

厚度控制对怀山药远红外干燥过程中水分迁移的影响

Effect of thickness on moisture transfer during Far-infrared drying of *Dioscorea opposita*

周四晴¹ 段 续^{1,2} 任广跃^{1,2}

ZHOU Si-qing¹ DUAN Xu^{1,2} REN Guang-yue^{1,2}

张 萌¹ 马 立¹ 车馨子¹

ZHANG Meng¹ MA Li¹ CHE Xin-zi¹

(1. 河南科技大学食品与生物工程学院, 河南 洛阳 471023;

2. 粮食储藏安全河南省协同创新中心, 河南 郑州 450001)

(1. College of Food and Bioengineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471023, China; 2. Collaborative Innovation Center of Grain Storage Security, Zhengzhou, Henan 450001, China)

摘要:采用远红外干燥设备对鲜怀山药片进行脱水处理,应用低场核磁共振波谱分析和成像分析技术,测定怀山药片干燥过程中的水分状态,综合干燥曲线、干燥速率规律,分析不同切片厚度(4, 8, 12 mm)的怀山药在干燥过程中的水分扩散特性,并建立薄层干燥模型。结果表明:干燥过程中干燥速率呈现短暂的快速上升后逐渐下降的趋势,4 mm 的怀山药达到干燥条件所需时间较 8, 12 mm 的分别短 36.33%, 53.33%; 3 种状态水分 T_2 峰面积减小且峰向左移动,干燥过程中自由水耗尽,干燥终点怀山药内部水分主要为结合水(87%)与少量弱结合水(13%);怀山药内部水分存在密度梯度,从高密度向低密度方向迁移,适当减小怀山药厚度可促进 H^+ 质子密度下降,提高干燥效率;Page 模型拟合效果较好($R^2 > 0.9$),能很好地表征和预测怀山药远红外干燥过程。

关键词:远红外干燥;低场核磁共振;核磁成像;水分迁移;数学模型

Abstract: The water diffusion characteristics of drying *dioscorea opposita* during by far infrared were investigate. The dehydration of *Dioscorea opposita* by Far-infrared drying equipment. The

technology of low field nuclear magnetic resonance (LF-NMR) and magnetic resonance imaging (MRI) were applied to measured moisture content of *D. opposita* during drying. Comprehensive consideration results of LF-NMR, MRI, drying curve and drying rate. Water diffusion characteristics of *D. opposita* with different slice thickness (4, 8, and 12 mm) during drying were analyzed, and the thin-layer drying were modeled. The results showed that the drying rate shortly and rapidly increased and then gradually decreased. The drying time of 4 mm thick *D. opposita* was 36.33% and 53.33% shorter than that of 8 mm and 12 mm respectively. The peak of T_2 were moves to the left and its area decreased. Free water was depleted during drying. At the end of drying, the internal moisture of *D. opposita* was mainly bound water (87%) and a small amount of weak bound water (13%). Water inside of *D. opposita* has density gradient, and moisture migrated from high to low density zone. Decreasing the thickness of *D. opposita* properly could promote the decrease of H^+ proton density and improve the drying efficiency. Page model fitted well ($R^2 > 0.9$), it could characterize and predict the process of drying *D. opposita* by far infrared well. In conclusion, the results provided the theoretical basis for the selection of material thickness and the prediction of drying process of *D. opposita*.

Keywords: Far-infrared drying; low field nuclear magnetic resonance (LF-NMR); magnetic resonance imaging (MRI); moisture migration; mathematical model

基金项目:十三五国家重点研发计划(编号:2017YFD0400901);国家自然科学基金项目(编号:31671907);智汇郑州·1125 聚才计划(编号:2016XT026)

作者简介:周四晴,男,河南科技大学在读硕士研究生。

通信作者:段续(1973—),男,河南科技大学教授,博士。

Email: duanxu_dx@163.com

收稿日期:2019-08-27

怀山药(*Dioscorea opposita*)特指河南焦作一带所产

山药,其富含薯蓣皂苷、活性蛋白及膳食纤维,块茎入药“性平”“温补”,食之滋补身体、增强免疫力^[1]。采用合适的干燥方式降低怀山药水分含量可延长货架期,同时获得优良的品质。

