

陈思, 华雨, 方诗怡, 等. 葛根淀粉对混合粉面团特性及酥性饼干品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(11): 108–116. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024060402

CHEN Si, HUA Yu, FANG Shiyi, et al. Effects of Kudzu Starch Incorporation on the Properties of Dough of Blended Flour and Quality of Shortbread Biscuits[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(11): 108–116. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024060402

· 研究与探讨 ·

葛根淀粉对混合粉面团特性及 酥性饼干品质的影响

陈思¹, 华雨¹, 方诗怡¹, 张传翌¹, 汤尚文^{1,2,*}, 豁银强^{1,2}, 刘传菊^{1,2}, 李欢欢^{1,2}

(1.湖北文理学院食品科学与化学工程学院, 湖北襄阳 441053;

2.湖北省食品配料工程技术研究中心, 湖北襄阳 441053)

摘要: 采用葛根淀粉 (Kudzu Starch, KS) 部分替代小麦粉 (Wheat Flour, WF) 制备酥性饼干, 用快速黏度分析仪、流变仪、色度仪、质构仪对混合粉面团特性和酥性饼干品质进行分析, 选取酥性饼干的色差、硬度、酥脆性、葛根素含量以及感官评价总分共 5 个指标进行标准化处理后进行综合评分。结果表明, 随着 KS 比例的增加, 混合粉的葛根素含量、最终黏度和回生值显著增加 ($P < 0.05$), 但面团的储能模量 (G') 和损耗模量 (G'') 逐渐下降; KS 的添加使酥性饼干颜色加深、色差变大; 硬度和酥脆性均随 KS 比例的增加呈现先下降后上升的趋势, 其中硬度在 20%~30% 最低, 酥脆性在 40% 时最高; KS 比例为 20% 时, 感官评价总分最高, 达到 85.75。当 KS 比例在 30% 时, 综合评分最高 (67.08), 此时酥性饼干中葛根素含量达到 15.89 mg/kg。综合而言, KS 部分替代 WF 有效地促进了酥性饼干品质的提升, 最合适的替代比例为 30%, 实验结果为葛根食品的开发提供了依据。

关键词: 葛根淀粉, 糊化特性, 面团, 酥性饼干, 质构特性

中图分类号: TS213.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)11-0108-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024060402



本文网刊:

Effects of Kudzu Starch Incorporation on the Properties of Dough of Blended Flour and Quality of Shortbread Biscuits

CHEN Si¹, HUA Yu¹, FANG Shiyi¹, ZHANG Chuanyi¹, TANG Shangwen^{1,2,*}, HUO Yinjiang^{1,2},
LIU Chuanju^{1,2}, LI Huanhuan^{1,2}

(1. School of Food Science and Chemical Engineering, Hubei University of Arts and Science, Xiangyang 441053, China;

2. Hubei Provincial Engineering and Technology Research Center for Food Ingredients, Xiangyang 441053, China)

Abstract: Shortbread biscuits were baked using blended flour in which the wheat flour (WF) was partially substituted with kudzu starch (KS). The properties of the blended flour dough and the quality of the resultant shortbread biscuits were analyzed using a rapid viscosity analyzer, rheometer, colorimeter, and texture analyzer. The color variation, hardness, crispness, puerarin content, and overall sensory evaluation score were selected as comprehensive scoring indexes, and the indexes were standardized to calculate comprehensive scores. The analysis revealed that with the increase in the KS proportion, the puerarin content, final viscosity, and retrogradation values of the blended flour increased significantly ($P < 0.05$), whereas the storage modulus (G') and loss modulus (G'') of the blended flour dough decreased progressively. KS-incorporated flour yielded shortbread biscuits with more accentuated and varied colors. The hardness and crispness of the biscuits initially diminished and then increased with rising KS proportions, with the minimum hardness achieved with 20%~30% KS and the maximum crispness attained at 40% KS. At a KS proportion of 20%, the overall sensory evaluation score peaked at an impressive 85.75 points. At a KS proportion of 30%, the overall score peaked at 67.08 points,

收稿日期: 2024-06-27

基金项目: 湖北文理学院大学生创新创业训练项目 (X202210519181)。

作者简介: 陈思 (2004-), 女, 大学本科, 研究方向: 农产品加工与贮藏, E-mail: 2518361811@qq.com。

* 通信作者: 汤尚文 (1983-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 农产品加工与贮藏, E-mail: tangshwbuas@163.com。

corresponding to a puerarin content of 15.89 mg/kg in the biscuits. In summary, partially substituting WF with KS effectively improved the quality of shortbread biscuits, with the optimal substitution proportion being 30%. These experimental findings lay the groundwork for the development of KS-incorporated food products.

Key words: kudzu starch; pasting properties; dough; shortbread biscuit; textural properties

葛根是一种多年生的半木本藤本植物, 主要分布于亚洲、北美和南美, 在我国广西、湖北、湖南、云南、四川等地有大规模种植, 在食品和药品中有着悠久的历史, 是我国最早列入“药食同源”目录的中药材之一^[1]。现代医学研究表明, 由于葛根富含多糖、葛根素等功能成分, 使其具有解酒护肝、抗氧化、抗炎、防治心脑血管病和糖尿病等系列生理活性^[2-4]。

淀粉是葛根最主要的成分, 根据品种的不同可占葛根干重的 30%~80%, 由于葛根中葛根素的水溶性较低, 采用沉淀法分离葛根淀粉后, 淀粉中会存留大量葛根素, 因此以葛根淀粉为配料制备的系列食品通常也被认为具有一定的功能活性而受到消费者的青睐^[5]。现有文献中, 葛根淀粉的研究主要集中在功能特性、改性等方面^[6-8], 以葛根淀粉为配料的食品开发则主要集中于固体饮料(冲调型葛粉、代餐粉)和传统面食(面条、馒头等)^[9-11]。

烘焙食品(面包、蛋糕、饼干等)是世界范围内消费最为广泛的食物之一。采用功能性淀粉部分替代小麦粉生产烘焙食品以改善其食用品质和消化特性的研究屡见报道。MENG 等^[12]采用 10%~30% 的马铃薯淀粉和甘薯淀粉部分替代小麦粉制备了面包, 研究发现马铃薯淀粉和甘薯淀粉降低了面包的硬度, 增加了面包比容和慢消化淀粉含量。MULARGIA 等^[13]采用蜡质玉米淀粉、大米淀粉、马铃薯淀粉和豌豆淀粉部分替代小麦粉制备了曲奇饼干, 研究表明用量为 45% 的豌豆淀粉制备的曲奇饼干食用品质最佳, 且能降低饼干的消化速率。

