

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2023.04.007

刘昊, 李玥, 郑焱诚, 等. 揉混时间对酸化面团中玉米醇溶蛋白的影响[J]. 粮油食品科技, 2023, 31(4): 48-54.

LIU H, LI Y, ZHENG Y C, et al. Effect of kneading time on the properties of zein in acidified model dough[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2023, 31(4): 48-54.

揉混时间对酸化面团中玉米醇溶蛋白的影响

刘 昊¹, 李 玥¹, 郑焱诚¹, 谢胜海², 吴东亮³, 乔 瀚¹, 赵金辉¹

- (1. 中国储备粮管理集团有限公司, 北京 100039;
2. 中国储备粮管理集团有限公司福建分公司, 福建 福州 350028;
3. 中央储备粮厦门直属库有限公司, 福建 厦门 361026)

摘 要: 以玉米醇溶蛋白(zein)、玉米淀粉、沙蒿胶为原料, 制备了 zein 基无麸质模拟面团(Z 面团)。基于粉质检测, 比较了不同乳酸含量的 zein 模拟面团在揉混成型时(扭矩达 1.1 Nm; 设为 ZS 面团)与揉混 12 min 时(设为 ZL 面团)面团的揉混扭矩、水分组成情况, 以及蛋白分布状态; 研究耐揉混面团的最佳乳酸添加量, 通过一定时长揉混作用下, 不同乳酸含量的面团中 zein 理化性质, 讨论了经长时间揉混面团逐渐弱化的原因, 为 zein 模拟面团的加工、相关谷物制品的制备提供参考。结果表明, 添加少量乳酸能促使 zein 在面团中构建起蛋白质网络, 但长时间的揉混会导致酸化面团强度下降, 破坏面团中 zein 网络连贯性, 降低 zein 对淀粉颗粒包裹水平, 面团中弱结合水占比下降、游离水占比增加, zein 发生脱酰胺反应、表面疏水性上升、相对分子质量下降。面团经长时间的揉混逐渐弱化, 是因为揉混作用会扩大乳酸对面团中 zein 的作用效果, 促使蛋白质表面疏水性增加、蛋白质碎片化, 进而导致 zein 网络连贯性下降。

关键词: 揉混时间; 乳酸; 玉米醇溶蛋白; 脱酰胺反应

中图分类号: TS255.1; S-3 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2023)04-0048-07

Effect of Kneading Time on the Properties of Zein in Acidified Model Dough

LIU Hao¹, LI Yue¹, ZHENG Yan-cheng¹, XIE Sheng-hai², WU Dong-liang³, QIAO Han¹, ZHAO Jin-hui¹

- (1. China Grain Reserves Group Ltd. Company, Beijing 100039, China;
2. China Grain Reserves Group Ltd. Company Fujian Branch, Fuzhou, Fujian 350028, China;
3. Sinograin Diamond Depot Ltd. Company, Xiamen, Fujian 361026, China)

Abstract: In this study, zein-based gluten-free model dough (Z dough) was prepared with zein, corn starch, and wormwood gum. Based on the flour quality test, the kneading torque, water composition and protein distribution of the zein simulated dough with different lactic acid content were compared when finish dough (torque up to 1.1 Nm; set as ZS dough) and kneading for 12 minutes (set as ZL dough) conditions. The optimal amount of lactic acid added to kneadable dough was explored, and the physical and chemical properties of zein in dough with different lactic acid content were discussed under the action of kneading for

收稿日期: 2023-03-10

作者简介: 刘昊, 男, 1995 年出生, 硕士, 研究方向为粮油加工与储藏。E-mail: m15639052039@163.com

a certain period of time, which could and provide reference for the preparation of related cereal products. Studies have shown that adding a small amount of lactic acid could promote zein to build a protein network in the dough, but long-term kneading would lead to decreasing the strength of the acidified dough, destroying the continuity of the zein network in the dough, reducing the level of zein wrapping on starch granules and weak bonding in the dough. The proportion of water decreased and the proportion of free water increased. The surface hydrophobicity increased and the relative molecular weight decreased, when the deamidation reaction of zein occurred. The analysis showed that the dough gradually weakened after a long time of kneading, because the kneading effect would expand the effect of lactic acid on zein in the dough, which would increase the hydrophobicity of the protein surface and fragment the protein, and lead to a decrease in the coherence of the zein network.

