

## 高添加苦荞面条的配方优化及其抗氧化活性分析

孔维凤, 李秀花, 邵丽君, 蒋依婷, 琚飞龙, 梁 进, 孙 , 陈 洪, 李雪玲

### Formula Optimization and Antioxidant Activity of High-added Tartary Buckwheat Noodles

KONG Weifeng, LI Xiuhua, SHAO Lijun, JIANG Yiting, JU Feilong, LIANG Jin, SUN Yue, CHEN Hong, and LI Xueling

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021070292>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 苦荞麸皮总黄酮体外抗氧化活性及体内解酒护肝作用

Antioxidant Activity of Total Flavonoids from Tartary Buckwheat Bran *in Vitro* and Its Effect on Antialcoholism and Liver Protection *in Vivo*

食品工业科技. 2020, 41(17): 314–319,326

#### 苦荞皮粉-小麦粉面条配方优化

Formulation Optimization for the Tartary Buckwheat-Wheat Mixed Flour Noodles

食品工业科技. 2018, 39(20): 194–199

#### 苦荞中D-手性肌醇的纯化及其抗氧化活性研究

Study on purification and antioxidant activity of D-chiro-inositol from tartary buckwheat

食品工业科技. 2017(14): 82–86

#### 碱蓬草总生物碱提取工艺优化及其对高脂饮食小鼠的体内抗氧化活性

Extraction of Total Alkaloids from *Suaeda salsa* and Its Antioxidant Activity in Mice Fed with High-fat Diet

食品工业科技. 2021, 42(7): 188–194

#### 贵州不同品种苦荞品质及其对荞麦面条加工的影响

Quality of Tartary Buckwheat of Different Varieties in Guizhou and Its Effect on Buckwheat Noodle Processing

食品工业科技. 2019, 40(19): 55–60

#### 不同苦荞茶总黄酮冲泡特性及其与抗氧化能力相关性的研究

Correlation Between Total Flavonoids Brewing Characteristics and Its Antioxidant Capacity of Different Types of Tartary Buckwheat Tea

食品工业科技. 2018, 39(18): 22–26,32



关注微信公众号，获得更多资讯信息

孔维凤, 李秀花, 邵丽君, 等. 高添加苦荞面条的配方优化及其抗氧化活性分析 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(12): 155-162. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021070292

KONG Weifeng, LI Xiuhua, SHAO Lijun, et al. Formula Optimization and Antioxidant Activity of High-added Tartary Buckwheat Noodles[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(12): 155-162. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021070292

· 工艺技术 ·

# 高添加苦荞面条的配方优化及其 抗氧化活性分析

孔维凤<sup>1</sup>, 李秀花<sup>1</sup>, 邵丽君<sup>1</sup>, 蒋依婷<sup>1</sup>, 琚飞龙<sup>1</sup>, 梁 进<sup>1</sup>, 孙 玥<sup>1</sup>, 陈 洪<sup>2</sup>, 李雪玲<sup>1,\*</sup>

(1. 安徽农业大学茶与食品科技学院, 安徽省农产品加工工程实验室, 安徽合肥 230036;

2. 枞阳县新长河食品发展有限责任公司, 安徽芜湖 246736)

**摘 要:** 优化高添加苦荞面条的配方并研究其抗氧化活性。采用单因素实验和响应面试验, 以综合评分为考察指标, 确定高添加苦荞面条的最优配方; 测定面团的热机械特性和面条蒸煮特性及其抗氧化活性。结果表明, 高添加苦荞面条的最佳配方是: 苦荞添加量 62%、面粉添加量 38%、蔗糖酯添加量 0.4%、食用碱添加量 0.2%、魔芋胶添加量 0.4%、食盐添加量 2%。改良组的面团蒸煮稳定性 (C4/C3) 优于纯小麦面条组, 采用该配方制备的高添加苦荞面条 (即改良组) 综合评分最高。总酚含量及体外抗氧化活性结果显示, 改良组面条的总酚含量及抗氧化能力显著高于纯小麦面条 ( $P < 0.05$ ), 其中, 改良组的总酚含量为 9.11 mg GAE/g, DPPH·清除率为 70.55%, ABTS<sup>+</sup>清除率为 87.73%; 而纯小麦面条的总酚含量及 DPPH·、ABTS<sup>+</sup>清除率分别为 1.11 mg GAE/g、36.70%、9.10%。通过蒸煮特性结果可以得出, 无改良剂的苦荞面条其蒸煮损失率、断条率及面汤浑浊度显著大于纯小麦面条 ( $P < 0.05$ ), 而改良组的蒸煮损失率、断条率与纯小麦面条差异不显著 ( $P > 0.05$ ), 但面汤浑浊度差异显著。因此, 本文优化后的高添加苦荞混合粉具有较高抗氧化活性及面条加工适性。

**关键词:** 高添加量, 苦荞面条, 魔芋胶, 抗氧化活性

中图分类号: TS211

文献标识码: B

文章编号: 1002-0306(2022)12-0155-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021070292

本文网刊:



## Formula Optimization and Antioxidant Activity of High-added Tartary Buckwheat Noodles

KONG Weifeng<sup>1</sup>, LI Xiuhua<sup>1</sup>, SHAO Lijun<sup>1</sup>, JIANG Yiting<sup>1</sup>, JU Feilong<sup>1</sup>, LIANG Jin<sup>1</sup>, SUN Yue<sup>1</sup>,  
CHEN Hong<sup>2</sup>, LI Xueling<sup>1,\*</sup>

(1. Agricultural Products Processing Engineering Laboratory of Anhui Province, College of Tea and Food Science and Technology, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China;

2. Zongyang County Xinchanghe Food Development Co., Ltd., Wuhu 246736, China)

**Abstract:** To optimize the formula of high addition tartary buckwheat noodles and study its antioxidant activity, single factor experiments and response surface method were used to determine the optimal formula of high-added tartary buckwheat noodles. Secondly, the thermal mechanical properties of dough and the cooking characteristics of noodle and its antioxidant activity were determined. The results showed that the best formula of high addition tartary buckwheat noodles were as follows: 62% tartary buckwheat, 38% flour, 0.4% sucrose ester, 0.2% edible alkali, 0.4% konjac gum and 2% salt. The dough cooking stability (C4/C3) of this formula was better than that of the pure wheat noodles and the comprehensive score of the high addition tartary buckwheat noodles prepared with this formula was the highest. The total phenol content and *in vitro* antioxidant activity results showed that the total phenol content and antioxidant capacity of the improved group

