

低温贮藏对小麦面筋蛋白特性的影响

雷 磊 王恩胜 刘海波 桑大席 李 坤

(信阳农林学院食品科学与工程学院, 河南 信阳 464000)

摘要: [目的]探究低温贮藏对面筋蛋白的游离巯基、二级结构、持水性、流变学特性等的影响。[方法]将小麦面筋蛋白于 4, -18 °C 下贮藏 3, 6, 9, 12, 15 d。[结果]随着贮藏时间的延长, 面筋蛋白的游离巯基含量逐渐增加, 与对照组相比, 4 °C 冷藏 15 d 时游离巯基含量增加了 73.44%, -18 °C 冷冻 15 d 时增加了 100.42%; 随着低温贮藏时间的延长, 蛋白的二级结构中 α -螺旋和 β -折叠含量减少, β -转角和无规卷曲含量增加; 面筋蛋白的持水性、持油性、乳化性及乳化稳定性、起泡性及起泡稳定性随贮藏时间的延长均有下降趋势; 面筋蛋白的硬度随低温贮藏时间的延长逐渐增大, 其黏性、弹性、黏附性、内聚性和回复性逐渐减小。[结论]低温(4, -18 °C)贮藏会改变面筋蛋白的结构特性, 进而影响其功能特性。
关键词: 面筋蛋白; 低温贮藏; 流变学特性; 二级结构; 面制品

Effects of low-temperature storage on the characteristics of wheat gluten

LEI Lei WANG Ensheng LIU Haibo SANG Daxi LI Kun

(College of Food Science and Engineering, Xinyang Agriculture and Forest University, Xinyang, Henan 464000, China)

Abstract: [Objective] This study aimed to investigate the effects of low-temperature storage (3, 6, 9, 12, 15 days) on the structural and functional properties of gluten proteins, including free sulfhydryl content, secondary structure, water-holding capacity, and rheological properties. [Methods] Wheat gluten was stored at 4 °C and -18 °C, and changes in free sulfhydryl groups, secondary structure, functional properties and rheological behavior were analyzed. [Results] Free sulfhydryl content increased with storage time, rising by 73.44% at 4 °C and 100.42% at -18 °C after 15 d compared to the control group. Prolonged low-temperature storage led to a decrease in α -helices and β -sheets, alongside an increase in β -turns and random coils in gluten proteins. Functional properties, including water holding capacity, oil holding capacity, emulsifying capacity, emulsifying stability, foaming capacity, and foaming capacity and stability, declined with extended storage. Additionally, gluten hardness increased, while the viscosity, elasticity, adhesiveness, cohesiveness and recovery gradually decreased. [Conclusion] Low-temperature storage (4 °C and -18 °C) significantly alters the structural characteristics of gluten proteins, leading to a deterioration in their functional properties.

Keywords: gluten protein; low-temperature storage; rheological characteristics; secondary structure; wheat flour products

小麦是最重要的粮谷作物之一, 以小麦粉为原料制作的馒头、面包、面条等主食被大量消费^[1-2]。自然条件下, 面制品的质量下降快、保质期短, 为了克服这一难题, 真空预冷、微波辐照和冷冻等技术被用于提高面食的质量, 其中冷冻是最常用的面制品贮藏方法之一^[3]。而市售的面制品经冷冻处理后会表面碎裂、面团韧性和弹性降低、组织结构受损、咀嚼硬度增强等品质劣变现象^[4-5]。

面筋蛋白是小麦面粉中的重要组成部分, 用小麦粉与水 and 面时, 面筋蛋白在吸水后可以形成具有黏性和弹

性的均匀网状结构, 构成面团骨架, 同时淀粉、脂肪和纤维等成分被镶嵌在网络中^[6-7]。面筋蛋白的性质、结构的变化一定程度上会影响面团的性质, 并决定面制品品质^[8]。Zhang 等^[9]研究发现, 发酵面团在 -12 °C 下的冷冻效果优于 -6, -18 °C。Yang 等^[10]用重组面粉研究了淀粉和面筋对冷冻面团理化性质的影响, 面筋蛋白经冷冻处理后明显改变面团的黏弹性和结构组织中的可冻结水含量。Chen 等^[11]探究了罗勒籽胶(BSG)对冷冻面团特性的影响, 加入 BSG 可提高冷冻面团的质地、流变性能、结合水

基金项目: 河南省自然科学基金面上项目(编号: 242300420173); 河南省科技攻关项目(编号: 242102230129); 河南省高等学校重点科研项目计划(编号: 23A550015)

