

利用 LF-NMR 技术分析油桃干燥过程中内部水分的变化

汤梅¹, 罗洁莹², 高杨文¹, 柳建良², 王琴²

(1. 上海纽迈电子科技有限公司, 上海 200000) (2. 仲恺农业工程学院轻工食品学院, 广东广州 510220)

摘要: 为研究油桃内部水分分布及干燥过程中水分迁移规律, 为油桃的保藏及加工提供新思路。利用 LF-NMR 技术测定了不同含水量油桃的信号强度与水分含量的关系及水分分布情况, 并测定了不同干燥方式的油桃片横向弛豫时间(T_2)的变化, 进而分析了油桃内部水分状态及变化规律。研究表明: 油桃的含水量与信号强度呈显著正相关, 拟合方程为: $y=12.415x-596.67$ ($R^2=0.9822$); MRI 图像可以清晰反映油桃的果肉、核壳、核仁儿等结构及其水分分布情况; 新鲜油桃中含有三种状态的水, 分别是结合水、不易流动水和自由水, 其中自由水约为 90%, 结合水约为 1%, 剩下的为不易流动水; 干燥处理能够降低水分的自由度, T_2 值减小, 且鼓风干燥的 T_2 减小速度比真空干燥的快; 鼓风干燥过程中不易流动水向自由水迁移, 自由水向外迁移散失, 而真空干燥中的自由水一部分向外迁移散失, 另一部分向不易流动水迁移。该研究为油桃的保藏与干燥实际产业化生产控制提供理论依据。

关键词: 低场核磁共振技术 (LF-NMR); 水分; 油桃; 干燥; 横向弛豫时间 (T_2)

文章编号: 1673-9078(2017)11-272-278

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2017.11.039

Analysis of Internal Moisture Changes of Nectarine during Drying Process Using LF-NMR Technology

TANG Mei¹, LUO Jie-ying², GAO Yang-wen¹, LIU Jian-liang², WANG Qin²

(1. Shanghai Niumag Electronic Technology Co., Ltd, Shanghai 200000 China) (2. College of Light Industry and Food Technology Zhongkai University of Agriculture & Engineering, Guangzhou 510220 China)

Abstract: The objective was to provide new ideas for the preservation and processing of nectarine by studying the moisture distribution and migration during drying process. The relationship between signal intensity and moisture content and moisture distribution of nectarine were determined using LF-NMR technology. The transverse relaxation time (T_2) changes of nectarine with different drying methods were measured simultaneously, and then the characteristics of internal moisture state and changes were analyzed. The results showed that the water content and the signal intensity of nectarine were positively correlated and the regression equation was $y = 12.415x - 596.67$ ($R^2 = 0.9822$). MRI images could clearly reflect the structures of nectarine pulp, core shell and nucleolus son and the distribution of water. There were three kinds of water in fresh nectarine, bound water (about 90%), immobilized water (1%) and free water. The drying process could reduce the free degree of water with the decrease of T_2 , and the air drying was faster than the vacuum drying. During the air drying process, the immobilized water transferred into free water and free water lost, while a part of free water lost and the other transferred into immobilized water during the vacuum drying. This research can provide theoretical basis for the industrial production and preservation of nectarine.

Key words: low-field nuclear magnetic resonance (LF-NMR); moisture; nectarine; drying; transverse relaxation time (T_2)

油桃, 学名桃驳李 (*Pmuspersica var. nectarina*), 它是普通毛桃 (果皮外被茸毛) 的一种变种, 油桃的果实可作为水果食用^[1]。其营养丰富, 除含多种维生

收稿日期: 2017-06-25

基金项目: 广东省科技计划项目 (2016A040402045、2016A020206007); 广东省农业厅对外合作项目 (粤财农[2016]108 号文)

作者简介: 汤梅 (1989-), 女, 硕士, 研究方向: 农产品加工及贮藏工程
通讯作者: 王琴 (1973-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 果蔬贮藏保鲜与加工

素、糖、有机酸、果胶和蛋白质外, 还含有 17 种人体必需的氨基酸类和胡萝卜素等^[2]。油桃作为一种强季节性水果, 在 6、7 月大量成熟, 此时温度高、雨水多, 且由于果实水分含量高, 极易造成物理和化学的变化而腐烂变质^[3]。干燥是一种有效控制水分, 延长油桃保存期的方法之一, 通过降低产品的含水量, 控制物料内水分的迁移, 达到防止产品腐败变质的效果。因此研究油桃干燥过程中的水分分布、状态及其迁移规律, 对油桃产品保藏和工业化生产有重要意义。

