



低场核磁共振分析冰温牛肉中不同状态水分变化

许倩¹, 朱秋劲^{1,2,3,*}, 叶春¹, 王文秀¹

(1. 贵州大学生命科学学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州省农畜产品贮藏与加工重点实验室, 贵州 贵阳 550025;

3. 国家牛肉加工技术研发分中心, 贵州 惠水 550600)

摘要: 利用低场核磁共振技术研究冰温贮藏条件下无包装与真空包装牛肉在贮藏过程中水分弛豫参数的变化规律。通过弛豫测定, 结果显示新鲜牛肉中有3种不同活动状态的水分, 即结合水、不易流动水和自由水, 其对应的横向弛豫时间分别是 T_{21} 、 T_{22} 、 T_{23} 。对弛豫参数与常见肉品质指标进行皮尔逊相关系数分析, 揭示了两者的相关性。结果表明: 无包装牛肉自由水弛豫参数与其品质指标均有较强的相关性, 而真空包装牛肉的弛豫参数与其品质指标的相关性均不强。对冰温贮藏牛肉的品质影响最大的水分是自由水, 自由水的弛豫参数能够很好的用于无包装牛肉常规品质指标的研究。

关键词: 冰温贮藏; 真空包装; 低场核磁共振; 牛肉; 水分状态

LF-NMR Studies of Variations of Different Water States during Controlled Freezing Point Storage of Beef

XU Qian¹, ZHU Qiu-jin^{1,2,3,*}, YE Chun¹, WANG Wen-xiu¹

(1. College of Life Science, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2. Key Laboratory of Agricultural and Animal Products Store and Processing of Guizhou Province, Guiyang 550025, China;

3. National Beef Processing Technology Research and Detection Sub-centre, Huishui 550600, China)

Abstract: The aim of this study to apply low field NMR to investigate regular variations of different relaxation parameters of water in vacuum packaged beef and non-vacuum packaged beef during controlled freezing point storage. NMR relaxation data indicated that there were three different types of water in fresh beef, namely bound water, free water and immobilized water with relaxation times of T_{21} , T_{22} and T_{23} (x-axis), respectively. Correlation analysis of three relaxation parameters and meat quality indices was conducted by measuring pearson correlation coefficients. Our results showed that the correlations between the studied relaxation parameters and meat quality indices were strong in non-vacuum packaged beef but not strong in vacuum packaged beef. Free water had the biggest influence on meat quality during controlled freezing point storage of beef. The relaxation parameter of free water may hold great promise for potential applications to study quality indices of non-vacuum packaged beef.

Key words: ice-temperature storage; vacuum package; low-field nuclear magnetic resonance; beef; moisture state

中图分类号: TS251.51; TS207.3

文献标志码: A

文章编号: 1001-8123(2013)05-0017-05

采购新鲜牛肉作为烹饪食材构成了国民消费牛肉的主要方式, 新鲜牛肉的贮藏和流通多采用冷藏手段, 普通0~4℃的贮藏温度并不能完全满足对牛肉保鲜的需要。而将生鲜食品置于0℃以下, 食品冰点以上的温度范围内保藏的冰温贮藏技术是继冷藏和气调贮藏之后的第3代保鲜技术, 将牛肉置于这个温度范围内时, 其生理活性维持在最低程度, 但又能保持正常的生化变化。并且肉始终处于不冻结的鲜活状态, 不会对肉产生冻害, 故能达到长期保鲜的效果^[1-4]。

牛肉中主要成分是水、蛋白质、脂肪、碳水化合物和其他一些可溶性物质, 其中水的含量可占到70%~80%^[5-6]。牛肉在储藏期间发生的许多理化变化都与牛肉内部水分的活动状态及迁移情况有关。核磁共振(nuclear magnetic resonance, NMR)可以通过检测肉中氢质子的弛豫时间来获得肉贮藏过程水分的状态、不同状态水分的含量及变化过程等信息^[7-8]。

