

# 真空油炸马铃薯脆片预处理工艺优化

王辉, 陈中爱, 陈朝军, 陈超, 刘嘉亮, 王梅, 刘辉

(贵州省农科院生物技术研究所, 贵州贵阳 550025)

**摘要:** 为优化马铃薯脆片的预处理工艺, 采用单因素和响应面试验, 以破碎力、含油量、 $L^*$ 值、感官评分、综合评分和电子鼻检测挥发性成分为指标, 对实验数据进行主成分分析。结果表明: 不同的预处理方式对马铃薯脆片的破碎力、感官评价和综合评分有显著影响 ( $p < 0.05$ )。主成分分析共提取 5 个主成分, 前 3 个主成分总贡献率大于 85%, 说明提取 3 个主成分能够全面反映马铃薯脆片的品质信息, 决定第 1 主成分的指标主要是感官评价和综合评分, 决定第 2 主成分的是破碎力和含油量; 决定第 3 主成分的是  $L^*$ 值和含油量。以主成分分析得到的规范化综合得分为响应值建立的二次多项式回归模型回归效果极显著 ( $p < 0.01$ ,  $R^2 = 0.9604$ )。确定最佳工艺参数为漂烫温度 91 °C、漂烫时间 4 min、切片厚度 4 mm 和冷冻时间 3 h, 在此条件得到规范化综合评分 0.9572, 与预测值 (0.9453) 相接近, 表明以主成分分析得到的规范化综合评分为响应值建立的回归模型具有良好的预测能力。

**关键词:** 马铃薯脆片; 真空油炸; 预处理; 响应面; 主成分分析

文章编号: 1673-9078(2018)12-187-195

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2018.12.028

## Optimization of the Vacuum Fried Potato Chips Pretreatment Technique

WANG Hui, CHEN Zhong-ai, CHEN CHAO-jun, CHEN CHAO, LIU JIA-liang, WANG Mei, LIU Hui

(Biological Technology Institute of Guizhou Province, Guiyang 550025, China)

**Abstract:** In order to optimize pretreatment technology of the vacuum fried potato chips, principal component analysis was performed on the experimental data obtained by single factor and response surface tests, including crushing force, oil content,  $L^*$  value, sensory score, comprehensive score and electronic nose-detected volatile components. The results showed that different pretreatment methods had significant effects on crushing force, sensory evaluation and comprehensive score for potato chip ( $p < 0.05$ ). Principal component analysis showed that 5 principal components were extracted, and the total contribution of the first three principal components was more than 85%. It showed that the three principal components could reflect the quality information of potato chips comprehensively. The first principal component is mainly the sensory evaluation and the comprehensive score, and the second principal component is the crushing force and the oil content; and the third principal component is the  $L^*$  value and the oil content. The regression effect of the quadratic polynomial regression model established by the comprehensive score in principal component analysis was extremely significant ( $p < 0.01$ ,  $R^2 = 0.9604$ ). The optimum process parameters were determined as the blanching temperature of 91 °C, the blanching time of 4 min, the slice thickness of 4 mm and the freezing time of 3 h. Under these conditions, the normalized comprehensive score was 0.9572, which was close to the predicted value (0.9453), indicating that the normalized comprehensive score obtained by principal component analysis has a good predictive ability for the regression model.

**Key words:** potato chips; vacuum frying; pretreatment; response surface methodology; principal component analysis

马铃薯 (*Solanum tuberosum* L.), 又称地蛋、土豆、洋芋等, 茄科植物的块茎, 属茄科多年生草本植物, 与小麦、稻谷、玉米和高粱并成为世界五大作物<sup>[1]</sup>。马铃薯的营养物质丰富且全面, 结构合理, 富含有人体所必需的亚油酸、亚麻酸等物质, 素有“地下

收稿日期: 2018-08-21

基金项目: 贵州特色果蔬脆片加工关键技术研究与应用示范项目 ([2018]2309); 薯类脆片太阳能热泵干燥技术研究与创新示范项目 ([2017]07)

作者简介: 王辉 (1989-), 男, 助理研究员, 硕士研究生, 研究方向: 农产品加工、果蔬加工

通讯作者: 刘辉 (1986-), 男, 副研究员, 博士研究生, 研究方向: 蛋白组学、农产品加工

苹果”、“第二面包”的美称<sup>[2,3]</sup>, 是世界上种植最广泛的蔬菜之一和唯一用作主食的作物块茎<sup>[4]</sup>。随着 2015 年, 我国启动马铃薯主粮化战略, 将马铃薯作为稻米、小麦、玉米外的又一主粮<sup>[5]</sup>, 截止到 2017 年全国马铃薯种植面积已超过 8500 万亩, 总产量逐年增加, 产量已超过 1 亿吨。但我国用于深加工的马铃薯只占 14%<sup>[6]</sup>, 大多数限于鲜贮、鲜运、鲜销、鲜食, 以及加工成粗制淀粉、薯条和薯片等。而油炸薯片是市场上最流行的马铃薯深加工产品之一, 特别是欧美国家<sup>[7]</sup>。但大多数马铃薯片都是经高温油炸工艺生产而成, 其成品含油量高, 感官品质差, 营养流失严重, 同时易产生丙烯酰胺等对人体有害的物质。故低温真空油

炸马铃薯技术孕育而生。真空油炸的温度低于传统油炸,所用时间较短,能较好保存马铃薯脆片风味和营养成分,减少产品的含油量,产品膨化度高,口感酥脆,同时,有效地降低油脂的劣化速度,提高油的利用率<sup>[8,9]</sup>。低温油炸马铃薯脆片工艺主要包括原料的预处理工艺、油炸工艺和脱油工艺,其中预处理工艺为提高产品的品质提供保障,可以抑制酶促褐变的发生、增加风味物质和固形物含量、除去一部分水分,保持产品形状,降低产品的含油量<sup>[10]</sup>。本文将系统研究不同的预处理条件切片厚度、漂烫时间、漂烫温度、食盐浸渍、冷冻时间对真空油炸马铃薯脆片品质变化的影响规律,确定较佳的预处理工艺,为马铃薯深加工提供技术参考和理论支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

