

超声协同大豆分离蛋白对米粉和米面包品质的影响及机制研究

张帅, 韩冰, 马春敏, 杨杨, 边鑫, 王冰, 张光, 张娜*

(哈尔滨商业大学食品工程学院, 哈尔滨 150028)

摘要: **目的** 探究超声协同大豆分离蛋白(soybean isolate protein, SPI)对米粉以及米面包品质的影响。**方法** 以碎米为主要原料, 5个梯度(0%、3%、6%、9%、12%, 以碎米粉质量计)的大豆分离蛋白(soybean isolate protein, SPI)为辅料, 比较超声协同5个梯度SPI对混合粉热机械学特性、糊化特性、流变特性以及米面包比容、损耗率、感官评价的影响。**结果** 与未进行超声处理的样品相比, 超声协同SPI处理的米粉的吸水率从 64.90 ± 0.00 增加至 94.80 ± 0.00 , 其混合粉的峰值黏度从 2704.00 ± 47.76 降低至 1567.00 ± 116.73 , 表明超声使淀粉部分支链断裂, 生成大量短直链淀粉, 导致分子量下降, 相互作用减弱; 超声处理后的样品储能模量(G')曲线随着SPI含量的增加呈现出先降低后增加再降低的趋势, 损耗模量(G'')曲线呈现出逐渐降低的趋势。当SPI添加量为9%时, 米面包的比容达到最大值, 为 (0.86 ± 0.08) mL/g, 感官评分从 50.05 ± 3.75 增加至 86.27 ± 2.28 ; 当SPI添加量达到12%时, 米面包的损耗率达到最低。**结论** 综上所述, 采用9%SPI的方法制备米面包, 可以有效地改善米面包品质, 本研究为米面包在食品领域的应用提供了理论基础。

关键词: 大豆分离蛋白; 超声; 碎米; 米粉; 米面包; 品质

Effect of ultrasound synergized soybean isolate protein on the quality of rice flour and rice bread and its mechanism

ZHANG Shuai, HAN Bing, MA Chun-Min, YANG Yang, BIAN Xin,
WANG Bing, ZHANG Guang, ZHANG Na*

(College of Food Science and Engineering, Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China)

ABSTRACT: Objective To investigate the effects of ultrasound synergized soybean isolate protein (SPI) on the quality of rice flour as well as rice bread. **Methods** Using broken rice as the main ingredient and 5 gradients (0%, 3%, 6%, 9%, and 12% by mass of broken rice flour) of SPI as the excipient, the effects of ultrasonically synergizing the 5 gradients of SPI on the thermo-mechanical properties, pasting properties, and rheological properties of the

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD2100902-3)、黑龙江省“双一流”学科协同创新成果项目(LJGXCG202080、LJGXCG202083)、中央引导地方科技发展专项项目(ZY2022B-HRB-12)、黑龙江省青年科技人才托举工程项目(2022QNTJ010)、哈尔滨商业大学“青年科研创新人才”培育计划项目

Fund: Supported by the National Key Research and Development Program (2021YFD2100902-3), the Provincial “Double First-class” Discipline Collaborative Innovation Achievement Project (LJGXCG202080, LJGXCG202083), the Special Program for Centralized Guidance of Local Scientific and Technological Development (ZY2022B-HRB-12), the Heilongjiang Province Young Science and Technology Talent Support Project (2022QNTJ010), and the Harbin Institute of Commerce “Young Innovative Research Talents” Cultivation Program

*通信作者: 张娜, 博士, 教授, 主要研究方向为食品安全与食品化学。E-mail: foodzhangna@163.com

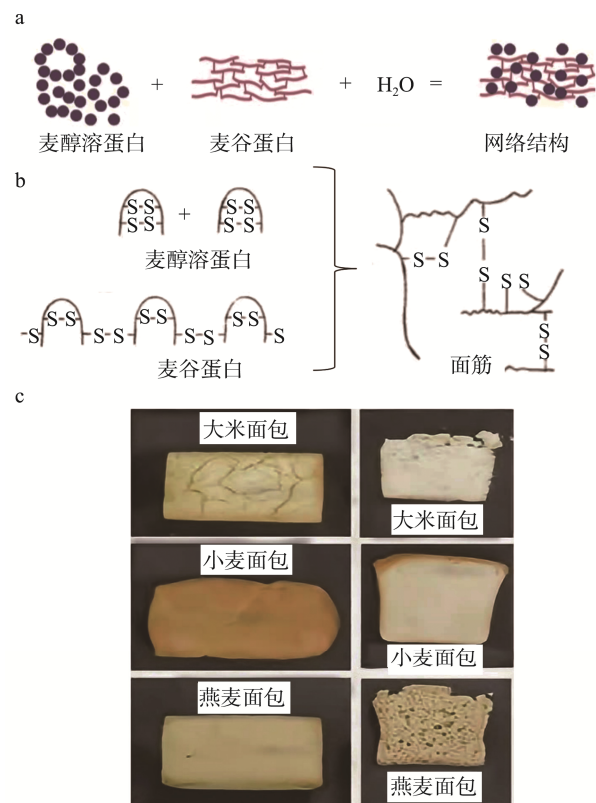
*Corresponding author: ZHANG Na, Ph.D, Professor, College of Food Engineering, Harbin University of Commerce, No.1 Xuehai Street, Songbei District, Harbin 150028, China. E-mail: foodzhangna@163.com

blended flour, as well as on the specific volume of the rice bread, the rates of loss, and the organoleptic evaluation were compared. **Results** Compared with the non-ultrasounded samples, the water absorption of the ultrasound synergized SPI-treated rice flour increased from 64.90 ± 0.00 to 94.80 ± 0.00 , and the peak viscosity of its blended flour decreased from 2704.00 ± 47.76 to 1567.00 ± 116.73 , indicating that ultrasound broke some of the branched chains of the starch, generating a large number of short straight-chained starches, which resulted in a decrease in the molecular weight and a interactions were weakened. The storage modulus (G') curves of the ultrasonically treated samples showed a decreasing then increasing and then decreasing trend with the increase of SPI content, and the loss modulus (G'') curves showed a gradual decreasing trend. At 9% SPI addition, the specific volume of rice bread reached a maximum value of (0.86 ± 0.08) mL/g and the sensory score increased from 50.05 ± 3.75 to 86.27 ± 2.28 ; the loss rate of rice bread was minimized when SPI was added at 12%. **Conclusion** In conclusion, the preparation of rice bread with 9% SPI can effectively improve the quality of rice bread. This study provides a theoretical basis for the application of rice bread in the food sector.

