

# 龙眼间歇真空微波干燥动力学研究

## Study on the drying kinetics of longan with intermittent vacuum-microwave

安可婧<sup>1,2,3</sup> 徐玉娟<sup>1,2,3</sup> 魏来<sup>1,2,3</sup> 余元善<sup>1,2,3</sup>  
AN Ke-jing<sup>1,2,3</sup> XIAO Geng-sheng<sup>1,2,3</sup> WEI Lai<sup>1,2,3</sup> YU Yuan-shan<sup>1,2,3</sup>  
唐道邦<sup>1,2,3</sup> 温靖<sup>1,2,3</sup> 林羨<sup>1,2,3</sup>  
TANG Dao-bang<sup>1,2,3</sup> WEN Jing<sup>1,2,3</sup> LIN Xian<sup>1,2,3</sup>

(1. 广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所, 广东 广州 510610; 2. 农业部功能食品重点实验室, 广东 广州 510610; 3. 广东省农产品加工重点实验室, 广东 广州 510610)

(1. *Sericulture and Agri-Food Research Institute Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou, Guangdong 510610, China*; 2. *Key Laboratory of Functional Foods, Ministry of Agriculture, Guangzhou, Guangdong 510610, China*; 3. *Guangdong Key Laboratory of Agricultural Products Processing, Guangzhou, Guangdong 510610, China*)

**摘要:**针对龙眼原料受热不均匀和微波干燥速率过快与局部过焦的问题,采用间歇微波与变功率微波相结合的方式对龙眼真空微波干燥,从功率密度、真空度、装载量三方面分析龙眼果肉在真空微波干燥过程中水分比及干燥速率的变化,并建立薄层拟合模型;以颜色、总酚含量、复水性为考察指标,建立功率密度、真空度、装载量三因素三水平的正交试验,优化最佳龙眼间歇真空微波干燥工艺。试验结果表明:龙眼间歇真空微波干燥有效扩散系数随着微波功率密度增加、真空度升高以及装载量减少呈上升趋势;7种数学模型中Two-term model模型拟合效果最好;功率密度12 W/g,真空度90 kPa,装载量100 g为龙眼间歇真空微波干燥的最佳干燥工艺。

**关键词:**龙眼;间歇真空微波干燥;动力学;营养品质

**Abstract:** Aiming at the problem of uneven heating of longan, excessive microwave drying rate and local over-focus, the vacuum microwave drying was carried out by the combination of intermittent microwave and variable power microwave. In this paper, the changes of water ratio and drying rate in the vacuum microwave drying process were analyzed, such as the power density, vacuum degree and loading quantity. Seven thin layer fitting models were tested. The orthogonal experiment of three factors and three levels for color, total

phenolic content and rehydration evaluation was established. The optimum intermittent vacuum microwave drying process of longan was optimized. The results showed that the effective diffusion coefficient of the longan presented rising trend with increasing power density and vacuum degree, and with decreasing loading capacity. Among the seven mathematical models, Two-term model was the best fitting one. The optimized intermittent vacuum microwave drying process of longan was under the condition of a power density of 12 W/g, vacuum degree of 90 kPa and loading capacity of 100 g.

**Keywords:** Longan; vacuum-microwave drying; kinetics; nutritional quality

龙眼(*Dimocarpus longan* Lour)是中国著名的热带亚热带水果,中国作为龙眼的原产国,其种植面积和产量分别占世界的73.6%和59.7%。龙眼果肉中含有丰富的糖类、多酚类等营养成分和活性物质<sup>[1]</sup>,早在《本草纲目》中就有“资益以龙眼为良”的记载<sup>[2]</sup>,现代医学也证实了龙眼具有抗衰老、增强免疫力等功效,是益气补血的佳品<sup>[3-5]</sup>。然而龙眼成熟于夏季,采收期短且果肉水分多,采后代谢旺盛,呼吸作用强,易于腐烂变质<sup>[6]</sup>,因此龙眼干是龙眼的主要加工产品<sup>[7-9]</sup>。传统龙眼干制主要有日晒法和火焙法,这2种方法加工生产的龙眼干存在原果营养损失严重,果肉颜色较深,烘干过程干燥不均匀等缺陷,影响龙眼干的市场销售<sup>[10]</sup>。张向阳等<sup>[11]</sup>发现真空微波干燥可以有效减少龙眼果肉颜色和风味物质的化学和酶反应,更好地保留龙眼原有的风味。

真空微波干燥(Vacuum-microwave drying, MVD)是在微波和真空技术上发展起来的新型干燥技术,具有效率高、能耗小、隔绝氧气等特点<sup>[12]</sup>,但微波加热效率高、干燥速率过快,容易产生“热点”导致局部过焦的现象。间歇微波是带

**基金项目:**国家重点研发计划(编号:2017YFD0400900, 2017YFD0400904);国家自然科学基金项(编号:31501500);广东省自然科学基金项目(编号:2015A030312001);广东省省级科技计划项目(编号:2017B020207005)

