

# 杏低温薄层干燥试验与建模<sup>\*</sup>

王 宁 刘文秀 李凤城 杜志龙

(中国包装和食品机械总公司, 北京 100083)

**【摘要】** 在较低温度下采用旋转组合设计对杏进行了薄层干燥试验,考察了温度、风速对杏干燥特性的影响。试验结果表明在一定范围内温度是影响干燥速率的主要因素,通过试验值回归,确定杏在较低温度下的干燥模型为 Wang-Singh 方程,且模型系数与温度、风速有关。试验值与模型预测值比较说明,该模型能较好地描述干燥过程中杏的水分比与干燥时间的关系。

**关键词:** 杏 薄层干燥 数学模型 试验

**中图分类号:** TQ028.6<sup>+</sup>3; S662.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)01-0140-04

## Thin Layer Drying Model of Apricot at Low Temperature

Wang Ning Liu Wenxiu Li Fengcheng Du Zhilong

(China National Packaging and Food Machinery Corporation, Beijing 100083, China)

### Abstract

Thin layer drying experiments of apricot in low temperature were carried out on rotation design. The drying characteristics and the drying model of apricot were studied based on temperature and velocity of drying medium. The experiments showed that temperature was the main influencing factor in the drying process. The mathematical model was set as Wang-Singh equation at low temperature and the coefficients of the model were related to temperature and velocity. The established mathematical model could be used to describe the change regulation of moisture ratio well during the drying process of apricot according to the comparison of experimental values and calculated values.

**Key words** Apricot, Thin layer drying, Mathematical model, Experiment

## 引言

目前,我国杏的干制主要采用自然摊晒的方法。杏采收洗净进行熏硫后,直接露天暴晒,生产出的杏干不仅残硫量高,外观品质差,产出比低,而且卫生状况无法得到有效保障,极大地影响了杏干的商品价值<sup>[1]</sup>。低温干燥是用较低温度、较低湿度的介质(如空气)对物料进行干制,可在一定程度上使物料保持良好的风味、色泽、感官等品质<sup>[2]</sup>。数学模型已成为现代干燥技术重要的研究内容,通过对数学模型的研究可以预测不同干燥条件下任意时刻的含水率,进而控制干燥过程,深化对干燥过程的理解,

掌握干燥过程变化的规律。而关于杏的低温干燥模型的研究鲜有报道。本文对杏进行低温干燥试验,进而建立薄层干燥模型,为低温干燥技术的推广应用提供参考依据。

## 1 试验方法

### 1.1 试验材料

为获得较好的制干比,选用固形物含量较高的赛买提(南疆杏),果实成熟度约 70%,为保证试验原料的一致性,均当天采于同一棵杏树,杏直径约 30 mm,单果质量约 28 g,桔黄色,总酸含量 0.84%,可溶性固形物含量 15%。将杏洗净并用 0.5% 的亚

收稿日期: 2010-04-01 修回日期: 2010-04-16

<sup>\*</sup> “十一五”国家科技支撑计划资助项目(2006BAD11A13)

**作者简介:** 王宁,硕士生,主要从事农产品干燥及其设备研究,E-mail: tswn@tom.com

**通讯作者:** 刘文秀,研究员,主要从事食品、农产品加工与设备研究,E-mail: Liuwx3725@sina.com

硫酸钠溶液浸泡 12 h。

1.2 试验装置

自制试验台,设有 20 个干燥室,温度、风速各自独立调节。试验台干燥温度、风速的设计以南疆杏采摘季节的当地气候条件为依据,温度调节范围:25 ~ 60℃;风速调节范围:0 ~ 5 m/s。

试验台采用风沿物料表面通过的层流方式,如图 1 所示。空气被风机带入干燥室后被加热器加热,通过温度传感器和风速传感器测量干燥室内的温度和风速进而控制风机的转速和加热器的功率。

