

番木瓜中短波红外干燥特性

高 鹤^{1,2}, 易建勇¹, 毕金峰^{1,*}, 刘 璇¹, 邓放明², 吴昕烨¹

(1. 中国农业科学院农产品加工研究所, 农业部农产品加工综合性重点实验室, 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: 本实验探讨不同干燥温度(60、70、80、90 °C)和不同红外功率(675、1 125、1 575、2 025 W)下番木瓜中短波红外干燥特性。结果表明:干燥温度对番木瓜干燥速率的影响较大,红外功率对番木瓜干燥速率影响较小;干燥温度和红外功率越高耗时越短,番木瓜中短波红外干燥主要为降速过程。利用3种数学模型对番木瓜中短波红外干燥实验数据进行拟合发现,Henderson and Pabis模型是番木瓜中短波红外干燥过程的最适模型,模型预测值与实验值较为一致,能够较好地描述番木瓜中短波红外干燥过程。番木瓜中短波红外干燥的水分有效扩散系数随干燥温度和红外功率的增大而增大;不同干燥温度和红外功率下番木瓜中短波红外干燥的水分有效扩散系数(D_{eff})变化范围分别为 $11.14 \times 10^{-10} \sim 29.11 \times 10^{-10}$ 、 $14.29 \times 10^{-10} \sim 17.22 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 。根据阿伦尼乌斯方程计算出番木瓜中短波红外干燥的活化能为32.13 kJ/mol。

关键词: 红外干燥;干燥特性;番木瓜;水分有效扩散系数;活化能

Drying Characteristics of Papaya with Middle- and Short-Wave Infrared Radiation

GAO He^{1,2}, YI Jianyong¹, BI Jinfeng^{1,*}, LIU Xuan¹, DENG Fangming², WU Xinye¹

(1. Key Laboratory of Agro-Products Processing, Ministry of Agriculture, Institute of Agro-Products Processing Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China;

2. College of Food Science and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: The characteristics of infrared radiation drying for papaya at different drying temperatures (60, 70, 80 and 90 °C) and powers (675, 1 125, 1 575 and 2 025 W) were discussed in this paper. The results showed that drying temperature had a significant effect on the drying rate of papaya. The influence of infrared power on the drying rate of papaya was less. The drying time was reduced with an increase in either drying temperature or infrared power. Infrared drying of papaya slices mainly occurred in the falling rate drying period. According to the statistical results, the middle- and short-wave infrared radiation drying behavior of papaya slices were properly described by Henderson and Pabis model among three mathematical models that were used to fit the experimental data. Better agreement between the predicted and experimental values was obtained using the selected model. The effective diffusion coefficient increased with increasing air temperature or infrared power. The effective moisture diffusion coefficient (D_{eff}) ranged from $11.14 \times 10^{-10} \sim 29.11 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ at different drying temperatures and from $14.29 \times 10^{-10} \sim 17.22 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ at different infrared powers. The calculated activation energy of middle- and short-wave infrared radiation drying for papaya was 32.13 kJ/mol based on the Arrhenius equation.

Key words: infrared drying; drying characteristics; papaya; effective moisture diffusion coefficient; activation energy

中图分类号: TS255.4; TN219

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2015)07-0030-06

doi:10.7506/spkx1002-6630-201507006

番木瓜(*Carica Papaya* Linn)俗称木瓜、满山柚、树冬瓜、万寿果,属于番木瓜科番木瓜属,为多年生常绿草本植物,原产于墨西哥南部和中美洲地区,在中国已有300多年的种植历史,广东、海南、广西等省均有栽培。番木瓜富含糖类、黄酮类、木瓜蛋白酶、萜类化合

物、色素、生物碱等多种成分,具有抗肿瘤、抗癌、免疫调节、美容等功效^[1-3]。但是,番木瓜属于呼吸跃变型果实,采后在病虫害、周围环境等因素的作用下,容易发生软化后熟和发病腐烂等现象,从而失去食用价值和商品价值^[4]。

收稿日期: 2014-06-19

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项目(2013AB020)

