

# 红枣气体射流冲击干燥收缩特性研究\*

姜正<sup>1</sup> 刘清<sup>1</sup> 师建芳<sup>1</sup> 赵玉强<sup>1</sup> 高振江<sup>2</sup>

(1. 农业部规划设计研究院农产品加工工程研究所, 北京 100125; 2. 中国农业大学工学院, 北京 100083)

**摘要:** 将气体射流冲击干燥技术应用于红枣的干燥,研究了其在不同干燥风温(55、60、65和70℃)和风速(6、9、12和15 m/s)下的收缩特性、考虑收缩的水分有效扩散系数以及收缩活化能。研究表明:随着干燥风温和风速的升高,红枣的体积相对收缩率呈现先增大后减小的趋势;考虑收缩的水分有效扩散系数随着干燥风温和风速的升高而增大,且随着干基含水率的降低先增大后减小;通过阿伦尼乌斯公式计算出红枣收缩活化能为12.81 kJ/mol。该研究为红枣干燥后体积的留存提供了技术依据。

**关键词:** 红枣 干燥 收缩 气体射流冲击

中图分类号: TQ028.6<sup>+</sup>3; S665.1 文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2014)S0-0241-06

## 引言

红枣是鼠李科枣属枣种植物的果实,在民间一直被视为“铁杆庄稼”和“木本粮食”<sup>[1-2]</sup>。现代研究表明:枣含有丰富的营养,有巨大的药用和食用价值,具有很高的经济价值和良好的发展前景<sup>[3-4]</sup>。红枣采摘后除少量鲜食外,绝大多数须经过干燥才能长期存放和加工,干燥是红枣初级加工中最主要的方式之一,干燥工艺直接决定着红枣产品的质量。

红枣的收缩特性一般是指整颗红枣的体积收缩特性。整颗红枣也称为免洗红枣<sup>[5]</sup>,目前市面上销售的红枣绝大部分均为整枣。果实硕大、颗粒饱满的红枣外观是消费者购买的首选要素<sup>[6]</sup>,干燥后红枣的体积是消费者关注的要点,是消费者考虑是否购买的重要指标。红枣加工企业按照红枣的体积对红枣进行分级,不同星级的红枣其价值和价格截然不同。因此体积收缩特性是红枣干燥后的重要品质之一。

气体射流冲击干燥技术与传统的热风干燥技术相比具有较高的对流换热系数和干燥速度<sup>[7]</sup>,现已被用于锥栗<sup>[8]</sup>、种子<sup>[9]</sup>和番茄<sup>[10]</sup>等物料的干燥。本文将气体射流冲击干燥技术应用于红枣的干燥,研究红枣干燥后体积的收缩变化情况,为红枣干燥加工后体积的留存提供技术依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验所用原料为新鲜的红枣,由新疆和田昆仑

山枣业有限责任公司提供,品种为骏枣。其平均湿基含水率为58.0%(干燥法测定,105℃加热24 h)。试验前将红枣放于纸箱中并将其置于(5±1)℃的冰箱中保存。

### 1.2 试验设备

试验采用现代农业装备与设施教育部工程研究中心自行设计研发的气体射流冲击干燥试验装置,如图1所示。

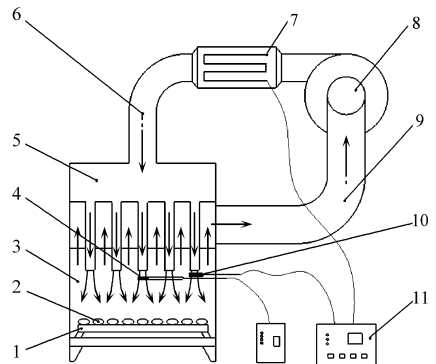


图1 气体射流冲击干燥试验装置

Fig. 1 Schematic diagram of equipment for impingement drying

1. 物料托盘 2. 物料 3. 干燥室 4. 湿度传感器 5. 气流分配室 6. 进风管道 7. 电加热管 8. 离心风机 9. 回风管道 10. 温度传感器 11. 温度风速控制器

