

苦瓜片气体射流冲击干燥特性及干燥模型

薛珊, 赵武奇, 高贵田, 吴忠

(陕西师范大学食品工程与营养科学学院, 西安 710119)

摘要:【目的】提高苦瓜片的干制品质、缩短干燥时间, 通过研究不同条件下气体射流冲击技术对苦瓜片干燥特性的影响, 并根据干燥过程中水分的变化规律确定最适干燥模型。【方法】利用实验室自制气体射流冲击干燥机干燥苦瓜片, 探讨不同风温(40、50、60、70和80℃)、风速(9、10、11、12和13 m·s⁻¹)和切片厚度(2、3、4、5和6 mm)对物料干燥特性和水分有效扩散系数的影响, 计算出干燥活化能。以确定系数(R^2)、卡方(χ^2)及均方根误差(RMSE)为评价指标, 并利用Origin 8.0软件将试验所得数据与5个常用的干燥模型进行拟合, 筛选出最适干燥模型, 建立模型参数与干燥条件之间的关系, 并检验干燥模型的预测效果。【结果】苦瓜片的气体射流冲击干燥属于降速干燥, 没有明显的恒速干燥阶段。在试验条件下, 风温、风速和切片厚度对苦瓜片在气体射流冲击干燥过程中的干燥特性均有一定影响, 风温越大、切片厚度越小、风速越大, 物料的干燥速率越大, 水分比下降越快, 干燥所需时间越短, 但风速的影响远不如风温和切片厚度明显。通过费克第二定律可以计算出苦瓜片在干燥过程中的水分有效扩散系数, 且随着风温、风速和切片厚度的增加而增加, 最高的有效扩散系数为 $2.9668 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 。通过阿伦尼乌斯公式可以计算出苦瓜片干燥过程中所需的活化能 E_a 为 $29.89 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。所选的5个模型均具有较高的拟合度($R^2 > 0.98$), 都能较好的预测苦瓜片在气体射流冲击干燥过程中水分的变化规律, 其中Two term exponential模型具有最大的确定系数 R^2 (0.99937)、最小的卡方值 χ^2 (0.00876)和均方根误差RMSE(0.000077), 是苦瓜片气体射流冲击干燥的最适模型。【结论】风温、风速和切片厚度对苦瓜片气体射流冲击干燥过程中的干燥曲线、干燥速率曲线和水分扩散系数均有影响, 且风温 > 切片厚度 > 风速。在风温40—80℃, 风速9—13 m·s⁻¹, 切片厚度2—6 mm范围内, Two term exponential模型的拟合度最高, 模型可有效描述苦瓜片在气体射流冲击干燥过程中的水分变化规律。

关键词: 苦瓜; 气体射流冲击; 干燥特性; 干燥模型

Drying Characteristics and Model of Bitter Melon Slice in Air-Impingement Jet Dryer

XUE Shan, ZHAO WuQi, GAO GuiTian, WU Zhong

(College of Food Engineering and Nutritional Science, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119)

Abstract:【Objective】In order to improve the drying quality of the bitter melon slice(BMS), shorten the drying time, the effects of the air-impingement drying conditions on the drying characteristics of the BMS were studied and the drying kinetics model was established to predict the moisture change in the drying process. 【Method】The BMS were dried by the air-impingement jet dryer made by the authors' laboratory. The effects of different air temperatures (40, 50, 60, 70 and 80℃), air velocities (9, 10, 11, 12 and 13 m·s⁻¹) and slice thickness (2, 3, 4, 5 and 6 mm) on the drying characteristics of materials and effective moisture diffusion coefficient of water were studied, and the activation energy was calculated. With the R^2 , χ^2 and RMSE as the evaluation indexes, the optimum model was screened within the five commonly used dry models fitting the experimental data by Origin 8.0 software, then the relationships between the model parameters and drying conditions was establish and the prediction effect of the optimum drying

收稿日期: 2016-07-04; 接受日期: 2016-10-18

基金项目: 陕西省农业科技创新与攻关项目(2016NY-188)

联系方式: 薛珊, Tel: 029-85310517; E-mail: sannyschann@163.com. 通信作者赵武奇, Tel: 029-85310517; E-mail: zwq65@163.com

model was verified. 【Result】 The air-impingement jet drying of BMS occurred in the falling rate drying period, and there was no constant drying rate stage. Under the experimental condition, air temperature, air velocities and slice thickness all had a certain effect on dry characteristics of BMS in air-impingement jet drying process. With the increase of air temperature and air velocities, the decrease of the slice thickness, the moisture of material decreased more fast and the drying rate was rising, the drying time was short, but the influence of air velocities was less significant than air temperature and slice thickness. The water effective diffusion coefficient of the BMS during drying process could be calculated by Fick's second law, and it increased with the increase of air temperature, air velocities and slice thickness. The maximum effective diffusion coefficient was $2.9668 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Arrhenius was used to calculate the activation energy of BMS in drying process and the value of E_a was $29.89 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$. The five selected models all had good fitness ($R^2 > 0.98$), they could predict the moisture change of the BMS in air-impingement jet drying process. Of the five models, the Two term exponential model had the highest coefficient of determination R^2 (0.99937), the lowest chi-square χ^2 (0.00876) and root mean square RMSE (0.000077), and it is the optimum model of the BMS in air-impingement jet drying. 【Conclusion】 All the factors including the air temperature, air velocities and slice thickness had influence on the drying curve, the drying rate curve and moisture effective diffusion coefficient, and their influences were in an order of the air temperature > air velocities > slice thickness. Two term exponential model could properly describe the air-impingement jet drying behavior of BMS and could be used to predict the moisture change of the BMS in air-impingement jet drying process under the condition that the air temperatures between 40 and 80 °C, air velocities between 9 and 13 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ and slice thickness between 2 and 6 mm.

Key words: bitter melon; air-impingement jet; drying characteristics; drying model

0 引言

【研究意义】 苦瓜, 又称之为凉瓜、锦荔枝、赖葡萄, 系葫芦科苦瓜属植物, 是一种日常生活中十分常见的蔬菜, 属一年生草质藤木植物, 原产于亚热带, 现在热带、亚热带和温带都能够种植^[1]。苦瓜营养丰富, 含蛋白质、糖类、多种氨基酸、粗纤维、维生素、矿物质等营养成分, 其中 Vc 含量高达 (56—120) $\text{mg}/100 \text{ g}$, 居于瓜类蔬菜之首^[2-3]。现代医药学研究表明, 苦瓜具有降低血糖、抗肿瘤以及提高人体免疫力等功能, 是一种药食兼用的保健食品^[4-7]。新鲜的苦瓜水分含量较高, 且不耐冷藏, 货架期短^[8], 而苦瓜干制是苦瓜贮藏的重要手段之一。将苦瓜干制不仅能平衡淡旺季需求、缩减存储空间、丰富产品结构, 而且可以使人们充分利用苦瓜的保健价值^[3]。气体射流冲击技术是近几年才引入中国的一种干燥技术, 在干燥过程中, 由于喷出的气体具有极高的速度, 使得气流与物料表面产生非常薄的边界层, 从而提高了传热效率和热质交换速率, 缩短了干燥时间。已有研究表明, 气体射流冲击干燥的换热系数比传统热风干燥的换热系数要高出几倍甚至一个数量级^[9-10]。因此, 气体射流冲击干燥技术对于提高干制品品质、节约能耗、缩短干燥时间等均具有重要意义。【前人研究进展】 现有的苦瓜干制方法主要有热风干燥、真空干燥、真空冷冻干燥、喷雾干燥、微波干燥以及联合干燥等^[3,11-12]。但已有的研究大多数都探讨的是不同干燥条件对苦瓜中各种营养成分的影响, 这些营养成分主要包括苦瓜多糖、多

