

## ◆ 中药材精深加工 ◆

基于干燥动力学结合 LF-NMR 分析的不同干燥过程中天麻切片水分变化<sup>\*</sup>吴钊龙<sup>1</sup>, 巫腾钰<sup>2</sup>, 邱展鸿<sup>3</sup>, 黄纪民<sup>1,4\*\*</sup>, 覃海波<sup>1</sup>, 李秉正<sup>1,4,5</sup>, 黄志民<sup>4\*\*</sup>

(1. 广西科学院大健康研究所, 广西南宁 530007; 2. 南宁学院食品科学与质量工程学院, 广西南宁 530200; 3. 广西华泰药业有限公司, 广西贺州 546800; 4. 广西科学院, 广西微波先进制造技术重点实验室, 广西南宁 530007; 5. 广西科学院来宾分院, 广西来宾 546100)

**摘要:**为探究天麻(*Gastrodia elata* Blume)切片干燥过程中水分迁移变化规律,并建立其量化表征方法,本研究采用低场核磁共振(Low-Field Nuclear Magnetic Resonance, LF-NMR)技术分析热风干燥(Hot Air Drying, HAD)和微波干燥(Microwave Drying, MWD)过程中不同热风温度(60、70、80 °C)和不同微波功率密度(2、3、4 W/g)条件下的天麻切片,结合干燥特性曲线建立基于 LF-NMR 参数的天麻切片含水量预测模型。结果表明,MWD 速率远大于 HAD,在热风温度(60–80 °C)和微波功率密度(2–4 W/g)范围内,高温、高功率密度有利于提高干燥速率,缩短干燥时间。Logarithmic 模型可以准确描述天麻切片 HAD 和 MWD 过程中含水量的变化。经 LF-NMR 技术分析,在 HAD 和 MWD 过程中,天麻切片的横向弛豫时间曲线整体上呈现左移的趋势,各状态水的弛豫峰信号强度不断降低;干燥结束时天麻切片中的自由水完全被脱去,仅存少量的不易流动水和结合水。无论是 HAD 还是 MWD,弛豫峰总面积  $A_2$  和天麻片的干基含水量相关性均在 0.99 以上。研究结果可为阐明天麻切片干燥机制和干燥工艺参数的优选提供参考。

**关键词:**天麻;热风干燥;微波干燥;水分;低场核磁

中图分类号:TS205 文献标识码:A 文章编号:1002-7378(2023)04-0433-12

DOI:10.13657/j.cnki.gxkxyxb.20231226.010

天麻(*Gastrodia elata* Blume)为兰科(Orchidaceae)天麻属(*Gastrodia*)多年生草本植物,其干燥块茎是我国传统珍贵中药材,收载于中国药典,富含天麻素、多糖等活性成分,具有较高的营养价值和保健

收稿日期:2023-08-15

修回日期:2023-11-20

<sup>\*</sup> 广西科技计划项目(桂科 AB18294028),贺州市创新驱动发展专项(贺科创 CX2009009)和广西科学院健康食品创制创新团队启动经费项目(CQ-E-2419)资助。

【第一作者简介】

吴钊龙(1995-),男,硕士,实习研究员,主要从事农产品加工研究,E-mail:wuzhaolong@gxas.cn。

【\*\*通信作者简介】

黄纪民(1976-),男,工程师,主要从事农产品加工研究,E-mail:huangjimin@gxas.cn。

黄志民(1965-),男,研究员,主要从事生物物理研究,E-mail:hzmjng@163.com。

【引用本文】

吴钊龙,巫腾钰,邱展鸿,等.基于干燥动力学结合 LF-NMR 分析的不同干燥过程中天麻切片水分变化[J].广西科学院学报,2023,39(4):433-444.

WU Z L, WU T Y, QIU Z H, et al. Determination of Moisture Changes in *Gastrodia elata* Blume Slices during Different Drying Processes Based on Drying Kinetics and LF-NMR Analysis [J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 2023, 39(4): 433-444.

功能<sup>[1,2]</sup>。现代药理学研究发现天麻具有镇静<sup>[3]</sup>、镇痛<sup>[4]</sup>、抗炎<sup>[5]</sup>、抗惊厥<sup>[6]</sup>、抗氧化<sup>[7]</sup>、抗抑郁<sup>[8]</sup>、改善记忆力<sup>[9]</sup>，以及增强免疫<sup>[10]</sup>和抗凝血<sup>[11]</sup>等作用。然而，鲜天麻初始湿基含水量为 70% - 80%，在储存过程中易出现腐败变质等问题，进而影响天麻的药效和商品价值，因此，为了延长天麻的货架期，采挖后应尽快将其切片后进行干燥处理<sup>[6]</sup>。天麻干燥前需要进行杀青预处理，《中华人民共和国药典(一部)》(2020 年版)<sup>[2]</sup>规定采用蒸制杀青，因为蒸制更利于有效成分的保留，以保持天麻品质。干燥前加热蒸制杀青至透心为宜，杀青不充分会使干燥过程中天麻切片变黑以致品质下降<sup>[8]</sup>。在现有研究和生产中，热风干燥(Hot Air Drying, HAD)是天麻切片最常用的干燥技术。此外，微波干燥(Microwave Drying, MWD)因干燥效率高、干制品品质好而逐渐受到青睐。

低场核磁共振(Low-Field Nuclear Magnetic Resonance, LF-NMR)技术操作简单，稳定性好，且能在无损、无侵入情况下通过横向弛豫时间  $T_2$  的变化实时、快速、直观地监测观察样品内部水分分布状态以帮助从微观角度分析样品水分迁移变化规律<sup>[12]</sup>。LF-NMR 技术不受样品形态、颜色、大小等影响，精确度高，适用范围更广<sup>[13]</sup>，目前国内外学者已将 LF-NMR 技术广泛应用于监测食品干燥、贮藏以及复水等过程水分的状态及其分布<sup>[14]</sup>。样品水分状态及含量是其干燥程度的重要信息，也是进行干燥参数调整以调控干燥过程的基础，利用 LF-NMR 技术可获取不同干燥过程中任意时刻的样品内部水分变化规律，并通过建立动力学模型来实现含水量的快速检测。然而，对于天麻切片这类需经预先蒸制杀青的物料而言，迄今鲜见有关将 LF-NMR 技术应用于其干燥过程中水分迁移变化规律研究的报道。

本文采用 LF-NMR 技术研究不同热风温度和不同微波功率密度条件下天麻切片干燥过程中内部水分变化规律，结合干燥特性曲线建立基于 LF-NMR 参数的天麻切片含水率预测模型，为多种干燥技术下建立基于 LF-NMR 的天麻含水率预测模型提供参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 原料及处理

新鲜天麻，精选二级品(100 - 120 g/个)，其初始湿基含水量 75.36%，取自云南省昭通市小草坝天麻种植基地，使用前用清水清洗干净，再沥干其表面的

水分，然后将其存放在 4 °C 冰箱中。样品经广西农业技术大学莫勇生高级工程师鉴定为乌天麻(*Gastrodia elata* Bl. f. *glauca* S. Chow)。