通信作者: 李坤(1987—), 男, 信阳农林学院副教授, 博士。E-mail: likunkm@163.com

收稿日期: 2024-04-07 **改回日期:** 2024-11-05

比例和谷蛋白大聚合物含量,同时有效降低了冷冻面团中游离巯基和可冷冻水含量,稳定了面筋的二级结构。

为了延长面制品的货架期,通常采用 4℃ 冷藏和 -18℃ 冷冻两种低温贮藏方式保存面制品。冷冻状态下,大多数生物活动是停止或缓慢的,因而面团具有较长的保质期,但因冰晶体的形成和融溶以及冻结状态下的失水问题,会影响面团品质。而冷藏则可避开水冻结的影响,对保持面团的质构非常有利。面团的加工性能和食用品质受小麦淀粉和面筋蛋白结构、性质变化的影响,其中,面筋蛋白是赋予小麦面团特殊加工性能的主要因素。因此,研究拟选取常用低温条件(4, -18℃)对小麦面筋蛋白进行处理,探究低温贮藏对面筋蛋白特性的影响,以期对面制品的产品改良以及低温贮藏保鲜提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

谷朊粉(面筋蛋白):山东滨州中裕食品有限公司;

金龙鱼精炼一级大豆油:益海嘉里金龙鱼粮油食品股份有限公司;

三羟甲基氨基甲烷(Tris)、甘氨酸(Gly)、5,5'-二硫代双(2-硝基苯甲酸)(DTNB)、乙二胺四乙酸二钠(Na₂EDTA)等为国产分析纯。

1.2 仪器与设备

电子分析天平:FA2104 型,杭州万特衡器有限公司;

冰箱:BCD-532WGHSS8EL9U1 型,海尔智家股份有限公司;

傅里叶红外光谱仪:iS5 型,赛默飞世尔科技(中国)有限公司;

质构仪:TMS-PRO 型,北京盈盛恒泰科技有限责任公司;

流变仪:MCR102e 型,安东帕(上海)商贸有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 样品处理 将谷朊粉与蒸馏水以 $m_{\text{谷朊粉}}:m_{\text{蒸馏水}}$ 为 2:3 混合制备湿面筋样品,保鲜膜密封包裹,分别于 4, -18℃ 环境中贮藏 3, 6, 9, 12, 15 d 后将面筋样品冻干,粉碎研磨,标记留样以备试验。未经贮藏处理的面筋蛋白作为对照。

1.3.2 游离巯基含量测定 参照孙嘉辉等^[12]的方法,根据式(1)计算面筋蛋白游离巯基含量。

$$R = \frac{73.53 \times A_{412\text{ nm}} \times 5.02}{C}, \quad (1)$$

式中:

R ——游离巯基含量, $\mu\text{mol/g}$;

$A_{412\text{ nm}}$ ——412 nm 处的吸光度;

5.02——稀释因子;

73.53——DTNB 试剂摩尔消光系数;

C ——样品质量浓度, mg/mL 。

1.3.3 二级结构含量测定 参照 Chen 等^[13]的方法,扫描范围 400~4 000 cm^{-1} 、分辨率 4 cm^{-1} 、扫描频次 32 次,利用 Peak Fit Software 软件对光谱图的酰胺 I 峰带进行拟合分析和计算。

1.3.4 持水性、持油性测定

(1) 持水性:参照李翠翠等^[14]的方法略修改,取 1.0 g 样品于离心管,加蒸馏水充分搅拌,静置 30 min, 5 000 r/min 离心 30 min,去掉上清液,称取离心管和样品质量,按式(2)计算持水性。

$$A = \frac{m_2 - m_1}{1.0} \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

A ——持水性, %;

m_1 ——起始质量(离心管和样品), g;

m_2 ——离心后质量(离心管和样品), g。

(2) 持油性:取 1.0 g 样品于离心管,加入大豆油并搅拌均匀,放置 30 min, 5 000 r/min 离心 30 min,去上层液称重,按式(3)计算持油性。

$$B = \frac{m_4 - m_3}{1.0} \times 100\%, \quad (3)$$

式中:

B ——持油量, %;

m_3 ——起始质量(离心管和样品), g;

m_4 ——离心后质量(离心管和样品), g。

1.3.5 乳化性及其稳定性测定 参照张麟^[15]的方法,分别按式(4)、式(5)计算乳化性和乳化稳定性。

$$E_c = \frac{V_2}{V_1} \times 100\%, \quad (4)$$

$$E_s = \frac{V_4}{V_3} \times 100\%, \quad (5)$$

式中:

V_1 ——乳化层体积, mL;

V_2 ——乳化性测试总体积, mL;

E_c ——乳化性, %;

V_3 ——静置 30 min 后乳化层体积, mL;

V_4 ——总乳化稳定性测试总体积, mL;

E_s ——乳化稳定性, %。

1.3.6 起泡性和泡沫稳定性测定 参照李翠翠等^[14]的方法,分别按式(6)、式(7)计算起泡性和泡沫稳定性。

$$F_c = \frac{V_5}{100} \times 100\%, \quad (6)$$

$$F_s = \frac{V_6}{100} \times 100\%, \quad (7)$$

式中:

V_5 ——起泡时泡沫体积, mL;

V_6 ——静置 10 min 后泡沫体积, mL;