肽、皂苷、Vc、叶绿素、黄酮等, 而关于苦瓜干燥过程中干燥特性和干燥模型的研究较少。气体射流冲击干燥技术是一种新型干燥技术, 目前已经成功应用于紫薯^[10]、无核紫葡萄^[13]、哈密瓜^[14]、杏子^[15]、胡萝卜^[16]、种子^[17]、板栗^[18]、党参^[19]的研究中, 并且取得了显著的效果。其中, 李文峰等^[10]通过对紫薯干燥模型的建立, 很好的描述了干燥过程中紫薯的水分散失规律; 杨文侠等^[13]通过对无核紫葡萄干燥模型的建立, 为在线监测无核紫葡萄的含水率提供了理论依据; 张茜等^[14]通过对哈密瓜干燥模型的建立, 为哈密瓜片的工业化生产提供了理论依据等。现有文献未见到将气体射流冲击技术应用于苦瓜干制的报道。【本研究切入点】 目前, 苦瓜片的制备方法主要是传统的晒干法和烘干法, 但其存在干燥周期长、品质难以控制或能耗高等不足, 且对于苦瓜片干燥过程中的传质特性还不清楚; 而气体射流冲击干燥技术不仅具有传热速度快, 能耗低, 产品品质佳的优势, 还可以为苦瓜片的新型干燥技术提供理论基础。【拟解决的关键问题】 本研究采用气体射流冲击干燥技术对苦瓜片进行干燥, 并探究风温、切片厚度和风速对苦瓜片干燥特性的影响, 确定最适的干燥模型, 为进一步研究苦瓜片干燥过程中质的传递提供理论依据。

1 材料与方法

试验于 2016 年 3 月在陕西师范大学食品工程与营养科学学院食品工程实验室进行。

1.1 试验原料

苦瓜购买于寿光市农圣庄园农业发展有限公司，挑选无腐烂、成熟度适中、直径为 5 cm 左右的鲜苦瓜（品种为赛碧绿 F1），在 3℃ 条件下贮藏。鲜苦瓜样品的平均干基湿含量为 95.3%（烘干法测定，105℃ 烘干至恒重^[20]）。

1.2 主要仪器及试验装置

电子天平：BS224S 型，北京赛多利斯系统有限公司；风速计：AVM-03，泰仪电子工业股份有限公司；电冰箱：海尔 BCD-210G/C，青岛海尔股份有限公司；烘箱：常州远宇干燥设备有限公司；刀具和尺子。

本研究所用的气体射流冲击干燥试验设备为陕西师范大学食品工程实验室设计，其结构原理见文献^[10]。

1.3 干燥试验

从冰箱中取出保存的鲜苦瓜，先用自来水冲洗干净，然后用纸巾将其表面的水吸干，待其恢复到室温；用刀切去苦瓜两端，并从中间纵向切成两半，去瓢，并按照试验要求切片。为节省称重时间，将处理好的苦瓜片均匀平铺于自制金属网筛中。干燥试验风温设置在 40—80℃ 范围内以每 10℃ 为间隔（温度太低，干燥时间太长；温度太高，干燥产品色泽差）；风速由变频器控制并在 9—13 m·s⁻¹ 范围内可调；切片厚度为 2—6 mm（苦瓜片太薄干燥后易破碎，太厚干燥耗时太长），以 1 mm 为间隔。具体试验安排如表 1 所示。

表 1 试验设计和试验参数

Table 1 Experiment design and parameters

试验序号 No.	风温 (T) Temperature (°C)	风速 (V) Air velocity (m·s ⁻¹)	切片厚度 (D) Slice thickness (mm)
1	40	11	4
2	50	11	4
3	60	11	4
4	70	11	4
5	80	11	4
6	60	9	4
7	60	10	4
8	60	12	4
9	60	13	4
10	60	11	2
11	60	11	3
12	60	11	5
13	60	11	6

本试验固定喷嘴到物料托盘的距离为 15 cm，在开始试验前先预热设备约 30 min，当设备运行稳定后将装有苦瓜片的金属网筛（15 cm×15 cm×10 cm）放入干燥室内，在不同时间间隔取出金属网筛，并测定样品质量，从而得出样品的质量变化。具体称重时间为：干燥过程前 15 min 内每 3 min 测定一次，15—30 min 时每 5 min 测定一次，30—60 min 时每 10 min 测定一次，之后每 30 min 测定一次，直至相隔两次的质量变化不大于 0.005 g 为止^[21]，每次称重时间不超过 20 s，且称重时间不计入干燥时长。所有试验均重复 3 次，取平均值。

1.4 水分比、干燥速率

干燥试验中的水分比（MR）表示一定干燥条件下物料的剩余水分率。水分比按式（1）计算^[22]：

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (1)$$

式中： M_0 为物料初始干基含水量（g·g⁻¹）； M_t 为任意 t 时刻的干基含水量（g·g⁻¹）； M_e 为干燥达到平衡时的干基含水量（g·g⁻¹）。

干燥速率（drying rate）按式（2）计算：

$$DR = \frac{M_{t_1} - M_{t_2}}{t_2 - t_1} \quad (2)$$

式中： M_{t_1} 为 t_1 时刻物料的干基含水量（g·g⁻¹）； M_{t_2} 为 t_2 时刻物料的干基含水量（g·g⁻¹）。

干基含水率（ M_t ）按式（3）计算：

$$M_t = \frac{W_t - G}{G} \quad (3)$$

式中： W_t 为任意 t 时刻物料的总质量（g）； G 为干物质质量（g）。

1.5 有效水分扩散系数

有效水分扩散系数（ D_{eff} ）描述的是物料在干燥过程中内部水分转移的重要参数，反应了水分在物料内部扩散迁移的难易程度。其值越大，表明水分在物料内部扩散迁移越容易；反之，则表示扩散迁移越困难。其值可通过菲克第二扩散方程^[23]来计算，如下式：