**作者简介:**安可婧,女,广东省农业科学院副研究员,博士。

**通信作者:**徐玉娟(1974—),女,广东省农业科学院研究员,博士。

E-mail: 418259325@qq.com

**收稿日期:**2018-05-29

有“缓苏”阶段的非连续性微波干燥。间歇阶段可使物料中的水分和温度均衡分配,提高下阶段干燥速率,同时有效控制温度,适用于热敏性物料<sup>[13]</sup>。在目前的真空微波干燥研究<sup>[6,14]</sup>中,微波多采用恒定功率,但干燥过程中水分含量不断变化,尤其后期物料的含水率较低,微波能量密度过大会导致物料过度干燥,进而破坏热敏性营养成分,降低品质。

本研究拟采用间歇微波与变功率微波相结合的方式对龙眼进行真空微波干燥,从功率密度、真空度、装载量三个方面分析龙眼果肉在真空微波干燥过程中水分比及干燥速率的变化,建立相关薄层拟合模型,并优化龙眼间歇真空微波干燥的工艺条件,以期开发高效节能保质的新型龙眼干加工技术提供理论支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

#### 1.1.1 材料与试剂

龙眼:储良,市售;

Folin-Ciocalteu 试剂:分析纯,上海源叶生物科技有限公司;其他试剂均为国产分析纯。

#### 1.1.2 仪器与设备

微波真空干燥机:RX-10ZK 型,广州荣兴工业微波设备有限公司;

分光光度计:UV-1800 型,日本岛津公司;

粉碎机:FS100S 型,广州雷迈机械设备有限公司;

自动色差仪:UltraScan VIS 型,美国 Hunter Lab 公司。

### 1.2 试验方法

1.2.1 龙眼真空微波干燥 真空微波干燥设备经过改装,微波功率和间歇比可调。微波功率为 600~1 800 W,2 450 MHz,依据前期试验,采用微波起始间歇比(PR)PR1=2(10 s 开—10 s 关)干燥至 1 g H<sub>2</sub>O/g DW 后调整为 PR2=3(5 s 开—10 s 关)干燥至终点 0.25 g H<sub>2</sub>O/g DW。干燥的龙眼粉碎后过 60 目筛,收集备用。

(1) 水分比:干燥动力学常采用水分比随时间变化来分析干燥过程的变化规律。水分比按式(1)计算<sup>[15]</sup>。

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \quad (1)$$

式中:

MR——水分比,g/g;

M——物料在任意时刻的干基含水量,g;

M<sub>0</sub>——物料干燥初始时刻的干基含水量,g;

M<sub>e</sub>——物料平衡时刻的干基含水量,g。

M<sub>e</sub>相对于初始干基含水量 M<sub>0</sub>较小,可忽略。

(2) 干燥速率:每克干基单位时间内失掉的水分含量,按式(2)计算。

$$DR = \frac{dM_t}{dt} = \frac{M_{d,i+1} - M_{d,i}}{t_{i+1} - t_i} \quad (2)$$

式中:

DR——干燥速率,g H<sub>2</sub>O/(g DW · min);

M<sub>d,i+1</sub>——t<sub>i+1</sub>时刻干基含水量,g;

M<sub>d,i</sub>——t<sub>i</sub>时刻干基含水量,g。

(3) 有效水分扩散系数:它是研究食品物料干燥中非静

态的质量传递的常用方法。Fick 扩散方程被广泛用于描述生物制品在降速干燥阶段的干燥特征,式(3)为 Fick 定律用于描述球状物料降速干燥过程的表达式<sup>[16]</sup>。

$$MR = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 D_{eff} t}{r^2}\right) \quad (3)$$

式中:

MR——水分比;

M<sub>t</sub>——任意时刻样品干基含水量,g;

M<sub>0</sub>——样品初始干基含水量,g;

D<sub>eff</sub>——干燥过程有效扩散系数,m<sup>2</sup>/s;

r——龙眼颗粒半径,m。

式(3)的对数形式为:

$$\ln MR = \ln \frac{6}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{eff} t}{r^2} \quad (4)$$

式中:

ln MR——时间 t 的函数,有效扩散系数 D<sub>eff</sub>的大小取决于 lnMR 对时间 t 作图的斜率的大小,其斜率 k 为:

$$k = -\frac{\pi^2 D_{eff}}{r^2} \quad (5)$$

#### 1.2.2 干燥模型的建立

(1) 模型拟合:选用 7 种常用薄层干燥模型对龙眼真空微波干燥过程进行研究,见表 1。

表 1 常用薄层干燥模型

Table 1 The thin layer drying models commonly used

序号	模型名称	表达式
1	Lewis	MR = exp(-kt) <sup>[17]</sup>
2	Page	MR = exp(-kt <sup>n</sup> ) <sup>[18]</sup>
3	Henderson and Pabis	MR = a exp(-kt) <sup>[19]</sup>
4	Logarithmic	MR = a exp(-kt) + C <sup>[20]</sup>
5	Two-term model	MR = a exp(-kt) + b exp(-gt) <sup>[21]</sup>
6	Wang and Singh	MR = 1 + at + bt <sup>2</sup> <sup>[22]</sup>
7	Modified Page	MR = exp[-(kt) <sup>n</sup> ] <sup>[23]</sup>

