

盘喻颜, 段振华, 钟静妮. 利用低场核磁共振技术分析月柿果片微波间歇干燥过程中的内部水分变化 [J]. 食品工业科技, 2021, 42(14): 33–39. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020110006

PAN Yuyan, DUAN Zhenhua, ZHONG Jingni. Analysis of Internal Moisture Changes of Persimmon Slices during Intermittent Microwave Drying Using Low-Field NMR [J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(14): 33–39. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020110006

· 研究与探讨 ·

利用低场核磁共振技术分析月柿果片微波间歇干燥过程中的内部水分变化

盘喻颜¹, 段振华^{1,2,*}, 钟静妮³

(1. 贺州学院食品与生物工程学院, 广西贺州 542899;
2. 广西果蔬保鲜和深加工研究人才小高地, 广西贺州 542899;
3. 佛山市顺德区佳誉检测技术有限公司, 广东佛山 528000)

摘要: 为探究广西月柿果片在微波间歇干燥过程中的水分变化规律和干燥效果, 应用低场核磁共振技术, 测定在不同的微波功率密度下果片干燥过程中的横向弛豫时间 T_2 反演谱, 进而分析其内部的水分赋存状态及迁移规律。结果表明: 新鲜月柿果片中主要存在三种状态的水, 即自由水、不易流动水、结合水; 月柿果片微波间歇干燥过程包括前期加速、中期恒速和后期降速阶段。当微波功率密度为 3.1、2.7、2.3 W/g 时, 随着微波功率密度的增大, 失水速度逐渐加快, 干燥至终点所需的时间分别为 210、240、300 min; 随干燥时间的延长, T_2 弛豫时间均向左迁移, 峰总面积减小。根据 MRI 图像可知柿子的失水方向是由表面向内部逐步进行, 最先消失的是最外侧的部分, 中心部位直到干燥后期才逐渐减少直至消失。

关键词: 月柿果片, 低场核磁共振, 水分分布, 微波间歇干燥

中图分类号: TS255 文献标识码: A 文章编号: 1002-0306(2021)14-0033-07

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2020110006

Analysis of Internal Moisture Changes of Persimmon Slices during Intermittent Microwave Drying Using Low-Field NMR

PAN Yuyan¹, DUAN Zhenhua^{1,2,*}, ZHONG Jingni³

(1. School of Food and Bioengineering, Hezhou University, Hezhou 542899, China;
2. Guangxi Talent Highland of Preservation and Deep Processing Research
in Fruit and Vegetables, Hezhou 542899, China;
3. Foshan Shunde Jiayu Testing Technology Co., Ltd., Foshan 528000, China)

Abstract: Magnetic analysis and nuclear magnetic resonance imaging were used to analyze the water migration rule of persimmon slices in the intermittent microwave drying process. The experimental results showed that: In the persimmon slices, there were mainly three types of water: free water, semi-combined water, the most closely bound water in persimmon slices. Persimmon slices intermittent microwave drying process showed the acceleration, constant speed and speed down the three stag. When the microwave power density was 3.1, 2.7, 2.3 W/g, as the microwave power density increased, the water loss rate gradually increased, and the time required for drying to the end point was 210, 240, 300 min. With the prolongation of drying time, the relaxation time of T_2 shifted to the left, and the total peak area continued to decrease. According to the MRI images, the water loss direction of persimmon was gradually from the surface to the interior, the most lateral part disappeared first, and the central part gradually decreased until the late drying stage.

收稿日期: 2020-11-03

基金项目: 广西科技基地和人才专项 (桂科 AD17195088); 贺州市创新驱动发展专项 (贺科创 PT1907006); 广西自然科学基金 (2020GXNSFAA 259012)。

作者简介: 盘喻颜 (1995-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 农产品加工, E-mail: 1192083916@qq.com。

* 通信作者: 段振华 (1965-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 现代食品加工新技术, E-mail: dzh65@126.com。

Key words: persimmon fruit slices; low field nuclear magnetic resonance(LF-NMR); water distribution; intermittent microwave drying

柿子隶属柿科柿属落叶乔木植物,不仅含有丰富蛋白质、葡萄糖、矿物质、氨基酸等基本营养物质,还含有甘露醇、单宁、V_C等活性成分,具有防治便秘、降压、润肠、清热解毒、治疗口疮等食用功效,被誉为“果中圣品”^[1]。我国作为柿子的原产地,不仅拥有多年的栽种历史,而且其面积和产量均领先其他国家。月柿是广西传统创汇的优势农产品资源,但采收期集中,易腐烂变质,在保存、保鲜方面存在一定的难度。目前的加工形式单一,主要是采用传统方法生产的柿饼^[2]。干燥作为食品加工重要手段之一,能够有效提高食品贮藏稳定性和食用方便性、丰富食品口味,因此,通过干燥将其制成干制品有利于延长柿子的贮藏时间^[3]。

