

紫米粉和羊肚菌粉添加对面团及面包品质的影响

章宇悦, 余虹达, 陈柯君, 程桂广, 张基亮, SOTEYOMETHanapop

Effects of Purple Rice and *Morchella esculenta* Powder Substitution on the Quality of Dough and Bread

QIN Yuyue, YU Hongda, CHEN Kejun, CHENG Guiguang, ZHANG Jiliang, and SOTEYOME Thanapop

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024020188>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

糜米粉对面团特性及面包品质的影响

Effect of Proso Millet Flour on Properties of Dough and Quality of Bread

食品工业科技. 2019, 40(9): 44-48,56 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.09.009>

紫淮山全粉对面团流变特性及面条质构特性的影响

Effect of Purple Yam Flour on Rheological Properties of Dough and Texture Attributions of Noodles

食品工业科技. 2019, 40(2): 41-46 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.02.008>

无果枸杞叶粉对小麦面团流变特性及面包品质的影响

Effects of the Leaf Powder of Fruitless Wolfberry Tree on the Rheological Behavior of Dough and Qualities of Bread

食品工业科技. 2021, 42(13): 88-94 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020100006>

红枣粉添加量对面团特性及馒头品质的影响

Effect of Jujube Powder Addition on Dough Characteristics and Steamed Bread Quality

食品工业科技. 2021, 42(5): 177-181,187 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020050352>

不同品种紫薯粉面团品质特性

Quality Characteristics of Different Varieties of Purple Sweet Potato Flour Dough

食品工业科技. 2021, 42(2): 12-18,25 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020040126>

黄秋葵粉对面团和面包质构特性的影响

Effect of Okra Powder on Texture Properties of Dough and Bread

食品工业科技. 2019, 40(3): 20-24 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.03.004>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

覃宇悦, 余虹达, 陈柯君, 等. 紫米粉和羊肚菌粉添加对面团及面包品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(4): 42–49. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024020188

QIN Yuyue, YU Hongda, CHEN Kejun, et al. Effects of Purple Rice and *Morchella esculenta* Powder Substitution on the Quality of Dough and Bread[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(4): 42–49. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024020188

· 研究与探讨 ·

紫米粉和羊肚菌粉添加对面团及面包品质的影响

覃宇悦^{1,2}, 余虹达¹, 陈柯君¹, 程桂广¹, 张基亮^{1,*}, SOTEYOME Thanapop^{3,*}

(1.昆明理工大学食品科学与工程学院, 云南昆明 650550;

2.昆明理工大学绿色食品加工国际联合实验室, 云南昆明 650550;

3.Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Thailand Bangkok 10300)

摘要: 为了满足人们对面包产品多样化、功能化的需求, 通过添加不同比例紫米粉 (0、3%、6%、9% 和 12%) 和羊肚菌粉 (0 和 3%) 替代小麦面粉用于制作面包, 测定了面团流变学特性、膳食纤维含量、面包焙烤特性、淀粉体外消化能力以及风味物质含量。结果表明: 紫米粉和羊肚菌粉的添加改善了面团的流变特性, 面团的储存模量和损耗模量随之上升, $\tan\delta$ 值缓慢下降。紫米粉和羊肚菌粉的添加显著 ($P<0.05$) 提高了面包膳食纤维含量, 却使比容、弹性和凝聚力下降, 硬度和咀嚼性显著 ($P<0.05$) 增大。当 3% 羊肚菌粉替代量不变, 紫米粉从 0 增加到 12%, 面包皮和面包芯的 L^* 值逐渐下降, ΔE 逐渐增加, 颜色偏暗。此外, 添加紫米粉和羊肚菌粉可以有效降低面包的淀粉水解率。电子鼻测定结果表明, 紫米羊肚菌面包的风味物质主要为醇类、芳香类、脂肪烃类和酯类, 面包风味丰富。因此, 使用适量紫米粉和羊肚菌粉替代小麦粉, 有效提高了面包品质和特性, 为功能型面包的开发提供有益参考。

关键词: 紫米粉, 羊肚菌粉, 面团, 流变学特性, 面包品质, 体外消化特性

中图分类号: Q949.9

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)04-0042-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024020188



本文网刊:

Effects of Purple Rice and *Morchella esculenta* Powder Substitution on the Quality of Dough and Bread

QIN Yuyue^{1,2}, YU Hongda¹, CHEN Kejun¹, CHENG Guiguang¹, ZHANG Jiliang^{1,*}, SOTEYOME Thanapop^{3,*}

(1. Faculty of Food Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650550, China;

2. Yunnan International Joint Laboratory of Green Food Processing, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650550, China;

3. Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Bangkok 10300, Thailand)

Abstract: In order to meet people's demand for diversified and functional bread products, the effects of wheat flour substituted with purple rice (0, 3%, 6%, 9%, and 12%) and *Morchella esculenta* (0 and 3%) powder on the rheological behavior of dough, dietary fiber content, baking attributes of bread, starch digestibility *in vitro*, and volatile flavor compounds were investigated. The results indicated that the substitution of purple rice and *Morchella esculenta* powder enhanced the storage modulus and loss modulus of dough, while the $\tan\delta$ value exhibited a gradual decline. Substitution of purple rice and *Morchella esculenta* powder elevated the dietary fiber content of bread, while decreasing the specific

收稿日期: 2024-02-23

基金项目: 云南省科技厅重大专项子课题 (202202AG050009-3); 国家自然科学基金项目 (22268024, 32060569); 云南省外国人才引进专项项目 (202305AO350021)。

作者简介: 覃宇悦 (1973–), 女, 博士, 教授, 研究方向: 食用菌资源的加工与利用, E-mail: rabbqy@163.com。

* 通信作者: 张基亮 (1983–), 男, 博士, 讲师, 研究方向: 乳酸菌及乳制品研究, E-mail: zhangjl2348@163.com。

SOTEYOME Thanapop (1980–), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品微生物, E-mail: thanapop.s@rmutp.ac.th。

volume, elasticity, and cohesion of bread, and significantly ($P<0.05$) increasing the hardness and chewiness of bread. When the *Morchella esculenta* powder substitution content maintained was 3%, the content of purple rice powder was in the range from 0 to 12%, the L^* value of bread crust and crumb gradually decreased and the ΔE value gradually increased, resulting in a darker color when compared to control group. The substitution of purple rice and *Morchella esculenta* powder decelerated the starch hydrolysis rate of bread. The electronic nose test revealed that the flavor substances were mainly alcohols, aromatics, aliphatic hydrocarbons, and esters, and the bread was rich in flavor. Therefore, the appropriate partial substitution with purple rice and *Morchella esculenta* powder could effectively improve the quality and characteristics of bread, and provided a useful reference for the development of functional bread.

