

前胡切片微波真空干燥特性分析及模拟

胡轶娟^{1,2}, 浦锦宝^{1,2}, 徐攀^{1,2}, 童晔玲^{1,2}, 楼柯浪^{1,2}, 梁卫青^{1,2*} (1.浙江省中医药研究院, 杭州 310007; 2.浙江省中药新药研发重点实验室, 杭州 310007)

摘要: 目的 为了探索前胡切片在微波真空干燥过程的水分及其成分变化规律, 以期有效提高前胡切片的干燥效率和饮片品质, 开展了前胡切片微波真空干燥特性分析与模拟研究。方法 进行不同干燥条件(微波功率密度、真空度和切片厚度)的前胡切片微波真空干燥实验, 研究干燥过程的水分比和干燥速率变化情况, 运用 HPLC 测定干燥后的前胡切片 3 个香豆素类成分(白花前胡甲素、白花前胡乙素和白花前胡素 E)含量, 并采用 Weibull 函数对干燥过程的水分比曲线进行模拟与分析。结果 前胡切片微波真空干燥过程存在加速、恒速和减速 3 个阶段。与真空度和切片厚度相比, 通过提高微波功率密度可以更有效地缩短干燥时间、提高干燥效率。在实验参数范围内, 较优干燥条件组合为微波功率密度 $3.0 \text{ W} \cdot \text{g}^{-1}$, 真空度 800 Pa, 切片厚度 2 mm。所有干燥条件的变化对干燥后的前胡切片香豆素类成分含量影响均不显著。Weibull 函数模拟与分析结果表明: 不同干燥条件下的尺度参数介于 17.43~45.38, 其值越小干燥时间越短, 形状参数介于 1.41~1.77 且均大于 1, 表明干燥过程由内外部水分扩散共同控制。结论 研究工作既为前胡切片微波真空干燥的工艺改进和质量控制提供了重要的理论依据和技术支持, 还将为前胡切片干燥的规范化和品质特征的形成提供重要参考。

关键词: 前胡切片; 微波真空干燥; 干燥特性; 模拟; Weibull 函数; 香豆素

中图分类号: R283.3 文献标志码: B

DOI: 10.13748/j.cnki.issn1007-7693.20223150

Drying Characteristics Analysis and Simulation of Peucedani Radix Slices During Microwave Vacuum Drying

HU Yijuan^{1,2}, PU Jinbao^{1,2}, XU Pan^{1,2}, TONG Yeling^{1,2}, LOU Kelang^{1,2}, LIANG Weiqing^{1,2*} (1.Zhejiang Academy of Traditional Chinese Medicine, Hangzhou 310007, China; 2.Key Laboratory of Research and Development of Chinese Medicine of Zhejiang Province, Hangzhou 310007, China)

ABSTRACT: OBJECTIVE In order to explore the moisture and components change law of Peucedani Radix slices during microwave vacuum drying, and effectively improve the drying efficiency and slice quality of Peucedani Radix slices, drying characteristics analysis and simulation of Peucedani Radix Slices during microwave vacuum drying were carried out. **METHODS** Microwave vacuum drying experiments of Peucedani Radix slices under different drying conditions (microwave power density, vacuum degree and slice thickness) were carried out. The changes of moisture ratio and drying rate during drying process were studied. The contents of three coumarin ingredients (praeruptorin A, praeruptorin B and praeruptorin E) in dried Peucedani Radix slices were determined by HPLC. Weibull function was used to simulate and analyze the moisture ratio curve during drying process. **RESULTS** The results showed that microwave vacuum drying process of Peucedani Radix slices has three stages: acceleration, constant speed and deceleration. Compared with vacuum degree and slice thickness, increasing microwave power density can shorten drying time and improve drying efficiency more effectively. In the range of experimental parameters, the optimum drying conditions were as follows: microwave power density was $3.0 \text{ W} \cdot \text{g}^{-1}$, vacuum degree was 800 Pa, and slice thickness was 2 mm. The changes of all drying conditions had no significant effect on the content of coumarins in dried Peucedani Radix slices. The results of Weibull function simulation and analysis showed that the scale parameters under different drying conditions ranged from 17.43 to 45.38, and the smaller the value, the shorter the drying time. The shape parameters ranged from 1.41 to 1.77 and were all greater than 1, indicating that the drying process was controlled by internal and external water diffusion. **CONCLUSION** The research work not only provides important theoretical basis and technical support for the process improvement and quality control of microwave vacuum drying process of Peucedani Radix slices, but also provides important reference for the standardization of Peucedani Radix slices drying and the formation of quality characteristics.

