

食盐添加量对滩羊肉蒸煮损失、嫩度及水分分布的影响

吴亮亮,罗瑞明*,孔 丰,田 银,张赫宇,苏春霞

(宁夏大学农学院,宁夏银川 750021)

摘 要:为探究不同食盐添加量对滩羊肉蒸煮损失、嫩度以及水分分布的影响,以滩羊肉为实验材料,借助低场核磁共振技术研究不同食盐添加量处理下滩羊肉的蒸煮损失、剪切力以及水分子 T_2 弛豫特性。结果表明:随着食盐添加量的增加,滩羊肉的蒸煮损失和剪切力都明显减小($p<0.05$),当食盐添加量大于2.5%时,差异不显著($p>0.05$)。LF-NMR检测到了四个明显的水分群,代表肉中的弱结合水、强结合水、不易流动水和自由水四种存在状态。增加食盐添加量,弛豫时间逐渐变短,不易流动水逐渐增多,自由水逐渐减少。核磁成像结果显示,随着食盐添加量的增加图像的亮度依次减弱。相关性分析结果表明,蒸煮损失与 T_{23} 、 T_{24} 呈显著正相关($p<0.05$);剪切力与 T_{23} 、 T_{24} 峰面积百分比呈显著正相关($p<0.05$),与 T_{23} 峰面积百分比呈显著负相关($p<0.05$)。由此表明,不同食盐添加量处理下滩羊肉的水分分布具有显著地变化。

关键词:食盐添加量,滩羊肉,水分分布,低场核磁共振,核磁共振成像

Effect of cooking loss, tenderness and water distribution of Tan sheep at different salt addition treatment

WU Liang-liang, LUO Rui-ming*, KONG Feng, TIAN Yin, ZHANG He-yu, SU Chun-xia

(College of Agricultural, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: The present study was undertaken to investigate the effects of different salt addition treatment on the cooking loss, tenderness and water distribution of Tan sheep. Cooking loss, shear stress and T_2 relaxation properties of water molecules by low-field NMR technology were assayed in the different treatment. The result showed that the cooking loss and shear stress were significantly decreased ($p<0.05$) with the increase of salt content. However, the difference was not significant ($p>0.05$) when the salt content was more than 2.5%. LF-NMR detected four distinct water group: weakly bound water, strongly bound water, immobilized water and free water. With the increase of salt content, the relaxation time shortened, immobilized water increased and free water reduced. The brightness of the image increased with the increase of the salt addition through the NMR results. The correlation analysis showed that the cooking loss was significantly ($p<0.05$) positive correlated with T_{23} and T_{24} , and the shear stress was positively ($p<0.05$) correlated with the ratio of T_{23} and T_{24} , and negatively ($p<0.05$) correlated with the ratio of T_{23} . The results suggested that the water distribution of Tan sheep had a significant change with the different treatments of salt addition.

Key words: salt addition; Tan sheep; water distribution; low-field nuclear magnetic resonance; magnetic resonance imaging

中图分类号: TS251

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2016)02-0322-05

doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2016.02.056

滩羊为宁夏优势特色畜种,是中国独特的名贵裘肉兼用型绵羊品种,其肉质细嫩,膻腥味轻,味道鲜美,营养丰富,风味独特,深受消费者的青睐^[1-2]。腌制是其肉品加工过程中的一个重要环节,是决定肉品质的重要因素之一,通过腌制使食盐进入组织中,

提高渗透压,降低水分活度,从而抑制腐败菌的生长,同时能够提高肉品的保水性和嫩度^[3]。相关研究表明:食盐质量浓度为2%~3%时,保水性较强,如果小于或超出这个范围,保水性则下降^[4]。对于改变肉制品嫩度方面,Barbut等^[5]研究认为高的食盐含量可

收稿日期:2015-08-17

作者简介:吴亮亮(1989-),男,硕士研究生,研究方向:畜产品加工与贮藏,E-mail:15109511276@163.com。

* 通讯作者:罗瑞明(1964-),男,博士,教授,研究方向:畜产品加工与贮藏,E-mail:ruimingluo.nx@163.com。

基金项目:国家科技支撑计划课题(2015BAD29B05);宁夏回族自治区科技攻关计划项目。

提高煮制后的禽肉糜的嫩度。

水分作为肉与肉制品的主要成分,以一定数量定位、定向的存在于其中,并以结合水(与大分子相互作用的水)、不易流动水(肌原纤维和网状组织中的水)和自由水(细胞外水)三种形式存在,而结合水又分为强结合水和弱结合水^[9]。水分子的存在形式和活性分布状态决定了蛋白质的保水能力,这不仅会直接影响产品的嫩度,也会对肉制品的食用品质、出品率以及产品货架期等产生显著影响。

