

# 葛根-山药复合功能性鲜湿薯类粉条工艺优化

焦婷婷<sup>1\*</sup>, 王 娇<sup>1</sup>, 时文芳<sup>1</sup>, 秦令祥<sup>1,2</sup>, 刘玉青<sup>1</sup>, 孟亚萍<sup>3</sup>

(1. 漯河食品职业学院, 漯河 462300; 2. 漯河市食品研究院有限公司, 漯河 462300;  
3. 郑州科技学院, 郑州 450064)

**摘要:** **目的** 探究葛根、山药不同添加量对鲜湿薯类粉条品质的影响, 加工一种功能性鲜湿薯类粉条。**方法** 使用白度测定仪、混合实验仪、数字粘度计等探究葛根粉、山药粉添加量对混合粉白度、糊化老化特性、黏度等的影响; 在此基础上, 以感官评价和弹性为响应值, 采用单因素和 Box-Behnken 响应面实验优化得出葛根-山药复合功能性鲜湿薯类粉条最佳加工工艺, 并通过体外消化模型研究葛根-山药复合鲜湿薯类粉条的血糖生成指数。**结果** 随着葛根粉含量增加, 混合粉水分含量、吸水率、白度下降, 糊化黏度增大, 粉团糊化特性总体上逐渐下降; 粉条感官评分先升高后降低, 硬度在葛根粉添加量为 15%达到最大值 1357.5 gf; 黏性、弹性和回复性先升高后降低。随着山药粉含量增加, 混合粉水分含量和白度下降, 吸水率上升, 糊化黏度减小, 延缓粉团淀粉回生; 粉条感官评分先升高后降低, 硬度在山药粉添加量为 10%达到最大值 1439.7 gf, 黏性、弹性和回复性整体上减小。水添加量为 53%时粉条品质最佳。响应面实验得出鲜湿薯类粉条最佳工艺条件为: 葛根粉添加量 13%、山药粉添加量 4%、水添加量 53%。该工艺制备的粉条感官评分为 92.97±0.36, 弹性为 0.911±0.010, 血糖生成指数比空白样降低 13.10。**结论** 在最佳工艺条件下制作的葛根-山药复合鲜湿薯类粉条, 具有葛根和山药风味, 感官品质好, 口感爽滑, 抗老化特性得到一定改善, 血糖生成指数降低, 为鲜湿薯类粉条企业生产提供了理论依据和技术支撑。

**关键词:** 功能性鲜湿薯类粉条; 葛根粉; 山药粉; 响应面; 工艺优化

## Optimization of the process of kudzu root yam composite functional fresh wet potato vermicelli

JIAO Ting-Ting<sup>1\*</sup>, WANG Jiao<sup>1</sup>, SHI Wen-Fang<sup>1</sup>, QIN Ling-Xiang<sup>1,2</sup>,  
LIU Yu-Qing<sup>1</sup>, MENG Ya-Ping<sup>3</sup>

(1. Luohe Vocational College of Food, Luohe 462300, China; 2. Luohe Food Research Institute Co., Ltd., Luohe 462300, China; 3. Zhengzhou University of Science and Technology, Zhengzhou 450064, China)

**ABSTRACT: Objective** To explore the effects of different dosages of kudzu root and yam on the quality of fresh and wet potato vermicelli, and produce a functional fresh and wet potato vermicelli. **Methods** The effects of adding amounts of kudzu root powder and yam powder on the whiteness, gelatinization and aging characteristics, viscosity, etc. of the mixed powder were explored by using a whiteness tester, mixed experimental apparatus, digital viscometer, etc.; on this basis, sensory evaluation and elasticity were used as response values, and single factor and

基金项目: 河南省重点研发与推广专项(科技攻关)项目(232102110142)

Fund: Supported by the Henan Province Key Research and Development and Promotion of Special (Science and Technology) Project (232102110142)

\*通信作者: 焦婷婷, 讲师, 主要研究方向为功能性食品及粮油制品研究。E-mail: 1476064044@qq.com

\*Corresponding author: JIAO Ting-Ting, Lecturer, Luohe Vocational College of Food, Intersection of Wenming Road and 107, Yancheng District, Luohe 462300, China. E-mail: 1476064044@qq.com

Box-Behnken response surface experiments were used to optimize the optimal processing technology of kudzu root yam composite functional fresh wet potato vermicelli. The blood glucose generation index of kudzu root yam composite functional fresh wet potato vermicelli was studied through an *in vitro* digestion model. **Results** With the content of kudzu root powder increasing, the moisture content, water absorption rate, and whiteness value of the mixed powder decreased, the gelatinization viscosity increased, and the gelatinization characteristics of the powder gradually decreased; the sensory evaluation results, viscosity, elasticity, and recovery of fresh and wet potato vermicelli all increased first and then decreased, and the hardness reached a maximum value of 1357.5 gf when the amount of kudzu root powder added was 15%. With the content of yam powder increasing, the moisture content and whiteness value of the mixed powder decreased, the water absorption increased, the gelatinization viscosity decreased, and the starch retrogradation of the powder was delayed; the sensory evaluation results of fresh and wet potato vermicelli first increased and then decreased, and the hardness reached its maximum value of 1439.7 gf when the amount of yam powder added was 10%, the overall viscosity, elasticity, and recovery decreased. The vermicelli was best quality when the water content was 53%. Response interview verification the optimal process conditions for fresh and wet potato vermicelli were 13% addition of kudzu root powder, 4% addition of yam powder, and 53% addition of water. Sensory evaluation was  $92.97 \pm 0.36$ , elasticity was  $0.911 \pm 0.010$ , glycemic index decreased by 13.10 compared to the blank sample. **Conclusion** The kudzu root yam composite functional fresh and wet potato vermicelli under the optimal process conditions have certain flavor of kudzu root and yam, good sensory quality, smooth taste, certain anti-aging characteristics, and lower glycemic index, this study provides theoretical basis and technical support for the production of potato vermicelli.

**KEY WORDS:** functional fresh wet potato vermicelli; kudzu root powder; yam powder; response surface; process optimization

## 0 引 言

粉条是我国以淀粉为主要原料加工制成的传统凝胶制品<sup>[1]</sup>, 根据不同原料可分为豆类粉条和薯类粉条<sup>[2]</sup>。薯类粉条加工所需能耗低、口感爽滑、食用方便, 深受消费者喜爱。目前薯类粉条主要原料是淀粉多糖, 在健康中国大背景下不能满足人们对营养、健康食物的需求。因此, 研究营养功能多样化的鲜湿薯类粉条很有必要。孙震曦<sup>[3]</sup>探究了壳聚糖和蛋白质对鲜湿薯类粉条结构及营养特性的影响, 该粉条质构特性较好, 蛋白质含量增加。FENG 等<sup>[4]</sup>在甘薯淀粉中添加蛋清蛋白制作营养粉条, 其品质较好。郭卫芸等<sup>[5]</sup>在红薯淀粉中添加茶多酚制作一种具有生理功能的粉条, 此粉条具有一定的抗氧化能力。

葛根是药食同源豆科双子叶植物葛的干燥根。葛根富含淀粉、氨基酸、膳食纤维以及黄酮类活性物质, 具有降糖降脂、降血压、治疗心血管疾病<sup>[6]</sup>以及保护缺氧诱导 PC12 细胞神经损伤的作用<sup>[7]</sup>。WANG 等<sup>[8]</sup>研究显示葛根与葛根多糖可调节肠道菌群, 可辅助治疗 2 型糖尿病。冯娜等<sup>[9]</sup>探索发现葛根素可改善糖尿病小鼠血管内皮损伤, 可减轻脂多糖诱导的小鼠炎症反应<sup>[10]</sup>。葛根粉含淀粉较多, 葛根淀粉中直链淀粉占 20%~22%, 支链淀粉占 78%~80%, 淀粉糊化后糊液质地光滑, 透明度好, 具有黏弹性, 易于形成凝胶<sup>[11]</sup>, 与其他淀粉混合可降低混合淀粉糊化温度<sup>[12]</sup>。曹

