

紫薯-中筋复配粉的理化特性及其馒头制品品质分析

赵时珊^{1,2}, 蔡芳¹, 隋勇¹, 施建斌¹, 熊添¹, 蔡沙¹, 陈学玲¹, 何建军¹, 李少斌², 梅新^{1*}

(1. 湖北省农业科学院农产品加工与核农技术研究所, 湖北武汉 430064)

(2. 长江大学生命科学学院, 湖北荆州 434025)

摘要: 对比紫薯全粉不同添加量对中筋粉的加工特性, 及其馒头制品食用品质的影响。结果表明, 紫薯全粉的加入提升了复配粉的持水性, 但降低了持油性。热特性结果显示, 复配粉表现出双峰糊化特性。未经复配的紫薯全粉起始温度(T_o)、峰值温度(T_p)、终止温度(T_c)高于中筋粉, 但 ΔH 更低。经复配后中筋粉的起始温度 T_o 、 T_p 、 T_c 介于60.67~71.43 °C、0.49~1.21 J/g之间, T_o 、 T_p 和 T_c 与未进行复配的中筋粉相比有所增加, 而 ΔH 有所下降。而经复配处理的紫薯全粉的 T_o 、 T_p 、 T_c 和 ΔH 介于78.33~87.97 °C、0.06~0.38 J/g之间, 均呈下降趋势。随着紫薯全粉添加量的增加, 面团的面筋网络形成能力下降, 导致形成和稳定时间缩短, 由其制成的馒头的硬度、黏性、咀嚼性呈现上升趋势, 而回复性、弹性、内聚性和粘着性呈现下降趋势。紫薯全粉的加入提高了馒头的抗性淀粉含量, 相较于对照组提高了1.77~11.47 g/100 g。10%~30% (m/m) 添加量馒头的色泽、感官品质具有较高的可接受度。该研究结果为紫薯全粉的进一步开发利用提供参考依据。

关键词: 紫薯全粉; 中筋粉; 馒头; 加工特性; 食用品质

文章编号: 1673-9078(2023)07-209-217

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.7.0906

Physicochemical Characteristics of Whole Purple Sweet Potato Flour- Plain Flour Composites and the Quality of Obtained Steamed Buns

ZHAO Shishan^{1,2}, CAI Fang¹, SUI Yong¹, SHI Jianbin¹, XIONG Tian¹, CAI Sha¹, CHEN Xueling¹, HE Jianjun¹, LI Shaobin², MEI Xin^{1*}

(1. Institute of Agricultural Products Processing and Nuclear Agricultural Technology, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430064, China) (2. School of Life Sciences, Yangtze University, Jingzhou 434025, China)

Abstract: The effects of whole purple sweet potato flour (WSPPF) addition on the processing characteristics of plain flour (PF) and the effects on the eating quality of steamed buns made from WSPPF-PF composite flours was analyzed. The results indicated that adding WSPPF increases the moisture retention while decreasing the oil retention. Thermodynamic analysis indicated two gelatinization peaks for the WSPPF-PF composite flours. Pure WSPPF has higher gelatinization onset (T_o), peak (T_p), and end (T_c) temperatures than pure PF, but has a lower ΔH . Composite PF showed T_o , T_p , and T_c temperatures between 60.67 °C and 71.43 °C, which are considerably higher than those of pure PF, and ΔH of 0.49~1.21 J/g, which is slightly lower than that of pure PF. The T_o , T_p , T_c , and ΔH values of 78.33~87.97 °C and 0.06~0.38 J/g obtained for composite WSPPF are all lower than those of pure WPPF. The ability of the dough to form gluten networks decreased as the percentage of WSPPF in the composite flour increased, reducing the formation and stabilization times. Consequently, WSPPF addition increased the hardness, viscosity, and chewiness of the steamed buns, while decreasing their recovery, elasticity, cohesiveness, and stickiness. WPPF also increased the resistant starch content of the steamed buns by 1.77~11.47 g/100 g as compared to the control group. Steamed buns with 10%~30 % WSPPF were found to be highly acceptable in terms of color and sensory quality. The findings of this study are expected to

引文格式:

赵时珊, 蔡芳, 隋勇, 等. 紫薯-中筋复配粉的理化特性及其馒头制品品质分析[J]. 现代食品科技, 2023, 39(7): 209-217.

ZHAO Shishan, CAI Fang, SUI Yong, et al. Physicochemical characteristics of whole purple sweet potato flour-plain flour composites and the quality of obtained steamed buns [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(7): 209-217.

收稿日期: 2022-07-18

基金项目: 湖北省技术创新重大专项 (2019AEE022)

作者简介: 赵时珊 (1997-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: 1045298995@qq.com

通讯作者: 梅新 (1978-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 农产品深加工及利用, E-mail: 112076404@qq.com

serve as a reference for the development and utilization of WSPSPF.

Key words: whole purple sweet potato flour; plain flour; steamed buns; processing characteristics; eating quality

紫薯 [*Ipomoea batatas* (L.) Lam], 属旋花科番薯属草本植物, 其薯皮呈紫黑色, 薯肉为紫色至深黑色, 故又被称为黑薯、紫心甘薯或紫肉甘薯等^[1]。紫薯是甘薯的一个特殊品种类型, 兼有粮食作物及经济作物的特点, 除含有普通甘薯一般的营养成分外, 还富含花色苷、维生素、氨基酸、矿物质和 β -胡萝卜素等多种功能性成分, 具有抗氧化、抗肿瘤、降血糖等作用, 深受消费者喜爱, 在我国具有较大的种植面积^[2]。但新鲜紫薯含水量较高, 不易长时间贮藏保鲜, 且贮藏过程中养分消耗较大, 病虫害损失严重。因此为了延长紫薯的货架期, 并最大限度地保持紫薯原有的色泽和营养, 可通过干燥并粉碎成末的方式对其进行保存^[3]。该种方式不仅能有效改善紫薯的贮藏问题, 且能最大限度地保持紫薯细胞颗粒的完整性, 复水后的紫薯全粉具有鲜薯的风味和口感, 同时丰富了紫薯的加工形式, 可将其作为馒头、面包、面条等面食制品的辅料, 以满足人们对营养的需求, 也为其增添紫薯特有的色泽及风味^[4,5]。

