

海鲜菇对小麦面团及面条品质的影响

马锦霞, 王含冰, 武晓玥, 常明昌, 冯翠萍, 孟俊龙, 程艳芬

(山西农业大学食品科学与工程学院 山西晋中 030801)

摘要:为探究海鲜菇对小麦面团及面条品质的影响,设置4个试验处理:WF(小麦面粉)、WF+1%HM(小麦面粉+1%海鲜菇粉)、WF+5%HM(小麦面粉+5%海鲜菇粉)、WF+10%HM(小麦面粉+10%海鲜菇粉),研究不同海鲜菇粉添加量(以混合粉总量计)对面粉的糊化特性、热力学特性,对面团的流变学特性、色泽、质构特性,以及对面条的蒸煮特性和消化特性的影响。结果表明,随着海鲜菇粉添加量的增加,混合粉的峰值黏度、回生值及衰减值显著降低;与WF相比,混合粉的热力学参数的起始温度(T_0)、峰值温度(T_p)、终止温度(T_c)均显著降低,WF+5%HM处理降低最显著。流变学结果表明,混合粉面团的储能模量(G')、损耗模量(G'')均较WF升高,WF+5%HM处理的 G' 和 G'' 均最高;硬度、咀嚼性从高到低依次均为:WF+1%HM>WF>WF+5%HM>WF+10%HM;与WF相比,混合粉面条的吸水率和溶胀率均下降;消化试验表明海鲜菇粉的加入使面条的葡萄糖释放量减少,WF+10%HM处理的葡萄糖释放量最低。综上所述,海鲜菇粉添加量为5%时面团具有更好的流变学特性及蒸煮特性,更易促进淀粉的糊化,海鲜菇粉添加量为10%时面团更加柔软、易于咀嚼,且抑制淀粉消化的效果最佳。在实际应用中可根据不同需求确定其添加量,使面团及面条的品质能够最大程度得到提高,为新型功能性海鲜菇面制品的开发奠定了基础。

关键词: 海鲜菇; 小麦面团; 流变学特性; 品质; 体外消化

中图分类号: S646.9

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2025)10-189-08

Effects of *Hypsizygus marmoreus* on quality of wheat dough and noodles

MA Jinxia, WANG Hanbing, WU Xiaoyue, CHANG Mingchang, FENG Cuiping, MENG Junlong, CHENG Yanfen

(College of Food Science and Engineering, Shanxi Agricultural University, Jinzhong 030801, Shanxi, China)

Abstract: To investigate the effects of *Hypsizygus marmoreus* (HM) on the quality of wheat dough and noodles, four experimental treatments were set up: WF (wheat flour), WF+1%HM (wheat flour+1% *H. marmoreus* powder), WF+5%HM (wheat flour+5% *H. marmoreus* powder), WF+10%HM (wheat flour+10% *H. marmoreus* powder). In order to study the effects of different addition amounts of *H. marmoreus* powder (calculated based on the total amount of mixed powder) on the gelatinization properties and thermodynamic properties of flour, the rheological properties, color and texture properties of dough, as well as the cooking and digestion properties of noodles. The results show that with the increase of the addition amount of *H. marmoreus* powder, the peak viscosity, rejuvenation value and attenuation value of the mixed powder decrease significantly. Compared with WF, the thermodynamic parameters of the mixed powder, such as the initial temperature, peak temperature, and termination temperature, were significantly reduced, especially in the WF+5%HM treatment. The rheological results show that the energy storage modulus (G') and loss modulus (G'') of the mixed powder dough are higher than those of WF, and the G' and G'' of the WF+5%HM treatment are the highest. Hardness and chewability from high to low are as follows: WF+1%HM>WF>WF+5%HM>WF+10%HM. Compared with WF, the water absorption rate and swelling rate of the mixed powder noodles both decreased. Digestion experiments indicated that the addition of *H. marmoreus* powder reduced the glucose release of noodles, and the glucose release was the lowest when treated with WF+10%HM. In conclusion, when the addition amount of *H. marmoreus* powder is 5%, the dough has better rheological prop-

收稿日期: 2024-11-26; 修回日期: 2025-02-21

基金项目: 山西省现代农业产业技术体系建设专项资金资助(2024CYJSTX09); 山西省基础研究计划项目(20210302123384); 山西省科技成果转化引导专项(202304021301055); 山西省科技重大专项计划“揭榜挂帅”项目(202301140601015)

作者简介: 马锦霞, 女, 在读本科生, 研究方向为食用菌科学。E-mail: 2641765795@qq.com

通信作者: 孟俊龙, 男, 教授, 研究方向为食用菌科学。E-mail: mengjunlongseth@126.com

程艳芬, 女, 副教授, 主要从事食品功能因子的提取及营养代谢调控机制等方面的研究工作。E-mail: cyf2341986@163.com

erties and cooking characteristics, and is more likely to promote the gelatinization of starch. When the addition amount of *H. marmoreus* powder is 10%, the dough is softer, easier to chew, and has the best effect on inhibiting the digestion of starch. In practical applications, the addition amount can be determined according to different needs, enabling the quality of dough and noodles to be improved to the greatest extent, laying a foundation for the development of new functional *H. marmoreus* noodle products.

