

# 板栗微波真空干燥特性及干燥工艺研究

## Microwave-vacuum drying characteristics and drying process of Chinese chestnut

张乐 赵守涣 王赵改 史冠莹

ZHANG Le ZHAO Shou-huan WANG Zhao-gai SHI Guan-ying

王晓敏 蒋鹏飞 杨慧 王继红

WANG Xiao-min JIANG Peng-fei YANG Hui WANG Ji-hong

(河南省农业科学院农副产品加工研究中心, 河南 郑州 450008)

(Agricultural Products Processing Center, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou, Henan 450008, China)

**摘要:**研究微波真空干燥方式下,微波强度、腔体压力等参数对板栗干燥过程中质热传递的影响规律。采用 Box-Behnken 中心组合试验设计,以水分含量和白度值为评价指标,确定板栗微波真空干燥过程中微波功率、压力、干燥时间的最优工艺参数。结果显示:板栗微波真空干燥过程主要为加速和降速阶段,恒速阶段持续时间较短。微波功率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,干基含水率和水分比都随着干燥时间的延长而逐渐下降。由回归模型得出板栗微波真空干燥的最佳工艺参数为时间 12 min,压力 -56 kPa,功率 3 kW。微波真空干燥的微波功率、腔体压力、干燥时间均对板栗品质有影响,以模型得出的干燥参数进行干燥,可保证板栗干燥后的品质,且干燥效率高、能耗低。

**关键词:**板栗;微波真空干燥;干燥特性;工艺参数

**Abstract:** With the purpose of providing theoretical basis for further processing and utilization of Chinese chestnut, the microwave-vacuum drying characteristics and the optimum process parameters of chestnut were investigated. The effects of microwave intensity and chamber pressure on the mass and heat transfer in the drying process of chestnut were studied. The microwave power, pressure and drying time were optimized using Box-Behnken design and response surface methodology for achieving minimum moisture content and maximum whiteness value. The results showed that the microwave-vacuum drying process of chestnut slices was mainly divided into acceleration

and deceleration stages, and the constant velocity phase was shorter. Both microwave power and vacuum degree had a significant influence on the drying time, the higher the power, the higher vacuum, the faster the drying rate was. The dry moisture content and moisture ratio decreased gradually with the extension of drying time of Chinese chestnut. The optimum process parameters of microwave-vacuum drying of chestnut were obtained by regression model, with the time of 12 min, the pressure of -56 kPa and the power of 3 kW. The microwave power, chamber pressure and drying time had a significant influence on the quality of drying Chinese chestnut by Microwave-vacuum. The drying parameters obtained from drying-mode ensure the edible value of Chinese chestnut with high efficiency and low energy consumption.

**Keywords:** Chinese chestnut; microwave-vacuum drying; drying characteristic; technology parameter

板栗(*Castanea mollissima* blume)也称为栗子、中国板栗,属壳斗科栗属坚果类植物。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>[1-2]</sup>。板栗深加工过程中,多需进行脱水处理。板栗属于热敏性物料,干燥脱水处理对其感官及营养品质有较大影响<sup>[3]</sup>。

干制是重要的食品加工方法,也是一种延长果蔬保存期的有效方法,可以使果蔬重量减轻、体积缩小、便于运输,不需添加防腐剂、食用方便且易于长期保藏<sup>[4]</sup>。目前果蔬脱水干制方法主要有热风干燥<sup>[7]</sup>、微波干燥<sup>[8]</sup>、热泵干燥<sup>[9]</sup>和真空冷冻干燥<sup>[10]</sup>等。热风干燥作为传统的干制方法,由于干燥时间长、处理强度大,导致干制品易出现褐变、特征风味明显降低等品质劣变问题<sup>[11]</sup>。微波真空干燥是近年来发展迅速的低热干燥方法,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,具有干燥效率高、温度低、容易控制及环保等特点,尤其是对于用传统干燥工艺难以实现的

**基金项目:**2016 年产粮大省奖励资金农业科技创新项目(编号: ycm201513122);2017 年河南省超级产粮大省奖励资金扶持粮油项目(编号: ycy20177612)

**作者简介:**张乐,女,河南省农业科学院助理研究员,硕士。

**通信作者:**王赵改(1980—),女,河南省农业科学院副研究员,博士。

E-mail: zgwang1999@126.com

**收稿日期:**2017-12-19

物料,能很好地保留物料原有的色香味及热敏性和生物活性成分,克服热风干燥的缺点,产品品质比热风干燥明显提高<sup>[12]</sup>,且与冷冻干燥接近,最有可能在食品干燥中部分代替冷冻干燥,且能大幅度降低生产成本<sup>[13]</sup>。

