阿魏酸对全麦面团热机械特性及全麦馒头质构品质的改善作用

苏安祥，杨 琴，李 文，裴 斐*，马高兴，马 宁，胡秋辉
（南京财经大学食品科学与工程学院，江苏省现代粮食流通与安全协同创新中心，
江苏省食用菌保鲜与深加工工程研究中心，江苏 南京 210023）

摘 要：研究阿魏酸（feuric acid，FA）对全麦面团结构和热机械特性影响，探讨添加FA对全麦馒头的质构特性和气孔分布影响规律。通过将不同比例（0.5%、1.0%、1.5%）FA添加到全麦面粉中制成面团，并利用Mixolab混合试验仪测定FA对全麦面团中面筋蛋白的弱化程度、淀粉的糊化特性以及酶降解速率等特性。同时，通过扫描电子显微镜分析面团的微观结构，并通过研究全麦馒头的质构特性和气孔分布等指标评估全麦馒头的品质变化情况。结果表明，与对照组相比，添加FA显著缩短了全麦面团的形成时间与稳定时间（$P<0.05$），其中，0.5% FA全麦面团的形成时间和稳定时间较对照组分别缩短21.02%和42.41%，添加FA能够促进面筋蛋白连续、均匀网状结构的形成，显著提高全麦面团的持水能力，有效减缓贮藏期间全麦馒头芯中的水分损失，使全麦馒头比容提高20.26%，从而显著改善全麦馒头微观结构以及弹性、内聚性等质构特性。然而，高添加量的FA（1.0%～1.5%）会导致面筋网络结构的断裂，对全麦面团流变特性和质构品质产生负面影响。该研究为解决传统全麦馒头口感粗糙、质地干硬等关键问题提出了新的解决方案，并为改善全麦面团流变特性与全麦馒头的质构品质提供理论依据。

关键词：阿魏酸；全麦面团；热机械特性；馒头；质构特性

Effect of Ferulic Acid on Thermo-Mechanical Properties of Whole Wheat Dough and Texture Quality of Whole Wheat Steamed Bread

SU Anxiang, YANG Qin, LI Wen, PEI Fei*, MA Gaoxing, MA Ning, HU Qiuhui
(Collaborative Innovation Center for Modern Grain Circulation and Safety, Jiangsu Province Engineering Research Center of Edible Fungus Preservation and Intensive Processing, College of Food Science and Engineering, Nanjing University of Finance and Economics, Nanjing 210023, China)

Abstract: This study investigated the effects of adding ferulic acid (FA) on the structural and thermo-mechanical properties of whole wheat dough as well as the texture quality and pore distribution of steamed whole wheat bread. The weakening degree of gluten proteins, starch gelatinization properties and whole wheat doughs incorporated with different proportions (0.5%, 1.0% and 1.5%) of FA were measured using a Mixolab apparatus. The microstructure was examined through scanning electron microscope (SEM). The quality changes of steamed whole wheat bread were evaluated by analyzing its textural properties and pore distribution. The results showed that compared with the control group, the addition of FA significantly shortened dough development time and stability time ($P < 0.05$), which were shortened by 21.02% and 42.41% upon the addition of 0.5% FA, respectively. The addition of 0.5% FA also promoted gluten proteins to form a continuous and uniform network structure, enhanced the water-holding capacity of whole wheat dough, effectively slowed down water loss from the core of steam whole wheat bread, and increased the specific volume of steamed whole wheat bread by 20.26%, thereby markedly improving the texture quality of steamed whole wheat bread in terms of microstructure, elasticity and cohesiveness. However, higher concentrations of FA (1.0%–1.5%) could lead to rupture of the gluten network structure, which negatively affected the rheological properties and texture quality of whole wheat dough. The results of this study will

收稿日期：2023-12-01
基金项目：江苏省重点研发计划（现代农业）项目（BE2023357）；江苏高校优势学科建设工程资助项目（PAPD）
第一作者简介：苏安祥（1984—）（ORCID: 0000-0001-7721-9885），男，讲师，博士，研究方向为食品科学。
E-mail: xiangansu@126.com
*通信作者简介：裴斐（1987—）（ORCID: 0000-0001-5063-6339），男，教授，博士，研究方向为农产品贮藏。
E-mail: feipei87@163.com

provide a new solution to the key problems of traditional steamed whole wheat bread such as rough taste and hard texture and provide the theoretical basis for improving the rheological properties of whole wheat dough and the texture quality of steamed whole wheat bread.

Keywords: ferulic acid; whole wheat dough; thermo-mechanical characteristics; steamed bread; texture properties

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20231201-006

中图分类号：TS202.1 文献标志码：A 文章编号：1002-6630（2024）05-0024-07

引文格式：

苏安祥, 杨琴, 李文, 等. 阿魏酸对全麦面团热机械特性及全麦馒头质构品质的改善作用[J]. 食品科学, 2024, 45(5): 24-30. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20231201-006. http://www.spkx.net.cn

SU Anxiang, YANG Qin, LI Wen, et al. Effect of ferulic acid on thermo-mechanical properties of whole wheat dough and texture quality of whole wheat steamed bread[J]. Food Science, 2024, 45(5): 24-30. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20231201-006. http://www.spkx.net.cn

