

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2024.81015

# 黄精粉对面团特性及面包品质的影响

吴坤伟<sup>1</sup> 魏明<sup>1</sup> 钱森和<sup>1</sup> 李紫嫚<sup>1</sup> 谢艳<sup>2</sup>

(1. 安徽工程大学生物与食品工程学院, 安徽 芜湖 241000; 2. 安徽盼盼食品有限公司, 安徽 滁州 239000)

**摘要:** [目的] 拓展黄精在面包中的应用, 提高面包的保健功能。[方法] 在小麦粉中添加黄精粉, 研究其对面粉糊化、面筋结构、面团流变学特性以及面包烘焙品质的影响。[结果] 添加黄精粉后, 面粉的糊化温度升高, 峰值黏度和回生值下降; 面团中面筋得率降低。面筋蛋白的二级结构发生变化, 面筋蛋白中的无规卷曲结构增加。黄精粉能增加面团硬度、面团的弹性模量和黏性模量, 但面团的发酵体积有所降低。黄精粉对面包烘焙品质有一定的影响, 随着黄精粉量的增加, 面包比容呈先增加后降低的趋势。黄精粉的添加破坏了面筋蛋白均匀致密的微观结构, 使面包的硬度和咀嚼性增大, 降低了面包的适口性。[结论] 黄精粉在一定程度上改变了面团特性和面包烘焙品质。在小麦粉中添加 2%~6% 的黄精粉, 可生产出感官品质可接受的富含生物活性成分的功能性面包。

**关键词:** 黄精粉; 面团; 流变性质; 面筋结构; 面包品质

## Effect of *Polygonatum sibiricum* powder on properties of dough and quality of bread

WU Kunwei<sup>1</sup> WEI Ming<sup>1</sup> QIAN Senhe<sup>1</sup> LI Ziman<sup>1</sup> XIE Yan<sup>2</sup>

(1. College of Biology and Food Engineering, Anhui Polytechnic University, Wuhu, Anhui 241000, China;

2. Anhui Panpan Food Co., Ltd., Chuzhou, Anhui 239000, China)

**Abstract:** [Objective] To explore the application of *Polygonatum sibiricum* powder in bread, enhancing its health benefits. [Methods] *Polygonatum* powder is added to wheat flour to study its effects on starch gelatinization, gluten structure, dough rheological properties, and bread baking quality. [Results] The addition of *Polygonatum* powder increases the gelatinization temperature of the flour, while peak viscosity and retrogradation values decrease. The gluten yield in the dough is reduced. Changes in the secondary structure of gluten proteins are observed, with an increase in the content of random coil structures. *Polygonatum sibiricum* powder increases dough hardness, elasticity modulus, and viscosity modulus, but it reduces the dough's fermentation volume. The baking quality of the bread is affected, with the bread volume initially increasing and then decreasing as the amount of *Polygonatum sibiricum* powder increases. The addition of *Polygonatum sibiricum* powder disrupts the uniform and dense microstructure of gluten proteins, leading to an increase in bread hardness and chewiness, which reduces the bread's palatability. [Conclusion] *Polygonatum sibiricum* powder significantly alters dough properties and bread baking quality. Adding 2%~6% *Polygonatum sibiricum* powder to wheat flour can produce functional bread with acceptable sensory quality and enriched with bioactive compounds.

**Keywords:** *Polygonatum sibiricum* powder; dough; rheological property; gluten structure; bread quality

现代食品工业中, 面包作为典型的即食类谷物制品虽具有消费普适性, 但在营养强化和功能性开发方面仍面临挑战。随着心脑血管疾病和糖尿病等疾病不断发

生, 功能性面包的需求量呈现不断增加的趋势<sup>[1]</sup>。在面粉中添加适量的紫山药<sup>[2]</sup>、藜麦<sup>[3]</sup>、紫薯<sup>[4]</sup>、杜仲<sup>[5]</sup>、酚类物质<sup>[6]</sup>和膳食纤维<sup>[7]</sup>等成分可以开发各式功能性面包。添

基金项目: 安徽省科技重大专项(编号: 202203a06020029)

通信作者: 魏明(1969—), 男, 安徽工程大学教授, 博士。E-mail: wmrainbow69@126.com

收稿日期: 2024-10-08 改回日期: 2025-03-21

引用格式: 吴坤伟, 魏明, 钱森和, 等. 黄精粉对面团特性及面包品质的影响[J]. 食品与机械, 2025, 41(7): 190-198.

Citation: WU Kunwei, WEI Ming, QIAN Senhe, et al. Effect of *Polygonatum sibiricum* powder on properties of dough and quality of bread [J]. Food & Machinery, 2025, 41(7): 190-198.

加药食同源植物能提高面包营养价值,但也会影响面包的加工性能<sup>[8]</sup>。螺旋藻的添加会提高面团硬度,降低其延展性,影响后续加工<sup>[9]</sup>。添加百合粉增加了面团的硬度、弹性模量和黏性模量,从而改变了面包的感官品质<sup>[10]</sup>。添加适量的菊粉膳食纤维使面团总产气量增加,面团韧性增加,面包比容增加,添加过多的菊粉会使面团持气性降低,阻碍面筋网络形成<sup>[11]</sup>。

黄精(*Polygonatum sibiricum* Redouté)作为典型药食同源的植物资源,其根茎富含多糖类、黄酮类、皂苷类及不饱和脂肪酸等物质,具有益气滋阴、调理脾胃、增强肾脏机能和润燥养肺等功效<sup>[12]</sup>。现代研究显示,它还具备抗肿瘤、降血糖、降脂、抗衰老及增强免疫力的功能<sup>[13-16]</sup>。随着人们对黄精认知的提高,其在食品中的应用正日益受到关注。目前,利用黄精开发相关功能性食品有黄精饼干、黄精酵素、速溶黄精茶等<sup>[17-19]</sup>,而关于黄精面包的研究报道较少。将黄精粉添加到面包中可以改善面包的营养结构,由于黄精粉中含有纤维素,也会影响面团特性和面包烘焙品质。

研究拟考察黄精粉添加对小麦面粉糊化特性、面筋含量及面筋蛋白二级结构的影响,并通过面团流变学性质和质构分析,分析黄精粉添加量对小麦面团结构及烘焙效果的作用机制,旨在为拓展其在烘焙食品中的应用提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料与试剂

黄精粉(黄精经过九蒸九晒,然后干燥粉碎过60目筛备用,其主要成分含量为膳食纤维54.75%,淀粉15.49%,可溶性多糖15.56%,蛋白质2.31%,黄酮0.41%);安徽省青阳县九华中药材科技有限公司;

