

不同干燥温度对牛肉脯水分分布迁移规律的影响

薛美芳¹, 王永瑞², 张也¹, 马亮¹, 贺晓光¹, 王松磊^{*1}

(1. 宁夏大学 食品与葡萄酒学院, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏大学 农学院, 宁夏 银川 750021)

摘要: 借助低场核磁共振技术及其核磁共振成像技术, 探讨不同热风干燥温度(50~70 ℃)在干燥时间(120~180 min)范围内牛肉脯的水分状态、水分质量分数与水分分布情况。3种干燥温度下平均干燥速率分别为 0.226 5、0.277 9、0.353 9 g/(g·min); 牛肉脯的干燥效果主要取决于其不易流动水的含量, 通过在热风干燥过程中提高温度, 可以明显提高肉脯的干燥速率, 结合水、不易流动水和自由水的迁移也会加快; 干燥过程中不易流动水在自由水和结合水之后发生变化, 不同热风温度条件下的峰面积、峰比例变化趋势较为一致, 温度越高曲线变化愈明显; 牛肉脯水分含量与峰面积之间呈现良好的线性关系, 其中 70℃干燥的线性回归方程为 $y=323.34x-6\ 092.77$ ($R^2=0.975\ 0$); 纵向弛豫时间 T_1 加权成像图表明牛肉脯 70 ℃热风干燥过程中氢质子密度分布相对均匀, 干燥品质较高。比较 3 种干燥温度的差异, 这可为今后肉脯品质提升、产品研发和节约能源提供理论依据。

关键词: 牛肉脯; 干燥温度; 低场核磁共振技术; 水分迁移

中图分类号: S 377 文章编号: 1673-1689(2021)11-0062-08 DOI: 10.3969/j.issn. 1673-1689.2021.11.008

Effect of Different Drying Temperatures on Moisture Distribution and Migration of Dried Beef Jerky

XUE Meifang¹, WANG Yongrui², ZHANG Ye¹, MA Liang¹, HE Xiaoguang¹, WANG Songlei^{*1}

(1. School of Food and Wine, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: The moisture status, moisture content and moisture distribution of beef jerky at different hot air-drying temperatures (50~70 ℃) within drying time (120~180 min) were investigated by low-field nuclear magnetic resonance and its nuclear magnetic resonance imaging technology. Results: The average drying rates at three drying temperatures were 0.226 5, 0.277 9, and 0.353 9 g/(g·min), and the drying effect of beef jerky mainly depended on its non-flowing water content. The drying rate of dried meat could be significantly increased by increasing the temperature during the hot-air drying process, and the migration of bound water, non-flowing water and free water could also be accelerated. During the drying process, the non-flowing water changed after the combination of free water and bound water. The changing trend of peak area and peak proportion under different hot air temperatures was consistent, and more significant curve changes could be observed under higher temperature. There was a good linear relationship between the moisture content of beef jerky

收稿日期: 2020-12-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(31660484); 宁夏回族自治区重点研发计划项目(2019BEH03002)。

*通信作者: 王松磊(1982—), 男, 博士, 副教授, 硕士研究生导师, 主要从事农产品无损检测研究。E-mail: wangsonglei163@126.com

and the peak area, and the linear regression equation of drying at 70 °C was $y=323.34x-6\ 092.77$ ($R^2=0.975\ 0$). The T_1 -weighted image of longitudinal relaxation time showed that the hydrogen proton density distribution was relatively uniform and the drying quality was better during the drying of beef jerky at 70 °C. The difference comparison of three drying temperatures could provide a theoretical basis for the improvement of jerky quality, product development and energy saving in the future.

Keywords: dried beef jerky, drying temperature, low field nuclear magnetic resonance, moisture migration

肉脯是肉类制品深加工的主要产品之一,因其本身诸多特点深受消费者的喜爱^[1]。水分是牛肉脯的重要组成部分,牛肉脯的品质、感官及各种变化受其水分含量及分布情况的影响^[2]。牛肉脯经过干燥后,水分含量有所降低,微生物的生长减缓^[3]。对于目前的一些干燥方法来说,晒干和风干因时间长、温差大、干燥慢,产品干燥效果不好,内外硬度不一等现象容易出现;用恒温鼓风干燥箱干燥,能使肉脯内外水分扩散较快,有利于产品工业化生产并提高产品品质。干燥能赋予肉脯良好的色泽和可接受性,牛肉经过高温会产生表面卷曲、体积减小、保水力下降等变化,这些变化都与水分损失迁移密切相关^[4]。与此同时,干燥温度和干燥时间显著影响着肉脯质量特征。

