

FIRD-HPD 方式对蓝莓干燥特性及品质的影响

张雨^{1,2}, 韩延超², 刘瑞玲², 陈慧芝², 房祥军², 吴伟杰^{2*}, 郜海燕^{2,3*}

¹浙江工业大学食品科学与工程学院 杭州 310014

²浙江省农业科学院食品科学研究所 农业农村部蔬菜采后保鲜与加工重点实验室(部省共建)
全省生鲜食品智慧物流与加工重点实验室 中国轻工工业果蔬保鲜与加工重点实验室 杭州 310021

³农业农村部果品采后处理重点实验室 杭州 310021)

摘要 为探究蓝莓在 FIRD-HPD 干燥方式下,内部水分含量及迁移状况随贮藏时间的变化规律,采用低场核磁共振(LF-NMR)及其成像技术(MRI),采集不同水分转换点干燥过程的蓝莓弛豫特性以及质子密度图像信息,分析其规律变化,并研究干燥前、后蓝莓品质的变化。结果表明:在水分转换点为 30%,40%,50%时,蓝莓到达干燥终点的时间分别为 480,420 min 和 360 min。蓝莓的 T_2 反演谱有 3 个不同的弛豫峰: T_{21} (0.01~10 ms)结合水、 T_{22} (10~100 ms)不易流动水和 T_{23} (100~1 000 ms)自由水。自由水(T_{23})和不易流动水(T_{22})向弛豫时间短的方向迁移,在干燥后期,结合水成为蓝莓中主要水分状态,自由水完全消失。基于 MRI 技术得到不同干燥方式各干燥阶段的磁共振成像,质子信号随干燥进程逐渐减小。LF-NMR 和 MRI 技术可很好地监测干燥过程中动态水分分布和迁移变化。另外,在 40%水分转换点联合远红外热泵干燥处理下,蓝莓果干色泽、营养品质等指标均优于 30%和 50%的水分转换点联合远红外热泵干燥方式。综合考量后,联合红外干燥水分转换点设置为 40%是加工蓝莓果干的最优选择。

关键词 蓝莓; 远红外联合热泵干燥; 低场核磁共振; 水分分布; 品质

文章编号 1009-7848(2024)06-0237-11 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2024.06.021

蓝莓是一种具有独特风味和丰富生物活性成分(如花青素和其它酚类化合物)的水果,然而采后蓝莓果实因富含水分而极易腐烂变质^[1]。目前果实的干制方式有多种,包括热风干燥、热泵干燥、红外干燥、微波干燥等^[2]。目前关于蓝莓干燥的研究相对较少。研究理想的干燥方式,明确其对蓝莓产品品质的影响,对蓝莓产品开发具有重要意义。由于各种干燥工艺都有一定的局限性,单一干燥工艺不能满足蓝莓加工的要求,很多研究采用两种或两种以上的干燥方法联合使用,既能克服单一干燥技术的缺陷,又能保留各干燥技术的优点,从而大大提升了产品经济价值和附加价值^[3]。其中,热风联合干燥、太阳能热泵联合干燥、红外热泵联合干燥、微波联合干燥等联合干燥方式研究最多,效果较好,达到优势互补的效果^[3]。远红外联合热泵干燥在玫瑰^[4]、龙眼^[5]、芒果^[6]、人参加工中被

报道^[7],这些研究表明远红外联合热泵干燥效率高,营养成分损失少,干制品具有较高的风味品质,但在蓝莓加工中鲜有报道。

低场核磁共振(LF-NMR)是一种快速、无损的现代检测技术,是利用氢原子核在磁场中的自旋弛豫特性^[8],通过横向弛豫时间(T_2)的变化,从微观角度解释物料内部水分的分布状态和迁移信息^[9],能实时跟踪物料干燥过程中水分状态变化过程。徐建国等^[10]利用此技术测定不同干燥方式的油桃片横向弛豫时间(T_2)的变化,分析油桃内部水分状态及变化规律。崔莉等^[11]为皱皮木瓜真空冷冻干燥提供最优的工艺参数,用低场核磁共振技术表征皱皮木瓜复水过程中水分状态的变化。罗洁莹等^[12]利用低场核磁共振技术明确了鹰嘴蜜桃贮藏过程中水分的总信号幅度和含水率的关系。综上,目前低场核磁共振及成像技术已在食品贮藏、干燥、品质监控和复水等方面得到广泛应用^[13],并取得显著成效^[14]。

本试验采用不同方式对蓝莓鲜果进行干燥,并基于 LF-NMR 技术确定水分分布和迁移变化规律,分析不同水分转换点联合红外辐射方式对蓝

收稿日期: 2024-03-22

基金项目: 浙江省重点研发计划项目(2023C02006)

第一作者: 张雨,女,硕士生

通信作者: 吴伟杰 E-mail: wuweijie87@163.com

郜海燕 E-mail: spsghy@163.com

莓果干的色泽,硬度,可滴定酸、总酚、花色苷、VC等营养成分的影响,筛选出适宜的干燥技术参数,为高品质果干的开发提供技术依据。

1 材料与方法

1.1 材料

蓝莓品种为灿烂,采自浙江省安吉县大唐蓝莓合作社。

1.2 设备与仪器

远红外-空气能热泵烘干机,浙江金光新能源设备科技有限公司与浙江省农业科学院共同开发;NMI20-060-I 变温低场核磁共振成像分析仪,苏州纽迈分析仪器股份有限公司;CR400 手持式色差仪,日本柯尼卡美能达公司。

1.3 试验方法

1.3.1 样品处理 挑选大小均一、成熟度一致的新鲜蓝莓,每组取 500 g 将其平铺在干燥平板上并置于远红外辅助热泵干燥室中,在联合干燥温度为 55 °C,辐照强度为 800 W,分别在物料湿基含水量为 30%,40%,50%时由单一热泵干燥转换为远红外辐射干燥联合热泵干燥,前 1 h 每 30 min 测定样品质量,后每 1 h 测定样品质量。每 1 h 测定样品质量,将水分含量低于 5%±1 作为干燥终点。

1.3.2 干基含水率 干基含水率的计算^[15]:

$$m(\text{g/g}) = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \quad (1)$$

