

江 宁,李丽娟,李大婧,等. 莲藕片热风干燥特性及动力学模型[J]. 江苏农业科学,2015,43(1):247-250.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2015.01.083

# 莲藕片热风干燥特性及动力学模型

江 宁,李丽娟,李大婧,刘春泉

(江苏省农业科学院农产品加工研究所/国家农业科技华东(江苏)创新中心农产品加工工程技术研究中心,江苏南京 210014)

**摘要:**为研究莲藕片热风干燥特性,探讨了不同装载量和热风温度对莲藕片薄层热风干燥过程的影响。根据试验数据建立了莲藕片热风干燥水分比与干燥时间关系的动力学模型,并对模型进行拟合,最后计算了莲藕片热风干燥条件下的有效扩散系数。结果表明,莲藕片热风干燥过程符合 Page 模型,经验证,模型预测值与试验值拟合良好;莲藕片热风干燥有效扩散系数在  $0.831 \times 10^{-7} \sim 3.516 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  范围内。Page 模型适用于描述莲藕片热风干燥过程。

**关键词:**莲藕;热风;干燥特性;动力学模型

**中图分类号:** TS255.36 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2015)01-0247-04

莲藕(*Nelumbo nucifera* Gaertn),别称荷藕、莲菜等,为睡莲科莲属多年生大型宿根水生草本植物<sup>[1]</sup>,原产中国和印度,历史悠久,种质资源丰富,以肥嫩根状茎供食用,是我国极重要的水生蔬菜。莲藕含有淀粉、膳食纤维、氨基酸、维生素等多种营养成分,营养丰富,同时又含有少量生物碱、黄酮类、鞣质等功能性成分,具有清热凉血、生津止渴、健脾开胃等药用价值,广受消费者喜爱<sup>[2-3]</sup>。莲藕采收后,易氧化褐变、失水干缩以及腐烂变质,不耐贮运,干制可有效延长其贮藏期限,且便于运输。

我国每年有大量的脱水藕片出口日本、韩国、新加坡、菲律宾、美国等国家,而脱水藕片所采用的干燥技术即为热风干燥。热风干燥技术操作简便、成本低廉,国内外的研究报道也较多,段振华等建立了罗非鱼片热风干燥水分比与干燥时间关系的数学模型<sup>[4]</sup>;诸爱士等分析了瓠瓜的热风干燥特性,

并在此基础上建立其干燥动力学模型<sup>[5]</sup>;刘坤等研究了红枣的热风干燥特性,并建立了薄层干燥数学模型<sup>[6]</sup>;Kaleta 等对苹果的热风干燥特性进行了研究,并建立了相应的干燥模型<sup>[7]</sup>;Doymaz 建立了猕猴桃热风干燥数学模型,并研究其有效扩散系数<sup>[8]</sup>;Kaleemullah 等研究了红辣椒的薄层热风干燥模型,并计算了有效扩散系数<sup>[9]</sup>。

本试验研究了热风干燥对莲藕片干燥特性的影响,并建立了莲藕片热风干燥动力学模型,用以描述莲藕片热风干燥过程中的水分变化,以期对莲藕热风干燥工艺的研究和生产控制提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

“美人红”莲藕:于 2012 年 5 月由江苏省扬州市宝应县天禾食品有限公司特供。莲藕肉质肥嫩,色泽洁白,无明显机械伤。

### 1.2 仪器与设备

DHG-9073B5-Ⅲ型电热恒温鼓风干燥箱(上海新苗医疗器械制造有限公司);FA2104 电子分析天平(北京赛多利斯科学仪器有限公司)。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 原料预处理

将莲藕洗净、去皮后,用不锈钢刀切分

收稿日期:2014-03-21

基金项目:江苏省农业科技自主创新资金[编号: CX(13)3082]。

作者简介:江 宁(1983—),男,江苏南京人,硕士,助研,从事农产品精深加工研究。Tel:(025)84391570;E-mail:jn19831109@163.com。

通信作者:刘春泉,硕士,研究员,从事农产品精深加工及产业化开发研究。Tel:(025)84390188;E-mail:liuchunquan2009@163.com。

[14]慕金超,刘春芬. 紫茄皮中花青素的提取研究[J]. 江苏农业科学,2014,42(4):227-229.

[15]姬晓灵,屈爱桃,汪 岭,等. 超声波辅助提取百脉根花色苷工艺[J]. 江苏农业科学,2013,41(11):298-301.

