

不同种类大豆蛋白对冷冻发酵面团馒头品质的影响机制

董梦飞¹, 郭兴凤¹, 朱婷伟¹, 赵树超²

(1. 河南工业大学 粮油食品学院, 郑州 450001; 2. 山东凯斯达机械制造有限公司, 山东 济宁 272100)

摘要:旨在为大豆蛋白在冷冻发酵面团中的应用提供一定的理论依据,对添加大豆分离蛋白(SPI)、质构化大豆分离蛋白(TSP)、水解大豆分离蛋白(SPH)的冷冻发酵面团馒头及冷冻发酵面团进行研究,分析了添加不同种类大豆蛋白的冷冻发酵面团馒头的理化指标(比容、水分含量、pH),并通过测定冷冻发酵面团的二硫键含量、蛋白质二级结构和微观结构,探讨不同种类大豆蛋白对冷冻发酵馒头品质的影响机制。结果表明:添加SPH的发酵面团冷冻储藏前后所蒸制的馒头比容变化最小,在冷冻储藏40 d时蒸制的馒头比容相比冷冻储藏10 d增加了4.59%;同一冷冻储藏时间下添加SPH的发酵面团蒸制的馒头水分含量最低;添加大豆蛋白可以减小在冷冻储藏过程中发酵面团馒头pH的下降速率,至少可延长冷冻发酵面团10 d的保质期;通过傅里叶红外光谱和激光共聚焦对冷冻发酵面团蛋白质结构分析,得出添加3种大豆蛋白均会降低面筋蛋白网络结构的均匀性和连续性,SPI和TSP对面筋蛋白网络结构的影响小于SPH,但在冷冻储藏过程中添加SPH的发酵面团的面筋蛋白网络结构相对较为稳定。综上,大豆蛋白与面筋蛋白通过二硫键和非共价键相互作用,改变面筋蛋白网络结构的均匀性和连续性,从而引起馒头品质变化。

关键词:大豆蛋白;馒头;冷冻发酵面团

中图分类号:TS229;TS213.2 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2023)12-0058-07

Effect mechanism of different kinds of soy protein on the quality of frozen fermented dough buns

DONG Mengfei¹, GUO Xingfeng¹, ZHU Tingwei¹, ZHAO Shuchao²

(1. College of Food Science and Technology, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China;
2. Shandong Kesida Machinery Manufacturing Co., Ltd., Jining 272100, Shandong, China)

Abstract: In order to provide some theoretical basis for the application of soy protein in frozen fermented dough, the frozen fermented dough buns and frozen fermented doughs with soy protein isolates (SPI), texturised soy protein isolates (TSP), hydrolysed soy protein isolates (SPH) added were studied, the physicochemical indexes (specific volume, water content, pH) of frozen fermented dough buns added with different kinds of soy proteins were analysed, and the effect mechanism of different kinds of soy proteins on the quality of frozen fermented dough buns was investigated by determining the disulphide

收稿日期:2022-10-14;修回日期:2023-08-02

基金项目:国家自然科学基金项目“花生油脂和蛋白的水酶法多相体系高效同步分离分子机理及调控”(U21A20270);国家重点研发计划项目“食品营养及生物活性物质的健康功能作用研究”(2017YFD0400200)

作者简介:董梦飞(1994),女,硕士研究生,研究方向为油脂与植物蛋白质工程(E-mail)1452720949@qq.com。

通信作者:郭兴凤,教授,博士(E-mail) guoxingfeng@haut.edu.cn。

bond content, the secondary structure and microstructure of proteins in the frozen fermented doughs. The results showed that the specific volume of steamed buns before and after frozen storage of fermented dough with SPH had the smallest change, and the specific volume of steamed buns after 40 d of frozen storage increased by 4.59% compared with 10 d of frozen storage. The water content of steamed buns with

SPH was the lowest under the same frozen storage time. The addition of soy protein could reduce the rate of pH drop of fermented dough buns during frozen storage, and could extend the shelf life of frozen fermented doughs by at least 10 d. The protein structure analysis of frozen fermented dough by Fourier infrared and laser confocal results showed that the addition of three soy proteins reduced the uniformity and continuity of gluten protein network structure. The effects of SPI and TSP on the gluten protein network structure were less than those of SPH, but the gluten protein network structure of fermented dough with SPH added during frozen storage was relatively stable. In summary, soy protein and gluten protein interact through S—S and non-covalent bonds to change the uniformity and continuity of the gluten protein network structure, causing changes in the quality of steamed buns.

