

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.05.039

不同部位冷却牛肉成熟过程中水分变化研究

左惠心 温彬 朱立贤 罗欣 牛乐宝 张一敏

(山东农业大学食品科学与工程学院, 泰安 271018)

摘要: 为探究宰后不同部位牛肉在成熟过程中的水分变化及其产生原因,以成熟1、2、3、5、7 d的冷却牛背最长肌、半膜肌和腰大肌作为研究对象,通过测定贮藏损失率、弛豫峰面积和比例、肌节长度和肌纤维直径,从贮藏损失、横向弛豫特性和肌肉结构特性3方面阐述了3种部位冷却牛肉在成熟过程中保水性、水分分布及细胞组织学的变化。结果表明,在成熟过程中,3种部位冷却牛肉的贮藏损失均呈现显著升高的趋势,腰大肌的保水性显著高于背最长肌和半膜肌($P < 0.05$);3种部位牛肉的各弛豫峰面积均显著降低($P < 0.05$),且各部位的结合水比例和不易流动水比例间的差异性不大($P > 0.05$);半膜肌的肌细胞排列松散,且肌节长度短,腰大肌具有较长的肌节和较小的肌纤维直径。不同部位肌细胞结构的差异导致不同部位牛肉呈现出不同的保水性。

关键词: 冷却牛肉; 不同部位肉; 保水性; 肌节长度; 低场核磁共振

中图分类号: TS207.3; TS251.5*2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2021)05-0350-08 **OSID:**



Water Changes in Different Parts of Chilled Beef during Postmortem Aging

ZUO Huixin WEN Bin ZHU Lixian LUO Xin NIU Lebao ZHANG Yimin

(College of Food Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China)

Abstract: Water-holding capacity (WHC) refers to the ability of meat to retain moisture when force is applied. As an important processing quality, WHC of beef affects the quality of the final products. The quality of different parts of beef have significant differences. Different WHC not only has an important impact on the flavor, tenderness and juiciness of different parts of beef, but also has an important economic significance. It is helpful to take corresponding measures to control the loss of water by clarifying the WHC of different parts of chilled beef during aging time. Thus, in order to investigate the changes of water distribution during postmortem ageing, the chilled *M. longissimus lumborum* (LL), *M. semimembranosus* (SM) and *M. psoas major* (PM) beef aged for 1 d, 2 d, 3 d, 5 d and 7 d were investigated. From the perspectives of purge loss, low field nuclear magnetic resonance (LF-NMR) characteristics and muscle structure, the changes of WHC, water distribution and microstructure of the three parts of chilled beef were described. The results indicated that the purge loss of three parts of chilled beef was increased significantly during postmortem aging time. And the WHC of PM were significantly higher than that of LL and SM ($P < 0.05$). The area of relaxation peak (A_2) in three parts of beef was decreased significantly ($P < 0.05$) and the differences among P_{2b} and P_{21} were not significant ($P > 0.05$). The loose arrangement of myofiber and the short length of sarcomere resulted in the poor WHC of SM. PM had longer sarcomere and smaller myofiber diameter. The difference of myofiber structure in three parts of beef resulted in different WHC.

Key words: chilled beef; different parts of meat; water-holding capacity; sarcomere length; low field NMR

收稿日期: 2020-12-04 修回日期: 2020-12-30

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(31801610)、国家自然科学基金面上基金项目(32072239)和国家肉牛牦牛产业技术体系项目(CARS-37)

作者简介: 左惠心(1988—),女,讲师,博士,主要从事畜产品加工研究,E-mail: hxzuo@sdau.edu.cn

通信作者: 朱立贤(1975—),女,教授,博士,主要从事肉品科学研究,E-mail: zhlix@sdau.edu.cn

0 引言

肉品保水性(Water-holding capacity, WHC)是指肌肉受到外力作用时保持其原有水分与添加水分的能力。牛肉的保水性作为一种重要的加工品质,对牛肉产品的质量产生重要影响^[1]。不同部位牛肉的品质具有显著差异,保水性不仅对牛肉的风味、嫩度、多汁性等产生重要的影响,而且具有经济意义^[2-3]。明确不同部位冷却牛肉在成熟过程中保水性的差异和变化规律,有助于采取相应的措施控制牛肉汁液损失。

不同部位的牛肉在价格和食用品质方面存在巨大差异^[4],不同部位牛肉的保水性也存在差异^[5]。为了控制肉品汁液损失,减小因汁液损失而导致的企业经济损失,研究不同部位肌肉的保水性至关重要。目前,关于不同类型肌肉的食用品质研究多集中在嫩度方面^[6],涉及不同部位保水性的差异及其原因的研究较少。文献[7]研究表明,不同部位肌肉的食用品质(肉色、嫩度、保水性和风味等)具有一定的差异性,且宰后不同部位肌肉的成熟速率也不同。在肉品贮藏、加工和运输过程中,任何导致肌细胞结构完整性破坏的因素都会引起肉品的保水性下降^[8-9]。文献[10]研究发现,24、48、120 h 的肌肉中,肌原纤维外空间存在差异,导致了肌肉中水分分布存在差异。但关于不同部位肌肉在成熟过程中的变化和产生差异的原因尚未进行分析。

因此,本文以冷却牛背最长肌、半膜肌和腰大肌作为研究对象,从贮藏损失、横向弛豫特性和肌肉结构等方面阐述 3 种部位冷却牛肉在成熟过程中保水性的变化,分析产生差异的原因,以期为提高牛肉的保水性提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

本实验所用牛肉样品采自山东省阳信县某公司,挑选 8 头质量相近、18~24 月龄的杂交公牛(鲁西黄牛×西门塔尔牛),屠宰后胴体在排酸库冷却成熟 24 h,取左半胴体的背最长肌(第 12 根胸肋到腰椎末尾)、半膜肌、腰大肌部位,将肉样于 4℃ 环境温度下运回实验室,将肉样分割成 2.54 cm 厚度的牛排并进行托盘包装,进行后续实验。

蔗糖(分析纯)、无水乙醇、二甲苯、盐酸、氨水、中性树胶,国药集团化学试剂有限公司;氯化钠(分析纯),天津市凯通化学试剂有限公司;苏木素染液套装,武汉塞维尔生物科技有限公司。

