

青稞粉对小麦面筋蛋白网络结构的影响

吴小红¹, 宋洋波², 冯晓宁¹, 鱼雷¹, 李泽¹, 柴怡宁¹, 许丹^{1*}

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

摘要: 该文探究了不同添加比例 (10%、20% 和 50%) 的青稞粉 (Highland Barley Flour, HBF) 对小麦面筋蛋白网络结构的影响。热机械学特性检测表明, 随着青稞粉添加比例的增多, 面团吸水率、形成时间和蛋白质弱化度 (C_2) 显著升高 ($P<0.05$), 而淀粉糊化特性、淀粉的稳定性和淀粉的回生值都整体呈现下降的趋势, 表明青稞粉对面团中的蛋白质弱化及淀粉的糊化特性有明显的影响。扫描电子显微镜和激光共聚焦显微镜结果显示, 较高的添加比例会阻碍面筋蛋白和淀粉的相互作用, 从而破坏面筋蛋白的网络结构。拉曼光谱和红外光谱结果显示, 蛋白质的空间结构发生了改变, 二硫键由相对稳定的扭-扭-扭结构向不稳定的反-扭-反结构转变。二硫键测定结果显示, 对照组的二硫键含量最高 (14.41 $\mu\text{mol/g}$), 当添加 50% 青稞粉后, 二硫键含量相比对照组降低了 21.44%。综上所述, 添加不同比例的青稞粉均会破坏小麦面筋蛋白的稳定性及空间结构。该研究可为开发青稞蛋糕提供理论依据和实践参考。

关键词: 青稞粉; 热机械学特性; 拉曼光谱; 红外检测; 二硫键; 小麦面筋蛋白

文章编号: 1673-9078(2025)03-300-308

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.3.0021

Effects of Adding Highland Barley Flour on the Network Structure of Wheat Gluten

WU Xiaohong¹, SONG Yangbo², FENG Xiaoning¹, YU Lei¹, LI Ze¹, CHAI Yining¹, XU Dan^{1*}

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

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

Abstract: Different proportions (10%, 20% and 50%) of highland barley flour (HBF) were added to wheat dough to clarify the effect of HBF proportion on the network structure of wheat gluten. The measured thermomechanical properties of the dough samples showed that when the HBF proportion increased, the mixed dough samples showed a significant increasing trend ($P<0.05$) in water absorption rate, formation time, and protein-weakening degree (C_2), but an overall decreasing trend in gelatinization degree, stability, and starch retrogradation value. This indicates that the protein-weakening and gelatinization degrees of starch in mixed dough were significantly affected by HBF addition. Scanning electron microscopy and confocal laser scanning microscopy images revealed that adding a higher proportion of HBF hindered the gluten-starch interaction, thus disrupting the network structure of gluten. Raman and FT-IR spectra indicated that the protein spatial structure was altered and that the disulfide bonds were transformed from a relatively stable g-g-g configuration into an unstable t-g-t

引文格式:

吴小红, 宋洋波, 冯晓宁, 等. 青稞粉对小麦面筋蛋白网络结构的影响[J]. 现代食品科技, 2025, 41(3): 300-308.

WU Xiaohong, SONG Yangbo, FENG Xiaoning, et al. Effects of adding highland barley flour on the network structure of wheat gluten [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(3): 300-308.

收稿日期: 2024-01-05

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-kyy-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, 硕士生, 研究方向: 营养与食品卫生学, E-mail: woxxiaohong7@163.com

通讯作者: 许丹 (1987-), 女, 博士, 讲师, 研究方向: 营养与食品卫生学, E-mail: 373114814@qq.com

configuration. The disulfide bond content was found to be the highest (14.41 $\mu\text{mol/g}$) in the control group and 21.44% less than that of the control group when 50% HBF was added. In summary, the stability and spatial structure of wheat gluten were disrupted by the addition of HBF in any proportion. This study provides a theoretical foundation and practical reference for the development of cakes with HBF.

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

青稞广泛种植于我国的西藏、青海、甘肃、四川和内蒙古,具有耐寒、耐旱、耐贫瘠、生长期短、适应性强、易栽培等优点^[1,2]。许多研究报道,青稞是一种高蛋白、高维生素、高膳食纤维、糖和脂肪含量较低的作物,其营养品质全面均衡^[1,3-5]。近年来,青稞被广泛应用于特色食品、功能食品、酒和饮料等领域,是一种具有广阔应用前景的经济作物^[3,6-8]。青稞营养价值高,产业发展潜力巨大,但仍存在口感粗糙、消化率低等问题,这严重制约了青稞产品的消费和青稞产业的规模化发展^[3,9]。迄今为止,青稞产业发展仍然比较缓慢,仍处于传统产品、传统工艺和传统市场的“三传统地位”之内。除此之外,青稞加工还具有产品效益低、深加工程度浅、附加值低等缺点,所以青稞产品市场迫切需要专业化和多元化发展^[4]。

