

# 竹笋热风薄层干燥特性及动力学分析

郑炯, 张甫生, 阚建全, 龚平, 钟金锋

(西南大学食品科学学院, 重庆市特色食品工程技术研究中心, 农业部农产品贮藏保鲜质量安全风险评估实验室(重庆), 重庆 400715)

**摘要:** 干燥是竹笋加工中最为常见的一种方式, 为了解竹笋在热风薄层干燥条件下的干燥特性, 本实验以大叶麻竹笋为试验原料, 竹笋片干基含水率和干燥速率为试验测试指标, 研究了不同干燥温度、风速和笋片厚度等因素对干燥速率的影响, 并建立竹笋热风薄层干燥的动力学模型。结果表明: 热风薄层干燥温度、风速和笋片厚度均对竹笋的干燥特性影响较大。随着干燥温度和风速的升高, 干燥速率增加; 随着笋片厚度的增加, 干燥速率降低。不同条件下的干燥均可分为加速、恒速和降速干燥3个阶段。竹笋的适宜热风薄层干燥条件为干燥温度 80 ℃、风速 2.0 m/s、笋片厚度 1.0 cm。竹笋热风薄层干燥的动力学满足 Page 模型, Page 模型适合对竹笋热风薄层干燥过程进行描述和预测。所得研究结果将为竹笋干的热风薄层干燥可控制工业化生产提供参考。

**关键词:** 竹笋; 热风薄层干燥; 干燥特性; 动力学; 模型

文章编号: 1673-9078(2014)2-112-116

## Analysis of Hot-air Thin Layer Drying Characteristics and Kinetics Model of Bamboo Shoots

ZHENG Jiong, ZHANG Fu-sheng, KAN Jian-quan, GONG Ping, ZHONG Jin-feng

(College of Food Science, Southwest University, Chongqing Research Center of Special Food Engineering and Technology, Agriculture Department of storage and preservation of agricultural products quality safety risk assessment Laboratory (Chongqing), Chongqing 400715, China)

**Abstract:** Drying is one of the most common ways in bamboo shoots processing and is the key to affect the quality of dried bamboo shoots. In order to evaluate the drying characteristics of bamboo shoots and determine the most appropriate drying model under the hot-air thin layer drying conditions, the moisture content and drying rate of bamboo shoots studies were carried out during hot-air thin layer drying process. The effects of drying temperature, air speed and slice thickness on the drying characteristics were determined and hot-air thin layer drying kinetics model of bamboo shoots was set up. The results showed that the hot-air thin layer temperature, air speed and slice thickness had greater influences on the drying characteristics of bamboo shoots. The drying rate increased with the increase of drying temperature and air speed, whereas the drying rate gradually decreased with the increase of slice thickness. The whole drying process was divided into three stages with different conditions, including the accelerated drying, constant rate drying and falling rate drying. The most appropriate hot-air thin layer drying conditions were drying temperature 80 ℃, air speed 2.0 m/s, and slice thickness 1.0 cm. The hot-air thin layer drying kinetics met Page model and this model was suitable for describing and predicting the hot-air thin layer drying of bamboo shoots. The research may provide a reference for industrial production of dried bamboo shoots or other dried vegetables.

**Key words:** bamboo shoots; hot-air thin layer drying; drying characteristics; kinetics; model

干燥是竹笋加工中最为常见的一种方式, 新鲜的竹笋经干燥处理后, 由于大部分水分被除去, 水分活

收稿日期: 2013-09-12

基金项目: 国家重大星火计划项目(2011GA811001); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(XDJK2013C131)

作者简介: 郑炯(1982-), 男, 博士研究生, 讲师, 研究方向为食品化学与营养学、果蔬加工技术

通讯作者: 阚建全(1965-), 男, 博士, 教授, 研究方向为食品化学与营养学、食品生物技术

度降低, 抑制了微生物正常的发育和繁殖活动, 同时也抑制了竹笋中酶的活性, 使得产品得以较好的保存<sup>[1]</sup>。传统的竹笋干燥方式干燥缓慢, 干燥过程中温度、时间难以控制, 使得营养成分破坏和色泽褐变严重、复水性差, 笋干总体品质差, 而且常会因阴雨季节无法晒干而导致腐败变质<sup>[2]</sup>。因此, 利用现代干燥方法和工艺对竹笋进行干燥是提高笋干质量的有效途径。Madamba 等<sup>[3]</sup>报道竹笋在热风干燥过程中干燥面积和水分含量之间的线性关系。Xu 等<sup>[4]</sup>研究了不同的冻干