马铃薯,品种为大西洋,由贵州省生物技术研究所提供;棕榈油购于益海嘉里粮油工业有限公司;食盐购于花溪区合力超市。

### 1.2 仪器与设备

TMS-Pro 质构仪,北京盈盛恒泰科技有限公司;Nh310 色差仪,上海卡罗卡超仪器有限公司;电子鼻,

北京盈盛恒泰科技有限公司;SOX500 脂肪测定仪,北京晨曦勇创科技有限公司;VF-80C 型真空油炸机,中山市维嘉真空机械厂。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 马铃薯脆片低温真空油炸工艺

原料→筛选→清洗→去皮→切片→漂烫→浸渍→沥水→预冻→真空油炸→脱油→包装→成品

#### 1.3.2 含油量测定

参照 GB/T5009.6-2016《食品中脂肪的测定》中索氏抽提法,由 SOX500 脂肪测定仪测定。

#### 1.3.3 破碎力的测定

采用 TPA 法测定破碎力,使用 P/36R 圆柱形探头,65%的压缩比例,触发力 0.15 N,30 mm/min 测试速率下降距离 20 mm。每个样品平行测定 6 次取平均值<sup>[11]</sup>。

#### 1.3.4 色差的测定

使用 Nh310 便携式色差仪测定马铃薯脆片亮度  $L^*$ ,每个样品平行测定 6 次取平均值<sup>[12]</sup>。

#### 1.3.5 马铃薯脆片感官评价

选定 12 名感官评价人员进行一定培训,然后以表 1 为标准对真空低温油炸脆片进行 100 分感官评价试验<sup>[13]</sup>。

表 1 马铃薯脆片官评定标准

Table 1 Criteria for sensory evaluation of potato chips

指标	具体描述	分值
形态 (30分)	片形完整,无碎片。	24~30
	片形较完整,有少量大碎片。	17~23
	片形不完整,有少量碎片。	9~16
	片形不完整,有大量碎片。	0~8
色泽 (20分)	淡黄色,色泽均匀,无油炸过焦色泽。	16~20
	淡黄色,色泽较均匀,无油炸过焦色泽。	11~15
	黄色,色泽一般,有轻微的油炸过焦色泽。	6~10
	黄色,色泽不均匀,较重的油炸过焦色泽。	0~5
香气 (20分)	具有马铃薯加工后的特有香气,香气浓郁,无异味。	16~20
	具有马铃薯加工后的香气,香气较浓郁,无异味。	11~15
	有马铃薯加工后的香气,香气一般,无明显异味。	6~10
	无马铃薯加工后的香气,异味明显。	0~5
口感 (30分)	酥脆性好,无油腻感,无焦苦味和哈喇味。	24~30
	酥脆性较好,无油腻感,无焦苦味和哈喇味。	17~23
	酥脆性一般,有油腻感,有焦苦味或哈喇味。	9~16
	酥脆性差,油腻感重,有焦苦味和哈喇味。	0~8

### 1.3.6 综合加权评分

将感官品质最好的定为 100 分，将其权重系数设为 30；破碎力越小越好，最低破碎力定为 100 分，设其权重系数设为 20；含油量越小越好，含油量定为 100 分，设其权重系数设为 30，亮度值  $L^*$  越大越好，定为 100 分，设其权重系数设为 20<sup>[14]</sup>。依据试验，以感官评分的最大值计为 40 分，其相应计分为 $(N_1/\text{感官评分 max})\times 30$ ；以破碎力的最低值计为 20 分，其相应计分为 $(\text{破碎力 min}/N_2)\times 20$ ；以含油量的最低值计为 30 分，其相应计分为 $(\text{含油量 min}/N_3)\times 30$ 。

综合评分 =  $(N_1/\text{感官评分 max})\times 30 + (\text{破碎力 min}/N_2)\times 20 + (\text{含油量 min}/N_3)\times 30 + (N_4/L^*\text{max})\times 20$

式中： $N_1$  为感官评分值； $N_2$  为破碎力； $N_3$  为含油量； $N_4$  为  $L^*$  值。

### 1.3.7 马铃薯脆片的电子鼻风味分析

分别取 3 g 马铃薯脆片样品放入电子鼻专用顶空瓶内，采用手动顶空进样法对苹果脆片挥发性物质进行测定<sup>[15]</sup>。以干燥空气为载气，流速为 300 mL/min，样品采样时间 60 s，清洗时间 60 s，采样间隔时间 5 s，

自动调零时间 10 s。

### 1.3.8 预处理工艺对马铃薯脆片品质影响的研究

在前期预实验的基础上，以综合评价、破碎力、挥发性成分和含油量为指标，分别考察不同切片厚度（1、3、5、7 mm）、漂烫温度（70、80、90、100 °C）、漂烫时间（1、3、5、7 min）、浸渍液（添加 0.1% 的食盐浓度和不添加食盐）、冷冻时间（1、2、3、4 h）5 个预处理单因素对马铃薯脆片产品品质的影响。经样品预处理后进行真空油炸，真空油炸参数为：真空度 0.098 MPa、油炸温度  $(88\pm 2)$  °C、时间 32 min、离心脱油转速 400 r/min、时间 6 min。

### 1.3.9 Box-Behnken 试验设计-响应面优化分析

在预处理工艺试验结果基础上进行响应面设计，采用 Design-Expert 8.0.5 软件对试验数据进行回归分析，并预测最佳配方。通过最小二乘法拟合二次多项方程，分析 4 个因素不同水平对马铃薯脆片综合评价的影响。

表 2 试验因素及水平

Table 2 Factors and levels table of test

因素	水平			
	漂烫温度 $X_1/^\circ\text{C}$	漂烫时间 $X_2/\text{min}$	切片厚度 $X_3/\text{mm}$	冷冻时间 $X_4/\text{min}$
-1	80	3	3	2.5
0	90	4	4	3
1	100	5	5	3.5

