

doi:10.3969/j.issn.1005-1295.2022.01.007

宝珠梨微波热风耦合干燥工艺优化及动力学模型研究

李丽霞^{1,2}, 周杰¹, 张付杰^{1,2}, 辛立东¹, 秦淘¹

(1. 昆明理工大学 农业与食品学院, 昆明 650500; 2. 云南省高校中药材机械化工程研究中心, 昆明 650500)

摘要:为研究宝珠梨微波热风耦合干燥特性及品质工艺优化,在不同热风温度、微波功率和热风风速条件下对宝珠梨进行试验,研究不同干燥因素对干燥速率和有效水分扩散系数的影响,并建立适合预测宝珠梨水分比变化规律的干燥动力学模型。以宝珠梨干品色泽、硬度和干燥速率作为品质评价指标,采用正交试验和综合评分法优选微波热风耦合干燥宝珠梨工艺。研究表明:有效水分扩散系数在 $5.296 \times 10^{-9} \sim 9.66 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 之间变化。通过对7个干燥动力学数学模型进行拟合,发现Page模型能够更好地预测宝珠梨干燥过程中水分比的变化规律,它具有最大 R^2 平均值、最小的 χ^2 和均方根误差平均值。各因素对宝珠梨干燥综合效果影响主次顺序:微波功率>热风温度>热风风速,综合效果最佳的组合:热风温度60℃、微波功率500W、热风风速2.0m/s。

关键词:宝珠梨;干燥特性;优化;微波热风耦合;Page模型

中图分类号:TS255.3

文献标志码:A

Study on optimization and kinetic model of microwave hot-air coupled drying process of Baozhu pear

LI Lixia^{1,2}, ZHOU Jie¹, ZHANG Fujie^{1,2}, XIN Lidong¹, QIN Tao¹

(1. Faculty of agriculture and food, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; 2. Yunnan Provincial University of Chinese Medicinal Materials Mechanization Engineering Research Center, Kunming 650500, China)

Abstract: In order to study the characteristics and quality optimization process of the microwave hot-air coupled drying of Baozhu pears, microwave hot-air coupled drying experiment was carried out on Baozhu pears under the condition of the temperature, microwave power and hot air speed. The effects of different drying factors on the drying rate and effective moisture diffusion coefficient were studied, and a drying kinetic model suitable for predicting the change of Baozhu pear moisture ratio was established. Taking the color, hardness and drying rate of the dried Baozhu pears as quality evaluation indicators, the microwave hot-air coupled drying process of Baozhu pears was optimized by orthogonal test and comprehensive scoring method. The research results show that the effective moisture diffusion coefficient ranges from 5.296×10^{-9} to $9.66 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$. By fitting seven mathematical models of drying kinetics, it was found the Page model can better predict the change of moisture ratio of Baozhu pears in its drying process, it has the largest average R^2 , and the smallest χ^2 and the average root mean square error. The primary and secondary order of the influence of each factor on the comprehensive effect of Baozhu pear drying is: Microwave power > hot air temperature > hot wind speed, the combination with the best overall effect is hot wind temperature 60℃, microwave power 500W, and hot wind speed 2.0 m/s.

Key words: Baozhu pear; drying characteristics; optimization; microwave thermo-wind coupling; Page model

0 引言

宝珠梨目前是昆明市呈贡万溪冲社区主要经济作物之一,能够帮助当地农民增收致富^[1]。但是新鲜的宝珠梨含水率很高,不易在常温下长时

间储藏,同时云南独特的地理位置导致宝珠梨运输成本较高,因此对其进行加工,以便于运输储藏,提高附加值,是宝珠梨资源利用的一条有效途径。热风干燥广泛应用于果蔬、农产品、中药材等加工,但由于温度梯度和湿度梯度的传递方向相

收稿日期: 2021-01-22 修稿日期: 2021-02-19

基金项目: 云南省重大科技专项计划(2018ZF004)

反,导致干燥时间长,且新鲜宝珠梨的高含糖量引起水的吸附,会阻碍水分的迁移扩散,延长干燥时间^[2]。因此,若能通过有效方式来使干燥过程中的水分传递速度加快,将缩短干燥时间,提高干燥品质^[3]。

微波可以在短时间内使物料内部温度迅速升高,促进物料内部水分向表面迁移扩散,具有速度快、时间短等特点^[4],因此微波干燥能够提升干燥速率(Drying Rate, DR)。JIAO等^[5]在速食米的干燥中,发现微波热风耦合干燥比单独热风和微波干燥所需时间短。宋树杰等^[6]发现与自然晒干处理相比,微波干燥得到的熟化紫薯片产品品质更好。宋飞虎等^[7]发现在一定试验条件范围,微波热风耦合干燥能够提高牛蒡干燥品质。

本文以宝珠梨为研究对象,利用微波热风耦合干燥技术,探讨不同热风温度、微波功率、热风风速对其干燥特性的影响和干燥过程中水分比(Moisture Ratio, MR)的变化规律,并建立适合拟合预测宝珠梨干燥过程中水分比变化规律的动力学模型,同时优化其干燥工艺,以期为该技术在宝珠梨干燥加工的应用提供理论依据和参考。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

