微波处理后发芽青稞挂面的品质及餐后血糖变化

普怡然，刘鉴深，唐若心，徐依，赵仁勇，蒋洪新，田双起，柳泽华*

（河南工业大学粮油食品学院，河南省谷物科学与技术重点实验室，河南郑州 450001）

摘要：微波处理可提高发芽青稞淀粉抗消化特性，但其在挂面中是否仍保有此特性有待验证。为此，本研究将未处理青稞粉（Highland barley flour，HBF）、发芽青稞粉（Germinated highland barley flour，GHBF）及 300 W 微波处理发芽青稞粉（Germinated microwave-treated highland barley flour，GMHBF）分别与小麦粉复配制作挂面，系统探究微波处理对挂面品质及餐后血糖的影响。结果表明，同等复配比例下，GHBF 组因内源性酶激活导致结构弱化，蒸煮损失率最高（10.27%）、质构性能最差；而 GMHBF 组经微波介电加热效应诱导淀粉分子结构致密化，蒸煮损失率显著降低，拉伸强度与折断力在 30%和 50%复配比例下优于 HBF 组。扫描电镜观测可见微波致密面筋网络，GMHBF-50%截面结构最为均匀。小鼠餐后血糖反应曲线显示，GMHBF 处理组在各比例下均为最优，控糖效果最佳。同时，GMHBF-50%的感官评价总分最高（87.30 分），实现了血糖控制与感官品质的协同优化。综上，300 W 微波处理能有效改善发芽青稞粉加工短板，在 50%复配比例下可获得兼具良好食用品质与低血糖指数特征的挂面产品。

关键词：青稞；发芽；微波处理；挂面；餐后血糖；质构特性

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2027.8.0843

Effect of Microwave Treatment on Quality Attributes and Postprandial Blood Glucose Response of Germinated Highland Barley Dried Noodles

PU Yiran, LIU Jianshen, TANG Ruoxin, XU Yi, ZHAO Renyong, JIANG Hongxin, TIAN Shuangqi, LIU Zehua*

(College of Food Science and Technology, Henan Key Laboratory of Grain Science and Technology, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Microwave treatment can improve the anti-digestibility properties of germinated highland barley starch. However, it remains to be verified whether these properties are retained in dried noodles. In this study, untreated highland barley flour (HBF), germinated highland barley flour (GHBF), and 300 W microwave-treated germinated highland barley flour (GMHBF) were adopted with wheat flour to produce dried noodles, to investigate the effects of microwave treatment on the quality of the blended noodles and postprandial blood glucose levels. Results showed that the GHBF group exhibited the highest cooking loss (10.27%) and the poorest textural properties due to structural weakening caused by the activation of endogenous enzymes during the germination process. Whereas in the GMHBF group, microwave-induced dielectric heating effects presumably promoted starch structural densification, resulting in a significantly lower cooking loss rate. At blending ratios of 30% and 50%, both tensile strength and breaking force were superior to those of the HBF group. Scanning electron microscopy confirmed that microwave treatment promoted the densification of the gluten network, with the GMHBF-50% group exhibiting the most uniform cross-sectional structure. Postprandial blood glucose response curves showed that the GMHBF-treated groups performed best, maintaining relatively stable blood glucose levels. Additionally, the GMHBF-50% group received the highest total score in sensory evaluation (87.30 points), achieving synergistic optimization of both glycemic control and sensory quality. In summary, 300 W microwave treatment effectively compensates for the quality deficiencies of germinated barley flour, and at a 50% blending ratio, it yields dried noodle products that combine good edible quality with low glycemic index characteristics.

Key words: highland barley; germination; microwave treatment; dried noodles; postprandial blood glucose; textural properties

收稿日期：2026-06-02；修回日期：2026-08-17；接受日期：2026-08-18

基金项目：中原科技创新领军人才项目（254200510031）；河南工业大学青年骨干教师培养项目（21421289）；河南工业大学高水平人才科研启动基金项目（2022BS008）

作者简介：普怡然（2002-），女，硕士研究生，研究方向：谷物食品与营养，E-mail：1793975532@qq.com

通讯作者：柳泽华（1992-），女，博士，副教授，研究方向：谷物食品与营养，E-mail：liuzehua@haut.edu.cn

挂面是中国的主食之一，但传统小麦挂面富含快速消化淀粉，食用后易导致血糖迅速升高，难以满足现代人群对健康饮食的需求[1]。青稞具备高膳食纤维、高蛋白、高维生素、低脂肪及低糖的营养特征，与当下人们对健康饮食的诉求高度契合[2]。然而，青稞较大的籽粒尺寸和高膳食纤维含量导致最终产品质地粗糙、风味平淡，消费者接受度较低。发芽，作为一种提升谷物适口性和营养价值的有效方法，已被应用于食品生产[3]。Ding 等[4]的研究也表明，控制发芽不仅能优化全麦粉的加工特性，还能结合超声处理进一步提升发芽谷物中 γ-氨基丁酸（GABA）等活性成分的积累[5,6]。Chen 等[7]的研究证实发芽不仅改善了糙米面条的营养价值，还显著缩短了蒸煮时间，降低了面条的硬度和粘性，使产品更易咀嚼。Seol 等[8]将不同比例的发芽黑藜麦粉与小麦粉复配制作面条，当添加比例为 15%时，面条的硬度、粘性、弹性、咀嚼性均得到显著改善。然而，发芽处理会导致抗消化性能的减弱，发芽过程中激活的内源性淀粉酶会水解淀粉无定形区，使淀粉颗粒形成疏松多孔结构，增强淀粉对消化酶的敏感性[9]。为了改善这一缺陷，采用微波处理的改性方法增强其抗消化性能。

微波改性作为一种高效、无污染的物理改性技术，凭借介电加热效应可实现快速均匀加热，促使淀粉分子有序重排与结晶结构增强，在调控淀粉消化特性方面展现出独特优势[10]。对于发芽青稞而言，Huang 等[11]采用 1 000 W 高功率微波处理发芽青稞粉，结果发现抗性淀粉含量显著降低（从 7.26%降至 6.63%），表明高功率微波并不适用。然而，已有文献指出，在适宜的微波功率条件下，不同来源淀粉的抗消化性能均能得到有效提升。例如，Liu 等[12]的研究发现，低功率微波处理（4.8 W g^{-1}）可提高藜麦淀粉的抗性淀粉含量，而较高功率则会显著降低其抗性淀粉含量。Zhang 等[13]的研究也证实 300 W 微波处理使豌豆淀粉-茶多酚复合物的抗性淀粉含量达到 47.78%。在面条应用领域，杨芝[14]将微波处理后的玉米粉添加到小麦粉中，显著降低了面条的蒸煮损失率，提高了面条的亮度和质构特性，并使慢消化淀粉含量升高了 20.57%。Tian 等[15]比较了不同烹饪方法对面条抗性淀粉含量的影响，发现经微波处理的面条抗性淀粉含量最高，消化速率最慢，预估血糖生成指数值最低。由此可见，现有的研究已经证实了在合适的微波功率条件下的微波改性对提高淀粉抗消化性能具有一定的作用。