方法对竹笋干燥的效率。Cheng<sup>[5]</sup>研究表明真空干燥能够延长了竹笋的贮藏时间和提高竹笋的保藏品质。

热风薄层干燥是指物料厚度在 20 mm 以下,其表面完全暴露在相同的环境条件下进行烘干的干燥方式。多年来,国内外研究人员对苹果片<sup>[5]</sup>、油菜籽<sup>[6]</sup>、大豆<sup>[7]</sup>、虎坚果种子<sup>[8]</sup>等的热风薄层干燥进行了研究,认为干燥特性的评价可以帮助预测合适的干燥条件从而获得品质较好的产品。目前,常用来描述食品或农产品的热风薄层干燥模型主要有 3 种:指数模型、Page 方程和单扩扩散模型。Demiray 等<sup>[9]</sup>研究了不同的热风薄层干燥温度对番茄片干燥动力学的影响。Fang 等<sup>[10]</sup>研究大枣的热风薄层干燥时比较了 13 种常用数学模型。Janjai 等<sup>[11~12]</sup>采用 8 种不同的薄层干燥模型分别来拟合剥皮龙眼和荔枝的薄层干燥实验数据。Doymaz 和 Ibrahim<sup>[13]</sup>用了 6 种薄层干燥的数学模型来分析柿子片的热风薄层干燥动力学。

但是,目前关于竹笋热风薄层干燥特性与干燥动力学,以及对干燥过程进行数学模拟的相关研究还鲜有报道,而这方面的研究将对竹笋干制品的工业化生产有重要的指导意义。因此,本研究拟以大叶麻竹笋 (*Dendrocalamus latiflorus*) 为实验原料,研究竹笋在热风薄层干燥条件下的干燥特性,探讨不同温度、风速和笋片厚度等因素对竹笋干燥速率的影响,建立竹笋热风薄层干燥的动力学模型,以期对竹笋片的热风薄层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 原料

大叶麻竹笋,采购于重庆市北碚区施家梁镇大叶麻竹笋种植基地。

### 1.2 主要仪器设备

DHG-9140 型电热恒温鼓风干燥箱,上海齐欣科学仪器有限公司;BC-2 型薄层干燥试验台,长春吉大科学仪器设备有限公司;JA5002 型精密分析电子天平,上海精天有限公司。

### 1.3 干燥试验方法

挑选无破损、色泽较好、笋龄和大小相对一致的新鲜大叶麻竹笋,洗净;切块后放入沸水中漂烫 5 min,沥干;将切成不同厚度 (0.5 cm、1.0 cm、1.5 cm) 的笋片均匀平铺在薄层干燥试验台的干燥盘上,分别设置不同的干燥温度 (60 °C、70 °C、80 °C、90 °C) 和干燥风速 (1.5m/s、2.0m/s、2.5m/s) 进行干燥,记录

干燥时间和质量,直至质量不变,停止试验。再将干燥盘从干燥装置中取出放入烘箱,在 105 °C 下烘干至恒重,得到笋片的绝干质量,进行数据处理。

## 1.4 试验指标测定

竹笋片干基含水率及干燥速率的计算分别如式 (1)、式(2)所示。

$$M_i = (m_i - m_g) / m_g \quad (1)$$

注:  $M_i$  为干基含水率, g/g;  $m_g$  为绝干时物料质量, g;  $m_i$  为物料  $t_i$  时刻对应的质量, g;

$$U_i = (G_{i-1} - G_{i+1}) / A(t_{i-1} - t_{i+1}) \quad (2)$$

注:  $A$  为干燥接触面积,  $m^2$ ;  $G_{i-1}$ ,  $G_{i+1}$  分别为  $t_{i-1}$ ,  $t_{i+1}$  时刻物料质量, g;  $U_i$  为  $t_i$  时刻干燥速率,  $g \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ 。

## 1.5 数据处理

应用 Microcal Origin 7.5 软件进行图表的绘制和相关数据的处理,使用 SPSS16.0 软件对竹笋热风薄层干燥试验数据进行回归拟合。

## 2 结果与讨论

### 2.1 干燥温度对竹笋干燥特性的影响

在热风风速 2.0 m/s,笋片厚度为 1.0 cm 的条件下分别考察热风干燥温度为 60 °C、70 °C、80 °C、90 °C 对竹笋干燥过程的影响,得到各条件下的干燥曲线见图 1,干燥速率曲线见图 2。

