

# 正交试验优化怀山药微波辅助真空冷冻干燥工艺

任广跃, 任丽影, 张伟, 段续, 罗磊, 朱文学  
(河南科技大学食品与生物工程学院, 河南 洛阳 471023)

**摘要:**为获取高品质怀山药干制品, 采用微波辅助真空冷冻干燥技术对怀山药进行干燥处理, 并对其干燥特性及干燥品质进行评价。以物料切片厚度、真空度、微波功率为试验因素, 以复水率、多糖得率及色泽明度( $L$ )值为指标, 考察干燥条件对怀山药干制品质量的影响; 采用线性加权法, 将多目标综合优化, 确定干燥工艺的最佳参数组合。结果表明: 各因素对综合指标的影响主次为: 切片厚度>真空度>微波功率。在切片厚度5 mm、真空度100 Pa、微波功率3.75 W的条件下, 微波辅助真空冷冻干燥怀山药切片达到安全含水量0.12 g/g(干基)时所需干燥时间为150 min, 干燥耗能为7 875.9 kJ/kg。同时制得的干制品品质优良, 复水性好, 色泽洁白, 多糖损失少, 其复水率、 $L$ 值和多糖得率分别为95.6%、92.90、18.97%。

**关键词:**怀山药; 微波; 真空冷冻干燥; 品质

## Optimizing Microwave-Assisted Vacuum Freeze-Drying of *Dioscorea opposita* by Orthogonal Array Design

REN Guangyue, REN Liying, ZHANG Wei, DUAN Xu, LUO Lei, ZHU Wenxue  
(College of Food and Bioengineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China)

**Abstract:** The microwave-assisted vacuum freeze-drying of *Dioscorea opposita* was executed to obtain high-quality dried products. Drying characteristics and quality traits of dried *Dioscorea opposita* were investigated. The effects of three drying conditions including sample slice thickness, vacuum degree in drying chamber and microwave power on the rehydration ration, polysaccharide yield and  $L$  value (brightness) of dried products were examined. Linear weighting method was used to analyze comprehensive multi-objective optimization to determine the optimal values of the studied parameters. The results showed that the influences of these three factors on the overall index score were in the decreasing order of slice thickness > vacuum degree > microwave power. The optimal drying conditions were slice thickness of 5 mm, degree of vacuum of 100 Pa, and microwave power of 3.75 W. The drying time to achieve safe moisture content of 0.12 g/g (dry basis) was 150 min and drying energy consumption was 7 875.9 kJ/kg. Under these conditions, the quality of the dried product was excellent with good rehydration ratio (95.6%), pure color (the value of color difference was 92.90) and high polysaccharide yield (18.97%).

**Key words:** *Dioscorea opposita*; microwave; vacuum freeze-drying; quality

中图分类号: TS201.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2015)12-0012-05

doi:10.7506/spkx1002-6630-201512003

怀山药(*Dioscorea opposita* Thunb)为薯蓣科(Dioscoreaceae)多年生缠绕草质藤本, 药用部位为根茎, 是我国著名的“四大怀药”之一<sup>[1]</sup>。药食同源的怀山药富含黏液多糖、淀粉、尿囊素、黏液蛋白、皂苷、多酚氧化酶和铁、钙、锌等多种营养素, 素有“怀参”之称<sup>[2]</sup>。由于黏液多糖、淀粉、水分含量较高, 使得怀山药在贮藏过程中易腐烂变质, 干燥是保证怀山药营养价值的重要手段<sup>[3-4]</sup>。