低频核磁共振技术(LF-NMR)为一种新型的无损检测方法被用于测定肌肉中的水分状态和流动性^[10]。近年来广泛用于研究冻融过程肉的持水力变化^[11]、不同蒸煮温度下肉的保水性^[12]、屠宰前后肌肉中肌原纤维水分的分布和迁移特征^[13],但对不同食盐添加量对滩羊肉水分分布的影响的研究鲜见报道。因此,本研究采用LF-NMR对不同食盐添加量处理下的滩羊肉的水分分布影响做初步探究,将为今后LF-NMR技术用于熟肉制品水分分布的评定提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

羊后腿肉 盐池滩羊,6月龄,购置于宁夏盐池县大夏牧场清真食品有限公司;食盐 购置于宁阳生活超市。

H-SY2L-NI 6-C型恒温水浴锅 北京长源实验设备厂;AL204型电子天平 梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;NMI20低场脉冲核磁共振分析仪 上海纽迈电子科技有限公司;TA-XT2i型质构仪 英国Stable Microsystem公司。

1.2 实验方法

滩羊后腿经剔骨、去皮等预处理后,分割成大小形状相似,重50 g左右的肉块。将预处理的滩羊肉平均分成四组,按肉:盐水=1:1.5 (m/V)的比例放入配制好的腌制液(0.5%、1.5%、2.5%、3.5%)中腌制6 h,并在腌制过程中不断翻动肉块,使肉块腌制均匀。腌制好的肉块分别置于四个烧杯中,加入10倍肉块体积的水,置于温度为80 ℃的水浴锅中加热至滩羊肉中心温度75 ℃蒸煮30 min。蒸煮完成沥水并冷却至室温后进行蒸煮损失的测定,并置于0~4 ℃条件下冷却12 h。然后将羊肉分成两部分,一部分修整成2 cm×2 cm(剔除筋腱及结缔组织)的肉样,用于测定羊肉剪切力值;另一部分用于LF-NMR的测定。每个指标测三个平行,且每组做3个重复。

1.3 测定方法

1.3.1 蒸煮损失的测定 取腌制好的四组肉样进行称重(m_0),分别置于四个烧杯中并加入10倍肉块体积的水,置于温度为80 ℃的水浴锅中加热至滩羊肉中心温度75 ℃,蒸煮30 min后取样,沥水并冷却至室温进行称重(m_1),按式(1)计算蒸煮损失:

$$c(\%) = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100 \quad \text{式(1)}$$

式中: c —蒸煮损失,%; m_0 —煮前肉样重,g; m_1 —煮后肉样重,g。

1.3.2 剪切力的测定 样品处理:用平行刀将蒸煮

的滩羊肉切成2 cm×2 cm×2 cm的肉样(剔除筋腱及结缔组织),切面要平整垂直,每组重复3次。质构参数确定:参照文献[10],略有修改。实验选用HDP/WBV探头,设置参数为:测试前速度:2 mm/s,测试速度:2 mm/s,测试后速度:5 mm/s,压缩比为50%。物性测试仪测定滩羊肉样品的剪切力,单位分别是g。

1.3.3 NMR横向弛豫时间(T_2)测定 NMR弛豫特性的测量是在NMI20低场脉冲核磁共振分析仪上进行。质子共振频率为18.384 MHz,温度为32 ℃。 T_2 用CPMG序列测量,所使用的参数为: η 值(90°脉冲和180°脉冲之间的时间)为200 μ s。重复采样4次,重复间隔TR时间为1200 ms,得到以指数形式衰减的核磁信号。将大约2 g样品放入直径15 mm核磁管中,而后放入分析仪中。每个测试至少3个重复。

