

# 响应面法优化真空油炸-压差膨化 联合生产藕脆片工艺

董雪萌<sup>1</sup>, 冯心雨<sup>1</sup>, 洗东妮<sup>1</sup>, 袁潮<sup>2</sup>, 卢芸<sup>3</sup>, 戴阳军<sup>1\*</sup>

(1. 常熟理工学院 生物与食品工程学院, 江苏 常熟 215500; 2. 宿迁楠景水产食品有限公司, 江苏 宿迁 223800;  
3. 扬州大学 旅游烹饪学院, 江苏 扬州 225127)

**摘要:**以莲藕为原料,采用真空油炸-压差膨化联用技术制作藕脆片。采用质构参数与感官评分为评价指标,结合单因素实验和响应面实验,对莲藕的加工工艺进行优化,得出藕脆片的最佳工艺参数:油炸温度为93℃、油炸时间为25 min、膨化时间为35 min。所得藕脆片的色泽莹亮、口感酥脆,该实验为果蔬脆片的工业化生产工艺提供了理论基础。

**关键词:**莲藕脆片;响应面实验;质构参数;感官评分

**中图分类号:** TS 972.12.8

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2095-8730(2021)01-0063-05

我国种植莲藕的历史源远流长,其中江浙、湖北等地的莲藕品质较好,种植面积最大。<sup>[1,2]</sup>莲藕因其香甜酥脆的口感,深受各方食客的喜爱。莲藕营养成分丰富,作为一种药食同源的食物,含有鞣质和多酚化合物等功能性成分。<sup>[3,4]</sup>由于新鲜莲藕在储藏过程中极易发生变色变质,因而对其工业化加工研究逐渐得到生产者们的重视。<sup>[5,6]</sup>即食藕脆片能够很大程度的解决在贮存、运输、销售等一系列过程中出现的问题,有极大的市场空间。因藕片长时间的低温油浴,导致藕片的一些油溶性的芳香物质及部分营养成分流失。同时,产品的含油量较高。单一的真空油炸不能生产出令人满意的果蔬脆片。<sup>[7]</sup>本课题使用真空油炸-压差膨化联用的工艺,尽可能降低产品含油率,最大程度保留藕脆片自然清香,旨在打开莲藕休闲食品的市场,为莲藕产品的工业化生产提供一定的理论依据。

## 1 材料与设备

### 1.1 材料与设备

#### 1.1.1 实验材料

莲藕、棕榈油:常熟市农贸市场;枸橼酸(食

品级):海星化工有限公司;焦亚硫酸钠(食品级):廊坊乾耀科技有限公司。

#### 1.1.2 实验设备

果蔬切片机:永康市新奈商贸公司;真空微油炸设备:山东日照同州山河机械科技有限公司;BCD-196KF速冻柜:青岛海尔股份有限公司;BSA4202S电子天平:塞多利斯上海贸易有限公司;TA.XT Plus质构仪:北京微讯超技仪器技术有限公司。

## 1.2 制作工艺

### 1.2.1 工艺流程

原料清洗→去皮→切片→护色→漂烫→速冻→油炸→膨化→脱油→包装→成品。

### 1.2.2 操作要点

原料选择及预处理:选取新鲜莲藕洗净去皮,切成3 mm厚的薄片。

护色:将藕片放在浓度为0.05%的焦亚硫酸钠和0.20%的枸橼酸溶液中浸泡1 h后捞出,流水冲净,注意藕片不能接触金属器具。

漂烫:将护色好的藕片置于95℃水中漂烫3 min后捞出,冲凉并沥干。

收稿日期:2020-05-21 \*通信作者

基金项目:泗洪县科技计划项目(L201802);苏北科技发展计划项目(BC2013467)

作者简介:董雪萌,女,常熟理工学院生物与食品工程学院学生,从事食品加工研究,E-mail:772168751@qq.com;

戴阳军,男,常熟理工学院生物与食品工程学院副教授,从事食品加工研究,E-mail:16013237@qq.com。

速冻:将藕片平铺于橡胶垫上,放入 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 速冻柜中速冻24 h。

真空油炸-压差膨化:将藕片放入真空油炸设备中,设置设备工作参数(油炸真空度 $0.085\pm 0.005\text{ MPa}$ ;膨化真空度上压 $0.090\text{ MPa}$ ,下压 $0.065\text{ MPa}$ ), $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下真空油炸30 min,膨化40 min至含水率5%以下,脱油10 min,脱油转速 $400\text{ r/min}$ 。<sup>[8]</sup>

