

宰后肌肉嫩度检测技术研究进展

狄雨晗, 廖博群, 李加慧, 张雅玮*
(南京农业大学食品科学技术学院, 江苏 南京 210095)

摘要: 嫩度作为评价肉品品质的重要指标之一, 影响消费者对于肉制品的购买选择。对宰后肉品的组成结构、蛋白特性进行检测, 可以准确判定肉品嫩化程度。本文就宰后成熟过程中各类肌肉蛋白质的变化及其嫩化作用、现有检测技术及相关机理进行综述, 讨论目前技术存在的局限性, 为研发新型嫩度检测技术提供理论参考。

关键词: 肌肉蛋白质; 检测技术; 肉的嫩度; 肉品质; 宰后嫩化

Advances in Techniques for Testing Postmortem Muscle Tenderness

DI Yuhan, LIAO Boqun, LI Jiahui, ZHANG Yawei*
(College of Food Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: Tenderness is one of the most important indicators of meat quality and influences consumers' choice of meat products. Meat tenderness can be determined accurately by testing the composition, structure and protein characteristics of postmortem meat. This paper presents a review of the changes in various muscle proteins during postmortem aging, their roles in meat tenderization, the existing detection techniques for meat tenderness and the related mechanisms, and discusses the limitations of the current techniques. It is hoped that this review will provide a theoretical reference for the development of new tenderness detection techniques.

Keywords: muscle proteins; detection techniques; meat tenderness; meat quality; postmortem tenderization

DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20230509-041

中图分类号: TS251.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-8123 (2023) 07-0052-08

引文格式:

狄雨晗, 廖博群, 李加慧, 等. 宰后肌肉嫩度检测技术研究进展[J]. 肉类研究, 2023, 37(7): 52-59. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20230509-041. <http://www.rlyj.net.cn>

DI Yuhan, LIAO Boqun, LI Jiahui, et al. Advances in techniques for testing postmortem muscle tenderness[J]. Meat Research, 2023, 37(7): 52-59. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20230509-041. <http://www.rlyj.net.cn>

肉品的食用品质可以通过感官评定和客观测定的方法进行评价, 通过检测肉品嫩度、风味、色泽和多汁性等指标, 反映肉品食用价值^[1]。嫩度作为评价肉质优劣及优质畜禽肉选种的重要指标, 展现了肌肉组织的机械强度, 包括蛋白质的结构特性、脂肪的数量及分布等^[2-4]。研究影响嫩度的关键因子、检测技术以及提高肉品嫩度是国内外肉品加工科学的研究热点之一。

肉品嫩度受到宰前因素和宰后因素的共同影响, 宰前因素包括畜禽品种、年龄、性别、饲养条件及宰前状况等; 动物宰后处理过程中的影响因素包括排酸时间、贮藏温度、嫩化技术及烹调方式等^[5-8]。肉品在宰后成熟

的过程中会发生一系列复杂的生化反应, 肉的嫩化是钙激活酶、细胞凋亡酶、过氧化物还原酶等多种内源酶共同调控的结果^[9-12], 多种酶的共同作用使得肌原纤维蛋白发生降解, 网状结构消失^[13]。因此, 深入研究宰后肌肉蛋白质的变化是理解肉品嫩化机制的关键。

借助现代仪器对肌肉的物理、生化和组织结构进行检测, 能够客观、量化地评定肉品嫩度^[14]。常见的嫩度测定方法包括剪切力法、光谱分析、质地剖面分析(texture profile analysis, TPA)等, 这些传统检测方法也存在一定局限性。例如, 剪切力法是最早、最常用的机械测定方法^[1], 但也存在难以区分不同处理组间肌肉嫩

收稿日期: 2023-05-09

基金项目: 江苏现代农业产业单项技术开发项目(CX(22)3071)