[16]肖军霞,黄国清,迟玉森. 樱桃花色苷的提取及抗氧化活性研究[J]. 中国食品学报,2011,11(5):70-75.

[17]Corrales M,Toepfl S,Butz P,et al. Extraction of anthocyanins from grape by-products assisted by ultrasonics,high hydrostatic pressure or pulsed electric fields:A comparison[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies,2008,9(1):85-91.

[18]迟海霞,涂宗财,陈 钢,等. 米糠多糖的超声波辅助纤维素酶-柠檬酸联合提取及结构分析[J]. 食品科学,2010,31(24):168-171.

[19]焦 岩,王振宇. 蓝靛果花色苷超声波辅助提取优化及其降血脂作用[J]. 中国食品学报,2010,10(2):52-59.

[20]李颖畅,郑凤娥,孟宪军. 大孔树脂纯化蓝莓果中花色苷的研究[J]. 食品与生物技术学报,2009,28(4):496-500.

[21]宋德群,孟宪军,王晨阳,等. 蓝莓花色苷的 pH 示差法测定[J]. 沈阳农业大学学报,2013,44(2):231-233.

[22]牟建楼,王 颀. 响应面法优化灵芝枣饮料工艺及其抗氧化性研究[J]. 中国食品学报,2013,13(11):21-27.

[23]Li X X,Han L J,Chen L J. In vitro antioxidant activity of protein hydrolysates prepared from corn gluten meal[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture,2008,88(9):1660-1666.

[24]程 丹,傅玉颖,梅 子,等. 响应曲面法优化酵母微胶囊化核桃油工艺[J]. 中国食品学报,2013,13(11):28-34.

成 5~6 mm 厚的薄片,立即浸于 0.2% 柠檬酸和 1% 氯化钠组成的护色剂中护色,0.5 h 后取出,于沸水中烫漂 3 min,流动水冷却至常温后,置于 2% 的麦芽糊精溶液中浸渍 1 h,取出沥干,置于 -18 ℃ 左右的冰箱中,冻藏备用。

1.3.2 热风干燥 打开鼓风干燥箱,将试验温度分别调至 50、60、70 ℃,待温度稳定 10 min 后,将解冻后的莲藕片 50、100、200 g 均匀铺成薄层,放入干燥箱内。干燥开始一段时间内莲藕片水分变化较大,在 0~1 h,每隔 10 min 测定 1 次水分含量;1~2 h,每隔 20 min 测定 1 次水分含量;2 h 之后水分变化量较小,每隔 30 min 测定 1 次水分含量。换算为干基含水率,直到干基含水率≤13% 为止。

1.4 薄层干燥数学模型

果蔬干燥常用的薄层干燥数学模型如表 1 所示。

表 1 应用于干燥曲线的薄层干燥数学模型

模型名称	方程表达式	线型表达式
指数模型	$MR = \exp(-kt)$	$\ln(MR) = -kt$
单项扩散模型	$MR = A \exp(-kt)$	$\ln(MR) = \ln A - kt$
Page 方程	$MR = \exp(-kt^N)$	$\ln[-\ln(MR)] = \ln k + N \ln t$

注:水分比  $MR = (M_t - M_e)/(M_0 - M_e)$ ;  $t$  表示干燥时间, min;  $M_t$  表示  $t$  时刻物料含水率(干基), %;  $M_e$  表示平衡含水率(干基), %;  $M_0$  表示初始含水率(干基), %;  $A$ 、 $k$ 、 $N$  表示待定系数。

由于平衡含湿量  $M_e$  资料很少,并且相对于  $M_t$  和  $M_0$  较小,因此把上述的水分比  $MR$  简化为  $MR = M_t/M_0$ 。

1.5 试验指标计算

1.5.1 水分含量 采用 GB 5009.3—2010 食品中水分的测定方法<sup>[10]</sup>,各时期水分含量通过定时取样、迅速称重后烘干,并计算湿基和干基含水率。湿基含水率(%) =  $(m_t - m_s)/m_t \times 100\%$ ;干基含水率(%) =  $(m_t - m_s)/m_s \times 100\%$ 。式中: $m_t$  表示物料  $t$  时刻对应的质量, g;  $m_s$  表示绝干物料质量, g。

1.5.2 干燥速率 干燥速率(g/min) =  $\Delta m/\Delta t$ , 式中:  $\Delta m$  表示失水质量, g;  $\Delta t$  表示相邻 2 次测量的时间间隔, min。