Key words: purple rice powder; *Morchella esculenta* powder; dough; rheological property; bread quality; *in vitro* digestion characteristics

面包在世界主食的消费量占有举足轻重的地位。随着新冠疫情的结束,消费者不仅注重食物的风味和口感,同时更加关注食物的营养价值。近年来,为了满足消费者对面包产品多样化、功能化的需求,一些新的面包配方和/或新的生产策略已经被开发出来^[1-3]。例如,添加富含多酚的枸杞来替代部分小麦粉可以提高面包的消化率,从而制得低血糖指数(GI)产品^[2];添加莲原花青素,起到膳食补充抗氧化以及延缓淀粉消化的效果^[3]。

近年来,有色米的种植和消费正不断增长,尤其是东南亚国家。紫米又称“紫珍珠”,盛产于云南省墨江县,与普通大米相比,紫米富含必需氨基酸、膳食纤维和花青素等多种营养成分^[4-5]。基于花青素多酚类物质的抗氧化作用,紫米具有很强的活性氧自由基、DPPH 自由基和羟自由基的清除能力^[6-8]。此外,紫米还有滋阴补肾、健脾暖肝及明目活血等作用。同时,来源于紫米种皮的花青素着色力强,能够赋予烘焙类食品令人愉悦的色泽。Klunklin 等^[9]用紫米粉制作饼干,发现全紫米粉饼干的活性成分含量最高、预测血糖指数(pGI)最低,但是感官品质急剧下降,综合考虑以 50% 紫米粉替代量最佳。

羊肚菌(*Morchella esculenta*)属于子囊菌亚门盘菌纲,具有肉质鲜嫩、香气浓郁等特点,是一种广受消费者喜爱的食用菌^[10]。除富含氨基酸、蛋白质、多糖、矿物质和维生素等营养物质外,还具有一定的功能性质,其含有的多酚类抗氧化活性物质,能够起到增强免疫、抗氧化、抗炎和抗癌等生理功能^[11-13]。此外,羊肚菌由于其独特、鲜美的风味,可以在食品加工中起到增香作用^[14]。陈东琪等^[13]以羊肚菌/小麦面粉(11 g/50 g)制作得到的饼干,不仅保留了羊肚菌原有的功能与营养成分,而且色泽均匀,香味协调。

基于有色米和食用菌的生物活性不断得到验证,可以作为原料应用于功能食品中^[9,13]。但是,将紫米和羊肚菌同时应用于主食面包制作鲜见报道。本实验以一定比例紫米粉和羊肚菌粉替代小麦面粉制作面包,以原味面包为对照样品,分析紫米粉和羊肚菌粉对面团的流变学特性、面包焙烤特性、风味物质及淀粉体外消化能力,以期对紫米羊肚菌面包的制作

工艺参数优化及创新工艺提供一定的技术支持。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

高筋小麦面粉 金像面粉厂(蛋白质 13.5%±0.5%,灰分 0.48%±0.05%);紫米 云南省普洱市墨江县农贸市场;羊肚菌 云南省昆明市农贸市场;安佳黄油 新西兰恒天然集团有限公司;高活性即发干酵母 乐斯福有限公司;白砂糖、食盐和鸡蛋 市售;1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH)、2,2'-联氮-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸二铵盐(ABTS)抗氧化试剂 阿拉丁试剂(上海)有限公司;其他试剂均为国产分析纯。

WK-150 粉碎机(200 目) 青州市精诚医药装备制造有限公司;MUMS2EW00C 厨师机 博世机械有限公司;SMF-32B 醒发箱 无锡胜麦机械有限公司;C40 海氏烤箱 深圳海氏烘焙电器有限公司;TA.XT Plus 质构仪 英国 Stable Micro Systems 公司;MCR102e 模块化智能流变仪 美国安东帕有限公司;CR-400 色差仪 日本 Konica Minolta 公司;TU 1901 分光光度计 北京普析仪器公司;C-Nose 电子鼻 上海保圣实业发展有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 紫米粉和羊肚菌粉的制作 将紫米和羊肚菌干燥后,进行粉碎,室温下密封保存;参照刘松韬等^[15]的方法稍作修改制作面包,按一定比例将紫米粉(0、3%、6%、9% 和 12%)、羊肚菌粉(0 和 3%)替代小麦面粉,面包配方如表 1 所示。

表 1 面包配方

Table 1 Ingredient of bread

成分(g)	对照样	M3	P3	M3P3	M3P6	M3P9	M3P12
小麦面粉	220	213.4	213.4	206.8	200.2	193.6	187.0
紫米粉	0	0	6.6	6.6	13.2	19.8	26.4
羊肚菌粉	0	6.6	0	6.6	6.6	6.6	6.6
鸡蛋	15	15	15	15	15	15	15
水	120	120	120	120	120	120	120
盐	1	1	1	1	1	1	1
糖	30	30	30	30	30	30	30
酵母	4	4	4	4	4	4	4
黄油	20	20	20	20	20	20	20

1.2.2 面团的动态流变学特性 根据 Cappelli 等^[16]的方法略微修改,采用流变仪测定使用上述方法制得面团的动态流变学特性。取 10 g 面团样品,置于流变仪的平板和压板之间,去除压板边缘的面团,并在样品边缘涂上硅脂,以避免样品水分流失。测试前,将样品松弛 5 min,恒定频率(1 Hz)下进行 0.1%~100% 应变力扫描测试,确定线性粘弹性区域(LVE-R)。在 LVER 区域内进行恒定剪切应力扫频测试,记录储能模量(G'),损耗模量(G'')和损耗系数($\tan\delta$)。实验至少重复 5 次。

1.2.3 膳食纤维含量的测定 参照 GB/T 5009.88-2023《食品安全国家标准 食品中膳食纤维的测定》,对小麦粉、紫米粉、羊肚菌粉和面包的膳食纤维含量测定。重复测定 3 次,取平均值。

1.2.4 比容测定 面包比容测定参照 GB/T 14611-2008《粮油检验 小麦粉面包烘焙品质试验 直接发酵法》,采用菜籽置换法。重复测定 3 次,取平均值。

