

不同紫薯馒头黄嘌呤氧化酶抑制活性及感官品质比较

李会品^{1,2}, 范超奇¹, 宋淼^{1,2}, 谷懿潇¹, 唐凝¹, 索标^{1,2}, 贾志莹¹, 艾志录^{1,2*}

(1. 河南农业大学食品科学技术学院, 河南郑州 450002)

(2. 农业农村部大宗粮食加工重点实验室, 河南郑州 450002)

摘要: 该研究采用8种紫薯粉, 对比了其制备紫薯面团的pH值、可滴定酸度(Titratable Acidity, TTA)值与发酵能力, 分析了8种紫薯馒头活性成分含量、黄嘌呤氧化酶抑制活性、抗氧化活性以及感官品质的差异, 阐明了紫薯馒头活性成分与黄嘌呤氧化酶抑制活性和抗氧化活性之间的内在联系, 并筛选出一种能制备具有潜在降尿酸功能紫薯馒头的紫薯粉。结果表明, 济黑一号紫薯馒头总黄酮和总花色苷含量、黄嘌呤氧化酶抑制活性、超氧阴离子自由基清除活性与还原力分别为195.70 mg RE/100 g、2.16 mg C3G/100 g、11.93 $\mu\text{mol AE}/100\text{ g}$ 、29.07 mmol TE/100 g和2.69 mmol VE/100 g, 均显著高于其它7种紫薯馒头($P<0.05$)。相关性分析表明, 总黄酮和总花色苷是造成不同紫薯馒头黄嘌呤氧化酶抑制活性与抗氧化活性存在差异的主要原因。济黑一号和济黑二号紫薯馒头感官评分相对较高, 分别为86.56和88.22。因此, 济黑一号紫薯馒头综合品质最优, 济黑一号紫薯粉适用于降尿酸紫薯馒头的开发。该研究为紫薯馒头降尿酸活性的深入研究以及功能性紫薯馒头的开发与工业化生产提供理论依据。

关键词: 紫薯馒头; 活性成分; 黄嘌呤氧化酶抑制活性; 抗氧化活性; 感官品质

文章编号: 1673-9078(2023)10-69-78

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.10.1425

Comparison of the Xanthine Oxidase Inhibitory Activity and Sensory Quality of Different Steamed Purple Sweet Potato Buns

LI Huipin^{1,2}, FAN Chaoqi¹, SONG Miao^{1,2}, GU Yixiao¹, TANG Ning¹, SUO Biao^{1,2}, JIA Zhiying¹, AI Zhilu^{1,2*}

(1. College of Food Science and Technology, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China)

(2. Key Laboratory of Staple Grain Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: The pH value, titratable acidity (TTA) value, and fermentation ability of purple sweet potato dough prepared with eight different types of purple sweet potato powder were determined. The differences in the active component content, xanthine oxidase inhibitory activity, antioxidant activity, and sensory quality of steamed buns prepared using the different purple sweet potato powders were analyzed. The intrinsic relationships between the active component content and the xanthine oxidase inhibitory activity and antioxidant activity were elucidated. Ultimately, the purple sweet potato powder capable of producing steamed buns with potential anti-hyperuricemic activity was selected for further analysis. The results showed that the total flavonoid and anthocyanin contents of the steamed purple sweet potato buns produced with Jihei No.1 purple sweet potato powder were 195.70 mg RE/100 g and 2.16 mg C3G/100 g, respectively, which were significantly higher than those of the other buns. Meanwhile, for the same powder, the xanthine oxidase inhibitory activity (11.93 $\mu\text{mol AE}/100\text{ g}$), superoxide anion radical scavenging activity (29.07 mmol TE/100 g), and reducing power (2.69 mmol VE/100 g) were markedly higher than those of the other seven variants of steamed purple sweet potato buns ($P<0.05$). Correlation analysis revealed that the total flavonoid and anthocyanin contents

引文格式:

李会品, 范超奇, 宋淼, 等. 不同紫薯馒头黄嘌呤氧化酶抑制活性及感官品质比较[J]. 现代食品科技, 2023, 39(10): 69-78

LI Huipin, FAN Chaoqi, SONG Miao, et al. Comparison of the xanthine oxidase inhibitory activity and sensory quality of different steamed purple sweet potato buns [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(10): 69-78

收稿日期: 2022-03-22

基金项目: 河南省高等学校重点科研项目(20B550006); 国家自然科学基金项目(22278114)

作者简介: 李会品(1989-), 女, 博士, 讲师, 研究方向: 谷物与面食食品营养与健康, E-mail: lihuipin0203@163.com

通讯作者: 艾志录(1965-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 主食及速冻食品加工与安全控制、农产品资源开发与功能性食品, E-mail: zhilafod@sina.com

were the primary contributors to the differences in the xanthine oxidase inhibitory activity and antioxidant activity of different purple sweet potato steamed buns. Moreover, the sensory scores of the steamed buns prepared using Jihei No.1 (86.56) or Jihei No.2 (88.22) purple sweet potato powder were higher than those of the six counterparts. In summary, the steamed buns prepared using Jihei No.1 purple sweet potato powder had the best comprehensive quality. Hence, this powder is suitable for preparing steamed purple sweet potato buns with anti-hyperuricemic activity. This study provides a theoretical foundation for further investigation of the anti-hyperuricemic activity of these buns as well as their development and industrial production as a functional food.

Key words: steamed purple sweet potato buns; active components; xanthine oxidase inhibitory activity; antioxidant activity; sensory quality

馒头营养丰富,易于消化吸收,是我国北方居民不可或缺的传统主食。随着人们营养保健意识的增强,杂粮食品受到越来越多消费者的青睐。紫薯除含有淀粉、可溶性糖、纤维素、蛋白质等营养成分外,还含有矢车菊素、芍药色素和天竺葵素等花色苷,绿原酸、异绿原酸、咖啡酸、肉桂酸和羟基肉桂酸等酚酸,以及槲皮素、杨梅素和山奈酚等黄酮^[1,2],具有抗氧化、抗肿瘤与降尿酸等生理功能^[1,3]。紫薯提取物可降低高尿酸血症小鼠血清尿酸水平,抑制尿酸生成通路关键酶黄嘌呤氧化酶活性^[1]。余洁^[4]报道了乳酸菌发酵可增强紫薯花青素提取物抗氧化活性。郭孝萱等^[5]发现米曲霉变种发酵后紫薯总酚含量和抗氧化能力均显著上升($P<0.05$),花色苷中酰化的酚类如对香豆酸和阿魏酸会被释放出来,而这些酚类物质是有效的降尿酸化合物^[6,7]。因此,发酵可能会提高紫薯的生理活性,将紫薯粉替代部分小麦粉发酵制备紫薯馒头,具有潜在的降尿酸活性。