1.2 仪器与设备

AB104-S 型分析天平(瑞士 Mettler Toledo 公司);BD-145HDE 型冷藏冷冻转换柜(青岛海尔特种电冰柜有限公司);NMI20-015V-I 型核磁共振成像仪(上海纽迈电子科技有限公司);BX41 型光学显微镜(日本 Olympus 公司);JJ-12J 型脱水机、JB-P5 型包埋机(武汉俊杰电子有限公司);RM2016 型病理切片机(上海徕卡仪器有限公司);Nikon Eclipse E100 型光学显微镜(日本 Nikon 公司);Nikon DS-U3 型成像系统(日本 Nikon 公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 贮藏损失的测定

参照文献[11]的方法,将各部位牛肉分割为 2.54 cm 厚度的牛排后,称其质量 m_1 并记录,托盘包装后置于环境温度为 0~4℃ 的冷库中避光成熟,分别在成熟 2、3、5、7 d 取出牛排,用滤纸吸干牛肉渗出的汁液,再次称量记为 m_2 。重复 3 次取平均值。贮藏损失率 W 计算公式为

$$W = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\%$$

1.3.2 横向弛豫特性的测定

参照文献[12]的方法并稍作修改。低场核磁共振(Low field nuclear magnetic resonance, LF-NMR)测定前将仪器预热 30 min 以上,测试温度为 32℃。测定样品前使用标准油样采用自由感应衰减(Free induction decay, FID)序列(质子共振频率为 21 MHz,等待时间为 2 000 ms,接收机带宽为 100 kHz,开始采样时间为 0.05 ms,模拟增益为 20,数字增益为 3,累加次数为 4)进行校准。肉样延肌纤维方向分切为 1 cm×1 cm×2 cm 的肉条,称量后轻轻放入直径为 12 mm 的核磁试管底部,32℃ 水浴加热至肉样内部恒温,擦干管壁后进行测定。样品的测定采用 CPMG(Carr-Purcell-Meiboom-Gill)序列,质子共振频率为 21 MHz,等待时间为 2 500 ms,接收机带宽为 250 kHz,测量回波间隔为 0.6 ms,回波次数为 10 000,累加次数为 8。肉样平行测定 3 份取平均值,数据进行归一化处理。

1.3.3 核磁成像的测定

参照文献[12]的方法并稍作修改。肉样的核磁成像测定前将仪器预热 30 min,测试温度为 32℃。在测试样品前,使用标准油样进行校准,并对样品进行定位预扫描后进行正式成像。重复时间为 500 ms,测量回波间隔为 20 ms,重复次数为 4,成像尺寸为 50 mm×50 mm,肉样成像厚度为 3 mm,同一样品进行 2 层成像,成像方式为横断面,图像保存为 fid 文件格式进行后续伪彩处理。

1.3.4 肌节长度的测定

参照文献[13-14]的方法并稍做修改。在成熟1、2、3、5、7 d取背最长肌、半膜肌和腰大肌的牛肉样品2 g,置于50 mL烧杯中,加入4℃预冷的0.25 mol/L蔗糖溶液18 mL,低速匀浆(转速约为6 000 r/min)1 min,然后取悬浮液制作载玻片,在Olympus BX41型光学显微镜下放大1 000倍观察并拍照,每个样品取5个平行样(载玻片),每个样品拍摄25幅图像,总共测量125次。使用Image-Pro Plus 6.0软件测量肌节长度。125次测量结果的平均值即为该样品的肌节长度。

1.3.5 肌细胞显微图像及肌纤维直径的测定

参照文献[12]的方法并稍作修改。在各成熟时间点沿肌纤维方向取肉样,置于脂肪专用固定液固定24 h以上,对样品修整后进行梯度酒精脱水并进行石蜡包埋和切片,依次将切片放入二甲苯I 20 min、二甲苯II 20 min、无水乙醇II 5 min、75%酒精5 min后用自来水清洗。之后用苏木素染色3~5 min,盐酸水溶液分化,氨水水溶液返蓝,水洗。随后将切片依次入85%、95%的梯度酒精脱水,入伊红染液中染色5 min。再将切片依次放入无水乙醇I 5 min、无水乙醇II 5 min、无水乙醇III 5 min、二甲苯I 5 min、二甲苯II 5 min后进行中性树胶封片。最后进行显微镜镜检,对图像进行采集。数据分析时,使用Pannoramic Viewer将采集的图像放大为原样品的200倍,并使用Adobe Photoshop CC除去肌纤维间的结缔组织,通过Image-Pro Plus 6.0测量获得肌纤维直径。每份样品取50个结果,取平均值记为该样品的肌纤维直径。

1.4 数据分析

数据采用IBM SPSS Statistics 20.0软件以成熟时间、部位为固定因子,采用一般线性模型(General linear model, GLM)进行统计分析,用多重比较选择(Least significant difference, LSD)比较主效应因素。采用Image-Pro Plus 6.0分析肌节长度和肌纤维直径数据,低场核磁共振数据通过核磁共振成像仪自

带的反演软件、采用联合迭代重建技术(Simultaneous iterative reconstruction technique, SIRT)方法反演获得,核磁成像伪彩图通过纽迈核磁共振图像处理软件V1.0分析获得。采用Orign 2018软件对数据制图。所有结果以平均值±标准差的形式表示。

2 结果与分析

2.1 不同部位牛肉成熟过程中贮藏损失变化

贮藏损失率表示牛肉在成熟过程中流失的汁液占总质量的百分比,相同时间点贮藏损失率越小表明其保水性越好,是衡量牛肉保水性的重要指标之一。从表1可以看出,成熟时间和部位对贮藏损失影响显著($P<0.01$),成熟时间和部位的交互作用对贮藏损失影响不显著($P>0.05$)。随着成熟的进行,贮藏损失率平均值由1.09%显著上升至2.34%($P<0.05$),说明3种部位牛肉随成熟时间的延长,汁液流失显著增多。腰大肌的贮藏损失率(1.36%)显著低于背最长肌(1.86%)和半膜肌(2.09%)($P<0.05$),说明腰大肌的保水性高于其余两组。贮藏损失率与成熟时间呈正相关(表1),表明随成熟时间延长,汁液流失更严重。文献[15]也表明贮藏处理的时间越长,贮藏损失越高。文献[16]同样表明牛背最长肌无论在托盘、真空还是气调包装中进行贮藏,其贮藏损失均持续上升。肌细胞结构的完整性受到破坏而导致肌肉汁液渗漏可能是其主要原因^[9]。

2.2 不同部位牛肉成熟过程中横向弛豫特性变化

低场核磁共振通过测定肉品中氢原子核在磁场中的弛豫特性可以分析肉品中水分的分布和状态^[12]。图1为牛肉成熟过程中横向弛豫特性的变化,图中出现了3种峰,峰I、峰II及峰III分别代表结合水(0~10 ms)、不易流动水(10~100 ms)和自由水(100~1 000 ms),这与文献[17]的研究结果相一致。从图中可以看出,随着成熟时间的延长,3种部位牛肉的不易流动水(峰II)的峰高呈现下降趋

