

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2025.80353

湿热处理改性小麦粉的热流变特性 及其在杂粮饼干中的应用

Le Thi Huyen Trang 李向红 苗金旭 王发祥 刘永乐 李 双

(长沙理工大学食品与生物工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: [目的] 开发低负担、高营养的功能性焙烤食品。[方法] 采用单因素试验设计, 运用快速黏度分析仪、流变仪和差示扫描量热仪分析湿热改性小麦粉的理化性质, 并以感官评价为标准优化饼干配方。[结果] 湿热处理可显著提高小麦粉的糊化稳定性和抗消化淀粉含量, 最优辅料配方为湿热改性小麦粉 50 g、燕麦粉 20 g、绿豆粉 10 g、抗性糊精粉 6 g。与对照组相比, 试验配方制作的饼干消化率显著降低, 血糖生成指数为 69.37, 具有良好的低升糖反应特性。[结论] 湿热改性小麦粉可优化饼干的质构与消化特性, 配比燕麦、绿豆粉等富含膳食纤维的杂粮原料, 可协同提升焙烤食品的营养价值与健康功效。

关键词: 饼干; 血糖生成指数; 湿热处理; 杂粮

Thermal rheological properties of heat-moisture modified and its application in multigrain cookies

Le Thi Huyen Trang LI Xianghong MIAO Jinxu WANG Faxiang LIU Yongle LI Shuang

(School of Food Science and Bioengineering, Changsha University of Science and Technology,
Changsha, Hunan 410114, China)

Abstract: [Objective] To develop low-burden, high-nutrient functional baked foods. [Methods] A single-factor experimental design is employed, with rapid visco analyzer, rheometer, and differential scanning calorimeter to analyze the physicochemical properties of heat-moisture modified wheat flour. The cookie formula is optimized based on sensory evaluation. [Results] Heat-moisture treatment significantly enhances the pasting stability and resistant starch content of wheat flour. The optimal auxiliary ingredient formula is 50 g of heat-moisture modified wheat flour, 20 g of oat flour, 10 g of mung bean flour, and 6 g of resistant dextrin powder. Compared with the control group, the cookies made from the experimental formula show a significantly lower digestibility, with a glycemic index of 69.37, exhibiting good low glycemic response characteristics. [Conclusion] Heat-moisture modified wheat flour can optimize the texture and digestive properties of cookies. By incorporating oat flour, mung bean flour, and other multigrain rich in dietary fiber, the nutritional value and health benefits of baked goods can be synergistically enhanced.

Keywords: cookie; glycemic index; heat-moisture treatment (HMT); multigrain

饼干作为典型的高糖高脂西式烘焙食品, 在中国消费市场中占据重要地位^[1]。其传统配方通常以精制小麦粉为基质, 配合添加高比例的蔗糖与油脂, 血糖生成指数 (GI) 普遍偏高, 长期摄入对糖代谢健康构成潜在风险^[2]。

在食品工业持续创新与消费升级驱动下, 开发兼具低 GI 特性、高膳食纤维含量及优质感官品质的杂粮饼干产品, 成为焙烤食品行业的重要发展方向^[3]。黄永莹等^[4]检测了复合代糖的溶解度、黏度、GI 等理化性质, 并以复合代

基金项目: 国家自然科学基金项目 (编号: 32072262); “科技兴蒙” 行动重点专项 (编号: NMKJXM 202209G2)

通信作者: 李双 (1994—), 女, 长沙理工大学讲师, 博士。E-mail: lis0116@126.com

收稿日期: 2024-02-21 改回日期: 2025-05-10

引用格式: Le Thi Huyen Trang, 李向红, 苗金旭, 等. 湿热处理改性小麦粉的热流变特性及其在杂粮饼干中的应用[J]. 食品与机械, 2025, 41(5): 135-142.

Citation: Le Thi Huyen Trang, LI Xianghong, MIAO Jinxu, et al. Thermal rheological properties of heat-moisture modified and its application in multigrain cookies[J]. Food & Machinery, 2025, 41(5): 135-142.

糖为原料研制了一款低 GI 饼干。彭辉等^[5]以玉米抗性淀粉部分替代低筋面粉、低聚异麦芽糖替代蔗糖生产了低 GI 饼干。侯晓倩^[6]将筛选出的低 GI 原料替代部分低筋面粉,并添加桑葚干粉和桑叶活性提取物,通过响应面法优化得到桑葚饼干的最佳辅料配比为小苏打 1.00%、黄油 11.00%、D-甘露醇 14.50%、桑葚干粉 8.00%。然而这些方法在原料上存在种类局限或来源稳定性问题,可能无法充分满足消费者对营养多元化的需求,并且部分代糖或功能性成分在人体长期摄入后的安全性和健康影响还需进一步研究。因此,探寻一种原料来源广泛、营养多样化、低负担的功能性焙烤食品的制备方法至关重要。

