

地黄真空红外辐射干燥模型^{*}

刘云宏^{1,2} 朱文学² 马海乐¹

(1. 江苏大学食品与生物工程学院, 镇江 212013; 2. 河南科技大学食品与生物工程学院, 洛阳 471003)

【摘要】 利用设计的真空红外辐射干燥箱,对中药材地黄进行了真空红外干燥研究。通过对试验值进行求对数并线性回归,确定了地黄的薄层真空红外干燥模型的形式为 Modified Page 方程,该模型与辐射板温度和干燥室压力有关,并得到了各参数的表达式和数值。试验值和模型预测值比较说明,该模型能很好地描述和预测地黄真空红外干燥的水分比变化规律。

关键词: 地黄 真空红外辐射干燥 薄层干燥 数学模型

中图分类号: TQ028.6⁺7; S567.23⁺4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)01-0122-05

Model of Vacuum Infrared Radiation Drying on *Rehmanniae*

Liu Yunhong^{1,2} Zhu Wenxue² Ma Haile¹

(1. School of Food and Biological Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. College of Food & Bioengineering, Henan University of Science & Technology, Luoyang 471003, China)

Abstract

Research on vacuum infrared radiation drying of *Rehmanniae* was carried out using an improved vacuum infrared radiation dryer. By means of logarithm of experimental data and linear regression, the pattern of thin-layer vacuum infrared drying model of *Rehmanniae*, which was related to the temperature of radiation board and pressure in the chamber, was set as Modified Page equation, and the expression and values of model parameters were also obtained subsequently. The model could describe and predict change regulation of moisture ratio very well according to the comparison of experimental values and calculated values.

Key words *Rehmanniae*, Vacuum infrared radiation drying, Thin-layer drying, Mathematical model

引言

地黄为玄参科植物地黄 (*Rehmannia glutinosa* Libosch.) 的新鲜或干燥根茎和块根,其块根以鲜地黄、生地黄和熟地黄等多种形式入药^[1],是一种常用中药材。目前,地黄干燥的研究多采用晒干、烘干、热风干燥等^[2-3]传统方法,还未见利用现代干燥技术的报道。地黄中有效成分梓醇属于环烯醚萜类化合物,在高温和有氧情况下容易发生变性^[2],因此,地黄适宜在真空条件下较低温度进行干燥。

真空红外辐射干燥由于是在低压无氧的情况下

进行非接触低温加热^[4],能够很好地保持物料的状况和减少物料中热敏和易氧化成分的变性,越来越受到研究人员的关注。目前,已有多种果蔬真空红外干燥的研究^[5-8]。近年来关于红外干燥薄层模型的研究较多^[9-12],但大多是利用现有的模型方程与试验值进行比较,通过相关系数、均方差等指标,选取最合适的模型,数学回归工作量很大。而目前真空远红外薄层干燥模型的研究很少,肖旭霖^[13]比较了3个模型方程,并建立了洋葱真空远红外薄层干燥模型。Swasdisevi T^[7]通过传热传质分析,模拟了香蕉片真空远红外干燥过程中水分比和温度的变

化。

本文以鲜地黄为干燥材料,进行真空红外辐射干燥研究,利用求对数和线性回归,建立与辐射板温度和干燥腔内压力相关的薄层干燥模型,通过与试验值对比进行模型验证,并通过改变干燥参数进行模型预测性的试验验证,以期建立能够模拟和预测地黄真空红外辐射干燥水分比最佳模型。

1 材料与方法

1.1 试验材料

鲜地黄:购于河南省温县西虢村地黄种植基地,新鲜地黄的干基含水率为 3.20 ~ 3.22。

1.2 试验设备与仪器

真空红外干燥试验装置由上海一恒公司生产的 DZF-6090 型真空干燥箱改装而成,结构如图 1 所示。干燥箱分为上箱体、控制面板和下箱体 3 部分。干燥室容积 45 cm × 45 cm × 45 cm,许用温度 120℃。辐射加热板由 4 块 12 cm × 12 cm 的陶瓷红外加热板组合而成,板上安装有温度传感器,温度传感器连接到温度控制器以控制辐射板表面温度。物料盘放于料架的支架上,并配有两个温度传感器以测量物料温度,料架由称量传感器吊起,称量传感器则连接到称量显示器上。真空泵为 2XZ-4 型旋片式真空泵,干燥室压力由电磁阀和压力控制器自动控制。MP4000B 型电子天平,上海第二天平厂。202 型恒温干燥箱,北京永光明医疗仪器厂。

