

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

李 波^{1,2,3}, 王明伟¹, 强正泽¹, 李 旭¹, 李成义^{1*}, 郑贵森^{1*}

1. 甘肃中医药大学, 甘肃 兰州 730000

2. 兰州市肺科医院, 甘肃 兰州 730000

3. 甘肃天士力中天药业有限责任公司研发中心, 甘肃 兰州 730000

摘要: **目的** 研究当归在低温阴干及低温回潮干燥条件下的干燥及回潮特性, 明确低温及回潮对当归干燥过程的影响。**方法** 采用 Weibull 分布函数和 1stOpt 软件模拟当归在低温阴干和低温(40、55 ℃)回潮条件下的函数模型, 分析模型参数、干燥曲线、相对干燥回潮率、有效水分扩散系数(D_{eff})、干燥活化能等指标, 对比低温阴干和低温回潮干燥条件下当归的干燥特性。**结果** 低温阴干和低温回潮干燥方法均可使当归干燥, 且低温回潮干燥方法可极大缩短当归的干燥周期, Weibull 函数模型及线性回归拟合方程结果理想, 当归低温阴干 D_{eff} 为 0.209 59 mm²/h, 低温回潮干燥 D_{eff} 在 4.489 40~4.566 90 mm²/h, 低温干燥条件下当归干燥活化能为 80.75 kJ/mol。**结论** 低温回潮干燥方法较传统低温阴干具有明显优势, 该研究可为提升当归传统阴干干燥技术, 建立新的适宜当归产地加工的干燥方法提供理论和技术依据。

关键词: 当归; 干燥; 阴干; 低温回潮; Weibull 分布

中图分类号: R283.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2670(2019)13-3052-06

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2019.13.009

Study on Weibull function simulation and drying characteristics of *Angelicae Sinensis Radix* drying based on low temperature and resurgence conditions

LI Bo^{1,2,3}, WANG Ming-wei¹, QIANG Zheng-ze¹, LI Xu¹, LI Cheng-yi¹, ZHENG Gui-sen¹

1. Gansu University of Chinese Medicine, Lanzhou 730000, China

2. Pulmonary Hospital of Lanzhou, Lanzhou 730000, China

3. Research and Development Center of Gansu Tasly Zhongtian Pharmaceutical Co., Ltd., Lanzhou 730000, China

Abstract: **Objective** To clarify the effects of low temperature and dry in shade on the drying process of *Angelicae Sinensis Radix* (ASR), the drying and regain characteristics of ASR under low temperature drying and low temperature resurgence drying conditions were studied. **Methods** Weibull distribution function and 1stOpt software were used to simulate the functional model of ASR under low temperature dry and low temperature (40, 55 ℃) resurgence conditions, analyze model parameters, drying curve, relative dry moisture regain, moisture effective diffusion coefficient (D_{eff}), dry activation energy and other indicators, and compare the drying characteristics of ASR under low temperature dry and low temperature resurgence drying conditions. **Results** Both low temperature drying and low temperature resurgence drying methods can make ASR dry, while low temperature resurgence drying method can greatly shorten the drying cycle of ASR, the Weibull function model and the linear regression fitting equation result meet the requirements. The D_{eff} of ASR under low temperature drying conditions was 0.209 59 mm²/h, and the D_{eff} under low temperature resurgence and drying conditions was between 4.489 40—4.566 90 mm²/h, the dry activation energy under low temperature drying condition was 80.75 kJ/mol. **Conclusion** The low temperature resurgence drying method has obvious advantages over the traditional low temperature drying, this research can provide theoretical and technical basis for improving the traditional low temperature drying technology of ASR and establishing a new drying method suitable for the processing of ASR origin.