式中: m 为干基含水率, g/g ; m_1 为湿物料质量, g ; m_0 为绝干物料质量, g 。

1.3.3 干燥速率 干燥速率的计算^[15]:

$$\text{DR}(\text{g/g} \cdot \text{min}) = \frac{\Delta m}{m_0 \times \Delta t} \quad (2)$$

式中:DR 为干燥速率, $\text{g/g} \cdot \text{min}$; Δt 为两次相邻时间之差, min ; m_0 为绝干物料质量, g ; Δm 为两次相邻质量之差, g 。

1.3.4 横向弛豫时间(T_2)的采集与反演 首先使用 FID(Free Induction Decay)脉冲序列进行系统校正^[16]。将干燥过程中的蓝莓样品放在样品管中,将样品管置于低场核磁共振样品室内,使用 CP-MG(Car-Purcell-Meiboom-Gill)序列测定干燥过程中的横向弛豫时间(T_2)。序列参数设置为:主频

为 21 MHz;频率偏置为 157 578.51 Hz;90 度脉宽为 13 μs ;180 度脉宽为 24.56 μs ;采样频率为 333.333 kHz;射频延时为 0.08000 ms;数字增益为 3;模拟增益为 20 dB;数据半径为 1;前放档位为 2;等待时间为 1 000.000 ms;累加次数为 16;回波时间为 0.5 ms;回波个数为 16 000;波峰偏移为 0.00000 ms。反演后可以得到信号幅值及峰面积。

1.3.5 磁共振成像(MRI) 使用核磁共振成像软件中的 IR 序列进行成像^[17],将干燥过程中的蓝莓放入样品管内,将其置于永磁场中心位置的射频线圈的中心。成像参数设置为:重复采样时间为 500 ms,回波时间为 20 ms,累加次数为 2,采样点数为 256,相位编码步数为 192,频率编码视野大小为 90 mm×90 mm,选层层厚度为 9.5 mm。

1.3.6 色泽 用色差仪测定蓝莓果实赤道的色泽。记录 L^* 、 a^* 、 b^* 和 ΔE 值。

1.3.7 硬度的测定 采用直径为 6 mm 的探头,使用 TA-XT plus 质地分析仪(StableMicro Systems Ltd, Surrey, U.K.)测定果实的硬度^[18]。每组随机抽取 20 个蓝莓。每个水果在赤道区域以 5 mm 测试速度(1.0 mm/s)压缩,在压缩过程中使用的最大力代表硬度,并表示为(N)。

1.3.8 总酚含量 总酚含量采用 Zheng 等^[19]的方法进行测定。取 0.1 g 蓝莓样品置于 2 mL 60%乙醇中,4 °C 条件下离心。取上清液与福林酚和 12% (g/L) Na_2CO_3 进行混合,置于暗室 60 min。测定 760 nm 处的吸光度值。

1.3.9 可滴定酸含量 可滴定酸(TA)含量^[18]采用自动滴定仪(877 Titrino plus, Metrohm, Herisau, Switzerland)测定,结果以柠檬酸百分比(%)表示。

1.3.10 花色苷含量 总花色苷含量测定参考 Correa-Betanzo 方法^[20],采用 pH 示差法稍作修改。称取充分研磨的蓝莓样品 0.1 g,加入 0.2 mL pH 3.0 的 60%乙醇溶液,40 °C 水浴 2 h,离心取 0.1 mL 上清液,分别用 0.2 mol/L KCl 缓冲液(pH 1.0)和 1 mol/L NaAc 缓冲液(pH 4.5)定容至 10 mL 容量瓶中,分别在 510 nm 和 700 nm 处测定吸光度值,花色苷含量以每克蓝莓所含矢车菊-3 葡萄糖苷的克数表示,单位: $\mu\text{g/g}$ 。

1.3.11 抗坏血酸含量 参考曹建康等^[21]的方法,含量以 100 g 蓝莓中抗坏血酸的质量(mg)表示,

单位:mg/100 g。

1.4 数据处理

使用 SPSS23.0 软件进行数据统计分析,使用 Origin 2021 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 联合干燥不同水分转换点对蓝莓干燥特性的影响

不同干燥方法下蓝莓干燥过程中的含水率和干燥速率变化如图 1 所示。研究发现,不同水分转换点条件下,蓝莓的含水率均随着干燥时间的增加而减少(图 1a),在水分转换点为 50%是联合远红外热泵干燥蓝莓达到干燥终点的时间为 360 min,而 30%和 40%时所需的时间分别为 480 min 和 420 min,联合干燥能有效减少干燥时间,越早联合,干燥效率越高。

由图 1b 可知,不同干燥方法对蓝莓干燥速率

影响不同,不同水分转换点干燥的蓝莓样品干燥速率在整个干燥阶段先增加后减小,可分为加速干燥阶段和降速干燥阶段,干燥速率分别在 180 min(50%)、240 min(40%)、300 min(30%)时达到最大,在干燥后期,干燥效率明显降低,其原因是在干燥初期时,热泵温度高,样品大量吸收热能,热效应逐渐增加,物料温度迅速升高,在高含水率下物料内外湿度差较大,水分子具有较强的流动性,扩散速度快,干燥速率快;含水率降低后湿度差减小,水分子扩散阻力增大,水分蒸发和迁移速率减慢,干燥速率减慢。这一结论和唐小闲在杏鲍菇干燥的研究结果一致^[8]。FIRD-HPD 后期由于在不同水分转换点联合了远红外辐照干燥,干燥速率上升,其原因是红外辐射穿透到蓝莓内部,蓝莓吸收辐射产生的热效应,使内部水分子动能增大,再次产生了较大的湿度差,导致水分更容易向外部逸出。

