

基于传热学原理研究中药材干燥 数学模型及参数分析*

□熊耀坤

(江西中医学院科研处 南昌 330004)

(上海中医药大学中药现代制剂技术教育部工程研究中心 上海 201203)

何 雁(江西中医学院计算机学院 南昌 330004)

黄 恺(江西中医学院中药固体制剂制造技术国家工程研究中心 南昌 330004)

杜 焰 冯 怡**

(上海中医药大学中药现代制剂技术教育部工程研究中心 上海 201203)

摘 要:目的:建立中药材干燥数学模型,为优化干燥工艺提供理论依据。方法:运用传热学原理,探求中药材干燥过程中影响因素及能量变化过程,建立中药材干燥数学模型,并对参数进行分析。结果:现有中药材的干燥研究多为经验知识的总结,在干燥方法、工艺及设备的选择上存在很大的盲目性。本文量化了中药材干燥过程,建立起中药材干燥数学模型,建立起干燥条件参数:热传导参数 C 、热辐射参数 D 、为热交换参数 E ,用于评价干燥设备的干燥性能;建立起干燥物性参数:孔隙率 Φ 、比热 C_p 、药材表面积 S 等,用于评价药材可干燥能力。结论:加强中药材干燥基础理论的研究,为选择合理的干燥方法、设备及工艺参数,提高干燥效率,降低能耗提供了新的方法和思路。

关键词:中药材 干燥 数学模型 Clausius-Clapeyron 方程

doi: 10.3969/j.issn.1674-3849.2012.06.015

随着世界范围内“回归自然”的呼声日益高涨,人们对自然药物、中草药等传统药物需求不断增加,这给我国中医药事业的发展带来了前所未有的机遇^[1]。我国土地辽阔,蕴藏着极其丰富的中草药天然资源,其中药材种类及其蕴藏量是世界之最,然而近些年由于质量问题,我国中药材在国际、国内市场上屡受

诟病,严重影响中药现代化及其推广应用。当前我国中药产业面临的主要问题,如中药疗效问题、质量标准问题和安全性问题,其源头多是中药材的质量问题^[2],特别是提倡中医药理论指导中药发展的今天,从源头控制中药材的质量问题显得尤为重要。除与产地、采收时间等有关外,干燥是影响中药材质量的一个非常重要的因素,干燥的好坏将直接影响产品的使用、质量和外观等^[3]。

收稿日期:2012-02-19

修回日期:2012-04-09

* 科学技术部国家“重大新药创制”科技重大专项(2009ZX09502-009):中药制剂物理改性技术研究,负责人:冯怡,江西省教育厅科技项目(GJJ11188)基于含湿多孔介质传热传质理论的中药材干燥机制的研究,负责人:熊耀坤。

** 通讯作者:冯怡,教授,主要研究方向:中药新剂型及关键技术研究,Tel:021-51322491,E-mail:fyi@vip.sina.com。

一、中药材干燥研究现状

中药材的干燥问题一直是困扰中药材质量的关键问题,目前对于中药材干燥工艺、方式和设备研究较多。当前,中药材干燥分为自然干燥和人工干燥两大类^[4,5],其中自然干燥是指在自然环境条件下进行干燥的方法,如晒干、风干和阴干等。自然干燥方法虽然简单,但受气候的影响较大,干燥周期长,劳动强度大,容易受到污染,干制品的质量较低。因此,在工业化干燥中,大多采用人工干燥的方法,最常见的人工干燥方法是烘干,包括烘房烘干和采用热风干燥机烘干,烘干法接触面积大,物料受热均匀,处理能力大,热效率较高,对保持药性有所改善,但难于适应各种规格中草药干燥,适宜处理粉粒状物料,不适用于易粘结或结块的物料^[6]。随着科技的发展,一些新的干燥设备,如气流干燥机、回转滚动干燥机、真空干燥机、红外线干燥器、静电干燥机、冷冻干燥机等被应用到中药材的干燥过程中^[7,8],新型人工干燥方法和干燥设备的运用,大大提高中药材干燥的效率,缩短周期,可控制性更强,通过这些新型干燥技术干燥出来的中药材品质较好,有效成分损失少,对于解决中药材干燥问题具有非常大的促进作用。但由于设备投资大,能耗高,提高了生产成本,无法达到大规模推广。因此,在目前的社会经济条件下无法应用到工业化生产当中,特别不适合中药材收获后的及时干燥,并且中药材的干燥在中药材加工过程当中只是一道初加工工序,干燥成本不宜太高^[9,10]。因此,如何针对不同中药材的干燥特性、干燥程度、干燥目的等要求选用不同的干燥方法、工艺和设备,以低能耗、低成本干燥出高品质的中药材,是中药生产过程中亟待解决的一个问题。

