

# 响应面法优化火龙果真空冷冻干燥工艺

## Optimization of vacuum freeze-drying of pitaya by response surface methodology

韦云伊 程 忠 雷霆德 黄春兰

WEI Yun-yi CHENG Zhong LEI Ting-de HUANG Chun-lan

(南宁学院, 广西 南宁 530000)

(Nanning University, Nanning, Guangxi 530000, China)

**摘要:**目的:提高火龙果冻干品酥脆度。方法:以美龙 1 号红肉火龙果为研究对象,通过 pearson 分析选出与感官评价相关性最高的多孔率为检测指标,考察切片厚度、预冻时间、干燥气压和干燥时间对火龙果冻干品品质的影响,并采用 Box-Behnken 响应面分析法优化火龙果真空冷冻干燥工艺。结果:切片厚度、预冻时间和干燥时间与火龙果冻干品的多孔率线性相关显著;最佳工艺条件为切片厚度 7 mm、预冻时间 30 h、干燥气压 43 Pa、干燥时间 40 h,此工艺生产的火龙果冻干品多孔率最高、表面平整、口感酥脆、颜色均匀鲜艳。结论:利用响应面法改进切片厚度、预冻时间、干燥气压和干燥时间工艺参数可以提高火龙果冻干品品质。

**关键词:**火龙果;真空冷冻干燥;多孔率;响应面

**Abstract:** **Objective:** Improve the brittleness and crisp of freeze-drying of pitaya. **Methods:** Taking red pitaya Meilong No.1 as the research object, the porosity was selected as the evaluation index by pearson correlation between sensory evaluation and objective indexes, the effects of slice thickness, pre-freezing time, drying air pressure and drying time on the quality of vacuum freeze-dried pitaya was studied by single factor experiments, and the optimal level was selected; The processing conditions were optimized using Box-Behnken response surface methodology. **Results:** Slice thickness, pre-freezing time and drying time were linearly correlated with the porosity of freeze-dried pitaya; The optimal process were slice thickness of 7 mm, pre-freezing time of 30 h, drying pressure of 43 Pa and drying time of 40 h, the freeze-dried pitaya produced by this process has the highest porosity, smooth surface, crisp taste and bright and uniform colour. **Conclusion:**

The quality of freeze-drying of pitaya can be improved by using response surface methodology to optimization the slice thickness, pre-freezing time, drying pressure and drying time.

**Keywords:** pitaya; vacuum freeze-drying; porosity; response surface methodology

火龙果是广西特色热带水果,产量居全国第一。由于加工水平低,火龙果精加工比例不足 3%。真空冷冻干燥技术是一种使物料中的水分直接从固态升华为气态,依靠冷阱将水蒸气冷凝捕集,从而去除湿物料中水分,获得干燥制品的干燥方法<sup>[1]</sup>,避免了高温对食品品质的影响,能够最大限度地保持原料的营养、色泽、形态和风味,且制品含水量低,复水性好,被认为是目前生产高品质食品最好的干制方法<sup>[2-3]</sup>。

易小红<sup>[4]</sup>研究了火龙果真空冷冻干燥传热传质过程,建立了动压测量模型;孙翠等<sup>[5-7]</sup>研究了真空冷冻工艺对果蔬冻干品质的影响,发现预冻速率、预冻的最终温度、干燥气压、加热板温度、干燥时间会影响果蔬冻干的含水量、复水率、色泽与色素、活性物质含量等;董会龙<sup>[8]</sup>研究了果蔬塌陷的影响因素;宋悦等<sup>[9-12]</sup>研究了高湿热空气冲击烫、微波辅助、热风干燥等辅助方法对真空冷冻速率和产品品质的影响。但目前关于真空冷冻干燥工艺对果蔬干酥脆度影响的研究尚未见报道。

试验拟以美龙 1 号红肉火龙果为研究对象,建立火龙果冻干品酥性、脆性评价方法,探索以客观指标替代感官评价的可能性;为提高产品酥脆性,利用响应面试验法优化真空冷冻干燥工艺,旨在为美龙 1 号红肉火龙果冻干品的规模化提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 主要材料与试剂

美龙 1 号火龙果:南宁振企农业科技有限公司;

正庚烷:分析纯,上海国药集团化学试剂有限公司。

**基金项目:**广西高校中青年教师基础能力提升项目(编号:2018KY0749)

**作者简介:**韦云伊(1988—),女,南宁学院讲师,硕士。

E-mail:236721391@qq.com

**收稿日期:**2021-02-21

1.2 主要仪器与设备

质构仪:CT3 型,美国 Brookfield 公司;  
真空冷冻干燥机:Alpha 1-2 LD plus 型,德国 CHRIST 公司;  
超低温冰箱:DW-86L386 型,青岛海尔股份有限公司;  
分析天平:XP204 型,瑞士 METTLER TOLEDO 公司。

1.3 试验条件

1.3.1 火龙果冻干品的制作 用水果切片机、正方形模具将新鲜火龙果切成厚度均匀、长 60 mm、宽 60 mm 的水果片,于-80 ℃超低温冰箱中预冻,真空冷冻干燥机中干燥。

