

# 中短波红外和热风干燥对番木瓜干燥特性及品质的比较

高鹤<sup>1,2</sup>, 易建勇<sup>1</sup>, 毕金峰<sup>1</sup>, 刘璇<sup>1</sup>, 邓放明<sup>2</sup>, 吴昕焯<sup>1</sup>

(1. 中国农业科学院农产品加工研究所/农业部农产品加工重点实验室, 北京 100193)

(2. 湖南农业大学食品科学技术学院, 湖南长沙 410128)

**摘要:** 本文以干燥特性、色泽、复水性以及抗坏血酸保留率为评价指标, 研究了不同干燥温度(60、70、80、90℃)下中短波红外辐射和热风干燥对番木瓜片品质的影响。结果表明: 与热风干燥相比, 相同温度条件下中短波红外干燥速率更快, 所需干燥时间更短; 随着干燥温度的升高, 两种干燥方式下的水分有效扩散系数均呈升高趋势, 番木瓜片中短波红外干燥和热风干燥水分有效扩散系数分别为  $0.58546 \times 10^{-10} \sim 9.87313 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 、 $0.01179 \times 10^{-10} \sim 4.88646 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ; 番木瓜片中短波红外干燥的活化能  $32.13 \text{ kJ/mol}$  低于热风干燥的活化能  $33.28 \text{ kJ/mol}$ ; 此外, 中短波红外干燥后番木瓜片的色泽和产品的复水性更好, 而番木瓜片的中短波红外干燥抗坏血酸保留率低于热风干燥。综合考虑, 试验范围内中短波红外干燥温度为  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  条件下所得产品的品质最好。

**关键词:** 中短波红外干燥; 热风干燥; 品质; 番木瓜; 水分有效扩散系数

文章编号: 1673-9078(2015)2-190-195

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2015.2.032

## Drying Characteristics and Quality of *Carica Papaya* Linn under Med- and Short-wave Infrared Radiation and Hot Air Drying

GAO He<sup>1,2</sup>, YI Jian-yong<sup>1</sup>, BI Jin-feng<sup>1</sup>, LIU Xuan<sup>1</sup>, DENG Fang-ming<sup>2</sup>, WU Xing-ye<sup>1</sup>

(1. Institute of Agro-Products Processing Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Agro-Products Processing, Ministry of Agriculture, Beijing 100193, China) (2. College of Food Science and Technology, Hunan Agriculture University, Changsha 410128, China)

**Abstract:** The effects of infrared and hot air drying at different temperatures (60, 70, 80, and 90 °C) on the quality of *Carica Papaya* Linn (papaya) slices were discussed. Four indicators viz. drying properties, color, rehydration, and vitamin C retention were employed. The results showed that, at the same drying temperature, the speed of infrared drying was faster than that of hot air drying. The effective moisture diffusion coefficients ( $D_{eff}$ ) increased with increase in drying temperature for both drying methods. The  $D_{eff}$  of infrared drying and hot air drying ranged from  $0.58546 \times 10^{-10} \sim 9.87313 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  and  $0.01179 \times 10^{-10} \sim 4.88646 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ , respectively. The activation energy was  $32.13 \text{ kJ/mol}$  and  $33.28 \text{ kJ/mol}$  for the infrared and hot air drying, respectively. The papaya slices dried by infrared showed better color and rehydration properties than those dried by hot air. However, the papaya slices dried by hot air had higher vitamin C retention. In summary, the best product was obtained with infrared drying at  $70 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**Key words:** med-and short-wave infrared radiation drying; hot air drying; quality; *Carica Papaya* Linn; effective moisture diffusion coefficient

番木瓜 (*Carica Papaya* Linn), 英文 Papaya 或 Pawpaw, 为多年生常绿草本植物, 属于番木瓜科番木瓜属, 原产于墨西哥南部以及中美洲地区, 在中国已

收稿日期: 2014-06-18

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201303077); 新疆生产建设兵团科技支疆计划(2013AB020)

作者简介: 高鹤(1990-), 男, 硕士研究生, 研究方向果蔬加工

通讯作者: 毕金峰(1970-), 男, 博士, 研究员, 研究方向为果蔬精深加工与副产物综合利用技术

有 300 多年的种植历史, 广东、广西、海南、福建等省均有栽培。番木瓜含有的黄酮类、木瓜蛋白酶、糖分、生物碱、萜类化合物、色素等多种成分, 具有免疫调节、抗肿瘤、保肝、抗癌、美容等功效<sup>[1-3]</sup>。但是, 番木瓜属于呼吸跃变型果实, 采后在环境温度、相对湿度、病虫害等因素的作用下, 容易出现软化后熟和腐烂等现象, 进而失去食用价值<sup>[4]</sup>。

