

复配蛋液对小麦面团流变学特性和面包品质的影响

何颖, 迟玉杰, 迟媛

Effect of Reconstituted Liquid Egg on the Rheological Properties of Wheat Dough and Bread Quality

HE Ying, CHI Yujie, and CHI Yuan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024060180>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

何颖, 迟玉杰, 迟媛. 复配蛋液对小麦面团流变学特性和面包品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(10): 93–101. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024060180

HE Ying, CHI Yujie, CHI Yuan. Effect of Reconstituted Liquid Egg on the Rheological Properties of Wheat Dough and Bread Quality[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(10): 93–101. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024060180

· 研究与探讨 ·

复配蛋液对小麦面团流变学特性和面包品质的影响

何 颖^{1,*}, 迟 媛^{2,*}

(1.东北农业大学食品学院, 黑龙江哈尔滨 150030;

2.东北农业大学工程学院, 黑龙江哈尔滨 150030)

摘要:为探究复配蛋液对小麦面团加工性能和面包烘焙品质的影响, 本研究通过粉质仪、流变仪等技术手段测定了小麦面团的粉质特性、粘弹性、蠕变恢复能力以及发酵性能等流变学性质, 同时利用扫描电子显微镜观察了面团的微观结构, 并评估了其所制成的面包的比体积、质构特性和内部纹理等品质。结果表明: 与未添加蛋液的空白组相比, 含有蛋黄的复配蛋液使面团的形成时间和稳定时间延长, 发酵体积增大, 持气能力提高; 面团的黏弹性随蛋液中蛋黄比例的增加呈先上升后下降的趋势, 应变值呈先下降后上升的趋势。当蛋液中蛋黄比例为 70% 时, 面团黏弹性最大, 抵抗外界形变的能力最强, 结构最稳定; 此时, 面包的比体积最大, 为 4.82 mL/g, 较添加硬脂酰乳酸钠 (Sodium stearyl lactate, SSL) 的面包提升 26.5%; 硬度和咀嚼性最低, 分别为 261.50 g 和 219.224 g; 内聚性最高, 为 0.848; 弹性和回复性也较好, 与 SSL 组面包相比回弹增加 5.9% 和 11.6%。然而, 蛋黄比例过高的复配蛋液 (80%~100%) 也会对面团的内部结构产生不利的影响, 导致面包蓬松度下降, 内部组织变得粗糙。综上, 蛋黄比例为 70% 的复配蛋液对面团加工性能和面包品质的提升效果最好。

关键词:复配蛋液, 流变学, 食品质构, 面团, 面包

中图分类号:TS201.2

文献标识码:A

文章编号:1002-0306(2025)10-0093-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024060180

本文网刊:



Effect of Reconstituted Liquid Egg on the Rheological Properties of Wheat Dough and Bread Quality

HE Ying^{1,*}, CHI Yujie^{1,*}, CHI Yuan^{2,*}

(1. College of Food Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China;

2. College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: This study aimed to explore the influence of reconstituted liquid egg on the processing performance of wheat dough and baking quality of bread, a farinograph and a rheometer were used to investigate the farinograph characteristics, viscoelasticity, creep-recovery characteristic and fermentability of wheat dough. The microstructure of the dough was observed by scanning electron microscope, and the specific volume, texture characteristics and crumb structure of bread. The results showed that compared with egg-free dough (blank control), the reconstituted liquid egg containing egg yolk extended the development time and stability time of the dough, increased the fermentation volume, and improved the air-holding capacity. As egg yolk proportion in reconstituted liquid egg increased, the viscoelasticity of the dough first increased and then decreased, while the strain exhibited a completely opposite trend. When yolk proportion in reconstituted liquid egg reached 70%, the dough had the largest viscoelasticity, the strongest resistance against external deformation and

收稿日期: 2024-06-13

基金项目: “十四五”国家重点研发计划重点专项 (2022YFD2101005)。

作者简介: 何颖 (1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 蛋产品深加工, E-mail: hying1224@126.com。

* 通信作者: 迟玉杰 (1963-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 蛋产品深加工, E-mail: yjchi323@126.com。

迟媛 (1974-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 机械工程, E-mail: cy207@126.com。

the most stable structure. With this formulation, the specific volume of the bread was the largest (4.82 mL/g), which was 26.5% higher than the bread with sodium stearyl lactate (SSL group). The hardness and gumminess were the lowest, which were 261.50 g and 219.224 g, the cohesiveness was the highest, which was 0.848, and the elasticity and resilience were also at a high level, which increased by 5.9% and 11.6%, compared with the SSL group. However, liquid egg containing excessive egg yolks (80%~100%) could adversely affect the inner structure of the dough, resulting in a decrease in the size of the bread and a rough internal tissue. In summary, reconstituted liquid egg with 70% of yolk exhibits the best effect on improving the processing performance of dough and baking quality of bread.

Key words: reconstituted liquid egg; rheology; food texture; dough; bread

液态蛋制品是由新鲜鸡蛋经去壳、分离、杀菌和包装等工序加工而成,运输和使用更方便快捷、安全性更高,更适合在食品工厂、餐饮企业和大型商超中销售和使用。在欧美、日本等发达工业国家,液蛋产品加工量约占其鲜蛋总量的 30%~40%^[1],并且液蛋已作为主料或食品重要辅料形成专业化加工产业^[2]。我国液蛋加工产业虽处于起步阶段,但我国鸡蛋产量位居世界第一,并拥有庞大的消费市场,液蛋产品的发展前景十分广阔^[3]。

面包凭借松软的质地和独特的发酵香气受到国内许多人的喜爱,与其他面制品相比,面包具有易于大规模机械化生产、贮存期较长等优点^[4]。随着消费者对面包品质的要求越来越高,面包的营养和感官品质还需进一步提升。硬脂酰乳酸钠(Sodium stearyl lactate, SSL)属于阴离子型乳化剂,在面制品加工中常被用来改良面包、馒头和方便面的品质,但作为一种化学食品添加剂,其安全性被消费者担忧。天然食材鸡蛋因较高的营养价值与多样的功能性质而被广泛应用到食品加工中。鸡蛋中的蛋白质属于完全蛋白^[5],能够补充面包中小麦蛋白所缺乏的限制性氨基酸—赖氨酸^[6]。此外,有许多研究通过添加某些鸡蛋组分来提升面团的加工性能和面包的品质。Masure 等^[7]研究发现,蛋清粉可增加无麸质米粉面包的体积,并降低面包在贮藏六天后的老化程度。何韵然等^[8]将蛋黄粉添加到小麦面团配方中发现,适量的蛋黄粉可增加面团的拉伸面积与拉伸阻力,提高面团的韧性。Sang 等^[9]研究发现,添加 2.8% 蛋黄液和 2.0% 蛋黄浆的面包高度比不含鸡蛋成分的对照组分别增加了 54.4% 和 49.2%,硬度分别降低了 63.7% 和 62.5%。

目前,虽有研究评估过不同蛋清蛋黄比例的复配蛋液对无麸质面包品质产生的作用^[10],但复配蛋液对普通含麸质小麦面团和面包的影响鲜见报道。同时,蛋液的工厂流水生产已能实现蛋清蛋黄的分离和定量配比^[11],这为复配蛋液的实际生产提供了技术支持。因此,本文拟将复配蛋液添加到面包制作配方中,并与添加 SSL 的面包做对比,探究复配蛋液对小麦面团的流变学性质以及面包品质特性的影响,旨在为提升面包的品质、研发面包专用焙烤型蛋液提供一定的参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