1.3 试验方法

按方案设定真空干燥机的辐射板温度和压力值,将物料盘放到所需位置,本试验中物料盘距辐射板为 10 cm,试验前设备均预热 30 min。选取粗细大致相同的新鲜地黄,清洗干净后擦干,用刀切成 5.8 ~ 6.2 mm 的薄片,厚度用游标卡尺测定。称取 200 g 地黄片并平铺于辐射板下的物料盘上,开启设备进行干燥试验。每隔一段时间计数一次,直至干燥结束。本文所指含水率均为干基含水率。

先固定干燥室压力 8 kPa 不变,改变辐射板温

度为 323、333、343、353 和 363 K,测量物料质量随干燥时间的变化。然后固定辐射板加热温度 363 K 不变,调节干燥室压力为 1.5、4.0、8.0、15.0 和 40.0 kPa,进行干燥试验。利用这 9 组试验的干燥曲线,建立地黄片薄层干燥模型。每组试验重复两次,经比较,试验重复性较好,取两次试验的平均值进行数据分析和处理。采用 Origin 8.0 软件进行分析和回归。

物料水分比的计算式为^[14]

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

式中 M_t ——物料在 t 时刻的含水率, %

M_0 ——物料的初始含水率, %

M_e ——物料的平衡含水率, %

由于 M_e 相对于 M_t 和 M_0 很小,通常在工程应用中常忽略不计,因此,物料水分比的计算采用简化式^[15],即

$$M_R = \frac{M_t}{M_0} \quad (2)$$

2 试验结果与分析

2.1 干燥模型的形式确定

首先对 9 组干燥曲线进行处理。以 $\ln t$ 为横坐标, $\ln(-\ln M_R)$ 为纵坐标,在坐标系上作图,如图 2、图 3 所示,其中图 2 为不同辐射板温度 T 下的结果,图 3 为不同压力 p 下的关系图。

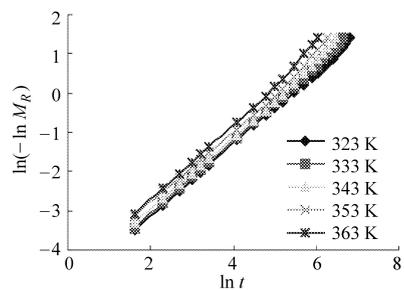


图 2 不同辐射板温度下的 $\ln(-\ln M_R) - \ln t$ 分布

Fig. 2 Distribution diagram of $\ln(-\ln M_R)$ vs $\ln t$ at different radiation board temperatures

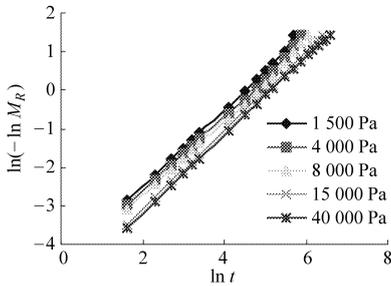
对曲线进行线性回归分析,得到 9 个线性回归方程,决定系数 R^2 在 0.991 192 ~ 0.999 723 范围内,平均值为 0.995 428,均方根误差 RMSE 的范围为 0.016 483 ~ 0.081 753,平均值为 0.055 172。结果表明, $\ln(-\ln M_R)$ 和 $\ln t$ 呈良好的线性关系,因此两者的关系式为

$$\ln(-\ln M_R) = \ln k + N \ln t \quad (3)$$

式中 k 、 N ——系数

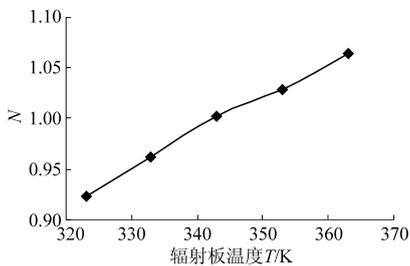
对该式连求两次幂,得 Page 方程^[16]为

$$M_R = \exp(-kt^N) \quad (4)$$

图3 不同腔内压力下的 $\ln(-\ln M_R) - \ln t$ 分布Fig. 3 Distribution diagram of $\ln(-\ln M_R)$ vs $\ln t$ under different pressures