目前柿子干燥加工是以柿饼为主,柿子干、柿子粉、柿子茶等也有少量生产。传统干燥制备柿饼存在干燥周期长、微生物含量高、产品品质参差不齐等不足之处,有学者设计了 5HD-35 型柿饼烘干机,虽然其更加适宜于柿饼的加工,但却缺少对人工干制柿饼成品的理化分析,无法判断其与自然干制柿饼之间的差异^[4-5]。采用热泵干燥制备柿饼,虽能提高干燥品质,但存在热泵干燥在中后期时,由于物料含水量下降,干燥速度变慢,会出现干燥周期长,能耗及劳动成本增加等问题,而且由于柿饼在加工制备需要手工揉捏,不仅费时费力而且还会污染产品,因此阻碍了柿饼产业规模化的发展^[6-7]。还有学者研究了真空冷冻干燥对柿品质及其玻璃化温度的影响,并对其营养品质进行了分析,结果表明冻干能较好地保持柿的营养品质,但是冷冻干燥制备柿子干成本高、能耗大,限制了其在柿子干燥上的应用^[8-9]。探求一种能够有效降低生产成本和能耗,提高干燥品质,缩短干燥周期的干燥工艺将是未来柿子干燥的发展方向。

微波干燥具有独特的内部加热模式,能有效省时节能、保质降本、环保易控^[10],因此被广泛应用于农产品加工保藏及食品工业生产中,包括罗非鱼^[11]、马蹄淀粉^[12]、山药^[13]等加工领域。但单纯使用微波技术进行干燥,易使局部温度过高,导致物料出现边缘焦糊和硬化等现象,为保证产品品质,防止局部过热则要研究微波干燥的新工艺。微波间歇干燥,在微波加热过程中通过暂停加热,均衡内部与表面的能量,减小内部温度梯度,改善水分分布情况,从而避免出现过热导致烧伤的现象,保证产品品质,节能降本^[14]。

物料水分含量与状态是影响物料干燥特的关键因素,物料中水分含量的高低以及其结合状态直接影响产品的外观、品质、组织结构和易腐烂程度,但是常规测定水分方法存在前处理步骤复杂、破坏样品的原有形态、测定时间长、测定结果不精准等问题,并且只能测定总体的水分含量,无法实时测定物料中

水分的变化,限制食品加工的进一步研究^[15]。而 LF-NMR 及其成像技术可以提供物料内部水分在空间和时间上的信息,显示水分的迁移状态,能够快速、直观地得到水分变化规律,因此近年来被广泛应用在监测物料干燥的过程中^[16]。

本试验以广西特色资源月柿为原料,运用低场核磁共振及其成像技术研究月柿果片在微波间歇干燥过程内部水分迁移过程,得到物料在干燥过程中的水分变化规律,为生产质量高、贮藏时间长、更为营养健康的月柿产品提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

广西月柿 贺州市泰兴超市。

G70D20CSP-D(S0)微波干燥设备 广东格兰仕微波炉电器制造有限公司; JJ1000 电子天平 常熟市双杰测试仪器厂; MA 150 水分测定仪 北京赛多利斯仪器系统有限公司; NMI20X 核磁共振成像分析仪 上海纽迈电子科技有限公司。

1.2 实验方法

取无破损、成熟度相对一致的月柿,经去皮后,将其切成厚度为 3 cm 的果片。均匀摆放在可微波的瓷盘中,置于微波干燥腔内,设装载量 1.7 kg/m²,间歇比为 6(干燥总时间/间歇时间=6),分别在微波功率密度 3.1、2.7、2.3 W/g 下进行干燥,测定干燥过程中月柿果片的初始含水量、干基含水率、干燥速率、横向弛豫时间 T₂,直至干基含水率≤20% 为止,为确保试验的可重复性和严谨性,在样品的形状和质量尽可能保持一致的情况下,做 3 组平行试验,且每组试验的样品重复测定 3 次。

1.3 指标测定

1.3.1 初始含水量测定 初始含水率采用水分测定仪进行测定。果片平均湿基含水率为 83.26%。

1.3.2 干基含水率 干基含水率的计算^[11]:

$$m(g/g) = \frac{m_t - m_0}{m_0}$$

式中: m 为干基含水率, g/g; m_t 为湿物料质量, g; m₀ 为绝干物料质量, g。

1.3.3 干燥速率 干燥速率的计算^[13]:

$$DR(g/g \cdot min) = \frac{\Delta m}{m_0 \times \Delta t}$$

式中: DR 为干燥速率, g/g·min; Δt 为两次相邻时间之差, min; m₀ 为绝干物料质量, g; Δm 为两次相邻质量之差, g。

1.3.4 T₂ 的采集及反演 当测量温度范围在 31.99~32.01 °C 时,收集样品并每隔 30 min 进行称重,置于核磁管中并放入磁体线圈中心,先用 FID 序列获得

样品的中心频率, 再用 Carr-Purcell-Meiboom-Gill (CPMG) 脉冲序列测样品中的横向弛豫时间 T_2 , 每份样品重复采集三次信号, 并将结果取平均值。 CPMG 序列参数设置为: 主频 SF1=18 MHz, 偏移频率 O1=418.33631 kHz, 采样频率 SW=100 kHz, 采样时间 DW=10.0 μ s, 重复采样等待时间 TW=6000 ms, 重复采样次数 NS=4, 回波个数 NECH=15000, 对所得图谱进行反演。