1.2.5 质构测定 采用质构仪测定面包的咀嚼性、硬度、弹性、粘合性和内聚性等特性。实验参数:选择 P/36R 探头;运行速度:测试前、中和后分别为 1.0、5.0 和 5.0 mm/s;形变程度为 50%;触发力 8 g^[17]。重复测定 6 次,取平均值。

1.2.6 色差测定 面包皮和面包芯的 L^* (亮度值)、 a^* (红绿值)、 b^* (黄蓝值)来表示其色泽变化(L 、 a 和 b 值分别代表了初始值),直接采用色差仪进行测定^[1],色差值 ΔE 按以下公式(1)进行计算。重复测定 6 次,取平均值。

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L)^2 + (a^* - a)^2 + (b^* - b)^2} \quad \text{式 (1)}$$

1.2.7 感官评价 感官评定小组成员来自于昆明理工大学食品科学与工程学院研究生,为有经验型感官评定人员 16 人,对紫米羊肚菌面包进行感官评定^[18]。参照 GB/T 20981-2021《面包质量通则》,评分标准如下:色泽(15 分):金黄色至褐色,色泽均匀;形态(15 分):外观完整、丰满、表面平滑、无凹陷和形态对称;面包芯质地(20 分):柔软且富有弹性,切面细腻;面包纹理结构(20 分):气孔均匀细腻,孔壁薄;口感(30 分):具有面包麦香味、略带食用菌香气、紫米粉香甜味、松软适口、不粘牙以及无异味。

1.2.8 体外消化特性的测定 称取 0.5 g 的紫米羊肚菌面包样品,参照 Liu 等^[18]的方法,采用 3,5-二硝基水杨酸法,测定葡萄糖含量,从而反映面包的体外消化特性。

1.2.9 电子鼻气味测定 每组样品取 10 g,置于 40 mL 顶空瓶当中,加盖密封在室温下放置 30 min 后,用探头吸取顶空瓶顶端气体进行测量^[19]。电子鼻参数设定:固定时间间隔 1.0 s,清洗时间 120.0 s,准备进样时间 5 s,检测时间 60 s,载气流速 300 mL/min,进样流量 300 mL/min,每次测定后将通道清零

再进行第二轮的顶空进样,每组样品测定 3 次。电子鼻传感器对应的敏感物质如表 2 所示。

表 2 电子鼻传感器性能特点

Table 2 Performance characteristics of electronic nose sensor

传感器名称	主要响应物质
S1	丙烷、烟雾等
S2	酒精、烟雾、异丁烷、甲醛等
S3	氢气
S4	硫化物
S5	氨气、胺类等
S6	甲苯、丙酮、乙醇、氢气等
S7	短链烷烃类可燃性气体等
S8	液化气
S9	甲苯、甲醛、苯、酒精、丙酮等
S10	含氢气体类
S11	烷烃,一氧化碳等
S12	液化气,甲烷类
S13	短链烷烃类
S14	甲烷,燃气,烟雾等
S15	氨气,胺类等
S16	硫化氢
S17	含氢物质
S18	芳香烃类,脂肪烃类,脂环烃类,卤代烃类,醚类,酯类,二醇衍生物,乙醇,吡啶,苯酚等

1.3 数据处理

实验结果以平均值±标准差表示,采用 SPSS 19.0 软件对数据进行统计分析,通过单因素方差分析方法(One-Way ANOVA)对组间平均数进行差异比较。当 $P < 0.05$ 时,代表组间存在显著性差异。用 Origin 2022 和 GraphPad Prism 8 进行数据可视化。

2 结果与分析

2.1 面团动态流变学特性

不同紫米粉和羊肚菌粉添加量对面团动态流变学特性的影响如图 1 所示。面包面团的储能模量(G')代表弹性模量,反映的是面团整体支撑性,损耗模量(G'')代表的是黏性模量。

从图 1 可以看出,所有样品的 G' 均大于 G'' ,并且 G' 和 G'' 都随着频率的增加而上升,面团样品表现出一种弹性大于黏性的流体特性,更多的是固态特性而非液态特性,这种特性对于面团的切块、整形加工工序有积极作用^[20]。随着羊肚菌粉和紫米粉替换量的增加,面团的 G' 和 G'' 会随之上升。这说明紫米粉和羊肚菌粉的吸水能力比面筋蛋白更强,从而增加了面团的黏弹性^[21]。但是,样品 M3P6、M3P9 和 M3P12 的 G' 和 G'' 均无显著差异,这可能是由于羊肚菌粉和紫米粉对于小麦面粉的相互作用达到了饱和所导致的^[22]。

$\tan\delta = G''/G'$ 表示面团的黏弹性,与面筋蛋白弱化程度有关。 $\tan\delta$ 值越大,说明面筋蛋白趋于弱化,面团表现出流体性质。从图 1c 可以得出,随着紫米粉、羊肚菌粉的含量增加, $\tan\delta$ 值呈现缓慢下降,其

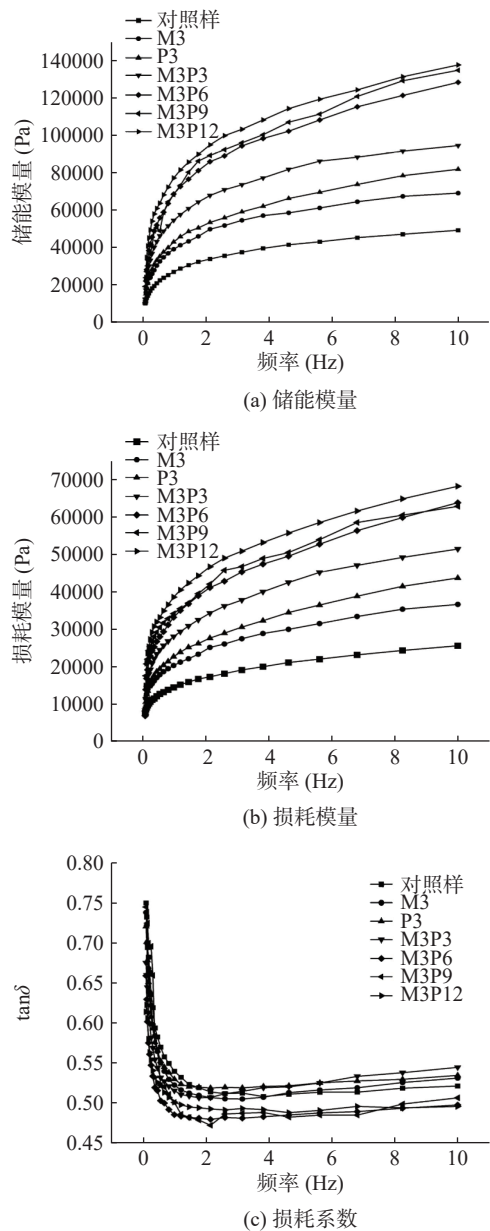


图 1 紫米羊肚菌面包面团的动态流变学特性
Fig.1 Dough rheology of bread with purple rice and morel mushroom