身体健康与饮食因素密切相关，有研究对1990—2017年间全球195 个国家调查分析，发现全谷物食品的摄入量过低是导致健康风险的第三大因素[1]。同时，《中国居民膳食指南（2022年）》建议每天摄入全谷物和杂豆类食品50～150 g，并着重强调了摄入全谷物的重要性。目前我国80%的成人每天全谷物摄入量不足50 g，全谷物食品口感差、质地硬、不松软是其主要原因。全麦食品作为全谷物饮食的重要组成部分，富有膳食纤维、矿物质、维生素、酚酸等，对人体健康具有促进作用[2-3]。然而，麦麸的存在会破坏面筋蛋白网络结构的形成与稳定，影响全麦面团的加工性能和食用品质，严重限制全麦食品产业发展，创新全麦食品品质改良技术是改善其食用品质、提高消费者接受程度的关键。本团队前期建立了植物乳杆菌（CGMCC No.18215）-酵母协同发酵的全麦面团品质调控技术，证明了该技术能够显著促进全麦面团质构品质的提升[4-6]。该研究显示酵母协同发酵可以水解麸皮细胞壁，促进麸皮内游离阿魏酸（feuric acid，FA）的释放。同时，FA的释放含量与全麦面团质构品质的提升呈显著正相关[7-8]。据此，推测FA在全麦面团发酵过程和全麦食品食用品质改善方面发挥了关键调控作用。

FA是麦麸中含量最高的酚酸物质，具有良好的抗氧化、抗炎症和抑菌活性[9-10]。已有研究表明，FA可与淀粉通过静电作用结合，进而降低淀粉的黏度，抑制淀粉短期回生[11-13]。Krekora等[14]发现FA能诱导面筋蛋白多肽链折叠，形成更加有序的结构。Han等[15]发现FA促进了不溶性谷蛋白大聚体的形成，提升了面团的延展性。Qiu Zhiping[16]和Karunaratne[17]等发现FA可以通过疏水力进入直链淀粉的空腔形成新的单螺旋，使得淀粉单螺旋含量显著升高。此外，还有研究发现添加FA能与麸皮中阿拉伯木聚糖发生反应，改变面筋蛋白的聚集状态[18-19]。以上研究均显示FA具备调节全麦食品品质的潜力。然而，FA改善全麦面团热机械特性和全麦食品食用品质的作用机制尚不明确。本实验在前期研究基础上，研究不同FA添加量对全麦馒头品质的影响，分析全麦面团热机械特性变化，研究全麦面团水分分布状态以及微观结构，结合全麦馒头比容、质构特性等指标变化，分析FA对全麦馒头品质影响规律。旨在为解决全麦馒头传统工艺口感粗糙、质地干硬、持气能力差等关键问题提供理论基础，以期提升消费者对全麦馒头产品的接受度，促进全麦食品产业健康发展。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

高活性干酵母 安琪酵母股份有限公司；全麦面粉（麸皮质量分数20%，面筋蛋白质量分数11.0%）南京储备粮管理集团有限公司；FA（≥99%） 北京索莱宝生物科技有限公司。

1.2 仪器与设备

万分之一天平 北京赛多利斯科学仪器有限公司；HWS型恒温恒湿箱 宁波东南仪器有限公司；TM-3000型台式扫描电子显微镜 日本日立公司；NMI20-Analyst核磁共振成像分析仪 苏州纽迈电子科技有限公司；TA-XT plus食品物性测定仪 英国Stable Micro Systems公司；JHMZ和面机、JXFD8醒发箱 宁波东南仪器有限公司；WSYH26A电蒸锅 美的集团股份有限公司；SM302N馒头切片机 新麦机械（无锡）有限公司。

1.3 方法

1.3.1 全麦面团及全麦馒头的制备

参考汤晓娟等[20]的方法并进行部分修改。称取300 g全麦粉、180 g水以及2.4 g高活性干酵母放入针式和面机中搅拌15 min至形成表面光滑的面团，以未添加FA组作为对照组，在对照组配方基础上加入0.5%、1.0%、1.5% FA作为实验组。

将全麦面团在6 mm间距下反复压片15 次，然后分割成70 g小面团，搓圆成型后将面团放入醒发箱，在38 ℃和相对湿度85%条件下醒发60 min，最后蒸制25 min，待馒头冷却后进行测试。

1.3.2 面团热机械特性测定

参考GB/T 37511—2019《粮油检验 小麦粉面团流变学特性测试 混合试验仪法》以及王崇崇[21]的方法，使用Mixolab混合试验仪测定不同FA添加量（0%、0.5%、1.0%、1.5%）对全麦面团热机械特性的影响，采用Chopin＋程序，目标扭矩为（1.10±0.05）Nm，测试速率为80 r/min，将全麦面粉放入揉面钵中混合得到总质量75 g的全麦面团，测试的温度控制分为3 个阶段，第1阶段将全麦面粉在30 ℃条件下加水混合8 min形成全麦面团；第2阶段将全麦面团从30 ℃以4 ℃/min的升温速率加热至90 ℃并在此温度条件下保持7 min；第3阶段将全麦面团以4 ℃/min的降温速率冷却至50 ℃，并在此温度下保持5 min。得到全麦面团形成时间、面团稳定时间、初始黏度（C_1）、蛋白弱化特性（C_2）、淀粉糊化特性（C_3）、淀粉糊化稳定性（C_4）以及淀粉回生特性（C_5）、蛋白弱化速率（α）、淀粉糊化速率（β）以及酶降解速度（γ）等参数。

