

胡萝卜切片红外干燥特性与数学模型*

王相友 张海鹏 张丽丽 孙传祝
(山东理工大学农业工程与食品科学学院, 淄博 255049)

摘要: 利用红外辐射干燥试验装置对胡萝卜切片红外干燥特性进行了研究,通过不同条件的干燥试验,得到胡萝卜切片干燥特性曲线。试验表明:干燥温度为 75℃,切片厚度为 5 mm,辐照距离为 140 mm 时干燥效果较佳。通过对建立的 3 种干燥模型进行拟合对比,表明 Page 模型能较好地描述胡萝卜切片的干燥过程。相同条件下 Page 模型和 Midilli 模型均与实测值相吻合,但 Page 模型更便于建模和计算。
关键词: 胡萝卜 红外干燥 干燥特性 Page 模型 Midilli 模型
中图分类号: S631.2; TQ028.6⁺76 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)10-0198-05

Infrared Radiation Drying Characteristics and Mathematical Model for Carrot Slices

Wang Xiangyou Zhang Haipeng Zhang Lili Sun Chuanzhu
(School of Agricultural and Food Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

Abstract: Infrared radiation drying characteristics of carrot slices were studied by using infrared radiation drying device. The drying curves of carrot slices were obtained in experiments under different drying conditions. The results showed that the better drying performance appeared when the drying temperature was 70℃, the slice thickness was 5 mm and the irradiation distance was 140 mm. The experimental datum was simulated with different mathematical models. The results also showed that Page model was fitted to express infrared radiation drying process of carrot slices. Both the Page model and Midilli model could match with the actual value under the same condition; however, Page model was easier to build and calculate.
Key words: Carrot slices Infrared radiation drying Drying characteristics Page model Midilli model

引言

红外辐射加热技术是将红外线照射到干燥物料上,物料中的水分子大量吸收相应波段的能量,使水分子运动加剧而造成水分大量蒸发从而达到干燥的目的。该加热方式热效率高,产品干燥过程中温度均匀,而且食品成分受热分解小,最终产品品质好^[1~3]。
薄层干燥模型一般可分为理论方程、半理论方程、半经验方程和经验方程,其中半经验方程因拟合度高、误差小,应用比较广泛^[4]。Hasan 选用 5 种薄

层干燥模型进行胡萝卜红外干燥对比,验证表明在 50 ~ 80℃ 温度范围内含水率随温度的变化最适合用 Midilli 模型来描述^[5]。林喜娜等选择红外辐射干燥苹果切片试验数据作为实测值样本,对传统干燥模型进行非线性最小二乘数据拟合求解,结果表明用 Modified Page equation- II 模型能够更好地预测和控制苹果切片红外辐射干燥过程^[6]。
本文对胡萝卜红外干燥特性进行研究,探讨干燥温度、切片厚度和辐照距离对干燥速率的影响。同时,以干燥速率数学模型为基础,得到胡萝卜切片

收稿日期: 2013-02-01 修回日期: 2013-03-22
* 国家自然科学基金资助项目(31271908)和山东省农业科技成果转化资金资助项目(鲁科农字[2012]65号)
作者简介: 王相友,教授,博士生导师,主要从事农产品加工与贮藏研究, E-mail: wxy@sdut.edu.cn

红外干燥的 Page 模型。

1 材料与方法

1.1 材料

胡萝卜,购自附近超市,挑选大小均一,色泽鲜艳,含水率为 89% ~ 91% (湿基)的胡萝卜作为试验材料。

1.2 设备

HZY - B2000 型电子天平,福州华志科学仪器有限公司生产,称量范围 0 ~ 2 000 g,精度 0.01 g。自行研发的红外辐射干燥试验装置如图 1 所示。