综上，现有研究多聚焦于微波对单一淀粉体系或普通谷物面条的消化特性改性，且多以体外评价为主[12-15]。而针对发芽对于青稞淀粉因内源酶激活导致结构疏松、抗消化性降低的特性，微波改性对其淀粉消化的抗性调控作用尚缺乏研究，其在挂面复杂体系中的品质调控及体内血糖响应的协同影响尚未见系统报道。由此，本研究在前期预实验筛选得到 300 W 最优微波处理参数的基础上，将微波改性发芽青稞粉与小麦粉复配制备挂面，从蒸煮品质、质构特性、微观结构、感官评价及体内血糖响应多维度系统探究微波处理的作用效果，旨在明确微波改性对发芽青稞挂面品质的调控规律，为低血糖指数青稞面制品的开发提供理论依据与技术支撑。

1 材料与方法

1.1 材料

青稞种子，购自浙江益斗农业科技有限公司（中国浙江）；小麦粉，购自五得利面粉集团有限公司（中国河北）。SPF 级小鼠 50 只，雄性，6～7 周龄，购自郑州大学（河南省实验动物中心），许可证号：SCXK（豫）2022-0001。本研究经郑州大学实验动物福利与伦理委员会批准，批准号为 zzu-LAC20230306〔01〕。

1.2 仪器与设备

AB204-S 型分析天平，Mettler-Toledo 公司；PL1502-S 型电子天平，Mettler-Toledo 公司；101A-2 型电热鼓风干燥箱，上海仪器厂有限公司；XIBA-120 型高速锤式旋风粉碎机，Perten 公司；SM-10 型针式和面机，新麦机械（无锡）有限公司；TA.XT plus 型质构仪，Stable Micro System 公司；GC-1183 型醒发箱，广州恒威厨房设备有限公司；ZEISS-Sigma 300 型扫描电子显微镜，德国蔡司公司；ZH-KB6-1.5P 型可程式恒温恒湿试验箱，昆山振弘检测设备有限公司；Instant 型罗氏血糖仪，荣晶医疗科技（昆山）有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 挂面的制作

本研究的青稞发芽方案参考并优化 Huang 等[11]的方法。挑选籽粒饱满、形态完整的青稞种子，用蒸馏水反复冲洗干净，随后沥干表面水分。采用体积分数为 5%的高锰酸钾溶液对沥干后的种子浸泡 60 min，以去除其表面

附着的杂质与微生物，之后用蒸馏水冲洗三次并再次沥干。按种子与蒸馏水体积比 1:4 的比例混合，于 30 ℃恒温环境下浸泡 12 h。铺种前再次用蒸馏水冲洗种子，之后将其均匀平铺于铺垫双层纱布的玻璃培养皿内。发芽阶段将培养皿放入恒温恒湿培养箱中，设定温度为 37 ℃、相对湿度为 80%，持续培养 24 h。培养结束后，将发芽种子转移至 45 ℃烘箱中烘干 24 h，待种子完全干燥后研磨成粉，经 100 目标准筛筛分备用。

称取 100 g（db）青稞粉，将其水分含量调节至 15%后充分搅拌混匀，密封置于室温环境下平衡 24 h。随后将青稞粉转移至微波加热容器中，平铺成厚度为 1 cm 的粉层，采用 300 W 的功率进行 90 s 的微波处理。处理后的样品放入 40 ℃恒温鼓风干燥箱内干燥 24 h，干燥完成后粉碎并过 100 目标准筛备用。未发芽青稞粉命名为 HBF，发芽青稞粉命名为 GHBF，发芽青稞粉经 300 W 微波处理后的样品命名为 GMHBF。

基于前期预实验及文献报道[16]，青稞粉添加量 75%时面筋网络被严重稀释导致挂面成型困难。将未处理青稞粉（HBF）、发芽青稞粉（GHBF）及 300 W 微波处理发芽青稞粉（GMHBF）分别按照 0、30、50、70 wt.%的比例与五得利八星小麦粉进行混合。

挂面的制作方法在 GB/T 40636-2021 的标准基础上进行优化调整。称取 200 g 混合面粉置于针式和面机中，按预实验确定的最佳加水量（占面粉质量的 60%）加入蒸馏水，搅拌 7 min 制成面絮；将面絮装入自封袋压平后，放入醒发箱熟化 30 min；熟化完成后，将面絮在压面机中多次压延，制得厚度为 1.25±0.05 mm 的面片；最后将面片切为 2.00 mm 宽度的面条，置于恒温恒湿试验箱中烘干，得到挂面干样。样品名称如表 1 所示。

表 1 样品名称

Table 1 Sample names

样品	添加的青稞粉	复配比例/%
WFN	0	0
HBFN-30%	HBF	30
HBFN-50%	HBF	50
HBFN-70%	HBF	70
GHBFN-30%	GHBF	30
GHBFN-50%	GHBF	50
GHBFN-70%	GHBF	70
GMHBFN-30%	GMHBF	30
GMHBFN-50%	GMHBF	50
GMHBFN-70%	GMHBF	70

1.3.2 挂面蒸煮品质的测定

最佳蒸煮时间的测定：根据黄滢洁等[17]所描述的方法并稍作修改。随机选取 20 根形态完整的挂面，向 1 L 烧杯中加入相当于样品质量 50 倍的蒸馏水，利用电磁炉加热使蒸馏水保持微沸状态，再将挂面完全浸没于沸水中并开始计时。自加热开始 2 min 起，每隔 30 s 取出 1 根面条，以洁净透明的玻璃板轻压面条，观察其内部是否存在白色未糊化硬芯，将硬芯完全消失时的加热时间，确定为该样品的最佳蒸煮时间。

蒸煮损失率的测定：根据黄滢洁等[17]所描述的方法并稍作修改。精确称取约 10 g 挂面样品，记录其实际质量（记为 m，精确到 0.01 g），将样品放入盛有 500 mL 蒸馏水的容器中，按照上述确定的最佳蒸煮时间进行加热处理。蒸煮结束后，将全部面汤转移至 500 mL 容量瓶中，用蒸馏水定容至刻度并充分摇匀。准确移取 100 mL 定容后的面汤，倒入 250 mL 烧杯中，先放置于可调式电磁炉上蒸至大部分水分挥发，再放入 105 ℃烘箱中烘至恒重，根据烘干后残留物质量与样品初始质量的比值计算蒸煮损失率。

$$Wp = 5 \times (m_{100} / m) \times (1 - W_m) \times 100 \quad (1)$$

式中:

Wp——蒸煮损失率，%;

m_{100}——100 ml 面汤中干物质质量，g;

W_m——挂面的水分含量，%;

m——样品质量，g。

1.3.3 挂面拉伸特性的测定

根据吕一鸣[18]所描述的方法并稍作修改。随机挑选适量的形态完整的挂面样品，放入盛有 500 mL 蒸馏水的容器中，加热至预先确定的最佳蒸煮时间。待面条煮制完成后，迅速捞出并以冷水冲洗表面，随后将熟面条置于洁净托盘内，用湿润纱布轻轻覆盖其表面，以此避免面条在后续处理过程中水分快速散失。

采用 A/SPR 型探头进行面条拉伸性能测定，设定测试参数如下：预测试速度为 2 mm s^{-1}，正式测试阶段速度保持 2 mm s^{-1}，测试结束后回升速度为 10 mm s^{-1}，测试间距设定为 140 mm，触发力采用 Auto-5 g。为保证数据可靠性，每个样品设置不少于 7 组平行实验，对所得测试数据进行筛选，剔除异常极值后用于后续分析。

