基于 LF-NMR 的香芋微波真空干燥中水分扩散特性研究

程新峰[1,2]，周守标[2]，杭华[1,2]，肖子群[2]
（1.安徽师范大学功能性食品研究所，安徽芜湖 241002）
（2.安徽师范大学环境科学与工程学院，安徽芜湖 241002）

摘要：为了研究香芋片微波真空干燥过程中水分扩散特性，采用微波真空干燥箱在 1.5、2.0 和 2.5 W/g 3 个微波强度下对香芋片进行了干燥试验，利用低场核磁共振技术测定了香芋片微波真空干燥过程中水分迁移及分布情况。结果表明，香芋片微波真空干燥过程主要为降速阶段，3 种微波强度下平均干燥速率为 0.149、0.185 和 0.224 g/(g·min)；有效水分扩散系数为 7.30×10^{-9}、9.46×10^{-9}、1.14×10^{-8} m^2/s。NMR T_2 谱显示，香芋中存在结合水、不易流动水和自由水 3 种状态，其横向弛豫时间分别为 T_{21}(2.31~9.32 ms)，T_{22}(10.72~49.77 ms)和 T_{23}(57.22~705.48 ms)。干燥过程中，MVD 香芋内自由水含量显著降低（$p<0.05$），不易流动水所占比例呈现先增加后下降的趋势，结合水含量变化不显著（$p>0.05$），所占比例逐步上升。MRI 检测表明，MVD 香芋内外同时失水，且微波强度越高，弛豫信号消失的越快。该研究揭示了微波真空干燥中香芋内水分扩散规律，即微波强度越高，样品内水分扩散速率及不同组分水分之间的转化越迅速。该研究为香芋的微波真空干燥产业化生产提供理论依据。

关键词：微波真空干燥；有效水分扩散系数；低场核磁共振；香芋
文章篇号：1673-9078(2019)02-17-23 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2019.2.003

Study on Water Diffusion Characteristics of Taro Slices during Microwave Vacuum Drying Based on LF-NMR

CHENG Xin-feng[1,2], ZHOU Shou-biao[2], HANG Hua[1,2], XIAO Zi-qun[2]
(1.Institute of Functional Food, Anhui Normal University, Wuhu 241002, China)
(2.College of Environmental Science and Engineering, Anhui Normal University, Wuhu 241002, China)

Abstract: Low field-nuclear magnetic resonance (LF-NMR) was employed in this work to evaluate water mobility and distribution in taro samples during the processing of microwave vacuum drying (MVD) under different microwave intensities of 1.5, 2.0 and 2.5 W/g. Results showed that there was no constant drying rate period, and the entire microwave vacuum drying process occurred in the falling rate period. The average drying rates under microwave intensities of 1.5, 2.0 and 2.5 W/g were 0.149, 0.185 and 0.224 g/(g·min), respectively. The effective moisture diffusivity (D_{eff}) values for MVD taro slices at different microwave intensities were 7.30×10^{-9}、9.46×10^{-9}、1.14×10^{-8} m^2/s, respectively. Among the transverse relaxation time (T_2), T_{21} (2.31~9.32 ms), T_{22} (10.72~49.77 ms) and T_{23} (57.22~705.48 ms) were corresponding to bound water, immobilized water and free water in fresh taro samples, respectively. The dramatically decreased content of free water for MVD taro was accompanied ($p<0.05$) by the increase in the proportion of bound water, although the content of bound water did not changed significantly ($p>0.05$). The proportion of immobilized water in taro samples increased, and then decreased with the drying time. The MRI results directly showed that the water-desorbing rate of outer layer in taro is equivalent to inner layer during microwave vacuum drying processing. The higher the microwave intensity, the faster relaxation signals disappear. This work obtaineded the laws of moisture diffusion in taro samples during microwave vacuum drying processing that the water diffusion and the conversion between the different components of moisture in MVD taro samples increased by the microwave intensity . It can provide a theoretical basis for industrial production of taro.

Key words: Microwave vacuum drying; effective moisture diffusivity; Low field-nuclear magnetic resonance (LF-NMR); taro

收稿日期：2018-10-13
基金项目：国家自然科学基金资助项目(31701663)；安徽省自然科学基金资助项目(1608085QC55)；安徽师范大学博士科研启动基金项目（2014bsqdjj52)；国家级大学生创新基金训练项目（2017103370164）
作者简介：程新峰(1981-)，男，博士，副教授，研究方向：食品资源综合利用与开发

香芋(*Colocasia esculenta* L. Schott)，又名地栗子、黄栗芋，属天南星科，是一种多年生草本植物的地下球茎[1]。香芋口感细腻，香甜可口，营养价值高，富含 Vc、Vb_1等多种维生素和矿物质。此外，香芋还含有一些功能性成分，具有一定的药用价值，如香芋淀粉易消化，血糖指数适中，适合糖尿病患者使用；香芋多糖能清除体内自由基，增强人体免疫力功能，长期食用能解毒、滋补身体[2]。我国香芋资源丰富，品种众多，目前主要以鲜食为主，精深加工水平低，其开发程度远不及土豆、山药等农产品。因此，针对香芋的品质特点，开发新型休闲食品，有助于提高香芋的综合利用水平，促进香芋相关产业的发展。

