

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2024.60088

阿魏酸对麦谷蛋白亚基聚集行为的影响及作用机制

张一文¹ 沈伟¹ 徐开秀²

(1. 山东中医药高等专科学校, 山东 烟台 264199; 2. 中国海洋大学, 山东 青岛 266000)

摘要: [目的] 研究阿魏酸对麦谷蛋白亚基聚集行为的影响及对馒头品质的影响效应。 [方法] 比较阿魏酸 (FA) 与高相对分子质量谷蛋白亚基 (HMW-GS) 和低相对分子质量谷蛋白亚基 (LMW-GS) 的互作行为, 明确 FA 添加量对麦谷蛋白亚基聚集的影响及其机制。 [结果] 添加质量分数为 0.5% 的 FA 能够有效促进 HMW-GS 及 LMW-GS 的聚集, 诱导游离巯基氧化形成更多的二硫键, 增大蛋白聚集体的平均粒径, 同时增加稳定的 α -螺旋和 β -折叠含量, 减少无序的无规卷曲含量, 促进 HMW-GS 及 LMW-GS 聚集体的形成, 进一步导致疏水基团掩埋, 降低其表面疏水性, 并形成更为稳定的三级结构。相较于 LMW-GS, 添加 0.5% 的 FA 可诱导 HMW-GS 更多地聚集。HMW-GS+0.5% FA 能够有效改善馒头品质, 相较于原生面粉, 比容增加了 29.62%, 硬度降低了 18.59%。 [结论] 高相对分子质量谷蛋白亚基+0.5% 阿魏酸能有效改善馒头品质。

关键词: 阿魏酸; 高相对分子质量谷蛋白亚基; 低相对分子质量谷蛋白亚基; 聚集; 馒头

Effect and mechanism of ferulic acid on aggregation behavior of glutenin subunits

ZHANG Yiwen¹ SHEN Wei¹ XU Kaixiu²

(1. Shandong College of Traditional Chinese Medicine, Yantai, Shandong 264199, China;

2. Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266000, China)

Abstract: [Objective] This paper aims to study the effect of ferulic acid (FA) on the aggregation behavior of glutenin subunits and the quality of steamed bread. [Methods] The interaction behavior between FA and gluten subunits with high relative molecular weight (HMW-GS) and gluten subunits with low relative molecular weight (LMW-GS) was compared to clarify the effect and mechanism of FA addition on the aggregation of gluten subunits. [Results] Adding FA with a mass fraction of 0.5% can effectively promote the aggregation of HMW-GS and LMW-GS, induce the oxidation of free thiol groups to form more disulfide bonds, increase the average particle size of protein aggregates, and enhance the content of stable α -helices and β -folds. It can also reduce the content of disordered random curls, promote the formation of HMW-GS and LMW-GS aggregates, further lead to the burial of hydrophobic groups, alleviate their surface hydrophobicity, and form a more stable tertiary structure. Adding 0.5% FA can induce more aggregation of HMW-GS than LMW-GS. HMW-GS+0.5% FA can effectively improve the quality of steamed bread. Compared with the original flour, the specific volume increases by 29.62%, and the hardness decreases by 18.59%. [Conclusion] HMW-GS+0.5% FA can effectively improve the quality of steamed bread.

Keywords: ferulic acid; gluten subunit with high relative molecular weight; gluten subunit with low relative molecular weight; aggregation; steamed bread

在面团的混合和揉制过程中, 面筋蛋白吸水膨胀并相互作用形成网络结构, 其中谷蛋白提供弹性, 醇溶蛋白提供延展性^[1]。良好的面筋网络能够有效捕获和保留发酵过程中产生的二氧化碳气体, 形成均匀的气孔结构, 对面包、馒头等发酵面制品的体积和质地至关重要^[2]。高相对分子质量谷蛋白亚基 (HMW-GS) 和低相对分子质量谷

基金项目: 全国中医药创新骨干人才培养项目 (编号: ZYCCRC08); 山东省中医药高层人才培养项目 (编号: 2021-12)

通信作者: 徐开秀 (1981—), 男, 中国海洋大学副主任药师。E-mail: xkxzl@163.com

收稿日期: 2024-06-11 改回日期: 2024-12-28

蛋白亚基(LMW-GS)为面筋蛋白的主要组成部分, HMW-GS 和 LMW-GS 共同作用可形成稳定且弹性良好的面筋网络, 其中 HMW-GS 提供骨架和强度, LMW-GS 提供柔韧性和延展性^[3]。近些年, 通过添加天然来源的添加剂提升面筋蛋白的聚集, 进一步强化蛋白网络结构, 改善面制品品质成为关注点^[4-7]。其中, 阿魏酸(FA)作为一种多功能的食品添加剂, 具有抗氧化、保鲜、改良和营养强化等多种作用^[8]。同时, FA 在延长食品保质期、改善产品品质和提升健康益处方面具有重要应用价值^[9]。

