

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2019.03.035

# 火龙果片微波间歇干燥特性及其动力学研究

## Research on properties and kinetic model of intermittent microwave drying to pitaya slices

盘喻颜<sup>1,2,3</sup> 段振华<sup>1,2,3</sup> 刘艳<sup>1,3</sup> 唐小闲<sup>1,3</sup> 李定金<sup>1,3</sup>

PAN Yu-yan<sup>1,2,3</sup> DUAN Zhen-hua<sup>1,2,3</sup> LIU Yan<sup>1,3</sup> TANG Xiao-xian<sup>1,3</sup> LI Ding-jin<sup>1,3</sup>

(1. 贺州学院食品与生物工程学院, 广西 贺州 542899; 2. 大连工业大学食品学院, 辽宁 大连 116034;

3. 广西果蔬保鲜和深加工研究人才小高地, 广西 贺州 542899)

(1. School of Food and Bioengineering, Hezhou University, Hezhou, Guangxi 542899, China; 2. School of Food Science and Technology, Dalian Polytechnic University, Dalian, Liaoning 116034, China; 3. Guangxi Talent Highland of Preservation and Deep Processing Research in Fruit and Vegetables, Hezhou, Guangxi 542899, China)

**摘要:**以火龙果为原料,微波功率、加热时间、间歇时间、切片厚度为考察因素,干燥速率和干基含水率为考察指标,研究了火龙果片在不同微波间歇条件下的干燥特性。结果表明:火龙果片微波间歇干燥过程包括加速、恒速和降速阶段;火龙果片微波间歇干燥的动力学符合 Page 模型,该模型适合对火龙果片微波间歇干燥过程进行预测和描述。

**关键词:**火龙果;微波间歇;干燥特性;动力学

**Abstract:** In order to understand the drying characteristics of pitaya slices under microwave intermittent conditions, the effects were studied, including the microwave power, heating time, intermittent time and slice thickness on the drying characteristics of pitaya slices under different microwave intermittent conditions. The results showed that the microwave intermittent drying process of pitaya slices included acceleration, constant speed and deceleration stages, and the mathematical model was established according to the experimental data. The kinetic model of microwave intermittent drying of pitaya slices conformed to page model, which was suitable for predicting and describing the microwave intermittent drying process of pitaya slices.

**Keywords:** pitaya; intermittent microwave drying; dehydration

**基金项目:**广西特色果蔬深加工与保鲜技术研究(编号:YS201601);贺州学院“果蔬深加工与保鲜团队建设”项目(编号:YS201602);广西特聘专家专项经费(编号:厅发[2016]21号);海南阳生生态农业科技有限公司委托项目(编号:HX229);广西科技基地和人才专项(编号:桂科 AD17195088);广西青年科学基金项目(编号:2017JJB130024)

**作者简介:**盘喻颜,女,大连工业大学在读硕士研究生。

**通信作者:**段振华(1965—),男,贺州学院教授,博士。

E-mail: dzh65@126.com

**收稿日期:**2018-09-30

characteristics; kinetic model

火龙果又称仙蜜果,源于中美洲,目前中国主要分布在广西、福建、台湾、云南等地<sup>[1]</sup>。火龙果不但富含多种维生素、氨基酸、矿物质等,且含其他植物体内稀有的花青素及植物性白蛋白,是兼备高营养和低热量的水果,具有预防重金属中毒、增强骨质、降低胆固醇等作用<sup>[2-3]</sup>。

火龙果以鲜食为主,含大量水分,易引发腐败变质,不利于运输与贮藏。干燥作为食品保存和加工应用的常见方式,是通过脱除物料中的水分,从而限制微生物和化学反应,具备便于产品流通、延长贮藏期等优点,能有效解决水果贮藏期太短而造成浪费的问题<sup>[4]</sup>。现有关于火龙果干燥的研究较少,陈晓旭等<sup>[5]</sup>、邹同华等<sup>[6]</sup>研究了火龙果热风联合变温压差膨化干燥、真空冷冻干燥工艺的优化。Yi 等<sup>[7]</sup>研究了微波联合变温压差膨化干燥对火龙果片胞壁多糖改性、理化性质的影响。Nordin 等<sup>[8-9]</sup>研究了关于微波干燥对火龙果片理化性质、质构、显微结构及复水性的影响。总体上看,已有关于火龙果冷冻干燥、热风联合变温压差膨化干燥工艺的优化以及微波及其联合干燥对火龙果品质影响的报道<sup>[10-11]</sup>,但火龙果微波干燥工艺的优化及动力学研究未见报道。动力学模型的研究作为加工过程中预测水分含量与干燥用时的重要理论依据,缺少相应的理论依据会限制微波干燥在火龙果中的实际应用,所以研究火龙果微波干燥动力学具有重要的意义。