宝珠梨购自昆明市吴家营农贸市场,4℃冷藏。所选宝珠梨的重量为300~400 g/个,去皮后采用标准烘箱法(105℃烘24 h)与水分测定仪共同测得宝珠梨的湿基含水率为(85.6±1.5)%。将宝珠梨洗净去皮,切成长4 cm、宽1.5 cm、高1 cm的条状,每次用电子天平称取100 g果肉。

1.2 仪器和设备

微波热风耦合干燥实验装置由昆明理工大学农业与食品学院研制^[8]。

其他仪器设备:游标卡尺(精度0.02 mm,成都成量工具有限公司);101-2AB型电热鼓风干燥箱(吴江亚邦电热科技有限公司);JA5103N型电子分析天平(精度0.001 g,四川中浪科技有限公司);PM6252B型数字风速仪(深圳市新华谊仪表有限公司);CR-400型色彩色差计(日本柯尼卡美能达公司);TMS-PRO型食物物性分析仪(美国FTC公司)。

1.3 单因素试验方法

选取不同的热风温度、微波功率和热风风速

进行试验。固定微波功率为500 W,热风风速为1.6 m/s,将热风温度分别设置:50,60,70,80℃;固定热风温度为30℃,热风风速为1.6 m/s,将微波功率分别设置:600,650,700,750 W;固定热风温度为60℃,微波功率为600 W,将热风风速分别设置:1.2,1.6,2.0,2.4 m/s。

待试验设备达到试验所需条件并稳定后,将装有宝珠梨样品的载物盘放置于干燥箱内。每隔10 min对样品称量一次,记录其重量,参照GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》对样品进行水分测定,当含水率达到6%时停止干燥。为避免偶然性,每个试验做3次,取平均值。

1.4 水分比、干燥速率计算

干燥试验中的水分比表示一定干燥条件下物料剩余水分率,可按式计算^[9]:

$$MR = (M_t - M_e) / (M_0 - M_e) \quad (1)$$

式中 M_t —— t 时刻的干基含水率, g/g;

M_e ——平衡时干基含水率, g/g;

M_0 ——初始干基含水率, g/g。

干燥速率是研究干燥动力学的一个重要参数,计算式如下^[10]:

$$DR = (M_{t_1} - M_{t_2}) / (t_1 - t_2) \quad (2)$$

式中 DR ——宝珠梨的干燥速率, g/(g·h);

M_{t_1} —— t_1 时刻干基含水率, g/g,

M_{t_2} —— t_2 时刻干基含水率, g/g。

1.5 有效扩散系数计算

有效水分扩散系数(D_{eff})是评价物料干燥脱水能力的一个指标。根据Fick第二扩散方程, D_{eff} 通过试验样品干燥数据,依据 $\ln MR-t$ 的直线方程进行描述,可按式进行计算^[11]:

$$\ln MR = \ln(8/\pi^2) - (\pi^2 D_{eff} / L^2) t \quad (3)$$

式中 D_{eff} ——有效水分扩散系数, m²/s;

L ——宝珠梨干的厚度, m;

t ——干燥时间, s。

1.6 宝珠梨干品质检测

1.6.1 色泽测定

色泽是评价干制农产品品质的重要指标之一,果蔬在脱水过程中保留原有天然色泽能够提高附加值。将宝珠梨干品均匀平铺在试验台上用色彩色差计测量其 L^* 、 a^* 和 b^* 值。 ΔE 代表被测物体的色泽与鲜样的色差,其总色差值计算如下。

$$\Delta E = \sqrt{(L - L^*)^2 + (a - a^*)^2 + (b - b^*)^2} \quad (4)$$

式中 L, a, b ——样品的亮度值、红绿值、黄蓝值;
 L^*, a^*, b^* ——鲜样的亮度值、红绿值、黄蓝值。

1.6.2 硬度测定

采用食物物性分析仪,使用直径 2 mm 柱型探头 (P/2) 对宝珠梨干制品进行穿刺试验。参数设定如下:测试前速度 1 mm/s,试验速度 1 mm/s,返程速度 5 mm/s,穿刺距离为测试样品厚度值的 50%。

1.7 综合加权评分法

采用熵权法确定指标的客观权重系数^[12],对色泽、硬度和干燥速率进行综合评分。把实际数据转变为标准化数据 d_{ij} ,依据以下公式计算第 j 项指标的信息熵:

$$E_j = -(\ln m)^{-1} \sum_{i=1}^m P_{ij} \ln P_{ij} \quad (5)$$

其中 $P_{ij} = d_{ij} / \sum_{i=1}^m d_{ij}$

式中 m ——被评价对象的数目。

计算各指标客观权重:

$$w_j = (1 - E_j) / \left(n - \sum_{j=1}^n E_j \right) \quad (6)$$

式中 n ——评价指标数目。

求得色泽、硬度和干燥速率的客观权重分别为 0.32, 0.44 和 0.24。根据经验优先考虑干燥速率,其次考虑色泽和硬度,故设定色泽、硬度和干燥速率指标的主客观权重分别为 0.3, 0.3 和 0.4。将客观权重与主观权重相加取平均值,求得各项指标的综合权重依次为 0.31, 0.37 和 0.32。按下式进行每次试验综合加权评分计算:

$$y_j = \left(0.31 \times \frac{\Delta E_{j\min}}{\Delta E_j} + 0.37 \times \frac{H_{j\min}}{H_j} + 0.32 \times \frac{V_j}{V_{j\max}} \right) \times 100 \quad (7)$$

