

基于蛋白交联探究偶氮甲酰胺对豆麦馒头品质影响的机理

Mechanism of azodicarbonamide's impact on protein cross-linking and quality of soy-wheat Chinese steamed bread

刘 莎¹ 郭晓娜¹ 朱科学¹ 刘 刚² 周惠明¹
LIU Sha¹ GUO Xiao-na¹ ZHU Ke-xue¹ LIU Gang² ZHOU Hui-ming¹

(1. 江南大学食品学院江苏省食品安全与质量控制协同创新中心, 江苏 无锡 214122;

2. 江苏省淮安新丰面粉有限公司, 江苏 淮安 223300)

(1. Collaborative Innovation Center for Food Safety and Quality Control, School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China, 2. Huaian Xinfeng Flour Co., Ltd., Huaian, Jiangsu 223300, China)

摘要:偶氮甲酰胺(ADA)作为一种常用的面粉改良剂,其对杂粮馒头品质改善的机制仍鲜有报道。通过 DTNB 法测定自由巯基(—SH)含量的变化,借助高效液相(SE—HPLC)和激光共聚焦(CLSM)分别测定 SDS 可萃取蛋白(SDSEP)含量和蛋白网状结构,并采用油菜籽置换法、TPA 和 Image J 统计法分别测定豆麦馒头的比容、全质构和气孔分布。结果表明,ADA 能显著降低—SH 含量,即增大二硫键含量;降低 SDSEP 含量,蛋白聚合程度增大;形成致密均匀的网络结构,淀粉—蛋白质基质紧密且均匀。ADA 对比容无显著影响;增大了硬度、胶着性及咀嚼度;提高了气孔数目,降低气孔平均大小和气孔占有分率,使气孔更规律、致密均匀。因此,ADA 使蛋白聚合程度增加,网状结构更均匀致密,豆麦馒头品质得到改善,表明蛋白交联程度与豆麦馒头品质之间存在内在的相关性。

关键词:豆麦馒头;偶氮甲酰胺;蛋白交联;品质

Abstract: Report on protein cross-linking mechanism of soy-wheat Chinese steamed bread treated with azodicarbonamide (ADA) was less while it was known as quality improvement agent of wheat flour. The content of free thiol (—SH) was determined by DTNB method. Meanwhile, size-exclusion high performance liquid chromatography (SE—HPLC) and confocal laser scanning microscope (CLSM) were used to analyze the content of sodium dodecyl sulfate extractable proteins (SDSEP) and gluten network respectively. In addition, the spe-

cific loaf volume of soy-wheat Chinese steamed bread was determined by rapeseed displacement method. TPA was used to test the texture and the software Image J was applied to analyze the pore structure of soy-wheat Chinese steamed bread treated. The result showed that ADA reduced the content of —SH, which meant that the —S—S— content was increased. The SDSEP content was decreased and the extent of protein cross-linking was increased. ADA could promote proteins aggregating into dense and uniform network. Gelatinized starches were warped by protein framework. Moreover, ADA made no significant effect on specific loaf volume and also increased the hardness, gumminess and chewiness. The gas cell counts were increased, and average size and average friction of gas cells were decreased, along with the forming of uniform, dense and small pore structure. In combining the greater protein polymerization with the better quality characteristics of soy-wheat Chinese steamed bread, it indicated that there was inner relationship between protein cross-linking and the final quality characteristics of soy-wheat Chinese steamed bread.

Keywords: soy-wheat Chinese steamed bread; azodicarbonamide; protein cross-linking; quality

大豆粉营养丰富,蛋白质含量约为 40%,富含人体必需的 8 种氨基酸,特别是谷类蛋白质所缺乏的赖氨酸含量非常高^[1],是与谷类蛋白质互补的天然理想食品。小麦粉蛋白质含量和赖氨酸含量较低^[2],并且加工过程中赖氨酸也易流失,因此,在馒头加工中加入适量大豆粉可以达到营养强化的目的。

豆麦馒头是小麦粉和大豆粉混合而制的发酵面制品。由于大豆粉中蛋白质不同于面筋蛋白,大豆粉的添加致使面筋含量降低,最终导致面制品的加工性能和品质发生劣

基金项目:国家自然科学基金面上项目(编号:31371849);江苏省“现代粮食流通与安全协同创新中心”资助项目

作者简介:刘莎,女,江南大学在读硕士研究生。

通讯作者:朱科学(1978—),男,江南大学教授。

E-mail: kxzh@jiangnan.edu.cn

收稿日期:2015-12-29

变^[3]。偶氮甲酰胺(ADA),被广泛应用于焙烤食品和馒头的品质改良^[4]。中国食品添加剂使用标准(GB 2760—2014)中,允许 ADA 在小麦粉中的使用限量为 45 mg/kg。