1.3.3 全麦面团水分分布测定

参照孙磊[22]的方法，采用低场核磁共振测定不同全麦面团中的水分分布状态。准确称取5 g面团样品，均匀放入样品瓶中，然后置于专用核磁管中，采用CPMG脉冲序列测定样品的T_2横向弛豫时间，具体实验参数如下：采样频率200 kHz、谱仪频率19 MHz、射频延时0.05 ms、漂移频率942 174.07 Hz、模拟增益20 Db、90°脉宽13 μs、数字增益3、采样点数300 150、重复采样间隔时间2 000 ms、180度脉宽25 μs、回波时间0.2 ms、回波个数7 500、重复扫描次数32。测试完成后利用纽曼核磁共振分析软件将得到的信号进行反演以获得T_2弛豫时间曲线，迭代次数设为10万 次。

1.3.4 全麦面团微观结构观察

将全麦面团切成小块，冷冻干燥后用双面导电胶固定于扫描电子显微镜样品台上，加速电压15 kV，在放大800 倍条件下对样品微观结构进行观察。

1.3.5 全麦馒头比容及高径比测定

将全麦馒头冷却至室温后，准确称取其质量，利用食品体积测定仪测定馒头的体积，馒头体积与质量之比为馒头比容。然后用游标卡尺测定馒头的高度和直径，馒头的高度与直径之比即高径比。

1.3.6 全麦馒头水分含量测定

全麦馒头冷却后放入自封袋，置于4 ℃冰箱中贮藏，根据GB 5009.3—2010《食品中水分的测定》测定不同FA添加量（0%、0.5%、1.0%、1.5%）全麦馒头在贮藏第0、1、3、5天时馒头芯的水分质量分数。

1.3.7 全麦馒头质构特性测定

利用食品物性测定仪测定全麦馒头的质构参数。利用切片机将馒头切成厚度为10 mm的薄片，放置于样品台上进行测试。选择P/36探头，测试前速率设为1 mm/s，测试速率设为1 mm/s，测试后速率设为3 mm/s，触发力为5 g，两次压缩时间间隔为10 s，压缩程度为50%，记录试样的硬度、弹性、内聚性、胶着度、咀嚼性和回复性。

1.3.8 全麦馒头内部气孔分布测定

利用切片机将不同FA添加量的全麦馒头切成厚度为10 mm的薄片，利用图像扫描仪扫描馒头切片的纹理结构，截取扫描图像中心3 cm×3 cm的区域，用ImageJ软件分析馒头样品的纹理结构，计算样品的气孔密度（气孔数/总面积）、平均气孔面积（孔隙面积/气孔数）、孔隙率（孔隙面积/总面积）。

1.4 数据处理与统计分析

所有实验重复至少3 次。采用SPSS 18.0和Origin Pro 8.0软件对数据进行分析和绘图，通过单因素方差分析中的Duncan检验进行显著性分析（P＜0.05）。

2 结果与分析

2.1 FA对全麦面团热机械特性的影响

利用Mixolab混合试验仪测定一次可得到同时反映谷物粉质特性和黏度特性的相关曲线，已被广泛用于面粉管控和配粉中[23-24]。本研究利用Mixolab试验仪测定了添加FA后全麦面团混合搅拌过程中的热机械特性，结果如表1所示。与对照组相比，添加FA显著缩短了全麦面团的形成时间与稳定时间（P＜0.05），当FA添加量为0.5%时，全麦面团的形成时间和稳定时间相较于对照组分别缩短了21.02%和42.41%，随着FA添加量的增加，全麦面团形成时间与稳定时间缩短幅度趋缓。添加FA后全麦面团的C_1值显著增加（P＜0.05），而C_2值和α绝

表1 不同FA添加量对全麦面粉Mixolab参数的影响

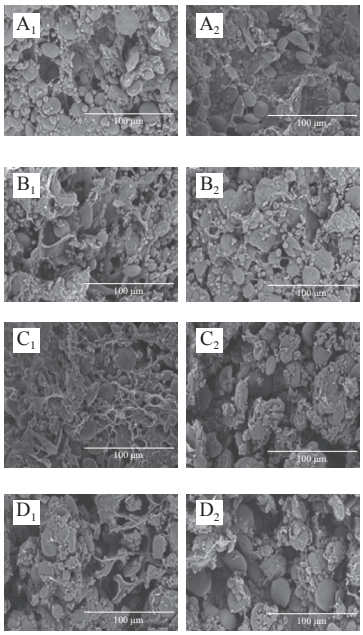
Table 1 Effects of different FA proportions on Mixolab parameters of whole wheat flour

FA添加量/%	形成时间/min	稳定时间/min	C_1/Nm	C_2/Nm	C_3/Nm	C_4/Nm	C_5/Nm	α	β	γ
0	4.33±0.24^a	6.13±0.47^a	1.13±0.13^b	0.51±0.00^a	1.59±0.01^b	1.60±0.12^{ab}	3.01±0.07^b	−0.070^c	0.338^b	−0.008^a
0.5	3.42±0.12^b	3.53±0.26^b	1.22±0.01^a	0.41±0.01^b	1.53±0.05^c	1.69±0.07^a	3.10±0.01^a	−0.036^a	0.402^a	−0.062^b
1.0	3.25±0.07^c	3.48±0.11^c	1.20±0.00^a	0.36±0.01^c	1.66±0.09^a	1.57±0.04^b	3.19±0.01^a	−0.032^a	0.268^d	−0.062^b
1.5	3.22±0.02^c	3.42±0.06^d	1.23±0.03^a	0.37±0.03^c	1.69±0.12^a	1.39±0.03^c	2.97±0.05^b	−0.046^b	0.274^c	−0.068^c

