

添加慈姑粉对馒头品质特性影响的研究

高瑞萍^{1,2}, 涂鸿阳^{1,2}, 梁明艳^{1,2}

1. 重庆工商大学 食品科学与工程学院, 重庆 400067

2. 重庆市特色农产品加工储运工程技术研究中心, 重庆 400067

摘要:目的 探究不同比例的慈姑粉对小麦馒头质构、比容、白度、水分含量、pH 值、抗氧化活性和感官特性的影响。方法 以小麦馒头为对照, 研究添加不同比例的慈姑粉(0.5%、1.5%、2.5%、3.5%)对馒头咀嚼性、硬度、弹性、回复性、比容、pH 值、白度、水分含量、抗氧化能力以及感官特性等 10 个品质指标的影响, 并对品质指标进行相关性分析。结果 随着慈姑粉含量增加, 馒头的硬度、咀嚼性、pH 值显著增大($P < 0.05$), 弹性、比容、水分含量随着慈姑粉添加量的增加而降低($P < 0.05$), 回复性没有显著性影响($P > 0.05$)。添加量在 1.5% 时, 色度值最高, 呈现亮白光泽, 添加 0.5% 慈姑粉的馒头感官评分最高(89 分)。馒头的抗氧化性随慈姑粉添加量增加而提高。通过相关性分析表明, 慈姑粉馒头的硬度与咀嚼性可以作为质构特性中的分析指标。馒头的 pH 值与咀嚼性、馒头硬度之间呈正相关($P < 0.01$), 慈姑粉馒头的弹性与比容、水分含量呈正相关($P < 0.01$), 与 pH 值呈负相关($P < 0.01$), 感官评分与比容、弹性、白度、水分含量呈正相关($P < 0.05$), 与硬度、咀嚼性呈负相关($P < 0.01$)。结论 添加慈姑粉会对馒头理化性质、抗氧化性和感官特性产生显著影响。

关键词:慈姑粉; 馒头; 理化特性; 抗氧化性; 感官特性

中图分类号: TS255.36 文献标识码: A doi: 10.16055/j.issn.1672-058X.2026.0002.003

Study on the Effect of Adding *Sagittaria sagittifolia* L. Powder on the Quality Characteristics of Steamed Bread

GAO Ruiping^{1,2}, TU Hongyang^{1,2}, LIANG Mingyan^{1,2}

1. School of Food Science and Engineering, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China

2. Chongqing Engineering Research Center for Processing, Storage & Transportation of Characterized Agro-Products, Chongqing 400067, China

Abstract: Objective This study aims to investigate the effects of incorporating different proportions of *Sagittaria sagittifolia* L. powder on the quality characteristics of steamed wheat bread, including its texture, specific volume, whiteness, moisture content, pH, antioxidant activity, and sensory properties. **Methods** Using plain wheat steamed bread as the control, different proportions of *Sagittaria sagittifolia* L. powder (0.5%, 1.5%, 2.5%, 3.5%) were added. Their effects on ten quality indicators—chewiness, hardness, elasticity, resilience, specific volume, pH, whiteness, moisture content, antioxidant capacity, and sensory characteristics—were evaluated, and correlation analysis was performed on these quality indicators. **Results** With increasing *Sagittaria sagittifolia* L. powder content, the hardness, chewiness, and pH of the steamed bread increased significantly ($P < 0.05$), while elasticity, specific volume, and moisture content

收稿日期: 2024-03-24 修回日期: 2024-05-25 文章编号: 1672-058X(2026)02-0018-09

基金项目: 重庆市教委科技项目(KJQN202300837)资助; 重庆市教委科技项目(KJQN202100828)资助; 重庆工商大学青年项目(2152028)资助; 重庆工商大学高层次人才科研启动项目(2156009)资助; 重庆工商大学研究生科研创新项目(YISCXX2024-284-161)。

作者简介: 高瑞萍(1987—), 女, 云南宣威人, 讲师, 博士, 从事农产品加工与贮藏、非热技术在食品加工中的应用等研究。Email: gaorp_113@126.com.

引用格式: 高瑞萍, 涂鸿阳, 梁明艳. 添加慈姑粉对馒头品质特性影响的研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2026, 43(2): 18-26.

GAO Ruiping, TU Hongyang, LIANG Mingyan. Study on the effect of adding *Sagittaria sagittifolia* L. powder on the quality characteristics of steamed bread[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2026, 43(2): 18-26.

decreased ($P < 0.05$). Resilience was not significantly affected ($P > 0.05$). The highest whiteness index (indicating bright, lustrous appearance) occurred at 1.5% addition. Sensory scores peaked at 89 points with 0.5% of *Sagittaria sagittifolia* L. powder. The antioxidant activity of steamed bread increased with the addition level of *Sagittaria sagittifolia* L. powder. Correlation analysis indicated that hardness and chewiness could serve as key indicators for textural analysis. A positive correlation was found between pH and both chewiness and hardness ($P < 0.01$). Elasticity was positively correlated with specific volume and moisture content ($P < 0.01$) but negatively correlated with pH ($P < 0.01$). Sensory scores were positively correlated with specific volume, elasticity, whiteness, and moisture content ($P < 0.05$), and negatively correlated with hardness and chewiness ($P < 0.01$). **Conclusion** The addition of *Sagittaria sagittifolia* L. powder significantly influences the physicochemical properties, antioxidant activity, and sensory characteristics of steamed bread.

Keywords: *Sagittaria sagittifolia* L. powder; steamed bread; physicochemical properties; antioxidant activity; sensory characteristic

馒头 (Steamed bread) 是中国传统发酵小麦制品,也是人们最重要的主食之一,具有悠久的历史,在泰国等东南亚国家也广泛食用^[1]。随着人们消费水平的提升与健康意识的增强,传统馒头已难以满足消费者的多元化需求,而低热量、低脂肪、高蛋白且高膳食纤维、高花青素馒头的市场热度正日益提升。近年来,研究者致力于在馒头中加入山药^[2]、红枣^[3]、苦荞麸皮^[4]、红藻^[5]、槲皮素^[6]、紫薯^[7]、黑米酒糟^[8]等,以增加其多样性、营养价值和产品吸引力^[9]。比如 Mamat 等^[5]将红藻粉添加到馒头中,提高了馒头中粗纤维和膳食纤维的比例,以此改善人体肠道功能。Ling 等^[6]将槲皮素加入馒头中,可生产出一种具有高抗氧化和抗糖化特性的馒头。研究表明添加富含膳食纤维和多糖类物质可以改善馒头的营养和感官特性^[10]。