低场核磁共振 (low field nuclear magnetic resonance, LF-NMR) 作为一种快速、无损检测技术, 能够利用样品内部质子相关信息从微观角度解释水分的变化规律^[4]。随着核磁技术的不断发展, LF-NMR 技术在果蔬的干燥^[5]、贮藏^[6]、加工^[7]和质量评价^[8]等领域得到较为广泛的应用。水与不同基质结合强度不同会导致在 LF-NMR 反演过程中的反演峰值时间不同; 水分含量的不同会导致信号幅度、反演峰面积的不同; 水分分布不同会导致质子密度成像的亮度不同。Belton^[9]和 Li 等^[10]认为出现在 1~10 ms 的峰表征的水分子是和分子紧密相连的, 10~100 ms 的为不易流动水, 100~1000 ms 峰表征的是自由流动水。以往低场核磁研究或单独进行水分分析, 或单独应用成像研究, 将两种方法结合应用的研究较少, 特别是关于油桃内部水分状态、分布, 油桃低场核磁横向弛豫时间 T_2 量化和 MRI 图像与油桃含水量关系研究未见报道。

本研究对油桃质子信号强度的量化计算, 将其与油桃含水量进行拟合, 得出拟合方程, 并通过横向弛豫时间的变化和 MRI 图像亮度分布的分析, 得到油桃内部不同水分状态和不同部位的水分情况, 为以后利用 LF-NMR 技术对油桃的干燥储藏过程中水分的迁移变化研究提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

市售新鲜油桃。

MesoMR23-040H-1 核磁共振成像分析仪: 上海纽迈电子科技有限公司; DZF-6020 型真空干燥箱: 上海博迅实业有限公司; DHG-9023A 电热恒温鼓风干燥箱: 上海培因实验仪器有限公司; FA1004 上皿电子天平: 上海精科天平 (万分之一)。

1.2 实验方法

1.2.1 样品制备及处理

将油桃洗净去皮后, 去核后, 切成 0.5 cm×1.0 cm×2.0 cm 的块状, 分别置于电热恒温鼓风干燥箱和真空干燥箱中进行干燥温度为 60 °C, 真空度 0.1 MPa 的干燥处理。每隔 10 min 取样进行横向弛豫时间的测定, 为保证测试结果的准确性, 样品的形状、成熟度和质量尽量保持一致。

1.2.2 横向弛豫时间 (T_2) 测定

利用多脉冲回波序列 (carr-purcell-meiboom-gill, CPMG) 测量样品的自旋-自旋弛豫时间 (T_2), 将样品置于永久磁场射频线圈的中心, 进行 CPMG 脉冲序

列的扫描实验。实验参数设定: 测量温度 $T=32\pm 0.01$ °C, 主频 $SF1=21$ MHz, 偏移频率 $O1=27576.57$ Hz, 90°脉冲时间 $P1=9$ μ s, 180°脉冲时间 $P2=19$ μ s, 采样点数 $TD=450056$, 重复时间 $TW=6000$ ms, 累加次数 $NS=8$, 回波时间 $TE=0.3$ ms, 回波个数 $NECH=15000$ 。每组测量 3 个样品, 每个样品重复 3 次。

1.2.3 不同含水率油桃标准曲线的测定

将油桃分别采取加湿和自然干燥的方法, 获得不同含水量的油桃样品, 最终获得样品的含水量分别为: 91.42%、90.95%、90.00%、89.05%、88.03%、87.23%、85.39%和 83.55%。

采用 CPMG 序列测量不同含水量样品的信号强度, 并以样品的含水量为横坐标, 以单位质量的样品信号强度为纵坐标, 即可得到含水率与核磁共振信号强度的标准曲线。

1.2.4 水分含量测定

按照 105 °C 干燥法, 将进行核磁共振信号采集后的试验样本置于热风干燥箱中, 每 30 min 称量一次, 直至相邻 2 次称量的质量差值小于 0.001 g 时, 认定为达到绝干程度^[11]。

1.3 数据处理

所有试验数据均重复 3 次, 将得到的信号强度、峰面积进行质量归一化处理, 运用 EXCELL 进行相关数据统计与标准偏差分析, 采用单因素方差分析 (One-way ANOVA) 进行各指标差异显著性分析。利用纽迈核磁共振图像处理软件 V1.0 将图片进行映射和伪彩处理。