Key words: *Angelicae Sinensis Radix*; dry; low temperature and dry; low temperature resurgence; Weibull distribution

收稿日期: 2019-03-26

基金项目: 国家中药标准化项目“当归等4种中药饮片标准化建设”(ZYBZH-Y-GS-11); 甘肃省重点研发计划“陇药当归、党参原产地加工关键技术提升研究”(18YF1FA085); 甘肃省自然科学基金“当归水分含量测定方法代替研究”(1508RJZA013); 兰州市人才创新创业项目“‘滋阴益肺’制剂的研发”(2017-RC-19)

作者简介: 李 波, 男, 博士研究生, 主要从事中药资源及新药开发研究。E-mail: gszylibo@163.com

***通信作者** 李成义, 男, 教授, 主要从事中藏药资源学研究。E-mail: gslchengyi@163.com

郑贵森, 男, 教授, 主要从事疾病预防与控制、食品营养与卫生。E-mail: zgs@gszy.edu.cn

当归为伞形科当归属植物当归 *Angelica sinensis* (Oliv.) Diels 的干燥根, 甘肃为其道地产区。干燥是影响当归药材品质与道地性的重要因素, 当归传统干燥方法有日干(意同晒干)、曝干、火干、焙干、熏干、晒干等, 《中国药典》2015 年版规定其干燥方法为“烟火熏干”, 传统干燥存在周期长、标准化低、干燥品质差异大, 熏干容易造成环境污染问题等弊端^[1-2]。

苯酐类又称内酯类, 是当归的重要活性成分之一, 极性小, 易挥发, 属热敏性成分, 容易受热和光产生结构转变, 以藁本内酯、正丁基苯酐等为代表的苯酐类多存在于当归挥发油中, 当归挥发油具有调节子宫平滑肌、降低血压、改善心肌缺血、抗心律失常、平喘、抑制内皮细胞增殖等多种药理作用^[3-12]。已有研究发现, 不同干燥方法对当归挥发油、阿魏酸的含量有影响, 当归在较低温度干燥所得挥发油含量较高^[13-18]。目前产地加工中主要采用阴干, 属低温干燥, 受产地的温度和湿度变化影响, 干燥过程中有回潮现象。物料的回潮是与其周围空气的水分平衡过程, 在农副产品的干燥过程中经常会利用其回潮特性以提高干燥效率和干燥品质, 在中药材的传统加工中也有应用^[19-21]。Weibull 函数是一种概率分布函数, 用来模拟和预测干燥模型、干燥特性, 近年来在中药材的干燥中广泛应用^[22-28], 因此, 采用 Weibull 函数对比研究当归阴干和低温回潮干燥过程及干燥特性, 明确低温和回潮干燥过程中关键参数对当归干燥速率及过程的影响, 对于研究当归现代干燥技术, 阐释当归低温回潮干燥过程中回潮现象与药材热敏性成分、挥发油变化, 提高干燥效率, 保障药材品质具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 药材

当归新鲜样品采自甘肃省定西市渭源县会川镇, 采挖 2 年生当归, 除去泥土、腐烂、冻伤根等杂质。样品经甘肃中医药大学李成义教授鉴定为伞形科当归属植物当归 *Angelica sinensis* (Oliv.) Diels 的根, 新鲜当归含水率为 72.36%。

1.2 仪器

低温干燥烘房, 由甘肃省万杞千红生物科技有限责任公司提供; CAV214C 分析天平, 美国奥豪斯仪器(上海)有限公司; 101 型电热鼓风干燥箱, 北京科伟永兴仪器有限公司; DL92150 游标卡尺, 宁波得力工具有限公司; QH-20 全自动真空保鲜机,

绍兴市锦涛电子有限公司。

1.3 当归低温干燥方法

1.3.1 低温阴干 选取当归统货样品, 置于室内恒温恒湿条件下 ($T \approx 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, 湿度 $\approx 35\%$), 初始测定当归水分后, 每隔 3 d 测定当归水分, 直至达到《中国药典》2015 年版规定含水量 15% 时停止, 记录水分测定数据。

