

可溶性大豆多糖对糯米粉理化特性及速冻汤圆品质的影响

申慧珊, 程上珍, 潘豫昌, 王宏伟, 刘兴丽, 张 华

Effects of Soluble Soybean Polysaccharide on Physicochemical Properties of Glutinous Rice Flour and Quality of Quick-frozen Sweet Dumplings

SHEN Huishan, CHENG Shangzhen, PAN Yuchang, WANG Hongwei, LIU Xingli, and ZHANG Hua

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024090127>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

木糖醇对糯米粉理化性质及汤圆品质的影响

Effects of Xylitol on Physicochemical Properties of Glutinous Rice Flour and Quality of Glutinous Rice Dumplings

食品工业科技. 2024, 45(7): 51-58 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023040253>

超声处理对糯米粉消化特性的影响及降低糯米粉血糖生成指数工艺优化

Effect of Ultrasonic Treatment on the Digestion Characteristics of Glutinous Rice Flour and Optimization of Process to Reduce Glutinous Rice Flour Glycemic Index

食品工业科技. 2024, 45(20): 215-222 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023120088>

不同品种糯米的粉质特性分析及对其冰点温度的影响

Characteristics Analysis of Different Glutinous Rice Flour and Its Influence on Freezing Point Temperature

食品工业科技. 2022, 43(15): 34-41 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021090247>

湿热处理对糯米粉血糖生成指数值及相关指标的影响

Effects of Heat-moisture Treatment on Glycemic Index and Relevant Indexes of Glutinous Rice Flour

食品工业科技. 2023, 44(1): 253-259 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022040041>

调质温度和时间对黑糯米半干法制粉品质的影响

Effect of Tempering Temperature and Time on the Quality of Semi-dry Black Glutinous Rice Flour

食品工业科技. 2020, 41(5): 17-22,30 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.05.004>

复合酶法提取黄秋葵可溶性膳食纤维的工艺优化及其理化特性、结构表征

Optimization Techniques for the Extraction of Soluble Dietary Fiber from Okra with Complex Enzymes and Its Physicochemical Properties and Structure Characterization

食品工业科技. 2020, 41(17): 199-205,218 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.17.033>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

申慧珊, 程上珍, 潘豫昌, 等. 可溶性大豆多糖对糯米粉理化特性及速冻汤圆品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(17): 143–150. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024090127

SHEN Huishan, CHENG Shangzhen, PAN Yuchang, et al. Effects of Soluble Soybean Polysaccharide on Physicochemical Properties of Glutinous Rice Flour and Quality of Quick-frozen Sweet Dumplings[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(17): 143–150. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024090127

· 研究与探讨 ·

可溶性大豆多糖对糯米粉理化特性及速冻汤圆品质的影响

申慧珊^{1,2}, 程上珍¹, 潘豫昌¹, 王宏伟^{1,2}, 刘兴丽¹, 张 华^{1,2,*}

(1. 郑州轻工业大学食品与生物工程学院, 河南郑州 450001;

2. 中原食品实验室, 河南漯河 462300)

摘要: 速冻汤圆存在持水性差、易冻裂及煮后粘连性高等问题。为了改善速冻汤圆的品质, 本论文研究了不同添加量 (0%、0.1%、0.3%、0.5%、0.7%、1.0%、1.5%、2.0%、2.5%) 的可溶性大豆多糖 (Soluble soybean polysaccharide, SSPS) 对糯米粉 (Glutinous rice flour, GRF) 糊化特性、热力学特性、胶稠度、凝沉性、溶解度、膨胀力和动态流变特性的影响, 以及 SSPS 对速冻汤圆的水分损失率、汤汁透过率和质构特性的影响。结果表明: 与 GRF 相比, SSPS-GRF 的峰值黏度、谷值黏度、终值黏度、崩解值、回生值、凝沉性、溶解度、膨胀力、储能模量和损耗模量均显著降低 ($P<0.05$)。然而, GRF 的起始温度、峰值温度、终值温度、糊化焓值和胶稠度随着 SSPS 添加量的增加呈现逐渐上升的趋势。SSPS 的添加显著降低了速冻汤圆的水分损失率 ($P<0.05$), 当 SSPS 添加量为 0.5% 时, 速冻汤圆的水分损失率最小。在速冻汤圆中添加 SSPS 显著提高了汤圆煮后的汤汁透过率 ($P<0.05$)。此外, 添加 SSPS 的速冻汤圆煮后硬度、咀嚼性、弹性和凝聚性显著下降 ($P<0.05$)。综上, SSPS 能够降低速冻汤圆的水分损失率, 提高汤圆的汤汁透过率, 改善汤圆的质地。

关键词: 可溶性大豆多糖, 糯米粉, 速冻汤圆, 理化特性, 品质

中图分类号: TS231

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)17-0143-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024090127



本文网刊:

Effects of Soluble Soybean Polysaccharide on Physicochemical Properties of Glutinous Rice Flour and Quality of Quick-frozen Sweet Dumplings

SHEN Huishan^{1,2}, CHENG Shangzhen¹, PAN Yuchang¹, WANG Hongwei^{1,2}, LIU Xingli¹, ZHANG Hua^{1,2,*}

(1. College of Food and Bioengineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China;

2. Food Laboratory of Zhongyuan, Luohe 462300, China)

Abstract: There are some problems with quick-frozen sweet dumplings, such as poor water retention, easy freezing cracking, and high adhesiveness after cooking. To improve the quality of quick-frozen sweet dumplings, this paper investigated the effects of different amounts of soluble soybean polysaccharide (SSPS) on the pasting properties, thermal properties, gel consistency, coagulation, solubility, swelling power, and rheological behavior of glutinous rice flour (GRF). Besides, the effects of SSPS on water loss rate, soup transparency, and textural characteristics of quick-frozen sweet dumplings were studied. The results showed that the peak viscosity, trough viscosity, final viscosity, breakdown, setback, coagulation, solubility, swelling power, viscous modulus, and elastic modulus of SSPS-GRF were significantly lower than GRF ($P<0.05$). However, the onset temperature, peak temperature, end temperature, enthalpy and gel consistency of GRF

收稿日期: 2024-09-12

基金项目: 河南省重点研发专项 (231111113200); 河南省高校科技创新团队 (23IRTSTHN029)。

作者简介: 申慧珊 (1994-), 女, 博士, 讲师, 研究方向: 谷物食品功能化加工, E-mail: shen1685778117@163.com。

* 通信作者: 张华 (1975-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 速冻食品加工与安全控制, E-mail: zhh7510@126.com。

showed a gradual upward trend with the increase of SSPS content. The SSPS significantly reduced the water loss rate of quick-frozen sweet dumplings ($P<0.05$), and the minimum value appeared at 0.5% SSPS. Moreover, SSPS significantly enhanced the soup transparency ($P<0.05$), while significantly decreasing the hardness, chewiness, springiness, and cohesiveness of boiled quick-frozen sweet dumplings ($P<0.05$). In conclusion, SSPS can reduce the water loss rate, enhance the soup transparency, and improve the textural characteristics of quick-frozen sweet dumplings.