众多研究显示, 功能性淀粉的部分替代对混合粉、面团的物理特性以及烘焙食品的食用品质均有显著的影响, 因此本文拟采用葛根淀粉部分替代小麦粉制备酥性饼干, 研究葛根淀粉对混合粉和面团物理特性以及饼干食用品质的影响, 以为葛根食品开发提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

葛根淀粉(Kudzu Starch, KS) 食用级, 湖北葛百岁葛业有限公司; 低筋小麦粉(Wheat Flour, WF) 食用级, 河南雪健; 绵白糖 食用级, 安琪酵母; 玉米油 金龙鱼; α -淀粉酶(100000 U/mL)、糖化酶(100000 U/mL) BR, 阿拉丁; DNS 试剂 AR, 飞净试剂; 芦丁标准品、葛根素标准品 $\geq 98\%$, 源叶生物; 直链淀粉试剂盒 南京建成; 其余药品和试剂均为国产分析纯。

DHR-2 流变仪 美国 TA; TA. XT. Plus 质构仪

英国 SMS; CRTF32PD 烤箱 广东伟仕达; RVA-Tec Master 快速黏度分析仪 瑞典 Perten; UltraScan PRO 色度仪 美国 Hunter Lab; PEN3 电子鼻 德国 Airsense 公司; MS-70 快速水分测定仪 日本 AND; LC-15 高效液相色谱仪、UV-1800 紫外可见分光光度计 日本岛津。

1.2 实验方法

1.2.1 葛根淀粉酥性饼干的制备 混合粉的制备: 按 10%、20%、30% 和 40% 的质量比例称取 KS 替代 WF, 制备混合粉(Kudzu Starch and Wheat Flour Blends, KW)。

酥性饼干面团的制备: 原料混合→面团调制(20 min)→醒发(保鲜膜包裹静置 20 min)→面片压制(厚度 2 mm)。

酥性饼干的烘焙: 面片→饼干坯成型(模具压制)→焙烤→冷却。

操作要点: KW 混合粉过 80 目筛网备用; 原料按 KW100 g、玉米油 30 g、糖粉 16 g、水 22 g 的比例进行混合; 糖粉加入水中充分搅打溶解, 随后加入玉米油用搅拌器充分搅打形成乳浊液; 向打发好的乳浊液中掺入过筛的混合粉进行搅拌, 用堆叠法反复揉搓直至面团均匀、表面出油适中且无干粉; 采用压面机(辊间距 2 mm)压制面片, 反复折叠换方向压制 3 次后成型; 烤盘中均匀涂抹一层玉米油后将饼干坯置于烤盘, 上下火设置为 180 °C, 烘烤 13 min。

1.2.2 混合粉成分与糊化特性的测定

1.2.2.1 水分含量测定 样品中水分含量测定, 采用快速水分测定仪检测, 测定温度 105 °C, 测定终点设置为 0.02%/min。

1.2.2.2 总淀粉和直链淀粉含量测定 总淀粉含量测定时, 试样的制备参照 GB 5009.9-2023《食品中淀粉的测定》第一法酶水解法进行, 样品完全水解后葡萄糖含量改用 3,5-二硝基水杨酸法(DNS)进行测定。直链淀粉含量采用南京建成直链淀粉含量试剂盒进行测定。

1.2.2.3 蛋白和脂肪含量测定 蛋白含量参照 GB 5009.5-2016《食品中蛋白质的测定》第一法凯氏定氮法进行测定; 脂肪含量参照 GB 5009.6-2016《食品中脂肪的测定》第一法索氏抽提法进行测定。

1.2.2.4 葛根素含量测定 葛根素含量测定, 参照 GB/T 22251-2008《保健食品中葛根素的测定》进行检测。用 70% 甲醇配制 5、10、20、30、40 和 50 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 的系列标准溶液, 进样后分别在波长 247 nm 下测定峰面积值, 绘制葛根素标准曲线($y=$

114302x-310187; $R^2=0.9986$)。称取 5.0 g 样品于烧瓶中,加入 70% 甲醇 100 mL 置于超声清洗仪中超声提取 30 min,抽滤后滤液置于旋转蒸发仪蒸干,用少量 70% 甲醇润洗烧瓶,合并洗液至 10 mL 容量瓶定容,之后取定溶液用 0.45 μm 微孔滤膜过滤后进样检测。液相色谱条件:色谱柱 ShimNex CS C18 (250 mm \times 4.6 mm, 5 μm),流动相=甲醇:6% 乙酸:水 (25:3:72),流速 0.6 mL/min,检测波长 247 nm,柱温 30 $^{\circ}\text{C}$,进样量 10 μL 。

1.2.2.5 混合粉糊化特性(RVA)测试 称取 3.0 g KW 混合粉(干基)和 25 g 水至 RVA 测试用铝筒,用浆叶搅拌均匀后上机测试。测试程序按照刘传菊等^[14]的方法进行。

1.2.3 面团流变特性测试 取 1.2.1 中制备的面片(厚度 2 mm)置于流变仪平台上,降下平板夹具(直径 40 mm,板间距 2 mm),精确刮去边角部分后迅速测试。测试温度 25 $^{\circ}\text{C}$,应变 0.1%,频率扫描范围 0.1~100 Hz,采集样品储能模量(G')、损耗模量(G'')以及损耗因子($\tan\delta$)随频率的变化曲线。

采用幂律方程对模量-频率曲线进行非线性拟合^[15],拟合方程如下:

$$G' = K' \times f^{n'}$$

$$G'' = K'' \times f^{n''}$$

式中, K' 和 K'' 为稠度系数($\text{Pa}\cdot\text{s}^n$), f 为频率(Hz), n' 和 n'' 为流动特征指数。

1.2.4 酥性饼干成分与食用品质测试

1.2.4.1 葛根酥性饼干色度测试 为防止饼干烘焙过程中温度不均匀造成颜色不均匀影响测试结果,取制备的酥性饼干研磨成粉末后,置于比色皿中上机测试,测量模式为全反射,测定明暗度(L^*)、红绿值(a^*)和黄蓝值(b^*)并计算色差(ΔE)和白度值(W)^[16]。

$$W = 100 - \sqrt{(100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}}$$

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

式中, ΔL^* 、 Δa^* 和 Δb^* 分别为样品 L^* 、 a^* 和 b^* 与 WF 酥性饼干(平均值)的差值。

1.2.4.2 葛根酥性饼干质构测试 采用穿刺实验和三点弯曲实验,获取质构数据为硬度和酥脆性。

穿刺实验: P/2 探头; HDP/90 带孔重载平台; 力量

感应元 5 kg; 测量模式为下压; 测前速度 1.00 mm/s, 测中速度 0.50 mm/s, 测后速度 10.00 mm/s; 触发力 5 g; 穿刺距离 5 mm。