1.3.2 低温回潮干燥 取阴干同一批新鲜当归约 200 kg, 采用低温烘房干燥, 分别设置 40、55 $^{\circ}\text{C}$ 2 个干燥梯度, 干燥过程中启动烘房排湿系统, 恒温条件下达到平衡湿度 $\approx 20\%$, 根据预定回潮时间置于室内回潮并取样, 每次回潮时间为 30 min, 直到参照样品称定质量前后一致时停止烘房干燥系统, 样品真空包装。实验设计及参数见表 1。

表 1 实验设计及参数

Table 1 Experimental design and parameters

实验编号	干燥条件	温度/ $^{\circ}\text{C}$	平均直径/cm	初始水分/%
1	低温阴干	25	2.33	72.36
2	低温与回潮	40	2.78	72.36
3	低温与回潮	55	2.78	72.36

1.4 工艺参数及 Weibull 函数模型计算方法

1.4.1 当归干基含水率 (M_t) 计算公式

$$M_t = (W_t - G) / G \quad (1)$$

W_t 为当归在任意干燥 t 时刻的总质量, G 为当归干物质质量

1.4.2 当归水分比 (moisture ratio, MR) 计算公式

$$\text{MR} = (M_t - M_e) / (M_0 - M_e) \quad (2)$$

MR 为当归任意 t 时刻干燥水分比, 根据公式 (1) 求得任意 t 时刻当归干基含水率 M_t 、初始干基含水率 M_0 和干燥到平衡时的干基含水率 M_e , 代入 (2) 式计算。与 M_t 和 M_0 相比较, M_e 值较小, 可忽略, 因此 (2) 式可简化为 (3) 式^[22]。

$$\text{MR} = M_t / M_0 \quad (3)$$

1.4.3 当归干燥速率 (drying rate, DR) 计算公式^[22]

$$\text{DR} = (M_{t_1} - M_{t_2}) / (t_2 - t_1) \quad (4)$$

M_t 为干基含水率, t_1 、 t_2 分别代表前、后 2 个时刻

根据以上 (1)、(3)、(4) 式计算当归阴干和低温回潮干燥过程中的干燥水分比和干燥速率。

1.4.4 当归相对回潮速率 (R) 计算公式

$$R = (M_{t_2} - M_{t_1}) / (t_2 - t_1) \quad (5)$$

M_{t_1} 、 M_{t_2} 、 t_1 、 t_2 分别为如 (4) 式所示, (5) 式可看做是 (4) 式的逆过程, 由于处于干燥过程中, R 可反映某一段干燥过程中的相对回潮速率。

1.4.5 Weibull 函数模型建立与计算

$$MR = \exp[-(t/\alpha)^\beta] \quad (6)$$

α 、 β 均为经验参数, α 为尺度参数, β 为形状参数

1.4.6 有效水分扩散系数 (D_{eff}) 计算

$$\ln MR = \ln(8/\pi^2) - \pi^2 t D_{\text{eff}} / 4L^2 \quad (7)$$

$$k = -\pi^2 D_{\text{eff}} / 4L^2 \quad (8)$$

式 (7)、(8) 根据 Fick 和 Arrhenius 方程简化和函数拟合求得曲线斜率可得 D_{eff} ^[29-30], L 为直径, t 为干燥时间。