高筋小麦粉、黄油:益海嘉里粮油工业公司;

高活性干酵母:安琪酵母股份有限公司;

白砂糖:常州市贯通食品有限公司;

奶粉:伊利乳业集团公司;

精制盐:安徽省盐业集团公司;

鸡蛋:市售;

甘氨酸(Gly)、三羟甲基氨基甲烷(Tris)、L-半胱氨酸、 $\beta$ -巯基乙醇、5,5-二硫代-2-硝基苯甲酸(DTNB)、乙二胺四乙酸(EDTA)、尿素、十二烷基硫酸钠(SDS)、三氯乙酸:分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

### 1.2 仪器

和面机:HMJ-D5600型,北京利仁科技股份有限公司;

烤箱:长帝F40型,佛山市伟仕达电器实业有限公司;

质构仪:CT310K型,美国Ametek Brookfield公司;

流变仪:TADisconeryDHR-3型,美国TA公司;

冷冻干燥机:FD-304型,上海培东冷冻干燥设备有限公司;

黏度分析仪:Rapid-20型,上海保圣实业发展有限公司;

台式离心机:JIDI-5G型,广州吉迪仪器有限公司;

分光测色仪:NS800型,深圳市三恩时科技有限公司;

傅里叶变换红外光谱仪:IRPrestige-21型,日本岛津公司。

### 1.3 试验方法

1.3.1 黄精—小麦混合粉的配制 通过将0%,2%,4%,6%,8%,10%的黄精粉(以总粉料的质量为基准)按比例替换小麦粉,研制梯度配比的小麦—黄精复配粉体系。

1.3.2 面团和面筋蛋白的制备提取工艺 精确称量1.3.1复配粉样品,按粉体质量55%添加蒸馏水,用和面机揉制30 min,得到不同黄精粉添加量的面团。

将面团手工搓洗以提取湿面筋,随后利用真空冷冻干燥机进行干燥,最终获得冻干的面筋蛋白,并对其二硫键及二级结构进行分析。

1.3.3 面包制作 称取混合粉200 g、酵母2.4 g、糖10 g、奶粉8 g、黄油16 g、盐2 g、鸡蛋20 g和水100 g放入和面机进行揉制。揉好后,面团38℃发酵60 min。发酵后排气整形,醒发30 min,放入烤箱进行烘焙,设定面火温度160℃,底火温度165℃。烘烤25 min,取出面包在室温下放置2 h备用,对照组不加黄精粉。

1.3.4 面粉糊化特性测定 按照0%,2%,4%,6%,8%,10%的比例,逐步用黄精粉替代小麦粉并充分混合。称取(2.50±0.01) g混合粉于样品桶,加入25 mL蒸馏水,放入快速黏度分析仪进行测试。

1.3.5 面团质构特性测定 将面团置于质构仪载物台,使用TA4/1000探头,设置参数:测定速度1.0 mm/s,压缩形变量50%,触发点负载0.049 N。

1.3.6 面团拉伸特性测定 待测面团经5 min应力松弛预处理后,将面团压制成10 mm×30 mm的条状样品,使用质构仪进行拉伸试验。设定参数:测定速度1.0 mm/s,应变位移50.0 mm,触发点负载0.049 N。

1.3.7 面团流变学特性测定 取适量面团放置于直径20 mm、夹缝1 mm的载物台,涂薄层油以防脱水,在0.1~20.0 Hz频率、0.5%应变力、25℃条件下进行测试,采用振荡模式进行频率扫描操作。

1.3.8 湿面筋测定 依据GB/T 5506.1—2008。

1.3.9 面筋蛋白FTIR分析 将冻干面筋与溴化钾混合后,进行快速研磨并手动压制成片。然后在4 000~400 cm<sup>-1</sup>的波段使用傅里叶变换红外光谱仪进行扫描。采用PeakFit 4.12对酰胺I带(1 700~1 600 cm<sup>-1</sup>)进行分

峰拟合,定量各二级结构的相对丰度。

1.3.10 面筋中二硫键、游离巯基和总巯基含量测定

(1) 游离巯基含量:用 0.2 mol/L Tris-Gly 缓冲溶液 (pH 8.0,含有 8 mol/L 尿素、1% SDS 和 3 mmol/L EDTA) 配制 2 mmol/L 的 L-半胱氨酸母液。量取 4 mL 不同浓度的 L-半胱氨酸溶液,定量加入 0.1 mL 的 10 mmol/L DTNB 并充分混合,静置 20 min 后于 412 nm 处测定吸光值,绘制标准曲线,其方程为  $y=1.839 3x+0.068 3, R^2=0.996 3$ 。

参照 Chan 等<sup>[20]</sup>的方法进行修改,分别称 200 mg 面筋蛋白样品溶于 20 mL 0.2 mol/L Tris-Gly 缓冲溶液中,振荡 5 min 后,5 000 r/min 离心 10 min。取 4 mL 上清液,加入 0.1 mL 10 mmol/L DTNB 充分摇匀,静置 20 min 后,在 412 nm 处测量吸光值,按式(1)计算面筋中游离巯基含量。

$$S_F = \frac{n}{c}, \tag{1}$$

式中:

- $S_F$ ——面筋中游离巯基含量,  $\mu\text{mol/g}$ ;
- $n$ ——根据标准曲线计算出的巯基浓度,  $\mu\text{mol/mL}$ ;
- $c$ ——样品质量浓度,  $\text{g/mL}$ 。

(2) 总巯基含量:取 1.3.10(1)中离心后的上清液 10 mL,加入 10 mL  $\beta$ -巯基乙醇充分混匀,60  $^\circ\text{C}$ 水浴反应 2 h,加入 50 mL 12% 三氯乙酸,5 000 r/min 离心 10 min 后,弃上清液。用 12% 的三氯乙酸洗涤沉淀,用 50 mL 0.2 mol/L 的 Tris-Gly 溶解沉淀,取该溶液 4 mL,加入 0.1 mL 10 mmol/L DTNB 充分摇匀,静置 20 min 后,在 412 nm 处测量吸光值,按式(2)计算总巯基含量。

$$S_T = \frac{nV_2}{cV_1}, \tag{2}$$

式中:

- $S_T$ ——面筋中总巯基含量,  $\mu\text{mol/g}$ ;
- $n$ ——根据标准曲线计算出的巯基浓度,  $\mu\text{mol/mL}$ ;
- $c$ ——样品质量浓度,  $\text{g/mL}$ ;
- $V_1$ ——上清液体积, mL;
- $V_2$ ——沉淀复溶后体积, mL。