慈姑 (*Sagittaria sagittifolia* L.) 也称茨菇、芽菇。属于泽泻科 (*Alismataceae*) 慈姑属 (*Sagittaria* L.) 多年生的草本植物,可食用的部分是球茎^[11]。慈姑生长于亚洲、欧洲和北美洲的温带湿地,主要分布在我国长江流域及其以南各省、太湖沿岸和云南、广西等地区^[12]。慈姑的茎块中含有淀粉 (54.6%)、蛋白质 (16.4%)、灰分 (4.76%) 和脂肪 (0.47%)^[13]。茎块中膳食纤维含量达到 162 g/kg^[14],丰富的膳食纤维可以促进人体的肠道消化。多糖是慈姑中最重要的生物活性成分,具有抗氧化活性、免疫活性、抗肿瘤活性、降血糖以及抗炎活性^[15]。Li^[16]的研究表示,慈姑中含有维生素 B、天门冬酰胺、葡萄糖、D-果糖和 D-乳糖等生物活性成分,具有很高的食用价值。慈姑还具有丰富的酚类化合物和黄酮类化合物,分别为 2.307 mgGAE/g (Gallic Acid Equivalent, GAE) 和 12.263 mgQE/g (Quercetin Equivalent, QE), DPPH 自由基清除能力达到 77.373%^[17]。

慈姑含有的多糖、酚类和黄酮类化合物,可以提高传统小麦馒头的营养价值,具有很好的开发应用前景。但目前尚未发现慈姑粉作为营养成分应用与小麦馒头的研究。基于慈姑中富含丰富的淀粉和营养成分,本研究将慈姑粉按照不同比例 (0%、0.5%、1.5%、2.5%、3.5%) 添加,制备富含慈姑粉的馒头,探究慈姑对馒头硬度、水分含量、咀嚼性、回复性、弹性、比容、白度、pH 值、感官品质以及对自由基清除能力等质量属性的影响,优化馒头中最适慈姑粉添加量,以此达到的最佳感官品质。本研究不仅能提高慈姑的附加值,同时也能对加工高品质馒头提供理论指导。

1 材料和方法

1.1 材料和仪器

(1) 材料。高筋小麦粉购自益海嘉里粮油有限公司 (中国重庆);新鲜慈姑购于云南;活性干酵母购自马利食品有限公司 (中国河北);无水甲醇、无水乙醇、盐酸购自川东化工有限公司 (中国重庆);DPPH、ABTS 购自源叶生物科技有限公司 (中国上海);过硫酸钾购自科隆化学品有限公司 (中国成都)。

(2) 仪器。800A 多功能粉碎机,永康市红太阳机电有限公司;DHG-9145A 电热恒温鼓风干燥箱,上海齐欣科学仪器有限公司;ZHWY-110X30 恒温培养振荡器,上海智城分析仪器制造有限公司;W3/031 醒发箱,济南兰光机电技术有限公司;UV1102 II 紫外分光光度计,上海天美科学仪器有限公司;PHS-2F pH 计,上海仪电科学仪器股份有限公司;KQ-700DE 超声波清洗仪,昆山市超声仪器有限公司;TD-5 医用离心机,四川蜀科仪器有限公司;CR-400/410 色彩色差计,柯美达美能达 (中国) 投资有限公司;TA-XT Plus 质构仪,英国 Stable Micro Systems 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 慈姑粉的制备

将新鲜慈姑去皮切片后于 65 ℃ 干燥 48 h, 将干慈姑片进行粉碎, 过 60 目筛后装入密封袋中低温密封保存。

1.2.2 慈姑粉馒头的制作

将慈姑粉按照混合粉总质量比例 (0%、0.5%、1.5%、2.5%、3.5%) 与小麦粉混合, 取混合粉 100 g、酵母粉 1 g、水 50 g 制成面团, 静置 5 min, 再进行揉搓排气, 使面团表面光滑无裂纹。放入醒发箱中发酵 50 min。醒发完成后, 排气造型, 在 35 ℃, 湿度 75% 的条件下再次醒发 15 min, 冷水上锅蒸制 15 min。馒头出锅后, 冷却至室温进行分析测量。

1.3 馒头理化指标测定

1.3.1 比容分析

参照 He 等^[18]的方法, 将馒头样品放入 250 mL 烧杯中, 将菜籽倒入烧杯中, 使烧杯内菜籽水平面达到 250 mL 的体积刻度线。比容按下式计算:

$$S = \frac{v}{m} \quad (1)$$

式(1)中, S 为比容 (mL/g); v 为 SLB 样品体积 (mL); m 为慈姑粉馒头样品质量 (g)。比容越大说明馒头越蓬松, 根据 GB/T 21118-2007《小麦粉馒头》国家标准, 要求馒头比容应大于 1.7 mL/g。

1.3.2 色泽测定

使用色差计对慈姑粉含量不同的馒头进行色泽测定。以 D56 光源作为参考, 用 L^* 、 a^* 和 b^* 表示 (L^* 为亮度、 $+a^*$ 为红色, $-a^*$ 为绿色, $+b^*$ 为黄色, $-b^*$ 为蓝色)。每份样品平行测定三次, 取平均值。并根据 Hunter 色度公式计算白度指数 (W), 以此来评价样品的白度:

$$W = 100 - \sqrt{(100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}} \quad (2)$$

式(2)中, L^* 为亮度; $+a^*$ 为红色; $-a^*$ 为绿色; $+b^*$ 为黄色; $-b^*$ 为蓝色。

1.3.3 水分含量测定

依据 GB 5009.3-2016, 采用直接干燥法对不同慈姑粉含量的馒头进行水分含量测定。将慈姑粉碎至直径 2 mm 左右的微粒, 称取 2 g 样品 (精确至 0.000 1 g), 105 ℃, 烘干 4 h。干燥完毕后, 放入干燥器内冷却。105 ℃ 再次干燥 1 h 左右, 取出冷却 0.5 h 后称量并重复以上操作, 两次的质量之差不超过 2 mg, 即为恒重。再根据公式计算慈姑粉馒头的水分含量:

$$X = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_0} \times 100 \quad (3)$$

