

申茹晓, 唐浩国, 杨同香, 等. 白芸豆粉对面团及饼干品质特性的影响 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(14): 136–143. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024070341

SHEN Ruxiao, TANG Haoguo, YANG Tongxiang, et al. Effect of White Kidney Bean Powder on Quality Characteristics of Dough and Biscuits[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(14): 136–143. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024070341

· 研究与探讨 ·

白芸豆粉对面团及饼干品质特性的影响

申茹晓, 唐浩国*, 杨同香, 司启贺, 王嘉康, 李凯丽, 王晨欢
(河南科技大学食品与生物工程学院, 河南洛阳 471023)

摘要: 为探究白芸豆粉对面团及饼干品质特性的影响, 本文在低筋面粉中添加 (0~50%) 白芸豆粉, 研究了不同比例复配粉的物化特性、糊化特性、面团的流变学特性, 以及饼干的质构特性、水分分布、蛋白质二级结构、二硫键含量和品质特性等指标的影响。结果表明: 随着白芸豆粉添加量的增加, 复配粉的特水能力显著提升 ($P<0.05$), 持油能力下降, 其回生值从 1585 cP 降低至 1084 cP, 有效抑制了淀粉老化。此外, 白芸豆粉的添加还提高了面团的储能模量 (G') 和损耗模量 (G''), 降低了饼干中自由水的含量。当白芸豆粉添加量为 30% 时, 饼干的硬度和咀嚼性分别为 3311.17 g 和 94.54 g, 与对照组 (0%) 相比有所提高。此时, 饼干的 α -螺旋含量升高至 28.04%, 微观结构与对照组差异较小。该添加量下的饼干色泽均匀、可接受度高, 豆香味突出, 获得了最高的感官评分。综上所述, 当白芸豆粉添加量为 30% 时饼干的品质最佳。此研究为白芸豆粉在烘焙类制品领域的进一步开发利用提供依据。

关键词: 白芸豆粉, 复配粉, 饼干, 微观结构, 品质特性

中图分类号: TS213.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)14-0136-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024070341



本文网刊:

Effect of White Kidney Bean Powder on Quality Characteristics of Dough and Biscuits

SHEN Ruxiao, TANG Haoguo*, YANG Tongxiang, SI Qihe, WANG Jiakang, LI Kaili, WANG Chenhuan
(College of Food and Bioengineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China)

Abstract: To investigate the effects of white kidney bean flour on the quality characteristics of dough and biscuits, white kidney bean flour (0~50%) was added to low-gluten flour, and the physicochemical properties, gelatinizing properties, rheological properties of dough, as well as the texture characteristics, moisture distribution, secondary structure of protein, disulfide bond content, and quality characteristics of biscuits of the composite flours at different ratios were examined. The results showed that with the increase in addition of white kidney bean flour, the water-holding capacity of the composite flour significantly improved ($P<0.05$), while the oil-holding capacity decreased. The retrogradation value decreased from 1585 cP to 1084 cP, effectively inhibiting starch retrogradation. Additionally, the addition of white kidney bean flour increased the storage modulus (G') and loss modulus (G'') of the dough and reduced the content of free water in the biscuits. When the addition of white kidney bean flour was 30%, the hardness and chewiness of the biscuits were 3311.17 g and 94.54 g, respectively, which were higher than those of the control group (0%). At this addition level, the α -helix content of the biscuits increased to 28.04%, and the micromechanism was similar to that of the control group. At this addition level, biscuits were characterized by uniform color, high acceptability, and prominent bean flavor, achieving the highest sensory score. In summary, the quality of biscuits was optimal when the addition of white kidney bean flour was 30%. This study provides a basis for further development and utilization of white kidney bean flour in the field of baked products.

Key words: white kidney bean powder; compound powder; biscuit; microstructure; quality characteristics

收稿日期: 2024-07-26

作者简介: 申茹晓 (1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全研究, E-mail: 18240696691@163.com。

* 通信作者: 唐浩国 (1968-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品化学及营养学、天然产物研究与开发和食品生物技术研究, E-mail: tanghaoguo@126.com。

近年来,随着社会经济的飞速发展,人们更加追求全方位的营养膳食。饼干作为一款以谷物类为主要原料烘烤而成,有酥脆香甜的口感及保质期长、便于携带等特点的休闲食品,深受大众的喜爱^[1]。但市售饼干大多高油、高脂,蛋白质、膳食纤维等营养物质含量较少^[2],不能满足当下健康饮食的理念。因此,各种营养型饼干逐渐出现在市场,并被大众接受,如何泽东等^[3]将白参菌粉与杂粮粉搭配制作的饼干,不仅使饼干的营养价值得到提升,还降低了饼干中淀粉的消化性。Oghenewogaga 等^[4]研制的蘑菇饼干可用于控制糖尿病和克服蛋白质能量缺乏症。

白芸豆,又叫多花菜豆,原产于墨西哥和阿根廷,国内种植地主要集中于云南,年产量 5 万吨左右^[5]。白芸豆中含有丰富的蛋白质、氨基酸、维生素、多糖及微量元素,具有较高的药用价值及营养价值,特别是其中含有的一种 α -淀粉酶抑制剂能使人体摄入食物中所含的淀粉无法转化成葡萄糖,增强胰岛素受体的反应、调节血糖水平^[6-8]。许多研究者对白芸豆开发利用,如王靖铤等^[9]研制了一种具有抑制淀粉分解功能的白芸豆果冻。Ma 等^[10]研制了白芸豆提取物低 eGI 方便粥,确定了白芸豆提取物对 α -淀粉酶的抑制作用。Han 等^[11]研制的白芸豆面条,证实了白芸豆的添加能够降低面条的消化率。但目前大多学者较为专注对白芸豆提取物的研究,对烘焙面制品领域的研究却鲜有报道,致使白芸豆的使用程度与应用价值可能被严重低估,因此,开发白芸豆烘焙类产品具有一定的研究意义。

本文拟将不同比例的白芸豆粉加入到低筋面粉中,考察其对混合粉的物化特性、面团流变学特性及饼干品质特性的影响,从而确定白芸豆粉的最佳添加量,以期开发一款营养型饼干。此研究不仅能丰富饼干的种类,也能提高白芸豆的应用价值,为其在烘焙类制品领域的进一步开发利用提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

低筋小麦粉(蛋白质 8.3%、脂肪 0.6%、碳水化合物 78.1%、水分 12.13%) 滕州市鑫银丰面粉厂;白芸豆粉(蛋白质 23.1%、脂肪 2.8%、碳水化合物 55.3%、水分 7%、钙 160 mg/100 g、磷 410 mg/100 g、铁 7.3 mg/100 g) 陕西昂熙生物科技有限公司;食盐、安琪高活性酵母、小苏打 洛阳大张超市;玉米胚芽油 东莞市贺年丰粮油有限公司;溴化钾 色谱纯,天津市科密欧化学试剂有限公司。