近几年,有关青稞粉的添加对面团特性和青稞面制品品质的研究相继被报道。张慧娟等^[10]探究了青稞粉的不同添加量如何影响馒头的品质和面团的热机械学性质,结果表明,随着青稞粉添加量的增多,馒头的感官评价和质构评分均呈下降趋势。李晶等^[11]对青稞面条的质构特征、感官评价和面粉流变学特性进行了分析,并研究了不同添加比例的谷朊粉对青稞面条品质及面团特性的影响。刘亚平等^[12]通过在小麦面粉中加入不同比例的发芽青稞粉,研究其对面团的粉质特性、流变学性质和产品质量的影响,为青稞麻花产品的开发利用提供了理论依据。青稞粉作为保健食品的加工原料,越来越受到人们的重视。然而,青稞粉的加工成型性能差、口感粗糙,此外,青稞粉中的面筋含量低,难以形成面筋网络,这些特性限制了青稞粉的应用^[13]。本文将青稞粉以不同比例添加至小麦粉中,研究青稞粉对小麦面筋蛋白网络结构的影响,对提高青稞-小麦面团的利用和开发具有十分重要的意义。

1 材料与方法

1.1 实验材料

小麦粉:蓝匙牌 60 低筋小麦粉,益海嘉里(北京)粮油食品工业有限公司;青稞粉:青海新绿康食品有限责任公司。

1.2 实验试剂

盐酸、氢氧化钠、硝酸、无水亚硫酸钠、柠檬酸钠、钼酸铵、氯化钾、氯化钠、溴化钾,以上试剂均购自国药化学试剂有限公司;苯酚、丙酮、乙醇、冰乙酸、二硫糖醇、5,5'-二硫代双(2-硝基苯甲酸)、Tris-HCl 缓冲液(80 mmol/L, pH 值 8.5)、Tris-HCl 缓冲液(250 mmol/L, pH 值 8.5)、异丙醇、冰醋酸、二硫赤藓醇、罗丹明 B。以上试剂均购自利安隆博华(天津)医药化学有限公司。所用化学试剂均为分析纯。

1.3 实验仪器

Q SJ-B02R1 小熊切碎机:广东小熊电器股份有限公司; Mixolab 混合试验仪:法国肖邦技术公司; JSM-5600LV 扫描电子显微镜:日本电子株式会社; Olympus Fluoview Fv1200 激光扫描共聚焦显微镜:日本电子株式会社; 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。

1.4 实验方法

1.4.1 混合粉制备

将预先准备好的青稞粉分别以 0%、10%、20% 和 50% (质量分数) 的添加比例与小麦粉混匀,采

用小熊切碎机进行机械混匀,待充分混匀后装于自封袋中备用。其中对照组为 0% 青稞粉。

1.4.2 混合面团的制备

制备混合面团的方法参考王红娜等^[14]的方法并稍作修改。准确地称量 250 g 混合粉,加入 150 mL 蒸馏水,用自动和面机和成均匀的面团(时间设置为 5 min),将面团于干净的自封袋中静置 10 min。

1.4.3 扫描电子显微镜检测

将 1.4.2 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^[15]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 20 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。

1.4.4 激光共聚焦显微镜检测

激光共聚焦显微镜测定方法参考之前的研究^[15]。先用超纯水配制 0.25 wt.% 的罗丹明 B 荧光染液。将湿润的面团均匀地涂抹在载玻片上,再加入几滴罗丹明 B 荧光染液,放置 2 min 后,将多余的染料用超纯水慢慢冲洗干净,再盖上盖玻片,进行显微镜观察。测定条件如下:物镜放大倍数 20×,目镜放大倍数 10×,罗丹明 B 的激发波长为 594 nm。

1.4.5 面团的热机械学特性测定

测定面团的热机械学特性时参考《ISO 17718:2013 揉混和加热条件下测定面粉的流变学特性》Chopin+ 标准测试法^[11,15]。

1.4.6 拉曼光谱检测

拉曼光谱的检测参考皮俊翔^[16]的方法。将添加不同比例青稞粉冷冻干燥后获得的面团粉,置于包裹一层锡箔纸的玻璃片上,然后用激光光源进行激光聚焦。激光测试波长为 633 nm,功率为 10 mW,扫描范围为 100~4 000 cm^{-1} ,分辨率为 2 cm^{-1} ,数据采集时间为 5 s,扫描次数为 3 次。

1.4.7 红外光谱检测

红外光谱的检测参考皮俊翔^[16]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 400~4 000 cm^{-1} ,扫描次数为 3 次。

1.4.8 二硫键检测

二硫键的检测方法参考王红娜等^[14]的研究并

进行适当修改。游离巯基含量的测定:取 50 mg 面团粉加入 4 mL 的 Ellman's 试剂,10 min 后摇匀,8 000 r/min (20 °C) 离心 8 min,取上清液在 412 nm 处测定吸光度。总巯基含量的测定:取 50 mg 面团粉加入 1.8 mL 二硫糖醇还原液,60 °C 反应 2 h 后,加入 3 mL 100 mmol/L 的冰醋酸-丙酮溶液洗涤离心并重复两次,除去上清液后于剩余沉淀中加入 44 mL 的 Ellman's 试剂,8 000 r/min (20 °C) 离心 8 min,取上清液在 412 nm 波长处测定吸光度。

总巯基、游离巯基和二硫键含量按公式(1)~

(4) 计算:

$$C = \frac{A}{\epsilon \times b} \quad (1)$$

$$D_1 = \frac{C_1 V_1}{M} \quad (2)$$

$$D_2 = \frac{C_2 V_2}{M} \quad (3)$$

$$D = \frac{C_1 V_1 - C_2 V_2}{2M} \quad (4)$$

式中:

C ——样品的巯基浓度, $\mu\text{mol/mL}$;

A ——样品在 412 nm 波长处的吸光度;