蒙等<sup>[13]</sup>在面条中添加葛根粉能有效地抑制淀粉老化, 降低面条老化速率, 延长面条保藏期。郭文滔等<sup>[14]</sup>探究了添加 15% 葛根粉馒头淀粉水解率降低, 抗氧化活性增加, 血糖生成指数(glycemic index, GI)下降。山药是人们常用滋补养生的药食同源植物<sup>[15]</sup>, 富含淀粉、蛋白质、维生素、矿物质和多糖、多酚等活性物质<sup>[16-17]</sup>, 具有调节糖代谢、抗衰老、抗氧化、抑制肿瘤、调节免疫活性、改善受损胰岛  $\beta$  细胞和肠道菌群的功能<sup>[18-19]</sup>, 山药淀粉含近 90% 的慢消化淀粉和抗性淀粉, 含量分别为 7% 和 82%, 升糖指数低, 且淀粉凝胶强度高于马铃薯淀粉<sup>[20]</sup>, 将山药粉添加到面粉中制作面条, GI 低于普通面条, 品质好<sup>[21]</sup>。石松业等<sup>[22]</sup>将山药粉替代部分小麦粉制作芝麻饅面团, 进行营养物质互补, 提高面制品营养价值。因此, 将葛根粉和山药粉与薯类淀粉复合开发具有高营养价值鲜湿粉条是可行的, 目前关于药食同源物质葛根粉和山药粉的应用多集中在面条、面包等面制品中, 与鲜湿薯类粉条技术结合研究的较少。而且市场上鲜湿薯类粉条普遍存在储藏期内老化发硬过快、断条率高、糊汤率高、营养成分单一等问题。

基于此, 本研究拟通过分析添加葛根粉和山药粉对混合粉水分含量、吸水率、糊化黏度、面团流变特性的影响, 明确葛根粉和山药粉对淀粉糊化特性的影响及延缓淀粉回生的机制, 并在此基础上探索葛根粉和山药粉对鲜湿薯类粉条综合食用品质和体外消化特性的影响, 旨在为高

品质低 GI 功能性鲜湿薯类粉条食品的开发和品质的提高提供理论基础。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 材料与试剂

马铃薯淀粉(山西鑫源绿业有限责任公司); 木薯淀粉(乌汶太阳花有限公司); 玉米淀粉(成武大地玉米开发有限公司); 葛根粉(湖北襄阳市南漳县山区); 淮山药粉(安徽亳州市谯城区);  $\alpha$ -淀粉酶(3700 U/g)、淀粉葡萄糖苷酶(10000 U/g)(北京索莱宝科技有限公司); 3,5-二硝基水杨酸(纯度 98%, 上海麦克林生化科技有限公司); 食盐(市售)。

### 1.2 仪器与设备

XKHY-MTJ 手持式电动压面机(武义东成电子有限公司); WSB-VI 智能白度测定仪(杭州大吉光电仪器有限公司); Mixolab2 混合实验仪(法国肖邦技术公司); TA touch 质构仪(上海保圣实业发展有限公司); NDJ-5S 数字式粘度计、FA2004N 电子分析天平(精度 0.0001 g)(上海菁海仪器有限公司); DHG-9203A 电热鼓风干燥箱(上海捷呈实验仪

器有限公司); CTH1850 台式高速离心机(湖南湘立科学仪器有限公司); UVS-4 漩涡震荡器(北京优晟联合科技有限公司)。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 鲜湿粉条制作工艺

本研究鲜湿薯类粉条的制作参考当地食品企业土豆粉的制作配方, 并经过多次预实验确定混合淀粉为木薯淀粉、马铃薯淀粉、玉米淀粉的添加比例为 5:4:1 ( $m:m:m$ )。

操作要点:

(1)按比例称取木薯淀粉、马铃薯淀粉、玉米淀粉、葛根粉、山药粉进行混合, 混合后称取总混合粉重量的 20% 进行勾芡, 勾芡用水量为总混合粉重量的 53%, 勾芡用水温度为 98℃, 勾芡时不停地搅拌使粉糊呈透明的黏稠状即可。最后将剩余的混合粉与勾好的芡糊和成光滑的粉团。

(2)将粉团放入粉条挤压机里, 与煮锅保持一定距离, 将粉条挤进沸腾的锅里进行糊化, 等待全部粉条飘起捞出, 放入凉水中冷却老化, 捞起沥水, 4℃冰箱冷藏备用。工艺流程如图 1 所示。

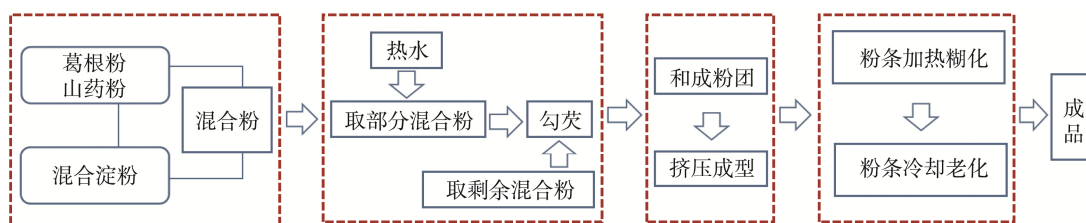


图 1 工艺流程

Fig.1 Process flow

#### 1.3.2 预实验

根据 1.3.1 所述, 进行粉条预实验, 确定基础配方为: 混合淀粉 150 g(木薯淀粉 75 g、马铃薯淀粉 60 g、玉米淀粉 15 g), 水添加量 73.5 g, 食盐添加 1.2 g, 冷藏 1 d 时粉条的感官品质和质构品质较好, 后期实验粉条均冷藏 1 d 时进行指标测定。

#### 1.3.3 单因素实验

根据基础配方木薯淀粉 50%, 马铃薯淀粉 40%, 玉米淀粉 10%, 食盐添加量为总混合粉的 0.8%, 本研究首先考察葛根粉添加量(5%、10%、15%、20%、25%)对粉条感官评价和全质构特性的影响(以下实验均以混合粉重量为基准, 按质量分数%计算); 其次在葛根粉添加量为 15%的基础上考察山药粉添加量(2%、4%、6%、8%、10%)对粉条感官评价和全质构特性的影响; 最后以葛根粉添加量和山药粉添加量分别为 15%和 6%时考察水添加量(52%、53%、54%、55%、56%)对粉条感官评价和全质构特性的影响。

#### 1.3.4 Box-Behnken 响应面法优化实验

按照鲜湿薯类粉条配方, 在单因素实验基础上, 以葛

根粉添加量、山药粉添加量、水添加量为单因素, 选择感官评价、全质构-弹性为响应值设计三因素三水平的响应面优化实验。利用 Design-Expert 软件进行 Box-Behnken 设计, 实验因素与水平见表 1。

表 1 响应面实验因素水平表  
Table 1 Factors and levels

水平	因素		
	A(葛根粉添加量)%	B(山药粉添加量)%	C(水添加量)%
-1	10	2	52
0	15	4	53
1	20	6	54

#### 1.3.5 混合粉水分测定

参照 GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》方法测定混合粉水分。

#### 1.3.6 混合粉吸水率测定

混合粉吸水率的测定参考 XIE 等<sup>[23]</sup>方法, 并略作修改, 精确称取 2 g 混合粉于装有 10 mL 纯水离心管中, 用漩

涡震荡器振荡 30 s, 静置 30 min。在室温下将混合粉在 5000 r/min 离心 30 min, 除去上清液, 直到没有多余的水, 将沉淀物倒在滤纸上称量。吸水率由式(1)计算:

$$\text{吸水率}/\% = \frac{m - m_0}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中,  $m_0$  为干基淀粉质量/g;  $m$  为离心后沉淀物的质量/g。

### 1.3.7 混合粉白度值测定

采用智能白度测定仪测定混合粉白度, 每个样品做 3 次重复实验。

### 1.3.8 混合粉黏度测定

采用数字粘度计测定混合粉糊化之后的黏度, 准确称取 25 g 混合粉与 225 mL 水混合, 在 80°C 水浴锅中加热 30 min, 选择 4 # 转子, 转速 12 r/min, 每组样品测定 3 次, 结果取平均值。