不同品种紫薯粉因其淀粉、蛋白和脂肪等营养成分,以及花色苷、酚酸与黄酮等活性物质含量与组成有所不同,其制备的紫薯馒头生理活性与感官品质也会有所差异。Zhu等^[8]研究了不同紫薯粉添加量对小麦馒头活性成分、抗氧化活性和感官品质的影响,发现小麦馒头的总酚、总花色苷含量与抗氧化活性随着紫薯粉添加量的增加而升高,同时馒头的硬度逐渐增加,比容逐渐减小。张毅等^[9]发现不同品种紫薯中花色苷均以酰基化形式存在,含量与组分各不相同。黄彪等^[10]研究发现不同品种紫薯中总酚、总黄酮与总花色苷含量,以及抗氧化活性具有明显差异。虽有部分研究报道了紫薯粉对小麦馒头抗氧化活性与品质的影响,但是关于不同品种紫薯粉对紫薯馒头黄嘌呤氧化酶抑制活性、抗氧化活性以及感官品质影响的系统研究较少,同时紫薯馒头活性成分与黄嘌呤氧化酶抑制活性和抗氧化活性的内在关系尚未明确。因此,本研究采用8种紫薯粉,以乳酸菌与商业酵母复合发酵制备紫薯馒头,对比不同紫薯面团的pH值、可滴定酸度(Titratable Acidity, TTA)值与发酵能力,分析不

同品种紫薯粉对紫薯馒头黄嘌呤氧化酶抑制活性、抗氧化活性与感官品质的影响,以期阐明紫薯馒头活性成分与黄嘌呤氧化酶抑制活性和抗氧化活性之间的内在联系,并筛选出一种紫薯粉,其适用于制备兼具潜在降尿酸功能与良好食用品质的紫薯馒头,对紫薯馒头降尿酸活性的深入研究以及功能性紫薯馒头的工业化生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

高筋面粉,河南金苑粮油有限公司。不同品种紫薯产地:济薯18号,山东临沂;渝紫263,重庆合川;泰紫薯1号,山东泰安;凌紫,山东聊城;济黑一号,山东临沂;济黑二号,湖北荆门;珍珠,广西龙州;紫罗兰,安徽阜阳。活性干酵母,安琪酵母股份有限公司。植物乳杆菌(*Lactobacillus plantarum*) ACX0267为实验室保藏菌株。

黄嘌呤、黄嘌呤氧化酶、别嘌呤醇、尿酸,分析纯,西格玛奥德里奇(上海)贸易有限公司;甲醇、甲酸,色谱纯,赛默飞世尔科技(中国)有限公司;其它试剂为分析纯。

1.2 仪器与设备

TU-1901 双光束紫外可见分光光度计,北京普析通用仪器有限责任公司;微孔板分光光度计,美国伯腾仪器有限公司;Orbitrap Exploris120 超高效液相色谱-串联质谱联用(Ultra-Performance Liquid Chromatography-Tandem Mass Spectrometry, UPLC-MS/MS)仪,赛默飞世尔科技(中国)有限公司;VeriVideDigiEye电子眼,英国VeriVide公司。

1.3 试验方法

1.3.1 紫薯粉的制备

新鲜紫薯清洗后去皮,切成小碎丁,于40℃干燥7h,直至紫薯的水分含量在7%以下;将紫薯丁粉碎,

过 100 目筛, 制得紫薯粉, 于 4 °C 冷藏待用。

1.3.2 乳酸菌的培养与收集

将保存的乳酸菌平板涂布活化后, 挑取单菌落置于 MRS 液体培养基中, 于 37 °C 厌氧培养至稳定生长期。再按照 1% (V/V) 的比例, 将乳酸菌接种于新鲜 MRS 培养基中, 继续厌氧培养至稳定生长期, 在 4 °C、12 000 r/min 条件下离心 5 min, 收集菌体沉淀, 并用 0.9% (m/V) 生理盐水将菌体清洗两次, 离心除去上清液, 得乳酸菌菌体。依据乳酸菌在紫薯面团中的数量 (2×10^9 CFU/g), 确定乳酸菌菌体添加量。

1.3.3 紫薯馒头的制备

称取 300 g 紫薯-小麦混合粉 (紫薯粉与小麦粉质量比 3:7)、180 g 水, 加入适量乳酸菌菌体, 用和面机搅拌 20 min, 将紫薯面团置于培养箱中发酵 24 h, 温度 37 °C, 湿度 60%。向一次发酵结束的紫薯面团中加入 9 g 酵母粉, 揉制均匀, 按每份 100 g 成型, 二次发酵 3.5 h, 温度 37 °C, 湿度 60%, 然后用沸水大火蒸制 20 min, 停火 5 min 后开盖, 完成紫薯馒头的制作^[11]。

1.3.4 紫薯面团 pH 值和 TTA 值的测定

在二次发酵结束时, 称取 10 g 紫薯面团与 90 mL 蒸馏水, 置于无菌均质袋中均质混匀, 使用 pH 计测定紫薯面团溶液的 pH 值。用 0.1 mol/L NaOH 溶液滴定样品溶液至 pH 值 8.5, 以消耗 NaOH 溶液的毫升数来表示发酵成熟的紫薯面团的 TTA 值^[12]。

1.3.5 紫薯面团发酵能力的测定

采用量筒法测定紫薯面团的发酵能力。取二次发酵起始阶段的紫薯面团 40 g, 放入 100 mL 量筒中, 读取紫薯面团起始体积, 将紫薯面团置于培养箱中, 温度为 37 °C, 湿度为 60%, 紫薯面团二次发酵结束时取出量筒, 读取紫薯面团最终体积^[13]。

$$FA = \frac{V_1 - V_0}{V_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

FA—发酵能力, %;

V_1 —紫薯面团最终体积, mL;

V_0 —紫薯面团起始体积, mL。

1.3.6 样品提取液制备

将紫薯馒头切成小碎片, 于 45 °C 烘干后粉碎。参考张子程^[1]的方法并稍作修改, 以 1:25 (m/V) 向 40 g 紫薯馒头粉中添加 80% (V/V) 乙醇溶液 1 000 mL, 超声提取 2 h, 超声功率为 700 W, 接着置于恒温振荡器中浸提 3 h, 温度为 40 °C, 转速 150 r/min, 将提取液抽滤取上清液。将滤渣重复以上提取流程, 合并两次上清液, 于 45 °C 减压浓缩至 100 mL。将浓缩液用乙