ϵ ——摩尔消光系数,值为 13 600 $\text{L}/(\text{mol} \cdot \text{cm})$;

b ——比色皿厚度,值为 1 cm;

D_1 ——总巯基含量, $\mu\text{mol/g}$;

C_1 ——样品的总巯基浓度, $\mu\text{mol/mL}$;

V_1 ——样品测定总巯基时样品总体积, mL;

M ——样品质量, g;

D_2 ——游离巯基含量, $\mu\text{mol/g}$;

C_2 ——样品的游离巯基浓度, $\mu\text{mol/mL}$;

V_2 ——样品测定游离巯基时样品总体积, mL;

D ——二硫键含量, $\mu\text{mol/g}$ 。

1.4.9 数据分析

所有实验数据使用 SPSS 22.0 软件进行处理,采用单因素方差分析。数值用平均值 $\pm$ 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 扫描电子显微镜

添加不同比例青稞粉后,面团的扫描电子显微镜检测结果如图 1 所示。结果显示,对照组样品(图 1a、1b)的结构相对均匀和紧凑,淀粉颗粒呈圆形或椭圆形,大小不一,小淀粉颗粒似乎部

分嵌入丝状和纤维状的面筋网络结构中，而较大的淀粉颗粒则更倾向于更多地暴露在表面。这说明在没有青稞粉的情况下，小麦面筋蛋白和小麦淀粉相互作用并紧密结合形成更好的簇。当添加比例为10%时（图1c、1d），依然可以看出其结构较均匀和紧凑，但是和对照组相比，其面筋蛋白的表面均匀度与光滑度都较差。当添加比例为20%时（图1e、1f），其结构被进一步破坏，部分呈现出更加松散的小簇结构，且有些面筋蛋白部分已经开始断裂呈现出松散的状态。当添加比例为50%时（图1g、1h），面团中面筋蛋白的网状结构被严重破坏，可以看出高添加比例的青稞粉对于面团结构有较大的破坏。这是因为青稞粉中缺乏面筋蛋白，原小麦面筋蛋白被稀释，面筋蛋白不足以包裹和结合淀粉（包括小麦和青稞），从而改变了面团的微观结构，导致小麦面筋结构相对松散。扫描电镜结果显示，青稞粉的添加阻碍了面筋网络结构的形成，同时也破坏了面筋蛋白网络的连续性。在朱明霞等^[17]的研究中，当青稞粉添加量超过30%时，也观察到面团中的面筋蛋白遭到严重的破坏，网状结构受到极大的破坏，形成了大的空洞，几乎看不见面筋蛋白的网络结构。高比例的添加会导致面团中面筋蛋白结构遭到严重破坏，且过量添加时，青稞的淀粉颗粒充斥于面筋网络，导致面筋网络结构的连续性和延展性降低，产生较大的空洞，导致面团结构紧密无弹性。

2.2 激光共聚焦显微镜

在面团中添加不同比例青稞粉后，其激光共聚焦的显微结构如图2所示。由图2可以看出，对照组中的面筋蛋白在大小淀粉颗粒上均匀分布，其网络结构形态最好，这对面团的稳定性十分有利。当添加量为10%时，尽管面筋蛋白的网络结构发生了改变，但仍能观察到较连续的面筋蛋白网络结构，这表明较低的添加比例对面筋蛋白网络结构的破坏作用不是很大。当添加比例为20%时，与对照组相比，其网状结构遭到了更大程度的破坏，网络结构出现了破裂且其含量也明显减少。当添加比例为50%时，面团中的面筋蛋白网络结构遭到了极大的破坏，其网络结构已经基本被完全破坏。由此可见，添加青稞粉影响了小麦面团的微观结构，其主要原因可能是青稞粉的高比例降低了混合面团中的谷蛋

白含量，从而将二硫键裂解为游离巯基，从而降低了面团体系中二硫键形成的谷蛋白^[18]。基于以上所述，青稞粉的加入对小麦面筋蛋白网络结构均有一定的影响，尤其是添加50%青稞粉时对小麦面筋蛋白网络结构的破坏效果最强，该结果与扫描电子显微镜的检测结果基本一致。在Wu等^[19]的研究中，当青稞粉添加量达到30%时，面团中面筋蛋白的网络结构被破坏，面筋网络连续性变弱。