作者简介: 高鹤(1990—),男,硕士研究生,研究方向为果蔬加工。E-mail: mustgh@sina.cn

*通信作者: 毕金峰(1970—),男,研究员,博士,研究方向为果蔬精深加工与副产物综合利用技术。E-mail: bijinfeng2010@163.com

干燥是一种传统的食品贮藏技术,可去除果蔬中的水分,抑制物料内部微生物活动,延长食品的货架期,减少贮运费,增加产品的附加值^[5]。目前国内番木瓜干燥以传统日晒干燥和热风干燥为主,对微波真空干燥^[6]、热泵干燥^[7]、真空冷冻干燥^[7]以及超声波渗透脱水^[8]报道较少,有待进一步加强对番木瓜干燥加工的研究。红外辐射干燥作为目前新型的农产品干燥加工方法,因其具有节能、高效、干燥均匀等特点,而在近些年干制品加工中得到快速的应用^[9]。中短波红外干燥(med- and short-wave infrared radiation drying, IR)是一种新兴果蔬红外辐射干燥加工技术,红外辐射波长范围为0.75~4 μm,具有波长短、穿透力强、加热快等特点,已经成功应用于苹果片^[10]、胡萝卜^[11]以及茄子^[12]的干燥加工中。但目前国内外对于番木瓜的中短波红外干燥方面的研究还未见报道。本实验探究不同干燥温度和红外功率对番木瓜中短波红外干燥特性的影响,并探讨干燥过程中水分有效扩散系数(effective moisture diffusion coefficient, D_{eff})的变化,以期对番木瓜中短波红外干燥提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

番木瓜购于北京市上地小营果品批发市场,产地海南三亚,品种为大白。选择形状、大小相似,质量约为(1.0±0.1) kg,表皮颜色由绿转黄,表面完整无损,成熟状态果实。

1.2 仪器与设备

FA-200切片机 广东省南海市德丰电热设备厂;
DHG-9203电热恒温干燥箱 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;
AUW220电子天平 日本Shimadzu公司。

1.3 方法

1.3.1 中短波红外干燥番木瓜

根据预实验的结果,选用干燥温度为60、70、80、90℃,红外功率为675、1 125、1 575、2 025 W,进行番木瓜中短波红外干燥实验,测定物料的质量变化。实验前,将原料去皮、去籽,用切片机将物料横切为扇形片状,厚度8 mm,经105℃恒温干燥法测定原料的初始含水量为(7.50±0.02) g/g(以干质量计,下同)。选择形状、大小相似的番木瓜片单层平铺到托盘上,待设备达到设定温度后放入。前1 h每隔5 min用电子天平对样品进行一次称量,第2小时每隔10 min称量一次,之后每隔30 min称量一次直到含水率达到0.1 g/g为止,干燥结束。每次实验重复3次,取平均值。

1.3.2 水分比及干燥速率计算方法

水分比(moisture ratio, MR)指在一定干燥条件下

样品的剩余水分比例,按下式计算^[10]。

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (1)$$

式中: M_0 为初始含水量/(g/g); M_e 为干燥到平衡时的含水量/(g/g); M_t 为任意 t 时刻的含水量/(g/g)。由于 M_0 和 M_t 远大于 M_e ,公式(1)可简化为公式(2)。

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

干燥速率(drying rate, DR)按公式(3)计算^[10]。

$$DR / (g / (g \cdot \min)) = \frac{M_{t_1} - M_{t_2}}{t_2 - t_1} \quad (3)$$

式中: M_{t_1} 和 M_{t_2} 分别为干燥到 t_1 和 t_2 时番木瓜的含水量/(g/g); t_1 和 t_2 为干燥时间/min。

1.3.3 模型分析

选用3种较为常见的数学模型对番木瓜中短波红外干燥数据进行拟和,数学模型名称及模型表达式如表1所示^[13-15]。

表1 果蔬薄层干燥的数学模型
Table 1 Thin layer drying models for vegetables and fruits

序号	模型名称	模型表达式
1	Newton	$MR = \exp(-kt)$
2	Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$
3	Two-term	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt)$

