

# 红外温度对超声处理红枣的干燥特性及品质影响

陈文敏<sup>1,2</sup>, 彭星星<sup>1</sup>, 孙田奎<sup>3</sup>, 董方慧<sup>1</sup>, 徐怀德<sup>1,2</sup>

(1. 西北农林科技大学食品科学与工程学院, 陕西杨凌 712100)

(2. 国家枣工程技术研究中心, 陕西清涧 718300) (3. 清涧县宏祥有限责任公司, 陕西清涧 718300)

**摘要:** 为提高红枣干燥品质, 减少干燥时间。不同温度下(50、55、60 °C)中短波红外分别干燥超声处理和未超声处理的红枣, 对比传统分段热风干燥, 研究不同干燥方法对红枣的干燥特性及品质的影响。结果表明: 比较传统分段热风干燥, 随温度增加, 中短波红外干燥未超声处理红枣的干燥时间减少 6.67~13 h, 能耗减少 7.05~13.05 kW h, 而超声处理红枣的干燥时间减少 9~13.67 h, 能耗减少 9.67~14.93 kW h。随着中短波红外干燥温度的增加, 干燥速率提高, 能耗降低。中短波红外干燥过程中, 红枣内外温度迅速达到设定温度, 表面温度高于内部温度, 水分在表皮易汽化, 干燥速度快, 褐变小, 营养成分损失少。综合评判 7 种干燥方法, 50 °C 中短波红外干燥超声处理的红枣, 干燥能耗较低, 糖酸比最高, 总维生素 C、总黄酮、总酚含量较高, 咀嚼性最好, 褐变最少, 色泽和外观质量最好, 是较好的红枣干燥方法。

**关键词:** 中短波红外干燥; 超声波处理; 红枣; 干燥特性; 品质

文章编号: 1673-9078(2015)6-224-219

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2015.6.035

## Effect of Infrared Drying Temperature on the Drying Characteristics and Quality of Jujube with Ultrasonic Pre-treatment

CHEN Wen-min<sup>1,2</sup>, PENG Xing-xing<sup>1</sup>, SUN Tian-kui<sup>3</sup>, DONG Fang-hui<sup>1</sup>, XU Huai-de<sup>1,2</sup>

(1. College of Food Science and Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

(2. Center of Jujube Engineering Technology in Shaanxi Province, Qingjian 718300, China)

(3. Qingjian Hongxiang Co. Ltd., Qingjian 718300, China)

**Abstract:** In order to improve the quality of dried jujube and reduce the drying time, medium-short wave infrared radiations at different temperatures (50, 55, and 60 °C) were utilized to dry jujubes with and without ultrasonic treatment. Compared with the traditional multi-stage air-drying, the effects of different drying methods on the drying characteristics and the quality of jujube were analyzed. The results showed that compared with the traditional multi-stage air-drying, the drying time and energy consumption for drying the jujube with no ultrasonic treatment but by medium-short wave infrared radiation were reduced to 6.67~13 h and 7.05~13.05 kW h, respectively, while the jujube subjected to ultrasonic treatment were reduced by 9~13.67 h and 9.67~14.93 kW h, respectively. With increasing medium-short wave infrared drying temperature, the drying rate increased and energy consumption decreased. During the medium-short wave infrared drying process, both the internal and external temperatures of jujube quickly reached the setted temperature, and the surface temperature was higher than the internal temperature. Moisture from the skin easily vaporized, the degree of browning was low, and small amounts of nutrients were lost. Seven kinds of drying methods were comprehensively evaluated. Compare to all the drying methods, when the jujube was dried by medium-short wave infrared radiation at 50 °C, the drying energy consumption was low, the sugar acid ratio was the highest, the contents of total vitamin C, total flavonoids, total phenols were relatively high, and chewiness, color, and appearance quality were the best, while the degree of browning was the lowest. Therefore, these conditions were identified as a good method for drying jujube.

**Key words:** medium-short wave infrared drying; ultrasonic treatment; jujube; quality; drying characteristics

收稿日期: 2014-09-14

基金项目: 陕西省难题攻关项目 (2013KTZB02-03-04)

作者简介: 陈文敏(1989-), 女, 硕士研究生, 主要从事果蔬贮藏与加工方面的研究

通讯作者: 徐怀德(1964-), 男, 教授, 研究方向为饮料加工、果品蔬菜贮藏与加工、天然产物提取

红枣(jujube)是鼠李科多年生小乔木-枣树的成熟果实,是药食同源的营养果品,含有丰富的维生素、糖、皂苷类化合物、黄酮类化合物、多糖、有机酸等,具有很高的食用价值和药用价值<sup>[1]</sup>。我国红枣种类多、种植广,产量占世界总产量 95%左右,近占 100%的国际贸易市场<sup>[2]</sup>。