Key words: kneading time; lactic acid; zein; deamidation reaction

近年来,我国乳糜泻发病率不断上升。数据表明内蒙古、山东、陕西、浙江等地,易感基因携带人群已超过 0.5%^[1]。鉴于我国人口基数较大,乳糜泻患者绝对数量不容小觑。终身严格遵守无麸质饮食,是避免因摄入麸质而引起的肠道不适,改善乳糜泻患者生活质量的重要治疗手段。由于无麸质谷物面团中无法形成连续的蛋白质相,构建起的网络结构不够充分,造成面团筋力不足,限制了无麸质谷物产品的开发。有研究发现,以玉米醇溶蛋白(zein)、淀粉和沙蒿胶为原料,添加一定量的乳酸,能够制备出蛋白网络结构连贯、流变特性良好的无麸质面团^[2]。提升了所制备面条的蒸煮品质,同时还会影响到面团中 zein 的相对分子质量与分子结构^[3]。在先前的研究基础上,进一步探讨揉混时间作为乳酸调控下 zein 模拟面团加工品质的影响,对比了面团形成时与揉混 12 min 后,乳酸酸化面团中水分组成,蛋白质微观结构、相对分子质量、表面疏水性强度,围绕 zein 的变化情况,分析了面团的弱化原因。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

乳酸(分析纯):上海麦克林生化科技有限公司;玉米醇溶蛋白:Sigma-Aldrich 公司;沙蒿胶:上海源叶生物科技有限公司;玉米淀粉:黑龙江鹏程生化有限公司(直链淀粉含量 $26.14\% \pm 1.64\%$,支链淀粉含量 $73.86\% \pm 1.47\%$);溴酚蓝(优级纯):北京索莱宝科技有限公司;溴化钾(分析纯):国药集团化学试剂有限公司;考马

斯亮蓝 G-250:Sigma-Aldrich 公司;实验用水为蒸馏水。

1.2 仪器与设备

DT2000 电子天平:常熟市嘉衡天平仪器有限公司;混合实验仪 Mixolab-2:法国 Chopin 技术公司;低场核磁共振成像 NMI20-030H-I:苏州纽迈分析仪器股份有限公司;FD-1C-80 真空冷冻干燥机:上海市比郎仪器制造有限公司;SIGMAHD 扫描电子显微镜:德国蔡司(Carl Zeiss Microscopy GmbH)公司;杜马斯定氮仪 DN2000:北京诺德泰科仪器仪表有限公司;凝胶电泳系统 Mini-Protein Tetra System、凝胶成像系统 Chemi Doc MP:美国 Bio-Rad 公司;紫外/可见分光光度计 A560:翱艺仪器有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 玉米醇溶蛋白模拟面团粉质特性检测

将 zein、沙蒿胶和玉米淀粉按 10:1:39 (w/w)的比例充分混合。基于 Mixolab 的 Chopin S 标准协议进行粉质实验,设定 Mixolab 搅拌刀片转速 80 rpm,揉混温度 25 °C。将混合好的原料粉置于 Mixolab 中,加入乳酸水溶液,通过控制补加水量,使揉混最大扭矩达 (1.1 ± 0.05) Nm(相当于粉质仪 500 FU)。制得面团中乳酸与原料粉比例(L/Z, mL/g)为 0:50、2:50、4:50、6:50,分别记为 Z0、Z2、Z4、Z6。实验重复 3 次。

1.3.2 揉混不同时间玉米醇溶蛋白模拟面团制备

当 Z0、Z2、Z4、Z6 揉混扭矩达 1.1 Nm 时,停止揉混,此时所制面团分别记为 ZS0、ZS2、

ZS4、ZS6。

当 Z0、Z2、Z4、Z6 揉混扭矩达 1.1 Nm 后,继续揉混 12 min,所制面团分别记为 ZL0、ZL2、ZL4、ZL6。

将制得面团置于自封袋中,25℃下静置 30 min 消去面团中应力后,进行后续检测。

1.3.3 面团中水分结合状态检测

参考刘锐^[4]等的检测方法,并略作调整。分别将不同乳酸含量的 ZS 和 ZL 面团填充到聚四氟乙烯管中,尽量不让管内留有空隙。静置 30 min 后,于场强 0.5 T 的永久磁场射频中心位置进行检测。测定样品的横向弛豫时间 T_2 。设置 TD 为 360 000,SW 为 200.00 kHz,TW 为 4 000 ms,NS 为 8。各面团重复制备 3 次,平行检测 2 次。

