

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.Supp.037

地黄真空红外辐射干燥过程中梓醇降解动力学研究^{*}

朱文学¹ 刘云宏^{1,2} 马海乐²

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

【摘要】 以地黄为真空红外辐射干燥试验的原料,在确定地黄中梓醇提取方法为超声+冷浸工艺的基础上,进行了干燥过程中梓醇降解动力学研究。结果表明:地黄真空红外辐射干燥中梓醇降解动力学不符合零级和一级反应动力学。通过对一级反应动力学方程引入一个与辐射板温度有关的参数 g_r ,并假设降解速率参数 k 符合Arrhenius方程,建立了地黄中有效成分梓醇在真空红外辐射干燥过程中的降解动力学模型方程,验证结果表明,该方程模拟效果较好。

关键词: 地黄 梓醇 真空红外辐射干燥 降解动力学

中图分类号: TQ028.6⁺7; S567.23⁺4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2010)S0-0172-06

Degradation Kinetics of Catalpol in *Rehmanniae* during Vacuum Infrared Radiation Drying

Zhu Wenxue¹ Liu Yunhong^{1,2} Ma Haile²

(1. College of Food & Bioengineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China

2. School of Food and Biological Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract

Rehmanniae was chosen as the experimental material. The extraction method of catalpol in *Rehmanniae* was achieved via supersonic treatment followed by methanol extraction, and extraction time was decided thereafter. The results showed that degradation kinetics of catalpol in *Rehmanniae* during vacuum infrared radiation drying did not follow zero order or first order kinetics regulations. The degradation kinetics model of catalpol in *Rehmanniae* was established through introducing a parameter g_r related to the radiation heater's temperature, assuming that the parameters of degradation rate k agreed with Arrhenius equation. The test result showed that the model was a good fit for the experimental data.

Key words *Rehmanniae*, Catalpol, Vacuum infrared radiation drying, Degradation kinetics

引言

物料在干燥、加工、贮藏等工艺过程中,其组分含量或物性参数一般会随时间产生变化。目前有关研究主要集中在物料贮藏、加工过程中的品质变化,选用指标主要是能反应物料品质的色泽、硬度、营养成分和药效成分等。

杨宏顺^[1]等研究了不同温度和气体组分下,花椰菜中叶绿素和维生素C含量在气调贮藏中的降

解动力学,建立了成分变化的一级反应动力学模型。上海海洋大学^[2~3]研究了几种水产品的菌落总数、挥发性盐基氮、鲜度指标和感官指标等随贮藏时间的变化规律,并得到了物料经历不同温度和时间流通后的品质损失量和货架寿命余量模型。Lau M H^[4]等研究了芦笋在不同温度下贮藏的硬度变化,并推导出预测温度下的硬度变化动力学模型。Wu L等^[5]通过对茄子进行真空干燥试验,得出物料水分变化的二次动力学模型和收缩率变化的线性方程。

收稿日期: 2010-07-01 修回日期: 2010-07-21

^{*} 河南省杰出青年基金资助项目(084100510005)

作者简介: 朱文学,教授,博士生导师,主要从事农产品加工与贮藏工程研究,E-mail: zwx@mail.haust.edu.cn

任迪峰^[6]以中药材地黄中有效成分梓醇、麦冬中有效成分总黄酮的含量为指标,考察其在干燥过程中的质量退化过程,建立了地黄和麦冬在热风干燥过程中质量退化动力学模型。

地黄在干燥过程中,其有效成分结构极易受到破坏^[7],《中国药典》2005 年版规定梓醇含量作为生地黄药效的主要指标。本文以地黄及其有效成分梓醇为研究对象,通过研究不同干燥条件下梓醇含量的变化情况,建立地黄真空红外辐射干燥过程中梓醇降解动力学模型。

1 材料与方法

1.1 试验装置

真空红外辐射干燥试验装置结构如图 1 所示,结构说明参见文献[8]。

KQ-200KDB 型数控超声波提取仪,江苏昆山超声仪器有限公司;Agilent1100 型全自动进样高效液相色谱仪,美国 Agilent 公司;202 型恒温干燥箱,北京永光明医疗仪器有限公司。