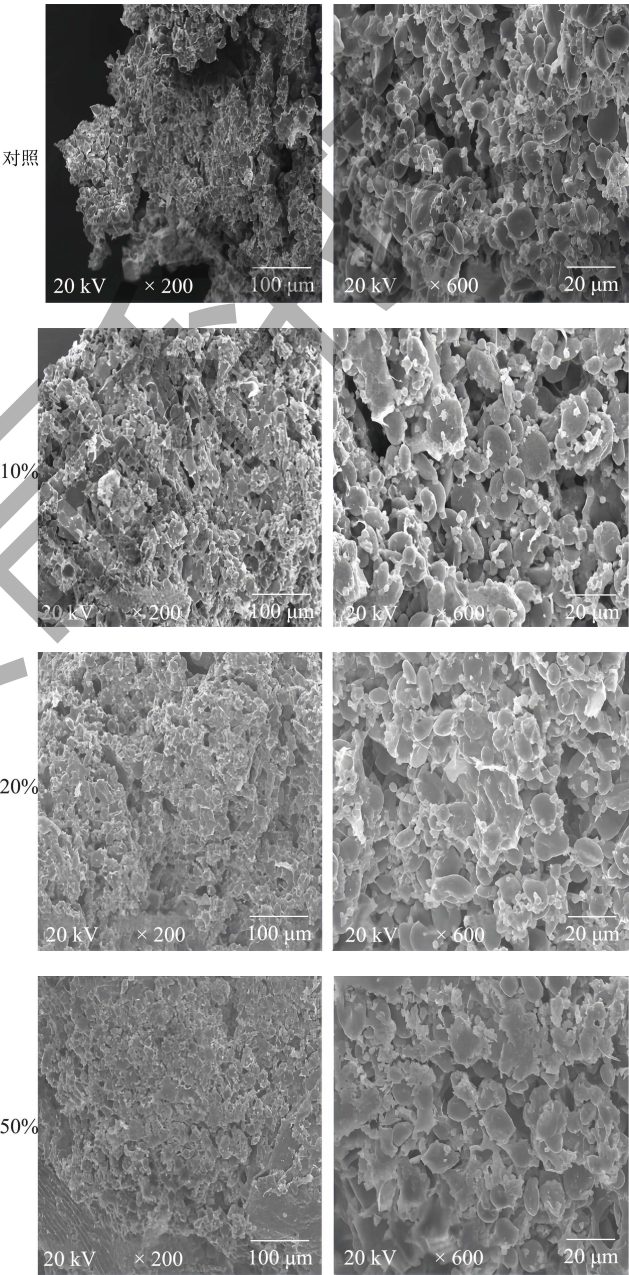


图1 不同添加比例青稞粉对面团微观结构的影响
Fig.1 Effects of highland barley flour with different proportions on microstructure of dough

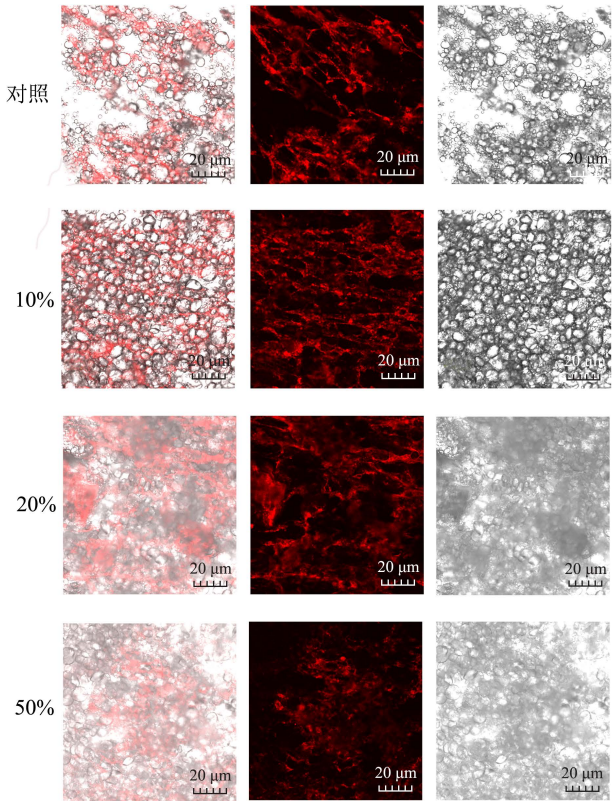


图 2 面团的激光共聚焦显微镜图

Fig.2 Confocal scanning laser microscope (CSLM) of dough

2.3 青稞粉对面团热机械学特性的影响

如图 3 和表 1 所示，随着青稞粉添加比例的增多，混合面团的吸水率和吸水率指数均显著升高 ($P<0.05$)，添加 50% 青稞粉的吸水率高达 59.90%，在张慧娟等^[10]和于利伟等^[20]的研究中，也发现青稞粉的加入使面团的吸水率显著提高。吸水率升高的原因可能是由于青稞粉中膳食纤维含量较高所致，因为纤维结构中含有较多的羟基，造成吸水率不同，使得较多的水分通过氢键相互作用^[20]。

C_1 时间是指面团的成型时间，面筋强度越高，成型时间越长；稳定时间能反映出面团的耐揉程度，随着稳定时间的延长，面团筋力也随之增大。如表 1 所示，随着青稞粉添加比例的增多，面团的形成时间 (C_1 时间) 与对照组相比均明显延长，而稳定时间呈先升高后降低但整体增大的趋势。但是，稳定时间的延长并不代表着混合面团的面筋强度增加，而是因为添加青稞粉后会降低面团的稠度，进而延长了面团的稳定时间。该结果与张慧娟等^[10]的研究结果不同，在她们的研究中，青稞粉的添加使面团的稳定时间先减小后增大，在她们的研究中使用的青稞粉是经过微细化处理的，从这一变化趋势来看，也反映了与普通杂粮粉相比微细化杂粮粉的变化规律是有差异的。 C_2 扭矩可以检测在搅拌力和温度双重作用下的蛋白质弱化^[15]。如表 1 所示，随着青稞粉的添加比例从 10% 升高到 50%， C_2 值显著增大 ($P<0.05$)，这说明蛋白质的弱化程度增强，导致蛋糕的烘焙质量受到影响。 C_3 、 C_4 和 C_5 值都可以用来表示淀粉的糊化特性^[21,22]。由表 1 可知，随着青稞粉添加比例的增大， C_3 (淀粉糊化特性)， C_4 (淀粉的稳定性) 和 C_5 (淀粉的回生) 值都整体呈现下降的趋势，当添加 50% 青稞粉时， C_3 、 C_4 和 C_5 值与对照组相比均出现了显著降低 ($P<0.05$) 的情况，由此可见，小麦淀粉的糊化特性发生了显著的变化。造成这一结果的原因可能是由于青稞粉的吸水率较高，导致面团的稠度值降低^[20]。影响面制品的品质及质构特性的因素很多，比如淀粉的糊化特性和回生特性等，前期有研究表明，馒头的稳定性会受到糊化特性的影响，而馒头的老化则会受到回生特性的影响^[23,24]。