1.3.4 微观结构观测

参考 WANG^[5]的方法。将不同 L/Z 比的 ZS 面团和 ZL 面团,进行真空冷冻干燥,挑取截面平整的冻干面团固定于样品台上,用离子溅射仪对表面喷金,于 2 KV 加速电压下,放大 1 000 倍进行观测。

1.3.5 蛋白质脱酰胺度检测

Zein 会在酸性条件下发生脱酰胺反应,谷氨酰胺的侧链基团 $-NH_2$ 被替换为 $-OH$,N 含量下降^[6]。借鉴李传雯^[7]等方法,通过测定蛋白质 N 含量的变化计算脱酰胺度。将 T 和 C 面团分别研磨成粉,用杜马斯定氮仪确定 N 含量。设 N_0 为 zein 中 N 含量, N_1 为脱酰胺反应后 zein 中 N 含量,根据下式计算脱酰胺度^[8]:

$$\text{脱酰胺度}(\%) = \frac{N_0 - N_1}{N_0} \times 100$$

1.3.6 蛋白质相对分子质量检测

参考 LI^[9]的方法。通过 SDS-PAGE 表征 zein 的相对分子质量。将 zein 分散于 Tris-HCl 溶液中,加入甘油和 SDS 充分搅拌,蛋白质上样 10 μg 。以 Precision Plus Protein Dual Xtra 标准品用作分子量 Maker,设定电泳仪电压 260 V,电流 13 mA。以 40%甲醇、10%乙酸、50%水配置固定液固定条带,考马斯亮蓝 G-250 染色过夜,10%乙酸对凝胶进行脱色。用凝胶成像仪成像。

Quantity One 对蛋白质条带灰度进行相对定

量分析。分别以提取自面团的 zein 条带总灰度为 C_1 ,以 zein 的条带总灰度为空白对照 (C_0),按下式计算面团中 zein 各条带灰度变化程度。

$$\text{条带灰度变化}(\%) = \frac{C_0 - C_1}{C_0} \times 100$$

1.3.7 表面疏水性测定

参考 SMITH^[10]的方法。将提取自面团的 zein 加入到 20 mM 的磷酸盐缓冲液 (pH 6.0) 中,蛋白质浓度 5 mg/mL,震荡 30 min。加入 1 mg/mL 的溴酚蓝去离子水溶液 200 μL ,磁力搅拌 10 min。将样品液以 4 000 rpm 离心 15 min,用磷酸盐缓冲液对上清液稀释 10 倍,充分震荡。用分光光度计,在 595 nm 处测定吸光度 A_1 。以 0.1 mg/mL 溴酚蓝去离子水溶液的吸光度 A_0 为检测空白。计算公式如下:

$$\text{溴酚蓝结合量}(\mu\text{g}) = \frac{200 \times (A_0 - A_1)}{A_0}$$

1.4 数据处理

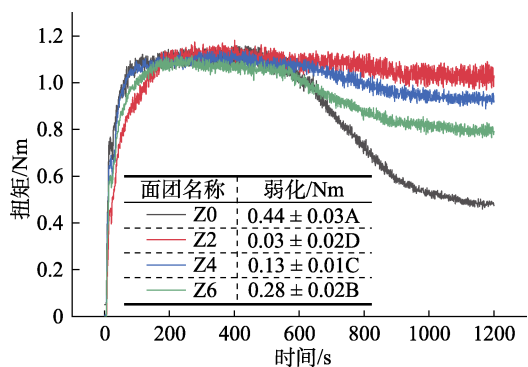
所有实验至少重复 2 次,平行 3 次,结果以均值 $\pm$ 标准方差表示。基于 SPSS 21 软件对数据进行方差分析 (ANOVA),置信区间 $P < 0.05$ 。使用 Origin 2018 软件绘图。

2 结果与讨论

2.1 粉质曲线

面团的揉混弱化是评价面团体系耐揉混性的重要指标,指面团成型时的揉混扭矩 (1.1 Nm) 与揉混 12 min 后的扭矩差值。根据图 1 中粉质曲线可知,相较不含乳酸的 Z0 面团,添加乳酸的面团具有较好的耐揉混性,弱化得到一定程度的减缓,当面团中乳酸和 zein 比例 (L/Z) 为 2 : 50 (mL/g) 时,即 Z2 面团的耐揉混性最强,弱化仅为 0.03 Nm,是 Z0 的 6.82%。但随着 L/Z 增加,面团耐揉混性有所下降,弱化程度逐渐提高。这与已有研究结果一致^[3],认为添加少量的乳酸可以提高 zein 模拟面团的耐揉混性,但长时间的揉混仍会导致酸化面团发生不同程度的弱化。

为探究酸化面团的弱化原因,就不同时长的揉混作用下,酸化面团中 zein 理化性质及微观状态的差异展开讨论。



注：同列数据后的不同字母表示显著性差异 ($P < 0.05$), 下同。

Note: Different letters after the same column of data indicated significant differences ($P < 0.05$), the same below.

