

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.07.015

罗勒籽胶对冷冻面团中淀粉特性的影响

陈宁, 陈寒青

(合肥工业大学 食品与生物工程学院, 安徽 合肥 230601)

摘要:为了探究添加罗勒籽胶(basil seed gum,BSG)对冷冻面团中淀粉理化性质和结构特性的影响,文章将BSG添加至面团中,经0、4、8次冻融循环后分析面团中淀粉的溶解度、膨胀力、热特性、结晶结构和体外消化特性。结果显示:添加BSG可以提高淀粉中直链淀粉的质量分数,降低淀粉的溶解度、膨胀力和糊化焓值;冻融循环处理后,淀粉的长程有序度和短程有序度显著增加($P<0.05$),而添加BSG有效抑制了淀粉分子的结构重排,降低了淀粉相对结晶度和短程有序性;BSG还可降低淀粉体外消化率,促进形成连续致密的面团微观结构。结果表明添加BSG可以有效减少冰晶对淀粉结构的损伤,从而改善冷冻面团的品质。

关键词:罗勒籽胶(BSG);冷冻面团;小麦淀粉;冻融循环;理化性质

中图分类号:TS213.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2025)07-0957-06

Effect of basil seed gum on the properties of starch in frozen dough

CHEN Ning, CHEN Hanqing

(School of Food and Biological Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China)

Abstract: In this paper, the effect of adding basil seed gum(BSG) on the physicochemical and structural properties of starch in frozen dough was investigated. BSG was added to the dough, after 0, 4 and 8 freeze-thaw cycles, the solubility, swelling power, thermal properties, crystalline structure and *in vitro* digestibility of the starch in the dough were analyzed. Results showed that the addition of BSG increased the amylose content and decreased the solubility, swelling power and gelatinization enthalpy of the starch. The long-range ordered degree and short-range ordered degree of the starch increased significantly($P<0.05$) after freeze-thaw treatment, while the addition of BSG effectively inhibited the structural rearrangement of starch molecules and decreased the relative crystallinity and short-range ordered structure of the starch. In addition, BSG reduced the *in vitro* digestibility of the starch and promoted the formation of continuous dense dough microstructure. These results showed that the addition of BSG could effectively reduce the damage of ice crystals on starch structure, thus improving the quality of frozen dough.

Key words: basil seed gum(BSG); frozen dough; wheat starch; freeze-thaw cycle; physicochemical property

0 引言

冷冻面团技术既能减少烘焙连锁店的经营成本,还可以实现质量标准的统一,已经逐步发展成为现代食品烘焙行业不可或缺的关键技术^[1]。然

而,在冻融或长时间冻藏过程中,冰晶的形成及温度波动引起的重结晶会造成淀粉损伤、面筋网络结构完整性丧失以及水分散失,从而导致面团品质的劣变^[2]。

淀粉是冷冻面团的主要组分(55%干基),与

收稿日期:2023-04-20;修回日期:2023-05-31

基金项目:国家自然科学基金资助项目(31972977);安徽省重大科技专项资助项目(202103a06020001)

作者简介:陈宁(1998—),男,河南商丘人,合肥工业大学硕士生;

陈寒青(1970—),男,安徽桐城人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师,通信作者,E-mail:hanqchen@hfut.edu.cn.

面筋蛋白相互作用形成面团的三维网络结构,淀粉理化性质和结构性质的改变会直接影响到冷冻面团及其产品的品质^[3]。冷冻面团中冰晶的形成会破坏淀粉颗粒的完整性,产生损伤淀粉,适量的损伤淀粉可以改善冷冻面团质量,而损伤淀粉含量过高会导致产品的硬度和黏性较大^[4]。冻藏一段时间后,淀粉中直链淀粉含量降低,溶解度和黏度增加,对冷冻面团延展性产生负面影响^[5-6]。文献^[7]研究发现,冷冻处理会破坏面团中淀粉颗粒表面结构,提高淀粉的消化率,并引起淀粉分子的内部重排。因此,为了提高淀粉在冻藏或冻融过程中的稳定性,改善冷冻面团品质,研究者们提出向面团中添加亲水性胶体,它们可以吸附在淀粉颗粒表面,保护淀粉结构,减少直链淀粉的溶出,削弱淀粉重结晶作用,减缓淀粉老化速率^[8]。