FA 是一种天然酚酸, 广泛存在于植物细胞壁中, 特别是在谷物如小麦的麸皮部分, 能够与多糖、蛋白质等生物大分子发生反应^[10]。FA 通过与面筋蛋白的相互作用, 可以调节面筋蛋白的聚集状态, 影响面筋网络的形成和性能^[11-12]。因此, 适量的 FA 有助于形成更均匀、稳定的面筋网络, 改善面团的机械性能和加工特性。Li 等^[13]研究发现, FA 能够与麦谷蛋白及醇溶蛋白交联、相互作用形成有序的面筋蛋白网络结构, 促进蛋白网络的聚集和稳定。张慧娟等^[14]发现, 添加 FA 后显著增加了面筋蛋白的黏弹性模量。因此, FA 在面筋蛋白及面团聚集中发挥了重要作用, 通过其交联、抗氧化和调节蛋白质聚集等多种机制, 显著改善了面团的结构和性能。目前, 有关 FA 对不同麦谷蛋白亚基聚集的影响及机制的研究尚未见报道。研究拟从 FA 与不同麦谷蛋白亚基(HMW-GS 及 LMW-GS)的相互作用角度出发, 分析 FA 影响麦谷蛋白聚集及馒头品质的潜在机制, 旨在为优化馒头制作工艺和提高其质量提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

面筋蛋白: 蛋白质含量 86%, 上海麦克林生化科技有限公司;

阿魏酸(FA): 9.98%, 北京索莱宝生物科技有限公司;

面粉: 蛋白质含量 15%, 金龙鱼食品有限公司;

酵母: 安琪酵母股份有限公司;

其他试剂均为国产分析纯。

1.2 仪器与设备

紫外分光光度计: UV-1780 型, 日本岛津公司;

粒度仪: Mastersizer 3000 型, 马尔文帕纳科有限公司;

扫描电子显微镜: TM3000 型, 日本日立公司;

质构仪: TA-XT plus 型, 英国 Stable Micro System 公司;

冷冻干燥机: Alpha1-4 LD 型, 德国 Marin Christ 公司;

傅里叶变换红外光谱仪器: Nicolet iS50 型, 赛默飞世尔科技公司。

1.3 试验方法

1.3.1 麦谷蛋白亚基提取 将 30 g 面筋蛋白溶解于 150 mL 体积分数为 50% 的 1-丙醇中, 离心(2 500×g, 4 °C, 15 min)收集上清液, 加入 1-丙醇溶液[含有质量分数

为 1% 的二硫代苏糖醇(DTT)]混匀至终体积分数为 60%, 4 °C 孵育 1 h, 离心(2 500×g, 15 min)获得 HMW-GS, 将剩余上清液与 1-丙醇溶液混匀至终体积分数为 85%, 4 °C 孵育 1 h, 离心(2 500×g, 15 min)获得 LMW-GS。

1.3.2 FA 与麦谷蛋白亚基混合样品制备 分别配制添加 0.0%, 0.5%, 1.0%, 1.5% FA 的 HMW-GS 及 LMW-GS 蛋白质样品, 并与水按质量比 2:3 混匀, 搅拌 10 min 形成光滑的面筋蛋白样品, 室温下松弛 20 min, 干燥, 磨粉, 备用。

1.3.3 游离巯基、二硫键含量测定

(1) 游离巯基含量: 50 mg 样品中加入 4 mL TGE (2.5% SDS, 92 mmol/L 甘氨酸, 4.1 mmol/L EDTA, 86 mmol/L Tris-HCl, pH 8.0) 分散 30 min, 加入 40 μL Ellman 试剂, 25 °C 避光反应 0.5 h, 离心(20 000×g, 4 °C, 15 min), 测定 412 nm 处吸光度。以 TGE 溶液为空白对照, 以还原型谷胱甘肽为标准品计算游离巯基含量。

(2) 二硫键含量: 准确称取 300 mg 样品, 加入 10 mL 的 0.06 mol/L NaCl+8 mol/L 尿素溶液(S1)以及 0.06 mol/L NaCl+8 mol/L 尿素+10 mmol/L 二硫苏糖醇(DTT)溶液(S2)。将所得溶液混合并均质化, 室温下提取 1 h, 随后进行离心(10 000×g, 4 °C, 20 min)。二硫键含量基于 S1 和 S2 中蛋白质溶解度的差异来计算。

1.3.4 粒度分布测定 将不同蛋白粉末样品溶解于 0.5 mol/L 乙酸溶液中, 配制成 0.1% 的蛋白质悬浮液, 于粒径测定仪中测定蛋白质粒径, 遮光度为 14%。

1.3.5 二级结构测定 将蛋白样品和溴化钾以质量比 1:100 充分混匀, 研磨压片, 用傅里叶变换红外光谱仪扫描面粉样品, 扫描范围 400~4 000 cm⁻¹, 分辨率 4 cm⁻¹, 扫描次数 64 次。通过 Omnic V6.1 和 peakfit 4.12 提取二级结构含量。

1.3.6 表面疏水性测定 将 10 mg 蛋白质样品与 40 mL SDS 溶液(0.1 mmol/L)充分混匀 1 h, 蒸馏水中透析 48 h。取 1 mL 透析液分别与 20 mL CHCl₃ 和 5 mL 亚甲基蓝(0.024 g/L)混匀, 离心(2 500×g, 15 min), 于 655 nm 处测定下层混合物的吸光度。采用 SDS 标准溶液在 0.01~0.10 mmol/L 范围内的线性曲线作为标准曲线。按式(1)计算表面疏水性。

$$H_0 = c \times 20 \times 288.38/10, \quad (1)$$

式中:

H_0 ——表面疏水性, mol;

c ——通过标准曲线计算的 SDS 浓度, mol/L。

1.3.7 微观结构分析 将面筋蛋白样品冻干, 取中心切片并固定至导电台上, 真空喷金, 扫描, 加速电压为 5.0 kV。

1.3.8 馒头制作及品质测定

(1) 馒头制作: 参照黎钧铸等^[15]的方法。在馒头配方

中添加3%不同麦谷蛋白亚基,按麦谷蛋白质量的0.5%,1.0%,1.5%添加FA。馒头成品于室温静置2 h,12 h内完成品质指标测定。

(2) 比容测定:参照GB/T 21118—2007。馒头切片(25 mm),采用质构仪测定馒头硬度,测前速度60 mm/min,测后速度60 mm/min,压缩率为50%。

1.4 数据统计与分析

各试验均重复3次,采用Excel 2019软件进行数据统计整理,使用SPSS 19软件进行统计分析,LSD进行多重比较,单因素进行方差分析。图和表中小写字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

2 结果与讨论

2.1 游离巯基含量

在蛋白质聚集过程中,可能伴随着二硫键的重新排列和断裂,导致游离巯基暴露或掩蔽,因此通过监测蛋白质样品中游离巯基的变化,可以间接反映蛋白质的聚集状态。由图1可知,HMW-GS中含有较少的游离巯基,从不同麦谷蛋白亚基的差异来看,加入0.5% FA后, HMW-GS及LMW-GS中的游离巯基含量显著降低,分别较未添加FA的降低了52.08%和33.09%,而随着FA添加量的进一步增加, HMW-GS及LMW-GS中游离巯基含量却显著增加,尤其在FA添加量为1.5%时,游离巯基含量显著高于未添加FA的样品。通常来讲,聚集态蛋白质通常会有更多暴露的游离巯基,尤其是在不溶性聚集体中^[16]。因此,适量(0.5%)添加FA能够显著降低游离巯基含量,进一步促进半胱氨酸残基通过二硫键相互连接,形成稳定的三维结构,且在此添加量下,FA对促进HMW-GS聚集较LMW-GS聚集的程度大,这主要是由于HMW-GS具有较长的氨基酸链和丰富的半胱氨酸残基^[17],这些半胱氨酸残基可以通过二硫键形成交联。高浓度的FA会导致不同麦谷蛋白亚基的聚集程度降低,可能是由于FA直接与半胱氨酸残基反应,形成稳定的复合物,阻碍了残基之间形成二硫键。

2.2 二硫键含量

巯基氧化反应或者二硫键—巯基交换反应等会造成二硫键含量波动^[18]。由图2可知,相较于LMW-GS,

HMW-GS中有较多的二硫键。添加0.5% FA后, HMW-GS和LMW-GS中二硫键含量显著增加,分别较未添加FA的增加了46.94%和33.21%,且随着FA添加量的进一步增加, HMW-GS及LMW-GS中二硫键含量均显著降低,其中LMW-GS的降低幅度更大。此外,高剂量的FA也可能会增强其与麦醇溶蛋白的非共价作用,导致蛋白质解聚^[19]。二硫键的变化趋势与游离巯基的一致,进一步表明FA在促进麦谷蛋白亚基,尤其是HMW-GS聚集的过程中,二硫键的形成是一个重要的促进因素。综上,添加0.5%的FA在促进麦谷蛋白聚集方面发挥重要作用,尤其是驱动HMW-GS中游离巯基更多地氧化形成二硫键,形成更多的聚集体。

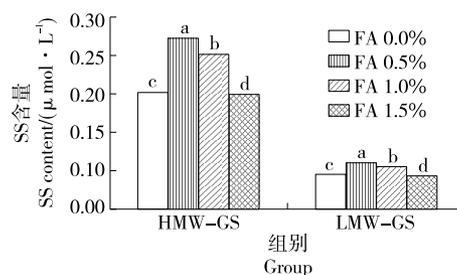


图2 二硫键含量变化

Figure 2 Change in disulfide bond content

2.3 平均粒径

醇溶蛋白与麦谷蛋白交联形成面筋蛋白网络,其中麦谷蛋白为高相对分子质量的多聚体,分子间通过二硫键形成聚集体,可以通过动态光散射(DLS)等技术测定面筋蛋白在不同条件下的粒径分布,反映其聚集状态。由图3可知, HMW-GS的粒径较LMW-GS的大。随着FA添加量的增加, HMW-GS的粒径显著增加, HMW-GS的粒径显著降低。此外,添加FA后, LMW-GS的平均粒径小幅增加,对粒径的影响较小。综上,FA可以与亲水基团相互作用,并在较低的FA浓度下诱导HMW-GS聚集。较高浓度下,FA可能会导致HMW-GS链展开,使麦谷蛋白网络结构被破坏^[20],从而降低其粒径。