注：同列不同小写字母表示差异显著（P＜0.05），下同。

对值显著降低。此外，随着FA添加量的增加，全麦面团C_3值先下降再上升，而C_4和β值却先上升后下降，其中添加0.5% FA的全麦面团C_3值较对照组显著降低3.77%（$P<0.05$），C_4值和β值分别显著提升5.63%和18.93%（$P<0.05$），表明添加1.0%和1.5% FA虽然促进了淀粉的糊化，但同时也降低了淀粉的糊化热稳定性，这与添加FA后γ绝对值显著增大（$P<0.05$）的结果一致。

2.2 FA对全麦面团微观结构的影响



A～D.分别为添加质量分数0%、0.5%、1.0%、1.5% FA的全麦面团；下标1、2.不同视野区域。

图1 不同FA添加量全麦面团的扫描电子显微镜图

Fig. 1 Scanning electron micrographs of whole wheat dough added with different FA proportions

利用扫描电子显微镜观察不同FA添加量对全麦面团微观结构的影响，结果如图1所示。对照组全麦面团中面筋骨架结构出现断裂，其间黏附着松散的膜状面筋，有部分淀粉颗粒暴露于面筋蛋白网络结构表面，且淀粉颗粒大小分布不均匀，全麦面团出现孔洞结构。这可能是麸皮与面筋蛋白以及淀粉颗粒竞争吸水，导致部分面筋蛋白脱水断裂，淀粉颗粒无法充分吸水膨胀[22]，同时，麸皮粒径较大，破坏了面筋成膜性[25]，不利于保持全麦面团内的CO_2气体。添加0.5% FA的全麦面团中膜状面筋蛋白结构增加，能够包裹住部分淀粉颗粒，同时纤维状面筋骨架结构与对照组相比明显增加，并表现出较好的连续性，且全麦面团中没有出现较大的孔洞结构，表明添加0.5% FA促进了面筋蛋白连续、均匀网状结构的形成。添加1.0% FA时，全麦面团中出现裸露的纤维状面筋网络结构，与其紧密结合的淀粉颗粒数量明显减少，此外，还有部分面团中面筋蛋白与淀粉等分子紧密结合并聚集形成块状结构，面团孔隙增大，说明全麦面团内部结构变得紊乱无序，组分分布不均。当FA含量进一步增加至1.5%时，可以观察到全麦面团面筋网络结构出现多处断裂，孔洞增大，且组分之间聚集程度增加，结构更加致密，结果表明高添加量FA（>1.0%）诱导了面筋蛋白过度聚集，降低了全麦面团结构的连续性与稳定性。

2.3 FA对全麦面团水分分布及馒头水分质量分数的影响

2.3.1 FA对全麦面团水分分布状态的影响

利用核磁共振仪可从微观角度研究水分的分布及迁移状态，T_2弛豫时间的长短反映了水、蛋白、淀粉等固体物质结合强度，影响全麦馒头的品质和稳定性，不同FA添加量对全麦面团T_2弛豫时间的影响如图2所示，3 个峰值T_{21}、T_{22}、T_{23}分别代表结合水、弱结合水和自由水的横向弛豫时间。与对照组相比，添加FA使全麦面团的横向弛豫时间吸收峰向左移动，说明FA的添加可以促进淀粉等大分子与水分子结合。然而，当添加量为1.5%时，弱结合水峰面积减小，自由水峰面积增大，说明添加过量FA增加的持水量主要以自由水为主。

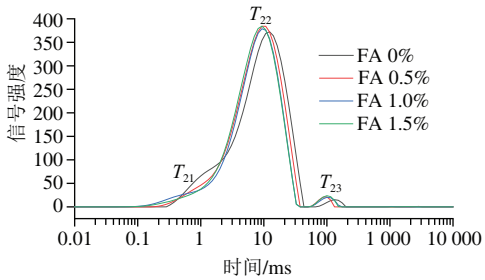
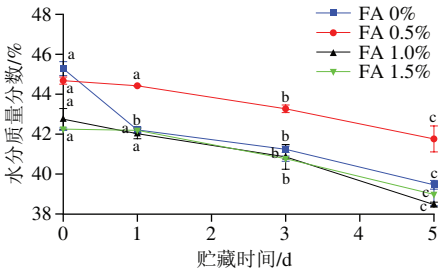


图2 不同FA添加量全麦面团的水分分布状态

Fig. 2 Water distribution of whole wheat dough added with different FA proportions

2.3.2 FA对全麦馒头芯水分质量分数的影响

水分质量分数是影响全麦馒头质构特性以及内部纹理结构的决定性因素，在一定范围内，较高的水分质量分数能赋予全麦馒头更好的质构组织、口感风味、体积以及比容等特性，本研究测定了全麦馒头贮藏5 d内馒头芯水分质量分数的变化，结果如图3所示。与对照组相比，蒸制结束后添加FA全麦馒头中的水分质量分数更低，但在贮藏期间水分下降较为平缓，尤其是添加0.5% FA的馒头芯在贮藏结束后水分质量分数仅下降了6.54%，低于对照组，说明添加FA增强了馒头的持水性，但是1.0%和1.5%的FA不利于保持馒头的持水性。