罗勒籽胶(basil seed gum,BSG)是从罗勒籽中提取的一种天然亲水性胶体,具有清理肠胃、抑制餐后血糖升高以及增强饱腹感等生理功能。研究人员发现,BSG 经冷冻处理后其黏度无显著变化,解冻后结构性性质仍保持稳定,未见断裂和破坏,且 BSG 可以抑制冰晶生长,具有作为冷冻保护剂延缓淀粉在冻藏过程中结构性性质变化、改善冷冻面团质量的潜力^[9]。

因此,本文从罗勒籽中分离得到 BSG,将其添加至面团中,经 0、4、8 次冻融循环处理后,分析添加 BSG 对冷冻面团中淀粉的直链淀粉质量分数、溶解度、膨胀力、热特性、结晶特性、短程有序性和体外消化特性等淀粉理化性质和结构特性的影响,以期为冷冻面团及其产品品质的提升提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

小麦粉购于河北金沙河有限公司;活性干酵母购于宜昌安琪酵母有限公司;实验中其他试剂均为分析级;水为超纯水。

实验所用仪器有:SHM01 和面机;Q200 差式扫描量热仪;D/MAX2500VL/PC X-射线衍射仪(X-ray diffractometer, XRD);Nicolet 6700 傅里叶变换红外光谱仪(Fourier transform infrared spectrometer, FTIR);HR Evolution 拉曼光谱仪;UV-2100 紫外可见分光光度计;TDL-40B 低速离心机。

1.2 罗勒籽胶的提取

参考文献^[10]的方法提取 BSG。罗勒籽清

洗干净后,将罗勒籽与超纯水按 1:20 的体积比浸泡于超纯水中,调节其 pH 值为 7.0,加热至 68 °C 后以 1 000 r/min 搅拌 20 min,然后离心机以 1 500 r/min 的转速从溶胀的种子表面刮取胶层,待胶溶液变为黏稠状后,将黏液过滤,加入 3 倍体积的 96%乙醇,4 °C 储存过夜,离心后收集沉淀,并将其重新溶解于超纯水中,然后在 40 °C 烘箱中烘干即可得到 BSG。

1.3 冷冻面团的制备和淀粉的分离

面团的基本原料有 100 g 小麦粉、2 g 活性干酵母和 50 g 水,BSG 的添加量为小麦粉质量的 0.5%。面团在 25 °C 下静置 10 min 后,密封于聚丙烯袋中,在 -80 °C 下冷冻 30 min,取出后将面团置于 -18 °C 下储存 22 h,然后在 25 °C 下解冻 2 h(这个过程即为 1 次冻融循环)。经 0、4、8 次冻融循环处理的面团样品分别命名为 0FT、4FT、8FT,未添加 BSG 的面团为对照组。

根据文献^[11]的方法从冷冻面团中分离出小麦淀粉样品。将完全解冻后的冷冻面团置于超纯水中揉洗,分批次加入适量超纯水揉洗出淀粉,直至洗液完全透明;然后将淀粉浆离心(3 000g, 20 min)去除上层黄色主要由戊聚糖和蛋白质组成的沉淀物,收集下层白色小麦淀粉沉淀物,置于 45 °C 的烘箱中干燥后用研磨机磨成粉,过 100 目筛,即得实验用小麦淀粉。

1.4 淀粉理化性质测定

直链淀粉质量分数参考文献^[12]中所述方法测定;溶解度和膨胀力根据文献^[7]的方法进行测定;淀粉的体外消化特性参考文献^[13]的方法进行测定。

准确称取 3 mg 淀粉样品于固体坩埚中,加入 9 μ L 超纯水,密封后在 4 °C 下平衡 24 h,差示扫描量热仪的测定温度范围为 30~90 °C,升温速率为 10 °C/min^[14]。

1.5 淀粉结构特性测定

使用 XRD 分析淀粉的结晶结构,实验参数设置如下:以 Cu-K α 为辐射线,测试电压 40 kV、电流 40 mA,2 θ 范围为 5°~35°^[14]。使用 FTIR 波数在 500~4 000 cm^{-1} 区间内对样品进行扫描^[12]。利用拉曼光谱仪测定样品拉曼光谱,测试范围为 50~2 000 cm^{-1} ,分辨率为 7 cm^{-1} ,扫描 32 次^[15]。

