刺槐豆胶对冷冻面团水分分布及面包品质的影响

龚维，吴磊燕，钟雅云，周锦枫，涂瑾，董武辉，罗登
（江西农业大学食品科学与工程学院，江西南昌 330000）

摘要：将刺槐豆胶（Locust bean gum，LBG）加入冷冻面团中，利用核磁共振测定冷冻面团的水分分布及状态，扫描电镜测定面团的微观网络结构，扫描仪及质构仪对面包的纹理结构和质构特性进行分析，研究持水性强的刺槐豆胶对冷冻面团水分分布状态的改善作用，探讨面团微观网络结构，纹理及质构特性与水分分布的关系。结果显示：随着冷冻面团冻藏周数的增加，对照组面团中深层次结合水占比由17.40%下降至14.40%，自由水占比上升了3.40%，面筋蛋白包裹淀粉颗粒能力逐渐下降，淀粉颗粒的排布逐渐混乱，面团的发酵速度逐渐缓慢，冷冻面团烘烤面包的纹理结构不再均一有序，硬度增大，弹性下降。加入LBG后，深层次结合水占比由17.20%下降至15.40%，自由水占比上升了2.70%，面筋蛋白网络结构及其烘烤面包劣变幅度减小，说明LBG有效的延缓了面团中深层次结合水的转化，改变了冷冻面团的储藏特性。

关键词：刺槐豆胶；冷冻面团；水分分布；微观结构

文章篇号：1673-9078(2018)12-67-73 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2018.12.011

Effect of Locust Bean Gum on Water Distribution and Bread Quality of Frozen Dough

GONG Wei, WU Lei-yan, ZHONG Ya-yun, ZHOU Jin-feng, TU Jin, DONG Wu-hui, LUO Deng
(School of Food Science and Engineering Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330000, China)

Abstract: In order to study the effect of water-holding locust bean gum on the water distribution and discusse the relationship between micro-network structure, texture characteristics and water distribution of dough, the locust bean gum (LBG) was added to the frozen dough, the moisture distribution and state of the frozen dough was measured by NMR, the microscopic network structure of dough was determine by scanning electron microscopy, and the structure characteristics of the bread were analyzed by the scanner and texture analyzer. The results showed that with the increase of frozen weeks, the proportion of deep combined water in the dough decreased from 17.40% to 14.40%, while free water increased by 3.40%. The ability of gluten to encapsulate starch granules gradually decreased, the arrangement of starch granules was gradually confusing, the fermentation speed of the dough was gradually slow, and the texture structure of the bread was no longer uniform, the hardness was increased, and the elasticity was decreased. After adding locust bean gum, the proportion of deep combined water in the dough decreased from 17.20% to 15.40%, while free water increased by 2.70%, the deterioration of the frozen dough and its baked bread was reduced, indicating that the storage characteristics of the frozen dough was changed and the conversion of deep combined water in the dough was effectively delayed by LBG.

Key words: locust bean gum; frozen dough; moisture distribution; microstructure

“短保”面包是当今烘焙产品的一种消费趋势，一般由集中生产的冷冻面团加工而成，以降低添加剂含量以及保证面包的品质，集中生产的面团经过冷冻后由于水分的结晶和重新分布会导致酵母失活，面筋网络结构弱化，面包老化等，最终导致面包品质下降，因此对面包水分分布调控是改善冷冻面团产品品质的方法之一[1,2]。目前使用广泛的是添加持水剂来改善冷冻面团的储藏特性，持水剂对冷冻面团的水分分布及状态的影响很大，刺槐豆胶(LBG)因其保水持水功效而被应用在冷冻面团中。

刺槐豆胶也称为角豆胶，具有良好的持水性，由含有许多氢键结合位点的甘露糖为主链的半乳甘露聚糖组成[3]（如图1），在较低的浓度范围内能形成高粘度的水状胶质[4]，能改变产品的水分分布状态，广泛应用于饮料、面包、面条、乳制品和食用涂料等方面，起到稳定以及脂肪替代等效果[5]。唐慧琳在无盐面条中添加1.5%的刺槐豆胶后，面条的保水能力和质地都有显著的提高[6]。AyselKoksoy等[7]研究了刺槐豆胶在

收稿日期：2018-07-12
基金项目：国家自然科学基金资助项目（3166100447）
作者简介：龚维（1995-），女，硕士，研究方向：食品工程
通讯作者：吴磊燕（1973-），男，博士，副教授，研究方向：蛋白界面