KEY WORDS: soy protein isolate; ultrasound; broken rice; rice flour; rice bread; quality

0 引言

麸质是一种广泛存在于麦类谷物中的蛋白质复合物,也是一种重要的过敏源物质,主要由麦醇溶蛋白和麦谷蛋白组成,是构成面团良好网络结构的重要物质。近年来,麸质不耐受症患病率逐年上升,无麸质饮食作为麸质不耐受症治疗的有效方法,越来越受到关注。此外,无麸质食品同传统食品相比,因其缺少面筋蛋白因而在制作过程中导致面团难以形成有效的网络结构,存在不易成型、弹性差等缺点^[1]。相关研究表明,与传统的麸质面包相比,使用无麸质原料烘烤的面包表面会出现干裂现象,其硬度更高,体积更小,老化速度更快,且货架期短^[2]。缺乏麦醇溶蛋白和麦谷蛋白是无麸质食品产生缺陷的重要原因^[3]。体系中的麦醇溶蛋白、麦谷蛋白可以吸附体系中的水分,引起蛋白质分子发生溶胀,从而影响面团的弹性、强度等加工性能(图 1a)^[4-7]。此外,麦醇溶蛋白和麦谷蛋白中均含有半胱氨酸残基,因此,麦醇溶蛋白分子内,麦谷蛋白在分子内及分子间均存在稳定的二硫键。麸质原料配制的溶液中,高分子量的麦谷蛋白以二硫键交联的形式形成骨架结构,而低分子量的麦醇溶蛋白则以二硫键交联的形式形成蛋白网状结构(图 1b)。而无麸质食品由于缺乏麦醇溶蛋白和麦谷蛋白,吸附水分能力差且难以形成网络结构,产品最终出现塌陷、干裂等问题(图 1c)。为改善无麸质食品品质,研究人员发现对无麸质食品生产原料进行预处理,可以提高其食品品质。此外,通过添加蛋白质、酶和盐等外源物质,可以改善无麸质食品内三维网络结构,进而提升产品品质^[8-9]。但是无麸质食品仍然存在很多缺陷^[10]。因此,根据乳糜泻患者的特殊饮食需要,研发出一种优质美味的无麸质面包成为一项巨大的挑战^[11-12]。



注: a: 面筋网络结构形成过程; b: 麸质面筋结构; c: 无麸质面包与小麦面包的外观比较。

图1 面筋结构及麸质、无麸质结构对比

Fig.1 Comparison of gluten structure with gluten and gluten-free structure

超声处理是一项环境友好的物理改性技术,其剪切、空化和冲击振荡的综合效应可以提高无麸质食品品质^[13]。这是因为超声处理可以使原料中含有二硫键的蛋白质中的多肽链降解,蛋白质部分伸展,淀粉中分子键断裂、颗粒结构变得疏松、大量羟基暴露,淀粉与水分子的相互作用

增强^[14]。HAN 等^[15]研究发现超声处理技术可以破坏分子间共价键, 加强分子间相互作用, 促使蛋白分子结构舒展, 有利于分子重排, 增加成品比容。JALALI 等^[16]研究发现, 超声处理会导致面包硬度降低。与未预处理米粉相比, 预处理增加了水分、孔隙度、比体积, 降低了面包屑质地。此外, 大豆分离蛋白(soybean isolate protein, SPI)是最常用的蛋白质改良剂, 且可以分为两类: 球蛋白和白蛋白, 球蛋白组分的聚合物主要成分为 7S 球蛋白和 11S 球蛋白, 由 3 或 6 个亚基形成, 经过热处理后分子内相互作用停止, 进而通过氢键和离子键开始分子间相互作用和聚集, 形成网络结构(图 2)^[17-18]。此外, 蛋白质改良剂的添加可以增加体系内巯基/二硫键含量, 使其在水和热的作用下发生巯基氧化或巯基/二硫键交换反应, 形成复杂的蛋白重组体。蛋白质重组体间进一步通过氢键、二硫键和离子键等作用力发生聚集, 促使蛋白质间形成类似面筋蛋白的三维网络结构(图 2), 增强无麸质面团的弹性, 对无麸质食品的比容和货架期具有显著改善作用^[19]。

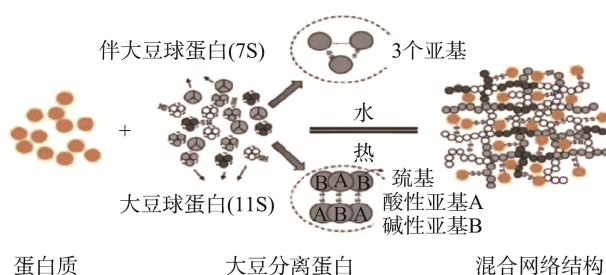


图2 大豆蛋白与其他蛋白结合对食品品质调控的机制^[17-18]
Fig.2 Mechanism of food quality regulation by combining soy protein with other proteins^[17-18]

ARENDET 等^[20]研究表明, SPI 增加了大米木薯面包的弹性模量, 从而使面包的体积增加。但目前的研究主要是通过单一改性方法来提高产品品质, 而利用外源蛋白并结合超声改性的方法以提高米粉加工性的研究尚不常见。因此本研究通过 Mixolab 混合实验仪、快速黏度分析仪、流变仪等技术对超声协同 SPI 混合粉的热机械学特性、糊化特性以及流变特性等进行分析; 通过比容、损耗率以及感官评价对米面包的品质进行分析, 为实现米制品开发与生产提供理论基础。