目前国内外关于 ADA 的研究主要集中于其对馒头^[5]、面包^[6]以及面团^[7]品质的影响,而对其添加引起的蛋白交联程度与面筋网络结构以及豆麦馒头品质特性之间的关系缺乏系统的研究。本试验拟探究 ADA 对豆麦馒头中自由巯基含量、蛋白交联程度和蛋白网络结构以及产品最终品质的影响,以进一步探究蛋白交联与豆麦馒头品质的关系,旨为 ADA 在中式面制品中的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

小麦粉(蛋白质 10.78%,赖氨酸 0.24%):特一粉,益海嘉里粮油有限公司;

大豆粉(100 目,蛋白质 46.29%,赖氨酸 3.07%):高温脱脂豆粉,山东烟台龙口有限公司;

高活性干酵母:安琪酵母股份有限公司;

ADA:食品级,河南兴和责任有限公司。

1.1.2 主要仪器设备

和面机:ARM-01 型,雷鸟机械有限公司;

醒发箱:SM-40SP 型,新麦机械有限公司;

酶标仪:Epoch 2 型,美国 Bio Tek 仪器公司;

物性测试仪:TA-XT2i 型,英国 Stable Microsystems 公司;

高效液相色谱仪:Alliance 2695 型,美国 Waters 公司;

徕卡手动轮转切片机:PM 2245 型,德国徕卡公司;

扫描电子显微镜:Su 1510 型,日本日立株式会社。

1.2 方法

1.2.1 豆麦馒头的制备 参照 SB/T 10139—93《馒头用小麦粉》:小麦粉、酵母、水→和面(小麦粉 264 g,高温脱脂豆粉 36 g,酵母 2.4 g,水 156 g)→成型(100 g 左右)→醒发(38 ℃,70% RH,35 min)→蒸制(30 min)→冷却(0.5~1.0 h)。

1.2.2 豆麦馒头蛋白交联程度的分析

(1) 豆麦馒头自由巯基含量的测定:采用 DTNB 方法^[8],取 10.4 g Tris,6.9 g 甘氨酸和 1.2 g EDTA,配制 pH 8.0 缓冲液,称为 TGE。40 mg 冻干样品溶于 4 mL 2.5% SDS—TGE 中,25 ℃温浴 1 h,每隔 10 min 旋涡一次,8 000 r/min 离心 20 min。再加入 0.04 mL 4 mg/mL DTNB 试剂,25 ℃温浴 30 min。采用酶标仪测定吸光度,检测波长为 412 nm,以不加 DTNB 的样品作空白对照。单位用 μmol/g·干基蛋白表示。

(2) 豆麦馒头蛋白中 SDS 可萃取蛋白含量的测定:蛋白的聚合程度可以用 SDS 可萃取蛋白(SDSEP)的含量[按式(1)计算]来表示。参照 Luo 等^[9]的研究,称取冻干样品(1 mg 干基蛋白)溶于 1 mL 缓冲液 A。漩涡 10 min,离心(10 min,10 000×g),用 0.45 μm 的微孔滤膜过滤。将同样含量的样品溶于 1 mL 缓冲液 B 中,按相同操作步骤所得的上清液为总蛋白。流动相为 50%乙腈,流速为 0.9 mL/min,

检测波长为 214 nm。

缓冲液 A:含有 2% SDS 的磷酸盐缓冲液(0.05 mol/L, pH 6.8);

缓冲液 B:含有 0.2×10⁻³ mol/L 尿素和 1%二硫苏糖醇(DTT)的缓冲液 A。

$$SDSEP = \frac{SDS \text{ 可萃取蛋白峰面积}}{\text{总蛋白峰面积}} \times 100\%。$$
 (1)

(3) 豆麦馒头面筋网络结构的分析:参照罗云^[10] 10 的研究,采用 CLSM 观察面筋网络微观结构。设置冰冻切片机参数:箱体-20 ℃,刀头为-22 ℃。包埋:利用徕卡包埋剂将样品固定于托盘;切片:样品厚度为 20 μm;染色和观察:FITC 浓度为 3.5×10⁻⁴ g/mL,用于淀粉染色,罗丹明 B 浓度为 1.3×10⁻⁵ g/mL,用于蛋白染色,临用时混合,染色 1 min;激光共聚焦显微镜目镜倍数为 10×,物镜倍数为 20×。

1.2.3 豆麦馒头品质特性的分析

(1) 豆麦馒头比容的测定:采用油菜籽置换法^[11]。出锅后冷却 0.5 h,称重质量(g),油菜籽置换法测定体积(mL)。比容即体积与质量之比。

(2) 豆麦馒头全质构的测定:采用 TPA 法^[12]。豆麦馒头冷却 1 h 后,选取 3 个切成厚度为 15 mm 的均匀薄片,取中心 2 片,用物性质构仪测定。