干燥可以很好的减少果蔬中的水分, 延长产品的货架期, 增加附加值<sup>[5]</sup>。热风干燥(Hot air drying, AD)

作为目前主要的农产品干燥加工方法,因其具有操作简单、成本较低以及对环境、场地和设备等要求不高等特点,而在干制品加工中得到广泛应用<sup>[6]</sup>。同时,热风干燥也存在着能量消耗较大、干燥加工周期过长等问题。与传统的热风干燥比,红外辐射干燥作为一种新型干燥方式,在减少干燥所需要的时间,提高产品的品质有显著优势,中短波红外干燥(Med-and short-wave infrared radiation drying, IR)已经成功应用于多种农产品及其副产物的干燥加工中<sup>[8-10]</sup>。在食品干燥加工过程中,可以通过水分有效扩散系数(Effective diffusion coefficient,  $D_{\text{eff}}$ )来对物料的干燥过程进行表征。目前对番木瓜干燥后产品的品质主要从感官品质、物理特性以及营养物质保留等方面进行评价分析。色泽是评价干制果品品质的重要指标之一,可以直接影响消费者对产品的接受程度。干燥后产品的复水性可以反映出样品的孔隙结构和酥脆度。番木瓜富含抗坏血酸,因此也可以作为番木瓜干燥加工过程中的一种重要营养指标。抗坏血酸易溶于水,在遇上空气中的氧、热、光、碱性物质时,容易氧化破坏。

本文探讨了不同干燥温度下的热风干燥和中短波红外干燥对番木瓜片干燥特性,以及对色泽、复水性以及抗坏血酸保留率等品质的影响,获得较优的番木瓜干燥加工条件,为番木瓜干燥提供理论依据。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 试验材料

番木瓜:海南三亚大白,购于北京市上地小营果品批发市场。选择形状、大小相似,重量约为 $1.0 \pm 0.1$  kg,表面完整无破损,表皮色泽由绿转黄,质地较硬的硬熟状态果实。经过测定,物料的初始干基含水率为 $7.50 \pm 0.2$  g/g。

### 1.2 仪器设备

切片机,FA-200,广东省南海市德丰电热设备厂;电热恒温干燥箱,DHG-9203,上海一恒科技有限公司;中短波红外干燥箱,江苏泰州圣泰科红外科技有限公司;万能粉碎机,FW100,天津市泰斯特仪器有限公司;色彩色差仪,D25L<sup>T</sup>,美国Huterlab公司;电子天平,AUW220,日本Shimadzu公司。

### 1.3 试验方法

新鲜番木瓜经去皮、去籽前处理,用切片机横切成厚度为8 mm的扇形片状待用。选择大小、形状相似的番木瓜片放到托盘上,单层平铺,待设备达到设

定温度后放入。根据预实验的结果,选用温度为60、70、80、90 ℃。根据前期预试验结果,选择红外辐射功率为1575 W。中短波红外干燥试验中,前1 h每隔5 min对物料进行一次称量,第2 h每隔10 min称量一次,之后每隔30 min称量一次直到物料干基含水率达到0.1 g/g为止,停止试验。热风干燥试验中,前4 h每隔20 min对物料进行称量,之后每隔30 min称量一次直至物料干基含水率达到0.1 g/g为止,停止试验。每次试验重复3次,取平均值。

## 1.4 干燥特性

### 1.4.1 干燥参数

干基含水率表示的是在一定干燥条件下物料的水分含量与干物质质量之比,按式(1)计算<sup>[8]</sup>:

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

注: $M_t$ 为干基含水率,g/g; $m_e$ 为干物质质量,g; $m_t$ 为任意t时刻物料的质量,g。

水分比(Moisture ratio, MR)可以由下式计算<sup>[8]</sup>:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (2)$$

注:MR为水分比,g/g; $M_0$ 为初始时刻的干基含水率,g/g; $M_e$ 为干燥到平衡时的干基含水率,g/g; $M_t$ 为任意t时刻的干基含水率,g/g。