采摘后的新鲜红枣含水量高,有助于微生物的滋生导致果实的霉变腐烂。因此,红枣总产量的 95%以上被制成干枣。红枣干燥中常采用的是传统分段热风干燥,但人工烘房干燥红枣受热不均,褐变严重<sup>[3]</sup>;干燥速度慢,品质差,能耗大;能源供应多为煤或秸秆,严重污染环境。红枣真空冷冻干燥耗能高,设备造价昂贵,微波干燥法易使红枣果皮褐变和裂果<sup>[4]</sup>,远红外干燥红枣时间长,导致其品质变差<sup>[5]</sup>。因此,在红枣干燥领域需要一种能缩短干燥时间,且能保证干燥物料品质的技术方法取代传统热风干燥。

中短波红外干燥是利用 1~4 μm 的红外线,基于水分吸收红外辐射的特性,使物料得以快速干燥。中短波红外线穿透力强,适合干燥较厚的物料<sup>[6]</sup>。王洪彩等<sup>[7]</sup>用中短波红外干燥香菇,干燥时间显著减少,产品品质明显优于传统热风干燥。中短波红外干燥的热效率高,加热造成的产品品质影响较小,是一种干燥时间短品质高的干燥方法。果蔬干燥前超声处理能加快干燥速率、缩短干燥时间,在水中超声波处理还可以达到清洗物料的目的。Fernandes 等<sup>[8]</sup>用超声波对香蕉进行预处理,然后进行热风干燥,干燥时间降低,品质显著提高。超声波处理、中短波红外干燥都能减少干燥时间,提高干燥品质。将两者结合,则成倍提高干燥效率,减少干燥过程中营养损失,此方法未见相关研究报道。

本论文将超声处理后中短波红外干燥技术应用于红枣干制中,研究不同干燥方式下红枣的干燥时间、能耗、糖酸比、总维生素 C、总黄酮、总酚含量、硬度、褐变、外观品质,得到较优的超声处理中短波红外干燥组合。为红枣干燥生产提供技术依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料、试剂与仪器

#### 1.1.1 材料

以清涧木枣(初始干基含水率为 92%左右)为试验材料。采自陕西省清涧县解家沟镇,选择果面全红、大小(短径约  $3.8 \times 10^{-2}$  m,长径约为  $7.5 \times 10^{-2}$  m)、形状一致的果实。

#### 1.1.2 试剂

抗坏血酸、没食子酸、芦丁、硫酸钠、氢氧化钠、硫酸、95%乙醇、磷酸、硝酸铝、葡萄糖、Folin-Ciocalteu 试剂等,均为分析纯。

#### 1.1.3 仪器

SB-500DTY 型超声波扫频清洗机,宁波新芝生物科技股份有限公司;STC 型中短波红外干燥设备,秦州圣泰科中短波红外科技有限公司;UV-mini1240 型紫外-可见分光光度计,日本岛津公司;DHG-9123A 型电热恒温鼓风干燥箱,上海精宏实验设备有限公司;JM 型数显式温度计,上海佳敏仪表有限公司;TA-XA2 型质构仪,英国 QTS 公司;WSC-S 测色色差计,上海精密科学仪器有限公司。

## 1.2 试验方法

### 1.2.1 超声处理条件设置

根据前期试验,设置超声温度 20 °C,频率 40 kHz,功率 350 W,时间 40 min。此条件下,每个处理组称取新鲜红枣 600 g,果实尽可能大小、形状一致。

### 1.2.2 干燥条件设置

传统分段热风干燥:将清洗过的红枣置于热风干燥箱中,热风 60 °C 干燥至干基含水率 66%,再热风 50 °C 干燥至干基含水率 40%<sup>[9]</sup>。中短波红外干燥:根据预实验,温度是影响红枣干燥特性和品质最主要因素。将超声处理和未超声处理的红枣分别放入红外干燥箱中干燥,温度分别设置为 50、55、60 °C,风速 4.5 m/s,在此条件下干燥至干基含水率为 40%。所有干燥方法果实尽可能一致,每隔 20 min 测定样品的质量变化。

表 1 7 种干燥方法的试验条件

Table 1 Experimental conditions of seven different drying methods

干燥方式	序号	原料是否超声处理	干燥条件
传统分段热风干燥	I	否	热风 60 °C,干燥至干基含水率 66%
	II	否	热风 50 °C,干燥至干基含水率 40%
	III	是	红外温度 50 °C
中短波红外干燥	IV	否	红外温度 55 °C
	V	是	红外温度 55 °C
	VI	否	红外温度 60 °C
	VII	是	红外温度 60 °C