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

式中： D_{eff} 为物料干燥过程中的水分有效扩散系数（m²·s⁻¹）； L 为苦瓜的切片厚度（mm）； t 为干燥时间（s）。

有效水分扩散系数还可以利用斜率法计算，通过 LnMR 对时间 t 绘图确定斜率后再由式（5）计算^[9]。

$$slope = -\frac{\pi^2 D_{eff}}{L^2} \quad (5)$$

1.6 干燥活化能

干燥活化能 (E_a) 表示的是物料在干燥过程中, 脱除 1 mol 的水分所需要的能量, 活化能越大表示物料越难被干燥。物料的水分有效扩散系数和温度的依赖关系可以用阿伦尼乌斯公式 (Arrhenius equation) 来描述, 通过阿伦尼乌斯公式可以估算出水分扩散活化能, 如公式 (6) [16,20]

$$D_{eff} = D_0 \exp\left[-\frac{E_a}{R(T + 273.15)}\right] \quad (6)$$

式中: D_0 为物料中的扩散基数, 是定值 ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$); E_a 为物料的干燥活化能 ($\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$); R 为气体摩尔常数, 其值为 $8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; T 为物料的干燥温度 ($^{\circ}\text{C}$)。

1.7 干燥模型的拟合

所选的 5 种干燥模型如表 2 所示, 将试验获得的苦瓜干燥曲线数据与表 2 中的数学模型进行拟合筛选。确定系数 (R^2) 是筛选样品干燥曲线最佳干燥模型的首要因素, 除确定系数外, 卡方 (χ^2) 和均方根误差 (RMSE) 也可用于确定拟合程度。通常认为最适模型应具有较高的 R^2 , 较低的 χ^2 和 RMSE [14]。这些统计参量根据式 (7) — (9) 进行计算:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{\sum_{i=1}^N (\overline{MR}_{exp} - MR_{pre,i})^2} \quad (7)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - n} \quad (8)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{N}} \quad (9)$$

(7) — (9) 式中: $MR_{exp,i}$ 表示第 i 个试验测得的水分比; $MR_{pre,i}$ 表示第 i 个预测的水分比; N 为试验测得数据的组数; n 为模型常数的个数。

表 2 干燥曲线拟合的数学模型

Table 2 Drying mathematical models

序号 No.	模型名称 Model names	模型方程 Model equation
1	Page ^[24]	$MR = \exp(-kt^n)$
2	Modified page ^[25]	$MR = \exp[-(kt)^n]$
3	Logarithmic ^[26]	$MR = a \exp(-kt) + c$
4	Henderson and Pabis ^[27]	$MR = a \exp(-kt)$
5	Two term exponential ^[22]	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kat)$

1.8 模型的验证

将苦瓜片分别在风速为 $11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、切片厚度为 4 mm、风温 55°C 条件下 (I 条件下) 和风速为 $11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、切片厚度为 3.5 mm 条件下 (II 条件下) 按 1.3 进行试验, 将试验所得到的数据分别与 1.7 中所确定的最适模型的预测值进行比较分析, 以检验模型的拟合效果。

1.9 统计与分析

利用 Excel 和 Origin8.0 软件进行数据处理、绘图及模型拟合分析, 显著性水平取 0.05。

2 结果

2.1 苦瓜片气体射流冲击干燥特性

2.1.1 风温对苦瓜片射流冲击干燥特性的影响 将风速固定为 $11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 切片厚度固定为 4 mm, 在不同风温条件下进行气体射流冲击干燥试验, 并将所得的试验数据绘制成干燥曲线和干燥速率曲线, 如图 1、图 2 所示。由图 1 可以看出, 在干燥初期, 物料的水分比变化比较大, 随着干燥时间的增加, 苦瓜片的水分比呈现降低的趋势, 且风温越高, 干燥所需时间越短, 水分比下降越快。在风温分别为 40°C 、 50°C 、 60°C 、 70°C 和 80°C 条件下, 苦瓜片干燥时间分别为 210、180、150、90 和 60 min, 与 40°C 时的干燥时间相比, 80°C 时所需的干燥时间缩短了 71.4%, 说明风温对苦瓜片的干燥时间有明显的影 响, 适当的提高风温可缩短苦瓜片的干燥时间, 但在实际生产中应综合考虑干燥效率、产品品质及能耗等, 从而确定合理的干燥风温。

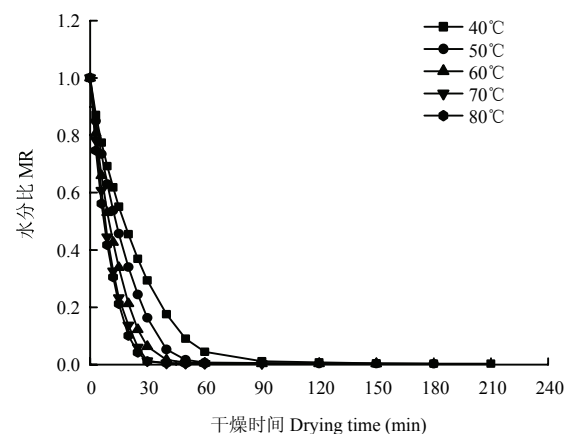


图 1 温度对干燥曲线的影响

Fig. 1 Effects of temperature on drying curves

由图 2 可以看出，风温越高，苦瓜片的干燥速率越大。这是因为随着风温的增加，使得物料中的水分子运动加剧，从而加快了物料的水分散失。苦瓜片的干燥过程主要为降速阶段，未见明显的恒速干燥阶段，且随着干燥时间的延长，干燥速率逐渐下降。这可能是由于苦瓜片在干燥过程中，随着干燥时间的延长，水分蒸发的界面不断向内部迁移，使得水分迁移的距离不断增加，从而导致干燥速率的不断降低^[28]。

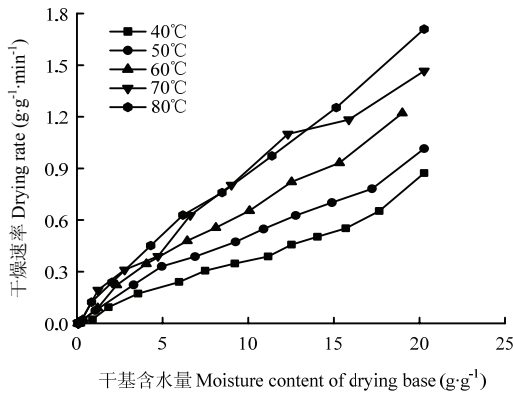


图 2 温度对干燥速率曲线的影响
Fig. 2 Effects of temperature on drying rate curves

2.1.2 风速对苦瓜片射流冲击干燥特性的影响 将风温固定为 60°C，切片厚度固定为 4 mm，在不同风速条件下进行气体射流冲击干燥试验，并将所得的试验数据绘制成干燥曲线和干燥速率曲线，如图 3、图 4 所示。由图 3 可以看出，随着干燥时间的增加，苦瓜片的水分比呈现降低的趋势，且风速越高，干燥所需时间越短，水分比下降越快。在风速分别为 9、10、11、12 和 13 m·s⁻¹ 条件下，苦瓜片干燥时间分别为 180、180、150、120 和 120 min，风速在 13 m·s⁻¹ 比 9 m·s⁻¹ 时的干燥时间缩短了 33.3%。由此可知，在试验的风速条件范围内，风速对苦瓜片的干燥时间有一定影响，但不如风温影响明显。

