

谷朊粉对青稞-小麦粉混合面团网络结构的影响

吴小红¹, 宋洋波², 冯晓宁¹, 白文洁¹, 鱼雷¹, 张义全², 许丹^{1*}

(1. 青海大学医学院公共卫生系, 青海西宁 810016) (2. 青海大学农牧学院, 青海西宁 810016)

摘要: 青稞作为青藏高原地区的主要粮食作物, 具有丰富的营养价值和健康益处, 但因面筋蛋白含量较低, 不易加工成型。谷朊粉作为一种天然面筋蛋白, 能有效改善面团的流变学特性。为了改善青稞面团的加工性能, 该文探究了谷朊粉添加对青稞-小麦混合面团网络结构的影响。通过红外光谱、拉曼光谱、扫描电子显微镜和激光共聚焦显微镜等技术, 分析了面团的分子结构、二硫键的变化以及面筋蛋白的微观结构。结果表明, 添加谷朊粉可以显著增强面团中的氢键和二硫键含量, 促进蛋白质二级结构的有序化, 其中 40% 青稞粉+8% 谷朊粉组的二硫键含量最高 (7.49 $\mu\text{mol/g}$)。此外, 谷朊粉的加入有效改善了青稞粉对面筋网络结构的破坏, 使面团表现出更好的整体结构稳定性。综上所述, 该研究为青稞粉在面制品中的应用与开发提供了科学依据, 并揭示了通过添加谷朊粉提高青稞面团质量的潜力。

关键词: 青稞粉; 谷朊粉; 拉曼光谱; 红外检测; 二硫键

文章编号: 1673-9078(2025)12-165-171

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.12.1400

Effects of Vital Wheat Gluten on A Highland Barley-Wheat Flour Mixed Dough Network Structure

WU Xiaohong¹, SONG Yangbo², FENG Xiaoning¹, BAI Wenjie¹, YU Lei¹, ZHANG Yiquan², XU Dan^{1*}

(1. Department of Public Health, Qinghai University Medical College, Xining 810016, China)

(2. College of Agriculture and Animal Husbandry, Qinghai University, Xining 810016, China)

Abstract: Highland barley, valued for its high nutritional value and health benefits, is a major cereal crop cultivated in the Tibetan Plateau region. However, its low gluten protein content makes it difficult to process. The addition of vital wheat gluten (VWG), a natural source of gluten protein, can improve the rheological properties of dough. The effect of VWG addition on the network structure of highland barley flour (HBF)-wheat flour mixed dough was investigated using infrared spectroscopy, Raman spectroscopy, scanning electron microscopy (SEM), and confocal scanning laser microscope (CSLM). The molecular structure of the dough, changes in disulfide bonds, and the microstructures of the gluten proteins were also analyzed. The results indicate that the addition of VWG markedly enhances the number of hydrogen and disulfide bonds within the dough and promotes the ordering of the protein secondary structure, with the highest disulfide bond content (7.49 $\mu\text{mol/g}$) observed in the group containing 40% HBF and 8% VWG. Furthermore, the inclusion of VWG effectively mitigated the disruption of the gluten network structure caused by HBF, enhancing the overall structural stability of the dough. The results provide a scientific basis for the application and development of HBF in baked products and demonstrate that VWG addition can improve the quality of highland barley dough.

Key words: highland barley flour; vital wheat gluten; Raman spectroscopy; infrared spectroscopy; disulfide bonds

引文格式:

吴小红, 宋洋波, 冯晓宁, 等. 谷朊粉对青稞-小麦粉混合面团网络结构的影响[J]. 现代食品科技, 2025, 41(12): 165-171.

WU Xiaohong, SONG Yangbo, FENG Xiaoning, et al. Effects of vital wheat gluten on a highland barley-wheat flour mixed dough network structure [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(12): 165-171.

收稿日期: 2024-09-19; 修回日期: 2024-10-31; 接受日期: 2024-11-07

基金项目: 青海大学青年科研基金项目 (2021-QYY-4); 青海大学医学部中青年教师科研基金项目 (2021-ky-3); 海东河湟新区双创特色载体科技成果转化项目

作者简介: 吴小红 (1997-), 女, 在读硕士研究生, 研究方向: 营养与食品卫生学, E-mail: wuoxiaohong7@163.com

通讯作者: 许丹 (1988-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 营养与食品卫生学, E-mail: 2021990014@qhu.edu.cn

青稞作为我国青藏高原地区主要的粮食作物^[1,2],在农业生产中占有重要地位,具有“三高两低”的特点^[3],且富含 β -葡聚糖及可抗氧化的酚类物质,具有降胆固醇、降血脂和降血糖等功效^[4-7],开发利用前景广阔。但是,由于青稞粉中面筋蛋白含量较低^[8],难以形成稳定的面团结构,为了实现更好的加工性能,通常需要将其与小麦粉混合使用。

