

萌芽青稞熟浆添加量对面团特性及叉烧包品质的影响

阮征^{1,2}, 李君¹, 成钰莹³, 李丹丹¹, 李沐生^{1,2}, 何靖雯³, 李志成^{3*}

(1. 华南理工大学食品科学与工程学院, 广东广州 510640) (2. 广东省天然产物绿色加工与产品安全重点实验室, 广东广州 510640) (3. 广州酒家集团利口福食品有限公司, 广东广州 511445)

摘要: 为了研究萌芽青稞熟浆不同添加量对面团特性及叉烧包品质的影响, 在小麦粉中添加质量分数为 0%、4%、8%、12% (干基 %) 萌芽青稞熟浆, 采用混合试验仪、流变发酵仪和核磁共振成像分析仪测定面团热机械学特性、发酵流变学特性和水分分布特性, 并对叉烧包质构、气孔结构、微观结构及感官品质等进行测定。结果表明, 随着添加量增加到 12%, C2 值从 0.46 下降到 0.34, 回生值由 2.12 下降至 0.91, 面团最大发酵高度从 49.00 mm 降低至 39.50 mm, 降幅达 19.4%; 添加量 8% 时, T1 和相应的气体释放量达到最大, 淀粉糊化热稳定性最好; 深层结合水 A21 和弱结合水 A22 含量显著增加 ($P<0.05$), 添加量 8% 时, A21 和 A22 分别为 17.54% 和 81.95%; 添加量 0% 增加到 12%, 叉烧包硬度无显著变化 ($P>0.05$), 仅增加 7.51%, 弹性由 0.91 降至 0.86, 回复性由 0.40 降至 0.36, 比容减小, 从 $2.54 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 下降至 $2.02 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 。皮层气孔均匀性显著降低, 添加量增至 12% 时内部网络出现大量孔洞; 感官评分结果可知, 随着叉烧包比容的减小, 其形状、内部组织结构及弹性得分逐渐降低, 而熟浆良好风味则提升了叉烧包滋味和气味评分。综合考虑面团特性及叉烧包的品质, 8% 的添加量为宜。该研究为拓展青稞在中式蒸制包点中的应用提供参考。

关键词: 萌芽青稞熟浆; 发酵特性; 面团流变特性; 气孔结构; 品质

文章编号: 1673-9078(2026)03-179-188

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.3.0083

Effects of Different Amounts of Cooked Germinated Highland Barley Pulp on the Dough Properties and Quality of Barbecued Pork Buns

RUAN Zheng^{1,2}, LI Jun¹, CHENG Yuying³, LI Dandan¹, LI Biansheng^{1,2}, HE Jingwen³, LI Zhicheng^{3*}

(1.School of Food Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)
(2.Guangdong Province Key Laboratory for Green Processing of Natural Products and Product Safety, Guangzhou 510640, China) (3.Guangzhou Restaurant Group Likoufu Food Co. Ltd., Guangzhou 511445, China)

Abstract: To investigate the effects of cooked germinated highland barley pulp (CGHBP) on the dough properties and quality of barbecued pork buns (BPB), different amount of CGHBP [0%, 4%, 8%, and 12% (dry weight basis, DW%)] were added to the wheat flour. The thermo-mechanical characteristics, fermentation rheological properties, and water distribution of dough were analyzed using a Mixolab mixer, Rheo-F4 fermentation rheometer, and nuclear magnetic resonance imaging analyzer, respectively. The texture, pore structure, microstructure, and sensory quality of BPB were also measured. Results showed that with an increasing addition of up to 12% CGHBP, the C2 value decreased from 0.46 to 0.34, and the recovery value dropped from 2.12

引文格式:

阮征,李君,成钰莹,等.萌芽青稞熟浆添加量对面团特性及叉烧包品质的影响[J].现代食品科技,2026,42(3):179-188.

RUAN Zheng, LI Jun, CHENG Yuying, et al. Effects of different amounts of cooked germinated highland barley pulp on the dough properties and quality of barbecued pork buns [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(3): 179-188.

收稿日期: 2025-01-17; 修回日期: 2025-04-15; 接受日期: 2025-04-21

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目 (2019B020212002); 广东省广州市番禺区产业人才政策项目 (2022-R01-1)

作者简介: 阮征 (1972-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 食品加工与保藏, E-mail: zhruan@scut.edu.cn; 共同第一作者: 李君 (2000-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与保藏, E-mail: 765309358@qq.com

通讯作者: 李志成 (1968-), 男, 正高级工程师, 中式面点师高级技师; 研究方向: 广式传统食品工艺, E-mail: lizhicheng201910@163.com

to 0.91. Moreover, the maximum fermentation height decreased from 49.00 to 39.50 mm, representing a reduction of 19.4%. At 8% CGHBP addition, T₁ and the corresponding gas release reached maximum values, indicating the best thermal stability of starch gelatinization. The content of deeply bound water (A₂₁) and weakly bound water (A₂₂) significantly increased to 17.54% and 81.95%, respectively. As the addition of CGHBP increased from 0% to 12%, hardness showed no significant changes, exhibiting an increase of merely 7.51%. In contrast, elasticity decreased from 0.91 to 0.86, resilience from 0.40 to 0.36, and specific volume from 2.54 to 2.02 mL·g⁻¹. At 12% CGHBP addition, pore uniformity in bun skin significantly deteriorated, with numerous pores appearing in the internal network. Sensory evaluation revealed gradual declines in shape, internal structure, and elasticity scores with a reduced specific volume, whereas flavor and aroma scores improved due to the pleasant flavor of CGHBP. Comprehensive analysis suggested 8% CGHBP as the optimal addition level for balancing dough properties and product quality. This study provides references for expanding the application of highland barley in Chinese steamed buns.