从目前情况来看,现有的中药材干燥研究多为经验知识的总结,关于中药材干燥特性与影响因素深入系统的研究未见报道,缺乏了解中药材干燥的基本过程与特性,未建立起适合中药材干燥特性的数学模型,对中药材干燥的了解仍停留在直观描述和猜测的感性认识阶段,难以形成共性技术,推广应用有一定困难,在干燥方法、工艺及设备的选择上存在很大的盲目性。研究中药材干燥的基础理论,探索中药材的干燥机制和规律,量化中药材干燥过程,进而从理论指导中药材干燥,为实际生产提供理论依据及技术参数,可提供一个新的方法和思路。

二、中药材干燥过程的理论探求

中药材的干燥过程实际上是与环境进行能量交换的过程,根据能量守恒定律,本文立足于中药材干燥过程的始态与终态能量的变化情况,建立干燥过程中干燥量和体系状态函数之间的关系,从总体上研究不同影响因素对中药材干燥的变化,借鉴传热学、食品科学、材料学及高等数学方面的知识,在中药材干燥理论方面做了一些探索^[11-15],以为中药材干燥提供新的研究思路和方法。

把中药材作为一个干燥体系,能量转换一般包括以下几个方面:热传导、热对流和热辐射。

一个体系的能量流动可用下式表示:

$$q = q(\text{热传递}) + q(\text{热交换}) + q(\text{热辐射}) \quad (1)$$

热传导可用 Fourier 定理:

$$q(\text{热传递}) = -a \frac{dT}{dx} \quad (2)$$

$$q(\text{热交换}) = -WC_p(T_c - T_s) \quad (3)$$

$$q(\text{热辐射}) = \sigma e(T_s^4 - T_c^4) \quad (4)$$

式中, W 是热传递速率, C_p 是热容量。 T_c 是环境中的温度, T_s 是中药材表面的温度, σ 是 Boltzmann 常数, e 表示辐射率。

因此,表面积为 A 中药材周围的能量流动可用以下方程表示:

$$q = A \left[-a \frac{dT}{dx} - WC_p(T_c - T_s) + \sigma e(T_s^4 - T_c^4) \right] \quad (5)$$

当体系趋于平衡时 $q_{in}(\text{热传递}) = q_{out}(\text{热传递})$

$$\text{对传递距离 } x \text{ 求导, } \frac{dT}{dx} = 0 \quad (6)$$

将 Fourier 方程 $q_{in}(\text{热传递}) = -a \frac{dT}{dx}$ 代入(6)得:

$$\alpha \frac{d^2T}{dx^2} = 0 \quad (7)$$

当界面的条件表示为: R_s 表示表面半径、 T_s 表示表面温度、 R_c 表示系统的半径、 T_c 表示系统温度,将式(7)对 $(T_s - T_c)$ 和 $(R_s - R_c)$ 区段进行积分后的:

$$T = \frac{T_s - T_c}{x/R_s - x/R_c} - \frac{T_s - T_c}{1 - R_s/R_c} + T_s \quad (8)$$

当中药材表面温度变化很小时可以认为 $x = R_s$, 将式(8)微分后得:

$$\frac{dT}{dx} = -(T_s - T_c) \frac{R_s R_c}{R_s^2 (R_s - R_c)} \quad (9)$$

将式(9)代入式(5)可得:

$$q=A[a(T_s-T_c)\frac{R_c}{R_s^2-R_sR_c}+WC_p(T_s-T_c)+\sigma e(T_s^4-T_c^4)] \quad (10)$$

假使能量的损失基本上转化为了水蒸气液化热,既在中药材干燥过程中能量的变化实际上就等于干燥量和水蒸气汽化热的积,即:

$$q=M\Delta H \quad (11)$$

式中, M 为水分蒸发量, ΔH 为水蒸气的汽化热。

因为 $R_c \gg R_s$, 所以式(10)又可以写成:

$$M=A[\frac{a(T_s-T_c)}{R_s}+WC_p(T_s-T_c)+\sigma e(T_s^4-T_c^4)]/\Delta H \quad (12)$$

根据 Clausius-Clapeyron 方程

$$\frac{dp}{dT}=\frac{\Delta H_m}{T\Delta V_m} \quad (13)$$

由式方程推导,我们得出:

$$\Delta H=\frac{RT_2T_1}{T_2-T_1}\ln\frac{a_{w^2}}{a_{w^1}}=\frac{RT_2T_1}{T_2-T_1}\ln\frac{RH_c}{RH_0} \quad (14)$$