包装:藕脆片密封包装。

### 1.3 实验设计与方法

#### 1.3.1 单因素实验设计

以预实验为基础,分别以油炸温度、油炸时间、膨化时间3个因素进行单因素实验设计。

油炸温度的选择:在其他工艺条件不变的情况下,依次考察油炸温度为80、85、90、95、 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时产品的品质。

油炸时间的选择:在其他工艺条件不变的情况下,依次考察油炸时间为20、25、30、35、40 min时产品的品质。

膨化时间的选择:在其他工艺条件不变的情况下,依次膨化时间为20、30、40、50、60 min时产品的品质。

#### 1.3.2 响应面实验设计

单因素实验只能检验每个因素在一定范围内的优势,而不能比较未选择水平的信息,响应面分析是一种用于在多种因素系统中寻找最佳条件的统计法,采用Box-Behnken设计。<sup>[9]</sup>通过单因素试验,将油炸温度(A)、油炸时间(B)、膨化时间(C)作为试验所要考察的变化量,设计3因素3水平的响应面试验,以产品脆度(Y)作为响应值,使用Design-Expert 8.0软件对实验结果进行分析处理。响应面因素水平表如表1所示。

### 1.4 测定方法

#### 1.4.1 质构测定

使用P/2.5球形探头,将样品置于测试平台上,样品的中心点放置于探头正下方进行测试。测试条件:测前速度 $3\text{ mm/s}$ 、测试速度 $1\text{ mm/s}$ 、测后速度 $10\text{ mm/s}$ 、触发力 $5\text{ g}$ 。脆度可定义为探头接触脆片爆裂时的力与爆裂时时间的比值,脆度越小表明酥脆性越好,品质越佳。<sup>[10]</sup>

#### 1.4.2 感官评定

感官评定小组选取10名受过感官检验训练的食品专业人士,其中男、女性各5名,小组成员

身体健康,12 h前禁止吸烟、酗酒或吃刺激性食物。<sup>[11]</sup>试验采用100分制,评定标准如表2。<sup>[12]</sup>

表1 响应面因素水平

水平	因素		
	A:油炸温度/ $^{\circ}\text{C}$	B:油炸时间/min	C:膨化时间/ $^{\circ}\text{C}$
-1	85	25	30
0	90	30	40
1	95	35	50

表2 感官评分标准

评分	感官指标			
	色泽	香气	风味	组织形态
21~25	色泽莹亮洁白	有浓郁藕香味和油炸香味	口感酥脆	外表饱满平整,气孔大小适中且分布均匀
16~20	色泽一般	有藕香味和油炸香味	口感较酥脆	外表较饱满,气孔大小适中分布比较均匀
11~15	有黄色斑点	藕香味较淡	口感脆硬	外表有皱缩,气孔大小适中但分布不均匀
6~10	色泽微黄	无藕香味	软而不脆	外表皱缩较严重,气孔较大
1~5	色泽焦黑	出现焦味或油腥味	口感很硬	外表弯曲,皱缩严重,无气孔或气孔太小

#### 1.4.3 数据处理

实验数据使用软件Origin 7.5及Design-Expert 8.0进行制图和方差分析。实验数据重复3次并取平均值。

## 2 结果与分析

### 2.1 单因素实验结果分析

#### 2.1.1 油炸温度对产品品质的影响与分析

油炸温度对产品品质的影响如图1所示。

真空油炸使果蔬产品在负压的条件下快速地汽化其中的水分,从而使果蔬脆片的口感具有酥脆性,合适的温度会使产品的表面富有一层诱人的金黄色,油炸温度过高会使脆片表面成焦黑色。由图1可知,当油炸温度小于 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,藕脆片的水分过高,口感不够酥脆,需延长油炸时间,造成设备能耗的提高;油炸温度大于 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,藕脆片快速脱水变硬,产品组织皱缩,膨化效果较差;当油炸温度为 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,藕脆片的感官评分较高,酥