(3) 二硫键含量计算:按式(3)进行计算。

$$D = \frac{S_T - S_F}{2}, \tag{3}$$

式中:

- $D$ ——二硫键含量,  $\mu\text{mol/g}$ ;
- $S_T$ ——面筋中总巯基含量,  $\mu\text{mol/g}$ ;
- $S_F$ ——面筋中游离巯基含量,  $\mu\text{mol/g}$ 。

1.3.11 面团发酵力测定 取 1.3.2 制备的面团 100 g 放入 250 mL 量筒内压实,38  $^\circ\text{C}$  下进行发酵,每隔 30 min 记录面团体积和收集的气体体积,发酵时间 120 min。

1.3.12 面包色泽测定 采用 LScolour 测色系统测定面

包色泽,按式(4)计算面包色差。

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}, \tag{4}$$

式中:

- $\Delta E$ ——色差;
- $\Delta L^*$ ——试验组与对照组黑白度的差值;
- $\Delta a^*$ ——试验组与对照组红绿度的差值;
- $\Delta b^*$ ——试验组与对照组黄蓝度的差值。

1.3.13 面包纹理结构测定 选取不同黄精添加量的面包切开,对其横截面进行拍照,比较各黄精添加量的面包纹理结构,分析气孔大小和分布等参数。

1.3.14 面包比容测定 依据 GB/T 14611—2008。面包称重后,使用菜籽置换法测量体积。面包的体积与其质量的比值即为比容 ( $\text{mL/g}$ )。

1.3.15 面包质构测定 取面包样品,去除面包外表皮,切出 30 mm  $\times$  30 mm  $\times$  20 mm 的样品,放置于质构仪载物台。选用 TA4/1000 探头,设定参数:压缩形变量 50%,触发点负载 0.049 N,测试速度 1 mm/s。2 次压缩时间间隔 5 s。

1.3.16 面包的感官评定 感官评价参考 9 分嗜好评分法<sup>[21]</sup>,选取 10 名食品相关专业学生作为感官评价员进行感官评价。1~9 分别代表极度不喜欢至极度喜欢。

1.4 数据处理和分析

使用 SPSS 24.0 软件进行统计分析。使用方差分析 (ANOVA) 中的 Duncan 检验法进行显著性分析,当  $P < 0.05$  时,表示差异显著。此外,使用 Origin 2018 软件进行数据绘图。

2 结果与分析

2.1 对面粉糊化特性的影响

图 1 展示了不同样品的糊化过程,分析糊化曲线可以提取糊化温度、黏度、崩解值和回生值等参数,具体数据

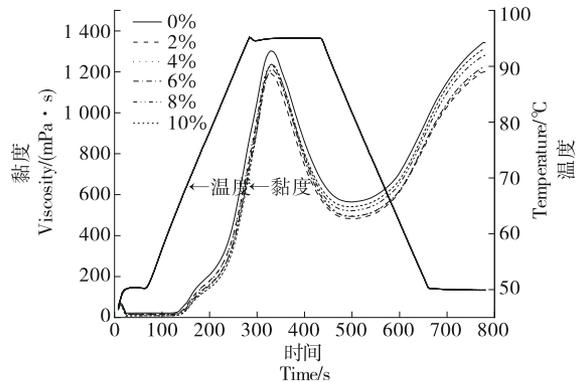


图 1 混合粉糊化过程中黏度的变化

Figure 1 Change in viscosity of mixed flour during gelatinization

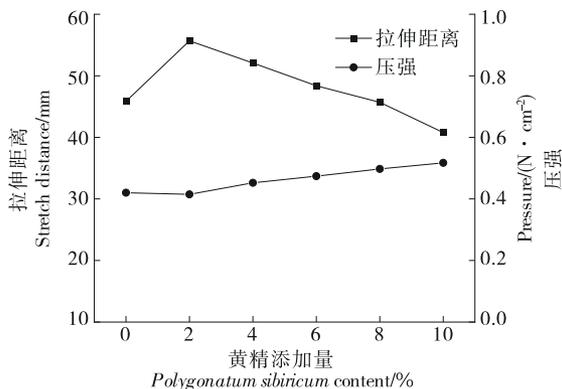
见表1。由表1可知,添加黄精的混合粉糊化温度显著提高( $P<0.05$ ),黏度、回生值和崩解值均显著降低。添加了黄精粉,减少了混合粉中的淀粉比例,同时由于黄精粉中富含膳食纤维和多糖类物质,膳食纤维具有很强的亲水性,而多糖能够与水结合形成凝胶,这会降低体系中自由水的含量,使淀粉的溶胀和糊化过程受到影响,导致混合粉糊化温度升高,黏度峰值下降。随着黄精粉添加量的继续增大,体系黏度值略有增加,可能是黄精粉中含有多糖形成凝胶反而增大了体系黏度。回生是糊化的淀粉重新结晶的现象,可以衡量淀粉短期老化程度,添加黄精粉能明显降低淀粉的回生值。回生值的降低可延缓淀粉老化,提高面包抗老化能力<sup>[22]</sup>。

### 2.2 对面团质构的影响

由表2可知,添加黄精粉后面团硬度和弹性较对照组有所增加。推测是由于黄精粉中丰富的不溶性膳食纤维填充面筋网络,改善了面筋网络结构强度,从而增强面团的硬度和弹性。面团的咀嚼性和胶着性则呈先降低后增加的趋势,黄精粉中纤维素的增加可能导致咀嚼性的提升。另外,黄精中含有多糖,多糖与水结合形成凝胶增大了面团的胶着性<sup>[23]</sup>。

### 2.3 对面团拉伸特性的影响

由图2可知,随着黄精粉添加量增加,面团强度提升,最大断裂距离呈先增后减趋势。原因在于黄精粉含有膳



字母不同表示存在显著性差异( $P<0.05$ )

图2 黄精粉对面团拉伸特性的影响

Figure 2 Effect of *Polygonatum sibiricum* powder on stretching properties of dough

食纤维,其吸水膨胀填充在面筋之中,增加了面团强度。在添加2%~6%的黄精粉时,面团具有较好的延展性;添加量在8%以上时,延展性低于对照组。黄精粉中富含纤维素和多糖,在黄精粉添加量较低时,多糖与水形成的凝胶增加了面团的延展性;而随着黄精添加量的增加,大量纤维素的存在抑制了面筋蛋白的交联,阻碍面筋网络的形成,导致面团的延展性下降。过量的黄精粉会降低面团的延展性,增加面团强度,这一现象与质构特性分析的