湿热处理(HMT)作为一种常见的物理改性方法,能够通过改变小麦粉中淀粉颗粒的晶体结构与分子排列方式,显著提升抗性淀粉(RS)和慢消化淀粉(SDS)含量,也可以通过促进淀粉-蛋白质网络结构的形成,构建物理屏障延缓酶对淀粉的水解进程,从而有效降低淀粉消化速率并改善餐后血糖反应^[7-8]。贾泽宇等^[9]研究表明,经湿热处理的改性小麦粉在糖尿病管理、体重控制和心血管健康方面具有广阔的应用前景。现有研究多集中于湿热改性淀粉与精制小麦粉的复合应用,即通过与精制小麦粉复配的方式改善产品品质^[10],而直接以湿热改性小麦粉和杂粮粉替代精制小麦粉制备饼干的研究尚未见报道。彭辉等^[3]开发了一种以抗性糊精部分替代低筋面粉,并采用低聚异麦芽糖替代蔗糖的低 GI 饼干,但其使用的粉类基料为未经改性的精制小麦粉,未对其结构与消化行为进行前期干预;同时其未涉及物理改性方法(如 HMT)对主粉淀粉结构与酶解速率的调控机制,限制了进一步提升抗性淀粉比例与延缓血糖反应的空间。因此,将湿热改性技术引入主粉原料体系,并联合配方中抗性淀粉、膳食纤维、蛋白质与脂类等多组分协同调控淀粉消化行为,不仅有望进一步降低产品 GI 值,还可提高膳食纤维摄入量,优化口感与质构,提升产品的整体营养品质与市场竞争力^[11-13]。

绿豆粉中富含优质植物蛋白、抗氧化物质与缓慢消化淀粉,有助于延缓葡萄糖释放^[14];燕麦粉中含有丰富的 β -葡聚糖,可降低餐后血糖反应并改善血脂水平^[15];抗性糊精则以其良好的水溶性和功能特性,被广泛认为是理想的膳食纤维来源;这些原料的协同作用有助于焙烤制品营养成分的丰富与功能性增强。而目前基于湿热改性小麦粉与上述多种功能性杂粮原料协同应用于饼干制备的可行性和功能特性的研究尚属空白。研究拟探索湿热改性小麦粉的糊化和流变特性,以及其在饼干基质的应用可行性。同时,通过配方优化引入燕麦粉、绿豆粉及抗性糊精等成分,探究饼干的消化特性、膳食纤维含量及感官评分,旨在为开发低负担、高营养的功能性焙烤食品提供依据。

1 材料与方 法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料

小麦粉:恒丰股份有限公司(中国内蒙古);
燕麦米:张家口惠康食品有限公司;
绿豆:赣州康瑞农产品有限公司;
抗性糊精:健隆生物科技股份有限公司;
黄油:恒天然商流(上海)有限公司;
麦芽糖醇:山东福田药业有限公司;
泡打粉:安琪酵母股份有限公司。

1.1.2 主要仪器设备

电子天平:AUY120型,日本岛津公司;
醒发箱:YHG 13型,珠海家宝德科技有限公司;
烤箱:F150型,广州三鼎金属制品有限公司;
质构仪:TA-XT32型,英国SMS公司;
和面机:HMJGA50N1型,小熊电器股份有限公司;
紫外可见分光光度计:UV2150型,尤尼柯(上海)仪器有限公司;

水浴恒温振荡器:SHA-C型,常州国宇仪器制造有限公司。

1.2 方法

1.2.1 湿热改性粉的制备 准确称取 50 g 小麦粉样品,用去离子水将其水分含量调至 25%。将处理后的样品置于耐高温密闭容器中,室温下平衡 24 h,120 °C 干燥 8 h,自然冷却后研磨成粉,过 100 目筛,得湿热处理后的样品。

1.2.2 曲奇饼干的制备

(1) 基本配方:以 50 g 小麦粉/改性粉为基准;分别添加 0, 20, 30 g 燕麦粉;5, 15, 25 g 绿豆粉;6, 8, 10 g 抗性糊精;20% 黄油、0.5% 食盐、25% 全蛋液、1% 泡打粉、30% 麦芽糖醇(以小麦粉、燕麦粉、绿豆粉及抗性糊精的总质量为基准,其余各配料的添加量均按该基准比例进行计算)。

(2) 工艺流程:原辅料混合→和面→静置→擀面→模具成型→烘烤→冷却→饼干成品。

(3) 烘烤条件:面火温度 180 °C、底火温度 180 °C、时间 10 min。

1.2.3 单因素试验 以感官评价为指标,以基础配方为依据,分别考察燕麦粉添加量、绿豆粉添加量和抗性糊精添加量对杂粮饼干的影响。

1.2.4 正交试验 根据单因素试验结果,以燕麦粉添加量、绿豆粉添加量和抗性糊精添加量为因素,以感官评分为指标,进行三因素三水平正交试验,优化饼干配方。

1.2.5 混合粉糊化特性测定 参照 GB/T 24853—2010 和吴伟等^[16]的方法分别按式(1)、式(2)计算混合粉质量和加水量。

$$s = \frac{86 \times 3.5}{100 - M} \quad (1)$$

$$w = 25 + (3.6 - s), \quad (2)$$

式中:

s ——经水分校正的混合粉质量, g;

M ——试样实际水分, g;

w ——经水分校正的加水量, mL。

1.2.6 混合粉流变特性测定 参照韩冰霜等^[17]的方法测定样品的储能模量(G')、损耗模量(G'')及损耗正切角($\tan \delta$)。测试条件:温度 25 °C, 应变率 1.0%, 频率扫描范围 0.1~10 Hz, 间隙 1 000 μm , 加载间隙 45 000 μm , 修边间隙 偏置 50 μm 。

