

防己趁鲜切制热风干燥动力学及其主要成分变化规律研究

陈小燕, 张金莲*, 金姝含, 张 文, 王 浩, 辛 力, 龚文慧, 郭静英

江西中医药大学, 江西 南昌 330004

摘 要: **目的** 建立防己 *Stephaniae Tetrandrae Radix* 趁鲜切制热风干燥的干燥动力学模型, 测定其干燥特性参数, 研究其干燥过程中的成分变化规律, 为阐明防己趁鲜切制热风干燥机制及干燥工艺提供参考依据。 **方法** 在 60、70、80 °C 条件下建立防己趁鲜切制干燥过程中的干燥动力学模型, 基于低场核磁共振技术研究防己干燥过程中的水分相态, 根据 Fick 扩散定律和 Arrhenius 方程计算出有效扩散系数 (effective diffusion coefficient, D_{eff}) 和活化能 (activation energy, E_a), 采用 HPLC 法对防己干燥过程中指标成分粉防己碱和防己诺林碱的质量分数进行动态监测。 **结果** Page 模型 ($MR = e^{-kt^n}$, MR 为水分比, k , n 为模型参数) 可以准确地描述防己干燥过程中水分含量的变化, 温度越高, 水分散失越快, 模型中的参数 k 随着温度的升高而增大, 参数 n 随着温度的升高而减小; 60、70、80 °C 热风干燥条件下的 D_{eff} 分别为 8.13×10^{-7} 、 9.97×10^{-7} 、 1.04×10^{-6} m^2/s , D_{eff} 随着温度的升高而增大; 防己趁鲜切制热风干燥的 E_a 为 12.51 kJ/mol。横向弛豫时间 (T_2) 图谱显示, 4 h 之前水分相态发生显著变化, 自由水比例大幅下降, 水的自由度逐渐降低; 4 h 之后水分含量和相态无明显变化。防己在趁鲜切制干燥过程中, 粉防己碱和防己诺林碱总含量无明显波动。 **结论** 采用干燥动力学模型和低场核磁共振技术可以直观地描述防己趁鲜切制干燥过程中的水分变化规律; 为阐明防己趁鲜切制干燥机制和干燥工艺提供参考。

关键词: 防己; 干燥动力学; 有效扩散系数; 活化能; 低场核磁共振; 粉防己碱; 防己诺林碱; 趁鲜切制

中图分类号: R283.6 文献标志码: A 文章编号: 0253-2670(2025)05-1580-07

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2025.05.009

Drying kinetics and variation of main components of *Stephaniae Tetrandrae Radix* fresh-cut

CHEN Xiaoyan, ZHANG Jinlian, JIN Shuhan, ZHANG Wen, WANG Hao, XIN Li, GONG Wenhui, GUO Jingying

Jiangxi University of Chinese Medicine, Nanchang 330004, China

Abstract: Objective To establish the drying kinetic model of Fangji (*Stephaniae Tetrandrae Radix*, STR) fresh-cut hot air drying, determine its drying characteristic parameters, and study the variation of its components during the drying process, so as to provide a reference for elucidating the drying mechanism of STR fresh-cut and optimizing the drying process. **Methods** The drying kinetics model of STR during fresh-cut drying was established at 60, 70, 80 °C. The water phase in the drying process of STR was studied based on low-field nuclear magnetic resonance technology. The effective diffusion coefficient (D_{eff}) and activation energy (E_a) were calculated according to Fick's diffusion law and Arrhenius equation. The mass fraction of tetrandrine and fangchinoline in the drying process of STR was investigated by HPLC for dynamic monitoring. **Results** The Page model ($MR = e^{-kt^n}$, MR is water ratio, k , n are model parameters) could accurately describe the change of moisture content in the drying process of STR. The higher the temperature, the faster the moisture loss. The k in the model increased with the increase of temperature, and the n decreased with the increase of temperature. D_{eff} were 8.13×10^{-7} , 9.97×10^{-7} , 1.04×10^{-6} m^2/s at 60, 70, 80 °C, and the effective diffusion coefficient increases with the increase of temperature. The E_a value was 12.51 kJ/mol. The T_2 spectrum showed that the water phase changed significantly before 4 h, the proportion of free water decreased significantly, and the degree of freedom of water decreased gradually. There was no significant change in water content and phase state after 4 h. In the process of fresh-cut drying, the total content of tetrandrine and

收稿日期: 2024-10-16

基金项目: 国家自然科学基金项目 (82060724); 国家自然科学基金项目 (82460772); 省重点研发计划项目 (20243BB191015); 江西省中医药标准化项目 (2023A19); 江西省高水平本科教学团队 (2252201013); 校级虚拟教研室 (2252300109)

作者简介: 陈小燕 (2001—), 硕士, 从事中药炮制研究。E-mail: 2045802787@qq.com

*通信作者: 张金莲 (1969—), 教授, 博士生导师, 主要从事中药学及中药炮制学教学研究。Tel: (0791)87118995 E-mail: jxjzzjl@163.com

fangchinoline had no obvious fluctuation. **Conclusion** The drying kinetics model and low field nuclear magnetic resonance technology can intuitively describe the moisture change law of STR during fresh-cut drying process. It provides a reference for elucidating the drying mechanism and drying process optimization of STR fresh-cut.