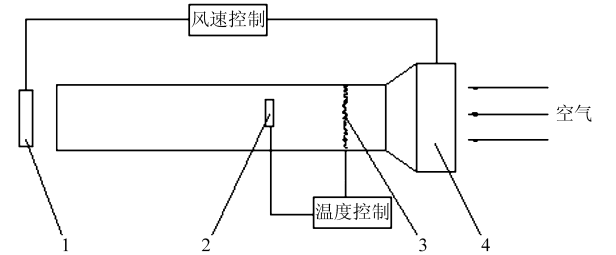


图 1 试验台原理图

Fig. 1 Principle of drying equipment

1. 风速传感器 2. 温度传感器 3. 加热器 4. 风机

1.3 试验安排

模拟新疆阴干葡萄干,以吐鲁番地区阴干房内的温度(一般不高于 35℃)、风速为依据<sup>[3]</sup>,选取干燥温度范围 30 ~ 40℃、干燥风速范围 1.0 ~ 3.4 m/s。试验采用二次通用旋转组合设计的方案<sup>[4]</sup>,查得设计参数  $\gamma = 1.414, m_0 = 5$ ,共需进行 13 次试验。

因素零水平及变化半径: $z_{01} = (z_{11} + z_{21})/2 = (30 + 40)/2 = 35, z_{02} = (z_{12} + z_{22})/2 = (1 + 3.4)/2 = 2.2, \Delta_1 = (z_{21} - z_{11})/(2\gamma) = (40 - 30)/(2 \times 1.414) \approx 3.5, \Delta_2 = (z_{22} - z_{12})/(2\gamma) = (3.4 - 1)/(2 \times 1.414) \approx 0.8$ 。

因素编码如表 1 所示。

表 1 试验因素编码

Tab.1 Factors and levels of test

| 编码     | 因素                        |                                       |
|--------|---------------------------|---------------------------------------|
|        | 干燥温度 $z_1/^\circ\text{C}$ | 干燥风速 $z_2/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ |
| -1.414 | 30.0                      | 1.0                                   |
| -1     | 31.5                      | 1.4                                   |
| 0      | 35.0                      | 2.2                                   |
| 1      | 38.5                      | 3.0                                   |
| 1.414  | 40.0                      | 3.4                                   |

为减小试验误差,13 组试验同时进行。调节 13 组干燥室的温度、风速,使其恒定到试验设计的数值。每组取杏 200 g 左右,均匀平铺在网状托盘上,放入各组干燥室内,开始试验。试验中,每隔 4 h 对 各组杏进行称重并校正温度和风速。

2 试验结果与分析

2.1 干燥特性及影响因素

水分比表示在一定干燥条件下,试样还有多少水分未被干燥<sup>[5]</sup>。水分比计算公式为

$$M_R = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e}$$

式中  $M$ ——干燥过程某时刻干基含水率

$M_e$ ——平衡干基含水率

$M_0$ ——初始干基含水率

在上述 13 组试验中选取 5 组数据做不同风速和不同温度下杏的水分比随时间变化的曲线,分别如图 2、3 所示。由图 2 可见风速在 2.2 m/s 较 1.0 m/s 干燥速率有所提升,而在 2.2 ~ 3.4 m/s 范围内风速对干燥速率的影响不大。当对杏进行干燥时,首先杏表面水分蒸发,然后内部水分传递到杏表面,并重复上述过程而蒸发。文献<sup>[6]</sup>报道,当空气湍流流动时,空气流速变化对干燥速率没有影响,即表面扩散阻力相对于内部传质阻力可以忽略不计。对于一定流场、流体密度和流体粘度的空气,当流速较低时,流体为层流状态;随着流速的增加,层流逐渐变为湍流,即流速变化对干燥速率的影响越来越小。以上数据恰好验证了这点。