刘丽美等探讨油炸温度对牛肉干水分变化与品质的影响^[5];渠琛玲等研究了热风干燥过程中花生仁内部水分的分布规律^[6]。低场核磁共振技术能够对不同状态的水分加以区分,分析与其他物质之间的相互作用^[3]。低场核磁共振包括低场核磁共振波谱及核磁共振成像技术,它是一种现代检测技术,具备了高精度、速度快、零损伤、无侵入等特点。不同的弛豫时间 T_2 值反映了样品中不同的水分状态。 T_2 值越高,水分子的流动性越高,在 T_2 图谱上峰位置越靠右;而 T_2 值越低,水分子的流动性越差,在 T_2 图谱上峰位置越靠左^[7]。因此通过样品中横向弛豫时间 T_2 的变化来观察水分状态的变化过程^[8]。氢质子核磁共振成像可以显示样品中水分分布和加工过程中的水分结构变化。

作者以热风干燥牛肉脯为研究对象,运用低场核磁共振技术动态观测牛肉脯不同干燥温度和不同干燥时间下横向弛豫时间和核磁共振成像,了解不同干燥温度对牛肉脯色泽、水分含量、水分状态、活跃程度及水分迁移动态规律。对结果进行分析,

为干燥牛肉脯品质提升、产品研发和节约能源提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

冰鲜牛肉、调味品(包括味精、白砂糖、食盐)、马铃薯淀粉、复合磷酸盐、大豆分离蛋白、卡拉胶、红曲红(食品级):市售。

1.2 仪器与设备

JP728 料理机:苏泊尔股份有限公司产品;WSC-S 色差计:上海精密科学仪器有限公司产品;SQP 电子天平:多利斯科学仪器北京有限公司产品;DHG-9123A 恒温鼓风干燥箱:上海精宏实验设备有限公司产品;NMI120 核磁共振成像分析仪:上海纽迈电子科技有限公司产品;K30FK806 电烤箱:苏泊尔股份有限公司产品;BCD-649WDGK 冰箱:海尔股份有限公司产品。

1.3 方法

1.3.1 工艺流程 选料→原料预处理→绞肉→混匀→腌制→摊筛→烘干→烘烤→压平切片→冷却→包装→成品。

1.3.2 干燥试验 热风干燥的干燥温度为 50、60、70 °C。样品尺寸为 6.0 cm×4.5 cm×0.3 cm。通过控制恒温鼓风干燥箱加热干燥设备中的温度开关进行干燥。其中,每 30 min 取样,当含水率由干燥前的 68%降至 30%以下时,肉脯半成品的干燥过程结束^[9]。实验重复做 3 次取平均值。

1.3.3 初始含水量的测定 采用烘干恒重法^[10]测定初始含水量。

1.3.4 湿基含水率的测定 参照马慧俐等^[11]的方法。

1.3.5 干基含水率的测定 参照楚文静等^[12]的方法。

1.3.6 干燥速率的测定 参照朱文学等^[13]的方法。

1.3.7 低场核磁共振的测定 参照 Caia^[14]等的方法,

略做修改。将样品切成肉条,进行横向弛豫时间(T_2)的测定。质子共振频率为 20 MHz,磁场强度为 0.47 T。 T_2 测量用 90°。脉冲时间 16 μ s;180°脉冲时间 33 μ s。扫描 16 次,回波 2 000 次,采样点 180 030。

1.3.8 低场核磁共振成像的测定 参照 Li^[15]等的方法,略做修改。主要参数:重复时间 1 500 ms;纵向弛豫时间 T_1 为 20 ms;自旋回波时间 T_2 为 20 ms。

1.3.9 色泽测定 采用 WSC-S 测色色差计,分别记录 L^* 值、 a^* 值和 b^* 值,其中 L^* 值表示亮度, a^* 值表示红度, b^* 值表示黄度。每个处理测定 4 次。

1.4 数据处理

用 SPSS 23 软件对数据进行方差分析,所有分析图均采用 Origin2018 软件绘制。

2 结果与分析

2.1 不同干燥温度对干燥耗时及湿基含水率的影响

由图 1 可知,不同干燥环境下的干燥曲线趋势较为一致,在 50、60、70 $^{\circ}$ C 3 种干燥温度下,含水率由 68%降至 30%以下,分别用的时间为 180、150、120 min。其中干燥时间与含水率成反比,在温度为 70 $^{\circ}$ C 时含水率下降最明显。如图,干燥时间延长,其含水率并不是匀速下降的,而是逐渐趋于缓慢。在干燥时间一致下,牛肉脯 70 $^{\circ}$ C 干燥比 50 $^{\circ}$ C 和 60 $^{\circ}$ C 的湿基含水率要低,表明干燥温度越高越能够有效加快水分的迁移,提高干燥效率。与曹叶萍等^[2]的研究结果一致。这可能与蛋白质变性和肌纤维收缩有关。