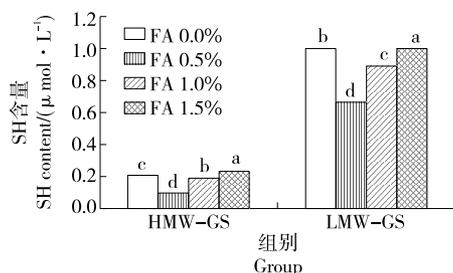


图1 游离巯基含量变化

Figure 1 Change in free thiol content

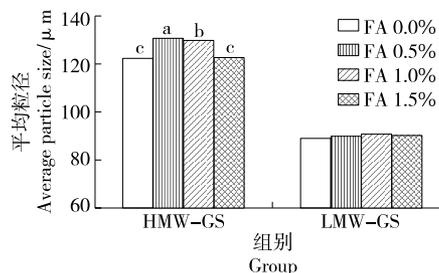


图3 蛋白质平均粒径变化

Figure 3 Change in average particle size of proteins

2.4 二级结构含量

FTIR 图谱中酰胺一带(1 600~1 720 cm^{-1})被用来进一步表征蛋白质中二级结构分布。由图 4 可知,蛋白质二级结构主要由 α -螺旋、 β -折叠、 β -转角及无规卷曲组成,相较于 LMW-GS, HMW-GS 中有较多的 α -螺旋和 β -折叠结构, β -转角和无规卷曲结构较少。添加 0.5% FA 后, HMW-GS 和 LMW-GS 中的 α -螺旋、 β -折叠结构含量均有所增加,且 HMW-GS 中的增加幅度较大, β -转角和无规卷曲结构含量却有所降低。当 FA 添加量为 1.0%、1.5% 时, HMW-GS、LMW-GS 中二级结构的分布及变化呈现相反的趋势,其中 β -转角和无规卷曲结构含量

增加。 α -螺旋结构更疏水、更刚性,具有较多的 α -螺旋结构意味着蛋白质结构更稳定^[21]。较高含量的 β -折叠可以通过氢键增强分子间相互作用,有助于蛋白质聚集^[22]。综上,低浓度 FA 可以促进具有较高稳定性的 α -螺旋以及聚集性较强的 β -折叠结构的形成,进一步促进麦谷蛋白聚集。这与 Welc-Stanowska 等^[23]的研究结果一致,即添加一定量的 FA 可以将其较易地融入面筋多肽链之间的空间,形成氢键并增加其有序二级结构比例,导致蛋白质聚集并促进面筋网络结构的稳定性。高浓度的 FA 会导致蛋白网络连接紊乱,不利于蛋白质网络稳定。

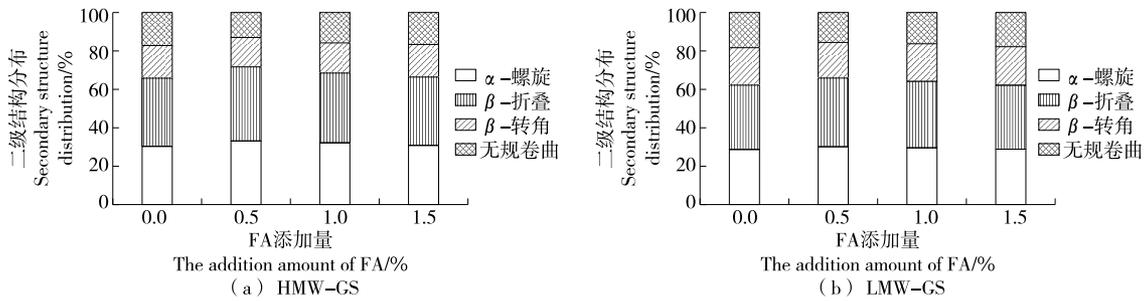


图 4 二级结构的分布及变化

Figure 4 Distribution and variation of secondary structure

2.5 表面疏水性

疏水基团倾向于远离水环境,通常位于蛋白质内部。通过表面疏水性的测定,可以反映蛋白质分子表面疏水基团(如苯丙氨酸、亮氨酸、异亮氨酸、缬氨酸等)的暴露程度,进一步反映其三级结构的变化^[24]。由图 5 可知,添加 0.5% FA 后, HMW-GS、LMW-GS 的表面疏水性均显著降低,分别较未添加 FA 的降低了 18.38% 和 7.99%,表明添加 0.5% FA 可导致疏水基团的掩埋,因此低浓度的 FA 诱导麦谷蛋白,尤其是 HMW-GS 发生了较大程度的聚集,与 Feng 等^[25]的研究结果一致。添加较多的 FA 会导致 HMW-GS、LMW-GS 的表面疏水性显著增加,添加 1.5% FA 后, HMW-GS 的表面疏水性与未添加 FA 的无显著差异,说明高浓度的 FA 会导致 HMW-GS 或者 LMW-GS 三级结构展开,一些疏水性基团暴露,进一步与 SDS 结合,从而增加了疏水性。

