

黄芩微波热风联合干燥动力学及品质研究

商 涛, 袁越锦*, 赵 哲, 徐英英

陕西科技大学机电工程学院, 陕西 西安 710021

摘要:目的 探索黄芩 *Scutellaria baicalensis* 更优干燥方式, 研究其干燥特性和干燥动力学, 为提高黄芩干燥品质提供依据。**方法** 采用分光测色技术和 HPLC 法分别测定黄芩的色泽和黄芩苷含量, 以干燥时间、色泽和黄芩苷含量为指标分析微波干燥、热风干燥、微波热风组合干燥 3 种干燥方式对黄芩干燥品质的影响, 用变异系数法对各指标进行综合评分, 确定更优干燥方式。探究不同微波功率密度 (9、12、15 W/g)、转换点含水率 (30%、40%、50%)、热风温度 (50、60、70 °C) 对黄芩干燥特性和干燥动力学的影响。**结果** 相比于单一的微波干燥和热风干燥, 黄芩微波热风联合干燥具有较短的干燥时间、总色差值最小为 16.25 ± 1.05 、黄芩苷含量和综合质量评分最高分别为 $(18.88 \pm 0.30)\%$ 和 88.16, 说明采用微波热风联合干燥方式能有效提高黄芩的干燥品质。黄芩的干燥时间随热风温度的增大而减小, 随转换点含水率和微波功率密度的增大先减小后增大。Two-term 模型可以用来描述黄芩微波热风联合干燥过程。微波干燥阶段有效水分扩散系数 (effective moisture diffusion coefficient, D) 为 $4.5169 \times 10^{-7} \sim 7.6999 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, 并随微波功率密度的增大而增大, 远大于热风干燥阶段 D 。**结论** 微波热风联合干燥更适用于黄芩中药材的干燥加工, 能有效提高黄芩的干燥品质, 为微波热风联合干燥技术应用于黄芩等中药材的干燥提供了理论依据和技术指导。

关键词: 黄芩; 微波热风联合干燥; 变异系数法; 干燥特性; 干燥动力学; 干燥品质

中图分类号: R283.6 文献标志码: A 文章编号: 0253-2670(2023)14-4501-10

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2023.14.010

Drying kinetics and quality of *Scutellaria baicalensis* microwave-hot air combined with drying

SHANG Tao, YUAN Yue-jin, ZHAO Zhe, XU Ying-ying

College of Mechanical and Electrical Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China

Abstract: Objective To explore the optimal drying method of Huangqin (*Scutellaria baicalensis*) and study its drying characteristics and kinetics, so as to provide basis for improving the drying quality of *S. baicalensis*. **Methods** The color and baicalin content of *S. baicalensis* were determined by spectrophotometric colorimetry and HPLC, and the drying time, color and content of baicalin were used to analyze the effects of microwave drying, hot air drying and microwave-hot air combined drying on the quality of dried *S. baicalensis* products, and the coefficient of variation method was used to score each index comprehensively, the better drying method was determined. The effects of different microwave power densities (9, 12, 15 W/g), moisture content on wet basis at transfer point (30%, 40%, 50%) and hot air temperature (50, 60, 70 °C) on the drying characteristics and kinetics of *S. baicalensis* were investigated. **Results** Compared with microwave drying and hot air drying, the microwave-hot air combined drying of *S. baicalensis* had shorter drying time, the minimum total color difference is 16.25 ± 1.05 , the highest content of baicalin and comprehensive quality evaluation are $(18.88 \pm 0.30)\%$ and 88.16, respectively, indicating that the microwave-hot air combined drying could effectively improve the drying quality of *S. baicalensis*. The drying time of *S. baicalensis* decreased with the increase of hot air temperature and first decreased and then increased with the increase of moisture content on wet basis at transfer point and microwave power density. The Two-term model can be used to describe the drying process of *S. baicalensis*. The D in microwave drying stage is $4.5169 \times 10^{-7} \sim 7.6999 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, and increases with the increase of microwave power density, which is much larger than that in hot air drying stage. **Conclusion**

收稿日期: 2023-02-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51876109); 陕西省教育厅青年创新团队科研计划项目 (22JP012); 陕西省教育厅青年创新团队科研计划项目 (21JP016)

作者简介: 商 涛, 硕士研究生, 主要从事中药干燥加工技术研究。E-mail: 987743297@qq.com

*通信作者: 袁越锦, 博士生导师, 教授, 研究方向为热能利用与干燥技术。E-mail: 156709547@qq.com

The microwave-hot air combined drying was more suitable for the drying of *S. baicalensis*, and could effectively improve the drying quality of *S. baicalensis*, which provides theoretical basis and technical guidance for the application of microwave-hot air combined drying technology of *S. baicalensis* and other Chinese medicinal materials.

Key words: *Scutellaria baicalensis* Georgi; microwave-hot air combined drying; coefficient of variation method; drying characteristic; drying kinetics; drying quality

黄芩是唇形科黄芩属植物黄芩 *Scutellaria baicalensis* Georgi 的干燥根, 性寒味苦, 具有清热燥湿、泻火解毒等功效^[1]。黄芩是我国大宗中药材, 药用历史悠久, 在新冠疫情防控方面起到了重要作用。据统计, 推荐用于预防和治疗新冠肺炎的中药和处方共 274 种, 其中含黄芩方药的处方及成药占 60 余种^[2]。然而新鲜黄芩的含水率很高, 在采收后的保存过程中若贮藏不当就会出现霉变、虫蛀、变色等现象, 难以保存且无法满足临床的要求^[3]。

干燥作为中药材加工过程中至关重要的环节, 干燥过程的好坏会直接影响中药材的品质。目前对黄芩等中药材的干燥加工仍然以传统的热风干燥为主, 其操作简单、成本低。张丽^[4]得出黄芩现代产地加工的工艺为先在 80 °C 以上沸水中煮 10~15 min, 再用 60 °C 热风干燥至 12% 含水率以下。但是热风干燥过程中的导热系数低, 干燥时间长, 中药材中有效活性成分损失严重^[5], 干燥前往往需要加入蒸煮的预处理过程, 而苷类成分具有一定程度的水溶性和吸湿性, 预处理过程中可能会造成成分大量损失。此外, 有研究表明微波干燥技术应用于中草药的干燥加工中时, 能起到杀酶保苷的作用, 防止皂苷等有效成分的流失^[6]; 且微波干燥能改善干燥过程的水分迁移条件, 缩短干燥时间^[7]。朱俊霖等^[8]的研究表明, 使用微波干燥能在很大程度上保留黄芩中的有效成分。

然而持续的微波干燥存在很大的不均匀性, 特别是在干燥后期会产生局部热点造成中药材中的有效活性成分受热分解, 严重降低产品质量^[9]。为了解决上述单一干燥存在的问题, 本研究采用微波热风联合干燥的方法对黄芩进行干燥, 该方法已经应用于三七^[10]、余甘子^[11]、杜仲叶^[12]等中药材的干燥加工中, 结果表明微波热风联合干燥相比于单一的干燥方法能有效的提高中药材的干燥品质。