F_c ——起泡性,%;

F_s ——泡沫稳定性,%。

1.3.7 流变学特性测定 参照Sun等^[16]的方法,记录并保存储能模量(G')和耗能模量(G'')。

1.3.8 质构特性测定 根据杨静洁等^[17]的方法稍修改,取一定量湿面筋样品,使其成型为直径4 cm的球体。仪器参数:TPA模式,P/50圆柱形探头,测前、中、后速度分别为3,1,3 mm/s;压缩形变量50%,2次压缩时间间隔10 s,触发力0.1 N。

1.4 数据处理与分析

所有试验平行3次,结果以“平均值±标准差”表示;利用SPSS 17.0软件处理数据,Origin 2022软件作图,字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 对面筋蛋白游离巯基含量的影响

两个游离巯基可以氧化形成一个二硫键,而二硫键对于稳定面筋网络结构具有重要作用,且会直接影响面制品的加工品质,所以常以游离巯基含量来反映二硫键的动态变化。通常情况下二硫键含量越多,面筋网络就越密集和稳固。由图1可知,游离巯基含量随贮藏时间的延长逐渐增加。未经处理的面筋蛋白游离巯基含量为 $4.82 \mu\text{mol/g}$, $4, -18^\circ\text{C}$ 贮藏3 d时,游离巯基含量均有增加且含量相近; $4, -18^\circ\text{C}$ 贮藏15 d时,面筋蛋白的游离巯基含量分别增至 $8.36, 9.64 \mu\text{mol/g}$ 。 4°C 贮藏环境中,面筋蛋白中的极性基团(如 $-\text{OH}$ 、 $-\text{SH}$)的水合作用降低,二硫键含量减少,自由态的游离巯基较多^[18]。 -18°C 贮藏过程中,面筋中的自由水被冻结,形成冰晶体,随着贮藏时间的延长,冰晶体逐渐聚集变大,导致蛋白分子的水合环境改变,原有的分子间平衡遭到破坏致使面筋蛋白的结构发生变化。此外,冷冻会引起溶液浓缩现象,面筋蛋白分子聚集,其分子间和分子内二硫键反应几率增加^[19]。低温贮藏前3 d,冷藏对水合作用的影响与冷冻对冰晶体

的形成及浓缩效应的影响效果基本一致,随着时间的延长,冷冻对巯基含量变化的影响作用逐渐超过冷藏。总体来看,低温($4, -18^\circ\text{C}$)贮藏过程中,面筋蛋白的游离巯基含量均有增加的趋势。

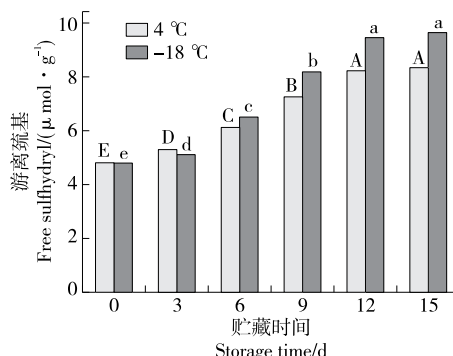


图1 低温贮藏对面筋蛋白游离巯基含量的影响

Figure 1 The effect of low-temperature storage on the free sulfhydryl content of gluten

2.2 对面筋蛋白二级结构含量的影响

红外图谱中位于 $1600\sim 1700 \text{ cm}^{-1}$ 的酰胺I带代表蛋白质的二级结构,蛋白的各类二级结构分别为: β -折叠($1610\sim 1640 \text{ cm}^{-1}$)、无规卷曲($1640\sim 1650 \text{ cm}^{-1}$)、 α -螺旋($1650\sim 1660 \text{ cm}^{-1}$)和 β -转角($1660\sim 1670 \text{ cm}^{-1}$)^[20]。由图2可知,蛋白中的 α -螺旋、 β -折叠、 β -转角和无规卷曲在空间结构的排列规律有序性逐渐减小,且主要以氢键的方式进行连接^[21]。对照组面筋蛋白的 α -螺旋、 β -折叠、 β -转角和无规卷曲含量分别为29.89%、23.64%、24.18%、22.9%。 4°C 冷藏15 d后,二级结构含量为: α -螺旋22.62%、 β -折叠18.27%、 β -转角28.92%、无规卷曲30.19%; -18°C 冷藏15 d后二级结构含量为: α -螺旋21.32%、 β -折叠18.58%、 β -转角29.12%、无规卷曲30.98%。总体来看,随着贮藏时间的延长, α -螺旋和 β -折叠的总含量逐渐降