果蔬在干燥过程中易受温度影响, 发生Maillard反应而引起褐变, 所以干燥温度和时间是影响果蔬颜色变

化的重要因素<sup>[5]</sup>。目前, 真空冷冻干燥是公认的干燥品质最佳的脱水方式, 广泛应用于食品和制药行业<sup>[6-7]</sup>。但常规冷冻干燥存在着干燥时间长, 从而导致能源消耗大、成本高的问题<sup>[8]</sup>。微波辅助真空冷冻干燥是将高效的微波辐射加热技术和真空冷冻干燥技术相结合的一项新技术, 是在真空条件下, 利用微波辐射冻结状态下的物料, 在高频交变电磁的作用下使物料水分子发生振动和相互磨擦, 从而将电磁能转化为物料中的水分升华所需要的潜热, 从而达到脱水的目的, 具有高效低温的特点<sup>[9-12]</sup>。有研究证实, 将微波作为冷冻干燥的热源, 可以

收稿日期: 2014-10-31

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31271972)

作者简介: 任广跃(1971—), 男, 教授, 博士, 研究方向为农产品干燥技术。E-mail: guangyueyao@163.com

显著地提高冻干效率,降低能耗<sup>[13-14]</sup>。1958年Copson<sup>[15]</sup>首先进行了微波冷冻干燥实验并获得了很好的效果。1967年,Hammond<sup>[16]</sup>采用微波冻干技术对牛肉、虾和豌豆进行干燥,结果表明干燥时间分别缩短为3、3、3.75 h。Litvin等<sup>[17]</sup>采用微波冷冻联合干燥胡萝卜使得冻干时间从9.5 h缩短到3.75 h,得到很好的干燥效果,但是由于系统设备较复杂,使得实用性受到限制。Huang Luelue等<sup>[18]</sup>研究微波冷冻干燥、冷冻干燥、真空微波干燥和真空干燥4种干燥方式对重组土豆/苹果脆片品质的影响,结果表明微波真空冷冻干燥所得到的产品质量最佳。姜唯唯等<sup>[19]</sup>研究比较微波真空冷冻干燥、热板真空冷冻干燥和热风干燥3种不同干燥方法对芒果干制品品质的影响,结果表明微波真空冷冻干燥具有干燥总时间短、物料厚度大、耗能低、产量高的优势。也有学者应用真空微波和冷冻干燥组合这项技术对胡萝卜、杏鲍菇和冬枣进行研究<sup>[20-24]</sup>,结果表明微波真空干燥技术能较好地保持产品的色泽和营养品质,有效降低能耗。段续等<sup>[25]</sup>以甘蓝为原料,将微波用作冷冻干燥的热源提供升华热,缩短干燥时间;同时探索了微波在冻干过程中对物料的杀菌作用。王安建等<sup>[26]</sup>对怀山药微波真空干燥已有初步研究,认为怀山药适合微波真空干燥,同时具有杀菌消毒功效。对产品品质和复水性未见报道。本实验以铁棍怀山药为材料,以复水性、色泽和多糖得率为指标,寻求最佳工艺参数,研究微波真空冷冻干燥怀山药的干燥特性及干燥品质,为怀山药切片干燥方法的选择提供理论依据和生产指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

新鲜铁棍怀山药为河南焦作怀庆铁棍山药,2013年10月采收,在0~4℃冷库贮藏2个月,购于河南温县,选择个体完整、粗细均匀、无机械损伤、肉质洁白的铁棍山药。

无硫复合护色液:由0.02 g/100 mL L-半胱氨酸、1.4 g/100 mL 柠檬酸、0.016 g/100 mL VC及2.5 g/100 mL NaCl的护色剂复合而成<sup>[27]</sup>。

葡萄糖标准储备溶液:精密称取在105℃干燥至质量恒定的葡萄糖标准品1.008 g,加水溶解,并定容至100 mL混匀,置4℃冰箱中保存备用。

硫酸溶液:取10 mL浓硫酸加入到80 mL左右水中,混匀,冷却后稀释至100 mL。

80%乙醇溶液、5%苯酚溶液、石油乙醚、三氯甲烷、正丁醇等均为分析纯。

### 1.2 仪器与设备

YHW-3S微波真空冷冻干燥机 南京亚泰微波能

研究所;102-2型电热鼓风干燥箱 北京科伟永兴仪器有限公司;X-rite Color I5色差计 美国爱色丽公司;UV754N型紫外-可见分光光度计、JA-2003N型电子天平 上海佑科仪器仪表有限公司;80-2型离心沉淀机 江苏金坛市中大仪器厂;RE52CS-1旋转蒸发器 上海亚荣生化仪器厂。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 护色处理