干燥动力学模型具有快速预测干燥过程中物料水分的变化规律, 且对干燥设备的设计及优化, 工艺参数的优化和分析干燥行为具有重要意义^[13]。国内外学者对黄芪^[14]、山茱萸^[15]、姜黄^[16]、大黄^[17]等中药材的干燥动力学模型进行了研究, 均取得了较

好干燥工艺和干燥品质。

本研究以干燥时间、色泽和黄芩苷含量为指标对比分析微波干燥、热风干燥和微波热风联合干燥对黄芩干燥品质的影响, 采用变异系数法确定更优干燥方式。将微波热风联合干燥方法应用在黄芩干燥加工过程中, 研究不同微波功率密度、转换点含水率和热风温度对黄芩干燥特性及动力学的影响, 以期为提高黄芩等中药材的干燥品质提供理论依据和技术指导。

1 仪器与材料

1.1 仪器与设备

BSA124S-CW 型万分之一天平, 赛多利斯科学仪器有限公司; G90F23MN3XVN-A7 (TM) 型微波炉, 广州格兰仕微波生活电器制造有限公司; DHG-9070A 型电热鼓风干燥箱, 上海一恒科学仪器有限公司; JY5002 型电子天平, 上海舜禹恒平科学仪器有限公司; Alliance E269 型高效液相色谱仪, 美国 Waters 公司; KQ-300VDE 型超声波清洗机, 昆山市超声仪器有限公司; MFJ-W153 型多功能粉碎机, 北京利仁科技股份有限公司; 3nh-YS3060 型智能型分光测色仪, 深圳市三恩时科技有限公司。

1.2 材料与试剂

新鲜黄芩购买于陕西省渭南市澄城县, 经陕西科技大学机电工程学院袁越锦教授鉴定为唇形科黄芩属植物黄芩 *S. baicalensis* Georgi 的干燥根。甲醇 (分析纯)、磷酸 (色谱纯), 天津市天力化学试剂有限公司; 乙腈, 色谱纯, 天津市科密欧化学试剂有限公司; 对照品黄芩苷 (批号 N15GB167969, 质量分数 ≥ 98%) 购自上海源叶生物科技有限公司。

2 方法

2.1 初始含水率的测定

黄芩的含水率测量方法参照《中国药典》2020 年版通则 0832 水分测定法第二法烘干法。最终测得黄芩初始干基含水率为 2.125 g/g。

2.2 黄芩的干燥

选取直径相对均匀的黄芩进行干燥试验, 试验前对热风干燥箱和微波炉进行预热。根据前期预实验结果和相关研究, 将黄芩切成 5 mm 的切片进行

干燥,太薄容易导致翘片,太厚干燥时间太长;黄芩最佳热风干燥温度 60~70 ℃,太高导致其中活性成分降解严重,温度低于 50 ℃很难将黄芩干燥到安全含水率;微波热风联合干燥时转换点含水率太高干燥时间长,太低容易导致黄芩质量下降严重;在一定范围内随着微波功率密度的提高能够缩短黄芩的总体干燥时间。根据预实验结果分别对黄芩进行如下实验研究。

2.2.1 微波干燥 取厚度为 5 mm 的黄芩切片,在微波功率密度为 12 W/g 的条件下进行干燥。

2.2.2 热风干燥 取厚度为 5 mm 的黄芩切片,在热风温度为 60 ℃的条件下进行干燥。

2.2.3 微波热风联合干燥 取厚度为 5 mm 的黄芩切片,在微波功率密度分别为 9、12、15 W/g,转换点含水率分别为 30%、40%、50%,热风温度分别为 50、60、70 ℃进行单因素实验。具体方法为先将黄芩放入微波干燥箱内微波干燥到中间转换点含水率,再将黄芩转入热风干燥箱内热风干燥至安全含水率。

微波干燥每加热 1 min 后取出称定质量并释放热量后放回,热风干燥每 20 min 取出快速称定质量后放回,将黄芩含水率干燥到 10%左右停止干燥。每组实验重复 3 次,取平均值。

2.3 黄芩干燥参数计算

2.3.1 干基含水率(M_t) 黄芩干基含水率按式(1)计算^[18]。

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

W_t 为 t 时刻物料的质量, G 为物料绝干质量

2.3.2 水分比(moisture ratio, MR) 黄芩水分比按式(2)计算。

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

M_0 为初始干基含水率, M_e 为平衡干基含水率

由于在干燥过程中 M_e 远小于 M_0 和 M_t , 因此可将式(2)简化为式(3)。

$$MR = M_t / M_0 \quad (3)$$

2.3.3 干燥速率(drying rate, DR) 黄芩切片的干燥速率按式(4)计算^[19]。

$$DR = (M_{t+\Delta t} - M_t) / \Delta t \quad (4)$$

$M_{t+\Delta t}$ 为 $t+\Delta t$ 时刻的干基含水率, Δt 为两相邻的干燥时间

2.3.4 有效水分扩散系数(D) D 计算公式如式(5)所示^[20]。

$$\partial M / \partial t = D \nabla^2 M \quad (5)$$

由于黄芩切片较薄,假设在干燥过程中黄芩内

部水分均匀分布,且忽略其收缩变形,可将上式简化为式(6)。

$$MR = 8 \exp(-\pi^2 D t / H^2) / \pi^2 \quad (6)$$

D 为黄芩的有效水分扩散系数, t 为干燥时间, H 为黄芩厚度
对式(6)两边同时取对数得式(7)。

$$\ln MR = \ln(8/\pi^2) - \pi^2 D t / H^2 \quad (7)$$

由式(7)可知,通过拟合 $\ln MR$ 的斜率 k , 可得到斜率与 D 的关系,从而计算出 D 。关系式如式(8)所示。

$$D = H^2 k / \pi^2 \quad (8)$$

2.4 干燥动力学模型

干燥动力学模型表示水分比与干燥时间之间的关系,在黄芩微波热风联合干燥过程中采用如下模型进行实验数据的拟合,见表 1。

表 1 干燥动力学模型

Table 1 Drying kinetic model

模型名称	模型公式	参考文献
Two-term	$MR = A \cdot \exp(-k_0 t) + B \cdot \exp(-k_1 t)$	李晓凤等 ^[11]
Logarithmic	$MR = A \cdot \exp(-k_0 t) + C$	张付杰等 ^[10]
Page	$MR = \exp(-k_0 t^n)$	Agrawal 等 ^[21]