馒头, 又称蒸馍, 为中国传统美食之一, 是一种以中筋粉为原料, 加入酵母发酵揉制、饧发后蒸熟而成的食品, 在我国人民的膳食结构中具有重要地位。近年来, 随着生活水平和健康意识的提高, 人们对于主食的需求越来越注重其营养和保健作用, 因而进一步促进馒头朝营养、健康和饱腹一体的方向发展。为此, 研究学者们通过将具有营养和保健价值的杂粮粉添加到馒头中以获得营养和功能上的改善^[6]。张三杉等^[7]以小麦全粉和荞麦粉为主要原料, 结合柚子果肉、菊粉等辅料以及淀粉回生处理工艺制作杂粮馒头, 该工艺处理不仅可以大幅降低馒头 GI 值, 而且能够保证产品良好的口感。史豫茹等^[8]以紫淮山全粉替代部分中筋粉制备馒头, 研究表明紫淮山全粉对馒头色泽品质和口感有一定的改善作用, 并增加了馒头的抗氧化活性。基于紫薯全粉具有较高的保健营养价值, 且符合中国人民的饮食喜好, 因此将紫薯全粉应用于馒头制品中具有广泛的市场前景, 但不考虑二者合适的融合比例可能会影响馒头整体的表观和口感等性状。因此, 为提高紫薯馒头的产品品质, 本研究以不同比例的紫薯全粉与中筋粉混合制备复配粉, 对其持水和持油性能、热力学特性、粉质特性及面团微观结构, 及其馒头制品品质特性、抗性淀粉含量及色泽值进行测定, 根据其变化筛选出合适的添加范围, 以期紫薯全粉的进一步开发利用提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

紫薯全粉, 湖北根聚地农业发展股份有限公司; 中筋粉, 一加一天然面粉有限公司; 酵母, 安琪酵母有限公司。10%~50%紫薯-中筋复配粉制备: 以100%中筋粉为基准, 分别以10%、20%、30%、40%、50% (m/m) 的紫薯全粉替代中筋粉混匀。

直链淀粉试剂盒, Megazyme 试剂有限公司; 硫酸、盐酸、石油醚、无水乙醇、硫酸铜、硫酸钾、硼酸、氢氧化钠、乙酸铅等均为分析纯, 国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

TE214S 电子分析天平, 赛多利科学仪器(北京)有限公司; TGL-24MC 台式高速冷冻离心机, 长沙平凡仪器仪表有限公司; SHB-III 循环水式真空泵, 郑州长城仪器有限公司; 红外智能消化炉, 上海沛欧分析仪器有限公司; K9840 自动凯士定氮仪, 海能仪器有限公司; GX-9240 MBE 电热鼓风干燥箱, 上海博迅实业有限公司医疗设备厂; 磁力搅拌振荡箱, VEP 试剂有限公司; 722N 可见分光光度计, 上海仪电仪器有限公司; DSC (示差扫描量热仪), METZSC 试剂有限公司; EM-30AX 电子扫描显微镜, 北京天耀科技有限公司; S-580A 分光光度仪, 惠州市华高仪器设备有限公司; CTA-20HPRO 质构仪; 天津创兴电子设备制造股份有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 基本成分测定

参照国标方法进行测定, 其中灰分、蛋白质、脂肪、淀粉、膳食纤维含量分别参照 GB 5009.4-2016^[9]、GB 5009.5-2016^[10]、GB/T 5009.6-2016^[11]、GB 5009.9-2016^[12]、GB 5009.88-2014^[13]测定, 直链淀粉含量采用 Megazyme 品牌的 K-AMYL 直链淀粉试剂盒测定, 具体测定方法见试剂盒。

1.3.2 化学成分测定

1.3.2.1 花青素

花青素含量采用 pH 差值法测定^[14]。称取 1 g 样品, 加入 15 mL 酸化乙醇 (60%乙醇:1%盐酸=200:1, V/V), 超声波 40 °C、45 kHz 条件下避光提取 1 h, 再

以 8 000 r/min 离心 5 min, 收集上清液。分别移取 1 mL 上清液到标为 A 管、B 管的 10 mL 比色管中, 再于 A 管中加入 4 mL pH 值 1.0 缓冲液(称取 7.455 g 的氯化钾, 以 1 mol/L 的盐酸缓冲液溶解并定容至 1 L)、B 管中加入 4 mL pH 值 4.5 缓冲液(称取 8.2 g 的醋酸钠, 以 1 mol/L 的冰醋酸缓冲液溶解并定容至 1 L), 混匀后暗室避光反应 15 min, 于分光光度计测定 510 nm 和 700 nm 处的吸光度, 按照公式(1、2)计算花青素的含量:

$$A=(A_1-A_2)-(A_1'-A_2') \quad (1)$$

$$C=\frac{A \times MW \times DF \times Ve \times 1000}{\epsilon \times l \times M} \quad (2)$$

式中:

A_1 ——加入 pH 值 1.0 缓冲液的溶液在 510 nm 处的吸光度;

A_2 ——加入 pH 值 1.0 缓冲液的溶液在 700 nm 处的吸光度;

A_1' ——加入 pH 值 4.5 缓冲液的溶液在 510 nm 处的吸光度;

A_2' ——加入 pH 值 4.5 缓冲液的溶液在 700 nm 处的吸光度;

C ——花青素含量, mg/g;

MW ——花青素-3-葡萄糖苷的分子量, 449 g/mol;

DF ——稀释因子;

Ve ——提取体积, mL;

ϵ ——花青素-3-葡萄糖苷的消光摩尔系数, 29 600;

M ——称取的样品质量, g。

1.3.2.2 总酚

总酚含量采用福林酚法测定^[15]。没食子酸标准曲线为: $y=9.2173x+0.0266$, $R^2=0.9997$ 。式中, y 为吸光度, x 为没食子酸浓度 (mg/mL)。称取 1 g 样品于 50 mL 离心管中, 加入 25 mL $\varphi=60\%$ 乙醇混匀, 于 50 °C 条件下超声提取 1 h, 再以 8 000 r/min 离心 10 min, 移取 1 mL 上清液至 10 mL 比色管中, 加入 5 mL 10% 福林酚试剂, 静置反应 5 min, 再加入 4 mL $m=7.5\%$ Na_2CO_3 溶液, 摇匀, 于室温下避光反应 30 min, 于 760 nm 处测定吸光度, 再依据标准曲线计算得总酚含量 (mg GAE/100 g DW)。