2.2 不同干燥温度对干燥速率的影响

在 50、60、70 $^{\circ}$ C 3 种干燥温度下,牛肉脯干燥过程的平均干燥速率分别为 0.226 5、0.277 9 和 0.353 9 g/(g $\cdot$ min),结果见如图 2,在干燥初期水分含量高干燥速率较大。干燥后期水分含量低干燥速率减小。在干燥前 90 min 干燥速率较快。因为干燥初期,样品水分含量高肌纤维没有收缩,孔隙度较大致使水分能快速向外迁移^[16]。随着干燥过程的进行水分含量降低,肌纤维收缩卷曲,孔隙度减小抑制了水分的扩散^[17-18],使其干燥速率降低并趋于平缓。干燥后期,温度为 70 $^{\circ}$ C 的干燥速率显著低于 ($P<0.05$)50 $^{\circ}$ C 与 60 $^{\circ}$ C 温度干燥,说明在干燥前期水分下降较快,越到后期扩散相对较难。牛肉脯水分质量分数达到 40%以上时 70 $^{\circ}$ C 干燥效果更好,在水分质量分数为 40%以下时效果一般。因此水分

质量分数为 40 %以上时用 70 $^{\circ}$ C 干燥,水分质量分数达到 40 %以下时降低温度可以适当节省能量。

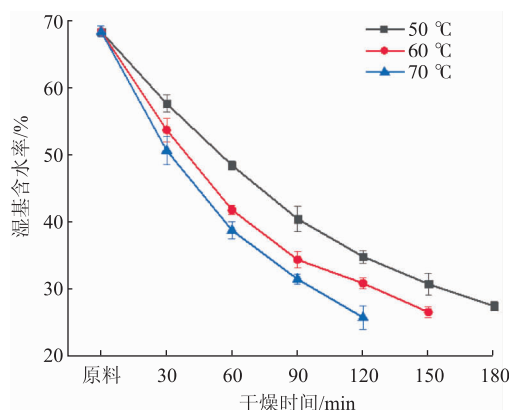


图 1 不同干燥温度下牛肉脯的干燥耗时及湿基含水率

Fig. 1 Drying time and moisture content of dried beef jerky under different drying temperatures

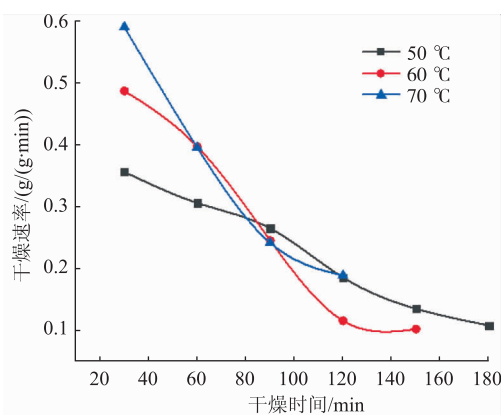


图 2 不同干燥温度下牛肉脯的干燥速率

Fig. 2 Drying rate of dried beef jerky under different drying temperatures

2.3 不同干燥温度对 T_2 弛豫图谱的影响

通过反演算法得到不同温度下牛肉脯核磁共振信号数据的 T_2 反演图谱,见图 3(a)-(c)。图中均出现 3 个峰,代表结合水、不易流动水和自由水^[19],横向弛豫时间 T_2 与水分子流动性成正比,这与刘宗博等^[20]研究结果一致。 T_2 图谱上信号量越强,峰面积越大代表该种水分含量越高^[21],可以看出牛肉脯中的不易流动水含量最高,结合水和自由水占比较少。并且不同干燥温度下,随着干燥时间的延长出现相似的变化,峰面积减小峰位置左移,说明含水率在逐渐降低^[22],这与 Lin 等^[23]研究中波红外辐射干燥胡萝卜切片水分的结果基本一致。

2.4 不同干燥温度对峰面积的影响

如表 1 所示,随着干燥时间的延长,3 种干燥温度下 A 、 A_{22} 和 A_{23} 均呈下降趋势,说明不易流动水在向自由水方向迁移而被脱去,导致不易流动水含量降低。 A_{23} 下降可能是由于牛肉在干燥过程中温度达到 50℃左右,牛肉肌球蛋白和部分肌浆蛋白发生变性,持水力降低^[23]。 A_{21} 先升高又逐渐降低,这是由于一些不易流动水开始向结合水迁移,随着干燥时间的延长结合水中结合相对较弱的弱结合水有所降低^[4]。由于干燥破坏了肉中的肌原纤维蛋白网络结构,大部分水位于肌原纤维蛋白网络结构中,导致的蛋白质变性与水分状态的变化有关。在干燥时间一致下,70℃干燥的 A 最低,这与干燥速率和含水量变化相同。表明 70℃干燥明显提升了水分扩散梯度。