冻干面团样品固定于测试台上,喷金 60 s 后,在 3.0 kV 加速电压下观察样品形貌。

1.6 数据处理和分析

本实验采用 SPSS 26.0 软件对实验数据进行显著性分析,用不同小写字母表示样品间存在显著性差异($P < 0.05$),结果以平均值±标准差表示。

2 结果与讨论

2.1 淀粉中直链淀粉的理化性质

小麦淀粉主要由支链淀粉和直链淀粉组成,冻融循环处理会影响小麦淀粉的理化性质。淀粉样品的直链淀粉质量分数、溶解度和膨胀力如图 1 所示。

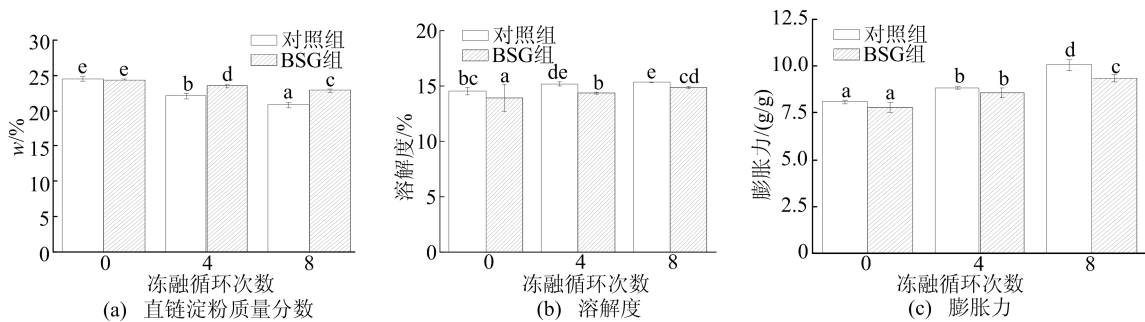


图 1 淀粉样品中直链淀粉质量分数、溶解度和膨胀力随冻融循环次数的变化

添加 BSG 后,样品中直链淀粉的质量分数降低速率明显减缓,同时淀粉的溶解度和膨胀力显著降低,表明 BSG 能够减少冻融循环处理后小麦淀粉中直链淀粉的溶出。BSG 作为一种亲水性水胶体,结合水能力较强,能够减少面团中的可利用水,降低冰晶数量和体积,从而减少冰晶对小麦淀粉表面结构的破坏。

2.2 淀粉的热特性

冷冻面团中淀粉的热力学参数见表 1 所列。

从图 1 可以看出,随着冻融循环次数的增加,所有样品中直链淀粉的质量分数均逐渐降低,溶解度和膨胀力逐渐升高。4、8 次冻融循环后,对照组样品直链淀粉质量分数分别为 22.06%、20.83%。这是由于冻融循环过程中,温度不断波动导致冰晶聚集从而可以重结晶形成更大体积的冰晶,对小麦淀粉造成机械性损伤,解冻后导致直链淀粉、蛋白等溶出,造成样品中直链淀粉质量分数不断降低,更多水分子进入到淀粉内部,与淀粉中亲水性结构(支链淀粉)通过氢键结合,使得淀粉溶解度和膨胀力提高^[14]。

从表 1 可以看出,面团经冻融处理后,淀粉样品的起始温度(T_o)、温度峰值(T_p)、终止糊化温度(T_c)和糊化焓值(ΔH)升高,与文献[13]报道的结果一致。这可能是由于水形成冰晶过程中产生的微观机械力和膨胀力导致淀粉分子聚集程度更高。添加 BSG 后降低了冻融循环处理后淀粉的 T_c 和 ΔH ,这是由于 BSG 会对淀粉形成包裹作用,减缓冰晶对淀粉结构的损伤,从而提高了冻融循环处理后淀粉的热稳定性。

表 1 淀粉样品的热特性

样品	$T_o/^\circ\text{C}$	$T_p/^\circ\text{C}$	$T_c/^\circ\text{C}$	$\Delta H/(\text{J/g})$
0FT-对照组	(58.04±0.20) ^a	(61.14±0.17) ^a	(66.24±0.16) ^a	(0.98±0.08) ^b
0FT-BSG 组	(58.20±0.60) ^a	(61.20±0.51) ^a	(66.23±0.32) ^a	(0.84±0.03) ^a
4FT-对照组	(59.08±0.46) ^{abc}	(62.18±0.38) ^a	(67.28±0.31) ^a	(1.24±0.04) ^c
4FT-BSG 组	(58.61±1.08) ^{ab}	(62.14±0.81) ^a	(67.34±0.58) ^a	(1.08±0.05) ^b
8FT-对照组	(60.95±1.55) ^c	(63.72±1.02) ^b	(68.48±0.62) ^b	(1.52±0.09) ^d
8FT-BSG 组	(60.60±0.98) ^{bc}	(63.70±0.67) ^b	(68.52±0.72) ^b	(1.32±0.05) ^c