1.2.7 感官评价 由 15 位评委对饼干的颜色、外观、口感、气味、组织状态和总体可接受进行感官评定。采用 9 点特征量表法。

1.2.8 体外消化特性测定

(1) 模拟胃肠消化:称取约 100 mg 样品,加入 2 mL α -淀粉酶(现配现用),静置 10 s,加入 20 mL HCl-KCl 缓冲液(pH 1.5)。将样品置于 37 °C 恒温振荡培养箱中,加入 5 mL 质量浓度为 15 mg/mL 的胃蛋白酶溶液(现配现用),恒温振荡 1 h,90 °C 沸水浴 10 min。用氢氧化钠和盐酸溶液调节 pH 至 6.8。将样品继续置于 37 °C 恒温振荡培养箱中,加入 5 mL 质量浓度为 5 mg/mL 的 α -淀粉酶(现用现配),加入 0.1 mL 淀粉葡萄糖苷酶。分别于消化 0, 20, 50, 70, 90, 120, 150, 180 min 时取 1 mL 样品溶液,90 °C 沸水浴 10 min,冰水浴中冷却。使用葡萄糖测定试剂盒检测葡萄糖含量,按式(3)~式(4)计算淀粉水解率。

$$C = \frac{a_1}{a_2} \times C_0, \quad (3)$$

$$H = \frac{C \times 0.9 \times 18}{C_1} \times 100\%, \quad (4)$$

式中:

C ——葡萄糖含量, mmol/L;

a_1 ——样品管吸光度;

a_2 ——标准管吸光度;

C_0 ——标准液浓度, 5.55 mmol/L;

H ——淀粉水解率, %;

C_1 ——样品中总淀粉含量, mmol/L。

(2) 水解指数和预估血糖指数:分别按式(5)、式(6)计算碳水化合物水解指数(HI)和预估血糖指数(GI),其中曲线下积分面积(AUC)由 Origin 软件计算所得。

$$I_H = \frac{A_{UC1}}{A_{UC2}} \times 100, \quad (5)$$

$$I_G = 8.198 + 0.862 \times I_H, \quad (6)$$

式中:

I_H ——碳水化合物水解指数;

I_G ——预估血糖指数;

A_{UC1} ——样品的曲线下积分面积;

A_{UC2} ——白面包曲线下积分面积。

(3) 淀粉含量:分别按式(7)~式(9)计算快消化淀粉

(RDS)、慢消化淀粉(SDS)和抗性淀粉(RS)含量^[13]。

$$S_{RD} = \left[(G_{20} - G_0) \times \frac{0.9}{T_s} \right] \times 100\%, \quad (7)$$

$$S_{SD} = \left[(G_{120} - G_{20}) \times \frac{0.9}{T_s} \right] \times 100\%, \quad (8)$$

$$S_s = \left[(T_G - G_0) \times \frac{0.9}{T_s} \right] \times 100\% - (S_{RD} + S_{SD}), \quad (9)$$

式中:

S_{RD} ——快消化淀粉含量, %;

S_{DS} ——慢消化淀粉含量, %;

S_R ——抗性淀粉含量, %;

G_0 ——0 min 时游离葡萄糖含量, mg;

G_{20} ——20 min 水解后的葡萄糖含量, mg;

G_{120} ——120 min 水解后的葡萄糖含量, mg;

T_s ——样品中总淀粉的含量, mg;

T_G ——样品中总葡萄糖量, mg。

1.2.9 数据处理与统计分析 采用 SPSS 20.0 软件进行数据方差分析;采用 Origin 2024 软件作图。

2 结果与分析

2.1 改性小麦粉的加工特性

2.1.1 对糊化特性的影响 由图 1 可知,经湿热改性处理的小麦粉(HMT)的糊化温度较普通小麦粉(CK)的提升 11 °C($P < 0.05$),而在此基础上添加燕麦粉、绿豆粉及抗性糊精的复合改性粉(HMT-OGD)的糊化温度升高了 12 °C。这归因于湿热处理可促使淀粉颗粒发生重新排列,增强其内部结构的有序性,从而导致糊化温度的升高^[8]。其次,燕麦粉、绿豆粉和抗性糊精的添加也可进一步引发面粉中更强烈的相互作用^[7,16-18],这在一定程度上促使糊化温度进一步增加。

由表 1 可知,与普通面粉相比,两种改性面粉(HMT 和 HMT-OGD)的峰值黏度、最终黏度和衰减值均显著降低($P < 0.05$)。这可能是由于湿热处理过程中高温诱导的蛋白质变性,干扰了淀粉颗粒与水分的相互作用,进而影响了淀粉颗粒的膨胀行为。HMT-OGD 与 HMT 的峰值黏度和最终黏度均显著增加,表明冷却后改性淀粉的结构恢复能力有所降低。同时,燕麦粉、绿豆粉和抗性糊精的添加进一步强化了复合改性粉冷却后的最终黏度。此外,与 CK 和 HMT 相比,HMT-OGD 展现出更佳的回生值,与吴小丽^[19]的研究结果一致。

综上,湿热处理显著改善了小麦面粉的糊化特性,当与燕麦粉、绿豆粉及抗性糊精进行协同复配时,改性体系的糊化行为呈现出更优的热力学特性。

2.1.2 对面团流变特性的影响 由图 2 可知,3 种面团的 G' 和 G'' 均随着角频率的增加呈上升趋势,且 G' 始终显著高于 G'' ($P < 0.05$),表明面团体系呈现典型的弱凝胶网络结构,符合动态流变学中黏弹性材料的基本响应模