2.5 不同干燥温度对横向弛豫时间的影响

横向弛豫时间 T_2 是指处于平衡态的系统受到外界刺激后,停止激发脉冲经一定时间能恢复到原来的平衡态,系统所经历的这一段时间^[20],氢质子与其他非水组分结合程度越小,水分越易失去^[25-26]。由表 2 可知,在这 3 种干燥温度下, T_{22} 和 T_{23} 均随着干燥时间的延长呈下降趋势,这与 Li 等^[14]报道的牛肉粒干燥过程中横向弛豫时间变化趋势一致。干燥初期的 T_{22} 、 T_{23} 比干燥后期的下降速度快,可能是主动力为干燥温度造成的,随着干燥时间的进行干燥速率降低, T_{22} 和 T_{23} 弛豫时间缓慢减少,说明这个阶段的主要驱动力是内部水分向外扩散的速率^[25]。这与石芳等^[25]研究食用菌的横向弛豫时间下降速率一致。在相同的干燥时间下,70℃干燥温度

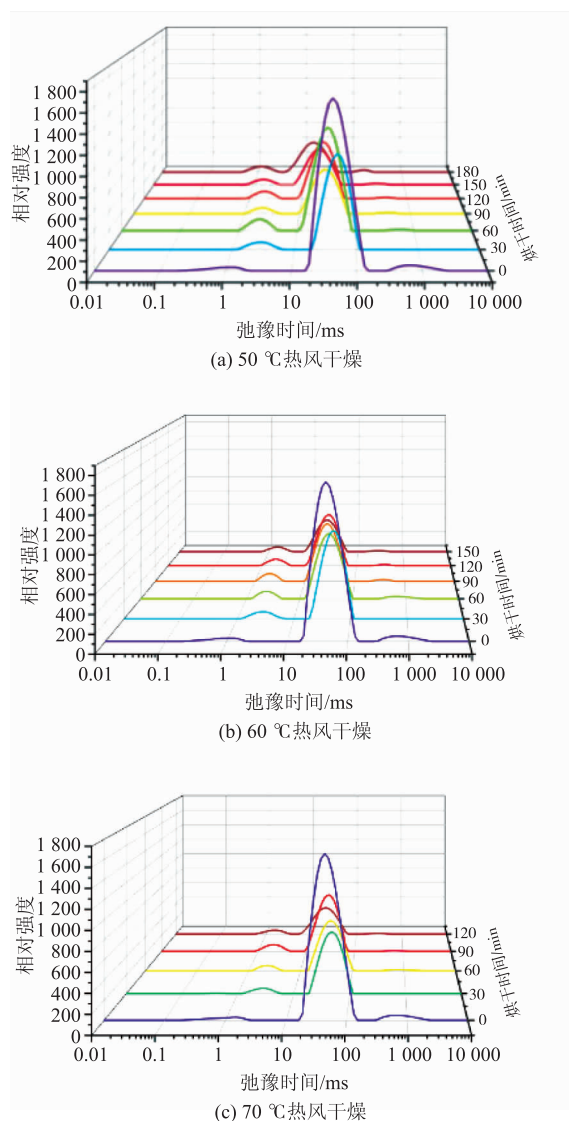


图 3 不同干燥温度下的核磁共振波谱

Fig. 3 NMR spectra under different drying temperatures

表 1 不同干燥温度下牛肉脯 3 种状态水峰积分面积

Table 1 Water peak integral area of three states of dried beef jerky under different drying temperatures

干燥温度/℃	干燥时间/min	峰面积			
		结合水 A_{21}	不易流动水 A_{22}	自由水 A_{23}	总峰积分面积 A
50	0	332.75±1.06 ^f	14 635.61±7.93 ^a	487.89±1.26 ^a	15 456.25±1.06 ^a
	30	867.13±3.01 ^a	11 996.56±3.45 ^b	138.51±0.72 ^b	13 002.20±3.11 ^b
	60	825.54±4.89 ^b	9 788.03±0.04 ^c	72.13±0.18 ^d	10 685.70±3.25 ^c
	90	474.99±2.84 ^d	4 565.87±1.60 ^d	81.15±1.63 ^c	5 122.01±4.23 ^d
	120	537.42±4.84 ^c	5 271.96±2.77 ^c	79.59±0.58 ^c	5 888.97±1.46 ^c
	150	391.89±1.26 ^e	3 441.95±4.31 ^f	54.16±0.23 ^e	3 888.00±5.66 ^f
	180	181.27±1.80 ^g	1 288.10±5.80 ^g	47.46±0.76 ^f	1 516.83±6.83 ^g