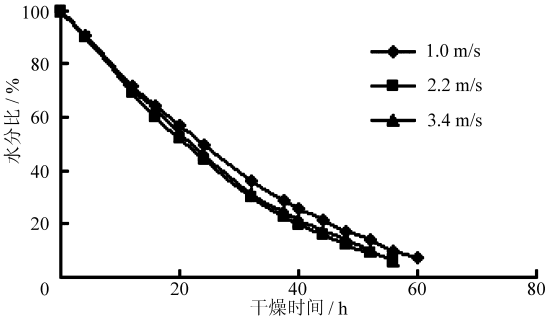


图 2 杏在 35℃、不同风速下水分比曲线

Fig. 2 Drying curves under different air velocities

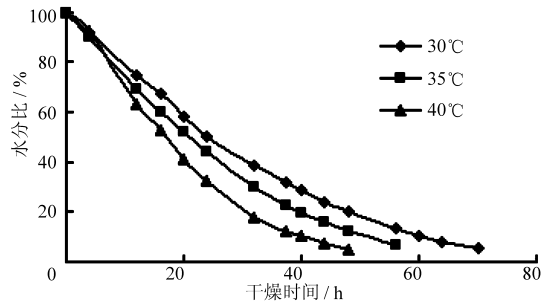


图 3 杏在 2.2 m/s、不同温度下水分比曲线

Fig. 3 Drying curves at different temperatures

由图 3 可看出,随着时间的推移杏所含水分逐渐减少,并且温度越高,杏的干燥速率越大。根据阿伦尼乌斯理论,干燥过程中水分扩散率  $D$  与温度  $T$  的关系可表示为

$$D = D_0 \exp(-E/(RT))$$

式中  $D_0$ ——阿伦尼乌斯因数

$E$ ——扩散活化能

$R$ ——理想气体常数<sup>[7]</sup>

由公式可见,温度升高可以加快水分蒸发,从而提高物料的干燥速率。

对比两图,在温度 30~40℃、风速 1.0~3.4 m/s 范围内,温度对干燥速率的影响要比风速的影响更大。由此可见适当提高干燥温度可提高干燥速率,而干燥风速应控制在 2.2 m/s 之内。

2.2 干燥模型分析

2.2.1 模型的确定

薄层干燥是指物料层表面完全暴露在相同的条件下进行干燥的干燥形态。由于杏均匀摆放于

干燥托盘网面上,干燥空气从杏的一侧吹向另一侧,故可以将其近似看作薄层干燥。对于薄层干燥,选择以下 2 种干燥数学模型进行分析。

Wang-Singh 模型<sup>[8]</sup>

$$M_R = 1 + at + bt^2 \tag{1}$$

Lewis 模型<sup>[9]</sup>

$$M_R = \exp(-Kt) \tag{2}$$

式中  $K$ 、 $a$ 、 $b$ ——模型系数,与干燥条件有关

$t$ ——干燥时间

平衡含水率受环境温度和湿度影响,可用改进 Oswin 模型表示,根据模型经验值取平衡含水率为 12%<sup>[10-13]</sup>。

依据图 2、3,用 Excel 软件对上述两种模型进行回归,求得的模型和相关指数  $R^2$  如表 2 所示。

表 2 薄层干燥模型及  $R^2$   
Tab.2 Thin layer drying model and the value of  $R^2$

| 干燥条件 |                      | Wang-Singh 模型                          |         | Lewis 模型                 |         |
|------|----------------------|----------------------------------------|---------|--------------------------|---------|
| 温度/℃ | 风速/m·s <sup>-1</sup> | $M_R = 1 + at + bt^2$                  | $R^2$   | $M_R = \exp(-Kt)$        | $R^2$   |
| 30   | 2.2                  | $M_R = 1 - 0.023\,63t + 0.000\,145t^2$ | 0.999 4 | $M_R = \exp(-0.035\,9t)$ | 0.958 2 |
| 35   | 2.2                  | $M_R = 1 - 0.028\,40t + 0.000\,210t^2$ | 0.999 7 | $M_R = \exp(-0.042\,0t)$ | 0.965 9 |
| 40   | 2.2                  | $M_R = 1 - 0.035\,38t + 0.000\,322t^2$ | 0.995 8 | $M_R = \exp(-0.056\,7t)$ | 0.964 3 |
| 35   | 1.0                  | $M_R = 1 - 0.024\,82t + 0.000\,157t^2$ | 0.999 8 | $M_R = \exp(-0.037\,5t)$ | 0.953 2 |
| 35   | 3.4                  | $M_R = 1 - 0.026\,83t + 0.000\,181t^2$ | 0.999 5 | $M_R = \exp(-0.041\,6t)$ | 0.949 0 |