图 1 Z0-Z6 粉质曲线及揉混弱化

Fig.1 Z0-Z6 farinographic curves and weakening degree

2.2 揉混时间对 zein 混合面团微观结构的影响

有研究表明,制备无麸质黏弹性面团的关键,是面团中构建起蛋白骨架,形成连续稳定的蛋白网络^[11]。在图 2 中用红色箭头标注了面团中的 zein,可观察到,ZS0 中的 zein 聚集严重,分布不均,主要以带状或团块状的形式存在。相较于

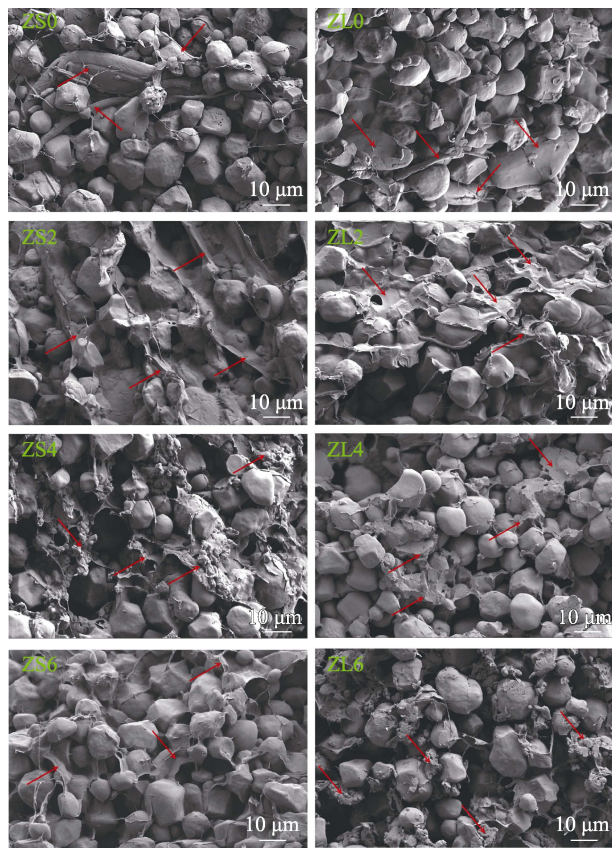


图 2 ZS0-ZS6、ZL0-ZL6 的 SEM 图像

Fig.2 SEM images of ZS0-ZS6 and ZL0-ZL6

ZS0, ZL0 中, zein 聚集块粒径减小。说明揉混对面团中 zein 聚集体有分化破碎作用,使之由大块蛋白聚集体转为小块聚集。

在含有乳酸的 ZS2、ZS4、ZS6 中, zein 均构建起了网状结构,认为乳酸可以抑制面团中 zein 聚集成块,有助于蛋白联结成网,该结果与先前的研究一致^[2]。对于添加乳酸的 Z 面团,长时间的揉混同样会导致 zein 网络发生不同程度的弱化。比较同等 L/Z 的 ZS 和 ZL 面团,发现相较刚刚揉混成型时,经长时间揉混,面团中 zein 网络均趋于松散、薄弱,结构连贯性与完整性均有所下降,认为长时间的揉混作用会对酸化面团中 zein 网络结构产生破坏。因此,适度揉混有助于构建酸化 zein 模拟面团的蛋白网络结构,保障面团加工性能。

2.3 揉混时间对 zein 模拟面团水分结合状态的影响

已有研究表明,水分是面团揉混成型与具备延展性的必要条件^[12],水分结合状态影响着面团质地和加工品质^[13]。测得样品的低场核磁共振弛豫时间越小,表示水分流动性越弱^[4]。信号峰面积与水分占比呈正比^[14]。根据检测结果,将 ZS 和 ZL 面团中的水分分为结合水 (0.01~0.3 ms)、弱结合水 (0.42~24.77 ms)、游离水 (91.12~546.23 ms) 三部分。结合水是与面团中组分紧密结合的水分^[15],主要通过静电力,与蛋白质和淀粉表面,以及淀粉无定形区内的极性基团相结合^[16];弱结合水是被包裹于蛋白质网络中和存在于淀粉颗粒间隙的水分,流动性介于结合水和游离水之间^[17];游离水通过毛细管作用存在于面团体组分中^[18]。