将新鲜怀山药清洗、去皮切片后在上述护色液中浸泡3 h护色,沥干表面水分备用。

#### 1.3.2 干燥处理

进行微波辅助真空冷冻干燥实验,首先启动微波真空冷冻设备中制冷机,使制冷温度降至-30℃,分别取厚度为3、5、7 mm怀山药切片300 g,放入微波干燥仓内,利用光纤测定物料中心温度。启动真空泵,使真空度降至设定值90、100、120 Pa时进行控制。待物料表面和中心温度降至-15℃以下,启动微波系统,调节阳极电流强度来控制微波功率。物料干燥至干基含水量为0.4 g/g时,采用间歇式微波加热10 min,间歇2 min,直至干燥到安全含水量0.12 g/g(干基)。利用单因素试验和L<sub>9</sub>(3<sup>4</sup>)正交试验考察物料厚度、真空度及微波功率对怀山药干燥特性及品质的影响。

#### 1.3.3 怀山药干基含水量测定

依据GB 5009.3—2010《食品中水分的测定》,直接干燥法测定怀山药含水量。干物质质量采用常压干燥法测定。设定干燥箱温度为105℃,称取一定质量的怀山药,放入干燥箱除湿干燥,待其质量不再发生变化后干燥结束。以 $\omega$ 表示干基含水量,每个实验做3个平行取平均值,按照式(1)计算:

$$\omega / (\text{g/g}) = \frac{m - m_d}{m_d} \quad (1)$$

式中: $\omega$ 为干基含水量/(g/g); $m$ 为样品质量/g; $m_d$ 为干物质质量/g。

#### 1.3.4 怀山药干制品复水率测定

精确称取微波辅助真空冷冻干燥后所得的怀山药片5.000 g测定复水性能。将称取的怀山药干制品分别快速放在盛有60℃、100 mL蒸馏水的三角锥形瓶中,然后放置在60℃恒温水浴锅中。2 h后快速取出,在室温条件下沥干表面水分,称质量。复水率的计算见公式(2)<sup>[28]</sup>。每个实验取3个平行样,以平均值计算。

$$R_r / \% = \frac{m_f - m_g}{m_g} \times 100 \quad (2)$$

式中: $R_r$ 为复水率/%; $m_f$ 为干制品复水后沥干的质量/g; $m_g$ 为脱水怀山药干制品质量/g。

#### 1.3.5 色差测定

根据CIE(国际发光照委员会)均匀色空间理论<sup>[29]</sup>,

利用X-riteI5色差计测定样品的明度(L)值(以新鲜怀山药为标准样品),选择6 mm孔径测量。干燥后的怀山药切片利用研钵粉碎,混合均匀进行测量。每个实验取3个平行样,取平均值。

### 1.3.6 多糖提取及其得率测定

采用参考文献[30]水提醇沉法对怀山药多糖进行提取,苯酚-硫酸比色法测定多糖含量。多糖得率按式(3)进行计算:

$$\varepsilon/\% = \frac{m_2}{m_1} \times 100 \quad (3)$$

式中: $\varepsilon$ 为多糖得率/%; $m_2$ 为提取的多糖含量/g; $m_1$ 为所测样品的质量/g。

### 1.3.7 干燥能耗计算

干燥能耗以每干燥1 kg怀山药片的能耗计算<sup>[31]</sup>,采用单向数字电表对每次实验的电耗记录,取平均耗电量,单位为kJ/kg。

### 1.3.8 综合评分

$L_9(3^4)$ 正交试验以复水率、色泽、多糖得率为指标,对所得的指标数据进行归一化处理<sup>[32]</sup>,消除各指标的量纲,使各指标处于同一数量级上,设 $Y_{jmax}$ 对应100分, $Y_{jmin}$ 对应0分,按照式(4)中计算各指标观测值的评分值 $Y'_{ij}$ :