Key words: soluble soybean polysaccharide; glutinous rice flour; quick-frozen sweet dumplings; physicochemical properties; quality

汤圆是以糯米粉(Glutinous rice flour, GRF)为主要原料制成的中国传统小吃,口感软糯香甜,深受人们喜爱。随着冷冻技术的发展,速冻汤圆应运而生,并且实现批量生产和冷链运输,发展成为快销食品,市场需求量大。然而,纯糯米粉制备的速冻汤圆在未煮时不能形成蛋白网络结构^[1],存在延展性差、持水能力弱、冻裂率高^[2-4]等问题,煮制后的汤圆会形成具有较强粘连性的弱凝胶结构^[5],导致汤圆在食用时容易粘牙、吞咽困难,不利于老人和儿童食用^[6]。当前,针对速冻汤圆存在的品质问题,国内外主要通过调控原料组分、添加食品添加剂、控制冻藏条件和优化加工工艺等方法改善速冻汤圆的品质,其中添加食品添加剂(多糖、蛋白质、乳化剂、亲水胶体和变性淀粉等)的应用最广泛^[7-9]。

可溶性大豆多糖(Soluble soybean polysaccharide, SSPS)是一种天然阴离子多糖,来源于豆渣再利用,其主链短、侧链多,结构近似球状,易溶于水并能在高浓度下保持较低的黏度而不形成凝胶,具有良好的乳化性、持水性、抗老化性及抗粘结性,而且,SSPS能够减缓人体血糖上升、降低胆固醇、作为益生元改善肠道健康^[10-13]。近年来,SSPS在米面制品中得到广泛应用,王雨等^[14]的研究表明,将SSPS添加到中筋小麦面粉中,能够提高面团的持水性、抑制淀粉回生,改善生鲜面品质。Furuta等^[15]研究了SSPS对大米淀粉糊化的影响,指出SSPS的加入能够显著降低大米淀粉的糊化黏度。此外,SSPS能够使面包和蛋糕的质地变得柔软,延长存放时间。在冷冻过程中SSPS能够抑制米面制品因水分损失引起的老化和冻裂^[16]。在米饭制作过程中加入SSPS能够减少米粒之间的粘连^[17]等。然而,利用SSPS改善糯米粉理化性质及速冻汤圆品质的研究鲜有报道。

因此,本实验研究了不同添加量的SSPS(0%、0.1%、0.3%、0.5%、0.7%、1.0%、1.5%、2.0%、2.5%)对GRF的糊化特性、热特性、胶稠度、凝沉性、溶解度、膨胀力和流变特性的影响,并将SSPS应用到速冻汤圆中,以期改善速冻汤圆在冻融循环过程中的水分损失率高和汤汁透过率低等问题,提高速冻汤圆的质地。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

糯米粉(水分含量 12.07%,食用级) 江苏山连山食品有限公司;可溶性大豆多糖(水分含量 4.59%、

食用级) 平顶山金晶生物科技股份有限公司。

RVA4500 快速黏度测定仪 澳大利亚 Perten 仪器有限公司;DSC Q20 差式扫描量热仪、Discovery HR-1 旋转流动仪 美国 TA 仪器公司;T6 紫外可见分光光度计 北京普析通用仪器有限责任公司;DW-HW 50 超低温冷冻储存箱 中科美菱低温科技股份有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 SSPS-GRF 混合物的制备 分别添加 0%、0.1%、0.3%、0.5%、0.7%、1.0%、1.5%、2.0%、2.5% (w/w)SSPS 代替 GRF 制成混合物(均以干基计),备用。

1.2.2 糯米粉糊化特性的测定 称取 1.5 g 的 SSPS-GRF 混合物于铝罐中,加蒸馏水至 25 g,搅拌均匀,配制成 6%(w/w)的 SSPS-GRF 悬浮液。采用快速黏度测定仪进行测试,设置程序如下:960 r/min 转速下,30 ℃ 保持 1 min;160 r/min 转速下,以 10 ℃/min 的速率升温至 95 ℃,保持 5 min,再以 10 ℃/min 的速率降温至 50 ℃,保持 5 min^[17]。

1.2.3 糯米粉热特性的测定 称取 0.6 g 的 SSPS-GRF 混合物于离心管中,加蒸馏水至 2 g,混合均匀,在 4 ℃ 平衡 12 h,取 9 mg 移入坩埚中,空白坩埚为对照。采用差式扫描量热仪进行分析测试,设置程序如下:20 ℃ 恒温 1 min,以 10 ℃/min 的速率升温至 120 ℃,再恒温 1 min^[5]。

1.2.4 糯米粉胶稠度的测定 参照 GB/T 22294-2008《粮油检验大米胶稠度的测定》进行胶稠度测定。

1.2.5 糯米粉凝沉性的测定 称取 0.3 g 的 SSPS-GRF 混合物于离心管中,加蒸馏水至 30 g,在沸水浴糊化 30 min,冷却至室温,转移至 25 mL 刻度试管至刻度线,分别记录静置 24、48、72 和 96 h 后上层清液体积。用上清液体积占总体积的百分比表示 SSPS-GRF 混合物的凝沉性^[18]。

1.2.6 糯米粉溶解度和膨胀力的测定 称取 0.5 g 的 SSPS-GRF 混合物于离心管中,加 25 mL 蒸馏水,混合均匀,分别在 50、70 和 90 ℃ 的水浴中糊化 30 min,冷却至室温,以 6000 r/min 离心 25 min,将上清液放入 105 ℃ 烘箱中干燥至恒重,并记录离心管中沉淀物的质量^[5]。采用公式(1)和(2)计算溶解度(S)和膨胀力(SP):

$$S(\%) = \frac{M_1}{M} \times 100$$

式 (1)

$$SP(g/g) = \frac{M_2}{M \times (1 - S)}$$

式 (2)

式中: M 为样品的质量, g ; M_1 为上清液烘干后的质量, g ; M_2 为离心后管中沉淀物的质量, g 。

1.2.7 糯米粉凝胶动态流变特性的测定 将 1.2.2 糊化所得的糯米粉凝胶样品转移至流变仪平台上, 选用 40 mm 平板夹具, 板间距为 1 mm。保证应变范围在线性粘弹区的前提下, 固定应变值为 0.5%。再进行动态频率扫描, 频率范围为 1~100 rad/s, 测定扫描过程中储能模量(G')和损耗模量(G'')的变化^[2]。

1.2.8 速冻汤圆的制备 将 1.2.1 中配制的 SSPS-GRF 混合物样品与蒸馏水按 5:4($w:w$)的比例混合均匀, 用保鲜膜包裹静置 20 min 后揉搓成汤圆 (10 g), 然后置于-35 ℃ 超低温冰箱中速冻, 待汤圆中心温度降低至-18 ℃ 时(45 min)将汤圆转移至-18 ℃ 冰箱储存。冻融循环:-18 ℃ 冷冻 46 h, 转移至 25 ℃ 解冻 2 h(相对湿度为 85%), 使汤圆中心温度达到 18 ℃, 记为一次循环(1 F/T), 以同样的操作分别进行 2、4、6 和 8 次冻融循环^[1], 分别记为 2 F/T、4 F/T、6 F/T、8 F/T。

1.2.9 速冻汤圆水分损失率的测定 测定并记录速冻汤圆冻融前后的质量, 采用公式(3)计算速冻汤圆的水分损失率^[8]:

$$H(\%) = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100$$

式 (3)

式中: H 为速冻汤圆的水分损失率, %; M_1 为样品冻融前的质量, g ; M_2 为样品冻融后的质量, g 。

1.2.10 速冻汤圆汤汁透过率的测定 500 mL 蒸馏水烧开, 放入一组速冻汤圆(5 个为一组), 1200 W 煮制 8 min, 待汤汁冷却至室温后移入 500 mL 容量瓶中, 定容, 静置 10 min, 在 620 nm 波长处读取透光率, 记为汤汁透过率, 以蒸馏水为空白对照^[19]。

1.2.11 速冻汤圆质构特性的测定 500 mL 蒸馏水烧开, 放入速冻汤圆, 1200 W 煮制 8 min, 将汤圆捞出沥干。采用 TPA 模式进行测试, 探头型号为