Key words: *Hypsizygus marmoreus*; Wheat dough; Rheological properties; Quality; *In vitro* digestion

海鲜菇(*Hypsizygus marmoreus*, HM)隶属层菌纲伞菌目白蘑科玉蕈属,含有丰富的营养物质和生物活性化合物(如多糖、酚类化合物和萜类化合物),具有抗氧化和抗炎的功效^[1]。因其独特的口感与较高的营养价值备受消费者喜爱。目前,海鲜菇以鲜食为主^[2],针对海鲜菇加工的研究主要集中在酱料、调味汤包、酸奶和风味饮料等方面^[3],而对海鲜菇与主食方面相关的研究却鲜有报道。

面条是我国居民重要的主食之一,其加工制作所需的小麦面粉(wheat flour, WF)为世界人口提供了超过20%的热量^[4]。纯小麦面粉制成的面条口感单一,已有研究表明添加食用菌粉可改善面团的流变学、质构、糊化等加工特性,从而赋予面条丰富的口感。Zhang等^[5]研究表明添加银耳粉有利于改善面团的黏弹性,能显著提高面条的硬度和咀嚼性,延缓淀粉老化,使煮熟的面条不易变坨。王无霞等^[6]研究表明,添加鳞杯伞粉、黑木耳粉的面团硬度均增加,利于面团成型,且可有效抑制面团回生,延长面条保存期。纯小麦面条血糖生成指数(GI值)较高,不适合高血糖及减肥人群食用。研究表明,添加香菇粉的面条葡萄糖释放量显著降低^[7],添加猴头菇粉的面条淀粉水解率下降^[8],表明添加食用菌粉可在一定程度上降低GI值,适宜高血糖及肥胖人群食用。

目前,我国海鲜菇的产量日益增加,但针对海鲜菇的添加对小麦面团及面条加工特性及消化特性的研究较少。因此,本试验将海鲜菇粉以不同添加量1%、5%、10%加入小麦面粉中,研究海鲜菇粉对面粉糊化特性、热力学特性,对面团流变学特性、色泽、质构及面条蒸煮特性的影响,并模拟口腔、胃、肠消化,研究其对面条消化特性的影响,旨在提高面团及面条的品质,为海鲜菇制品的开发提供理论依据。

1 材料与amp;方法

1.1 材料

海鲜菇由山西农业大学食用菌团队提供;小麦面粉购自金沙河面业集团有限公司; α -淀粉酶(14 U·mg⁻¹)、胰酶(BR)(1:4000)购自上海源叶生

物公司;胃蛋白酶(1:10 000)、猪胆盐(BR)购自北京索莱宝科技有限公司。

1.2 方法

试验于2023年8—12月在山西农业大学食用菌实验室进行。将新鲜的海鲜菇均匀平铺,放置在鼓风干燥箱中进行干燥,温度为55℃,时间为48 h。干燥后用粉碎机破碎并过100目筛,密封保存备用。

1.2.1 混合粉面团及面条制备 称取一定质量的小麦面粉,分别添加0%、1%、5%、10%的海鲜菇粉(以混合粉总量计),分别记为WF、WF+1%HM、WF+5%HM、WF+10%HM处理,充分混匀制成混合粉,然后按照混合粉、水质量比为100:55揉成面团,静置30 min备用。取一部分面团用压面机(龙口复兴机械有限公司)在辊距为4.0 mm处复合压延4次,随后反复压片直至面片厚度在1 mm左右时切条备用。

1.2.2 小麦面粉及海鲜菇粉基本成分测定 参照GB 5009.3—2016^[9]测定小麦面粉及海鲜菇粉的水分含量,参照GB 5009.4—2016^[10]测定小麦面粉及海鲜菇粉的灰分含量。采用苯酚-硫酸法^[11]测定小麦面粉及海鲜菇粉中多糖含量;采用考马斯亮蓝染色法测定蛋白质含量^[12]。

1.2.3 面粉糊化特性测定 用RVA快速黏度分析仪(RAPID-20型,上海保圣实业发展有限公司)测定海鲜菇粉对小麦面粉糊化特性的影响。

1.2.4 面粉热力学特性测定 准确称量5.0 mg混合粉于铝制坩埚中,用压盖机密封。以空坩埚为对照,采用差示扫描量热仪(DSC,梅特勒-托利多公司)测定样品糊化过程中的起始温度(T_0)、峰值温度(T_p)、终止温度(T_c)及焓值(ΔH)。坩埚以10℃·min⁻¹的升温速率从20℃加热至160℃,以氮气为保护气,流速为50 mL·min⁻¹。

1.2.5 面团流变学特性测定 从面团中心处取适量样品置于流变仪(MCR102型,奥地利安东帕有限公司)中,选择平板转子(PP50),平板间距2 mm。样品静止3 min后,进行测定。

(1)静态扫描。对面团样品进行静态扫描,并分析面团黏度随剪切速率的变化情况。扫描条件:

温度 25 °C, 剪切速率范围 0.1~100 s⁻¹。

(2) 频率扫描。首先通过应变扫描测试, 确定面团样品的线性黏弹区, 并选择合适的应变值。然后对面团样品进行动态频率扫描。扫描条件: 扫描频率范围 0.1~10 Hz, 应变值 0.1%, 温度 25 °C; 获得储能模量(G')、损耗模量(G'')、损耗系数($\tan \delta$)、复合剪切模量(G^*)及复合黏度(η^*)。

采用幂律方程对模量-频率曲线进行非线性拟合^[13], 拟合方程如下:

$$G' = G_0' \times f^{n'}$$

$$G'' = G_0'' \times f^{n''}$$

式中 G_0' 和 G_0'' 分别是 1 Hz 时的储能模量和损耗模量, n' 和 n'' (均为无量纲) 表示两个模量的 f 依赖性。

(3) 时间扫描。对面团样品进行时间扫描, 并分析面团储能模量(G')随剪切时间的变化情况。扫描条件: 温度 90 °C, 剪切时间 600 s。

(4) 温度扫描。对面团样品进行温度扫描, 并分析面团储能模量(G')和损耗模量(G'')随温度的变化情况。扫描条件: 温度扫描范围 4~100 °C, 升温速率 5 °C·min⁻¹。

1.2.6 面团色泽测定 利用色差仪[CM-5 型, 柯尼卡美能达(中国)投资有限公司]对制备好的面团压片进行测量, 记录 L^* (亮度)、 a^* (红绿值)、 b^* (黄蓝值)的数值。 ΔE 反映颜色总体差异。样品的色差 ΔE 、白值(WI)计算公式如下:

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

式中, ΔL^* 、 Δa^* 和 Δb^* 为样品与标准数值 ($L^*=100, a^*=0$ 和 $b^*=0$) 间的差值。

$$WI = 100 - [(100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}]^{1/2}$$

1.2.7 面团质构特性测定 将面团制成长宽高均为 1 cm 的正方体煮熟, 采用 TMS-Touch 质构仪(美国 FTC 公司)进行全质构分析(TPA)。探头类型: P/5 型铝制柱状探头; TPA 参数设置: 感应力量程 100 N; 起始高度 33 mm; 起始力 0.3 N; 挤压距离 5 mm; 挤压时间 3 s; 测试速率 60 mm·s⁻¹, 测后速率 200 mm·s⁻¹; 触发力 0.3 N。

1.2.8 面条蒸煮特性测定 (1) 最佳蒸煮时间: 任意取长度为 5 cm 的面条 20 根, 放入沸水中煮, 开始计时, 一定时间后每隔 1 min 取一根面条, 挤压面条并观察其横切面中间的白芯, 白芯刚好消失的时间即为面条的最佳蒸煮时间。

(2) 吸水率与溶胀率: 在搪瓷杯中加入约 200 mL 水, 煮至沸腾, 加入 5.0 g 面条, 煮至最佳蒸煮时间, 捞出后用冷水冲洗, 沥干 30 s, 将煮好的面条烘干至

恒质量, 计算公式如下:

$$\text{吸水率}/\% = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100;$$

$$\text{溶胀率}/\% = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100。$$

式中: m_0 为煮前面条质量(g); m_1 为煮后面条质量(g); m_2 为烘干后面条质量(g)。

1.2.9 面条消化特性测定 取煮熟的面条 5.0 g, 切碎置于 50 mL 离心管中, 将 65 mg α -淀粉酶溶于 50 mL 浓度为 1 mmol·L⁻¹ 的 CaCl₂ 溶液并加入离心管中, 置于 37 °C 恒温水浴锅中模拟口腔消化 2 min。经口腔消化后, 下一步加入 4 mL 胃蛋白酶, 并用盐酸调节 pH 至 3, 37 °C 条件下模拟胃消化阶段 120 min, 随后加入 NaOH 将消化液 pH 调为中性后胃消化阶段结束。加入胰酶(2 mg·mL⁻¹)与猪胆盐(12 mg·mL⁻¹)等体积混合液 5 mL, 模拟小肠消化, 并在小肠消化阶段的 0、10、20、40、60、90、120、180 min 分别吸取 1 mL 酶解物于 15 mL 试管中, 加入配制好的 3,5-二硝基水杨酸溶液 2 mL, 补蒸馏水至 15 mL 刻度线, 沸水浴 6 min, 待其冷却后在 540 nm 波长下测定吸光度值。以葡萄糖作为标准品绘制标准曲线: $y=0.1597x-0.1598, R^2=0.9991$, 将所得吸光值带入标准曲线计算面条中的葡萄糖含量, 用葡萄糖释放量代表淀粉体外消化特性。

1.3 数据处理

所有试验至少 3 次重复。采用 Excel 2016 对试验数据进行整理统计, 采用 SPSS 26.0 对数据进行单因素 ANOVA 检验, 差异显著性水平为 $P<0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 小麦面粉及海鲜菇粉的基本成分含量

小麦面粉及海鲜菇粉中水分、灰分、多糖、蛋白质含量见表 1。与小麦面粉相比, 海鲜菇粉有较高的蛋白质和灰分含量, 但水分及多糖含量相对较低。

表 1 小麦面粉及海鲜菇粉基本成分含量

Table 1 The basic component contents of wheat flour and *Hypsizygus marmoreus* powder %

组别 Group	w(水分) Hydration content	w(灰分) Ash content	w(多糖) Polysaccharide content	w(蛋白质) Protein content
小麦面粉 WF	12.00	0.44	5.81	1.73
海鲜菇粉 HM	6.93	7.92	4.69	2.85

2.2 不同海鲜菇粉添加量对小麦面粉糊化特性的影响

不同处理的糊化特性结果如表 2 所示。与 WF 相比, 混合粉的峰值黏度、最终黏度均显著降低, 其

表2 不同处理混合粉的糊化指标

Table 2 Gelatinization index of mixed powder with different treatments

处理 Treatment	峰值黏度 Peak viscosity/cP	糊化温度 Pasting temperature/°C	回生值 Setback/cP	衰减值 Breakdown/cP	谷值黏度 Trough viscosity/cP	最终黏度 Final viscosity/cP
WF	2 596.99±19.36 a	78.31±3.13 a	1 463.95±27.93 a	1 537.36±40.81 a	1 077.79±12.24 a	2 573.58±29.34 a
WF+1%HM	2 391.52±9.36 b	90.61±0.15 a	1 224.39±30.78 b	1 225.22±31.61 b	813.47±4.31 b	2 390.40±10.48 b
WF+5%HM	2 245.64±20.30 c	78.29±9.50 a	1 024.48±28.27 c	1 042.59±14.54 c	1 104.42±7.13 a	1 950.09±43.42 d
WF+10%HM	1 646.32±47.40 d	81.34±3.32 a	912.86±39.97 c	914.47±39.88 d	1 136.19±37.06 a	2 110.05±16.03 c

注：同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicated significant difference($P<0.05$)between different treatments. The same below.