由于 $M_0$ 和 $M_t$ 远大于 $M_e$ ,公式(2)可简化为公式(3)。

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

干燥速率(Drying rate, DR)可按公式(4)计算<sup>[8]</sup>:

$$DR = \frac{M_{t1} - M_{t2}}{t_2 - t_1} \quad (4)$$

注:DR为干燥速率,g/(g·min); $M_{t1}$ 、 $M_{t2}$ 分别为干燥到 $t_1$ 和 $t_2$ 时番木瓜的干基含水率,g/g; $t_1$ 和 $t_2$ 为干燥时间,min。

### 1.4.2 有效扩散系数及活化能

通过Fick第二定律可以很好的描述物料在降速阶段的干燥特性。Crank假设干燥过程中水分迁移主要是利用水分扩散进行、有效扩散系数和温度都恒定,并忽略物料体积收缩变化的情况下,提出了公式(5)<sup>[8]</sup>。

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{\text{eff}} t}{4L^2}\right) \quad (5)$$

注: $D_{\text{eff}}$ 为物料的水分有效扩散系数, $\text{m}^2/\text{s}$ ;L为物料厚度的一半,m;t为干燥时间,s;n为考虑的组数。

可以通过阿伦尼乌斯公式(Arrhenius equation)

来表示干燥过程中物料的水分有效扩散系数和温度之间的关系，公式如下<sup>[10]</sup>：

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (6)$$

注： $D_{eff}$  指水分有效扩散系数， $m^2/s$ ； $D_0$  指样品中的扩散基数， $m^2/s$ ； $E_a$  指物料的干燥活化能， $kJ/mol$ ； $T$  指绝对温度， $K$ ； $R$  指气体摩尔常数， $8.314 J/(mol.k)$ 。

## 1.5 指标测定

### 1.5.1 色泽的测定

采用色彩色差仪测定番木瓜的色泽，本实验用  $\Delta L$ 、 $\Delta a$ 、 $\Delta b$ 、 $\Delta E$  值代表被测样品的色泽 ( $L$ 、 $a$ 、 $b$ ) 与鲜样的 ( $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ ) 的色差值<sup>[11]</sup>。总色差值 (Total color change,  $\Delta E$ ) 计算方法如下：

$$\Delta E = \sqrt{(L - L^*)^2 + (a - a^*)^2 + (b - b^*)^2} \quad (7)$$

注： $L$ 、 $L^*$  分别为鲜样和干样的明度值； $a$ 、 $a^*$  分别是鲜样和干燥的红绿值； $b$  和  $b^*$  分别是鲜样和干样的黄蓝值； $\Delta E$  分别为总色差值。

### 1.5.2 复水性的测定

将干燥后的样品至于 300 mL 的烧杯中，按照料液比 1:50 倒入蒸馏水，在室温下进行试验。前 1 h 每隔 5 min 测定一次样品质量，后 1 h 每隔 10 min 测定一次。测定前沥干 60 s，以去除表面水分。物料在复水 2 h 后停止试验，每次试验重复三次，取平均值。复水比 (Rehydration ratio,  $RR$ ) 的计算公式如下<sup>[12]</sup>：

$$RR = \frac{M_t}{M_0} \quad (8)$$

注： $M_t$  为复水到  $t$  时刻物料的重量， $g$ ； $M_0$  为复水前物料的重量， $g$ ； $RR$  为复水比， $g/g$ 。

### 1.5.3 抗坏血酸的测定

采用 2-6 二氯酚法进行测定。将样品粉碎后，称取番木瓜干样 5 g，加入 50 mL 2% 草酸溶液，过滤，得到待测液。吸取 10 mL 待测液于 50 mL 三角瓶中，用已标定的 2-6 二氯酚溶液进行滴定直至溶液呈粉红色 15 s 内不退色为止，记录溶液所消耗的体积<sup>[11]</sup>。

$$V_c = \frac{(V_t - V_0)V_s}{T_d} \times 100 \quad (9)$$

注： $V_c$  为抗坏血酸的含量， $mg/100 mL$ ； $T_d$  为 2-6 二氯酚溶液的滴定度， $mg/mL$ ； $V_0$  为空白样品所消耗的溶液体积， $mL$ ； $V$  为吸取的抗坏血酸体积， $mL$ ； $V_t$  为滴定样品所消耗的溶液体积， $mL$ ； $V_s$  为滴定时吸取样品溶液的体积， $mL$ 。