(2) 模型评价指标:模型拟合程度通常由决定系数(R<sup>2</sup>)、均方根误差(RMSE)、卡方(χ<sup>2</sup>)和平均偏差(MBE)决定。R<sup>2</sup>越大,RMSE、χ<sup>2</sup>和 MBE 越小,说明拟合程度越好。RMSE、χ<sup>2</sup>和 MBE 分别定义为<sup>[24-25]</sup>:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (MP_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{N}} \quad (6)$$

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

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \quad (8)$$

式中:

RMSE——均方根误差;

χ<sup>2</sup>——卡方;

MBE——平均偏差;

MR<sub>pre</sub>——水分比的预测值;

MR<sub>pre,i</sub>——水分比的试验值;

N——观测次数;

$n$ ——回归模型中常数项个数。

### 1.2.3 品质指标测定

(1) 总酚含量的测定:将干燥后的龙眼果肉粉碎,准确称取 5 g 于烧杯中,加入 20~30 mL 的 80% 甲醇超声提取 30 min,4 000 r/min 离心 5 min,收集上清液,重复操作至提取液基本无色(提取 3~4 次),合并提取液,定容至 100 mL。

总酚的测定采用 Folin-Ciocalteu 法<sup>[26]</sup>,取适当稀释后的样品 0.4 mL,分别加入稀释 10 倍的 Folin-Ciocalteu 溶液 2.0 mL,混匀,加入质量分数 10% 的  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  溶液 3.0 mL,混匀。常温下避光反应 2 h,以甲醇做空白对照,于 765 nm 波长处测定吸光值。样品总酚含量以没食子酸当量(GAE)表示。

(2) 颜色的测定:采用分光测色仪的反射模式测定不同参数下干燥样品的  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  值,其中  $L^*$  值表示明亮度; $a^*$  值表示由红色(正)向绿色(负)渐变; $b^*$  值由黄色(正)向蓝色(负)渐变, $\Delta E$  为两点之间的变化值。为准确测定颜色的变化,每组样品做 3 个平行试验,每个试验测 2 次。总色差值  $\Delta E$  按式(9)计算<sup>[27]</sup>:

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2}, \quad (9)$$

式中:

$\Delta E$ ——色差值

$L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ ——分别为龙眼干的测定值;

$L_0^*$ 、 $a_0^*$ 、 $b_0^*$ ——分别为新鲜龙眼的测定值。

(3) 复水性的测定:精确称取龙眼干 10 g 置于 25 °C 蒸馏水中,当复水龙眼质量不变(或 2 次称量的质量差小于 0.1 g)时,取出吸干表面水分,称重。按式(10)计算复水比。

$$RR = \frac{W_{\text{absorbed}}}{W_{\text{initial}}}, \quad (10)$$

式中:

RR——复水比;

$W_{\text{absorbed}}$ ——复水后的龙眼肉质量,g;

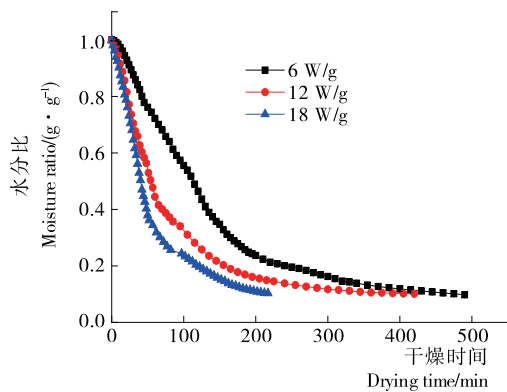
$W_{\text{initial}}$ ——复水前干燥龙眼肉质量,g。

1.2.4 数据处理 采用 Origin 9.0 和 SPSS 17.0 软件进行统计分析, $P < 0.05$  表示具有显著性差异。

## 2 结果与分析

### 2.1 微波功率密度对龙眼干燥特性影响

如图 1(a)所示,随着微波功率密度增大,水分比的下降速



(a) 水分比

率加快,干燥时间缩短。当功率密度由 6 W/g 升到 12 W/g 时,干燥时间缩短 50.24%。由图 1(b)可知,干燥速率随着微波功率密度的升高而加快。龙眼真空微波干燥速率呈升速和降速两段式变化趋势。干燥初期龙眼内部受热,产生温差,表面水分蒸发速率大于内部水分扩散速率,呈升速阶段<sup>[28]</sup>;表面水分蒸发速率等于内部水分扩散速率时为恒速干燥阶段,但其在真空微波干燥中不明显;降速阶段主要脱去结合水,物料内部水分的扩散速率低于表面水分的蒸发速率,速度缓慢。综上可知,真空微波干燥的加热效率高,温差推动水分迅速向外表迁移,不经恒速阶段,直接脱去结合水,遵循水分含量的变化趋势,控制适宜的功率密度和间歇比,可以在提高干燥效率的同时更好地保证产品品质。

