

蓝莓热风干燥过程中水分扩散特性和微观结构变化

张 群,刘 伟*,袁洪燕,谭 欢,于美娟

(湖南省农业科学院农产品加工研究所,湖南长沙 410125)

摘 要:为了研究蓝莓热风干燥过程中水分扩散特性和微观结构的变化规律,采用电热恒温箱在 50、65 和 80 ℃ 的条件下对蓝莓进行热风干燥试验,应用核磁共振(nuclear magnetic resonance,NMR)和微观电镜扫描仪(scanning electron microscope,SEM)技术,测定蓝莓在干燥过程中水分迁移和内果皮微观结构的变化。结果表明:干燥过程改变了蓝莓中水分迁移特性,自由度高的水分向自由度低的迁移。干燥温度和干燥时间两个维度影响干燥效果,干燥速率随干燥温度的升高渐增。50、65、80 ℃ 的温度下干燥时间分别为 50、18、7.5 h。干基含水率与核磁共振信号幅值之间存在显著的线性关系($y = 113.99x + 5728.6, R^2 = 0.9901, p < 0.01$)。随干燥过程中水分的散失,蓝莓果干发生皱缩现象,微观上为细胞壁微丝排列由紧密有序变得松散无序。本研究为蓝莓果干干燥过程中水分迁移和组织微观结构的变化规律提供数据参考。

关键词:蓝莓,热风干燥,核磁共振,水分扩散,微观结构

Water Diffusion Characteristics and Microstructure of Blueberry During Hot-air Drying

ZHANG Qun, LIU Wei*, YUAN Hong-yan, TAN Huan, YU Mei-juan

(Agricultural product processing institute of Hunan agriculture science academy, Changsha 401125, China)

Abstract: The objective of this study was to investigate water diffusion characteristics and microstructure of blueberry at different temperatures during hot-air drying process, which was respectively 50, 65, 80 ℃. Using nuclear magnetic resonance (NMR) and microscopic electron microscopy (SEM) techniques, water transport and micro-structural changes in the inner pericarp of blueberries during drying were analyzed. Results showed that moisture distribution was changed in drying process and the moisture with high degree of freedom moved to the moisture with low degree of freedom. Temperature and time were two main aspects during hot-air drying. Drying rate was accelerated with the rise of drying temperature. Drying time at 50, 65 and 80 ℃ were 50, 18 and 7.5 h, respectively. Water contents in dry base and nuclear magnetic resonance signal amplitude were followed significant linear regression ($y = 113.99x + 5728.6, R^2 = 0.9901, p < 0.01$). With loss of moisture during hot-air drying process, shrinkage of blueberry occurred and microstructure changed. Microscopically, cell wall microfilaments were arranged from tightly ordered to loosely disordered. This study provided data reference for the changes of water migration and microstructure in the drying process of blueberry fruit.

Key words: blueberry, hot-air drying, nuclear magnetic resonance, water diffusion, micro-structure

中图分类号: TS255.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2019)06-0076-06

doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2019.06.013

引文格式:张群,刘伟,袁洪燕,等.蓝莓热风干燥过程中水分扩散特性和微观结构变化[J].食品工业科技,2019,40(6):76-81.

蓝莓,属杜鹃花科(Ericaceae)越橘属(Vaccinium),学名越橘,富含花色苷、维生素、鞣花酸、类黄酮等药用保健物质^[1-3],被誉为“浆果之王”,被联合国粮食及农业组织列为人类五大健康食品之一,是一种集营养与保健于一身的蓝色浆果^[4-6]。由

于蓝莓柔软多汁、易于腐烂,保质期相对较短,从延长贮藏时间、提高蓝莓食用的方便性以及丰富食品口味等方面综合考虑,蓝莓的加工以干制为主^[7-9]。目前,国内外学者已经在真空冷冻干燥、热风-微波真空联合干燥、流化床干燥等蓝莓干燥方式上取得