经揉混、静置,在面团中各组分的争夺下,水分被重新分配^[19]。有研究发现,强筋小麦面团中致密的面筋网络有较好的水分束缚力,游离水占比较小,但经过度揉混,面筋网络被破坏,游离水占比随之增加^[20]。Zein 模拟面团中游离水占比与面团中蛋白质网络的紧密程度同样相关。当 L/Z 一定时,ZS 面团中弱结合水占比更高,而游离水占比比较低。说明长时间的揉混弱化了 zein 网络结构,相比 ZL 面团,ZS 面团中 zein 网络结构

更为结实稳定,对体系中弱结合水的束缚能力更强,抑制了弱结合水向游离水的转化。

ERICKSON 等^[21]发现增塑剂会影响到面团体系的质地,在油酸调控 zein 团块拉伸性的研究中发现,油酸所起的增塑作用有效地增加了 zein 的延展性,但延展性的改善是以牺牲体系的强度为代价的。如表 1 中数据可知,当 L/Z 一定时,ZL 中的游离水占比明显高于 ZS 的。结合 zein 模拟面团粉质检测结果,分析认为随揉混时间增加,面团弱化程度的提高可能与游离水占比增加有关。在揉混作用下,存在于面团大分子组分间的游离水起到了增塑效果,减少了分子间摩擦,彼此纠缠水平降低,使面团质地变得更加柔软。

表 1 ZS0-ZS6、ZL0-ZL6 水分结合状态
Table1 Contents of three forms of moisture in ZS0-ZS6 and ZL0-ZL6 %

面团名称	弱结合水占比	游离水占比
ZS0	76.18±1.08A	0.92±0.23C
ZS2	68.98±1.16B	0.69±0.14D
ZS4	66.40±0.49C	1.76±0.09B
ZS6	65.55±0.31C	2.37±0.13A
ZL0	76.17±0.73a	0.95±0.22c
ZL2	68.30±0.92b	1.10±0.21c
ZL4	65.53±0.54c	2.54±0.14b
ZL6	64.20±0.80d	3.35±0.33a

注:同列数据后的不同字母表示显著性差异($P<0.05$)。

Note: Different letters after the same column of data indicated significant differences ($P<0.05$).

2.4 揉混时间对面团中 zein 脱酰胺度的影响

在酸性条件下,富含谷氨酰胺的蛋白质会发生脱酰胺反应,谷氨酰胺残基上的 $-NH_2$ 侧链基团被转化为 $-OH$,由疏水性氨基酸被转化为中性的谷氨酸^[22]。Zein 中 20% 以上的氨基酸为谷氨酰胺,发生脱酰胺反应的底物充足^[23]。

当 L/Z 一定时,相较 ZS 面团,ZL 面团中 zein 的脱酰胺度更高。如图 3 可见,其中 ZL4 和 ZL6 中 zein 的脱酰胺度分别达到 ZS4 和 ZL6 中 zein 的 1.31 倍和 1.25 倍。说明长时间的揉混对 zein 的脱酰胺反应起到促进作用,增加了反应程度。

2.5 揉混时间对面团中 zein 相对分子质量的影响

对 ZS 和 ZL 面团中 zein 相对分子质量的变化

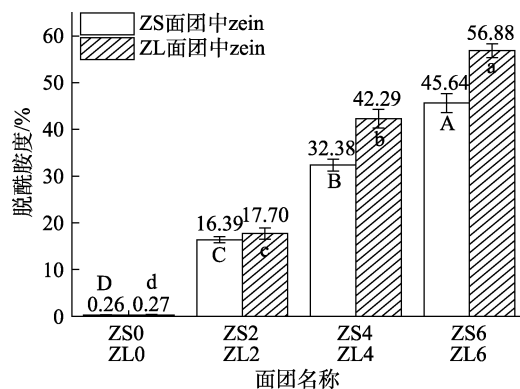


图 3 ZS0-ZS6、ZL0-ZL6 中 zein 脱酰胺度

Fig.3 Deamidation degrees of zein in ZS0-ZS6 and ZL0-ZL6

情况进行了检验与分析。根据图 4-2 (a) 的 SDS-PAGE 可知,本研究所用蛋白质主要为 α -zein,由 35~48 kDa 的 α -zein 二倍体和 19、22 kDa 的 α -zein 单倍体组成。研究认为,脱酰胺反应会引起蛋白质的水解^[24]。在反应中,谷氨酰胺的酰胺侧链被转化为带负电荷的羧酸基团,减少了分子内氢键,使蛋白质表面电负性增加,分子结构得以舒展,增加了肽键与 H^+ 的接触机率。