酸奶饮料中稳定结构的作用；用刺槐豆胶和卡拉胶复配对益生乳酸菌进行包裹，使益生菌在胃肠道不良环境下其存活率能维持在 8 log CFU/g 以上[8]。但是很少文献涉及刺槐豆胶添加到冷冻面团中研究对水分分布和状态的影响。

本文将刺槐豆胶加入冷冻面团中研究其对冷冻面团水分分布及状态的影响，旨在探讨面团中的水分分布状态与最终产品品质的关系，为寻求品质更佳的短保面包产品提供理论依据。

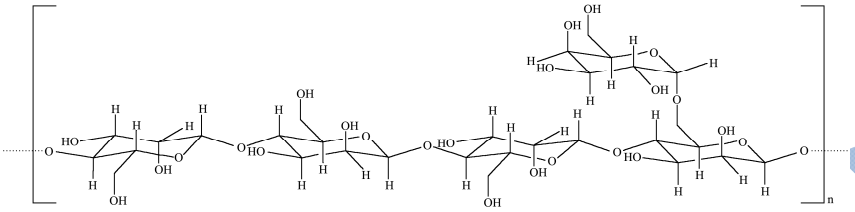


图 1 由半乳糖和甘露糖组成的刺槐豆胶结构图

Fig.1.Structure of locust bean gum consisting of mannose and galactose

1 材料与方法

1.1 材料与设备

金像牌面包用小麦粉，蛇口南顺面粉有限公司；高活性干酵母，安琪酵母股份有限公司；刺槐豆胶，东莞泛亚太生物科技有限公司；质构仪，美国 TA 仪器公司；MicroMR-25 核磁共振成像分析仪，上海纽迈电子科技有限公司；JSM-6490LV 扫描电子显微镜，日本 JEOL 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 冷冻面团面包的制作工艺要点

面团的基本配方：高筋粉 1000 g，刺槐豆胶 20 g，高活性干酵母 10 g，黄油 100 g，白砂糖 200 g，食盐 10 g，蒸馏水 510 g。根据 Wang P[9]的方法并稍作修改，面团制作完成后分切成 50 g/个，-80 ℃下速冻 25 min 后-17 ℃冷藏。将上述制得的冷冻面团分别冻藏 1~8 周备用。

1.2.2 冷冻面团水分分布及状态测定

取不同冻藏时间的冷冻面团，利用 FID 试验调节共振中心频率，CPMG 脉冲序列测量样品的自旋弛豫时间(T2)，称取面团(3.0±0.01) g 放入试管中，置于永久磁场中心位置射频线圈的中心，进行 CPMG 脉冲序列的扫描试验。CPMG 试验参数：主频=21（MHz），偏移频率=99315.9（MHz），采样点数 TD=156492，重复扫描次数 NS=64，重复时间 TR=1500 ms，半回波时间 τ=7 μs，温度=32 ℃。利用 T2 反演拟合软件对 CPMG 弛豫衰减曲线进行反演得到弛豫图谱和 T2[10]。

MRI试验主要参数：重复时间TR=1000 ms；矩阵256×256；信号接收带宽SW=40 kHz；采样次数NS=4；根据CPMG序列测得的T2值，选择回波时间TE=1 ms进行成像，采集数据，同时，通过调整MSE序列中的选层梯度、相位编码梯度和频率编码梯度，获取样品侧视成像数据[11]。

1.2.3 冷冻面团微观结构分析

根据 Zhang Y，Shao J H 等[12,13]的方法，并稍作修改，使用扫描电子显微镜观察、记录添加刺槐豆胶以及空白组冷冻面团冻藏不同时间的微观结构。将冻藏后样品放入 1 cm^2大小的正方形模具中进行冷冻干燥，冷冻干燥结束后用导电双面胶固定到样品台上进行样品表面喷金，喷金后置于 SEM 下观察（电压 10 kV），拍摄放大倍数 2000 倍的图像。

1.2.4 冷冻面团发酵速度测定

参照Chevallier S[14]的方法，将面团块（50 g）置于量筒中，用软纸蘸取少量向日葵油涂抹量筒壁以避免气泡产生，温度30 ℃，湿度70%发酵2 h，对面团发酵速度进行测定。

1.2.5 冷冻面团面包内部纹理结构分析

根据王沛[15]等的方法，在面包中心位置切出厚度为1 cm的面包片，利用图像扫描仪获取图像，并用Image J分析软件进行内部纹理结构参数分析（孔隙率，气孔密度，气孔均面积）。

1.2.6 冷冻面团面包的质构测定

根据黄桂东和 Xia K 的[16,17]方法，将不同冷藏时间的面团烘烤，冷却至室温，切成 2 cm 厚薄片，用物性仪测定硬度和弹性，每个样品重复 3 次。程序参数设定条件如表 1。