P/50, 触发力为 5 g, 测前速率为 2 mm/s, 测试速率为 1 mm/s, 测后速率为 1 mm/s, 压缩比 60%, 两次测定时间间隔为 5 s^[10]。

1.3 数据处理

所有实验均重复 3 次, 数据采用“均值±标准差”表示。使用 SPSS 27 软件对数据进行统计和分析, 通过 Duncan 法进行差异显著性分析($P<0.05$), 采用 Origin 2018 软件作图。

2 结果与分析

2.1 可溶性大豆多糖对糯米粉糊化特性的影响

由图 1 可知, 随着 SSPS 含量的增加, 糯米粉的峰值黏度、谷值黏度、终值黏度均呈下降趋势, 这是因为 SSPS 吸附在淀粉颗粒表面^[20], 阻碍了糯米淀粉颗粒的吸水膨胀和破裂, 减少了淀粉颗粒内部物质的溶出^[21], 因此, SSPS 应用于糯米粉制品中, 可以缓解糯米粉制品中粘连的现象。由表 1 可知, 当 SSPS 添加量从 0% 增加到 2.5% 时, 崩解值从 179.7 mPa·s 降低到 46.5 mPa·s, 说明 SSPS 可以提高淀粉糊的热稳定性。Nakauma 等^[22] 研究也发现 SSPS 可以降低小麦淀粉的糊化黏度和崩解值, 且 SSPS 效果好于阿拉伯胶。回生值反映淀粉凝胶冷却后重新聚合的能力, 即淀粉老化的程度^[23]。SSPS 添加量从 0% 增加

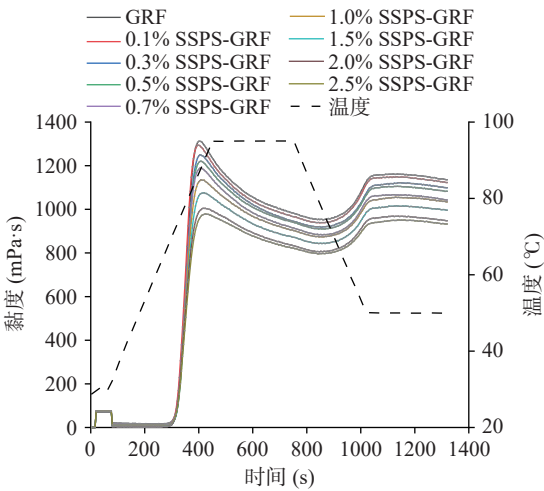


图 1 可溶性大豆多糖对糯米粉糊化特性的影响
Fig.1 Effect of SSPS on pasting properties of GRF

表 1 可溶性大豆多糖对糯米粉糊化特性的影响
Table 1 Effect of SSPS on pasting properties of GRF

SSPS添加量(%)	峰值黏度(mPa·s)	谷值黏度(mPa·s)	终值黏度(mPa·s)	崩解值(mPa·s)	回生值(mPa·s)	糊化温度(℃)
0	1314.3±5.9 ^a	945.7±10.1 ^a	1134.7±5.1 ^a	179.7±11.0 ^a	189.0±5.6 ^a	73.5±0.4 ^{ab}
0.1	1298.7±6.4 ^a	944.0±5.3 ^a	1130.0±6.6 ^a	168.7±3.2 ^a	186.0±1.7 ^a	73.3±0.1 ^b
0.3	1249.0±4.6 ^b	911.7±5.5 ^b	1091.3±8.0 ^b	157.7±10.7 ^{ab}	179.7±4.2 ^{ab}	74.0±0.0 ^a
0.5	1219.3±10.6 ^c	911.3±4.0 ^b	1086.0±3.6 ^b	133.3±9.0 ^c	174.7±1.2 ^b	74.0±0.0 ^a
0.7	1193.0±5.7 ^c	886.0±4.2 ^{bc}	1049.5±9.2 ^c	143.5±3.5 ^{bc}	163.5±4.9 ^c	73.6±0.5 ^{ab}
1.0	1139.3±19.2 ^d	873.7±15.6 ^c	1032.3±14.6 ^c	107.0±6.2 ^d	158.7±1.5 ^c	74.0±0.1 ^a
1.5	1074.7±10.1 ^e	836.0±13.0 ^d	984.0±19.1 ^d	90.7±11.0 ^d	148.0±6.2 ^d	74.0±0.1 ^a
2.0	992.5±17.7 ^f	795.5±13.4 ^e	936.0±17.0 ^e	56.5±0.7 ^e	140.5±3.5 ^{de}	74.0±0.0 ^a
2.5	979.5±0.7 ^f	797.0±1.4 ^e	933.0±0.0 ^e	46.5±0.7 ^e	136.0±1.4 ^e	74.0±0.0 ^a

注: 同列不同小写字母表示数据差异显著($P<0.05$), 表2~表4同。

到 2.5%，回生值从 189.0 mPa·s 降低到 136.0 mPa·s，说明 SSPS 抑制了糯米淀粉糊的老化。糯米粉在加热糊化过程中，SSPS 与溢出的直链淀粉分子之间形成氢键，抑制了淀粉分子的重新聚合，从而导致回生值降低^[24]。

2.2 可溶性大豆多糖对糯米粉热力学特性的影响

如表 2 所示，糯米粉的起始温度、峰值温度和终值温度分别为 60.64、68.56 和 81.30 ℃。添加 SSPS 后，糯米粉的起始温度、峰值温度和终值温度增加，且随着 SSPS 添加量的增加不断升高，在 Abdolkhaligh 等^[25]研究的阿拉伯胶对玉米淀粉的影响中也发现类似结果。在加热过程中，SSPS-GRF 体系吸收的能量主要用于淀粉的吸水膨胀和打破淀粉颗粒的无定形区，从而破坏淀粉颗粒。SSPS 改变淀粉热力学特性可能是因为 SSPS 包裹在糯米淀粉颗粒上形成水合层^[13]，并通过羟基和羧基与水分子形成氢键，从而抑制了淀粉的吸水膨胀，争夺了与淀粉作用的水分子，提高了体系中结合水的比例，因此，起始温度、峰值温度、终值温度有所增加^[26]。SSPS 含量从 0% 增加到 2.5% 时，糊化焓值从 10.61 J/g 增加到 14.45 J/g，可能是因为 SSPS 中含有较多的羟基和羧基等活性基团，能与水分子形成氢键，增大淀粉在糊化过程中所需的能量，因此，糊化焓值增加。

表 2 可溶性大豆多糖对糯米粉热力学特性的影响
Table 2 Effect of SSPS on thermal properties of GRF

SSPS添加量 (%)	起始温度 (℃)	峰值温度 (℃)	终值温度 (℃)	糊化焓值 (J/g)
0	60.64±0.31 ^e	68.56±0.24 ^c	81.30±0.28 ^d	10.61±0.14 ^h
0.1	61.08±0.21 ^d	68.77±0.08 ^{bc}	82.29±0.37 ^c	10.89±0.15 ^g
0.3	61.12±0.03 ^d	68.82±0.39 ^{bc}	82.93±0.97 ^c	11.06±0.04 ^g
0.5	61.17±0.08 ^d	68.92±0.02 ^{abc}	82.66±0.42 ^c	11.34±0.08 ^f
0.7	61.26±0.12 ^{cd}	68.94±0.46 ^{abc}	83.18±0.32 ^c	11.84±0.10 ^e
1.0	61.50±0.20 ^{bc}	69.19±0.30 ^{ab}	85.15±0.12 ^b	12.13±0.07 ^d
1.5	61.63±0.17 ^{ab}	69.31±0.49 ^{ab}	85.61±1.15 ^b	12.56±0.18 ^c
2.0	61.69±0.16 ^{ab}	69.49±0.08 ^a	86.09±1.02 ^b	13.62±0.28 ^b
2.5	61.79±0.17 ^a	69.50±0.43 ^a	89.70±0.23 ^a	14.45±0.08 ^a

