

醇溶蛋白和谷蛋白配比对面粉及速冻水饺品质的影响

Effects on the quality of flour and deep-frozen dumpling from the proportion of prolamin to glutelin

王喜庆^{1,2} 刘颖¹ 刘东琦²

WANG Xi-qing^{1,2} LIU Ying¹ LIU Dong-qi²

郭天时² 张晓琳¹ 徐晨冉¹

GUO Tian-shi² ZHANG Xiao-lin¹ XU Chen-ran¹

(1. 哈尔滨商业大学食品工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150076;

2. 绥化学院食品与制药工程学院, 黑龙江 绥化 152061)

(1. College of Food Engineering, Harbin Commercial University, Harbin, Heilongjiang 150076, China;

2. College of Food and Pharmaceutical Engineering, Suihua University, Suihua, Heilongjiang 152061, China)

摘要:以高筋小麦粉为材料,通过分离重组的方法,将小麦中醇溶蛋白、谷蛋白和淀粉分离成单体,然后按所需条件进行重组配比,分析不同醇溶蛋白与谷蛋白配比重组面粉对面筋蛋白二级结构、面团热特性和流变学特性及速冻水饺品质的影响。结果表明:随着醇谷比的增加(0:1,1:3,1:1,3:1,1:0,g/g),重组体系的 α -螺旋和 β -转角含量逐渐下降, β -折叠含量逐渐上升,热变性温度和焓值逐渐上升,弹性模量和黏性模量逐渐下降,流变损耗角 $\tan \delta$ 逐渐上升。当重组体系中醇谷比为1:1(g/g)时,制作的速冻水饺的感官得分最高为87.27。该条件下的速冻水饺冻后形态完好、无裂纹、表面光滑,煮后外观颜色均一、完好无损、爽口不黏牙,有韧性和咬劲,饺子汤清晰、透明、无浑浊。

关键词:速冻水饺;品质;醇溶蛋白;谷蛋白;蛋白重组

Abstract: Using high gluten wheat flour as material, Gliadin, glutenin and starch in wheat flour were separated into monomers by separation and recombination. Thereafter, the effects of different Gliadin/glutenin ratios of reconstituted flour on the secondary structure of gluten protein and the thermal and rheological properties of dough and the quality of quick-frozen dumplings were analyzed. The results showed that, with the increase of the

ratio of gliadin/glutenin(0:1, 1:3, 1:1, 3:1, and 1:0), the content of α -helix and β -corner decreased gradually, and the content of β -folding increased gradually. Thermal denaturation temperature (T_p) and the enthalpy (ΔH) increased gradually, and the elastic modulus (G') and viscous modulus (G'') decrease gradually, with the gradual increases of rheological loss angle $\tan \delta$ (G'/G''). The highest sensory score of frozen dumplings was 87.27 when the gliadin glutenin ratio was 1:1 in the recombinant system. Under the control of these conditions, the quick-frozen dumplings have good shape, without cracks, smooth surface, uniform appearance after boiling, intact, refreshing and non-sticky teeth, toughness and biting strength, and the dumpling soup is clear, transparent and non-turbid.

Keywords: quick-frozen dumplings; quality; gliadin; glutenin; reconstitution; protein recombination

水饺是中国的传统美食,因其味道鲜美、营养丰富、方便快捷等优点,深受广大消费者的喜爱。小麦粉是制作水饺皮的主要原料,其中醇溶蛋白和谷蛋白以一定比例结合时,能够形成面筋,赋予面团特有的性质,决定着面团的加工品质^[1]。在面团混合过程中,醇溶蛋白以非共价键作用力与谷蛋白中的二硫键聚集形成三维网络结构^[2]。其中,醇溶蛋白为单体蛋白,分子量为30~80 kDa,单链结构由链内二硫键、氢键、疏水键等次级作用力维持,形成较紧密的球状结构,对面团的延展性和黏性起重要作用^[3]。谷蛋白是由多个亚基通过链外二硫键

基金项目:黑龙江省自然科学基金资助项目(编号:C2018036)