微波干燥有独特的内部加热模式,省时节能、保质降本、环保易控<sup>[10-11]</sup>,因此被广泛应用于农产品加工保藏及食品工业生产中,包括罗非鱼<sup>[12-13]</sup>、马蹄淀粉<sup>[14]</sup>、山药<sup>[15]</sup>、黄秋葵<sup>[16]</sup>、花椒<sup>[17]</sup>、银杏果<sup>[18]</sup>、枸杞<sup>[19]</sup>等加工领

域,但单纯使用微波技术进行干燥,易使局部温度过高,导致物料出现边缘焦糊和硬化等现象,为保证产品品质,防止局部过热则要探索微波在干燥工艺上的创新。采用微波间歇干燥,能有效均衡水分分布和温度情况,从而避免出现过热导致烧伤<sup>[14]</sup>。本试验拟以火龙果为原料,研究火龙果片在微波间歇干燥条件下的干燥特性,并根据试验数据建立了火龙果片微波间歇干燥的动力学模型,意为火龙果片微波间歇干燥的相关基础研究、工艺设计及参数优化提供参考,解决水果因贮藏期太短而造成浪费的问题。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料与主要仪器

#### 1.1.1 材料

火龙果:红肉火龙果,购于贺州泰兴超市。

#### 1.1.2 主要仪器设备

电子天平:JJ1000 型,常熟市双杰测试仪器厂;

水分测定仪:MA150 Starorius 型,北京赛多利斯仪器系统有限公司;

微波炉:G70D20CN1P-D2(S0)型,广东格兰仕微波炉电器制造有限公司。

### 1.2 方 法

1.2.1 预处理 火龙果经人工去皮后切成一定厚度的火龙果片,5%的 NaCl 溶液浸泡 2 min 后,沥水 10 min 备用。

1.2.2 微波功率 取 60.0 g 火龙果片切成 6 mm 薄片,加热 1 min,间歇 1 min,选择不同功率(350,420,490 W)进行微波间歇干燥试验,测定并记录干燥过程中间歇时间下火龙果片质量,直至干燥至干基含水量≤15%为止。

1.2.3 切片厚度 每次取 60.0 g 火龙果片,微波功率 420 W,加热时间 1 min,间歇时间 1 min,选择不同切片厚度(3,6,9 mm)的火龙果片进行微波间歇干燥试验,测定并记录干燥过程中间歇时间下火龙果片质量,直至干燥至干基含水量≤15%为止。

1.2.4 加热时间 每次取 60.0 g 火龙果片,微波功率 420 W,切片厚度 6 mm,加热时间 1 min,间歇时间 1 min,选择不同加热时间(0.75,1.00,1.25 min)进行微波间歇干燥试验,测定并记录干燥过程中间歇时间下火龙果片质量,直至干燥至干基含水量≤15%为止。

1.2.5 间歇时间 每次取 60.0 g 火龙果片,微波功率 420 W,切片厚度 6 mm,加热时间 1 min,选择不同间歇时间(0.50,0.75,1.00 min)进行微波间歇干燥试验,测定并记录干燥过程中间歇时间下火龙果片质量,直至干燥至干基含水量≤15%为止。

### 1.3 指 标

1.3.1 含水量的测定 采用水分测定仪进行测定。火龙果片初始含水率的平均测定值为 86.81%,任一时刻火龙

果干基含水率按式(1)计算。

#### 1.3.2 干基含水率计算

$$M = \frac{m_i - m}{m} \tag{1}$$

式中:

$M$ ——干基含水率,g/g;

$m_i$ ——湿物料质量,g;

$m$ ——绝干物料质量,g<sup>[11]</sup>。

#### 1.3.3 干燥速率计算

$$DR = \frac{\Delta m}{m \times \Delta t} \tag{2}$$

式中:

$DR$ ——干燥速率,g/(g·min);

$\Delta t$ ——两次相邻时间之差,min;

$m$ ——绝干物料质量,g;

$\Delta m$ ——两次相邻质量之差,g<sup>[15]</sup>。

#### 1.3.4 水分比计算

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \tag{3}$$

式中:

$MR$ ——水分比;

$M_0$ ——初始含水率,%;

$M_t$ ——干燥中某时刻的含水率,%;

$M_e$ ——平衡含水率(远远小于  $M_0$  和  $M_t$ ,通常忽略不计),%<sup>[20-21]</sup>。

1.3.5 干燥模型拟合 本试验筛选了 5 种常见干燥模型来拟合火龙果片的干燥模型。对其进行线性化处理以便统计分析和数据处理,如表 1 所示<sup>[14]</sup>。

表 1 5 种干燥模型及表达式<sup>†</sup>

Table 1 Five mathematical models and expressions for drying

模型类型	模型表达式	线性化表达式
Logarithmic	$MR = a e^{-kt} + c$	$\ln(MR - c) = \ln a - kt$
Handerson and Pabis	$MR = a e^{-kt}$	$\ln MR = \ln a - kt$
Newton	$MR = e^{-kt}$	$\ln MR = -kt$
Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	$MR = 1 + at + bt^2$
Page	$MR = e^{-ktn}$	$\ln(-\ln MR) = \ln k + n \ln t$