1 材料与amp;方法

1.1 实验材料

碎米(黑龙江省五常金禾米业有限责任公司); 大豆分离蛋白(纯度 $\geq 90\%$, 山东禹王集团公司)。

1.2 仪器与设备

FC204 分析天平(精度 0.1 mg, 上海佑科仪器仪表有限公司); DFY-1000 粉碎机(温岭市林大机械有限公司);

JK-100DB 超声清洗器(合肥金尼克机械制造有限公司); RVA4800 快速粘度测定仪(上海珀金埃尔默企业管理有限公司); Mixolab 分析仪(河南荣程联合科技有限公司); MCR72/92 流变仪(上海安东帕商贸有限公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 超声协同大豆分离蛋白混合粉制备

碎米经粉碎机打碎, 并过 80 目筛, 向其添加不同含量的 SPI (0%、3%、6%、9%、12%, 以碎米粉质量计), 将含有不同比例的 SPI 的混合粉置于烧杯中, 加入一定量的蒸馏水制备质量浓度为 10% 的米浆, 使用玻璃棒搅拌均匀后静置 12 h 使其充分水化。后将米浆置于槽式超声波反应器中, 在 360 W、25°C、40 kHz 的条件下, 反应 20 min, 再进行冷冻干燥, 粉碎, 过 80 目筛得到混合粉, 备用。

1.3.2 混合粉热机械学特性的测定

参考 SANTOS 等^[21]的方法并稍作修改, 采用 Mixolab 混合实验仪的 Chopin+协议测定混合粉的热机械学特性。混合实验仪运作程序如下, 首先, 将仪器温度设置为 30°C, 保持 8 min; 然后, 以 4°C/min 的速度升至 90°C, 并保持 7 min; 最后以 4°C/min 的速度降至 50°C, 并保持 5 min。整个测定过程的搅拌速度为 80 r/min, 加水量以满足面团在和面时最大扭矩达到(1.10 \pm 0.05) N·m 为准。最终测定吸水率、C1(和面阶段的最大扭矩)、C2(加热阶段的最小扭矩)、C3(加热阶段的最大扭矩)、C3-C4(淀粉崩解值)和 C5-C4(淀粉回生值)的变化规律。

1.3.3 混合粉糊化特性的测定

参考周艳青等^[22]的方法并进行适当修改。具体测试条件, 按水分含量为 14% 时, 添加 3.0 g 样品, 25 mL 蒸馏水的标准加入待测样品; 先以 960 r/min 的转速混合样品 10 s, 后以 160 r/min 的转速测试样品; 温度程序是先 50°C 平衡 1 min, 后加热至 95°C 并保持 7 min, 最后以相同速率降温至 50°C 并保持 4.5 min。用 TCW 配套软件对峰值黏度、最低黏度、最终黏度、衰减值和回生值进行统计和分析^[23]。

1.3.4 混合粉面团流变学特性的测定

样品取自 1.3.3 制备的面团, 转子 PP50, 间距为 2 mm, 测量前, 样品在 25°C 下静置 5 min, 以便释放应力, 流变学测量在(25 \pm 0.01)°C 进行^[24]。为防止水分蒸发, 在样品的边缘涂上硅油。具体测试条件, 测试温度为 25°C, 应力为 0.5%, 频率范围变化为 0.1~20.0 Hz, 测定在频率范围内面团储能模量(G')、损耗模量(G'')的变化。

1.3.5 米面包的制备

将 2.4 g 活化酵母、1.6 g 盐、16 g 黄油、12 g 奶粉、36 g 绵白糖、6 g 鸡蛋与 126 g 混合粉在和面机里混合, 加入最佳吸水率的水, 持续和面约 15 min 左右; 采用一次发酵法, 将和好的面团放入面包模具内, 在温度为 38°C、相对湿度为 85% 的发酵箱里发酵 1 h。在烤箱中以上火 170°C、下火 180°C, 烘焙 25 min, 表面金黄即可取出。稍冷却后,

对所制米面包进行所需指标的测定。

1.3.6 混合粉面包品质的测定

(1) 米面包比容的测定

比容一般用来表示米面团体积的膨胀度以及气体保持能力,是影响面包的外型、口感与组织结构的重要指标^[25]。通过小米置换法对米面包的体积进行测定,所制米面包的比容根据公式(1)计算。

$$v=V/m \quad (1)$$

式中, v ——面包比容(mL/g); V ——面包体积(mL); m ——面包质量(g)。

(2) 米面包损耗率的测定

根据 WU 等^[26]的方法,测定所制米面包的损失率,焙烤前面团的质量记作 m_1 ,焙烤后面团的质量记作 m_2 ,根据公式(2)计算出面包的损失率。

$$L\%=(m_1-m_2)/m_1 \times 100\% \quad (2)$$

式中, L ——面包损失率(%); m_1 ——焙烤前的面团质量(g); m_2 ——焙烤后的大米面包质量(g)。

(4) 米面包感官评价

由 10 位有经验的品评人员(5 男 5 女)对米面包进行打分,测定指标包括面包的形态、表面色泽、香味、组织以及口感,其中每项指标 20 分,总分 100 分。具体评价标准见表 1。根据评分标准,将每个样品的得分进行统计,并对各项打分结果进行累计,得到各个样品的最终评价结果^[27]。

1.4 数据处理

所有实验每次进行 3 次平行实验,结果表示为平均值±标准偏差,实验得到的数据用 SPSS 17.0 统计软件进行方差分析,并且当 $P<0.05$ 时,认为差异显著;采用 Origin 8.5 软件作图。

2 结果与分析

2.1 超声协同大豆分离蛋白对米粉热机械学特性的影响

使用 Mixolab 混合实验仪探究不同 SPI 添加量对混合米粉热机械学特性的影响。吸水率指面团扭矩最大值(C1)达到(1.10±0.05) N·m 处所需要的水分,是影响面团性质的重要因素^[28]。