### 1.3.9 混合粉面团混合实验仪测定

仪器参数设定及操作方法参考陈博睿等<sup>[24]</sup>, 略修改, 实验协议为 Chopin<sup>+</sup>90; 吸水率湿基 14% (b14), 目标扭矩 C1 (1.10±0.05) Nm; 根据混合粉水分含量和吸水率准确称取相应混合粉重量。

### 1.3.10 鲜湿薯类粉条全质构特性测定

鲜湿薯类粉条全质构特性测定选择 P36/R 型探头。测试条件: 测试前速度 2.0 mm/s; 测试中、后速度均为 1.0 mm/s; 形变 75%; 触发力为 5.0 gf。

### 1.3.11 感官评价

感官评价参照 GB/T 23587—2009《粉条 感官要求》和郭卫芸等<sup>[5]</sup>评价方法, 根据粉条的特点稍作修改, 评价小组由 5 人组成(经过专业培训), 从粉条的组织状态、色泽、透明性、风味和口感 5 个方面进行综合评价, 感官评分标准见表 2。

表 2 感官评价标准  
Table 2 Sensory evaluation standards

评价指标	评分标准	分值
组织状态 (20分)	表面光滑, 粗细均匀, 弹性良好, 拉伸性好	16~20
	表面光滑, 粗细较均匀, 弹性较好, 拉伸不易断	11~15
	表面光滑, 粗细不均, 弹性差, 拉伸易断	0~10
色泽(20分)	色泽良好, 色泽较纯净, 颜色亮	11~20
	色泽差, 表面粗糙, 颜色暗淡	0~10
透明性 (20分)	晶莹透亮	16~20
	透明性一般	11~15
	不透明	0~10
风味(20分)	具有该粉条滋味, 气味正常, 无不良味感	11~20
	具有该粉条滋味, 有不良味感	0~10
口感(20分)	咀嚼时软硬适中	16~20
	咀嚼时偏硬或偏软	11~15
	太软、黏牙或太硬不易咀嚼	0~10

### 1.3.12 体外消化实验

#### (1) 淀粉水解率

参考郭文滔等<sup>[14]</sup>的方法, 称量 1.0 g 鲜湿薯类粉条样品于锥形瓶中, 加入 30 mL pH 5.2 的磷酸盐缓冲液和 5 颗玻璃珠, 将锥形瓶在摇床中 37°C 水浴 10 min, 加入 10 mL  $\alpha$ -淀粉酶和淀粉葡萄糖苷酶的混合酶液(37°C 水浴 5 min), 将锥形瓶于 37°C 摇床中振荡 30 min。在 0、20、30、60、90、120、180 min 处各取 1 mL 消化液, 加入 4 mL 80% 乙醇混匀, 8000 r/min 离心 10 min, 用二硝基水杨酸法测定上清液中的葡萄糖含量, 计算快消化淀粉、慢消化淀粉、抗性淀粉含量及淀粉体外消化率。淀粉水解率按式(2)计算。

淀粉水解率/%=

$$\frac{\text{取样时间点消化液中葡萄糖当量} \times 0.9}{\text{总淀粉含量}} \times 100\% \quad (2)$$

#### (2) 血糖生成指数计算

参考郭文滔等<sup>[14]</sup>的方法, 以白面包为参考物。按式(3)计算粉条淀粉水解指数(hydrolysis index, HI); 按式(4)计算粉条的 GI。

$$\text{HI} = \frac{\text{HCA}_{\text{样品}}}{\text{HCA}_{\text{参考}}} \quad (3)$$

$$\text{GI} = 0.594 \times \text{HI} + 39.71 \quad (4)$$

式中, HCA 为淀粉水解曲线面积(hydrolysis curve area)。

## 1.4 数据分析

实验结果均重复 3 次及以上, 结果均以平均值±标准偏差表示, 采用 Minitab 21 进行数据方差分析, 采用 Design-Expert.V8.0.6.1 软件进行响应面实验设计和数据分析, 用 OriginPro 8.5 绘图,  $P < 0.05$  表示具有显著性差异。

## 2 结果与分析

### 2.1 混合粉水分含量和吸水率结果分析

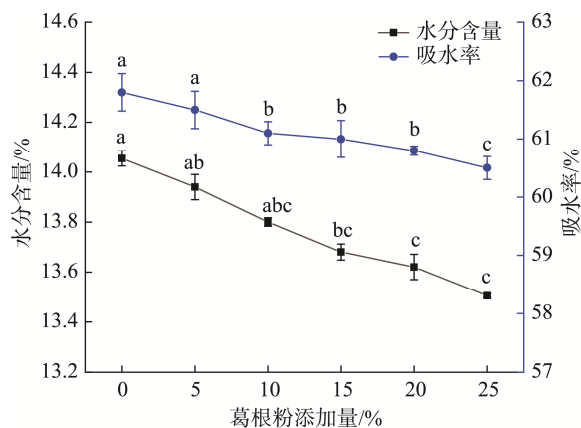
#### 2.1.1 葛根粉添加量对混合粉水分含量和吸水率的影响

水分含量的多少会影响淀粉的糊化特性及淀粉糊化之后的黏度, 而且水分含量对淀粉糊化之后的峰值黏度、崩解值、最终黏度和回生值起着至关重要的作用<sup>[25]</sup>。粉质吸水率与淀粉、蛋白质、纤维素等大分子物质紧密联系, 随着吸水率的增加, 有利于淀粉之间的黏结, 在淀粉糊化时增加淀粉凝胶强度。如图 2 所示, 随着葛根粉添加量的增加混合粉水分含量和吸水率均呈下降趋势, 可能是因为葛根淀粉的颗粒形态多为球形或多角形, 表面光滑, 与水分子结合能力弱, 因此随着葛根粉添加量的增加其吸水率降低<sup>[26]</sup>。

#### 2.1.2 山药粉添加量对混合粉水分含量和吸水率的影响

如图 3 所示, 随着山药粉添加量的增加混合粉水分含量呈下降趋势, 吸水率均呈上升趋势。纯山药粉水分含量

为 10%左右, 混合淀粉水分含量为 14%左右, 因此随着山药粉添加量的增加混合粉水分含量降低。由于山药粉富含膳食纤维和山药多糖等大分子物质使其吸水能力增强<sup>[22]</sup>, 因此随着山药粉添加量的增加吸水率增加。



注: 不同小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ ), 下同。

图 2 葛根粉添加量对混合粉水分含量和吸水率的影响

Fig.2 Effects of adding amount of kudzu root powder on the moisture content and water absorption of mixed powder

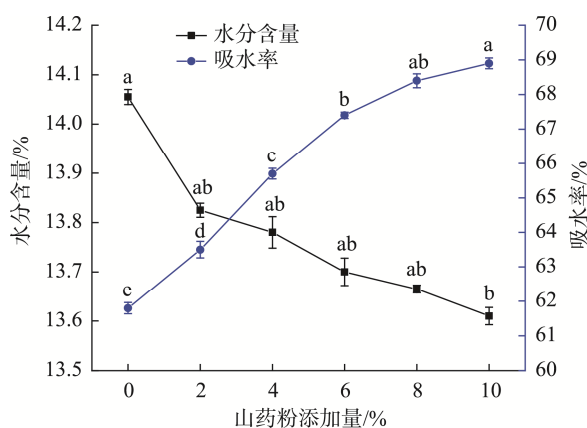


图 3 山药粉添加量对混合粉水分含量和吸水率的影响

Fig.3 Effects of adding amount of yam powder on the moisture content and water absorption of the mixed powder

## 2.2 混合粉白度值结果分析

随着葛根粉添加量的增加混合粉的白度呈下降趋势(图 4A 所示)。原因可能是纯葛根粉色灰白, 葛根粉添加量增加, 混合粉白度下降, 此结果与曹蒙等<sup>[13]</sup>、郭文滔等<sup>[14]</sup>研究结果一致。山药粉富含膳食纤维、多糖和矿物质, 本研究采用的山药粉色呈乳黄色, 则随着山药粉添加量的增加混合粉的白度呈下降趋势(图 4B 所示)。经预实验结果显示, 原料粉的白度与鲜湿薯类粉条的白度呈正相关, 因此, 添加葛根粉和山药粉均降低了鲜湿薯类粉条的白度。基于此, 鲜湿薯类粉条在增加营养的同时不减感官特性, 葛根粉和山药粉需适量添加。