由图 4 可以看出，随着风速的增加，苦瓜片的干燥速率增大，但风速的变化对苦瓜片干燥速率的影响不明显，且呈现一定的波动。与风温的变化一样，整个干燥过程为降速干燥，没有明显的恒速干燥阶段。

2.1.3 切片厚度对苦瓜片射流冲击干燥特性的影响 将风温固定为 60°C，风速固定为 11 m·s⁻¹，在不同切片厚度条件下进行气体射流冲击干燥试验，并将所得的试验数据绘制成干燥曲线和干燥速率曲线，如图 5、

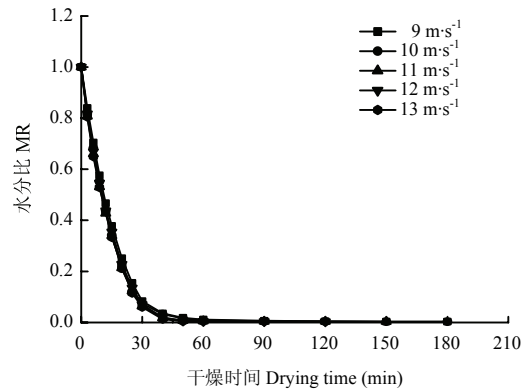


图 3 风速对干燥曲线的影响
Fig. 3 Effects of air velocities on drying curves

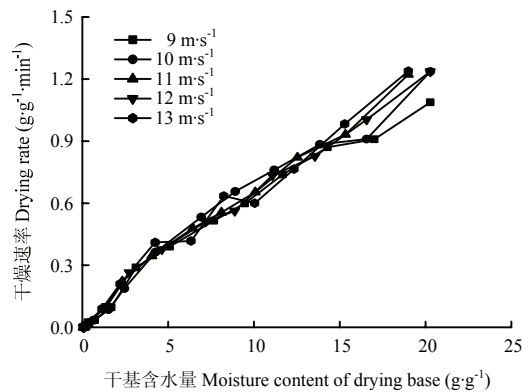


图 4 风速对干燥速率曲线的影响
Fig. 4 Effects of air velocities on drying rate curves

图 6 所示。由图 5 可以看出，随着干燥时间的增加，苦瓜片的水分比呈现降低的趋势，且切片厚度越薄，干燥所需时间越短，水分比下降越快。在切片厚度分别为 2、3、4、5 和 6 mm 条件下，苦瓜片干燥时间分别为 120、120、150、180 和 210 min，干燥风温在 2 mm 比 6 mm 时的干燥时间缩短了 42.9%，说明切片厚度对苦瓜片的干燥时间有一定的影响。

由图 6 可以看出，切片厚度越薄，苦瓜片的干燥速率越大，这可能是由于切片厚度变薄时，使得物料中水分的传递距离减少，样品的比表面积增加所导致的^[21]。与风温和风速对干燥速率曲线的影响一致，切片厚度的干燥速率曲线也为降速干燥，没有明显的恒速干燥阶段。

2.2 有效扩散系数

表 3 为不同试验条件下苦瓜片气体射流冲击干燥

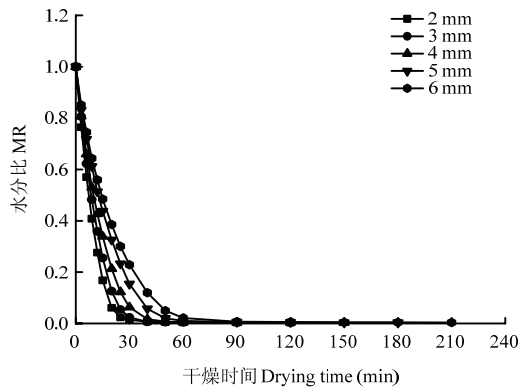


图 5 切片厚度对干燥曲线的影响

Fig. 5 Effects of slice thickness on drying curves

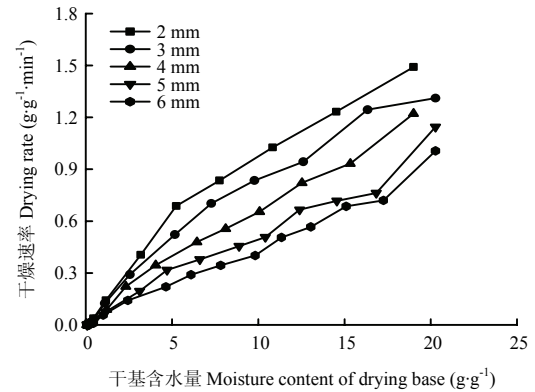


图 6 切片厚度对干燥速率曲线的影响

Fig. 6 Effects of slice thickness on drying rate curves

水分有效扩散系数的计算值。由表 3 可以看出, 当风温分别为 40、50、60、70 和 80℃ 时, 水分有效扩散系数分别为 8.4300×10^{-10} 、 9.8475×10^{-10} 、 1.1681×10^{-9} 、 2.1075×10^{-9} 和 $2.9667 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 。风温越高, 水分有效扩散系数越大, 风温为 80℃ 比 40℃ 时的水分有效扩散系数增大了约 2.52 倍。当风速分别为 9、10、11、12 和 13 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 水分有效扩散系数分别为 9.4580×10^{-10} 、 9.4334×10^{-10} 、 1.1681×10^{-9} 、 1.5395×10^{-9} 和 $1.5533 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 。风速越大, 水分有效扩散系数越大, 风速为 13 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 比 9 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时的

水分有效扩散系数增大了约 0.64 倍。当切片厚度分别为 2、3、4、5 和 6 mm 时, 水分有效扩散系数分别为 3.5060×10^{-10} 、 8.3840×10^{-10} 、 1.1681×10^{-9} 、 1.5318×10^{-9} 和 $1.8193 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 。切片厚度越厚, 水分有效扩散系数越大, 切片厚度为 6 mm 比 2 mm 时的水分有效扩散系数增大了 4.19 倍。因此, 切片厚度对水分有效扩散系数的影响最为明显。在所有试验组中, 在风温为 80℃、风速 11 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、切片厚度为 4 mm 时的水分有效扩散系数达到最高值, 为 $2.9667 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 。

表 3 不同干燥条件苦瓜片的水分有效扩散系数

Table 3 Moisture effective diffusion coefficients of bitter melon slice under different drying conditions