第一作者简介: 狄雨晗(2002—)(ORCID: 0009-0003-3342-3392), 女, 本科生, 研究方向为肉品加工与质量控制。

E-mail: 1533027262@qq.com

*通信作者简介: 张雅玮(1986—)(ORCID: 0000-0001-7353-7771), 女, 副教授, 博士, 研究方向为肉品加工与质量控制。

E-mail: zhangyawei@njau.edu.cn

度差异的问题^[15-17]。关于宰后肉品嫩度的检测技术很多，综合国内外学者的相关研究，本文就有关反映肌肉蛋白质变化的嫩度检测技术及其原理等方面进行综述，为改进和开发肉品嫩度检测技术提供思路。

1 宰后成熟过程中肌肉蛋白质的变化对嫩度的影响

1.1 肉的嫩度

畜禽宰后会由僵直、解僵到成熟一系列复杂的生理生化反应过程，肌肉组织的生化条件会发生较大转变。宰后早期肉品逐步进入僵直阶段，肌纤维收缩导致肌节长度明显减小，肌球蛋白和肌动蛋白交联导致硬度明显增大^[18-19]，嫩度降低。僵直持续时间受到三磷酸腺苷（ATP）、糖原储备等因素的影响^[20]，在僵直结束时肉品达到极限pH值，肉品嫩度最小，口感最差。随着肌肉解僵进入成熟期，维持肌原纤维完整性的关键蛋白质，如肌联蛋白、伴肌动蛋白等被钙蛋白酶降解^[21]，肌肉超微结构受到破坏，大部分Z线断裂，M线和I带消失^[22]，H区模糊难辨，肌原纤维小片化程度增加，肉品持水能力和嫩度增加。针对肉品成熟机制，有学者提出四大成熟理论：钙蛋白酶理论、溶酶体组织蛋白酶理论、细胞凋亡酶理论和蛋白酶体理论，其中钙蛋白酶理论在大量研究中得到了更多学者的认可，钙蛋白酶也被认为在降解宰后肌肉蛋白质的过程中起到主导作用^[23-24]。

1.2 肌肉蛋白质的嫩化作用

骨骼肌由肌纤维、结缔组织、肌内脂肪细胞、血管和神经组织组成^[25]，其中水约占75%，蛋白质约占19%^[26]。肌肉中的蛋白质主要分为三大类：肌原纤维蛋白、结缔组织蛋白和肌浆蛋白。肌原纤维蛋白占总蛋白含量的一半以上，是影响肉品品质的重要因素之一；结缔组织蛋白在肌肉中起到结构支撑作用，因此对肉品嫩度也有较大影响。

肌纤维作为骨骼肌结构的组成单位，是成束排列的多核条带状细胞。大量研究表明，肌纤维特性与肉品嫩度密切相关^[27-29]，肌纤维类型（I型和II型）及其完整性、肌纤维蛋白的降解、肌纤维直径、肌节长度和收缩状态等都会影响嫩度。肌原纤维占肌纤维含量的65%左右，每条肌原纤维由许多平行排列的肌球蛋白粗丝和肌动蛋白细丝构成。目前研究表明，在肉品成熟过程中，肌原纤维的关键蛋白质水解是肉品嫩化的主要原因，这些关键蛋白质在维持肌原纤维结构中起到重要作用，例如，肌间线蛋白参与肌原纤维间的连接，肌联蛋白和伴肌动蛋白参与肌原纤维内的连接等^[23,30]。通过电子显微镜观察肉品的超微结构，如肌原纤维的排列情况、肌原纤维中肌节、A带、I带、Z线、H区的清晰程度，可以判断肉品成熟程度。

肌肉中的结缔组织以肌外膜、肌束膜和肌内膜的结构形式存在，在维持肌肉结构完整性方面起到关键作

用^[31-32]。结缔组织蛋白包括胶原蛋白、弹性蛋白、网状蛋白和糖蛋白，结缔组织中还含有少量起到连接作用的蛋白多糖^[33-34]。胶原蛋白作为结缔组织的主要组成成分，其含量、热溶解性、蛋白交联程度等均会对肉品嫩度产生影响^[35]，牛肉嫩度与胶原蛋白含量和交联程度呈负相关^[36-37]，而与胶原蛋白热溶解性呈正相关^[38]。