### 1.4 数据处理

对马铃薯脆片品质各指标进行主成分分析，取特征值大于 1 的因子提取主成分，马铃薯脆片品质的综合评分按公式(1)计算菊芋饼干各个试验组的综合得分后按公式(2)将得到的综合评分 F 进行规范化处理，并分别计算综合得分和标准化综合得分<sup>[16]</sup>。

$$F = (F_1Y_1 + F_2Y_2 + F_3Y_3) / C \quad (1)$$

式中：F 为综合评分； $F_1$ 、 $F_2$  和  $F_3$  为主成分 1、2 和 3 的得分； $Y_1$ 、 $Y_2$ 、 $Y_3$  为主成分的特征值；C 为累积特征值。

$$Z = (F - F_{\text{min}}) / (F_{\text{max}} - F_{\text{min}}) \quad (2)$$

式中：Z 为规范化综合评分；F 为综合评分； $F_{\text{max}}$  为综合评分最大值； $F_{\text{min}}$  为综合评分最小值。

采用 Microsoft Excel 2016 软件对实验数据进行分析及制图，并采用 SPSS18.0 和 Design-Expert 8.0.5 对数据进行统计分析，显著水平  $p < 0.05$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 预处理工艺对马铃薯脆片品质影响的研究

#### 2.1.1 预处理对马铃薯品质的影响

预处理是影响产品品质的重要因素之一，预处理可以使油炸物料的酶充分失活，保持果蔬原有的色泽和风味提高固形物含量，增加组织强度，防止油炸后果片变形，改善油炸果蔬的某些不良品味提高脱水速率降低产品含油量以及保护油的质量等<sup>[17]</sup>。由表 3 可知，除切片厚度和漂烫温度对产品  $L^*$  值影响显著 ( $p < 0.05$ ) 外，其余预处理方式无显著影响。漂烫可以破坏马铃薯的氧化酶系统，防止酶促褐变以及维生素的进一步氧化<sup>[18,19]</sup>，Krokida<sup>[20]</sup> 等研究表明：漂烫使样品中还还原性糖和游离氨基酸溶出，减少油炸时美拉德反应等非酶褐变的发生，提高产品亮度，使  $L^*$  值增加。样品厚度越大，其中心部位的酶系统受破坏程度不一致，影响样品  $L^*$  值。各预处理对样品破碎力影响

显著 ( $p<0.05$ ), 其中, 切片厚度和冷冻时间对样品破碎力影响较大, 切片厚度过小时, 样品易碎、易焦, 油腻感较重, 得率低; 当切片厚度太大时, 马铃薯脆片内部的水分不能快速蒸发, 心发软, 影响松脆性<sup>[17]</sup>。样品经冷冻处理后, 其组织内部水分结晶, 在油炸过程中细胞内的水分直接从固态汽化蒸发, 有助于形成外观蓬松和口感酥脆的产品<sup>[21]</sup>。经食盐浸渍处理后, 样品固形物含量增加, 产品得率显著提高。低浓度的食盐可以破坏酶或酶的氧化系统和减少氧气的供给,

从而减少样品的变色且可保存维生素含量, 因此具有减缓酶促褐变的作用<sup>[22]</sup>。除含油量食盐浓度和冷冻时间外, 其余预处理工艺影响显著 ( $p<0.05$ )。油炸产品的油脂含量与样品的表面积和总体积的比例密切相关, 厚度大吸油量较少<sup>[14,23]</sup>, 漂烫使样品表面淀粉凝胶化, 阻止样品油炸时油脂的进入, 降低含油量<sup>[24,25]</sup>, 但高温长时间的漂烫会使样品组织破坏, 产品变形, 甚至软烂, 从而影响产品品质。感官评价和综合评分受各预处理工艺的影响, 均呈现显著性关系 ( $p<0.05$ )。

表 3 预处理对马铃薯脆片品质的影响

Table 3 Effect of pretreatment on the quality of potato chip

预处理方式	水平	$L^*$	破碎力/%	感观评价	含油量/%	综合评分
切片厚度/mm	1	63.5±4.7 <sup>b</sup>	5.9±2.3 <sup>d</sup>	70.7±2.3 <sup>a</sup>	28.1±0.9 <sup>a</sup>	86.44±2.6 <sup>a</sup>
	3	71.3±0.9 <sup>a</sup>	18.4±1.1 <sup>c</sup>	80.3±4.2 <sup>a</sup>	23.5±1.5 <sup>c</sup>	83.1±2.5 <sup>ab</sup>
	5	70.6±3.1 <sup>a</sup>	154.9±1.4 <sup>b</sup>	85.3±3.8 <sup>a</sup>	22.3±2.2 <sup>c</sup>	80.6±2.7 <sup>b</sup>
	7	63.7±1.4 <sup>b</sup>	315.5±3.2 <sup>a</sup>	74.0±1.0 <sup>b</sup>	26.2±1.4 <sup>b</sup>	69.8±1.2 <sup>c</sup>
烫漂温度/°C	70	60.4±2.3 <sup>b</sup>	206.9±8.9 <sup>a</sup>	71.7±6.8 <sup>b</sup>	23.2±2.2 <sup>b</sup>	79.1±5.0 <sup>c</sup>
	80	64.2±1.0 <sup>b</sup>	100.3±2.1 <sup>b</sup>	80.7±4.0 <sup>a</sup>	28.3±1.0 <sup>a</sup>	85.0±2.4 <sup>b</sup>
	90	70.1±3.1 <sup>a</sup>	66.7±1.2 <sup>b</sup>	81.7±3.5 <sup>a</sup>	23.2±2.1 <sup>b</sup>	99.0±2.6 <sup>a</sup>
	100	62.8±2.1 <sup>b</sup>	96.5±2.7 <sup>b</sup>	75.3±1.2 <sup>b</sup>	22.5±1.2 <sup>b</sup>	89.4±1.9 <sup>b</sup>
烫漂时间/min	1	68.6±6.5 <sup>a</sup>	401.2±2.9 <sup>a</sup>	69.6±10.0 <sup>b</sup>	22.0±1.1 <sup>b</sup>	79.5±5.1 <sup>b</sup>
	3	65.9±3.2 <sup>a</sup>	65.2±1.1 <sup>b</sup>	68.6±2.9 <sup>b</sup>	22.2±2.4 <sup>b</sup>	93.8±3.0 <sup>a</sup>
	5	70.6±3.1 <sup>a</sup>	83.2±6.5 <sup>b</sup>	77.3±4.9 <sup>a</sup>	23.4±1.4 <sup>b</sup>	90.0±4.0 <sup>a</sup>
	7	69.9±1.0 <sup>a</sup>	61.3±1.9 <sup>b</sup>	63.3±4.7 <sup>c</sup>	26.0±0.9 <sup>a</sup>	89.7±3.0 <sup>a</sup>
食盐浓度/%	空白	68.2±6.5 <sup>a</sup>	192.1±1.0 <sup>a</sup>	75.0±3.4 <sup>b</sup>	21.0±0.6 <sup>a</sup>	85.0±3.1 <sup>b</sup>
	0.1%食盐	65.5±3.5 <sup>a</sup>	80.8±6.3 <sup>b</sup>	84.0±3.5 <sup>a</sup>	22.1±1.4 <sup>a</sup>	96.5±4.0 <sup>a</sup>
冷冻时间/h	1	68.3±2.2 <sup>a</sup>	86.8±5.2 <sup>b</sup>	62.0±6.6 <sup>b</sup>	22.3±1.3 <sup>a</sup>	69.9±4.6 <sup>c</sup>
	2	66.2±3.5 <sup>a</sup>	173.4±2.3 <sup>a</sup>	69.7±6.1 <sup>a</sup>	21.0±2.1 <sup>a</sup>	72.2±3.1 <sup>b</sup>
	3	66.5±4.1 <sup>a</sup>	26.3±1.0 <sup>d</sup>	71.7±0.6 <sup>a</sup>	24.9±3.0 <sup>a</sup>	94.45±2.3 <sup>a</sup>
	4	70.6±3.1 <sup>a</sup>	76.1±7.4 <sup>c</sup>	74.0±8.5 <sup>a</sup>	23.0±0.9 <sup>a</sup>	80.37±5.0 <sup>b</sup>