目前, 我国对牛肉品质指标的检测仍为传统方法, 缺点在于费时费力, 不易进行大批量的快速检测^[9], 而核

收稿日期: 2013-03-03

基金来源: 贵州省农业攻关项目[黔科合NY字(2011-3099)]

作者简介: 许倩(1988—), 女, 硕士研究生, 研究方向为食品加工与贮运保鲜。E-mail: kana615@163.com

*通信作者: 朱秋劲(1969—), 男, 教授, 博士, 研究方向为食品营养与安全畜产品加工。E-mail: qiujiu_z@hotmail.com

磁共振技术具有检测迅速、样品需要量少、无需前处理且对样品无损等优点^[7]。本实验利用低场核磁共振技术研究了冰温贮藏条件下无包装(no packing, NP)的牛肉与真空包装(vacuum packing, VP)的牛肉在贮藏过程中不同活动状态水分的变化规律,并与常见的肉品质指标进行了皮尔逊相关系数分析,研究了两者间的相关性,确定对冰温贮藏牛肉的品质影响最大的水分,为牛肉品质检测提供一种快速、无损的新方法。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

冷鲜牛肉:屠宰12h内的鲜牛霖肉 市购;盐酸、稀硫酸、碳酸钾、硼酸、甘油、阿拉伯胶、甲基红、次甲基蓝、乙醇均为分析纯。

1.2 仪器与设备

NMI20-Analyst核磁共振成像分析仪 上海纽迈电子科技有限公司;数显温度计 天津市科辉仪表厂;JY3001型电子天平、JA-1104N型电子天平(感应量为0.0001g) 上海民桥精密科学仪器有限公司;pH100型笔式pH计 上海三信仪表厂;C-LM3型数显式肌肉嫩度仪由东北农业大学工程学院研制;双夹板压力计 实验室自制。

1.3 方法

1.3.1 肉样处理

购买屠宰12h内的冷鲜牛霖肉,采用内装冰袋的保温包4℃运回,去除附着的脂肪和结缔组织,平均分割成小份,将肉置于温度为-1℃(冰温)冰箱变温区贮藏(冰箱内相对湿度70%)。各项指标每2d测定1次。

1.3.2 冰点测定

将数显温度计的电极插入5cm×5cm×5cm的牛肉块体积中心,置于-15℃冷库中,每分钟记录温度,作牛肉中心温度随冻结时间变化的曲线,当温度下降到0℃以下出现轻微回升,而后变化缓慢或停止,以此时的温度为牛肉的冰点温度^[10]。

1.3.3 核磁共振测定

每次测定时,一块肉取3份样品,每份样品均准确称质量1g,肉样无需进行前处理,只需切成适宜大小,用玻棒轻轻塞入核磁共振专用试管,尽量排除肉样间隙中的空气,切勿用力挤压肉,避免挤出肉中水分,影响实验结果。

核磁共振测定在纽迈核磁共振成像分析仪上进行,测定过程中为保证实验的平行性和结果的可靠性,每次测定均固定在相同时间段。并且确保40min内完成样品制备和测定,以免肉样过久暴露在空气中失水,影响实验结果。

测定样品横向弛豫时间(T_2)步骤:1)测定时,开启电脑,将样品管放入仪器磁体箱中,打开核磁共振分析软件(上海纽迈电子科技有限公司提供的Analyst Software Ver3.3),开启射频单元电源(仪器工作温度32℃)。2)在参数设置中选择硬脉冲序列(Hard Pulse FID),寻找中心频率SF1+O1(肉中氢质子的共振频率)。3)进入硬脉冲CPMG 序列设置参数:TD=100050, SW=100kHz, D3=80μs, TR=1000ms, RG1=20, RG2=3, NS=4, EchoTime=500.00μs, EchoCount=1000,开始检测。4)检测结束保存数据,进入反演软件(上海纽迈电子科技有限公司提供的核磁共振弛豫时间反演拟合软件Ver4.09)反演出 T_2 的分布情况。