注: a 、 k 、 b 、 g 为模型参数, t 为干燥时间/min。

利用决定系数(R^2)、均方根误差(root-mean-square error, RMSE)、误差平方和(error sum of square, SSE)和离差平方和(χ^2)4个参数对模型拟合结果进行评价,其中决定系数 R^2 是评价模型拟合结果的主要参数。 R^2 越大、RMSE、SSE和 χ^2 越小,则拟合度越好。具体计算公式如下^[14-16]:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{\text{pre},i} - \overline{MR_{\text{exp}}})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{\text{pre},i} - MR_{\text{exp}})^2} \quad (4)$$

$$SSE = \sum_{i=1}^N (MR_{\text{pre},i} - MR_{\text{exp},i})^2 \quad (5)$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (MR_{\text{pre},i} - MR_{\text{exp},i})^2}{N} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{\text{pre},i} - MR_{\text{exp},i})^2}{N - n} \quad (7)$$

式中: $MR_{\text{exp},i}$ 和 $MR_{\text{pre},i}$ 分别为第 i 个数据点的实验所得MR和模型预测所得MR; N 为实验数据点的个数; n 为模型中参数的个数。

1.3.4 水分有效扩散系数

在降速阶段,可以利用菲克第二定律来描述样品的干燥特性^[17]。Crank假设干燥过程中水分迁移主要是利用水分扩散进行,水分有效扩散和干燥温度都恒定,并忽略样品体积收缩变化的情况下,提出了公式(8)^[15]。

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

式中: D_{eff} 为物料的水分有效扩散系数/ m^2/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。

1.3.5 活化能

通过阿伦尼乌斯公式(Arrhenius equation)可以表示物料在干燥过程中水分有效扩散系数和干燥温度之间的关系,如公式(9)所示^[13]。

$$D_{\text{eff}} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (9)$$

式中: D_0 为物料中的扩散基数/ m^2/s ; E_a 为样品的干燥活化能/ kJ/mol ; T 为绝对温度/ K ; R 为气体摩尔常数 $8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 。

1.4 数据分析

采用Origin8.0软件绘图并进行多元非线性回归拟和,用SPSS19.0软件进行数据分析。

2 结果与分析

2.1 番木瓜干燥特性

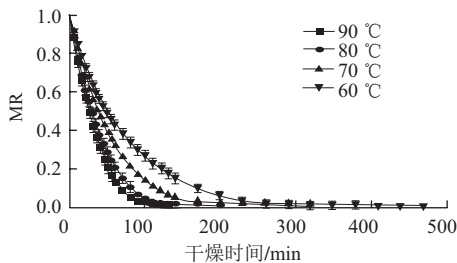


图1 不同温度条件下番木瓜中短波红外干燥特性曲线

Fig.1 Drying curves of papaya in middle- and short-wave infrared radiation drying at different temperatures

由图1可知,番木瓜的含水量随着干燥时间的延长而减少,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90 °C的干燥时间明显短于其他条件下的干燥时间。

由图2可知,番木瓜中短波红外干燥过程属于降速干燥过程,随着物料含水量的降低,干燥速率逐渐减小。干燥温度越高,番木瓜干燥速率越大。相同的情况也出现在对新鲜和渗透处理后蓝莓的红外干燥特性研究中^[14]。

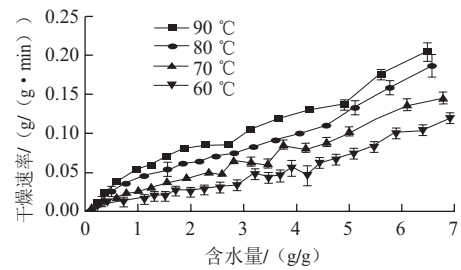


图2 不同温度条件下番木瓜中短波红外干燥速率曲线

Fig.2 Drying rate curves of papaya in middle- and short-wave infrared radiation drying at different temperatures

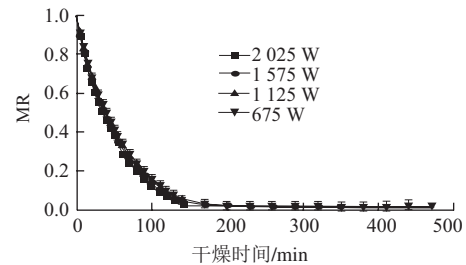


图3 不同功率条件下番木瓜红外干燥特性曲线

Fig.3 Drying curves of papaya in middle- and short-wave infrared radiation drying at different powers

