## 超声预处理和湿度控制对香蕉干燥特性的影响

夏蓉<sup>1</sup>, 姬青华<sup>2</sup>, 周存山<sup>2</sup>, 陶汇源<sup>1</sup>, 卞晶晶<sup>1</sup>, 李雅思<sup>2</sup>

(1.镇江恒顺生物工程有限公司,镇江 212143; 2.江苏大学 食品与生物工程学院,镇江 212013)

摘要:目的 研究超声预处理和湿度控制技术对香蕉干燥特性的影响,以缩短香蕉的干燥时间、减少色泽劣变。方法 首先在超声波发生器功率为 300 W,温度为 30 ℃条件下对厚度为 (5.0±0.1) mm 的香蕉片进行单频 (20,40,60 kHz) 预处理,每个频率分 3 组,处理时间为 20,30 和 40 min,得到的最佳超声预处理时间为 30 min。再分别进行单频 (20,40,60 kHz)、双频 ((20+40),(20+60),(40+60) kHz) 和三频 ((20+40+60) kHz) 的处理,在 65 ℃条件下进行恒温热风干燥;在此基础上进行干燥介质相对湿度为 5%,10%,15%的热风干燥。结果在超声波预处理中,单频 (60 kHz)、双频 ((40+60) kHz) 和三频 ((20+40+60) kHz) 的超声波预处理对温湿度控制热风干燥速率的作用效果最佳,在同一干燥介质相对湿度条件下,干燥速率、复水率以及维生素 C含量从大到小依次为三频((20+40+60) kHz)、双频 ((40+60) kHz)、单频 (60 kHz)、空白对照组;在相同的超声波预处理条件下,干燥介质相对湿度越小,干燥速率和复水率越高,而维生素 C含量越低。结论 探索了不同相对湿度的干燥介质对超声预处理后的香蕉干燥特性的影响,为选择合适的干燥工艺提供了理论依据。

关键词:香蕉;超声波预处理;干燥介质;湿度

中图分类号:TS255.3 文献标识码:A 文章编号:1001-3563(2019)01-0040-09

**DOI**: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.01.006

# Effects of Ultrasonic Pretreatment and Humidity Control on Banana Drying Characteristics

XIA Rong<sup>1</sup>, JI Qing-hua<sup>2</sup>, ZHOU Cun-shan<sup>2</sup>, TAO Hui-yuan<sup>1</sup>, BIAN Jing-jing<sup>1</sup>, LI Ya-si<sup>2</sup>

(1.Zhenjiang Heng Shun Biological Engineering Co., Ltd., Zhenjiang 212143, China; 2.School of Food and Biological Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

ABSTRACT: The work aims to study the effect of ultrasonic pretreatment and humidity control on banana drying characteristics, in order to shorten drying time and reduce color deterioration of banana. First, the banana chips with a thickness of (5.0±0.1) mm were pretreated with single frequency (20, 40, 60 kHz) at a power of 300 W and a temperature of 30 °C. Each frequency was divided into 3 groups with treatment time of 20, 30 and 40 min, and the optimal ultrasonic pretreatment time obtained was 30 min. Then, single frequency (20, 40, 60 kHz), double frequency ((20+40), (20+60), (40+60) kHz) and triple frequency ((20+40+60) kHz) were respectively treated, and the constant temperature hot air drying was carried out at 65 °C. On this basis, hot air drying with drying media's relative humidity of 5%, 10% and 15% was carried out. In ultrasonic pretreatment, the ultrasonic pretreatment with single frequency (60 kHz), dual frequency ((40+60) kHz) and triple frequency ((20+40+60) kHz) had the best effect on the hot air drying rate under temperature and

收稿日期: 2018-09-30

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFD0400903-01,2016YFD0400705-04);江苏省科技厅资助项目(BZ2016013);镇江大利共民农财源日(AXX2016013);镇江大利共民农财源日(AXX2016013);镇江大利共民农财源日(AXX2016013);

市科技局资助项目(NY2017015);镇江市经济和信息化委员会资助项目(镇江制造 2025 领军人才计划)

作者简介:夏蓉(1970-),女,高级工程师,主要研究方向为果蔬干燥技术与装备。

通信作者:周存山(1979—),男,江苏大学教授、博导,主要研究方向为果蔬加工绿色技术集成及装备。

humidity control. Under the same relative humidity of dry medium, the order of drying rate, rehydration rate and Vc content from large to small in turn was triple frequency ((20+40+60) kHz), dual frequency ((40+60) kHz), single frequency (60 kHz) and blank control group. Under the same ultrasonic pretreatment conditions, the smaller the relative humidity of the drying medium, the higher the drying rate and the rehydration rate, and the lower the Vc content. The effects of drying media with different relative humidity on the drying characteristics of banana after ultrasonic pretreatment are explored to provide theoretical basis for selecting appropriate drying process.