中, M3、P3、M3P3 样品与对照样品无显著差异, 而紫米粉添加量 6%、9%、12% 的面包面团样品, 略低于上述 4 种样品。因为紫米粉是一种糯性稻米, 随着替换量的增加, 其吸水率呈现上升趋势^[23-24]。此外, 糯性稻米一般具有高黏度, 应用于主食面包生产时, 起到了类似于增稠剂的作用, 有助于改善面包的品质^[25]。

2.2 面包膳食纤维

紫米粉和羊肚菌粉对面包膳食纤维含量的影响见表 3。从表 3 得出, 小麦面粉的总膳食纤维含量最低(2.51±0.04 g/100 g), 紫米粉和羊肚菌粉的总膳食纤维含量显著($P<0.05$)高于小麦面粉, 分别为其 3.75 倍和 15.5 倍。采用紫米粉和羊肚菌粉替代部分小麦面粉制作得到的面包, 其总膳食纤维均显著($P<0.05$)高于对照样。这可能是因为替代物的总膳食纤维含

表 3 紫米粉和羊肚菌粉对面包膳食纤维含量的影响
Table 3 Effects of purple rice and morel mushroom powder addition on the dietary fiber content of bread

样品	总膳食纤维 (g/100 g)	不溶性膳食纤维 (g/100 g)	可溶性膳食纤维 (g/100 g)
小麦面粉	2.51±0.04 ^a	1.97±0.15 ^a	0.53±0.12 ^a
紫米粉	9.40±0.04 ^b	7.05±0.04 ^c	2.36±0.05 ^b
羊肚菌粉	38.9±0.05 ^j	27.7±2.71 ^d	11.1±2.66 ^c
对照样	3.74±0.03 ^b	2.82±0.01 ^{ab}	0.92±0.03 ^a
M3	7.93±0.01 ^d	5.65±0.03 ^c	2.27±0.02 ^b
P3	5.80±0.02 ^c	3.73±0.18 ^b	2.07±0.19 ^b
M3P3	8.44±0.01 ^e	6.17±0.25 ^c	2.28±0.24 ^b
M3P6	8.63±0.01 ^f	6.36±0.12 ^c	2.27±0.13 ^b
M3P9	9.23±0.17 ^g	6.96±0.03 ^c	2.28±0.15 ^b
M3P12	9.56±0.10 ⁱ	7.27±0.14 ^c	2.29±0.12 ^b

注: 同一列数据的不同上标字母代表组间数据存在显著性差异($P<0.05$), 表 4~表 5 同。

量高于小麦面粉, 所以替代部分小麦粉之后, 提高了面包总膳食纤维含量。

同时, 紫米粉和羊肚菌粉的不溶性膳食纤维、可溶性膳食纤维含量均显著($P<0.05$)高于小麦面粉, 其中, 羊肚菌粉不溶性膳食纤维、可溶性膳食纤维含量均显著($P<0.05$)高于紫米粉, 分别为紫米粉的 3.93 倍和 4.70 倍。羊肚菌粉添加(5.65 g/100 g)对面包不溶性膳食纤维含量的影响, 强于紫米粉添加(3.73 g/100 g)。其中, 添加了紫米粉的 P3 样品, 其不溶性膳食纤维含量与对照样品无显著差异($P>0.05$), 却显著($P<0.05$)低于添加了羊肚菌粉的 M3、M3P3、M3P6、M3P9、M3P12 面包样品。添加了相同含量 3% 羊肚菌粉的 M3、M3P3、M3P6、M3P9、M3P12 面包样品, 随着紫米粉替代量不断增加至 12%, 其不溶性膳食纤维、可溶性膳食纤维含量均无显著差异($P>0.05$)。实验结果与其他采用富含膳食纤维物质, 如食用菌、水果、花粉等, 替代小麦面粉的研究结果相似^[3,18]。

2.3 面包比容和质构

紫米粉和羊肚菌粉对面包比容的影响见表 4。从表 4 得出, 对照样的比容(7.36 cm³/g)最大, 且显著高于($P<0.05$)紫米羊肚菌面包。当羊肚菌粉替代量为 3%、紫米粉替代量为 6%(M3P6 样品)时, 面包比容为 5.89 cm³/g, 降低了 19.9%, 在可接受范围内。

表 4 紫米粉和羊肚菌粉对面包比容及质构的影响
Table 4 Effects of purple rice and morel mushroom powder addition on the specific volumn and texture property of bread

样品	比容(cm ³ /g)	硬度(N)	弹性	咀嚼性(N)	凝聚力
对照样	7.36±0.44 ^d	281±13.9 ^a	0.95±0.01 ^c	151±5.16 ^a	0.74±0.04 ^d
M3	6.17±0.33 ^b	338±15.6 ^b	0.93±0.01 ^{abc}	291±14.9 ^{cd}	0.71±0.01 ^{bcd}
P3	6.72±0.23 ^c	311±23.1 ^b	0.93±0.01 ^{bc}	182±15.0 ^b	0.72±0.01 ^d
M3P3	5.94±0.15 ^b	385±19.3 ^c	0.92±0.01 ^{ab}	332±11.8 ^d	0.69±0.01 ^{abc}
M3P6	5.89±0.03 ^b	429±21.1 ^c	0.92±0.02 ^{ab}	348±15.8 ^d	0.67±0.01 ^{ab}
M3P9	4.76±0.05 ^a	496±10.8 ^{de}	0.92±0.02 ^{ab}	414±14.6 ^e	0.65±0.01 ^a
M3P12	4.60±0.07 ^a	558±12.5 ^e	0.90±0.01 ^a	521±15.2 ^f	0.64±0.03 ^a

羊肚菌粉含有丰富的膳食纤维,而膳食纤维的加入,减弱了面团的产气与持气能力,在发酵和烘焙过程膨胀率降低,从而使得添加了羊肚菌粉的面包体积相对较小^[22]。但是,当紫米粉替代量增加至 9%(M3P9 样品)时,面包比容为 $4.76 \text{ cm}^3/\text{g}$,急剧下降了 35.3%。因为替代的米粉过量,显著减弱了面团的吸水能力,使面团弱化度升高,从而影响面团发酵,减小面包比容^[25]。