水分是食品的重要组成部分，它的含量、分布和存在状态对食品的营养品质、感官特性及贮藏稳定性均会产生影响。因此，对干燥过程中食品内水分扩散特性进行研究具有重要意义。低场核磁共振（low field nuclear magnetic resonance，LF-NMR）是一种快速的、无损的、无侵入的检测手段，它能从微观层面上通过分析质子弛豫行为来反映物料内水分状态及分布的变化情况[3~5]。目前该技术已成功应用于研究苹果[6]、胡萝卜[3,7]、冬瓜[5]等干燥过程，面团的冷冻过程[8]，西兰花[9]、苹果[10]的渗透脱水过程，鸡肉[11]的反复冻融过程，香菇[12]的复水过程中的水分变化，但将 LF-NMR 用于微波真空干燥香芋内水分的变化规律研究还鲜有报道。

微波真空干燥（Microwave vacuum drying，MVD）是将微波加热和真空干燥相结合的一种新型干燥技术。与传统干燥方式相比，MVD 不仅大大提高干燥效率，降低能耗，而且对产品营养成分保持和感官特性改善也有较好的效果[13,14]。目前，国内外学者针对不同物料已开展了广泛的研究，包括微波真空干燥工艺优化[15,16]及干燥特性[13,17~20]研究。物料内水分状态及含量变化对干燥工艺的优化和产品形成至关重要。基于现有干燥设备的特点，对干燥物料内部水分进行在线监测仍然是个难题，因此，研究干燥过程中物料内水分分布及状态变化将为实际的生产提供更多的理论依据。本论文将以香芋为实验对象，采用 LF-NMR 和 MRI 比较分析不同微波强度下，香芋内水分状态及分布的变化，从而揭示微波真空干燥过程香芋片水分扩散的规律，为高品质香芋脆片的开发提供了理论指导和技术支持。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

实验所用香芋（*Colocasia esculenta* L. Schoot）为槟榔芋，购于安徽芜湖欧尚超市，其外形呈圆柱状，长 30~40 cm，直径 12~15 cm，每个重量 1.5~2.5 kg。

1.2 仪器与设备

ORW08S-5Z 微波真空干燥箱，南京澳润微波科技有限公司；NMI20 核磁共振分析仪，上海纽迈电子科技有限公司；BPG-9070A 鼓风干燥箱，上海恒一科学仪器有限公司；JT3101N 型天平，上海精密实验设备有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 样品制备与处理

挑选新鲜的、无机械损伤的香芋球茎，洗净表面泥土后去皮，然后切成厚度为 6 mm，直径为 2.5 cm 的圆柱状待用。称取 100 g 左右的香芋切片，单层平铺放入微波真空干燥箱内。实验过程干燥设备的真空度为-90 kPa，微波强度为 1.5、2.0 和 2.5 W/g，期间每隔 2.5 min 测定样品的质量变化，直至干基水分含量低于 0.1 g/g（*db*）后停止实验，每组实验重复 3 次，取其均值。

1.3.2 水分含量测定

参照 GB/T5009.3-2010《食品中水分的测定》，直接测定香芋含水量。干燥箱温度设定为 105 ℃，称取一定质量的香芋，放入鼓风干燥箱内除湿干燥，待其质量保持恒定时停止干燥。以 M 表示干基含水量，每个实验重复 3 次取平均值，按照式（1）计算：

$$M=\frac{m-m_d}{m_d} \tag{1}$$

式中：M 为物料的干基含水率/（g/g）；m 为物料的质量/g；m_d 为物料绝干时的质量/g。

1.3.3 干燥速率计算

干燥速率按照式（2）计算：

$$\varphi=\frac{M_{t+\Delta t}-M_t}{\Delta t} \tag{2}$$

式中：φ 为物料的干燥速率/（g/(g·min)）；$M_{t+\Delta t}$ 为物料在 $t+\Delta t$ 时刻的干基含水率/（g/g）；M_t 为物料在 t 时刻的干基含水率/（g/g）；Δt 为干燥时间间隔/min。

1.3.4 有效水分扩散系数计算

水分比（MR）表示一定干燥条件下物料的剩余水分所占比例，按照式（3）计算[13]：

$$MR=\frac{M_t-M_e}{M_0-M_e} \tag{3}$$

式中：MR 为 t 时刻物料的水分比；M_t 为物料在 t 时刻的干基含水量/（g/g）；M_0 为物料的初始干基含水量/（g/g）；M_e

为物料的平衡干基含水量/（g/g）。

采用 Fick 扩散定律计算物料干燥过程有效水分扩散系数[19]，按照式（4）计算：

$$MR=\frac{8}{\pi^2}\exp(-\frac{\pi^2\cdot D_{eff}}{L^2}\cdot t) \quad (4)$$

式中：t 为时间/s；D_{eff} 为有效水分扩散系数/（m^2/s）；L 为物料的厚度/m。

1.3.5 横向弛豫时间(T_2)的测定

采用 NMI20 核磁共振仪自带分析软件中的 CPMG（Carr-Purcell-Meiboom-Gill）脉冲序列测定物料中的横向弛豫时间 T_2。将精确称量的样品置于永久磁场中心位置的射频线圈中心进行信号采集，然后对信号进行反演获得 T_2 的反演谱。CPMG 序列采用的参数如下：磁体温度为 32 ℃，主频 23.2 MHz，90°脉冲时间 P_1=18 μs，180°脉冲时间 P_2=36 μs，采样点数 TD=56873，谱宽 SW=100 kHz，采样重复时间 TW=6000 ms，扫描次数 NS=4 次，回波数 Echo Count=12000。