式(3)中, X 为试样中水分含量; m_1 为称量瓶的质量, 单位为 g; m_0 为干燥前称量瓶和样品颗粒的总质量, 单位为 g; m_2 为干燥后称量瓶和样品颗粒的总质量, 单位为 g。

1.3.4 pH 值测定

将慈姑粉馒头样品粉碎, 称取 10 g, 加入 90 mL 蒸馏水, 搅拌 30 min。高速离心后, 取适量上清液, 用 pH 计测定其 pH 值, 待 pH 计显示数字稳定后, 记录数据。

1.3.5 质构 (TPA) 测定

使用 TA-XT Plus 纹理分析仪 (Stable Micro System, 英国) 进行纹理轮廓分析, 配备直径为 75 mm 的压盘探针 P/75 型。取馒头中芯, 将其切为厚度约 15 mm 的片状, 测试前速率 2.0 mm/s; 测试速率 1.0 mm/s; 测定后速率 1.0 mm/s; 压缩率为 50%; 两次压缩之间的时间间隔 5.0 s。

1.4 体外抗氧化活性测定

1.4.1 DPPH 自由基清除能力的测定

取 5 g 不同慈姑粉含量的馒头样品, 分别加入 10 mL 80% 乙醇溶液 (v/v), 震荡 30 min, 再加入 40 mL 80% 乙醇溶液 (v/v), 于 70 ℃ 水浴浸提 45 min, 随后于 4 000 r/min 离心 10 min, 取上清液, 用 80% 的乙醇溶液 (v/v) 稀释 10 倍。参照 Zhou 等^[19]的方法, 取慈姑粉馒头样品稀释液 0.5 mL, 加入 4 mL 预先配制好的 DPPH 乙醇溶液 (质量分数 0.004%)。混合后在室温下在避光环境中反应 30 min。测定待测溶液在 517 nm 处的吸光度比值。DPPH 自由基清除率 (E) 计算公式:

$$E = \left(1 - \frac{A}{A_0}\right) \times 100\% \quad (4)$$

式(4)中, A_0 为空白对照吸光度比值; A 为样品稀释液的吸光度比值。

1.4.2 ABTS 自由基清除能力的测定

取 2.5 g 含不同慈姑粉添加量的馒头粉末在 5 mL 80% 乙醇溶液 (v/v) 中震荡溶解, 再加入 45 mL 80% 乙醇溶液 (v/v), 密封后混合均匀, 于 4 000 r/min 离心 15 min, 取上清液稀释 10 倍。参照 Khumploy 等^[20]的测定方法进行改进, 将 7 mmol/L 的 ABTS 溶液与等量 2.45 mmol/L 过硫酸钾溶液氧化, 生成自由基阳离子 $ABTS^{\cdot+}$ 。混合后在 12 ℃ 的黑暗条件下反应 24 h 形成深蓝色溶液。将 ABTS 溶液用 PBS 稀释, 使其在 734 nm 处的吸光度约为 0.90。得到 ABTS 工作溶液。取 4 mL ABTS 工作溶液加入 0.1 mL 慈姑粉馒头样品稀释液中, 进行 ABTS 自由基清除能力的测定, 并在 734 nm 处测量吸光度。ABTS 自由基清除率 (R) 计算公式:

$$R = \left(1 - \frac{A_1 - A_2}{A_0}\right) \times 100\% \quad (5)$$

式(5)中, A_0 为 0.1 mL PBS 和 4 mL ABTS 工作液吸光度的值; A_1 为 0.1 mL 慈姑粉馒头样品与 4 mL ABTS 工作溶液吸光度的值; A_2 为 0.1 mL 慈姑粉馒头样品与 4.0 mL PBS 吸光度的值。

1.5 感官评定

参照 Liu 等^[21] 报道的馒头感官评价方法,邀请 10 名食品专业人员组成的感官评定小组进行感官评定。对慈姑粉馒头样品的光泽颜色、外观形状、组织结构、质地气味以及弹韧性进行评定。感官评定总分为评分项目得分加权后相加,总分为 100 分。评定标准如表 1 所示。

表 1 感官评定标准

Table 1 Sensory evaluation criteria

评分项目	满分	评分标准	分值
光泽颜色	17	自然色,光泽度高,馒头表皮颜色均匀	12~17
		中等色,光泽度一般,馒头表皮颜色均匀程度一般	6~11
		发暗过浅,光泽度差,馒头表皮颜色不均匀	1~5
外观形状	17	表皮光滑无凹陷,馒头完整挺立	12~17
		表皮略有褶皱,馒头较完整挺立	6~11
		表皮凹陷严重发硬,馒头形状不规则	1~5
组织结构	16	纵剖面气孔小且均匀	11~16
		纵剖面气孔略大,较不均匀	5~10
		纵剖面过大且不均匀	1~4
质地	17	质地柔软,口感细腻不黏牙	12~17
		质地较柔软,口感较粗糙,较黏牙	6~11
		质地较硬,口感粗糙,有颗粒感,黏牙	1~5
气味	17	具有麦香味,无其他异味	12~17
		香气较淡,轻微酸味	6~11
		酸味大,有异味	1~5
弹韧性	16	复原性好,按下恢复较快,有嚼劲	11~16
		按下恢复较慢,嚼劲不足,较硬,按下不恢复,不爽口	5~10

1.6 数据处理

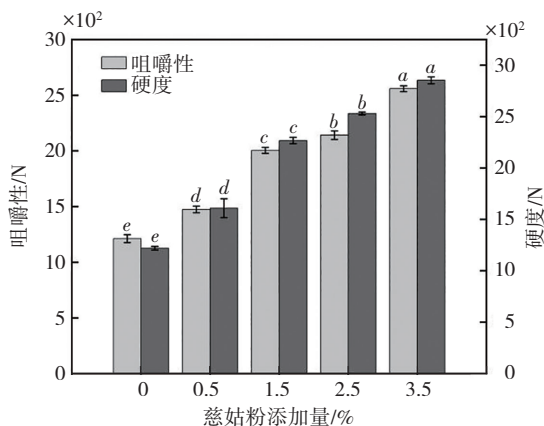
数据统计分析采用 SPSS 26.0 软件分析,实验图表采用 Origin 2022 软件分析。

