

羊肉烤制过程中水分的分布与迁移规律

王永瑞¹, 薛美芳², 罗瑞明², 王松磊^{2*}

(¹宁夏大学农学院 银川 750021

²宁夏大学食品与葡萄酒学院 银川 750021)

摘要 以宁夏盐池滩羊为试验原料,采用低场-核磁共振技术研究 3 个温度下羊肉烤制过程中水分的分布与迁移规律。结果表明:3 个烤制温度下羊肉水分含量均逐渐降低趋势,烤制 20 min 的羊肉含水率在 55%左右。羊肉的 L^* 值随烤制时间的延长呈先上升后下降, a^* 值呈先下降后趋于平衡趋势, b^* 值呈先上升后趋于平衡趋势。3 个烤制温度下的结合水含量普遍呈现上升的趋势,而不易流动水含量呈现相反的趋势,自由水含量差异不显著($P>0.05$)。不同烤制时间条件下羊肉弛豫时间对应的不易流动水和自由水发生明显迁移,水分的自由度由高至低,水分流动性变小。3 个烤制温度下羊肉的氢质子密度图像亮度随烤制时间的延长呈下降趋势,以 250 °C 烤制温度最为明显,表明该温度条件下羊肉的水分含量降低最快。烤制过程中,低场核磁共振峰积分面积总和与羊肉含水率呈显著的线性关系($P<0.05$),感官评价结果表明:烤制 12,14 min 和 18 min,分别为 250,220 °C 和 190 °C 烤制羊肉风味最佳的时间。

关键词 低场核磁共振;烤羊肉;水分迁移;色泽变化;感官评价

文章编号 1009-7848(2022)03-0297-12 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2022.03.033

低场-核磁共振技术(low-field nuclear magnetic resonance, LF-NMR),为近些年来兴起的一种分析技术,具有快速、无损、无侵入等特点^[1]。在石油能源、地质岩矿以及食品、农业等领域得到广泛的应用,可以对样品中水分的分布及迁移规律进行针对性的研究^[2-7]。其主要依据的原理是外加于氢质子的恒定外磁场 B_0 会使氢质子发生能级分裂。采用一定频率的射频脉冲干预氢质子,当该射频脉冲的频率与氢质子固有的回旋频率恰好相等时,氢质子就会吸收射频脉冲的能量,进而发生能级跃迁。而当射频脉冲结束后,氢质子先前从射频脉冲中吸收的能量就会以非辐射的形式释放,氢质子返回到基态状态。当体系达到玻尔兹曼热平衡时所消耗的时间称之为横向弛豫时间 T_2 ,又称自旋-自旋弛豫时间^[8]。样品中,氢质子的 T_2 值与其所处化学环境息息相关,而从 T_2 值的变化可以反映样品中水的状态。在样品 T_2 的反演图谱上, T_2 值呈现自左向右逐渐升高,所对应的水分子

的自由度也自左向右逐渐升高,水分子的流动性逐渐增强^[9]。根据 T_2 的变化对微观水分的状态和迁移规律进行分析,可实时监测样品在高温失水的过程中水分状态的变化^[10]。氢质子核磁成像可以清晰地显示水分在样品内部的空间分布。

羊肉具有较高的蛋白以及较低的脂肪,肉质比较细嫩且容易被人体消化,是重要的营养物质来源。宁夏盐池的滩羊肉可以说是羊肉中的极品,作为宁夏特色畜种,广受美食家以及消费者的认可^[11]。烤羊肉作为一种传统的羊肉制作方式,早在 1 800 年前就已盛行,且一直延续至今。本研究采用 LF-NMR 技术对不同烤制时间的滩羊肉样品进行水分迁移规律分析,研究烤羊肉的最佳烤制技术,为烤羊肉的工业化生产提供技术依据。

1 材料与方 法

1.1 材料与试剂

试验用羊肉为宁夏鑫海食品有限公司提供的 9 月龄体重(30±1)kg 的盐池公羊后腿肉。

1.2 仪器与设备

NMI20 核磁共振成像分析仪,上海纽迈电子有限公司;海氏 HO-405 型电烤箱,青岛汉尚电器有限公司;DHG-9213A 型电热恒温鼓风干燥箱,上海精宏试验设备有限公司。

收稿日期:2021-03-10

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFD0400101);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)

作者简介:王永瑞(1991—),男,博士生

通信作者:王松磊 E-mail:wangsonglei163@126.com

1.3 试验方法

1.3.1 样品制备 将羊后腿上的羊骨剔除,剔除后将羊肉上的脂肪以及筋膜撕去得到纯羊肉肌肉样品。然后用自来水对羊肉清洗,将表面的血迹和其它杂质洗净^[2]。洗净后,将羊肉肌肉部分分别切成 2.0 cm×2.0 cm×1.5 cm 的小块,然后将其以前后左右 3 cm 的间距放在垫有锡箔纸的烤盘上,然后放入提前已预热 10 min 的烤箱中进行烤制。烤箱的上、下面温度分别设置为 190,220 和 250 °C 3 个温度对羊肉进行烤制。取分别烤制了 2,4,6,8,10,12,14,16,18 和 20 min 的烤羊肉肌肉样品作为材料进行后续的分析。

1.3.2 指标测定

1.3.2.1 色度值的测定 烤羊肉的色度值(a^* 值、 b^* 值以及 L^* 值)使用 WSC-S 型测色差计进行测量,每个样品测定 5 次。

1.3.2.2 羊肉含水率的测定 羊肉的含水率采用烘干恒重法^[13]测定。称取一定量不同烤制时间的羊肉样品,放置在 105 °C 的恒温鼓风干燥箱内进行烘干,干燥至其质量保持恒定时停止干燥。分别称取干燥前、后的样品的质量进行含水率的计算。含水率的计算公式如下:

$$W_t = \frac{m_t - m_0}{m_t} \times 100\%$$

式中: W_t ——在烤制 t 时刻羊肉样品的含水率,%; m_t ——在烤制 t 时刻羊肉样品的质量,g; m_0 ——羊肉样品在绝干时的质量,g。

1.3.2.3 核磁共振波谱的测定条件 参照 Li 等^[14]的核磁共振波谱的测定方法并加以修改,烤羊肉样品的 T_2 横向弛豫时间使用 FID 硬脉冲序列进行测量。其中 CPMG 脉冲序列的参数:18 MHz 的质子共振频率;382.241 65 kHz 的偏移频率;16 μ s 的 90°脉冲时间,33 μ s 的 180°的脉冲时间;采样点数设置为 143 140;1 500 ms 的重复间隔 TR 时间;16 次累加;2 000 回波数。待核磁共振扫描结束后对信号进行反演,进而获得 T_2 的反演谱。

1.3.2.4 氢质子密度成像的测定 参照 Li 等^[14]的方法。氢质子密度成像通过核磁共振成像系统自旋回波成像序列进行,成像的方式采用冠状面成像。基本参数: T_1 (纵向弛豫时间)的值设置为 20 ms;1 500 ms 重复时间;4 次重复;20 ms 自旋回