式中 j ——试验号, 1~9;
 ΔE_j ——第 j 号试验的总色差值;
 $\Delta E_{j\min}$ ——总色差最小值;
 H_j ——第 j 号试验的硬度值;
 $H_{j\min}$ ——硬度最小值;
 V_j ——第 j 号试验干燥速率;
 $V_{j\max}$ ——干燥速率最大值。

1.8 宝珠梨干燥过程水分比预测模型

采用 7 种常用的干燥动力学模型来对宝珠梨干燥数据进行拟合,见表 1。

表 1 宝珠梨微波热风耦合干燥曲线拟合数学模型

Tab.1 Mathematical model of microwave hot air coupled drying curve fitting for Baozhu Pear

模型序号	模型名称	模型公式
1	Lewis	$MR = \exp(-kt)$
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$
3	Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$
4	Verma et al	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-gt)$
5	Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$
6	Approximation of diffusion	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$
7	Modified page	$MR = \exp[-(kt)^n]$

在最优模型选取时,一般有 3 个评价标准^[13]: 决定系数 R^2 、卡方值 χ^2 和均方根误差 e_{RMSE} 。 R^2 、 χ^2 和 e_{RMSE} 分别按下式计算:

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

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N (MR_{\text{exp},i} - MR_{\text{pre},i})^2 / (N - n) \quad (9)$$

$$e_{\text{RMSE}} = \left[\sum_{i=1}^N (MR_{\text{pre},i} - MR_{\text{exp},i})^2 / N \right]^{1/2} \quad (10)$$

式中 $MR_{\text{exp},i}$ ——第 i 个试验测得的水分比;

$MR_{\text{pre},i}$ ——第 i 个预测的水分比;

N ——观察量个数;

n ——模型参数的个数。

1.9 数据处理

运用 Excel 2016 和 Origin 2019 软件对数据进行处理、绘图及干燥动力学模型拟合分析。

2 结果与分析

2.1 不同干燥条件对水分比的影响

干燥过程中不同热风温度、微波功率与热风风速条件下的宝珠梨 MR 随时间的变化曲线如图 1 所示。随着干燥时间的延长,MR 呈下降趋势。在不同的热风温度下,MR 随时间的变化曲线如图 1(a) 所示,热风温度越高,完成干燥的时间越短。当热风温度为 70, 80 °C 时,干燥完成的时间相

同,约为 120 min,明显少于热风温度为 50,60 °C 时的干燥完成时间 160 min 和 150 min。因为热风温度越高,物料表面的水分蒸发越快,干燥时间越短。在不同的微波功率密度下,MR 随时间的变化曲线如图 1(b)所示,随着微波功率的增大,完成干燥的时间逐渐缩短。微波功率为 600 W 时,干燥时间约 190 min;微波功率为 700 W 时,干燥时间约 120 min,缩短了 36.8%。因为微波能使物料内部温度迅速升高,微波功率越大,物料内部升温越快,内部水分向表面扩散越快,干燥时间越短。

但并不是微波功率越大越好,试验过程中发现,当微波功率为 750 W 时宝珠梨容易焦化,影响干品品质。在不同的热风风速下,MR 随时间变化曲线如图 1(c)所示。当风速从 1.2 m/s 增加到 2.0 m/s 时,干燥时间缩短了 10 min;但热风风速达到 2.4 m/s 时,干燥时间又变长,这是因为微波加速物料内部水分向表面迁移,热风吹走了表面的水分,加速表面的水分蒸发,缩短干燥时间。但是同时也会降低表层温度,水分不易蒸发,从而使干燥时间变长。

