

### 3种干燥方式对山药片干燥动力学和品质的影响

孟建升<sup>1</sup>, 蒋俊春<sup>1</sup>, 郑志安<sup>2</sup>, 邓利珍<sup>2</sup>, 王军<sup>2</sup>, 薛令阳<sup>2</sup>, 韩知利<sup>1</sup>, 王辉<sup>2</sup>, 肖红伟<sup>2\*</sup>

1. 商丘市食品药品检验检测中心, 河南 商丘 476001

2. 中国农业大学工学院, 北京 100083

**摘要:** **目的** 为选择适宜山药片的干燥技术及工艺, 将中短波红外干燥、真空脉动干燥、气体射流冲击干燥3种干燥技术用于山药片的干燥, 研究分析了不同干燥方式下的山药片干燥动力学和品质。 **方法** 运用3种干燥方法对同一切片厚度为5 mm的山药片进行干燥, 研究其水分比、干燥速率随干燥时间的动态变化规律, 分析3种干燥方式下的山药片干燥动力学; 并对干燥时间、干燥后的色泽、复水比、浸出物、尿囊素含量等指标进行评价。 **结果** 山药片在3种干燥技术下均为降速干燥, 其中气体射流冲击干燥时间最短, 当干燥温度为70 °C、风速为15 m/s时, 干燥时间为120 min; 真空脉动干燥、中短波红外干燥、气体射流冲击干燥3种干燥方式的水分有效扩散系数分别为 $7.52 \times 10^{-10}$ 、 $1.19 \times 10^{-9}$ 、 $1.30 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s; 基于复水比、明亮度、绿红值、蓝黄值、干燥时间、浸出物、尿囊素含量7项指标对3种干燥技术进行了综合评价, 中短波红外干燥、真空脉动干燥和气体射流冲击干燥的山药片综合评分分别为0.29、0.59、0.70, 气体射流冲击干燥的山药片综合评价最优。 **结论** 在实验参数范围内, 3种干燥方式相比, 气体射流冲击干燥最适宜于山药片的干燥, 干燥时间最短、品质最佳, 该研究为探索山药的适宜干燥技术和工艺提供了理论依据。

**关键词:** 山药片; 干燥动力学; 中短波红外干燥; 气体射流冲击干燥; 真空脉动干燥

**中图分类号:** R283.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2670(2019)11-2575-08

**DOI:** 10.7501/j.issn.0253-2670.2019.11.011

### Effects of three drying technologies on drying kinetics and quality attributes of yam slices

MENG Jian-sheng<sup>1</sup>, JIANG Jun-chun<sup>1</sup>, ZHENG Zhi-an<sup>2</sup>, DENG Li-zhen<sup>2</sup>, WANG Jun<sup>2</sup>, XUE Ling-yang<sup>2</sup>, HAN Zhi-li<sup>1</sup>, WANG Hui<sup>2</sup>, XIAO Hong-wei<sup>2</sup>

1. Center of Inspection and Detection, Shangqiu Food and Drug Control, Shangqiu 476001, China

2. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

**Abstract: Objective** In order to explore suitable drying technology for yam slices, the effects of three different drying methods, namely medium and short infrared wave drying, air impingement drying, pulsed vacuum drying, on drying kinetics and quality attributes of yam slices were investigated. **Methods** The moisture ratio, drying rate curves along with the change of drying time and relationship between dry basis moisture content and drying rate of yam slices were studied under three drying methods. Additionally, the effects of the three drying technologies on color parameters ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ), rehydration ratio, allantoin and extract contents were investigated. **Results** All drying process of the three drying methods for yam slices belonged to the falling rate period without constant drying stage, and the shortest drying time was only 120 min obtained under air impingement drying temperature of 70 °C, air velocity of 15 m/s. The effective moisture diffusivities were  $7.52 \times 10^{-10}$ ,  $1.19 \times 10^{-9}$  and  $1.30 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s for pulsed vacuum drying, medium and short infrared wave drying and air impingement drying, respectively. The three drying methods were comprehensively evaluated based on seven indexes including rehydration ratio, drying time, extract and allantoin content, etc. The comprehensive scores of medium and short infrared wave drying, pulsed vacuum drying and air impingement drying were 0.29, 0.59, and 0.70, respectively, which indicated that air impingement drying obtained the highest score. **Conclusion** Comprehensive evaluation results showed that the best drying method for yam slices drying is air impingement drying and the air impingement drying at 70 °C and 9 m/s were

收稿日期: 2019-02-25

基金项目: 农业部现代农业产业体系中中药材加工机械化(CARS-21); 国家重点研发计划项目(2017YFD0400905)

作者简介: 孟建升, 男, 副主任药师, 研究方向为中药材干燥技术与装备、中药材质量控制。E-mail: 18258284@qq.com

\*通信作者 肖红伟, 男, 副教授, 博士生导师, 主要从事农产品干燥技术与装备研究。E-mail: xhwcaugxy@163.com

proposed as the most favorable drying conditions for yam slices. This study provides a theoretical basis for the exploration of suitable drying technology and drying conditions for yam slices dehydration.