2.3 可溶性大豆多糖对糯米粉胶稠度和凝沉性的影响

在一定条件下，大米粉经过加热糊化、冷却回生

后形成的胶体，在一定时间内水平状态流动的长度称为胶稠度，长度≥60 mm 为软胶，米饭口感柔软，冷却后不变硬；长度<40 mm 为硬胶，米饭口感僵硬，易老化开裂^[27]。由表 3 可知，SPSS 添加量为 0% 时，糯米粉的胶稠度为 53.33 mm，属于中等胶。随着 SSPS 添加量的增多，胶稠度也随之增加，当添加量达到 0.3% 时，胶稠度增加至 60.67 mm，糯米粉凝胶由中等胶转变为软胶，SSPS 明显提高了糯米粉的延展性。同时，一定程度上表明 SSPS 能够降低糯米粉凝胶的老化程度，这与上述 SSPS-GRF 体系糊化特性中回生值的研究结果一致(表 1)。

糊化过的糯米粉糊在静置过程中会发生分子重排和聚集，形成不溶性的淀粉分子微晶束^[28]，导致 SSPS-GRF 体系溶解度降低，出现上层清液析出的现象。上层清液析出的越多说明 SSPS-GRF 体系的凝沉性越强，凝胶稳定性越弱，糯米淀粉老化程度越高。在相同静置时间下，随着 SSPS 添加量的增加，糯米粉的凝沉性呈下降趋势，说明添加 SSPS 能够抑制糯米粉糊发生凝沉，且添加量越大，抑制效果越好。一方面，SSPS 易与水分子结合，增加 SSPS-GRF 体系的持水力，另一方面，SSPS 能抑制糯米淀粉的糊化，减少糯米淀粉老化，因此，添加 SSPS 后，糯米粉的亲水能力增强，凝沉性降低^[29]。

2.4 可溶性大豆多糖对糯米粉溶解度和膨胀力的影响

由表 4 可知，当 SSPS 的添加量相同时，GRF 的溶解度和膨胀力随温度的升高均呈上升趋势，这是因为在加热过程中，淀粉分子间氢键发生断裂，双螺旋结构被破坏，淀粉颗粒吸水膨胀，直链淀粉及小分子支链淀粉浸出^[30]。翟羽恒^[26]在研究果胶对糯米淀粉的影响时也发现了类似的结果，作者指出可能是因为淀粉颗粒在不断加热的过程中，晶体结构遭到破坏，导致淀粉的溶解度和膨胀力增加。

在相同温度下，GRF 的溶解度和膨胀力均随着 SSPS 添加量的增加而显著降低($P<0.05$)。温度为 90 ℃ 时，SSPS 从 0% 增加到 2.5%，溶解度和膨胀力分别从 58.67% 和 91.83 g/g 降低到 19.37% 和 32.25 g/g，可能是因为 SSPS 在糯米淀粉周围形成多糖层，限制了糯米淀粉与水的相互作用^[31]，从而减少

表 3 可溶性大豆多糖对糯米粉胶稠度和凝沉性的影响

Table 3 Effect of SSPS on gel consistency and coagulation of GRF

SSPS添加量(%)	胶稠度(mm)	凝沉性(%)			
		24 h	48 h	72 h	96 h
0	53.33±1.53 ^g	2.33±0.58 ^{ab}	8.67±3.06 ^a	11.67±4.04 ^a	13.00±1.73 ^a
0.1	58.50±0.50 ^f	2.67±0.58 ^a	5.67±2.08 ^b	7.33±1.15 ^b	10.00±2.00 ^b
0.3	60.67±2.75 ^{ef}	0.67±1.15 ^c	4.00±0.00 ^{bc}	5.33±0.58 ^{bc}	7.00±1.00 ^c
0.5	63.00±1.00 ^{de}	1.33±1.15 ^{abc}	3.00±1.00 ^{cd}	4.67±0.58 ^{bc}	6.33±0.58 ^c
0.7	65.83±1.44 ^{cd}	1.00±1.00 ^{bc}	3.67±2.08 ^{bcd}	5.00±1.73 ^{bc}	6.67±1.53 ^c
1.0	67.67±2.08 ^c	1.33±0.58 ^{abc}	3.33±1.15 ^{bcd}	4.00±2.00 ^{cd}	6.67±0.58 ^c
1.5	67.83±1.04 ^c	2.33±0.58 ^{ab}	2.00±0.00 ^{cd}	3.00±1.00 ^{cd}	4.67±2.89 ^{cd}
2.0	71.67±0.58 ^b	2.00±0.00 ^{abc}	2.67±0.58 ^{cd}	3.33±0.58 ^{cd}	3.67±1.15 ^{de}
2.5	77.67±2.89 ^a	1.00±0.00 ^{bc}	1.33±0.58 ^d	1.67±0.58 ^d	1.67±0.58 ^e

表 4 可溶性大豆多糖对糯米粉溶解度和膨胀力的影响
Table 4 Effect of SSPS on solubility and swelling power of GRF

SSPS添加量(%)	溶解度(%)			膨胀力(g/g)		
	50 ℃	70 ℃	90 ℃	50 ℃	70 ℃	90 ℃
0	3.32±0.2 ^a	43.49±0.67 ^a	58.67±0.57 ^a	4.34±0.12 ^a	34.77±0.87 ^a	91.83±1.1 ^a
0.1	2.9±0.21 ^{ab}	39.11±6.77 ^b	55.31±2.49 ^b	4.14±0.13 ^b	32.03±0.49 ^b	86.79±2.1 ^b
0.3	2.23±0.6 ^{cd}	26.6±10.65 ^c	52.11±0.74 ^b	3.81±0.1 ^c	29.81±0.46 ^c	74.28±1.38 ^c
0.5	2.3±0.33 ^{cd}	24.57±4.48 ^d	47.82±5.31 ^c	3.66±0.06 ^d	25.61±0.14 ^d	56.88±4.52 ^d
0.7	2.04±0.18 ^d	20.12±0.58 ^e	34.09±0.88 ^d	3.52±0.03 ^e	23.27±0.18 ^e	46.44±0.54 ^e
1.0	2.5±0.29 ^{bc}	20.09±1.85 ^f	29.73±1.73 ^e	3.36±0.07 ^f	21.45±0.14 ^f	44.37±1.96 ^e
1.5	1.1±0.05 ^e	18.89±3.39 ^g	27.08±0.14 ^e	3.27±0.04 ^f	20.4±0.1 ^g	41.12±0.57 ^f
2.0	1.25±0.17 ^e	18.09±0.4 ^h	23.31±1.11 ^f	3.09±0.05 ^g	19.67±0.04 ^h	37.7±1.89 ^g
2.5	1.19±0.16 ^e	16.7±1.18 ^h	19.37±0.12 ^g	2.95±0.06 ^h	18.59±0.07 ⁱ	32.25±0.6 ^h

淀粉分子浸出, 表现为溶解度和膨胀力下降。Wang 等^[32] 在研究 SSPS 对玉米淀粉膨胀力的影响时, 指出 SSPS 的存在能延缓淀粉颗粒的膨胀, 一方面, SSPS 有较强的水合能力, 限制了玉米淀粉吸水膨胀, 另一方面, SSPS 溶液具有相对较低的黏度, 低黏度的多糖溶液可以在淀粉颗粒周围形成多糖层, 从而阻止淀粉膨胀。