1.3.5 核磁共振成像试验及参数设定 每隔 30 min 用磁共振成像软件中的多层自旋回波(SE)序列来实现, 将 1 g 月柿果片放于永磁场中心位置的射频线圈的中心进行信号采集。成像参数设置为: 主频 SF1=18 MHz, 偏移频率 O1=418724.0 Hz, 采样频率 SW=20 kHz, 采样时间 DW=50 μ s, 90°脉冲宽度 P1=3200 μ s, 180°脉冲宽度 P2=3200 μ s, 90°脉冲幅度 RFA1=0.3%, 180°脉冲幅度 RFA2=0.4%。

为保证高精准性, 对实验数据进行标准化处理, 得到每单位质量样品(忽略干物质影响)对应的测试信号量^[17]。

横向弛豫时间 T_2 标准化处理可描述为^[18]:

$$T_2(\text{ms}) = \frac{T_x}{M}$$

式中: T_x 为软件反演后的横向弛豫时间, ms; T_2 为标准化处理后的横向弛豫时间, ms; M 为对应果片的质量, g。

峰面积 A_2 标准化处理可描述为^[18]:

$$A_2 = \frac{A_x}{M}$$

式中: A_x 为软件反演后的峰面积; A_2 为标准化处理后的峰面积; M 为对应果片的质量。

1.4 数据处理

利用 Excel 处理数据, 采用 Origin 2017 软件进行图形的绘制。

2 结果与分析

2.1 不同微波功率密度下月柿果片干燥的低场核磁共振检测结果

2.1.1 不同功率密度对月柿果片干燥特性的影响

由图 1 可知, 当设装载量 1.7 kg/m², 间歇比为 6, 分别在微波功率密度 3.1、2.7、2.3 W/g 下进行干燥, 对月柿片微波间歇干燥曲线的影响, 以干燥至干基含水率 $\leq 20\%$ 为终点。结果表明, 随着微波功率密度的增大, 月柿果片的干燥曲线变化越陡峭, 所需干燥时间越短, 微波功率密度为 3.1、2.7、2.3 W/g 时, 干燥时间分别为 210、240、300 min。是因为月柿果片中水分子吸收的微波随微波功率密度增大而增加, 从而加剧月柿果片内部振荡, 加快干燥速度, 减少所需的干燥时间。因此, 在一定的微波功率密度范围内, 适当地增大微波功率密度可以缩短干燥时间。

由图 2 可知, 月柿果片微波间歇干燥过程包括

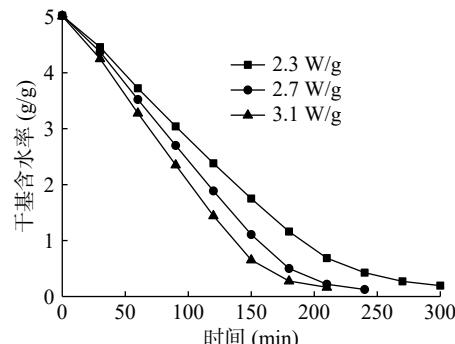


图 1 月柿果片在不同微波功率密度下的干燥曲线

Fig.1 Drying curves of persimmon slices under different microwave power density

前期加速、中期恒速和后期降速阶段。月柿果片的干燥速率曲线随微波功率密度的增加而变陡峭。干燥前期, 月柿果片含有大量水分, 能够吸收大量微波, 干燥速率呈上升趋势; 干燥中期, 月柿果片吸收的微波均用于蒸发内部的大部分水分, 干燥速率保持恒定状态; 干燥后期, 随着月柿果片内部水分子的减少, 吸收的微波也减少, 干燥速率呈下降趋势^[19]。

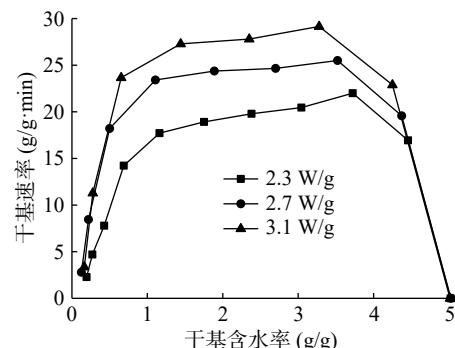
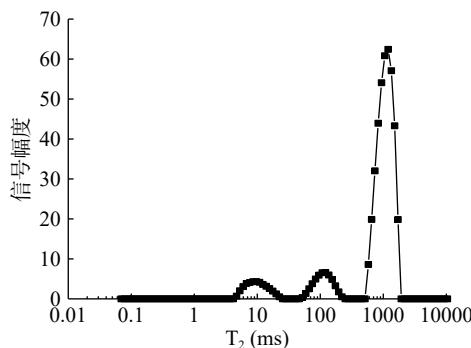