Keyword: *Stephaniae Tetrandrae Radix*; drying kinetics; effective diffusion coefficient; activation energy; low field nuclear magnetic resonance; tetrandrine; fangchinoline; fresh cutting

防己 *Stephaniae Tetrandrae Radix* (STR) 为防己科防己属植物粉防己 *Stephania tetrandra* S. Moore 的干燥根, 味苦, 性寒。归膀胱、肺经, 主要含有生物碱成分, 具有祛风止痛、利水消肿的功效, 用于风湿痹痛、水肿脚气、小便不利、湿疹疮毒^[1]。现代研究表明防己在治疗类风湿关节炎、心血管疾病、肿瘤、高血压、肝腹水等方面具有较好疗效^[2]。防己为临床常用的大宗药材, 自古多以生品入药。传统加工方式需再次浸润, 易造成有效成分的流失, 趁鲜切制可以有效避免生品再次干燥, 最大程度地保持药材的新鲜度和药效^[3-4]。防己被收载于《中国药典》2020 年版鲜切药材的品种目录中^[1]。防己趁鲜切制是将新鲜防己洗净切制之后干燥的加工方式。中药干燥是中药加工过程中的一个重要环节, 它对确保中药质量和疗效具有至关重要的意义。

目前, 药材干燥多以含水量和外观性状作为评价指标, 缺少干燥机制研究。药材干燥过程中的变化复杂, 其干燥终点难以判断, 大多数是长时间经验的积累。低场核磁共振技术可以实时监测中药中水分的分布与转化等, 为优化炮制工艺提供依据, 目前已有关于延胡索^[5]、地黄^[6]、白术^[7]等中药材干燥过程的研究, 还未有关于防己干燥过程的研究, 因此本实验基于干燥模型拟合、低场核磁共振技术、HPLC 法、有效扩散系数 (effective diffusion coefficient, D_{eff}) 和活化能 (activation energy, E_a) 计算, 阐明趁鲜切制防己干燥过程中水分及成分变化的规律, 为防己趁鲜切制干燥过程提供科学、量化的数据支持, 也为防己趁鲜切制干燥工艺提供科学依据, 对促进防己产业的发展具有重要意义。

1 仪器与试剂

1.1 仪器

GZX-9076MBE 型电热鼓风干燥箱, 上海博讯实业有限公司医疗设备厂; NMI20-025V-1 型核磁共振成像分析仪, 苏州纽迈分析仪器股份有限公司; Waters e2695 型高效液相色谱仪, 美国 Waters 公司; 111B 型二两装高速中药打粉机, 瑞安市永历制药机械有限公司; CP214 型电子天平, 万分之一, 奥豪斯仪器有限公司; KS-500E 型超声波清洗器, 南昌

恒益科学仪器有限公司; HH-6 型数显恒温水浴锅, 国华电器有限公司; QRZG-S60 型直线往复式切药机, 杭州海善制药设备有限公司。

1.2 试剂

鲜防己, 购自江西宜春, 2024 年 4 月份采摘, 经江西中医药大学中药资源教研室邓可众教授鉴定, 为防己科防己属植物粉防己 *S. tetrandra* S. Moore 的干燥根。对照品防己诺林碱 (批号 WP23080404, 质量分数 98%)、粉防己碱 (批号 WP23050513, 质量分数 98%), 四川省维克奇生物科技有限公司; 甲醇 (批号 240305A1)、乙酸 (批号 2207081), 西陇科学股份有限公司; 盐酸, 批号 10011018, 国药集团化学试剂有限公司; 十二烷基磺酸钠, 批号 K2317048, 上海阿拉丁科技股份有限公司; 纯净水, 娃哈哈集团有限公司; 乙腈 (批号 30Y2310FT)、甲醇 (批号 40Y2310NU), 色谱纯, 恩科化学有限公司。

2 方法与结果

2.1 防己趁鲜切制热风干燥动力学研究

2.1.1 干燥实验操作方法 选取大小均匀的鲜防己药材, 洗净, 切药机切制厚度为 3 mm 的厚片, 均匀地分成 3 份, 放置单层托盘中, 分别置于 60、70、80 °C 热风烘箱中。干燥过程中每隔 30 min 称定质量, 直至连续 2 次称定质量差异不超过 1% 时停止干燥^[4], 平行进行 3 次实验。测量干燥过程中的参数变化, 建立干燥动力学模型。