谷朊粉是一种天然的面筋蛋白,麦醇溶蛋白和麦谷蛋白是其主要成分,对面团的流变学性质起着至关重要的作用^[9-11]。许多研究表明,加入谷朊粉能有效改善杂粮面团的流变学特性,增强其面筋网络结构并提升最终产品的食用品质^[12]。乔明锋等^[13]在青稞粉与高筋小麦粉的混合物中添加鱼糜和谷朊粉,生产出了感官品质良好且营养价值高的青稞鱼面。魏新虹^[14]的研究表明,在青稞面条中添加12%的谷朊粉可达到最佳效果,表明谷朊粉是面条加工中优秀的面团改良剂。崔晚晚等^[10]的研究表明,在面粉中添加1.5%至3%的谷朊粉能显著改善面筋特性,增强面粉的粉质和拉伸性能,从而改善面条的硬度和口感。熊添等^[15]也在马铃薯热干面的生产过程中通过添加谷朊粉来改善其质构和储存特性。此外,Thanusheree等^[16]的研究指出,谷朊粉与亲水胶体及乳化剂联合使用,可以生产出高质量的含75%苦荞的面条,并保留了苦荞挂面的大部分营养成分。

本文以不同比例的青稞粉和小麦粉混合制成的面团为研究对象,探讨了谷朊粉添加对面团性能的具体影响机制,旨在为青稞粉在面食产品中的应用与开发提供一定的科学依据和参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

小麦粉、青稞粉:均由青海新丁香粮油有限责任公司提供;谷朊粉:购自河南封丘县华丰粉业有限公司。

异丙醇、丙酮、冰醋酸、无水乙醇、Tris-HCl缓冲液(80 mmol/L, pH 值 8.5)、Tris-HCl 缓冲液(250 mmol/L, pH 值 8.5)、5,5'-二硫代双(2-硝基苯甲酸)、二硫糖醇(Dithiothreitol, DTE)、罗丹明 B(均为分析纯):均购自北京半夏科技有限公司。

1.2 仪器与设备

Q SJ-B02R1 小熊切碎机,广东小熊电器股份有限公司;752 Pro 紫外可见分光光度计,上海棱光技术有限公司;LabRAM Odyssey 显微共焦拉曼光谱仪,法国 HORIBA Jobin Yvon S.A.S. 公司;Nicolet 6700 傅里叶红外光谱仪,赛默飞世尔科技(中国)有限公司;

Eppendorf 5810R 高速离心机,艾本德中国有限公司;JSM-7900F 场发射扫描电子显微镜,日本电子株式会社;Nikon A1R+ 激光共聚焦显微镜,日本电子株式会社。

1.3 试验方法

1.3.1 混合粉的配制

将青稞粉按照40%、50%、60%(质量分数)的不同比例与小麦粉混合,作为基础混合粉。在这些混合粉中添加8%的谷朊粉,充分混合后备用。不含谷朊粉的青稞-小麦混合粉作为对照组,纯小麦粉作为参照组。

1.3.2 混合面团的制备

参考王红娜等^[17]的研究。准确称量100 g 混合粉,加入70 mL 蒸馏水,用自动和面机和成均匀的面团,将面团于干净的自封袋中静置10 min。

1.3.3 红外光谱检测

参考皮俊翔^[18]的方法并稍作修改。采用溴化钾压片法,将少量冷冻干燥后的面团粉与溴化钾混合用研钵充分研磨至没有颗粒,用压片机压成透明的薄片,在 4 cm^{-1} 分辨率下进行扫描测定,扫描波长为 $400\sim 4\,000\text{ cm}^{-1}$,扫描次数为3次。

红外谱图的处理:采用PeakFit v4.12 软件对酰胺 I 带($1\,600\sim 1\,700\text{ cm}^{-1}$ 区间)的光谱图进行分析。

1.3.4 拉曼光谱检测

参考皮俊翔^[18]的方法。将添加了谷朊粉的冷冻干燥面团粉末放置于覆盖有一层铝箔纸的玻璃片上,使用波长为633 nm、功率为10 mW 的激光光源进行聚焦。扫描范围设定在 $100\sim 4\,000\text{ cm}^{-1}$,分辨率设置为 2 cm^{-1} ,数据采集时间为5 s,总共扫描3次。

1.3.5 巯基和二硫键的测定

参考王红娜等^[17]的研究并进行适当修改。

1.3.6 扫描电子显微镜检测

将1.3.2中所制备的面团进行真空冷冻干燥。扫描电子显微镜的检测方法参考许丹等^[19]的研究。测试前将冷冻干燥制得的面团敲碎,选取内部表面较为平整的样品块用导电胶带粘到样品台上,将样品台进行喷金处理,在1 kV 的加速电压条件下,分别使用200倍和600倍的放大倍数对样品进行分析。