波时间。

1.3.2.5 感官性评价 参考李燕杰等^[15]的方法,选取年龄在 22~25 岁之间,且具有食品专业背景的男生与女生各 5 名组成感官评定小组,并对感官术语的熟悉以及反复嗅觉评价进行相应的培训。在本次试验中,一共选取了 8 种气味属性(烘烤味、焦糊味、清香味、油脂味、腥味、肉味、坚果味以及总体风味)作为感官评价指标,以打分的形式对样品各个感官评价指标进行描述性分析。采用十分制打分规则对烤羊肉的感官特性进行了评估(8~10:极强,6~8:强,4~6:中等,2~4:弱,0~2:极弱)。

1.4 数据处理

数据的平均值和标准偏差分析在 Excel 表格中执行;所有需要进行显著性差异分析的数据均使用 SPSS 17 软件进行分析,设定 $P < 0.05$ 为显著差异;使用 Origin 18C 软件对数据进行作图。

2 结果与分析

2.1 不同烤制温度下羊肉含水率的变化

羊肉中的水分含量对于羊肉的风味和质构有重要的影响。设置 250,220 和 190 °C 3 个烤制温度,按照 1.3.2.2 节中的公式对羊肉的含水率进行计算,计算结果如图 1 所示。从图中可以看出在 3 种烤制温度下,随着烤制时间的增加,羊肉含水率总体呈现下降趋势。鲜羊肉中的含水率在 73%左右,烤制 20 min 后羊肉含水率降低至 55%左右,表明羊肉在烤制过程中具有一定的持水性。

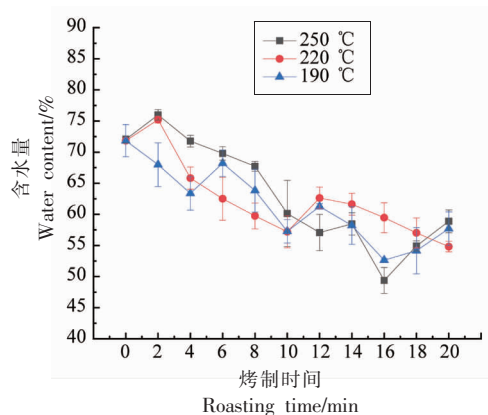


图 1 不同烤制温度下羊肉水分的变化

Fig.1 Changes of mutton moisture at different roasting temperatures

2.2 不同烤制温度下羊肉色度值的变化

色泽是判别羊肉是否烤熟的重要判断标准之一。图2展示的是3种烤制温度下羊肉表面 L^* (白度值)、 a^* (红绿值)和 b^* (黄蓝值)的随烤制时间变化的图。从图中可以看出在3种烤制温度下,羊肉的 L^* 值从鲜肉到烤制20 min整体上呈现先上升后下降的趋势,其中在烤制6~8 min时达到最大值。 a^* 值在0~6 min后呈现明显的下降趋势,但在烤制6 min至烤制20 min期间趋于平衡基本保持不变。 b^* 值在烤制0~4 min呈现上升的趋势,烤制4 min之后趋于平衡保持不变。随着烤制时间的增加,羊肉的颜色会由鲜红色逐渐变白色。然后颜色逐渐加深至黄色、黑色,这个过程中主要与蛋白质和碳水化合物因高温而发生美拉德反应、Strecker降解反应、焦糖化反应和热解反应等有关。另外,在这些反应过程中产生的部分挥发性物质如酮和醛等发生氧化、聚合、焦化等反应进一步导致羊肉颜色变深^[16]。

2.3 烤制温度对羊肉水分迁移规律的影响

2.3.1 羊肉中不同状态水的含量变化

在低场-核磁共振的分析中,弛豫时间指的是样品中的氢质子释放能量从高能级返回至低能级所消耗的时间。弛豫时间 T 分为 T_1 (纵向弛豫时间)和 T_2 (横向弛豫时间)^[17]。可以通过对羊肉核磁共振波谱的 T_2 值变化以及峰面积的大小进行分析来衡量羊肉中水分的分布,并对不同状态的水之间的化学渗透交换进行区分^[18-19]。羊肉中的水的状态主要分为3种,即结合水,自由水以及不易流动水。烤羊肉样品的低场-核磁共振反演谱图如图3所示,其中 T_2 值在0.01~10 ms间的峰为结合水的峰,主要指的是与蛋白质、脂质等生物大分子紧密结合的水;在10~100 ms间的峰为不易流动水的峰,主要指的是肌原纤维内截留的水;在100~1 000 ms之间的峰为自由水的峰,主要指的是存在于肌细胞间的水^[20];不同状态的水的含量由 T_2 反演图谱上对应峰积分面积大小代表^[21]。由图3和表1可知,在250,220和190℃3个烤制温度烤制过程中, T_2 图谱整体上反映出2个现象。一是随着烤制时间的延长,3种状态水的峰面积之和即总峰面积在逐渐减小,这表明烤羊肉样品中的水分含量随着烤制时间的延长在逐渐降低;二是随着烤制时间

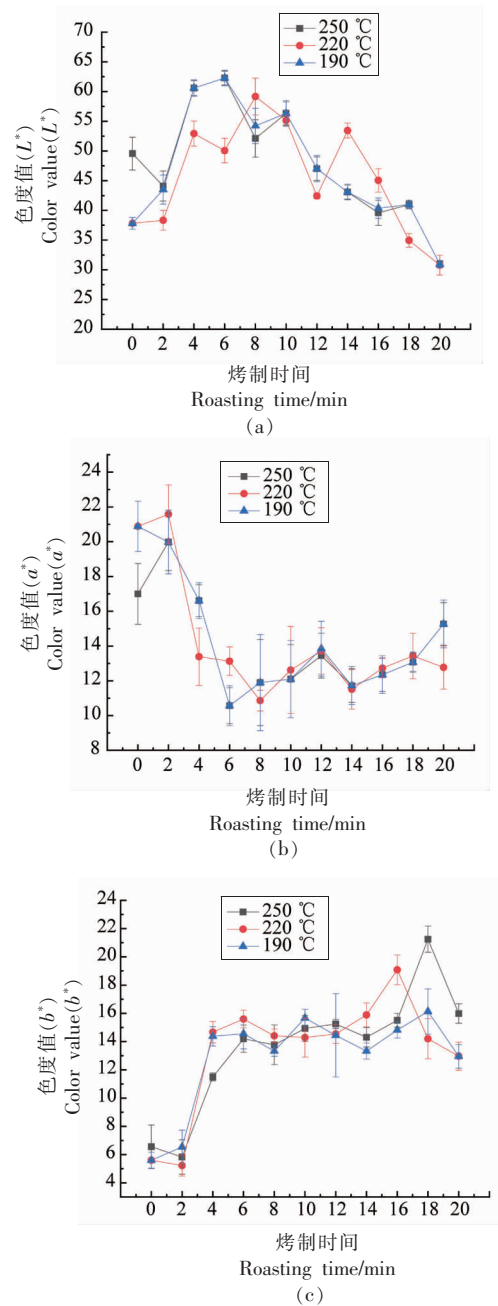


图2 不同烤制温度下羊肉色泽的变化 (L^* 值、 a^* 值和 b^* 值)