1.5.3 有效扩散系数 扩散系数反映物料在一定干燥条件下的脱水能力,因为降速干燥过程受内部扩散的控制,所以物料的内部水分扩散系数是果蔬干燥过程数学模型中的主要参数。Fick 扩散方程经常用来描述生物产品降速阶段的干燥特性。本试验采用下式计算莲藕片的有效扩散系数。

$$\ln(MR) = \ln \frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{\text{eff}} t}{4L^2};$$
$$\text{斜率} = -\frac{\pi^2 D_{\text{eff}}}{4L^2}.$$

式中:  $D_{\text{eff}}$  是有效扩散系数,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;  $L$  为物料层厚度的一半, m。

1.6 统计分析

采用 SPSS 20.0 分析软件对表 1 中各干燥方程的参数进行线性回归分析,显著性水平为  $P \leq 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 莲藕片薄层热风干燥特性分析

2.1.1 装载量对莲藕片热风干燥特性的影响 由图 1 可知,在热风温度恒定在 60 ℃ 的条件下,随着装载量的降低,干燥

时间缩短。在装载量为 50 g 时,干燥 180 min,莲藕片水分含量就已经降到 13% (干基) 以下;而装载量为 200 g 时,水分含量降到 13% 以下,需要干燥 300 min 以上。这可能是由于装载量越低,单位质量水分所吸收的热能越高,汽化所需时间缩短,达到目标含水率所需的时间也随之缩短。

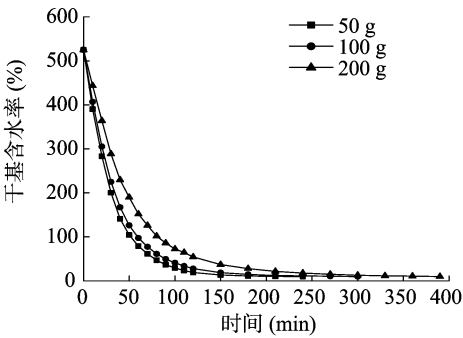


图1 不同装载量下莲藕片的热风干燥曲线

由图 2 可以看出,热风温度设定为 60 ℃,在装载量为 200 g 时,莲藕片的热风干燥过程分为加速、恒速、降速 3 个阶段,基本符合传统的干燥速率曲线变化规律,但加速阶段与恒速阶段均较短,干燥的大部分时间在恒速阶段;装载量为 50 g 和 100 g 时,莲藕片的热风干燥过程只分为加速和降速 2 个阶段。装载量越高,相同干基含水率所对应的干燥速率越大。

2.1.2 干燥温度对莲藕片热风干燥特性的影响 由图 3 可知,在装载量为 100 g 时,热风温度越高,干燥相同时间物料含水率就越低。当热风温度为 70 ℃ 时,干基含水率降至 13% 以下需 150 min,而当热风温度为 50 ℃ 时,则需 300 min 以上。这是由于热风温度越高,传热动力越大,蒸发速率快,要达到一定含水率所需的时间就越短。

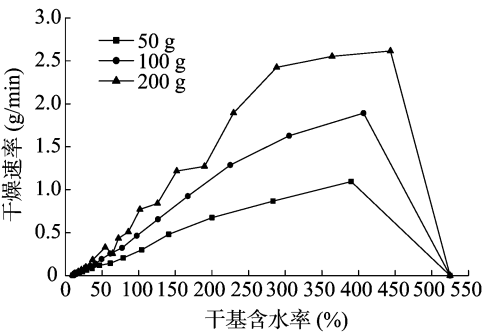


图2 不同装载量下莲藕片的热风干燥速率曲线

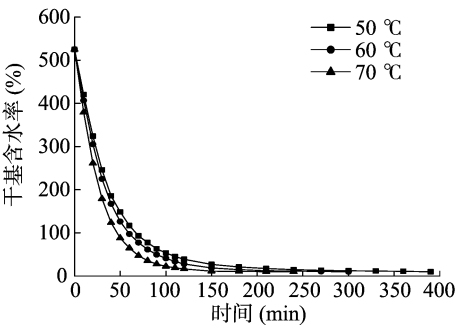


图3 不同温度下莲藕片的热风干燥曲线

由图 4 可以看出,当装载量为 100 g 时,在热风温度 50、

60、70 ℃ 的条件下,莲藕片的干燥过程在升速阶段后均不经恒速阶段直接进入降速阶段。热风温度越高,相同干基含水率所对应干燥速率越大。这与张建军等对不同热风温度下辣椒的干燥特性进行研究后所得结论<sup>[11]</sup>一致。