1.2 材料与试剂

鲜地黄,购于河南省温县西虢村地黄种植基地,保藏在冰箱中待用。新鲜地黄的干基含水率为 3.20~3.22。

乙腈为色谱纯,美国 Fisher 公司;甲醇为色谱纯;磷酸为分析纯;水为超纯水;梓醇对照品,购自中国药品生物制品检定所。

1.3 干燥方法

调节好真空红外辐射干燥设备的参数,每次试验前均预热 30 min。将地黄切成 6 mm 厚的切片,称取 10 份,每份 15 g。将物料摆放到物料盘中,并对每份物料进行编号。将物料盘放入设备后,开启设备。每隔 1 h 停止干燥,打开放气阀放入气体,开启箱门,拿出一份物料后迅速关上箱门,继续干燥。重复以上步骤,直至干燥结束。每次物料取出后,迅速称其质量,记为 M_1 ,然后取适量切成小丁,精密称取并计算质量 M_2 ,置入锥形瓶,密封好后,放入 2~4℃ 冰箱待测。待该批次试验结束后,统一进行梓醇提取。

设 X 为新鲜地黄的干基含水率,由于每份物料所含有的绝干物料质量是相同的,因此每次取出的物料干基含水率计算公式为

$$X_i = \frac{M_{1,i}(1+X)}{15} - 1 \tag{1}$$

式中 $M_{1,i}$ ——每次取出物料的质量,下标 i 表示取出序号

因此,若对应取出 0.5 g 绝干地黄用于梓醇的检测,每次取出物料并切丁后,用于提取的样品质量计算公式为

$$M_{2,i} = 0.5(1+X_i) = \frac{M_{1,i}(1+X)}{30} \tag{2}$$

本文后述含水率均为干基含水率。

1.4 检测方法

1.4.1 色谱条件

色谱柱: Diamond C_{18} 柱 (150 mm × 4.6 mm, 5 μm);流动相: 乙腈-0.1% 磷酸溶液 (体积比 1:99);流速: 1.0 mL/min;柱温: 25℃;检测波长 210 nm;进样量: 10 μL。

1.4.2 对照品溶液的制备

精密称取梓醇对照品 1 mg,置入 10 mL 量瓶内,加流动相至刻度并摇匀,为对照品溶液。

1.4.3 供试品溶液的制备

将适量地黄样品切成丁,按式(2)计算的质量进行称取,并置于 50 mL 锥形瓶中,加 50 mL 甲醇,放置 10 min,超声提取 30 min,取出并静置 16 h。用甲醇定容至刻度,取溶液 10 mL 旋转蒸发,残渣用 10 mL 流动相溶解,为供试品溶液。取 2 mL 供试品溶液经 0.45 μm 的膜滤,进行 HPLC 测定。

1.4.4 精密度测定

线性关系测定:精取对照品溶液 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 mL,并置于 5 mL 容量瓶中,用流动相定容,进行 HPLC 检测,以峰面积 y 为纵坐标,以进样量 x 为横坐标,进行线性回归,得回归方程 $y = 3.87 + 204.2x, r = 0.9996$ 。精密度测定峰面积的相对标准偏差为 0.4% ($n = 5$),表明精密度良好。回收率测定:平均回收率为 99.7%,相对标准偏差为 1.7% ($n = 5$)。

1.5 试验指标

定义梓醇含量 C 为单位质量绝干地黄中梓醇所占的质量分数。为利于建立地黄真空红外辐射干燥的梓醇降解动力学模型,引入一个无因次参数——梓醇含量比,即地黄样品中梓醇的含量与新鲜地黄中梓醇含量的比值,以 C_R 表示,即

$$C_R = \frac{C}{C_0} \tag{3}$$

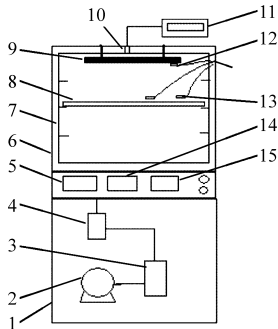


图 1 真空红外辐射干燥试验装置示意图
Fig.1 Diagram of vacuum infrared radiation drying equipment

1. 下箱体 2. 真空泵 3. 干燥罐 4. 电磁阀 5. 温度显示器 6. 上箱体 7. 料架 8. 料盘 9. 远红外加热板 10. 质量传感器 11. 质量显示器 12. 板面温度传感器 13. 物料温度传感器 14. 压力控制器 15. 温度控制器