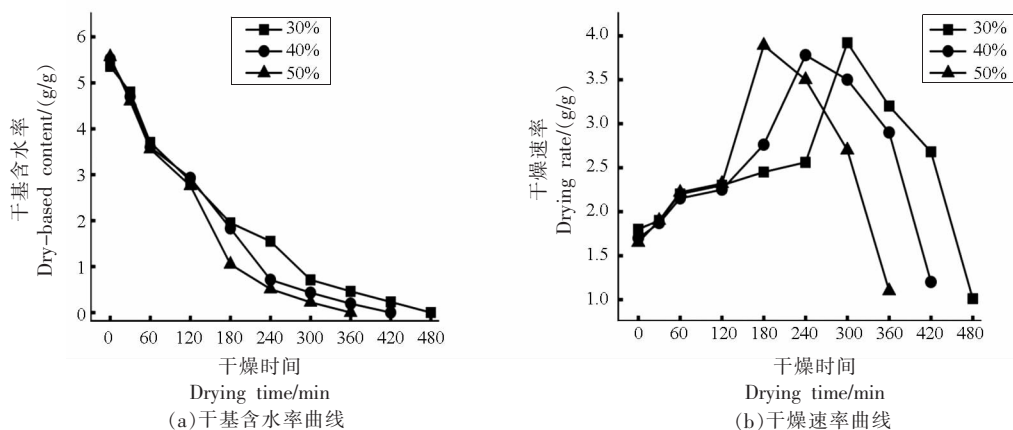


图 1 蓝莓不同水分转换点下的干燥曲线

Fig.1 Drying curves of blueberries at different water transition points

2.2 联合干燥不同水分转换点下 T_2 反演谱随干燥时间变化

对不同水分转换点联合干燥的蓝莓进行 LF-NMR 扫描,得到横向弛豫时间 T_2 ,横向弛豫时间 T_2 是指 H 质子自旋核在外加磁场收到射频脉冲刺激后,系统内部达到横向热平衡所需要得时间, T_2 越大水分的流动性越强^[21]。如图 2 所示。 T_2 表示水组分的自由度和迁移率:物质中的水一般分为 0.01~10 ms 时的结合水(T_{21})、10~100 ms 时的不

易流动水(T_{22})和 100~1 000 ms 时的自由水(T_{23}),结合水、不易流动水和自由水的峰面积记作 A_{21} 、 A_{22} 、 A_{23} ^[23]。自由水主要存在于细胞结构中的液泡、原生质体和细胞间隙中^[24],与其它两种形式的水相比,自由水更容易吸收磁能振动,并且在磁场消失后需要更长的时间才能恢复到基态^[25]。在干燥过程中,随着总含水量的减少,观察到 A_{23} 急剧减少, T_{22} 和 T_{23} 略有减少,曲线向弛豫时间较低的方向移动,表明游离含水量连续下降,水与非水组分

结合越来越紧密。弛豫峰的峰面积可以反映蓝莓中的水分含量, A_2 和 T_2 的减少表明干燥过程中水分不断蒸发, 自由水和不易流动水的流动性随干燥的进行而逐渐下降, 在杏鲍菇^[8]、大豆豆渣^[26]和虾干燥^[27]加工中发现了相同的结果。

由图 2 可知, 随干燥进行, T_2 反演谱信号随干燥进行, T_2 反演谱信号幅值呈下降趋势, 反演谱总体向左偏移, 表明蓝莓水分含量呈逐渐降低趋势, 水分的结合度逐渐变高。干燥初期, T_{23} 左迁幅度很大, 干燥后期, 左迁幅度变小, 这是因为随着干燥时间的延长, 蓝莓因不断失水发生皱缩, 组织之间相互堆叠, 束缚了自由水的流动性^[28]。在干燥后

期, 残留少量的不易流动水, 结合水所占比例变大, 不易流动水与结合水和自由水之间转化渗透, 剩余的水分越少, NMR 信号越微弱, 直到最后仅残留少量结合水紧密结合于蓝莓果实中^[29]。因此, 蓝莓在干燥过程中, 不同状态的水分之间存在互相转化和渗透, 部分水分向内迁移紧密结合底物, 部分水分向外迁移脱除。对比 30%, 40% 和 50% 水分转换点下的 T_2 反演谱, 发现 50% 条件下, 信号幅值下降得最多, 反演谱图向左移动得也最快。说明水分转换点是影响蓝莓水分迁移的重要因素, 越早联合, 水分的迁移速率越快。

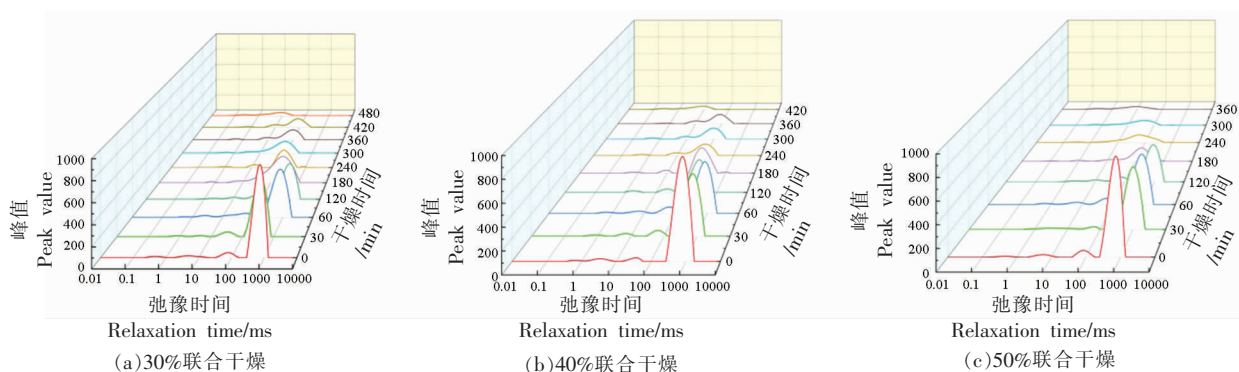


图 2 蓝莓在不同水分转换点的干燥过程中的 T_2 反演光谱曲线

Fig.2 T_2 inversion spectral curves of blueberry during drying at different water transition points