表 1 不同添加比例青稞粉对面团热机械学特性的影响

Table 1 Effects of highland barley flour with different proportions on the thermomechanical properties of dough

参数	对照	10%	20%	50%
吸水率/%	53.50 ± 0.26 ^c	54.70 ± 0.10 ^b	55.10 ± 0.20 ^b	59.90 ± 0.30 ^a
C_1 时间/min	0.63 ± 0.04 ^c	0.73 ± 0.03 ^b	0.72 ± 0.02 ^b	0.98 ± 0.02 ^a
C_1 扭矩/(N·m)	1.15 ± 0.01 ^a	1.08 ± 0.02 ^b	1.13 ± 0.02 ^a	1.15 ± 0.03 ^a
稳定时间/(min)	1.05 ± 0.03 ^d	6.20 ± 0.02 ^a	6.07 ± 0.03 ^b	5.50 ± 0.02 ^c
C_2 扭矩/(N·m)	0.36 ± 0.03 ^d	0.45 ± 0.01 ^c	0.53 ± 0.03 ^b	0.59 ± 0.02 ^a
C_2 温度/min	53.50 ± 0.26 ^a	51.70 ± 0.10 ^b	51.20 ± 0.20 ^c	51.30 ± 0.10 ^c
C_3 扭矩/(N·m)	2.14 ± 0.05 ^a	2.17 ± 0.05 ^a	2.15 ± 0.03 ^a	1.94 ± 0.01 ^b
C_4 扭矩/(N·m)	2.07 ± 0.02 ^a	2.06 ± 0.01 ^a	2.03 ± 0.03 ^a	1.63 ± 0.02 ^b
C_5 扭矩/(N·m)	3.10 ± 0.01 ^a	3.01 ± 0.04 ^b	2.93 ± 0.06 ^b	2.32 ± 0.06 ^c

注：同行右肩不同的小写字母表示具有显著性差异 ($P<0.05$)。

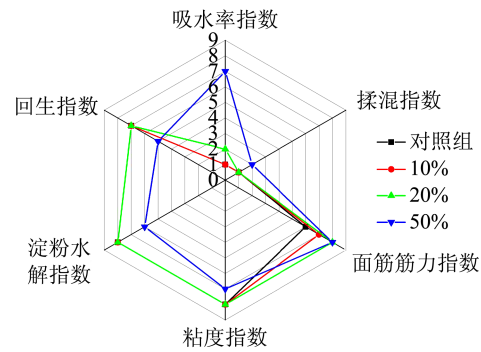


图 3 Mixolab 检测的目标剖面图指数

Fig.3 Indexes of target profile tested by Mixolab

2.4 面团拉曼光谱谱图分析

向小麦粉中添加不同比例的青稞粉后采用拉曼光谱进行分析研究，结果如图 4 所示。已知拉曼的指纹图谱范围在 500~1 800 cm^{-1} 区间，随着青稞粉的加入，该区域发生了显著的改变，提示青稞粉可能显著改变了蛋白质的空间结构以及氨基酸残基之间的环境^[25]。除此之外，添加青稞粉之后，C-H 振动区及 -OH 振动区（2 800~3 400 cm^{-1} ）的峰位也随之发生了改变^[26]。通过分析这些特定区域，可以更深入地了解青稞粉加入面团后蛋白质的变化情况。具体出峰位置及其振动来源如表 2 所示^[25]。已有研究发现，在蛋白质、多肽和芳香族氨基酸中，通常会在波数 2 900 cm^{-1} 附近的范围内出现 C-H 的伸缩振动，从图中可以观察到，随着青稞粉添加比例的增加，该处吸收峰的位置从 2 911.29 cm^{-1} 逐渐偏移到了 2 899.59 cm^{-1} 附近，这种变化可能是由于青稞粉的加入与水分子羟基之间的氢键结合位点竞争，因此改变了面筋蛋白主链的结构，使得吸收峰的位置发生偏移。在拉曼指纹图谱中，1 230~1 350 cm^{-1} 对应的是酰胺 III 带，1 600~1 700 cm^{-1} 对应的是酰胺 I 带，其中酰胺 I 带来自于 C-N 与 C=O 的振动，酰胺 III 带来自于 N-H 在平面上的转折和 C-N 键的振动。在酰胺 III 带中，蛋白质二级结构中的 β - 折叠谱带位于 1 230~1 245 cm^{-1} 区域之间，而无规则卷曲谱带则位于 1 240~1 255 cm^{-1} 区域之间^[25]。从图中可以看出，1 256.96 cm^{-1} 和 1 331.22 cm^{-1} 处的峰强随着青稞粉的加入相比于对照组而言是逐渐减弱的，这说明随着青稞粉的加入之后，蛋白质二级结构中 β - 折叠的含量和无规则卷曲结构的含量会增加，也就是说蛋白质结构趋于无序化。皮俊翔^[16]的研究显示，添加 2% 茶多酚时使 β - 折叠结构的含量增加了 17.2%，这也说明多酚类会影响蛋白质二级结构的比例，使蛋白质结构变得无序化。