目前国内外已开展了对苹果<sup>[14]</sup>、草莓<sup>[15]</sup>、葡萄<sup>[16]</sup>、猕猴桃<sup>[17]</sup>、杏鲍菇<sup>[18]</sup>、胡萝卜<sup>[19]</sup>、大蒜<sup>[20]</sup>、银耳<sup>[21]</sup>等果蔬的微波真空干燥研究。曹小红<sup>[22]</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>[23]</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了产品质量。关于微波真空干燥技术在板栗上的应用研究未见报道。由于热敏性物料干燥中物理、化学及感官品质变化与其传热传质过程密切相关,而不同物料干燥过程中的传热传质特性并不相同,干燥工艺参数对不同物料品质的影响规律也不相同。本研究采用微波真空干燥技术对板栗片进行干燥,探究微波功率、真空度对板栗片干燥特性的影响,确定最佳的干燥参数,为板栗深加工产业的发展提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

#### 1.1.1 材料与试剂

板栗:大板红,河北美客多食品有限公司;

柠檬酸:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

谷胱甘肽:分析纯,上海博尚生物技术有限公司;

L-半胱氨酸:分析纯,北京奥博星生物技术有限责任公司。

#### 1.1.2 主要仪器设备

去壳机:JG01型,新沂市精工机械设备有限公司;

电子天平:YP20002型,上海越平科学仪器有限公司;

微波真空干燥设备:KL-2D-6KW型,广州市凯棱工业用微波设备有限公司;

色差仪:Color Quest XE型,美国 HunterLab 公司。

### 1.2 方法

1.2.1 干燥工艺 挑选无虫眼、无霉烂的板栗,采用脱壳机去壳去红衣;将板栗仁切成 5 mm 左右的板栗片,称取一定质量板栗片按照料液比 1:3 (g/mL) 加入护色液(0.8% 柠檬酸+0.04% L-半胱氨酸+0.05% 谷胱甘混合液)进行护色处理(50 min),护色后吸干表面水分,将 500 g 板栗片单层均匀平铺于微波真空干燥箱的物料盘内,在不同真空度及微波功率条件下进行干燥,每隔 2 min 测定样品质量变化。

#### 1.2.2 单因素试验设计

(1) 微波功率:固定板栗切片厚度 5 mm、装载量 500 g,真空度-60 kPa,选取微波功率 2,3,4,5 kW 进行试验。通过测定干燥水分比、干燥速率的变化探索微波功率对板栗干燥特性的影响。

(2) 真空度:固定板栗切片厚度 5 mm、装载量 500 g,微波功率 3 kW,选取真空度-20,-40,-60,-80 kPa 进行试验。通过测定干燥水分比、干燥速率的变化探索真空度对板栗干燥特性的影响。

1.2.3 响应曲面试验设计 选择微波功率、真空压力、干燥时间为自变量,采用 Design-Expert.8.05b 软件依据 Box-Be-

hnken 中心组合试验的设计原理,以水分含量( $Y_1$ )和白度值( $Y_2$ )为响应值进行三因素三水平响应面试验,建立最佳干燥参数的数学模型。

#### 1.2.4 指标测定方法

(1) 水分测定:采用直接干燥法<sup>[24]</sup>。

(2) 色泽测定:利用色彩色差计进行测定,以仪器白板色泽为标准,根据 CIELAB 表色系统测量板栗片的明度指数  $L^*$  ( $0 \sim 100$ ),  $L^* = 0$  表示黑色,  $L^* = 100$  表示白色,明度指数 ( $L^*$ ) 间接反映色泽好坏。此次试验选取  $L$  值来表示干燥后板栗的褐变程度,色泽 ( $L^*$ ) 值越大,表示产品颜色越好<sup>[25]</sup>。

#### 1.2.5 干燥参数的计算方法

(1) 干基含水率:按式(1)计算。

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

式中:

$M_t$ ——干基含水率, g/g;

$m_t$ —— $t$  时刻对应的物料质量, g;

$m_g$ ——绝干时物料质量, g。

(2) 干燥速率:按式(2)计算。

$$DR = \frac{\Delta m}{\Delta t}, \quad (2)$$

式中:

$DR$ ——干基速率, g/min;

$\Delta m$ ——相邻 2 次测量的失水质量, g;

$\Delta t$ ——相邻 2 次测量的时间间隔, min。

(3) 水分比:按式(3)计算。

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

式中:

$MR$ ——水分比;

$M_t$ ——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  $M_t$ , 式(3)可简化为式(4)。

$$MR = \frac{M_t}{M_0}. \quad (4)$$

### 1.3 数据处理与分析

采用 SPSS 软件进行数据统计分析,采用 Origin 8.0 软件进行绘图,通过 Design-Expert.8.05b 软件进行响应曲面模型建立及方差分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 微波功率对板栗片干燥特性的影响

在真空度为-60 kPa 下,微波功率对板栗微波真空干燥过程的水分比、干燥速率的影响结果见图 1。微波真空干燥功率分别为 2,3,4,5 kW 时,板栗的干燥时间分别为 26,18,14,12 min,即功率越大,干燥时间越短,干燥速率越快。水分比随着干燥时间的延长而逐渐下降。干燥速率均呈现为开始的短暂升速,中间恒速和随后的降速阶段,基本符合传

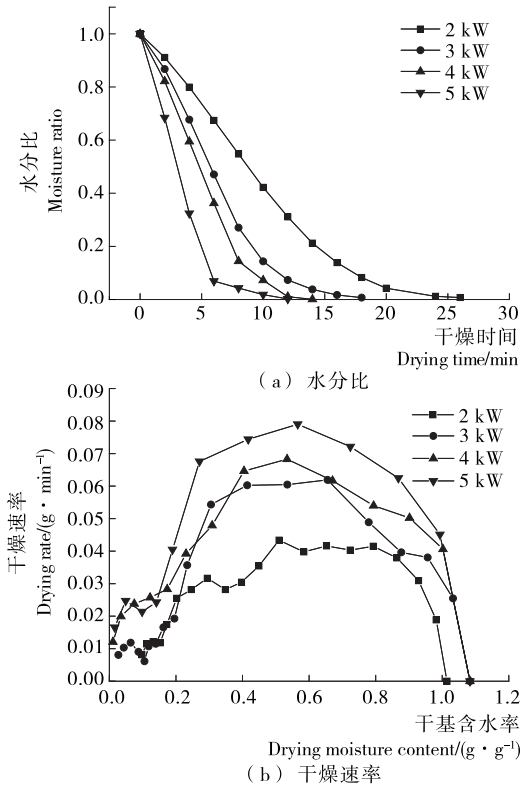


图 1 微波功率对板栗干燥特性的影响

Figure 1 Effect of microwave power on the drying characteristics of Chinese chestnut

统的干燥速率变化规律。微波能使板栗内部水分子高速震动,瞬间产生摩擦热,板栗片表面和内部同时升温,干燥层首先在物料内层形成,然后由里层向外扩展,由于外部温度低,产生内外温度梯度,推动水分向外表迁移。但由于板栗片中的水分从升温到转化为水蒸气排出需要一个过程,干燥速率不是很大。在干燥中期,由于微波加热完全用于水分的汽化,干燥速率比较平稳,这时板栗片表面水分散失速率等于内部水分向外迁移速率,故在一段时间内降水速率保持不变。到干燥后期,随着物料含水量的减少,物料所吸收的微波能随之减少,使传质推动力下降,干燥速率开始逐渐下降<sup>[26-28]</sup>。

### 2.2 真空度对板栗片干燥特性的影响

在微波功率为 2 kW 下,真空度对板栗微波真空干燥过程的干基含水率、水分比、干燥速率的影响结果见图 2。真空度分别为 -20, -40, -60, -80 kPa 时,板栗片的干燥时间分别为 38, 36, 26, 22 min。可见真空度对干燥速率有显著影响,随着真空度的加大,干燥时间缩短。这是因为物料干燥需使物料达到水沸点的温度并具有水分蒸发所需的潜热,真空度增大,水的沸点降低,水分蒸发速率加快,但是压力下降,水分蒸发潜热增大,同时过大的真空度会导致静电的释放。真空度较低时,水的沸点较高,物料局部升温较大,致使物料烧焦,阻碍了水分的扩散路径<sup>[29-30]</sup>。干基含水率和水分比都随着干燥时间的延长而逐渐下降。由干燥速率曲线可知,干燥过程主要为加速和降速阶段,恒速阶段持续时间较短。由图 1、2 可知,微波功率和真空度对干燥时间均有显著影响。