4800 快速黏度仪(RVA) 澳大利亚 Perten 公司;SMS TA.XT Epress Enhanced 物性分析仪 美国 Stable Micro Systems Ltd;TADHR-2 食品流变仪 沃特斯公司;NMI20-015V-I 低场核磁共振成像分析仪 上海纽迈电子科技有限公司;VERTEX70 傅立叶变换中远红外光谱仪 德国 BRUKER 公司;Scientz-12N 型真空冷冻干燥机 宁波新芝生物科技

股份有限公司;TM3030Plus 电子扫描显微镜 日本日立高新技术公司;SM-522 烤箱 新麦机械(无锡)有限公司;color 15 色差仪 美国爱色丽公司。

1.2 实验方法

1.2.1 白芸豆-小麦复配粉的制备 以 100% 低筋粉为基准,分别以 10%、20%、30%、40%、50% 的白芸豆粉(过 40 目筛)替代低筋粉在密封袋中充分摇晃混匀,保存备用。

1.2.2 物化特性测定

1.2.2.1 持水性 称取质量为 M_1 的不同比例复配粉,按料液比 1:20(g/mL)加入蒸馏水,25 ℃ 搅拌 30 min,2500 r/min 离心 10 min,取沉淀,记为 M_2 ^[12],持水性按式(1)计算:

$$\text{持水性} = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \quad \text{式(1)}$$

式中, M_1 为吸水前样品质量(g); M_2 为吸水后样品质量(g)。

1.2.2.2 持油性 称取质量为 M_1 的不同比例复配粉,按料液比 1:10(g/mL)加入大豆油,混合均匀,25 ℃ 放置 1 h,1500 r/min 离心 10 min,残渣记为 M_2 ^[12],持油性按式(2)计算:

$$\text{持油性} = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \quad \text{式(2)}$$

式中, M_1 为吸油前样品质量(g); M_2 为吸油后样品质量(g)。

1.2.3 糊化特性测定 参考 GB/T 24853-2010《小麦、黑麦及其粉类和淀粉糊化特性测定 快速粘度仪法》测定复配粉的糊化特性。

1.2.4 复配粉面团的调制及饼干的制作 参考苟青松等^[13]的配方并结合预实验稍作修改制作白芸豆苏打饼干,具体步骤如下:分别称取不同比例的白芸豆-小麦复配粉,加入 1.5% 酵母粉、0.8% 食盐、1.2% 小苏打、10% 玉米油、55 mL 水,以相同的力度在和面机中和面 10 min,和好的面团 32 ℃ 静置发酵 30 min 后制作饼干,烤箱设置面火 170 ℃、底火 160 ℃,烘烤 15 min。

1.2.5 流变学特性测定 面团的流变学特性参照 Cappelli^[14]的方法稍作改动,将不同比例的复配粉按 1.2.2 的方法制作成面团,测定流变学性质,选择 40 mm 直径平板,将面团置于流变仪圆形平台上,间距设置为 2000 μm ,开始测试。设置应变温度 25 ℃,应变范围 0.1%,频率设定为 0.1~100 Hz,测定面团的储能模量(G')和损耗模量(G''),并计算 $\tan\delta$ 值。

1.2.6 质构特性测定 参照张禧等^[15]的方法稍加改动,探头 P/5、测前速度 1.00 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、测中速度 1.00 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、测后速度 10.00 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、应变位移 3 mm、触发力 5.0%、秒点数 200 pps,测定饼干的硬度、咀嚼性和脆性。每组测量 3 次,取平均值。

1.2.7 水分分布测定 分别取 3 g 不同添加量的饼干样品,放入核磁管内,于核磁共振仪(测试温度 32 ℃)中测定。测试参数为采样点数 2048、SW 设置为 200 kHz、TW 设为 500 ms、重复扫描次数 8、通过 CPMG(Carr-PurcellMeiboom-Gill)脉冲序列表征样品的横向弛豫时间^[16]。

1.2.8 傅里叶变换红外光谱分析 参照 Wu 等^[17]的方法稍加改动,将饼干样品与溴化钾(样品:溴化钾=1:100, w/w)混合充分并在干燥处研磨压片,随后置于傅里叶变换红外光谱(FTIR)中进行全波长扫描,设置扫描范围为 400~4000 cm⁻¹,扫描分辨率为 4 cm⁻¹,扫描次数为 32。

1.2.9 二硫键含量测定 饼干中二硫键含量测定,参考罗明江等^[18]的方法稍做修改。将 70 mg 样品与 4.7 g 盐酸胍用 1 mL Tris 缓冲溶液混匀,定容至 10 mL。游离巯基:取 1 mL 样液加入 Ellman's 试剂于 412 nm 处测吸光度。二硫键:样液中加入巯基乙醇,然后用三氯乙酸处理,与游离巯基一样在 412 nm 处测吸光度。

$$-\text{SH}_{\text{游离}}(\mu\text{mol/g}) = \frac{73.53 \times A_{412} \times D}{C} \quad \text{式 (3)}$$

$$-\text{SS}(\mu\text{mol/g}) = \frac{\text{SH}_{\text{总}} - \text{SH}_{\text{游}}}{2} \quad \text{式 (4)}$$

式中, A_{412} 为 412 nm 处的吸光值; D 为稀释因子,其中游离巯基的稀释因子为 5.02,总巯基的稀释因子为 10; C 为样品浓度(mg/mL)。

1.2.10 微观结构测定 将不同添加量的饼干样品切成 4 mm×4 mm 的正方块,冷冻干燥 24 h,将冻干后的样品在真空条件下通过离子溅射喷金后,于 3 kV 加速电压下观察其内部结构。

1.2.11 饼干色差测定 采用色差仪测定饼干的色度,在饼干表面选取三个点进行测定,测定结果用 L^* 、 a^* 、 b^* 表示。

1.2.12 感官评价 组织 16 名具有相关经验的评价人员(男女各一半),根据林琳等^[19]的方法对饼干色泽、滋味、气味、口感及组织状态进行评分。具体评价标准见表 1。

1.3 数据处理

本试验结果均为三次及以上平行试验结果的平均数。采用 SPSS 25 及 Excel 对数据进行差异显著性分析,采用 Origin 2021 软件作图,采用 Omnic 以及 PeakFit 4.0 分析傅里叶变换中远红外光谱。

