

# 板栗片微波真空干燥的动力学模型及品质分析

张乐<sup>1</sup>, 李鹏<sup>2</sup>, 王赵改<sup>1</sup>, 史冠莹<sup>1</sup>, 王晓敏<sup>1</sup>, 程菁菁<sup>1</sup>, 蒋鹏飞<sup>1</sup>, 赵丽丽<sup>1</sup>, 王旭增<sup>1</sup>

(1. 河南省农业科学院农副产品加工研究中心, 河南郑州 450002)

(2. 湖南省华文食品有限公司, 湖南岳阳 414000)

**摘要:** 为获得干燥速率快、品质高的板栗制品, 以新鲜板栗为原料对其进行微波真空干燥处理。研究了板栗片在不同真空度、微波功率条件下的微波真空干燥特性。根据试验数据建立板栗微波真空干燥的水分比与干燥时间关系的动力学模型, 对模型进行拟合检验, 同时对不同干燥条件的板栗品质进行评价。结果表明: 微波强度和真空度均对干燥时间有显著影响, 功率越大, 真空度越高, 干燥速率越快。在试验范围内水分有效扩散系数随着真空度升高而升高, 随着微波功率的升高而升高, 而且功率对板栗水分有效扩散系数的影响比真空度更显著。利用 Fick 第二定律求出其范围为  $3.5462 \times 10^{-9} \sim 2.128 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ 。通过对板栗干燥动力学数学模型拟合发现, Page 模型对板栗片干燥过程的拟合性最好, 模型的预测值与实验值吻合性好, 可以用来描述和预测板栗的微波真空干燥过程。在真空度-20 kPa、微波功率 3 kW 干燥条件下, 板栗片的亮度  $L^*$  值最大为 71.77 且板栗片的质地最优, 与其他干燥条件下有显著差异 ( $p < 0.05$ )。该研究为微波真空干燥技术应用于板栗的干燥提供了技术依据。

**关键词:** 板栗; 微波真空干燥; 干燥特性; 动力学模型; 品质

文章编号: 1673-9078(2020)04-235-243

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2020.4.031

## Microwave-vacuum Drying Kinetics Model and Quality Analysis of Chinese Chestnut Slice

ZHANG Le<sup>1</sup>, LI Peng<sup>2</sup>, WANG Zhao-gai<sup>1</sup>, SHI Guan-ying<sup>1</sup>, WANG Xiao-min<sup>1</sup>, CHENG Jing-jing<sup>1</sup>,  
JIANG Peng-fei<sup>1</sup>, ZHAO Li-li<sup>1</sup>, WANG Xu-zeng<sup>1</sup>

(1. Agricultural Products Processing Center, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China)

(2. Hunan Huawen Food Co., Ltd, Yueyang 414000, China)

**Abstract:** In order to obtain chestnut products with a fast drying rate and high quality, fresh Chinese chestnut was used as the raw material for microwave-vacuum drying. The drying characteristics of chestnut slices under different vacuum degrees and microwave powers were investigated. Based on the experimental data, the kinetic model for the relationship between the moisture ratio and drying time of the microwave-vacuum dried chestnut slices was established and then tested by fitting. At the same time, the quality of chestnut slices prepared under different drying conditions was evaluated. The results showed that both the microwave power and vacuum degree had a significant influence on the drying time: the higher the microwave power, the higher vacuum degree, the faster the drying. In the test range, the effective diffusion coefficient of moisture increased with the rise of drying microwave power and with the increase of vacuum degree, with the effect of microwave power on the effective diffusion coefficient of moisture being more significant than that of vacuum degree. Using the Fick's second law of diffusion, the range of moisture effective diffusivity ( $D_{eff}$ ) was  $3.5462 \times 10^{-9} \sim 2.128 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ . The Page model was found to be the best to simulate microwave-vacuum drying of chestnut slices among the four mathematical models. By fitting the mathematical drying kinetics model of chestnut slices, it was found that the Page model exhibited the best fit to the drying process of chestnut slices, with the predicted value of the

引文格式:

张乐,李鹏,王赵改,等.板栗片微波真空干燥动力学模型及品质分析[J].现代食品科技,2020,36(4):235-243

ZHANG Le, LI Peng, WANG Zhao-gai, et al. Microwave-vacuum drying kinetics model and quality analysis of Chinese chestnut slice [J].

Modern Food Science and Technology, 2020, 36(4): 235-243

收稿日期: 2019-09-21

基金项目: 河南省科技创新杰出青年计划项目 (184100510010); 河南省科技攻关项目 (202102110134); 河南省农业科学院优秀青年科技基金 (2020YQ37); 河南省农业科学院杰出青年科技基金 (2019JQ06)

作者简介: 张乐 (1987-), 女, 助理研究员, 硕士, 研究方向: 农产品贮藏与加工研究

通讯作者: 王赵改 (1980-), 女, 博士, 副研究员, 研究方向: 农产品贮藏与加工研究

model in good agreement with the experimental value, therefore, can be used to describe and predict the microwave-vacuum drying process of chestnut slices. Chinese chestnut slices dried under a vacuum degree of -20 kPa and microwave power of 3 kW had the greatest brightness ( $L^*$  value: 71.77) and the best texture, and differed significantly from those obtained under other drying conditions ( $p < 0.05$ ). This study provides a technical basis for the application of microwave-vacuum drying technology in chestnut drying.