续表 1

干燥温度/℃	干燥时间/min	峰面积			
		结合水 A_{21}	不易流动水 A_{22}	自由水 A_{23}	总峰积分面积 A
60	0	337.99±4.23 ^e	14 529.11±1.26 ^a	505.20±3.11 ^a	15 372.30±3.25 ^a
	30	512.10±1.27 ^d	7 447.45±7.71 ^b	233.77±0.33 ^b	8 193.31±4.68 ^b
	60	521.95±7.14 ^d	6 812.96±2.88 ^{bc}	231.56±2.21 ^b	7 566.47±4.99 ^c
	90	562.01±5.64 ^e	5 200.45±0.64 ^d	118.57±0.81 ^c	5 881.02±1.44 ^d
	120	581.94±2.74 ^b	3 971.28±8.88 ^e	69.71±0.41 ^c	4 622.94±4.16 ^e
	150	663.86±3.03 ^a	1 766.30±1.84 ^f	76.87±1.60 ^d	2 507.02±2.80 ^f
70	原料	306.56±2.21 ^d	14 506.66±1.90 ^a	460.74±1.78 ^a	15 273.97±5.70 ^a
	30	636.13±2.64 ^a	10 208.14±5.85 ^b	206.72±2.43 ^b	11 050.99±1.40 ^b
	60	592.21±3.13 ^b	6 834.98±0.03 ^c	108.96±1.47 ^c	7 536.14±8.68 ^c
	90	537.42±2.23 ^c	3 271.96±1.47 ^d	79.59±0.58 ^d	3 888.97±1.46 ^d
	120	299.61±0.55 ^e	1 047.27±3.21 ^e	67.59±0.58 ^e	1 414.46±0.76 ^e

注: 同列不同小写字母表示差异性显著 ($P<0.05$)。下同。

表 2 不同干燥温度下牛肉脯中 3 种状态水的横向弛豫时间

Table 2 Transverse relaxation time of water in three states of dried beef jerky under different drying temperatures

干燥温度/℃	干燥时间/min	弛豫时间/ms		
		结合水 T_{21}	不易流动水 T_{22}	自由水 T_{23}
50	0	2.47±0.14 ^f	135.69±3.81 ^a	1211.47±6.41 ^a
	30	4.99±0.12 ^a	98.68±2.37 ^b	1022.98±4.21 ^b
	60	4.34±0.02 ^b	76.25±2.47 ^c	1001.83±2.59 ^c
	90	2.75±0.08 ^c	51.09±1.54 ^c	530.73±3.86 ^d
	120	3.46±0.04 ^c	50.19±1.18 ^c	331.96±2.78 ^f
	150	3.01±0.02 ^d	60.46±2.18 ^d	498.62±1.96 ^e
	180	1.04±0.05 ^g	17.22±1.11 ^f	282.23±3.15 ^g
60	原料	2.49±0.09 ^f	135.69±3.81 ^a	1011.46±5.00 ^a
	30	3.64±0.04 ^c	118.02±2.80 ^b	971.69±2.39 ^b
	60	4.19±0.02 ^a	87.67±3.29 ^c	771.69±4.68 ^c
	90	3.04±0.04 ^c	66.32±0.96 ^d	530.73±3.21 ^d
	120	3.77±0.04 ^b	57.68±1.86 ^c	470.73±3.21 ^e
	150	3.38±0.03 ^d	51.09±1.54 ^f	331.96±1.46 ^f
70	原料	2.96±0.06 ^d	135.69±3.26 ^a	1151.47±5.00 ^a
	30	4.68±0.08 ^a	115.90±4.10 ^b	996.92±4.36 ^b
	60	4.34±0.05 ^b	72.80±3.96 ^c	772.80±3.96 ^c
	90	3.46±0.09 ^c	50.17±2.59 ^d	331.96±4.29 ^d
	120	1.16±0.04 ^e	23.25±2.47 ^e	103.71±5.25 ^e

下的 T_{22} 、 T_{23} 显著低于 ($P<0.05$) 50 ℃和 60 ℃干燥, 表明 70 ℃干燥能加快水分的自由扩散度。随着干燥的进行, T_{21} 逐渐增大然后又减小, 结合水的波峰右移, 不易流动水的波峰左移, 这说明结合水和不易流动水两种水分相互转化, 逐渐成连续状态。

2.6 不同干燥温度对水分分布的影响

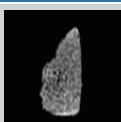
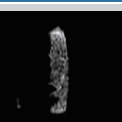
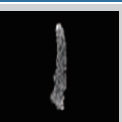
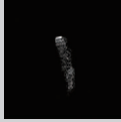
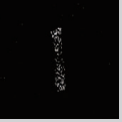
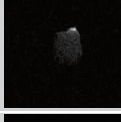
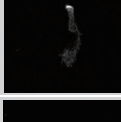
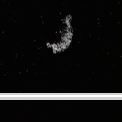
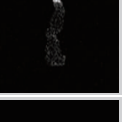
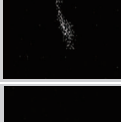
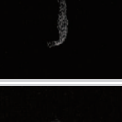
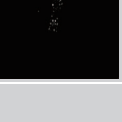
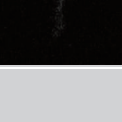
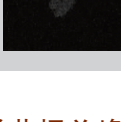
核磁共振成像技术 MRI 是用投影重建法根据