### 1.2.3 主要理化指标的测定

(1) 干基含水率的计算:

$$M_t = \frac{m_t - m_g}{m_g}$$

式中,  $M_t$ -样品干至  $t$  时刻的干基含水率, kg/kg;  $m_t$ -样品干至  $t$  时刻的质量, kg;  $m_g$ -样品绝干物质的质量, kg。

(2) 干燥速率  $D_r$  的计算:

$$D_r = \frac{M_t - M_{t+\Delta t}}{\Delta t}$$

式中,  $\Delta t$ -干制间隔时间, h。

(3) 能量消耗的计算:

$$N = \frac{G}{W \times T}$$

式中,  $N$ -单位能耗除湿量, g/(kW h);  $G$ -去除水分的质量, g;  $W$ -额定输入功率, kW;  $T$ -总干燥时间, h。

(4) 内外温度测定: 参考刘晓丹<sup>[9]</sup>的方法。

(5) 色差值的测定: 用色差计测鲜枣和干燥后的枣, 明度指数  $L^*$  值 ( $L^*=0$  表示黑色;  $L^*=100$  表示白色)、彩度指数  $a^*$  (正数代表红色, 负数代表绿色) 和  $b^*$  (正数代表黄色, 负数代表蓝色)。表 2 为鲜红枣色差值<sup>[16]</sup>。每个样品重复 6 次, 取平均值, 干燥前后的色差值为:

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2}$$

式中,  $\Delta L$ 、 $\Delta a$ 、 $\Delta b$  表示干燥前后  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  值之差。

(6) 基于穿刺试验的质构分析: 对干燥后的红枣进行果皮穿刺试验, 采用 P/2 探头 (柱形探头底面直径为 2 mm), 测试条件为: 测试前、后速率均 10.00 mm/s; 穿透距离  $S=3.0$  mm; 触发力 5.0 g。选赤道附近进行果皮穿刺, 每种处理重复 15 次。图 1 为红枣穿刺试验特征曲线, 最大力  $F_1$  为果皮硬度, 探针在 1.5 s~3 s 内从已刺穿果皮到下压至表皮下 5 mm 处所感受到的平均力为果肉硬度 (图 1 中  $F_2$ - $F_3$ )。

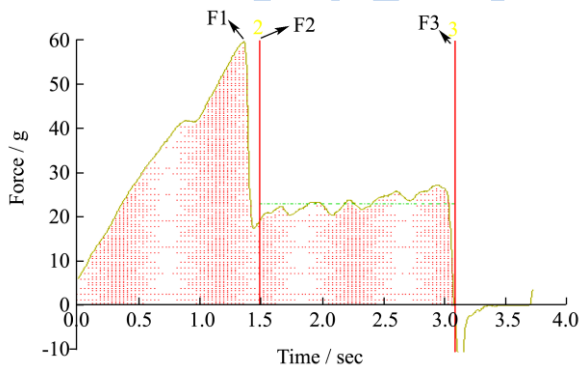


图 1 果皮穿刺试验

Fig.1 Puncture test of dried jujube peel

### 1.2.3 综合评价

用红外干燥超声处理红枣与传统分段热风干燥红枣的干燥测量值 (能耗、糖酸比、总维生素 C 含量、总酚含量、硬度、色泽变化) 比值确定最优干燥温度。能耗、硬度、色泽比值为红外干燥除以热风干燥红枣,

而糖酸比、总维生素 C 含量、总酚含量比值为热风干燥除以红外干燥红枣, 因为糖酸比、总维生素 C、总酚含量越高, 红枣品质越好。用雷达图来表示, 即图面积越小, 红枣品质越好<sup>[10]</sup>。

### 1.2.4 数据分析

用 SPSS18.0 软件进行方差分析, 并用 Duncan's 复相关试验法进行均值差异性的相关分析, 显著性水平设为  $P<0.05$ , 数据均以平均值±标准差 ( $\bar{x} \pm s$ ) 表示。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同干燥方法对红枣干燥特性的影响

#### 2.1.1 不同干燥方法下干基含水率的变化

图 2 为不同干燥方法的干燥曲线。由图可知, 传统分段热风干燥红枣至最终含水率所需时间最长 (18 h), 50、55、60 °C 红外干燥超声处理红枣至终点所用时间分别为 10.13、6.15、4.87 h, 较分段热风干燥减少了 44%、66%、73%。不同干燥方法下红枣的干基含水率下降幅度为: VII>VI>V>IV>III>II>I。