收稿日期:2018-06-06

作者简介:张群(1972-),女,博士,研究员,主要从事果蔬加工与质量安全控制技术方面的研究,E-mail:445613692@qq.com。

* 通讯作者:刘伟(1983-),男,博士,副研究员,主要从事果蔬加工技术方面的研究,E-mail:175244822@qq.com。

基金项目:湖南省农业科学院科技创新项目(2017JC66);湖南农业科技创新资金果蔬加工与质量安全创新团队(2017GC03)。

一定的成果^[2-3,10-12]。但在实际生产中热风干燥仍然是主要技术方法,其简单易行、成本较低。

近年来,核磁共振(NMR, nuclear magnetic resonance)已成为检测物料中水分分布较有前景的技术,其突出优点是可在不破坏物料结构、不修饰其物理特性情况下完成试验,同时,NMR 可用来证实水分迁移和水分运动的关系,并建立精准的水分迁移模型^[13]。NMR 技术能通过测定氢原子核在磁场中的纵向弛豫时间 T_1 和横向弛豫时间 T_2 来分析研究物质的含水量、水分分布、迁移以及与之相关的其他性质,此外还可得到被底物部分固定的不同部位的水分子流动特性和结构特征^[14-16]。目前国内外学者对玉米^[14]、苹果^[15-16]、牛肉粒^[17]、胡萝卜^[18]、冬瓜^[19]、小麦^[20-21]、稻谷^[22-23]、木材^[24-25]等物料干燥过程中水分迁移以及水分状态的分布和胡萝卜^[27]、土豆^[28]、葡萄^[29]和洋葱^[30]等干燥中微观结构的变化进行了研究,但蓝莓干燥过程中的水分状态变化及其微观结构的关联性少有研究报道。

因此本文以新鲜的蓝莓果实为原料,热烫处理后对其进行热风干燥,研究热风温度对其干燥过程的影响,同时利用核磁共振技术(NMR)横向弛豫时间(T_2)反演谱,获取蓝莓果实在热风干燥过程中的横向弛豫时间 T_2 及其信号幅值,并结合蓝莓果干内果皮的微观结构电镜扫描图,分析蓝莓果干热风干燥中水分扩散特性和微观组织结构的变化,以期为蓝莓果干干燥过程中水分迁移和组织微观结构的变化规律提供数据参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

蓝莓(品种为“粉蓝”) 2017 年 6 月 18 日采自贵州麻江,要求形状均匀、大小一致,采前 7 d 停止施肥,选取无霉变、无病害、无机械损伤的果实,小盒单独包装,装入周围放有冰块的泡沫箱,装入泡沫箱(事先准备好冰块),当日运回冷库预冷 24 h 待处理。

PQ001 核磁共振分析仪 上海纽迈电子科技有限公司;电热鼓风恒温干燥箱 上海精宏实验设备有限公司;Mettler Toledo AL204 电子天平 梅特勒-托利多仪器上海有限公司;Carl-Zeiss Evols 10 扫描电子显微镜 德国卡尔蔡司公司。

1.2 实验方法

1.2.1 原料处理 剔除蓝莓果实的杂质和破碎的蓝莓粒,在试验前准确称取适量的蓝莓果实放入恒温干燥箱,105 ℃烘至恒重,准确称量,计算出成熟蓝莓果实的平均初始含水率,成熟蓝莓果实平均初始含水率为 79.27% ± 1.65%。

根据预实验结果从蓝莓果干的感官和口感等指标考虑确定本研究的温度范围为 50~80 ℃,蓝莓果干水分含量 20% ± 1%。

将采摘的新鲜蓝莓果实于沸水中热烫 15 s,捞起沥干,冷却后均匀铺于托盘内,烘箱温度设定为 50、65 和 80 ℃,风速为 2.0 m/s,干燥不同的时间取出样品,测定其质量,直到蓝莓的水分含量达 20% ± 1%。

并进行低温核磁和微观电镜扫描的测定。

1.2.2 横向弛豫时间反演谱采集 采集方法参考王雪媛等^[15]方法,采集信号前称取样品质量,然后用核磁共振分析测量软件及 CPMG 序列进行横向弛豫时间 T_2 采集。试验参数为主频 18.18 MHz,测量温度为 32 ℃,90 度脉冲时间 6 us,180 度脉冲时间 12 us,重复时间 4000 ms,回波时间 0.15 ms,回波数 16000,累加采样次数 16。使用核磁共振分析测量软件及 CPMG 序列采集样品信号,每次采集信号 3 次,用于观测信号幅值的稳定性和数据修补,最后采用 SIRT 100000 进行反演得到 T_2 的反演谱,进而获得弛豫组分面积随干燥温度、干燥时间的变化曲线。

1.2.3 微观结构电镜观察 参照刘峰娟等^[29]的方法,略有改进。将干燥不同时间的蓝莓内果皮用双刃刀片切成 1 mm × 1 mm × 2 mm 大小的块状样品,用石墨双面胶粘在样品台上,样品喷金后通过扫描电子显微镜扫描观察。

1.2.4 含水量和干基含水率的测定 含水量参考 GB 5009.2-2010 中的直接干燥法。干基含水率 $W_t(\%)$ 的计算公式如下:

$$W_t(\%) = \frac{[M_t - M_0 \times (1 - W_0)] \times 100}{[M_0 \times (1 - W_0)]}$$