<sup>†</sup>  $k, n, a, b, c$  均为表达式中的待定系数; $t$  为时间,min。

### 1.4 数据分 析

最终试验结果为 3 组平行试验的平均值;SPSS 17.0 进行线性回归和求得模型方程的待定系数,Excell 2010 进行数据分析,Origin 2017 绘图。

## 2 结果与分 析

### 2.1 火龙果片微波间歇干燥特性

2.1.1 微波功率对火龙果片干燥特性的影响 由图 1 可

知,随着微波功率的增大,火龙果片的干燥曲线变化越陡峭,所需干燥时间越短,微波功率为 490,420,350 W 时,干燥时间分别为 22,30,38 min。这是因为在固定其他条件不变时,火龙果片中水分子吸收的微波随着微波功率增大而增加,加剧了火龙果片内部振荡,加快了干燥速度,所需的干燥时间就越少。因此,在一定的微波功率范围内,适当地提高微波功率可以缩短干燥时间。

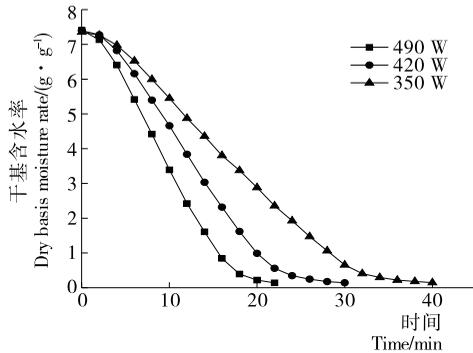


图1 火龙果片在不同微波功率下的干燥曲线  
Figure 1 Drying curves of pitaya slices at different microwave power

由图2可知,火龙果片微波间歇干燥过程包括前期加速、中期恒速和后期降速阶段。火龙果片的干燥速率曲线随微波功率的增大而变陡峭。干燥前期,火龙果片含有大量水分,能够吸收大量微波,干燥速率呈上升趋势;干燥中期,火龙果片吸收的微波均用于蒸发内部的大部分水分,干燥速率保持恒定状态;干燥后期,随着火龙果片内部水分子的减少,吸收的微波也减少,干燥速率呈下降趋势<sup>[22]</sup>。

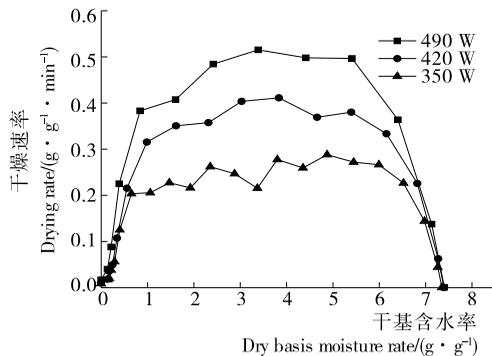


图2 火龙果片在不同微波功率下的干燥速率曲线  
Figure 2 Drying rate curves of pitaya slices at different microwave power

2.1.2 加热时间对火龙果片干燥的影响 由图3可知,火龙果片的干燥曲线随着加热时间的延长而变陡峭,所需的干燥时间缩短,加热时间为 1.25,1.00,0.75 min 时,干燥时间相差不大。原因可能是加热时间越长,增加了火龙果片内的水分子的振荡时间,增大了干燥速率,所需

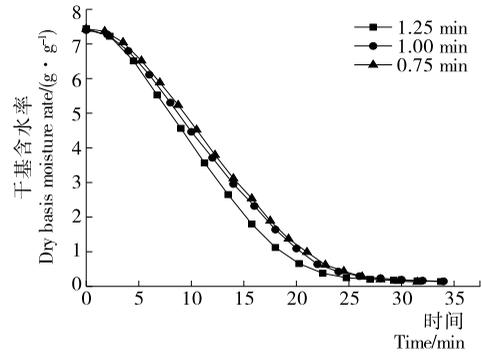


图3 火龙果片在不同加热时间下的干燥曲线  
Figure 3 Drying curves of pitaya slices at different microwave action time

干燥时间就越短。因此,在一定加热时间范围内,可通过增大加热时间来提高干燥速率。

由图4可知,在微波间歇干燥过程中,干燥速率曲线随着加热时间的延长而越陡峭;由前期加速和后期降速阶段组合而成,而中期恒速阶段不明显。原因是随着加热时间的延长,火龙果片中大量的水分在升温阶段之初就已脱除,所以当加速阶段的干燥速率达到极大值时,火龙果片吸收微波的能力明显下降,干燥速率呈下降趋势,因此恒速阶段不明显。

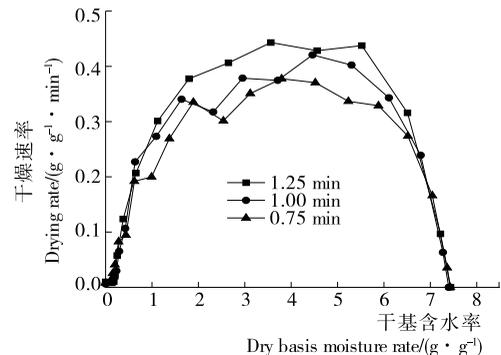


图4 火龙果片在不同加热时间下的干燥速率曲线  
Figure 4 Drying rate curves of pitaya slices at different microwave action time