### 2.2 真空度对龙眼干燥特性影响

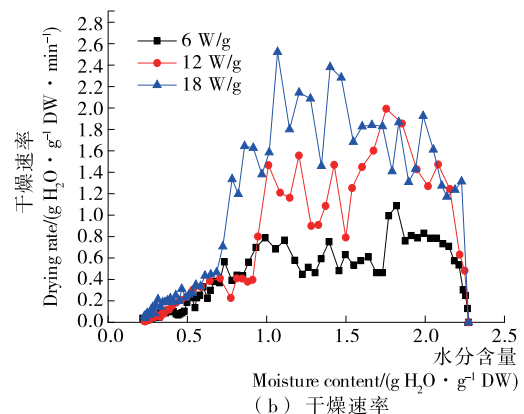
由图 2(a)可知,水分比的下降速率随真空度的增大而加快,尤其是 90 kPa 条件下。当真空度由 50 kPa 升到 90 kPa 时,干燥时间由 615 min 缩短到 420 min。如图 2(b)所示,不同真空度条件下,干燥速率亦呈现两段式变化,90 kPa 条件下干燥速率明显最高。综上可知,随着真空度的增大,龙眼的干燥时间缩短,干燥速率提高,与庄培荣<sup>[12]</sup>的研究结论一致。

### 2.3 装载量比对龙眼干燥特性影响

如图 3(a)所示,随着干燥时间延长,水分比下降速率随着装载量的增大而减小。这是由于在微波干燥中物料实际吸收的能量是按单位质量物料吸收的微波能(即能量密度)计算的,微波能量密度随着装载质量的增大而减小,单位时间内蒸发的水分减少。如图 3(b)所示,不同装载量的条件下,干燥速率也呈现两段式变化,且随着装载量的增大,干燥速率减小。综上可知,装载量对于干燥效率有显著影响,且随着装载量的减少,干燥时间缩短,速率提高。但装载量过小,干燥后期不易控制。

### 2.4 干燥动力学模型拟合

由表 2 可知,Logarithmic 和 Two-term model 模型的  $R^2$  均高于 0.98, $\chi^2$  小于  $1.15 \times 10^{-3}$ ,RMSE 小于 0.034,表明这两个模型与试验数据拟合良好。其中,Two-term model 模型  $R^2$  最大, $\chi^2$  和 RMSE 最小,说明 Two-term model 模型拟合效果最好。



(b) 干燥速率

图 1 不同功率密度下龙眼真空微波干燥过程中水分比和干燥速率的变化

Figure 1 The effect of microwave power density on the changes of moisture ratio and drying rate of Longan

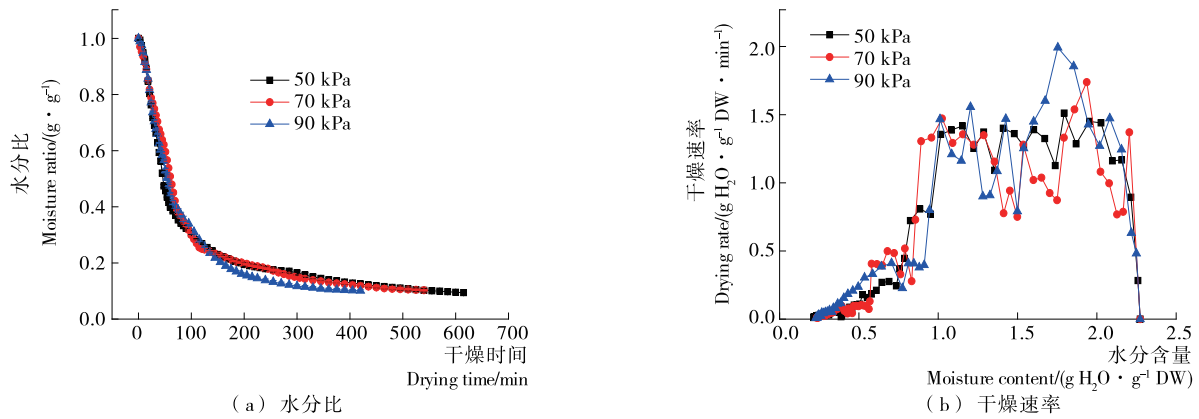


图 2 不同真空度下龙眼真空微波干燥过程中水分比和干燥速率的变化

Figure 2 The effect of vacuum degree on the changes of moisture ratio and drying rate of Longan