1.3.4 pH值测定

用pH100型笔式pH计直接测定肉新鲜切面的pH值,依次取3个测试点。

1.3.5 失水率^[11]

将肉样切为1.0mm厚度,用直径2.523cm圆形取样器切取肉样,用感量为0.0001g天平称质量,然后将肉样上下各垫6层滤纸,置于35kg压力计上压制5min,撤除压力后立即称质量。

$$\text{失水率}/\% = \frac{\text{加压前肉样质量} - \text{加压后肉样质量}}{\text{加压前肉样质量}} \times 100$$

1.3.6 数据分析方法

对采集的试验数据采用SPSS 17.0进行相关性和方差分析,多重比较采用Duncan法。

2 结果与分析

2.1 牛肉冰点测定

图1为牛肉冻结过程中温度随冻结时间变化的曲线,在温度下降到-1.1~-1.2℃后,进入最大冰晶生成带,温度变化开始停止,因此确定-1.2℃为其初始冰点,故将冰温贮藏的温度定为-1℃。

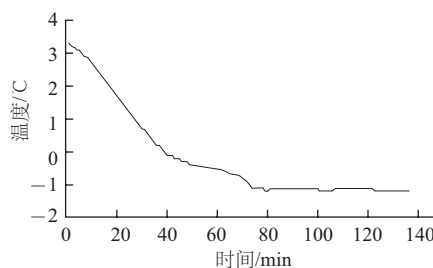


图1 牛肉中心温度变化曲线

Fig.1 Changes in internal temperature during controlled freezing point storage of beef

2.2 冷鲜牛肉的核磁共振弛豫参数

NMR用于肉品水分研究时主要采用的是横向弛豫

时间(T_2), 这是由于 T_2 变化范围较大, 与 T_1 相比对多相态的存在更敏感^[7]。图2是由核磁共振反演软件作出的新鲜牛肉横向弛豫时间(T_2)谱图, 图中形成几个峰, 则可说明牛肉中有几种活动状态的水分^[12]。谱图中各个峰点所对应的横坐标位置就是该种水分的平均 T_2 值, T_2 值越低表明该种水分与底物结合越紧密, T_2 值越大说明水分越自由^[13-14]。由图2可看出新鲜牛肉中有3种不同活动状态的水: 结合水、不易流动水和自由水, 用 T_{21} (0~10ms)、 T_{22} (10~100ms)、 T_{23} (100~1000ms)分别对应^[15]。

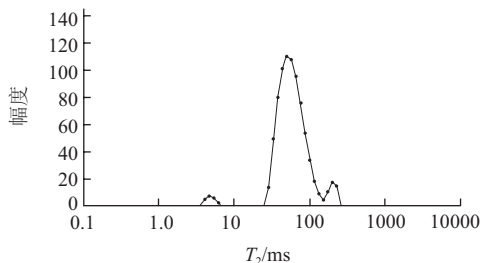


图2 新鲜牛肉横向弛豫时间(T_2)谱图

Fig.2 The transverse relaxation time (T_2) of fresh beef

牛肉贮藏期间冰箱内相对湿度为70%。从表1可以看出, 在整个贮藏期间, 随着贮藏时间的增加, 无包装和真空包装牛肉的 T_{21} 值无显著变化($P>0.05$), 平均值在2~5ms之间。两种包装牛肉的 T_{22} 值均稳定在49ms左右无变化, 说明随着贮藏时间的延长, 牛肉中结合水和不易流动水与底物的结合程度改变很小或没有改变。

两种包装牛肉的 T_{23} 值均差异显著($P<0.05$), 其中无包装的牛肉 T_{23} 值1~9d随贮藏时间的延长显著上升($P<0.05$), 之后9~11d显著下降($P<0.05$), 11~17d变化不显著($P>0.05$), 之后开始显著下降, 从第19天开始, 在100~1000ms的范围内已经没有峰, T_{23} 消失。说明无包装的牛肉在贮藏前期, 肉中自由水的移动性越来越强, 即越来越自由。后期自由水的移动性开始慢慢下降直至完全消失。真空包装的牛肉的 T_{23} 在整个贮藏期内一直存在, T_{23} 值的组间变化显著($P<0.05$), 但规律性不强。

