曾鹏, 秦永萍, 房丹丹, 等. 响应面法优化沙棘果渣玉米面馒头配方及其品质分析 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(3): 244−253. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025020100

ZENG Peng, QIN Yongping, FANG Dandan, et al. Optimization of Sea Buckthorn Pomace Cornmeal Steamed Bread Formulation Using Response Surface Methodology and Its Quality Analysis[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(3): 244−253. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025020100

·工艺技术·

# 响应面法优化沙棘果渣玉米面馒头配方及其品质分析

曾　鹏[1], 秦永萍[1], 房丹丹[1,2,*], 陈　麟[1,2]

（1.新疆理工学院 食品安全与营养实验教学示范中心, 新疆阿克苏 843000;
2.新疆黑木耳工程技术研究中心, 新疆阿克苏 843000）

**摘　要:** 研究玉米面、沙棘果渣、酵母的添加量以及发酵时间对馒头感官评价的影响。基于单因素感官评分，运用 Box-Behnken 试验设计优化沙棘果渣玉米面馒头的配方。以不添加沙棘果渣的馒头作为对照组，对其品质特性、抗氧化活性、体外消化以及模拟沙棘果渣玉米面馒头的血糖生成指数等进行分析。结果表明，馒头最优配方为：取 100 g 中筋小麦粉，添加 44% 玉米面、添加 4% 沙棘果渣、添加 1.5% 酵母、发酵时间为 50 min。该配方下制备的馒头感官评分为 97.10，与预测值 97.29 相近。沙棘果渣对馒头比容、质构、风味均有显著影响。采用最佳配方制作的沙棘果渣玉米面馒头，其多酚含量为 0.033 mg/g，黄酮含量为 0.21 mg/g、DPPH 和 $ABTS^{+}$的自由基清除率分别达到 23.15% 和 54.46%。经体外消化发现，添加沙棘果渣的馒头能够降低血糖生成指数值，降低淀粉消化速率，其预测血糖生成指数（expected glycemic index，eGI）为 71.87，属于中 GI 食品。为沙棘果渣在馒头制品方面的应用提供参考。

**关键词:** 沙棘果渣, 玉米面, 馒头, 响应面法, 抗氧化, 预测血糖生成指数

**中图分类号:** TS213.2　　**文献标识码:** B　　**文章编号:** 1002−0306(2026)03−0244−10

**DOI:** 10.13386/j.issn1002-0306.2025020100

本文网刊:

# Optimization of Sea Buckthorn Pomace Cornmeal Steamed Bread Formulation Using Response Surface Methodology and Its Quality Analysis

**ZENG Peng[1], QIN Yongping[1], FANG Dandan[1,2,*], CHEN Lin[1,2]**

（1.Experimental Teaching Demonstration Center of Food Safety and Nutrition, Xinjiang Institute of Technology, Aksu 843000, China;
2.Xinjiang Auricula Engineering Technology Research Center, Aksu 843000, China）

**Abstract:** In this study, the effects of corn flour content, sea buckthorn pomace, yeast dosage, and fermentation time on the sensory evaluation of steamed bread were investigated. Based on single-factor experiments sensory scoring, a Box-Behnken experimental design was employed to optimize the formulation of sea buckthorn pomace-corn flour-steamed bread. Analyses were conducted on the quality characteristics, antioxidant activity, *in vitro* digestibility, and expected glycemic index (eGI) of the optimized product while using steamed bread without sea buckthorn pomace as a control. The results demonstrated that the optimal formulation was 100 g of medium-gluten wheat flour supplemented with 44% corn flour, 4% sea buckthorn pomace, and 1.5% yeast and a fermentation time of 50 min. The sensory score of steamed bread prepared with this formulation was 97.10, closely matching the predicted value of 97.29. Sea buckthorn pomace significantly

**收稿日期:** 2025−02−17

**基金项目:** 新疆维吾尔自治区教育厅培育类项目（XJEDU2024P092）; 新疆理工学院慕萨莱思品质检测重点实验室（PT202102）。

**作者简介:** 曾鹏（2004−）, 男, 大学本科, 研究方向: 食品营养与检验教育, E-mail: 977692395@qq.com。

*** 通信作者:** 房丹丹（1987−）, 女, 硕士, 副教授, 研究方向: 食品加工与感官评价, E-mail: fdc2015087202112@126.com。

influenced the specific volume, texture, and flavor of steamed bread. The optimized product contained 0.033 mg/g polyphenols and 0.21 mg/g flavonoids, with DPPH and $ABTS^+$ radical scavenging rates of 23.15% and 54.46%, respectively. *In vitro* digestion tests revealed that incorporating sea buckthorn pomace reduced both the glycemic index value and starch digestion rate, yielding an expected glycemic index (eGI) of 71.87, classifying it as a medium-GI food. This study provides a theoretical reference for applying sea buckthorn pomace to steamed bread products.

**Key words**: sea buckthorn pomace; cornmeal; steamed bread; response surface methodology; antioxidant activity; expected glycemic index

沙棘(*Hippophae rhamnoides* Linn.), 隶属于胡秃子科, 为落叶型灌木。中国是世界上沙棘资源最多的国家之一, 占世界总产量的 90%[1]。沙棘是一种被称为“绿色黄金”的植物, 它含有丰富的营养物质, 具有延缓衰老、抗氧化、抗辐射、抗癌等作用[2−3]。据相关数据显示, 中国沙棘产业每年产生的废弃果渣量达到数百万吨[4], 而沙棘果渣中依然含有丰富的营养物质, 包括多酚、黄酮、氨基酸、维生素和多糖等成分[5−6], 这不仅对环境造成了污染, 同时也是对资源的一种浪费。

目前国内外关于沙棘果渣的研究主要集中在成分提取、利用与饲料应用方面。崔蔚然等[7] 探究了沙棘果渣膳食纤维对吸附丙烯酰胺的影响和体内外吸附稳定性, 结果表明, 添加 8 mg/mL 沙棘果渣膳食纤维对丙烯酰胺的吸附率最大且具有较好的体内外稳定性。裴龙英等[8] 利用超声波辅助提取沙棘果渣中的色素成分, 研究其使用条件得出, 沙棘果渣色素在 70 ℃ 以下稳定性较强, 且自然光照射对其破坏性较强。Wu 等[9] 采用不同溶剂结合超声辅助法提取沙棘果渣中的不同活性成分, 探究了多酚提取物与抗氧化性能的相关性, 得出沙棘果渣可成为天然酚类物质和抗氧化剂的宝贵来源。Qin 等[10] 研究了在饲料中添加沙棘果渣对羔羊品质的影响, 研究结果表明沙棘果渣用作羔羊饲料可增加羔羊肌肉质量, 改善肉的嫩度、持水性和抗氧化能力。

玉米作为我国第二位的粮食作物, 具有很高的营养价值, 可以预防便秘、癌症[11−12]。馒头作为中国传统主食之一, 长期以来深受人们喜爱。传统上, 馒头主要以小麦粉为原料制作。随着生活水平的提高, 人们对主食的需求不再局限于单一的口感和营养价值, 而是更加注重营养性和多样性。为满足这一需求, 食品研究者们开始探索在馒头制作中加入绿茶粉[13]、香菇粉[14]、改性膳食纤维[15] 等, 以提升其营养价值和口感多样性, 但鲜有以沙棘果渣为原料研制粗粮馒头的研究报道。因此, 本实验将玉米面和沙棘果渣以一定比例与小麦粉混合, 通过响应面法优化沙棘果渣玉米面馒头的配方, 并探究该配方下馒头的风味、抗氧化活性、消化特性等指标, 对拓展粗粮馒头的市场及沙棘果渣资源的综合利用具有重要参考价值。

## 1　材料与方法

### 1.1　材料与仪器

小麦粉　阿克苏华星面粉有限公司; 玉米面、白面包　市售; 沙棘果渣(干品)　新疆达尔生物科技有限公司; 酵母　安琪酵母股份有限公司; DPPH 试剂、ABTS 试剂　山东西亚化学股份有限公司; 福林酚、芦丁标准品、糖化酶(≥10 万 U/g)、猪胰腺 $\alpha$-淀粉酶(9 U/mg)　上海源叶生物科技有限公司; 无水乙醇　国药集团化学试剂有限公司; 过硫酸钾、无水碳酸钠　天津市光复百世化工有限公司; 水杨酸　天津市永大化学试剂有限公司; 没食子酸　天津市光复精细化工研究所; 硝酸铝、乙酸钠、氢氧化钠、结晶乙酸钠　天津市鑫铂特化工有限公司, 均为分析纯试剂。