Key words: soy protein; steamed bun; frozen fermented dough

随着生活节奏的加快,冷冻面制半成品产品因加工方便、节约时间而备受欢迎,但以小麦粉为主要原料的面制品缺乏赖氨酸,长期单一食用可能会引起体内蛋白质营养素不平衡^[1]。除此之外,小麦粉制成的面团在冷冻过程中,体系中的水冻结形成冰结晶,会破坏面筋蛋白网络结构^[2],影响面制品品质。大豆蛋白中富含赖氨酸,在小麦粉中添加大豆蛋白可以起到均衡营养的作用^[3],而且小麦粉中添加适量水解大豆分离蛋白(SPH)和质构化大豆分离蛋白(TSP)可以使面团的面筋网络结构变得更为致密^[4]。但是目前关于大豆蛋白对面制品品质影响机制的报道较少。

本研究将3种不同特性的大豆蛋白——大豆分离蛋白(SPI)、TSP和SPH分别添加到小麦粉中,比较不同种类的大豆蛋白对冷冻发酵面团蒸制的馒头品质的影响差异。通过对冷冻发酵面团中二硫键含量、蛋白质二级结构以及微观结构进行分析,探究大豆蛋白对发酵面团品质的影响机制,为大豆蛋白在冷冻发酵面团中的应用提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

大豆分离蛋白(蛋白质含量为91.35%,水分含量为6.80%),山东谷神生物科技集团有限公司;金苑特一面粉(中筋粉),郑州金苑面业有限公司;高活性干酵母,安琪酵母股份有限公司。

DMT-10A 电动家用面条机,山东龙口市复兴机械有限公司;SPX 型生化培养箱,北京市永光明医疗仪器有限公司;LGJ-25 C 冷冻干燥机,北京四环科学仪器有限公司;LGL-18 高速冷冻离心机,上海安亭科技仪器厂;722S 可见分光光度计,上海精密科学有限公司;Clextal Ev02 双螺杆挤压机,法国Clextalgroup 公司。

1.2 试验方法

1.2.1 TSP 和 SPH 的制备

以SPI为原料制备TSP和SPH。参考张莹莹等^[5]的方法制备TSP,设置双螺旋挤压机进料速度30 g/min、物料水分50%、螺旋转速160 r/min、温度160℃后,进行投料,挤出的物料在55℃烘箱中干燥,粉碎过0.15 mm(100目)筛后即得TSP(蛋白质含量为87.96%,水分含量为10.19%)。参考Guo等^[6]的方法制备SPH,所用水解酶为中性蛋白酶,制得的SPH蛋白质含量为92.75%,水分含量为5.40%,水解度为(4.95±0.07)% (采用茚三酮比色法测定)。

1.2.2 混合粉的配制

每种大豆蛋白分别以1.5%、3.0%、4.5%、6.0%的比例替代面粉(小麦粉),混合均匀,同时用纯小麦粉作为对照。分别用WF、WF-SPI、WF-TSP和WF-SPH表示纯小麦粉、SPI与小麦粉的混合粉、TSP与小麦粉的混合粉和SPH与小麦粉的混合粉。

1.2.3 冷冻发酵面团及馒头的制作

参考黎芳等^[7]的方法,称取100 g混合粉、1 g酵母,加水量为混合粉粉质吸水率的78%,用37℃的水活化干酵母3 min,将混合粉、酵母溶液和水加入面条机中和面3 min,压片10次,整形后放入30℃培养箱中发酵40 min,将发酵面团在-35℃冷冻储藏,得到冷冻发酵面团。每隔10 d,将部分冷冻发酵面团冷冻干燥后测定各指标,将部分冷冻发酵面团在4℃解冻3 h后蒸制25 min,得到冷冻发酵面团馒头,室温静置2 h后测定各指标。

1.2.4 馒头感官品质评价

馒头感官评分标准参考付丽红等^[8]的方法并稍作改动,增加馒头体积评分项,去掉馒头滋味评分项,感官评价总分仍为100分。

1.2.5 馒头理化特性评价

比容、pH 和水分含量测定均参照 GB/T 21118—2007。

1.2.6 大豆蛋白对冷冻发酵面团馒头品质影响机制的分析

1.2.6.1 二硫键含量的测定

参考张莹莹等^[5]的方法,取 0.5 g(精确到 0.001 g)冷冻干燥后的冷冻发酵面团溶解于 20 mL 0.2 mol/L 的 Tris - Gly 缓冲溶液中,在 4 000 r/min 下离心 15 min,收集上清液。

