

# 二氧化碳浸渍处理对生姜真空微波干燥特性及微观结构的影响

魏来<sup>1,2</sup>, 王治同<sup>2</sup>, 余元善<sup>1</sup>, 徐玉娟<sup>1</sup>, 安可婧<sup>1</sup>

(1. 广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所, 农业部功能食品重点实验室, 广东省农产品加工重点实验室, 广东广州 510610) (2. 吉林农业大学食品科学与工程学院, 吉林长春 130118)

**摘要:** 为探究二氧化碳浸渍处理对生姜真空微波干燥特性及微观结构的影响, 分别选用不同浸渍温度(35、40、45 °C)、压力(1、2、3 MPa)、时间(3、5、7 h)对生姜进行预处理, 测定干燥过程中水分比、干燥速率、有效扩散系数的变化, 并进行薄层干燥模型拟合。此外, 对不同浸渍条件下生姜的微观结构进行研究。试验结果显示: 经二氧化碳浸渍后, 生姜的干燥速率显著提高, 尤其在干燥后期。当浸渍条件为2 MPa、45 °C、7 h时, 样品的水分扩散最快, 且干燥时间相比于直接干燥样品缩短了47%。5种薄层干燥模型中, 通过比较决定系数( $R^2$ )、卡方( $\chi^2$ )和均方根差(RMSE), 认为 Modified Page 模型对生姜干燥过程中水分变化的拟合效果最好。扫描电镜结果显示, 二氧化碳浸渍增大了生姜内部的细胞面积, 增加孔隙率, 提高物料的传质传热性能。结果表明, 二氧化碳浸渍对于改善生姜内部结构、提高干燥效率具有积极的影响, 为生姜干燥新技术的开发提供了理论依据。

**关键词:** 二氧化碳浸渍(CM); 生姜; 真空微波干燥(MVD); 干燥速率; 水分扩散

文章编号: 1673-9078(2019)08-121-129

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2019.8.019

## Effect of Carbonic Maceration Treatment on Vacuum-microwave Drying Characteristics and Microstructure of Ginger

WEI Lai<sup>1,2</sup>, WANG Zhi-tong<sup>2</sup>, YU Yuan-shan<sup>1</sup>, XU Yu-juan<sup>1</sup>, AN Ke-jing<sup>1</sup>

(1. Sericulture and Agri-Food Research Institute Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Functional Foods, Ministry of Agriculture, Guangdong Key Laboratory of Agricultural Products Processing, Guangzhou 510610, China) (2. College of Food Science and Engineering, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China)

**Abstract:** In order to study the effects of carbon dioxide impregnation (CDI) on the microwave-vacuum drying characteristics and microstructure of ginger, different temperatures (35, 40, 45 °C), pressures (1, 2, 3 MPa) and treatment times (3, 5, 7 h) were selected for CDI to pretreat ginger. The changes in moisture ratio, drying rate, effective diffusion coefficient of ginger during drying were measured, and the mathematical model for thin layer drying was fitted. In addition, the microstructures of ginger under different CDI conditions were also studied. The results showed that after CDI, the rate of drying ginger significantly increased, especially in the late drying stage. When the ginger was pretreated at 2 MPa and 45 °C for 7 h, the moisture diffusion was the fastest, and the drying time was shortened by 47% compared to that for the sample dried directly. Among the five thin layer drying models, the Modified Page model exhibited the best fit to the changes in ginger's moisture content during drying, based on the coefficient of determination ( $R^2$ ), chi-square ( $\chi^2$ ) and root mean square error (RMSE). Scanning electron microscopy revealed that CDI increased the cell area and porosity of ginger tissues, and enhanced the mass and heat transfer of the material. Therefore, CDI had a positive effect on improving the internal structure and drying efficiency of ginger. The results obtained in this study provide the theoretical basis for the development of new drying technologies for ginger.

**Key words:** carbonic maceration (CM); ginger; vacuum-microwave drying; drying rate; water diffusion

收稿日期: 2018-12-09

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0400900; 2017YFD0400904);

国家自然科学基金项目(31501500)

作者简介: 魏来(1994-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 果蔬贮藏加工

通讯作者: 安可婧(1985-), 女, 博士, 副研究员, 研究方向: 果农产品加工及贮藏

生姜是一种姜科姜属的植物根茎, 含有丰富的蛋白质、碳水化合物、维生素等营养成分, 是传统的辛香保健蔬菜之一, 具有抗氧化、降温防暑、杀菌解毒等功效<sup>[1,2]</sup>。新鲜生姜的水分较高, 在贮藏过程中易干瘪、霉烂, 因此干燥处理成为延长生姜贮藏期的一种重要方法<sup>[3]</sup>。晾晒法和烘烤法作为传统的生姜干燥方

法, 存在干燥时间长、产品品质差、硫含量较高、易被霉菌污染等问题, 因此, 近年来一些新型干燥技术被应用于生姜干燥, 如微波流态化干燥、热风-微波联合干燥及微波干燥等<sup>[4-6]</sup>。

真空微波干燥技术 (vacuum-microwave drying, MVD) 可以使物料内外同时受热, 在真空条件下降低水分的沸点温度, 从而在提高干燥效率的同时较好地保留物料的营养成分<sup>[7,8]</sup>。李丽娟等<sup>[9]</sup>在探究不同干燥方式对莲藕脆片品质影响的过程中, 发现真空微波干燥的莲藕片中 Vc 和多酚的保留率最高; 卜召辉<sup>[10]</sup>等人在对金针菇进行真空微波干燥的过程中, 发现真空微波干燥的效果明显优于其他干燥方法。然而真空微波干燥均匀性差, 容易出现物料边缘或尖角部分焦化的现象, 且干燥后期水分扩散速度较慢, 这些问题制约了真空微波干燥的应用<sup>[11,12]</sup>。因此, 在物料干燥之前进行适当的前处理, 增强物料内部细胞的通透性, 从而改善其传质传热性能, 是干燥技术发展的重要趋势。二氧化碳浸渍技术 (carbonic maceration, CM) 最早被应用于葡萄酒的酿造, 通过增加细胞孔隙率和无氧环境下的物质转化, 达到提高葡萄酒风味和营养品质的目的<sup>[13]</sup>。近年来, 因 CO<sub>2</sub> 成本低廉、绿色环保, 被广泛地应用于果蔬加工领域<sup>[14]</sup>, 通过学者们的大量研究, 发现 CM 技术不仅对果蔬的营养品质具有良好的保护作用<sup>[15-17]</sup>, 且对于果蔬的干燥效率也有着积极的影响。An 等<sup>[18]</sup>人用 CM 方法处理三华李, 发现 CM 处理能破坏三华李表面蜡质层, 提高细胞膜渗透率, 干燥时间可缩短近 40%; Liu 等<sup>[19]</sup>将红辣椒经 CM 处理后进行微波干燥, 发现 CM 处理使辣椒干燥速率提高了 1.50~1.85 倍; 刘沫茵等<sup>[20]</sup>用 CO<sub>2</sub> 辅助葡萄发酵, 并进行干制, 发现经过 CO<sub>2</sub> 处理后葡萄的干燥速率提高了 44.60%。

