

当归切片远红外干燥特性及动力学研究

李武强¹, 万芳新¹, 罗 燕¹, 韦 博², 黄晓鹏^{1*}

1. 甘肃农业大学机电工程学院, 甘肃 兰州 730070

2. 酒泉奥凯种子机械股份有限公司, 甘肃 酒泉 735000

摘 要: **目的** 以当归切片为研究对象, 探索当归切片的远红外干燥特性及动力学模型, 为提高干制品品质, 建立当归科学适宜的产地加工方法提供理论依据。**方法** 将远红外加热技术应用于当归切片干燥, 研究不同干燥温度、切片厚度和辐照高度条件下, 当归切片的远红外干燥特性和干制品品质的变化规律, 并利用 Weibull 函数拟合干燥曲线, 建立试验因素和模型参数的定量关系。**结果** 随着干燥温度的增加, 切片厚度和辐照高度的降低, 水分比明显减小, 干燥速率显著增加; 当归切片的远红外干燥过程服从 Weibull 分布函数 ($R^2=0.983\ 34\sim0.999\ 34$, $\chi^2=0.001\ 3\sim0.006\ 5$), 尺寸参数和形状参数均与干燥温度、切片厚度和辐照高度有关; 估算水分扩散系数 (D_{cal}) 的区间为 $4.698\times10^{-11}\sim2.084\times10^{-10}\ \text{m}^2/\text{s}$, 有效水分扩散系数 (D_{eff}) 的区间为 $3.891\times10^{-9}\sim2.179\ 2\times10^{-8}\ \text{m}^2/\text{s}$, 均随着干燥温度和切片厚度的增加, 辐照高度的减少, 总体呈现上升的趋势; 与热风干燥的干制品相比, 远红外干制品的色差值和水活度更小, 更容易保留当归中的阿魏酸和挥发油; 对不同干燥条件下干制品微观结构的扫描电镜分析发现, 远红外可以增加当归切片内部的微孔数量, 细胞排列更加整齐, 增加了干燥过程的热质迁移速率, 缩短了干燥时间。**结论** Weibull 分布函数可预测当归切片干燥过程的水分迁移规律, 对于当归切片干燥过程的预测和工艺优化具有重要意义。

关键词: 当归切片; 远红外干燥; 干燥特性; Weibull 分布函数; 水分扩散系数

中图分类号: R286.1

文献标志码: A

文章编号: 0253-2670(2019)18-4320-09

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2019.18.010

Far infrared drying characteristics and kinetics of *Angelicae Sinensis Radix* slices

LI Wu-qiang¹, WAN Fang-xin¹, LUO Yan¹, WEI Bo², HUANG Xiao-peng¹

1. College of Mechanical and Electromechanical Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China

2. Jiuquan Okay Seed Machinery Co., Ltd., Jiuquan 735000, China

Abstract: Objective Taking *Angelicae Sinensis Radix* (ASR) slices as the research object, the far infrared drying characteristics and kinetic model of ASR slice were explored, which provided a theoretical basis for improving the quality of dry products and establishing a suitable processing method. **Methods** The far-infrared drying technique was applied to the drying of ASR. The far-infrared drying characteristics and dry product quality of ASR were studied under different drying temperature, slice thickness and irradiation height, and the Weibull function was used to fit the drying curve. The quantitative relationship between test factors and model parameters were established. **Results** With the increase of drying temperature and the decrease of the slice thickness and the irradiation height, the water ratio was decreased significantly, and the drying rate was increased significantly. The far-infrared drying process of the ASR slice obeyed the Weibull distribution function ($R^2=0.983\ 34\sim0.999\ 34$, $\chi^2=0.001\ 3\sim0.006\ 5$), both the size parameter and the shape parameter were related to the drying temperature, slice thickness and irradiation height; The interval for estimating the water diffusion coefficient (D_{cal}) was $4.698\times10^{-11}\sim2.084\times10^{-10}\ \text{m}^2/\text{s}$. The effective moisture diffusion coefficient (D_{eff}) was in the range of $3.891\times10^{-9}\sim2.179\ 2\times10^{-8}\ \text{m}^2/\text{s}$, both of which tended to increase with the increase of drying temperature, slice thickness and irradiation height. Compared with dry products from hot-air drying, the color difference and water activity of far infrared drying were smaller, and it was easier to retain ferulic acid and volatile oil in ASR. Scanning electron microscopy analysis of the microstructure of dry products under different drying conditions showed that far infrared increased the interior of ASR slices. The number of micropores was

收稿日期: 2019-05-22

基金项目: 甘肃省科技重大专项 (2060404); 甘肃农业大学科技创新基金—学科建设基金项目 (GSAU-XKJS-2018-187)

作者简介: 李武强, 男, 硕士研究生, 研究方向为农产品加工技术与装备。Tel: 18894311850 E-mail: gsaulw@163.com

*通信作者 黄晓鹏, 教授, 研究方向为农产品加工技术与装备。Tel: 13893159327 E-mail: huangxp@gsau.edu.cn

increased, the cells were arranged more neatly, so as to increase the rate of thermal mass migration during the drying process and reduce the drying time. **Conclusion** The Weibull distribution function can predict the water migration law of the drying process of ASR. It is of great significance for the prediction of the drying process of ASR and the process optimization.