KEY WORDS: banana; ultrasonic pretreatment; drying medium, humidity

香蕉被称为"新的水果之王",拥有多种对人体有益的保健功效<sup>[1]</sup>。香蕉属于跃变型果实,采摘后呼吸强度大,成熟香蕉在常温下贮藏 1~3 d 后就失去了商品价值<sup>[1-3]</sup>。除此之外,香蕉含有丰富的果胶、糖类、酶类以及酚类物质,因此不耐贮藏和加工,容易发生褐变,高温条件干燥时易产生糊化,营养物质极易被破坏,这为香蕉干燥产业化的发展带来很大干扰。由此,寻求适合香蕉大规模开发的产业化干燥技术迫在眉睫。

超声波是一种声波,有聚束、定向等特点,将超声波应用于食品工业中,可以改变食品物料内部的组织机构,不断收缩和膨胀物料,使之形成疏松的海绵状结构和水分蒸发通道,有利于后续的干燥<sup>[4]</sup>。超声预处理不仅可以加快干燥速率,缩短干燥时间,还可以节省能耗,减少产品营养物质的损失。研究发现,利用超声波对物料进行预处理,然后对其进行热风干燥,显著缩短了干燥时间<sup>[5]</sup>。代亚萍等<sup>[6]</sup>研究证明了超声波这一物理手段可显著减少处理南瓜时的色泽变化及抗坏血酸等营养物质的流失。干燥介质的相对湿度是影响干燥速率的重要因素,研究表明,降低干燥介质的相对湿度有利于加快干燥速率<sup>[7-10]</sup>。Janjai<sup>[11]</sup>等研究指出,在荔枝的薄层干燥中,干燥介

质相对湿度对干燥速率并没有显著的影响,可能是由其实验参数范围内相对湿度变化较小而引起。控制热风干燥时的温湿度还能改善干燥产品的品质。贾磊<sup>[12]</sup>等在对黎豆荚的干燥研究中发现,合适的干燥介质相对湿度可改善干燥后黎豆荚的色泽、形状和复水率。

由此,这里在香蕉片干燥工艺操作中,探索不同 频率超声波预处理对香蕉片干燥特性的影响,并研究 不同相对湿度对香蕉干燥品质的影响,以获得具有较 高品质的干燥香蕉片。文中研究旨在为香蕉的精深加 工提供理论依据,对果蔬干制品的应用开发研究提供 参考。

### 1 实验

#### 1.1 材料及仪器

主要材料:香蕉(五成熟),香蕉的含水率为(73.69±0.02)%,购于江苏大学校园超市。

主要仪器: SQP型天平,赛多利斯科学仪器(北京)有限公司;超声波清洗设备,江苏大学自制,其中单频、双频和三频超声设备见图1;温湿度控制热风干燥设备,江苏大学自制,见图2。