2.1.3 间歇时间对火龙果片干燥的影响 由图5可知,火龙果片的干燥曲线随着间歇时间的延长而变平缓,所需的干燥时间增加。间歇时间为 0.50,0.75,1.00 min 时,所需的干燥时间为 19.50,26.25,36.00 min。随着微波加热的进行,火龙果片内部温度急剧上升,造成局部过热,导致火龙果片烧焦。因此在微波加热时增加间歇这一步骤,可以有效防止火龙果片烧焦,充分脱除内部水分,通过减少微波加热时间,降低能耗。

由图6可知,在微波间歇干燥过程中,干燥速率曲线随着间歇时间的增加而变平缓。由于火龙果片中的水分子在微波作用下,摩擦生热从而达到干燥的目的,但间歇

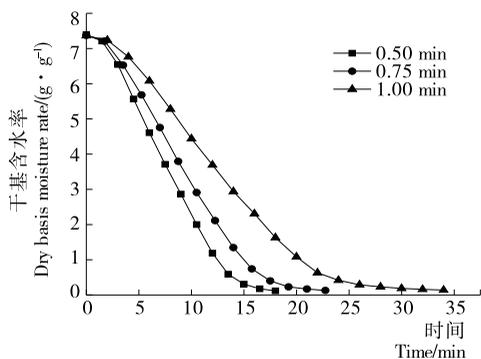


图 5 火龙果片在不同间歇时间下的干燥曲线  
Figure 5 Drying curves of pitaya slices at different microwave intermittent time

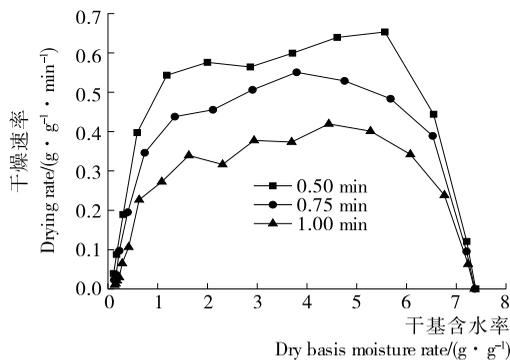


图 6 火龙果片在不同间歇时间下的干燥速率曲线  
Figure 6 Drying rate curves of pitaya slices at different microwave intermittent time

时间内没有微波的辅助,只能依靠残留的热能进行干燥,所以间歇时间越长,干燥时间越久。因此,在一定间歇时间范围内,可通过缩短间歇时间来提高干燥速率。

2.1.4 切片厚度对火龙果片干燥特性的影响 由图 7 可知,随着切片厚度的增大,火龙果片的干燥曲线变化越平缓,所需的干燥时间越长。切片厚度为 3, 6, 9 mm 时,所需的干燥时间分别为 26, 38, 48 min。这是由于火龙果片的厚度决定了内部水分迁移的距离,火龙果片越薄,内部

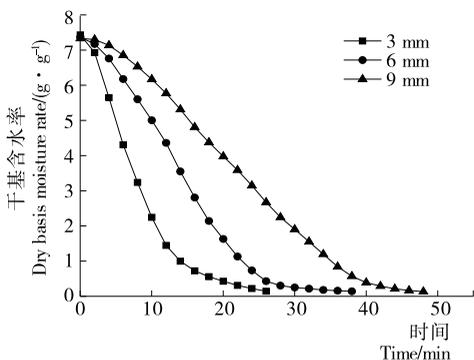


图 7 火龙果片在不同切片厚度下的干燥曲线  
Figure 7 Drying curves of pitaya slices at different thickness of slices

水分迁移的距离就越小,干燥所需的时间就越短;火龙果片越厚,内部水分迁移的距离就越大,内部传热传质阻力越大,所需的干燥时间就越长<sup>[23]</sup>。因此,在一定的切片厚度范围内,适当减小切片厚度可以缩短干燥时间。

由图 8 可知,在微波间歇干燥过程中,随着切片厚度的减小,干燥速率曲线变化越陡峭,中期恒速阶段越不明显。这是由于火龙果片的加热过程是内外同时进行,随着切片厚度的减小,从外到内热量传递的距离减小,从内到外水分迁移的距离也减小,加快了热量和水分的传递速度,从而增大了干燥速率。

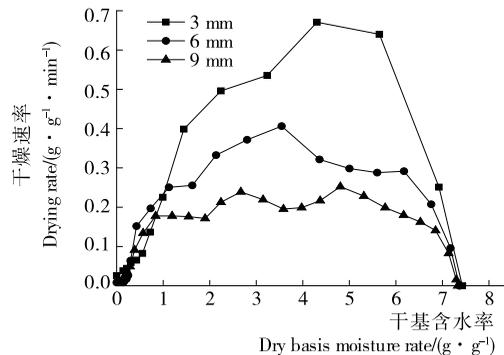


图 8 火龙果片在不同切片厚度下的干燥速率曲线  
Figure 8 Drying rate curves of drying curves of pitaya slices at different thickness of slices