收稿日期: 2021-07-26

基金项目: 安徽省中央引导地方科技发展资金项目 (202107d06020015)。

作者简介: 孔维凤 (1996-), 女, 硕士, 研究方向: 农产品加工与贮藏, E-mail: 1915451116@qq.com。

\* 通信作者: 李雪玲 (1972-), 女, 硕士, 副教授, 研究方向: 农产品加工及食品配料, E-mail: 2488559391@qq.com。

were significantly higher than the pure wheat noodles ( $P<0.05$ ), and the total phenolic content of the improved group was 9.11 mg GAE/g, the scavenging rate of DPPH $\cdot$  and ABTS $^{+\cdot}$  was respectively 70.55% and 87.73%. While the total phenolic content, the scavenging rate of DPPH $\cdot$  and ABTS $^{+\cdot}$  were 1.11 mg GAE/g, 36.70% and 9.10%, respectively. According to the results of cooking characteristics, the cooking loss rate, break rate and noodle soup turbidity of Tartary buckwheat noodles without improved agents were significantly greater than that of pure wheat noodles ( $P<0.05$ ), while the cooking loss rate and break rate of the improved group were not significantly different from pure wheat noodles, but the turbidity of the improved noodle soup was significant. Therefore, the optimized high content tartary buckwheat flour mixture had the higher antioxidant activity and the noodle processing suitability.

**Key words:** high addition; tartary buckwheat noodles; konjac flour; antioxidant activity

苦荞麦 (*Fagopyrum tataricum* Gaertn.) 为蓼科荞麦属植物苦荞麦的种子, 含有黄酮、D-荞麦碱、荞麦糖醇等成分<sup>[1-2]</sup>, 具有一定的降血脂、降血糖、降血压和抗氧化功效<sup>[3]</sup>。苦荞作为一种兼具营养和保健功能的杂粮作物, 不仅可以制作功能性食品, 也可以作为主食食用, 许多学者进行了这方面的探究<sup>[4-5]</sup>。其中, 苦荞麦面条在中国、日本、韩国等东亚国家内广受消费者欢迎<sup>[6]</sup>。

苦荞面条中的苦荞粉添加量越高, 理论上其保健功能越好, 但目前对于苦荞粉的添加比例不得低于多少, 仍然没有标准, 导致市场上的苦荞面条食疗效果参差不齐。此外高苦荞添加量面条还可以应对食用精细精白主食引起的健康问题<sup>[7]</sup>。但当苦荞粉添加量超过 30% 时, 面条就有成型困难、易断条和混汤等缺点<sup>[8]</sup>。主要原因在于苦荞不含面筋蛋白, 加工适性差, 导致其单独加工面条时无法成型, 通常需要与小麦粉复配, 同时再使用改良剂<sup>[9]</sup>、或对苦荞预处理<sup>[10]</sup>或改变加工工艺<sup>[11]</sup>来弥补面筋蛋白缺乏而带来的不良影响, 其中改良剂的使用是高效又经济的措施之一。食用胶在食品加工领域是应用比较广泛的改良剂之一<sup>[12]</sup>, 其本身也具有一定的保健功能<sup>[13]</sup>, 可以选用合适的食用胶强化高添加苦荞面条的网络结构, 以保证高添加混合粉具有良好的加工适性。

为了积极响应《“健康中国 2030”规划纲要》, 本文以苦荞-小麦混合粉制作高添加苦荞面条, 考察苦荞添加量、魔芋胶添加量、食用盐添加量对高添加苦荞面条的质构和感官品质特性的影响, 确定高添加苦荞面条的最优配方, 并研究苦荞面条的热机械学特性和抗氧化活性, 为高添加苦荞面条的生产提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

苦荞全粉 由安徽新长河食品发展有限责任公司提供; 特一小麦粉 想念食品股份有限公司(小麦粉中的蛋白质和脂质分别为 9.5 g/100 g 和 1.3 g/100 g); 魔芋胶 糖柜食品有限公司; S-11 型蔗糖酯 迪耳牌; 食用碱、食用盐 均为市售; 甲醇、过硫酸钾、碳酸钠、福林酚试剂、没食子酸、乙醇 国药集团化学试剂有限公司; DPPH、ABTS 上海蓝季生物公司; 其他化学试剂 均为分析纯。

JA503 分析天平 常州市幸运电子设备有限公

司; JM-A10002 电子天平 余姚纪铭称重校验设备有限公司; DK-98-II 电子调温万用电炉、HH-2 数显恒温水浴锅 金坛市杰瑞尔电器有限公司; TA-XT Plus 型质构分析仪 英国 Stable Micro Systems 公司; Mixolab 混合试验仪 法国肖邦技术有限公司; HC-3514 高速离心机 安徽中科中佳科学仪器有限公司; UV-9000 紫外可见分光光度计 上海元析仪器有限公司。

### 1.2 实验方法

1.2.1 苦荞粉的制备 将苦荞全粉过 80 目筛去除残留籽壳, 装至塑封袋置于干燥器中保存。

1.2.2 面条的制备 纯小麦面条的制备(对照组): 称取小麦粉, 加水 35%, 充分搅拌揉捏, 和面 10 min, 保鲜膜包裹静止醒发 20 min, 用压面机压成厚度 1 mm, 宽度 4 mm 的面条, 切成 20 cm, 自然晾干后备用。

苦荞-小麦面条的制备(空白组): 将按比例称取好的苦荞粉和面粉充分混匀, 加水 55%, 搅拌揉捏成面团, 静置醒发 20 min, 用压面机压延 10 次, 压成厚度 1 mm, 宽度 4 mm 的面条, 切成 20 cm, 自然晾干后备用。

苦荞-小麦面条的制备(改良组): 将魔芋胶和碱混合, 加入魔芋胶重量 50 倍水, 水浴溶胀, 静置冷却后加入苦荞粉搅拌均匀, 置于水浴锅预糊化(55 ℃, 15 min)静置冷却; 加入面粉和溶解后的蔗糖酯、食盐(水浴锅搅拌溶解)搅拌, 揉捏充分, 保鲜膜包裹静置熟化 20 min<sup>[14]</sup>。压延十次, 切成 20 cm 长的面条, 自然晾干后备用。

### 1.2.3 高添加苦荞-小麦面条配方的优化

1.2.3.1 单因素实验 将蔗糖酯和食用碱的添加量固定为 0.4% 和 0.2%。通过固定魔芋胶和食盐的添加量为 0.4% 和 1%, 考察不同苦荞粉添加量 45%、50%、55%、60%、65% 对面条品质的影响; 固定苦荞粉和食盐添加量为 60% 和 1%, 考察魔芋胶添加量 0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.5% 对面条品质的影响; 固定苦荞粉和魔芋胶添加量为 60% 和 0.4%, 考察食盐添加量为 1%、2%、3%、4%、5% 对面条品质的影响。

1.2.3.2 响应面试验 根据单因素实验结果, 选取苦荞粉、魔芋胶、食用盐添加量 3 个因素, 分别选取 3 个水平, 以综合评分为考察指标, 进行响应面试验设计, 因素水平如表 1 所示。