## 1.6 统计分析

采用 Origin 8.0 软件绘图并进行多元非线性回归

拟和，用 SPSS 19.0 软件进行数据分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 干燥特性

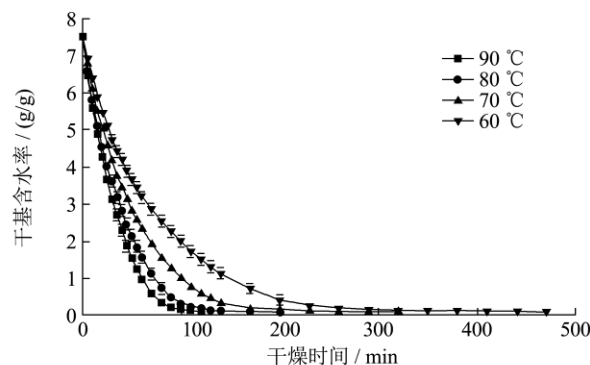


图 1 番木瓜片中短波红外干燥特性曲线

Fig.1 Drying property curves of papaya slices in med- and short-wave infrared radiation drying

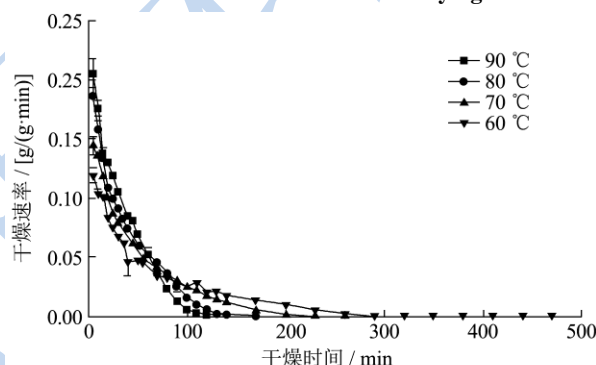


图 2 番木瓜片中短波红外干燥速率曲线

Fig.2 Drying rate curves of papaya slices in med- and short-wave infrared radiation drying

在物料厚度 8 mm、辐射功率 1575 W 的条件下，考察不同干燥温度为 60、70、80、90 °C 对番木瓜的中短波红外干燥特性的影响。图 1 和图 2 分别显示的是番木瓜在不同干燥温度下的中短波红外干燥特性曲线和干燥速率曲线。由图 1 可知，番木瓜的水分比随着干燥时间的延长而呈现出降低的趋势，其中温度越高干燥所需时间越短，水分降低越快。干燥温度分别为 60、70、80、90 °C 条件下，番木瓜的干燥时间分别为 470、320、200、140 min，其中 70、80、90 °C 与 60 °C 相比较，所需干燥时间缩短了 32%、57% 和 70%。由图 2 可知，干燥温度越高，番木瓜干燥速率越大，其可能的原因是在干燥温度一定范围内，温度越高则环境中的相对湿度也就越低，物料和空气的温差以及湿度差越大，干燥速率也随之增大。此外，还可以看出番木瓜中短波红外干燥过程属于降速干燥过程，类似的结果也出现在了猕猴桃片中短波红外