式中: W_t 为试样 t 时刻干基含水率,%; M_t —蓝莓干燥 t 时刻的质量,g; M_0 —蓝莓初始质量,g; W_0 —蓝莓初始含水率,%; W_t —蓝莓 t 时刻的干基含水率,%。

1.3 数据统计

以上各指标测定均为 3 次重复,其平均值, Sigmaplot 12.5 作图并进行邓肯氏差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 不同干燥温度对蓝莓果干中总水分含量的影响

按照“1.2.2 干燥处理”的实验方法,考察热风干燥温度对总水分含量的影响,试验结果如图 1 所示。随干燥时间延长,蓝莓果干含水率降低;干燥温度越高,干燥曲线越陡,干燥速率越大,水分散失越快,干燥时间越短,这与干燥玉米^[14]、胡萝卜^[18]和苹果片^[15]的干燥特性研究结果一致。干燥过程主要为降速阶段,说明蓝莓在热风干燥过程中,蓝莓果实内部水分扩散占主导因素,直接控制蓝莓果干干燥速率变化,这与玉米^[14]和胡萝卜^[18]的干燥特性一致。由图 1 可知,热风温度与干燥时间的关系呈负相关,即热风温度越高,达到干燥终点的时间越短。50、65、80 ℃不同温度下干燥,水分含量达 20% ± 1%,干燥时间分别为 50、18 和 7.5 h。在干燥过程中,物料中水分子从液态变成气态是一个吸热的过程,热风温度越高,热风与蓝莓的温度差越大,单位时间内水分子吸收的热量就越多,达到干燥终点所需时间就越短。干燥曲线的斜率代表干燥速率,80 ℃的干燥曲线最陡,65 ℃次之,50 ℃最平缓,高温干燥可明显提高干燥效率。干燥温度越高,分子运动越快,物料表面的热空气对流加快,物料内体积热增加,加速分子运动,导致水分扩散速率加快,这与任广跃等^[14]对干燥玉米、王雪媛等^[15]对干燥苹果片和张绪坤等^[18]对胡萝

卜干燥过程中内部水分变化的结果一致。

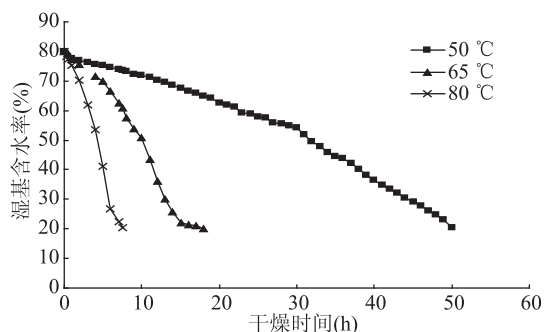


图1 不同干燥温度对蓝莓湿基含水率的影响

Fig.1 Effects of different drying temperature on the moisture content of blueberry

2.2 热风干燥过程中蓝莓果干 NMR 反演谱信号幅值变化规律

2.2.1 干燥温度对蓝莓中水状态的影响 按照“1.2.3 T_2 的采集及反演”的试验方法,测定蓝莓果干干燥过程中水分状态变化,分别为获得不同干燥温度下蓝莓果粒的横向弛豫时间反演图谱及弛豫组分面积随干燥温度的变化,试验结果如下图 2~图 3 所示。 T_2 反演图谱是以横向弛豫时间为横坐标,以 NMR 信号值为纵坐标绘成图谱,由反演图谱可得出样品中不同组分的水分弛豫时间及各组分的峰面积及其比例^[13]。以每个组分峰值对应的时间作为弛豫时间常数,弛豫时间常数的大小反映了水分的自由度, T_2 值越小,说明水与底物结合越紧密, T_2 值越大说明水分越自由。

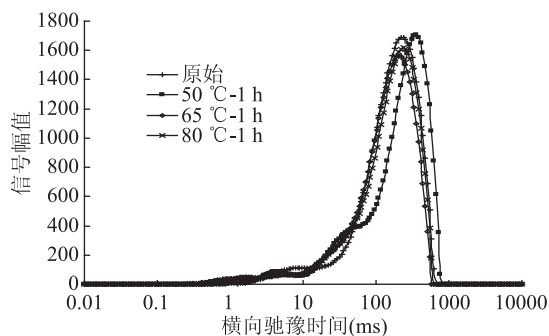


图2 不同温度干燥 1 h 蓝莓横向弛豫时间反演图谱

Fig.2 Distribution of transverse relaxation times of blueberry dried 1 h under different temperature