从表 2 可以看出,上述两种模型的相关指数都在 0.94 以上,均有较高的模拟性。但相比两个模型,Wang-Singh 模型模拟更好一些,故选用其作为杏的低温薄层干燥模型。

2.2.2 模型系数的确定

用 Excel 软件对 13 组试验数据进行回归,得到二次通用旋转组合设计的试验结果,如表 3 所示。 $X_1$ 、 $X_2$ 分别表示干燥温度  $z_1$  和干燥风速  $z_2$  的编码值。

表 3 二次通用旋转组合设计及结果

Tab.3 Experimental design and results

| 试验序号 | $X_1$  | $X_2$  | $a$       | $b$       |
|------|--------|--------|-----------|-----------|
| 1    | 1      | 1      | -0.032 55 | 0.000 288 |
| 2    | 1      | -1     | -0.031 01 | 0.000 252 |
| 3    | -1     | 1      | -0.024 04 | 0.000 150 |
| 4    | -1     | -1     | -0.023 68 | 0.000 142 |
| 5    | 1.414  | 0      | -0.035 58 | 0.000 326 |
| 6    | -1.414 | 0      | -0.023 63 | 0.000 145 |
| 7    | 0      | 1.414  | -0.026 83 | 0.000 181 |
| 8    | 0      | -1.414 | -0.024 82 | 0.000 157 |
| 9    | 0      | 0      | -0.028 40 | 0.000 210 |
| 10   | 0      | 0      | -0.028 35 | 0.000 204 |
| 11   | 0      | 0      | -0.028 70 | 0.000 211 |
| 12   | 0      | 0      | -0.028 63 | 0.000 215 |
| 13   | 0      | 0      | -0.028 51 | 0.000 207 |

用 DPS 软件对试验数据进行分析处理,在  $\alpha = 0.10$  显著水平下剔除不显著项后,得到简化后的回归方程为

$$a = -0.028\,51 - 0.004\,22X_1 - 0.000\,47X_2 - 0.000\,63X_1^2 + 0.001\,26X_2^2 \tag{3}$$

$$b = 0.000\,209 + 0.000\,006\,3X_1 + 0.000\,009\,7X_2 + 0.000\,014\,5X_1^2 - 0.000\,019X_2^2 + 0.000\,007X_1X_2 \tag{4}$$

将  $X_1 = (z_1 - 35)/3.535\,57$ ,  $X_2 = (z_2 - 2.2)/0.848\,5$  代入式(3)和(4),得到模型系数关于干燥温度  $z_1$  和干燥风速  $z_2$  的回归方程为

$$a = -0.038\,29 + 0.002\,31z_1 - 0.008\,25z_2 - 0.000\,05z_1^2 + 0.001\,75z_2^2 \tag{5}$$

$$b = 0.001\,032 - 0.000\,068z_1 + 0.000\,046z_2 + 0.000\,001\,16z_1^2 - 0.000\,026\,4z_2^2 + 0.000\,002\,33z_1z_2 \tag{6}$$

应用 Matlab 绘制干燥温度  $z_1$  和干燥风速  $z_2$  对  $a$ 、 $b$  影响的响应面<sup>[14]</sup>,如图 4、5 所示。由图可见在试验范围内,当干燥风速一定时随着干燥温度的上升  $a$  减小, $b$  增加;当干燥温度一定时随着干燥风速的增大  $a$  先减小后增加, $b$  先增大后减小。