**Key words:** yam slices; drying kinetics; medium and short infrared wave drying; air impingement drying; pulsed vacuum drying

山药为薯蓣科薯蓣属植物薯蓣 *Dioscorea opposita* Thunb. 的地下根茎, 它既是常用的中药材, 被收录于历版《中国药典》<sup>[1]</sup>, 也是卫生部首批公布的“药食同源”的作物之一<sup>[2]</sup>; 其地下根茎是主要的食用器官, 是当前国际上最为重要的十大块根(茎)类食用植物之一<sup>[3]</sup>; 山药又是一种常见的蔬菜, 因其糯香可口的风味口感和特殊的营养价值而深受人们的喜爱。山药具有养胃补脾、生津益肺、涩精补肾等功效<sup>[1]</sup>。山药主含淀粉、蛋白质、赖氨酸、谷氨酸等多种营养成分及多糖、黏蛋白、胆碱、尿囊素、多巴胺、甾醇类等多种生物活性成分和 Zn、Fe、Mn、Cu、Se 等微量元素<sup>[4-7]</sup>。现代研究发现山药具有调脾胃、降血糖、调血脂、调节免疫、促进细胞生长、加快创伤愈合等药理作用<sup>[6-11]</sup>。用于治疗脾虚食少、久泻不止、肺虚喘咳、肾虚遗精、尿频、虚热消渴等疾病<sup>[3]</sup>。近年来我国山药的种植面积和产量逐渐增加, 目前全国山药种植面积已经突破 25 万公顷、年产量突破 500 万吨, 形成东北、西北、华北、华中和华南 5 个大的种植区, 其中河南、山东、江苏、河北、广西 5 个主产区常年种植面积均在 2 万公顷以上<sup>[12]</sup>。

新鲜山药含水量高达 70% 以上, 收获后由于其含水量高且皮薄, 易损伤, 长时间贮存会腐烂变质。我国每年因腐烂而损失的怀山药占相当高的比例<sup>[12]</sup>。干燥脱水是山药深加工的重要方式, 可以延长其销售期、降低贮运成本。目前, 山药的干燥加工方法有自然晾晒、热风干燥、真空冻干、微波干燥、红外干燥等<sup>[13-17]</sup>。自然晾晒成本虽低但干燥时间长且受天气影响较大; 热风干燥易引起变色、造成有效成分损失等; 真空冻干和微波干燥加工成本较高<sup>[18]</sup>。中短波红外干燥技术、气体射流冲击干燥技术和真空脉动干燥技术是新的干燥加工技术, 研究表明 3 种干燥技术具有干燥效率高、产品品质好等优点<sup>[19-23]</sup>, 已应用于茯苓、西洋参等中药材的干燥, 但鲜见 3 种干燥技术用于山药干燥加工的报道。

为筛选出适宜山药的干燥加工技术和工艺, 本研究将中短波红外干燥、真空脉动干燥、气体射流冲击干燥技术用于山药的干燥, 研究分析 3 种干燥方法对山药干燥时间及干燥后的色泽参数、复水比、

浸出物、尿囊素等品质指标的影响, 为完善山药片的干燥加工方法提供理论依据。

## 1 仪器与材料

中短波红外干燥机, 江苏泰州圣泰红外科技有限公司, 红外加热管功率: 0~2 kW, 由主体装置(离心风机、红外加热管)及温度自动调节系统组成。气体射流冲击干燥机, 中国农业大学工学院农产品加工技术与装备实验室自制, 其主要由气体射流冲击主体装置(射流冲击回风管道、加热管、风机、进风管道、干燥室等)及温湿度控制和采集系统组成。温度控制系统由 FUZZY-PID (Proportion integration differentiation, PID) 自编程序控制, 温度控制精度为  $\pm 0.3$  °C, 以 ASC100 型 ABB 变频器控制风速。真空脉动干燥机, 中国农业大学工学院农产品加工技术与装备实验室自制, 其主要由真空系统(水循环式真空泵、真空管路、冷却装置、干燥室等)、加热系统(碳纤维红外板, 温度传感器, 循环水路等)和控制系统(触摸屏、单片机、压力传感器、温度传感器等) 3 部分构成。控制精度为  $\pm 0.1$  °C。SQC-1 型切片机, 哈尔滨瑞华厨房设备厂; YP 型电子天平, 上海精密科学仪器有限公司, 精度 0.1 g; AR-3130 型电子天平, 上海奥豪斯仪器有限公司, 精度 0.001 g; AUW-220D 型电子天平, 日本岛津公司, 精度 0.01 mg; FW80 型高速万能粉碎机, 北京中兴伟业仪器有限公司; SB800DTD 型超声波清洗机, 宁波新芝生物科技股份有限公司; SMY2000SF 型色差仪, 北京盛名扬科技开发有限公司; Agilent-1260 型高效液相色谱仪, 美国 Agilent 公司, 上海月旭 Ultimate AQ-C<sub>18</sub> (250 mm×4.6 mm, 5 μm) 色谱柱。尿囊素对照品, 中国食品药品检定研究院, 批号 111501-00202, 质量分数 100%。

新鲜山药购自河南省商丘市虞城县店集乡惠楼村, 经商丘市食品药品检验检测中心王正波主任中药师鉴定为薯蓣科薯蓣属植物薯蓣 *Dioscorea opposita* Thunb. 的新鲜根茎。挑选表皮无机械损伤、无腐烂的山药, 所用物料的初始湿基含水率为  $(75.05 \pm 2.05)$  %, 长度  $(55.0 \pm 3.0)$  cm, 平均直径  $(2.50 \pm 0.25)$  cm, 单根质量  $(400 \pm 10)$  g。实验前将山药置于  $(4 \pm 1)$  °C, 相对湿度为 90% 的冰