新鲜鸡蛋 黑龙江省双城区农场;高筋小麦粉 河北金沙河集团有限公司;酵母粉 安琪酵母股份有限公司;乳粉 内蒙古伊利实业集团股份有限公司;白砂糖 山东金怡神糖业有限公司;食盐 中盐黑龙江盐业有限公司;硬脂酰乳酸钠 山东齐鲁生物科技集团有限公司。

M5 和面机 青岛海氏烘焙电器有限公司;CF340C 发酵箱 中山卡式电器有限公司;MG38CB 美的电烤箱 美的集团股份有限公司;JFZD 电子式粉质仪 北京东孚久恒仪器技术有限公司;MARS60 模块化旋转流变仪 赛默飞世尔科技有限公司;*TA.XT Plus C 质构仪 英国 Stable Micro System 公司;S-3400N 鸽丝灯扫描电子显微镜 日本日立公司。

1.2 实验方法

1.2.1 复配蛋液的制备 用分蛋器分离蛋清和蛋黄,蛋清除去系带,磁力搅拌 20 min,蛋黄除去蛋黄膜,磁力搅拌成均匀蛋黄液。每份复配蛋液的质量为 100 g,蛋黄液按 0%、10%、20%、30%、40%、50%、60%、70%、80%、90%、100%(wt%)的比例加入烧杯中,剩余用蛋清液补足,混合均匀。

1.2.2 面包制作工艺 参考 GB/T 14611-2008《粮油检验小麦粉面包烘焙品质试验直接发酵法》并略作修改。高筋小麦粉 200 g,复配蛋液 50 g,白砂糖 12 g,乳粉 10 g,酵母 3.2 g,水 110 g(包含复配蛋液中的水,每组面团的含水量保持一致),硬脂酰乳酸钠 0.2 g(只有 SSL 组面包添加)。所有原材料放入和面机低档速 2 min 搅拌均匀,然后转高档速 10 min 揉成光滑面团,面团室温松弛 15 min 后整型放入模具,于温度 37 °C、湿度 80% 的发酵箱中发酵 90 min,上下火 180 °C 烘烤 20 min,烘烤后立即取出,室温下冷却 2 h。设置未添加蛋液和硬脂酰乳酸钠的面包为空白对照;仅添加硬脂酰乳酸钠的面包为实验对照,记为 SSL;添加蛋黄比例为 0%、10%、20%、30%、40%、50%、60%、70%、80%、90% 和 100% (wt%) 复配蛋液的面包分别记为 EY0、EY10、EY20、EY30、EY40、EY50、EY60、EY70、EY80、EY90 和 EY100。

1.2.3 小麦面团粉质特性的测定 参照 GB/T 14614-2019《粮油检验 小麦粉面团流变学特性测试粉质仪法》中的方法测定面团的粉质特性。

1.2.4 小麦面团发酵特性的测定 面团发酵特性测定包括面团产气量测定和面团发酵体积测定。

产气量测定参考 Wang 等^[12] 的方法。取和好的面团 100 g 放入已灭菌 500 mL 烧瓶内, 用带有软管的橡皮塞密封后将管路连接到盛有排出液的试剂瓶中, 试剂瓶橡皮塞上的另一软管插入量筒中, 装有面团的烧瓶 37 ℃ 水浴, 量筒内滴入第一滴水时开始计时, 测定时间 100 min。排入量筒内液体的体积即为面团的产气量。

发酵体积的测定参考袁翊榕等^[13] 的方法并稍作修改。取 100 g 面团放入 500 mL 量筒中压实使所有待测面团处在同一高度, 并记录此时的体积, 放入 37 ℃、80% 湿度的醒发箱中醒发 100 min, 每 10 min 记录一次面团的体积。

1.2.5 小麦面团动态流变特性的测定 取 4 g 静置 20 min 的面团放置在流变仪测试盘中央, 测试选用 P25/Ti 探头, 平行板之间的距离设为 2 mm, 多余样品进行刮边, 边缘涂抹硅油防止水分蒸发。频率变化范围为 0.1~10 Hz, 应变为 0.5%^[14], 温度为 25 ℃。

1.2.6 小麦面团蠕变-恢复特性的测定 参考陈前等^[15] 的方法。取 4 g 静置 20 min 的面团放置在流变仪测试盘中央, 选用 P35/Ti 探头, 平行板间距为 2 mm, 多余样品刮边, 边缘涂抹硅油防止水分蒸发, 恒定应力 50 Pa, 扫描时间 150 s, 移除应力后观察面团在 300 s 内的应力恢复情况。

1.2.7 小麦面团微观结构的观察 参考 Sun 等^[16] 的方法。将面团切成 5 mm×5 mm×10 mm 的长方体块, 放入-18 ℃ 冰箱冷冻 24 h, 取出后放入真空冷冻干燥机干燥 48 h。掰断冻干样品, 将样品平整面黏在金属圆盘上后进行喷金处理。5 kV 电压下放大 500 倍观察面团自然断面。

1.2.8 面包比体积和高径比的测定 烘焙后的面包放凉 2 h, 采用油菜籽置换法测定面包体积, 用电子天平测量面包的质量。比体积按公式(1)计算:

$$\text{比体积}(\text{mL/g}) = \frac{V}{m} \quad \text{式 (1)}$$

式中: V 为面包的体积, mL; m 为面包的质量, g。

使用游标卡尺测定面包的高度和底面直径, 并按公式(2)计算高径比:

$$\text{高径比} = \frac{h}{d} \quad \text{式 (2)}$$

式中: h 为面包的高度, cm; d 为面包的底面直径, cm。

1.2.9 面包质构特性的测定 取面包中间部分切片, 厚度 20 mm, 放在质构仪载物台上, 探头选择 P/25 规格, 触发力 5 g, 形变量 50%, 测前、测中、测

后的速度分别为 3、1、3 mm/s。获得硬度、弹性、咀嚼性、胶着性、内聚性和回复性五个参数。

1.2.10 面包内部纹理结构的测定 取面包中间切片用扫描仪扫描, 并使用 Image J 软件分析面包切片中心部位(4 cm×4 cm)的孔隙率、气孔均面积和气孔密度, 分析复配蛋液对面包内部纹理结构产生的影响。

1.3 数据处理

每个试验至少有 3 个重复, 结果表示为平均值±标准差。使用 Microsoft Excel 2019 统计整理数据, 采用 SPSS 25.0 软件进行显著性分析($P<0.05$), Origin 2018 软件绘制图表。