表1 黄精粉对面粉糊化特性的影响<sup>†</sup>

Table 1 Effect of *Polygonatum sibiricum* powder on gelatinization properties of flour

黄精添加量/%	糊化温度/℃	峰值黏度/(mPa·s)	谷值黏度/(mPa·s)	最终黏度/(mPa·s)	回生值/(mPa·s)	崩解值/(mPa·s)
0	67.7±1.6 <sup>b</sup>	1 307.5±11.5 <sup>a</sup>	566.0±18.0 <sup>a</sup>	1 346.5±23.5 <sup>a</sup>	780.5±5.5 <sup>a</sup>	741.5±6.5 <sup>a</sup>
2	84.1±0.3 <sup>a</sup>	1 194.5±2.5 <sup>c</sup>	483.0±6.0 <sup>c</sup>	1 201.0±7.0 <sup>c</sup>	718.0±1.0 <sup>c</sup>	719.3±13.1 <sup>ab</sup>
4	84.1±0.4 <sup>a</sup>	1 231.7±14.1 <sup>b</sup>	490.0±6.0 <sup>c</sup>	1 211.3±14.6 <sup>c</sup>	715.7±6.3 <sup>c</sup>	736.0±6.2 <sup>a</sup>
6	84.7±0.1 <sup>a</sup>	1 212.0±1.0 <sup>bc</sup>	493.5±3.5 <sup>c</sup>	1 211.7±18.4 <sup>c</sup>	729.5±7.5 <sup>bc</sup>	718.5±2.5 <sup>ab</sup>
8	85.2±0.8 <sup>a</sup>	1 235.5±7.5 <sup>b</sup>	501.3±3.1 <sup>bc</sup>	1 239.0±16.0 <sup>bc</sup>	737.7±2.0 <sup>bc</sup>	714.5±21.5 <sup>ab</sup>
10	85.5±0.6 <sup>a</sup>	1 240.0±19.0 <sup>b</sup>	514.0±6.0 <sup>b</sup>	1 250.5±20.5 <sup>b</sup>	753.0±6.2 <sup>b</sup>	699.0±2.0 <sup>b</sup>

<sup>†</sup> 字母不同表示存在显著性差异( $P<0.05$ )。

表2 黄精粉对面团质构的影响<sup>†</sup>

Table 2 Effect of *Polygonatum sibiricum* powder on texture properties of dough

黄精添加量/%	硬度/N	弹性/mm	咀嚼性/mJ	内聚性	胶着性
0	2.63±0.10 <sup>b</sup>	11.34±0.09 <sup>b</sup>	31.48±5.68 <sup>ab</sup>	0.73±0.04	208.7±3.3 <sup>ab</sup>
2	2.59±0.13 <sup>b</sup>	12.19±1.26 <sup>b</sup>	25.05±2.35 <sup>b</sup>	0.74±0.04	186.0±10.8 <sup>b</sup>
4	2.83±0.28 <sup>ab</sup>	12.61±1.67 <sup>b</sup>	25.25±3.26 <sup>b</sup>	0.75±0.07	212.7±4.9 <sup>ab</sup>
6	2.96±0.67 <sup>ab</sup>	13.04±1.81 <sup>ab</sup>	36.30±0.30 <sup>a</sup>	0.76±0.10	245.7±35.3 <sup>a</sup>
8	3.11±0.17 <sup>ab</sup>	15.14±0.72 <sup>a</sup>	36.43±3.32 <sup>a</sup>	0.79±0.06	237.8±26.6 <sup>a</sup>
10	3.23±0.13 <sup>a</sup>	13.30±1.01 <sup>ab</sup>	34.47±1.43 <sup>a</sup>	0.79±0.02	232.4±27.2 <sup>a</sup>

<sup>†</sup> 同列字母不同表示存在显著性差异( $P<0.05$ )。

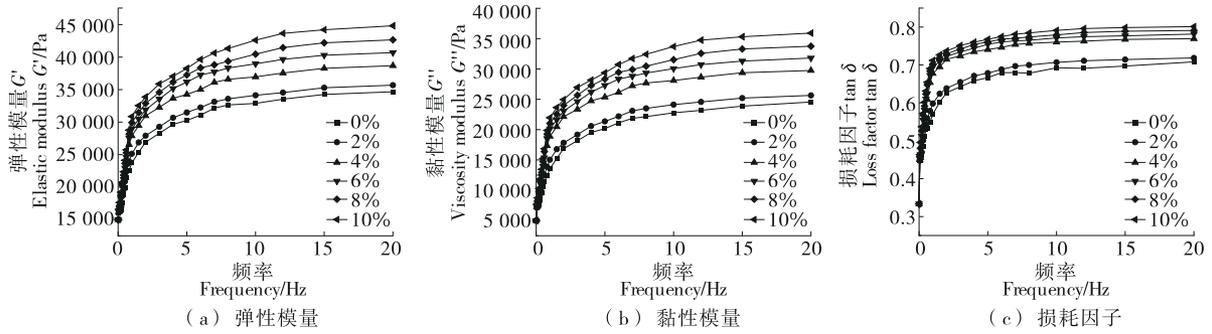


图3 黄精粉对面团流变学特性的影响

Figure 3 Effect of *Polygonatum sibiricum* powder on rheological properties of dough

结果相符。

### 2.4 对面团流变学特性的影响

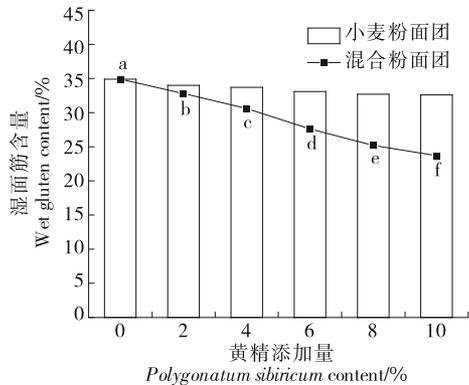
由图3可知,随着频率的增加,面团的弹性模量和黏性模量均在增加,且弹性模量高于黏性模量,损耗因子  $\tan \delta < 1$ ,表明面团的流变特性更加接近固体。同时,黄精粉添加使面团的弹性模量和黏性模量变大。黄精粉中含有纤维素,随着黄精粉添加量的增加,体系中纤维素含量增加,此时面团体系的弹性比例更大,弹性模量增大,类似固体的特性更为明显。黄精粉中还含有多糖,黄精多糖具有很强的亲水性,与水结合能形成凝胶。凝胶与面筋网络彼此交联,面筋网络体系的黏弹性增强,从而提高了面团的弹性模量和黏性模量<sup>[24]</sup>。黄精粉的添加促进了面团对水分的吸收,提高了面团含水量,使面团的黏弹性增大,影响面团的后续加工。