采用 P/25 探头,TPA 模式,参数设置为:测前速度:3 mm/s;测中速度:1 mm/s;测后速度:5 mm/s;压缩比例:50%;触发力:Auto—5 g。

(3) 豆麦馒头内部气孔的分析:采用 Image J 统计分析豆麦馒头气孔结构^[13]。豆麦馒头冷却 0.5 h 后,切成 15 mm 的均匀薄片,取中间两片。设定扫描仪的分辨率为 600 dpi,用 Photoshop CS3 截取切片中心位置 3 cm×3 cm 的图像,用 Image J 软件进行分析,其阈值选择 Ostu thresholding 技术,得到以下参数:气孔数目,气孔平均孔径,气孔占有分率。

1.2.4 数据统计 所有数据均为 3 次及以上重复测定的平均值,采用 SPSS 16.0 对各组数据进行显著性(P<0.05)分析。

2 结果与分析

2.1 添加 ADA 对豆麦馒头蛋白交联程度的影响

2.1.1 添加 ADA 对豆麦馒头中自由巯基含量的影响 蛋白质中自由巯基含量可以用来表征二硫键的改变,同时,这种改变可以表明蛋白质之间是否存在共价交联^[14]。—SH 与—S—S—之间产生的交换反应和—SH 的氧化,可以使—SH 的数量发生变化,巯基和二硫键对于维持面筋蛋白的网络结构具有重要作用^[15]。面筋蛋白中醇溶蛋白分子中的二硫键均分布在分子内部,麦谷蛋白分子间存在的二硫键结合能力强,框架牢固,对产品品质起着重要作用^[16]。图 1 结果显示:与空白豆麦馒头相比,不同浓度的 ADA 作用后,—SH 含量显著降低。尤其 ADA 添加量为 5 mg/kg 和 15 mg/kg 时,—SH 含量最低。ADA 在面粉和水分条件下能释放活性氧,可以将—SH 氧化成—S—S—,因此,—SH 含量降低,表明—S—S—含量提高,蛋白分子量增大^[17]。

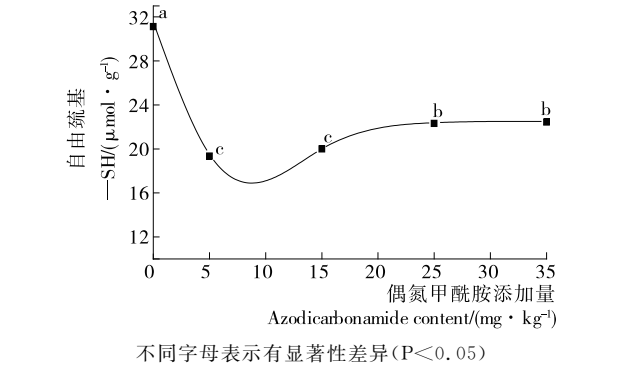


图 1 添加 ADA 对豆麦馒头中自由巯基含量的影响
Figure 1 Effect of ADA on the content of —SH of soy-wheat Chinese steamed bread

2.1.2 添加 ADA 对豆麦馒头蛋白中 SDS 可萃取蛋白含量的影响 馒头蒸制过程中,高温条件可以引起蛋白质二硫键交联,形成更大的蛋白质聚集体^[18]。当面筋蛋白发生交联或解聚时,其分子量也发生变化。十二烷基硫酸钠(SDS)作为一种表面活性剂,可打断分子间疏水作用,能在较低浓度下使大部分蛋白质溶解。通常,当蛋白质发生交联后,SDSEP 含量降低,不可萃取蛋白含量增加^[19]。因此,将 SDS 萃取的蛋白通过体积排阻色谱柱,能直观地比较蛋白质分子量变化,该方法能较好地反映蛋白聚合行为^[20]。

由图 2 和图 3 可知,与豆麦馒头相比,ADA 作用后,洗脱曲线面积有不同程度地降低,SDSEP 含量减小,聚合的蛋白质不能溶于缓冲液而被检测出,即 SDS 可萃取蛋白的含量降低,蛋白聚合程度增大^[21]。这与自由巯基的变化趋势一致,由于 ADA 促使—SH 形成—S—S—,形成分子间的共价交联,蛋白聚集成大聚体,形成更加牢固的网络结构,从而使蛋白可溶出率降低。当 ADA 浓度为 5 mg/kg 时,SDS 可萃取蛋白百分含量最小,为 11.60%。

2.1.3 添加 ADA 对豆麦馒头面筋网络结构形成的影响 为了进一步了解淀粉和蛋白质的结合方式,采用 CLSM 观察 ADA 作用前后豆麦馒头的面筋网状微观结构的变化。对比图 4(a)和(b),图 4(b)的蛋白结构分布更为密集且均匀,形成