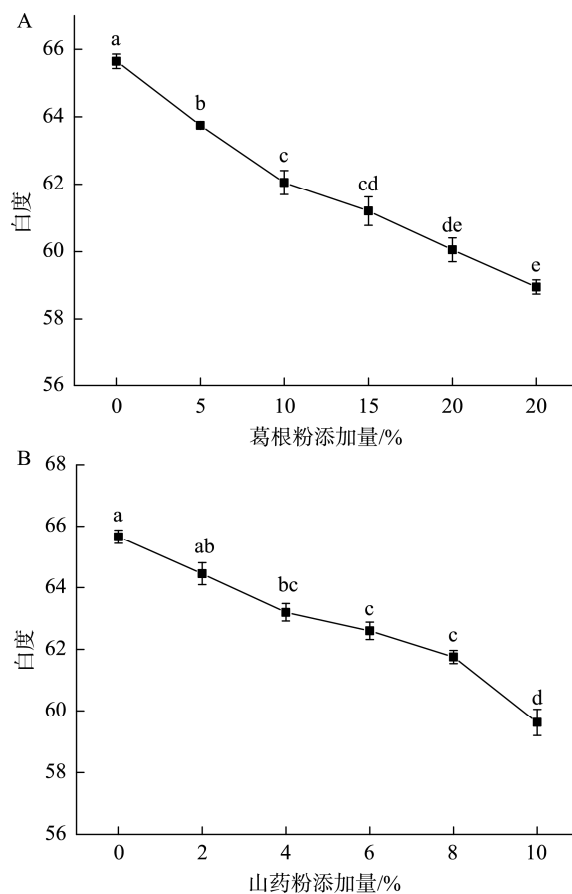


图 4 葛根粉和山药粉添加量对混合粉白度的影响

Fig.4 Effects of adding amount of kudzu root powder and yam powder on the whiteness of mixed powder

## 2.3 混合粉黏度结果分析

本研究采用数字粘度计测定混合粉糊化之后的黏度, 葛根淀粉透明度高, 糊化温度低, SUN 等<sup>[27]</sup>研究显示随着葛根粉添加量的增加, 混合粉糊化温度降低, 且淀粉易糊化。如图 5A 所示, 混合粉糊化黏度随着葛根粉添加量的增加而增大, 此结果与曹蒙等<sup>[13]</sup>研究结果一致。而且其研究还显示随着葛根粉添加量的增加, 淀粉回生值下降, 由此说明葛根粉可抑制淀粉老化, 可使鲜湿薯类粉条老化速率减慢, 延长其保存期。

山药粉富含膳食纤维和非淀粉多糖, 糊化温度高, 不易糊化, 具有较好的热糊稳定性和凝胶性, 如图 5B 所示, 混合粉糊化黏度随着山药粉添加量的增加而减小, 混合淀粉逐渐被山药粉替代, 山药粉中的膳食纤维和非淀粉多糖对淀粉稀释作用增加, 使其糊化黏度降低。

## 2.4 混合粉面团混合实验仪特性分析

面团流变性能对食品加工及其产品品质非常重要, 本研究利用 Mixolab2 混合实验仪模拟混合粉加水混合形成面团、面团加热糊化以及冷却过程面团流变特性变化, 预测混合粉面团质量<sup>[28]</sup>。由图 6 可知, 随着葛根粉添加量

的增加,混合淀粉(空白)曲线趋势越来越偏离葛根粉曲线,而偏离空间趋势较小,添加不同含量葛根粉的混合粉面团流变特性曲线比较相似。由图 7 可知,随着山药粉添加量的增加,随着山药粉含量的增加,混合粉曲线趋势越来越偏离混合淀粉曲线,偏离空间趋势比葛根粉大。

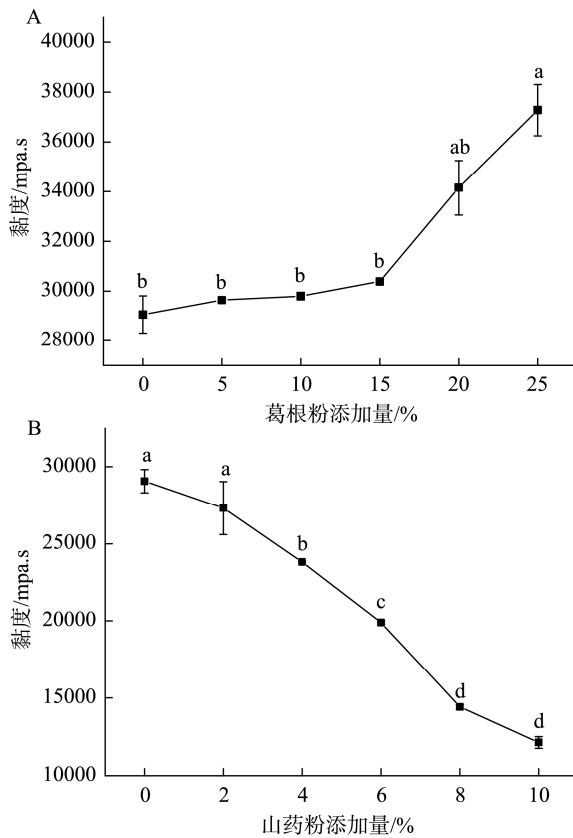


图 5 葛根粉和山药粉添加量对混合粉黏度的影响

Fig.5 Effects of adding amount of kudzu root powder and yam powder on the viscosity of mixed powder

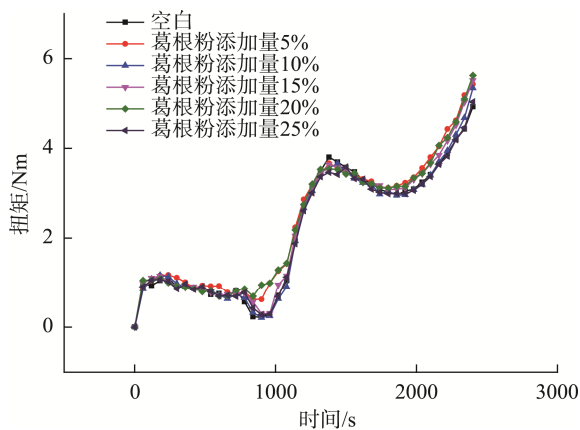


图 6 添加 0%~25%葛根粉的混合粉面团混合实验仪曲线

Fig.6 Mixing experiment instrument curve of mixed flour with 0%~25% kudzu root powder