1.4.7 干燥活化能 (E_a) 计算

$$\ln D_{\text{eff}} = \ln D_0 - E_a / [R(T + 273.15)] \quad (9)$$

D_0 为扩散基数 (定值), R 为气体摩尔常数, 为 8.314 J/(mol·K), T 为干燥温度

经曲线拟合可得斜率, 根据斜率计算 E_a ^[29]。

2 结果与分析

2.1 低温阴干与低温回潮干燥曲线比较

当归阴干与低温 (40、55 °C) 干燥均属于低温条件, 阴干和低温回潮干燥过程中干燥曲线差异较大, 两者水分比曲线相对比, 阴干过程中, 耗时较长, 水分比处于逐渐下降趋势, 未出现回潮现象, 在干燥中期以前下降较快, 后期下降趋缓; 与阴干相比较, 低温回潮干燥时间大幅缩短, 其干燥至同一水分比所用时间明显比阴干少, 低温回潮干燥过程中, 受回潮工艺影响出现水分比上升现象, 但是整体趋势呈下降趋势。就干燥速率而言, 阴干干燥速率整体较低, 且浮动范围较小, 而低温回潮干燥平均速率和最高速率均显著高于阴干, 低温回潮干燥过程中, 受回潮影响, 低温 40 °C 和 55 °C 干燥条件下回潮速率增加, 而阴干干燥未出现明显回潮现象, 这可能跟当归在阴干实验过程中, 干燥环境温度湿度相对恒定, 当归内部温度与周围环境温差较小, 在较长的干燥周期内, 水分子在当归表面由内向外自由缓慢扩散, 而当受热后置于低温环境, 在当归表面形成温度和湿度差, 导致当归开始吸湿回潮。

低温回潮 40 °C 和 55 °C 干燥曲线呈相近趋势, 在干燥终点, 受回潮工艺影响, 40 °C 回潮干燥水分比略低于 55 °C 回潮干燥, 40 °C 回潮干燥速率高于 55 °C 回潮干燥速率, 低温回潮干燥周期显著小于传统阴干干燥。结果见图 1 和表 2。

2.2 低温阴干与低温回潮干燥 Weibull 函数模型比较分析

2.2.1 Weibull 函数干燥曲线拟合及检验参数分析

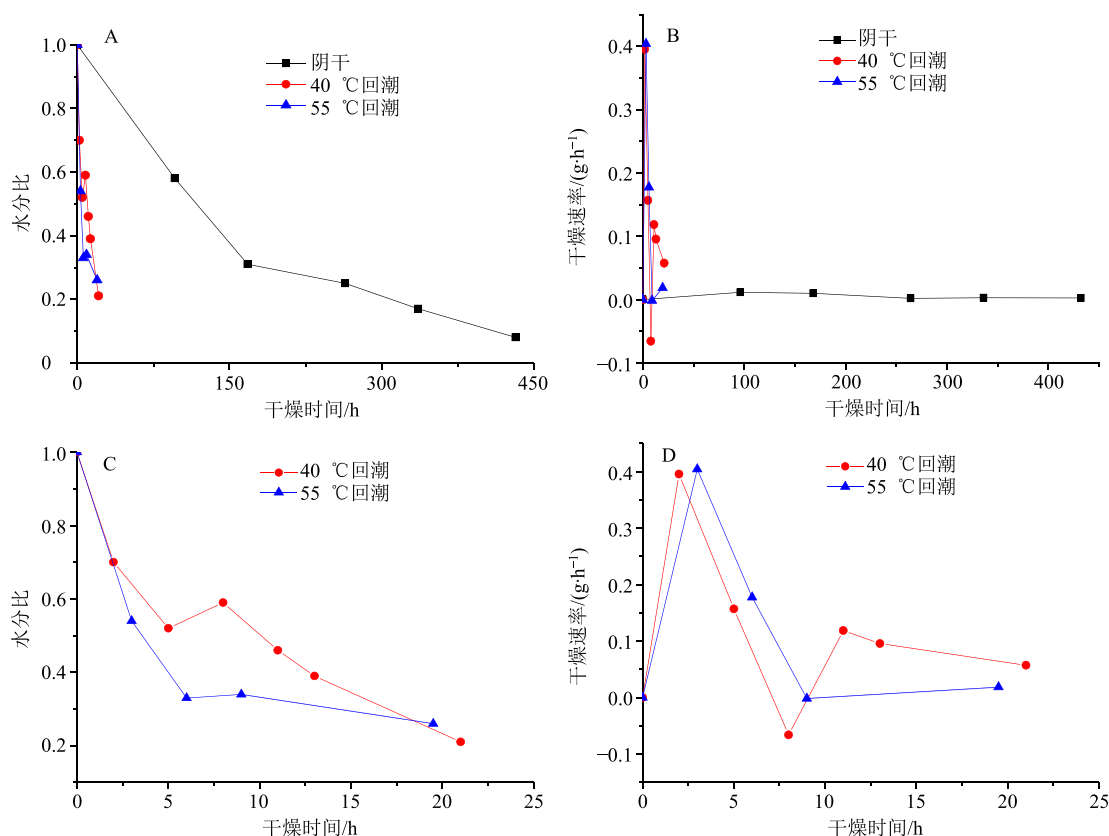
采用 1stOpt、Excel 等软件进行编程计算、方程拟合, 非线性回归参数计算, 以检验参数均方差 (RMSE)、残差平方和 (SSE)、相关系数平方 (R^2)、决定系数 (DC)、卡方系数 (Chi-Square, CS)、 F 值等判断函数拟合理想程度。当归阴干和低温回潮干燥 Weibull 函数拟合检验参数如表 3 所示, R^2 值在 0.984 6~0.942 1, RMSE 值在 0.056~0.075, SSE 值在 0.020~0.033, DC 值在 0.941 0~0.944 4, CS 值在 0.024~0.062, F 值在 81.4~256.2, 其中 RMSE、CS、SSE 值越小, F 值越大, R^2 和 DC 趋近于 1 表示拟合越理想^[29], 由表 3 拟合结果可知函数拟合理想, 说明 Weibull 函数可以较好模拟当归阴干和低温回潮干燥过程中的干燥动力学变化趋势。