Fig.2 Changes of mutton chroma value at different roasting temperatures (L^* value, a^* value and b^* value)

的增加, T_2 峰的位置在逐渐地向左移动(结合水除外),说明在烤羊肉样品中水分的流动性在逐渐变小,高自由度的水分在朝着低自由度的水分进行迁移。羊肉的持水性也可以通过烤制过程中 T_2 峰面积的变化程度来反映。由图2可知,羊肉在250

℃过程中结合水峰面积变化在 2.78%~6.87%之间,自由水峰面积变化在 0.00%~11.21%,在 220℃烤制过程中结合水峰面积变化在 3.03%~6.77%,自由水峰面积变化在 0.00%~7.79%,在

190℃烤制过程中结合水峰面积变化在 3.14%~5.94%,自由水峰面积变化在 0.00%~8.01%,可见羊肉在烤制过程中持水性较好。

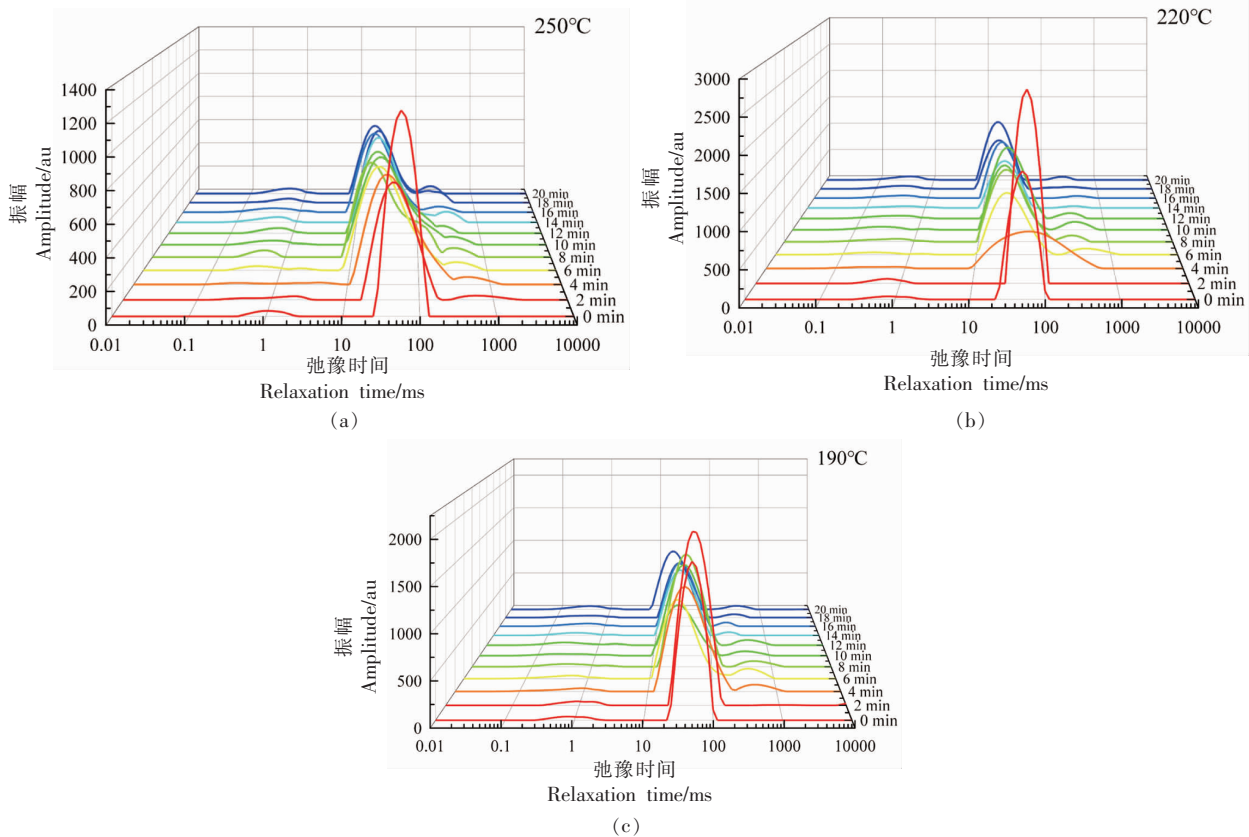


图 3 羊肉水分横向弛豫时间 T_2 分布

Fig.3 Distribution of water transverse relaxation time (T_2) of mutton

表 1 羊肉弛豫特征中不同状态水的含量的变化

Table 1 Changes of moisture state and content in mutton based on the transverse relaxation time of water protons

烤制温度/℃	烤制时间/min	强结合水 M_{21} /%	弱结合水 M_{22} /%	不易流动水 M_{23} /%	自由水 M_{24} /%
250	0	1.17 ± 1.35 ^g	2.53 ± 0.94 ^a	96.30 ± 0.41 ^a	0.00 ± 0.00 ^k
	2	2.94 ± 0.12 ^f	0.00 ± 0.00 ^e	92.75 ± 0.13 ^{ik}	4.31 ± 0.05 ^e
	4	1.04 ± 0.04 ^h	1.74 ± 0.25 ^b	96.57 ± 0.30 ^a	0.65 ± 0.45 ^j
	6	3.44 ± 0.60 ^e	0.64 ± 0.07 ^c	92.21 ± 0.88 ^e	3.71 ± 0.13 ^f
	8	3.61 ± 0.33 ^e	0.35 ± 0.02 ^d	94.94 ± 1.47 ^b	1.10 ± 0.03 ⁱ
	10	4.01 ± 0.07 ^d	0.00 ± 0.00 ^e	92.82 ± 0.17 ^d	3.17 ± 0.16 ^g
	12	4.14 ± 0.05 ^d	0.00 ± 0.00 ^e	93.31 ± 0.15 ^c	2.55 ± 0.10 ^h
	14	5.50 ± 0.05 ^b	0.00 ± 0.00 ^e	88.61 ± 0.16 ^g	5.89 ± 0.11 ^b
	16	5.70 ± 0.33 ^b	0.48 ± 0.00 nd	89.11 ± 0.79 ^f	4.71 ± 0.78 ^c
	18	4.53 ± 0.08 ^c	0.00 ± 0.00 ^e	84.26 ± 0.06 ^h	11.21 ± 0.02 ^a
	20	6.87 ± 0.86 ^a	0.00 ± 0.00 ^e	88.42 ± 0.84 ^g	4.71 ± 0.20 ^d

(续表 1)