表1 牛肉 T_2 随贮藏时间变化趋势

Table 1 Temporal evolution of T_2 during controlled freezing point storage of beef

贮藏时间/d	NP			VP		
	T_{21} /ms	T_{22} /ms	T_{23} /ms	T_{21} /ms	T_{22} /ms	T_{23} /ms
1	3.49±0.87 ^{ab}	49.77±0 ^a	175.89±24.49 ^{bc}	3.49±0.87 ^a	49.77±0 ^a	175.89±24.49 ^d
3	3.03±1.014 ^{ab}	49.77±0 ^a	192.20±15.11 ^{bc}	2.61±0.079 ^a	49.77±0 ^a	220.98±17.37 ^{ab}
5	2.96±0.61 ^{ab}	49.77±0 ^a	200.92±0 ^{abc}	3.34±0.89 ^a	49.77±0 ^a	192.20±15.11 ^{bcd}
7	2.96±0.60 ^{ab}	49.77±0 ^a	200.92±0 ^{abc}	3.20±0.25 ^a	49.77±0 ^a	174.75±0 ^d
9	3.16±0.69 ^{ab}	49.77±0 ^a	220.98±17.37 ^a	2.56±0.43 ^a	49.77±0 ^a	231.01±0 ^a
11	2.26±0.78 ^b	49.77±0 ^a	192.20±15.11 ^{bc}	3.07±0.43 ^a	49.77±0 ^a	167.17±13.14 ^d
13	3.66±1.21 ^{ab}	49.77±0 ^a	200.92±0 ^{abc}	4.44±0.35 ^a	49.77±0 ^a	212.26±32.48 ^{abc}
15	3.68±1.25 ^{ab}	49.77±0 ^a	202.23±28.15 ^{ab}	3.43±1.06 ^a	49.77±0 ^a	231.01±0 ^a
17	2.71±0.69 ^{ab}	49.77±0 ^a	174.75±0 ^f	4.10±0.70 ^a	49.77±0 ^a	192.20±15.11 ^{bcd}
19	2.75±0.56 ^{ab}	49.77±0 ^a	—	3.25±0.71 ^a	49.77±0 ^a	210.95±17.37 ^{abc}
21	4.74±1.21 ^a	49.77±0 ^a	—	4.21±1.39 ^a	49.77±0 ^a	183.48±15.11 ^{cd}

注: 不同上标字母表示同列数据间差异显著($P<0.05$), 下同。—表示无包装牛肉第19天开始 T_{23} 消失, 无此值。

核磁共振反演软件可自动求得谱图上每个峰的峰面积及总峰面积, 由峰面积可估算出肉中不同状态水分及总水分的含量^[15]。由无包装和真空包装的牛肉 T_2 峰面积随贮藏时间的变化趋势(表2)可知, 两种包装牛肉中 T_{21} 、 T_{22} 和 T_{23} 峰面积随贮藏时间的变化均显著($P<0.05$)。无包装牛肉的总峰面积变化显著($P<0.05$)和真空包装牛肉的总峰面积变化不显著($P>0.05$)。

无包装牛肉的 T_{23} 峰面积在贮藏期间总体变化趋势为先上升后下降, 峰面积从第1天的31.35±5.89到第9天达到最大的64.40±9.77, 之后显著下降($P<0.05$), 从第19天开始 T_{23} 消失, 峰面积降为0, 表示牛肉中自由水消失, 并且总峰面积显著下降, 表现在感官上就是无包装的牛肉在贮藏后期失水变得干硬。