1.3.6 质子密度成像的测定

采用核磁共振成像系统自旋回波成像序列对样品进行质子密度成像。将样品放入线圈中央，选取不同层面进行 MRI 成像实验。主要参数为：重复时间 TW=2000 ms，重复次数 NS=8 次，根据 CPMG 序列测得的 T_2 值，选择自旋回波时间 20 ms，图像大小 128×128。

1.3.7 统计分析

采用 Origin 8.5 软件绘制图表，结果以 $\bar{x}\pm sd$ 表示。采用 PASW Statistics 18.0 软件中 ANOVA 程序进行方差分析，均值间显著性差异采用 Duncan 程序计算，当 $p<0.05$ 时表示均值间具有显著性差异。

2 结果与讨论

2.1 微波强度对香芋片干燥特性的影响

随着干燥时间的延长，香芋片干基含水量逐渐降低，且微波强度越大，水分散失越快，干燥曲线越陡。如图 1 所示，在 1.5、2.0 和 2.5 W/g 3 个微波强度下，香芋片干基含水量由4.59 g/g降低到0.10 g/g以下所需时间分别为 30、25 和 20 min。Kumar 等[21]对预熟化香芋的水分扩散特性进行研究也得到了类似的结论。作者发现，在 360、540 和 720 W 3 个微波功率下，样品干基含水量由 3.37 g/g 下降至 0.10 g/g 左右，所需时间分别为 23、15 和 12 min。微波强度对香芋干燥速率也有显著影响。如图 2 所示，相同干基含水量时，微波强度越大，香芋失水速率越快。经计算，3 个微波强度下，香芋片干燥过程的平均干燥速率分别为 0.149、0.185 和 0.224 g/(g·min)。微波强度越大，单位质量的物料吸收、转化微波能越多，更易在物料表面与内部形成蒸汽压差，促使水分能快速达到其沸点。整个干燥过程中，除干燥前期出现短暂的升速阶段之外，物料以降速干燥阶段为主，无明显的恒速干燥阶段。这是因为干燥初期，物料水分含量高，具有较强的微波吸收能力，致使水分能快速向外迁移。随着干燥的进行，物料水分含量降低，微波吸收能力下降，同时，物料内结构变化和淀粉凝胶化也会抑制水分的扩散[21]。

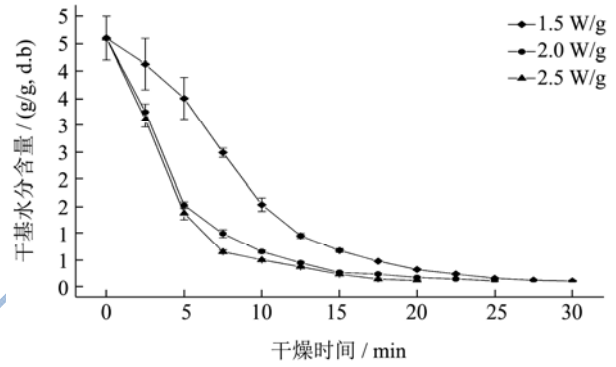


图 1 不同微波强度下的香芋片干燥曲线

Fig.1 Drying curves of taro at different microwave intensities

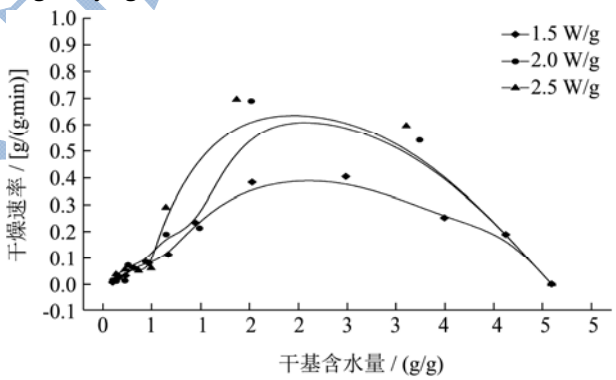


图 2 不同微波强度下的香芋片干燥速率曲线

Fig.2 Curves of drying rates of taro at different microwave intensities

有效水分扩散系数（effective moisture diffusivity，D_{eff}）反映了物料内水分的迁移及扩散特性，对于干燥工艺的优化具有重要的意义。有效水分扩散系数的大小不仅与物料组分、水分含量、微观结构等有关，更取决于外部的干燥条件[22]。依据 Fick 定律，通过线性回归分析计算出 3 个微波强度下香芋片的有效水分扩散系数分别为 7.30×10^{-9}、9.46×10^{-9}、1.14×10^{-8} m^2/s，这与 MVD 马齿苋有效水分扩散系数变化规律一致[23]。Demirhan 等[23]发现，当微波功率从 180 W 增加到 900 W 时，马齿苋的有效水分扩散系数由 5.913×10^{-11} m^2/s 上升到 1.8723×10^{-10} m^2/s。Kumar 等[21]