紫米粉和羊肚菌粉对面包质构的影响见表 4。从表 4 可以看出,当紫米粉替代量 3% 或羊肚菌粉替代量 3% 时,与对照样品相比,面包的硬度和咀嚼性显著($P<0.05$)增大,弹性和凝聚力略微下降。紫米粉和羊肚菌粉经干燥粉碎后,粒度较小,可以较好地与小麦面粉混合。适量替代对面包的弹性和凝聚力影响较小^[26]。由于羊肚菌粉丰富的膳食纤维,3% 替代量使面团弱化度上升,加快了面团的老化,从而显著提高面包硬度。当羊肚菌粉为 3%,紫米粉替代量增加至 9% 时,面包的硬度增加了 76.5%,咀嚼性增加了 174%,反之,弹性和凝聚力发生了显著($P<0.05$)降低^[27-28]。紫米粉、羊肚菌粉的替代,不溶性膳食纤维含量显著增加,影响面筋的形成,降低了面团的延展性,使面包内部结构趋于紧密,其咀嚼性与硬度变化呈现正相关关系^[22]。面包过硬会降低适口性,影响产品感官品质,虽然此时面包耐咀嚼,却降低了消费者购买意愿。

2.4 面包色泽

紫米粉、羊肚菌粉添加量对面包色泽的影响见表 5。从表 5 得出,采用 3% 羊肚菌粉替代小麦面粉,面包皮的 L^* 值显著($P<0.05$)降低, a^* 值(红绿值)、 b^* 值(黄蓝值)和 ΔE (色差值)显著($P<0.05$)增加。采用 3% 紫米粉替代小麦面粉(P3 样品),面包皮的 L^* 、 b^* 、 a^* 和 ΔE 值的变化趋势与 M3 样品一

致,且差异显著($P<0.05$)大于 M3 样品。羊肚菌粉的菌盖部分凹凸成蜂窝状,呈暗褐色,菌柄则呈现白色。羊肚菌粉经过干燥粉碎后,总体呈现浅褐色,将其用于制作面包,其表面亮度值 L^* 降低,色泽加深(图 2)。此外,紫米粉呈现暗紫色,添加制作面包,对面包皮亮度值 L^* 和色泽的影响比羊肚菌粉更大。当 3% 羊肚菌粉替代量不变,紫米粉从 0 增加到 12%,面包皮的 L^* 值逐渐下降, ΔE 逐渐增加。其中, M3P6、M3P9 和 M3P12 样品之间的 L^* 值无显著($P>0.05$)差异。同时,紫米羊肚菌面包芯的变化趋势与面包皮基本一致。这说明紫米粉对面包的外观色泽影响较大,紫米粉的皮层富含花青素,着色力强,烘焙后呈现暗色调,但是对于面包来说,是可以接受的、令人愉悦的色泽^[9]。

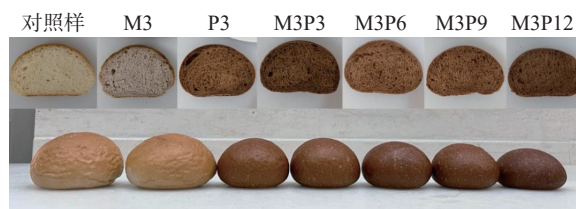


图 2 不同配方的面包

Fig.2 Images of bread with different formulations

2.5 面包感官品质

紫米粉、羊肚菌粉添加量对面包感官品质的影响见图 3。从图 3 得出,对照样各项指标评分较高,羊肚菌粉添加量 3% 的面包(M3 样品)在色泽、形态、质地、纹理等指标略低于对照样,而口感得分有所提高,紫米粉添加量 3% 的面包在感官各项指标均高于对照样。当羊肚菌粉添加量为 3%,紫米粉添加量增加至 6%,面包各项感官指标均出现略微下降,但是,仍在消费者购买意愿范围内(各指标均超过评分 $\times 60\%$)。当紫米粉添加量达到 9%,面包各项感官指标得分急剧降低,尤其是口感评分, M3P9 样品得分为 16.2 分, M3P12 样品仅为 14.3 分。

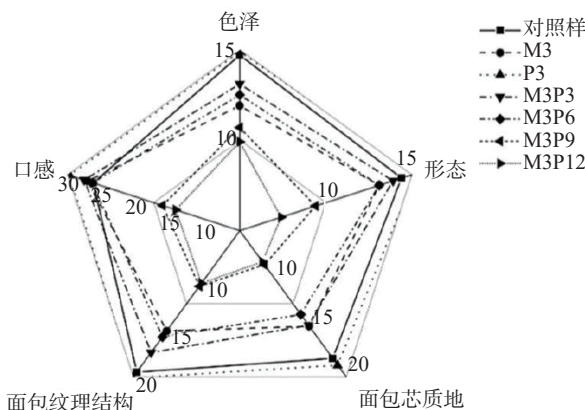


图 3 紫米羊肚菌面包的感官品质

Fig.3 Sensory evaluation of bread with purple rice and morel mushroom powder

由于紫米粉中富含花青素,适量添加紫米粉的

表 5 紫米粉和羊肚菌粉对面包色泽的影响

Table 5 Effects of purple rice and morel mushroom powder addition on the color of bread

样品	L^*	a^*	b^*	ΔE
面包皮				
对照样	50.9±0.56 ^c	10.0±0.18 ^a	24.8±0.61 ^b	46.8±0.25 ^a
M3	42.6±0.42 ^d	14.3±0.47 ^c	27.6±0.76 ^d	56.3±0.77 ^b
P3	35.7±0.86 ^b	11.6±0.34 ^{cd}	29.1±0.85 ^c	62.4±0.39 ^d
M3P3	36.8±1.25 ^c	10.8±0.33 ^b	29.0±0.29 ^c	61.2±1.04 ^c
M3P6	35.4±0.26 ^b	10.6±0.07 ^{ab}	28.4±0.35 ^{de}	61.4±0.21 ^c
M3P9	33.4±0.28 ^a	11.0±0.31 ^{bc}	26.3±0.12 ^c	63.0±0.15 ^d
M3P12	33.2±0.23 ^a	12.1±0.56 ^d	23.5±0.14 ^a	62.8±0.12 ^d
面包芯				
对照样	74.3±2.79 ^d	3.71±0.20 ^a	22.5±0.96 ^b	33.2±1.69 ^a
M3	59.4±0.05 ^c	2.79±0.11 ^a	17.4±0.22 ^a	34.9±0.08 ^b
P3	37.8±0.81 ^b	12.0±0.39 ^{bc}	29.9±1.06 ^d	60.9±0.53 ^c
M3P3	36.3±1.14 ^b	11.7±0.49 ^{bc}	31.2±0.71 ^c	62.8±1.12 ^d
M3P6	37.8±1.32 ^b	11.9±0.38 ^{bca}	30.2±0.54 ^{de}	61.1±0.87 ^c
M3P9	32.5±0.23 ^a	11.2±0.09 ^b	30.9±0.41 ^{de}	65.9±0.06 ^e
M3P12	33.3±0.99 ^a	12.2±1.04 ^c	24.7±0.35 ^c	63.1±0.77 ^d