$$Y'_{ij} = \frac{Y_{ij} - Y_{jmin}}{Y_{jmax} - Y_{jmin}} \times 100 \quad (4)$$

式中: $Y_{ij}$ 为第*i*行第*j*列试验点的观测值; $Y_{jmin}$ 为第*j*列中试验点观测值的最小值; $Y_{jmax}$ 为第*j*列中试验点观测值的最大值。

对3个试验指标进行加权分配,作为药食同源的怀山药,其干制品首先应具有高的药用性能、营养价值和复水性能,其次考虑其外观色泽,为此采用综合加权评分法,对各指标进行加权,根据各指标的重要程度设定复水率、多糖得率、 $L$ 值的加权值 $w_i$ 分别为 $w_1=0.4$ 、 $w_2=0.4$ 、 $w_3=0.2$ 且 $w_1+w_2+w_3=1$ ;对指标按加权综合评分公式(4)进行综合评分。即计算加权综合评分值 $Y=0.4Y_1+0.4Y_2+0.2Y_3$ 。

### 1.3.9 正交试验设计

为了进一步确定最佳怀山药切片微波真空冷冻干燥工艺参数,以怀山药干制品的复水率、多糖得率、 $L$ 值为指标,正交试验因素水平表如表1所示。

表1 正交试验因素水平表

Table 1 Factors and levels used in orthogonal array design

| 水平 | 因素       |         |         |
|----|----------|---------|---------|
|    | A切片厚度/mm | B真空度/Pa | C微波功率/W |
| 1  | 3        | 100     | 2.2     |
| 2  | 5        | 110     | 3.75    |
| 3  | 7        | 120     | 5.4     |

## 1.4 统计方法

每次设定3个平行样,取平均值。采用Origin 5.0和DPS(ver. 8.05)数据处理软件对数据进行处理和方差分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 微波真空冷冻干燥对怀山药切片干燥特性的影响

#### 2.1.1 真空度对怀山药微波真空冷冻干燥的影响

在切片厚度5 mm、微波功率3.75 W条件下,分别设定真空度为90、100、120 Pa,对怀山药进行微波真空冷冻干燥,考察真空度对怀山药切片干燥的影响。怀山药切片干基含水量随真空度的变化规律曲线如图1所示。

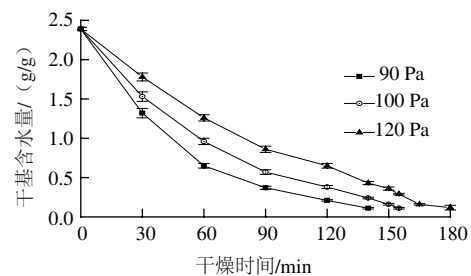


图1 不同真空度条件下微波真空冷冻干燥曲线

Fig.1 Microwave vacuum freeze-drying curves under different vacuum degrees

从图1可以看出,真空度对怀山药的干燥速率有显著影响,真空度越高,达到安全含水量的时间则越短,怀山药的干燥速率越快。这是因为随着真空的升高,冻结后的产品在密闭的真空容器中,其冰晶易升华成水蒸气逸出而使产品脱水干燥。开始阶段干燥是将水以冰晶的形式除去,因此其温度和压力都必须控制在产品共熔点以下,才不至使冰晶融化。但随着干燥过程的进行,由于吸附水吸附能量高,需要提供足够的能量;同时能量过高又易于使产品过热或者变性。因此,在保证品质的前提下,为了使解吸出来的水蒸气有足够的动力逸出产品,干燥箱内低真空度使物料内外部蒸汽压差增大,增加了物料内部水分向外扩散的动力。考虑到微波干燥仓内真空度过低(压力过高)状态下,容易使物料内部骨架和冰晶出现崩解和熔化导致产品品质下降。并且在真空条件下,气体分子易被电场电离产生等离子体,发生电晕放电现象,这样不仅会消耗微波能、破坏谐振腔中电磁场分布的均匀性还可能会产生较大的微波反射,从而缩短磁控管使用寿命<sup>[4]</sup>。在试验中100 Pa和120 Pa条件下表面平整,而真空度为90 Pa条件下,怀山药表面有轻微裂痕。因此,选择真空度为100~120 Pa,做进一步正交试验。