序号 No.	风温 (T) Temperature (°C)	风速 (V) Air velocity ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	切片厚度 (D) Slice thickness (mm)	线性回归公式 Linear regression formula	R^2	有效水分扩散系数 $D_{\text{eff}} (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$
1	40	11	4	$\ln \text{MR} = -5.2001 \times 10^{-4} t - 0.3722$	0.9486	8.4300×10^{-10}
2	50	11	4	$\ln \text{MR} = -6.0744 \times 10^{-4} t - 0.6895$	0.9589	9.8475×10^{-10}
3	60	11	4	$\ln \text{MR} = -7.2052 \times 10^{-4} t - 0.8922$	0.9774	1.1681×10^{-9}
4	70	11	4	$\ln \text{MR} = -1.3000 \times 10^{-3} t - 0.5472$	0.9832	2.1075×10^{-9}
5	80	11	4	$\ln \text{MR} = -1.8300 \times 10^{-3} t - 0.0988$	0.9487	2.9667×10^{-9}
6	60	9	4	$\ln \text{MR} = -5.8342 \times 10^{-4} t - 0.8673$	0.9825	9.4580×10^{-10}
7	60	10	4	$\ln \text{MR} = -5.8190 \times 10^{-4} t - 0.9734$	0.9503	9.4334×10^{-10}
8	60	12	4	$\ln \text{MR} = -9.4967 \times 10^{-4} t - 0.5360$	0.9639	1.5395×10^{-9}
9	60	13	4	$\ln \text{MR} = -9.5814 \times 10^{-4} t - 0.6252$	0.9804	1.5533×10^{-9}
10	60	11	2	$\ln \text{MR} = -8.6507 \times 10^{-4} t - 1.2390$	0.9714	3.5060×10^{-10}
11	60	11	3	$\ln \text{MR} = -9.1941 \times 10^{-4} t - 0.9270$	0.9617	8.3840×10^{-10}
12	60	11	5	$\ln \text{MR} = -6.0472 \times 10^{-4} t - 0.6845$	0.9841	1.5318×10^{-9}
13	60	11	6	$\ln \text{MR} = -4.9878 \times 10^{-4} t - 0.6224$	0.9601	1.8193×10^{-9}

2.3 干燥活化能

图 7 表示水分有效扩散系数的自然对数 $\ln Deff$ 与 $1/(T+273.15)$ 的关系, 由图中的直线回归方程可以求出苦瓜片的干燥活化能 E_a 为 $29.89 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$, 说明在气体射流冲击干燥过程中, 从苦瓜片中去除 1 kg 的水分所需要的最低能量约为 $1\ 660.56 \text{ kJ}$ 。

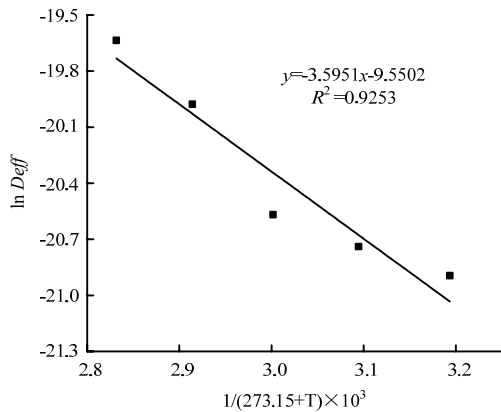


图 7 水分有效扩散系数与干燥温度的关系曲线

Fig. 7 The relation curves of moisture effective diffusion coefficients and drying temperatures

2.4 干燥模型的拟合效果

通常选择具有较高 R^2 , 较低 χ^2 和 RMSE 的模型为最适模型, 更适于描述在干燥过程中物料的水分散失规律。本研究用苦瓜片气体射流冲击干燥试验的数据对 5 个干燥模型方程进行拟合, 得到的数据分析结果如表 4。

从表 4 中可以看出, 所选模型的 R^2 都在 0.9900 以上, 均在可接受的范围^[29]。从模型 1 到模型 5, R^2 的范围分别是 0.99788—0.99929、0.99788—0.99929、0.99378—0.99847、0.99312—0.99837 和 0.99811—0.99937; RMSE 的范围分别是 0.00930—0.01609、0.00929—0.01609、0.01412—0.02815、0.01409—0.02835 和 0.00876—0.01522; χ^2 的范围分别是 0.000086—0.000259、0.000086—0.000259、0.000199—0.000792、0.000199—0.000804 和 0.000077—0.000232。其中 5 号模型, 即 Two term exponential 模型的具有最高的 R^2 (0.99937), 最低的 RMSE (0.00876) 和最低的 χ^2 (0.000077), 从而此模型具有最高的拟合度。因此, 在风温 $40\text{—}80^\circ\text{C}$ 、风速 $9\text{—}13 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、切片厚度为 $2\text{—}6 \text{ mm}$ 内, 所选的 5 个模型中 Two term exponential 模型是最适合描述苦瓜片

在气体射流冲击干燥过程中的水分变化规律, 并对此模型进行拟合分析。

2.5 模型中参数的回归结果

由 2.4 结果可知 Two term exponential 模型中的干燥常数 a 和 k 与干燥条件 (风温、风速和切片厚度) 呈现一定的线性变化, 可表示为:

$$a=x_1+x_2T+x_3V+x_4D \quad (10)$$

$$k=y_1+y_2T+y_3V+y_4D \quad (11)$$

式中, T 为干燥风温 ($^\circ\text{C}$); V 为干燥风速 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$); D 为切片厚度 (mm); x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 为常数; y_1 、 y_2 、 y_3 、 y_4 为常数。

根据各次试验的风温、风速和切片厚度及 Two term exponential 模型中的 a 和 k 值, 并用 Origin 8.0 数据处理软件对相关数据进行线性回归, 分别求出 Two term exponential 模型中的 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 和 y_1 、 y_2 、 y_3 、 y_4 的值, 并代入式 (10)、(11) 得:

$$a=2.06071+0.00254T-0.02271V-0.08367D \quad (12)$$

$$k=0.05665+0.0021T-6.95 \times 10^{-4}V-0.02344D \quad (13)$$

把 (12) 和 (13) 代入 Two term exponential 模型方程中, 得到苦瓜片气体射流冲击干燥模型为:

$$MR=A\exp(-Bt)+(1-A)\exp(-Bat) \quad (14)$$

$$\text{其中, } A=2.06071+0.00254T-0.02271V-0.08367D$$

$$B=0.05665+0.0021T-6.95 \times 10^{-4}V-0.02344D$$

2.6 模型的验证效果

利用在 I 条件和 II 条件下的试验数据对模型的准确度进行检验, 其中图 8 和图 9 分别是 I 条件和 II 条件下实测值和模型预测值的相关性结果。从图中可以看出, R^2 均大于 0.99, 说明实测值与预测值具有较好的吻合度。因此, 在试验条件下, Two term exponential 模型能较好的预测苦瓜片在气体射流冲击干燥过程中水分的散失规律。

