *中国粮油学报*, 2015, 30(4): 27–32. [YAN X M, HU X Z, LI J J, et al. Effects of moisture content on the gelatinization and retrogradation of oat starch[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2015, 30(4): 27–32.]
- [35] 陈焱芳, 张雁, 邓媛元, 等. 糙米挥发性风味物质分析技术及其在加工中变化研究进展[J]. *中国粮油学报*, 2020, 35(8): 160–169. [CHEN Y F, ZHANG Y, DENG Y Y, et al. Research progress in analysis technology of volatile flavor compounds in brown rice and its changes during processing[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2020, 35(8): 160–169.]
- [36] LIU X, HUANG S, CHAO C, et al. Changes of starch during thermal processing of foods: Current status and future directions[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2022, 119: 320–337.
- [37] 王婧. 热处理对燕麦蛋白质理化与功能特性影响的研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2019. [WANG J. Study on the effects of heat treatment on the physical, chemical and functional properties of oat protein[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2019.]
- [38] 何璐, 杨英, 林亲录. 大米淀粉回生机理、检测及控制方法的研究现状[J]. *食品工业科技*, 2015, 36(8): 365–369, 373. [HE L, YANG Y, LIN Q L. Research status on the mechanism, detection and control methods of rice starch retrogradation[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2015, 36(8): 365–369, 373.]