表 1 质构仪程序参数

Table 1 The program parameters of the texture instrument

探头	感应力	测前速度	测中速度	测后速度	目标模式	目标值
P50	5.0 g	5 mm/s	2 mm/s	2 mm/s	距离	1 cm

1.3 数据处理和分析

用SPSS 16.0软件进行数据处理。采用Origin 8.5软件整理数据和作图。

2 结果与分析

2.1 冷冻面团水分分布及状态分析

从冷冻面团的 T2 图谱可以看出，冷冻面团在弛豫时间内有 3 个峰，第 1 个峰（T21）表示与淀粉或面筋蛋白紧密结合的深层结合水，与蛋白的三、四级结构相关[18]；T22 表示弱结合水，流动性介于深层结合水和自由水之间，此部分水结合于蛋白质、淀粉等大分子之间；T23 代表冷冻面团中的自由水[13,19,20]。从表 2 可以看出，A22 占比均在 75.80%以上，即冷冻面团中的水分主要以半结合水的状态存在着，这部分水是面筋形成以及淀粉胀润过程所吸收的水分。随着储藏周数的增加，对照组的深层结合水 A21 占比由 17.40%下降至 14.40%，LBG 组由 17.20%下降至 15.70%，冷冻面团的深层结合水所占比例逐渐减小；对照组自由水 A23 占比上升了 3.40%，LBG 组上升了 2.70%，冷冻面团的自由水所占比例逐渐上升，深层次结合水逐渐迁移为半结合水和自由水。第 8 周时，LBG 组深层次结合水所占比例多于对照组，说明添加 LBG 后能在一定程度上延缓面团在冻藏过程中水分的迁移，水分的迁移主要是由于面团中氢键结构的变化引起的，亲水物质，如蛋白质和碳水化合物有氢键位点，可以与水分子形成氢键从而影响水的流动[21]。冷冻过程中面筋蛋白的弱化，三四级结构的改变，减少了深层次结合水的结合位点，导致深层次结合水向半自由水以及自由水的转化，而 LBG 具有许多裸露在外的氢键结合位点，能与面团中的面筋蛋白、淀粉颗粒以及水形成络合物，从而延缓面筋蛋白的弱化，保持冷冻面团水分分布的稳定[22]。另外，面团中的其他物质如脂质可与蛋白质形成复合体因而防止面筋的解聚，刺槐豆胶与面团中水结合的同时也能加速脂质与蛋白复合体的结合，增强面筋的网络结构，延缓网络结构的弱化速度，最终影响面包的品质特性。

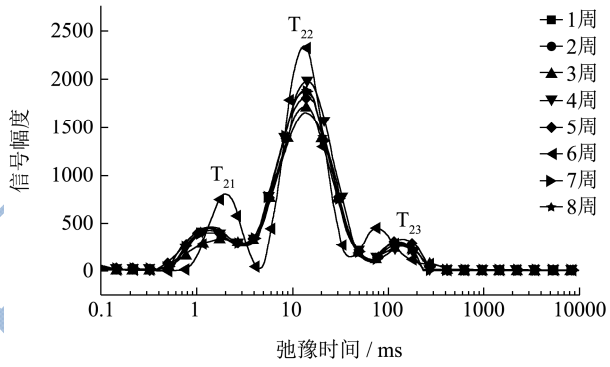


图 2 刺槐豆胶对冷冻面团储藏过程中 T2 分布与变化的影响

Fig.2 T2 distributions and changes of frozen dough during storing because of LBG

表 2 不同冻藏时间内刺槐豆胶对冷冻面团三种状态水相对百分含量的影响

Table 2 Effect of LBG addition in different store time on the contents of three forms of moisture in frozen dough