表 1 不同部位牛肉成熟过程中贮藏损失变化

Tab.1 Rate of purge loss in different parts of beef during postmortem aging							
成熟时间/d	贮藏损失率/%				P		
	背最长肌	半膜肌	腰大肌	平均值±标准差	成熟时间	部位	成熟时间×部位
2	1.12±0.13	1.17±0.11	0.97±0.10	(1.09±0.07) ^d	<0.01	<0.01	>0.05
3	1.64±0.15	1.98±0.18	1.32±0.09	(1.65±0.09) ^c			
5	2.24±0.24	2.29±0.21	1.49±0.14	(2.01±0.12) ^b			
7	2.44±0.25	2.91±0.17	1.66±0.13	(2.34±0.13) ^a			
平均值±标准差	(1.86±0.12) ^x	(2.09±0.11) ^x	(1.36±0.07) ^y				

注:a~d不同字母表示同一部位不同成熟时间差异达到显著水平($P<0.05$),x,y不同字母表示同一成熟时间不同部位差异达到显著水平($P<0.05$),下同。

势,但结合水与自由水的变化趋势不明显。因此为了更好地分析 3 种水分的变化,对各峰的峰面积及其比例进行了显著性分析(表 2),从而更好地分析水分随成熟时间的变化。

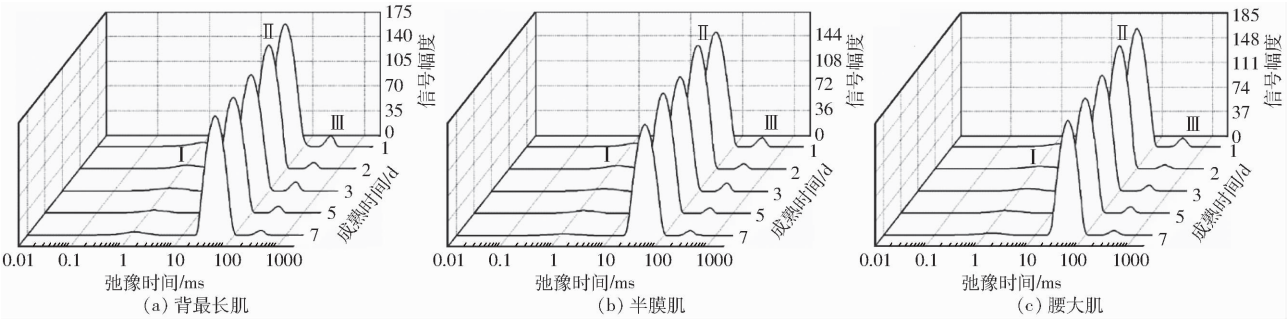


图 1 不同部位牛肉成熟过程中横向弛豫特性变化

Fig. 1 Transverse relaxation characteristics in different parts of beef during postmortem aging

表 2 不同部位牛肉成熟过程中弛豫峰面积 A₂变化

Tab. 2 A₂ of water in different parts of beef during postmortem aging

指标	成熟时间/d	部位			平均值 ± 标准差	P		
		背最长肌	半膜肌	腰大肌		成熟时间	部位	成熟时间 × 部位
A _{2b}	1	104. 58 ± 4. 73	97. 20 ± 4. 87	96. 33 ± 3. 47	(99. 37 ± 2. 57) ^a	<0. 01	<0. 05	>0. 05
	2	102. 10 ± 4. 09	97. 48 ± 3. 48	98. 38 ± 3. 98	(99. 32 ± 2. 24) ^a			
	3	94. 69 ± 4. 81	86. 72 ± 4. 66	75. 07 ± 2. 54	(85. 49 ± 2. 54) ^c			
	5	83. 82 ± 4. 37	90. 68 ± 4. 89	89. 83 ± 2. 02	(88. 11 ± 2. 31) ^b			
	7	92. 65 ± 4. 65	70. 34 ± 8. 23	76. 50 ± 6. 43	(79. 83 ± 4. 04) ^c			
	平均值 ± 标准差	(95. 57 ± 2. 11) ^x	(88. 48 ± 2. 79) ^y	(87. 22 ± 2. 11) ^y				
A ₂₁	1	2 897. 05 ± 19. 85	2 773. 48 ± 64. 81	2 924. 24 ± 13. 35	(2 864. 92 ± 25. 54) ^a	<0. 01	>0. 05	>0. 05
	2	2 882. 91 ± 23. 73	2 878. 39 ± 31. 39	2 890. 14 ± 36. 39	(2 883. 81 ± 16. 93) ^a			
	3	2 767. 99 ± 19. 64	2 727. 42 ± 32. 74	2 751. 77 ± 27. 77	(2 749. 07 ± 15. 31) ^b			
	5	2 742. 03 ± 21. 03	2 818. 21 ± 35. 45	2 762. 88 ± 25. 47	(2 774. 37 ± 16. 34) ^b			
	7	2 764. 00 ± 28. 79	2 674. 16 ± 35. 82	2 757. 06 ± 34. 86	(2 731. 74 ± 19. 85) ^b			
	平均值 ± 标准差	2 810. 79 ± 11. 83	2 774. 33 ± 19. 89	2 817. 22 ± 14. 74				
A ₂₂	1	(92. 38 ± 13. 58) ^{ax}	(92. 96 ± 5. 79) ^{ax}	(91. 80 ± 9. 48) ^{ax}	92. 38 ± 5. 62	<0. 01	>0. 05	<0. 05
	2	(57. 29 ± 5. 16) ^{bex}	(47. 92 ± 4. 06) ^{bx}	(49. 93 ± 5. 87) ^{bx}	51. 71 ± 2. 90			
	3	(84. 08 ± 7. 90) ^{ax}	(77. 02 ± 7. 38) ^{ax}	(58. 85 ± 5. 87) ^{bx}	73. 31 ± 4. 34			
	5	(66. 63 ± 5. 26) ^{bx}	(50. 52 ± 3. 69) ^{bx}	(65. 02 ± 5. 50) ^{bx}	60. 72 ± 2. 92			
	7	(48. 20 ± 4. 84) ^{cx}	(56. 24 ± 2. 79) ^{bx}	(55. 75 ± 4. 22) ^{bx}	53. 40 ± 2. 29			
	平均值 ± 标准差	69. 71 ± 3. 77	64. 93 ± 2. 69	64. 27 ± 3. 16				
A _{2total}	1	3 094. 01 ± 14. 13	2 963. 64 ± 69. 14	3 112. 37 ± 16. 08	(3 056. 67 ± 26. 86) ^a	<0. 01	>0. 05	>0. 05
	2	3 042. 29 ± 22. 12	3 023. 79 ± 31. 33	3 038. 44 ± 34. 18	(3 034. 84 ± 16. 29) ^a			
	3	2 946. 75 ± 18. 44	2 891. 15 ± 32. 39	2 885. 68 ± 24. 38	(2 907. 86 ± 14. 57) ^{bc}			
	5	2 892. 48 ± 26. 89	2 959. 40 ± 40. 62	2 917. 74 ± 25. 26	(2 923. 21 ± 18. 36) ^b			
	7	2 904. 85 ± 29. 32	2 800. 73 ± 43. 66	2 889. 30 ± 38. 77	(2 864. 96 ± 22. 64) ^c			
	平均值 ± 标准差	2 976. 08 ± 12. 70	2 927. 74 ± 21. 91	2 968. 71 ± 15. 96				