2 结果与分析

2.1 水分含量与信号强度

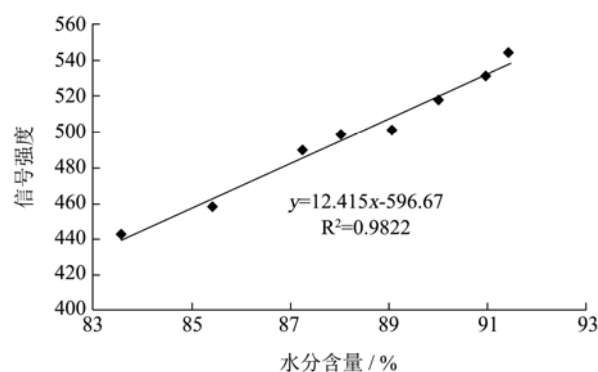


图1 油桃含水量与信号强度关系

Fig.1 The relationship between water content and signal intensity of nectarine

因为核磁共振总信号强度与样品的氢质子数量成

成正比，因此可以根据信号强度间接的表示样品中的水分相对含量^[12]。经过质量归一化处理的油桃信号强度与水分含量之间的关系如图 1 所示。油桃的含水量与质子信号强度呈显著正相关 ($R^2=0.9822, p<0.01$)，表明油桃的含水量与信号强度有较好的拟合性，拟合方程为： $y=12.415x-596.67$ 。从 LF-MNR 试验得到的不同 T_2 质子信号强度，可以推算出样品中水分含量。宋伟^[13]等对稻谷水分研究也得出类似结论： T_2 峰面积与水分含量有较好的线性相关性 ($R^2>0.9817$)。由于 LF-NMR 技术具有快速、无损等特点，因此在不破坏样品的前提下，可极大的提高油桃水分测定工作效率。

2.2 不同含水量对 MRI 信号强度的影响

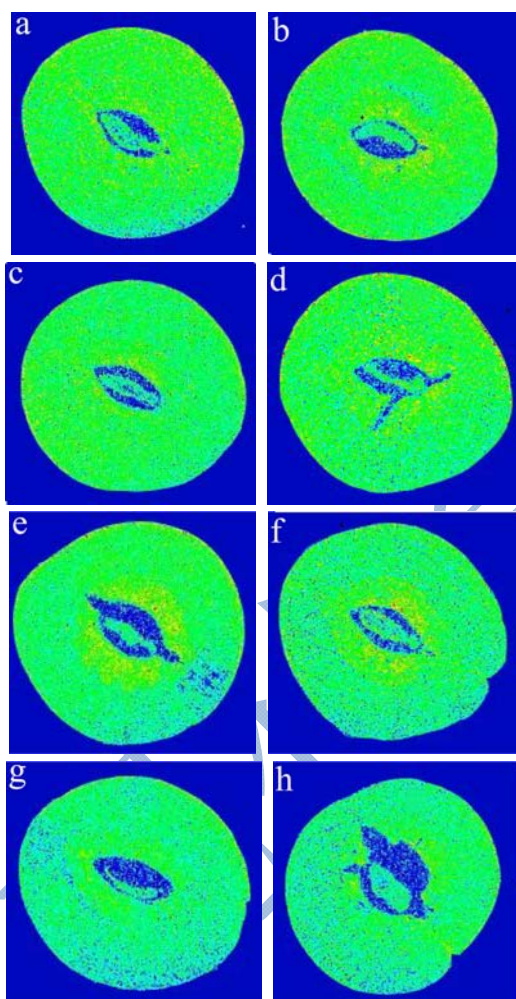


图 2 不同含水量油桃的 MRI 图像

Fig.2 MRI images of nectarine with different water contents

注：图中 a、b、c、d、e、f、g 和 h 分别表示水分含量为 91.42%、90.95%、90.00%、89.05%、88.03%、87.23%、85.39% 和 83.55%。

由于油桃的水分含量较高，一般的成像序列很难得到高质量的图像，而常见的高光谱、荧光成像等成像技术很难提取到内部信息来判断样品整体含水量

^[14,15]，利用 MRI 技术可以直观的观察样品内部水分信息。不同含水量的油桃 MRI 图像如图 2 所示，油桃中水分含量高，图片亮。从图像中可清晰的看到油桃内部结构包括：果皮、果肉、核壳和核仁儿。Juan 等^[16]利用 MRI 技术不仅观察到苹果内部结构，而且还能根据质子密度的变化判断苹果发生褐变的程度。由图 2 可知核壳的质子密度低，图片亮度暗，水分含量少；核仁儿的质子密度比核壳的高，图片亮度较暗，水分含量较少；而果肉及果皮中的质子密度、图片亮度、水分含量都明显比核壳和核仁儿中的高，且果肉越靠近果核儿的水分含量越高，图片越亮。