如表 2 所示,与未超声处理相比,经超声处理的混合粉最佳吸水率增加,这可能是因为超声处理的空化效应会使蛋白结构可能发生很大程度的伸展以获得更高的捕水能力^[29],使面团的最佳吸水率增加。此外,超声协同 SPI 处理的混合粉的最佳吸水率会随着 SPI 添加量的增加而逐渐增大,这可能是由于 SPI 具有良好的吸水性,从而使面团的吸水率逐渐增加。当 SPI 添加量为 12% 时,最佳吸水率达到最高值,为 94.80%。BOLLAIN 等^[30]研究发现,在小麦粉中添加蛋白质可以提高混合粉的吸水率,这可能是由于蛋白质是一种具有强吸水性的化合物,蛋白质含量的增加,混合粉的吸水率也随之增加;且随着 SPI 添加量的增加,混合粉的回生值逐渐降低,在 SPI 添加量为 12% 时达到最低值,为 0.38%,这可能是因为 SPI 强化了米粉的网络结构,因此增加了米粉的保水性,延迟老化^[31]。

表 1 米面包感官评价评分标准

Table 1 Rice bread sensory evaluation scoring standards		
项目	评定标准	得分
形态	外形完好无裂痕,外形饱满	15~20
	外形比较完整	6~14
	外形不完整有明显裂痕,外形不饱满	0~5
表面色泽	表面颜色均匀,呈金黄色,无焦斑	15~20
	表面颜色适中,有少量焦斑	6~14
	表面颜色分布不均,颜色黯淡,焦斑多	0~5
香味	具有烘焙产品浓郁的香气,无异味	15~20
	香气适中,但没有其他异味	6~14
	香气很淡,有生面味或其他不良异味	0~5
组织	柔软,弹性好,表面光滑细腻,切面气孔大小均匀,纹路清楚	15~20
	硬度适中,弹性适中,切面气孔分布较为均匀	6~14
	整体质地坚硬,弹性差,切面气孔大小不均匀,表面纹理粗糙	0~5
口感	松软适口,入口有弹性,不黏牙,甜度咸度合适无怪味	15~20
	较为松软,中规中矩	6~14
	口感干硬,黏牙易掉渣,过甜过咸或有其他怪味	0~5

表 2 超声协同 SPI 对米粉热机械学特性的影响

Table 2 Effects of ultrasonic coordination with SPI on thermomechanical properties of rice flour

添加量/%	吸水率/%	峰值黏度 (C3)/(N·m)	最低黏度 (C4)/(N·m)	最终黏度 (C5)/(N·m)	淀粉崩解值 (C3-C4)/(N·m)	淀粉回生值 (C5-C4)/(N·m)
未超声处理	64.90±0.00 ^f	2.32±0.04 ^a	1.64±0.05 ^a	2.57±0.07 ^a	0.68±0.02 ^a	0.94±0.02 ^a
单独超声处理	67.00±0.00 ^e	2.05±0.03 ^b	1.47±0.01 ^b	2.17±0.05 ^b	0.59±0.02 ^b	0.70±0.04 ^b
3% SPI	70.50±0.00 ^d	1.78±0.01 ^c	1.28±0.03 ^c	1.92±0.01 ^c	0.50±0.03 ^c	0.65±0.02 ^c
6% SPI	83.20±0.00 ^c	1.54±0.12 ^d	1.10±0.10 ^d	1.64±0.09 ^d	0.44±0.01 ^d	0.54±0.02 ^d
9% SPI	88.70±0.00 ^b	1.38±0.03 ^e	0.95±0.01 ^e	1.42±0.01 ^e	0.43±0.02 ^d	0.47±0.00 ^e
12% SPI	94.80±0.00 ^a	1.28±0.01 ^f	0.89±0.00 ^e	1.28±0.01 ^f	0.39±0.01 ^e	0.38±0.01 ^f

注: 同列不同字母表示差异显著($P<0.05$), 下同。

2.2 超声协同大豆分离蛋白对米粉糊化特性的影响

峰值黏度是表征淀粉黏度曲线的重要参数^[32]。如表 3 所示,与未超声处理的混合粉相比,经超声处理的混合粉峰值黏度降低,这可能是由于超声处理产生的空化作用和机械振荡导致淀粉分子链断开,从而造成混合粉峰值黏度降低。超声协同 SPI 处理的混合粉峰值黏度会随着 SPI 添加量的增加而降低,这可能由于 SPI 与水结合,影响了淀粉与水分子间氢键的形成,导致峰值黏度下降^[33]。当 SPI 添加量为 12% 时,峰值黏度达到最低值为 1567.00 cP。黏度崩解值是峰值黏度和最终黏度的差值,反映了米粉的热稳定性,崩解值低说明热稳定性强^[34]。与未超声处理的混合粉相比,经超声处理的混合粉崩解值降低,这可能是由于超声处理使米粉的结晶结构受到破坏,支链淀粉减少,从而导致混合粉崩解值降低。超声协同 SPI 处理的混合粉崩解值随着 SPI 添加量的增加而降低,表明蛋白强化与超声波结合的协同作用对纯米粉的热稳定性在一定条件下有提升作用;回生值是最终黏度与最低黏度之差,反映了淀粉再生的趋势和冷却过程中形成凝胶的能力,回生值越

大越容易老化^[35]。超声后的米粉随着 SPI 添加量的增加,回生值逐渐降低,在 SPI 添加量为 12% 时,达到最低值为 757.00 cP,表明在超声协同 SPI 处理下,导致淀粉分子发生重排,抑制食品回生。与 SHIN 等^[36]研究结果一致,表明 SPI 对米粉具有防止老化回生的作用。

2.3 超声协同大豆分离蛋白对米面团动态流变学特性的影响

储能模量(G')是衡量米粉品质的关键参数,代表类似固体性质, G' 越大表明米粉具有越高的胶体强度、胶体网状结构和回弹性能^[37];损耗模量(G'')代表类似液体性质, G'' 的值越大,其对流体的阻力愈大,表示一种不可逆的黏滞特性^[38]。流变特性是确定面团性能和生产加工的重要因素^[39],面团的低黏度对最终产品的质量会产生积极的影响。对不同 SPI 添加量米粉所制面团进行流变学特性的测定,结果如下图 3 所示,面团的 G' 和 G'' 均随着扫描频率的增大而增大,这表明面团内部结构流动性强^[40];在任何情况下, $G' > G''$, 这表明整个体系是典型的弹性体系,即弹性特性比黏性特性更显著。对混合粉进行流变特性