KEYWORDS: Peucedani Radix slices; microwave vacuum drying; drying characteristics; modeling; Weibull function; coumarin

基金项目: 浙江省基础公益研究计划项目 (LGF21H280003), 浙江省中医药健康服务研究计划项目 (2024ZF047), 浙江省中医药科技计划中药现代化专项项目 (2020ZX004)

作者简介: 胡轶娟, 女, 硕士, 副研究员 Email: huyijuan604@163.com *通信作者: 梁卫青, 男, 硕士, 副研究员 Email: jxllwq22@163.com

前胡为伞形科植物白花前胡 *Peucedanum praeruptorum* Dunn 的根。前胡药材广泛栽培于浙江、江西、安徽、山东、贵州和四川等省份。前胡味苦、辛，性微寒，有降气化痰、散风清热的功效，常用于治疗痰热喘满、咳痰黄稠和风湿咳嗽痰多等症^[1]。中国药典 2020 年版描述前胡洗净后，晒干或低温干燥^[2]。晒干受气候条件的影响易发生霉烂变质的情况。采用低温干燥则因干燥终点难以判断，常出现过度烘干或烘干不足^[3]。

微波真空干燥技术充分结合了微波干燥和真空干燥的优点。在真空干燥过程中引入微波辐射能，利用微波从内向外加热的特性，加快水分的传热速率，缩短物料的干燥时间，同时兼具真空低温干燥的优点^[4]。目前微波真空干燥技术已广泛应用于莲子^[5]、瓜蒌皮^[6]、黄芩^[7]、玛咖^[8]、油茶籽^[9]、咖啡豆^[10]和蘑菇^[11]等干燥。

通过建立数学模型对干燥过程进行量化描述是干燥过程的主要重要内容之一，利用数学模型预测干燥特性是指导干燥实验和生产的重要研究手段，这对干燥理论的发展和應用都具有重要意义^[12-13]。目前已有许多理论、经验和半理论半经验模型用于描述干燥过程的水分变化，其中 Weibull 函数具有适用性广、覆盖面广的优点^[14-15]。通过对 Weibull 函数的拟合参数进行分析，还有助于掌握干燥物料的水分扩散机制，这将有利于干燥方法的合理选择和应用^[16-17]。

目前关于前胡切片微波真空干燥过程的传热传质规律报道较少，通过建立数学模型描述前胡切片微波真空干燥过程水分变化规律的相关研究尚未见报道。将微波真空干燥技术应用于前胡切片干燥，研究微波功率密度、真空度和切片厚度对干燥过程特性(水分比和干燥速率)以及干燥后的香豆素类成分含量的影响，并采用 Weibull 函数拟合干燥过程的水分比曲线，探索并论述尺度参数 α 和形状参数 β 的物理意义及影响因素，希望为前胡切片的干燥工艺改进和质量控制提供重要的理论依据和技术支持。

1 材料与仪器

1.1 材料

前胡新鲜药材于 2021 年 12 月采自浙江省淳安县中药材种植基地，采用同一批种子在同一地块栽培，且该地块周边没有前胡栽培。所有样品经浦锦宝研究员鉴定为伞形科植物白花前胡

Peucedanum praeruptorum Dunn 的根。新鲜前胡药材的初始湿基含水率范围为 56%~60%(105 ℃ 烘 24 h)，挑选表皮无机械损伤、无腐烂的前胡新鲜药材放入纸箱置于 (4±1) ℃ 冰箱中保存备用。

白花前胡甲素对照品(批号: PS000114; 纯度 99.57%)、白花前胡乙素对照品(批号: PS010975; 纯度 99.85%)、白花前胡素 E 对照品(批号: PS001175; 纯度 99.96%) 均购自成都普思生物科技股份有限公司; 甲醇(色谱纯, 批号: I1215607221; MERCK); 超纯水为实验室自制。

1.2 仪器

NJZ07-9B 型微波真空干燥系统(南京杰全微波设备有限公司)主要由微波发射系统、冷凝收集系统、真空系统和控制面板所组成, 微波真空干燥室为内径 40 cm、深度 25 cm 的圆柱形容器, 微波频率为 2 455 MHz; JM-B20002 电子天平(余姚市纪铭称重校验设备有限公司); DQ-103 台式方形中药切片机(温岭林大机械有限公司); Agilent 1 260 infinity II 液相色谱仪包含 1 260 四元泵、1 260 自动进样器、1260DAD 检测器和 1 260 柱温箱; BS210S 电子分析天平(Sartorius); JK-300DB 型数控超声波清洗器(合肥金尼克机械制造有限公司); arium 611UV 超纯水仪(Sartorius)。

2 方法与结果

2.1 微波真空干燥

2.1.1 实验设计 每次实验均提前取出冰箱中的新鲜前胡药材恢复至室温。除去须根, 选取直径为 0.8~1.7 cm 的主根用于干燥实验, 洗净切片。称取前胡切片质量 200 g, 均匀铺于微波炉托盘上进行微波真空干燥实验。开启微波加热前, 真空泵需要运行 30 min, 以保证干燥过程的真空度。