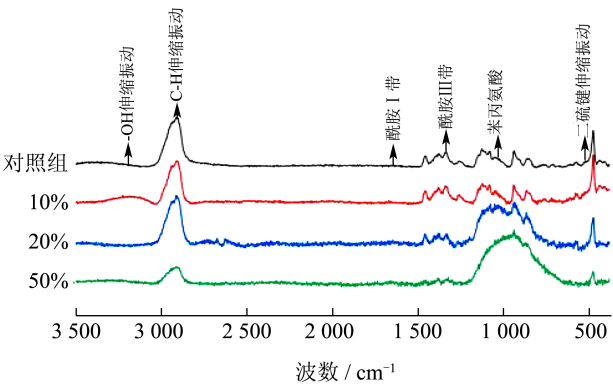


图 4 不同添加比例青稞粉面团的拉曼光谱图

Fig.4 Raman spectra of dough with different proportions of highland barley flour

表 2 面团拉曼光谱中谱带的归属

Table 2 Tentative assignment of selected bands in the Raman spectra of dough

波数/ cm^{-1}	振动信息归属
3 074.16~3 257.33	-OH 伸缩振动，氢键作用
2 922.76~2 943.64	C-H 伸缩振动
1 600.00~1 700.00	酰胺 I 带
1 230.00~1 350.00	酰胺 III 带
1 004.17	苯丙氨酸残基
500.00~550.00	S-S 伸缩振动

在拉曼光谱图中，500~550 cm^{-1} 范围内的特征峰是二硫键的特征谱带，在这个频率范围内，二硫键结构形式与波数的对应关系为：510 cm^{-1} 附近为扭-扭-扭 (g-g-g) 结构、525 cm^{-1} 附近为扭-扭-反 (g-g-t) 结构、535 cm^{-1} 附近为反-扭-反 (t-g-t) 结构，二硫键结构的稳定性随着吸收频率的增加而逐渐变得不稳定，其中最不稳定的是反-扭-反结构^[27]。二硫键结构是影响蛋白质功能发挥的关键因素，也是影响蛋白质稳定性的关键因素。如图 4 所示，当青稞粉添加比例增加时，二硫键的吸收峰由低波数偏移至高波数方向，表明其结构稳定性降低。本研究采用 Peakfit 4.12 软件进行曲线拟合后对二硫键的结构进行定量分析，由表 3 可看出，与未加入青稞粉的对照组相比，添加 20%、50% 青稞粉后可使二硫键中扭-扭-扭结构含量分别降低 27.92%、29.02%；在添加 50% 青稞粉后，相比于对照组二硫键的扭-扭-反结构含量显著降低；而反-扭-反结构含量在添加 20%、50% 青稞粉组中较对照组均有显著增加，分别增加了 33.46%、39.41%。

表 3 不同添加比例青稞粉面团二硫键（500~550 cm⁻¹）结构占比
Table 3 Structure content of disulfide bonds (500~550 cm⁻¹) in dough with different proportions of highland barley flour

二硫键结构 /%	对照	10%	20%	50%
扭-扭-扭	42.60 ± 1.10 ^a	52.92 ± 10.84 ^a	14.68 ± 0.84 ^b	13.58 ± 2.06 ^b
扭-扭-反	28.80 ± 2.69 ^{ab}	31.19 ± 3.43 ^a	23.26 ± 0.99 ^{bc}	18.41 ± 0.09 ^c
反-扭-反	28.61 ± 3.78 ^b	15.90 ± 7.40 ^c	62.07 ± 1.83 ^a	68.02 ± 1.97 ^a

注：同行右肩不同的小写字母表示具有显著性差异（ $P<0.05$ ）。下表同。

综上所述，随着青稞粉添加比例的增加，面团中的二硫键发生了由 g-g-g 结构和 g-g-t 结构向 t-g-t 结构转变的变化，使得二硫键的稳定性被降低了，因此小麦面筋蛋白的网络结构被削弱。这可能是由于青稞粉中富含的多酚对二硫键具有还原作用，而多酚具有良好的抗氧化性，这会影响二硫键的稳定性，从而阻碍二硫键在面团分子间的形成，这种作用的效果与酚类的抗氧化能力呈正比^[28]。在皮俊翔^[16]的研究中发现，在面团中添加 2% 茶多酚时会使二硫键的扭-扭-扭结构含量下降 23.25%，导致稳定性下降，进而影响面筋蛋白的网络结构，造成面团的品质下降。