Key words: *Angelicae Sinensis Radix* slices; far infrared drying; drying characteristics; Weibull distribution function; water diffusion coefficient

当归 *Angelicae Sinensis Radix* 是多年生伞形科植物,其根具有补血活血、调经止痛和抗癌等功效,主要分布于甘肃、云南和四川等地,以甘肃岷县所产为上乘,称“岷归”或“西当归”^[1-3]。岷归的产地加工常用的干燥方法有晒干、阴干和熏制等方法,但存在干燥时间长,有害物质残留多和中药饮片药效低等不足^[4-6]。因此,探索当归科学适宜的产地加工方法具有重要的意义。

目前根茎类中药材常见的干燥方式有热风、微波、真空冷冻和气流冲击等方式。孙庆运等^[7]通过真空干燥试验研究了不同干燥条件下黄芪的干燥特性,并对干制品吸湿度和色泽的变化进行了分析。邱亚磊等^[8]以党参的有效成分为指标考察了不同的产地加工方法。燕晓辉^[9]以人参片的色泽、复水比和有效成分为目标参数进行热风与微波真空干燥的优化试验,确定了最佳的工艺条件。段素敏等^[10]对采用热风-微波联合干燥的当归进行了质量评价研究,得出了适宜的干燥工艺。远红外干燥,通过发射频率与物料内部水分固有频率相匹配产生共振进行加热,具有干燥速度快、干燥均匀和生产效率高优点,目前已应用于胡萝卜、金银花和柠檬片等果蔬的干燥,但针对根茎类中药材中的研究相对较少^[11-14]。

干燥是通过加热将水分从细胞微孔和间隙中传递出来,是一个复杂的热质传递过程。使用数学模型对数据进行拟合,不仅能描述干燥过程,对后期干燥工艺的选择也具有指导作用。常见的干燥数学模型有 Page、Two-term、Weibull 和神经网络等^[15-22]。Weibull 分布函数用于模拟干燥过程时,干燥系数与干燥方式可以有效结合,能够加深对物料干燥机制的了解。

目前,Weibull 分布函数已应用于茯苓、党参和枸杞等中药材的干燥中^[23-26],但利用其模拟当归切片干燥过程的研究鲜有报道。本研究拟采用远红外干燥技术研究干燥时间、切片厚度和辐照高度对当归切片干燥特性的影响,并利用 Weibull 分布函数描述干燥过程,以期远红外干燥技术在中药材深

加工中的应用提供理论参考。

1 仪器与材料

1.1 仪器

YHG-300-S 型远红外快速恒温干燥箱,上海博泰实验设备有限公司,额定功率 1.6 kW,远红外发生器:板式碳化硅;Agilent 1100 高效液相色谱仪,美国安捷伦公司;YQ101-0A 型数显电热鼓风干燥箱,北京宇勤腾达制药设备有限公司,额定功率 1.3 W;AUW 220D 型电子天平,日本岛津公司,0.1 mg;CR-10 型色差仪,日本柯尼卡美能达公司;HD-3A 型智能水分活度测量仪,无锡市华科仪器仪表有限公司;S-3400 N 扫描电子显微镜,日本 Hitachi 公司;DXF-4D 型粉碎机,广州市大祥电子机械设备有限公司;自制切片机。

1.2 材料

实验所用当归〔经甘肃农业大学陈垣教授鉴定为伞形科当归属植物当归 *Angelica sinensis* (Oliv.) Diels. 的根〕购于甘肃宕昌中药材专业合作社,购回后立即于 2~4 ℃ 的冰箱中冷藏。样品平均长度 (120±5) mm,直径为 (37±3) mm,选择外表无损伤、无腐烂,尺寸相当的样品作为实验材料。

当归切片初始含水率的测定参照 GB5009.3-2016《食品中水分的测定方法》^[27]中的恒温干燥法,测得新鲜物料的平均湿基含水率为 (56.26±0.50)%。

2 方法与结果

2.1 干燥参数的计算

2.1.1 干基含水率 (M_t) 的测定 M_t 按公式 (1) 计算。

$$M_t = (m_t - m_0) / m_0 \quad (1)$$

m_t 为 t 时刻当归切片的质量, m_0 为当归切片干物质的质量

2.1.2 水分比 (MR) 的计算 不同干燥时间条件下当归切片的 MR 按公式 (2) 计算。

$$MR = M_t / M_0 \quad (2)$$

M_t 为 t 时刻当归切片的 M_t , M_0 为当归切片的初始 M_t

2.1.3 干燥速率 (DR) 的计算 DR 按公式 (3) 计算。

$$DR = (M_{t_1} - M_{t_2}) / (t_2 - t_1) \quad (3)$$

DR 为当归切片的干燥速率, t_1 、 t_2 为任意干燥时刻, M_{t_1} 、 M_{t_2} 为 t_1 、 t_2 时刻当归切片的干基含水率

2.1.4 模型分析 Weibull 分布函数表达式由公式(4)表示^[28]。

$$MR = \exp[-(t/\alpha)^\beta] \quad (4)$$

α 、 β 为与干燥介质有关的经验常数, α 为尺度参数, β 为形状参数, t 为干燥时间

数学模型拟合的优劣用决定系数 (R^2) 和离差平方和 (χ^2) 表示, 公式如下。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{\text{exp},i} - MR_{\text{pre},i})^2}{\sum_{i=1}^N (\overline{MR_{\text{exp},i}} - \overline{MR_{\text{pre},i}})^2} \quad (5)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{\text{pre},i} - MR_{\text{exp},i})^2}{N - n} \quad (6)$$

$MR_{\text{exp},i}$ 为第 i 个试验测得的水分比, $MR_{\text{pre},i}$ 为第 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