干燥特性的研究中<sup>[13]</sup>。

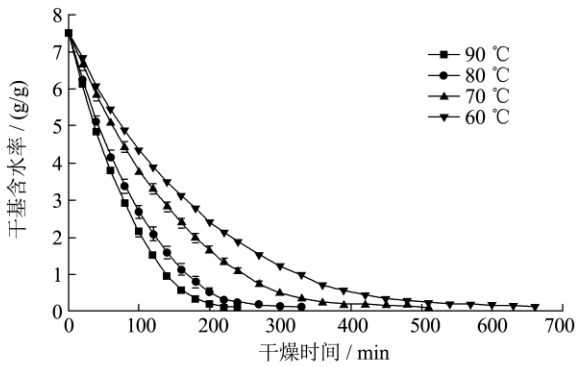


图3 番木瓜片热风干燥特性曲线

Fig.3 Drying property curves of papaya slices in hot air drying

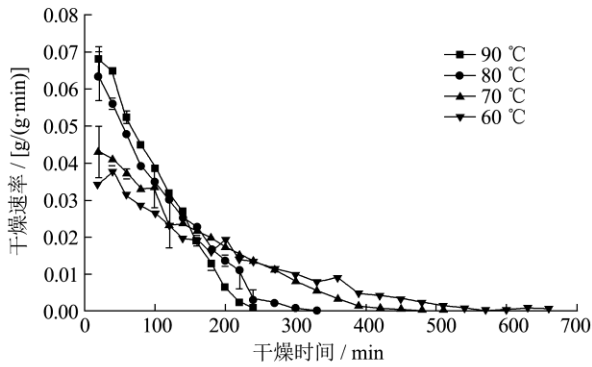


图4 番木瓜片热风干燥速率曲线

Fig.4 Drying rate curves of papaya slices in hot air drying

在物料厚度为 8 mm 的条件下, 研究温度为 60、70、80、90 °C 的热风干燥对番木瓜的干燥特性的影响。番木瓜在不同热风干燥温度下的干燥特性曲线和干燥速率曲线如图 3 和图 4 所示。由图 3 可知, 番木瓜的水分比随着干燥时间的延长而呈现出降低的趋势, 其中温度越高干燥所需时间越短, 水分降低越快。干燥温度分别为 60、70、80、90 °C 条件下, 番木瓜的干燥时间分别为 660、510、330、240 min, 其中 90 °C 干燥时间为 60 °C 所耗时间的 36%。由图 4 可知, 随着温度的升高番木瓜干燥速率逐渐增大; 番木瓜热风干燥过程属于降速干燥过程, 干燥速率随着干基含水率的降低而减少。

### 2.1.1 水分有效扩散系数

不同干燥温度下番木瓜片中短波红外干燥和热风干燥水分有效扩散系数的结果如图 5 和图 6 所示。从图中可以看出, 整个干燥过程呈现出两个阶段, 两种干燥方式在试验范围内均在干基含水率在 0.3 g/g 左右时出现了极值。可能是由于番木瓜在干燥过程中, 随着水分迁移、物料收缩以及表面硬化, 使得干燥到一定阶段时物料内部水分迁移遭到抑制, 番木瓜干燥水分有效扩散系数开始减小。在试验条件范围内, 番

木瓜片中短波红外干燥和热风干燥水分有效扩散系数分别为  $0.58546 \times 10^{-10} \sim 9.87313 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 、 $0.01179 \times 10^{-10} \sim 4.88646 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 。随着水分含量的降低, 有效扩散系数逐渐增大。随着干燥温度的升高, 有效扩散系数不断增大。在相同的干燥温度下, 中短波红外干燥过程中水分有效扩散系数均高于热风干燥。

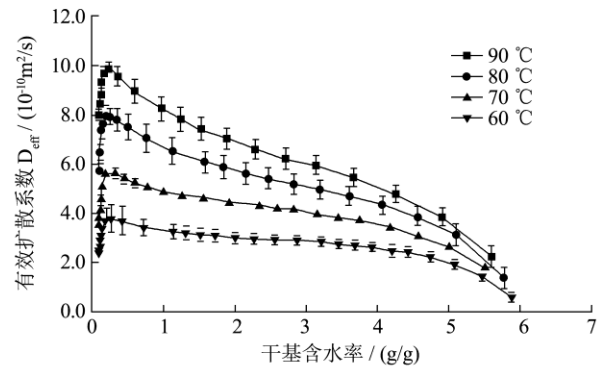


图5 中短波红外干燥水分有效扩散系数随水分含量变化曲线

Fig.5 Variation curves of effective moisture diffusion coefficients with moisture content under med- and short-wave infrared radiation drying

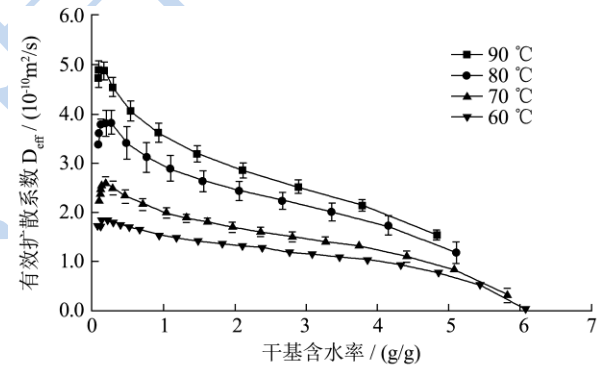


图6 热风干燥水分有效扩散系数随水分含量变化曲线

Fig.6 Variation curves of effective moisture diffusion coefficient with moisture content under hot air drying