2.2.2 Weibull 函数模型参数分析 函数模型中尺度参数 α 值为干燥过程完成 63% 时所需时间, 其值大小反映干燥效率, 形状参数 β 由函数拟合计算得出, 从表 3 可知 α 与干燥方式有关, β 和干燥方式、温度有关, 由于阴干和低温回潮干燥方式不同, α 值变化区间为 272.16~12.29 h, 阴干 α 值为 272.16 远大于低温回潮 40 °C 和 50 °C, 低温回潮 40 °C 和 50 °C 的 α 接近, 分别为 13.23、12.29 h, 说明低温回潮干燥条件下干燥尺度 α 值基本稳定, 干燥效率相近, 且干燥效率远高于阴干。同时根据表 3 可知, β 值在 0.94~0.25, 阴干和低温回潮干燥以及低温回潮 40 °C 和 50 °C 之间 β 值均相差较大, 说明当归干燥形状参数 β 值除受干燥方式影响外, 温度对其也有影响, 在低温干燥条件下, β 值随温度升高呈现减小趋势。

根据文献可知, β 值与干燥物料形状有关, $\beta > 1$ 干燥曲线呈“Z”状, β 在 0.3~1.0, 其干燥属于降速干燥^[22], 当归阴干过程属于降速干燥, 形状参数 β 值在 0.3~1.0, 而低温回潮干燥中, 出现 $\beta < 0.3$ 的情况, 这可能由于回潮引起的当归形状和干燥速率变化, 低温回潮过程中, 整体水分比呈下降趋势, 属降速干燥, 但是水分比有阶段性的上升现象, 引起当归回潮干燥过程中质地和内部结构与正常受热干燥时不一致, 造成 β 值异常, β 值略低于 0.3, 其具体变化原理有待进一步深入研究。

2.3 低温阴干及低温回潮干燥 D_{eff} 结果及分析

D_{eff} 可根据 Fick 第 2 定律计算^[22], 具体计算公式如 (7) 和 (8), 其反映干燥过程中水分的运输和扩散情况, 在当归的干燥过程中, 受当归性状和性质的影响, 其水分扩散是一个复杂的系统过程, 由



A-阴干与低温回潮干燥水分比 B-阴干与低温回潮干燥速率 C-低温(40、55 °C)回潮干燥水分比 D-低温(40、55 °C)回潮干燥速率
A-moisture ratio of shade drying and low temperature resurgence drying B-drying rate of shade drying and low temperature resurgence drying
C-moisture ratio of resurgence at low temperature (40, 55 °C) D-drying rate of low temperature (40, 55 °C) resurgence