相同添加量不同贮藏时间不同小写字母表示差异显著（$P<0.05$）。

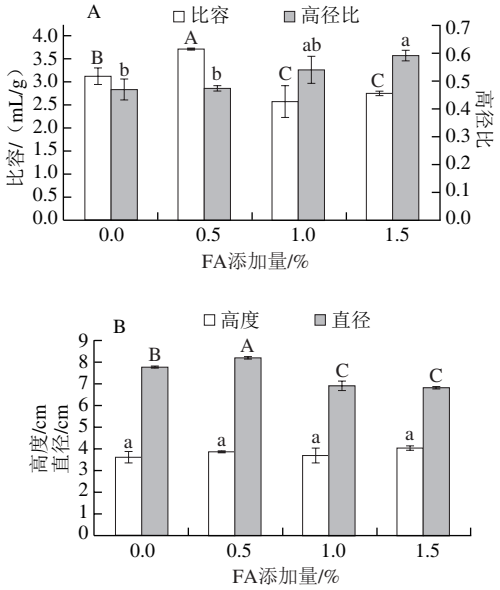
图3 不同FA添加量全麦馒头贮藏期间的水分质量分数变化

Fig. 3 Changes in water content in steamed whole wheat bread added with different FA proportions during storage

2.4 FA对全麦馒头比容、高径比的影响

比容是评价全麦馒头品质的重要因素，由面筋蛋白网络结构强弱和酵母产气共同决定[26]，不同FA添加量对全麦面团比容和高径比的影响如图4A所示。添加0.5% FA时，全麦面团的比容与对照组相比增加了20.26%，当FA添加量高于0.5%时，全麦面团的比容显著下降，并且显著低于对照组（$P<0.05$），说明添加0.5% FA能在一定程度上增加全麦馒头的比容，而高添加量FA不利于馒头比容增大。

此外，添加0.5% FA对全麦馒头的高径比没有显著影响，但随着FA添加量的增大，高径比显著增加（$P<0.05$）（图4A）。从图4B可知，与对照组相比，FA的添加对全麦馒头高度没有显著影响，但显著影响馒头的直径（$P<0.05$）。



不同大、小写字母表示差异显著（$P<0.05$）。

图4 不同FA添加量对馒头比容、高径比（A）以及高度、直径（B）的影响

Fig. 4 Effect of FA on specific volume, height/diameter (A) and height, diameter (B) of steamed bread

2.5 FA对全麦馒头质构品质的影响

质构特性能够客观地反映出全麦馒头的柔软程度和口感好坏，是衡量全麦馒头品质的重要参数。硬度指的是全麦馒头在压缩过程中发生最大形变时所需要的力；弹性是指馒头被压缩之后的恢复能力；内聚性是指全麦馒头在全质构分析两次压缩过程中所做的功之比，反映了馒头内部的黏合力；胶着度代表馒头的黏度，其值越大说明馒头越黏牙；咀嚼度是模拟口腔将馒头咀嚼成能够吞咽状态所需要的能量，反映面团的韧性；回复性是指馒头发生形变之后恢复到原始状态的能力[22,26]。其中，硬度、胶着度以及咀嚼度在一定范围内与全麦馒头的食用品质呈负相关，而弹性、内聚性以及回复性与全麦馒头的品质呈正相关[27-28]。由表2可知，FA添加量与馒头硬度和弹性不呈线性关系，相较于对照组来说，添加0.5% FA使全麦馒头硬度降低了47%，弹性提升了4.5%。但随着FA添加量增加，馒头弹性下降至与对照组无显著差异（$P>0.05$），硬度也越来越大。此外，添加0.5% FA的全麦馒头也表现出更好的回复性和内聚性，随着FA添加量的增加，全麦馒头的内聚性和回复性显著下降（$P<0.05$），结果表明添加0.5% FA能够改善面筋结构，提高全麦馒头的弹性、内聚性以及回复性，降低馒头的硬度、胶着度和咀嚼度。

表2 不同添加量FA对全麦馒头质构特性的影响

Table 2 Effects of different FA proportions on texture properties of steamed whole wheat bread

FA添加量/%	硬度/g	弹性/mm	内聚性	胶着度/g	咀嚼度/g	回复性
0	3 699.30±29.90^{b}	0.89±0.03^{b}	0.74±0.01^{b}	2 748.39±19.84^{b}	2 449.36±15.77^{b}	0.37±0.01^{c}
0.5	1 950.48±31.49^{d}	0.93±0.02^{a}	0.79±0.01^{a}	1 544.64±23.97^{c}	1 432.40±23.03^{c}	0.45±0.01^{a}
1.0	3 107.06±44.85^{c}	0.89±0.03^{b}	0.78±0.02^{a}	2 426.61±33.63^{b}	2 159.52±28.84^{b}	0.41±0.03^{b}
1.5	6 277.14±62.21^{a}	0.89±0.02^{b}	0.76±0.01^{b}	4 764.31±45.33^{a}	4 223.69±43.29^{a}	0.37±0.01^{c}