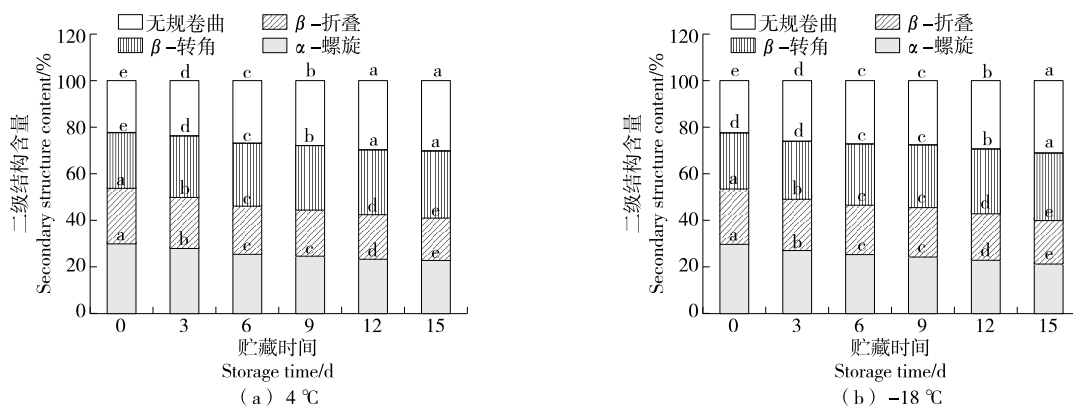


图2 低温贮藏对面筋蛋白二级结构含量的影响

Figure 2 The effect of low-temperature storage on the secondary structure content of gluten

低,而 β -转角和无规卷曲的总含量逐渐增加,说明低温贮藏会降低面筋蛋白二级结构排列的有序性,这可能是贮藏过程中极性基团水合作用及冰晶体的变化破坏了氢键以及面筋蛋白二硫键断裂引起的^[18-19]。

2.3 对面筋蛋白持水性、持油性的影响

蛋白质的持水性是指蛋白质吸收并保持水分的能力,持油性表示蛋白质对脂质的吸收和保留能力,持水性和持油性的变化会直接影响食物的外观、组织构造和口感风味^[22]。由图 3 可知,未经低温贮藏处理的面筋蛋白持水性为 194%,持油性为 290%。不同贮藏温度下,随着贮藏时间的延长,面筋蛋白的持水性和持油性均下降。4℃贮藏 15 d 后持水性降为 139%、持油性降至 168%,−18℃贮藏 15 d 后持水性降为 109%、持油性降至 141%,相较而言,−18℃处理后的面筋蛋白持水性和持油性下降程度更为明显,说明贮藏温度越低、贮藏时间越久,对面筋蛋白的持水和持油效果影响越大。这可能是低温条件使面筋蛋白的极性基团及网络结构受到影响,蛋白对水分子和油脂分子的吸附能力减弱,导致面筋蛋白的持水性和持油性下降。

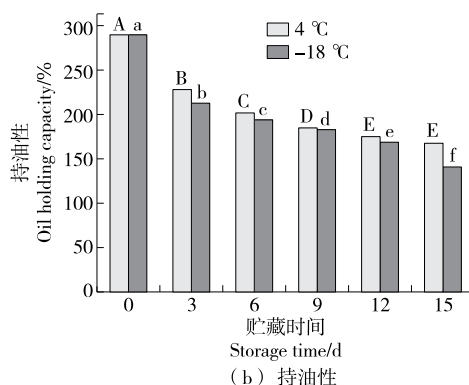
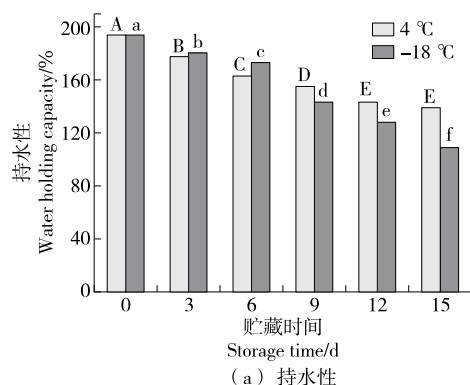


图 3 低温贮藏对面筋蛋白持水性、持油性的影响

Figure 3 The effect of low-temperature storage on the water and oil holding capacity of gluten

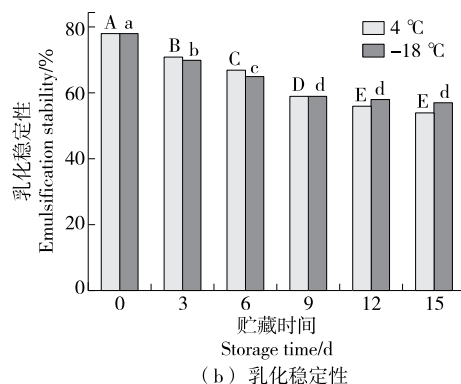
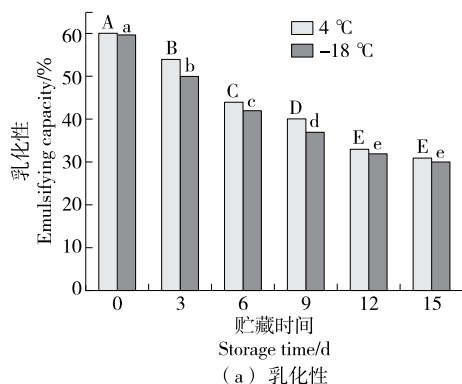