干燥机主要由气体射流冲击主体装置(射流冲击回风管道、离心风机、电加热管、进风管道、气流分配室、干燥室等)、温湿度控制和采集系统两部分组

收稿日期: 2014-06-17 修回日期: 2014-08-20

\* 公益性行业(农业)科研专项经费资助项目(200903009, 201003077)

作者简介: 姜正, 工程师, 博士, 主要从事农产品加工技术与装备研究, E-mail: chris.lz@163.com

通讯作者: 刘清, 高级工程师, 博士, 主要从事农产品精深加工研究, E-mail: qingliu21@aliyun.com

成。风速调节使用 TDS-V8 型变频器(台湾东达)、物料称量使用 YP 型电子秤(上海精科天平),物料干燥使用 DHG-9140A 型电热恒温鼓风干燥箱(上海一恒科技有限公司)。

### 1.3 试验方法

按试验要求设定风温和风速,预热 30 min。取出冰箱中保存的红枣,挑选出质地坚硬、表皮光泽、体积相差不多的红枣,等待其温度达到室温时再进行干燥。将红枣在托盘上平铺一层,按不同干燥风温和风速进行干燥试验,每隔 1 h 测定样品的质量和体积,根据 GB/T 5835—2009 的要求直到湿基含水率降到 25% 时停止试验,取出样品并冷却后放入保鲜袋中贮存,然后进行下一组试验。每组试验重复 3 次。根据前期预试验的结果,风温分别为 55、60、65 和 70℃,风速分别为 6、9、12 和 15 m/s,具体试验安排如表 1 所示。

表 1 试验设计和试验参数

Tab. 1 Experimental design and run conditions

试验序号	干燥风温/℃	干燥风速/(m·s <sup>-1</sup> )
1	55	12
2	60	12
3	65	12
4	70	12
5	60	6
6	60	9
7	60	15

### 1.4 体积测量方法

整颗红枣体积的测量使用固体置换法<sup>[11]</sup>,介质为直径 200 μm 的玻璃珠。假设水的密度为 1.0 g/cm<sup>3</sup>,选取容积适当的烧杯,则烧杯的容积为

$$V_V = W_W - W_V \quad (1)$$

式中  $W_V$ ——空烧杯的质量, g

$W_W$ ——将烧杯中充满水后的总质量, g

$V_V$ ——烧杯的容积, mL

得到烧杯的容积之后,玻璃珠的容积密度  $\rho_B$  为

$$\rho_B = \frac{W_B - W_V}{V_V} \quad (2)$$

式中  $W_B$ ——将烧杯中充满玻璃珠后的总质量, g

将需要测量的样本置入烧杯后使用玻璃珠将烧杯充满,用玻璃棒使烧杯表面平齐,称取质量。则样本的体积  $V_S$  为

$$V_S = \frac{W_B - (W_T - W_S)}{\rho_B} \quad (3)$$

式中  $W_S$ ——样本的质量, g

$W_T$ ——将烧杯中置入样本并用玻璃珠充满后的总质量, g

### 1.5 相关计算方法

#### (1) 收缩曲线参数计算

农产品、果蔬等干燥后体积收缩程度通常用体积相对收缩率  $S$  来表示,收缩率越大则表示干燥后保留的体积越大,体积收缩情况越有限。体积相对收缩率一般简称为体积收缩率或收缩率,为