1.3.4 NMR微成像 NMR成像采用多层自旋回波(Multi-slice Spin Echo, MSE)序列来产生自旋回波图像。

1.4 统计分析

所有实验数据用Origin 8.0进行绘图,SPSS 19.0软件进行方差分析(Duncan法进行多重比较)和双变量相关分析,上述实验进行3次重复,结果采用平均值±标准差表示。

2 结果与分析

2.1 食盐添加量对滩羊肉蒸煮损失的影响

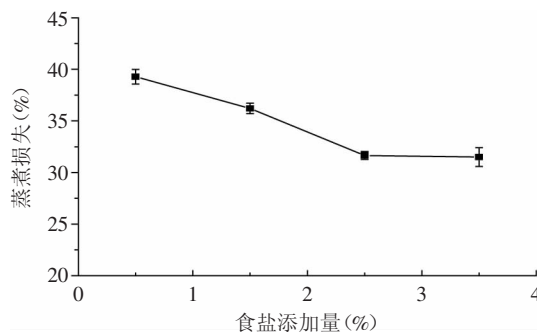


图1 食盐添加量对滩羊肉蒸煮损失的影响

Fig.1 Effect of different salt addition on cooking loss in Tan sheep

由图1可知,随着食盐浓度的增加,蒸煮损失逐渐下降;当食盐添加量从0.5%增加至2.5%,滩羊肉的蒸煮损失呈现出显著的下降趋势($p < 0.05$);当食盐的添加量继续增至3.5%时,滩羊肉的蒸煮损失下降不显著($p > 0.05$)。有研究认为:食盐质量浓度小于3%时,保水性较强,如果超越这个范围,保水性则下降^[14]。可能是由于食盐使得肌原纤维发生膨胀,大量氯离子被束缚在肌原纤维中,增加了负电荷引起的静电斥力,使得肉的离子强度增大,肌纤维蛋白质数量增多,在这些纤维状肌肉蛋白质加热变性的情况下,将水分和脂肪包裹起来凝固,使肉的保水性提高^[15]。Trout等^[16]研究发现,当食盐添加量从1.33%提高到2.9%,牛肉保水性显著提高,蒸煮损失降低的结果与本实验一致。

2.2 食盐添加量对滩羊肉嫩度的影响

由图2可知,随着食盐添加量的增加,滩羊肉的

剪切力呈下降趋势,当食盐添加量为0.5%~2.5%,剪切力下降比较明显($p<0.05$),大于2.5%时,下降不显著($p>0.05$)。这是因为食盐使肉的离子强度提高,能活化蛋白质,肌球蛋白溶出量增多,从而改善肉制品的质地,改善多汁性,增加其嫩度^[12]。这与Baublits^[13]的研究结果也是一致的。

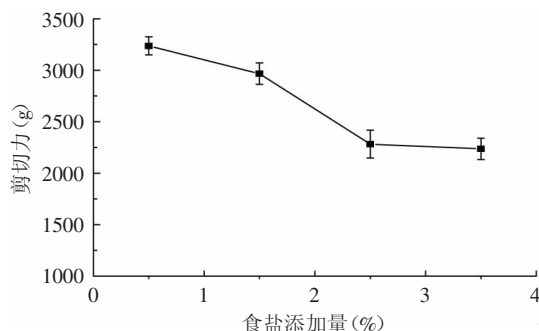


图2 食盐添加量对滩羊肉剪切力的影响

Fig.2 Effect of salt addition on shear force in Tan sheep

2.3 弛豫特性

在LF-NMR测量中得到的两个主要参数是自旋-晶格弛豫时间(用 T_1 来表示,又称为纵向弛豫时间)和自旋-自旋弛豫时间(用 T_2 来表示,又称为横向弛豫时间)。在肉与肉制品研究中,常用 T_2 弛豫时间来作为测定肉品持水性的指标,因为 T_2 变化范围较大,并且对水分分布状态比 T_1 更加敏感。不同的 T_2 弛豫时间,能够容易区分自由水和结合水^[14]。

不同食盐添加量处理下滩羊肉中水分子 T_2 弛豫特性见图3。拟合后的 T_2 分布按弛豫时间呈现四个峰:0.01~0.45 ms和1.2~3.0 ms各出现一个小峰,20.4~118.4 ms出现一个大峰,118.4~285.2 ms又明显出现一个峰。根据出峰时间及各自峰面所占总面积比,认为四个峰代表滩羊肉蒸煮过程中水分的四种不同存在状态,既弱结合水(T_{21})、强结合水(T_{22})、不易流动水(T_{23})和自由水(T_{24})^[15]。图3中横向弛豫时间可以反应水分的自由度,水分迁移的程度。随着食盐添加