注:A_{2b}、A₂₁、A₂₂分别表示结合水、不易流动水、自由水弛豫峰面积;A_{2total}表示弛豫峰总面积。

2. 2. 1 弛豫峰面积变化

由表 2 可知,随着成熟时间的延长,3 种部位牛肉的 A_{2b}由 1 d 的 99. 37 显著降低至 7 d 的 79. 83,背最长肌的 A_{2b}显著高于半膜肌与腰大肌(P<0. 05),后者之间无显著差异(P>0. 05)。文献[18]认为,由于结合水占据总水分的比例不大,其整体的变化对肌肉保水性无太大影响。对于不易流动水峰面积 A₂₁,仅成熟时间对 A₂₁影响显著(P<0. 01),部位对

A₂₁影响不显著(P>0. 05),且成熟时间和部位的交互作用对 A₂₁影响不显著(P>0. 05)。结合图 1 与表 2 可以看出,随成熟时间的延长,不易流动水峰面积从 1 d 的 2 864. 92 显著降低至 7 d 的 2 731. 74(P<0. 05),但 3 种部位牛肉的 A₂₁差异不显著(P>0. 05),这意味着不易流动水的含量随成熟时间显著下降(P<0. 05),3 种部位之间的不易流动水含量无显著差异(P>0. 05)。自由水的峰面积

A_{22} 在成熟过程中的变化与 A_{21} 类似,随成熟时间呈现显著下降趋势($P < 0.05$)。

2.2.2 弛豫峰比例变化

弛豫峰面积百分比 P_{2b} 、 P_{21} 和 P_{22} 反映了肉中结合水、不易流动水和自由水在总水分中所占的比例。由表 3 可知,背最长肌 P_{2b} 在成熟 1 ~ 3 d 的变化不显著($P > 0.05$),但在 5 d 显著降低至 2.88% ($P <$

0.05),半膜肌 P_{2b} 的变化较晚,在 7 d 时由 3.04% 显著降低至 2.44% ($P < 0.05$),腰大肌的变化趋势与背最长肌和半膜肌均不同,于成熟 3 d 显著降低至 2.60% 后,之后显著升高至 3.09%,在 7 d 又显著降低至 2.60% ($P < 0.05$),结合水比例的剧烈变化可能是不同部位牛肉自由水的损失速度不同所造成的。

表 3 不同部位牛肉成熟过程中弛豫峰面积百分比 P_2 变化
Tab.3 Evolution of P_2 in different parts of beef during postmortem aging

指标	成熟	部位			P		
	时间/d	背最长肌	半膜肌	腰大肌	成熟时间	部位	成熟时间×部位
$P_{2b}/\%$	1	(3.37 ± 0.14) ^{ax}	(3.25 ± 0.12) ^{ax}	(3.09 ± 0.11) ^{ax}			
	2	(3.35 ± 0.13) ^{ax}	(3.22 ± 0.10) ^{ax}	(3.24 ± 0.13) ^{ax}			
	3	(3.21 ± 0.15) ^{abx}	(2.98 ± 0.14) ^{axy}	(2.60 ± 0.08) ^{by}	<0.01	<0.05	<0.05
	5	(2.88 ± 0.13) ^{bx}	(3.04 ± 0.13) ^{ax}	(3.09 ± 0.08) ^{ax}			
	7	(3.18 ± 0.13) ^{abx}	(2.44 ± 0.26) ^{by}	(2.60 ± 0.19) ^{by}			
$P_{21}/\%$	1	(93.64 ± 0.45) ^{bx}	(93.59 ± 0.21) ^{cx}	(93.96 ± 0.30) ^{cx}			
	2	(94.76 ± 0.22) ^{ax}	(95.18 ± 0.16) ^{ax}	(95.10 ± 0.25) ^{abx}			
	3	(93.93 ± 0.27) ^{by}	(94.33 ± 0.26) ^{by}	(95.34 ± 0.24) ^{ax}	<0.01	<0.01	<0.05
	5	(94.83 ± 0.23) ^{ax}	(95.26 ± 0.19) ^{ax}	(94.69 ± 0.19) ^{bx}			
	7	(95.15 ± 0.16) ^{ax}	(95.56 ± 0.29) ^{ax}	(95.45 ± 0.19) ^{ax}			
$P_{22}/\%$	1	(2.99 ± 0.45) ^{ax}	(3.16 ± 0.19) ^{ax}	(2.95 ± 0.29) ^{ax}			
	2	(1.89 ± 0.18) ^{bex}	(1.60 ± 0.19) ^{bx}	(1.66 ± 0.21) ^{bx}			
	3	(2.86 ± 0.27) ^{ax}	(2.69 ± 0.22) ^{ax}	(2.07 ± 0.22) ^{by}	<0.01	>0.05	<0.05
	5	(2.29 ± 0.17) ^{bx}	(1.70 ± 0.19) ^{by}	(2.23 ± 0.19) ^{bx}			
	7	(1.68 ± 0.18) ^{cx}	(2.01 ± 0.18) ^{bx}	(1.95 ± 0.16) ^{bx}			