三点弯曲实验: HDP/3PB 三点弯曲探头(支架跨度调整为 20 mm); HDP/90 无孔重载平台; 力量感应元 5 kg; 测量模式为下压; 测试距离 5 mm; 测前速度 1.00 mm/s, 测中速度 3.00 mm/s, 测后速度 10.00 mm/s; 触发力 5 g。

1.2.4.3 葛根酥性饼干感官评价 选择 10 名食品科学专业学生,其中男女各 5 名,年龄在 19~22 岁,经培训后按表 1 评分标准进行感官评定。评分标准参考 GB/T 20980-2021《饼干质量通则》中关于饼干的感官要求。

1.2.4.4 酥性饼干成分测定 酥性饼干中水分、蛋白、脂肪和葛根素含量参照 1.2.2 中的方法进行测定。

1.2.4.5 葛根酥性饼干综合评分 参考张云亮等^[17]的方法略作修改。为消除各测试指标单位差异,选取合适的葛根酥性饼干评价指标,对各指标数据进行无量纲归一化处理(归一化到区间 [0,100])。对于越大越好的指标(正向指标)测试值直接进行归一化处理,越小越好的指标(逆向指标)需在测试值之前加上负号再进行处理。综合评分为各指标归一化值的平均值,计算方式如下:

$$T_s = \frac{\sum_{i=1}^n Z_i}{n}$$

式中, T_s 为样品综合评分; Z_i 为样品 i 指标的归一化值; $i=1, 2, \dots, n$ 。

1.3 数据处理

质构测试两种方法所有样品均重复测试 10 次,色度测试各样品重复测试 6 次,其余各项测试均重复测定 3 次。采用 Origin 2021 作图并计算各项数据的平均值、标准差和显著性($P<0.05$),其中显著性分析使用 Fisher-LSD 法。各测试数据的平均值、标准差及显著性,表示方式采用 $\bar{X}\pm\text{SD}$ (平均值 \pm 标准差)。

2 结果与分析

2.1 葛根淀粉对混合粉化学组成的影响

表 2 为 KS、WF 和 KW 的化学组成。由表可见,WF 的直链淀粉、蛋白和脂肪含量显著高于 KS,葛根素在 WF 中未检出。KW 混合粉中,随着 KS 比

表 1 酥性饼干感官评定标准

Table 1 Sensory evaluation criteria for shortbread biscuits

指标	好	一般	差
形态	外形齐整,厚薄均匀,无变形,无凹底(25~30分)	有少量裂痕、变形、凹底,厚薄基本均匀(19~24分)	破碎较多,变形严重,凹底多,厚薄不均匀(0~18分)
色泽	色泽均匀、有光泽,无过焦、过白现象(8~10分)	色泽较为均匀,光泽不明显,有少量过焦、过白现象(5~7分)	色泽不均匀,表面无光泽,有大量过焦、过白现象(0~4分)
口感	酥松、酥脆,不黏牙(25~30分)	较酥松、酥脆,有黏牙(19~24分)	僵硬,黏牙(0~18分)
组织	断面呈多孔状,细密、均匀(17~20分)	断面呈多孔状,粗糙、不均匀(13~16分)	断面无多孔结构,粗糙、不均匀(0~12分)
气味	香气浓郁,无异味(8~10分)	香气正常,无异味(5~7分)	香气较淡,有异味(0~4分)

表 2 混合粉成分分析(干重)
Table 2 Blended flour composition analysis (dry weight)

KS比例(%)	总淀粉(g/100 g)	直链淀粉(g/100 g)	蛋白(g/100 g)	脂肪(g/100 g)	葛根素(mg/kg)
0(WF)	83.44±4.34 ^a	22.58±1.82 ^a	8.70±0.58 ^a	1.21±0.13 ^a	/
10	83.12±4.20 ^a	22.19±1.92 ^{ab}	7.97±0.72 ^{ab}	1.05±0.06 ^{ab}	11.02±4.17 ^c
20	82.73±3.72 ^a	21.77±1.77 ^{ab}	7.30±0.52 ^{bc}	1.03±0.08 ^{ab}	25.97±4.80 ^{bc}
30	81.56±3.94 ^a	21.34±1.72 ^{ab}	6.64±0.34 ^c	0.99±0.13 ^{ab}	30.86±8.50 ^{bc}
40	81.61±4.78 ^a	20.95±1.61 ^{ab}	5.74±0.44 ^d	0.95±0.22 ^b	44.47±9.65 ^b
100(KS)	80.02±4.79 ^a	19.02±1.35 ^b	1.71±0.13 ^e	0.54±0.07 ^c	134.89±32.17 ^a

注: “/”表示未检出, 表8同; 同列不同字母间有显著差异($P<0.05$), 表3~表9同。

例的增加, 总淀粉和直链淀粉略有下降, 但差异不显著($P>0.05$); 蛋白和脂肪含量随 KS 比例的增加显著下降($P<0.05$), 葛根素则显著上升($P<0.05$)。

KW 混合粉中蛋白、脂肪和葛根素含量的变化主要是由于 KS 具有较低的蛋白和脂肪含量以及较高的葛根素含量, 当混合粉中 KS 比例增加时, 稀释了混合粉中蛋白和脂肪的含量, 同时 KS 的添加又为混合粉带入了大量的葛根素。葛根素是葛根最为重要的功能性成分, GB/T 30637-2014(食用葛根粉)中规定葛根粉中葛根素含量 ≥ 20 mg/kg 即为合格品, 而 KW 混合粉中葛根素含量在 11.02~44.47 mg/kg, 当 KS 比例 $\geq 20\%$ 时, KW 混合粉中葛根素含量已超过国标食用葛根粉合格品的要求。混合粉成分分析表明适当添加 KS 虽然会降低蛋白、脂肪等营养素含量, 但有利于提高混合粉的功能性。