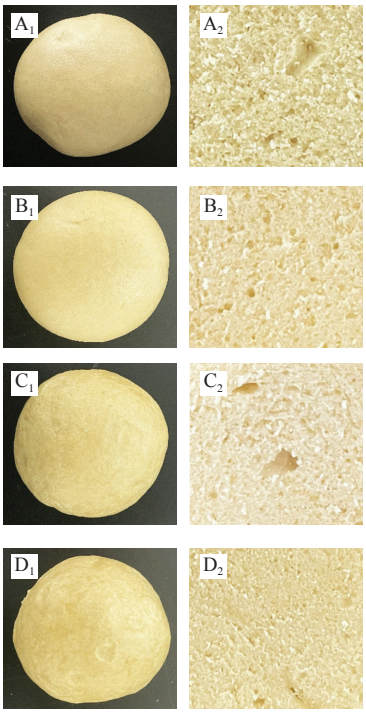
2.6 FA对全麦馒头气孔分布的影响

气孔数量与气孔分布情况是全麦面团中各组分共同作用的结果，是衡量馒头品质的重要指标，不同FA添加量对全麦馒头气孔分布影响结果见表3、图5。由图5可以看出，添加FA对馒头的气孔数量和气孔大小均有影响，添加0.5% FA的馒头气孔数量最多，分布均匀且气孔大小差异性较小，添加0.5% FA的馒头有较大的气孔出现。对气孔的具体数据分析表明，与对照组相比，添加FA可显著降低全麦馒头的孔隙率，添加0.5% FA的全麦馒头气孔密度与对照组相比增加了12.23%，而添加1.0% FA和1.5% FA却显著降低了馒头气孔密度（$P<0.05$）（表3）。表明低添加量FA在一定程度上能够改善面团内部结构从而增加全麦馒头持气性能，高添加量FA不利于馒头内部气体的保持。

表 3 不同FA添加量对全麦馒头气孔分布的影响

Table 3 Effects of different FA proportions on bubble distribution in steamed whole wheat bread

FA添加量/%	孔隙率/%	气孔密度/（个/cm^2）	平均气孔面积/mm^2
0	41.70±2.03^a	79.08±5.91^b	0.25±0.08^b
0.5	39.55±1.17^b	88.75±7.56^a	0.25±0.03^b
1.0	32.56±1.22^c	67.38±5.28^c	0.34±0.05^a
1.5	21.94±1.65^d	62.44±1.57^d	0.24±0.06^b



A～D.分别为添加0%、0.5%、1.0%、1.5% FA的全麦馒头；下标1、2.分别表示馒头整体、横截面图。

图 5 不同FA添加量的全麦馒头与馒头芯切片

Fig. 5 Photographs and cross-sectional observation of steamed whole wheat bread added with different FA proportions

3 讨 论

3.1 FA对全麦面团热机械特性的影响

通过混合和加热引起面团的机械变化，可以量化面团的糊化程度及黏度等特性[29]。在本实验中，添加0.5%的FA，其C_3值与对照组相比降低了3.77%，糊化程度降低，而当FA添加至1.0%、1.5%时C_3值明显增加，并且显著高于对照组（P<0.05），说明添加高剂量FA的全麦面粉更易于糊化。这与王玉娟[30]和王欢[31]等的研究结果一致，这可能是由于FA中的酚羟基会与淀粉分子侧链发生相互作用，并能够与淀粉分子的非结晶区结合，降低了淀粉糊化所需要的能量，从而促进了淀粉的糊化并提高了淀粉的糊化速率[32]。添加FA后全麦面团的C_2值呈下降趋势，且显著低于对照组（P<0.05）。同时，添加FA后全麦面团的α绝对值显著低于对照组（P<0.05），表明添加FA增大了面筋蛋白的弱化程度，并且在一定程度上降低了面筋蛋白的结构强度，这可能与FA和面筋蛋白之间的相互作用及面筋蛋白交联形成聚集物多少有关[33]。

3.2 FA对全麦面团和全麦馒头内部结构的影响

面团内部结构的改变影响馒头的口感品质以及贮藏期限等性质。本研究通过添加FA改善了全麦面团内部结构，从而提升馒头品质及口感。其中，添加0.5% FA促使面筋蛋白网状结构变得连续和均匀，增加了馒头的气孔密度，提升其持气性，增加全麦馒头的比容。而添加1.0%和1.5%的FA导致全麦面团的面筋网络结构变得紊乱，空洞增大，降低馒头的气孔密度，以致持气性不佳，不利于体积膨胀，降低馒头的比容。这主要是由于FA能够促进面筋蛋白交联形成聚集物，有利于面筋蛋白网络结构的形成，提升全麦面团在发酵过程中对CO_2气体包裹能力，从而促进馒头比容增加[34]。当FA添加量过高时，其自身的还原性会破坏面筋蛋白的相互作用，导致馒头气孔密度减小，孔隙率降低，比容降低。此外，面团和馒头微观结构的改变能影响水分质量分数和水分分布情况。0.5% FA可增强面团和馒头的持水性，1.0%和1.5%的FA则对持水能力不利。其原因是FA的亲水基团可通过氢键与自由水分子相互键合，导致弱结合水含量增加，持水能力强。但高添加量FA诱导的面筋蛋白交联聚集，破坏了面筋蛋白网络结构，导致全麦面团紧密结合水能力降低[35-36]。同时，淀粉-FA相互作用可以抑制淀粉的回生，而高添加量FA抑制淀粉回生能力不及低添加量FA[37]，造成高添加量FA馒头在蒸制结束和贮藏期间水分损失加快，持水能力降低。

