

张付杰, 辛立东, 李丽霞, 等. 三七主根微波真空-热风分段式干燥特性及品质分析[J]. 江苏农业学报, 2022, 38(1): 214-222.  
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2022.01.026

## 三七主根微波真空-热风分段式干燥特性及品质分析

张付杰<sup>1,2</sup>, 辛立东<sup>1</sup>, 李丽霞<sup>1,2</sup>, 周杰<sup>1</sup>, 李子建<sup>1</sup>, 林宇浩<sup>1</sup>

(1. 昆明理工大学农业与食品学院, 云南 昆明 650500; 2. 云南省高校中药材机械化工程研究中心, 云南 昆明 650500)

**摘要:** 为研究三七主根微波真空-热风分段式干燥特性及品质, 探讨不同功率密度(0.50 W/g、0.75 W/g、1.00 W/g、1.50 W/g)、腔室压力(1 kPa、3 kPa、5 kPa、10 kPa)和温度上限(45 ℃、50 ℃、55 ℃)对三七主根干燥特性及有效水分扩散系数的影响, 建立分段式干燥拟合模型, 并对比分析三七品质的变化。结果表明, 三七主根微波真空-热风分段式干燥主要分为减速阶段和恒速阶段, 恒速阶段发生在干基含水率从1.0 g/g降至0.5 g/g阶段。三七主根干燥过程中微波真空阶段的有效水分扩散系数( $D_{\text{eff}}$ )为 $7.84 \times 10^{-10} \sim 1.80 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ , 并且随着温度上限、功率密度的增大及腔室压力的降低而增大, 热风干燥阶段的 $D_{\text{eff}}$ 为 $1.45 \times 10^{-10} \sim 6.82 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 。对干燥过程进行分段拟合, 发现 Weibull 模型能更好地预测三七主根微波真空-热风分段式干燥规律。与热风对照组相比, 微波真空-热风分段式干燥可缩短干燥时间44.6%~60.0%, 其三七干制品总皂苷含量最高为10.2%, 其应用具有较好的可行性及优势。

**关键词:** 三七; 干燥特性; 模型; 分段式干燥; 微波真空-热风; 品质

**中图分类号:** S567.23+6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2022)01-0214-09

## Characteristics and quality analysis of main roots of *Panax notoginseng* (Burk.) F. H. Chen by microwave vacuum-hot air segmented drying

ZHANG Fu-jie<sup>1,2</sup>, XIN Li-dong<sup>1</sup>, LI Li-xia<sup>1,2</sup>, ZHOU Jie<sup>1</sup>, LI Zi-jian<sup>1</sup>, LIN Yu-hao<sup>1</sup>

(1. Faculty of Agriculture and Food, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; 2. Mechanization Engineering Research Center of Chinese Medicinal Materials of Yunnan Provincial Colleges and Universities, Kunming 650500, China)

**Abstract:** To investigate the characteristics and quality of microwave vacuum-hot air segmented drying of *Panax notoginseng* main roots, effects of different power densities (0.50 W/g, 0.75 W/g, 1.00 W/g and 1.50 W/g), chamber pressures (1 kPa, 3 kPa, 5 kPa and 10 kPa) and upper temperature limits (45 ℃, 50 ℃ and 55 ℃) on the drying characteristics and effective moisture diffusion coefficient of *P. notoginseng* roots were discussed. Segmented drying fitting models were established, and the changes of *P. notoginseng* qualities were compared and analyzed. The results suggested that the microwave vacuum-hot air segmented drying of *P. notoginseng* main roots was mainly in the stages of falling rate and constant rate. The constant rate stage occurred when the moisture content of the dry basis dropped from 1.0 g/g to 0.5 g/g. During the microwave vacuum stage of drying process, the effective moisture diffusivity coefficient ( $D_{\text{eff}}$ ) was between  $7.84 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  and  $1.80 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ , which added with the increase of temperature upper limit, power density and the decrease of chamber pressure. The

收稿日期: 2021-04-13

基金项目: 云南省重大科技专项计划项目(2018ZF004); 昆明理工大学分析测试基金资助项目(2019T20030031)

作者简介: 张付杰(1977-), 男, 山东青岛人, 博士, 副教授, 主要从事农产品加工技术与装备研究。(E-mail) 66605115@qq.com

通讯作者: 李丽霞, (E-mail) lilixia2012@kust.edu.cn

constant rate. The constant rate stage occurred when the moisture content of the dry basis dropped from 1.0 g/g to 0.5 g/g. During the microwave vacuum stage of drying process, the effective moisture diffusivity coefficient ( $D_{\text{eff}}$ ) was between  $7.84 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  and  $1.80 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ , which added with the increase of temperature upper limit, power density and the decrease of chamber pressure. The

$D_{\text{eff}}$  of the hot air drying stage was between  $1.45 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  and  $6.82 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ . Through segmental fitting of the drying process, it was found that the Weibull model could better predict the law of microwave vacuum-hot air sectional drying of *P. notoginseng* main roots. Compared with the hot air control group, it could be seen that microwave vacuum-hot air drying had shortened the drying time by 44.6% to 60.0%, and the saponins content of *P. notoginseng* dry products reached 10.2%, which had better feasibility and advantages.

**Key words:** *Panax notoginseng*; drying characteristics; model; segmented drying; microwave vacuum-hot air; quality

三七 [*Panax notoginseng* (Burk.) F. H. Chen] 是中国特有的传统名贵中药材之一,也是中国中药第一大品种。2019 年云南三七的种植面积已达  $3.3 \times 10^4 \text{ hm}^2$ , 产量超过  $3.5 \times 10^4 \text{ t}$ , 产业规模较大, 用途甚广<sup>[1]</sup>。三七具有镇痛、抗贫血、增强机体免疫力、延缓衰老等功效, 其总皂苷特别是人参皂苷 ( $\text{Rg}_1$ ) 含量远超人参、西洋参, 具有很高的经济价值<sup>[2-3]</sup>。干燥是中药材加工及保留有效成分的重要环节。经过干燥的中药材不仅可以较好地保留其有效成分, 还更利于贮藏、运输、深加工<sup>[4-5]</sup>。目前, 三七的干燥以传统自然晾晒为主, 已不能满足人们对其品质、经济性、卫生条件的要求。相关学者对新型干燥工艺进行了探讨, Popovich 等<sup>[6]</sup>研究了冷冻、热风、微波真空 3 种干燥方式对西洋参的干燥情况, 发现与热风干燥相比, 微波真空干燥可以更好地保留总皂苷含量, 并提高干燥速率。