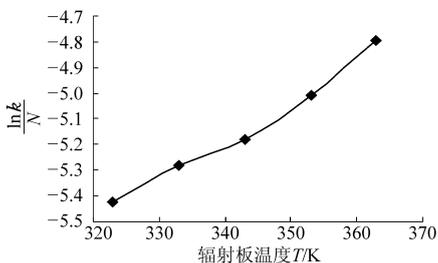
将图2中拟合的5条直线的斜率 N 对温度 T 作图,如图4所示。对 N 和 T 进行线性回归, R^2 为 0.9953,所以 N 和 T 也呈良好的线性关系,其线性关系式为

$$N = a_1 + a_2 T \quad (5)$$

图4 $N - T$ 的关系曲线Fig. 4 Relationship of N vs T

将图2中5条直线方程中的系数 $\ln k$ 对 T 作图,结果为一曲线。但把 $\ln k$ 除以系数 N 后再对 T 进行作图,如图5所示,可以看出 $\frac{\ln k}{N}$ 和 T 呈较好的线性关系,进行线性回归, R^2 为 0.9825。因此,可得方程式

$$\frac{\ln k}{N} = b_1 + b_2 T \quad (6)$$

图5 $\frac{\ln k}{N} - T$ 的关系曲线Fig. 5 Relationship of $\frac{\ln k}{N}$ vs T

如果用 $N \ln K$ 来代替 $\ln k$,可得

$$\ln K = b_1 + b_2 T \quad (7)$$

式(3)可变为

$$\ln(-\ln M_R) = N \ln K + N \ln t \quad (8)$$

因此,得

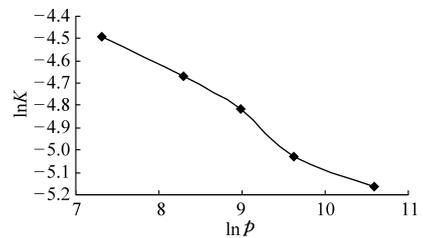
$$M_R = \exp(- (Kt)^N) \quad (9)$$

此为 Modified Page 方程^[17],也是最终选用的模型方程。

由图3可知,图中拟合的5条直线基本平行,说明斜率 N 和 p 无关,这和文献[13]得到的结论相同。线性回归的斜率范围为 1.021571 ~ 1.067166,变化范围不大,因此,可将 N 看成一个只与 T 有关而与 p 无关的系数。

将利用图3中求得的 $\ln K$ 对 $\ln p$ 作图,如图6所示。可以发现两者呈良好的线性关系,线性回归的 R^2 为 0.9834,因此,可得线性方程

$$\ln K = c_1 + c_2 \ln p \quad (10)$$

图6 $\ln K - \ln p$ 的关系曲线Fig. 6 Relationship of $\ln K$ vs $\ln p$

综上,斜率 N 和 T 呈线性关系但和 p 无关,而 $\ln K$ 分别和 T 和 $\ln p$ 呈线性关系,因此综合式(7)和式(10)可得

$$\ln K = a_3 + a_4 T + a_5 \ln p \quad (11)$$

N 的表达式可采用式(5),而 K 的表达式为

$$K = \exp(a_3 + a_4 T + a_5 \ln p) \quad (12)$$

将式(5)和式(12)代入式(9),得 M_R 的薄层模型方程为

$$M_R = \exp(- (\exp(a_3 + a_4 T + a_5 \ln p)t)^{a_1 + a_2 T}) \quad (13)$$

2.2 模型参数的确定

由图4的线性回归结果,可得

$$N = a_1 + a_2 T = -0.2002 + 0.0035T \quad (R^2 = 0.9953) \quad (14)$$

将图5和图6回归所得的 $\ln K$ 与 T 和 $\ln p$ 进行多元线性回归,可得

$$\ln K = -8.404231 + 0.015124T - 0.213968 \ln p \quad (15)$$

因此

$$K = \exp(-8.404231 + 0.015124T - 0.213968 \ln p) \quad (R^2 = 0.9881) \quad (16)$$

即水分比预测模型为

$$M_R = \exp(- (\exp(-8.404231 + 0.015124T - 0.213968 \ln p)t)^{-0.2002 + 0.0035T}) \quad (17)$$

2.3 模型方程的验证

在固定辐射板温度 363 K 下,不同压力条件下

的干燥曲线的试验结果和模型值如图 7 所示,在压力 8.0 kPa 下的不同辐射板温度的干燥曲线的实测值和模型值如图 8 所示。由干燥曲线可以看出,随着压力的降低或辐射板温度的升高,干燥时间减少,干燥速度增大。无论是实测值还是模型值,均能很好地表现水分比的变化规律和参数的影响。

