



天津科技大学学报

Journal of Tianjin University of Science & Technology

ISSN 1672-6510, CN 12-1355/N

《天津科技大学学报》网络首发论文

题目：不同预热条件对油炸马铃薯饼品质的影响
作者：王龙君，胡宏海，刘伟，张国辉，郭志乾，吴涛
DOI：10.13364/j.issn.1672-6510.20240172
收稿日期：2024-09-02
网络首发日期：2025-01-14
引用格式：王龙君，胡宏海，刘伟，张国辉，郭志乾，吴涛. 不同预热条件对油炸马铃薯饼品质的影响[J/OL]. 天津科技大学学报.
<https://doi.org/10.13364/j.issn.1672-6510.20240172>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

2025 年

天津科技大学学报
Journal of Tianjin University of Science and Technology

DOI: 10.13364/j.issn.1672-6510.20240172

不同预热条件对油炸马铃薯饼品质的影响

王龙君¹, 胡宏海², 刘伟², 张国辉³, 郭志乾³, 吴涛¹

(1.天津科技大学食品科学与工程学院, 天津 300457; 2.中国农业科学院农产品加工研究所, 北京 100193;
3.宁夏农林科学院固原分院, 宁夏固原 756000)

摘要:为探明不同预热处理时间和温度对油炸马铃薯饼品质的影响,本研究在不同温度(60~100℃)和时间(10~30 min)预热条件下制备了马铃薯饼,通过流变仪、质构仪、色差计、低场核磁、扫描电子显微镜等仪器比较了不同马铃薯饼油炸前后的加工和食用品质差异。结果表明:随着预热温度升高和时间延长,油炸后薯饼的硬度、黏性、内聚性和咀嚼性逐渐增加,颜色变得金黄和明亮,油脂含量显著降低;感官评价显示预热处理提升了油炸后薯饼的组织状态、质构、滋味、色泽和总体接受度评分。预热处理使油炸前的薯饼形成较大的聚集颗粒,颗粒之间的孔洞和缝隙变小,内部结构更加致密,减少了油炸过程中油脂进入薯饼内部的通道;预热处理导致油炸前薯饼中结合水和不易流动水向自由水转化,自由水的含量增加,导致反应底物浓度降低,减缓油炸过程中美拉德反应及类黑精色素生成。研究结果可为阐明预热处理提升油炸薯饼综合感官品质提供科学依据。

关键词:马铃薯; 马铃薯泥; 预热处理; 薯饼; 油炸; 感官品质

中图分类号: TS215

文献标志码: B

文章编号: 1672-6510(0000)00-0000-00

Effect of Different Preheating Conditions on the Quality of Fried Potato Cakes

WANG Longjun¹, HU Honghai², LIU Wei², ZHANG Guohui³, GUO Zhiqian³, WU Tao¹

(1. College of Food Science and Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China;
2. Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China;
3. Guyuan Branch, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Guyuan, Ningxia 756000, China)

Abstract: To explore the impact of different preheating treatments (temperature and time) on the quality of fried potato cakes, this study prepared potato cakes under various preheating conditions at different temperatures (60-100 °C) and times (10-30 minutes). The quality differences in processing and sensory properties before and after frying were compared using rheometer, texture analyzer, colorimeter, low-field nuclear magnetic resonance (LF-NMR), and scanning electron microscopy (SEM). The results showed that as preheating temperature and time increased, the hardness, viscosity, cohesiveness, and chewiness of the fried cakes gradually increased, while the color became golden and bright. The oil content significantly decreased. Sensory evaluation indicated that preheating improved the texture, structure, flavor, color, and overall acceptability of the fried cakes. Preheating caused the formation of larger aggregate particles in the cakes before frying, reducing the gaps and voids between the particles, resulting in a denser internal structure. This reduction in gaps decreased the passageways for oil infiltration during frying. Preheating also caused a transformation of bound water and unfreezable water into free water in the cakes before frying, which led to an increase in free water content. This, in turn, reduced the concentration of reactive substrates and slowed down the Maillard reaction and the formation of melanins during

收稿日期: 2024-09-02; 修回日期: 2024-11-29

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD1602502); 国家现代农业产业技术体系(CARS-09-P27)

作者简介: 王龙君(2000—), 男, 河北邢台人, 硕士研究生; 通信作者: 吴涛, 副教授, wutao@tust.edu.cn

frying. The findings provide scientific evidence for understanding how preheating treatment enhances the overall sensory quality of fried potato cakes.

Key words: potato; mashed potato; preheating treatment; potato cake; deep frying; sensory quality

马铃薯 (*Solanum tuberosum* L.) 富含碳水化合物、蛋白质、膳食纤维、维生素和矿物质等营养成分, 可加工为薯泥、油炸薯片、薯条、薯饼等不同类型的马铃薯食品。其中, 油炸薯饼以马铃薯为主要原料, 通过制泥、调配、混料、成型、油炸等工艺加工而成^[1], 具有外酥内糯、薯香浓郁、外形多样、营养均衡等特点, 迎合了当代快节奏的消费习惯, 日益受到消费者的喜爱。然而, 油炸食品富含脂肪, 长期过量摄入可能引发肥胖以及心血管疾病、糖尿病、癌症等慢性病, 对人体健康构成威胁^[2]。

近年来, 人们越来越关注饮食对身体健康的影响, 消费者对于营养美味的低脂食品需求日益增加。目前, 科研人员研发了不同原料预处理技术改善油炸食品的品质, 包括: 涂膜^[3]、冷冻^[4]、大气压冷等离子体^[5]、超声波^[6]、微波^[7]、脉冲电场^[8]等。其中, 预干燥、漂烫和湿热处理等热处理技术具有经济、有效、可连续化操作等特点。1000 W 60 s 微波预处理, 可显著提升油炸薯条的感官品质, 油脂含量从 41.3% 降低至 18.1%^[9]; 100 °C 30 min 漂烫结合热风干燥预处理, 油炸薯片中油脂含量可降低 39.17%^[10]。Chen 等^[11]发现湿热处理可提高淀粉晶体结构的有序性和热稳定性, 抑制淀粉在油炸过程中的吸油现象。目前, 不同原料预处理改善油炸马铃薯产品品质的研究主要集中于油炸薯条和薯片产品, 对于油炸薯饼的相关研究鲜有报道。

本实验系统研究了不同温度和时间预处理对油炸前薯饼流变特性、质构特性、微观形貌、水分分布和色泽等品质的影响; 进一步研究了预处理对油炸后薯饼质构、色泽、油脂含量以及感官品质的影响。通过本研究揭示了预处理对油炸薯饼品质的作用规律, 为开发营养健康的油炸薯饼产品提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与设备