2 结果与分析

2.1 梓醇提取方法

本文对地黄丁进行超声 + 冷浸的提取方法,即先采用超声波处理,提取物料中大部分的梓醇,然后进行冷浸,缓慢提取物料中难以提取的剩余梓醇。

为确保有充分的冷浸时间将不同含水率地黄中的梓醇提取出来,选取了新鲜地黄和干基含水率为 0.2 的地黄进行提取试验,其中含水率 0.2 的物料采用真空红外辐射干燥获得。将新鲜地黄和含水率 0.2 的地黄切丁后,称取适量并放入锥形瓶中,加入 50 mL 的甲醇,室温下超声提取 30 min,然后静置进行冷浸,定期取出 2 mL 进行检测。

不同冷浸时间对应的梓醇检出量如图 2 和图 3 所示。

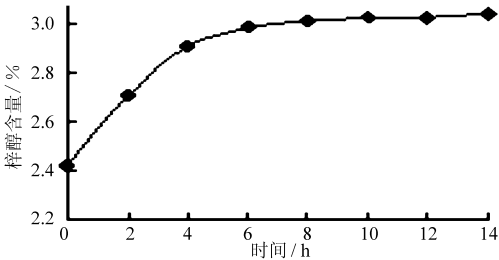


图 2 新鲜地黄丁的梓醇检出量

Fig. 2 Catalpol extraction from fresh *Rehmanniae*

由图可知,新鲜地黄丁在超声处理后就已经提取出了大部分梓醇,在冷浸过程中,由于地黄没有经

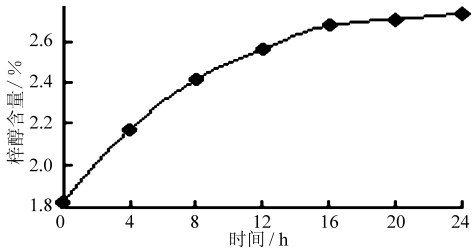


图 3 含水率 0.2 地黄的梓醇检出量

Fig. 3 Catalpol extraction from *Rehmanniae* with 0.2 moisture content

过干燥,其结构保持良好,且利用超声波已经破坏了地黄中植物细胞的细胞壁,因此梓醇较易通过浓度差浸入到提取液中,6 h 后梓醇浸提量变化已经很小了。而含水率 0.2 的地黄由于在干燥过程中脱除了大量水分,发生了较大的收缩^[9],物料中用于传质的毛细管也变形或遭到破坏,导致相同时间超声波提取后,所提取出的梓醇量比率相对较小。此外,冷浸过程中,含水率低的地黄内传质通道不如含水率大的物料,地黄中梓醇的浸出速率相对缓慢,到 16 h 后,浸出的梓醇量才变化较小。冷浸时间应满足所需冷浸时间较长的情况,因此,在地黄真空红外辐射干燥的梓醇降解动力学研究中,确定每批物料在 30 min 超声波提取后,冷浸时间统一为 16 h。