比较研究了不同预熟化香芋片微波干燥过程中有效水分扩散系数变化，发现在 360~720 W 微波功率下，水煮香芋、蒸汽熟化香芋以及柠檬酸浸泡香芋的有效水分扩散系数变化范围分别为 8.39×10^{-9}~1.619×10^{-8}、1.029×10^{-8}~2.039×10^{-8}、1.239×10^{-8}~2.119×10^{-8} m^2/s。

2.2 微波真空干燥香芋片的 NMR T2 图谱分析

LF-NMR 是一种无损检测手段，可用于食品内水分状态及分布情况的检测。由图 3 可知，反演后的香芋片 NMR T_2 谱有 3 个峰，它们代表 3 种不同状态的水分，即 T_{21}（2.31~9.32 ms）代表与物料内其它分子结合紧密的结合水，T_{22}（10.72~49.77 ms）为自由度介于自由水和结合水之间，容易发生转化的不易流动水，T_{23}（57.22~705.48 ms）为流动性较好的自由水[5]。研究表明[9,24]，存在于细胞质中与高浓度细胞溶质、酶以及细胞骨架结合的那部分水，流动性较差，弛豫时间短；相反，存在于液泡或细胞间隙中的那部分水，则具有较好的流动性和较长的弛豫时间，其质子的化学交换介于水和糖类或其它低分子量化合物构成的稀溶液之间。不同物料由于化学组成、处理方式等存在差异，所测得 NMR T_2 谱也不尽相同。Xu 等[25]发现西兰花茎中存在 3 种组分的水群，分别代表与细胞壁中多糖结合的水、细胞质中与大分子（如蛋白质、碳水化合物等）结合的水、存在于液泡和木质素间隙的水，它们对应的 T_2 值为 T_{21} (4.99±1.08 ms)、T_{22} (54.89±11.80 ms)、T_{23} (400.80±68.75 ms)。郭婷等[26]测得甘薯的 T_2 反演谱有 4 个波峰，T_2 的范围为 T_{21} (0.25~0.55 ms)、T_{22} (1~2.5 ms)、T_{23} (5~12 ms)、T_{24} (40~200 ms)，分别对应的水分为紧密结合水、与淀粉相结合的结合水、不易流动水、自由水。

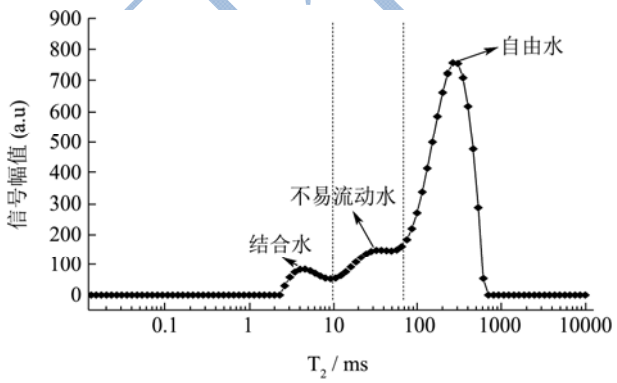


图 3 新鲜香芋横向弛豫时间（T_2）分布图

Fig.3 Transverse relaxation spectrum of fresh taro sample

由图 4 可知，在整个干燥过程中，随干燥时间的延长，香芋片 T_2 弛豫时间和信号幅值呈现下降趋势，这与微波真空过程中苹果块内质子 T_2 弛豫信息的变化趋势相一致[27]。物料内质子弛豫时间（T_2）的大小与含水量密切相关，且水分子与其它组分之间的相互作用也是引起质子弛豫行为变化的重要因素。干燥初始阶段，物料内自由水含量高，由于它们流动性好，且不受大分子物质束缚，因此表现出较长 T_2 弛豫时间；干燥一段时间后，物料内自由水含量明显降低，同时干燥造成物料内部结构发生变化，释放出碳水化合物等成分，降低了水的流动性，致使弛豫时间缩短，T_2 反演谱图向左侧偏移；干燥后期，物料内主要以结合水为主，它们通过氢键与蛋白质、多糖等大分子物质紧密结合，表现出较短的弛豫时间。因此，T_2 弛豫时间的变化可以间接地反映出微波真空干燥过程中物料内水分子的状态以及组织结构变化。