中 WF+10%HM 处理的峰值黏度降幅最大,WF+5% HM 处理的最终黏度降幅最大;糊化温度无显著差异。混合粉的衰减值和回生值均较 WF 显著降低,WF+10%HM 处理对淀粉结构稳定性的提升效果最佳。这表明小麦面粉中添加海鲜菇粉能有效缓解加工对淀粉颗粒的损伤,保持结构稳定性,并抑制淀粉的短期回生,10%添加量效果最优。

2.3 不同海鲜菇粉添加量对小麦面粉热力学特性的影响

如图1所示,WF和混合粉的DSC曲线均有一个放热峰,趋势基本一致。具体来看,WF+1%HM、WF+5%HM、WF+10%HM处理的峰值温度较WF分别降低22.42、24.24、10.88 °C。由表3可知, T_0 、 T_p 、 T_c 的排序均为:WF>WF+10%HM>WF+1%

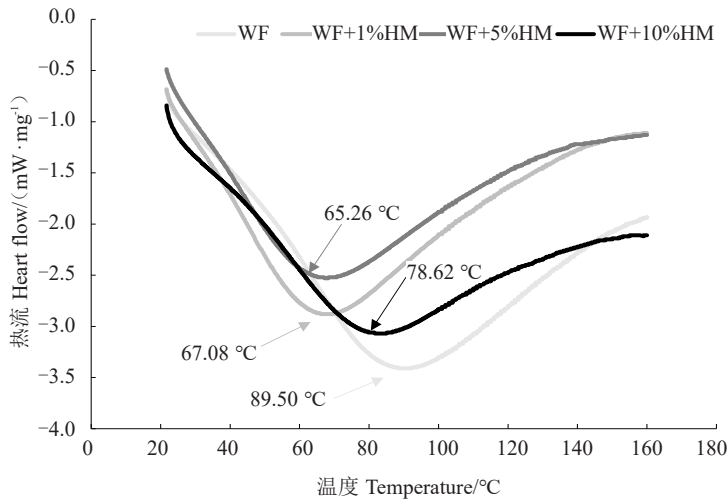


图1 不同处理混合粉的DSC曲线图

Fig. 1 DSC curve of mixed powders with different treatments

HM>WF+5%HM,混合粉的 T_0 、 T_p 、 T_c 均显著低于WF,其中WF+5%HM处理较WF更易糊化。此外,混合粉的 ΔH 均较WF显著降低,WF+10%HM处理降幅最大。这表明WF+10%HM处理在淀粉糊化初始阶段释放更多热量,适量添加海鲜菇粉可促进小麦面粉中淀粉的糊化。

2.4 不同海鲜菇粉添加量对小麦面团流变学特性的影响

2.4.1 不同海鲜菇粉添加量对小麦面团黏度的影响 如图2所示,所有处理面团的黏度均随剪切速率增大而降低,呈现剪切变稀特性。面团结构在静止时能阻碍淀粉分子运动,维持高黏度;受剪切应力作用时,缠结在网络结构中的链分子被拉直解开,黏度下降;当剪切速率超过 10 s^{-1} 时,黏度趋于稳定。

2.4.2 基于频率扫描的不同海鲜菇粉添加量对小麦面团流变学特性的影响 图3为不同海鲜菇粉添加量对小麦面团 G' 和 G'' 的影响。随扫描频率的增加, G' 、 G'' 均呈上升趋势,且 G' 始终大于 G'' ,表明面团都表现出类似固体的弹性特性。混合粉面团的 G' 和 G'' 均较WF高,且WF+5%HM处理的 G' 和 G'' 均最高,表明5%海鲜菇粉添加量时面团黏弹性最好。如图4所示,各处理面团的 $\tan \delta$ 均小于1,表明弹性特性优于黏性特性。高频区(3~10 Hz)模拟加工快速变形时,混合粉面团的 $\tan \delta$ 均较WF降低,且随海鲜菇粉添加量的增加呈下降趋势,其中WF+10%HM处理的 $\tan \delta$ 值最小。说明海鲜菇粉对 G' 的改善效果强于 G'' ,且10%添加量时对 G' 的改善效果更好。

如表4所示,所有处理的 n' 、 n'' 值均介于0~1且

表3 不同处理混合粉的热力学参数
Table 3 Thermodynamic parameters of mixed powders with different treatments

处理 Treatment	$T_g/^\circ\text{C}$	$T_g/^\circ\text{C}$	$T_g/^\circ\text{C}$	$\Delta H/(\text{J}\cdot\text{g}^{-1})$
WF	68.47±3.45 a	89.50±0.32 a	117.14±5.79 a	-16.10±3.88 a
WF+1% HM	46.46±2.32 c	67.08±0.00 c	95.37±3.86 bc	-31.40±2.85 c
WF+5% HM	44.22±1.09 c	65.26±1.30 d	92.09±6.02 c	-25.48±1.11 b
WF+10% HM	53.90±1.23 b	78.62±0.83 b	105.38±2.67 b	-38.39±1.04 d

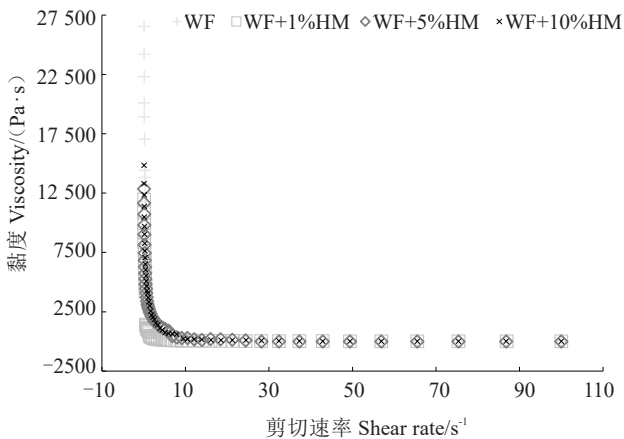


图2 不同处理小麦面团的黏度随剪切速率变化的关系
Fig. 2 The relationship between the viscosity of wheat dough with different treatments and shear rate