采用单因素实验法研究不同干燥条件(微波功率密度、真空度和切片厚度)的前胡切片干燥特性, 具体实验方案如表 1 所示。采用微波功率除以前胡切片质量的方式计算得到微波功率密度。在某组干燥参数组合实验中, 若相邻 5 min 内前胡切片的质量减少 <1%, 则完成该干燥参数组合的干燥实验。每组干燥参数组合的干燥实验均重复 3 次, 取平均值用于干燥特性分析。

为了分析前胡切片微波真空干燥特性, 需要每隔 5 min 采集干燥过程的前胡切片质量数据, 但是对于真空状态下的干燥实验, 若采用定时取样

表 1 前胡切片微波真空干燥的单因素实验方案

Tab. 1 Single factor experimental scheme of Peucedani Radix slices during microwave vacuum drying

序号	微波功率密度/W·g ⁻¹	真空度/Pa	切片厚度/mm
1	1.5	500	2
2	2.0	500	2
3	2.5	500	2
4	3.0	500	2
5	1.5	300	3
6	1.5	500	3
7	1.5	800	3
8	1.5	1 000	3
9	2.0	500	1
10	2.0	500	2
11	2.0	500	3
12	2.0	500	4

离线称重的方法获得前胡切片的失水数据，会破坏预设的实验条件，不能真实反映干燥过程的连续动态。设计了以下实验方案：首先设定一组干燥参数组合进行前胡切片微波真空干燥实验，干燥至 5 min 时停止实验，然后取出所有前胡切片进行离线称重，得到干燥至 5 min 的前胡切片质量数据，最后重复相似操作，可以依次得到在该干燥参数组合下干燥至其它 5 min 整数倍时间(如 10、15、20 min)的前胡切片质量数据。该实验方案虽然能够真实反映干燥过程的连续动态，但较为繁琐、耗时，还可能由于原料的一致性问题导致存在较大的实验误差。为了提高失水数据的可靠性，采用以下方法来尽可能保证原料的一致性：新鲜前胡药材均在同一采收期采自同一产地，切片时使用相同部位，同一批次前胡切片用于同一组干燥参数组合的所有干燥实验。

在完成上述干燥特性实验以后，继续根据表 1 开展不同微波功率密度、真空度或切片厚度下的前胡切片微波真空干燥实验，并采用 HPLC 测定干燥结束时白花前胡甲素、白花前胡乙素和白花前胡素 E 等香豆素类成分含量^[18]。每次干燥实验直至前胡切片含水率降至 10% 时停止实验。每组实验重复 3 次，取平均值作为结果。

2.1.2 干燥参数 前胡切片的干基含水率是指前胡切片在干燥过程中某一时刻的水分质量与前胡切片干质量的比值，其计算公式如下^[19]：

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

式中， m_t 表示任意干燥 t 时刻前胡切片的质量

(g)， m_d 表示前胡切片干物质的质量 (g)。

采用水分比 (moisture ratio, MR) 表示前胡切片在不同时刻的含水量，其计算公式如下^[20]：

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

式中， M_t 表示任意干燥 t 时刻前胡切片的干基含水率， M_0 表示前胡切片的初始干基含水率。

干燥速率 DR(Drying Rate) 是指前胡切片干燥过程中干基含水率的变化与干燥时间的比值，单位为 %/min，其计算公式如下^[21]：

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

式中， $\bar{x} \pm s$ 和 M_{t_2} 分别表示干燥时间为 t_1 和 t_2 时前胡切片的干基含水率。

2.1.3 Weibull 函数 采用 Weibull 函数拟合前胡切片微波真空干燥过程的水分比曲线。Weibull 函数的表达式如下^[22]：

$$MR = \exp \left[- \left(\frac{t}{\alpha} \right)^\beta \right] \quad (4)$$

式中，MR 表示水分比； α 表示尺度参数，其值约等于干燥过程完成 63% 所需的时间； β 表示形状参数，其与前胡切片在干燥初始阶段的水分迁移机制相关； t 表示干燥时间 (min)。

采用决定系数 (R^2)、均方根误差 (RMSE) 和卡方值 (χ^2) 评价 Weibull 函数的拟合效果， R^2 越接近 1、RMSE 越小或者 χ^2 越小，则拟合效果越好。3 个评价指标的具体计算公式如下^[17]：

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

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

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 / (N - n) \quad (7)$$

式中， $MR_{pre,i}$ 表示模型计算得到的第 i 个水分比， $MR_{exp,i}$ 表示干燥实验得到的第 i 个水分比， N 表示实验数据个数， n 表示模型参数个数。

2.1.4 数据统计与分析 各组数据均用 $\bar{x} \pm s$ 表示，多组间均数比较采用方差分析，所有数据均用 SPSS 19.0 统计软件进行处理， $P < 0.05$ 为统计学上差异有显著性。采用 Matlab 7.0.1 软件进行干燥数据的 Weibull 函数拟合并绘图。