3 讨论

3.1 不同干燥条件对苦瓜片气体射流冲击干燥特性的影响

现有文献少见将气体射流冲击干燥技术应用于苦瓜片干燥的报道, 对苦瓜片的干燥特性、干燥动力学研究甚少。从图 1—图 6 可知, 改变风温、风速和切片厚度都会引起干燥曲线和干燥速率曲线的变化, 但风温的影响最为明显, 说明物料在干燥过程中水分的散失主要是通过热扩散。在不同干燥条件下, 苦瓜片在 $1\text{—}4 \text{ h}$ 内基本完成干燥, 所需干燥时间均较短, 故将气体射流冲击技术应用于苦瓜片

表 4 苦瓜片干燥模型参数值及 R^2 、RMSE 和 χ^2 Table 4 Gourd bitter slice drying model parameters, R^2 , RMSE and χ^2

试验序号 No.	模型名称 Model No.	模型方程 Model equation	模型参数 Model parametric			R^2	RMSE	χ^2
	Page	MR=exp(-kt ⁿ)	k	n				
1			0.03535	1.05226		0.99834	0.01449	0.000210
2			0.03800	1.13289		0.99809	0.01551	0.000241
3			0.05426	1.12318		0.99874	0.01228	0.000151
4			0.06295	1.16350		0.99922	0.00979	0.000096
5			0.07799	1.11340		0.99859	0.01315	0.000173
6			0.04262	1.16816		0.99929	0.00930	0.000086
7			0.04801	1.15729		0.99913	0.01015	0.000103
8			0.05116	1.13055		0.99871	0.01267	0.000160
9			0.05559	1.11576		0.99788	0.01609	0.000259
10			0.06189	1.23605		0.99887	0.01151	0.000133
11			0.05116	1.22366		0.99899	0.01117	0.000125
12			0.04577	1.08353		0.99829	0.01442	0.000208
13			0.04401	1.04030		0.99868	0.01268	0.000161
	Modified page	MR=exp[-(kt) ⁿ]	k	n				
1			0.04173	1.05351		0.99834	0.01449	0.000210
2			0.05576	1.13470		0.99810	0.01551	0.000240
3			0.07468	1.12433		0.99874	0.01227	0.000151
4			0.09285	1.16386		0.99922	0.00979	0.000096
5			0.10111	1.11452		0.99859	0.01315	0.000173
6			0.06713	1.16886		0.99929	0.00929	0.000086
7			0.07253	1.15817		0.99913	0.01015	0.000103
8			0.07211	1.13173		0.99871	0.01267	0.000160
9			0.07502	1.11738		0.99788	0.01609	0.000259
10			0.10527	1.23719		0.99887	0.01151	0.000133
11			0.08807	1.22472		0.99899	0.01117	0.000125
12			0.05805	1.08499		0.99829	0.01442	0.000208
13			0.04967	1.04143		0.99868	0.01268	0.000161
	Logarithmic	MR=aexp(-kt)+c	a	k	c			
1			1.00997	0.04098	-0.00815	0.99800	0.01648	0.000272
2			1.03306	0.05527	-0.01454	0.99621	0.02269	0.000515
3			1.0286	0.07454	-0.01192	0.99714	0.01922	0.000370
4			1.04021	0.09270	-0.01708	0.99679	0.02086	0.000435
5			1.03020	0.09901	-0.01944	0.99769	0.01775	0.000315
6			1.03799	0.06815	-0.00894	0.99641	0.02168	0.000470
7			1.03263	0.07360	-0.00768	0.99651	0.02105	0.000430
8			1.03476	0.07118	-0.01737	0.99710	0.01981	0.000392
9			1.03032	0.07374	-0.01739	0.99670	0.02098	0.000400
10			1.04412	0.10784	-0.0127	0.99378	0.02815	0.000792

续表 4 Continued table 4

试验序号 No.	模型名称 Model No.	模型方程 Model equation	模型参数 Model parametric		R^2	RMSE	χ^2	
11			1.04961	0.08920	-0.01639	0.99442	0.02736	0.000749
12			1.01884	0.05729	-0.01084	0.99750	0.01811	0.000328
13			1.00715	0.04908	-0.00583	0.99847	0.01412	0.000199
	Henderson and Pabis	$MR=a\exp(-kt)$	a	k				
1			1.00385	0.04177		0.99783	0.01659	0.000275
2			1.02204	0.05714		0.99560	0.02356	0.000555
3			1.01979	0.07671		0.99667	0.01995	0.000398
4			1.02751	0.09666		0.99591	0.02244	0.000504
5			1.01589	0.10399		0.99667	0.02023	0.000409
6			1.03130	0.06959		0.99614	0.02167	0.000470
7			1.02692	0.07495		0.99629	0.02091	0.000437
8			1.02193	0.07420		0.99628	0.02147	0.000461
9			1.01749	0.07690		0.99585	0.02254	0.000508
10			1.03427	0.11119		0.99312	0.02835	0.000804
11			1.03710	0.09271		0.99352	0.02825	0.000798
12			1.01088	0.05879		0.99714	0.01865	0.000348
13			1.00287	0.04977		0.99837	0.01409	0.000199
	Two term exponential	$MR=a\exp(-kt)+(1-a)\exp(-kat)$	a	k				
1			1.49365	0.04988		0.99864	0.01314	0.000173
2			1.63639	0.07269		0.99831	0.01460	0.000213
3			1.61944	0.09637		0.99891	0.01139	0.000130
4			1.68419	0.12480		0.99922	0.00979	0.000096
5			1.59678	0.12870		0.99874	0.01244	0.000155
6			1.69433	0.09074		0.99937	0.00876	0.000077
7			1.67891	0.09712		0.99927	0.00925	0.000086
8			1.63161	0.09375		0.99887	0.01186	0.000141
9			1.60441	0.09590		0.99811	0.01522	0.000232
10			1.76932	0.14920		0.99864	0.01260	0.000159
11			1.75718	0.12383		0.99880	0.01215	0.000148
12			1.55247	0.07186		0.99859	0.01311	0.000172
13			1.45333	0.05797		0.99889	0.01164	0.000135

干燥，不仅具有较高的干燥效率，还可有效降低干燥能耗。从苦瓜片的干燥曲线可以看出，在 0—30 min 内物料的水分比急剧下降，随着干燥时间的推移，水分比变化趋于缓慢，这与紫薯^[10]、哈密瓜^[14]、杏子^[15]、板桥党参片^[19]等的气体射流冲击干燥曲线

具有相似规律，但比它们具有更高的干燥速率和更短的干燥时间。这一方面可能是因为物料之间具有一定的差异性，另一方面则可能是由于新鲜苦瓜本身含水量较高。从苦瓜片的干燥速率曲线可以看出，苦瓜片的气体射流冲击干燥过程属于降速干燥，未