烘焙产品能够呈现令人愉悦的紫红色,紫米粉添加量 3% 的面包在色泽评分方面得分最高。而羊肚菌的菌盖呈深褐至黑色,替换小麦面粉制作面包,会使面包成品呈现褐色,导致色泽评分有所下降。当紫米粉与羊肚菌粉同时添加时,面包色泽趋于深褐色,色泽评分随着总替代量的增加而逐渐降低。面包形态、质地、纹理结构、口感等指标评分的变化趋势,与比容、质构测定结果一致^[29]。羊肚菌粉 3%、紫米粉 9% 替代量制作的面包(M3P9 样品),其带有野生食用菌香气且伴有紫米粉香味风味,但是其硬度较高,面包内部结构不够蓬松,口感偏硬,使得消费者购买意愿大大降低。

2.6 紫米粉和羊肚菌粉对面包体外消化特性的影响

紫米粉、羊肚菌粉添加对面包体外消化特性的影响见图 4。由图 4 可知,随着淀粉消化时间的延长,紫米羊肚菌面包的淀粉水解率增加。淀粉水解开始 30 min 内,体外消化率急剧上升。接下来 30~180 min,体外消化率增加缓慢,其中,紫米羊肚菌面包在该时间段的淀粉水解率均明显低于对照组样品, M3P9(36%~85%)和 M3P12(35%~78%)样品的体外消化率低于 M3(41%~94%)、P3(39%~92%)、M3P3(37%~91%)和 M3P6(38%~90%)样品。这可能是因为羊肚菌粉的膳食纤维含量为小麦面粉 15.5 倍左右,能够有效降低淀粉消化酶的敏感性,阻碍淀粉消化^[30]。此外,使用富含膳食纤维的羊肚菌粉替换部分小麦面粉,降低了面包中快速消化淀粉(RDS)和慢速消化淀粉(SDS)的含量,从而降低淀粉的消化速度^[31]。

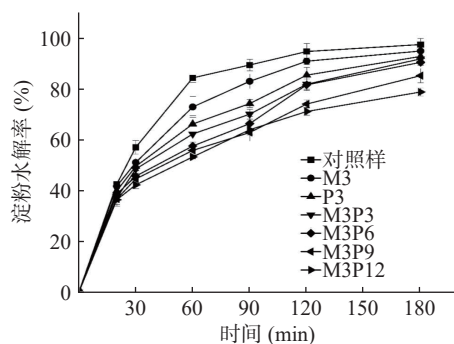


图 4 紫米羊肚菌面包的体外消化特性

Fig.4 *In vitro* digestibility characteristics of bread with purple rice and morel mushroom powder

当紫米粉添加量超过 9% 时(M3P9 和 M3P12 样品),面包的淀粉水解率明显低于其他样品。这是由于紫米粉的直链淀粉含量高,直链淀粉与支链淀粉相比,其分子结构更为紧密,且在酶解过程中不易被水解,使其消化速度较慢^[32-33]。此外,紫米粉中膳食纤维含量为小麦面粉的 3.75 倍,膳食纤维在溶液中具有黏性,能够吸附葡萄糖并阻止其扩散,在一定程度上阻碍了淀粉酶对淀粉的水解,从而降低面包的淀粉水解率^[34-35]。由此可以看出,紫米羊肚菌面包具有较低的淀粉水解率,可以调节血糖水平,满足消费者

对健康食品的需求。

2.7 电子鼻分析面包挥发性成分

紫米羊肚菌面包的气味雷达图见图 5,这是从电子鼻 18 个传感器响应值得到的面包挥发性成分雷达指纹。从图 5 可以看出,响应值最大的为 sensor_14,其次是 sensor_17 和 sensor_18。说明样品中的醇类、芳香类、脂肪烃类和酯类等含量较高。与对照组相比,单独添加紫米粉或羊肚菌粉,都能明显地提高面包挥发性成分物质的含量。M3P6 样品在 sensor_14、sensor_17 和 sensor_18 传感器上与对照组表现出更显著的差异。M3 和 P3 面包样品与对照组相比,挥发性成分物质含量差异明显,但 M3 和 P3 面包样品之间并无差异。当羊肚菌粉添加量为 3%,紫米粉逐渐增多时,对面包的挥发性成分影响显著,紫米粉添加量为 6% 时,面包气味特征相较于其他组更加丰富。当紫米粉添加量达到 9% 或 12% 时,二者之间无差异,但是均显著低于 6% 添加量(M3P6 样品)。这可能是因为过多添加紫米粉,增加了面团中的纤维类物质,影响面包的醒发及焙烤时风味物质的产生及释放^[19,36]。