1.3.2.3 可溶性糖

可溶性糖含量采用硫酸-蒽酮比色法测定^[16]。葡萄糖标准曲线为: $y=(x-0.0023)/0.0087$, $R^2=0.999$ 。式中, y 为吸光度, x 为葡萄糖质量浓度 (mg/mL)。称取 0.1 g 样品, 加入 50 mL 的 $\varphi=85\%$ 乙醇, 45 °C 水浴 10 min, 过滤取滤液 1 mL, 以去离子水作空白, 冰水浴中冷却备用。加入 5 mL 蒽酮试剂(称取 0.2 g 的蒽酮溶于 100 mL $m=80\%$ 的硫酸, 避光保存备用), 沸水浴加热 10 min, 冷却后于分光光度计测定 620 nm 处的吸光度, 再依据标准曲线计算得可溶性糖含量 (g/100 g)。

1.3.3 物化特性测定

1.3.3.1 持水性

称取一定量样品, 记为 M_1 , 按料液比 1:20 (g/mL) 加入去离子水, 室温条件下搅拌 30 min 后, 2 500 r/min 离心 10 min, 弃上清液, 沉淀称质量, 记为 M_2 ^[17], 持水性按公式(3)计算:

$$W=\frac{M_2-M_1}{M_1} \quad (3)$$

式中:

W ——持水性, g/g;

M_1 ——样品质量, g;

M_2 ——沉淀质量, g。

1.3.3.2 持油性

称取一定量样品, 记为 M_3 , 按料液比 1:10 (g/mL) 加入大豆油, 充分混匀, 室温条件下放置 1 h, 1 500 r/min 离心 10 min, 残渣称质量记为 M_4 ^[17], 持油性按公式(4)计算:

$$O=\frac{M_4-M_3}{M_3} \quad (4)$$

式中:

O ——持油性, g/g;

M_3 ——样品质量, g;

M_4 ——残渣质量, g。

1.3.4 热特性

淀粉热力学特性分析参照 Patindol^[18]的方法。称取 (5±0.1) mg (干基) 样品至铝坩埚中, 加入 10 μL 去离子水, 加盖密封, 于室温下平衡 2 h 后采用 DSC 分析糊化特性, 空坩埚作为参比。按 10 °C/min 升温速率将坩埚从 30 °C 升温至 120 °C, 氮气流量 20 mL/min, 根据吸热曲线分析计算得糊化起始温度 (T_0)、峰值温度 (T_p)、终止温度 (T_c) 及糊化焓 (ΔH)。

1.3.5 粉质特性测定

粉质特性参照 GB/T 14614-2019^[19]测定。称取一定量的样品置于和面钵中, 加入适量的水, 于搅拌器中搅拌, 使面团稠度达到 (500±20) FU, 面团依次经过形成、稳定和弱化三个主要阶段。通过粉质仪软件绘制出粉质曲线, 计算出复配粉的吸水率、稳定时间、形成时间, 对复配粉面团的品质进行评价。

1.3.6 微观结构测定

面团经真空冷冻干燥、切块, 进行镀金处理, 使用扫描电子显微镜 (SEM) 对样品观察拍照^[20]。

1.3.7 馒头的制作

以 10%~50% 的紫薯-中筋复配粉制作馒头, 中筋粉组为对照。基础配方: 以 200 g 的中筋粉为基准, 加入 4% 酵母、50% 水。以 100 mL 温水将酵母溶解活化, 分次加入复配粉揉搓 15 min 成团, 待表面光滑后

置于醒发箱醒发 1 h (温度 38 °C, 湿度 85%), 排气整形后再以相同条件醒发 20 min, 后转入蒸锅蒸制 15 min^[21]。

1.3.8 质构特性测定

参照 Miñarro 等^[22]的方法对样品进行取样。以质构仪测定对照组和 10%~50%紫薯-中筋复配粉馒头的硬度、回复性、弹性、咀嚼性、内聚性、黏性及粘着性。质构仪参数: 探头型号为 P36/R; 测试操作模式为压力测试; 操作类型为 TPA; 测前、测中及测后速率均为 1 mm/s; 压缩量为 50%, 触发力为 5 N, 两次压缩间隔 2 s; 触发类型设置为 Auto; 起点感应力为 5 g, 数据采集速率为 200 bps。

1.3.9 抗性淀粉含量测定

参照 Caballero 等^[23]的方法并加以修改。样品测定: 将冷却至 37 °C 的馒头分切为 5 mm 薄片, 称取 1 g 置于 100 mL 烧杯中, 加入 2 mL 0.05 mol/L 盐酸缓冲液和 10 mg 胃蛋白酶, 于 37 °C 水浴 30 min (180 S/min), 加入 4 mL 0.5 mol/L 乙酸钠缓冲液(pH 值 5.2)和 1 mL 酶溶液(取 0.9 g 猪胰酶溶于 8 mL 去离子水中, 以 4 000 r/min 离心 10 min, 取 5.4 mL 上清液与 0.6 mL 3 260 U/mL 糖化酶溶液及 0.4 mL 去离子水混合), 分别于 0、10、20、30、60、90、120 和 180 min 时取出 0.1 mL 消化液, 立即与 1 mL $\varphi=50\%$ 乙醇混合, 后沸水浴加热 2 min, 再以 3 000 r/min 离心 10 min, 按 DNS 法测定上清液中的葡萄糖浓度。按照式(5)计算抗性淀粉含量:

$$RS = 100 - \frac{(G_{20} - G_0) \times 0.9 \times 100}{TS} - \frac{(G_{120} - G_{20}) \times 0.9 \times 100}{TS} \quad (5)$$

式中:

RS——抗性淀粉含量, %;

TS——总淀粉含量, mg;

G_0 ——水解 0 min 时产生的葡萄糖含量, mg;

G_{20} ——水解 20 min 时产生的葡萄糖含量, mg;

G_{120} ——水解 120 min 时产生的葡萄糖含量, mg;

0.9——由葡萄糖换算为淀粉的系数。

1.3.10 色度值测定

利用分光光度计测定不同比例紫薯-中筋复配粉馒头的 3 个色值。 L^* 为色彩的明度, $L^*=0$ 为黑色, $L^*=50$ 为灰色, $L^*=100$ 为白色。 a^* 和 b^* 为色彩的颜色值, a^* 表示红绿 ($a^*=0$ 为灰色), 正值越大表示越偏红, 负值绝对值越大表示越偏绿; b^* 表示表示黄蓝 ($b^*=0$ 为灰色), 正值越大表示越偏黄, 负值绝对值越大表示越偏蓝^[24]。