2.2 不同干燥参数下梓醇含量的变化

不同辐射板温度下的地黄中梓醇含量的变化规律,如图 4 所示。

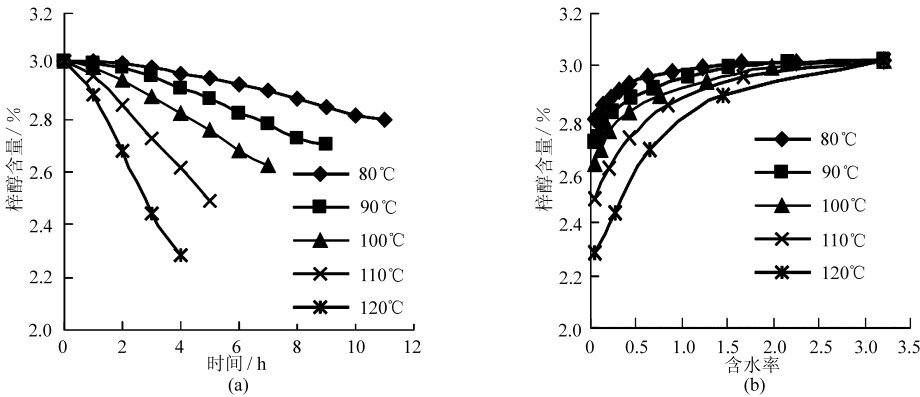


图 4 不同辐射板温度下梓醇含量的变化

Fig. 4 Change of catalpol content at different temperatures of the radiator

(a) 梓醇含量与时间的关系 (b) 梓醇含量与含水率的关系

由图可知,随着干燥的进行,梓醇含量逐渐下降,且辐射板温度低时下降得慢,板温高时下降相对较快。由于物料是在真空条件下进行较低温度的干燥,干燥初期抽真空过程降低了物料的温度,此后,在压力稳定的情况下,物料不断吸收热量,在水分不断蒸发的过程中,物料温度缓慢增加,直至干燥结束^[9]。因此,干燥初期物料的温度很低,所以梓醇

所处的环境为低温环境,从而其降解较为缓慢。随着物料温度的上升,此时地黄仍具有大量水分,地黄中生物活性物质的活性开始增强,同时梓醇与糖类物质的合成反应速率逐渐加快,导致梓醇的降解速率上升。当干燥进行到最后阶段,此时物料中的含水率已经很低了,物料中水分活度大大降低,虽然物料的温度仍在不断升高,但反应赖以进行的环境

发生了变化,因此干燥后期,梓醇含量的下降速率有变缓的趋势。

图 5 给出了干燥过程中,物料温度与梓醇含量的关系。该图表明,尽管不同的辐射板温度有不同的干燥时间,梓醇含量及其变化规律也不同,但在物料温度低于 40℃ 时,梓醇含量的变化规律却相差不大,而在物料温度高于 50℃ 时,其变化规律才有明显差别。在干燥初期的温度较低阶段,物料升温到同一温度时,虽然物料的含水率差别较大,但梓醇含量差别不大,说明在该阶段影响梓醇含量的主要因素为物料温度,而物料中的含水率虽然有所差别,但均满足梓醇降解的水分要求,所以对梓醇的降解速率影响不大。此后物料温度继续上升,但梓醇含量的下降速率开始有差别,说明此时不同物料含水率的影响开始显著了。

在辐射板温度为 100℃ 的条件下,不同干燥室压力下地黄中梓醇含量的变化规律如图 6 所示。由图可知,改变干燥室压力,物料中梓醇含量的变化情况差别不大。由于干燥室压力主要影响物料表面水

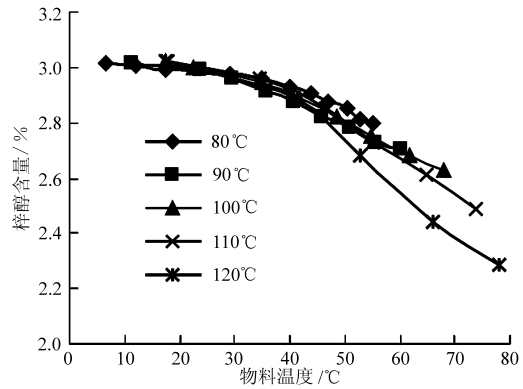
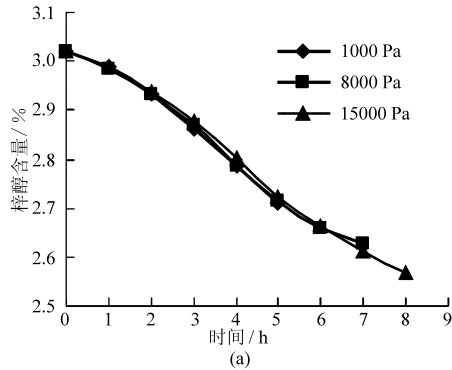