对于不易流动水峰面积百分比 P_{21} ,3 种部位牛肉的 P_{21} 在成熟过程中变化趋势相同,均随成熟时间的进行呈现显著下降后上升的趋势($P < 0.05$),在成熟 7 d,3 种部位牛肉的 P_{21} 均超过 95%,显著高于 1 d($P < 0.05$)。且对比 3 种部位牛肉的 P_{21} 发现,仅在成熟 3 d 腰大肌的 P_{21} 显著高于背最长肌和半膜肌($P < 0.05$),在其余时间点 P_{21} 的差异不显著($P > 0.05$)。 P_{22} 变化的趋势与 P_{21} 不同,在成熟 1 ~ 2 d 时,背最长肌、半膜肌和腰大肌的 P_{22} 分别显著降低至 1.89%、1.60% 和 1.66% ($P < 0.05$),在 2 ~ 3 d 又显著升高($P < 0.05$),且不同部位牛肉间的 P_{22} 也有所差异。 P_{22} 的变化表明在成熟期间自由水变化的复杂性,且不同部位牛肉间的自由水变化存在差异,但结合表 2 可以发现, A_{2b} 、 A_{21} 和 A_{22} 随成熟时间的进行而降低($P < 0.05$),因此认为在成熟期间 3 种部位牛肉的结合水、不易流动水和自由水均减少,结合水的变化表明部分蛋白质发生变性,与蛋白质结合较弱的部分结合水流出肌细胞外^[19-20]。3 种水分比例的变化表明在成熟过程中,肉中水分的变化是动态的过程,且由于重力的作用,自由水逐渐流失。成熟 2 ~ 5 d 内 P_{22} 增加的原因可能是成熟过程

中部分肌原纤维间的水分转移至肌原纤维外的间隙,即不易流动水逐步向自由水转化,较高的自由水比例造成成熟后期汁液损失增加^[21]。

2.3 不同部位牛肉成熟过程中核磁成像变化

图 2 表示成熟过程中 3 种部位牛肉氢质子密度成像图,颜色越深表示氢质子密度越高,即自由水含水率高。颜色越浅表示肉中的氢质子密度越低,自由水含水率越低^[12,22]。随着成熟时间延长,核磁成像图像的颜色越来越浅,表明肉中的水分在损失。文献[18]在测量时发现低保水性的样品边缘亮度增加,但在本研究中不同部位间核磁成像的变化结果之间的差异不大,且结合贮藏损失的结果分析,半膜肌的核磁成像边缘与内部区域相比未见明显的亮度,可以得出 3 种部位冷却牛肉的水分流失速率无明显差异。此外,核磁图像中出现亮色的条带与成熟过程中的汁液流失通道的形成有关^[23]。

分析部位之间保水性间的差异,除去肌肉类型的差异^[7]和蛋白质降解速率的差异^[24-25]等因素,肉中的水分分布和转化是影响保水性的又一大因素^[23]。在整个成熟期间内,仅在成熟 3 d 腰大肌的

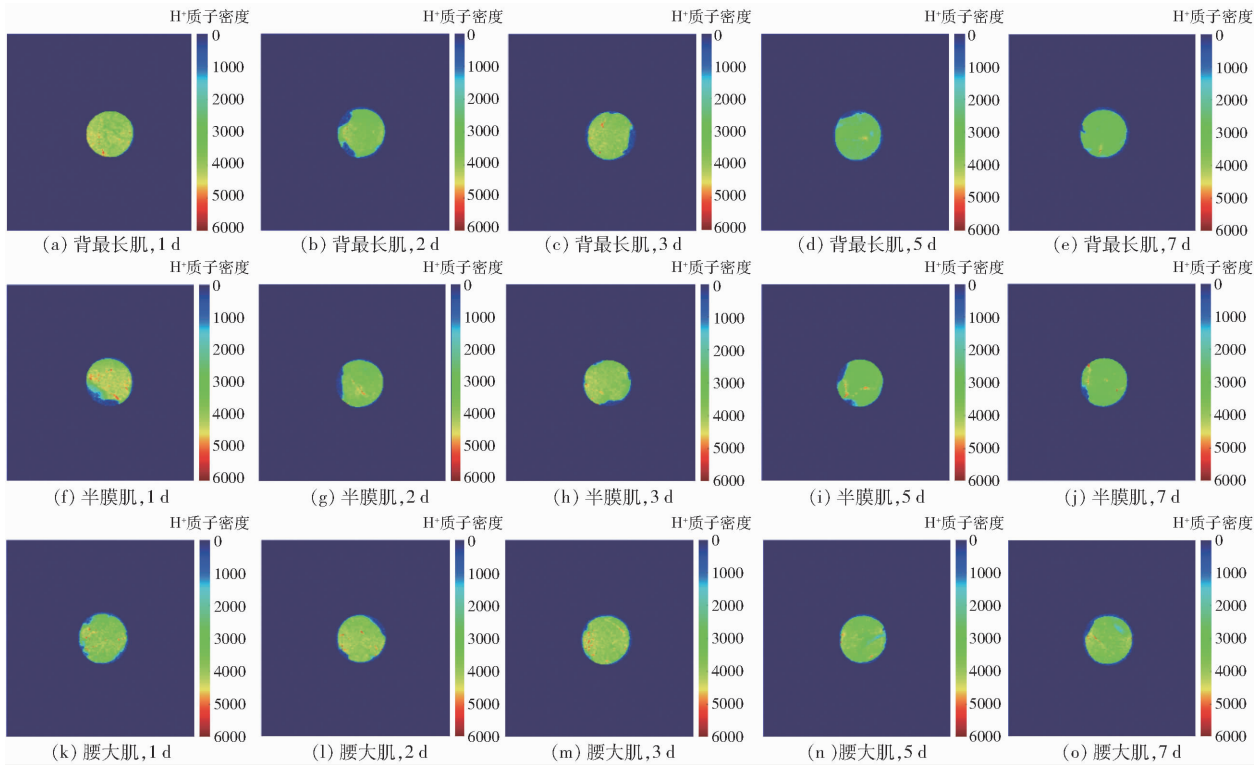


图 2 不同部位牛肉成熟过程中核磁共振成像图

Fig. 2 Magnetic resonance images of different parts of beef during postmortem aging

P_{21} 显著高于背最长肌和半膜肌($P < 0.05$),在其余时间点 P_{21} 的差异不显著($P > 0.05$)。此外 3 种部位牛肉的总水分相对含量之间(A_{2total})无显著性差异($P > 0.05$),核磁共振成像的结果同样支持该结论,颜色的变化并无明显差异。因此分析认为 3 种部位牛