### 2.5 对湿面筋含量的影响

由图4可知,黄精粉梯度添加使混合粉面团的湿面筋含量降低( $P < 0.05$ )。表面上看是因为黄精粉部分取代了小麦粉,导致麦谷蛋白和醇溶蛋白含量降低。为进一步解释黄精粉对面筋形成的影响机制,将混合粉面团与去除黄精粉的小麦粉面团(100%, 98%, 96%, 94%, 92%, 90%)的湿面筋含量进行对比。一方面,因为黄精粉的加入在一定程度降低了能够形成湿面筋的蛋白质含量,但这种影响差异不显著;另一方面,黄精粉中的膳食纤维抑制了麦谷蛋白和醇溶蛋白之间的交联作用,面筋形成受阻,使面团的湿面筋含量降低。

### 2.6 对面筋中游离巯基和二硫键含量的影响

蛋白质中的游离巯基通过形成二硫键来促进面筋网络的形成,二硫键含量可用来衡量面团质量<sup>[25]</sup>。如图5所示,黄精粉添加量增加使面筋游离巯基含量相较于对照组显著上升( $P < 0.05$ ),而二硫键含量显著下降( $P < 0.05$ )。这可能与黄精中的膳食纤维使二硫键的形成受到抑制,而黄酮类、酚类物质具有较强的还原性,能将二硫键还原成游离巯基有关。李平等<sup>[26]</sup>研究也表明,螺旋藻



字母不同表示存在显著性差异( $P < 0.05$ )

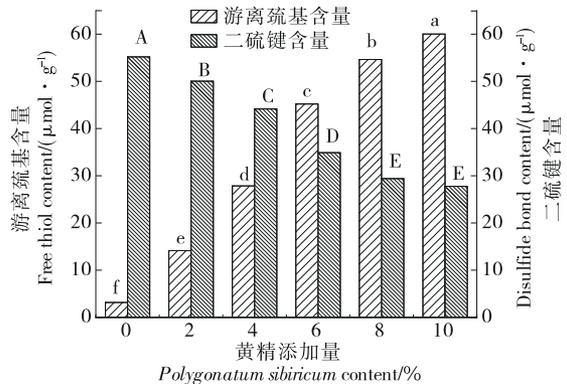
图4 黄精粉对面团湿面筋含量的影响

Figure 4 Effect of *Polygonatum sibiricum* powder on wet gluten content of dough

中的膳食纤维在减弱面筋蛋白交联作用的同时,使面筋中的二硫键含量下降,游离巯基含量升高。

### 2.7 对面筋蛋白质二级结构的影响

面筋网络结构的稳定性对面包的烘焙品质具有重要影响,图6为不同面筋样品的红外光谱图。通过去卷积化



字母不同表示存在显著性差异( $P < 0.05$ )

图5 小麦面筋中游离巯基和二硫键含量的变化

Figure 5 Changes in free thiol groups and disulfide bonds in wheat gluten

方法可以计算酰胺 I 带( $1\ 700\sim 1\ 600\ \text{cm}^{-1}$ )中蛋白质的二级结构的含量。由表3可知,黄精粉的添加增加了 $\beta$ -折叠和无规卷曲的含量,降低了 $\alpha$ -螺旋、 $\beta$ -转角含量,表明黄精粉影响了面筋网络结构的稳定性。无规卷曲含量的增加和 $\alpha$ -螺旋含量的降低,主要由于黄精粉中的膳食纤维破坏了面筋蛋白的二级结构,导致无序结构的增加和有序结构的降低<sup>[27]</sup>。黄精粉中的膳食纤维能够引起面筋网络中水分重新分配、部分蛋白脱水,导致 $\beta$ -折叠含量上升和 $\beta$ -转角含量下降,而黄精粉中酚类物质的作用,也会促进 $\beta$ -折叠的形成<sup>[28]</sup>。

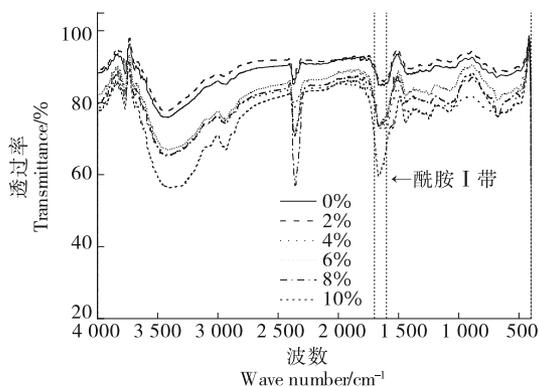
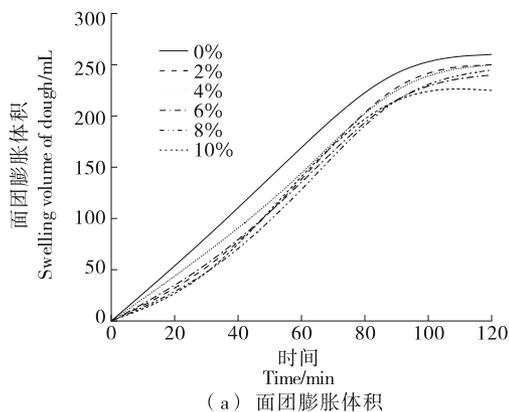


图6 不同黄精添加量面筋的红外光谱图

Figure 6 Infrared spectra of gluten with different *Polygonatum sibiricum* powder additions

## 2.8 对面团发酵的影响

由图7(a)可知,面团的体积随着发酵时间延长而逐渐增大,在发酵90 min后,体积趋于稳定不再增加。添加黄精粉导致了面团发酵体积相较于对照组有所降低。由图7(b)可知,添加黄精粉的面团产气量低于对照组。黄精粉的添加可能抑制了酵母菌的生长,导致产气量有所降低,另外,黄精粉中的膳食纤维会与面筋蛋白竞争水



(a) 面团膨胀体积

表3 小麦面团面筋蛋白二级结构相对含量的变化<sup>†</sup>

Table 3 Changes in relative content of secondary structure in gluten protein in wheat dough %