3.3 FA对全麦馒头质构特性的影响

馒头硬度、弹性、回复性等质构参数与面筋蛋白网络结构、持水性及持气能力有关。添加0.5% FA显著降低全麦馒头的硬度，提升全麦馒头的弹性，可能是因为FA与面筋蛋白作用改善了面筋蛋白网络结构，导致馒头硬度降低[21]。而添加1.5%的FA增加了全麦馒头的硬度，主要是因为高添加量FA的还原性较高，破坏了面筋蛋白分子之间的二硫键，影响了面筋蛋白连续的网络结构，部分面筋蛋白聚集形成致密结构，导致馒头质地、口感变差。本研究中低添加量FA增强了面团和馒头的持水能力和持气能力，与低添加量FA降低全麦馒头的硬度、提升全麦馒头的弹性结果相符。此外，全麦面粉中含有的膳食纤维与FA作用，会干扰面团样品中面筋网络的形成[38-39]。

4 结 论

本研究分析了FA对全麦馒头质构特性等品质的影响。结果表明添加0.5% FA促进了面筋蛋白连续、均匀网状结构的形成，提高了全麦面团的持水能力并有效减缓贮藏期间全麦馒头芯中的水分损失，使全麦馒头比容提

高了20.26%，改善馒头内部气孔分布、硬度、弹性和内聚性等特性，而加入1.0%～1.5% FA对面筋网络结构、持水能力、全麦馒头比容与质构特性产生负面影响。该研究证明添加适量的FA可以作为解决传统全麦馒头口感粗糙、质地干硬等关键问题的有效手段。

参考文献：

[1] AFSHIN A, SUR P J, FAY K A, et al. Health effects of dietary risks in 195 countries, 1990–2017: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2017[J]. The Lancet, 2019, 393: 1958-1972. DOI:10.1016/S0140-6736(19)30041-8.

[2] TAN B, WU N N, ZHAI X T. Solutions for whole grain food development[J]. Nutrition Reviews, 2020, 78: 61-68. DOI:10.1093/nutrit/nuz068.

[3] ROSEN R A, BURGESS-CHAMPOUX T L, MARQUART L, et al. Associations between whole-grain intake, psychosocial variables, and home availability among elementary school children[J]. Journal of Nutrition Education and Behavior, 2012, 44(6): 628-633. DOI:10.1016/j.jneb.2010.02.007.

[4] SUN L, LI X F, ZHANG Y Y, et al. A novel lactic acid bacterium for improving the quality and shelf life of whole wheat bread[J]. Food Control, 2020, 109: 106914. DOI:10.1016/j.foodcont.2019.106914.

[5] PEI F, SUN L, FANG Y, et al. Behavioral changes in glutenin macropolymer fermented by *Lactobacillus plantarum* LB-1 to promote the rheological and gas production properties of dough[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(11): 3585-3593. DOI:10.1021/acs.jafc.9b08104.

[6] SUN L, SUN X Y, DU Y F, et al. Effect of the starch structure fermented by *Lactobacillus plantarum* LB-1 and yeast on rheological and thermomechanical characteristics of dough[J]. Food Chemistry, 2022, 369: 130877. DOI:10.1016/j.foodchem.2021.130877.

[7] LI W, SUN X Y, DU Y F, et al. Effects of co-fermentation on the release of ferulic acid and the rheological properties of whole wheat dough[J]. Journal of Cereal Science, 2023, 111: 103669. DOI:10.1016/j.jcs.2023.103669.

[8] LI W, SUN X Y, ALFRED MUGAMBI M, et al. Effects of ferulic acid on the polymerization behavior of gluten protein and its components[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 147: 109388. DOI:10.1016/j.foodhyd.2023.109388.

[9] BROUNS F, HEMERY Y, PRICE R, et al. Wheat aleurone: separation, composition, health aspects, and potential food use[J]. Critical Reviews in food Science & Nutrition, 2012, 52(6): 553-568. DOI:10.1080/10408398.2011.589540.

[10] SILVA E D O, BATISTA R. Ferulic acid and naturally occurring compounds bearing a feruloyl moiety: a review on their structures, occurrence, and potential health benefits[J]. Comprehensive Reviews in Food Science & Food Safety, 2017, 16(4): 580-616. DOI:10.1111/1541-4337.12266.

[11] 郑启航, 苗振弛, 宋斌, 等. 高静水压处理对玉米淀粉/阿魏酸复合体系理化及结构特性的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(19): 51-57. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220921-206.

[12] 王岸娜, AMIR A, 吴立根, 等. α-淀粉酶与肉桂酸、阿魏酸相互作用的研究[J]. 粮食与油脂, 2022, 35(11): 139-142. DOI:10.3969/j.issn.1008-9578.2022.11.029.

[13] XU N, ZHANG Y, ZHANG G Z, et al. Effects of insoluble dietary fiber and ferulic acid on rheological and thermal properties of rice starch[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 193: 2260-2270. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2021.11.058.

[14] KREKORA M, NAWROCKA A. The influence of selected polyphenols on the gluten structure: a study on gluten dough with application of FT-IR and FT-Raman spectroscopy[J]. Journal of Cereal Science, 2022, 108: 103570. DOI:10.1016/j.jcs.2022.103570.

[15] HAN H M, KOH B K. Effect of phenolic acids on the rheological properties and proteins of hard wheat flour dough and bread[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2011, 91(13): 2495-2499. DOI:10.1002/jsfa.4499.