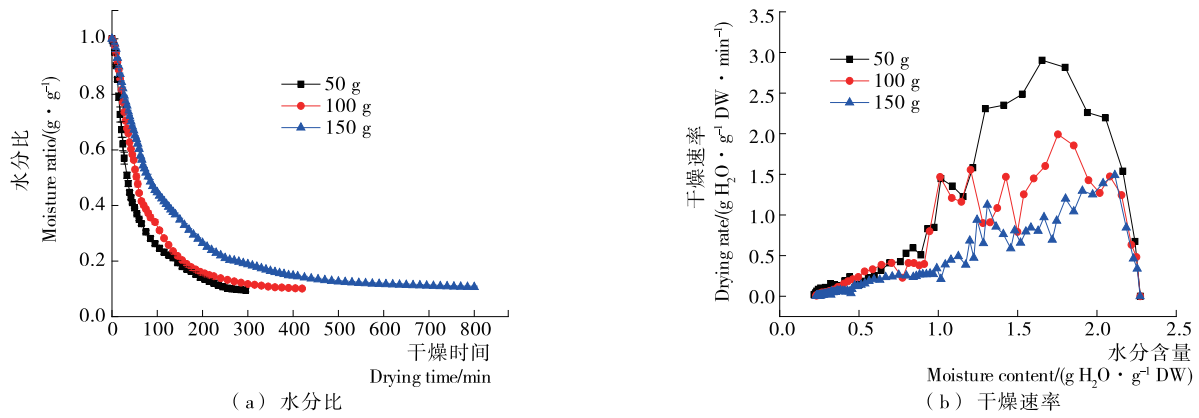


图 3 不同装载量的龙眼真空微波干燥过程中水分比和干燥速率的变化

Figure 3 The effect of loading capacity on the changes of moisture ratio and drying rate of Longan

表 2 不同能量密度下薄层干燥模型拟合

Table 2 Thinlayer drying model fitting under different energy density conditions

功率密度/ (W · g <sup>-1</sup> )	模型 编号	方程系数						R <sup>2</sup>	χ <sup>2</sup>	RMSE
		a	k	n	b	C	g			
6	1		0.006					0.984	1.45 × 10 <sup>-3</sup>	0.038
	2			1.096				0.987	1.22 × 10 <sup>-3</sup>	0.035
	3	1.056	0.007					0.989	9.97 × 10 <sup>-4</sup>	0.032
	4	1.018	0.008			0.058		0.992	7.10 × 10 <sup>-4</sup>	0.026
	5	1.067	0.007		2.74E-3		-0.007	0.993	1.15 × 10 <sup>-3</sup>	0.034
	6	-0.005			7.12E-6			0.985	1.36 × 10 <sup>-3</sup>	0.037
	7			1.094				0.987	1.22 × 10 <sup>-3</sup>	0.035
12	1		0.011					0.968	2.72 × 10 <sup>-3</sup>	0.052
	2		0.021	0.848				0.977	1.93 × 10 <sup>-3</sup>	0.044
	3	0.989	0.011					0.968	2.70 × 10 <sup>-3</sup>	0.052
	4	0.945	0.016			0.110		0.997	2.63 × 10 <sup>-4</sup>	0.016
	5	0.147	9.060E-4		0.91		0.016	0.997	2.44 × 10 <sup>-4</sup>	0.016
	6	-0.007			1.35E-5			0.890	9.33 × 10 <sup>-4</sup>	0.096
	7		0.011	0.843				0.977	1.93 × 10 <sup>-3</sup>	0.044
18	1		0.016					0.975	2.12 × 10 <sup>-3</sup>	0.046
	2		0.017	0.974				0.975	2.09 × 10 <sup>-3</sup>	0.046
	3	1.029	0.016					0.976	2.02 × 10 <sup>-3</sup>	0.045
	4	0.988	0.021			0.090		0.989	9.04 × 10 <sup>-4</sup>	0.030
	5	0.038	-0.004		1.04		0.020	0.989	8.60 × 10 <sup>-4</sup>	0.029
	6	-0.012			4.16E-5			0.962	3.27 × 10 <sup>-3</sup>	0.057
	7		0.016	0.968				0.975	2.09 × 10 <sup>-3</sup>	0.046

由表 3 可知,Logarithmic 和 Two-term model 模型的  $R^2$  均高于 0.99,  $\chi^2$  小于  $7.00 \times 10^{-4}$ , RMSE 小于 0.026, 表明这 2 个模型与试验数据拟合良好。其中, Two-term model 模型

$R^2$  最大,  $\chi^2$  和 RMSE 最小, 说明 Two-term model 模型拟合效果最好。

由表 4 可知, Logarithmic 和 Two-term model 模型的  $R^2$

表 3 不同真空度下薄层干燥模型拟合  
Table 3 Thinlayer drying model fitting under different vacuum conditions