2 结果与讨论

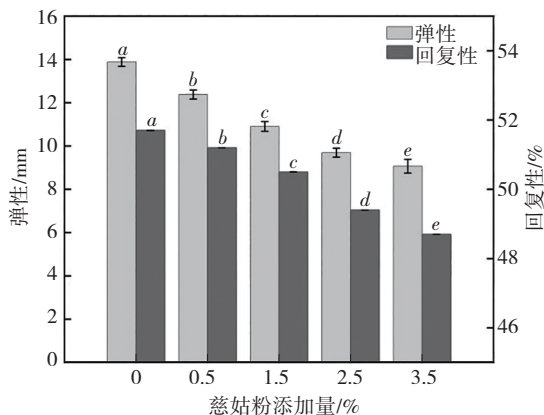
2.1 不同慈姑粉添加量对馒头质构特性的影响

由图 1 的质构分析结果表明:慈姑粉对馒头的硬度、咀嚼性、弹性和回复性具有显著影响($P < 0.05$)。硬度是指压缩馒头所需的最大力,通常被认为是整个质构属性的指标,咀嚼性反映了将食物咀嚼成可吞咽的状态并保持一定硬度所需要的能量。由图 1(a)得知,

随着慈姑粉添加量的增加,硬度和咀嚼性呈上升趋势($P < 0.05$)。可得出慈姑粉添加量与硬度、咀嚼性有显著正相关,当慈姑粉添加量为 3.5% 时慈姑粉馒头的咀嚼性和硬度最高。慈姑的可食用部分主要是以淀粉为主,还有蛋白质、多糖和少量纤维素。慈姑淀粉可用作食品增稠剂、黏合剂、乳化剂、混浊剂或胶凝剂等^[22]。馒头的硬度随着慈姑粉的添加明显增加,这可能是由于慈姑粉中的淀粉糊化不充分或淀粉在糊化后发生逆转导致硬度增加^[23]。其次,慈姑粉中的多糖类组分会导致馒头中的面筋网络强度降低,使持气性降低,体积减小,也会导致硬度增加^[24]。由图 1(b)得知,慈姑粉的添加使馒头的弹性和回复性显著下降($P < 0.05$),回复性有一定的下降趋势。根据杨雪峰等^[25]关于对小麦面筋蛋白对面团拉伸特性的影响研究表明,醇溶蛋白和麦谷蛋白的相互作用决定了小麦的面筋蛋白的强度和弹性,可以通过改变其比例来改善面筋蛋白的产生^[26]。因此,添加慈姑粉会使馒头面团的面筋蛋白比例降低,不利于面筋网络结构的形成,使面团弹性降低。图中,不同上标字母表示差异显著($P < 0.05$)。



(a) 慈姑粉添加量对馒头咀嚼性、硬度的影响



(b) 慈姑粉添加量对馒头弹性、回复性的影响

图 1 慈姑粉添加量对馒头质构的影响

Fig. 1 Effect of *Sagittaria sagitifolia* L. powder addition level on the texture of steamed bread

2.2 不同慈姑粉添加量对馒头比容的影响

比容反映了馒头的体积膨胀程度和持气能力,也是消费者选择时的重要参数,比容较大说明馒头蓬松^[27-28]。由图 2 可得,未添加慈姑粉和添加慈姑粉的馒头的比容范围为 1.956 mL/g~2.636 mL/g,两者均大于 1.7 mL/g,符合 GB/T 21118-2007《小麦粉馒头》国家标准要求。

由图 2 结果可得,与未添加慈姑粉的馒头相比,添加量为 0.5%、1.5%、2.5%和 3.5%时,馒头的比容分别降低了 6.3%、19.6%、22.8%和 25.8%。添加慈姑粉后馒头的比容下降与面团在发酵过程中面筋的结构形成有关^[29]。由图 3 中可看出,未添加慈姑粉的馒头内部孔洞较大,形成了均匀致密的微观结构。随着慈姑粉含量的添加,添加慈姑粉的馒头的内部孔洞分布不均匀,气孔变小,尤其是添加量增加至 1.5%时,馒头的气孔变得更小、更致密。添加慈姑粉会导致馒头的比容减小,这可能是由于慈姑粉中的不溶性膳食纤维水合后会引起空间位阻效应,阻止了面团中的面筋网络的形成,对面团内的微观结构产生影响^[30]。另一方面,慈姑粉中的膳食纤维可能会使面筋蛋白中的 α -螺旋变成 β -反螺旋,减弱面团中的面筋结构,使馒头的持气性降低,比容减小^[31]。

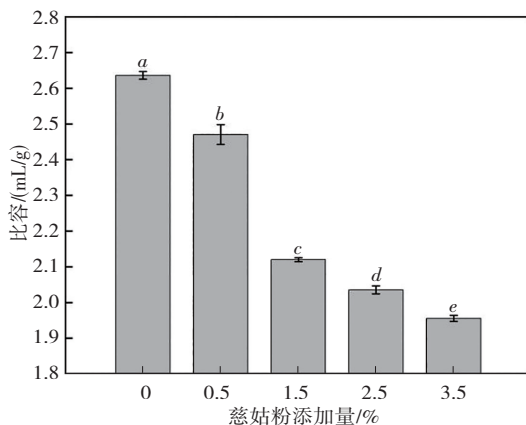


图 2 慈姑粉添加量对馒头比容的影响

Fig. 2 Effect of *Sagittaria sagittifolia* L. powder addition level on the specific volume of steamed bread



图 3 慈姑粉添加量对馒头内部组织的影响

Fig. 3 Effect of *Sagittaria sagittifolia* L. powder addition level on the internal structure of steamed bread

2.3 不同慈姑粉添加量对馒头 pH 值的影响

pH 值是研究馒头质量的重要指标之一,根据 GB/T 21118-2007《小麦粉馒头》国家标准,馒头的 pH 范围为 5.6~7.2。由图 4 可得,不同慈姑粉添加量得到的馒头的 pH 值为 5.6~5.9,均符合标准要求。馒头的 pH

值随着慈姑粉添加量的增加而升高 ($P < 0.05$)。由于慈姑中含有丰富的秋水仙碱^[32],可能会使馒头的 pH 值上升,因此,随着慈姑粉添加量增加,馒头的 pH 逐渐增大。

结合图 4、图 1(a)、图 1(b)、和图 2 的结果,当面团 pH 值在 5.6~5.7 时,馒头硬度低,弹性与回复性以及比容都较高,同时慈姑粉馒头的光泽度好,蓬松度高,口感好。此外,当 pH 值接近 6 时,慈姑粉馒头的适口性较差,且体积较小。据 Komlenić 等^[33]的研究得出馒头中的 pH 值变化可能会影响面筋结构和发酵过程中酵母菌的酶活性,从而影响蛋白分解和淀粉分解的活性,导致馒头的质构和颜色发生变化。