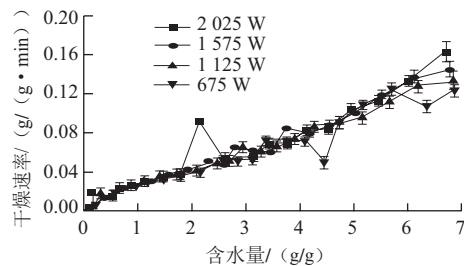


图4 不同功率条件下番木瓜红外干燥速率曲线

Fig.4 Drying rate curves of papaya in middle- and short-wave infrared radiation drying at different powers

由图3可知,番木瓜的含水量随着干燥时间的延长而减少,功率越小则干燥所需时间越长。红外功率为675、1125、1575、2025 W时,对应的干燥时间分别为470、350、320、290 min。由图4可知,红外功率越大,干燥速率越大,但各功率之间差异较小。

2.2 干燥模型的拟合

利用不同干燥模型对番木瓜中短波红外干燥过程进行拟合,结果如表2所示。所有模型的 R^2 均 ≥ 0.995 , SSE 均 ≤ 0.009 , $RMSE$ 均 ≤ 0.020 , χ^2 均 ≤ 0.000 ,表明实验所选用的模型适合描述番木瓜中短波红外干燥过程。其中Henderson and Pabis模型有最大平均 R^2 值(0.9979),最小平均 SSE 值(0.0045)、平均 $RMSE$ 值

(0.012 8) 和 χ^2 值 (0.000 2), 表明Henderson and Pabis模型可以更好地描述番木瓜中短波红外干燥过程中的水分变化。因此, Henderson and Pabis模型是3个模型中最适合描述番木瓜中短波红外干燥过程的模型。

表2 番木瓜薄层干燥模型拟合结果
Table 2 Fitted results of thin-layer drying models for papaya

模型	温度/℃	功率/W	参数				R^2	SSE	RMSE	χ^2
			k	a	b	g				
Newton模型	90	1 575	0.030 8				0.995 2	0.009 2	0.020 9	0.000 5
	80	1 575	0.025 7				0.996 9	0.006 3	0.016 5	0.000 3
	70	1 575	0.019 8				0.999 2	0.001 9	0.008 3	0.000 1
	60	1 575	0.014 1				0.997 9	0.006 3	0.014 0	0.000 2
	70	2 025	0.020 4				0.997 7	0.005 3	0.014 3	0.000 2
	70	1 125	0.018 9				0.998 9	0.002 9	0.010 1	0.000 1
	70	675	0.018 0				0.998 6	0.004 1	0.011 3	0.000 1
Henderson and Pabis模型	90	1 575	1.023 6	0.031 5			0.995 6	0.008 0	0.019 5	0.000 4
	80	1 575	1.009 7	0.026 0			0.996 9	0.006 1	0.016 2	0.000 3
	70	1 575	0.998 5	0.019 8			0.999 2	0.001 9	0.008 3	0.000 1
	60	1 575	0.971 9	0.013 5			0.998 8	0.003 5	0.010 4	0.000 1
	70	2 025	0.998 2	0.020 4			0.997 7	0.005 3	0.014 2	0.000 2
	70	1 125	1.005 2	0.019 0			0.998 9	0.002 8	0.010 0	0.000 1
	70	675	1.006 8	0.018 1			0.998 6	0.004 0	0.011 1	0.000 1
Two-Term模型	90	1 575	0.031 5	0.511 8	0.511 8	0.031 5	0.995 1	0.008 0	0.019 5	0.000 5
	80	1 575	0.026 0	0.504 8	0.504 8	0.026 0	0.996 6	0.006 1	0.016 2	0.000 3
	70	1 575	0.019 8	0.499 2	0.499 2	0.019 8	0.999 1	0.001 9	0.008 3	0.000 1
	60	1 575	0.098 5	0.070 4	0.932 3	0.012 9	0.999 5	0.001 4	0.006 6	0.000 1
	70	2 025	0.020 4	0.499 1	0.499 1	0.020 4	0.997 4	0.005 3	0.014 2	0.000 2
	70	1 125	0.019 0	0.502 6	0.502 6	0.019 0	0.998 8	0.002 8	0.010 0	0.000 1
	70	675	0.018 1	0.503 4	0.503 4	0.018 1	0.998 5	0.004 0	0.011 1	0.000 1