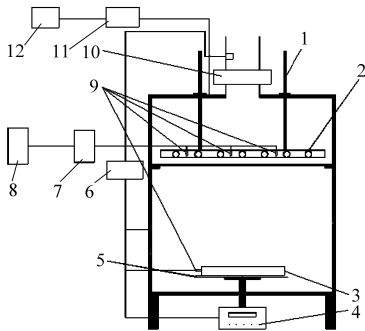


图 1 红外干燥试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of infrared dryer

1. 升降螺杆 2. 红外加热管 3. 物料 4. 电子天平 5. 物料托盘 6. 控制箱 7. 采集板卡 8. 计算机 9. 温度传感器 10. 风机 11. 晶闸管 12. 电源

1.3 试验因素与水平

通过初步试验,确定各试验因素与水平,如表 1 所示。

表 1 胡萝卜切片干燥试验因素与水平

Tab. 1 Factors and levels of carrot slices tests

水平	干燥温度 $X_1/^\circ\text{C}$	切片厚度 X_2/mm	辐照距离 X_3/mm
1	65	4	120
2	75	5	140
3	85	6	160

1.4 测定指标与计算方法

(1) 初始含水率的测定

参照 GB 5009. 3—2010。

(2) 干基含水率

干基含水率按下式计算^[7]

$$M_t = \frac{m_t - m_s}{m_0} \times 100\%$$

(1)

式中 M_t ——物料的干基含水率, g/g

m_t ——物料在 t 时刻质量, g

m_s ——物料在干燥平衡时质量, g

m_0 ——物料在干燥开始时质量, g

(3) 干燥速率

干燥速率按下式计算^[7]

$$v_t = \frac{M_t - M_{t-1}}{t_d}$$

(2)

式中 v_t ——干燥速率, g/(g·min)

M_{t-1} ——物料在 $t-1$ 时刻的干基含水率, g/g

t_d —— t 与 $t-1$ 时刻之间的时间间隔, min

(4) 水分比 M_r

水分比按下式计算^[8]

$$M_r = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e}$$

(3)

式中 M_e ——物料干燥平衡时干基含水率, g/g

M_0 ——物料初始的干基含水率, g/g

相对于初始含水率 M_0 和 t 时刻的含水率 M_t 而言,一定干燥条件下平衡含水率 M_e 可以忽略不计,因此式(3)通常可以简化为 $M_r = M_t/M_0$ 。

2 结果与分析

2.1 胡萝卜的干燥特性

2.1.1 干燥温度

在辐照距离为 160 mm,切片厚度为 5 mm 时,不同干燥温度下胡萝卜切片的干燥曲线和干燥速率曲线如图 2 所示。

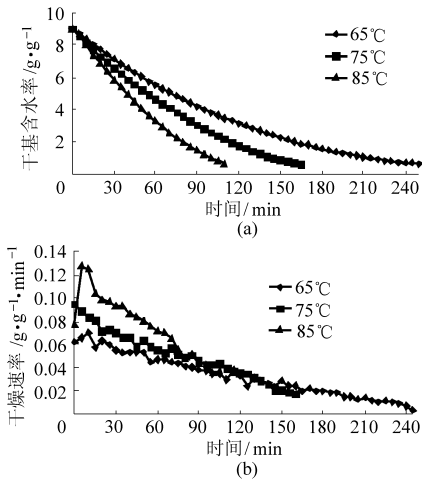


图 2 不同温度下的干燥和干燥速率曲线

Fig. 2 Dehydration and drying rate curves under different temperatures

分析图 2 可知,胡萝卜切片干燥速率曲线分为恒速和降速 2 个阶段,预热阶段不明显并且恒速阶段较短,基本符合传统的干燥速率曲线规律,并且干燥温度越高,干燥速率越大。