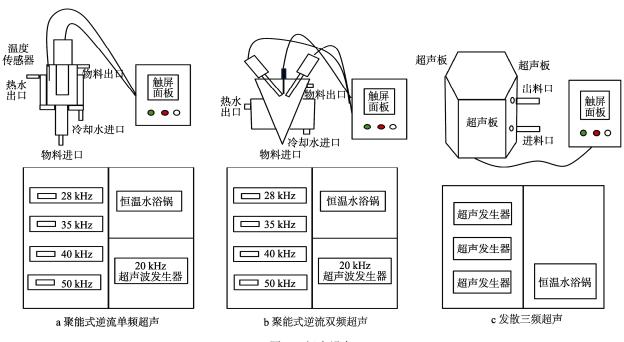


图 1 超声设备 Fig.1 Ultrasound equipment

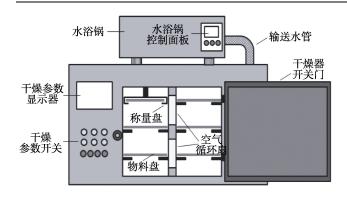


图 2 温湿度控制热风干燥机 Fig.2 Hot air dehydrator under temperature and humidity control

#### 1.2 方法

#### 1.2.1 工艺流程

文中的工艺流程为:原料选择→清洗→去皮→切片→超声预处理→温湿度控制热风干燥→成品。

#### 1.2.2 操作要点

- 1)原料选择。选择五成熟、无机械损伤的青香蕉。
  - 2)清洗。用清水充分洗涤,去除泥沙、杂质。
- 3)去皮、去络、切片。剥去香蕉外皮,将果皮 四周的丝络挑除,切成厚度为(5.0 ± 0.1) mm 的香 蕉片。
- 4)超声波预处理。将水浴锅温度设为 30 ℃,预热,待温度达到设定值,将超声波清洗设备上端的水管一头放入水浴锅内,另一头与超声波清洗设备连接,中间与泵连接,下端的水管一头与超声波清洗设备相连,另一头与水浴锅相连,上进下出,形成恒温水循环。超声波发生器的功率设置为 300 W。向超声波清洗设备内加入 2000 mL 蒸馏水,打开水泵,选择超声波作用方式,设定好超声波预处理时间,脉冲时间与间隔时间均设置为 5 s,然后把 100 g 香蕉片放入超声波清洗机中进行预处理。
- 5)湿度控制热风干燥。在65℃条件下进行不同干燥介质相对湿度条件下的热风干燥,温湿度控制热风干燥设备会自动记录物料的质量和湿基含水率。先将设备开关打开,将水浴锅预热至65℃,设定好温湿度控制热风干燥设备的温度和干燥介质的相对湿度。待温度和干燥介质相对湿度达到设定值便可将100g香蕉片放入干燥箱内进行干燥。每隔10 min 记录1次物料的质量和湿基含水率,直至物料的湿基含水率达到3%~5%便停止干燥。每组试验重复3次,取其平均值。

#### 1.2.3 单频超声处理时间

在超声波发生器功率为 300 W 和温度为 30 ℃条件下对一定量的香蕉片进行单频处理一定时间,后续

的干燥条件均相同,然后比较其干燥速率。每组试验重复3次,取其平均值,得到最优超声预处理时间。实验设计见表1。

## 表 1 单频超声处理时间对热风干燥香蕉片影响 试验的设计与参数

Tab.1 Experimental design and parameters of effects of single frequency ultrasonic treatment time on banana chips by hot air drying

	1 0	-
序号	超声波频率/kHz	超声时间/min
1	20	20
2	20	30
3	20	40
4	40	20
5	40	30
6	40	40
7	60	20
8	60	30
9	60	40

#### 1.2.4 超声波频率

在超声波发生器功率为 300 W 和温度为 30 ℃条件下对一定量的香蕉片分别进行单频、双频和三频处理,然后均在 65 ℃条件下进行温湿度控制热风干燥。设置未进行超声波预处理为空白对照组,干燥条件相同。每组试验重复 3 次,取平均值。得到单频、双频和三频的超声预处理最优频率,试验参数见表 2。

表 2 超声波频率对热风干燥香蕉片影响 试验的设计与参数

Tab.2 Experimental design and parameters of effects of ultrasonic frequency on banana chips by hot air drying

类别	试验序号	超声波频率/kHz	预处理时间/min
单频	1	未超声	30
单频	2	20	30
单频	3	40	30
单频	4	60	30
双频	5	未超声	30
双频	6	20+40	15
双频	7	20+60	15
双频	8	40+60	15
三频	9	未超声	30
三频	10	20+40+60	10

#### 1.2.5 干燥介质相对湿度

在超声波发生器功率为 300 W 和温度为 30 ℃条件下对香蕉片分别进行单频、双频和三频处理,然后分别进行干燥介质相对湿度为 5%,10%,15%的温湿度控制热风干燥,比较其干燥速率。设置未进行超

声波预处理组为空白对照,干燥条件相同,然后对其进行品质分析,包括复水率、色差和维生素 C 含量。得到香蕉超声预处理联合温湿度控制热风干燥的最优工艺参数,试验参数见表 3。

表 3 湿度控制干燥试验设计与试验参数
Tab.3 Experimental design and parameters of drying under moisture control

试验	超声波	超声时间/min	干燥介质相			
序号	频率/kHz	<u>ДЕ</u> ) - н ј јеј/ппп	对湿度/%			
1	未超声	30	5			
2	60	30	5			
3	40+60	15	5			
4	20+40+60	10	5			
5	未超声	30	10			
6	60	30	10			
7	40+60	15	10			
8	20+40+60	10	10			
9	未超声	30	15			
10	60	30	15			
11	40+60	15	15			
12	20+40+60	10	15			

#### 1.2.6 测定方法

1)水分比的计算方法 $^{[13-14]}$ 。水分比  $M_R$  的计算公式为 $^{[15-17]}$ :

$$M_{\rm R} = \frac{M_{\rm t}}{M_0} \tag{1}$$

式中:  $M_0$  为初始干基含水率;  $M_t$  为 t 时刻的干基含水率。

2)干燥速率的计算方法。干燥速率  $D_R$  的计算公式为 $^{[18-19]}$ :

$$D_{\rm R} = \frac{M_{\rm tl} - M_{\rm t2}}{t_{\rm l} - t_{\rm 2}} \tag{2}$$

式中:  $t_1$  和  $t_2$  均为干燥时间 (min);  $D_R$  为干燥过程时间为  $t_1$  和  $t_2$  时刻之间的干燥速率 (g/(g·min));  $M_{t1}$  和  $M_{t2}$  为干燥时间为  $t_1$  和  $t_2$  时刻的干基含水率。其中干基含水率的计算方法为<sup>[20]</sup>:

$$M = \frac{W}{1 - W} \tag{3}$$

式中: W 为干燥任意时刻的湿基含水率。

3)复水率的测定。称取一定质量的香蕉片放入(90±5)℃的热水中,15 min 复水后取出,放置在不锈钢丝网上沥干 8~10 min,并用吸水纸擦干香蕉片表面的水分,称量复水后香蕉片的质量。每次试验重复3次,取平均值作为结果。复水率计算公式为<sup>[21-22]</sup>.