2 结果与分析

2.1 白芸豆粉添加量对复配粉物化特性影响

食品的物化特性对食品的加工、感官性状及营养价值都有影响^[20]。不同比例复配粉的物化特性结果由图 1 可知,白芸豆粉的添加提高了小麦粉的持水性,但降低了其持油能力。随着白芸豆粉添加量的增加,复配粉的持水力呈递增趋势。Yuan 等^[21]研究

表 1 白芸豆苏打饼干感官评分标准与细则

Table 1 Sensory scoring criteria and details for white kidney bean soda cookies

指标	评价标准	得分(分)
表面色泽(20分)	表面光泽均匀	15~20
	光泽较差,颜色稍不均匀	7~14
	光泽差,颜色过深或过浅	0~6
滋味(20分)	白芸豆滋味混合均匀	15~20
	白芸豆滋味无明显突出	7~14
	白芸豆滋味过重,盖过饼干香味	0~6
气味(20分)	饼干香气突出,无豆腥味	15~20
	饼干香气较淡,豆腥味突出	7~14
	豆腥味过重,掩盖饼干香气	0~6
组织状态(20分)	饼干断层组织均匀,无明显颗粒物,无结块	15~20
	饼干断层组织基本均匀,但肉眼可见轻微结块	7~14
	饼干断层组织不均匀,有明显颗粒物,结块较多	0~6
口感(20分)	咀嚼性适当,脆度较好,无沙粒感	15~20
	咀嚼性适当,脆度一般,有沙粒感	7~14
	咀嚼性较差,脆度较差,沙粒感较强	0~6
总分		100

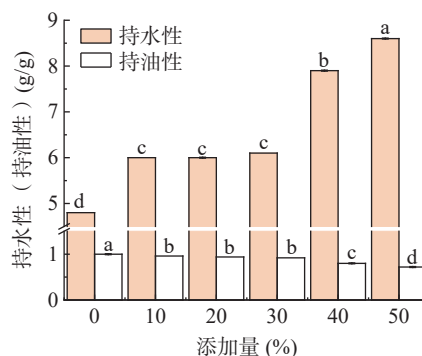


图 1 白芸豆粉对复配粉物化特性影响

Fig.1 Effect of white kidney bean powder on the chemical characteristics of compound powder

注:不同小写字母表示存在显著性差异($P < 0.05$);图 5 同。

表明,持水性的强弱与膳食纤维总量有关。白芸豆中富含膳食纤维,可以有效截留水分,减少水分流失,所以随白芸豆粉添加量的增加,持水性得到提高。复配粉的持油性则随白芸豆粉的增加而逐渐降低,从添加量 0(1 g/g)至 50%(0.72 g/g),共降低了 0.28 g/g。持油性受表面疏水性的影响,表面疏水力增加,持油性也会增加。芸豆蛋白的表面疏水性在豆类蛋白中较弱^[22],所以在与低筋面粉复配的过程中,随着白芸豆粉添加比例的增加,体系中的蛋白含量也在提高,从而导致复配粉的持油性减弱。

2.2 白芸豆粉添加量对复配粉糊化特性影响

为研究不同添加量白芸豆粉对复配粉糊化特性的影响,采用 RVA 4800 快速黏度仪测定不同比例复配粉的糊化结果如表 2 所示。由表 2 可知,与对照组相比,复配粉的峰值黏度、低谷黏度、回生值、最终黏度随白芸豆粉添加量增加而显著($P < 0.05$)降低。白芸豆粉的加入替代了部分小麦粉,进而降低了

表 2 白芸豆粉添加量对复配粉糊化特性的影响

白芸豆粉添加量(%)	峰值黏度(cP)	崩解值(cP)	低谷黏度(cP)	回生值(cP)	最终黏度(cP)	糊化温度(℃)
0	2966.50±31.50 ^a	1395.00±58.00 ^a	1571.50±26.50 ^a	1585.00±79.00 ^a	3156.50±52.50 ^a	66.00±0.03 ^c
10	2860.00±17.00 ^b	1327.50±0.50 ^{ab}	1532.50±17.50 ^a	1453.50±20.50 ^b	2986.00±3.00 ^b	66.9±0.08 ^c
20	2648.00±34.00 ^c	1251.50±14.50 ^b	1396.50±19.50 ^b	1369.50±11.50 ^{bc}	2766.00±31.00 ^c	68.00±1.23 ^{bc}
30	2432.00±35.00 ^d	1081.50±3.50 ^c	1350.50±31.50 ^{bc}	1275.00±9.00 ^{cd}	2625.50±40.50 ^d	69.70±0.43 ^{ab}
40	2296.50±10.50 ^e	995.00±9.00 ^c	1301.50±19.50 ^{cd}	1211.00±2.00 ^d	2512.50±17.50 ^e	70.70±0.20 ^a
50	2148.00±27.00 ^f	883.00±33.00 ^d	1265.00±6.00 ^d	1084.50±14.50 ^e	2349.50±20.50 ^f	71.00±0.40 ^a

注: 同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

复配粉中的淀粉含量, 导致淀粉之间的作用力减弱, 可能使复配粉的峰值黏度降低, 其次白芸豆粉中蛋白质含量高, 吸水性较强, 在与淀粉争夺水分子时, 淀粉的吸水膨胀能力受阻, 使得膨胀能力降低, 也会导致峰值黏度的降低^[23]。回生值是最终黏度和谷值黏度的差值, 反映老化程度, 差值越小说明抗老化能力越强^[24]。添加 0~50% 白芸豆粉后, 复配粉的回生值从 1585 cP 降低到 1084 cP, 这表明白芸豆粉的添加在一定程度上抑制了面粉的老化, 其原因可能是白芸豆粉中膳食纤维与淀粉之间相互作用延缓了淀粉的回生能力。同时, 体系中的蛋白含量也可能会对回生能力造成影响, 从而起到了抗老化的作用^[24]。

2.3 白芸豆粉添加量对饼干面团流变学特性影响

流变学特性中的储能模量(G')代表黏弹性的弹性部分, 损耗模量(G'')描述黏弹性的黏性部分, 损耗角正切 $\tan\delta$ 表示 G'' 与 G' 的比值^[25]。研究不同比例白芸豆-小麦复配面团的流变学特性结果如图 2 所示。由图 2(A)和图 2(B)可知, 与对照组相比, 添加白芸豆粉均能使 G' 和 G'' 升高, 可能是白芸豆粉的添加提高了面团的持水力, 且白芸豆粉中含有较多的蛋白质和不溶性膳食纤维, 作为面团弹性填充材料的膳食纤维会与面筋蛋白争夺水分, 从而导致面团的黏弹性增大^[26]。由图 2(C)可知, 在同一频率下, 随着白芸豆粉添加量的增加, 不同比例的白芸豆-小麦复配面团都表现为 $G'>G''$, 且不同复配面团的 $\tan\delta$ 均小于 1, 这表明添加白芸豆粉后的面团仍表现为典型的固体状态^[27]。有研究表明当面团黏弹性较低时, 饼干烘烤中容易断裂, 而当面团黏弹性过大, 制作时会导致饼干的形态收缩, 使饼干酥脆度不佳^[28], 因此选定添加量为 30% 时进行后续试验。