### 1.2 仪器

热风干燥箱(PH-070A 型,上海一恒科学仪器有限公司),微波炉(G70F20CN1L-DG 型,佛山市顺德区格兰仕微波炉电器有限公司),核磁共振成像分析仪(NMI20 型,苏州纽迈分析仪器股份有限公司)。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 原料预处理

将经过处理存放在 4 °C 冰箱内的天麻放置在蒸笼上,加热蒸 20 min 至透心为宜,然后将其切成约 4.0 mm 的厚片,最后分别采用热风干燥和微波干燥两种方式对其进行干燥处理。

#### 1.3.2 干燥方法

根据预试验,确定热风干燥的温度为 60、70 和 80 °C,干燥过程中每 20 min 取样进行称重以及 LF-NMR 测定,直至天麻切片干基含水量降到 0.004 g/g 以下停止干燥。

微波干燥的功率密度为 2、3 和 4 W/g,干燥过程每 2 min 取样进行称重以及 LF-NMR 测定,直至天麻切片干基含水量降到 0.004 g/g 以下停止干燥。

#### 1.3.3 干基含水量

天麻干基含水量按式(1)计算<sup>[15]</sup>:

$$M = \frac{m_t - m}{m}, \quad (1)$$

式中, $M$  为天麻切片的干基含水量, g/g;  $m_t$  为干燥至  $t$  时刻的天麻切片质量, g;  $m$  为天麻切片干物质的质量, g。

#### 1.3.4 干燥速率

天麻干燥速率按式(2)计算<sup>[16]</sup>。

$$DR = \frac{M_{t+\Delta t} - M_t}{\Delta t}, \quad (2)$$

式中, $DR$  为天麻切片的干燥速率, g/(g · min);  $\Delta t$  为干燥时间间隔, min;  $M_{t+\Delta t}$  为  $t + \Delta t$  时刻的天麻切片干基含水量, g/g;  $M_t$  为  $t$  时刻的天麻切片干基含水量, g/g。

#### 1.3.5 水分比

水分比按式(3)计算<sup>[17]</sup>:

$$MR = \frac{M_t}{M_0}, \quad (3)$$

式中, $MR$  为天麻切片的水分比;  $M_t$  为干燥至  $t$  时刻的天麻切片干基含水量, g/g;  $M_0$  为天麻切片的初始

干基含水量。

### 1.3.6 $T_2$ 的采集及反演

序列参数参考吴钊龙等<sup>[12]</sup>的方法。热风干燥每隔 20 min、微波干燥每隔 2 min 取出样品称量后,置于核磁管中并放入磁体线圈中心,先用 FID (Free Induction Decay) 序列获得样品的中心频率,再用 CPMG (Carr-Purcell-Meiboom-Gill) 脉冲序列测样品中的横向弛豫时间  $T_2$ , 每份样品重复采集 3 次信号,并将结果取平均值。序列参数设置:主频 SF1 = 18 MHz、偏移频率 O1 = 418 100.47 kHz、 $90^\circ$  脉冲时间 P90 = 10  $\mu$ s、 $180^\circ$  脉冲时间 P180 = 20  $\mu$ s、采样点数 TD = 240 008、累加次数 4 次、回波时间 TE = 600 ms、回波次数 = 4 000。

### 1.3.7 LF-NMR 成像测定

成像参数参考吴钊龙等<sup>[13]</sup>的方法。成像参数设置:主频 SF1 = 18 MHz、偏移频率 O1 = 159.609 131 kHz、采样点数 TD = 256、采样频率 SW = 20 kHz、采样时间 DW = 50  $\mu$ s、信号采样总时间 ACQ = 12.8 ms、接收机死时间 DT2 = 1.4 ms、模拟增益 RG1 = 20 dB、数字增益 DRG1 = 3 dB、选层方向 GsliceY = 1、相位编码方向 GphaseZ = 1、频率编码方向 GreadX = 1、 $90^\circ$  脉冲宽度 P1 = 1 200  $\mu$ s、 $180^\circ$  脉冲宽度 P2 = 1 200  $\mu$ s、 $90^\circ$  脉冲幅度 RFA1 = 3%、 $180^\circ$  脉冲幅度 RFA2 = 6%、射频脉冲形状 RFSH1 为 5sinc256、重复采样次数 NS = 4、累加次数 RP1count = 4、相位编码步数 RP2count = 128。

### 1.4 干燥模型的拟合

筛选 5 种最常用的动力学模型对天麻切片进行非线性拟合(表 1)。

表 1 5 种动力学模型

Table 1 Five dynamic models

模型名称 Model name	模型表达式 Model expression
Logarithmic	$MR = ae^{-kt} + c$
Handerson and Pabis	$MR = ae^{-kt}$
Newton	$MR = e^{-kt}$
Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$
Page	$MR = \exp(-kt^n)$

Note:  $n, k, a, b$ , and  $c$  all represent constants of the undetermined drying equation;  $t$  represents time, in min.

### 1.5 数据统计

每组试验均重复 3 次,试验结果表示为平均值  $\pm$  标准偏差。采用 Origin 8.0 绘制图;采用 JMP Pro 16.0 进行非线性拟合,选取决定系数  $R^2$ 、均方根误差 RMSE、误差平方和 SSE 作为拟合评价指标, $R^2$

越大, RMSE 和 SSE 越小则说明模型拟合效果越好;采用 SPSS 17.0 进行显著性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 干燥特性

#### 2.1.1 HAD

天麻切片 HAD 过程的干燥曲线和干燥速率曲线见图 1。由图 1(a)可知,不同热风干燥温度的天麻切片干基含水量均持续降低,其中热风温度  $80^\circ\text{C}$  的天麻切片干基含水量下降更明显,达到恒重的时间更短。主要是由于热风干燥温度越高,水分蒸发越快,从而加速干燥过程<sup>[18]</sup>。60、70、 $80^\circ\text{C}$  下干燥时间分别为 160、140 和 120 min。

从图 1(b)的 3 条不同温度干燥速率曲线中可以看出,整个热风干燥过程均有增速和降速两个阶段,天麻切片在整个热风干燥过程中以降速为主;初期干燥速率较快,中后期干燥速率逐渐降低。对比不同热风温度之间的干燥速率可知,在干燥初期,温度对干燥速率影响显著,随着干燥的进行,温度对其影响逐

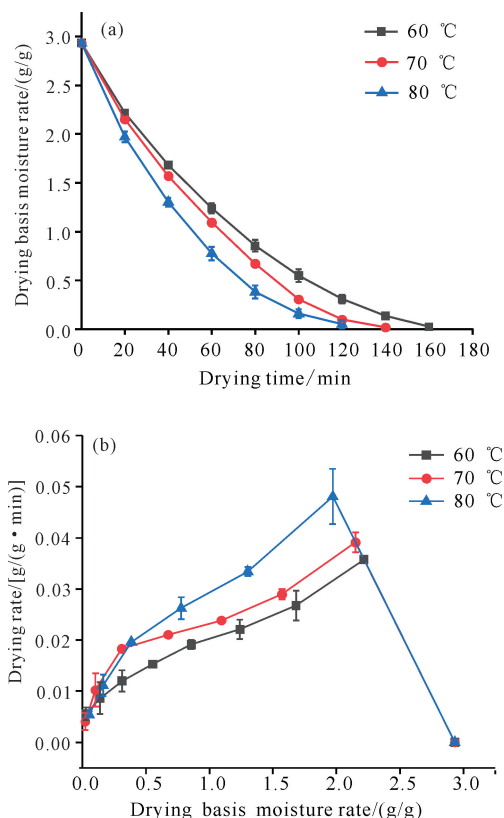


图 1 不同热风干燥温度下天麻切片干燥曲线(a)及干燥速率曲线(b)