$$R_{\rm R} = \frac{m_2}{m_1} \tag{4}$$

式中:  $R_R$  为复水率;  $m_2$  为复水后质量 (g);  $m_1$ 

为复水前质量(g)。

4)色差的测定。香蕉片整体的色差从新鲜到干燥使用色度计测量 6次(6个测量值),使用国际照明委员会的  $L^*a^*b^*$ 颜色空间来表示。色差计的  $L^*$ 表示色泽的明暗度, $L^*$ =0表示颜色最暗, $L^*$ =100表示颜色最亮, $L^*$ 值越大表明颜色越亮,褐变程度越低, $L^*$ 值越小表明颜色暗,褐变程度越高; $a^*$ 表示从红色到绿色的颜色参数; $b^*$ 表示从黄色到蓝色的颜色参数。 $\Delta E$  的计算为 $[^{23}]$ :

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$
 (5)

5)维生素 C含量的测定。依据 GB 5009.86—2016 《食品安全国家标准:食品中抗坏血酸的测定》中 2,6—二氯酚靛酚滴定法<sup>[24]</sup>进行测定。

#### 1.2.7 数据统计与分析

试验数据均由 3 次重复平行试验所得,用平均数±相对偏差(Mean±SD)的形式表示,采用 Origin 8.6 软件绘制,并采用 SPSS 20.0 统计软件进行 Anova 方差分析。

### 2 结果与讨论

## 2.1 单频超声处理时间对恒温热风干燥香 蕉片的影响

单频超声处理时间对恒温热风干燥香蕉片的影响见图 3—5,可知经过不同预处理的香蕉在干燥过程中,干燥速率均呈不断下降的趋势,基本没有恒速干燥阶段,整个干燥过程始终处于降速干燥阶段。这可能与香蕉在干燥的过程中无法提供恒定充足的水分以供蒸发有关。在 3 种频率的超声波预处理条件下,时间为 30 min 的样品的干燥速率明显优于时间为 20 和 40 min 样品的干燥速率差异不显著。由此,在后续实验中选择 30 min 作为单频超声预处理的时间。

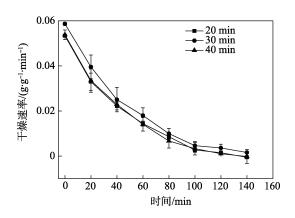


图 3 单频 20 kHz 超声处理不同时间的干燥速率 Fig.3 Drying rate under 20 kHz single-frequency ultrasonic treatment at different time

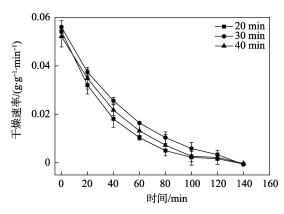


图 4 单频 40 kHz 超声处理不同时间的干燥速率 Fig.4 Drying rate under 40 kHz single-frequency ultrasonic treatment at different time

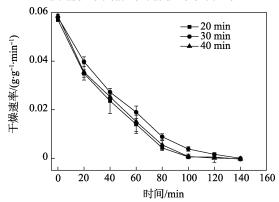


图 5 单频 60 kHz 超声处理不同时间的干燥速率 Fig.5 Drying rate under 60 kHz single-frequency ultrasonic treatment at different time

## 2.2 单频超声频率对恒温热风干燥香蕉片 的影响

单频超声波预处理香蕉片的干燥速率见图 6,可知香蕉分别经过未超声和 20,40,60 kHz 超声预处理后,通过温湿度控制热风干燥达到目标含水率所需要的时间分别约为 140,120,110,100 min。未做预处理所需干燥时间最长,超声频率越大,干燥时间越短。研究表明,超声预处理能够提高干燥效率、缩短干燥时间。

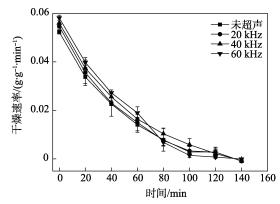


图 6 单频超声波预处理香蕉片的干燥速率 Fig.6 Drying rate of banana chips under single-frequency ultrasonic pretreatment

## 2.3 双频超声频率对恒温热风干燥香蕉片 的影响

双频超声波预处理香蕉片的干燥速率见图 7,可知香蕉未经超声处理,与分别经过(20+40),(20+60),(40+60) kHz 双频超声预处理相比,未做预处理的香蕉所需干燥时间最长,且超声频率越大,干燥时间越短。由图 7可知(40+60) kHz 为最优超声频率。