## 2.2 火龙果片微波间歇干燥动力学

2.2.1 模型的选择 在筛选的 5 种模型中 Wang-Singh 模型的  $MR-t$  为线性关系, Lagarithmic、Henderson-Pabis、Newton3 种模型的  $-\ln MR-t$  均为线性关系, Page 模型的  $\ln(-\ln MR)-\ln t$  为线性关系, 所以以  $MR$ 、 $-\ln MR$ 、 $\ln(-\ln MR)$  为纵坐标,  $t$ 、 $t$ 、 $\ln t$  为对应的横坐标, 分别绘制不同微波功率、加热时间、间歇时间、切片厚度下的  $MR-t$ 、 $-\ln MR-t$ 、 $\ln(-\ln MR)-\ln t$  曲线图, 如图 9~11 所示。

由图 9 可知, Wang-Singh 模型不适用于建立目前模型, 因为相关变量下  $MR-t$  是非线性关系, 通过分析计算可知, Wang-Singh 模型拟合方程的  $R^2=0.943$ 。

由图 10 可知, 这 3 种模型均不适用于建立目标模型, 因为相关变量下  $-\ln MR-t$  是非线性关系, 通过分析计算可知, Logarithmic 模型拟合方程的  $R^2=0.964$ , Handerson and Pabis 模型拟合方程的  $R^2=0.935$ , Newton 模型拟合方程的  $R^2=0.908$ 。

由图 11 可知, 在所筛选的模型中, 只有相关变量下  $\ln(-\ln MR)-\ln t$  呈线性关系, 通过分析计算可知, Page 模型拟合方程的  $R^2=0.991$ , 优于前面 4 个模型所得的  $R^2$  值, 表明 Page 的模型能更好地适应所有干燥条件, 所以采用 Page 模型作为火龙果片微波干燥动力学模型。

Page 模型:  $\ln(-\ln MR)=\ln k+n \ln t$ , 令:

$$\ln k = a + bP + cH + dX_1 + eX_2, \quad (4)$$

$$n = f + gP + hH + iX_1 + jX_2, \quad (5)$$

式中:

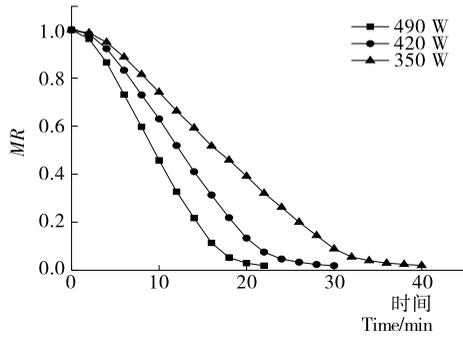
$P$ ——微波功率, W;

$X_1$ ——加热时间, min;

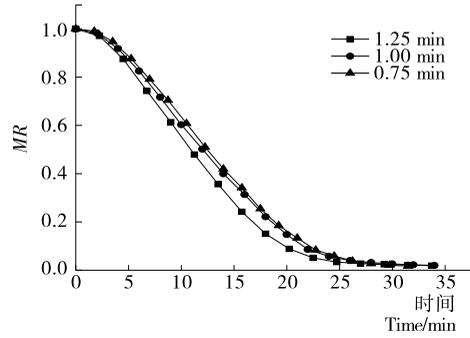
$X_2$ ——间歇时间, min;

$H$ ——切片厚度, mm;