1.3.7 激光共聚焦显微镜检测

激光共聚焦显微镜检测方法参考先前研究^[19]。

1.3.8 数据分析

利用Excel 和 SPSS 28.0 进行数据处理,采用Origin 2022 软件进行绘图。数据以平均值 $\pm$ 标准差

来表示 ($n=3$), $P<0.05$ 表示具有显著性差异。

2 结果与讨论

2.1 红外光谱分析

FT-IR 分析通过评价化学键和官能团的分子振动来揭示结构变化。如图 1 所示, 尽管谷朊粉的添加量不同, 但红外谱图的峰值位置和趋势基本一致, 表明谷朊粉的添加未改变面团中特定基团的性质。图 1 显示, 在 $3\ 000\sim3\ 600\text{ cm}^{-1}$ 范围内存在一个强烈的宽吸收峰, 推测这是由于面团内部-OH 的伸缩振动以及氢键的形成所致^[20]。随着谷朊粉的加入, 该吸收峰的位置出现了不同程度的偏移, 当加入谷朊粉之后, 与对照组相比该吸收峰的位置分别从 $3\ 417.93$ 、 $3\ 419.78$ 、 $3\ 409.45\text{ cm}^{-1}$ 降至 $3\ 417.66$ 、 $3\ 418.84$ 、 $3\ 398.93\text{ cm}^{-1}$, 表明面团内部的氢键含量发生不同程度的增加。Bock 等^[21]指出, 随着体系中水分子间或水分子与聚合物间氢键数量的增加, -OH 的伸缩振动向较低波数位移, 因为水分子更容易与高分子聚合物的官能团形成氢键, 所需能量减少。

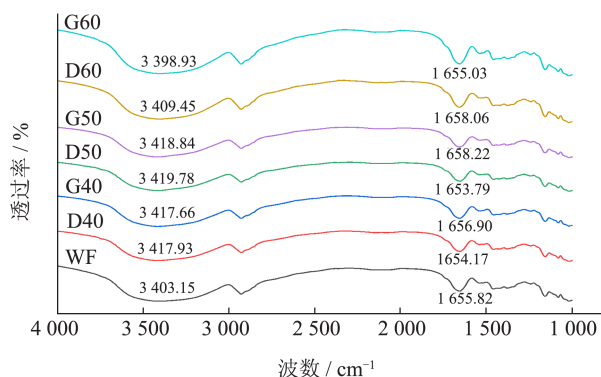


图 1 谷朊粉对官能团的影响

Fig.1 Effects of vital wheat gluten on functional groups

注: WF 为参照组, 即纯小麦粉面团; D40 为未添加谷朊粉的 40% 青稞-小麦面团; G40 为添加 8% 谷朊粉的 40% 青稞-小麦面团; D50 为未添加谷朊粉的 50% 青稞-小麦面团; G50 为添加 8% 谷朊粉的 50% 青稞-小麦面团; D60 为未添加谷朊粉的 60% 青稞-小麦面团; G60 为添加 8% 谷朊粉的 60% 青稞-小麦面团。

酰胺 I 带 ($1\ 600\sim1\ 700\text{ cm}^{-1}$) 对蛋白质二级结构的变化非常敏感, 通常用于研究蛋白质的二级结构^[22]。此区域主要反映 C=O 伸缩振动, 当蛋白质氨基酸残基间的氢键较强时, C=O 的电子云密度降低, 振动所需能量减少, 导致吸收峰向低波数位移, 接近 $1\ 600\text{ cm}^{-1}$ 。具体而言: $1\ 610\sim1\ 640\text{ cm}^{-1}$ 对应 β -折叠结构, $1\ 640\sim1\ 650\text{ cm}^{-1}$ 对应无规则卷曲结构, $1\ 650\sim1\ 660\text{ cm}^{-1}$ 对应 α -螺旋结构, $1\ 660\sim1\ 700\text{ cm}^{-1}$

对应 β -转角结构^[23]。图 1 显示, $1\ 650\text{ cm}^{-1}$ 附近的吸收峰在添加谷朊粉后发生偏移, 表明谷朊粉的添加引起了面团体系中蛋白质二级结构的变化。用 PeakFit 对酰胺 I 带进行二阶导数和曲线拟合处理, 计算峰面积得到二级结构含量。已有研究表明, β -折叠是一种具有特定几何构象的扩展结构, 主要涉及局部协同性氢键的形成; 而 β -转角则是一种非周期性结构, 主要关联于多肽链的弯折、转向和重新定位^[24]。由图 1 可知, 面团的二级结构主要由 β -折叠和 β -转角为主, 加入谷朊粉之后, β -折叠含量增加, 表明蛋白质二级结构变得有序, 面团结构稳定性提高。赵玉茹等^[25]的研究也表明, 谷朊粉的加入使植物蛋白肉中的无规则卷曲向 β -折叠转化, 结构趋于有序化。