作者简介:王喜庆,男,哈尔滨商业大学在读硕士研究生。

通信作者:刘颖(1968—),女,哈尔滨商业大学教授,博士。

E-mail: 154057693@qq.com

收稿日期:2019-04-02

聚合形成的聚合物蛋白,其分子量的数量级可达 $10^5 \sim 10^6$,对面团的强度和弹性起主要作用。面团中醇溶蛋白和谷蛋白的比例、含量、结构对面团的性质和最终产品的质量有非常大的影响^[4-6]。史建芳^[7]发现随着谷蛋白/醇溶蛋白比值的增大,水饺皮的最佳蒸煮时间增大、吸水率减小、蒸煮损失率减小。潘治利等^[8]研究发现,当面粉中的醇溶蛋白质量分数为4.16%~3.16%,谷蛋白质量分数为4.44%~3.68%,面粉粉质稳定时间为232~673 s,拉伸面积为60~99 cm²,加工的速冻水饺质构特性最优。

目前对速冻水饺的品质研究多集中在面粉的选择和改良剂的开发上^[9-11],而对将面粉转化成醇溶蛋白、谷蛋白和淀粉单体进行重组的研究并应用在速冻水饺上还是空白。试验拟以高筋小麦粉为原料,分离制得醇溶蛋白和谷蛋白,在总蛋白和淀粉比例不变的基础上,通过改变总蛋白中醇溶蛋白和谷蛋白的比例,研究不同醇溶蛋白和谷蛋白重组配比对面团及速冻水饺品质的影响,为小麦面粉的配粉及原料的选择提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

高筋小麦粉:益海嘉里面粉有限责任公司;

甘氨酸、EDTA、Tris-HCl:分析纯,国药化学试剂上海有限公司;

氯化钠、盐酸、硫酸锌、二氯甲烷、乙醇、亚铁氰化钾:分析纯,天津市恒兴化学试剂公司;

DTNB:色谱纯,上海瑞永生物科技有限公司。

1.2 仪器

差示扫描量热仪:Diamond型,美国Perkin Elmer公司;

安东帕流变仪:MCR102型,奥地利安东帕(中国)有限公司;

冷冻干燥机:PDU-1200型,日本东京理化公司;

傅里叶变换红外光谱仪器:Thermo Nicolet Nexus型,美国赛默飞世尔科技公司;

质构仪:New plus型,英国Stable Microsystem公司;

冰箱:BCD-226UN型,青岛海信集团有限公司;

粮油磨粉机:ZS70-II型,涿州市粮油机械厂;

恒温恒湿培养箱:HWS-128型,宁波江南仪器厂;

速冻试验机:HLSY-II小型,郑州亨利制冷设备有限公司。

1.3 方法

1.3.1 醇溶蛋白、谷蛋白和淀粉的分离与提取 按料液比1:15(g/g)的比例,向面粉中添加适量二氯甲烷,磁力搅拌器搅拌1 h,滤纸抽滤脱脂,以上步骤重复两次,将脱脂后的面粉在通风橱中晾干。

参考Wang等^[12]的方法,将300 g脱脂面粉用

160 mL的NaCl(0.2 mol/L)溶液在2 min之内揉成面团,面团静置8 min,然后用NaCl(0.2 mol/L)溶液进行揉搓,将淀粉洗脱,直至形成面筋蛋白,用去离子水洗去面筋蛋白中NaCl。将洗脱的淀粉悬浊液过320目筛,然后离心(3 000×g,10 min)得到湿淀粉。将分离得到的面筋蛋白和淀粉冷冻干燥24 h,用GB 5009.9—2016方法测得淀粉的纯度为92.02%。将分离出来的面筋蛋白在室温条件下,以料液质量比1:15的比例,添加70%乙醇,用磁力搅拌器搅拌30 min,然后进行离心(9 000×g,4℃,10 min),收集上清液,将上述步骤重复两次,所收集的上清液旋转蒸发后,冷冻干燥得到醇溶蛋白,离心后的沉淀进行冷冻干燥得到谷蛋白。用凯氏定氮法测定面筋蛋白组分的纯度,在干基情况下,醇溶蛋白和谷蛋白的蛋白质含量分别为84.01%,75.21%。