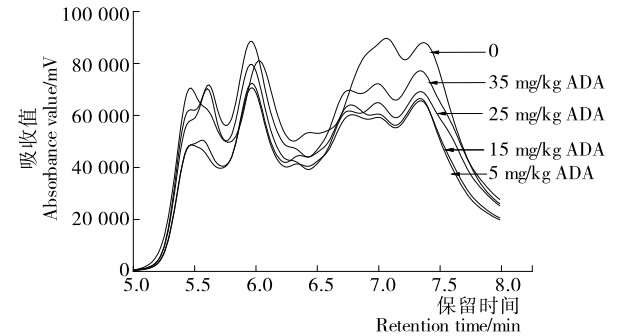


图 2 非还原条件下 ADA 对豆麦馒头蛋白交联程度影响的 SE—HPLC 图谱
Figure 2 SE—HPLC atlas about ADA's effect on protein cross-linking of soy-wheat Chinese steamed bread in non-reducing conditions

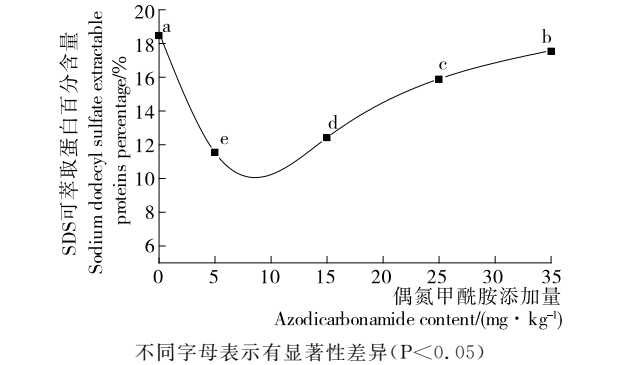


图 3 ADA 对豆麦馒头 SDSEP 含量的影响
Figure 3 Effect of ADA on the SDSEP percentage of soy-wheat Chinese steamed bread

网状。对比图 4(c)和(d),(d)中淀粉—蛋白质基质结合紧密且均匀,经过高温蒸制,淀粉颗粒糊化肿胀。糊化的淀粉能完整地包裹蛋白骨架,气孔结构细小且密集。豆麦馒头瓤的显微结构显示了小分子蛋白组群和高密度蛋白的微结构^[22]。大量气孔的出现是由于面团发酵过程酵母产生的二氧化碳所致,产生多层气孔赋予面团柔软特性^[23]。因此可知,ADA 增强了蛋白网络结构的致密性,淀粉充分被包裹在蛋白骨架中,并且使得气孔结构更为细小致密^{[10] 25—27}。

2.2 添加 ADA 对豆麦馒头品质特性的影响

2.2.1 添加 ADA 对豆麦馒头比容的影响 图 5 显示,ADA 作用后比容无显著性变化。由于 ADA 的加入促进了蛋白之间的交联,淀粉—蛋白质结合更加紧密,形成了更为致密牢固的凝胶网络结构,使得豆麦馒头的比容略有减小,当添加量超过 5 mg/kg 时,过量的 ADA 快速氧化过程中会造成面粉与水分不能充分接触,蛋白聚合程度减小,网络气孔结构不太密集,使比容略有上升,但是在本试验设计中,总

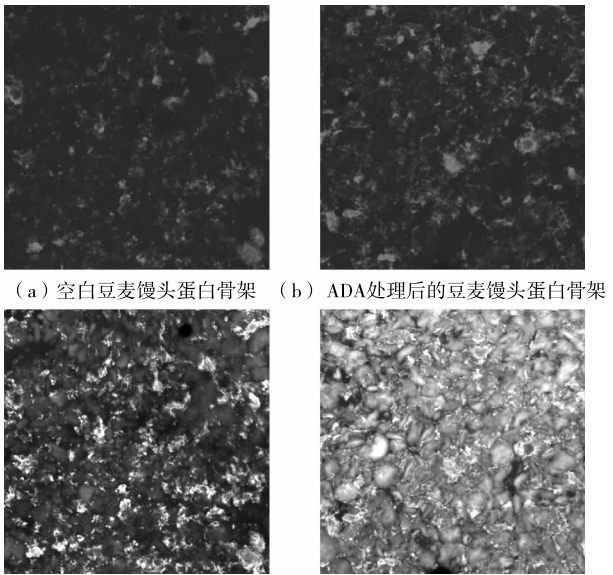
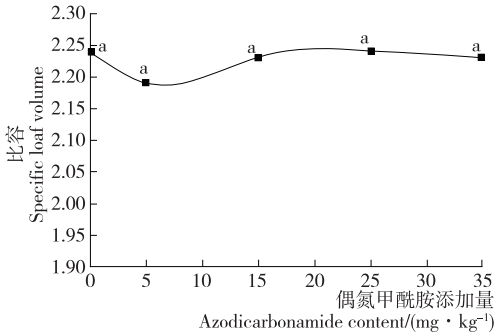