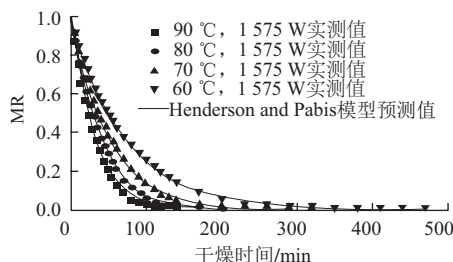


图5 不同干燥条件下实测值与Henderson and Pabis模型预测值的比较
Fig.5 Comparison of experimental data and predicted data using Henderson and Pabis models at different drying conditions

如图5所示, 在不同中短波红外干燥条件下Henderson and Pabis模型的实测值和预测值较为相近, 表明该模型可以较好地预测番木瓜中短波红外干燥过程中水分变化规律。

2.3 Henderson and Pabis模型参数的求解

为了更好地理解番木瓜中短波红外干燥过程中干燥温度和红外功率对水分的影响, 利用Origin8.0软件对Henderson and Pabis模型中的参数 a 、 k 的数值进行回归分析, 得到的干燥温度、红外功率与参数 a 、 k 之间的关系式如下:

$$a = 2.506 \times 10^{-4} + 1.752 \times 10^{-2}T + 4.025 \times 10^{-4}P - 6.124 \times 10^{-6}TP - 4.169 \times 10^{-5}T^2 + 6.663 \times 10^{-9}P^2 \quad (10)$$

$$k = 4.969 \times 10^{-6} + 3.487 \times 10^{-4}T - 1.938 \times 10^{-5}P + 3.193 \times 10^{-7}TP - 1.657 \times 10^{-6}T^2 - 4.658 \times 10^{-10}P^2 \quad (11)$$

式中: a 、 k 为模型参数; T 为干燥温度/℃; P 为红外功率/W; t 为干燥时间/min。

代入Henderson and Pabis模型得到下式:

$$MR = (2.506 \times 10^{-4} + 1.752 \times 10^{-2}T + 4.025 \times 10^{-4}P - 6.124 \times 10^{-6}TP - 4.169 \times 10^{-5}T^2 + 6.663 \times 10^{-9}P^2) \exp[-(4.969 \times 10^{-6} + 3.487 \times 10^{-4}T - 1.938 \times 10^{-5}P + 3.193 \times 10^{-7}TP - 1.657 \times 10^{-6}T^2 - 4.658 \times 10^{-10}P^2)t] \quad (12)$$

2.4 Henderson and Pabis模型验证

选择在中短波红外干燥温度为70℃, 红外功率为1 575 W的条件下进行Henderson and Pabis模型的验证。比较实测值与模型预测值, 结果见图6。实测MR值与预测MR值基本一致, R^2 为0.999 2。因此, 在实验范围内Henderson and Pabis模型更适合表达番木瓜中短波红外干燥过程中的水分变化规律。

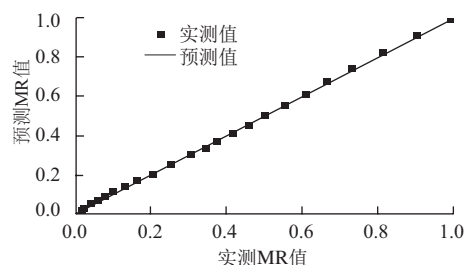


图6 Henderson and Pabis模型验证实测值与预测值的比较
Fig.6 Comparison of experimental data and predicted data using Henderson and Pabis models at selected conditions