2.4 白芸豆粉添加量对饼干质构特性的影响

不同比例白芸豆苏打饼干的质构特性测定结果见表 3, 随着白芸豆粉添加量的增加, 饼干的硬度先升高后降低, 内聚力呈现递增趋势。硬度的增加与白芸豆粉中的多糖类物质有关, 白芸豆粉作为添加物存在于面团的面筋网络结构中, 其颗粒附着在淀粉颗粒上, 含有的蛋白质和膳食纤维颗粒也会抑制面筋网络的形成, 从而导致饼干组织紧凑, 硬度增大。当白芸豆粉添加量大于 30% 后, 饼干的破裂率高, 硬度降低^[29], 这可能是由于白芸豆粉中含有抗性淀粉, 添加

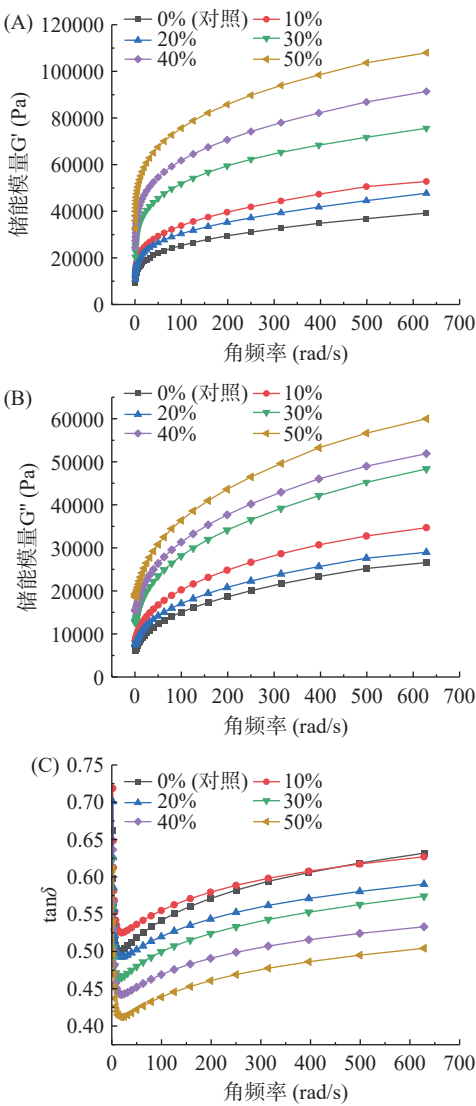


图 2 不同比例白芸豆-小麦复配面团的流变学特性
Fig.2 Rheological characteristics of different proportions of white kidney bean-low-tendon mixed dough

量过大时, 一定量的抗性淀粉干扰了饼干面团中水、油与面筋蛋白等的结合, 影响饼胚的形成。其次白芸豆粉的过量添加, 会使体系中蛋白含量过多, 也可能使饼干的硬度降低。这与秦仁炳等^[29]的研究结果一致。回复性和内聚性的变化幅度不大, 说明白芸豆粉的添加对饼干质地影响不大。

2.5 白芸豆粉添加量对饼干水分分布的影响

低场核磁共振技术广泛运用于食品中水分流动

表 3 白芸豆粉对饼干质构特性的影响

Table 3 Effect of white kidney bean powder on the structural characteristics of biscuits

白芸豆粉添加量(%)	硬度(g)	咀嚼性(g)	回复性	内聚力
0	3168.31±13.14 ^b	33.95±2.22 ^e	0.54±0.03 ^e	0.89±0.00 ^a
10	3197.72±45.09 ^b	43.96±3.42 ^e	0.57±0.04 ^{bc}	0.73±0.02 ^c
20	3253.15±20.03 ^{ab}	75.26±0.02 ^d	0.56±0.00 ^{bc}	0.79±0.00 ^b
30	3311.17±20.45 ^a	94.59±1.13 ^c	0.75±0.03 ^a	0.80±0.02 ^b
40	3072.25±11.07 ^c	130.53±6.69 ^b	0.70±0.08 ^{ab}	0.81±0.02 ^b
50	2697.41±21.76 ^d	151.85±6.08 ^a	0.80±0.01 ^a	0.87±0.00 ^a

注: 同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

及分布情况的测定, T_{21} 、 T_{22} 、 T_{23} 分别表示强结合水、弱结合水和自由水的峰顶点时间; A_{21} 、 A_{22} 、 A_{23} 分别表示强结合水、弱结合水和自由水的峰面积比^[30]。不同比例白芸豆苏打饼干的水分分布状态结果如图 3 和表 4 所示, 由图 3 可知, T_{23} 的峰比例最大, 占饼干总信号的 85% 左右, 表明饼干中的水分主要是以自由水的状态存在。随着白芸豆粉添加量的增加, 饼干的迁移曲线向左移动, 这与白芸豆粉中的膳食纤维和多糖物质有关, 白芸豆粉的添加, 使饼干中的非淀粉多糖变多, 非淀粉多糖的持水性较强, 从而减弱了饼干中自由水的流动性^[31]。水质子在颗粒内迁移率的降低, 导致饼干中自由水的比例降低, 弱结合水含量升高, 表明白芸豆粉的添加增强了淀粉与颗粒表面水的相互作用, 提高了对低筋粉的水溶性, 饼干硬度的改变可能也与此有关。因此, 白芸豆粉的添加对饼干的水分分布和品质特性有正面影响。

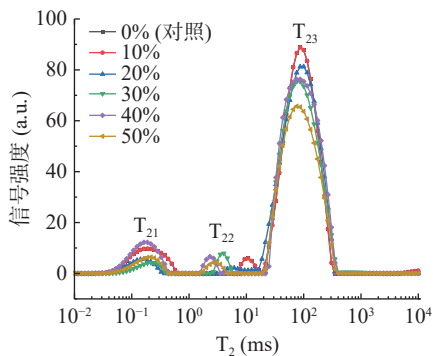


图 3 白芸豆粉对饼干水分分布的影响

Fig.3 Water transverse relaxation time T_2 inversion diagram of white kidney bean crackers表 4 白芸豆粉对饼干水分弛豫时间 T_2 及对应峰面积的影响Table 4 Effect of white kidney bean powder on the water relaxation time T_2 and the corresponding peak area