国内外对山药脆片的加工多采用热风干燥^[2]、热泵干燥^[3]与冷冻干燥^[4]。远红外干燥是利用 5.6~1 000.0 μm 的电磁波使物料内部水分子产生共振、热效应,与其他干燥技术相比,该技术具有速度快、效率高、维护容易、投入低的特点^[5],研究^[6-9]发现远红外干燥技术可以较好地保存果蔬品质,且能耗较低。厚度对果蔬干燥结果影响显著^[10-11],孙传柱等^[12]发现,红萝卜远红外干燥的有效水分扩散系数和干燥时间随厚度的增大而增大;郭玲玲等^[13]采用远红外干燥香菇片时发现,较厚的香菇片干燥速率较慢且品质较差。怀山药富含皂苷、多糖类、黏液蛋白等亲水大分子,具有不同自由度的水分,而远红外辐射的能量会随穿透的深度逐渐衰减,因此物料厚度的选择对不同自由度水分迁移和红外脱水效果有重要影响。

试验拟通过远红外辐射对不同厚度鲜怀山药进行脱水处理,借助 LF-NMR 和 MRI 技术,研究不同自由度状态水分的迁移规律,以及水分在物料内部空间的分布和迁移规律^[14-15],结合干燥曲线、干燥速率变化情况分析水分在不同厚度物料内部的扩散规律,采用 6 种常用的薄层干燥模型对干燥过程中水分比随时间变化趋势进行拟合,筛选出最优模型预测不同厚度条件下怀山药的水分散失状况,为远红外干燥怀山药加工过程中水分监测、精确控制提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

怀山药:选择长柱状直径为 23~30 mm,个体均匀无缺损、无病虫害和霉变的新鲜怀山药,产自焦作市温县。

1.2 仪器与设备

电热鼓风干燥箱:PH-010(A)型,上海一恒科学仪器有限公司;

电子天平:YP-6002 型,上海越平科学仪器有限公司;

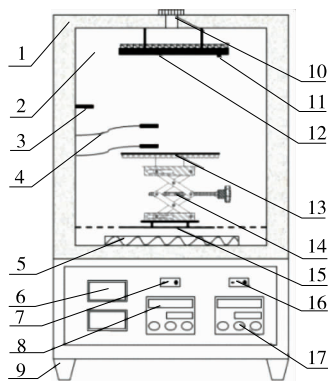
低场核磁共振成像分析仪:NMI20 型,纽迈电子科技有限公司;

切片机:GZM20 型,格芝美刀具厂;

远红外辐射干燥设备(图 1):自主制造,由干燥仓、远红外辐射发生器(4 块 12 cm×12 cm 陶瓷辐射板)、可升降物料架、控制单元等组成。辐射板辐射波长 5~15 μm ,辐射率 0.90,最高温度 1 000 $^{\circ}\text{C}$,辐射距离通过可升降物料架进行调控,辐射板及物料温度通过热电偶进行测量。

1.3 试验方法

1.3.1 干燥试验 怀山药清洗、削皮并修整为粗细均匀



1. 保温层 2. 干燥仓 3. 温度传感器 4. 热电偶 5. 电加热器 6. 热电偶温度显示屏 7. 远红外辐射板开关 8. 远红外辐射板温度控制器 9. 干燥箱支架 10. 排气孔 11. 温度传感器 12. 远红外辐射板 13. 载物盘 14. 伸缩架 15. 底座 16. 电加热器开关 17. 电加热器温度控制器

图 1 远红外辐射干燥箱示意图

Figure 1 Schematic of far-infrared radiation dryer

的圆柱体[直径(22±1) mm],切片(厚度分别为 4, 8, 12 mm),每种厚度分两组(计重组,取样组)进行干燥,远红外辐射干燥箱参数设定参照文献^[16]进行修改,辐射距离 10 cm,辐射板温度 130 $^{\circ}\text{C}$ 。分别于干燥 0, 10, 30, 60, 90, 150, 210, 330, 450 min 时取样^[17],测定样品横向弛豫时间(T_2)及核磁成像,直至达到安全贮存水分含量(干基含水率 0.13~0.20 g/g),停止干燥。每组试验重复 3 次。

1.3.2 干基含水率的测定 按 GB 5009.3—2016 执行,并按式(1)计算干基含水率。

$$M_t = \frac{m_t - m_d}{m_d}, \quad (1)$$

式中:

M_t —— t 时刻怀山药切片的干基含水率, g/g;

m_t —— t 时刻怀山药质量, g;

m_d ——达到绝干条件后的怀山药切片质量, g。

1.3.3 干燥速率的测定 参照文献^[16],按式(2)计算干燥速率。

$$D_r = \frac{M_{t_1} - M_{t_2}}{t_1 - t_2}, \quad (2)$$

式中:

D_r ——干燥速率, g/(g·min);

M_{t_1} —— t_1 时刻的干基含水率, g/g;