2.2 拉曼光谱分析

添加谷朊粉后的面团拉曼吸收光谱图如图 2 所示。已知 $500\sim1\ 800\text{ cm}^{-1}$ 是拉曼光谱的指纹区, 该区域内观察到显著变化, 表明谷朊粉的加入可能对面团中蛋白质的空间构象及其氨基酸残基周围的环境产生了明显影响^[26]。此外, 在 C-H 和-OH 振动区 ($2\ 800\sim3\ 400\text{ cm}^{-1}$) 的峰位也发生了变化。通过对这些特定区域的深入分析, 可以更好地理解加入谷朊粉对面团中蛋白质性质的影响。研究表明, 在蛋白质、多肽以及芳香族氨基酸中, C-H 伸缩振动通常在约 $2\ 900\text{ cm}^{-1}$ 处显现。随着青稞粉的加入, 吸收峰的位置从 $2\ 909.21\text{ cm}^{-1}$ 逐渐偏移到 $2\ 904.96\text{ cm}^{-1}$, 这种变化可能是由于青稞粉与水分子羟基之间的氢键竞争, 导致面筋蛋白结构发生变化, 从而引起吸收峰的位移。在拉曼指纹图谱中, $1\ 230\sim1\ 350\text{ cm}^{-1}$ 对应酰胺 III 带, $1\ 600\sim1\ 700\text{ cm}^{-1}$ 对应酰胺 I 带, 其中酰胺 I 带来自 C-N 与 C=O 的振动, 酰胺 III 带主要来自 N-H 在平面上的转折和 C-N 键的振动。酰胺 III 带中, 蛋白质二级结构中的 β -折叠谱带位于 $1\ 230\sim1\ 245\text{ cm}^{-1}$ 区域^[26]。从图 2 可以看出, 与对照组相比, 加入谷朊粉之后面团在 $1\ 240.13\text{ cm}^{-1}$ 处的峰值强度逐渐增强, 表明蛋白质二级结构中的 β -折叠含量增加, 蛋白质结构更加稳定。在拉曼光谱图中, $500\sim550\text{ cm}^{-1}$ 的特征峰可以归属为二硫键的伸缩振动, 二硫键结构是影响蛋白质功能和蛋白质稳定性的关键因素。其中 510 cm^{-1} 附近对应扭-扭-扭结构、 525 cm^{-1} 附近对应扭-扭-反结构、 535 cm^{-1} 附近对应反-扭-反结构, 随着吸收频率的增加, 二硫键的结构稳定性逐渐降低, 即反-扭-反是最不稳定的结构^[27]。对曲线进行拟合后发现, 对照组中扭-扭-扭结构含量分别为 47.19%、36.26%、26.91%, 添加谷朊粉之后, 扭-扭-扭结构的含量分别增加了 21.74%、

22.44%、38.49%，表明谷朊粉的添加增强了二硫键的稳定性，从而提高了蛋白质网络结构的稳定性。由图 2 也可以看出，加入谷朊粉之后，二硫键的吸收峰由高波数偏移至低波数方向，进一步证实了其结构稳定性的增强。

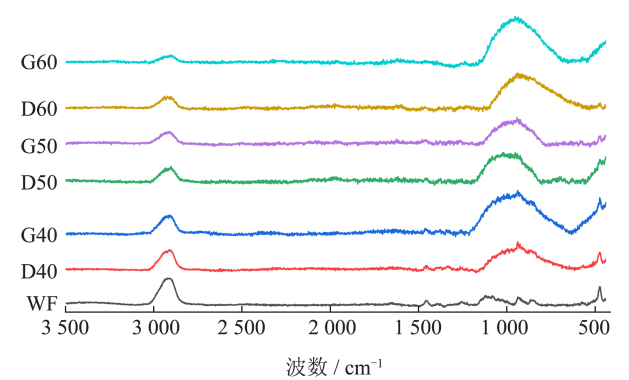


图 2 添加谷朊后面团的拉曼光谱图
Fig.2 Raman spectra of dough with vital wheat gluten

2.3 面团巯基和二硫键分析

二硫键普遍存在于面筋蛋白网络结构中，对于保持面筋蛋白的稳定性和面团的流变性至关重要^[28]。通常，面团中的半胱氨酸经氧化后形成二硫键，这些二硫键相互连接形成大的纤维状聚合物，构成面团的“骨架”，赋予面团一定的弹性和强度^[29]。表 1 显示了谷朊粉添加对面团二硫键的影响。从表 1 可以看出，当添加 40%、50%、60% 青稞粉后，与纯小麦粉组相比，面团游离巯基含量显著上升，而总巯基含量显著下降 ($P<0.05$)，其中纯小麦粉组的二硫键含量最高 ($6.61\text{ }\mu\text{mol/g}$)，与其他组别相比均有显著性差异 ($P<0.05$)。这是因为，当不同比例的青稞粉添加到混合面团中时，醇溶蛋白和谷蛋白含量减少，直接影响了二硫键的形成^[30]，且随着青稞粉添加比例的增加，面筋蛋白的稳定性遭受破坏的程度也加大。当添加 8% 谷朊粉后，面团的总巯基和二硫键含量与对照组相比均显著增加，而游离巯基含量无显著变化。具体而言，40% 青稞粉+8% 谷朊粉组面团 ($7.49\text{ }\mu\text{mol/g}$) 的二硫键含量最高，60% 青稞粉+8% 谷朊粉组面团 ($5.40\text{ }\mu\text{mol/g}$) 的二硫键含量最低，而 50% 青稞粉+8% 谷朊粉组面团 ($6.19\text{ }\mu\text{mol/g}$) 的二硫键含量与纯小麦粉组最接近。这表明谷朊粉的添加促进了二硫键的形成，提高了面筋蛋白的稳定性，形成了更强的面团骨架结构。谷朊粉富含谷蛋白和醇溶蛋白，在混合粉中直接添加谷朊粉能够有效补偿青稞粉引起的面筋蛋白稀释问题，有助于形成稳定的面筋网络^[31]。韩曼玉等^[32]在将谷朊粉添加到小麦粉中时发现，随着谷朊粉比例的增加，谷蛋白大聚体 (GMP) 的含量升高，