图 4 低温贮藏对面筋蛋白乳化性及其稳定性的影响

Figure 4 The effect of low-temperature storage on the emulsification and stability of gluten

2.4 对面筋蛋白乳化性及其稳定性的影响

蛋白质的乳化性是指蛋白分子使互不相溶的水相和油相融为均匀一体乳状液的能力,乳化稳定性是指其维持乳状液保持均匀的能力^[23]。由图 4 可知,对照组面筋蛋白的乳化性为 60%,乳化稳定性为 78%;4℃处理 15 d 后,乳化性下降了 48.33%,乳化稳定性下降了 30.77%;−18℃处理 15 d 后,乳化性下降了 50%,乳化稳定性下降了 26.92%。随着贮藏时间的延长,面筋蛋白的乳化性和乳化稳定性逐渐降低。这可能是低温贮藏过程中,面筋蛋白的游离巯基含量增多,二级结构的有序性降低,导致其乳化能力减弱,乳化稳定性降低。相关研究^[24]表明,蛋白中疏水性和构象稳定性是影响乳化性及乳化稳定性的主要因素。低温贮藏时间越长,面筋蛋白中的极性基团及网络结构受影响程度越大,乳化性能衰退得更明显,乳化稳定性也随之下降。

2.5 对面筋蛋白起泡性及其稳定性的影响

蛋白质的起泡特性对于保持气液界面的稳定有重要作用,且会影响烘焙食品和含糖食品品质^[25]。起泡性是衡量面筋蛋白品质的重要指标之一,良好的起泡性能够极大提高面制品的加工特性^[15]。由图 5 可知,面筋蛋白的

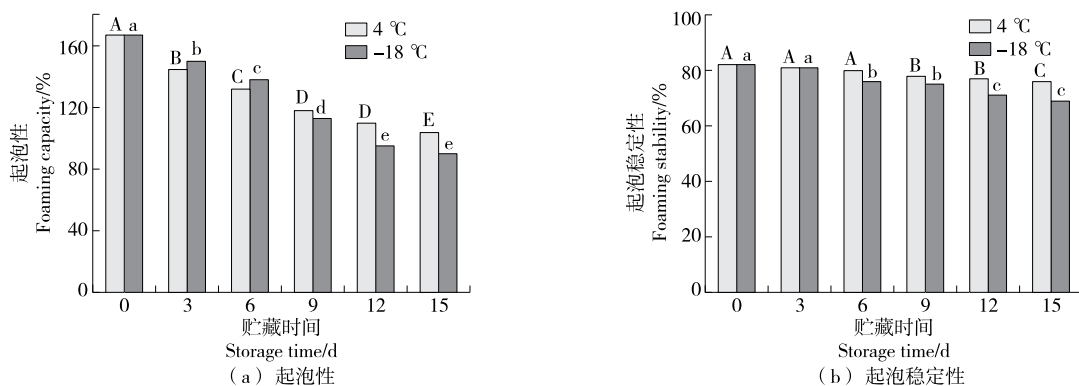


图5 低温贮藏对面筋蛋白起泡性及其稳定性的影响

Figure 5 The effect of low-temperature storage on the foaming and stability of gluten

起泡性随贮藏时间的延长逐渐降低。对照组面筋蛋白起泡性为167%,4 °C处理15 d后,起泡性降至104%;-18 °C处理15 d后降至90%。面筋蛋白经-18 °C冷冻处理后,因二硫键的断裂导致面筋蛋白中心的各种基团分散,疏水相互作用、氢键等作用力平衡被打破,蛋白的空间构象发生变化^[15],因此,面筋蛋白分子不能在气、水界面均匀地分散和延展,从而导致面筋蛋白的起泡性下降。未经低温贮藏的面筋蛋白起泡稳定性为82%,4 °C处理3,6 d时无显著性变化($P < 0.05$),随着时间的继续延长,起泡稳定性略微降低;-18 °C处理下起泡性也表现出相同趋势,

贮藏温度和时间对面筋蛋白起泡稳定性的影响较小,可能与蛋白的初始起泡量有关。

2.6 对面筋蛋白流变学特性的影响

面筋蛋白体系中, G' 代表弹性, G'' 代表黏性,二者共同赋予面筋蛋白体系的黏弹性^[26]。由图6可知,与对照组面筋蛋白相比,4,-18 °C条件下,随着贮藏时间的延长,面筋蛋白的 G' 和 G'' 逐渐下降,说明低温贮藏会降低面筋蛋白的黏性和弹性。测试过程中, G' 始终大于 G'' ,说明在面筋蛋白体系中,弹性发挥的作用大于黏性。这可能是因为低温贮藏过程中,面筋蛋白巯基、二硫键含量的变