时间	LBG			对照组		
	A21/%	A22/%	A23/%	A21/%	A22/%	A23/%
第 1 周	17.20±0.01^{a}	77.40±0.00^{a}	5.80±0.01^{a}	17.40±0.00^{a}	77.00±0.01^{a}	5.60±0.00^{a}
第 2 周	15.90±0.00^{b}	78.00±0.01^{a}	6.10±0.01^{ab}	16.90±0.00^{b}	78.00±0.00^{a}	5.10±0.00^{b}
第 3 周	15.40±0.00^{b}	78.40±0.00^{a}	6.60±0.00^{bc}	16.20±0.00^{c}	78.00±0.00^{a}	5.80±0.01^{b}
第 4 周	15.40±0.00^{bc}	78.50±0.00^{a}	6.10±0.01^{bc}	16.10±0.00^{c}	77.30±0.01^{a}	6.60±0.00^{b}
第 5 周	15.70±0.00^{bc}	77.90±0.00^{a}	6.40±0.01^{bc}	15.10±0.00^{d}	77.10±0.00^{a}	7.80±0.01^{c}
第 6 周	15.60±0.00^{bc}	75.80±0.02^{a}	8.60±0.03^{bc}	14.60±0.00^{e}	77.30±0.02^{a}	8.10±0.00^{d}
第 7 周	15.00±0.00^{bc}	78.20±0.01^{a}	6.80±0.01^{bc}	14.70±0.00^{e}	77.20±0.00^{a}	8.10±0.00^{d}
第 8 周	15.70±0.00^{bc}	78.50±0.00^{b}	8.50±0.00^{c}	14.40±0.00^{e}	76.60±0.00^{a}	9.00±0.01^{d}

注：A 为各峰面积与总面积的比值；同一列英文字母上标不同表示均值之间存在显著性差异（p<0.05）。

低场核磁共振在研究食品中的水分形态、水分分布及迁移规律等方面有着广泛的应用，信号强度的强弱能直接反应食品组分的质子密度及水分含量[11,23]。从图3可以看到，随着储藏周数的增加，LBG组和对照组的信号强度均逐渐减弱，面团图像的亮度逐渐变弱，质子密度逐渐减小，说明面团的总含水量在逐渐减少。到冻藏6周后，对照组的面团质子成像图基本上已经呈现深灰色，而LBG组的信号强度较强，这是因为添加LBG后有效的延缓了面团整体的失水速度。自由水是面团在冻藏过程中极易失去的一部分水，LBG加入面团中与面筋蛋白、淀粉以及水形成的络合物包裹冷冻面团中的水分，面团的流动性减弱，调整三种不同状态水的分布，延缓自由水增加速率，从而有效的防止面团中总水分的流失，在一定程度上起到保水

的作用[24]。这与刺槐豆胶能延缓面团水分迁移的结果相一致，面团的总含水量能直接影响面包的品质特性。

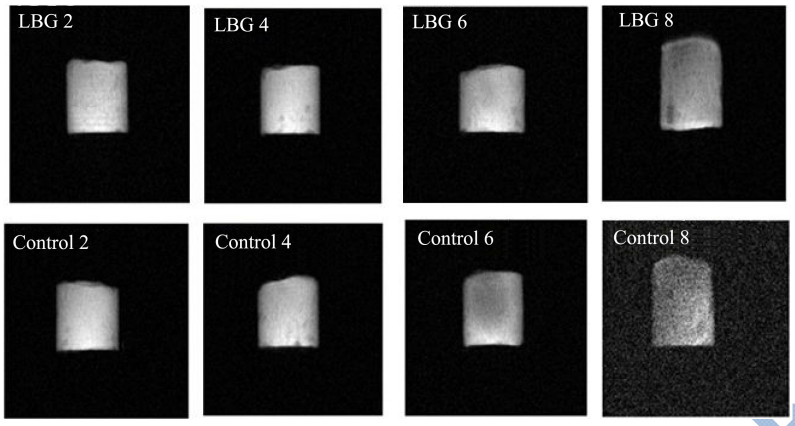


图3 储藏过程中冷冻面团核磁共振质子成像变化图

Fig.3 NMR images of frozen dough during storing

注：每一行依次为冻藏2周、4周、6周、8周的NMR图。

2.2 冷冻面团微观结构分析

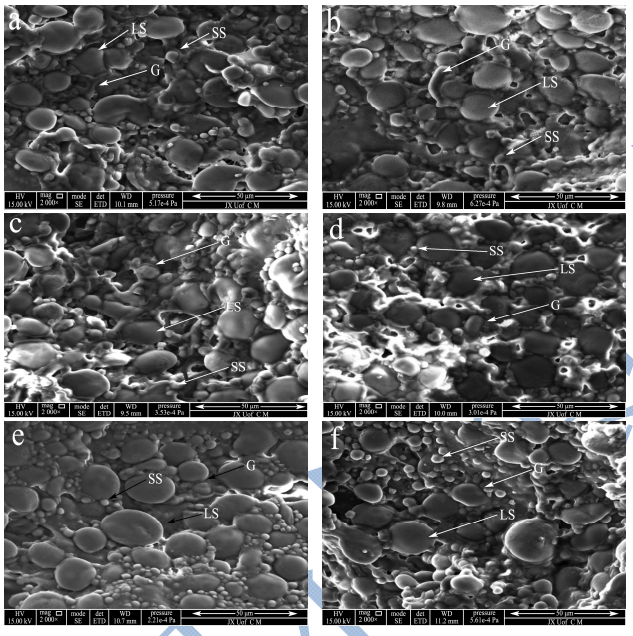


图 4 刺槐豆胶对不同冻藏时间的冷冻面团微观结构的影响

Fig.4 Scanning electron microscopy (SEM) of dough without and with locust bean gum addition at different freezing times