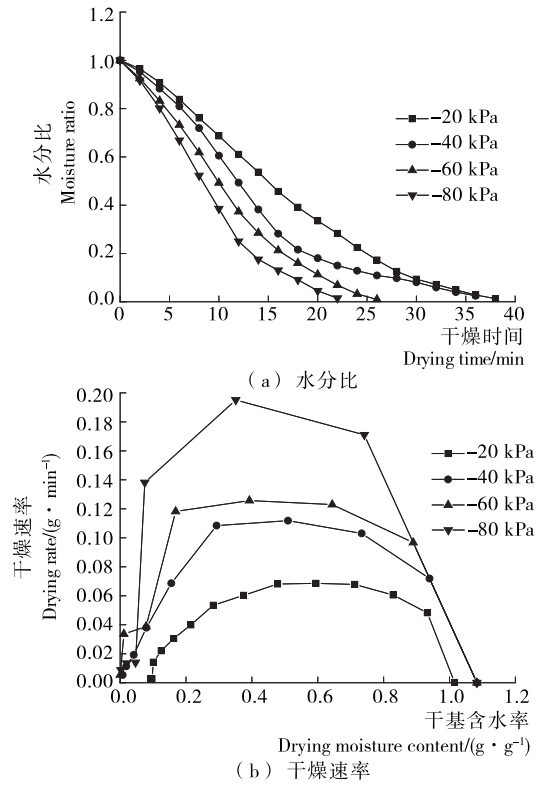


图 2 真空度对板栗干燥特性的影响

Figure 2 Effect of vacuum degree on the drying characteristics of Chinese chestnut

### 2.3 响应面试验结果分析

2.3.1 回归方程的建立及分析 根据单因素试验结果,以干燥时间、功率、真空度为自变量,试验因素水平和编码见表 1,以水分含量( $Y_1$ )和白度值( $Y_2$ )为响应值,响应面设计及其结果见表 2。

采用 Design-Expert.8.05b 软件对试验结果进行分析,得到响应值水分含量( $Y_1$ )和白度值( $Y_2$ )与时间、真空度、功率 3 个因素的数学回归模型:

$$Y_1 = 2.54 - 1.74A + 1.54B - 4.02C + 0.33AB + 1.95AC - 1.57BC + 1.22A^2 - 0.028B^2 + 3.55C^2, \quad (5)$$

$$Y_2 = 66.57 - 0.96A + 3.78B - 3.59C + 1.45AB + 0.32AC + 0.57BC - 3.91A^2 - 3.22B^2 - 1.75C^2. \quad (6)$$

由表 3 可知,模型的  $F = 14.24, P = 0.001$ ,说明该模型有意义;失拟项不显著。决定系数  $R^2 = 0.948 2$ ,表明该模型的拟合性较好,可以用来对微波真空干燥板栗片水分含量进行分析和预测。此模型的信噪比为 13.639 可以在生产当中应用(信噪比  $> 4$  即可认为该模型可用)。由表 3 还可以看出,

表 1 试验因素水平及编码表

Table 1 Variables and experimental design levels for response surface

因素水平	A 时间/min	B 压力/kPa	C 功率/kW
-1	10	-50	2
0	12	-60	3
1	14	-70	4

表2 Box-Behnken 中心组合设计的试验结果

Table 2 Experimental results of Box-Behnken central composite design of conditions

序号	A	B	C	$Y_1/\%$	$Y_2$
1	-1	0	-1	16.43	64.45
2	0	-1	-1	6.06	60.89
3	1	1	0	4.38	61.28
4	-1	0	1	3.57	59.02
5	0	1	1	2.91	63.46
6	0	0	0	4.13	68.78
7	0	0	0	2.15	65.16
8	-1	-1	0	3.75	60.50
9	1	-1	0	1.52	55.41
10	0	1	-1	13.17	71.88
11	0	0	0	1.60	63.94
12	1	0	1	2.08	58.01
13	-1	1	0	5.29	60.57
14	0	-1	1	2.10	50.17
15	1	0	-1	7.15	62.16
16	0	0	0	2.33	69.55
17	0	0	0	2.48	65.41

影响水分含量的显著性项分别为 A、B、C、AC、 $C^2$ ，由 F 检验得到 3 个因素对水分含量方差影响大小顺序为功率 > 时间 > 压力。

由方差分析结果可知，模型中 AB、BC 无明显交互作用，AC 交互作用显著，即干燥时间和功率之间的交互作用对板栗片水分含量有显著影响，其交互作用响应曲面和等高线见图 4。由图 4 可知，一定的功率下，随着干燥时间的延长，水分含量降低，在 12 min 达到最小值后又升高；等高线呈椭圆形明显，说明二者的交互作用显著。