表 3 超声协同大豆分离蛋白对米粉糊化特性的影响
Table 3 Effects of ultrasound and soy protein isolate on gelatinization characteristics of crushed rice

添加量/%	峰值黏度/cP	最低黏度/cP	最终黏度/cP	崩解值/cP	回生值/cP
未超声处理	2704.00±47.76 ^a	1760.67±54.05 ^a	2987.33±41.55 ^a	943.33±32.56 ^a	1226.67±12.50 ^a
单独超声处理	2222.00±52.32 ^b	1457.00±69.53 ^b	2643.00±56.36 ^b	766.00±17.19 ^b	1186.00±14.18 ^a
3% SPI	2056.00±11.36 ^c	1396.00±180.54 ^b	2541.00±91.06 ^c	660.00±169.71 ^{bc}	1145.00±93.31 ^a
6% SPI	1816.00±159.82 ^d	1151.00±132.66 ^c	2122.00±113.14 ^d	665.00±37.86 ^{bc}	971.00±22.59 ^b
9% SPI	1745.00±101.01 ^d	1138.00±52.57 ^c	1964.00±82.82 ^c	607.00±55.79 ^{bc}	826.00±32.79 ^c
12% SPI	1567.00±116.73 ^e	1014.00±56.52 ^c	1770.00±88.55 ^f	553.00±60.72 ^d	757.00±32.13 ^c

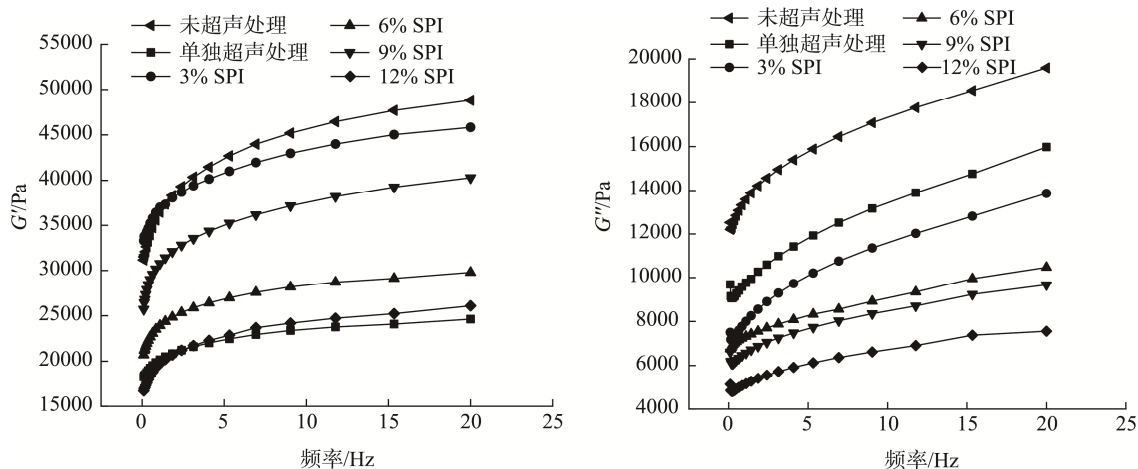


图 3 超声协同SPI对米粉动态流变特性的影响

Fig.3 Effects of ultrasound and SPI on dynamic rheological properties of crushed rice noodles

的测定,结果表明,与未超声处理的混合粉相比,经超声处理的混合粉 G' 曲线呈现出降低趋势,超声协同 SPI 处理的混合粉随着 SPI 含量的增加, G' 曲线呈现出先减小后增加再降低的趋势, G'' 曲线随着 SPI 含量的增加呈现出逐渐降低的趋势,这可能是由于系统内部结构的耦合作用,即 SPI 与面团相互作用形成交联网络结构。BAINY 等^[41]研究发现,在小麦粉中添加 7%~9% 的 SPI 后,面团的流变性得到改善,且随着蛋白质含量的增加,面条的加工性能、感官质量也得到提升。

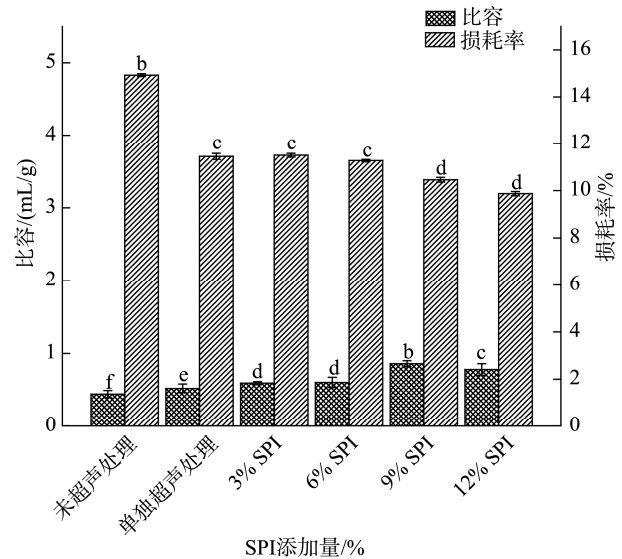
2.4 超声协同大豆分离蛋白对米面包品质的影响

2.4.1 超声协同大豆分离蛋白对米面包的比容、损耗率的影响

面包的比容能够反映出面团的体积膨胀性和保气性能,用小米置换法测定面包的比容,结果如图 4 所示,与未超声处理的样品相比,超声处理的样品比容增加,这可能是由于超声处理使蛋白质聚合物中的氢键断裂,形成小的可溶性蛋白质聚集体,最终导致馒头的硬度下降、比容增加。超声协同 SPI 处理的米面包比容随着 SPI 添加量的增加而呈现先增加后降低的趋势。当 SPI 添加量为 9% 时,面包的比容达到最大值为 (0.86 ± 0.08) mL/g,说明添加 9% 的 SPI 对米面包的膨胀性和保气性均有改善作用。这可能是因为 SPI 代替了面筋蛋白的作用,改善了米面团的持气性。通过与大米淀粉非共价相互作用使面团内的气泡结构更加稳定^[42]。TONG 等^[43]研究表明,当乳清蛋白添加量在 10% 左右时,面包比容也会显著性增加。