SB-3200DTD 型超声波清洗机　宁波新芝生物科技股份有限公司; SHA-C 型水浴恒温振荡器、HWS-24 型恒温水浴锅　上海精密仪器仪表有限公司; TA.Touch 质构仪　上海保圣实业发展有限公司; UV759 型紫外可见分光光度计、JA3003N 型佑科电子天平　上海佑科仪器仪表有限公司; TG16-WS 型高速离心机　常州市金坛友联仪器研究所; GZX-9030MBE 型电热鼓风干燥箱　上海博迅医疗生物仪器股份有限公司; C-PEN3 型电子鼻　北京怡诺威腾科技发展有限公司; DZF-6050 型真空干燥箱　上海一恒科学仪器有限公司; FD-1A-50 型冷冻干燥机　江苏天翎仪器有限公司。

### 1.2　实验方法

1.2.1　沙棘果渣玉米面馒头工艺流程　参考刘维汐等[16] 方法清洗沙棘果渣, 粉碎过筛备用。馒头制作工艺为: 适量温水和面→发酵(37 ℃)→分割→醒发(30 min)→沸水蒸制(20 min)→静置。对照组选用普通玉米面馒头, 玉米面馒头的配方为: 取 100 g 中筋小麦粉, 添加 50% 玉米面、添加 1.5% 酵母、发酵时间 50 min; 和面时不添加沙棘果渣, 其余加工工艺与沙棘果渣玉米面馒头相同。

1.2.2　单因素实验　沙棘果渣玉米面馒头的配方为: 取 100 g 中筋小麦粉, 添加 50% 玉米面、添加 3% 沙棘果渣、添加 1.5% 酵母、发酵时间 50 min。分别设置玉米面添加量(40%、45%、50%、55%、60%), 沙棘果渣质量分数(2%、3%、4%、5%、6%), 酵母质量分数(0.5%、1.0%、1.5%、2.0%、2.5%), 发酵时间(30、40、50、60、70 min)作为参考因素, 对馒头的感官评分进行测定。

1.2.3　响应面法优化沙棘果渣玉米面馒头配方　运用 Design-Expert10 软件, 通过三因素三水平的试验

表 1 响应面试验因素及水平

Table 1 Factors and levels of response surface experiment

| 水平 | A玉米面添加量(%) | B沙棘果渣添加量(%) | C酵母添加量(%) |
|---|---|---|---|
| −1 | 40 | 3 | 1 |
| 0 | 45 | 4 | 1.5 |
| 1 | 50 | 5 | 2 |

设计,分析玉米面添加量、沙棘果渣添加量和酵母添加量对感官评分的影响,并进行响应面优化。因素及水平设计如表 1。

1.2.4 感官评价 参考叶双灵等[17]方法并略作修改,得到沙棘果渣玉米面馒头感官评价标准,如表 2 所示。由 10 位具有感官经验的食品专业学生(男女比例为 1∶1),按照评分标准对馒头的表面色泽、外观形状、气味、内部结构、口感进行感官评定,重复三次取平均值。

表 2 沙棘果渣玉米面馒头感官评分标准

Table 2 Sensory evaluation criteria for corn flour steamed bread with sea buckthorn pomace

| 项目 | 分值 | 评分标准 |
|---|---|---|
| 表面色泽 | 15 | 表皮光泽性好,颜色均一(11~15) |
| | | 表皮光泽性较好,颜色较均一(6~10) |
| | | 表皮光泽性差,颜色不均匀(0~5) |
| 外观形状 | 15 | 表皮光滑且形态完整(11~15) |
| | | 表皮较为光滑,有少量气泡(6~10) |
| | | 表皮不光滑,有气泡,有裂口,或起皱表皮(0~5) |
| 气味 | 20 | 有浓郁馒头麦香、玉米及沙棘香气,无异味(16~20) |
| | | 有较淡馒头麦香、玉米及沙棘香气,无异味(11~15) |
| | | 有较淡馒头麦香、玉米及沙棘香气,有异味(6~10) |
| | | 没有明显馒头麦香、玉米及沙棘香气,有异味(0~5) |
| 内部结构 | 20 | 表皮光滑,气孔分布均匀,切片完整不碎裂,无掉屑(16~20) |
| | | 表皮较光滑,气孔分布较均匀,切片无断裂,无明显掉渣(11~15) |
| | | 表皮有气泡,局部较硬,皮心分离,切片易掉渣(6~10) |
| | | 表皮鼓胀、无弹性、质地不均、皮芯脱落、切片后有断屑等现象(0~5) |
| 口感 | 30 | 指压感强,咬劲好,口感爽滑,不粘牙(21~30) |
| | | 手指压后恢复慢,咬劲一般,咀嚼略粘牙(11~20) |
| | | 手指压感硬,复原性和咬劲差(0~10) |

1.2.5 馒头的品质评价

1.2.5.1 比容测定 参考朱翠玲等[14]方法并略作修改。采用小米置换法对馒头的体积进行测定,电子天平测定馒头质量,重复测定 3 次,取平均值。计算公式如下:

$$\lambda = \frac{V}{m} \quad 式(1)$$

式中:$\lambda$ 表示馒头比容(mL/g);V 表示馒头体积(mL);m 表示馒头质量(g)。

1.2.5.2 质构测定 参考饶颖等[18]方法并略作修改。将蒸制完成的馒头置于室温环境下自然冷却。采用标准切片法,选取厚度为 25 mm 的中间部分样品,并将其固定于测试探头下方。实验参数设置如下:下压位移为 10 mm,选用 TA/36 柱形探头作为测试探头。测试前速率为 3.0 mm/s,测试中速度为 1.0 mm/s,测试后速度为 1.0 mm/s,时间间隔设定为 5.0 s。重复 3 次实验,取平均值。

1.2.6 电子鼻分析 参考张佳丽等[19]方法并略作修改。电子鼻包含 10 个不同的传感器阵列,其检测物质如表 3 所示。分别称取 3.00 g 馒头,立即装入 15 mL 电子鼻样品瓶中,室温下密封放置 30 min,用 PEN3 型电子鼻进行测定。重复测定 3 次。

表 3 PEN3 型电子鼻传感器性能描述

Table 3 Performance description of PEN3 electronic nose sensors

| 阵列序号 | 传感器名称 | 敏感物质类型 |
|---|---|---|
| 1 | W1C | 芳烃成分 |
| 2 | W5S | 氮氧化合物 |
| 3 | W3C | 香成分,氨类 |
| 4 | W6S | 氢气 |
| 5 | W5C | 短链烷烃、芳香成分 |
| 6 | W1S | 甲基类 |
| 7 | W1W | 硫化物 |
| 8 | W2S | 醇类 |
| 9 | W2W | 芳香成分、有机硫化物 |
| 10 | W3S | 长链烷烃 |

1.2.7 基本成分测定 测定最优配方下的沙棘果渣玉米面馒头的基本成分,以不添加沙棘果渣的玉米面馒头为对照组。参考 GB 5009-2016,对馒头进行水分、灰分、蛋白质、脂肪的基本成分测定。

1.2.8 抗氧化性能测定

1.2.8.1 提取液的制备 参考王敬涵等[20]方法并略作修改。将馒头内芯预冷 24 h 后真空冷冻干燥,粉碎,制得馒头粉。将 10.0 g 馒头粉添加到 100 mL 的 80% 乙醇中,然后在 37 ℃ 下水浴振荡 2 h,37 ℃ 下超声提取 15 min,以 2500 r/min 的速度离心 10 min,获得提取液。

1.2.8.2 多酚含量测定 参考 Guo 等[21]方法并略作修改。取 0.5 mL 提取液,与 9.5 mL 蒸馏水、0.5 mL 福林酚混匀,加入 1.5 mL 20% 的碳酸钠溶液,避光 1 h 后,在波长 760 nm 处测定吸光值。以没食子酸含量(mg/mL)为横坐标、吸光度值为纵坐标绘制标准曲线,制得标准曲线为 y=1.6938x+0.014,$R^2$=0.9936。

