

不同成熟方式对哈萨克羊肉冻藏品质的影响

杜婷婷, 张莉, 徐泽权*, 王子荣*

(新疆农业大学食品科学与药学院, 新疆乌鲁木齐 830000)

摘要: 探究了超声辅助成熟后冷冻, 常规冷藏成熟后冷冻及直接冷冻方式对羊肉冻藏品质的影响。以哈萨克羊半膜肌及背最长肌为研究对象, 测定羊肉冻藏期间嫩度、色泽及保水性等指标, 分析3种成熟方式对羊肉品质变化的影响。结果表明: 冻藏12周后的常规冷藏成熟后冷冻组的半膜肌及背最长肌冻藏解冻损失(6.93%、7.24%)、蒸煮损失(33.67%、30.12%)优于其他两组, 保水性最好, 色泽劣变速度缓慢, 食用品质最佳; 超声辅助成熟后冷冻组的半膜肌及背最长肌在第12周时剪切力(84.4 N、86.4 N)、肌原纤维小片化指数(Myofibrillar Fragmentation Index, MFI)(46.3、47.6)值较其他组最差, 食用品质最不理想; 而直接冷冻组在第12周时半膜肌及背最长肌的解冻损失(7.22%、11.06%)及剪切力(98.2 N、95 N)值均显著高于其他两组($P<0.05$), 羊肉品质最差。综上冷藏成熟处理对羊肉冻藏品质的负面影响最小, 更适合作为羊肉冻藏前成熟方式, 能较好保持羊肉食用品质。

关键词: 成熟方式; 冷藏; 超声波; 哈萨克羊; 冻藏; 食用品质

文章编号: 1673-9078(2023)10-170-177

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.10.0977

Effects of Different Aging Methods on the Quality of Kazakh Mutton during Frozen Storage

DU Tingting, ZHANG Li, XU Zequan*, WANG Zirong*

(Collage of Food Science and Pharmacy, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830000, China)

Abstract: The effects of ultrasound-assisted freezing after aging, conventional refrigeration after aging and direct freezing on the quality of frozen mutton were studied. Taking the Kazakh sheep semimembranous muscle and the longissimus dorsi muscle as the research objects, the tenderness, color and water retention capacity of mutton during frozen storage were measured, and the effects of three aging methods on the quality of mutton were also analyzed. The results showed that the thaw loss (6.93% and 7.24%) and cooking loss (33.67% and 30.12%) of the semimembranous muscle and longissimus dorsi muscle in the conventional cold aging following 12-week freezing group were smaller than those of the other two groups, having the greatest water retention, slowest color deterioration and the best eating quality. The shearing force (84.4 N, 86.4 N) and myofibrillar fragmentation index (MFI; 46.3, 47.6) values of the semimembranous muscle and longissimus dorsi muscle in the ultrasound-assisted aging following freezing group were worse than those for the other groups, having the worst eating quality. For the direct freezing group, the thaw loss (7.22% and 11.06%) and shear force (98.2 N, 95 N) of the semimembranous muscle and the longissimus dorsi muscle were significantly higher than those of the other two groups ($P<0.05$) at the 12th week, and the eating quality of mutton was the worst. In summary, the refrigerated aging had the least negative impact on the quality of mutton during frozen storage, which is a more suitable aging method before the frozen storage of mutton, resulting in better preservation of mutton's edible quality.

Key words: aging methods; refrigerated; ultrasound; Kazakh sheep; frozen; edible quality

引文格式:

杜婷婷,张莉,徐泽权,等.不同成熟方式对哈萨克羊肉冻藏品质的影响[J].现代食品科技,2023,39(10):170-177

DU Tingting, ZHANG Li, XU Zequan, et al. Effects of different aging methods on the quality of Kazakh mutton during frozen storage [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(10): 170-177

收稿日期: 2022-08-04

基金项目: 新疆维吾尔自治区重点研发计划项目(2020B02017-2)

作者简介: 杜婷婷(1997-),女,硕士研究生,研究方向: 食品营养与安全, E-mail: 674938406@qq.com

通讯作者: 徐泽权(1990-),男,博士,高级畜牧师,研究方向: 肉品加工及质量安全控制, E-mail: 624173842@qq.com; 共同通讯作者: 王子荣(1963-),男,博士,教授,研究方向: 食品营养与安全, E-mail: wangzirong212@126.com

成熟是企业对肉品进行冷冻贮藏前的一种关键手段,屠宰后的鲜肉经过成熟期,肉质嫩度会得到充分改善,质地变得柔软有弹性,更有利于肉类生鲜品质的提高。目前常用的成熟方法有干法成熟、湿法成熟以及干-湿结合成熟^[1]。干法成熟是将未包装的胴体或分割部位肉暴露于一定的温度、湿度和空气流速中进行一段时间的成熟。湿法成熟是将肉品真空包装后放置于冷藏条件下进行成熟。而干-湿结合成熟通常是将胴体先放置一段时间的干法成熟后,再对不同部位进行一段时间的湿法成熟^[2]。肉品经干法成熟后风味和嫩度得到了很大的改善,由于干法成熟的时间一般是14~21 d,长时间的成熟使肌肉中与风味相关的挥发性物质含量增加,研究发现经过干法成熟后的肉品通常会有“黄油味”、“坚果味”和“烤牛肉味”^[3,4]。Ha等^[5]研究发现牛里脊经过56 d的干法成熟后,嫩度得到显著的改善。但由于肉品长时间暴露在空气中会导致表面水分流失出现皱缩、肉色变暗等现象,在销售过程中造成严重的质量损失。湿法成熟虽然操作简单且方便运输,但肉品会容易产生金属味、酸味等一些不良气味。而干-湿结合成熟虽然集合了两种方法的优点,但由于成熟条件、时间以及部位的组分不同使干-湿结合成熟方法很难大规模应用于企业中。因此开发新型成熟技术很有必要。