将式(5)和式(6)代入式(1),得到杏的低温薄

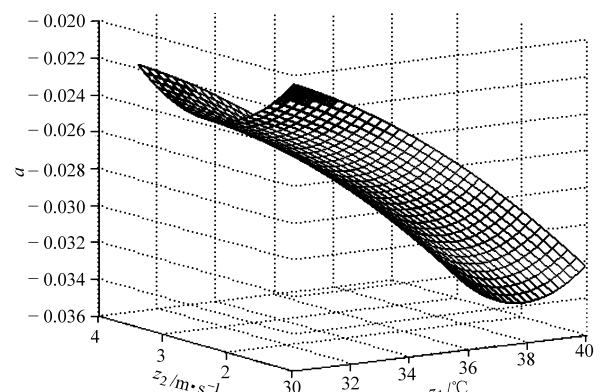


图 4 干燥温度  $z_1$  和干燥风速  $z_2$  对  $a$  影响的响应面  
Fig. 4 Response surface of the value of  $a$  at air velocity and temperature

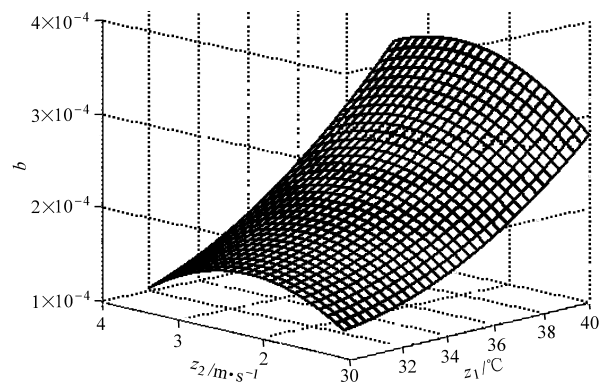


图 5 干燥温度  $z_1$  和干燥风速  $z_2$  对  $b$  影响的响应面  
Fig. 5 Response surface of the value of  $b$  at air velocity and temperature

层干燥模型为

$$M_R = 1 + (-0.038\,29 + 0.002\,31z_1 - 0.008\,25z_2 - 0.000\,05z_1^2 + 0.001\,75z_2^2)t + (0.001\,032 - 0.000\,068z_1 + 0.000\,046z_2 + 0.000\,001\,16z_1^2 - 0.000\,026\,4z_2^2 + 0.000\,002\,33z_1z_2)t^2 \quad (7)$$

其中  $30^{\circ}\text{C} < z_1 < 40^{\circ}\text{C}$   $1.0\text{ m/s} < z_2 < 3.4\text{ m/s}$

$$0 < t < -\frac{a}{2b} = \frac{38\,290 - 2\,310z_1 + 8\,250z_2 + 50z_1^2 - 1\,750z_2^2}{2\,064 - 136z_1 + 92z_2 + 2.32z_1^2 - 52.8z_2^2 + 4.66z_1z_2}$$

2.2.3 模型方程的验证

在一定干燥温度 ( $30 \sim 40^{\circ}\text{C}$ ) 和干燥风速 ( $1.0 \sim 3.4\text{ m/s}$ ) 范围内随机选取一个组合:  $z_1 = 37^{\circ}\text{C}$ ,  $z_2 = 2\text{ m/s}$  作验证试验。由式 (5) 和 (6) 可以得到  $a = -0.030\,77$ ,  $b = 0.000\,267$ , 即  $M_R = 1 - 0.030\,77t + 0.000\,267t^2$ , 将模型的模拟值与试验值进行对比, 由图 6 可见, 该模型可以较好地描述试验结果, 当干燥时间小于  $40\text{ h}$  时, 试验值与预测值几乎一致; 随着干燥时间的延长, 试验值与预测值有所偏离。