表 1 响应面试验设计

因素	水平		
	-1	0	1
A苦荞添加量(%)	55	60	65
B魔芋胶添加量(%)	0.3	0.4	0.5
C食盐添加量(%)	1	2	3

1.2.4 综合评分的确定 单因素实验和响应面试验均以综合评分为评价指标,综合评分通过加权评分法确定,其中质构评分权重为 0.6,感官评分权重为 0.4。

1.2.4.1 质构评分 TPA 测定:将干面条用可调式电炉煮至最佳蒸煮时间,冷水冲淋 10 s 吸干表面水分,室温下晾 3 min 后将 6 根面条均匀摆放在操作台上。使用 P36R 探头,参数设定:测前速度:2.00 mm/s,测试速率:0.8 mm/s,测后速率:0.8mm/s,压缩程度:75%,触发力:5 g。采用咀嚼性为质构评分指标,咀嚼性=硬度×内聚性×弹性,每组测量六次,去除咀嚼性最大值和最小值后取平均值。通过前期预实验所得质构数据,以咀嚼性 8000 为目标数据。评分公式(1)计算:

$$\text{质构评分} = \left(1 - \frac{|A - X|}{A}\right) \times 100$$

式 (1)

式中: A 为咀嚼性目标数据; X 为咀嚼性实际测定数据。

1.2.4.2 感官评分 由 8 名受过培训的食品感官评价员对苦荞-小麦面条进行感官评定。取 10 g 面条煮至最佳蒸煮时间,置于已编号的白色盘子上对面条进行感官评价,结果去除最大值与最小值后取平均值。评价标准根据表 2 进行适当修改<sup>[2]</sup>,对面条的色泽、适口性、弹性、粘性、食味进行感官评价。

表 2 感官评价标准

项目	满分	评分标准
色泽(指面条的颜色和亮度)	15	棕黄色,光亮10~15分 深棕色,亮度一般5~9分 灰褐色,较暗0~4分
适口性(硬度)	15	软硬合适10~15分 稍硬或软5~9分 太硬或太软0~4分
弹性(面条在咀嚼时,咬劲和弹性的大小。)	25	有咬劲、弹性适中21~25分 弹性一般15~20分 咬劲差、弹性不足1~14分
黏性(指在咀嚼过程中,面条粘牙强度。)	25	咀嚼时无粉质感、不粘牙 21~25分 较有粉质感、稍粘牙15~20分 易散、发粘0~14分
食味(指品尝时的味道)	20	荞麦清香味,苦味适中16~20分 苦味较大,可接受10~15分 苦味浓 难以接受0~9分

1.2.5 面团的热机械学特性的测定 采用 Mixolab 分别处理纯面粉、空白组粉、改良组粉,进一步验证上述优化后的高添加苦荞-小麦粉的加工适性。

使用肖邦 Chopin+程序:第一阶段在 30 ℃ 混合 8 min,将第二阶段以 4 ℃/min 的速度加热到 90 ℃,然后在 90 ℃ 保持 7 min。最后,该阶段以 4 ℃/min 的速度将温度降至 30 ℃。试验进行 45min,从曲线图中可以获取参数:吸水率,面团稳定时间,C2(稠度最小值),C4/C3(蒸煮稳定性)<sup>[15]</sup>,C5(回生特性),β(糊化速率)。通过这些参数分析空白组、对照组和改良组的品质差异。

1.2.6 面条抗氧化活性的测定

1.2.6.1 样品前处理 样品粉碎后过 80 目筛,取 2 g 样,加 40 mL 浓度为 80% 甲醇,混合液在摇床上以 220 r/min、37 ℃ 提取 2 h,在 4000 r/min 条件下离心 5 min,取上清液待用。

1.2.6.2 总酚含量的测定 总酚含量采用福林酚法<sup>[16]</sup>进行测定,以没食子酸为对照在 760 nm 下测定吸光度值。

1.2.6.3 自由基清除率的测定 DPPH:采用唐仁勇等<sup>[17]</sup>和王洁洁等<sup>[18]</sup>的方法并稍作调整,用无水甲醇将配制成 DPPH 0.1 mmol/L 的溶液,取 1 mL DPPH 溶液与 2 mL 提取液混合,避光反应 30 min,用紫外分光光度计于波长 517 nm 处测定吸光值,全程避光。

样品的 DPPH·清除率按公式(2)计算:

$$\text{DPPH}\cdot\text{清除率}(\%) = \frac{A_0 - (A_1 - A_2)}{A_0} \times 100$$

式 (2)

式中: A<sub>1</sub> 是实验样品组; A<sub>2</sub> 是无水乙醇代替 DPPH 试剂组; A<sub>0</sub> 是去离子水代替样品组,其他条件不变。

ABTS<sup>+</sup>:参照王洁洁等<sup>[18]</sup>的实验方法并进行适当调整,分别配制 7 mm/L 的 ABTS 溶液和 2.4 mm/L 的过硫酸钾溶液,按 1:1 比例混合,避光反应 12~16 h 后用无水甲醇稀释,调整吸光度值为 0.70±0.02。最后取 0.5 mL 样品溶液,加入 4 mL ABTS 溶液,反应 6 min,于波长 734 nm 处测定吸光值,按照公式(3)计算:

$$\text{ABTS}^+\cdot\text{清除率}(\%) = \frac{A_{\text{空白}} - (A_{\text{样}} - A_{\text{对照}})}{A_{\text{空白}}}$$

式 (3)

式中: A<sub>样</sub>为实验组; A<sub>空白</sub>为无水甲醇代替样品组; A<sub>对照</sub>为无水甲醇代替 ABTS 溶液组,其他条件不变。

1.3 数据处理

使用 Excel 2007 软件筛选数据和计算综合得分; SPSS 22.0 软件进行显著性分析(ANOVA), P<0.05 为显著性检验标准; Design Expert 软件进行处理响应面数据; Origin 8.0 软件进行数据及图谱分析,所有实验重复不少于三次。