2.3 联合干燥不同水分转换点下蓝莓果实水峰面积的变化

在干燥的早期阶段, 蓝莓中的自由水较多, 自由水的自由度很高且易流动, 在干燥过程中最先生被脱除^[30]。早期的干燥速度快, 导致 A_{23} 快速下降, 表明自由水在不断减少, 部分通过干燥被去除, 部分转化为其它状态的水。在干燥过程中, 一定量的不易流动水可以转化为自由水, 从样品内部扩散到外部然后被去除, 因此 A_{22} 随着干燥时间的延长而减少。同时, 样品中的水分梯度也使一些流动性相对较高的结合水迁移到不易流动水^[31]。干燥过程中结合在蓝莓营养物质的结合水由于物质被分解而减少或者迁移, 造成 A_{21} 逐渐下降。导致 A_{21} 在整个干燥过程中呈现无规律的上下波动, 不过波动范围非常小。50% FIRD-HPD 处理组结合水峰面积的上下波动幅度最大, 说明水分转换点影响着不同形态水分之间的转化速度。另一方面原

因是不易流动水容易与大分子物质结合转化成结合水。随着干燥时间的延长, 大部分自由水被去除, 不易流动水 (A_{22}) 的残留量高于自由水 (A_{23}), 不易流动水在一定时间内成为蓝莓的主要水分状态, 并且很难去除^[31]。内部水分扩散到样品表面的速度逐渐慢于表面水扩散到空气中的速度, 从而导致干燥速率降低在干燥后期, 蓝莓中自由水已经被完全除去, 不易流动水逐渐下降, 结合水的比例高于不易流动水, 成为蓝莓的主要水分状态直至蓝莓水分干燥至安全含水量。

2.4 联合干燥不同水分转换点下蓝莓果实核磁共振成像

磁共振成像可以显示水体的空间分布, 干燥过程中水分含量的变化可以直接通过 MRI 反映出来。不同干燥方式的蓝莓在各干燥阶段的 MRI 图像如图 4 所示, 右边的条形图表示核磁共振谱带, 图像颜色从蓝色到红色表示质子信号密度从

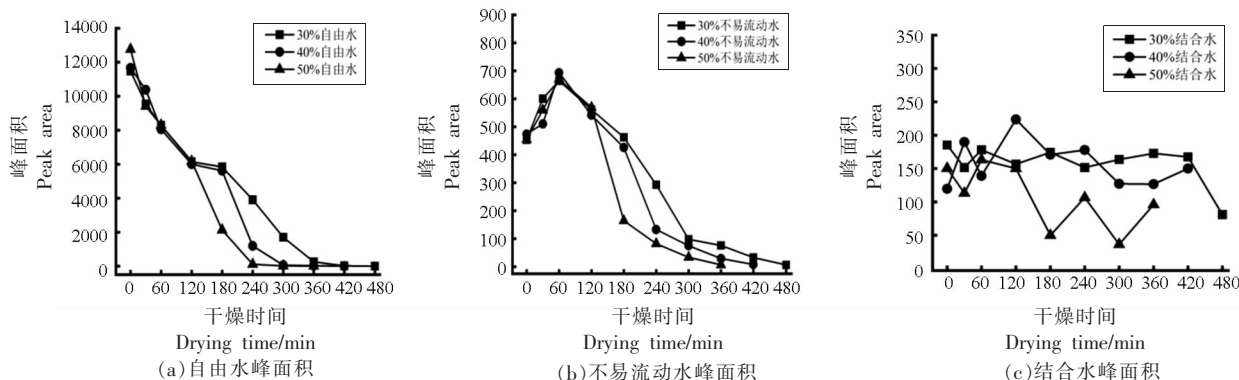


图 3 蓝莓在不同水分转换点的干燥过程中各组分水分状态变化

Fig.3 Changes in water state of each component of blueberry during drying at different water transition points

低到高^[33]。MRI 的信号强度与样品的水分子含量成正比。如图 4 所示,蓝莓中含有大量的水分,随着干燥的进行,水分和核磁共振信号量逐渐减少。在干燥初期,蓝莓轮廓清晰可见,这是由于此时在蓝莓内部水分含量的比例高,加之内部信号强度高于外围。随着干燥时间的延长,红色区域消失,黄色和绿色区域的大小逐渐减小,表明在干燥过程中内部水分会向表面迁移并蒸发扩散而损失,以及蓝莓体积在不断收缩。50% FIRD-HPD 组磁共振成像的变化速率快于 40% FIRD-HPD 处理组,40% FIRD-HPD 处理组又快于 30% FIRD-HPD 处理组,代表越早联合后的除水效率更高,其原因为物料在吸收远红外辐射后,水分子和大分子物质的结合能力会下降。在干燥 300 min 时,50% FIRD-HPD 组成像红色区域已经完全消失,黄色区域几乎消失,40% FIRD-HPD 组成像红色区域依稀可见,黄色区域成为主要部分,而此时 30% FIRD-HPD 组红色区域还很明显,表明蓝莓

中还有大量水分未被除去。在干燥末期,蓝莓中的质子信号已经几乎没有,在 MRI 成像中基本消失^[34]。这个现象在 50% FIRD-HPD 组出现在 360 min,而 40%和 30%处理组出现同样的现象出现在 420 min 和 480 min。

根据 MRI 图像,明亮部分区域随干燥过程的进行逐渐减小,边缘部分逐渐模糊,蓝莓明显地由果实边缘部分向中心逐步收缩,说明蓝莓干燥过程是物料表面水分先被除去,这部分水就是自由水,之后样品内部的水分再被除去。图 4 中 50% FIRD-HPD 组能够保持较快的除水速率,与远红外干燥强穿透性和高热效应密切相关,也是在 120 min 时就联合远红外干燥的主要原因,既可以加速蓝莓干燥进程,还能提高干燥效率。上述结果说明,FIRD-HPD 可以持续加速水分子运动,加速蓝莓中水分由内向外的扩散并除去,对蓝莓内部水分的迁移速度影响较大。

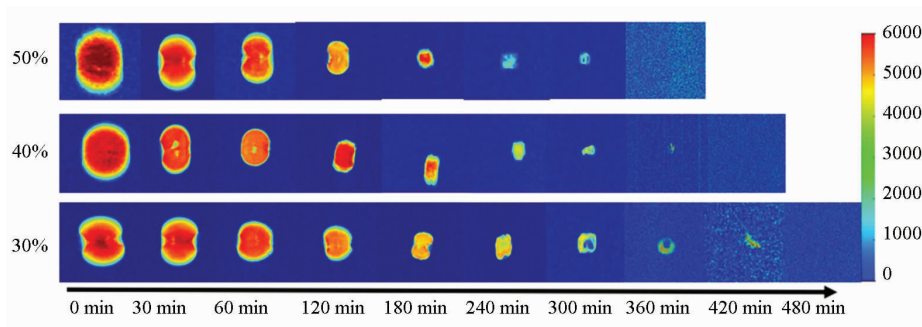


图 4 蓝莓在不同水分转换点的干燥时间的核磁成像

Fig.4 Nuclear magnetic imaging of drying time of blueberries at different water transition points