1.2.8.3 黄酮含量测定 参考 Ma 等[22]方法并略作修改。取 2 mL 提取液、0.3 mL 10% 的硝酸铝溶液于试管中,室温下静置 6 min,再加入 0.3 mL 5% 的亚硝酸钠溶液,室温下静置 6 min,加入 4 mL 40% 的氢氧化钠溶液,室温下静置 15 min,在波长 510 nm 处测定吸光值。以芦丁含量(mg/mL)为横坐标、吸光度值为纵坐标绘制标准曲线,制得标准曲线为 y=7.217x+0.0972,$R^2$=0.9913。

1.2.8.4 DPPH 自由基清除率的测定 参考江梦影

等[23]的方法并略作修改。各取 2 mL DPPH 自由基乙醇溶液和提取液混合。以无水乙醇为对照组，以蒸馏水为空白组，波长 517 nm 处测定吸光值。

$$\text{DPPH自由基清除率}(\%) = \left(1 - \frac{A_1 - A_2}{A_0}\right) \times 100$$

式（2）

式中：$A_0$ 表示 DPPH 试剂与蒸馏水的吸光值；$A_1$ 表示 DPPH 试剂与提取液的吸光值；$A_2$ 表示乙醇与提取液的吸光值。

1.2.8.5　$ABTS^+$自由基清除率的测定　参考 Xiao 等[24]的方法并略作修改。将 ABTS 和 $K_2S_2O_8$ 等体积混合后，放置 12 h。稀释至在 734 nm 下吸收值为 0.7±0.02。在进行测定时，取 0.4 mL 的提取液与 3 mL 的 ABTS 试剂在暗环境下混合，室温下静置 6 min 后，用无水乙醇替代提取液作对照，在 734 nm 波长处测定吸光值。

$$ABTS^+\text{自由基清除率}(\%) = \frac{A_0 - A}{A_0} \times 100$$

式（3）

式中：$A_0$ 表示 ABTS 试剂与乙醇的吸光值；A 表示 ABTS 试剂与提取液的吸光值。

1.2.9　体外消化性能测定

1.2.9.1　总淀粉含量测定　参考 Agama-Acevedo 等[25]的方法并略作修改，对馒头样品中的总淀粉含量进行测定。分别制备不同浓度梯度的葡萄糖标准溶液（0、0.02、0.04、0.08、0.10、0.12 mg/mL），在 540 nm 波长处测定各标准溶液的吸光值。以葡萄糖浓度（mg/mL）为横坐标、吸光度值为纵坐标，绘制标准曲线，并拟合得到线性回归方程：y=0.5007x−0.1579，$R^2$=0.9970。参考孙康娜等[26]的方法制备还原糖提取液，使用 3,5-二硝基水杨酸法测定还原糖含量。每组样品重复 3 次实验，取平均值。

$$\text{总淀粉含量}(\%) = \text{葡萄糖当量} \times 0.9$$

式（4）

1.2.9.2　预测血糖生成指标　参照汪雅馨等[27]的方法并略作修改。称取 1 g 馒头粉，与 10 mL 的混合酶液（0.01 g 糖化酶、0.32 g 猪胰腺 $\alpha$-淀粉酶）、20 mL 的醋酸钠缓冲液（pH5.2）充分混匀，进行 37 ℃ 恒温水浴振荡。在反应开始后的 0、30、60、90、120、180 min 时间点分别取样 1 mL、加入 4 mL 无水乙醇在 2500 r/min 下离心 10 min，使用 3,5-二硝基水杨酸法测定溶液上清液的葡萄糖含量，并计算淀粉水解率。

$$\text{淀粉水解率}(\%) = \frac{\text{提取液在取样点的葡萄糖当量} \times 0.9}{\text{总淀粉含量}} \times 100$$

式（5）

以时间（min）作为横轴坐标，以淀粉水解速率（%）作为纵轴坐标，绘制对应的曲线。HI 为淀粉水解指数，表示样品和白面包对照品在 0~180 min 内水解曲线面积之比；eGI 表示样品的预测血糖生成指数。

$$\text{HI} = \frac{\text{样品淀粉水解曲线围成的面积}}{\text{对照品淀粉水解曲线围成的面积}}$$

式（6）

$$\text{eGI} = 0.549 \times \text{HI} + 39.71$$

式（7）

### 1.3　数据处理

各组数据重复测定 3 次，结果采用平均值±标准偏差（SD）表示，采用 SPSS 软件进行显著性分析（显著水平为 $P$<0.05），用 Origin2021 软件对馒头各指标进行统计分析与作图。运用 Design-Expert10 软件进行响应面设计分析。

## 2　结果与分析

### 2.1　沙棘果渣玉米面馒头的单因素实验结果

2.1.1　玉米面添加量对沙棘果渣玉米面馒头感官的影响　由图 1 可知，当玉米面添加至 45% 时，感官评分最高。随着玉米面比例的增大，馒头的感官评分显著降低（$P$<0.05），这是由于玉米面中缺乏面筋蛋白，无法为面团提供黏弹特性，阻碍了面团中面筋网络结构的形成[28]，且含有大量的天然色素，随着玉米面的增加，馒头色泽变暗，体积变小[29]，从而影响了馒头的整体外观。因此，将玉米面添加量定为 40%~50% 之间。

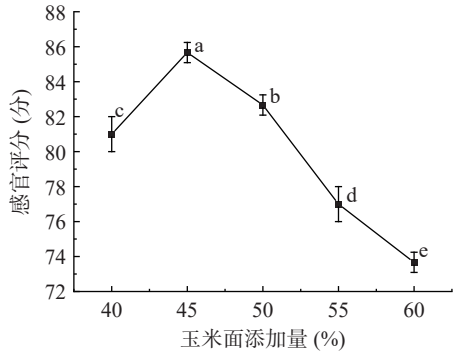



图 1　玉米面添加量对馒头感官的影响

Fig.1　Effect of corn flour addition on the sensory quality of steamed bread

注：不同字母代表数据间具有显著性差异（$P$<0.05），图 2~图 4、图 10 同。

2.1.2　沙棘果渣添加量对沙棘果渣玉米面馒头感官的影响　由图 2 可知，沙棘果渣添加量对馒头的感

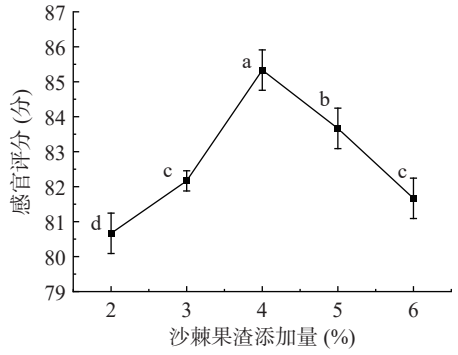



图 2　沙棘果渣添加量对馒头感官的影响

Fig.2　Effect of sea buckthorn pomace addition on the sensory quality of steamed bread

官评分影响显著($P$<0.05),在沙棘果渣添加量为 4% 时,感官评分最高,馒头有沙棘香气,软硬适中;超过 4%,馒头表面果渣颗粒感增加,口感粗糙。感官评分出现先升后降的现象是因为沙棘果渣粉的颗粒较大,少量的沙棘果渣在面团中形成了更多的空隙,使面团体积增大[30],并且沙棘果渣中的膳食纤维能够稀释面团中面筋含量,使面团适度胀润,提高疏松度;但当沙棘果渣添加量较高时,沙棘气味过重,不利于整体风味感知,且大量沙棘果渣粉破坏了面筋网络结构,导致面团的结合力变弱,影响气体保留,使得馒头变硬[31]。因此,将沙棘果渣添加量定为 3%~5% 之间。