$$S = \frac{V_{S-t}}{V_0} \times 100\% \quad (4)$$

式中  $V_{S-t}$ ——红枣任意  $t$  时刻样本的体积, m<sup>3</sup>

$V_0$ ——红枣的初始体积, m<sup>3</sup>

任意干燥  $t$  时刻红枣的水分比  $M_R$  为

$$M_R = \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e} \quad (5)$$

式中  $M_o$ ——红枣的初始干基含水率, g/g

$M_t$ ——红枣在任意干燥  $t$  时刻的干基含水率, g/g

$M_e$ ——红枣干燥到平衡时的干基含水率, g/g

#### (2) 考虑收缩的水分有效扩散系数计算

由体积测量方法可以测得红枣任意  $t$  时刻的样本体积  $V_{S-t}$ ,则红枣任意  $t$  时刻的等量半径  $R_{e-t}$  可以利用球体体积公式计算,即

$$R_{e-t} = \sqrt[3]{\frac{3V_{S-t}}{4\pi}} \quad (6)$$

则红枣任意时刻的水分有效扩散系数  $D_{eff}$  满足<sup>[12-13]</sup>

$$\ln M_R = \ln \frac{6}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{eff} t}{R_e^2} \quad (7)$$

式中  $D_{eff}$ ——干燥过程中物料的水分有效扩散系数, m<sup>2</sup>/s

$R_e$ ——红枣的等量半径, m

$t$ ——干燥时间, s

#### (3) 红枣收缩活化能的计算

忽略红枣在干燥过程中发生的热膨胀情况,可以将体积收缩系数  $f$  定义为<sup>[14]</sup>

$$f = \frac{1}{V} \frac{dV_{S-t}}{dM_t} \quad (8)$$

由于  $f$  在一次干燥过程中为常数,则  $f$  作为体积收缩系数,在一定程度上可以反映物料收缩的速率快慢,因此将  $f$  视为收缩变化速率常数。收缩变化速率常数  $f$  与干燥温度  $T$  的关系可以使用阿伦尼乌斯公式计算<sup>[15]</sup>,即

$$f = A \exp\left(-\frac{E_a}{R(T+273.15)}\right) \quad (9)$$

式中  $T$ ——物料的干燥温度, ℃

$A$ ——对应的收缩变化速率常数的频率因子,为定值

$E_a$ ——物料的收缩活化能, J/mol

$R$ ——摩尔气体常数, 取 8.314 J/(mol·K)

## 2 结果与分析

### 2.1 风温对红枣干燥的影响

将风速固定为 12 m/s, 进行不同风温条件下的红枣干燥试验, 根据试验结果得到红枣的收缩特性和收缩速率曲线, 如图 2 所示。由图 2 可以看出: 不同干燥风温下红枣的收缩率  $S$  随干燥时间  $t$  的延长均呈逐渐下降的趋势, 说明红枣在干燥过程中体积不断减小。干燥风温为 55、60、65 和 70℃ 时, 红枣干燥到终了时的收缩率分别为 64.42%、65.28%、62.36% 和 59.14%, 收缩率随干燥风温的增加呈现先增高后减小的趋势, 当干燥风温高于 60℃ 时收缩率明显下降。其中 60℃ 条件下的收缩率最高, 比 70℃ 时的收缩率提高了 10.38%, 说明干燥风温为 60℃ 条件时可以较好地保持红枣干燥后的体积。