[16] QIU Z P, CHEN L, RAO C L, et al. Starch-guar gum-ferulic acid molecular interactions alter the ordered structure and ultimate retrogradation properties and *in vitro* digestibility of chestnut starch under extrusion treatment[J]. Food Chemistry, 2023, 416: 135803. DOI:10.1016/j.foodchem.2023.135803.

[17] KARUNARATNE R, ZHU F. Physicochemical interactions of maize starch with ferulic acid[J]. Food Chemistry, 2016, 199: 372-379. DOI:10.1016/j.foodchem.2015.12.033.

[18] HUANG L Y, ZHANG X S, ZHANG H J, et al. Interactions between dietary fiber and ferulic acid changed the aggregation of gluten in a whole wheat model system[J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 91: 55-62. DOI:10.1002/jsfa.10814.

[19] WANG M W, OUDGENOEG G, VLIET T V, et al. Interaction of water unextractable solids with gluten protein: effect on dough properties and gluten quality[J]. Journal of Cereal Science, 2003, 38(1): 95-104. DOI:10.1016/S0733-5210(03)00018-3.

[20] 汤晓娟. 产胞外多糖酸面团发酵及其冷冻面团抗冻机理研究[D]. 无锡: 江南大学, 2019.

[21] 王崇崇. 膳食纤维和阿魏酸对馒头品质及淀粉消化性的影响机理研究[D]. 无锡: 江南大学, 2022.

[22] 孙磊. 植物乳杆菌LB-1/酵母菌协同发酵对面团组分行为及全麦面包品质提升作用研究[D]. 南京: 南京财经大学, 2021.

[23] 田海娟, 张传智, 韩诚俊. 高粱粉对面团特性及面包品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2014, 35(18): 1-3. DOI:10.3969/.issn.1005-6521.2014.18.001.

[24] 赵萍, 周伟, 张生堂, 等. 混合实验仪在评价面团流变学特性中的应用与研究[J]. 食品工业科技, 2015, 36(1): 97-109. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2015.01.012.

[25] 佟颖. 小麦蛋白膜改良及成膜机理研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2012.

[26] 夏玉琳. 改良剂对全麦馒头品质的影响[D]. 南京: 南京财经大学, 2019.

[27] 陈佳芳, 汤晓娟, 蒋慧, 等. 不同高产胞外多糖乳酸菌发酵荞麦酸面团对面团面筋网络结构和面包烘焙特性的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(6): 1-6. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201806001.

[28] 毛濛兰. 麦麸生物改性及其在全麦馒头中的应用[D]. 南京: 南京农业大学, 2020.

[29] AL-ANSI W, FADHL J A, ABDULLAH A B, et al. Effect of highland barely germination on thermomechanical, rheological, and micro-structural properties of wheat-oat composite flour dough[J]. Food Bioscience, 2023, 53: 102521. DOI:10.1016/j.fbio.2023.102521.

[30] 王玉娟, 李晓磊, 付婧超, 等. 普鲁兰酶水解制备抗消化性和低回生性木薯淀粉的研究[J]. 粮食与油脂, 2017, 30(12): 46-49. DOI:10.3969/j.issn.1008-9578.2017.12.013.

[31] 王欢, 贾强, 黄利华, 等. 红树莓多酚提取物对大米淀粉理化性质和体外消化性能的影响[J]. 食品科技, 2021, 46(9): 265-270. DOI:10.13684/j.cnki.spkj.2021.09.043.

[32] 李蟠莹, 戴涛涛, 陈军, 等. 原花青素对大米淀粉老化性质的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(18): 6-11. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2018.18.002.

[33] EL MAZLOUZI M, MOREL C, ROBERT T, et al. The dynamics of phosphorus uptake and remobilization during the grain development period in durum wheat plants[J]. Plants, 2022, 11(8): 1006. DOI:10.3390/plants11081006.

[34] LIU S Y, GU S M, SHI Y, et al. Alleviative effects of mannosylerythritol lipid-A on the deterioration of internal structure and quality in frozen dough and corresponding steamed bread[J]. Food Chemistry, 2024, 431: 137122. DOI:10.1016/j.foodchem.2023.137122.

[35] KREKORA M, MIS A, NAWROCKA A. Molecular interactions between gluten network and phenolic acids studied during overmixing process with application of FT-IR spectroscopy[J]. Journal of Cereal Science, 2021, 99: 103203. DOI:10.1016/j.jcs.2021.103203.

[36] WANG C C, YANG Z, XING J J, et al. Effects and underlying mechanisms of insoluble dietary fiber and ferulic acid on the crumb structure of steamed bread[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 125: 107448. DOI:10.1016/j.foodhyd.2021.107448.

[37] PHOON P Y, SAN A X Y, NGE C E, et al. Solubilised rice bran ferulic acid has potential to retard cooked rice retrogradation and not impact digestibility[J]. Journal of Functional Foods, 2022, 99: 105330. DOI:10.1016/j.jff.2022.105330.

[38] 潘志琴. 漆酶协同阿魏酸对小麦面团微观结构及冻藏稳定性的影响机制[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.

[39] LIU M J, ZHANG Q A. Valorization of the under-utilized apricot kernels protein based on the rheology and texture properties of dough[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 169: 114019. DOI:10.1016/j.lwt.2022.114019.