2.1.2 干基含水率 物料中水分质量与物料中绝对干料质量之比称为干基含水率。防己的干基含水率按公式 (1) 计算。热风干燥是利用热空气对物料进行加热, 热空气与物料接触发生热交换, 从而使物料中的水分蒸发出来, 从而实现干燥的目的^[14]。防己在不同温度下的干基含水率曲线如图 1 所示。在同一温度下, 干基含水率随着干燥时间延长而下降, 逐渐趋于稳定; 在不同温度下, 随着干燥温度的升高, 干基含水率的下降趋势变快。

$$\text{干基含水率} = (m_t - m_0) / m_0 \quad (1)$$

m_t 为 t 时刻防己饮片质量, m_0 为干燥防己饮片质量

2.1.3 干燥速率 干燥速率与干基含水率有关, 物

料的干基含水率与干燥速率呈正比。防己干燥速率按公式 (2) 计算。鲜防己在不同温度下的干燥速率曲线如图 2 所示。在同一温度下,干燥速率随着干燥时间延长逐渐减慢;在不同温度下,0.5 h 之前温度与干燥速率成正比;0.5~1.5 h 时,低温的干燥速率逐渐大于高温的干燥速率;1.5 h 之后温度与干燥速率成反比;4 h 之后趋于稳定。

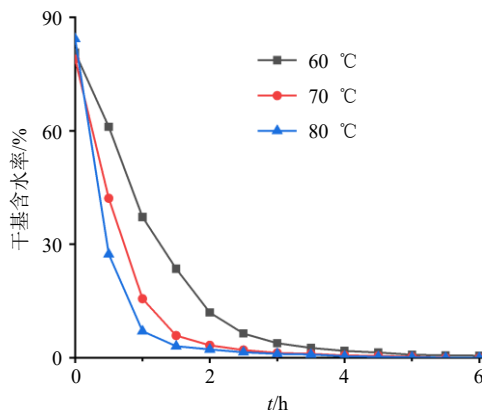


图 1 不同干燥温度下防己干基含水率变化

Fig. 1 Changes of dry basis moisture contents of STR at different drying temperatures

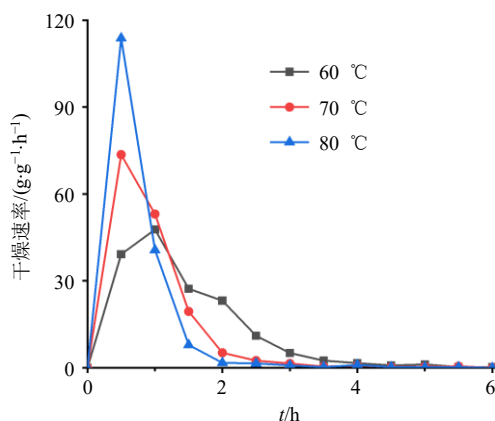


图 2 不同干燥温度下防己干燥速率变化

Fig. 2 Changes of drying rate of STR at different drying temperatures

$$\text{干燥速率} = (M_t - M_{t-1}) / \Delta t \quad (2)$$

M_t 、 M_{t-1} 分别为 t 、 $t-1$ 时刻防己饮片干基含水率, Δt 为时间间隔

2.1.4 水分比 (moisture ratio, MR) MR 被定义为某时刻待除去的自由水分量与初始总自由水分量的比值,是一个无量纲的量^[15]。防己 MR 按公式 (3) 计算^[7]。防己在不同温度下的 MR 如图 3 所示,在同一时间点温度越高 MR 越低,随着干燥时间的延长,物料中水分的含量越来越低,最后趋于平衡。

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

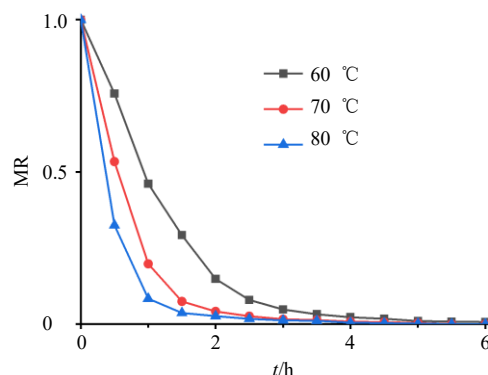


图 3 不同干燥温度防己 MR 变化

Fig. 3 Moisture ratio changes of STR at different drying temperatures

M_t 为干燥任意 t 时刻的防己饮片干基含水率, M_0 为初始干基含水率 (参照《中国药典》2020 年版通则 0832 水分测定法第二法烘干法)