箱中冷藏保存。

## 2 方法

### 2.1 山药的干燥

参考山药干燥的相关报道<sup>[11-16]</sup>及预试验的较优结果, 确定实验参数如表 1 所示。

表 1 实验设计和参数

Table 1 Design for experiments with run conditions included

干燥技术	实验参数
气体射流冲击干燥	温度 70 °C, 风速 15 m·s <sup>-1</sup>
中短波红外干燥	温度 70 °C, 风速 15 m·s <sup>-1</sup>
真空脉动干燥	温度 70 °C, 脉动比 5 : 2

实验前选取无机械损伤、无腐烂的山药, 用清水清洗干净, 去皮切片, 切片厚度为 5 mm。将其单层平铺于不锈钢料盘上, 料质量 100 g 左右。按表 1 的参数进行实验, 干燥开始以后, 每当一个真空时间完成时称量物料的质量, 中短波红外干燥和气体射流冲击干燥间隔 20 min 称量物料的质量, 干燥结束湿基含水率控制在约 10%, 每组实验重复 3 次, 取平均值。将干燥完成的样品封存于聚乙烯袋内, 密封, 然后放入干燥器中, 以备测量其他相关品质参数。

### 2.2 山药干燥参数的计算

山药干燥过程中的干燥曲线以水分比(moisture ratio, MR)表示<sup>[17]</sup>。

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

$M_t$  为干燥到任意  $t$  时刻下的干基含水率,  $M_0$  为山药片的初始干基含水率

干燥速率 (drying rate, DR)<sup>[24]</sup>和干基含水率 (moisture content on dry basis,  $M_t$ )<sup>[25]</sup>分别按照公式计算。

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

DR 为干燥时间  $t_1$ 、 $t_2$  之间的干燥速率,  $M_{t_1}$ 、 $M_{t_2}$  分别为干燥时间  $t_1$ 、 $t_2$  时的干基含水率

$$M_t = (W_t - G) / G \quad (3)$$

$W_t$  为  $t$  时刻山药片的总质量,  $G$  为干物质质量

可用费克第 2 定律计算干燥过程中水分有效扩散规律<sup>[26]</sup>。

$$MR = M_t / M_0 \approx 8 / \pi^2 \exp(-\pi^2 t D_{eff} / H^2) \quad (4)$$

$D_{eff}$  为山药片气体射流冲击干燥下水分有效扩散系数,  $H$  为山药片的厚度,  $t$  表示干燥时间

对公式(4)两边同时取自然对数, 得到公式(5)。

$$\ln MR = \ln(8 / \pi^2) - \pi^2 t D_{eff} / H^2 \quad (5)$$

由公式(5)可知, 在干燥过程中, 山药片的干燥水分比的自然对数  $\ln MR$  与干燥时间  $t$  呈线性相关, 因此可以通过计算出直线的斜率  $k$ , 得出  $k$  与  $D_{eff}$  的关系如式(6)所示。

$$D_{eff} = -kH^2 / \pi^2 \quad (6)$$

### 2.3 色泽的测定

将干燥后山药片用粉碎机粉碎, 使用 SMY2000 S 型色差仪依据 CIELAB 表色系统测定  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  值。 $L^*$  为明亮度指数, 其范围是 0 (黑色) ~ 100 (白色),  $L^*$  越大, 说明山药的明亮度越高;  $a^*$  表示绿红值指数, 其范围是 -60 (纯绿色) ~ +60 (纯红色),  $b^*$  表示蓝黄值指数, 变化范围为 -60 (纯蓝色) ~ +60 (纯黄色)。测定完成后对处理组和原料总色泽差异值  $\Delta E$  进行评价, 按照公式 7~10 进行计算<sup>[27]</sup>。

$$\Delta E = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2} \quad (7)$$

$$\Delta L^* = L^* - L_0^* \quad (8)$$

$$\Delta a^* = a^* - a_0^* \quad (9)$$

$$\Delta b^* = b^* - b_0^* \quad (10)$$

$\Delta E$  为气体射流冲击干燥处理山药片与干燥前山药片的色泽差异值,  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  为气体射流冲击干燥处理山药片的色泽参数值,  $L_0^*$ 、 $a_0^*$ 、 $b_0^*$  为干燥前山药片的色泽参数值

实验时于自然光下进行颜色的测定, 实验重复 3 次。

### 2.4 山药片的复水特性

取 3 组干燥好的山药片, 每组准确称取 2 g, 放入 200 mL 70 °C 去离子水中, 30 min 后取出, 用吸水纸拭干表面水分并称定质量, 复水比 (RR) 按照公式 (11)<sup>[28]</sup> 计算。

$$RR = W_w / W_d \quad (11)$$

$W_w$  和  $W_d$  分别为复水后和复水前山药片的质量

### 2.5 山药片浸出物的测定

按照《中国药典》2015 年版一部山药浸出物检查项下冷浸法进行测定, 以水为溶剂, 测定水溶性浸出物质量分数。

### 2.6 山药中尿囊素含量的测定<sup>[29]</sup>

**2.6.1 对照品溶液的制备** 取尿囊素对照品约 5 mg, 精密称定, 置 50 mL 量瓶中, 加水适量, 超声使完全溶解后, 加水至刻度, 摇匀。精密量取 10 mL 于 100 mL 量瓶中, 加水至刻度, 摇匀, 即得。

**2.6.2 供试品溶液的制备** 取不同干燥条件下处理的山药片, 粉碎制成粉末 (过 40 目筛), 精确称定 0.05 g, 置 10 mL 量瓶中, 加水 1.0 mL 使山药粉充分湿润, 超声 10 min 后加甲醇适量, 继续超声 10

min, 加甲醇至刻度, 摇匀, 放置 1 h 后转移至离心管中, 4 000 r/min 高速离心 5 min, 取上清液过 0.45 μm 微孔滤膜, 滤液即为供试品溶液。