1.3.4 挂面力学特性的测定

根据吕一鸣[18]所描述的方法并稍作修改。使用质构仪的压缩模式对挂面的力学特性进行测定。随机挑选形态完整、无破损的挂面干样样品，将其长度修整至 15 cm 并保证两端平整。实验选用 A/SFR 型探头，设定测试参数如下：预测试速度为 0.5 mm s^{-1}，正式测试速度为 2.0 mm s^{-1}，测试结束后回升速度为 10 mm s^{-1}，压缩下压距离设定为 30 mm，触发力设置为 15 g。为确保实验数据的稳定性与可靠性，每个样品均进行不少于 10 组平行实验，对测试所得数据进行筛选，剔除异常极值后用于后续统计分析。

1.3.5 挂面质构特性的测定

根据 Mo 等[19]所描述的方法并稍作修改。预处理同 1.3.3 的实验操作步骤。然后用质构仪对煮制至最佳蒸煮时间的挂面湿样进行测定，实验选用 Code HDP/PFS 型探头。设定测试参数如下：预测试速度为 1 mm s^{-1}，正式测试速度为 0.8 mm s^{-1}，测试结束后回升速度为 1 mm s^{-1}，触发力采用 Auto-5 g，样品压缩率设定为 75%，两次压缩动作的时间间隔为 2 s。测试时，选取 3 根形态完整的挂面样品，将其紧密平行排列于洁净载物台上，确保探头与样品充分接触。为保障数据的可靠性，每个样品设置不少于 7 组平行实验，对测试所得原始数据进行筛选，剔除异常极值后，选取有效数据用于后续分析。

1.3.6 挂面微观结构的测定

根据钟少文[20]所描述的方法并稍作修改。使用扫描电子显微镜对挂面干样的截面微观形态进行表征分析。首先将挂面截取为长度 2～4 mm 的小段，通过双面胶固定于样品台上，经喷金处理后，将样品移入样品台内进行观测与成像，选取具有代表性的显微图像用于后续分析。

1.3.7 动物的饲养

本研究中所有动物实验均遵循《实验动物管理与使用指南》规范开展，并获得了中国郑州实验动物中心福利委员会的批准（伦理批准号：zzu-LAC20230306 [01]）。6~7 周龄健康小鼠饲养于 12 小时光照-黑暗循环环境中，温度控制在 20~26 ℃，湿度维持在 40%~70%，笼内自由摄食饮水，每两天更换一次垫料。实验前 1 周，小鼠饲喂基础饲料并自由饮水。实验过程中剔除异常个体，后续实验安排均不涉及该组小鼠。

1.3.8 挂面餐后血糖的测定

根据余梦玲等[21]所描述的方法并稍作修改。选取 50 只健康小鼠，随机分为 10 组。实验初期，所有小鼠均饲喂基础饲料，以适应实验饲养环境。实验前 1 天对各组小鼠进行称重。正式实验前，小鼠需要进行 12 h 禁食处理（自由饮水）。将挂面样品粉碎后，按 0.80 g/kg BW（以碳水化合物计）的剂量溶于蒸馏水中，对禁食 12 h 的小鼠进行灌胃处理。小鼠首次进食前采集尾静脉血样，测定并记录空腹血糖值作为对照；自小鼠开始进食起计时，分别于餐后 30、60、90 及 120 min 通过尾静脉采血，测定各时间点血糖浓度。根据餐后不同时间点的血糖值绘制餐后血糖变化曲线。

1.3.9 挂面感官特性的测定

感官评价小组由 7 名经过食品感官评价培训的专业人员组成。感官评价方法参照 GB/T 13868-2009《感官分析 建立感官分析实验室的一般导则》在标准感官评价实验室内进行，具体评分标准依据 GB/T 35875-2018《粮油检验 小麦粉面条加工品质评价》执行。评价员选拔与培训参照 GB/T 16291.1-2012《感官分析 选拔、培训与管理评价员一般导则》执行，正式品评前通过标准样品训练对评分尺度进行统一。具体评分标准如表 2 所示。

表 2 面条品尝项目和评分标准

Table 2 Sensory evaluation items and scoring criteria for noodles

项目	得分/分	评分标准
色泽	10	指面条的色泽和亮度，面条白、乳白、奶黄色，光亮为 8.5~10 分；亮度一般为 6~8.4 分；色发暗，亮度差为 1~6 分。
表观状态	10	指面条表面光滑和膨胀程度。表面结构细密、光滑为 8.5~10 分，中间为 6.0~8.4 分，表面粗糙、膨胀、变形严重为 1~6 分。
适口性	20	用牙咬断一根面条所需力的大小。力适中得分为 17~20 分，稍偏硬或软 12~17 分，太硬或太软 1~12 分。
韧性	25	面条在咀嚼时，咬劲和弹性的大小。有咬劲、富有弹性为 21~25 分，一般为 15~21 分，咬劲差、弹性不足为 1~15 分。
粘性	25	指在咀嚼过程中，面条粘牙强度，咀嚼时爽口、不粘牙 21~25 分，较爽口、稍粘牙为 15~21 分，不爽口、发粘为 10~15 分。
光滑性	5	指在品尝面条时口感的光滑程度，光滑性为 4.3~5 分，中间为 3~4.3 分，光滑程度差为 1~3 分。
食味	5	指品尝面条时的味道，具有麦清香味 4.3~5 分，基本无异味 3~4.3 分，有异味 1~3 分。

1.4 数据分析

所有测试样品均设置不少于 3 组平行实验，实验数据以平均值±标准差的形式进行统计呈现。借助 SPSS 27.0 统计分析软件，采用 Duncan 法对数据开展方差分析，设定显著性检验水平为 $P<0.05$，以判断组间差异是否具有统计学意义。实验相关图表的绘制工作通过 Origin 2023 软件完成。

2 结果与讨论

2.1 挂面的蒸煮品质

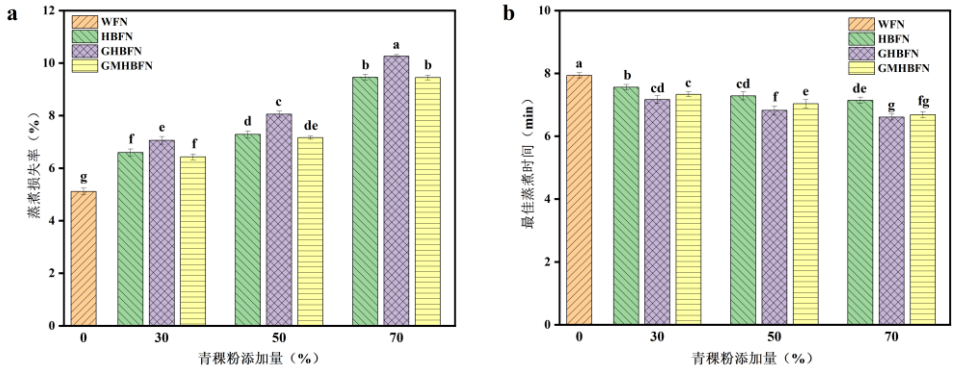


图 1 挂面的蒸煮品质

Fig.1 Cooking quality of dried noodles

注：a-蒸煮损失率；b-最佳蒸煮时间。图中不同字母表示数值存在显著性差异（$P<0.05$），下同。

最佳蒸煮时间与蒸煮损失率是衡量面条蒸煮品质的核心指标，直接反映淀粉糊化进程与面筋网络对淀粉的束缚能力。在面条的煮制过程中，随着体系温度的逐渐升高，面团中的面筋蛋白会发生构象转变与变性凝聚，而淀粉颗粒则会经历吸水溶胀并最终完成糊化过程[22]。挂面的最佳蒸煮时间和蒸煮损失率如图 1 所示。WFN 的最佳蒸煮时间最长，并且蒸煮损失率最低，显著优于所有青稞粉复配组。这可能是由于小麦粉中面筋蛋白含量充足，能够形成连续致密的三维网络结构，在蒸煮过程中既能阻碍水分向淀粉颗粒内部渗透，又能抑制淀粉分子溶出，减少蒸煮过程中的物质损失，这与范金磊[23]的研究结果相符合。而青稞粉因为缺乏面筋蛋白，与小麦粉进行复配后会稀释面筋网络导致结构不连续和孔隙率增加，进而使最佳蒸煮时间缩短、蒸煮损失率升高。此外，随着复配比例从 30%增加至 70%，各处理组的最佳蒸煮时间均逐渐缩短，而蒸煮损失率呈现显著升高的趋势。这些结果表明了高比例青稞粉对面筋网络具有显著的加剧破坏作用，这与吴小红等[24]报道的青稞粉中的膳食纤维会破坏面筋