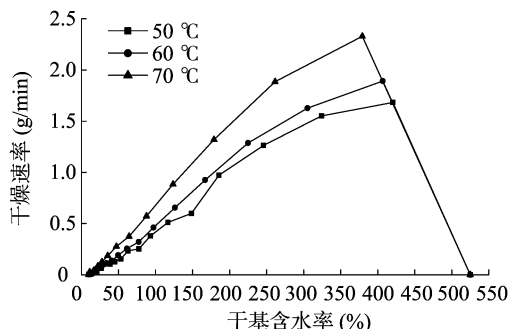


图4 不同温度下莲藕片的热风干燥速率曲线

## 2.2 莲藕片热风干燥动力学

2.2.1 莲藕片热风干燥模型的选择 根据干燥特性试验数据,分别绘制不同装载量和热风温度下的  $-\ln(MR) - t$  曲线和  $\ln[-\ln(MR)] - \ln t$  曲线,如图 5 至图 8 所示。从图 5 和图 7 中明显可以看出,  $-\ln(MR)$  与  $t$  呈非线性,从图 6 和图 8 中可以看出,  $\ln[-\ln(MR)]$  与  $\ln t$  呈线性,由此可见莲藕片的热风干燥动力学模型满足 Page 方程,可以选择 Page 模型作为莲藕片热风干燥的动力学模型。

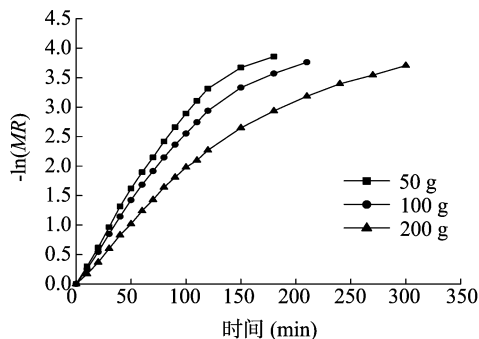


图5 不同装载量下的 $-\ln(MR)-t$ 关系曲线

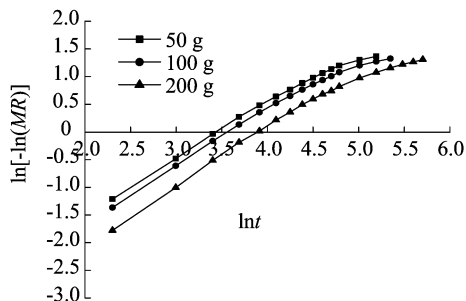


图6 不同装载量下的 $\ln[-\ln(MR)]-\ln t$ 关系曲线

2.2.2 莲藕片热风干燥方程拟合 采用 SPSS 20.0 分析软件对不同装载量和热风温度下对应的  $\ln[-\ln(MR)]$  与  $\ln t$  值进行一元线性回归分析,得出干燥常数  $\ln k$  和  $N$  值,相关系数  $R$  均在 0.95 以上,表明方程与实际操作参数拟合度良好。令:

$$\ln k = a + bX_1 + cX_2;$$

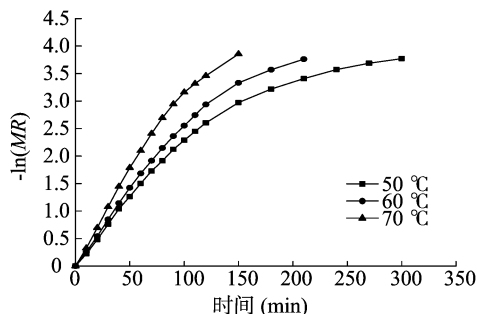


图7 不同热风温度下的 $-\ln(MR)-t$ 关系曲线

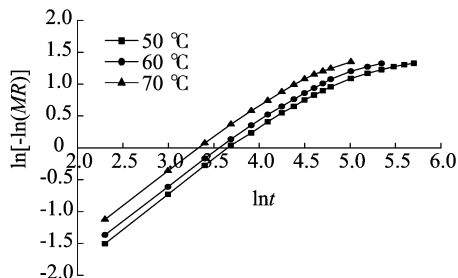


图8 不同热风温度下的 $\ln[-\ln(MR)]-\ln t$ 关系曲线

$$N = d + eX_1 + fX_2。$$

式中: $X_1$  表示装载量,g; $X_2$  表示热风温度,℃; $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $e$ 、 $f$  表示待定系数。