而 GMP 通过巯基-二硫键的交换反应强化了面筋网络结构。

表 1 谷朊粉对面团二硫键的影响
Table 1 Effects of vital wheat gluten on the disulfide bond of dough

样品	游离巯基含量/ ($\mu\text{mol/g}$)	总巯基含量/ ($\mu\text{mol/g}$)	二硫键含量/ ($\mu\text{mol/g}$)
WF	0.09 ± 0.02^c	13.31 ± 0.43^b	6.61 ± 0.21^b
D40	0.52 ± 0.03^b	10.89 ± 0.20^{cd}	5.19 ± 0.11^{de}
G40	0.57 ± 0.02^{ab}	15.55 ± 0.42^a	7.49 ± 0.21^a
D50	0.53 ± 0.06^b	10.27 ± 0.44^{de}	4.87 ± 0.23^{ef}
G50	0.60 ± 0.05^{ab}	12.98 ± 0.61^b	6.19 ± 0.33^c
D60	0.58 ± 0.10^{ab}	9.62 ± 0.16^e	4.52 ± 0.13^f
G60	0.66 ± 0.05^a	11.45 ± 0.11^c	5.40 ± 0.07^d

注：同一列右肩不同的小写字母表示具有显著性差异 ($P<0.05$)。

2.4 扫描电子显微镜

扫描电子显微镜具有高分辨率，适用于观察面团的微观结构^[33]。在面团体系中，面筋蛋白与水分子的相互作用促使内部形成紧密的三维网络结构，而淀粉颗粒则作为填充物支撑这一网络结构^[34]。图 3 展示了谷朊粉对面筋蛋白微观结构的影响。可以看出，纯小麦粉面团 (图 3a、3b) 的面筋蛋白网络结构连续性好，相互连接紧密。大小不一的球形淀粉颗粒镶嵌于其中，且淀粉颗粒表面圆润，整体呈现的网络结构较为稳定。加入青稞粉之后，可以观察到面筋蛋白结构松散，出现较多断裂的面筋片段，且随着青稞粉添加比例的增加，这一趋势加剧。当青稞粉的添加比例达到 60% 时，结构被严重破坏。这表明添加青稞粉对面筋蛋白的微观结构有负面作用。原因在于，随着青稞粉的增加，面团中的面筋蛋白含量相对减少；另外，青稞粉与面筋蛋白争夺自由水，抑制了面筋网络的形成。王小媛等^[35]研究也发现，高比例的红枣粉添加会导致面团的面筋网络稀释，破坏气室结构，增大面筋间的空隙。观察添加 8% 谷朊粉的面团 SEM 照片可以看出，与对照组相比，在低倍镜下可以看到片状的面筋，而在高倍镜下则观察到不同大小的淀粉颗粒附着在面筋膜上，表明面团的整体组织得到改善。加入 8% 谷朊粉后的面筋网络更平滑，孔径更均匀，这表明谷朊粉增加了面筋蛋白的含量，使面筋网络更加稳固。崔晚晚等^[36]研究也发现，谷朊粉可以增强面筋的网络结构，增加麦谷蛋白的形成，促进面条硬度增加。此外，扫描电镜结果显示，60% 青稞粉+8% 谷朊粉组面团中面筋蛋白的网络结构与纯小麦粉组最为接近。