图 4 ADA 对豆麦馒头面筋网络结构的影响
Figure 4 Effect of ADA on the gluten network of soy-wheat Chinese steamed bread



相同字母表示无显著性差异(P>0.05)

图 5 ADA 对豆麦馒头比容的影响

Figure 5 Effect of ADA on SLV of soy-wheat Chinese steamed bread

表 1 ADA 对豆麦馒头全质构的影响[†]

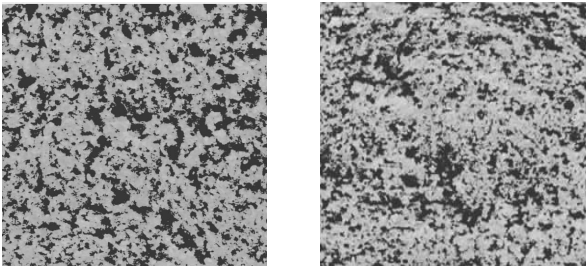
Table 1 Effect of ADA on texture characteristics of soy-wheat Chinese steamed bread

ADA 添加量/ (mg · kg ⁻¹)	硬度	弹性	黏聚性	胶着性	咀嚼度	回复性
0	1 583.24±62.32 ^c	0.92±0.04 ^a	0.79±0.01 ^a	1 258.31±38.11 ^c	1 146.36±77.57 ^c	0.44±0.01 ^a
5	2 248.40±34.54 ^a	0.90±0.01 ^{ab}	0.78±0.01 ^b	1 741.70±23.15 ^a	1 564.71±12.90 ^a	0.41±0.01 ^{bc}
15	1 977.38±60.75 ^b	0.90±0.01 ^{ab}	0.78±0.01 ^b	1 611.90±17.54 ^b	1 395.97±46.93 ^b	0.42±0.01 ^b
25	2 011.73±39.46 ^b	0.89±0.01 ^b	0.78±0.01 ^b	1 567.94±27.58 ^a	1 381.63±29.92 ^b	0.42±0.01 ^b
35	2 073.29±18.74 ^b	0.90±0.01 ^{ab}	0.77±0.01 ^b	1 608.33±18.25 ^b	1 458.02±19.12 ^b	0.42±0.01 ^{bc}

[†] 同列中不同字母表示有显著性差异(P<0.05)。

况。由图 6 可知,与空白豆麦馒头相比,ADA 作用后气孔整体分布均匀,气孔小且致密^[25]。这与王远成等^[6]的研究一致,表明 ADA 能促使面包组织细腻均匀。由表 2 可知,ADA 作用后,气孔数目增多,气孔的平均孔径减小,气孔占有分率降低。尤其当 ADA 添加量为 5 mg/kg 时,这种趋势更为明显。

ADA 对豆麦馒头气孔分布的影响进一步解释了比容和质构的变化。气孔数目的增加以及气孔平均孔径的减小在一定程度上不会对体积造成显著影响。由于少量 ADA 作用后馒头气孔细小而密集,因此硬度增大,胶着性和咀嚼度也随之增大。



(a) 空白豆麦馒头 (b) 添加ADA的豆麦馒头
黑色部分为气孔

图 6 ADA 对豆麦馒头内部气孔分布的影响

Figure 6 Effect of ADA on inner gas cell distribution of soy-wheat Chinese steamed bread

体来说这种影响并不显著。因此,ADA 的加入对豆麦馒头的比容未产生不好的影响。

2.2.2 添加 ADA 对豆麦馒头全质构的影响 由表 1 可知,ADA 使豆麦馒头硬度增加,胶着性及咀嚼度也随之有不同程度的增加,而弹性、黏聚性和回复性降低。ADA 添加量为 5 mg/kg 时,这种趋势更为明显。这是由于 ADA 促进面筋网络的形成,面筋的弹性较差,导致馒头的气室减小,因而硬度增加,咀嚼度增加^[24]。然而,当添加量大于 5 mg/kg 时,硬度显著降低,随着添加量的继续增大,硬度不再显著变化。通常,胶着性、咀嚼度和硬度的变化趋势一致^[3]。

2.2.3 添加 ADA 对豆麦馒头内部气孔分布的影响 气孔分布均匀、气孔的平均表面积适中是内部纹理结构改良之后的表征^[13]。图 6 直观反映了豆麦馒头切片气孔总体分布情

表 2 ADA 对豆麦馒头内部气孔分布的影响[†]

Table 2 Effect of ADA on inner gas cell distribution of soy-wheat Chinese steamed bread