2 结果与分析

2.1 单因素实验结果

2.1.1 苦荞粉添加量对苦荞面条品质的影响 苦荞粉添加量对苦荞面条品质的影响如图 1 所示。由



图1可以看出,在设定实验浓度(45%~65%)范围内,随着苦荞粉添加量增大,熟面条的咀嚼性增大,在45%~55%添加范围内,咀嚼性变化不明显,而添加量在55%~65%时,咀嚼性急剧增大,增幅为9.32%。咀嚼性是硬度、内聚性和弹性的综合表现,其与面条的口感关联性很大<sup>[19]</sup>,在测定质构参数时,内聚性和弹性随着苦荞粉的添加降低,而硬度增加明显。这可能是因为随着苦荞添加量升高,混合粉中多酚及纤维含量也随着增大,导致面条硬度急剧增大。任顺成等<sup>[20]</sup>报道芦丁和槲皮素促进了淀粉颗粒的交联和聚合,加快了淀粉的老化速度,使得面条硬度增加;纤维的高持水性,会改变水分的分布状态,进而影响淀粉的糊化程度,另外,增加的纤维会进一步弱化面筋网络结构的形成,使得淀粉颗粒紧密堆积,塑性增强,面条表现为硬度增加,这和许彦腾等<sup>[21]</sup>的结果一致。面条质构和色泽的改变使得面条的感官评分在45%~60%范围内,随着苦荞添加量增加,评分也增加,但当添加量达到65%时,面条由于硬度太大、无韧性且颜色较深,评分较低。

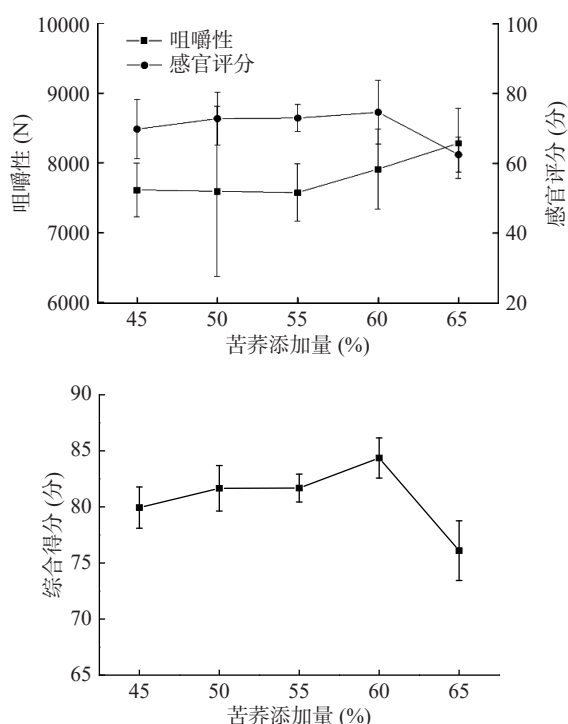


图1 苦荞添加量对咀嚼性、感官评分及综合得分的影响  
Fig.1 Effect of tartary buckwheat addition on chewiness, sensory score and the comprehensive score

由图1可以看出,当苦荞添加量处于(45%~65%)的范围内,苦荞-小麦面条的综合评分呈先上升后下降的趋势,苦荞粉添加量在45%~55%范围,面条韧性较差,荞麦香不明显,综合评分较低。随着苦荞粉添加量增大到60%,面条外观呈现棕黄色且荞麦香浓郁,综合评分达到峰值。进一步增加添加量到65%,面条外观呈黄褐色且苦味突出,适口性较差,综合评分降低。

#### 2.1.2 魔芋胶添加量对苦荞面条品质的影响 采用

苦荞和小麦粉制作高添加苦荞面条,由于苦荞的高添加使得面筋蛋白含量降低,面团韧性和延展性较差,造成面条断条率较高。为了改善上述复配粉的加工适性,使用魔芋胶作为改良剂提高苦荞面条品质。魔芋胶可以改善面条的韧性和弹性,使面汤澄清<sup>[18]</sup>。魔芋胶添加量对苦荞面条品质的影响如图2所示。

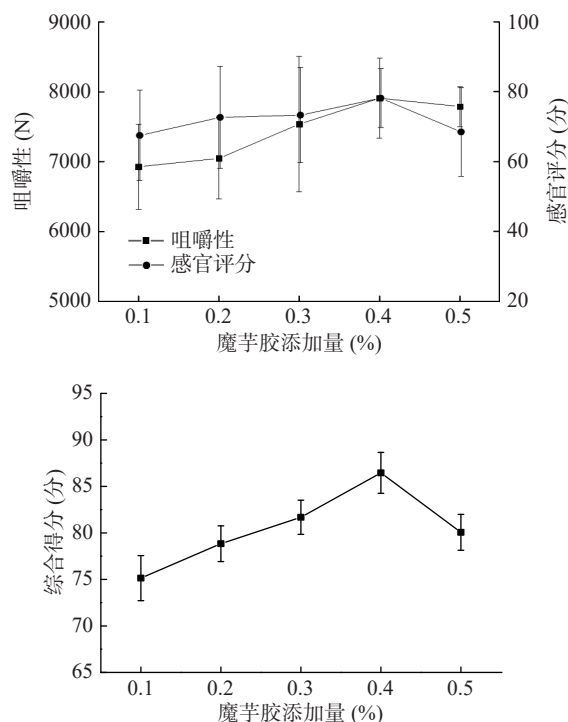


图2 魔芋胶添加量对咀嚼性、感官评分及综合得分的影响  
Fig.2 Effect of konjac gum addition on chewiness, sensory score and the comprehensive score

由图2可以看出,在设定实验浓度(0.1%~0.4%)范围内,随着魔芋胶添加量增大,熟面条的咀嚼性和感官评分都增大,而添加量在0.4%~0.5%时,咀嚼性略有下降,而感官评分则下降较大。咀嚼性随着魔芋胶添加量增加而增大,这可能是魔芋胶在碱性条件下加热,脱去部分乙酰基可形成热不可逆凝胶<sup>[22]</sup>,与面筋蛋白网络共同充当面条的框架,使得面条中淀粉颗粒固定在网格中,使其具有一定硬度。当添加量为0.4%~0.5%,过多魔芋胶影响了水分的分布,导致面筋蛋白网络形成不佳,表现为面条咀嚼性下降。面条质构的改变使得面条的感官评分在0.4%~0.5%范围内,面条由于硬度太大、口感差且颜色较深,评分降低。

魔芋胶添加量对苦荞面条综合得分的影响如图2所示。魔芋胶添加量少时,面条延展性差,颜色较深,适口性较差,综合评分较低。随着魔芋胶添加量的增大,魔芋胶充当面筋,面团拉伸强度增大,提高面条耐煮性,适口性提高,面条颜色明亮<sup>[3,23]</sup>,综合评分增大。魔芋胶可以延缓淀粉的重结晶,随着魔芋胶添加量过大,面团吸水率的增加可能会弱化面团结构<sup>[12]</sup>,面条适口性降低,综合评分随之降低。