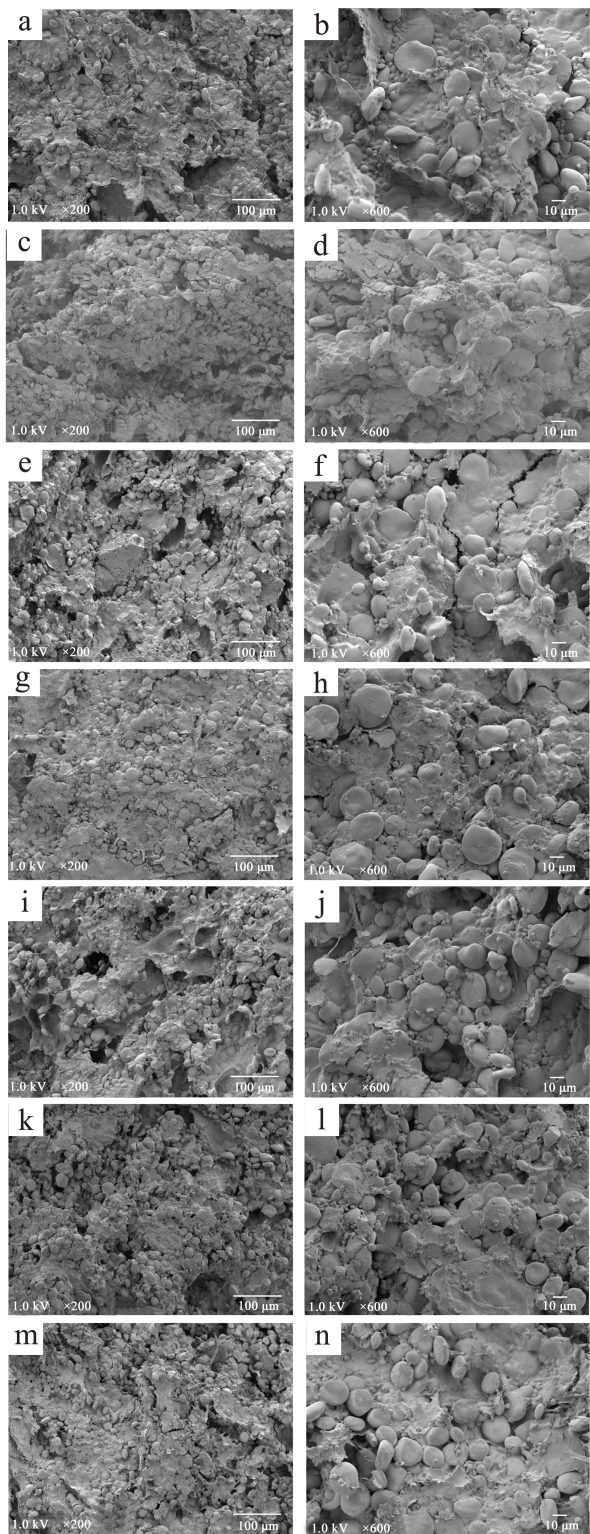


图 3 添加谷朥粉对面团微观结构的影响（200×、600×）

Fig.3 Effects of vital wheat gluten on microstructure of dough (200×, 600×)

注：图中 a、b 为纯小麦面团；c、d 为未添加谷朥粉的 40% 青稞-小麦面团；e、f 为添加 8% 谷朥粉的 40% 青稞-小麦面团；g、h 为未添加谷朥粉的 50% 青稞-小麦面团；i、j 为添加 8% 谷朥粉的 50% 青稞-小麦面团；k、l 为未添加谷朥粉的 60% 青稞-小麦面团；m、n 为添加 8% 谷朥粉的 60% 青稞-小麦面团。