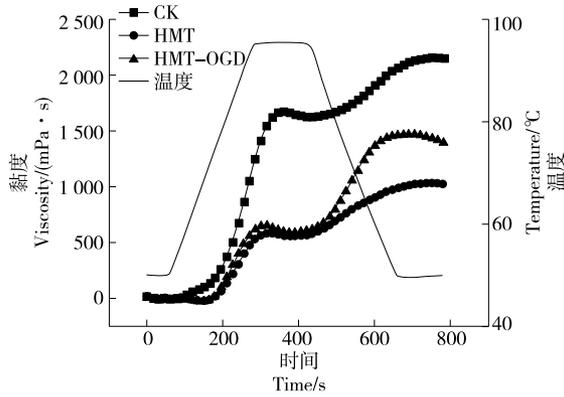


图 1 湿热改性小麦粉的糊化曲线

Figure 1 Pasting curves of heat-moisture modified wheat flour

式^[20-21]。此外, $\tan \delta$ 始终小于 1 且随着频率的升高呈下降趋势, 说明面团在测试频率范围内主要表现为弹性行为, 而黏性贡献相对较弱, 这一特性对面团的加工成型性和产品质构特性具有重要影响。

HMT 的 G' 、 G'' 最高, 其次为 HMT-OGD, 表明湿热处理增强了面团的弹性和黏性, 燕麦、绿豆和抗性糊精

(OGD) 的添加则部分降低了这一趋势。HMT-OGD 的 G' 、 G'' 介于 CK 和 HMT 之间, 说明 OGD 的加入虽略微削弱了湿热处理对弹性的提升作用, 但仍高于 CK。这可能是湿热处理促进了蛋白质变性和直链淀粉重组, 增强了淀粉-蛋白质网络的稳定性, 从而提升了 G' 和 G'' ^{[22]26}。而 HMT-OGD 面团的弹性略低于 HMT, 可能是由于燕麦粉、绿豆粉和抗性糊精的添加, 部分水分被纤维和抗性淀粉竞争吸收, 影响了淀粉的交联结构^[15,23-24]。

面团的 $\tan \delta$ 随着频率的升高呈先减小后增大趋势, 当频率 < 1 Hz 时面团内部筋网络结构相对完整, 赋予面团较好的弹性; 当频率 > 1 Hz 时面团内部的交联作用减弱, 黏性增加, 面团的凝胶体系和流动性增强^{[22]18}。3 种面团的 $\tan \delta$ 值均 < 1 , 表明面团主要以弹性为主, 具有固体状性质。CK 的 $\tan \delta$ 最高, 说明其流动性最强, 而 HMT 的最低, 表明湿热处理使面团更具弹性。HMT-OGD 的 $\tan \delta$ 值介于 HMT 和 CK 之间, 反映出其在弹性与黏性特性上达到了一种适中的协调状态。这可能是由于湿热处理促进了蛋白质和淀粉的交联, 使面团结构更加紧密, 增强了弹性, 降低了 $\tan \delta$ ^[25]。而 HMT-OGD 通过增加可溶性膳食纤维和抗性淀粉含量, 部分恢复了面团的黏性, 致使 $\tan \delta$ 有所上升。

表 1 湿热处理对面粉黏度的影响[†]

Table 1 Effect of heat-moisture treatment on wheat flour viscosity

样品	糊化温度/°C	峰值黏度/(mPa·s)	最低黏度/(mPa·s)	最终黏度/(mPa·s)	回生值/(mPa·s)
CK	62.22 ± 0.26 ^a	1 638.41 ± 34.91 ^c	1 536.91 ± 61.29 ^b	2 222.62 ± 67.42 ^c	617.70 ± 73.36 ^b
HMT	73.22 ± 1.45 ^b	590.03 ± 14.85 ^a	555.36 ± 11.82 ^a	1 071.77 ± 32.53 ^a	516.41 ± 20.04 ^a
HMT-OGD	73.80 ± 0.55 ^b	657.80 ± 19.64 ^b	578.28 ± 18.70 ^a	1 402.39 ± 15.61 ^b	824.11 ± 14.83 ^c

† 小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

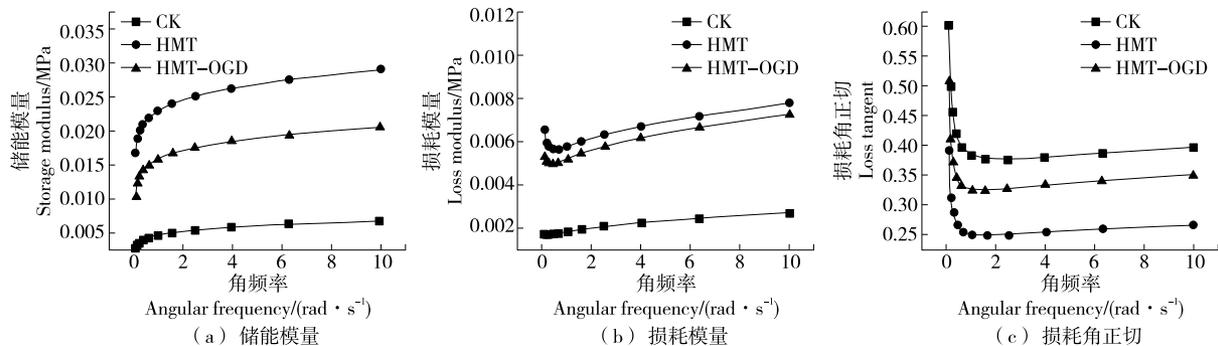


图 2 湿热改性小麦粉的流变曲线

Figure 2 Rheological curves of heat-moisture modified wheat flour

2.2 单因素试验

2.2.1 燕麦粉添加量对饼干的质构特性和感官评价的影响

由表 2 可知, 随着燕麦粉添加量的增加, 饼干的硬度和咀嚼性显著降低。当燕麦粉添加量为 10 g 时, 硬度和咀嚼性最高; 当燕麦粉添加量为 30 g 时, 硬度和咀嚼性最低。这与 Sergiacomo 等^[26]的研究结论一致。随着