图 2 月柿果片在不同微波功率密度下的干燥速率曲线

Fig.2 Drying rate curves of persimmon slices under different microwave power density

2.1.2 新鲜月柿的 T_2 反演谱随弛豫时间的变化 采用核磁共振仪获取新鲜月柿的 T_2 反演图谱, 其中的弛豫时间 T_2 揭示了水分所处的状态和自由度, 峰面积反映了不同状态下水分含量的多少, 因此采用低场核磁共振技术可以研究月柿果片在微波间歇干燥过程中水分含量和状态的变化及分布和迁移情况。

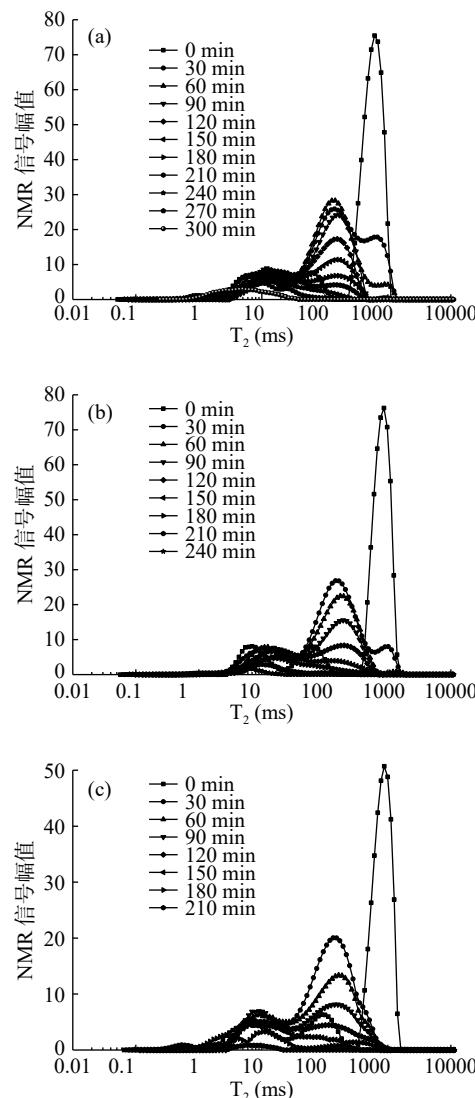
由图 3 可知, 新鲜月柿的 T_2 反演图谱有 3 个峰, 表明月柿果片内部存在 3 种状态的水分, 三种状态的水分在 T_2 反演图谱中所对应的弛豫时间 T_2 范围分别为结合水 T_{21} (4.69~22.45 ms)、不易流动水 T_{22} (52.15~221.13 ms)、自由水 T_{23} (579.33~1711.89 ms), 水分的弛豫时间越短, 其流动性越小, 反之则水分流动性越强^[20]; 三种状态水分的峰面积分别为 M_{21} 、 M_{22} 、 M_{23} , 峰比例分别为 S_{21} 、 S_{22} 、 S_{23} , 其中 A_{21} 为 63.14, A_{22} 为 72.37, A_{23} 为 408.53, S_{21} 为 11.61%、 S_{22} 为 13.30%、 S_{23} 为 75.09%, 表明月柿果片中含量最少的是结合水, 其次为不易流动水, 最多的为自由水。

图 3 新鲜月柿果片的 T_2 反演谱Fig.3 T_2 inversion spectrum of persimmon slices

2.1.3 低场核磁共振波谱的结果分析 如图 4 所示, 月柿果片在不同微波功率密度进行微波间歇干燥的 T_2 反演图谱均有 1~4 个峰, 按照驰豫时间 T_2 由短到长分别是结合水、不易流动水、自由水^[18]。随着干燥时间的延长, 整个 T_2 反演谱呈现出所有峰逐渐向左移动, 峰总面积减少, 峰融合以及峰个数增多的现象, 表明果片在微波间歇过程中高自由度的水分向低自由度的水分迁移, 其中物料内自由水的自由度大, 干燥初期就被脱除, 所以 A_{23} 持续下降, 而 A_{21} 和 A_{22} 是先上升后下降, 原因是干燥初期存在温度梯度, 使自由度较高、不稳定的水向自由度较低、相对稳定状态的水移动, 所以结合水、不易流动水含量增加; 峰融合和峰个数增多是因为微波间歇干燥存在一个间歇时间, 果片内部温度梯度在间歇时间内会减小, 水分会重新分布, 由此说明不同状态水之间并非一成不变, 而是动态的连续变化过程, 它们之间存在着相互渗透与转化 3 种状态的水分会相互转化, 所以反演谱图中出现峰融合和峰个数增多的情况^[21]。随着微波功率密度的增大, 峰总面积越小, A_{21} 和 A_{22} 增加的越少, 因为微波功率密度越大, 失水越快, 物料中水分含量越少, 能够转化为结合水和不易流动水就越少, 所以峰总面积逐渐下降, A_{21} 和 A_{22} 增加的越少。由此可见, 微波功率密度、干燥时间对月柿果片水分的迁移均有影响, 较大的微波功率密度能加快果片的失水速度, 有效缩短干燥时间, 但连续使用较大的功率微波密度进行加热会导致局部过热出现焦糊现象, 所以选择合适的间歇比和功率密度能够保证产品质量和缩短干燥时间。