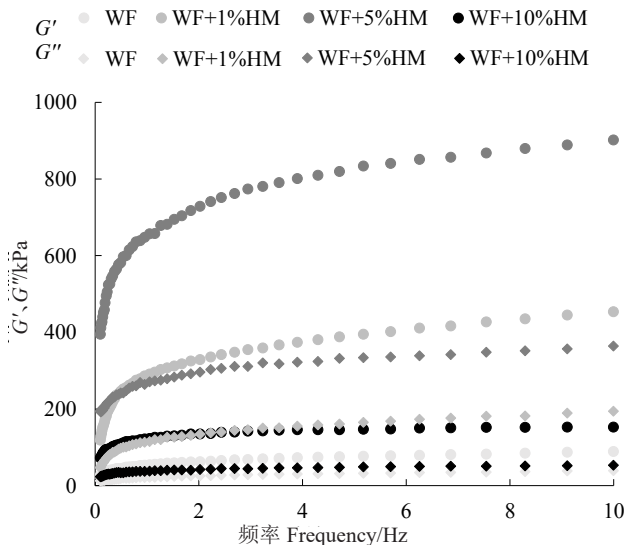


图3 不同处理小麦面团的储能模量、损耗模量随频率变化的关系
Fig. 3 The relationship between the storage modulus and loss modulus of wheat dough with different treatments and frequency

相近,呈弱凝胶特性^[13]。混合粉面团的 $G_0'-G_0''$ 均高于 WF, 其中 WF+5%HM 处理增幅最大。以 1 Hz 的黏弹性参数作比较, 面团均以弹性为主 ($G'>$

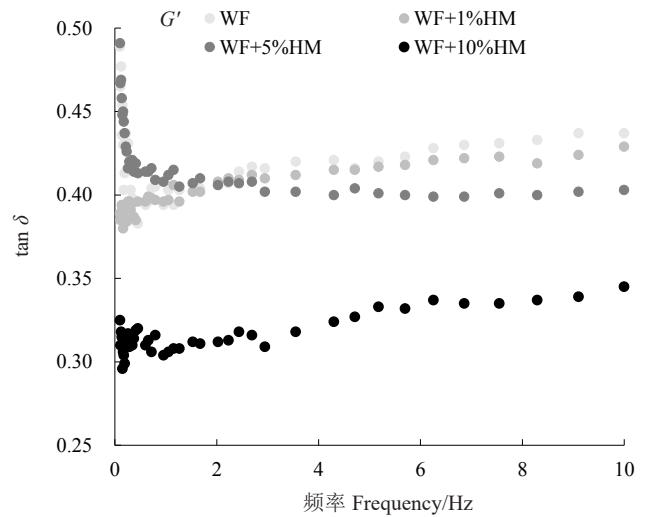


图4 不同处理小麦面团的损耗系数随频率变化的关系
Fig. 4 The relationship between the loss coefficient of wheat dough with different treatments and frequency

G'')。 G^* 、 η^* 排序均为: WF+5%HM > WF+1%HM > WF > WF+10%HM, 可能是少量海鲜菇粉可增强分子间作用, 但过量添加会阻碍结构填充, 削弱淀粉颗粒间的相互作用, 从而降低面团的刚性和硬度。

2.4.3 基于时间扫描的不同海鲜菇粉添加量对小麦面团流变学特性的影响 由图 5 可知, 在模拟高温加工条件(如蒸煮)下面团的 G' 均随时间的延长而升高, G' 排序为: WF+10%HM > WF > WF+1%HM > WF+5%HM。其中 WF+1%HM、WF+5%HM 处理的 G' 低于 WF, 表明添加适量海鲜菇粉可有效延缓面制品回生, 与 RVA 试验结果一致。

2.4.4 基于温度扫描的不同海鲜菇粉添加量对小麦面团流变学特性的影响 图 6 所示, 在 4~100 °C 范围内 $G'>G''$, 表明面团以弹性行为为主。4~35 °C 时, G' 和 G'' 稳定, 表明面团的结构稳定性较好; 温度高于 35 °C 后, G' 和 G'' 逐渐上升且出现峰值。温度超过 60 °C 时, WF+5%HM 和 WF+10%HM 处理的 G' 和 G'' 均低于 WF, 表明适量添加海鲜菇粉能降低小麦面团高温下的黏弹性。

2.5 不同海鲜菇粉添加量对小麦面团色泽的影响

如表 5 所示, 与 WF 相比, 混合粉面团的 L^* 、 W' 均显著降低; a^* 和 b^* 均显著升高。 L^* 随海鲜菇粉添加量的增加而降低, 呈负相关; a^* 和 b^* 随添加量增加而增大, 因为海鲜菇粉本身是浅黄褐色的。 ΔE 随海鲜菇粉添加比例的增加而增大, ΔE 越大, 表明与 WF 颜色差异更大。 综上, 海鲜菇粉对面条颜色有显著影响。

2.6 不同海鲜菇粉添加量对小麦面团质构特性的影响

由表 6 可知, 与 WF 相比, WF+1%HM 处理的

表4 在25℃时进行的频率扫描测试中获得的的处理小麦面团的凝胶特性参数和黏弹性参数

Table 4 Gel property parameters and viscoelastic parameters of wheat dough with different treatments obtained by frequency scanning test at 25 °C

处理 Treatment	凝胶特性参数 Gel properties parameters			黏弹性参数 Viscoelastic parameters				
	n'	n''	$G_0'-G_0''/kPa$	G'/kPa	G''/kPa	G^*/kPa	$\eta^*/(kPa \cdot s)$	$\tan \delta$
WF	0.30±0.06 a	0.30±0.05 a	48.74±14.85 a	103.67±54.15 b	54.93±40.48 b	117.46±66.55 b	19.62±11.14 b	0.49±0.12 a
WF+1%HM	0.29±0.05 a	0.30±0.04 a	83.38±81.11 a	140.66±131.19 ab	57.28±50.10 b	152.29±140.54 b	25.37±23.40 b	0.44±0.07 a
WF+5%HM	0.20±0.03 a	0.15±0.01 b	205.33±167.06 a	398.67±239.67 a	193.33±73.66 a	444.33±247.46 a	74.20±41.38 a	0.54±0.14 a
WF+10%HM	0.23±0.11 a	0.22±0.09 ab	50.01±34.56 a	75.52±45.63 b	25.51±11.09 b	79.65±46.42 b	13.30±7.75 b	0.37±0.10 a