2.3 新鲜油桃片横向弛豫时间 (T_2) 反演谱

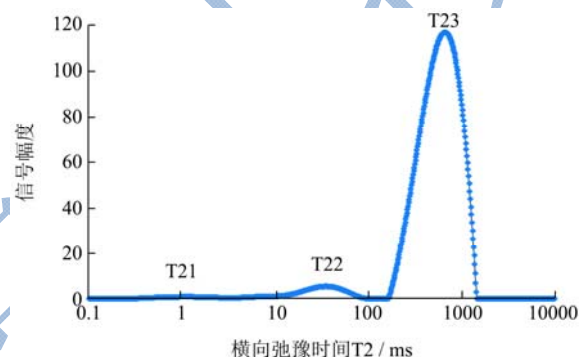


图 3 新鲜油桃横向弛豫时间 (T_2) 反演图

Fig.3 The transverse relaxation time (T_2) spectrum inversion of fresh nectarine

图 3 为油桃样品应用多组分联合迭代重建反演算法 (Simultaneous Iterative Reconstruction Technique, SIRT) 解得连续光谱 T_2 反演图谱。通常果蔬中水分可分为 3 种状态，即自由水、不易流动水和结合水。由于油桃是一个复杂的不均匀系统，水分子通过不同的作用力 (氢键和毛细管作用力等) 与油桃内的大颗粒物质相互作用，从而改变了水分子的自由度，因而可以用多重弛豫时间系数来表征，为了便于描述，分别用 T_{21} 、 T_{22} 和 T_{23} 表示^[13]。由图 3 可知，油桃的 T_2 谱有 3 个波峰，弛豫时间 T_2 的范围分别为 T_{21} (0.1~10 ms)， T_{22} (10~100 ms)， T_{23} (100~1500 ms)。经归一化处理后，对应 3 个峰的峰面积分别为：6.01、31.46 和 593.56，峰面积所占的比例分别为：0.95%、4.99% 和 94.06%。 T_{21} 、 T_{22} 和 T_{23} 各峰值面积占总面积的比例，可以间接反映不同状态的水分含量^[5]。由此可见，成熟油桃中 90% 以上的水都是自由流动的水，只有不到 1% 的水与油桃中的大分子进行紧密的结合。

2.4 干燥方式对油桃片横向弛豫时间 T_2 值变化

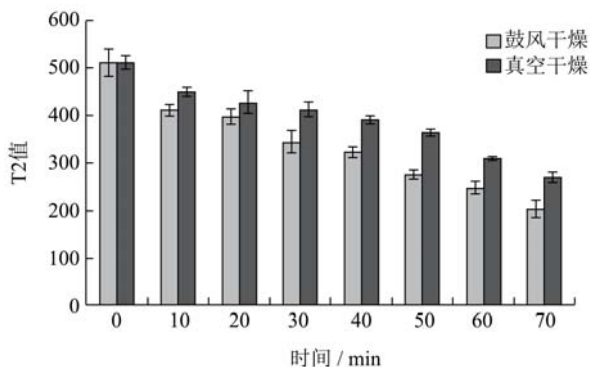


图4 不同干燥方式的油桃片 T₂值的变化

Fig.4 Effects of different drying methods on the T₂ value changes of nectarine

控制温度 60 °C，真空度 0.1 MPa 的条件，采用单组分反演得到的鼓风干燥和真空干燥油桃片横向弛豫时间 T₂ 值的变化如图 4 所示。由图 4 可知干燥时间越长，油桃片的横向弛豫时间 T₂ 越小，且差异极显著 ($p < 0.01$)；其中鼓风干燥的油桃片 T₂ 值小于真空干燥 T₂ 值。弛豫时间与水分子流动性成正比^[17]，T₂ 值

越小，水分自由度越低，结合越牢固，T₂ 值越大，水分自由度越高，越容易被排出。由此说明，干燥处理能够使样品中水分整体自由度降低，随着干燥的继续，样品中的水分越难被排出。

油桃片在干燥过程中，采用多组分反演得到的横向弛豫时间 T₂ 分值的变化如表 1 所示。新鲜油桃片中的水有三种状态，当将其放入到 60 °C 的环境中加热时，油桃片中的水分发生了明显的变化。鼓风干燥的 T₂₂ 和 T₂₃ 值随干燥时间的延长而迅速减小，且 T₂₂ 值在前 40 min 存在显著性差异 ($p < 0.05$)，T₂₃ 值在干燥和未干燥时差异极显著 ($p < 0.01$)；而 T₂₁ 值在干燥开始后由于小于 0.001，而未被检测到，或是结合水的结合程度变高，或是结合水向不易流动水发生了迁移。在真空干燥过程中，T₂₃ 值的减小速度较鼓风干燥的慢，且干燥 50 min 后有显著性差异 ($p < 0.05$)；T₂₂ 值逐渐增加，且存在显著性差异 ($p < 0.05$)；T₂₁ 值干燥开始时突然减小未被检测到，待干燥到 50 min 后重新出现，且随干燥时间增加。