2.1.5 干燥模型拟合 采用 Origin 2021 pro 软件进行数据分析处理,将以下模型 (表 1) 与实验数据进行拟合,得出相应的模型参数如表 2 所示。从残差平方和 (sum of squared errors, SSE)、 X^2 和 R^2 等参数分析,其中 R^2 值越高, SSE、 X^2 越低,表示拟合程度越好。Page 模型和 Logarithmic 模型的 R^2 均大于 0.99,但从各项参数的平均值来看 Page 模型的 SSE 和 X^2 值最小, R^2 值最大,表明 Page 模型是模拟实验数据的最佳模型。

表 1 干燥动力学模型及参数

Table 1 Drying kinetic model and parameters

模型名称	模型方程	模型参数
Page ^[4]	$MR = e^{-kt^n}$	k, n
Lewis ^[8]	$MR = e^{-kt}$	k
Logarithmic ^[9]	$MR = be^{-kt} + a$	k, a, b
Diffusion approximation ^[10]	$MR = ae^{-kt} + (1-a)e^{-kat}$	k, a

2.1.6 干燥模型验证 为进一步验证防己趁鲜切制热风干燥动力学模型的准确性,对 Page 模型进行验证。取“2.1.1”项下趁鲜切制的防己厚片,在 60~80 °C 下进行热风干燥,将实验值与预测值进行比较,结果见图 4。可知,Page 模型的预测值和实验值基本吻合,表明 Page 模型能很好地反映防己药材趁鲜切制热风干燥过程中水分变化规律,并能用于预测防己趁鲜切制热风干燥过程。

2.2 低场核磁共振技术分析防己趁鲜切制热风干燥过程中的水分相态

防己在 60 °C 下干燥,分别在 0、1、2、3、4、5 h 时取样置于直径为 25 mm 玻璃管中,采用核磁

表 2 模型拟合参数统计

Table 2 Model fitting parameter statistics

模型名称	温度/°C	参数	SSE	X^2	R^2
Page	60	$k=0.741\ 13, n=1.318\ 90$	0.001\ 26	$1.145\ 80 \times 10^{-4}$	0.999\ 00
	70	$k=1.547\ 84, n=1.267\ 66$	0.001\ 42	$1.288\ 54 \times 10^{-4}$	0.998\ 65
	80	$k=2.323\ 30, n=1.029\ 36$	0.001\ 06	$9.651\ 42 \times 10^{-5}$	0.998\ 87
Lewis	60	$k=0.832\ 42$	0.015\ 85	0.001\ 32	0.987\ 46
	70	$k=1.476\ 87$	0.005\ 53	$4.611\ 90 \times 10^{-4}$	0.994\ 72
	80	$k=2.292\ 54$	0.001\ 08	$9.004\ 55 \times 10^{-5}$	0.998\ 85
Logarithmic	60	$a=-0.020\ 19, b=1.060\ 48, k=0.817\ 86$	0.011\ 45	0.001\ 15	0.990\ 94
	70	$a=-0.001\ 03, b=1.015\ 37, k=1.489\ 67$	0.005\ 30	$5.301\ 04 \times 10^{-4}$	0.994\ 95
	80	$a=0.005\ 76, b=0.995\ 55, k=2.337\ 12$	$7.748\ 26 \times 10^{-4}$	$7.748\ 26 \times 10^{-5}$	0.999\ 17
Diffusion approximation	60	$a=1.909\ 85, k=1.226\ 22$	$8.106\ 48 \times 10^{-4}$	$7.369\ 53 \times 10^{-5}$	0.999\ 36
	70	$a=0.998\ 26, k=1.000\ 01$	0.070\ 01	0.006\ 36	0.933\ 25
	80	$a=0.998\ 75, k=1.000\ 01$	0.213\ 51	0.019\ 41	0.772\ 22

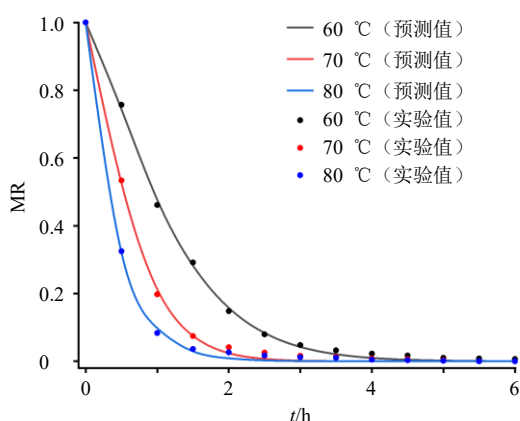


图 4 防己热风干燥 MR 实验值与预测值的对比

Fig. 4 Comparison of experimental and predicted moisture ratios of STR self-drying by hot air