2.1.3 酵母添加量对沙棘果渣玉米面馒头感官的影响 由图 3 可知,酵母的添加量对馒头的感官评分影响显著($P$<0.05),感官评分呈现先上升后急剧下降的趋势,当酵母添加量小于 1.5% 时,馒头面团较硬,发酵不充分,口感较差;当酵母添加量为 1.5% 时,感官评分达到最大值,说明该添加量下的馒头,软硬适中,口感更好;当酵母添加量大于 1.5% 时,面团发酵速度加快,在发酵时导致面团塌陷,内部气孔偏小,严重影响馒头口感,导致感官评分下降[32]。因此,将酵母添加量定为 1.0%~2.0% 之间。

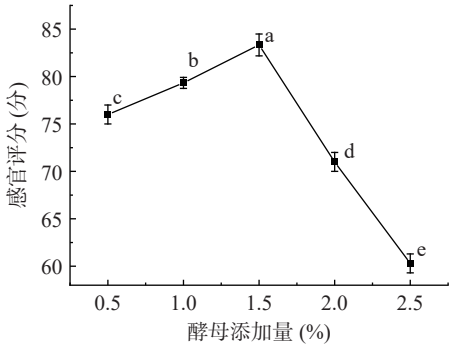



图 3 酵母添加量对馒头感官的影响

Fig.3 Effect of yeast addition on the sensory quality of steamed bread

2.1.4 发酵时间对沙棘果渣玉米面馒头感官的影响 由图 4 可知,发酵时间对馒头的感官评分影响显著($P$<0.05),随着发酵时间的增加,馒头感官评分呈现出先升后降的趋势。当发酵时间为 50 min 时馒头的感官评分达到最大值,此时,馒头的表皮光滑,气孔分布均匀,口感较好。当发酵时间低于 50 min 时,馒头较硬,咬劲差。这可能是由于发酵时间过短,酵母产气不足,使馒头不松软;而发酵时间过长使得酵母活性增强,形成较大的蜂窝状气泡,造成馒头塌陷,对馒头的感官评分造成影响[33]。因此,确定馒头的最佳发酵时间为 50 min。

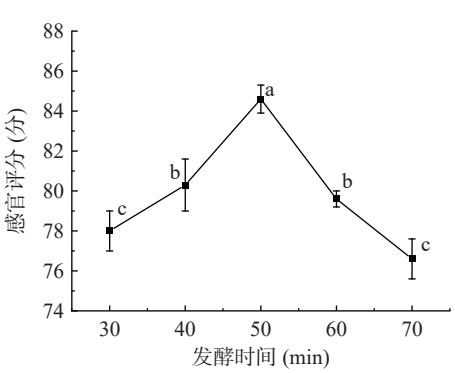



图 4 发酵时间对馒头感官的影响

Fig.4 Effect of fermentation time on the sensory quality of steamed bread

## 2.2 响应面试验结果分析

2.2.1 试验结果 在单因素实验基础上,固定馒头发酵时间为 50 min,以感官评分值为响应值,选用玉米面添加量、沙棘果渣添加量、酵母添加量三个因素开展响应面优化试验。响应面的设计方案及其试验结果如表 4 所示。

表 4 响应面设计方案及试验结果

Table 4 Response surface design scheme and experimental results

| 试验号 | 因素 | | | 感官评分Y |
|---|---|---|---|---|
| | A 玉米面添加量 | B 沙棘果渣添加量 | C 酵母添加量 | |
| 1 | −1 | 0 | −1 | 93.0 |
| 2 | −1 | 0 | 1 | 88.5 |
| 3 | −1 | 1 | 0 | 92.0 |
| 4 | −1 | −1 | 0 | 88.0 |
| 5 | 1 | 1 | 0 | 78.5 |
| 6 | 1 | 0 | 1 | 87.0 |
| 7 | 1 | 0 | −1 | 87.0 |
| 8 | 1 | −1 | 0 | 89.0 |
| 9 | 0 | −1 | 1 | 87.0 |
| 10 | 0 | 1 | −1 | 86.5 |
| 11 | 0 | −1 | −1 | 88.5 |
| 12 | 0 | 1 | 1 | 85.5 |
| 13 | 0 | 0 | 0 | 97.0 |
| 14 | 0 | 0 | 0 | 96.5 |
| 15 | 0 | 0 | 0 | 97.0 |
| 16 | 0 | 0 | 0 | 96.0 |
| 17 | 0 | 0 | 0 | 97.5 |

2.2.2 试验分析 由表 5 可知,该模型 $P$ 值<0.0001,具有极显著性,且失拟项不显著,模型的 $R^2$=0.9864、$R^2_{Adj}$=0.9690,说明该模拟实验数据具有可信度。在模型各项系数中,一次项玉米面添加量(A)、沙棘果渣添加量(B)、玉米面添加量和沙棘果渣添加量的交互项(AB)都具有极显著性($P$<0.01),酵母添加量(C)、玉米面添加量和酵母添加量的交互项(AC)具有显著性($P$<0.05);玉米面添加量二次项($A^2$)、沙棘果渣添加量二次项($B^2$)、酵母添加量二次项($C^2$)均具有极显著性差异($P$<0.0001)。

将表 4 及表 5 中的数据通过 Design-Expert 10 软件进行回归分析和拟合处理,得到方程模型为:$Y=96.80-2.50\times A-1.25\times B-0.88\times C-3.63\times AB+1.12\times AC+0.12\times BC-3.96\times A^2-5.96\times B^2-3.96\times C^2$。

由图 5、图 6 可知,交互项 AB、AC 的等高线图呈椭圆形且具有比较陡的曲面坡度,表明玉米面添加

表 5　响应面回归模拟的方差分析

Table 5　Analysis of variance for response surface regression simulation

| 变异来源 | 自由度 | 平方和 | 均方 | $F$值 | $P$值 | 显著性 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 模型 | 9 | 439.51 | 48.83 | 56.50 | <0.0001 | *** |
| A | 1 | 50.00 | 50.00 | 57.85 | 0.0001 | ** |
| B | 1 | 12.50 | 12.50 | 14.46 | 0.0067 | ** |
| C | 1 | 6.13 | 6.13 | 7.09 | 0.0324 | * |
| AB | 1 | 52.56 | 52.56 | 60.82 | 0.0001 | ** |
| AC | 1 | 5.06 | 5.06 | 5.86 | 0.0461 | * |
| BC | 1 | 0.063 | 0.063 | 0.072 | 0.7958 | |
| $A^2$ | 1 | 66.11 | 66.11 | 76.49 | <0.0001 | *** |
| $B^2$ | 1 | 149.69 | 149.69 | 173.20 | <0.0001 | *** |
| $C^2$ | 1 | 66.11 | 66.11 | 76.49 | <0.0001 | *** |
| 残差 | 7 | 6.05 | 0.86 | | | |
| 失拟 | 3 | 4.75 | 1.58 | 4.87 | 0.0801 | |
| 误差 | 4 | 1.30 | 0.33 | | | |
| 总变异 | 16 | 445.56 | | | | |
| $R^2$ | 0.9864 | | | | | |
| $R^2_{Adj}$ | 0.9690 | | | | | |

注：*$P$<0.05，**$P$<0.01，***$P$<0.001。

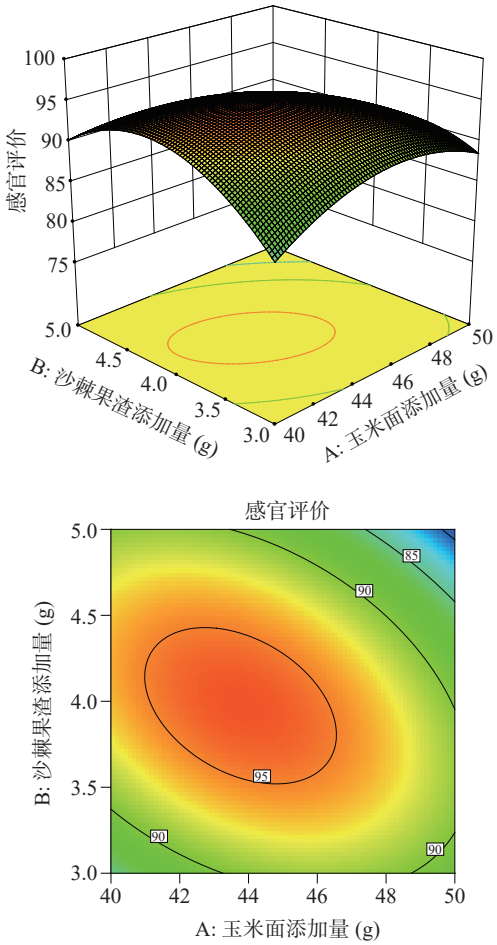



图 5　玉米面添加量与沙棘果渣添加量对馒头感官品质的影响

Fig.5　Effect of corn flour addition and sea buckthorn pomace addition on the sensory quality of steamed bread