M_{t_2} —— t_2 时刻的干基含水率, g/g;

t ——干燥时间, min。

1.3.4 水分比的测定 参照文献^[18]。

1.3.5 LF-NMR 试验 根据文献^[19]修改如下:干制过程中,在固定的时间点采集样品,从完整片状样品中切割扇形部分,取(0.50±0.01) g 样品放入直径 15 mm 圆柱

形玻璃管中,进行核磁共振分析,利用 CPMG 脉冲序列进行信号采集,并将采集的信号进行反演得到 T_2 反演谱。CPMG 序列采集参数:90°脉冲时间 13.52 μ s,180°脉冲时间 26 μ s,采样点数 72 008,谱宽 100 kHz,回波个数 18 000,重复扫描次数 64,采样重复时间 400 ms。

1.3.6 MRI 试验 在怀山药圆形薄片中间部位取样,样品处理为宽约 6 mm、长为样品直径、厚度为样品实际厚度的条状,将处理好的样品置于样品管中,进行自旋回波 SE 脉冲序列的质子密度的二维成像,并参照文献[20]进行试验参数设置:重复时间 500 ms,回波时间 20 ms,矩阵 256×192,层厚 6.0 mm,累加次数 8。得到样品的质子密度图像。

1.3.7 干燥曲线的数学表征 选取 6 种国内外常用的薄层干燥模型对干燥曲线进行数学表征^[21-22](表 1),对所选取的数学模型进行拟合,使用 Origin 内置数据分析进行非线性拟合,其中决定系数 R^2 、误差平方和(SSE)表示拟合优度, R^2 越大、SSE 越小则拟合越成功,选择最适的干燥动力学数学表征模型。并选取拟合精度高的模型用于怀山药远红外干燥脱水过程的数学表征。

表 1 常见干燥数学模型选择

Table 1 Selection of common drying mathematical models

模型	公式
TaghianDinani	$MR=A \exp[-(\frac{t-B}{C})^2]$
Polynomial	$MR=a+bt+ct^2$
Newton(Lewis)	$MR=\exp(-kt)$
Page	$MR=\exp(-kt^n)$
Midilli	$MR=a \exp(-kt^n)+bt$
Weibull	$MR=\exp[-(\frac{t}{b})^n]$

1.3.8 数据处理 采用 SPSS 22.0 软件进行显著性、相关性分析及标准差计算;采用 Origin 2017C 软件进行试验数据图形绘制及非线性拟合。

2 结果与分析

2.1 切片厚度对怀山药片干燥特性的影响

由图 2 可知,不同厚度怀山药片样品干燥速率在干燥初始阶段先增加后减小,是由于物料干燥初始吸收辐射能量,所产生的热效应逐渐增加,在高含水率下物料内外湿度差较大,水分子流动性强、扩散快,干燥速率快;含水率降低后湿度差变小,水分子扩散阻力增大,迁出速率变慢,干燥速率变慢。辐射距离、温度相同的情况下,4, 8,12 mm 的怀山药片干燥至安全贮存水分所需的时间分别为 210,330,450 min。不同厚度的物料干燥速率不同,

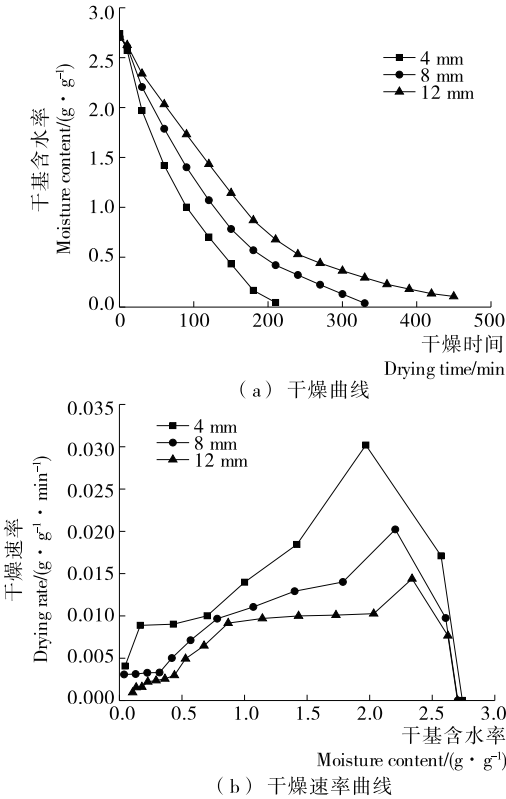


图 2 怀山药片远红外干燥特性

Figure 2 Curves of *Dioscorea oppositifolia* slices

主要是因为红外辐射的穿透程度受样品厚度的影响,热能从薄片表面到内部的效率高于是从厚片表面到内部的^[23]。怀山药富含的多糖类、黏蛋白脱水后在表面形成一层致密的网状薄膜,限制了深层水分的排出,较薄的物料吸收辐射产生的热效应高,使内部水分子获得较大动能,更容易逸出网状薄膜,而较厚的物料内部红外辐射能量衰减,水分子所获得的能量较低。此外,单位质量的物料越薄,总表面积越大,更多水分子处于物料表面附近,单位时间内释放的水分子则越多,干燥时间越短。因此怀山药在工业远红外干燥加工时可适当降低厚度以利于红外线的穿透,增强水分迁移的均匀性,提高干燥速率。