2.1.3 食盐添加量对面条品质的影响 食盐除改善面条风味,还可以改良面条的质构<sup>[24]</sup>。图3呈现了

食盐添加量对苦荞面条品质的影响。由图 3 可以看出, 在设定实验浓度(1%~5%)范围内, 随着食盐添加量增大, 熟面条的咀嚼性在 1%~3% 内随着食盐添加量的增加而降低, 而在 3%~5% 内出现波动, 但食盐添加量 4% 及 5% 时的咀嚼性高于 3% 的咀嚼性。而感官评分在 1%~3% 添加范围内不断增大, 而添加量在 3%~5% 时, 感官评分下降。添加适量食盐改良面条质构是通过加强面筋网络结构实现的, 有资料报道添加食盐的面条, 硬度、黏附性、弹性等均高于对照组<sup>[25]</sup>。这种实验现象主要是对纯小麦面条而言的, 而对于面筋含量较低的高添加苦荞面条来说, 可能不合适。食盐因面筋含量低, 对面筋网络几乎无影响, 可能主要是通过影响淀粉的理化特性而影响高添加苦荞面条的质构。食盐抑制淀粉颗粒膨胀进而影响其糊化及胶凝, 表现为面条咀嚼性在 1%~3% 内下降。当食盐添加量 3%~4% 时, 其对水分活度的影响更大, 进而也会影响淀粉糊化, 导致淀粉以完整颗粒的形态堆积在一起, 同时, 可能也会一定程度促进面条中面筋网络的形成<sup>[26]</sup>, 面条表现为咀嚼性上升; 当添加量 4%~5% 时, 咀嚼性又呈下降趋势, 推测浓度过高的食盐会形成一定的静电屏蔽, 影响氢键的形成, 故而会对面条的网络结构有影响。

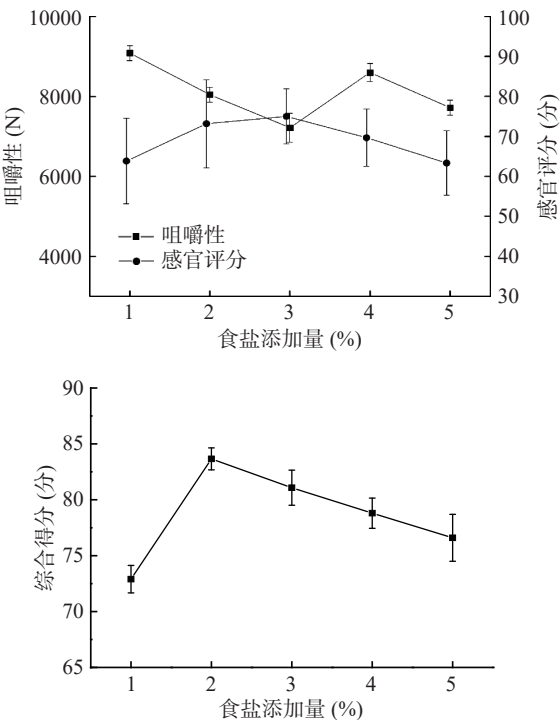


图 3 食盐添加量对咀嚼性、感官评分及综合评分的影响  
Fig.3 Effect of salt addition on chewiness, sensory scores and the comprehensive score

随着食盐添加量的增大, 综合评分呈先上升后下降的趋势(图 3)。当食盐添加量在 2% 时, 综合评分达到峰值, 此后, 再随着添加量的增大, 综合评分随之降低。低浓度的食盐可以提高面团持水性, 但随着浓度增大, 可能会影响淀粉糊化, 使得面条太硬且没

韧性, 同时, 随着食盐添加量增大也会影响面条风味, 导致综合评分下降<sup>[27]</sup>。

2.2 响应面试验结果

根据软件对响应面回归过程进行分析(表 3), 建立模型, 得出以综合评分为目标函数的二次回归方程:

$$Y=89.33-1.47A-0.98B+0.018C-0.26AB+1.000E-002AC+0.035BC-6.30A^2-5.17B^2-3.70C^2$$
。通过数据得出, 此方程  $P<0.01$ , 达到极显著水平, 失拟项 = 0.0543, 不显著, 表示实验结果较稳定, 决定系数  $R^2=0.9819$ , 拟合度较好。在所选的各因素水平范围内, 对响应值的影响排序为  $A>B>C$ , 即苦荞添加量 > 魔芋胶添加量 > 食盐添加量, 且苦荞添加量和魔芋胶添加量对响应值的影响显著 ( $P<0.05$ )。

表 3 Box-Behnken 试验设计与结果  
Table 3 Experiment design and results of Box-Behnken experiment

实验号	A	B	C	综合评分(分)
1	0	1	1	75.59
2	0	-1	-1	82.42
3	1	0	1	78.02
4	0	1	-1	75.87
5	1	-1	0	76.5
6	0	-1	1	82.00
7	-1	-1	0	81.66
8	-1	1	0	82.76
9	0	0	0	89.59
10	1	0	1	78.46
11	-1	0	-1	76.24
12	0	0	0	89.87
13	-1	0	1	76.64
14	0	0	0	89.63
15	0	0	0	89.15
16	1	1	0	75.55

由表 4 可看到各因素对综合得分的影响以及各因素之间的交互作用。经过对所得回归方程取一阶偏导等于零得出:  $A=$ 苦荞 62.49%、 $B=$ 魔芋胶 0.39%、 $C=$ 食盐 2% 为最佳组合, 得出最高综合评分为 87.10。根据实际参数修改为  $A=62\%$ 、 $B=0.4\%$ 、 $C=$ 食盐 2%。最终优化配方为: 苦荞添加量 62%、面粉添加量 38%、魔芋胶 0.4%、蔗糖酯 0.4%, 食盐 2%、碱 0.2%, 通过添加合适的改良剂(魔芋胶、蔗糖酯、碳酸钠、食盐), 把苦荞粉添加量提高到 60% 以上, 此添加量远远大于 30%, 且此配方制备的高添加苦荞面条质量标准符合面条国家标准(GB/T 40636-2021)。

为证实软件预测结果, 以此配方进行实验验证。最终得出综合评分为  $87.60\pm0.81$ , 这个结果和理论预测值 87.1 差异不显著 ( $P>0.05$ ), 说明该模型具有实际的应用价值, 改良苦荞面条的配方是有效的。产品实物图如下(图 4), 与空白组苦荞面条相比, 改良面条色泽均匀有光泽, 断条率和弯曲度都得到改善, 其断条率由 37.5% 降低为 2.5%, 符合面条行

表4 回归模型及方差分析

Table 4 Regression model and analysis of variance

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P	显著性
模型	399.47	9	44.39	42.23	<0.0001	**
A	17.32	1	17.32	16.48	0.0048	**
B	7.62	1	7.62	7.62	0.0309	*
C	2.450E-003	1	2.450E-003	2.331E-003	0.9628	
AB	0.28	1	0.28	0.26	0.6243	
AC	4.000E-004	1	4.000E-004	3.806E-004	0.9850	
BC	4.900E-003	1	4.900E-003	4.662E-003	0.9475	
A <sup>2</sup>	167.02	1	167.02	158.92	<0.0001	**
B <sup>2</sup>	112.47	1	112.47	107.01	<0.0001	**
C <sup>2</sup>	57.51	1	57.51	54.72	0.0001	**
残差	7.36	7	1.05			
失拟项	6.07	3	2.02	6.26	0.0543	
误差项	1.29	4	0.32			
总变异	406.82	16				