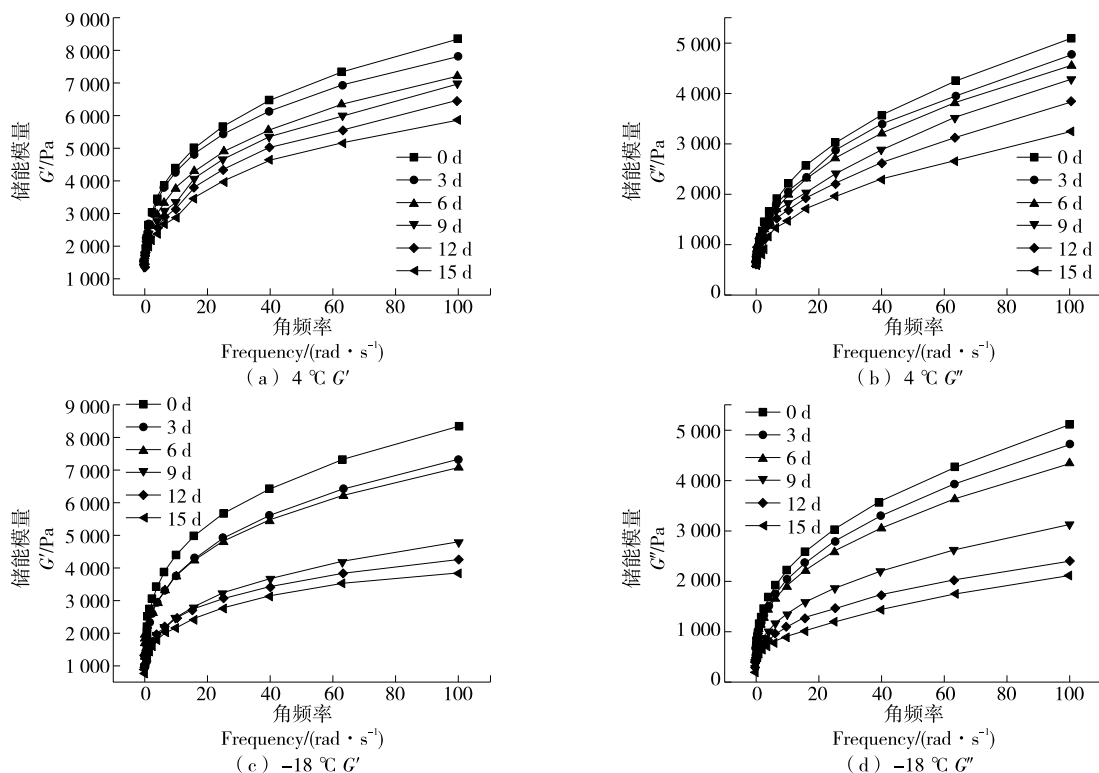


图6 低温贮藏对面筋蛋白流变学特性的影响

Figure 6 The effect of low-temperature storage on the rheological properties of gluten

化、二级结构的改变引起的分子解聚、分子间作用力的改变及空间结构的改变,这些因素共同导致面筋蛋白的网络结构变得疏松,连接紧密度和韧性下降,宏观上表现为面筋蛋白的黏性和弹性降低,与张麟等^[15]的研究结果类似。以黏性和弹性的数据比较来看,随着贮藏时间的延长,4℃下面筋蛋白的黏性和弹性下降的速度较为均匀缓慢,而-18℃下黏性和弹性下降较为剧烈明显,说明-18℃贮藏对面筋蛋白网络结构的影响程度更大。

2.7 对面筋蛋白质构特性的影响

由表 1 可知,4,-18℃条件下,随着贮藏时间的延长,面筋蛋白的硬度逐渐增大,弹性、黏附性、内聚性和回复性逐渐减小。与对照组相比,4℃贮藏 15 d 后,面筋

蛋白的硬度增加 32.80%,弹性下降 23.39%,黏附性下降 21.53%,内聚性下降 44.71%,回复性下降 77.14%;-18℃贮藏 15 d 后,硬度增加 24.80%,弹性下降 36.30%,黏附性下降 38.54%,内聚性下降 50.59%,回复性下降 80.00%。这可能是因为面筋蛋白中极性基团及网络结构的变化,导致蛋白分子的黏弹性下降,流动性减弱,分子叠加聚集导致硬度增加,具有黏弹性的面筋网络被破坏,弹性、黏附性、内聚性和回复性也随之减小。因此,面筋蛋白结构和性质的变化会影响其凝胶质构强度,一定程度上反映出面筋蛋白在贮运过程中的质地特性与组织结构的变化,从而间接影响面团及面制品的品质特性和货架期。

表 1 低温贮藏对面筋蛋白质构特性的影响

Table 1 The effect of low-temperature storage on the structural characteristics of gluten