2.2 NMR 反演谱信号幅值变化规律

在反演图谱中,峰位置越靠右(T_2 越长),该部分水分受约束的引力越小、自由度越高,与农产品纤维组织的结合程度越弱,越容易被除去,相反,峰位置越靠左(T_2 越短)则水分越难被除去^[24-26]。由图 3 可知,3 个峰分别对应结合水(T_{21} 0.01~10.00 ms)、半结合水(T_{22} 10.00~100.00 ms)、自由水(T_{23} 100.00~10 000.00 ms)。

由图 4 可知,干燥过程中,样品的 NMR 信号反演图谱峰值整体左移且幅值降低。怀山药中的多糖、纤维素等维持稳定性的大分子与水分子之间的引力逐渐增加,是干燥过程中弛豫时间减小的主要原因^[27],信号幅度的

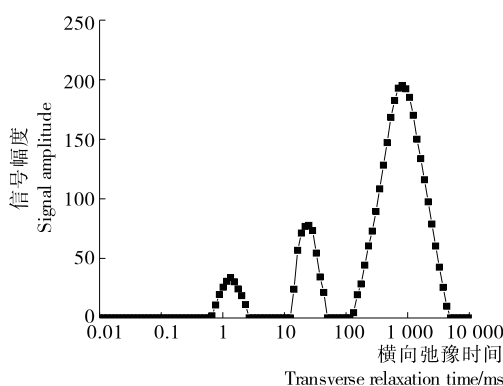


图 3 新鲜怀山药横向弛豫时间反演图谱

Figure 3 Inversion map of transverse relaxation time of fresh *Dioscorea oppositifolia*

减小是由于含水率的下降。干燥初始阶段,怀山药的干基含水率高,核磁共振反演图谱信号幅值大,横向弛豫时间长,此阶段怀山药中的水分比较活跃,可轻易脱去,且脱去的水分为游离在怀山药细胞间隙及部分液泡内的自由水;随干燥的进行,信号幅值降低,横向弛豫时间变短,活跃水分逐渐减少;在临近干燥终点的阶段,单位时间信号幅值降低的幅度变小,横向弛豫时间缩短的程度减小,与 Cao 等^[28]的变化过程相似。

由图4还可知,厚度对怀山药干燥过程中横向弛豫

信号幅值衰减影响较大,干燥初期怀山药厚度越薄,横向弛豫时间缩短越快、幅值衰减越快。其原因是水在不同厚度物料中存在不同的红外吸收光谱,厚度越薄吸收带越向长波范围移动^{[29]351-352},对辐射能的吸收率越高,温度上升越快,干燥速率越快;其次,单位质量的物料厚度越薄,表面积越大,干燥速率越快。怀山药片越薄,横向弛豫时间缩短得越快,剩余少量的自由水与弱结合水脱除的速率越快,可能是由于薄层水分对远红外的高吸收带引起的剧烈分子振动破坏了弱结合水与怀山药干物质之间的作用力。干燥终点时物料内主要为结合水,结合水与大分子物质(如多糖、皂苷、蛋白质)通过氢键紧密结合,形成较为稳定的结构,不利于水分的迁出。

2.3 水分状态变化

对苹果^[17]、大麦苗^[28]等物料的研究表明干基含水率与 NMR 信号总幅度具有线性关系,因此可根据 T_2 反演谱峰值和峰面积估算出特定组分水的含量,得到干燥过程中样品中各组分水对应的比例。由图 5 可知,样品中 3 种状态水分和样品分子之间的氢键、结构以及水分存在的位置均与质子弛豫时间和强度有关^[20]。

鲜怀山药内部自由水约占总质量 78%,弱结合水与结合水分别占 12%,10%。对比图 5 发现,在相同干燥温度下,4 mm 的怀山药自由水和弱结合水脱除时间相比 8,