1.3.2 醇溶蛋白与谷蛋白质量比(醇谷比)的确定 研究中重组面粉的蛋白质和淀粉分别占12%和88%,根据粉质参数中吸水率的数据按照比例加水至面团最佳状态。在面筋蛋白占比12%的前提下,改变醇溶蛋白和谷蛋白的比例,按照0:1,1:3,1:1,3:1,1:0(g/g)比例形成5个配比方案。

1.3.3 速冻水饺的制备及加速试验

(1)速冻水饺的制备:水饺皮的制作参照李雪琴等^[13]的方法,制得的水饺皮厚度为(1.2±0.1) mm,直径(80±2) mm。取适量鲜猪肉、菜、食盐与大豆油和馅,包馅,将水饺于-30℃速冻30 min后,于-18℃冷冻备用。

(2)加速试验:取于-18℃冻藏2 h的水饺,置于10℃恒温培养箱内解冻1 h,以上操作为1次冻融试验,重复4次。

1.3.4 蛋白二级结构测定 称取定量的醇溶蛋白和谷蛋白,按照配比方案制备面筋蛋白样品,准确称取1 mg面筋蛋白样品,用溴化钾稀释和研磨后压片,用傅里叶变换红外光谱仪测定面筋蛋白的二级结构变化,扫描范围400~4 000 cm⁻¹,分辨率4 cm⁻¹,扫描次数32次。对酰胺I带的吸收峰(1 600~1 700 cm⁻¹)进行基线校正,高斯平滑和去卷积后分析,得出各二级结构的分布图,根据各二级结构对应峰面积所占总峰面积的比例定量计算各二级结构含量^[14]。

1.3.5 差示扫描量热分析 称取定量的醇溶蛋白、谷蛋白和淀粉,按照配比方案制备面筋蛋白,面筋蛋白和淀粉在重组面粉中分别为12%和88%。准确称取重组面粉5~8 mg置于铝坩埚中,按料液比1:2(g/g)的比例加水,室内下平衡1 h,以不加样的铝盒作为空白,以10℃/min的升温速度,从20℃升温至120℃,测定糊化峰值温度(*T_p*)以及糊化焓(ΔH),每个样品均测试3次,取平均值。

1.3.6 流变学特性分析 参考Wang等^[15]的方法,以料

液比 1:1 (g/g)的比例,向重组面粉中添加去离子水,形成面团,称量 5~7 mg 面团揉成圆球放置在底板中心,选用直径为 50 mm 的平板,平板间距设置为 3 mm,多余的用刀片去除,在室温下静置 10 min 后用流变仪进行频率扫描。应变设置为 0.2%,扫描频率 0.1~10.0 Hz。计算流变损耗角 $\tan \delta(G''/G')$,并且在 5 Hz 下对样品的流变学进行定量分析。

1.3.7 速冻水饺感官评价 感官评价小组由 5 人组成,评定员根据各项评定指标打分,各项指标评分相加并取平均值即为感官评定得分(满分 100 分)。以冷冻后外观(20 分)、煮后外观(20 分)、耐煮性(20 分)、口感(20 分)、汤浑浊度(20 分)作为评价指标,对速冻水饺的感官品质进行评分。

1.4 数据统计与处理

利用 Excel 软件和 SPSS 17.0 软件进行数据处理,试验设 3 次重复,以(平均值±标准差)的形式表示。

2 结果与分析

2.1 醇谷比对蛋白二级结构的影响

不同醇谷比处理对蛋白流变学参数影响见表 1。从表 1 可以看出,醇谷比对蛋白二级结构含量有显著差异($P<0.05$), α -螺旋和 β -转角含量随着醇谷比增大呈现逐渐增大趋势, β -折叠随着醇谷比增大呈现逐渐减小趋势。与醇谷比 0:1(g/g)的蛋白二级结构相比,1:0 的 α -螺旋、 β -转角分别增大了 4.30%,3.70%, β -折叠含量减少 4.56%,说明醇谷比对蛋白质二级结构有显著影响($P<0.05$)。这主要因为蛋白二级结构主要是由蛋白质中醇溶蛋白和谷蛋白分子结构决定,天然面筋蛋白中醇溶蛋白和谷蛋白二级结构差异较大, α -螺旋是醇溶蛋白最主要的二级结构^[16],而谷蛋白则以 β -折叠最多^[17]。