1.3.2 火龙果冻干品评价指标的相关性试验 采用不同的真空冷冻工艺(见表 1)制作 9 组火龙果冻干产品,对其进行感官评价,并分析其多孔率和质构指标。

表 1 火龙果冻干品评价指标的相关性试验设计

Table 1 Design of correlation test for evaluation indexes onvacuum freeze-drying of pitaya

| 样品编号 | 切片厚度/mm | 预冻时间/h | 干燥气压/Pa | 干燥时间/h |
|------|---------|--------|---------|--------|
| 1    | 14      | 42     | 30      | 30     |
| 2    | 8       | 36     | 40      | 24     |
| 3    | 6       | 30     | 40      | 36     |
| 4    | 4       | 30     | 30      | 42     |
| 5    | 6       | 36     | 50      | 36     |
| 6    | 12      | 24     | 60      | 18     |
| 7    | 4       | 30     | 40      | 42     |
| 8    | 10      | 36     | 50      | 24     |
| 9    | 10      | 42     | 40      | 36     |

1.3.3 剪切力测定 探头为 TA-SBA;测前速度 2 mm/s;测试速度 0.5 mm/s;测试距离 15 mm;触发点负载 10.0 g;平行测定 7 次。

1.3.4 TPA 测定 探头为 TA-AACC36;夹具为 TA-RT-KIT;测前速度 2 mm/s;测试速度 0.5 mm/s;75%形变;触发点负载 5.0 g;平行测定 7 次,分析冻干品的质构硬度和咀嚼性。

1.3.5 多孔率测定 参照文献[8]。

1.3.6 感官评价 根据 GB/T 16291.1—2012 进行人员培训,评价方法参照文献[13]并修改,具体评价标准见表 2。

1.3.7 单因素试验

(1) 切片厚度对多孔率的影响:固定新鲜火龙果长 60 mm、宽 60 mm,-80 ℃超低温冰箱中预冻 24 h,真空冷冻干燥机干燥气压 30 Pa、加热板温度 40 ℃,干燥时间

表 2 火龙果冻干品酥脆感官评价

Table 2 Sensory evaluation of vacuum freeze-drying of pitaya

| 指标 | 评价方法                                | 参考物    | 评分  | 权重/% |
|----|-------------------------------------|--------|-----|------|
| 酥性 | 将样品放在口腔中咀嚼食品发生破碎需要的力                | 仙贝膨化食品 | 7~9 | 40   |
|    |                                     | 芒果冻干   | 4~6 |      |
|    |                                     | 韧性饼干   | 1~3 |      |
| 脆性 | 将样品放在白齿间(口腔后方两侧的牙齿)咬合造成食品断裂所需的力     | 油炸薯片   | 7~9 | 30   |
|    |                                     | 芒果冻干   | 4~6 |      |
|    |                                     | 仙贝膨化食品 | 1~3 |      |
| 硬度 | 将样品放在白齿间(口腔后方两侧的牙齿)并均匀咀嚼,压迫食品形变所需的力 | 仙贝膨化食品 | 7~9 | 30   |
|    |                                     | 芒果冻干   | 4~6 |      |
|    |                                     | 磨牙饼干   | 1~3 |      |

30 h,考察切片厚度(4,6,8,10,12 mm)对冻干品多孔率的影响。

(2) 预冻时间对多孔率的影响:固定新鲜火龙果长 60 mm、宽 60 mm、切片厚度 8 mm,-80 ℃超低温冰箱中预冻,真空冷冻干燥机干燥气压 30 Pa、加热板温度 40 ℃,干燥时间 30 h,考察预冻时间(18,24,30,36,42,48 h)对冻干品多孔率的影响。

(3) 干燥气压对多孔率的影响:固定新鲜火龙果长 60 mm、宽 60 mm、切片厚度 8 mm,-80 ℃超低温冰箱中预冻 24 h,真空冷冻干燥机加热板温度 40 ℃,干燥时间 30 h,考察干燥气压(10,20,30,40,50,60 Pa)对冻干品多孔率的影响。

(4) 干燥时间对多孔率的影响:固定新鲜火龙果长 60 mm、宽 60 mm、切片厚度 8 mm,-80 ℃超低温冰箱中预冻 24 h,真空冷冻干燥机干燥气压 30 Pa、加热板温度 40 ℃,考察干燥时间(18,24,30,36,42,48 h)对冻干品多孔率的影响。

1.3.8 响应面优化试验 在单因素试验的基础上,以火龙果冻干品多孔率为响应值,选取切片厚度、预冻时间、干燥气压和干燥时间为影响因素,根据 Box-Benhknen 试验设计,利用四因素三水平的试验设计优化火龙果真空冷冻干燥工艺参数。

1.4 数据处理

多孔率检测试验重复 3 次,质构分析和感官评价重复 7 次,结果以 Mean±SD 表示。采用 SPSS 26 软件进行数据分析,组间差异比较采用 ANOVA 分析,采用 Origin 9.0 软件制图。