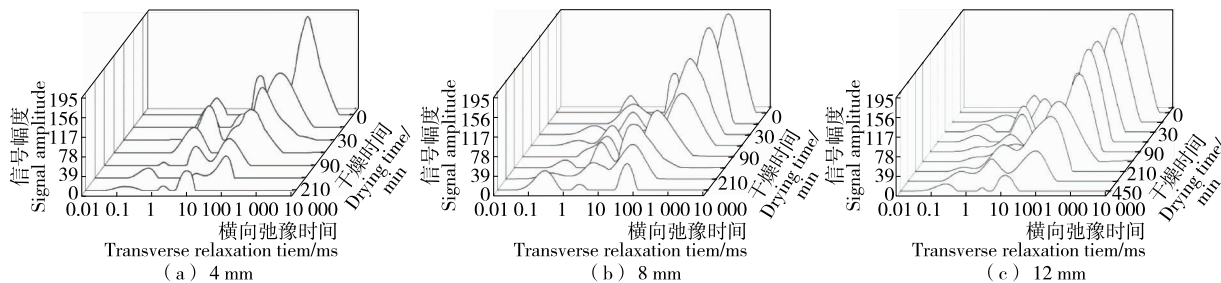


图 4 怀山药远红外干燥过程横向弛豫时间反演谱三维图

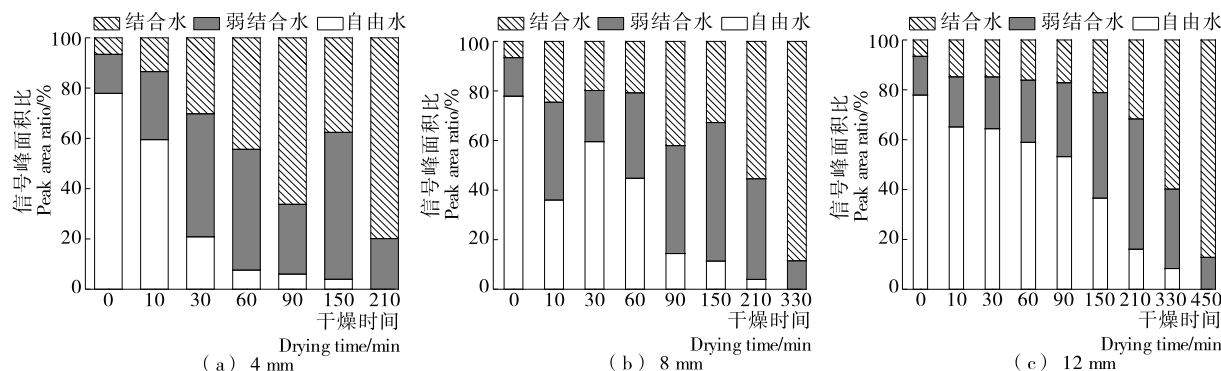
Figure 4 Graphic model inversion spectra of transverse relaxation time during far-infrared drying of *Dioscorea oppositifolia*

图 5 怀山药远红外干燥过程中各组分水分状态变化

Figure 5 Variation of moisture state of components in the process of far-infrared drying of *Dioscorea oppositifolia*

12 mm 的分别缩短 36.37%, 53.33%; 其中 8 mm 的怀山药内 3 种状态水分的峰面积比例存在波动, 与 Cao 等^[28]的变化相似。在水分向外迁移的过程中, 物料不断吸收辐射能, 多糖、蛋白质等与水分结合部位键能较弱的氢键发生断裂, 使部分结合水自由程度增大, 导致结合水信号幅值减小, 结合水峰面积比例随信号总幅值的下降(含水率降低)而发生波动, 但整体增大。相较于 4, 12 mm, 8 mm 的物料波动更为明显, 与前人^[12]的研究结果相似, 可能是因为干燥过程中 4 mm 怀山药水分脱除速率较快, 水分从物料内向外扩散对信号衰减产生的影响比水分自由度发生变化对信号变化产生的影响更大, 因此信号幅值的波动不明显; 12 mm 物料较厚, 干燥前期温度较低, 内部水分排出速度较为舒缓, 内部多糖、氨基酸等有机物的生化反应较为温和, 可保持其持水能力, 物料内部水分传输的通道较长, 部分自由水在向外迁移的过程中转化为弱结合水, 在干燥后期逐渐脱除, 弱结合水的信号幅值先增大后减小, 后期水分含率降低、温度升高而出现氢键断裂水分转化, 但由于自由水含率较低, 并未出现信号幅值波动的现象。