Key words: cooked germinated highland barley pulp; fermentation characteristics; dough rheological properties; pore structure; quality

青稞是我国高原地区一种重要的谷物作物，其特征包括耐低温、抗寒性强、生长周期短、高产、早熟以及广泛的适应性。相较于其他粮食种类，青稞含有更高的蛋白质、纤维素及维生素含量，同时含有较低的糖分与脂肪含量，并蕴藏丰富的功能性组分，比如β-葡聚糖、γ-氨基丁酸等^[1]。目前国内外对青稞面制品的研究大多集中在面包、馒头^[2]、面条^[3]等方面：丁双鲲等^[4]通过在 10% 青稞面包中添加赖氨酸，使青稞面包质构特性、风味等得到改善；张烁等^[5]通过在含有 30% 及 50% 青稞的面包中引入β-葡聚糖酶，面包的比容、质地发生变化，并增添了挥发性风味物质；黄冰羽^[6]探讨了不同粒度青稞粉及改良剂对青稞面包品质的影响，发现 100 目青稞粉具备良好的保水性、保油性及冻融稳定性，适宜用于青稞小麦面包的生产。现有研究多围绕青稞粉料展开，对青稞熟浆在面制品加工应用方面的研究甚少。

熟化处理后，青稞籽粒淀粉糊化，其水分含量下降，消化性增强、保藏性和安全性提升。经萌芽处理后，胚乳中的某些内源酶系（如蛋白酶、谷氨酸脱羧酶等）活力增加，进一步转化谷氨酸（Glu）或者其它氨基酸生成 GABA，可达到对 GABA 的富集作用^[7]。Al-ansi 等^[8]指出萌芽对青稞淀粉的结构、理化和形态特性有显著影响，在萌发过程中发生的变化可以提高所得青稞面粉的营养价值；Gao 等^[9]研究表明，在全谷物烘焙食品中，萌芽技术对其感官品质有显著改善作用。

目前以青稞粉为原料的面制品研究存在诸多局限。青稞质地较硬，制粉较为困难，且制粉过筛去除麸皮等物质会降低其营养价值，同时口感粗粝，限制了青稞面制品的加工空间，因此需要改进青稞的添加形式以使其加工特性和营养特性在产品中得到最大保留。本研究通过青稞籽粒萌芽后整粒熟化磨浆，获得 GABA 和β-葡聚糖等特征营养素富集的萌芽青稞熟浆，

加入粤式叉烧包皮层面团中进行营养强化，探究熟浆不同添加量对面团特性以及叉烧包品质的影响，以期为拓展青稞在中式蒸制包点中的应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 主要材料及试剂

小麦粉（湿面筋质量分数为 26.60%，水分质量分数为 12.80%），广州酒家集团利口福食品有限公司提供；高活性干酵母，安琪酵母股份有限公司；食用盐，福建省中盐集团股份有限公司；青稞，青海嘉悦食品有限公司；γ-氨基丁酸、硼酸、苯酚、次氯酸钠溶液等试剂均为分析纯。

1.2 主要仪器与设备

Foss Kjelttec 8400 全自动凯氏定氮仪，福斯分析仪器公司；LXJ-IIB 离心机，上海安亭科学仪器公司；HC-400 蒸柜，广州恒心西厨设备有限公司；W30 电动石磨，佛山市味美仕电器科技有限公司；TA-XT Plus 质构分析仪，英国 Stable Micro System 有限公司；F4 发酵流变仪、混合试验仪，法国 Chopin 公司；Merlin 场发射扫描电子显微镜，德国 Zeiss 公司；NMI20-40H-I 核磁共振成像分析仪，苏州纽迈分析仪器股份有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 样品制备

萌芽青稞熟浆（下简称熟浆）的制备：去除青稞籽粒中的霉变籽粒、未成熟籽粒、碎粒杂质等，洗净后置于萌芽罐中，用无菌水浸泡 3~4 h；然后倒出萌芽罐中的无菌水，室温放置 24 h 萌芽^[10]，接着进行蒸制熟化，热处理荷载量为 1.50~2.00 kJ·kg⁻¹·s⁻¹（以湿质量

计), 然后再分别经过破壁机粗磨和电动石磨机细磨, 按照 1:3 的料液比, 获得萌芽青稞熟浆。

熟浆面团的制备: 面团原料主要为小麦粉和熟浆, 按照烘焙比, 熟浆固形物添加质量分数为 0% (对照)、4%、8%、12% (下均默认 DW%, 表示干基), 添加水的质量分数根据粉质特性确定^[11]。

叉烧包样品的制备: 皮层以 500 g 小麦粉为基础, 按照烘焙比, 熟浆固形物添加质量分数为 0% (对照)、4%、8%、12%, 添加水的质量分数根据粉质特性确定, 其它辅料分别为干酵母 5 g, 白糖 80 g, 膨松剂 5.5 g, 盐 1 g; 馅料为带芡汁的叉烧馅, 皮馅比为 2:1; 和面条件: 采用立式和面机慢速搅拌 4 min (131 r·min⁻¹) 和快速搅拌 6 min (262 r·min⁻¹), 再经自动压面机轧皮 100 s; 醒发条件: 醒发箱中醒发 50 min、温度 37~39 ℃、相对湿度 70%~75%; 蒸制条件 (满载): 0.025 MPa、600 s。

1.3.2 熟浆基本理化性质的测定

1.3.2.1 水分含量测定

参考 GB 5009.3-2016 的直接干燥法; 蛋白质含量测定参考 GB 5009.5-2016 中的凯氏定氮法; 膳食纤维含量测定参考 GB 5009.88-2023。

1.3.2.2 γ -氨基丁酸含量的测定

参考张紫晋等^[12]的比色方法并稍作改动, 称取 50 mg γ -氨基丁酸标准品, 加入蒸馏水溶解后定容至 100 mL。在试管内分别加入 0、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 mL γ -氨基丁酸溶液, 并加入蒸馏水补足体积至 1.0 mL, 加入 0.1 mol·L⁻¹ 硼酸盐缓冲液 (pH 值 9.18) 2 mL、5% 苯酚溶液 1 mL、7% 次氯酸钠溶液 1 mL, 沸水浴 8 min 后, 冰浴 8~10 min, 最后加入 φ =60% 乙醇 2 mL 摇匀, 在 645 nm 的波长下测定吸光度, 制作 γ -氨基丁酸标准曲线。

将熟浆在提取温度 60 ℃、液料比 5:1 (m/m , 以青稞干物质计) 的条件下, 震荡浸提 2 h, 在 6000 r·min⁻¹ 离心 10 min, 取 1 mL 上清液进行显色反应后在 645 nm 的波长下测量吸光度, 通过标准曲线计算出样品中 γ -氨基丁酸的含量。

1.3.3 面团热机械学特性的测定

采用 Mixolab 混合试验仪进行测定^[13]。实验方案设定为 Chopin+ 模式, 设定双刀旋转速率为 80 r·min⁻¹, 面团样本质量为 75 g, 水温维持在 30 ℃, 目标扭矩值 (C1) 设定为 (1.10±0.05) N·m。Mixolab 混合仪各参数的具体含义见表 1。

1.3.4 面团发酵特性的测定

采用 F4 流变发酵仪进行测定^[14]。首先配置好面团协议, 将 315 g 面团精确称量后置入发酵篮中。将发酵温度设定为 35 ℃, 并设置发酵时长为 90 min, 获