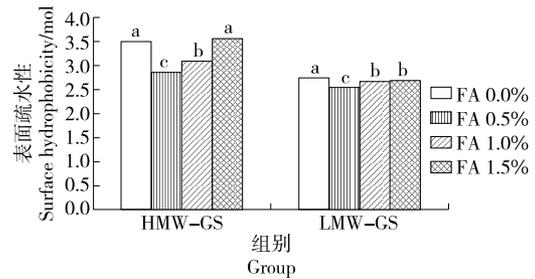


图 5 表面疏水性变化

Figure 5 Change in surface hydrophobicity

2.6 微观结构

由图 6 可知, HMW-GS 和 LWM-GS 具有不同的微观结构,其中 HMW-GS 的孔洞较多,而 LMW-GS 较为平整。添加 0.5% FA 后, HMW-GS、LMW-GS 的孔洞增多,且较为致密。随着 FA 添加量的增加,两种蛋白中的蛋白网络不均匀性增加,其中 LMW-GS 的不平整性增加较为明显。

但通过与面筋蛋白的相互作用能够改变面筋网络结构,提高面团的弹性和延展性。有研究^[26]发现,馒头配料中添加 0.5% FA 能够使其比容提升 20.26%,并改善其弹性和内聚性等性质。此外, HMW-GS、LMW-GS 作为面筋蛋白的主要成分,影响面团弹性,并对馒头等产品品质造成极大影响^[27-28]。由图 7 可知,加入 HMW-GS、LMW-GS 后,面包比容分别增加了 17.62% 和 10.96%,这与麦谷蛋白亚基形成麦谷蛋白网络,强化和稳定面筋蛋白网络结构息息相关。添加 0.5% FA 后,馒头比容显著增加,其中 HMW-GS+0.5% FA、LMW-GS+0.5% FA 组的馒头比容较未添加任何材料的分别增加了 29.62% 和 16.96%。随着 FA 添加量的继续增大,馒头比容显著降低。当 FA 添加量为 0.5% 时,馒头具有较高的综合感官评分。由表 1 可知,硬度、弹性、内聚性、黏附性、咀嚼性和胶黏性等随着

2.7 馒头品质

面粉中的阿魏酸含量一般为 0.1%~0.2%,相对较少,

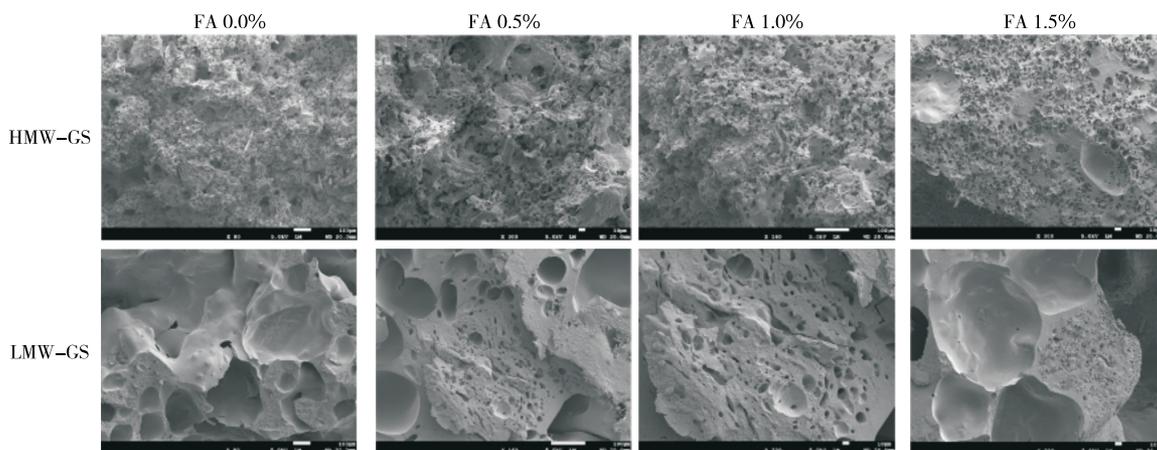


图6 不同蛋白质样品的微观结构

Figure 6 Microstructures of different protein samples

FA添加量的变化呈现出明显的变化。就硬度而言, HMW-GS+0.5% FA 和 LMW-GS+0.5% FA 组的硬度相较于CK组显著降低,分别降低了12.87%和6.96%。当FA添加量>1.0%时,硬度升高,表明添加适量的FA能够有效改善馒头质地,即添加0.5% FA可使HMW-GS、LMW-GS聚集程度增加,进一步诱导更强的蛋白网络结构的形成,从而包裹住酵母发酵过程中产生的CO₂气体^[29],使馒头在发酵、蒸制过程中获得更大的体积。王崇崇^[30]研究表明,FA可与面筋蛋白发生有效相互作用,进一步降低馒头硬度,与试验结果类似。而FA添加量过大

会导致HMW-GS或LMW-GS的聚集受阻或者破坏,影响馒头体积的增加,且增加其硬度,口感变差。

3 结论

研究了阿魏酸对高相对分子质量谷蛋白亚基和低相对分子质量谷蛋白亚基聚集行为及馒头品质的影响。结果表明,添加0.5%的阿魏酸能够有效促进高相对分子质量谷蛋白亚基和低相对分子质量谷蛋白亚基的聚集,通过诱导游离巯基氧化形成更多的二硫键,增大蛋白聚集体的平均粒径,同时通过增加稳定的 α -螺旋和 β -折叠含