ADA 添加量/ (mg · kg ⁻¹)	气孔数目	平均孔径/ μ m	气孔占有 分率/%
0	1 706.00±96.14 ^d	104.94±10.39 ^a	33.80±1.54 ^a
5	3 424.80±122.22 ^a	71.19±3.85 ^{cd}	29.63±1.67 ^c
15	3 382.50±86.69 ^a	71.88±4.50 ^d	29.53±1.52 ^c
25	3 112.70±138.54 ^b	82.60±3.59 ^b	31.23±0.15 ^b
35	3 027.00±205.31 ^c	83.83±4.34 ^{bc}	30.77±0.67 ^b

[†] 同列中不同字母表示有显著性差异(P<0.05)。

2.3 添加 ADA 后豆麦馒头的蛋白交联程度与其品质特性的内在关系探讨

与空白豆麦馒头相比,ADA 的加入降低了豆麦馒头中的一SH 含量,意味着—S—S—含量提高,表明 ADA 能将自由巯基氧化形成二硫键。根据王远成等^[6]的研究,ADA 在面粉和水存在下,很快释放出活性氧,将小麦蛋白质内自由巯基氧化成为二硫键,使蛋白质链相互连结而构成网状结构,从而改善面团的物理操作性质及面制品组织结构。根据谢宏等^[26]的研究,二硫键含量与米饭的硬度有关。同时,罗云^{[10]32}的研究表明,蛋清蛋白与面筋蛋白之间的二硫键的交联作用提高了面条的硬度。由此说明,在本试验中,ADA 促使发生的二硫键共价交联作用可以提高豆麦馒头的硬度和

咀嚼性。

与空白豆麦馒头相比,ADA 降低了 SDSEP 含量,SDS 可溶性蛋白减少,蛋白质分子之间产生聚合现象。这与—SH 含量变化趋势一致。根据 Bert 等^[27]的研究,焙烤阶段面筋蛋白的聚合有助于其最终结构和品质的形成。Steertgem 等^[28]表明,以 SDSEP 水平代表的面筋聚合程度决定了焙烤食品的硬度,聚合程度降低,硬度减小。Moore 等^[29]研究表明,蛋白交联不总是对面包造成更好的比容。因此可以说明,在本试验中,ADA 促使蛋白交联程度的增加可以提高豆麦馒头的硬度,对比容无显著影响。

与空白豆麦馒头相比,ADA 的加入促进了面筋网络结构的形成,在蒸制过程中,糊化的淀粉被蛋白骨架包裹,淀粉—蛋白质基质结合紧密,基质之外间隙小,形成细小的气孔。原因可能是面筋蛋白聚合和自由巯基氧化形成的二硫键^[30],以及麦醇溶蛋白和麦谷蛋白通过—SH 和—S—S—的交换反应^[31]。之前研究^[25]表明,ADA 能够强化面团的持气特性,改善最终的面包结构和面包瓤质构。由此可说明,本试验中,ADA 促使面筋网络结构的形成,提高气孔数目,减小气孔平均大小,降低了气孔占有分率,整体分布均匀而规律,气孔多,细小而致密。

然而,当 ADA 添加量超过 5 mg/kg 时,—SH 和 SDSEP 的含量略有升高,伴随着豆麦馒头硬度和咀嚼度略有下降,气孔数量略有减小,平均孔径和气孔占有分率略有升高。这与 ADA 小于 5 mg/kg 时的趋势相反。这可能是 ADA 作为一种快速氧化剂,反应时间短,过量的 ADA 加入后,面粉和水分在接触不够充分的条件下发生氧化反应,导致活性氧减少,—SH 氧化成为—S—S—的数目有限,以二硫键为主的共价交联蛋白聚合程度低,蛋白网络结构不够致密,进而引起豆麦馒头品质的相应变化。

3 结论

一定浓度范围内,ADA 能降低自由巯基含量和 SDSEP 含量,提高蛋白交联程度,形成致密均匀的凝胶网络结构;与之对应的是,ADA 对豆麦馒头比容无显著影响,增大硬度、咀嚼度和气孔数目,减小气孔孔径。综合分析蛋白交联程度提高和豆麦馒头品质好转这一结果,表明蛋白网络结构与豆麦馒头品质存在内在相关性。

参考文献

[1] 李景明. 食品营养强化技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 92-99.

[2] 朱青葵. 小麦粉的化学成分及营养强化[J]. 产品可靠性报告, 2008(5): 54-56.

[3] Roccia P, Ribotta P D, Ferrero C, et al. Enzymes action on wheat-soy dough properties and bread quality[J]. Food & Bio-process Technology, 2010, 5(4): 1 255-1 264.

[4] Li Meng-hua, Guo Xiao-yu, Wang Hui, et al. Rapid and label-free raman detection of azodicarbonamide with asthma risk[J]. Sensors & Actuators B Chemical, 2015, 216: 535-541.

[5] 刘钟栋. 面粉制品的品质改良技术[M]. 北京: 化学工业出版

社, 2013: 61-95.

[6] 王远成, 任凌云, 张鹏涛. 偶氮甲酰胺对面粉粉质及面包质量的影响[J]. 中国粮油学报, 2001, 16(1): 32-35.