1.3.11 感官评价

参照韩冰霜^[25]的方法, 并进行一些修改。由受过

训练的 10 人组成评价小组, 对馒头的色泽、气味、口感、硬度及外观形状 5 个方面进行感官评定。每项的评分标准见表 1。

表 1 感官评价表

Table 1 Sensory evaluation

项目	分数	评分细则
色泽	15~20	表面色泽均匀、鲜艳
	8~14	表面色泽较均匀、鲜艳
	1~7	表面色泽暗淡、不均匀
气味	15~20	紫薯香气适中
	8~14	紫薯香气较浓
	1~7	紫薯香气较淡
外观形状	15~20	表面光滑无裂纹, 比容体积大而饱满
	8~14	表面较光滑, 无裂纹, 比容体积中等
	1~7	表面不光滑, 裂纹较大, 比容体积较小
口感	15~20	甜度适中, 口感好
	8~14	甜度较淡、口感一般
	1~7	甜度较高、口感差
脆性	8~10	弹性好
	4~7	弹性一般
	1~3	弹性差
硬度	15~20	质地硬度适中
	8~14	质地硬度较高
	1~7	质地湿软

1.4 数据处理

试验重复 3 次, 结果用 $\bar{x} \pm s$ 表示, 列表或采用 origin 2017 对所得数据进行作图处理。用 SPSS 25 通过一元方差分析 (One-Way ANOVA) 进行多个组间平均数的比较, 如组间存在显著性差异 ($P < 0.05$), 则采用 Duncan 检验进行组间多重比较。

2 结果与分析

2.1 紫薯全粉与中筋粉成分分析

紫薯全粉与中筋粉成分分析结果显示, 中筋粉的脂肪、蛋白质含量较紫薯全粉高, 分别为 1.09 g/100 g、11.92 g/100 g。中筋粉当中的蛋白质主要由醇溶蛋白和谷蛋白组成, 其经水和揉搓后能形成具有黏性和弹力的面筋, 它们之间合适的比例赋予了中筋粉良好的加工品质, 可用于制作馒头、面条等制品^[26]。紫薯全粉不含面筋蛋白, 因此加工性能较差, 但其营养价值丰富, 膳食纤维、直链淀粉、可溶性糖、花青素及总酚含量分别达到 13.34 g/100 g、24.05 g/100 g、8.47 g/100 g、0.93 mg/g、97.81 mg GAE/100 g DW, 常以代餐粉、

面包、面条等食品辅料的形式食用。前人研究表明,膳食纤维是一种既不能被胃肠道消化吸收,也不能产生能量的多糖,适量食用可预防便秘、肠癌、肥胖症及高血压等疾病的产生^[27]。此外,紫薯中含有的花青

素不仅具有着色效果,而且具有抗氧化、抗衰老、抗炎和抗癌等多种生物活性功能^[2]。因此,在保证和提高馒头产品质量的同时,通过添加紫薯全粉等健康粗粮有利于提高馒头的营养和保健品质。

表2 紫薯全粉与中筋粉成分分析(干质量)

Table 2 Composition Analysis of purple potato whole powder and medium gluten powder (dry weight)

品种/指标	灰分/(g/100 g)	脂肪/(g/100 g)	蛋白质/(g/100 g)	淀粉/(g/100 g)	粗纤维/(g/100 g)	直链淀粉/(g/100 g)	可溶性糖/(g/100 g)	总酚/(mg GAE/10 g)	花青素/(mg/g)
紫薯全粉	2.43±0.01 ^a	0.41±0.02 ^b	6.55±0.02 ^b	61.38±0.56 ^a	13.34±0.04 ^a	24.05±0.16 ^a	8.47±0.08 ^a	97.81±0.06 ^a	0.93±0.00 ^a
中筋粉	0.39±0.01 ^b	1.09±0.03 ^a	11.92±0.01 ^a	59.19±0.10 ^b	0.81±0.02 ^b	20.91±0.26 ^b	1.06±0.05 ^b	5.98±0.04 ^b	

注:同一列内不同字母差异性显著($P<0.05$)。下表同。

表3 不同比例紫薯-中筋复配粉热力学特性

Table 3 Thermodynamic characteristics of purple potato medium gluten composite powder with different proportions

组别/指标	一次糊化峰				二次糊化峰			
	Tc/°C	Tp/°C	Tc/°C	ΔH /(J/g)	Tc/°C	Tp/°C	Tc/°C	ΔH /(J/g)
紫薯全粉	78.73±0.21 ^a	84.13±0.21 ^a	88.87±0.32 ^a	1.17±0.05 ^b				
中筋粉	59.40±0.08 ^e	64.27±0.05 ^e	69.27±0.09 ^d	1.32±0.06 ^a				
10% CP	60.67±0.24 ^d	65.67±0.17 ^d	70.40±0.78 ^c	1.21±0.02 ^b	79.63±0.74 ^a	83.10±0.29 ^b	86.27±0.17 ^{bc}	0.06±0.01 ^c
20% CP	61.67±0.09 ^c	66.40±0.14 ^c	70.70±0.14 ^{bc}	1.15±0.01 ^b	79.40±0.14 ^a	83.17±0.12 ^{ab}	86.40±0.29 ^{bc}	0.13±0.02 ^c
30% CP	61.86±0.37 ^c	66.53±0.09 ^c	71.17±0.12 ^{bc}	0.87±0.04 ^c	78.33±0.21 ^b	83.07±0.24 ^b	86.13±0.94 ^c	0.23±0.04 ^b
40% CP	62.20±0.29 ^c	66.67±0.12 ^c	71.37±0.19 ^b	0.66±0.03 ^d	78.93±0.19 ^{ab}	83.40±0.36 ^{ab}	87.97±0.52 ^a	0.33±0.06 ^{ab}
50% CP	63.17±0.12 ^b	67.50±0.08 ^b	71.43±0.12 ^b	0.49±0.03 ^e	79.27±0.25 ^{ab}	83.77±0.09 ^a	87.50±0.29 ^{ab}	0.38±0.05 ^a

2.2 不同比例紫薯-中筋复配粉物化特性分析

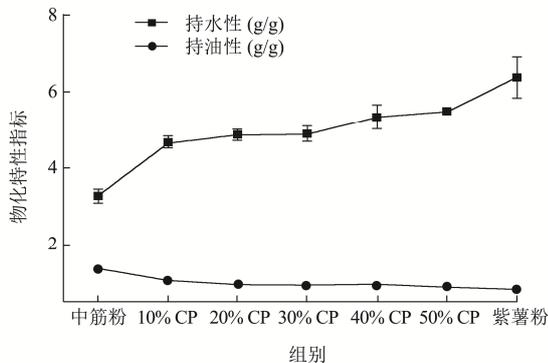


图1 不同比例紫薯-中筋复配粉物化特性

Fig.1 Physicochemical characteristics of purple potato medium gluten composite powder with different proportions