A 、 B 、 C 、 k_0 、 k_1 、 n 均为模型常数, t 为干燥时间

A , B , C , k_0 , k_1 , n are model coefficients; t is drying time

模型的拟合程度通常用如下 3 个指标来评价。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{\text{exp},i} - MR_{\text{pre},i})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{\text{exp},i} - \overline{MR}_{\text{pre},i})^2} \quad (9)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{\text{exp},i} - MR_{\text{pre},i})^2}{(N - Z)} \quad (10)$$

$$RMSE = [\sum_{i=1}^N (MR_{\text{exp},i} - MR_{\text{pre},i})^2 / N]^{1/2} \quad (11)$$

$MR_{\text{exp},i}$ 为实验测得的第 i 个水分比, $MR_{\text{pre},i}$ 为模型预测得到的第 i 个水分比, N 为实验数据个数, Z 为水平因素个数, R^2 为决定系数, χ^2 为误差平方和, $RMSE$ 为均方根误差

2.5 黄芩品质评价

2.5.1 色泽测定 用分光测色仪测量黄芩干燥前后的明亮度、红绿值和蓝黄值,每组测 3 次,取平均值。采用总色差值(ΔE)进行色泽综合评价, ΔE 的值按式(12)进行计算^[22]。

$$\Delta E = [(L - L^*)^2 + (a - a^*)^2 + (b - b^*)^2]^{1/2} \quad (12)$$

L 、 a 、 b 分别为干黄芩的明亮度、红绿值、蓝黄值; L^* 、 a^* 、 b^* 分别为鲜黄芩的明亮度、红绿值及蓝黄值

2.5.2 黄芩苷含量测定 黄芩干制品中黄芩苷的含量参照《中国药典》2020 年版通则 0512 高效液相

色谱法测定。按《中国药典》2020 年版要求,干制品中黄芩苷质量分数不得低于 9%。

2.6 综合评价

用变异系数法对黄芩微波热风联合干燥后产品品质进行综合评价。变异系数按式 (13) 计算^[23]。

$$V_i = \sigma_i / X_i \quad (13)$$

V_i 为第 i 项指标的变异系数, σ_i 为第 i 项指标的标准差, X_i 为第 i 项指标的平均值

权重系数按式 (14) 计算。

$$W_i = V_i / (V_1 + V_2 + V_3) \quad (14)$$

W_i 为第 i 项指标的权重系数

综合评分公式按式 (15) 计算^[24], 综合评分越高, 质量越好。

$$Y = (W_1 y_{1b} / y_1 + W_2 y_{2b} / y_2 + W_3 y_{3b} / y_{3b}) \times 100 \quad (15)$$

$y_1 \sim y_3$ 分别为干燥时间、色差值和黄芩苷含量, y_{ib} 为各指标最优值

2.7 数据处理

用 Excel 软件进行数据统计, Origin 2022 软件进行绘图和曲线拟合。

3 结果与分析

3.1 不同干燥方式对黄芩品质的影响

分别对比微波干燥 (12 W/g)、热风干燥 (60 °C) 以及微波热风联合干燥 (12 W/g、40%、60 °C) 3 种干燥方式下黄芩的干燥时间、色泽和黄芩苷含量, 通过变异系数法确定黄芩更优干燥方式。

3.1.1 干燥时间 干燥过程中干燥时间的长短不仅能影响干燥过程中的能耗, 还与干燥品质密切相关。图 1 为 3 种不同干燥方式下黄芩的干基含水率与干燥时间之间的关系。由图 1 可知, 新鲜黄芩干燥到安全含水率时, 微波干燥所需要的时间最短为 13 min; 热风干燥所需要的干燥时间最长为 340 min。微波热风联合干燥的干燥时间为 146 min, 相较于热风干燥总干燥时间缩短了 57.06%。微波直接作用于物料内部, 物料内部热量和水分的传递方向相同, 因此微波干燥黄芩的干基含水率下降最快。

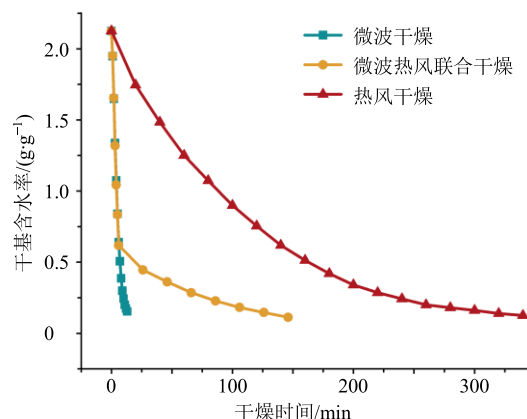


图 1 3 种干燥方式干燥时间对比

Fig. 1 Comparison of drying time between three drying methods

3.1.2 色泽 药材的颜色是反映其药效成分的外在体现^[25]。因此以色泽为评价指标对提高黄芩干燥质量具有重要意义。3 种不同干燥方法对黄芩色泽的影响如表 2 所示。干燥后黄芩的 L^* 、 a^* 、 b^* 相较于新鲜黄芩均有不同程度的降低。其中热风干燥的颜色变化最大, 总色差高达 36.33, 且断面呈绿色, 如图 2 所示。微波热风联合干燥的总色差最小为 16.25, 在干燥过程中黄芩中药材的主要活性成分黄芩苷在酶的作用下会降解成为黄芩素, 黄芩素被氧化为醌类物质呈现为绿色^[26]。微波干燥时的“杀青”作用能够有效的钝化黄芩中的酶, 能防止切片产生颜色的变化。

3.1.3 黄芩苷含量 黄酮类化合物是黄芩中的主要成分, 目前黄酮类成分的高低是评价黄芩品质优劣常用的评价指标, 其中黄芩苷含量是最常用的评价指标之一^[27]。3 种不同的干燥方式黄芩苷含量如表 2 所示。3 种干燥方法的黄芩苷质量分数均大于 9%, 符合《中国药典》2020 年版的要求。微波热风联合干燥的黄芩苷质量分数最高为 18.55%, 热风干燥后黄芩苷的质量分数最低为 10.86%。

酶解作用和高温分解作用是导致黄芩干燥过程中黄芩苷含量降低最主要的原因。干燥时间过长和

表 2 3 种干燥方式下黄芩切片的色泽及黄芩苷含量变化

Table 2 Effects of three drying technologies on color and baicalin content parameters of *S. baicalensis* slices

干燥方式	L^*	a^*	b^*	ΔE	黄芩苷/%
新鲜黄芩	83.73±0.97	3.18±0.05	74.14±3.26	—	23.68±2.82
热风干燥	47.86±1.35	0.27±0.09	49.35±0.28	36.33±1.33	10.86±0.91
微波干燥	72.35±0.47	1.47±0.11	50.09±0.53	27.27±0.35	16.05±0.85
微波热风联合干燥	70.41±1.00	2.68±0.14	64.85±0.44	16.25±1.05	18.88±0.30