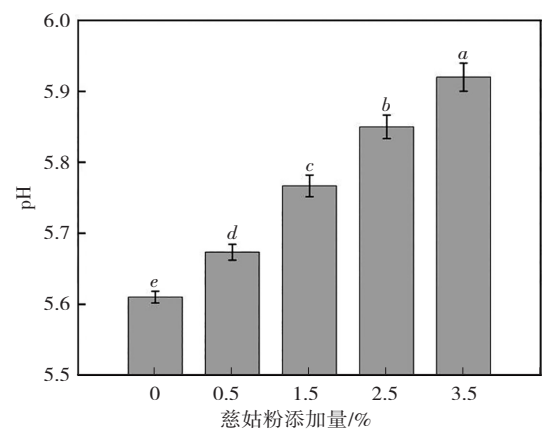


图 4 慈姑粉添加量对馒头 pH 值的影响

Fig. 4 Effect of *Sagittaria sagittifolia* L. powder addition level on the pH of steamed bread

2.4 不同慈姑粉添加量对馒头白度的影响

色泽是影响人们对馒头选择的重要因素,其中白度值越大馒头样品的颜色越亮白。馒头的色泽取决于各种因素,例如面团配方(即面粉的类型、所用成分的类型和数量)、烘烤温度和时间^[34]。通过图 5 可得,在 1.5%慈姑粉含量时馒头的色泽最白。由表 2 可知,慈姑粉馒头的白度值与未添加慈姑粉的馒头有显著性差异 ($P < 0.05$)。0%~1.5%慈姑粉含量的范围内,慈姑粉馒头的白度值逐渐上升。1.5%~3.5%慈姑粉含量的范围内,慈姑粉馒头的白度值逐渐降低。在慈姑粉含量为 1.5%时,慈姑粉馒头的白度值达到峰值,馒头表皮呈现柔和乳白色,这与图 5 的观察结果一致。石飞等^[35]的研究发现,馒头的内部结构越细腻,孔洞越小,则馒头的白度越高,这与图 3 中馒头的内部孔洞情况相一致,1.5%慈姑粉含量的馒头内部孔洞最小。随着慈姑粉添加量 $\geq 2.5\%$,馒头白度值降低,这可能是因为随着慈姑粉增加,馒头中存在的多糖和单糖增加,高温下部分分解产生美拉德反应,因此导致慈姑粉馒头颜色变深,色度值下降^[36]。面团颜色加深也可能是慈姑粉中的多酚氧化酶(PPO)催化酚类物质生成高活性醌和深色色素^[37]。



图 5 不同慈姑粉添加量的馒头外观色泽

Fig. 5 Appearance and color of steamed bread with different *Sagittaria sagittifolia* L. powder additions

表 2 慈姑粉添加量对馒头白度的影响

Table 2 Effect of *Sagittaria sagittifolia* L. powder addition level on the whiteness of steamed bread

慈姑粉添加量/%	L^*	a^*	b^*	Hunter 白度 (W)
0	89.98 ^b	1.07 ^a	21.26 ^a	79.47 ^e
0.5	91.47 ^a	0.94 ^d	20.69 ^b	80.59 ^c
1.5	89.60 ^c	0.93 ^e	16.66 ^c	82.26 ^a
2.5	89.91 ^d	1.02 ^c	14.88 ^d	81.17 ^b
3.5	89.95 ^c	1.03 ^b	14.67 ^e	80.17 ^d

2.5 不同慈姑粉添加量对馒头水分含量的影响

馒头的水分含量也是评价馒头品质的重要指标之一,根据 GB/T 21118-2007《小麦粉馒头》国家标准,小麦粉馒头的水分含量要求不大于 45%。由图 6 可知,不同慈姑粉添加量的馒头水分含量在 40.8%~44.5% 范围内,均符合国家标准要求。

由图 6 可得,馒头的水分含量随着慈姑粉添加量的增加而减少($P < 0.05$)。随着慈姑粉添加量增大,慈姑粉馒头的水分含量下降,可能是由于水分子在面团中的蛋白质水合过程中,部分水分子被慈姑粉中的淀粉颗粒吸收,使馒头中的水分含量下降^[38]。这也与胡晓会^[39]在淀粉对面包体系中面筋蛋白的研究中的结论相似。慈姑淀粉中的疏水性淀粉颗粒进入面筋蛋白疏水核心区,导致面团中游离水减少,水分含量下降;同时淀粉颗粒吸水糊化也会减少水分含量。另外,慈姑粉富含膳食纤维,其中的粗纤维会使慈姑粉吸水能力降低,导致馒头的水分含量降低^[40]。

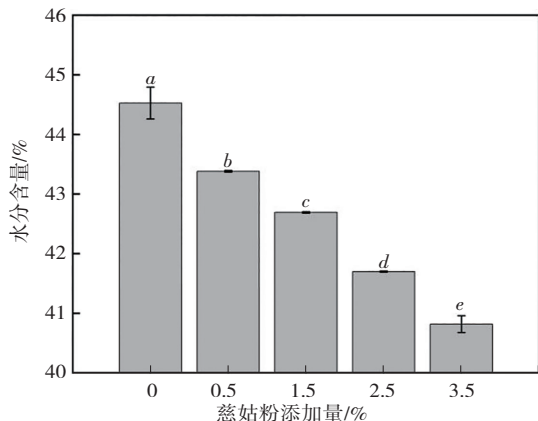
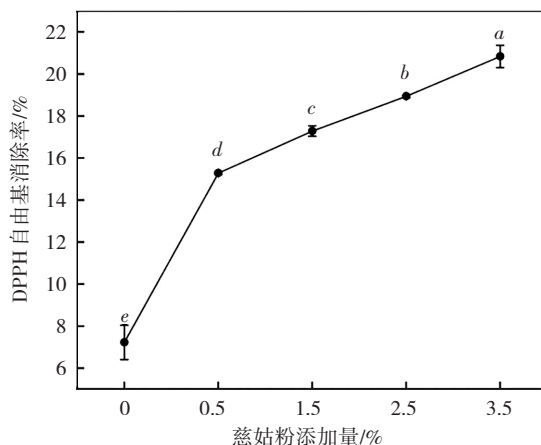