2 结果与分析

2.1 复配蛋液对小麦面团粉质特性的影响

粉质特性是评价面团加工性能的重要指标, 可反映面团的筋度和稳定性。从图 1 可以看出, 与空白组相比, 仅添加蛋清液的面团的吸水率下降, 这是因为蛋清液本身含水量较高, 蛋清液中的水分与一部分面筋蛋白和淀粉分子先结合, 使面团不能吸收更多的水分。类似研究也显示, 含水量大的物质会稀释小麦粉中的面筋蛋白, 导致面团吸水能力下降^[17]。复配蛋液中蛋黄比例达 20% 以后, 面团的吸水率开始高于空白组, 且随着蛋黄比例的增加, 面团吸水率呈上升趋势。这可能是因为蛋黄中的蛋白质和极性脂质上有许多亲水性基团, 容易与水分子结合, 从而使面团吸水率增加。制作面包一般要求较长的形成时间和稳定时间^[18]。相较于空白组, 仅添加蛋清液的面团的形成时间缩短了 12.1%。这是因为作为湿性材料的蛋清液能够在面团中起到快速黏合的作用, 加快面团达到吸水平衡的速率, 从而使面团形成时间缩短。随着蛋黄比例的增加, 面团的形成时间和稳定时间延长, 弱化度降低。这可能是由于蛋黄中的极性脂质颗粒吸附在面筋蛋白上, 与水分子竞争在面筋蛋白上的结合位点, 从而延长面团的形成时间。类似研究发现, 将杏仁油和小麦粉混合后, 油脂分子能够与面筋蛋白形成复合体, 阻碍水分子和面筋蛋白结合, 延缓面筋的形成, 导致面团形成时间增加^[19]。此外, 蛋黄中的蛋白质与面筋蛋白相互作用, 强化了面筋网络结构, 面团的耐搅拌能力和稳定性增强, 因此其稳定时间延长, 弱化度降低。粉质质量指数与稳定时间和弱化度分别具有良好的正、负相关性^[20], 蛋黄比例在 0%~70% 时, 粉质指数随蛋黄比例的增大而增大, 蛋黄比例大于 70% 后, 粉质指数有所下降, 说明过多的蛋黄脂质会减弱面筋蛋白之间的作用而对面团加工品质产生不利影响。

2.2 复配蛋液对小麦面团发酵特性的影响

在面团发酵过程中, 酵母利用糖类物质代谢出的二氧化碳气体被面筋网络保留, 使面团不断膨胀, 良好的发酵能力可赋予面包可观的外形和良好的质地^[21]。从图 2A 可以看出, 空白组和添加蛋清比例较

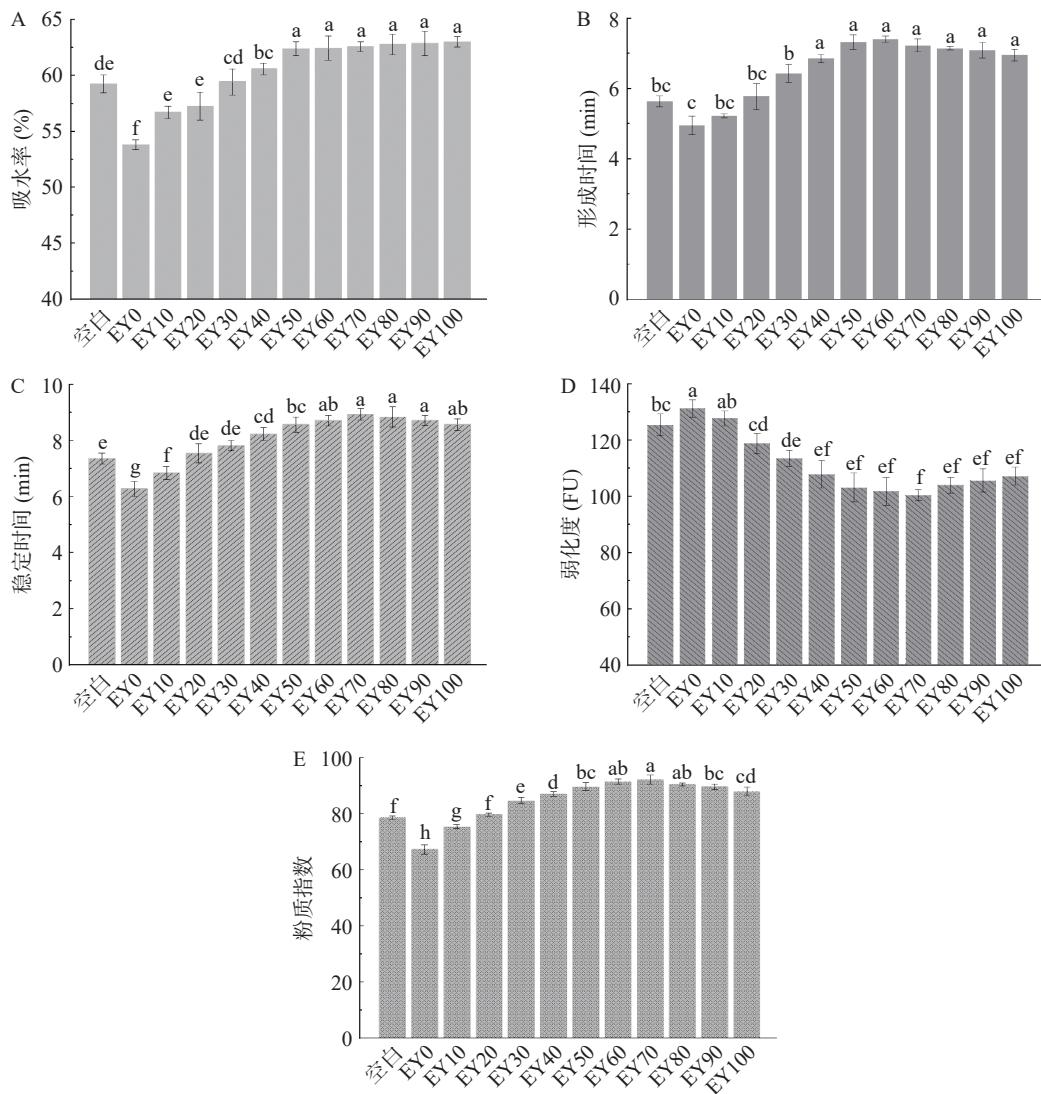


图 1 小麦面团的吸水率(A)、形成时间(B)、稳定时间(C)、弱化度(D)和粉质指数(E)

Fig.1 Absorption (A), development time (B), stability time (C), softening degree (D) and farinograph quality number (E) of wheat dough

注: 不同小写字母表示数据具有显著差异($P<0.05$), 图 2、图 6 同。

高(80%~100%)的复配蛋液的面团的产气量较大, 均超过 500 mL; 蛋黄含量在 40%~70% 时, 面团的产气量较少, 为 472.67~480.83 mL。但是, 由方法 1.2.4 测得的产气量还可能包括由于面团内部气孔破裂而溢出的气体量^[22], 并不能完全代表面团的发酵能力。

发酵性能是面团产气能力和持气能力的综合体现, 最直观的表现就是面团的发酵体积^[23]。如图 2B 所示, 产气量较大的面团(空白组和 EY0 组)其发酵体积却相对较小, 且在发酵 60 min 后体积不再增大, 说明面团的面筋网络结构较弱, 无法保持住二氧化碳气体, 导致大量气体外溢, 面团膨胀受阻。添加含有蛋黄的复配蛋液的面团的发酵速度提升, 当蛋黄比例在 60%~90% 时, 发酵体积在 100 min 内没有出现停滞并一直保持上升趋势, 100 min 后可能会继续膨胀, 这表明蛋黄使面团的漏气时间点向后推移, 增强了面团的发酵耐力。随蛋液中蛋黄含量的增加, 面团发酵体积呈现先上升后下降的趋势, 在蛋黄比例为