因此在本研究中, 我们将 CM 技术与生姜真空微波干燥相结合, 探讨不同 CM 温度、压力、处理时间对生姜 MVD 干燥特性及微观结构的影响, 进一步探究 CM 技术对生姜内部微观结构的影响与水分扩散效率的关系, 以期为生姜干燥新技术开发奠定理论基础。

## 1 材料与方

### 1.1 材料

新鲜生姜, 购于广州市天平架果蔬批发市场, 于 4 °C 冷库保存。

### 1.2 仪器与设备

CO<sub>2</sub> 超临界流体萃取设备, 台超萃取洗净精机有

限公司; RX-10ZK 型微波真空干燥机, 广州荣兴工业微波设备有限公司; JJ1000 型电子天平, 常熟市双杰测试仪器厂。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 原料预处理

挑选根茎粗壮的新鲜生姜, 清洗后去皮, 统一切成直径为 3.4 cm、厚度为 5 mm (±0.5 mm) 的圆形姜片。

#### 1.3.2 样品制备

将预处理后的姜片, 放入二氧化碳浸渍罐中, 先将浸渍罐外的加热装置打开, 并设置一定温度, 然后向浸渍罐中注入二氧化碳, 直至压力达到设定值后, 停止注入气体, 开始浸渍。

浸渍完毕后将原料进行真空微波干燥, 经前期预实验确定了真空微波干燥的工艺参数, 功率为 1200 W, 真空度 -90 kPa, 干燥过程选取两段式加热, 干燥第一阶段间歇比 PR1=1.70 (10 s/7 s, t<sub>on</sub>/t<sub>off</sub>), 在干燥至湿基含水率为 30%±3% 时, 将第二阶段间歇比调整为 PR2=3.00 (5 s/10 s, t<sub>on</sub>/t<sub>off</sub>)。当姜片的湿基含水率达到 12%±2% 时为干燥终点, 取出待用。

#### 1.3.3 间歇比的测定

间歇比 (pulse ratio, PR) 对于 MVD 是指微波启动和停止的频率, 其表达式如 (1) 所示:

$$PR = \frac{t_{on} + t_{off}}{t_{off}} \quad (1)$$

式中: t<sub>on</sub>: 微波开启时间, s; t<sub>off</sub>: 微波停止时间, s。

#### 1.3.4 水分比的测定

水分比用于表示一定干燥条件下物料还有多少水分未被除去<sup>[21]</sup>, 通常用 MR 表示, 其计算方法如式

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

式中: MR: 水分比; M: 某时刻物料的干基含水率, %; M<sub>e</sub>: 物料的平衡干基含水率, %; M<sub>0</sub>: 物料的初始干基含水率, %; M<sub>e</sub> 相对于初始干基含水率 M<sub>0</sub> 来说比较小, 可以忽略不计。

#### 1.3.5 干燥速率的测定

干燥速率表示每克干基单位时间内失掉的水分含量, 其计算方法如式 (3):

$$DR = \frac{M_{d,i+1} - M_{d,i}}{m_e(t_{i+1} - t_i)} \quad (3)$$

式中: DR: 干燥速率, g H<sub>2</sub>O/(g dw·min); m<sub>e</sub>: 物料平衡时刻的干基质量, g; M<sub>d,i+1</sub>: t<sub>i+1</sub> 时刻干基含水量, g; M<sub>d,i</sub>: t<sub>i</sub> 时刻干基含水量, g。

#### 1.3.6 干燥数学模型的建立

##### 1.3.6.1 模型的选择

本文选用了 5 种常用的薄层干燥模型对于生姜 MVD 过程进行研究, 5 种薄层干燥模型如表 1 所示。

表 1 常用薄层干燥模型

Table 1 The thin layer drying curves models commonly used

序号	模型名称	公式表达式
1	Lewis	$MR=\exp(-kt)^{[22]}$
2	Page	$MR=\exp(-kt^n)^{[23]}$
3	Henderson and Pabis	$MR=a\exp(-kt)^{[24]}$
4	Logarithmic	$MR=a\exp(-kt)+c^{[25]}$
5	Modified Page	$MR=\exp(-(kt)^n)^{[26]}$

### 1.3.6.2 模型评价指标

干燥模型拟合的优劣程度通常由决定系数 ( $R^2$ )、均方根误差 (RMSE)、卡方 ( $\chi^2$ ) 决定<sup>[27,28]</sup>。决定系数 ( $R^2$ ) 反映了拟合值与预测值之间的相关程度。当  $R^2$  越接近于 1 时, 表示该拟合方程的可参考价值越高, 相反, 越接近于 0 时, 可参考价值越低。 $R^2$  的计算方法如式 (4):

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

均方根差 (RMSE) 又称回归标准误差, 均方根差的值接近于零表示拟合效果很好, 其计算公式 (5):

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

卡方 ( $\chi^2$ ) 的计算公式如式 (6):

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{N - n} \quad (6)$$

式中:  $MR_{pre,i}$ : 水分比的预测值;  $MR_{exp,i}$ : 水分比的试验值;  $N$ : 观测次数;  $n$ : 回归模型中常数项的个数。