2.1.2 预处理对马铃薯脆片挥发性成分的影响

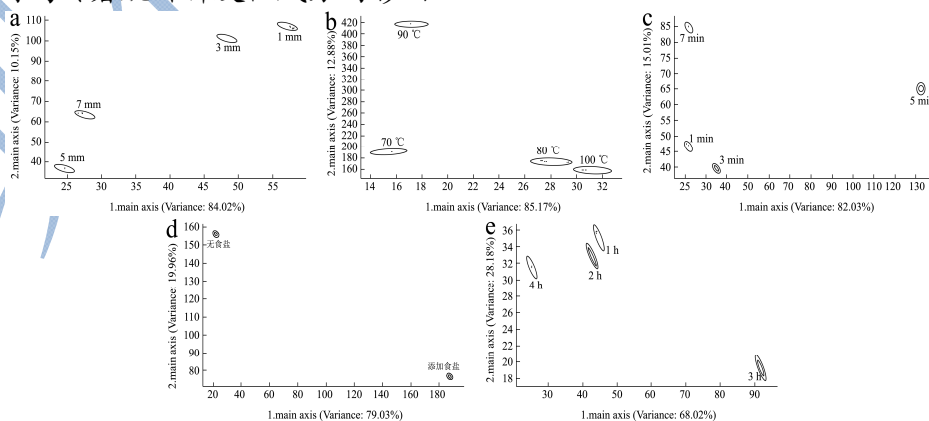


图 1 预处理对马铃薯风味的影响

Fig.1 Effect of pretreatment on potato volatile components

注: a:切片厚度; b:漂烫温度; c:漂烫时间; d:添加食盐; e:冷冻时间。

采用电子鼻对样品挥发性物质进行主成分分析 (principal component analysis PCA), 在 PCA 法分析中, 总贡献率越大, 越能较全面的反映试样整体信息。根据样品在横纵坐标轴上的距离判断样品风味物质之间的差异性, 距离越远, 差异越大。横坐标表示第一主成分贡献率的大小, 且贡献率 (或权重) 较大, 因此, 如果不同样品之间在横坐标上的距离差距较大, 说明它们之间的差异较明显; 而样品在纵坐标上的距离即使很大, 由于第二主成分的贡献率 (或权重) 很小, 不同样品之间的实际差异较小<sup>[26]</sup>。由图 1 可知, 切片厚度、漂烫温度、漂烫时间、食盐浓度和冷冻时间的总贡献率分别为 94.16、98.05、97.04、98.99 和

96.20%, 均大于 85%, 能反样品整体信息。根据图 1 中样品在横坐标上距离的差异, 选择切片厚度 3 mm、漂烫温度为 90 °C、漂烫时间为 3 min、食盐浓度为 0.1%和冷冻时间为 2 h 进行后续试验。

## 2.2 响应面结果分析

### 2.2.1 响应面实验结果分析

根据单因素实验结果设计 Box-Behnken Design 实验, 设定不同漂烫温度、漂烫时间、切片厚度和冷冻时间实验设计结果如表 4 所示。根据表 4 试验结果进行主成分分析。