**Key words:** Chinese chestnut; microwave-vacuum drying; drying characteristic; kinetics model; quality

我国是板栗生产大国, 种植面积广泛, 年产量达  $1.0 \times 10^6$  t, 居世界第一, 已有几千年的栽培历史。板栗具有很高的营养价值和医学功效, 板栗淀粉含量高达 70% 左右, 素有“木本粮食”“铁杆庄稼”之美誉<sup>[1]</sup>。但是新鲜板栗含水量较高, 新陈代谢旺盛, 鲜板栗在贮藏、运输过程中易发生发芽、霉烂等现象, 不宜久藏<sup>[2]</sup>, 故需要对板栗进行加工处理。干制是食品重要的加工和贮藏方式, 能够使果蔬减轻重量、缩小体积、便于运输、食用方便且易于长期保藏<sup>[3]</sup>。板栗属于热敏性物料, 干燥过程对品质有较大影响, 因此干燥过程成为其深加工的关键操作之一。

目前果蔬干制方法主要有热风干燥<sup>[4]</sup>、微波干燥<sup>[5]</sup>、热泵干燥<sup>[6]</sup>和真空冷冻干燥<sup>[7]</sup>等。在板栗干燥方面, 张会坡等<sup>[8]</sup>对板栗真空冷冻干燥工艺进行了研究, 娄正等<sup>[9]</sup>研究了板栗气体射流冲击干燥特性并确定了最佳工艺参数, 张乐<sup>[10]</sup>等研究了几种干燥方式对板栗品质的影响, 曹小红<sup>[11]</sup>研究了板栗微波干燥的特性及其干后品质的变化, 周洁等<sup>[12]</sup>对板栗微波干燥工艺进行研究, 但由于干燥时温度高严重影响产品质量。微波真空干燥是在真空条件下利用微波能进行物料干燥加工的高新联合干燥技术, 具有高效、低温、易控及环保等特点, 能很好地保留物料原有的色香味及热敏性成分<sup>[13]</sup>。国内外进行的微波真空干燥研究主要有蔓越莓<sup>[14]</sup>、葡萄<sup>[15]</sup>、猕猴桃<sup>[16]</sup>、胡萝卜<sup>[17]</sup>、大蒜<sup>[18]</sup>、蘑菇<sup>[19]</sup>等果蔬。关于微波真空干燥技术在板栗上应用的系统研究未见报道。本研究采用微波真空干燥技术对板栗片进行干燥处理, 研究微波强度、真空度对板栗片水分迁移规律的影响, 采用 Newton、Page、Henderson-Pabis 等经验或半经验干燥模型对干燥脱水曲线进行拟合, 建立板栗微波真空干燥数学模型, 计算干燥过程中的水分有效扩散系数, 揭示微波真空干燥板栗的水分迁移机制, 为板栗工业化应用提供理论依据和技术支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

板栗: 大板红, 平均单粒重 8.7 g, 横径 3.2 cm, 纵径 2.1 cm, 含水率 52%, 由河北美客多食品有限公

司提供。

### 1.2 仪器与设备

JG01 型去壳机, 新沂市精工机械设备厂; YP20002 型电子天平, 上海越平科学仪器有限公司; KL-2D-6KW 型微波真空干燥设备, 广州市凯棱工业用微波设备有限公司; TMS-Pro 质构仪, 美国 Food Technology 公司; Color Quest XE 色差仪, 美国 Hunter Lab 公司。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 板栗片微波真空干燥特性分析

挑选无霉烂、无虫眼的完整的板栗, 用板栗去壳机去壳, 手工去除红衣; 用不锈钢刀片手工将栗仁切成 5 mm 左右的板栗片。取相同质量板栗片单层平铺于微波真空干燥设备的物料盘内, 在预实验基础上, 固定真空度 -60 kPa, 设置板栗片在微波功率分别为 2、3、4、5 kW 条件下进行微波真空干燥, 定时测定样品质量变化直至干基水分含量; 固定微波功率 2 kW 设置板栗片在真空度分别为 -20、-40、-60、-80 kPa 条件下进行微波真空干燥, 定时测定样品质量变化直至干基水分含量。研究板栗微波真空干燥特性。

#### 1.3.2 干燥模型及评价标准

干基含水率  $M_t$  按式 (1) 计算:

$$M_t = \frac{m_t - m_g}{m_g} \quad (1)$$

式中,  $m_t$ -t 时刻对应的物料质量, g;  $m_g$ -绝干时物料质量, g。

水分比  $MR$  按式 (2) 计算:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (2)$$

式中,  $M_t$ -干燥至 t 时刻的干基含水率, g/g;  $M_0$ -初始干基含水率, g/g;  $M_e$ -干燥至平衡时的干基含水率, g/g。

由于平衡干基含水率  $M_e$  远小于  $M_0$  和  $M_t$ , 公式 (2) 可简化为公式 (3)<sup>[20]</sup>。

$$MR = \frac{M_t}{M_0} \quad (3)$$

水分有效扩散系数  $Deff$  按式 (4) 计算<sup>[21,22]</sup>

$$\ln MR = \ln \frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2} \quad (4)$$

式中,  $D_{eff}$ 水分有效扩散系数,  $m^2/s$ ;  $L$ 为板栗的物料厚度, 其值为  $0.005\text{ m}$ ;  $t$ 干燥时间,  $s$ 。用于干燥曲线分析的数学模型表 1 所示。

表 1 干燥曲线分析的数学模型

Table 1 Mathematical models for drying kinetics

NO.	模型名称	模型方程
1	Newton/Lewis	$MR = \exp(-kt)$
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$
3	Henderson and Pebis	$MR = a \exp(-kt)$
4	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$

注: 此表格数据引自参考文献<sup>[23]</sup>。

用非线性回归分析将模型表达式与试验数据进行拟合, 并用决定系数  $R^2$ 、卡方检验值  $\chi^2$  和均方根误差  $RMSE$  来评价模型拟合的好坏,  $R^2$  越大、 $RMSE$  和  $\chi^2$  值越小, 则拟合越好, 其表达式如下:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2} \quad (5)$$

$$RMSE = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - n} \quad (7)$$

式中,  $MR_{exp}$ ,  $i$ -干燥试验实测的第  $i$  个水分比;  $MR_{pre}$ ,  $i$ -利用模型预测的第  $i$  个水分比;  $N$ -试验测得数据的个数;  $n$ -模型中待定常数个数。