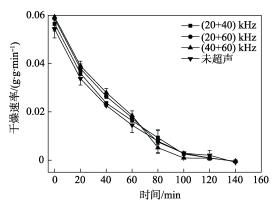


图 7 双频超声波预处理香蕉片的干燥速率 Fig.7 Drying rate of banana chips under dual-frequency ultrasonic pretreatment

### 2.4 三频超声频率对恒温热风干燥香蕉片 的影响

三频超声波预处理香蕉片的干燥速率见图 8,可知单频 60 kHz、双频(40+60)kHz 和三频(20+40+60)kHz 这 3 组样品的干燥速率明显优于空白对照组,但这 3 组间的差异不显著。

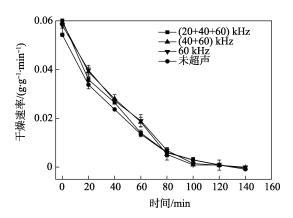


图 8 三频超声波预处理香蕉片的干燥速率 Fig.8 Drying rate of banana chips under three-frequency ultrasonic pretreatment

## 2.5 相同干燥介质相对湿度条件下不同频 率超声预处理对热风干燥速率的影响

相同干燥介质相对湿度条件下不同频率超声预处理对热风干燥速率的影响见图 9—11,可以看出干燥介质相对湿度相同的条件下,干燥速率从大到小依

次是三频(20+40+60)kHz、双频(40+60)kHz、单频60kHz、空白对照组。这可能是因为超声波频率越大,机械振动越强,更大程度地影响香蕉片的结构,促进香蕉片内部蒸发通道的形成,使其内部的水分更容易蒸发,从而加快干燥速率。

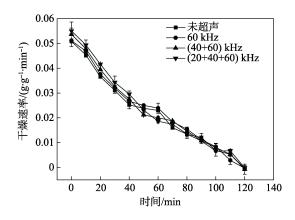


图 9 相对湿度为 5%时的干燥速率 Fig.9 Drying rate at 5% RH

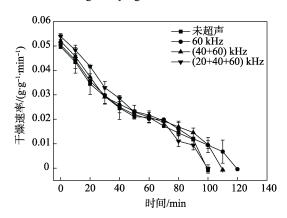


图 10 相对湿度为 10%时的干燥速率 Fig.10 Drying rate at 10% RH

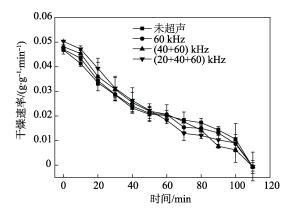


图 11 相对湿度为 15%时的干燥速率 Fig.11 Drying rate at 15% RH

# 2.6 相同预处理条件下不同干燥介质相对 湿度对香蕉片干燥速率的影响

相同预处理条件下不同干燥介质相对湿度对香

蕉片干燥速率的影响见图 12—15,可知在相同超声波预处理条件下,干燥速率随干燥介质相对湿度的减小而增大,干燥介质相对湿度为 5%时干燥速率最快。这可能是因为干燥介质相对湿度越低,物料与周围环境的水蒸气分压差值越大,根据费克第二定律及其边界条件可知,水蒸气分压差值越大则对干燥的推动力越大,从而可以加快干燥速率。

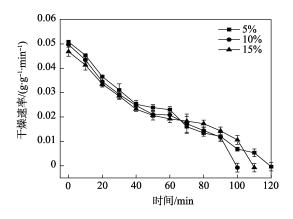


图 12 未超声组在不同相对湿度下的干燥速率 Fig.12 Drying rate of no ultrasound group at different relative humidity

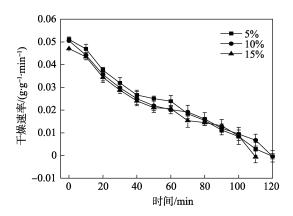


图 13 60 kHz 组在不同相对湿度下的干燥速率 Fig.13 Drying rate of 60 kHz group at different relative humidity

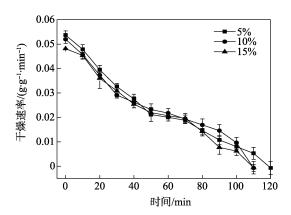


图 14 (40+60) kHz 组在不同相对湿度下的干燥速率 Fig.14 Drying rate of (40+60) kHz group at different relative humidity

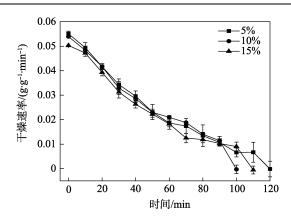


图 15 (20+40+60)kHz 组在不同相对湿度下的干燥速率 Fig.15 Drying rate of (20+40+60) kHz group at different relative humidity