2.2 醇谷比对面团热力学特性的影响

利用 DSC 仪器对样品的热力学性能进行分析,不同醇谷比处理对面团热力学特性的影响见表 2。由表 2 可以看出,随着醇谷比的增加,热变性温度和焓值差异性不显著($P>0.05$),热变性温度范围为 61.53~63.56 °C,焓

表 1 醇谷比对蛋白二级结构的影响[†]

Table 1 Effect of different gliadin glutenin ratio on secondary structure of protein

醇谷比(g/g)	α -螺旋/%	β -折叠/%	β -转角/%
0:1	22.33±0.57 ^a	56.16±0.83 ^d	23.00±0.81 ^a
1:3	23.43±0.05 ^b	55.65±0.20 ^{cd}	25.33±0.47 ^{ab}
1:1	24.74±0.17 ^c	54.70±0.35 ^{ab}	25.90±0.57 ^b
3:1	25.36±0.26 ^c	53.40±0.37 ^b	26.50±0.50 ^b
1:0	26.63±0.26 ^d	51.60±0.32 ^a	26.70±1.06 ^b

[†] 同列小写字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

表 2 醇谷比对面团热力学特性的影响

Table 2 Effects of different gliadin glutenin ratio on the thermodynamic properties of dough

醇谷比(g/g)	热变性温度 $Tp/^\circ\text{C}$	焓值 $\Delta H/(\text{J} \cdot \text{g}^{-1})$
0:1	61.53±0.44	9.23±0.12
1:3	62.10±0.77	9.40±0.07
1:1	62.53±0.47	9.47±0.13
3:1	63.56±0.48	9.49±0.12
1:0	63.03±0.85	9.56±0.15

值变化范围为 9.23~9.56 J/g,热变性温度和焓值变化范围都很小,说明不同醇谷比重组面粉制作的面团在热力学性质上的差异性不显著($P>0.05$)。这主要是因为蛋白质占样品质量分数低,只有 12%,且热敏性低于淀粉,吸收峰也较小,导致蛋白中醇谷比差异对样品糊化温度及整个吸收峰的影响较小。另一方面,蛋白质吸收热量主要是完成次级键的破坏,多肽链的打开,蛋白质分子从有序变为无序状态,而醇溶蛋白和谷蛋白都还有大量相似的 S—S, O—N, O—O 键,导致二者热特性差异不显著^[18-19]。有研究学者^[20]指出醇溶蛋白和谷蛋白间疏水基数量的差异会导致淀粉糊化所需要的温度和热量不同,进而对糊化温度和焓值产生影响,与试验结果不同,可能是组成面团中蛋白质总量太少,其中的疏水基随着醇谷比产生的差异不显著造成的。

2.3 醇谷比对面团流变学特性的影响

不同醇谷比的面团弹性模量和黏性模量频率扫描图分别见图 1、2。从图 1、2 可以看出,在(0.1~10.0 Hz)的振荡频率范围内,随着振荡频率的增加,各组的弹性模量和黏性模量均呈现逐渐上升的趋势,面团内部产生了强烈的交联作用^[21],表现为一种典型的弱凝胶动态流变图谱。并且弹性模量都大于黏性模量(G''),说明不同醇谷比的面团主要体现固体的特性,即面团还主要以弹性

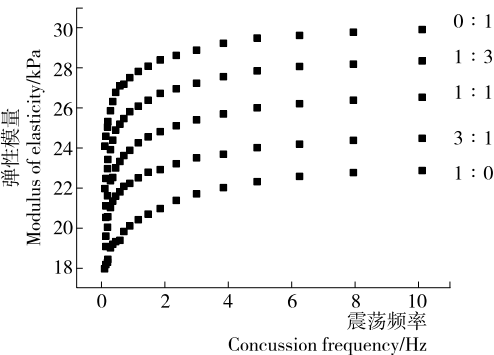


图 1 不同醇谷比的面团弹性模量频率扫描图
Figure 1 Frequency sweeps of storage modulus of dough made from reconstituted flour for different treatments of gliadin glutenin