注：G表示面筋蛋白，LS表示大淀粉颗粒，SS表示小淀粉颗粒。

图4是经过不同冷冻时间，冻干后面团的扫描电镜图。其中a、c、e为添加刺槐豆胶的面团微观图，b、d、f为空白对照。a、b为冻藏2周，c、d为冻藏4周，e、f为冻藏8周的面团微观图。面团是由淀粉和蛋白网络结构组成的复合体系[23]，不同大小的圆形颗粒为面团中的淀粉颗粒，面筋网络包裹着淀粉颗粒。从4a，4b中可以清晰的看到面筋网络结构G，以及被包裹着的淀粉颗粒LS，SS，淀粉颗粒完全镶嵌于面筋网络结构中且LS和SS分布均匀，两者再由面筋网络结构包裹，形成的面团结构更加稳定[26]。随着冻藏时间的延长，面筋的网络结构出现了弱化的趋势，图4c，4d中淀粉颗粒逐渐开始裸露在面筋网络结构外，D的裸露程度更明显；冻藏8周时，对照组4f中LS以及SS基本已经完全裸露在面筋蛋白之外，LS的外围大部分没有SS的包围，蛋白面筋网络结构已经弱化严重；LBG组4e中LS基本已经完全裸露在面筋的网络结构之外，SS还有部分被面筋包裹着，LS的周围分布着SS。这是因为在低温冻藏期间，面团的结合水发生迁移，自由水增多，面筋蛋白失水，面筋网络逐渐弱化，淀粉颗粒逐渐裸露，包裹能力逐渐下降[1,25]，刺槐豆胶的添加改变了冷冻面团的水分分布以及维持了面团总含水量的稳定，进而避免了面筋网络由于失水而导致的弱化以及淀粉由于失水而导致的老化，使淀粉颗粒与面筋网络结构排列更均匀，细腻均匀的微观结构排列有助于提升产品的质地和口感[27]。

2.3 LBG对冷冻面团发酵速度的影响

面团发酵是制作面包的关键工序之一，酵母将面粉中的糖代谢成二氧化碳气体，二氧化碳气体在混合过程中扩散到面团内部[28]，面包的最终气体体积可以超过面包体积的70%，气体的大小和密度与酵母的活性以及面团的水分分布有关，导致最终产品在质地和感官性能上的巨大差异[14]。从图5面团的发酵速度图可以看出，随着冻藏时间的延长，LBG和对照组的发酵速度都有明显的下降趋势，这是因为面团中的自由水不断聚集成大冰晶，刺破酵母细胞从而抑制了酵母的活性，LBG的添加延缓了冷冻面团在冻藏期间发酵速度的下降，这是因为LBG改变了面团内部的水分分布状态，减弱了面团的流动性，使面团中总含水量的维持稳定，有效的降低了酵母细胞被冻藏过程中大冰

晶刺破的概率[29]，保护了酵母的活性，从而维持冷冻面团较好的发酵速度。

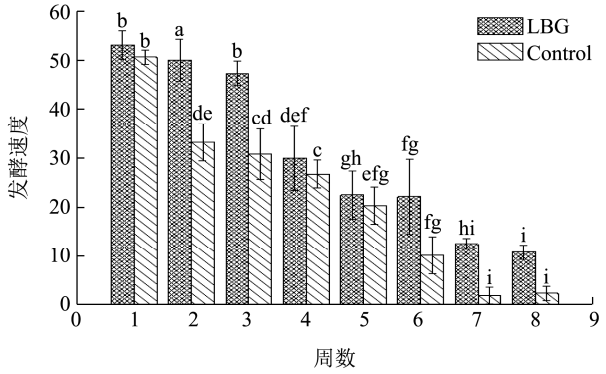


图5 不同冻藏时间LBG对冷冻面团发酵速度的影响

Fig.5 Effects of LBG on the fermentation rate of frozen dough under different freezing time