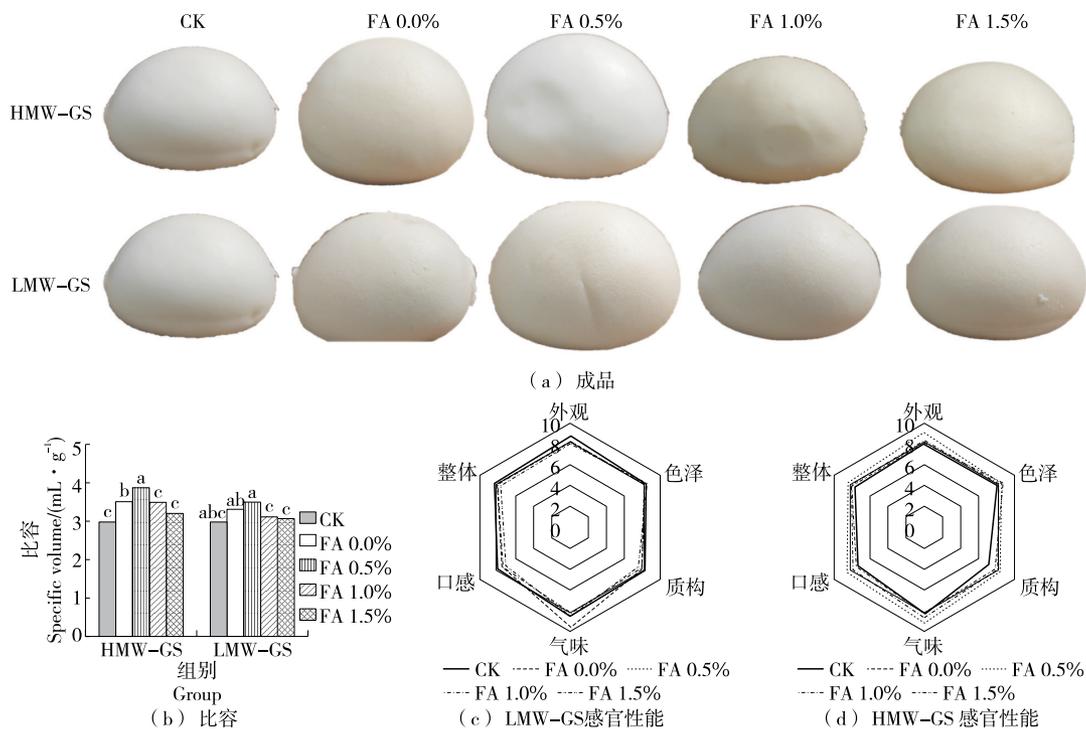


图7 不同处理馒头的成品、比容及感官性能

Figure 7 Photos, specific volume, and sensory performance of steamed bread with different treatments

表 1 馒头 TPA 参数变化

Table 1 Change in TPA parameters of steamed bread

样品	硬度/N	弹性/mm	内聚性	黏附性/(g·s)	咀嚼性/N	胶黏性/N
CK	34.65±0.98 ^b	1.20±0.04 ^b	0.65±0.010 ^b	-10.00±0.22 ^d	21.58±0.53 ^b	22.56±0.78 ^b
0.0% FA+HMW-GS	30.19±1.26 ^d	1.10±0.05 ^c	0.62±0.020 ^c	-8.00±0.24 ^c	19.12±0.59 ^c	20.60±0.79 ^c
0.5% FA+HMW-GS	28.21±1.30 ^e	1.05±0.05 ^d	0.60±0.013 ^c	-7.00±0.28 ^a	18.14±0.69 ^e	19.62±0.87 ^e
1.0% FA+HMW-GS	30.62±1.42 ^c	1.12±0.09 ^c	0.61±0.013 ^d	-7.50±0.31 ^b	18.63±0.63 ^d	20.11±0.84 ^d
1.5% FA+HMW-GS	35.63±1.52 ^a	1.25±0.08 ^a	0.66±0.011 ^a	10.50±0.31 ^c	22.07±0.66 ^a	23.05±0.63 ^a
0.0% FA+LMW-GS	32.24±1.26 ^b	1.15±0.06 ^{bc}	0.63±0.020 ^c	-8.00±0.31 ^c	19.62±0.63 ^c	20.60±0.87 ^c
0.5% FA+LMW-GS	29.43±1.30 ^d	1.10±0.08 ^d	0.60±0.017 ^c	-7.00±0.22 ^a	18.63±0.59 ^c	19.62±0.69 ^c
1.0% FA+LMW-GS	30.41±1.42 ^c	1.12±0.07 ^{cd}	0.61±0.018 ^d	-7.50±0.35 ^b	19.12±0.56 ^d	20.11±0.77 ^d
1.5% FA+LMW-GS	34.33±1.52 ^a	1.18±0.05 ^{ab}	0.64±0.020 ^b	-9.00±0.41 ^d	21.09±0.68 ^b	22.07±0.80 ^b