2.3 淀粉的结晶结构和短程有序结构

淀粉样品的 XRD 图谱如图 2 所示。由图 2 可知,所有样品均在 15°、17°、18°、23°处显示出特征峰,表现为 A-型结晶结构,与文献[16]研究结果一致。冻融循环处理后面团中淀粉的相对结晶

度(relative crystallinity, RC)逐渐增加,在 8 次冻融循环处理后,对照组样品 RC 由 22.08%增加至 24.77%。这是由于冻融处理过程中,冰晶和重结晶形成的微机械力促进了直链淀粉侧链移动和重新排列,引起有序分子结构的形成和结晶化,导致

RC 明显增加^[11]。由图 2 可以计算出添加 BSG 的淀粉 RC 低于对照组,说明 BSG 的存在能够加强淀粉结构中的氢键,阻碍支链淀粉侧链的迁移和重排,抑制新双螺旋结构的形成,降低淀粉分子结构的有序度,从而减小了冰晶对淀粉结晶区和双螺旋结构的影响。

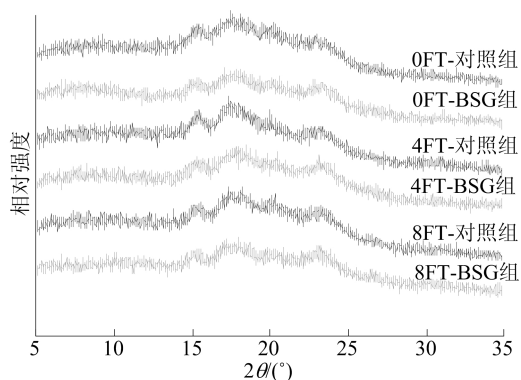


图 2 淀粉样品的 XRD 图谱

淀粉样品的 FTIR 谱图如图 3 所示。样品在 $1\ 047$ 、 $1\ 022\ \text{cm}^{-1}$ 处吸光度的比值 $A_{1\ 047}/A_{1\ 022}$ 可用于分析淀粉的短程有序性^[17],结果见表 2 所列。

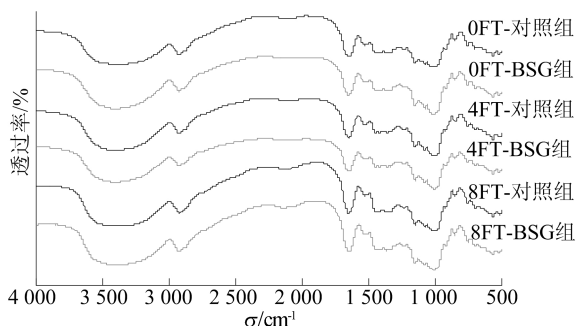


图 3 淀粉样品的 FTIR 谱图

表 2 淀粉样品的短程有序性分析结果

样品	$A_{1\ 047}/A_{1\ 022}$	FWHM
0FT-对照组	$(0.801 \pm 0.003)^a$	$(22.48 \pm 0.55)^c$
0FT-BSG 组	$(0.803 \pm 0.001)^a$	$(22.82 \pm 0.69)^d$
4FT-对照组	$(0.838 \pm 0.012)^c$	$(20.51 \pm 0.12)^b$
4FT-BSG 组	$(0.821 \pm 0.002)^b$	$(22.14 \pm 0.23)^c$
8FT-对照组	$(0.866 \pm 0.011)^d$	$(19.53 \pm 0.51)^a$
8FT-BSG 组	$(0.837 \pm 0.004)^c$	$(20.51 \pm 0.93)^b$

由表 2 可知,未经冻融循环处理的对照组小麦淀粉 $A_{1\ 047}/A_{1\ 022}$ 值(0.801)最低^[18]。随冻融循环次数增加,淀粉的 $A_{1\ 047}/A_{1\ 022}$ 值逐渐升高,表明冻融循环处理后样品短程有序分子结构明显增多,螺旋结构的堆积或缠绕更加明显。添加 BSG