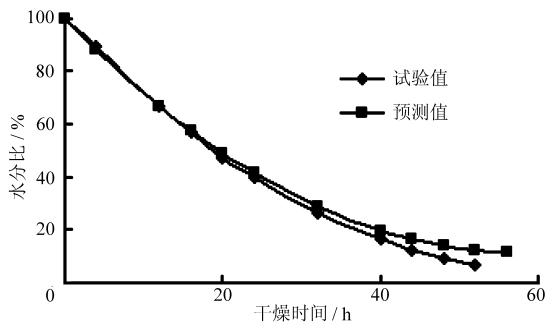


图 6 试验值与预测值比较  
Fig. 6 Comparison between the experimental values and model values

3 结论

- (1) 在杏的低温薄层干燥过程中, 恒速干燥阶段时间很短, 过程基本属于降速干燥阶段。温度对干燥速率的影响要比风速的影响大。
- (2) 在本文条件下, 杏的低温薄层干燥过程可用 Wang-Singh 模型描述, 得出的模型能较好地预测干燥过程中的即时水分比。

参 考 文 献

1 过利敏, 张谦, 赵晓梅, 等. 优质杏干的太阳能干燥特点及工艺研究[J]. 新疆农业科学, 2008, 45(6): 1 102 ~ 1 109.  
Guo Limin, Zhang Qian, Zhao Xiaomei, et al. Study on the drying technology and drying characteristics of solar-dryer for high-quality dried apricot[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2008, 45(6): 1 102 ~ 1 109. (in Chinese)

2 张懋. 生鲜食品保质干燥新技术理论与实践[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.

3 汪政富, 李玲玲, 胡小松, 等. 两种不同晾房中无核白葡萄薄层干燥的数学模型[J]. 中国农业大学学报, 2008, 13(5): 28 ~ 31.  
Wang Zhengfu, Li Lingling, Hu Xiaosong, et al. Mathematical modeling on thin layer drying of seedless grape in two different air-drying shelters[J]. Journal of China Agricultural University, 2008, 13(5): 28 ~ 31. (in Chinese)

4 任露泉. 回归设计及其优化[M]. 北京: 科学出版社, 2009.

5 闻陶, 朱跃钊, 孙庆梅, 等. 马铃薯吸附干燥特性及模型拟合[J]. 生物加工过程, 2006, 4(3): 56 ~ 61.  
Wen Tao, Zhu Yuezhao, Sun Qingmei, et al. Potato's adsorption drying characteristic and model regressing [J]. Chinese Journal of Bioprocess Engineering, 2006, 4(3): 56 ~ 61. (in Chinese)

表 4 不同产地芝麻样品压榨芝麻油的抗氧化  
成分含量及氧化稳定性

Tab.4 Antioxidant components content and oxidative  
stability of sesame oil from different cultivated areas

| 产地    | 名称   | 抗氧化物质含量/mg·(100 g) <sup>-1</sup> |     |      | 诱导<br>时间/h |
|-------|------|----------------------------------|-----|------|------------|
|       |      | 生育酚                              | 芝麻素 | 芝麻酚  |            |
| 江西    | 黑芝麻油 | 48.38                            | 270 | 8.3  | 18.01      |
| 缅甸    | 黑芝麻油 | 43.21                            | 230 | 5.6  | 11.78      |
| 河南    | 白芝麻油 | 54.87                            | 230 | 7.9  | 19.70      |
| 安徽    | 白芝麻油 | 48.66                            | 280 | 7.0  | 13.46      |
| 湖北    | 白芝麻油 | 56.23                            | 382 | 12.4 | 20.44      |
| 埃塞俄比亚 | 白芝麻油 | 45.63                            | 265 | 10.3 | 12.56      |

(2)国产芝麻样品和进口芝麻样品的粗脂肪含量差别不大。但国产芝麻较进口芝麻的粗蛋白含量明显要高,草酸和灰分含量明显要低。

(3)国产芝麻样品和进口芝麻样品压榨所得芝麻油的色泽无明显差别,但磷脂含量、酸价、皂化值、过氧化值都较低。

(4)不同产地芝麻样品所得芝麻油的 6 种主要脂肪酸含量均在芝麻油国标范围内。国产黑芝麻油比进口黑芝麻的油酸含量高,亚油酸和棕榈酸含量低。

(5)国产芝麻样品较进口芝麻样品压榨所得芝麻油中含有较多的抗氧化物质,氧化稳定性更好。

参 考 文 献

1 赵国志. 世界芝麻生产与贸易概况[J]. 粮食与油脂,2005(1):31~32.