2.5 可溶性大豆多糖对糯米粉凝胶动态流变特性的影响

添加 SSPS 后 GRF 凝胶的储能模量(G')和损耗模量(G'')如图 2 所示, GRF 凝胶和 SSPS-GRF 凝胶样品的 G' 和 G'' 均随着角频率的增加而增加, 且在相同角频率下 G' 略大于 G'' , 说明所有样品处于弱凝胶状态^[33-34]。随着 SSPS 添加量的增加, G' 和 G'' 逐渐下降, SSPS 的添加对 G' 的影响较大, G' 的降低表明

SSPS-GRF 体系内部应力减小, 硬度和刚度有所降低, 这可能是由于 SSPS 包裹在淀粉颗粒表面形成一层“屏障”^[35], 限制了淀粉颗粒的吸水膨胀, 且阻止了淀粉分子之间形成网络结构^[36], 因此, SSPS 的添加能够减弱体系凝胶结构的强度, 黏弹性降低。Liu 等^[37] 的研究也发现了类似的结果, 作者指出 SSPS 能够降低葛根淀粉和莲藕淀粉的黏弹性, 削弱淀粉凝胶的网络结构。

2.6 可溶性大豆多糖对速冻汤圆水分损失率的影响

在冻融循环过程中, 受温度变化和水分迁移的影响, 汤圆内部的水分从结合水转变为自由水, 汤圆表面冰晶升华及脱落, 造成水分流失并出现干耗现象^[26]。由表 5 可知, 冻融次数相同时, 随着 SSPS 添加量的增加, 水分损失率逐渐下降, 当 SSPS 添加量为 0.5% 时, 水分损失率最小, 随着 SSPS 添加量的继续增加, 水分损失率又略有上升。这是因为在汤圆内部, SSPS 作为连续相分布在糯米淀粉颗粒的周围, 并与水分子结合形成氢键, 减少水分的流动和损失, 减缓大冰晶的生成^[32], 因此, SSPS 能够降低冻融过程中汤圆的水分损失率。

表 5 可溶性大豆多糖对速冻汤圆水分损失率的影响
Table 5 Effect of SSPS on water loss rate of quick-frozen sweet dumplings

SSPS添加量(%)	水分损失率(%)			
	2 F/T	4 F/T	6 F/T	8 F/T
0	1.88±0.28 ^{Da}	3.08±0.51 ^{Ca}	4.99±0.66 ^{Ba}	5.99±0.74 ^{Aa}
0.1	1.53±0.05 ^{Db}	2.50±0.25 ^{Cb}	3.67±0.28 ^{Bb}	4.49±0.33 ^{Ab}
0.3	1.39±0.07 ^{Cb}	2.06±0.23 ^{Bc}	3.11±0.36 ^{Ac}	3.08±0.19 ^{Ad}
0.5	0.95±0.22 ^{Cd}	1.08±0.38 ^{Bc}	1.27±0.19 ^{Bg}	1.55±0.11 ^{Ag}
0.7	1.02±0.25 ^{Cod}	1.18±0.41 ^{Ce}	1.72±0.15 ^{Bf}	2.08±0.17 ^{Af}
1.0	1.12±0.16 ^{Cod}	1.59±0.30 ^{Bd}	2.19±0.12 ^{Ac}	2.28±0.14 ^{Af}
1.5	1.17±0.20 ^{Bc}	2.41±0.46 ^{Ab}	2.65±0.17 ^{Ad}	2.64±0.14 ^{Ac}
2.0	1.16±0.05 ^{Cc}	2.42±0.34 ^{Bb}	2.74±0.39 ^{Bd}	3.5±0.22 ^{Ac}
2.5	1.06±0.08 ^{Cod}	2.46±0.35 ^{Bb}	2.76±0.11 ^{Bd}	3.69±0.22 ^{Ac}

注: 同一行上标大写字母不同表示相同SSPS添加量下不同冻融循环次数之间差异显著; 同一列上标小写字母不同表示相同冻融循环次数下不同SSPS添加量之间差异显著($P<0.05$), 表6、表7同。

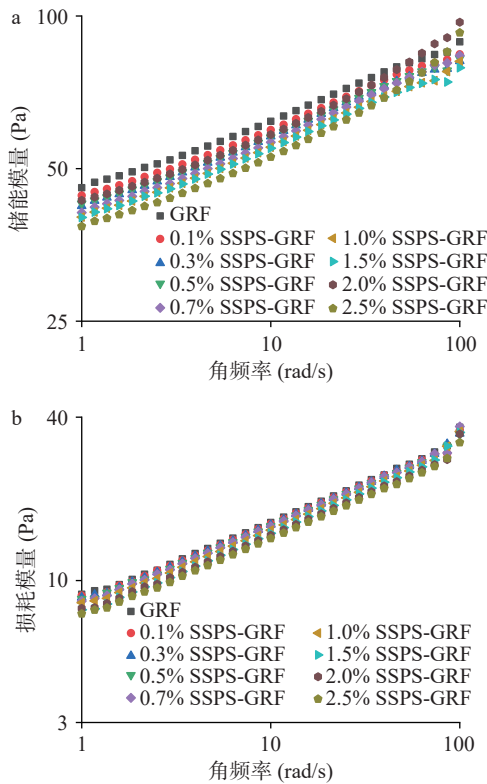


图 2 可溶性大豆多糖对糯米粉凝胶动态流变特性的影响
Fig.2 Effect of SSPS on the dynamic rheology of GRF gel

2.7 可溶性大豆多糖对速冻汤圆汤汁透过率的影响
汤汁透过率与速冻汤圆的品质密切相关, 速冻

汤圆在冻融过程中会因表面失水而发生脱粉、开裂,这使得在蒸煮过程中,汤圆表面的糯米粉失水脱离并融入汤汁,使蒸煮后的汤汁变得浑浊,汤汁透过率降低^[26]。由表 6 可知,冻融循环次数相同时,汤汁透过率随着 SSPS 添加量的增加呈先升高后降低的趋势,但整体高于未添加 SSPS 的汤圆。这可能是 SSPS 的添加改善了 SSPS-GRF 体系的水分分布。在蒸煮过程中,SSPS 增加了汤圆内部凝胶结构的强度和稳定性^[1],从而抑制了自由水的逸出,减少表面水分的损失,进而抑制了汤圆蒸煮时表面的 GRF 脱落扩散进入水中,提高了汤圆的汤汁透过率。

2.8 可溶性大豆多糖对速冻汤圆质构特性的影响

表 7 是不同 SSPS 添加量的速冻汤圆在不同冻融循环次数下的质构特性参数。由表 7 可知,在 SSPS 添加量相同的情况下,随着冻融循环次数的增加,速冻汤圆的硬度、咀嚼性、弹性和凝聚性均显著上升($P<0.05$),这是由于在冻融循环过程中,汤圆中的水分形成冰晶,随着冻融次数的增加,冰晶发生重

结晶形成大冰晶,破坏汤圆的内部结构,且汤圆随着冻融循环次数的增加会出现水分散失的现象,导致汤圆变得干燥和坚硬,此外,汤圆中的淀粉在冻融循环过程中会发生老化,淀粉颗粒重结晶,表现出汤圆的硬度和咀嚼性增加^[19]。