图 5 干燥过程中梓醇含量与物料温度的关系

Fig. 5 Relationship between catalpol content and material temperature during drying

分蒸汽压和室内压力的压差以及蒸发温度^[10],对物料接受辐射板发射的热量以及物料内部的传热没有较大影响,因此导致干燥室内压力对干燥过程中梓醇含量变化的影响有限。干燥室压力的影响主要体现在压力越小对应的干燥时间越短,从而受热时间越短,导致干燥结束时梓醇降解较少。

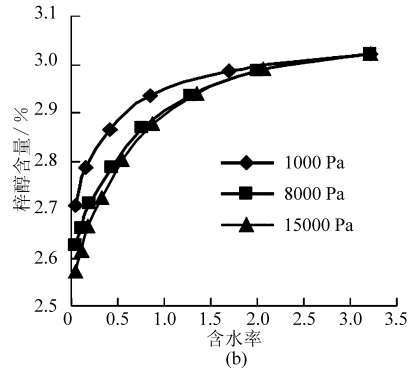


图 6 不同干燥室压力下梓醇含量的变化

Fig. 6 Change of catalpol content under different pressures in the chamber

(a) 梓醇含量与时间的关系 (b) 梓醇含量与含水率的关系

文献[6]中热风干燥的地黄中梓醇降解动力学模型研究结果表明,随着干燥的进行,梓醇降解速率逐渐降低,且其含量变化符合一级反应动力学模型。其原因是热风干燥中,氧气对梓醇降解反应的影响很大,尤其是物料含水率较大的情况。而本试验由于在真空条件下进行,较大程度降低了氧气的影响,因此梓醇含量的变化规律以及降解程度和热风干燥有较大区别。

2.3 梓醇降解动力学模型

本文采用无因次量梓醇含量比 C_R 用于梓醇降解动力学模型的建立。物料中主要成分或有效成分变化动力学的阶数通常为零阶或一阶^[11],其中最常见的为一阶反应动力学。

零阶反应动力学的方程为

$$C_R = -kt \tag{4}$$

可知,若为零阶反应动力学, C_R 应与时间 t 呈线性关系。

一阶反应动力学的方程为

$$\ln C_R = -kt \tag{5}$$

由式可知,若为一阶反应动力学, $\ln C_R$ 应与时间 t 呈线性关系。

分别做出地黄真空红外辐射干燥过程的 $C_R - t$ 和 $\ln C_R - t$ 的关系图,如图 7 和图 8 所示。可知 C_R 、 $\ln C_R$ 与时间均呈非线性关系。究其原因,可能是在干燥过程中,虽然辐射板温度恒定,但物料的温度随着干燥的进行而不断升高,从而物料本身的状态为非稳态,导致梓醇降解速率和时间的关系不是简单的线性或对数关系。