则延缓了 $A_{1\ 047}/A_{1\ 022}$ 值的升高速率,说明 BSG 可以减弱淀粉链间的相互作用,干扰淀粉重排和螺旋结构的形成,降低淀粉分子结构的有序性。

此外,拉曼光谱也被广泛应用于检测淀粉的短程有序度。淀粉样品的拉曼光谱图如图 4 所示,根据样品的拉曼光谱计算淀粉样品在 $480\ \text{cm}^{-1}$ 处的半峰全宽值(full width at half maximum, FWHM),见表 2 所列。

FWHM 值越高,说明淀粉分子有序程度越低。由表 2 可知,经过冻融循环处理后,淀粉样品的 FWHM 值随冻融循环次数的增加而逐渐降低,表明冻融循环处理可能会促进双螺旋结构之间分子内和分子间氢键的形成,XRD 和 FTIR 结果也证实了这一结果。在添加 BSG 样品中 FWHM 值显著高于相应的对照组,说明 BSG 可以减少冻融处理中冰晶对淀粉结构的破坏,维持氢键稳定,降低淀粉分子的短程有序性。

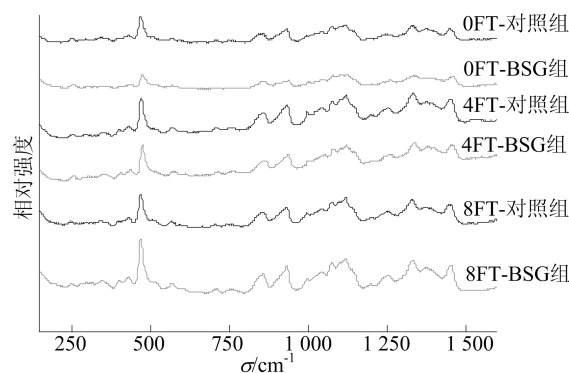


图 4 淀粉样品的拉曼光谱图

2.4 淀粉的体外消化特性

对于淀粉基食品来说,淀粉的消化特性是影响消费者选择的重要评价指标之一,淀粉样品的体外消化特性如图 5 所示。

由图 5 可知,随着冻融循环次数的增加,所有淀粉样品的快消化淀粉(rapidly digested starch, RDS)质量分数逐渐增加,对照组样品在经历 8 次冻融循环处理后,RDS 质量分数由 43.68%增加至 55.56%,慢消化淀粉(slowly digested starch, SDS)和抗性淀粉(resistant starch, RS)质量分数分别从 22.99%和 33.33%降低至 14.46%和 29.98% ($P < 0.05$)。结果表明,冻融循环处理会破坏淀粉与面筋的相互作用,导致原来被面筋基质包裹的淀粉分离出来,从而促进了淀粉酶与淀粉之间的结合,加速了淀粉的消化进程。此外,在冻融循环处理过程中,冰晶的形成和重结晶会破坏淀粉