表 4 Box-Behnken 响应面实验设计与结果

Table 4 Box-Behnken experimental design and results

试验号	漂烫温度 $X_1/^\circ\text{C}$	漂烫时间 $X_2/\text{min}$	切片厚度 $X_3/\text{mm}$	冷冻时间 $X_4/\text{min}$	破碎力/N	含油量/%	L*值	感官评价	综合评分
1	-1	0	0	-1	160.7	34.6	70	68	57.1
2	0	0	1	1	15.2	34.5	71.3	69	64.9
3	0	1	1	0	130.9	36.1	73.7	68	57.6
4	0	0	-1	1	21.1	34.2	67.4	69	61.8
5	1	1	0	0	109	30.2	73	68	60.6
6	0	1	0	-1	29.9	35.9	69.1	77	62.4
7	0	0	0	0	7.2	32.8	68.3	92.5	81.1
8	-1	0	0	1	134.1	28.3	70.6	68	60.9
9	1	0	1	0	30.8	27.9	70.9	67	64
10	0	-1	-1	0	25.8	32.2	70.5	64	61
11	0	1	0	1	59.4	36.1	71	66.5	57.5
12	0	0	0	0	20.7	32.8	68.3	91	69.8
13	1	0	0	-1	29.2	33.4	67.1	56.5	56.6
14	0	0	0	0	10	32.8	68.3	90	75.1
15	0	0	0	0	6	32.8	68.3	90.5	83.9
16	-1	-1	0	0	153.6	27.8	67.2	66	59.6
17	0	0	1	-1	21.2	30.5	64.3	69.5	63.1
18	0	0	0	0	8	32.8	68.3	95	80.3
19	0	1	-1	0	12	36.3	68.3	54	60.77
20	0	0	-1	-1	46	34.3	67.3	69	58.7
21	1	-1	0	0	65.2	30.2	68.2	63.5	58.6
22	1	0	-1	0	51.3	32.8	70.8	67.5	59.6
23	0	-1	0	-1	56.9	33.9	67.93	55.5	54.3
24	-1	0	-1	0	96.8	18.3	71.5	66	71.5
25	0	-1	0	1	26	34.7	68.4	65	59.5
26	-1	0	1	0	93.6	37	55.1	48.5	46.4
27	0	-1	1	0	58	35.8	67.6	64.5	56.19
28	-1	1	0	0	83.6	32.8	65.6	62	55.6
29	1	0	0	1	40	28.1	68	70	63.1

### 2.2.2 试验结果主成分分析

采用 SPSS 17.0 软件对表 4 中各指标数据进行主成分分析(PCA)<sup>[27,28]</sup>。由表 5 可知,共提取 5 主成分,累积贡献率达到 100%。根据贡献率大于 85%的原则,说明提取的 3 个主成分能够全面反映马铃薯脆片的品质信息。因此,选择第 1 主成分、第 2 主成分和第 3

主成分进行后续的综合得分和标准得分的分析。根据 5 个指标的特征向量绝对值大小可以看出,决定第 1 主成分的指标主要是感官评价和综合评分,决定第 2 主成分的是破碎力和含油量;决定第 3 主成分的是 L\*值和含油量。

表 5 马铃薯预处理主成分的特征值、贡献率及特征向量

Table 5 Characteristic values, contribution rates and eigenvectors of principal components in pretreatment of potato

主成分	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%	特征向量				
				破裂力	含油量	L*值	感官评价	综合评分
1	2.294	45.887	45.887	-0.376	-0.152	0.253	0.603	0.639
2	1.396	27.913	73.800	0.545	-0.654	0.520	-0.065	0.0209
3	1.005	14.996	88.796	0.042	0.629	0.759	0.035	-0.159
4	0.240	9.892	98.688	0.723	0.316	-0.299	0.522	0.125
5	0.066	1.312	100	0.195	0.231	-0.019	-0.598	0.742

对第 1 主成分、第 2 主成分和第 3 主成分的得分值进行综合得分和标准化得分计算,结果见表 6。标

准化得分值介于 0~1 之间,第 15 号实验组标准化得分最高,24 号实验组最低。

表 6 主成分得分值与规范化综合评分

Table 6 Principal component scores and standardized score

试验号	F1	F2	F3	F	Z	试验号	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	F	Z
1	-2.971	0.117	0.923	-0.067	0.238	16	-3.167	0.080	-0.940	-0.089	0.134
2	0.489	-0.390	0.930	0.014	0.637	17	0.045	-0.742	-1.340	-0.022	0.460
3	0.859	0.089	2.004	0.041	0.765	18	3.030	-0.467	-0.281	0.069	0.902
4	1.161	-0.898	0.033	0.016	0.646	19	-0.796	-1.150	0.564	-0.034	0.401
5	-1.663	1.059	0.466	-0.022	0.457	20	-0.445	-0.641	0.108	-0.021	0.466
6	0.467	-0.863	0.738	0.005	0.590	21	-1.803	0.085	-0.371	-0.048	0.330
7	2.967	0.660	-0.304	0.084	0.980	22	-0.565	0.258	0.656	-0.005	0.542
8	-2.657	0.011	-0.398	-0.072	0.215	23	-2.516	-0.273	0.241	-0.067	0.238
9	-1.313	0.002	-0.254	-0.036	0.390	24	-3.918	0.050	-1.821	-0.116	0.000
10	-0.029	0.032	0.423	0.003	0.583	25	-0.059	-0.750	0.387	-0.010	0.518
11	-0.564	-0.193	1.304	-0.007	0.534	26	0.004	-1.410	-2.068	-0.040	0.373
12	1.910	0.618	-0.081	0.058	0.852	27	-1.011	-0.693	0.477	-0.033	0.405
13	-0.102	-0.650	-0.104	-0.014	0.500	28	-1.433	-0.166	-0.469	-0.044	0.353
14	2.352	0.527	-0.095	0.068	0.901	29	-0.302	0.494	-0.862	-0.007	0.531
15	3.086	0.756	-0.365	0.089	1.000						

注: F1、F2、F3、F 和 Z 分别代表第 1 主成分、第 2 主成分、第 3 主成分、综合得分和标准化综合得分。

### 2.2.3 响应面建立模型及方差分析

以表 6 中的标准化综合得分为响应值,采用 Design-Exper8.0.6 对数据进行多元回归拟合处理,获得标准化综合得分的二次多项回归方程为:

$$Y=0.927+0.12X_1+0.074X_2+0.049X_4-0.131X_1X_3+0.135X_2X_3-0.084X_2X_4-0.385X_1^2-0.229X_2^2-0.184X_3^2-0.196X_4^2$$

由表 7 方差分析可知,回归模型极显著( $p<0.01$ )。失拟项  $p=0.3865(p>0.05)$ ,失拟项不显著,试验结果

受未知因素干扰较小。且模型决定系数  $R^2=0.9604$ ,说明模型拟合程度良好,试验误差小,模型选择合适,可用该模型来确定马铃薯脆片的最佳预处理条件。由  $p$  值可知,因素  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_1X_3$ 、 $X_2X_3$ 、 $X_1^2$ 、 $X_2^2$ 、 $X_3^2$ 、 $X_4^2$ 对标准化得分的影响极显著( $p<0.01$ ), $X_4$ 、 $X_2X_4$ 对标准化得分的影响显著( $p<0.05$ ),说明该设计中因素对响应值的影响不是简单的线性关系,交互项和二次项都有显著影响。