2.2 干燥特性分析

2.2.1 微波功率密度 由不同微波功率密度的前胡切片微波真空干燥过程水分比曲线(图1)可知,相同干燥时间的前胡切片水分比随微波功率密度的增大而逐渐减小。由不同微波功率密度的前胡切片微波真空干燥过程干燥速率曲线(图2)可知,微波功率密度越高,则干燥速率越高。单位质量前胡切片吸收的微波能量随微波功率密度的增大而增大,前胡切片产生的热量较快,可以加快干燥速度,因此增加微波功率密度可以显著缩短干燥时间。由于干燥过程温度变化范围为25.2~39.6℃,微波功率密度的变化对干燥温度影响不大且均处于低温范围,因此本实验的最佳微波功率密度为 $3.0\text{ W}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

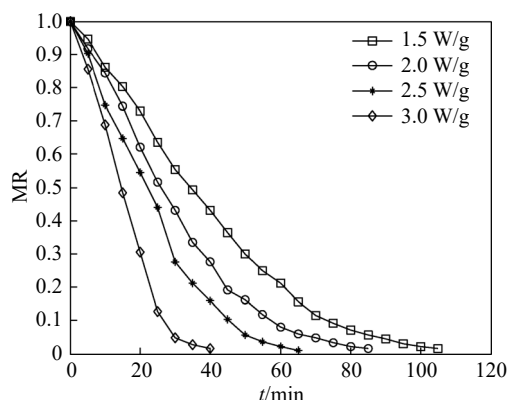


图1 不同微波功率密度的前胡切片微波真空干燥过程的水分比曲线

Fig. 1 Moisture ratio curve of Peucedani Radix slices during microwave vacuum drying with different microwave power densities

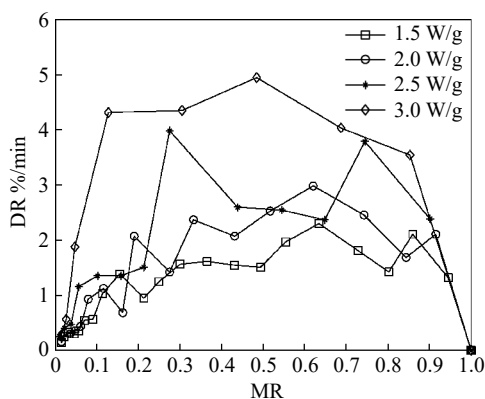


图2 不同微波功率密度下的前胡切片微波真空干燥过程的干燥速率曲线

Fig. 2 Drying rate curve of Peucedani Radix slices during microwave vacuum drying with different microwave power densities

2.2.2 真空度 由不同真空度的前胡切片微波真空干燥过程水分比曲线(图3)可知,相同干燥时间的前胡切片水分比随真空度的增加而逐渐减小。由不同真空度的前胡切片微波真空干燥过程干燥速率曲线(图4)可知,真空度越高,干燥速率稍微更高一点。真空度越高,前胡切片中水的沸点越低,水分蒸发速率越快,因此增加真空度可以缩短干燥时间。由于真空度过大易发生击穿放电致使微波管寿命缩短,再结合能耗因素,因此本实验的最佳真空度为800 Pa。

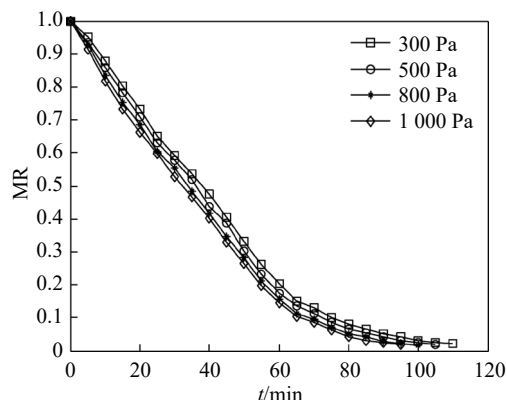


图3 不同真空度下的前胡切片微波真空干燥过程的水分比曲线
Fig. 3 Moisture ratio curve of Peucedani Radix slices during microwave vacuum drying with different vacuum degrees

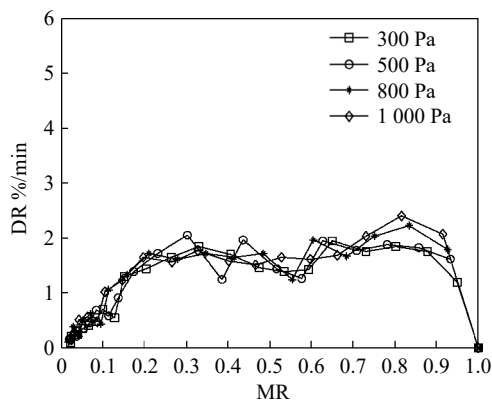


图4 不同真空度下的前胡切片微波真空干燥过程的干燥速率曲线

Fig. 4 Drying rate curve of Peucedani Radix slices during microwave vacuum drying with different vacuum degrees