蛋白网络结构的结论相符合。

此外，在同一复配比例下，GHBFN 处理组的蒸煮损失率高于 HBFN 处理组，最佳蒸煮时间短于 HBFN 处理组。这可能归因于青稞在发芽过程中激活的内源性淀粉酶水解淀粉无定形区域使淀粉颗粒形成疏松多孔的结构，减少其对水分扩散的阻碍，导致淀粉糊化更加迅速；同时，发芽过程中 β-葡聚糖的降解也削弱了其在水相中形成黏稠凝胶阻碍物质溶出的能力[25]。而 GMHBFN 处理组经过 300 W 微波处理后，其蒸煮损失率显著低于 GHBFN 处理组，但仍高于 HBFN 处理组。推测微波介电加热效应可促使淀粉分子重排，增强淀粉结构稳定性，降低其蒸煮过程中的溶胀与破碎[26]。因此其蒸煮损失率虽仍高于 HBFN 处理组，但较 GHBFN 处理组已显著降低，证实微波处理能够有效改善复配挂面的蒸煮性能。

2.2 挂面的拉伸特性

挂面的拉伸强度与拉伸距离直接关联面筋网络的完整性与稳定性，拉伸性能越优，面制品的筋力与韧性表现越好。挂面的拉伸强度和拉伸距离如图 2 所示。WFN 的拉伸强度为 16.32 g，拉伸距离为 83.76 mm。随着青稞粉复配比例从 30%提升至 70%，所有处理组挂面的拉伸强度与拉伸距离均呈现出逐渐降低的变化趋势：HBFN 处理组的拉伸强度由 12.86 g 降至 8.67 g，拉伸距离则从 72.35 mm 下降至 58.49 mm；GHBFN 处理组的拉伸强度从 11.24 g 降至 7.52 g，拉伸距离由 68.53 mm 降至 54.83 mm；GMHBFN 处理组的拉伸强度从 13.57 g 降至 9.75 g，拉伸距离也从 75.68 mm 下降至 62.18 mm。导致这一现象的原因可能是因为青稞粉本身不含面筋蛋白，其添加比例的增加会稀释小麦粉中面筋蛋白的有效浓度，使得原本连续的面筋网络结构产生孔洞甚至断裂[27]，进而使得挂面的拉伸抗性与变形适应能力同步减弱。

此外，在相同的复配比例下，不同处理方式的青稞粉所制成的挂面拉伸性能也存在显著差异。GHBFN 处理组的拉伸强度与拉伸距离均明显低于 HBFN 处理组，推测这可能是由于青稞发芽时所激活的内源性淀粉酶和蛋白酶共同削弱了淀粉和蛋白质对面筋网络的填充支撑效果，最终导致面筋网络稳定性下降[28]。而 GMHBFN 处理组经过 300 W 微波处理后，拉伸性能显著优于 GHBFN 处理组，并且在 30%、50%复配比例下超过 HBFN 处理组。这可能是由于微波处理一方面可以导致面筋蛋白分子解折叠，暴露巯基基团并通过二硫键交联形成更为致密的蛋白质网络结构[29]；另一方面可以通过优化面粉内部水分分布，使面筋蛋白-淀粉复合体系的持水能力显著增强，实现面筋网络结构的重构与强化[30]，从而改善拉伸特性。

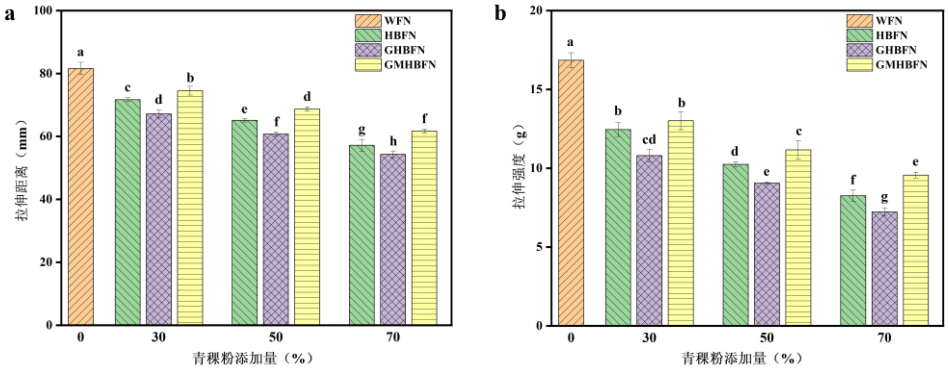


图 2 挂面的拉伸特性

Fig.2 Tensile properties of dried noodles

注：a-拉伸距离；b-拉伸强度。

2.3 挂面的力学特性

折断力与柔韧性是评估挂面在包装、运输环节中破损风险的关键指标。挂面的力学特性测定结果如图 3 所示。其中，WFN 处理组凭借其连续致密的面筋网络结构，表现出最高的折断力与柔韧性，这与王香玉[31]在研究中所证实的面筋蛋白的交联程度可以决定谷物面制品的力学稳定性结果相符合。对于 HBFN 处理组而言，随着青稞粉添加比例从 30%增加至 70%，挂面折断力从接近 WFN 处理组的水平逐步下降，柔韧性也同步减弱，这一方面可能归因于青稞粉缺乏面筋蛋白，稀释了小麦粉中面筋蛋白的有效浓度，导致面筋网络结构的完整性受损[27]；另一

方面青稞淀粉颗粒表面相对平整但存在凹陷，这种形态特征使其难以像小麦淀粉那样均匀嵌入面筋网络[32,33]，导致与面筋基质的界面结合力较弱。在外力作用下，青稞淀粉颗粒容易从面筋网络中脱粘并形成裂隙。

此外，GHBFN 处理组在相同的复配比例下，折断力较 HBFN 处理组进一步降低，柔韧性表现也更差，高比例（70%）样品甚至出现易脆断、无弹性的特征。而经过 300 W 微波处理之后的 GMHBFN 处理组的力学特性得到了显著改善，折断力较 GHBFN 处理组而言显著提升，柔韧性也有所增强，并且在 30%、50%的复配比例下其力学特性参数优于 HBFN 处理组。微波处理对挂面力学性能的强化作用，可能归因于两个方面的因素：300 W 微波处理推测可通过热效应诱导淀粉分子发生有序重排，从而形成更为致密的淀粉凝胶网络，在面筋网络中发挥更好的填充支撑作用[34]。微波处理还可能通过改善挂面内部的孔隙分布，减少大孔径裂隙的形成[35]，使结构更加均匀致密，在外力作用时应力分布更加均匀，从而提升折断力与柔韧性，这与图 4 中 SEM 所观察到的结果相一致。