表 7 回归模型方差分析

Table 7 Analysis variance of regression model

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	p 值	显著性
模型	1.684	14	0.120	24.276	<0.0001	**
X <sub>1</sub> -漂烫温度	0.172	1	0.172	34.714	<0.0001	**
X <sub>2</sub> -漂烫时间	0.066	1	0.066	13.376	0.0026	**
X <sub>3</sub> -切片厚度	0.013	1	0.013	2.583	0.1303	
X <sub>4</sub> -冷冻时间	0.029	1	0.029	5.832	0.0300	*
X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	0.002	1	0.002	0.427	0.5241	
X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>	0.069	1	0.0689	13.900	0.0022	**
X <sub>1</sub> X <sub>4</sub>	0.0007	1	0.0007	0.147	0.7071	
X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	0.073	1	0.073	14.815	0.0018	**
X <sub>2</sub> X <sub>4</sub>	0.028	1	0.028	5.694	0.0317	*
X <sub>3</sub> X <sub>4</sub>	2.25E-06	1	2.25E-06	0.0004	0.9833	
X <sub>1</sub> <sup>2</sup>	0.962	1	0.962	193.100	<0.0001	**
X <sub>2</sub> <sup>2</sup>	0.341	1	0.341	68.871	<0.0001	**
X <sub>3</sub> <sup>2</sup>	0.221	1	0.221	44.502	<0.0001	**
X <sub>4</sub> <sup>2</sup>	0.250	1	0.250	50.418	<0.0001	**
残差	0.0693	14	0.005			
失拟项	0.0543	10	0.005	1.443	0.3865	
净误差	0.0151	4	0.0038			
总变异	1.7541	28				
R <sup>2</sup>	0.9604					
R <sub>adj</sub> <sup>2</sup>	0.9209					

2.2.4 交互项解析

等高线图可以反映各因素交互作用对响应值的影响。圆形表示因素间交互作用不显著，椭圆表示因素间交互作用显著。由图 2 可知，漂烫温度与漂烫时间交互作用较显著，当漂烫时间大于 4 min 时，标准化得分逐渐降低。漂烫时间越长，温度越高，导致样品组织结构破坏严重，品质变差，影响最终标准化得分 [20]。

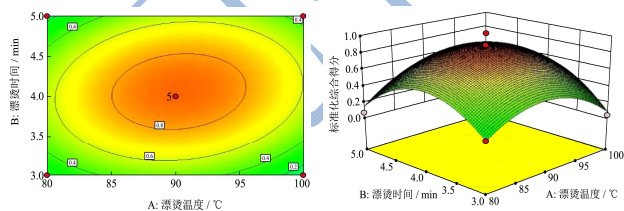


图 2 漂烫温度与漂烫时间响应面图和等高线图

Fig.2 Blanching temperature and blanching time response surface and contour map

如图 3 所示，漂烫温度与切片厚度之间交互作用显著，切片厚度和漂烫温度分别为 4 mm 和 90 °C 时，标准化综合得分达到最大值。当切片厚度大于 4 mm 样品厚度越大，内部淀粉颗粒为糊化，使得产品破碎力增加，脆度降低。在一定漂烫温度和时间下，样品

中引起褐变的为完全失活，有利于产品色泽的提高。

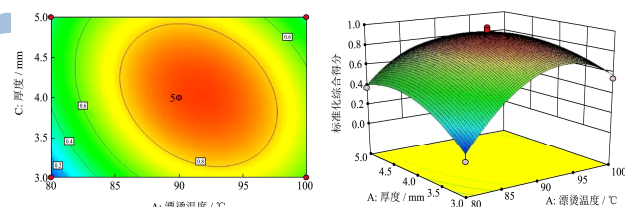


图 3 漂烫温度与切片厚度响应面图和等高线图

Fig.3 Blanching temperature and slice thickness response surface and contour map

由图 4 可知，漂烫温度与冷冻时间交互作用无显著性关系，漂烫温度和冷冻时间对脆度和含油量影响较大。当漂烫温度与冷冻时间大于 90 °C 和 2.9 h 时，产品标准化综合得分降低。

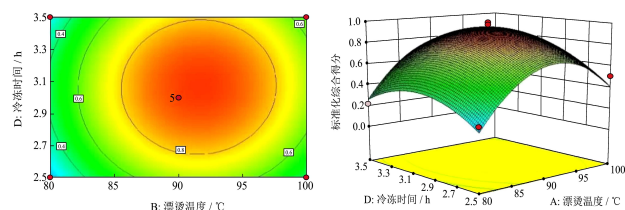


图 4 漂烫温度与冷冻时间响应面图和等高线图

Fig.4 Blanching temperature and freezing time response surface and contour map

如图 5 所示,漂烫时间与切片厚度交互作用显著。随着漂烫时间一定时和切片厚度的增加,等高线密集,有利产品呈形,标准化综合得分值增加,当厚度超过 4 mm,漂烫时间大于 4 min 时,产品品质较差,标准化综合得分降低。

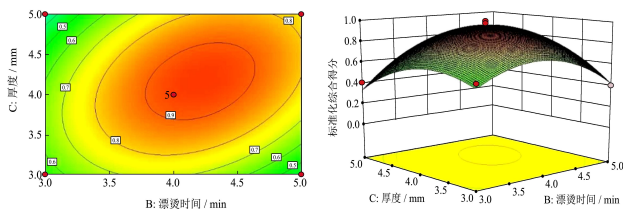


图 5 漂烫时间与切片厚度响应面图和等高线图

Fig.5 Blanching time and slice thickness response surface and contour map

如图 6 所示,当冷冻时间小于 2.9 h,漂烫时间小于 4 min 时,等高线较密集,表明在此范围内,二者对马铃薯脆片标准化综合得分影响较大。适当的冷冻时间和漂烫时间有利于样品多孔性的形成,提高产品脆度,色泽和降低含油量,有利产品品质。