2.1.4 不同功率密度对月柿果片干燥过程中水分状态随干燥时间的变化 月柿果片微波间歇干燥过程存在三种状态的水分, 分别是结合水、不可移动水、自由水, 可以通过峰面积 M_{21} 、 M_{22} 、 M_{23} , 峰比例 S_{21} 、 S_{22} 、 S_{23} 从一定程度上解释不同状态水分间的相互转化^[22]。

2.1.4.1 微波功率密度对月柿果片内自由水迁移变化的影响 自由水是具有较高自由度、易流动的水分, 因此在干燥过程中最先被脱除^[17]。如图 5 所示, 随着干燥时间的延长, 峰面积 M_{21} 和峰比例 S_{21} 均

图 4 不同微波功率密度下 T_2 反演谱随干燥时间的变化Fig.4 Variation of T_2 inversion spectrum with drying time under different microwave power density

注: (a)2.3 W/g, (b) 2.7 W/g, (c)3.1 W/g。

呈下降趋势, 表明自由水在不断减少, 一部分自由水通过微波间歇干燥被去除, 一部分自由水转化为了其他状态的水分。随着功率密度的增大, 自由水失水速度逐渐增大, 干燥时间逐渐减少, 自由水的峰面积和峰比例下降, 但并不是微波功率密度越大就越好, 因为微波功率密度过大时会使物料焦糊, 影响品质, 所以选择合适的微波功率密度对保证产品品质是非常重要的。

2.1.4.2 微波功率密度对月柿果片内不易流动水迁移变化的影响 不易流动水处于细胞内与生物大分子相结合的较难移动的水, 限制了其自由度, 从而不易流动水远小于自由水的弛豫时间。图 6 可见, 随着干燥时间的延长, 不易流动水的峰面积 A_{22} 和峰比例 S_{22} 均呈先上升后下降的趋势, 这是因为月柿果片在干燥初期时因为自由水的大量流失, 增大了内部碳水化合物的浓度, 在细胞内外产生较大的浓度差, 促使部分自由水转化不易流动水, 引起峰面积 A_{22} 和峰

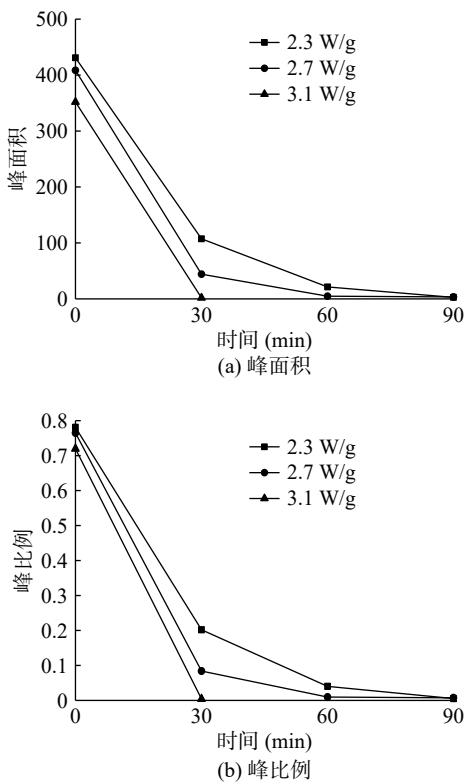


图 5 微波功率密度对自由水峰面积和峰比例的影响曲线

Fig.5 Influence curve of microwave power density value on changes in the peak area and peak ratio of free water

比例 S_{22} 增大^[22]; 干燥中后期, 不易流动水峰面积慢慢下降, 可能是因为部分不易流动水通过干燥被逐渐除去, 部分与细胞壁中具有亲水基团结构相接触, 促使不易流动水向结合水迁移。随着微波功率密度的增大, 峰面积 A_{22} 增加的越小, 原因是自由水流失速度越快, 能够转化为不易流动水就越少, 所需的干燥时间越来越短。

2.1.4.3 微波功率密度对月柿果片内结合水迁移变化的影响 结合水是与物料结合最紧密的水, 自由度极低, 干燥过程中一般难以脱除^[23]。由图 7 可知, 峰面积 A_{21} 的值呈现先上升后下降的趋势, 峰面积 A_{21} 之所以上升是因为在干燥初期, 自由水和不易流动水被先脱出, 一部分不易流动水转化为结合程度最紧密的结合水所引起的; 随着干燥时间的延长, 大量的自由水和不易流动水基本被脱去, 不再发生转化, 随着干燥的进行结合水峰面积 A_{21} 开始下降。但干燥终点的 A_{21} 与最初的 A_{21} 值基本一致。由图 7 可知, 峰比例 S_{21} 呈现不断上升的趋势, 表明结合水特别稳定, 不易被脱除, 因此在果片微波间歇干燥过程中结合水几乎不会对干燥效果产生影响^[24]。