70% 时发酵体积最大, 为 395 mL。Sang 等^[9]研究表明, 蛋黄液能够增加面团的膨胀体积, 延迟其破裂时间, 使面团的持气性提高。本文研究结果与其一致。一方面这是由于蛋黄中具有表面活性的极性脂类物质能够吸附在气孔的气液界面上^[24], 有利于稳定气孔而不易破裂, 提高面团的持气能力; 另一方面蛋黄中的蛋白质通过与面筋蛋白作用来增加面筋网络的强度, 提升面团的膨胀延展性^[25]。此外, 马启昱等^[26]研究表明棕榈油能够稳定面团中的气孔, 提高面团持气能力。Ozcan^[27]研究发现分别添加迷迭香精油和月桂油的面团均具有较高的延展性和发酵体积。Debonne 等^[28]研究发现黑醋栗籽油、孜然籽油和小麦胚芽油能够提高酵母活性, 促进面团醒发。由此可见, 脂类物质对面团发酵性能的改善有重要意义。

2.3 复配蛋液对小麦面团动态流变特性的影响

通过研究面团的动态流变特性可了解面团性质和内部结构的变化, 对其烘焙产品如面包的生产加工

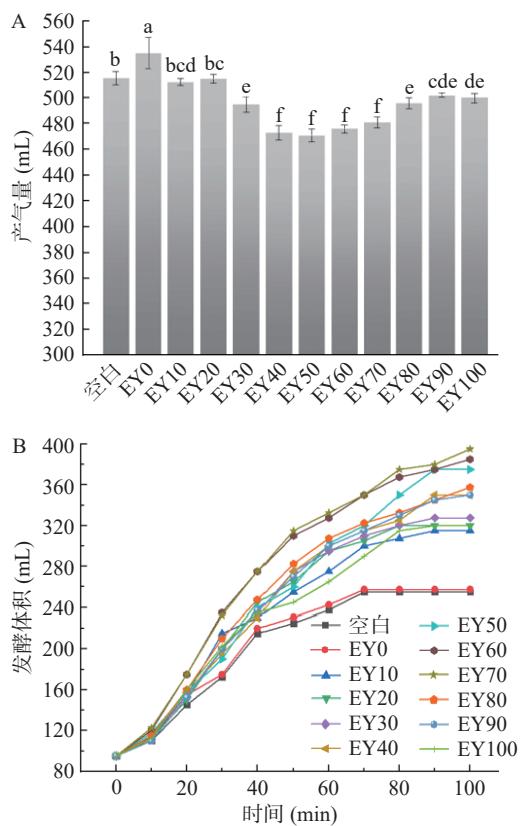


图 2 小麦面团的产气量(A)和发酵体积(B)

Fig.2 Gas production (A) and fermentation volume (B) of wheat dough

有着重要的指导意义。储能模量 G' 反映了面团的弹性性质, 损耗模量 G'' 反映了面团的黏性性质。损耗因子 $\tan\delta$ 是 G'' 与 G' 的比值, $\tan\delta$ 越大, 面团的黏性比例越大, 液体流动属性越强; 反之, 面团的弹性比例越大, 固体属性越强^[29]。

从图 3 可看出, 各组面团的 $\tan\delta$ 始终小于 1, 说明面团的储能模量大于损耗模量, 面团偏向于固体弹性属性^[30]。与空白组面团相比, 仅添加蛋清液的面团的 G' 和 G'' 均降低, 表明面团的整体粘弹性下降; $\tan\delta$ 增大, 表明其固体性质减弱, 液体流动属性增强。Sang 等^[31] 向小麦粉中添加 4% 蛋清粉后也发现混合面团的 G' 和 G'' 均降低, 并进一步通过凝胶电泳条带分析发现蛋清蛋白并未与面筋蛋白发生交联反应。这说明蛋清液中的蛋白质只是充当具有润滑效应的惰性物质填充在面筋蛋白和淀粉颗粒之间, 降低了两者之间的摩擦力, 使面团变软, 储能模量变小, 流动性质增强。随蛋黄比例的增加, G' 和 G'' 均呈现先升高后降低的趋势, 表明面团的整体黏弹性先提升后下降, 当蛋液中蛋黄含量为 70% 时, G' 与 G'' 均最大, 整体黏弹性最佳, $\tan\delta$ 最小, 弹性性质最突出。面团黏弹性升高的原因可能是蛋黄蛋白与面筋蛋白通过二硫键^[32-33] 进行共价结合, 形成致密的三维面筋网络复合体, 使面团内部结构得到强化。类似地, 罗磊等^[34] 研究表明, 向面团中添加牡丹花蕊蛋白后面筋网络结构的强度提高, 面团的黏弹性增加。石长硕

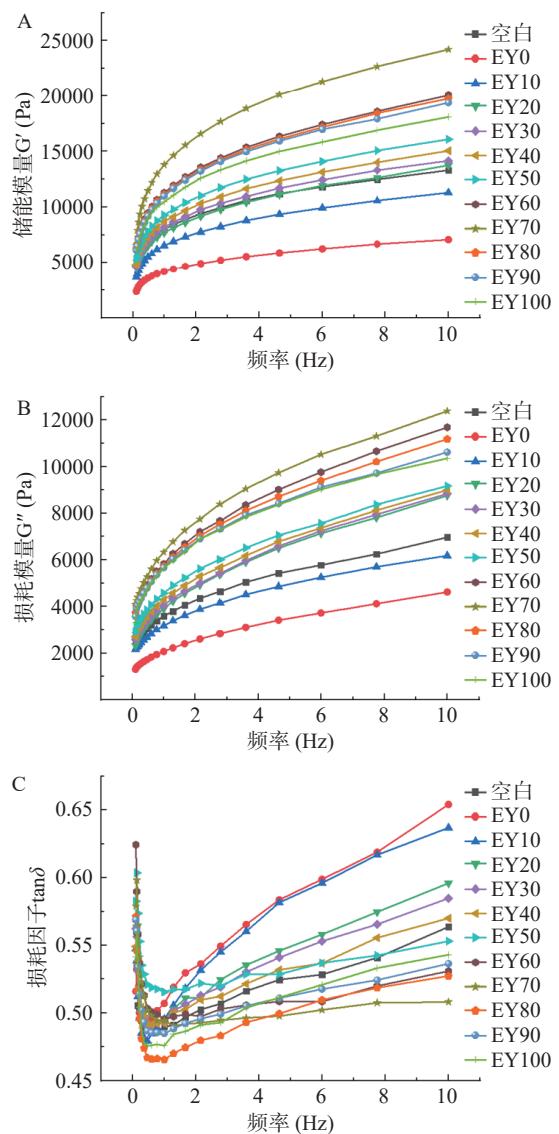


图 3 小麦面团的频率扫描曲线

Fig.3 Frequency scanning curve of wheat dough

等^[35] 研究发现, 添加大豆分离蛋白后, 大豆分离蛋白与面筋蛋白相互作用产生新的交联结构, 使面筋的 G' 和 G'' 均提高, 赋予面团更高黏弹性。然而, 当复配蛋液中蛋黄含量过高时($>70\%$), 过多的蛋黄脂质也会在一定程度上减弱面筋蛋白之间的交联作用, 影响面筋网络的紧密性, 导致面团内部稳定性下降。类似研究也证实过量的油脂(棕榈油添加量 $>8\%$)会限制面筋网络的形成, 导致面团黏弹性变差^[26]。