超声波近年来被广泛应用在肉制品加工,它产生的空化、机械及热效应不仅能破坏肌肉结缔组织、肌原纤维蛋白(Myofibrillar Protein, MP)和溶酶体等,实现肌肉嫩化,还能引起钙蛋白酶、组织蛋白酶及Ca²⁺等物质提前释放并进入细胞间隙,使肌肉提前僵直,缩短成熟时间^[6-8]。尽管该技术在肉的冷藏过程中应用广泛,但经该法处理后的肌肉在冻藏过程中是否能保持较好的品质还鲜有报道。

前期试验表明,月龄在14月的哈萨克羊的半膜肌及背最长肌冷藏成熟时间分别为3 d、1 d左右,超声辅助成熟(超声频率为40 Hz,超声功率为100 W,超声时间为20 min)时间分别为1 d、12 h左右。因此本试验在此基础上设置超声辅助成熟后冷冻组,与直接冷冻组及常规冷藏成熟后冷冻组对比,测定肌肉在-18℃冰箱冻藏0、2、4、6、8、10、12周后的食用品质指标,明确超声辅助成熟后冷冻对冻藏期间哈萨克羊肉食用品质的影响,最终为冻结羊肉的成熟方式及货架期预判提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 试验材料

原料肉购于新疆乌鲁木齐市米东区新华凌市场。选用6只未去势哈萨克公羊(14月龄、体质量约50 kg),宰前24 h禁食禁水,屠宰放血后30 min内取出半膜肌及背最长肌,装入标记好的自封袋,置于冰盒内(0~4℃)30 min内运回实验室。

氢氧化钠,聚信化工有限公司;硫酸铜,升华化工有限公司;碘化钾,河南欣之源化工产品有限公司;酒石酸钾钠,廊坊乾耀科技有限公司;乙二胺四乙酸,益瑞科技;氯化镁,勃瑞镁业;氯化钾,瑞威尔生物;磷酸氢二钾,云诚化工有限公司;磷酸二氢钾,廊坊天科生物科技有限公司;叠氮化钠,青岛雪洁;均为分析纯。

1.1.2 主要仪器

TESTO 205 便携式pH计,德国德图有限公司;AI204-IC 电子分析天平,梅特勒-托利多仪器有限公司;JZ-350 色彩色差计,深圳市金准仪器设备有限公司;SSW-600-2S 电热恒温水槽,上海市博迅实业有限公司医疗设备厂;C-LM.3B 数显式肌肉嫩度仪,东北农业大学工程学院;11047 食品中心温度计,Delta TRAK;KQ250DE 数控超声波清洗器,昆山市超声仪器有限公司;HR40-IIA2 生物安全柜,青岛海尔特种电器有限公司;FSH-2A 可调高速匀浆机,常州天瑞仪器有限公司;SF-GL-16A 高速冷冻离心机,上海菲恰尔分析仪器有限公司;T6 新世纪紫外分光光度计,北京普析通用仪器有限责任公司。

1.2 试验方法

1.2.1 原料处理

将取回的羊背最长肌及半膜肌表面脂肪、筋膜及结缔组织剔除,沿肌纤维方向分别切成质量为(200±5) g且大小均匀的21块并真空包装,将包装好的原料肉随机分成3组:第一组将半膜肌及背最长肌直接置于-18℃冰箱冻藏,记为直接冷冻组,下文表示为ZD组;第二组先贮藏于4℃冰箱(半膜肌72 h、背最长肌24 h)后置于-18℃冰箱冻藏,记为常规冷藏成熟后冷冻组,下文表示为LD组;第三组超声处理(100 W,20 min)后置于4℃冰箱(半膜肌24 h、背最长肌12 h),随后置于-18℃冰箱冻藏,记为超声辅助成熟后冷冻组,下文表示为CD组。分别记录上述各处理组的冻藏时间,并分别在第0、2、4、6、8、10、12周后随机取出1块置于室温空气中解冻至中心温度为4℃左右,测定相关品质指标,每组重复6次。

1.2.2 pH值

将TESTO 205 便携式pH计的探头插入肉样2 cm

左右,测定其 pH 值,待读数稳定,记录结果并取平均值,每个样品随机取 6 个点进行测试。

1.2.3 解冻损失

解冻损失按公式 (1) 计算。

$$L_1 = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

L_1 —解冻损失, %;

m_1 —解冻前羊肉质量, g;

m_2 —解冻后羊肉质量, g。

1.2.4 蒸煮损失

参照 Gambuteanu 等^[9]建立的方法,沿肌肉纤维方向,将肉样切成 5 cm×3 cm×2 cm 肉条,用吸水纸将其表面水分擦干称重,置于蒸煮袋内,将蒸煮袋置于 85 °C 水浴锅中加热,使用食品中心温度计检测肉品中心温度,待肉样中心温度为 (70±1) °C 时立即取出,并用吸水纸将其表面水分擦干、冷却至室温后对肉条称质量,称质量后的肉样用于剪切力测定,蒸煮损失按照公式 (2) 计算。

$$L_2 = \frac{m_3 - m_4}{m_3} \times 100\% \quad (2)$$

式中:

L_2 —蒸煮损失, %;

m_3 —蒸煮前羊肉质量, g;

m_4 —蒸煮后羊肉质量, g。

1.2.5 色差

将肉样取出后用吸水纸擦干其表面的水分并置于试验台表面,同时对色差仪进行校准,校准完毕测定样品的亮度值 (L^* 值)、红度值 (a^* 值) 及黄度值 (b^* 值),每个样品随机选取 6 个点进行测试,结果取平均值。

1.2.6 剪切力

参照李桂霞等^[10]建立的方法,沿肌纤维方向用取样器取致经为 1 cm 的肉柱,垂直肌纤维方向,利用肌肉嫩度仪测定剪切力,单位“N”。

1.2.7 MFI

参照 Culler 等^[11]建立的方法,用天平准确称取 1.0 g 肉样,切碎后加入 10.0 mL 预冷的 MFI 缓冲液 (100 mmol/L 氯化钾、11.2 mmol/L 磷酸二氢钾、8.8 mmol/L 磷酸氢二钾、1 mmol/L 氯化镁、1 mmol/L 叠氮化钠),调整高速匀浆机转速为 11 000 r/min,冰浴条件下匀浆 3 次,每次 30 s (中间间隔 60 s),制成 10% 的匀浆液,将匀浆液置于高速冷冻离心机中,设置离心机转速: 700×g、温度: 4 °C、时间: 20 min,离心后去除上清液,此过程重复两次,得到 MP 沉淀。再加入 5.0 mL 预冷的 MFI 缓冲液将沉淀充分悬浮,