利用 SPSS 20.0 软件对试验数据进行多元线性回归拟合,求得方程各待定系数,即可得出  $\ln k$  和  $N$  的回归方程为:

$$\ln k = -3.969 - 0.00418X_1 + 0.0193X_2;$$

$$N = 0.764 - 0.000126X_1 + 0.00255X_2。$$

2 个方程的  $P$  值分别为 0.001 和 0.000,均小于 0.05,故可认为干燥  $\ln k$  和  $N$  与变量装载量及热风温度的线性关系成立。因此,莲藕片热风干燥方程为  $MR = \exp(-kt^N)$ ,式中,  $k = \exp(-3.969 - 0.00418X_1 + 0.0193X_2)$ ,  $N = 0.764 - 0.000126X_1 + 0.00255X_2$ 。

2.2.3 莲藕片热风干燥模型方程验证 为进一步验证莲藕片热风干燥动力学模型的准确性,选取试验中的 1 组数据进行验证。试验条件为:热风温度 70 ℃,装载量 200 g。将该组试验值与模型的预测值进行比较,结果见图 9。从图 9 可以看出,Page 方程预测曲线与实际值拟合良好,表明 Page 方程能较准确地描述莲藕片热风干燥过程。

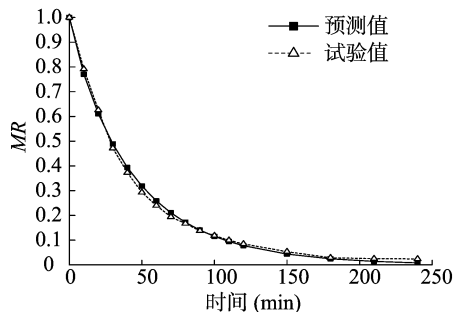


图9 相同条件下热风干燥试验值与预测值的比较

## 2.3 莲藕片热风干燥条件下的有效扩散系数

在不同的热风干燥条件下所得的  $-\ln(MR) - t$  的关系图中,采用 Excel 软件对干燥曲线添加线性趋势线,从趋势线方

程中即可读出其斜率。由下式:

$$\text{斜率} = \frac{\pi^2 D_{\text{eff}}}{4L^2}$$

即可求出不同干燥条件下莲藕片的有效扩散系数  $D_{\text{eff}}$  值(表 2)。

表 2 热风干燥条件下莲藕片有效扩散系数值的比较

装载量 (g)	热风温度 (℃)	扩散系数 $D_{\text{eff}}$ ( $\times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ )
50	50	1.905
50	60	2.341
50	70	3.516
100	50	1.297
100	60	1.915
100	70	2.766
200	50	0.831
200	60	1.287
200	70	1.712

由公式计算得出莲藕片分别在装载量 50、100、200 g, 热风温度 50、60、70 ℃ 的条件下的有效扩散系数  $D_{\text{eff}}$  值, 如表 2 所示。莲藕片热风干燥条件下的扩散系数大约在  $0.831 \times 10^{-7} \sim 3.516 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  的范围内。由表 2 可以看出, 随着装载量的降低和热风温度的升高, 有效扩散系数增大。这可能是由于装载量越低, 鼓风干燥箱体中水分含量越低, 单位水分含量吸取的热能升高, 从而增加了传质推动力, 扩散速率加快<sup>[9]</sup>; 而温度升高, 物料内部水分子运动加剧, 扩散速率随之加快<sup>[12]</sup>。由于干燥速率曲线图可以看出, 莲藕片的热风干燥过程几乎不存在恒速干燥阶段, 而在降速干燥阶段, 莲藕片表面的水分汽化速率高于内部的水分扩散速率, 故干燥速率下降, 这说明内部水分扩散为干燥速率的主要控制因素<sup>[13]</sup>。果蔬的有效扩散系数大小不仅与果蔬本身的组织结构、品种、形状有关, 也与干燥方式及其操作条件联系紧密。孟岳成等计算得到了不同热风温度、风速及物料厚度条件下熟化红薯的有效扩散系数, 研究表明: 随热风温度、风速和红薯厚度的增大, 有效扩散系数增大, 其范围在  $5.18 \times 10^{-10} \sim 2.11 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  之间<sup>[14]</sup>; Simal 等发现热风干燥猕猴桃时, 随着温度的升高, 物料的有效扩散系数增大, 热风温度由 30 ℃ 增加到 90 ℃ 时, 猕猴桃的有效扩散系数值由  $3.0 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  增加到  $17.2 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ <sup>[15]</sup>; Doymaz 等得出玉米粒在 55 ~ 75 ℃ 热风范围内有效扩散系数值为  $9.488 \times 10^{-11} \sim 2.716 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ <sup>[16]</sup>; 胡庆国在不同的热风温度和风速条件下, 得到毛豆的有效扩散系数在  $0.703 \times 10^{-9} \sim 1.299 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  范围内<sup>[17]</sup>。本试验中莲藕片的有效扩散系数明显大于上述各例, 这可能是由于莲藕片经冷藏、解冻后内部多孔, 结构疏松, 有利于水分扩散。