图 1 当归低温与回潮条件下干燥曲线

Fig. 1 Drying curves of ASR under low temperature and resurgence conditions

表 2 当归干燥及回潮参数对比

Table 2 Comparison of drying and moisture regain parameters of ASR

组别	最大干燥速率/(mg·h ⁻¹)	平均干燥速率/(mg·h ⁻¹)	相对回潮速率/(mg·h ⁻¹)	干燥周期/h
低温阴干	11.6	5.6		423.0
低温 40 °C 回潮	395.3	148.2	66.0	21.0
低温 55 °C 回潮	404.1	150.4	1.7	19.5

平均干燥速率为 t_1 至 t_n 时刻干燥速率的平均值

The average drying rate is the average of the drying rates from t_1 to t_n

表 3 Weibull 分布函数模拟当归干燥过程模型及检验参数

Table 3 Weibull distribution function simulation of ASR drying process model and test parameters

干燥方法	RMSE	SSE	R^2	DC	CS	F 值	β	α/h
低温阴干	0.075	0.033	0.984 6	0.942 1	0.062	256.2	0.94	272.16
低温 40 °C 回潮	0.056	0.022	0.942 1	0.941 0	0.024	81.4	0.62	13.23
低温 55 °C 回潮	0.063	0.020	0.970 4	0.944 4	0.028	98.4	0.25	12.29

计算公式和 Fick 第 2 定律可知,其理想计算模型为降速干燥,当归干燥过程中可以看成是铺成平板状进行,阴干属于降速干燥,低温回潮干燥过程受回潮影响干燥速率有波动,但是整体属于降速干燥过

程,因此计算过程采用 Weibull 函数模拟曲线计算水分比值。

首先根据(7)式线性拟合结果,计算斜率,再根据曲线斜率计算 D_{eff} 值,函数非线性拟合参数及

斜率计算结果如表 4 所示, RMSE 值区间为 0.094~0.249, SSE 值区间为 0.062~0.309, R^2 值区间为 0.998 9~0.999 9, DC 值区间为 0.998 6~0.999 9, 以上检验参数说明函数拟合效果理想。

表 4 当归干燥过程中 D_{eff}
Table 4 D_{eff} of ASR during drying

干燥方法	斜率	平均直径/cm	$D_{\text{eff}}/(\text{mm}^2 \cdot \text{h}^{-1})$	拟合检验参数			
				RMSE	SSE	R^2	DC
低温阴干	-0.003 8	2.33	0.209 59	0.102	0.063	0.999 9	0.999 9
低温 40 °C 回潮	-0.057 3	2.78	4.489 40	0.094	0.062	0.999 8	0.999 8
低温 55 °C 回潮	-0.058 1	2.78	4.566 90	0.249	0.309	0.998 9	0.998 6

当归阴干及低温回潮干燥过程中 D_{eff} 值结果见表 4, 由结果可知当归阴干 D_{eff} 小于低温回潮干燥, 低温回潮 40 °C 和 50 °C 干燥 D_{eff} 随干燥温度升高而增大, 但是增长幅度小于干燥条件引起的 D_{eff} 变化, 以上结果说明, 低温回潮干燥水分扩散效率快于阴干, 低温回潮 50 °C 干燥水分扩散效率快于低温回潮 40 °C。

2.4 低温条件下干燥活化能计算及分析

干燥活化能计算和 D_{eff} 、干燥温度有关, 根据计算公式 (9) 进行函数拟合, 由于干燥方法和干燥温度对当归干燥 D_{eff} 影响趋势一致, 曲线拟合过程中可将阴干和低温回潮干燥都可近似看作是低温干燥过程, 干燥温度由室温递增到 55 °C, 根据线性方程斜率求干燥活化能 E_a , 其值反映当归在低温干燥过程中的干燥能耗和难易程度。

根据不同温度和相应 D_{eff} 进行拟合, 其结果 RMSE 值为 0.687, SSE 值为 1.416, R^2 值为 0.996 9, DC 值为 0.996 9, 说明函数拟合理想, 根据函数斜率进一步求得当归低温干燥过程中干燥活化能 E_a 为 80.75 kJ/(mol·K)。