烤制温度/℃	烤制时间/min	强结合水 $M_{21}/\%$	弱结合水 $M_{22}/\%$	不易流动水 $M_{23}/\%$	自由水 $M_{24}/\%$
220	0	3.08 ± 0.61^{ab}	0.29 ± 0.00^d	96.63 ± 0.16^b	0.00 ± 0.00^e
	2	3.03 ± 0.19^b	0.00 ± 0.00^f	96.97 ± 0.19^a	0.00 ± 0.00^e
	4	3.37 ± 0.27^e	0.20 ± 0.13^c	96.43 ± 0.00^c	0.00 ± 0.00^e
	6	4.04 ± 0.38^f	0.54 ± 0.06^a	88.08 ± 0.12^b	7.34 ± 0.46^b
	8	4.72 ± 0.17^c	0.00 ± 0.00^f	90.97 ± 0.24^c	4.31 ± 0.12^c
	10	5.42 ± 0.30^{cd}	0.39 ± 0.19^b	86.53 ± 0.45^i	7.66 ± 0.27^a
	12	5.12 ± 0.22^d	0.41 ± 0.00^{bc}	90.11 ± 0.08^f	4.36 ± 0.10^c
	14	5.63 ± 0.78^c	0.54 ± 0.00^a	91.39 ± 0.39^d	2.44 ± 0.10^f
	16	6.28 ± 0.17^b	0.36 ± 0.02^c	90.34 ± 0.35^f	3.02 ± 0.17^c
	18	6.57 ± 0.46^b	0.00 ± 0.00^f	89.18 ± 0.42^e	4.25 ± 0.34^c
190	0	3.08 ± 0.61^{cd}	0.29 ± 0.00^f	96.63 ± 0.16^a	0.00 ± 0.00^h
	2	2.38 ± 0.60^e	0.71 ± 0.00^{bc}	96.81 ± 0.16^a	0.10 ± 0.07^h
	4	2.60 ± 0.83^{de}	0.85 ± 0.55^a	91.95 ± 0.37^c	4.60 ± 0.06^c
	6	4.10 ± 0.50^d	0.45 ± 0.00^e	87.44 ± 0.58^f	8.01 ± 0.39^a
	8	3.14 ± 0.05^f	0.44 ± 0.01^c	92.62 ± 0.28^b	3.80 ± 0.16^c
	10	4.10 ± 0.40^d	0.61 ± 0.10^{cd}	89.21 ± 0.29^c	6.08 ± 0.07^b
	12	3.47 ± 0.62^e	0.74 ± 0.06^{bc}	91.58 ± 1.07^c	4.21 ± 0.39^{cd}
	14	4.45 ± 0.48^{cd}	0.48 ± 0.00^e	92.08 ± 0.46^c	2.99 ± 0.93^f
	16	5.47 ± 0.00^b	0.00 ± 0.00^e	91.85 ± 0.00^c	2.68 ± 0.00^e
	18	4.85 ± 0.48^c	0.53 ± 0.00^{de}	90.62 ± 0.22^d	4.00 ± 0.19^{de}
20	5.94 ± 0.64^a	0.00 ± 0.00^e	89.63 ± 0.61^c	4.43 ± 0.11^c	

注:同列字母不同表示差异显著($P < 0.05$)。

羊肉在烤制过程中不同状态水的相对百分含量如表 1 所示,其中 M_{21} 、 M_{22} 、 M_{23} 、 M_{24} 分别代表强结合水、弱结合水、不易流动水和自由水的相对百分含量。由表 1 可知,在烤羊肉样品中不易流动水的相对百分含量远远高于结合水以及自由水的百分含量。样品中的不易流动相对百分含量普遍都在 90% 以上,最低值为 250 ℃ 下烤制 18 min 的羊肉样品。在不同烤制温度下,随着烤制时间的延长结合水的相对百分比含量呈现增加的趋势,这可能是由于羊肉具有良好的保水性却表面干燥的原因^[22]。与此同时,不易流动水的相对百分含量呈现下降的趋势,这可能由于部分的不易流动水随着烤制的进行转化成自由水。而自由水的相对百分比含量随着烤制时间的变化呈现无规律的趋势($P > 0.05$),这可能是由于在烤制过程中,不易流动水和结合水转化的自由水的部分弥补了烤制过程中羊肉部分汁液的损失^[23]。

2.3.2 水分迁移变化分析 弛豫时间 T_2 可以用来表征不同状态的水分的流动性, T_2 越大,水分自由度越大,流动性强;反之 T_2 越小,水分自由度小,流动性越差^[24]。自由水的 T_2 值一般在 100 ms 左右,这是因为自由水从基态跃迁至激发态需要的能量较低,相对于结合水和不易流动水更容易从磁场中吸收能量而发生振动。而当附加磁场消失以后,自由水会需要更长的时间恢复到基态。结合水是最难从磁场中获取能量,达到激发态的能量最高,极不稳定,因而恢复到基态则需要较短的时间,一般在 1 ms 左右。而不易流动水则介于自由水和结合水之间,一般在 10 ms 左右。

如表 2 所示,在 3 个烤制温度下, T_{21} 、 T_{22} 随着烤制时间的延长没有明显的变化趋势,这表明羊肉样品的结合水的自由度受烤制时间的影响较小。 T_{23} 在随着烤制时间的延长呈现明显的先增加后减小的趋势,这种波动可能是在烤制过程初期

表2 羊肉弛豫时间 T_2 随烤制时间的变化趋势Table 2 Changing on relaxation time T_2 of LF-NMR on mutton