白芸豆粉添加量(%)	弛豫时间			峰面积		
	T_{21} (ms)	T_{22} (ms)	T_{23} (ms)	A_{21} (%)	A_{22} (%)	A_{23} (%)
0	0.34±0.09 ^a	3.02±1.43 ^b	77.82±12.18 ^a	5.72±4.16 ^a	1.73±0.38 ^{bc}	92.55±4.41 ^a
10	0.24±0.05 ^a	9.42±1.85 ^a	78.98±0.00 ^a	5.71±1.78 ^a	1.71±0.16 ^{ab}	92.59±1.48 ^a
20	0.52±0.04 ^a	8.03±3.81 ^{ab}	87.82±12.18 ^a	7.86±0.41 ^a	1.77±0.52 ^c	90.37±1.93 ^a
30	0.25±0.01 ^a	4.04±0.00 ^{ab}	85.65±0.00 ^a	8.68±1.58 ^a	1.85±0.07 ^a	89.47±2.02 ^a
40	0.20±0.01 ^a	4.22±2.71 ^{ab}	86.98±0.00 ^a	9.85±1.01 ^a	1.90±0.15 ^{ab}	88.25±1.19 ^a
50	0.20±0.01 ^a	2.29±1.08 ^b	81.31±5.66 ^a	8.38±2.00 ^a	1.95±0.06 ^a	89.67±1.94 ^a

注: 同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

2.6 白芸豆粉添加量对饼干蛋白质二级结构的影响

傅里叶变换红外光谱是研究蛋白质以及多肽结构的方法之一, 图 4 为不同添加量白芸豆苏打饼干在波长 4000~400 cm^{-1} 范围内的傅立叶变换红外光谱图。由图 4 可知, 白芸豆苏打饼干在 3745、2932、2367、1747、1068、912 cm^{-1} 附近的峰强度随着白芸豆粉添加量而不断波动变化。其中, 酰胺 I 带的吸收峰集中在 1659 cm^{-1} , 主要由 C-O 的伸缩振动峰和无定形区吸收的水分子组成^[32-33], 2367 cm^{-1} 处出现新的特征峰, 由 O=C=O 引起^[34], 2932 cm^{-1} 和 3745 cm^{-1} 处的峰分别来自于 CH_2 变形和 -OH 键^[35], 1200~1500 cm^{-1} 处的峰主要与多糖和蛋白质有关^[36], 1747 cm^{-1} 处主要是双键振动峰, 912、1068 cm^{-1} 附近的峰与淀粉的结构有关, 在此处的吸收强度波动, 可能是白芸豆粉的添加影响了淀粉的结晶度^[11,35]。

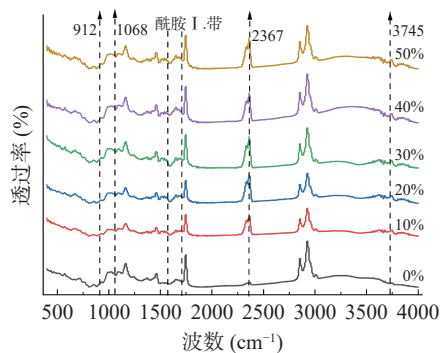


图 4 不同白芸豆粉添加量饼干的红外光谱图

Fig.4 IR spectrogram of biscuits with different added amounts of white kidney bean powder

红外图谱中, 通过计算每个吸收峰的峰面积与酰胺 I 带总面积(1700~1600 cm^{-1})的比值, 可以得到面筋蛋白质二级结构的相对含量。经曲线拟合分析不同白芸豆粉添加量饼干的蛋白质二级结构及其含量如表 5 所示, 由表 5 可知, 对照组(0%)蛋白质二级结构含量分别为: α -螺旋(20.32%)、 β -折叠(31.56%)、 β -转角(32.66%)、无规则卷曲(15.48%), 与对照组(0%)相比, 添加白芸豆粉后, 饼干的蛋白质二级结构含量明显发生变化, 当添加量为 30% 时, 白芸豆苏打饼干的 α -螺旋含量显著增加($P<0.05$), 从 20.32% 增加到 28.04%, 增加了 7.72%, β -折叠从 31.56% 增加

到 37.10%, β -转角含量降低, 从 32.66% 降到 18.57%。总体来说, 添加 30% 白芸豆粉的饼干有相对较高的 α -螺旋含量, 而较大含量的 α -螺旋会使结构更加的稳定、有序^[37-38]。

表 5 白芸豆粉添加量对饼干蛋白质二级结构的影响
Table 5 Effect of added amount of white kidney bean powder on biscuit protein secondary structure

白芸豆粉添加量(%)	α -螺旋(%)	β -折叠(%)	β -转角(%)	无规则卷曲(%)
0	20.32±0.01 ^b	31.56±0.01 ^{bc}	32.66±0.03 ^a	15.48±0.01 ^{bc}
10	22.61±0.00 ^b	30.83±0.00 ^{bc}	19.80±0.00 ^{bc}	26.75±0.00 ^a
20	27.30±0.00 ^a	35.47±0.00 ^a	21.67±0.00 ^{bc}	15.57±0.00 ^{bc}
30	28.04±0.00 ^a	37.10±0.01 ^a	18.57±0.01 ^c	16.29±0.01 ^b
40	27.75±0.01 ^a	33.09±0.01 ^{abc}	24.78±0.00 ^b	14.38±0.01 ^d
50	27.19±0.00 ^a	35.57±0.02 ^a	21.94±0.01 ^{bc}	15.32±0.01 ^c

注: 同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

2.7 白芸豆粉添加量对饼干二硫键含量的影响

不同白芸豆粉添加量对饼干中二硫键含量的影响如图 5 所示。随着白芸豆粉含量的增加, 二硫键含量呈现先升高后降低的趋势。当白芸豆粉添加量为 30% 时, 二硫键含量显著高于其它组($P<0.05$)。这可能是因为白芸豆粉中的蛋白含量较高, 适量加入对面筋网络的聚集与交联有积极作用, 促进饼干中二硫键的形成, 使蛋白质网络结构更稳定^[39]。但白芸豆粉加入过量时, 引入过多蛋白反而会导致面筋蛋白间的相互作用减弱, 使二硫键含量降低, 导致面筋网络疏松, 这也就解释了饼干质构指标下降的原因^[40]。

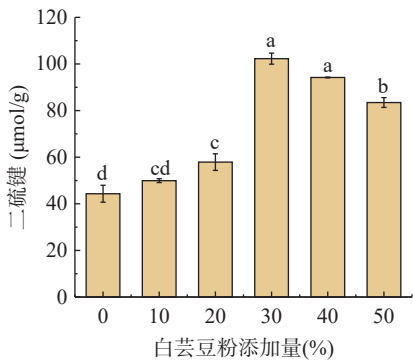


图 5 不同白芸豆粉添加量对饼干二硫键含量影响
Fig.5 Effect of different amounts of white kidney bean powder on disulfide bond content in biscuits