2.4 复配蛋液对小麦面团蠕变-恢复特性的影响

蠕变与恢复特性可用来表征面团内部结构的强度和抵抗形变能力。对具有黏弹性的面团施加一定的外界应力时, 其会因为内部组织的变化发生形变, 移除应力后, 面团会发生部分弹性恢复^[36]。发生形变的程度用应变值表示, 应变值越小, 表明面团发生的形变越小, 面团内部结构越稳定; 反之, 结构则不稳定。

从图 4 可以看出, 各组面团的应变值在蠕变阶段(0~150 s)均随时间的推移而不断升高, 撤除应力

后面团的应变值急剧下降而后慢慢趋于平缓。与空白组相比,仅添加蛋清液的面团的应变值明显增大,且高于所有面团组,这表明蛋清液使面团的内部稳定性变差。由2.3的研究结果可知,蛋清液会降低面团的黏弹性,使面团的流动性增强,因此面团更易发生形变。随着蛋黄比例的升高,面团发生的形变明显变小,蛋液中蛋黄比例大于10%时,各组面团的应变值均小于空白组。这可能是因为蛋黄液中有许多蛋白质和脂类物质具有两亲性,可以作为乳化剂结合更多的淀粉分子或面筋蛋白,从而使面团各种组分之间的连接更加致密,结构更强。类似研究显示,甘油二酯、卵磷脂等亲水亲油性物质均能通过与面筋蛋白和淀粉相互作用来增加面团的强度^[37-38]。当蛋黄含量为70%时,面团发生的形变最小,说明此时面团抵抗形变的能力最强,内部结构最稳定。这与2.3频率扫描结果一致。

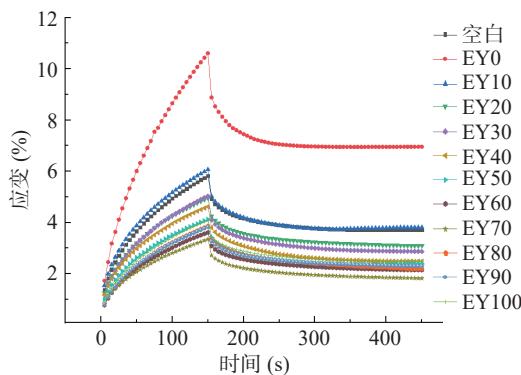


图4 小麦面团的蠕变-恢复曲线
Fig.4 Creep-recovery curve of wheat dough

2.5 复配蛋液对小麦面团微观结构的影响

不同蛋黄比例的复配蛋液对面团微观结构产生的影响如图5所示。从图5A可观察到,未添加蛋液的面团内部有许多孔洞,面筋网络松散且连续性较差,淀粉颗粒与面筋结构结合不紧密,部分淀粉颗粒暴露于面筋网络表面。与空白组相比,仅添加蛋清液的面团内部孔洞变大,且面筋结构出现较大断裂。随着蛋液中蛋黄比例的增加,面团的孔洞数量减少且孔洞变小,面筋网络的连续性得到改善,尤其是蛋液中蛋黄比例在50%~70%时,面筋蛋白网络结构致密均匀,淀粉颗粒与其紧密结合呈粘连状态,面团内部细腻有序,这进一步证实了适量的蛋黄能够提高面筋网络的交联度,改善面团的内部结构,提升其加工性能,与上述面团流变学研究结果一致。从图5J~图5L可发现,随着蛋黄比例的增加,淀粉颗粒与面筋网络的结合紧密度下降,面筋结构连续性变差,内部组织变得粗糙并开始出现较大孔洞,这表明过多的蛋黄也会对面团结构产生不利的影响,导致面团的稳定性降低。这与上述面团流变学特性研究结果一致。

2.6 复配蛋液对面包比体积和高径比的影响

面包的比体积反映了面包的蓬松度,直接影响

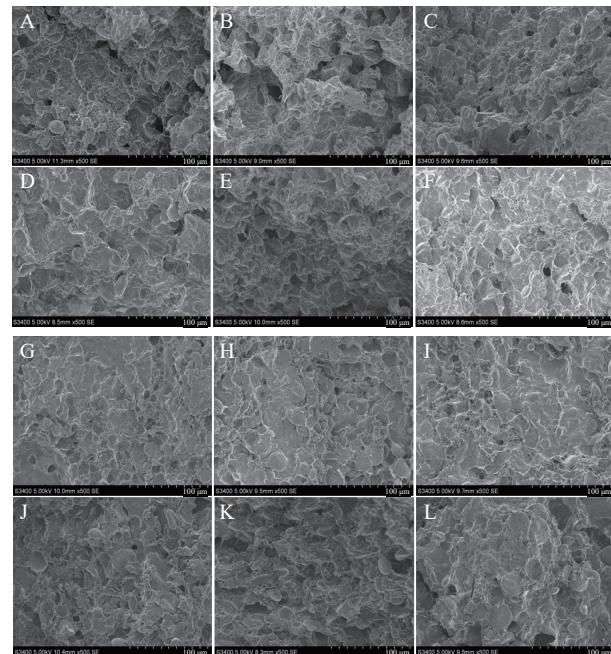


图5 小麦面团的扫描电镜图(500×)

Fig.5 Scanning electron microscope of wheat dough (500×)

注: A 代表空白对照组; B、C、D、E、F、G、H、I、J、K、L 分别代表添加蛋黄比例为 0%、10%、20%、30%、40%、50%、60%、70%、80%、90%、100%(wt%)复配蛋液的面团。

面包的外形、口感和内部组织。从图6可以看出,与空白组相比,添加SSL的面包的比体积有显著提升。这是因为SSL作为阴离子型乳化剂,可与面筋蛋白相互作用,形成SSL-面筋蛋白复合物,使面筋网络变得更加致密和有弹性,提高面团持气能力,从而增大面包的体积。添加蛋清液的面包的比容与空白组相比略有降低,但差别并不显著。面团的发酵性能对成品面包的比体积有重要影响。由2.2的研究结果可知,仅添加蛋清液的面团的持气能力较差,发酵体积较小,进而会导致成品面包的体积变小。桑尚源^[39]发现添加蛋清液的面包的高度降低,体积变小。本实验结论与其一致。Masure等^[40]研究发现用蛋清粉部分替代大米粉后,大米面包的体积增大。这与本研究结果相反。推测可能是小麦粉和大米粉之间成分的差异导致蛋清的作用效果不同。蛋黄比

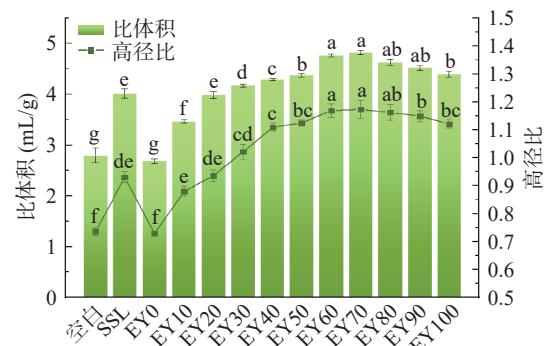


图6 复配蛋液对面包比体积、高径比的影响

Fig.6 Effect of reconstituted liquid egg on specific volume and aspect ratio of bread