从图 2~图 6 中可以看出每个横向弛豫时间 T_2 图谱中出现 2 个峰: T_{21} 和 T_{22} , T_{21} 表示结合水,这部分水与其他分子结合程度最紧密,被认为在磁场中是不可转动的结合水。 T_{22} 的弛豫时间最长,这部分水被定义为自由水,主要为体积水和结构水,认为是在液泡、原生质和细胞间隙中的水分,这部分水具有水溶液中水的分子流动性。蓝莓干燥过程中伴随着很多复杂的物理化学反应,横向弛豫时间 T_2 与水分子流动性呈正比。横向弛豫时间 T_2 越短,表示水分的自由度越低,水分流动性越小,结合越牢,这部分水通常存在与细胞质中,与细胞骨架、酶褐高浓度细胞溶质结合;横向弛豫时间 T_2 越长,水分流动性越强,

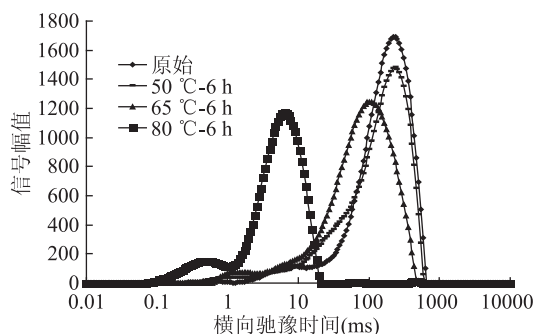


图3 不同温度干燥 6 h 蓝莓横向弛豫时间反演图谱

Fig.3 Distribution of transverse relaxation times of blueberry dried 6 h under different temperature

这部分水通常存在于液泡中,其质子的化学交换介于水和糖类或其他低分子量化合物构成的稀溶液中,与胡萝卜^[18]和冬瓜^[19]干燥物料中水分的状态分布与 T_2 的相关性的研究结果一致。

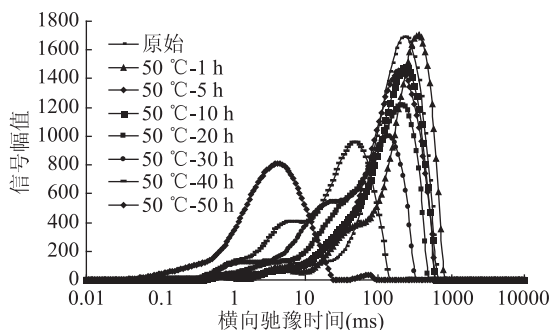


图4 50 °C 干燥不同时间蓝莓横向弛豫时间反演图谱

Fig.4 Distribution of transverse relaxation times of blueberry dried different time under 50 °C

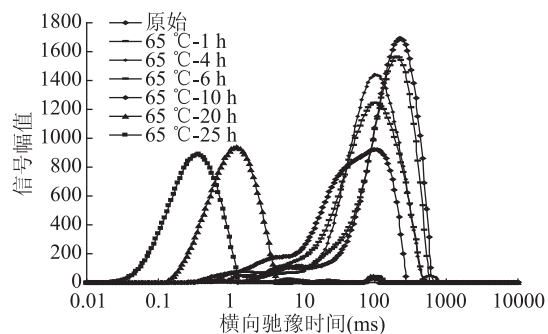


图5 65 °C 干燥不同时间蓝莓横向弛豫时间反演图谱

Fig.5 Distribution of transverse relaxation times of blueberry dried different time under 65 °C

干燥过程中核磁谱图的弛豫时间和信号幅值发生了变化,因为蓝莓样品在干燥过程中失水导致样品结构紧缩,氢质子运动性降低,横向弛豫时间缩短。由表 1 可知,在 50、65、80 °C 干燥 1 h,总含水率差异不显著($p > 0.05$),横向弛豫时间和信号幅值差异均不显著($p > 0.05$)。由图 3 可知,50、65、80 °C 干燥 6 h 后,三组样品的总含水率差异显著($p < 0.05$),横向弛豫时间和信号幅值差异显著($p < 0.05$);80 °C 的蓝莓整体谱线显著向左迁移,横向弛豫时间 T_2 为 50 °C > 65 °C > 80 °C;信号幅值减少,信号幅值大小依次为 50 °C > 65 °C > 80 °C。综合图 1 和图 2~图 3

表1 不同干燥温度条件下蓝莓含水量随干燥时间的变化

Table 1 Moisture contents change of blueberry with drying time at different temperatures

干燥时间(h)	50 ℃	65 ℃	80 ℃
1	77.71% ± 0.69% ^a	77.14% ± 0.60% ^a	75.24% ± 0.74% ^a
6	74.60% ± 0.66% ^a	66.46% ± 0.67% ^b	26.72% ± 0.82% ^c