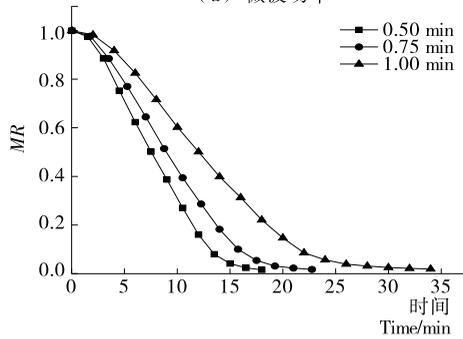
$a, b, c, d, e, f, g, h, i, j$ ——待定系数。



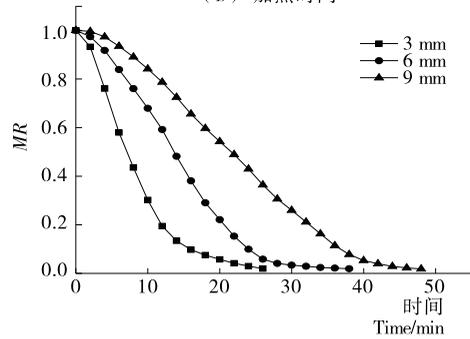
(a) 微波功率



(b) 加热时间



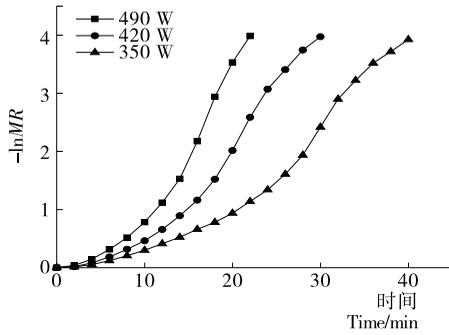
(c) 间歇时间



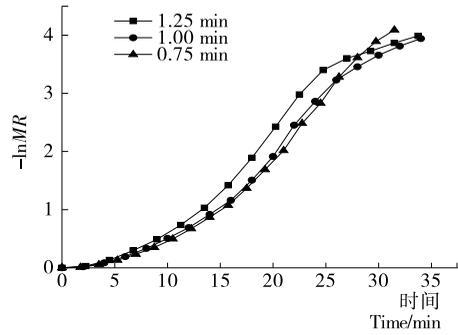
(d) 切片厚度

图9 火龙果片在不同因素下 MR 与 t 的关系曲线

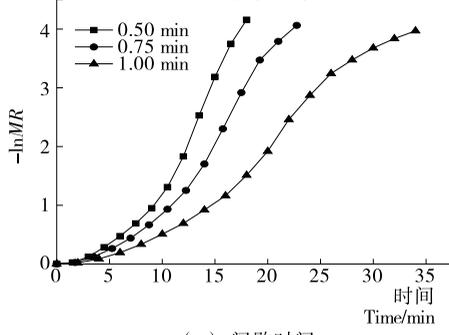
Figure 9 The relationship between MR and t of pitaya slices under different factor



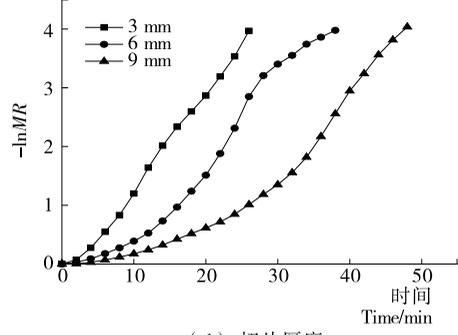
(a) 微波功率



(b) 加热时间



(c) 间歇时间



(d) 切片厚度

图10 火龙果片在不同因素下 -lnMR 与 t 的关系曲线

Figure 10 The relationship between -lnMR and t of pitaya slices under different factor

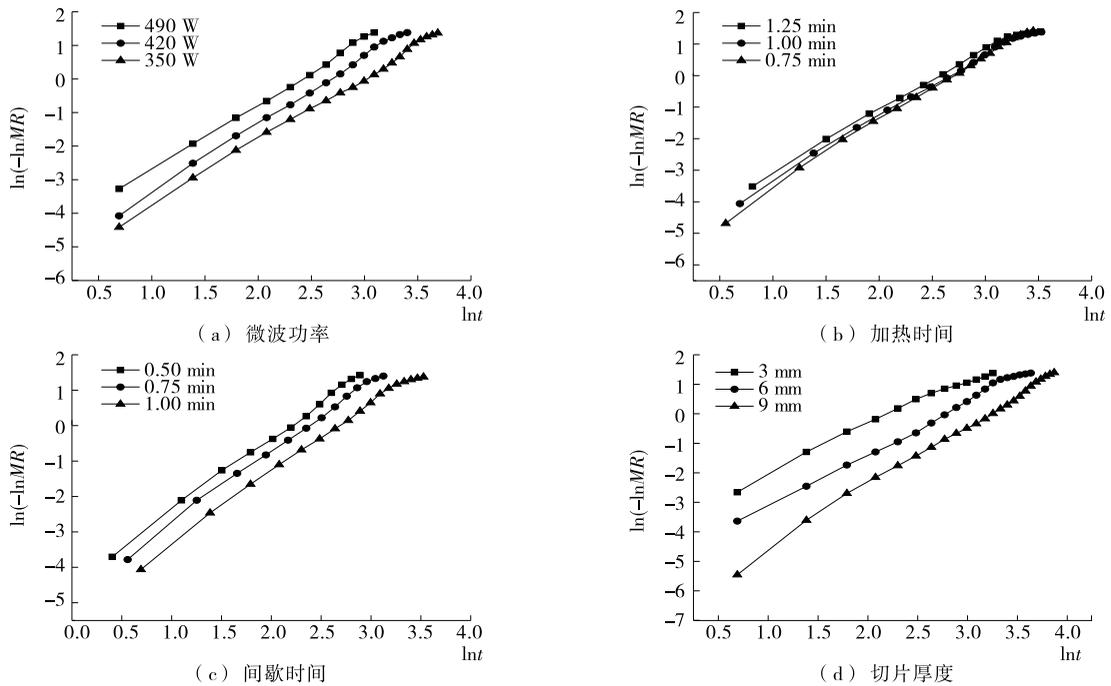


图 11 火龙果片在不同因素下  $\ln(-\ln MR)$  与  $\ln t$  的关系曲线

Figure 11 The relationship between  $\ln(-\ln MR)$  and  $\ln t$  of pitaya slices under different factor