注: \*\*差异极显著,  $P<0.01$ ; \*差异显著,  $P<0.05$ 。



空白组面条 对照组面条 改良组面条

图4 优化产品对比分析

Fig.4 Comparison analysis of optimized products

业标准(LS/T 3212-2021)。

### 2.3 Mixolab 实验结果

Mixolab 混合试验仪可全面、科学、直接地表征面粉的质量,能综合评价面粉的流变加工特性<sup>[15]</sup>。由表5可知,改良组粉、对照组粉和空白组粉的面团流变特性存在显著差异。由 Mixolab 实验获得的指标中,吸水率最高的是对照组(73%),最低的为改良组(60.9%)。对照组(纯面粉)的吸水率明显高于空白组(苦荞-小麦)和改良组(苦荞-小麦-改良剂),可能主要原因在于纯面粉中有较高的面筋蛋白,蛋白质的水合作用使吸水率增大<sup>[28]</sup>。而空白组和改良组因为苦荞的大量添加使它们面筋蛋白含量低而导致吸水率降低。稳定时间最大的是对照组(8.4 min),最低的为空白组(0.67 min),改良组的稳定时间为 0.75 min,数据表明高添加苦荞稀释了面筋蛋白,使得耐搅拌性能明显下降,但通过改良剂的使用,机械稳定性能有所提高。C2 指的是面团受到机械及热作用后扭矩降

低的最小值,称为稠度最小值。最高的为对照组(0.50 Nm),空白组和改良组分别为 0.34、0.31 Nm,其中空白组和改良组的 C2 差异不显著( $P>0.05$ ),但与对照组显著降低( $P<0.05$ ),说明高添加苦荞影响了面粉的机械稳定性。C4/C3 代表蒸煮稳定性,值越大,蒸煮稳定性越强。改良组数值最大,空白组数值最小,改良组的蒸煮稳定性优于其他两组。C5 代表面团冷却阶段糊化淀粉的回生特性,在加热过程中从淀粉颗粒中浸出的直链淀粉链被重新结晶,产生凝胶结构,回生值低表明淀粉回生率低且脱水收缩率低<sup>[29]</sup>。从表5可以看出三组的回生特性差异显著,对照组的回生特性最弱,而改良组的回生特性高于空白组,这与蒸煮后的感官评价是一致的,原因可能是因为改良组所含的直链淀粉含量较高<sup>[30]</sup>。 $\beta$ 斜率代表糊化速率,数值越大,糊化速率越快。空白组的糊化速率(0.92)远远大于对照组(0.38)和改良组(0.37),差异显著( $P<0.05$ ),而对照组和改良组差异不显著( $P>0.05$ )。这可能是因为空白组的多酚含量高,促使空白组淀粉易于糊化<sup>[31]</sup>;改良组由于加入了碱及食用胶,一方面由于碱对多酚有一定程度的破坏,其次是食用胶与淀粉竞争水分,这两个原因都会导致改良组淀粉不易糊化。

### 2.4 抗氧化特性

如图5所示,与纯小麦面条相比,优化后的高添加苦荞面条,其总酚含量由 1.11 至 9.11 mg GAE/g,含量增加了 7 倍多;DPPH·清除率由 36.70%±7.11% 提升至 70.55%±1.17%,提高到 1.9 倍多;ABTS<sup>+</sup>清除率由 9.10%±0.27% 提升至 87.73%±1.46%,提高到了 9 倍多。由此可知苦荞面条的抗氧化活性远高于纯小麦面条。此结果与添加苦荞粉香肠的结果一

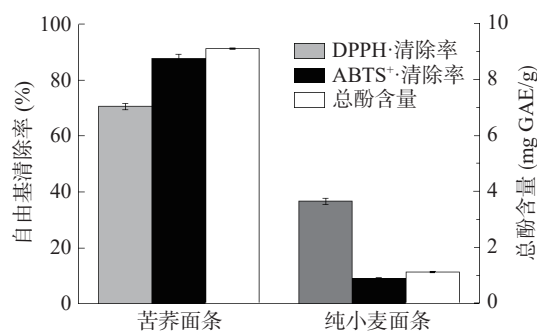


图5 苦荞对面条抗氧化特性的影响

Fig.5 Effect of tartary buckwheat on the antioxidant properties of noodles

表5 Mixolab 实验结果

Table 5 Mixolab mixing characteristics analysis

编号	吸水率(%)	稳定时间(min)	C2(Nm)	C4/C3	C5(Nm)	$\beta$ (Nm/min)
改良组	60.9±0.14 <sup>c</sup>	0.75±0.07 <sup>b</sup>	0.31±0.00 <sup>b</sup>	0.98±0.02 <sup>a</sup>	4.46±0.1 <sup>a</sup>	0.37±0.44 <sup>b</sup>
对照组	73±0.00 <sup>a</sup>	8.4±0.36 <sup>a</sup>	0.50±0.00 <sup>a</sup>	0.85±0.03 <sup>b</sup>	3.74±0.04 <sup>c</sup>	0.38±0.03 <sup>b</sup>
空白组	68.67±0.9 <sup>b</sup>	0.67±0.06 <sup>b</sup>	0.34±0.02 <sup>b</sup>	0.82±0.01 <sup>b</sup>	4.09±0.14 <sup>b</sup>	0.92±0.06 <sup>a</sup>

注: 同列不同字母表示具有显著性差异( $P<0.05$ )。



致,因为苦荞含有丰富的多酚类物质,其中芦丁和槲皮素含量较高,具有抗氧化作用<sup>[17]</sup>。另外,图 5 还显示,纯面粉面条与苦荞面条对本实验中 2 种自由基清除能力不同,纯面粉面条对 DPPH· 的清除能力远大于对 ABTS<sup>+</sup> 的清除能力(36.70%>9.10%),而高添加苦荞面条表现的清除能力与纯面粉面条相反,即对 ABTS<sup>+</sup> 的清除能力远大于对 DPPH· 的清除能力(87.73%>70.55%)。这种实验现象可能是苦荞中某些成分引起的。并且此高添加苦荞面条中加入了魔芋葡甘聚糖,研究<sup>[32-33]</sup> 报道其可显著提高抗氧化活性,因此,高添加苦荞面条的高抗氧化活性可能也与其配方中的魔芋葡甘聚糖有一定关联。