### 1.3.3 板栗干制品品质分析

色泽是干制品的一个重要感官指标, 直接影响着消费者的购买欲望。食品原料在干燥过程中会发生物理和化学方面的变化, 其中变色最为常见, 它与干燥方式、干燥温度以及含水量变化有关。质地 TPA 是干制品的重要指标, 直接决定了成品的口感。因此色泽、质地这两个指标反映了干制品品质。板栗色泽及质地的测定参照张乐<sup>[10]</sup>等方法进行测定。质地测试具体条件参数为: 下压过程中测量力; 测试前速度  $60\text{ mm/min}$ ; 测试速度  $60\text{ mm/min}$ ; 测试后速度  $60\text{ mm/min}$ ; 测试深度(形变量) $30\%$ ; 触发力  $2.5\text{ N}$ ; 力量感应元量程  $2500\text{ N}$ ; 探头: P/50 圆盘挤压探头。

### 1.4 数据分析

采用 SPSS 软件进行数据处理及显著性分析, 采用 Origin 8.0 软件进行绘图。试验过程测定的结果以

平均值标准偏差 (means±SD) 表示。

## 2 结果与分析

### 2.1 板栗片微波真空干燥特性分析

在不同微波强度和不同真空度下, 板栗片的含水率变化如图 1 和 2 所示。图 1 显示, 在压力恒定为  $-60\text{ kPa}$ , 随着微波强度的增加, 干燥曲线变化明显, 干燥功率对板栗的干燥速率影响较大, 功率越高干燥时间越短, 干燥速率越快。0~10 min 的干燥速度明显加快, 初始阶段被加热物料内外部同时受热, 温度快速升高, 物料内部水分不断向外部迁移; 外表面由于蒸发扩散较容易散热, 使物料内外部产生温度梯度差, 温度梯度方向和水分迁移方向相同, 传热和传质方向一致, 干燥速率增大。干燥后期, 随着物料含水量减少, 所吸收的微波能随之减少, 使传质推动力下降, 干燥速率逐渐下降<sup>[24,25]</sup>。4 kW 和 5 kW 的干燥时间此时微波功率虽然加大 1 kW, 但两者干燥时间并没有太大差别, 这是由于微波功率过大, 物料表面水分蒸发速率低于内部水分扩散的速率, 微波能的吸收率受到影响<sup>[26]</sup>。

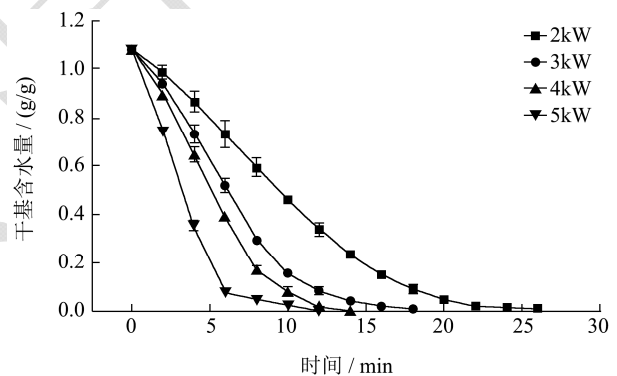


图 1 不同干燥功率对干基含水量的影响

Fig.1 Influence of different microwave power on moisture ratio

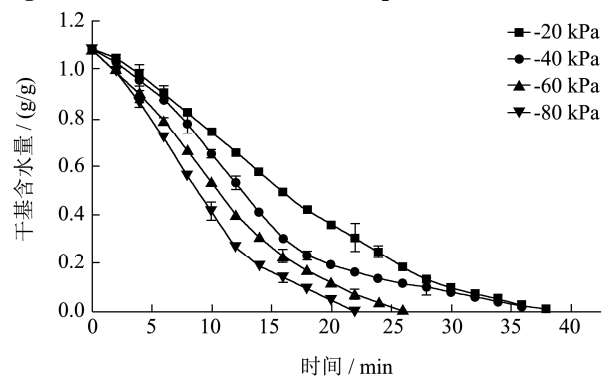


图 2 不同干燥压力对干基含水量的影响

Fig.2 Influence of different vacuum degree on moisture ratio

图 2 显示, 在微波功率恒定为  $2\text{ kW}$  下, 随着真空度的加大, 干燥时间缩短。随着相对压力的提高, 水分的沸点不断下降, 干燥过程传质推动力增大, 同

时物料水分向外扩散所需要吸收的微波能量就减少,使得干燥速率不断增大,干燥时间也缩短。微波功率和真空度对干燥速率的均有显著影响,微波功率越高、真空度越高,干燥时间越短,即干燥速度越快,这与番木瓜片<sup>[27]</sup>、香蕉片<sup>[28]</sup>、莲藕片<sup>[29]</sup>的微波真空干燥特性结果类似。

## 2.2 板栗微波真空干燥水分有效扩散系数

由图 1 和图 2 可知,整个过程除了开始阶段的短暂升速,主要过程属于降速阶段控制,因此干燥过程中的水分有效扩散系数可以用费克第二定律计算。板栗在干燥过程中水分比 MR 的自然对数 lnMR 与干燥时间 t 呈线性关系。图 3 给出了不同真空度和功率条件下 lnMR 随干燥时间的变化。通过对图 3 进行线性回归,计算得出不同干燥条件下板栗片水分有效扩散系数 Deff 如表 2 所示,可以看出,当切片厚度为 5 mm,干燥功率为 3 kW,真空度在-20~60 kPa 时,板栗的水分有效扩散系数 Deff 为 3.546~5.570×10<sup>-9</sup> m<sup>2</sup>/s。当切片厚度为 5 mm,真空度-40 kPa,干燥功率为 3~5 kW 时,板栗片的水分有效扩散系数 Deff 为 4.306×10<sup>-9</sup>~2.077×10<sup>-8</sup> m<sup>2</sup>/s。由表 2 可知,板栗水分有效扩散系数随着微波真空干燥的真空度升高而升高,