例大于 20% 后, 面包的比容均显著高于 SSL 组, 这说明蛋黄比例高于 20% 的复配蛋液对面包比容的提升效果比 SSL 好。当蛋黄比例为 70% 时, 面包的比体积最大, 为 4.82 mL/g, 比 SSL 组提升 26.5%。面包的高径比反映了面包的挺立度。从图中可以发现, 面包的高径比与比体积的变化趋势一致。其中, 添加蛋黄比例高于 30% 的复配蛋液的面包的高径比值均大于 1, 即面包的高度大于直径, 此时面包的外形较美观。

2.7 复配蛋液对面包质构特性的影响

质构特性是衡量面包食用品质的重要参数, 能够客观地反映面包的口感。食用品质较好的面包呈现出较低的硬度、咀嚼性和胶着性以及较高的弹性、内聚性与回复性^[41]。由表 1 可知, 加入 SSL 可降低面包的硬度和咀嚼性, 提升弹性、内聚性和回复性, 改善面包的口感。有研究表明 SSL 在面包烘烤时可与淀粉颗粒形成络合物, 降低淀粉的结晶度, 从而阻抑面包变硬^[42]。与空白组相比, 添加蛋清液的面包的弹性、内聚性增大, 这可能是因为蛋清蛋白具有热凝胶特性, 在烘烤过程中增加了面包各组分间的结合紧密度^[43]。但蛋清液却增加了面包的硬度、胶着性和咀嚼性, 使其变得硬实、黏牙以及吞咽难度增大。含有蛋黄的复配蛋液对降低面包硬度有着良好的效果, 蛋黄比例为 50%~80% 时, 面包的硬度相较空白组降低 64.9%~74.3%, 较 SSL 组降低 47.9%~61.8%。这可能是因为高温下蛋黄中的油脂分子与直链淀粉形成脂质-淀粉复合物^[44], 可防止或减少淀粉形成凝胶变硬, 起到软化面包的作用。当蛋黄比例高于 20% 时, 面包的质构品质均优于 SSL 组。其中, 添加蛋黄比例为 70% 的复配蛋液的面包的硬度、咀嚼性和胶着性最小; 内聚性最高, 为 0.848, 较 SSL 组增加 13.45%; 弹性和回复性也较好, 为 0.975 和 0.411, 比 SSL 组分别提高 5.9% 和 11.6%。综合来看, 蛋黄比例为 70% 的复配蛋液对面包质构品质的改善效果

最好。

2.8 复配蛋液对面包纹理结构的影响

由图 7 各组面包的中间切片图和表 2 数据可知, 空白组面包的气孔面积小、数量少, 气孔分布不均匀, 切面紧实, 外形质地与馒头相似。SSL 组面包的孔隙率和气孔均面积与空白组相比均有显著提升 ($P<0.05$), 说明添加 SSL 后面团的持气能力变好。添加蛋清液的面包的气孔面积和数量较空白组有所增大, 但其欠缺蓬松感, 切面较空白组也更为紧实。实含有蛋黄的复配蛋液使面包的蓬松度得到很大改善, 气孔数量增多, 气孔面积也明显增大, 这进一步说明了蛋黄能够增强面团中气泡的稳定性, 提高面团的持气能力, 赋予面包疏松多孔的特质。当蛋黄比例为 40%~70% 时, 面包的蓬松感较好, 孔隙率较高, 气孔均面积较大, 气孔形状圆润且分布均匀, 切片表面平整, 内部组织细腻光滑, 具备面包特有的纹路特征, 此时内部纹理结构较佳, 明显优于 SSL 组。蛋黄比例大于 70% 后, 面包气孔大小开始变得不均匀, 并出现狭长状气孔, 组织纹路变得粗糙, 蓬松度也降低。

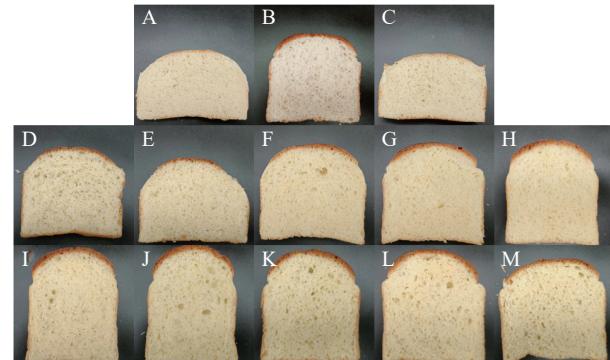


图 7 面包样品的中间切片图

Fig.7 Center slices of bread samples

注: A 代表空白对照组面包; B 代表添加 SSL 的面包; C、D、E、F、G、H、I、J、K、L、M 分别代表添加蛋黄比例为 0%、10%、20%、30%、40%、50%、60%、70%、80%、90%、100%(wt%)复配蛋液的面包。

表 1 复配蛋液对面包质构特性的影响

Table 1 Effect of reconstituted liquid egg on the texture characteristics of bread

面包样品	硬度(g)	弹性	内聚性	胶着性	咀嚼性(g)	回复性
空白	1017.23±13.02 ^c	0.882±0.015 ^g	0.652±0.024 ^g	663.889±32.76 ^c	602.932±16.68 ^c	0.311±0.091 ^c
SSL	713.21±18.12 ^d	0.934±0.004 ^{de}	0.734±0.017 ^{ef}	553.671±22.51 ^d	478.875±31.25 ^d	0.368±0.021 ^d
EY0	1532.54±44.27 ^a	0.932±0.001 ^{de}	0.672±0.003 ^g	1009.490±26.73 ^a	921.075±21.36 ^a	0.284±0.008 ^c
EY10	1135.50±39.51 ^b	0.927±0.005 ^f	0.728±0.006 ^{ef}	827.653±36.06 ^b	760.766±29.51 ^b	0.302±0.009 ^c
EY20	760.26±15.93 ^d	0.928±0.006 ^f	0.741±0.010 ^{ef}	563.690±4.07 ^d	523.078±1.08 ^d	0.362±0.007 ^d
EY30	538.56±22.44 ^e	0.943±0.008 ^{cd}	0.762±0.011 ^{de}	410.361±17.67 ^e	387.045±18.71 ^e	0.389±0.003 ^{bcd}
EY40	455.67±32.76 ^f	0.959±0.014 ^{bc}	0.789±0.025 ^{cd}	367.091±15.34 ^f	358.624±28.13 ^{ef}	0.394±0.026 ^{abc}
EY50	356.62±23.08 ^{gh}	0.970±0.012 ^{ab}	0.832±0.028 ^{ab}	300.641±22.89 ^g	300.550±15.97 ^{gh}	0.421±0.023 ^{ab}
EY60	292.95±15.65 ⁱ	0.985±0.009 ^a	0.845±0.021 ^a	248.339±12.92 ^h	244.579±10.56 ⁱ	0.430±0.016 ^a
EY70	261.50±18.21 ⁱ	0.975±0.011 ^{ab}	0.848±0.024 ^a	225.727±21.00 ^h	219.224±20.92 ⁱ	0.411±0.010 ^{abc}
EY80	310.34±10.51 ^{hi}	0.970±0.004 ^{ab}	0.810±0.004 ^{bc}	245.275±8.39 ^h	236.891±6.28 ⁱ	0.381±0.006 ^{cd}
EY90	381.24±25.39 ^g	0.966±0.006 ^{ab}	0.793±0.009 ^{cd}	298.431±15.05 ^g	289.572±14.51 ^h	0.389±0.007 ^{bcd}
EY100	447.81±11.80 ^f	0.946±0.002 ^{cd}	0.784±0.003 ^{cd}	350.966±10.44 ^f	331.910±10.36 ^{fg}	0.375±0.014 ^{cd}