宰后成熟过程中，早期肌原纤维蛋白发生降解，肌原纤维结构弱化，肉品处于快速嫩化阶段；成熟阶段后期肉品处于慢速嫩化阶段，肌束膜和肌内膜组织结构破坏，结缔组织结构发生弱化^[39-40]。肌浆蛋白中包括大多数与糖酵解有关的酶，如丙酮酸激酶、磷酸丙糖异构酶等，这些蛋白的磷酸化水平与肌肉嫩度密切相关^[41]，磷酸化水平越高越不利于肉的嫩化。Carlson等^[42]研究发现，过氧化物还原酶2等应激反应蛋白在氧化应激中的含量变化也可能对猪肉嫩度产生影响，应激反应蛋白含量升高会导致肉嫩度的降低。

2 肉嫩度检测技术

嫩度能够反映肉的质地，以及肉在食用时的口感^[43]，是肉品质评价的重要指标之一。肌原纤维的结构和状态会导致嫩度的差异，肌内结缔组织的含量和性质决定了肉的硬度^[1]，因此针对肌内蛋白质对肉品的嫩化作用，可以从观察质构、持水性等肉品品质变化、组成结构以及肌肉蛋白特性的角度进行研究（图1），开发肉嫩度的检测方法。下文选取了部分具有代表性的用于嫩度测定的常用检测技术，并对其基本原理和应用进行描述。

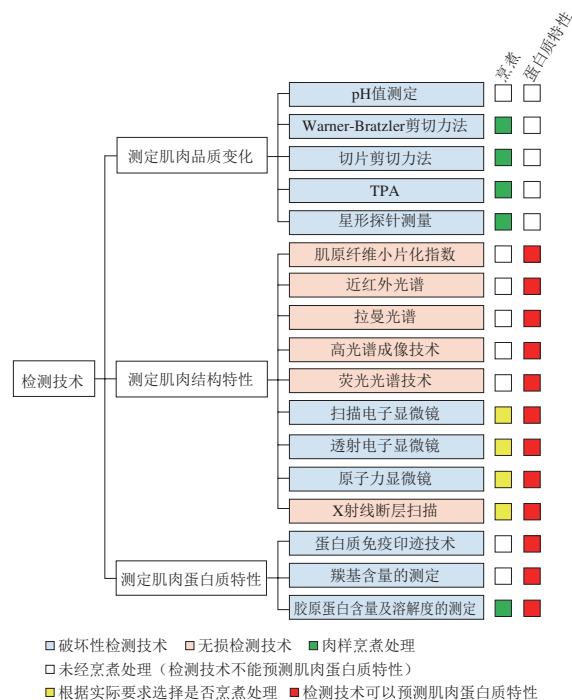


图1 嫩度破坏性和无损检测技术

Fig. 1 Destructive and non-destructive techniques for tenderness testing

2.1 测定肌肉品质变化

2.1.1 pH值测定

pH值常用作评价肉品质的重要指标之一,其能够直接影响肉的风味、嫩度、持水性等品质^[44]。宰后早期肌肉细胞通过糖酵解途径产生乳酸,ATP水解产生磷酸,引起pH值下降^[45]。pH值变化的程度和速率会影响嫩度、持水力等肉品质^[46],pH值的降低会导致肌原纤维收缩,钙蛋白酶活性降低,影响蛋白质的降解程度,从而影响肉品嫩度^[47]。在宰后成熟过程中,肉品pH值会随着贮藏时间的延长先快速降低到极限pH值,再缓步上升达到稳定状态,整体仍呈现下降趋势。由于畜禽种类、测量部位、屠宰条件的不同会导致蛋白水解、能量代谢等情况的差异,因此同一宰后时间肉品的pH值也会存在一定差异,但总体趋势不会发生变化^[48]。

pH值的测定通常使用pH检测仪,在经4℃校准液校准后,将电极沿肌原纤维方向插入样品内部或加入缓冲液将样品匀浆,平行重复测定,记录最终数值^[49-50]。在测定过程中,由于宰后早期pH值下降较快,应当注意时间的把控,避免检测时间过长导致数据误差过大,以牛肉为例,一般牛肉的检测时间为0、6、12、24、48、72、120 h。