得面团的膨胀历程曲线及气体释放曲线。关于 F4 流变发酵仪各参数的具体含义见表 2。

表 1 混合试验仪指标及其含义

Table 1 Indicators and their meanings of mixed testing equipment	
指标	参数含义
C2	稠度最小值, 用于测定在机械力和温度下蛋白质的弱化程度
C3	糊化粘度最大值, 用于测定淀粉糊化特性
C4	糊化粘度最小值, 用于测定淀粉糊化热稳定性
C5	粘度最终值, 用于测定冷却过程中淀粉的回生特性
C3-C2	淀粉糊化特性, 数值越大, 糊化特性越强
C3-C4	淀粉糊化热稳定性, 数值越小, 热稳定性越强
C4/C3	蒸煮稳定性
C5-C4	淀粉回生特性, 数值越小, 回升特性越弱

表 2 流变发酵仪指标及其含义

Table 2 Rheological fermentation instrument indicators and their meanings	
指标	参数含义
Hm	面团最大发酵高度
h	面团最终发酵高度
T ₁	面团发酵最大高度的时间
H'm	气体释放时的最大高度
T' ₁	达到气体释放最大高度的时间
Tx	面团开始泄露二氧化碳气的时间
A _T	总产气量
A ₁	持气量
R	保留系数

1.3.5 面团水分分布特性的测定

利用 Q-FID 测试手段调整共振的中心频率, 采用 Q-CPMG 脉冲序列来测定样品的横向弛豫时间 T_2 , 并借助 SIRT 方法来获取反演结果^[15]。实验参数设置为: 90° 脉冲射频脉宽 P1=9.0 μ s, 信号采样点数 TD=80 012, 采样次数 NS=16, 重复采样等待时间 Tw=2 500 ms, 回波个数 NECH=1 000; 反演参数: 弛豫时间最小值: 0.01 ms, 弛豫时间最大值: 100 000 ms, 迭代次数: 1 000 000。

1.3.6 叉烧包蒸制前后质量变化

测定叉烧包在蒸前蒸后的质量变化, 蒸制前后叉烧包质量的差值与蒸制前叉烧包质量之比为叉烧包蒸制质量变化率。

1.3.7 叉烧包质构的测定

将整个叉烧包置于载物平台上^[16]。具体测定参数配置为: 选用 P/100 型探头, 预设压前速度为 5.0 mm·s⁻¹,

测试阶段速度调整为 $1.0\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ，压后复位速度为 $5.0\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ，压缩形变比例设定为 50%，触发灵敏度设定为 5 g，两次连续压缩操作间的时间间隔保持为 5 s。测量的指标包含：硬度、弹性、咀嚼性和内聚性等几个方面。

1.3.8 叉烧包比容的测定

采用国标 GB/T 21118-2007 小麦粉馒头菜籽置换法测定叉烧包体积，采用感量为 0.01 g 的天平测定叉烧包质量，体积与质量之比为叉烧包比容 ($\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$)。

1.3.9 叉烧包气孔结构的测定

参考文献^[17-19]的研究方法，取叉烧包的皮层内瓢拍摄孔隙照片，使用 Image J 软件分析计算单位面积气孔的个数 (CD, $\text{cells}\cdot\text{cm}^{-2}$) 及气孔的表面积占有率 (AF, %)。

1.3.10 叉烧包微观结构的测定

参考李晓宁等^[20]的研究方法，先取叉烧包皮层内瓢在室温下冷却，随后用刀具将其切割成尺寸为

$4.0\text{ mm}\times 4.0\text{ mm}\times 4.0\text{ mm}$ 的立方体，对立方体样品进行冷冻干燥处理后，将其粘附于导电胶带上并稳妥安置于样品台上，在样品表面喷涂一层厚度约为 20 nm 的金镀膜。将处理好的样品置于扫描电子显微镜的观察舱内并进行真空处理，在 15 kV 加速电压下，分别将放大倍数调整至 100 倍和 500 倍，对样品进行观察并拍摄相应的显微图像。

1.3.11 叉烧包感官评价

参照李建华^[21]、阮雁春等^[22]的方法并略有修改。从外观、色泽、表面光滑程度、内部组织结构、滋味、粘牙性、弹性与气味等方面进行感官评分，选择 15 名经过专业培训的感官评价员进行评价，评价标准如表 3 所示。

1.3.12 数据处理

数据采用 Excel 2019、SPSS 22.0 和 Origin 2022 软件处理，采用 Duncan 新复极差分析法，取 95% 置信区间 ($P<0.05$)，结果用“平均值 $\pm$ 标准差”表示。

表 3 叉烧包感官评价评分标准
Table 3 Cha siu bao sensory evaluation scoring standard

项目	满分 / 分	评分标准
外观	15	呈圆形，匀称饱满，不发生塌陷和皱缩，清晰的褶皱（10.1~15 分）；
		对称性和饱满性略差，模糊的褶皱（5.1~10 分）；
		扁塌，发生皱缩和塌陷，褶皱不明显（1~5 分）
色泽	15	表皮光泽性好（10.1~15 分）；
		表皮稍暗（5.1~10 分）；
		表皮发灰发暗（1~5 分）
表皮光滑程度	15	表皮平滑，未出现小孔点和泡皮（10.1~15 分）；
		表皮略有小孔点（5.1~10 分）；
		表皮粗糙，小气泡或泡皮较多（1~5 分）
内部组织结构	15	气孔细小且均匀，呈海绵状（10.1~15 分）；
		气孔中等且不均匀，内部组织结构较粗糙（5.1~10 分）；
		气孔极不均匀，内部组织结构极差，且表面较粗糙（1~5 分）
滋味	15	较好的咀嚼性，细腻的口感，明显的皮香甜味和馅料味，没有涩味（10.1~15 分）；
		一般的咀嚼性，其皮香甜味和馅料味不明显，有轻微涩味（5.1~10 分）；
		较差的咀嚼性，其皮和馅有异味，严重的涩味（1~5 分）
粘牙性	10	爽口，咀嚼两次时有不粘牙性（7.1~10 分）；
		不爽口，稍微粘牙性（4.1~7 分）；
		粘牙性较重（1~4 分）
弹性	10	用手指按压叉烧包后，能迅速恢复原状（7.1~10 分）；
		用手指按压叉烧包后，恢复性较差（4.1~7 分）；
		用手指按压叉烧包后，不能恢复原状（1~4 分）
气味	5	麦香味、青稞香气以及叉烧馅的肉香味明显，没有异味（4.1~5 分）；
		除麦香味、青稞香气和叉烧馅肉香味外，有些许的异味（3.1~4 分）；
		麦香味、青稞香气和叉烧肉味稍弱，有明显异味（1~3 分）