肉保水性存在差异的原因不是水分分布和含水率的差异性造成的。

2.4 不同部位牛肉成熟过程中肌细胞变化

图 3 为背最长肌、半膜肌与腰大肌在成熟过程中的 HE 染色(苏木精-伊红染色法)图像,从图中可

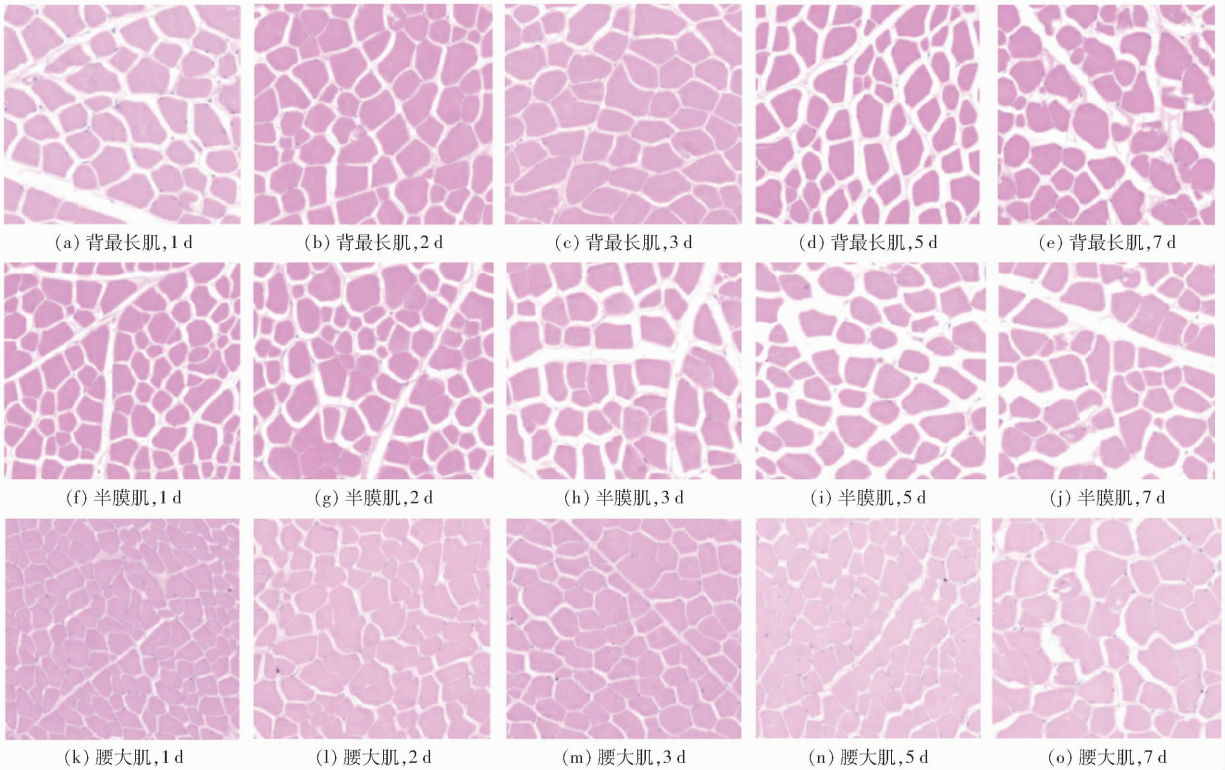


图 3 不同部位牛肉成熟过程中肌细胞变化图

Fig. 3 Muscle fibers images in different parts of beef during postmortem aging

以看出在成熟前期肌细胞排列紧密且肌细胞维持良好的形态,腰大肌的细胞排列更紧密,背最长肌和半膜肌细胞间的空隙较大,随着成熟的进行,细胞不再维持良好的形态且发生破裂,致使细胞中的水分更易流失。文献[26]认为肌肉中的生理生化反应会对肌肉的组织形态和结构产生影响,并且会使随后的蛋白质变性呈现一定程度的差异,肌细胞的伸缩随之受到影响,最终对牛肉的保水性产生影响。

2.4.1 不同部位牛肉成熟过程中肌纤维直径变化

由图4(图中a~d不同字母表示同一部位不同成熟时间差异达到显著水平($P<0.05$),x、y、z不同字母表示同一成熟时间不同部位差异达到显著水平($P<0.05$))可以看出,在成熟过程中3种部位牛肉的肌纤维直径均呈现先显著上升后下降的过程($P<0.05$),在成熟1~2 d牛肉的肌纤维直径呈现显著升高趋势,2~7 d均呈现显著降低的趋势($P<0.05$)。在整个成熟时间内,腰大肌的肌纤维直径均显著低于背最长肌与半膜肌($P<0.05$),表明腰大肌的肌纤维直径最低。成熟前5 d背最长肌的肌纤维直径显著高于半膜肌($P<0.05$),直到成熟7 d时,背最长肌与半膜肌的肌纤维直径无显著差异($P>0.05$)。文献[23]表明,肌肉纵向收缩的过程对肉中水分的流动性具有重要的影响,包括肌纤维、肌原纤维直径的改变及肌节长度的改变,改变了弛豫水分的特征。结合图3可以分析出,在成熟过程中,成熟前期(1~2 d)肌细胞发生膨胀,在成熟后期肌细胞皱缩并发生破裂,最终导致成熟7 d总水分损失的升高。

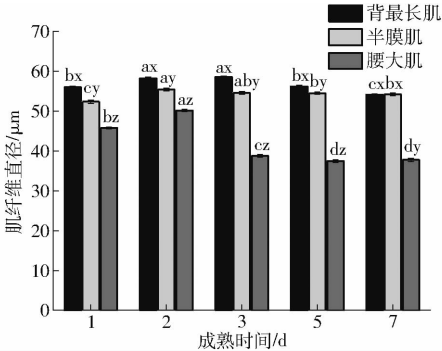


图4 不同部位牛肉成熟过程中肌纤维直径

Fig.4 Muscle fibers diameter in different parts of beef during postmortem aging

2.4.2 不同部位牛肉成熟过程中肌节长度变化

表4为成熟过程中不同部位牛肉肌节长度的变化,部位、成熟时间及其交互作用对肌节长度影响显著($P<0.01$)。在成熟期间,对比不同部位牛肉的肌节长度来看,腰大肌的肌节长度显著高于背最长肌和半膜肌,半膜肌的肌节长度最小($P<0.05$)。对比不同部位牛肉的肌肉结构指标发现,腰大肌的肌纤维直径均显著低于背最长肌与半膜肌($P<0.05$),而腰大肌在整个成熟期间内的肌节长度显著高于背最长肌和半膜肌($P<0.05$)。由于肌节的单位体积是恒定的,在成熟过程中,3种部位之间随着肌节的缩短造成肌原纤维直径变大,肌细胞内肌原纤维之间的空隙减小;同时伴随肌纤维直径的减小(图4),胞内空间进一步减小,造成肌原纤维间汁液流失,因而导致保水性降低^[27]。由表4可知,在成熟后期,不同部位牛肉的肌节长度均呈现不同程度的增加,背最长肌和半膜肌在成熟7 d的肌节长