2.5 番木瓜中短波红外干燥水分有效扩散系数

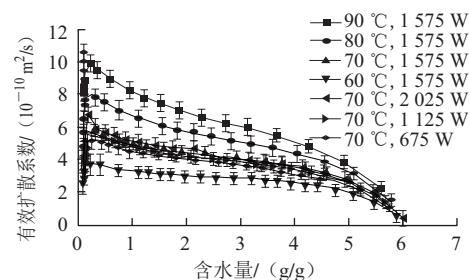


图7 不同干燥条件下水分有效扩散系数随含水量的变化曲线
Fig.7 Curves of effective moisture diffusion coefficient as a function of moisture content for middle-and short-wave infrared radiation drying at different drying conditions

由图7可知, 随着番木瓜含水量的降低, 水分有效扩散系数逐渐增大。当含水量降到0.3 g/g左右时, 水分有效扩散系数均出现明显的减小。造成这一现象的原因可能是干燥过程中水分不断迁移、物料体积收缩以及物料表面硬化等因素综合作用, 使得样品干燥到一定程度时水

分的迁移受到抑制，水分有效扩散系数开始不断减少。在实验条件范围内，不同干燥温度和红外功率条件下，番木瓜片中短波红外干燥的水分有效扩散系数分别为 $0.585\ 46\times 10^{-10}\sim 9.873\ 13\times 10^{-10}$ 、 $0.266\ 83\times 10^{-10}\sim 6.737\ 99\times 10^{-10}\text{ m}^2/\text{s}$ 。干燥温度和红外功率对水分有效扩散系数均有影响，其中干燥温度对于水分有效扩散系数影响更显著($P<0.05$)。

2.6 含水量对番木瓜中短波红外干燥有效扩散系数的影响
可以用三次方程表示水分有效扩散系数和含水量之间的关系^[18]。

$$D_{\text{eff}}=A+BMR+CMR^2+DMR^3 \quad (13)$$

式中： D_{eff} 为水分有效扩散系数/ m^2/s ；MR为水分比； A 、 B 、 C 、 D 为公式参数/ m^2/s 。

根据图7中出现水分有效扩散系数变化的趋势，将整个干燥加工过程以水分有效扩散系数最高值为分段点，将其分成两个阶段（第1阶段为增大阶段、第2阶段为减小阶段），并对各阶段以及整体进行分析。不同干燥条件下番木瓜中短波红外干燥回归系数和决定系数(R^2)的结果如表3所示，进行分阶段分析后各个部分的决定系数(R^2)均在0.98以上，说明方程可以很好地描述番木瓜片中短波红外干燥过程中，水分有效扩散系数与含水量之间的关系。但不分阶段分析的总体决定系数，均要低于分阶段分析的决定系数。

表3 不同干燥条件下番木瓜中短波红外干燥方程回归系数和决定系数
Table 3 Regression coefficients and determination coefficients for papaya under different drying conditions

序号	温度/ $^{\circ}\text{C}$	功率/ W	阶段	参数/ $(10^{-9}\text{ m}^2/\text{s})$				决定系数 R^2
				A	B	C	D	
1	90	1 575	1	4.203	-8.990	17.23	-14.91	0.999 9
			2	0.235 1	364.9	-1.172×10^4	1.228×10^5	0.986 2
			全过程	37.31	-40.75	39.35	-46.19	0.939 5
2	80	1 575	1	3.381	-7.141	14.86	-13.39	0.998 5
			2	-3.467	858.1	-3.858×10^4	5.996×10^5	0.998 8
			全过程	26.89	2.117	-49.00	17.00	0.706 3
3	70	1 575	1	2.383	-4.267	9.620	-9.409	0.998 5
			2	-2.086	420.7	-1.329×10^4	1.355×10^5	0.998 3
			全过程	18.40	16.29	-67.24	35.53	0.718 9
4	60	1 575	1	1.590	-3.114	8.427	-8.410	0.995 1
			2	-1.574	312.9	-1.058×10^4	1.179×10^5	0.988 1
			全过程	12.36	1.545	3.174	-25.23	0.772 8
5	70	2 025	1	2.704	-6.549	15.17	-13.67	0.986 8
			2	-1.964	492.5	-2.197×10^4	3.937×10^5	0.999 8
			全过程	21.09	-6.229	1.291	-27.47	0.802 6
6	70	1 125	1	2.407	-5.193	11.95	-11.13	0.996 9
			2	-2.065	392.4	-1.173×10^4	1.152×10^5	0.991 6
			全过程	17.47	17.26	-66.73	32.54	0.677 2
7	70	675	1	2.204	-3.970	8.693	-8.493	0.995 3
			2	1.415	-196.1	1.591×10^4	-2.866×10^5	0.980 9
			全过程	13.46	48.78	-146.9	92.69	0.525 4