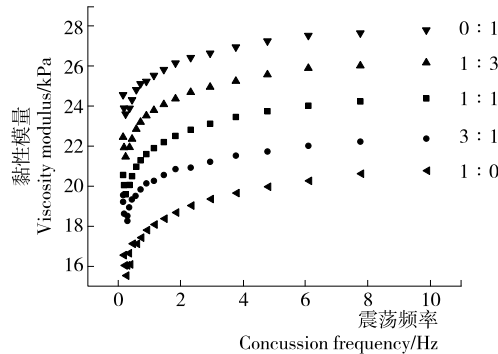


图2 不同醇谷比的面团黏性模量频率扫描图
Figure 2 Frequency sweeps of loss modulus of dough made from reconstituted flour for different treatments of gliadin glutenin

为主。此外,在同一振荡频率下,随着醇谷比的增加,弹性模量和黏性模量呈现下降的趋势,主要与醇溶蛋白呈现流体特性和谷蛋白呈现固体特性^[22]有关,这是由醇溶蛋白和谷蛋白自身的分子结构和分子间作用力所决定的^[2-3]。

醇谷比对面团流变学特性的影响见表3。由表3可知,当振荡频率为5 Hz时,随着醇谷比的增加,各处理的弹性模量和黏性模量都呈现下降的趋势,差异显著($P<0.05$);流变损耗角 $\tan \delta$ 为0.45~0.48时,差异不显著($P>0.05$),说明面团的弹性模量较黏性模量下降得更快,导致面团的流体性质在不断增强,主要是由醇溶蛋白和谷蛋白分子量大小和分子间的作用力的差异造成的,根据现代聚合物理论,认为蛋白的流变性受分子量大小影响,分子量越大,黏弹性则越好^[23-24]。

2.4 醇谷比对速冻水饺品质的影响

不同醇谷比处理面粉制作速冻水饺的感官评分见

表4 不同醇谷比处理面粉制作速冻水饺的感官评分[†]

Table 4 Sensory scoring of quick-frozen dumplings made from flour treated with different gliadin glutenin ratio

醇谷比(g/g)	冷冻后外观	煮后外观	耐煮性	口感	汤浑浊度	总分
0 : 1	13.00±0.52 ^{ab}	13.87±0.52 ^{ab}	14.13±0.26 ^{ab}	13.90±0.44 ^b	13.83±0.24 ^a	69.64±1.67 ^a
1 : 3	14.94±0.28 ^{bc}	15.03±0.18 ^{bc}	15.03±0.18 ^b	15.03±0.19 ^c	15.03±0.19 ^b	75.07±1.01 ^b
1 : 1	16.06±0.41 ^c	17.80±0.32 ^d	17.80±0.32 ^c	17.80±0.33 ^c	17.80±0.33 ^d	87.27±1.06 ^c
3 : 1	15.00±0.42 ^{bc}	15.06±0.41 ^c	15.06±0.41 ^c	16.40±0.28 ^d	15.40±0.83 ^c	77.00±1.81 ^b
1 : 0	13.87±0.40 ^a	13.33±0.26 ^a	13.50±0.40 ^a	12.93±0.12 ^a	13.27±0.20 ^{ab}	66.04±0.87 ^a

† 同列小写字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

表5 速冻水饺感官评分与面团蛋白二级结构、热力学特性和流变特性的相关性

Table 5 Correlation of sensory score of quick-frozen dumplings and secondary structure, thermodynamic and rheological properties of dough protein

α -螺旋	β -折叠	β -转角	弹性模量	黏性模量	流变损耗角	糊化峰值温度	糊化焓
-0.53	0.292	0.197	0.202	0.287	0.095	0.113	0.127

表3 醇谷比对面团流变学特性的影响[†]