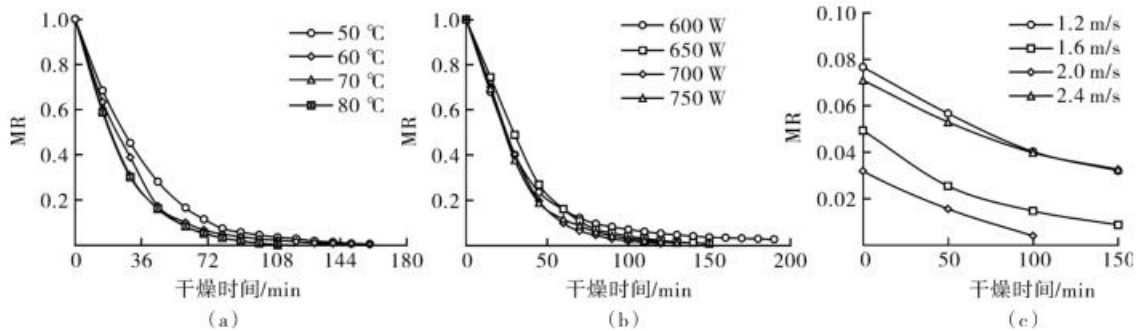


图 1 不同干燥条件下宝珠梨干燥曲线

Fig.1 Drying curves of Baozhu pears under different drying conditions

2.2 不同干燥条件对干燥速率的影响

在不同干燥条件下,宝珠梨的 DR 随干基含水率变化的曲线如图 2 所示。可以看出 DR 的变化趋势基本一致,在干燥前期,DR 迅速变化并达到峰值,然后随着干基含水率的减小而降低。整个干燥过程主要表现为 2 个阶段:加速干燥和降速干燥。这是因为在干燥的初始阶段,宝珠梨含水率很高,表层水分快速升温,自由水大量脱除,从而导致 DR 迅速增大,并且温度越高,干燥速率越大,这与图 1(a)的结论一致。随着干燥的进行,当表层水分降到一定程度后,内部水分向外扩散对 DR 的影响大于表层水分蒸发,此时内部水分向外扩散的距离不断增大,并且由于宝珠梨的糖

浓度相对较高,随着水分蒸发而显著增加,糖对水分转移具有额外的抵抗力,从而导致 DR 降低^[14]。从图 2(b)可以看出,干燥前期 DR 随着微波功率的增大而增大,因为微波使物料内部温度迅速升高,改变物料分子结构,使内部孔隙结构扩大,加速水分向外扩散,DR 也就越大;到了干燥中后期,物料内部温度与表层温度相差越来越小,促进水分向外迁移扩散的温度差随之减小,水分向外扩散减缓,导致 DR 降低^[15]。由图 2(c)可知,热风风速从 1.2 m/s 到 2.0 m/s 时,DR 随之增大;当热风风速为 2.4 m/s 时,DR 比 1.6 m/s 和 2.0 m/s 时减小,这与图 1(c)的结论一致。

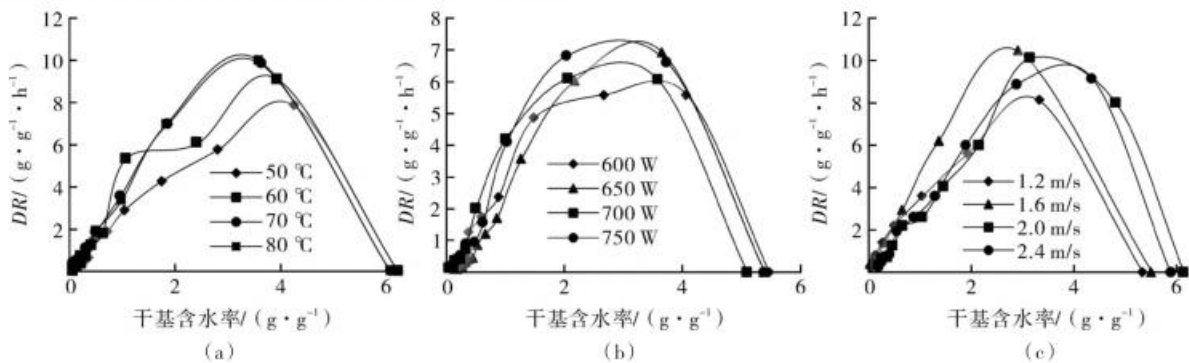


图 2 不同干燥条件下宝珠梨的干燥速率曲线

Fig.2 Drying rate curves of Baozhu pears under different drying conditions

2.3 正交试验

根据单因素试验结果,按表2进行试验,以色泽和DR为指标,采用 $L_9(3^4)$ 设计微波热风耦合干燥宝珠梨的3因素3水平正交试验^[16],结果及极差分析见表3。可得影响因素顺序: $C>A>B$,即微波功率>热风温度>热风风速,最佳的组合为 $A_2B_3C_1$,即热风温度为60℃、热风风速为2.0 m/s、微波功率为500 W,试验用时150 min。

表2 正交试验因素水平表

Tab.2 Orthogonal test factor level table

水平	因素		
	热风温度/℃	热风风速/($m \cdot s^{-1}$)	微波功率/W
1	50	1.2	500
2	60	1.6	600
3	70	2.0	700