黄精添加量	$\alpha$ -螺旋	$\beta$ -折叠	$\beta$ -转角	无规卷曲
0	24.08 $\pm$ 0.12 <sup>a</sup>	19.29 $\pm$ 0.16 <sup>d</sup>	37.61 $\pm$ 0.34 <sup>a</sup>	18.40 $\pm$ 0.04 <sup>c</sup>
2	23.65 $\pm$ 0.80 <sup>ab</sup>	22.03 $\pm$ 3.05 <sup>c</sup>	35.11 $\pm$ 1.62 <sup>b</sup>	19.20 $\pm$ 1.08 <sup>b</sup>
4	20.48 $\pm$ 0.43 <sup>b</sup>	24.20 $\pm$ 2.16 <sup>bc</sup>	35.86 $\pm$ 0.57 <sup>b</sup>	19.46 $\pm$ 1.16 <sup>b</sup>
6	20.42 $\pm$ 0.03 <sup>b</sup>	26.93 $\pm$ 0.23 <sup>b</sup>	33.09 $\pm$ 0.24 <sup>c</sup>	19.56 $\pm$ 0.06 <sup>b</sup>
8	18.64 $\pm$ 0.36 <sup>c</sup>	27.40 $\pm$ 0.09 <sup>b</sup>	32.54 $\pm$ 0.35 <sup>c</sup>	21.42 $\pm$ 0.13 <sup>a</sup>
10	16.69 $\pm$ 0.07 <sup>d</sup>	31.64 $\pm$ 0.31 <sup>a</sup>	29.38 $\pm$ 0.34 <sup>d</sup>	22.29 $\pm$ 0.01 <sup>a</sup>

<sup>†</sup> 同列字母不同表示存在显著性差异( $P < 0.05$ )。

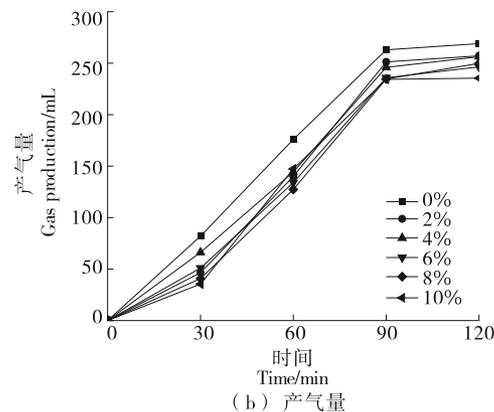
分,导致蛋白质二级结构发生变化,使面筋网络延展性劣化,持气量降低,导致面团发酵体积减小<sup>[29]</sup>。

## 2.9 对面包烘焙品质的影响

2.9.1 面包色泽 由表4可知,黄精粉的增加,导致了面包内部的 $L^*$ 值逐渐降低, $a^*$ 值和 $b^*$ 值则呈上升趋势。面包的色差值( $\Delta E$ )也随着黄精粉的添加而增大,说明添加黄精粉会使面包色泽变暗。这可能是因为黄精粉中含有色素、黄酮和多糖等物质,色素和黄酮使面包颜色变深,多糖和蛋白质在烘烤过程中产生美拉德反应使面包色泽加深。

2.9.2 面包纹理结构 由图8可知,黄精粉添加量为2%~6%时,面包的纹理结构差异较小,此时面包结构较为紧密,气孔较小,分布较为均匀;当黄精粉添加量 $>6\%$ 时,面包结构较为疏松,气孔较大,分布不均匀,部分区域有塌陷,可能是添加黄精粉后,黄精粉中的纤维素破坏了面筋的网络结构,导致面包的整体结构变得松散。

2.9.3 面包比容 由图9可知,随着黄精添加量增加,面包比容先升后降,可能是由于黄精粉中丰富的多糖能够与面筋蛋白结合,面筋延展度上升,使面包比容大于对照



(b) 产气量

图7 黄精粉对面团发酵力的影响

Figure 7 Effect of *Polygonatum sibiricum* powder on dough fermentation power

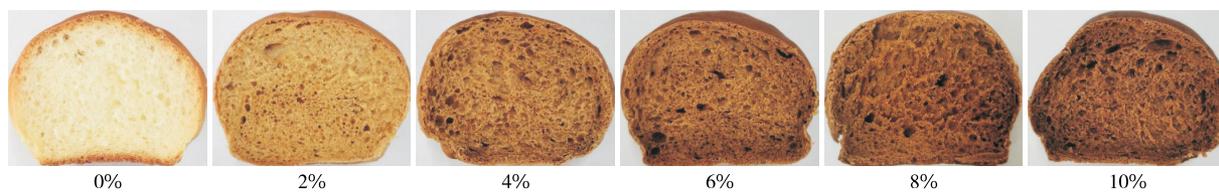


图 8 黄精粉对面包纹理结构的影响

Figure 8 Effect of *Polygonatum sibiricum* powder on texture structure of bread

表 4 黄精粉对面包芯色度的影响<sup>†</sup>

Table 4 Effect of *Polygonatum sibiricum* powder on bread core color

黄精粉添加量/%	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$\Delta E$
0	81.1±1.71 <sup>a</sup>	-1.08±0.36 <sup>c</sup>	16.12±0.29 <sup>d</sup>	—
2	54.5±0.34 <sup>b</sup>	5.74±0.14 <sup>b</sup>	28.54±1.51 <sup>a</sup>	30.77±2.03 <sup>c</sup>
4	49.1±0.59 <sup>c</sup>	9.90±0.75 <sup>a</sup>	28.10±0.76 <sup>ab</sup>	35.84±1.93 <sup>b</sup>
6	40.3±0.65 <sup>d</sup>	9.95±0.14 <sup>a</sup>	24.32±2.01 <sup>c</sup>	43.05±2.71 <sup>a</sup>
8	39.2±0.55 <sup>d</sup>	9.44±0.26 <sup>a</sup>	24.16±3.12 <sup>c</sup>	44.07±1.22 <sup>a</sup>
10	38.7±0.28 <sup>d</sup>	10.39±0.69 <sup>a</sup>	25.46±0.41 <sup>abc</sup>	44.90±2.00 <sup>a</sup>

<sup>†</sup> 同列字母不同表示存在显著性差异( $P<0.05$ )。

组。而添加了2%以上的黄精粉后,面包比容随着黄精粉的增加而显著下降。这可能是因为膳食纤维的存在干扰了面筋网络的形成,从而导致比容降低,且膳食纤维对比容的负面影响逐渐大于多糖对比容的正面影响。所以从比容上看,黄精粉添加量在2%~8%较为适宜。