马铃薯 (品种: 大西洋); 马铃薯全粉, 雪川六盘山食品 (宁夏) 有限公司提供; 棕榈油, 益海嘉里金龙鱼粮油食品股份有限公司; K-TSTA-100A

总淀粉检测试剂盒, K-TDFR-100A 膳食纤维总量检测试剂盒, 爱尔兰 Megazyme 公司; 所有化学品和试剂均为分析纯。

T-3.5 型特福油炸锅, 上海赛博电器有限公司; IKA LR-2.ST 型双层玻璃反应釜, 德国 IKA 公司; TA.XT plus 型质构仪, 英国 Stable Micro Systems 公司; MesoMR12-060H-I 型低场核磁分析仪, 苏州纽迈分析仪器股份有限公司; SU8010 型扫描电子显微镜, 日本日立公司; CR-400/410 型色差计, 柯尼卡美能达有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 马铃薯基本成分的测定

马铃薯鲜薯的干物质含量根据 GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》直接干燥法进行测定; 蛋白质含量根据 GB 5009.5-2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》中凯氏定氮法测定; 淀粉含量根据 K-TSTA-100A 总淀粉检测试剂盒说明书进行测定; 膳食纤维含量根据 K-TDFR-100A 膳食纤维总量检测试剂盒说明书进行测定; 根据李天昊等^[12]的 DNS (二硝基水杨酸) 法测定还原糖含量。

1.2.2 薯饼样品制备

马铃薯泥制备: 筛选新鲜的马铃薯, 清洗、去皮后, 切块 (边长为 3~4 cm), 100 °C 蒸煮 30 min, 冷却至室温, 用捣泥器制备马铃薯泥。

马铃薯泥预处理: 取 450 g 马铃薯泥和 50 g 马铃薯全粉加入到 IKA 双层玻璃反应釜 (注: 由于马铃薯泥水分含量较高, 薯饼不能成型, 因此需要添加部分马铃薯全粉), 转速为 50 r/min, 分别在不同温度 (60~100 °C) 和时间 (10~30 min) 条件下进行预处理。

油炸前薯饼制备: 以经过预处理的马铃薯泥为原料, 采用直径为 4.3 cm 和高为 1.6 cm 的标准模具制作圆形薯饼。如图 1 所示, 未经过预处理的油炸前薯饼作为对照组, 命名为 bf-control; 经过预处理的油炸前薯饼作为处理组, 其中 60 °C 预处理 10、20、30 min 的油炸前薯饼, 分别命名为 bf-60-10、bf-60-20、bf-60-30; 80 °C 预处理 10、20、30 min 的油炸前薯饼, 分别命名为 bf-80-10、

bf-80-20、bf-80-30; 100 °C预热处理 10、20、30 min 的油炸前薯饼, 分别命名为 bf-100-10、bf-100-20、bf-100-30。

油炸后薯饼制备: 将上述样品分别在 180 °C油炸 2 min, 取出, 沥油, 冷却至室温得到油炸后薯饼。如图 1 所示, 未经过预热处理的油炸后薯饼作为对照组, 命名为 af-control; 经过预热处理的油炸后薯饼作为处理组, 60 °C预热处理 10、20、30 min 的油炸后薯饼, 分别命名为 af-60-10、af-60-20、af-60-30; 80 °C预热处理 10、20、30 min 的油炸后薯饼, 分别命名为 af-80-10、af-80-20、af-80-30; 100 °C预热处理 10、20、30 min 的油炸后薯饼, 分别命名为 af-100-10、af-100-20、af-100-30。

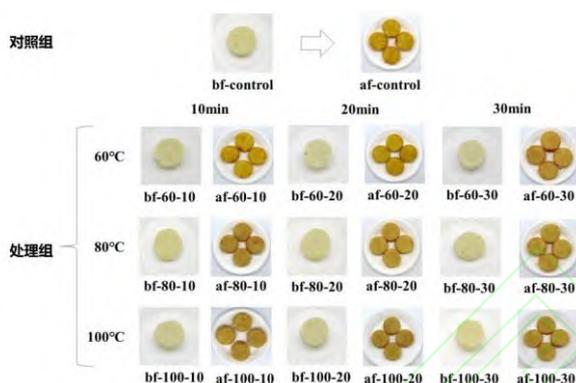


图 1 不同薯饼样品

Fig.1 Different potato cake samples

1.2.3 质构品质

分别将油炸前和油炸后的薯饼样品置于物性测定质构仪 (TPA) 载物台, 采用 TA39 (2 mm Φ) 探头进行测定。测前、测试中、测后速率分别为 1.5、1、1 mm/s。测试距离为 10 mm, 触发力为 5 g。选取硬度、黏力、内聚性、咀嚼性及弹性表征样品的质构品质。

1.2.4 微观形貌

采用 SEM 对不同油炸前薯饼的微观形貌进行观察。样品通过真空冷冻干燥除去水分, 用超薄刀片横向切割, 使所有样品的厚度尽量保持一致 (直径约 4 mm, 厚度约 0.2 mm)。将样品黏在样品台上并干燥喷金。所有照片均以 100 倍的放大倍率拍摄。

1.2.5 流变特性

采用流变仪对不同油炸前薯饼的流变特性进行检测分析。取 5 g 样品均匀地添加至流变仪的帕尔贴板上, 并用平行板将周围多余的样品移除。测试时选用直径为 40 mm 的平行板, 间隙设置为 1 mm,

25 °C平衡 2 min。

静态流变: 剪切速率 ($\dot{\gamma}$) 从 0.1 递增至 100 s^{-1} , 记录剪切应力 (τ) 随 $\dot{\gamma}$ 的变化。采用 Power Law 模型对实验数据进行回归拟合分析。计算公式见式 (1)。

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^{n-1} \quad (1)$$

式中: τ 为剪切应力/Pa; K 为稠度指数/(Pa sn); $\dot{\gamma}$ 为剪切速率/ s^{-1} ; n 为流动行为指数。

动态流变: 应变恒定在 1%, 频率为 0.1~100 Hz, 记录样品储能模量 G' 及损耗模量 G'' 随频率的变化。

1.2.6 水分状态

采用脉冲核磁分析仪对不同油炸前薯饼的水分状态进行检测分析。用打孔器取直径为 2 cm、高度为 1 cm 的圆柱体样品放于核磁管内进行检测。测量参数: 磁场强度 0.5 T, 工作温度 25 °C, 磁场频率 32 MHz, 等待时间 1500.000 ms, 时间回波=0.250 ms, 基于得到原始数据的对数坐标绘制 T_2 分布曲线。