第1、2阶段以及整个干燥过程的平均有效扩散系数见表4。在实验条件范围内，番木瓜片中短波红外干

燥在不同干燥温度和红外功率条件下水分有效扩散系数分别为 $11.14\times 10^{-10}\sim 29.11\times 10^{-10}$ 、 $14.29\times 10^{-10}\sim 17.22\times 10^{-10}\text{ m}^2/\text{s}$ 。其中在不同干燥温度条件下，第1阶段和第2阶段有效扩散系数分别为 $10.87\times 10^{-10}\sim 26.83\times 10^{-10}$ 、 $12.20\times 10^{-10}\sim 36.14\times 10^{-10}\text{ m}^2/\text{s}$ ；在不同红外功率条件下，第1、2阶段有效扩散系数依次为 $14.89\times 10^{-10}\sim 16.77\times 10^{-10}$ 、 $13.82\times 10^{-10}\sim 20.27\times 10^{-10}\text{ m}^2/\text{s}$ ，第2阶段较第1阶段有更明显的影响。在两个阶段中，干燥温度和红外功率对有效扩散系数均有着影响，其中干燥温度影响更为显著。有效扩散系数随着干燥温度和红外功率的升高而不断增大。类似的结果也出现在对无籽葡萄^[19]、葡萄副产物^[20]以及土豆副产物^[21]干燥的研究中。

表4 不同干燥条件下番木瓜中短波红外干燥水分有效扩散系数
Table 4 Moisture effective diffusion coefficients of papaya in middle- and short-wave infrared radiation drying under different drying conditions

序号	温度/ $^{\circ}\text{C}$	功率/ W	有效扩散系数/ $(10^{-10}\text{ m}^2/\text{s})$		
			第1阶段	第2阶段	全过程
1	90	1 575	26.83	36.14	29.11
2	80	1 575	22.36	25.58	22.94
3	70	1 575	16.61	18.43	16.90
4	60	1 575	10.87	12.20	11.14
5	70	2 025	16.77	20.27	17.22
6	70	1 125	15.64	17.59	15.98
7	70	675	14.89	13.82	14.29

2.7 水分有效扩散系数与干燥参数的关系
为了解干燥温度 T 和红外功率 P 对番木瓜片中短波红外干燥水分有效扩散系数 D_{eff} 的影响，利用Origin8.0软件对实验数据进行回归分析，得到干燥温度 $T(^{\circ}\text{C})$ 、红外功率 $P(\text{kW})$ 与水分有效扩散系数 $D_{\text{eff}}(10^{-10}\text{ m}^2/\text{s})$ 的关系表达式。

$$D_{\text{eff}}=-8\ 286+118.4T+5\ 261P-75.16TP+1.265\times 10^{-13}T^2-1.673\times 10^{-10}P^2 \quad (14)$$

经回归分析得到 R^2 值为1.000，说明水分有效扩散系数 D_{eff} 可以用干燥温度 T 和红外功率 P 来表示。

2.8 活化能计算结果
根据阿伦尼乌斯方程，计算出番木瓜片中短波红外干燥第1阶段、第2阶段以及整体的活化能分别为31.19、36.13、32.13 kJ/mol。因此，可以看出中短波红外干燥在第1阶段中更容易去除水分。番木瓜中短波红外干燥的活化能与其他果蔬^[22-25]干燥的结果相近。