燕麦粉添加量的增加, 饼干的风味强度和感官接受度升高。适量添加燕麦粉可使饼干不易形变, 但过度添加则会导致饼干脆性增加^[27]。当燕麦粉添加量为 20 g 时, 饼干在色泽、外观、口感、气味、组织结构和总体可接受度等指标上达到最优平衡。因此, 确定燕麦粉添加量为 20 g。

表2 燕麦粉对曲奇饼干质构特性和感官评分的影响[†]

Table 2 Effects of oat flour on textural properties and sensory scores of cookies

燕麦粉添 加量/g	质构特性		感官评分					
	硬度/N	咀嚼性/(N·mm)	色泽	外观	口感	气味	组织结构	总体可接受度
10	15.10±3.58 ^a	14.08±2.58 ^a	7.37±1.23 ^b	7.63±0.61 ^{ab}	6.10±1.34 ^b	7.59±1.14	7.47±1.29	6.63±1.04 ^b
20	12.59±3.03 ^a	11.18±2.38 ^b	8.23±0.68 ^a	8.00±0.85 ^a	8.29±0.96 ^a	8.15±0.84	8.31±0.96	8.49±0.83 ^a
30	8.76±0.99 ^b	9.70±1.09 ^b	6.83±1.41 ^b	7.17±1.45 ^b	7.88±1.15 ^a	7.63±1.14	7.67±1.39	8.07±0.83 ^a

† 小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

2.2.2 绿豆粉添加量对饼干的质构特性和感官评价的影响 由表3可知,随着绿豆粉添加量的增加,饼干硬度呈先升高后降低趋势,表明绿豆粉添加量对饼干硬度的提升存在非线性响应特征,添加量为15 g时,可维持饼干硬度的相对稳定。此外,当绿豆粉添加量从5 g增加到15 g时,饼干的咀嚼性得到改善。但过量添加绿豆粉会使饼干质地变得松散,降低其咀嚼性,可能是过多的绿豆粉破坏了饼干原本的结构,使其在咀嚼过程中更易破碎,从而降低了咀嚼所需的能量。因此,适量添加绿豆粉(15 g)有助于提升饼干的硬度和咀嚼性,从而改善其质构特性,但过量添加(25 g)则可能削弱饼干的结构完整性,降低整体口感。

当绿豆粉添加量由5 g增加至15 g时,饼干的色泽与外观评分基本维持稳定,表明适量添加绿豆粉对视觉品质无显著影响。当绿豆粉添加量为25 g时,饼干的色泽明显暗沉,外观评分显著下降,可能与绿豆粉中多酚类物质参与褐变反应及粉体分布不均有关。口感方面,适量添加绿豆粉(5~15 g)可维持饼干的良好风味与酥脆度,而25 g添加组口感评分明显下降,可能因结构松散导致酥脆

性降低。组织结构评分亦呈下降趋势,表明高添加量下饼干内部组织被破坏。气味受绿豆粉添加影响较小,整体变化不显著。综合感官评分,当绿豆粉添加量为15 g时,饼干的感官评分最高,各感官特性平衡协调。综上,适量添加绿豆粉(约15 g)有助于提升饼干的感官品质,而过量添加(25 g)则可能因结构与外观劣变而降低产品接受度。

2.2.3 抗性糊精添加量对饼干的质构特性和感官评价的影响 由表4可知,当抗性糊精添加量为6 g时,饼干的硬度较高,可赋予产品坚实口感;当抗性糊精添加量为8 g时,硬度降至(10.81±1.06) N,表明抗性糊精可使饼干的质构变得更加松软。当抗性糊精添加量为10 g时,硬度略升至(11.36±1.59) N。饼干的咀嚼性随着抗性糊精添加量的增加呈先升后稳趋势,表明抗性糊精的添加有助于改善饼干的咀嚼性。综上,适量添加抗性糊精(8 g左右)可在保持质地松软的同时增强咀嚼性,有助于优化饼干的整体质构表现。

当抗性糊精添加量为6 g时,饼干的感官品质表现最佳,尤其在色泽、外观、口感和质构特性方面得分较高,总体可接受度达到较优水平。当抗性糊精添加量为8 g时,

表3 绿豆粉对曲奇饼干质构特性和感官评分的影响[†]

Table 3 Effects of mung bean flour on textural properties and sensory scores of cookies

绿豆粉添 加量/g	质构特性		感官评分					
	硬度/N	咀嚼性/(N·mm)	色泽	外观	口感	气味	组织结构	总体可接受度
5	13.06±2.69	12.00±2.84	7.64±1.01	7.86±1.17 ^a	7.46±0.89 ^a	7.21±1.53	7.57±0.94 ^a	7.29±1.94 ^{ab}
15	15.18±3.31	13.21±3.15	7.68±1.49	7.68±1.41 ^a	7.50±1.16 ^a	7.43±1.40	7.46±1.39 ^{ab}	7.82±1.59 ^a
25	14.92±2.67	10.54±3.51	6.57±1.95	6.36±1.69 ^b	6.18±1.23 ^b	6.32±1.51	6.54±1.42 ^b	6.43±1.65 ^b