2 结果与分析

2.1 火龙果冻干品评价指标的相关性

由表 3 和表 4 可知,剪切力与感官硬度、酥性、脆性间无显著相关性,是因为剪切力测定采用的 TA-SBA 探

头厚度约 1.5 mm,而火龙果冻干品体积较小、质量较轻,剪切过程中样品由于翘起存在横截面受力不均的可能,该测定方法在测定火龙果冻干品时数据波动较大;质构硬度与感官硬度、酥性、脆性、感官评价总分显著负相关,与关文苑<sup>[14]</sup>的结果一致;多孔率与感官硬度、感官脆性、感官酥性、感官评价总分显著正相关,多孔率是表

示样品表观体积和实际体积比例的关系,多孔率越大表示样品膨化程度越高,李宝玉<sup>[15]</sup>指出产品多孔结构增加了产品脆性。相关性分析表明硬度和多孔率均能较好地预测食品口感,为减少主观评价的波动性,综合考虑设备成本和相关系数,采用多孔率作为评价指标进行后序工艺优化。

表 3 火龙果冻干品品质构指标、多孔率和感官评分结果

Table 3 Results of texture index, porosity and sensory score of vacuum freeze-drying of pitaya

| 样品编号 | 硬度/g      | 咀嚼性/g     | 剪切力/g    | 多孔率/%    | 感官硬度    | 感官脆性    | 感官酥性    | 感官评价总分  |
|------|-----------|-----------|----------|----------|---------|---------|---------|---------|
| 1    | 2 801±201 | 3 809±234 | 955±88   | 48.3±1.4 | 7.1±0.5 | 6.5±0.7 | 7.0±0.4 | 6.8±0.1 |
| 2    | 1 648±192 | 3 598±167 | 643±91   | 52.8±1.8 | 8.2±0.7 | 7.7±0.3 | 7.7±0.6 | 7.9±0.5 |
| 3    | 1 543±123 | 2 970±251 | 698±65   | 54.1±1.0 | 8.3±0.5 | 8.0±0.5 | 8.1±0.8 | 8.1±0.6 |
| 4    | 1 201±196 | 3 122±192 | 896±66   | 55.3±1.2 | 8.8±0.4 | 8.5±0.2 | 8.1±0.3 | 8.4±0.4 |
| 5    | 1 799±130 | 3 104±127 | 565±70   | 52.7±0.8 | 8.1±0.6 | 7.3±0.1 | 7.2±0.8 | 7.5±0.6 |
| 6    | 3 487±174 | 3 789±95  | 1 023±51 | 47.1±1.4 | 6.0±0.2 | 6.0±0.2 | 5.8±0.7 | 5.9±0.6 |
| 7    | 2 579±129 | 2 511±49  | 607±49   | 53.5±1.5 | 8.7±0.3 | 8.0±0.3 | 8.0±0.6 | 8.2±0.3 |
| 8    | 2 686±152 | 3 430±212 | 788±92   | 50.3±0.8 | 8.0±0.5 | 7.0±0.5 | 7.0±0.3 | 7.3±0.5 |
| 9    | 2 378±98  | 2 881±238 | 982±78   | 51.2±1.0 | 8.1±0.4 | 7.0±0.6 | 7.0±0.4 | 7.3±0.3 |

表 4 火龙果冻干品客观分析指标与感官评价指标间的相关性<sup>†</sup>

Table 4 Pearson correlation analysis between objective analysis index and sensory evaluation index of vacuum freeze-drying of pitaya

| 指标     | 硬度       | 咀嚼性     | 剪切力    | 多孔率     | 感官硬度    | 感官脆性    | 感官酥性    | 感官评分总分 |
|--------|----------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|--------|
| 硬度     | 1.000    |         |        |         |         |         |         |        |
| 咀嚼性    | 0.342    | 1.000   |        |         |         |         |         |        |
| 剪切力    | 0.475    | 0.505   | 1.000  |         |         |         |         |        |
| 多孔率    | -0.891** | -0.669* | -0.601 | 1.000   |         |         |         |        |
| 感官硬度   | -0.775*  | -0.726* | -0.589 | 0.921** | 1.000   |         |         |        |
| 感官脆性   | -0.850** | -0.608  | -0.555 | 0.919** | 0.913** | 1.000   |         |        |
| 感官酥性   | -0.812** | -0.580  | -0.586 | 0.918** | 0.905** | 0.953** | 1.000   |        |
| 感官评价总分 | -0.832** | -0.653  | -0.593 | 0.920** | 0.963** | 0.979** | 0.980** | 1.000  |

<sup>†</sup> \*\*表示极显著( $P<0.01$ ),\*表示显著( $P<0.05$ )。

2.2 火龙果冷冻干燥单因素试验

2.2.1 切片厚度 由图 1 可知,切片厚度对火龙果冻干品多孔率影响显著( $P<0.05$ ),物料切片厚度越厚,多孔率越低,与任广跃等<sup>[16]</sup>的结论一致。真空冷冻干燥通过制造低于水三相点的真空度,在一定温度下将火龙果中完全冻结的固态水直接升华为水蒸气,样品厚度越小,传热效率越高,冰升华受到的空间阻碍越小<sup>[17]</sup>,越能被快速去除,相反,较厚的样品由于传热和传质阻力较大,水分去除较慢,还未去除的水和可溶性物质由于自由扩散造成冷冻品结构收缩,导致多孔率下降。切片厚度为 4~6 mm 的火龙果片真空冷冻干燥后出现产品颜色加深、四周翘起、表面不平整等现象,同时果片厚度过小批量生产能力也会随之降低,选择合适的物料厚度可在生产能力