表3 正交试验结果与极差分析

Tab.3 Orthogonal test results and range analysis

试验号	因素			空列	指标			综合评分
	A(热风温度/℃)	B[热风风速/($m \cdot s^{-1}$)]	C(微波功率/W)		色泽	硬度/N	DR/($g \cdot g^{-1} \cdot min^{-1}$)	
1	1	1	1	1	8.43	40.54	0.613	81.21
2	1	2	2	2	11.33	45.52	0.628	70.73
3	1	3	3	3	10.32	43.67	0.713	77.11
4	2	1	2	3	11.95	46.27	0.736	73.00
5	2	2	3	1	12.17	47.77	0.835	75.40
6	2	3	1	2	9.13	31.86	0.821	93.98
7	3	1	3	2	16.53	50.93	0.890	70.23
8	3	2	1	3	13.56	43.27	0.853	76.33
9	3	3	2	1	16.89	49.12	0.833	68.67
k1	76.35	74.81	83.84	75.09				
k2	80.79	74.15	70.80	78.31				
k3	71.74	79.92	74.25	75.48				
R	9.05	5.77	9.59	3.22				
因素主次				C > A > B				
最优方案				$A_2B_3C_1$				

为避免正交试验存在偶然性,取3份宝珠梨进行验证试验,用前述相同的方法进行试验前处理,按最佳工艺进行加工,采用相同的方法进行各项指标检测,得到综合评分分别为90.02,89.83,92.33,说明最佳干燥组合合理可行。

2.4 有效水分扩散系数

有效水分扩散系数越高,物料脱水能力越强。

由表4可知,不同热风温度、微波功率和热风风速下宝珠梨 D_{eff} 的范围分别为 $5.296 \times 10^{-9} \sim 7.675 \times 10^{-9} m^2/s$ 、 $5.509 \times 10^{-9} \sim 6.858 \times 10^{-9} m^2/s$ 、 $9.660 \times 10^{-9} \sim 6.139 \times 10^{-9} m^2/s$ 。 D_{eff} 随温度升高而升高,随热风风速的增大而减小,与表3的结论相符,即热风温度与微波功率对干燥时间均有显著影响。

表4 有效水分扩散系数的拟合结果

Tab.4 Fitting results of effective diffusion coefficient of water

条件	线性回归拟合公式	R^2	$D_{eff}/(m^2 \cdot s^{-1})$	
温度/℃	50	$y = -0.000\ 522\ 7x + 0.068\ 315\ 1$	0.995\ 985\ 0	5.296×10^{-9}
	60	$y = -0.000\ 580\ 6x + 0.065\ 589\ 7$	0.993\ 015\ 3	5.883×10^{-9}
	70	$y = -0.000\ 880\ 2x + 0.409\ 106\ 1$	0.940\ 512\ 2	8.918×10^{-9}
	80	$y = -0.000\ 757\ 5x + 0.149\ 306\ 4$	0.993\ 770\ 6	7.675×10^{-9}
功率/W	600	$y = -0.000\ 543\ 7x + 0.116\ 448\ 0$	0.997\ 451\ 5	5.509×10^{-9}
	650	$y = -0.000\ 305\ 1x + 0.531\ 059\ 7$	0.933\ 406\ 1	6.091×10^{-9}
	700	$y = -0.000\ 676\ 9x + 0.168\ 449\ 8$	0.997\ 121\ 8	6.858×10^{-9}
	750	$y = -0.000\ 574\ 0x + 0.005\ 785\ 0$	0.997\ 378\ 3	5.816×10^{-9}
热风风速/($m \cdot s^{-1}$)	1.2	$y = -0.000\ 953\ 7x + 0.264\ 056\ 5$	0.970\ 598\ 4	9.660×10^{-9}
	1.6	$y = -0.000\ 810\ 9x + 0.298\ 436\ 4$	0.986\ 802\ 0	8.216×10^{-9}
	2.0	$y = -0.000\ 611\ 9x + 0.046\ 097\ 9$	0.998\ 561\ 9	6.200×10^{-9}
	2.4	$y = -0.000\ 635\ 5x + 0.022\ 318\ 6$	0.997\ 204\ 2	6.139×10^{-9}

2.5 干燥动力学模型的确定

2.5.1 模型选择

一般认为 R^2 值越大, χ^2 和 e_{RMSE} 越小, 表示模型拟合度越好, 预测精度越高。利用表 1 中的 7 个数学模型对试验得到的宝珠梨 MR 数据进行拟合, 结果整理如表 5 所示。可以得出, Page 模型和 Modified page 模型 R^2 的平均值都为 0.998 43, 为 7 个模型中最大, 并且 Page 模型 χ^2 和 e_{RMSE} 平均值最小, 分别为 5.832×10^{-5} , 0.006 86。综合来看, Page 模型是所选 7 个模型中拟合度最好, 预测精度最高的模型, 最适合对宝珠梨微波热风干燥过程中 MR 变化规律进行预测。通过数学模

型预测干燥过程中物料的水分变化在其他农产品中已有应用, 张乐等^[17]发现 Page 模型能较好地预测板栗片干燥过程中水分变化规律; 程丽君等^[18]得到 Page 模型适合预测蓝莓微波干燥过程中水分变化规律; 但是王汉羊等^[19]得到 Two term exponential 模型能较好地预测山药干燥过程中的水分变化规律; 于海明等得到 Midilli et al 模型适合预测水稻秸秆营养穴盘干燥过程中的水分变化规律。这可能是由于不同的干燥条件、物料种类、物料形状及干燥环境等造成的。将不同干燥条件下 Page 模型中的干燥系数和常数值进行整理, 结果如表 6 所示。