取 4 mL 上清液,加入 0.1 mL 10 mmol/L DTNB 溶液,显色 20 min,在 412 nm 波长处测定吸光度,带入以 L-半胱氨酸为标准品绘制的标准曲线中,计算游离巯基的含量。冷冻发酵面团中游离巯基的含量(S_F)计算见公式(1)。

$$S_F = n_1 / c_1 \quad (1)$$

式中: n_1 为根据标准曲线计算出的游离巯基的含量, $\mu\text{mol/mL}$; c_1 为样品质量浓度, g/mL 。

取 1 mL 上清液,加入 4 mL 缓冲溶液混合均匀,加 0.1 mL β -巯基乙醇,于 25 °C 水浴 1 h,再加入 10 mL 质量分数为 12% 的三氯乙酸溶液于 25 °C 水浴 1 h 后,在 4 500 r/min 下离心 15 min,弃上清;用 5 mL 质量分数为 12% 的三氯乙酸溶液重悬沉淀,于 4 500 r/min 下离心 15 min,清洗沉淀两次;最后用 20 mL 缓冲溶液复溶沉淀,加入 0.1 mL 10 mmol/L DTNB 溶液,静置 20 min 后,于 412 nm 波长处测定吸光度,带入以 L-半胱氨酸为标准品绘制的标准曲线中,计算游离巯基含量。总巯基含量(S_T)的计算如公式(2)所示。

$$S_T = n_2 V_2 / (c_1 V_1) \quad (2)$$

式中: n_2 为根据标准曲线计算出的游离巯基的含量, $\mu\text{mol/mL}$; c_1 为样品质量浓度, g/mL ; V_1 为上清液体积, mL ; V_2 为沉淀后复溶体积, mL 。

二硫键含量(S)的计算如公式(3)所示。

$$S = (S_T - S_F) / 2 \quad (3)$$

1.2.6.2 蛋白质二级结构的测定

称取 1.0 mg 冷冻干燥后的冷冻发酵面团粉,与 200.0 mg 烘干的 KBr 粉混合研磨至细粉后压片,再参照 Li 等^[9]的方法进行蛋白质二级结构的测定。采用 Peakfit 软件对酰胺 I 带的吸收峰进行二阶导数拟合,计算出对应区间范围内蛋白质中各个二级结构的相对含量。

1.2.6.3 发酵面团微观结构的观测

参考吴玉新等^[10]的方法并稍加修改。用乙醇作为溶剂,配制质量分数 0.25% 的异硫氰酸荧光素

(FITC)溶液和 0.025% 的罗丹明 B 溶液,将 FITC 溶液和罗丹明 B 溶液按体积比 1:1 混合,得到混合荧光染液。将发酵面团用冰冻切片切为 20 μm 的薄片,随后滴入混合荧光染液染色 20 min,之后洗去表面浮色,静置 3 min 后用激光共聚焦显微镜观察。FITC 可将淀粉颗粒染成绿色,罗丹明 B 将面筋蛋白染成红色。

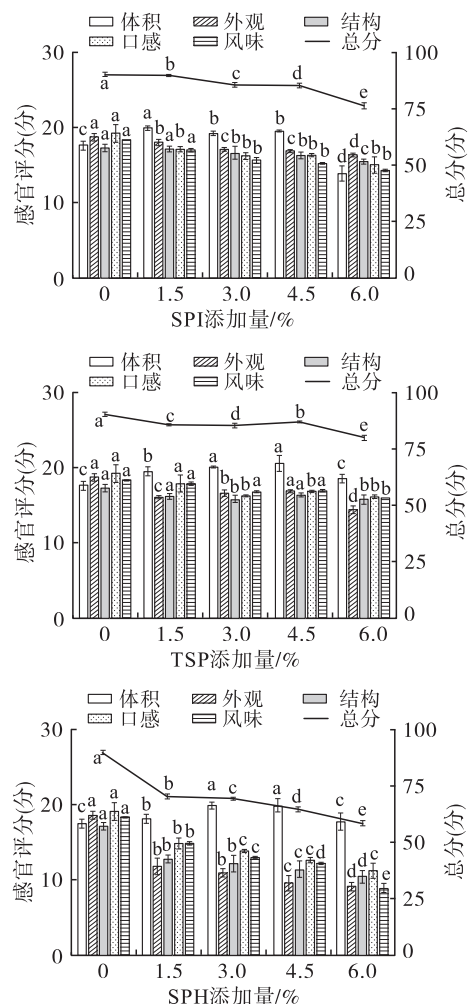
1.2.7 数据统计与分析

每个指标重复测定 3 次,使用 Excel 软件作图,利用 SPSS 22.0 软件对试验数据进行分析,单因素方差分析采用 Duncan 法,差异显著水平 $p < 0.05$ 。

2 结果与讨论

2.1 大豆蛋白添加量对馒头感官品质的影响

图 1 为不同大豆蛋白添加量对馒头感官品质的影响。



注:在同一感官评分下不同小写字母表示有显著差异($p < 0.05$)