微波真空干燥具有效率高、质量高并且可以隔绝氧气等特点, 被越来越多地应用于农产品和中药材的加工生产中<sup>[7-9]</sup>。但微波加热的干燥速率过快, 易产生“热点”, 导致局部过热甚至焦糊<sup>[10-11]</sup>。在持续微波干燥条件下, 三七干制品中热敏性物质皂苷损失较多, 较自然晾晒所得干制品损失达 12%~24%<sup>[12-13]</sup>, 这可能是因为持续的微波加热, 产生了局部过热现象, 并在干燥后期更加明显, 皂苷受热挥发, 物料品质整体降低。间歇微波是带有“缓苏”效果的非连续性干燥, 可平衡物料内部水分和温度, 缓解温度的持续上升, 并将物料温度控制在一定范围内, 适用于热敏性物料<sup>[14]</sup>。针对微波干燥后期易出现的受热不均匀性及过度干燥现象, 本研究采用热风代替微波作为干燥后期的热源, 该替代方法已应用于红枣<sup>[15]</sup>、黄精<sup>[16]</sup>、大蒜<sup>[17]</sup>的研究中, 结果表明这种方法可以提高物料的品质及有效成分含量。

综上, 本研究拟采用间歇微波与分段干燥相结

合的方式对三七主根进行微波真空-热风分段式干燥, 探讨不同功率密度、腔室压力、温度上限条件下的干燥特性, 建立分段式干燥拟合模型并分析验证该新型工艺的可行性, 以期为三七的工业化干燥加工提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

选用云南省文山州特有的 3 年生新鲜三七, 挑选大小、质量相当, 无虫害, 表面完整且无机械损伤的原料作为试验材料。根据试验要求, 所用新鲜三七为同一批次, 并置于 4℃ 环境中冷藏备用。清洗后, 去除剪口、侧根、须根, 所选主根大小为 1 个 13.64~19.28 g, 初始湿基含水率为  $61.24\% \pm 0.50\%$ 。

### 1.2 试验仪器

本研究用于三七微波真空干燥的设备为 HM-VD-2020 型微波真空干燥装置(成都纽曼和瑞微波技术有限公司产品), 图 1 显示, 该设备可实现由温度精准控制的间歇式微波真空干燥, 即设置温度上限、下限, 物料内部温度超过温度上限时, 微波组件停止工作, 待温度降低至温度下限时, 微波组件启动工作, 该方式可有效控制温度(精度 0.1℃), 保留干制品有效成分。将荧光式光纤传感器插入物料内部测得真实温度, 并由工控触摸一体机根据温度变化控制磁控管组件开始或停止向干燥室发射微波, 实现间歇式微波真空干燥, 且微波功率可实现精准调控, 调节范围为 50~2 000 W。同时具有在线称量装置, 可实时监测物料干燥过程中水分的变化。

本研究所用其他试验仪器有 101-2AB 型电热鼓风干燥箱(北京中兴伟业仪器有限公司产品)、JA5103N 型电子分析天平(四川中浪科技有限公司产品, 精度 0.001 g)、Ultimate 3000 型高效液相色谱仪(赛默飞世尔科技公司产品)、BJ-200 粉碎机(德清拜杰电器有限公司产品)。

### 1.3 试验方法

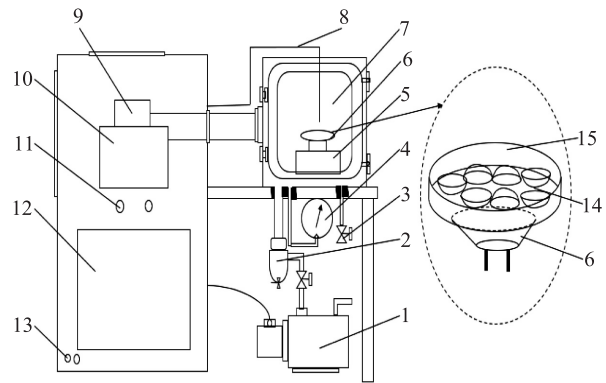
**1.3.1 单因素试验** 根据预试验结果,在连续微波真空环境下,较高功率密度或当含水率低于 20% 时,三七主根内部易形成不规则孔洞及焦褐色柱状结块,皂苷含量降低。相关研究结果<sup>[18-19]</sup>表明,干燥温度为 40~60 ℃ 时,三七干制品皂苷含量较高。综合考虑干燥设备技术参数的限制,本研究采用单因素试验设计,进行微波真空-热风分段式干燥试验。首先通过干燥时间和物料品质选定转换含水率(20%、30%、40%),然后在第一阶段微波真空干燥过程中选取不同温度上限(45 ℃、50 ℃、55 ℃)、腔室压力(1 kPa、3 kPa、5 kPa、10 kPa)、功率密度(0.50 W/g、0.75 W/g、1.00 W/g、1.50 W/g),第二阶段热风干燥的参数参照文献[18]中的较优温度 55 ℃ 进行具体研究,探索不同干燥条件对三七主根干燥特性及品质的影响,具体试验参数设置见表 1。

表 1 试验设计和试验参数

Table 1 Experiment design and parameters

试验内容	序号	转换含水率(%)	温度上限(℃)	腔室压力(kPa)	功率密度(W/g)
转换点确定	1	20	50	5	1.00
	2	30	50	5	1.00
	3	40	50	5	1.00
单因素试验	1	30	45	5	1.00
	2	30	50	5	1.00
	3	30	55	5	1.00
	4	30	50	1	1.00
	5	30	50	3	1.00
	6	30	50	10	1.00
	7	30	50	3	0.50
	8	30	50	3	0.75
	9	30	50	3	1.50

**干燥方法:**每次试验取新鲜三七主根 6 个,称取质量为(100.0±0.5) g,在室温(15±2) ℃ 下放置 30 min,使其温度与室温相近。将所有三七放入培养皿中,对其中 1 个三七进行打孔,深度(8.0±1.0) mm,直径(1.9±0.1) mm,然后放入 HMVD-2020 型微波真空干燥装置中干燥,直至样品含水率降至设定的转换含水率。最后转入 101-2AB 型电热鼓风干燥箱中干燥,每 6~8 h 称 1 次样品质量,直至其含水率降至安全含水率。每组试验重复 3 次,取平均值。