2.1.5 有效水分扩散系数 (D_{eff}) 物料水分迁移特点可以用 D_{eff} 表示, 常采用 Fick 第 2 扩散定律来计算, 按公式(7)计算。

$$\ln MR = \ln(8/\pi^2) - \pi^2 D_{\text{eff}} / L^2 \quad (7)$$

L 为当归切片的厚度

$$D_{\text{cal}} = L^2 / \alpha \quad (8)$$

D_{cal} 为估算的水分扩散系数

D_{cal} 和 D_{eff} 之间的关系由公式(9)表示。

$$D_{\text{eff}} = D_{\text{cal}} / R_g \quad (9)$$

R_g 为几何参数

2.2 品质指标测定

2.2.1 阿魏酸含量测定 阿魏酸含量采用 HPLC 法测定。色谱条件: 色谱柱为 Agilent Eclipse XDB-C₁₈ (250 mm × 4.6 mm, 5 μm); 流动相为甲醇-1%冰乙酸溶液(30:70); 体积流量 1.0 mL/min; 柱温 25 °C; 进样量 20 μL; 检测波长 323 nm。理论塔板数按阿魏酸峰计算应不低于 5 000。按照《中国药典》2015 年版所述步骤制备阿魏酸的对照品溶液和供试品溶液^[29]。分别精密吸取对照品溶液和供试品溶液各 20 μL, 注入高效液相色谱仪测定峰面积, 按公式(10)计算。

$$G = DS_1 / S_2 \quad (10)$$

G 为供试品溶液中阿魏酸的含量, D 为对照品溶液中阿魏酸含量, S_1 为供试品溶液所得峰面积, S_2 为对照品溶液所得峰面积

2.2.2 挥发油含量的测定 按照《中国药典》2015 年版通则 2204 挥发油测定法中甲法测定^[29]。

2.2.3 水活度的测定 水活度表示物质中自由水分的含量。将不同干燥条件下当归切片的干制品粉碎, 取粉末 5 g 置于传感器的料盘中, 30 min 后测量各组的水活度值。

2.2.4 色泽的测定 用粉碎机将干燥后的当归切片粉碎成粉末, 取胡萝卜粉 5 g, 用色差计测定其色泽, 每个样品重复测量 3 次, 取平均值。总色差值 (ΔE) 表示被测样品色泽 (L 、 a 、 b) 与鲜样色泽 (L^* 、 a^* 、 b^*) 的差异。 ΔE 按公式(11)计算。

$$\Delta E = [(L - L^*)^2 + (a - a^*)^2 + (b - b^*)^2]^{1/2} \quad (11)$$

L 为表示干样的明度值, L^* 为表示鲜样的明度值, a 为表示干样的红绿值, a^* 为表示鲜样的红绿值, b 为表示干样的黄蓝值, b^* 为表示鲜样的黄蓝值

2.3 当归切片远红外干燥特性分析

根据前期探索性实验和文献的实验参数^[30-31], 选取干燥温度、切片厚度和辐照高度作为实验影响因素, 其中干燥温度的水平为 50、55、60、65、70 °C, 切片厚度的水平为 2、3、4、5、6 mm, 辐照高度的水平为 60、120、180、240、300 mm。

干燥前, 将设备调至预定参数, 取新鲜当归, 去须根, 清洗干净后切片, 每组物料的质量范围为 100~110 g, 平铺在筛网上, 放入远红外干燥箱中进行干燥实验, 前期每隔 15 min 称取样品质量, 后期每隔 30 min 称取样品质量, 直至样品含水率降至安全含水率(《中国药典》2015 年版规定切片含水率降至 10%)时停止实验, 每组实验重复 3 次, 取平均值作为结果。

2.3.1 不同干燥温度条件下当归切片的远红外干燥特性 当切片厚度为 4 mm, 辐照高度为 180 mm 时, 考察干燥温度对当归切片远红外干燥特性的影响。不同干燥温度条件下当归切片的干燥曲线和 DR 曲线见图 1。可以看出, 干燥温度为 50 °C 时整个干燥过程较缓慢, 干燥时间为 300 min, 而干燥温度为 70 °C 时干燥至安全含水率的时间为 175 min; 同一时间点, 干燥温度与水分比呈反相关。干燥时间范围为 25~50 min 时, DR 曲线整体呈现上升趋势, 并且 DR 与干燥温度成正比, 这说明干燥温度强化传质行为显著, 干燥初期当归切片表面的自由水在 50 min 时基本蒸发, 升温可以达到减少干燥时间的目的。但干燥温度不易过高, 这是因为温度升高可以使细胞处于严重脱水阶段, 给细胞本体结构带来

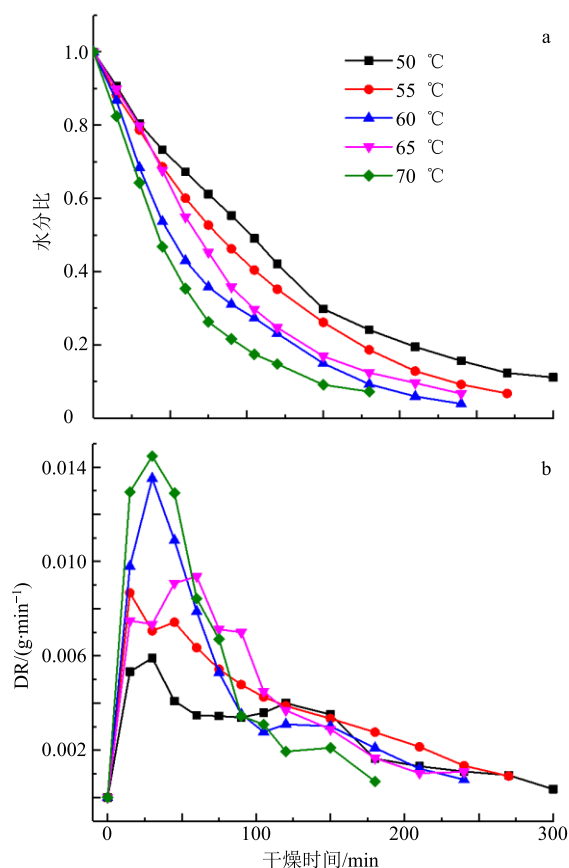


图 1 不同干燥温度条件下当归切片的干燥曲线 (a) 和 DR 曲线 (b)