量和沙棘果渣添加量、玉米面添加量和酵母添加量的交互作用更显著，对沙棘果渣玉米面馒头的感官品质影响较大。通过观察等高线之间间隔的紧密程度

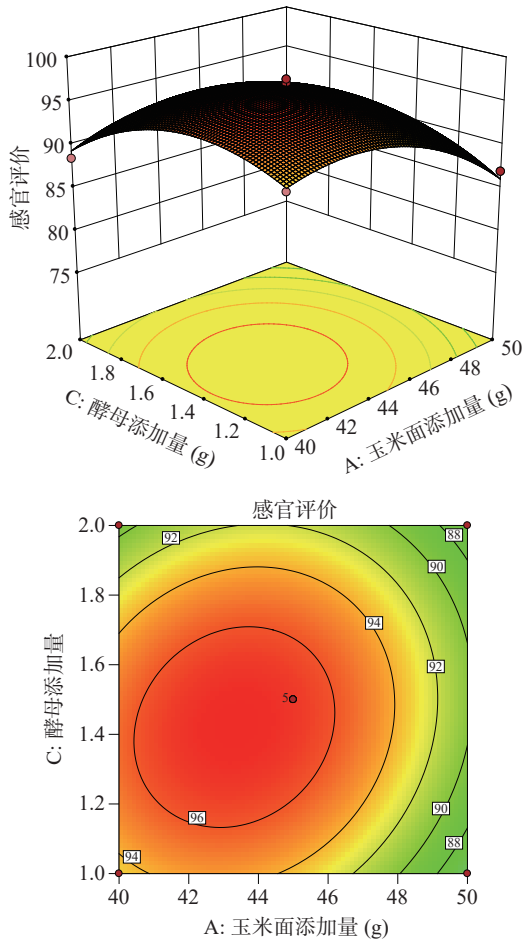



图 6　玉米面添加量与酵母添加量对馒头感官品质的影响

Fig.6　Effect of corn flour addition and yeast addition on the sensory quality of steamed bread

以及整体形状，可以推断出玉米面和沙棘果渣添加量的相互作用比玉米面和酵母添加量的相互作用更为显著，这与方差分析的结果相吻合。

2.2.3　验证实验　经 Design-Expert 软件分析，获得沙棘果渣玉米面馒头的最优配方为玉米面添加量 43.31%、沙棘果渣添加量 3.99%、酵母添加量 1.42%，此时的感官评分为 97.29。为方便实际操作，将沙棘果渣玉米面馒头配方修正为：玉米面添加量 44%、沙棘果渣添加量 4%、酵母添加量 1.5%，重复进行 3 次验证实验，得出此配方下的沙棘果渣玉米面馒头的感官评分为 97.10，与理论感官评分相近，说明该模型真实可靠，具有一定的应用价值。

## 2.3　馒头品质评价

馒头品质的评价标准包括比容、硬度、弹性、咀嚼性、内聚性和回复性。其中弹性、内聚性和回复性与馒头的品质呈正相关关系，其硬度和咀嚼性与馒头的品质呈负相关关系[34]。由表 6、图 7 可知，添加沙棘果渣后，馒头的比容、弹性、回复性、内聚性均显著降低（$P$<0.05），硬度、咀嚼性均显著增加（$P$<0.05）。这可能是由于沙棘果渣中富含膳食纤维，影响淀粉的吸水膨胀，导致馒头的硬度和咀嚼性增加[35]，对应的馒头比容降低。沙棘果渣的添加会稀释

表 6 馒头比容、质构测定结果

Table 6 Determination results of specific volume and texture properties of steamed bread

| 样品 | 比容(mL/g) | 硬度(g) | 弹性(mm) | 咀嚼性 | 内聚性 | 回复性 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 沙棘果渣玉米面馒头 | 1.580±0.012$^{b}$ | 5391.923±30.385$^{a}$ | 0.741±0.043$^{b}$ | 2528.992±27.579$^{a}$ | 0.631±0.026$^{b}$ | 0.278±0.036$^{b}$ |
| 玉米面馒头 | 1.845±0.011$^{a}$ | 3710.786±97.647$^{b}$ | 0.783±0.024$^{a}$ | 1925.098±15.894$^{b}$ | 0.678±0.039$^{a}$ | 0.316±0.046$^{a}$ |

注: 数据表示为平均值±标准偏差, 均值不同字母上标表示样品间差异显著($P$<0.05), 表7、表8同。

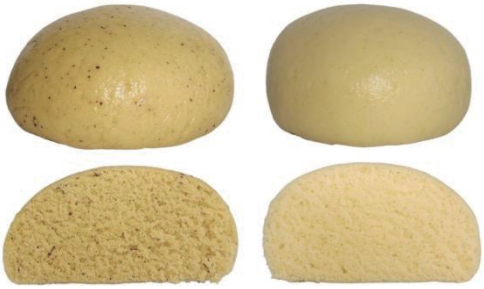



图 7 馒头外观与内部结构图

Fig.7 Morphological characteristics and internal structure of steamed bread

面团中面筋蛋白的含量, 导致面筋网络结构无法正常形成[36], 使得沙棘果渣玉米面馒头的内部结构变得粗糙, 从而导致其弹性、内聚性和回复性均降低。

由图 7 所示, 沙棘果渣玉米面馒头与玉米面馒头在外观形态上均呈现出良好的圆润饱满特征。但沙棘果渣玉米面馒头的质地相对粗糙, 气孔分布不均且孔径大小不一; 相比之下, 玉米面馒头的孔隙结构更为细腻, 气孔细小且分布均匀, 其口感会更适宜。

## 2.4 电子鼻分析

2.4.1 传感器响应值分析 利用电子鼻检测馒头挥发性风味成分, 结果如图 8 所示, 与玉米面馒头相比, 添加了沙棘果渣的玉米面馒头在 W1S、W1W、W2S、W2W 传感器中的响应值较高, 表明添加沙棘果渣后, 馒头含有更多的甲基类、硫化物、醇类等挥发性成分, 这与沙棘果渣本身风味成分有关[37], 在一定程度上增强了馒头的香气。

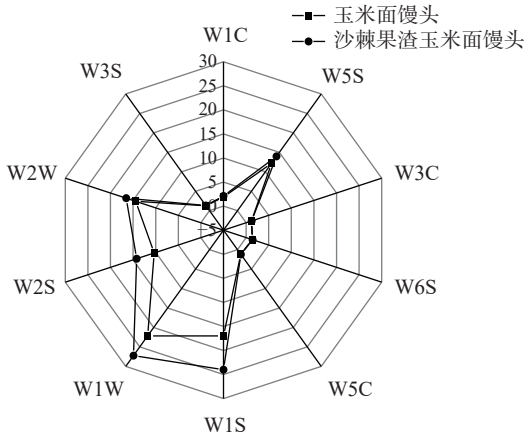



图 8 馒头挥发性风味成分传感器响应值雷达图

Fig.8 Radar chart of sensor response values for volatile flavor compounds in steamed bread

2.4.2 主成分分析(PCA) 对电子鼻测定到的信号数据进行主成分分析, 进而研究沙棘果渣对玉米面馒头挥发性风味成分的影响。由图 9 可知, 第一主成分 PC1 和第二主成分 PC2 的贡献率分别为 86.2%、8.5%, 并且第一主成分 PC1 和第二主成分 PC2 的累计贡献率达到 94.7%(>85%), 表明 PC1、PC2 足以代表样品的整体信息[38]。沙棘果渣玉米面馒头与玉米面馒头样品相互分离, 说明沙棘果渣对玉米面馒头的挥发性风味成分影响显著。因此, 结合传感器响应值分析添加沙棘果渣, 对于馒头的挥发性风味有改善作用。