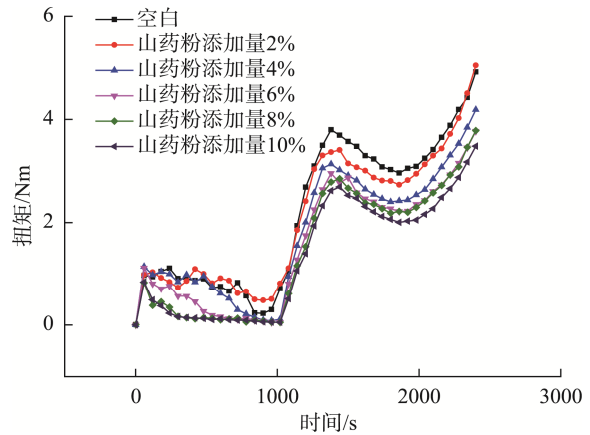


图 7 添加 0%~10%山药粉的混合粉面团混合实验仪曲线

Fig.7 Mixing experiment instrument curve of mixed flour with 0%~10% yam powder

混合实验仪力矩曲线图分 5 个阶段, C1、C2 主要反映粉团中蛋白组分的特性<sup>[29]</sup>。C1 点代表粉团的吸水率, 如图 2 所示, 随着葛根粉添加量的增加, 粉团吸水率呈下降趋势, 如图 3 所示, 随着山药粉添加量的增加, 粉团吸水率呈上升趋势, 此结果和混合粉吸水率结果相对应。C3 点代表淀粉糊化的扭矩, 用于淀粉糊化特性的测定, 是淀粉糊化的峰值黏度; C4 点代表糊化淀粉加热稳定变化时的扭矩, 用于测定淀粉热糊化胶的稳定性, 是淀粉糊化的最低黏度; C5 点代表淀粉老化时的扭矩, 用于测定糊化淀粉回生特性, 是淀粉糊化的最终黏度。随着葛根粉添加量的增加粉团糊化特性变化如表 3 所示, C3、C4、C5、C3-C2、C3-C4 呈下降的趋势, C5-C4 先升高后下降。C3-C2 表示淀粉糊化特性, 表明随着葛根粉添加量的增加, 粉团的糊化特性逐渐下降。C3-C4 是黏度崩解值, 能够反映粉团糊化时热黏度稳定性, 值越小, 说明越稳定, 因此随着葛根粉添加量的增加粉团热黏度稳定性整体上增加。C5-C4 体现淀粉老化回生性质, 回生值越高, 越容易老化<sup>[30]</sup>, 与未添加葛根粉相比, 葛根粉添加量为 25% 时 C5-C4 数值减小, 但减小比例较小, 因此从混合粉面团混合实验仪特征值来看葛根粉的添加对粉团回生抑制作用小。随着山药粉添加量的增加, 粉团糊化特性变化如表 4 所示, C3、C4、C5、C3-C2、C3-C4、C5-C4、 $\beta$  均呈下降的趋势, 因此随着山药粉含量的增加, 粉团回生值整体上降低, 可能是因为山药粉中富含膳食纤维及非淀粉多糖, 吸水性强, 影响了粉团中淀粉颗粒正常的溶解和膨胀, 阻碍了直链淀粉的重新排列, 使得混合粉在冷却过程中形成凝胶的能力被弱化, 从而增强粉团抗老化能力, 延缓粉团老化速度<sup>[31]</sup>。从总的结果看, 随着山药粉的添加可以延缓粉团的回生, 可降低鲜湿粉条的老化速度。



表 3 添加 0%~25%葛根粉的混合粉面团混合实验仪特征值  
Table 3 Characteristic values of the mixed dough mixing experimental instrument with 0%~25% kudzu root powder

葛根粉添加量/%	C3/Nm	C4/Nm	C5/Nm	C3-C2/Nm	C3-C4/Nm	C5-C4/Nm	$\beta$ /(Nm/min)
0	3.711	2.981	4.924	3.519	0.730	1.943	0.864
5	3.373	2.810	4.805	3.159	0.563	1.955	0.338
10	3.132	2.781	4.742	2.913	0.351	1.961	0.322
15	2.868	2.497	4.514	2.702	0.341	1.987	0.432
20	2.506	2.197	4.103	2.292	0.309	1.906	0.183
25	2.342	2.047	3.935	2.158	0.295	1.888	0.112

表 4 添加 0%~10%山药粉的混合粉面团混合实验仪特征值  
Table 4 Characteristic values of the mixed flour dough mixing experimental instrument with 0%~10% yam powder

山药粉添加量/%	C3/Nm	C4/Nm	C5/Nm	C3-C2/Nm	C3-C4/Nm	C5-C4/Nm	$\beta$ /(Nm/min)
0	3.711	2.981	4.924	3.519	0.730	1.943	0.864
2	3.589	2.863	4.751	3.418	0.726	1.888	0.644
4	3.122	2.404	4.189	3.057	0.718	1.785	0.500
6	2.946	2.262	3.772	2.898	0.684	1.510	0.422
8	2.831	2.183	3.606	2.785	0.648	1.423	0.396
10	2.692	2.094	3.483	2.646	0.598	1.389	0.334

## 2.5 单因素实验结果分析

### 2.5.1 葛根粉添加量对鲜湿薯类粉条品质的影响

如图 8 所示, 评价结果先升高后降低。适量葛根粉的添加可以增加鲜湿薯类粉条的风味, 增加其保健功能。当葛根粉添加 15% 时感官评价分最高, 葛根风味佳, 色泽亮度好。当葛根粉添加量低于 15% 时, 葛根风味弱, 功能性能低。但葛根粉添加量超过 15% 时粉条色泽变暗, 品尝时黏牙(此结果与添加葛根粉混合粉糊化黏度结果一致), 弹性降低。这可能是葛根淀粉在糊化过程中淀粉颗粒吸水溶胀, 光反射能力降低, 使粉条颜色变暗, 此结果和混合粉白度变化一致。在全质构特性上(表 5), 随着葛根粉添加量的增加, 硬度在葛根粉添加量为 15% 达到最大值 1357.5 gf; 黏性、弹性和回复性整体呈先升高后降低的趋势, 黏性在葛根粉添加量为 15% 达到最大值 17.040 gf\*s, 葛根粉添加量大于 15% 时弹性和回复性无显著性变化。从混合粉混合实验仪结果可知, 葛根粉的添加对粉条老化抑制作用小, 葛根粉添加量 15% 时硬度最大, 葛根粉添加量超过 15% 时硬度降低。原因可能是随着葛根粉添加比例增

大, 粉条非淀粉多糖含量相对增加, 在糊化过程抑制淀粉吸水膨胀, 使粉条网络结构的连续紧密性降低, 导致复煮后粉条弹性和回复性降低。

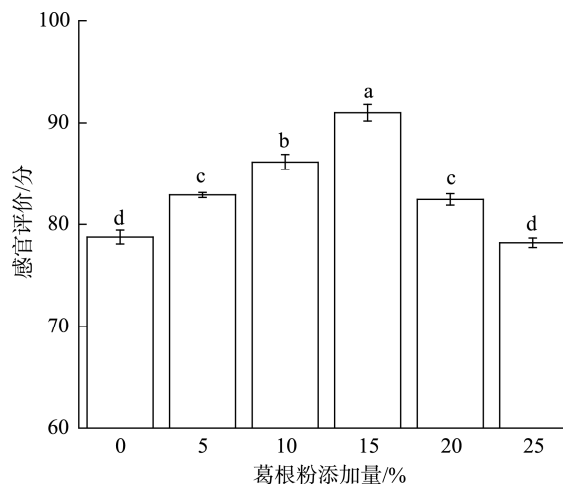


图 8 葛根粉添加量对鲜湿薯类粉条感官评价的影响  
Fig.8 Effects of adding amount of kudzu root powder on sensory evaluation of fresh and wet potato vermicelli

表 5 葛根粉添加量对鲜湿薯类粉条全质构特性的影响  
Table 5 Effects of adding amount of kudzu root powder on the whole texture characteristics of fresh wet potato vermicelli

葛根粉添加量/%	硬度/gf	黏性/(gf*s)	弹性	回复性
0	1273.7±57.2 <sup>b</sup>	8.192±0.575 <sup>b</sup>	0.8505±0.017 <sup>b</sup>	0.5035±0.004 <sup>ab</sup>
5	1282.7±65.7 <sup>b</sup>	9.223±0.203 <sup>b</sup>	0.8873±0.007 <sup>a</sup>	0.5134±0.006 <sup>a</sup>
10	1311.5±44.7 <sup>ab</sup>	12.633±0.648 <sup>ab</sup>	0.8688±0.015 <sup>ab</sup>	0.5082±0.003 <sup>ab</sup>
15	1357.5±40.7 <sup>a</sup>	17.040±0.390 <sup>a</sup>	0.8573±0.005 <sup>b</sup>	0.5002±0.003 <sup>b</sup>
20	1322.4±13.8 <sup>ab</sup>	15.238±0.414 <sup>a</sup>	0.8506±0.014 <sup>b</sup>	0.4769±0.006 <sup>c</sup>
25	1318.0±32.5 <sup>ab</sup>	14.470±0.330 <sup>a</sup>	0.8431±0.004 <sup>b</sup>	0.4704±0.007 <sup>c</sup>