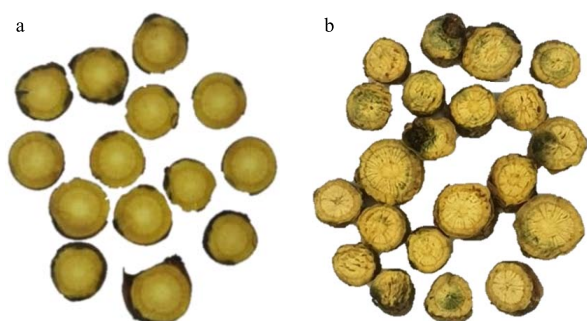


图 2 干燥前 (a) 和热风干燥后 (b) 黄芩比较

Fig. 2 Comparison of *S. baicalensis* before (a) and after hot air drying (b)

局部温度过高均会造成黄芩苷的分解和破坏,微波热风联合干燥不仅能缩短黄芩单一热风干燥的时间,且前期的微波干燥能起到杀酶保苷的作用,后期的热风干燥能在一定程度上改善单一微波干燥的不均匀性,从而使微波热风联合干燥的黄芩苷含量要高于单一微波干燥和热风干燥。

3.1.4 黄芩不同干燥方式的综合质量评价 用变异系数法对黄芩干燥时间、色差值和黄芩苷含量的变异系数、权重进行计算。结果见表 3。黄芩干燥品中黄芩苷含量所占权重最大为 0.56,说明不同的干燥方式对黄芩干制品中黄芩苷的含量影响最大。

不同干燥方式的黄芩综合质量评分见表 4 所示。3 种干燥方式下微波热风联合干燥的黄芩评分最高为 88.16 分,微波干燥次之,热风干燥评分最低。说明相比于单一的热风干燥和微波干燥,微波热风联合干燥后的黄芩具有更好的干燥品质。

3.2 黄芩微波热风联合干燥特性

3.2.1 微波功率密度对黄芩干燥特性的影响 固定

表 3 各指标变异系数、权重系数

Table 3 Variation coefficient and weight coefficient of various indicators

评价指标	变异系数	权重
干燥时间	0.05	0.14
色差值	0.11	0.30
黄芩苷含量	0.21	0.56

表 4 3 种干燥方式下黄芩综合评分

Table 4 Comprehensive quality evaluation of *S. baicalensis* in three drying methods

干燥方式	综合评分
微波干燥	78.93
热风干燥	47.14
微波热风联合干燥	88.16

转换点含水率 40%,热风温度 60 °C,研究微波功率为 9、12、15 W/g 对黄芩联合干燥特性的影响,得到不同微波功率密度下黄芩干燥特性曲线如图 3 所示。由图 3-a 可知,微波干燥到转换点含水率(40%)的时间依次为 7、6、4 min,然后热风干燥到安全含水率的完成时间依次为 260、140、300 min。微波功率密度为 12 W/g 时总干燥时间最短为 146 min,相较于微波功率密度为 15 W/g 时总干燥时间 304 min 缩短了 51.97%。随着微波功率密度的增大,能缩短微波干燥阶段的时间,但热风干燥阶段的干燥时间随微波功率密度的增大先减小后增大。微波功率密度太大,会导致黄芩表面硬化结壳现象严重,不利于后期热风干燥。

由图 3-b 可知,微波功率密度和微波干燥阶段的干燥速率呈正相关关系,不同微波功率密度下最大干燥速率分别为 0.28、0.33、0.36 g/(g·min)。微波干燥阶段的干燥速率远大于热风干燥阶段的干燥速

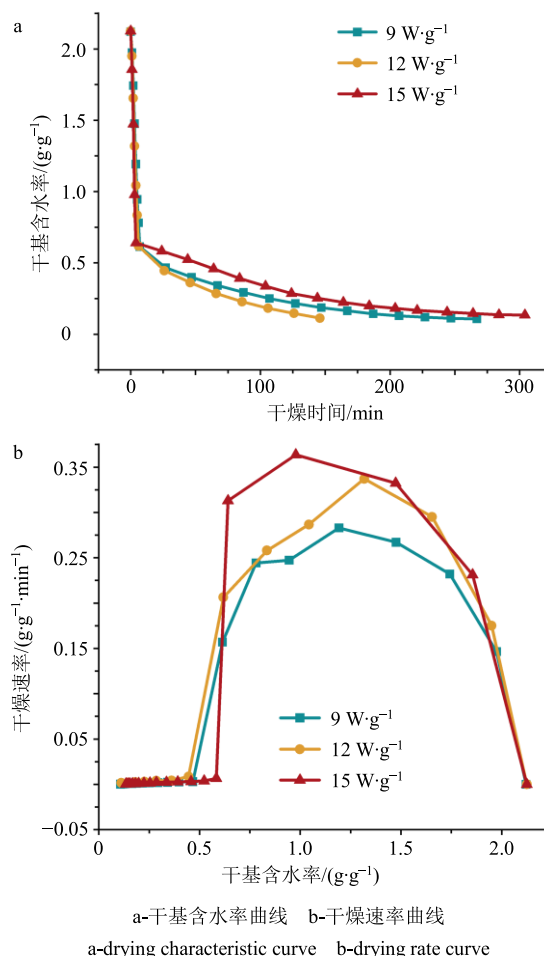


图 3 微波功率密度对黄芩干燥特性的影响

Fig. 3 Effect of microwave power density on drying characteristics of *S. baicalensis*

率,这是因为微波加热是从物料内部加热,热量和水分的传递方向相同,所以其干燥速率很快。热风干燥阶段的干燥速率随着微波功率密度的增大先增大后减小。在一定微波功率密度范围内,随着微波功率密度的增大,干燥过程中会产生更大的由内向外的压力梯度,使黄芩切片内部形成许多微小孔道,会加快黄芩热风干燥阶段的水分传输效率;但过高的功率密度会导致物料失水过快,干燥过程中会产生严重的收缩变形和表面结壳现象,还会导致黄芩内部细胞坍塌增多,会对后期的热风干燥产生不利的影响^[28]。

3.2.2 转换点含水率对黄芩干燥特性的影响 固定微波功率密度 12 W/g 和热风温度 60 °C 的条件下,研究不同转换点含水率为 30%、40%、50% 对黄芩联合干燥特性的影响,如图 4 所示。

由图 4-a 可知,随着转换点含水率的减小,黄芩的干燥时间呈现先减小后增大的趋势,转换含水

率为 40% 时需要的干燥时间最短为 146 min,与转换含水率为 50% 时的总体干燥时间相比缩短了 40.16%。转换含水率并不是越低越好。随着转换点含水率的降低,黄芩热风干燥阶段的初始含水率就越低,在一定程度上会缩短干燥时间,但转换点含水率太低会导致黄芩内部孔道网络结构发生变化,甚至会延长总体干燥时间,而且会导致黄芩品质下降严重。