表 5 宝珠梨微波热风耦合干燥动力学模型 R^2 、 χ^2 和 e_{RMSE} 值范围与平均值

Tab.5 Range and average value of R^2 , χ^2 and e_{RMSE} value of the kinetic model of microwave hot-air coupled drying of Baozhu pears

模型 序号	R^2		χ^2		e_{RMSE}	
	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值
1	0.999 67~0.987 20	0.994 37	$2.975 4 \times 10^{-5}$ ~ $1.340 0 \times 10^{-3}$	$4.721 3 \times 10^{-4}$	0.005 45~0.036 61	0.020 24
2	0.992 72~0.999 90	0.998 43	$1.236 1 \times 10^{-5}$ ~ $2.617 6 \times 10^{-4}$	$5.832 1 \times 10^{-5}$	0.003 52~0.016 18	0.006 86
3	0.987 85~0.999 64	0.994 62	$3.215 4 \times 10^{-5}$ ~ $1.270 1 \times 10^{-3}$	$4.576 6 \times 10^{-4}$	0.005 67~0.035 64	0.020 02
4	0.991 46~0.999 85	0.998 32	$1.627 0 \times 10^{-5}$ ~ $5.941 8 \times 10^{-4}$	$9.802 8 \times 10^{-5}$	0.004 00~0.098 03	0.014 61
5	0.869 90~0.991 19	0.955 09	$1.041 0 \times 10^{-3}$ ~ $9.050 3 \times 10^{-3}$	$3.560 8 \times 10^{-3}$	0.032 25~0.095 13	0.057 86
6	0.917 91~0.999 63	0.982 86	$3.570 4 \times 10^{-5}$ ~ $4.506 3 \times 10^{-2}$	$4.658 4 \times 10^{-3}$	0.000 30~0.224 77	0.048 02
7	0.992 73~0.999 90	0.998 43	$1.236 1 \times 10^{-5}$ ~ $5.058 0 \times 10^{-4}$	$1.077 3 \times 10^{-4}$	0.003 52~0.166 70	0.020 73

表 6 Page 模型在不同干燥条件下的统计结果及其常数及系数

Tab.6 Statistical results of Page model and its constants and coefficients under different drying conditions

热风温度 / $^{\circ}\text{C}$	微波功率 /W	热风风速 /($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	k	n	R^2	χ^2	e_{RMSE}
50	500	1.6	0.017 33	1.130 62	0.999 58	$3.660 2 \times 10^{-5}$	0.006 05
60	500	1.6	0.019 67	1.156 13	0.998 24	$1.470 8 \times 10^{-5}$	0.003 84
70	500	1.6	0.024 31	1.134 73	0.999 83	$1.835 1 \times 10^{-5}$	0.004 28
80	500	1.6	0.026 54	1.111 91	0.999 79	$2.380 2 \times 10^{-5}$	0.004 73
30	600	1.6	0.009 07	1.290 21	0.999 06	$8.366 1 \times 10^{-5}$	0.009 15
30	650	1.6	0.009 34	1.305 03	0.999 12	$6.760 5 \times 10^{-5}$	0.007 11
30	700	1.6	0.009 99	1.326 08	0.999 38	$6.537 7 \times 10^{-5}$	0.008 09
30	750	1.6	0.014 86	1.216 36	0.997 22	$2.784 3 \times 10^{-5}$	0.005 28
60	600	1.2	0.032 12	1.104 88	0.999 90	$1.236 1 \times 10^{-5}$	0.003 52
60	600	1.6	0.018 60	1.184 28	0.999 36	$7.595 8 \times 10^{-5}$	0.008 72
60	600	2.0	0.020 71	1.143 72	0.997 57	$2.617 6 \times 10^{-5}$	0.016 18
60	600	2.4	0.026 00	1.098 52	0.998 60	$1.468 9 \times 10^{-5}$	0.012 12

2.5.2 模型求解

Page 模型的干燥系数 k 和 n 是热风温度、微波功率和热风风速的函数, 通过 Matlab 2019b 软件, 采用二次多项式拟合 k 和 n 的值, 计算如下:

$$k = a_0 + b_0 T + c_0 P + d_0 V + e_0 T^2 + f_0 P^2 + g_0 V^2 \quad (11)$$

$$n = a_1 + b_1 T + c_1 P + d_1 V + e_1 T^2 + f_1 P^2 + g_1 V^2 \quad (12)$$

式中 T ——热风温度, $^{\circ}\text{C}$;

P ——微波功率, W;