注: 同列不同小写字母表示差异显著(P<0.05), 表 6、7、11 同。

### 2.5.2 山药粉添加量对鲜湿薯类粉条品质的影响

如图 9 所示, 评价结果先升高后降低。适量添加山药粉可增加鲜湿薯类粉条的风味, 增加其保健功能。当山药粉添加 4% 时感官评价分最高, 山药风味佳, 色泽亮度好。如表 6 所示, 山药粉添加量在 0%~8% 范围内硬度无显著性变化, 硬度在山药粉添加量为 10% 达到最大值 1439.7 gf, 黏性、弹性和回复性整体上减小, 山药中除淀粉外膳食纤维、蛋白质、多糖等成分在淀粉糊化后冷却期间阻碍直链淀粉聚集, 影响凝胶三维网络结构的形成, 因此, 与未添加山药粉的鲜湿薯类粉条相比, 添加少量山药粉的鲜湿薯类粉条硬度减小, 但随着山药粉含量进一步增加, 由于山药粉富含膳食纤维和非淀粉多糖, 吸水性强, 与混合淀粉争夺水分, 同时在淀粉糊化的过程中形成半固体网络结构, 使粉条硬度增加, 黏性减小。

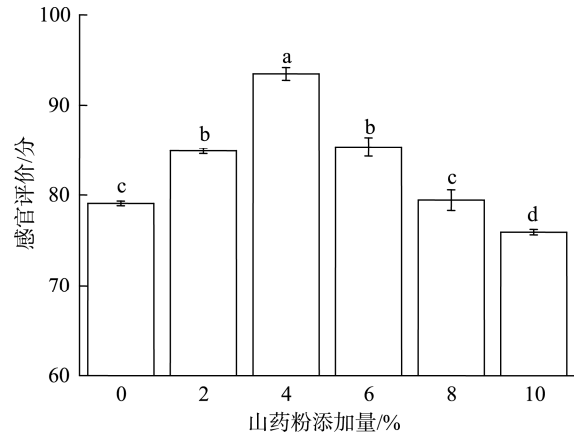


图 9 山药粉添加量对鲜湿薯类粉条感官评价的影响  
Fig.9 Effects of yam powder addition on sensory evaluation of fresh and wet potato vermicelli

表 6 山药粉添加量对鲜湿薯类粉条全质构特性的影响

Table 6 Effects of yam powder addition on the overall texture characteristics of fresh and wet potato vermicelli

山药粉添加量/%	硬度/gf	黏性/(gf*s)	弹性	回复性
0	1357.5±40.7 <sup>ab</sup>	17.040±1.090 <sup>a</sup>	0.8573±0.005 <sup>a</sup>	0.5002±0.004 <sup>a</sup>
2	1231.9±71.4 <sup>b</sup>	15.258±1.140 <sup>ab</sup>	0.8502±0.008 <sup>a</sup>	0.4794±0.005 <sup>b</sup>
4	1243.2±82.7 <sup>b</sup>	14.447±0.562 <sup>ab</sup>	0.8440±0.021 <sup>ab</sup>	0.4614±0.006 <sup>bc</sup>
6	1270.3±80.5 <sup>b</sup>	13.028±1.060 <sup>ab</sup>	0.8361±0.013 <sup>ab</sup>	0.4592±0.011 <sup>bc</sup>
8	1368.4±80.9 <sup>ab</sup>	11.603±0.511 <sup>b</sup>	0.8302±0.009 <sup>ab</sup>	0.4505±0.009 <sup>bc</sup>
10	1439.7±43.3 <sup>a</sup>	11.188±1.467 <sup>b</sup>	0.8268±0.021 <sup>b</sup>	0.4450±0.015 <sup>c</sup>

### 2.5.3 水添加量对鲜湿薯类粉条品质的影响

如图 10 所示, 水分添加量为 53% 时感官评分最高, 粉条口感好, 组织状态好。但水添加量过多时, 粉团较黏, 粉条挤出时易黏模具, 且挤出的粉条较软, 表面不光滑, 咀嚼性变差。随着水分添加比例的增大(如表 7 所示), 粉条的硬度、黏性和回复性整体上降低, 弹性先升高后降低。淀粉在糊化过程中淀粉分子变得无序, 直链淀粉和支链淀粉相互交联, 形成稳固的重结晶, 当体系中水分含量增加, 淀粉分子的流动性增强, 从而促进直链淀粉和支链淀粉间的交联和重结晶的形成, 生成较好的淀粉凝胶网络结构, 从而增加粉条黏弹性。但水分含量过高时, 会阻碍淀粉分子之间的结合, 在糊化时降低淀粉凝胶强度, 因此水添加量为 53% 时粉条品质最佳。

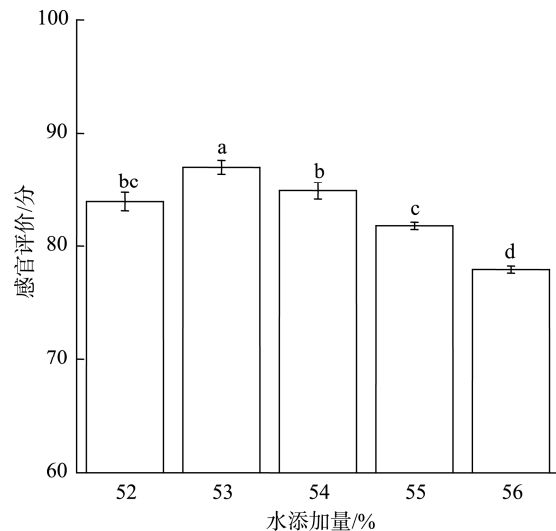


图 10 水添加量对鲜湿薯类粉条感官评价的影响  
Fig.10 Effects of water addition on sensory evaluation of fresh and wet potato vermicelli

## 2.6 响应面优化实验结果分析

### 2.6.1 响应面实验结果分析

选择葛根粉添加量(A)、山药粉添加量(B)、水添加量(C)为因素水平, 以感官评价和弹性为响应值, 结果见表 8。

表 7 水添加量对鲜湿薯类粉条全质构特性的影响

Table 7 Effects of water addition on the total texture characteristics of Fresh and wet potato vermicelli

水添加量/%	硬度/gf	黏性/(gf*s)	弹性	回复性
52	1529.7±46.5 <sup>a</sup>	14.485±0.167 <sup>a</sup>	0.8432±0.014 <sup>a</sup>	0.4735±0.012 <sup>a</sup>
53	1508.6±57.6 <sup>a</sup>	14.038±0.450 <sup>a</sup>	0.8725±0.003 <sup>a</sup>	0.4676±0.006 <sup>ab</sup>
54	1312.9±78.5 <sup>b</sup>	13.837±0.283 <sup>a</sup>	0.8439±0.028 <sup>a</sup>	0.4613±0.009 <sup>ab</sup>
55	1303.9±93.4 <sup>b</sup>	11.385±0.384 <sup>b</sup>	0.8396±0.008 <sup>a</sup>	0.4568±0.003 <sup>b</sup>
56	1155.2±84.3 <sup>c</sup>	10.980±0.727 <sup>b</sup>	0.7964±0.012 <sup>b</sup>	0.4528±0.006 <sup>b</sup>



表 8 葛根-山药复合功能性鲜湿薯类粉条响应面实验设计及结果

序号	A/%	B/%	C/%	感官评价/分	弹性
1	15	4	53	93.68±0.153	0.917±0.021
2	10	4	54	83.57±0.702	0.853±0.013
3	15	2	54	78.77±0.551	0.794±0.010
4	15	4	53	93.43±0.569	0.896±0.014
5	15	6	54	76.60±0.518	0.784±0.011
6	15	2	52	84.60±1.172	0.847±0.007
7	15	4	53	91.40±1.750	0.884±0.008
8	10	6	53	86.20±1.493	0.872±0.008
9	15	4	53	91.57±0.874	0.899±0.019
10	20	4	54	80.97±0.306	0.823±0.018
11	10	2	53	76.70±0.412	0.805±0.016
12	20	4	52	81.40±0.350	0.828±0.010
13	15	6	52	79.72±0.503	0.801±0.005
14	10	4	52	89.90±0.240	0.883±0.024
15	15	4	53	92.93±0.611	0.891±0.012
16	20	2	53	81.97±0.569	0.823±0.009
17	20	6	53	75.57±0.651	0.766±0.003