#### 2.1.2 微波功率对怀山药微波真空冷冻干燥的影响

在切片厚度5 mm、真空度100 Pa条件下,调节阳极

电流强度, 设定微波功率分别为2.2、3.75、5.4 W, 对怀山药进行微波辅助真空冷冻干燥, 考察微波功率对怀山药切片干燥的影响。怀山药切片干基含水量随微波功率的变化规律曲线如图2所示。

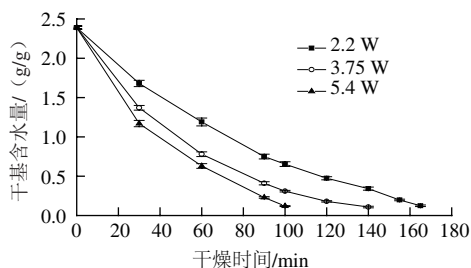


图2 不同微波功率条件下微波真空冷冻干燥曲线

Fig.2 Microwave vacuum freeze-drying curves at different microwave powers

从图2可以看出, 随着微波功率的增加, 达到安全含水量的时间缩短。这是因为物料对微波的介电吸收加速了分子间相互碰撞摩擦, 使微波能转化为热能, 物料内部快速加热。在开始阶段怀山药水分含量较高, 水是极性分子, 较易受到微波作用而发热, 干燥速率较快。微波加载过大情况下, 容易导致物料升温过快, 使得冰核局部熔化, 产品质量下降。当微波功率为5.4 W时, 干燥速率最快, 但物料表面出现硬化现象。因此选择微波功率为2.2~5.4 W, 做进一步正交试验。

### 2.1.3 怀山药切片厚度对微波真空冷冻干燥的影响

在真空度100 Pa、微波功率3.75 W条件下, 分别设定切片厚度为3、5、7 mm, 对怀山药进行微波真空冷冻干燥处理, 考察物料厚度对怀山药切片干燥的影响。怀山药切片干基含水量随物料切片厚度的变化规律曲线如图3所示。

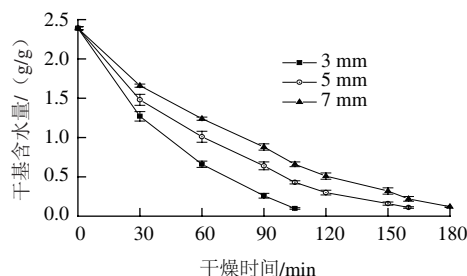


图3 不同切片厚度条件下微波真空冷冻干燥曲线

Fig.3 Microwave vacuum freeze-drying curves at different material thicknesses

从图3可以看出, 在干燥过程中, 随着物料厚度的增加, 干燥速率减慢。但是, 并非切片厚度越薄越好, 因为微波具有穿透性, 它可以直接透入物料内部, 对内外均衡加热, 从而大大缩短了干燥时间, 但是它存在一个穿透深度的问题, 相对于被干燥物料的尺寸量级, 在温度分布方面产生不能接受的不均匀性。又由于微波加