2 结果与分析

2.1 熟浆的基本理化性质

熟浆的基本理化性质如表 4 所示，其中 γ -氨基丁酸含量达到 66.91 mg/100 g DW，青稞萌芽前的 γ -氨基丁酸含量为 36.37 mg/100 g DW，萌芽后其含量显著提高了 83.97%。 γ -氨基丁酸是一种重要的功能性成分，具有改善睡眠、缓解焦虑等作用，这表明该熟浆在功能性面制品开发方面可能具有潜力。

Table 4 The basic physical and chemical properties of the cooked pulp			
水分/%	蛋白质/%	膳食纤维/%	γ -氨基丁酸/(mg/100 g DW)
78.43 $\pm$ 0.03	9.32 $\pm$ 0.01	11.77 $\pm$ 0.14	66.91 $\pm$ 6.40

2.2 不同熟浆添加量的面团热机械学特性的变化

如表 5 所示，随着熟浆添加量的增加，C2 值总体上呈现出递减的趋势，这可能是因为熟浆本身膳食纤维比较丰富，随着其添加量的增加，面团中的面筋蛋白被稀释，导致面筋含量减少，进而削弱了面团的筋力。淀粉的糊化及回生特性对面制品的品质具有显著影响，糊化特性和回生特性分别与叉烧包的稳定性和老化有关。添加熟浆后，在改变面团的糊化特性方面呈现出以下趋势：随着熟浆添加比例的增加，表征淀粉糊化热稳定性的 C3-C4 值呈现波动性变化，添加量 8% 的时候淀粉糊化热稳定性最好，耐热性最好。此外，有诸多研究表明^[23]，面粉中膳食纤维及外源性蛋白的添加会导致淀粉糊化黏度的下降。在熟化制浆过程中，热力和机械粉碎的共同作用，破坏了青稞淀粉的结晶区和氢键，使得混合面团中的破损淀粉含量增多^[24]，此外青稞中含有的纤维素对面筋网络也

有一定破坏作用，使得 C4/C3 值降低。相较于小麦粉，青稞含有更为丰富的膳食纤维，这些纤维在受热后会形成凝胶，阻碍淀粉分子间氢键的重新排列，延缓了淀粉由无序态向有序结晶态的转变，导致回生值降低，从而对叉烧包的老化回生有一定的抑制作用^[25]。

2.3 不同熟浆添加量的面团发酵特性的变化

如表 6 所示，随着熟浆添加量的增加， Hm 和 h 出现显著下降趋势 ($P<0.05$)，面团的最大发酵高度和叉烧包比容显著正相关^[26]。从 Hm 和 h 值可以看出面团在发酵时的产气情况， Hm 和 h 的下降，表明面团发酵能力降低。这是因为随着熟浆添加比例的增加，面筋含量下降，面团的发酵膨胀没有足够的面筋蛋白网络结构支撑，使得最大发酵高度从 49.00 mm 降低至 39.50 mm。在气体释放方面， T'_1 和 T_x 与面团的性质有关， T'_1 越长，表明面团的持气能力越好^[27]。与对照相比，添加熟浆的面团， T'_1 显著增大 ($P<0.05$)，添加量在 8% 时， T'_1 和相应的气体释放量达到最大，这可能是因为熟浆淀粉糊化，淀粉颗粒吸水膨胀，破坏了原有的结晶结构^[28]，适量添加熟浆量 8%，糊化后的淀粉颗粒可以填充到面筋网络的空隙中，增强面筋网络的连续性和稳定性，使得面团在发酵过程中能够更好地保持气体，从而提高持气能力；当添加量继续增加到 12% 时，过多的熟浆会导致面筋蛋白含量相对降低，面筋网络结构被削弱，影响二硫键的形成，面筋强度下降，持气能力也随之降低。保留系数 R 对面团持气性的体现很重要， R 越高表示面团结构越好，能够保留面团发酵产生的二氧化碳； R 越低，则二氧化碳等气体外溢越多，面团持气力越差。由表 6 可以看出，添加量 0~8%， R 无显著变化，添加量增至 12%， R 出现显著性降低 ($P<0.05$)。

Table 5 The effect of the amount of cooked pulp added on the thermo mechanical properties of dough								
熟浆添加量/(DW%)	C2/(N·m)	C3/(N·m)	C4/(N·m)	C5/(N·m)	C3-C2/(N.m)	C3-C4/(N·m)	C4/C3	C5-C4/(N·m)
0	0.46	2.30	2.23	4.35	1.84	0.06	0.97	2.12
4	0.46	2.15	2.11	3.55	1.70	0.04	0.98	1.44
8	0.31	1.78	1.69	2.76	1.47	0.10	0.95	1.07
12	0.34	1.65	1.56	2.47	1.31	0.09	0.95	0.91

表 6 不同熟浆添加量的面团发酵特性的变化

Table 6 The effect of the amount of cooked pulp added on the fermentation characteristics of dough									
熟浆 添加/ (DW%)	面团发酵			气体释放					
	Hm/mm	H/mm	T ₁ /min	H'm/mm	T' ₁ /min	T _x /min	A _T /mL	A ₁ /mL	R/%
0	49.00 ± 0.41 ^a	48.88 ± 0.31 ^a	88.50 ± 0.10 ^b	90.31 ± 2.00 ^c	66.00 ± 3.10 ^b	58.50 ± 2.00 ^a	999.01 ± 10.40 ^c	958.02 ± 2.00 ^d	95.19 ± 1.01 ^a
4	46.31 ± 0.22 ^b	46.05 ± 0.21 ^b	79.50 ± 0.30 ^c	90.51 ± 0.20 ^{bc}	75.00 ± 1.00 ^a	54.00 ± 1.50 ^b	1 027.20 ± 6.03 ^b	984.10 ± 2.36 ^c	95.28 ± 0.12 ^a
8	40.71 ± 0.41 ^c	40.71 ± 0.41 ^c	90.00 ± 0.00 ^a	93.80 ± 1.91 ^{ab}	75.00 ± 0.50 ^a	40.50 ± 0.20 ^c	1 077.10 ± 3.21 ^a	1 007.80 ± 7.10 ^a	93.05 ± 1.20 ^a
12	39.50 ± 0.30 ^d	39.50 ± 0.30 ^d	90.00 ± 0.00 ^a	95.70 ± 2.10 ^a	72.00 ± 1.20 ^a	42.00 ± 1.00 ^c	1 088.03 ± 1.30 ^a	997.04 ± 1.03 ^b	91.26 ± 0.64 ^b