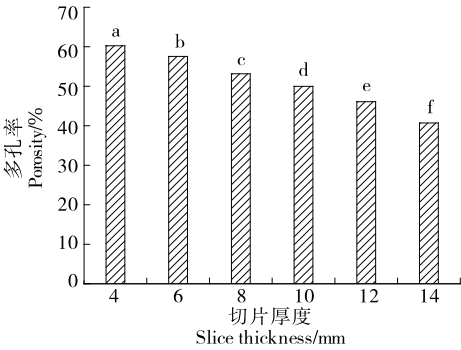


图 1 切片厚度对火龙果冻干品多孔率的影响  
Figure 1 Effect of slice thickness on the porosity of vacuum freeze-drying of pitaya

和生产效率之间找到最佳平衡点<sup>[18]</sup>。因此,选择厚度为 8 mm 的火龙果片进行优化。

**2.2.2 预冻时间** 预冻是为了使火龙果片中所有自由水和部分多分子层水被完全冻结,为保证冻结完全,食品原料预冻温度一般比其共晶点低 5~10 °C<sup>[19]</sup>。美龙 1 号火龙果可溶性固形物质量分数为 21%,水冻结温度随糖含量的升高而降低,因此,美龙 1 号中的水分完全冻结可能需要更低的温度。由图 2 可知,预冻 18 h 的冻干品多孔率显著低于预冻 24 h 的,样品外观皱缩明显,说明 -80 °C 预冻 18 h 不足以使 8 mm 厚的火龙果片中的自由水全部被冻结,外层未冻结的水汽化沸腾造成样品表面变形,内部未冻结的水由高浓度向低浓度迁移至样品表面,水分的扩散带动溶质的迁移,多孔结构被挤压,样品体积进一步塌陷,冻干制品出现表面硬化<sup>[20]</sup>。因此,综合选择预冻时间为 30 h。

**2.2.3 干燥气压** 由图 3 可知,多孔率随干燥气压的增大先上升后下降,当干燥气压为 40 Pa 时多孔率最高,可能是高真空度可以保持水蒸气的快速逸散,但会造成传热效率降低、产品多孔率下降,同时真空度越高能耗越

大,气体分子越容易被电场电离产生等离子体,产生击放电造成物料焦化<sup>[21]</sup>,因此选择干燥气压为 40 Pa。

**2.2.4 干燥时间** 由图 4 可知,干燥 18 h 的火龙果冻干品多孔率不足 50%,延长干燥时间可以显著增加火龙果冻干品多孔率( $P<0.05$ ),但干燥 36 h 后继续延长干燥时间,火龙果冻干品多孔率增加不明显,是因为干燥 18 h 的火龙果冻干品中还存在较多未升华的冰晶,故延长干燥时间可以继续去除水分,干燥 36 h 后火龙果中所有自由水和大部分多层水已被去除,因此增加干燥时间多孔率变化不明显。综合考虑,选择干燥时间为 36 h。

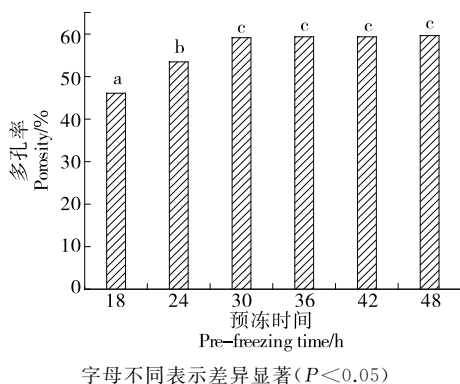


图 2 预冻时间对火龙果冻干品多孔率的影响

Figure 2 Effect of pre-freezing time on the porosity of vacuum freeze-drying of pitaya

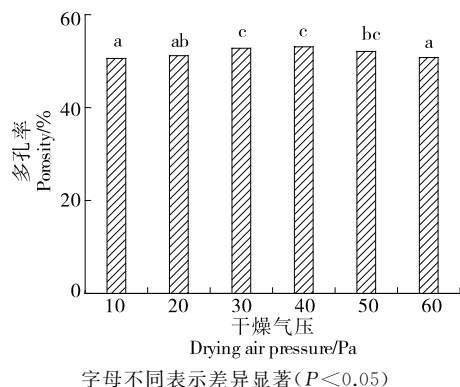
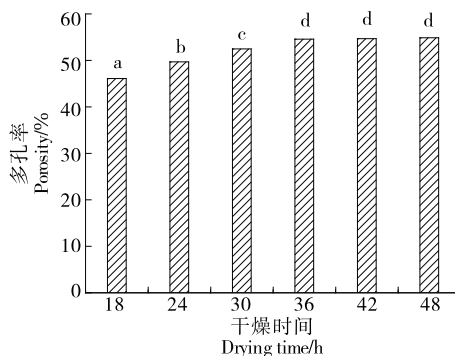


图 3 干燥气压对火龙果冻干品多孔率的影响

Figure 3 Effect of drying air pressure on the porosity of vacuum freeze-drying of pitaya