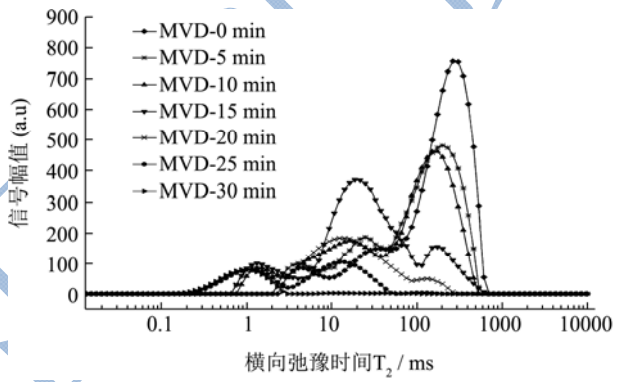


图 4 在 1.5 W/g 下微波真空干燥过程香芋内水分状态的变化

Fig.4 The status of water in taro during microwave vacuum drying at microwave intensity of 1.5 W/g

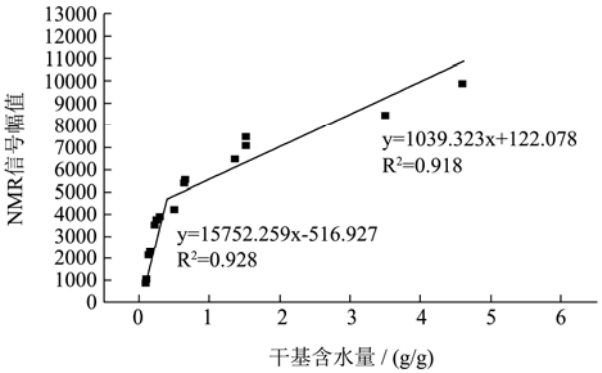


图 5 NMR 总信号幅值和干基含水率（*db*）的拟合曲线

Fig.5 Calibration curve between NMR signal amplitude and moisture content (*db*)

图 5 为香芋片干基含水量与 NMR 总信号幅值的拟合曲线，其中横坐标上的数据点为微波真空干燥过程物料的干基含水量（*db*），纵坐标数据点为对应时刻的 NMR 总信号幅值。从图 5 可以看出，NMR 总信号幅值与干基含水量呈现明显线性关系($p<0.05$)，但在干基含水量为 0.50 g/g 处出现了转折，当干基水分含量高于 0.50 g/g 时，样品 NMR 总信号幅值与干基含水

量之间的关系符合 y=1039.323x+5122.078（R^2=0.918）；当干基水分含量低于 0.50 g/g 时，样品 NMR 总信号幅值与干基含水量的拟合曲线方程为 y=15752.259x-516.927（R^2=0.928）。因此，可以依据质子信号幅值来预测物料的干基含水量。采用 LF-NMR 对苹果块[27]和玉米粒[28]的微波真空干燥过程进行在线监测也得到了类似的结论。

2.3 微波真空干燥过程香芋片水分状态的变化

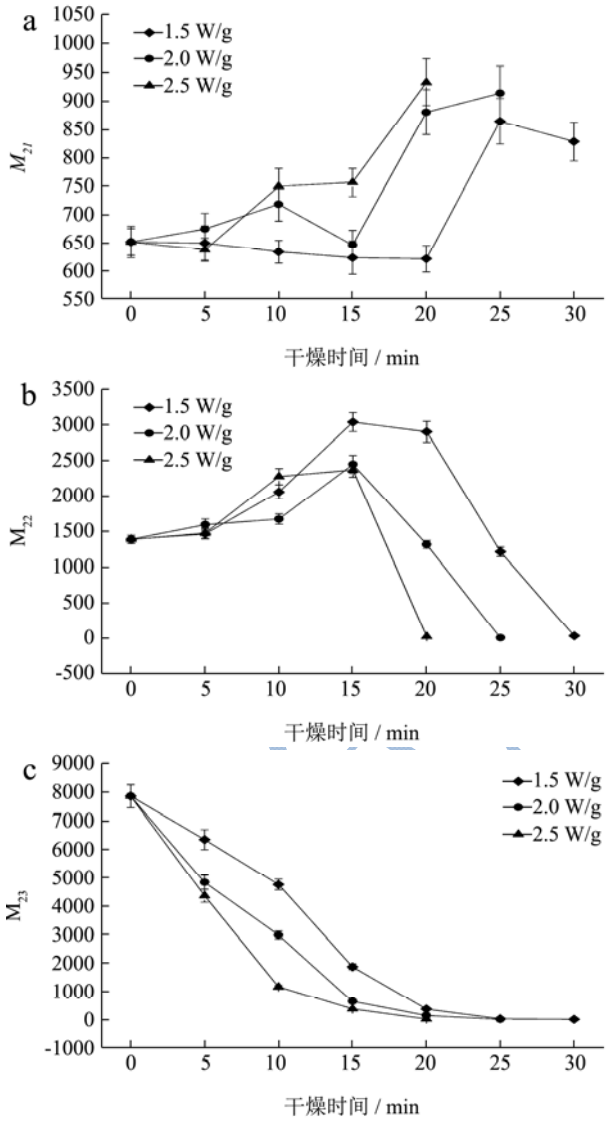


图 6 微波真空干燥香芋片 NMR 信号幅值随干燥时间的变化

Fig.6 Changes of NMR amplitude of taro slices with drying time during microwave vacuum drying