酸乙酯 (体积比为 1:3) 萃取两次, 取其水相组分, 于 45 °C 减压浓缩至恒重。样品溶解后置于 4 °C 冰箱待用。

1.3.7 总酚含量测定

将 120 μ L 经适当稀释的样品提取液与 600 μ L 福林酚试剂 (10 倍稀释) 混合均匀, 加入 300 μ L 质量浓度为 75 g/L 的碳酸钠溶液, 混匀后于 40 °C 避光静置 30 min, 于 765 nm 比色。以没食子酸作为标准品, 结果表示为每 100 g 干质量紫薯馒头没食子酸当量, 单位为 mg GAE/100 g^[14]。

1.3.8 总黄酮含量测定

取 500 μ L 经适当稀释的样品提取液与 500 μ L 亚硝酸钠溶液 (5%, m/V), 混匀后反应 6 min, 加入 300 μ L 六水合三氯化铝溶液 (10%, m/V), 混匀后反应 5 min, 加入 1 mL 浓度为 1 mol/L 的氢氧化钠溶液, 于 510 nm 比色。以芦丁为标准品, 结果表示为每 100 g 干质量紫薯馒头芦丁当量, 单位为 mg RE/100 g^[14]。

1.3.9 总花色苷含量测定

取 300 μ L 经适当稀释的样品提取液, 分别用 pH 值 1.0 氯化钾缓冲溶液 (0.2 mol/L) 和 pH 值 4.5 醋酸钠缓冲液 (0.13 mol/L) 稀释至 10 mL, 然后在 700 nm 和最大吸收峰 λ_{\max} 条件下测定吸光度。总花色苷含量以矢车菊素-3-O-葡萄糖苷计^[8], 按照以下公式计算, 结果表示为每 100 g 干质量紫薯馒头中矢车菊素-3-O-葡萄糖苷含量:

$$c = \frac{A_b}{\epsilon L} \times M_w \times D \times \frac{V}{m} \times 100 \quad (2)$$

式中:

c—总花色苷含量, mg C3G/100 g;

A_b —为 $(A_{\lambda_{\max}} - A_{700})_{\text{pH} 1.0} - (A_{\lambda_{\max}} - A_{700})_{\text{pH} 4.5}$ 的值;

ϵ —矢车菊素-3-O-葡萄糖苷的摩尔消光系数, 26 900 L/(mol·cm);

L—比色皿宽度, 1 cm;

M_w —矢车菊素-3-O-葡萄糖苷的摩尔质量, 449.2 g/mol;

D—稀释倍数;

V—样品体积, mL;

m—样品质量, g。

1.3.10 黄嘌呤氧化酶抑制活性测定

反应在 pH 值 7.5 磷酸盐缓冲液 (0.2 mol/L) 中进行。取 50 μ L 经适当稀释的样品提取液和 50 μ L 酶活为 0.05 U/mL 黄嘌呤氧化酶工作液, 加入 96 孔酶标板中, 于 25 °C 保温 5 min 后加入 150 μ L 浓度为 0.42 mmol/L 黄嘌呤溶液以启动酶促反应。反应 30 min 后, 加入 80 μ L 浓度为 1 mol/L 盐酸溶液以终止反应。将反应液用超纯水稀释 10 倍, 经 0.22 μ m 尼龙滤膜过滤后, 采用 UPLC-MS/MS 法测定样品尿酸含量。UPLC

检测条件: HSS T3 C18 色谱柱 (2.1 mm×100 mm, 1.8 μm); 柱温 40 °C; 进样量 2 μL; 流动相: 0.1%(V/V) 甲酸水溶液 (A) 和甲醇 (B); 流速 0.3 mL/min; 梯度洗脱条件为 0~1 min, 2% A; 1~3 min, 2%~10% A; 3~7 min, 10%~90% A; 7~9 min, 90% A; 9~9.1 min, 90%~2% A; 9.1~17 min, 2% A。质谱检测条件: 电喷雾 (ESI) 正离子模式; 喷雾电压: 静态; 正离子电压: 3 500 V; 气流模式: 静态; 鞘气流速 30 Arb; 反吹气流速 5 Arb; 离子传输管温度 320 °C; 雾化器温度 350 °C; 碰撞气氩气; 碰撞能量 45 eV; 分辨率 30 000; 扫描模式: Product Ion 扫描; 质谱分析范围 100~1 500 *m/z*; 提取尿酸的一级质谱准分子离子质荷比为 169.0356。

根据尿酸含量计算样品的黄嘌呤氧化酶抑制活性, 以别嘌呤醇为标准品, 结果表示为每 100 g 干质量紫薯馒头别嘌呤醇当量 (μmol AE/100 g) [15], 计算公式如下:

$$XOI = \frac{UA_{\text{空白}} - UA_{\text{样品}}}{UA_{\text{空白}}} \times 100\% \quad (3)$$

式中:

XOI——黄嘌呤氧化酶抑制活性, %;

UA_{空白}——空白组尿酸含量, μg/mL;

UA_{样品}——样品组尿酸含量, μg/mL。

1.3.11 超氧阴离子自由基清除活性测定

反应在 0.2 mol/L pH 值 7.4 磷酸盐缓冲液中进行。向 96 孔酶标板中加入 50 μL 经适当稀释的样品提取液, 60 μL 浓度为 2 mmol/L 氯化硝基四氮唑蓝溶液与 50 μL 酶活为 0.1 U/mL 黄嘌呤氧化酶溶液, 混合均匀后, 加入 50 μL 浓度为 1 mmol/L 黄嘌呤溶液启动反应,

于 37 °C 反应 30 min, 在 560 nm 处测定样品组吸光值 (*OD*_{样品}) 以及空白组的吸光值 (*OD*_{空白})。以 Trolox 为标准品, 结果表示为每 100 g 干质量紫薯馒头 Trolox 当量, 单位为 mmol TE/100 g^[16]。

$$SSA = \frac{OD_{\text{空白}} - OD_{\text{样品}}}{OD_{\text{空白}}} \times 100\% \quad (4)$$

式中:

SSA——超氧阴离子自由基清除活性, %;

*OD*_{空白}——空白组吸光值;

*OD*_{样品}——样品组吸光值。

1.3.12 还原力测定

取 0.5 mL 经适当稀释的样品提取液, 加入 0.5 mL 磷酸盐缓冲液 (pH 值 6.6, 0.2 mol/L) 与 0.5 mL K₃Fe(CN)₆ 溶液 (1%, *m/V*), 于 50 °C 条件下保温 20 min, 接着加入 0.5 mL 三氯乙酸溶液 (10%, *m/V*), 2 mL 去离子水与 0.4 mL FeCl₃ 溶液 (0.1%, *m/V*), 混匀后静置 10 min, 于 700 nm 比色。以抗坏血酸为标准品, 结果表示为每 100 g 干质量紫薯馒头抗坏血酸当量, 单位为 mmol VE/100 g^[17]。