字母不同表示差异显著( $P<0.05$ )

图 4 干燥时间对火龙果冻干品多孔率的影响

Figure 4 Effect of drying time on the porosity of vacuum freeze-drying of pitaya

## 2.3 响应面优化试验

**2.3.1 响应面试验设计及结果** 在单因素试验的基础上,利用 Design-Expert 11 软件中的 Box-Behnken 中心组合法,对切片厚度、预冻时间、干燥气压、干燥时间进行四因素三水平的响应面试验设计(见表 5),试验设计方案及结果见表 6。

由表 6 可知,对试验数据进行多元回归拟合,得到火龙果真空冷冻干燥产品多孔率对各因素的二次多项式回归方程:

$$R = -134.52 + 11.61A + 5.80B + 0.336C + 2.87D + 0.108AB + 0.038AC - 0.100AD + 0.004BC - 0.001BD - 0.001CD - 0.923A^2 - 0.102B^2 - 0.010C^2 - 0.025D^2. \quad (1)$$

表 5 响应面试验因素及水平

Table 5 Response surface experimental factors and levels

| 水平 | A 切片厚度/mm | B 预冻时间/h | C 干燥气压/Pa | D 干燥时间/h |
|----|-----------|----------|-----------|----------|
| -1 | 7         | 24       | 30        | 30       |
| 0  | 8         | 30       | 40        | 36       |
| 1  | 9         | 36       | 50        | 42       |

2.3.2 回归模型方差分析 由表 7 可知,模型拟合显著( $P<0.000\ 1$ ),失拟项不显著( $P>0.05$ ),模型相关系数 $R^2=0.986\ 9$ ,校正系数 $R^2_{\text{adj}}=0.977\ 1$ ,说明模型预测值和实测值有较好的拟合度。一次项 A 和交互项 AB、AD 对多孔率影响显著( $P<0.05$ ),一次项 B、D 和二次项 $A^2$ 、 $B^2$ 、 $C^2$ 、 $D^2$ 对多孔率影响极显著( $P<0.01$ )。根据 $F$ 值可知,各因素对多孔率影响排序为 B(预冻时间) $>$ D(干燥时间) $>$ A(切片厚度) $>$ C(干燥气压)。

2.3.3 因素交互作用分析 由图 5 可知,交互项 AB 对多孔率的影响随切片厚度、预冻时间的增加先上升后下降、交互项 AD 对多孔率的影响随切片厚度、干燥时间的增加先上升后下降;响应面图中等高线形状和密度反映因

素交互性能,交互项 AB 和 AD 的交互作用显著( $P<0.05$ ),说明在火龙果真空冷冻干燥中切片厚度和预冻时间、切片厚度与干燥时间应作为一个整体进行优化。

2.3.4 工艺优化及验证 由 Design-Expert 11 软件得出,美龙 1 号红肉火龙果真空冷冻干燥最佳工艺条件为切片厚度 7.07 mm、预冻时间 30.67 h、干燥气压 43.25 Pa、干燥时间 40.93 h,此时冻干品多孔率为 63.6%。考虑实际操作,将最佳工艺条件调整为切片厚度 7 mm、预冻时间 30 h、干燥气压 43 Pa、干燥时间 40 h,在此条件下进行 3 次验证实验,所得火龙果冻干品多孔率为 62.603%,与预测值相对误差 $\leq 5\%$ ,此时产品外观平整、口感酥脆、颜色均匀鲜艳,说明该模型合理可信,具有指导意义。

3 结论

试验表明,火龙果冻干品多孔率与感官酥性、脆性显著相关( $P<0.05$ ),在单因素试验和响应面试验中可作为替代检测指标。火龙果真空冷冻干燥最佳工艺条件为切片厚度 7 mm、预冻时间 30 h、干燥气压 43 Pa、干燥时间 40 h,该最佳工艺下火龙果冻干品多孔率为 62.603%,与预测值相对误差 $\leq 5\%$ ,且火龙果冻干品外观无塌陷、无结块,颜色鲜红、香气浓郁、适口干脆。研究使用的是实

表 6 响应面试验设计方案及结果

Table 6 Response surface experimental design and results

| 试验号 | A  | B  | C  | D  | 多孔率/% |
|-----|----|----|----|----|-------|
| 1   | 0  | 0  | 0  | 0  | 61.8  |
| 2   | 0  | 0  | -1 | 1  | 62.0  |
| 3   | 0  | 0  | -1 | -1 | 59.3  |
| 4   | 1  | 1  | 0  | 0  | 60.0  |
| 5   | -1 | -1 | 0  | 0  | 55.8  |
| 6   | 0  | 0  | 0  | 0  | 62.3  |
| 7   | 1  | 0  | 0  | -1 | 58.0  |
| 8   | 0  | 0  | 0  | 0  | 61.2  |
| 9   | 1  | 0  | -1 | 0  | 57.5  |
| 10  | 0  | 1  | 0  | 1  | 61.8  |
| 11  | -1 | 0  | 0  | -1 | 60.0  |
| 12  | 0  | 0  | 1  | -1 | 58.0  |
| 13  | 0  | -1 | 1  | 0  | 52.6  |
| 14  | 0  | 0  | 0  | 0  | 62.1  |
| 15  | 0  | -1 | -1 | 0  | 53.7  |
| 16  | 0  | -1 | 0  | -1 | 53.0  |
| 17  | -1 | 0  | -1 | 0  | 63.0  |
| 18  | -1 | 1  | 0  | 0  | 62.8  |
| 19  | 0  | 1  | -1 | 0  | 61.0  |
| 20  | -1 | 0  | 0  | 1  | 63.0  |
| 21  | 1  | 0  | 0  | 1  | 58.6  |
| 22  | 0  | 1  | 0  | -1 | 60.0  |
| 23  | 0  | -1 | 0  | 1  | 55.0  |
| 24  | 0  | 0  | 0  | 0  | 62.0  |
| 25  | 0  | 1  | 1  | 0  | 60.9  |
| 26  | 0  | 0  | 1  | 1  | 60.5  |
| 27  | 1  | 0  | 1  | 0  | 58.0  |
| 28  | -1 | 0  | 1  | 0  | 62.0  |
| 29  | 1  | -1 | 0  | 0  | 50.4  |