1.2.7 色泽

利用色差计对不同油炸后薯饼的色泽进行测定, 随机取 3 个样品, 每个样品平行测定 6 次取平均值。色泽采用 CIE-L*a*b*色空间表示方法, 得到 3 个参数 L^* 、 a^* 和 b^* , 其中: L^* 代表亮度, L^* 越大表示亮度越高; a^* 代表红色到绿色之间的变化, 正数表示红色方向, 负数表示绿色方向; b^* 代表黄色-蓝色之间的变化, 正数表示黄色方向, 负数表示蓝色方向。

1.2.8 油脂含量

参照 GB 5009.6—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》中规定的索氏抽提法, 使用脂肪测定仪测定不同油炸后薯饼中油脂含量。

1.2.9 感官评价

评价员筛选和培训方法参照 GB/T 16291.1—2012《感官分析 选拔、培训与管理评价员一般导则》进行。组织 20 名食品专业研究生 (男女比例为 1:1, 年龄为 25~30 岁) 组成感官评价小组, 对不同油炸后薯饼进行感官评分。参照 Kwaw 等^[13]的方法, 从组织形态、色泽、质构、滋味和总体接受度 5 个指标进行评价, 取评分的平均值作为最终的感官评分, 具体标准见表 1。

表 1 不同油炸后薯饼的感官评分标准

Tab. 1 Standard for sensory evaluation of different fried potato

指标	分值	评价标准
组织形态	>6~9	形状完整、规则，表面结构紧密
	>3~6	形状较为完整、规则，表面结构相对紧密
	1~3	形状不完整、不规则，表面结构松散
色泽	>6~9	色泽金黄，颜色均匀
	>3~6	色泽较为金黄，颜色较为均匀
	1~3	色泽过浅或过深，颜色不均匀
质构	>6~9	外表酥脆，内里软糯
	>3~6	外表较为酥脆，内里较为软糯
	1~3	外表不酥脆，内里不软糯
滋味	>6~9	富含马铃薯特有的滋味
	>3~6	具有马铃薯特有的滋味
	1~3	缺少马铃薯特有的滋味
总体接受度	>6~9	总体接受度较高
	>3~6	总体接受度中等
	1~3	总体接受度较低

1.3 数据处理

每组实验均重复 3 次，以“平均值±标准差”表示。采用 IBM SPSS statistics 22 软件进行单因素方差分析 (ANOVA)，不同小写字母表示组间差异显著 ($P<0.05$)。相关性分析中皮尔逊相关系数计算及热图绘制通过 R 语言软件完成。

2 结果与分析

2.1 马铃薯基本成分

马铃薯及薯饼的基本组成成分 (以干质量计) 见表 1。相关研究表明淀粉、蛋白质、膳食纤维和还原糖等为马铃薯干物质中的主要组分^[14-15]。

表 2 马铃薯及薯饼的基本组成成分

Tab. 2 Basic components of potato tuber and potato cake

组成	马铃薯	薯饼
干物质/%	22.25±0.31	21.16±0.25
淀粉/%	85.78±0.96	84.32±0.53
蛋白质/%	8.23±0.61	7.86±0.48
膳食纤维/%	2.90±0.45	2.21±0.35
还原糖/%	0.36±0.02	0.42±0.05

2.2 预处理对油炸前薯饼品质的影响

2.2.1 质构品质

不同油炸前薯饼样品的质构品质如图 2 所示。不同油炸前薯饼样品的质构品质 (硬度、黏力、内聚性、咀嚼性和弹性) 差异显著 ($P<0.05$)。

硬度用于表示物料变形所需作用力。由图 2 (a) 可知，随着预处理温度增加、时间延长，薯饼的硬度逐渐增加。在不同样品中，80 °C 或 100 °C 分别处理 20 min 或 30 min 薯饼样品的硬度值最高，可能与高温长时预处理促进薯饼中糊化淀粉回生，导致薯饼形成较为致密的网络结构有关。

黏力和内聚性分别代表物料经过加压变形之后，样品表面黏性产生的负向力量，以及物料经过第一次压缩变形后所表现出来的对第二次压缩的相对抵抗力。物料的内聚性越高，表明不同组分之间相互作用较强，导致物料黏力增加^[16]。如图 2 (b) 和 2 (c) 所示，随着预处理温度增加、时间延长，薯饼样品的黏力和内聚性逐渐增加。在 80 °C 或 100 °C 处理条件下，薯饼样品的黏力和内聚性达到最高值，可能与高温预处理促进薯饼中淀粉、蛋白质、膳食纤维等不同组分之间的非共价相互作用有关，该结果与图 3 中不同预处理薯饼样品的微观形貌相一致。随着预处理温度增加、时间延长，薯饼中的颗粒结构变大，颗粒之间的孔洞和缝隙缩小，整体结构更加致密。

咀嚼性代表将固态食品咀嚼成能够吞咽状态所需的能量。如图 2 (d) 所示，随着预处理温度增加、时间延长，薯饼的咀嚼性逐渐增加。在不同样品中，100 °C 分别处理 10 min 的薯饼咀嚼性最高。

弹性用于表示物料在外力作用下发生形变，当撤去外力后恢复原来状态的能力^[17]。如图 2 (e) 所示，随着预处理温度增加、时间延长，薯饼样品的弹性逐渐降低。在不同样品中，100 °C 分别处理 20 min 或 30 min 的薯饼弹性最低，可能与高温长时预处理促进薯饼中果胶组分发生 β -消解，削弱了细胞之间的结合作用有关。

随着预处理温度增加、时间延长，薯饼的硬度、黏力、内聚性和咀嚼性增加，而弹性降低。预处理可能导致薯饼中膳食纤维和蛋白质等主要组分降解，减弱了其于淀粉链的竞争吸水作用，有利于薯饼形成更加稳定的网络结构。