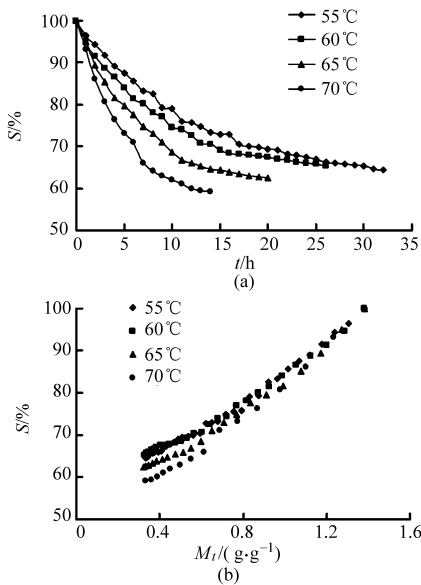


图 2 干燥风温对红枣收缩的影响

Fig. 2 Influence of air temperature on Chinese jujube shrinkage

(a) 收缩特性 (b) 收缩速率

干燥风温为 55℃ 条件时, 整个干燥过程中红枣的干燥速率较低, 红枣体积保持持续的缓慢收缩。干燥速率过低导致了干燥时间的大幅度延长, 收缩率持续缓慢减小最终超过 60℃ 条件下的收缩率。这可能是因为干燥速率较低时水分由内部向外部扩散速率与物料表面水分蒸发速率较接近, 物料内部没有出现急速的湿度下降现象, 因此物料会均匀收缩直到干燥终了<sup>[16-17]</sup>。干燥风温为 60℃ 条件时, 红枣的干燥速率较适中, 干燥后期红枣发生了表面的硬化和结壳阻止了体积的进一步收缩。这可能是因为随着干燥进行物料表面的低湿度条件会导致橡

胶态和玻璃态的相互转化, 在物料外部形成了渗水的硬壳, 起到了固定体积的作用<sup>[18]</sup>。Schrader<sup>[19]</sup>通过磁性共振的试验方法证明了干燥胶体时会形成硬壳。

干燥风温为 65℃ 条件时, 干燥时间较短红枣没有发生明显的表面结壳或硬化; 干燥风温较高干燥强度较大, 作用于细胞毛细管壁上的压差迅速增大, 从而产生较大的内部应力导致了较大的体积收缩, 而且高温还会起到软化组织的作用, 使固体间架的强度下降更加降低了收缩率。干燥风温为 70℃ 条件下的情况与 65℃ 时类似, 由于其干燥强度大于 65℃ 时则最终收缩率小于 65℃ 时的收缩率。

方舒正<sup>[20]</sup>的研究印证了红枣热风干燥前期干燥风温越高收缩率越小, 干燥终了时干燥风温越高收缩率越大。因此干燥风温对收缩率的影响主要应该结合风温选择范围和干燥过程持续的时间长短进行综合考虑。

### 2.2 风速对红枣干燥的影响

将风温固定为 60℃, 进行不同风速条件下的红枣干燥试验, 根据试验结果得到红枣的收缩特性和收缩速率曲线, 如图 3 所示。由图 3 可以看出: 不同干燥风速下红枣的收缩率  $S$  随干燥时间  $t$  的延长均呈逐渐下降的趋势, 说明红枣在干燥过程中体积不断减小。干燥风速为 6、9、12 和 15 m/s 时, 红枣干燥到终了时的收缩率分别为 64.95%、65.67%、65.28% 和 63.13%, 收缩率随干燥风速的增加呈现先增高后减小的趋势, 其中 9 m/s 条件下的收缩率最高, 比 15 m/s 时的收缩率提高了 4.02%, 说明干燥风速为 9 m/s 条件时可以较好地保持红枣干燥后

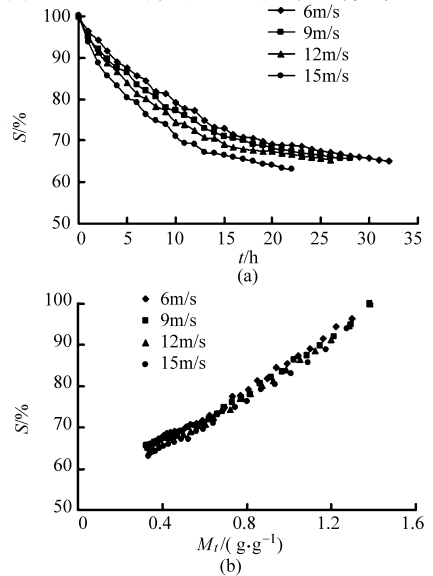


图 3 干燥风速对红枣收缩的影响

Fig. 3 Influence of air velocities on Chinese jujube shrinkage

(a) 收缩特性 (b) 收缩速率

的体积。

干燥风速为 6 m/s 条件时,整个干燥过程中红枣的干燥速率较低,红枣体积保持持续的缓慢收缩,收缩率不断减小最终超过 9 m/s 和 12 m/s 条件下的收缩率。这可能是因为干燥速率较低时,红枣表面没有发生硬化,因此红枣持续的收缩直到干燥的最后阶段。