2.5 激光共聚焦显微镜

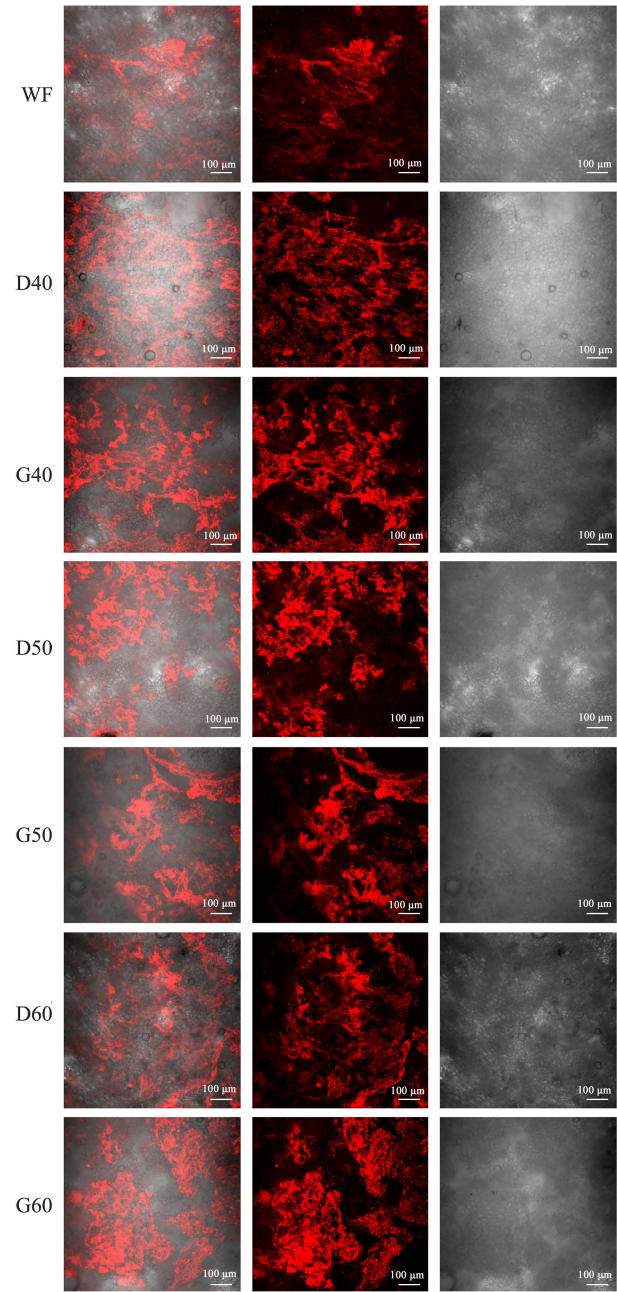


图 4 面团的激光共聚焦显微镜

Fig.4 Confocal scanning laser microscope (CSLM) of dough

为进一步分析面团内蛋白质的形态分布，使用了激光共聚焦显微镜（CSLM），观察结果见图 4。罗丹明 B 用于对面筋蛋白进行标记^[37]。图 4 显示，在纯小麦粉样品中，面团构建了一个完整的面筋网络，表现出优良的延展特性，并且淀粉颗粒嵌于其中，表明淀粉颗粒与蛋白质分子之间存在相互缠绕的现象，共同构建了一个稳固的体系。加入青稞粉之后，原有的面筋蛋白形成的网络结构受到了干扰，导致其连续性减弱且变得更加疏松。同时，原本被面筋蛋白包裹的淀粉颗粒也暴露出来。这与青稞粉导致的面筋蛋白分布

不均密切相关,进而降低了面团的稳定性。当青稞粉添加比例达到60%时,大量淀粉颗粒暴露,表明添加60%的青稞粉几乎完全破坏了面团中的蛋白质网络结构。该结果与扫描电子显微镜观察的结果基本相一致。当添加8%谷朊粉之后,相较于对照组,图像显示出更明亮且更为紧密的结构特征,表明面筋网络的稳定性和紧密度显著提升。这是因为谷朊粉提高了面粉中的蛋白质含量,促进了蛋白质与淀粉之间的结合,增强了蛋白质网络结构。这一发现证明,在混合粉中补充谷朊粉能够增强面团的面筋强度。Hu等^[38]的研究也发现,谷朊粉和羧甲基纤维素的相互作用改善了因添加马铃薯粉导致的面筋基质不连续性和面筋蛋白聚集,形成了更加紧凑的面筋网络,这可能是由于谷朊粉的补充作用。

3 结论

本文通过系统研究发现,谷朊粉的添加对青稞-小麦面团的网络结构产生了显著的积极影响。通过红外光谱和拉曼光谱分析,揭示了谷朊粉添加后面团内部氢键含量的增加以及蛋白质二级结构的有序化,这有助于提高面团的弹性和强度。同时,面团中巯基和二硫键的分析显示,谷朊粉的添加显著增加了二硫键的含量,增强了面筋蛋白的稳定性,有利于形成更加坚固的面团结构骨架。利用扫描电子显微镜和激光共聚焦显微镜进行的观察进一步证实了谷朊粉对面团微观结构的改善作用,添加谷朊粉后的面团展现出更加平滑、孔径更均匀的面筋网络结构。

综上所述,谷朊粉作为一种天然的面团改良剂,在青稞-小麦混合粉中的应用表现出良好的潜力。通过增加面团中的氢键和二硫键含量,改善蛋白质二级结构的有序化,以及优化面团的微观结构,谷朊粉可显著提升青稞粉在面制品中的加工特性和最终产品的品质。这些结果为青稞粉在面制品中的广泛应用提供了一定的参考。