真空度/kPa	模型 编号	方程系数					$R^2$	$\chi^2$	RMSE
		$a$	$k$	$n$	$b$	$C$			
50	1		0.010				0.921	$6.27 \times 10^{-3}$	0.079
	2		0.035	0.719			0.952	$3.78 \times 10^{-3}$	0.061
	3	0.962	0.010				0.921	$6.15 \times 10^{-3}$	0.078
	4	0.936	0.016			0.129	0.991	$6.68 \times 10^{-4}$	0.026
	5	0.871	0.019		0.210		0.994	$4.65 \times 10^{-4}$	0.022
	6	-0.005			$7.060E-6$		0.712	$2.28 \times 10^{-2}$	0.150
	7		0.009	0.716			0.952	$3.78 \times 10^{-3}$	0.060
70	1		0.010				0.935	$4.92 \times 10^{-3}$	0.070
	2		0.027	0.773			0.955	$3.35 \times 10^{-3}$	0.058
	3	0.969	0.010				0.935	$4.83 \times 10^{-3}$	0.070
	4	0.932	0.015			0.126	0.991	$7.00 \times 10^{-4}$	0.026
	5	0.164	$7.130E-4$		0.899		0.991	$6.58 \times 10^{-4}$	0.026
	6	-0.006			$8.990E-6$		0.776	$1.69 \times 10^{-2}$	0.129
	7		0.010	0.769			0.955	$3.35 \times 10^{-3}$	0.058
90	1		0.011				0.968	$2.72 \times 10^{-3}$	0.052
	2		0.021	0.848			0.977	$1.93 \times 10^{-3}$	0.044
	3	0.989	0.011				0.968	$2.71 \times 10^{-3}$	0.052
	4	0.945	0.016			0.110	0.997	$2.63 \times 10^{-4}$	0.016
	5	0.147	$9.060E-4$		0.913		0.997	$2.44 \times 10^{-4}$	0.016
	6	-0.007			$1.340E-5$		0.890	$9.34 \times 10^{-3}$	0.096
	7		0.011	0.842			0.977	$1.93 \times 10^{-3}$	0.044

表 4 不同装载量下薄层干燥模型拟合  
Table 4 Thinlayer drying model fitting under different loading capacity

装载量/g	模型 编号	方程系数					$R^2$	$\chi^2$	RMSE
		$a$	$k$	$n$	$b$	$C$			
50	1		0.016				0.929	$5.36 \times 10^{-3}$	0.073
	2		0.047	0.725			0.970	$2.23 \times 10^{-3}$	0.047
	3	0.928	0.014				0.934	$4.86 \times 10^{-3}$	0.070
	4	0.907	0.024			0.132	0.988	$8.87 \times 10^{-4}$	0.029
	5	0.727	0.035		0.345		0.994	$4.0 \times 10^{-4}$	0.020
	6	-0.010			$2.590E-5$		0.808	$1.44 \times 10^{-2}$	0.120
	7		0.015	0.722			0.970	$2.23 \times 10^{-3}$	0.047
100	1		0.011				0.968	$2.72 \times 10^{-3}$	0.052
	2		0.021	0.848			0.977	$1.93 \times 10^{-3}$	0.044
	3	0.989	0.011				0.968	$2.70 \times 10^{-3}$	0.052
	4	0.945	0.016			0.110	0.997	$2.63 \times 10^{-4}$	0.016
	5	0.147	$9.060E-4$		0.913		0.997	$2.44 \times 10^{-4}$	0.016
	6	-0.007					0.890	$9.34 \times 10^{-3}$	0.096
	7		0.011	0.843			0.977	$1.93 \times 10^{-3}$	0.044
150	1		0.007				0.938	$4.58 \times 10^{-3}$	0.068
	2		0.027	0.715			0.980	$1.49 \times 10^{-3}$	0.038
	3	0.911	0.006				0.948	$3.80 \times 10^{-3}$	0.062
	4	0.881	0.010			0.123	0.997	$2.02 \times 10^{-4}$	0.014
	5	0.223	0.001		0.799		0.999	$8.59 \times 10^{-5}$	0.009
	6	-0.004			$3.990E-6$		0.787	0.016	0.124
	7		0.006	0.712			0.979	$1.49 \times 10^{-3}$	0.039

均高于 0.987,  $\chi^2$  小于  $8.87 \times 10^{-4}$ , RMSE 小于 0.029, 表明这 2 个模型与试验数据拟合良好。其中, Two-term model 模型的  $R^2$  最大,  $\chi^2$  和 RMSE 最小, 说明 Two-term model 模型拟合效果最好。综上, 对不同条件下龙眼真空微波干燥动力学拟合而言, Two-term model 模型拟合效果最好。

2.5 有效扩散系数

如表 5 所示, 当功率密度由 6 W/g 增加到 18 W/g 时, 有效扩散系数由  $3.31 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$  增加到  $7.47 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ ; 当真空度由 50 kPa 增加到 90 kPa 时, 有效扩散系数由  $2.86 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$  增加到  $4.16 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ ; 当装载量由 50 g 增加到 150 g, 有效扩散系数由  $5.59 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$  降低到  $2.22 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

表 5 不同间歇真空微波条件下龙眼有效系数扩散的值

Table 5 Values of effective diffusivity obtained for longan at different intermittent vacuum-microwave conditions

功率密度/ (W · g <sup>-1</sup> )	真空度/ kPa	装载量/ g	有效扩散系数/ (m <sup>2</sup> · s <sup>-1</sup> )
6	90	100	$3.31 \times 10^{-8}$
12	90	100	$4.16 \times 10^{-8}$
18	90	100	$7.47 \times 10^{-8}$
12	50	100	$2.86 \times 10^{-8}$
12	70	100	$3.25 \times 10^{-8}$
12	90	100	$4.16 \times 10^{-8}$
12	90	50	$5.59 \times 10^{-8}$
12	90	100	$4.16 \times 10^{-8}$
12	90	150	$2.22 \times 10^{-8}$