Fig. 1 Drying curves (a) and drying rate curves (b) of *G. elata* Blume slices under different hot air drying temperature

渐减小,这与柠檬、牛大力等的热风干燥过程相似<sup>[19,20]</sup>。这是因为在干燥初期,主要以物料表面水分散失为主,随着干基含水量的逐渐降低,天麻切片收缩变形,水分迁移阻力增大,干燥速率逐渐下降。

### 2.1.2 MWD

天麻切片 MWD 过程的干燥曲线和干燥速率曲线见图 2。由图 2(a)可知,随着干燥时间的延长,不同微波功率密度条件下的干基含水量呈现下降的趋

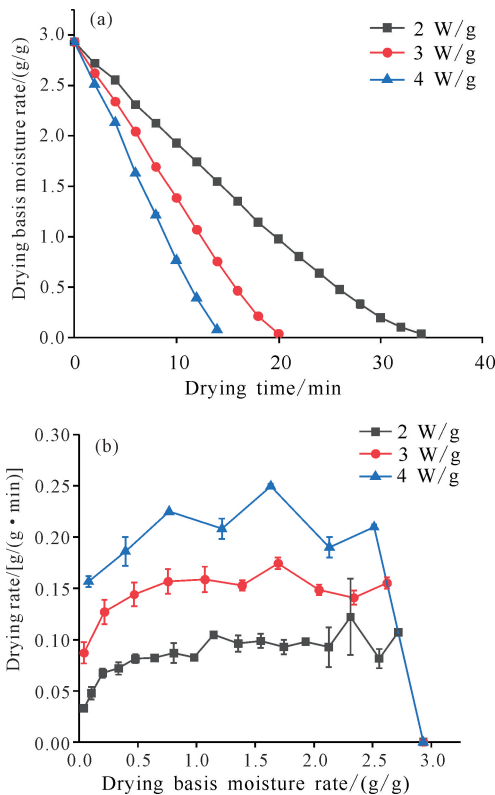


图 2 不同微波功率密度下天麻切片干燥曲线(a)及干燥速率曲线(b)

Fig. 2 Drying curves (a) and drying rate curves (b) of *G. elata* Blume slices under different microwave power density

表 2 天麻切片干燥模型统计分析结果

Table 2 Results of statistical analysis of *G. elata* Blume slices drying model

模型 Models	参数 Parameters	HAD			MWD		
		60 °C	70 °C	80 °C	2 W/g	3 W/g	4 W/g
Logarithmic	<i>a</i>	0.966	0.972	0.797	2.134	3.495	3.300
	<i>k</i>	0.011	0.012	0.018	0.019	0.017	0.025
	<i>c</i>	-0.205	-0.230	-0.120	-1.190	-2.586	-2.432
	<i>R</i> <sup>2</sup>	0.999	0.997	0.999	0.999	0.999	0.999
	RMSE	0.008	0.019	0.014	0.012	0.014	0.014
	SSE	0.000	0.001	0.001	0.002	0.001	0.001
Handerson and Pabis	<i>a</i>	0.787	0.766	0.691	1.020	0.977	0.920

势;微波功率密度越大,干燥曲线越陡峭,达到恒重所需的干燥时间越短。2、3、4 W/g 下干燥时间分别为 34、20 和 14 min。

由图 2(b)可知,微波功率密度为 2 W/g 和 3 W/g 时有明显的加速阶段、恒速阶段和降速 3 个阶段,微波功率密度为 4 W/g 时只有加速和降速两个阶段。微波功率密度越大,干燥速率越快,恒速阶段越不明显,然而微波功率密度越大会导致天麻切片焦糊;但微波功率密度越小,加工效率越低<sup>[21]</sup>。从实际生产应用方面来说,选择适当的微波功率密度干燥天麻切片还需进一步考察。

### 2.1.3 干燥动力学模型拟合

根据不同干燥方式所得的天麻切片干燥过程中的干燥时间和水分比数值,采用 JMP Pro16.0 软件对 5 种常见的动力学模型进行非线性拟合,各模型的参数及评价指标见表 2。可以看出,无论何种干燥方式,在 5 种干燥动力学模型中 Logarithmic 模型的 *R*<sup>2</sup> 最高,均在 0.997 以上,其 RMSE 和 SSE 分别为 0.008 - 0.019 和 0.000 - 0.002,说明 Logarithmic 模型的拟合精度明显高于其他模型,因此可用 Logarithmic 模型来描述和预测天麻切片 HAD 和 MWD 过程中的水分变化规律。

## 2.2 干燥过程水分变化规律

### 2.2.1 *T*<sub>2</sub> 反演谱图及质子密度加权图像

新鲜天麻切片和蒸煮后天麻切片的横向弛豫时间(*T*<sub>2</sub>)曲线如图 3 所示。由图 3 可知,蒸煮前后的横向弛豫时间(*T*<sub>2</sub>)均有 3 个波峰,表明天麻切片内部均存在 3 种不同状态的水。其中,*T*<sub>21</sub>(0 - 10 ms)、*T*<sub>22</sub>(10 - 200 ms)、*T*<sub>23</sub>(200 - 1 700 ms)分别对应结合水、不易流动水和自由水。

续表

Continued table

模型 Models	参数 Parameters	HAD			MWD		
		60 °C	70 °C	80 °C	2 W/g	3 W/g	4 W/g
Newton	$k$	0.018	0.021	0.026	0.066	0.109	0.156
	$R^2$	0.984	0.978	0.989	0.959	0.947	0.951
	RMSE	0.039	0.048	0.032	0.067	0.078	0.078
	SSE	0.009	0.012	0.004	0.067	0.049	0.030
	$k$	1.000	1.000	1.000	0.065	0.112	0.170
	$R^2$	0.480	0.517	0.622	0.961	0.945	0.941
	RMSE	0.317	0.306	0.281	0.065	0.075	0.081
	SSE	0.702	0.562	0.396	0.068	0.050	0.039
Wang and Singh	$a$	-0.016	-0.019	-0.024	-0.046	-0.078	-0.122
	$b$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.003
	$R^2$	0.977	0.975	0.971	0.997	0.993	0.988
	RMSE	0.120	0.134	0.181	0.025	0.043	0.068
	SSE	0.086	0.090	0.131	0.009	0.015	0.023
Page	$k$	1.000	1.000	1.000	0.025	0.052	0.105
	$n$	1.000	1.000	1.000	1.341	1.338	1.256
	$R^2$	0.480	0.517	0.622	0.983	0.976	0.970
	RMSE	0.317	0.306	0.281	0.045	0.060	0.078
	SSE	0.702	0.562	0.396	0.030	0.029	0.030