2.5 联合干燥不同水分转换点对干燥后蓝莓色泽的影响

干燥后的蓝莓的色泽会有不同程度的变化。色泽是评价蓝莓干制品品质最重要的指标之一^[35]。不同干燥方式对蓝莓的 L^* 、 a^* 、 b^* 、 ΔE 的影响结果见表 1。干燥方式对蓝莓干燥后的 L^* 影响较大,在 30% 和 50% 联合远红外热泵干燥的样品在干燥后 L^* 分别为鲜蓝莓初始值的 60.92% 和 75.05%, 说明 30% 和 50% FIRD-HPD 处理组会明显降低蓝莓的亮度值;40% FIRD-HPD 处理后的蓝莓 L^* 为鲜蓝莓初始值的 83.46%, 下降幅度显著小于其它两种干燥方法。40% FIRD-HPD 后的蓝莓能够保持较高的亮度值, 其原因为在 40% FIRD-HPD 的干燥方式适宜, 有效减少了干燥中酶促褐变的时间。另一方面 40% FIRD-HPD 处理后的蓝莓中花

色苷含量保持的最好, 是影响色泽变化的主要原因^[35]。3 组样品的 a^* 在干燥后 30% FIRD-HPD 处理组明显下降, 40% 和 50% FIRD-HPD 处理组之间没有显著性差异, 干燥结束后 a^* 均略低于初始值。50% 干燥后的样品 b^* 小幅度下降, 但 30% 和 40% FIRD-HPD 处理组的香菇 b^* 明显下降。采用 30% FIRD-HPD 的样品色泽变化明显, ΔE 在 3 种干燥方式中最小, 最小值达 66.47333; 采用 50% FIRD-HPD 的样品 ΔE 小于 40% FIRD-HPD, 为 74.01667; 40% FIRD-HPD 后整体色泽变化较小, 与 30% 和 50% FIRD-HPD 处理组相比, ΔE 增加不明显, 干燥后样品 ΔE 为 76.05333。由此可见, 由色泽指标可知, 40% 联合干燥工艺要优于 30% 和 50%, 40% 联合干燥工艺可以最大限度地保留原样品的色泽。

表 1 不同水分转换点 FIRD-HPD 干燥后对蓝莓色泽的影响

Table 1 Effects of FIRD-HPD drying at different water transfer points on color of blueberries

干燥方法	色泽			
	L^*	a^*	b^*	ΔE
鲜样	28.60667 ± 0.839127 ^a	6.30333 ± 0.35302 ^a	5.543333 ± 0.479826 ^a	
联合 30%	17.43 ± 0.816884 ^d	2.79667 ± 0.037859 ^c	2.95667 ± 0.061101 ^c	66.47333 ± 4.412849 ^c
联合 40%	23.87667 ± 0.147422 ^b	3.61 ± 0.167033 ^b	2.836667 ± 0.265769 ^c	76.05333 ± 0.572393 ^a
联合 50%	21.47 ± 0.956922 ^c	4.486667 ± 0.768462 ^b	3.656667 ± 0.115902 ^b	74.01667 ± 0.357258 ^b

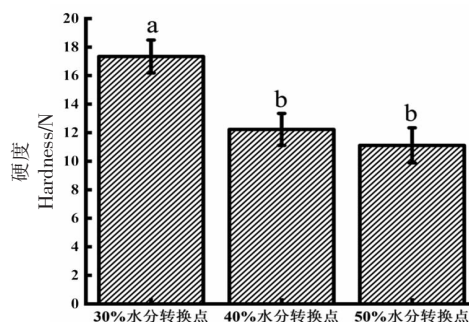
注: 小写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)。

2.6 联合干燥不同水分转换点对干燥后蓝莓硬度的影响

果干质地属性是源于果实结构的一组物理特性^[5]。由图 5 可以看出, 不同水分转换点下干燥后的蓝莓硬度有显著差异, 50% FIRD-HPD 后的蓝莓硬度最小, 为 11.11 N; 30% FIRD-HPD 后的蓝莓硬度最大, 为 17.34 N; 40% FIRD-HPD 干燥后的蓝莓硬度略高于 50% FIRD-HPD 处理组的蓝莓, 为 12.23 N。40% FIRD-HPD 能够保持较低的硬度, 而 30% 处理组的干燥时间长于其它两种干燥方式, 导致 30% FIRD-HPD 干燥后的蓝莓具有较大的硬度值。在干燥的初始阶段, 蓝莓的水分含量高, 越早联合远红外, 效率越高得到更低的硬度, 但是 50% 与 40% 最终硬度没有显著差异。

2.7 联合干燥不同水分转换点对干燥后蓝莓营养成分的影响

不同水分转换点下 FIRD-HPD 对蓝莓果干内



注: 小写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图 5 不同水分转换点 FIRD-HPD 干燥后对蓝莓硬度的影响

Fig.5 Effects of FIRD-HPD drying at different water transition points on the hardness of blueberry

在品质的影响见图 6。总酚含量。在干燥过程中, 蓝莓果实中的总酚在多酚氧化酶的作用下被氧化^[36], 导致酚类物质含量减少。40% FIRD-HPD 干燥的蓝莓干多酚含量显著高于 30% FIRD-HPD

干燥的;而 40%和 50% FIRD-HPD 对蓝莓干中总酚含量的影响差异不显著。由此可见,越早联合,果干总酚损失越多。蓝莓果干大量吸收辐射能量,热效应逐渐增加,物料温度迅速升高,使酚类物质氧化分解,导致酚类物质含量减少最多。40% FIRD-HPD 干燥的蓝莓果干总酚损失最少,究其原因可能是在 40%水分转换点联合使蓝莓中易氧化分解的成分有较好的保护作用。因此,选择适宜的水分转换点可以减少总酚含量的下降。可滴定酸含量,3 种水分转换点对蓝莓果干的可滴定酸