为体现干燥过程中温度变化对梓醇降解的影响,对一阶反应动力学方程进行修正,即对时间参数

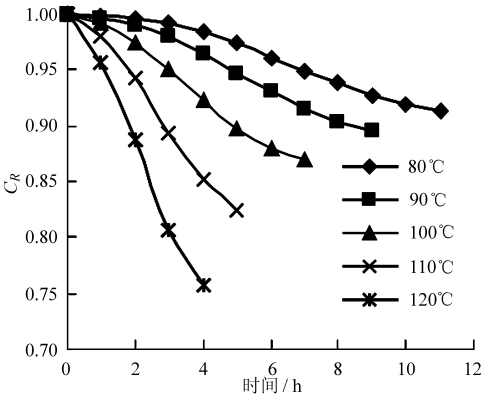


图 7 C_R 和时间的关系

Fig. 7 Relationship between C_R and t

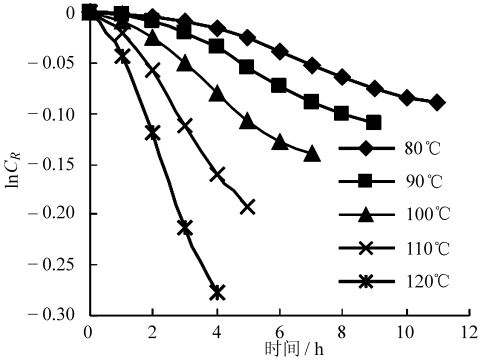


图 8 $\ln C_R$ 和时间的关系

Fig. 8 Relationship between $\ln C_R$ and t

上加一个和温度有关的指数 g_T 。方程形式为

$$\ln C_R = -kt^{g_T} \tag{6}$$

方程两边求对数,可得

$$\ln(-\ln C_R) = \ln k + g_T \ln t \tag{7}$$

由式(7)可知,若满足上式,需 $\ln(-\ln C_R)$ 和 $\ln t$ 呈线性关系。为此,作出 $\ln(-\ln C_R)$ 与 $\ln t$ 的关系图,如图 9 所示。可见 $\ln(-\ln C_R)$ 与 $\ln t$ 呈良好的线性关系,因此,式(7)符合梓醇降解的动力学变化规律。

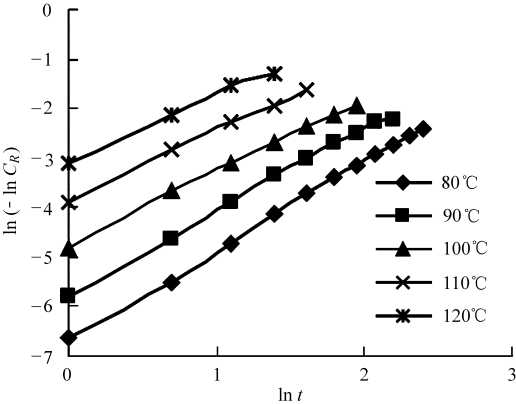


图 9 $\ln(-\ln C_R)$ 和 $\ln t$ 的关系

Fig. 9 Relationship between $\ln(-\ln C_R)$ and $\ln t$

将式(7)连求两次幂,可得

$$C_R = \exp(-kt^{g_T}) \tag{8}$$

其中, k 表示有效成分的降解速率,与干燥温度有关,一般符合 Arrhenius 方程形式^[6],即

$$k = k_0 \exp\left(-\frac{E_A}{RT}\right) \tag{9}$$

式中 k_0 ——系数

E_A ——质量退化活化能, J/mol

R ——通用气体常数, 8.314 J/(mol·K)

T ——辐射板温度, °C

辐射板通过红外辐射对物料提供热量,具有较高的传热效率^[12],该辐射能除了满足水分蒸发所需热量外,还用于物料的加热,而 g_T 则表示辐射板温度在干燥过程中对物料温度的影响。由文献[9]可知,若不考虑干燥初期短暂的抽真空阶段,物料温度在真空红外辐射干燥过程中不断上升,且温度的变化类似于二次方程的曲线变化,所以 g_T 可采用二次方程表示,即

$$g_T = b_1 + b_2 T + b_3 T^2 \tag{10}$$

将 k 和 g_T 代入式(8),可得

$$C_R = \exp\left(-k_0 \exp\left(-\frac{E_A}{RT}\right) t^{b_1 + b_2 T + b_3 T^2}\right) \tag{11}$$

式(11)即为地黄真空红外辐射干燥过程中梓醇降解动力学模型。

2.4 模型参数的确立

将式(11)连求两次对数,可得

$$\ln(-\ln C_R) = \ln k_0 - \frac{E_A}{RT} + g_T \ln t =$$

$$a_1 + \frac{a_2}{T} + (b_1 + b_2 T + b_3 T^2) \ln t \tag{12}$$

若求出不同辐射板温度下的 $\ln(-\ln C_R)$ 和 $\ln t$ 线性方程,斜率即为 g_T ,截距即为 $\ln k = \ln k_0 - \frac{E_A}{RT}$ 。作出 $\ln k$ 和 $1/T$ 的关系图,如图 10 所示,求线性回归方程,可求出 a_1 和 a_2 分别为 4.016 1 和 -866.45, R^2 为 0.991 8。作出 g_T 和 T 的关系图,如图 11 所示,对曲线进行二次非线性拟合,可得 b_1 、 b_2 和 b_3 分别为 4.769 6、-0.053 7 和 0.000 2, R^2 为 0.987 1。