1.3.13 紫薯馒头色度测定

紫薯馒头蒸制完成后, 于室温放置 1 h 后, 使用电子眼测定紫薯馒头的 *L**、*a**、*b** 值。

1.3.14 紫薯馒头感官评价

由 10 名食品专业人员组成紫薯馒头感官评定小组, 感官评分标准见表 1^[18]。

1.4 数据处理

使用 IBM SPSS Statistics 26 软件进行数据统计与分析, 采用 Origin 2019 软件进行绘图。

表 1 紫薯馒头感官评分标准

Table 1 Sensory evaluation standards for purple sweet potato steamed bread

馒头部位	指标	分值	评分标准
	比容	20	比容≥1.8: 20分; 比容在 1.8 以下, 每下降 0.1 减 1 分
外部	外观形状	15	表皮光滑且形状对称, 高径比较大: 12.1~15 分; 次等 9.1~12 分; 表皮不光滑且有孔洞形状不对称, 高径比较小: 1~9 分
	表皮色泽	15	紫红色: 12.1~15 分; 棕褐色: 9.1~12 分; 深褐色: 1~9 分
	内部色泽	10	紫红色: 8.1~10 分; 棕褐色: 6.1~8 分; 深褐色: 1~6 分
	内部组织	15	切面气孔均匀: 12.1~15 分; 气孔细密且均匀: 9.1~12 分; 气孔不均匀: 1~9 分
内部	弹性	5	按压复原性较好: 4.1~5 分; 次等: 3.1~4 分; 按压复原性较差: 1~3 分
	气味	10	具有浓郁紫薯香味和麦香味、无异味: 8.1~10 分; 次等: 6.1~8 分; 无异味、无香味: 1~6 分
	口感	10	口感筋道且不粘牙: 8.1~10 分; 次等: 6.1~8 分; 口感不筋道, 掉渣且粘牙: 1~6 分
	综合评分	100	

2 结果与分析

2.1 不同品种紫薯粉对紫薯面团 pH 值、TTA 值与发酵能力的影响

酸度是衡量紫薯面团成熟度的重要标志,植物乳杆菌在发酵过程中利用葡萄糖、麦芽糖等糖类物质产生乳酸、乙酸和丙酸等有机酸,能改善紫薯面团的质构,有助于形成紫薯馒头特有的风味^[19]。不同品种紫薯粉对紫薯面团 pH 值、TTA 值与发酵能力的影响见表 2。由表 2 可知,8 种紫薯粉制成的紫薯面团 pH 值、TTA 值和发酵能力存在一定差异。8 种紫薯面团 pH 值在 3.61~3.78 之间,其中渝紫 263 紫薯面团 pH 值最低,为 3.61;济薯 18 号紫薯面团 pH 值最高,为 3.78。本研究中 8 种紫薯面团酸度相对较高,Xing 等^[11]分别采用戊糖片球菌、魏斯氏菌、乳酸片球菌、面包乳杆菌、发酵乳杆菌与酿酒酵母复配发酵制备小麦面团,检测得到小麦面团 pH 值在 5.04~5.42 之间。8 种紫薯面团 TTA 值在 16.67~18.83 之间,其中济黑一号和济黑二号紫薯面团 TTA 值较高,分别为 18.83 和 18.63,表明这两种紫薯面团中总酸含量较高,而紫罗兰紫薯面团 TTA 值最低,为 16.67,表明该品种紫薯面团总酸含量较低,这可能是由于不同品种紫薯粉中淀粉和可溶性糖含量有所差异^[20],植物乳杆菌转化糖类物质生成酸性物质的量有所不同。

表 2 不同品种紫薯粉对紫薯面团 pH 值、TTA 值和发酵能力的影响
Table 2 Effects of different varieties of purple sweet potato flour on pH value, TTA value and fermentation ability of purple sweet potato dough

紫薯粉品种	pH 值	TTA 值	发酵能力/%
济薯 18 号	3.78±0.01 ^a	18.00±0.41 ^{abc}	71.42±0.87 ^d
渝紫 263	3.61±0.01 ^e	16.90±0.41 ^{cd}	70.40±2.14 ^d
泰紫薯 1 号	3.73±0.01 ^b	18.53±0.81 ^{ab}	110.60±2.54 ^b
凌紫	3.73±0.01 ^b	17.90±0.57 ^{abc}	117.96±3.05 ^a
济黑一号	3.64±0.01 ^d	18.83±0.46 ^a	90.93±4.92 ^c
济黑二号	3.66±0.01 ^c	18.63±0.29 ^a	54.26±3.83 ^e
珍珠	3.66±0.02 ^c	17.43±0.42 ^{bcd}	110.56±2.58 ^b
紫罗兰	3.74±0.01 ^b	16.67±0.34 ^d	106.33±5.33 ^b

注:表中数据为平均值±标准偏差;同一列小写英文字母上标不同表示均值之间存在显著性差异($P<0.05$)。

紫薯面团的发酵能力反映其持气率的高低,与酵母菌的生长情况密切相关。紫薯面团发酵过程中,酵母菌和乳酸菌共同作用,淀粉水解成单糖,酵母菌主

要利用单糖,转化成醇、醛、酯等香气成分,同时释放 CO₂ 和水,CO₂ 可支撑面团蓬松稳定的结构。8 种紫薯面团发酵能力在 54.26%~117.96%之间,其中凌紫紫薯面团发酵能力最高,为 117.96%,该紫薯面团内部结构较为蓬松多孔,济黑二号紫薯面团发酵能力最低,为 54.26%,该紫薯面团内部结构较为紧实。紫薯面团在较高酸度条件下,支撑馒头结构的面筋蛋白会在一定程度上发生水解,弱化面筋网络结构,影响了紫薯面团的持气性^[21]。

2.2 不同品种紫薯粉对紫薯馒头活性成分含量的影响

2.2.1 不同品种紫薯粉对紫薯馒头总酚含量的影响

不同品种紫薯粉对紫薯馒头总酚含量的影响结果见图 1。由图 1 可知,8 种紫薯馒头总酚含量在 38.47~132.99 mg GAE/100 g 之间,并存在明显差异,其中泰紫薯 1 号和济黑二号紫薯馒头总酚含量较高,分别为 132.99 和 131.68 mg GAE/100 g,而渝紫 263 和珍珠紫薯馒头总酚含量较低。Zhu 等^[8]也检测到酵母粉发酵制备紫薯馒头(紫薯粉占混合粉质量的 30%)中总酚含量为 82 mg GAE/100 g,而纯小麦馒头总酚含量仅为 22 mg GAE/100 g,说明紫薯馒头中酚酸大部分来自紫薯粉。有研究表明,紫薯经过黑曲霉等真菌发酵后,总酚含量提高,原因可能是酚酸结构中羟基或羧基通常以酯化形式存在,在酶的作用下,酚酸被释放出来^[5]。从总酚含量来看,泰紫薯 1 号和济黑二号是适合制备降尿酸紫薯馒头的紫薯粉品种。