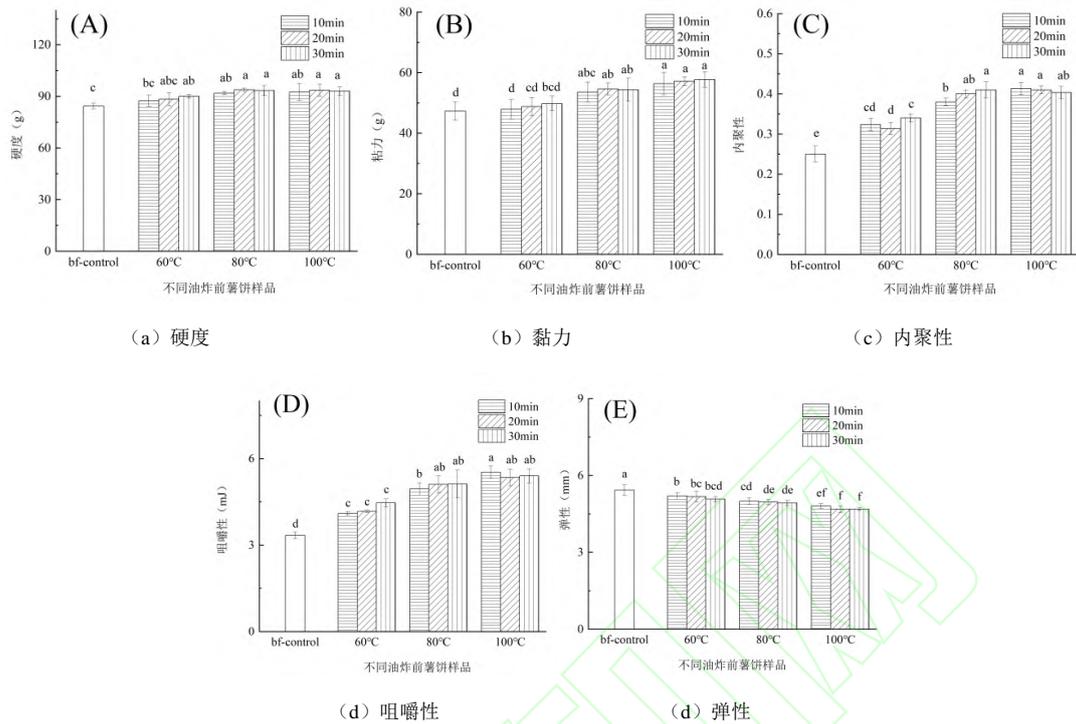


图2 不同油炸前薯饼样品的质构品质

Fig.2 Texture quality of different potato cake samples before frying

2.2.2 微观形貌

不同油炸前薯饼样品的微观形貌如图 3 所示, 其中红色箭头为薯饼微观结构中的孔洞与缝隙。马铃薯块茎组织经过蒸煮处理后, 淀粉颗粒充分吸收细胞内水分, 发生溶胀和糊化^[18]; 溶胀的淀粉颗粒在细胞壁内形成内部压力, 导致薄壁细胞体积变大, 发生破损^[19]。

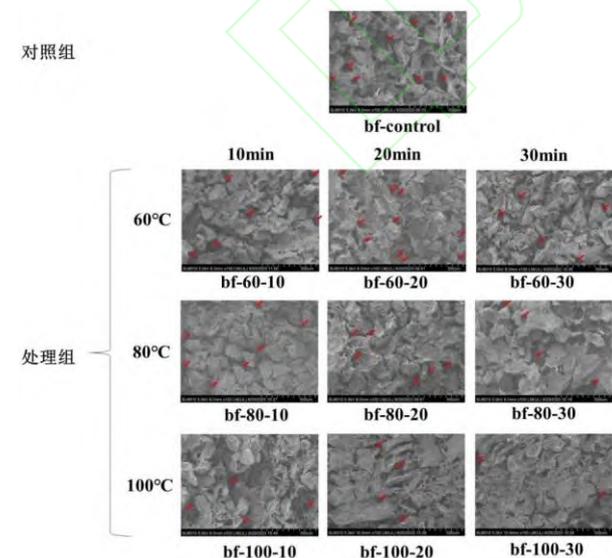


图3 不同油炸前薯饼样品的微观形貌图 (×100)

Fig.3 Microstructure of different potato cake samples

before frying (×100)

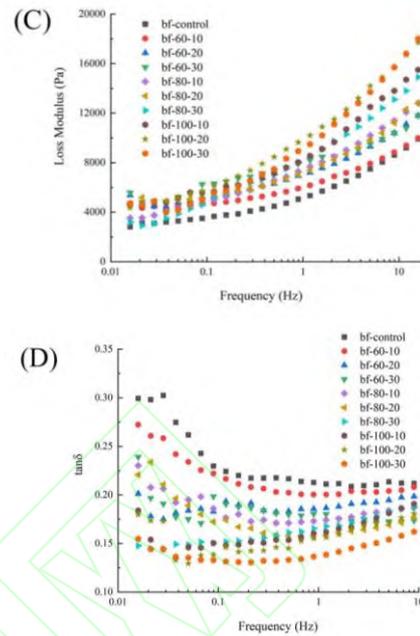
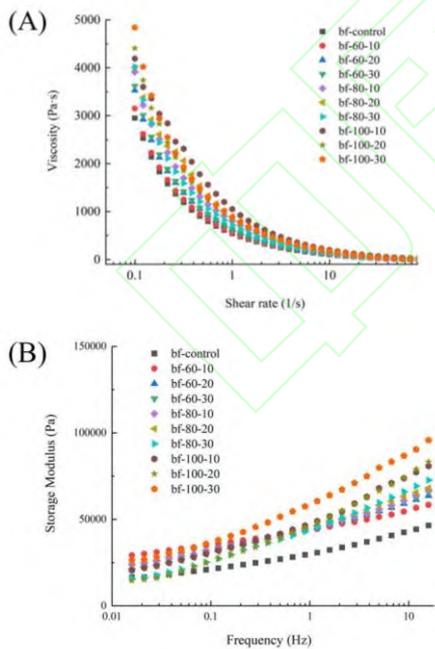
在对照组样品中, 薯饼呈现松散且不规则的形态, 糊化淀粉与破碎细胞壁、蛋白质等组分相互作用形成大小不一的颗粒结构。而碎片之间狭长且连通的缝隙, 为油炸过程中油脂进入薯饼内部提供了通道。随着 60°C 预热处理时间延长, 薯饼中颗粒体积逐渐变大, 颗粒之间孔洞和缝隙逐渐变小, 主要与热处理促进薯饼中淀粉、蛋白质、膳食纤维等不同组分之间的非共价相互作用, 发生聚集有关^[19]。80°C 30 min、100°C 20 min 和 100°C 30 min 预热处理使薯饼样品中形成了较大颗粒结构, 颗粒之间孔洞和缝隙进一步缩小, 薯饼整体结构变得较为致密, 减少了油炸过程中油脂进入薯饼内部的通道。

预热处理可能导致薯饼中膳食纤维发生不同程度降解, 生成果胶链、单糖和半乳糖醛酸等降解产物^[20]; 蛋白质内部氢键以及二硫键断裂, 螺旋结构打开, 导致疏水氨基酸以及部分亲水性基团暴露, 促进了蛋白质与淀粉之间发生聚集^[21,22]。随着预热处理温度增加、时间延长, 薯饼中淀粉、膳食纤维和蛋白质等主要组分及其降解产物的相互作用和聚集程度增加, 导致薯饼中的碎片结构变大, 孔洞和缝隙变小。