将求出的参数代回模型方程并进行整理,可得

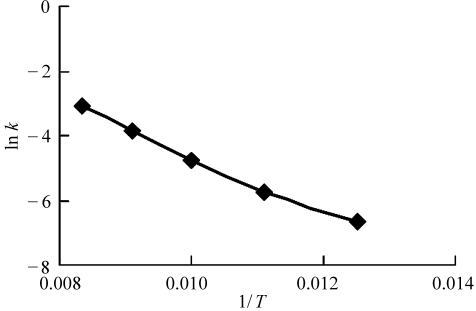


图 10 $\ln k$ 和 $1/T$ 的关系

Fig. 10 Relationship between $\ln k$ and $1/T$

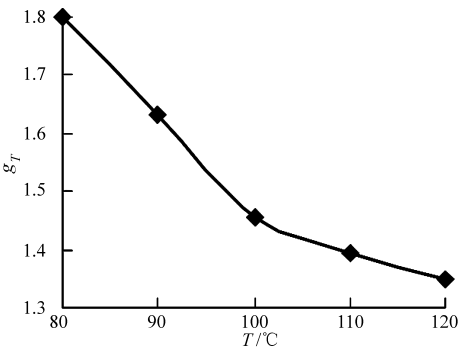


图 11 g_T 和 T 的关系

Fig. 11 Relationship between g_T and T

$$C_R = \exp \left(-55.484 \times \exp \left(-\frac{866.45}{T} \right) t^{4.7696 - 0.0537T + 0.0002T^2} \right) \quad (13)$$

式(13)即为地黄真空红外辐射干燥中梓醇降解动力学方程。

2.5 模型方程的验证

为检验该模型和试验值的拟合精度,作出不同辐射板温度下的 C_R 的模型计算曲线和试验值,如图 12 所示。可见,辐射板温度为 80、90 和 100℃ 时,模型值和试验值具有良好的拟合关系,而 110℃ 和 120℃ 时,在干燥的后期,模型值和试验值有一定偏差。总之,模型方程可以较好地表示地黄真空红外辐射干燥的梓醇降解动力学变化规律。

3 结论

(1) 由于地黄真空红外辐射干燥的梓醇降解动

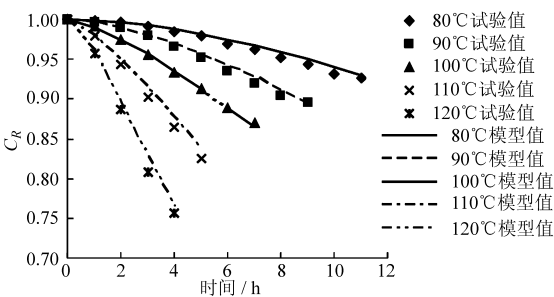


图 12 试验值和模型值的比较

Fig. 12 Comparison between experimental data and modeling data

力学研究中,要处理不同含水率的地黄,因此,设计了将待测样品切成丁后进行超声 + 冷浸的梓醇提取方法。

(2) 试验结果表明,地黄真空红外辐射干燥中梓醇降解动力学不符合零级和一级反应动力学。通过对一级反应动力学方程引入一个和温度有关的参数 g_T ,并假设降解速率参数 k 符合 Arrhenius 方程,得到了梓醇在真空红外辐射干燥过程中的降解动力学模型方程为

$$C_R = \exp \left(-55.484 \times \exp \left(-\frac{866.45}{T} \right) t^{4.7696 - 0.0537T + 0.0002T^2} \right)$$

(3) 通过模型值和试验值的比较,可知该模型方程可以较好地表示真空红外辐射干燥中梓醇降解动力学变化规律。

参 考 文 献

1 杨宏顺, 冯国平, 李云飞. 嫩茎花椰菜在不同气调贮藏下叶绿素和维生素 C 的降解及活化能研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(4): 172 ~ 175.
Yang Hongshun, Feng Guoping, Li Yunfei. Contents and apparent activation energies of chlorophyll and ascorbic acid of broccoli under controlled atmosphere storage[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(4): 172 ~ 175. (in Chinese)