干燥风速为 9 m/s 和 12 m/s 条件时,红枣的干燥速率较适中,干燥后期红枣表面发生了硬化和结壳,阻止了红枣的进一步收缩。杜志龙<sup>[21]</sup>通过研究发现干燥风速在 8.1 m/s 左右时杏子的干后收缩率存在拐点。

干燥风速为 15 m/s 条件时,红枣没有发生明显的表面结壳或硬化,红枣风速较高干燥强度较大,作用于毛细管壁上的压差增大,从而产生较大的内部应力导致较大的体积收缩。

Ratti<sup>[22]</sup>研究发现物料干燥过程中的收缩特性主要受干燥风速的影响。与干燥风温对物料收缩的影响相类似,干燥风速对物料干燥后的收缩的影响随着干燥也会不断变化。因此寻找能够使干燥强度较合理的干燥风速尤其重要。

### 2.3 考虑收缩的红枣水分有效扩散系数

目前关于食品、农产品水分有效扩散系数的大部分研究均忽略了物料的收缩,而实际上收缩是重要的影响因素。红枣干燥的整个过程属于降速干燥,干燥过程的水分有效扩散系数可以用 Fick 第二定律进行计算。

将不同干燥风温和风速条件下气体射流冲击干燥试验结果进行计算,得到考虑收缩情况下的红枣  $D_{eff} - M_i$  曲线,如图 4 所示。由图 4 可以看出:考虑收缩情况下不同干燥风温和风速下红枣的有效扩散系数  $D_{eff}$  随干基含水率  $M_i$  的减小均呈先增大后下降的趋势,这与 Azzouz 等<sup>[23]</sup>的研究结果相吻合。较高的干燥风温和风速条件下的水分有效扩散系数大于较低的干燥风温和风速条件下的水分有效扩散系数,Fang 等<sup>[24]</sup>在对考虑收缩的红枣热风干燥研究中得出了相同的结论。经过与不考虑收缩条件进行对比<sup>[25]</sup>,发现相同干燥条件下考虑收缩情况时的水分有效扩散系数要普遍小于不考虑收缩时的情况,这与大部分学者的研究结果相同<sup>[26-27]</sup>,可能是因为不考虑收缩时物料中水分的迁移路径被高估了。

### 2.4 红枣收缩活化能

红枣的收缩活化能越大表明其越难收缩。红枣在气体射流冲击干燥过程中,其体积收缩的变化速率常数  $f$  与干燥温度  $T$  的关系可以用阿伦尼乌斯公式表示为式(9)。由式(9)可知收缩的变化速率常

数  $f$  的自然对数  $\ln f$  与  $1/(T + 273.15)$  呈线性关系,而其斜率为  $-E_a/R$ ,二者的关系如图 5 所示。

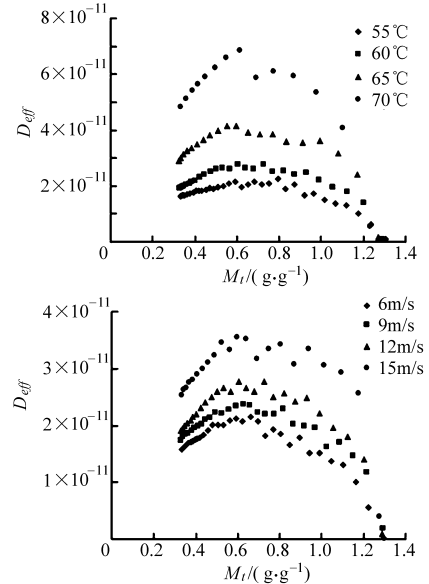


图 4 考虑收缩的红枣水分有效扩散系数

Fig. 4 Moisture effective diffusivity of Chinese jujube considering shrinkage characteristics