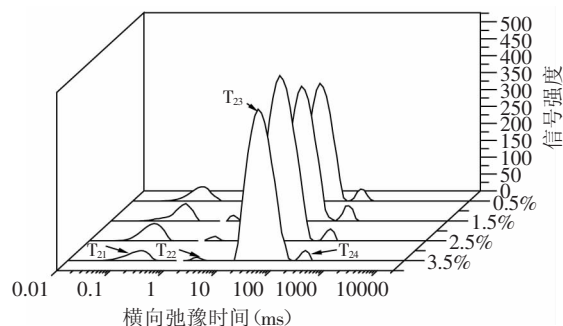


图3 不同食盐添加量下滩羊肉的低场核磁弛豫时间(T_2)

Fig.3 T_2 relaxation time of water molecular from Tan sheep at different salt addition treatment

量的增加,不易流动水的出峰时间在提前,说明蒸煮时间的改变,导致结合水朝向不易流动水的方向迁移,使得不易流动水提前出现。

弛豫时间(T_2)分布的变化表征经不同食盐添加量处理后滩羊肉中存在的多种状态水分群的分布情况,即各状态下水分的结合状态和自由移动程度;而弛豫峰面积百分数可以估算氢质子的相对含量,从而反映各种状态水分群的含量,其变化可以表征经不同食盐添加量处理后滩羊肉中各种状态水分子的含量变化情况,即各种状态水分群的流动转移情况。表1为不同食盐添加量处理后滩羊肉中水分子 T_2 弛豫时间的变化。

由表1可以看出随着食盐添加量的增加,四种不同状态的水分向快弛豫方向移动,但 T_{21} 和 T_{22} 变化不显著($p>0.05$),这主要是因为 T_{21} 和 T_{22} 反映的是与大分子紧密结合的那部分水,所以食盐添加量很难对其造成显著影响;当食盐添加量为0.5%~2.5%时, T_{23} 和 T_{24} 显著下降($p<0.05$),当食盐添加量超过2.5%时, T_{23} 和 T_{24} 没有显著变化($p>0.05$)。这一结果与前人报道的食盐质量浓度超过3%时,保水性将会下降^[14]相对应。随着食盐添加量的增加, T_{23} 和 T_{24} 向快弛豫方向移动,既弛豫速度增加, T_2 弛豫时间减少,表明不易流动水和自由水的移动性明显减弱($p<0.05$)。

表1 不同食盐添加量处理滩羊肉的低场核磁弛豫时间(T_2)变化

Table 1 Effect of different salt addition treatment on Trelaxation time of water(T_2) from Tan sheep

食盐添加量(%)	T_{21} 弛豫时间(ms)	T_{22} 弛豫时间(ms)	T_{23} 弛豫时间(ms)	T_{24} 弛豫时间(ms)
0.5	0.45±0.13 ^a	1.76±0.28 ^a	97.21±1.38 ^a	168.21±6.92 ^a
1.5	0.44±0.04 ^a	1.65±0.34 ^a	69.10±1.48 ^b	143.78±2.83 ^b
2.5	0.43±0.03 ^a	1.63±0.10 ^a	38.40±0.82 ^c	106.49±8.36 ^c
3.5	0.43±0.00 ^a	1.58±0.06 ^a	38.99±1.45 ^c	105.36±2.93 ^c

注:同一列中不同字母表示数值差异显著($p<0.05$);表2同。

表2 不同食盐添加量处理滩羊肉的低场核磁弛豫峰面积百分数变化

Table 2 Effect of different salt addition treatment on T_2 peak area fraction of water from Tan sheep

食盐添加量(%)	T_{21} 峰面积百分数(%)	T_{22} 峰面积百分数(%)	T_{23} 峰面积百分数(%)	T_{24} 峰面积百分数(%)
0.5	7.62±0.56 ^a	1.24±0.13 ^a	86.22±2.62 ^b	3.82±0.66 ^a
1.5	7.52±0.03 ^a	1.22±0.01 ^a	87.62±4.37 ^{ab}	3.36±0.37 ^a
2.5	7.56±0.24 ^a	1.16±0.25 ^a	90.66±6.51 ^a	1.45±0.28 ^b
3.5	7.56±0.27 ^a	1.18±0.08 ^a	90.78±3.58 ^a	1.21±0.16 ^b