植物源食品中，结合水是指与细胞壁中多糖（如果胶）紧密结合的那部分水，它们性质稳定，干燥过程不易被脱去[24,27]。由图 6a 可知，1.5 和 2.5 W/g 下香芋片结合水信号幅值（M_{21}）随干燥时间的延长总体呈现先下降后增加的趋势，而在 2.0 W/g 下，M_{21} 值呈现出先增加后下降再增加的趋势，这种变化可能是由于物料在干燥过程中结合水和不易流动水相互转变，如食品成分生化反应会导致部分结合水释放转变成不易流动水，相反，不易流动水当与细胞壁多糖（如果胶、纤维素）紧密结合时也可转化为结合水[3]。值得注意的是，尽管 M_{21} 值有所改变但变化均不明显（p>0.05）。由图 6 可知，香芋片内结合水含量占总水分含量的比例随干燥时间的推移逐渐增加，且前期上升速率较慢，后期变快。究其原因在于随着干燥进行，自由水逐渐被脱去，致使总水分含量下降，但结合水性质稳定，不易被脱去，因此结合水所占比例呈逐渐上升趋势。

植物源食品中不易流动水主要存在于细胞质中，它们与大分子物质紧密结合，其流动性介于自由水和结合水之间，在干燥过程中当自由水大部分被脱去后不易流动水才会被去除[25,27]。如图 6b 所示，3 种微波强度下不易流动水的信号幅值均呈现出先增加后减小的变化趋势。在干燥前 15 min 物料内不易流动水信号幅值一直增大，这是因为干燥造成物料内蔗糖、果糖或葡萄糖等碳水化合物浓度升高，使自由水向不易流动水迁移[3,5~7]，另一方面，可能是因为香芋淀粉颗粒的晶体结构在干燥过程遭到破坏，使原先包埋在淀粉颗粒内部的部分化合水转变为不易流动水，同时物料内部酶和其它营养物质的分解也会使部分结合水转化为不易流动水[3,9,24]。如图 6 所示，3 种微波强度下，干燥 15 min 后物料内不易流动水的比例分别由原先的 14.02%上升到 54.88%、65.53%和 67.79%，但之后不易流动水呈现下降趋势，这是因为自由水被大部分去除后，不易流动水也将迅速被脱除，剩余小部分转化为结合水，使得不易流动水含量快速下降[3]。

自由水是植物性原料中具有很好流动性的那部分水，它们存在于液泡和细胞间隙，其性质与纯水相似，干燥过程容易被去除[9,27,28]。由图 6c 可看出，自由水信号幅值随干燥时间延长而下降，尤其是干燥前期，自由水含量下降迅速。由图可知，1.5、2.0 和 2.5 W/g 3 种微波强度下，干燥 20 min 后物料内的自由水比例由原先的 79.39%分别降低到 9.39%、5.84%和 1.04%。

2.4 微波真空干燥过程中香芋片水分迁移规律

核磁共振成像（MRI）是一种高效、准确、无损的现代检测技术，它能将物料内 H 质子磁共振产生的信号通过空间编码技术转变成图像，反映出物料内水

分分布情况以及加工过程中的结构变化[25,29]。MRI 图像越亮，表明共振信号越强，质子密度越大；反之，则说明信号弱，质子密度小。如图 7 所示，随着干燥时间的延长，香芋片 MRI 图像的亮度越来越暗，质子密度越来越小，最后呈现淡灰色，表明香芋片的水分含量逐步降低。比较 3 种微波强度下香芋片的 MRI 图像，发现微波强度越高，弛豫信号降低越明显，水分散失速率越快。从 MRI 图像可以直观地看出，香芋片内部和外部的弛豫信号同时减弱，说明微波真空干燥过程物料内水分均匀分布，具有相似的微波吸收能力，这与微波干燥过程中牛肉粒水分迁移和分布规律相一致[30]。然而 Lv 等[28]却发现微波真空干燥前期玉米粒的 MRI 图像中弛豫信号并非均匀分布，这可能是因为香芋和牛肉粒的结构及营养成分分布相对均一，而玉米粒中不同区域所含水分和营养成分存在差异，如玉米胚芽比胚乳和种皮含有更多的水分。