由图1可知,笋片干基含水率随干燥时间的延长而下降,且干燥温度越高下降越快。比较不同热风干燥温度的影响,发现温度越高,相同干燥时间笋片的干基含水率就越低。其原因是由于温度越高,干燥空气的相对湿度就越低,物料与热空气的温度差、湿度差就越大,干燥速度也就越大,要达到一定的含水率所需时间就越短。

不同温度下的热风干燥速率曲线如图2所示,竹笋热风干燥过程可分为加速、恒速和降速干燥3个阶段,其中,加速阶段和降速阶段的时间都较短,而在整个干燥过程中,失水率最大的阶段是恒速干燥阶段。恒速干燥阶段干燥速率受风温影响较显著,随风温增大而增大,但其增幅逐渐减小,这是因为随着笋片中的含水率越来越少,水分从内部迁移到表面的速率和从表面蒸发到周围空气中的速率都随之降低,导致干燥变缓慢。干燥温度越高,干燥速率越快,90 °C 时笋片的干燥速率最快,但该温度下干燥的笋片颜色较暗,且营养成分破坏较大,因此,本试验选择 80 °C 作为干燥温度。

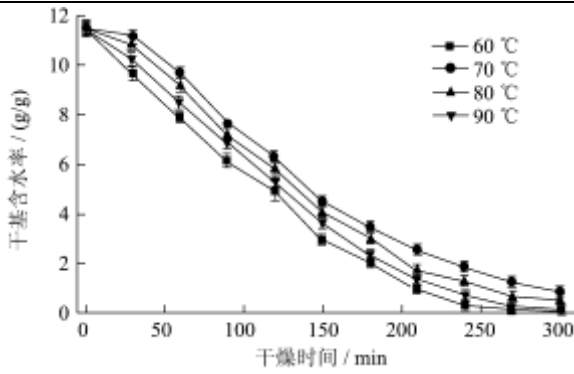


图 1 不同干燥温度的干燥曲线

Fig.1 Drying curves at different drying temperatures

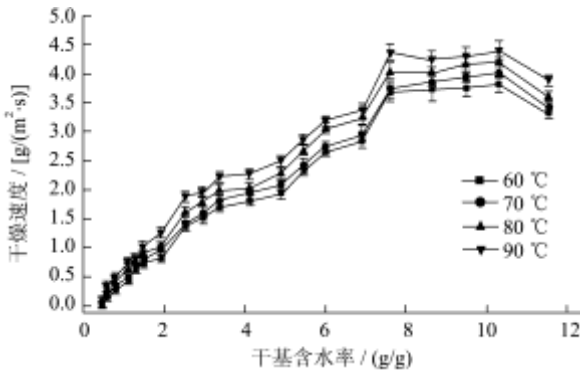


图 2 不同干燥温度的干燥速率曲线

Fig.2 Drying rate curves at different drying temperatures

### 2.2 干燥风速对竹笋干燥特性的影响

在热风干燥温度 80 °C，笋片厚度为 1.0 cm 的条件下分别考察热风干燥风速为 1.5 m/s、2.0 m/s、2.5 m/s 对竹笋干燥过程的影响，得到各条件下的干燥曲线见图 3，干燥速率曲线见图 4。

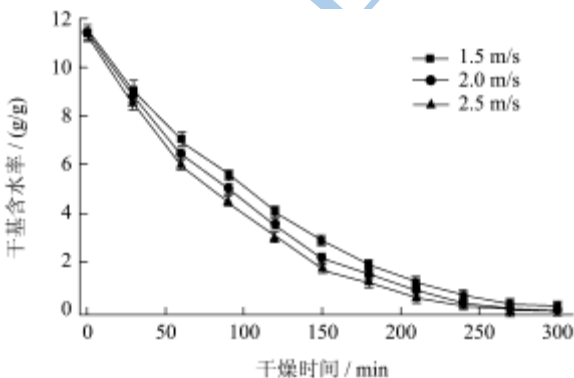


图 3 不同干燥风速的干燥曲线

Fig.3 Drying curves at different air speeds

由图3可知，笋片干基含水率随干燥风速的增加而下降，且干燥风速越大下降越快。比较不同干燥风速，风速越大，相同干燥时间笋片的干基含水率就越低。这是由于风速越大，单位时间内通过的风量越多，空气中的含水率越小，与物料间的湿度差就越大，因此，干燥速度就越快。