2 刘红艳,赵应忠. 我国芝麻生产现状及发展方向[J]. 农技服务,2006(4):4~5.

3 冉启才. 芝麻中草酸含量及测定方法[J]. 四川粮油科技,1992(3):34~36.

4 戴洪平,王兴国,金青哲. HPLC 法测定芝麻油中生理活性成分——芝麻素[J]. 中国粮油学报,2004,19(6):80~82.

Dai Hongping, Wang Xingguo, Jin Qingzhe. Determination of sesamin in sesame oil by HPLC[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association,2004,19(6):80~82. (in Chinese)

5 罗杰. 芝麻酚的化学合成[D]. 成都:四川大学,2002.

Luo Jie. Chemical synthesis of sesamol[D]. Chengdu: Sichuan University, 2002. (in Chinese)

6 孙曙庆. 油脂氧化稳定性的研究[J]. 食品与发酵工业,1998,25(3):20~22.

Sun Shuqing. Study oil oxidative stability of fats and oils[J]. Food and Fermentation Industry, 1998, 25(3):20~22. (in Chinese)

7 刘玉兰,陈刘杨,汪学德,等. 芝麻品种和制油工艺对芝麻油品质的影响[J]. 中国油脂,2010,35(2):6~10.

Liu Yulan, Chen Liuyang, Wang Xuede, et al. Effect of sesame variety and oil preparation technology on quality of sesame oil [J]. China Oils and Fats, 2010,35(2):6~10. (in Chinese)

(上接第 143 页)

6 Henderson S M, Pabis S. Grain drying theory I. Temperature effect on drying coefficients[J]. Journal of Agricultural Engineering Research,1961,6(3):169~174.

7 潘永康,王喜忠. 现代干燥技术[M]. 北京:化学工业出版社,1998.

8 Wang C Y, Singh R P. Use of variable equilibrium moisture content in modeling rice drying[J]. Transactions of American Society of Agricultural Engineering, 1978, 11:668~672.

9 Bruce D M. Exposed-layer barley drying: three models fitted to new data up to 150℃[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1985, 32(4):337~347.

10 王辰,张欣,代志凯,等. 菊花吸湿与解吸等温线拟合模型的选择[J]. 长江大学学报,2008,5(1):25~26.

Wang Chen, Zhang Xin, Dai Zhikai, et al. Selection of fitting models on adsorption and desorption isotherms of chrysanthemum[J]. Journal of Yangtze University, 2008, 5(1):25~26. (in Chinese)

11 Falade K O, Lukini I O, Adegoke G O. Adsorption isotherm and heat of sorption of osmotically pretreated and air-dried pineapple slices[J]. European Food Research and Technology, 2004, 218(6):540~543.

12 李栋,毛志怀,曹崇文. 低温下水稻的薄层干燥模型[J]. 中国农业大学学报,2000,5(2):37~39.

Li Dong, Mao Zhihuai, Cao Chongwen. Study on thin layer drying model of paddy in low temperature[J]. Journal of China Agricultural University, 2000,5(2):37~39. (in Chinese)

13 柴京富. 枸杞热风干燥特性及最佳工艺的试验研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2004.

Chai Jingfu. An experimental study on lycium hot air drying characteristic and optimum technology[D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University,2004. (in Chinese)

14 周开利,邓春晖. MATLAB 基础及其应用教程[M]. 北京:北京大学出版社,2007.