参考文献

- [1] 吴舒颖,高纪儒,杜艳,等.青稞制品加工研究进展[J].食品研究与开发,2021,42(21):201-210.
- [2] 梁珠英.青海省青稞产业发展现状及对策建议[J].青海农林科技,2020,1:42-45,52.
- [3] 王梦倩,孙颖,邵丹青,等.青稞的营养价值和功效作用研究现状[J].食品研究与开发,2020,41(23):206-211.
- [4] CHEN H H, NIE Q X, XIE M, et al. Protective effects of β -glucan isolated from highland barley on ethanol-induced gastric damage in rats and its benefits to mice gut conditions [J]. Food Research International, 2019, 122: 157-166.
- [5] 陈晨,何蒙蒙,吴泽蓉,等.青稞 β -葡聚糖的研究现状与展望[J].中国食品添加剂,2020,31(2):172-177.
- [6] OBADI M, SUN J, XU B. Highland barley: Chemical composition, bioactive compounds, health effects, and applications [J]. Food Research International, 2021, 140: 110065.
- [7] LIU H C, CHEN T, XIE X Q, et al. Hepatic lipidomics analysis reveals the ameliorative effects of highland barley β -Glucan on western diet-induced nonalcoholic fatty liver disease mice [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2021, 69(32): 9287-9298.
- [8] ZHANG H X, CHEN G J, LIU M, et al. Effects of multi-frequency ultrasound on physicochemical properties, structural characteristics of gluten protein and the quality of noodle [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 67: 105135.
- [9] 曹希雅,邓长建,王永伟,等.谷朊粉在食品中的应用研究[J].现代农业科技,2018,8:238-239,241.
- [10] 崔晚晚,李利民,郑学玲,等.不同种类谷朊粉对新鲜面条品质的影响[J].粮食与油脂,2018,31(12):43-49.
- [11] YAO Y Y, JIA Y M, LU X R, et al. Release and conformational changes in allergenic proteins from wheat gluten induced by high hydrostatic pressure [J]. Food Chemistry, 2021, 368(3): 130805.
- [12] ZHAO B B, DENG J W, LI M Y, et al. Effects of gluten on rheological properties of dough and qualities of noodles with potato-wheat flour blends [J]. Cereal Chemistry, 2020, 97(3): 601-611.
- [13] 乔明锋,彭毅秦,丁捷,等.速冻青稞鱼面的研发及配方优化[J].食品科技,2017,3:162-168.
- [14] 魏新虹.谷朊粉的添加量对青稞面条品质的影响[J].粮食加工,2017,42(2):66-67.
- [15] 熊添,何建军,蔡芳,等.谷朊粉对马铃薯热干面品质的影响[J].食品与发酵工业,2021,47(2):205-211.
- [16] THANUSHREE M P, SUDHA M L, MARTIN A, et al. Enhancing the nutritional and quality profiles of buckwheat noodles: Studies on the effects of methods of milling and improvers [J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 160: 113286.
- [17] 王红娜,曹欣然,黄莲燕,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.
- [18] 皮俊翔.茶多酚对面筋蛋白网络结构影响机制的研究[D].无锡:江南大学,2020.
- [19] 许丹,赵宇慈,曾凡逵,等.添加马铃薯雪花全粉对面团特性和纸杯蛋糕营养品质的影响[J].现代食品科技,2021,37(3):154-162.
- [20] XU J W, LIU L, LI X H, et al. Role of xanthan gum in wheat-highland barley dough and noodle quality [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46: e17163.
- [21] BOCK J E, DAMODARAN S. Bran-induced changes in water structure and gluten conformation in model gluten dough studied by Fourier transform infrared spectroscopy [J]. Food Hydrocolloids, 2013, 31(2): 146-155.
- [22] 刘珍,王金厢,李学鹏,等.马铃薯淀粉-卵清蛋白-肌球蛋白互作对肌球蛋白凝胶的影响[J].中国食品学报,2024,24(7):128-137.
- [23] 孙晓静,麻琳,张丽霞,等.低温花生粕粉对小麦面团特性的影响[J].食品研究与开发,2020,41(20):35-39,50.
- [24] 胡敢.琥珀酰化卵白蛋白凝胶结构及其伤口敷料应用研究[D].

- 武汉:华中农业大学,2022.
- [25] 赵玉茹,杨进洁,边文洁,等.谷朊粉对豌豆植物蛋白肉产品特性的影响[J].食品研究与开发,2024,45(2):1-6.
- [26] 皮俊翔,张根义.茶多酚对面团中面筋蛋白结构的影响[J].食品工业科技,2020,41(18):1-7,16.
- [27] 刘兴丽,沈力,张艳艳,等.紫甘薯花色苷对面筋蛋白结构特性及饺子皮品质的影响[J].食品科学,2022,43(14):14-21.
- [28] ZHANG J, LI M Q, LI C R, et al. Effect of wheat bran insoluble dietary fiber with different particle size on the texture properties, protein secondary structure, and microstructure of noodles [J]. Grain & Oil Science and Technology, 2019, 2(4): 97-102.
- [29] 徐茹,杨晓清,刘晓波,等.超声波处理对马铃薯全粉面团网状结构的影响[J].中国食品学报,2022,22(10):242-251.
- [30] 薛超强.低升糖指数苦荞挂面的研制及品质改良[D].无锡:江南大学,2023.
- [31] LIU J X, MEENU M, XU B J. Effect of unripe banana flour and wheat gluten on physicochemical characteristics and sensory properties of white salted noodles [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2020, 44(7): 14513.
- [32] 韩曼玉,陈洁,姚科,等.谷朊粉对挂面血糖生成指数的影响及机理研究[J].河南工业大学学报(自然科学版),2024,45(3):78-85,94.
- [33] ZHOU J, YANG H, QIN X, et al. Effect of β -cyclodextrin on the quality of wheat flour dough and prebaked bread [J]. Food Biophysics, 2019, 14(2): 173-181.
- [34] 范嘉伟,郭金英.亲水胶体对冷冻面团及馒头特性的研究进展[J].中国调味品,2023,48(10):208-213.
- [35] 王小媛,王文静,丁俊豪,等.红枣粉对小麦面团特性以及微观结构的影响[J].食品工业科技,2018,39(9):28-32,39.
- [36] 崔晚晚,李利民,郑学玲.谷朊粉对面筋和面团流变学及面条质构特性的影响[J].食品科技,2018,43(6):165-171.
- [37] JIA F Y, MA Z, WANG X L, et al. Effect of kansui addition on dough rheology and quality characteristics of chickpea-wheat composite flour-based noodles and the underlying mechanism [J]. Food Chemistry, 2019, 298: 125081.
- [38] HU X H, CHENG L, HONG Y, et al. Combined effects of wheat gluten and carboxymethylcellulose on dough rheological behaviours and gluten network of potato-wheat flour-based bread [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2021, 8 (56): 4249-4158.