3 讨论

当归的适宜干燥技术是产地加工的关键, 当归在传统的晒干、阴干和熏干过程中, 一般难以直接干燥, 熏干多数需要熏至七八成干, 再晒干或晾干, 阴干和晒干过程中, 都需经过反复的晾晒和回潮过程, 传统干燥方法复杂且耗时较长, 目前已经难以满足生产要求, 本研究采用 Weibull 分布函数模拟当归阴干及低温回潮干燥模型, 比较低温条件下, 当归低温回潮干燥与传统阴干干燥效率, 函数模拟和实验结果表明, Weibull 函数模型均可较好反映当归阴干及低温回潮干燥特征, 函数拟合参数变化趋势和当归干燥曲线吻合, 同时, 研究结果发现当归低温回潮干燥效率远高于传统阴干干燥, 采用低温

回潮干燥当归, 达到最终干燥水分比时, 其所用时间远小于阴干干燥时间, 在较低温度条件下, 极大地缩短了当归传统阴干干燥周期。在低温和回潮条件下, 干燥过程函数模拟参数、干燥曲线、回潮速率、 D_{eff} 和干燥活化能等均可有效反映当归的干燥规律和干燥过程脱水效率。

在当归产地加工中, 阴干干燥当归样品具有特殊质地、气味和油润性, 体现出当归药材的道地性, 其干燥过程中的低温环境和反复吸潮、干燥过程也是其品质形成的重要因素, 因此采用低温回潮干燥当归, 不但满足当归传统干燥过程中低温条件, 有利于当归干燥效率的提升, 还能模拟传统干燥过程中的受热吸潮现象, 在干燥和回潮的交替过程中, 使当归药材性状和质地也发生变化, 在特定的干燥条件下形成当归所特有的药材品质属性, 同时回潮过程有助于干燥过程中药材整形, 减少侧根断裂, 提高当归药材干燥加工成品率。实际生产过程中, 低温回潮所需温度较低、能耗小、回潮干燥条件容易满足, 与传统干燥过程中的受热吸潮过程相似, 且低温条件有利于当归品质保障, 因此, 对低温回潮干燥技术的进一步研究有助于当归产地干燥技术的发展和提升。

综上所述, 当归干燥过程受干燥方法参数选择、药材直径、干燥时间、回潮效率等因素影响, 当归干燥脱水过程不仅与当归外部形状有关, 还与当归内部微观构造变化有关, 加之当归含有挥发油等热敏性化学成分, 其干燥过程对当归品质有影响, 因此, 在探讨各个具体因素对当归干燥工艺影响的同时, 还应当研究当归干燥对其品质或热敏性成分变化的相关性。

参考文献

- [1] 中国药典 [S]. 一部. 2015.