1:真空泵;2:冷凝器;3:进气阀;4:真空压力表;5:金属外壳电子秤;6:天平;7:干燥室;8:光纤传感器;9:磁控管组件;10:工控触摸一体机;11:开关;12:电子控制部分;13:出入口水口;14:三七主根;15:玻璃托盘。

图 1 微波真空干燥装置

Fig.1 Schematic diagram of equipment for microwave vacuum drying

**1.3.2 热风对照试验** 为了确定微波真空干燥环境对三七干燥时间、皂苷含量等的影响,在上述单因素试验的基础上根据文献[18]选择 55 ℃ 进行热风干燥对比试验。取新鲜三七主根 18 个,在室温(15±2) ℃ 下放置 30 min,使其温度与室温相近,然后单层平铺放入 3 个培养皿中,每个培养皿中三七主根质量为(100±0.5) g,在 55 ℃ 条件下进行干燥,每 6~8 h 称取 1 次样品质量,直至样品湿基含水率降至安全值。

1.3.3 含水率测定 本研究所用水分含量都以湿基含水率作为计算标准,按国家标准 GB/T 5009.3-2016<sup>[20]</sup> 执行,并采用标准烘箱法(80 ℃干燥 24 h)测得三七的湿基含水率为(61.24±0.5)%,根据《中国药典》<sup>[21]</sup> 规定,干燥后安全贮藏含水率为 13%。

1.3.4 皂苷含量测定 按《中国药典》<sup>[21]</sup> 规定,测定干燥后三七中人参皂苷(R<sub>g1</sub>、R<sub>b1</sub>)和三七皂苷(R<sub>1</sub>)的含量。按照国家标准制得对照样品溶液及供试样品溶液,分别放入高效液相色谱仪进行走帧,获得 2 种溶液的色谱图,根据色谱图相应位置波峰面积对比,分别求得标样曲线和供试样品溶液的质量浓度,通过计算获得各样品的皂苷质量分数<sup>[19]</sup>。

#### 1.4 干燥数学模型

干燥是一个复杂的传质、传热过程,内部水分迁移过程涉及液相流动、毛细流动、蒸汽扩散等传质、传热现象<sup>[22]</sup>,难以使用特定理论进行分析。构建干燥过程的干燥模型,可根据失水规律从数值上预测干燥时间、干燥速率等参数。干燥模型的建立能更好地描述、预测、控制整个干燥过程,为优化干燥工艺提供理论依据<sup>[8]</sup>。本研究从经典干燥动力学模型中选取 5 个经验模型拟合三七的干燥曲线<sup>[23]</sup>,具体见表 2。数学模型的拟合优度由决定系数( $R^2$ )、残差平方和(RSS)、卡方验证值( $\chi^2$ )表示, $R^2$ 越接近 1, RSS,  $\chi^2$ 越接近 0,则拟合度越高<sup>[24-25]</sup>。

表 2 干燥数学模型表达式

Table 2 Equations of mathematical models for fitting of drying curves

模型序号	模型名称	模型表达式
1	Lewis	$M_R = \exp(-kt)$
2	Logarithmic	$M_R = a \exp(-kt) + c$
3	Wang and Singh	$M_R = 1 + at + bt^2$
4	Two-term	$M_R = a \exp(-k_0 t) + b \exp(k_1 t)$
5	Weibull	$M_R = \exp[-(t/\alpha)^\beta]$

$M_R$ 为不同干燥时间下三七的水分比; $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $k$ 、 $k_0$ 、 $k_1$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$ 均为系数; $t$ 为干燥时间(min)。

#### 1.5 干燥特性参数计算

不同干燥时间下三七的水分比( $M_R$ )为<sup>[26]</sup>:

$$M_R = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (1)$$

式中, $M_0$ 为初始干基含水率(g/g); $M_e$ 为三七干燥到平衡状态时的干基含水率(g/g); $M_t$ 为在任意时刻  $t$  的干基含水率(g/g)。

由于物料达到平衡状态时含水率很小, $M_e$ 可忽略不计,故简略后的水分比计算公式如下:

$$M_R = \frac{M_t}{M_0} \quad (2)$$

干燥速率( $D_R$ )计算公式如下<sup>[27]</sup>:

$$D_R = \frac{M_{t_1} - M_{t_2}}{t_2 - t_1} \quad (3)$$

式中, $D_R$ 为干燥过程中时间为  $t_1$  到  $t_2$  的三七干燥速率[g/(g·h)]; $M_{t_1}$ 和  $M_{t_2}$ 为干燥过程中时间分别为  $t_1$  和  $t_2$  时物料的干基含水率(g/g)。

将三七主根简化为球形,物料初始水分含量均匀分布,忽略物料收缩,干燥过程中三七的有效水分扩散系数可按公式(4)进行计算<sup>[28]</sup>:

$$\ln M_R = \ln \frac{6}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{\text{eff}}}{L^2} t \quad (4)$$

式中, $D_{\text{eff}}$ 为干燥过程中三七的有效水分扩散系数( $\text{m}^2/\text{s}$ ); $L$ 为三七的直径(m); $t$ 为干燥时间(s)。

#### 1.6 数据处理

采用 Excel 2019 软件对试验数据进行处理,用 Origin 2019 软件对多种数学模型方程和试验过程进行拟合并绘制图形,利用 SPSS 24.0 软件对函数模型参数和干燥条件的关系进行二次多项式回归分析,剔除不显著因素,最终确定数学模型的值。

## 2 结果与分析

#### 2.1 转换含水率的确定与分析

为确定合适的转换含水率,分别设置转换含水率为 20%、30%、40%,并得到水分比随干燥时间变化的干燥曲线(图 2)。图 2 显示,随着转换含水率从 40%降低至 20%,微波真空段干燥时间不断增加,分别为 8.0 h、11.6 h、19.3 h,而达到安全含水率的总干燥时间不断缩短,分别为 71.0 h、53.0 h 和 37.6 h。这是因为在干燥中后期,去除的主要是物料内部的结合水,干燥阻力不断增加,而微波真空干燥是由内向外加热物料,物料热质传递方向相同,同时真空环境提高了物料蒸发量以及水蒸气压差,更有利于水分的传递,相对于热风干燥具有更大的干燥驱动力,干燥速率大,转换含水率降低,总干燥时间缩短。但同时发现,在 20%转换含水率条件下,三七干制品易受微波不均匀性的影响,造成局部高温,降低品质。综合考虑三七干制品的品质和干燥