2.6 正交试验

为进一步确定龙眼真空微波干燥工艺, 以微波功率密度、真空度、装载量为考察因素, 以总酚、复水性、颜色为考察指标, 进行三因素三水平正交试验。试验方案及结果见表 6、7。

极差结果显示, 功率密度是影响总酚含量最重要的因素; 真空度是影响复水性和颜色最重要的因素; 装载量对总酚和复水性的影响最小。基于干燥速率、总酚含量、复水性以及颜色等品质指标, 龙眼间歇真空微波干燥的最佳干燥工艺为功率密度 12 W/g, 真空度 90 kPa, 装载量 100 g, 此时龙眼的总酚、复水比以及色差分别为 6.02 mg/g DW, 2.56 和 16.28, 与前期本实验室的龙眼热泵干燥<sup>[10, 29]</sup>结果比较, 间歇

表 6 正交试验因素水平表

Table 6 Design form of orthoronal test

因素水平	A 功率密度/(W · g <sup>-1</sup> )	B 真空度/kPa	C 装载量/g
1	6	50	50
2	12	70	100
3	18	90	150

表 7 真空微波干燥工艺优化正交试验

Table 7 Orthogonal test of optimization of microwave vacuum drying process

试验号	A	B	C	总酚/ (mg · g <sup>-1</sup> DW)	复水比	$\Delta E$
1	1	1	1	4.32	2.12	16.81
2	1	2	2	4.78	2.45	16.01
3	1	3	3	4.99	2.46	16.21
4	2	1	2	5.42	2.28	16.81
5	2	2	3	5.02	2.36	16.41
6	2	3	1	5.93	2.50	15.53
7	3	1	3	3.92	2.13	17.02
8	3	2	1	4.08	2.22	17.12
9	3	3	2	4.18	2.43	16.34
-----						
	$K_1$	4.70	4.55	4.78		
总酚	$K_2$	5.46	4.63	4.79	A>B>C	$A_2B_3C_2$
	$K_3$	4.06	5.03	4.64		
	R	4.19	1.44	0.45		
复水比	$K_1$	2.34	2.18	2.28		
	$K_2$	2.38	2.34	2.39	B>A>C	$A_2B_3C_2$
	$K_3$	2.26	2.46	2.32		
	R	0.36	0.86	0.32		
$\Delta E$	$K_1$	16.34	16.88	16.49	B>A>C	$A_2B_3C_2$
	$K_2$	16.25	16.51	16.39		
	$K_3$	16.83	16.03	16.55		
	R	1.73	2.56	0.48		

真空微波干燥效果更佳。

3 结论

由龙眼间歇真空微波干燥动力学可知, 龙眼干燥速率和有效扩散系数随着微波功率密度的增加、真空度的增大以及装载量的减小而增大。7 种薄层模型对龙眼间歇真空微波干燥动力学的拟合结果显示, Two-term model 模型  $R^2$  最大,  $\chi^2$ , RMSE 最小, 拟合效果最好。结合动力学和品质指标, 确定龙眼间歇真空微波干燥的最佳工艺为: 功率密度 12 W/g, 真空度 90 kPa, 装载量 100 g。

参考文献

[1] 盛康美, 王宏杰. 龙眼肉的化学成分与药理作用研究进展[J]. 中国实验方剂学杂志, 2010, 16(5): 236-238.

[2] 石骏. 干制加工对龙眼品质及抗氧化活性的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2011: 7-8.

[3] SCHEPETKIN I A, QUINN M T. Botanical polysaccharides: Macrophage immunomodulation and therapeutic potential[J]. International Immunopharmacology, 2006, 6(3): 317-333.

[4] WANG Qing-jiang, FANG Yu-zhi. Analysis of sugars in traditional Chinese drugs[J]. Journal of Chromatography B Analytical Technologies in the Biomedical & Life Sciences, 2004, 812(1/2): 309-324.