### 3 结论

(1) 莲藕片热风干燥过程在升速阶段后不经恒速阶段直接进入降速阶段。

(2) 莲藕片热风干燥过程符合 Page 模型, 模型方程为

$MR = \exp(-kt^N)$ , 其中,  $k = \exp(-3.969 - 0.00418X_1 + 0.0193X_2)$ ,  $N = 0.764 - 0.000126X_1 + 0.00255X_2$ ;  $R$  值均大于 0.95,  $P$  值均小于 0.05, 说明拟合显著。经验证, 模型的预测值与试验值拟合良好。

(3) 莲藕片热风干燥条件下的有效扩散系数随装载量的降低和热风温度的升高而增大, 范围在  $0.831 \times 10^{-7} \sim 3.516 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  之间。

### 参考文献:

- [1] 王向阳, 姜丽佳, 王忠英. 莲藕的酶促褐变及其贮藏中褐变的控制[J]. 农业工程学报, 2009, 25(4): 276-280.
- [2] Xing Y G, Li X H, Xu Q L, et al. Effects of chitosan-based coating and modified atmosphere packaging (MAP) on browning and shelf life of fresh-cut lotus root (*Nelumbo nucifera* Gaerth) [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2010, 11(4): 684-689.
- [3] 刘建学. 全藕粉喷雾干燥工艺试验研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(9): 229-231.
- [4] 段振华, 冯爱国, 向东, 等. 罗非鱼片的热风干燥模型及能耗研究[J]. 食品科学, 2007, 28(7): 201-205.
- [5] 诸爱士, 夏凯. 瓠瓜薄片热风干燥动力学研究[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 365-369.
- [6] 刘坤, 鲁周民, 包蓉, 等. 红枣薄片干燥数学模型研究[J]. 食品科学, 2011, 32(15): 80-83.
- [7] Kaleta A, Gornicki K. Evaluation of drying models of apple (var. McIntosh) dried in a convective dryer [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2010, 45(5): 891-898.
- [8] Doymaz I. Convective air drying characteristics of thin layer carrots [J]. Journal of Food Engineering, 2004, 61(3): 359-364.
- [9] Kaleemullah S, Kailappan R. Modelling of thin-layer drying kinetics of red chillies [J]. Journal of Food Engineering, 2006, 76(4): 531-537.
- [10] GB 5009.3—2010 食品中水分的测定[S].
- [11] 张建军, 王海霞, 马永昌, 等. 辣椒热风干燥特性的研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(3): 298-301.
- [12] Akpinar E, Midilli A, Bicer Y. Single layer drying behaviour of potato slices in a convective cyclone dryer and mathematical modeling [J]. Energy Conversion and Management, 2003, 44(10): 1689-1705.
- [13] 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.
- [14] 孟岳成, 王君, 房升, 等. 熟化红薯热风干燥特性及数学模型适用性[J]. 农业工程学报, 2011, 27(7): 387-392.
- [15] Simal S, Femenia A, Garau M C, et al. Use of exponential, Page's and diffusional models to simulate the drying kinetics of kiwi fruit [J]. Journal of Food Engineering, 2005, 66(3): 323-328.
- [16] Doymaz I, Pala M. The thin-layer drying characteristics of corn [J]. Journal of Food Engineering, 2003, 60(2): 125-130.
- [17] 胡庆国. 毛豆热风与真空微波联合干燥过程研究[D]. 无锡: 江南大学, 2006.