米面包损耗率是焙烤前面团的质量与焙烤后面团的质量之差^[44]。在高温条件下,淀粉的胶凝性和水分的流失往往会造成面团质量下降,因此,流失的数值越大,说明米粉的

保水性能越差。结果如图 4 所示,与未超声处理的样品相比,超声处理的样品损耗率降低,且超声协同 SPI 处理的米面包损耗率随着 SPI 含量的增加而降低,当 SPI 添加量为 12% 时,米面包的损耗率达到最低值,为 9.87%,这可能是由于 SPI 具有良好的保水性能,降低了米面团的水分流失^[45]。



注:不同小写字母表示统一指标组间具有显著差异, $P < 0.05$ 。

图4 超声协同SPI对米面包比容、损耗率的影响

Fig.4 Effects of ultrasound assisted SPI on the specific volume and the loss rate of broken rice bread

2.4.2 超声协同 SPI 对米面包感官评价分析

将 10 位品鉴人员对于各评价指标的打分取平均值,整理汇总得到各样本的最终评价结果,面包图像结果如图 5,感官评价结果如表 4 所示。

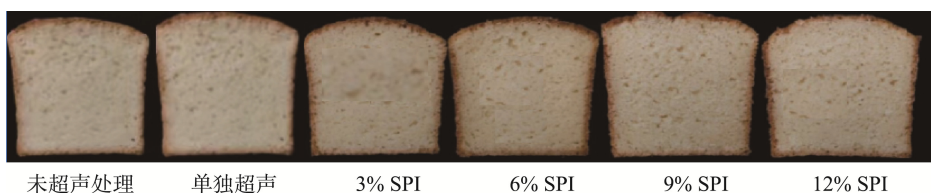


图5 超声协同添加不同含量SPI的无麸质米面包图像

Fig.5 Images of gluten-free rice bread with different levels of SPI added by ultrasound

表 4 米面包的感官评价

Table 4 Sensory evaluation of broken rice bread

组别	形态 (20)	表面色泽 (20)	香味 (20)	组织 (20)	口感 (20)	得分
未超声处理	10.40±1.67 ^b	10.25±1.35 ^d	12.04±1.58 ^d	10.82±1.29 ^c	11.32±1.11 ^d	50.05±3.75 ^d
单独超声处理	12.41±1.52 ^b	10.80±1.64 ^d	13.67±1.52 ^d	10.82±1.92 ^c	11.55±1.15 ^b	55.09±3.75 ^d
3% SPI	15.40±1.14 ^b	11.63±1.24 ^c	13.83±1.30 ^c	13.04±1.00 ^b	15.23±1.30 ^c	67.05±2.55 ^c
6% SPI	17.54±0.84 ^a	16.55±0.84 ^c	15.88±0.85 ^{ab}	16.56±1.15 ^a	16.52±0.85 ^{ab}	79.86±1.41 ^{ab}
9% SPI	16.47±1.14 ^{ab}	17.67±0.99 ^b	17.60±1.16 ^a	16.65±1.16 ^a	17.65±1.16 ^a	86.27±2.28 ^a
12% SPI	17.80±0.84 ^a	15.63±0.76 ^a	15.24±1.09 ^{bc}	18.29±0.86 ^a	16.82±0.86 ^{bc}	78.65±1.82 ^b

由图 5 可知, 添加 SPI 的米面包颜色偏黄, 这可能是由于 SPI 本身颜色偏黄, 同时米面包表皮 SPI 还参与了美拉德反应, 从而使得面包芯及表皮颜色偏黄。气泡对于面包海绵状孔洞的形成, 以及烘焙过程中的热量传递起着至关重要的作用, 决定了面包的体积与品质。随着 SPI 添加量的增加, 米面包高度和面包芯孔隙均随 SPI 添加量的增加而增多。

由表 4 可以得出, 与未超声处理的样品相比, 超声处理的样品感官评分增加, 且超声协同 SPI 处理的米面包感官评分随着 SPI 含量的增加, 米面包在形态、组织和香味方面的评分也随之提高, 在表面色泽和口感方面的评分呈现出了一个先上升后下降的趋势。当 SPI 添加量为 9% 时, 感官评分值最高, 为 86.27 分, 且米面包比容明显增大^[46], 表明加入 SPI 有利于面团内气孔产生。当 SPI 添加量为 12% 时, 也可以在一定程度上改善米面包品质, 但是感官评分略低, 为 78.65 分, 可能是因为添加了过量的蛋白质, 导致蛋白质聚集, 米面包品质变差。高雪丽^[46]研究表明, 添加 SPI 后, 馒头的硬度、咀嚼性增加, 比容减小, 外观和口味等感官品质也得到改善。

3 结 论

通过超声协同 SPI 改善米面包品质研究发现, 超声处理产生的空化作用和机械振荡导致淀粉分子链断开, 改变混合粉的内部网络结构, 提高米面包的品质; 超声协同 SPI 处理的混合粉随着 SPI 添加量的增加, 显著降低了混合粉的峰值黏度、崩解值以及回生值, 对混合粉的吸水率有显著提升。在米面包的质构特性、比容、损耗率以及感官评分中发现, 随着 SPI 的添加, 米面包的硬度和损耗率降低, 弹性和比容增加, 当 SPI 添加量为 9% 时, 米面包的感官评价更高, 米面包品质得以改善。结果表明超声协同 SPI 处理可以使蛋白聚集体变少, 进一步证明了超声协同 SPI 可以改变内部网络结构, 改善大米面团成型困难、易老化等缺陷, 进而生产出优质的无麸质面团。综上所述, 超声协同 SPI 的方式, 对米制品品质改善方面具有积极的影响, 为米制品的品质调控提供了理论基础。