2.2.3 切片厚度 由不同切片厚度的前胡切片微波真空干燥过程水分比曲线(图5)可知,相同干燥时间的前胡切片水分比随切片厚度的减少而逐渐减少。由不同切片厚度的前胡切片微波真空干燥过程干燥速率曲线(图6)可知,切片厚度越薄,干燥速率稍微更高一点。前胡切片厚度越

薄，内部水分迁移扩散阻力越小，水分可以从切片内部更及时地迁移到其表面，然后蒸发去除，因此减小切片厚度可以缩短干燥时间。考虑到中国药典 2020 年版一部“前胡饮片”项下的“性状”要求，本实验的最佳切片厚度为 2 mm。

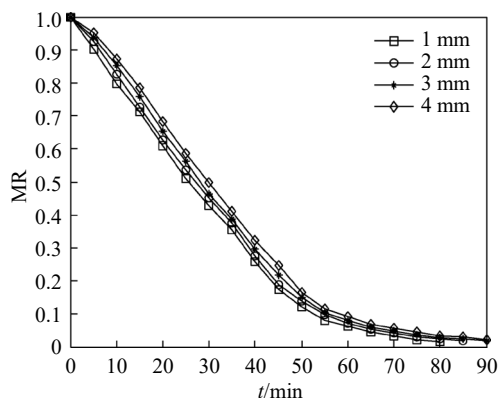


图 5 不同切片厚度的前胡切片微波真空干燥过程的水分比曲线

Fig. 5 Moisture ratio curve of Peucedani Radix slices during microwave vacuum drying with different slice thicknesses

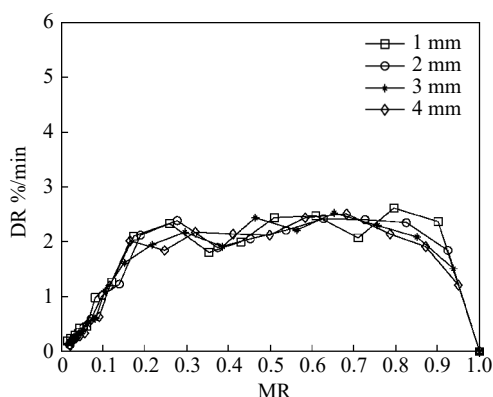


图 6 不同切片厚度的前胡切片微波真空干燥过程的干燥速率曲线

Fig. 6 Drying rate curve of Peucedani Radix slices during microwave vacuum drying with different slice thicknesses

2.3 Weibull 函数拟合

2.3.1 微波功率密度 采用 Weibull 函数拟合不同微波功率密度的水分比曲线，拟合结果如表 2 所示。由表 2 可知， R^2 在 0.996~0.999，RMSE 在 0.009~0.021， χ^2 在 8.10×10^{-5} ~ 5.85×10^{-4} ，拟合效果较好。随着微波功率密度的增加，尺度参数 α 从 43.39 min 逐渐减小至 17.43 min，这表明微波功率密度对尺度参数 α 影响较大，提高微波功率密度可以显著缩短干燥时间。形状参数 β 值在 1.48~1.77， $\beta > 1$ 表示干燥前期存在延滞阶段，这表明前

胡切片微波真空干燥过程由内外部水分扩散共同控制，干燥速率呈现先升速、恒速后降速的阶段。

表 2 基于 Weibull 函数的水分比曲线拟合结果 (不同微波功率密度)

Tab. 2 Fitting results of moisture ratio curve based on Weibull function (different microwave power densities)

微波功率密度 $W \cdot g^{-1}$	Weibull函数				
	α/min	β	R^2	RMSE	χ^2
1.5	43.39	1.48	0.998	0.013	1.86×10^{-4}
2.0	33.09	1.49	0.999	0.009	8.10×10^{-5}
2.5	26.32	1.50	0.996	0.021	5.17×10^{-4}
3.0	17.43	1.77	0.996	0.021	5.85×10^{-4}

2.3.2 真空度 采用 Weibull 函数拟合不同真空度的水分比曲线，拟合结果如表 3 所示。由表 3 可知， R^2 在 0.993~0.997，RMSE 在 0.018~0.026， χ^2 在 3.61×10^{-4} ~ 7.67×10^{-4} ，拟合效果较好。随着真空度的增加，尺度参数 α 从 45.38 min 逐渐减小至 39.42 min，这表明提高真空度可缩短干燥时间，但幅度不大。形状参数 β 值在 1.41~1.53，这表明前胡切片微波真空干燥过程由内外部水分扩散共同控制，干燥速率呈现先升速、恒速后降速的阶段。