表 7 回归模型方差分析结果<sup>†</sup>

Table 7 Results of regression model analysis of variance

| 来源    | 自由度    | 平方和 | 均方    | $F$ 值  | $P$ 值            |
|-------|--------|-----|-------|--------|------------------|
| 模型    | 332.68 | 12  | 27.72 | 100.42 | $<0.000\ 1^{**}$ |
| A     | 2.29   | 1   | 2.29  | 8.31   | 0.010 8*         |
| B     | 27.20  | 1   | 33.51 | 121.39 | $<0.000\ 1^{**}$ |
| C     | 0.33   | 1   | 0.35  | 1.27   | 0.276 2          |
| D     | 6.12   | 1   | 7.35  | 26.64  | $<0.000\ 1^{**}$ |
| AB    | 1.69   | 1   | 1.69  | 6.12   | 0.024 9*         |
| AC    | 0.56   | 1   | 0.56  | 2.04   | 0.172 7          |
| AD    | 1.44   | 1   | 1.44  | 5.22   | 0.036 4*         |
| BC    | 0.25   | 1   | 0.25  | 0.91   | 0.355 5          |
| BD    | 0.01   | 1   | 0.01  | 0.03   | 0.860 9          |
| CD    | 0.01   | 1   | 0.01  | 0.03   | 0.860 9          |
| $A^2$ | 5.53   | 1   | 5.53  | 20.03  | 0.000 4**        |
| $B^2$ | 88.12  | 1   | 88.12 | 319.20 | $<0.000\ 1^{**}$ |
| $C^2$ | 6.46   | 1   | 6.46  | 20.58  | 0.000 2**        |
| $D^2$ | 5.38   | 1   | 5.38  | 17.13  | 0.001 0**        |
| 残差    | 4.42   | 14  | 0.28  |        |                  |
| 失拟    | 3.69   | 10  | 0.37  | 2.08   | 0.249 6          |
| 纯误差   | 0.71   | 4   | 0.18  |        |                  |
| 总误差   | 337.10 | 28  |       |        |                  |

<sup>†</sup> \*\* 表示极显著( $P<0.01$ ), \* 表示显著( $P<0.05$ ); $R^2=0.986\ 9$ , $R^2_{\text{adj}}=0.977\ 1$ 。