### 2.1.2 平均水分有效扩散系数

根据图 5 和图 6 中有效水分扩散系数的值, 计算出番木瓜红外干燥和热风干燥过程中, 各个阶段与整个过程有效水分扩散系数的平均值, 结果见表 1。干燥温度从 60 °C 升高到 90 °C 过程中, 番木瓜中短波红外干燥有效水分扩散系数从  $2.80637 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  增加到  $7.28599 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ , 热风干燥从  $1.36025 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  增加到  $3.52834 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 。其中, 中短波红外干燥第一阶段为  $2.72865 \times 10^{-10} \sim 6.91860 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ , 第二阶段为  $3.09554 \times 10^{-10} \sim 8.87713 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ; 热风干燥第一阶段为  $1.26656 \times 10^{-10} \sim 3.40954 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ , 第二阶段为  $1.75073 \times 10^{-10} \sim 4.80147 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

表 1 不同干燥条件下番木瓜红外干燥水分扩散系数

**Table 1 Effective moisture diffusion coefficients of papaya under different drying conditions**

干燥序号	干燥方式	干燥条件	平均有效扩散系数 $D_{eff}/(10^{-10}m^2 \cdot s^{-1})$		
			Stage1	Stage2	total
1	IR	90 °C	6.91860 ± 0.40124	8.87713 ± 0.24140	7.28599 ± 0.36767
2	IR	80 °C	5.60577 ± 0.44133	7.04947 ± 0.35998	5.83714 ± 0.42254
3	IR	70 °C	4.15478 ± 0.11762	4.61522 ± 0.16388	4.22843 ± 0.12673
4	IR	60 °C	2.72865 ± 0.25988	3.09554 ± 0.30507	2.80637 ± 0.26316
5	AD	90 °C	3.40953 ± 0.40124	4.80147 ± 0.24140	3.52834 ± 0.36767
6	AD	80 °C	2.53510 ± 0.44133	3.67426 ± 0.35998	2.85050 ± 0.42254
7	AD	70 °C	1.64790 ± 0.11762	2.38884 ± 0.16388	1.82474 ± 0.12673
8	AD	60 °C	1.26656 ± 0.25988	1.75073 ± 0.30507	1.36025 ± 0.26316

### 2.1.3 活化能

通过公式 (5) 得出番木瓜片中短波红外干燥的活化能为: 第一阶段 31.19 kJ/mol、第二阶段 36.13 kJ/mol、整个干燥过程 32.13 kJ/mol; 热风干燥的活化能为: 第一阶段 34.18 kJ/mol、第二阶段 34.78 kJ/mol、整个干燥过程 33.28 kJ/mol。由此可以看出, 中短波红外干燥在第一阶段中比热风干燥更容易去除水分, 而在第二阶段中则更难。

### 2.2 不同干燥条件对番木瓜片色泽的影响

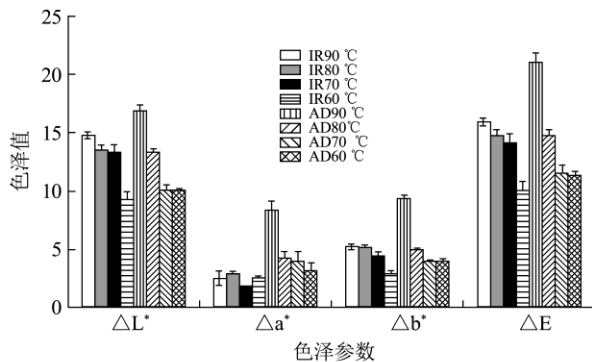


图 7 不同干燥条件对番木瓜片色泽的影响

**Fig.7 Effect of different drying conditions on the color of papaya slices**

不同干燥方式对番木瓜片色泽变化的影响, 如图 7 所示。由图 7 可知, 在干燥温度为 60 °C 至 90 °C 之间, 除中短波红外干燥后番木瓜片 a 值以外, 产品的 L、a、b 随着干燥温度升高而呈下降趋势, 色差值总体随着温度的升高而增大, 说明温度越高对番木瓜色泽的影响越大。中短波红外干燥温度为 60 °C 时, 番木瓜片的总色差值最小; 热风干燥温度为 90 °C 时, 产品的色差值最大。在中短波红外干燥中, 干燥温度 70 °C、80 °C、90 °C 之间差异较小, 而与 60 °C 有着明显差别 ( $P < 0.05$ ); 在热风干燥中, 干燥温度 60 °C 和 70 °C 之间差异不大, 而与 80 °C、90 °C 之间有着明显