表 3 基于 Weibull 函数的水分比曲线拟合结果 (不同真空度)

Tab. 3 Fitting results of moisture ratio curve based on Weibull function (different vacuum degrees)

真空度/Pa	Weibull函数				
	α/min	β	R^2	RMSE	χ^2
300	45.38	1.53	0.997	0.018	3.61×10^{-4}
500	43.16	1.50	0.996	0.021	4.84×10^{-4}
800	40.89	1.45	0.995	0.023	6.06×10^{-4}
1 000	39.42	1.41	0.993	0.026	7.67×10^{-4}

2.3.3 切片厚度 采用 Weibull 函数拟合不同切片厚度的水分比曲线，拟合结果如表 4 所示。由表 4 可知， R^2 在 0.996~0.999，RMSE 在 0.012~0.021 之间， χ^2 在 1.57×10^{-4} ~ 4.79×10^{-4} ，拟合效果较好。随着切片厚度的增加，尺度参数 α 从 31.86 min 逐渐增加至 36.43 min，这表明增加切片厚度会延长干燥时间，但幅度不大。形状参数 β 值在 1.48~1.65，这表明干燥过程由内外部水分扩散共同控制，干燥速率呈现先升速、恒速后降速的阶段。

2.4 香豆素类成分含量测定

在微波真空干燥过程中，受热和失水可能会导致前胡切片的物理和化学性能发生较大变化。不同干燥条件下 (微波功率密度、真空度和切片厚度) 的干燥后前胡切片香豆素类 (白花前胡甲素、

表 4 基于 Weibull 函数的水分比曲线拟合结果 (不同切片厚度)

Tab. 4 Fitting results of moisture ratio curve based on Weibull function (different slice thicknesses)

切片厚度 /mm	Weibull函数				
	α /min	β	R^2	RMSE	χ^2
1	31.86	1.48	0.996	0.021	4.79×10^{-4}
2	33.35	1.53	0.998	0.016	2.99×10^{-4}
3	34.72	1.59	0.999	0.012	1.60×10^{-4}
4	36.43	1.65	0.999	0.012	1.57×10^{-4}

白花前胡乙素和 白花前胡素 E) 成分含量测定结果如表 5~7 所示。由表 5~7 可知, 在不同干燥条件下, 干燥后的前胡切片香豆素类成分含量波动不大。方差分析的结果也表明所有干燥条件的变化对干燥前后前胡切片香豆素类成分含量影响均不显著。

表 5 前胡切片干燥品的香豆素类成分含量测定结果 (不同微波功率密度)($n=3$)

Tab. 5 Measurement results of coumarin content in dried Peucedani Radix slices (different microwave power densities) ($n=3$)

微波功率密度/ $W \cdot g^{-1}$	质量分数/ $mg \cdot g^{-1}$		
	白花前胡甲素	白花前胡乙素	白花前胡素E
1.5	13.11 ± 1.17	0.90 ± 0.06	2.80 ± 0.53
2.0	13.21 ± 0.73	0.91 ± 0.17	2.85 ± 0.25
2.5	13.33 ± 0.86	1.00 ± 0.17	2.69 ± 0.41
3.0	13.52 ± 1.07	0.99 ± 0.13	2.73 ± 0.36

表 6 前胡切片干燥品的香豆素类成分含量测定结果 (不同真空度)($n=3$)

Tab. 6 Measurement results of coumarin content in dried Peucedani Radix slices (different vacuum degrees) ($n=3$)

真空度/ Pa	质量分数/ $mg \cdot g^{-1}$		
	白花前胡甲素	白花前胡乙素	白花前胡素E
300	13.93 ± 0.42	0.92 ± 0.12	2.74 ± 0.21
500	13.48 ± 0.76	1.01 ± 0.08	2.79 ± 0.34
800	12.58 ± 1.30	0.93 ± 0.12	2.58 ± 0.16
1 000	13.87 ± 0.77	1.01 ± 0.12	2.83 ± 0.30

表 7 前胡切片干燥品的香豆素类成分含量测定结果 (不同切片厚度)($n=3$)

Tab. 7 Measurement results of coumarin content in dried Peucedani Radix slices (different slice thicknesses) ($n=3$)

切片厚度/ mm	质量分数/ $mg \cdot g^{-1}$		
	白花前胡甲素	白花前胡乙素	白花前胡素E
1	12.93 ± 0.76	0.98 ± 0.14	2.75 ± 0.40
2	13.52 ± 0.82	1.05 ± 0.14	3.26 ± 0.26
3	13.31 ± 0.87	0.96 ± 0.05	3.15 ± 0.08
4	12.97 ± 0.63	0.97 ± 0.06	2.92 ± 0.49