所释放的磁共振的信号强度, 研究加工过程中的水分分布和结构变化^[27-28]。由表 3 可知, 对比不同热风温度条件下 T_1 加权成像图发现, 在热风温度为 50 ℃时, 成像图亮度变化缓慢; 随着温度的增加, 亮度变化越明显。干燥时间相同, 不同温度条件下的加权成像图有所不同, 成像图的亮度下降, 表明其含水率逐渐减少, 与玉米干燥过程中的成像图亮度变化

一致^[29]。这说明不同的温度条件下,水分迁移速率的变化较明显。随着干燥的进行,物料不断收缩卷曲,其原因是水分子外迁产生的应力效应造成物料组织结构出现收缩现象。

表 3 不同干燥温度下牛肉脯氢质子密度成像对比

Table 3 Comparison of hydrogen proton density imaging of dried beef jerky under different drying temperatures

干燥时间/min	干燥温度/℃		
	50	60	70
0			
30			
60			
90			
120			
150			
180			

2.7 低场核磁共振总峰积分面积与涇源牛肉湿基含水率相关性分析

从图 4 可以看出,不同干燥条件下,低场核磁共振峰积分面积总和与湿基含水率均呈现显著的线性关系 ($P<0.05$),50℃干燥的线性回归方程为 $y=337.83x-6\ 946.19$ ($R^2=0.957\ 0$),60℃干燥的线性回归方程为 $y=270.72x-4\ 296.98$ ($R^2=0.928\ 6$),70℃干燥的线性回归方程为 $y=323.34x-6\ 092.77$ ($R^2=0.975\ 0$),表明其含水率对核磁共振峰积分面积有影响。因为

直接测定湿基含水率耗时长,根据建立的方程可以更好地预测样品含水率,为牛肉脯热风干燥工艺优化、过程控制提供参考。

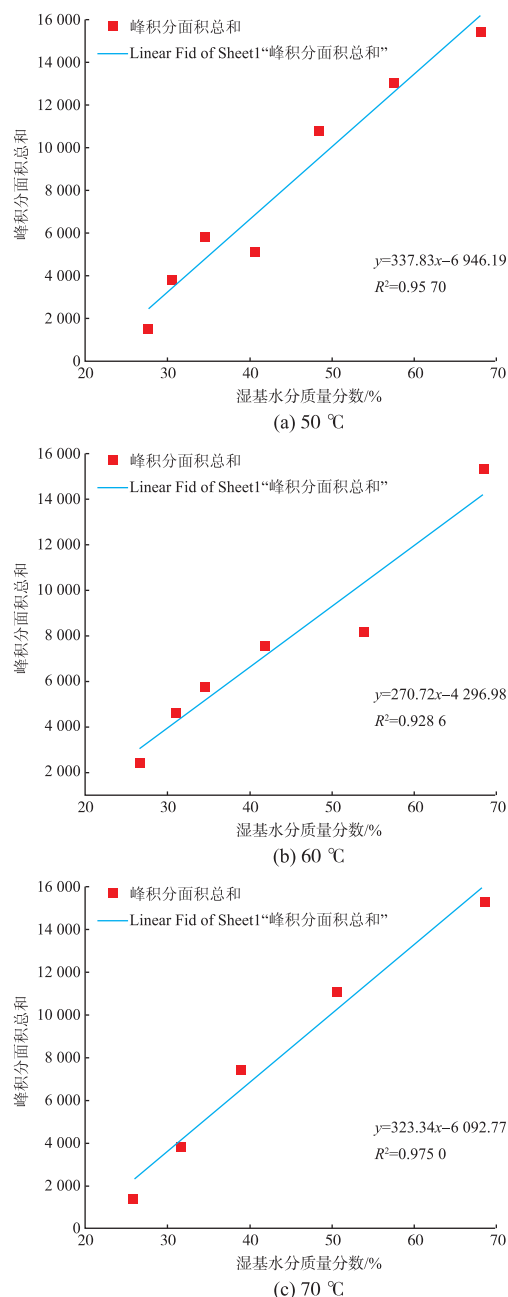


图 4 不同干燥温度下牛肉脯湿基含水率与低场核磁共振总峰积分面积的相关性分析

Fig. 4 Correlation analysis between moisture content of wet base and total peak integral area of low-field NMR magnetic resonance under different drying temperatures