而真空包装牛肉的 T_{23} 峰面积在贮藏期间变化趋势为先上升再下降最后上升, 峰面积在第11天时为最小的12.10±3.31, 之后慢慢上升, 到第21天时为29.20±3.90, 基本接近第1天的值。真空包装牛肉总峰面积在贮藏期内变化不显著, 表示真空包装牛肉中总水分含量变化不大。

表2 牛肉 T_2 峰面积随贮藏时间变化

Table 2 Temporal evolution of peak areas of T_2 during controlled freezing point storage of beef

贮藏时间/d	NP峰面积			总峰面积	VP峰面积			总峰面积
	T_{21}	T_{22}	T_{23}		T_{21}	T_{22}	T_{23}	
1	18.0±3.32 ^{fg}	768.66±10.33 ^c	31.35±5.89 ^f	818.36±17.33 ^{abc}	18.00±3.32 ^d	768.66±10.33 ^c	31.35±5.89 ^c	818.36±17.33 ^b
3	17.60±4.40 ^g	776.20±16.78 ^b	39.50±7.90 ^d	829.54±18.21 ^a	15.60±3.90 ^f	785.50±9.87 ^a	47.37±4.54 ^b	830.10±10.23 ^a
5	16.43±3.45 ^h	759.30±13.98 ^c	53.30±8.18 ^b	829.79±10.24 ^{abc}	15.20±4.87 ^g	764.50±8.51 ^f	47.70±5.21 ^a	827.65±11.68 ^b
7	18.30±4.12 ^{ef}	776.30±7.54 ^b	38.70±4.54 ^e	834.07±13.43 ^{ab}	19.50±6.98 ^b	778.20±11.12 ^c	24.80±3.43 ^g	817.57±10.82 ^b
9	23.40±3.90 ^c	745.90±9.81 ^h	64.40±9.77 ^a	820.12±10.56 ^{abc}	13.10±3.45 ^h	774.70±9.02 ^d	17.10±4.29 ⁱ	805.02±9.29 ^b
11	18.30±4.56 ^{ef}	757.10±11.53 ^f	42.90±7.30 ^c	812.25±11.31 ^{abcd}	18.40±2.32 ^c	778.40±5.83 ^c	12.10±3.31 ^k	809.08±8.72 ^b
13	20.30±5.78 ^d	767.50±9.57 ^d	25.87±5.83 ^h	806.70±9.87 ^{bcd}	21.70±4.21 ^a	780.60±9.10 ^b	15.40±2.72 ^j	808.44±9.65 ^b
15	26.30±3.86 ^a	755.50±8.69 ^g	28.40±3.54 ^g	810.52±10.01 ^{abcd}	21.90±3.67 ^a	761.30±8.12 ^g	19.80±3.56 ^h	803.70±9.23 ^b
17	25.10±4.03 ^b	745.20±13.34 ⁱ	5.87±2.89 ⁱ	772.55±8.23 ^{de}	12.53±2.90 ⁱ	726.10±11.34 ⁱ	29.50±4.12 ^d	807.07±8.76 ^b
19	18.00±4.21 ^{fg}	784.50±6.29 ^a	0 ^j	787.13±7.87 ^{cde}	16.35±1.45 ^e	742.90±7.89 ^b	28.40±3.22 ^f	806.91±9.19 ^b
21	18.65±1.34 ^e	717.20±8.21 ^j	0 ^j	749.03±9.23 ^c	15.20±2.11 ^g	708.60±8.17 ^j	29.20±3.90 ^e	809.27±10.90 ^b