2.2 不同微波功率密度对月柿果片干燥过程中核磁共振成像的影响 核磁共振成像(MRI)作为现代检测技术的重要组成部分, 具有高效率、高精准、无损伤等优点, 它可以通过图像的清晰度和亮度直接反映物料水分含量及分布情况。MRI 图像轮廓清晰分明、亮度高, 表明物料水分含量高; 图像模糊、亮度

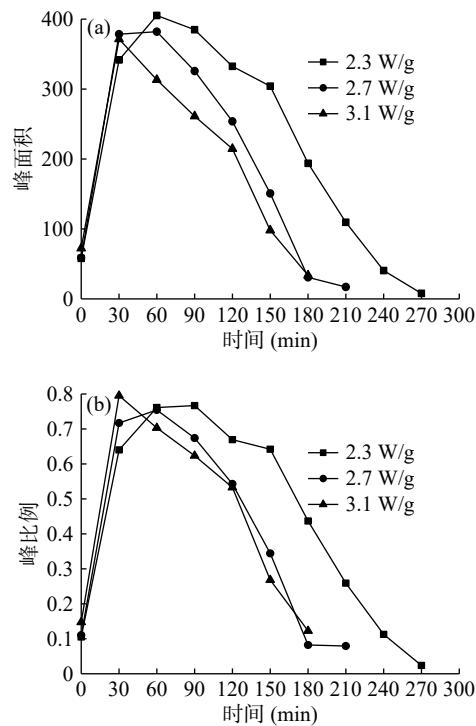


图 6 微波功率密度对不易流动水峰面积和峰比例的影响曲线

Fig.6 Influence curve of microwave power density value on changes in the peak area and peak ratio of semi-combined water

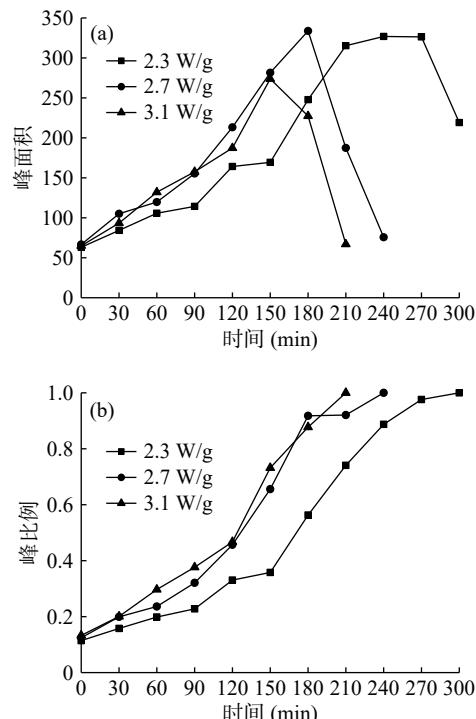


图 7 微波功率密度对结合水峰面积和峰比例的影响曲线

Fig.7 Effect of microwave power density value on changes in the peak area and peak ratio of bound water

低, 表明物料水分含量低。

如图 8~图 10 所示, 随着月柿果片微波间歇干燥时间的延长, MRI 图像的外侧轮廓逐渐变得模糊, 总体体积开始收缩, 亮度逐渐减弱, 直至干燥后期, 因水

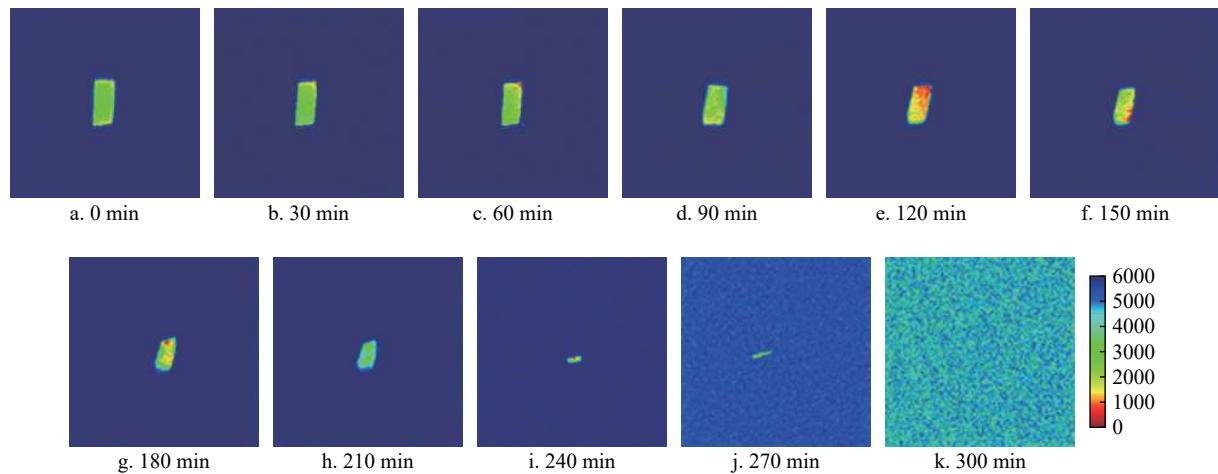


图 8 2.3 W/g 时条件下月柿果片随干燥时间变化的氢质子成像图

Fig.8 Hydrogen proton imaging with the change of drying time under the condition of microwave power density of 2.3 W/g