## 2.7 干燥介质相对湿度对香蕉片复水率的 影响

干燥介质相对湿度对香蕉片复水率的影响见图 16 (其中不同字母表示差异性显著 (  $P \le 0.05$  ),相同字母表示差异性不显著,图 17—18 相同 )。由图 16 可以看出,干燥介质相对湿度为 15%的试验组复水率显著低于相对湿度为 5%和 10%的试验组 (  $P \le 0.05$  );随着干燥介质相对湿度逐渐变小,复水率逐渐升高;同一干燥介质相对湿度条件下,各组的复水率差异显著 (  $P \le 0.05$  ),其中,复水率从高到低依次为三频(20+40+60)kHz 超声波预处理组、双频(40+60)kHz 超声波预处理组、单频 60 kHz 超声波预处理组、空白对照组。复水率的高低主要取决于被干燥物料细胞和结构的被破坏程度。超声波频率越大,对物料的细胞和结构破坏程度越高,越容易形成蒸发通道,复水后水分更容易通过蒸发通道进入物料,因此复水率较高。复水率

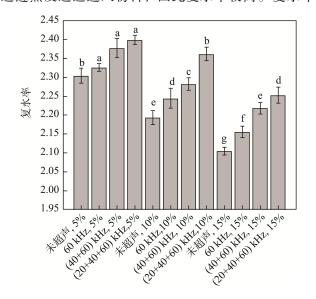


图 16 湿度控制干燥试验的复水率 Fig.16 Rehydration rate of humidity control drying experiment

还会受复水前含水率的影响,干燥介质相对湿度越高,干燥后成品的含水率就越高,因此复水率较低。

#### 2.8 干燥介质相对湿度对香蕉片色差的影响

湿度控制干燥试验的色差值见图 17。由图 17 可知,与干燥介质相对湿度高的试验组相比,干燥介质相对湿度越低的试验组的整体色差水平显著增加(P ≤ 0.05),而且,在同一干燥介质相对湿度下,各组的色差值差异十分显著(P ≤ 0.05)。其中,色差值从大到小依次为未超声组、三频(20+40+60)kHz 超声波预处理组、双频(40+60)kHz 超声波预处理组、单频 60 kHz 超声波预处理组。这可能是因为干燥介质相对湿度越低,香蕉片最终的含水率越低,颜色越偏黄;同一干燥介质相对湿度下,未进行超声波预处理的试验组色差明显高于进行过超声波预处理的试验组色差明显高于进行过超声波预处理的试验组,超声波预处理越强,干燥后香蕉片的色差值越大。

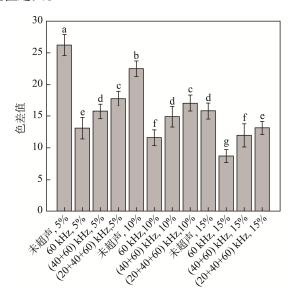


图 17 湿度控制干燥试验的色差值 Fig.17 Color difference of humidity control drying experiment

## 2.9 干燥介质相对湿度对香蕉片维生素 C 含量的影响

湿度控制干燥试验的维生素 C 含量见图 18,可知新鲜、未超声以及各个频率超声预处理后,每100g香蕉片的维生素 C含量无显著差异(P≥0.05),说明超声波预处理过程中维生素 C含量损失很小,主要损失都集中在后续的干燥过程中。分析各个干燥介质相对湿度条件下的试验组可以发现,同一干燥介质相对湿度条件下,各组的维生素 C含量差异显著(P≤0.05),其中,维生素 C含量从低到高依次为三频(20+40+60)kHz超声波预处理组、双频(40+60)kHz超声波预处理组、单频 60kHz超声波预处理组、空白对照组。这可能是因为超声波频率越高,对香蕉

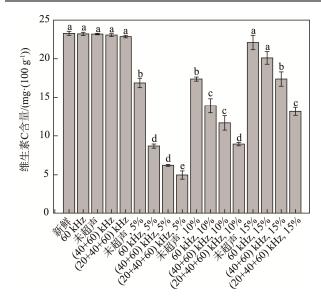


图 18 湿度控制干燥试验的维生素 C 含量 Fig.18 Vitamin C content of humidity control drying experiment

片组织结构破坏越强,造成后续干燥过程中维生素 C 含量损失较大。分析不同干燥介质相对湿度条件下干燥的试验组可以发现,干燥介质相对湿度越高,干燥后香蕉片的维生素 C 含量也越高。这可能是因为维生素 C (又称 L-抗坏血酸)是水溶性维生素,干燥介质的相对湿度越高,水分不易散失,维生素 C 得以保留,如果干燥介质相对湿度越低,香蕉中的水分会减少,而干燥过程中部分维生素 C 随着水分的蒸发而流失,从而造成干燥后的香蕉维生素 C 含量不如新鲜的香蕉。