### 1.3.7 生姜微观结构的测定

将干燥后的姜片固定在样品台上, 在 15 kV 下真空喷金, 利用扫描电镜进行观察、取像。

### 1.3.8 生姜内部细胞面积的测定

从不同 CM 条件处理后的生姜电镜图中, 选取 20 个细胞结构, 对其直径进行测量, 换算成细胞面积 (拟按椭圆形计算), 然后取平均值。

### 1.3.9 数据统计分析

实验所得数据采用 origin 8.5 软件作图及进行生姜干燥动力学模型拟合分析。

## 2 结果与分析

在前期的预实验中, 已分别选取 CM 温度 30、35、40、45、50 °C, CM 压力 1、3、5、7、9 MPa, CM 时间 1、3、5、7、9 h 进行单因素试验, 通过对比干燥特性及总酚、颜色等品质指标, 筛选出以下 CM 处理条件 (如表 2) 进行后续试验的研究。

表 2 不同 CO<sub>2</sub> 浸渍预处理的工艺参数

Table 2 Process parameters of carbonic maceration

pretreatment at different conditions			
序号	压力/MPa	时间/h	温度/°C
CM1	2	3	35
CM2	2	3	40
CM3	2	3	45
CM4	1	3	45
CM5	2	3	45
CM6	3	3	45
CM7	2	3	45
CM8	2	5	45
CM9	2	7	45

### 2.1 不同 CM 条件对生姜 MVD 动力学的影响

#### 2.1.1 不同 CM 温度对生姜 MVD 动力学的影响

如图 1a 所示, CM 处理的样品和直接干燥样品的水分比均随着干燥时间逐渐下降, 干燥初期水分比下降较快, 随后下降速度变慢并趋于平缓, 而在干燥后期, 经 CM 处理后样品水分比的下降速度都快于直接干燥的样品, 其中 CM2-40 °C 处理的样品水分比下降最快, 且干燥时间比直接干燥样品缩短了 33%。

图 1b 为不同 CM 温度下样品干燥速率随水分含量的变化。据前人报道<sup>[29]</sup>, 微波干燥一般分为升速、恒速、降速三个阶段。在干燥初期, 物料受热迅速升温, 干燥速率加快, 为升速阶段; 随着干燥的进行, 物料表面水分蒸发, 内部水分及时补充到表面, 干燥速率趋于稳定, 此为恒速阶段。然而, 本研究中样品的干燥速率曲线经升速阶段后直接降速, 没有恒速阶段, 这是由于真空环境降低了水的沸点, 使物料表面水分蒸发过快, 内部水分扩散速率小于表面蒸发速率, 干燥速率有所下降。如图 1b 所示, 在干燥初期的升速阶段, CM 处理对样品干燥速率的影响较小。而在干燥后期, 经 CM 处理样品的干燥速率均高于直接干燥样品, 其中 CM3-45 °C 样品的干燥速率最快, 其原因是 CM 处理使物料内部的细胞结构扩张, 减小传质传热阻力, 使其干燥速率加快, 下文的电镜结果也证实了 CM 对生姜细胞结构有所改变这一结论。

不同 CM 温度下生姜干燥过程中的有效水分扩散系数 ( $D_{eff}$ ) 如表 3 所示, 相比于直接干燥样品, 经 CM 处理样品的  $D_{eff}$  均有所增大, 且  $D_{eff}$  随 CM 温度的升高而增大, 其中 CM3-45 °C 样品的  $D_{eff}$  最大, 这与干燥速率的变化趋势相一致。

表 3 不同 CO<sub>2</sub> 浸渍温度的生姜 MVD 条件下的有效水分扩散系数

**Table 3 Values of effective diffusivity of ginger under MVD with different carbonic maceration temperatures**

条件	线性回归拟合方程	决定系数 R <sup>2</sup>	D <sub>eff</sub> /(m <sup>2</sup> /s)
fresh+MVD	y=-0.0013x-0.7591	0.8885	3.293×10 <sup>-9</sup>
CM1+MVD	y=-0.0019x-0.748	0.8646	4.813×10 <sup>-9</sup>
CM2+MVD	y=-0.002x-0.6105	0.8737	5.066×10 <sup>-9</sup>
CM3+MVD	y=-0.0025x-0.4558	0.9265	6.333×10 <sup>-9</sup>

表 4 不同 CO<sub>2</sub> 浸渍压力的生姜 MVD 条件下的有效水分扩散系数

**Table 4 Values of effective diffusivity of ginger under MVD with different carbonic maceration pressures**

条件	线性回归拟合方程	决定系数 R <sup>2</sup>	D <sub>eff</sub> /(m <sup>2</sup> /s)
fresh+MVD	y=-0.0013x-0.7591	0.8885	3.293×10 <sup>-9</sup>
CM4+MVD	y=-0.0021x-0.8048	0.8595	5.319×10 <sup>-9</sup>
CM5+MVD	y=-0.0025x-0.4558	0.9265	6.333×10 <sup>-9</sup>
CM6+MVD	y=-0.0024x-0.4326	0.9544	6.079×10 <sup>-9</sup>

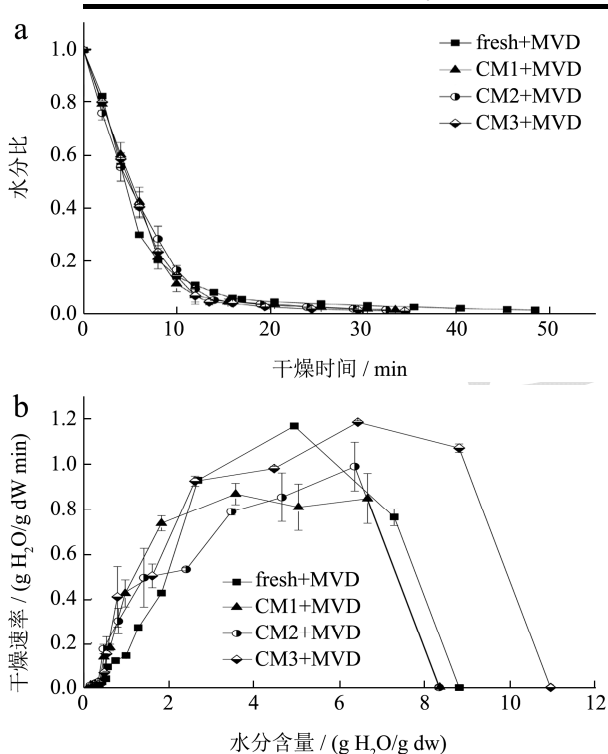


图 1 不同 CO<sub>2</sub> 浸渍温度的生姜真空微波干燥过程中水分比及干燥速率的变化

Fig.1 The moisture ratio and drying rate during MVD of ginger with different carbonic maceration temperatures