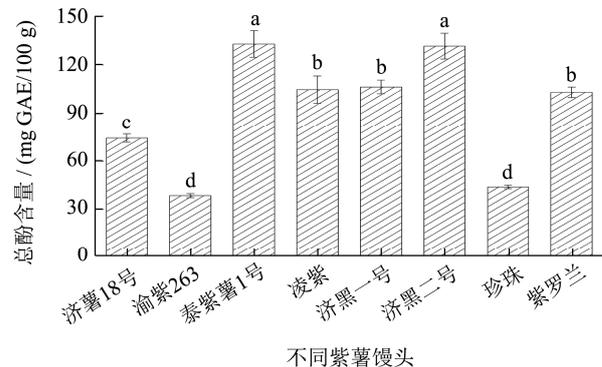


图 1 不同品种紫薯粉对紫薯馒头总酚含量的影响
Fig.1 Effects of different varieties of purple sweet potato powder on total phenolic content of purple sweet potato steamed bread

注:小写英文字母上标不同表示数值之间存在显著性差异($P<0.05$)。下图同。

2.2.2 不同品种紫薯粉对紫薯馒头总黄酮含量的影响

不同品种紫薯粉对紫薯馒头总黄酮含量的影响结果见图 2。由图 2 可知, 8 种紫薯馒头总黄酮含量在 23.21~195.70 mg RE/100 g 之间, 并存在明显差异 ($P<0.05$), 济黑一号和济黑二号紫薯馒头总黄酮含量较高, 分别为 195.70 和 126.02 mg RE/100 g, 可能是因为这两种紫薯粉中总黄酮含量较高。徐柯等^[22]检测得到渝紫 3 号和渝紫 7 号等 6 种紫薯块根中总黄酮含量为 321~839 mg/100 g (以干质量计), 高于本研究中紫薯馒头总黄酮含量, 可能是因为紫薯粉中黄酮类物质在发酵和蒸制过程中被降解。有研究发现, 经过黑曲霉等真菌发酵后, 紫薯总黄酮含量显著降低, 可能是因为部分黄酮在酶的作用下发生了转化, 对呈色反应起关键作用的邻苯二酚结构被破坏^[5]。从总黄酮含量来看, 济黑一号和济黑二号是适合制备降尿酸紫薯馒头的紫薯粉品种。

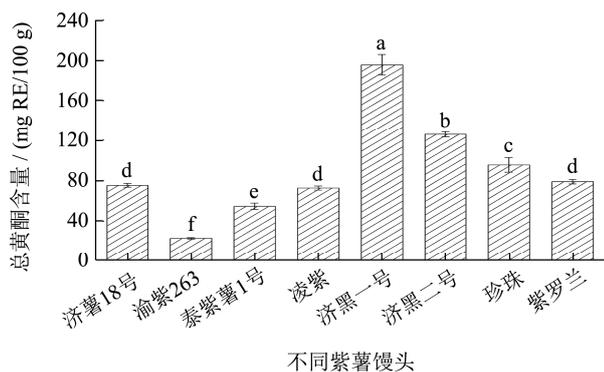


图 2 不同品种紫薯粉对紫薯馒头总黄酮含量的影响
Fig.2 Effects of different varieties of purple sweet potato powder on total flavonoid content of purple sweet potato steamed bread

2.2.3 不同品种紫薯粉对紫薯馒头总花色苷含量的影响

花色苷是水溶性色素, 不稳定, 不同品种紫薯中花色苷含量与组分各不相同, 且以酰基化形式存在^[9]。不同品种紫薯粉对紫薯馒头总花色苷含量的影响结果见图 3。由图 3 可知, 8 种紫薯馒头总花色苷含量在 0.05~2.16 mg C3G/100 g 之间, 并存在显著性差异 ($P<0.05$)。济黑一号和济黑二号紫薯馒头总花色苷含量较高, 分别为 2.16 和 2.01 mg C3G/100 g, 可能是因为这两种紫薯粉中总花色苷含量较高; 而济薯 18 号和渝紫 263 紫薯馒头总花色苷含量较低。王洪云等^[23]检测得到凌紫和渝紫 263 紫薯粉中总花色苷含量分别为 18.52 和 4.69 mg/100 g, 高于本研究中对应紫薯馒头总花色苷含量, 可能是由于发酵和蒸制过程都会引起紫薯花色苷的降解。袁江月等^[24]从紫薯中鉴定

出 8 种花色苷, 发现它们在发酵后含量明显降低。Hong 等^[25]从紫薯中鉴定出 6 种花色苷, 为酰化的矢车菊素和芍药素, 紫薯在 120 °C 蒸制 40 min 后, 这些花色苷含量显著降低。Zhu 等^[8]检测得到酵母粉发酵紫薯馒头 (紫薯粉与小麦粉质量比 3:7) 中总花色苷含量为 18 mg/100 g, 高于本研究中检测到的花色苷含量, 这可能与紫薯粉品种与发酵剂的差异有关。从总花色苷含量来看, 济黑一号和济黑二号是适合制备降尿酸紫薯馒头的紫薯粉品种。

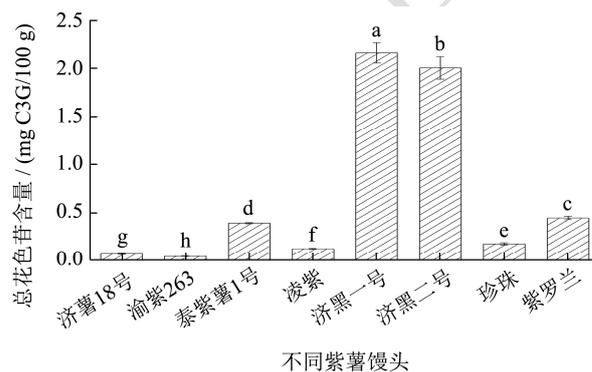


图 3 不同品种紫薯粉对紫薯馒头总花色苷含量的影响
Fig.3 Effects of different varieties of purple sweet potato powder on total anthocyanin content of purple sweet potato steamed bread