不同比例紫薯-中筋复配粉物化特性结果显示,中筋粉作为馒头、面条等中式面点的主要原料,持水、持油等基本特性是衡量其加工品质的指标之一,可影响到食品的弹力、柔软性、吸湿性。结果显示,紫薯全粉的加入对中筋粉的持水、持油能力具有一定的影响。其中,复配粉的持水性相较于中筋粉增加,而持油性减小。由图1可知,不同比例的紫薯-中筋复配粉的持水性、持油性分别介于3.27~6.38 g/g、0.82~1.07 g/g之间。当紫薯全粉添加量从0%增至50%时,复配粉

的持水性提高了2.22 g/g,持水性则降低了0.24 g/g。蔡沙等^[17]研究表明,食品中存在的亲水基团越多,吸附及保留水分的能力越强,而紫薯中的可溶性膳食纤维含有大量的亲水基团,能够与水分子结合形成氢键和共价,因此复配粉的持水能力增加。段欣等^[28]研究表明,吸油能力的大小受蛋白质的来源、加工条件、外添加物颗粒大小等的影响,其中,含非极性侧链的蛋白质含量越高,吸油能力则越好。在本研究中,复配粉持油能力的下降,可能是因为紫薯全粉添加量的增加稀释了复配粉中的非极性侧链氨基酸的比例,导致与油脂的结合能力变差。

2.3 不同比例紫薯-中筋复配粉热特性分析

不同比例紫薯-中筋复配粉热力学特性结果显示,未进行复配处理前,紫薯全粉的 T_o 、 T_p 、 T_c 为 78.73~88.87 °C, ΔH 为 1.17 J/g,中筋粉的 T_o 、 T_p 、 T_c 为 59.40~67.27 °C, ΔH 为 1.32 J/g。当进行复配处理后,10%~50%紫薯-中筋复配粉表现出了双峰糊化的特性。其中,第一次为中筋粉的糊化过程,其 T_o 、 T_p 、 T_c 和 ΔH 分别介于 60.67~71.43 °C、0.49~1.21 J/g 之间。与未进行复配的中筋粉相比,其经复配后的 T_o 、 T_p 、 T_c 有所增加,而 ΔH 呈下降趋势。第二次为紫薯全粉的糊化过程,其 T_o 、 T_p 、 T_c 和 ΔH 分别介于

78.33~87.97 °C、0.06~0.38 J/g 之间。经复配处理后的紫薯全粉的 T_0 、 T_p 、 T_c 和 ΔH 均呈下降趋势，其中 10%添加比例时下降趋势最大，这可能是紫薯全粉在第一个糊化峰阶段时淀粉结构已被部分破坏，因此最终完成糊化仅需要少量的温度和能量。前人研究^[29,30]表明，淀粉的直链淀粉含量与糊化温度呈正相关，且其能够与一酰基甘油或脂肪酸组成形成螺旋形包合物，其内部疏水性高于外部，可有效地阻止水分进入淀粉颗粒。因此，第一次糊化阶段中筋粉的 T_0 、 T_p 、 T_c 的增加可能是由于其脂类成分与紫薯全粉中的淀粉发生了结合作用，且这种结合会随着紫薯全粉添加量的增加而增强，因此需要更高的温度完成糊化，但也造成了紫薯全粉中的直链淀粉含量减少，因此导致第二次糊化阶段中紫薯全粉的 T_0 、 T_p 、 T_c 降低。

2.4 不同比例紫薯-中筋复配粉粉质特性分析

表 4 不同比例紫薯-中筋复配粉粉质特性

Table 4 Powder properties of purple potato medium gluten composite powder with different proportions

组别/指标	吸水率/%	稳定时间/min	形成时间/min
紫薯全粉	67.20±0.10 ^a	0.14±0.28 ^c	0.46±0.06 ^d
中筋粉	58.67±0.17 ^d	3.91±0.09 ^a	4.03±0.20 ^a
10% CP	59.27±0.40 ^{cd}	3.85±0.78 ^a	3.86±0.22 ^a
20% CP	59.63±0.34 ^{cd}	3.04±0.77 ^{ab}	2.59±0.20 ^b
30% CP	60.47±0.65 ^{bc}	2.24±0.13 ^b	1.20±0.03 ^c
40% CP	61.23±1.18 ^b	1.69±0.31 ^c	1.01±0.05 ^c
50% CP	61.60±0.08 ^b	1.32±0.22 ^d	0.90±0.31 ^{cd}

不同比例紫薯-中筋复配粉粉质特性结果显示，未进行复配处理前，紫薯全粉的吸水率、稳定时间及形成时间分别为 67.20%、0.14 min 和 0.46 min，中筋粉的吸水率、稳定时间和形成时间分别为 58.67%、3.91 min 和 1.93 min。当进行复配处理后，10%~50%紫薯-中筋复配粉的吸水率、面团稳定时间和形成时间分别介于 59.27%~61.60%、1.32~3.85 min 及 0.90~4.03 min 之间。其中，吸水率随着紫薯全粉添加量的增加而升高，这主要是因为紫薯全粉纤维素和淀粉结构中含有大量亲水基团羟基，可与水分子发生氢键相互作用^[31]。吸水率的升高可提高馒头成品的保湿能力。面团形成时间反映了面粉面筋网络形成的速度，而稳定时间反映了面团的机械阻力，稳定时间越长，证明面团的抗揉性越好^[32]。结果显示，紫薯全粉的加入缩短了复配粉面团的面团形成时间和稳定时间。原因可能是紫薯全粉的加入稀释了复配粉当中的面筋蛋白比例，且紫薯淀粉颗粒的存在减弱了面筋之间的粘着性，从而导致面团的形成和稳定时间缩短。