注： n' 和 n'' 表示两个模量的 f 依赖性； $G_0'-G_0''$ ，凝胶强度； G' ，1Hz时的储能模量； G'' ，1Hz时的损耗模量； G^* ，1Hz时的复合剪切模量； η^* ，1Hz时的复合黏度； $\tan \delta$ ，1Hz时的损耗系数。

Note: n' and n'' represent the f -dependencies of two moduli; $G_0'-G_0''$, Gel strength; G' , Energy storage modulus at 1 Hz; G'' , Loss modulus at 1 Hz; G^* , Complex modulus at 1 Hz; η^* , Complex viscosity at 1 Hz; $\tan \delta$, Loss coefficient at 1 Hz.

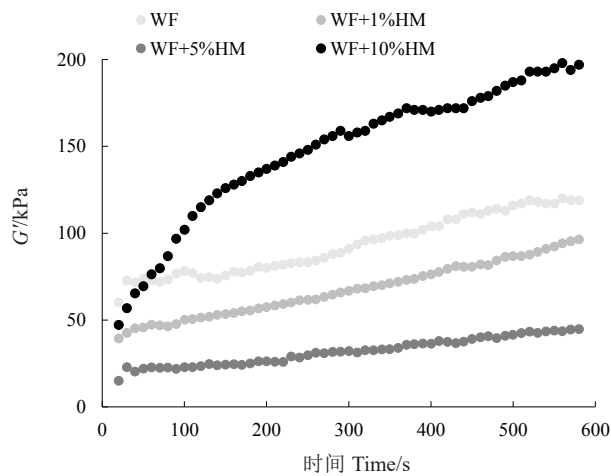


图5 不同处理小麦面团的储能模量随时间变化的关系
Fig. 5 The relationship between the stored modulus of wheat dough with different treatments and time

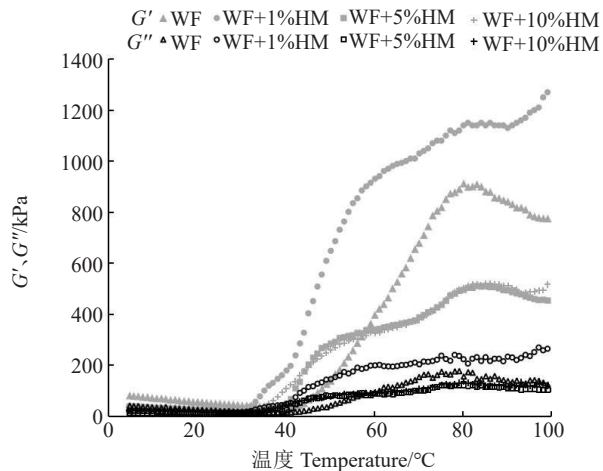


图6 不同处理小麦面团的储能模量、损耗模量随温度变化的关系
Fig. 6 The relationship between the storage modulus and loss modulus of wheat dough treated differently and temperature

硬度、咀嚼性、弹性均显著增加，面团更坚硬耐嚼；WF+5%HM和WF+10%HM处理的硬度和咀嚼性

表5 不同处理小麦面条的色泽特征

Table 5 Color properties of wheat noodles with different treatments

处理 Treatment	L^*	a^*	b^*	ΔE	WI
WF	67.913±1.490 a	0.067±0.050 d	11.577±0.292 d		65.888 a
WF+1%HM	62.327±1.113 b	1.037±0.186 c	15.580±0.668 c	6.941	59.217 b
WF+5%HM	57.390±0.094 c	2.973±0.180 b	20.147±1.021 b	13.879	52.764 c
WF+10%HM	57.200±0.732 c	4.500±0.445 a	22.007±0.465 a	15.595	51.661 c

显著降低，面团更柔软易嚼，弹性与WF无显著差异。与WF相比，混合粉面团的黏附性均增强，WF+1%HM处理增幅最大，与WF差异显著。海鲜菇粉添加量不同会改变面制品质地，需根据需求选择适宜添加量。

2.7 不同海鲜菇粉添加量对小麦面条蒸煮特性的影响

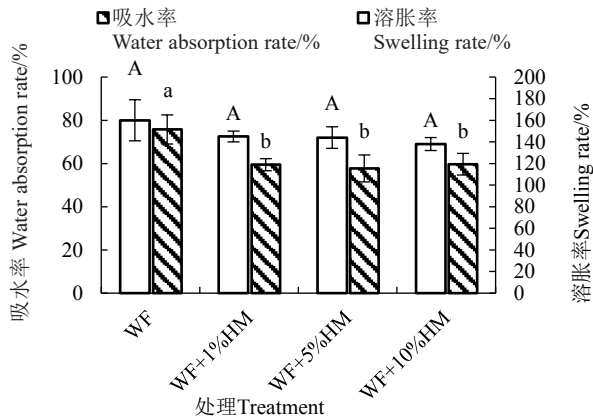
由图7可知，加入海鲜菇粉使面条的吸水率均显著下降，WF+1%HM、WF+5%HM、WF+10%HM处理较WF的吸水率分别显著降低16.31百分点、18.04百分点、16.08百分点，WF+5%HM处理的改善效果最佳。与WF相比，混合粉面条的溶胀率均降低，但不同处理间差异不显著，其中WF+10%HM处理下降幅度最大。结果表明，适宜添加海鲜菇粉有利于保持面条的分散状态、防止变坨，延长保存期。

2.8 不同海鲜菇粉添加量对小麦面条消化特性的影响

图8所示的不同处理面条的葡萄糖释放量曲线趋势相似，葡萄糖释放量在前20min内快速增加，在20~90min内稳定增加，90~180min趋于平缓。最终葡萄糖释放量排序为：WF>WF+5%