2.5 面团红外光谱谱图分析

在红外光谱中，峰出现的位置及其变化的强度取决于样品中分子化学键所在的化学环境和振动形态^[16]。由图 5 可以看出，在 3 700~3 100 cm⁻¹ 区域内，面团存在一个较强的吸收峰，其原因在于面团内部分子 -OH 的伸缩振动以及面团中的氢键相互作用造成的。随着青稞粉添加比例的增加，该吸收峰的位置出现了不同程度的向右偏移，对照组的吸收峰位置为 3 407.98 cm⁻¹，当添加比例为 10%、20% 和 50% 时，该吸收峰的位置分别为 3 419.79、3 406.67、3 398.33 cm⁻¹，这说明青稞粉的加入使面团内部的氢键含量逐渐增加。Bock 等^[29]指出随着体系中水分子之间或水分子与聚合物之间氢键含量的增加，-OH 伸缩振动会向低波数方向移动，因为水分子更易与高分子聚合物中的官能团形成氢键，此时 -OH 伸缩振动所需要的能量较低。而且随着氢键作用的增强，-OH 伸缩振动会越向低波数方向移动^[30]。皮俊翔^[16]发现当茶多酚添加量增加时，这个峰就会逐渐向右移动，这表明在面团体系中，多酚类物质的添加增强了氢键的作用。在张慧娟等^[10]的研究中，分析结果表明随着青稞粉添加量的增大，面团的吸水率提高了 3.6%~7.0%，所以吸水率的增加可能导致 3 700~3 100 cm⁻¹ 处的吸收峰位置向右

偏移。-CH 的伸缩振动的吸收峰则是在 2 930 cm⁻¹ 附近，1 800~1 500 cm⁻¹ 波段为蛋白质氨基 I、II 带的特征吸收峰。从图中可得出在添加青稞粉后，1 650 cm⁻¹ 附近处吸收峰发生了偏移，表明青稞粉的添加引起了面团体系中蛋白质二级结构的变化。

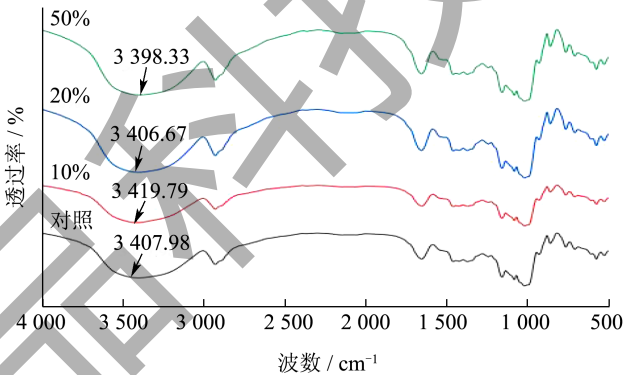


图 5 不同添加比例青稞粉面团的红外谱图

Fig.5 FT-IR spectra of dough with different proportions of highland barley flour

2.6 面团二硫键分析

二硫键是重要的化学键，会影响面筋蛋白流变特性，并能够稳定面筋蛋白的网络结构^[14]。二硫键的存在对于面筋蛋白网络结构的形成是有利的，但是面筋蛋白网络结构的形成会随着面团中二硫键含量的减少而受到影响，最终面制品的品质也会因此受到影响^[16]。添加不同比例青稞粉后，面筋蛋白的巯基及二硫键含量见表 4。从表 4 中可以看出，当添加青稞粉之后，面团游离巯基的含量呈上升趋势，而总巯基的含量显著下降（ $P<0.05$ ），其中对照组的二硫键含量最高（14.41 μmol/g），并且与其他组别相比均有显著性差异（ $P<0.05$ ），这说明在对照组中，面筋蛋白网络的稳定性是最强的。由表 4 可知，当青稞粉的添加比例为 10%、20%、50% 时，与对照组相比较，面团中二硫键的含量分别下降了 15.61%、19.08%、21.44%。二硫键含量的减少说明不同添加比例的青稞粉均会导致二硫键的形成被抑制，从而导致面筋蛋白的稳定性遭到严重破坏，同

时，随着青稞粉的添加比例越来越大，面筋蛋白的空间结构遭到破坏的程度也随之增大，这同 2.4 中结论一致。出现这种实验现象的原因可能是青稞粉中含有丰富的具有还原性质的酚类物质，将其加入到面团中可使得二硫键被还原，从而增加了面团中游离巯基的含量，因此，面团中的面筋蛋白的网络结构形成受到了影响。Zhang 等^[31]在将单宁酸加入到小麦粉中，随着单宁酸添加量的增加，未发酵面团中的游离巯基含量增加了 24.2%，导致面团中的二硫键断裂。Wang 等^[32]的研究也发现，添加单宁类多酚可以提高面筋蛋白的游离巯基含量。

表 4 不同添加比例青稞粉对面团二硫键的影响 (μmol/g)

Table 4 Effects of highland barley flour with different proportions on the disulfide bond of dough

样品	游离巯基含量	总巯基含量	二硫键含量
对照	0.24 ± 0.04 ^c	29.20 ± 0.60 ^a	14.41 ± 0.44 ^a
10%	0.35 ± 0.08 ^{bc}	24.83 ± 0.08 ^b	12.16 ± 0.01 ^b
20%	0.47 ± 0.08 ^{ab}	23.90 ± 0.23 ^c	11.66 ± 0.02 ^{bc}
50%	0.58 ± 0.07 ^a	22.82 ± 0.52 ^d	11.32 ± 0.26 ^c

3 结论

本文主要通过对面团的热机械学特性和二硫键含量的测定，以及采用拉曼光谱、红外光谱和扫描电镜对面团结构的分析，探究了添加不同比例青稞粉（10%、20% 和 50%）对小麦面筋蛋白结构的影响。结果表明青稞粉的加入会影响面筋蛋白的网络结构，降低面团体系中总巯基和二硫键的含量，改变面筋蛋白二级结构的比例，从而使面筋蛋白的网络结构遭到破坏，并降低二硫键的稳定性。面团的热机械学特性结果表明，青稞粉的加入会显著影响蛋白质弱化度以及小麦淀粉的糊化特性。综上所述，本研究从多个角度证明了青稞粉的加入会影响小麦的面筋蛋白的形成及结构，可为青稞 - 小麦面粉制品的应用和开发提供理论依据。

参考文献

[1] AL-ANSI W, MAHDI A A, Al-MAQTARI Q A, et al. The potential improvements of naked barley pretreatments on GABA, β-glucan, and antioxidant properties [J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 130: 109698.