Table 3 Effect of different gliadin glutenin ratio on the rheological properties of dough (5 Hz)

醇谷比(g/g)	弹性模量 G' /kPa	粘性模量 G'' /kPa	流变损耗角 $\tan \delta (G''/G')$
0 : 1	29.37±0.26 ^c	13.26±0.17 ^c	0.45±0.003 ^a
1 : 3	28.23±0.40 ^b	13.23±0.18 ^c	0.47±0.001 ^b
1 : 1	26.40±0.32 ^b	12.37±0.20 ^b	0.47±0.005 ^b
3 : 1	24.40±0.41 ^a	11.67±0.17 ^b	0.48±0.014 ^c
1 : 0	22.04±0.81 ^a	10.47±0.33 ^a	0.48±0.017 ^c

† 同列小写字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

表4。随着醇谷比的增加,重组面粉制作速冻水饺的感官品质总分呈现先上升后下降的趋势,醇谷比1:1(g/g)时速冻水饺的感官评分最高。这主要是因为醇溶蛋白和谷蛋白的合理配比是形成面筋的主要成分,面筋含量的多少和质量与速冻水饺品质关系密切^[25]。

2.5 相关性分析

不同醇谷比处理的面团蛋白制作的速冻水饺与面团二级结构、热力学特性和流变特性的相关性分析见表5。从表5中可以看出,速冻水饺品质与面筋蛋白二级结构、面团的热变形和流变性存在相关性,但根据试验数据显示相关性均不高。这主要是因为速冻水饺的品质受面筋质量的影响,而面筋的形成需要满足一定的醇谷比,过高或者过低的醇谷比都无法形成良好的面筋,因此,速冻水饺的品质与醇谷比呈现出先升高后降低的变化趋势;而面团蛋白的二级结构、热变性和流变性与醇谷比呈现单一的变化趋势,导致相关性较低。

3 结论

运用分离重组的方法,研究了小麦蛋白的重组对面团及速冻水饺品质的影响。结果表明,当醇谷比是 1 或者是 0 时,测定的结果体现的是醇溶蛋白和谷蛋白单体的性质,可以得出醇溶蛋白和谷蛋白在蛋白二级结构和流变学上存在显著的差异($P < 0.05$)。当醇谷比在 0 和 1 之间递增时,面筋蛋白的 α -螺旋和 β -转角含量呈下降趋势, β -折叠含量呈上升趋势;热变性温度呈上升趋势,差异显著($P < 0.05$),焓值呈上升趋势,差异不显著($P > 0.05$);同一振荡频率下,重组体系的弹性模量和黏性模量呈下降趋势,流变损耗角 $\tan \delta$ 呈上升趋势;速冻水饺的感官总分呈现先上升后下降的趋势,当醇谷比为 1:1 (g/g) 时速冻水饺感官得分最高为 87.27,此时制作的速冻水饺冻后形态完好、无裂纹、表面光滑,煮后外观颜色均一、完好无损、爽口不粘牙,有韧性和咬劲,饺子汤清晰、透明、无浑浊。

研究通过改变面粉蛋白质中醇溶蛋白和谷蛋白的质量比,利用醇溶蛋白和麦谷蛋白自身性质改善面粉所制得面团的特性,为速冻水饺的品质提升提供了一种新的思路,对产品的开发和品质的改良具有重要意义。由于试验条件和时间的限制,无法获得 100% 纯度的醇溶蛋白和谷蛋白,造成获得的最佳比存在一定的误差,因而,在今后的研究中,需要创造相应的条件,这也为后续的研究提供了方向。