共振成像分析仪进行低场核磁共振分析，将各样品的核磁信号数据先用 FID (free induction decay) 序列校准，再用 CPMG (Carr-Purcell-Meiboom-Gill) 脉冲序列测得样品横向弛豫时间 (T_2)，累计采集 3 次，取平均值，绘制 T_2 反演谱图。参数设置如下：主频 (SF) = 20 MHz，偏移频率 (O_1) = 673 236.68 Hz，90°脉宽 (P_1) = 7.00 μ s，180°脉宽 (P_2) = 12.48 μ s，累加采集次数 (NS) = 16，回波时间 (TE) = 0.200 ms，回波个数 (NECH) = 2 000，采样频率 (SW) = 200 kHz。 T_2 反演谱图分别对应着 3 种水分状态： T_{21} (0.1~1.0 ms) 对应的为结合态水， T_{22} (1.0~10.0 ms) 对应的为束缚态水 (不易流动)、 T_{23} (10.0~1 000.0 ms) 对应的为自由水^[16]。防己在不同干燥时间时的 T_2 反演谱图变化如图 5 所示，总峰面积 ($A_{总}$) 代表总含水量，峰面积越大含水量越高。 T_2 可以反映水分的自由度， T_2 越大水分自由度越高，

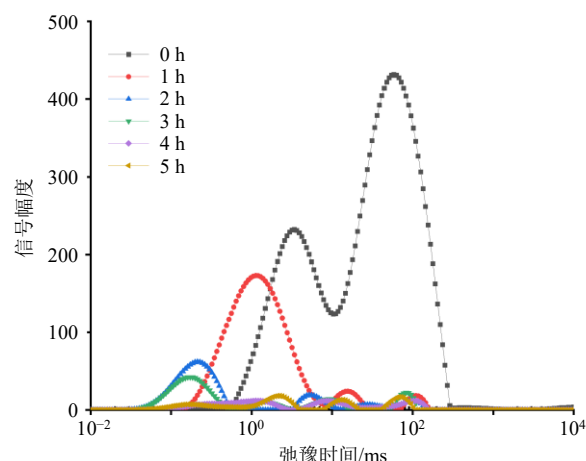


图 5 不同干燥时间防己的 T_2 反演谱图

Fig. 5 T_2 Inverse spectrogram of STR with different drying time

水分越容易失去； T_2 越小水分自由度越小，水分越难失去。从图 5 中可以看出，随着干燥时间的延长， $A_{总}$ 逐渐变小，表明含水量逐渐减少。4 h 前自由水的含量快速下降，部分自由水向结合水转化，占比大的水分组的 T_2 逐渐越来越小。4 h 后基本完成干燥，防己中的水分变化逐渐稳定， T_2 谱图上信号幅度曲线趋于平缓。

2.3 D_{eff} 和 E_a 计算

2.3.1 D_{eff} 在防己干燥过程中，通常认为防己中的内部水分是采用扩散的方式 (液体或蒸气) 进入热风中。物质的分子扩散系数表示它的扩散能力，根据 Fick 定律定义为 D_{eff} ，水分 D_{eff} 是干燥过程中的一个重要参数。在整个分析过程中，结合实验数据可以计算出防己在干燥过程中水分的 D_{eff} ，按公式 (4) 计算^[11]。

$$MR = 8\pi^{-2} \sum_{i=1}^n (2n+1)^{-2} e^{[-(2n+1)^2 \pi^2 D_{\text{eff}} L_0^{-2}]} \quad (4)$$

t 为干燥时间, L_0 为切片厚度 (m), n 为实验采样数

将式 (4) 中等式两边同时取自然对数 (ln), 可以得到 $\ln MR$ 与时间 t 的表达式式 (5), 绘制不同温度下的 $\ln MR$ 与时间 t 的线性关系图, 可以得到斜率 k 与 D_{eff} 的关系表达式式 (6), 计算得出 D_{eff} [12]。

$$\ln MR = \ln(8/\pi^2) - \pi^2 D_{\text{eff}} t / L^2 \quad (5)$$

$$k = -\pi^2 D_{\text{eff}} / L^2 \quad (6)$$

2.3.2 E_a 物料内部水分的扩散与其温度有关, 其关系符合 Arrhenius 方程。 E_a 表示其干燥过程中蒸发单位物质的量水分所需要的能量, E_a 越高表示其所需的能量就越高, 越难干燥。 D_{eff} 与 E_a 的关系可根据 Arrhenius 方程, 建立公式 (7), 等式两边同时取自然对数 (ln), 绘制 $\ln D_{\text{eff}}$ 与 $1/T$ 的线性关系图, 可以得到斜率 k 与 E_a 的关系表达式式 (8), 计算得