† 小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

表4 抗性糊精对曲奇饼干质构的影响[†]

Table 4 Effect of resistant dextrin on the texture of cookies

抗性糊精 添加量/g	质构特性		感官评分					
	硬度/N	咀嚼性/(N·mm)	色泽	外观	口感	气味	组织结构	总体可接受度
6	13.09±1.91 ^a	10.52±2.30	7.60±0.83	7.80±1.08 ^a	7.78±1.25	7.35±1.40	7.92±0.95	8.05±0.69
8	10.81±1.06 ^b	11.12±2.87	7.87±0.67	7.70±0.80 ^a	7.83±0.79	6.73±1.16	7.43±0.90	7.90±0.76
10	11.36±1.59 ^b	10.87±1.84	7.11±1.49	6.68±1.92 ^b	7.75±1.17	7.47±1.14	7.13±1.13	7.06±0.85

† 小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

饼干的口感和质构特性仍保持良好,但外观与组织结构评分略有下降,气味表现也有所减弱,这可能与抗性糊精在较高浓度下的特殊风味释放有关。当抗性糊精添加量为 10 g 时,饼干的色泽、外观与组织结构等评分普遍下降,即使气味和口感略有回升,整体接受度仍不如低添加组,表明过量添加抗性糊精可能破坏饼干的原有结构和风味平衡。综上,适量添加(6 g)抗性糊精有助于提升饼干的感官品质,尤其在色泽、外观和口感方面表现显著,可能因其在改善质构的同时不会过度干扰风味所致。

2.3 正交实验

在单因素试验的基础上,以燕麦粉添加量、绿豆粉添加量和抗性糊精添加量为因素进行 $L_9(3^3)$ 正交试验,试验水平见表 5,试验设计及结果见表 6。

表 5 饼干原料配比的因素及水平

Table 5 Factors and levels of cookie raw material ratio

水平	A 燕麦粉 添加量/%	B 绿豆粉 添加量/%	C 抗性糊精 添加量/%
1	15	10	5
2	20	15	6
3	25	20	7

由表 6 可知,各因素对饼干品质的影响主次顺序依次为绿豆粉添加量>燕麦粉添加量>抗性糊精添加量,杂粮饼干的最佳配方工艺为 $A_3B_1C_2$,即燕麦粉添加量 25 g,绿豆粉添加量 10 g,抗性糊精添加量 6 g。

2.4 杂粮饼干的最佳配方工艺的质构特性和感官评价

由表 7 可知,优化方案制备的饼干在感官评价和质构特性方面均表现良好。感官评价中,气味(8.3)、总体可接受度(8.2)和外观(8.1)得分较高,表明优化配方赋予了饼干良好的香气和整体品质,受到评价者的一致认可;色泽、口感及组织结构评分均为 7.8,略低但差异不大,说明产品的感官稳定性较好,整体感官得分均在 7.75 分以上,反映出该饼干具有优良的感官品质和较强的实用性。从质构特性来看,饼干的硬度为 13.19 N,咀嚼性(破裂能量)为 10.67 $N \cdot mm$,两项指标适中,标准差较小,表明产品具

表 6 正交试验设计及结果

Table 6 Orthogonal experimental design and results

试验号	A	B	C	感官评分
1	1	1	1	47.1
2	1	2	2	44.2
3	1	3	3	43.3
4	2	1	2	46.3
5	2	2	3	42.7
6	2	3	1	42.7
7	3	1	3	46.6
8	3	2	1	44.4
9	3	3	2	43.7
k_1	44.9	46.7	44.7	
k_2	43.9	43.8	44.7	
k_3	44.9	43.2	44.2	
R	1.0	2.9	0.5	

有良好的脆性和质构稳定性,咀嚼体验协调舒适。综上所述,该优化配方不仅提升了饼干的感官表现,也保证了其质构品质,具有良好的产品开发潜力。

2.5 湿热改性对饼干体外淀粉消化性的影响

由图 3 可知,消化初期(0~20 min),对照组的水解速率显著高于改性组,表明对照组饼干在淀粉酶作用下更快地开始被消化分解。随着消化时间的延长,对照组的水解率增速逐渐减缓,于 60 min 后趋于平稳,并最终约稳定在 55%;而改性组水解率上升相对缓慢,在约 80 min 后趋于平稳,最终水解率约为 47%。改性组饼干在整个消化过程中的水解率均显著低于对照组,表明改性饼干在消化过程中更不易被快速水解,有助于延缓血糖上升速度^[28]。这可能与改性淀粉中 RDS 含量较低、RS 含量较高有关^[10]。

由表 8 可知,与对照组相比,改性饼干的 GI 和 HI 均呈下降趋势。GI 值显著降低表明该改性饼干可有效抑制餐后血糖峰值的产生,有利于血糖的平稳维持,可降低因血糖大幅波动带来的健康风险。此外,改性饼干的 RDS 含量减少,RS 含量增加,表明湿热处理可以改变淀粉结构,

表 7 优化方案制备的饼干的感官评价

Table 7 Sensory evaluation of cookies prepared by the optimized scheme

硬度/N	咀嚼性/($N \cdot mm$)	色泽	外观	口感	气味	组织结构	总体可接受度	总分
13.19±2.85	10.67±2.69	7.8±1.0	8.1±0.7	7.8±0.7	8.3±0.9	7.8±0.7	8.2±0.3	48.0