2.5 不同比例紫薯-中筋复配粉面团微观结构分析

面团在发酵过程中，酵母可将其中的糖分转换为二氧化碳，其经受热后发生膨胀而产生气孔，可以使馒头的口感变得蓬松^[5]。而由面筋蛋白形成的具有粘结性、弹力的面筋可更好的维持这种结构。不同比例紫薯-中筋复配粉面团微观结构结果显示，复配粉的面筋网络形成能力随着紫薯全粉添加量的增加而降低。其中，中筋粉面团（图 a）面筋之间具有良好的粘结性，对淀粉颗粒的包裹效果较好。当紫薯全粉添加量为 10%时，复配粉仍具有一定的面筋网络形成能力，但面团（图 b）的面筋膜强度下降而发生撕裂，对内部淀粉分子的连接能力变差。当紫薯全粉添加量增至 50%时，复配粉面团仍有少量的面筋存在，但基本丧失粘合作用，仅有部分粘附在淀粉颗粒上。而紫薯全粉（图 d）由于不含面筋蛋白，不具备面筋网络形成能力，因此仅观察到淀粉颗粒存在。顾晶晶^[5]研究表明，紫薯全粉的加入会降低面团的面筋强度，拉伸性能变差，添加量不宜超过 40%。张梦潇^[32]研究表明，紫薯全粉的添加有利于提升面团的持水性，保湿效果更佳。

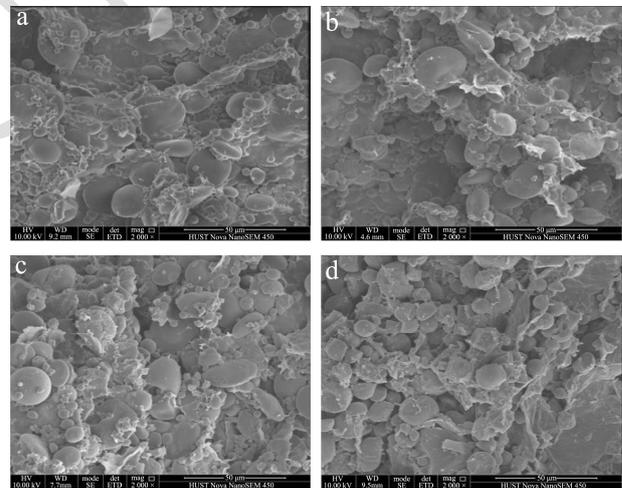


图 2 不同比例紫薯-中筋复配粉面团微观结构

Fig.2 Microstructure of purple potato medium gluten flour dough with different proportions

注：a 为中筋粉面团；b 为 10%紫薯-中筋复配粉面团；c 为 50%紫薯-中筋复配粉面团；d 为紫薯全粉面团。

2.6 不同比例紫薯-中筋复配粉馒头质构特性分析

不同比例紫薯-中筋复配粉馒头质构特性结果显示，对照组和 10%~50%紫薯馒头的硬度、回复性、弹

性、咀嚼性、内聚性、黏性和粘着性分别介于 1 627.92~6 309 N、21.43~37.46 N、25.06~34.55 mm、889.70~3 549.85 N、71.30~92.92 N、824.96~3 697.40 N 及 0.43~0.72 N 之间。相较于对照组，随着紫薯全粉添加量的增加，馒头的硬度、黏性、咀嚼性呈现上升趋势，而回复性、弹性、内聚性和粘着性呈现下降趋势。由于紫薯全粉不含面筋蛋白，进行复配使用造成中筋粉的面筋蛋白比例下降，导致面筋形成不足或部分撕裂，面团的内聚性和粘着性下降而发生坍塌，抑制了面团

在发酵中 CO₂ 气泡的膨胀，导致馒头内部结构变得致密，因此硬度升高，而回复性变差。此外，紫薯全粉具有良好的持水能力，可为馒头制品保留更多的水分，但当水分添加过量时，则会导致馒头口感湿度、黏度上升。Zhang 等^[33]研究表明，添加紫薯全粉的面团持气能力降低，内部组织致密度上升，因此馒头成品口感偏硬，但紫薯全粉添加量不超过 20% 时，馒头仍具有较高的被接受度。

表 5 不同比例紫薯-中筋复配粉馒头质构特性

Table 5 Texture characteristics of steamed bread with different proportions of purple potato medium gluten composite powder

组别/指标	硬度/N	回复性/N	弹性/mm	咀嚼性/N	内聚性/N	黏性/N	粘着性/N
对照	1 627.92±19.26 ^f	37.46±0.26 ^a	34.55±0.28 ^a	889.70±4.50	92.92±0.34	824.96±4.02	0.72±0.00
10% CP	1 777.99±20.53 ^e	32.65±0.60 ^b	32.18±0.23 ^b	1 213.22±33.92	89.74±0.32	1 312.43±14.02	0.61±0.01
20% CP	2 118.56±26.18 ^d	30.73±0.33 ^c	30.39±0.30 ^c	1 571.32±29.61	84.43±0.37	1 517.12±48.49	0.57±0.02
30% CP	3 203.99±26.44 ^c	27.72±0.35 ^d	28.79±0.55 ^d	1 791.13±33.75	77.40±0.44	1 961.12±19.51	0.54±0.01
40% CP	5 512.78±48.72 ^b	22.82±0.33 ^e	27.75±0.32 ^e	2 764.05±26.54	74.49±0.27	2 924.62±20.63	0.49±0.00
50% CP	6 309.44±50.51 ^a	21.43±0.76 ^f	25.06±0.45 ^f	3 549.85±27.01	71.30±0.24	3 697.40±43.83	0.43±0.01

2.7 不同比例紫薯-中筋复配粉馒头抗性淀粉

含量分析

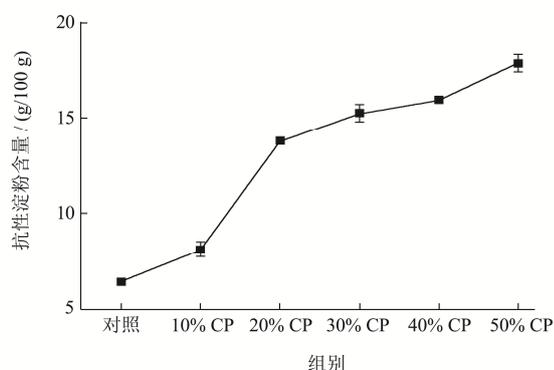


图 3 不同比例紫薯-中筋复配粉馒头抗性淀粉含量

Fig.3 Resistant starch content of steamed bread with purple potato medium gluten composite powder in different proportions