由图 4-b 可知,黄芩的干燥速率随着干基含水率的降低而降低。在干基含水率为 1.33 g/g 时,微波干燥速率出现最大值为 (0.33 ± 0.01) g/(g·min),且微波干燥阶段的干燥速率远大于热风干燥阶段的干燥速率。在相同的干基含水率下热风干燥阶段黄芩的干燥速率随着转换点含水率的减小而减小。这是因为同一批物料在相同的微波功率密度下,随着转换含水率的降低,微波干燥时间就会有所增加。随着微波干燥时间的延长,黄芩内部可能会出现细胞坍塌、孔道收缩等现象,甚至可能会出现黄芩内部孔道封闭的现象,阻碍了水分的传递,从而降低了热风干燥阶段的干燥速率。

3.2.3 热风温度对黄芩干燥特性的影响 固定微波功率密度 12 W/g 和转换点含水率 40% 的条件下,研究不同热风温度为 50、60、70 °C 对黄芩微波热风联合干燥特性的影响,如图 5 所示。由图 5-a 可知,黄芩微波热风联合干燥总干燥时间随着热风温度的升高而降低。当热风温度为 70 °C 时总干燥时间最短为 126 min,相较于 50 °C 时最长的总干燥时间 346 min 来说,干燥时间缩短了 63.58%,在很大程度上可以降低干燥能耗。由图 5-b 可知,热风干燥过程呈降速干燥阶段,热风温度越高,干燥速率越快,最高的干燥速率出现在热风 70 °C 的条件下,为 0.01 g/(g·min)。这是由于在微波干燥阶段结束后,黄芩表面的水分基本已经除去,但由于微波干燥导致黄芩收缩和表面形成的一层致密的薄膜阻碍了水分的迁移,增大了传热和传质的阻力,提高热风温度,物料与外部环境间的温差越大,温度梯度越大,越有利于黄芩水分的蒸发^[29]。

3.3 干燥动力学模型

3.3.1 干燥动力学模型拟合 选取 Two-term 模型、Logarithmic 模型和 Page 模型 3 种干燥动力学模型拟合了不同微波功率密度、转换点含水率和热风干燥温度处理后黄芩的微波热风联合干燥过程,拟合结果如表 5 所示。通常 R^2 越趋近于 1, χ^2 和 RMSE

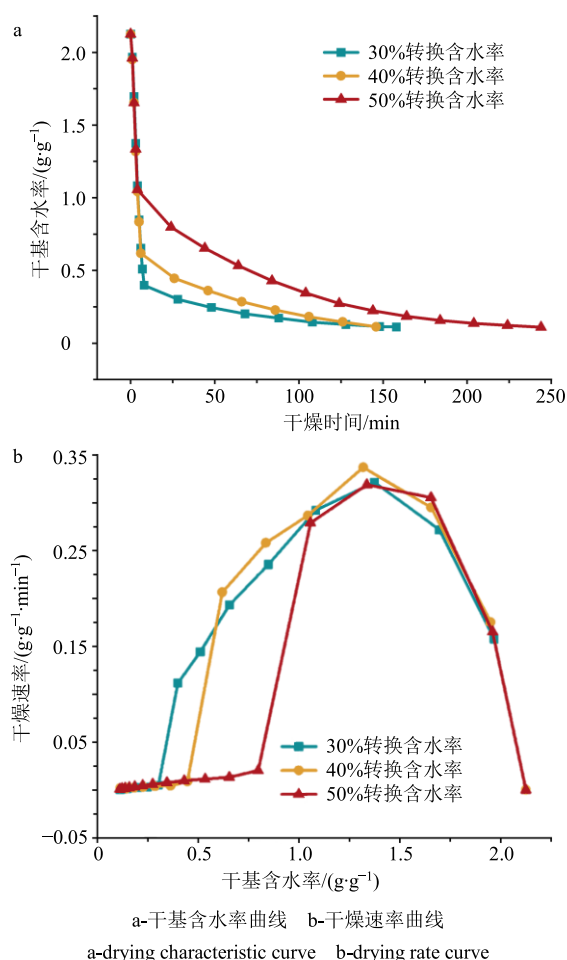


图 4 转换点湿基含水率对黄芩干燥特性的影响
Fig. 4 Effect of moisture content on wet basis at transfer point on drying characteristics of *S. baicalensis*

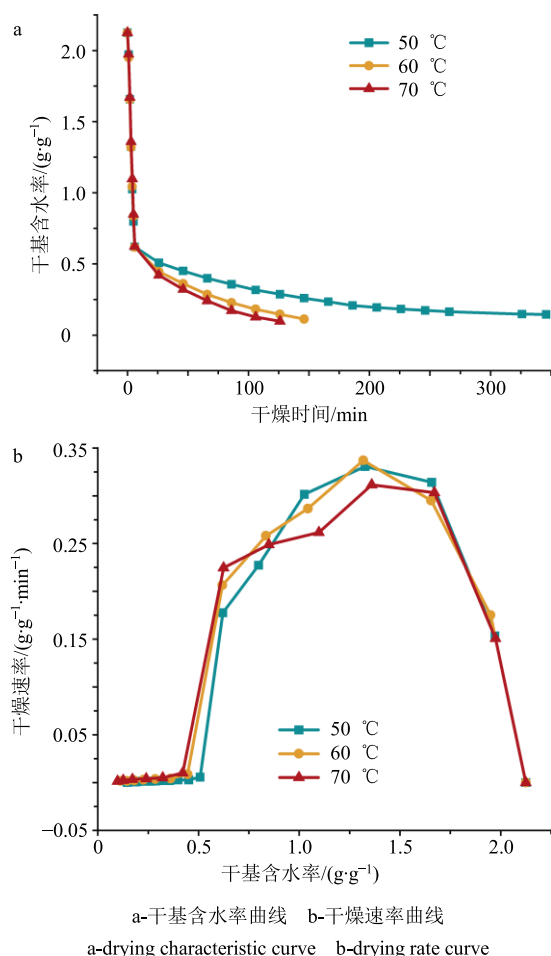


图 5 热风温度对黄芩干燥特性的影响

Fig. 5 Effect of hot air temperature on drying characteristics of *S. baicalensis*

越趋近于 0，模型的拟合度越好，预测结果越准确。由表 5 可知，在不同的干燥条件下，Two-term 模型具有最高的 R^2 ，为 0.972 4~0.988 6，最低的 χ^2 和 RMSE 值，分别为 0.014 9~0.034 2 和 0.033 8~0.052 8。说明 Two-term 模型具有更好的拟合效果，可以很好的用来描述黄芩的微波热风联合干燥过程。