时间,将转换含水率设置为 30%。

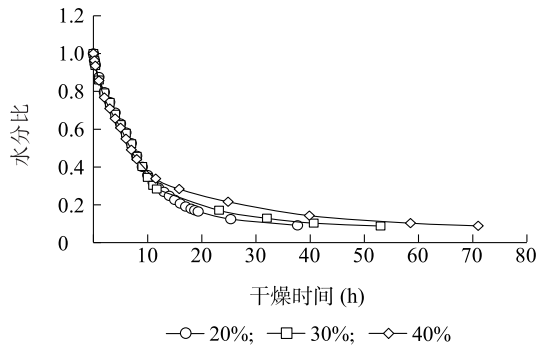


图2 不同转换含水率条件下三七的水分比变化曲线

Fig.2 Moisture ratio curves under different converted moisture contents

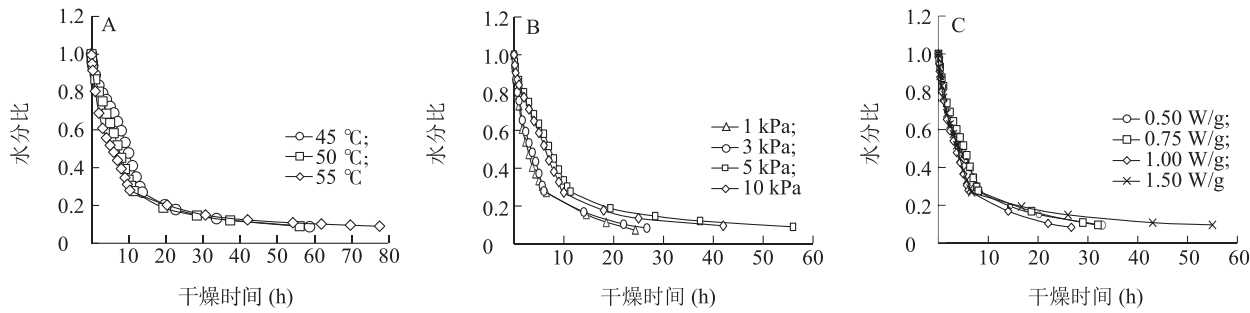
## 2.2 不同干燥条件下的干燥动力学分析

**2.2.1 水分比变化** 在不同的温度上限、腔室压力和功率密度条件下,得到三七水分比随干燥时间变化的曲线。结果(图3)显示,在不同干燥条件下,干燥时间为23.5~77.5 h,存在较大差异。微波真空干燥过程中,在试验范围内适当增加功率密度、温度上限,降低腔室压力可以有效缩短干燥时间,使湿基含水率快速降低至30%左右。从干燥时间方面考虑,微波功率密度1.00 W/g、温度上限50℃、腔室压力1 kPa条件下三七主根干燥时间最短,工艺最佳。图3A显示,当温度上限为45℃、50℃时,三七主根的干燥时间分别为58.7 h、56.0 h,温度对干燥时间的影响不大。当温度上限为55℃时,热风干燥阶段最缓慢,达到安全含水率所需的干燥时间最长。图3B显示,当腔室压力为1 kPa、3 kPa、5 kPa、10 kPa时,干燥时间分别为23.5 h、26.7 h、56.0 h、42.0 h,腔室压力从1 kPa增加至5 kPa,干燥时间增加了1.38倍,这可能是因为较低的大气压下,水的沸点大大降低,有利于水分的蒸发与扩散<sup>[9]</sup>。图3C显示,功率密度为0.50 W/g、0.75 W/g、1.00 W/g、1.50 W/g时,干燥时间分别为32.8 h、32.0 h、26.7 h和55.0 h,1.00 W/g功率密度下的干燥时间最短。在较高的功率密度(1.50 W/g)与温度(55℃)条件下,整体干燥时间反而增加,这可能是因为受较高功率密度和温度的影响,微波真空条件对物料干燥产生的膨化效应在干燥后期遭到了破坏,同时孔隙变得越来越复杂,物料体积由于力的作用而变小,孔隙变小阻塞物料内部水分的向外扩散,最终导致干燥时间变长<sup>[29]</sup>。

**2.2.2 干燥速率变化** 干燥过程中不同温度、功率密度、腔室压力条件下三七干燥速率曲线(图4)显示,整个干燥过程主要为减速阶段和恒速阶段,前期短暂的增速是因为此时物料处于预热阶段,物料升温,水分蒸发。随着样品中水分扩散,水分含量(干基含水率)降低,三七的干燥速率逐渐变小并趋于稳定。图4A显示,对于较高的干基含水率,干燥温度的升高导致干燥速率的增加进而缩短干燥时间,这可能是因为样品和腔体内空气之间的温差增加,加速水分迁移。图4B显示,在较低腔室压力条件下,干燥速率较高,随着腔室压力的增大(从1 kPa到10 kPa),干燥速率先减小后增大,5 kPa条件下干燥速率最小。干燥速率增大的原因可能是在10 kPa条件下,腔体内外部气体交换更加频繁,加快了腔体内湿热空气向外流动,促进物料的降温,增大了物料与空气的温湿度差,同时提高了微波启停的频率,有利于水分向外扩散,提高干燥速率。图4C显示,随着功率密度增加,干燥速率最大值逐渐增加,且预热阶段更短。当物料干基含水率为0.5~1.0 g/g时,不同干燥条件下的干燥速率均存在恒速阶段,这可能与物料内部结构及独特的间歇干燥方式有关。