2.3 不同品种紫薯粉对紫薯馒头黄嘌呤氧化酶抑制活性的影响

高尿酸血症是由于机体长期嘌呤代谢紊乱引起的代谢性疾病, 黄嘌呤氧化酶是参与嘌呤代谢的关键酶, 降低黄嘌呤氧化酶活性可以有效减少尿酸的生成。有研究报道紫薯双酰化花色苷组分黄嘌呤氧化酶活性的 IC₅₀ 值为 0.595 mg/mL^[26]。不同品种紫薯粉对紫薯馒头黄嘌呤氧化酶抑制活性的影响结果见图 4。由图 4 可知, 8 种紫薯馒头黄嘌呤氧化酶抑制活性在 5.39~11.93 μmol AE/100 g 之间, 且存在一定差异, 强弱顺序依次为: 济黑一号>凌紫>济薯 18 号>珍珠>紫罗兰>渝紫 263>济黑二号>泰紫薯 1 号, 济黑一号和凌紫紫薯馒头黄嘌呤氧化酶抑制活性较高, 分别为 11.93 和 8.35 μmol AE/100 g, 说明这两种紫薯馒头具有较强的体外降尿酸能力。济黑一号紫薯馒头具有最高含量的总黄酮和总花色苷, 较高含量的总酚, 可能是由于这些活性成分贡献了该紫薯馒头较强的黄嘌呤氧化酶抑制活性。凌紫紫薯馒头具有较高含量的总酚, 黄酮含量处于中等水平, 花色苷含量较低, 其较强的黄嘌呤氧化酶抑制活性可能是由于某些活性组分虽然含量不高, 但是黄嘌呤氧化酶抑制活性较强, 或者这

些活性组分之间存在协同增效作用。从黄嘌呤氧化酶抑制活性来看,济黑一号和凌紫是适合制备降尿酸紫薯馒头的紫薯粉品种。

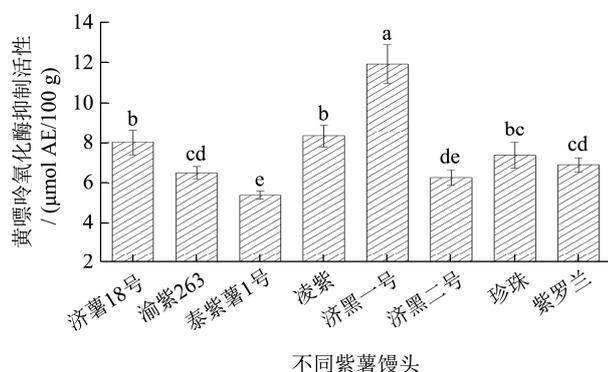


图4 不同品种紫薯粉对紫薯馒头黄嘌呤氧化酶抑制活性的影响

Fig.4 Effects of different varieties of purple sweet potato powder on xanthine oxidase inhibitory activity of purple sweet potato steamed bread

2.4 不同品种紫薯粉对紫薯馒头抗氧化活性的影响

黄嘌呤氧化酶在催化尿酸生成反应的同时,会产生部分活性氧,过量活性氧会导致机体的氧化应激反应,甚至引起炎症病变。很多酚酸、黄酮和花色苷类物质不仅具有黄嘌呤氧化酶抑制活性,还具有良好的抗氧化活性,可抑制活性氧的生成。不同品种紫薯粉对紫薯馒头超氧阴离子自由基清除活性的影响结果见图5a。由图5a可知,8种紫薯馒头超氧阴离子自由基清除活性在7.56~29.07 mmol TE/100 g之间,且存在一定差异,济黑一号和珍珠紫薯馒头超氧阴离子自由基清除活性较高,分别为29.07和19.36 mmol TE/100 g,说明这两种紫薯馒头具有较强的抑制活性氧能力。还原力是基于电子转移机理的抗氧化活性评价方法,反映紫薯馒头中活性物质提供电子的能力。不同品种紫薯粉对紫薯馒头还原力的影响结果见图5b。由图5b可知,8种紫薯馒头还原力存在明显差异,在0.30~2.69 mmol VE/100 g之间,济黑一号和济黑二号紫薯馒头还原力较高,分别为2.69和1.71 mmol VE/100 g,说明这两种紫薯馒头中活性物质提供电子的能力较强。

紫薯发酵产物具有良好的抗氧化活性。王宏兹等^[27]报道了添加乳酸菌发酵紫薯粉(紫薯粉占混合粉质量的10%)的小麦面包具有较强的抗氧化活性,其提取液DPPH自由基清除率达60%以上。Zhu等^[8]检测得到酵母粉发酵制备紫薯馒头(紫薯粉添加量为混合粉的30%)的还原力为270 μmol TE/100 g。紫薯馒头中酚酸、黄酮和花色苷组分是良好的抗氧化剂,济

黑一号紫薯馒头中较高含量的总酚、最高含量的总黄酮和总花色苷可能是其具有最强超氧阴离子自由基清除活性与还原力的原因。从抗氧化活性分析,济黑一号是适合制备功能性紫薯馒头的紫薯粉品种。

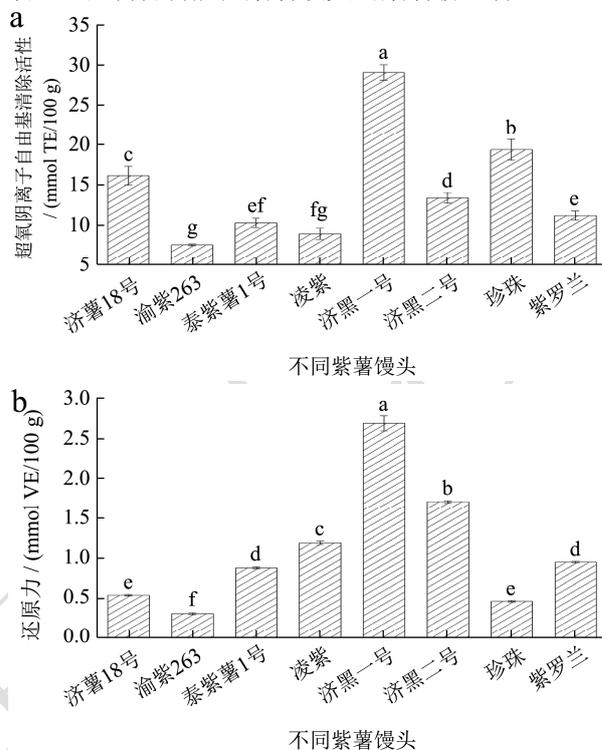


图5 不同品种紫薯粉对紫薯馒头抗氧化活性的影响

Fig.5 Effects of different varieties of purple sweet potato powder on the antioxidant activity of purple sweet potato steamed bread

2.5 紫薯馒头活性成分含量、黄嘌呤氧化酶抑制活性与抗氧化活性之间的相关性

对8种紫薯馒头活性成分含量、黄嘌呤氧化酶抑制活性与抗氧化活性进行相关性分析,结果见表3。由表3可知,紫薯馒头总黄酮含量与黄嘌呤氧化酶抑制活性呈显著正相关($P<0.05$),与超氧阴离子自由基清除活性和还原力呈极显著正相关($P<0.01$);紫薯馒头总花色苷含量与黄嘌呤氧化酶抑制活性和超氧阴离子自由基清除活性呈正相关,与还原力呈极显著正相关($P<0.01$);紫薯馒头总酚含量与还原力呈正相关。说明总黄酮含量对紫薯馒头黄嘌呤氧化酶抑制活性、超氧阴离子自由基清除活性和还原力具有较大影响,总花色苷含量对紫薯馒头黄嘌呤氧化酶抑制活性具有一定影响,总酚含量对紫薯馒头还原力具有一定影响。总黄酮和总花色苷含量的不同是8种紫薯馒头黄嘌呤氧化酶抑制活性、超氧阴离子自由基清除活性和还原力存在差异的主要原因。