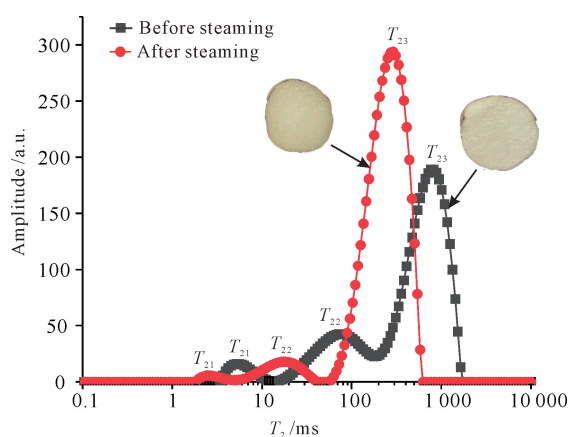
图3 新鲜天麻切片及蒸煮后天麻切片的  $T_2$  反演谱图

Fig. 3  $T_2$  inversion spectrum of fresh and steamed *G. elata* Blume slices

结合水、不易流动水、自由水的弛豫峰面积分别用  $A_{21}$ 、 $A_{22}$ 、 $A_{23}$  表示。由表3可以看出,新鲜天麻切片和蒸煮后天麻切片的横向弛豫时间( $T_2$ )曲线中的  $T_{21}$ 、 $T_{22}$ 、 $T_{23}$  相比均发生显著性变化( $P < 0.05$ ),结合水、不易流动水与自由水的自由度显著降低,峰向左移动。无论是新鲜天麻切片还是蒸煮后天麻切片,

其自由水的弛豫峰面积  $A_{23}$  最大,说明自由水含量最高,占天麻切片总水分的70%以上。蒸煮后的天麻切片  $A_{21}$ 、 $A_{22}$ 、 $A_{23}$  与新鲜天麻切片  $A_{21}$ 、 $A_{22}$ 、 $A_{23}$  相比有显著性差异( $P < 0.05$ ),天麻切片经蒸煮后的自由水含量由  $3407.63 \text{ g}^{-1}$  增加到  $5318.65 \text{ g}^{-1}$ ,不易流动水由  $960.36 \text{ g}^{-1}$  下降到  $305.04 \text{ g}^{-1}$ ,结合水含量由  $176.36 \text{ g}^{-1}$  下降到  $51.27 \text{ g}^{-1}$ 。这可能是由于蒸煮破坏了天麻切片的组织结构,内外力差使天麻切片本身的水分向外分散,所以自由水显著增加。蒸煮前后的总峰面积  $A_2$  分别为  $4544.34 \text{ g}^{-1}$  和  $5674.96 \text{ g}^{-1}$ ,表明蒸煮后的天麻切片总水分增多。

图4为蒸煮前后天麻切片的横切面核磁共振成像(nuclear Magnetic Resonance Imaging, MRI)图,不同颜色代表不同的水分含量,结合右边的颜色条带可知,颜色越红表示天麻切片组织结构中含水量越高,颜色越蓝表示天麻切片组织结构中含水量越低<sup>[22,23]</sup>。由图4可知蒸煮前天麻切片内部水分分布不均匀,其本身的水分由内向外逐渐增加,蒸煮后会破坏天麻切片的内部结构,内部不同水组分重新分布,并加速其中的水分迁移,使内部水分趋于均匀分

布。这也是蒸煮会提高天麻切片干燥速率的原因。

表 3 蒸煮前后天麻切片中各状态水的横向弛豫时间和弛豫峰面积

Table 3 Transverse time and relaxation peak area of different states of water *G. elata* Blume slices before and after steaming

样品 Samples	$T_{21}/\text{ms}$	$T_{22}/\text{ms}$	$T_{23}/\text{ms}$	$A_{21}/\text{g}^{-1}$	$A_{22}/\text{g}^{-1}$	$A_{23}/\text{g}^{-1}$	$A_2/\text{g}^{-1}$
Before steaming	$5.56 \pm 0.39^a$	$86.5 \pm 8.98^a$	$882.61 \pm 61.18^a$	$176.36 \pm 2.63^a$	$960.36 \pm 16.26^a$	$3\,407.63 \pm 16.26^b$	$4\,544.34 \pm 14.66^b$
After steaming	$2.42 \pm 0.17^b$	$17.44 \pm 0.61^b$	$280.22 \pm 9.72^b$	$51.27 \pm 1.04^b$	$305.04 \pm 2.86^b$	$5\,318.65 \pm 78.82^a$	$5\,674.96 \pm 82.72^a$

Note: <sup>a</sup> and <sup>b</sup> means values with different superscripts are significantly difference ( $P < 0.05$ ).

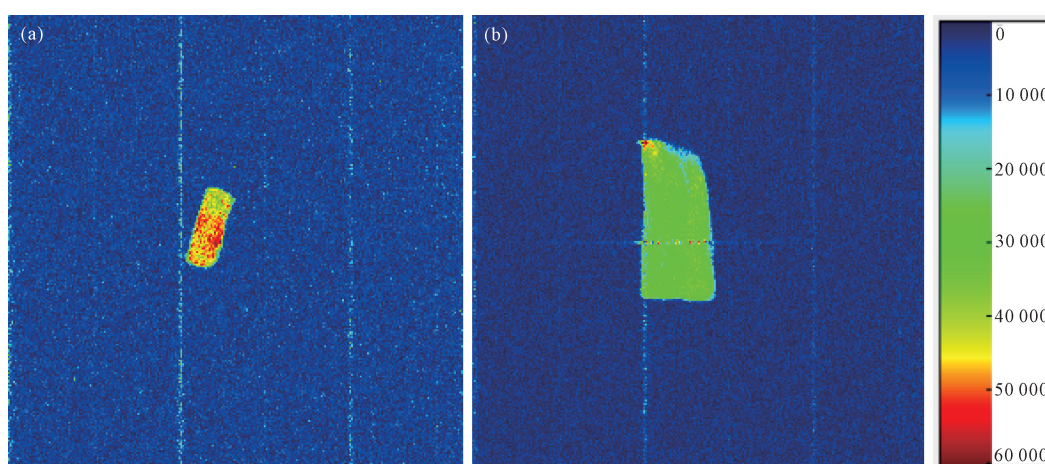


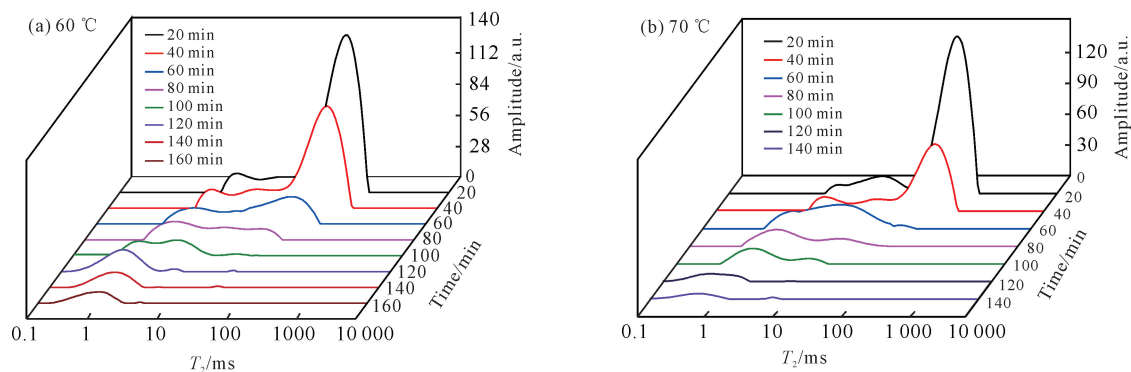
图 4 新鲜天麻切片(a)和蒸煮后天麻切片(b)的质子密度加权图像

Fig. 4 Proton density weighted images of fresh (a) and steamed (b) *G. elata* Blume slices