## 2.3 干燥模型分析

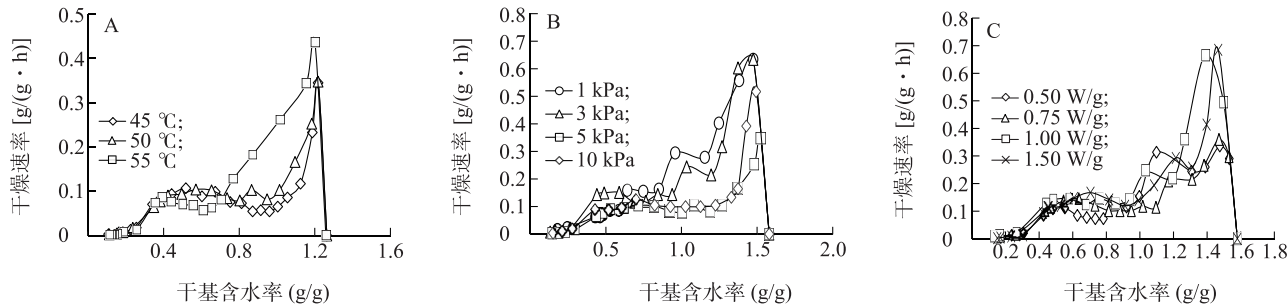
**2.3.1 模型比较与分析** 使用Origin软件按照表2中的模型表达式对试验数据进行拟合分析。表3显示,在微波真空干燥阶段,Two-term模型和Weibull模型的 $R^2$ 平均值最高,为0.989,其 $R^2$ 值分别为0.958~0.999和0.972~0.999,RSS值分别为 $4.96 \times 10^{-5}$ ~ $3.08 \times 10^{-2}$ 和 $8.67 \times 10^{-4}$ ~ $2.36 \times 10^{-2}$ , $\chi^2$ 值分别为 $4.96 \times 10^{-5}$ ~ $2.37 \times 10^{-3}$ 和 $7.22 \times 10^{-5}$ ~ $1.57 \times 10^{-3}$ ,均较优。说明Two-term模型和Weibull模型的拟合效果均较好,适用于三七微波真空干燥过程。考虑稳定性及拟合效果,由于Weibull模型的函数极差较小,干燥参数较少,并且拟合效果与Two-term模型相近,所以选择Weibull模型作为三七微波真空干燥阶段模型。为了简化整个干燥过程的拟合模型,将Weibull模型应用于热风干燥阶段,发现其 $R^2$ 平均值达到0.989,RSS和 $\chi^2$ 值均接近于零,同样具有较优的拟合性,可作为三七热风干燥阶段模型。所以选择Weibull模型作为三七微波真空-热风分段式干燥的最优拟合函数模型。



A:不同干燥温度、干燥时间下的水分比;B:不同腔室压力、干燥时间下的水分比;C:不同功率密度、干燥时间下的水分比。

图3 不同干燥条件下三七水分比变化曲线

Fig.3 Moisture ratio curves of *Panax notoginseng* under different drying conditions



A:不同干燥温度、干基含水率下的干燥速率;B:不同腔室压力、干基含水率下的干燥速率;C:不同功率密度、干基含水率下的干燥速率。

图4 不同干燥条件下三七干燥速率曲线

Fig.4 Drying rate curves of *Panax notoginseng* under different drying conditions

表3 各干燥模型的系数与拟合结果

Table 3 Coefficients and fitting results of different drying models

干燥阶段	模型序号	$R^2$		RSS		$\chi^2$	
		范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值
微波真空	1	0.965~0.989	0.978	$9.95 \times 10^{-3} \sim 3.09 \times 10^{-2}$	$1.83 \times 10^{-2}$	$6.63 \times 10^{-4} \sim 2.09 \times 10^{-3}$	$1.33 \times 10^{-3}$
	2	0.961~0.998	0.984	$1.56 \times 10^{-3} \sim 3.05 \times 10^{-2}$	$1.12 \times 10^{-2}$	$1.42 \times 10^{-4} \sim 2.21 \times 10^{-3}$	$9.04 \times 10^{-4}$
	3	0.966~0.991	0.980	$6.99 \times 10^{-3} \sim 2.43 \times 10^{-2}$	$1.51 \times 10^{-2}$	$5.38 \times 10^{-4} \sim 2.03 \times 10^{-3}$	$1.21 \times 10^{-3}$
	4	0.958~0.999	0.989	$4.96 \times 10^{-5} \sim 3.08 \times 10^{-2}$	$7.66 \times 10^{-3}$	$4.96 \times 10^{-5} \sim 2.37 \times 10^{-3}$	$6.62 \times 10^{-4}$
	5	0.972~0.999	0.989	$8.67 \times 10^{-4} \sim 2.36 \times 10^{-2}$	$8.31 \times 10^{-3}$	$7.22 \times 10^{-5} \sim 1.57 \times 10^{-3}$	$6.27 \times 10^{-4}$
热风	5	0.981~0.999	0.989	$1.01 \times 10^{-5} \sim 2.70 \times 10^{-4}$	$1.72 \times 10^{-4}$	$5.04 \times 10^{-6} \sim 1.30 \times 10^{-4}$	$6.68 \times 10^{-5}$

$R^2$ :决定系数;RSS:残差平方和; $\chi^2$ :卡方验证值。模型1~5的具体信息见表2。

基于 Weibull 模型对不同干燥条件下的三七试验数据进行拟合,得到干燥系数和评价指标值(表4)。为了进一步描述干燥因素对 Weibull 模型参数的影响,建立了干燥模型系数( $\alpha, \beta$ )与干燥因素(功率密度  $W$ 、腔室压力  $P$ 、温度上限  $T$ )之间的二次回归方程<sup>[23,30]</sup>,计算式如下:

$$\begin{aligned} \alpha &= a_0 + a_1 W + a_2 P + a_3 T + a_4 WP + a_5 WT + a_6 PT + \\ & a_7 W^2 + a_8 P^2 + a_9 T^2 \quad (5) \\ \beta &= b_0 + b_1 W + b_2 P + b_3 T + b_4 WP + b_5 WT + b_6 PT + b_7 W^2 + \end{aligned}$$

$$b_8 P^2 + b_9 T^2 \quad (6)$$

式中, $a_i, b_i$ 均为系数, $i=1,2,3,\dots,7,8,9$ 。

利用 SPSS 24.0 软件多元线性回归中的后退回归法,剔除不显著因素( $P>0.05$ ),得到 Weibull 模型中  $\alpha$  和  $\beta$  参数的回归方程,结果如下:

微波真空干燥阶段:

$$\alpha = 32.962\ 00 - 0.648\ 00T - 0.178\ 00P^2 + 0.052\ 00TP \quad (7)$$

$$\beta = 2.061\ 00 + 0.023\ 80W - 0.000\ 60T^2 -$$

$$0.008\ 40P^2 + 0.002\ 40TP \quad (8) \quad 1.020\ 70W^2 + 0.004\ 10TP \quad (9)$$

热风干燥阶段:

$$\alpha = 157.317\ 30 - 5.858\ 00T + 0.056\ 00T^2 - \quad 0.003\ 85P^2 - 0.317\ 00W^2 - 0.001\ 00TP \quad (10)$$

表 4 不同试验条件下 Weibull 模型拟合参数及评价指标

Table 4 Fitting parameters and evaluation indices of Weibull model under different test conditions