出 E_a [13]。

$$D_{\text{eff}} = D_0 e^{-E_a/RT}$$

$$\ln D_{\text{eff}} = \ln D_0 - E_a/RT \quad (7)$$

$$k = -E_a/R \quad (8)$$

D_0 为方程的指前因子 (m^2/s), R 为气体常数 [$8.31 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$], T 为干燥温度 (K)

2.3.3 防己趁鲜切制热风干燥过程中的 D_{eff} 和 E_a 对 $\ln MR$ 与 t 进行线性方程拟合, 不同温度下拟合结果如图 6 所示, 得到斜率 k 和 R^2 , 根据公式 (6) 计算得出 D_{eff} , 结果见表 3。

根据结果可以明显地发现温度越高 D_{eff} 越大, 说明温度越高, 水分向热空气扩散的越快。 D_{eff} 取自然对数 $\ln D_{\text{eff}}$ 与 $1/T$ 拟合线性关系的 R^2 为 0.936 62, 表明 $\ln D_{\text{eff}}$ 与 $1/T$ 之间有良好的线性关系, 方程为 $\ln D_{\text{eff}} = -1\,505.248\,49/T - 9.491\,35$, 根据公式 (8) 可以计算出 E_a 为 12.51 kJ/mol。

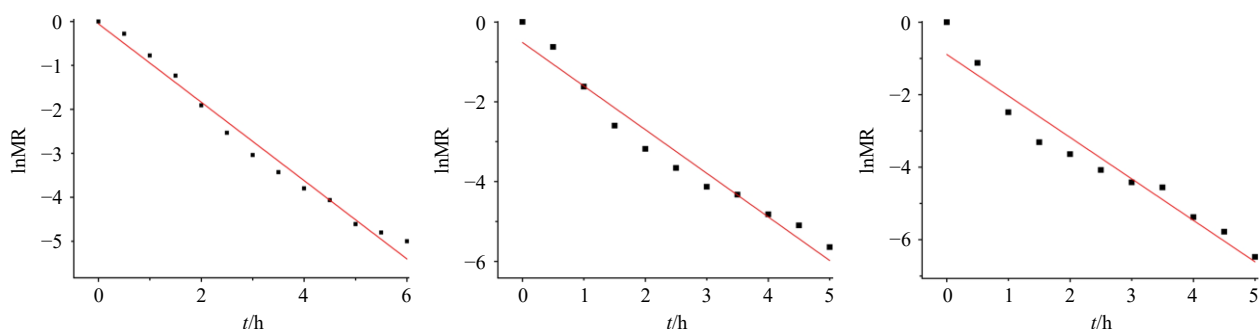


图 6 60、70、80 °C 下拟合 $\ln MR$ 与时间 t 的线性关系

Fig. 6 Linear relationship between $\ln MR$ and time t at 60, 70, 80 °C

表 3 不同干燥温度下 $\ln MR$ 与时间 t 的拟合参数及 D_{eff}

Table 3 Fitting parameters and D_{eff} of $\ln MR$ and t at different drying temperatures

温度/°C	k	R^2	$D_{\text{eff}}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$
60	-0.891 72	0.984 65	8.13×10^{-7}
70	-1.092 84	0.959 24	9.97×10^{-7}
80	-1.144 21	0.943 78	1.04×10^{-6}

2.4 防己干燥过程中成分变化规律

参考《中国药典》2020 年版方法 [1], 采用 HPLC 法测得在 60 °C 条件下热风干燥 0、1、2、3、4、5 h 样品中粉防己碱和防己诺林碱的含量, 平行测定 3 次, 取平均值。

2.4.1 色谱条件 以十八烷基硅烷键合硅胶为填充剂; 色谱柱为 Titank- C_{18} 柱 (250 mm $\times$ 4.6 mm, 5 μm); 以乙腈-甲醇-水-冰醋酸 (40:30:30:1) (每 100 mL 含十二烷基磺酸钠 0.41 g) 为流动相等度洗脱; 检测波长为 280 nm; 柱温 30 °C; 体积流

量 1 mL/min; 进样体积 10 μL 。色谱图见图 7。

2.4.2 对照品溶液的制备 取粉防己碱、防己诺林碱对照品适量, 精密称定, 加甲醇分别制成含粉防己碱 0.1 mg/mL、防己诺林碱 0.05 mg/mL 的混合对