2.1.2 切片厚度

在温度为 75℃,辐照距离为 160 mm 时,不同切片厚度下胡萝卜的干燥曲线和干燥速率曲线如图 3 所示。

分析图 3 可知,切片厚度对胡萝卜干燥时间的影响明显小于温度的影响,切片厚度为 4 mm 时比

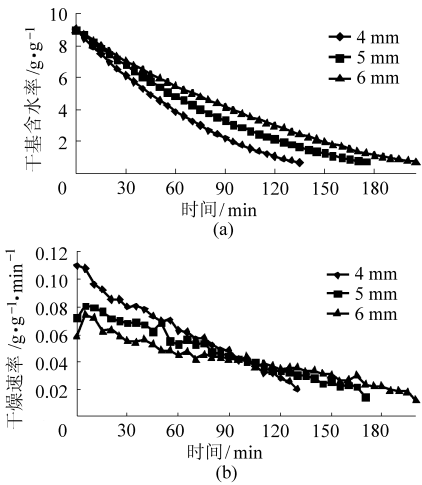


图3 不同切片厚度下的干燥和干燥速率曲线
Fig.3 Dehydration and drying rate curves under different slice thicknesses

6 mm 缩短了近 30% 的时间,而切片厚度为 5 mm 和 6 mm 时的情况基本相同,说明切片厚度对干燥速率的影响是有限的。

2.1.3 辐照距离

在干燥温度为 75℃,切片厚度为 5 mm 时,不同的辐照距离下胡萝卜的干燥曲线和干燥速率曲线如图 4 所示。

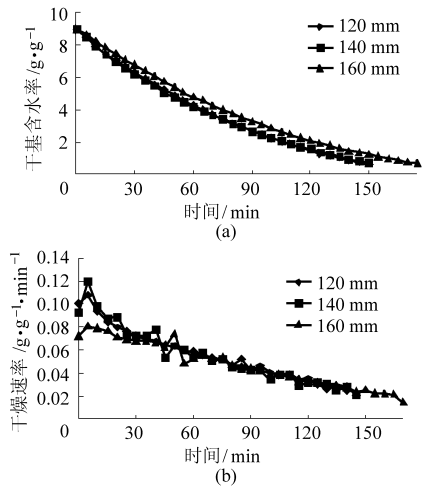


图4 不同辐照距离下的干燥和干燥速率曲线
Fig.4 Dehydration and drying rate curves under different irradiation distances

由图 4 可知,辐照距离对胡萝卜的红外干燥过程影响明显小于温度和切片厚度的影响。当辐照距离增大时,干燥时间也会延长。在干燥初期,辐照距离对干燥速率有较显著的影响,但随着时间的推移,干燥进入减速干燥阶段,辐照距离的影响逐渐减小。

2.2 胡萝卜切片红外干燥模型的建立

2.2.1 干燥模型与线性化

在参阅文献[9~16]的基础上,采用以下 3 种数学模型对胡萝卜切片红外干燥进行试验数据的拟合:

(1) 单项扩散模型

$$M_r = Ae^{-Kt}$$

式中 A 、 K ——模型参数

(2) 指数模型

$$M_r = e^{-Kt}$$

(3) Page 模型

$$M_r = e^{-Kt^n}$$

式中 n ——模型参数

为了确定胡萝卜切片的干燥模型,对这 3 种常用的干燥模型进行线性化处理。从表达式形式上,指数模型可以看作是单项扩散模型或者 Page 模型的特殊形式,本文仅对单项扩散模型和 Page 模型进行对比讨论。

单项扩散模型一次线性化后的形式为

$$-\ln M_r = Kt - \ln A$$

Page 模型进行两次线性化后的形式为

$$\ln(-\ln M_r) = \ln K + n \ln t$$

根据试验数据分别绘制 $-\ln M_r - t$ 曲线和 $\ln(-\ln M_r) - \ln t$ 曲线,结果如图 5~7 所示。

通过比较图 5~7 可知,图 5b、图 6b 和图 7b 均呈现良好的线性关系,说明 Page 模型更适合描述胡萝卜切片的干燥过程。

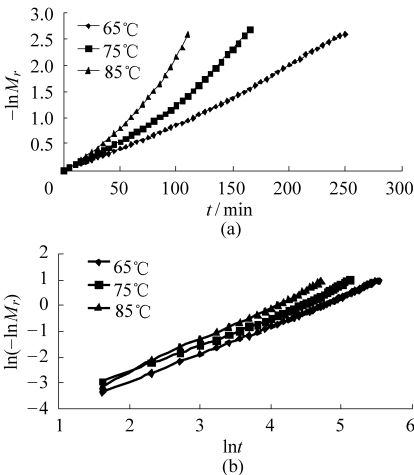


图5 在不同温度下 $-\ln M_r - t$ 和 $\ln(-\ln M_r) - \ln t$ 的变化曲线
Fig.5 Curves of $-\ln M_r - t$ and $\ln(-\ln M_r) - \ln t$ under different temperatures