参考文献

- [1] 刘安伟. 无麸质食品的研究进展[J]. 现代面粉工业, 2022, 36(1): 13–16.
- [2] LIU ANW. Research progress in gluten-free food [J]. Mod Flour Mill Ind, 2022, 36(1): 13–16.
- [3] 马洁. 添加苦荞麦粉对米粉面团流变学及面包品质的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- [4] MA J. Effects of adding tartary buckwheat flour on theology of rice flour dough and bread quality [D]. Yangling: Northwest Agriculture & Forestry University, 2019.
- [5] WANG P, JIN Z, XU X. Physicochemical alterations of wheat gluten proteins upon dough formation and frozen storage: a review from gluten, glutenin and gliadin perspectives [J]. Trends Food Sci Technol, 2015, 46(2): 189–198.
- [6] LI Y, FU JH, SHEN Q, *et al.* High-molecular-weight glutenin subunits: Genetics, structures, and relation to end use qualities [J]. Int J Mol Sci, 2020, 22(1): 184–193.
- [7] STANCIUC N, BANU I, BOLEA C, *et al.* Structural and antigenic properties of thermally treated gluten proteins [J]. Food Chem, 2017, 267: 43–51.
- [8] BONILLA JC, RYAN V, YAZAR G, *et al.* Conjugation of specifically developed antibodies for high and low molecular-weight glutenins with fluorescent quantum dots as a tool for their detection in wheat flour dough [J]. J Agric Food Chem, 2018, 66(16): 4259–4266.
- [9] CERESION EB, KUKTAITE R, SATO HH, *et al.* Impact of gluten separation process and transglutaminase source on gluten based dough properties [J]. Food Hydrocolloid, 2019, 87: 661–669.
- [10] CAPRILES VD, ARÉAS JAG. Novel approaches in gluten-free bread making: Interface between food science, nutrition, and health [J]. Compr Rev Food Sci Food Saf, 2014, 13(5): 871–890.
- [11] WOOME RJS, ADEDEJI AA. Current applications of gluten-free grains: A review [J]. Crit Rev Food Sci, 2020, 61(1): 14–24.
- [12] MIR MB, MIR SA, RAJPUT R, *et al.* Challenges in development of gluten-free breads [Z]. 2021.
- [13] RAI S, KAUR A, SINGH B. Quality characteristics of gluten free cookies prepared from different flour combinations [J]. J Food Sci Technol, 2014, 51(4): 785–789.
- [14] DI-CAIRANO M, GALGANO F, TOLVE R, *et al.* Focus on gluten free biscuits: ingredients and issues [J]. Trend Food Sci Technol, 2018, 81: 203–212.
- [15] Ultrasound and microwave for food processing: Synergism for preservation and extraction [Z]. 2022.
- [16] 张友松, 孙孟仲. 变性淀粉及其在食品工业中的应用[J]. 食品科学, 1985, (10): 20–23.
- [17] ZHANG YS, SUN MZ. Modified starch and its application in the food industry [J]. Food Sci, 1985, (10): 20–23.
- [18] HAN L, CAO S, YU Y, *et al.* Modification in physicochemical, structural and digestive properties of pea starch during heat-moisture process assisted by pre and post-treatment of ultrasound [J]. Food Chem, 2021, 360: 12992.
- [19] JALALI M, SHEIKHOLESLAMI Z, ELHAMIRAD AH, *et al.* The effect