在本研究中发现,长时间的揉混会促进乳酸对面团中 zein 的水解。如图 4 数据可知,相较于 ZS0, ZL0 中 zein 的各条带灰度无显著变化 ($P>0.05$),说明在不添加乳酸的条件下,揉混过程对面团中 zein 不存在显著的水解作用。在添加乳酸后, ZL2、ZL4、ZL6 面团中 zein 条带总灰度变化程度,均分别显著大于 ZS2、ZS4、ZS6,且随 L/Z 增加, ZL 中 zein 条带灰度变化程度逐渐提高。由此认为,揉混过程会增加乳酸对面团中 zein 的水解效果。

2.6 揉混时间对面团中 zein 表面疏水性的影响

有研究表明,表面疏水性反映了蛋白质表面的疏水基团分布情况,是蛋白质的重要特征^[25]。基于表面疏水性,zein 可以联结彼此,构建起 zein 网络结构^[26]。Zein 的脱酰胺反应及水解反应,均会影响到蛋白质的表面疏水性。

溴酚蓝 (BPB) 与蛋白质在疏水力的作用下会发生结合,可通过蛋白质的 BPB 结合量来评价其表面疏水性。测得 BPB 结合量越大,说明蛋白质与 BPB 疏水作用结合能力越强,表面疏水性越大。

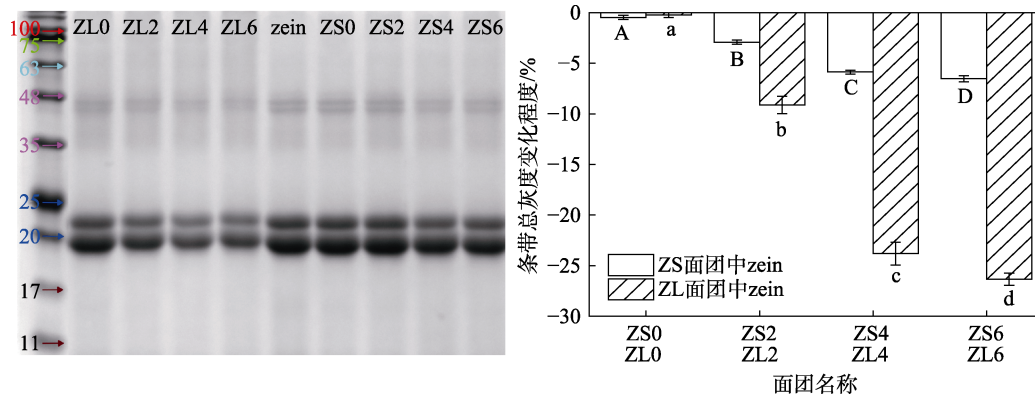


图 4 ZS0-ZS6 和 ZL0-ZL6 中 zein 相对分子质量与条带灰度变化

Fig.4 Relative molecular mass and degree of change of band gray scale of zein in ZS0-ZS6 and ZL0-ZL6

由图 5 可知, ZS0 和 ZL0 中 zein 的 BPB 结合量无显著差异 ($P>0.05$), 说明当面团中不含乳酸时, 揉混处理不会导致 zein 的表面疏水性发生太大变化。随乳酸含量增加, 面团中 zein 表面疏水性呈先提高后下降趋势, 与刘昊^[3]等研究结果一致。ZS2 与 ZL2 中 zein 的表面疏水性之间无显著差异, 而 ZL4 和 ZL6 中蛋白表面疏水性则分别远高于 ZS4 和 ZS6 中 zein 所测结果。认为这是因为 Z4 和 Z6 中 zein 相对分子质量下降明显, 蛋白质碎片化, 原本包埋于 zein 结构内部的疏水性基团被充分暴露, 蛋白表面疏水性大幅增加。