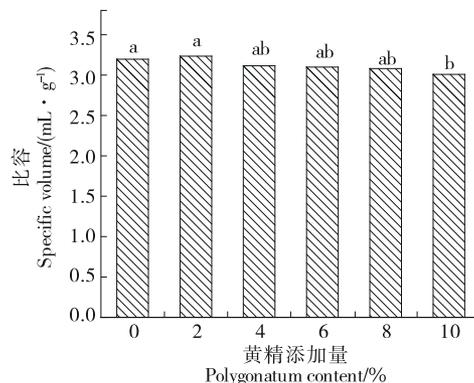
2.9.4 面包质构 由表5可知,添加黄精粉的面包硬度、胶着性和咀嚼性显著增加。面包硬度、胶着性和咀嚼性增加在一定程度上降低了面包的感官品质,这可能与黄精粉中的膳食纤维有关,膳食纤维含量与面包加工操作性呈负相关,从而使面包的适口性变差。黄精粉添加量为2%时,面包弹性较大,继续添加黄精粉,面包弹性降低,伴随内聚性略有降低。黄精粉添加量为2%~6%时,面包的品质尚可接受;但如果继续添加黄精粉,则会导致

表 5 黄精粉对面包质构的影响<sup>†</sup>

Table 5 Effect of *Polygonatu sibiricum* powder on bread texture

黄精添加量/%	硬度/N	弹性/mm	咀嚼性/mJ	内聚性	胶着性
0	1.65±0.26 <sup>d</sup>	9.07±0.11 <sup>b</sup>	12.20±2.15 <sup>c</sup>	0.74±0.01 <sup>a</sup>	125.0±16.9 <sup>c</sup>
2	1.90±0.30 <sup>cd</sup>	14.24±4.76 <sup>a</sup>	14.10±1.13 <sup>bc</sup>	0.72±0.03 <sup>a</sup>	138.5±16.2 <sup>c</sup>
4	2.12±0.20 <sup>c</sup>	9.14±0.18 <sup>b</sup>	16.35±1.06 <sup>bc</sup>	0.71±0.03 <sup>a</sup>	165.7±29.7 <sup>c</sup>
6	2.37±0.03 <sup>bc</sup>	9.14±0.14 <sup>b</sup>	18.13±5.08 <sup>bc</sup>	0.70±0.03 <sup>a</sup>	171.0±12.7 <sup>c</sup>
8	2.64±0.05 <sup>b</sup>	9.11±0.02 <sup>b</sup>	20.60±0.57 <sup>b</sup>	0.67±0.02 <sup>ab</sup>	222.0±1.4 <sup>b</sup>
10	3.51±0.02 <sup>a</sup>	8.84±0.24 <sup>b</sup>	30.35±0.78 <sup>a</sup>	0.61±0.11 <sup>b</sup>	303.5±19.1 <sup>a</sup>

<sup>†</sup> 同列字母不同表示存在显著性差异( $P<0.05$ )。



字母不同表示存在显著性差异( $P<0.05$ )

图 9 黄精粉对面包比容的影响

Figure 9 Effect of *Polygonatum sibiricum* powder on specific volume of bread

面包的感官品质下降。

2.9.5 面包感官品质 图10显示,当黄精粉添加量在2%~6%时,面包的外观、质地、口感风味和整体接受度较高,产品特征较为理想;黄精粉添加量超过6%时,面包感官评分降低,特别是面包质地和口感较差,出现明显纤维粗糙口感,导致评价质量较低。添加黄精粉增加了面包的风味,但是过多的黄精粉会导致外观、质地和口感发生劣变。

### 3 结论

黄精粉的添加能提高面包的保健功能,但也改变了面团特性与面包烘焙品质。黄精粉造成淀粉糊化温度升

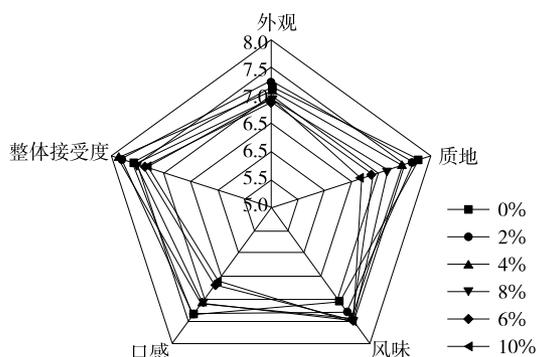


图10 黄精粉对面包感官评定的影响

Figure 10 Effect of *Polygonatum sibiricum* powder on sensory evaluation of bread

高,混合粉黏度降低,降低了淀粉回生值,使其老化速度变慢。黄精粉的加入使湿面筋和二硫键含量降低,影响了面筋蛋白二级结构,使面筋蛋白无规卷曲结构含量增加,弱化了面筋的网状结构,使面包烘烤质量下降,但对提高面包的抗老化能力有一定作用,黄精粉改善了面包的风味,使面包颜色变深,硬度增大,口感变差。黄精粉添加量在2%~6%为宜,此时对面包比容影响较小,硬度也在可接受范围之内,感官品质较好,但继续增加黄精粉的量会降低面包的感官品质。黄精面包在未来的研究中可以通过优化配方来提高烘焙品质。