2.2 冷鲜牛肉品质指标变化

如表3所示,牛肉贮藏过程中,两种包装牛肉的pH值开始均会下降,当下降到一定程度后,又会逐渐升高。牛肉pH值的这一变化规律是由于家畜宰后肌肉中代谢过程发生改变,肌糖原无氧酵解,产生乳酸,三磷酸腺苷(ATP)迅速分解,使肉pH值下降。肉腐败时,由于肉内蛋白质在细菌酶的作用下,被分解为氨和胺类化合物等碱性物质,因而使肉趋于碱性,pH值显著增高^[16-18]。无包装与真空包装牛肉的pH值在前7d随贮藏时间的延长显著下降($P<0.05$),最低pH值均出现在第7天,分别为 4.88 ± 0.02 和 4.95 ± 0.01 ,第7天开始至第21天总体趋势显著升高($P<0.05$)。贮藏期间真空包装牛肉的pH值一直维持在较低水平,pH值在 $4.98\sim 5.81$ 之间。肉类pH值在 $5.45\sim 5.60$ 之间时能保持较好的品质^[19]。故可推断冰温结合真空包装对牛肉的保鲜效果良好。

表3 牛肉pH值及失水率随贮藏时间的变化
Table 3 Temporal evolution of pH and drip loss during controlled freezing point storage of beef

贮藏时间/d	NP		VP	
	pH	失水率/%	pH	失水率/%
1	5.81 ± 0.05^d	32.90 ± 1.03^{cd}	5.81 ± 0.05^b	32.90 ± 1.04^{def}
3	4.95 ± 0.02^e	34.22 ± 1.78^{bcd}	5.14 ± 0.02^e	33.17 ± 0.79^{cdef}
5	4.96 ± 0.04^e	33.48 ± 1.70^{cd}	4.98 ± 0.01^b	35.64 ± 1.32^{bcd}
7	4.88 ± 0.02^f	35.73 ± 0.03^{bc}	4.95 ± 0.01^b	35.82 ± 1.56^{bc}
9	4.94 ± 0.01^e	40.13 ± 1.64^a	5.12 ± 0.02^e	32.46 ± 1.43^{ef}
11	4.94 ± 0.02^e	37.19 ± 1.35^{abc}	5.26 ± 0.03^d	31.28 ± 1.72^f
13	4.96 ± 0.01^e	38.07 ± 1.51^{ab}	5.05 ± 0.01^f	34.74 ± 1.05^{bcde}
15	5.8 ± 0.04^d	35.2 ± 1.21^{bc}	5.14 ± 0.01^e	35.47 ± 0.27^{bcd}
17	6.09 ± 0.04^c	34.69 ± 0.69^{bcd}	5.26 ± 0.01^d	36.88 ± 0.37^b
19	6.37 ± 0.02^b	30.56 ± 0.65^d	5.31 ± 0.01^c	36.92 ± 0.90^b
21	6.62 ± 0.03^a	26.39 ± 1.23^e	5.52 ± 0.02^b	40.28 ± 1.29^a

肉的失水率越高,表明肌肉系水力越低。牛肉贮藏过程中,失水率存在先升高,然后再下降的趋势。这一变化趋势主要是由于宰后肌肉的pH值变化直接影响肌肉的系水力。pH值下降,时肌肉蛋白质的静电荷强度减弱,使电荷间的相互作用力减弱,肌球蛋白纤丝和肌动蛋白纤丝之间的间隙缩小,肉的保水性能降低,失水率升高。发生僵直时,肌球蛋白和肌动蛋白形成肌动球蛋白复合体而使肌肉系水力变得最低,失水率达到最大。之后的成熟过程中,蛋白质和钙、镁阳离子结合,肌原纤维的蛋白质自由电荷逐渐增加,系水力会有所提高。当

pH值大于或小于蛋白质的等电点时。由于蛋白质的两性解离作用,肌原纤维蛋白结构松弛,水分子在亲水基团的作用下,贮留于肌原纤维蛋白质分子间,系水力提高,失水率下降^[16]。由表3可知,无包装牛肉的失水率前9d随贮藏时间延长显著升高($P<0.05$),从第9天开始到第21天显著下降($P<0.05$)。真空包装牛肉的失水率变化呈现的趋势为前7d先显著升高($P<0.05$),7~11d显著下降($P<0.05$),最后11~21d再显著升高($P<0.05$)。可能与外加真空包装会对牛肉组织产生压力,影响牛肉保水性有关。