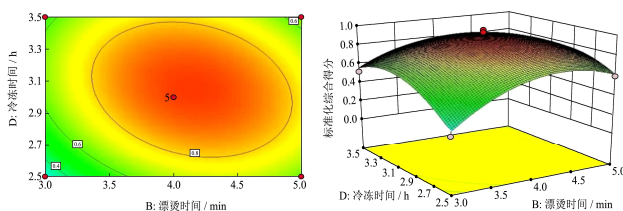


图 6 漂烫时间与冷冻时间响应面图和等高线图

Fig.6 Blanching time and freezing time response surface and contour map

如图 7 所示,切片厚度与感官评分之间无显著性关系。当冷冻时间和切片厚度分别小于 3 h 和 4 mm 时,样品标准化综合得分增加。说明一定的冷冻时间和切片厚度利于产品品质的形成,从而间接增加样品的标准化综合得分。

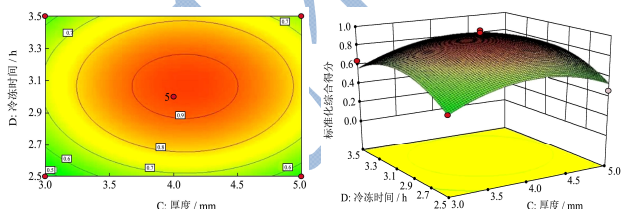


图 7 切片厚度与冷冻时间响应面图和等高线图

Fig.7 Slice thickness and freezing time response surface and contour map

2.2.5 验证试验

在最优工艺条件下进行马铃薯预处理工艺验证实验。通过软件 Design-Expert 8.0.6 对所得到的响应面模型进行分析,得到马铃薯最佳预处理工艺参数为漂烫温度 91.34 °C、漂烫时间 4.17 min、切片厚度 4.1 mm 和冷冻时间 3.05 h,此条件下马铃薯的规范化综合得

分为 0.9453。考虑到实际操作的可行性,修正参数后马铃薯脆片最佳预处理工艺为漂烫温度 91 °C、漂烫时间 4 min、切片厚度 4 mm 和冷冻时间 3 h,得到规范化综合评分 0.9572,与预测值基本一致,说明该回归模型准确,主成分分析与响应面分析法相结合对马铃薯脆片预处理工艺进行优化的综合评价方法准确可行。

3 结论

3.1 通过单因素和响应面试验,并结合主成分分析对马铃薯脆片的最佳预处理工艺进行优化。单因素结果表明:不同预处理方式对破碎力、感官评价和综合评分的存在显著性影响 ( $p < 0.05$ ),且因此样品挥发性成分。经主成分分析共提取 5 个主成分,贡献率达到 100%,且前 3 个主成分总贡献率大于 85%,说明提取 3 个主成分能够全面反映马铃薯脆片的品质信息,根据 5 个指标的特征向量绝对值大小可以看出,决定第 1 主成分的指标主要是感官评价和综合评分,决定第 2 主成分的是破碎力和含油量;决定第 3 主成分的是  $L^*$  值和含油量。采用经主成分分析得到的标准化综合得分作为响应值,得到二次多项回归方程为:

$$Y = 0.927 + 0.12X_1 + 0.074X_2 + 0.049X_4 - 0.131X_1X_3 + 0.135X_2X_3 - 0.084X_2X_4 - 0.385X_1^2 - 0.229X_2^2 - 0.184X_3^2 - 0.196X_4^2$$

3.2 最佳工艺参数为漂烫温度 91 °C、漂烫时间 4 min、切片厚度 4 mm 和冷冻时间 3 h,在此条件得到规范化综合评分 0.9572,与预测值 (0.9453) 基本一致,说明该回归模型准确,主成分分析与响应面分析法相结合对马铃薯脆片预处理工艺进行优化的综合评价方法准确可行。

参考文献

[1] 吕金庆,衣淑娟,陶桂香,等.马铃薯播种机分体式滑刀开沟器参数优化与试验[J].农业工程学报,2018,34(2):44-54  
 LYU Jin-qing, YI Shu-juan, TAO Gui-xiang, et al. Parameter optimization and experiment of splitter sliding-knife opener for potato planter [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(2): 44-54

[2] 卢肖平.马铃薯主粮化战略的意义,瓶颈与政策建议[J].华中农业大学学报(社会科学版),2015,103(3):1-7  
 LU Xiao-ping. Strategy of potato as staple food: Significance, bottlenecks and policy suggestions [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2015, 103(3): 1-7