V ——热风风速, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

$a_0, b_0, c_0, d_0, e_0, f_0, g_0, a_1, b_1, c_1, d_1, e_1, f_1, g_1$ 为待定系数。

根据表 6 所示试验条件及 Page 模型的 k 和

n 值,对式(11)、(12)进行多元非线性回归,分别求出 k 和 n 的回归方程,如下式所示:

$$k=0.129\ 16+0.000\ 54T-0.000\ 12P-0.111\ 12V-1.648\ 12\times 10^{-6}T^2+1.069\ 98\times 10^{-7}P^2+0.029\ 75V^2 \quad (13)$$

$$n=-0.255\ 53-0.011\ 68T+0.003\ 69P+0.773\ 33V+8.195\ 39\times 10^{-5}T^2-2.912\ 95\times 10^{-6}P^2-0.220\ 09V^2 \quad (14)$$

其中, k 和 n 的回归方程的相关系数 R^2 分别为 0.990 和 0.965。

2.5.3 模型验证

在热风温度 55 ℃、热风风速 1.6 m/s、微波功率 500 W 的条件下,对 Page 模型进行验证,结果如图 3 所示。试验值与 Page 模型预测值拟合度较高,但是还存在差异,原因是宝珠梨在微波热风耦合干燥试验过程中需要每隔 10 min 称重一次,在这期间会耽搁一定时间,而且由于仪器精度等也会存在误差,这就会导致试验干燥时间比预测干燥时间长。从整个干燥过程来看,Page 模型能够较好地反映干燥中 MR 的变化规律,更适合描述本试验条件下 MR 变化过程。

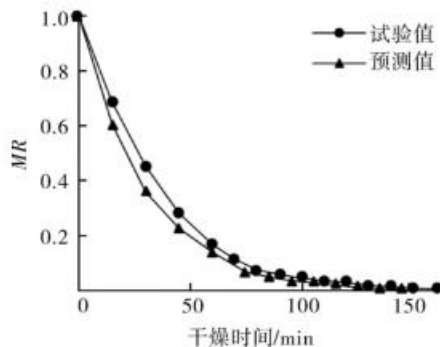


图3 相同干燥条件下的试验值与预测值

Fig.3 Experimental and predicted values under the same drying conditions

3 结语

本文以宝珠梨为干燥对象,进行微波热风耦合干燥试验。结果表明:

(1) 影响宝珠梨微波热风耦合干燥的因素顺序:微波功率 > 热风温度 > 热风风速,综合加权评分最高的组合:热风温度 60 ℃、微波功率 500 W、热风风速 2.0 m/s,该条件下的总色差 $\Delta E=9.13$,硬度值为 31.86 N,干燥时间为 150 min。

(2) 微波热风干燥能够促进物料内部水分向外迁移扩散,从而使 D_{eff} 提高,宝珠梨的 D_{eff} 范围为 $5.926\times 10^{-9}\sim 9.66\times 10^{-9}$ m²/s,且水分扩散变化规律与干燥 MR 变化规律一致。

(3) 通过对 7 个干燥动力学数学模型进行拟合,得到 Page 模型为宝珠梨微波热风耦合干燥最优拟合模型,它具有最大 R^2 平均值 0.998 43,最小的 χ^2 和 e_{RMSE} 平均值,分别为 $5.832\ 1\times 10^{-5}$, 0.006 86,因此 Page 模型能够更好地预测宝珠梨干燥过程中水分比的变化规律。试验证明 Page 模型的预测值与试验值拟合度较高。

参考文献:

- [1] 能艳兰.昆明市宝珠梨特色产业发现状状及问题[J].商场现代化,2017(12):22-23.
NAI Y L. Development status and problems of Baozhu pear characteristic industry in Kunming [J]. Market Modernization, 2017 (12): 22-23.
- [2] DURTE Y, CHAUX A, LOPEZ N, et al. Effects of blanching and hot air drying conditions on the physicochemical and technological properties of yellow passion fruit (*passiflora edulis* var. *flavicarpa*) by-products [J]. Journal of Food Process Engineering, 2017, 40 (3): 212-220.
- [3] 孙畅莹,刘云宏,曾雅,等.直触式超声强化热风干燥梨片的干燥特性[J].食品与机械,2018,34(9):37-42.
SUN C Y, LIU Y H, ZENG Y, et al. The drying characteristics of direct-touch ultrasonic enhanced hot-air drying of pear slices [J]. Food and Machinery, 2018, 34 (9): 37-42.
- [4] 程裕东,易正凯,金银哲.微波干燥过程中南极磷虾肉糜的传热传质及形变参数模型[J].农业工程学报,2020,36(3):302-312.
CHENG Y D, YI Z K, JIN Y Z. Heat and mass transfer and deformation parameter model of Antarctic krill meat paste during microwave drying [J]. Journal of Agricultural Engineering, 2020, 36 (3): 302-312.
- [5] JIAO A Q, XU X M, JIN Z Y. Modelling of dehydration-rehydration of instant rice in combined microwave-hot air drying [J]. Food and Bioproducts Processing: Transactions of the Institution of Chemical Engineers Part C, 2014, 92 (C3): 259-265.
- [6] 宋树杰,王蒙.熟化紫薯片微波干燥特性及数学模型[J].食品与发酵工业,2020,46(2):85-93.
SONG S J, WANG M. Microwave drying characteristics and mathematical model of matured purple potato chips