不同比例紫薯-中筋复配粉馒头抗性淀粉含量结果显示，对照组和 10%~50%紫薯-中筋复配粉馒头的抗性淀粉含量介于 6.39~17.86 g/100 g 之间。相较于对照组，随着紫薯全粉添加量的增加，复配粉馒头的抗性淀粉含量逐渐升高。前人研究表明，淀粉颗粒的湿润膨胀与其淀粉粒径、回生特性、结晶度和直链淀粉、脂肪等化学组成含量密切相关^[34]。其中，直链淀粉能抑制淀粉的胀润，并对淀粉回生起协同作用，回生导致糊化淀粉中支链淀粉分离再重新结合形成更有序的晶体结构，可延缓淀粉消化分解为葡萄糖的速率，反

之低直链淀粉食品通常不耐消化，但直链淀粉含量并不能作为唯一的评判标准，食品的淀粉消化特性还受其他因素的影响。Kim^[30]研究表明，紫薯所含的花色苷具有多羟基结构，可与淀粉作用形成结晶，结晶度增大可提高淀粉的抗消化性。因此，10%~50%复配粉馒头抗性淀粉含量的增加可能因为直链淀粉含量的提高及其化学组分之间的相互作用而导致的。顾晶晶^[5]研究表明，紫薯全粉馒头的抗性淀粉含量高于小麦粉，因此具有较低的淀粉水解速率与预测血糖指数。孟红伟^[34]研究表明，紫薯全粉添加量与抗性淀粉含量呈正相关，与小麦粉搭配食用在预防肥胖等方面发挥作用。

2.8 不同比例紫薯-小麦复配粉馒头色度值分析

表 6 不同比例紫薯-中筋复配粉馒头色度值

Table 6 Color value of steamed bread with purple potato medium gluten composite powder in different proportions

组别/指标	L*	a*	b*
对照	80.57±0.39	-0.53±0.05	14.78±0.26
10%紫薯馒头	47.71±0.11	11.46±0.08	4.50±0.06
20%紫薯馒头	36.57±0.08	13.18±0.04	3.49±0.22
30%紫薯馒头	34.53±0.12	13.55±0.09	3.71±0.13
40%紫薯馒头	29.46±0.06	11.06±0.16	2.33±0.21
50%紫薯馒头	25.10±0.58	7.66±0.06	1.72±0.33

色泽一定程度上可以衡量消费者可接受度。由于紫薯全粉中含有的花青素具有一定的着色能力，因此会对馒头的色泽品质造成影响。不同比例紫薯-中筋复配粉馒头色度结果显示，对照组和 10%~50%紫薯-中

筋复配粉馒头的 L^* 值、 a^* 值和 b^* 值分别介于 25.10~80.57、-0.53~11.46、1.72~14.78 之间。相较于对照组,随着紫薯全粉的加入和增加,馒头的 L^* 值明亮度和 b^* 值黄绿色呈现下降趋势,而 a^* 值红绿色呈现先上升后下降的趋势,其中 10%紫薯全粉添加量时,馒头的 a^* 值最高。前人研究^[5]表明,食物的颜色与人的食欲

有一定的联系,其深度和鲜艳程度是衡量色泽品质的因素之一。其中,颜色鲜艳的食品可以增加食欲。由图 4 可知,10%~30%复配粉馒头的色泽鲜艳度、光泽度和均匀度较佳,但当添加量达到 40%以上时,馒头色泽品质下降,其颜色呈现暗紫色,且突起斑点增多。

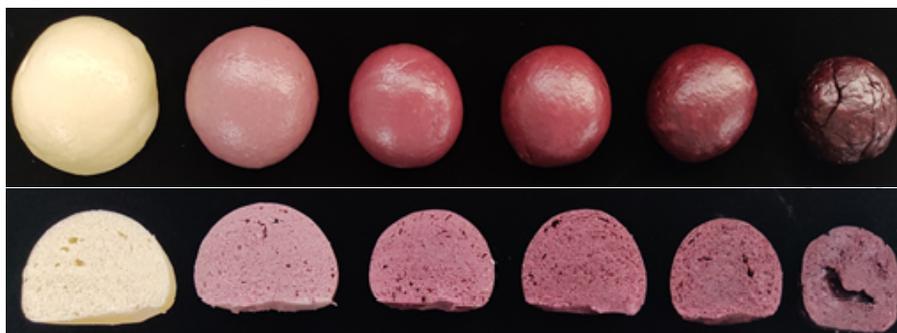


图 4 不同比例紫薯-中筋复配粉馒头图片

Fig.4 Picture of steamed bread with purple potato and medium gluten in different proportions

注: 从左到右依次为添加量 0%、10%、20%、30%、40%、50%的紫薯-中筋复配粉馒头。

表 7 不同比例紫薯-中筋复配粉馒头感官评价结果

Table 7 Sensory evaluation results of different proportions of purple potato medium gluten composite flour steamed bread

组别/指标	粘性	软硬	色泽	气味	外观形状	口感	总分
对照组	7.83±0.24	8.50±0.82	18.33±1.25	17.00±0.82	19.50±0.41	18.33±0.47	89.50±0.84
10%紫薯馒头	8.17±0.24	8.17±0.24	17.17±1.65	17.67±0.47	18.00±0.82	17.67±0.47	86.83±0.35
20%紫薯馒头	8.67±0.47	8.33±0.47	17.67±0.47	18.50±0.41	18.17±0.24	18.00±0.82	89.33±0.68
30%紫薯馒头	8.17±0.24	7.83±0.62	17.00±0.00	18.00±0.82	17.50±0.41	17.67±0.24	86.17±1.04
40%紫薯馒头	7.33±0.94	6.83±0.24	15.33±0.47	16.67±0.94	16.83±0.62	16.33±0.94	79.33±0.53
50%紫薯馒头	6.50±0.41	6.50±0.41	15.00±0.82	15.67±1.70	15.67±0.47	15.17±1.03	74.50±0.83

2.9 不同比例紫薯-中筋复配粉感官评价结果

分析

由表 7 显示,未进行复配处理前,对照组馒头的综合感官评分为 89.5 分。当添加紫薯全粉后,馒头的感官评分呈现出下降趋势。其中,对照组馒头色泽洁白,弹性良好,比容体积大而饱满且表面光滑无裂痕。40%、50%的紫薯馒头比容体积小,表面粗糙,弹性较差,口感质地湿软且紫薯气味过于浓郁,因此接受度均不及对照组,而 10%~30%紫薯馒头的色泽鲜艳均匀,表面较光滑无裂纹,硬度、甜度及紫薯气味适中,但相较于对照组比容体积中等,因此感官评分略低于对照组,但仍具有较高的可接受度。