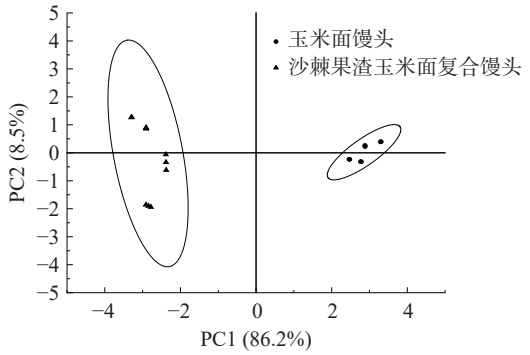



图 9 电子鼻检测主成分分析(PCA)

Fig.9 Principal component analysis (PCA) of electronic nose detection

## 2.5 基本成分分析

水分含量对于馒头的口感和整体品质具有重要作用。由表 7 可知, 两组馒头均展现出较高的含水量, 根据 GB/T 21118-2007《小麦粉馒头》标准, 馒头水分含量低于 45%, 所测两组馒头均符合要求。此外, 沙棘果渣玉米面馒头中的蛋白质、脂肪、灰分含量均显著高于不添加沙棘果渣的玉米面馒头($P$<0.05)。综上, 添加沙棘果渣提高了馒头的营养价值。

表 7 馒头基本成分测定结果

Table 7 Determination results of basic components in steamed bread

| 指标 | 成分含量(每100 g样品) | |
|---|---|---|
| | 沙棘果渣玉米面馒头 | 玉米面馒头 |
| 水分(g) | 44.52±0.20$^{a}$ | 44.37±0.21$^{b}$ |
| 蛋白质(g) | 5.98±0.02$^{a}$ | 5.36±0.02$^{b}$ |
| 脂肪(g) | 2.64±0.03$^{a}$ | 2.20±0.01$^{b}$ |
| 灰分(g) | 0.83±0.00$^{a}$ | 0.45±0.00$^{b}$ |

## 2.6 沙棘果渣玉米面馒头抗氧化性能分析

黄酮和多酚有着抗氧化、抗菌和抗炎等丰富的生物活性, 这些性质对改善人体健康水平有着积极的

作用[39−40]。由图 10(a)可知, 玉米面馒头和沙棘果渣玉米面馒头的黄酮含量分别为 0.18、0.21 mg/g; 多酚含量分别为 0.024、0.033 mg/g。沙棘果渣的加入使玉米面馒头的多酚和黄酮含量显著提高($P$<0.05)。这与沙棘果渣本身有着丰富的黄酮和多酚有关[41]。

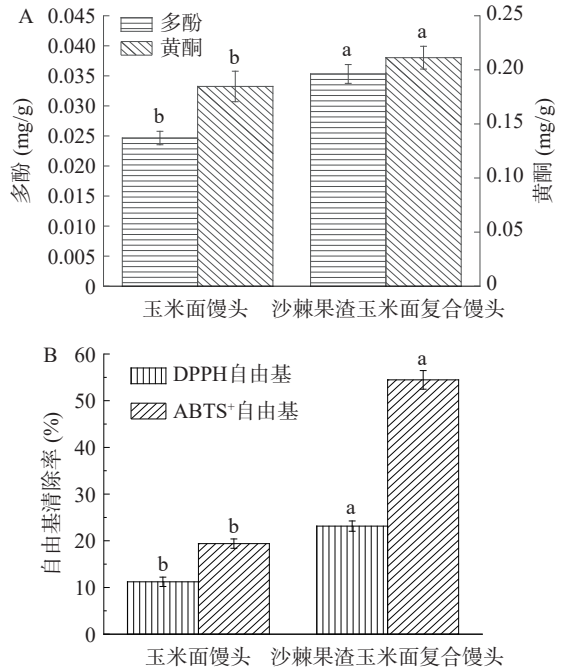



图 10　馒头的抗氧化性能分析

Fig.10　Analysis of antioxidant properties of steamed bread

注: A: 黄酮和多酚含量; B: DPPH 自由基和 ABTS$^+$自由基清除率。

由图 10(b)可知, 玉米面馒头和沙棘果渣玉米面馒头的 DPPH 自由基清除率分别为 11.22%、23.15%; 两组 ABTS$^+$自由基清除率分别为 19.40%、54.46%。添加沙棘果渣对馒头的抗氧化能力提升有显著作用($P$<0.05)。此外, 图中两组馒头的黄酮和多酚含量与其对应的 DPPH、ABTS$^+$自由基清除能力之间呈较好的正相关, 这与李东香等[42] 研究结果一致。综上, 馒头中添加沙棘果渣能够提高其抗氧化能力。

### 2.7　沙棘果渣玉米面馒头体外消化性能分析

由图 11 可知, 各组淀粉消化率均随消化时间的增加而增大, 在被消化 0~30 min 时, 淀粉消化速率最快, 但沙棘果渣玉米面馒头的淀粉消化速率比玉米面馒头低。随着消化过程的持续进行, 淀粉消化的速率减慢, 在 120 min 后呈稳定趋势。在淀粉消化的整个过程中, 白面包淀粉水解率达到 60.60%, 沙棘果渣玉米面馒头和玉米面馒头淀粉水解率分别为 40.40%、42.50%。沙棘果渣玉米面馒头较玉米面馒头的淀粉水解速度更平缓且淀粉水解率均低于白面包。这主要是因为沙棘果渣和玉米面均富含膳食纤维[43−44], 其网状结构有助于延缓碳水化合物的消化, 从而减慢淀粉的分解速度; 并且丰富的膳食纤维有助于延长饱腹感, 满足了减肥人群的需求[45]。

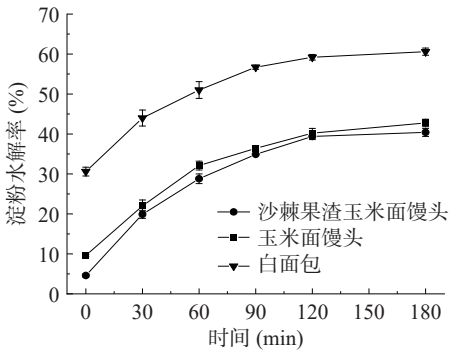



图 11　馒头的淀粉水解图

Fig.11　Starch hydrolysis curve of steamed bread

血糖生成指数(glycaemic index, GI)是评估食物摄入后对人体血糖水平影响的重要指标。根据 GI 值的不同, 食品可被划分为三类: GI 值>75 的高血糖食品、GI 值为 55~75 的中血糖食品以及 GI 值< 55 的低血糖食品[46]。预测血糖生成指数(expected glycemic index, eGI)是反映馒头淀粉分解速度的重要指标, 其结果与体内淀粉消化试验结果呈现正相关, 有助于理解淀粉的吸收与代谢[47]。以沙棘果渣玉米面馒头为研究对象, 采用 eGI 对馒头进行体外血糖指数预测。由表 8 可知, 添加沙棘果渣对馒头的 HI、eGI 具有显著降低的效果, 馒头的 eGI 由 74.12 显著降低至 71.87($P$<0.05)。因此, 添加沙棘果渣能够降低馒头的体外血糖生成指数, 并且沙棘果渣玉米面馒头的 eGI 值为 71.87 属于中 GI 食品。

表 8　馒头血糖生成指数预测值

Table 8　Predicted glycemic index values of steamed bread

| 测定指标 | 玉米面馒头 | 沙棘果渣玉米面馒头 |
|---|---|---|
| HI | 62.69±0.54$^a$ | 58.59±1.27$^b$ |
| eGI | 74.12±0.29$^a$ | 71.87±0.69$^b$ |

## 3　结论

本文以响应面法优化沙棘果渣玉米面馒头的配方, 通过探究玉米面添加量、沙棘果渣添加量、酵母添加量、发酵时间对馒头感官指标的影响, 最终确定沙棘果渣玉米面馒头的最优配方为: 取 100 g 中筋小麦粉, 添加 44% 玉米面、添加 4% 沙棘果渣、添加 1.5% 酵母、发酵时间为 50 min。经响应面分析, 该模型显著, 且回归方程拟合度良好。采用此配方制作的沙棘果渣馒头具有表面光滑、弹性佳的特点, 同时兼具良好的挥发性风味和丰富的营养价值。