2.2.3 流变特性

不同油炸前薯饼样品的流变特性如图 4 所示。由图 4 (a) 可知, 所有样品的表观黏度均随着剪切速率的增加而逐渐降低, 表现出剪切变稀行为, 表明不同薯饼样品均为非牛顿流体^[23]。随着温度增加处理时间延长, 薯饼的表观黏度值越高, 可能与预热处理降解薯饼中膳食纤维和蛋白质等主要组分降低其与淀粉链的竞争吸水作用有关^[24]。

通过动态流变检测不同薯饼样品的动态黏弹性, 储能模量 (G') 是指薯饼在受力时内部所储存的弹性能量, 损耗模量 (G'') 是描述薯饼在振动条件下吸收和消耗能量的重要参数。图 4B 和 4C 为不同预热处理薯饼样品 G' 和 G'' 随频率变化曲线。不同样品在整个振荡频率范围内, 所有样品 G' 值始终大于 G'' 值, 表明弹性特性在体系中占主导地位, 所有样品均表现出弱凝胶行为的特征。不同薯饼样品的 G' 和 G'' 值随着频率增加而增加。表明随着温度增加处理时间延长, 预热处理促进薯饼形成更加稳定的网络结构。由图 4D 可知, 所有样品 $\tan\delta$ 值均小于 1, 随着温度增加、处理时间延长, 薯饼样品 $\tan\delta$ 值呈现降低的趋势, 表明预热处理导致薯饼结构的刚性增强^[26]。



(A: 黏度值; B: 储能模量; C: 损耗模量; D: 损耗因子)

图 4 不同油炸前薯饼样品的流变特性

Fig. 4 Rheological behavior of different potato cake samples before frying

不同油炸前薯饼样品的 Power-Law 模型参数见表 3。所有测定系数 R^2 均为 0.999, 表明模型很好地拟合了不同样品的流变行为。流动行为指数 n 反应了样品的流体性质与牛顿流体的接近程度。所有样品的 n 值都小于 1, 表明薯饼样品均为假塑性流体^[25]。稠度系数 K 表示表观黏度的变化, K 值越高, 黏度越高。随着处理温度增加、时间延长, 不同样品 K 值从 517.84 Pa Sn 增加到 844.28 Pa Sn, 表明预热处理导致薯饼的黏度逐渐增加。

表 3 不同油炸前薯饼样品的 Power-Law 模型参数

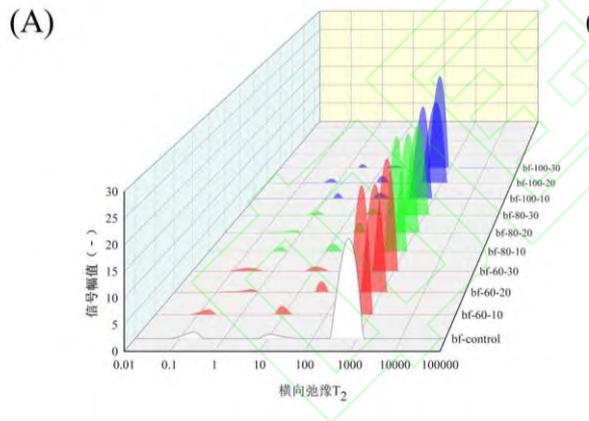
Table 3 Power-Law parameters of different potato cake samples before frying

样品组	K (Pa Sn)	n	R^2
bf-control	517.84±15.23d	0.25±0.02c	0.999
bf-60-10	542.71±20.42d	0.25±0.00c	0.999
bf-60-20	602.76±13.65c	0.25±0.01c	0.999
bf-60-30	607.68±16.78c	0.24±0.01c	0.999
bf-80-10	772.21±18.92b	0.31±0.02b	0.999
bf-80-20	812.09±25.65a	0.36±0.01a	0.999
bf-80-30	833.65±15.23a	0.25±0.01c	0.999
bf-100-10	810.52±19.36a	0.27±0.01bc	0.999

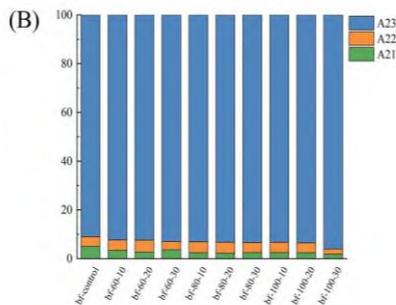
bf-100-20	824.68±20.12a	0.28±0.02bc	0.999
bf-100-30	844.28±23.15a	0.26±0.01bc	0.999

2.2.4 水分状态

不同油炸前薯饼样品的水分分布如图 5 所示。图 5 (a) 显示了不同油炸前薯饼样品中氢质子的横向弛豫分布曲线 (T_2)，在 T_2 弛豫谱中有三个明显的峰，即 T_{21} (0.1~10 ms)、 T_{22} (10~100 ms) 和 T_{23} (100~1000 ms)，分别代表结合水、不易流动水和自由水^[27]。随着温度增加、处理时间延长，水分子弛豫时间的吸收峰向右移动，结合水的吸收峰强度增加。图 5 (b) 显示了不同预热处理薯饼样品水分分布峰面积变化，A21、A22 和 A23 分别代表不同样品中结合水、不易流动水和自由水的百分占比。对照组薯饼的结合水为 5.04%，不易流动水为 3.92%，自由水为 91.03%；处理组薯饼样品的结合水范围为 1.86%~3.37%，不易流动水范围为 2.11%~4.92%，自由水范围为 92.36%~96.04%。结果表明预热处理导致薯饼中结合水和不易流动水向自由水转化，可能与预热处理导致淀粉、膳食纤维和蛋白质等大分子的持水性降低有关^[28,29]。



(a) 水分横向弛豫时间反演图



(b) 水分分布峰面积

图 5 不同油炸前薯饼样品的水分分布

Fig.5 Distributions of water within different potato cake samples before frying

2.3 预热处理对油炸后薯饼品质的影响

2.3.1 色泽

不同油炸后薯饼样品的表面色度见表 4。不同油炸后薯饼样品色泽存在显著差异 ($P < 0.05$)。油炸过程中薯饼颜色变化是由美拉德反应和焦糖化反应所引起的，最终产品颜色的深浅取决于薯饼表面还原糖和氨基酸或蛋白质的含量，以及水分分布状态、油炸温度和时间等^[30]。如表 4 所示，经过热处理后，油炸薯饼的亮度 L^* 与黄度值 b^* 逐渐增加，红度值 a^* 逐渐降低，表明经过热处理导致油炸薯饼的颜色变得金黄和明亮。如图 9 所示，油炸薯饼的 L^* 与 A21 和 A23 分别呈显著负相关 ($r = -0.79, P < 0.01$) 和显著正相关 ($r = 0.77, P < 0.01$)。随着预热处理温度增加、时间延长，不同油炸前薯饼样品自由水的含量增加，导致薯饼中还原糖、游离氨基酸以及蛋白质降解产物等反应底物浓度降低，从而减缓油炸过程中美拉德反应及类黑精色素生成^[31]。