表 1 不同干燥方式的油桃片 T₂分值的变化

Table 1 Effects of different drying methods on the T₂ signal per value changes of nectarine slice

时间/min	鼓风干燥/ms			真空干燥/ms		
	T ₂₁	T ₂₂	T ₂₃	T ₂₁	T ₂₂	T ₂₃
0	5.58±0.16 ^{Aa}	35.78±0.75 ^{Ec}	665.044±9.20 ^{Dd}	4.62±0.50 ^{Aa}	29.41±0.31 ^{Hh}	702.82±0.00 ^{Dd}
10	-	22.56±0.48 ^{Dd}	518.49±7.17 ^{Cc}	-	28.22±0.83 ^{Aa}	693.24±13.56 ^{Dd}
20	-	20.92±0.54 ^{Aa}	504.35±6.97 ^{Cc}	-	29.89±0.24 ^{Bb}	638.04±12.48 ^{Cc}
30	-	19.46±1.71 ^{Ccd}	507.83±4.97 ^{Cc}	-	32.17±0.00 ^{Ccd}	624.89±6.22 ^{BCbc}
40	-	17.93±0.76 ^{BCbc}	490.59±6.78 ^{Cc}	-	32.87±0.60 ^{Dbd}	616.31±6.03 ^{BCbc}
50	-	17.2±1.85 ^{BCabc}	457.83±8.95 ^{Bb}	2.09±0.34 ^{Aa}	33.31±0.33 ^{Ec}	610.63±12.14 ^{CBb}
60	-	16.27±0.34 ^{BCabc}	454.64±4.45 ^{Bab}	2.23±0.09 ^{Aa}	35.20±0.34 ^{Ff}	598.12±4.79 ^{Bab}
70	-	15.28±1.29 ^{ABab}	423.45±14.79 ^{Aa}	2.29±0.33 ^{Aa}	37.72±0.37 ^{Gg}	575.14±5.62 ^{Aa}

注：表中同一列中的不同小写字母表示相互之间存在极显著的差异 ($p < 0.01$)，大写字母为显著差异 ($p < 0.05$)。

以上分析结果说明，油桃片在干燥过程中，整体上 T₂ 值是呈现下降的趋势，但不同加热方式的水分的迁移情况是不同的。在鼓风干燥过程中 T₂₃ 值减小，T₂₂ 值减小、T₂₁ 值减小，即油桃片中水的自由度整体降低，结合能力整体增强；而在真空干燥过程中 T₂₃ 值减小，T₂₂ 值增加，T₂₁ 值先减小后缓慢增加，或许是自由水的自由度降低，部分自由水逐渐向不易流动水迁移，不易流动水又向结合水迁移，从而削弱了不易流动水的结合能力。

2.5 不同干燥方式油桃片信号幅度变化

在 60 °C，0.1 MPa 条件下，两种干燥方式油桃片的峰面积的变化如表 2 所示。由表 2 可知，在整个干燥过程中，油桃的总峰面积不断下降，且存在极显著

性差异 ($p < 0.01$)，干燥 70 min 后，鼓风干燥和真空干燥的单位质量的峰面积分别为 76.22 和 220.93。因为峰面积可间接的反应含水量的多少，因此在鼓风干燥过程中，由于蒸发作用，油桃中的自由水含量逐渐减少，且变化差异极其显著 ($p < 0.01$)；由于热动力不平衡，不易流动水向自由水迁移，不易流动水含量减小，但变化无显著性差异 ($p > 0.05$)；结合水快速的向不易流动水迁移，结合水迅速减小。在真空干燥过程中，由于压力差及温度梯度作用，一部分被蒸发消耗掉，另一部分向不易流动水迁移，油桃中的自由水含量逐渐减少，且存在极显著差异 ($p < 0.01$)；

不易流动水由于自由水和结合水的迁移作用而不断增加，干燥 30 min 后差异极显著 ($p < 0.01$)；结合水由于迁移作用而呈现先减小后增加。

表 2 不同干燥方式油桃片峰面积的变化

Table 2 Effects of different drying methods on the changes of peak area of nectarine slice