表6 不同处理小麦面团的质构特性
Table 6 Texture properties of wheat dough with different treatments

处理 Treatment	硬度 Hardness/N	黏附性 Adhesiveness/mJ	内聚性 Cohesiveness	弹性 Springiness/mm	胶黏性 Gumminess/N	咀嚼性 Chewiness/mJ
WF	11.57±0.23 b	1.26±0.37 c	0.45±0.00 b	4.42±0.34 b	4.50±0.07 b	25.02±0.77 b
WF+1% HM	12.59±0.36 a	3.99±0.48 a	0.55±0.00 a	5.24±0.07 a	7.16±0.46 a	31.00±0.89 a
WF+5% HM	9.96±0.02 c	1.38±0.24 bc	0.37±0.00 c	4.58±0.16 b	3.68±0.14 c	16.75±0.48 c
WF+10% HM	9.46±0.41 c	2.06±0.07 b	0.37±0.01 c	4.12±0.07 b	3.53±0.16 c	13.62±0.88 d



注: 图中大写字母表示不同处理间溶胀率差异显著 ($P<0.05$); 不同小写字母表示不同处理间吸水率差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Different uppercase letters in the figure indicate significant differences in the swelling rate among different treatments ($P<0.05$); different lowercase letters indicate significant differences in the water absorption rate among different treatments ($P<0.05$).

图7 不同处理小麦面条的吸水率和溶胀率

Fig. 7 Water absorption of wheat noodles with different treatments and swelling rate

HM>WF+1%HM>WF+10%HM, 其中 WF+10% HM 处理较 WF 降幅最大。结果表明, 添加海鲜菇粉能有效抑制小麦面条中淀粉分解, 降低葡萄糖释放量和增长速度。

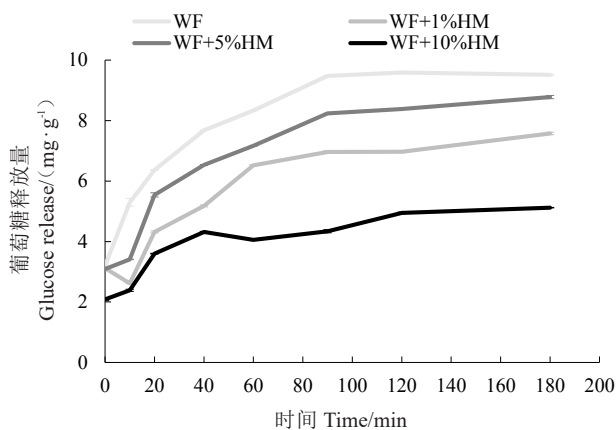


图8 不同处理小麦面条的葡萄糖释放量曲线

Fig. 8 Glucose release curve of wheat noodles with different treatments

3 讨论与结论

本研究系统分析了海鲜菇粉对小麦面团及面条品质的影响。在糊化特性方面, 与纯小麦面粉相比, 添加海鲜菇粉均显著降低面粉的衰减值和回生值, 面制品的保存期延长, 这与 Tian 等^[14]研究添加稻壳低聚木糖面团的糊化特性时所得结果一致。DSC 试验与 RVA 试验测得的糊化温度差异源于检测原理不同, DSC 对样品放热反应的感应更灵敏, 能够感知淀粉糊化初始阶段的放热, 所以测得的糊化温度较低^[15]。流变学特性方面, 混合粉面团的黏弹性始终大于 WF 面团, 其中 WF+5%HM 处理面团的黏弹性最好, 且凝胶强度最大, 这可能是海鲜菇粉使面团分子间相互作用的程度增加, 凝胶强度增大^[16], 通过增强面筋网络结构的有序性和紧凑度, 提高了 G' 和 G'' ^[17]。淀粉的回生在流变学中表现为 G' 升高^[18], 时间扫描结果表明, WF+1%HM 和 WF+5%HM 处理均比 WF 面团的 G' 值低, 可能是海鲜菇粉会干扰淀粉的有序排列, 从而限制淀粉(尤其是直链淀粉)的交叉网络结构^[19], 可有效延缓面制品的回生。温度扫描结果表明, 所有处理小麦面团均以弹性行为为主, Ramirez-brewer 等^[20]在对添加芒果皮天然提取物的水凝胶进行温度扫描中也得到了类似的结果。色泽方面, 与 WF 相比, 添加海鲜菇粉的小麦面条的色泽加深, L^* 值显著降低, 这与海鲜菇粉中含有的酚类物质和膳食纤维有关^[17]。口感方面, 与 WF 相比, WF+1%HM 处理面条的硬度和咀嚼性增大, 可能是海鲜菇粉中所含膳食纤维增加了面筋结构强度^[5], 而 WF+5%HM 和 WF+10%HM 处理面条的硬度和咀嚼性降低, 可能与面团中面筋含量减少和不溶性膳食纤维增多有关, 对面筋网络的破坏增大, 这与 Wang 等^[8]分析猴头菇粉对面条质地的影响结果类似。蒸煮特性方面, 与 WF 相比, 混合粉面条的吸水率和溶胀率均下降, 吸水率降低可能是海鲜菇粉中的膳食纤维削弱了面筋网络, 限制了水分的流动性, 与灵芝不溶性膳食纤维使面条吸水率显著下降的结果一致^[21]。而溶胀率的降低可

能是由于淀粉分子链的内部重排和海鲜菇粉与淀粉颗粒之间的相互作用,降低了淀粉颗粒的溶胀能力^[22]。此外,也可能和海鲜菇粉会与淀粉竞争水分有关^[23]。体外消化试验结果表明,加入海鲜菇粉抑制了面条中淀粉的分解,与其含有的多酚^[8]、多糖和膳食纤维^[5]有关。与WF相比,WF+10%HM处理对葡萄糖释放表现出最强的抑制效果,WF+1%HM处理次之,WF+5%HM处理效果较差,可能是海鲜菇粉添加量达到5%时,面筋网络结构最为疏松,增加了消化酶与淀粉颗粒接触的可能性,从而使面条在模拟消化中的葡萄糖释放量高于WF+1%HM和WF+10%HM处理。这与添加豆渣粉使面条淀粉消化率降低,但降低的程度不随豆渣粉添加量的增加而增高的结果一致^[24]。