## 3 结语

- 1)在不同的超声时间和频率下对香蕉片进行预处理,结果表明,单频超声波预处理中,30 min 超声时间的干燥速率最快,因此后续试验单频处理时间均为30 min。为方便比较单频、双频和三频的超声效果,双频超声15 min,三频超声10 min。单频处理中,60 kHz 超声波预处理对热风干燥速率的作用效果最佳;双频超声波预处理中,(40+60)kHz 超声波预处理对热风干燥速率的作用效果最佳;三频超声波预处理中,(20+40+60)kHz 超声波预处理组的干燥速率明显优于空白对照组。虽然三频(20+40+60)kHz、双频(40+60)kHz、单频60kHz 这3组样品的干燥速率均优于空白对照组,但这3组之间差异不显著。
- 2)湿度控制干燥试验中,将香蕉片在不同干燥介质相对湿度条件下进行干燥。试验结果表明,同一干燥介质相对湿度条件下,干燥速率从大到小依次为三频(20+40+60)kHz、双频(40+60)kHz、单频60kHz、空白对照组。在相同的超声波预处理条件下,干燥速率随干燥介质相对湿度的减小而增大,干燥介

质相对湿度为 5%时干燥速率最快,干燥介质相对湿度为 15%的试验组复水率明显低于相对湿度为 5%和 10%的试验组,干燥介质相对湿度越小,复水率越高。同一干燥介质相对湿度条件下,复水率从高到低依次为三频(20+40+60)kHz 超声波预处理组、双频(40+60)kHz 超声波预处理组、单频 60 kHz 超声波预处理组、空白对照组。干燥介质相对湿度越低的试验组的色差整体水平高于干燥介质相对湿度高的试验组。同一干燥介质相对湿度条件下,维生素 C 含量从低到高依次为三频(20+40+60)kHz 超声波预处理组、双频(40+60)kHz 超声波预处理组、平同干燥介质相对湿度条件下,干燥介质相对湿度越高,干燥后的香蕉片的维生素 C 含量也越高。

#### 参考文献:

- [1] FAN Zhong-qi, KUANG Jian-fei, FU Chang-chun, et al. The Banana Transcriptional Repressor MaDEAR1 Negatively Regulates Cell Wall-modifying Genes Involved in Fruit Ripening[J]. Frontiers in Plant Science, 2016(7): 1021.
- [2] AHMED Z F R, PALTA J P. Postharvest Dip Treatment with a Natural Lysophospholipid Plus Soy Lecithin Extended the Shelf Life of Banana Fruit[J]. Postharvest Biology and Technology, 2016, 113: 58—65.
- [3] 黄斌, 麦馨允, 张开平, 等. 香蕉片远红外干燥工艺的研究[J]. 食品工业, 2018, 39(7): 132—136. HUANG Bin, MAI Xin-yun, ZHANG Kai-ping, et al. The Processing Technique of Banana Slice under Far-infrared Drying[J]. The Food Industry, 2018, 39(7): 132—136.
- [4] 马空军, 金思, 潘言亮. 超声波技术在食品研究开发中的应用现状与展望[J]. 食品工业, 2016, 37(9): 207—211.
  - MA Kong-jun, JIN Si, PAN Yan-liang. Research Status and Prospect of Ultrasonic Technology in Food Development[J]. The Food Industry, 2016, 37(9): 207—211
- [5] 吕豪, 韩清华, 吕为乔, 等. 果蔬微波干燥与低频超声波协同干燥应用研究进展[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(11): 180—185.
  - LYU Hao, HAN Qing-hua, LYU Wei-qiao, et al. Trends in Microwave and Low-frequency Ultrasonic Assisted Drying of Fruit and Vegetables[J]. Food Research and Development, 2018, 39(11): 180—185.
- [6] 代亚萍, 邓凯波, 卢旭, 等. 超声波辅助漂烫预处理对太阳能-热泵联合干燥南瓜片品质的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(9): 136—142.
  - DAI Ya-ping, DENG Kai-bo, LU Xu, et al. Effect of Ultrasonic-assisted Blanching Pretreatment on the Characteristics of Solar-heat Pump Dried Pumpkin Slices[J]. Science and Technology of Food Industry,