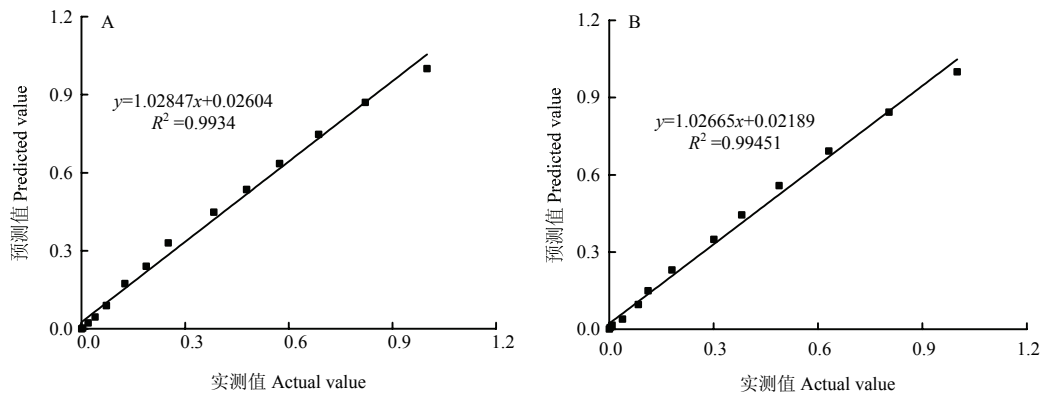


图 8 I (A)、II (B) 条件下预测值与实测值的相关性

Fig. 8 Correlation between the actual and predicted values under I (A) and II (B) conditions

见明显的恒速干燥阶段，这与大多数食品物料干燥速率曲线相似^[15,21,23,30]，可能是因为：（1）物料在干燥初期，含水量较大，有较大的干燥速率，随着干燥时间的不断进行，物料自身的含水量变少，干燥速率也随之减少。（2）物料在干燥过程中，干燥前期的水分散失导致物料体积收缩，内部显微结构遭到破坏。随着干燥时间的不断进行，水分散失越多，物料体积收缩的程度也会越大：内部显微结构破坏越严重，内层水分向外迁移受到的阻力也会越大，因此干燥速率也会下降。（3）物料在干燥过程中，首先被干燥的是外部及浅表层水分，这些水分扩散迁移到空气中的距离小，所需时间短，当干燥到物料内部水分时，由于内部水分扩散迁移到空气中的距离相对增加从而使干燥速率变小。本研究未对不同干燥条件下的干制品品质及能耗进行探索，有待进一步完善。

3.2 有效扩散系数

苦瓜片气体射流冲击干燥的水分有效扩散系数随着风温、风速和切片厚度的增加而增加，该结果与紫薯^[10]的气体射流冲击干燥具有相似的结果。从表 3 可以看出，风温、切片厚度对水分有效扩散系数的影响较风速明显。在用气体射流冲击干燥技术的相关研究中，李文峰等^[10]研究的紫薯的有效扩散系数范围在 0.7086×10^{-9} — $3.5431 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ，张茜等^[14]研究的哈密瓜片的有效扩散系数为 2.38×10^{-9} — $4.55 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ，而本研究中苦瓜片的有效扩散系数的范围 3.5060×10^{-10} — $2.9667 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ，其有效扩散系数变化范围较大，占了 2 个数量级。一部分原因可能与苦瓜物料本身的性质有关；一部分原因可能是苦瓜本身的含水量较高，用

来散失的水分高于其他果蔬类；也可能是因为苦瓜的自由水分含量较大，导致其散失的水分不稳定，变化范围较大。

3.3 干燥模型的拟合

许多研究发现，很多物料在进行气体射流冲击干燥时，在相应的试验条件下，Modified page 模型和 Page 模型为最适合的干燥模型，如哈密瓜^[14]、党参^[19]等的气体射流冲击干燥。但由于物料的差异性和所选模型种类的不同，本研所得到的最适模型为 Two term exponential 模型。

4 结论

4.1 苦瓜片的气体射流冲击干燥主要为降速干燥。

4.2 风温、风速和切片厚度对苦瓜片的气体射流冲击干燥特性都有影响，且风温 > 切片厚度 > 风速。其中，风温和切片厚度的影响较风速明显。但在实际情况下，由于风温太高，会导致苦瓜片外观变黄，营养成分大量损失，因此，在实际生产过程中干燥温度不宜超过 60°C 。

4.3 苦瓜片气体射流冲击干燥的水分有效扩散系数随着风温、风速、切片厚度的增加而增加。最高的水分有效扩散系数为 $2.9668 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ，活化能为 $29.89 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

4.4 在风温为 40 — 80°C 、风速为 9 — $13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、切片厚度为 2 — 6 mm 条件下，对所选的 5 个模型与所测的数据进行拟合，发现所选模型都能较好地描述苦瓜片在气体射流冲击干燥过程中水分的变化规律，但 Two term exponential 模型的拟合度最好，是苦瓜片气体射流冲击干燥的最适模型。