2.2 葛根淀粉对混合粉糊化特性的影响

图 1 和表 3 分别是混合粉糊化曲线和糊化特征参数。KS 的峰值黏度(PV)、谷值黏度(TV)、崩解值(BD)、最终黏度(FV)和回生值(SB)相较于 WF 分别高出 101.13%、85.12%、133.71%、47.82% 和 5.01%; 而峰值时间(PT)比 WF 缩短 0.95 min。随着混合粉中 KS 比例的增加, PV、TV、BD、FV 和 SB 均显著增加($P<0.05$), PT 显著下降($P<0.05$), 起糊温度无显著性变化。当 KS 比例为 40% 时, 与 WF 相比, 其 PV、TV、BD、FV 和 SB 分别增加了 57.46%、57.33%、54.75%、37.70% 和 15.17%, PT 缩短了 0.53 min。RVA 测试中, 黏度主要反映淀粉颗粒在糊化过程中吸水、膨胀、崩解及分子链纠缠而导致的颗粒、碎片或分子链相互间作用力的变化。混合粉糊化特性的变化主要由 KS 比例引起, 虽然混合粉总淀粉含量无显著变化, 但 KS 和 WF 不同的颗粒大小、结构强

度、直/支链比例、结晶度以及其他非淀粉组分含量等均会影响其糊化特性, 当 KS 比例增加时混合粉中淀粉颗粒组成随之变化而引起糊化特性的变化。

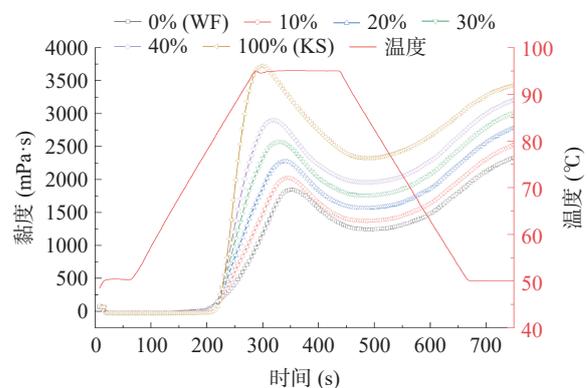


图 1 混合粉糊化曲线

Fig.1 Pasting curve of blended flour

CAPPA 等^[18]的研究表明, RVA 糊化参数与饼干的几何特性存在显著的线性相关性, 其中 PV、FV 和 SB 与饼干的厚度正相关, 与饼干的直径和扩散比呈负相关。LIU 等^[19]的研究表明, RVA 糊化参数中 PV、TV、BD、FV 和 SB 均与饼干的感官评分呈显著正相关, 而与饼干硬度呈负相关。上述饼干的厚度主要是指同等质量面团在烘焙过程中受热直至定型所维持的厚度, 因此厚度越大表明面团烘焙时不易塌落, 且成型的饼干具有较好的多孔结构, 酥脆性越好。而较大的厚度、较小的扩散比以及更高的感官评分意味着饼干有着较好的食用品质。因此, 从 RVA 特征参数来看 KS 的添加能有效改善酥性饼干的食用品质。

经线性拟合(图 2)可发现 KS 比例在 0%~40% 时, 其比例与 PV、TV、BD、FV 和 SB 呈线性正相

表 3 混合粉糊化特征参数

Table 3 Pasting property parameters of blended flour

KS比例(%)	峰值黏度(mPa·s)	谷值黏度(mPa·s)	崩解值(mPa·s)	最终黏度(mPa·s)	回生值(mPa·s)	峰值时间(min)	起糊温度(°C)
0(WF)	1853.00±30.51 ^f	1243.00±17.35 ^f	610.00±36.06 ^f	2326.33±48.42 ^f	1083.33±58.16 ^c	5.86±0.12 ^a	80.33±0.03 ^b
10	2025.67±40.50 ^e	1370.67±32.87 ^e	655.00±11.53 ^e	2521.67±22.12 ^e	1151.00±11.27 ^b	5.76±0.10 ^{ab}	80.37±0.06 ^b
20	2278.33±23.07 ^d	1565.33±13.05 ^d	713.00±12.77 ^d	2779.67±36.67 ^d	1214.33±29.01 ^a	5.67±0.07 ^b	80.33±0.10 ^b
30	2572.00±28.69 ^c	1761.33±23.35 ^c	810.67±8.62 ^c	3010.33±32.72 ^c	1249.00±12.29 ^a	5.51±0.03 ^c	80.37±0.06 ^b
40	2899.67±23.50 ^b	1955.67±13.28 ^b	944.00±35.68 ^b	3203.33±5.51 ^b	1247.67±8.74 ^a	5.33±0.07 ^d	80.27±0.03 ^b
100(KS)	3726.68±20.90 ^a	2301.06±11.06 ^a	1425.62±12.37 ^a	3438.70±2.75 ^a	1137.64±8.33 ^b	4.91±0.03 ^e	80.75±0.09 ^a

关,与PT呈线性负相关,Pearson相关系数 r 在0.9472~0.9988(极强相关)。当将线性拟合范围扩大至100%(KS)时,SB与KS比例无相关性($r=0.0702$),而PV、TV、BD、FV和PT与KS比例线性相关(r 在0.8998~0.9962),但相关性稍弱于KS比例在0%~40%时。SUN等^[20]研究了玉米粉替代部分小麦粉(Wheat Flour, WF; PV=1622.50 cP; FV=2020.50 cP)对混合粉糊化特性的影响,结果显示未经挤压处理的玉米粉(Unextruded Corn Flour, UECF; PV=1794.00 cP; FV=2895.00 cP)混合比例在0%~40%时,PV、FV和SB均线性上升,其中PV数据线性拟合 $r=0.9649$;而经过挤压的玉米粉(Extruded Corn Flour, ECF; PV=545.00 cP; FV=308.50 cP)混合比例在0%~40%时,PV、FV和SB均线性下降,其中PV数据线性拟合 $r=-0.9867$;该研究中混合粉的比例呈极强相关性,其中UECF混入时呈正相关,而ECF混入时则呈现负相关,主要原因在于UECF的PV、FV和SB均高于WF,这与本文测试结果一致。

众多研究表明采用淀粉基原料部分替代小麦粉制备混合粉,当混入物黏度高于小麦粉时,混合粉黏度上升,当混入物黏度低于小麦粉时混合粉黏度下降。至于黏度的上升或下降与混入物比例是否呈线性相关则与是否有累加效应有关^[21]。当存在累加效应时,混合物体现出的糊化特性是其组分糊化特性的总和,混合物的糊化特性可以根据混合比例进行预测,而混合物如果呈现非累加效应,则组分间相互作用较强,其糊化特性无法预测^[22-23]。本文中,KS比例在0%~40%时,混合比例和混合粉的糊化特性呈高度的线性相关,表明KS与WF相互作用较弱而呈累加效应,KW混合粉的糊化特性可根据KS混入比例进行预测。