2.1.2 不同 CM 压力对生姜 MVD 动力学的影响

如图 2a, CM 处理样品和直接干燥样品的水分比均随干燥时间逐渐下降, 经 CM 处理后样品的水分比下降速度较快, 且干燥时间有明显缩短, 其中 CM4-1 MPa 处理的样品水分比下降最快, 且干燥时间比直接干燥样品缩短了 36%, 其次是 CM5-2 MPa 的样品, 干燥时间缩短了 29%。图 2b 为不同 CM 压力下样品干燥速率随水分含量的变化, 如图, 在干燥过程中, 样品的干燥速率曲线均呈先上升后下降的趋势。在干

燥后期的降速阶段, CM 处理样品的干燥速率均高于直接干燥样品, 其中 CM5-2 MPa 样品的干燥速率最快。不同 CM 压力下生姜干燥过程中的有效扩散系数 (D<sub>eff</sub>) 如表 4, 相比于直接干燥样品, 经不同 CM 压力处理的样品 D<sub>eff</sub> 均有所增大, 其中 CM5-2 MPa 样品的 D<sub>eff</sub> 最大, 与干燥速率的结果一致, 可知适当增大 CM 压力有利于物料中水分扩散, 而压力过大, CM 处理对物料内部结构破坏严重, 反而使物料中水分扩散速度下降, 这与刘沫茵<sup>[20]</sup>对葡萄干制的研究结论相似。

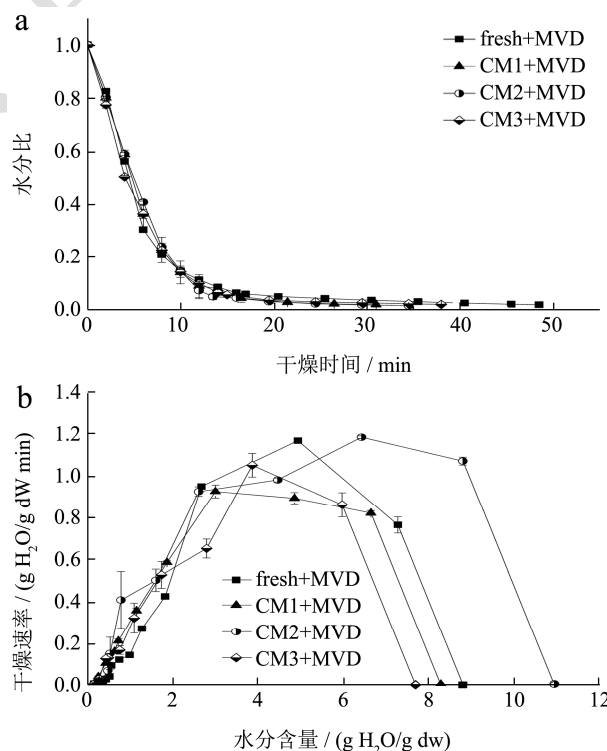


图 2 不同 CO<sub>2</sub> 浸渍压力的生姜真空微波干燥过程中水分比及干燥速率的变化

Fig.2 The moisture ratio and drying rate during MVD of ginger with different carbonic maceration pressures

### 2.1.3 不同 CM 处理时间对生姜 MVD 动力学的影响

如图 3a 所示, CM 处理样品水分比的下降速度快于直接干燥的样品, 且在干燥后期尤为明显。其中 CM9-7 h 处理的样品水分比下降最快, 且干燥时间比直接干燥样品缩短了 47%, 其次是 CM8-5 h 的样品, 干燥时间缩短了 42%。

图 3b 为不同 CM 处理时间下样品干燥速率随水分含量的变化, 如图所示, 在干燥过程中, 样品的干燥速率均呈先上升后下降的趋势。在干燥初期, CM8-5 h 样品的干燥速率最快。在干燥后期, 直接干燥样品的干燥速率迅速下降, 明显低于 CM 处理的样品。

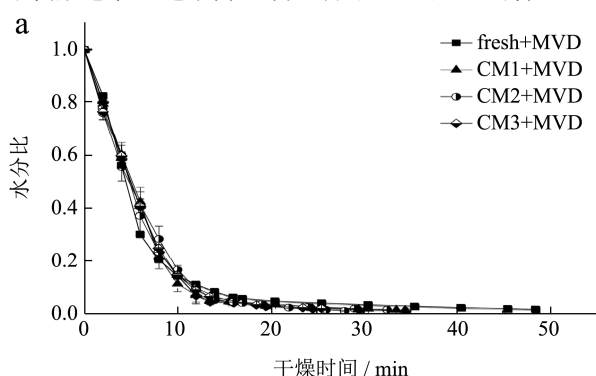


表 5 不同 CO<sub>2</sub> 浸渍时间的生姜 MVD 条件下的有效水分扩散系数

Table 5 Values of effective diffusivity of ginger under MVD with different carbonic maceration treatment durations

条件	线性回归拟合方程	决定系数 R <sup>2</sup>	D <sub>eff</sub> (m <sup>2</sup> /s)
fresh+MVD	y=-0.0013x-0.7591	0.8885	3.293×10 <sup>-9</sup>
CM7+MVD	y=-0.0025x-0.4558	0.9265	6.333×10 <sup>-9</sup>
CM8+MVD	y=-0.0033x+0.0434	0.988	8.359×10 <sup>-9</sup>
CM9+MVD	y=-0.0034x-0.1231	0.9915	8.612×10 <sup>-9</sup>

表 6 不同 CO<sub>2</sub> 浸渍条件下薄层干燥模型拟合

Table 6 Thin layer drying model fitting under different carbonic maceration conditions