References

- [1] 朱群娣, 吴康郁, 袁伟彬. 苦瓜中总皂苷的比色法测定. 中医学报, 2014, 29(10): 1469-1472.
ZHU Q D, WU K Y, YUAN W B. Colorimetric method determination of total saponins from *Momordica Charantia* L. *China Journal of Chinese Medicine*, 2014, 29(10): 1469-1472. (in Chinese)
- [2] 鲁允. 苦瓜的加工利用. 农产品加工(学刊), 2006(7): 41-43, 46.
LU Y. Processing and utilization of bitter gourd. *Academic Periodical of Farm Products Processing*, 2006(7): 41-43, 46. (in Chinese)
- [3] 朱香燕, 张珺, 何义雁, 邓放明. 热风与远红外干燥温度对苦瓜全粉品质的影响. 现代食品科技, 2015, 31(7): 265-269, 325.
ZHU X Y, ZHANG J, HE Y Y, DENG F M. Effects of hot air and far-infrared drying temperatures on quality Of bitter gourd (*Momordica charantia* L.) powder. *Modern Food Science and Technology*, 2015, 31(7): 265-269, 325. (in Chinese)
- [4] SARKAR S, PRANAVA M, MARIT A R. Demonstration of the hypoglycemic action of *Momordica Charantia* in a validated animal model of diabetes. *Pharmacological Research*, 1996, 33(1): 1-4.
- [5] REYES B A S, BAUTISTA N C, TANQUILUT R V, ANUNCIADO A B, LEUNG G C, SANCHEZ R L, MAGTOTO P, CASTRONUEVO H, TSUKAMURA K, MAEDA. Anti-diabetic potentials of *Momordica charantia* and *Andrographis paniculata* and their effects on estrous cyclicity of alloxan-induced diabetic rats. *Journal of Ethnopharmacology*, 2006, 105(1/2): 196-200.
- [6] GUEVAR A P, LIM-SYLIANCO C, DAYRIT F, FINCH P. Antimutagens from *Momordica charantia*. *Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*, 1990, 230(2): 121-126.
- [7] SINGH A, SINGH S P, BAMEZAI R. *Momordica charantia* (Bitter Gourd) peel, pulp, seed and whole fruit extract inhibits mouse skin papillomagenesis. *Toxicology Letters*, 1998, 94(1): 37-46.
- [8] 华中农业大学. 蔬菜贮藏加工学. 北京: 中国农业出版社, 2001.
Huazhong Agricultural University. *Vegetable Storage Processing*. Beijing: *China Agriculture Press*, 2001. (in Chinese)
- [9] 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 Z J. Experimental research on mechanism and parameter of air-impingement jet drying of particulate Materials [D]. Beijing: *China Agricultural University*, 2000. (in Chinese)
- [10] 李文峰, 肖旭霖, 王玮. 紫薯气体射流冲击干燥效率及干燥模型的建立. 中国农业科学, 2013, 46(2): 356-366.
LI W F, XIAO X L, WANG W. Drying characteristics and model of purple sweet potato in air-impingement jet dryer. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(2): 356-366. (in Chinese)
- [11] 汤琴. 不同干制方式苦瓜茶的品质差异及其“降火”相关活性[D]. 武汉: 华中农业大学, 2014.
TANG Q. Quality differences and “Jianghuo” effects of different drying method on *Momordica Charantia* L [D]. Wuhan: *Huazhong Agricultural University*, 2014. (in Chinese)
- [12] 王华红. 苦瓜切片热风干燥特性及含水率预测模型研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2013.
WANG H H. Sliced bitter melon's hot air drying characteristics and moisture prediction model research [D]. Hohhot: *Inner Mongolia Agricultural University*, 2013. (in Chinese)
- [13] 杨文侠, 高振江, 谭红梅, 杨洋, 陈曾, 肖红伟. 气体射流冲击干燥无核紫葡萄及品质分析. 农业工程学报, 2009, 25(4): 237-242.
YANG W X, GAO Z J, TAN H M, YANG Y, CHEN Z, XIAO H W. Drying Monukka grapes with air-impingement jet technique and quality analysis. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(4): 237-242. (in Chinese)
- [14] 张茜, 肖红伟, 代建武, 杨旭海, 白竣文, 姜正, 高振江. 哈密瓜片气体射流冲击干燥特性和干燥模型. 农业工程学报, 2011, 27(S1): 382-388.
ZHANG Q, XIAO H W, DAI J W, YANG X H, BAI J W, LOU Z, GAO Z J. Air impingement drying characteristics and drying model of Hami melon flake. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(Supp.1): 382-388. (in Chinese)
- [15] 肖红伟, 张世湘, 白竣文, 方小明, 张泽俊, 高振江. 杏子的气体射流冲击干燥特性. 农业工程学报, 2010, 26(7): 318-323.
XIAO H W, ZHANG S X, BAI J W, FANG X M, ZHANG Z J, Gao Z J. Air impingement drying characteristics of apricot. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(7): 318-323. (in Chinese)
- [16] XIAO H W, GAO Z J, LIN H, YANG WX. Air impingement drying characteristics and quality of carrot cubes. *Journal of Food Process Engineering*, 2010, 33(5): 899-918.
- [17] 姚雪东, 肖红伟, 高振江, 田松涛, 杜荣. 气流冲击式转筒干燥机设计与试验. 农业机械学报, 2009, 40(10): 67-70.
YAO X D, XIAO H W, GAO Z J, TIAN S T, DU R. Design and experiment of air-impingement rotary dryer. *Transactions of the CSAE*, 2009, 40(10): 67-70. (in Chinese)
- [18] 姜正, 高振江, 肖红伟, 王晓拓, 李伟, 孙新超. 板栗气体射流冲击干燥特性和工艺优化. 农业工程学报, 2010, 26(11): 368-373.
LOU Z, GAO Z J, XIAO H W, WANG X T, Li W, SUN X C. Air

- impingement drying characteristics and process optimization of chestnut. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(11): 368-373. (in Chinese)
- [19] 张建, 赵武奇, 肖旭霖, 黄小丽, 吴忠, 赵雪萌. 板桥党参片气体射流冲击干燥工艺及干燥模型. *中药材*, 2016, 39(3): 534-539.
- ZHANG J, ZHAO W Q, XIAO X L, HUANG X L, WU Z, ZHAO X M. Drying process and model of Banqiao *Codonopsis radix* slice in air-impingement jet dryer. *Journal of Chinese Medicinal Materials*, 2016, 39(3): 534-539. (in Chinese)
- [20] DOYMAZ I. Air-drying characteristics of tomatoes. *Journal of Food Engineering*, 2007, 78(4): 1291-1297.
- [21] ERTEKIN C, YALDIZ O. Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. *Journal of Food Engineering*, 2004, 63(3): 349-359.
- [22] O'CALLAGHAN J R, MENZIES D J, BAILEY P H. Digital simulation of agricultural dryer performance. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1971, 16(3): 223-244.
- [23] FALADE K O, SOLADEMI O J. Modelling of air drying of fresh and blanched sweet potato slices. *International Journal of Food Science and Technology*, 2010, 45(2): 278-288.
- [24] WANG Z F, SUN J H, LILOX J, CHEN F, ZHAO G H, WU J H, HU X S. Mathematical modeling on hot air Drying of thin layer apple pomace. *Food Research International*, 2007, 40(1): 39-46.
- [25] WHITE G M, ROSS I J, PONELER R. Fully exposed drying of popcorn. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 1981, 24: 466-468.
- [26] BAINI R, LANGRISH T A G. Choosing an appropriate drying model for intermittent and continuous drying of bananas. *Journal of Food Engineering*, 2007, 79(1): 330-343.
- [27] CHKIR I, BALTI M A, AYEDA L, AZZOUZC S, KECHAOU N, HAMDI M. Effects of air drying properties on drying kinetics and stability of cactus/brewer's grains mixture fermented with lactic acid bacteria. *Food and Bioproducts Processing*, 2015, 94: 10-19.
- [28] PURLIS E, SALVADORI V O. A moving boundary problem in a food material undergoing volume change-simulation of bread baking. *Food Research International*, 2010, 43(4): 949-958.
- [29] DOYMAZ I. Effect of dipping treatment on air drying of plums. *Journal of Food Engineering*, 2004, 64(4): 465-470.
- [30] WANG R, ZHANG M, MUJUMDAR A S, SUN J C. Microwave freeze-drying characteristics and sensory quality instant vegetable soup. *Drying Technology*, 2009, 27(9): 962-968.

(责任编辑 赵伶俐)