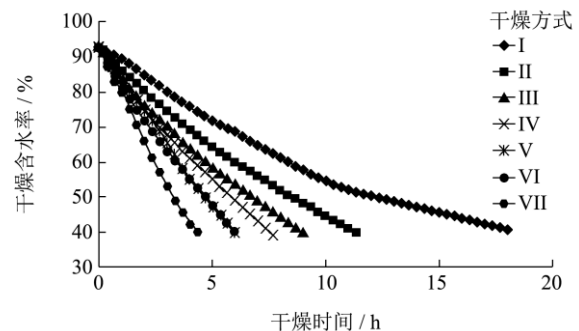


图 2 7 种干燥方法的干燥曲线

Fig.2 Drying curve for seven different drying methods

注: I-分段热风干燥; II-未超声 50 °C 红外干燥; III-超声 50 °C 红外干燥; IV-未超声 55 °C 红外干燥; V-超声 55 °C 红外干燥; VI-未超声 60 °C 红外干燥; VII-超声 60 °C 红外干燥。

从图 2 可以看出, 红外干燥过程中含水率变化速率显著大于传统分段热风干燥, 且随着干燥温度增加, 含水率变化速率越大。这是由于, 中短波红外辐射器发出的中短波红外线, 红外辐射频率与物料内部水分对红外光吸收频率相匹配, 高效率地将光能转化为热能, 且物料内部水分迁移方向和热扩散方向相同, 从而使物料得以快速干燥, 与传统干燥方法相比显著提高了红枣的干燥效率<sup>[11-12]</sup>。不同温度下, 红外干燥超声处理的红枣含水率变化速度均大于未超声处理的红枣, 这是由于超声波在媒介中产生机械振动处理物料, 使其内部结构松弛, 水分扩散通道增加, 水分转移阻力减小, 从而加快干燥速率、缩短干燥时间<sup>[13-14]</sup>。



### 2.1.2 不同干燥方法下的干燥速率变化及能耗

表2表示不同干燥方式下干燥速率变化及能耗。从总体来看,分段热风干燥的干燥速率显著低于红外干燥。热风干燥前期,温度越高,物料表面对流传质

越快,及时带走了物料表面的水分,使得干燥速率较快,但是在干燥后期即干基含水率由66 kg/kg降至40 kg/kg过程中,干燥温度降低的同时水分含量降低,蒸发面不断向物料中心转移,干燥速率迅速下降<sup>[9]</sup>。

表2 7种干燥方式对干燥速率及能耗的影响

Table 2 Drying rates and energy consumption of jujube products treated with seven different drying methods

干燥方式	干燥速率/[kg/(kg h)]×10 <sup>-3</sup>					时间与能耗		
	80~92	70~80	60~70	50~60	40~50	干燥时间/h	总能耗/(kw h)	单位能耗/[g/(kW h)]
I	41.04	38.46	36.30	24.36	16.08	18.00	19.80	8.18
II	60.93	54.76	45.16	39.18	34.80	11.33	12.75	12.71
III	79.98	62.07	58.11	47.69	45.09	9.00	10.13	15.99
IV	100.57	69.16	62.88	60.59	59.71	7.67	8.63	18.77
V	105.81	102.62	90.45	71.85	69.66	6.00	6.75	24.00
VI	105.40	93.88	81.57	76.30	73.78	6.00	6.75	24.00
VII	141.03	114.03	95.09	87.28	79.46	4.33	4.87	33.26

注: 40~50代表干基含水率从50 kg/kg降至40 kg/kg, 其他以此类推。

中短波红外干燥初期,红枣含水率高,对红外的吸收能力较强,干燥速率高,之后干燥速率逐渐降低。红外干燥超声红枣的干燥速率显著高于未超声红枣。这是由于中短波红外干燥过程中,物料水分易排出,干燥速率高,水分来不及蒸发,使红枣表面的蜡质层变厚影响随后的干燥<sup>[11-12]</sup>。而红外干燥经过超声处理的红枣时,超声处理使物料表皮产生大量裂缝且变薄,内部水分可以通过这些通道到达表面迅速蒸发,减小蜡质层的厚度。中短波红外干燥温度与干燥速率成正比,干燥速率是传统分段热风干燥1.58-4.16倍。

干燥能耗是评价干燥工艺的一个重要指标,从表2中可得,传统分段热风干燥红枣所需的能量消耗最大,单位能耗除湿量最低。红外干燥超声红枣所需的能耗低于干燥未超声红枣,且与温度成反比。中短波红外干燥能耗均低于传统分段热风干燥。由此可以看出,中短波红外干燥能更有效利用热能用于红枣的干燥,超声处理可进一步减少能耗。

### 2.1.3 不同干燥方法下内外温度的变化

表3表示不同干燥方式对红枣内外温度的影响。热风干燥过程中,热量是由物料外部向内部传导,干燥物料表面温度大于内部温度,但是红枣表皮的蜡质层抑制了里层水分的蒸发,热量聚集,内部温度高于表面温度<sup>[9]</sup>。