- 2018, 39(9): 136-142.
- [7] 巨浩羽, 肖红伟, 郑霞, 等. 干燥介质相对湿度对胡萝卜片热风干燥特性的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(16): 296—304.
  - JU Hao-yu, XIAO Hong-wei, ZHENG Xia, et al. Effect of Hot Air Relative Humidity on Drying Characteristics of Carrot Slabs[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(16): 296—304.
- [8] 张建文,辛亚男,李斌.干燥介质温湿度条件对片烟干燥动力学特性的影响[J].烟草科技,2014(10):15—19.
  - ZHANG Jian-wen, XIN Ya-nan, LI Bin. Effect of Temperature and Humidity of Drying Medium on Drying Kinetics of Strips[J]. Tobacco Science & Technology, 2014(10): 15—19.
- [9] 王雅娇, 郭洁, 姚思远, 等. 热风风速和相对湿度对扇贝柱干燥特性及品质的影响[J]. 现代食品科技, 2013, 29(12): 2915—2920.
  - WANG Ya-jiao, GUO Jie, YAO Si-yuan, et al. Effect of Different Hot-air Drying Parameters on Drying Characteristics and Quality of Scallops[J]. Modern Food Science and Technology, 2013, 29(12): 2915—2920.
- [10] 吴中华,李文丽,赵丽娟,等. 枸杞分段式变温热风干燥特性及干燥品质[J]. 农业工程学报,2015,31(11):287—293.
  - WU Zhong-hua, LI Wen-li, ZHAO Li-juan, et al. Drying Characteristics and Product Quality of Lycium Barbarum under Stages-varying Temperatures Drying Process[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(11): 287—293.
- [11] JANJAI S, PRECOPPE M, LAMLERT N, et al. Thin-layer Drying of Litchi (*Litchi Chinensis Sonn*.)[J]. Food & Bioproducts Processing, 2011, 89(3): 194—201.
- [12] 贾磊, 孔进喜, 刘艳红, 等. 黎豆荚高温高湿干燥工艺的研究[J]. 食品工业科技, 2012, 33(12): 251—254. JIA Lei, KONG Jin-xi, LIU Yan-hong, et al. Study on High Temperature and Humidity Drying of Velvetbean[J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(12): 251—254.
- [13] GB 5009.3—2016, 食品中水分的测定[S]. GB 5009.3—2016, Determination of Moisture in Food [S].
- [14] 白竣文,肖瑞,董晨,等. 山药催化式红外干燥特性 及色泽评价[J]. 食品工业科技,2017,38(7):221— 225.
  - BAI Jun-wen, XIAO Rui, DONG Chen, et al. Drying Characteristic and Product Color Evaluation of Yam by Catalytic Infrared Drying[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(7): 221—225.
- [15] XIAO Hong-wei, YAO Xue-dong, LIN Hai, et al. Ef-

- fects of SSB (Superrheated Steam Blanching) Time and Drying Temperature on Hot Impingement Drying Kinetics and Quality Attributes of Yam Slices[J]. Journal of Food Process Engineering, 2012, 35(3): 370—390.
- [16] SARIMESELI A, COSKUN M A, YUCEER M. Modeling Microwave Drying Kinetics of Thyme (*Thymus Vulgaris* L.) Leaves Using ANN Methodology and Dried Product Quality[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2014, 38(1): 558—564.
- [17] SUPMOON N, NOOMHORM A. Influence of Combined Hot Air Impingement and Infrared Drying on Drying Kinetics and Physical Properties of Potato Chips[J]. Drying Technology, 2013, 31(1): 24—31.
- [18] BAI Jun-wei, SUN Da-wen, XIAO Hong-wei, et al. Novel High-humidity Hot Air Impingement Blanching (HHAIB) Pretreatment Enhances Drying Kinetics and Color Attributes of Seedless Grapes[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2013, 20(4): 230—237.
- [19] XIA Hong-wei, PAN Cang-le, WANG Li-hong, et al.
  Drying Kinetics and Quality of Monukka Seedless
  Grapes Dried in an Air-impingement Jet Dryer[J].
  Biosystems Engineering, 2010, 105(2): 233—240.
- [20] 许牡丹, 马可纯, 黄萌, 等. 猕猴桃片真空-红外联合干燥数学模型建立[J]. 食品工业科技, 2016, 37(18): 127—132.

  XU Mu-dan, MA Ke-chun, HUANG Meng, et al.
  - Modeling of the Combination of Vacuum and Infrared Drying of Kiwifruit Slices[J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(18): 127—132.
- [21] XIAO Hong-wei, BAI Jun-wei, XIE Long, et al. Thin-layer Air Impingement Drying Enhances Drying Rate of American Ginseng (*Panax Quinquefolium L.*) Slices with Quality Attributes Considered[J]. Food & Bioproducts Processing, 2015, 94: 581—591.
- [22] 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.
  - CHEN Jian-kai, LIN He-tong, LIN Yi-fen, et al. Optimized Technology of *Pleurotus Eryngii* by Microwave-vacuum Drying Based on Quality and Energy Consumption[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(3): 277—284.
- [23] SZADZINSKA J, KOWALSKI S J, STASIAK M. Microwave and Ultrasound Enhancement of Convective Drying of Strawberries: Experimental and Modeling Efficiency[J]. International Journal of Heat\s&\smass Transfer, 2016, 103: 1065—1074.
- [24] GB 5009.86—2016, 食品中抗坏血酸的测定[S]. GB 5009.86—2016, Determination of ASCORBIC acid in Food[S].