量,减少无序的无规卷曲的含量,促进高相对分子质量谷蛋白亚基和低相对分子质量谷蛋白亚基聚集体的形成,使疏水基团被掩埋,降低其表面疏水性,形成更为稳定的三级结构。与此同时,相较于高相对分子质量谷蛋白亚基,添加 0.5% 阿魏酸可诱导高相对分子质量谷蛋白亚基更多地聚集。但阿魏酸添加量过高又会对高相对分子质量谷蛋白亚基和低相对分子质量谷蛋白亚基聚集产生负面影响。综上,高相对分子质量谷蛋白亚基+0.5% 阿魏酸能够有效改善馒头品质,相较于原生面粉制作的馒头,比容增加了 29.62%,硬度降低了 18.59%。该研究对馒头品质进行了定量分析,发现比容增加和硬度降低,但并未进行长期贮藏或品质变化的追踪研究。馒头的质量受贮藏条件、湿度等因素的影响较大。因此,未来研究将聚集于改善后长期贮藏的馒头,测试其保质期、感官评价和物理性质的变化,评估阿魏酸处理对馒头品质长期稳定性的影响。

参考文献

- [1] 崔国庭,王缙,郭金英,等.加工方式对面筋蛋白结构及性质影响的研究进展[J].食品与机械,2024,40(3):225-232.
CUI G T, WANG D, GUO J Y, et al. Research progress on the effects of processing methods on gluten protein structure and properties[J]. Food & Machinery, 2024, 40(3): 225-232.
- [2] 邢金金,张霞,母梦羽,等.不同筋力小麦面筋聚集特性及结构特性分析[J].食品研究与开发,2024,45(2):72-79.
XING J J, ZHANG X, MU M Y, et al. Analysis of gluten aggregation characteristics and structural characteristics of wheat with different gluten strengths[J]. Food Research and Development, 2024, 45(2): 72-79.
- [3] 苏婷,刘鸿飞,李芳,等.综述小麦面团制造中麦谷蛋白大聚体的变化[J].中国食品学报,2023,23(4):481-489.
SU T, LIU H F, LI F, et al. Review on changes of glutenin macropolymer in wheat dough processing[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(4): 481-489.
- [4] 刘姣姣,郭金英.亲水胶体对冷冻面筋蛋白性质的影响及机

理研究进展[J].粮食与油脂,2023,36(12):6-9.

- LIU J J, GUO J Y. Research progress on the influence of hydrophilic colloids on the properties of frozen gluten protein and its mechanism[J]. Cereals & Oils, 2023, 36(12): 6-9.
- [5] 王红娜,曹欣然,黄连燕,等.膳食纤维与阿魏酸复配对面团和面筋蛋白性质的影响[J].食品科学,2019,40(12):62-69.
WANG H N, CAO X R, HUANG L Y, et al. Effects of dietary fiber and ferulic acid on properties of dough and gluten[J]. Food Science, 2019, 40(12): 62-69.
- [6] 冯钰琳,张慧娟,王静.膳食纤维和阿魏酸对面团醒发过程中麦谷蛋白大聚体聚集态的影响及其分子间相互作用[J].中国食品学报,2023,23(6):92-102.
FENG Y L, ZHANG H J, WANG J. The effect of dietary fiber and ferulic acid on the aggregation of glutenin macropolymer and intermolecular interactions during dough resting[J]. Chinese Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(6): 92-102.
- [7] 李凡,李言,钱海峰,等.阿拉伯木聚糖提取及其对面团性质影响研究进展[J].中国粮油学报,2022,37(6):194-202.
LI F, LI Y, QIAN H F, et al. Research progress on extraction of arabinoxylan and its effects on dough[J]. China Oils and Fats, 2022, 37(6): 194-202.
- [8] 刘珂,徐成,郭玉梅,等.酚酸类化合物阿魏酸的研究进展[J].当代化工研究,2022(20):70-74.
LIU K, XU C, GUO Y M, et al. Research progress of phenolic acid compound ferulic acid[J]. Modern Chemical Research, 2022(20): 70-74.
- [9] 孙晓明,辛嘉英,林雪,等.阿魏酸及其衍生物在食品添加剂领域研究进展[J].中国食品添加剂,2019,30(1):170-176.
SUN X M, XIN J Y, LIN X, et al. Research progress of ferulic acid and its derivatives in food additives[J]. China Food Additives, 2019, 30(1): 170-176.
- [10] 郝杰.小麦麸皮中酚酸类抗氧化活性物质的研究[D].北京:北京工商大学,2011:7-9.
HAO J. Study on phenolic acids antioxidant active substances in wheat bran[D]. Beijing: Beijing Technology and Business University, 2011: 7-9.