值得指出的是无包装牛肉的失水率在第9天时达到最大的(40.13 ± 1.64)%,而牛肉 T_{23} 峰面积亦达到最高。真空包装的牛肉的失水率在第11天时最小,为(31.28 ± 1.72)%,此时真空包装牛肉 T_{23} 峰面积也为最小。可以推断牛肉系水力与牛肉中的自由水含量密切相关。

2.3 弛豫参数与品质指标的相关性分析

利用SPSS 17.0软件对对NMR弛豫参数与各项理化指标进行Pearson相关系数分析。相关系数(R)的值在-1~1之间(负号代表两个变量呈负相关),一般当 $0.8\leq R\leq 1$ 或 $-1\leq R\leq -0.8$ 时,说明两变量之间具有很强的相关性;当R值介于0.5~0.8或-0.8~-0.5之间时,说明两变量之间具有一般的相关性;当 $-0.5\leq R\leq 0.5$ 时,说明两变量之间相关性较弱^[20]。

本实验相关性分析的结果如表4所示:无包装牛肉 T_{23} 值与其pH值、失水率均有较强的相关性, T_{23} 峰面积与其pH值有较强的相关性,与其失水率相关性一般。无包装牛肉的其余弛豫参数与品质指标的相关性均较弱;真空包装牛肉 T_{22} 峰面积与其失水率的相关性较强,而其余弛豫参数与品质指标的相关性均不强。

并且无包装牛肉 T_{23} 峰面积的变化规律与牛肉宰后的尸僵与成熟过程密切相关有关,牛肉屠宰后,会先进入僵直期。发生僵直时,肌肉保水性变得最低^[16],此时牛肉对水分的束缚能力最弱,水分逐步转变成与底物结合程度较低的自由水。与此对应,无包装的牛肉在第9天时失水率与自由水的峰面积均达到最大,可以推断牛肉在此时间段达到最大僵直。常温下牛肉僵直一般发生在宰后12h以后,低温会导致僵直延迟,0~4℃情况下僵直的完成需一周左右的时间^[21]。说明冰温贮藏有效延迟了牛肉的僵直、解僵过程。该条件下贮藏牛肉,能较长时间使牛肉保持在较好的品质范围内。

表4 牛肉弛豫参数与指标间相关性
Table 4 Correlation between NMR relaxation parameters and meat quality indices

项目	NP		VP		NP			VP		
	$T_{21}(\text{ms})$	$T_{23}(\text{ms})$	$T_{21}(\text{ms})$	$T_{23}(\text{ms})$	T_{21} 峰面积	T_{22} 峰面积	T_{23} 峰面积	T_{21} 峰面积	T_{22} 峰面积	T_{23} 峰面积
NP	pH值	0.4437	-0.8079		0.1897	-0.3775	-0.8628			
	失水率	-0.4889	0.8409		0.3648	0.2651	0.7016			
VP	pH值			0.2155	-0.3521			-0.1350	-0.4131	0.0111
	失水率			0.6090	-0.0669			-0.1504	-0.8364	0.2141



牛肉在达到最大僵直后进入解僵期，肉中继续发生一系列生物化学变化进入后熟期，保水性能恢复，肌肉变的柔软多汁^[16]。按此规律，此时肉中自由水含量应当增加，而事实上是从第9天开始，无包装的牛肉自由水开始减少，可能与牛肉长时间无包装贮藏导致失水有关。

而真空包装的牛肉自由水含量变化规律之所以与无包装的牛肉不同，是由于真空包装导致牛肉中水分难以挥发，这点可由真空包装牛肉的总水分含量在贮藏期内变化不显著得知。并且真空包装加大了牛肉组织间的压力，影响了牛肉的保水性。