表 3 紫薯馒头活性成分含量、黄嘌呤氧化酶抑制活性与抗氧化活性之间的相关性

Table 3 Correlation among contents of active components, xanthine oxidase inhibitory activity and antioxidant activity of purple sweet potato steamed bread

指标	总酚含量	总黄酮含量	总花色苷含量	黄嘌呤氧化酶抑制活性	超氧阴离子自由基清除活性	还原力
总酚含量	1	0.359	0.542	-0.035	-0.002	0.604
总黄酮含量		1	0.861**	0.756*	0.879**	0.895**
总花色苷含量			1	0.453	0.603	0.904**
黄嘌呤氧化酶抑制活性				1	0.804*	0.681
超氧阴离子自由基清除活性					1	0.641
还原力						1

注: *表示显著相关 ($P<0.05$), **表示极显著相关 ($P<0.01$)。

2.6 不同品种紫薯粉对紫薯馒头色度的影响

色度是评价紫薯馒头外观品质的重要指标。不同品种紫薯粉对紫薯馒头色度的影响结果见表 4。由表 4 可知, 8 种紫薯馒头色度存在一定差异, L^* 值在 26.99~37.65 之间, 渝紫 263 和泰紫薯 1 号紫薯馒头 L^* 值较高, 分别为 36.63 和 37.65, 说明这两种紫薯馒头色泽较浅, 较为明亮, 而济黑一号紫薯馒头因其花色苷含量较高, 色泽较深, L^* 值较低。紫薯馒头 a^* 值和 b^* 值与花色苷的构型相关, pH 值较低时, 花色苷主要以黄烺盐阳离子形式存在, 呈红色, 而 pH 较高时, 花色苷主要以醌型碱形式存在, 呈蓝色^[28]。8 种紫薯馒头 a^* 值在 6.90~16.58 之间, 渝紫 263 紫薯馒头的 a^* 值最大, 为 16.58, 可能是由于该紫薯面团 pH 值较低, 使该紫薯馒头色泽偏红。8 种紫薯馒头 b^* 值在 1.77~12.83 范围内, 存在较大差异, 其中泰紫薯一号紫薯馒头 b^* 值较大, 为 12.83, 其色泽也偏蓝紫色。从色泽来看, 泰紫薯 1 号和渝紫 263 紫薯馒头亮度较高, 红绿值和黄蓝值较大, 是适合制备紫薯馒头的紫薯粉品种。

表 4 不同品种紫薯粉对紫薯馒头色度的影响

Table 4 Effects of different varieties of purple sweet potato flour on the colour of purple sweet potato steamed bread

紫薯粉品种	L^*	a^*	b^*
济薯 18 号	29.59±2.56 ^d	9.12±0.69 ^c	2.63±0.44 ^d
渝紫 263	36.63±3.04 ^a	16.58±1.42 ^a	7.03±0.97 ^c
泰紫薯 1 号	37.65±2.14 ^a	15.43±0.85 ^b	12.83±1.32 ^a
凌紫	31.99±1.50 ^c	15.30±0.96 ^b	6.44±0.40 ^c
济黑一号	26.99±2.06 ^e	6.90±0.71 ^d	2.04±0.88 ^{de}
济黑二号	27.68±2.10 ^{de}	7.12±1.54 ^d	1.77±0.75 ^e
珍珠	34.49±1.49 ^b	14.87±0.81 ^b	8.18±0.79 ^b
紫罗兰	28.47±0.83 ^{de}	8.24±0.53 ^c	1.90±0.31 ^{de}

注: 表中数据为平均值±标准偏差; 同一列小写英文字母上标不同表示均值之间存在显著性差异 ($P<0.05$)。

2.7 不同品种紫薯粉对紫薯馒头感官品质的影响

感官品质是评价紫薯馒头综合品质优劣的重要指标。不同紫薯粉对紫薯馒头感官品质的影响结果见图 6。由图 6 可知, 8 种紫薯馒头感官评分在 78.08~88.22 之间, 感官品质存在一定差异, 济黑二号和济黑一号紫薯馒头感官评分较高, 分别为 88.22 和 86.56, 说明这两种紫薯馒头感官品质较为优良, 色泽鲜艳, 组织状态均匀, 风味芳香浓郁, 口感软硬适中, 更适合消费者食用。从感官品质来看, 济黑一号和济黑二号是适合制备紫薯馒头的紫薯粉品种。

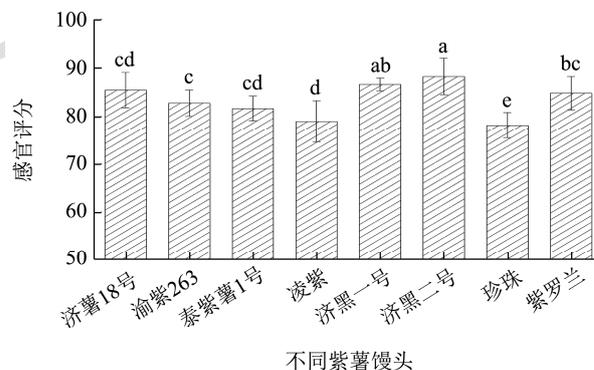


图 6 不同品种紫薯粉对紫薯馒头感官品质的影响

Fig.6 Effects of different varieties of purple sweet potato powder on the sensory quality of purple sweet potato steamed bread

3 结论

本研究选取济薯 18 号和渝紫 263 等 8 种紫薯粉, 对比了不同品种紫薯粉制备紫薯面团的 pH 值、TTA 值与发酵能力, 考察了不同品种紫薯粉对紫薯馒头活性成分含量、黄嘌呤氧化酶抑制活性、抗氧化活性以及感官品质的影响, 发现不同品种紫薯粉制备紫薯馒头总酚、总黄酮和总花色苷含量、黄嘌呤氧化酶抑制