条件	模型编号	方程系数				R <sup>2</sup>	χ <sup>2</sup>	RMSE
		a	k	n	c			
CM1	1		0.2246			0.9975	6.98×10 <sup>-3</sup>	0.0835
	2		0.2576	0.9290		0.9974	2.25×10 <sup>-4</sup>	0.0150
	3	0.9992	0.2245			0.9971	2.46×10 <sup>-4</sup>	0.0157
	4	0.9813	0.2407		0.0200	0.9991	7.06×10 <sup>-5</sup>	0.0079
	5		0.2323	0.9285		0.9974	2.25×10 <sup>-4</sup>	0.0150
CM2	1		0.1719			0.9947	4.67×10 <sup>-4</sup>	0.0216
	2		0.1029	1.2566		0.9972	3.81×10 <sup>-4</sup>	0.0195
	3	1.0089	0.1731			0.9939	4.66×10 <sup>-4</sup>	0.0216
	4	1.0052	0.1753		0.0043	0.9928	5.13×10 <sup>-4</sup>	0.0212
	5		0.1637	1.2551		0.9972	3.80×10 <sup>-4</sup>	0.0195
CM3	1		0.1958			0.9961	3.73×10 <sup>-4</sup>	0.0193
	2		0.1183	1.2589		0.9984	1.77×10 <sup>-4</sup>	0.0133

转下页

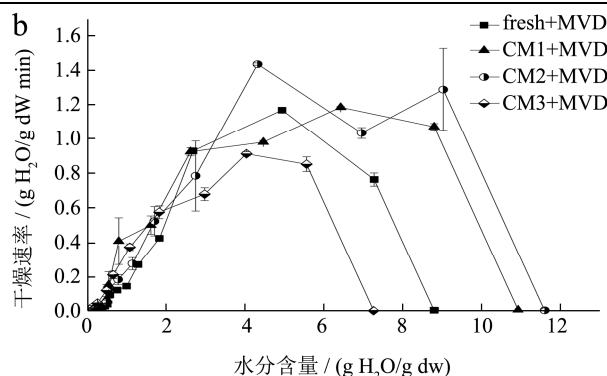


图 3 不同 CO<sub>2</sub> 浸渍时间的生姜真空微波干燥过程中水分比及干燥速率的变化

Fig.3 The moisture ratio and drying rate during MVD of ginger with different carbonic maceration treatment durations

不同 CM 时间处理的生姜干燥过程中的有效扩散系数 (D<sub>eff</sub>) 如表 5 所示, 相比于直接干燥样品, CM 处理的样品 D<sub>eff</sub> 均有所增大, 且 D<sub>eff</sub> 随 CM 时间的延长而增大, 其中 CM9-7 h 样品的 D<sub>eff</sub> 最大, 其次是 CM8-5 h 处理的样品, 可知适当延长 CM 处理时间, 对于改善物料内部细胞结构具有积极作用, 可以加快物料中水分的扩散。

接上页							
	3	1.0068	0.1967		0.9955	$3.69 \times 10^{-4}$	0.0192
	4	1.0079	0.1960	-0.0012	0.9946	$4.23 \times 10^{-4}$	0.0192
	5		0.1835	1.2571	0.9984	$1.97 \times 10^{-5}$	0.0044
	1		0.2297		0.9990	$1.01 \times 10^{-4}$	0.0101
	2		0.2066	1.0571	0.9990	$9.21 \times 10^{-5}$	0.0096
CM4	3	1.0010	0.2299		0.9989	$1.01 \times 10^{-4}$	0.0100
	4	0.9932	0.2363	0.0086	0.9992	$7.02 \times 10^{-5}$	0.0078
	5		0.2251	1.0561	0.9990	$9.21 \times 10^{-5}$	0.0096
	1		0.1958		0.9961	$3.73 \times 10^{-4}$	0.0193
	2		0.1183	1.2589	0.9984	$1.77 \times 10^{-4}$	0.0133
CM5	3	1.0068	0.1967		0.9955	$3.69 \times 10^{-4}$	0.0192
	4	1.0079	0.1960	-0.0012	0.9946	$4.23 \times 10^{-4}$	0.0192
	5		0.1835	1.2571	0.9984	$1.97 \times 10^{-5}$	0.0044
	1		0.1844		0.9983	$1.63 \times 10^{-4}$	0.0128
	2		0.1463	1.1137	0.9989	$9.01 \times 10^{-5}$	0.0095
CM6	3	1.0047	0.1850		0.9981	$1.61 \times 10^{-4}$	0.0127
	4	1.0035	0.1858	0.0014	0.9978	$1.80 \times 10^{-4}$	0.0126
	5		0.1781	1.1133	0.9989	$9.01 \times 10^{-5}$	0.0095
	1		0.1958		0.9961	$3.73 \times 10^{-4}$	0.0193
	2		0.1183	1.2589	0.9984	$1.77 \times 10^{-4}$	0.0133
CM7	3	1.0068	0.1967		0.9955	$3.69 \times 10^{-4}$	0.0192
	4	1.0079	0.1960	-0.0012	0.9946	$4.23 \times 10^{-4}$	0.0192
	5		0.1835	1.2566	0.9984	$1.97 \times 10^{-5}$	0.0044
	1		0.1748		0.9894	$7.51 \times 10^{-4}$	0.0274
	2		0.0750	1.4101	0.9990	$2.04 \times 10^{-4}$	0.0143
CM8	3	1.0162	0.1768		0.9877	$7.34 \times 10^{-4}$	0.0271
	4	1.0524	0.1569	-0.0416	0.9890	$9.21 \times 10^{-3}$	0.0888
	5		0.1593	1.4090	0.9990	$2.03 \times 10^{-4}$	0.0142
	1		0.2306		0.9992	$1.26 \times 10^{-4}$	0.0112
	2		0.2858	0.8872	0.9998	$3.37 \times 10^{-5}$	0.0058
CM9	3	0.9977	0.2302		0.9991	$1.25 \times 10^{-4}$	0.0112
	4	0.9881	0.2394	0.0110	0.9995	$9.66 \times 10^{-5}$	0.0090
	5		0.2438	0.8872	0.9998	$3.37 \times 10^{-5}$	0.0058

## 2.2 不同 CM 条件下生姜 MVD 的模型拟合

不同 CM 条件下生姜 MVD 动力学拟合结果 (表 6) 显示, Page 模型和 Modified Page 模型的  $R^2$  均高于 0.9972,  $\chi^2$  小于  $3.81 \times 10^{-4}$ , RMSE 小于 0.0195, 表明这 2 个模型与试验数据拟合良好。其中, Modified Page 模型  $R^2$  最大,  $\chi^2$  和 RMSE 最小, 说明生姜的 MVD 干燥过程更符合 Modified Page 模型。