Fig. 1 Drying curve (a) and DR curve (b) of ASR under different drying temperatures

损伤,造成干缩和表面硬化的现象^[32]。因此远红外干燥当归切片适宜的干燥温度为 60 °C。

2.3.2 不同切片厚度条件下当归切片的远红外干燥特性 当干燥温度为 60 °C,辐照高度为 180 mm 时,考察切片厚度对当归切片远红外干燥特性的影响。不同切片厚度条件下当归切片的干燥曲线和 DR 曲线见图 2。可以看出,同一时间点当归切片的水分比与切片厚度呈正相关,这是因为切片厚度越厚,物料内部的水分越多,扩散至表面的阻力增大,干燥过程由物料内部水分扩散控制的时间增加,降速阶段持续的时间增多;切片厚度为 2 mm 时干燥时间最短,DR 的极值最高,这是因为切片厚度越小,物料内部的含水率越少,物料内部的热质迁移通道变短,物料内部的半结合水更不易通过化学键保留至细胞内,绝大多数通过升温产生的热量传递到表面蒸发,物料收缩严重,并且当归药性成分的损失多,品质较差^[33];当切片厚度为 6 mm 时,由于细胞内外保持水分平衡而使物料收缩,降低了物

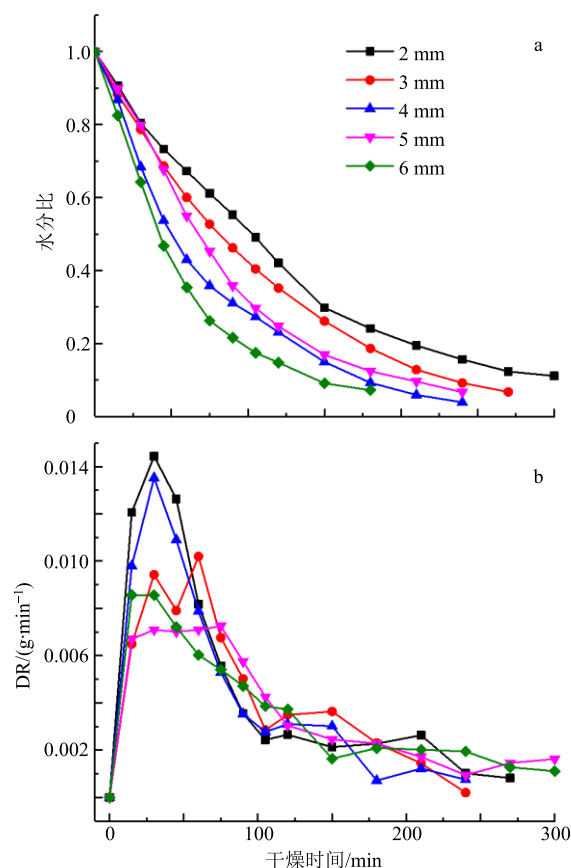


图 2 不同切片厚度条件下当归切片的干燥曲线 (a) 和 DR 曲线 (b)

Fig. 2 Drying curve (a) and DR curve (b) of ASR under different slice thickness

料内部水分的渗透性,减小了细胞内部水分的析出机率,使物料内部的水分更不易迁移至表面,干燥至安全含水率的时间增加。因此远红外干燥当归切片适宜的切片厚度为 4 mm。

2.3.3 不同辐照高度条件下当归切片的远红外干燥特性 当干燥温度为 60 °C,切片厚度为 4 mm 时,考察辐照高度对当归切片远红外干燥特性的影响。不同切片厚度条件下当归切片的干燥曲线和 DR 曲线见图 3。可以看出,辐照高度越低,干燥至安全含水率的时间越短,DR 极值越小,这是因为辐照高度越低,远红外更容易被物料内部水分吸收,内部温度升高,水分在毛细管和细胞间隙的流动速度加快,DR 增加。但由于物料表面接收的远红外过多,会给细胞膜和细胞内的组织器官造成不可恢复的破坏,表面细胞失去活性,当归切片的药性减少;物料内部水分吸收的远红外与辐照高度呈负相关,在 180 mm 时 DR 极值最高,干燥至安全含水率的时间较少,因此远红外干燥当归切片适宜的辐照高

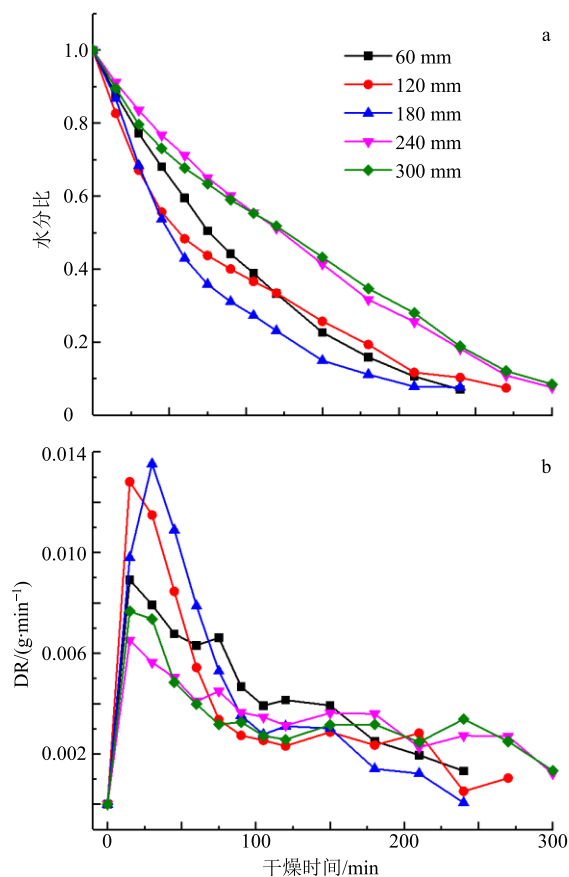


图 3 不同辐照高度条件下当归切片的干燥曲线 (a) 和 DR 曲线 (b)