注：同列数据上标不同表示具有显著性差异（ $P<0.05$ ），下同。

表 7 不同熟浆添加量混合面团的T₂值及相对峰面积

Table 7 T ₂ value and relative peak area of cooked dough mixture						
熟浆添加量/(DW%)	T ₂₁ /ms	T ₂₂ /ms	T ₂₃ /ms	A ₂₁ /%	A ₂₂ /%	A ₂₃ /%
0	2.35 ± 0.19 ^a	17.31 ± 0.83 ^a	214.84 ± 10.01 ^b	15.15 ± 0.23 ^d	79.32 ± 0.16 ^b	1.62 ± 0.15 ^a
4	1.36 ± 0.25 ^b	15.37 ± 0.23 ^b	222.90 ± 4.93 ^b	16.39 ± 1.04 ^c	79.64 ± 1.66 ^b	1.42 ± 0.07 ^a
8	0.77 ± 0.09 ^c	13.78 ± 0.08 ^c	241.11 ± 6.51 ^a	17.54 ± 0.24 ^b	81.95 ± 1.03 ^a	1.18 ± 0.12 ^b
12	0.53 ± 0.04 ^c	11.87 ± 0.53 ^d	252.39 ± 6.15 ^a	19.14 ± 0.32 ^a	83.67 ± 0.16 ^a	1.10 ± 0.12 ^b

2.4 不同熟浆添加量的面团水分分布特性的变化

面团的形成是面筋蛋白、淀粉及水分相互作用的结果。依据结合强度的差异，面团中的水分可被划分为3种状态：深层结合水、弱结合水以及自由水，其结合强度依次减弱^[29]。表7中T₂₁、T₂₂、T₂₃分别表示了3种水分状态的弛豫时间，其数值的大小反映了相应状态水分的流动性强弱；A₂₁、A₂₂、A₂₃分别为3个峰的积分面积，其数值代表3种水分相对含量^[30]。由表7可知，随着熟浆添加比例的增大，与对照组相比，横向弛豫时间T₂显著降低（ $P<0.05$ ），T₂值减小，深层结合水和弱结合水较多，自由水较少。有研究表明^[31]，淀粉糊化实际上是一个水化过程，高度水合的淀粉分子对水分子具有更好的亲和力，降低了它们的扩散系数，这导致系统动力学的整体减慢，因此添加熟浆的面团具有较低的水迁移率。由表6可知，与对照样相比，随着熟浆添加量的增加，A₂₁和A₂₂呈显著性上升趋势（ $P<0.05$ ），说明熟浆的加入限制了面团内部水分的流动，使结合水上升，这可能是由于熟浆含有较高含量β-葡聚糖，其具有高吸水能力，改变了面团的水分分布状态，使得面团拥有更好的持水性。

2.5 不同熟浆添加量的叉烧包蒸制前后质量变化

叉烧包蒸制前后的质量变化率对评价叉烧包整体品质而言十分重要。由表8可知，与对照组相比，添

加量达到8%，对叉烧包整体质量变化无显著性影响（ $P<0.05$ ），添加量继续增加达到12%时，叉烧包蒸制前后质量变化显著。这可能是因为熟浆的加入减弱了叉烧包组分对于水分的束缚程度，结构进一步松散，水分蒸发量增大，导致损失率增加。结果表明，添加量为8%时还能较好的保持叉烧包蒸制前后的整体质量。

表 8 不同熟浆添加量的叉烧包蒸制前后质量变化

Cha siu bao before and after steaming	
熟浆添加量/(DW%)	质量变化率/%
0	8.01 ± 0.11 ^a
4	7.83 ± 0.21 ^a
8	7.81 ± 0.30 ^a
12	7.21 ± 0.26 ^b

2.6 不同熟浆添加量的叉烧包皮层内瓤气孔结构的变化

叉烧包内部的气孔结构与面团发酵和蒸制过程中气孔的形成和增长有关。如表9所示，CD值与叉烧包制备过程中淀粉、蛋白质等物质交互作用、面筋网络的交联水平都有关，数值较高则说明包点内部的气孔细小、组织结构细腻；AF值反映内部气孔的稳定性以及面团的持气能力；CD/AF值则体现了内部气孔的大小与均匀性，该值越大，表明叉烧包内部组织结

构越佳。添加熟浆的叉烧包单位面积气孔数量出现显著降低趋势 ($P<0.05$), 气孔表面积分率呈显著增大 ($P<0.05$)。有研究指出^[32], 叉烧包单位面积的气孔数的变化与可溶性纤维、水胶体和水形成的网络有关。青稞中富含膳食纤维, 对面筋蛋白的稀释作用造成发酵及蒸制过程中不能产生均匀致密的气孔。由图 1 可以看出, 添加量达到 8% 时, 膳食纤维吸水后形成的凝胶网络也可助于叉烧包膨胀定型, 添加量逐渐增大到 12% 时, 其中所含的膳食纤维对叉烧包结构造成了较大的破坏作用。