用 200 目筛网除去悬浮液中的结缔组织,利用双缩脲法测定滤液的蛋白浓度,最后用 MFI 缓冲液将蛋白浓度调整为 (0.50±0.05) mg/mL,540 nm 波长处测定紫外吸光度 A,结果乘 200 得到 MFI。

1.2.8 数据分析

数据均采用 Microsoft Excel 2016 整理,采用 SPSS 19.0 软件进行显著性 ($P < 0.05$) 分析 (SPSS 公司),结果以均值±标准差表示,采用 Origin 8.5 软件绘制图形 (美国 Origin Lab 公司),每组试验至少重复三次。

2 结果与分析

2.1 成熟后冷冻对哈萨克羊肉冻藏期间 pH 值的影响

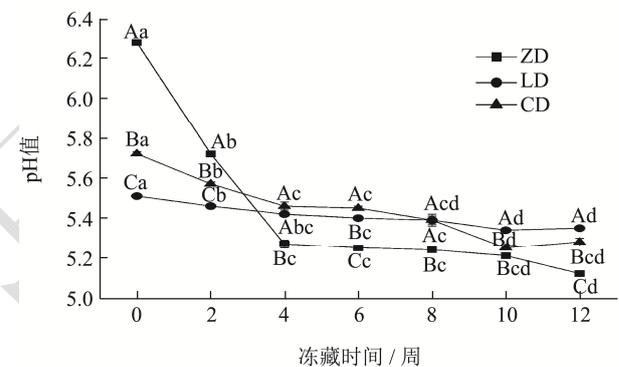


图 1 哈萨克羊半膜肌 pH 值在冻藏过程中变化趋势图

Fig.1 The change trend of pH value of the semimembranosus of Kazakh sheep during freezing storage

注: 不同大写字母表示不同处理差异显著 ($P < 0.05$), 不同小写字母表示不同冻藏时间差异显著 ($P < 0.05$)。下图同。

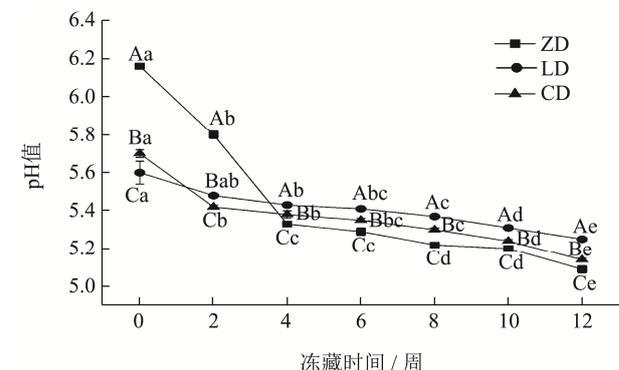


图 2 哈萨克羊背最长肌 pH 值在冻藏过程中变化趋势图

Fig.2 The change trend of pH value of the longissimus dorsi of Kazakh sheep during the freezing storage

pH 值是分析和判断肉质变化程度的重要指标,决定原料肉和肉制品的品质,并对肉的颜色、嫩度及风味等均有影响^[12]。成熟后冷冻对肌肉冻藏期间 pH 值的影响如图 1、图 2 所示,两种肌肉的 pH 值随冻藏时间的

延长呈下降趋势,且差异显著 ($P<0.05$)。说明动物经屠宰后,机体呼吸停止、供氧中断,机体开始进行无氧糖酵解,在一系列酶的作用下,糖原被分解产生乳酸,乳酸含量的积累导致肌肉 pH 值下降明显^[13]。在第 0 周时均表现为 ZD 组最大,半膜肌及背最长肌分别是 6.28、6.16; LD 组最小,半膜肌及背最长肌分别是 5.51、5.60。相比 ZD 组,LD 组的 pH 值在整个冻藏期下降速度缓慢,其中半膜肌 CD 组在第 0~8 周期间高于 LD 组,随后低于 LD 组;背最长肌 CD 组除第 0 周高于 LD 组外,随后均低于 LD 组;而 ZD 组在第 0~4 周时下降速度较快,随后下降速度变慢且低于成熟后冷冻组。可能是成熟过程中已经完成了大部分糖酵解进程,导致冻藏期初始的 pH 值较低、下降速度平缓;而到了冻藏后期,各处理组 pH 值下降速度缓慢,可能是由于羊肉自身中的各种酶作用以及产生的嗜冷菌等微生物为获取能量,分解肉中的含氮化合物和蛋白质,导致肌肉蛋白在微生物和酶的作用下发生脱氨基反应,生成氨及胺类等碱性含氮物质,中和部分乳酸,导致肌肉 pH 值下降速度减缓^[14,15]。由于背最长肌的 II B 型肌纤维含量高于半膜肌,肌纤维含量高的肌肉,其无氧酵解能力强,使得肌肉内乳酸大量积累, pH 值快速下降^[16]。因此同一处理方法下半膜肌的 pH 值略优于背最长肌。

2.2 成熟后冷冻对哈萨克羊肉冻藏期间保水性的影响

肌肉中水分的含量及状态直接影响肉品的色泽、嫩度等食用品质,是影响肉品加工质量及出品率的关键因素^[17]。成熟后冷冻对肌肉冻藏期间解冻损失的影响如图 3a、b 所示,两种肌肉的解冻损失随冻藏时间的延长呈逐渐上升趋势,且差异显著 ($P<0.05$)。半膜肌的解冻损失在冻藏期间表现为 CD 组 > ZD 组 > LD 组;而背最长肌 CD 组在第 2~4 周期间先高于其他两组,随后低于 ZD 组、高于 LD 组,到第 12 周时表现为 ZD 组最大 (11.06%), CD 组次之 (9.71%), LD 组最小 (7.24%)。成熟后冷冻对肌肉冻藏期间蒸煮损失的影响如图 3c、d 所示,两种肌肉的蒸煮损失随冻藏时间的延长均呈上升趋势,且差异显著 ($P<0.05$)。相比 ZD 组,LD 组的处理对肌肉的蒸煮损失影响较大。半膜肌 CD 组在第 0~8 周期间大于 ZD 组,但在第 10~12 周期间低于 ZD 组,背最长肌 CD 组在第 0~6 周期间低于 ZD 组,但在第 8~12 周期间高于 ZD 组。但总体上两种肌肉 LD 组的蒸煮损失始终低于 ZD 组及 CD 组 ($P<0.05$)。同一处理方法下背最长肌的解冻损失显著大于半膜肌的解冻损失。而两种肌肉间的