**2.6.3 色谱条件** UV 检测器, 以甲醇-水 (5:95) 为流动相; 体积流量为 0.5 mL/min; 检测波长为 224 nm; 柱温 30 °C; 进样量 10 μL。在该色谱条件下, 3 种干燥方式下尿囊素色谱峰理论塔板数均大于 15 000。

### 2.7 综合评价方法

为使数据具有统一性, 需对评价指标进行归一化。正向指标 (RR、明亮度  $L^*$ 、浸出物、尿囊素含量) 和负向指标 (绿红值  $a^*$ 、蓝黄值  $b^*$ 、干燥时间  $t$ ) 的归一化公式分别按公式 (12) 和 (13) 进行计算<sup>[30]</sup>。

$$y_i = (x_i - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min}) \quad (12)$$

$$y_i = (x_{\max} - x_i) / (x_{\max} - x_{\min}) \quad (13)$$

$y_i$  为归一值,  $x_i$  为指标实际值,  $x_{\max}$  和  $x_{\min}$  分别为指标最大值和最小值

按照公式 (12) 和 (13) 进行加权得到干燥条件的综合评分  $S$ 。

$$S = y_1l_1 + y_2l_2 + y_3l_3 + y_4l_4 + y_5l_5 + y_6l_6 + y_7l_7 \quad (14)$$

$y_1$ 、 $y_2$ 、 $y_3$ 、 $y_4$ 、 $y_5$ 、 $y_6$ 、 $y_7$  分别为  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ 、浸出物、尿囊素、 $t$ 、RR 归一化后的结果,  $l_1$ 、 $l_2$ 、 $l_3$ 、 $l_4$ 、 $l_5$ 、 $l_6$ 、 $l_7$  分别对应其权重

在保证干燥品质  $L^*$ 、RR、浸出物、尿囊素良好的条件下, 使得  $t$ 、 $a^*$  和  $b^*$  减小。对上述 7 个指标进行加权分配。

### 2.8 数据处理方法

采用 Microsoft Excel 2013 软件和 SPSS 20.0 软件对不同方法干燥的山药样品各指标测定结果进行处理、分析, 显著差异水平为 0.05。

## 3 结果与分析

### 3.1 不同干燥技术对山药片干燥特性的影响

**3.1.1 不同干燥技术对山药片干燥曲线的影响** 中短波红外干燥、气体射流冲击干燥、真空脉动干燥 3 种干燥技术对山药片 MR 随干燥时间的变化曲线见图 1。由图 1 中可知, 随着干燥时间的延长, 3 种干燥方式下山药片的 MR 均呈指数形式下降, 气体射流冲击干燥、中短波红外干燥和真空脉动干燥用时分别为 120、140、190 min, 由此可见, 真空脉动干燥过程最慢。相同温度下, 真空脉动干燥比气体射流冲击干燥和中短波红外干燥分别延长了 58.3% 和 35.7%。

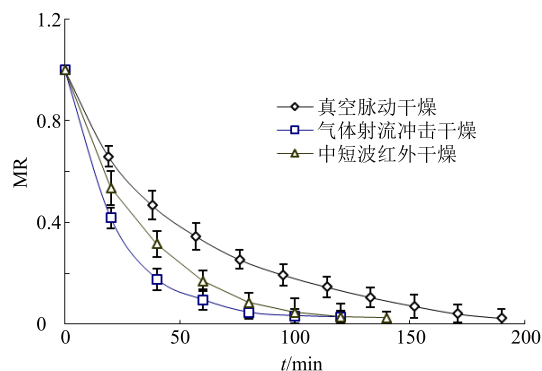


图 1 不同干燥方式下山药片干燥曲线

Fig. 1 Drying curves of yam slices at different drying technologies

相同干燥温度下, 真空脉动干燥用时最长, 可能原因为山药和电热板接触式传热, 传热效率低, 并且由于在干燥过程中, 随着山药 MR 的降低, 山药片逐渐收缩、变形, 与电热板的接触面积逐渐变小, 从而使后期干燥时间变长。气体射流冲击干燥技术通过将高压热气流通过喷嘴喷出, 直接冲击山药片表面而带走水分, 具有高传热传质系数的特点。中短波红外干燥技术在加热山药过程中, 能够穿透山药片直接与水分耦合, 使山药片温度迅速升高, 利于水分进一步外迁, 加热能力强, 所以后两者技术相对真空脉动干燥技术能够获得较短的加热时间。这与毕金峰等<sup>[19]</sup>的研究结论一致。

**3.1.2 3 种干燥方式对山药片 DR 的影响** 3 种干燥方式下, 山药片 DR 与干基含水率的关系曲线如图 2 所示。3 种干燥方式下, 山药片的干燥过程均无明显恒速干燥阶段, 整个干燥过程均为降速干燥。气体射流冲击干燥速率大于其他 2 种干燥设备, 解释了达到相同目标含水率时气体射流冲击干燥所用时间较其他 2 种干燥设备短。这与肖红伟<sup>[20]</sup>和钱婧