含量影响无显著差异。花色苷含量,蓝莓干燥过程中花色苷含量不断下降,40% FIRD-HPD 干燥果干花色苷含量最高,为 119.56 $\mu\text{g/g}$,分别为 30%,40% FIRD-HPD 果干的 1.144 倍和 1.0945 倍。3 种干燥方式使得花色苷含量呈现显著差异。40%干燥蓝莓果干 VC 含量为 12.23 mg/100 g,30% VC 含量为 8.78 mg/100 g,50%为 11.12 mg/100 g,影响蓝莓果干 VC 降解依次为 30%>50%>40%。因此,选择 40% FIRD-HPD 进行干燥,能够较大程度地保护蓝莓果干的营养物质不被分解。

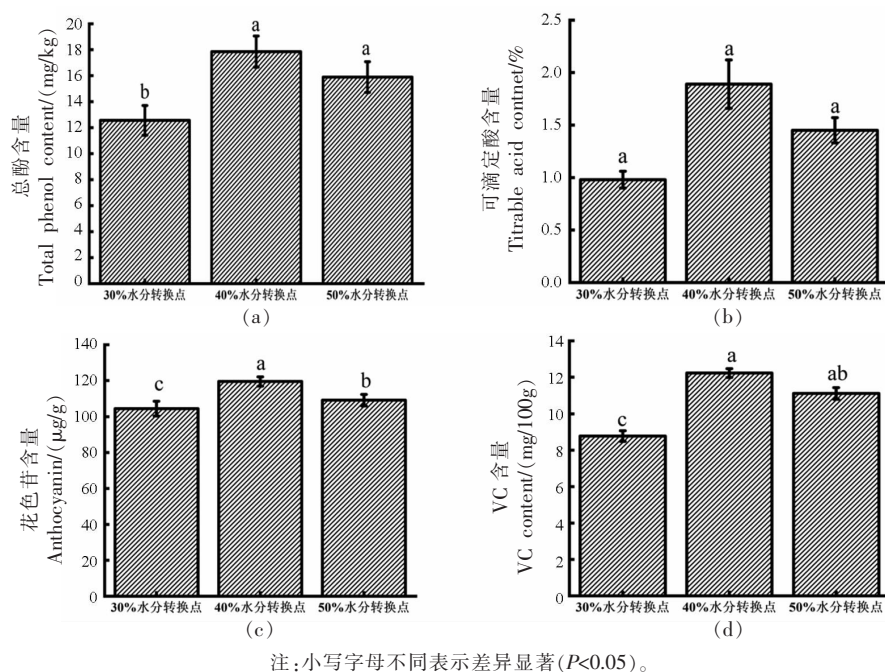


图 6 不同水分转换点 FIRD-HPD 干燥后对蓝莓营养成分的影响

Fig.6 Effects of FIRD-HPD drying at different water transition points on nutrient components of blueberry

3 结论

本研究采用低场核磁共振及成像技术研究了蓝莓远红外辅助热泵干燥过程中水分分布规律,并分析了 30%,40%和 50%水分转换点干燥后蓝莓的色泽、硬度及品质变化。结果表明:蓝莓中存在不同形式的 3 种水分别对应横向弛豫时间 T_{21} 、 T_{22} 和 T_{23} ;高自由度的水分向低自由度的水分迁移,在 3 个不同水分转换点打开远红外辐射时, T_{23} 左迁幅度较大,在干燥后期, T_{23} 左迁幅度变小,随着干燥时间延长,自由水的流动性降低,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,蓝莓的水分在不断的转化迁移,H

质子由外向内慢慢消失,水分是由外到内逐渐脱去的,内部最后失水;干燥后期,水分集中于蓝莓的内层,仅剩残余的微量结合水,NMR 成像模糊,基本接近背景色。水分转换点为 40%时,能使蓝莓获得较快的干燥速率和较短的干燥时间,且硬度低,能很好的保留原样品的色泽,所得的蓝莓果干具有最高的总酚、可滴定酸、VC 和花色苷含量。以上结论表明 LF-NMR 技术可有效地用于蓝莓干燥过程中水分与品质变化的快速、无损检测。另外 40% FIRD-HPD 干燥综合效果最佳,能够有效地保留干燥处理后的品质特性,是蓝莓干燥中高效合理的一种方式。