蒸煮损失差异不显著 ($P>0.05$)。

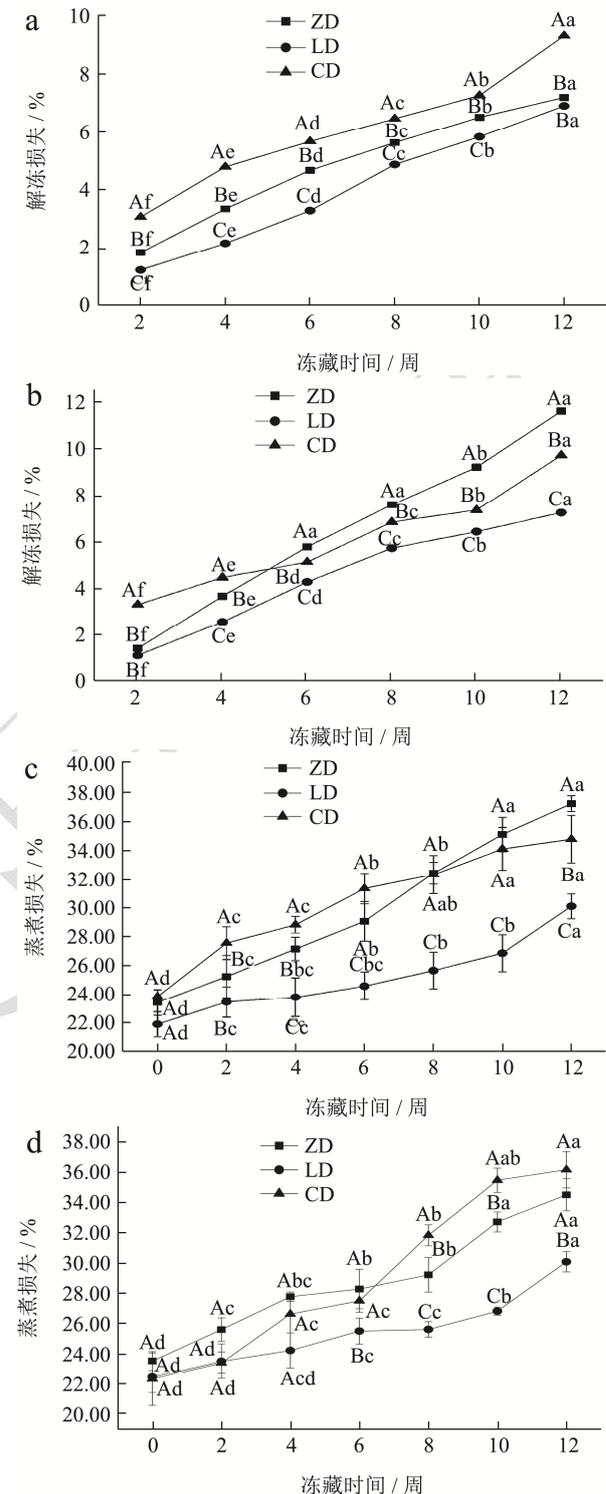


图 3 哈萨克羊半膜肌、背最长肌解冻损失及蒸煮损失在冻藏过程中变化趋势图

Fig.3 The change trend of thawing loss and cooking loss of Kazakh sheep semimembranosus and longissimus dorsi during the freezing storage

注: a 半膜肌解冻损失; b 背最长肌解冻损失; c 半膜肌蒸煮损失; d 背最长肌蒸煮损失。

从试验结果分析得出, LD 组两种肌肉的保水性

在整个冻藏期间均较高，而背最长肌 CD 组在冻藏后期保水性较低。研究认为，肌纤维结构的变化是导致水分流失的主要原因，成熟后肌肉微观结构排列整齐，使得冰晶的大小均匀，降低了对肌原纤维结构的破坏程度，使细胞能够最大程度的保留水分，从而降低解冻损失。CD 组在冻藏后期保水性降低，可能是超声波作用产生的机械、空化效应破坏了蛋白质的骨架结构，增加蛋白质变性的程度，阻碍了肌间蛋白网状结构的形成，直接导致保水性下降^[18]。此外在冻藏期间，蛋白质间易发生凝聚与结合现象，导致肌原纤维收缩，加剧了冰晶对细胞膜的破坏，解冻后汁液流失严重，在蒸煮损失中，由于熟制过程会使脂肪融化流失，蛋白质变性，肌球蛋白保水保油的能力降低，导致肌肉保水性下降^[19,20]。鲁蒙等^[21]发现将羊肉在-18℃冻结条件下冻藏 30 d 后，发现其解冻损失明显增加，与本研究结果一致，可能是在冻藏过程中，肌肉蛋白由于冷冻原因变性程度增加，肌肉产生强烈的收缩，导致解冻时汁液流失明显^[22]。

2.3 成熟后冷冻对哈萨克羊肉冻藏期间色差的影响

色泽是评判肉品新鲜度及感官特性的重要指标，直接影响消费者的购买欲望^[23]。成熟后冷冻对肌肉冻藏期间 L^* 值的影响如表 1 所示，两种肌肉的 L^* 值随冻藏时间的延长呈逐渐下降趋势，且差异性显著 ($P<0.05$)。相比 ZD 组，LD 组的 L^* 值在第 0~2 周时较低，随后与 ZD 组的差异较大，但 LD 组始终高于 ZD 组和 CD 组，第 12 周时半膜肌及背最长肌的 LD 组的 L^* 值分别是 36.77、30.35。半膜肌 CD 组在第 4~8 周期间 L^* 值高于 ZD 组，第 10~12 周期间低于 ZD 组，而背最长肌 CD 组与 ZD 组相比差异较小，但第 12 周时高于 ZD 组。同一处理方法下背最长肌的 L^* 值低于半膜肌。张昕等^[24]对冻藏期鸡胸肉 L^* 值进行测定，发现肌肉中水分含量随冻藏时间的延长而下降，肌肉表面失去光泽， L^* 值不断下降，与本文研究结果一致。