随着微波功率的升高而升高,而且功率对板栗水分有效扩散系数的影响比真空度更显著。安可婧等<sup>[30]</sup>研究了龙眼的薄层微波干燥特性,当功率密度由 6 W/g 增加到 18 W/g 时,有效扩散系数由 3.31×10<sup>-8</sup> m<sup>2</sup>/s 增加到 7.47×10<sup>-8</sup> m<sup>2</sup>/s;胡庆国<sup>[31]</sup>在不同的真空度和单位质量微波功率条件下真空微波干燥毛豆,分析得出有效扩散系数在 1.306×10<sup>-9</sup>~4.573×10<sup>-9</sup> m<sup>2</sup>/s 范围内,且随真空度和单位质量微波功率的增加而增大,与本试验结论一致。

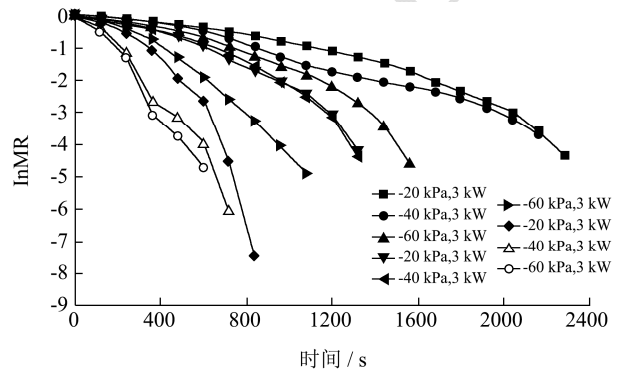


图 3 不同微波真空干燥条件下 lnMR 随干燥时间的变化曲线  
Fig.3 Curves of lnMR vs drying time under different microwave-vacuum drying conditions

表 2 不同微波真空干燥条件下板栗片水分有效扩散系数

Table 2 Moisture effective diffusion coefficients of Chinese chestnut under different microwave-vacuum drying conditions

压力/kPa	功率/kW	线性回归拟合公式	决定系数 R <sup>2</sup>	有效扩散系数
-20	3	y=-0.0014x+0.384	0.9421	3.546×10 <sup>-9</sup>
-40	3	y=-0.0017x+0.3272	0.9794	4.306×10 <sup>-9</sup>
-60	3	y=-0.0022x+0.4042	0.9367	5.57×10 <sup>-9</sup>
-20	4	y=-0.0029x+0.4811	0.9495	7.346×10 <sup>-9</sup>
-40	4	y=-0.0032x+0.6682	0.9342	8.105×10 <sup>-9</sup>
-60	4	y=-0.0047x+0.5831	0.9627	1.19×10 <sup>-8</sup>
-20	5	y=-0.0059x+0.5856	0.8922	1.494×10 <sup>-8</sup>
-40	5	y=-0.0082x+0.4664	0.9581	2.077×10 <sup>-8</sup>
-60	5	y=-0.0084x+0.2972	0.9733	2.128×10 <sup>-8</sup>

## 2.3 干燥模型的确定

### 2.3.1 干燥模型拟合

用表 1 所选的 4 个薄层干燥数学模型对板栗片在不同微波功率、不同真空度条件下的干燥曲线进行非线性拟合,得到模型相应的参数值、R<sup>2</sup>、χ<sup>2</sup>和 RMSE,并通过比较拟合的评价指标来确定最优的干燥模型见表 3。由表 3 可知,所用 4 个数学模型均能模拟板栗片微波真空干燥过程中的水分变化,其中 Page 模型拟合程度最好,其 R<sup>2</sup> 均值高达 0.9934, p<0.0001。

Page 模型的求解,根据表 3 得到的 4 个模型观察

得出,Page 模型中 R<sup>2</sup> 的最高值为 0.9993, RMSE 的最低值为 0.00961, χ<sup>2</sup> 的最低值为 9.24×10<sup>-5</sup>,整体看来此模型具有最高的拟合程度。因此,Page 模型最适合用来描述板栗的微波真空干燥,与香菇<sup>[32]</sup>、马铃薯<sup>[33]</sup>的微波真空干燥过程用 Page 模型进行描述结论一致。同时对此模型进行分析拟合,模型中的 k 和 n 是真空度和功率的函数,采用二次多项式来拟合 Page 方程中的干燥常数,除了考虑每个独立变化因素的一次和二次作用外,还需考虑各个因素之间的交互作用。设定:

$$k=a_0+a_1P+a_2W+a_3PW+a_4P^2+a_5W^2 \quad (8)$$

$$n=b_0+b_1P+b_2W+b_3PW+b_4P^2+b_5W^2 \quad (9)$$

式中,  $P$ -真空度 (kPa);  $W$ -微波功率 (kW);  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $e$ 、 $f$ 待定系数。

对以上两方程进行回归分析, 分别求出 Page 模型中参数  $k$  和  $n$  的回归方程, 结果如下:

$$k=0.515509+0.003487P-0.26695W, R^2=0.9646 \quad (8)$$

$$n=2.1096+0.014006P-0.16695W, R^2=0.8955 \quad (9)$$

$$\text{MR}=\exp(-kt^n) \\ =\exp[(-0.515509-0.003487P+0.26695W)t^{(2.1096+0.014006P-0.16695W)}]$$

注: 此模型适用范围为压力 (-20~-60 kPa), 微波功率 (3~5 kW)。

表 3 不同微波真空干燥条件下板栗片的干燥模型数据拟合结果

Table 3 Statistical results of drying models for chestnut slice s under the different microwave vacuum drying conditions