以感官评价为响应值, 通过 Design-Expert.V8.0.6.1 软件对结果进行回归模型方差分析(表 9), 得出模型极显著,  $P<0.001$ , 模型失拟项  $P=0.0714>0.05$  不显著, 可用该回归方程分析。由分析结果  $AB$ 、 $A^2$ 、 $B^2$ 、 $C^2$  项极显著,  $A$ 、 $C$  项显著,  $B$ 、 $AC$ 、 $BC$  不显著, 可知各因素对于感官评价的影响程度  $A>C>B$ 。以弹性为响应值, 结果进行回归模型方差分析(见表 10), 得出模型极显著,  $P<0.001$ , 模型失拟项  $P=0.4368>0.05$  不显著, 可用该回归方程分析。由分析结果  $A$ 、 $AB$ 、 $B^2$ 、 $C^2$  项极显著,  $C$ 、 $A^2$  项显著,  $B$ 、 $AC$ 、 $BC$  不显著, 可知各因素对于弹性的影响程度  $A>C>B$ 。

### 2.6.2 验证实验

经响应面优化得到葛根-山药复合功能性鲜湿薯类粉条最佳工艺: 葛根粉添加量为 12.86%、山药粉添加量为 4.11%、水添加量为 52.73%, 感官评价分预测值为 93.12,

弹性预测值为 0.905, 考虑实际可操作性, 将最佳工艺调整为葛根粉添加量为 13%、山药粉添加量为 4%、水添加量为 53%, 得出感官评价分为  $92.97\pm 0.36$ , 弹性为  $0.911\pm 0.010$ 。

### 2.6.3 粉条体外消化结果分析

采用最佳工艺制作葛根-山药复合鲜湿薯类粉条, 其 GI 见表 11, 添加葛根粉和山药粉显著降低鲜湿粉条的 GI, 比空白样降低 13.10。有研究者研究添加葛根粉使葛根馒头的抗性淀粉含量增多, 使其 GI 降低, 山药粉中多糖可抑制  $\alpha$ -葡萄糖苷酶活性, 使粉条中淀粉水解不彻底, GI 降低。郭文滔等<sup>[14]</sup>研究发现在馒头中添加 15%~20%葛根粉, 降 GI 效果较好; 余梦玲等<sup>[32]</sup>将面粉与山药粉混合制作面条, 其 HI 和预估血糖生成指数(estimate glycemic index, eGI)均显著降低, 与本研究结果一致。

表 9 回归模型方差分析(感官评价)

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P	显著性
模型	630.33	9	70.04	22.22	0.0002	**
A	33.87	1	33.87	10.75	0.0135	*
B	1.95	1	1.95	0.62	0.4573	不显著
C	30.85	1	30.85	9.79	0.0166	*
AB	63.20	1	63.20	20.05	0.0029	**
AC	8.70	1	8.70	2.76	0.1405	不显著
BC	1.84	1	1.84	0.58	0.4702	不显著
$A^2$	75.24	1	75.24	23.87	0.0018	**
$B^2$	287.60	1	287.60	91.26	<0.0001	**
$C^2$	82.06	1	82.06	26.04	0.0014	**
残差	22.06	7	3.15			
失拟项	17.60	3	5.87	5.25	0.0714	不显著
纯误差	4.47	4	1.12			
总离差	652.39	16				

注: \*\*表示极显著( $P<0.01$ ); \*表示显著( $0.01<P<0.05$ ); 决定系数  $R^2=0.9662$ 。

表 10 回归模型方差分析(弹性)  
Table 10 Analysis of variance of regression model (elasticity)

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P	显著性
模型	0.032	9	3.60E-03	22.38	0.0002	**
A	3.20E-03	1	3.20E-03	19.89	0.0029	**
B	4.35E-04	1	4.35E-04	2.71	0.144	不显著
C	1.38E-03	1	1.38E-03	8.57	0.0221	*
AB	4.69E-03	1	4.69E-03	29.17	0.001	**
AC	1.56E-04	1	1.56E-04	0.97	0.3572	不显著
BC	3.24E-04	1	3.24E-04	2.01	0.1988	不显著
A <sup>2</sup>	1.47E-03	1	1.47E-03	9.15	0.0192	*
B <sup>2</sup>	0.015	1	0.015	90.97	< 0.0001	**
C <sup>2</sup>	4.30E-03	1	4.30E-03	26.72	0.0013	**
残差	1.13E-03	7	1.61E-04			
失拟项	5.17E-04	3	1.72E-04	1.13	0.4368	不显著
纯误差	6.09E-04	4	1.52E-04			
总离差	0.034	16				

注: \*\*表示极显著( $P < 0.01$ ); \*表示显著( $0.01 < P < 0.05$ ); 决定系数  $R^2 = 0.9664$ 。

表 11 葛根-山药复合鲜湿薯类粉条 GI 值  
Table 11 GI value of pueraria lobata yam composite fresh and wet potato vermicelli

样品	GI
空白粉条	73.05±0.354 <sup>a</sup>
13%葛根粉+4%山药粉粉条	59.95±0.212 <sup>b</sup>

### 3 结 论

本研究将葛根粉、山药粉加入鲜湿薯类粉条中, 探究葛根粉、山药粉对混合淀粉糊化特性和黏性的影响, 并利用单因素和响应面实验分析葛根粉、山药粉、水添加量对鲜湿薯类粉条感官评价、质构特性的影响, 以感官评价、弹性为响应值, 得出各因素对于感官评价的影响程度为: 葛根粉添加量>水添加量>山药粉添加量; 以弹性为响应值, 得出各因素对于弹性的影响程度为: 葛根粉添加量>水添加量>山药粉添加量。通过响应面实验得出最佳工艺条件为: 葛根粉添加量为 13%、山药粉添加量为 4%、水添加量为 53%, 此条件下感官评分  $92.97 \pm 0.36$ , 弹性  $0.911 \pm 0.010$ , GI 比空白样降低 13.10。在最佳工艺条件下制作的葛根-山药复合鲜湿薯类粉条, 具有一定的葛根和山药风味, 感官品质好, 口感爽滑, 抗老化特性提高, GI 降低。若对葛根-山药复合鲜湿薯类粉条进行品质改良, 可增加葛根粉、山药粉添加量, 丰富鲜湿薯类粉条营养, 降 GI 效果更好, 为薯类粉条企业生产提供理论数据和技术支撑。

### 参考文献

- 郭昊, 孙红男, 马梦娜, 等. 无明矾薯类营养鲜湿粉条研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(19): 6263-6270.  
GUO H, SUN HG, MA MG, et al. Research progress on nutrient free fresh and wet potato noodles without alum [J]. J Food Saf Qual, 2022, 13(19): 6263-6270.
- 陈兵. 鲜湿菠菜粉条的研制及其保鲜的研究[D]. 重庆: 西南大学, 2016.  
CHEN B. Research on the development and preservation of fresh and wet spinach noodles [D]. Chongqing: Southwest University, 2016.
- 孙震曦. 薯类鲜湿粉条制备及其营养功能特性研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2020.  
SUN ZX. Study on the preparation and nutritional functional characteristics of fresh and wet potato noodles [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2020.
- FENG YY, MU TH, ZHANG M, et al. Effects of ionic polysaccharides and egg white protein complex formulations on dough rheological properties, structure formation and *in vitro* starch digestibility of wet sweet potato vermicelli [J]. Int J Biol Mac, 2020, 149(C): 1170-1179.
- 郭卫芸, 陈振毫, 高雪丽, 等. 茶多酚红薯粉条的研制及其抗氧化活性评价[J]. 食品工业科技, 2022, 43(13): 156-161.  
GUO WY, CHEN ZH, GAO XL, et al. Preparation and antioxidant activity evaluation of tea polyphenol sweet potato starch noodles [J]. Food Ind Sci Technol, 2022, 43(13): 156-161.
- LV J, SHI S, ZHANG B, et al. Role of puerarin in pathological cardiac remodeling: A review [J]. Pharmacol Res, 2022, 178: 106152.
- 李祥欣, 陈笛, 孙军, 等. 葛根素对缺氧诱导 PC12 细胞神经损伤及 JNK/MAPK 信号通路的影响[J]. 中国老年学杂志, 2023, 43(11): 2738-2742.  
LI XX, CHEN D, SUN J, et al. The effect of puerarin on hypoxia induced neural damage and JNK/MAPK signaling pathway in PC12 cells [J]. Chin J Ger, 2023, 43(11): 2738-2742.
- WANG Z, DU H, PENG W, et al. Efficacy and mechanism of *Pueraria lobata* and *Pueraria thomsonii* polysaccharides in the treatment of type 2 diabetes [J]. Nutrients, 2022, 14(19): 3926.
- 冯娜, 唐杰, 贺细菊, 等. 葛根素减轻 LPS 诱导的小鼠肾脏炎症反应[J]. 基础医学与临床, 2022, 42(11): 1727-1730.  
FENG N, TANG J, HE XJ, et al. Puerarin attenuates LPS-induced renal inflammatory response in mice [J]. Basic Med Clin, 2022, 42(11): 1727-1730.
- 邹洁, 张德德, 陶毅, 等. 葛根素减轻 KKAy 小鼠血管内皮细胞炎症反