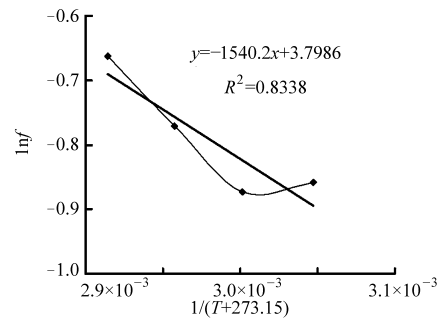


图 5 收缩变化速率常数与干燥温度的关系曲线

Fig. 5 Relation curves of shrinkage change rate constants and drying temperatures

可以得到  $\ln f$  随着  $1/(T + 273.15)$  的变化曲线,通过对图 5 进行线性回归求出其斜率  $k = 1540.2$ ,由斜率  $k$  即可求出  $E_a = 1540.2 \times 8.314 \text{ J/mol} = 12.81 \text{ kJ/mol}$ 。有研究表明<sup>[28]</sup>红枣的干燥活化能在 34.97 ~ 74.20 kJ/mol 之间变化,可以看出红枣的收缩活化能明显低于红枣的干燥活化能,说明红枣发生水分迁移的难度要高于发生体积变化的难度,即红枣在水分开始迁移之前体积就已经开始发生收缩。红枣的收缩活化能数值偏低,低于绝大多数农产品的干燥活化能和色泽活化能<sup>[29]</sup>,说明红枣发生体积收缩所需要的启动阈值能量较低,对于红枣加工而言极易出现体积上的收缩,干燥加工时应给予特殊关注。

## 3 结论

(1) 在红枣的气体射流冲击干燥中,随着干燥

风温的升高,红枣的体积相对收缩率呈现出先增大后减小的趋势,其中干燥风温为 60℃ 时的收缩率达到最大为 65.28%;随着干燥风速的升高,红枣的体积相对收缩率呈现出先增大后减小的趋势,其中干燥风速为 9 m/s 时的收缩率达到最大为 65.67%。

(2) 通过费克第二定律求出考虑收缩情况下的气体射流冲击干燥过程中红枣的水分有效扩散系数,在不同的干燥风温和风速条件下,红枣的水分有

效扩散系数随着干基含水率的降低呈现先增大后减小的趋势;考虑收缩情况下的红枣的水分有效扩散系数随着干燥风温的升高而增大,随着干燥风速的提高而增大。

(3) 使用阿伦尼乌斯公式计算得出了红枣的收缩活化能  $E_a$  为 12.81 kJ/mol,明显低于红枣和多种农产品的干燥活化能,说明红枣极易发生体积的收缩。