干燥方式	时间/min	S21	S22	S23	S 总
鼓风干燥	0	11.35±0.95 ^{Aa}	21.88±0.49 ^{Cc}	574.38±9.64 ^{Hh}	607.6±11.06 ^{Hg}
	10	-	19.98±0.41 ^{BCac}	435.75±2.17 ^{Gg}	455.73±1.76 ^{Gf}
	20	-	18.76±0.50 ^{ABabc}	198.44±1.16 ^{Ff}	217.2±1.66 ^{Fe}
	30	-	19.84±1.11 ^{BCabc}	168.4±0.02 ^{Ee}	188.24±1.13 ^{Ed}
	40	-	20.15±0.77 ^{BCbc}	138.68±0.03 ^{Dd}	158.83±0.74 ^{Dc}
	50	-	19.07±1.01 ^{Babc}	96.34±0.49 ^{Cc}	115.4±0.52 ^{Cb}
	60	-	18.32±1.12 ^{ABab}	71.45±0.25 ^{Bb}	89.76±1.37 ^{Ba}
	70	-	16.91±1.06 ^{Aa}	59.3±0.50 ^{Aa}	76.22±0.54 ^{Aa}
真空干燥	0	9.32±0.30 ^{Dd}	29.89±0.44 ^{Aa}	604.66±10.05 ^{Gg}	643.87±10.79 ^{Gf}
	10	-	29.16±0.22 ^{Aa}	397.38±1.22 ^{Ff}	427.08±0.66 ^{Fe}
	20	-	29.21±0.53 ^{Aa}	352.3±1.72 ^{Ee}	380.41±0.68 ^{Ed}
	30	-	31.68±0.03 ^{Aa}	253.84±0.32 ^{Dd}	285.52±0.35 ^{Dc}
	40	-	40.96±2.49 ^{Bb}	227.2±2.97 ^{Cc}	267.82±0.00 ^{Cb}
	50	0.32±0.19 ^{ABab}	47.62±1.68 ^{Cc}	204.24±0.02 ^{Bb}	252.18±1.47 ^{Ba}
	60	0.57±0.06 ^{Bbc}	60.95±0.77 ^{Dd}	188.32±6.40 ^{Bb}	249.55±5.96 ^{Cbc}
	70	0.95±0.18 ^{Cc}	69.91±1.78 ^{Ee}	150.06±4.91 ^{Aa}	220.93±3.32 ^{Aa}

注：表中同一列中的不同小写字母表示相互之间存在极显著的差异 ($p < 0.01$)，大写字母为显著差异 ($p < 0.05$)，S21、S22 和 S23 分别代表结合水、不易流动水和自由水的峰面积。

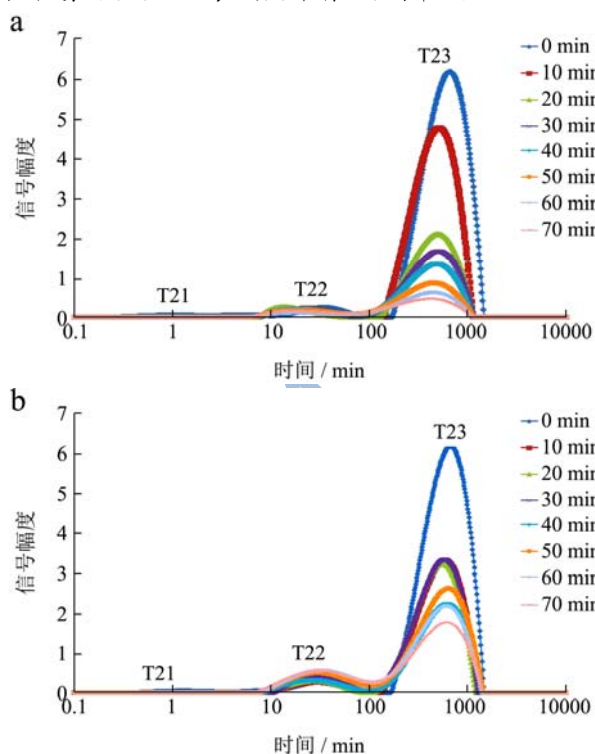


图 5 鼓风干燥 (a) 和真空干燥 (b)

Fig.5 Air drying (a) and Vacuum drying (b)

图 5a 和 5b 分别为油桃鼓风干燥和真空干燥的多组分 T₂ 反演波谱图，波谱图中从左到右对应的依次为结合水 (T₂₁)、不易流动水 (T₂₂) 和自由水 (T₂₃) 的信号强度。由图 5a 可知，随着干燥时间的延长，样品