表 1 哈萨克羊半膜肌及背最长肌冻藏期间色差测定结果

Table 1 Results of color difference measurement of Kazakh sheep longissimus dorsi and semimembranosus during freezing storage

指标	部位/处理	冻藏时间/周						
		0	2	4	6	8	10	12
L^*	T-ZD	47.67±0.86 ^{Aa}	45.77±0.55 ^{Ab}	41.22±0.4 ^{Bc}	38.1±0.62 ^{Bd}	35.77±0.6 ^{Be}	34.68±0.51 ^{Bf}	32.31±0.23 ^{Bf}
	T-LD	45.37±0.58 ^{Ba}	43.77±0.53 ^{Ab}	42.96±0.41 ^{Abc}	41.74±0.57 ^{Ac}	40.45±1.22 ^{Ad}	37.3±1.49 ^{Ae}	36.77±1.57 ^{Ae}
	T-CD	44.72±1.14 ^{Ba}	42.39±1.01 ^{Ab}	41.22±0.33 ^{Bb}	39.83±0.2 ^{Bbc}	36.83±1.97 ^{Bc}	31.91±0.29 ^{Cd}	30.78±0.17 ^{Ce}
	B-ZD	48.78±0.32 ^{Aa}	42.22±0.4 ^{Ab}	37.74±0.5 ^{Bc}	38.77±0.83 ^{Ac}	32.7±1.3 ^{Bd}	32.88±0.28 ^{Bd}	29.86±0.33 ^{Ce}
	B-LD	42.37±1.83 ^{Ca}	41.39±0.91 ^{Bab}	40.38±0.69 ^{Ab}	34.94±1.19 ^{Cc}	32.83±0.48 ^{Bd}	34.02±0.69 ^{AcCd}	30.35±1 ^{Ce}
	B-CD	44.03±0.27 ^{Ba}	41.73±0.47 ^{Bb}	41.14±0.99 ^{Ab}	37.15±0.29 ^{Ab}	34.48±1.02 ^{Ac}	33.25±0.97 ^{Bc}	33.95±0.34 ^{Bc}
a^*	T-ZD	9.4±0.13 ^{Ba}	9.33±0.89 ^{Ba}	9.08±0.06 ^{Aa}	8.63±0.6 ^{Ba}	6.5±0.91 ^{Cb}	7.04±0.74 ^{Bb}	5.23±0.15 ^{Cc}
	T-LD	10.5±0.8 ^{Aa}	10.23±0.22 ^{Aab}	9.62±0.33 ^{Aab}	9.41±0.27 ^{Ab}	8.48±0.18 ^{Ac}	8.12±0.48 ^{Ac}	7.36±0.91 ^{Ad}
	T-CD	9.67±0.21 ^{Ba}	8.46±0.16 ^{Cb}	8.2±0.37 ^{Bbc}	7.62±0.48 ^{Cbc}	7.56±0.19 ^{Bbc}	7.1±0.64 ^{Bcd}	6.55±0.27 ^{Bd}
	B-ZD	9.24±0.12 ^{Aa}	8.57±0.27 ^{Ab}	8.1±0.16 ^{Ab}	7.11±0.1 ^{Bc}	6.75±0.03 ^{Bc}	6.8±0.26 ^{Bc}	5.87±0.83 ^{Cd}
	B-LD	9.55±0.16 ^{Aa}	8.52±0.28 ^{Ab}	7.63±0.35 ^{Bc}	7.40±0.18 ^{Ac}	7.31±0.28 ^{Ac}	7.21±0.77 ^{Ac}	6.58±0.21 ^{Bd}
	B-CD	7.84±0.28 ^{Ba}	7.63±0.34 ^{Ba}	7.39±0.19 ^{Ba}	6.78±0.12 ^{Cb}	6.52±0.1 ^{Bb}	6.43±0.22 ^{Bb}	6.14±0.71 ^{BCb}
b^*	T-ZD	2.78±0.24 ^{Bde}	2.98±0.07 ^{Be}	2.67±0.22 ^{Ce}	5.65±0.49 ^{Bd}	9.91±0.81 ^{Ac}	10.99±0.91 ^{Ab}	12.05±0.15 ^{Aa}
	T-LD	2.3±0.25 ^{Cf}	2.94±0.17 ^{Be}	3.37±0.42 ^{Be}	3.92±0.1 ^{Cd}	7.57±0.34 ^{Bc}	8.59±0.39 ^{Cb}	10.61±0.35 ^{Aa}
	T-CD	3.76±0.07 ^{Ae}	4.06±0.24 ^{Ace}	5.65±0.27 ^{Ad}	7.23±0.44 ^{Ac}	8.41±0.28 ^{Bc}	9.43±0.59 ^{Bb}	10.99±0.56 ^{Aa}
	B-ZD	2.48±0.09 ^{Ce}	4.52±0.29 ^{Ad}	5.31±0.24 ^{Abd}	7.26±0.45 ^{Ac}	8.61±0.11 ^{Ab}	10.44±0.19 ^{Aa}	10.45±0.49 ^{Ba}
	B-LD	3.32±0.24 ^{Bf}	4.44±0.27 ^{Abc}	4.93±0.34 ^{Bd}	6.26±0.16 ^{Bc}	7.57±0.34 ^{Bb}	9.08±0.32 ^{Ba}	9.34±0.16 ^{Ca}
	B-CD	3.6±0.19 ^{Abc}	3.78±0.06 ^{Be}	4.46±0.12 ^{Bd}	5.43±0.44 ^{Cd}	8.1±0.36 ^{Cc}	9.52±0.21 ^{Bb}	9.87±0.26 ^{Ba}