中短波红外干燥干燥初期,物料吸收了能量,内外温度均呈快速上升趋势,干燥速率最高。随着干燥的进行,内外温度迅速达到设定温度,物料中能够耦合红外辐射的水分减少,使红枣内外温度一直保持相对稳定<sup>[11]</sup>。红外干燥可使被加热物质内外同时加热,物料表面温度高于内部温度,水分在表皮易汽化。中短波红外干燥的红枣温度与设定温度基本一致,而传统分段热风干燥温度却显著低于设定温度,所以红外干燥应设置一个较低的温度,使红枣在干燥过程中保持较低的内外温度,避免高温引起的褐变。

表3 7种干燥方式对红枣内外温度的影响

Table 3 Effect of seven different drying methods on the internal and external temperatures of jujube products

干燥方式	表面温度/℃					内部温度/℃				
	80~92	70~80	60~70	50~60	40~50	80~92	70~80	60~70	50~60	40~50
I	45.96±1.29 <sup>c</sup>	51.38±0.85 <sup>c</sup>	48.67±1.77 <sup>d</sup>	40.75±1.54 <sup>d</sup>	42.97±0.96 <sup>d</sup>	56.15±0.62 <sup>a</sup>	61.33±1.02 <sup>a</sup>	59.85±0.45 <sup>a</sup>	51.30±0.43 <sup>b</sup>	52.78±0.84 <sup>b</sup>
II	47.22±0.69 <sup>c</sup>	52.89±1.14 <sup>c</sup>	51.78±1.07 <sup>c</sup>	50.88±0.63 <sup>c</sup>	51.37±0.32 <sup>c</sup>	43.92±0.25 <sup>c</sup>	48.76±0.88 <sup>c</sup>	49.16±0.62 <sup>d</sup>	47.69±0.65 <sup>c</sup>	48.09±0.96 <sup>c</sup>
III	46.56±1.34 <sup>c</sup>	51.76±0.98 <sup>c</sup>	52.34±0.29 <sup>c</sup>	51.21±1.55 <sup>c</sup>	52.64±0.65 <sup>c</sup>	44.34±0.43 <sup>c</sup>	49.07±0.92 <sup>c</sup>	48.11±0.57 <sup>d</sup>	49.59±0.38 <sup>c</sup>	49.71±0.57 <sup>c</sup>
IV	52.32±0.86 <sup>b</sup>	56.71±1.39 <sup>b</sup>	56.11±0.76 <sup>b</sup>	58.34±1.38 <sup>b</sup>	58.45±0.94 <sup>b</sup>	48.22±0.36 <sup>b</sup>	54.16±0.64 <sup>b</sup>	52.88±1.03 <sup>c</sup>	53.85±0.85 <sup>b</sup>	51.66±0.84 <sup>b</sup>
V	51.84±1.12 <sup>b</sup>	58.89±1.44 <sup>b</sup>	57.84±1.35 <sup>b</sup>	57.42±1.15 <sup>b</sup>	56.87±1.04 <sup>b</sup>	49.98±0.66 <sup>b</sup>	53.96±0.54 <sup>b</sup>	54.11±0.69 <sup>c</sup>	52.30±0.68 <sup>b</sup>	53.78±0.98 <sup>b</sup>
VI	54.83±1.04 <sup>a</sup>	62.94±0.87 <sup>a</sup>	61.92±0.95 <sup>a</sup>	60.76±0.73 <sup>a</sup>	61.75±1.33 <sup>a</sup>	50.93±1.03 <sup>b</sup>	59.21±1.74 <sup>a</sup>	56.43±0.77 <sup>b</sup>	56.79±0.58 <sup>a</sup>	58.45±1.01 <sup>a</sup>
VII	55.28±1.52 <sup>a</sup>	61.26±1.23 <sup>a</sup>	62.51±1.22 <sup>a</sup>	62.11±1.63 <sup>a</sup>	63.03±0.56 <sup>a</sup>	51.63±0.94 <sup>b</sup>	58.00±0.73 <sup>a</sup>	57.22±0.84 <sup>b</sup>	58.62±0.99 <sup>a</sup>	59.41±0.89 <sup>a</sup>