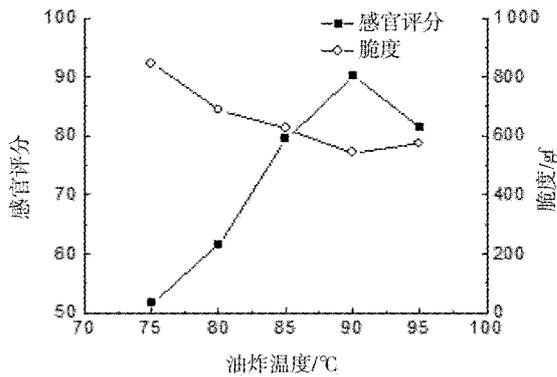


图1 不同油炸温度对产品品质的影响

香可口。经综合分析,取油炸温度 85 ~ 95 °C 为范围进行进一步分析。

2.1.2 油炸时间对产品品质的影响与分析

油炸时间对藕脆片品质的影响如图 2 所示。

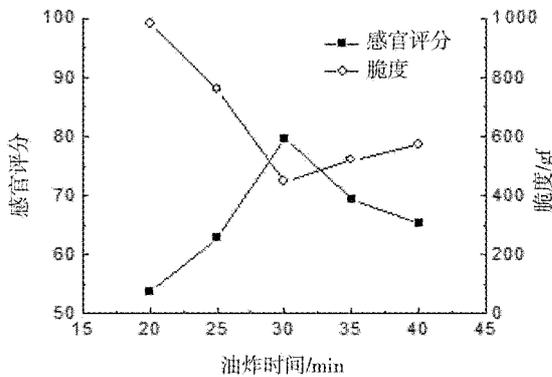


图2 不同油炸时间对产品品质的影响

在果蔬加工过程中,油炸时间是影响脆片质量的重要因素。随着油炸时间的增加,产品失水速率增加,从而达到保藏的要求。由图 2 可知,随着油炸时间的增加,产品含水率逐渐降低,口感变得酥脆,当油炸时间过长,藕脆片口感干硬,藕香味降低。当油炸时间为 30 min 左右时,产品酥脆可口。因此本试验取油炸时间 25 ~ 35 min 进行进一步分析。

2.1.3 膨化时间对产品品质的影响与分析

膨化时间对藕脆片品质的影响如图 3 所示。

实验发现,膨化时间对果蔬脆片质感有较大的影响。由图 3 可知,当膨化时间小于 40 min 时,产品口感较软,不够酥脆,形状不平整;当膨化时间大于 40 min 时,产品过于干燥易碎;当膨化时间为 40 min 左右时藕脆片的感官评分较好。经综合分析,取膨化时间 30 ~ 50 min 进行进一步分析。

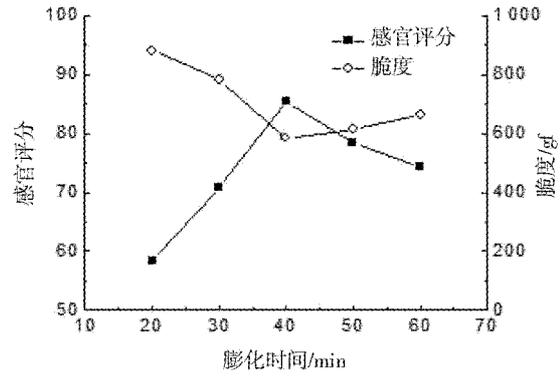


图3 不同的膨化时间对产品品质的影响

2.2 响应曲面实验结果

根据单因素实验结果,以脆度为响应值,采用 Box - Behnken 设计,选取油炸温度(A)、油炸时间(B)、膨化时间(C)3 个影响因素,采用 3 因素 3 水平的响应曲面设计方法进行实验,并对模型进行方差分析,得出最佳工艺参数,建立响应曲面回归模型。实验设计和分析结果如表 3、表 4 所示。

表 3 Box - Behnken 设计方案与实验结果

序号	A/°C	B/min	C/min	Y
1	1	0	1	1 193.17
2	0	-1	1	1 206.83
3	0	0	0	979.54
4	1	0	-1	1 359.85
5	0	0	0	856.04
6	0	1	-1	1 495.16
7	-1	0	-1	1 582.87
8	0	0	0	957.46
9	-1	1	0	1 331.75
10	1	1	0	1 275.00
11	0	0	0	867.25
12	-1	-1	0	1 382.83
13	0	0	0	906.75
14	-1	0	1	1 514.67
15	1	-1	0	603.33
16	0	1	1	927.83
17	0	-1	-1	657.00

利用 Design Expert8.0.6 软件对表 3 中响应值进行二元回归拟合,确定多元二次响应面回归方程模型如下:

$$Y = 913.41 - 172.60A + 147.47B - 31.55C + 180.69AB - 24.62AC - 279.29BC + 287.88A^2 - 53.06B^2 + 211.35C^2。$$

表4 回归方程的显著性检验与方差分析

方差来源	平方和	均方	F值	P值	显著性
模型	$1.43 \times 10^6$	$1.59 \times 10^5$	38.72	<0.000 1	**
A	$2.38 \times 10^5$	$2.38 \times 10^5$	57.93	0.000 1	**
B	$1.74 \times 10^5$	$1.74 \times 10^5$	42.29	0.000 3	**
C	7 961.96	7 961.96	1.94	0.206 8	
AB	$1.31 \times 10^5$	$1.31 \times 10^5$	31.74	0.000 8	**
AC	2 424.58	2 424.58	0.59	0.467 8	
BC	$3.12 \times 10^5$	$3.12 \times 10^5$	75.84	<0.000 1	**
A <sup>2</sup>	$3.49 \times 10^5$	$3.49 \times 10^5$	84.82	<0.000 1	**
B <sup>2</sup>	11 853.16	11 853.16	2.88	0.133 4	
C <sup>2</sup>	$1.88 \times 10^5$	$1.88 \times 10^5$	45.72	0.000 3	**
残项	28 796.76	4 113.82			
失拟项	17 016.76	5 672.25	1.93	0.267 0	
误差项	11 780	2 945			
总和	$1.46 \times 10^6$				

\*\*表示  $P < 0.01$ 。

由表4可知,该模型  $P < 0.000 1 (P < 0.01)$ ,表示该回归模型效应极显著,失拟项  $P$  值为  $0.267 0 (P > 0.05)$  不显著,说明实验模型的失拟度好,该回归模型合理。由  $F$  值大小可知,影响藕脆片酥脆性因素的主次顺序为油炸温度、油炸时间、膨化时间,其中一次项  $A$ 、 $B$  极显著 ( $P < 0.01$ ),说明油炸温度、油炸时间对产品酥脆性影响极显著,交互项  $AB$ 、 $BC$  极显著 ( $P < 0.01$ ),说明油炸时间和油炸温度相互作用极显著,油炸时间和膨化时间相互作用极显著。

### 2.3 响应曲面交互作用分析

为进一步研究各因素之间的交互作用并得到最佳工艺条件,通过 Design - Expert 8.0.6 绘制响应面 3D 图进行可视化分析各响应值与相关因素的趋势图。从图4可知,油炸时间和膨化时间两者的交互作用极显著,油炸温度对应的响应面坡度较陡,油炸时间对应的响应面坡度相对平缓一些,说明油炸温度对藕脆片的酥脆性影响比油炸时间更为明显。同理,从图5可知,油炸温度和膨化时间两者交互作用不显著,油炸温度对藕脆片酥脆性的影响比膨化时间更为明显。从图6可知,油炸时间与膨化时间二者交互作用极显著,油炸时间对藕脆片酥脆性的影响比膨化时间更为明

显,与方差分析一致。

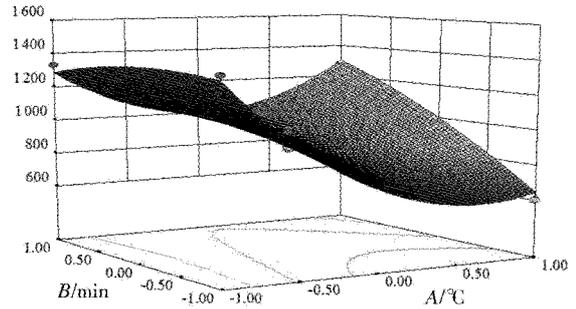


图4 油炸温度与油炸时间对产品酥脆性影响响应曲面图

### 2.4 最佳工艺与验证实验

根据所建立模型进行参数最优分析,得藕脆片最佳预测工艺条件为:油炸温度为  $92.95\text{ }^\circ\text{C}$ 、油炸时间为  $25\text{ min}$ 、膨化时间为  $34.49\text{ min}$ 。根据实际工艺情况进行调整,确定藕脆片制作最佳工艺参数为:油炸温度  $93\text{ }^\circ\text{C}$ 、油炸时间  $25\text{ min}$ 、膨化时间  $35\text{ min}$ 。为确保试验结果准确,将试验结果进行3次验证,结果显示,藕脆片的脆度为  $572.56\text{ g/s}$ ,接近预测值  $540.32\text{ g/s}$ ,相对误差仅为  $5.97\%$ 。