图 6 慈姑粉添加量对馒头水分含量的影响

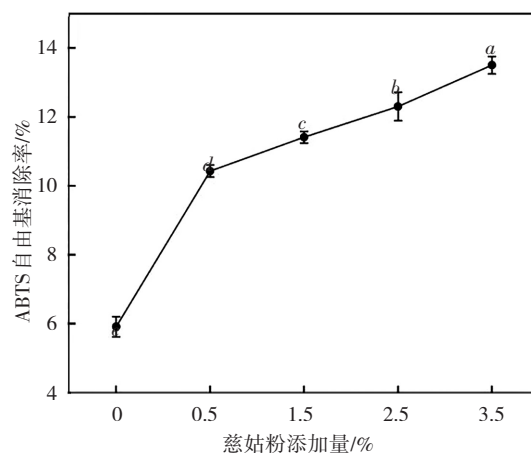
Fig. 6 Effect of *Sagittaria sagittifolia* L. powder addition level on the moisture content of steamed bread

2.6 不同慈姑粉添加量对馒头抗氧化性的影响

如图 7(a)、图 7(b)所示,未添加慈姑粉的馒头对 DPPH 和 ABTS 自由基清除能力分别为 7.23% 和 5.91%,添加慈姑粉(0.5%~3.5%)后馒头的 DPPH 自由基清除能力分别提高了 112%、139%、162%、188%; ABTS 自由基清除能力分别提高了 76%、93%、108%、128%。根据 Ou 等^[41]的研究,慈姑多糖对 DPPH 自由基具有显著的清除效果,且清除能力随多糖浓度的增加而增强。参考 Ahmed 等^[17]的研究,慈姑中的苯酚和黄酮类化合物含量较高,类黄酮可以清除大部分氧化分子和其他自由基,阻碍食品中的脂类氧化,提高慈姑粉馒头的自由基清除能力。由结果可知,添加慈姑粉能显著提高馒头的抗氧化能力。



(a) 慈姑粉添加量对馒头清除 DPPH 自由基的影响



(b) 慈姑粉添加量对馒头清除 ABTS 自由基的影响

图 7 慈姑粉添加量对馒头抗氧化性的影响

Fig. 7 Effect of *Sagittaria sagittifolia* L. powder addition level on the antioxidant activity of steamed bread

2.7 不同慈姑粉添加量对馒头的感官品质影响

根据 GB/T 21118-2007《小麦粉馒头》国家标准要求,馒头应具有外观完整挺立无凹陷,光泽度高,且表

皮颜色均匀,纵剖面气孔小且均匀,质地柔软不黏牙,具有麦香味且复原性好。由图 8 可得,慈姑粉添加量为 0.5% 时,馒头感官评分总分最高,继续添加慈姑粉后,馒头的感官评分总分开始下降。结合图 9,随着慈姑粉添加量增加,馒头的光泽颜色、外观、组织结构、质地评分基本呈下降趋势,而馒头的气味以及弹韧性呈现先增后降趋势。其原因可能是低浓度的慈姑粉可改善馒头风味,但添加量过多,会破坏面筋蛋白结构,且馒头中的色素含量增加,使慈姑粉馒头的风味和感官品质下降。

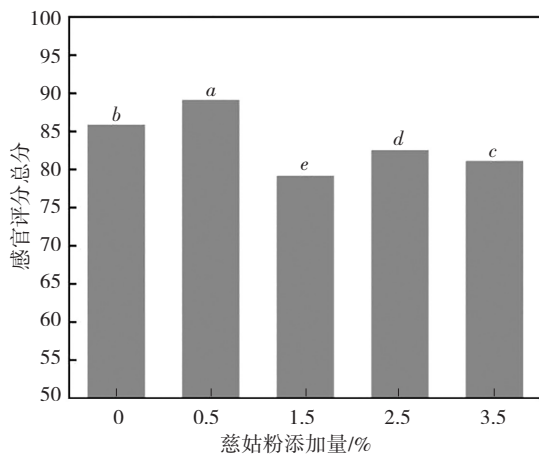


图 8 慈姑粉添加量对馒头感官评分的影响

Fig. 8 Effect of *Sagittaria sagittifolia* L. powder addition level on the sensory evaluation score of steamed bread

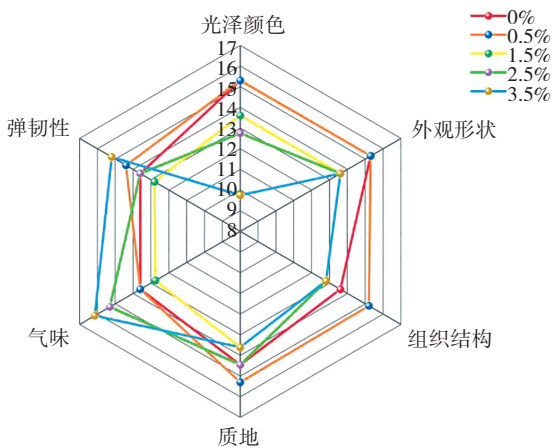


图 9 慈姑粉添加量对馒头感官评定的影响

Fig. 9 Effect of *Sagittaria sagittifolia* L. powder addition level on the sensory evaluation of steamed bread

2.8 相关性分析

由图 10 可知,在慈姑粉添加量不同时,馒头的硬度、咀嚼性与弹性、回复性、比容、pH 值、白度、水分含量和感官评分呈显著性关系 ($P < 0.05$),表明硬度和咀嚼性可以作为慈姑粉馒头质构特性的分析指标。馒头

的 pH 值与咀嚼性、馒头硬度之间呈极显著正相关 ($P < 0.01$),这是由于馒头 pH 值变化会影响面团中面筋结构形成,使硬度与咀嚼性发生变化^[33]。慈姑粉馒头的弹性与比容、水分含量呈极显著正相关 ($P < 0.01$),与 pH 值呈极显著负相关 ($P < 0.01$),说明馒头的孔洞大小、水分含量和 pH 值对馒头的弹性有显著影响。感官评分与比容呈极显著正相关 ($P < 0.01$),与弹性、白度、水分含量呈显著正相关 ($P < 0.05$),与硬度、咀嚼性呈极显著负相关 ($P < 0.01$)。表明慈姑粉馒头的质构特性、外观颜色等对感官评分有显著影响。慈姑粉馒头的回复性与感官评分之间没有显著相关性。图 10 中,*和**分别表示在 $P < 0.05$ 水平(双侧)显著相关和 $P < 0.01$ 水平(双侧)极显著相关。