- [11] KŁOSOK K, WELC R, SZYMAŃSKA-CHARGOT M, et al. Phenolic acids-induced aggregation of gluten proteins. Structural analysis of the gluten network using FT-Raman spectroscopy[J]. *Journal of Cereal Science*, 2022, 107: 103503.
- [12] 梁盈, 袁晓娟, 刘巧丽, 等. 阿魏酸及其衍生物的生理活性及应用研究进展[J]. *食品与生物技术学报*, 2018, 37(5): 449-454.
- LIANG Y, XI X J, LIU Q L, et al. Research progress on the physiological activity and application of ferulic acid and its derivatives[J]. *Journal of Food and Biotechnology*, 2018, 37(5): 449-454.
- [13] LI W, SUN X, MARIGA A M, et al. Effects of ferulic acid on the polymerization behavior of gluten protein and its components[J]. *Food Hydrocolloids*, 2024, 147: 109388.
- [14] 张慧娟, 冯钰琳, 付冰冰, 等. 麦麸酚酸类物质对面团聚集态的影响[J]. *中国食品学报*, 2021, 21(4): 55-63.
- ZHANG H J, FENG Y L, FU B B, et al. Effect of phenolic acids from wheat bran on aggregation state of dough[J]. *Chinese Journal of Food Science*, 2021, 21(4): 55-63.
- [15] 黎钧铸, 黄文晶, 沈汪洋, 等. 卡拉胶/ α -淀粉酶复合冻融稳定性对馒头的影响[J]. *食品与生物技术学报*, 2022, 41(11): 82-89.
- LI J Z, HUANG W J, SHEN W Y, et al. Effects of freeze-thaw stability of carrageenan/ α -amylase complex on steamed bread [J]. *Journal of Food and Biotechnology*, 2022, 41(11): 82-89.
- [16] ZHOU Y, ZHAO D, FOSTER T J, et al. Konjac glucomannan-induced changes in thiol/disulphide exchange and gluten conformation upon dough mixing[J]. *Food Chemistry*, 2014, 143: 163-169.
- [17] ZHANG D L, HE T T, LIANG H H, et al. Flour quality and related molecular characterization of high molecular weight glutenin subunit genes from wild emmer wheat accession TD-256[J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2016, 64(24): 5 128.
- [18] 李翠翠, 马宇翔, 闫慧丽, 等. 面条加工过程中蛋白质中巯基和二硫键的变化规律[J]. *中国食品学报*, 2021, 21(1): 143-147.
- LI C C, MA Y X, YAN H L, et al. The change regulation of sulfhydryl groups and disulphide bonds in protein in noodle processing[J]. *Chinese Journal of Food Science*, 2021, 21(1): 143-147.
- [19] WANG Q, LI Y, SUN F, et al. Tannins improve dough mixing properties through affecting physicochemical and structural properties of wheat gluten proteins[J]. *Food Research International*, 2015, 69: 64-71.
- [20] HAN C W, MA M, ZHANG H H, et al. Progressive study of the effect of superfine green tea, soluble tea, and tea polyphenols on the physico-chemical and structural properties of wheat gluten in noodle system[J]. *Food Chemistry*, 2020, 308: 125676.
- [21] WANG J J, YANG J, WANG Y, et al. Heat and edible salts induced aggregation of the *N*-terminal domain of HMW 1Dx5 and its effects on the interfacial properties[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 82: 388-398.
- [22] BOCK J E, CONNELLY R K, DAMODARAN S. Impact of bran addition on water properties and gluten secondary structure in wheat flour doughs studied by attenuated total reflectance Fourier transform infrared spectroscopy[J]. *Cereal Chemistry*, 2013, 90(4): 377-386.
- [23] WELC-STANOWSKA R, KŁOSOK K, NAWROCKA A. Effects of gluten-phenolic acids interaction on the gluten structure and functional properties of gluten and phenolic acids [J]. *Journal of Cereal Science*, 2023, 111: 103682.
- [24] WANG P, ZHAO X, YANG R, et al. Water-extractable arabinoxylan-induced changes in the conformation and polymerization behavior of gluten upon thermal treatment[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2020, 68(13): 4 005-4 016.
- [25] FENG Y, FENG X, LIU S, et al. Effects of dietary fiber and ferulic acid on dough characteristics and glutenin macropolymer (GMP) aggregation behavior during dough resting[J]. *LWT*, 2022, 166: 113782.
- [26] 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.
- SU A X, YANG Q, LI W, 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.
- [27] 杨天一, 徐学明, 金亚美, 等. 不同面筋蛋白组分对面包品质的影响[J]. *食品与生物技术学报*, 2023, 42(2): 40-44.
- YANG T Y, XU X M, JIN Y M, et al. Effects of different gluten components on bread quality[J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2023, 42(2): 40-44.
- [28] 邹易, 王晶, 肖安红. 专用小麦粉中高分子麦谷蛋白亚基的组成及含量对稳定时间的影响[J]. *粮食与饲料工业*, 2016(8): 22-26.
- ZOU Y, WANG J, XIAO A H. Composition and content of HMW-GS and its correlation with the dough stability time of tailored wheat flour[J]. *Cereal & Feed Industry*, 2016(8): 22-26.
- [29] WELC R, KŁOSOK K, SZYMANSKA-CHARGOT M, et al. Effect of chemical structure of selected phenolic acids on the structure of gluten proteins[J]. *Food Chemistry*, 2022, 389: 133109.
- [30] 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: 15-18.
- WANG C C. Effect mechanism of dietary fiber and ferulic acid on steamed bread quality and starch digestibility[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022: 15-18.