差异 ( $P < 0.05$ )。类似的研究也出现在研究茄子红外辐射干燥特性及色泽变化的过程中<sup>[4]</sup>。

### 2.3 不同干燥条件对番木瓜片复水性的影响

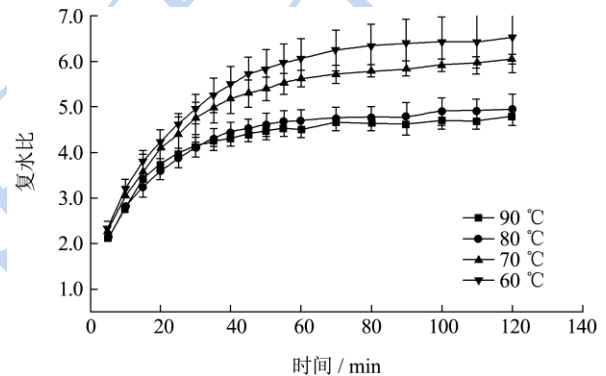


图 8 不同中短波红外干燥温度对番木瓜片复水比的影响

**Fig.8 Effects of different temperatures of med- and short-wave infrared radiation drying on the rehydration ratio of papaya slices**

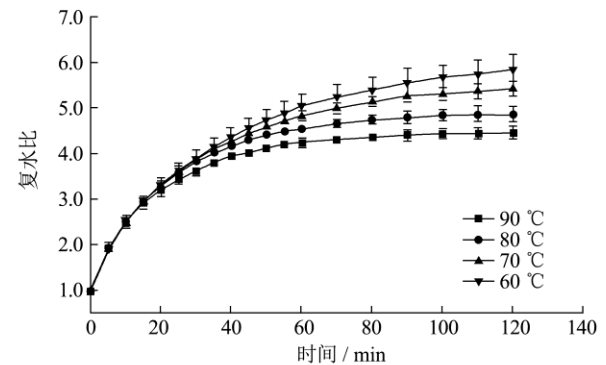


图 9 不同热风干燥温度对番木瓜片复水比的影响

**Fig.9 Effects of different temperatures of hot air drying on the rehydration ratio of papaya slices**

图 8 和图 9 为不同干燥方式对番木瓜片复水性的影响。由图可知, 两种干燥方式中, 随着干燥温度的升高复水比都呈现减小的趋势; 在相同的干燥温度下, 中短波红外干燥后产品的复水比高于热风干燥后的。

中短波红外干燥温度为 80 °C 和 90 °C 的复水比与 60 °C、70 °C 之间差异明显, 不同温度热风干燥后产品的复水比之间均有差异 ( $P < 0.05$ )。在试验范围内, 红外温度为 60 °C 和 70 °C 时, 可以获得复水性较优的产品。类似的结果也出现在了研究鱿鱼丁干燥的过程中<sup>[12]</sup>。

## 2.4 不同干燥条件对番木瓜片抗坏血酸的影响

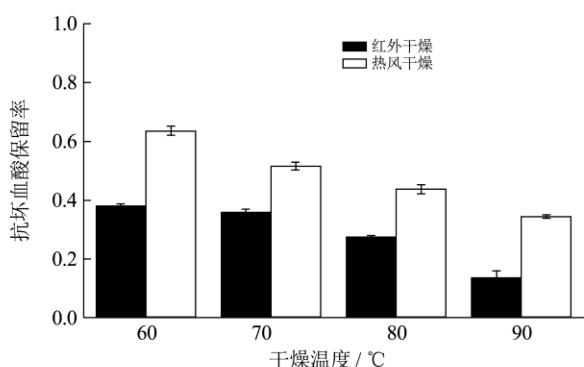


图 10 不同干燥条件下番木瓜片的抗坏血酸保留率

Fig.10 Vitamin C retention rates of papaya slices under different dehydration conditions

不同干燥条件下番木瓜片抗坏血酸的保留率见图 10。结果表明, 不同干燥温度和干燥方式对抗坏血酸均有影响 ( $P < 0.05$ ); 在相同干燥温度下, 热风干燥后产品的抗坏血酸保留率比中短波红外干燥后的更高; 随着干燥温度的升高, 热风干燥和中短波红外干燥后番木瓜的抗坏血酸保留率均不断降低, 抗坏血酸损失越大; 不同干燥温度热风干燥后产品的抗坏血酸含量差异明显; 中短波红外干燥温度为 60 °C 和 70 °C 的番木瓜片抗坏血酸保留率差异不大; 干燥温度在 70 °C 和 80 °C 之间热风干燥和中短波红外干燥抗坏血酸保留率之差小于二者在 60 °C 和 90 °C 之间的差值。因此, 其他参数一定, 中短波红外干燥温度 70 °C 时, 可以获得抗坏血酸保留率相对较高的番木瓜片。