[7] 陈波, 靳保辉, 林燕奎, 等. 面粉中偶氮甲酰胺含量的高效液相色谱法测定[J]. 分析测试学报, 2008, 27(9): 1 002-1 004.

[8] 林慧珏, 滕月斐, 梁建芬. 小麦粉自由巯基(—SH)测定方法的对比研究[J]. 食品科技, 2011, 36(5): 286-290.

[9] Luo Li-jun, Guo Xiao-na, Zhu Ke-xue. Effect of steaming on the quality characteristics of frozen cooked noodles[J]. LWT- Food Science and Technology, 2015, 62(2): 1 134-1 140.

[10] 罗云. 蛋清粉对挂面品质的影响及其机理研究[D]. 无锡: 江南大学, 2015.

[11] 杨健, 赵康, 周君华. 面团 pH 对馒头膨松效果的影响[J]. 食品工业科技, 2002, 23(8): 28-29.

[12] 盛琪. 馒头的常温保鲜研究[D]. 无锡: 江南大学, 2015: 9-11.

[13] 韩薇薇, 郭晓娜, 朱科学, 等. 水溶性胶体对无麸质面团流变学特性及面包品质的影响[J]. 中国粮油学报, 2015, 30(2): 15-19.

[14] 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, 2012(9): 187-194.

[15] 李里特, 江正强, 卢山. 焙烤食品工艺学[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2000: 23-25.

[16] Osborne T B. The proteins of the wheat kernel[M]. Carnegie: Inst Washington Pub, 1907: 84-119.

[17] Chrastil J, Zarins Z M. Influence of storage on peptide subunit composition of rice oryzenin[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2002, 40(6): 927-930.

[18] Lagrain B, Brijs K, Veraverbeke W S, et al. The impact of heating and cooling on the physico-chemical properties of wheat gluten-water suspensions[J]. Journal of Cereal Science, 2005, 42(3): 327-333.

[19] Stathopoulos C E, Tsiami A A, Schofield J D, et al. Effect of heat on rheology, surface hydrophobicity and molecular weight distribution of glutens extracted from flours with different bread-making quality[J]. Journal of Cereal Science, 2008, 47(2): 134-143.

[20] 骆丽君. 冷冻熟面加工工艺对其品质影响的机理研究[D]. 无锡: 江南大学, 2015: 20-25.

[21] Luo Yun, Li Man, Zhu Ke-xue, et al. Heat-induced interaction between egg white protein and wheat gluten[J]. Food Chemistry, 2016, 197(Pt A): 699-708.

[22] Renzetti S, Courtin C M, Delcour J A, et al. Oxidative and proteolytic enzyme preparations as promising improvers for oat bread formulations: Rheological, biochemical and microstructural background[J]. Food Chemistry, 2010, 119(4): 1 465-1 473.

[23] Halima N B, Borchani M, Fendri I, et al. Optimised amylases extraction from oat seeds and its impact on bread properties[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2015, 72: 1 213-1 221.

[3] Bagheri H, Manap M Y B A, Solati Z. Antioxidant activity of *Piper nigrum* L. essential oil extracted by supercritical CO₂ extraction and hydro-distillation[J]. *Talanta*, 2014, 121: 220-228.

[4] 阿荣. 胡椒碱衍生物合成及其调脂作用研究[D]. 北京: 北京中医药大学, 2015: 17-21.

[5] 唐坚, 刘四新, 侯源源, 等. 胡椒脱皮方法研究进展[J]. *热带农业科学*, 2009, 29(7): 66-68.

[6] Vijayan V, Kumar A, John Z. Purification and characterization of polygalacturonase from *Bacillus licheniformis* MTCC 5408-An industrially important bacterium for white pepper production[J]. *International Journal of Applied Biotechnology and Biochemistry*, 2013, 3(1): 25-36.

[7] 熊海波. 胡椒的固态发酵脱皮研究[D]. 海口: 海南大学, 2011: 54.

[8] 李影, 李从发, 刘四新, 等. 乙烯利对胡椒固态发酵脱皮的影响[J]. *食品与机械*, 2014, 30(6): 187-190.

[9] Zhou Hong-wei, Sonogo L, Khalchitski A, et al. Cell wall enzymes and cell wall changes in 'Flavortop' nectarines: mRNA abundance, enzyme activity, and changes in pectic and neutral polymers during ripening and in woolly fruit[J]. *Journal of the American Society for Horticultural Science American Society for Horticultural Science*, 2000, 125(5): 630-637.

[10] 冯静. 菠萝皮果胶的提取、理化性质及其多糖组成的研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2012: 14-15.

[11] Garna H, Mabon N, Wathelet B, et al. New method for a two-step hydrolysis and chromatographic analysis of pectin neutral sugar chains[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2004, 52(15): 4 652-4 659.