表 4 不同油炸后薯饼样品的表面色度

Tab. 4 The color of different fried potato cake samples

样品组	L^*	a^*	b^*
af-control	77.51±2.09 ^c	10.61±0.96 ^a	53.23±0.61 ^b
af-60-10	80.53±1.00 ^b	8.97±0.68 ^b	54.68±1.88 ^{ab}
af-60-20	81.89±1.58 ^{ab}	8.88±0.12 ^b	57.22±2.56 ^{ab}
af-60-30	82.56±2.00 ^{ab}	8.79±0.42 ^b	55.89±2.57 ^{ab}
af-80-10	80.56±1.05 ^b	8.98±0.57 ^b	55.23±2.35 ^{ab}
af-80-20	81.82±1.05 ^{ab}	8.81±0.41 ^b	56.23±3.25 ^b
af-80-30	82.23±0.53 ^{ab}	8.73±0.46 ^b	55.56±2.68 ^b
af-100-10	83.23±1.48 ^{ab}	8.41±0.70 ^b	58.56±1.05 ^a
af-100-20	83.56±1.78 ^a	8.31±0.59 ^b	57.89±2.37 ^{ab}
af-100-30	83.56±1.68 ^a	8.23±0.25 ^b	57.56±3.49 ^{ab}

注：表中同列不同字母代表组间差异显著 ($P < 0.05$)

2.3.2 质构品质

不同油炸后薯饼样品的质构品质如图 6 所示。随着热温度增加、处理时间延长，薯饼的硬度、黏力、内聚性和咀嚼性逐渐增加，而弹性逐渐降低，主要与对油炸前薯饼中淀粉、膳食纤维和蛋白质等主要组分的作用有关。

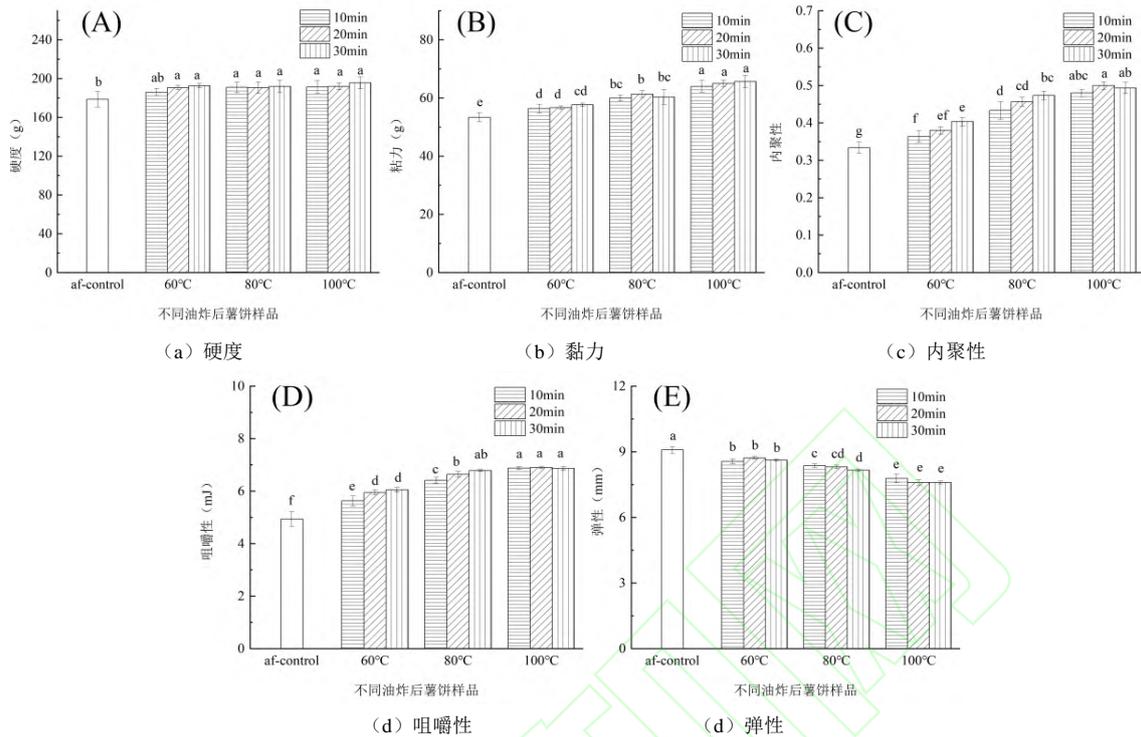


图 6 不同油炸后薯饼样品的质构品质

Fig.6 Texture quality of different fried potato cake samples

2.3.3 油脂含量

不同油炸后薯饼样品的油脂含量如图 7 所示。不同样品中，对照组油炸薯饼的油脂含量最高为 10.8%。随着温度升高、处理时间延长，不同油炸后薯饼样品的油脂含量显著降低，其中 100 °C 热处理 10~30 min 薯饼制备油炸薯饼样品的油脂含量最低 (8.85%~8.95%)。如图 3 所示，随着温度增加、处理时间延长，热处理促进了油炸前薯饼中不同组分相互作用，形成更加致密的网络结构，抑制油炸过程中油脂由通道进入到薯饼内部。Rahimi 等^[30]同样发现与未经热处理的面糊相比，60 °C 热处理预热面糊制备油炸制品表面孔洞较小，油脂含量较低。

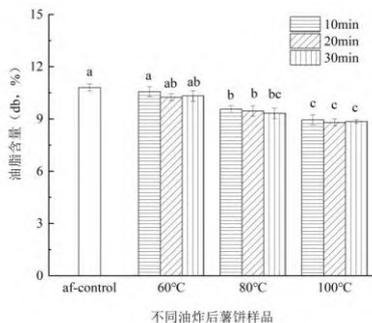


图 7 不同油炸后薯饼样品油脂含量

Fig.7 Oil content of different fried potato cake samples

2.3.4 感官评价

感官评价是评估油炸后薯饼食用品质的重要标准^[32]。不同油炸后薯饼样品的感官评价雷达图如图 8 所示。随着温度增加、处理时间延长，热处理显著提升了薯饼的组织状态、质构、滋味和色泽评分。对照组油炸后薯饼的总体接受度为 7.8 分，而处理组油炸后薯饼的总体接受度均大于 8 分，其中 100 °C 热处理样品的总体接受度均大于 9 分。与对照组相比，经过热处理的油炸后薯饼表面结构较为致密，口感更为酥脆，油脂含量减少，降低了油腻感。因此，热处理有利于提高油炸后薯饼的感官品质，尤其 100 °C 热处理 10~30 min 具有较好的效果。