### 2.2.2 干燥过程 $T_2$ 曲线变化

图 5 为天麻切片在 HAD 和 MWD 不同条件下干燥过程的低场核磁共振  $T_2$  曲线的变化。由图 5 可知,无论是 HAD 还是 MWD,在各温度或微波功率密度条件下  $T_2$  曲线变化趋势基本一致,整体均发生了不同程度的左移。这表明天麻切片在干燥过程中,3 种状态的水分含量均有所减少,其中自由水减

少最多,不易流动水次之,结合水最少,类似的结果在 Cheng 等<sup>[24]</sup>的研究中也有报道。主要是因为自由水的自由度高、流动性强,在干燥过程中容易先被脱去,而结合水和不易流动水这两种形态的水自由度和流动性低,极难脱除<sup>[25]</sup>。干燥结束时天麻切片内部仅含有结合水和少量不易流动水。



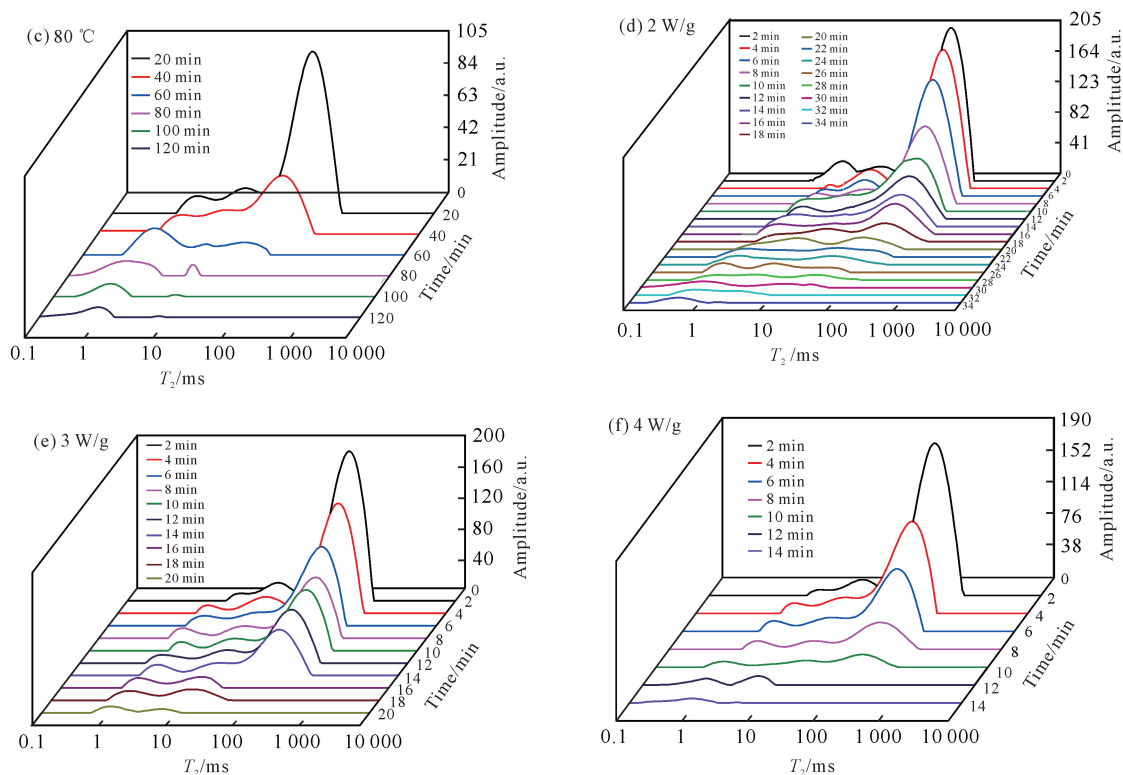


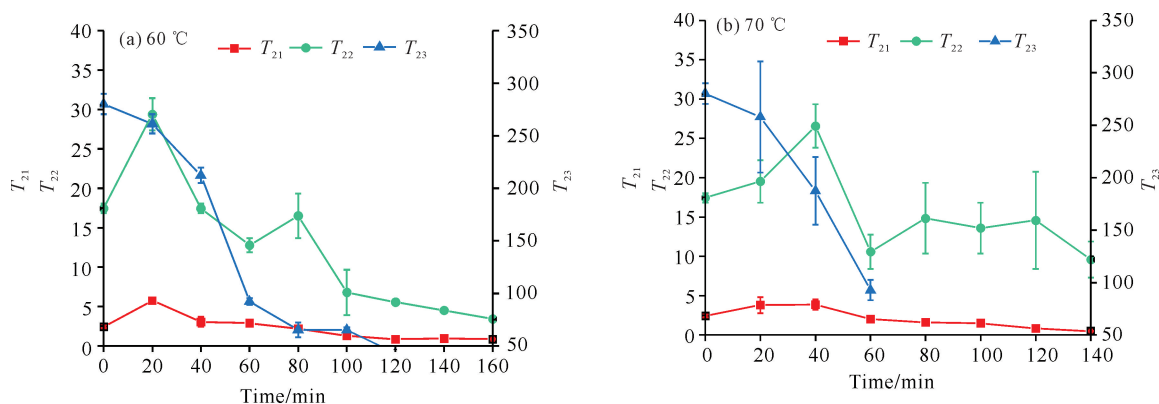
图5 HAD过程(60、70、80 °C)和MWD过程(2、3、4 W/g)天麻切片  $T_2$  曲线的变化

Fig. 5 Changes of  $T_2$  curve of *G. elata* Blume slices during HAD process (60, 70 and 80 °C) and MWD process (2, 3 and 4 W/g)

### 2.2.3 水分状态及含量变化

由图6可知,无论是HAD还是MWD,在不同干燥条件下,天麻切片在干燥过程中结合水  $T_{21}$  值变化幅度均很小,原因是结合水与天麻切片内的大分子物质结合紧密,导致干燥过程中该状态水难以脱除<sup>[26]</sup>。

$T_{22}$  和  $T_{23}$  值在干燥过程中明显下降,说明不易流动水和自由水在干燥过程中不断地被脱除。在HAD过程中,温度越高,  $T_{22}$  值和  $T_{23}$  值下降越快;在MWD过程中,微波功率密度越大,  $T_{22}$  和  $T_{23}$  值下降越快。