注：英文字母上标不同表示均值之间存在显著性差异（p<0.05）。

2.4 冷冻面团面包切面内部纹理结构分析

图6和表3是冷冻面团面包在冻藏不同时期的切面纹理结构图及其参数分析，可以看出随着冻藏周数的增加，面包的气孔均面积逐渐增大，LBG组由23.17 mm^2增加到51.96 mm^2，对照组由20.84 mm^2增加到78.98 mm^2，孔隙率及气孔密度均逐渐减小。面包的气孔均面积越大，孔隙率和气孔密度越小说明面包的结构致密，组织结构不均一，最终导致面包硬度增大，弹性减弱。从图6可以清晰地看到第6周时LBG组和对照组面包的气孔大小均参差不齐，纹理不再均一有序，到第8周对照组的孔隙率下降到0.31%，LBG组下降到1.21%，LBG组与对照组相比有效的延缓了冷冻面团面包气孔密度和孔隙率减小的速度以及气孔均面积增大的速度。说明LBG可以改善冷冻面团的烘烤面包的烘焙性质及储藏特性，这与上述刺槐豆胶改变冷冻面团内部的水分分布以及维持面筋网络蛋白强度的研究结果相符。

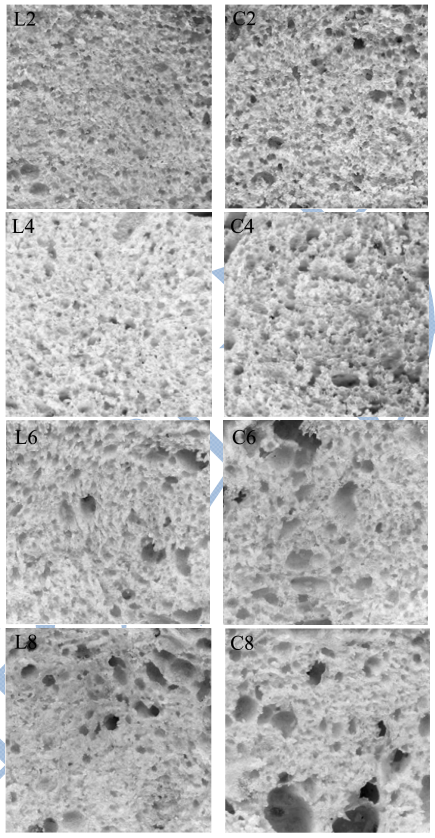


图6 LBG组和空白组冷冻面团面包切面纹理图

Fig.6 The surface texture illustration of LBG group and blank group of frozen dough bread

注：L表示添加LBG实验组，C表示空白对照组，不同数字表示不同周数。

表3 冻藏不同时间后LBG组与空白组所制面包切面参数分析

Table 3 Analysis of cutting parameters of bread made by LBG group and blank group in different frozen time

时间	气孔均面积/mm^2		孔隙率/%		气孔密度/（个/cm^2）	
	LBG	对照组	LBG	对照组	LBG	对照组
第2周	23.17±5.40^{de}	20.84±6.37^{e}	1.88±1.73^{a}	1.58±0.42^{a}	39.46±4.35^{a}	33.98±3.72^{b}
第4周	37.91±6.68^{bcd}	30.21±4.10^{cde}	1.31±0.06^{a}	0.61±0.49^{a}	20.62±3.74^{c}	20.27±4.30^{c}
第6周	42.63±8.27^{bc}	38.93±4.37^{bcd}	1.67±1.37^{a}	0.74±0.34^{a}	14.50±0.94^{d}	8.02±1.94^{e}
第8周	51.96±14.13^{b}	78.98±13.28^{a}	1.21±0.50^{a}	0.31±0.17^{a}	3.33±1.35^{e}	5.21±1.10^{e}

注：英文字母上标不同表示均值之间存在显著性差异（p<0.05）。

2.5 LBG对冷冻面团面包弹性、硬度的影响

面包的弹性和硬度是直观反映面包品质的质构指标。从图7可以发现，第5周后面包的弹性下降迅速；第1周到第6周面包硬度增加迅速，第6周后趋于稳定。这是因为随着储藏时间的延长，面团逐渐失水，面筋网络逐渐弱化，导致面包弹性下降，硬度增大。添加LBG后，面包的弹性高于对照组，硬度低于对照组，说明LBG改善了冷冻面团面包的烘焙品质。