表2为不同食盐添加量处理下滩羊肉中水分子 T_2 弛豫峰面积百分数的变化,由表2可知,随着食盐添加量的增加, T_{21} 和 T_{23} 峰面积百分数都在逐渐增大,且 T_{23} 的增大显著($p<0.05$),而 T_{24} 峰面积百分数逐渐下降,说明随着食盐添加量的增加,可以提高滩羊肉的保水性。有文献指出,决定肉保水性的主要是不易流动水(T_{23}),存在于纤维、肌原纤维及膜之间,它能溶解盐类及其他物质,使得食盐在水中电离出 Na^+ 和 Cl^- ,由于 Cl^- 与肌肉蛋白质中带正电荷的基团结合,使蛋白质分子的静电斥力增强,使肌原纤维蛋白质分子间的内聚力降低,网状结构松弛,结合了大量的不易流动水,提高肉的保水性^[16]。

图4是用核磁成像技术得到的4个处理组滩羊肉的图像,NMR图像法是通过选择合适的脉冲序列得到回波信号,在二维傅里叶变化法中,通过三个互相垂直的可控线性梯度定位,将样品的体素与图像上的像素一一对应,然后根据样品截面上不同点的信号强度的差异,经过计算机处理得到明暗对比、再将这此像素组合起来得到的图像。检测中一般用的是二维图像,即得到某一截面的图像,通过信号颜色的亮暗反映样品中水等组成物质的含量,水分含量越多,在图中显示越亮^[17]。

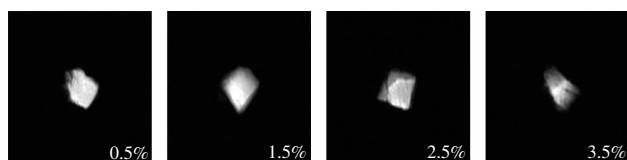


图4 不同食盐添加量处理滩羊肉的核磁成像图

Fig.4 The NMR images of different salt addition treatment from Tan sheep

由图4可以看出,经不同食盐添加量处理的羊肉的NMR图像亮度随着浓度的增大而减弱,表明随着食盐添加量的增加,滩羊肉表面的水分逐渐减少。这与不同食盐添加量处理下的 T_{24} 峰面积百分数的变化是一致的,说明核磁成像可在一定程度上反应肉品中水分含量与分布的变化,可以快捷、方便、无损的检测肉品水分分布的变化情况。

2.4 相关性分析

本文研究了不同食盐添加量处理下的滩羊肉蒸煮损失、剪切力和水分分布的变化,结果发现,经不同食盐添加量处理下的滩羊肉的蒸煮损失和剪切力都有较大影响,这可能与肌原纤维蛋白的网络结构、分子间的内聚力以及 T_2 弛豫特性有关。因此,对滩羊肉的蒸煮损失、剪切力以及 T_2 弛豫特性进行相关性分析,能够更好地了解滩羊肉经不同食盐添加量处理后,其蒸煮损失、剪切力以及 T_2 弛豫特性之间的关系。

表3中显示了不同食盐添加量处理下的滩羊肉测定指标的相关性,从表3中的相关系数可以看出,蒸煮损失分别与 T_{23} 、 T_{24} 呈极显著($p<0.01$)正相关、显著($p<0.05$)正相关,相关系数分别为0.978、0.936;剪切力分别与 T_{23} 、 T_{24} 峰面积百分比、 T_{24} 峰面积百分比呈显著($p<0.05$)正相关、显著($p<0.05$)负相关、极显著($p<0.01$)正相关,相关系数分别为0.898、-0.589、0.463;蒸煮损失与剪切力呈显著($p<0.05$)正相关,相关系数为0.985。