注: 同一列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$), 表2同。

表2 复配蛋液对面包纹理结构的影响

Table 2 Effect of reconstituted liquid egg on the cell texture of bread

面包样品	孔隙率(%)	气孔均面积(mm^2)	气孔密度(cells/cm^2)
空白	14.67±0.71 ^f	0.28±0.01 ^g	49±2.6 ^g
SSL	19.84±0.33 ^e	0.33±0.05 ^e	56±2.0 ^{def}
EY0	16.48±0.45 ^f	0.30±0.03 ^f	52±1.9 ^{fg}
EY10	18.91±0.98 ^e	0.33±0.01 ^e	54±3.7 ^{ef}
EY20	19.52±0.59 ^e	0.33±0.06 ^e	56±1.0 ^{def}
EY30	21.76±1.07 ^d	0.34±0.09 ^e	57±5.2 ^{cde}
EY40	23.38±0.64 ^{cd}	0.36±0.02 ^d	60±4.0 ^{bcd}
EY50	24.93±0.74 ^e	0.39±0.06 ^e	63±1.8 ^{ab}
EY60	28.12±1.27 ^a	0.43±0.08 ^b	65±2.8 ^a
EY70	28.82±0.31 ^a	0.44±0.14 ^b	65±5.1 ^a
EY80	27.93±1.81 ^{ab}	0.47±0.07 ^a	62±3.3 ^{ab}
EY90	27.54±1.44 ^{ab}	0.48±0.05 ^a	59±2.6 ^{bcd}
EY100	26.35±2.32 ^b	0.48±0.10 ^a	57±4.8 ^{cde}

3 结论

本文研究了不同蛋清蛋黄比例的复配蛋液对小麦面团流变学特性以及面包烘焙品质的影响,得到以下结论:与空白组相比,仅添加蛋清液的面团的各项流变学指标性能变差,其面包品质也降低。含有蛋黄的复配蛋液使面团的吸水率增加,形成时间和稳定时间延长,持气能力提高,发酵体积增大。面团的黏弹性随蛋液中蛋黄比例的增加呈先上升后下降的趋势,应变值呈先下降后上升的趋势,当蛋黄比例为70%时,面团的黏弹性最大,应变值最小,内部结构最稳定。SSL和含有蛋黄的复配蛋液均能改善面包的比体积、质构和内部纹理结构等烘焙品质。当蛋黄比例大于20%时,复配蛋液对面包的比体积、质构品质和内部纹理结构的改良效果优于SSL,其中,添加蛋黄比例为70%的复配蛋液对面包烘焙品质的提升效果最好,此时面包比容最大;硬度、咀嚼性和胶着性最低,内聚性最高,弹性和回复性也较好;内部组织细腻平整,孔隙率最高,气孔面积较大且分布均匀。本研究可为面团和面包品质的改良提供一定的理论依据,为焙烤型蛋液产品的开发提供一定的参考。后续研究可采用物理、化学或生物手段对筛选出的复配蛋液进行处理,来进一步提升蛋液对面包品质的改良效果和蛋液附加值。

© The Author(s) 2025. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

- [1] 马美湖,赵一夫,邱宁,等.2012年美国鸡蛋产业考察报告[J].*中国家禽*,2012,34(14):1-9. [MA Meihu, ZHAO Yifu, QIU Ning, et al. 2012 American egg industry investigation report[J]. *China Poultry*, 2012, 34(14): 1-9.]
- [2] 全其根.液蛋加工技术展望[J].农产品加工,2014(1):16-17. [TONG Qigen. Technical prospect of liquid-egg processing[J]. *Farm Products Processing*, 2014(1): 16-17.]
- [3] 王喜琼,刘旭明,李凤宁,等.我国液蛋生产情况调研报告[J].*中国畜牧杂志*,2018,54(10):134-137. [WANG Xiqiong, LIU Xuming, LI Fengning, et al. Investigation report on liquid egg production in China[J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2018, 54(10): 134-137.]
- [4] 田晓红,姜平,刘明,等.我国市场全麦面包品质现状分析[J].*中国粮油学报*,2023,38(9):57-64. [TIAN Xiaohong, JIANG Ping, LIU Ming, et al. Analysis on quality of whole wheat bread in Chinese market[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2023, 38(9): 57-64.]
- [5] REHAULT-GODBERT S, GUYOT N, NYS Y. The golden egg: nutritional value, bioactivities, and emerging benefits for human health[J]. *Nutrients*, 2019, 11(3): 684.
- [6] 郑颜,胥清翠,范丽霞,等.鸡蛋营养品质评价的研究进展[J].*中国食物与营养*,2022,28(1):45-50. [ZHENG Yan, XU Qingcui, FAN Lixia, et al. Research progress on nutritional quality evaluation of eggs[J]. *Food and Nutrition in China*, 2022, 28(1): 45-50.]
- [7] MASURE G H, WOUTERS G A, FIERENS E, et al. Impact of egg white and soy proteins on structure formation and crumb firming in gluten-free breads[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 95: 406-417.
- [8] 何韵然,李金玲,王展,等.蛋黄粉对小麦粉挂面品质的影响[J].*食品研究与开发*,2023,44(15):37-42. [HE Yunran, LI Jinling, WANG Zhan, et al. Effect of egg yolk powder on the quality of wheat flour and noodles[J]. *Food Research and Development*, 2023, 44(15): 37-42.]
- [9] SANG S Y, XU D, MA Y S, et al. Effect of egg yolk on the properties of wheat dough and bread[J]. *Food Bioscience*, 2020, 37: 100689.
- [10] GENE A, KRISTIN D, KATHRYN J, et al. A comparison of egg white and egg yolk in gluten-free bread[J]. *Food Chemistry Advances*, 2022, 1: 100142.
- [11] 王树才.鸡蛋深加工关键装备应用现状及其技术研究方向[J].*中国家禽*,2015,37(21):1-5. [WANG Shucai. Application status and technical research direction of key equipment for egg deep processing[J]. *China Poultry*, 2015, 37(21): 1-5.]
- [12] WANG P, LEE T C, XU X M, et al. The contribution of glutenin macropolymer depolymerization to the deterioration of frozen steamed bread dough quality[J]. *Food Chemistry*, 2016, 211: 27-33.
- [13] 袁翊榕,肖宁,徐倩倩,等.乳酸菌发酵菊芋全粉对面团及米糕品质的影响[J].*中国食品学报*,2022,22(11):256-267. [YUAN Yirong, XIAO Ning, XU Qianqian, et al. Effect of fermented jerusalem artichoke on the quality of brown rice batter and steamedbread[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2022, 22(11): 256-267.]
- [14] HU H, ZHOU X Y, ZHANG Y X, et al. Influences of particle size and addition level on the rheological properties and water mobility of purple sweet potato dough[J]. *Foods*, 2023, 12(2): 398.
- [15] 陈前,李娜,贺晓光,等.瓜尔豆胶对马铃薯-小麦混合粉面团质构和流变特性的影响[J].*食品工业科技*,2020,41(6):198-203. [CHEN Qian, LI Na, HE Xiaoguang, et al. Effect of guar gum on texture and rheology property of potato-wheat dough[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(6): 198-203.]
- [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] 任妍妍,张凤婕,张天语,等.甘薯生浆对面团特性及馒头品