注:同行数据标注不同小写字母表示差异显著($p < 0.05$)。

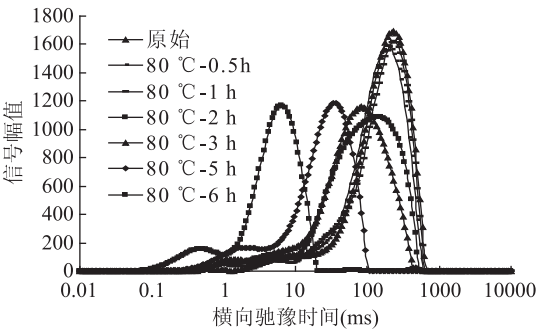


图6 80 ℃干燥不同时间蓝莓横向弛豫时间反演谱图

Fig.6 Distribution of transverse relaxation times of blueberry dried different time under 80 ℃

可得出在干燥过程中,蓝莓总水分含量降低,果肉中的自由水越来越少,使得整体的谱线向左迁移即横向弛豫时间 T_2 缩短,信号幅值逐渐减小,样品总水分含量与样品的核磁共振和水分迁移有一定的相关性,与玉米^[14]、苹果^[15-16]、胡萝卜^[18]、冬瓜^[19]等物料干燥过程中水分含量与核磁信号幅值相关性的研究结果一致。

由核磁共振原理可知,质子所处的化学环境不同,其横向弛豫时间(T_2)长短就不一样^[13]。 T_2 的大小反应样品中水分自由度的大小, T_2 越长,质子的自由度越大,说明样品中水分的结合度越小,越容易被排出^[13-14,18-19]。 T_2 的变化能够反应水分子的流动性,可以了解蓝莓干燥过程中水分的迁移。

2.2.2 干燥时间对蓝莓中水状态的影响 按照“1.2.3 T_2 的采集及反演”的试验方法,分别获得不同干燥时间蓝莓果粒的横向弛豫时间反演图谱及弛豫组分面积随干燥时间的变化,试验结果如下图4~图6所示。从图4~图6可知,在相同温度下干燥,随着烘干时间的延长,蓝莓样品在烘干过程中失水导致样品结构紧缩,氢质子运动性降低,横向弛豫时间 T_2 缩短,谱线整体向左移,信号幅值减少。80 ℃干燥1 h的弛豫时间为 T 235.43,干燥6 h的弛豫时间为 T 6.37;65 ℃干燥1 h的弛豫时间为 T 204.91,干燥6 h的弛豫时间为 T 102.34;50 ℃干燥1 h的弛豫时间为 T 357.08,干燥6 h的弛豫时间为 T 178.34;随干燥时间的延长,蓝莓果干中水分含量降低,低温核磁的峰面积减少,横向弛豫时间缩短,谱线左偏移,果干样品中水分含量与核磁的峰面积有一定的相关性,与玉米^[14]、苹果片^[15-16]、胡萝卜片^[18]、冬瓜片^[19]和洋葱片^[30]等物料干燥过程中水分含量的变化与核磁峰面积的相关性的研究结果一致。

图4~图6可知,干燥初期,蓝莓中含水率高,核磁共振信号幅值高。随干燥时间延长,含水率降低,弛豫时间和信号幅值减小。决定水分子横向弛豫时

间(T_2)主要因素是水分子流动性,物料含水率多少是弛豫行为变化的基本原因^[15-17]。由图4~图6可知,干燥初期自由水含量高,水中的氢质子与大分子间的相互作用较小,具有流动性,表现出较长的 T_2 弛豫时间;干燥时间的延长,自由水含量降低,样品中水分的自由度降低, T_2 反演谱图向左侧偏移,弛豫时间缩短;干燥后期,样品中以结合水为主,氢质子运动性降低,细胞结构更加紧密,从而减小了内部水分向外迁移的驱动力,横向弛豫时间缩短^[18-19]。整个热风干燥过程中水分逐渐由高自由度向低自由度转变,横向弛豫时间缩短,横向弛豫时间 T_2 可以间接表征出蓝莓热风干燥过程中水分子的动力学特性,与水分扩散、流动性和温度等都有密切的联系。

从图2~图6可知,干燥时间和干燥温度两个维度影响了蓝莓的脱水效果。相同的温度下干燥不同的时间,随着时间的延迟,弛豫时间缩短,信号幅值减小,整体谱线向左迁移。不同的温度下烘相同的时间,高温干燥样品的弛豫时间和信号幅值均小于低温干燥,谱线向左迁移。干燥温度升高,信号幅值降低,横向弛豫时间减少;随干燥时间的延长,核磁反演谱图的信号幅值降低,横向弛豫时间减少。干燥时间对信号幅值的影响与干燥温度的影响趋势一致,干燥时间和干燥温度是影响干燥过程中内部水分向外迁移的2个重要因素。