3 讨论

由前胡切片微波真空干燥特性分析的结果可知: 虽然微波功率密度、真空度和切片厚度的改变均能影响干燥过程的水分比和干燥速率, 且微波功率密度越高、真空度越高或切片厚度越薄, 前胡切片的干燥速率越快、达到目标水分比所需的干燥时间越短, 但是与微波功率密度相比, 真空度或切片厚度的改变对干燥过程的水分比和干燥速率影响均不显著, 除了真空度会影响传热效率以外, 原因可能是在本实验所设置的微波功率下, 在前胡切片内部发生了蒸发干燥, 水分传输距离对干燥几乎没有影响。在实验参数范围内, 较优干燥条件组合为微波功率密度 $3.0 W \cdot g^{-1}$, 真空度 800 Pa, 切片厚度 2 mm。

由前胡切片微波真空干燥过程的所有干燥速率曲线(图 2、4 和 6)和 Weibull 函数拟合结果的参数分析结果可知: 不管是微波功率密度、真空度还是切片厚度的单因素干燥实验, 干燥速率均存在升速、恒速和降速 3 个阶段^[21]。干燥初期, 由于前胡切片含水率较高, 内部迅速产生蒸汽, 形成压力梯度, 并带动水分向表面迁移。该阶段的微波能量主要用于使前胡切片升温并形成压力梯度, 随着温度的升高干燥速率逐渐增大。干燥中期, 当微波吸收的能量与水向外扩散所需的能量达到平衡时, 干燥过程进入恒速阶段, 此阶段的前胡切片水分大部分是自由水, 且大部分自由水都将在该阶段移除。干燥后期, 前胡切片内部以含量较低的结合水为主, 干燥引起的前胡切片内部结构变化导致微波能量吸收能力下降, 阻碍了结合水的移除, 这表现为干燥过程进入减速阶段。

由 Weibull 函数的所有拟合结果(表 2~4)可知: 所有水分比曲线的拟合效果较好。尺度参数 α 与总干燥时间相关, 其值随着微波功率密度的增加、真空度的增加或切片厚度的减少而减少, 这与图 1、3、5 的变化保持一致。所有的形状参数 β 均 >1 , 这表明干燥速率均呈现先升速、恒速后降速 3 个阶段, 这与图 2、4、6 的变化保持一致。这表明 Weibull 函数能准确描述干燥过程的水分比变化, 且尺度参数 α 和形状参数 β 均能准确反映干燥过程的水分扩散机制。

香豆素是一类含有苯并吡喃酮结构的有机杂环化合物, 具有良好的热力学和光化学稳定性。香豆素类是前胡药材的主要有效成分, 虽然这些

成分相对较稳定,但是在干燥过程中也会发生不同程度的降解和转变^[23]。文献^[24]指出宁前胡应尽量选择在<50℃干燥,因为白花前胡甲素和乙素的含量因降解和转化而不符合药典要求。本实验的温度变化范围为25.2~39.6℃,所有干燥条件的变化对干燥后的前胡切片香豆素类成分含量影响均不显著。因此,微波真空低温干燥技术可以减少香豆素类成分的损失,提高前胡切片的干燥品质。

通过开展前胡切片微波真空干燥特性分析及模拟研究,表明微波真空干燥技术可以实现前胡切片的低温快速干燥,既能提高干燥效率,又能有效避免干燥过程的香豆素类成分损失。将数学模型与干燥过程水分变化相结合,采用Weibull函数量化描述干燥过程,结果表明干燥过程由内外部分水扩散共同控制,这可以为实现前胡切片的干燥过程质量控制和工艺优化提供重要基础。这些研究工作为前胡切片的微波真空干燥工艺改进和质量控制提供了重要的理论依据和技术支持。同时,还将为前胡切片干燥的规范化和品质特征的形成提供重要参考。