2.8 白芸豆粉添加量对饼干微观结构的影响

经扫描电镜观察不同比例白芸豆-小麦复配面团及白芸豆苏打饼干的微观结构如图 6 所示。图 6A1、图 6B1 作为对照组的面团面筋网络结构较为致密、连续, 淀粉颗粒被包裹的较好, 饼干内部平整, 孔洞均匀。当白芸豆粉 $\leq 30\%$ (图 6A4、图 6B4)时, 与对照相比, 随着添加量的增加, 可以观察到有椭圆形的白芸豆淀粉填充于面筋蛋白内部, 淀粉颗粒与蛋白质基

质紧密相连, 可能是因为白芸豆中有较高的蛋白含量, 适量的白芸豆粉与低筋粉混合能够增强面团的稳定性^[41]; 当白芸豆粉($>30\%$)后, 饼干内部结构孔洞变大, 可能是由于面团在发酵过程中会产生二氧化碳, 面团中含有的蛋白质具有持气性, 使得气体被存留在面团中。随着白芸豆添加量的增大, 面团持气性增强, 因为白芸豆添加量增大时, 蛋白质含量增大, 增大了气体存留量, 导致烘焙过程中气泡膨胀和气体逸出, 从而出现空腔。饼干面团的微观结构改变, 与上述饼干 TPA 性质相符。

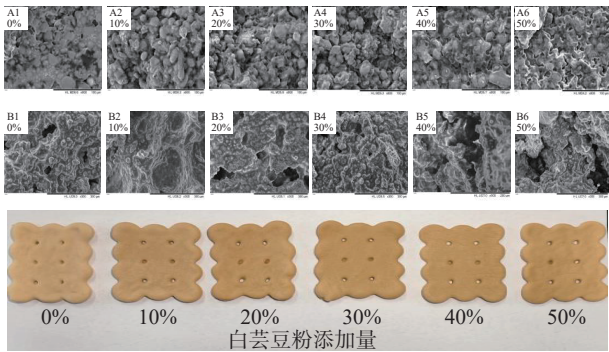


图 6 不同比例白芸豆-小麦复配面团图(A1~A6)、饼干扫描电镜图(B1~B6)及饼干实物图
Fig.6 Different proportions of white kidney bean-wheat mixed dough drawing (A1~A6), scanning electron microscope drawing of biscuits (B1~B6) and physical drawing of biscuits

2.9 白芸豆粉添加量对饼干色泽的影响

饼干的色泽对饼干的品质起关键性作用, 较好的饼干色泽会增强消费者的购买欲。色差仪中的 L^* 表示该产品的黑白亮度, a^* 表示红绿度, b^* 表示黄蓝度。由表 6 可知, 随着白芸豆粉添加量的增加, 饼干的 L^* 、 a^* 、 b^* 值有明显变化, 具体表现为降低了饼干的 L^* 值(由 58.245 降低至 45.135), 增加了饼干的 a^* 、 b^* 值($P<0.05$)。当添加 50% 白芸豆粉时, 饼干的 a^* 值和 b^* 值达到最大, 分别为 16.06 和 40.95。综上, 说明白芸豆粉的添加会使饼干表面色泽变暗、变红、变黄, 这与白芸豆粉本身的色泽和添加量有关, 白芸豆粉为淡黄色的固体, 加入小麦粉中改变了复配粉的颜色。此外, 白芸豆粉中的多糖类物质也会促进美拉德反应的发生, 从而影响饼干色泽。

表 6 不同添加量白芸豆苏打饼干的色差分析
Table 6 Color difference analysis of different added amounts of white kidney bean soda cookies

白芸豆粉添加量(%)	L^*	a^*	b^*
0	58.25±0.24 ^a	10.21±1.51 ^b	37.86±2.83 ^a
10	52.68±0.11 ^b	12.36±0.25 ^{ab}	38.31±1.00 ^a
20	50.25±0.23 ^c	12.52±0.33 ^{ab}	38.72±1.34 ^a
30	48.77±0.24 ^d	13.93±1.86 ^a	38.92±1.82 ^a
40	48.56±0.025 ^d	15.63±0.17 ^a	39.68±0.30 ^a
50	45.14±0.44 ^e	16.06±0.03 ^a	40.95±0.14 ^a

注: 同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

2.10 白芸豆粉添加量对饼干感官的影响

考察白芸豆粉添加量对饼干感官品质的影响如

图 7 所示。由图 7 可知: 当白芸豆粉添加为 10%~20% 时, 此时饼干豆香味不突出, 组织状态较差, 得分最低。当白芸豆粉添加量 30% 时, 饼干的口感、组织、色泽、气味、滋味均为最佳水平, 咀嚼性较好, 整体豆香味突出, 无其他异味, 当添加量超过 30% 时, 感官的各部分指标得分均有降低, 此时饼干有轻微豆腥味, 颗粒感突出。这可能是因为白芸豆作为一种豆类食品, 添加过多会使饼干产生豆腥味, 同时白芸豆粉中的蛋白质和膳食纤维会与小麦粉争夺水分, 影响面团的面筋结构, 导致饼干口感不佳, 脆度不够。因此得出, 添加 30% 白芸豆粉制作的饼干感官综合评分最高。

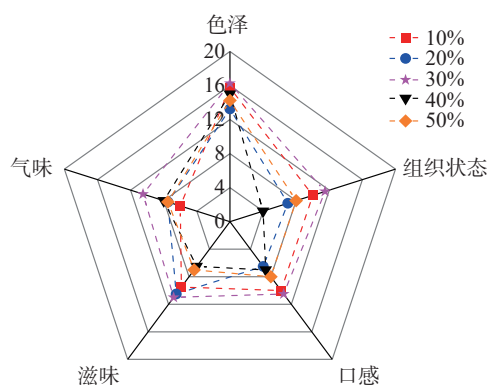


图 7 白芸豆粉添加量对饼干感官的影响

Fig.7 Effect of the amount of white kidney bean powder on the senses of biscuits

3 结论

本研究考察了添加不同比例白芸豆粉对复配粉及饼干品质等指标的影响。结果表明, 白芸豆粉的添加提高了复配粉的持水性, 降低了其持油能力, 有效抑制了淀粉的老化。随着白芸豆粉添加比例的增加, 面团的黏弹性得到提升, 饼干的咀嚼性也随之升高。傅里叶红外结果表明白芸豆粉对饼干的稳定性有积极作用。当白芸豆粉添加量为 30% 时, 饼干的面筋网络结构较为稳定, 感官接受度最高。综上所述, 白芸豆粉添加量为 30% 时对饼干品质的影响最好。因此, 白芸豆粉可作为一种天然安全的辅助成分, 与低筋粉复配开发营养型饼干, 不仅能提高饼干中膳食纤维和抗性淀粉的含量, 而且此类物质的加入还能对餐后血糖水平的降低起积极作用。后续将针对白芸豆苏打饼干的营养品质及消化特性进行深入研究, 以进一步确定白芸豆在烘焙面制品中的应用价值。

© 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] MANALU M, RUMIDA, JULIANTI E, et al. Composites flour formulation made from yellow pumpkin, purple sweet potato, corn, and wolf-herring flour for replacement of wheat flour on low- and high- moisture foods part I: Cookies and muffin[J]. *Food and*

Humanity, 2024, 2: 100261.