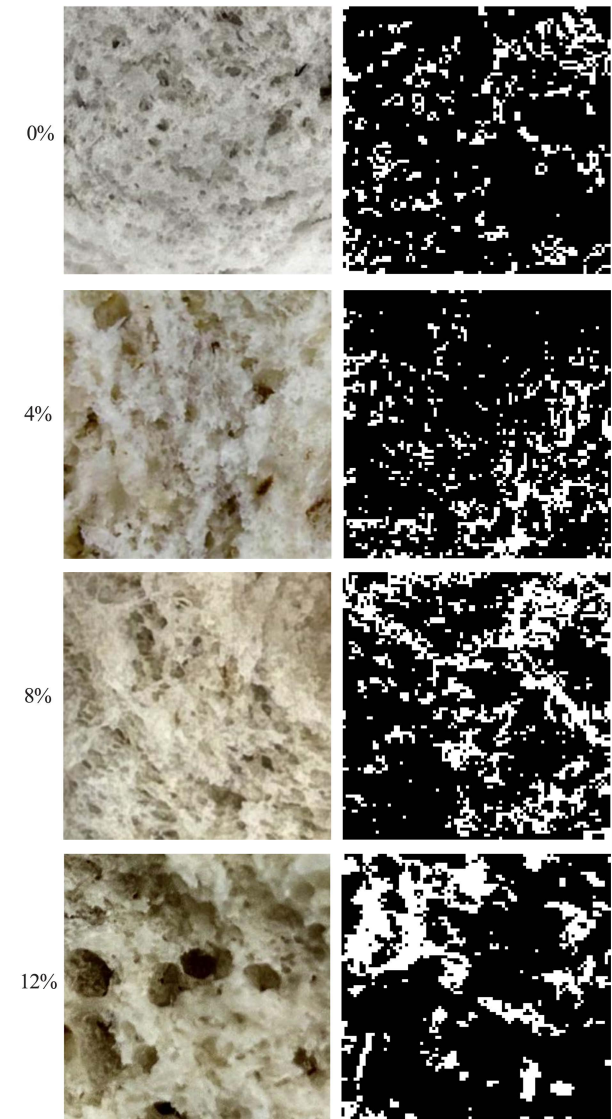


图 1 不同熟浆添加量的叉烧包皮层内瓤的气孔结构对比
Fig.1 Comparison of pore structure in Cha siu bao with different amount of cooked pulp

2.7 不同熟浆添加量的叉烧包质构和比容的变化

质构特性是表征叉烧包品质的重要指标, 质地口感往往与硬度呈负相关, 在一定范围内, 硬度越小,

叉烧包吃起来越柔软, 口感越好^[33]。由表 10 可知, 熟浆的添加对叉烧包的硬度无显著性影响 ($P<0.05$), 硬度仅增加 7.51%; 而弹性和回复性有一定程度的下降, 弹性由 0.91 下降至 0.86, 回复性由 0.40 下降至 0.36。Rodriguez-garcia 等^[34]发现叉烧包内部气孔数量的减少会导致弹性值的降低。结合熟浆对叉烧包的面团流变性能和皮瓤气孔结构的影响可知, 随着熟浆的加入, 面团中原有的面筋网络受到影响, 不能充盈足够的二氧化碳, 故面团流变学特性变差, 持气能力减弱, 叉烧包膨松度变差; 此外, 比容也随之减小, 根据上述气孔结构变化分析可知, 皮层气孔数量及均匀性显著降低, 也会导致弹性下降。内聚性是指食品内部结合力的大小, 反映叉烧包咀嚼口感的稳定性。胶着性体现食品的粘性口感。8% 以内的添加量对于内聚性和胶着性的影响不大, 继续增加熟浆量, 则内聚性显著下降, 胶着性显著上升, 皮瓤粘牙的口感较为明显。

表 9 不同熟浆添加量的叉烧包皮层内瓤的气孔密度及气孔表面积分率

Table 9 Pore density and pore surface fraction of Cha siu bao with different amount of cooked pulp			
熟浆添加量/ (DW%)	CD/(cells·cm ²)	AF/%	CD/AF
0	373.12 ± 5.16 ^a	28.26 ± 1.09 ^d	13.20 ± 0.12 ^a
4	332.27 ± 1.88 ^b	30.77 ± 0.66 ^c	10.79 ± 0.20 ^b
8	267.78 ± 7.96 ^c	35.65 ± 0.71 ^b	7.51 ± 0.11 ^c
12	196.19 ± 6.56 ^d	38.96 ± 2.25 ^a	5.04 ± 0.35 ^d

2.8 不同熟浆添加量的叉烧包皮层内瓤微观结构的变化

叉烧包的微观结构决定其宏观特性。叉烧包内部结构中, 蛋白质包裹着淀粉颗粒, 构建了面筋网络^[35]。如图 2 所示, 在对照组叉烧包中, 受热后的淀粉颗粒破裂, 与面筋蛋白网络相互交织, 形成了流畅且紧密的结构^[36], 使得叉烧包内部有了更强的缓冲和支撑性, 故对照组叉烧包硬度较低、弹性较大。当添加量达到 8% 时, 面筋网络结构仍能保持一定的连续性; 然而, 随着添加量进一步增加至 12%, 面筋结构逐渐受到破坏, 原本致密的平面上孔洞增多, 连续结构也出现了断裂现象。这可能是由于面团中膳食纤维的含量较高, 导致水分发生了重新分配。熟浆的加入促使更多水分进入纤维中, 从而使得面筋的淀粉基质所能利用的水分减少, 面筋蛋白因此受到影响, 最终导致了结构的塌陷和孔洞数量的增加。

表 10 不同熟浆添加量的叉烧包质构和比容的变化

Table 10 Effect of cooked pulp addition on texture and specific volume of Cha siu bao						
熟浆添加量/(DW%)	硬度/g	弹性	内聚性	胶着性	回复性	比容 /(mL·g ⁻¹)
0	1 079.31 ± 89.98 ^a	0.91 ± 0.00 ^a	0.81 ± 0.01 ^a	837.28 ± 20.85 ^c	0.40 ± 0.01 ^a	2.54 ± 0.01 ^a
4	1 086.55 ± 35.85 ^a	0.89 ± 0.00 ^b	0.80 ± 0.01 ^{ab}	900.23 ± 19.49 ^b	0.38 ± 0.00 ^b	2.46 ± 0.03 ^b
8	1 121.95 ± 22.09 ^a	0.87 ± 0.01 ^c	0.80 ± 0.00 ^{ab}	911.00 ± 13.77 ^b	0.37 ± 0.01 ^{bc}	2.23 ± 0.07 ^c
12	1 160.43 ± 27.27 ^a	0.86 ± 0.01 ^c	0.79 ± 0.01 ^b	1 212.53 ± 58.74 ^a	0.36 ± 0.00 ^c	2.02 ± 0.01 ^d

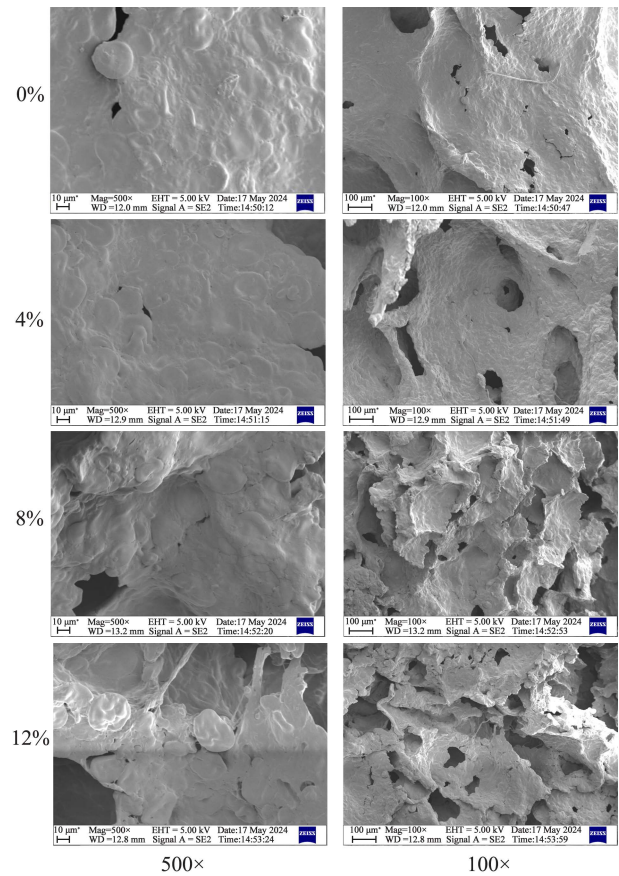


图 2 不同熟浆添加量的叉烧包皮层内瓤的微观结构变化
Fig.2 Comparison of Internal microstructure of Cha siu bao with different pulp doses