Fig. 3 Drying curve (a) and DR curve (b) of ASR under different irradiation height conditions

表 1 不同干燥条件下 Weibull 函数的模拟结果

Table 1 Simulation results of Weibull function at different drying conditions

干燥条件	α/min	β	R^2	χ^2	干燥条件	α/min	β	R^2	χ^2
干燥温度 50 °C	136.417	1.206	0.993 41	0.002 7	5 mm	118.482	1.055	0.996 44	0.003 3
55 °C	112.519	1.096	0.998 63	0.005 9	6 mm	118.476	1.137	0.998 31	0.001 6
60 °C	76.777	1.089	0.999 08	0.004 1	60 mm	77.681	0.825	0.998 46	0.001 2
65 °C	92.844	1.059	0.996 78	0.003 1	辐照高度 120 mm	95.945	0.974	0.989 82	0.005 2
70 °C	60.981	1.011	0.997 02	0.004 4	180 mm	106.397	1.055	0.999 08	0.004 9
切片厚度 2 mm	78.277	0.882	0.998 22	0.006 5	240 mm	156.249	1.117	0.992 53	0.006 5
3 mm	85.143	0.947	0.998 87	0.003 4	300 mm	158.717	1.177	0.983 34	0.001 3
4 mm	97.123	0.954	0.999 08	0.005 9					

$$\beta = b_0 + b_1 \ln W + b_2 \ln T + b_3 \ln H$$

a_0 、 a_1 、 a_2 、 a_3 和 b_0 、 b_1 、 b_2 、 b_3 为待定模型系数

采用多元线性回归方法, 求解 Weibull 方程中参数 α 和 β 的回归方程, 得:

$$\alpha = 93.434\ 1 - 70.933\ 4 \ln W + 40.228\ 8 \ln T + 34.575\ 6 \ln H$$

$$\beta = 0.989\ 7 - 0.040\ 6 \ln W + 0.039\ 2 \ln T + 0.035\ 7 \ln H$$

度为 180 mm^[34]。

2.4 基于 Weibull 分布函数的干燥过程模拟

利用 Weibull 分布函数对不同干燥条件下当归切片远红外干燥数据进行分析, 结果见表 1。可见, R^2 的区间为 0.983 34~0.999 34, χ^2 的区间为 0.001 3~0.006 5。因此, Weibull 分布函数可以较好地模拟当归切片远红外干燥过程水分比的变化规律。

2.4.1 α 的影响因素 α 代表干燥过程完成了 63% 时所用的时间, 可以表示 DR 的快慢。由表 1 可见, 不同干燥条件下 Weibull 分布函数中的 α 不同。 α 值随着干燥温度的增加而减少, 随着切片厚度和辐照高度的增加呈现增加的趋势。因此增加干燥温度、减少切片厚度和辐照高度均可以缩短干燥时间, 提高干燥效率。

2.4.2 β 的影响因素 β 与物料干燥过程中的水分迁移机理有关。由表 1 可以看出, β 与干燥温度呈负相关, 与切片厚度和辐照高度呈正相关。而且形状参数的极差较小, 说明当归切片在远红外干燥过程中变形较小, 这是因为当归属于肉质药材, 同时含有多糖等成分, 收缩量较小。

2.4.3 Weibull 模型的求解 以 α 和 β 为因变量, 将当归切片远红外干燥的实验因素干燥温度 (W)、切片厚度 (T) 和辐照高度 (H) 作为自变量, 按照下式进行 1 次多项式拟合。

$$\alpha = a_0 + a_1 \ln W + a_2 \ln T + a_3 \ln H$$

α 和 β 回归方程的决定系数分别为 0.957 3、0.965 9, 均在水平 $P=0.05$ 情况下显著, 可见拟合效果好。因此, 当归切片远红外干燥的 Weibull 模型方程为 $MR = \exp\{-[t/(93.434\ 1 - 70.933\ 4 \ln W + 40.228\ 8 \ln T + 34.575\ 6 \ln H)]^{0.989\ 7 - 0.040\ 6 \ln W + 0.039\ 2 \ln T + 0.035\ 7 \ln H}\}$ 。

2.4.4 Weibull 模型的验证 验证试验工艺参数为干燥温度 60 ℃, 切片厚度 3 mm, 辐照高度 180 mm。比较 MR 的试验值和 Weibull 模型预测值 (图 4), 可以看出, 试验值和模型预测值的一致性较好。因此, Weibull 模型能够较好的反映当归切片远红外干燥过程中水分比的变化规律。