注: 同列不同字母表示组间有显著性差异, (p<0.05), 下表同。

## 2.2 不同干燥方法对红枣外观品质影响

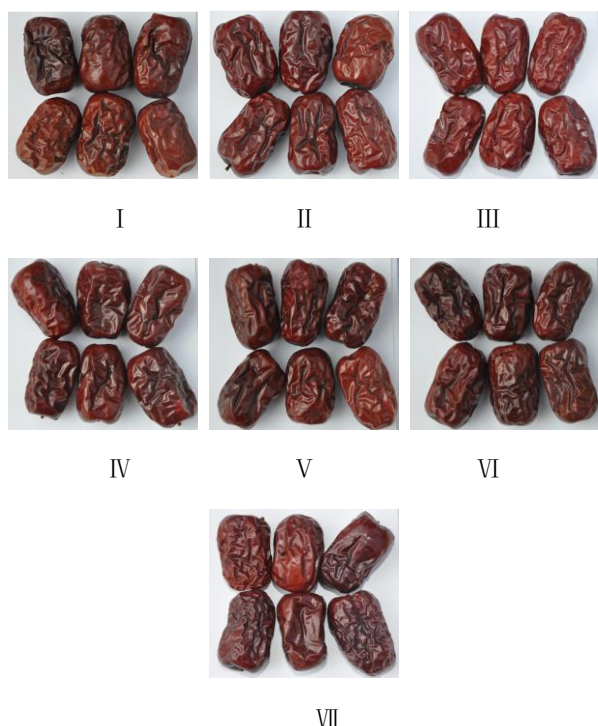


图3 不同干燥方法对红枣外观品质影响

Fig.3 Effect of different drying methods on the appearance quality of dried jujube

红枣的感官品质即色泽、形状等因素在一定程度上决定了销售市场。从图3看出，传统分段热风干燥的红枣，果实收缩较严重，果皮褐变严重，外观品质较差。从总体上说，中短波红外干燥红枣的感官品质与温度成反比，温度越高，红枣表皮褐变和皱缩越严重，破裂越多，干燥越不均匀。七种不同干燥方法中，50℃中短波红外干燥超声处理红枣的果皮基本不出现严重褐变，更符合消费者心理，颜色最鲜艳，感官品质最佳。因此，感官最好的为50℃红外干燥超声红枣。

表4 不同干燥方法对红枣色差值和质构的影响

表5 不同干燥方法对红枣品质的影响

Table 5 Effect of different drying methods on the quality of dried jujube

干燥方法	可溶性固形物/%	总糖/%	总酸度/%	糖酸比	总黄酮/(mg/100g)	总酚/(mg/100g)	总维生素 C/(mg/100g)
I	54.83±0.08 <sup>c</sup>	41.71±0.76 <sup>e</sup>	0.97±0.09 <sup>a</sup>	43.00 <sup>e</sup>	92.41±1.36 <sup>f</sup>	183.22±4.12 <sup>e</sup>	69.74±4.16 <sup>e</sup>
II	60.33±0.12 <sup>b</sup>	48.90±0.84 <sup>d</sup>	0.53±0.04 <sup>c</sup>	92.26 <sup>b</sup>	163.78±0.83 <sup>e</sup>	319.41±7.23 <sup>d</sup>	88.06±2.26 <sup>d</sup>
III	63.60±0.17 <sup>a</sup>	52.29±1.55 <sup>c</sup>	0.52±0.05 <sup>c</sup>	100.56 <sup>a</sup>	184.71±2.24 <sup>d</sup>	358.06±13.28 <sup>c</sup>	92.87±4.24 <sup>c</sup>
IV	64.83±0.17 <sup>a</sup>	57.16±1.63 <sup>b</sup>	0.68±0.09 <sup>b</sup>	84.06 <sup>c</sup>	266.45±4.26 <sup>b</sup>	396.05±14.64 <sup>a</sup>	95.98±5.32 <sup>c</sup>
V	64.43±0.17 <sup>a</sup>	59.22±1.55 <sup>a</sup>	0.69±0.05 <sup>b</sup>	85.83 <sup>c</sup>	273.43±5.32 <sup>a</sup>	400.98±13.92 <sup>a</sup>	106.17±7.43 <sup>b</sup>
VI	65.40±0.29 <sup>a</sup>	59.43±0.67 <sup>a</sup>	0.90±0.02 <sup>a</sup>	66.03 <sup>d</sup>	168.69±2.75 <sup>c</sup>	351.64±10.27 <sup>c</sup>	108.66±8.28 <sup>b</sup>
VII	66.30±0.19 <sup>a</sup>	60.65±0.43 <sup>a</sup>	0.92±0.08 <sup>a</sup>	65.92 <sup>d</sup>	190.71±2.88 <sup>d</sup>	386.18±14.07 <sup>b</sup>	114.15±6.14 <sup>a</sup>

从表5可知，红外干燥的红枣总糖与可溶性固形物含量显著高于分段热风干燥的红枣。随着红外干燥

Table 4 Effect of different drying methods on the color and texture of dried jujube