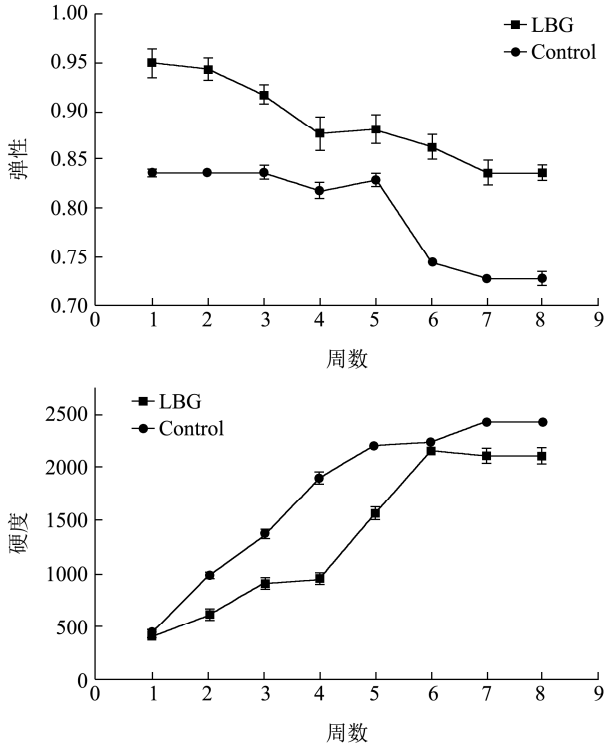


图7 不同冻藏时间LBG对冷冻面团米面包弹性和硬度的影响

Fig.7 Effects of LBG on the elasticity and hardness of frozen dough under different freezing time

3 结论

本文研究了刺槐豆胶对冷冻面团水分分布及面包品质的影响。刺槐豆胶对冷冻面团具有良好的持水保水性能，随着冷冻面团冻藏时间的增加，面团中的水分发生迁移，由深层次结合水向半结合水和自由水转化，自由水的占比由5.60%增加到9.00%，添加刺槐豆胶后自由水的占比由5.80%增加到8.50%，减小了自由水的占比，减弱了冷冻面团的流动性。面团的微观结构在冻藏过程中会有明显改变，面筋蛋白逐渐弱化，包裹淀粉颗粒能力逐渐下降，淀粉颗粒的排布逐渐混乱，面团的发酵速度逐渐缓慢，刺槐豆胶的加入，一定程度上保护了面筋蛋白的网络结构，维持了淀粉颗粒的排布状态以及面团发酵速度的稳定。面包的纹理结构以及品质随着冻藏时间的延长而逐渐下降，加入刺槐豆胶能有效的延缓冷冻面团及其烘烤面包品质在储藏期间的劣变，与面团的水分分布及微观结构分析结果相符。由此可见，冷冻面团面包的品质可以通过面团的水分分布状态来进行预测和分析。

参考文献

[1] Ban C, Yoon S, Han J, et al. Effects of freezing rate and terminal freezing temperature on frozen croissant dough quality [J]. Lwt, 2016, 73: 219-225

[2] Silvas-García M I, Ramírez-Wong B, Torres-Chávez P I, et al. Effect of freezing rate and storage on the rheological, thermal and structural properties of frozen wheat dough starch [J]. Starch - Stärke, 2016, 68(11-12): 1103-1110

[3] Dea I C M, Morrison A. Chemistry and interactions of seed galactomannans [J]. Advances in Carbohydrate Chemistry & Biochemistry, 1975, 31: 241-312

[4] Prajapati V D, Jani G K, Moradiya N G, et al. Locust bean gum: a versatile biopolymer [J]. Carbohydr Polym, 2013, 94(2): 814-21

[5] Hussain R, Singh A, Vatankhah H, et al. Effects of locust bean gum on the structural and rheological properties of resistant corn starch [J]. J Food Sci Technol, 2017, 54(3): 650-658

[6] Tan H-L, Tan T-C, Easa A M. The use of selected hydrocolloids to enhance cooking quality and hardness of zero-salt noodles [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2018, 53(7): 1603-1610

[7] Koksoy A, Kilic M. Use of hydrocolloids in textural stabilization of a yoghurt drink, ayran [J]. Food Hydrocolloids, 2004, 18(4): 593-600

[8] Shi L-E, Li Z-H, Zhang Z-L, et al. Encapsulation of lactobacillus bulgaricus in carrageenan-locust bean gum coated milk microspheres with double layer structure [J]. LWT - Food Science and Technology, 2013, 54(1): 147-151

[9] Wang P, Tao H, Jin Z, et al. Impact of water extractable arabinoxylan from rye bran on the frozen steamed bread dough quality [J]. Food Chem, 2016, 200: 117-24

[10] Miklos R, Cheong L-Z, Xu X, et al. Water and fat mobility in myofibrillar protein gels explored by low-field NMR [J]. Food Biophysics, 2015, 10(3): 316-323