综上所述,添加海鲜菇粉可有效抑制小麦面团的短期回生、改善流变学特性及蒸煮特性、调节色泽与口感,海鲜菇粉添加量为5%时综合效果最佳,添加量为10%时抑制面条中淀粉消化的效果较突出,可应用于特殊人群比如糖尿病患者功能性食品的开发,具有广阔的市场应用前景。本试验可视为初步研究,为后续功能性海鲜菇面制品的开发及深层作用机制研究提供一定理论依据。

参考文献

- [1] WU Y Y, PENG Q Y, KANG Q J, et al. Comparative profiling of volatile compounds in white and brown *Hypsizygus marmoreus* during fruiting body development and postharvest storage[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2024, 136: 106800.
- [2] WANG Y L, GUI X R, JIA M Y, et al. Effect of different drying methods on the quality characteristics and non-volatile taste compounds of *Hypsizygus marmoreus pileus* and *stipe*[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2024, 192: 115685.
- [3] 谭硕果,王盈,孙颖慧. 海鲜菇的人工栽培、营养成分及加工利用研究进展[J]. *中国食用菌*, 2024, 43(3): 1-5.
- [4] PAN X W, CHEN X X, NIU H, et al. Large and small amplitude oscillatory shear techniques evaluate the nonlinear rheological properties of *Ficus pumila* polysaccharide-wheat starch gel[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 270(1): 132352.
- [5] ZHANG L F, CHEN J, XU F, et al. Effect of *Tremella fuciformis* on dough structure and rheology, noodle flavor, and quality characteristics[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2022, 172: 114180.
- [6] 王无霞,于东梅,张德芳,等. 鳞杯伞粉和黑木耳粉对面团加工特性及挂面品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2024, 45(24): 50-58.
- [7] DE S B, CHAWLA P, DATTATRAY A, et al. Formulation of functional noodles by adding *Lentinus edodes* mushroom powder: Physicochemical attributes, cellular mineral uptake and improved glycemic index[J]. *Food Chemistry-X*, 2024, 24: 101900.
- [8] WANG L, TIAN Y P, CHEN Z Q, et al. Effects of *Hericium erinaceus* powder on the digestion, gelatinization of starch, and quality characteristics of Chinese noodles[J]. *Cereal Chemistry*, 2021, 98(3): 482-491.
- [9] 国家卫生和计划生育委员会. 食品中水分的测定: GB 5009.3—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [10] 国家卫生和计划生育委员会. 食品中灰分的测定: GB 5009.4—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [11] 梁琰,赵志国,张敏敏,等. 超声辅助提取苯酚-硫酸法测定野生平盖灵芝多糖含量[J]. *食品研究与开发*, 2018, 39(16): 125-129.
- [12] 田月. 茶树菇发酵燕麦前处理与加工参数对酸奶品质的影响[D]. 贵州贵阳: 贵州大学, 2024.
- [13] ALVAREZ M D, FUENTES R, GUERRERO G, et al. Characterization of commercial Spanish hummus formulation: Nutritional composition, rheology, and structure[J]. *International Journal of Food Properties*, 2017, 20(4): 845-863.
- [14] TIAN S Q, YANG Z Y, YAN F, et al. Effect of xylooligosaccharides from rice husks on the pasting and rheological properties of dough and biscuit quality[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2024, 205: 116547.
- [15] 赵阳,王雨生,陈海华,等. 海藻酸钠对小麦淀粉性质及馒头品质的影响[J]. *中国粮油学报*, 2015, 30(1): 44-50.
- [16] GALLEGO M, RIBES S, GRAU R, et al. Food matrix impact on rheological and digestive properties of protein-enriched and texture-modified mushroom creams[J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 135: 108143.
- [17] RANASINGHE M, STATHOPOULOS C, SUNDARAKANI B, et al. Valorizing date seeds through ultrasonication to enhance quality attributes of dough and biscuit, Part-1: Effects on dough rheology and physical properties of biscuits[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2024, 109: 107015.
- [18] 曾琼,成健,李丛冠,等. 苹果果胶改善马铃薯淀粉的糊化和流变特性[J]. *现代食品科技*, 2023, 39(7): 75-81.
- [19] HUNG S H, LAI L S. Changes in the pasting and rheological properties of wheat, corn, water caltrop and lotus rhizome starches by the addition of *Annona montana* mucilage[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 265: 131009.
- [20] RAMÍREZ- BREWER D, QUINTANA- MARTINEZ S E, GARCÍA-ZAPATEIRO L A. Obtaining and characterization of natural extracts from mango (*Mangifera indica*) peel and its effect on the rheological behavior in new mango kernel starch hydrogels[J]. *Food Chemistry*, 2025, 462: 140949.
- [21] 高秀薇,刘晗,王玲玉,等. 灵芝不溶性膳食纤维对面团及面条品质的影响[J]. *食品研究与开发*, 2024, 45(15): 85-92.
- [22] MEHERUNNAHAR M, HOQUE M M, SATTER M A, et al. Effect of cooking characteristics, amino acid consistency, and functional properties of composite noodles made from foxtail millet[J]. *Measurement: Food*, 2024, 13: 100138.
- [23] WEI Z X, OU Y J, LAN X L, et al. Effects of laminarin on the structural properties and *in vitro* digestion of wheat starch and its application in noodles[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2023, 178: 114543.
- [24] 谢乐,赵良忠,陈浩,等. 豆渣粉添加量对鲜湿面品质和淀粉消化特性的影响[J]. *粮食与油脂*, 2024, 37(12): 13-18.