烤制温度/℃	烤制时间/min	弛豫时间 (T_{21})	弛豫时间 (T_{22})	弛豫时间 (T_{23})	弛豫时间 (T_{24})	
250	0	0.42 ± 0.01 ^h	2.34 ± 0.08 ^e	98.38 ± 1.36 ⁱ	0.00 ± 0.00 ^f	
	2	3.05 ± 0.26 ^b	0.00 ± 0.00 ^f	124.24 ± 4.58 ^g	1559.63 ± 18.95 ^b	
	4	0.79 ± 0.06 ^g	5.56 ± 0.23 ^a	391.37 ± 0.00 ^a	2012.92 ± 0.00 ^a	
	6	1.78 ± 0.12 ^d	2.82 ± 0.08 ^b	223.61 ± 0.61 ^e	813.63 ± 10.24 ^d	
	8	1.06 ± 0.09 ^f	2.19 ± 0.00 ^d	285.33 ± 0.00 ^b	976.48 ± 30.51 ^c	
	10	3.39 ± 0.02 ^a	0.00 ± 0.00 ^f	258.55 ± 0.00 ^c	586.73 ± 7.13 ^e	
	12	2.06 ± 0.28 ^c	0.00 ± 0.00 ^f	226.21 ± 5.74 ^d	351.38 ± 6.90 ^h	
	14	1.75 ± 0.35 ^d	0.00 ± 0.00 ^f	192.81 ± 0.00 ^f	527.29 ± 4.71 ^f	
	16	1.60 ± 0.07 ^e	1.16 ± 0.00 ^e	109.59 ± 6.11 ^h	430.73 ± 7.51 ^g	
	18	1.83 ± 0.23 ^d	0.00 ± 0.00 ^f	91.89 ± 0.00 ^j	349.18 ± 0.00 ^h	
	20	1.88 ± 0.20 ^d	0.00 ± 0.00 ^f	93.86 ± 0.00 ^j	236.14 ± 0.00 ⁱ	
	220	0	2.20 ± 0.04 ^a	1.73 ± 0.00 ^{ab}	93.43 ± 0.00 ^e	0.00 ± 0.00 ^g
		2	1.66 ± 0.12 ^{bc}	0.00 ± 0.00 ^f	86.50 ± 0.00 ^f	0.00 ± 0.00 ^g
		4	1.59 ± 0.13 ^{bc}	1.31 ± 0.47 ^{bc}	697.46 ± 0.00 ^a	0.00 ± 0.00 ^g
		6	0.95 ± 0.08 ^f	1.82 ± 0.28 ^a	142.67 ± 0.00 ^{bc}	1442.01 ± 74.70 ^a
		8	2.32 ± 0.32 ^a	0.00 ± 0.00 ^f	143.07 ± 0.70 ^b	412.20 ± 46.14 ^c
		10	1.08 ± 0.57 ^{def}	0.86 ± 0.76 ^{cd}	136.88 ± 12.13 ^c	724.95 ± 56.99 ^c
		12	1.66 ± 0.58 ^b	0.39 ± 0.67 ^e	122.87 ± 0.00 ^d	434.96 ± 46.14 ^c
		14	1.66 ± 0.58 ^b	0.50 ± 0.87 ^{de}	67.54 ± 0.00 ^g	584.77 ± 9.94 ^d
		16	1.00 ± 0.44 ^{ef}	0.59 ± 0.51 ^{de}	49.46 ± 0.61 ^h	718.57 ± 73.25 ^c
18		1.44 ± 0.11 ^{cd}	0.00 ± 0.00 ^f	51.09 ± 0.00 ^h	784.53 ± 25.44 ^b	
190	0	2.20 ± 0.04 ^a	1.73 ± 0.00 ^{de}	93.43 ± 0.00 ^g	0.00 ± 0.00 ^k	
	2	1.70 ± 0.16 ^{bc}	1.53 ± 0.00 ^f	130.45 ± 0.00 ^f	3073.13 ± 49.01 ^a	
	4	1.29 ± 0.18 ^{cd}	2.47 ± 0.29 ^c	218.68 ± 0.00 ^a	1090.32 ± 10.59 ^d	
	6	1.21 ± 0.34 ^{de}	1.90 ± 0.00 ^d	191.60 ± 0.00 ^b	921.54 ± 13.55 ^f	
	8	2.04 ± 0.26 ^a	2.82 ± 0.43 ^b	162.42 ± 0.00 ^c	1783.88 ± 16.90 ^b	
	10	0.99 ± 0.00 ^e	1.77 ± 0.23 ^{de}	143.07 ± 0.70 ^d	951.04 ± 9.71 ^e	
	12	1.14 ± 0.00 ^e	3.02 ± 0.43 ^a	141.27 ± 0.00 ^c	1611.20 ± 21.11 ^c	
	14	1.06 ± 0.11 ^e	1.62 ± 0.16 ^{cd}	141.74 ± 2.22 ^{de}	303.18 ± 0.74 ⁱ	
	16	2.30 ± 0.00 ^a	0.00 ± 0.00 ^g	90.67 ± 0.00 ^h	251.12 ± 0.00 ^j	
	18	1.58 ± 0.44 ^{bc}	1.51 ± 0.00 ^f	90.67 ± 0.00 ^h	498.62 ± 7.34 ^h	
20	2.00 ± 0.00 ^{ab}	0.00 ± 0.00 ^g	66.23 ± 5.69 ^j	856.96 ± 0.00 ^g		

注:同列字母不同表示差异显著($P < 0.05$)。

肌肉纤维蛋白经分解、断裂,肌肉出现多空层,肌纤维蛋白分子的结构变化进而影响其与水分子相互作用^[25]。3种烤制温度下 T_{23} 在烤制 4 min 时达到最高,说明在此过程中水分子与大分子物质的结合紧密度逐渐减小。而随着烤制时间的延长, T_{23} 逐渐减小,说明在此过程中水分子与大分子物质结合更加紧密。 T_{24} 表示在细胞间存在的自由水,也是最容易流失的水。如表 2 所示, T_{24} 整体呈现下降的趋势。在 250 °C 烤制温度下, T_{24} 在烤制 4

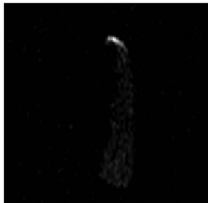





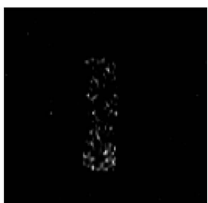




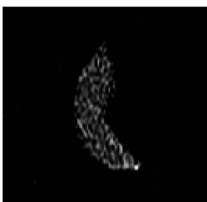
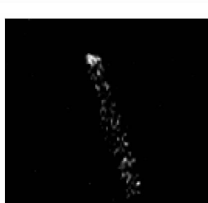


min 时达到最大, 8 min、12 min 出现波动, 220 °C 烤制温度下, T_{24} 在烤制 6 min 时达到最大, 10 min 和 14 min 出现波动。而 190 °C 烤制温度下, T_{24} 在烤制 2 min 达到最大, 8, 12 和 18 min 出现波动。250 °C 随着烤制时间的延长 T_{24} 降低明显, 在烤制 20 min 后 T_{24} 变为 236.14 ms, 而 220 °C 和 190 °C 在烤制 20 min 后 T_{24} 分别为 340.66 ms 和 856.96 ms, 这表明烤制温度越高水分逃逸能力越强。

2.3.3 羊肉烤制过程中水分分布 处于不同位置的氢质子具有不同的共振频率,因此核磁共振成像技术 MRI 对应获得的磁共振信号强度也会有差异^[26]。NMI20 核磁共振成像分析仪可以通过空间编码技术将磁共振信号强度转变成图像的形式,进而可以更加直观的研究羊肉样品中的水分分布情况以及在烤制过程中的结构变化^[27-28]。其中影响着图像的亮度的主要因素是氢质子的活跃程度及密度。当氢质子越活跃且密度越高时,图像就