[12] Levisne S, Thomas M, Ralet M C, et al. Determination of the degrees of methylation and acetylation of pectins using a C₁₈ column and internal standards[J]. *Food Hydrocolloids*, 2002, 16(6): 547-550.

[13] Černá M, Barros A S, Nunes A, et al. Use of FT-IR spectroscopy as a tool for the analysis of polysaccharide food additives[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2003, 51(4): 383-389.

[14] Monfregola L, Leone M, Vittoria V, et al. Chemical modification of pectin: environmental friendly process for new potential material development[J]. *Polymer Chemistry*, 2011, 2(4): 800-804.

[15] Mano J F, Koniarova D, Reis R L. Thermal properties of thermoplastic starch/synthetic polymer blends with potential biomedical applicability[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 2003, 14(2): 127-135.

[16] Yapo B M. Biochemical characteristics and gelling capacity of pectin from yellow passion fruit rind as affected by acid extractant nature[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2009, 57(4): 1 572-1 578.

[17] Kumar A, Chauhan G S. Extraction and characterization of pectin from apple pomace and its evaluation as lipase (steapsin) inhibitor[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2010, 82(2): 454-459.

[18] Pappas C S, Sakkas L, Moschopoulou E, et al. Direct determination of lactulose in heat - treated milk using diffuse reflectance infrared Fourier transform spectroscopy and partial least squares regression[J]. *International Journal of Dairy Technology*, 2015, 68(3): 448-453.

[19] Wu Wen-lin, Zhu Yuan-ting, Zhang Li, et al. Extraction, preliminary structural characterization, and antioxidant activities of polysaccharides from *Salvia miltiorrhiza* Bunge[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2012, 87(2): 1 348-1 353.

[20] Chen Xiao-ming, Jin Jing, Tang Jia, et al. Extraction, purification, characterization and hypoglycemic activity of a polysaccharide isolated from the root of *Ophiopogon japonicus*[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2011, 83(2): 749-754.

[21] 李英华, 朱威. 不同酯化度和分子量的果胶解酒效果的比较研究[J]. *天然产物研究与开发*, 2014, 26(11): 1 868-1 871.

[22] Bethke G, Grundman R E, Sreekanta S, et al. Arabidopsispectin methylsterases contribute to immunity against *Pseudomonas syringae*[J]. *Plant Physiology*, 2014, 164(2): 1 093-1 107.

[23] de Vries J. Properties of weak LMA-pectin-and alginate-gels[J]. *Gums and Stabilisers for the Food Industry 17: The Changing Face of Food Manufacture: The Role of Hydrocolloids*, 2014, 17: 190.

[24] 徐晓波. 李果实成熟过程中细胞壁多糖的降解和相关酶的研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2008: 32-34.

[25] 金昌海, 索标, 阙娟, 等. 桃果实成熟软化过程中细胞壁多糖降解特性的研究[J]. *扬州大学学报: 农业与生命科学版*, 2006, 27(3): 70-75.

[26] 周林燕, 廖小军, 曹霞敏, 等. 高压二氧化碳对桃果胶甲基酯酶活性的钝化效果与动力学研究[J]. *高压物理学报*, 2014, 28(6): 753-761.

(上接第 13 页)

[24] 冯世德, 孙太凡. 玉米粉对小麦面团和馒头质构特性的影响[J]. *食品科学*, 2013, 34(1): 101-104.

[25] Joiner R R, Vidal F D, Marks H C, et al. A new powdered agent for flour maturing[J]. *Cereal Chemistry*, 1963, 40: 539-553.

[26] 谢宏, 原蓼蓼, 李丹丹, 等. 含二硫键的稻米蛋白质对米饭蒸煮食味品质的影响[J]. *食品科技*, 2012, 37(9): 139-142.

[27] Bert L, Thewissen B G, Kristof B, et al. Impact of redox agents on the extractability of gluten proteins during bread making[J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2007, 55(13): 5 320-5 325.

[28] Steertegem B V, Pareyt B, Brijs K, et al. Impact of mixing time and sodium stearyl lactylate on gluten polymerization during baking of wheat flour dough[J]. *Food Chemistry*, 2013, 141(4): 4 179-4 185.

[29] Moore M M, Heinbockel M, Dockery P, et al. Networkformation in gluten-free bread with application of transglutaminase[J]. *Cereal Chemistry*, 2006, 83(1): 28-36.

[30] Singh H, Macritchie F. Changes in proteins induced by heating gluten dispersions at high temperature[J]. *Journal of Cereal Science*, 2004, 39(2): 297-301.

[31] Lagrain B, Thewissen B G, Brijs K, et al. Mechanism of gliadin-glutenin cross-linking during hydrothermal treatment[J]. *Food Chemistry*, 2008, 107(2): 753-760.