表4 成熟过程中不同部位牛肉肌节长度

Tab.4 Evolution of sarcomere length of different parts of beef during postmortem aging						
成熟时间/d	肌节长度/μm			P		
	背最长肌	半膜肌	腰大肌	成熟时间	部位	成熟时间×部位
1	(1.93±0.0055) ^{cy}	(1.72±0.0046) ^{abz}	(2.55±0.0066) ^{ax}			
2	(2.10±0.0092) ^{ay}	(1.68±0.0063) ^{hz}	(2.38±0.0110) ^{bx}			
3	(1.89±0.0057) ^{cdy}	(1.69±0.0058) ^{hz}	(2.24±0.0110) ^{cx}	<0.01	<0.01	<0.01
5	(1.86±0.0075) ^{dy}	(1.69±0.0037) ^{hz}	(2.34±0.0064) ^{bx}			
7	(2.02±0.0014) ^{by}	(1.77±0.0039) ^{az}	(2.38±0.0073) ^{bx}			

度已经超过成熟1 d,但腰大肌的肌节长度在成熟后期变化幅度不大。文献[28]认为肌节长度的变化影响肌球蛋白与肌动蛋白之间的储水空间,通常认为肌节长度越长,保水性越好,这与本研究结果一致。

3 结束语

在成熟过程中,腰大肌的贮藏损失显著低于背最长肌与半膜肌($P<0.05$),背最长肌和半膜肌的贮藏损

失无显著差异($P>0.05$)。LF-NMR 结果表明,3种部位牛肉水分变化和流失的速率一致,水分的变化速率并不是造成不同部位牛肉保水性存在差异的原因。不同部位牛肉的肌肉结构存在差异,肌纤维直径和肌节长度通过改变肌原纤维外部空间而影响保水性。本研究利用低场核磁共振技术、显微成像技术对不同部位牛肉在成熟过程中的水分变化进行探讨,为研究肉品保水性和不同部位肉品质差异提供理论依据。

参 考 文 献

- [1] 左惠心, 殷元虎, 韩玲, 等. 宰后牦牛肉保水性变化与差异蛋白的生物信息学分析 [J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 325–331.
ZUO Huixin, YIN Yuanhu, HAN Ling, et al. Changes of postmortem water-holding capacity in yak muscle and bioinformatics analysis of differentially abundant proteins [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 325–331. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170741&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.041. (in Chinese)
- [2] 左惠心, 韩玲, 余群力, 等. 牦牛与黄牛肌肉差异蛋白质组及生物信息学分析 [J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(4): 313–320.
ZUO Huixin, HAN Ling, YU Qunli, et al. Proteomics and bioinformatics analyses of differentially expressed proteins in yak and beef cattle muscle [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(4): 313–320. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170441&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.04.041. (in Chinese)
- [3] ZUO H X, HAN L, YU Q L, et al. Proteome changes on water-holding capacity of yak *Longissimus lumborum* during postmortem aging [J]. Meat Science, 2016, 121(11): 409–419.
- [4] 丰永红, 李海鹏, 张松山, 等. 牛肉肌纤维类型差异及成熟过程中组织蛋白酶活性研究 [J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(7): 355–364.
FENG Yonghong, LI Haipeng, ZHANG Songshan, et al. Difference of muscle fiber types in various beef cuts and change of cathepsins activity during postmortem ageing [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(7): 355–364. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20200740&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.07.040. (in Chinese)
- [5] MELODY J L, LONERGAN S M, ROWE L J, et al. Early postmortem biochemical factors influence tenderness and water-holding capacity of three porcine muscles [J]. Journal of Animal Science, 2004, 82(4): 1195–1205.
- [6] 郎玉苗. 肌纤维类型对牛肉嫩度的影响机制研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.
- [7] BHAT Z F, MORTON J D, MASON S L, et al. Role of calpain system in meat tenderness: a review [J]. Food Science and Human Wellness, 2018, 7(3): 196–204.
- [8] BOWKER B, ZHUANG H. Relationship between water-holding capacity and protein denaturation in broiler breast meat [J]. Poultry Science, 2015, 94(7): 1657–1664.
- [9] 尹靖东. 动物肌肉生物学与肉品科学 [M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2011: 18–19.
- [10] BERTRAM H C, PURSLOW P P, ANDERSEN H J. Relationship between meat structure, water mobility, and distribution: a low-field nuclear magnetic resonance study [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2002, 50(4): 824–829.
- [11] LIU Y, MAO Y, ZHANG Y, et al. Pre-rigor temperature control of Chinese yellow cattle carcasses to 12–18°C during chilling improves beef tenderness [J]. Meat Science, 2015, 100(4): 139–144.
- [12] 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 Wenbin, LUO Xin, MAO Yanwei, 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. (in Chinese)
- [13] CROSS H R, WEST R L, DUTSON T R. Comparison of methods for measuring sarcomere length in beef *semitendinosus* muscle [J]. Meat Science, 1981, 5(4): 261–266.
- [14] LI K, ZHANG Y, MAO Y, et al. Effect of very fast chilling and aging time on ultra-structure and meat quality characteristics of Chinese Yellow cattle *M. longissimus lumborum* [J]. Meat Science, 2012, 92(4): 795–804.
- [15] BOGDANOWICZ J, CIERACH M, ŻMIJEWSKI T. Effects of aging treatment and freezing/thawing methods on the quality attributes of beef from Limousin × Holstein-Friesian and Hereford × Holstein-Friesian crossbreeds [J]. Meat Science, 2018, 137(3): 71–76.
- [16] 扶庆权, 张万刚, 王海鸥, 等. 包装方式对宰后牛肉贮藏过程中食用品质的影响 [J]. 食品与机械, 2018, 34(6): 127–132.
FU Qingquan, ZHANG Wan'gang, WANG Haiou, et al. Effects of different packaging methods on beef quality during the postmortem aging [J]. Food and Machinery, 2018, 34(6): 127–132. (in Chinese)
- [17] BERTRAM H C, ANDERSEN H J, KARLSSON A. Comparative study of low-field NMR relaxation measurements and two traditional methods in the determination of water holding capacity of pork [J]. Meat Science, 2001, 57(2): 125–132.
- [18] 甄少波, 刘奕忍, 郭慧媛, 等. 低场核磁共振分析猪肉宰后成熟过程中的水分变化 [J]. 食品工业科技, 2017, 38(22): 66–70.
ZHEN Shaobo, LIU Yiren, GUO Huiyuan, et al. Analysis of moisture changes of pork during postmortem aging by low-field NMR [J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(22): 66–70. (in Chinese)
- [19] 郭兆斌, 余群力, 陈骋, 等. 宰后牦牛肉水分分布变化与持水性能关系研究 [J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(10): 343–351.
GUO Zhaobin, YU Qunli, CHEN Cheng, et al. Relationship between water distribution change and water retention properties of yak meat during postmortem aging [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 343–351. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20191040&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.10.040. (in Chinese)
- [20] 李春, 张录达, 任发政, 等. 利用低场核磁共振研究冷却条件对猪肉保水性的影响 [J]. 农业工程学报, 2012, 28(23): 243–249.
LI Chun, ZHANG Luda, REN Fazheng, et al. Study on different chilling factors influencing water-holding capacity of pork based on low-field nuclear magnetic resonance (LF-NMR) [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(23): 243–249. (in Chinese)