试验序号	微波真空干燥阶段					热风干燥阶段				
	$\alpha$	$\beta$	$R^2$	RSS	$\chi^2$	$\alpha$	$\beta$	$R^2$	RSS	$\chi^2$
1	9.632	1.066	0.988	$9.56 \times 10^{-3}$	$7.36 \times 10^{-4}$	5.781	0.403	0.988	$1.87 \times 10^{-4}$	$6.23 \times 10^{-5}$
2	12.208	1.206	0.972	$2.36 \times 10^{-2}$	$1.57 \times 10^{-3}$	7.064	0.446	0.982	$2.70 \times 10^{-4}$	$9.01 \times 10^{-5}$
3	8.352	0.733	0.995	$3.51 \times 10^{-3}$	$2.92 \times 10^{-4}$	4.717	0.325	0.990	$2.50 \times 10^{-4}$	$4.16 \times 10^{-5}$
4	4.431	0.757	0.999	$8.67 \times 10^{-4}$	$7.22 \times 10^{-5}$	3.917	0.501	0.986	$1.96 \times 10^{-4}$	$9.79 \times 10^{-5}$
5	5.026	0.796	0.993	$4.41 \times 10^{-3}$	$4.01 \times 10^{-4}$	3.503	0.438	0.992	$1.20 \times 10^{-4}$	$6.00 \times 10^{-5}$
6	8.613	0.937	0.981	$1.35 \times 10^{-2}$	$1.12 \times 10^{-3}$	5.209	0.429	0.985	$1.72 \times 10^{-4}$	$8.58 \times 10^{-5}$
7	6.507	0.815	0.994	$5.07 \times 10^{-3}$	$3.62 \times 10^{-4}$	4.467	0.427	0.999	$1.01 \times 10^{-4}$	$5.04 \times 10^{-6}$
8	6.903	0.943	0.989	$9.04 \times 10^{-3}$	$6.46 \times 10^{-4}$	4.491	0.418	0.981	$2.61 \times 10^{-4}$	$1.30 \times 10^{-4}$
9	5.295	0.871	0.993	$5.29 \times 10^{-3}$	$4.41 \times 10^{-4}$	2.565	0.278	0.994	$8.48 \times 10^{-5}$	$2.83 \times 10^{-5}$

$R^2$ : 决定系数; RSS: 残差平方和;  $\chi^2$ : 卡方验证值;  $\alpha, \beta$  均为系数。试验 1~9 的具体信息见表 1。

2.3.2 模型验证 分别选择功率密度 0.50 W/g、腔室压力 3 kPa、干燥温度 50 ℃, 功率密度 1.00 W/g、腔室压力 5 kPa、干燥温度 45 ℃, 功率密度 1.00 W/g、腔室压力 5 kPa、干燥温度 50 ℃作为试验条件, 分别代入公式(7)~(10)中, 求得相应的  $\alpha$  与  $\beta$ , 用于 Weibull 模型的预测, 得到干燥试验值与 Weibull 模型预测值的水分比变化曲线。图 5 显示, 水分比预测值与实测值拟合度较好, 说明 Weibull 模型的函数拟合度较好, 可用来预测三七微波真空-热风分段式干燥中不同干燥条件下的水分比变化情况。

## 2.4 不同干燥条件下有效水分扩散系数的变化

三七干燥过程中水分比 ( $M_R$ ) 的变化符合 Weibull 模型, 说明三七主根的干燥过程主要受水分扩散影响。有效水分扩散系数 ( $D_{\text{eff}}$ ) 是干燥过程中量化水分迁移速度的一个重要指标, 能够用来表明不同干燥条件对物料干燥过程中水分迁移的影响程度<sup>[26]</sup>。根据试验数据计算得到  $M_R$ 、 $\ln M_R$  和干燥时间 ( $t$ ), 由公式(2)、(4) 计算得到不同干燥时间段的  $D_{\text{eff}}$  值(表 5)。表 5 显示,  $D_{\text{eff}}$  在微波真空干燥阶段的值为  $7.84 \times 10^{-10} \sim 1.80 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ , 在热风干燥阶段的值为  $1.45 \times 10^{-10} \sim 6.82 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ , 符合大部分物料的有效水分扩散系数范围 ( $1.00 \times 10^{-12} \sim 1.00 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ )<sup>[11,26,28]</sup>。在转换含水率 30%、腔室压力 5 kPa 和功率密度 1.00 W/g 条件下, 随着温度的增加

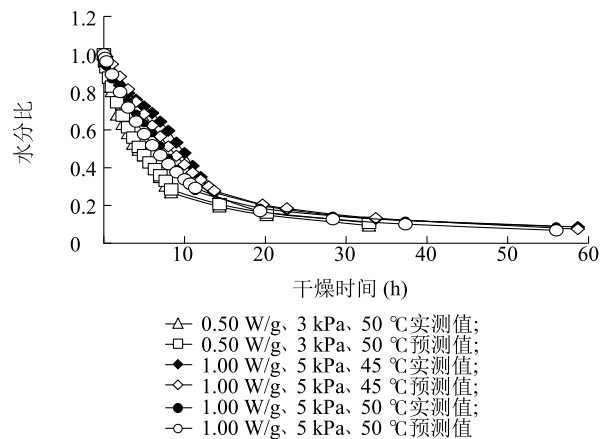


图 5 Weibull 模型预测值与实测值比较

Fig.5 Comparison between predicted and measured values of Weibull model

(45~55 ℃), 微波真空干燥段的  $D_{\text{eff}}$  逐渐增加, 为  $7.84 \times 10^{-10} \sim 1.03 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ ; 在转换含水率 30%、温度 50 ℃、功率密度 1.00 W/g 条件下, 随着腔室压力的增加,  $D_{\text{eff}}$  先减小后增大, 在 5 kPa 条件下,  $D_{\text{eff}}$  最小; 在转换含水率 30%、温度 50 ℃、腔室压力 3 kPa 条件下, 随着功率密度的增加 (0.50~1.50 W/g),  $D_{\text{eff}}$  先增大后减少, 控制功率密度在 1.00 W/g 左右, 可以提高水分扩散, 缩短干燥时间。另外, 与热风干燥相比, 微波真空-热风分段式干燥方式得到的水分扩散系数更高, 能够明显增加物料内部的水分扩散