- 应[J]. 基础医学与临床, 2023, 43(3): 433-437.
- ZOU J, ZHANG DD, TAO Y, *et al.* Puerarin reduces inflammatory response of vascular endothelial cells in KKAY mice [J]. *Basic Med Clin*, 2023, 43(3): 433-437.
- [11] 李祉贤, 奉思思, 孙佳颖, 等. 高温烘烤对葛根淀粉物化、结构及消化特性的影响[J]. 中国粮油学报, 2023, (10): 38.
- LI ZX, FENG SS, SUN JY, *et al.* The effect of high-temperature baking on the physicochemical, structural, and digestive properties of kudzu root starch [J]. *J Chin Cere Oils Ass*, 2023, (10): 38.
- [12] LI C, GAN H, TAN XL, *et al.* Effects of active ingredients from traditional Chinese medicines on glycogen molecular structure in diabetic mice [J]. *Eur Polymer J*, 2019, 112: 67-72.
- [13] 曹蒙, 王雪菲, 柳诚刚, 等. 葛根粉对面条质构和蒸煮品质的影响及葛根面条配方优化[J]. 中国食品添加剂, 2023, (7): 149-158.
- CAO M, WANG XF, LIU CG, *et al.* The effect of kudzu root powder on the texture and cooking quality of noodles and the optimization of kudzu root noodle formula [J]. *Chin Food Add*, 2023, (7): 149-158.
- [14] 郭文滔, 郑志, 季一顺, 等. 添加葛根粉对冷冻馒头食用品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(11): 9-16.
- GUO WT, ZHENG Z, JI YS, *et al.* Effect of adding *Pueraria lobata* powder on eating quality of frozen Mantou [J]. *J Food Saf Qual*, 2023, 14(11): 9-16.
- [15] HUANG R, SHEN MY, YU Y, *et al.* Physicochemical characterization and immunomodulatory activity of sulfated Chinese yam polysaccharide [J]. *Int J Bio Mac*, 2020, 165: 635-644.
- [16] LI Q, LI XJ, REN ZY, *et al.* Physicochemical properties and antioxidant activity of Maillard reaction products derived from *Dioscorea opposita* polysaccharides [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2021, 149: 111833.
- [17] MENG L, HU WP, WU SK, *et al.* Chinese yam peel enhances the immunity of the common carp (*Cyprinus carpio* L.) by improving the gut defence barrier and modulating the intestinal microflora [J]. *Fish Shellfish I*, 2019, 95: 528-537.
- [18] WANG X, HUO XZ, LIU Z, *et al.* Investigations on the anti-aging activity of polysaccharides from Chinese yam and their regulation on klotho gene expression in mice [J]. *J Mol S*, 2020, 1208: 127895.
- [19] CHEN ZZ, XU JJ, WU Y, *et al.* Diosgenin inhibited the expression of TAZ in hepatocellular carcinoma [J]. *Biol Biol R Com*, 2018, 503(3): 1181-1185.
- [20] 贺永朝, 吴泉铨, 宋洪波, 等. 高压均质改性淮山药淀粉及其消化性的研究[J]. 现代食品科技, 2016, 32(5): 227-233.
- HE YC, WU XQ, SONG HB, *et al.* Research on high pressure homogenization modified Huashan yam starch and its digestibility [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2016, 32(5): 227-233.
- [21] 乔宇. 低GI山药粉制备技术及主食产品开发[Z].
- QIAO Y. Low GI yam powder preparation technology and staple food product development [Z].
- [22] 石松业, 温纪平, 刘帅, 等. 山药粉添加量对芝麻饅面团品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(6): 7-12.
- SHI SY, WEN JP, LIU S, *et al.* The effect of yam powder addition on the quality of sesame nang dough [J]. *Food Res Dev*, 2023, 44(6): 7-12.
- [23] XIE Y, LI MN, CHEN HQ, *et al.* Effects of the combination of repeated heat-moisture treatment and compound enzymes hydrolysis on the structural and physicochemical properties of porous wheat starch [J]. *Food Chem*, 2019, 274: 351-359.
- [24] 陈博睿, 付永霞, 侯殿志, 等. 挤压和超微粉碎对绿豆面条特性的影响[J]. 中国食品学报, 2022, 22(9): 136-144.
- CHEN BR, FU YX, HOU DZ, *et al.* The effect of extrusion and ultrafine crushing on the characteristics of mung bean noodles [J]. *Chin J Food Sci*, 2022, 22(9): 136-144.
- [25] WANG B, DONG YQ, FANG YX, *et al.* Effects of different moisture contents on the structure and properties of corn starch during extrusion [J]. *Food Chem*, 2021, 1: 130804.
- [26] 米旺, 陈吉, 余佳, 等. 武陵山区4种块根类淀粉的糊化特性和冲调性质分析[J]. 食品与机械, 2023, 39(2): 159-163.
- MI W, CHEN J, YU J, *et al.* Analysis of gelatinization and blending properties of four types of root starch in Wuling Mountain area [J]. *Food Mach*, 2023, 39(2): 159-163.
- [27] SUN XY, YU C, FU MX, *et al.* Extruded whole buckwheat noodles: Effects of processing variables on the degree of starch gelatinization, changes of nutritional components, cooking characteristics and in vitro starch digestibility [J]. *Food Funct*, 2019, 10(10): 6362-6373.
- [28] GUJRAL HS, SHARMA B, SINGH K. Rheological characterization of wheat flour as modified by adding barley glucagel (a  $\beta$ -glucan isolate) under thermomechanical stress using Mixolab [J]. *J Food Meas Charact*, 2021, 15(1): 228-236.
- [29] COTOVANU I, MIRONESA S. Buckwheat seeds: Impact of milling fractions and addition level on wheat bread dough rheology [J]. *Appl Sci*, 2021, 11(4): 1731.
- [30] 尹旭敏, 刘月如, 杨茂, 等. 微细化薯渣粉对小麦面团特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(13): 190-195.
- YIN XM, LIU YR, YANG M, *et al.* The effect of micronized potato residue powder on the characteristics of wheat dough [J]. *Food Ferment Ind*, 2020, 46(13): 190-195.
- [31] 刘兴丽, 赵双丽, 靳艳军, 等. 挤压膨化紫薯粉对小麦面团糊化特性和热机械学特性的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(15): 106-111.
- LIU XL, ZHAO SL, JIN YJ, *et al.* The effect of extruded purple potato flour on the gelatinization and thermo mechanical properties of wheat dough [J]. *Food Sci*, 2019, 40(15): 106-111.
- [32] 余梦玲, 张三杉, 雷激. 鹰嘴豆、山药、魔芋精粉复配面条对血糖生成指数的影响[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(12): 29-35.
- YU ML, ZHANG SS, LEI J. The effect of chickpea, yam, and konjac flour mixed noodles on blood glucose production index [J]. *Food Res Dev*, 2023, 44(12): 29-35.

(责任编辑: 于梦娇 韩晓红)

## 作者简介



焦婷婷, 讲师, 主要研究方向为功能性食品及粮油制品研究。  
E-mail: 1476064044@qq.com