2.4 MRI 图像变化

由图 6 可知, 随着干燥的进行, 图像中心与边缘颜色

梯度逐渐减小, 与 Wang 等^[30]的研究结果相似, 表明水在热辐射过程中不断蒸发流失。中心红色信号区域缩减较快, 中密度区呈现环状贴附于高密度区周围, 在干燥过程中随着高密度区缩减而向中心移动, 但环宽基本不变, 表明水分含量较高的区域含水率降低较快, 是因为表面水分蒸发, 内部水密度梯度形成势差, 产生推动力使水不断向外扩散并趋于平衡, 中密度区处于扩散过渡区, 水分通过该区域迅速分散密度减小, 因此环宽基本不变。低密度区在怀山药样品的表层, 在干燥前期外轮廓基本不变, 内轮廓随着高密度区和中密度区的缩减而向内扩增; 在干燥后期, 高密度区和中密度区的信号密度降低, 转为低密度信号区。干燥前期物料表面水分蒸发, 内部存在水分干湿梯度, 水分由物料内部向表面迁移, 与物料的热扩散方向相同^{[29]355-356}, 从而加速了干燥进程, 后期水分梯度减小, 干燥速率变慢。4 mm 物料信号衰减最快, 山药内部在吸收红外辐射后获得动能的水分子距离表面最近, 单位时间逸出的水分更多, 导致信号降低较快; 12 mm 物料在干燥过程中内部较为密集的质子云扩散较慢, 虽然内部密度差较大, 但水分迁移距离较长, 深层水分远红外热效应较低, 温度较低获得动能较小, 干燥速率较低。

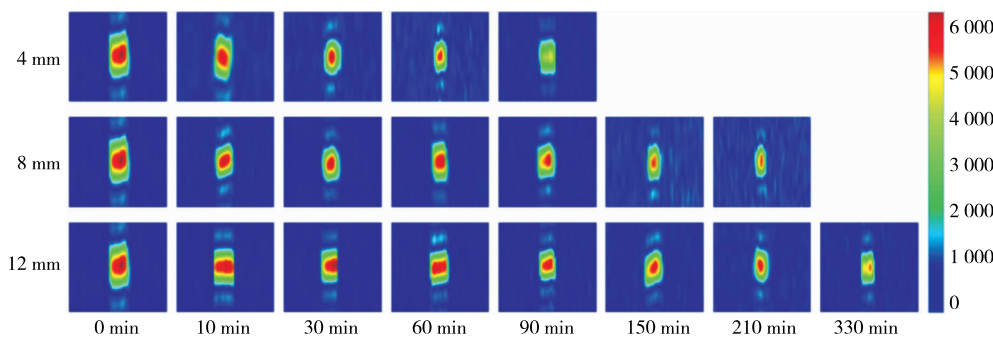


图 6 怀山药片远红外干燥过程中 H^+ 质子密度图像

Figure 6 H^+ proton density images of *Dioscorea oppositifolia* slices during far infrared drying

2.5 怀山药远红外干燥模型的建立

采用数学模型对物料中水分的迁移规律进行表征, 可以更清楚地表达水分随干燥时间散失的规律, 并在生产中用以精准控制干燥过程, 以达到提高产品质量、节约能耗的目的^[31-32]。试验选取 6 个干燥模型进行拟合求证, 由表 2 可知, Page 模型具有最高的 R^2 (0.997) 及最低的 SSE (0.003), 可作为最优模型, 并进行验证。

2.6 模型验证

为了验证所选模型的准确性, 在辐射温度 130 $^{\circ}C$ 、辐射距离 10 cm 条件下, 分别取建模以外的不同厚度怀山药片进行远红外干燥试验。由图 7 可知, 建模以外的实测值和模型预测值基本一致 ($R^2 > 0.9$), 表明该模型具有较优的预测性, 能很好地描述怀山药远红外干燥过程, 通

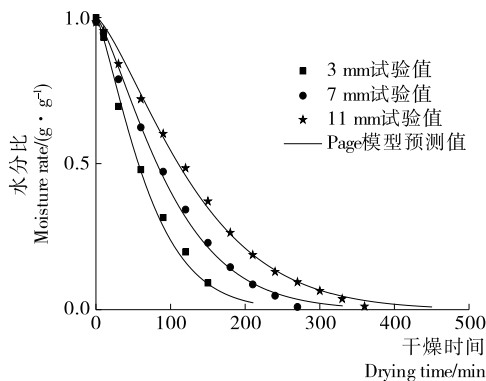


图 7 怀山药远红外干燥 Page 模型验证

Figure 7 Verification of Page model of far infrared drying of *Dioscorea oppositifolia*