由以上相关系数和显著性分析可知,经不同食盐添加量处理后,滩羊肉的蒸煮损失和剪切力与不易流动水和自由水的弛豫时间和含量都有着密切的关系。同时可以看出,蒸煮损失与 T_{23} 、 T_{24} 弛豫时间呈显著正相关,说明不易流动水和自由水的弛豫时间越长,蒸煮损失越大。而剪切力与 T_{23} 、 T_{24} 峰比例呈显著正相关,与 T_{23} 峰比例显著负相关,说明不易流动水的弛豫时间越长、含量越大且自由水含量越少,剪切力就越大。

3 结论

经不同食盐添加量处理的滩羊肉中水分子的状态发生着显著地变化。随着食盐添加量的增加,滩羊肉中不易流动等水分子与肌原纤维蛋白的结合程度增加,降低了蒸煮损失,提高了滩羊肉的嫩度。核磁成像显示,经不同食盐添加量处理的羊肉的NMR图像亮度随着浓度的增大而减弱,表明随着食盐添加量的增加,滩羊肉表面的水分逐渐减少,与上述 T_{24} 峰面积百分比的变化规律的结论相对应。相关性分析发现,经不同方式处理后,滩羊肉的蒸煮损失和剪切力与不易流动水和自由水的弛豫时间和含量都有着密切的关系;不易流动水和自由水的弛豫时间越长,

表3 不同食盐添加量处理下的滩羊肉测定指标的相关性分析

Table 3 Correlational analyses of indexes considered in Tan sheep at different salt addition treatment

指标	T_{22}	T_{23}	T_{24}	T_{21} 峰面积百分数	T_{22} 峰面积百分数	T_{23} 峰面积百分数	T_{24} 峰面积百分数	蒸煮损失	剪切力
T_{21}	0.534	0.630	0.416	-0.710	-0.535	-0.703	0.513	0.562	0.521
T_{22}		0.848	0.899	-0.964	-0.8896	-0.862	0.737	0.867	0.678
T_{23}			0.957*	-0.899	-0.964	-0.948*	0.923	0.978**	0.898*
T_{24}				-0.839	-0.635	-0.672	0.960	0.936*	0.763
T_{21} 峰面积百分比					0.863*	0.874	-0.834	-0.989	-0.246
T_{22} 峰面积百分比						0.866	-0.730	-0.966	-0.302
T_{23} 峰面积百分比							-0.983**	-0.986	-0.589*
T_{24} 峰面积百分比								0.960	0.463**
蒸煮损失									0.985*

注:*表示显著相关($p<0.05$),**表示极显著相关($p<0.01$)。

(下转第366页)

- [5] Ghilissi Z, Hakim A, Sila A, et al. Evaluation of efficacy of natural astaxanthin and vitamin E in prevention of colistin-induced nephrotoxicity in the rat model[J]. Environmental toxicology and pharmacology, 2014, 37(3): 960-966.
- [6] Ames B N, Shigenaga M K, Hagen T M. Oxidants, antioxidants, and the degenerative diseases of aging[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 1993, 90(17): 7915-7922.
- [7] Komaki A, Karimi S A, Salehi I, et al. The treatment combination of vitamins E and C and astaxanthin prevents high-fat diet induced memory deficits in rats[J]. Pharmacology Biochemistry and Behavior, 2015, 131: 98-103.
- [8] Katagiri M, Satoh A, Tsuji S, et al. Effects of astaxanthin-rich Haematococcus pluvialis extract on cognitive function: a randomised, double-blind, placebo-controlled study[J]. Journal of clinical biochemistry and nutrition, 2012, 51(2): 102.
- [9] Hartree E F. Determination of protein: a modification of the Lowry method that gives a linear photometric response[J]. Analytical biochemistry, 1972, 48(2): 422-427.
- [10] Dey A, Cederbaum A I. Alcohol and oxidative liver injury[J]. Hepatology, 2006, 43(S1): S63-S74.
- [11] Dekanski D, Ristić S, Mitrović D M. Antioxidant effect of dry olive (*Olea europaea* L.) leaf extract on ethanol-induced gastric lesions in rats[J]. Mediterranean Journal of Nutrition and Metabolism, 2009, 2(3): 205-211.
- [12] Zhang Q, Li N, Zhou G, et al. *In vivo* antioxidant activity of polysaccharide fraction from *Porphyra haitanensis* (Rhodophyta) in aging mice[J]. Pharmacological Research, 2003, 48(2): 151-155.
- [13] 盛良全, 郑晓云, 闫向阳, 等. 生物体中的超氧化物歧化酶[J]. 安徽卫生职业技术学院学报, 2002, 1(2): 48-51.
- [14] Leeuwenburgh C, Hollander J, Leichtweis S, et al. Adaptations of glutathione antioxidant system to endurance training are tissue and muscle fiber specific[J]. American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology, 1997, 272(1): R363-R369.
- [15] Abadie-Guedes R, Guedes R C A, Bezerra R S. The Impairing Effect of Acute Ethanol on Spreading Depression is Antagonized by Astaxanthin in Rats of 2 Young-Adult Ages[J]. Alcoholism: Clinical and Experimental Research, 2012, 36(9): 1563-1567.