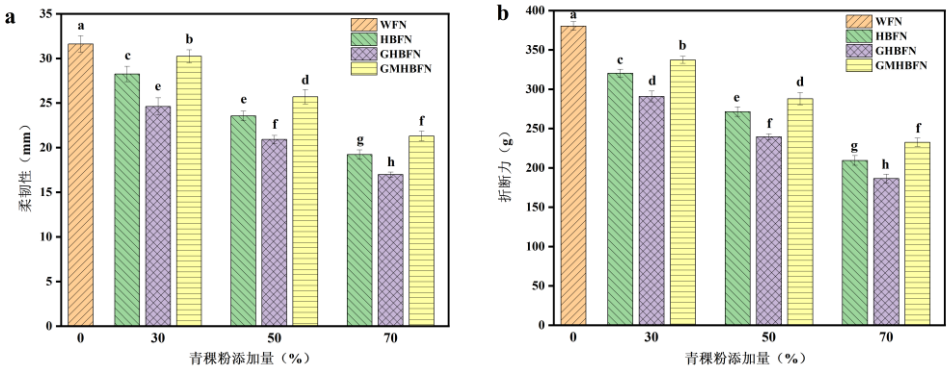


图 3 挂面的力学特性

Fig.3 Mechanical properties of dried noodles

注：a-柔韧性；b-折断力。

2.4 挂面的 TPA 特性

由表 3 中数据可知，随着青稞粉复配比例从 0 增加至 70%，HBFN 处理组的挂面硬度持续升高、粘性逐渐下降、内聚性下降。高比例青稞粉的添加导致面筋网络不连续，淀粉颗粒吸水膨胀后缺乏足够的弹性约束，形成质地坚硬但弹性不足的面条[36]。而 GHBFN 处理组在相同的复配比例下硬度显著低于 HBFN 处理组，这可能是由于青稞发芽过程中淀粉酶激活导致淀粉颗粒破裂、结构疏松，降低了原料颗粒间的机械结合力；同时，发芽过程中蛋白质的水解和 β-葡聚糖的降解进一步削弱了面筋网络的连续性[37]。GHBFN-70%的弹性（0.80）在数据上高于 GHBFN-30%和 50%两组，这与其随添加比例升高弹性下降的总体趋势相悖。这一反常现象可能与高比例下发芽青稞中的部分水解淀粉糊化后黏弹性发生变化有关，但在高添加比例下面筋网络显著稀释的整体结构弱化趋势仍占主导地位（与其内聚性和咀嚼性显著下降一致）[16]。值得注意的是，GHBFN 处理组的粘性高于 HBFN 处理组，这可能与发芽青稞淀粉颗粒破碎后更易溶出、增加其表面粘附性有关。经过微波处理的 GMHBFN 处理组则呈现出较好的质构特性：在 30%和 50%的复配比例下，其硬度介于 HBFN 与 GHBFN 处理组之间，弹性高于 GHBFN 处理组，内聚性优于 HBFN 和 GHBFN 处理组。这一变化趋势可能是由于 300 W 微波处理促进淀粉结构致密化，降低其溶解度，从而导致淀粉在蒸煮过程中形成更为致密的凝胶网络，增强了对面筋网络的物理填充和支撑作用，因此表现出硬度适中、弹性改善的质构特征。

内聚性主要表示面条的成分在煮制的过程中结合在一起的程度，GMHBFN-30%的内聚性显著优于 HBFN-30%和 GHBFN-30%，说明微波处理通过优化淀粉相的结构特性，部分补偿了面筋相的稀释缺陷，使挂面内部结构相对更为紧密。但这一改善是有限度的，GMHBFN-70%的内聚性与 HBFN-70%和 GHBFN-70%差异缩小，表明当青稞粉添加比例过高时，面筋网络的严重稀释限制了微波处理的改善效应。而粘性与直链淀粉在煮制过程中从面条内部的溶出有关[38]，由表中数据可以发现，微波处理能够较为有效地减少挂面蒸煮过程中直链淀粉的溶出，这与蒸煮损失率所得出的结果相符合。总体而言，微波处理发芽青稞粉的质构改善效果在 30%和 50%添加比例下，通过增强淀粉凝胶的填充支撑作用，可以弥补因面筋蛋白稀释所导致的品质劣化；但在较高添加比例（70%）下，改善效应被显著削弱。

表 3 挂面的质构特性

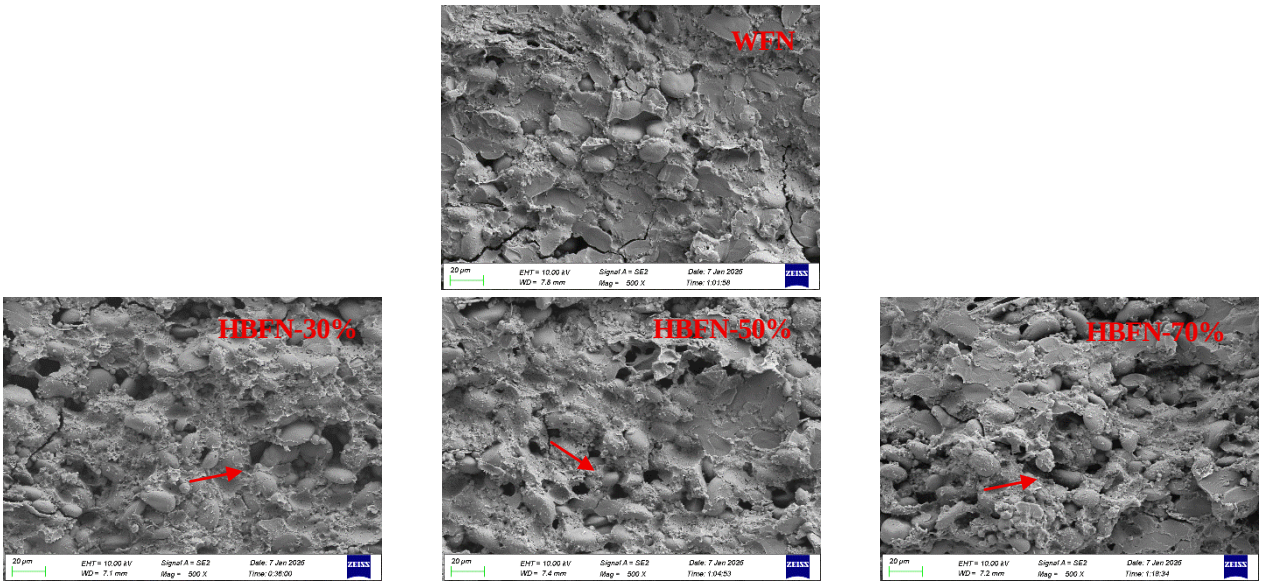
Table 3 Textural properties of dried noodles