#### 参考文献

- [1] BETORET E, ROSELL C M. Enrichment of bread with fruits and vegetables: trends and strategies to increase functionality[J]. *Cereal Chemistry*, 2020, 97(1): 9-19.
- [2] LIU X, LU K, YU J L, et al. Effect of purple yam flour substitution for wheat flour on in vitro starch digestibility of wheat bread[J]. *Food Chemistry*, 2019, 284: 118-124.
- [3] XU X J, LUO Z G, YANG Q Y, et al. Effect of quinoa flour on baking performance, antioxidant properties and digestibility of wheat bread[J]. *Food Chemistry*, 2019, 294: 87-95.
- [4] 何兆位, 刘雄, 赵天天, 等. 紫薯粉对面粉流变学及糊化特性的影响[J]. *食品与机械*, 2017, 33(8): 6-10.  
HE Z W, LIU X, ZHAO T T, et al. The influence of purple potato starch on bread flour rheology properties and gelatinization characteristics[J]. *Food & Machinery*, 2017, 33(8): 6-10.
- [5] 陈书明, 刘明娣, 陈玮, 等. 超微杜仲粉对面包品质的影响[J]. *河南科技大学学报(自然科学版)*, 2021, 42(5): 88-92.  
CHEN S M, LIU M D, CHEN W, et al. Effect of ultrafine *Eucommia ulmoides* powder on bread quality[J]. *Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science)*, 2021, 42(5): 88-92.
- [6] SWIECA M, GAWLIK-DZIKI U, SECZYK L, et al. Interactions of green coffee bean phenolics with wheat bread matrix in a model of simulated in vitro digestion[J]. *Food Chemistry*, 2018, 258: 301-307.
- [7] MA S, WANG Z, LIU H M, et al. Supplementation of wheat flour products with wheat bran dietary fiber: purpose, mechanisms, and challenges[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2022, 123: 281-289.
- [8] MILLAR K A, BARRY-RYAN C, BURKE R, et al. Dough properties and baking characteristics of white bread, as affected by addition of raw, germinated and toasted pea flour[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2019, 56: 1-11.
- [9] URIBE-WANDURRAGE Z N, IGUAL M, GAECIA-SEGOVIA P, et al. Effect of microalgae addition on mineral content, colour and mechanical properties of breadsticks[J]. *Food & Function*, 2019, 10(8): 4 685-4 692.
- [10] 李嘉仪, 谭莹宇, 邹金浩, 等. 百合粉添加量对面团特性及面包品质的影响[J]. *食品与机械*, 2020, 36(1): 198-203.  
LI J Y, TAN X Y, ZOU J H, et al. Effect of wheat flour substitution with lily powder on properties of dough and quality of bread[J]. *Food & Machinery*, 2020, 36(1): 198-203.
- [11] 罗登林, 赵影, 徐宝成, 等. 天然菊粉对面团发酵流变学和面包品质的影响[J]. *食品科学*, 2018, 39(6): 26-31.  
LUO D L, ZHAO Y, XU B H, et al. Effect of natural inulin on dough rheological properties and bread quality[J]. *Food Science*, 2018, 39(6): 26-31.
- [12] CUI X W, WANG S Y, CAO H, et al. A review: the bioactivities and pharmacological applications of polygonatum sibiricum polysaccharides[J]. *Molecules*, 2018, 23(5): 1 170.
- [13] GONG H, GAN X N, LI Y Z, et al. Review on the genus *Polygonatum* polysaccharides: extraction, purification, structural characteristics and bioactivities[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 229: 909-930.
- [14] LIU T, WU L, WANG D, et al. Role of reactive oxygen species-mediated MAPK and NF- $\kappa$ B activation in *Polygonatum cyrtonema* lectin-induced apoptosis and autophagy in human lung adenocarcinoma A549 cells[J]. *Journal of Biochemistry*, 2016, 160(6): 315-324.
- [15] ZENG T, TANG Y R, LI B, et al. Chemical characterization of constituents from *Polygonatum cyrtonema* Hua and their cytotoxic and antioxidant evaluation[J]. *Natural Product Research*, 2020, 34(17): 2 482-2 489.
- [16] 孔瑕, 刘娇娇, 李慧, 等. 黄精多糖对高脂血症小鼠脂代谢相关基因mRNA及蛋白表达的影响[J]. *中国中药杂志*, 2018, 43(18): 3 740-3 747.  
KONG X, LIU J J, LI H, et al. Effects of polysaccharide from *Polygonatum sibiricum* on lipid metabolism related mRNA

- and protein expression in hyperlipidemic mice[J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2018, 43(18): 3 740-3 747.
- [17] LI X L, MA R H, ZHANG F, et al. Evolutionary research trend of polygonatum species: a comprehensive account of their transformation from traditional medicines to functional foods [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2023, 63 (19): 3 803-3 820.
- [18] 陆姝余, 马雅鸽, 程清云, 等. 自然发酵滇黄精醇素的工艺优化及功能活性分析[J]. *食品研究与开发*, 2024, 45(10): 135-141.  
LU S Y, MA Y G, CHENG Q Y, et al. Optimization of natural fermentation process and functional activity analysis of polygonatum kingianum Jiaosu[J]. *Food Research and Development*, 2024, 45(10): 135-141.
- [19] 王莹, 李锋涛, 黄美子, 等. 黄精速溶茶酶解工艺条件优化及其抗氧化性[J]. *食品研究与开发*, 2023, 44(1): 139-145.  
WANG Y, LI F T, HUANG M Z, et al. Optimization of enzymatic hydrolysis conditions and antioxidation of *Polygonatum sibiricum* instant tea[J]. *Food Research and Development*, 2023, 44(1): 139-145.
- [20] CHAN K Y, WASSERMAN B P. Direct colorimetric assay of free thiol groups and disulfide bonds in suspensions of solubilized and particulate cereal proteins[J]. *Cereal Chemistry*, 1993, 70(1): 22-26.
- [21] YOUSIF A, NHEPERA D, JOHNSON S. Influence of sorghum flour addition on flat bread in vitro starch digestibility, antioxidant capacity and consumer acceptability [J]. *Food Chemistry*, 2012, 134(2): 880-887.
- [22] VILLARINO C B J, JAYASENA V, COOREY R, et al. The effects of Australian sweet lupin (ASL) variety on physical properties of flours and breads[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2015, 60(1): 435-443.
- [23] 王小媛, 王文静, 丁俊豪, 等. 红枣粉对小麦面团特性以及微观结构的影响[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(9): 30-32.  
WANG X Y, WANG W J, DING J H, et al. Effect of jujube powder on properties and microstructure of wheat dough[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2018, 39(9): 30-32.
- [24] ZHANG Y, HONG T T, YU W J, et al. Structural, thermal and rheological properties of gluten dough: comparative changes by dextran, weak acidification and their combination[J]. *Food Chemistry*, 2020, 330: 127154.
- [25] SHOBHA D, JOSHI N, BENERLAL P S. *Spirulina* enriched gluten free quality protein maize (QPM) pasta as functional food[J]. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 2022, 34 (4): 279-288.
- [26] 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 P, LÜ Y G, LI X Q, et al. Effect of *Spirulina* powder on rheological properties and gluten structure of dough[J]. *Food Science*, 2023, 44(14): 63-71.
- [27] FAN L, WANG H P, LI M Y, et al. Impact of wheat bran dietary fiber on gluten aggregation behavior in dough during noodle processing[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 257: 128765.
- [28] ŚWIECA M, GAWLIK-DZIKI U, DZIKI D, et al. The influence of protein-flavonoid interactions on protein digestibility in vitro and the antioxidant quality of breads enriched with onion skin[J]. *Food Chemistry*, 2013, 141(1): 451-458.
- [29] GUO J Y, LIU F, GAN C F, et al. Effects of Konjac glucomannan with different viscosities on the rheological and microstructural properties of dough and the performance of steamed bread[J]. *Food Chemistry*, 2022, 368: 130853.