3 结论

紫薯全粉较中筋粉营养价值丰富,其膳食纤维、直链淀粉、可溶性糖、花青素及总酚含量更高。随着紫薯全粉添加量的增加,中筋-紫薯复配粉的持水性、

To、Tp、Tc、吸水率呈上升趋势,持油性、 ΔH 、面筋形成能力则呈下降趋势。相较于未复配中筋粉馒头制品,由复配粉所制成的馒头制品的硬度、咀嚼性、黏性及抗性淀粉含量更高,但回复性、弹性、内聚性和粘着性有所降低。10%~30%添加量馒头的色泽、感官品质具有较高的可接受度,且营养价值更加丰富,可作为紫薯全粉与中筋粉搭配使用的添加量标准,以获得品质较好的紫薯馒头。

参考文献

- [1] 樊小静,任广跃,段续,等.不同干燥方式对紫薯全粉物性品质及花青素含量的影响[J].食品与发酵工业,2022,7(18):1-10.
- [2] 易婕,刘云宏,李海登,等.紫薯远红外辐射干燥及品质特性[J].食品科学,2018,39(7):160-167.
- [3] 王欣,李强,曹清河,等.中国甘薯产业和种业发展现状与未来展望[J].中国农业科学,2021,54(3):483-492.
- [4] Jenkins M, Shanks C B, Brouwer R, et al. Correction to: Factors affecting farmers' willingness and ability to adopt and

- retain vitamin A-rich varieties of orange-fleshed sweet potato in Mozambique [J]. *Food Security*, 2018, 10(6): 1-17.
- [5] 顾晶晶.紫薯全粉馒头与湿面条研制及品质特性分析[D].沈阳:沈阳师范大学,2021.
- [6] 杨淼,敖常伟,张贺,等.柿粉馒头的研制及营养特性分析[J].*粮食与饲料工业*,2022,16(2):27-33.
- [7] 张三杉,余梦玲,雷激,等.低血糖生成指数杂粮馒头的研制[J].*食品工业科技*,2022,7(18):1-13.
- [8] 史豫茹,郑宗平,郭凤仙,等.紫淮山粉对馒头品质及抗氧化活性的影响[J].*食品与机械*,2022,38(3):227-233.
- [9] GB 5009.4-2016,食品安全国家标准食品中灰分的测定[S].
- [10] GB 5009.5-2016,食品安全国家标准食品中蛋白质的测定[S].
- [11] GB 5009.6-2016,食品安全国家标准食品中脂肪的测定[S].
- [12] GB 5009.9-2016,食品安全国家标准食品中淀粉的测定[S].
- [13] GB5009.88-2014,食品安全国家标准食品中膳食纤维的测定[S].
- [14] Meng J F, Fang Y L, Qin M Y, et al. Varietal differences among the phenolic profiles and antioxidant properties of four cultivars of spine grape (*Vitis davidii* Foex) in Chongyi County (China) [J]. *Food Chemistry*, 2012, 134(4): 2051-2052.
- [15] 杜俊娜,陈书霞,程智慧,等.响应曲面法优化大蒜中总酚提取工艺及其抗氧化活性的测定[J].*食品科学*,2012,33(10): 276-280.
- [16] 王佩芬,池源,王丽波.蒽酮-硫酸比色法测定南瓜籽多糖含量[J].*食品研究与开发*,2014,35(24):121-125.
- [17] 蔡沙,隋勇,施建斌,等.马铃薯膳食纤维物化特性分析及其对马铃薯热干面品质的影响[J].*食品科学*,2019,4:87-94.
- [18] Patindol J, Wang Y J, Jane J L, et al. Structure-functionality changes in starch following rough rice storage [J]. *Starch/Stärke*, 2005, 57(5): 197-207.
- [19] 陈洁,张智勇,李璞,等.马铃薯生全粉-小麦粉混粉面团特性研究[J].*河南工业大学学报(自然科学版)*,2021,42(1):1-7.
- [20] GB/T 14614-2019,粮油检验小麦粉面团流变学特性测试粉质仪法[S].
- [21] 马栎,唐海霞.甘薯全粉馒头加工工艺的优化研究[J].*粮食科技与经济*,2020,45(10):124-127.
- [22] Minarro B, Normahomed I, Guamis B, et al. Influence of unicellular protein on gluten-free bread characteristics [J]. *European Food Research and Technology*, 2010, 231(2): 171-179.
- [23] Caballero N N, Borrás L, Gerde J A. Physical and chemical kernel traits affect starch digestibility and glycemic index of cooked maize flours [J]. *Food Chemistry*, 2021, 223(21): 1-9.
- [24] 张毅,Tawanda M,岳瑞雪,等.东非不同肉色甘薯的营养品质分析与综合评价[J].*江苏师范大学学报(自然科学版)*,2020, 38(2):1-9.
- [25] 韩冰霜.紫甘薯全粉对面团特性与饼干品质影响研究[D].合肥:安徽农业大学,2020.
- [26] 钟少文,郑波,李晓玺,等.不同消化性能青稞全粉与中筋小麦粉复配体系的流变特性分析[J].*现代食品科技*,2018,34(4):75-80.
- [27] 张灿,郭依萍,田艾,等.刺梨果渣及其膳食纤维提取物对面条品质的影响[J].*食品与发酵工业*,2022,18(7):1-10.
- [28] 段欣,薛文通,张惠.不同品种甘薯全粉基本特性研究[J].*食品科学*,2009,30(23):119-122.
- [29] Saehun, Mun, Malshick. Molecular structures of rice starch to investigate the differences in the processing quality of rice flours [J]. *Food Science and Biotechnology*, 2018, 27(4): 1007-1014.
- [30] Kim C S, Walker C E. Effects of sugars and emulsifiers on starch gelatinization evaluated by differential scanning calorimetry [J]. *Cereal Chemistry*, 1992, 69(2): 212-217.
- [31] 姚慧慧,王燕,吴卫国,等.酸改性麦麸粉对面粉粉质特性及面团质构特性的影响[J].*食品科学*,2019,40(2):6-10.
- [32] 张梦潇,周文化,莫华,等.不同品种紫薯粉面团品质特性[J].*食品工业科技*,2021,42(2):12-25.
- [33] Zhang T, Zhang F, Cao Y F, et al. Effect of whole purple potato flour on dough properties and quality of steamed bread [J]. *Journal of Food Research*, 2019, 8(4): 122.
- [34] 孟红伟.添加薯粉对面包质构和消化特性影响的研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2020.