## 3 结论

在相同干燥温度下, 番木瓜中短波红外干燥速率比热风干燥要快。随着干燥温度的升高, 水分有效扩散系数不断增大。番木瓜片红外干燥和热风干燥水分有效扩散系数分别为  $0.58546 \times 10^{-10} \sim 9.87313 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 、 $0.01179 \times 10^{-10} \sim 4.88646 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 。番木瓜片中短波红外干燥的活化能 32.13 kJ/mol, 低于热风干燥的活化能 33.28 kJ/mol。和热风干燥相比, 番木瓜片中短波红外干燥产品的  $\Delta E$  更低, 色泽变化较小; 复水速

率更快、复水比较大, 但抗坏血酸保留率低于热风干燥。综合考虑, 在试验范围内, 中短波红外干燥温度为 70 °C 的条件下, 能获得品质较优的番木瓜干燥产品。

## 参考文献

- [1] Tripathi S, Suzuki J Y, Carr J B, et al. Nutritional composition of rainbow papaya, the first commercialized transgenic fruit crop [J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2011, 24(2): 140-147
- [2] Schweiggert R M, Mezger D, Schimpf F, et al. Influence of chromoplast morphology on carotenoid bioaccessibility of carrot, mango, papaya, and tomato [J]. *Food Chemistry*, 2012, 135(4): 2736-2742
- [3] De Oliveira J G, Vitória A P. Papaya: Nutritional and pharmacological characterization, and quality loss due to physiological disorders. an overview [J]. *Food Research International*, 2011, 44(5): 1306-1313
- [4] Rivera-Pastrana D M, Yahia E M, González-Aguilar G A. Phenolic and carotenoid profiles of papaya fruit (*Carica papaya L.*) and their contents under low temperature storage [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2010, 90(14): 2358-2365
- [5] Mujumdar A S, Law C L. Drying technology: Trends and applications in postharvest processing [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2010, 3(6): 843-852
- [6] Fernandes F A N, Rodrigues S, Law C L, et al. Drying of exotic tropical fruits: a comprehensive review [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2011, 4(2): 163-185
- [7] Krishnamurthy K, Khurana H K, Soojin J, et al. Infrared heating in food processing: an overview [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2008, 7(1): 2-13
- [8] Doymaz İ. Infrared drying of sweet potato (*Ipomoea batatas L.*) slices [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2012, 49(6): 760-766
- [9] Çağlar A, Toğrul İ T, Toğrul H. Moisture and thermal diffusivity of seedless grape under infrared drying [J]. *Food and Bioproducts Processing*, 2009, 87(4): 292-300
- [10] Niamnuy C, Nachaisin M, Poomsa-ad N, et al. Kinetic modelling of drying and conversion/degradation of isoflavones during infrared drying of soybean [J]. *Food Chemistry*, 2012, 133(3): 946-952
- [11] Hawlader M N A, Perera C O, Tian M, et al. Drying of guava and papaya: impact of different drying methods [J]. *Drying Technology*, 2006, 24(1): 77-87

- 
- [12] Chen H, Zhang M, Fang Z, et al. Effects of different drying methods on the quality of squid cubes [J]. *Drying Technology*, 2013, 31(16): 1911-1918
- [13] 曾目成, 毕金峰, 陈芹芹, 等. 猕猴桃切片中短波红外干燥特性及动力学模型[J]. *现代食品科技*, 2014, 30(1): 153-159  
ZENG Mu-cheng, BI Jin-feng, CHEN Qin-qin, et al. Drying characteristics and kinetics of kiwifruit slice under medium and shortwave infrared radiation [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2014, 30(1): 153-159
- [14] 张丽丽, 王相友, 遇龙, 等. 茄子红外辐射干燥特性及色泽变化[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(26): 291-296  
ZHANG Li-li, WANG Xiang-you, YU Long, et al. Drying characteristics and color changes of infrared drying eggplant [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2012, 28(26): 291-296

现代食品科技