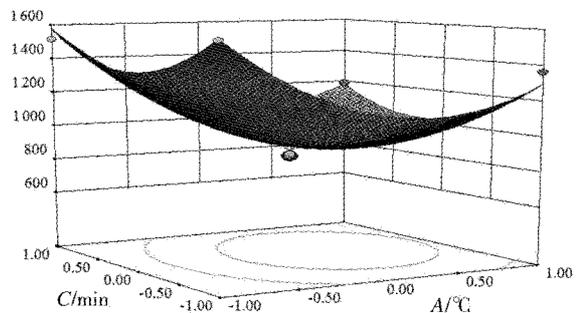


图5 油炸温度与膨化时间对产品酥脆性影响响应曲面图

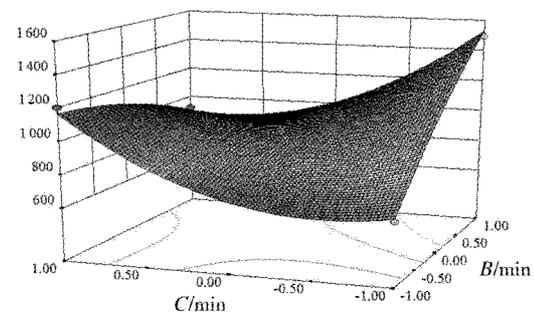


图6 油炸时间与膨化时间对产品酥脆性影响响应曲面图

### 3 结论

本实验以莲藕为原料,利用真空油炸-压差膨化联用技术制作藕脆片,优化其加工工艺。采用藕脆片的脆度和感官评分为测定指标,通过单因素实验和响应面实验,探讨分析藕脆片制作过程中油炸温度、油炸时间以及膨化时间对藕脆片酥脆性的主要影响,最后确定了最佳配方和工艺参数为:油炸温度为 93 ℃、油炸时间为 25 min、膨化时间为 35 min,此时得到的藕脆片色泽洁白,香味十足,酥脆可口。该实验为果蔬脆片的工业化生产工艺提供了理论基础。

#### 参考文献:

- [1] 黄建韶,田宏现. 莲藕中多酚氧化酶的性质[J]. 吉首大学学报(自然科学版), 2002,23(2):82-84.
- [2] 张福平,陈蔚辉,黄泽虹,等. 莲藕的营养保健功能[J]. 中国果菜, 2002(6):42.
- [3] 张长贵,董加宝,王祯旭,等. 莲藕的营养保健功能及其开发利用[J]. 中国食物与营养,2006(1):22-24.
- [4] MIN H, LEIF H S. Antioxidative capacity of rhizome extract and rhizome knot extract of edible lotus (*Nelumbo nuficera*) [J]. Food Chemistry, 2002, 76 (3): 327-333.
- [5] 夏文水,姜启兴,张家骊. 莲藕方便食品加工技术的研究[J]. 食品与机械,2007,23(1):139-142.
- [6] 彭立军,彭西甜,龚艳,等. 湖北省莲藕质量安全状况及产业发展的思考[J]. 农产品质量与安全,2017(5):56-59.
- [7] 宋贤聚,张魁,范柳萍. 真空微波-真空油炸-真空微波三阶段联合脱水工艺生产低含油率马铃薯脆片[J]. 食品科学,2009,30(8):297-302.
- [8] 李丽娟. 莲藕休闲脆片组合干燥技术研究[D]. 南京:南京师范大学,2013.
- [9] 刘辉,田秉晖,张松林. 基于 Box-Behnken 实验设计的电渗析脱盐效率影响因素实验研究[J]. 科学技术与工程,2017,17(24):124-131.
- [10] 熊昌定,王林. 响应面法优化川明参香肠配料的工艺条件[J]. 美食研究,2019,36(3):60-64.
- [11] 卢芸,周莹,施淑文,等. 响应面法优化青稞桃酥配方工艺[J]. 美食研究,2019,36(1):58-62.
- [12] 俞明君,李苗苗,杨伟,等. 即食杏鲍菇脆片加工方式比较研究[J]. 食用菌,2017,39(5):77-78.

## Optimizing joint technology of vacuum frying and differential pressure expansion to process lotus root chips by response surface methodology

DONG Xuemeng<sup>1</sup>, FENG Xinyu<sup>1</sup>, XIAN Dongni<sup>1</sup>, YUAN Chao<sup>2</sup>, LU Yun<sup>3</sup>, DAI Yangjun<sup>1</sup>

(1. School of Biotechnology and Food Engineering, Changshu Institute of Technology, Changshu, Jiangsu 215500, China;

2. Nanjin Aquatic Food Co., Ltd. Suqian, Jiangsu 223800, China;

3. School of Tourism and Culinary Science, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225127, China)

**Abstract:** The lotus root was used as raw material, and the vacuum frying and differential pressure expansion technology was used to make lotus root chips. Using texture parameters and sensory scores as evaluation indicators, the processing technology of lotus root was optimized by combining single-factor experiments and response surface experiments, and the optimal parameters for lotus root chips were obtained as frying temperature of 93 ℃, frying time of 25 min, expansion time of 35 min; the obtained product had a bright color and crisp taste.

**Key words:** lotus root crisps; response surface experiment; texture parameters; sensory score

(责任编辑:赵 勇)