表 2 6 种薄层干燥模型分析结果
Table 2 Analysis results of 6 drying models

模型	厚度/ mm	模型常数	SSE	R^2	模型	厚度/ mm	模型常数	SSE	R^2
TaghianDinani	4	$A=1.013,$	0.018	0.983	Page	4	$k=0.004,$	0.005	0.997
		$B=-27.725,$					$n=1.288$		
		$C=106.793$							
	8	$A=0.895,$	0.027	0.983		8	$k=0.002,$	0.002	0.999
		$B=-13.640,$					$n=1.314$		
		$C=136.359$					$k=0.001,$		
12	$A=0.995,$	0.008	0.996	4	$a=1.028,$	0.034	0.982		
	$B=-45.336,$				$b=-0.002,$				
	$C=196.262$				$k=0.072,$				
Polynomial	4	$a=0.992,$	0.005	0.995	Midilli	8	$a=1.045,$	0.030	0.991
		$b=-0.009,$					$b=-0.002,$		
		$c=2.074\text{E}-005$					$k=0.032,$		
	8	$a=0.985,$	0.004	0.997		12	$n=0.562$	0.015	0.992
		$b=-0.006,$					$a=1.048,$		
		$c=1.032\text{E}-005$					$b=-0.001,$		
12	$a=0.991,$	0.005	0.998	4	$k=0.035,$	0.014	0.987		
	$b=-0.005,$				$n=0.662$				
	$c=6.187\text{E}-006$				$b=75.234,$				
Newton(Lewis)	4	$k=0.014$	0.032	0.975	Weibull	8	$b=107.898,$	0.012	0.992
	8	$k=0.010$	0.039	0.977		$n=1.322$	0.009	0.995	
	12	$k=0.007$	0.050	0.976		$b=144.436,$			
							$n=1.369$		

过模型可以将干燥规律方程化,为怀山药远红外干燥工艺和过程控制优化提供理论依据,避免能耗浪费、提高产品品质。

3 结论

试验结果表明,厚度对怀山药远红外干燥过程中水分迁移产生一定影响,随着怀山药厚度的减小,远红外辐射热效应增强,干燥速率明显增大,干燥时间缩短。通过 LF-NMR 和 MRI 技术研究怀山药远红外干燥过程中水分的迁移规律,分别对不同自由度水分转化迁移规律和水分在怀山药内部空间分布迁移规律进行实时检测,结合 Page 干燥模型,可为怀山药远红外干燥过程预测和质量控制提供理论依据。为全面评价厚度对远红外干燥怀山药品质特性的影响,后续可针对厚度与怀山药品质的联系进行研究。

参考文献

[1] 任广跃. 怀山药干燥技术[M]. 北京科学出版社, 2017: 2-9.

[2] 陆学中, 刘亚男, 张德榜, 等. 高湿预处理对怀山药热风干燥特性及复水性的影响[J]. 食品与机械, 2017, 33(11): 147-151, 183.

[3] AKTAS M, SEVIK S, AKTEKELI B. Development of heat pump and infrared-convective dryer and performance analysis for stale bread drying[J]. Energy Conversion and Management, 2016, 113: 82-94.

[4] ZHENG Mei-yu, XIA Qi-le, LU Sheng-min. Study on drying methods and their influences on effective components of loquat flower tea[J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 63(1): 14-20.

[5] PAWAR S B, PRATAPE V M. Fundamentals of infrared heating and its application in drying of food materials; A review[J]. Journal of Food Process Engineering, 2017, 40(1): 1-15.

[6] CAO Zhen-zhen, ZHOU Lin-yan, BI Jin-feng, et al. Effect of different drying technologies on drying characteristics and quality of red pepper (*Capsicum frutescens* L.): A comparative study[J]. Journal of the Science of Food and Ag-