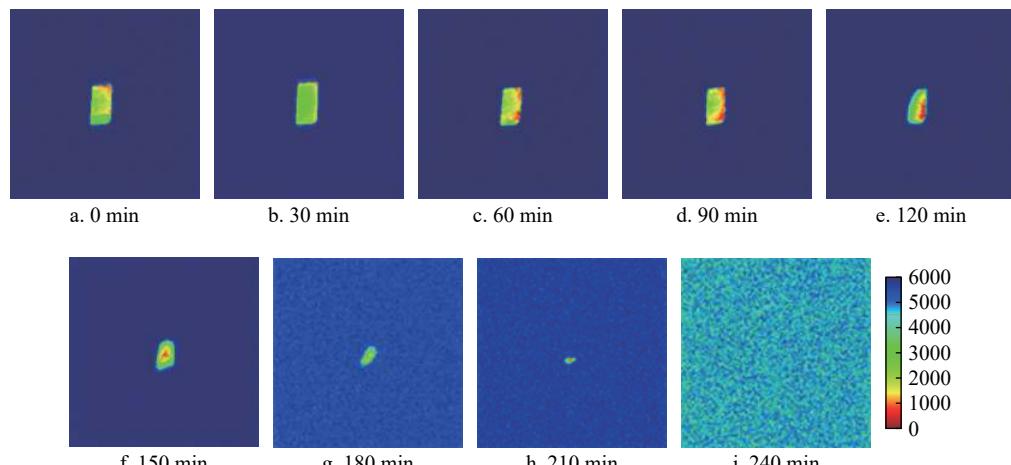


图 9 2.7 W/g 时条件下月柿果片随干燥时间变化的氢质子成像图

Fig.9 Hydrogen proton imaging with the change of drying time under the condition of microwave power density of 2.7 W/g

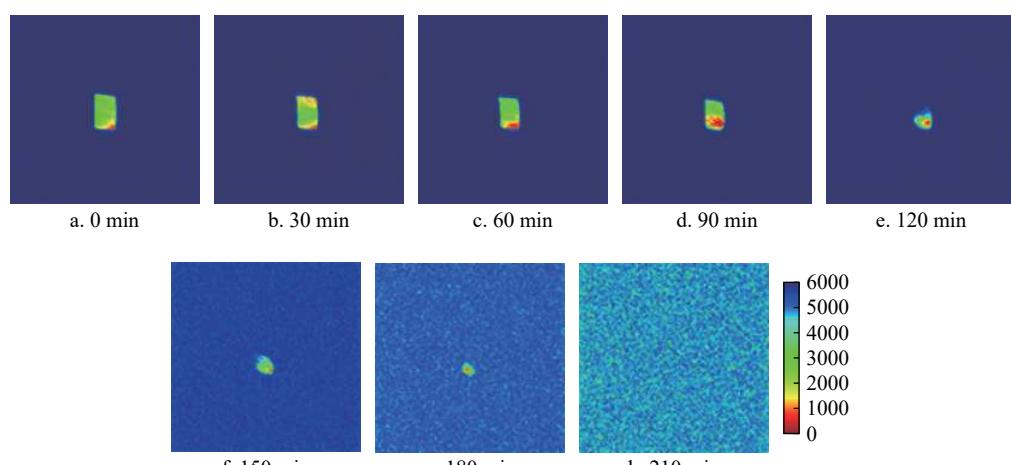


图 10 3.1 W/g 时条件下月柿果片随干燥时间变化的氢质子成像图

Fig.10 Hydrogen proton imaging with the change of drying time under the condition of microwave power density of 3.1 W/g

分过低无法获取 MRI 图像^[25]。表明月柿果片随着微波间歇干燥时间的延长,水分含量逐渐降低,水分流失的方向是从外到内的,外侧最先失水,内部最后失水;通过比较 3 种微波功率密度下月柿果片的 MRI 图像可以看出,随着微波功率密度的增大,水分

流失的速度越来越快,亮度下降越明显,能够获取图像的时间越短。

3 结论

本文研究利用低场核磁共振及其成像技术研究广西特色优势农产品资源月柿微波间歇干燥过程中

的水分状态及其分布情况。利用 CPMG 脉冲序列获得样品的 T_2 反演图谱及其相应数据, 分析了不同微波功率密度条件下不同状态水所占比例和横向弛豫时间。主要结论如下: 新鲜的月柿果片含有自由水、不易流动水、结合水三种状态的水分; 月柿果片微波间歇干燥过程包括前期加速、中期恒速和后期降速阶段。随着微波功率密度的增大和干燥时间的延长, 失水速度逐渐加快, T_2 弛豫时间均向左迁移, 峰总面积减小, 高自由度的水分向低自由度的水分迁移, 其中物料内自由水的自由度大, 干燥初期就被脱除, 最终只剩下较难脱去的结合水。通过成像技术分析可知, 随着干燥的进行, 月柿果片的水分被不断脱去, H 质子由外向内逐渐消失, 水分逐渐向内层聚集, 水分是由外到内逐渐失去的, 内部最后失水; 干燥后期, 水分集中于月柿果片的内层, 由于水分含量过低, NMR 成像模糊, 基本接近背景色。