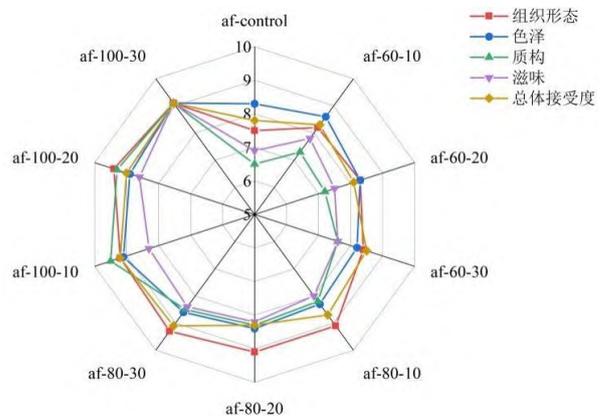


图 8 不同油炸后薯饼样品的感官评价雷达图

Fig.8 Sensory evaluation radar map of different fried potato cake samples

2.4 相关性分析

不同油炸前和油炸后薯饼品质以及感官评价的相关性分析如图 9 所示。油炸后薯饼中油脂含量与油炸前薯饼的硬度、黏力、内聚性、咀嚼性以及 A23 (自由水比例) 分别呈显著负相关($r=-0.91, P<0.001$; $r=-0.99, P<0.001$; $r=-0.93, P<0.001$; $r=-0.96, P<0.001$; $r=-0.66, P<0.05$), 而与弹性呈显著正相关($r=0.96, P<0.001$)。这一结果表明, 油炸过程中的水分和油脂迁移受到薯饼微观结构和水分状态的显著影响。油炸过程中, 水分分子从薯饼内部的缝隙和孔洞中逸出, 而油脂则通过这些通道进入薯饼内部^[31]。相关性分析结果进一步揭示了油炸前薯饼的质构特性和 A23 (自由水比例) 在一定程度上决定了油炸后薯饼的油脂含量。高温预热处理可能通过促进油炸前薯饼中糊化淀粉的回生, 降低淀粉链分子对水分的持水能力, 从而减少薯饼的水合作用。与此同时, 高温预热处理还可能削弱了薯饼中淀粉、蛋白质、膳食纤维及其降解产物之间的非共价相互作用, 使得这些组分与水分子之间的结合力减弱, 导致薯饼的 A23 增大, 从而形成更均匀、致密的网络结构。这种结构变化使得薯饼的孔隙和缝隙减小, 阻碍了油脂在油炸过程中进入薯饼内部。此外, 预热处理后薯饼中自由水的比例增高, 油炸过程中自由水的蒸发外溢也进一步抑制了油脂通过缝隙进入薯饼内部。在感官评价方面, 油炸后薯饼的组织形态评分与稠度系数 K 呈显著正相关($r=0.96, P<0.001$), 这表明稠度系数 K 能够很好地表征薯饼的口感和组织稳定性。色泽评分与 L*(亮度)和 b*(黄色度)也分别呈显著正相关($r=0.61, P<0.05$; $r=0.67, P<0.05$), 进一步证实了高温预热处理对薯饼外观色泽的正向影响。质构评分与硬度值呈显著正相关($r=0.78, P<0.01$), 表明硬度值可以作为表征薯饼质构感官评价的关键指标。相关性分析结果表明, 油炸前薯饼的质构特性(如硬度、黏性、内聚性、弹性等)以及自由水比例(A23)与油炸后薯饼的油脂吸收、质构和感官品质之间具有密切关系。

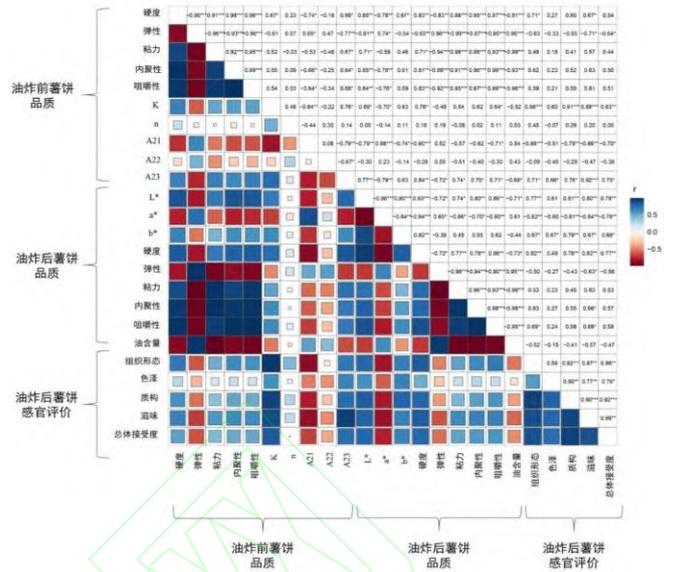


图 9 不同油炸前和油炸后薯饼品质以及感官评价的相关性分析

Fig.9 Correlation analysis between the processing quality of potato cake samples before or after frying and the sensory evaluation of fried potato cake samples

3 结论

本研究系统研究了不同预热温度(60~100°C)和处理时间(10~30 min)对油炸薯饼品质的影响。研究表明, 随着预热温度的升高和处理时间的延长, 油炸薯饼的感官品质显著提升。预热处理使油炸薯饼表面结构更加致密, 口感更为酥脆, 颜色呈现金黄明亮的外观, 且油脂含量明显降低, 从而有效减少了油腻感。通过预热处理, 薯饼中的淀粉、膳食纤维、蛋白质等组分逐渐形成较大的颗粒, 颗粒之间的孔隙和缝隙逐渐缩小, 最终形成了更加稳定和致密的网络结构。感官评价结果显示经过预热处理的油炸后薯饼口感更为酥脆, 降低了油腻感。其中, 100°C 预热处理 10~30 min 的薯饼具有较好的效果。本研究为预热处理降低油炸薯饼中油脂含量, 提升产品综合感官品质提供理论依据和科学依据。

参考文献:

[1] 杨鸞. 马铃薯薯饼成型技术研究[D]. 北京: 中国农业机械化科学研究院, 2014.
 [2] RANI L, KUMAR M, KAUSHIK D, et al. A review on the frying process: Methods, models and their mechanism and