- riculture, 2016, 96(10): 3 596-3 603.
- [7] ZHOU Lin-yan, GUO Xiao-ning, BI Jin-feng, et al. Drying of garlic slices (*Allium Sativum* L.) and its effect on thiosulfates, total phenolic compounds and antioxidant activity during infrared drying[J]. Journal of Food Processing & Preservation, 2017, 41(1): 1-11.
- [8] 王相友, 魏忠彩, 孙传祝, 等. 胡萝卜切片红外辐射干燥水分迁移特性研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(12): 240-245.
- [9] LIU Yun-hong, ZHU Wen-xue, LUO Lei, et al. Drying characteristics and process optimization of vacuum far-infrared radiation drying on cornus officinalis[J]. Advanced Materials Research, 2012, 554/555/556: 1 459-1 465.
- [10] 徐晚秀, 李臻锋, 李静, 等. 微波干燥温度和物料厚度对铁棍山药片品质的影响[J]. 食品与机械, 2016, 32(11): 191-193, 236.
- [11] 盘喻颜, 段振华, 刘艳, 等. 火龙果片微波间歇干燥特性及其动力学研究[J]. 食品与机械, 2019, 35(3): 195-201.
- [12] 孙传祝, 石东岳, 王相友, 等. 单片物料厚度对胡萝卜红外薄层干燥水分迁移的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(13): 53-59.
- [13] 郭玲玲, 周林燕, 毕金峰, 等. 香菇中短波红外干燥工艺优化[J]. 食品科学, 2016, 37(6): 44-51.
- [14] 阮榕生. 核磁共振技术在食品和生物体系中的应用[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2009: 37-41.
- [15] CHENG Sha-sha, TANG Ying-qiang, ZHANG Tan, et al. An approach for monitoring the dynamic states of water in shrimp during drying process with LF-NMR and MRI[J]. Drying Technology, 2018, 36(7): 841-848.
- [16] 刘云宏, 李晓芳, 苗帅, 等. 南瓜片超声—远红外辐射干燥特性及微观结构[J]. 农业工程学报, 2016, 32(10): 277-286.
- [17] 王雪媛, 高琨, 陈芹芹, 等. 苹果片中短波红外干燥过程中水分扩散特性[J]. 农业工程学报, 2015, 31(12): 275-281.
- [18] ONWUDE D I, HASHIM N, ABDAN K, et al. Modelling the mid-infrared drying of sweet potato: Kinetics, mass and heat transfer parameters, and energy consumption [J]. Heat & Mass Transfer, 2018, 54(10): 2 917-2 933.
- [19] LI Lin-lin, ZHANG Min, BHANDARI B, et al. LF-NMR online detection of water dynamics in apple cubes during microwave vacuum drying[J]. Drying Technology, 2018, 36(16): 2 006-2 015.
- [20] 刘云宏, 孙畅莹, 曾雅. 直触式超声功率对梨片超声强化热风干燥水分迁移的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(19): 284-292.
- [21] LEWIS W K. The rate of drying of solid materials[J]. Journal of Industrial & Engineering Chemistry, 1921, 13(5): 427-432.
- [22] DHANUSHKODI S, WILSON V H, SUDHAKAR K. Mathematical modeling of drying behavior of cashew in a solar biomass hybrid dryer[J]. Resource-Efficient Technologies, 2017, 3(4): 359-364.
- [23] ZHU Yi, PAN Zhong-li. Processing and quality characteristics of apple slices under simultaneous infrared dry-blanching and dehydration with continuous heating [J]. Journal of Food Engineering, 2009, 90(4): 441-452.
- [24] SONG Yu-kun, ZANG Xiu, KAMAL T, et al. Real-time detection of water dynamics in Abalone (*Haliotis discus hannai* Ino) during drying and rehydration processes assessed by LF-NMR and MRI[J]. Drying Technology, 2018, 36(1): 72-83.
- [25] VILLALÓNLÓPEZ N, SERRANOCONTRERAS J I, TÉLLEZMEDINA D I, et al. An ¹H NMR-based metabolomic approach to compare the chemical profiling of retail samples of ground roasted and instant coffees[J]. Food Research International, 2018, 106: 263-270.
- [26] LV Wei-qiao, ZHANG Min, BHANDARI B, et al. Analysis about drying properties and vacuum impregnated qualities of Edamame (*Glycine Max* L. Merrill)[J]. Drying Technology, 2017, 35(9): 1 075-1 084.
- [27] LI Xia, XIE Xiao-lei, ZHANG Chun-hui, et al. Role of mid- and far- infrared for improving dehydration efficiency in beef Jerky drying[J]. Drying Technology, 2017, 36(3): 283-293.
- [28] CAO Xiao-huang, ZHANG Min, MUJUMDAR A S, et al. Measurement of water mobility and distribution in vacuum microwave-dried barley grass using low-field-NMR[J]. Drying Technology, 2018, 36(15): 1 892-1 899.
- [29] 金国森. 干燥设备[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [30] WANG Si-qi, LIN Zhu-yi, XIA Ke-xin, et al. Dynamics of water mobility and distribution in Sur clam (*Macrarchinensis*) during dehydration and rehydration processes assessed by low-field NMR and MRI[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2017, 11(3): 1 342-1 354.
- [31] 李国鹏, 谢焕雄, 王嘉麟, 等. 鸡腿菇热风干燥特性及数学模型研究[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(1): 67-73.
- [32] 张赛, 陈君若, 刘显茜. 水果在热风干燥中的水分扩散分形模型[J]. 农业工程学报, 2014, 30(4): 286-292.