样品	硬度/g	粘性/g	弹性/mm	内聚性	咀嚼性/g
WFN	2884.80±109.32^{h}	114.34±7.71^{ab}	0.91±0.01^{a}	0.74±0.03^{a}	1005.34±51.82^{e}
HBFN-30%	3750.50±98.19^{e}	95.01±7.55^{d}	0.78±0.01^{d}	0.58±0.02^{c}	1085.92±68.82^{d}
HBFN-50%	4350.20±114.73^{c}	88.55±7.99^{e}	0.73±0.02^{f}	0.52±0.02^{d}	1280.52±70.89^{b}
HBFN-70%	4781.82±114.64^{a}	86.86±6.98^{e}	0.75±0.03^{g}	0.51±0.02^{e}	1416.61±67.36^{a}
GHBFN-30%	3250.94±99.51^{g}	108.71±8.07^{c}	0.75±0.01^{e}	0.55±0.03^{d}	980.25±42.61^{f}
GHBFN-50%	3850.46±141.17^{d}	95.03±8.38^{d}	0.72±0.02^{f}	0.48±0.02^{e}	1185.96±32.51^{c}
GHBFN-70%	4450.51±139.11^{b}	85.18±6.84^{e}	0.80±0.01^{e}	0.52±0.01^{de}	1343.35±57.31^{a}
GMHBFN-30%	3550.52±157.39^{f}	98.60±6.57^{cd}	0.76±0.01^{e}	0.62±0.02^{b}	1050.84±41.73^{de}
GMHBFN-50%	4150.25±83.07^{c}	92.28±11.18^{d}	0.74±0.02^{f}	0.56±0.01^{c}	1250.99±49.55^{b}
GMHBFN-70%	4501.09±150.66^{ab}	93.62±6.69^{d}	0.78±0.01^{g}	0.59±0.02^{c}	1412.25±32.71^{a}

注：同一列数据标注不同字母，表明数据间存在显著性差异（P<0.05）。下表同。

2.5 挂面的微观结构

图 4 为不同处理条件下青稞挂面的 SEM 断面图。由图可知，WFN 的截面呈现较为致密的面筋网络结构，由面筋蛋白（主要含谷蛋白与醇溶蛋白）构成的连续网络将球形淀粉颗粒紧密包裹其中[22]，孔隙较少，这一完整结构与其蒸煮损失率较低、拉伸强度较高相一致。HBFN-30%的面筋网络结构较为完整，存在少量孔隙，部分淀粉颗粒被包裹；随着青稞粉复配比例提升至 70%，面筋网络中孔隙直径扩大，淀粉颗粒的包裹程度降低，挂面整体结构越发松散，这与 TPA 特性中硬度增加、弹性下降的变化趋势相符合。此外，在相同的复配比例条件下，GHBFN 处理组的结构松散程度大于 HBFN 处理组，挂面面筋网络更加松散，对淀粉颗粒的包裹性下降，淀粉颗粒表面可以观察到明显的凹陷痕迹，推测可能是由于发芽激活的内源性淀粉酶优先水解淀粉颗粒无定形区[39]，导致其蒸煮损失率升高、断条率上升。而经过微波处理，挂面的面筋网络结构得到一定程度的改善。微波的介电加热效应可以促使淀粉分子发生预糊化或分子重排，预糊化后的淀粉在面筋网络中具有很好的填充作用，促进了面筋网络结构的致密化[40]。其中，GMHBFN-50%的结构状态相对最优，孔隙数量相比其他处理组而言有所减少，结构松散程度显著降低。



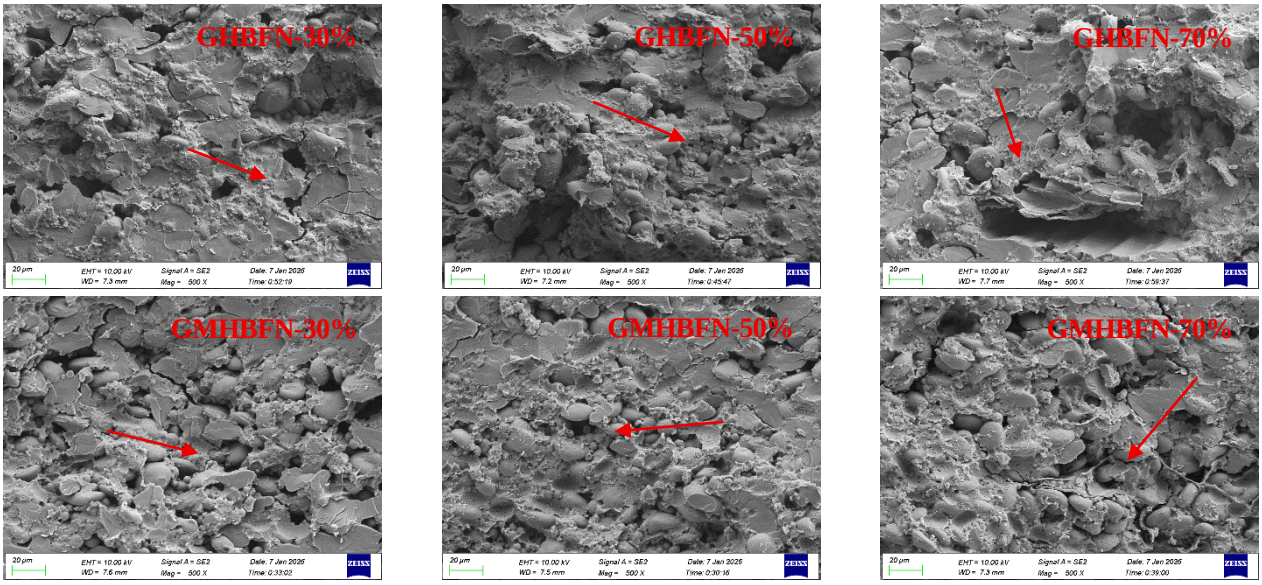


图 4 挂面的微观形态

Fig.4 Microstructure of dried noodles

2.6 挂面的感官评价

挂面的感官评价结果如表 4 所示。由表中数据可以得知，WFN 处理组以 91.65 的总分呈现最优感官表现。HBFN 处理组的感官评分随青稞粉添加比例从 30%增加至 70%呈现下降趋势，色泽从 8.46 降至 6.99、适口性从 16.83 降至 14.20、韧性从 19.04 降至 15.97，总分相应的从 83.92 跌至 69.33。相比而言，GHBFN 处理组在同比例下的感官表现显著优于 HBFN 处理组，说明发芽处理是有效地改善了青稞挂面的粗糙质构缺陷，优化了挂面的口感。而经过微波处理后的 GMHBFN 处理组的感官品质在各组中表现最为优异，特别是在复配比例为 50%时其感官评分在所有处理组中具有最高值，这表明了微波处理未对其挂面的感官品质造成较大的负面影响，通过适度调控淀粉、蛋白质与膳食纤维的结构，进一步优化了面条的品质特性，有效改善其复配挂面的感官品质。