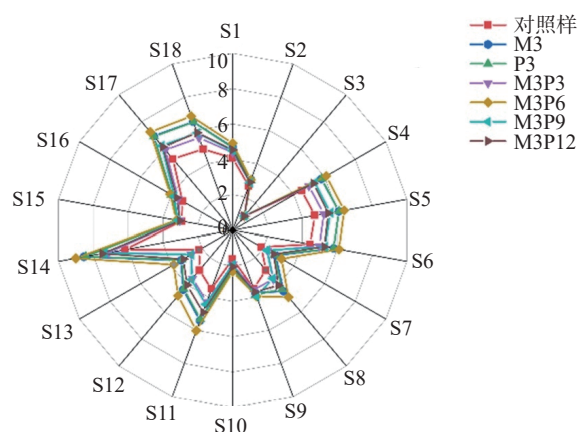


图 5 紫米羊肚菌面包的气味雷达图

Fig.5 Smell radar of bread with purple rice and morel mushroom powder

紫米羊肚菌面包的主成分分析(PCA 分析)如图 6 所示。结合前两种主成分分析的结果表明,主成分 1(PC1)的贡献率为 87.7%,主成分 2(PC2)的贡

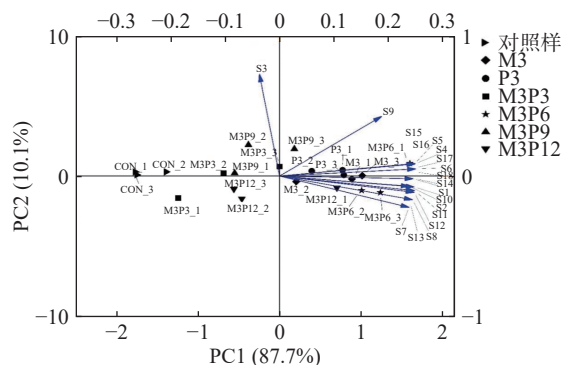


图 6 主成分分析图

Fig.6 Principal component analysis diagram

献率为 10.1%, 说明样品之间存在显著差异, 两者累计贡献率达到 97.8%, 说明这两个主成分可以反映样品大部分特征, 电子鼻的信息具有良好的可信度。对照组与添加了紫米粉或羊肚菌粉的面包有明显区分, 说明风味存在差异性的特征。但是, P3(紫米粉)和 M3(羊肚菌粉)面包样品没有明显区分。添加 3% 羊肚菌粉和 6% 紫米粉制作的面包(M3P6 样品)区分最为明显, 也表明具有最优的风味贡献。所有传感器的结果均能够表明羊肚菌粉和紫米粉对面包风味物质的影响(S3 传感器除外)。

3 结论

本研究将不同含量紫米粉、羊肚菌粉替代小麦面粉, 应用于面包制作。结果表明, 紫米粉、羊肚菌粉的添加有效提高了面包的总膳食纤维含量, 在一定程度上降低了面包比容, 同时不溶性膳食纤维含量显著增加, 影响面筋的形成, 其咀嚼性与硬度增大, 弹性和凝聚力下降。此外, 面包皮和面包芯的 L^* 值逐渐下降, ΔE 逐渐增加, 加深了面包色泽, 紫米粉对面包色泽的影响比羊肚菌粉更大。添加紫米粉、羊肚菌粉后的面团吸水能力比面筋蛋白更强, 使面包面团的储存模量和损耗模量上升, 增加了面团的黏弹性, 使得面团具有更好的动态流变学性能。在同样的时间内, 所有添加紫米粉和羊肚菌粉的面包都表现出了比对照样品更低的淀粉体外消化率, 紫米粉、羊肚菌粉中丰富的膳食纤维能够在一定程度上阻碍淀粉酶对淀粉的水解, 从而降低面包的淀粉水解率。而且, 替代量越多, 则降低效果越好。添加 3% 羊肚菌粉和 6% 紫米粉(M3P6 样品)对面包感官品质影响较小, 而且该添加量可以在风味方面显著提高 18 类挥发性风味化合物的含量, 为面包提供更丰富气味。本实验不仅得到了 M3P6 紫米羊肚菌面包的优化配方, 同时探讨了紫米粉、羊肚菌粉对面包品质的影响, 为营养健康型主食面包的开发提供了理论基础。

© The Author(s) 2025. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

- [1] GRAÇA C, RAYMUNDO A, DE SOUSA I. Yoghurt and curd cheese addition to wheat bread dough: Impact on *in vitro* starch digestibility and estimated glycemic index[J]. *Food Chemistry*, 2021, 339: 127887.
- [2] WANG H, XIA X Y, YU H Z, et al. Effect of liquid fermentation on bread fortified with *Lycium ruthenicum*: A quality attribute and *in vitro* digestibility study[J]. *Food Chemistry*, 2019, 299: 125131.
- [3] 郑妍, 张馨匀, 隋勇, 等. 莲原花青素对面包品质及功能特性的影响[J]. *食品科学*, 2020, 41(8): 62–68. [ZHENG Y, ZHANG X Y, SUI Y, et al. Effect of lotus Seedpod Procyanidins on bread quality and functional properties[J]. *Food Science*, 2020, 41(8): 62–68.]
- [4] GU W, PENG Y H, WANG R Z, et al. Comparison of metabo-

lites and main nutritional components between uncooked and cooked purple rice[J]. *Metabolites*, 2023, 13(9): 1018.

- [5] KLUNKLIN W, SAVAGE G. Physicochemical, antioxidant properties and *in vitro* digestibility of wheat-purple rice flour mixtures[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2018, 53: 1962–1971.
- [6] YAMUANGMORN S, PROM-U-THAI C. The potential of high-anthocyanin purple rice as a functional ingredient in human health[J]. *Antioxidants*, 2021, 10(6): 833.
- [7] NIGNPENSE B E, LATIF S, FRANCIS N, et al. The impact of simulated gastrointestinal digestion on the bioaccessibility and antioxidant activity of purple rice phenolic compounds[J]. *Food Bioscience*, 2022, 47: 101706.
- [8] SHEN Y B, SONG X, CHEN Y S, et al. Effects of sorghum, purple rice, and rhubarb rice on lipids status and antioxidant capacity in mice fed a high-fat diet[J]. *Journal of Functional Foods*, 2017, 39: 103–111.
- [9] KLUNKLIN W, SAVAGE G. Effect of substituting purple rice flour for wheat flour on physicochemical characteristics, *in vitro* digestibility, and sensory evaluation of biscuits[J]. *Journal of Food Quality*, 2018, 8052847.
- [10] ZHAO X Y, HENGCHAO E, DONG H, et al. Combination of untargeted metabolomics approach and molecular networking analysis to identify unique natural components in wild *Morchella sp.* by UPLC-Q-TOF-MS[J]. *Food Chemistry*, 2022, 366: 130642.
- [11] 李翔, 钟方友, 凌云坤, 等. HS/SPME-GC/MS 法比较分析野生与人工栽培羊肚菌粉挥发性成分[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(17): 225–228, 234. [LI X, ZHONG F Y, LING Y K, et al. Comparative analysis of the volatile component from wild and cultivated *Morchella* by HS/SPME-GC/MS[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2018, 39(17): 225–228, 234.]
- [12] TIETEL Z, MASAPHY S. True morels (*Morchella*) - nutritional and phytochemical composition, health benefits and flavor: A review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2018, 58(11): 1888–1901.
- [13] 陈东琪, 刘超. 酥性羊肚菌饼干的工艺研制[J]. *食品研究与开发*, 2017, 38(13): 100–103. [CHEN D Q, LIU C. The development process of *Morchella esculenta* crispness biscuits[J]. *Food Research and Development*, 2017, 38(13): 100–103.]
- [14] 王雪梅, 龙叶峰, 林勇涛, 等. 羊肚菌多糖含片的研制及其体外抗氧化活性研究[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(19): 163–172. [WANG X M, LONG Y F, LIN Y T, et al. Study on the preparation of polysaccharide lozenge from *Morchella esculenta* and its antioxidant activity[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(19): 163–172.]
- [15] 刘松韬, 刘宇迪, 张珩, 等. 双孢菇粉添加量对面包品质及抗氧化特性的影响[J]. *海南师范大学学报(自然科学版)*, 2021, 34(3): 300–307. [LIU S T, LIU Y D, ZHANG H, et al. Effect of addition of *Agaricus bisporus* flour on the bread for quality and antioxidant properties[J]. *Journal of Hainan Normal University (Natural Science)*, 2021, 34(3): 300–307.]
- [16] CAPPELLI A, OLIVA N, CINI E. A systematic review of gluten-free dough and bread: Dough rheology, bread characteristics, and improvement strategies[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(18): 6559.
- [17] TANG Z Y, FAN J, ZHANG Z Z, et al. Insights into the structural characteristics and *in vitro* starch digestibility on steamed rice bread as affected by the addition of okara[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 113: 106533.