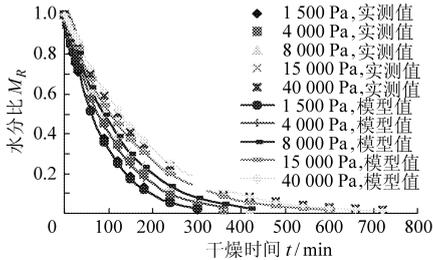


图 7 不同压力下的地黄干燥曲线

Fig. 7 Drying curves of *Rehmanniae* under different pressures

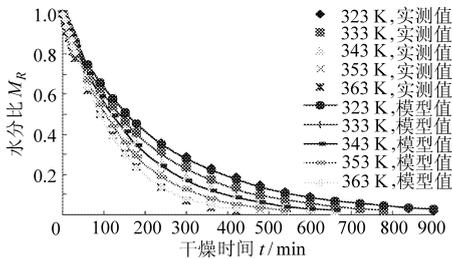


图 8 不同辐射板温度的地黄干燥曲线

Fig. 8 Drying curves of *Rehmanniae* at different radiation board temperatures

由图 7、8 可知,两图中的模型值和实测值拟合得很好。经计算,所有组拟合的 R^2 均在 0.998 5 以上。经 F 双样本检验,所有组中的模型值和实测值的方差均齐性。 t 齐方差检验的结果显示,各组中的模型值和实测值的差异不显著。分别求出各组中模型值和实测值的偏差,除了其中几组值的后半部的偏差较大外,其余的水分比偏差均未超过 5%。

为验证该模型的预测性,选取了和建模所用参数不同的 3 组参数进行计算,并做了 3 组验证试验,试验值和预测值的比较曲线如图 9 所示。由图可以看出,两者具有很好的一致性, R^2 均在 0.998 0 以上, F 双样本检验表示各组中的预测值和试验值的方差均齐性, t 齐方差检验各组中的预测值和试验值的差异不显著。

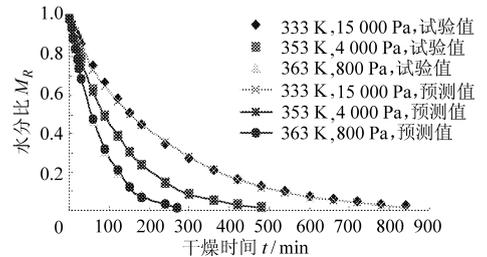


图 9 模型预测值和试验值的比较曲线

Fig. 9 Comparison of experimental values and predicted values

综上,该薄层干燥模型方程有较好的预测性,能很好地描述和表达地黄真空红外辐射干燥的规律和变化。

3 结束语

通过考虑辐射板加热温度和干燥腔内压力等试验参数,对地黄真空红外辐射干燥曲线进行拟合,得到其水分比的预测模型为

$$M_R = \exp\left(-\left(\exp\left(-8.404231 + 0.015124T + 0.213968\ln p\right)t\right)^{-0.2002 + 0.0035T}\right)$$

根据试验内容,该模型适用范围为 $800 \text{ Pa} \leq p \leq 40000 \text{ Pa}$, $323 \text{ K} \leq T \leq 363 \text{ K}$, 辐射距离 10 cm, 地黄厚度 6 mm。

经模型预测值和试验值进行比较,该模型能很好地描述和表达地黄真空红外辐射干燥的水分比的变化规律。

参 考 文 献

- 1 国家药典委员会. 中华人民共和国药典[M]. 北京:化学工业出版社, 2005.
- 2 任迪峰. 中药材干燥过程中质量退化及优化干燥工艺的研究[D]. 北京:中国农业大学, 2002.
Ren Difeng. Research on the degradation and optimization in the drying process of some common China herbs[D]. Beijing: China Agricultural University, 2002. (in Chinese)
- 3 边宝林, 杨健, 王宏洁, 等. 不同干燥条件对鲜地黄中梓醇含量的影响[J]. 中国中药杂志, 1996, 21(6):346~347.
Bian Baolin, Yang Jian, Wang Hongjie, et al. Influence of different drying conditions on the content of catalpol in fresh *Rehmannia glutinosa*[J]. Journal of Chinese Material Medicines, 1996, 21(6):346~347. (in Chinese)
- 4 潘永康, 王喜忠, 刘相东. 现代干燥技术[M]. 2版. 北京:化学工业出版社, 2007.
- 5 Mongpraneet S, Abe T, Tsurusaki T. Accelerated drying of welsh onion by far infrared radiation under vacuum conditions[J]. Journal of Food Engineering, 2002, 55(2):147~156.
- 6 徐凤英, 李长友, 陈震. 荔枝在不同红外辐射源下真空干燥优化试验[J]. 农业机械学报, 2009, 40(4):147~150, 106.
Xu Fengying, Li Changyou, Chen Zhen. Optimization test of Litchi vacuum drying under different infrared radiation sources [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(4):147~150,106. (in Chinese)