REFERENCES

- [1] SONG Z Q, LI B, TIAN K Y, et al. Research progress on chemical constituents and pharmacological activities of Peucedani Radix and Peucedani Decursivi Radix[J]. Chin Tradit Herb Drugs(中草药), 2022, 53(3): 948-964.
- [2] 中国药典. 一部[M]. 2020: 277.
- [3] SHI X X, HUANG Q W, GUO Z X, et al. Study on the key factors affecting the quality of Peucedani Radix[J]. Chin J Mod Appl Pharm(中国现代应用药学), 2022, 39(2): 192-195.
- [4] WANG Q, ZHENG Y F, GAO H Y, et al. Characteristics and kinetics of microwave-vacuum dehydration of osmotically pretreated cherry tomatoes[J]. Fujian J Agric Sci(福建农业学报), 2017, 32(10): 1118-1123.
- [5] ZHAO Y T, WANG W W, ZHUANG W J, et al. Microwave vacuum drying characteristics of lotus seeds and the fractal characteristics of their microstructures[J]. Mod Food Sci Technol(现代食品科技), 2016, 32(8): 213-218.
- [6] ZHANG H Q, LIU P, QIAN D W, et al. Study on modern drying processing method for Trichosanthis Pericarpium based on multi-bioactive constituents[J]. Chin Tradit Herb Drugs(中草药), 2020, 51(4): 950-964.
- [7] TAO X K, CHEN N, ZHANG S B. A experimental study of microwave vacuum drying technology in the drying process of *Scutellaria baicalensis*[J]. J Suzhou Univ(宿州学院学报), 2018, 33(3): 114-116.
- [8] ZHANG M Y, REN Y M, ZHANG C F. Microwave vacuum drying characteristics and quality of maca slices(*Lepidium meyenii*)[J]. Mod Food Sci Technol(现代食品科技), 2019, 35(6): 230-236.
- [9] TANG X H, LI C Y, HUANG D, et al. Microwave vacuum drying characteristics of oil camellia seed[J]. J Central South Univ For & Technol(中南林业科技大学学报), 2021, 41(6): 139-146,166.
- [10] DONG W J, CHENG K, HU R S, et al. Effect of microwave vacuum drying on the drying characteristics, color, microstructure, and antioxidant activity of green coffee beans[J]. *Molecules*, 2018, 23(5): 1146.
- [11] JIANG N, LIU C Q, LI D J, et al. Effect of thermosonic pretreatment on drying kinetics and energy consumption of microwave vacuum dried *Agaricus bisporus* slices[J]. J Food Eng, 2016(177): 21-30.
- [12] CHENG X F, PAN L, LI N, et al. Moisture diffusivity characteristics and model fitting of Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) during microwave vacuum drying[J]. Sci Technol Food Ind(食品工业科技), 2022, 43(6): 33-40.
- [13] TORKI-HARCHEGANI M, GHANBARIAN D, GHASEMI PIRBALOUTI A, et al. Dehydration behaviour, mathematical modelling, energy efficiency and essential oil yield of peppermint leaves undergoing microwave and hot air treatments[J]. Renew Sustain Energy Rev, 2016(58): 407-418.
- [14] ZHU S Q, GUO S, SHA X X, et al. Modelling and analysis of the moisture dynamic process of *Codonopsis Radix* with different drying methods[J]. Sci Technol Food Ind(食品工业科技), 2017, 38(7): 245-249,255.
- [15] ZHAO Y T, WANG W W, ZHENG B D, et al. Mathematical modeling and influence of ultrasonic pretreatment on microwave vacuum drying kinetics of lotus (*Nelumbo nucifera* Gaertn.) seeds[J]. *Dry Technol*, 2017, 35(5): 553-563.
- [16] WANG X C, KANG C C, WU Z F, et al. Simulation of drying process of single Liuwei Dihuangwan and analysis of its dynamics based on weibull function[J]. Chin J Exp Tradit Med Form(中国实验方剂学杂志), 2019, 25(12): 133-139.
- [17] JU H Y, ZHAO S H, ZHAO H Y, et al. Vacuum pulsed drying characteristics of Lycii Fructus based on Weibull distribution model[J]. Chin Tradit Herb Drugs(中草药), 2018, 49(22): 5313-5319.
- [18] HU Y J, ZHANG H J, LIANG W Q, et al. Rapid and simultaneous measurement of praeurotin A, praeurotin B, praeurotin E, and moisture contents in Peucedani Radix using near-infrared spectroscopy and chemometrics[J]. *J AOAC Int*, 2020, 103(2): 504-512.
- [19] LI C, ZHOU M, BI J F, et al. Effects of hot-air drying as well as short-and medium-wave infrared radiation drying on the drying characteristics and polyphenol content of peach pomace[J]. Mod Food Sci Technol(现代食品科技), 2017, 33(12): 137-144.
- [20] WANG X C, KANG C C, WU Z F, et al. Simulation and experiment of temperature uniformity of Erzhi Pills during hot air drying process[J]. Chin Tradit Herb Drugs(中草药), 2020, 51(5): 1226-1232.
- [21] ZHU D Q, MA J, JIANG R, et al. Parameter optimization of hickory nut drying by phased varying power microwave[J]. Trans Chin Soc Agric Eng(农业工程学报), 2016, 32(15): 268-274.
- [22] XUE G, LI M, GUAN Z Q. Simulation of vacuum microwave drying of Tilapia fillets by ultrasonic penetration based on Weibull function[J]. Food Ferment Ind(食品与发酵工业), 2020, 46(1): 157-165.
- [23] YU F, WAN N, LI Y H, et al. Analysis on change rule and mechanism in physical and chemical properties of Chinese herbal medicines during drying[J]. Chin Tradit Herb Drugs(中草药), 2021, 52(7): 2144-2153.
- [24] 邱晓霞,张玲,岳婧怡,等.宁前胡中3种香豆素含量影响因素的考察[J].中药材, 2016, 39(4): 713-716.

收稿日期: 2022-09-05

(本文责编:李艳芳)