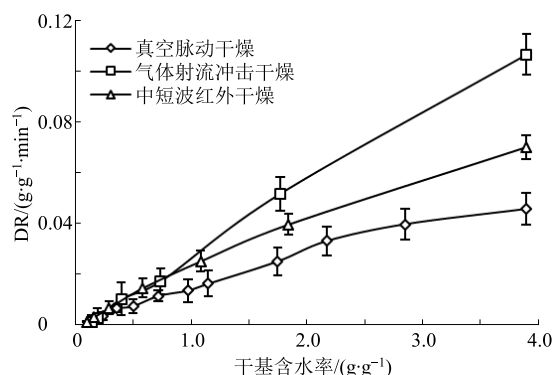


图 2 不同干燥方式下山药片 DR 随干基含水率变化曲线图  
Fig. 2 Drying rate curves of yam slices at different drying technologies

雅等<sup>[21]</sup>的研究结论一致。

**3.1.3 3 种干燥方式对山药片水分有效扩散系数的影响** 有效扩散系数是物料在一定干燥条件下脱水性能的反映,是干燥工艺优化的重要参数之一,可以较好地表述水分在物料干燥过程中的散失情况。由图 2 可知,山药片的整个干燥过程没有恒速干燥段,整个干燥过程属于降速干燥,这表明内部水分

扩散控制其整个过程,所以可以使用费克第 2 定律来描述干燥过程中水分的扩散规律,由线性回归计算出其水分有效扩散系数如表 2 所示。由表 2 可知, $D_{eff}$  由大到小依次为气体射流冲击干燥、中短波红外干燥和真空脉动干燥,其大小分别是  $1.30 \times 10^{-9}$ 、 $1.19 \times 10^{-9}$ 、 $7.52 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ,这与水分扩散越慢,干燥时间越长的规律相一致。

表 2 不同干燥方式下山药片水分有效扩散系数

Table 2 Effective moisture diffusion coefficients of yam slices at different drying technologies

干燥方式	线性回归公式	$r^2$	$D_{eff}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$
真空脉动干燥	$\ln MR = -2.96 \times 10^{-4} t + 0.012 0$	0.989 7	$7.52 \times 10^{-10}$
中短波红外干燥	$\ln MR = -4.68 \times 10^{-4} t - 0.082 6$	0.986 6	$1.19 \times 10^{-9}$
气体射流冲击干燥	$\ln MR = -5.12 \times 10^{-4} t - 0.351 7$	0.946 5	$1.30 \times 10^{-9}$

**3.2 不同干燥方式对山药片色泽的影响**

由表 3 可知,3 种干燥方式下干燥得到的山药片的  $L^*$  值均显著低于鲜样,这可能与物料本身的性质有关,实验采用的物料为河南虞城惠楼山药,又称小红皮,表皮有红色斑点,去皮可见红色斑点处山药肉质为淡红色,但其余部分粉碎后呈乳白色,所以鲜样测定  $L^*$  值、 $a^*$  值及  $b^*$  值均较大。气体射流冲击干燥  $\Delta E$  变化最小,表明该干燥方式下物料色泽变化最接近鲜样。3 种干燥方式下得到的山药片对比图片如图 3 所示,通过肉眼观察也可以看出,3 种方式干燥的山药片均未有褐变现象发生,这可

能与该品种有关。由表 3 可知,3 种干燥方式下中短波红外干燥山药片  $\Delta E$  变化最大,其次为真空脉动干燥,气体射流冲击干燥  $\Delta E$  变化最小,其大小分别为 18.84、16.42、15.21,表明气体射流冲击干燥样品与鲜样最为接近。气体射流冲击干燥山药片颜色较真空脉动干燥样品白,但中部开裂较多,可能原因与风速较高有关。中短波红外干燥得到的山药片呈暗红色,色泽较差,可能与中短波红外具有穿透性,对山药的组织结构有破坏作用,组织结构破坏后,糖与氨基酸蛋白质接触增加,美拉德反应较为剧烈。

表 3 3 种干燥方式下山药片的色泽变化

Table 3 Effects of three drying technologies on color parameters of yam slices

干燥方式	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$\Delta E$
鲜样	$89.67 \pm 1.14^a$	$-1.14 \pm 0.13^a$	$9.82 \pm 0.46^a$	$0.00 \pm 0.00^d$
中短波红外干燥	$71.01 \pm 0.55^d$	$1.12 \pm 0.08^b$	$8.46 \pm 0.02^b$	$18.84 \pm 0.12^a$
气体射流冲击干燥	$75.36 \pm 0.57^b$	$0.27 \pm 0.07^c$	$4.90 \pm 0.11^d$	$15.21 \pm 0.11^c$
真空脉动干燥	$73.62 \pm 0.68^c$	$-1.36 \pm 0.08^a$	$6.59 \pm 0.10^c$	$16.42 \pm 0.10^b$

同列不同字母表示处理间有显著性差异 ( $P < 0.05$ ),下同

There is a significant difference between different letters in the same column ( $P < 0.05$ ), same as below