3.3.2 模型求解及验证 从表 5 可以看出 Two-term 模型的模型常数 A 、 B 、 k_0 、 k_1 是微波功率密度、转换点含水率和热风温度的函数。为了进一步描述干燥因素对 Two-term 模型参数的影响，对上述 Two-term 模型的模型常数进行多项式拟合。拟合方程如下式所示。

$$A = x_0 + x_1 \ln P + x_2 \ln M_{wb} + x_3 \ln T \quad (16)$$

$$B = x_4 + x_5 \ln P + x_6 \ln M_{wb} + x_7 \ln T \quad (17)$$

$$k_0 = x_8 + x_9 \ln P + x_{10} \ln M_{wb} + x_{11} \ln T \quad (18)$$

$$k_1 = x_{12} + x_{13} \ln P + x_{14} \ln M_{wb} + x_{15} \ln T \quad (19)$$

P 为微波功率密度， M_{wb} 为中间转换点含水率， T 为热风干

燥温度， x_i 为待定系数

利用 Origin 软件中的多元线性回归法，求解出 Two-term 模型的模型常数的回归方程。线性回归方程如式 (20) ~ (23) 所示。

$$A = 0.766\ 8 + 0.117\ 9 \ln P + 0.642\ 5 \ln M_{wb} - 0.056\ 7 \ln T \quad (20)$$

$$B = 0.371\ 9 - 0.151\ 0 \ln P - 0.718\ 8 \ln M_{wb} + 0.041\ 6 \ln T \quad (21)$$

$$k_0 = -0.051\ 9 + 0.000\ 3 \ln P + 0.012\ 0 \ln M_{wb} + 0.016\ 9 \ln T \quad (22)$$

$$k_1 = 0.004\ 1 + 0.329\ 3 \ln P + 0.232\ 3 \ln M_{wb} - 0.016\ 9 \ln T \quad (23)$$

综上所述，得到基于 Two-term 模型黄芩微波热风联合干燥的方程如式 (24) 所示。

$$\begin{aligned} MR = & (0.766\ 8 + 0.117\ 9 \ln P + 0.642\ 5 \ln M_{wb} - 0.056\ 7 \ln T) \\ & \exp[(0.051\ 9 - 0.000\ 3 \ln P - 0.012\ 0 \ln M_{wb} - 0.016\ 9 \ln T)t] + \\ & (0.371\ 9 - 0.151\ 0 \ln P - 0.718\ 8 \ln M_{wb} + 0.041\ 6 \ln T) \\ & \exp[(-0.004\ 1 - 0.329\ 3 \ln P - 0.232\ 3 \ln M_{wb} + 0.016\ 9 \ln T)t] \end{aligned} \quad (24)$$

为了验证模型的准确性，在微波功率密度 10 W/g，转换点含水率 40%和热风温度 60 °C 的试验条件下，对黄芩微波热风联合干燥的试验值和基于 Two-term 模型预测所得到的模拟值进行对比，对比结果如图 6 所示。由图 6 可知，黄芩微波热风联合干燥水分比的试验值和模拟值差异较小，误差在 ± 9.83% 以内，说明 Two-term 模型的函数拟合度较好，可以用来预测黄芩微波热风联合干燥过程中不同干燥条件下水分比的变化。

3.4 D

D 是表征干燥过程中水分迁移速度快慢的重要参数^[30]。如式 (8) 所示，在微波热风联合干燥过程中黄芩水分比的自然对数和干燥时间呈线性关系，通过 Origin 软件进行线性拟合可得到直线斜率 k 。结果见表 6。由表 6 可知，微波干燥阶段和热风干燥阶段的 R^2 值分别为 0.941 8~0.983 7 和 0.944 9~0.997 5，说明拟合效果理想。微波干燥阶段 D 在 $4.516\ 9 \times 10^{-7} \sim 7.699\ 9 \times 10^{-7}$ m²/s，热风干燥阶段的 D 在 $1.090\ 3 \times 10^{-8} \sim 3.889\ 6 \times 10^{-8}$ m²/s。微波干燥阶段的有效水分扩散速率比热风干燥阶段大一个数量级，导致了微波干燥阶段的干燥速率远大于热风干燥阶段的干燥速率。微波功率密度、转换点含水率、热风温度均对黄芩的 D 有影响。随着微波功率密度的增大，黄芩微波干燥阶段的 D 也增大，但热

表 5 不同干燥条件下的 3 个干燥动力学模型拟合结果

Table 5 Fitting results of three drying kinetics models at different drying conditions

模型	微波功率/ (W·g ⁻¹)	转换点含 水率/%	热风温 度/℃	R ²	χ ²	RMSE	模型常数
Two-term	12	30	60	0.977 3	0.031 0	0.048 8	$A=0.102\ 0, B=0.980\ 5, k_0=0.003\ 3, k_1=0.229\ 9$
	12	40	60	0.978 4	0.023 4	0.048 4	$A=0.212\ 1, B=0.852\ 8, k_0=0.007\ 9, k_1=0.266\ 9$
	12	50	60	0.988 6	0.014 9	0.033 8	$A=0.444\ 0, B=0.598\ 4, k_0=0.009\ 4, k_1=0.351\ 0$
	12	40	50	0.980 7	0.028 9	0.040 1	$A=0.226\ 2, B=0.845\ 8, k_0=0.004\ 0, k_1=0.281\ 2$
	12	40	60	0.978 4	0.023 4	0.048 4	$A=0.212\ 1, B=0.852\ 8, k_0=0.007\ 9, k_1=0.266\ 1$
	12	40	70	0.976 1	0.025 1	0.052 8	$A=0.202\ 9, B=0.864\ 9, k_0=0.009\ 7, k_1=0.250\ 9$
	9	40	60	0.982 8	0.028 2	0.040 8	$A=0.214\ 8, B=0.857\ 9, k_0=0.005\ 6, k_1=0.233\ 9$
	12	40	60	0.978 4	0.023 4	0.048 4	$A=0.212\ 1, B=0.852\ 8, k_0=0.007\ 9, k_1=0.266\ 1$
	15	40	60	0.972 4	0.034 2	0.046 3	$A=0.277\ 8, B=0.777\ 6, k_0=0.005\ 4, k_1=0.413\ 8$
Logarithmic	12	30	60	0.978 1	0.0323	0.048 0	$A=1.004\ 7, k_0=0.220\ 0, C=0.076\ 1$
	12	40	60	0.970 0	0.034 7	0.056 2	$A=0.940\ 6, k_0=0.225\ 4, C=0.113\ 8$
	12	50	60	0.907 6	0.130 1	0.096 4	$A=0.874\ 9, k_0=0.193\ 6, C=0.153\ 0$
	12	40	50	0.962 3	0.059 7	0.056 1	$A=0.943\ 5, k_0=0.233\ 5, C=0.124\ 0$
	12	40	60	0.970 9	0.034 7	0.056 2	$A=0.947\ 0, k_0=0.214\ 0, C=0.113\ 8$
	12	40	70	0.970 8	0.034 1	0.058 4	$A=0.961\ 4, k_0=0.192\ 2, C=0.103\ 0$
	9	40	60	0.968 7	0.054 5	0.055 0	$A=0.963\ 4, k_0=0.225\ 4, C=0.113\ 8$
	12	40	60	0.970 9	0.034 7	0.056 2	$A=0.947\ 1, k_0=0.225\ 4, C=0.113\ 8$
	15	40	60	0.931 9	0.089 6	0.072 6	$A=0.925\ 3, k_0=0.317\ 0, C=0.129\ 2$
Page	12	30	60	0.959 5	0.063 8	0.065 2	$k_0=0.089\ 6, n=1.431\ 3$
	12	40	60	0.915 8	0.109 5	0.095 5	$k_0=0.302\ 9, n=0.499\ 9$
	12	50	60	0.968 0	0.048 2	0.056 7	$k_0=0.234\ 6, n=0.449\ 7$
	12	40	50	0.908 0	0.153 3	0.087 6	$k_0=0.356\ 3, n=0.375\ 4$
	12	40	60	0.915 8	0.109 5	0.095 5	$k_0=0.302\ 9, n=0.499\ 9$
	12	40	70	0.922 1	0.099 9	0.095 3	$k_0=0.266\ 4, n=0.575\ 3$
	9	40	60	0.920 4	0.146 5	0.087 8	$k_0=0.298\ 7, n=0.454\ 2$
	12	40	60	0.915 8	0.109 5	0.095 5	$k_0=0.302\ 9, n=0.499\ 9$
	15	40	60	0.919 5	0.112 1	0.078 9	$k_0=0.401\ 7, n=0.342\ 2$