2.3 葛根淀粉对面团流变特性的影响

图3为混合粉面团的流变曲线,储能模量 G' 和损耗模量 G'' 分别反映了面团的弹性和黏性;损耗因子 $\tan\delta$ 是 G'' 与 G' 的比值,反映了面团黏弹性的比例, $\tan\delta$ 越大表明面团黏性越强, $\tan\delta$ 越小代表弹性越强。

在未添加KS时 $\tan\delta$ 位于1附近,说明低筋小麦粉面团兼具一定的黏弹性,当KS比例增加时,混合粉面团 $\tan\delta$ 均大于1,且随着KS比例增加而增大,表明加入KS后面团以黏性为主。幂律方程拟合结果(表4)显示,稠度系数 K 和流动特征指数 n 均随着KS比例的增加而降低,表明KS的加入使得面团流动性减弱,刚度降低^[24]。随着KS比例的增加,混合粉面团的 G' 和 G'' 逐渐减小, $\tan\delta$ 逐渐增加,表明面团的黏弹性均被抑制。面团的流变特性取决于面筋和淀粉的含量、面筋网络的形成以及淀粉的颗粒状结构。随着KS比例的增加,混合粉中面筋的整体含量随之降低,面筋网络的形成更加困难,更多的淀粉暴露在面筋网络之外。此外,由于KS的加入,淀粉比例的升高会与蛋白竞争性吸收水分,导致面筋蛋白水合不充分,形成的面筋网络强度下降,从而导

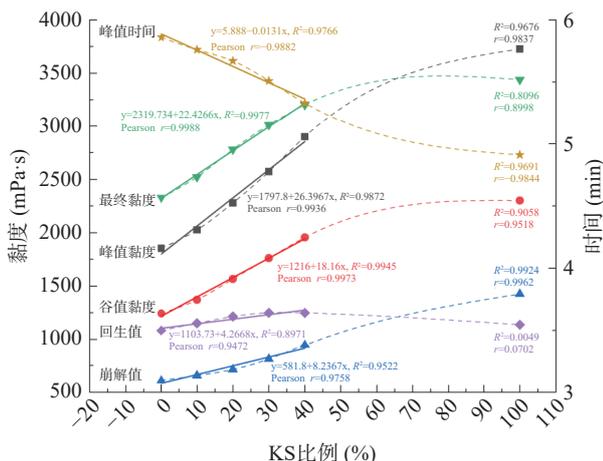


图2 KS比例与混合粉RVA特征参数相关性分析
Fig.2 Correlation analysis between KS proportions and RVA property parameters of blended flour

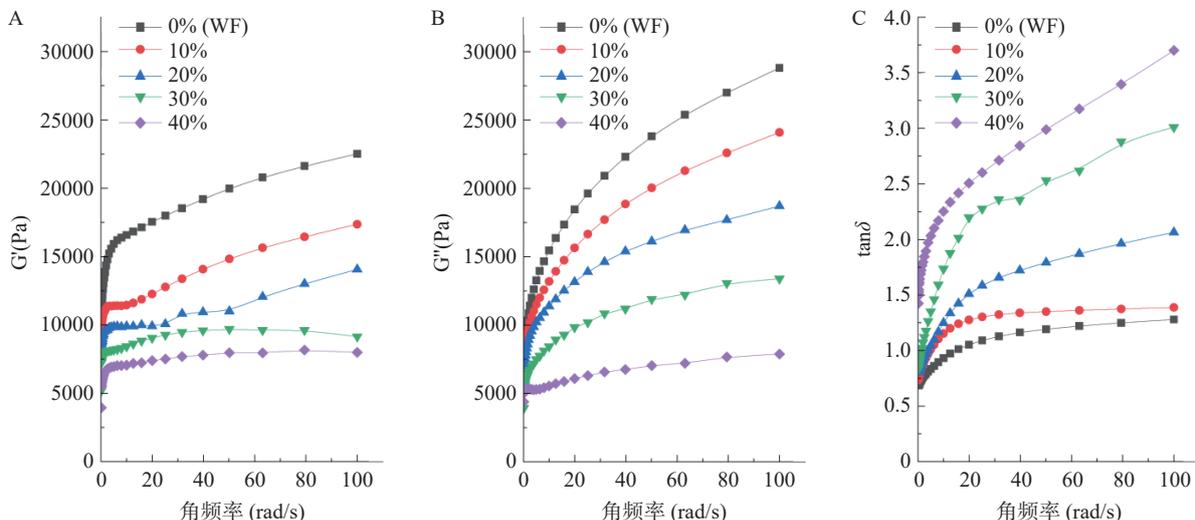


图3 混合粉面团的流变曲线
Fig.3 Rheological curve of blended flour dough

表 4 流变曲线拟合数据
Table 4 Rheological curve fitting data

KS比例(%)	G'			G''		
	K'(Pa·s ⁿ)	n'	R ²	K''(Pa·s ⁿ)	n''	R ²
0(WF)	11129.18±1440.91 ^a	0.23±0.03 ^a	0.9608~0.9902	8564.08±750.63 ^a	0.27±0.02 ^a	0.9452~0.9898
10	10762.74±1920.06 ^a	0.18±0.02 ^b	0.9388~0.9596	8335.72±580.64 ^a	0.23±0.01 ^b	0.9729~0.9872
20	6001.67±2429.05 ^b	0.14±0.02 ^{bc}	0.9029~0.9300	6893.51±1035.37 ^{ab}	0.21±0.01 ^b	0.9579~0.9871
30	5590.85±947.91 ^b	0.13±0.01 ^c	0.9062~0.9954	6506.46±1201.25 ^b	0.15±0.02 ^c	0.9554~0.9701
40	5353.24±832.79 ^b	0.12±0.02 ^c	0.9315~0.9798	6077.84±754.99 ^b	0.17±0.01 ^c	0.9280~0.9823

致 G'和 G''下降^[25]。TAO 等^[26] 在研究马铃薯淀粉对面团流变特性的影响时亦发现马铃薯淀粉的增加降低了面团的 G'和 G''; KAUR 等^[27] 的报道显示, G'和 G''与饼干的硬度呈显著正相关。本文中 KS 的添加降低了面团的黏弹性, 使得面团可塑性较强, 烘焙后饼干硬度降低, 对于酥性饼干酥脆的口感具有积极作用。