参 考 文 献

- [1] TOBAR BOLAÑOS G, CASAS FORERO N, ORELLANA PALMA P, et al. Blueberry juice: Bioactive compounds, health impact, and concentration technologies—A review[J]. *Journal of Food Science*, 2021, 86(12): 5062–5077.
- [2] 孙振刚, 陈健, 屈佳蕾, 等. 化橘红干燥技术与设备研究现状及对策[J]. *中国农机化学报*, 2023, 44(8): 110–117.
- SUN Z G, CHEN J, QU J L, et al. Research status and countermeasures of drying technology and equipment of Tangerine red[J]. *Chinese Journal of Agricultural Mechanization*, 2023, 44(8): 110–117.
- [3] 李晓燕, 强秋秋, 樊博玮, 等. 热管-热泵和红外-热泵联合干燥技术在农产品加工中的应用[J]. *食品与机械*, 2019, 35(215): 222–232.
- LI X Y, QIANG Q Q, FAN B W, et al. Application of heat pipe-heat pump and infrared heat pump combined drying technology in the processing of agricultural products[J]. *Food and Machinery*, 2019, 35(215): 222–232.
- [4] 青舒婷, 丰杨, 张海仑, 等. 远红外辅助热泵干燥食用玫瑰花瓣及产品品质分析[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(22): 246–253.
- QING S T, FENG Y, ZHANG H L, et al. Far-infrared assisted heat pump drying of edible rose petals and product quality analysis[J]. *Food Industry Science and Technology*, 2021, 42(22): 246–253.
- [5] 彭健, 王蔚婕, 唐道邦, 等. 分段式远红外-热泵干燥对龙眼品质的影响[J]. *食品科学*, 2020, 41(19): 118–124.
- PENG J, WANG W J, TANG D B, et al. Effect of sectional far-infrared heat pump drying on the quality of Longan[J]. *Food Science*, 2020, 41(19): 118–124.
- [6] LI D, DENG L, DAI T, et al. Ripening induced degradation of pectin and cellulose affects the far infrared drying kinetics of mangoes[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2022, 219(1): 119582–119593.
- [7] NING X, FENG Y, GONG Y, et al. Drying features of microwave and far-infrared combination drying on white ginseng slices[J]. *Food Sci Biotechnol*, 2018, 28(19): 1065–1072.
- [8] 唐小闲, 蔡明君, 韦珍珍, 等. 低场核磁共振技术分析杏鲍菇在热风-微波联合干燥过程中的水分变化[J]. *粮食与油脂*, 2023, 36(8): 90–95.
- TANG X X, CAI M J, WEI Z Z, et al. Analysis of moisture change of *Pleurotus eryngii* during hot-air and microwave drying by low-field nuclear magnetic resonance technique[J]. *Grains and Oils*, 2023, 36(8): 90–95.
- [9] 胡潇予, 蓝蔚青, 张楠楠, 等. 低场核磁共振技术在食品领域中的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(6): 380–390.
- HU X Y, LAN W Q, ZHANG N N, et al. Research progress of low field nuclear magnetic resonance technology in food field[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2017, 38(6): 380–390.
- [10] 徐建国, 徐刚, 张绪坤, 等. 利用核磁共振成像技术分析胡萝卜干燥过程中内部水分传递[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(12): 271–276.
- XU J G, XU G, ZHANG X K, et al. Analysis of water transfer in carrot during drying using nuclear magnetic resonance imaging[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(12): 271–276.
- [11] 崔莉, 杜利平, 闫慧娇, 等. 皱皮木瓜真空冻干工艺优化及基于 LF-NMR 技术的复水特性研究[J]. *中国食品学报*, 2019, 19(6): 125–132.
- CUI L, DU L P, YAN H J, et al. Optimization of vacuum freeze-drying process and rehydration characteristics of Papaya with wrinkled skin based on LF-NMR technique[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2019, 19(6): 125–132.
- [12] 罗洁莹, 梅汤, 丘苑新, 等. 利用 LF-NMR 技术研究鹰嘴蜜桃在贮藏过程中水分的变化[J]. *仲恺农业工程学院学报*, 2019, 32(1): 23–34.
- LUO J Y, MEI T, QIU Y X, et al. Study on the change of water content of Olecranon peach during storage by LF-NMR[J]. *Journal of Zhong kai University of Agricultural Engineering*, 2019, 32(1): 23–34.
- [13] CARNEIRO C D S, MARSICO E T, DE OLIVEIRA RESENDE RIBEIRO R, et al. Low-field nuclear magnetic resonance (LF NMR 1H) to assess the mobility of water during storage of salted fish (*Sardinella brasiliensis*) [J]. *Journal of Food Engineering*, 2016, 169: 321–325.
- [14] MONAKHOVA Y B, KUBALLA T, TSCHERSCH

- C, et al. Rapid NMR determination of inorganic cations in food matrices: Application to mineral water[J]. Food Chemistry, 2017, 221: 1828-1833.
- [15] 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): 34-39.
- PAN Y Y, DUAN Z H, ZHONG J N. Analysis of internal moisture variation of Persimmon slices during microwave intermittent drying by low field nuclear magnetic resonance technique[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(14): 34-39.
- [16] 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): 303-310.
- CHEN W Y, MU H L, WU W J, et al. Non-destructive determination of water content of Macadamia nut by low-field nuclear magnetic resonance technique[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 36(11): 303-310.
- [17] 卞瑞姣, 荣曹, 赵玲, 等. 基于低场核磁共振技术检测秋刀鱼腌干制过程水分状态变化[J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8(5): 1699-1703.
- BIAN R J, RONG C, ZHAO L, et al. Determination of water status change of saknife during salting and drying based on low field nuclear magnetic resonance technique[J]. Journal of Food Safety and Quality Inspection, 2017, 8(5): 1699-1703.
- [18] JIANG B, LIU R, FANG X, et al. Effects of salicylic acid treatment on fruit quality and wax composition of blueberry (*Vaccinium virgatum* Ait)[J]. Food Chemistry, 2022, 368: 130757-130766.
- [19] ZHENG Y, WANG C Y, WANG S Y, et al. Effect of high-oxygen atmospheres on blueberry phenolics, anthocyanins, and antioxidant capacity[J]. Agricultural and Food Chemistry, 2003, 51(24): 7162-7169.
- [20] CORREA-BETANZO J, ALLEN-VERCOE E, McDONALD J, et al. Stability and biological activity of wild blueberry (*Vaccinium angustifolium*) polyphenols during simulated *in vitro* gastrointestinal digestion[J]. Food Chemistry, 2014, 165: 522-531.
- [21] 曹建康, 姜微波, 赵玉梅. 果蔬采后生理生化实验指导[Z]. 中国轻工业出版社, 2007
- CAO J K, JIANG W B, ZHAO Y M, et al. Experimental guidance on postharvest physiology and Biochemistry of fruits and vegetables[Z]. China Light Industry Press, 2007.
- [22] 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 X L, LI X, ZHANG C H, et al. Water migration of beef jerky in combined infrared and hot air drying process[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(14): 322-330.
- [23] 陈衍男, 赵恒强, 卢丙, 等. 基于低场核磁共振技术的不同干燥过程中光皮木瓜水分迁移规律研究[J]. 中草药, 2018, 49(17): 4022-4028.
- CHEN Y N, ZHAO H Q, LU B, et al. Study on water migration of papaya in different drying processes based on low field nuclear magnetic resonance technique[J]. Chinese Herbal Medicine, 2018, 49(17): 4022-4028.
- [24] HANSEN C L, THYBO A K, BERTRAM H C, et al. Determination of dry matter content in potato tubers by low-field nuclear magnetic resonance (LF-NMR)[J]. Agricultural and Food Chemistry, 2010, 58(19): 10300-10304.
- [25] SONG Y K, ZANG X, 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.
- [26] CHEN T, ZHANG W, LIU Y X, et al. Water status and predictive models of moisture content during drying of soybean dregs based on LF-NMR[J]. Molecules, 2022(27): 4421-4435.
- [27] LING J G, XUAN X T, YU N, et al. High pressure-assisted vacuum-freeze drying: A novel, efficient way to accelerate moisture migration in shrimp processing[J]. Food Engineering, 2020, 85(4): 1167-1176.
- [28] 张群, 刘伟, 袁洪燕. 不同温度热风干燥对蓝莓果干品质的影响[J]. 湖南农业科学, 2018, 38(6): 79-83.
- ZHANG Q, LIU W, YUAN H Y. Effect of hot air drying at different temperatures on dry quality of blueberry[J]. Hunan Agricultural Science, 2018, 38(6): 79-83.
- [29] 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.