热具有响应快的特性, 微波加热的时滞极短, 加热与升温几乎是同时的。切片厚度较大时, 过快的加热速率会在物料内部形成很大的温度梯度, 因热应力过大而引起物料开裂。切片厚度较小时, 物料表面的水蒸气迅速带走, 表面也会因收缩过快而导致物料焦化, 表层组织硬化, 结壳。在实际干燥过程中, 切片厚度为3 mm时, 使得怀山药干硬、翘曲变形, 产品质量下降; 而当切片太厚时, 干燥过程中会出现怀山药片崩裂的现象。因此, 选择切片厚度为3~7 mm做进一步正交试验。

### 2.2 怀山药微波真空冷冻干燥正交试验结果

采用 $L_9(3^4)$ 正交试验表对怀山药干燥特性及品质进行研究, 利用DPS 8.05数据处理软件, 试验结果及极差分析见表2, 方差检验见表3。

表2  $L_9(3^4)$  正交试验结果与极差分析

Table 2 Orthogonal array design  $L_9(3^4)$  with experimental and range analysis

| 试验号              | A切片厚度   | B真空度    | C微波功率   | 空列      | $Y_1$ 复水率/% | $Y_2$ 多糖得率/% | $Y_3$ L值 | $Y$ 综合评分 |
|------------------|---------|---------|---------|---------|-------------|--------------|----------|----------|
| 1                | 1       | 1       | 1       | 1       | 81.9        | 10.18        | 79.87    | 52.806   |
| 2                | 1       | 2       | 2       | 2       | 73.3        | 11.38        | 76.21    | 49.114   |
| 3                | 1       | 3       | 3       | 3       | 57.6        | 9.21         | 80.27    | 42.778   |
| 4                | 2       | 1       | 3       | 2       | 96.1        | 19.18        | 92.83    | 64.678   |
| 5                | 2       | 2       | 1       | 3       | 80.8        | 12.48        | 82.68    | 53.848   |
| 6                | 2       | 3       | 2       | 1       | 66.3        | 12.06        | 74.87    | 46.318   |
| 7                | 3       | 1       | 2       | 3       | 49.4        | 17.32        | 90.85    | 44.858   |
| 8                | 3       | 2       | 3       | 1       | 36.5        | 10.89        | 80.85    | 35.126   |
| 9                | 3       | 3       | 1       | 2       | 52.9        | 9.72         | 73.87    | 39.822   |
| $K_1$            | 144.698 | 162.342 | 134.250 | 146.476 |             |              |          |          |
| $K_2$            | 164.844 | 138.088 | 153.614 | 140.29  |             |              |          |          |
| $K_3$            | 119.806 | 128.918 | 141.484 | 142.582 |             |              |          |          |
| $k_1$            | 48.233  | 54.114  | 44.750  | 48.825  |             |              |          |          |
| $k_2$            | 54.948  | 46.029  | 51.205  | 46.763  |             |              |          |          |
| $k_3$            | 39.935  | 42.973  | 47.161  | 47.527  |             |              |          |          |
| 极差R              | 15.013  | 11.141  | 6.455   | 2.062   |             |              |          |          |
| 因素主次 $A>B>C$     |         |         |         |         |             |              |          |          |
| 较优搭配 $A_2B_1C_2$ |         |         |         |         |             |              |          |          |

表3 正交试验方差分析表

Table 3 Analysis of variance of overall index score

| 方差来源  | 平方和    | 自由度 | 均方     | F值     | 显著性水平         |
|-------|--------|-----|--------|--------|---------------|
| A切片厚度 | 339.32 | 2   | 169.66 | 52.040 | $\alpha=0.05$ |
| B真空度  | 198.83 | 2   | 99.42  | 30.494 | $\alpha=0.05$ |
| C微波功率 | 63.83  | 2   | 31.91  | 9.789  | $\alpha=0.1$  |
| 误差    | 6.52   | 2   | 3.26   |        |               |
| 总和    | 6.52   | 8   |        |        |               |