2.9 不同熟浆添加量的叉烧包外观和感官评分的变化

叉烧包感官评价是判断面制品品质和消费者喜爱度的重要参考因素。随着熟浆的加入，叉烧包的色泽和弹性会发生变化，影响叉烧包的感官评价^[37]。图 3 为熟浆不同添加量叉烧包的外观、色泽、表面光滑程度、内部组织结构、滋味、粘牙性、弹性与气味感官评分。由图 4 可知，在相同蒸制条件下，对照组叉烧包的表皮色泽在蒸制后呈现乳白色，加入熟浆的叉烧包表面颜色相比对照组叉烧包更暗，可能是熟浆自身的颜色影响了叉烧包表面的黄度值，加入熟浆对外观评分值无显著影响。结合上述叉烧包皮瓤气孔结构分析结果，添加量增大到 12% 时，叉烧包内部气孔结构的破坏作

用较大，因而内部组织结构评分降低，并影响口感的弹性。加入熟浆后，并没有明显粗粝的口感；由上述质构结果可知，8% 以内的添加量对于内聚性和胶着性的影响不大，皮瓤粘牙的口感不明显，粘牙性评分值无显著降低。同时，其独特的风味也影响了叉烧包的气味，滋味和气味评分上升，熟浆的加入增加了消费者对叉烧包的喜爱程度。

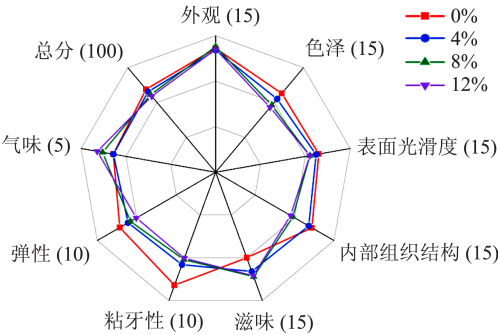


图 3 不同熟浆添加量的叉烧包感官评分
Fig.3 Sensory evaluation scores of Cha siu bao with different amount of cooked pulp

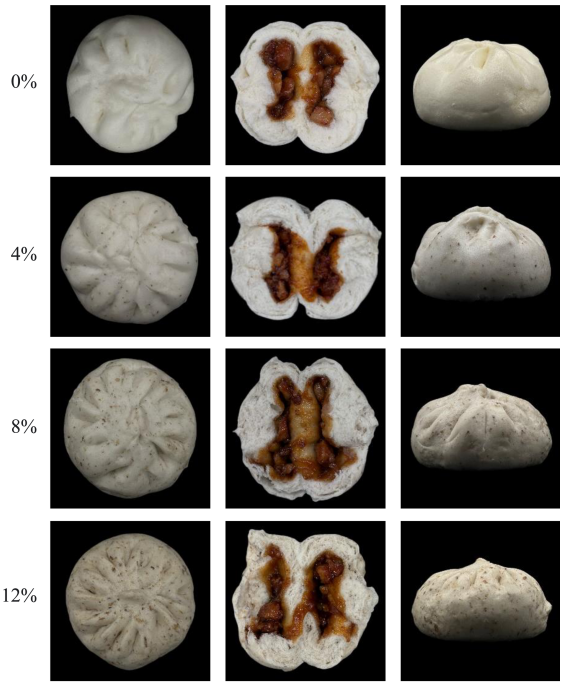


图 4 不同熟浆添加量的叉烧包照片
Fig.4 Photos of Cha siu bao with different dosages of cooked pulp

3 结论

萌芽青稞熟浆的添加对面团的性质及叉烧包的品质有重要影响。结果显示,添加量在8%的时候淀粉糊化热稳定性最好,耐热性最好。随着熟浆添加量的增加,C5-C4值减小,从2.12减小至0.91,说明抑制了淀粉的老化回生,可以减缓叉烧包的老化速率;面团的最终发酵高度和最终发酵高度显著降低($P<0.05$),添加量在8%时, T'_1 和相应的气体释放量达到最大,适量添加熟浆量8%,糊化后的淀粉颗粒可以填充到面筋网络的空隙中,增强面筋网络的连续性和稳定性,使得面团在发酵过程中能够更好地保持气体,从而提高持气能力;当添加量继续增加到12%时,过多的熟浆会导致面筋蛋白含量相对降低,面筋网络结构被削弱,影响二硫键的形成,面筋强度下降,持气能力也随之降低。添加量0~8%, R 无显著变化,添加量增至12%, R 出现显著性降低($P<0.05$)。水分分布特性结果显示,随着熟浆添加量的增大,与对照组相比,面团中自由水含量下降,向结合水迁移,使得面团的持水性增强,叉烧包具有更好的保水性。

与对照相比,添加量为8%时还能保持叉烧包蒸制前后的整体质量;随着熟浆添加量增加,叉烧包的比容显著减小($P<0.05$),对照组为 $2.54\text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$,12%添加量的为 $2.02\text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$;弹性及回复性降低,硬度无显著性变化。微观结构结果显示,添加量达到8%时,面筋网络结构仍能保持一定的连续性;随着添加量增加至12%,面筋结构逐渐受到破坏,致密的平面上孔洞增多,连续结构也出现断裂现象。感官评分结果显示,随着叉烧比比容的减小,其形状、内部组织结构及弹性得分逐渐降低,对感官品质并没有显著劣化影响,反而滋味和气味评分上升。综合考虑面团特性及叉烧包的品质,8%的添加量为宜。本研究为拓展青稞在中式蒸制包点中的应用提供理论参考和指引。