2 佟懿, 谢晶. 鲳鱼品质变化动力学模型的实验研究[J]. 上海理工大学学报, 2009, 31(5): 489 ~ 495.
Tong Yi, Xie Jing. Experimental research on kinetic model of pomfret[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2009, 31(5): 489 ~ 495. (in Chinese)

3 刘丽媛, 谢晶, 励建荣. 预测南美白对虾品质变化的动力学模型的建立[J]. 食品工业科技, 2009, 30(6): 278 ~ 281.
Liu Liyuan, Xie Jing, Li Jianrong. Building of the kinetics model for prediction of the quality change of *Penaeus vannamei* Boone[J]. Science and Technology of Food Industry, 2009, 30(6): 278 ~ 281. (in Chinese)

4 Lau M H, Tang J, Swanson B G. Kinetics of textural and color changes in green asparagus during thermal treatments[J]. Journal of Food Engineering, 2000, 45(4): 231 ~ 236.

5 Wu L, Orikasa T, Ogawa Y, et al. Vacuum drying characteristics of eggplants[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 83(3): 422 ~ 429.

6 任迪峰. 中药材干燥过程中品质退化及优化干燥工艺的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2002.

7 朱文学. 中药材干燥原理与技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.

8 刘云宏, 朱文学, 马海乐. 地黄真空红外辐射干燥模型[J]. 农业机械学报, 2010, 41(1): 122 ~ 126.
Liu Yunhong, Zhu Wenxue, Ma Haile. Modeling of vacuum infrared radiation drying on *Rehmanniae* [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(1): 122 ~ 126. (in Chinese)

Wu Yan, Qu Bo. Application of quantum-inspired genetic algorithm in human face image segmentation [J]. Science and Technology of West China, 2008,7(30): 25 ~ 26. (in Chinese)

7 王克俊. 基于模板法的苹果图像与背景快速分离技术的研究[J]. 黑龙江科技信息, 2009(8): 38.

8 李元金, 高维春, 王精明. 车牌识别技术中字符切割新算法. [J]. 深圳信息职业技术学院学报, 2007, 5(1): 32 ~ 34.
Li Yuanjin, Gao Weichun, Wang Jingming. A novel approach for character segmentation in basing on the image processing auto-recognition [J]. Journal of Shenzhen Institute of Information Technology, 2007, 5(1): 32 ~ 34. (in Chinese)

9 张静, 王双喜. 温室植物病害图像处理技术中图像分割方法的研究[J]. 内蒙古农业大学学报: 自然科学版, 2007, 28(3): 20 ~ 22.
Zhang Jing, Wang Shuangxi. A study on the segmentation method in image processing for plant disease of greenhouse [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University: Natural Science Edition, 2007, 28(3): 20 ~ 22. (in Chinese)

10 庞新华, 朱文泉, 潘耀忠, 等. 基于高分辨率遥感影像的耕地地块提取方法研究[J]. 测绘科学, 2009, 34(1): 48 ~ 49.
Pang Xinhua, Zhu Wenquan, Pan Yaozhong, et al. Research on cultivated land parcel extraction based on high-resolution remote sensing image [J]. Science of Surveying and Mapping, 2009, 34(1): 48 ~ 49. (in Chinese)

(上接第 177 页)

9 刘云宏. 中药材真空红外辐射干燥试验研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2010.

10 徐成海, 张世伟, 关奎之. 真空干燥[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.

11 朱文学. 食品干燥原理与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009.

12 王相友, 操瑞兵, 孙传祝. 红外加热技术在农业物料加工中的应用[J]. 农业机械学报, 2007, 38(7): 177 ~ 182.
Wang Xiangyou, Cao Ruibing, Sun Chuanzhu. Application of infrared radiation technology on processing agriculture biological materials [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(7): 177 ~ 182. (in Chinese)