注：表中 T、B 分别代表羊半膜肌及背最长肌。不同大写字母表示不同处理差异显著 ($P<0.05$)，不同小写字母表示不同冻藏时间差异显著 ($P<0.05$)。

a^* 值的变化与肌肉中肌红蛋白及血红蛋白的含量及状态有关^[25]。当肌红蛋白及血红蛋白含量高时，肌肉 a^* 值较高，反之亦然；当肌肉暴露在空气中时，肌

红蛋白中的亚铁血红素与氧气会结合生成氧合肌红蛋白，此时肌肉呈鲜红色，但二价铁在空气中很不稳定，会迅速被氧化为三价铁，导致 MetMb 积累，肉品呈

现暗红色或红褐色, a^* 值降低^[26,27]。成熟后冷冻对肌肉冻藏期间 a^* 值的影响如表 1 所示, 两种肌肉的 a^* 值随冻藏时间的延长呈下降趋势, 且差异显著 ($P < 0.05$), 说明该过程中 MetMb 含量增加。相比 ZD 组, 成熟后冷冻对肌肉 a^* 值影响显著 ($P < 0.05$)。其中半膜肌 LD 组 a^* 值始终高于 ZD 组及 CD 组, CD 组在第 0 周时与 ZD 组差异不显著 ($P > 0.05$), 但在第 2~8 周期间低于 ZD 组, 在第 10~12 周期间高于 ZD 组, 第 12 周时 ZD、LD 及 CD 组 a^* 值分别是 (5.23、7.36、6.55); 背最长肌 LD 组在第 0~2 周期间与 ZD 组差异不显著 ($P > 0.05$), 在第 4 周时低于 ZD 组, 但在第 6~12 周时显著高于 ZD 组及 CD 组 ($P < 0.05$), CD 组在第 12 周时与 LD 组差异不显著 ($P > 0.05$)。在此期间 CD 组 a^* 值的下降, 可能是超声辅助成熟过程中加速了 Mb 发生氧化, 且超声波机械作用破坏了肌原纤维结构, 使得肌红蛋白及血红蛋白的流失, 导致肌肉 a^* 值显著降低^[28]; 同一处理下背最长肌的 a^* 值均显著低于半膜肌 ($P < 0.05$)。

b^* 值的变化主要与肌肉脂质氧化程度及冻藏期间某些耐冷微生物的生长繁殖有关^[29]。冻藏期间, 肌肉内生生化反应进程会变缓慢但并未停止, 脂质的自动氧化会使肌肉表面变黄, 导致 b^* 值升高; 且耐冷微生物在冻藏期间依然具有生物活性并在生长繁殖过程中分泌水溶性或脂溶性色素, 从而引起肌肉颜色发生改变, b^* 值升高^[30]。成熟后冷冻对肌肉冻藏期间 b^* 值的影响如表 1 所示, 两种肌肉的 b^* 值随冻藏时间的延长均呈上升趋势, 且差异显著 ($P < 0.05$)。相比 ZD 组, LD 组对半膜肌 b^* 值影响较大, 对背最长肌 b^* 值影响较小。半膜肌 LD 组在 0~4 周期间与 ZD 组差异不显著 ($P > 0.05$), 但在第 6~12 周期间显著低于 ZD 组; CD 组在 0~6 周始终显著高于 ZD 组及 LD 组 ($P < 0.05$), 可能是超声处理导致脂质氧化加快。但在第 8~12 周期间, CD 组显著低于 ZD 组 ($P < 0.05$), 与 LD 组差异不显著 ($P > 0.05$)。同一处理方法在冻藏期第 12 周时, 半膜肌的 b^* 值显著优于背最长肌 ($P < 0.05$)。

2.4 成熟后冷冻对肌肉冻藏期间剪切力的影响

嫩度是指人们在咀嚼肉过程中的感受, 可以用剪切力值来表示^[31]。成熟后冷冻对肌肉冻藏期间剪切力的影响如图 4、图 5 所示, 两种肌肉的剪切力随冻藏时间的延长均呈逐渐上升趋势, 且差异性显著 ($P < 0.05$)。本试验中, ZD 组肌肉未经成熟直接冷冻, 是由于肌肉僵直前冷冻加快解冻过程中糖酵解的反应速率, 导

致剪切力较大。冻藏过程中, 肌肉内的冰晶对其蛋白结构影响更大, 期间肌原纤维骨架断裂严重, 导致解冻损失加剧, 蛋白质降解、氧化程度也会随冻藏时间的延长不断增强, 造成肌肉剪切力剧增^[32]; 相比 ZD 组, LD 组能够显著降低肌肉的剪切力 ($P < 0.05$)。半膜肌 CD 组的剪切力值在第 0~6 周期间低于 LD 组, 在第 8~12 周期间高于 LD 组; 背最长肌 CD 组的剪切力值在第 0~8 周期间显著低于 LD 组, 在第 10~12 周期间显著高于 LD 组 ($P < 0.05$); 第 12 周时半膜肌及背最长肌的剪切力均表现为 ZD 组 (98.2 N, 95.0 N) > CD 组 (86.8 N, 84.3 N) > LD 组 (78.5 N, 77.2 N)。两种肌肉的 CD 组在冻藏后期出现嫩度大幅度降低的现象, 可能是超声波作用破坏了肌原纤维结构, 尽管在冻藏前期效果较好, 但随着蛋白质的冷冻变性, 更多的蛋白质发生重组, 而且保水性试验结果也表示后期冻藏中超声处理组的解冻损失和蒸煮损失明显高于其他两组, 汁液的流失导致肌肉纤维持水能力的减弱也会引起肌肉剪切力增大^[20,33]。同一处理方法在第 12 周时, 背最长肌的嫩度显著优于半膜肌 ($P < 0.05$)。

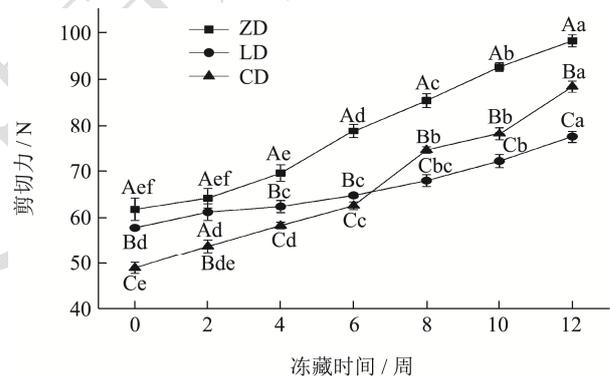


图 4 哈萨克羊半膜肌剪切力在冻藏过程中变化趋势图

Fig.4 The change trend of shear force of the semimembranosus of Kazakh sheep during the freezing storage