图 1 大豆蛋白添加量对馒头感官品质的影响

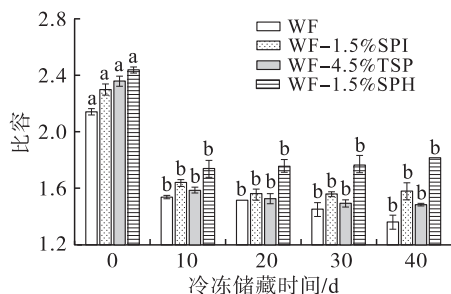
由图 1 可知,随着大豆蛋白添加量的增大,WF - SPI、WF - TSP 和 WF - SPH 发酵面团蒸制的馒头的体积整体均呈现先增大后减小的趋势。有研究表

明,少量添加大豆蛋白可以提高酵母的发酵能力^[11],这是由于大豆蛋白富含多肽和游离氨基酸,可为酵母提供充足的营养和氮源,从而促进面团的发酵。与WF发酵面团蒸制的馒头相比,WF-SPI、WF-TSP和WF-SPH发酵面团蒸制的馒头的表皮不光滑、颜色发暗,外观评分显著减小;WF-SPH发酵面团蒸制的馒头由于表皮出现裂痕,外观评分低于WF-SPI和WF-TSP发酵面团蒸制的馒头。与WF发酵面团蒸制的馒头相比,WF-SPH发酵面团蒸制的馒头比较黏牙,咀嚼性下降,麦香味减弱。以上研究发现,适量添加大豆蛋白可以促进面团的发酵,增大馒头的体积评分,但馒头的感官总评分均减小,SPI、TSP和SPH的添加量分别为1.5%、4.5%、1.5%时发酵面团蒸制的馒头的感官总评分最大。本文旨在比较不同种类的大豆蛋白对冷冻发酵面团馒头的影响差异,因此选择SPI、TSP和SPH在发酵面团中的添加量分别为1.5%、4.5%和1.5%进行以下研究。

2.2 大豆蛋白对冷冻发酵面团馒头理化性质的影响

2.2.1 对比容的影响

馒头比容的大小与面团的醒发程度和面团的持气性有关^[12]。冷冻储藏过程中发酵面团馒头比容的变化如图2所示。



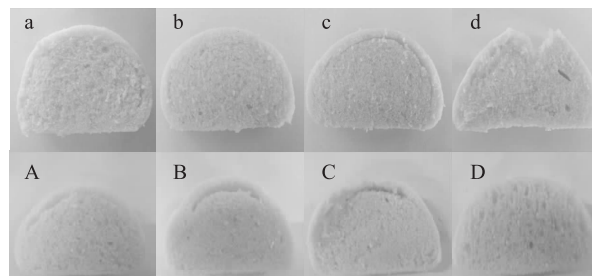
注:在添加同一种类大豆蛋白条件下,不同小写字母表示有显著差异($p < 0.05$)。下同

图2 冷冻储藏过程中发酵面团馒头比容的变化

由图2可知,当冷冻储藏10 d时,4种冷冻发酵面团,即WF、WF-1.5% SPI、WF-4.5% TSP和WF-1.5% SPH发酵面团蒸制的馒头的比容均显著减小,与未冷冻储藏时相比分别减小了28.03%、28.69%、32.62%和28.68%。这是由于冷冻会使发酵面团中的水生成冰结晶破坏面团的面筋结构,发酵面团的持气性降低,从而导致熟制后馒头的比容减小^[13]。在冷冻储藏40 d时,4种发酵面团蒸制的馒头的比容相比冷冻储藏10 d时分别减小了11.68%、3.65%、6.28%和-4.59%,WF-1.5% SPH发酵面团馒头的比容相对增加,但不具有显著

差异($p > 0.05$),这可能是因为添加SPH的发酵面团冷冻储藏稳定性较高所致。

图3为未冷冻储藏和冷冻储藏40 d发酵面团馒头纵切图。



注:a、b、c、d和A、B、C、D分别为WF、WF-1.5% SPI、WF-4.5% TSP、WF-1.5% SPH发酵面团在未冷冻储藏时和冷冻储藏40 d时蒸制的馒头

图3 未冷冻储藏和冷冻储藏40 d发酵面团馒头纵切图

由图3可知,未冷冻储藏的WF-1.5% SPH发酵面团蒸制的馒头出现裂痕,可能是因为添加SPH破坏了面团的面筋蛋白网络结构,蒸制过程中发酵面团的面筋筋力无法承受内部气体带来的压力,使所制得的馒头出现裂痕。杜振亚^[4]研究发现,当SPI水解度超过4.4%以后,面筋蛋白网络局部出现断裂现象,与本文结果一致。未冷冻储藏时,WF-1.5% SPI发酵面团和WF-4.5% TSP发酵面团蒸制的馒头的内部气孔小于WF发酵面团,但WF-1.5% SPI发酵面团和WF-4.5% TSP发酵面团蒸制的馒头的气孔分布比较均匀,WF-4.5% TSP发酵面团蒸制的馒头表皮出现分层的现象。在冷冻储藏40 d时,WF-1.5% SPH发酵面团蒸制的馒头表皮无裂痕且没有表皮与内部分层的现象,这说明冷冻储藏过程中WF-1.5% SPH发酵面团的稳定性高于其他3种发酵面团。