- [2] 李波, 强正泽, 李成义. 当归干燥加工的历史沿革 [J]. 中国中药杂志, 2019, 44(6): 1278-1283.
- [3] 龚苏晓, 刘毅, 刘素香, 等. 当归总苯酐的超临界 CO₂ 萃取工艺研究 [J]. 现代药物与临床, 2010, 25(6): 448-452.
- [4] 黄伟晖, 宋纯清. 当归的化学和药理学研究进展 [J]. 中国中药杂志, 2001, 26(3): 147-155.
- [5] 宋秋月, 付迎波, 刘江, 等. 当归的化学成分研究 [J]. 中草药, 2011, 42(10): 1900-1904.
- [6] Pei Y, Tan C B, Xu W R, *et al.* Virtual evaluation on the activities of phthalides and terpenoids from *Angelica sinensis* [J]. *Chin Herb Med*, 2010, 2(3): 236-241.
- [7] 杜俊蓉, 白波, 余彦, 等. 当归挥发油研究新进展 [J]. 中国中药杂志, 2005, 30(18): 1400-1406.
- [8] 宫文霞, 周玉枝, 李肖, 等. 当归抗抑郁化学成分及药理作用研究进展 [J]. 中草药, 2016, 47(21): 3905-3911.
- [9] Fang L, Xiao X F, Liu C X, *et al.* Recent advance in studies on *Angelica sinensis* [J]. *Chin Herb Med*, 2012, 4(1): 12-25.
- [10] 张来宾, 吕洁丽, 陈红丽, 等. 当归中苯酐类成分及其药理作用研究进展 [J]. 中国中药杂志, 2016, 41(2): 167-176.
- [11] Yeh J C, Garrard I J, Cho C W C, *et al.* Bioactivity-guided fractionation of the volatile oil of *Angelica Sinensis Radix* designed to preserve the synergistic effects of the mixture followed by identification of the active principles [J]. *J Chromatogr A*, 2012, 1236: 132-138.
- [12] 韦玮, 龚苏晓, 张铁军, 等. 当归多糖类成分及其药理作用研究进展 [J]. 药物评价研究, 2009, 32(2): 130-134.
- [13] 李成义, 祝永甲, 王明伟, 等. 不同干燥方法对当归质量影响研究 [J]. 甘肃中医学院学报, 2013, 30(5): 21-25.
- [14] 祝永甲. 当归产地加工干燥工艺技术研究 [D]. 兰州: 甘肃中医学院, 2014.
- [15] 郭玫, 李应东, 邵晶, 等. 不同干燥方式对当归质量的影响 [J]. 中成药, 2004, 26(1): 36-37.
- [16] 唐文文, 李国琴, 晋小军. 不同干燥方法对当归挥发油成分的影响 [J]. 中国实验方剂学杂志, 2014, 20(4): 9-12.
- [17] 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.
- [18] 朱邵晴, 郭盛, 钱大玮, 等. 基于多元功效成分的当归药材产地现代干燥加工方法研究 [J]. 中国中药杂志, 2017, 42(2): 364-273.
- [19] 辛学倩, 薛长湖, 薛勇, 等. 秘鲁鱿鱼丝加工中回潮工艺的作用机理研究 [J]. 食品工业科技, 2010, 31(3): 83-86.
- [20] 张保全, 陈小翔, 马留军, 等. 烤烟回潮特性及其动力学模型 [J]. 天津农业科学, 2017, 23(8): 91-94.
- [21] 李振丰, 徐建中, 王治, 等. 浙麦冬产地加工不同干燥方法研究 [J]. 中国现代中药, 2016, 18(12): 1624-1627.
- [22] 沙秀秀, 朱邵晴, 段金殿, 等. 基于 Weibull 分布函数的当归干燥过程模拟及其动力学研究 [J]. 中国中药杂志, 2015, 40(11): 2117-2121.
- [23] 张卫鹏, 高振江, 肖伟红, 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): 317-323.
- [24] Corzo O, Bracho N, Alvarez C. Weibull modle for thin-layer drying of Mango slices at different maturity stages [J]. *J Food Process Pres*, 2010, 34(6): 993-1008.
- [25] Corzo O, Bracho N, Pereira A, *et al.* Weibull distribution for modeling air drying of coroba slices [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2008, 41(10): 2023-2028.
- [26] Bantle M, Kolsaker K, Eikevik T M. Modification of the Weibull distribution for modeling atmospheric freeze-drying of food [J]. *Dry Technol*, 2011, 29(10): 1161-1169.
- [27] Ju H Y, Zhao S H, Mujumdar A S, *et al.* Energy efficient improvements in hot air drying by controlling relative humidity based on Weibull and Bi-Di models [J]. *Food Bioprod Process*, 2018, 111: 20-29.
- [28] 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.
- [29] 汤尚文, 马雪伟, 于博, 等. 南瓜红外干燥模型及关键参数计算 [J]. 食品与发酵工业, 2017, 43(1): 124-129.
- [30] 王蕴博, 王宝和. Weibull 函数及其在干燥动力学研究中的应用 [J]. 干燥技术与设备, 2011, 9(3): 103-109.