活性、超氧阴离子自由基清除活性、还原力与感官评分之间存在明显差异, 8 种紫薯馒头总酚含量为 38.47~132.99 mg GAE/100 g, 总黄酮含量为 23.21~195.70 mg RE/100 g, 总花色苷含量为 0.05~2.16 mg C3G/100 g, 黄嘌呤氧化酶抑制活性为 5.39~11.93 $\mu\text{mol AE}/100\text{ g}$, 超氧阴离子自由基清除活性为 7.56~29.07 mmol TE/100 g, 还原力为 0.30~2.69 mmol VE/100 g, 感官评分为 78.08~88.22。其中济黑一号紫薯馒头总黄酮和总花色苷含量、黄嘌呤氧化酶抑制活性、超氧阴离子自由基清除活性和还原力均显著高于其它 7 种紫薯馒头 ($P<0.05$)。相关性分析表明, 总黄酮和总花色苷是造成不同紫薯馒头黄嘌呤氧化酶抑制活性、超氧阴离子自由基清除活性和还原力存在差异的主要原因。济黑一号与济黑二号紫薯馒头感官评分相对较高。因此济黑一号紫薯馒头综合品质最优, 济黑一号紫薯粉适用于降尿酸紫薯馒头的开发。本研究阐明了紫薯馒头活性成分含量与黄嘌呤氧化酶抑制活性和抗氧化活性之间的内在联系, 并筛选出适用于降尿酸紫薯馒头开发的紫薯粉品种, 为紫薯馒头降尿酸活性的深入研究以及功能性紫薯馒头的开发与工业化生产提供理论依据。

参考文献

- [1] 张子程.紫薯花色苷干预尿酸代谢异常的分子机制研究[D].武汉:华中农业大学,2019.
- [2] Jiang T, Ye S, Liao W, et al. The botanical profile, phytochemistry, biological activities and protected-delivery systems for purple sweet potato (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.): An up-to-date review [J]. Food Research International, 2022, 161: 111811.
- [3] Zhao J G, Yan Q Q, Lu L Z, et al. *In vivo* antioxidant, hypoglycemic, and anti-tumor activities of anthocyanin extracts from purple sweet potato [J]. Nutrition Research and Practice, 2013, 7(5): 359-365.
- [4] 余洁.乳酸菌发酵对紫薯花青素抗氧化及抗衰老活性的影响[D].重庆:西南大学,2021.
- [5] 郭孝萱,柳嘉,陆雪娇,等.紫薯发酵前后总酚、总黄酮、花色苷、抗氧化性和抗癌作用比较[J].中国食品学报,2017,17(3): 289-295.
- [6] Lin L, Yang Q, Zhao K, et al. Identification of the free phenolic profile of Adlay bran by UPLC-QTOF-MS/MS and inhibitory mechanisms of phenolic acids against xanthine oxidase [J]. Food Chemistry, 2018, 253: 108-118.
- [7] 张焕仕,张鹤云,宰学明,等.三种互花米草天然化合物降尿酸作用研究[J].中国野生植物资源,2019,38(3):9-12.
- [8] Zhu F, Sun J. Physicochemical and sensory properties of steamed bread fortified with purple sweet potato flour [J]. Food Bioscience, 2019, 30: 100411.
- [9] 张毅,孔秀林,王洪云,等.不同品种紫甘薯花色苷含量与组分分析[J].江苏师范大学学报(自然科学版),2019,37(2):26-30.
- [10] 黄彪,韦航,李国良,等.不同品种紫薯抗氧化物质及体外抗氧化活性比较[J].食品工业科技,2020,41(24):226-231.
- [11] Xing X, Suo B, Yang Y, et al. Application of lactobacillus as adjunct cultures in wheat dough fermentation [J]. Journal of Food Science, 2019, 84(4): 842-847.
- [12] Wang X, Zhao R, Yuan W. Type I sourdough steamed bread made by retarded sponge-dough method [J]. Food Chemistry, 2020, 311: 126021-126029.
- [13] 孙溪,刘海晴,张军,等.高表达 MAL62 基因对面包酵母耐高糖的影响[J].食品与发酵工业,2021,47(1):8-13.
- [14] Lu X, Huang Q. Nano/submicrometer milled red rice particles-stabilized pickering emulsions and their antioxidative properties [J]. Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68: 292-300.
- [15] Peng A, Lin L, Zhao M, et al. Identifying mechanisms underlying the amelioration effect of *Chrysanthemum morifolium* Ramat. 'Boju' extract on hyperuricemia using biochemical characterization and UPLC-ESI-QTOF/MS-based metabolomics [J]. Food & Function, 2019, 10(12): 8042-8055.
- [16] 杨清韵.薏苡仁麸皮游离型多酚分离纯化、结构鉴定及抗氧化作用机制研究[D].广州:华南理工大学,2017.
- [17] Zheng L, Zhao Y, Dong H, et al. Structure-activity relationship of antioxidant dipeptides: Dominant role of Tyr, Trp, Cys and Met residues [J]. Journal of Functional Foods, 2016, 21: 485-496.
- [18] Zhu F. Influence of ingredients and chemical components on the quality of Chinese steamed bread [J]. Food Chemistry, 2014, 163: 154-162.
- [19] 龚云霞,齐小保.检测不同菌群发酵产生有机酸种类与含量[J].食品工业,2020,41(7):174-178.
- [20] Guo K, Liu T, Xu A, et al. Structural and functional properties of starches from root tubers of white, yellow, and purple sweet potatoes [J]. Food Hydrocolloids, 2019, 89: 829-836.
- [21] 钟京,王凤,刘娜,等.乳酸菌发酵麸皮面团对高纤维面包面团流变发酵学及烘焙特性的影响[J].食品工业科技,2013, 34(9):49-54.
- [22] 徐柯,曾凡坤,袁美,等.红薯叶、紫薯块根及不同时期紫薯叶中主要活性成分含量比较[J].食品与机械,2018,34(6):30-34.
- [23] 王洪云,张毅,孔秀林,等.紫甘薯花色苷体内外抗氧化能力研

- 究[J].江苏师范大学学报(自然科学版),2019,37(4):32-36,48.
- [24] 袁江月,何佳,孙军杰,等.UPLC-MS/MS 分析紫薯酒发酵前后花色苷种类和含量变化[J].食品与机械,2021,37(6):56-61, 68.
- [25] Hong K H, Koh E. Effects of cooking methods on anthocyanins and total phenolics in purple-fleshed sweet potato [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2016, 40(5): 1054-1063.
- [26] Yang Y, Zhang Z, Zhou Q, et al. Hypouricemic effect in hyperuricemic mice and xanthine oxidase inhibitory mechanism of dietary anthocyanins from purple sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) [J]. Journal of Functional Foods, 2020, 73: 104151.
- [27] 王宏兹,王凤,黄卫宁,等.植物乳杆菌发酵紫薯粉对酸面团面包的抗氧化特性及品质影响[J].食品科学,2012,33(13): 40-44.
- [28] 张永祥.紫薯花色苷分离纯化,结构鉴定及其抗氧化活性研究[D].秦皇岛:河北科技师范学院,2016.