向馒头中添加沙棘果渣, 对馒头的抗氧化性能和淀粉消化特性均产生影响。实验结果显示, 随着沙棘果渣的加入, 馒头中的黄酮和多酚含量显著增加($P$<0.05), 并且 DPPH 和 ABTS$^+$自由基清除能力也同样显著增强($P$<0.05), 证明向馒头中添加沙棘果渣可以改善馒头的抗氧化性; 并且沙棘果渣玉米面馒头中的膳食纤维能够降低淀粉的消化速率, 起到降低血糖指数的作用, 其预测血糖生成指数为 71.87, 属于

中 GI 食品。本研究为沙棘果渣玉米面馒头的工业化生产及深入研究奠定了理论基础，拓展了沙棘果渣的应用领域。

© The Author(s) 2026. 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] 王璇, 张志伟, 陈志玺, 等. 沙棘果食品开发利用研究进展与发展对策[J]. 保鲜与加工, 2024, 24(1): 75−82. [WANG Xuan, ZHANG Zhiwei, CHEN Zhixi, et al. Research progress and countermeasure on development and utilization of seabuckthorn berries in food[J]. Storage and Process, 2024, 24(1): 75−82.]

[2] GÂTLAN A M, GUTT G. Sea buckthorn in plant based diets. An analytical approach of sea buckthorn fruits composition: Nutritional value, applications, and health benefits[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(17): 8986.

[3] YU Wenting, DU Yongqiang, LI Shanshan, et al. Sea buckthorn-nutritional composition, bioactivity, safety, and applications: A review[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2024, 133: 106371.

[4] 王薇, 曹雯. 沙棘果渣多酚、多糖及黄酮抑菌性及对葡萄保鲜研究[J]. 中国食品添加剂, 2023, 34(11): 12−18. [WANG Wei, CAO Wen. Study on bacteriostasis of polyphenols, polysaccharides and flavonoids from sea buckthorn pomace and their preservative effects on grapes[J]. China Food Additives, 2023, 34(11): 12−18.]

[5] ARORA R, MUNDRA S, YADAV A, et al. Antimicrobial activity of seed, pomace and leaf extracts of sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.) against foodborne and food spoilage pathogens[J]. African Journal of Biotechnology, 2012, 11(45): 10424−10430.

[6] KANT V, MEHTA M, VARSHNEYA C. Antioxidant potential and total phenolic contents of seabuckthorn (*Hippophae rhamnoides*) pomace[J]. Free Radicals and Antioxidants, 2012, 2(4): 79−86.

[7] 崔蔚然, 吕孟玲, 白红雨, 等. 沙棘果渣膳食纤维对丙烯酰胺的吸附特性[J]. 食品工业科技, 2025, 46(6): 361−368. [CUI Weiran, LÜ Mengling, BAI Hongyu, et al. Adsorption characteristics of dietary fibres from sea buckthorn pomace on acrylamide[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(6): 361−368.]

[8] 裴龙英, 王晓雨, 徐恒, 等. 沙棘果渣中色素的提取工艺及其性质研究[J]. 发酵科技通讯, 2023, 52(1): 1−7. [PEI Longying, WANG Xiaoyu, XU Heng, et al. Study on extraction technology and properties of pigment from sea buckthorn pomace[J]. Bulletin of Fermentation Science and Technology, 2023, 52(1): 1−7.]

[9] WU Dan, YANG Zhihao, LI Jiong, et al. Optimizing the solvent selection of the ultrasound-assisted extraction of sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.) pomace: Phenolic profiles and antioxidant activity[J]. Foods, 2024, 13(3): 482.

[10] QIN Xuze, ZHANG Ting, CAO Yuxin, et al. Effects of dietary sea buckthorn pomace supplementation on skeletal muscle mass and meat quality in lambs[J]. Meat Science, 2020, 166: 108141.

[11] DANG Chongshu, ZHAO Kexin, XUN Yiping, et al. *In vitro* intervention of *Lactobacillus paracasei* N1115 can alter fecal microbiota and their SCFAs metabolism of pregnant women with constipation and diarrhea[J]. Current Microbiology, 2022, 79(7): 212.

[12] 李晓娜, 亓鑫, 赵卉, 等. 植物乳杆菌改性玉米粉制作玉米面条的工艺及品质分析[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(5): 185−189. [LI Xiaona, QI Xin, ZHAO Hui, et al. Processing technique and quality analysis of corn noodles made from *Lactobacillus plantarum* modified corn flour[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(5): 185−189.]

[13] 靳羽慧, 刘晓媛, 李飞, 等. 酒酿绿茶馒头的护色剂筛选及配方优化[J]. 食品科技, 2025(1): 172−178. [JIN Yuhui, LIU Xiaoyuan, LI Fei, et al. Screening of color fixative and optimization of formula for fermented glutinous rice and green tea steamed bread[J]. Food Science and Technology, 2025(1): 172−178.]

[14] 朱翠玲, 洪群燕, 周超, 等. 不同添加量香菇粉对面团特性及馒头品质的影响研究[J]. 食品科技, 2024, 49(8): 178−184. [ZHU Cuiling, HONG Qunyan, ZHOU Chao, et al. Influence of different amounts of shiitake mushroom powder added on the characteristics of dough and the quality of steamed bread[J]. Food Science and Technology, 2024, 49(8): 178−184.]

[15] 裴丽娜, 罗登林, 李佩艳, 等. 改性膳食纤维在面制品中的应用研究进展[J]. 食品与机械, 2024, 40(2): 221−226. [PEI Lina, LUO Denglin, LI Peiyan, et al. Applications of modified dietary fibers in flour products[J]. Food & Machinery, 2024, 40(2): 221−226.]

[16] 刘维汐, 张存莉. 沙棘果渣膳食纤维咀嚼片的工艺[J]. 食品工业, 2019, 40(10): 120−123. [LIU Weixi, ZHANG Cunli. The technology of seabuckthorn residue dietary fiber chewable tablets[J]. The Food Industry, 2019, 40(10): 120−123.]

[17] 叶双灵, 丘苑新, 湛斯域, 等. 发酵豆渣添加量对馒头品质影响研究[J]. 中国食品添加剂, 2024, 35(5): 250−257. [YE Shuangling, QIU Yuanxin, ZHAN Siyu, et al. Effect of fermented soybean dregs on the quality of steamed buns[J]. China Food Additives, 2024, 35(5): 250−257.]

[18] 饶颖, 冯小平, 郑静, 等. 南瓜全麦馒头配方优化与营养特性分析[J]. 食品工业科技, 2024, 45(11): 167−174. [RAO Ying, FENG Xiaoping, ZHENG Jing, et al. Formula optimization and nutritional characteristics analysis of pumpkin whole wheat steamed bread[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(11): 167−174.]

[19] 张佳丽, 李朋亮, 赵巍, 等. 基于电子鼻和 GC-IMS 联用技术分析不同豆类馒头挥发成分的差异[J]. 中国粮油学报, 2023, 38(6): 156−163. [ZHANG Jiali, LI Pengliang, ZHAO Wei, et al. Analysis of volatile components in different bean steamed bread based on electronic nose and GC-IMS[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2023, 38(6): 156−163.]

[20] 王敬涵, 杜密英, 黄水莲, 等. 桑葚果粉添加量对馒头品质及抗氧化能力的影响[J]. 粮油食品科技, 2024, 32(5): 133−141. [WANG Jinghan, DU Miying, HUANG Shuilian, et al. Effect of mulberry powder addition on the quality and antioxidant capacity of steamed bread[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2024, 32(5): 133−141.]

[21] GUO Xudan, WU Chunsen, MA Yujie, et al. Comparison of milling fractions of Tartary buckwheat for their phenolics and antioxidant properties[J]. Food Research International, 2012, 49(1): 53−59.

[22] MA Yujie, GUO Xudan, LIU Hang, et al. Cooking, textural, sensorial, and antioxidant properties of common and Tartary buckwheat noodles[J]. Food Science and Biotechnology, 2013, 22(1): 153−159.