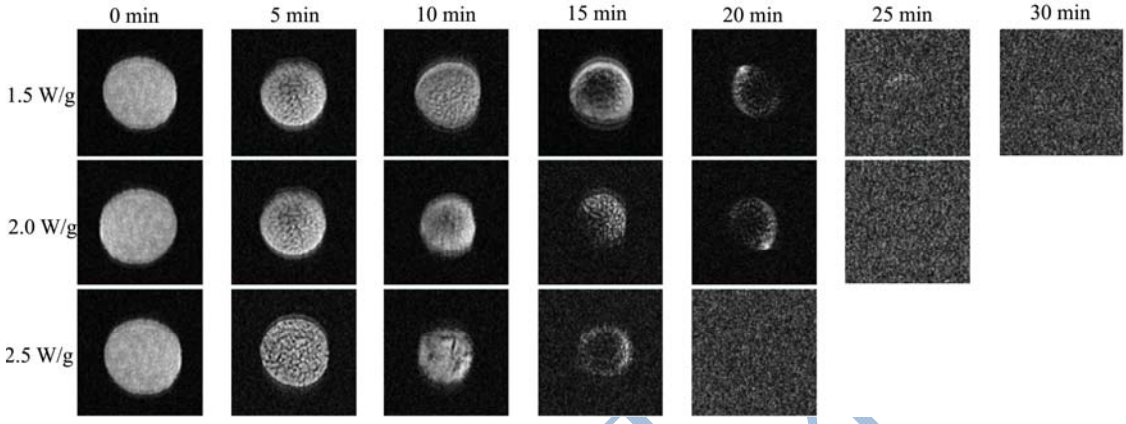


图 7 微波真空干燥过程香芋片的 MRI 图谱

Fig.7 The MRI images of taro samples during microwave vacuum drying

3 结论

香芋片微波真空干燥过程主要为降速阶段，无明显的恒速阶段，1.5、2.0 和 2.5 W/g 3 个微波强度下，香芋片的有效水分扩散系数分别为 7.30×10^{-9}、9.46×10^{-9}、1.14×10^{-8} m^2/s；平均干燥速率为 0.149、0.185 和 0.224 g/(g·min)。NMR T_2 谱显示，香芋片内存在 3 种状态的水，分别为结合水、不易流动水和自由水。微波真空干燥过程中，香芋片干基含水量与 NMR 总信号具有显著相关性（$p<0.05$），但在干基水分含量 0.50 处出现转折。微波真空干燥过程中，不同状态的水会发生相互转化，其中存在于液泡和细胞间隙的自由水会大幅度降低；细胞质中不易流动水所占比例呈现先增加后下降的趋势；结合水含量变化不显著，但所占比例逐步上升。MRI 图像显示，微波真空干燥过程中香芋片内外同时失水，且微波功率越高，弛豫信号消失的越快，表明香芋片的微波真空干燥是一个均匀的干燥过程。本论文通过研究不同微波强度下的香芋片弛豫行为变化，揭示微波真空干燥过程中香芋片内水分迁移机制，为进一步研究产品的保藏提供理论指导。

参考文献

[1] 魏秋羽,张钟元,李大婧,等.不同芋头品种真空微波干燥品质变化的比较[J].现代食品科技,2016,32(1):235-241
WEI Qiu-yu, ZHANG Zhong-yuan, LI Da-jing, et al. Quality changes in different varieties of taro treated by microwave vacuum drying [J] . Modern Food Science and Technology, 2016, 32(1): 235-241

[2] Simsek S, Ei S N. *In vitro* starch digestibility, estimated glycemic index and antioxidant potential of taro (*Colocasia esculenta* L. Schott) corm [J]. Food Chemistry, 2015, 168: 257-261

[3] Xu C, Li Y, Yu H. Effect of far-infrared drying on the water state and glass transition temperature in carrots [J]. Journal of Food Engineering, 2014, 136: 42-47

[4] Khan M I H, Wellard R M, Nagy S A, et al. Investigation of bound and free water in plant-based food material using NMR T_2 relaxometry [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2016, 38: 252-261

[5] 李娜,李瑜.利用低场核磁共振技术分析冬瓜真空干燥过程中的内部水分变化[J].食品科学,2016,37(23):84-88
LI Na, LI Yu. Analysis of internal moisture changes of *Benincasa hispida* during vacuum drying using low-field NMR [J]. Food Science, 2016, 37(23): 84-88

[6] 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
WANG Xue-yuan, GAO Kun, CHEN Qin-qin, et al. Water diffusion characteristics of apple slices during short and medium-wave infrared drying [J]. Transactions of the

Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(12): 275-281

[7] 张绪坤,祝树森,黄俭花,等.用低场核磁分析胡萝卜切片干燥过程的内部水分变化[J].农业工程学报,2012,28(22):282-287
ZHANG Xu-kun, ZHU Shu-sen, HUANG Jian-hua, et al. Analysis on internal moisture changes of carrot slices during drying process using low-field NMR [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(22): 282-287

[8] 樊海涛,刘宝林,王欣,等.乳化剂对冷冻面团水分状态和玻璃化转变温度的影响[J].食品科学,2012,33(17):10-14
FAN Hai-tao, LIU Bao-lin, WANG Xin, et al. Effect of emulsifiers on water state and glass transition temperature of frozen dough [J]. Food Science, 2012, 33(17): 10-14

[9] Xin Y, Zhang M, Adhikari B. 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

[10] Dellarosa N, Ragni L, Laghi L, et al. Time domain nuclear magnetic resonance to monitor mass transfer mechanisms in apple tissue promoted by osmotic dehydration combined with pulsed electric fields [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2016, 37: 345-351

[11] Li W, Wang P, Xu X, et al. Use of low-field nuclear magnetic resonance to characterize water properties in frozen chicken breasts thawed under high pressure [J]. European Food Research and Technology, 2014, 239(2): 183-188