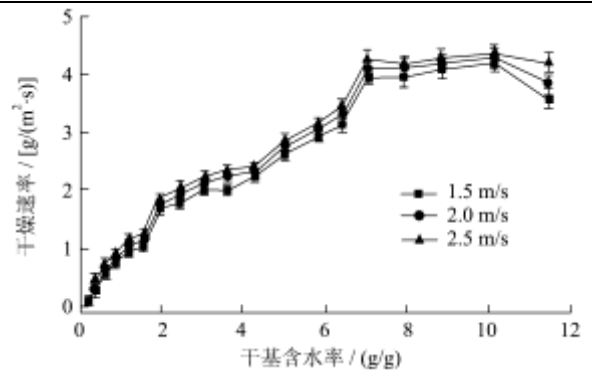


图 4 不同干燥风速的干燥速率曲线

Fig.4 Drying rate curves at different air speeds

不同风速下的热风干燥速率曲线如图4所示，笋片干燥过程仍可分为加速、恒速和降速干燥3个阶段，其中，加速阶段和降速阶段的时间都较短，而恒速干燥阶段干燥速率受风速的影响较大，其随着风速的增加而增大。因此，提高风速对干燥过程有利，但是风速越大耗能也越多，为干燥温度越高，干燥速率越快，而且风速为2.0 m/s和2.5 m/s时，笋片的干燥速率相差不多，综合考虑，本试验选择2.0 m/s作为干燥风速。

### 2.3 笋片厚度对竹笋干燥特性的影响

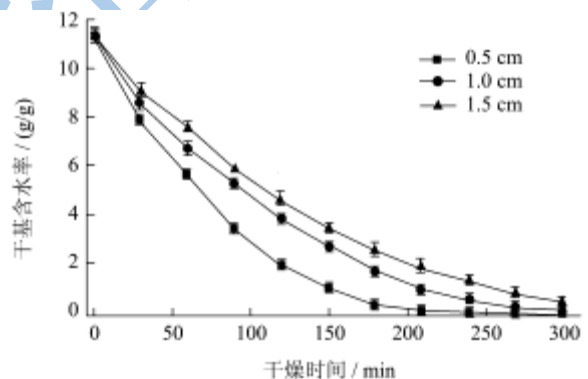


图 5 不同笋片厚度的干燥曲线

Fig.5 Drying curves at different slices thickness

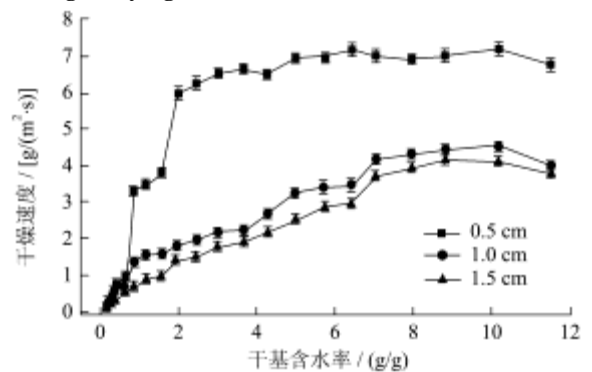


图 6 不同笋片厚度的速率热风干燥曲线

Fig.6 Drying rate curves at different slices thickness

在热风干燥温度 80 °C，热风干燥风速 2.0 m/s 的条件下分别考察笋片厚度为 0.5 cm、1 cm、1.5 cm 对

干燥过程的影响, 得到各条件下的干燥曲线见图 3a, 干燥速率曲线见图 5。

在干燥温度和风速恒定的条件下, 不同的物料厚度对笋片的干燥也有很大的影响。由图5可知, 笋片干基含水率随笋片厚度的增加而降低。笋片越厚, 到达平衡含水率所需的时间就越长, 这是由于物料越薄, 内部水分迁移的距离就越小, 对于一定体积的物料来说, 厚度越大, 与干燥空气接触的相对表面积越小, 因此干燥速率就越缓慢。不同笋片厚度的热风干燥速率曲线如图6所示, 热风干燥速率随笋片厚度的增大而减小。0.5 cm厚度笋片的加速阶段非常短, 而恒速阶段的时间较长且干燥速率维持在一个较高的水平, 但是0.5 cm厚度的笋片干制后, 厚度太薄, 脆度较高, 不耐运输和贮藏。所以, 热风干燥笋片厚度宜选用1.0 cm。