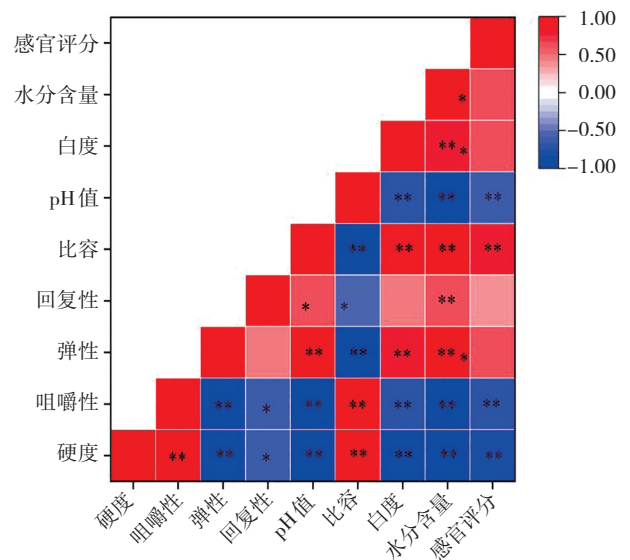


图 10 慈姑粉馒头的各类指标相关性分析热图

Fig. 10 Heat map of correlation analysis of various indicators of steamed bread with *Sagittaria sagittaria* L. powder

3 结论

本研究将不同比例的慈姑粉添加到馒头中,发现慈姑粉的添加对馒头的理化特性(质构、比容、pH 值、色度、水分含量等)、感官品质和抗氧化能力均有一定的影响。慈姑粉的添加会导致馒头的咀嚼性、硬度、弹韧性和白度值降低。但添加慈姑粉可以显著提高馒头的抗氧化活性 ($P < 0.05$)。馒头中慈姑粉含量为 0.5% 时,馒头的感官评分总分最高,易于消费者接受。相关性分析表明:慈姑粉馒头的硬度与咀嚼性可以作为质构特性中的分析指标。馒头的质构特性以及比容大小、弹性、白度、水分含量等对感官评分有着显著相关性。综上结果表明:添加适量慈姑粉能够改善馒头理

化特性和感官品质。本研究为开发慈姑粉馒头提供了理论参考。

参考文献(References):

- [1] LUANGSAKUL N, KEERATIPIBUL S, JINDAMORAKOT S, et al. Lactic acid bacteria and yeasts isolated from the starter doughs for Chinese steamed buns in Thailand[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2009, 42(8): 1404–1412.
- [2] 柳诚刚. 山药多糖对馒头品质的影响[J]. *粮食与饲料工业*, 2023(1): 16–19.
LIU Cheng-gang. The effect of yam polysaccharides on the quality of steamed bread[J]. *Cereal & Feed Industry*, 2023(1): 16–19.
- [3] 孟凤华, 孙凯, 冯润芳, 等. 红枣粉添加量对面团特性及馒头品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(5): 177–181, 187.
MENG Feng-hua, SUN Kai, FENG Run-fang, et al. Effect of jujube powder addition on dough characteristics and steamed bread quality[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(5): 177–181, 187.
- [4] 韩畅. 苦荞麸皮粉对面团特性的影响及其馒头品质改良研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2022: 2–4.
HAN Chang. Effects of tartary buckwheat bran flour on dough properties and quality improvement of steamed bread [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2022: 2–4.
- [5] MAMAT H, LING Y Y, ABDUL AZIZ A H, et al. Utilization of seaweed composite flour (Kappaphycus alvarez II) in the development of steamed bun[J]. *Journal of Applied Phycology*, 2023, 35(4): 1911–1919.
- [6] LIN J, TAN Y X G, LEONG L P, et al. Steamed bread enriched with quercetin as an antiglycative food product: Its quality attributes and antioxidant properties[J]. *Food & Function*, 2018, 9(6): 3398–3407.
- [7] ZHU F, SUN J. Physicochemical and sensory properties of steamed bread fortified with purple sweet potato flour[J]. *Food Bioscience*, 2019, 30: 100411.
- [8] 江梦影, 赵一鸣, 荆旻歌, 等. 黑米酒糟添加量对馒头品质及生理活性的影响[J]. *食品工业科技*, 2024, 45(13): 116–123.
JIANG Meng-ying, ZHAO Yi-ming, JIANG Min-ge, et al. Effect of black rice spent grain addition on quality and physiological activity of steamed bread[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2024, 45(13): 116–123.
- [9] TSAI S Y, YANG J H, TSENG Y H, et al. Quality of silver ear steamed bun[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2010, 34(4): 649–663.
- [10] LIU X L, MU T H, SUN H N, et al. Influence of potato flour on dough rheological properties and quality of steamed bread[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2016, 15(11): 2666–2676.
- [11] MAROYI A. Phytochemical, pharmacological and socio-economic properties of *Sagittaria sagittifolia* L. [J]. *Medicinal Plants-International Journal of Phytomedicines and Related Industries*, 2022, 14(4): 513–523.
- [12] 孙洋洋. 乙酸处理对慈姑片热加工品质和细胞壁多糖结构的影响研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2023: 1–2.
SUN Yang-yang. Effect of acetic acid treatment on thermal processing quality and cell wall polysaccharide structure of arrowhead slices[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023: 1–2.
- [13] ALIWANI A, WANI I A, HUSSAIN P R, et al. Physicochemical properties of native and γ -irradiated wild arrowhead (*Sagittaria sagittifolia* L.) tuber starch[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2015, 77: 360–368.
- [14] RAZA H, AMEER K, MA H, et al. Structural and physicochemical characterization of modified starch from arrowhead tuber (*Sagittaria sagittifolia* L.) using tri-frequency power ultrasound [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, 80: 105826.
- [15] GU J, ZHANG H, ZHANG J, et al. Optimization, characterization, rheological study and immune activities of polysaccharide from *Sagittaria sagittifolia* L. [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 246: 116595.
- [16] LI T S C. Vegetables and fruits: Nutritional and therapeutic values[M]. Boca Raton, FL: CRC Press, 2008.
- [17] AHMED M, JI M, SIKANDAR A, et al. Phytochemical analysis, biochemical and mineral composition and GC-MS profiling of methanolic extract of Chinese arrowhead *Sagittaria trifolia* L. from Northeast China[J]. *Molecules*, 2019, 24(17): 3025.
- [18] HE W J, CHEN N, YU Z L, et al. Effect of tea polyphenols on the quality of Chinese steamed bun and the action mechanism[J]. *Journal of Food Science*, 2022, 87(4): 1500–1513.
- [19] ZHOU S, HUANG G, CHEN G. Extraction, structural analysis, derivatization and antioxidant activity of polysaccharide from Chinese yam[J]. *Food Chemistry*, 2021, 361: 130089.
- [20] KHUMPLOY P, RAKSAT A, CHOODEJ S, et al. Picrotoxane sesquiterpene and α -pyrone derivative from *Dendrobium signatum* and their free radical scavenging potency[J]. *Journal of Natural Medicines*, 2021, 75(4): 967–974.
- [21] LIU R, SOLAH V A, WEI Y, et al. Sensory evaluation of Chinese white salted noodles and steamed bread made with Australian and Chinese wheat flour [J]. *Cereal Chemistry*, 2019, 96(1): 66–75.
- [22] ALI WANI A, WANI I A, HUSSAIN P R, et al.