- [5] DETERS A, DAUER A, SCHNETZ E, et al. High molecular compounds ( polysaccharides and proanthocyanidins ) from Hamamelisvirginiana, bark; influence on human skin keratinocyte proliferation and differentiation and influence on irritated skin[J]. *Phytochemistry*, 2001, 58(6): 949-958.
- [6] 王喜鹏, 胡光华, 张进疆, 等. 龙眼的真空微波干燥试验研究[J]. *农业机械学报*, 2006, 37(8): 155-158.
- [7] CHUNTHAWORN S, ACHARIYAVIRIYA S, ACHARIYAVIRIYA A, et al. Color kinetics of longan flesh drying at high temperature[J]. *Procedia Engineering*, 2012, 32: 104-111.
- [8] VARITH J, DIJKANARUKKUL P, ACHARIYAVIRIYA A, et al. Combined microwave-hot air drying of peeled longan[J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 81(2): 459-468.
- [9] NATHAKARANAKULE A, JAIBOON P, SOPONRONNARIT S. Far-infrared radiation assisted drying of longan fruit[J]. *Journal of Food Engineering*, 2010, 99(4): 662-668.
- [10] 邓彩玲. 龙眼热泵干燥特性研究及高水分龙眼干的研发[D]. 南昌: 江西农业大学, 2013: 2-3.
- [11] 张向阳, 乔方, 方长发, 等. 龙眼真空微波干燥过程中香气成分的研究[J]. *食品工业科技*, 2012, 33(3): 81-84.
- [12] 庄培荣. 龙眼肉微波真空干燥技术的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2011: 5-6.
- [13] SUNDARAM G. Pulsed microwave-vacuum drying of food materials[J]. *Drying Technology*, 1999, 17(3): 395-412.
- [14] 江宁, 刘春泉, 李大婧, 等. 甘薯片真空微波干燥工艺的优化[J]. *中国食品学报*, 2011, 11(7): 81-88.
- [15] THAKOR N J, SOKHANSANJ S, SOSULSKI F W, et al. Mass and dimensional changes of single canola kernels during drying [J]. *Journal of Food Engineering*, 1999, 40 ( 3 ): 153-160.
- [16] DOYMAZ B. Drying kinetics of black grapes treated with different solution[J]. *Journal of Food Engineering*, 2006, 76(2): 212-217.
- [17] BRUCE D M. Exposed-layer barley drying: Three models fitted to new data up to 150 °C [J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1985, 32(4): 337-348.
- [18] ZHANG Q, LITCHFIELD J B. An optimization of intermittent corn drying in a laboratory scale thin layer dryer[J]. *Drying Technology*, 2016, 9(1): 233-244.
- [19] CHHINNAN M S. Evaluation of selected mathematical models for describing thin-layer drying of in-shell pecans[J]. *Transactions of the ASAE*, 1984, 27(2): 610-615.
- [20] TOGRUL Inci Türk, PEHLIVAN D. Mathematical modelling of solar drying of apricots in thin layers[J]. *Journal of Food Engineering*, 2002, 55(3): 209-216.
- [21] RAHMAN M S, PERERA C O, THEBAUD C. Desorption isotherm and heat pump drying kinetics of peas[J]. *Food Research International*, 1997, 30(7): 485-491.
- [22] WANG C Y, SINGH R. Use of variable equilibrium moisture content in modeling rice drying[J]. *Transactions of the ASAE*, 1978, 11: 668-672.
- [23] OVERHULTS D G, WHITE G M, HAMILTON H E, et al. Drying soybeans with heated air [J]. *Transactions of the ASAE*, 1973, 16(1): 112-113.
- [24] AKGUN N A, DOYMAZ I. Modelling of olive cake thin-layer drying process[J]. *Journal of Food Engineering*, 2005, 68(4): 455-461.
- [25] SILVA E M, DA S J, PENA R S, et al. A combined approach to optimize the drying process of flavonoid-rich leaves (*Inga edulis*) using experimental design and mathematical modelling[J]. *Food & Bioproducts Processing*, 2011, 89(1): 39-46.
- [26] AN Ke-jing, ZHAO Dan-dan, WANG Zheng-fu, et al. Comparison of different drying methods on Chinese ginger (*Zingiber officinale* Roscoe): Changes in volatiles, chemical profile, antioxidant properties, and microstructure [J]. *Food Chemistry*, 2016, 197(Pt B): 1 292-1 300.
- [27] GNANASEKHARAN V, SHEWFELT R L, CHINNAN M S. Detection of color changes in green vegetables[J]. *Journal of Food Science*, 2010, 57(1): 149-154.
- [28] 朱文学. 食品干燥原理与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 27-28.
- [29] 卜智斌, 唐道邦, 肖更生, 等. 超高压和热处理对龙眼干品质特性的影响[J]. *现代食品科技*, 2014(5): 202-208.

## 2019 年《粮油食品科技》征订启事

邮发代号 82-790

《粮油食品科技》杂志是由国家粮食局科学研究院主办的学术期刊,是中国科技核心期刊和中国农业核心期刊,被中国知网、万方期刊数据库、中文科技期刊数据库、超星期刊域出版平台等多家数据库全文收录。

《粮油食品科技》以传播和弘扬先进的科学技术为宗旨,以服务行业为己任,以选文严格、内容精炼、信息丰富、印刷精美为特色,在粮食行业内的影响力极佳。

**主要栏目:**粮食加工、油脂加工、营养与品质、质量安全、仓储物流、生物工程等。

**主要读者:**科研院所、大专院校、粮油检测机构、粮库等领域相关人员。

《粮油食品科技》为国内外公开发行,双月刊(逢单月 21 日出刊),大 16 开本,96 页,国内定价:20 元/期,全年 120 元;境外定价:20 美元/期,全年 120 美元。全国各地邮局均可订阅,也可直接联系本社订阅。

订阅单位:《粮油食品科技》杂志社

邮编:100037

地址:北京市西城区百万庄大街 11 号粮科大厦

电话:010-58523617/3620/3713

传真:58523614

E-mail:tougao@chinagrains.com

QQ:240868236

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告