#### 参 考 文 献

- 1 曲泽洲,王永蕙. 中国果树志. 枣卷[M]. 北京:中国林业出版社,1993.
- 2 刘孟军. 枣优质生产技术手册[M]. 北京:中国农业出版社,2003:30.
- 3 Li J W, Fan L P, Ding S D, et al. Nutritional composition of five cultivars of Chinese jujube[J]. Food Chemistry, 2007, 103(2): 454 - 460.
- 4 Cyong J C, Kiyomichi H. Cyclic adenosine monophosphate in fruits of *Zizyphus jujube*[J]. Phytochemistry, 1980, 19(12): 2747 - 2748.
- 5 GB/T 26150—2010 免洗红枣[S]. 2010.  
GB/T 26150—2010 Exempts washes Chinese jujube[S]. 2010. (in Chinese)
- 6 刘小丹,张淑娟,贺虎兰,等. 红枣微波-热风联合干燥特性及其品质的影响[J]. 农业工程学报,2012,28(24):280 - 286.  
Liu Xiaodan, Zhang Shujuan, He Hulan, et al. Drying characteristics and its effects on quality of jujube treated by combined microwave-hot-air drying[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(24): 280 - 286. (in Chinese)
- 7 高振江. 气体射流冲击颗粒物料干燥机理与参数试验研究[D]. 北京:中国农业大学,2000.  
Gao Zhenjiang. Experimental research on mechanism and parameters of air-impingement jet drying of particulate materials[D]. Beijing: China Agricultural University, 2000. (in Chinese)
- 8 林海,高振江. 响应曲面法优化气体射流冲击锥栗脱壳工艺[J]. 农业机械学报,2006,37(4):71 - 75.  
Lin Hai, Gao Zhenjiang. Optimization of air-impingement shelling for *Castanea henryi* using response surface methodology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(4):71 - 75. (in Chinese)
- 9 姚雪东,肖红伟,高振江,等. 气流冲击式转筒干燥机设计与试验[J]. 农业机械学报,2009,40(10):67 - 70.  
Yao Xuedong, Xiao Hongwei, Gao Zhenjiang, et al. Design and experiment of air-impingement rotary dryer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(10):67 - 70. (in Chinese)
- 10 王丽红,高振江,林海,等. 脉动式气体射流冲击干燥机[J]. 农业机械学报,2011,42(10):141 - 144.  
Wang Lihong, Gao Zhenjiang, Lin Hai, et al. Pulsed air-impingement dryer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(10):141 - 144. (in Chinese)
- 11 Cui Zhengwei, Li Chunyang, Song Chunfang, et al. Combined microwave-vacuum and freeze drying of carrot and apple chips[J]. Drying Technology, 2008, 26(12): 1517 - 1523.
- 12 Crank J. The mathematics of diffusion[J]. London: Clarendon Press, 1975.
- 13 Doymaz I. Drying kinetics of black grapes treated with different solutions[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 76(2): 212 - 227.
- 14 Charm S E. The fundamental of food engineering[M]. 3rd edition. Westport: AVI Publishing Company Inc., 1978.
- 15 娄正. 红枣干燥特性及收缩品质研究[D]. 北京:中国农业大学,2013.  
Lou Zheng. Drying characteristics and shrinkage of Chinese jujube[D]. Beijing: China Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- 16 Litchfield J B, Okos M R. Moisture diffusivity in pasta during drying[J]. Journal of Food Engineering, 1992, 17(2): 117 - 142.
- 17 Wang N, Brennan J G. Changes in structure, density and porosity of potato during dehydration[J]. Journal of Food Engineering, 1995, 24(1): 61 - 76.
- 18 Mayor L, Sereno A M. Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review [J]. Journal of Food Engineering, 2004, 61(3): 373 - 386.
- 19 Schrader G W, Litchfield J B. Moisture profiles in a model food gel during drying-measurement using magnetic-resonance-imaging and evaluation of the fickian model[J]. Drying Technology, 1992, 10(2): 295 - 332.
- 20 方舒正. 大枣干燥特性和数学模型研究[D]. 北京:中国农业大学,2008.  
Fang Shuzheng. Drying characteristics and mathematical modeling of Chinese jujube[D]. Beijing: China Agricultural University, 2008. (in Chinese)
- 21 杜志龙. 气体射流冲击果蔬烫漂及干燥试验研究[D]. 北京:中国农业大学,2007.  
Du Zhilong. Experimental study of blanching and drying in fruits and vegetables on the air-jet impingement oven[D]. Beijing: China Agricultural University, 2007. (in Chinese)