- LIU Z B, ZHANG Z Y, LI D J, et al. Changes of internal water content in the far infrared drying process of mushroom[J]. Food Science, 2016, 37(9): 82–86.
- [30] 曾雅, 刘云宏, 张嘉怡, 等. 远红外辐射温度对猕猴桃干燥水分迁移的影响[J]. 食品与机械, 2019, 35(8): 143–147.
- ZENG Y, LIU Y H, ZHANG J Y, et al. Effect of far-infrared radiation temperature on dry water migration of Kiwifruit[J]. Food and Machinery, 2019, 35(8): 143–147.
- [31] WEI S, TIAN Q B, JIA H F, et al. Investigation on water distribution and state in tobacco leaves with stalks during curing by LFNMR and MRI[J]. Drying Technology, 2018, 36(12): 1071–1080.
- [32] 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): 240–246.
- WANG X Y, WEI Z C, SUN C Z, et al. Research on infrared radiation drying water migration characteristics of carrot slices[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12): 240–246.
- [33] 黄国中, 王琴, 刘东杰. 基于 LF-NMR 及其成像技术探究冬枣贮藏过程中的水分变化[J]. 食品工业科技, 2021, 42(21): 319–324.
- HUANG G Z, WANG Q, LIU D J, et al. Water changes during storage of winter jujube were investigated based on LF-NMR and its imaging technology [J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(21): 319–324.
- [34] KAMAL T, ZHANG T, SONG Y K, 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, 2017, 25(2): 1–17.
- [35] 沈炜, 张会忠, 郑伟尉, 等. 干燥方式对蓝莓果干品质的影响研究[J]. 落叶果树, 2021, 4(53): 26–29.
- SHEN W, ZHANG H Z, ZHENG W W, et al. Effects of drying methods on dry quality of blueberry [J]. Deciduous Fruit Trees, 2021, 4(53): 26–29.
- [36] 刘文旭, 黄午阳, 曾晓雄, 等. 草莓、黑莓、蓝莓中多酚类物质及其抗氧化活性研究[J]. 食品科学, 2011, 32(23): 130–134.
- LIU W X, HUANG W Y, ZENG X X, et al. Study on polyphenols and their antioxidant activities in strawberry, blackberry and blueberry[J]. Food Science, 2011, 32(23): 130–134.
- [37] 范金波, 蔡茜彤, 冯叙桥, 等. 桑葚、蓝莓、黑加仑中多酚类物质的抗氧化活性[J]. 食品与发酵工业, 2015, 41(2): 157–162.
- FAN J B, CAI X T, FENG X Q, et al. Antioxidant activities of polyphenols in mulberry, blueberry and black currant[J]. Food and Fermentation Industry, 2015, 41(2): 157–162.
- [38] WANG S Y, CHEN C T, SCIARAPPA W, et al. Fruit quality, antioxidant capacity, and flavonoid content of organically and conventionally grown blueberries[J]. Agriculture and Food Chemistry, 2008, 56(14): 5788–5794.

Effect of FIRD-HPD Method on Drying Characteristics and Quality of Blueberry

Zhang Yu^{1,2}, Han Yanchao², Liu Ruiling², Chen Huizhi², Fang Xiangjun², Wu Weijie^{2*}, Gao Haiyan^{2,3*}

¹College of Food Science and Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014

²Institute of Food Science, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Vegetable Postharvest Preservation and Processing of Ministry of Agriculture and Rural Affairs (jointly established by the Ministry of Agriculture and Rural Affairs), Zhejiang Key Laboratory of Intelligent Food Logistic and Processing, China Key Laboratory of Fruit and Vegetable Preservation and Processing for Light Industry, Hangzhou 310021

³Key Laboratory of Fruit Postharvest Treatment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Hangzhou 310021)

Abstract In order to investigate the changes of internal water content and migration of blueberries with storage time under FIRD-HPD drying method, Low Field Nuclear Magnetic Resonance (LNMR) was used. LF-NMR and its Magnetic Resonance Imaging (MRI) technique were used to collect the relaxation characteristics and proton density image informa-

tion of blueberry during drying at different water transition points, analyze the changes of their regularity, and further study the changes of blueberry quality before and after drying. The results showed that when the water transfer point was 30%, 40% and 50%, the drying time of blueberry was 480 min, 420 min and 360 min, respectively. The T_2 inversion spectrum of blueberry has three distinct relaxation peaks: T_{21} (0.01–10 ms) bound water, T_{22} (10–100 ms) immobile water, and T_{23} (100–1 000 ms) free water. Free water (T_{23}) and non-mobile water (T_{22}) migrated to the direction of short relaxation time. In the late drying period, bound water became the main water state in blueberry, and free water disappeared completely. Based on MRI technology, magnetic resonance imaging of different drying methods at each drying stage was obtained, and the proton signal gradually decreased with the drying process. LF-NMR and MRI techniques can be used to monitor dynamic water distribution and migration during drying. In addition, the dry color and nutritional quality of blueberries under 40% moisture transfer point combined with far-infrared heat pump drying were superior to 30% and 50% moisture transfer point combined with far-infrared heat pump drying. Taking into consideration, the combination of infrared dry moisture conversion point set at 40% is the best choice for processing dried blueberries.

Keywords blueberry; far-infrared combined heat pump drying; low field nuclear magnetic resonance; water distribution; quality