在冻融循环次数相同的情况下,SSPS 的添加使速冻汤圆的硬度、咀嚼性、弹性和凝聚性均发生显著变化。TPA 模式中,硬度是模拟人体牙齿咀嚼导致食品产生形变时所需力的大小,通常与淀粉内部水分和凝沉作用有关^[3]。在相同冻融循环次数下,随着 SSPS 添加量从 0% 增加到 2.5%,速冻汤圆的硬度分别从 532.42 g(0 F/T)、608.34 g(2 F/T)、625.72 g(4 F/T)、676.67 g(6 F/T)、794.92 g(8 F/T)降低至 352.24 g(0 F/T)、364.40 g(2 F/T)、369.52 g(4 F/T)、447.75 g(6 F/T)、441.66 g(8 F/T),这是由于 SSPS 的加入阻碍了糯米淀粉分子的聚集重排,减弱了淀粉分子链间的缔合度,使汤圆质地变得柔软。咀嚼性是模拟口腔咀嚼食物直到吞咽所需要的能量,咀嚼性越

表 6 可溶性大豆多糖对速冻汤圆汤汁透过率的影响

Table 6 Effect of SSPS on the soup transparency of quick-frozen sweet dumplings

SSPS添加量(%)	汤汁透过率(%)				
	0 F/T	2 F/T	4 F/T	6 F/T	8 F/T
0	76.42±0.30 ^{Ad}	57.27±1.19 ^{Bf}	54.98±0.67 ^{Ci}	40.68±0.51 ^{Df}	27.11±2.75 ^{Ef}
0.1	78.45±0.62 ^{Ac}	59.22±0.42 ^{Be}	58.00±0.51 ^{Ch}	42.14±1.25 ^{Df}	32.85±0.95 ^{Ec}
0.3	82.12±1.69 ^{Aa}	69.29±0.04 ^{Bc}	63.56±1.44 ^{Cf}	47.58±1.79 ^{De}	38.38±0.93 ^{Ed}
0.5	78.48±0.35 ^{Ac}	70.28±0.02 ^{Bc}	76.43±2.01 ^{Ad}	62.21±0.44 ^{Ca}	50.38±2.26 ^{Dc}
0.7	79.30±0.06 ^{Bbc}	73.37±1.90 ^{Cb}	82.11±1.17 ^{Ab}	63.32±1.06 ^{Da}	61.13±0.95 ^{Eb}
1.0	79.92±0.04 ^{Bb}	75.99±1.63 ^{Ca}	87.77±2.34 ^{Aa}	60.66±1.00 ^{Db}	77.49±1.32 ^{Ca}
1.5	78.85±0.20 ^{Abc}	72.70±1.30 ^{Bb}	79.31±1.04 ^{Ac}	58.62±0.25 ^{Cc}	52.30±2.69 ^{Dc}
2.0	78.83±0.33 ^{Abc}	69.68±0.51 ^{Bc}	69.58±3.19 ^{Be}	57.18±0.84 ^{Cc}	40.64±0.69 ^{Dd}
2.5	75.09±0.33 ^{Ae}	65.44±1.90 ^{Bd}	60.75±0.08 ^{Cg}	49.56±0.56 ^{Bd}	32.95±2.19 ^{Ec}

表 7 可溶性大豆多糖对速冻汤圆质构特性的影响

Table 7 Effect of SSPS on textural characteristics of quick-frozen sweet dumplings

指标	SSPS添加量(%)	冻融循环				
		0 F/T	2 F/T	4 F/T	6 F/T	8 F/T
硬度(g)	0	532.42±6.37 ^{Ba}	608.34±59.09 ^{Ba}	625.72±20.73 ^{Ba}	676.67±73.26 ^{ABa}	794.92±124.54 ^{Aa}
	0.1	513.30±2.64 ^{Bab}	519.49±20.10 ^{Bb}	591.81±20.02 ^{ABb}	628.89±71.45 ^{ABab}	664.36±77.27 ^{Ab}
	0.3	448.94±22.77 ^{Cc}	486.63±16.88 ^{BCbc}	552.11±12.15 ^{Bc}	619.95±62.94 ^{Aabc}	667.44±72.80 ^{Ab}
	0.5	460.76±0.00 ^{Bbc}	463.11±0.60 ^{Bcd}	505.02±16.45 ^{Bde}	606.32±4.64 ^{Aabc}	598.95±42.64 ^{Abc}
	0.7	427.95±41.74 ^{Cc}	473.69±30.50 ^{BCcd}	516.81±4.12 ^{Bd}	574.38±21.83 ^{ABcd}	570.61±10.98 ^{ABcd}
	1.0	422.62±19.74 ^{Cc}	435.11±16.39 ^{Cde}	486.16±10.85 ^{Bef}	546.90±20.45 ^{Acde}	530.21±13.27 ^{Acde}
	1.5	421.74±36.84 ^{CDc}	403.64±9.69 ^{Def}	465.21±7.22 ^{BCf}	509.09±40.01 ^{Ade}	491.76±8.23 ^{ABde}
	2.0	410.13±49.31 ^{Bcd}	388.06±2.47 ^{Bfg}	407.05±7.06 ^{Bg}	458.45±14.39 ^{Ae}	471.11±15.22 ^{Ae}
	2.5	352.24±9.69 ^{Bd}	364.40±2.81 ^{Bg}	369.52±34.84 ^{Bh}	447.75±27.30 ^{Ae}	441.66±15.66 ^{Ae}
咀嚼性	0	293.06±0.12 ^{Ca}	353.21±29.80 ^{BCa}	377.14±18.53 ^{BCa}	459.58±70.29 ^{ABa}	512.96±91.54 ^{Aa}
	0.1	275.04±3.57 ^{Cab}	287.01±14.57 ^{BCb}	352.49±15.69 ^{ABb}	401.84±36.30 ^{ABb}	406.84±56.36 ^{Abc}
	0.3	232.16±14.20 ^{Db}	271.30±22.62 ^{CDbc}	330.69±11.35 ^{BCb}	392.86±53.72 ^{ABbc}	425.70±58.51 ^{Ab}
	0.5	243.14±4.12 ^{Dab}	245.31±10.57 ^{Dcd}	294.85±4.85 ^{Cc}	370.10±19.81 ^{Abc}	355.76±31.03 ^{Bbcd}
	0.7	232.05±43.33 ^{Db}	262.89±24.50 ^{CDbc}	300.18±12.43 ^{BCc}	361.28±15.36 ^{Abc}	341.54±6.69 ^{ABcde}
	1.0	236.24±11.99 ^{Cab}	227.67±8.62 ^{Cde}	269.20±7.58 ^{Bd}	335.19±27.39 ^{Acde}	316.34±11.34 ^{Adef}
	1.5	219.47±35.91 ^{BCbc}	204.52±10.43 ^{Cef}	262.72±15.98 ^{ABd}	294.86±38.92 ^{Ad}	280.03±17.86 ^{Aef}
	2.0	225.38±45.22 ^{Bbc}	196.09±5.89 ^{Bfg}	218.71±12.29 ^{Be}	280.58±16.62 ^{Ad}	269.48±18.55 ^{Aef}
	2.5	170.23±6.86 ^{Bc}	173.55±5.18 ^{Bg}	193.15±28.14 ^{Bf}	270.51±33.24 ^{Ad}	248.00±8.89 ^{Af}