颗粒的完整性,淀粉酶更容易进入到淀粉颗粒内部,酶解程度进一步升高,导致 RDS 质量分数升高和 SDS 质量分数降低^[19]。

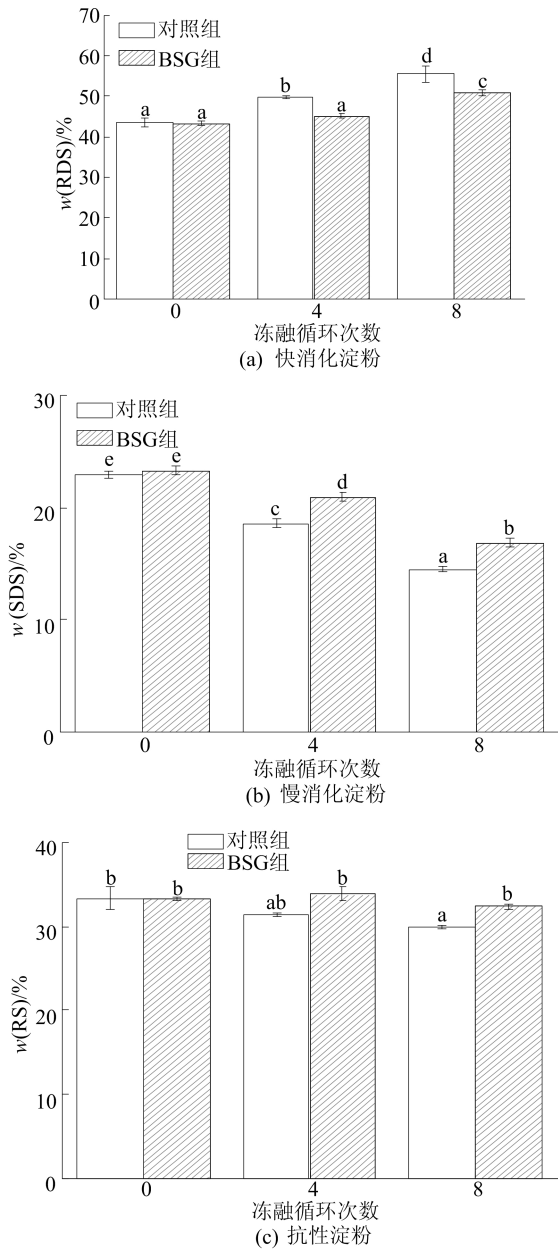


图 5 淀粉样品的体外消化特性

从图 5 可以看出,与对照组相比,添加 BSG 后 RDS 质量分数减少,SDS 质量分数增加,主要归因于 BSG 降低了冰重结晶对淀粉-面筋网络的破坏,而且 BSG 可对淀粉形成包裹作用,保护淀粉结构的完整性,阻碍淀粉酶与淀粉分子的接触,从而降低淀粉的体外消化率。

2.5 面团的微观结构

新鲜面团和冻融循环 8 次后冷冻面团的 SEM 图像如图 6 所示。图 6 中放大倍数均为 300 倍。

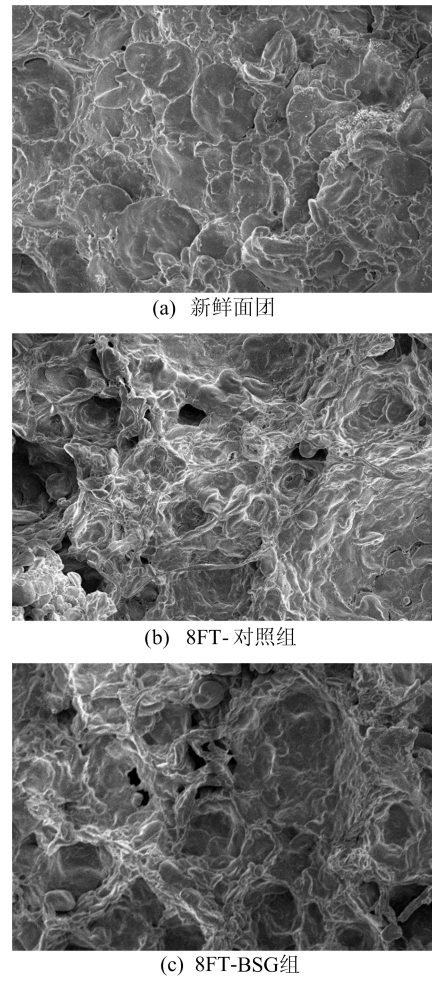


图 6 新鲜面团和冷冻面团的微观结构

从图 6 可以看出:新鲜面团具有最连续均匀的网络结构,淀粉颗粒很好地被包裹在面筋网络中;8 次冻融循环后,冷冻面团结构断裂,连续均匀的结构被冰晶破坏,出现较多孔洞,面筋网络变得不再紧密连续,许多淀粉颗粒从面筋网络结构中脱离出来^[15];添加 BSG 后,冷冻面团的面筋网络得到了加强,可以更有效地嵌入淀粉颗粒,减少空隙的产生,面团面筋基质的网状结构特征更为明显。

3 结 论

面团经冻融循环处理后,淀粉由于结构完整性被破坏,其内容物流出,导致直链淀粉质量分数降低、溶解度和膨胀力升高,BSG 的存在降低了冰晶对淀粉表面的破坏及其对淀粉结构的损伤,减缓了直链淀粉质量分数的降低。冻融循环处理促进了淀粉分子双螺旋结构和结晶区的形成,添加 BSG 可以维持结构中氢键稳定,阻碍淀粉分子重排,降低淀粉分子结构的有序性和结晶化。淀粉体外消化特性分析表明,冻融循环处理后,RDS