- of the ultrasound process and pre-gelatinization of the corn flour on the textural, visual, and sensory properties in gluten-free pan bread [J]. *J Food Sci Technol*, 2020, 57: 993–1002.
- [17] AHMED J, RAMASWAMY HS, ALLI I, *et al.* Thermo rheological characteristics of soybean protein isolate [J]. *J Food Sci*, 2006, 71(1): 158–163.
- [18] 何林阳, 杨杨, 陈凤莲, 等. 无麸质面包品质改良研究进展[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(17): 439–447.
- HE LY, YANG Y, CHEN FL, *et al.* Research progress on quality improvement of gluten-free bread [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2021, 42(17): 439–447.
- [19] RODRIGUEZ FLT, PÉREZ PA, CAMPDERRÓS ME. Improvement of gluten-free bread properties by the incorporation of bovine plasma proteins and different saccharides into the matrix [J]. *Food Chem*, 2015, 170: 257–264.
- [20] ARENDT EK, DAL-BELLO F. *Functional cereal products for those with gluten intolerance* [M]. London: Woodhead Publishing, 2008.
- [21] SANTOS FG, AGUIAR EV, CENTENO A, *et al.* Effect of added psyllium and food enzymes on quality attributes and shelf life of chickpea-based gluten-free bread [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2020, 134: 110025.
- [22] 周艳青, 杨英, 周娇娇, 等. 米糠膳食纤维对大米粉糊化特性的影响[J]. *粮食与油脂*, 2018, 31(12): 64–67.
- ZHOU YQ, YANG Y, ZHOU JJ, *et al.* Effect of bran dietary fiber on the pasting characteristics of rice flour [J]. *J Cere Oils*, 2018, 31(12): 64–67.
- [23] CAO J, LU B, ZHANG D, *et al.* Optimization of the preparation process of mung bean puffed infant rice cereal and evaluation of the structure and digestion characteristics of starch [J]. *Int J Food Eng*, 2020, 16(8): 20200025.
- [24] QI MM, REN ZS, ZHANG GY, *et al.* Effect of extrusion treatment on rheological properties and *in vitro* digestibility of pea starch [J]. *Food Sci*, 2021, 42(9): 55–63.
- [25] 闫巧珍, 高端雄, 邢沁浚, 等. 马铃薯-小麦粉混粉的理化性质与消化特性研究[J]. *食品工业科技*, 2016, 37(22): 173–177.
- YAN QZ, GAO RX, XING QH, *et al.* Physicochemical properties and digestive characteristics of potato-wheat flour blends [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2016, 37(22): 173–177.
- [26] WU T, WANG L, LI Y, *et al.* Effect of milling methods on the properties of rice flour and gluten-free rice bread [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2019, 108: 137–144.
- [27] 王宝贝, 邱颖辉, 陈玖璇, 等. 小球藻对青稞面包品质的影响及其抗氧化特性[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(23): 157–162.
- WANG BB, QIU YH, CHEN WX, *et al.* Effect of *Chlorella vulgaris* on the quality of barley bread and its antioxidant properties [J]. *Food Ferment Ind*, 2019, 45(23): 157–162.
- [28] BANU I, APRODU I. Investigations on functional and thermo-mechanical properties of gluten free cereal and pseudocereal flours [J]. *Foods*, 2022, 11(13): 1857.
- [29] ZHANG K, WEN Q, LI T, *et al.* Comparative study of the effects of ultrasonic power on the structure and functional properties of gliadin in wheat and green wheat [J]. *J Food Sci*, 2022, 87(3): 1020–1034.
- [30] BOLLAIN C, ANGIOLONI A, COLLAR C. Relationships between dough and bread viscoelastic properties in enzyme supplemented wheat samples [J]. *J Food Eng*, 2006, 77(3): 665–671.
- [31] PHONGTHAI S, D'AMICO S, SCHOENLECHNER R, *et al.* Effects of protein enrichment on the properties of rice flour based gluten-free pasta [J]. *LWT*, 2017, 80: 378–385.
- [32] WANG P, FU Y, WANG L, *et al.* Effect of enrichment with stabilized rice bran and extrusion process on gelatinization and retrogradation properties of rice starch [J]. *Starch-Stärke*, 2017, 69(7–8): 1600201.
- [33] XU L, ZHU H, YI C. Soybean protein isolate affects *in vitro* digestion properties of fermented indica rice starch by regulating its gel characteristics [J]. *Food Hydrocolloid*, 2023, 145: 109165.
- [34] YANG XQ, SHI HG, MI X, *et al.* Gelatinization and rheological properties of blend of defatted rice bran and broken rice [J]. *IOP Conf Ser: Earth Environ Sci*, 2021, 792(1): 1–12.
- [35] WEI X, GONG Y, HU X. Effects of starch, protein structure change on quality of raw and cooked frozen oat roll [J]. *LWT*, 2022, 167: 113839.
- [36] SHIN M, GANG DO, SONG JY. Effects of protein and transglutaminase on the preparation of gluten-free rice bread [J]. *Food Sci Biotechnol*, 2010, 19: 951–956.
- [37] 肖瑜, 杨新标, 林楠, 等. 不同蛋白质对大黄米淀粉老化特性的影响[J]. *食品科学*, 2020, 41(16): 45–51.
- XIAO Y, YANG XB, LIN N, *et al.* Effect of different proteins on the aging characteristics of rhubarb rice starch [J]. *Food Sci*, 2020, 41(16): 45–51.
- [38] 郭涛, 张焕霞, 薛芳, 等. 低谷蛋白水稻的淀粉颗粒扫描电镜观察及 RVA 谱特征研究[J]. *北方农业学报*, 2020, 48(5): 49–54.
- GUO T, ZHANG HX, XUE F, *et al.* Scanning electron microscopic observation and RVA spectral characterization of starch granules in low-gluten rice [J]. *J North Agric*, 2020, 48(5): 49–54.
- [39] SUN X, WU S, KOKSEL F, *et al.* Effects of ingredient and processing conditions on the rheological properties of whole wheat flour dough during breadmaking-A review [J]. *Food Hydrocolloid*, 2023, 135: 108123.
- [40] LOPES-DA-SILVA JA, SANTOS DMJ, FREITAS A, *et al.* Rheological and nuclear magnetic resonance (NMR) study of the hydration and heating

- of undeveloped wheat doughs [J]. *J Agric Food Chem*, 2007, 55(14): 5636–5644.
- [41] BAINY EM, CORREDIG M, POYSA V, *et al.* Assessment of the effects of soy protein isolates with different protein compositions on gluten thermosetting gelation [J]. *Food Res Int*, 2010, 43(6): 1684–1691.
- [42] 张莹莹, 石长硕, 王瑞红, 等. 大豆蛋白复配对面团特性及面条品质的影响[J]. *粮食与饲料工业*, 2019, 388(8): 32–36.
- ZHANG YY, SHI CS, WANG RH, *et al.* Effect of soy protein compounding on dough characteristics and noodle quality [J]. *Cere Feed Ind*, 2019, 388(8): 32–36.
- [43] TONG Q, ZHANG X, WU F, *et al.* Effect of honey powder on dough rheology and bread quality [J]. *Food Res Int*, 2010, 43(9): 2284–2288.
- [44] 韩倪. 小麦损伤淀粉的结构性质及其无麸质模型面团面包品质特性研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2023.
- HAN N. Structural properties of wheat damage starch and its bread quality characteristics in gluten-free model doughs [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2023.
- [45] 邵娟娟, 张雅, 张青, 等. 大豆分离蛋白与小麦粉复配对面制品品质影响的研究进展[J]. *粮食与油脂*, 2020, 33(1): 4–5.
- SHAO JJ, ZHANG Y, ZHANG Q, *et al.* Progress of research on the effect of compounding soybean isolate protein with wheat flour on the quality of prepared foods [J]. *J Cere Oils*, 2020, 33(1): 4–5.
- [46] 高雪丽. 大豆 7S、11S 球蛋白与分离蛋白影响面团特性及馒头品质的机理[D]. 杨陵: 西北农林科技大学, 2015.
- GAO XL. Mechanisms of soybean 7S and 11S globulins and isolate proteins affecting dough properties and steamed bread quality [D]. Yanglin: Northwest Agriculture & Forestry University, 2015.

(责任编辑: 韩晓红 于梦娇)

作者简介



张 帅, 硕士, 副教授, 主要研究方向为食品生物技术。

E-mail: roson5@163.com



张 娜, 博士, 教授, 主要研究方向为食品安全与食品化学。

E-mail: foodzhangna@163.com