中信号强度降低，水分含量减小。其中 T₂₃ 的信号幅度变化最快，T₂₂ 的次之，T₂₁ 自加热 10 min 后就未被检测到。鼓风干燥中的三个峰随着干燥时间的延长，峰顶点有向左移的趋势，这同表 1 中的鼓风干燥 T₂ 值的变化趋势一致。由图 5b 可知，干燥时间越长，T₂₃ 信号幅度越小，T₂₂ 的信号幅度有所增大，T₂₃ 变化不明显。

2.6 干燥方式油桃片失水率变化

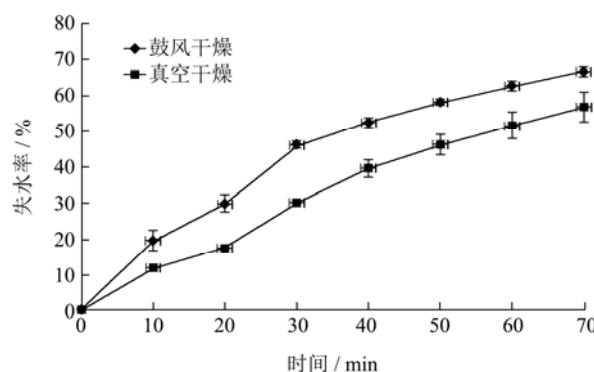


图 6 不同干燥方式对油桃片失水率的影响

Fig.6 The effects of different drying methods on the water loss rate of nectarine slice

两种不同干燥方法的失水率如图 6 所示，在 60 °C 的加热条件下，油桃片的失水率逐渐增加，干燥 30 min 后，鼓风干燥的油桃片的失水率已达到 45.87%，而真

空干燥的为 30.30%。经方差分析,在整个干燥过程中,鼓风干燥和真空干燥的样品失水率的变化存在显著性的差异 ($p < 0.01$)。鼓风干燥由于空气流动快,物料升温快,失水率也快;而真空干燥,由于传热介质少,样品升温慢,水分蒸发的速度也慢,因此样品的失水速度较鼓风干燥的慢,但是真空干燥后的样品保持了较好的外观品质。经过干燥处理的样品中水分的自由度降低,样品中的水分越难被排出,因此随着干燥的继续,两种干燥方式的油桃片失水速率不断的降低。30 min 后,鼓风干燥由于升温快,加之果肉中含有大量的糖分,由于焦糖化作用在样品的表面形成了一层坚硬的薄壳,增加了油桃片中心水分向外蒸发扩散的阻力,因此鼓风干燥的失水速率降低较真空干燥的快。

3 结论

本文利用低场核磁共振技术研究了不同含水量油桃的水分含量与信号强度的关系及水分分布情况。并利用 CPMG 脉冲序列获得样品的 T_2 反演图谱及其相应数据,分析了不同干燥方式不同状态含水量、横向弛豫时间、干燥速率的变化,得出以下结论:

3.1 油桃的含水量与信号强度呈显著正相关,拟合方程为: $y = 12.415x - 596.67$ ($R^2 = 0.9822$, $p < 0.01$)。

3.2 低场核磁采集的油桃 MRI 图像可以反映油桃内部质子状态和质子强度,根据质子的分布和强弱,判断果实内部的水分分布及内部结构。油桃结构包括:果皮、果肉、核壳和核仁儿,其中核壳中的水分含量最少,其次为核仁儿,水分最多的为果肉,且越靠近核壳的部位水分含量越高。

3.3 新鲜的油桃中含有三种状态的水,分别是结合水、不易流动水和自由水,其中 90%左右的是自由水,1%左右的为结合水,剩下的为不易流动水。

3.4 干燥处理能够降低油桃中水分自由度,使水分越难被排出。

3.5 不同干燥方式对油桃片水分特性的研究表明,干燥时间长,水分含量少,油桃中横向弛豫时间 T_2 值逐渐减小,且鼓风干燥较真空干燥更小,但鼓风干燥速率比真空干燥快。

3.6 不同干燥方式的油桃水分迁移情况是不同的。鼓风干燥的油桃中自由水随干燥的进行不断的被蒸发散失,不易流动水向自由水迁移,结合水又向不易流动水迁移,最终三种状态的水分都减少。真空干燥的油桃中的自由水随干燥时间的延长,一部分向外扩散散失,另一部分向不易流动水迁移;结合水先向不易流动水迁移,而使不易流动水的含量增加;待不易流动水达到一定量时,又向结合水迁移。