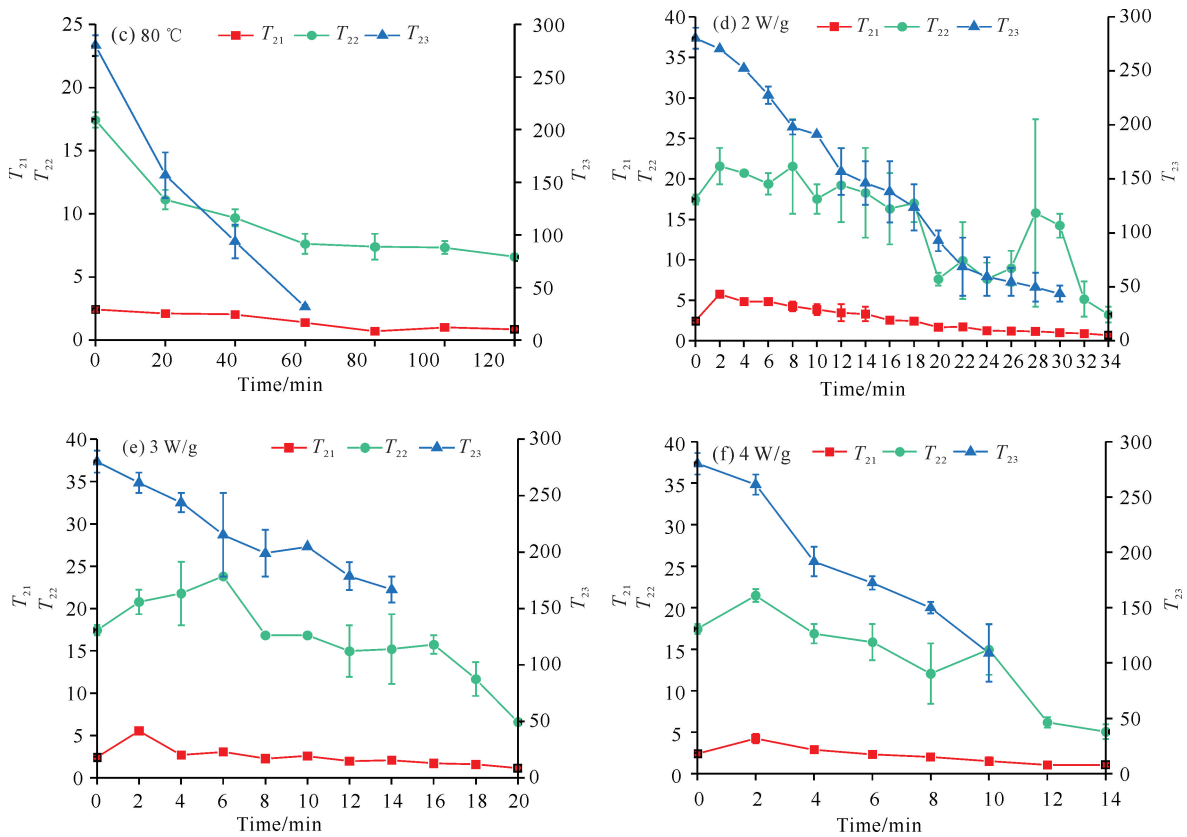


图6 HAD过程(60、70、80 °C)和MWD过程(2、3、4 W/g)天麻切片中各状态水的横向弛豫时间变化

Fig. 6 Changes of relaxation time of water in *G. elata* Blume slices during HAD process (60, 70 and 80 °C) and MWD process (2, 3 and 4 W/g)

由图7可知,无论是HAD还是MWD,在各温度或微波功率密度条件下 $A_2$ 值均随干燥时间的延长而逐步减小,与图1和图2中天麻切片干基含水量的变化趋势一致。不同之处在于,对于HAD而言,在60、70和80 °C条件下干燥时, $A_{23}$ 值降为0的时间分别为160、80和80 min;而对于MWD而言,在2、3、4 W/g条件下干燥时, $A_{23}$ 降为0的时间分别为32、16、12 min,MWD与HAD相比具有更高的干燥速率。此外,从图7可以看出, $A_{23}$ 值是天麻切片中占比最大的水分,是干燥时最容易脱除的水, $A_{23}$ 值的变化规律还与总峰面积 $A_2$ 值变化规律相似<sup>[27]</sup>。无论HAD还是MWD过程中,不易流动水均呈波动的、无明显规律的变化趋势。同种干燥方式下干燥条件

的不同使 $A_{22}$ 呈现不同的变化趋势,总体表现为在干燥结束之前有一个升高的过程,类似的结果在陈文玉等<sup>[28]</sup>的研究中也有报道。原因可能是干燥过程中天麻切片内部分自由水逐渐转化为不易流动水。 $A_{21}$ 值是天麻切片中占比最小的水分,也是干燥时最不容易脱除的水,无论是HAD还是MWD,各条件下 $A_{21}$ 值均呈先上升后下降的趋势,在干燥终点时天麻切片中剩余总水分信号均以少量结合水和不易流动水为主。从整体上看, $A_{21}$ 值在HAD和MWD过程中整体呈较轻微的波动,在干燥中期有略微的升高,之后逐渐降低直到干燥结束。推测其原因可能是干燥引起的有机物结构性质的改变使不易流动水与大分子的结合度提高,不易流动水转化为结合水<sup>[29]</sup>。