2.2.2 对pH的影响

冷冻储藏过程中发酵面团馒头pH的变化如图4所示。

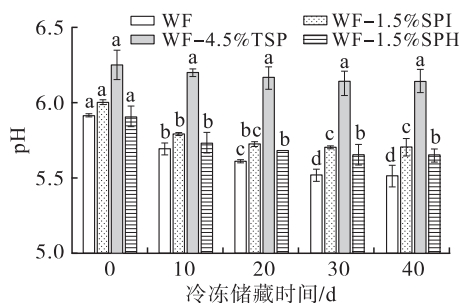


图4 冷冻储藏过程中发酵面团馒头pH的变化

由图4可知,随着冷冻储藏时间的延长,4种冷冻发酵面团馒头的pH均呈现减小的趋势,其中WF-

4.5% TSP 发酵面团蒸制的馒头的 pH 变化无显著差异。在冷冻储藏 30 d 时,WF 发酵面团蒸制的馒头的 pH 低于国标 GB/T 21118—2007 要求(5.6 ~ 7.2),但 3 种小麦粉-大豆蛋白冷冻发酵面团馒头的 pH 均在国标范围内。分析可知,添加大豆蛋白至少可以延长 10 d 冷冻发酵面团的保质期。面团冷冻储藏过程中有机酸增加是导致其馒头的 pH 降低的主要原因,有机酸可使面筋蛋白发生水解,弱化面筋蛋白网络结构,从而影响面制品品质^[14]。

2.2.3 对水分含量的影响

冷冻储藏过程中发酵面团馒头水分含量的变化如图 5 所示。

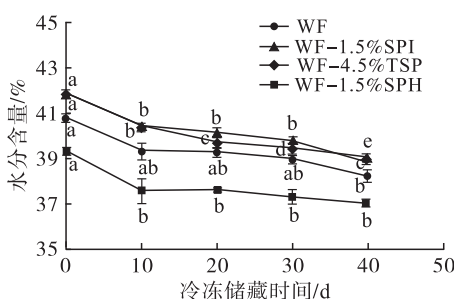


图 5 冷冻储藏过程中发酵面团馒头水分含量的变化

由图 5 可知,在未冷冻储藏时,WF-1.5% SPI 和 WF-4.5% TSP 发酵面团蒸制的馒头的水分含量均大于 WF 和 WF-1.5% SPH 发酵面团蒸制的馒头的水分含量,随着冷冻储藏时间的延长,4 种冷冻发酵面团蒸制的馒头的水分含量均呈现减小的趋势。这是因为面团冻藏过程中形成的冰结晶使面筋蛋白脱水,降低了面团的持水性^[15]。对冷冻储藏 10 d 和冷冻储藏 40 d 进行对比发现,WF、WF-1.5% SPI、WF-4.5% TSP 发酵面团蒸制的馒头和 WF-1.5% SPH 发酵面团蒸制的馒头的水分含量分别降低了 2.77%、3.85%、3.48% 和 1.46%,这说明在冷冻储藏过程中,添加 SPH 的冷冻发酵面团保水性高于其他 3 种冷冻发酵面团,这可能是由于蛋白质经过水解之后表面疏水性减小^[16],面团在冷冻储藏过程中持水性较强,相当于间接抵消了部分失水。

2.3 大豆蛋白对冷冻发酵面团馒头品质影响机制的分析

2.3.1 冷冻储藏过程中发酵面团中二硫键含量的变化

图 6 为冷冻储藏过程中发酵面团中二硫键含量的变化。

由图 6 可知,随着冷冻储藏时间的延长,4 种发酵面团中二硫键含量均呈减小的趋势。与未冷冻储

藏相比,冷冻储藏 40 d 时 WF、WF-1.5% SPI、WF-4.5% TSP 发酵面团和 WF-1.5% SPH 发酵面团的二硫键含量分别减少了 23.76%、18.11%、9.51% 和 7.86%。二硫键含量反映蛋白质的结构状态^[17]。冷冻储藏使蛋白质的二硫键断裂,蛋白质结构发生变化^[18-19]。本研究表明,在冷冻储藏过程中添加大豆蛋白的发酵面团的二硫键相对 WF 发酵面团来说更稳定。结合图 3D 馒头纵切图分析,可能因为 WF-1.5% SPH 发酵面团冷冻储藏过程中二硫键的变化较小,而且 WF-1.5% SPH 发酵面团在冷冻后的解冻过程中由于酵母细胞的死亡导致二次发酵效果较差,生面团的体积没有进一步胀大,此时的面筋筋力和面团的气体体积相当,所以在熟制过程中馒头没有出现裂痕。