[23] 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 Mengying, ZHAO Yiming, JING Minge, 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. ]
[ 24 ] XIAO Yu, XING Guangliang, RUI Xin, et al. Enhancement of the antioxidant capacity of chickpeas by solid state fermentation with *Cordyceps militaris* SN-18[J]. Journal of Functional Foods, 2014, 10: 210−222.
[ 25 ] AGAMA-ACEVEDO E, ISLAS-HERNÁNDEZ J J, PACHECO-VARGAS G, et al. Starch digestibility and glycemic index of cookies partially substituted with unripe banana flour[J]. LWT - Food Science and Technology, 2012, 46(1): 177−182.
[ 26 ] 孙康娜, 院珍珍, 李岩, 等. 低 GI 青稞馒头加工工艺优化及品质分析[J]. 中国酿造, 2024, 43(10): 230−235. [ SUN Kangna, YUAN Zhenzhen, LI Yan, et al. Optimization of processing technology and quality analysis of low-GI highland barley steamed bread[J]. China Brewing, 2024, 43(10): 230−235. ]
[ 27 ] 汪雅馨, 刘晓媛, 申茹晓, 等. 金丝绞瓜馒头的配方优化及品质分析[J]. 食品科技, 2023, 48(9): 127−135. [ WANG Yaxin, LIU Xiaoyuan, SHEN Ruxiao, et al. Process formula optimization and quality analysis of steamed bread with *Cucurbita pepo* L. subsp. Pepo[J]. Food Science and Technology, 2023, 48(9): 127−135. ]
[ 28 ] 刘莹莹, 李嘉豪, 胡燕, 等. 蛹虫草玉米馒头加工工艺及品质[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(11): 175−180. [ LIU Yingying, LI Jiahao, HU Yan, et al. Processing technology and quality of *Cordyceps militaris* corn steamed bread[J]. Food Research and Development, 2023, 44(11): 175−180. ]
[ 29 ] LI Shaohui, ZHAO Wei, LI Pengliang, et al. Effects of different cultivars and particle sizes of non-degermed millet flour fractions on the physical and texture properties of Chinese steamed bread[J]. Cereal Chemistry, 2020, 97(3): 661−669.
[ 30 ] 邹磊. 葡萄皮渣对馒头感官品质和抗氧化能力的影响[J]. 粮食与油脂, 2016, 29(7): 19−22. [ ZOU Lei. Effect of grape pomace on the sensory quality and antioxidant capacity of steamed bread[J]. Cereals & Oils, 2016, 29(7): 19−22. ]
[ 31 ] 周杰, 孙科祥. 甘薯渣粉对馒头品质的影响及品质改良方法[J]. 粮食与油脂, 2021, 34(9): 73−77. [ ZHOU Jie, SUN Kexiang. Effect of sweet potato residue powder on the quality of steamed bread and its improvement method[J]. Cereals & Oils, 2021, 34(9): 73−77. ]
[ 32 ] 程万兴, 王勇杰, 王富, 等. 魔芋馒头的工艺条件研究[J]. 粮食加工, 2023, 48(4): 32−36. [ CHENG Wanxing, WANG Yongjie, WANG Fu, et al. Study on technological conditions of konjac steamed bread[J]. Grain Processing, 2023, 48(4): 32−36. ]
[ 33 ] 翁金通, 生庆海, 刘敬科, 等. 小米老面馒头发酵工艺优化[J]. 粮食与油脂, 2023, 36(11): 43−48. [ WENG Jintong, SHENG Qinghai, LIU Jingke, et al. Optimization of fermentation technology of millet sourdough steamed bread[J]. Cereals & Oils, 2023, 36(11): 43−48. ]
[ 34 ] 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(2): 27−33. [ YANG Miao, AO Changwei, ZHANG He, et al. Study on processing of persimmon powder steamed bread and nutritional characteristics[J]. Cereal & Feed Industry, 2022(2): 27−33. ]
[ 35 ] 梁美媛, 杨佳洋, 赵萌迪, 等. 毛竹笋粉馒头的制备及其品质特征研究[J]. 食品与生物技术学报, 2024, 43(10): 78−87. [ LIANG Meiyuan, YANG Jiayang, ZHAO Mengdi, et al. A study on preparation and quality characteristics of moso bamboo shoot powder steamed buns[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2024, 43(10): 78−87. ]
[ 36 ] 张贞炜, 蒋静, 谢跃, 等. 添加竹笋粉的面制品品质及其功能特性[J]. 现代食品科技, 2024, 40(12): 271−280. [ ZHANG Zhenwei, JIANG Jing, XIE Yue, et al. Quality and functional properties of flour products fortified with bamboo shoot powder[J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(12): 271−280. ]
[ 37 ] 连雅丽. 不同品种新疆大果沙棘冻干粉特性分析及泡腾片产品开发[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2022. [ LIAN Yali. Characteristics analysis and analysis of freeze-dried powder of different varieties of Xinjiang large fruit seabuckthorn effervescent tablet product development[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2022. ]
[ 38 ] 莫梅清, 江梓仪, 胡梦迪, 等. 刺梨汁冷冻贮藏过程中风味的动态变化规律[J]. 食品工业科技, 2024, 45(20): 320−331. [ MO Meiqing, JIANG Ziyi, HU Mengdi, et al. Dynamic flavor changes of *Rosa roxburghii* juice during frozen storage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(20): 320−331. ]
[ 39 ] 杭书扬, 杨林霄, 郭建行, 等. 山药皮中黄酮、多酚提取工艺优化及其抗氧化活性[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(20): 122−127. [ HANG Shuyang, YANG Linxiao, GUO Jianhang, et al. Optimization of extraction technology and antioxidant activity of flavonoids and polyphenols from yam skin[J]. Food Research and Development, 2023, 44(20): 122−127. ]
[ 40 ] CRISTE A, URCAN A C, BUNEA A, et al. Phytochemical composition and biological activity of berries and leaves from four Romanian Sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.) varieties[J]. Molecules, 2020, 25(5): 1170.
[ 41 ] 孙伟鹏. 沙棘果渣中主要有效成分的盐析萃取[D]. 石河子: 石河子大学, 2018. [ SUN Weipeng. Salting out extraction of the main effective components from sea buckthorn seeds[D]. Shihezi: Shihezi University, 2018. ]
[ 42 ] 李东香, 关荣发, 黄海智, 等. 3 种新疆沙棘黄酮的提取优化及抗氧化活性对比[J]. 中国食品学报, 2023, 23(4): 157−167. [ LI Dongxiang, GUAN Rongfa, HUANG Haizhi, et al. Optimization of extraction of flavonoids from three kinds of Xinjiang Sea buckthorns and comparative of antioxidant activities[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(4): 157−167. ]
[ 43 ] HUSSAIN S, SHARMA M, BHAT R. Valorisation of sea buckthorn pomace by optimization of ultrasonic-assisted extraction of soluble dietary fibre using response surface methodology[J]. Foods, 2021, 10(6): 1330.
[ 44 ] LI Sheng, ZHENG Yuqian, CHEN Zhilong, et al. Effect of soluble dietary fiber from corn bran on pasting, retrogradation, and digestion characteristics of corn starch[J]. Food Chemistry: X, 2024, 24: 102013.
[ 45 ] 李晓宁, 汪丽萍, 田晓红, 等. 麦麸膳食纤维及原料麦麸对馒头品质的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(3): 75−82. [ LI Xiaoning, WANG Liping, TIAN Xiaohong, et al. Effects of wheat bran dietary fiber and raw wheat bran on the quality of steamed bread[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(3): 75−82. ]
[ 46 ] 赵云珠, 李爽, 王明慧, 等. 改性豆渣的工艺优化及豆渣馒头的品质改良[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(21): 144−151. [ ZHAO Yunzhu, LI Shuang, WANG Minghui, et al. Process optimization of modified soybean residue and quality improvement of steamed bread with soybean residue[J]. Food Research and Development, 2024, 45(21): 144−151. ]
[ 47 ] 赵晓燕, 张晓伟, 王萌, 等. 馓制品中淀粉消化特性及生物活性物质的研究[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(9): 14−21. [ ZHAO Xiaoyan, ZHANG Xiaowei, WANG Meng, et al. Digestion characteristics of starch and bioactive substance in Nang product[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2021, 36(9): 14−21. ]