- 7 Swasdisevi T, Devahastin S, Sa-Adchom P, et al. Mathematical modeling of combined far-infrared and vacuum drying banana slice[J]. *Journal of Food Engineering*, 2009, 92(1):100~106.
- 8 王相友, 林喜娜. 果蔬红外辐射干燥动力学的影响因素综述[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(10):114~120.
Wang Xiangyou, Lin Xi'na. Influence factors of kinetics of infrared radiation drying for fruits and vegetables[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(10):114~120. (in Chinese)
- 9 Sharma G P, Verma R C, Pathare P B. Thin-layer infrared radiation drying of onion slices[J]. *Journal of Food Engineering*, 2005, 67(3):361~366.
- 10 Hebbar H U, Rastogi N K. Mass transfer during infrared drying of cashew kernel[J]. *Journal of Food Engineering*, 2001, 47(1):1~5.
- 11 Hasan Togrul. Simple modeling of infrared drying of fresh apple slices[J]. *Journal of Food Engineering*, 2005, 71(3):311~323.
- 12 Ruiz Celma A, Rojas S, Lopez-Rodriguez F. Mathematical modeling of thin-layer infrared drying of wet olive husk[J]. *Chemical Engineering and Processing*, 2008, 47:1810~1818.
- 13 肖旭霖. 洋葱真空远红外薄层干燥模型[J]. *食品科学*, 2002, 23(5):40~43.
Xiao Xulin. Thin-layer modal of vacuum and far-infrared drying on onion[J]. *Food Science*, 2002, 23(5):40~43. (in Chinese)
- 14 Midilli A. Determination of pistachio drying behavior and conditions in a solar drying system[J]. *International Journal of Energy Research*, 2001, 25(8):715~725.
- 15 Hasan Togrul. Suitable drying model for infrared drying of carrot[J]. *Journal of Food Engineering*, 2006, 77(3):610~619.
- 16 Page G E. Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers[D]. West Lafayette: Purdue University, 1949.
- 17 White G M. Fully exposed drying of popcorn[J]. *Transactions of the ASAE*, 1981, 24(2):466~468.

~~~~~

(上接第 121 页)

- 9 张莉, 周守标. 安徽产三种野菜的营养成分比较[J]. *营养学报*, 2008, 30(1):117~118.  
Zhang Li, Zhou Shoubiao. The comparative study on nutritional composition of three nature vegetables from Anhui Province [J]. *Acta Nutrimenta Sinica*, 2008, 30(1):117~118. (in Chinese)
- 10 田龙. 黄金梨的气调贮藏保鲜试验[J]. *农业机械学报*, 2007, 38(10):77~79.  
Tian Long. Study on control atmosphere storage of Whangkeumbae[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2007, 38(10):77~79. (in Chinese)
- 11 刘战丽, 王相友, 朱继英, 等. 高氧气调对果蔬采后生理和品质影响研究进展[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(7):112~118.  
Liu Zhanli, Wang Xiangyou, Zhu Jiying, et al. Progress in effects of high oxygen on postharvest physiology and quality of fresh fruits and vegetables[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(7):112~118. (in Chinese)
- 12 赵世杰, 刘华山, 董新纯. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1998:56~124.
- 13 田国忠, 李怀方, 裘维蕃. 植物过氧化物酶研究进展[J]. *武汉植物学研究*, 2001, 19(4):332~344.  
Tian Guozhong, Li Huafang, Qiu Weifan. Advances on research of plant peroxidases[J]. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 2001, 19(4):332~344. (in Chinese)
- 14 王相友, 李霞, 王娟, 等. 气调包装下果蔬呼吸速率研究进展[J]. *农业机械学报*, 2008, 39(8):94~100.  
Wang Xiangyou, Li Xia, Wang Juan, et al. Advances of respiration rate in modified atmosphere packaging for fruits and vegetables[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2008, 39(8):94~100. (in Chinese)
- 15 Gorny J R, Hess P B, Cifuentes R A, et al. Quality changes in fresh-cut pear slices as affected by controlled atmospheres and chemical preservatives[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2002, 24(3):271~278.
- 16 Soliva-Fortuny R C, Elez M P, Martin B O. Microbiological and biochemical stability of fresh-cut apples preserved by modified atmosphere packaging[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2004, 5(2):215~224.
- 17 刘颖, 郭志敏, 李云飞, 等. 果蔬气调贮藏国内外研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2006, 32(4):94~97.  
Liu Ying, Guo Zhimin, Li Yunfei, et al. The study developments of controlled and modified atmosphere storage for fruits and vegetables in China and abroad[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2006, 32(4):94~97. (in Chinese)