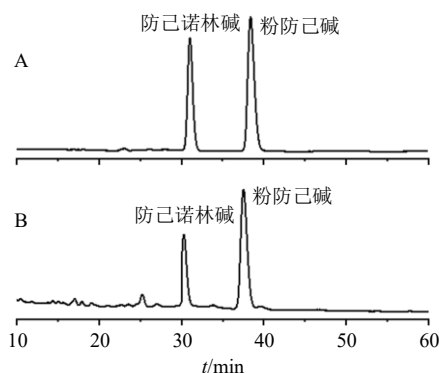


图 7 防己诺林碱和粉防己碱对照品 (A) 和防己样品 (B) 的 HPLC 图

Fig. 7 HPLC of fangchinoline, tetrandrine reference substance (A) and STR sample (B)

照品溶液。

2.4.3 供试品溶液的制备 取在 60 °C 条件下热风干燥 0、1、2、3、4、5 h 样品粉末（过三号筛）约 0.5 g，精密称定，精密加入 2% 盐酸甲醇溶液 25 mL，称定质量，加热回流 30 min，放冷，再称定质量，用 2% 盐酸甲醇溶液补足减失的质量，摇匀，滤过，精密量取续滤液 5 mL，置 10 mL 量瓶中，加流动相至刻度，摇匀，即得供试品溶液。

2.4.4 防己干燥过程中的含量变化 防己干燥过程中的指标成分含量变化见表 4。随着干燥过程的进行，防己中粉防己碱和防己诺林碱的总量在小范围内无太大变化。

表 4 防己干燥过程中指标成分含量测定
Table 4 Determination of index component content in the drying process of STR

干燥 时间/h	质量分数/%		
	防己诺林碱	粉防己碱	总量
0	0.79±0.00	1.53±0.00	2.32±0.00
1	0.84±0.01	1.37±0.01	2.21±0.01
2	0.86±0.02	1.50±0.02	2.36±0.02
3	0.83±0.02	1.50±0.02	2.33±0.02
4	0.76±0.01	1.69±0.02	2.45±0.01
5	0.77±0.01	1.61±0.00	2.38±0.01

3 讨论

前期实验表明，温度太低干燥时间过长不利于干燥，温度太高易导致裂片、翘边等情况，因此选择 60~80 °C 热风干燥；并研究了防己趁鲜切制与传统切制对比，发现传统切制有效成分含量降低，其中粉防己碱较防己诺林碱损失率更高，从结构角度分析，粉防己碱有较多的亲水基团，更易与水分子发生相互作用，增加了其在水中的溶解度，造成有效成分含量的下降，因而本实验围绕防己趁鲜切制的干燥过程展开研究。本实验研究表明，趁鲜切制防己干燥过程是一个动态变化的过程，与大多数中药材干燥特性相似^[17]，整个干燥过程分为 2 个阶段：快速干燥阶段和缓慢干燥阶段。含水量高时，物料与空气的水分浓度梯度较大，可以增加水分蒸发的速率，因此防己在干燥前期的干燥速率较快，后期干燥速率较为平缓。温度越高，物质内部的分子运动速度加快，周围热空气携带水分的能力增强，因而温度越高干燥速率越快， D_{eff} 越大、干燥所需的时间越短。实验对 4 种干燥模型进行了模型拟合，其结果表明 Page 模型最适合防己趁鲜切制热

风干燥特性的数学模型。Page 模型能很好地描述防己干燥过程中水分含量随时间变化的规律，有助于优化干燥工艺，提高干燥效率，确保干燥产品的质量和安全。

低场核磁共振技术可将药材中的水分进行量化，是阐释干燥过程中水分变化规律的重要手段^[18]。本实验基于低场核磁共振技术发现随着防己干燥时间的增加，总水分含量在不断的减少，自由水所占的比例逐渐下降，相应束缚水的比例增加，4 h 后水分分布趋于稳定。低场核磁共振技术具有仪器设备成本低、操作快速简便等优点。但由于中药成分体系复杂，低场核磁共振磁场较低，导致其灵敏度不足分辨率低，其应用仍存在一定的局限性，可以联用其他分析技术如二维 NMR、质谱（MS）、HPLC 等，提高分析的准确性。

防己中的主要化学成分粉防己碱和防己诺林碱，此 2 种成分作为判断其品质优劣的重要指标，粉防己碱具有抗肿瘤、抗心律失常、抗高血压、抗炎、抗硅肺及抗纤维化等多种药理作用^[19]，防己诺林碱具有抗癌、抗肿瘤、缓解骨质疏松、抗炎、抗病毒、视网膜保护、抑制瘢痕生长等作用^[20]，此 2 种成分是目前防己药理作用研究的热点。据文献报道，含有生物碱的根茎类药材的干燥温度宜在 50~60 °C^[21]，因此本实验采用 HPLC 法测定了 60 °C 防己中粉防己碱和防己诺林碱的含量变化，结果表明两者的总量无明显变化，指标成分含量与其功效相关，在干燥过程中其功效较为稳定。因此从水分和化学成分变化规律综合考虑，在防己趁鲜切制的工艺中，根据 Page 模型可推算出在一定温度下达到目标水分所需的时间，有利于生产过程中的质量控制以及实现智能化生产。