[11] 徐建国,张森旺,徐刚等.莲子薄层热风干燥特性与水分变化规律[J].农业工程学报,2016,32(13):303-309
XU Jian-guo, ZHANG Sen-wang, XU Gang. et al. Thin-layer hot air drying characteristics and moisture diffusivity of lotusseeds [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(13): 303-309

[12] 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 and Bioprocess Technology, 2015, 8(10): 2066-2075

[13] Shao J H, Deng Y M, Jia N, et al. Low-field NMR determination of water distribution in meat batters with NaCl and polyphosphate addition [J]. Food Chemistry, 2016, 200: 308-314

[14] Chevallier S, Zúñiga R, Le-Bail A, et al. Assessment of bread dough expansion during fermentation [J]. Food and Bioprocess Technology, 2010, 5(2): 609-617

[15] 王沛.冷冻面团中小麦面筋蛋白品质劣变机理及改良研究[D].江南大学,2016:98
WANG Pei. Deterioration mechanism and improvement of wheat gluten in frozen dough [D]. Jiangnan University, 2016: 98

[16] 黄桂东,黄伟志,冯结铧等.冻藏时间对冷冻面团馒头品质的影响[J].现代食品科技,2018,34(8):44-51
HUANG Gui-dong, HUANG Zhi-wei, FENG Jie-hua, et al. Effect of refrigeration time on the quality of frozen dough steamed bread [J]. Modern Food Science and Technology, 2018, 34(8): 44-51

[17] Xia K, Xu W, Huang L, et al. Water dynamics of turbot flesh during frying, boiling, and stewing processes and its relationship with color and texture properties: Low-field NMR and MRI studies [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2018, 42(1): e13338

[18] Wang S, Lin Z, Xia K, et al. Dynamics of water mobility and distribution in Sur clam (*Mactra chinensis*) during dehydration and rehydration processes assessed by low-field NMR and MRI [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2017, 11(3): 1342-1354

[19] Cheng S, Zhang T, Yao L, et al. Use of low-field-NMR and MRI to characterize water mobility and distribution in pacific oyster (*Crassostrea gigas*) during drying process [J]. Drying Technology, 2017, 36(5): 630-636

[20] Zang X, Lin Z, Zhang T, et al. Non-destructive measurement of water and fat contents, water dynamics during drying and adulteration detection of intact small yellow croaker by low field NMR [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2017, 11(4): 1550-1558

[21] Sangpring Y, Fukuoka M, Ban N, et al. Evaluation of relationship between state of wheat flour-water system and mechanical energy during mixing by color monitoring and low-field 1 H NMR technique [J]. Journal of Food Engineering, 2017, 211: 7-14

[22] Zhang H, Zhang Y, Wang X, et al. Effects of bamboo shoot dietary fiber on mechanical properties, moisture distribution, and microstructure of frozen dough [J]. Journal of Chemistry, 2017, 2017: 1-7

[23] 张艳艳,李银丽,吴萌萌等.超声波对醒面过程中面团流变学特性,水分分布及蛋白二级结构的影响[J].食品科学,2017:1-12
ZHANG Yan-yan, LI Yin-li, WU Meng-meng, et al. Effects of ultrasonic-assisted resting on dough rheological properties, water distribution and protein secondary structure [J]. Journal of Foodscience, 2017: 1-12

[24] Sousa A M, Gonçalves M P. The influence of locust bean gum on native and alkali-modified agar gels [J]. Food Hydrocolloids, 2015, 44: 461-470

[25] Mohammed M P, Tarleton E, Charalambides M N, et al. A micromechanics model for bread dough [J], 2015, 1642: 305-309

[26] Arp C G, Correa M J, Ferrero C. Rheological and microstructural characterization of wheat dough formulated with high levels of resistant starch [J]. Food and Bioprocess Technology, 2018, 11(6): 1149-1163

[27] 张华,李银丽,李佳乐等.竹笋膳食纤维对冷冻面团流变学特性-水分分布和微观结构的影响[J].食品科学,2018,39(1):53-57
ZHANG Hua, LI Yin-li, LI Jia-le, et al. Effect of bamboo shoot dietary fiber on rheological properties,moisture distribution and microstructure of frozen dough [J]. Journal of Food science, 2018, 39(1): 53-57

[28] Le-Bail A, Nicolitch C, Vuillod C, et al. Fermented frozen dough: Impact of pre-fermentation time and of freezing rate for a pre-fermented frozen dough on final volume of the bread [J]. Food and Bioprocess Technology, 2008, 3(2): 197-203

[29] Luo W, Sun D-W, Zhu Z, et al. Improving freeze tolerance of yeast and dough properties for enhancing frozen dough quality- a review of effective methods [J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 72: 25-33