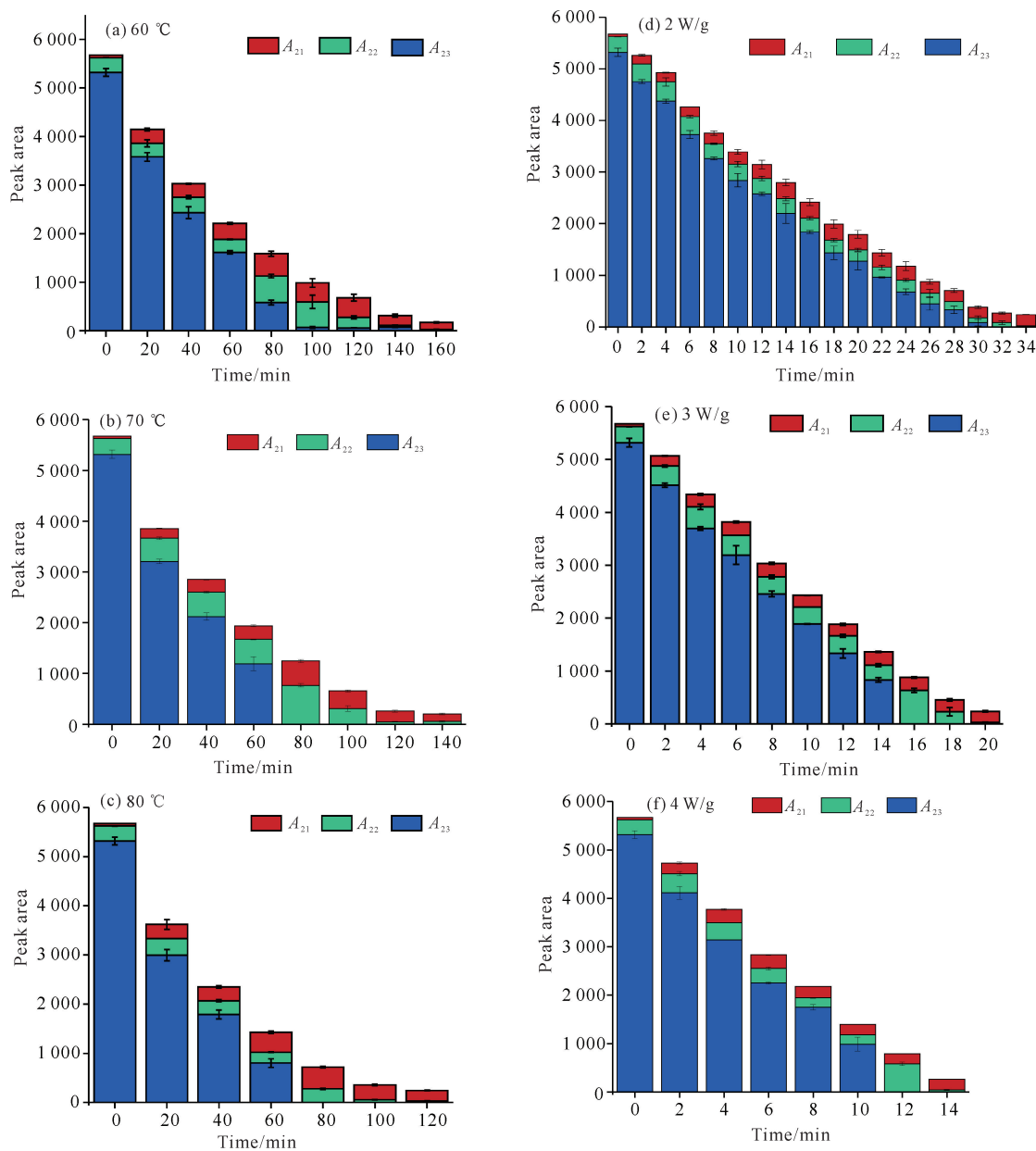


图7 HAD过程(60、70、80 °C)和MWD过程(2、3、4 W/g)天麻切片中各状态水的弛豫峰面积变化

Fig. 7 Changes of relaxation peak area of water in *G. elata* Blume slices during HAD process (60, 70 and 80 °C) and MWD process (2, 3 and 4 W/g)

#### 2.2.4 天麻干基含水量和 $T_2$ 反演谱总峰面积 $A_2$ 相关性分析

为了研究天麻切片在HAD和MWD过程中 $A_2$ 与干基含水量的相关性,建立了天麻切片HAD和MWD过程 $A_2$ 与干燥过程中的实际干基含水量的关系方程(图8)。由图8可知,利用LF-NMR测定的

数据与对应的天麻切片干基含水量进行相关性分析,发现无论是HAD还是MWD,各干燥条件下天麻切片总峰面积 $A_2$ 和干基含水量相关性较好, $R^2$ 均在0.99以上。因此,低场核磁共振可作为快速检测天麻切片HAD和MWD过程中含水量和水分状态及分布的有效手段。

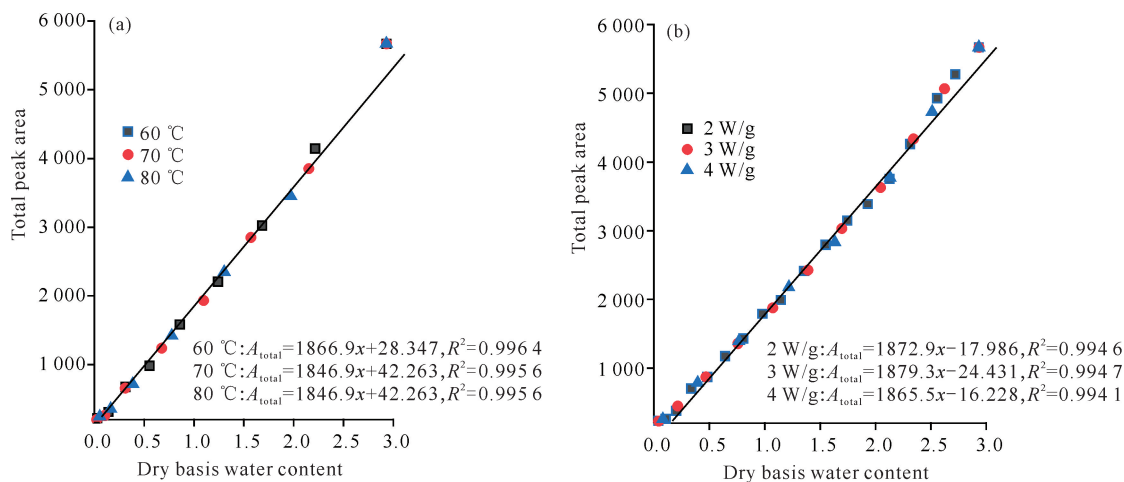


图8 HAD过程(60、70、80 °C)和MWD过程(2、3、4 W/g)天麻切片干基含水量和总峰面积的相关性分析

Fig. 8 Correlation analysis between dry basis water content and total peak area of *G. elata* Blume slices during HAD process (60, 70 and 80 °C) and MWD process (2, 3 and 4 W/g)

### 3 结论

Logarithmic 模型可描述天麻切片干燥过程中干基含水量变化;在HAD过程中,干燥温度越高越有利于加快干燥速率,缩短干燥时间;在MWD过程中,微波功率密度越高,干燥速度越快,干燥时间越短;MWD可以渗透到物料中,实现内部加热,与HAD相比,干燥效率更高,干燥时间更短。

LF-NMR 分析显示,新鲜天麻切片中主要存在结合水、不易流动水和自由水3种状态的水。在HAD和MWD过程中,干燥结束时天麻切片中的自由水完全被脱除,仅存少量的不易流动水和结合水。无论何种干燥方式,总峰面积  $A_2$  和干基含水量相关性较好,  $R^2$  均在0.99以上。

#### 参考文献

- [1] 于雪,胡文忠,姜爱丽,等.天麻的活性成分及功能性研究进展[J].食品工业科技,2016,37(8):392-395,399.
- [2] 国家药典委员会.中华人民共和国药典:一部[M]:2020年版.北京:中国医药科技出版社,2020:59-60.
- [3] MATIAS M, SILVESTRE S, FALCÃO A, et al. *Gastrodia elata* and epilepsy: rationale and therapeutic potential [J]. *Phytomedicine*, 2016, 23(12): 1511-1526.
- [4] CHEN W C, LAI Y S, LIN S H, et al. Anti-depressant effects of *Gastrodia elata* Blume and its compounds gastrodin and 4-hydroxybenzyl alcohol, via the monoaminergic system and neuronal cytoskeletal remodeling [J]. *Journal of Ethnopharmacology*, 2016, 182: 190-199.
- [5] 葛进,刘大会,鲁惠珍,等.蒸制断生后真空冷冻干燥对天麻质量的影响[J].中国医院药学杂志,2016,36(3): 180-186.
- [6] 孙静,王昌利,杜鹃.不同炮制方法对天麻饮片中多糖含量影响的实验研究[J].时珍国医国药,2010,21(11): 2773-2774.
- [7] 毕荣璐,倪兆武,李德勋,等.不同炮制方法对天麻素及天麻苷元含量的影响[J].云南中医学院学报,2015, 38(1): 34-37.
- [8] 季德,宁子琬,张雪荣,等.不同干燥加工方法对天麻药材质量的影响[J].中国中药杂志,2016,41(14): 2587-2590.
- [9] WONG H Y, HU B, SO P K, et al. Rapid authentication of *Gastrodiae rhizoma* by direct ionization mass spectrometry [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2016, 938: 90-97.
- [10] 单鸣秋,钱岩,于生,等.基于响应面法的天麻产地加工炮制一体化工艺研究[J].中草药,2016,47(3): 420-424.
- [11] TEO C C, TAN S N, YONG J W H, et al. Evaluation of the extraction efficiency of thermally labile bioactive compounds in *Gastrodia elata* Blume by pressurized hot water extraction and microwave-assisted extraction [J]. *Journal of Chromatography A*, 2008, 1182(1): 34-40.
- [12] 吴钊龙,林芳,唐小闲,等.基于LF-NMR分析蚕蛹在不同干燥过程中的水分迁移规律[J].现代食品科技, 2022, 38(3): 237-243, 96.
- [13] 吴钊龙,黄纪民,林芳,等.低场核磁共振方法下热泵干燥过程中蚕蛹的品质变化[J].食品与发酵工业, 2022, 48(15): 267-272.
- [14] 吴梦玫,叶丽芳,彭杰,等.基于动力学过程的地黄润制科学内涵研究[J].中国中药杂志,2022,47(13): 3511-3518.
- [15] 吴钊龙,林芳,陈振林,等.蚕蛹变温压差膨化干燥特性