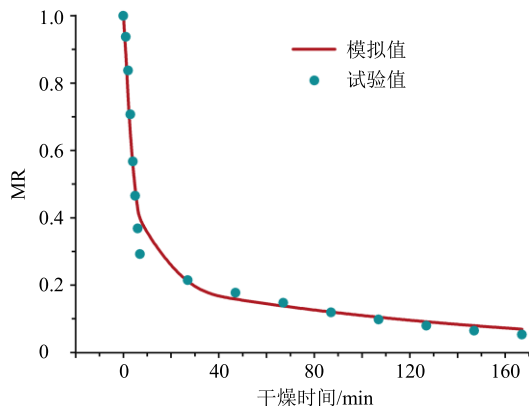


图 6 模拟值和试验值对比图

Fig. 6 Comparison of simulated and tested values

风干燥阶段的 D 先增大后减小。这是因为微波功率密度越大, 黄芩吸收的微波能量越多, 物料内外的压力梯度越大, 导致微波干燥阶段传质速率增加, 但太高的功率密度会导致物料内部的孔道网络结构更加复杂, 降低了热风干燥阶段的传质过程。转换点含水率和热风干燥温度对黄芩的热风干燥阶段的 D 有很大影响, 黄芩热风干燥阶段的 D 与转换点含水率、热风干燥温度呈正相关关系。这是因为微波干燥能迅速降低黄芩内部的含水量, 但微波时间过长会使物料内部细胞塌陷, 传质通道受阻, 从而导致 D 减小。热风温度的升高能提高黄芩与外部环境的温度梯度, 增大传质驱动力。

表 6 不同干燥条件下 D

Table 6 Effective moisture diffusion coefficient at different drying conditions

微波功率/ (W·g ⁻¹)	转换点含 水率/%	热风温 度/℃	微波干燥阶段			热风干燥阶段		
			k	$D/(\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1})$	R^2	k	$D/(\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1})$	R^2
12	30	60	0.219 1	$5.555\ 5\times 10^{-7}$	0.983 7	0.008 4	$2.117\ 2\times 10^{-8}$	0.974 7
12	40	60	0.209 3	$5.306\ 0\times 10^{-7}$	0.976 3	0.011 8	$2.992\ 0\times 10^{-8}$	0.997 4
12	50	60	0.217 8	$5.523\ 0\times 10^{-7}$	0.962 1	0.014 6	$3.702\ 0\times 10^{-8}$	0.987 8
12	40	50	0.213 7	$5.417\ 3\times 10^{-7}$	0.976 6	0.004 3	$1.090\ 3\times 10^{-8}$	0.944 9
12	40	60	0.209 3	$5.306\ 0\times 10^{-7}$	0.976 3	0.011 8	$2.992\ 0\times 10^{-8}$	0.997 4
12	40	70	0.206 6	$5.237\ 3\times 10^{-7}$	0.967 9	0.015 3	$3.889\ 6\times 10^{-8}$	0.997 5
9	40	60	0.182 9	$4.637\ 4\times 10^{-7}$	0.972 9	0.006 7	$1.701\ 4\times 10^{-8}$	0.975 1
12	40	60	0.209 3	$5.306\ 0\times 10^{-7}$	0.976 3	0.011 8	$2.992\ 0\times 10^{-8}$	0.997 4
15	40	60	0.303 7	$7.699\ 9\times 10^{-7}$	0.941 8	0.005 6	$1.425\ 0\times 10^{-8}$	0.974 2

4 讨论

中草药的干燥加工是中草药贮藏和运输的有效手段。干燥加工会通过影响中药材的色泽、外观等因素进而影响药性^[31]。本研究采用变异系数法,以黄芩的干燥时间、色泽和黄芩苷含量为指标,分析比较了微波干燥、热风干燥和微波热风联合干燥对黄芩干燥品质的影响。研究发现,微波热风联合干燥方式具有较短的干燥时间,最小的色差值和最高的黄芩苷含量,综合评分最高为 88.16。说明相较于单一的微波干燥和热风干燥,应用微波热风联合干燥方式对黄芩进行干燥效果更优。

本研究在更优干燥方式的基础上,探究了不同干燥条件对黄芩微波热风联合干燥特性的影响。结果发现微波功率密度、转换点含水率和热风温度均对黄芩的干燥特性有影响。黄芩的干燥时间随热风温度的升高而缩短,温度为 70 ℃时的干燥时间相较于 50 ℃缩短了 63.6%。随着微波功率密度和转换点含水率的增加,黄芩微波干燥阶段的干燥时间均有不同程度的减少,但总体干燥时间呈先减小后增大的趋势。说明除了热风温度对黄芩热风干燥阶段有影响外,前期的微波干燥通过改变黄芩的内部组织结构,如皱缩、结壳、细胞塌陷、封闭传质孔道等作用从而对后期的热风干燥产生影响。

黄芩具有很强的热敏性和湿敏性,黄芩苷在高温湿热的环境易降解,降低干燥产品品质^[32]。研究干燥过程中黄芩内部水分的变化规律对提高黄芩干燥质量具有重要意义。采用数学模型能定量描述中草药干燥过程中的水分含量的变化规律。本研究采用 3 种干燥动力学模型对黄芩微波热风联合干燥过