式中, $T_2=T_s, T_1=T_c$, 将式(14)代入到(12)中:

$$M=\frac{A}{R}[a\frac{(T_s-T_c)^2}{T_cT_sR_s}+WC_p\frac{(T_s-T_c)^2}{T_cT_s}+\sigma e\frac{(T_s^4-T_c^4)(T_s-T_c)}{T_cT_s}]\ln\frac{RH_c}{RH_0} \quad (15)$$

由于上式太过复杂,我们可将其简化,即令:

$$C=\frac{\alpha(T_s-T_c)^2}{T_cT_sR_s} \quad (16)$$

$$D=\sigma e\frac{(T_s^4-T_c^4)(T_s-T_c)}{T_cT_s} \quad (17)$$

$$E=C_p\frac{(T_s-T_c)^2}{T_cT_s} \quad (18)$$

则可简化下式:

$$M=[C+D+E]\frac{A}{R}\ln\frac{RH_c}{RH_0} \quad (19)$$

多数中药材为属于植物性药材,从组成结构上来说,多含纤维素、树胶等高分子多孔性物质,在形态上属于为多孔性介质,其干燥特性亦有所不同,其表面积 A 除了与药材表面面积 S 有关,还与药材内部空隙的表面积 S_b 有关,既 $A=S+S_b$, 根据柯兹奈-卡尔曼方程式^[16, 17]:

$$S_b=\sqrt{\frac{10^8\Phi^3}{S_{hf}\tau k}} \quad (20)$$

式中, Φ 为孔隙率; k 为渗透率(达西); S_{hf} 为形状因子; τ 为曲折度;对于给定中药材来说, S_{hf} 和 τ 均为

固定值,引入形状参数 K ,令 $K=\sqrt{\frac{10^8}{S_{hf}\tau}}$,将式(20)

整理后代入式(19)中,我们得到:

$$M=\frac{[C+D+E]}{R}\ln\frac{RH_c}{RH_0}\left(K\sqrt{\frac{\Phi^3}{k}}+S\right) \quad (21)$$

式中 M 为干燥量; R 为理想气体常数; C 为热传导参数; D 为热辐射参数; E 为热交换参数; Φ 为孔隙率; k 为渗透率; K 为形状参数; S 为药材的外面积为环境中的相对湿度,为中药材表面饱和溶液的相对湿度。

从中药材干燥数学模型我们可以看出,中药材的干燥量除了与干燥条件参数有关,还与中药材本身的物性参数有关,具体可表述如下:

1、中药材表面与环境之间温度差(T_s-T_c)相距越大,热传导参数 C 、热辐射参数 D 、热交换参数 E 也就越大,干燥量 M 也就越大。

2、环境与中药材表面的之间的湿度比($\frac{RH_c}{RH_0}$)越大,干燥量 M 也就越大。

3、中药材的比热(C_p)越大,热交换参数 E 越大,干燥量 M 就越大。

4、中药材本身属于多孔性介质,其孔隙率 Φ 越大,内部比表面 S_b 也随之增大,中药越不规则,形状参数 K 越大,外面积 S 越大,相应的干燥量 M 就越大。

5、中药质地越紧密,越结实,水分越不容易渗透,其渗透率 k 也越大,干燥量就越小。

在干燥预测数学模型中,我们引入热传导参数 C 、热辐射参数 D 和热交换参数 E 来量化在干燥过程中干燥设备对中药材干燥的影响,测定不同干燥条件下的热传导参数 C 、热辐射参数 D 、热交换参数 E ,可用来评价该干燥设备的干燥性能。应当指出,该模型是在干燥过程中能量只转化为水蒸气液化热理想状况下进行推导的,在实际运用中,还需引入一个校正因子,公式的适用性尚有待检验。

三、展 望

本文分析了现行中药材干燥研究存在的问题和不足,强调加强对中药材基础理论研究对解决中药材实际生产干燥问题的重要性,尝试性地提出了运用传热学原理研究中药材干燥问题,通过建立中药材干燥数学模型,量化干燥过程,进而从理论指导中药材干燥,为实际生产提供理论依据及技术参数,为提高中药材干燥效率提供了新的方法和思路。在前期实验中,本课题组采用静力学法,在其他参数不变的情况下,考察了丹参、三七在不同温度,不同相对湿度下干燥量的变化,用所测干燥量实验数据对该数学模型进