参考文献

- [1] GUO T, HORVATH C, CHEN L, et al. Understanding the nutrient composition and nutritional functions of highland barley (qingke): a review [J]. Trends in Food Science and Technology, 2020, 103: 109-117.
- [2] 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.
- [3] 王润,党斌,杨希娟,等.青稞低GI挤压面条制作工艺优化及营养与抗氧化活性分析[J].中国粮油学报,2019,34(6):37-44.
- [4] 丁双鲲,杜恺,袁增慧,等.赖氨酸对青稞面包品质及风味特征的影响[J].食品与发酵工业,2023,49(7):256-263.
- [5] 张烁,王伟,郭志顶,等. β -葡聚糖酶对青稞面包质构特性及其风味物质的影响[J].食品工业科技,2023,44(10):11-19.
- [6] 黄冰羽.青稞粉及品质改良剂对青稞-小麦混合粉面团特性及面包品质的影响[D].雅安:四川农业大学,2023.
- [7] 张驰.发芽青稞熟粉的功能特性及其在烘焙食品中的应用研究[D].广州:华南理工大学,2020.
- [8] 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.
- [9] GAO K, LIU Y X, TAN B, et al. An insight into the rheology and texture assessment: The influence of sprouting treatment on the whole wheat flour [J]. Food Hydrocolloids, 2022, 125: 107248.
- [10] 阮征,张驰,李汴生,等.一种富含 γ -氨基丁酸的高得率熟化青稞全粉的生产方法:中国,CN201910283068.8[P].2019-08-06.
- [11] 索文静.甘薯生浆对面团加工特性及面包品质的影响研究[D].淄博:山东理工大学,2023.
- [12] 张紫晋,任益明,江迪,等.不同大麦籽粒 γ -氨基丁酸含量的差异及环境影响[J].西南农业学报,2022,35(5):1089-1094.
- [13] 张纷,赵亮,靖卓,等.藜麦-小麦混合粉面团特性及藜麦馒头加工工艺[J].食品科学,2019,40(14):323-332.
- [14] HUANG W, KIM Y, LI X, et al. Rheofermentometer parameters and bread specific volume of frozen sweet dough influenced by ingredients and dough mixing temperature [J]. Journal of Cereal Science, 2018, 48(3): 639-646.
- [15] CHIKPAH S K, KORESE J K, HENSEL O, et al. Rheological properties of dough and bread quality characteristics as influenced by the proportion of wheat flour substitution with orange-fleshed sweet potato flour and baking conditions [J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 147: 111515.
- [16] 李赛.高含量青稞戚风蛋糕的烘焙特性及其贮存稳定性研究[D].广州:华南理工大学,2022.
- [17] 钟京,王凤,刘娜,等.乳酸菌发酵麸皮酸面团对高纤维面包面团流变发酵学及烘焙特性的影响[J].食品科学,2013,34(9):49-54,57.
- [18] DEMIRKESEN I, SUMNU G, SAHIN S. Image analysis of gluten-free breads prepared with chestnut and rice flour and baked in different ovens [J]. Food and Bioprocess Technology, 2013, 6(7): 1749-1758.
- [19] OZGE O S, SUMNU G, SAHIN S. The effects of gums on macro and micro-structure of breads baked in different ovens [J]. Food Hydrocolloids, 2009, 23(8): 2182-2189.
- [20] 李晓宁,汪丽萍,田晓红,等.麦麸膳食纤维及原料麦麸对馒头品质的影响[J].食品工业科技,2024,45(3):75-82.
- [21] 李建华.发酵包子对小麦粉品质要求的研究[D].郑州:河南工业大学,2022.
- [22] 阮雁春,刘宁海,王引兰.青稞小麦混合粉面团特性及青稞馒头加工工艺研究[J].食品研究与开发,2021,42(3):92-96.
- [23] BAAH R O, DUODU K G, EMMAMBUX M N. Cooking quality, nutritional and antioxidant properties of gluten-free maize-Orange-fleshed sweet potato pasta produced by extrusion [J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 162: 113415.
- [24] SUN Y M, PAN Z J, YANG C X, et al. Comparative assessment of phenolic profiles, cellular antioxidant and antiproliferative activities in ten varieties of sweet potato (*Ipomoea batatas*) storage

- roots [J]. *Molecules*, 2019, 24(24): 4476.
- [25] WANG H, LI Z, WANG L, et al. Different thermal treatments of highland barley kernel affect its flour physicochemical properties by structural modification of starch and protein [J]. *Food Chemistry*, 2022, 387: 132835.
- [26] KIM Y S, HUANG W, DU G, et al. Effects of trehalose, transglutaminase, and gum on rheological, fermentation, and baking properties of frozen dough [J]. *Food Research International*, 2008, 41(9): 903-908.
- [27] AZEEM M, MU T H, ZHANG M. Influence of particle size distribution of orange-fleshed sweet potato flour on dough rheology and simulated gastrointestinal digestion of sweet potato-wheat bread [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2020, 131: 109690.
- [28] WANG C J, LIU Y, XU L, et al. Changes of the main components, physicochemical properties of distiller's grains after extrusion processing with focus on modification mechanism [J]. *Food Chemistry*, 2022, 390: 133187.
- [29] 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,2019.
- [30] 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.
- [31] LU Z, SEETHARAMAN K. H nuclear magnetic resonance (NMR) and differential scanning calorimetry (DSC) studies of water mobility in dough systems containing barley flour [J]. *Cereal Chemistry*, 2013, 90(2): 120-126.
- [32] 顾雨辰.高直链玉米粉对面团特性及馒头品质的影响探究[D].无锡:江南大学,2023.
- [33] MBOGO D, MUZHINGI T, JANASWAMY S. Starch digestibility and beta-carotene bioaccessibility in the orange-fleshed sweet potato puree-wheat bread [J]. *Journal of Food Science*, 2021, 86(3): 901-906.
- [34] RODRÍGUEZ-GARCÍA J, SALVADOR A, HERNANDO I. Replacing fat and sugar with inulin in cakes: bubble size distribution, physical and sensory properties [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2014, 7(4): 964-974.
- [35] SHEN Y, CHEN G, LI Y. Bread characteristics and antioxidant activities of Maillard reaction products of white pan bread containing various sugars [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2018, 95: 308-315.
- [36] WANG H, LI Z, WANG L, et al. Different thermal treatments of highland barley kernel affect its flour physicochemical properties by structural modification of starch and protein [J]. *Food Chemistry*, 2022, 387: 132835.
- [37] 张龔.青稞复配粉对面包品质影响的研究[D].郑州:河南工业大学,2022.