参考文献

- [1] 柿子的食用功效 [J]. 现代食品, 2016(17): 112.
- [2] 秦富, 邓全道, 李湧, 等. 液相色谱-串联质谱法测定月柿中 187 种农药残留 [J]. 分析测试学报, 2018, 37(8): 879–886.
- [3] 刘宗博, 张钟元, 李大婧, 等. 双孢菇远红外干燥过程中内部水分的变化规律 [J]. 食品科学, 2016, 37(9): 82–86.
- [4] 陈华. 5HD-35 型柿饼烘干机及其工艺研究 [J]. 福建农机, 2016(4): 23–26.
- [5] 施宝珠, 段旭昌, 吴烨婷, 等. 柿饼干制过程中理化性质的变化规律研究 [J]. 现代食品科技, 2017, 33(9): 224–230, 62.
- [6] 尤中尧. 促进柿饼出口的工艺对策 [J]. 食品科学, 2000(6): 64–65, 5.
- [7] 赵宗彬, 朱斌祥, 李金荣, 等. 空气源热泵干燥技术的研究现状与发展展望 [J]. 流体机械, 2015(6): 76–81.
- [8] 瞿文俊, 安娜, 张昕. 柿子冻干保鲜技术及冻干粉的化学成分研究 [J]. 食品科技, 2006, 31(1): 39–42.
- [9] 刘滔, 朱维, 李春美. 我国柿子加工产业的现状与对策 [J]. 食品工业科技, 2016, 37(24): 369–375.
- [10] 段振华, 汪菊兰. 微波干燥技术在食品工业中的应用研究 [J]. 食品研究与开发, 2007, 28(1): 155–158.
- [11] 胡冰洋, 段振华, 刘艳. 微波条件对罗非鱼片渗透-微波联合干燥的影响 [J]. 食品科技, 2016(4): 97–104.
- [12] 唐小闲, 段振华, 刘艳, 等. 马蹄湿淀粉微波间歇干燥特性及其动力学研究 [J]. 食品研究与开发, 2017, 38(5): 15–21.
- [13] 李定金, 段振华, 刘艳, 等. 调味山药片真空微波干燥特性及其动力学模型 [J]. 食品科技, 2018(3): 86–92.
- [14] 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.
- [15] 藏秀. 低场核磁共振及成像技术监测海参干制过程中的品质变化 [D]. 大连: 大连工业大学, 2017.
- [16] Hansen C L, Thybo A K, Bertram H C, et al. Determination of dry matter content in potato tubers by lowfield nuclear magnetic resonance (LF-NMR) [J]. J Agric Food Chem, 2014, 58(19): 10300–10304.
- [17] 魏硕, 王德勋, 苏家恩, 等. 低场核磁共振法测定烘烤过程中烤烟主脉的水分 [J]. 烟草科技, 2016, 49(10): 31–35.
- [18] 王相友, 魏忠彩, 孙传祀, 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.
- [19] 周旺, 程裕东, 张云蓉. 辣椒粉的微波干燥特性研究 [J]. 食品科学, 2009, 30(19): 65–69.
- [20] Ying X, Min Z, Benu A. Effect of trehalose and ultrasound-assisted osmotic dehydration on the state of water and glass transition temperature of broccoli (*Brassica oleracea* L. var. *botrytis* L.) [J]. Journal of Food Engineering, 2013, 119(3): 640–647.
- [21] 薛广, 李敏, 关志强, 等. 基于低场核磁共振的罗非鱼片微波真空干燥过程水分变化规律 [J]. 广东海洋大学学报, 2020, 40(6): 123–129.
- [22] Einhorn-Stoll U, Hatakeyama H, Hatakeyama H. Influence of pectin modification on water binding properties [J]. Food Hydrocolloids, 2012, 27(2): 494–502.
- [23] Wang Y, Zhang M, Mujumdar A S, et al. Experimental investigation and mechanism analysis on microwave freeze drying of stem lettuce cubes in a circular conduit [J]. Drying Technology, 2012, 30(11–12): 1377–1386.
- [24] 李定金, 段振华, 刘艳, 等. 利用低场核磁共振技术研究调味山药片真空微波干燥过程中水分的变化规律 [J]. 食品科学, 2019, 40(5): 116–123.
- [25] Kamal T, Zhang T, Song Y, et al. Water dynamics and physicochemical analysis of two different varieties of apple Jam (Fuji) and (Yinduqing) by LF-NMR and MRI [J]. International Journal of Food Engineering, 2018, 14(3): 225.