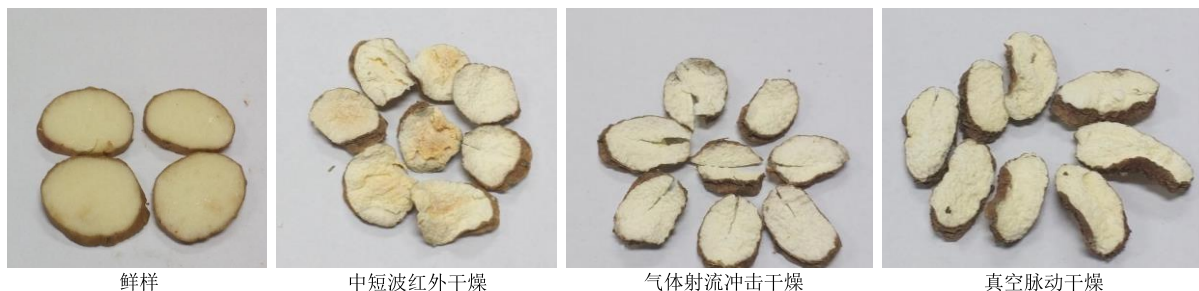


图 3 不种干燥方式下山药片的图片

Fig. 3 Pictures of yam slices at different drying technologies

### 3.3 3 种干燥方式对山药片干燥后 RR 的影响

复水能力是山药制干品质的一项重要评价指标,复水能力保留越好,则说明山药干制品质量越高。3 种干燥方式下山药片的 RR 如表 4 所示。由表 4 可知,干燥方式对山药片的 RR 有显著影响,真空脉动干燥的山药复水性最好,其次是气体射流冲击干燥,中短波红外干燥最差,RR 分别为 2.91、2.66、2.28。3 种干燥方式干燥后的山药均能在较短时间内复水,复水后的山药质地较软,说明 3 种干燥方式对山药的组织结构破坏均较小。

表 4 3 种干燥方式下山药片的 RR、浸出物、尿囊素变化  
Table 4 Rehydration ratio, extract and allantoin content of yam slices at three drying technologies

干燥方式	RR	浸出物/ (mg·g <sup>-1</sup> )	尿囊素/ (mg·g <sup>-1</sup> )
鲜样	—	14.80±0.87 <sup>a</sup>	0.85±0.02 <sup>a</sup>
中短波红外干燥	2.28±0.14 <sup>c</sup>	10.95±0.43 <sup>c</sup>	0.60±0.03 <sup>b</sup>
气体射流冲击干燥	2.66±0.10 <sup>b</sup>	11.37±0.55 <sup>bc</sup>	0.59±0.02 <sup>b</sup>
真空脉动干燥	2.91±0.08 <sup>a</sup>	12.43±0.54 <sup>b</sup>	0.62±0.04 <sup>b</sup>

产品的复水能力取决于物料细胞和结构的破坏程度。物料在干燥过程中,其内部会发生不可逆转的细胞破坏、错位,导致细胞完整性的丧失,毛细管收缩,组织结构塌陷而变得致密,从而降低亲水性能,无法完全实现再水化。造成这种现象的可能原因是真空脉动干燥后的山药片能较好地保持其原来的空隙,且分布均匀,疏松的组织结构加速了山药片干制品的渗透能力,故复水性强。山药片经中短波红外干燥和气体射流冲击干燥后,组织空隙变小,分布不均匀,结构被破坏,渗透性降低,致使复水性变弱。这与聂莹等<sup>[22]</sup>运用热风干燥、红外干燥、真空干燥、真空冷冻干燥 4 种干燥方法对白灵菇干燥后品质的研究结果相似。

### 3.4 3 种干燥方式对山药片浸出物的影响

浸出物是《中国药典》2015 年版山药品种项下一个重要指标,因此选择浸出物的保存情况作为营养成分评价指标。3 种干燥方式下山药片的浸出物测定结果如表 4 所示。由表 4 可知,3 种干燥方式对山药片的浸出物有显著影响,真空脉动干燥的山药浸出物含量最高,其次是气体射流冲击干燥,中短波红外干燥的结果稍差些。表中鲜样山药浸出物测定结果为 14.80 mg/g,不同干燥方式下浸出物含量均低于新鲜山药 ( $P<0.05$ ),其中真空脉动干燥后的山药片浸出物含量能够保留 84.0%,远高于气

体射流冲击干燥和中短波红外干燥的 76.8%和 74.0%。虽然真空脉动干燥时间稍长,但在干燥过程中真空度高,物料长时间处于脉动低氧状态,与氧气接触时间最短,抑制了干燥过程耗氧反应的发生。因此,浸出物含量质量分数最高,此结论与张卫鹏等<sup>[30]</sup>的研究结论一致。

### 3.5 3 种干燥方式对山药片的尿囊素的影响

3 种干燥方式下山药片的尿囊素测定结果如表 4 所示。由表 4 可知,鲜样浸出物测定结果为 0.85 mg/g。3 种干燥方式对山药片中尿囊素的测定影响不显著,但均低于鲜样中尿囊素含量。真空脉动干燥、中短波红外干燥和气体射流冲击干燥尿囊素含量分别为 0.62、0.60、0.59 mg/g;真空脉动干燥后的山药尿囊素含量保留率最高为 72.9%,随后依次为中短波红外干燥和气体射流冲击干燥,尿囊素含量保留率分别为 70.6%和 69.4%。

### 3.6 3 种干燥方式下山药片的品质指标的评价

色泽是中药材极为重要的品质评价指标。对于消费者来说,它是对饮片品质的第一印象,直接影响到人们对饮片品质优劣的判断。作为药食同源的山药,其干制品首先应具有良好的外观色泽、商品性,同时考虑其药用价值、营养性能和复水性能。为此采用综合加权评分法,对以上指标进行加权,对明亮度  $L^*$  权重赋值为  $l_1=0.16$ ,其余 6 项指标权重赋值均为 0.14,且  $l_1+l_2+l_3+l_4+l_5+l_6+l_7=1$ 。按照公式(14)进行加权得到干燥条件的综合评分。