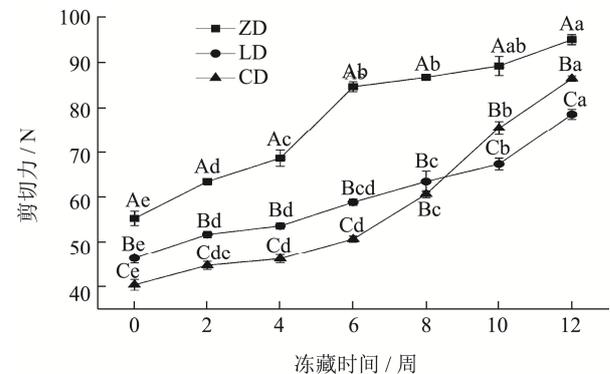


图 5 哈萨克羊背最长肌剪切力在冻藏过程中变化趋势图

Fig.5 The change trend of shear force of the longissimus dorsi of Kazakh sheep during freezing storage

2.5 成熟后冷冻对哈萨克羊肉冻藏期间 MFI

的影响

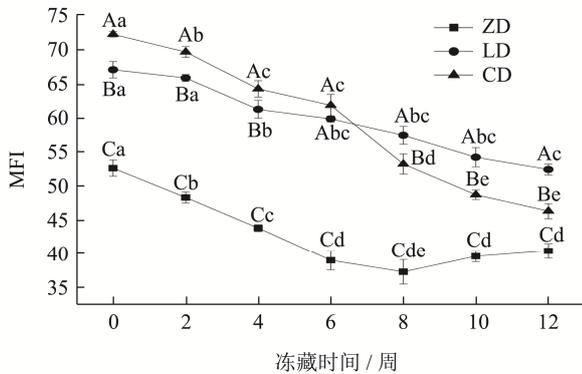


图6 哈萨克羊半膜肌 MFI 在冻藏过程中变化趋势图

Fig.6 The change trend of MFI of the semimembranosus of

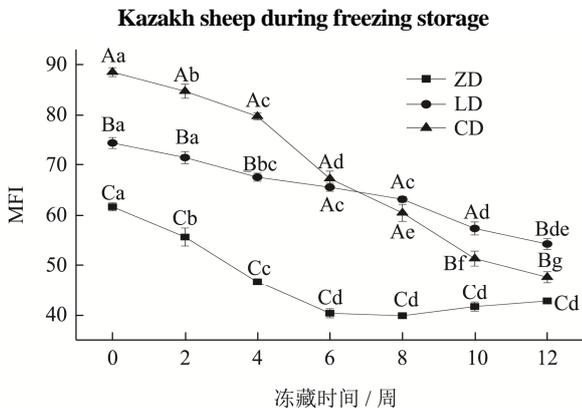


图7 哈萨克羊背最长肌 MFI 在冻藏过程中变化趋势图

Fig.7 The change trend of MFI of the longissimusdorsi of

Kazakh sheep during the freezing storage

MFI 是用来表征肌原纤维小片化程度的指标, 该值越大说明肌原纤维蛋白降解程度越高, 肌肉嫩度越好^[34,35]。成熟后冷冻对肌肉冻藏期间 MFI 的影响如图 6、图 7 所示, 随着冻藏时间的延长, 两种肌肉的 MFI 均呈逐渐下降趋势, 且差异显著 ($P < 0.05$), 相比 ZD 组, LD 组在整个贮藏期间能显著增加肌肉的 MFI 值 ($P < 0.05$)。这是由于肌肉成熟后其肌纤维组织排列整齐, 在冻藏过程中降低了冰晶对细胞的压迫, 肌肉的破坏程度降低, 使得肌肉在冻藏过程中嫩度较好。半膜肌 CD 组在第 0~6 周期间 MFI 值显著优于 LD 组, 在第 8~12 周期间显著低于 LD 组, 背最长肌 CD 组 MFI 值在第 0~4 周期间显著优于 LD 组, 第 6~8 周期间与 LD 组间差异不显著, 在第 10~12 周期间低于 LD 组, 第 12 周时, 两种肌肉的 MFI 均表现为 LD 组 > CD 组 > ZD 组, 与剪切力结果对应。由于半膜肌的肌纤维直径大于背最长肌, 其肌原纤维之间结合牢固, 导致剪切力大, 嫩度差。因此同一处理方法下背

最长肌的 MFI 略优于半膜肌。

3 结论

试验表明, 与直接冷冻方式对比发现, 成熟后冷冻能够有效提高肌肉嫩度, 且冷藏成熟方式在整个冻藏期均能够有效改善羊肉嫩度、保水性及色泽, 肌肉食用品质最佳, 认为冷藏成熟方式更适于作为羊肉冷冻前的成熟方式。超声辅助成熟方式能使肌肉嫩度得到改善, 提前进入僵直期, 加快成熟进程, 但在冻藏后期会造成肌肉保水性、嫩度均降低。未来可从超声波和冷藏方式的优点入手联合应用, 缩短肉品的成熟时间, 使肉品的食用品质得到进一步的改善。