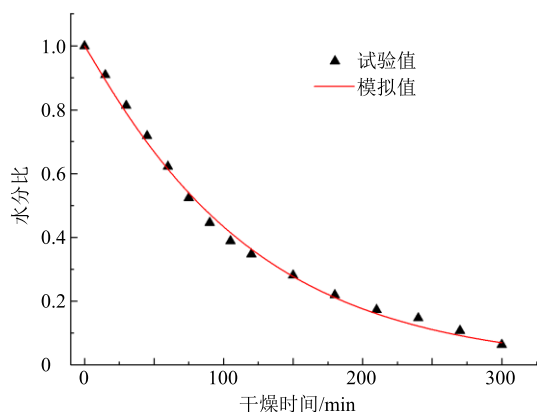


图 4 Weibull 模型的验证

Fig. 4 Verification of Weibull model

2.5 D_{eff} 的分析

干燥过程中水分迁移是由毛细管流动、液体扩散和蒸汽扩散等多种因素共同决定的, 被认为是一个复杂的过程。当归在不同干燥条件下的计算参数见表 2。可见, D_{cal} 的区间为 $4.698 \times 10^{-11} \sim 2.084 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, D_{eff} 的区间为 $3.891 \times 10^{-9} \sim 2.179 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$, 均随着干燥温度和切片厚度的增加, 辐照高度的减少, 呈现上升的趋势。这是因为在远红外干燥是一种由物料内部水分扩散控制的干燥过程, 升高温度可以将更多的结合水转变为半结合水和自由水, 增加物料内部的自由水含量, 促使更多的水分迁移至表面, 使干燥过程中 D_{eff} 值增大。同时几何参数是与物料几何尺寸有关的常数, 通过实验发现当归切片的变形量小, 所以几何参数总体的变化量较小。

2.6 不同干燥条件对当归切片品质的影响

在干燥过程中, 由于受热和失水, 中药材的物理和化学性能发生较大变化, 对这些变化进行研究选择干燥工艺的基础。通过前期的预实验发现, 热风干燥为 70 ℃ 时, DR 较快, 干制品品质较好。

不同干燥条件对当归阿魏酸含量、挥发油含量和色差值等品质的影响见表 3。可见, 与热风干燥相比, 远红外干燥更易保留当归中阿魏酸的含量。这是因为在远红外的干燥过程中, 维生素、氨基酸和蔗糖等成分相互发生转换, 致使阿魏酸的含量增

表 2 不同干燥条件下远红外干燥过程的计算参数

Table 2 Calculation parameters of far infrared drying process under different drying conditions

干燥条件	$D_{\text{eff}}/(\times 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	$D_{\text{cal}}/(\times 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	R_g
干燥温度 50 ℃	1.075 6	1.172 9	1.090 4
55 ℃	1.495 8	1.422 0	0.950 6
60 ℃	2.056 3	2.084 0	1.013 4
65 ℃	1.690 6	1.723 3	1.019 3
70 ℃	2.179 2	2.623 8	1.204 0
切片厚度 2 mm	0.389 1	0.469 8	1.207 5
3 mm	0.842 6	0.926 7	1.099 8
4 mm	1.598 1	2.044 0	1.279 1
5 mm	2.152 9	2.110 0	0.980 1
6 mm	2.885 5	3.038 6	1.053 1
辐照高度 60 mm	1.655 5	1.503 8	0.908 4
120 mm	1.434 9	1.667 6	1.162 2
180 mm	1.598 1	2.059 7	1.288 9
240 mm	1.283 6	1.024 0	0.797 7
300 mm	1.223 0	1.008 1	0.824 3

加。但是阿魏酸不稳定, 遇热容易分解, 因此干燥温度越高, 切片厚度和辐照高度越低, 差异越显著。同时与晾晒和热风干燥技术相比, 远红外干制品中挥发油的含量更多, 这是因为当归切片的热风干燥时间和晾晒干燥时间长, 当归切片的受热时间久, 物料内部中的藁本内酯受热分解, 造成挥发油成分减少的现象。

干制品的色差值随着物料内部温度的增加而增大, 这可能是由于当归中含有较多的碳水化合物, 容易发生美拉德反应, 促使干制品变色, 增加了色差值; 并且干燥温度升高, 切片厚度减小, 辐照高度降低时, 物料内部产生高温, 使表面发生严重褐变, 造成当归切片内部部分色素分解的现象, 使干制品的色差值增加, 降低了干制品的品质。远红外干制品粉末的水活度值明显小于热风 and 晾晒干制品粉末, 体现出远红外干燥升温的特点, 并且干燥温度越高, 水活度值越小, 这是因为升高温度会使更多的水分在毛细管力作用下迁移至表面, 减少了水分汽化时间, 增加了 DR^[35-36]。对比不同干燥条件下干制品的品质发现, 干燥温度 60 ℃、切片厚度 4 mm、辐照高度 180 mm 所对应干制品的品质指标较高, 可为当归远红外干燥的参数优化提供理论依据。

2.7 不同干燥条件对当归切片微观结构的影响

不同干燥条件下当归切片的微观结构见图 5。

表 3 不同干燥条件对当归切片品质的影响

Table 3 Effect of different drying conditions on quality of ASR slices

干燥条件		阿魏酸含量/(μg·mL ⁻¹)		挥发油含量/%		色差值		水活度	
		平均值	标准偏差	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差
晾晒		10.34	1.017	0.54	0.037	29.56	0.873	0.158	0.025
热风 70 ℃		5.99	1.243	0.61	0.025	26.21	0.737	0.169	0.038
干燥温度	50 ℃	8.83	0.598	0.84	0.027	24.57	1.198	0.156	0.028
	55 ℃	8.57	0.631	0.78	0.038	21.21	0.909	0.154	0.042
	60 ℃	6.41	1.094	0.69	0.043	20.77	1.349	0.151	0.037
	65 ℃	7.28	1.192	0.71	0.043	29.61	1.864	0.153	0.041
	70 ℃	6.12	1.061	0.58	0.029	31.79	1.399	0.149	0.041
切片厚度	2 mm	7.78	1.045	0.53	0.018	28.88	1.551	0.147	0.012
	3 mm	8.29	1.136	0.61	0.027	34.02	1.319	0.144	0.011
	4 mm	11.38	1.327	0.67	0.036	29.49	1.281	0.142	0.015
	5 mm	8.86	1.541	0.75	0.029	29.61	3.363	0.143	0.014
	6 mm	8.49	1.393	0.78	0.025	21.32	2.104	0.145	0.013
辐照高度	60 mm	6.45	0.999	0.51	0.024	36.82	1.553	0.156	0.015
	120 mm	11.65	0.807	0.66	0.018	33.59	1.181	0.155	0.012
	180 mm	11.45	1.144	0.71	0.038	30.47	1.102	0.151	0.011
	240 mm	10.17	1.671	0.73	0.023	28.88	2.052	0.153	0.036
	300 mm	7.31	1.479	0.79	0.028	27.75	1.451	0.146	0.029