[3] 张群.马铃薯脆片真空油炸前预处理工艺的研究[D].无锡:江南大学,2007,8-9



- ZHANG Qun. The pretreatment technology of vacuum fried potato chips [D]. Wu xi: Jiangnan University, 2007, 8-9
- [4] Food and Agriculture Organization of the United Nations, Food and Agricultural Commodities Production [M]. 2016
- [5] 陈萌山,王小虎.中国马铃薯主食产业化发展与展望[J].农业经济问题,2015,12,4-11
- CHEN Meng-shan, WANG Xiao-hu. The development and prospect of Chinese potato staple food industrialization [J]. Issues in Agricultural Economy, 2015, 12: 4-11
- [6] 王辉,欧阳岁燕,黄珊,等.马铃薯干片干燥工艺参数优化[J].食品研究与开发,2018,39(2):33-38
- WANG Hui, OUYANG Sui-yan, HUANG Shan, et al. Optimization of drying conditions for dried potato slices [J]. Food Research & Development, 2018, 39(2): 33-38
- [7] Jeong Y, Jang Y A, Chang Y H, et al. Prediction of consumer acceptability of potato chips with various moisture contents using survival analysis [J]. Food Science & Biotechnology, 2013, 22(6): 1621-1627
- [8] Su Y, Zhang M, Bhandari B, et al. Enhancement of water removing and the quality of fried purple-fleshed sweet potato in the vacuum frying by combined power ultrasound and microwave technology [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2018, 44: 368-379
- [9] 李志雅,李清明,苏小军,等.果蔬脆片真空加工技术研究进展[J].食品工业科技,2015,36(17):384-387
- LI Zhi-ya, LI Qing-ming, SU Xiao-jun, et al. Research progress in vacuum processing technology of fruit and vegetable chips [J]. Science & Technology of Food Industry, 2015, 36(17): 384-387
- [10] 王钰.真空低温脱水蒜片工艺的研究[D].南京:南京农业大学,2012
- WANG Yu. Study on the dehydration technology by vacuum low-temperature drying of garlic slice [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012, 8-9
- [11] 肖敏,易建勇,毕金峰,等.不同聚合度糖渗透对苹果片干燥特性及品质的影响[J].食品科学,2017,38(9):53-58
- XIAO Min, YI Jian-yong, BI Jin-feng, et al. Effect of sugars with different degrees of polymerization on apple hot-air drying behavior and physical characteristics of instant controlled pressure drop dried apple chips [J]. Food Science, 2017, 38(9): 53-58
- [12] 刘敏,谭书明,张洪礼,等.基于模糊感官评价对大米感官品质分析[J].食品工业科技,2017,21:247-251
- LIU Min, TAN Shu-ming, ZHANG Hong-Li, et al. Sensory quality analysis of rice based on fuzzy sensory evaluation [J]. Science & Technology of Food Industry, 2017, 21: 247-251
- [13] 侯春辉,易建勇,毕金峰,等.添加辅料对压差闪蒸联合干燥马铃薯复合脆片品质的影响[J].中国粮油学报,2018,33(2):74-81,88
- HOU Chun-hui, YI Jian-yong, BI Jin-feng, et al. The effect of excipients on qualities of restructured potato chips dried by hot air coupled with instant controlled pressure drop [J]. Journal of the Chinese Cereals & Oils Association, 2018, 33(2): 74-81, 88
- [14] 康巧娟.紫甘薯真空油炸工艺研究[D].杭州:浙江工商大学,2012
- KANG Qiao-juan. The technical study of vacuum fried purple sweet potato [D]. Hangzhou: Zhejiang Industrial and Commercial University, 2012
- [15] Qiu S, Wang J, Gao L. Qualification and quantisation of processed strawberry juice based on electronic nose and tongue [J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 60(1): 115-123
- [16] 吴泽河,熊双丽.响应面-主成分分析法优化低糖菊芋饼干配方[J].核农学报,2018,32(3):539-547
- WU Ze-he, XIONG Shuang-li. Optimization of low sugar jerusalem artichoke biscuit formula by response surface methodology and principal component analysis [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2018, 32(3): 539-547
- [17] 宋贤聚.低含油率马铃薯脆片加工过程研究[D].无锡:江南大学,2008
- SONG Xian-ju. Studied on process of low oil content potato chips [D]. Wu xi: Jiang nan University, 2008
- [18] 张岩,吴继军,唐道邦,等.香蕉片的真空油炸工艺及质构品质初探[J].现代食品科技,2010,26(9):987-990
- ZHANG Yan, WU Ji-jun, TANG De-bang, et al. Effects of processing conditions on the quality and texture of the vacuum-fried banana chips [J]. Modern Food Science & Technology, 2010, 26(9): 987-990
- [19] Krokida, M. K., Oreopoulou, V., Maroulis, Z. B., et al. Colour changes during deep fat frying [J]. Journal of Food Engineering, 2001, 48: 219-225
- [20] 张树禄.低温真空油炸生产马铃薯脆片的过程研究及其品质控制[D].济南:山东轻工业学院,2009
- ZHANG Shu-lu. Process study and quality control for low temperature vacuum fried potato chips [D]. Ji nan: Shandong Institute of light Industry, 2009
- [21] Albertos I, Martin-Diana A B, Sanz M A, et al. Effect of high pressure processing or freezing technologies as pretreatment in vacuum fried carrot snacks [J]. Innovative Food Science &

- Emerging Technologies, 2016,33: 115-122
- [22] Bunger A, Moyano P, Rioseco V. NaCl soaking treatment for improving the quality of french-fried potatoes [J]. Food Research International, 2003, 36(2): 161-166
- [23] 金玮玲,高虹,范秀芝,等.不同预处理方法对真空冷冻干燥香菇脆片感官品质的影响[J].食品科学,2017,38(13):108-112
- JIN Wei-ling, GAO Hong, FAN Xiu-zhi, et al. Effect of different pretreatment methods on the sensory quality of *Lentinus edodes* chips produced by vacuum freeze-drying [J]. Food Science, 2017, 38(13): 108-112
- [24] Moreira R G, Silva P F D, Gomes C. The effect of a de-oiling mechanism on the production of high quality vacuum fried potato chips [J]. Journal of Food Engineering, 2009, 92(3): 297-304
- [25] Krokida M K, Oreopoulou V, Maroulis Z B. Water loss and oil uptake as a function of frying time [J]. Journal of Food Engineering, 2000, 44(1): 39-46
- [26] 刘敏,谭书明,张洪礼,等.不同品种大米口感品质分析[J].食品科学,2018,39(15):1
- LIU Min, TAN Shu-ming, ZHANG Hong-Li, et al. Analysis on the taste quality of different rice varieties [J]. Food Science, 2018, 39(15): 1
- [27] 蒋旖旋,龚超,侯莉莉,等.响应面-主成分分析法研制莲房膳食纤维曲奇[J].食品研究与开发,2016,37(1):100-106
- JIANG Yi-xuan, GONG Chao, HOU Li-li, et al. Development of lotus seed pot dietary fiber cookie by response surface methodology and principal component analysis [J]. Food Research & Development, 2016, 37(1): 100-106
- [28] 李玉龙,杨焯,陆国权.基于均匀设计和主成分分析的甘薯薯片常压油炸工艺优化[J].核农学报,2017,31(1):118-124
- LI Yu-long, YANG Ye, LU Guo-quan. Optimization of sweet potato chips frying process under normal pressure based on uniform design and principal component analysis [J]. Journal of nuclear agricultural sciences, 2017, 31(1): 118-124