2.8 不同干燥温度对色泽变化的影响

色泽是影响消费者喜爱度和产品市场接受度

的重要品质属性之一。肌红蛋白的氧化是牛肉干燥过程中色泽变化的主要原因。从图 5 可以看出,不同干燥温度下 L^* 值逐渐下降,亮度降低, a^* 值和 b^* 值先升高,随后又慢慢降低。干燥温度升高,亮度 L^* 值逐渐降低,这是因为干燥过程中发生美拉德反应,产生诱人的亮红色;美拉德反应随着温度的升高而加剧,当温度过高时美拉德反应过度直接影响色泽;亮度值 L^* 下降,还因为牛肉脯汁液减少,引起样品表面光鲜度下降,从而使样品亮度减弱。此外,干燥结束后干燥温度高的 a^* 值和 b^* 值比干燥温度低的高,此结果与姜秀丽^[3]研究的牛肉干颜色变化结果一致。

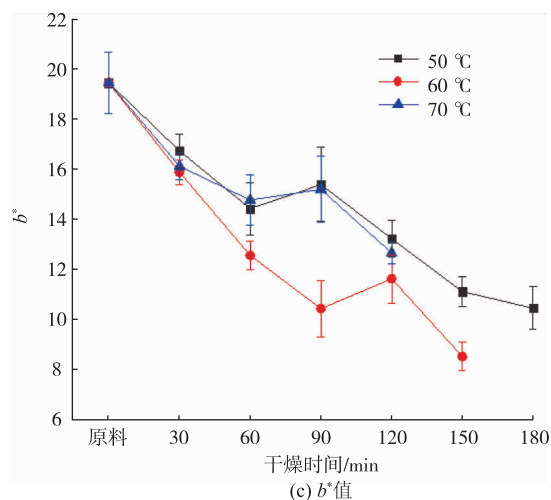
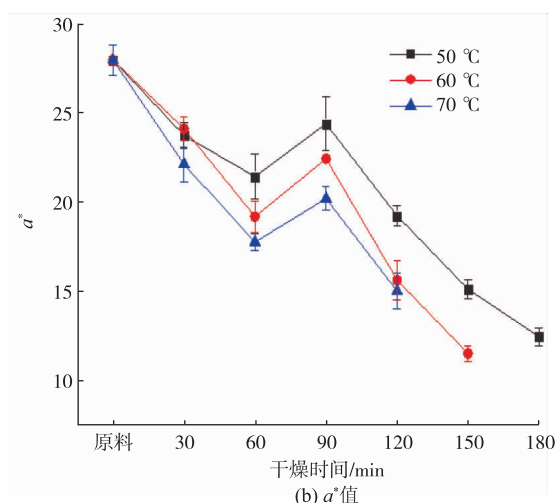
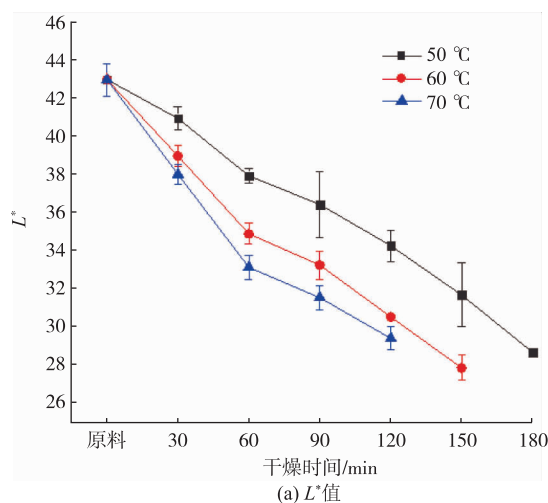


图 5 不同干燥温度下的色泽

Fig. 5 Color under different drying temperatures

3 结 语

采用低场核磁共振技术,分别从以下方面揭示了牛肉脯在 3 种不同干燥温度下的水分状态。

1) 牛肉脯在 50、60、70 °C 3 种干燥温度下,含水率 68% 降至 30% 以下,用的时间为 180、150、120 min,平均干燥速率分别为 0.226 5、0.277 9、0.353 9 g/(g·min)。

2) 牛肉湿基含水率达到 35% 左右时,结合水峰积分面积 A_{21} 明显降低,不易流动水的波峰明显左移。

3) 不同干燥温度下,牛肉湿基含水率与核磁共振峰积分面积总和均呈现显著的线性关系 ($P < 0.05$),其中 70 °C 干燥的线性回归方程为 $y = 323.34x - 6\ 092.77$ ($R^2 = 0.975\ 0$)。

4) 3 种温度下的水分变化基本一致。70 °C 干燥前期水分下降较快,而后期水分扩散速率显著低于 ($P < 0.05$) 50 °C 及 60 °C 干燥,但在相近含水状态下 70 °C 干燥的氢质子密度分布相对均匀,牛肉脯干燥品质较高。

参考文献:

- [1] SHUO S H, BAOHUA K, YAN W, et al. Comparison of the quality of beef jerky processed by traditional and modern drying methods from different districts in Inner Mongolia[J]. *Meat Science*, 2020, 163: 108080.
- [2] 曹叶萍, 郇延军, 高静. 烘烤过程中水分分布和蛋白变性对猪肉脯质构的影响[J]. *食品与机械*, 2019, 35(1): 25-31.