模型	压力/kPa	功率/kW	模型参数		$\chi^2$	RMSE	$R^2$
			k	n			
Newton MR= $\exp(-kt)$	-20	3	0.05552		0.00746	0.08637	0.9350
	-40	3	0.06946		0.00649	0.08054	0.9446
	-60	3	0.08432		0.00713	0.08444	0.9410
	-20	4	0.10053		0.00718	0.08473	0.9431
	-40	4	0.09777		0.00657	0.08104	0.9472
	-60	4	0.15336		0.00755	0.08688	0.9462
	-20	5	0.186		0.00875	0.09352	0.9420
	-40	5	0.29581		0.00532	0.07292	0.9655
	-60	5	0.32895		0.00446	0.0668	0.97256
Page MR = $\exp(-kt^n)$	-20	3	0.00836	1.64226	$1.97 \times 10^{-4}$	0.01404	0.9983
	-40	3	0.01324	1.60396	$5.83 \times 10^{-4}$	0.02415	0.9950
	-60	3	0.01697	1.62921	$1.73 \times 10^{-4}$	0.01318	0.9986
	-20	4	0.02189	1.64581	$1.34 \times 10^{-4}$	0.01156	0.9989
	-40	4	0.02208	1.608	$3.07 \times 10^{-4}$	0.01751	0.9975
	-60	4	0.03725	1.70355	$9.24 \times 10^{-5}$	0.00961	0.9993
	-20	5	0.04854	1.73515	$4.08 \times 10^{-4}$	0.02021	0.9973
	-40	5	0.11608	1.67274	$3.50 \times 10^{-4}$	0.01871	0.9977
	-60	5	0.15732	1.55925	$4.57 \times 10^{-4}$	0.99775	0.02138
Henderson and Pebis MR= $a \exp(-kt)$	-20	3	1.13536	0.06304	0.00516	0.07183	0.9574
	-40	3	1.13438	0.07832	0.00442	0.0665	0.9643
	-60	3	1.1154	0.09831	0.00551	0.07422	0.9544
	-20	4	1.111	0.11136	0.0057	0.07551	0.9548
	-40	4	1.11048	0.10769	0.00522	0.07227	0.9580
	-60	4	1.09818	0.16632	0.00673	0.08206	0.9520
	-20	5	1.08342	0.19915	0.00865	0.09302	0.9426
	-40	5	1.04678	0.030641	0.00588	0.07668	0.9619
	-60	5	1.03386	0.3374	0.00526	0.07251	0.97413

转下页

接上页

模型	压力/kPa	功率/kW	模型参数			$\chi^2$	RMSE	$R^2$
			a	k	c			
LogarithmicMR=aexp(-kt)+c	-20	3	1.68772	0.02734	-0.62691	0.000827	0.02876	0.99356
	-40	3	1.27841	0.05507	-0.18595	0.00285	0.05336	0.97839
	-60	3	1.572383	0.0447	-0.51923	0.00126	0.03552	0.99117
	-20	4	1.40253	0.06496	-0.33745	0.00243	0.04931	0.98423
	-40	4	1.346	0.06527	-0.28515	0.00203	0.04506	0.98619
	-60	4	1.2933	0.10829	-0.23155	0.00346	0.05885	0.9808
	-20	5	1.38359	0.11332	-0.33791	0.00366	0.06051	0.98267
	-40	5	1.1295	0.24677	-0.09525	0.00501	0.07077	0.97835
	-60	5	1.13893	0.26032	-0.11784	0.00388	0.06231	0.98567

### 2.3.2 干燥动力学模型验证

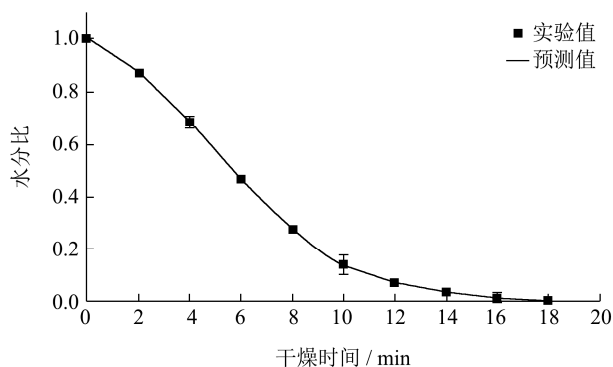


图4 Page模型的检验曲线

Fig.4 Test curves of Page model

选取微波真空干燥实验条件为真空度-60 kPa, 微波功率3 kW的实验值和Page模型预测值进行验证比较, 预测值与实际值的比较见图4, 可以看出, 实际值与预测值基本拟合, 说明Page方程较准确地反映了板栗微波真空干燥的水分变化规律, 对干燥过程可以起到预测作用。