## 2.3 不同 CM 条件对 MVD 生姜的微观结构的

影响

### 2.3.1 不同 CM 温度的生姜 MVD 的微观结构

如图 4 所示, 直接干燥的生姜内部细胞结构模糊、相互粘连, 淀粉颗粒分布不均 (图 a), 而经过 CM 处理后, 样品的细胞结构都有不同程度的改善。其中 CM1-35 °C 处理的样品与直接干燥的样品结构较为相似, 低温 CM 处理对其内部结构的影响较小 (图 b); 而 CM3-45 °C 处理的样品细胞结构更加清晰, 排列规则 (图 d)。

生姜内部结构的变化现象表明细胞结构在干燥过程中对水分扩散起着重要的作用。为进一步明确水分扩散与细胞结构之间的联系,将有效扩散系数( $D_{eff}$ )与细胞面积进行线性拟合(如图5),可知随着CM温度升高,样品的细胞面积增大, $D_{eff}$ 也随之增大,二者线性拟合效果良好( $R^2=0.9615$ ),说明适当升高CM处理温度,可以增大生姜内部的细胞结构,改善细胞膜的渗透性,有利于生姜内部水分的扩散。

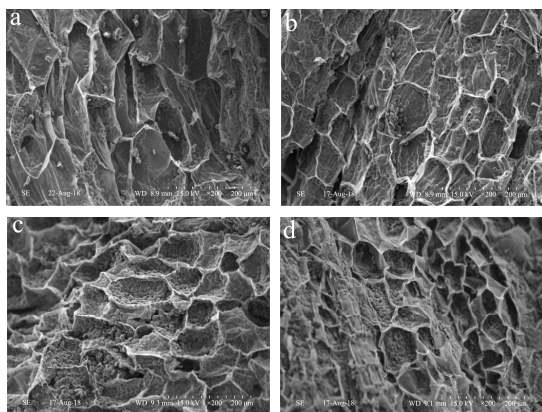


图4 不同温度CO<sub>2</sub>浸渍处理后干燥生姜扫描电镜图

Fig.4 Electron micrographs of dried ginger through different carbonic maceration temperatures

注: a: fresh+MVD; b: CM1+MVD; c: CM2+MVD; d: CM3+MVD。

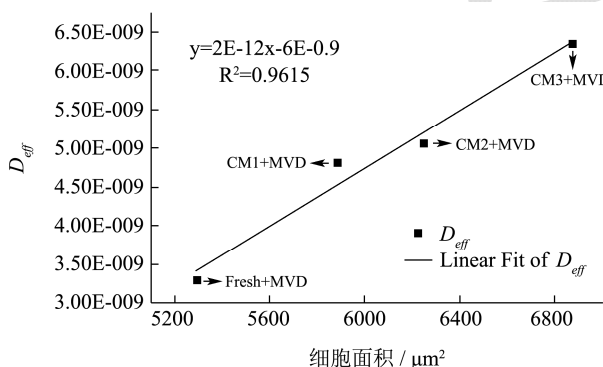


图5  $D_{eff}$ -细胞面积的线性拟合曲线

Fig.5 Linear fit curve of  $D_{eff}$  and cell area

### 2.3.2 不同CM压力的生姜MVD的微观结构

如图6所示,图a为直接干燥样品的电镜图,生姜内部细胞结构塌陷,淀粉颗粒分布杂乱,图b、c、d分别为CM-1、2、3 MPa处理后样品的电镜图,可见CM-1 MPa、2 MPa处理的样品内部细胞结构清晰立体,而CM6-3 MPa的样品由于CM压力过大,内部细胞受到挤压,组织结构被破坏(图6)。

图7为生姜干燥的有效扩散系数( $D_{eff}$ )与细胞面积的线性拟合曲线,二者的拟合效果良好( $R^2=0.9977$ ),证实了生姜干燥过程中的 $D_{eff}$ 与细胞面积呈线性相关,适当增大CM压力,有助于打开生

姜内部的细胞结构,增大细胞面积,提升其传质传热性能;而CM压力过大(3 MPa),生姜内部细胞通透性变差,会对干燥后期物料内部水分的扩散造成阻碍,这与我们前期的研究结论相契合<sup>[30]</sup>。

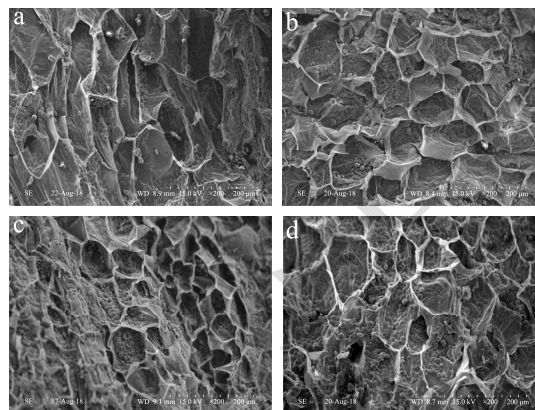


图6 不同CO<sub>2</sub>浸渍压力处理后干燥生姜扫描电镜图

Fig.6 Electron micrographs of dried ginger through different carbonic maceration pressures

注: a: fresh+MVD; b: CM4+MVD; c: CM5+MVD; d: CM6+MVD。

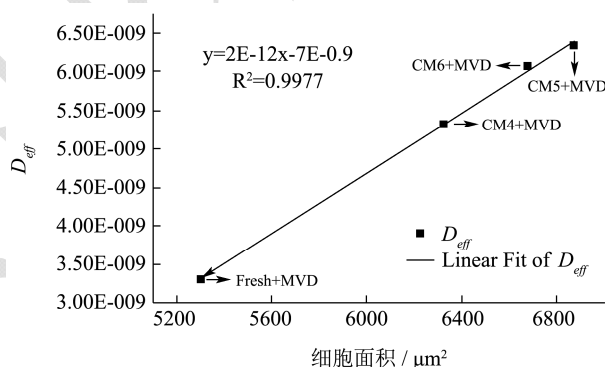


图7  $D_{eff}$ -细胞面积线性拟合曲线

Fig.7 Linear fit curve of  $D_{eff}$  and cell area

### 2.3.3 不同CM处理时间的生姜MVD的微观结构

如图8所示,直接干燥的生姜内部细胞结构模糊,淀粉颗粒排列杂乱(图a),图b、c、d分别为CM-3、5、7 h处理后样品的电镜图,其中CM-3 h、5 h处理的样品内部骨架结构规则立体,而CM9-7 h处理的样品因处理时间过长,其内部结构受到一定程度的破坏(图D),导致细胞结构互相粘连,淀粉颗粒分布不均。