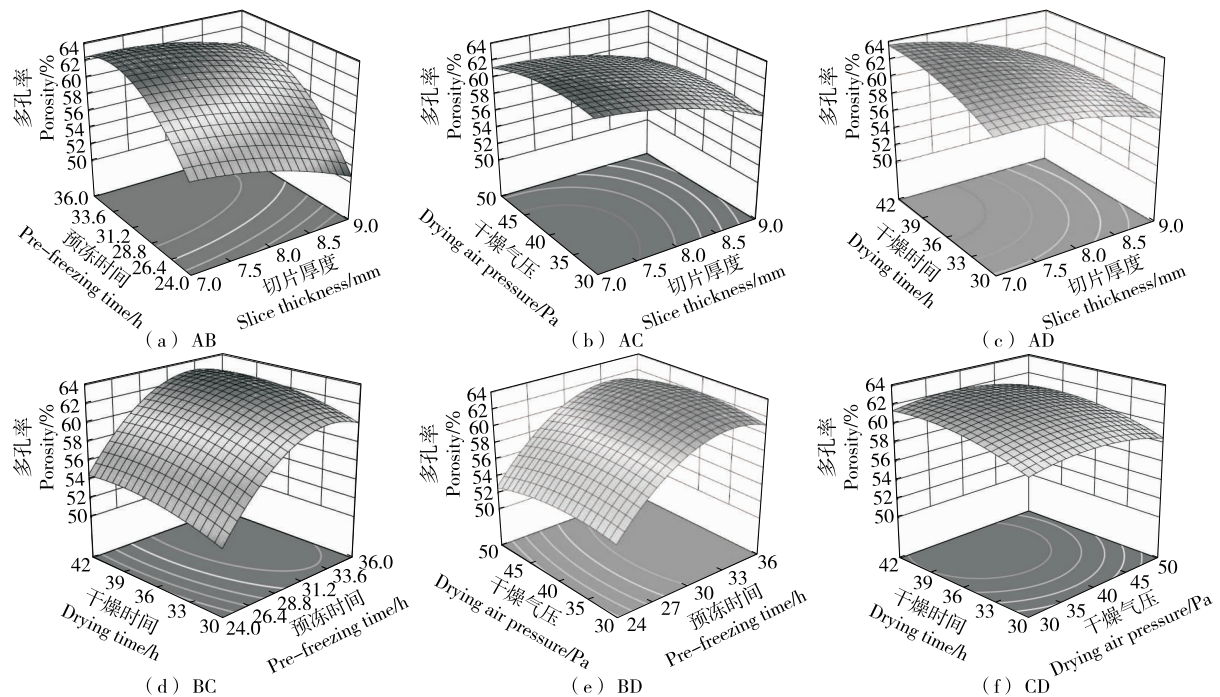


图5 各因素交互作用对火龙果冻干品多孔率的影响

Figure 5 Effects of interaction of various factors on the porosity of pitaya

验型真空冷冻干燥机,验证了通过适宜的切片厚度和足够的预冻时间可以有效改善高糖度火龙果冻干的外观和脆性,而大型冻干机相较实验型存在隔板加热不均匀、真空度较低等问题,在进行规模化生产前需要对工艺进一步优化。

### 参考文献

- [1] ORAK H H, AKTAS T, YAGAR H, et al. Effects of hot air and freeze drying methods on antioxidant activity, colour and some nutritional characteristics of strawberry tree (*Arbutus unedo* L.) fruit[J]. Food Science and Technology International, 2012, 18(4): 391-402.
- [2] DJEKIC I, TOMIC N, BOURDOUX S, et al. Comparison of three types of drying (supercritical CO<sub>2</sub>, air and freeze) on the quality of dried apple-quality index approach [J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 94: 64-72.
- [3] 邹晓霜, 李佳妮, 姜楠, 等. 响应面法优化豆腐真空冷冻干燥工艺[J]. 食品科学, 2017, 38(18): 200-207.  
ZOU Xiao-shuang, LI Jia-ni, JIANG Nan, et al. Optimization of vacuum freeze-drying of tofu by response surface methodology[J]. Food Science, 2017, 38(18): 200-207.
- [4] 易小红. 火龙果真空冷冻干燥传热传质理论和试验[D]. 天津: 天津商业大学, 2008: 36-37.  
YI Xiao-hong. Theoretical and experimental study on heat and mass transfer of firedrake fruit's vacuum freeze-drying [D]. Tianjing: Tianjing University of Commerce, 2008: 36-37.
- [5] 孙翠, 王钰, 沈小瑞, 等. 杏鲍菇热风-真空冷冻干燥工艺优化[J]. 食品与机械, 2017, 33(2): 189-193.
- [6] 王海鸥, 扶庆权, 陈守江, 等. 预处理方式对真空冷冻干燥苹果片品质的影响[J]. 食品与机械, 2018, 34(11): 126-130.
- [7] 贺健, 易军鹏, 李欣, 等. 酸菜微波真空冷冻干燥工艺及复水特性研究[J]. 食品与机械, 2020, 38(8): 109-166.
- [8] 董会龙. 番木瓜冻干脆片塌陷现象影响因素研究[D]. 南宁: 广西大学, 2012: 23-24.
- [9] 宋悦. 基于不同预处理的桃脆片真空冷冻联合干燥工艺优化[D]. 北京: 中国农业科学院, 2020: 30-32.
- [10] 张乐, 赵守涣, 王赵改, 等. 板栗微波真空干燥特性及干燥工艺研究[J]. 食品与机械, 2018, 34(4): 206-210.