### 2.4 板栗干制品品质分析

#### 2.4.1 板栗片质地分析

通过TPA测试可以实现对不同干燥参数条件下板栗质地具体的量化分析, 不同微波真空干燥参数的板栗片质地参数见表4。

表4 板栗片的质地剖面分析

Table 4 Textural profile analysis of Chinese chestnut slices

压力/kPa	功率/kW	硬度/N	粘附性/(N·mm)	内聚性	弹性/mm	胶粘性/N	咀嚼性/N
-20	3	372.80±16.06 <sup>b</sup>	0.24±0.01 <sup>b</sup>	0.27±0.06 <sup>a</sup>	0.50±0.04 <sup>a</sup>	99.53±7.47 <sup>b</sup>	50.38±7.01 <sup>b</sup>
-40	3	394.77±98.13 <sup>b</sup>	0.24±0.02 <sup>b</sup>	0.18±0.02 <sup>a</sup>	0.52±0.11 <sup>a</sup>	74.67±4.98 <sup>b</sup>	42.10±3.36 <sup>b</sup>
-60	3	499.50±34.6 <sup>ab</sup>	0.23±0.01 <sup>b</sup>	0.38±0.04 <sup>a</sup>	0.58±0.01 <sup>a</sup>	186.37±9.09 <sup>a</sup>	107.59±5.33 <sup>a</sup>
-20	4	431.63±37.36 <sup>ab</sup>	0.33±0.04 <sup>ab</sup>	0.21±0.015 <sup>a</sup>	0.53±0.05 <sup>a</sup>	88.37±14.59 <sup>b</sup>	47.17±1.76 <sup>b</sup>
-40	4	492.17±6.20 <sup>ab</sup>	0.35±0.08 <sup>ab</sup>	0.29±0.13 <sup>a</sup>	0.50±0.03 <sup>a</sup>	143.37±6.18 <sup>ab</sup>	74.97±4.08 <sup>ab</sup>
-60	4	556.20±24.41 <sup>a</sup>	0.37±0.10 <sup>a</sup>	0.31±0.04 <sup>a</sup>	0.63±0.02 <sup>a</sup>	172.8±10.38 <sup>a</sup>	109.41±6.86 <sup>a</sup>
-20	5	504.63±19.08 <sup>ab</sup>	0.31±0.02 <sup>ab</sup>	0.30±0.16 <sup>a</sup>	0.54±0.05 <sup>a</sup>	148.17±13.75 <sup>ab</sup>	83.13±5.38 <sup>a</sup>
-40	5	570.93±37.26 <sup>a</sup>	0.39±0.02 <sup>ab</sup>	0.31±0.08 <sup>a</sup>	0.59±0.01 <sup>a</sup>	175.7±8.42 <sup>a</sup>	104.92±11.01 <sup>a</sup>
-60	5	577.07±117.60 <sup>a</sup>	0.30±0.01 <sup>ab</sup>	0.28±0.01 <sup>a</sup>	0.57±0.04 <sup>a</sup>	163.43±11.39 <sup>a</sup>	94.83±6.69 <sup>a</sup>

注: 同列小写字母不同表示差异显著 ( $p < 0.05$ )。

硬度是果实在外力作用下发生形变所需要的屈服力大小, 由表4可知在功率相同下压力越大硬度越大, 在压力相同条件下功率越大硬度越大, 在压力-20 kPa 功率3 kW条件下板栗片的硬度值最小为372.80 N, 说明其组织结构较疏松, 脆度较好; 在压力-60 kPa 功率5 kW条件下硬度值最高为577.07 N, 说明其结构结实紧密, 脆度差。内聚性反映咀嚼果实时果实抵抗牙齿咀嚼破坏而表现出的内部结合力, 其反映了果实

组织细胞间结合力的大小, 使果实保持完整的性质。弹性反映的是果实经压缩变形后, 在去除变形力的条件下所能恢复的程度。各干燥条件下内聚性、弹性无显著差异 ( $p > 0.05$ )。胶黏性用于描述测试样品的黏性特性, 数值上用硬度和内聚性的乘积表示。咀嚼性模拟牙齿将固体样品咀嚼成吞咽稳定状态时所需要的能量, 它能综合反映果实在牙齿咀嚼过程中对外力的持续抵抗作用, 所测值为硬度、内聚性和弹性的乘积

[34,35]。板栗片的胶粘性、咀嚼性在功率 3 kW 压力-20, -40 kPa 条件下与功率 4 kW 压力-20 kPa 条件下无显著差异,与其他条件有显著差异( $p<0.05$ )。综合分析板栗片的硬度、粘附性、内聚性、弹性、胶粘性、咀嚼性这几个指标,得出在压力-20 kPa 功率 3 kW 条件下板栗片的质地最优。

### 2.4.2 微波真空干燥参数对色泽的影响

色泽是干制品品质的主要指标之一,通过对色泽

进行分析,能够反映出干燥参数的作用影响力。不同微波真空干燥参数对板栗片色泽的影响如表 5 所示,由表 5 可知,在压力-20 kPa、功率 3 kW 条件下,板栗片的亮度  $L^*$  值最大为 71.77,色泽最好,与其他干燥参数下有显著差异( $p<0.05$ ),且随微波功率和压力增大,亮度  $L^*$  值降低,说明板栗褐变越严重,与猕猴桃片在不同微波真空干燥条件下的色泽变化一致[36]。不同干燥参数条件下,红绿值  $a^*$ ,黄蓝  $b^*$  差异不显著。

表 5 不同干燥条件对板栗片色泽的影响

Table 5 Effect of different drying conditions on the color of Chinese chestnut slices

压力/kPa	功率/kW	$L^*$	$a^*$	$b^*$
-20	3	71.77±1.09 <sup>a</sup>	3.25±0.18 <sup>a</sup>	21.37±1.65 <sup>ab</sup>
-40	3	62.17±1.55 <sup>bcd</sup>	4.40±0.51 <sup>a</sup>	19.22±0.44 <sup>ab</sup>
-60	3	63.69±0.59 <sup>cd</sup>	3.78±0.74 <sup>a</sup>	19.29±0.78 <sup>ab</sup>
-20	4	67.46±2.18 <sup>ab</sup>	3.27±0.49 <sup>a</sup>	22.02±1.27 <sup>ab</sup>
-40	4	64.91±2.76 <sup>b</sup>	4.23±0.28 <sup>a</sup>	23.15±0.70 <sup>a</sup>
-60	4	65.60±2.73 <sup>b</sup>	4.03±0.18 <sup>a</sup>	22.20±1.42 <sup>ab</sup>
-20	5	59.18±2.09 <sup>cde</sup>	4.18±0.58 <sup>a</sup>	18.28±0.38 <sup>ab</sup>
-40	5	57.62±1.42 <sup>de</sup>	4.64±0.78 <sup>a</sup>	17.73±1.02 <sup>ab</sup>
-60	5	55.44±1.19 <sup>e</sup>	4.43±0.53 <sup>a</sup>	15.98±0.91 <sup>b</sup>