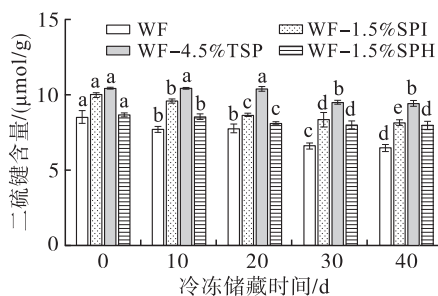


图 6 冷冻储藏过程中发酵面团中二硫键含量的变化

2.3.2 冷冻储藏前后发酵面团蛋白质二级结构的变化

红外光谱图中酰胺 I 区 C=O 的伸缩振动及其与 N-H 的弯曲振动以及与 C-N 伸缩振动的偶合均能反映蛋白质二级结构^[20]。其中最主要的研究是酰胺 I 区中的 α -螺旋(波数范围 1 650 ~ 1 660 cm^{-1})、 β -折叠(波数范围 1 605 ~ 1 615 cm^{-1})、 β -转角(波数范围 1 660 ~ 1 700 cm^{-1})和无规卷曲(波数范围 1 640 ~ 1 650 cm^{-1})的吸收峰。冷冻储藏前后发酵面团蛋白质二级结构的变化如表 1 所示。

由表 1 可知,与 WF 发酵面团相比,3 种小麦粉-大豆蛋白发酵面团蛋白质中 α -螺旋和 β -折叠含量均减小, β -转角和无规卷曲含量均增大。同一种发酵面团在经过冷冻之后 α -螺旋和 β -折叠含量减小, β -转角(除 WF-1.5% SPI)和无规卷曲含量增大。冷冻过程中冰结晶形成产生的微作用力导致蛋白质结构变化, α -螺旋结构减少,面筋蛋白网络结构的无序化增加^[21]。蛋白质分子总是倾向于最低的能量状态以保持结构的稳定, α -螺旋和 β -折叠是较为有序的结构,稳定性较高^[22]。 α -螺旋是醇溶蛋白的特征结构,维持其结构稳定的作用力

主要是氢键,氢键被破坏后,蛋白质的亲水和疏水残基暴露在外界环境中,进而蛋白质的分子间、分子内出现新的交联现象,最终蛋白质的二级结构发生改变^[23]。李学红^[24]、潘治利^[25]等的研究结果也证明

了添加大豆蛋白和冷冻均会对发酵面团的蛋白质的二级结构产生影响。以上研究说明,添加大豆蛋白和冷冻都会对发酵面团蛋白质的二级结构产生影响,进而影响面团的特性和产品质量。

表 1 冷冻储藏前后发酵面团蛋白质二级结构的变化

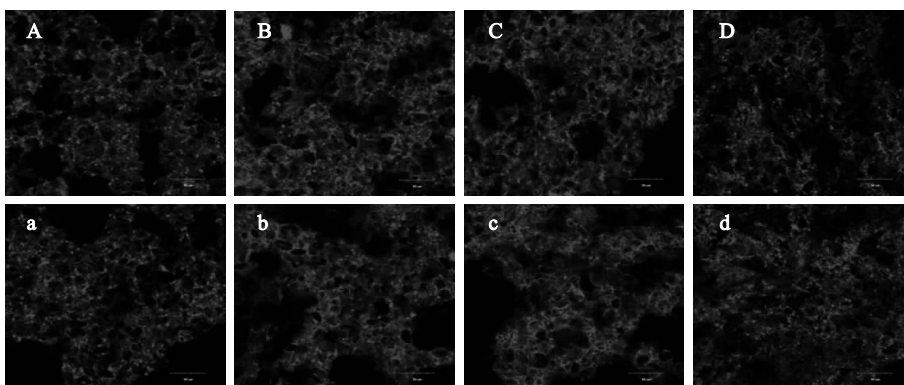
| 发酵面团 | α -螺旋 | β -折叠 | β -转角 | 无规卷曲 |
|----------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|
| 未冷冻发酵面团 | | | | |
| WF | 12.46 ± 0.05 ^a | 36.59 ± 0.02 ^a | 37.05 ± 0.02 ^d | 13.90 ± 0.13 ^b |
| WF-1.5% SPI | 12.24 ± 0.02 ^b | 34.16 ± 0.22 ^b | 39.55 ± 0.12 ^b | 14.05 ± 0.07 ^b |
| WF-4.5% TSP | 12.16 ± 0.06 ^c | 33.18 ± 0.02 ^b | 39.08 ± 0.32 ^c | 14.58 ± 0.01 ^a |
| WF-1.5% SPH | 11.94 ± 0.02 ^d | 32.56 ± 0.13 ^b | 41.03 ± 0.14 ^a | 14.47 ± 0.02 ^a |
| 冷冻储藏 10 d 发酵面团 | | | | |
| WF | 11.90 ± 0.08 ^a | 35.40 ± 0.02 ^a | 37.71 ± 0.04 ^d | 14.99 ± 0.06 ^c |
| WF-1.5% SPI | 11.68 ± 0.02 ^b | 33.72 ± 0.03 ^b | 38.45 ± 0.05 ^c | 15.65 ± 0.03 ^{ab} |
| WF-4.5% TSP | 11.39 ± 0.03 ^c | 32.81 ± 0.11 ^c | 40.29 ± 0.15 ^b | 15.51 ± 0.15 ^b |
| WF-1.5% SPH | 10.42 ± 0.18 ^d | 32.17 ± 0.09 ^c | 41.61 ± 0.02 ^a | 15.80 ± 0.01 ^a |