贮藏温度/℃	贮藏时间/d	硬度/N	弹性/mm	黏附性/mJ	内聚性	回复性
对照	0	2.50±0.04 ^c	18.43±0.07 ^a	2.88±0.03 ^a	0.85±0.01 ^a	0.35±0.02 ^a
4	3	2.58±0.03 ^c	17.92±0.03 ^b	2.76±0.02 ^b	0.81±0.01 ^b	0.28±0.01 ^b
	6	2.73±0.02 ^d	16.99±0.02 ^c	2.62±0.04 ^c	0.74±0.02 ^c	0.21±0.02 ^c
	9	2.81±0.03 ^c	15.21±0.03 ^d	2.53±0.07 ^c	0.62±0.03 ^d	0.13±0.01 ^d
	12	2.94±0.06 ^b	14.91±0.04 ^e	2.42±0.04 ^d	0.51±0.02 ^e	0.11±0.01 ^d
	15	3.32±0.02 ^a	14.12±0.08 ^f	2.26±0.03 ^e	0.47±0.01 ^e	0.08±0.01 ^e
-18	3	2.51±0.05 ^c	15.26±0.02 ^b	2.63±0.03 ^b	0.79±0.02 ^b	0.29±0.02 ^b
	6	2.64±0.02 ^d	14.85±0.06 ^c	2.45±0.07 ^c	0.62±0.03 ^c	0.24±0.02 ^b
	9	2.82±0.04 ^c	13.99±0.07 ^d	2.33±0.06 ^d	0.57±0.01 ^d	0.19±0.01 ^c
	12	2.91±0.02 ^b	12.69±0.04 ^e	2.09±0.05 ^e	0.45±0.02 ^e	0.14±0.02 ^d
	15	3.12±0.03 ^a	11.74±0.05 ^f	1.77±0.04 ^f	0.42±0.02 ^e	0.07±0.02 ^e

3 结论

研究了 4,-18℃两种温度贮藏处理对面筋蛋白特性的影响。结果表明,随着贮藏时间的延长,面筋蛋白的游离巯基含量逐渐增加;二级结构的有序性程度降低;持水性、持油性逐渐下降,乳化性及乳化稳定性、起泡性及起泡稳定性逐渐降低;面筋蛋白的黏性和弹性会随着贮藏时间的延长逐渐降低;面筋蛋白的硬度随贮藏时间的延长逐渐增大,而弹性、黏附性、内聚性和回复性逐渐减小。在冷冻面制品中,可能还涉及主要成分淀粉的特性变化,后续可借助红外光谱、低场核磁、扫描电镜等进一步了解面筋蛋白和淀粉的相互作用,进一步阐明低温贮藏对面制品品质变化的影响机制。

参考文献

[1] CUI Y L, CHEN J F, ZHANG S G. The effect of degree of esterification of pectin on the interaction between pectin and wheat gluten protein[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 136: 108272.

[2] MA S, WANG Z, LIU H M, et al. Supplementation of wheat flour products with wheat bran dietary fiber: purpose, mechanisms, and challenges[J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 123: 281-289.

[3] WANG Y Y, GUO J Y, WANG C Y, et al. Effects of konjac glucomannan and freezing on thermal properties, rheology, digestibility and microstructure of starch isolated from wheat dough[J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 177: 114588.

[4] 忻晨,周锐丽,龚方圆.改良剂对冷冻面团品质影响的研究进展[J].食品与机械,2023,39(3):217-225.

XIN C, ZHOU R L, GONG F Y. Research progress on the effect of different improvers on the quality of frozen dough[J]. Food & Machinery, 2023, 39(3): 217-225.

[5] 陈晶晶,孙卿,张慙.冷冻华夫面团保质期内品质提升的研究[J].食品与生物技术学报,2021,40(2):54-61.

CHEN J J, SUN Q, ZHANG M. Study on quality improvement of frozen waffle dough during shelf life[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2021, 40(2): 54-61.