质量分数升高、SDS 和 RS 质量分数降低,BSG 可以保护淀粉结构完整性,阻碍淀粉消化酶与淀粉的接触,有效降低多次冻融循环处理后淀粉的体外消化率,且添加 BSG 的冷冻面团微观结构更加连续紧密。结果表明,BSG 作为一种新型的面团改良剂,对冷冻面团中淀粉稳定性有一定的改善效果。该研究为生产高品质冷冻面团提供了理论依据。

[参 考 文 献]

- [1] 郭雪阳,贾春利.我国冷冻面团技术的应用和发展综述[J].中国食物与营养,2013,19(2):41-44.
- [2] MEZIANI S, JASNIEWSKI J, GAIANI C, et al. Effects of freezing treatments on viscoelastic and structural behavior of frozen sweet dough[J]. Journal of Food Engineering, 2011, 107(3/4):358-365.
- [3] 张艳艳,郭鹏磊,张予涵,等.超声波辅助冷冻对面团中小麦淀粉理化特性及分子结构的影响[J].食品工业科技,2023,44(7):53-59.
- [4] MA S, LI L, WANG X X, et al. Effect of mechanically damaged starch from wheat flour on the quality of frozen dough and steamed bread[J]. Food Chemistry, 2016, 202:120-124.
- [5] 叶晓枫,赵黎平,曹蓉,等.冷冻非发酵面团冻藏过程中化学成分及物理特性的变化[J].食品科学,2014,35(6):219-223.
- [6] 张华,袁博,赵琼,等.冻藏对小麦 A 链、B 链淀粉理化性质及热力学特性的影响[J].中国粮油学报,2015,30(11):54-64.
- [7] YANG Y, ZHENG S S, LI Z, et al. Influence of three types of freezing methods on physicochemical properties and digestibility of starch in frozen unfermented dough[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 115:106619.
- [8] 张雨,张康逸,张国治.淀粉老化过程机理及淀粉抗老化剂应用的研究进展[J].食品工业科技,2019,40(13):316-321.
- [9] ZEYNALI M, NAJI-TABASI S, FARAHMANDFAR R. Investigation of basil (*Ocimum bacilicum* L.) seed gum properties as Cryoprotectant for Frozen Foods[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 90:305-312.
- [10] RAZAVI S, MORTAZAVI S A, MATIA-MERINO L, et al. Optimisation study of gum extraction from Basil seeds (*Ocimum basilicum* L.)[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2009, 44:1755-1762.
- [11] WANG H W, XU K, LIU X L, et al. Understanding the structural, pasting and digestion properties of starch isolated from frozen wheat dough[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 111:106168.
- [12] LI M N, ZHANG B, XIE Y, et al. Effects of debranching and repeated heat-moisture treatments on structure, physicochemical properties and *in vitro* digestibility of wheat starch[J]. Food Chemistry, 2019, 294:440-447.
- [13] WANG H W, LIU Y F, CHEN L, et al. Insights into the multi-scale structure and digestibility of heat-moisture treated rice starch [J]. Food Chemistry, 2018, 242:323-329.
- [14] TAO H, HUANG J S, XIE Q T, et al. Effect of multiple freezing-thawing cycles on structural and functional properties of starch granules isolated from soft and hard wheat [J]. Food Chemistry, 2018, 265:18-22.
- [15] ZHANG Y, ZHANG H, WANG L, et al. Extraction of oat (*Avena sativa* L.) antifreeze proteins and evaluation of their effects on frozen dough and steamed bread[J]. Food Bioprocess Technology, 2015, 8(10):2066-2075.
- [16] MUTUNGI C, PASSAUER L, ONYANGO C, et al. Debranched cassava starch crystallinity determination by Raman spectroscopy: correlation of features in Raman spectra with X-ray diffraction and ¹³C CP/MAS NMR spectroscopy[J]. Carbohydrate Polymers, 2012, 87(1):598-606.
- [17] TAO H, WANG P, WU F, et al. Effect of freezing rate on rheological, thermal and structural properties of frozen wheat starch[J]. RSC Advances, 2016, 6(100):97907-97911.
- [18] TAO H, WANG P, ZHANG B, et al. A comparative study of sodium dodecyl sulfate and freezing/thawing treatment on wheat starch; the role of water absorption[J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 143:149-154.
- [19] YE J, LIU C, LUO S, et al. Modification of the digestibility of extruded rice starch by enzyme treatment (β -amylolysis): an *in vitro* study[J]. Food Research International, 2018, 111:590-596.

(责任编辑 闫杏丽)