续表 7

指标	SSPS添加量(%)	冻融循环				
		0 F/T	2 F/T	4 F/T	6 F/T	8 F/T
弹性	0	0.77±0.01 ^{Dab}	0.80±0.02 ^{CDa}	0.81±0.01 ^{Ca}	0.90±0.02 ^{Aa}	0.85±0.02 ^{Ba}
	0.1	0.76±0.00 ^{Cab}	0.77±0.01 ^{Cb}	0.81±0.02 ^{Ba}	0.85±0.01 ^{Aab}	0.83±0.03 ^{Aab}
	0.3	0.74±0.00 ^{Cab}	0.76±0.02 ^{BChc}	0.81±0.01 ^{ABa}	0.84±0.04 ^{Aab}	0.85±0.03 ^{Aa}
	0.5	0.75±0.01 ^{Bab}	0.74±0.03 ^{Bbcd}	0.79±0.03 ^{ABab}	0.82±0.05 ^{Ab}	0.80±0.02 ^{ABbcd}
	0.7	0.77±0.06 ^{Bab}	0.77±0.02 ^{Bab}	0.79±0.02 ^{ABab}	0.84±0.01 ^{Aab}	0.81±0.01 ^{ABabc}
	1.0	0.78±0.00 ^{Ba}	0.73±0.01 ^{Ccd}	0.76±0.01 ^{BCbcd}	0.83±0.04 ^{Aab}	0.80±0.01 ^{ABbcd}
	1.5	0.73±0.05 ^{Aab}	0.72±0.02 ^{Ade}	0.78±0.03 ^{Aabc}	0.79±0.04 ^{Ab}	0.79±0.03 ^{Accl}
	2.0	0.77±0.06 ^{BCab}	0.72±0.02 ^{Cde}	0.75±0.03 ^{BCcd}	0.82±0.02 ^{Ab}	0.78±0.03 ^{ABcd}
	2.5	0.70±0.01 ^{Cb}	0.70±0.01 ^{Ce}	0.73±0.03 ^{BCd}	0.81±0.05 ^{Ab}	0.77±0.02 ^{ABd}
	0	0.72±0.00 ^{ABa}	0.72±0.00 ^{Bab}	0.74±0.00 ^{ABa}	0.75±0.01 ^{Aa}	0.76±0.00 ^{Aa}
凝聚性	0.1	0.71±0.01 ^{Bab}	0.72±0.01 ^{Bbc}	0.74±0.01 ^{ABa}	0.75±0.01 ^{Aa}	0.73±0.01 ^{ABbcd}
	0.3	0.70±0.00 ^{Bab}	0.73±0.02 ^{ABa}	0.74±0.01 ^{Aa}	0.75±0.01 ^{Aa}	0.75±0.00 ^{Aab}
	0.5	0.71±0.00 ^{BCab}	0.72±0.01 ^{Bbcd}	0.74±0.01 ^{ABa}	0.74±0.01 ^{Aab}	0.74±0.01 ^{ABcd}
	0.7	0.70±0.01 ^{Bab}	0.72±0.01 ^{Bbc}	0.73±0.01 ^{Aab}	0.75±0.01 ^{Aa}	0.74±0.00 ^{ABcd}
	1.0	0.71±0.00 ^{Aa}	0.71±0.01 ^{ABcd}	0.73±0.01 ^{Aabc}	0.74±0.01 ^{Aab}	0.75±0.01 ^{Aabc}
	1.5	0.71±0.00 ^{Bab}	0.70±0.00 ^{Bd}	0.73±0.01 ^{Aabc}	0.73±0.00 ^{Ab}	0.72±0.01 ^{Ad}
	2.0	0.71±0.01 ^{CDa}	0.71±0.01 ^{Dcd}	0.72±0.01 ^{BCbc}	0.75±0.01 ^{Aab}	0.73±0.01 ^{Bcd}
	2.5	0.69±0.01 ^{CDb}	0.68±0.00 ^{De}	0.71±0.01 ^{BCc}	0.74±0.01 ^{Aab}	0.73±0.02 ^{ABcd}

低表明食品的口感越好^[10]。在相同冻融循环次数下,随着 SSPS 添加量从 0% 增加到 2.5%,速冻汤圆的咀嚼性分别从 293.06 g(0 F/T)、353.21 g(2 F/T)、377.14 g(4 F/T)、459.58 g(6 F/T)、512.96 g(8 F/T)降低至 170.23 g(0 F/T)、173.55 g(2 F/T)、193.15 g(4 F/T)、270.51 g(6 F/T)、248.00 g(8 F/T),说明 SSPS 的添加能够改善速冻汤圆的质地,可能是 SSPS 的添加降低了汤圆的粘牙性,减少了汤圆在口腔中咀嚼时所需要的能量^[29],因此添加 SSPS 后汤圆的咀嚼性降低。食品的弹性与凝聚性是密切相关的,在相同冻融循环次数下,与纯糯米粉速冻汤圆相比,添加 SSPS 后汤圆的弹性和凝聚性下降。SSPS 和淀粉组分之间的热力学不相容性可能会导致相分离,破坏汤圆中淀粉凝胶的连续性结构,导致汤圆的弹性降低。凝聚性反映食品内部结构的凝聚力,凝聚性高的汤圆在咀嚼时表现出更强的粘附感^[11],SSPS 与糯米淀粉分子相结合阻碍了淀粉分子间的交联,使淀粉分子之间的相互作用力减弱,从而导致汤圆的凝聚性下降^[24]。综上,添加 SSPS 降低了速冻汤圆的硬度、咀嚼性、弹性和凝聚性,SSPS 有助于改善速冻汤圆的粘连性,降低汤圆食用时的粘牙性,使其易于咀嚼和吞咽。

3 结论

在 SSPS-GRF 体系中,SSPS 包裹在淀粉颗粒表面,抑制淀粉与水之间的相互作用。随着 SSPS 添加量的增加,SSPS-GRF 混合物的糊化黏度、崩解值、回生值、凝沉性、溶解度、膨胀力、储能模量和损耗模量均呈下降趋势,糊化焓值和胶稠度均呈上升趋势。冻融循环加速了速冻汤圆质地的劣变,SSPS 的添加降低了速冻汤圆的水分损失率 and 提高了汤圆的汤汁透过率,且在冻融循环过程中随着 SSPS 添加量的增加,汤圆的硬度、咀嚼性、弹性和凝聚性显著降

低($P<0.05$)。综上,SSPS 与糯米淀粉相互作用,增强了速冻汤圆的稳定性、持水性、抗老化性及抗冻性,降低了速冻汤圆的黏弹性和粘连性,改善了速冻汤圆的质地,为 SSPS 在速冻汤圆中的应用提供理论依据。

© The Author(s) 2025. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

[1] WANG H W, ZHANG J, WANG R L, et al. Improving quality attributes of sweet dumplings by germination: Effect of glutinous rice flour microstructure and physicochemical properties[J]. Food Bioscience, 2021, 44(Pt.B): 101445.

[2] LI Y, DINI G, YOKOYAMA W, et al. Characteristics of annealed glutinous rice flour and its formation of fast-frozen dumplings [J]. Journal of Cereal Science, 2017, 79: 106–112.

[3] WANG H W, XIAO N Y, WANG X T, et al. Effect of pre-gelatinized starch on the characteristics, microstructures, and quality attributes of glutinous rice flour and dumplings[J]. Food Chemistry, 2019, 283(JUN.15): 248–256.

[4] XU K, CHI C, SHE Z Y, et al. Understanding how starch constituent in frozen dough following freezing-thawing treatment affected quality of steamed bread[J]. Food Chemistry, 2022, 366: 130614.

[5] 肖乃勇. 发芽对糙糯米淀粉特性的影响规律及其在汤圆制品中的应用[D]. 郑州: 郑州轻工业大学, 2020. [XIAO N Y. Effect of germination on characteristics of starch isolated from waxy brown rice and its application in glutinous dumplings[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University of Light Industry, 2020.]

[6] SHI C M, ZHU S, DING G Q, et al. Modulating structure and properties of glutinous rice flour and its dumpling products by annealing[J]. Processes, 2021, 9(12): 2248.

[7] LI Z N, WANG L, CHEN Z X, et al. Impact of protein content on processing and texture properties of waxy rice flour and glutinous dumpling[J]. Journal of Cereal Science, 2018, 81: 30–36.