防己是以根入药的药材，传统方法经过产地晒干后需浸润切成饮片。趁鲜切制相较于传统切制方法操作简单、节能环保，符合未来中药产业发展的大方向^[22]。本实验通过研究防己干燥过程中的干燥特性，测定干燥过程中的水分及其主要成分的变化规律，为防己趁鲜切制工艺提供参考。

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: 107.
- [2] 杨隼, 王毛毛, 于淼, 等. 基于网络药理学、分子对接和体外实验探讨防己生物碱类活性成分逆转乳腺癌耐药的作用机制 [J]. 中草药, 2023, 54(9): 2841-2851.

- [3] 谈景福, 李雨晴, 高俊斌. 中药材趁鲜切制政策研究及品种分析 [J]. 中成药, 2024, 46(2): 702-708.
- [4] 国家药品监督管理局. 国家药监局综合司关于中药饮片生产企业采购产地加工(趁鲜切制)中药材有关问题的复函 [EB/OL]. (2021-07-05) [2024-09-01] <https://www.nmpa.gov.cn/xxgk/fgwj/gzwj/gzwjyp/20210705142059112.html>.
- [5] 王海丽, 张姝妍, 辛洁萍, 等. 延胡索药材干燥动力学及其化学成分变化规律研究 [J]. 中草药, 2023, 54(13): 4128-4136.
- [6] 吴梦玫, 张英, 吴孟华, 等. 干燥动力学结合低场核磁共振和物性分析技术的地黄饮片干燥过程表征 [J]. 中草药, 2022, 53(15): 4645-4652.
- [7] 郭慧玲, 徐梦甜, 伍振峰, 等. 白术热风干燥动力学及其挥发性成分变化规律的研究 [J]. 中国中药杂志, 2022, 47(4): 922-930.
- [8] Yue Y M, Zhang Q, Wan F X, *et al.* Effects of different drying methods on the drying characteristics and quality of *Codonopsis pilosulae* slices [J]. *Foods*, 2023, 12(6): 1323.
- [9] 孙辉, 张渤, 周江鸿, 等. 佛手叶粉微波干燥动力学模型的建立及品质特性分析 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(3): 278-287.
- [10] 方良材, 吴钊龙, 刘梦姣, 等. 牛大力切片热风干燥特性及其动力学模型建立 [J]. 南方农业学报, 2021, 52(6): 1683-1691.
- [11] Karathanos V T. Determination of water content of dried fruits by drying kinetics [J]. *J Food Eng*, 1999, 39(4): 337-344.
- [12] Bai T T, Wan Q, Liu X B, *et al.* Drying kinetics and attributes of *Fructus Aurantii* processed by hot air thin-layer drying at different temperatures [J]. *Heliyon*, 2023, 9(5): e15554.
- [13] 刘书斌, 杨晓玲, 李成义, 等. 分程变温对不同商品等级党参干燥特性及动力学模型的影响 [J]. 中国现代应用药学, 2023, 40(24): 3341-3351.
- [14] Dong R J, Lu Z H, Liu Z Q, *et al.* Effect of drying and tempering on rice fissuring analysed by integrating intra-kernel moisture distribution [J]. *J Food Eng*, 2010, 97(2): 161-167.
- [15] 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.
- [16] 段思菲, 陈怡, 许莞儿, 等. 基于低场核磁共振技术的玉米子粒发育过程中水分变化规律 [J]. 玉米科学, 2024, 32(2): 69-76.
- [17] 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.
- [18] 陈丽霞, 叶丽芳, 张英, 等. 基于低场核磁共振和物性分析技术的牡丹皮饮片干燥特性及动力学研究 [J]. 暨南大学学报: 自然科学与医学版, 2023, 44(2): 203-210.
- [19] 孔晓旭, 左红艳, 李杨. 粉防己碱的药理作用及临床应用研究进展 [J]. 国际药学研究杂志, 2020, 47(7): 496-501.
- [20] 王斐然, 张会敏, 林永强, 等. 防己诺林碱药理作用研究进展 [J]. 食品与药品, 2022, 24(5): 476-481.
- [21] 周丽娟. 中药材的产地初加工技术 [J]. 现代园艺, 2021, 44(13): 96-97.
- [22] 姚旭, 徐梦丹, 张雪晶, 等. 甘草饮片趁鲜切制与传统切制方法对其质量的影响 [J]. 中药材, 2024, 47(2): 342-347.

[责任编辑 郑礼胜]