能力,缩短干燥时间。这是因为微波可直接作用于物料内部,使物料内部迅速升温,形成温度梯度,加快水分向外扩散的速率;同时,在较高真空环境下,

水分沸点降低,提高了水分蒸发量以及水蒸气分压力与真空腔的压差,更有利于水分向外扩散与挥发,最终干燥时间更短。

表 5 不同干燥条件下的有效水分扩散系数

Table 5 Effective diffusion coefficients of water under different drying conditions

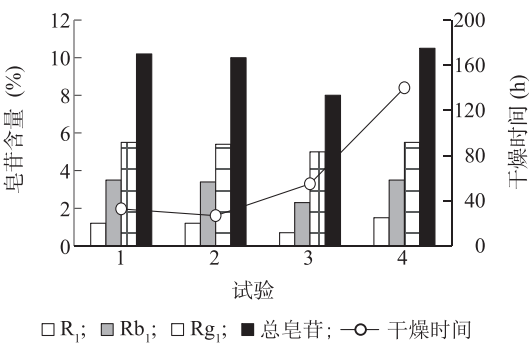
转换含水率 (%)	温度 (℃)	腔室压力 (kPa)	功率密度 (W/g)	微波真空干燥阶段			热风干燥阶段		
				<i>k</i>	<i>D<sub>eff</sub></i> (m <sup>2</sup> /s)	<i>R</i> <sup>2</sup>	<i>k</i>	<i>D<sub>eff</sub></i> (m <sup>2</sup> /s)	<i>R</i> <sup>2</sup>
20	50	5	1.00	2.67×10 <sup>-5</sup>	8.77×10 <sup>-10</sup>	0.996	8.65×10 <sup>-6</sup>	2.82×10 <sup>-10</sup>	0.979
30	50	5	1.00	2.87×10 <sup>-5</sup>	9.41×10 <sup>-10</sup>	0.989	7.87×10 <sup>-6</sup>	2.58×10 <sup>-10</sup>	0.946
40	50	5	1.00	2.69×10 <sup>-5</sup>	8.84×10 <sup>-10</sup>	0.994	6.79×10 <sup>-6</sup>	2.23×10 <sup>-10</sup>	0.958
30	45	5	1.00	2.39×10 <sup>-5</sup>	7.84×10 <sup>-10</sup>	0.952	6.64×10 <sup>-6</sup>	2.18×10 <sup>-10</sup>	0.945
30	55	5	1.00	3.13×10 <sup>-5</sup>	1.03×10 <sup>-9</sup>	0.987	4.43×10 <sup>-6</sup>	1.45×10 <sup>-10</sup>	0.922
30	50	1	1.00	5.47×10 <sup>-5</sup>	1.80×10 <sup>-9</sup>	0.984	2.08×10 <sup>-5</sup>	6.82×10 <sup>-10</sup>	0.999
30	50	3	1.00	5.39×10 <sup>-5</sup>	1.77×10 <sup>-9</sup>	0.991	1.64×10 <sup>-5</sup>	5.39×10 <sup>-10</sup>	0.998
30	50	10	1.00	3.30×10 <sup>-5</sup>	1.08×10 <sup>-9</sup>	0.985	8.73×10 <sup>-6</sup>	2.87×10 <sup>-10</sup>	0.939
30	50	3	0.50	4.08×10 <sup>-5</sup>	1.34×10 <sup>-9</sup>	0.988	1.18×10 <sup>-5</sup>	3.86×10 <sup>-10</sup>	0.991
30	50	3	0.75	4.13×10 <sup>-5</sup>	1.35×10 <sup>-9</sup>	0.985	1.23×10 <sup>-5</sup>	4.02×10 <sup>-10</sup>	0.999
30	50	3	1.50	5.20×10 <sup>-5</sup>	1.71×10 <sup>-9</sup>	0.995	5.88×10 <sup>-6</sup>	1.93×10 <sup>-10</sup>	0.963

*D<sub>eff</sub>*:有效水分扩散系数;*R*<sup>2</sup>:决定系数;*k*:斜率。

2.5 品质及可行性分析

三七干制品的品质优劣主要表现为有效成分皂苷含量的高低,图 6 显示,以不同温度上限条件下三七干制品皂苷含量为例,在总皂苷含量方面,不同温度条件下的微波真空-热风分段式干燥结果均符合  $R_{g1}+R_{b1}+R_1 \geq 5.0\%$  的要求,其中 45℃、50℃ 条件下的三七总皂苷含量与热风干燥对照组接近(均  $\geq 10.0\%$ ),55℃ 条件下总皂苷含量最低(8.0%)。微波真空-热风分段式干燥中,随着干燥温度从 45℃ 升高至 55℃, *R<sub>1</sub>*、*R<sub>b1</sub>*、*R<sub>g1</sub>* 含量均总体呈下降趋势,三七主根中有效成分严重流失,3 种主要皂苷 *R<sub>1</sub>*、*R<sub>b1</sub>*、*R<sub>g1</sub>* 含量分别下降了 41.7%、34.3%、9.1%,总皂苷含量下降了 21.6%。分析其原因为:较高温度易造成皂苷挥发,干制品中总皂苷含量减少;同时,真空环境还会导致细胞壁结构发生变化,降低其对皂苷有效成分挥发的抑制作用,所以同为 55℃ 条件下,相比于热风干燥,微波真空干燥更易引起皂苷成分挥发。适当降低干燥温度,提高腔室压力,可提高干制品中皂苷含量。在干燥时间方面,相比于热风干燥对照组的干燥时间(140 h),微波真空-热风分段式干燥工艺条件下的干燥时间明显缩短,45℃、50℃ 和 55℃ 条件下的干燥时间分别为 58.7 h、56.0 h、77.5 h,干燥时间分别缩减了 58.1%、

60.0%、44.6%。



试验 1:转换含水率 30%,温度上限 45℃,腔室压力 5 kPa,功率密度 1.00 W/g 条件下的微波真空干燥;试验 2:转换含水率 30%,温度上限 50℃,腔室压力 5 kPa,功率密度 1.00 W/g 条件下的微波真空干燥;试验 3:转换含水率 30%,温度上限 55℃,腔室压力 5 kPa,功率密度 1.00 W/g 条件下的微波真空干燥;试验 4:55℃ 下的热风干燥。