图9为生姜MVD的有效水分扩散系数( $D_{eff}$ )与细胞面积的线性拟合曲线,二者拟合效果较好( $R^2=0.9228$ ),即生姜干燥过程中的 $D_{eff}$ 与细胞面积呈线性相关,随着CM处理时间延长,样品的细胞面积增大, $D_{eff}$ 也随之增大;而当CM处理时间由5 h延长至7 h时,样品的细胞面积与 $D_{eff}$ 的增幅有所下降。

结合上文中生姜微观结构的变化可知,适当延长 CM 处理时间,可以改善生姜内部的细胞结构,增加孔隙率,提升传质传热性能;而 CM 处理时间过长,细胞结构被破坏,反而会对物料干燥后期内部水分的扩散产生阻碍。

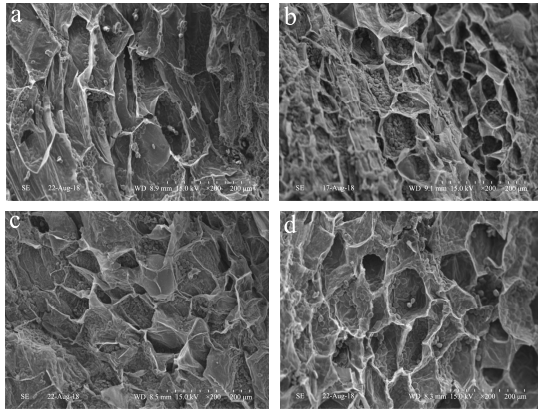


图 8 不同 CO<sub>2</sub> 浸渍时间处理后干燥生姜扫描电镜图

Fig.8 Electron micrographs of dried ginger through different carbonic maceration treatment durations

注: a: fresh+MVD; b: CM7+MVD; c: CM8+MVD; d: CM9+MVD.

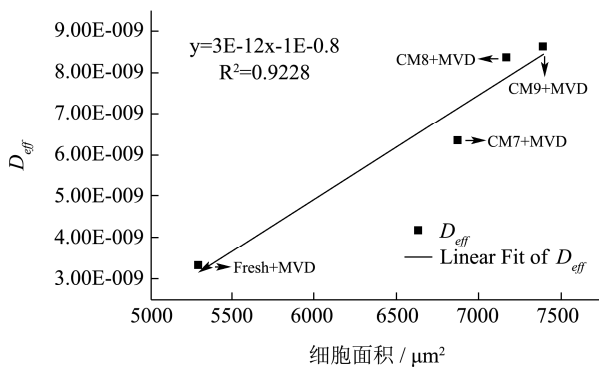


图 9  $D_{eff}$ -细胞面积线性拟合曲线

Fig.9 Linear fit curve of  $D_{eff}$  and cell area

综合比较不同 CM 条件下生姜干燥动力学及微观结构的变化,可知 CM 时间对于生姜内部结构及水分扩散的影响最为明显,适当的 CM 时间处理下生姜的细胞面积及水分扩散系数最大,其次是 CM 温度。CM 压力对生姜结构及水分扩散的影响相对较小,但压力过大仍会破坏生姜的内部结构,阻碍水分扩散。

### 3 结论

文章主要研究了不同 CM 条件下的生姜 MVD 干燥特性及其微观结构的变化,试验结果显示,CM 处理可以加快物料在 MVD 过程中的水分扩散,提高干燥速率,其中 CM9-7 h 处理的样品水分扩散最快,且干燥时间相比于直接干燥样品缩短了 47%;通过对生姜 MVD 干燥过程进行薄层干燥模型拟合,在 5 个薄

层干燥数学模型中 Modified Page 模型的  $R^2$  大于 0.9972,  $\chi^2$  小于  $3.80 \times 10^{-4}$ , RMSE 小于 0.0195,拟合效果最好;通过扫描电镜成像,并将生姜内部的细胞面积与有效水分扩散系数进行线性拟合,发现 CM 处理可以改善生姜内部细胞的微观形态,增大孔隙率,从而提高物料的传质传热性能,加速生姜内部水分扩散。综上所述,CM 处理对生姜 MVD 干燥特性具有十分积极的影响。

### 参考文献

- [1] Chrubasik S, Pittler M H, Roufogalis B D. Zingiberis rhizoma: a comprehensive review on the ginger effect and efficacy profiles. [J]. Phytomedicine International Journal of Phytotherapy & Phytomedicine, 2005, 12(9): 684
- [2] 赵文竹,张瑞雪,于志鹏,等.生姜的化学成分及生物活性研究进展[J].食品工业科技,2016,37(11):383-389  
ZHAO Wen-zhu, ZHANG Rui-xue, YU Zhi-peng, et al. Research process in ginger chemical composition and biological activity [J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(11): 383-389
- [3] 赵文竹,李思慧,宋宝雯,等.生姜多糖类物质的提取及抗氧化活性研究[J].食品安全质量检测学报,2017,8(4):1357-1362  
ZHAO Wen-zhu, LI Si-hui, SONG Bao-wen, et al. Extraction and antioxidant activity of polysaccharides from ginger [J]. Journal of Food Safety and Quality, 2017, 8(4): 1357-1362
- [4] 吕为乔.微波流态化干燥姜片的过程研究和干燥品质分析[D].中国农业大学,2015  
LYU Wei-qiao. Analysis on the drying process and quality of ginger slices in microwave fluidized drying [D]. China Agricultural University, 2015
- [5] 徐艳阳,杜焯,宋佳,等.生姜片的热风与微波联合干燥工艺优化[J].中国调味品,2016,41(2):13-19  
XU Yan-yang, DU Ye, SONG Jia, et al. Optimization of combination drying process by hot-air and microwave for fresh ginger slices [J]. China Condiment, 2016, 41(2): 13-19
- [6] 刘绍军,吴建民,范紫焯,等.微波干燥对生姜全粉特性的影响[J].农产品加工,2015,5:4-6  
LIU Shao-jun, WU Jian-min, FAN Zi-xuan, et al. The influence of microwave drying characteristics of ginger whole powder [J]. Farm Products Processing, 2015, 5: 4-6
- [7] 尹青,赵有斌,韩清华,等.微波真空干燥技术在农产品加工中的应用进展[J].农产品加工(学刊),2013,21:52-55  
YIN Qing, ZHAO You-bin, HAN Qing-hua, et al.