由表 5 评价结果可知,中短波红外干燥、真空脉动干燥和气体射流冲击干燥的山药片综合评分分别为 0.29、0.59、0.70。尽管真空脉动干燥在 RR、浸出物质量分数、尿囊素含量方面占优,但气体射流冲击干燥色泽较好、干燥时间短。因此,在实验参数范围内,气体射流冲击干燥适合山药片的干燥。

## 4 讨论

干燥是中药材深加工的重要环节,干燥过程不仅是一个物理过程,而且是一个生化反应的过程,涉及热力学、机械学、化学等学科,是一门综合性交叉学科。山药传统的干燥方法有晒干、烘干等,虽然加工成本低,但营养损失严重、品质差。为保证其色白、质粉,目前市场上多使用硫磺熏制的方法来抑制山药褐变,造成二氧化硫超标,严重危害人体健康,阻止了山药的深度开发和产业化进程。山药的现代干燥技术有热风干燥法、红外干燥法、微波干燥法等。中短波红外干燥、气体射流冲击干

表 5 不同干燥方式的测试数据及综合评价结果

Table 5 Results of determination and comprehensive evaluation at different drying technologies

干燥方式	RR		明亮度 $L^*$		绿红值 $a^*$		蓝黄值 $b^*$		干燥时间/min		浸出物/(mg·g <sup>-1</sup> )		尿囊素/(mg·g <sup>-1</sup> )		综合评分
	原始值	归一值	原始值	归一值	原始值	归一值	原始值	归一值	原始值	归一值	原始值	归一值	原始值	归一值	
中短波红外干燥	2.28	0.00	71.01	0.00	1.12	0.00	8.46	0.00	140	0.71	10.95	0.00	0.60	0.33	0.29
气体射流冲击干燥	2.66	0.60	75.36	1.00	0.27	0.34	4.90	1.00	120	1.00	11.37	0.28	0.59	0.00	0.70
真空脉动干燥	2.91	1.00	73.62	0.60	-1.36	1.00	6.59	0.53	190	0.00	12.43	1.00	0.62	1.00	0.59

燥、真空脉动干燥 3 种技术均是新型的干燥技术<sup>[21]</sup>。目前,采用中短波红外干燥、气体射流冲击干燥、真空脉动干燥 3 种技术干燥加工山药的研究较少,本实验将中短波红外干燥、气体射流冲击干燥、真空脉动干燥 3 种技术应用于山药片的干燥加工中,并比较了 3 种干燥方式下的干燥动力学曲线、水分有效扩散系数,为筛选适宜山药的干燥技术提供了理论依据。

色泽是评价中药材干制品的重要指标之一,是评判山药饮片等级的重要参数,宋《本草图经》载:“刮之白色者为上,青黑者不堪”<sup>[31]</sup>;宋《证类本草》载:“一者白且佳;一者青黑,味亦不美”<sup>[32]</sup>;传统及现代均以山药色白者为佳。复水是指干后的物料放入一定量水中吸收水分后的复原过程,复水特性能够反映干燥加工过程中物料的物理化学变化,能够间接反映出干燥对物料组织结构的破坏程度<sup>[18]</sup>。RR 与干燥预处理方法、物料特性、干燥参数等都有关系,是衡量干制品品质的指标之一。RR 高表明干燥方式对干燥物料的组织结构破坏程度小,干制品的品质较好。现代研究表明,山药生物活性多样,具有调脾胃、降血糖、抗氧化等药理作用<sup>[7]</sup>。山药的水溶性浸出物中含有水溶性多糖、皂苷类、低聚糖及多种氨基酸等。尿囊素是山药中重要的活性成分之一,可促进细胞生长、加快创伤愈合,是皮肤良好的愈合剂和抗溃疡药剂,广泛用于皮肤皴裂溃疡、鳞屑性皮肤病的治疗。尿囊素还可用作糖尿病、肝硬化及癌症治疗剂的重要成分,用于治疗骨髓炎等,是近年山药有效成分研究的热点<sup>[7]</sup>。故本实验以山药干品的色泽、RR、浸出物、尿囊素为品质指标。

惠楼山药是豫东著名传统特产,因产于河南商丘市虞城县店集乡惠楼村而得名,距今已有 400 余年的种植历史。据《虞城县志》记载:明朝万历年,惠楼山药被封为“一品山药”,成为以后历代宫廷享用的贡品。有研究报道<sup>[33]</sup>,惠楼山药中的还原糖、多糖、淀粉、蛋白质含量等均明显高于怀山药,

故本研究以惠楼山药为试验对象,具有一定的研究意义。

运用综合加权评分法对山药干燥时间及干品的色泽、RR、浸出物、尿囊素各指标进行评判,在实验范围内,中短波红外干燥、真空脉动干燥和气体射流冲击干燥的山药片综合评分分别为 0.29、0.59、0.70。因此,在实验参数范围内,气体射流冲击干燥是最适宜于山药片的干燥方法,该方法下,干燥时间最短、品质最佳。