(上接第325页)

蒸煮损失越大; 不易流动水的弛豫时间越长、含量越大且自由水含量越少, 剪切力就越大。

参考文献

- [1] 李伟. 宁夏滩羊肉的特征香气成分分析[J]. 现代食品科技, 2013, 29(5): 1173-1177.
- [2] 赵万余. 宁夏滩羊不同部位肉中挥发性风味物质分析[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(5): 2725-2727.
- [3] 张立彦, 熊玲. 真空腌制条件对猪肉食盐渗透规律及品质变化的影响[J]. 现代食品科技, 2013, 29(11): 2595-2600.
- [4] 李雨露, 刘丽萍. 提高肉制品保水性方法的研究进展[J]. 食品工业科技, 2012, 33(20): 398-400.
- [5] Barbut S, Mittal G S. Effect of salt reduction on the rheological properties of beef, pork and poultry meat batters[J]. Meat science, 1989(26): 177-191.
- [6] Sánchez-Alonso I, Moreno P, Careche M. Low field nuclear magnetic resonance (LF-NMR) relaxometry in hake (*Merluccius merluccius* L.) muscle after different freezing and storage conditions[J]. Food Chemistry, 2014, 153: 250-257.
- [7] 戚军, 高菲菲, 李春保, 等. 低场NMR研究冻融过程中羊肉持水力的变化[J]. 江苏农业学报, 2010, 26(3): 617-622.
- [8] Bertram H C, Kohler A, Böcker U, et al. Heat-induced changes in myofibrillar protein structures and myowater of two pork qualities. A combined FT-IR spectroscopy and low-field NMR relaxometry study[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2006, 54(5): 1740-1746.
- [9] Pearce KL, Rosenfold K, Andersen HJ, et al. Water distribution and mobility in meat during the conversion of muscle to meat and ageing and the impacts on fresh meat quality attributes—A review[J]. Meat Science, 2011, 89(2): 111-124.
- [10] 杨慧娟, 于小波, 胡忠良, 等. 低场核磁共振技术研究超高压处理对乳化肠质构和水分分布的影响[J]. 食品工业科技, 2014, 35(4): 96-104.
- [11] Trout G R, Schmidt G R. Effect of phosphate type and concentration salt level and method of preparation on the Binding in restructured beef rolls[J]. Journal of Food Science, 1986(51): 1061-1062.
- [12] 谢碧秀, 何会, 宋哲, 等. 酱油、白糖、食盐对粉蒸肉质构特性影响的研究[J]. 食品工业科技, 2008, 29(11): 133-137.
- [13] Baublits R T, Pohlman F W, Brown A H, et al. Effects of sodium chloride, phosphate type and concentration, and pump rate on beef biceps femoris quality and sensory characteristics[J]. Meat Science, 2005(70): 205-214.
- [14] Carneiro C, Marsico E, Ribeiro R, et al. Studies of the effect of sodium tripolyphosphate on frozen shrimp by physicochemical analytical methods and Low Field Nuclear Magnetic Resonance (LF 1H NMR)[J]. LWT-Food Science and Technology, 2013, 50(2): 401-407.
- [15] Chappleau N J, Lamballerie-Anton M I. Changes in myofibrillar proteins interactions and rheological properties induced by high-pressure processing[J]. European Food Research and Technology, 2003, 216(6): 470-476.
- [16] 孔保华, 马丽珍主编. 肉品科学与技术[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2003: 75-76, 191-197.
- [17] 陈珊珊, 李然, 俞捷, 等. 永磁低场核磁共振分析仪原理和应用[J]. 生命科学仪器, 2009(10): 49-53.