可得到:

$$\ln(-\ln MR) = a + bP + cH + dX_1 + eX_2 + (f + gP + hH + iX_1 + jX_2) \ln t \quad (6)$$

将不同功率、不同加热时间、不同间歇时间、不同切片厚度试验所得的数据依次代入,由 SPSS 17.0 进行多元线性回归求得方程线性拟合各待定系数,为  $a = -5.95$ ,  $b = 0.008$ ,  $c = -0.458$ ,  $d = 1.578$ ,  $e = -1.314$ ,  $f = 2.441$ ,  $j = -0.373$ ,  $h = 0.056$ ,  $i = -0.458$ ,  $g = 0.000$ 。

得拟合方程:

$$\ln(-\ln MR) = -5.95 + 0.008P - 0.458H + 1.578X_1 - 1.314X_2 + (2.441 + 0.056H - 0.458X_1 - 0.373X_2) \ln t \quad (7)$$

即

$$MR = e^{-k t^n} \quad (8)$$

式中:

$$k = e^{-5.95 + 0.008P - 0.458H + 1.578X_1 - 1.314X_2};$$

$$n = 2.441 + 0.056H - 0.458X_1 - 0.373X_2.$$

该拟合方程的  $F$  为 2 192.294, 显著性水平  $P < 0.001$ ,  $R^2 = 0.991$ , 表明该方程极显著且拟合度较高。

2.2.2 模型的检验 如图 12 所示, 设定条件为功率 420 W, 加热时间 1 min, 间歇时间 1 min 时, 切片厚度 6 mm, 试验值与拟合值有较高的拟合度, Page 模型适用于描述和预测火龙果片微波间歇干燥过程中水分变化和干燥用时情况。

### 3 结论

试验表明, 火龙果片微波间歇干燥包括加速、恒速和

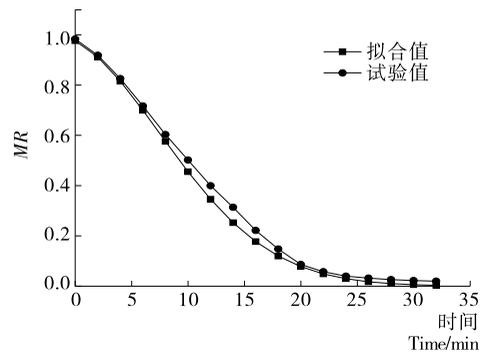


图 12 Page 模型的拟合值与试验值的比较

Figure 12 Comparison between fitting values of Page model and experimental values

降速阶段, 其中切片厚度, 间歇时间与干燥速率、物料脱水量呈负相关, 与干燥时间呈正相关。加热时间、微波功率与干燥时间呈负相关, 与干燥速率、物料脱水量呈正相关, 其中加热时间对火龙果片微波间歇干燥速率的影响较小。比较了 5 种常见的干燥模型, 经拟合得到火龙果片微波间歇干燥的最佳模型为 Page 模型。但本试验所用的火龙果片为了之后的工艺优化均用 5% NaCl 浸泡过, 可能会与鲜果存在一定差异, 批量生产时应做小批量的预试验。

### 参考文献

[1] 段振华. 火龙果的营养评价与加工技术[J]. 食品研究与开发, 2018(10): 215-219.