- 质的影响[J]. 食品科技, 2019, 44(3): 158–164. [REN Yanyan, ZHANG Fengjie, ZHANG Tianyu, et al. Effect of fresh sweet potato pulp on dough characteristics and quality of steamed bread[J]. Food Science and Technology, 2019, 44(3): 158–164.]
- [18] 崔会娟, 郭兴凤. 面团流变学特性与面制品品质的关系[J]. 粮食加工, 2015, 40(2): 28–31. [CUI Huijuan, GUO Xingfeng. The relationship between the rheological characteristics of dough and the quality of dough products[J]. Grain Processing, 2015, 40(2): 28–31.]
- [19] 王富刚. 杏仁油对面粉理化指标的影响研究[J]. 粮食与油脂, 2022, 35(5): 80–82. [WANG Fugang. Study on the effect of almond oil on the physical and chemical indexes of flour[J]. Cereals & Oils, 2022, 35(5): 80–82.]
- [20] ZHANG Y, WANG X X, GUAN X. Effects of adding quinoa flour on the composite wheat dough: A comprehensive analysis of the pasting, farinograph and rheological properties[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2022, 57(11): 7099–7106.
- [21] 张爱霞, 苗盼盼, 李朋亮, 等. 乳酸菌对酵母菌发酵多谷物杂粮面包品质的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(22): 129–135. [ZHANG Aixia, MIAO Panpan, LI Pengliang, et al. Impact of lactic acid bacteria on the quality of yeast-fermented multigrain bread[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(22): 129–135.]
- [22] LIU T J, LI Y, SADIQ F A, et al. Predominant yeasts in Chinese traditional sourdough and their influence on aroma formation in Chinese steamed bread[J]. Food Chemistry, 2018, 242: 404–411.
- [23] 汪名春, 钱秀丽, 夏传礼, 等. 黄秋葵全粉对小麦面团流变学特性的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(22): 122–128. [WANG Mingchun, QIAN Xiuli, XIA Chuanli, et al. Effect of okra powder on the rheological properties of wheat dough[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(22): 122–128.]
- [24] ANTON M. Egg yolk: Structures, functionalities and processes[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2013, 93(12): 2871–2880.
- [25] SANG S, CHEN Y, ZHU X, et al. Effect of egg yolk lipids on structure and properties of wheat starch in steamed bread[J]. Journal of Cereal Science, 2019, 86: 77–85.
- [26] 马启昱, 刘忠义, 付满, 等. 棕榈油添加量对面团质量的影响[J]. 食品与机械, 2022, 38(5): 179–183. [MA Qiyu, LIU Zhongyi, FU Man, et al. Effect of the amount of palm oil on dough quality[J]. Food & Machinery, 2022, 38(5): 179–183.]
- [27] OZCAN M M. Effect of some essential oils on rheological properties of wheat flour dough[J]. International Journal of Food Sciences and Nutrition, 2009, 60(2): 176–181.
- [28] DEBONNE E, LEYN D I, VERWAEREN J, et al. The influence of natural oils of blackcurrant, black cumin seed, thyme and wheat germ on dough and bread technological and microbiological quality[J]. LWT, 2018, 93: 212–219.
- [29] PERESSINI D, SENSIDONI A. Effect of soluble dietary fibre addition on rheological and breadmaking properties of wheat doughs[J]. Journal of Cereal Science, 2008, 49(2): 190–201.
- [30] LOU X Q, YUE C H, LUO D L, et al. Effects of natural inulin on the rheological, physicochemical and structural properties of frozen dough during frozen storage and its mechanism[J]. Food Science and Technology, 2023, 184(2): 78–86.
- [31] SANG S Y, ZHANG H, XU L, et al. Functionality of ovalbumin during Chinese steamed bread-making processing[J]. Food Chemistry, 2018, 253: 203–210.
- [32] ANTON M, MARTINET V, DALGALARRONDO M, et al. Chemical and structural characterisation of low-density lipoproteins purified from hen egg yolk[J]. Food Chemistry, 2003, 83(2): 175–183.
- [33] DELCOUR A J, JOYE J I, PAREYT B, et al. Wheat gluten functionality as a quality determinant in cereal-based food products[J]. Annual Review of Food Science and Technology, 2012, 3(1): 469–492.
- [34] 罗磊, 夏迎利, 杨浩昆, 等. 牡丹花蕊蛋白对面团和面筋蛋白特性的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(4): 42–47. [LUO Lei, XIA Yingli, YANG Haokun, et al. Effect of peony stamen protein on dough and gluten protein properties[J]. Food Science, 2023, 44(4): 42–47.]
- [35] 石长硕, 张明, 赵方圆, 等. 大豆蛋白对小麦面筋蛋白特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(19): 174–179. [SHI Changshuo, ZHANG Ming, ZHAO Fangyuan, et al. Effects of soybean proteins on the properties of wheat gluten[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(19): 174–179.]
- [36] 王玉颜, 刘海波, 杨溶, 等. 淀粉种类对重组粉面团的流变学特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(3): 112–118. [WANG Yuyan, LIU Haibo, YANG Rong, et al. Effects of starch types on rheological properties of reconstituted dough[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(3): 112–118.]
- [37] 陈永莹, 曹家宝, 王霞, 等. 甘油二酯对面团特性及面包品质的影响[J/OL]. 食品与发酵工业: 1–11[2024-08-22]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802.ts.039702>. [CHEN Yongying, CAO Jiabao, WANG Xia, et al. Effect of diacylglycerol on characteristics of dough and quality of bread[J/OL]. Food and Fermentation Industries: 1–11[2024-08-22]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802.ts.039702>.]
- [38] KUMAR A K, SHARMA K G. The effect of surfactants on multigrain incorporated short biscuit dough and its baking quality[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2018, 12(2): 1360–1368.
- [39] 桑尚源. 鸡蛋改善馒头与面包品质的机理探究[D]. 无锡: 江南大学, 2020. [SANG Shangyuan. Study on the mechanism of quality improvement in steamed and baked bread with hen egg[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2020.]
- [40] MASURE G H, WOUTERS G A, FIERENS E, et al. Electrical resistance oven baking as a tool to study crumb structure formation in gluten-free bread[J]. Food Research International, 2018, 116: 925–931.
- [41] 王博, 张维清, 李鹏, 等. 不同发酵类型乳酸菌对全麦面包品质影响研究[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(17): 180–186. [WANG Bo, ZHANG Weiqing, LI Peng, et al. Effects of different fermentation types of lactic acid bacteria on the quality of whole wheatbread[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(17): 180–186.]
- [42] 杨连战, 蔡金鑫, 孟宪伟, 等. 复配改良剂对面包烘焙品质及抗老化的影响[J]. 中国粮油学报, 2023, 38(3): 61–67. [YANG Lianzhan, CAI Jinxin, MENG Xianwei, et al. Effects of compound improver on bread baking qualities and anti-aging[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2023, 38(3): 61–67.]
- [43] NOZAWA M, ITO S, ARAI E. Effect of ovalbumin on the quality of gluten-free rice flour bread made with soymilk[J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 66: 598–605.
- [44] HANIEH S, HAMID R, MAHNAZ A M, et al. Potential application of bioemulsifier RAG-1 as an anti-staling agent in flat bread quality[J]. Journal of Food Science and Technology, 2023, 60(10): 2619–2627.