干燥方式	ΔE	果皮硬度	果肉硬度
I	3.46±0.29 <sup>c</sup>	115.17±5.02 <sup>d</sup>	58.75±2.97 <sup>c</sup>
II	2.95±0.67 <sup>c</sup>	123.43±8.55 <sup>c</sup>	65.18±5.34 <sup>b</sup>
III	2.21±0.24 <sup>d</sup>	114.13±4.33 <sup>d</sup>	56.89±2.46 <sup>c</sup>
IV	4.92±0.96 <sup>b</sup>	117.97±7.12 <sup>d</sup>	62.82±4.57 <sup>b</sup>
V	4.89±0.42 <sup>b</sup>	114.30±4.87 <sup>d</sup>	59.97±6.43 <sup>c</sup>
VI	6.21±1.27 <sup>a</sup>	155.67±9.12 <sup>a</sup>	71.63±8.22 <sup>a</sup>
VII	5.98±1.06 <sup>a</sup>	142.20±7.56 <sup>b</sup>	63.81±7.89 <sup>b</sup>

穿刺测试就是模拟人的牙齿却不受人主观意识的限制，果蔬质地是感官评价的一项重要指标，硬度越小，咀嚼性越好。由表4可知，红枣果皮硬度与果肉硬度间具有显著相关性。红外干燥超声红枣果皮、果肉硬度比未超声小。随着红外干燥温度的增加，红枣果皮、果肉硬度变大，咀嚼性变差。红枣干燥过程中，内部溶质随水分迁移至果皮，不断累积形成结晶的硬化现象。温度越大，中短波红外干燥越剧烈，干燥过程中水分气化越快，内部水分不能及时迁移到表面扩散，致使表面迅速形成干硬膜。这是中短波红外干燥的缺点，而在干燥前加入超声处理，使红枣表皮很厚的蜡质层变薄、果皮产生大量裂缝，不仅在干制前就减小了果皮厚度，且有助于干燥过程中水分的及时扩散降低硬化程度。

## 2.3 不同干燥方法对红枣的品质影响

由表4可知，50℃中短波红外干燥超声处理红枣的色差值最小。红外干燥未超声红枣色泽品质劣于超声红枣。随着红外温度的增加，色差值增大，原因是红枣温度越高，美拉德反应、焦糖化反应以及抗坏血酸氧化引起的非酶褐变程度越严重。

温度的增加，红枣的总糖与可溶性固形物含量都呈上升趋势。分段热风干燥红枣的总酸含量最高。随着红

外干燥温度的增加,总酸含量增加,这是由于较高的干燥温度,氨基酸上的氨基较多的参与美拉德反应,使红枣中氨基基团减少,总酸含量增高<sup>[15]</sup>。相同温度下,红外干燥超声与未超声红枣的总酸含量无显著差异。红外干燥红枣的糖酸比较高,口感较甜,感官品质好,消费者更易接受,而分段热风干燥的红枣糖酸比最低,仅为43.00,口感微酸。其中,50℃红外干燥超声红枣的糖酸比最高,达到100.56,口感最佳。

干燥过程会造成红枣部分水溶性维生素的破坏,其中维生素C极易损失,受温度、水分活度等影响发生降解<sup>[15]</sup>。从表5可知,分段热风干燥红枣的总维生素C含量显著低于红外干燥。随着红外干燥温度的增加,红枣总维生素C含量增加。这是由于高温下红外干燥红枣,物料内外温度高,氧化酶活性受到抑制,有利于稳定红枣的品质,且整个干燥过程时间短,有助于维生素C的保留。红枣产品中的总黄酮与总酚含量具有显著相关性。分段热风干燥红枣的总黄酮、总酚含量显著低于红外干燥。红外干燥超声红枣的总黄酮、总酚含量较高,优于未超声红枣。这是由于干燥时间越短,酚类物质氧化越少,总黄酮、总酚的破坏越少。

#### 2.4 不同干燥方法的综合评价

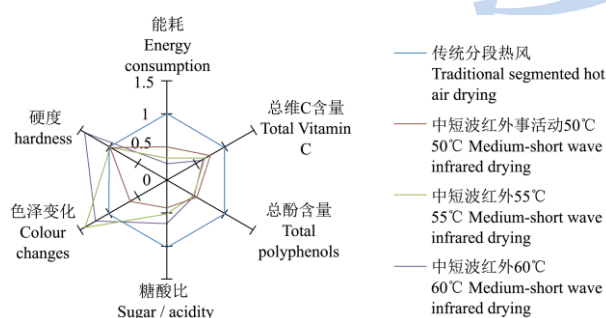


图4 不同干燥方法的综合评价

#### Fig.4 Comprehensive evaluation of different drying methods

图4为不同干燥方法的综合评价。不同温度下,红外干燥超声红枣较未超声红枣在干燥时间、产品品质等方面均具有显著优势。因此以分段热风干燥为基准,只对比50、55、60℃下红外干燥超声处理红枣,便可得最优干燥方法。从图4可得,50℃红外干燥红枣面积最小,每个指标均优于传统热风干燥,而55、60℃时红枣在硬度和色泽方面差于传统热风干燥。因此,50℃红外干燥超声处理的红枣能耗较低,糖酸比最高,总维生素C、总酚含量较高,咀嚼性最好,褐变最少,色泽值最小,是较优的红枣干燥方法。