从图2~图6分析可知,脱水温度对脱水时间有一定的补偿作用。在干燥初始阶段(1 h以前),干燥温度对蓝莓脱水影响差异较小(图2);在干燥6 h时50和65 ℃样品脱水差异小,80 ℃样品脱水差异较大(图3);在超过20 h时,50和65 ℃样品间脱水差异显著。干燥相同的时间,低温干燥的样品核磁谱线主峰比高温的偏右(图3),意味着结构中存在较多的自由水分。为达到同等干燥效果,低温干燥需要更长的时间。

2.3 反演谱总信号幅值与干基含水率关系分析

按照1.2.3 T_2 的采集及反演,考察反演谱总信号幅值与干基含水率的关系,结合干基含水率与NMR数据分析可知,NMR总信号幅值与干基含水率之间存在一定的相关性,并得到拟合曲线(如图7)。

由图7可知,蓝莓果干干燥时干基含水率与NMR信号幅值呈明显的线性关系,经线性回归分析得到NMR信号幅值与干基含水率的拟合曲线为 $y = 113.99x + 5728.6$,拟合得出的决定系数 $R^2 = 0.9901$,相关性极显著($p < 0.01$),说明干基含水率对NMR信号幅值有极显著的影响,通过线性方程可以利用NMR测得的水质子的信号幅值计算出蓝莓果干的干基含水率,进而可间接无损快速准确确定蓝莓果干

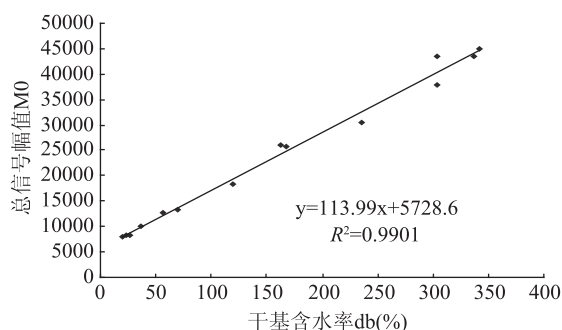


图7 NMR 总信号幅值与干基含水率(db)拟合曲线

Fig.7 Calibration curve between moisture content (db) and total NMR signal amplitude

内部的含水量,与任广跃等^[14]对玉米干燥过程中水分含量的变化、李娜等^[19]对冬瓜真空干燥中水分含量的变化结果一致。

2.4 热风干燥过程中蓝莓果干微观结构分析

图8a~图8d为干燥前和不同温度下干燥后蓝莓果干(水分含量 $20\% \pm 1\%$)果皮超微电镜扫描结果。干燥初始,图8a显示蓝莓内果皮组织结构整齐均匀,有清晰的明暗结构,没有孔洞和沟壑^[3],与胡萝卜^[27]、土豆^[28]的研究结果一致。图8b~图8d显示干燥到水分含量 $20\% \pm 1\%$ 时,不同温度干燥后的蓝莓内果皮组织微观结构有一定的差异性,与采用不同的脱水速度干燥葡萄的研究结果一致^[29]。图8b 50℃干燥50 h的蓝莓果干组织结构紧密,细胞结构变形,组织遭到破坏,对蓝莓的质构破坏程度较大,口感干硬,与干燥初始样结构差异显著^[3]。图8c显示65℃干燥18 h的蓝莓果肉组织较平滑,结构较紧密,内果皮组织超微结构显示中没有出现较深孔洞。图8d显示80℃干燥7.5 h的蓝莓果肉失水快,叠状块层结构多,果皮严重皱缩,果肉组织的相互交织网状结构遭到破坏,细胞壁紧紧地粘连在一起。综合

干燥温度和干燥时间两个维度,65℃干燥组可更好的延缓蓝莓果肉组织的皱缩干硬,降低皱缩程度,抑制果肉组织均匀的破坏,保持较好的品质。65℃干燥18 h超微结构优于80℃干燥7.5 h,优于50℃干燥50 h。干燥温度、干燥时间与果肉组织细胞结构的超微结构密切相关,此研究与胡萝卜^[27]、土豆^[28]、葡萄^[29]、洋葱^[30]的研究结果一致。不同的热风干燥温度影响水分的扩散速率和果肉组织的微观结构,与采用不同的脱水速度干燥葡萄的研究结果一致^[29]。蓝莓干燥是一个水分减少的过程,在干燥脱水过程中,组织内部超微结构受到不同程度的损伤,不同温度干燥不同时间,果干含水量不同,内果皮组织的超微结构不同,此研究与胡萝卜^[27]、土豆^[28]、葡萄^[29]、洋葱^[30]的研究结果一致。干燥后的蓝莓果肉组织细胞壁总体结构破坏、胞壁物质皱缩,果肉组织从均匀变分裂,出现许多波形皱褶,微观上为细胞壁微丝排列由紧密有序变得松散无序,宏观上果实皱缩干瘪^[3,27-30]。