2.2.2 胡萝卜切片干燥模型的建立

为了进一步说明 Page 模型对胡萝卜红外干燥特性的适用性,采用 SPSS 统计分析软件对图 5b、图 6b 和图 7b 中的试验数据进行回归分析和模型拟合的方差分析,得到各条件下胡萝卜切片的干燥模型决定系数及复相关系数 R^2 和 F ,如表 2 所示。表 2 中的决定系数 R^2 反映了拟合值与预测值之间的相关程度。

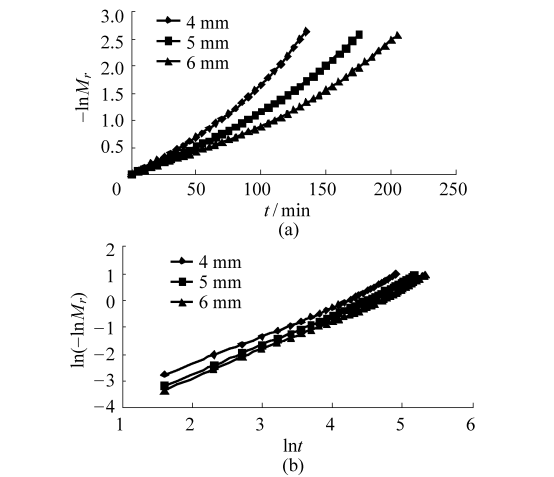


图 6 在不同切片厚度下 $-\ln M_r-t$ 和 $\ln(-\ln M_r)-\ln t$ 的变化曲线

Fig. 6 Curves of $-\ln M_r-t$ and $\ln(-\ln M_r)-\ln t$ under different slice thicknesses

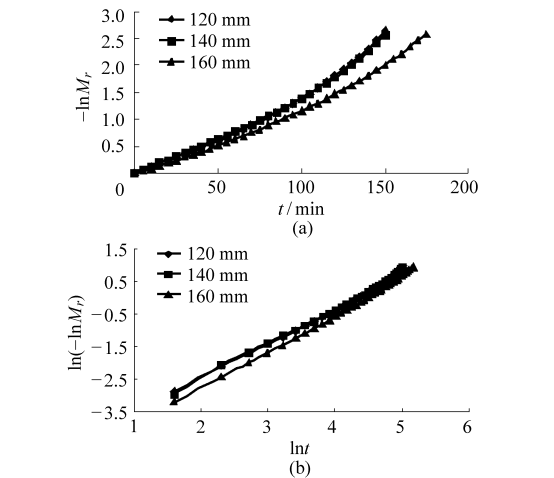


图 7 在不同辐照距离下 $-\ln M_r-t$ 和 $\ln(-\ln M_r)-\ln t$ 的变化曲线

Fig. 7 Curves of $-\ln M_r-t$ and $\ln(-\ln M_r)-\ln t$ under different irradiation distances

表 2 Page 模型拟合结果及 R^2 值

Tab. 2 Regression analysis of Page model					
变量	水平	K	n	R ²	F
X ₁	1	0.005 42	1.108	0.999	36 454.633
	2	0.007 22	1.128	0.994	5 580.219
	3	0.005 92	1.268	0.998	8 473.256
X ₂	1	0.008 46	1.142	0.996	6 521.141
	2	0.005 68	1.162	0.998	16 018.828
	3	0.004 88	1.147	0.994	6 841.121
X ₃	1	0.008 54	1.110	0.995	5 774.227
	2	0.008 96	1.101	0.997	8 824.052
	3	0.005 68	1.162	0.998	16 113.010