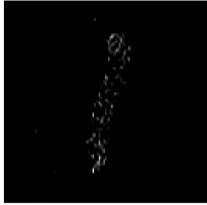
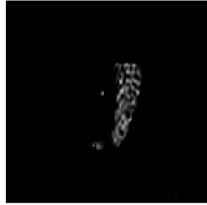
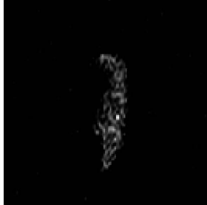
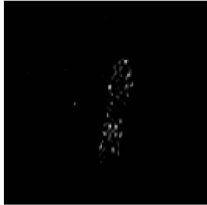
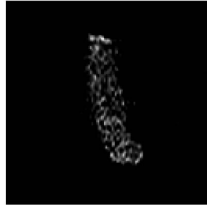
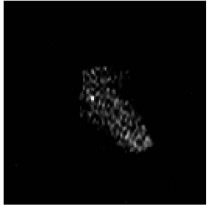
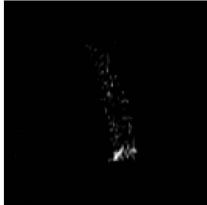

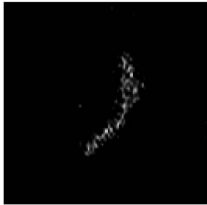
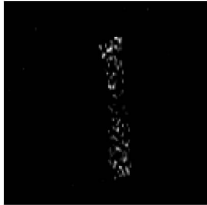
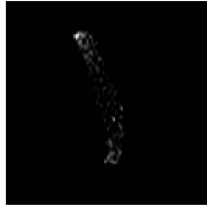
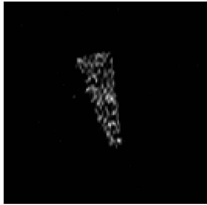
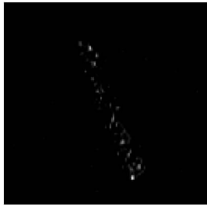
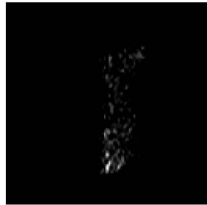
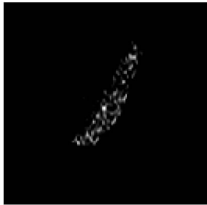



会更加明亮^[29]。由表 3 可知,在 3 个烤制温度下,羊肉的氢质子密度图像的亮度随着烤制过程的进行均有下降趋势,这表明随着烤制的进行羊肉内部的水分含量在逐渐减少,其中 250 °C 烤制温度下的变化最为明显。由于烤羊肉样品的体积较小,内外受热较为均匀,因而不同烤制时期的羊肉内部与表面的水分信号同时减弱,水分含量在各个区域的分布强弱均匀。

表 3 不同烤制时间下羊肉氢质子密度成像对比

Table 3 Hydrogen proton density imaging of mutton at different roasting time

烤制时间	烤制温度		
	250 °C	220 °C	190 °C
0 min			
2 min			
4 min			
6 min			
8 min			

续表 3

烤制时间	烤制温度		
	250 °C	220 °C	190 °C
10 min			
12 min			
14 min			
16 min			
18 min			
20 min			

2.3.4 核磁共振总峰积分面积与烤羊肉含水率的相关性分析 核磁共振总峰积分面积为结合水、不易流动水以及自由水 3 种状态水的峰面积之和。采用一元线性回归方式对不同烤制时间的核磁共振总峰积分面积与羊肉的含水率进行相关性

分析,结果如图 4 所示。

由图 4 可知,3 种烤制温度下,低场核磁共振峰积分面积总和与羊肉含水率呈现显著的线性关系($P < 0.05$),其中 250 °C 烤制温度下的线性回归方程为 $y = 125.92x + 481.71$ ($R^2 = 0.9228$),220 °C 烤

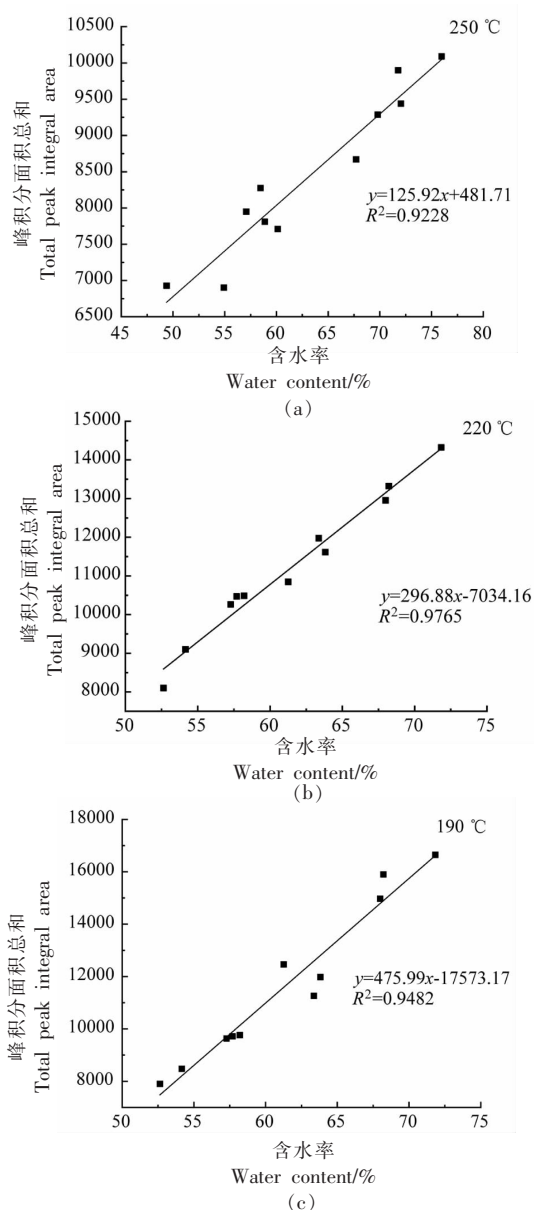


图 4 不同烤制温度下羊肉含水率与低场核磁共振总峰积分面积的相关性分析

Fig.4 Correlation analysis between moisture content and total peak integral area of low field NMR of mutton at different roasting temperatures

制的线性回归方程为 $y = 296.88x - 7\ 034.16$ ($R^2 = 0.9765$), 190 °C 烤制的线性回归方程为 $y = 475.99x - 17\ 573.17$ ($R^2 = 0.9428$)。这一结果表明在使用核磁共振对烤羊肉样品水分进行分析时, 可将 T_2 反演图谱与线性方程进行结合, 间接计算出羊肉样品在烤制某一时刻的含水率。

2.4 感官性评价分析

感官研究的目的是表征每个样品的不同风

味特征^[30]。图 5 所示的是 3 种烤制温度下羊肉的感官评价得分结果。由图可知在加热过程中, 从单一风味上来看, 不同烤制时间下的羊肉除肉味外在其它的气味得分上都具有差异。对于腥味而言, 在烤制初期的评分达到最高, 随着温度的升高, 腥