3 结 论

低场核磁共振技术能够很好地表征冰温贮藏条件下牛肉中不同形式的水分含量及分布情况。无包装牛肉自由水弛豫参数与其pH值、失水率均有较强的相关性，而结合水与不易流动水的弛豫参数与品质指标的相关性则较弱；真空包装牛肉的弛豫参数与品质指标的相关性均不强。

由本研究可知，对冰温贮藏牛肉的品质影响最大的水分是自由水，自由水的弛豫参数能够很好的用于无包装牛肉常规品质指标的研究。

参考文献：

- [1] 吕峰, 林勇毅, 宋丽君, 等. 牛肉冰温气调保鲜技术的研究[J]. 江西食品工业, 2008(4):15-18.
- [2] 黎冬明, 叶云花, 刘成梅, 等. 冰温技术在食品工业中的应用[J]. 江西食品工业, 2006(1): 32-34.
- [3] 江英, 赵晓梅, 胡建军, 等. 食品的冰温贮藏保鲜技术及其应用[J]. 食品研究与开发, 2005, 26(5): 162-163.
- [4] 石文星, 邵双全, 李先庭, 等. 冰温技术在食品贮藏中的应用[J]. 食品工业科技, 2002, 23(4): 64-66.
- [5] ANNETTE S, KATJA R, PETER P P, et al. Physiological and structural events post mortem of importance for drip loss in pork[J]. Meat Science, 2002, 61(4): 355-366.
- [6] TOLDRA F. Muscle foods: water, structure and functionality[J]. Food Sci Technol Int, 2003, 9(3): 173-177.
- [7] 阮榕生. 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: 1-36.
- [8] 姜晓文, 韩剑众. 生鲜肉品持水性的核磁共振研究[J]. 食品工业科技, 2009, 30(1): 322-325.
- [9] 陈育涛, 朱秋劲, 卢开红, 等. 近红外光谱对特征部位牛肉的分析[J]. 肉类研究, 2012, 26(3): 34-38.
- [10] 李红霞. 鱼糜制品冰温气调保鲜技术研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2003.
- [11] 周永昌, 王文升, 等. 畜产品加工实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999: 55-56.
- [12] CHEN Fengliang, WEI Yimin, ZHANG Bo. Characterization of water state and distribution in textured soybean protein using DSC and NMR[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 100(3): 522-526.
- [13] BERTRAM H C, SUNE D, ANDERS H K, et al. Continuous distribution analysis of T_2 relaxation in meat-an approach in the determination of water-holding capacity[J]. Meat science, 2002, 60(3): 279-285.
- [14] BERTRAM H C, KARLSSON A H, ANDERS H J. The significance of cooling rate on water dynamics in porcine muscle from heterozygote carriers and non-carriers of the halothane gene: a low-field NMR relaxation study[J]. Meat Science, 2003, 65(4): 1281-1291.
- [15] TORNERBERG E, WAHLGREN M, BRONDUM J, et al. Pre-rigor conditions in beef under varying temperature and pH falls studied with rigometer, NMR and NIR[J]. Food Chemical, 2000, 69(4): 407-418.
- [16] 郭锋, 刘凤民. 宰后畜禽肌肉组织生化变化及其对肉质的影响[J]. 中国家禽, 2003(2): 46-47.
- [17] 罗爱平, 朱秋劲, 郑虹, 等. 综合保鲜技术对冷却牛肉的保质研究[J]. 食品科学, 2004, 25(2): 174-177.
- [18] 戴瑞彤, 南庆贤. 气调包装对冷却牛肉货架期的影响[J]. 食品工业科技, 2003, 24(6): 71-73.
- [19] 胡长利, 郝慧敏, 刘文华. 不同组分气调包装牛肉冷藏保鲜效果的研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(7): 241-245.
- [20] 王军, 董庆利, 丁甜. 预测微生物模型的评价方法[J]. 食品科学, 2011, 32(21): 268-272.
- [21] HONIKEL K O, RONCAL P E S, HAMM R. The influence of temperature on shortening and rigor onset in beef muscle[J]. Meat Science, 1983, 8(3): 221-241.