程进行拟合,发现 Two-term 模型能很好的描述黄芩微波热风联合干燥过程。能为黄芩等中药材的干燥工艺参数优化、加工过程智能化提供理论基础和技术指导。

本研究采用微波热风联合干燥方式对黄芩进行干燥加工,并研究了其干燥特性和干燥动力学。干燥前期充分利用了微波干燥的杀菌效应、杀青效应等效应,可以钝化黄芩中的酶,防止黄芩在干燥时黄芩苷的降解,同时也能抑制微生物的繁殖,有效提高黄芩的干燥品质。但是在微波干燥过程中尤其是干燥后期会产生局部热点的现象导致微波干燥的不均匀性,而且干燥温度难以控制,致物料烧糊等现象。因此,本研究在干燥后期以热风为热源,可以在一定程度上改善了微波干燥不均匀和过度干燥的现象。本研究发现微波热风联合干燥的方法能有效提高黄芩的干燥品质,为微波热风联合干燥应用于黄芩等中草药的干燥加工提供了理论基础和技术指导。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] 中国药典 [S]. 一部. 2020: 301-316.
- [2] 范毓慧, 刘晓节, 秦雪梅, 等. 防治 COVID-19 的含黄芩方药分析及其网络药理作用机制研究进展 [J]. 中药药理与临床, 2020, 36(4): 40-47.
- [3] 巨浩羽, 赵士豪, 赵海燕, 等. 中草药干燥加工现状及发展趋势 [J]. 南京中医药大学学报, 2021, 37(5): 786-796.
- [4] 张丽. 根类药材黄芪、黄芩及银柴胡现代产地干燥加工研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2020.

- [5] Khakbaz H M, Dehghani K H, Jalal D, *et al.* 3D simulation of momentum, heat and mass transfer in potato cubes during intermittent microwave-convective hot air drying [J]. *Heat Mass Transf*, 2022, 59(2): 239-254.
- [6] 高凯娜, 顾立群, 沈威, 等. 不同加工方法对中草药有效成分的影响研究 [J]. 现代园艺, 2019(1): 29-31.
- [7] 邢文龙, 杨延辰, 张小燕, 等. 微波联合干燥技术在农产品领域的应用 [J]. 农业工程, 2021, 11(2): 69-74.
- [8] 朱俊霖, 闫永红, 张学文, 等. 不同干燥方法对黄芩有效成分含量的影响 [J]. 中国实验方剂学杂志, 2012, 18(5): 7-9.
- [9] Pham N D, Karim M A. Investigation of nutritional quality evolution of papaya during intermittent microwave convective drying [J]. *Dry Technol*, 2022, 40(16): 3694-3707.
- [10] 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.
- [11] 李晓凤, 杨琳, 王嘉祥, 等. 余甘子微波-热风分段联合干燥工艺优化及动力学模型研究 [J/OL]. 食品与发酵工业, [2022-10-10]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.033423>.
- [12] 蒋齐翻, 张凯, 周明干, 等. 杜仲叶微波热风组合干燥工艺研究 [J]. 真空电子技术, 2020(3): 77-81.
- [13] Tepe T K, Tepe B. The comparison of drying and rehydration characteristics of intermittent-microwave and hot-air dried-apple slices [J]. *Heat Mass Transfer*, 2020, 56(11): 3047-3057.
- [14] 张记, 彭桂兰, 张雪峰, 等. 黄芪切片热风干燥特性及动力学模型研究 [J]. 食品与机械, 2020, 36(8): 22-28.
- [15] 赵梦月, 段续, 任广跃, 等. 山茱萸微波冷冻干燥动力学及品质变化分析 [J]. 食品与机械, 2021, 37(11): 111-117.
- [16] Ganesapillai M, Rose Miranda L, Reddy T, *et al.* Modeling, characterization, and evaluation of efficiency and drying indices for microwave drying of *Zingiber officinale* and *Curcuma mangga* [J]. *Asia Pac J Chem Eng*, 2011, 6(6): 912-920.
- [17] Sharifi A, Niakousari M, Rigi S. Experimental study and mathematical modeling of thin layer drying of rhubarb (*Rheum ribes* L.) [J]. *J Food Bioprocess Eng*, 2020, 3(1): 1-6.
- [18] 李梁, 程秀峰, 杨尚雄, 等. 基于低场核磁共振的热风干燥猕猴桃切片含水率预测模型 [J]. 农业工程学报, 2020, 36(10): 252-260.
- [19] 巨浩羽, 赵士豪, 赵海燕, 等. 阶段降湿对山药热风干燥特性和品质的影响 [J]. 中草药, 2021, 52(21): 6518-6527.
- [20] 王吉强, 邓利珍, 裴昱鹏, 等. 成熟度对冬枣真空脉动干燥动力学及产品品质的影响 [J]. 农业工程学报, 2021, 37(23): 273-279.
- [21] Agrawal Y C, Singh R P. *Thin-Layer Drying Studies on Short-Grain Rough Rice* [M]. Michigan: American Society of Agricultural Engineers, 1977: 45-60.
- [22] 徐凤英, 黄木水, 陈震, 等. 稻谷烘干过程中的水分扩散特性与品质特性 [J]. 农业工程学报, 2016, 32(15): 261-267.
- [23] 臧泽鹏, 黄晓鹏, 马国军, 等. 基于熵权-变异系数法对不同干燥方式下当归干燥特性及理化性质的评价 [J]. 中草药, 2022, 53(23): 7403-7413.
- [24] 赵泽颖, 袁越锦, 王栋, 等. 多指标试验公式法优化哈密瓜片真空热风干燥工艺 [J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(15): 140-146.
- [25] 武艳雪, 翁丽丽, 姜雨昕, 等. 基于色差原理分析黄芩化学成分含量与色度相关性 [J]. 世界科学技术—中医药现代化, 2020, 22(8): 2839-2844.
- [26] 韩喜桃, 唐雅楠, 刘子琴, 等. 不同加工方法的“杀酶保苷”作用及对黄芩片质量的影响 [J]. 中华中医药杂志, 2022, 37(1): 120-124.
- [27] 葛秀允, 朱建光. 不同加工方法对黄芩饮片质量影响的综合评价研究 [J]. 时珍国医国药, 2017, 28(3): 603-605.
- [28] 贺亚男, 陈露梦, 黄伟, 等. 微波炮制炮制工艺影响因素研究 [J]. 中草药, 2020, 51(12): 3157-3164.
- [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] 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.
- [31] 张玖捌, 张伟, 王彬, 等. 基于 Box-Behnken 响应面法的白芍产地加工与炮制生产一体化工艺研究 [J]. 中草药, 2022, 53(18): 5657-5662.
- [32] 胡恋琪, 熊优, 王雅琪, 等. 黄芩饮片加工工艺标准化的初步研究 [J]. 中国中药杂志, 2019, 44(15): 3281-3286.

[责任编辑 郑礼胜]