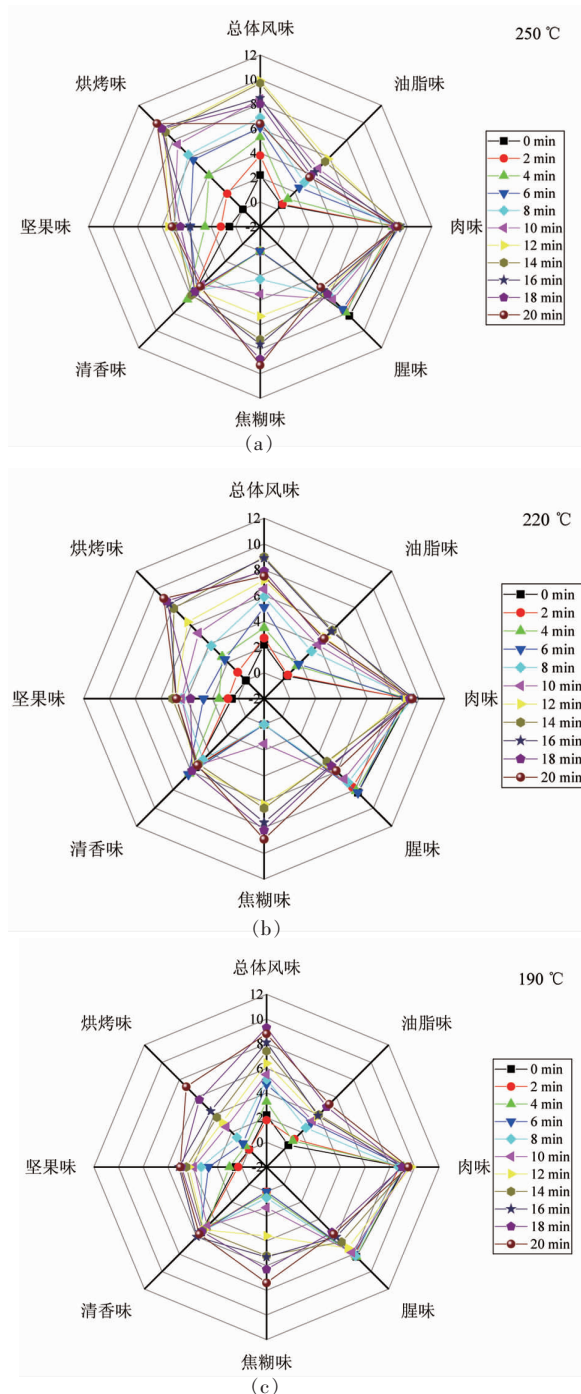


图 5 不同烤制温度下滩羊肉的感官风味评价

Fig.5 Sensory flavor evaluation of Tan mutton under different roasting temperatures

味逐渐减弱。油脂味随着烤制时间延长逐渐加强至最终平衡。烘烤味都是在烤制 20 min 时分数最高。羊肉总体风味在温度较低时分数较低,250 ℃烤制下的羊肉总体风味得分在 12 min 时达到最高,220 ℃烤制条件下在 14 min 时羊肉总体风味得分达到最高,190 ℃烤制温度下在烤制 18 min 时总体风味得分达到最高。总体来说,12 min,14 min 和 18 min 可分别作为羊肉 250,220,190 ℃烤制时的最佳风味时间。

3 结论

本研究表明,通过低场核磁共振技术可以对烤制过程中的羊肉内部水分子的弛豫特性变化规律进行探索。在 250,220 和 190 ℃ 3 个烤制温度下的羊肉样品中,核磁共振 T_2 图谱反映出 2 个现象。一是总峰面积随着烤制时间的增加在逐渐减小,这说明烤羊肉样品中的水分含量在逐渐降低;二是 T_2 峰位置随着烤制时间的增加逐渐向左偏移(结合水除外),说明烤羊肉样品中的水分流动性在逐渐变小,水的自由度在由高向低的迁移。羊肉的氢质子密度图亮度下降的趋势与烤制温度有关,250 ℃烤制温度下下降明显,表明此温度下烤制温度越高,羊肉内部水分总含量减少越快。通过建立羊肉烤制过程中的含水率和核磁共振峰积分面积的关系表达式可以预测未知羊肉样品中的水分含量,这可对烤制成熟预判奠定一定的理论依据,对工业化烤羊肉生产提供一定的理论支持。