[12] 石芳,肖星凝,杨雅轩,等.基于低场核磁共振技术研究不同热风条件下香菇复水过程中的水分传递特性[J].食品与发酵工业,2017,43(10):144-149
SHI Fang, XIAO Xing-ning, YANG Ya-xuan, et al. Characterization of moisture transfer inrehydration process for dried mushroom (*Lentinus edodes*) by different drying methods [J]. Food and Fermentation Industries, 2017, 43(10): 144-149

[13] 曾目成,毕金峰,陈芹芹,等.基于 Weibull 分布函数猕猴桃切片微波真空干燥过程模拟及应用[J].中国食品学报,2015,15(6):129-135
ZENG Mu-cheng, BI Jin-feng, CHEN Qin-qin, et al. Weibull distribution for modeling microwave vacuum drying of kiwifruit slices and its application [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2015, 15(6): 129-135

[14] Pu Y Y, Zhao M, O'Donnell C, et al. Nondestructive quality evaluation of banana slices during microwave vacuum drying using spectral and imaging techniques [J]. Drying Technology, 2018, 1-12

[15] 陈健凯,林河通,林艺芬,等.基于品质和能耗的杏鲍菇微波真空干燥工艺参数优化[J].农业工程学报,2014,30(3):277-284
CHEN Jian-kai, LIN He-tong, LIN Yi-fen, et al. Optimized technology of *Pleurotus eryngii* by microwave-vacuum drying based on quality and energy consumption [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(3): 277-284

[16] 任广跃,任丽影,张伟,等.正交试验优化怀山药微波辅助真空冷冻干燥工艺[J].食品科学,2015,36(12):12-16
REN Guang-yue, REN Li-ying, ZHANG Wei, et al. Optimizing microwave-assisted vacuum freeze-drying of *dioscorea opposite* by orthogonal array design [J]. Food Science, 2015, 36(12): 12-16

[17] 赵莹婷,王为为,庄玮婧,等.莲子微波真空干燥特性及动力学模型的研究[J].食品工业科技,2016,37(18):111-115
ZHAO Ying-ting, WANG Wei-wei, ZHUANG Wei-jing, et al. Drying characteristics and kinetics of lotus seeds using microwave vacuum drying [J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(18): 111-115

[18] Figiel A. Drying kinetics and quality of beetroots dehydrated by combination of convective and vacuum-microwave methods [J]. Journal of Food Engineering, 2010, 98(4): 461-470

[19] Jiang N, Liu C, Li D, et al. Effect of thermosonic pretreatment on drying kinetics and energy consumption of microwave vacuum dried Agaricus bisporus slices [J]. Journal of Food Engineering, 2016, 177: 21-30

[20] Jiang N, Liu C, Li D, et al. Effect of blanching on the dielectric properties and microwave vacuum drying behavior of Agaricus bisporus slices [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2015, 30: 89-97

[21] Kumar V, Sharma H K, Singh K. Mathematical modeling of thin layer microwave drying of taro slices [J]. Journal of The Institution of Engineers (India): Series A, 2016, 97(1): 53-61

[22] Dak M, Pareek N K. Effective moisture diffusivity of pomegranate arils under going microwave-vacuum drying [J]. Journal of Food Engineering, 2014, 122: 117-121

[23] Demirhan E, Özbek B. Drying kinetics and effective moisture diffusivity of purslane undergoing microwave heat treatment [J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2010, 27(5):

1377-1383

[24] Vicente S, Nieto A B, Hodara K, et al. Changes in structure, rheology, and water mobility of apple tissue induced by osmotic dehydration with glucose or trehalose [J]. Food and Bioprocess Technology, 2012, 5(8): 3075-3089

[25] Xu F, Jin X, Zhang L, et al. Investigation on water status and distribution in broccoli and the effects of drying on water status using NMR and MRI methods [J]. Food Research International, 2017, 96: 191-197

[26] 郭婷,何新益,邓放明,等.利用 LF-NMR 探讨冻融处理影响甘薯膨化产品品质的机理[J].农业工程学报,2013,29(17): 279-285
GUO Ting, HE Xin-yi, DENG Fang-ming, et al. Mechanism of freeze-thaw treatment influencing quality of puffing product for sweet potato using low-field nuclear magnetic resonance [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(17): 279-285

[27] Li 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): 1-10

[28] Lv W, Zhang M, Wang Y, et al. Online measurement of moisture content, moisture distribution, and state of water in corn kernels during microwave vacuum drying using novel smart NMR/MRI detection system [J]. Drying Technology, 2018, 36(13): 1592-1602

[29] Cheng S, Zhang T, Yao L, et al. Use of low field NMR and MRI to characterize water mobility and distribution in pacific oyster (*Crassostrea gigas*) during drying process [J]. Drying Technology, 2018, 36(5): 630-636

[30] 李欣,苏珊珊,马俪珍,等.利用 LF-NMR 研究牛肉粒微波干燥过程中水分迁移和分布变化[J].食品科技,2013,38(1): 145-149
LI Xin, SU Shan-shan, MA Li-zhen, et al. Low feld-NMR in measuring water mobility and distribution in beef granules during microwave drying process [J]. Food Science and Technology, 2013, 38(1): 145-149

现代食品科技