- Physicochemical properties of native and γ -irradiated wild arrowhead (*Sagittaria sagittifolia* L.) tuber starch[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2015, 77: 360–368.
- [23] CHENG L, WANG X, GU Z, et al. Effects of different gelatinization degrees of starch in potato flour on the quality of steamed bread[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 209(Pt A): 144–152.
- [24] XIAO F, ZHANG X, NIU M, et al. Gluten development and water distribution in bread dough influenced by bran components and glucose oxidase[J]. LWT, 2021, 137: 110427.
- [25] 杨雪峰, 宋维富, 刘东军, 等. 小麦面筋蛋白对面团拉伸特性的影响研究进展[J]. 黑龙江农业科学, 2023(3): 104–108.
YANG Xue-feng, SONG Wei-fu, LIU Dong-jun, et al. Research progress on effect of wheat gluten protein on main tensile properties of dough[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2023(3): 104–108.
- [26] UTHAYAKUMARAN S, NEWBERRY M, KEENTOK M, et al. Basic rheology of bread dough with modified protein content and glutenin-to-gliadin ratios[J]. Cereal Chemistry, 2000, 77(6): 744–749.
- [27] CHANG X, HUANG X, TIAN X, et al. Dynamic characteristics of dough during the fermentation process of Chinese steamed bread[J]. Food Chemistry, 2020, 312: 126050.
- [28] AZIZI S, AZIZI M H, MOOGOUEI R, et al. The effect of Quinoa flour and enzymes on the quality of gluten-free bread[J]. Food Science & Nutrition, 2020, 8(5): 2373–2382.
- [29] WANG C C, YANG Z, GUO X N, et al. Effects of insoluble dietary fiber and ferulic acid on the quality of steamed bread and gluten aggregation properties[J]. Food Chemistry, 2021, 364: 130444.
- [30] BASKAYA-SEZER D. The characteristics of microwave-treated insoluble and soluble dietary fibers from grape and their effects on bread quality[J]. Food Science & Nutrition, 2023, 11(12): 7877–7886.
- [31] KŁOSOK K, WELC R, FORNAL E, et al. Effects of physical and chemical factors on the structure of gluten, gliadins and glutenins as studied with spectroscopic methods[J]. Molecules, 2021, 26(2): 508.
- [32] 崔光芬, 杜文文, 金鹏程, 等. 秋水仙碱提取分离研究进展[J]. 江苏农业学报, 2023, 39(1): 295–304.
CUI Guang-fen, DU Wen-wen, JIN Peng-cheng, et al. Advances in extraction and separation of colchicine[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2023, 39(1): 295–304.
- [33] KOMLENIĆ D K, UGAR ČIĆ-HARDI Ž, JUKIĆ M, et al. Wheat dough rheology and bread quality effected by *Lactobacillus brevis* preferment, dry sourdough and lactic acid addition[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2010, 45(7): 1417–1425.
- [34] BCHIR B, RABETAFIKA H N, PAQUOT M, et al. Effect of pear, apple and date fibres from cooked fruit by-products on dough performance and bread quality[J]. Food and Bioprocess Technology, 2014, 7(4): 1114–1127.
- [35] 石飞, 刘长虹. 不同米粉对酵子及馒头品质影响研究[J]. 食品科技, 2017, 42(6): 142–146.
SHI Fei, LIU Chang-hong. Effects of different rice flour on Jiaozi and steamed bread quality[J]. Food Science and Technology, 2017, 42(6): 142–146.
- [36] HAGER A S, RYAN L A M, SCHWAB C, et al. Influence of the soluble fibres inulin and oat β -glucan on quality of dough and bread[J]. European Food Research and Technology, 2011, 232(3): 405–413.
- [37] 赵雪, 张展开, 张智宏, 等. 酱油酿造过程中微生物及生物酶的研究进展[J]. 现代食品科技, 2024, 40(2): 329–337.
ZHAO Xue, ZHANG Zhan-kai, ZHANG Zhi-hong, et al. Research advancements in microorganisms and biological enzymes during soy sauce fermentation[J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(2): 329–337.
- [38] MEERTS M, CARDINAELS R, OOSTERLINCK F, et al. The impact of water content and mixing time on the linear and non-linear rheology of wheat flour dough[J]. Food Biophysics, 2017, 12(2): 151–163.
- [39] 胡晓会. 淀粉对马铃薯面包体系中面筋蛋白网络形成及聚集状态影响的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2022: 6–8.
HU Xiao-hui. Study on the Effects of Starch on the Formation and Aggregation State of Gluten Protein in Wheat-potato Composite Bread[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022: 6–8.
- [40] JIANG G, FENG X, WU Z, et al. Development of wheat bread added with insoluble dietary fiber from ginseng residue and effects on physicochemical properties, *in vitro* adsorption capacities and starch digestibility[J]. LWT, 2021, 149: 111855.
- [41] OU L, SHUI P, ZHU Y, et al. Study on extraction of polysaccharides and antioxidant activity of *Sagittaria sagittifolia* L. Polysaccharide[J]. Agricultural Science & Technology, 2017, 18(4): 724–728, 732.

责任编辑:陈芳