对白度值回归模型进行方差分析，结果见表 4。

由表 4 可知，该模型的  $F=3.690$ ， $P=0.0496$ ，表明该模型有意义；失拟项不显著。决定系数  $R^2$  为 0.826，说明该模型的拟合性较好。信噪比为 5.931，说明该模型可以在生产当中应用。由表 4 还可以看出，影响白度值的显著性项分别为 B、C、 $A^2$ ，由 F 检验得到 3 个因素对白度值方差影响大小顺序为压力 > 功率 > 时间。由方差分析结果可知，模型中 AB、AC、BC 均无明显的交互作用。

2.3.2 回归模型验证 由 Design-Expert.8.05b 软件对试验模型进行典型性分析以水分含量低，白度值高为最佳，得到板栗片微波真空干燥的最佳参数为时间 12.22 min，压力 -56.16 kPa，功率 3.16 kW，该条件下栗片的水分含量为

表3 水分含量回归模型的方差分析†

Table 3 ANOVA for response surface quadratic model of moisture content

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	259.58	9	28.84	14.24	0.001 0	**
A	24.17	1	24.17	11.93	0.010 6	*
B	18.98	1	18.98	9.37	0.018 3	*
C	129.27	1	129.27	63.80	<0.000 1	**
AB	0.43	1	0.43	0.21	0.658 0	
AC	15.17	1	15.17	7.49	0.029 1	*
BC	9.91	1	9.91	4.89	0.062 6	
$A^2$	6.29	1	6.29	3.10	0.121 5	
$B^2$	3.28E-003	1	3.28E-03	1.62E-03	0.969 0	
$C^2$	53.03	1	53.03	26.17	0.001 4	**
残差	14.18	7	2.03			
失拟	10.58	3	3.53	3.91	0.110 4	
纯误差	3.61	4	0.90			
总和	273.77	16				

† \* 表示差异显著 ( $P < 0.05$ )；\*\* 表示差异极显著 ( $P < 0.01$ )； $R^2 = 0.9482$ ； $R_{adj}^2 = 0.8816$ ； $R_{SN} = 13.6390$ 。

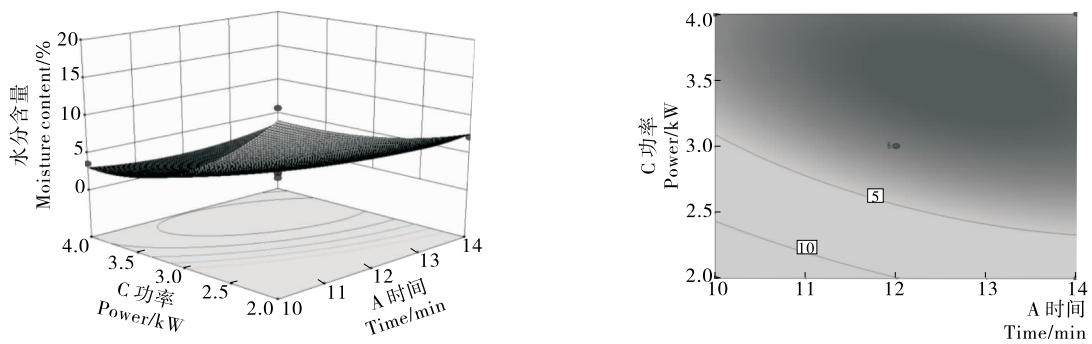


图3 时间和功率交互影响水分含量的曲面图及等高线图

Figure 3 Response surface and contour plot for the effect of time and power and their mutual interactions on moisture content

表 4 白度值回归模型的方差分析<sup>†</sup>

Table 4 ANOVA for response surface quadratic model of whiteness

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	368.181	9	40.909	3.690	0.049 6	*
A	7.358	1	7.358	0.664	0.442 1	
B	114.251	1	114.251	10.306	0.014 9	*
C	103.069	1	103.069	9.297	0.018 6	*
AB	8.417	1	8.417	0.759	0.412 4	
AC	0.410	1	0.410	0.037	0.853 0	
BC	1.317	1	1.317	0.119	0.740 5	
A <sup>2</sup>	64.357	1	64.357	5.805	0.046 8	*
B <sup>2</sup>	43.645	1	43.645	3.937	0.087 6	
C <sup>2</sup>	12.861	1	12.861	1.160	0.317 2	
残差	77.600	7	11.086			
失拟	53.592	3	17.864	2.976	0.159 7	
纯误差	24.008	4	6.002	3.690		
总和	445.781	16				