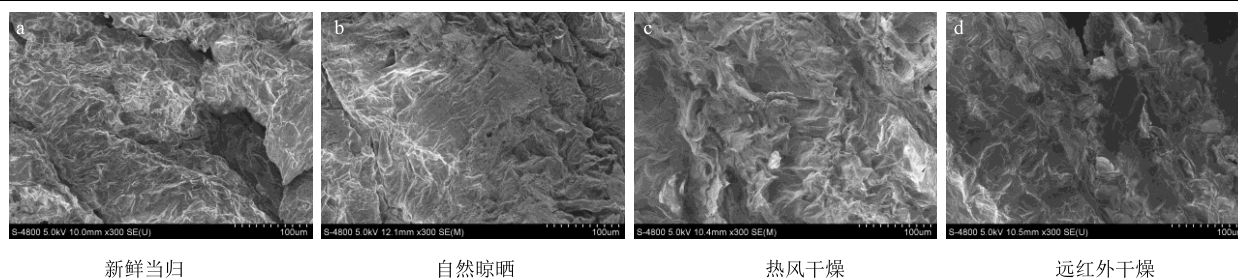


图 5 不同干燥条件下当归切片的微观结构

Fig. 5 Microstructure of ASR under different drying conditions

可以看出, 经过远红外干燥的当归切片具有松散致密的微观结构, 细胞间的孔隙排列比较均匀 (图 5-d), 这是因为远红外干燥具有升温快的优点, 内部细胞腔受热膨胀产生微孔, 并且由于远红外干燥的热传递方向与水分迁移方向相同, 使当归表面细胞受到较小的结构应力, 细胞内外受热均匀, 皱缩变形少, 干制品品质优良。由图 5-b、c 可知, 对比远红外干燥的微观结构图, 热风干燥和自然晾晒的干制品品质较差, 主要因为这 2 种干燥方式的产热方式都是由外到内, 造成内部的热流密度较小, 内部水分不能汽化的现象, 并且表面细胞结构塌陷严重, 孔隙率较小。因此, 把远红外干燥技术应用于中药材干燥, 不仅能够增加内部结构的微孔数量,

强化热质传递过程, 还能使物料受热均匀, 改善中药材干制品的品质^[37-38]。

3 讨论

本实验研究了不同干燥温度、切片厚度和辐照高度条件下, 当归切片在远红外干燥过程中的水分变化规律。结果表明, 当归切片的远红外干燥过程主要有升速期和降速期, 干燥温度越高, 切片厚度和辐照高度越小, 水分比越小, DR 越快。综合考虑干制品的品质和干燥能耗, 当归远红外干燥适宜的参数为干燥温度 60 °C、切片厚度 4 mm、辐照高度 180 mm。

使用 Weibull 分布函数对不同干燥条件下当归切片的试验数据进行拟合, 求得决定系数 R^2 在

0.983 34~0.999 34, 离差平方和 χ^2 在 0.001 3~0.006 5, 尺寸参数和形状参数与干燥温度呈负相关, 与切片厚度和辐照高度呈正相关。验证试验表明, 试验值与模拟值的一致性较好, 说明该函数能很好地描述当归切片的远红外干燥过程。根据 Fick 扩散定律计算的 D_{eff} 区间为 $3.891 \times 10^{-9} \sim 2.179 2 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$, D_{cal} 区间为 $4.698 \times 10^{-11} \sim 2.084 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, 均随着干燥温度、切片厚度和辐照高度的增加总体呈现上升的趋势。

通过比较不同干燥条件下当归干制品的品质, 发现远红外干燥技术更容易保留当归切片中的阿魏酸和挥发油, 降低色差值, 减少干制品粉末的水活度。通过对不同干燥条件下干制品微观结构的扫描电镜进行分析发现, 远红外干燥技术可以增多物料表面与物料内部的微孔数量, 提高细胞的平整度。将远红外干燥技术应用于当归的干燥过程, 可以强化物料内部的热质传递过程, 缩短干燥时间。