参考文献

- [1] 徐志祥,董海洲. 小麦加工品质与面包烘焙品质关系的研究[J]. 西部粮油科技, 2002(4): 16-18.
- [2] DOMENEK S, MOREL M H, REDL A, et al. Rheological investigation of swollen gluten polymer networks: Effects of process parameters on cross-link density[J]. Macromolecular Symposia, 2003, 200(1): 137-146.
- [3] BERT G T, INGE C, KRISTOF B, et al. Foaming properties of wheat gliadin[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2011, 59(4): 1 370-1 375.
- [4] KOGA S, BKER U, MOLDESTAD A, et al. Influence of temperature during grain filling on gluten viscoelastic properties and gluten protein composition[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2015, 96(1): 122-130.
- [5] 付苗苗, 王晓曦. 小麦蛋白质及其各组分与面制品品质的关系[J]. 粮食与饲料工业, 2006(8): 10-12.
- [6] CHO S W, KANG C S, KO H S, et al. Influence of protein characteristics and the proportion of gluten on end-use quality in Korean wheat cultivars[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2018, 17(8): 1 706-1 719.
- [7] 史建芳. 面粉组分对水饺皮品质影响的研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2010: 16-23.
- [8] 潘治利, 罗元奇, 艾志录, 等. 不同小麦品种醇溶蛋白的组成与速冻水饺面皮质构特性的关系[J]. 农业工程学报, 2016, 32(4): 242-248.
- [9] 刘元涛, 崔晓, 徐淑科, 等. 复合改良剂对速冻水饺品质的影响研究[J]. 中国食品添加剂, 2018(11): 150-154.
- [10] 赵欣怡, 童群义. 几种杂粮粉对速冻水饺品质的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(9): 72-77.
- [11] 罗元奇. 不同小麦品种面粉特性与速冻水饺面皮品质关系的研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2016: 49-50.
- [12] WANG Pei, CHEN Hai-ying, 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 Hydrocolloids, 2014, 39(8): 187-194.
- [13] 李雪琴, 葛静静, 谢沁, 等. 饺子皮感官品质和质构品质关系的研究[J]. 河南工业大学学报: 自然科学版, 2012, 33(4): 1-4.
- [14] ALMUTAWAH A, BARKER S A, BELTON P S. Hydration of gluten: A dielectric, calorimetric, and Fourier transform infrared study[J]. Biomacromolecules, 2007, 8(5): 1 601-1 606.
- [15] WANG Pei, ZOU Min, LIU Ke-xin, et al. Effect of mild thermal treatment on the polymerization behavior, conformation and viscoelasticity of wheat gliadin[J]. Food Chemistry, 2018, 239: 984-992.
- [16] 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]. 无锡: 江南大学, 2016: 20-21.
- [17] 王怡然, 王金水, 赵谋明, 等. 小麦面筋蛋白的组成、结构和特性[J]. 食品工业科技, 2007(10): 228-231.
- [18] SUN Shao-min, SONG Yi-hui, ZHENG Qiang. Morphologies and properties of thermo-molded biodegradable plastics based on glycerol-plasticized wheat gluten[J]. Food Hydrocolloids, 2007, 21(7): 1 005-1 013.
- [19] MARQUIÉ C. Chemical reactions in cottonseed protein cross-linking by formaldehyde, glutaraldehyde, and glyoxal for the formation of protein films with enhanced mechanical properties[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2001, 49(10): 4 676-4 681.
- [20] MYERS C. Study of thermodynamics and kinetics of protein stability by thermal analysis [J]. Thermal Analysis of Foods, 1990, 22(3): 16-50.
- [21] 张海华, 朱跃进, 张士康, 等. 茶多酚对高筋粉面团流变特性的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(13): 42-46.
- [22] SINGH S, SINGH N. Relationship of polymeric proteins and empirical dough rheology with dynamic rheology of dough and gluten from different wheat varieties[J]. Food Hydrocolloids, 2013, 33(2): 342-348.
- [23] LEFEBVRE J, MAHMOUDI N. The pattern of the linear viscoelasticbehaviour of wheat flour dough as delineated from the effects of water content and high molecular weight glutenin subunits composition[J]. Journal of Cereal Science, 2007, 45(1): 49-58.
- [24] MCLEISH T, LARSON R. Molecular constitutive equations for a class of branched polymers: The pom-pom polymer[J]. Journal of Rheology, 1998, 42(1): 81-110.
- [25] 李梦琴, 张剑, 冯志强. 小麦品质特性与速冻水饺品质的关系的研究[J]. 中国粮油学报, 2006, 21(3): 217-220.