- 22 Ratti C. Shrinkage during drying of foodstuffs[J]. *Journal of Food Engineering*, 1994, 23(1): 91 – 105.
- 23 Azzouz S, Guizani A, Jomaa W, et al. Moisture diffusivity and drying kinetic equation of convective drying of grapes[J]. *Journal of Food Engineering*, 2002, 55(4): 323 – 330.
- 24 Fang S Z, Wang Z F, Hu X S. Hot air drying of whole fruit Chinese jujube (*Zizyphus jujuba* Miller): thin-layer mathematical modelling[J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2009, 44(9): 1818 – 1824.
- 25 Lou Zheng, Xiao Hongwei, Gao Zhenjiang. Air impingement drying characteristics and model of Chinese jujube [C] // 2013 ASABE Annual Meeting, ASABE Paper 131591346.
- 26 Ponkham K, Meeso N, Soponronnarit S, et al. Modeling of combined far-infrared radiation and air drying of a ring shaped-pineapple with/without shrinkage[J]. *Food and Bioproducts Processing*, 2012, 90(C2): 155 – 164.
- 27 Ramallo L A, Mascheroni R H. Effect of shrinkage on prediction accuracy of the water diffusion model for pineapple drying[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2013, 36(1): 66 – 76.
- 28 Motevali A, Abbaszadeh A, Minaei S, et al. Effective moisture diffusivity, activation energy and energy consumption in thin-layer drying of jujube (*Zizyphus jujube* Mill) [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2012, 14(3): 523 – 532.
- 29 肖红伟. 西洋参片的气体射流冲击干燥特性和色泽变化动力学[D]. 北京: 中国农业大学, 2010.  
Xiao Hongwei. The drying characteristics and color change kinetics of American ginseng slices undergoing air impingement drying[D]. Beijing: China Agricultural University, 2010. (in Chinese)

## Air Impingement Drying Shrinkage Characteristics of Chinese Jujube

Lou Zheng<sup>1</sup> Liu Qing<sup>1</sup> Shi Jianfang<sup>1</sup> Zhao Yuqiang<sup>1</sup> Gao Zhenjiang<sup>2</sup>

(1. *Institute of Agricultural Product Processing, Chinese Academy of Agricultural Engineering, Beijing 100125, China*

2. *College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China*)

**Abstract:** Chinese jujube originated in China and has a long historical standing. China is the only country which can produce a great amount of Chinese jujube in the world. Modern research showed that the nutrition of Chinese jujube is abundant. Chinese jujube has great medicinal and food value, with high economic value and good prospects for development. Shrinkage characteristics of dates generally refer to volume shrinkage characteristics of whole dates. Large fruit and plump grain appearance of dates is the first choice of consumers to buy elements. The volume of dried jujube points to the consumer's heart, and is an important indicator of consumers whether to buy. Jujube processing enterprises grade the date in accordance with its size, different grades dates have different value and price. Therefore, drying is the most important steps during the dates processing as it affects directly the quality of the product, and the shrinkage characteristics is the most important quality characteristic of Chinese jujube after drying. However, the traditional natural desiccation and desiccation in the drying room of the red dates has many problems. The conventional drying method for Chinese jujube has some disadvantages of severe shrinkage, long drying time and large energy consumption etc. Therefore, in order to improve the quality of dried Chinese jujube and reduce the shrinkage, it is imperative to replace the traditional drying method with the modern technologies. Air impingement drying technology was applied to dry Chinese jujube. The drying characteristics of shrinkage, moisture effective diffusivity considering shrinkage characteristics and the activation energy of Chinese jujube shrinkage were investigated under different air temperatures (55, 60, 65 and 70°C) and air velocities (6, 9, 12 and 15 m/s). The dynamic changes of the regular pattern for the shrinkage characteristic of Chinese jujube in the air impingement drying process were studied, the results showed that the volume relative shrinkage ratio of Chinese jujube appeared to increase and then decrease with the increase of air temperature and air velocity. Considering shrinkage characteristics, the moisture effective diffusivity of Chinese jujube in the air impingement drying process through the Fick's second law was obtained. The diffusivity appeared to increase and then decrease with the decrease in moisture content in dry basis of Chinese jujube. The Arrhenius equation calculated the shrinkage activation energy of the Chinese jujube was 12.81 kJ/mol. This research provided technical basis for shrinkage characteristics of Chinese jujube using air impingement drying technology.

**Key words:** Chinese jujube Drying Shrinkage Air impingement