图 6 不同温度条件下的干燥时间及对皂苷含量的影响

Fig.6 Influence of different temperatures on saponin contents and drying time

3 结论

本研究以三七主根为研究对象,采用间歇微波与分段干燥相结合的方式对其进行微波真空-热风



分段式干燥,探索其干燥特性和品质,结论如下:三七微波真空-热风分段式干燥的主要干燥过程为恒速阶段和减速阶段,恒速阶段的干基含水率为 $0.5\sim 1.0\text{ g/g}$ ;在微波真空干燥阶段,适当提高温度上限、功率密度,降低腔室压力,可缩短该阶段的干燥时间,提高干燥速率和水分扩散能力。仅从干燥时间方面考虑,微波功率 $1.00\text{ W/g}$ 、温度上限 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、腔室压力 $1\text{ kPa}$ 条件下三七主根干燥时间最短,工艺最佳。使用 5 种常用函数模型对干燥过程进行分段拟合,统计结果表明,Weibull 模型的 $R^2$ 较大,RSS 和 $\chi^2$ 值较小,可较好地描述三七微波真空-热风分段式干燥过程中的水分变化规律;微波真空-热风分段式干燥方法处理下,三七总皂苷含量( $R_{g_1}$ 、 $R_{b_1}$ 、 $R_1$ )远高于《中国药典》要求的 $5\%$ ,且与热风干燥相比可缩短 $44.6\%\sim 60.0\%$ 的干燥时间,证明该干燥方式应用于三七干燥的可行性,为三七干燥产业的发展提供了参考。

#### 参考文献:

- [1] 维恒农业. 2020 年中国三七产业数据分析报告[R/OL]. (2020-09-28) [2020-12-06]. [https://www.weihengag.com/home/data/productdetail/id/122/doc\\_id/7347.html](https://www.weihengag.com/home/data/productdetail/id/122/doc_id/7347.html).
- [2] 张崇喜. 人参、西洋参和三七化学成分的研究[D]. 长春:吉林农业大学,2004:53-108.
- [3] WANG T, GUO R, ZHOU G, et al. Traditional uses, botany, phytochemistry, pharmacology and toxicology of *Panax notoginseng* (Burk.) F.H. Chen: A review[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2016, 188(1): 234-258.
- [4] 陈林伟,秦昆明,朱艳汇,等. 中药材产地加工的研究现状及展望[J]. 中国中药杂志,2015,40(4):602-606.
- [5] 周国燕,詹博,桑迎迎,等. 不同干燥方法对三七内部结构和复水品质的影响[J]. 食品科学,2011,32(20):44-47.
- [6] POPOVICH D G, HU C, DURANCE T D, et al. Retention of ginsenosides in dried ginseng root: comparison of drying methods[J]. Journal of Food Science, 2005, 70(4):355-358.
- [7] 李武强. 当归切片微波真空干燥特性及传热传质机理研究[D]. 兰州:甘肃农业大学,2020.
- [8] 张付杰,辛立东,代建武,等. 猕猴桃片旋转托盘式微波真空干燥特性分析[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊1):501-508.
- [9] MONTEIRO R L, LINK J V, TRIBUZI G, et al. Microwave vacuum drying and multi-flash drying of pumpkin slices[J]. Journal of Food Engineering, 2018, 232:1-10.
- [10] WANG M X, LIU B, WANG C, et al. Heat and mass transfer analysis of apple slice during microwave drying[J]. Food Research and Development, 2017, 38(21):10-14,51.
- [11] 安可婧,徐玉娟,魏来,等. 龙眼间歇真空微波干燥动力学研究[J]. 食品与机械,2018,34(9):30-36.
- [12] 高明菊,冯光泉,曾鸿超,等. 微波干燥对三七皂苷有效成分的影响[J]. 中药材,2010,33(2):198-200.
- [13] 杨海峰. 改进三七加工技术的研究[D]. 长春:吉林农业大学,2011.
- [14] SUNDARAM G. Pulsed microwave-vacuum drying of food materials[J]. Drying Technology, 1999, 17(3):395-412.
- [15] 刘小丹,徐怀德,孙田奎,等. 红枣微波-热风联合干燥工艺优化[J]. 食品科学,2013,34(10):98-102.
- [16] 衡银雪,郑旭熙,殷钟意,等. 黄精微波真空-热风联合干燥工艺研究[J]. 应用化工,2018,47(5):952-955.
- [17] 李湘利,刘静,侯一超,等. 大蒜粒微波-热风联合干燥的工艺优化[J]. 食品与发酵工业,2018,44(11):237-244.
- [18] 郭徽,杨薇,刘英. 云南三七主根干燥特性及其功效指标评价[J]. 农业工程学报,2014,30(17):305-313.
- [19] 刘勇,徐娜,陈骏飞,等. 不同干燥方法对三七药材外观性状与内在结构及其品质的影响[J]. 中草药,2019,50(23):5714-5723.
- [20] 国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中水分的测定:GB/T 5009.3-2016[S]. 北京:中国人口出版社,2016.
- [21] 国家药典委员会. 中国药典[M]. 北京:中国医药科技出版社,2015:28-29.
- [22] 李向阳,李保明,郑炜超,等. 鸡粪中低温干燥动力学特性与参数优化[J]. 农业工程学报,2018,34(10):194-199.
- [23] 王汉羊,刘丹,于海明. 山药微波热风耦合干燥特性及动力学模型[J]. 食品科学,2018,39(15):115-121.
- [24] TAHERI-GARAVAND A, MEDA V. Drying kinetics and modeling of savory leaves under different drying conditions[J]. International Food Research Journal, 2018, 25(4):1357-1364.
- [25] 吴小华,马渊博,宁旭丹,等. 西洋参分段式热风干燥动力学模型构建[J]. 农业工程学报,2020,36(5):318-324.
- [26] 尹晓峰,杨明金,李光林,等. 稻壳薄层热风干燥工艺优化及数学模型拟合[J]. 食品科学,2017,38(8):198-205.
- [27] 代建武,杨升霖,王杰,等. 微波真空干燥对香蕉片干燥特性及品质的影响[J]. 农业机械学报,2020,51(S1):493-500.
- [28] DARVISHI H. Quality, performance analysis, mass transfer parameters and modeling of drying kinetics of soybean[J]. Brazilian Journal of Chemical Engineering, 2017, 34(1):143-158.
- [29] 顾思忠,刘斌,杨兆丹. 胡萝卜在微波干燥条件下的热物理性质和多孔特性[J]. 江苏农业学报,2018,34(4):897-903.
- [30] 于海明,李海源,张欣悦,等. 水稻秸秆营养穴盘微波热风耦合干燥动力学模型研究[J]. 农业机械学报,2020,51(5):339-348.

(责任编辑:王妮)