### 2.4 竹笋热风干燥动力学模型

许多文献研究表明, 蔬菜水果干燥适用薄层Page模型<sup>[10,12-14]</sup>, 因此, 本文拟采用该模型对试验数据进行拟合。方程为:

$$(M-M_e)/(M_0-M_e)=\exp(-Kt^n) \quad (3)$$

对式(3)线性化后得出:

$$\ln[-\ln(M-M_e)/(M_0-M_e)]=n\ln t+\ln K \quad (4)$$

注: t为干燥时间, s; M为t时刻竹笋的含水率(干基), g/g;  $M_e$ 为竹笋的平衡含水率(干基), g/g;  $M_0$ 为竹笋的初始含水率(干基), g/g; K、n为待定干燥方程系数。

将试验数据分别在 $\ln[-\ln(M-M_e)/(M_0-M_e)]$ 与 $\ln t$ 坐标上画图, 见图7、8, 可得到方程的斜率即为n, 截距为 $\ln K$ 。

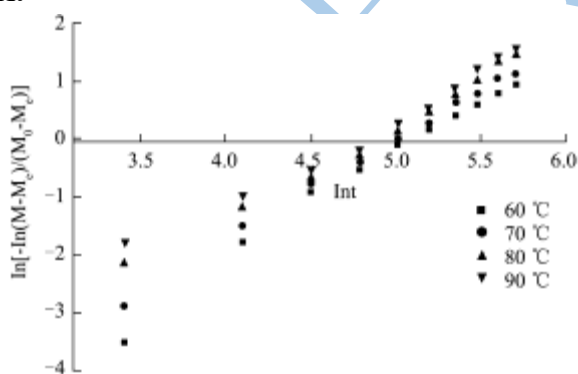


图7 不同干燥温度下的  $\ln[-\ln(M-M_e)/(M_0-M_e)]$  与  $\ln t$  的关系  
Fig.7 Relationship between  $\ln[-\ln(M-M_e)/(M_0-M_e)]$  and  $\ln t$  at different drying temperatures

注: 风速为 2.0 m/s。

由图7可知, 在不同干燥温度下的  $\ln[-\ln(M-M_e)/(M_0-M_e)]$  与  $\ln t$  呈线性关系。其中, 70 °C 条件下的线性关系最好 ( $R^2=0.9967$ )。由图8可知, 不同干燥风速下的  $\ln[-\ln(M-M_e)/(M_0-M_e)]$  与  $\ln t$  也呈线性关

系。但是, 在恒速段与降速段的开始阶段(图中横坐标下方),  $\ln[-\ln(M-M_e)/(M_0-M_e)]$  与  $\ln t$  的线关系较好, 而在干燥最后阶段可能是由于笋片水分含量的测定误差增大而使部分方程的线性不是很理想。通过对不同干燥温度和干燥风速下的  $\ln[-\ln(M-M_e)/(M_0-M_e)]$  与  $\ln t$  的线性关系分析, 表明竹笋的干燥曲线符合Page模型, 干燥曲线方程系数K、n见表1。

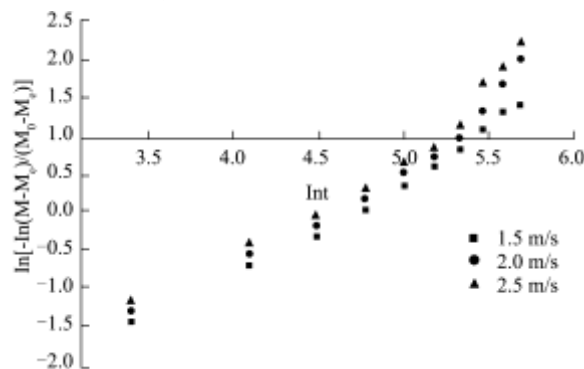


图8 不同干燥风速下的  $\ln[-\ln(M-M_e)/(M_0-M_e)]$  与  $\ln t$  的关系  
Fig.8 Relationship between  $\ln[-\ln(M-M_e)/(M_0-M_e)]$  and  $\ln t$  at different air speeds

注: 温度为 80 °C。

表1 不同干燥风速和温度下的干燥方程系数

Table 1 Drying equations coefficient of different air speeds and temperatures

temperatures		
条件	n	$K \times 10^3$
温度 T/°C		
60	1.869	0.07
70	1.724	0.18
80	1.583	0.46
90	1.487	0.88
-----		
风速 V/(m/s)		
1.5	1.251	2.92
2.0	1.360	2.13
2.5	1.425	1.84