2.4 葛根淀粉对酥性饼干食用品质的影响

2.4.1 葛根淀粉对酥性饼干色度的影响 由表 5 可知, WF 原粉 L*与 KS 无显著差异(P>0.05), 但 a*和 b*显著高于 KS(P<0.05), W 显著低于 KS(P<0.05), 这可能跟 WF 中含有的粗纤维等非淀粉组分有关。混合粉经调制制备成酥性饼干后, 整体颜色呈焦黄色, 其 L*和 W 远低于原粉, 且添加 KS 后的饼干(10%~40%)L*和 W 显著降低(P<0.05), 表明加入 KS 后饼干颜色加深。饼干烘焙过程中的颜色变化与淀粉糊化、焦糖化反应和美拉德反应有关, KS 的加入可能带入了部分游离还原糖, 促进了焦糖化和美拉德反应的发生, 从而使饼干颜色加深^[28]。以 0% 样品组为对照, 取其 L*、a*和 b*的平均值计算各组样品的 ΔE, ΔE 越大表明样品与对照样品差距越大。结果显示, 当 KS 比例在 10%~40% 时, ΔE 在 2.69~

3.22(ΔE 在 2.00~4.00 时表明样品间有中等以上差距, 仅在特定应用中可接受), 说明 KS 的添加对酥性饼干颜色有较大影响, 且影响程度随其添加比例的增加而增大。

2.4.2 葛根淀粉对饼干质构的影响 穿刺实验可模拟牙齿咀嚼饼干时的质感, 其中硬度(H₁)定义为测试曲线正峰面积(g·s); 酥脆性(F₁)定义为穿刺曲线的线性距离(无量纲), 线性距离越大表明样品酥脆性越好。三点弯曲实验可模拟饼干掰断时的质感, 其中硬度(H₂)定义为测试曲线中第一个最大峰对应的力(g); 酥脆性(F₂)定义为第一个最大峰对应的距离(mm), 距离越小表明酥脆性越好。

由表 6 可知, 在穿刺实验中, 随着 KS 比例的增加, H₁和 F₁均呈现先降低后升高的趋势, KS 比例为 30% 时 H₁最低(1570.52 g·s), KS 比例为 10% 时 F₁最低(3008.17)。在三点弯曲实验中, 随着 KS 比例的增加, 硬度(H₂)同样呈现先降低后升高的趋势, 在 KS 比例为 20% 时 H₂最低(1107.66 g), 而 F₂虽略有增加, 但差异不显著。

硬度(H₁和 H₂)和酥脆性(F₁)均表现出先下降后上升的趋势。少量 KS 的添加稀释了面筋蛋白的含量, 使得饼干中面筋蛋白网络结构疏松, 可承受的

表 5 酥性饼干的色度
Table 5 Color of shortbread biscuits

样品	KS比例(%)	L*	a*	b*	W	ΔE
原粉	KS	94.01±0.21 ^a	0.16±0.01 ^b	2.37±0.05 ^b	93.56±0.17 ^a	/
	WF	93.52±0.60 ^a	1.49±0.25 ^a	8.35±0.20 ^a	89.31±0.19 ^b	/
酥性饼干	0(WF)	79.28±1.35 ^a	1.61±0.35 ^c	17.84±0.46 ^c	72.59±1.08 ^a	1.29±0.57 ^b
	10	77.72±0.81 ^b	2.67±0.46 ^b	19.60±0.34 ^a	70.20±0.61 ^b	2.69±0.55 ^a
	20	77.55±0.48 ^b	3.06±0.25 ^{ab}	19.48±0.23 ^a	70.12±0.29 ^b	2.84±0.25 ^a
	30	77.30±0.50 ^b	3.27±0.29 ^a	19.43±0.34 ^a	69.94±0.42 ^b	3.08±0.38 ^a
	40	76.82±1.51 ^b	3.48±0.34 ^a	18.43±0.27 ^b	70.17±1.24 ^b	3.22±1.40 ^a

表 6 酥性饼干的质构
Table 6 Texture of shortbread biscuits

KS比例(%)	穿刺		三点弯曲	
	硬度(H ₁)	酥脆性(F ₁)	硬度(H ₂)	酥脆性(F ₂)
0(WF)	1811.81±61.83 ^{ab}	4965.34±555.27 ^{ab}	1427.36±130.03 ^b	3.76±0.34 ^a
10	1792.20±330.64 ^{ab}	3008.17±134.78 ^d	1279.47±214.09 ^{bc}	4.00±0.09 ^a
20	1723.27±239.99 ^{ab}	3807.53±165.43 ^c	1107.66±99.94 ^c	3.98±0.20 ^a
30	1570.52±91.63 ^b	4474.34±214.49 ^{bc}	1384.19±48.17 ^b	3.84±0.39 ^a
40	2049.98±252.88 ^a	5183.05±546.93 ^a	2136.95±130.92 ^a	3.73±0.29 ^a

表7 酥性饼干的感官评分

Table 7 Sensory evaluation scores of shortbread biscuits

KS比例(%)	形态	色泽	口感	组织	气味	总分
0(WF)	23.00±1.07 ^c	7.75±0.46 ^c	24.13±0.99 ^{ab}	17.00±0.76 ^b	8.38±0.52 ^{cd}	80.25±2.25 ^d
10	24.88±0.35 ^{ab}	8.00±0.53 ^{bc}	24.50±0.93 ^{ab}	16.75±0.71 ^b	8.13±0.35 ^d	82.25±1.16 ^c
20	25.63±0.74 ^a	8.88±0.35 ^a	23.75±1.04 ^b	18.25±0.46 ^a	9.25±0.46 ^a	85.75±1.58 ^a
30	24.88±0.99 ^{ab}	8.75±0.46 ^a	24.13±1.55 ^{ab}	18.63±0.52 ^a	8.88±0.35 ^{ab}	85.25±2.66 ^{ab}
40	24.50±0.53 ^b	8.25±0.46 ^b	25.38±1.85 ^a	16.88±0.64 ^b	8.75±0.46 ^{bc}	83.75±1.83 ^{bc}

表8 酥性饼干营养成分

Table 8 Nutritional composition of shortbread biscuits

KS比例(%)	水分(%)	蛋白(%)	脂肪(%)	葛根素(mg/kg)
0(WF)	3.72±0.15 ^a	5.51±0.41 ^a	22.36±1.34 ^a	/
10	3.68±0.32 ^a	5.41±0.30 ^a	23.07±0.45 ^a	4.98±2.00 ^c
20	3.59±0.15 ^a	4.52±0.45 ^b	22.61±0.90 ^a	13.96±2.79 ^b
30	3.80±0.30 ^a	3.75±0.44 ^c	22.57±1.87 ^a	15.89±2.63 ^b
40	3.40±0.31 ^a	3.16±0.17 ^c	21.57±1.63 ^a	22.19±4.44 ^a