#### 4 结论

4.1 随温度的增加,红外干燥未超声处理红枣的干燥时间较传统分段热风干燥减少6.67~13h,能耗减少7.05~13.05kW h;红外干燥超声处理红枣的干燥时间较传统干燥减少9~13.67h,能耗减少9.67~14.93kW h。随着红外干燥温度的增加,干燥速率提高,能耗降低。红外干燥过程中,红枣内外温度迅速达到设定温度,表面温度高于内部温度,水分有效扩散,干燥速度快,褐变小,营养成分损失少。

4.2 综合对比7种干燥方法,50℃红外干燥超声处理的红枣能耗较低,糖酸比最高,总维生素C、总黄酮、总酚含量较高,咀嚼性最好,褐变最少,色泽和外观质量最好,是较好的红枣干燥方法。

#### 参考文献

- [1] Fang S Z, Wang Z F, Hu X S, et al. Hot-air drying of whole fruit Chinese jujube (*Zizyphus jujube* Miller): physicochemical properties of dried products [J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2009, 44(9): 1415-1421
- [2] Gao Q, et al. Textural Characteristic, Antioxidant Activity, Sugar, Organic Acid, and Phenolic Profiles of 10 Promising Jujube [J]. *Journal of Food Science*, 2012, 77(11): 1218-1225
- [3] Nantawan T, Hasaya N. Characterization of hot air drying and microwave vacuum drying of fingerroot (*Boesenbergia pandurata*) [J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2011, 46(3): 601-607
- [4] Fang S Z, Wang Z F, Hu X S, et al. Shrinkage and quality characteristics of whole fruit of Chinese jujube (*Zizyphus jujube* Miller) in microwave drying [J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2010, 45(12): 2463-2469
- [5] D Mihoubi, S Timoumi, F Zagouba. Modeling of convective drying of carrot slices with IR heat source [J]. *Chemical Engineering and Processing*, 2009, 48: 808-815
- [6] Thanit Swasdisevi, Sakamon Devahastin, Poomjai Sa-Adcho, et al. Mathematical modeling of combined far-infrared and vacuum drying banana slice [J]. *Journal of Food Engineering*, 2009, 92: 100-106
- [7] 王洪彩,张懋,王兆进.香菇中短波红外干燥的试验[J].食品与生物技术学报,2013,32(7):698-705  
WANG Hong-cai, ZHANG Min, WANG Zhao-jin. Xianggu mushroom medium short wave infrared drying test [J]. *Journal of food and biological technology*, 2013, 32(7): 698-705
- [8] Fernandes F A N, Rodrigues S. Ultrasound as pre-treatment for drying of fruits: Dehydration of banana [J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 83(4): 1-24
- [9] 刘小丹,张淑娟,贺虎兰,等.红枣微波-热风联合干燥特性及

- 对其品质的影响[J].农业工程学报,2012,28(24):280-286
- LIU Xiao-dan, ZHANG Shu-juan, HE Hu-lan, et al. Drying characteristics and its effects on quality of jujube treated by combined microwave-hot-air drying [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(24): 280-286
- [10] Ning X, Han C. Drying characteristics and quality of taegeuk ginseng [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2013, 48(3): 477-483
- [11] Pan Z, Atungulu G. Infrared Heating for Food and Agricultural Processing [M]. USA: CRC Press Taylor and Francis Group, 2010
- [12] Ning Xiaofeng, Han Chungsu. Suitable drying model for far infrared drying of taegeuk ginseng [J]. Food Science and Biotechnology, 2012, 21(4): 1087-1094
- [13] 严小辉,余小林,胡卓炎,等.超声处理对半干型荔枝干干燥时间的影响[J].农业工程学报,2011,27(3):351-356
- YAN Xiao-hui, YU Xiao-lin, HU Zhuo-yan, et al. Effects of ultrasound pretreatment oil drying time for intermediate-dried litchi [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(3): 351-356
- [14] Ozuna César, Gómez Álvarez-Arenas Tomás, Riera Enrique, et al. Influence of material structure on air-borne ultrasonic application in drying [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2014, 21(3): 1235-1243
- [15] Xiao Hongwei, Gao Zhenjiang, Lin Hai, et al. Air impingement drying characteristics and quality of carrot cubes [J]. Journal of Food Process Engineering, 2010, 33(5): 899-918