表 4 挂面感官评价得分

Table 4 Sensory evaluation scores of dried noodles

样品	色泽	表观形态	适口性	韧性	粘性	光滑性	食味	总分
WFN	9.48 ± 0.25^{a}	8.98 ± 0.14^{ab}	18.85 ± 0.49^{a}	23.85 ± 0.96^{a}	22.10 ± 1.15^{a}	4.29 ± 0.13^{bc}	4.10 ± 0.09^{d}	91.65 ± 0.06^{a}
HBFN-30%	8.46 ± 0.31^{bc}	8.98 ± 0.36^{ab}	16.83 ± 0.61^{bc}	19.04 ± 1.04^{bcd}	22.01 ± 0.72^{a}	4.20 ± 0.16^{bc}	4.40 ± 0.09^{abc}	83.92 ± 0.74^{c}
HBFN-50%	8.00 ± 0.35^{cd}	8.81 ± 0.35^{ab}	15.48 ± 0.56^{def}	17.53 ± 1.13^{cdef}	18.30 ± 0.95^{bcd}	3.80 ± 0.16^{de}	4.30 ± 0.09^{bcd}	76.21 ± 0.53^{f}
HBFN-70%	6.99 ± 0.37^{e}	8.50 ± 0.36^{b}	$14.20\pm0.54g$	15.97 ± 1.25^{f}	16.17 ± 1.08^{d}	3.30 ± 0.17^{h}	4.20 ± 0.16^{cd}	69.33 ± 1.76^{i}
GHBFN-30%	8.58 ± 0.37^{bc}	9.08 ± 0.36^{ab}	17.24 ± 0.61^{b}	19.53 ± 1.18^{bc}	22.42 ± 1.24^{a}	4.40 ± 0.18^{ab}	4.50 ± 0.13^{ab}	85.75 ± 0.24^{b}
GHBFN-50%	8.18 ± 0.31^{bc}	8.89 ± 0.37^{ab}	16.01 ± 0.73^{cde}	18.05 ± 1.28^{bcdef}	19.02 ± 1.41^{bc}	4.00 ± 0.16^{cd}	4.40 ± 0.14^{abc}	78.54 ± 0.38^{e}
GHBFN-70%	7.29 ± 0.36^{e}	8.60 ± 0.37^{ab}	14.77 ± 0.61^{fg}	16.46 ± 1.31^{ef}	16.55 ± 1.29^{d}	3.50 ± 0.19^{fg}	4.29 ± 0.14^{bcd}	71.45 ± 1.67^{h}
GMHBFN-30%	8.30 ± 0.39^{bc}	9.04 ± 0.31^{ab}	16.48 ± 0.65^{bcd}	18.53 ± 1.29^{bcde}	19.53 ± 1.38^{b}	4.21 ± 0.18^{bc}	4.49 ± 0.13^{ab}	80.57 ± 0.18^{d}
GMHBFN-50%	8.70 ± 0.37^{b}	9.19 ± 0.28^{a}	17.51 ± 0.65^{b}	19.96 ± 1.31^{b}	22.77 ± 1.41^{a}	4.59 ± 0.17^{a}	4.58 ± 0.16^{a}	87.30 ± 0.16^{b}
GMHBFN-70%	7.50 ± 0.38^{de}	8.67 ± 0.31^{ab}	15.20 ± 0.56^{efg}	17.00 ± 1.32^{def}	17.12 ± 1.21^{cd}	3.69 ± 0.18^{ef}	4.39 ± 0.15^{abc}	73.56 ± 1.69^{g}

2.7 挂面的餐后血糖反应曲线

餐后血糖反应直接反映人体对食物中可以利用的碳水化合物的代谢处理能力，餐后血糖反应曲线如图 5 所示。从图中可以看出，所有处理组的餐后血糖反应曲线在前 30 min 内迅速上升，在 30 min 时达到峰值，随后呈现逐渐下降的趋势，在 120 min 时趋于空腹水平。其中，WFN 处理组的餐后血糖峰值最高、血糖曲线下面积（AUC）最大（14.31 mmol h/L），血糖上升速率最快并且回落波动明显。当复配比例从 0 增加至 70%，GMHBFN 处理组始终表现出最优的血糖控制效果，其餐后血糖峰值最低，血糖在餐后 2 小时内维持相对平稳的状态；例如

GMHBFN-50%组的 AUC 值为 12.46 mmol ḥ/L，显著低于同比例 GHBFN-50%组（13.45 mmol ḥ/L）。此外，在同一复配比例下，发芽青稞挂面的餐后血糖波动大于青稞挂面，这可能是由于青稞本身富含 *β*-葡聚糖与抗性淀粉，*β*-葡聚糖作为可溶性膳食纤维，能在肠道内形成黏稠凝胶，减缓葡萄糖扩散与吸收速率，并且抗性淀粉也可以抵抗小肠消化酶的水解，减缓消化速率[41]；而发芽处理通过激活淀粉酶使部分淀粉水解为可溶性糖，导致抗性淀粉含量下降，*β*-葡聚糖含量降低，进而削弱抗消化性。对于 GMHBFN 处理组较好的血糖控制效果而言，这推测得益于微波处理的热效应可能诱导了淀粉分子重排，促使部分糊化淀粉在冷却后形成类似 RS3 型回生淀粉的结构特征，从而提升了抗性淀粉的含量[42]。

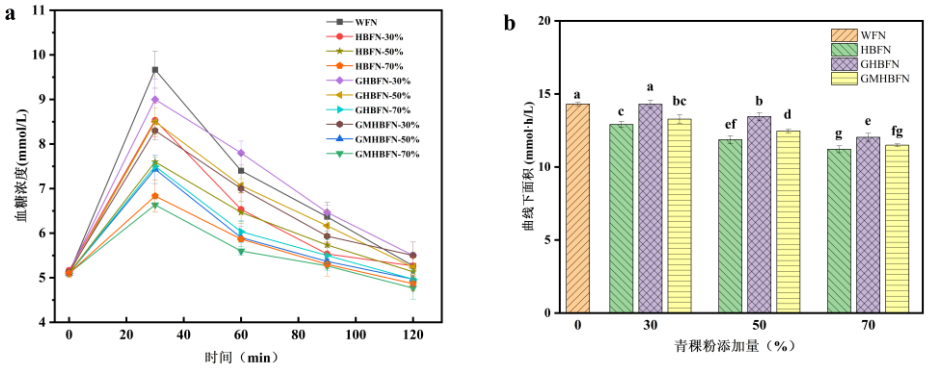


图 5 挂面的餐后血糖反应曲线和曲线下面积（AUC）

Fig.5 Postprandial blood glucose response curves and area under the postprandial blood glucose curve (AUC) of dried noodles

3 结论

本研究系统探究了未处理青稞粉（HBF）、发芽青稞粉（GHBF）及 300 W 微波处理发芽青稞粉（GMHBF）以不同比例（0～70%）与小麦粉复配后对挂面品质及餐后血糖的影响。结果表明，随青稞粉复配比例升高，各组挂面的蒸煮损失率升高、最佳蒸煮时间缩短，拉伸与力学性能均呈下降趋势，但血糖控制效果逐渐增强。在同一复配比例下，GHBFN 处理组因发芽过程中内源酶水解导致结构弱化，蒸煮损失率最高、质构性能最差；而 GMHBFN 处理组经微波介电加热效应诱导淀粉分子有序重排，形成更致密的网络结构，蒸煮损失率显著降低，拉伸强度与折断力在 30%和 50%比例下优于 HBFN 处理组，TPA 质构特性改善，微观结构更为致密均匀。餐后血糖反应曲线显示，GMHBFN 处理组在各比例下血糖控制效果均为最优。感官评价中，GMHBFN-50%总分最高（87.30 分），餐后 2 小时内血糖维持相对平稳，实现了血糖控制与感官品质的协同优化。

本研究证实了 300 W 微波处理能有效弥补发芽青稞粉的面筋网络缺陷，在 50%复配比例下可实现蒸煮品质、质构特性与血糖控制能力的协同优化，为低血糖指数青稞挂面的开发提供了技术支撑。

参考文献

[1] ATKINSON F S, BRAND-MILLER J C, FOSTER-POWELL K, et al. International tables of glycemic index and glycemic load values 2021: a systematic review [J]. The American Journal of Clinical Nutrition, 2021, 114(5): 1625-1632.

[2] 强小林,顿珠次仁,次珍,等.西藏青稞产业发展现状分析[J].西藏农业科技,2011,33(1):1-3.