注:同列小写字母不同表示差异显著( $p<0.05$ )。

## 3 结论

3.1 板栗微波真空干燥过程中,微波功率和真空度对干燥速率的均有显著影响,干燥时间随着功率和真空度的升高而降低。

3.2 在试验范围内水分有效扩散系数随着真空度升高而升高,随着微波功率的升高而升高,而且功率对板栗水分有效扩散系数的影响比真空度更显著。利用 Fick 第二定律求出其范围为  $3.5462 \times 10^{-9} \sim 2.128 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

3.3 在试验范围内,Page 模型对板栗微波真空干燥过程的拟合性最好,对该模型进行求解确定了模型的相关参数与干燥温度和功率的函数关系式即  $MR = \exp(-kt^n) = \exp[(-0.515509 - 0.003487P + 0.26695W)t^2 + 0.1096 + 0.014006P - 0.16695W]$ ;验证试验结果表明该模型能很好地预测板栗微波真空干燥过程中的水分变化。

3.4 在微波真空干燥参数为压力-20 kPa、功率 3 kW 条件下,板栗片的质地最优,板栗片色泽最好,亮度值达 71.77。

## 参考文献

[1] 蔡荣,魏佳花,祁春节.板栗产业发展现状、问题与对策[J].北方果树,2007,4:1-3  
CAI Rong, GUO Jia-hua, QI Chun-jie. Current situation,

problems and countermeasures of chestnut industry [J]. Northern Fruits, 2007, 4: 1-3  
[2] 黄礼平.板栗常温保鲜贮藏的难点与对策[J].陕西林业科技,2012,4:120-122  
HUANG Li-ping. Storage of chestnut at the normal temperature difficulties and countermeasures [J]. Shanxi Forest Science and Technology, 2012, 4:120-122  
[3] 冯爱国,李国霞,李春艳.食品干燥技术的研究进展[J].农业机械,2012,18:90-93  
FENG Ai-guo, LI Guo-xia, LI Chun-yan. Research progress of food drying technology [J]. Farm Machinery, 2012, 18: 90-93  
[4] 师建芳,吴辉煌,姜正,等.豇豆隧道式热风干燥特性和模型[J].农业工程学报,2013,29(11):232-240  
SHI Jian-fang, WU Hui-huang, LOU Zheng, et al. Drying characteristics and model of cowpea in tunnel hot air dryer [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(11): 232-240  
[5] 田华,韩艳婷.苦瓜微波干燥特性及动力学模型[J].食品研究与开发,2017,38(23):125-129  
TIAN Hua, HAN Yan-ting. Microwave drying characteristics and dynamic model of balsam pear [J]. Food Research and Development, 2017, 38(23): 125-129  
[6] 蔡正云,何建国,周翔.热泵技术在食品工业中的应用及研

- 究开发[J].食品研究与开发,2007,28(5):157-161  
CAI Zheng-yun, HE Jian-guo, ZHOU Xiang. Application and development of heat pump technology in food industry [J]. Food Research and Development, 2007, 28(5): 157-161
- [7] 宋凯,徐仰丽,郭远明,等.真空冷冻干燥技术在食品加工应用中的关键问题[J].食品与机械,2013,29(6):232-235  
SONG Kai, XU Yang-li, GUO Yuan-ming, et al. Some key issues on vacuum freezing technology in food application [J]. Food and Machinery, 2013, 29(6): 232-235
- [8] 张会坡,张子德,陈志周,等.板栗真空冷冻干燥工艺研究[J].食品与机械,2005,21(2):27-28,31  
ZHANG Hui-po, ZHANG Zi-de, CHEN Zhi-zhou, et al. Investigation of vacuum freeze-drying process of chestnut [J]. Food and Machinery, 2005, 21(2): 27-28, 31
- [9] 娄正,高振江,肖红伟,等.板栗气体射流冲击干燥特性和工艺优化[J].农业工程学报,2010,26(11):368-373  
LOU Zheng, GAO Zhen-jiang, XIAO Hong-wei, et al. Air impingement drying characteristics and process optimization of chestnut [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(11): 368-373
- [10] 张乐,王赵改,杨慧,等.不同干燥方法对板栗品质的影响[J].核农学报,2016,30(12):2363-2372  
ZHANG Le, WANG Zhao-gai, YANG Hui, et al. Effects of different drying methods on the quality of Chinese chestnut. [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2016, 30(12): 2363-2372
- [11] 曹小红,常学东.板栗的微波干燥特性及其对干后品质的影响[J].食品工业科技,2005,26(1):63-65  
CAO Xiao-hong, CHANG Xue-dong. Microwave drying characteristics of chestnut and its effect on quality after drying [J]. Science and Technology of Food Industry, 2005, 26(1): 63-65
- [12] 周洁,孔晓玲,高楠.微波与热风组合干燥对板栗干燥特性的影响[J].包装与食品机械,2009,27(2):11-13  
ZHOU Jie, KONG Xiao-ling, GAO Nan. Effects of combination of microwave and hot-air drying on characteristics of chestnuts [J]. Packaging and Food Machinery, 2009, 27(2): 11-13
- [13] 张国琛,徐振方,潘澜澜.微波真空干燥技术在食品工业中的应用与展望[J].大连水产学院学报,2004,19(4):292-296  
ZHANG Guo-chen, XU Zhen-fang, PAN Lan-lan. The development and application of microwave vacuum drying technology in food industry [J]. Journal of Dalian Fisheries University, 2004, 19(4): 292-296
- [14] Sunjka P S, Rennie T J, Beaudry C, et al. Microwave convective and microwave-vacuum drying of cranberries [J]. Drying Technology, 2004, 22(5): 1217-1231
- [15] Vega-Mercado H, Góngora-Nieto M M, Barbosa-cánovas G V. Advances in dehydration of foods [J]. Journal of Food Engineering, 2001, 49(4): 271-289
- [16] 朱德泉,王继先,钱良存,等.猕猴桃切片微波真空干燥工艺参数的优化[J].农业工程学报,2009,25(3):248-252  
ZHU De-quan, WANG Ji-xian, QIAN Liang-cun, et al. Optimization of technical parameters of microwave-vacuum drying of Chinese gooseberry slices [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(3): 248-252
- [17] 王丰,李保国,苏树强,等.胡萝卜微波真空干燥研究[J].食品与发酵工业,2011,37(9):146-150  
WANG Feng, LI Bao-guo, SU Shu-qiang, et al. Study on microwave-vacuum drying of carrot [J]. Food and Fermentation Industries, 2011, 37(9): 146-150
- [18] Figiel A. Drying kinetics and quality of vacuum-microwave dehydrated garlic cloves and slices [J]. Journal of Food Engineering, 2009, 94(1): 98-104
- [19] Giri S K, Prasad S. Optimization of microwave-vacuum drying of button mushrooms using response-surface methodology [J]. Drying Technology, 2007, 25(5): 901-911
- [20] 张茜,肖红伟,杨旭海,等.预处理对线辣椒气体射流冲击干燥特性和色泽的影响[J].农业工程学报,2012,28(1):276-281  
ZHANG Qian, XIAO Hong-wei, YANG Xu-hai. Effects of pretreatment on air impingement drying characteristics and product color for line pepper [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(1): 276-281
- [21] Saravaco G D, Raouzeos G S. Diffusivity of moisture in air-drying of raisins [J]. In: A.S. Mujumdar (Ed.). Drying. New York: Hemisphere Publishing Co. 1986, 86(2): 487-491
- [22] Doymaz İ. Drying kinetics of black grapes treated with different solutions [J]. Journal of Food Engineering, 2006, 76(2): 212-217
- [23] Wang Z F, Sun J H, Liao X J, et al. Mathematical modeling on hot air drying of thin layer apple pomace [J]. Food Research International, 2007, 40: 39-46.
- [24] Zhu D Q, Cao C M, Zhu L, et al. Characteristics and optimal technology parameters of drying pineapple slices by microwave-vacuum [J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2009, 17(1): 52-55
- [25] 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-gai, et al. Microwave-vacuum drying characteristics and drying process