表9 酥性饼干综合评分

Table 9 Overall score of shortbread biscuits

KS比例(%)	标准化值[0,100]					综合评分(T _s)
	色差(ΔE)	硬度(H ₁)	酥脆性(F ₁)	感官评价总分	葛根素含量	
0(WF)	87.32±9.44 ^a	61.35±7.21 ^{ab}	74.51±19.61 ^{ab}	32.69±17.32 ^d	0.00±0.00 ^c	51.17
10	64.22±9.11 ^b	63.64±38.57 ^{ab}	5.40±4.76 ^d	48.08±8.96 ^c	18.72±7.50 ^c	40.01
20	61.86±4.10 ^b	71.68±28.00 ^{ab}	33.63±5.84 ^c	75.00±12.16 ^a	52.43±10.49 ^b	58.92
30	57.86±6.33 ^b	89.50±10.69 ^a	57.17±7.57 ^{bc}	71.15±20.46 ^{ab}	59.70±9.87 ^b	67.08
40	55.60±23.00 ^b	33.57±29.50 ^b	82.20±19.31 ^a	59.62±14.09 ^{bc}	83.33±16.67 ^a	62.86

外力下降,从而造成硬度和酥脆性下降^[29];当KS比例较高时,面团中淀粉占主导结构,大量的淀粉竞争性吸收水分造成面筋蛋白网络无法形成,此时烘焙后饼干主体结构为淀粉凝胶网络,其结构相对致密细腻,从而造成硬度和酥脆性上升^[30]。酥性饼干应具有较低的硬度和较高的酥脆性^[28],综合考虑KS比例在20%~40%较为适宜。

2.4.3 葛根酥性饼干感官评价 由表7可知随着KS比例的增加,酥性饼干的形态、色泽、组织、气味和总分均在20%~30%时达到最大值,而口感在40%时达到最大值;其中KS比例为20%时,感官总分最高,为85.75,此时酥性饼干外形完整,色泽均匀,断面呈多孔状且细腻均匀,香气较为浓郁。当KS比例为10%时,虽然总分略有提升,但口感和组织评分与0%相比没有显著改善,气味评分则有所下降;当KS比例为40%,饼干口感评分较高,且趋势与质构测试相符,但面筋蛋白含量过低造成饼干表面出现裂纹,其总分反而下降。

2.4.4 葛根酥性饼干营养和功能成分 由表8可知,所有样品水分含量在3.40%~3.80%,符合GB/T 20980-2021《饼干质量通则》中对酥性饼干水分含量的要求(≤4%)。蛋白含量在3.16%~5.51%,随着KS比例的增加,蛋白含量显著下降($P<0.05$);脂肪含量在21.57%~23.07%,各样品间无显著差异。水分、蛋白、脂肪含量均与常见酥性饼干相当,此外由于加

入了葛根淀粉,在酥性饼干中葛根素含量在4.98~22.19 mg/kg,其含量略低于表2中KW混合粉按配方比例经计算后饼干中的葛根素含量(6.13~24.66 mg/kg),主要是葛根素在烘焙过程中有部分分解。

2.4.5 葛根酥性饼干的综合评分 根据前述测试结果,选用饼干色差(ΔE)、硬度(H₁)、酥脆性(F₁)、感官评价总分和葛根素含量共5个指标进行葛根酥性饼干的综合评分。其中酥脆性(F₁)、感官评价总分和葛根素含量为正向指标,色差(ΔE)和硬度(H₁)为逆向指标。因各指标重复测试次数不一致,在对各指标进行标准化处理后,计算综合评分时直接采用标准化值的平均值进行计算,结果见表9。计算结果显示,当KS比例为30%时,综合评分最高,达到67.08。

3 结论

采用KS部分替代WF制备酥性饼干,对混合粉、面团以及酥性饼干的化学组成、糊化特性、流变特性、色度、质构和感官进行了测定。化学组成检测结果显示,KS的添加有利于提高混合粉中葛根素的含量;RVA结果显示,随着KS比例的增加,混合粉的黏度和回生值显著上升($P<0.05$),且混合比例和混合粉的糊化特性呈高度的线性相关,混合物的糊化特性可以根据混合比例进行预测;面团流变学显示,G'和G''均随KS比例的增加而下降,说明KS的添加降低了面团的黏弹性。选取了酥性饼干的色差、硬

度、酥脆性、葛根素含量以及感官评价总分共 5 个指标, 对指标值进行了标准化处理后进行综合评分, 结果显示当 KS 比例在 30% 时, 综合评分最高, 达到 67.08。综合而言, KS 部分替代 WF 有效地促进了酥性饼干食用品质的提升, 最合适的替代比例为 30%, 此时, 酥性饼干中葛根素含量为 15.89 mg/kg。实验结果为葛根食品的开发提供了依据。