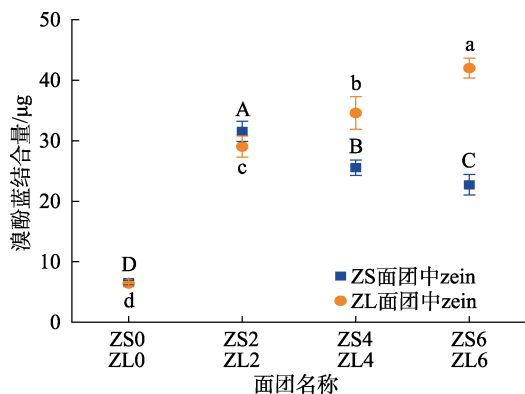


图 5 ZS0-ZS6、ZL0-ZL6 中 zein 溴酚蓝结合量

Fig.5 Bonud BPB of zein in ZS0-ZS6 and ZL0-ZL6

3 结论

以玉米醇溶蛋白 (zein)、玉米淀粉、沙蒿胶为原料, 制备了 zein 模拟面团, 探究了揉混时间对乳酸调控下面团弱化程度、水分组成情况, 以及蛋白分布状态的影响规律; 通过比较面团揉混成型时与揉混 12 min 后, 酸化面团中 zein 理化性

质的差异, 探究了持续揉混造成面团弱化的原因, 为 zein 模拟面团的加工制备、相关谷物制品的开发提供技术参考。

研究发现, 在不含乳酸时, zein 模拟面团耐揉混性差, 弱化明显, 但揉混作用不会造成 zein 的水解反应。长时间的揉混同样会导致酸化面团弱化, 随乳酸含量增加, 面团弱化程度加大, 面团中 zein 聚集团块粒径减小, 蛋白网络连贯性被破坏程度增加, zein 对淀粉颗粒的包裹水平下降, 弱结合水占比减小, 游离水占比增加; 面团中 zein 脱酰胺反应程度逐渐提高, 相对分子质量下降, 蛋白表面疏水性呈上升趋势。研究认为, 揉混作用会促进酸化面团中 zein 的表面疏水性增强、蛋白质碎片化, 导致 zein 网络连贯性下降, 面团弱化。

参考文献:

- [1] 袁娟丽. 中国青年人群的乳糜泻风险性分析[D]. 南昌大学, 2014.
YUAN L. The risk analysis of dietary cadmium in the Chinese youth population[D]. Nanchang University, 2014.
- [2] 刘昊, 顾丰颖, 朱金锦, 等. 乳酸调控玉米醇溶蛋白基面团流变特性和微观结构的研究[J]. 食品工业科技, 2021, 42(18): 81-88.
- [3] 刘昊, 顾丰颖, 朱金锦, 等. 乳酸对玉米醇溶蛋白基面团品质提升的作用[J]. 食品科学, 2021, 42(24): 1-8.
- [4] LIU H, GU F Y, ZHU J J, et al. Rheological properties and microstructure of zein dough under the control of lactic acid[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(18): 81-88.
- [5] 刘昊, 顾丰颖, 朱金锦, 等. 乳酸对玉米醇溶蛋白基面团品质提升的作用[J]. 食品科学, 2021, 42(24): 1-8.
- [6] LIU H, GU F Y, ZHU J J, et al. Effect of lactic acid on improving the quality of zein-based dough[J]. Food Science, 2021, 42(24): 1-8.
- [7] 刘锐, 武亮, 张影全, 等. 基于低场核磁和差示量热扫描的面