参考文献

- [1] 汪燕平. 从草木到药材 [D]. 西安: 陕西师范大学, 2014.
- [2] 晋玲, 吴迪, 崔治家, 等. 当归药材资源种类及分布研究 [J]. 中兽医医药杂志, 2013, 32(1): 74-77.
- [3] 严辉, 段金彪, 宋秉生, 等. 我国当归药材生产现状与分析 [J]. 中国现代中药, 2009, 11(4): 12-17.
- [4] Zhang C C, Liu D Q, Gao H Y. Kinetics, physicochemical properties, and antioxidant activities of *Angelicae Sinensis Radix keiskei* processed under four drying conditions [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2018, 98: 349-357.
- [5] 毛文琴. 中药材硫黄熏蒸干燥加工方法的现状及问题分析 [J]. 心血管病防治知识: 学术版, 2017 (1): 111-112.
- [6] 吴志成, 杨锡仓, 韩静, 等. 岷当归民间加工炮制方法初探 [J]. 甘肃中医学院学报, 2013, 30(5): 48-50.
- [7] 孙庆运, 王光辉, 王德成. 黄芩切片真空干燥特性与吸湿特性的研究 [J]. 食品工业科技, 2017, 38(22): 76-81.
- [8] 邱亚磊, 李玮, 王建科, 等. 党参产地加工方法对有效成分的影响 [J]. 贵州农业科学, 2017, 45(9): 84-88.
- [9] 燕晓辉. 微波真空干燥人参工艺特性及装置的试验研究 [D]. 北京: 中国农业机械化科学研究院, 2007.
- [10] 段素敏, 孔铭, 李秀杨, 等. 当归药材热风-微波联合干燥方法研究 [J]. 中草药, 2016, 47(19): 3415-3419.
- [11] 刘英. 胡萝卜远红外干燥特性及品质的研究 [D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2018.
- [12] 李晓芳, 刘云宏, 马丽婷, 等. 远红外辐射温度对金银花干燥特性及品质的影响 [J]. 食品科学, 2017, 38(15): 69-76.
- [13] 张晓妮. 柠檬片真空远红外干燥工艺研究 [D]. 天津: 天津科技大学, 2015.
- [14] Adak N, Heybeli N, Ertekin C. Infrared drying of strawberry [J]. *Food Chem*, 2017(219): 109-116.
- [15] 李波, 王明伟, 强正泽, 等. 基于低温与回潮条件的当归干燥 Weibull 函数模拟及其干燥特性研究 [J]. 中草药, 2019, 50(13): 3052-3057.
- [16] 王凤贺, 丁治春, 陈鹏泉, 等. 油茶籽热风干燥动力学研究 [J]. 农业机械学报, 2018, 49(S1): 426-432.
- [17] 孟国栋, 彭桂兰, 罗传伟, 等. 花椒真空干燥特性分析及动力学模型研究 [J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(4): 89-96.
- [18] Doymaz İ. Infrared drying kinetics and quality characteristics of carrot slices [J]. *J Food Process Pres*, 2015, 39(6): 2738-2745.
- [19] 齐娅汝, 李远辉, 韩丽, 等. 二至丸热风干燥动力学及干燥过程数学模拟研究 [J]. 中草药, 2017, 48(15): 3056-3063.
- [20] 孙畅莹, 刘云宏, 曾雅, 等. 直触式超声强化热风干燥梨片的干燥特性 [J]. 食品与机械, 2018, 34(9): 37-42.
- [21] 吴雪辉, 龙婷, 王泽富, 等. 油茶籽热泵干燥特性及模型的研究 [J]. 中国粮油学报, 2018, 33(1): 111-117.
- [22] 林冰, 孙悦, 廖力, 等. 4 种藤类中药材干燥模型、动力学及有效成分稳定性研究 [J]. 中草药, 2018, 49(13): 3001-3008.
- [23] 张卫鹏, 高振江, 肖红伟, 等. 基于 Weibull 函数不同干燥方式下的茯苓干燥特性 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(5): 317-324.
- [24] 朱邵晴, 郭盛, 沙秀秀, 等. 党参药材不同干燥方法水分动态过程模拟与分析 [J]. 食品工业科技, 2017, 38(7): 245-249.
- [25] 王鹤, 慕松, 吴俊, 等. 基于 Weibull 分布函数的枸杞微波干燥过程模拟及应用 [J]. 现代食品科技, 2018, 34(1): 141-147.
- [26] 巨浩羽, 赵士豪, 赵海燕, 等. 基于 Weibull 分布函数的枸杞真空脉动干燥过程模拟及动力学研究 [J]. 中草药, 2018, 49(22): 5313-5319.
- [27] 食品安全国家标准 食品中水分的测定 [S]. GB 5009.3—2016. 2016.
- [28] 郭守志, 宋占华, 李法德, 等. 基于 Weibull 分布函数的槟榔干燥模拟 [J]. 山东农业大学学报: 自然科学版, 2016, 47(5): 710-715.
- [29] 中国药典 [S]. 一部. 2015.
- [30] 张兴盈, 辛延蓉, 蔡良辉, 等. 云当归干燥特性及动力学研究 [J]. 安徽农业科学, 2017, 45(5): 102-106.

- [31] Wang Y, Li X, Zhao P, *et al.* Physicochemical characterizations of polysaccharides from *Angelica Sinensis Radix* under different drying methods for various applications [J]. *Int J Biol Macromol*, 2018, 121: 381-389.
- [32] 朱文学. 中药材干燥原理与技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [33] 易 婕, 刘云宏, 李海登, 等. 紫薯远红外辐射干燥及品质特性 [J]. *食品科学*, 2018, 39(7): 160-167.
- [34] Vishwanathan K H, Giwari G K, Hebbar H U. Infrared assisted dry-blanching and hybrid drying of carrot [J]. *Food Biopro Process*, 2013, 91(2): 89-94.
- [35] Wang Y, Li J, Xuan L Y, *et al.* Astragalus root dry extract restores Connexin43 expression by targeting miR-1 in viral Myocarditis [J]. *Phytomedicine*, 2018, 8(18): 32-38.
- [36] 初丕江. 不同产地初加工方法对当归中阿魏酸含量的影响 [J]. *亚太传统医药*, 2017, 13(12): 40-41.
- [37] Rojas M L, Leite T S, Cristianini M, *et al.* Peach juice processed by the ultrasound technology: Changes in its microstructure improve its physical properties and stability [J]. *Food Res Int*, 2016, 82(14): 22-33.
- [38] 刘云宏, 李晓芳, 苗 帅, 等. 南瓜片超声-远红外辐射干燥特性及微观结构 [J]. *农业工程学报*, 2016, 32(10): 277-286.