[2] BURSA B, İLYASOĞLU H. Development of gluten-free cookie using composite flour from corn and lentil flours: Study by response surface methodology[J]. *Food Science and Technology International=Ciencia Y Tecnologia De Los Alimentos Internacional*, 2024, 10820132241238258.

[3] 何泽东, 冯慧, 王灵艳, 等. 白参菌粉添加量对饼干品质及其淀粉消化性的影响[J/OL]. *食品工业科技*: 1-13[2024-09-28]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024050008>. [HE Zedong, FENG Hui, WANG Lingyan, et al. Effect of white ginseng powder on biscuit quality and starch digestion[J/OL]. *Food Industry Technology*: 1-13[2024-09-28]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024050008>.]

[4] OGHENEWOGAGA J O, IRUOGHENE G E, TIMILEYIN D O, et al. Quality evaluation of value-added nutritious biscuit with high antidiabetic properties from blends of wheat flour and oyster mushroom[J]. *Food Chemistry Advances*, 2023, 3: 100375.

[5] 董锐宽. 云南云龙县白芸豆种植生产现状、存在问题与发展建议[J]. *农业工程技术*, 2023, 43(25): 115-116. [DONG Ruikuan. Current status, existing problems and development suggestions of white kidney bean in Yunlong County, Yunnan[J]. *Agricultural Engineering Technology*, 2023, 43(25): 115-116.]

[6] YANG Yufei, HE Shudong, ZHANG Yi, et al. Comparison of crude prolamins from seven kidney beans (*Phaseolus vulgaris* L.) based on composition, structure and functionality[J]. *Food Chemistry*, 2021, 357: 129748.

[7] 让一峰, 赵伟, 杨瑞金, 等. 白芸豆 α -淀粉酶抑制剂在加工和消化过程中的活性变化研究[J]. *食品工业科技*, 2015, 36(17): 53-57. [RANG Yifeng, ZHAO Wei, YANG Ruijin, et al. Changes of the activity of α -amylase inhibitors in white kidney bean during processing and digestion[J]. *Food Industry Technology*, 2015, 36(17): 53-57.]

[8] LIU Yan, ZHANG Jian, GUO Hongping, et al. Effects of mulberry leaf and white kidney bean extract mix on postprandial glycaemic control in pre-diabetic subjects aged 45-65 years: A randomized controlled trial[J]. *Journal of Functional Foods*, 2020, 73: 104117.

[9] 王靖银, 刘梓昭, 侯子怡, 等. 白芸豆中 α -淀粉酶抑制剂的提取及其产品研发[J]. *北京农学院学报*, 2022, 37(4): 114-117. [WANG Jingyi, LIU Zizhao, HOU Ziyi, et al. Extraction of α -amylase inhibitors from white kidney beans and product development in white kidney beans[J]. *Journal of Beijing College of Agriculture*, 2022, 37(4): 114-117.]

[10] MA Yanli, RANG Yifeng, YANG Ruijin, et al. Effect of white kidney bean extracts on estimated glycemic index of different kinds of porridge[J]. *LWT*, 2018, 96: 576-582.

[11] HAN Jiahui, PANG Linjiang, BAO Linxin, et al. Effect of white kidney bean flour on the rheological properties and starch digestion characteristics of noodle dough[J]. *Foods*, 2022, 11(22): 3680-3680.

[12] 蔡沙, 隋勇, 施建斌, 等. 马铃薯膳食纤维物化特性分析及其对马铃薯热干面品质的影响[J]. *食品科学*, 2019, 40(4): 87-94. [CAI Sha, SUI Yong, SHI Jianbin, et al. Analysis of chemical properties of dietary fiber and its influence on the quality of potato[J]. *Food Science*, 2019, 40(4): 87-94.]

[13] 苟青松, 胡伟, 王展, 等. 添加豆渣对苏打饼干制作过程及品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(16): 39-44. [GOU Qingsong, HU Wei, WANG Zhan, et al. The influence of adding bean dregs on the production process and quality of soda cookies[J]. *Food Industry Technology*, 2019, 40(16): 39-44.]

[14] CAPPELLI A, OLIVA N, CINI E. A systematic review of gluten-free dough and bread: Dough rheology, bread characteristics, and improvement strategies[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(18): 6559.