- [J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(2): 85-93.
- [7] 宋飞虎,周洪梅,李臻峰,等.热风微波耦合干燥牛蒡温度梯度研究[J].浙江农业学报,2016,28(11): 1934-1940.
SONG F H, ZHOU H M, LI Z F, et al. Study on Temperature Gradient of Coupling Drying Burdock with Hot Air and Microwave [J]. Journal of Zhejiang Agriculture, 2016, 28(11): 1934-1940.
- [8] 宋瑞凯,张付杰,杨薇,等.热风微波耦合干燥系统的设计与试验[J].包装与食品机械,2019,37(1): 50-55.
SONG R K, ZHANG F J, YANG W, et al. Design and experiment of hot-air-microwave coupling drying system [J]. Packaging and Food Machinery, 2019, 37(1): 50-55.
- [9] 刘云宏,孙悦,王乐颜,等.超声波强化热风干燥梨片的干燥特性[J].食品科学,2015,36(9):1-6.
LIU Y H, SUN Y, WANG L Y, et al. Ultrasonic enhanced hot air drying of pear slices drying characteristics [J]. Food Science, 2015, 36(9): 1-6.
- [10] 李秋庭,吴建文.盐焗鸡微波干燥特性及数学模型[J].食品科学,2014,35(11):58-61.
LI Q T, WU J W. Microwave drying characteristics and mathematical model of salt-baked chicken [J]. Food Science, 2014, 35(11): 58-61.
- [11] 巨浩羽,肖红伟,白竣文,等.苹果片的中短波红外干燥特性和色泽变化研究[J].农业机械学报,2013,44(2):186-191.
JU H Y, XIAO H W, BAI J W, et al. Study on the drying characteristics and color change of apple slices by medium and short wave infrared [J]. Journal of Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 186-191.
- [12] 顾苗青,周厚源,李汴生,等.肉鸡烤翅加工的多指标分析及工艺参数优化[J].食品与发酵工业,2013,39(8):149-156.
GU M Q, ZHOU H Y, LI B S, et al. Multi-index analysis and process parameter optimization of broiler wings processing [J]. Food and Fermentation Industry, 2013, 39(8): 149-156.
- [13] 于海明,李海源,张欣悦,等.水稻秸秆营养穴盘微波热风耦合干燥动力学模型研究[J].农业机械学报,2020,51(5):339-348.
YU H M, LI H Y, ZHANG X Y, et al. Study on dynamic model of rice straw nutrient plug microwave hot-air coupling drying [J]. Journal of Agricultural Machinery, 2020, 51(5): 339-348.
- [14] PROIETTI N, ADILETTA G, RUSSO P, et al. Evolution of physicochemical properties of pear during drying by conventional techniques, portable-NMR, and modelling [J]. Journal of Food Engineering, 2018, 230: 82-98.
- [15] LYU W Q, LI D, JIN X, et al. Recent development of microwave fluidization technology for drying of fresh fruits and vegetables [J]. Trends in Food Science & Technology, 2019, 86: 59-67.
- [16] 张付杰,王璐,杨薇,等.小粒咖啡微波烘焙工艺优化及破裂力分析[J].食品与机械,2019,35(6): 182-187.
ZHANG F J, WANG L, YANG W, et al. Microwave roasting process optimization and breaking force analysis of small coffee beans [J]. Food and Machinery, 2019, 35(6): 182-187.
- [17] 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 L, LI P, WANG Z G, et al. Microwave vacuum drying kinetic model and quality analysis of chestnut slices [J]. Modern Food Technology, 2020, 36(4): 235-243.
- [18] 程丽君,蔡敬民,胡勇,等.蓝莓微波干燥动力学模型的研究[J].保鲜与加工,2020,20(5):78-82.
CHENG L J, CAI J M, HU Y, et al. Study on the kinetic model of blueberry microwave drying [J]. Preservation And Processing, 2020, 20(5): 78-82.
- [19] 王汉羊,刘丹,于海明.山药微波热风耦合干燥特性及动力学模型[J].食品科学,2018,39(15):115-120.
WANG H Y, LIU D, YU H M. Drying characteristics and kinetic model of yam microwave hot-air coupling [J]. Food Science, 2018, 39(15): 115-120.

作者简介:李丽霞(1983),女,博士,讲师,研究方向为农业物料特性及农产品加工装备,E-mail:lilixia2012@kust.edu.cn。

通信作者:张付杰(1977),男,博士,副教授,研究方向为农产品加工装备,通信地址:650500 云南省昆明市呈贡区景明南路727号昆明理工大学农业与食品学院,E-mail:66605115@qq.com。

本文引用格式:

李丽霞,周杰,张付杰,等.宝珠梨微波热风耦合干燥工艺优化及动力学模型研究[J].包装与食品机械,2022,40(1):40-47.

LI L X, ZHOU J, ZHANG F J, et al. Study on optimization and kinetic model of microwave hot-air coupled drying process of Baozhu pear [J]. Packaging and Food Machinery, 2022, 40(1): 40-47.