参 考 文 献

- [1] 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(1): 611-617.
- [2] 辜雪冬, 孙术国, 杨飞艳, 等. 冰温或冷藏对牦牛肉贮藏品质及水分迁移的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(16): 343-350.
GU X D, SUN S G, YANG F Y, et al. Effects of ice temperature or chilled storage on quality of yak meat and moisture migration[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(16): 343-350.
- [3] 李梁, 程秀峰, 杨尚雄, 等. 基于低场核磁共振的热风干燥猕猴桃切片含水率预测模型[J]. 农业工程学报, 2020, 36(10): 252-260.
LI L, CHENG X F, YANG S X, et al. Model for predicting the moisture content of kiwifruit slices during hot air drying based on low-field nuclear magnetic resonance[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(10): 252-260.
- [4] 计红芳, 李莎莎, 张令文, 等. 添加面筋蛋白对猪肉热诱导凝胶品质及水分迁移特性的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(18): 58-63.
JI H F, LI S S, ZHANG L W, et al. Effect of gluten on quality properties and water migration of heat-induced gel from pork[J]. Food Science, 2020, 41(18): 58-63.
- [5] 范雷雷, 史海滨, 李瑞平, 等. 秸秆覆盖对沟灌水盐迁移与玉米水分利用效率的影响[J]. 农业机械学报, 2021, 52(2): 283-293, 319.
FAN L L, SHI H B, LI R P, et al. Effects of straw mulching on soil water-salt transportation and water use efficiency of maize under furrow irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(2): 283-293, 319.
- [6] 张世懋, 葛祥, 王辛, 等. 川西气田白云岩储层二维核磁共振测井气水识别方法[J]. 波谱学杂志, 2020, 37(3): 360-369.
ZHANG S M, GE X, WANG X, et al. A two-dimensional NMR logging method for gas-water identification in dolomite reservoir of the western Sichuan gas field[J]. Chinese Journal of Magnetic Resonance, 2020, 37(3): 360-369.
- [7] 侯伟, 赵天天, 张雷, 等. 基于低场核磁共振的煤储层束缚水饱和度应力响应研究与动态预测:以保德和韩城区块为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2020, 50(2): 608-616.
HOU W, ZHAO T T, ZHANG L, et al. Stress sensitivity and prediction of irreducible water saturation in coal reservoirs in Baode and Hancheng blocks based on low-field magnetic resonance[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2020, 50(2): 608-616.
- [8] 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 X K, ZHU S S, HUANG J H, 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.
- [9] 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.
- [10] 孙圳, 谢小雷, 李侠, 等. 不同冻结温度下牛肉水分的状态变化[J]. 肉类研究, 2016, 30(1): 15-20.
- SUN Z, XIE X L, LI X, et al. The transformation of water states during beef freezing[J]. Meat Research, 2016, 30(1): 15-20.
- [11] 尤丽琴, 罗瑞明, 苑昱东, 等. 超高效液相色谱-质谱法检测滩羊宰后成熟过程中风味前体物质的变化[J]. 食品科学, 2020, 41(8): 171-176.
- YOU L Q, LUO R M, YUAN Y D, et al. Changes in flavor precursors during postmortem ageing of Tan sheep meat as determined by ultra-high performance liquid chromatography-mass spectrometry[J]. Food Science, 2020, 41(8): 171-176.
- [12] ZHAN P, TIAN H L, ZHANG X M, et al. Contribution to aroma characteristics of mutton process flavor from the enzymatic hydrolysate of sheep bone protein assessed by descriptive sensory analysis and gas chromatography olfactometry[J]. Journal of Chromatography B, 2013, 921-922: 1-8.
- [13] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中水分的测定: GB 5009.3-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. National Food Safety Standard Determination of Moisture in Foods: GB 5009.3-2016[S]. Beijing: China Standard Press, 2016.
- [14] 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.
- [15] 李燕杰, 高新亮, 甄成, 等. 植物油感官分析方法的研究[J]. 中国油脂, 2008(1): 68-71.
- LI Y J, GAO X L, ZHEN C, et al. Sensory evaluation of vegetable oils[J]. China Oils and Fats, 2008(1): 68-71.
- [16] GÖKHAN D, VURAL G. Changes in oxidative stability, antioxidant capacity and phytochemical composition of Pistacia terebinthus oil with roasting[J]. Food Chemistry, 2011, 128(2): 410-414.
- [17] RUBIO-CELORIO M, FULLADOSA E, GARCIA-GIL N, et al. Multiple spectroscopic approach to elucidate water distribution and water-protein interactions in dry-cured ham after high pressure processing[J]. Journal of Food Engineering, 2016, 169: 291-297.
- [18] SHAO J H, DENG Y M, SONG L, et al. Investigation the effects of protein hydration states on the mobility water and fat in meat batters by LF-NMR technique[J]. LWT - Food Science and Technology, 2016, 66: 1-6.
- [19] HINRICHS R, GÖTZ J, NOLL M, et al. Characterisation of the water-holding capacity of fresh cheese samples by means of low resolution nuclear magnetic resonance[J]. Food Research International, 2004, 37(7): 667-676.
- [20] BERTRAM H C, ANDERSEN H J. NMR and the water-holding issue of pork[J]. Journal of Animal Breeding and Genetics, 2015, 124(s1): 35-42.
- [21] 赵茂程, 顾盛, 汪希伟, 等. 银杏种子萌发过程低场核磁共振 T2 反演谱解译初探[J]. 农业工程学报, 2020, 36(15): 317-324.
- ZHAO M C, GU S, WANG X W, et al. Preliminary study on interpretation of LF-NMR T2 inversion spectrum of ginkgo biloba seed during germination process[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(15): 317-324.
- [22] 卢骁, 董鹏程, 张一敏, 等. 微冻贮藏对牛肉保水性的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(7): 253-259.
- LU X, DONG P C, ZHANG Y M, et al. Effect of superchilled storage on water-holding capacity of beef muscle[J]. Food Science, 2021, 42(7): 253-259.
- [23] 孙文彬, 罗欣, 毛衍伟, 等. 正常牛肉与 DFD 牛肉成熟过程中保水性和水分状态变化[J]. 食品科学, 2020, 41(13): 14-21.
- SUN W B, LUO X, MAO Y W, et al. Changes in water retention and moisture state of normal and dark, firm and dry beef during postmortem aging[J]. Food Science, 2020, 41(13): 14-21.
- [24] 刘丽美, 刘骞, 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.

- LIU L M, LIU Q, KONG B H, et al. Effect of deep-frying temperature on moisture distribution and quality of beef jerky based on low field NMR[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2016, 16(5): 238-244.
- [25] BERTRAM H C, SCHÄFER A, ROSENVOLD K, et al. Physical changes of significance for early post mortem water distribution in porcine *M.longissimus*[J]. Meat Science, 2004, 66(4): 915-924.
- [26] 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 X, SU S S, MA L Z, et al. Low field-NMR in measuring water mobility and distribution in beef granules during microwave drying process [J]. Food Science and Technology, 2013, 38(1): 145-149.
- [27] 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 T, HE X Y, DENG F M, 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.
- [28] 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.
- [29] 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.
- LÜ H, LÜ W Q, CUI Z W, et al. Analysis on drying characteristics of apple slices under different microwave conditions [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(S1): 433-439.
- [30] 符成刚, 刘文玉, 陈友志, 等. 不同加热温度对新疆马脂理化性质、脂肪酸及挥发性风味化合物的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(16): 54-60.
- FU C G, LIU W Y, CHEN Y Z, et al. Effects of different heating temperatures on physicochemical properties, fatty acids and volatile flavor compounds of fat from horses raised in Xinjiang[J]. Food Science, 2021, 42(16): 54-60.

Moisture Distribution and Migration Law of Mutton during the Roasting Process

Wang Yongrui¹, Xue Meifang², Luo Ruiming², Wang Songlei^{2*}

¹College of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021

²College of Food and Wine, Ningxia University, Yinchuan 750021

Abstract In this paper, Ningxia Yanchi Tan sheep was used as the material, and the LF-NMR detection technology was used to analyze the moisture distribution and migration laws of the mutton during the roasting process at three roasting temperatures. The results showed that the moisture content of mutton was gradually reduced at the three roasting temperatures, and the moisture content was about 55% after roasting for 20 minutes. The L^* value of mutton increased at the beginning of roasting process and then decreased with the extension of the roasting time, the a^* value showed a first decline and then tended to balance, and the b^* value increased at the beginning of roasting process and then tended to balance. At the same time, the combined water content of the three roasting temperatures showed a gradual upward trend, and the non-flowing water content all showed a downward trend. The free water content did not significantly differ during the roasting process ($P<0.05$). The non-flowing water and free water migration corresponding to the relaxation time of mutton under different roasting times were obvious, indicating that the fluidity of water becomes smaller, and the water with high degree of freedom gradually transfers to the water with low degree of freedom. The brightness of the hydrogen proton density image of mutton at the three roasting temperatures showed a decreasing trend with the extension of roasting time, and the roasting temperature of 250 °C was the most obvious, indicating that its internal moisture content decreased the fastest. The total area of low-field nuclear magnetic resonance peaks and the moisture content of mutton in the roasting process showed a significant linear relationship ($P<0.05$). Sensory evaluation found that roasting for 12, 14 and 18 minutes can be used as the best flavor time for mutton roasting at 250, 220 and 190 °C, respectively.

Keywords low field nuclear magnetic resonance; roast mutton; moisture migration; color change; sensory evaluation