## 2.5 蒸煮特性

加入了高含量的苦荞粉后,制得的空白组面条的烹煮损失率 7.26% 和对照组(纯小麦)面条 3.76% 相比差异性显著( $P<0.05$ ),主要的原因是因为苦荞缺乏谷蛋白和醇溶蛋白,导致面团难以成型,面筋的网络结构弱,高温烹煮后淀粉颗粒和其他营养物质流失严重,烹煮损失率增大。添加了食品改良剂后,魔芋胶和碱会形成热不可逆稳定凝胶充当面筋蛋白,面团的网络结构加强<sup>[22]</sup>,面条的烹煮损失率由 7.26% 降为 5.25%。通过紫外分光光度计对三种面汤进行测定,由表 6 可以看出,三种面条的浑浊度数据差异显著( $P<0.05$ ),且浑浊度和烹煮损失率呈正相关,烹煮损失率大,溶出物增多,使得面汤浑浊度增大。三种面条浑浊度关系为:对照组(纯小麦面条)<改良组<空白组。对照组(纯小麦面条)的断条率为 5%,而添加了高含量的苦荞粉面条,其断条率变为 37.5%,添加魔芋胶和蔗糖酯后,使得改良面团的韧性和延展性增大,改良后的高添加苦荞面条,其断条率降为 2.5%,符合面条行业标准(GB/T 3212-2021)。

表 6 蒸煮特性结果  
Table 6 Results of cooking characteristics

组别	蒸煮损失率(%)	断条率(%)	浑浊度
对照组面条	3.76±0.57 <sup>b</sup>	5.0±0.07 <sup>b</sup>	0.028±0.003 <sup>c</sup>
改良组面条	5.25±1.06 <sup>ab</sup>	2.5±0.03 <sup>b</sup>	0.081±0.008 <sup>b</sup>
空白组面条	7.26±0.31 <sup>a</sup>	37.5±0.03 <sup>a</sup>	0.097±0.003 <sup>a</sup>

注:同列不同字母表示具有显著性差异( $P<0.05$ )。

## 3 结论

将一定比例的苦荞粉和小麦粉混合,且辅以食品改良剂制成高添加苦荞面条。通过单因素实验和响应面实验得出复合苦荞面条的最佳配方参数是苦荞添加量 62%、面粉添加量 38%、蔗糖酯添加量 0.4%、食用碱添加量 0.2%、魔芋胶添加量 0.4%、食盐添加量 2%,依据该配方制作的面条蒸煮特性符合面条标准(GB/T 40636-2021),并且该面条的抗氧化活性明显提高。

添加了高含量的苦荞粉虽然稀释了面筋蛋白及一定程度破坏了面筋结构,导致面条断条率增加。但

辅以适当改良剂后,高添加苦荞粉面条质量指标可以符合面条标准。因此,通过选择合适的品质改良剂,可以提高苦荞粉的添加量并使混合粉的加工适性得到改善,并使该面条具有更高的营养价值。

## 参考文献

- [1] SEERAT B, BALWINDER S, AMRITPAL K, et al. Effect of infrared roasting on antioxidant activity, phenolic composition and Maillard reaction products of Tartary buckwheat varieties[J]. *Food Chemistry*, 2019, 285: 240–251.
- [2] 樊环环. 复合苦荞海带面条的研制与其品质特性研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016. [FAN H H. Preparation and quality characteristics of compound tartary buckwheat kelp noodles[D]. Yangling: Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, 2016.]
- [3] HAN L H, CHENG Y Q, ZHANG Q, et al. Synergistic effects of calcium hydroxide and konjac glucomannan (KGM) on the thermomechanical properties of buckwheat flour and the quality of buckwheat noodles[J]. *Journal of Texture Studies*, 2014, 45(6): 420–429.
- [4] HAN L H, ZHOU Y, TATSUMI E, et al. Thermomechanical properties of dough and quality of noodles made from wheat flour supplemented with different grades of tartary buckwheat (*Fagopyrum tataricum* Gaertn.) flour[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2013, 6(8): 1953–1962.
- [5] GIMÉNEZ-BASTIDA J A, PISKULA M K, ZIELIŃSKI H. Recent advances in processing and development of buckwheat derived bakery and non-bakery products - a review[J]. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 2015, 65(1): 9–20.
- [6] HAN X M, XING J J, HAN C, et al. The effects of extruded endogenous starch on the processing properties of gluten-free Tartary buckwheat noodles[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2021, 267(2): 118170.
- [7] 蔡细旋, 王建榜, 吴江, 等. 我国全科医疗持续发展的挑战: 社区多重慢性病的管理策略[J]. *中国全科医学*, 2020, 23(34): 4279–4284, 4290. [CAI X X, WANG J B, WU J, et al. Challenges to the sustainable development of general practice in my country: Management strategies for multiple chronic diseases in the community[J]. *Chinese General Practice*, 2020, 23(34): 4279–4284, 4290.]
- [8] 张文蕾. 五成荞麦挂面的加工品质改良方法及其机制研究[D]. 沈阳: 沈阳师范大学, 2019. [ZHANG W L. Research on the improvement method and mechanism of processing quality of Wucheng buckwheat noodles[D]. Shenyang: Shenyang Normal University, 2019.]
- [9] 高海燕, 祝海洋, 闫利纳, 等. 复合改良剂在荞麦面条中的应用研究[J]. *食品工业*, 2012, 33(1): 68–70. [GAO H Y, ZHU H Y, YAN L N, et al. Application of compound improver in buckwheat noodles[J]. *Food Industry*, 2012, 33(1): 68–70.]
- [10] OBADI M, CHEN Y, QI Y, et al. Effects of different pre-gelatinized starch on the processing quality of high value-added Tartary buckwheat noodles[J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2020, 14: 3462–3472.
- [11] 周星杰. 添加挤压糊化苦荞粉对小麦面团性质的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017. [ZHOU X J. The effect of adding extruded gelatinized tartary buckwheat flour on the properties of