参考文献

- [1] 中国药典 [S]. 一部. 2015.
- [2] 田元生, 闫惠霞. 药食同源话山药 [A] // 2014 中国广州第二届国际养生大会论文集 [C]. 广州: 广州中医药大学, 2014.
- [3] 黄玉仙. 山药种质资源研究 [D]. 福州: 福建农林大学, 2012.
- [4] 赵宏, 谢晓玲, 万金志, 等. 山药的化学成分及药理研究进展 [J]. 今日药学, 2009, 19(3): 49-52.
- [5] 李月仙, 黄东益, 黄小龙, 等. 山药的研究进展 [J]. 中国农学通报, 2009, 25(9): 91-96.
- [6] 孙雯雯, 窦金霞, 张琳, 等. 山药提取物联合 DC-CIK 细胞疗法对结肠癌 HT29 干细胞荷瘤裸鼠的体内抗肿瘤研究 [J]. 中草药, 2017, 48(7): 1362-1368.
- [7] 万瑾瑾, 孙萍, 刘旭海, 等. 山药组成成分的研究进展 [J]. 亚太传统医药, 2011, 7(4): 149-150.
- [8] 景娴, 江海, 杜欢欢, 等. 我国山药研究进展 [J]. 安徽农业科学, 2016, 44(15): 114-117.
- [9] 黄桂东, 钟先锋, 易军鹏. 山药的研究概况 [J]. 农产品加工学刊, 2006(7): 55-57.
- [10] 杨学梅. 山药营养保健成分及其应用前景 [J]. 当代生态农业, 2012(3/4): 131-134.
- [11] 聂桂华, 董秀华. 山药的研究概况 [J]. 中草药, 1993, 24(3): 158-160.
- [12] 聂文清. 广西山药产业发展的研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2012.
- [13] Ju H Y, Zhang Q, Mujumdar A S, et al. Hot air drying kinetics of yam slices under step change in relative humidity [J]. *Int J Food Eng*, 2016, 12(8): 783-792.
- [14] Ju H Y, EI-Mashad H, Fang X M, et al. Drying

- characteristics and modeling of yam slices under different relative humidity conditions [J]. *Drying Technol*, 2016, 34(3): 296-306.
- [15] 张雪, 马永生, 陈复生, 等. 真空微波干燥对小米、山药营养与品质特性的影响 [J]. *粮食与油脂*, 2018, 31(4): 34-38.
- [16] 李珂, 王蒙蒙, 沈晓萍. 熟化山药热风干燥工艺参数优化及数学模型研究 [J]. *食品科学*, 2008, 29(8): 363-368.
- [17] Chen X T, Li X, Mao X H, *et al.* Effects of drying processes on starch-related physicochemical properties, bioactive components and antioxidant properties of yam flours [J]. *Food Chem*, 2017, 224(1): 224-232.
- [18] Xiao H W, Bai J W, Xie L, *et al.* Thin-layer air impingement drying enhances drying rate of American ginseng (*Panax quinquefolium* L.) slices with quality attributes considered [J]. *Food Bioprod Process*, 2015, 94(2): 581-591.
- [19] 毕金峰, 周禹含, 陈芹芹, 等. 干燥方式对超微枣粉品质的影响 [J]. *中国食品学报*, 2015, 15(2): 150-156.
- [20] 肖红伟. 西洋参片的气体射流冲击干燥特性和色泽变化动力学 [D]. 北京: 中国农业大学, 2010.
- [21] 钱婧雅, 张茜, 王军, 等. 三种干燥技术对红枣脆片干燥特性和品质的影响 [J]. *农业工程学报*, 2016, 32(17): 259-265.
- [22] 聂莹, 丁洋, 李淑英, 等. 不同干燥方法对白灵菇品质的影响 [J]. *中国食物与营养*, 2014, 20(2): 48-51.
- [23] 张卫鹏, 肖红伟, 高振江, 等. 中短波红外联合气体射流干燥提高茯苓品质 [J]. *农业工程学报*, 2015, 31(10): 269-275.
- [24] Xie Y C, Gao Z J, Liu Y H, *et al.* Pulsed vacuum drying of *Rhizoma Dioscoreae* slices [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2017, 80(7): 237-249.
- [25] Xiao H W, Yao X D, Lin H, *et al.* Effect of SSB (superheated steam blanching) time and drying temperature on hot air impingement drying kinetics and quality attribute yam slices [J]. *J Food Proc Eng*, 2012, 35(3): 370-390.
- [26] Bai J W, Sun D W, Xiao H W, *et al.* Novel high-humidity hot air impingement blanching (HHAIB) pretreatment enhances drying kinetics and color attributes of seedless grapes [J]. *Innov Food Sci Emerg*, 2013, 20(4): 230-237.
- [27] Xiao H W, Gao Z J, Lin H, *et al.* Air impingement drying characteristics and quality of carrot cubes [J]. *J Food Proc Eng*, 2010, 33(5): 899-918.
- [28] 赵海燕, 方小明, 王军, 等. 乙醇浸渍对切片茄子干燥特性和品质的影响 [J]. *农业工程学报*, 2016, 32(9): 233-240.
- [29] 赵海霞, 刘伟. 硫磺熏蒸对山药中尿囊素的影响 [J]. *中草药*, 2009, 40(6): 903-904.
- [30] 张卫鹏, 高振江, 肖红伟, 等. 基于 Weibull 函数不同干燥方式下的茯苓干燥特性 [J]. *农业工程学报*, 2015, 31(5): 317-324.
- [31] 苏颂. 本草图经 [M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 1994.
- [32] 唐慎微. 证类本草 [M]. 北京: 人民卫生出版社, 1957.
- [33] 杜平. 虞城县惠楼优质山药的品质及立地条件分析 [D]. 开封: 河南大学, 2010.