[6] WANG Z M, HAO J, DENG Y Y, et al. Viscoelastic properties,

- antioxidant activities and structure of wheat gluten modified by rice bran[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 150: 112003.
- [7] WANG X H, LIANG Y, WANG Q, et al. Effect of low-sodium salt on the physicochemical and rheological properties of wheat flour doughs and their respective gluten[J]. *Journal of Cereal Science*, 2021, 102: 103371.
- [8] 杨天一, 徐学明, 金亚美, 等. 不同面筋蛋白组分对面包品质的影响[J]. *食品与生物技术学报*, 2023, 42(2): 40-44.
YANG T Y, XU X M, JIN Y M, et al. Effects of different gluten components on bread quality[J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2023, 42(2): 40-44.
- [9] ZHANG L, TIAN X L, ZENG J, et al. Changes of moisture distribution and starch properties in fermented dough under subfreezing temperature storage[J]. *Food Science and Technology*, 2022, 42: e113821.
- [10] YANG Z X, XU D, ZHOU H L, et al. Rheological, microstructure and mixing behaviors of frozen dough reconstituted by wheat starch and gluten[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 212: 517-526.
- [11] CHEN N, YANG Q, ZHANG C C, et al. Impact of basil seed gum on the textural, rheological properties, water state, gluten depolymerization and microstructure of frozen dough[J]. *Journal of Cereal Science*, 2023, 112: 103728.
- [12] 孙嘉辉, 王俊彤, 郑喜群, 等. 热超声处理对绿豆浆液理化性质及腐竹品质特性的影响[J]. *食品与机械*, 2024, 40(7): 17-23.
SUN J H, WANG J T, ZHENG X Q, et al. Comparison of physicochemical properties of mung bean liquid and quality characteristics of mung bean yuba by different thermoultrasonic treatment[J]. *Food & Machinery*, 2024, 40(7): 17-23.
- [13] CHEN H J, GUO Z H, WANG Z R, et al. Structural and physicochemical properties of the different ultrasound frequency modified Qingke protein[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2023, 94: 106338.
- [14] 李翠翠, 陆啟玉, 马宇翔, 等. 巯基、二硫键变化对小麦面筋蛋白性质的影响[J]. *中国食品学报*, 2019, 19(7): 93-98.
LI C C, LU Q Y, MA Y X, et al. Effects of sulfhydryl groups and disulfide bonds on the characteristics of wheat gluten protein[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2019, 19(7): 93-98.
- [15] 张麟. 冻藏温度对非发酵面团面筋蛋白及冷冻饺子皮品质的影响研究[D]. 新乡: 河南科技学院, 2022: 9-20.
ZHANG L. Effects of freezing storage temperature on gluten protein of non-fermented dough and quality of frozen dumpling skin[D]. Xinxiang: Henan Institute of Science and Technology, 2022: 9-20.
- [16] SUN X Y, BU Z W, QIAO B Q, et al. The effects of wheat cultivar, flour particle size and bran content on the rheology and microstructure of dough and the texture of whole wheat breads and noodles[J]. *Food Chemistry*, 2023, 410: 135447.
- [17] 杨静洁, 张波, 张影全, 等. 冷冻温度对非发酵面团蛋白质结构及面团特性的影响[J]. *中国粮油学报*, 2020, 35(5): 11-17.
YANG J J, ZHANG B, ZHANG Y Q, et al. Effect of freezing temperature on protein structure and dough properties of non-fermented dough[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2020, 35(5): 11-17.
- [18] 张喆, 田少君, 刘培成, 等. 低温储藏对小麦面筋蛋白膜性能的影响[J]. *河南工业大学学报(自然科学版)*, 2011, 32(6): 13-17.
ZHANG Z, TIAN S J, LIU P C, et al. Effects of low temperature storage on property of edible wheat gluten film[J]. *Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition)*, 2011, 32(6): 13-17.
- [19] 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.
LI X H, HU Z Y, LU Y, et al. Effect of the time of frozen on secondary structure of glutenin and gliadin and textural properties of dough[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2014, 35(1): 83-86.
- [20] ZHAO Z K, MU T H, ZHANG M, et al. Effects of high hydrostatic pressure and microbial transglutaminase treatment on structure and gelation properties of sweet potato protein[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2019, 115: 108436.
- [21] 黄梦凡, 温纪平. 柑橘纤维添加对面筋蛋白的影响研究[J]. *食品科技*, 2022, 47(10): 171-176.
HUANG M F, WEN J P. Effects of citrus fiber addition on gluten protein[J]. *Food Science and Technology*, 2022, 47(10): 171-176.
- [22] NAWAZ A, TAHER ALHILALI A H, LI E P, et al. The effects of gluten protein substitution on chemical structure, crystallinity, and Ca in vitro digestibility of wheat-cassava snacks[J]. *Food Chemistry*, 2021, 339: 127875.
- [23] 姬晓月. γ -聚谷氨酸对小麦面筋蛋白特性影响的研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2018: 10-16.
JI X Y. Study on the effect of poly- γ -glutamic acid on the characteristic of wheat gluten[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2018: 10-16.
- [24] ZHANG Y P, YANG R J, ZHAO W, et al. Application of high density steam flash-explosion in protein extraction of soybean meal[J]. *Journal of Food Engineering*, 2013, 116(2): 430-435.
- [25] DUAN X, LI J Y, ZHANG Q J, et al. Effect of a multiple freeze-thaw process on structural and foaming properties of individual egg white proteins[J]. *Food Chemistry*, 2017, 228: 243-248.
- [26] 刘海波, 廖超, 郑万琴, 等. 微波处理小麦面粉对淀粉及蛋白质性质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(14): 91-97.
LIU H B, LIAO C, ZHENG W Q, et al. Effect of microwave-treated wheat flour on starch and protein properties[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46(14): 91-97.