[16] MINEA V. Drying heat pumps—Part II : agro-food, biological and wood products[J]. International Journal of Refrigeration, 2013, 36(3) :659 – 673.

[17] MOHAMMADI I, TABATABAEKOLOOR R, MOTEVALI A. Effect of air recirculation and heat pump on mass transfer and energy parameters in drying of kiwifruit slices[J]. Energy, 2018,170(9) :149 – 158.

[18] WANG D C, ZHANG G, HAN Y P, et al. Feasibility analysis of heat pump dryer to dry hawthorn cake [J]. Energy Conversion & Management, 2011, 51(8) :2919 – 2924.

[19] 陈明,龚丽,赵锡和,等. 热泵干燥机干燥稻谷的试验研究[J]. 现代农业装备,2004,25(4) :62 – 64.
CHEN Ming, GONG Li, ZHAO Xihe, et al. Experimental research on drying rice with heat pump dryer [J]. Modern Agricultural Equipment,2004,25(4) :62 – 64. (in Chinese)

[20] 李伟钊,盛伟,张振涛,等. 热管联合多级串联热泵玉米干燥系统性能试验[J]. 农业工程学报,2018,34(4) :278 – 284.
LI Weizhao, SHENG Wei, ZHANG Zhentao, et al. Experiment on performance of corn drying system with combination of heat pipe and multi-stage series[J]. Transactions of the CSAE,2018,34(4) :278 – 284. (in Chinese)

[21] 倪超,李娟玲,丁为民,等. 全封闭热泵干燥装置监控系统的设计与试验[J]. 农业工程学报,2010,26(10) :134 – 139.
NI Chao, LI Juanling, DING Weimin, et al. Design and experiment of monitoring system for heat pump dryer of enclosed cycles[J]. Transactions of the CSAE,2010,26(10) :134 – 139. (in Chinese)

[22] 陈浩,刘振全,王汉芝,等. 台达 PLC 编程技术及应用案例[M]. 北京:化学工业出版社,2014.

[23] 李世超,曹如月,季宇寒,等. 基于不同电机的拖拉机自动导航转向控制系统性能对比[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(增刊) :40 – 49.
LI Shichao, CAO Ruyue, JI Yuhan, et al. Performance analysis and comparison of different types of steering wheel turning control motors in automatic navigation system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(Supp.) :40 – 49. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2019s007&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.S0.007. (in Chinese)

[24] 欧阳玉平,孙晗,洪添胜,等. 果园运输机钢丝绳损伤试验平台设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(7) :118 – 128.
OUYANG Yuping, SUN Han, HONG Tiansheng, et al. Design and test of wire rope damage test platform for orchard transporter [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(7) :118 – 128. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20200714&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.07.014. (in Chinese)

[25] 张刚,胡洋洋,韩祥兰,等. 淡水珍珠蚌循环水养殖模式下分布式水质监控系统设计[J]. 农业工程学报,2020,36(7) :239 – 247.
ZHANG Gang, HU Yangyang, HAN Xianglan, et al. Design of distributed water quality monitoring system under circulating water aquaculture mode of freshwater pearl mussels[J]. Transactions of the CSAE,2020,36(7) :239 – 247. (in Chinese)

[26] 章祥炜. 触摸屏应用技术从入门到精通[M]. 北京:化学工业出版社,2017.

[27] 於海明,刘浩鲁,张正伟,等. 基于喷气增焓技术的谷物干燥机热泵装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(5) :363 – 369.
YU Haiming, LIU Haolu, ZHANG Zhengwei, et al. Design and test of grain dryer heat pump based on vapor injection technology[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(5) :363 – 369. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20200540&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.05.040. (in Chinese)

[28] GB/T 16714—2007 连续式粮食干燥机[S]. 2007.

(上接第 357 页)

[21] LI X, WEI X, WANG H, et al. Relationship between protein denaturation and water holding capacity of pork during postmortem ageing [J]. Food Biophysics, 2018, 13(1) : 18 – 24.

[22] 马莹,杨菊梅,王松磊,等. 基于 LF-NMR 及成像技术分析牛肉贮藏水分含量变化 [J]. 食品工业科技, 2018, 39(2) : 278 – 284.
MA Ying, YANG Jumei, WANG Songlei, et al. Analysis of water content in beef storage by LF-NMR and imaging technique [J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(2) : 278 – 284. (in Chinese)

[23] BERTRAM H C, SCHAFFER 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.

[24] KRISTENSEN L, PURSLOW P P. The effect of ageing on the water-holding capacity of pork; role of cytoskeletal proteins [J]. Meat Science, 2001, 58(1) : 17 – 23.

[25] FAROUK M M, MUSTAFA N M, WU G, et al. The “sponge effect” hypothesis: an alternative explanation of the improvement in the waterholding capacity of meat with ageing [J]. Meat Science, 2012, 90(3) : 670 – 677.

[26] WARNER R D, GREENWOOD P L, PETHICK D W, et al. Genetic and environmental effects on meat quality [J]. Meat Science, 2010, 86(1) : 171 – 183.

[27] WARNER R D. The eating quality of meat—IV water-holding capacity and juiciness [M] // TOLDRÁ F. Lawrie’s meat science. 8th edition. Sawston: Woodhead Publishing, 2017: 419 – 459.

[28] HUGHES J M, OISETH S K, PURSLOW P P, et al. A structural approach to understanding the interactions between colour, water-holding capacity and tenderness [J]. Meat Science, 2014, 98(3) : 520 – 532.