3 结 论

番木瓜中短波红外干燥主要表现为降速干燥。干燥温度和红外功率对番木瓜中短波红外干燥特性均有显著影响($P<0.05$)。随着干燥温度和红外功率的增大，干燥

速率逐渐增大,干燥所需时间缩短。番木瓜中短波红外干燥水分有效扩散系数随着干燥温度和红外功率的增大而增大。番木瓜中短波红外干燥的活化能为32.13 kJ/mol。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] NGUYEN T T, SHAW P N, PARAT M O, et al. Anticancer activity of carica papaya: a review[J]. Molecular Nutrition & Food Research, 2013, 57(1): 153-164.
- [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] ONG M K, KAZI F K, FORNEY C F, et al. Effect of gaseous ozone on papaya anthracnose[J]. Food and Bioprocess Technology, 2013, 6(11): 2996-3005.
- [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] NIMMANPIPU N, THERDTHAI N, DHAMVITHEE P. Characterisation of osmotically dehydrated papaya with further hot air drying and microwave vacuum drying[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2013, 48(6): 1193-1200.
- [7] 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.
- [8] RODRIGUES S, OLIVEIRA F I P, GALLAO M I, et al. Effect of immersion time in osmosis and ultrasound on papaya cell structure during dehydration[J]. Drying Technology, 2009, 27: 220-225.
- [9] 潘忠礼, 马海乐, 佟秋芳, 等. 食品和农产品干燥的一种有效方法-红外加热法[J]. 干燥技术与设备, 2013, 11(1): 61-66.
- [10] 巨浩羽, 肖红伟, 白峻文, 等. 苹果片的中短波红外干燥特性和色泽变化研究[J]. 农业机械学报, 2013, 44(2): 186-191.
- [11] 王相友, 张海鹏, 张丽丽, 等. 胡萝卜切片红外干燥特性与数学模型[J]. 农业机械学报, 2013, 44(10): 198-202.
- [12] 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.
- [13] ERBAY Z, ICIER F. A review of thin layer drying of foods: theory, modeling, and experimental results[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2010, 50(5): 441-464.
- [14] SHI Junling, PAN Zhongli, MCHUGH T H, et al. Drying and quality characteristics of fresh and sugar-infused blueberries dried with infrared radiation heating[J]. LWT-Food Science and Technology, 2008, 41(10): 1962-1972.
- [15] 杨爱金, 毕金峰, 刘璇, 等. 预干燥含水率对苹果片变温压差膨化干燥特性的影响[J]. 中国食品学报, 2014, 14(2): 180-186.
- [16] 李怡彬, 孔智伟, 陈君琛, 等. 卤制香菇热风干燥特性及其数学模型[J]. 中国食品学报, 2012, 12(10): 102-106.
- [17] WANG Zhengfu, SUN Junhong, LIAO Xiaojun, et al. Mathematical modeling on hot air drying of thin layer apple pomace[J]. Food Research International, 2007, 40(1): 39-46.
- [18] 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.
- [19] ÇAĞLAR A, TOĞRUL İ T, TOĞRUL H. Moisture and thermal diffusivity of seedless grape under infrared drying[J]. Food and Bioprocess Technology, 2009, 87(4): 292-300.
- [20] CELMA A R, LÓPEZ-RODRÍGUEZ F, BLÁZQUEZ F C. Experimental modelling of infrared drying of industrial grape by-products[J]. Food and Bioprocess Technology, 2009, 87(4): 247-253.
- [21] RUIZ CELMA A, CUADROS F, LÓPEZ-RODRÍGUEZ F. Characterisation of industrial tomato by-products from infrared drying process[J]. Food and Bioprocess Technology, 2009, 87(4): 282-291.
- [22] 王君, 房升, 陈杰, 等. 糖渍甘薯热风干燥特性及数学模型研究[J]. 食品科学, 2012, 33(7): 105-109.
- [23] 康彦, 关志强, 李敏, 等. 预处理对无核白葡萄热风干燥特性的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(5): 119-123. doi: 10.7506/spkx1002-6630-201405024.
- [24] HUI C L, LAW C L, CLOKE M. Modeling using a new thin layer drying model and product quality of cocoa[J]. Journal of Food Engineering, 2009, 90(2): 191-198.
- [25] KUMAR N, SARKAR B C, SHARMA H K. Mathematical modelling of thin layer hot air drying of carrot pomace[J]. Journal of Food Science and Technology, 2012, 49(1): 33-41.