表 8 改性饼干的消化模型参数的影响

Table 8 Effect of modified cookies on digestion model parameters

组别	HI	GI	RDS/%	SDS/%	RS/%
对照组	0.80±0.04	77.18±3.52	37.25±4.47	15.52±1.77	47.23±2.71
改性组	0.71±0.02	69.37±2.21	32.40±3.24	15.09±2.55	52.51±0.69

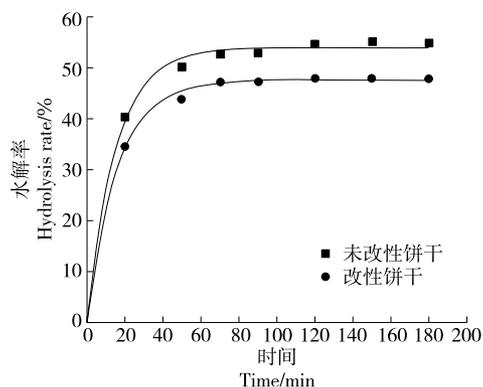


图3 改性饼干的消化动力学模型拟合曲线

Figure 3 Digestion kinetics model fitting curves of modified cookies

在体外消化过程中表现出更慢的葡萄糖释放速度和更高的抗消化能力^[10]。

3 结论

采用湿热处理技术制备了改性小麦粉,并结合燕麦粉、绿豆粉及抗性糊精构建复合改性面粉,成功用于中血糖生成指数杂粮饼干的开发。结果表明,湿热处理后,小麦粉的糊化温度升高,峰值黏度、最终黏度和衰减值降低,糊化体系的稳定性增强,面团在加工过程中具有更好的适应性和耐贮藏性。杂粮饼干的最佳辅料配方为燕麦粉 25 g、绿豆粉 10 g、抗性糊精 6 g,此条件下制备的杂粮饼干兼具优良的感官品质和质构特性,且血糖生成指数显著降低。此外,该研究仅针对饼干产品进行应用,对于蛋糕等其他低筋焙烤食品的适用性仍有待进一步探讨;同时,鉴于绿豆粉中富含抗氧化活性物质,其在产品抗氧化功能方面的作用亦需后续深入研究。

参考文献

- [1] 吴祎帆. 小米曲奇预拌粉的研制[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020: 8.
WU Y F. Preparation of millet cookie premix powder[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2020: 8.
- [2] VAN HUNG P, DUYEN T T M, VAN THANH H, et al. Starch digestibility and quality of cookies made from acid and heat-moisture treated sweet potato starch and wheat flour composites [J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2021, 15(4): 3 045-3 051.
- [3] 彭辉, 刘绍, 黄染林, 等. 抗性糊精饼干的研制及其血糖生成指数测定[J]. *食品安全质量检测学报*, 2020, 11(21): 7 821-7 828.
PENG H, LIU S, HUANG R L, et al. Development and determination of glycemic index value of a resistant dextrin biscuit[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2020, 11(21): 7 821-7 828.
- [4] 黄永莹, 李国坤, 陈晓熠. 复合代糖的理化性质及低 GI 饼干的研制[J]. *现代食品科技*, 2023, 39(11): 111-117.
HUANG Y Y, LI G K, CHEN X Y. Physical and chemical properties of complex sugar substitute and preparation of low GI biscuit[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2023, 39(11): 111-117.
- [5] 彭辉, 刘绍, 黄染林, 等. 一种低 GI 饼干的研制[J]. *食品科技*, 2020, 45(12): 156-162.
PENG H, LIU S, HUANG R L, et al. Development of a low GI biscuit[J]. *Food Science and Technology*, 2020, 45(12): 156-162.
- [6] 侯晓倩. 低 GI 桑葚饼干的研制[D]. 太原: 山西大学, 2024: I.
HOU X Q. Development of low GI mulberry biscuits[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2024: I.
- [7] 李明菲, 刘翀, 李利民, 等. 湿热处理对小麦粉基本理化特性影响的研究[J]. *河南工业大学学报(自然科学版)*, 2016, 37(1): 10-15, 42.
LI M F, LIU C, LI L M, et al. Effect of heat-moisture treatment on the physicochemical properties of wheat flour[J]. *Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition)*, 2016, 37(1): 10-15, 42.
- [8] 黄薇, 刘远晓, 李萌萌, 等. 湿热处理改性淀粉的研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2025, 51(1): 354-362, 372.
HUANG W, LIU Y X, LI M M, et al. Recent advances in heat-moisture modified starch[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2025, 51(1): 354-362, 372.
- [9] 贾泽宇, 卞科, 刘远晓, 等. 热处理对小麦粉品质特性影响的研究进展[J]. *中国粮油学报*, 2023, 38(6): 169-178.
JIA Z Y, BIAN K, LIU Y X, et al. Research progress on the effect of heat treatment on quality characteristics of wheat flour [J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2023, 38(6): 169-178.
- [10] 燕翔, 曾庆梅. 湿热处理对小麦粉抗消化特性的影响研究 [J]. *粮食与油脂*, 2022, 35(12): 68-72.
YAN X, ZENG Q M. Effects of moisture-heat treatment on antidigestion properties of wheat flour[J]. *Cereals & Oils*, 2022, 35(12): 68-72.
- [11] ZHOU Q Q, WANG L L, ZHANG Y W, et al. Characterization of mung bean endogenous proteases and globulins and their effects on the production of mung bean protein[J]. *Food Chemistry*, 2024, 442: 138477.
- [12] QUYEN D K, TRANG D H. Study on the effects of wheat flour ratio and saccharose ratio on quality of oat cookies aided pandan leaves[J]. *Vietnam Journal of National & Food*, 2022: 18(1): 111-118.
- [13] ZHANG G P, XUAN Y, LYU F, et al. Microstructural, physicochemical properties and starch digestibility of brown rice flour treated with extrusion and heat moisture[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 242: 124594.
- [14] 孙嘉辉, 王俊彤, 郑喜群, 等. 热超声处理对绿豆浆液理化性