© 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] ZHAO Y G, ZHU X Y, FANG Y P. Structure, properties and applications of kudzu starch[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 119: 106817.
- [2] WANG J L, DAI G N, SHANG M Y, et al. Extraction, structural-activity relationships, bioactivities, and application prospects of *Pueraria lobata* polysaccharides as ingredients for functional products: A review[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 243: 125210.
- [3] BHARTI R, CHOPRA B S, RAUT S, et al. *Pueraria tuberosa*: A review on traditional uses, pharmacology, and phytochemistry[J]. *Frontiers in Pharmacology*, 2020, 11: 582506.
- [4] WANG S G, ZHANG S M, WANG S P, et al. A comprehensive review on *Pueraria*: Insights on its chemistry and medicinal value[J]. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 2020, 131: 110734.
- [5] XUAN T, LIU Y H, LIU R, et al. Advances in extraction, purification, and analysis techniques of the main components of kudzu root: A comprehensive review[J]. *Molecules*, 2023, 28(18): 6577.
- [6] DUAN X T, GUAN Y M, DONG H H, et al. Study on structural characteristics and physicochemical properties of starches extracted from three varieties of kudzu root (*Pueraria lobata* starch) [J]. *Journal of Food Science*, 2023, 88(3): 1048–1059.
- [7] YANG Y F, LI M X, WANG Q, et al. *Pueraria lobata* starch regulates gut microbiota and alleviates high-fat high-cholesterol diet induced non-alcoholic fatty liver disease in mice[J]. *Food Research International*, 2022, 157: 111401.
- [8] 莫琰, 杨尚威, 赵灿, 等. 普鲁兰酶水解对葛根淀粉理化特性的影响[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(13): 79–85. [MO Y, YANG S W, ZHAO C, et al. Effect of enzymatic hydrolysis by pullulanase on the physicochemical properties of kudzu starch[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(13): 79–85.]
- [9] LIU D M, MA L Y, ZHOU Z J, et al. Starch and mineral element accumulation during root tuber expansion period of *Pueraria thomsonii* Benth[J]. *Food Chemistry*, 2021, 343: 128445.
- [10] WANG D, FAN D C, DING M, et al. Characteristics of different types of starch in starch noodles and their effect on eating quality[J]. *International Journal of Food Properties*, 2015, 18(11): 2472–2486.
- [11] 郭文滔, 郑志, 季一顺, 等. 添加葛根粉对冷冻馒头食用品质的影响[J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(11): 9–16. [GUO W T, ZHENG Z, JI Y S, et al. Effects of addition of *Pueraria lobata* powder on the edible quality of frozen steamed buns[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2023, 14(11): 9–16.]
- [12] MENG H W, XU C, WU M Y, et al. Effects of potato and sweet potato flour addition on properties of wheat flour and dough, and bread quality[J]. *Food Science & Nutrition*, 2022, 10(3): 689–697.
- [13] MULARGIA L I, LEMMENS E, KOROMPOKIS K, et al. Tailoring the formulation of sugar-snap cookies to lower *in vitro* starch digestibility: A response surface modelling approach[J]. *Food Chemistry*, 2024, 435: 137601.
- [14] 刘传菊, 赵玉, 汤尚文, 等. 可溶性大豆多糖对碎米粉物化特性的影响[J]. *中国粮油学报*, 2021, 36(9): 7–13, 21. [LIU C J, ZHAO Y, TANG S W, et al. Effects of soluble soybean polysaccharide on physicochemical properties of broken rice powder[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2021, 36(9): 7–13, 21.]
- [15] TAO C S, WANG K J, LIU X J, et al. Effects of potato powder and starch on the pasting, rheological, and thermal properties of dough: Original papers[J]. *Food Science and Technology Research*, 2020, 26(5): 579–587.
- [16] 赵灿, 陶星宇, 汤尚文, 等. 甘薯淀粉对山药凝胶肠理化特性的影响[J]. *中国粮油学报*, 2023, 38(2): 58–65. [ZHAO C, TAO X Y, TANG S W, et al. Effects of sweet potato starch on physicochemical properties of yam gel[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2023, 38(2): 58–65.]
- [17] 张云亮, 窦博鑫, 刘丽宅, 等. 基于变异系数法分析四种改良剂对马铃薯面条品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(5): 26–32. [ZHANG Y L, DOU B X, LIU L Z, et al. Analysis of effects of four improvers on quality of potato noodles based on the coefficient of variation method[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(5): 26–32.]
- [18] CAPP A C, KELLY J D, NG P K W. Baking performance of 25 edible dry bean powders: Correlation between cookie quality and rapid test indices[J]. *Food Chemistry*, 2020, 302: 125338.
- [19] LIU L, YANG T, YANG J T, et al. Relationship of starch pasting properties and dough rheology, and the role of starch in determining quality of short biscuit[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 829229.
- [20] SUN H X, JU Q, MA J, et al. The effects of extruded corn flour on rheological properties of wheat-based composite dough and the bread quality[J]. *Food Science & Nutrition*, 2019, 7(9): 2977–2985.
- [21] FONSECA-FLORIDO H A, CASTRO-ROSAS J, HERNÁNDEZ-HERNÁNDEZ E, et al. Structural properties of waxy corn and potato starch blends in excess water[J]. *International Journal of Food Properties*, 2017, 20(S1): S353–S365.
- [22] WATERSCHOOT J, GOMAND S V, FIERENS E, et al. Starch blends and their physicochemical properties[J]. *Starch-Stärke*, 2015, 67(1-2): 1–13.
- [23] 罗芳会, 刘传菊, 聂荣祖, 等. 玉米淀粉和马铃薯淀粉共混糊化及凝胶特性的研究[J]. *中国粮油学报*, 2022, 37(8): 159–165. [LUO F H, LIU C J, NIE R Z, et al. Gelatinization and gel properties of blends of corn and potato starches[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2022, 37(8): 159–165.]
- [24] 王甜, 密更, 劳敏军, 等. 鱼肌球蛋白与不同来源天然淀粉共混面团的流变特性[J]. *中国食品学报*, 2023, 23(9): 99–108. [WANG T, MI G, LAO M J, et al. The rheological properties of blend doughs of hairtail actomyosin and natural starch from differ-

- ent sources[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2023, 23(9): 99-108.]
- [25] 陈金凤, 汪月, 马云翔, 等. 马铃薯淀粉对面团流变学特性及酥性饼干品质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(5): 121-127. [CHEN J F, WANG Y, MA Y X, et al. Effect of potato starch on rheological properties of dough and quality characteristics of crisp biscuits[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46(5): 121-127.]
- [26] TAO C S, WANG K J, LIU X J, et al. Effects of potato starch on the properties of wheat dough and the quality of fresh noodles [J]. *CyTA-Journal of Food*, 2020, 18(1): 427-434.
- [27] KAUR A, SINGH N, KAUR S, et al. Relationships of flour solvent retention capacity, secondary structure and rheological properties with the cookie making characteristics of wheat cultivars[J]. *Food Chemistry*, 2014, 158: 48-55.
- [28] 高琦, 曹丹, 王迪, 等. 马铃薯全粉对酥性饼干理化性质和结构的影响[J]. *食品研究与开发*, 2024, 45(4): 40-48. [GAO Q, CAO D, WANG D, et al. Effect of potato granules on the physicochemical properties and structure of crisp biscuits[J]. *Food Research and Development*, 2024, 45(4): 40-48.]
- [29] 赵时珊, 蔡芳, 邹浩峰, 等. 黄甘薯-小麦复配粉理化特性及其制品品质分析[J]. *食品研究与开发*, 2023, 44(10): 91-99. [ZHAO S S, CAI F, ZOU H F, et al. Physicochemical characteristics and product quality analysis of yellow sweet potato-wheat composite flour[J]. *Food Research and Development*, 2023, 44(10): 91-99.]
- [30] 李艳艳, 廖雪勤, 程诗涵, 等. 方竹笋全粉酥性饼干制作工艺优化及品质分析[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(15): 238-247. [LI Y Y, LIAO X Q, CHENG S H, et al. Processing technology optimization and quality analysis of *Chimonobambusa quadrangularis* shoot powder crisp biscuits[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(15): 238-247.]