[2] LIU H L, CHEN X M, ZHANG D W, et al. Effects of highland barley bran extract rich in phenolic acids on the formation of N ε-carboxymethyllysine in a biscuit model [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66(8): 1916-1922.

[3] GUO T L, HORVATH C, CHEN L, et al. Understanding the nutrient composition and nutritional functions of highland barley (Qingke): A review [J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 103: 109-117.

[4] OBADI M, SUN J, XU B. Highland barley: Chemical composition, bioactive compounds, health effects, and applications [J]. Food Research International, 2021, 140: 110065.

[5] ZHENG B, ZHONG S W, TANG Y K, et al. Understanding the nutritional functions of thermally-processed whole grain highland barley *in vitro* and *in vivo* [J]. Food Chemistry, 2020, 310: 125979.

[6] GUO H, LIN S, LU M, et al. Characterization, *in vitro* binding properties, and inhibitory activity on pancreatic lipase of β-glucans from different Qingke (Tibetan hullless barley) cultivars [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 120(B): 2517-2522.

[7] TUERSUNTUOHETI T, WANG Z H, ZHENG Y Y, et al. Study on the shelf life and quality characteristics of highland barley fresh noodles as affected by microwave treatment and food preservatives [J]. Food Science & Nutrition, 2019, 7(9): 2958-2967.

[8] ZHANG Y Z, YIN L Q, RASHEED H A, et al. Effects of chitosan on the physicochemical properties, *in vitro* starch digestibility, antimicrobial potentials, and antioxidant activities of purple highland barley noodles [J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 132: 109802.

[9] YANG Y Y, JIAO A Q, ZHAO S N, et al. Effect of removal of endogenous non-starch components on the structural, physicochemical properties, and *in vitro* digestibility of highland barley starch [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 117(2): 106698.

[10] 张慧娟,黄莲燕,王静,等.青稞添加量对面团热机械学性质及馒头品质的影响[J].中国食品学报,2016,16(4): 104-112.

[11] 李晶,杜艳,祁兴芳,等.谷朊粉对青稞面条品质及面团流变特性的影响[J].食品工业,2020,41(12):47-51.

[12] 刘亚平,李文钊,曾琦琦,等.发芽青稞粉对青稞-小麦面团特性及非油炸麻花品质的影响[J].中国粮油学报, 2021,36(6):45-51.

[13] LYU Y, MA S, LIU J, et al. A systematic review of highland barley: Ingredients, health functions and applications [J]. Grain & Oil Science and Technology, 2022, 5(1): 35-43.

[14] 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.

[15] 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.

[16] 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.

- [17] 朱明霞,白婷,靳玉龙,等.青稞全粉对面团特性的影响[J].食品工业,2021,42(11):242-246.
- [18] CAO Y F, YANG Z, ZHANG H J, et al. Influence of potato pulp on gluten network structure in wheat dough and steamed bread [J]. *Cereal Chemistry*, 2020, 97(2): 226-234.
- [19] WU D Y, YU L W, GUO L, LI S Q, et al. Effect of highland barley on rheological properties, textural properties and starch digestibility of Chinese steamed bread [J]. *Foods*, 2022, 11(8): 1091.
- [20] 于利伟.青稞-小麦复配粉的品质特性分析[D].咸阳:西北农林科技大学,2021.
- [21] OZTURK S, KAHRAMAN K, TIFTIK B, et al. Predicting the cookie quality of flours by using Mixolab [J]. *European Food Research and Technology*, 2008, 227(5): 1549-1554.
- [22] SVEC I, HRUSKOVA M. The Mixolab parameters of composite wheat/hemp flour and their relation to quality features [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2015, 60(1): 623-629.
- [23] MIYAZAKI M, VAN H P, MAEDA T, et al. Recent advances in application of modified starches for bread making [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2006, 17(11): 591-599.
- [24] GOESAERT H, BRIJS K, VERAVERBEKE W S, et al. Wheat flour constituents: how they impact bread quality, and how to impact their functionality [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2005, 16(1): 12-30.
- [25] 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.
- [26] 高文宏,叶瑞森,潘廷跳,等.基于拉曼光谱解析冻藏过程中鱼糜蛋白的结构变化[J].食品科学,2018,39(24):78-84.
- [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] 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.
- [29] 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.
- [30] LIU M J, WU P Y, DING Y F, et al. Two-dimensional (2D) ATR-FTIR spectroscopic study on water diffusion in cured epoxy resins [J]. *Macromolecules*, 2002, 35(14): 5500-5507.
- [31] ZHANG L, CHENG L, JIANG L, et al. Effects of tannic acid on gluten protein structure, dough properties and bread quality of Chinese wheat [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2010, 90(14): 2462-2468.
- [32] WANG L, LI C, HUANG Q, et al. Biofunctionalization of selenium nanoparticles with a polysaccharide from *Rosa roxburghii* fruit and their protective effect against H₂O₂-induced apoptosis in INS-1 cells [J]. *Food & Function*, 2019, 10(2): 539-553.