注:  $F_{0.01(2,2)} = 99.01$ ,  $F_{0.05(2,2)} = 19$ ,  $F_{0.1(2,2)} = 9$ 。

由表2、3可知, 各因素对综合指标影响显著且影响主次为切片厚度>真空度>微波功率, 怀山药微波真空冷冻干燥最佳工艺参数为 $A_2B_1C_2$ , 即切片厚度5 mm、真空度100 Pa、微波功率3.75 W, 此条件下, 实际测定复水率为95.6%, 多糖得率为18.97%, L值为92.90, 干燥时间为150 min。干燥300 g怀山药片, 实际干燥总耗能为8.506 kW·h, 干燥耗能为7 875.9 kJ/kg。

### 3 结 论

采用连续微波辅助真空冷冻干燥处理使怀山药切片干燥至0.4 g/g(干基)之后,再采用间歇式微波加热对怀山药切片进行干燥,各因素对综合指标影响主次为切片厚度>真空度>微波功率;获取的最佳工艺参数为真空度100 Pa、切片厚度5 mm、微波功率3.75 W。此条件下,且干燥时间为150 min,干燥耗能为7 875.9 kJ/kg,制得的干制品复水率为95.6%,多糖得率为18.97%,*L*值为92.90。

任广跃等<sup>[33]</sup>对怀山药热风、微波及真空干燥的实验研究,结果表明在不同干燥方法中干燥速率差异较大,其干燥速率、多糖得率和复水率以微波干燥最高,热风干燥最差;但是对于感官评定指标微波干燥最差,真空干燥最好。热风干燥是较常规的传统干制方法,其优点是物料处理量大,设备成本及操作费用低,但由于干燥时间长,干燥温度高,易造成产品的品质差。微波干燥与传统干燥方式相比,具有干燥时间短、热效率高的优点。但物料局部温度过高现象时有发生,导致产品品质下降。本实验利用微波真空冷冻干燥时,水分不经过液态而直接升华,无机盐等营养素不发生溶质迁移而不会导致物料收缩或硬化,物料在冻结状态下,实现脱水干燥。制得干制品组织结构疏松在复水性、色泽、质量等方面优良。因此,微波辅助真空冷冻干燥技术适合怀山药等富含热敏性活性成分高品质物料的干燥。