- [2] 李国胜, 陈小碗. 响应面法优化低糖火龙果果脯加工工艺[J]. 食品工业, 2015(8): 68-73.
- [3] 白桂芬, 张果果. 火龙果的营养保健功能与加工利用[J]. 农产品加工: 学刊, 2008(5): 95-96.
- [4] FANG Zhong-xiang, WU Dan, YU Dong, et al. Phenolic compounds in Chinese purple yam and changes during vacuum frying[J]. Food Chemistry, 2011, 128(4): 943-948.
- [5] 陈晓旭, 易建勇, 毕金峰, 等. 火龙果热风联合变温压差膨化干燥工艺优化[J]. 农产品加工: 学刊, 2014(13): 21-25.
- [6] 邹同华, 陈见兴, 易小红, 等. 真空冷冻干燥技术及其在火龙果冻干中的应用[J]. 食品研究与开发, 2009, 30(5): 159-163.
- [7] YI Jian-yong, ZHOU Lin-yan, BI Jin-feng, et al. Influences of microwave pre-drying and explosion puffing drying induced cell wall polysaccharide modification on physicochemical properties, texture, microstructure and rehydration of pitaya fruit chips[J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 70: 271-279.
- [8] NORDIN M F M. Quality changes of red pitaya (*Hylocereus undatus*) slices dried in hot air, microwave-hot air and microwave-vacuum dryers[J]. Iranica Journal of Energy & Environment, 2014, 5(3): 313-322.
- [9] NORDIN M F M, WAN R W D, TALIB M Z M, et al. Effect of process parameters on quality properties of microwave dried red pitaya (*Hylocereus costaricensis*) [J]. International Journal of Food Engineering, 2008, 4(6): 99-107.
- [10] 段振华, 汪菊兰. 微波干燥技术在食品工业中的应用研究[J]. 食品研究与开发, 2007, 28(1): 155-158.
- [11] 段振华. 现代高新灭菌技术及其在食品工业中的应用研究[J]. 中国食物与营养, 2006(9): 28-30.
- [12] 胡冰洋, 段振华, 刘艳. 微波条件对罗非鱼片渗透-微波联合干燥的影响[J]. 食品科技, 2016(4): 97-104.
- [13] 段振华, 于晓阳, 汪菊兰, 等. 罗非鱼片的热风微波复合干燥动力学[J]. 食品研究与开发, 2009, 30(12): 37-40.
- [14] 唐小闲, 段振华, 刘艳, 等. 马蹄淀粉微波间歇干燥特性及其动力学研究[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(5): 15-21.
- [15] 李定金, 段振华, 刘艳, 等. 调味山药片真空微波干燥特性及其动力学模型[J]. 食品科技, 2018, 43(3): 86-92.
- [16] 李婧怡, 段振华. 真空微波干燥对黄秋葵品质的影响[J]. 食品工业, 2014(3): 80-83.
- [17] 赵超, 陈建, 邱兵, 等. 花椒微波干燥特性试验[J]. 农业机械学报, 2007, 38(3): 99-101.
- [18] 张黎骅, 刘波, 刘涛涛, 等. 银杏果微波间歇干燥特性及动力学模型研究[J]. 食品工业科技, 2013, 34(18): 127-131.
- [19] 李天聪. 枸杞微波间歇干燥特性研究与试验[D]. 银川: 宁夏大学, 2017: 34-35.
- [20] 刘艳, 段振华, 唐小闲, 等. 大果山楂片热风干燥特性及其动力学模型[J]. 食品工业, 2017(3): 82-87.
- [21] 段振华, 冯爱国, 向东, 等. 罗非鱼片的热风干燥模型及能耗研究[J]. 食品科学, 2007, 28(7): 201-205.
- [22] 周旺, 程裕东, 张云蓉. 辣椒粉的微波干燥特性研究[J]. 食品科学, 2009, 30(19): 65-69.
- [23] 郑炯, 张甫生, 阚建全, 等. 竹笋热风薄层干燥特性及动力学分析[J]. 现代食品科技, 2014(2): 112-116.

(上接第 123 页)

### 参考文献

- [1] 周力辉. 动感形态与汽车造型设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012: 77-78.
- [2] 胡浩, 鲁玉军, 秦菊英, 等. 基于多色集合的产品风格模型研究[J]. 人类工效学, 2014(3): 68-71, 74.
- [3] 沈亮亮, 蒙祖强, 张兵, 等. 面向不完备数据的改进 C4.5 算法研究[J]. 软件导刊, 2018(6): 95-99.
- [4] 李辉, 张淑红, 陈金周. 感性工学方法论及其在产品过程中的应用研究进展[J]. 湖南包装, 2016(4): 23-27.
- [5] 李辉, 侯雅单, 张玥, 等. 包装的感性设计方法探析[J]. 湖南包装, 2018, 33(3): 12-14, 39.
- [6] 苏建宁, 赵慧娟, 王瑞红, 等. 基于支持向量机和粒子群算法的产品意象造型优化设计[J]. 机械设计, 2015, (1): 105-109.
- [7] 肖旺群, 陈龙, 张良安. 基于感性工学的牛奶包装机器人创新设计研究[J]. 食品与机械, 2017, 33(10): 111-114.
- [8] 张玥, 侯雅单, 李辉. 基于聚类分析和因子分析的茶包包装品牌感性意象研究[J]. 湖南包装, 2018, 33(3): 20-25.
- [9] 周美玉, 李超, 陶艳红, 等. 文化创意产品设计的感性评价方法[J]. 东华大学学报: 自然科学版, 2017(5): 607-611.
- [10] 邵丹, 朱莉思. 基于眼动实验的服装品牌风格意象认知探析: E 品牌上装风格案例研究[J]. 东华大学学报: 自然科学版, 2013(2): 240-246.
- [11] 蔡忠弟. 基于“SD 法”在日用玻璃器皿设计中的应用研究[J]. 陇东学院学报, 2015(3): 25-27.
- [12] 戚彬, 余隋怀, 杨延璞. 基于风格意象的罐车形态设计研究[J]. 现代制造工程, 2013(11): 34-38.
- [13] FARQUAD M A H, RAVI V, RAJU S B. Support vector regression based hybrid rule extraction methods for forecasting[J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37(8): 5 577-5 589.
- [14] HSIAO S W, CHIU F Y, LU S H. Product-form design model based on genetic algorithms[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2010, 40(3): 237-246.
- [15] SHANNON C E. A mathematical theory of communication[J]. Bell System Technical Journal, 1948, 27(3): 379-423.
- [16] 龚剑波. 基于椅子的金属与塑料材质视觉特性研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2012: 55.