- wheat dough[D]. Yangling: Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, 2017. ]
- [ 12 ] 万金虎, 陈晓明, 徐学明, 等. 四种常见亲水胶体对面团特性的影响研究[J]. 中国粮油学报, 2009, 24(11): 22-25, 90. [ WAN J H, CHEN X M, XU X M, et al. Study on the influence of four common hydrocolloids on dough characteristics[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2009, 24(11): 22-25, 90. ]
- [ 13 ] 陈运忠, 侯章成. 魔芋胶(魔芋葡甘聚糖 KGM)在食品添加剂工业中的应用机理和实践[J]. 食品工业科技, 2006(1): 155-157. [ CHEN Y Z, HOU Z C. The application mechanism and practice of konjac gum (konjac glucomannan KGM) in food additive industry[J]. Science and Technology of Food Industry, 2006(1): 155-157. ]
- [ 14 ] 张忠. 苦荞系列挂面配方改进[D]. 成都: 四川农业大学, 2013. [ ZHANG Z. Improved formula of tartary buckwheat noodles[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2013. ]
- [ 15 ] 赵萍, 周伟, 张生堂, 等. 混合实验仪在评价面团流变学特性中的应用与研究[J]. 食品工业科技, 2015, 36(1): 97-100. [ ZHAO P, ZHOU W, ZHANG S T, et al. Application and research of mixing experiment instrument in evaluating the rheological properties of dough[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(1): 97-100. ]
- [ 16 ] LI X C, HU Q P, JIANG S X, et al. Flos chrysanthemi indicis protects against hydroxyl-induced damages to DNA and MSCs via antioxidant mechanism: A chemistry study[J]. Journal of Saudi Chemical Society, 2015, 19: 454-460.
- [ 17 ] 唐仁勇, 刘禹, 白玉婷, 等. 添加苦荞粉对中式香肠抗氧化能力和品质的影响[J]. 食品科技, 2020, 45(9): 109-114. [ TANG R Y, LIU Y, BAI Y T, et al. The effect of adding tartary buckwheat flour on the antioxidant capacity and quality of Chinese sausage[J]. Food Science and Technology, 2020, 45(9): 109-114. ]
- [ 18 ] 王洁洁, 邵子晗, 韩晶, 等. 挤压重组紫薯米工艺优化及其抗氧化活性研究[J]. 食品工业科技, 2020, 41(8): 137-150. [ WANG J J, SHAO Z H, HAN J, et al. Study on the optimization of the process of extruded recombinant purple potato rice and its antioxidant activity[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(8): 137-150. ]
- [ 19 ] 张秋会, 宋莲军, 黄现青, 等. 质构仪在食品分析与检测中的应用[J]. 农产品加工, 2017(24): 52-56. [ ZHANG Q H, SONG L J, HUANG X Q, et al. The application of texture analyzer in food analysis and detection[J]. Agricultural Products Processing, 2017(24): 52-56. ]
- [ 20 ] 任顺成, 孙晓莎. 芦丁和槲皮素对小麦淀粉理化特性的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(2): 25-30. [ REN S C, SUN X S. Effects of rutin and quercetin on the physicochemical properties of wheat starch[J]. Food Science, 2018, 39(2): 25-30. ]
- [ 21 ] 许彦腾, 张建新, 宋真真, 等. 豆渣膳食纤维面条制作工艺的优化[J]. 西北农业学报, 2015, 24(11): 157-164. [ XU Y T, ZHANG J X, SONG Z Z, et al. Optimization of the production process of soybean dregs dietary fiber noodles[J]. Northwest Agricultural Journal, 2015, 24(11): 157-164. ]
- [ 22 ] 周韵. 魔芋面团形成及热加工过程中的成分相互作用解析与消化性评价[D]. 北京: 中国农业大学, 2017. [ ZHOU Y. Analysis of ingredient interaction and evaluation of digestibility during the formation and thermal processing of konjac dough[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. ]
- [ 23 ] 张忠, 巩发永, 肖诗明. 碳酸钾与魔芋精粉添加量对苦荞挂面品质的影响[J]. 西昌学院学报, 2012(4): 24-28. [ ZHANG Z, GONG F Y, XIAO S M. The effect of potassium carbonate and konjac flour addition on the quality of tartary buckwheat noodles[J]. Journal of Xichang College, 2012(4): 24-28. ]
- [ 24 ] 陈霞, 王文琪, 朱在勤, 等. 食盐对面粉糊化特性及面条品质的影响[J]. 食品工业科技, 2015, 36(2): 98-101. [ CHEN X, WANG W Q, ZHU Z Q, et al. The effect of salt on flour gelatinization characteristics and noodle quality[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(2): 98-101. ]
- [ 25 ] 侯磊, 沈群. 添加 3% 食盐的面团与高压处理的面团质构性质的比较[J]. 食品科技, 2011, 36(6): 172-174. [ HOU L, SHEN Q. Comparison of texture properties of dough added with 3% salt and high-pressure processed dough[J]. Food Science and Technology, 2011, 36(6): 172-174. ]
- [ 26 ] 张笑笑, 李瑜, 张利苹. 菠菜营养面条工艺研究[J]. 粮食加工, 2017, 42(1): 62-65. [ ZHANG X X, LI Y, ZHANG L P. Study on the technology of spinach nutritious noodles[J]. Food Processing, 2017, 42(1): 62-65. ]
- [ 27 ] 王冠岳, 陈洁, 王春, 等. 氯化钠对面条品质影响的研究[J]. 中国粮油学报, 2008, 23(6): 184-187. [ WANG G Y, CHEN J, WANG C, et al. Study on the effect of sodium chloride on noodle quality[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2008, 23(6): 184-187. ]
- [ 28 ] 胡秋辉, 高永欣, 杨文建, 等. 混合实验仪评价香菇粉对面团流变特性的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(10): 2159-2167. [ HU Q H, GAO Y X, YANG W J, et al. Evaluation of the effect of lentinus edodes powder on the rheological properties of dough by mixing experimental instrument[J]. Chinese Agricultural Sciences, 2013, 46(10): 2159-2167. ]
- [ 29 ] CRISTINA C M, ROSELL C, COLLAR C, et al. Assessment of hydrocolloid effects on the thermo-mechanical properties of wheat using the Mixolab[J]. Food Hydrocolloids, 2006, 21(3): 452-462.
- [ 30 ] 蔡宏郁, 袁建, 王明洁, 等. 混合实验仪法对大米食用品质评价的探索研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2016, 7(4): 1561-1567. [ CAI H Y, YUAN J, WANG M J, et al. Research on the evaluation of rice edible quality by mixing experimental instrument method[J]. Journal of Food Safety and Quality Inspection, 2016, 7(4): 1561-1567. ]
- [ 31 ] 何财安, 张珍, 刘航, 等. 苦荞多酚对苦荞淀粉和小麦淀粉理化性质的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(9): 66-71. [ HE C A, ZHANG Z, LIU H, et al. Effects of tartary buckwheat polyphenols on the physical and chemical properties of tartary buckwheat starch and wheat starch[J]. Food Science, 2017, 38(9): 66-71. ]
- [ 32 ] LIU J, XU Q, ZHANG J, et al. Preparation, composition analysis and antioxidant activities of konjac oligo-glucomannan[J]. Carbohydr Polym, 2015, 130: 398-404.
- [ 33 ] 计艳艳. 魔芋甘露低聚糖的制备与抗氧化性研究及应用[D]. 长春: 吉林大学, 2018. [ JI Y Y. Preparation and antioxidant research and application of konjac mannan oligosaccharides[D]. Changchun: Jilin University, 2018. ]