### 参考文献:

- [1] 张重义, 谢彩侠, 黄晓书. 怀山药道地产区与非道地产区药材质量比较[J]. 现代中药研究与实践, 2003, 17(1): 19-21.
- [2] 周玥, 郭华, 周洁. 铁棍怀山药中主要营养成分的研究[J]. 中国食物与营养, 2011, 17(3): 69-71.
- [3] 任广跃, 化春光, 段续. 鲜切怀山药片微波干燥特性及品质研究[J]. 食品科学, 2010, 31(22): 203-206.
- [4] 化春光. 微波真空干燥对怀山药片品质的影响[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2010.
- [5] MASKAN M. Microwave/air and microwave finish drying of banana[J]. Journal of Food Engineering, 2000, 44(2): 71-78.
- [6] ORAK H H, AKTAS T, YAGAR H, et al. Effects of hot air and freeze drying methods on antioxidant activity, colour and some nutritional characteristics of strawberry tree (*Arbutus unedo* L.) fruit[J]. Food Science and Technology International, 2012, 18(4): 391-402.
- [7] 宫元娟, 王博, 林静, 等. 香菇冷冻干燥工艺参数的试验研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 226-229.
- [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] DROUZAS E, SCHUBERT H. Microwave application in vacuum drying of fruits[J]. Journal of Food Engineering, 1996, 28(2): 203-209.
- [10] BONDARUK J, MARKOWSKI M, BŁASZCZAK W. Effect of drying conditions on the quality of vacuum-microwave dried potato cubes[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 81(2): 306-312.
- [11] 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.
- [12] WANG Rui, ZHANG Min, MUJUMDAR A S. Effect of salt and sucrose content on dielectric properties and microwave freeze drying behavior of re-structured potato slices[J]. Journal of Food Engineering, 2011, 106(4): 290-297.
- [13] TAO Zhi, WU Hongwei, CHEN Guohua, et al. Numerical simulation of conjugate heat and mass transfer process within cylindrical porous media with cylindrical dielectric cores in microwave freeze-drying[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48(2): 561-572.
- [14] DUAN Xu, ZHANG Min, MUJUMDAR A S, et al. Microwave freeze drying of sea cucumber (*Stichopus japonicus*)[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 96(4): 491-497.
- [15] COPSON D A. Microwave sublimation of foods[J]. Food Technology, 1958, 12: 270.
- [16] HAMMOND L H. Economic evaluation of u hf dielectric vs radiant heating for freeze-drying[J]. Food Technology, 1967, 21: 735.
- [17] LITVIN S, MANNHEIM C H, MILTZ J. Dehydration of carrots by a combination of freeze drying, microwave heating and air or vacuum drying[J]. Journal of Food Engineering, 1998, 36(1): 103-111.
- [18] HUANG Luelue, ZHANG Min, MUJUMDAR A S, et al. Comparison of four drying methods for re-structured mixed potato with apple chips[J]. Journal of Food Engineering, 2011, 103(3): 279-284.
- [19] 姜唯唯, 刘刚, 张晓喻, 等. 微波真空冷冻干燥对芒果干制品品质特性的影响[J]. 食品科学, 2012, 33(18): 49-52.
- [20] 王海鸥, 胡志超, 屠康. 真空冷却预处理在微波冻干胡萝卜片中的应用[J]. 农业工程学报, 2011, 27(7): 358-363.
- [21] 钱革兰, 张琦, 崔政伟. 真空微波和冷冻干燥组合降低胡萝卜片的干燥能耗[J]. 农业工程学报, 2011, 27(6): 387-392.
- [22] CUI Zhengwei, LI Chunyang, SONG Chunfang, et al. Combined microwave-vacuum and freeze drying of carrot and apple chips[J]. Drying Technology, 2008, 26(12): 1517-1523.
- [23] 陈健凯, 林河通, 林艺芬, 等. 基于品质和能耗的杏鲍菇微波真空干燥工艺参数优化[J]. 农业工程学报, 2014, 30(3): 277-284.
- [24] 曹有福, 韩清华, 李树君, 等. 微波真空冷冻干燥装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(7): 105-108.
- [25] 段续, 张慈. 甘蓝微波冷冻干燥工艺与杀菌特性[J]. 食品与生物技术学报, 2007, 26(5): 20-24.
- [26] 王安建, 黄纪念, 王玉川. 微波真空冻干怀山药生产工艺的研究[J]. 食品工业, 2007, 28(5): 35-36.
- [27] 陈艳珍, 任广跃, 张仲欣. 怀山药多酚氧化酶特性及其无硫护色研究[J]. 中国食品添加剂, 2009(5): 107-112.
- [28] 庞文燕, 王金庆, 姚志勇, 等. 不同真空压力对冰温干燥罗非鱼片品质的影响[J]. 食品科学, 2013, 34(21): 5-9. doi: 10.7506/spkx1002-6630-201321002.
- [29] NASTAJ J F, WITLIEWICZ K. Mathematical modeling of the primary and secondary vacuum freeze drying of random solids at microwave heating[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009, 52(21/22): 4796-4806.
- [30] 丁玲. 山药多糖的研究[D]. 沈阳: 辽宁中医药大学, 2009.
- [31] 邓宇, 郑先哲. 蕨菜微波真空干燥特性和品质试验研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(5): 253-257.
- [32] 张仲欣, 杜双奎. 食品实验设计与数据处理[M]. 郑州: 郑州大学出版社, 2011.
- [33] 任广跃, 陈艳珍, 张仲欣, 等. 怀山药热风、微波及真空干燥的实验研究[J]. 食品科技, 2010, 35(7): 111-115.