[3] GAN R, LUI W, WU K, et al. Bioactive compounds and bioactivities of germinated edible seeds and sprouts: An updated review [J]. Trends in Food Science & Technology, 2017, 59: 1-14.

[4] DING J, HOU G G, NEMZER B V, et al. Effects of controlled germination on the whole-wheat flour (WWF) functional properties and enhanced *γ*-aminobutyric acid (GABA) accumulation by ultrasonication [J]. Food Chemistry, 2018, 243: 214-221.

[5] DING J, FENG H. Chapter10: Controlling germination process to enhance the nutritional value of sprouted grains. Sprouted Grains (Second Edition) [M]. Sprouted Grains. Amsterdam: Elsevier. 2025, 335-358.

[6] DING J, SADEGHI H, FENG H, et al. Chapter: Trends in Germination Technology of Edible Seeds and Applications for Functional Food [M]. London: IntechOpen. 2024.

[7] CHEN R, YAN X, CAI M, et al. Impact of Germination on the Edible Quality and Nutritional Properties of Brown Rice Noodles [J].

Foods, 2024, 13(13): 2152.

[8] SEOL H, SIM K. Quality Characteristics of Noodles with added Germinated Black Quinoa Powder [J]. The Korean Journal of Food And Nutrition, 2017, 30: 19-30.

[9] LIM J W, MUN S, SHIN M. Action of alpha-amylase and acid on resistant starches prepared from normal maize starch [J]. Food science and biotechnology, 2005, 14: 32-38.

[10] LIU T, ZHANG B, WANG L, et al. Microwave reheating increases the resistant starch content in cooked rice with high water contents[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 184: 804-811.

[11] HUANG L U, DONG J L, ZHANG K Y, et al. Thermal processing influences the physicochemical properties, in vitro digestibility and prebiotics potential of germinated highland barley [J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 140: 110814.

[12] LIU G, ZHANG R, HUO S, et al. Insights into the changes of structure and digestibility of microwave and heat moisture treated quinoa starch [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 246: 125681.

[13] ZHANG X, QIN P, WU D, et al. Effects of Microwave Treatment on Physicochemical Attributes, Structural Analysis, and Digestive Characteristics of Pea Starch-Tea Polyphenol Complexes [J]. Foods, 2024, 13(17): 2654.

[14] 杨芝.微波改性玉米粉及玉米面条品质研究[D].郑州:河南工业大学,2022.

[15] TIAN Y, LI M, TANG A, et al. RS Content and eGI Value of Cooked Noodles (I): Effect of Cooking Methods [J]. Foods, 2020, 9(3): 328.

[16] 贾斌,姚亚静,关文强,等.青稞粉添加量对面条加工特性的影响[J].食品研究与开发,2019,40(9):8-12.

[17] 黄滢洁,冯龙斐,梁新红,等.甘薯渣混合粉面条工艺优化及品质分析[J].扬州大学学报(农业与生命科学版),2020,41(5):87-94.

[18] 吕一鸣. 湿热处理对青稞-小麦复配面团特性及挂面品质的影响研究[D].郑州:河南工业大学, 2023.

[19] MO W, PENG J, GUAN C, et al. Effects of different fermentation processes on cooking and eating quality of brown rice noodles [J]. LWT, 2024, 208: 116706.

[20] 钟少文.青稞粉消化性能的调控及其在面条应用的研究[D].广州:华南理工大学,2018.

[21] 余梦玲,张三杉,张巧,等.低血糖生成指数面条对糖尿病小鼠糖脂代谢的影响[J].食品工业科技,2022,43(23):353-359.

[22] 申慧珊.面团加工过程中小麦 A、B 淀粉影响面筋蛋白结构转变的机制研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2023.

[23] 范金磊.小麦面筋蛋白-大米淀粉模型面团的制备、结构性质及应用研究[D].合肥:合肥工业大学, 2021.

[24] 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.

[25] 刘虹.青稞发芽过程中营养成分变化及其营养粉的研发[D].南京:南京农业大学,2018.

[26] PALAV T, SEETHARAMAN K. Impact of microwave heating on the physico-chemical properties of a starch–water model system [J]. Carbohydrate Polymers, 2007, 67(4): 596-604.

[27] WU X, WANG Y, FENG X, et al. Influence of Highland Barley Flour on Nutritional Quality, Dough Characteristics, and Volatile Aroma Compounds in Cakes [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2025, 2025(1): 9969215.

[28] DING J, HU H, YANG J, et al. Mechanistic study of the impact of germinated brown rice flour on gluten network formation, dough properties and bread quality [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2023, 83: 103217.

[29] CHEN R, ZHANG H, CAI J, et al. Germination-Induced Enhancement of Brown Rice Noodle Nutritional Profile and Gut Microbiota Modulation [J]. Foods, 2024, 13(14): 2279.

[30] 母梦羽,张霞,贾峰,等.微波功率对面筋蛋白-淀粉复合体系功能特性的影响[J].河南工业大学学报(自然科学版),2021,42(4):16-21.

[31] 王香玉.馒头制作过程中蛋白交联行为及其对品质的影响[D].无锡:江南大学,2016.

[32] SHANG J, ZHAO B, LIU C, et al. Impact of wheat starch granule size on viscoelastic behaviors of noodle dough sheet and the underlying mechanism [J]. Food Hydrocolloids, 2023, 134: 108111.

[33] YAN H-L, LU Q-Y. Effect of A-and B-granules of wheat starch on Chinese noodle quality [J]. Journal of Cereal Science, 2020, 91: 102860.

[34] WANG M, SUN M, ZHANG Y, et al. Effect of microwave irradiation-retrogradation treatment on the digestive and physicochemical properties of starches with different crystallinity [J]. Food Chemistry, 2019, 298: 125015.

[35] TRAN THI MINH T, VU T, LE P, et al. The application of microwave and ultrasound treatment on breadfruit flour for noodle fortification [J]. Journal of Applied Biology & Biotechnology, 2024, 12(6): 201-207.

[36] LIN S, HUANG B, LIU S, et al. Impact of supplement of Qingke flours on physiochemical properties, sensory and in vitro starch

digestibility of wheat bread and its enhancement by bread quality improvers [J]. Food Chemistry: X, 2023, 19: 100855.

[37] PARK S H, MORITA N. Dough and Breadmaking Properties of Wheat Flour Substituted by 10% with Germinated Quinoa Flour [J]. Food Science and Technology International, 2005, 11: 471-476.

[38] LI H, LI Z, FOX G P, et al. Protein-starch matrix plays a key role in enzymic digestion of high-amylose wheat noodle [J]. Food Chemistry, 2021, 336: 127719.

[39] AL-ANSI W, MAHDI A A, AL-MAQTARI Q A, et al. Characterization of molecular, physicochemical, and morphological properties of starch isolated from germinated highland barley [J]. Food Bioscience, 2021, 42: 101052.

[40] 张雪艳,刘敬科,李朋亮,等.食品组分对面筋网络及面团加工品质影响的研究进展[J].食品工业科技,2025,46(9):404-413.

[41] MALUNGA L N, AMES N, ZHOUYAO H, et al. Beta-Glucan From Barley Attenuates Post-prandial Glycemic Response by Inhibiting the Activities of Glucose Transporters but Not Intestinal Brush Border Enzymes and Amylolysis of Starch [J]. Frontiers in Nutrition, 2021, 8: 628571.

[42] LIU T, ZHANG B, WANG L, et al. Microwave reheating increases the resistant starch content in cooked rice with high water contents [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 184: 804-811.