- 条面团水分状态研究[J]. 农业工程学报, 2015, 31(9): 288-294.
- LIU R, WU L, ZHANG Y Q, et al. Water state and distribution in noodle dough using low-field nuclear magnetic resonance and differential scanning calorimetric[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(9): 288-294.
- [5] WANG Y, CHEN Y, ZHOU Y, et al. Effects of konjac glucomannan on heat-induced changes of wheat gluten structure[J]. Food Chemistry, 2017, 229(AUG.15): 409-416.
- [6] HE W, ZHAO W, YANG R. Effects of wheat gluten modified by deamidation-heating with three different acids on the microstructure of model oil-in-water emulsion and rheological-physical property of ice cream[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 87: 679-690.
- [7] 李传雯, 袁江兰, 柳旺, 等. 大米谷蛋白碱法脱酰胺条件优化[J]. 食品科技, 2016, 41(10): 143-146.
- LI C W, YUAN J L, LIU W, et al. Optimization of alkali deamidation on rice glutelin[J]. Food Science and Technology, 2016, 41(10): 143-146.
- [8] LIAO L, LIU T X, ZHAO M M, et al. Functional, nutritional and conformational changes from deamidation of wheat gluten with succinic acid and citric acid[J]. Food Chemistry, 2010, 123(1): 123-130.
- [9] GUO X N, ZHU K X, ZHOU H M. Effects of alkali on protein polymerization and textural characteristics of textured wheat protein[J]. Food Chemistry, 2018, 239(15): 579-587.
- [10] SMITH B M, BEAN S R, SELLING G, et al. Role of non-covalent interactions in the production of visco-elastic material from zein - sciencedirect[J]. Food Chemistry, 2014, 147(6): 230-238.
- [11] SCHOBERT T J, MOREAU R A, BEAN S R, et al. Removal of surface lipids improves the functionality of commercial zein in viscoelastic zein-starch dough for gluten-free breadmaking[J]. 2010, 52(3): 417-425.
- [12] 张影全, 师振强, 赵博, 等. 小麦粉面团形成过程水分状态及其比例变化[J]. 农业工程学报, 2020, 36(15): 307-314.
- ZHANG Y Q, SHI Z Q, ZHAO B, et al. Changes of water status and proportion during wheat flour dough mixing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(15): 307-314.
- [13] JIANG Y, ZHAO Y, ZHU Y, et al. Effect of dietary fiber-rich fractions on texture, thermal, water distribution, and gluten properties of frozen dough during storage[J]. Food Chemistry, 2019, 297: 124902.
- [14] WANG L, YE F, LI S, et al. Effects of oat β -glucan incorporation on the gelatinization, flowability and moisture sorption of wheat flour[J]. Powder Technology, 2017, 315: 430-437.
- [15] 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.
- [16] 肖东, 周文化, 陈帅, 等. 亲水多糖对鲜湿面货架期内水分迁移及老化进程的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(18): 298-303.
- XIAO D, ZHOU W H, CHENG S, et al. Effects of hydrophilic polysaccharides on moisture migration and regeneration process during shelf life of fresh noodles[J]. Food Science, 2016, 37(18): 298-303.
- [17] 刘锐, 卢洋洋, 邢亚楠, 等. 高速连续和面机的和面效果及其对面条质量的影响[J]. 中国食品学报, 2015, 15(11): 52-52.
- LIU R, LU Y Y, XING Y N, et al. Mixing effects and noodles quality of differential continuous high-speed mixers[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2015, 15(11): 52-52.
- [18] XUAN Y, ZHANG Y, ZHAO Y, et al. Effect of hydroxypropylmethylcellulose on transition of water status and physicochemical properties of wheat gluten upon frozen storage[J]. Food Hydrocolloids, 2017, 63: 35-42.
- [19] XU F, HU H H, LIU Q N, et al. Rheological and microstructural properties of wheat flour dough systems added with potato granules[J]. International Journal of Food Properties, 2017, 20(sup1): 1145-1157.
- [20] RACHEL. Feasibility of using zein in gluten-free baking[J]. 2015.
- [21] ERICKSON D P, RENZETTI S, JURGENS A, et al. Modulating state transition and mechanical properties of viscoelastic resins from maize zein through interactions with plasticizers and co-proteins[J]. Journal of Cereal Science, 2014, 60(3): 576-583.
- [22] LIAO L, HAN X Y, ZHAO M M, et al. Effect of native aggregation state of soluble wheat gluten on deamidation behavior in a carboxylic acid/heat water solution[J]. Journal of Cereal Science, 2016, 72: 1-9.
- [23] ZHOU L, XU G, ZHANG Z, et al. Surface activity and safety of deamidated zein peptides[J]. Colloids and Surfaces, A. Physicochemical and Engineering Aspects, 2018, 540: 150-157.
- [24] 廖兰. 湿热有机酸脱酰胺改性小麦面筋蛋白及作用机理的研究[D]. 华南理工大学, 2012.
- LIAO L. Study on the deamidation of wheat gluten by organic acids upon hydrothermal treatment and reaction mechanism[D]. South China University of Technology, 2012.
- [25] QIU C, WANG Y, TENG Y, et al. Influence of glycosylation of deamidated wheat gliadin on its interaction mechanism with resveratrol[J]. Food Chemistry, 2017, 221(APR.15): 431-438.
- [26] MATTICE K D, MARANGONI A G. Functionalizing zein through antisolvent precipitation from ethanol or acetic acid[J]. Food Chemistry, 2020, 313(17): 126-137. 
- 备注: 本文的彩色图表可从本刊官网 (<http://lyspkj.ijournal.cn>)、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。