[15] 张禧, 卫新雨, 张睿, 等. 燕麦粉添加量对马铃薯-燕麦复合

- 面团特性的影响[J]. 食品与机械, 2023, 39(6): 26–30. [ZHANG Xi, WEI Xinyu, ZHANG Rui, et al. Effect of oat flour addition on the characteristics of potato-oat compound dough[J]. Food and Machinery, 2023, 39(6): 26–30.]
- [16] HONG Tingting, ZHAO Qiyang, XU Dan, et al. Effect of heat-treated flour on the quality and storage stability of fresh noodles[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 146: 111463.
- [17] WU Yeting, XU Xiaoli, SHENG Long. Effects of different plant proteins on the quality and characteristics of heat induced egg white protein gel under freezing conditions[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 146: 109281.
- [18] 罗明江, 罗春霞, 吴赣香. Ellman's 试剂比色法测定食品中蛋白质的巯基和二硫键[J]. 郑州粮食学院学报, 1986(1): 92–95. [LUO Mingjiang, LUO Chunxia, WU Ganxiang. Thiol and disulfide bonds of proteins in food by Ellman's reagent[J]. Journal of Zhengzhou Grain University, 1986(1): 92–95.]
- [19] 林琳, 邵馨漫, 刘蒲蘋, 等. 金针菇苏打饼干的制作工艺研究及质构分析[J]. 保鲜与加工, 2023, 23(1): 47–51. [LIN Lin, SHAO Xinman, LIU Pucheng, et al. Manufacturing technology research and qualitative structure analysis of Flammulina mushroom soda biscuits[J]. Preservation and Processing, 2023, 23(1): 47–51.]
- [20] 赵时珊, 蔡芳, 施建斌, 等. 紫薯-低筋复配粉理化特性及其饼干制品品质分析[J]. 中国粮油学报, 2023, 38(5): 49–57. [ZHAO Shishan, CAI Fang, SHI Jianbin, et al. Physical and chemical characteristics of purple sweet potato-low gluten compound powder and quality analysis of biscuit products[J]. Chinese Journal of Grain and Oil, 2023, 38(5): 49–57.]
- [21] YUAN T Z, LIU S Y, REIMER M, et al. Evaluation of pasting and gelling properties of commercial flours under high heating temperatures using Rapid Visco Analyzer 4800[J]. Food Chemistry, 2020, 344: 128616.
- [22] 惠君玉, 熊江红, 杨安树, 等. 不同豆类蛋白组成、结构和功能特性[J]. 南昌大学学报(理科版), 2020, 44(6): 562–569. [HUI Junyu, XIONG Jianghong, YANG Anshu, et al. The composition, structural and functional properties of different legume proteins[J]. Journal of Nanchang University (Science edition), 2020, 44(6): 562–569.]
- [23] 梁靖, 刘学强, 邢那葵, 等. 食叶草粉对面团及面条品质特性的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(13): 67–74. [LIANG Jing, LIU Xueqiang, XING Ruizhen, et al. Effect of leafy flour on the quality characteristics of dough and noodles[J]. Food Industry Technology, 2024, 45(13): 67–74.]
- [24] 孟宇行, 高旭升, 段翠翠, 等. 大豆低聚肽对小麦淀粉理化性质的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(12): 85–91. [MENG Yuxing, GAO Xusheng, DUAN Cuicui, et al. Effect of soybean oligomeric peptides on the physicochemical properties of wheat starch[J]. Food Industry Technology, 2024, 45(12): 85–91.]
- [25] SHI Miaomiao, CHENG Yanqiu, WANG Fei, et al. Rheological properties of wheat flour modified by plasma-activated water and heat moisture treatment and *in vitro* digestibility of steamed bread[J]. Frontiers in Nutrition, 2022: 9850227.
- [26] ZHAO Qinyu, SHE Zhenyun, HOU Danting, et al. Effect of partial substitution of wheat flour with kiwi starch on dough rheology, microstructure, the quality attributes and shelf life of Chinese steamed bread[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 258(P1): 128920.
- [27] YUAN Dan, LI Chao, HUANG Qiang, et al. Ultrasonic degradation effects on the physicochemical, rheological and antioxidant properties of polysaccharide from *Sargassum pallidum*[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 239: 116230.
- [28] 葛飞. 制粉与挤压改性对青稞粉理化特性及饼干食用品质改良研究[D]. 南京: 南京财经大学, 2023. [GE Fei. Study on the physical and chemical characteristics and improvement of highland barley flour and biscuit edible quality by pulverizing and extrusion modification[D]. Nanjing: Nanjing University of Finance and Economics, 2023.]
- [29] 秦仁炳, 项丰娟, 曾洁等. 抗性淀粉酥性饼干工艺条件优化及其体外消化性[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(8): 105–110. [QIN Renbing, XIANG Fengjuan, ZENG Jie, et al. Optimization of process conditions for resistant starch crisp cookies and their *in vitro* digestibility[J]. Food Research and Development, 2023, 44(8): 105–110.]
- [30] ZHAO Jie, WU Jihong, CHEN Yanni, et al. Gel properties of soy protein isolate modified by lipoxygenase-catalyzed linoleic acid oxidation and their influence on pepsin diffusion and *in vitro* gastric digestion[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(20): 5691–5698.
- [31] 郭平平. 油莎豆全脂及脱脂粉在面制食品中的应用研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2023. [GUO Pingping. Research on the application of whole fat and skimfat powder in flour food[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2023.]
- [32] 李平, 吕莹果, 李雪琴, 等. 螺旋藻粉对面团流变性质及面筋结构的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(14): 63–71. [LI Ping, LÜ Yingguo, LI Xueqin, et al. Effect of spirulina powder on the rheological properties and gluten structure of dough[J]. Food Science, 2023, 44(14): 63–71.]
- [33] DANKAR I, HADDARAH A, OMAR E F, et al. Characterization of food additive-potato starch complexes by FTIR and X-ray diffraction[J]. Food Chemistry, 2018, 26: 7–12.
- [34] 范宽秀, 李清明, 王锋, 等. 挤压处理对淮山全粉速溶性和理化性质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(6): 71–76. [FAN Kuanxiu, LI Qingming, WANG Feng, et al. Effect of extrusion treatment on the instant solubility and physicochemical properties of the total Huaishan powder[J]. Food and Fermentation Industry, 2022, 48(6): 71–76.]
- [35] TOOLE A G, KAČURÁKOVÁ M, SMITH C A, et al. FT-IR study of the *Chara corallina* cell wall under deformation[J]. Carbohydrate Research, 2003, 339(3): 629–635.
- [36] 邹越婕. 青稞-小麦混合粉理化特性及薄脆饼干品质研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2022. [ZOU Zhaojie. Study on physicochemical characteristics of highland barley-wheat mixed powder and quality of crispy biscuits[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2022.]
- [37] WANG Hanmiao, FAN Hongxiu, ZHANG Shanshan, et al. Effects of Tremella polysaccharide on frost resistance of frozen dough considering water state, physical property and gluten structure[J]. LWT, 2023, 190.
- [38] 杨雪, 郭金英, 鲁鹏等. 食品多糖对冷冻面团特性的影响及作用机理研究进展[J/OL]. 食品与发酵工业: 1–8[2024-03-19]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.038509>. [YANG Xue, GUO Jinying, LU Peng, et al. Progress on the influence of food polysaccharide on frozen dough characteristics and its mechanism[J/OL]. Food and fermentation industry: 1–8[2024-03-19]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.038509>.]
- [39] 罗磊, 夏迎利, 杨浩昆, 等. 牡丹花萼蛋白对面团和面筋蛋白特性的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(4): 42–47. [LUO Lei, XIA Yingli, YANG Haokun, et al. Effect of peony amen protein on dough and gluten properties[J]. Food Science, 2023, 44(4): 42–47.]
- [40] LIU L Y, YANG W, CUI S W, et al. Effects of pentosanase and glucose oxidase on the composition, rheology and microstructure of whole wheat dough[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 84: 545–551.
- [41] GHUFRAN M S S, ARSALAN S A, RASHIDA A, et al. Exploring the potential of black gram (*Vigna mungo*) flour as a fat replacer in biscuits with improved physicochemical, microstructure, phytochemicals, nutritional and sensory attributes[J]. SN Applied Sciences, 2020, 2(12): 2083.