- [18] LIU Y D, ZHANG H, BRENNAN M, et al. Physical, chemical, sensorial properties and *in vitro* digestibility of wheat bread enriched with Yunnan commercial and wild edible mushrooms[J]. *LWT*, 2022, 169: 113923.
- [19] 孟宁, 孙莹, 刘明, 等. 马铃薯粉对面包烘焙特性与风味化合物的影响[J]. *食品科学*, 2020, 41(2): 223–229. [MENG N, SUN Y, LIU M, et al. Effect of potato flour on baking properties and flavor compounds of bread[J]. *Food Science*, 2020, 41(2): 223–229.]
- [20] WANG X X, LAO X, BAO Y Z, et al. Effect of whole quinoa flour substitution on the texture and *in vitro* starch digestibility of wheat bread[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 119: 106840.
- [21] 郑莉雯, 温梁健, 邓婉达, 等. 野灰菜面包的研制及质构特性的研究[J]. *食品工业*, 2022, 43(6): 30–34. [ZHENG L W, WEN L J, DENG W D, et al. Study on the preparation and texture properties of *Chenopodium album linn* bread[J]. *Food Industry*, 2022, 43(6): 30–34.]
- [22] KOTSIU K, SACHARIDIS D, MATSAKIDOU A, et al. Physicochemical and functional aspects of composite wheat-roasted chickpea flours in relation to dough rheology, bread quality and staling phenomena[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 124: 107322.
- [23] HORSTMANN S, AXEL C, ARENDT E. Water absorption as a prediction tool for the application of hydrocolloids in potato starch-based bread[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 81: 129–138.
- [24] HU Z Q, YANG H, CHAIMA M, et al. A visualization and quantification method to evaluate the water-absorbing characteristics of rice[J]. *Food Chemistry*, 2020, 331: 127050.
- [25] CHISENGA S M, WORKNEH T S, BULTOSA G, et al. Dough rheology and loaf quality of wheat-cassava bread using different cassava varieties and wheat substitution levels[J]. *Food Bioscience*, 2020, 34: 100529.
- [26] JIANG Q, WEI X, LIU Q C, et al. Rheo-fermentation properties of bread dough with different gluten contents processed by 3D printing[J]. *Food Chemistry*, 2024, 433: 137318.
- [27] LQBAL H, ALI T M, ARIF S, et al. Effects of red rice flour addition on the rheological, textural, sensory and bioactive properties of wheat flour-based pan breads[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2022, 58(1): 473–481.
- [28] CAO H W, GAO F, SHEN H J, et al. Influence of partial substitution of wheat flour with sprouted oat flours on physicochemical and textural characteristics of wheat bread[J]. *Journal of Cereal Science*, 2023, 110: 103649.
- [29] 肖攀飞, 谢华, 陶笑寒, 等. 糜子粉粒径对小麦面包品质、抗氧化能力、体外消化特性的影响[J]. *食品与机械*, 2022, 38(5): 12–18. [XIAO P F, XIE H, TAO X H, et al. Effects of different particle sizes of finger millet on the quality, antioxidant ability and *in vitro* digestibility of wheat bread[J]. *Food & Machinery*, 2022, 38(5): 12–18.]
- [30] DEMIRKESEN-BICAK H, ARICI M, YAMAN M, et al. Effect of different fermentation condition on estimated glycemic index, *in vitro* starch digestibility, and textural and sensory properties of sourdough bread[J]. *Foods*, 2021, 10(3): 514.
- [31] ALOTAIBI H N, ANDERSON A K, SIDHU J S. Influence of lutein content of marigold flowers on functional properties of baked pan bread[J]. *Annals of Agricultural Sciences*, 2021, 66(2): 162–168.
- [32] RATSEWO J, WARREN F J, SIRIAMORNUN S. The influence of starch structure and anthocyanin content on the digestibility of Thai pigmented rice[J]. *Food Chemistry*, 2019, 298: 124949.
- [33] TAO X Q, SU Q Q, WU H, et al. Structure and physicochemical properties of a new variety of purple rice (*Oryza sativa L. indica*) starch[J]. *Food Science and Biotechnology*, 2023, 32(6): 793–802.
- [34] ULZIJARGAL E, YANG J H, LIN L Y, et al. Quality of bread supplemented with mushroom mycelia[J]. *Food Chemistry*, 2013, 138(1): 70–76.
- [35] 刘婷, 孙小东, 罗雯雯, 等. 有色米营养米粥配方优化及血糖生成指数评价[J]. *农产品加工*, 2022(16): 50–53, 56. [LIU T, SUN X D, LUO W W, et al. Formula optimization and glycaemic index evaluation of nutritive pigmented rice porridge[J]. *Farm Products Processing*, 2022(16): 50–53, 56.]
- [36] RUSINEK R, GAWRYSIAK-WITULSKA M, SIGER A, et al. Effect of supplementation of flour with fruit fiber on the volatile compound profile in bread[J]. *Sensors*, 2021, 21(8): 2812.