- of Chinese chestnut [J]. Food and Machinery, 2018, 34(4): 206-210
- [26] Michael K D, Robert A N. The development of a microwave fluidbed processor. II drying performance and physical characteristics of typical pharmaceutical granulations [J]. Pharmaceutical Research, 2008, 9(11): 1493-1501
- [27] 陈健凯,王绍青,林河通,等. 番木瓜片的微波真空干燥特性与动力学模型[J]. 热带作物学报,2017,38(8):1534-1542  
CHEN Jian-kai, WANG Shao-qing, LIN He-tong, et al. Microwave-vacuum drying characteristics and kinetics model of papaya slices [J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2017, 38(8): 1534-1542
- [28] 陈燕珠. 香蕉片微波真空干燥水分特性的研究[J]. 闽西职业技术学院学报,2010,12(3):107-111  
CHEN Yan-zhu. Research on moisture content properties of banana slice under microwave vacuum drying condition [J]. Journal of Minxi Vocational and Technical College, 2010, 12(3): 107-111
- [29] 张钟元,李丽娟,李大婧,等. 莲藕片薄层真空微波干燥特性及动力学模型[J]. 江苏农业科学,2019,47(2):201-205  
ZHANG Zhong-yuan, LI Li-juan, LI Da-jing, et al. Vacuum microwave drying characteristics and kinetic model of lotus root tablets [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47(2): 201-205
- [30] 安可婧,徐玉娟,魏来,等. 龙眼间歇真空微波干燥动力学研究[J]. 食品与机械,2018,34(9):30-36  
AN Ke-jing, XU Yu-juan, WEI Lai, et al. Study on the drying kinetics of Longyan with intermittent vacuum-microwave [J]. Food and Machinery, 2018, 34(9): 30-36
- [31] 胡庆国. 毛豆热风与真空微波联合干燥过程研究[D]. 无锡: 江南大学,2006:72-74  
HU Qing-guo. Study on drying process of edamame by hot-air and vacuum microwave combination [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2006: 72-74
- [32] 黄姬俊,郑宝东. 香菇微波真空干燥特性及其动力学[J]. 福建农林大学学报(自然科学版),2010,39(3):319-324  
HUANG Ji-jun, ZHENG Bao-dong. Drying characteristics and dynamics of shiitake mushroom dried with microwave vacuum equipment [J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2010, 39(3): 319-324
- [33] 丁睿. 马铃薯微波真空干燥动力学及设备能耗的实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学,2017  
DING Rui. Microwave vacuum drying kinetics of potato chips and experimental research of the equipment energy consumptions [D]. Harbin: Harbin University of Commerce, 2017
- [34] 杨玲,肖龙,王强,等. 质地多面分析(TPA)法测定苹果果肉质特性[J]. 果树学报,2014,31(5):977-985  
YANG Ling, XIAO Long, WANG Qiang, et al. Study on texture properties of apple flesh by using texture profile analysis [J]. Journal of Fruit Science, 2014, 31(5): 977-985
- [35] Zdunek A, Bednarczyk J. Effect of mannitol treatment on ultrasound emission during texture profile analysis of potato and apple tissue [J]. Journal of Texture Studies, 2006, 37(3): 339-359
- [36] 曾目成. 猕猴桃片新型联合干燥技术研究[D]. 北京: 中国农业科学院,2014  
ZENG Mu-cheng. Research on the novel combination drying technology of kiwifruit slices [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2014