参考文献

- [1] Kim Y H B, Ma D, Setyabrata D, et al. Understanding postmortem biochemical processes and post-harvest aging factors to develop novel smart-aging strategies [J]. Meat Science, 2018, 144: 74-90.
- [2] 喻倩倩, 李诗萌, 程蓓, 等. 肉类宰后成熟机制及成熟进程监测研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(1): 337-344.
- [3] Corbin C H, O'quinn T G, Garmyn A J, et al. Sensory evaluation of tender beef strip loin steaks of varying marbling levels and quality treatments [J]. Meat Science, 2015, 100: 24-31.
- [4] Lepper-Blilie A N, Berg E P, Buchanan D S, et al. Effects of post-mortem aging time and type of aging on palatability of low marbled beef loins [J]. Meat Science, 2016, 112: 63-68.
- [5] Ha M, Mcgilchrist P, Polkinghorne R, et al. Effects of different ageing methods on colour, yield, oxidation and sensory qualities of Australian beef loins consumed in Australia and Japan [J]. Food Research International, 2019, 125: 108528.
- [6] Delia Alarcon-Rojo, Alma Manuel Carrillo-Lopez, Luis Reyes-Villagrana, et al. Ultrasound and meat quality: A review [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2019, 55: 369-382.
- [7] Zhong Z, Xiong Y L. Thermosonication-induced structural change and solution properties of mung bean protein [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2019, 62: 104908.
- [8] Ma W C, Wang J M, Xu X B, et al. Ultrasound treatment improved the physicochemical characteristics of cod protein and enhanced the stability of oil-in-water emulsion [J]. Food Research International, 2019, 121: 247-256.
- [9] Gambuteanu C, Alexe P. Comparison of thawing assisted by low-intensity ultrasound on technological properties of pork Longissimusdorsi muscle [J]. Journal of Food Science &

- Technology, 2015, 52(4): 2130.
- [10] 李桂霞,李欣,李铮,等.宰后僵直及成熟过程中羊背最长肌理化性质的变化[J].食品科学,2017,38(21):112-118.
- [11] Culler R D, Parrishjr F C, Smith G C, et al. Relationship of myofibril fragmentation index to certain chemistry, physical and sensory characteristics of bovine longissimus muscle [J]. Journal of Food Science, 1978, 43(4): 1177-1180.
- [12] Wei J, Elzo m A, Jia X B, et al. Calpastatin gene polymorphism is associated with rabbit meat quality traits [J]. Journal of Applied Animal Research, 2017, 45(1): 342-345.
- [13] 周大鹏,蓝蔚青,莫雅娴,等.超声前处理对冷藏海鲈鱼品质及蛋白质特性的影响[J].食品与发酵工业,2020,46(17):204-211.
- [14] Aalhus J L, Robertson W M, Dugan M E R, et al. Very fast chilling of beef carcasses [J]. Canadian Journal of Animal Science, 2002, 82(1): 59-67.
- [15] 孔永昌,李丹,刘孝沾,等.冷冻与解冻对肉类品质影响的研究进展[J].肉类工业,2017,7:54-56.
- [16] 王丽莎,王航,李侠,等.不同部位猪肉肌纤维类型组成与品质特性比较研究[J].肉类研究,2020,34(6):1-7.
- [17] 刘文营,王守伟.羊肉生产及加工工艺对肉及肉制品品质的影响研究进展[J].食品科学,2020,41(01):304-311.
- [18] Siddaish D, Reddy G V S, Raju C V, et al. Changes in lipids, proteins and kamaboko forming ability of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) mince during frozen storage [J]. Food Research International, 2001, 34: 47-53.
- [19] Farouk M M, Wielizko K J, Merts I. Ultra-fast freezing and low storage temperature are not necessary to maintain the functional properties of manufacturing beef [J]. Meat Science, 2004, 66(1): 171-179.
- [20] 刘兵,马宗欣,邵智博.简述冷冻及缓化对原料肉品质影响的研究进展[J].肉类工业,2021,485(9):50-54.
- [21] 鲁蒙,巴吐尔·阿不力克木,欧阳宇恒,等.冻藏时间及 pH 值对宰后不同部位羊肉保水性变化的影响[J].肉类研究,2013, 27(9):26-30.
- [22] 柳银强,徐嘉宾,年芳,等.不同贮藏温度对湖羊羊肉品质特性的影响[J].甘肃农业大学学报,2021,56(6):159-168,175.
- [23] 明丹丹,张一敏,董鹏程,等.牛肉肉色的影响因素及其控制技术研究进展[J].食品科学,2020,41(1):284-291.
- [24] 张昕,宋蕾,高天,等.超声波解冻对鸡胸肉品质的影响[J].食品科学,2018,39(5):135-140.
- [25] Xie D D, Yue J, Li C Y, et al. Effects of different storage treatments on physicochemical indexes of green plums [J]. Agricultural Biotechnology, 2021, 10(4): 37-41.
- [26] Wang Z C, Yan Y Z, Nisar T, et al. Influence of postmortem treatment with nitric oxide on the muscle color and color stability of tilapia (*Oreochromis niloticus*) fillets [J]. Nitric Oxide: Biology and Chemistry, 2018, 76: 122-128.
- [27] 胡斐斐,钱书意,李侠,等.低压静电场辅助冷藏对牛肉品质的影响[J].食品科学,2021,42(1):132-138.
- [28] 陈丽艳,潘道东,曹锦轩,等.超声波处理对鹅肉蛋白结构及品质的影响[J].核农学报,2018,32(12):2363-2372.
- [29] Fortunato A R, Monteiro M, BRC CostaIma, et al. Effect of Brazilian pepper (*Schinus terebinthifolius* Raddi) extracts on color and oxidative stability of sardine patties stored under refrigeration [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2019, 43: e14187.
- [30] 王芳芳,张一敏,罗欣,等.冷冻解冻对生鲜肉品质的影响及其新技术研究进展[J].食品科学,2020,41(11):295-302.
- [31] 刁小琴,关海宁,乔秀丽,等.超声处理对肌原纤维蛋白凝胶特性和结构的影响[J].食品工业,2020,41(2):197-200.
- [32] 郑尧,邱泽慧,王锡昌.冻藏肉及其制品中蛋白氧化的研究进展[J].中国食品学报,2021,21(6):331-341.
- [33] 季现秋,罗欣,朱立贤,等.新型牛肉嫩化技术研究进展[J].食品与发酵工业,2021,47(1):327-333.
- [34] 丰永红.肌纤维类型影响牛肉成熟过程中蛋白降解的机制研究[D].北京:中国农业科学院,2020.
- [35] 高永芳,宫玉霞,杨雅媛,等.AMPK 活性对宰后牛肉糖酵解、肌肉内环境及品质的影响[J].食品科学,2019,40(17):45-52.