3 结论

本试验应用核磁共振(NMR)和扫描电镜研究热风干燥对蓝莓果干水分扩散特性和微观组织结构的变化规律。

热风干燥曲线从宏观角度解释了水分扩散特性,水分扩散引起水分含量的变化,温度加速了水分的迁移速度;NMR从微观角度解释热风干燥过程中的水分迁移变化,含水率的降低引起细胞组织间隙的流动性降低,水分由高自由度逐渐向低自由度转变,随干燥时间的延长,横向弛豫时间和信号幅值降低。干燥温度和干燥时间是影响蓝莓脱水效果的两个维度,干燥温度对干燥时间有一定的补偿作用,干燥温度高,干燥时间短,干燥效率高。NMR信号幅值与干基含水率之间呈显著的线性回归($y = 113.99x +$

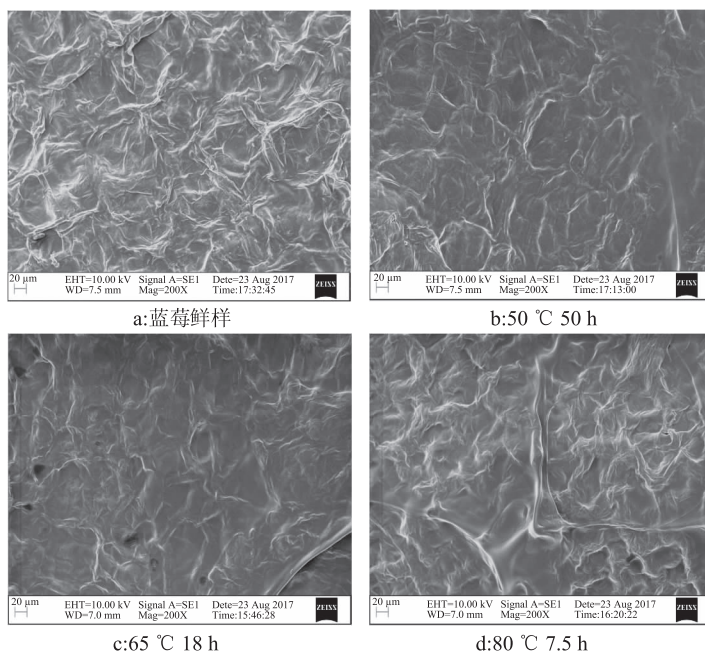


图8 不同干燥温度蓝莓果干的超微结构

Fig.8 Effects of different drying temperature on the microstructure of blueberry

5728.6, $R^2 = 0.9901$, $p < 0.01$), 利用 NMR 的信号幅值可确定干燥过程中蓝莓果干的干基含水率。

蓝莓在热风干燥过程中, 随水分迁移, 物料内产生较大的水分梯度变化, 引起蓝莓果肉组织产生不规则收缩变化, 果肉组织的相互交织网状结构遭到破坏, 细胞壁紧紧粘连在一起, 果皮出现皱缩萎蔫, 组织内部超微结构受到不同程度的损伤。在相同含水率的样品中, 干燥温度不同, 微观结构不一样。在高温干燥时, 表面温度要高于内部温度, 蓝莓表面水分迅速迁移并形成一层硬膜。当蓝莓内部干燥时, 又会呈现出内裂空隙的现象, 进而使热风干燥后的产品干燥, 口感坚硬。三组温度下干燥以 $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ 干燥 18 h 为最佳。