- 质及腐竹品质特性的影响[J]. 食品与机械, 2024, 40(7): 17-23.
- SUN J H, WANG J T, ZHENG X Q, et al. Comparison of physicochemical properties of mung bean liquid and quality characteristics of mung bean yuba by different thermoultrasonic treatment[J]. Food & Machinery, 2024, 40(7): 17-23.
- [15] LI H, WANG J, CHENG A W, et al. Effects of mechanical processing on the physicochemical properties of oat β -glucan and its *in vitro* fermentation[J]. Food & Machinery, 2024, 40(4): 20-26.
- [16] 吴伟, 李彤, 蔡勇建, 等. 三种稻米在贮藏过程中蒸煮特性变化的比较[J]. 食品与机械, 2014, 30(3): 122-126.
- WU W, LI T, CAI Y J, et al. Comparison of cooking quality of three kind of rice during storage[J]. Food & Machinery, 2014, 30(3): 122-126.
- [17] 韩冰霜, 安俊晓, 杜先锋. 紫甘薯全粉对面团流变特性与曲奇饼干品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(19): 58-63.
- HAN B S, AN J X, DU X F. Effect of purple sweet potato entire powder on dough rheological properties and the quality of cookies[J]. Food Research and Development, 2020, 41(19): 58-63.
- [18] 胡蒙蒙, 廖梓康, 黎琼, 等. 两种杂粮对面包预拌粉烘烤性能和淀粉消化性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(5): 185-193.
- HU M M, LIAO Z K, LI Q, et al. Effects of two kinds of coarse cereals on baking properties and *in vitro* starch digestibility of pre-blent multigrain bread flour[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(5): 185-193.
- [19] 吴小丽. 不同储藏条件对小麦粉糊化特性的影响[J]. 粮食与食品工业, 2020, 27(4): 7-9, 13.
- WU X L. Effects of different storage conditions on gelatinization characteristics of wheat flour[J]. Cereal & Food Industry, 2020, 27(4): 7-9, 13.
- [20] 刘德志, 武云娇, 王一飞, 等. 抗性糊精对面粉流变特性及糊化凝胶的影响[J]. 包装工程, 2023, 44(1): 253-258.
- LIU D Z, WU Y Q, WANG Y F, et al. Effect of resistant dextrin on rheological properties of flour and gelatinized gel [J]. Packaging Engineering, 2023, 44(1): 253-258.
- [21] 张剑, 张杰, 李梦琴, 等. 绿豆配粉对面团特性及面条品质的影响[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2015, 36(6): 10-15.
- ZHANG J, ZHANG J, LI M Q, et al. Effects of mung bean flour on the dough properties and the quality of noodles[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2015, 36(6): 10-15.
- [22] 吕一鸣. 湿热处理对青稞—小麦复配面团特性及挂面品质的影响研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2023.
- LU Y M. Effects of heat moisture treatment on highland barley-wheat dough and dried noodles[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2023.
- [23] 张宇, 陈远文, 段丹, 等. 挤压改性绿豆粉对小麦粉加工及其面条品质特性的影响[J]. 食品工业科技, 2019, 40(20): 36-41.
- ZHANG Y, CHEN Y W, DUAN D, et al. Effects of mung bean flour modified by extrusion on characteristics of flour processing and quality of noodles[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(20): 36-41.
- [24] 吴祎帆, 邵晔, 郑徽, 等. 小米曲奇预拌粉配方的优化[J]. 现代食品科技, 2020, 36(8): 258-264.
- WU Y F, SHAO Y, ZHENG H, et al. Optimization of millet cookie premix powder formula[J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(8): 258-264.
- [25] 杨雪飞, 袁蓓蓓, 罗水忠, 等. 品质改良剂对复合杂粮面包粉流变学特性的影响[J]. 食品科学, 2015, 36(11): 75-80.
- YANG X F, YUAN B L, LUO S Z, et al. Effects of composite improvers on rheological properties of coarse grain bread flour [J]. Food Science, 2015, 36(11): 75-80.
- [26] SERGIACOMO A, BRESCIANI A, GALLIO F, et al. Sprouted oats (*Avena sativa* L.) in baked goods: from the rheological properties of dough to the physical properties of biscuits[J]. Food and Bioprocess Technology, 2024, 17(11): 4 094-4 105.
- [27] 石磊, 刘超, 周柏玲, 等. 粒度分布对绿豆粉流变学性质的影响研究[J]. 食品科技, 2022, 47(5): 114-119.
- SHI L, LIU C, ZHOU B L, et al. Effect of granularity distribution on the rheological properties of mung bean powder [J]. Food Science and Technology, 2022, 47(5): 114-119.
- [28] YANG L P, WANG S Y, LI S N, et al. Effect of heat-moisture treatment on the physicochemical properties and starch digestibility of mix powder (wheat flour-black soybean flour) and corresponding cookies [J]. Gels, 2022, 8(7): 429.