令

$$K=a+bT+cV$$

$$n=d+eT+fV$$

注: T为风温, °C; V为风速, m/s; a、b、c、d、e、f为待定模型系数。

经二元线性回归得到竹笋的热风薄层干燥方程:

$$(M-M_e)/(M_0-M_e)=\exp[(-0.682659+0.026344T-1.00008V) t^{2.485158-0.01691T+0.174V}]$$

### 3 结论

竹笋的热风薄层干燥试验表明, 不同干燥温度、风速和笋片厚度均对竹笋的干燥特性影响较大。其中,

热风干燥速率与干燥温度和风速成正比,与笋片厚度成反比。不同条件下的干燥可分为加速、恒速和降速干燥3个阶段,并且加速阶段和降速阶段的时间都较短,而恒速阶段是整个干燥过程中失水率最大的阶段。综合笋干的食用品质和能源损耗等方面考虑,选择干燥温度80℃、风速2.0 m/s、笋片厚度1.0 cm为竹笋热风薄层干燥较适宜的试验条件。同时,对竹笋热风薄层干燥动力学模型进行分析,结果表明各条件下的干燥曲线方程均符合Page模型,二元线性回归得到的干燥方程为 $(M-M_e)/(M_0-M_e) = \exp[-(0.682659 + 0.026344T - 1.00008V)t^{2.485158 - 0.01691T + 0.174V}]$ 。以上结果可以为竹笋片的热风薄层干燥工艺研究和生产控制提供理论依据。

### 参考文献

- [1] BAL L M, KAR A, SATYA S, et al. Drying kinetics and effective moisture diffusivity of bamboo shoot slices undergoing microwave drying [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2010, 45(11): 2321-2328
- [2] BANOUT J, EHL P. Using a Double-pass solar drier for drying of bamboo shoots [J]. Journal of Agriculture and Rural Development in the Tropics and Subtropics, 2010, 111(2): 119-127
- [3] MADAMBA P S. Physical changes in bamboo (*Bambusa phyllostachys*) shoot during hot air drying: Shrinkage, density, and porosity [J]. Drying Technology, 2003, 21(3): 555-568
- [4] XU Yan-yang, ZHANG Min, TU Ding-yu, et al. A two-stage convective air and vacuum freeze drying technique for bamboo shoots [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2005, 40(6): 589-595
- [5] CHENG H P. Vacuum cooling combined with hydrocooling and vacuum drying on bamboo shoots [J]. Applied Thermal Engineering, 2006, 26(17-18): 2168-2175
- [6] SACILIK K, ELICIN A K. The thin layer drying characteristics of organic apple slices [J]. Journal of Food Engineering, 2006, 73(3): 281-289
- [7] LE A D, HAN J W, KEUM D H. Thin layer drying characteristics of rapeseed (*Brassica napus L.*) [J]. Journal of Stored Products Research, 2011, 47(1): 32-38
- [8] KHATCHATOURIAN O A. Experimental study and mathematical model for soya bean drying in thin layer [J]. Biosystems Engineering, 2012, 113(1): 54-64
- [9] SRIKIATDEN J, ROBERTS J S. Measuring moisture diffusivity of potato and carrot (core and cortex) during convective hot air and isothermal drying [J]. Journal of Food Engineering, 2006, 74(1): 143-152
- [10] DEMIRAY E, TULEK Y. Thin-layer drying of tomato (*Lycopersicon esculentum Mill. cv. Rio Grande*) slices in a convective hot air dryer [J]. Heat and Mass Transfer, 2012, 48(5): 841-847
- [11] FANG Shu-zheng, WANG Zheng-fu, HU Xiao-song. 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
- [12] JANJAI S, LAMLERT N, MAHAYOTHEE B, et al. Thin Layer Drying of Peeled Longan (*Dimocarpus longan Lour.*) [J]. Food Science and Technology Research, 2011, 17(4): 279-288
- [13] JANJAI S, PRECOPPE M, LAMLERT N, et al. Thin-layer drying of litchi (*Litchi chinensis Som.*) [J]. Food and Bioprocess Technology, 2011, 89(C3): 194-201
- [14] DOYMAZ I. Evaluation of some thin-layer drying models of persimmon slices (*Diospyros kaki L.*) [J]. Energy Conversion and Management, 2012, 56: 199-205