注:同一储藏条件下添加不同大豆蛋白的发酵面团间不同字母表示有显著差异($p < 0.05$)

2.3.3 发酵面团的微观结构变化

发酵面团面筋蛋白网络结构的激光共聚焦显微

图如图 7 所示。



注:A、B、C、D 和 a、b、c、d 分别为未冷冻储藏和冷冻储藏 10 d 的 WF、WF-1.5% SPI、WF-4.5% TSP、WF-1.5% SPH 发酵面团

图 7 发酵面团面筋蛋白网络结构的激光共聚焦显微图

由图 7 可知,在未冷冻储藏时,WF 发酵面团中面筋蛋白结构完整,呈连续致密的网络状,添加大豆蛋白后面筋蛋白网络孔隙率增加,说明大豆蛋白对面筋蛋白网络结构具有弱化作用。在未冷冻储藏时,添加 SPI 和 TSP 的发酵面团面筋蛋白网络结构较添加 SPH 的发酵面团的面筋蛋白网络结构均匀和致密,其中添加 TSP 的发酵面团面筋蛋白网络结构更加均匀,连续性更强。二硫键的数量在一定程度上反映了面筋蛋白网络结构的交联程度,二硫键测定结果(图 6)显示添加 SPH 的发酵面团中二硫键数量相对于 WF 发酵面团来说减少得更多,说明 SPH 通过破坏二硫键影响面筋蛋白网络结构的形成,而蛋白与面粉的结构疏松使气体更容易进入到面团中^[26],这是比容测定(图 2)中 WF-1.5% SPH

馒头比容较高的原因。同一种发酵面团冷冻储藏 10 d 之后面筋蛋白网络结构发生聚集,且在面团中分布的连续性和均匀性下降,使面团中出现较大的孔洞。结合馒头纵切面(图 3)结果分析,添加 SPI 和 TSP 的发酵面团在冷冻过程中内部面筋蛋白网络结构变得更加紧密,内部体积减小,而面团表皮较硬,外部体积几乎保持不变,导致馒头切面出现分层。而添加 SPH 的发酵面团在冷冻储藏后面筋蛋白网络结构变化较小,此时馒头的切片显示无分层现象;同时在冷冻面团馒头比容测定(图 2)结果中,添加 SPH 的冷冻发酵面团馒头比容变化最小,这与微观结构分析结果一致。

3 结论

本文对添加不同种类大豆蛋白的冷冻发酵面团

馒头进行研究。结果表明:添加 SPI、TSP、SPH 均会减小发酵面团在冷冻储藏过程中蒸制馒头比容的减小速率,其中添加 SPH 的馒头比容相对增大;添加 SPI、TSP 增加了馒头的水分含量,添加 SPH 减小了馒头的水分含量。相比未添加大豆蛋白的小麦粉面团,添加大豆蛋白的发酵面团冷冻储藏保质期延长;SPI 和 TSP 对面筋蛋白网络结构的影响小于 SPH,但是在冷冻储藏过程中添加 SPH 的发酵面团面筋网络结构相对较为稳定。综上所述,不同种类大豆蛋白对冷冻发酵面团馒头品质的影响不同,大豆蛋白通过改变面筋蛋白网络结构的均匀性和连续性,引起馒头品质变化。

参考文献:

- [1] RIBOTTA P D, LEÓN A E, PÉREZ G T, et al. Electrophoresis studies for determining wheat – soy protein interactions in dough and bread [J]. *Eur Food Res Technol*, 2005, 221(1):48 – 53.
- [2] ESSELINK E F J, VAN AALST H, MALIEPAARD M, et al. Long – term storage effect in frozen dough by spectroscopy and microscopy[J]. *Cereal Chem*, 2003, 80(4):396 – 403.
- [3] NISHINARI K, FANG Y, GUO S, et al. Soy proteins: a review on composition, aggregation and emulsification[J]. *Food Hydrocoll*, 2014, 39:301 – 318.
- [4] 杜振亚. 改性大豆分离蛋白对馒头品质影响的研究 [D]. 郑州: 河南工业大学, 2016.
- [5] 张莹莹, 郭兴凤, 王瑞红, 等. TSP 与 SPH 复合物对面团特性及面条品质的影响机制[J]. *食品科学*, 2020, 41(2):37 – 42.
- [6] GUO X, SUN X, ZHANG Y, et al. Interactions between soy protein hydrolyzates and wheat proteins in noodle making dough[J]. *Food Chem*, 2018, 245:500 – 507.
- [7] 黎芳, 滕文韶, 刘野, 等. 3 种功能性蛋白对淀粉 – 面筋重组面团流变学特性及馒头品质的影响[J]. *中国食品学报*, 2020, 20(3):103 – 111.
- [8] 付丽红, 刘璐婕, 张茹, 等. 小米混合面团特性及馒头制作工艺研究[J]. *食品研究与开发*, 2021, 42(20):63 – 70.
- [9] LI M, ZHU K X, PENG J, et al. Delineating the protein changes in Asian noodles induced by vacuum mixing[J]. *Food Chem*, 2014, 143(2):9 – 16.
- [10] 吴玉新, 张可欣, 蒋慧, 等. 不同发酵时间甜酒酿面团的超微结构与面包香气特征研究[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(2):29 – 36.
- [11] LIU X, LI T, LIU B, et al. An external addition of soy protein isolate hydrolysate to sourdough as a new strategy to improve the quality of Chinese steamed bread [J]. *J Food Qual*, 2016, 39(1):3 – 12.
- [12] VAN STEERTEGEM B, PAREYT B, SLADE L, et al. Impact of heat treatment on wheat flour solvent retention capacity (SRC) profiles [J]. *Cereal Chem*, 2013, 90(6):608 – 610.
- [13] BAN C, YOON S, HAN J, et al. Effects of freezing rate and terminal freezing temperature on frozen croissant dough quality[J]. *LWT – Food Sci Technol*, 2016, 73:219 – 225.
- [14] 郭璐楠. 面团冻藏过程中酵母稳定性变化及其对面团品质的影响[D]. 江苏 无锡: 江南大学, 2021.
- [15] TANG X, ZHANG B, HUANG W, et al. Hydration water distribution and microstructure of gluten during freeze thaw process: role of a high molecular weight dextran produced by *Weissella confusa* QS813 [J]. *Food Hydrocoll*, 2019, 90:377 – 384.
- [16] 张娅妮, 阮晓惠, 陈浩, 等. 核桃蛋白的酶解工艺优化及产物特性研究[J]. *中国油脂*, 2021, 46(10):18 – 23.
- [17] ZHAO J, DONG F, LI Y, et al. Effect of freeze – thaw cycles on the emulsion activity and structural characteristics of soy protein isolate [J]. *Process Biochem*, 2015, 50(10):1607 – 1613.
- [18] XUAN Y F, ZHANG Y, ZHAO Y Y, et al. Effect of hydroxypropylmethylcellulose on transition of water status and physicochemical properties of wheat gluten upon frozen storage[J]. *Food Hydrocoll*, 2017, 63:35 – 42.
- [19] 赵雷. 冻藏对面筋蛋白分子量、链结构及聚集态影响的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- [20] GU L, WANG M, ZHOU J. Effects of protein interactions on properties and microstructure of zein – gliadin composite films[J]. *J Food Eng*, 2013, 119(2):288 – 298.
- [21] BIGNE F, FERRERO C, PUPPO M C. Effect of freezing and frozen storage on mesquite – wheat dough for panettone – like breads [J]. *J Food Meas Charact*, 2019, 13(4):2853 – 2861.
- [22] NIU M, XIONG L, ZHANG B, et al. Comparative study on protein polymerization in whole – wheat dough modified by transglutaminase and glucose oxidase[J]. *LWT – Food Sci Technol*, 2018, 90:323 – 330.
- [23] WANG P, CHEN H, MOHANAD B, et al. Effect of frozen storage on physico – chemistry of wheat gluten proteins: studies on gluten – , glutenin – and gliadin – rich fractions[J]. *Food Hydrocoll*, 2014, 39:187 – 194.
- [24] 李学红, 胡钟毓, 陆勇, 等. 冻藏时间对麦谷蛋白和麦醇溶蛋白二级结构及面团性能的影响研究[J]. *食品工业科技*, 2014, 35(1):83 – 86, 97.
- [25] 潘治利, 邢仕敏, 张秀玲, 等. 反复冻融对麦谷蛋白结构及其功能性质的影响[J]. *中国食品学报*, 2015, 15(9):47 – 53.
- [26] KAWAMURA – KONISHI Y, SHODA K, KOGA H, et al. Improvement in gluten – free rice bread quality by protease treatment[J]. *J Cereal Sci*, 2013, 58(1):45 – 50.