- [3] 姜秀丽,牛海力,孔保华,等. 烘干温度对牛肉干水分分布与品质相关性的影响[J]. 食品研究与开发,2016,37(21):10-15.
- [4] WALSH H, MARTINS S, O'NEILL E E, et al. The effects of different cooking regimes on the cook yield and tenderness of non-injected and injection enhanced forequarter beef muscles[J]. **Meat Science**, 2010, 84(3):444-448.
- [5] 刘丽美,刘莺,孔保华,等. 基于低场 NMR 研究油炸温度对牛肉干水分分布与品质的影响[J]. 中国食品学报,2016,16(5):238-244.
- [6] 渠琛玲,汪紫薇,王雪珂,等. 基于低场核磁共振的热风干燥过程花生仁含水率预测模型 [J]. 农业工程学报,2019,(12):290-296.
- [7] 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.
- [8] XIAO Q, LIM L T, ZHOU Y J, et al. Drying process of pullulan edible films forming solutions studied by low-field NMR[J]. **Food Chemistry**, 2017, 230(17):611-617.
- [9] 姚芳,刘靖,张静,等. 热风远红外联合干燥肉脯的工艺优化及其品质研究[J]. 食品工业科技,2018,39(20):165-172.
- [10] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.3—2016 食品安全国家标准食品中水分的测定[S]. 北京:中国标准出版社,2016.
- [11] 马慧俐,王松磊,贺晓光,等. 不同干燥方式下黄牛肉水分分布迁移规律研究[J]. 核农学报,2021,35(1):138-146.
- [12] 楚文靖,盛丹梅,张楠,等. 红心火龙果热风干燥动力学模型及品质变化[J]. 食品科学,2019,40(17):150-155.
- [13] 朱文学,尤泰斐,白喜婷,等. 基于低场核磁的马铃薯切片干燥过程水分迁移规律研究[J]. 农业机械学报,2018,49(12):364-370.
- [14] CAIA L Y, WENDI Z H, AILING C, et al. Effects of ultrasonics combined with far infrared or microwave thawing on protein denaturation and moisture migration of *Sciaenops ocellatus* (red drum)[J]. **Ultrasonics-Sonochemistry**, 2019:96-104.
- [15] 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.
- [16] SIMONE S, CYRIL V, FREDERIC O. The impact of cooking on meat microstructure studied by low field NMR and neutron tomography[J]. **Food Structure**, 2017, 36-45:2213-3291.
- [17] LI L, ZHANG M, YANG P. Suitability of LF-NMR to analysis water state and predict dielectric properties of Chinese yam during microwave vacuum drying[J]. **Food Science and Technology**, 2019, 105:257-264.
- [18] 程新峰,周守标,杭华,等. 基于 LF-NMR 的香芋微波真空干燥中水分扩散特性研究[J]. 现代食品科技,2019,35(2):1-8.
- [19] 史胜娟,刘丽莉,张孟军,等. 微波真空冷冻干燥功率对鸡蛋清水分迁移及凝胶微观结构的影响[J]. 食品与发酵工业,2020,46(20):15-20.
- [20] 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.
- [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] 孟舒雨,赵改名,李苗云,等. 反复冻融过程中调理狮子头脂肪氧化与低场核磁共振弛豫特性的相关性[J]. 食品与发酵工业,2019,45(20):75-80.
- [23] LIN W, BAOGUO X, BENXI W, et al. Low frequency ultrasound pretreatment of carrot slices: effect on the moisture migration and quality attributes by intermediate-wave infrared radiation drying[J]. **Ultrasonics Sonochemistry**, 2018, 40:619-628.
- [24] 李银,孙红梅,张春晖,等. 牛肉解冻过程中蛋白质氧化效应分析[J]. 中国农业科学,2013,46(7):1426-1433.
- [25] 石芳,肖星凝,李瑶,等. 食用菌恒温干燥过程中 MRI 成像及水分迁移变化[J]. 食品与发酵工业,2017,43(7):98-104.
- [26] RUIZ-CABRERA M A, GOU P, FOUCAT L, et al. Water transfer analysis in pork meat supported by NMR imaging[J]. **Meat Science**, 2004, 67(1):169-178.
- [27] 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.
- [28] 吕豪,吕为乔,崔政伟,等. 不同微波环境下苹果片干燥特性分析[J]. 农业机械学报,2018,49(S1):433-439.
- [29] BOROMPICHAICHARTKUL C, MORAN G, SRZEDNICKI G, et al. Nuclear magnetic resonance (NMR) and magnetic resonance (NMR) and magnetic resonance imaging (MRI) studies of corn at subzero temperatures[J]. **Journal of Food Engineering**, 2005, 69(2):199-205.