- Microwave vacuum drying technology in the processing of agricultural products [J]. Academic Periodical of Farm Products Processing, 2013, 21: 52-55
- [8] 化春光,任广跃,朱文学.微波真空组合干燥技术的研究[J].干燥技术与设备,2009,7(2):57-62  
HUA Chun-guang, REN Guang-yue, ZHU Wen-xue. Study on vacuum-microwave drying technology [J]. Drying Technology and Equipment, 2009, 7(2): 57-62
- [9] 李丽娟,刘春泉,李大婧,等.不同干燥方式对莲藕脆片品质的影响[J].核农学报,2013,27(11):1697-1703  
LI Li-juan, LIU Chun-quan, LI Da-jing, et al. Effect of different drying methods on quality of *nelumbo nucifera gaertn* products [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2013, 27(11): 1697-1703
- [10] 卜召辉,胡庆国,陆宁.真空微波干燥金针菇的工艺研究[J].包装与食品机械,2010,28(6):13-16  
BU Zhao-hui, HU Qing-guo, LU Ning. Study on the process of *Flammulina dehydrated* by vacuum microwave drying [J]. Packaging and Food Machinery, 2010, 28(6): 13-16
- [11] 宋杨,张国琛,王彩霞,等.热泵与微波真空联合干燥海参的初步研究[J].渔业现代化,2009,36(1):47-51  
SONG Yang, ZHANG Guo-chen, WANG Cai-xia, et al. Combined heat pump and microwave-vacuum drying of sea cucumber [J]. Fishery Modernization, 2009, 36(1): 47-51
- [12] 刘威,任广跃,段续,等.农产品微波干燥均匀性研究[J].干燥技术与设备,2015,13(4):2-7  
LIU Wei, REN Guang-yue, DUAN Xu, et al. Investigate the uniformity of microwave drying of agricultural products [J]. Drying Technology and Equipment, 2015, 13(4): 2-7
- [13] 梁学军.二氧化碳浸渍法及其在红葡萄酒酿造中的应用[J].中外葡萄与葡萄酒,2001,4:40-43  
LIANG Xue-jun. Carbonic Maceration and its application in red wine brewing [J]. Sino-overseas Grapevine and Wine, 2001, 4: 40-43
- [14] 张瑞宇.二氧化碳在现代食品领域中的技术应用与进展[J].低温与特气,2003,3:4-8  
ZHANG Rui-yu. Technological Applications and progresses of carbon dioxide in modern food technology field [J]. Low Temperature and Specialty Gases, 2003, 3: 4-8
- [15] 肖建,张静,孟艳霞,等.高密度二氧化碳技术对哈密瓜汁中多酚氧化酶的钝化效果研究[J].食品科技,2009,34(5):42-45, 63  
XIAO Jian, ZHANG Jing, MENG Yan-xia, et al. Research on the inactivation of polyphenol oxidase in cloudy hami melon juice with dense phase carbon dioxide [J]. Food Science and Technology, 2009, 34(5): 42-45, 63
- [16] Tedjo W, Eshtiaghi M N, Knorr D. Impact of supercritical carbon dioxide and high pressure on lipoxygenase and peroxidase activity [J]. Journal of Food Science, 2010, 65(8): 1284-1287
- [17] 贝君,吴继红,廖小军,等.高密度二氧化碳对脂肪氧化酶活性与结构变性的影响[J].中国食品学报,2008,5:51-57.  
BEI Jun, WU Ji-hong, LIAO Xiao-jun, et al. The Effect of dense phase carbon dioxide on the activity and denaturation of lipoxygenase [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2008, 5: 51-57
- [18] An K J, Wu J J, et al. Effect of carbonic maceration (CM) on mass transfer characteristics and quality attributes of Sanhua plum (*Prunus Salicina Lindl.*) [J]. Food Science and Technology, 2017, 87: 537-545
- [19] Liu L, Wang Y, Zhao D, et al. Effect of carbonic maceration pre-treatment on drying kinetics of chilli (*capsicum annum, L.*) flesh and quality of dried product [J]. Food & Bioprocess Technology, 2014, 7(9): 2516-2527
- [20] 刘沫茵,郭蕴涵,赵翠萍,等.二氧化碳辅助发酵葡萄的干制和发酵工艺优化[J].农业工程学报,2012,28(12):269-272  
LIU Mo-yin, GUO Yun-han, ZHAO Cui-ping, et al. Optimization of drying and fermentation process for carbon dioxide assisted fermentation [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(12): 269-272
- [21] 刘春泉,张钟元,李丽娟,等.莲藕片真空微波联合气流膨化干燥工艺[J].核农学报,2015,29(4):751-760  
LIU Chun-quan, ZHANG Zhong-yuan, LI Li-juan, et al. Optimization of combined vacuum microwave-explosion puffing drying of *Nelumbo nucifera gaertn* chips [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2015, 29(4): 751-760
- [22] ÇAKmak H, Kumcuoğ Lu S, Tavman S. Mathematical modeling and thin layer drying of chicken meat enriched baguette bread slices [J]. GIDA -Journal of Food, 2014, 39(3): 131-138
- [23] Zhang Q, Litchfield J.B. An optimization of intermittent corn drying in a laboratory scale thin layer dryer [J]. Drying Technology, 1991, 9(2): 383-395
- [24] Chhinnman M. Evaluation of selected mathematical models for describing thin layer drying of in-shell pecans [J]. Transactions of the ASAE, 1984, 27(2): 610-615
- [25] Togrul I T, Pehlivan D. Mathematical Modelling of solar drying of apricots in thin layers [J]. Journal of Food Engineering, 2003, 55(3): 209-216