- ZHANG Le, ZHAO Shou-huan, WANG Zhao-ga, et al. Microwave-vacuum drying characteristics and drying process of Chinese chestnut[J]. Food & Machinery, 2018, 34(4): 206-210.
- [11] XIN Xua, LEI Zhan-ga. Ultrasound freeze-thawing style pretreatment to improve the efficiency of the vacuum freeze-drying of okra (*Abelmoschus esculentus* (L.) Moench) and the quality characteristics of the dried product[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 70(2): 217-229.
- [12] 巨浩羽, 杨劲松, 赵海燕, 等. 真空—蒸汽脉动烫漂预处理对百合干燥特性的影响[J]. 食品与机械, 2019, 35(11): 210-216.
- JU Hao-yu, YANG Jin-song, ZHAO Hai-yan, et al. The effect of vacuum steam pulsed blanching pretreatment on drying characteristics of *lilium brownie* [J]. Food & Machinery, 2019, 35(11): 210-216.
- [13] 赵清霞, 郑环宇, 丁阳月, 等. 湿豆渣面包仪器质构与感官质构相关性分析[J]. 食品工业科技, 2016, 37(6): 93-99.
- ZHAO Qing-xia, ZHEN Huan-yu, DING Yang-yue, et al. Analysis of the correlation between the sensory evaluation and texture instruments of fresh okara-wheat bread[J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(6): 93-99.
- [14] 关文苑. 小麦面粉制备薯片类脆片[D]. 无锡: 江南大学, 2018: 25-26.
- GUAN Wen-yuan. Study on preparation of potato chip-like product with wheat flour [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2018: 25-26.
- [15] 李宝玉. 不同干燥方式对香蕉产品品质的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(15): 100-106.
- LI Bao-yu. Effects of different drying methods on quality of banana products[J]. Food Science, 2016, 37(15): 100-106.
- [16] 任广跃, 任丽影, 张伟, 等. 正交试验优化怀山药微波辅助真空冷冻干燥工艺[J]. 食品科学, 2015, 36(12): 12-16.
- REN Guang-yue, REN Li-ying, ZHANG Wei, et al. Optimizing microwave-assisted vacuum freeze-drying of *dioscorea opposita* by orthogonal array design[J]. Food Science, 2015, 36(12): 12-16.
- [17] 崔清亮, 郭玉明, 郑德聪. 基于干燥动力学特性的冷冻干燥过程判别[J]. 农业机械学报, 2010, 41(4): 124-127.
- CUI Qing-liang, GUO Yu-ming, ZHENG De-cong. Judgment of freeze-drying process based on drying dynamical characteristics[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(4): 124-127.
- [18] 陈林, 胡霞. 基于升华和解析干燥结束点杨梅冻干工艺优化[J]. 食品与机械, 2020, 36(2): 134-139.
- CHEN Lin, HU Xia. Optimization on freeze-drying technology of bayberry based on the end time of sublimation and analytical drying[J]. Food & Machinery, 2020, 36(2): 134-139.
- [19] 邢华, 周国燕, 蓝浩. 食品冷冻干燥物料共晶点、共熔点测量[J]. 食品与机械, 2012, 28(1): 19-24.
- XING Hua, ZHOU Guo-yan, LAN Hao. Measurement of eutectic and co-melting point in freeze-drying foods[J]. Food & Machinery, 2012, 28(1): 19-24.
- [20] 程袁霞, 陈素芝, 谢秀英. 食品共晶点和共熔点的试验研究[J]. 食品工业, 2004(1): 48-50.
- CHENG Yuan-xia, CHENG Su-zhi, XIE Xiu-ying. Experimental study on eutectic point and co-melting point of food[J]. The Food Industry, 2004(1): 48-50.
- [21] 化春光. 微波真空干燥对怀山药片品质的影响[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2010: 14-18.
- HUA Chun-guang. Study on microwave vacuum drying on qualities of Chinese yam [D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2010: 14-18.
- (上接第 164 页)
- [20] 熊科, 夏延斌, 王燕, 等. 辣椒及其制品辣度分级方法研究[J]. 食品科学, 2007, 28(5): 37-40.
- XIONG Ke, XIA Yan-bin, WANG Yan, et al. Research on pungency ratings method for capsicum and products[J]. Food Science, 2007, 28(5): 37-40.
- [21] 周婧琦, 秦令祥, 张彩芳, 等. 正交优化双螺杆挤压前处理协同微波辅助提取香菇多糖的工艺研究[J]. 现代食品, 2020(22): 89-94, 99.
- ZHOU Jing-qi, QIN Ling-xiang, ZHANG Cai-fang, et al. Study on extraction of lentinan by orthogonal optimization of twin-screw extrusion pretreatment and microwave-assisted extraction [J]. Modern Food, 2020(22): 89-94, 99.
- [22] 蔡金星, 刘秀凤, 常学东, 等. 芦笋老茎超微粉碎工艺优化[J]. 食品与机械, 2009, 25(6): 157-159.
- CAI Jin-xing, LIU Xiu-feng, CHANG Xue-dong, et al. Optimization of dried older stems ultrafine pulverizing of *Asparagus officinalis* [J]. Food & Machinery, 2009, 25(6): 157-159.
- [23] 王剑平, 张建国, 王爱军. 辣椒碱及其工业生产方法[J]. 江苏科技信息, 1997(11): 20-21.
- WANG Jian-ping, ZHANG Jian-guo, WANG Ai-jun. Capsaicin and its industrial production method [J]. Jiangsu Science and Technology Information, 1997(11): 20-21.
- [24] 陈猛, 袁东星. 微波法萃取辣椒中辣椒素的研究[J]. 食品科学, 1999(10): 25-27.
- CHEN Meng, YUAN Dong-xing. Study on microwave extraction of capsaicin from Capsicum[J]. Food Science, 1999(10): 25-27.
- [25] 豆甲立, 傅式洲, 魏增斌, 等. 离子液体和表面活性剂形成的双水相及其萃取性能[J]. 日用化学工业, 2010, 40(4): 246-249.
- DOU Jia-li, FU Shi-zhou, WEI Zeng-bin, et al. Dual aqueous phases system formed by ionic liquids and surfactant and its performance in extraction operations[J]. China Surfactant Detergent and Cosmetics, 2010, 40(4): 246-249.
- [26] 周细军, 王燕, 邓放明, 等. 影响辣椒碱稳定性因素的研究[J]. 食品与机械, 2007, 23(1): 97-99.
- ZHOU Xi-jun, WANG Yan, DENG Fang-ming, et al. Study on the affecting factors on the stability of capsaicinoids[J]. Food & Machinery, 2007, 23(1): 97-99.