[8] CHEN L, TAN H X, FENG R Z, et al. Effect of modified starches on the quality of skins of glutinous rice dumplings[J]. In-

- ternational Journal of Biological Macromolecules: Structure, Function and Interactions, 2023, 253(Pt.4): 127139.
- [9] LIU X L, CHEN Y F, YANG J J, et al. Effect of molar substitution on the properties of γ -hydroxypropyl starch[J]. *Molecules*, 2022, 27(7): 2119.
- [10] LIN Z X, GENG D H, QIN W Y, et al. Effects of damaged starch on glutinous rice flour properties and sweet dumpling qualities[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 181(3): 390–397.
- [11] HONG T T, WANG L L, XU Y, et al. Comparative study of soluble soybean polysaccharides on bread staling under acidic conditions[J]. *Food Chemistry*, 2023, 400: 133950.
- [12] TIAN H, ZHAO Q Z, HE Z Y, et al. Effects of molecular weight and degree of esterification of soluble soybean polysaccharide on the stability of casein under acidic conditions[J]. *Foods*, 2021, 10(3): 686.
- [13] 徐平, 王月慧, 陈磊, 等. 可溶性大豆多糖对鲜湿豆丝货架期内贮藏品质的影响[J]. *食品科学*, 2023, 44(17): 144–152. [XU P, WANG Y H, CHEN L, et al. Effect of soluble soybean polysaccharide on storage quality of fresh wet bean thread during shelf life period[J]. *Food Science*, 2023, 44(17): 144–152.]
- [14] 王雨, 刘翀, 洪静, 等. 可溶性大豆多糖对中筋小麦粉面团特性和生鲜面品质的影响[J]. *食品科技*, 2020, 45(3): 177–183. [WANG Y, LIU C, HONG J, et al. Effect of soluble soy polysaccharides on dough properties and fresh noodle quality of medium gluten wheat flour[J]. *Food Science and Technology*, 2020, 45(3): 177–183.]
- [15] FURUTA H, NAKAMURA A, ASHIDA H, et al. Properties of rice cooked with commercial water-soluble soybean polysaccharides extracted under weakly acidic conditions from soybean cotyledons[J]. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 2003, 67(4): 677–683.
- [16] 徐洁茹, 童群义. 乙酰化可溶性大豆多糖的制备及其乳化性能研究[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(21): 148–157. [XU J R, TONG Q Y. Preparation and emulsifying properties of acetylated soybean soluble polysaccharides[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(21): 148–157.]
- [17] 潘燕. 可溶性大豆多糖对面浆体系及冻藏条件下春卷皮品质的影响[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021. [PAN Y. Effects of soluble soybean polysaccharide on the batter and the quality of spring roll wrappers in frozen storage[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2021.]
- [18] 高雪丽, 张梦迪, 王梦赞, 等. 湿热处理对红薯淀粉特性的影响[J]. *食品工业科技*, 2024, 45(5): 30–36. [GAO X L, ZHANG M D, WANG M Y, et al. Effect of heat-moisture treatment on the properties of sweet potato starch[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2024, 45(5): 30–36.]
- [19] 张宁, 徐丽娜, 王展, 等. 木糖醇对糯米粉理化性质及汤圆品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2024, 45(7): 51–58. [ZHANG N, XU L N, WANG Z, et al. Effects of xylitol on physicochemical properties of glutinous rice flour and quality of glutinous rice dumplings[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2024, 45(7): 51–58.]
- [20] LIN S Y, LIU X, CAO Y, et al. Effects of xanthan and konjac gums on pasting, rheology, microstructure, crystallinity and *in vitro* digestibility of mung bean resistant starch[J]. *Food Chemistry*, 2021, 339(Mar.1): 128001.1–128007.
- [21] CHEN H M, FU X, LUO Z G, et al. Effect of gum arabic on freeze-thaw stability, pasting and rheological properties of tapioca starch and its derivatives[J]. *Food Hydrocolloids*, 2015, 51(Oct.1): 355–360.
- [22] NAKAUMA M, FUNAMI T, NODA S, et al. Comparison of sugar beet pectin, soybean soluble polysaccharide, and gum arabic as food emulsifiers. 1. Effect of concentration, pH, and salts on the emulsifying properties[J]. *Food Hydrocolloids*, 2008, 22(7): 1254–1267.
- [23] LIU S, LIN L, SHEN M, et al. Effect of *Mesona chinensis* polysaccharide on the pasting, thermal and rheological properties of wheat starch[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 118: 945–951.
- [24] ZHAO Q Z, TIAN H, CHEN L, et al. Interactions between soluble soybean polysaccharide and starch during the gelatinization and retrogradation: Effects of selected starch varieties[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 118(Sep.): 106765.1–106765.14.
- [25] ABDOLKHALEGH G, MOHAMMADZADEH J M, ALI M, et al. Modification of corn starch by thermal-ultrasound treatment in presence of arabic gum[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 19340.
- [26] 翟羽恒. 果胶对糯米淀粉特性的影响及在汤圆中的应用[D]. 无锡: 江南大学, 2022. [ZHAI Y H. Effect of pectin on the characteristics of waxy rice starch and its application in glutinous rice dumplings[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022.]
- [27] 顾玲. 速冻汤圆粉团品质改良的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2015. [GU L. Study on the improvement of quality of quick-frozen rice balls[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2015.]
- [28] 徐磊, 闫璟圆, 陈舒拉, 等. 交联甜菜果胶对豌豆淀粉糊化及流变特性的影响[J]. *中国粮油学报*, 2024, 39(1): 102–108. [XU L, YAN J Y, CHEN S L, et al. Effects of cross-linked sugar beet pectin on gelatinization and rheological properties of pea starch[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2024, 39(1): 102–108.]
- [29] ZHANG X M, ZHANG K, YANG N, et al. Effect of natural gums on pasting, rheological, structural and hydrolysis properties of kudzu starch[J]. *Current Research in Food Science*, 2023, 7: 100607.
- [30] CHAISAWANG M, SUPHANTHARIKA M. Pasting and rheological properties of native and anionic tapioca starches as modified by guar gum and xanthan gum[J]. *Food Hydrocolloids*, 2006, 20(5): 641–649.
- [31] 焦昆鹏, 马丽苹, 张晓宇, 等. 水溶性大豆多糖对马铃薯淀粉理化性能的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(14): 54–59. [JIAO K P, MA L P, ZHANG X Y, et al. Effect of soluble soybean polysaccharides on the physical and chemical properties of potato starch[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46(14): 54–59.]
- [32] WANG H M, QIU J J, WU Y W, et al. Impact of soluble soybean polysaccharide on the gelatinization and retrogradation of corn starches with different amylose content[J]. *Food Research International*, 2024, 184: 114254.
- [33] YURIS A, GOH K K T, HARDACRE A K, et al. Understanding the interaction between wheat starch and *Mesona chinensis* polysaccharide[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2017(84): 212–221.
- [34] XU N, YU Z, ZHANG G H, et al. Effects of insoluble dietary fiber and ferulic acid on rheological and thermal properties of rice starch[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 193: 2260–2270.
- [35] REN Y M, JIANG L, WANG W J, et al. Effects of *Mesona chinensis* Benth polysaccharide on physicochemical and rheological properties of sweet potato starch and its interactions[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 99: 105371.
- [36] HONG T T, YANG T, CHEN L Y, et al. Soluble soybean polysaccharides-induced changes in pasting properties of wheat flour under acidic conditions: From the view of starch molecular structure[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2024, 17(3): 799–810.
- [37] LIU D, LI Z, FAN Z W, et al. Effect of soybean soluble polysaccharide on the pasting, gels, and rheological properties of kudzu and lotus starches[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 89: 443–452.