<sup>†</sup> \* 表示差异显著( $P < 0.05$ ); \*\* 表示差异极显著( $P < 0.01$ );  $R^2 = 0.826$ ;  $R_{adj}^2 = 0.602$ ;  $R_{SN} = 5.931$ 。

2.35%, 白度值为 66.875。考虑到实际操作, 将干燥条件修正为时间 12 min, 压力 -56 kPa, 功率 3 kW, 进行验证实验, 3 次平行实验得到板栗片水分含量 2.36%, 白度值 67.34, 相对偏差分别为 0.42% 和 0.69%, 证实了该模型的可靠性。

### 3 结论

板栗片在微波真空干燥过程中, 微波功率和真空度均对干燥特性有显著影响, 功率越大, 真空度越高, 干燥速率越快, 干燥过程主要分为加速和降速阶段, 恒速阶段持续时间较短。通过对板栗微波真空干燥进行参数优化, 得最佳工艺参数为时间 12 min, 压力 -56 kPa, 功率 3 kW, 可确保板栗片干燥后的品质, 而且干燥效率高、能耗低。

本研究填补了微波真空干燥技术在板栗上应用的空白, 板栗微波真空干燥过程与其他一般物料如荔枝果肉<sup>[31]</sup>、双孢菇片<sup>[32]</sup>等的干燥具有相同的特点。另外, 微波真空干燥的干燥效果与物料本身的大小、厚度、含水率等因素也有关系, 所以干燥时应控制板栗片的大小、厚度、水分含量等尽可能一致。本研究对板栗干燥工艺的应用还处于小试阶段, 有待进行大规模生产。

#### 参考文献

- [1] 魏宗峰, 邵颖, 魏明奎. 板栗深加工产品的研究现状及前景分析[J]. 农产品加工: 学刊, 2014(8): 69-71.
- [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.
- [3] 郑传祥. 板栗干燥特性及干燥机的开发研究[J]. 中国粮油学报, 2001(5): 55-58.
- [4] 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(6): 90-93.
- [5] 孟阳, 刘峰娟, 王玉红, 等. 热风干燥温度对无核白葡萄干品质的影响[J]. 食品与机械, 2015, 31(1): 204-207.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 周水琴, 应义斌. 食品干燥新技术及其应用[J]. 农机化研究, 2003(4): 150-152.
- [10] 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]. 大连海洋大学学报, 2004, 19(4): 292-296.
- [11] 常虹, 李远志, 刘清化, 等. 微波真空干燥技术及其在农产品加工中的应用[J]. 农业工程技术: 农产品加工业, 2007(7): 52-59.
- [12] ERLE U, SCHUBERT H. Combined osmotic and microwave-vacuum dehydration of apples and strawberries[J]. Journal of Food Engineering, 2001, 49(2): 193-199.
- [13] SUNJKA P S, RENNIE T J, BEAUDRY C, et al. Microwave convective and microwave-vacuum drying of cranberries[J]. Drying Technology, 2004, 22(5): 1 217-1 231.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [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.
- [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] 黄艳, 黄建立, 郑宝东. 银耳微波真空干燥特性及动力学模型[J]. 农业工程学报, 2010, 26(4): 362-367.
- [20] 曹小红. 板栗的微波干燥特性及其对于后品质的影响[J]. 食品工业科技, 2005, 26(1): 63-65.
- [21] 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.
- [22] 中华人民共和国卫生部. GB/T 5009.3—2016 食品安全国家标准 食品中水分的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 1-2.
- [23] 张茜, 肖红伟, 杨旭海. 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.
- [24] 朱德泉, 曹成茂, 朱琳, 等. 菠萝片微波真空干燥特性及工艺参数优化[J]. 粮油食品科技, 2009, 17(1): 52-59.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 赵莹婷, 王为为, 庄玮婧, 等. 莲子微波真空干燥特性及其微观结构的分形特征[J]. 现代食品科技, 2016, 32(8): 213-218.
- [28] ZHANG Jun, ZHANG Min, SHAN Liang, et al. Microwave-vacuum heating parameters for processing savory crisp bighead carp (*Hypophthalmichthys nobilis*) slices[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 79(3): 885-891.
- [29] 李辉, 林河通, 袁芳, 等. 荔枝果肉微波真空干燥特性与动力学模型[J]. 农业机械学报, 2012, 43(6): 107-112.
- [30] 李波, 芦菲, 刘本国, 等. 双孢菇片微波真空干燥特性及工艺优化[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 380-384.