通过研究不同水分含量油桃及不同干燥方式对油桃水分变化的影响,揭示了干燥过程中油桃内部水分迁移机制,为进一步研究产品的保藏及加工提供理论指导。

参考文献

- [1] 高慧,饶景萍.油桃采后生理及贮藏保鲜技术[J].山西农业科学,2003,4:55-58
GAO Hui, RAO Jing-ping. The postharvest physiology and storage technology of nectarine [J]. Shanxi Agricultural Sciences, 2003, 4: 55-58
- [2] 周林宗,陶永元,徐明芳.溶菌酶、海藻酸钠与壳聚糖复配溶液对油桃的保鲜效果[J].北方园艺,2017,9:116-119
ZHOU Lin-zong, TAO Yong-yuan, XU Ming-fang. The preservation effect of the Lysozyme, sodium alginate and chitosan compound solution on nectarine [J]. Northern Horticulture, 2017, 9: 116-119
- [3] Rodríguez M M, Mascheroni R H, Armando Q R. Mathematical modeling of hot-air drying of Osmo-dehydrated nectarines [J]. Int. J. Food Eng., 2015, 11(4): 533-545
- [4] 谢小雷,李侠,张春晖,等.牛肉干中红外-热风组合干燥工艺中水分迁移规律[J].农业工程学报,2014,30(14):322-330
XIE Xiao-lei, LI Xia, ZHANG Chun-hui, et al. The law of moisture migration in beef jerky combined infrared and hot air drying process [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(14): 322-330
- [5] 李娜,李瑜.利用 LF-NMR 分析冬瓜真空干燥过程中的内部水分变化[J].食品科学,2016
LI Na, LI Yu. Analysis on internal moisture changes of *Benincasa hispida* during vacuum drying process using low-field NMR [J]. Food Science, 2016
- [6] 朱丹实,梁洁玉,吕佳煜,等.秋红李子贮藏过程中水分迁移对其质构的影响[J].现代食品科技,2014,30(12):100-105
ZHU Dan-shi, LIANG Jie-yu, LV Jia-yu, et al. Effects of moisture mobility on qihong plum during storage [J]. Modern Food Science and Technology, 2014, 30(12): 100-105
- [7] 马申嫣,范大明,王丽云,等.微波加热对马铃薯淀粉颗粒内部水状态及分布的影响[J].现代食品科技,2015, 31(5):219-225
MA Shen-yan, FAN Da-ming, WANG Li-yun, et al. Impact of microwave heating on the water state and distribution of potato starch granules [J]. Modern Food Science and Technology, 2015, 31(5): 219-225

- [8] 王淼,张晶,贺妍,等.基于低场核磁共振的柑橘汁胞粒化评级[J].农业工程学报,2016,32(7):290-295
WANG Miao, ZHANG Jing, HE Yan, et al. Based on low field NMR cell citrus juice grain rating [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(7): 290-295
- [9] Belton P S, Jackson R R, Packer K J. Pulsed NMR studies of water in striated muscle: I. transverse nuclear spin relaxation times and freezing effects [J]. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-General Subjects*, 1972, 286(1): 16-25
- [10] Li X, Ma L Z, Tao Y, et al. Low field-NMR in measuring water mobility and distribution in beef granules during drying process [J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 550/553: 3406-3410
- [11] 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,2015,6(12):240-245
WANG Xiang-you, WEI Zhong-cai, SUN Chuan-zhu, et al. Moisture transfer characteristic of carrot slices by infrared radiation drying [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 6(12): 240-245
- [12] Lu Z, Seetharaman K. ¹H nuclear magnetic resonance (NMR) and differential scanning calorimetry (DSC) studies of water mobility in dough systems containing barley flour [J]. *Cereal Chemistry*, 2013, 90(2): 120-126
- [13] 宋伟,李冬琬,乔琳,等.对不同含水量粳稻谷 T₂ 峰面积和 MRI 图像的定量分析[J].中国农业科学,2015,48(22): 4529-4538
SONG Wei, LI Dong-kun, QIAO Lin, et al. Quantitative analysis of T₂ peak area and the MRI images of japonica rice with different moisture contents [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(22): 4529-4538
- [14] 彭彦颖,孙旭东,刘燕德.果蔬品质高光谱成像无损检测研究进展[J].激光与红外,2010,40(6):586-592
PENG Yan-ying, SUN Xu-dong, LIU Yan-de. Research progress of hyper-spectral imaging in nondestructive detection of fruits and vegetables quality [J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(6): 586-592
- [15] 卢劲竹,蒋焕煜,崔笛.荧光成像技术在植物病害检测的应用研究进展[J].农业机械学报,2014,45(4):244-252
LU Jin-zhu, JIANG Huan-yu, CUI Di. The progress of fluorescence imaging application in plant disease detection [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(4): 244-252
- [16] Gonzalez J J, Valle R C, Bobroff S, et al. Detection and monitoring of internal browning development in 'fuji' apples using MRI [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2001, 22(2): 179-188
- [17] 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