2.2.3 模型的验证与对比

选取切片厚度为 5 mm,辐照距离为 160 mm,干

燥温度分别为 65、75 和 85℃ 的实测值和 Page 模型的模拟值结果进行比较,如图 8 所示,其预测值的最大相对误差为 6.53%。

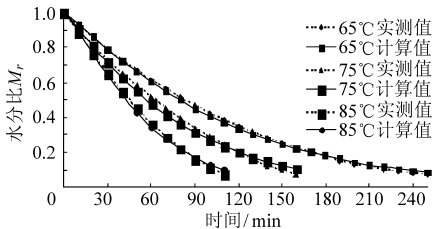


图 8 在相同条件下实测值和计算值的比较

Fig. 8 Comparison of test values and regression values under same condition

选取切片厚度为 5 mm,辐照距离为 160 mm,干燥温度为 65℃,建立 Midilli 模型并与本文所建立的 Page 模型进行对比。

Midilli 模型^[5]为

$$M_r=0.993\,77\exp(-0.005\,310\,4t^{1.092\,4})-0.000\,176\,89t$$

Page 模型为

$$M_r=\exp(-0.005\,42t^{1.108})$$

从图 9 可以看出,在相同的条件下,Midilli 模型、Page 模型均与实测值相吻合,而对比这两个模型,Page 模型要比 Midilli 模型简单,所以建模和计算也简便。

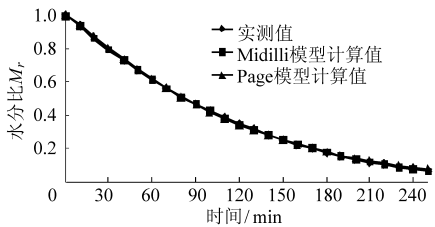


图 9 在相同条件下实测值与 Midilli 模型、Page 模型计算值的比较

Fig. 9 Comparison of test values and Midilli model, Page model regression values under the same condition

3 结论

(1)胡萝卜红外干燥过程分恒速和降速 2 个阶段,但是恒速过程时间较短。试验表明:在干燥温度为 75℃,切片厚度为 5 mm,辐照距离为 140 mm 时干燥效果较佳。

(2)利用单项扩散模型、指数模型和 Page 模型对胡萝卜切片的干燥过程进行拟合,通过模型线性化回归分析,得出 Page 模型能较好地描述其红外干燥过程。计算值与实测值的最大误差为 6.53%。