- 及其动力学模型研究[J]. 食品科技, 2020, 45(10): 88-95.
- [16] 陈振林, 郭婷, 赵广河, 等. 红瓜子薄层热风干燥特性及其动力学研究[J]. 食品与机械, 2014, 30(6): 23-26.
- [17] 吴钊龙, 林芳, 陈振林, 等. 蚕蛹热泵干燥特性及其动力学模型研究[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(18): 1-6.
- [18] VEGA-GÁLVEZ A, AH-HEN K, CHACANA M, et al. Effect of temperature and air velocity on drying kinetics, antioxidant capacity, total phenolic content, colour, texture and microstructure of apple (var. Granny Smith) slices [J]. Food Chemistry, 2012, 132(1): 51-59.
- [19] TORKI-HARCHEGANI M, GHANBARIAN D, SADEGHI M. Estimation of whole lemon mass transfer parameters during hot air drying using different modeling methods [J]. Heat and Mass Transfer, 2015, 51(8): 1121-1129.
- [20] 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.
- [21] REN X, LI L L, CHEM J L, et al. Drying characteristics and quality of Chinese yam by multiphase microwave drying based on fractal theory [J]. Drying Technology, 2022, 40(15): 3310-3323.
- [22] 金听祥, 王广红, 彭钰航, 等. 不同预处理方式对胡萝卜热泵干燥品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(7): 173-178.
- [23] 任爱清, 蔡文, 韩春阳, 等. LF-NMR 结合 MRI 分析热泵干燥过程中黑木耳水分迁移[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(10): 10-16.
- [24] CHENG S S, LI R R, YANG H M, et al. Water status and distribution in shiitake mushroom and the effects of drying on water dynamics assessed by LF-NMR and MRI [J]. Drying Technology, 2020, 38(8): 1001-1010.
- [25] CHEN Y N, DONG H J, LI J K, et al. Evaluation of a nondestructive NMR and MRI method for monitoring the drying process of *Gastrodia elata* Blume [J]. Molecules, 2019, 24(2): 236.
- [26] MOTHIBE K J, ZHANG M, MUJUMDAR A S, et al. Effects of ultrasound and microwave pretreatments of apple before spouted bed drying on rate of dehydration and physical properties [J]. Drying Technology, 2014, 32(15): 1848-1856.
- [27] LI L L, ZHANG M, BHANDARI B, et al. LF-NMR online detection of water dynamics in apple cubes during microwave vacuum drying [J]. Drying Technology, 2018, 36(16): 2006-2015.
- [28] 陈文玉, 穆宏磊, 吴伟杰, 等. 利用低场核磁共振技术无损检测澳洲坚果含水率[J]. 农业工程学报, 2020, 36(11): 303-309.
- [29] 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.

## Determination of Moisture Changes in *Gastrodia elata* Blume Slices during Different Drying Processes Based on Drying Kinetics and LF-NMR Analysis

WU Zhaolong<sup>1</sup>, WU Tengyu<sup>2</sup>, QIU Zhanhong<sup>3</sup>, HUANG Jinmin<sup>1,4\*\*</sup>, QIN Haibo<sup>1</sup>, LI Bingzheng<sup>1,4,5</sup>, HUANG Zhimin<sup>4\*\*</sup>

(1. Institute of Grand Health, Guangxi Academy of Sciences, Nanning, Guangxi, 530007, China; 2. College of Food Science and Quality Engineering, Nanning University, Nanning, Guangxi, 530200, China; 3. Guangxi Huatai Pharmaceutical Co., Ltd., Hezhou, Guangxi, 546800, China; 4. Guangxi Key Laboratory of Advanced Microwave Manufacturing Technology, Guangxi Academy of Sciences, Nanning, Guangxi, 530007, China; 5. Laibin Branch, Guangxi Academy of Sciences, Laibin, Guangxi, 546100, China)

**Abstract:** Combining drying characteristic curves, a predictive model for *Gastrodia elata* Blume slice moisture content based on Low-Field Nuclear Magnetic Resonance (LF-NMR) parameters was established. In order to

explore the change rule of moisture migration in the drying process of *G. elata* Blume slices and establish its quantitative characterization method, in this study, LF-NMR technology was used to analyze *G. elata* Blume slices under different hot air temperatures (60, 70, 80 °C) and different microwave power densities (2, 3, 4 W/g) during Hot Air Drying (HAD) and Microwave Drying (MWD). Combined with the drying characteristic curve, a prediction model of moisture content of *G. elata* Blume slices based on LF-NMR parameters was established. The results showed that the drying rate of MWD was much higher than that of HAD. In the range of hot air temperature (60 – 80 °C) and microwave power density (2 – 4 W/g), high temperature and high power density were beneficial to improve the drying rate and shorten the drying time. The Logarithmic model can accurately describe the change of moisture content in the process of HAD and MWD of *G. elata* Blume slices. LF-NMR analysis showed that in the process of HAD and MWD, the transverse relaxation time curve of *G. elata* Blume slices showed a trend of left shift on the whole, and the relaxation peak signal intensity of each state water decreased continuously. At the end of drying, the free water in the *G. elata* Blume slices was completely removed, and only a small amount of immobile water and bound water remained. Whether it is HAD or MWD, the correlation between the total area of relaxation peak  $A_2$  and the dry basis water content of *G. elata* Blume slices is above 0.99. The research results provide a reference for elucidating the drying mechanism of *G. elata* Blume slices and the optimization of drying process parameters.

**Key words:** *Gastrodia elata* Blume; hot air drying; microwave drying; moisture content; Low-Field Nuclear Magnetic Resonance (LF-NMR)

责任编辑: 陆 雁



微信公众号投稿更便捷

联系电话: 0771-2503923

邮箱: gxxkxyxb@gxas.cn

投稿系统网址: <http://gxxkx.ijournal.cn/gxxkxyxb/ch>