行拟合,用统计软件 SPSS11.5 进行“Nonlinear Regression”,得到丹参、三七干燥数学模型下的预测值和实测值具有较好的拟合度,但拟合度随着湿度的增加而变差,初步的解释是随着湿度的增加,空气中水分子之间作用力凸显造成的,课题组拟综合多个药材实验结果,进一步考察不同湿度条件下模型的适用性,并考察其他参数对模型的影响,通过统计软件评价各影响因素对中药材干燥量影响力的大小。目前本课题组已将该模型用于川芎、杜仲、薄荷、红花、枳实、冰片等多种不同种类、不同质地、不同来源的中药材干燥研究,相关详细研究结果另文报道。

参考文献

- 1 杨峻山.中药与天然药物新药研发的思考.第五届全国药用植物和植物药学术研讨会论文集.2005:4~9.
- 2 陆善旦.中药材质量现状及提高措施.中药研究与信息,2002,4(5):33~36.
- 3 陈平,刘小平,陈新,等.中药制药工艺与设计.北京:化学工业出版社,2009:155.
- 4 潘永康.现代干燥技术.北京:化学工业出版社,1998:14~18.
- 5 葛仕福.现代干燥理论与技术简评.化工装备技术,2004,25(2):19~22.
- 6 桑迎迎,周国燕,王爱民,等.中药材干燥技术研究进展.中成药,2010,32(12):2140~2143.
- 7 任迪峰,毛志怀.我国中草药干燥的现状与发展趋势.农业工程学报,2001,17(2):5~7.
- 8 田晓亮,孙晖.对中药干燥工艺与设备的研究与探讨.中国制药装备,2006(6):10~12.
- 9 闫泽华,张仲欣.中药材干燥的现状与发展趋势.农产品加工(学刊),2008,10(2):39~42.
- 10 邱天尧,邱军.中药材干燥的相关问题.黑龙江医学,2001,5(25):338~339.
- 11 Adamiec J, Kamiński W, Markowski AS. Drying of biotechnological products. Handbook of Industrial Drying, Marcel Dekker, New York, 1995:905~931.
- 12 Holman JP. Heat Transfer (4th ed.). McGraw Hill, New York, 1976:148~154.
- 13 张靖周.传热学.北京:科学出版社,2009.
- 14 刘彬,卢荣.物理化学.武汉:华中科技大学出版社,2008:204~210.
- 15 Luikov AV, Teoriya S, et al. Dry ceereal grains. Int J Heat Mass Tran, 1974,11(2):154~158.
- 16 GV Chilingar, Richard Main. relationship between porosity, permeability and surface areas of sedimentary. petrology, 1963,9(33):759~765.
- 17 徐鹏,邱淑霞.各向同性多孔介质中 Kozeny-Carman 常数的分形分析.重庆大学学报,2011,4(34):78~80.

Studies on Drying Mathematic Model of Chinese Herbal Medicine and Parameter Analysis by Heat Transfer Theory

Xiong Yaokun^{1, 2}, He Yan³, Huang Kai⁴, Du Yan², Feng Yi²

(1. Management Office of Scientific Research of Jiangxi University of Traditional Chinese Medicine, Nanchang 330004, China;

2. Engineering Research Center of Modern Preparation Technology of Traditional Chinese Medicine, Ministry of Education, Shanghai University of Traditional Chinese Medicine, Shanghai 201203, China;

3. Computer College of Jiangxi University of Traditional Chinese Medicine, Nanchang 330004, China;

4. National Pharmaceutical Engineering Center for Solid Preparation in Chinese Herbal Medicine, Jiangxi University of Traditional Chinese Medicine, Nanchang 330004, China)

Abstract: This study was aimed to establish the drying mathematical model of Chinese herbal medicine. The energy changes and influence factors were studied in the process of Chinese herbal medicine dried by thermodynamic theory. The Chinese herbal medicine drying mathematical model and analysis of the parameters ere established. The results showed that the existing drying research of Chinese herbal medicine is the summary of experienced knowledge. There is a big blindness in the choice of the drying method, process and equipment. We quantized the process of drying, and established Chinese herbal medicine drying mathematical model. The established parameters of the external environment are the heat conduction parameter C , the thermal radiation parameter D , and heat exchange parameters E . These parameters reflect the drying efficiency of the drying equipment. The established parameters of medicinal properties are the porosity Φ , specific heat C_p , herbs surface area S . These parameters reflect the herb drying capacity. It was concluded that the strengthening of basic theory study on Chinese herbal medicine drying will provide new methods and ideas for the reasonable selection of drying methods, processes and equipments. Therefore, the drying efficiency will be improved and the energy consumption will be reduced.

Keywords: Chinese herbal medicine, drying, mathematical model, Clausius-Clapeyron equation

(责任编辑 李沙沙 张志华, 责任译审 王 晶)