(3)相同条件下 Page 模型和 Midilli 模型均与实测值相吻合,但 Page 模型更便于建模和计算。

参 考 文 献

- 1 马春燕,赵欣. 干、鲜胡萝卜营养成分的比较分析及对脱水蔬菜的利用[J]. 畜牧与饲料科学,2008,29(5):30~36.
Ma Chunyan, Zhao Xin. Comparison between fresh carrot and dehydrated carrot and enlightenment for using dehydrated vegetables [J]. Animal Husbandry and Feed Science,2008,29(5):30~36. (in Chinese)
- 2 李远志,胡晓静,叶盛英,等. 胡萝卜热泵干燥特性及数学模型的研究[J]. 食品与发酵工业,1999,25(6):1~4.
Li Yuanzhi, Hu Xiaojing, Ye Shengying, et al. Studies on the heat pump drying characteristics and mathematical model of carrot [J]. Food and Fermentation Industries,1999,25(6):1~4. (in Chinese)
- 3 遇龙. 双孢蘑菇远红外辐射干燥的试验研究[D]. 淄博:山东理工大学,2012.
Yu Long. The experimental study of the fir drying of *Agaricus bisporus* [D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2012. (in Chinese)
- 4 关志强,王秀芝,李敏,等. 荔枝果肉热风干燥薄层模型[J]. 农业机械学报,2012,43(2):151~158.
Guan Zhiqiang, Wang Xiuzhi, Li Min, et al. Mathematical modeling of hot air drying of thin layer litchi flesh[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2012,43(2):151~158. (in Chinese)
- 5 Hasan T. Suitable drying model for infrared drying of carrot[J]. Journal of Food Engineering, 2006,77(3):610~619.
- 6 林喜娜,王相友. 苹果切片红外辐射干燥模型建立及评价[J]. 农业机械学报,2010,41(6):128~132.
Lin Xi'na, Wang Xiangyou. Modeling and evaluation of infrared radiation drying for apple slices[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2010,41(6):128~132. (in Chinese)
- 7 张亚晶,杨薇. 康乃馨热风干燥特性研究[J]. 食品与机械,2012,28(1):50~54.
Zhang Yajing, Yang Wei. Research on hot-air drying characteristics of carnation[J]. Food and Machinery,2012,28(1):50~54. (in Chinese)
- 8 刘伟,黄立新,张彩虹,等. 栀子黄色素低温真空干燥模型建立与评价[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2011,35(5):95~98.
Liu Wei, Huang Lixin, Zhang Caihong, et al. Modeling and evaluation of low-temperature vacuum drying of Gardenia yellow pigment[J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Science Edition, 2011,35(5):95~98. (in Chinese)
- 9 Sokhansanj J W, Singh D, Wasserman J D. Drying characteristics of wheat, barley and canola subjected to repetitive wetting and drying cycles [J]. Transactions of the ASAE,1984,27(3):903~914.
- 10 Stamatiou J B, Elias P, Nikolas K, et al. Evaluation of thin-layer drying models for describing drying kinetics of figs (*Ficus carica*) [J]. Journal of Food Engineering, 2006,75(2):205~214.
- 11 孙逢龙,杜焱,纪建伟. 五味子热风干燥特性及数学模型[J]. 农机化研究,2012,34(8):93~97.
Sun Fenglong, Du Yan, Ji Jianwei. Characteristics and mathematical model for hot air drying of schisandra chinensis[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2012,34(8):93~97. (in Chinese)
- 12 赵海波,杨昭. 白菜种子热泵干燥过程动态模型研究[J]. 农业机械学报,2011,42(11):118~123.
Zhao Haibo, Yang Zhao. Dynamic model of heat pump drying for cabbage seeds[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(11):118~123. (in Chinese)
- 13 Sharma G P, Verma R C, Pathare P. Mathematical modeling of infrared radiation thin layer drying of onion slices[J]. Journal of Food Engineering, 2005,71(3):282~286.
- 14 Sutar P P, Prasads S. Modeling microwave vacuum drying kinetics and moisture diffusivity of carrot slices[J]. Drying Technology, 2007,25(10):1695~1702.
- 15 王宁,刘文秀,李凤城,等. 杏低温薄层干燥试验与建模[J]. 农业机械学报,2011,42(1):140~143.
Wang Ning, Liu Wenxiu, Li Fengcheng, et al. Thin layer drying model of apricot at low temperature[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(1):140~143. (in Chinese)
- 16 李辉,林河通,袁芳,等. 荔枝果肉微波真空干燥特性与动力学模型[J]. 农业机械学报,2012,43(6):107~112.
Li Hui, Lin Hetong, Yuan Fang, et al. Microwave-vacuum drying characteristics and kinetics model of litchi pulp [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2012,43(6):107~112. (in Chinese)

(上接第171页)

- 31 黄国锋,张振铎,钟流举,等. 重金属在猪粪堆肥过程中的化学变化[J]. 中国环境科学, 2004, 24(1): 94~99.
Huang Guofeng, Zhang Zhentian, Zhong Liuju, et al. Chemical changes of heavy metals in the process of pig manure composting [J]. China Environmental Science, 2004, 24(1): 94~99. (in Chinese)
- 32 董占荣,陈一定,林咸永,等. 杭州市郊规模化养殖场猪粪的重金属含量及其形态[J]. 浙江农业学报, 2008, 20(1): 35~39.
- 33 王敦球,潘盛. 模糊综合评价法在评价堆肥腐熟度中的应用[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(增刊): 212~215.