- application in the food industry[J]. Food Research International, 2023, 172: 113176.
- [3] NAGHAVI E A, DEGHANNYA J, GHANBARZADEH B. 3D computational simulation for the prediction of coupled momentum, heat and mass transfer during deep-fat frying of potato strips coated with different concentrations of alginate[J]. Journal of Food Engineering, 2018, 235: 64-78.
- [4] ALBERTOS I, MARTIN-DIANA A B, SANZ M A, et al. Effect of high pressure processing or freezing technologies as pretreatment in vacuum fried carrot snacks[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2016, 33: 115-122.
- [5] NATEGHI L, HOSSEINI E, FAKHERI M A. The effect of cold atmospheric plasma pretreatment on oil absorption, acrylamide content and sensory characteristics of deep-fried potato strips[J]. Food Chemistry, 2024, 21: 101194.
- [6] OLADEJO A O, MA H, QU W, et al. Effects of ultrasound pretreatments on the kinetics of moisture loss and oil uptake during deep fat frying of sweet potato (*Ipomea batatas*)[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2017, 43: 7-17.
- [7] OMIDIRAN A T, ODUKOYA O J, AKINBULE O O, et al. Effect of microwave-assisted pre-drying and deep-fat-frying conditions on some quality attributes of orange fleshed sweetpotato chips[J]. Food Chemistry Advances, 2023, 3: 100534.
- [8] ZHANG C, LYU X, ZHAO W, et al. Effects of combined pulsed electric field and blanching pretreatment on the physiochemical properties of French fries[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2021, 67: 102561.
- [9] ZHANG C, LYU X, AADIL R M, et al. Microwave heating instead of blanching to produce low-fat French fries[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2023, 84: 103298.
- [10] ZHANG J, LI J, Fan L. Comparative analysis of oil absorption and microstructure of fried potato chips treated with different pretreatment via X-ray micro-computed tomography and mercury intrusion method[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2024, 129: 106129.
- [11] CHEN L, MCCLEMENTS D J, YANG T, et al. Effect of annealing and heat-moisture pretreatments on the oil absorption of normal maize starch during frying[J]. Food Chemistry, 2021, 353: 129468.
- [12] 李天昊, 位绍文, 毛伟健, 等. 三种酶前处理对香蕉酵素理化性质、生物活性及感官的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45 (7): 86-92.
- [13] KWAW E, OSAE R, APALIYA M T, et al. Influence of different osmotic dehydration pretreatment on the physiochemical and sensory characteristics of fried cassava chips (*Manihot esculenta*)[J]. Journal of Agriculture and Food Research, 2023, 12: 100613.
- [14] KUMAR S, CHANDYA R. Integrated field application of *T.viride*, botanicals, and fungicides for managing early blight (*Alternaria solani*) and enhancement of plant growth, tuber nutritional quality, and potato yield[J]. Journal of Natural Pesticide Research, 2024, 8: 100070.
- [15] 惠宇晴, 沈卉芳, 姚鑫淼, 等. 不同品种马铃薯雪花全粉品质分析[J]. 食品工业科技, 2023, 44(19): 356-365.
- [16] ALI M, LIAO L, ZENG X A, MANZOOR M. F, et al. Impact of sustainable emerging pulsed electric field processing on textural properties of food products and their mechanisms: An updated review[J]. Journal of Agriculture and Food Research, 2024, 15: 101076.
- [17] 付玉虎, 辛世华, 吴庆, 等. 马铃薯全粉烤饼制作配方的优化及其质构特性研究[J]. 食品工业科技, 2023, 44(22): 176-181.
- [18] GÓMEZ-MAQUEO A, FERREIRA-LAZARTE A, AMIRRUDDIN, et al. Generating slow digestibility in cooked potatoes by modulating starch accessibility to α -amylase and mucosal α -glucosidase to different levels[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 141: 108718.
- [19] BORDOLOI A, KAUR L, SINGH J. Parenchyma cell microstructure and textural characteristics of raw and cooked potatoes[J]. Food Chemistry, 2012, 133(4): 1092-1100.
- [20] BERSKI W, ZIOBRO R. Pasting and gel characteristics of normal and waxy maize starch in glucose syrup solutions[J]. Journal of Cereal Science, 2018, 79: 253-258.
- [21] SONG B, XU X, HOU J, et al. Research on corn starch and black bean protein isolate interactions during gelatinization and their effects on physicochemical properties of the blends[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 254: 127827.
- [22] LI Y, HE Z, TU Y. et al. Understanding synchronous regulating effects of starch-protein interactions on starch

- digestion and retrogradation under thermal shear processing[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2024, 329: 121767.
- [23] ZHANG R, HUANG R, CAI Z, et al. Effect of annealing treatment on physicochemical properties, rheology and *in vitro* digestion of potato starch-galactomannan complexes[J]. *Food Hydrocolloids*, 2024, 152: 109963.
- [24] WANG Y, GUO J, WANG C, et al. Effects of konjac glucomannan and freezing on thermal properties, rheology, digestibility and microstructure of starch isolated from wheat dough[J]. *LWT-Food Science And Technology*, 2023, 177: 114588.
- [25] WEDAMULLA N E, FAN M, CHOI Y J, et al. Combined effect of heating temperature and content of pectin on the textural properties, rheology, and 3D printability of potato starch gel[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 253: 127129.
- [26] CHEN S, QIN L, CHEN T, et al. Modification of starch by polysaccharides in pasting, rheology, texture and *in vitro* digestion: A review[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022: 207, 81-89.
- [27] LIU L, HU X, Zou L. Wheat polysaccharides and gluten effect on water migration and structure in noodle doughs: An ¹H LF-NMR study[J]. *Journal of Cereal Science*, 2023, 110: 103628.
- [28] IGLESIAS-CARRES L, RACINE K C, CHADWICK S, et al. Mechanism of off-color formation in potato chips fried in oil systems containing ascorbic acid as a stabilizer[J]. *Lwt*, 2023, 179: 114682.
- [29] DOS SANTOS T P R, FRANCO C M L, Leonel M. Gelatinized sweet potato starches obtained at different preheating temperatures in a spray dryer[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 149: 1339-1346.
- [30] RAHIMI J, NGADI M. Effects of pre-heating temperature and formulation on porosity, moisture content, and fat content of fried batters[J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2016, 10(3): 569-575.
- [31] 张璐, 熊双丽, 李安林, 等. 油炸温度和时间对小酥肉品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2024, 45(7): 68-75.
- [32] 孙江艳, 刘义凤, 刘磊, 等. 食品感官评价的技术手段与应用研究进展[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(24): 359-366.