参考文献

- [1] 李晓英, 薛梅, 樊汶樵. 蓝莓花、茎、叶酚类物质含量及抗氧化活性比较[J]. 食品科学, 2017, 38(3): 142-147.
- [2] 李星琪, 陈厚荣. 蓝莓热风干燥特性及数学模型[J]. 农产品加工, 2016(13): 9-13.
- [3] 许晴晴, 陈杭君, 邹海燕, 等. 真空冷冻和热风干燥对蓝莓品质的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(5): 64-68.
- [4] Wang SY, Chen CT, Sciarappa W, et al. Fruit quality, antioxidant capacity, and flavonoid content of organically and conventionally grown blueberries[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2008, 56(14): 5788-5794.
- [5] Li C Y, Feng J, Huang W Y, et al. Composition of polyphenols and antioxidant activity of rabbiteye blueberry (*Vaccinium ashei*) in Nanjing[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2013, 61(3): 523-531.
- [6] 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): 130-133.
- [7] 邵春霖, 孟宪军, 毕金峰, 等. 不同干燥方式对蓝莓品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2013, 39(11): 109-113.
- [8] 吕芳楠, 温靖, 徐玉娟, 等. 不同品种蓝莓干的品质比较及干燥方式的选择[J]. 热带作物学报, 2016, 37(11): 2230-2237.
- [9] Boris N, Luis V, Xia XY. Phytochemical and physical properties of blueberries, tart cherries, strawberries, and cranberries as affected by different drying methods[J]. Food Chemistry, 2018, 262(10): 242-250.
- [10] Roberta C, Mary HG, Debora E, et al. Wild blueberry polyphenol-protein food ingredients produced by three drying methods: Comparative physico-chemical properties, phytochemical content, and stability during storage[J]. Food Chemistry, 2017, 235(12): 76-85.
- [11] Vetrachandra KY, Manjeet SC, William LK, et al. Effect of drying method on drying time and physico-chemical properties of dried rabbiteye blueberries[J]. LWT - Food Science and Technology, 2013, 50(3): 739-745.
- [12] Magdalena Z, Anna M. Microwave-assisted drying of blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) fruits: Drying kinetics, polyphenols, anthocyanins, antioxidant capacity, colour and texture[J]. Food Chemistry, 2016, 212(12): 671-680.
- [13] 阮榕生, 林向阳, 张锦胜. 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: 90-94.
- [14] 任广跃, 曾凡莲, 段续, 等. 利用低场核磁分析玉米干燥过程中内部水分变化[J]. 中国粮油学报, 2016, 31(8): 96-99.
- [15] 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.
- [16] Mothibe KJ, Zhang M, Mujumdar A, et al. Effects of ultrasound and microwave pretreatments of apple before spouted bed drying on rate of dehydration and physical properties[J]. Drying Technology, 2014, 32(15): 1848-1856.
- [17] Li X, Ma LZ, 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.
- [18] 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]. 食品科学, 2012, 28(22): 282-287.
- [19] 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, 2012, 37(23): 84-88.
- [20] Ghosh PK, Jayas DS, Gruwel MLH, et al. Magnetic resonance imaging analysis to explain moisture movement during wheat drying[J]. Transactions of the ASABE, 2006, 49(4): 1181-1191.
- [21] Ghosh PK, Jayas DS, White NDG. Magnetic resonance imaging studies to determine the moisture removal patterns in wheat during drying[J]. Canadian Biosystems Engineering, 2006, 48(1): 713-718.
- [22] Nobuaki I, Sigehiro N, Hiromi K. Loss of moisture from harvested rice seeds on MRI[J]. Magnetic Resonance Imaging, 2004, 22(6): 871-875.
- [23] Shyhshin H, Cheng YC, Chang C, et al. Magnetic resonance imaging and analyses of tempering processes in rice kernels[J]. Journal of Cereal Science, 2009, 50(1): 36-42.
- [24] Handman MS. Magnetic resonance imaging of water concentration in low moisture content wood[J]. Wood and Fiber Science, 2002, 34(2): 276-286.
- [25] Ilvonen K, Palva L, Peramaki M, et al. MRI-Based $\text{D}_2\text{O}/\text{H}_2\text{O}$ -Contrast method to study water flow and distribution in wood xylem[J]. Journal of Magnetic Resonance, 2001, 149(1): 36-44.
- [26] 陈森, 孟兆磊, 陈闰奎, 等. 樱桃水分变化的低场核磁共振[J]. 实验室研究与探索, 2013, 32(8): 52-54.
- [27] Voda A, Homan N, Witek M, et al. The impact of freeze-drying on microstructure and rehydration properties of carrot[J]. Food Research International, 2012, 49(2): 687-693.
- [28] Wang R, Zhang M, Mujumdar AS. Effects of vacuum and Microwave freeze drying on microstructure and quality of potato slices[J]. Journal of Food Engineering, 2010(2): 131-139.
- [29] 刘峰娟, 冯作山, 孟阳, 等. 脱水速度对“无核白”葡萄果皮褐变和细胞超微结构的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(6): 220-225.
- [30] Abbasi S, Mousavi SM, Mohebbi M. Investigation of changes in physical properties and microstructure and Mathematical modeling of shrinkage of onion during hot air drying[J]. Iranian Food Science and Technology Research Journal, 2011, 7(1): 92-98.