近年来,研究学者通过检测宰后肉品pH值的变化,分析肌肉中能量代谢过程中的关键因子。Schulte等^[51]指出,钙蛋白酶-1自溶和肌间线蛋白降解越多,到达极限pH值的速度越快。糖酵解速率的升高将加速pH值下降速率。Wang Chengcheng等^[52]通过动力学研究模型,发现磷酸果糖激酶将加速宰后猪肉pH值的降低速率。

2.1.2 剪切力法

最常用的剪切力测定仪器为Warner-Bratzler剪切仪,用于测量切割一定厚度的肉柱所需力的大小^[1]。常见的剪切力测定方法还有切片剪切力法等。最早的肉类剪切力测定标准由美国肉类科学协会制定^[53]。剪切仪的使用是在样品中插入热电偶温度计,水浴加热至肉样中心温度为70~72℃时取出,流水冷却或自然冷却至室温后平行于肌原纤维方向取肉柱,再用剪切力测试仪沿肌纤维垂直方向进行剪切,记录峰值,重复测量取均值^[54]。切割速度及V型切割刀片的夹角大小会影响剪切力^[55],为了提高实验的重复性和准确性,每组至少取6个直径相同的肉柱进行检测^[56]。不过剪切力法仍会受到肌肉类型、烹饪方式、设备差异等干扰因素的影响,造成一定的误差^[57]。

剪切力和肉嫩度呈负相关,随着宰后时间的延长,剪切力整体上呈先增大后减小的趋势,其下降幅度大于上升幅度^[58]。宰后成熟过程中,在内源性蛋白酶系统和微生物的作用下,肌肉中的肌原纤维蛋白发生降解,剪切力下降。肉的嫩度可直观表现为肉品在咀嚼

时牙齿所用力的大小,Warner-Bratzler剪切力(Warner-Bratzler shear force, WBSF)是最常用的将肉品嫩度进行量化的检测方法^[59]。将WBSF与感官评价方法结合是目前研究的热点,通过可量化数据与感官评分进行比较分析可以确定肉品可接受嫩度的阈值^[60]。Silva等^[61]研究发现,用方形横截面芯的WBSF测量方法在检测肉品嫩度中的效果较使用圆形横截面芯的Warner-Bratzler剪切仪更好,表明剪切仪的特性也会影响嫩度的检测效果,这也为进一步改进嫩度检测仪器与检测方法提供了一定的方向和思路。

2.1.3 TPA

TPA广泛应用于各类食品的质构分析,包括果蔬制品、面制品、肉制品等。通过模仿咀嚼过程,能够客观反映食品硬度、黏性、内聚性、弹性、咀嚼性和回复性等质构指标^[62],能够较为全面衡量肉的质地特性。实验方法参照NY/T 1180—2006《肉嫩度的测定 剪切力测定法》^[62],用质构仪进行测定即可。魏直升等^[63]通过研究不同部位牛肉在宰后成熟过程中的品质特性,发现宰后成熟能够改善肉的质构,且由于测量部位、肉品成熟时间等因素的不同,肌纤维类型及肌纤维蛋白的降解模式存在差异,对质构特性结果存在一定影响。

TPA是常见的用于食品质地评估的方式,de Huidobro等^[64]在研究中发现,TPA与WBSF相比,能够更好地预测感官特性中的硬度。TPA和WBSF作为2种公认有效的食品机械评估方式,TPA能够模拟食物在口腔咀嚼时的变化,WBSF能够模拟最佳的切割效果。目前越来越多的研究关注于仪器测定指标(TPA和WBSF)与感官评定测定数据间的相关性分析,TPA能够提供更全面的量化参数进行嫩度预测,且TPA的成本和耗时相较于感官评定更低。不过基于食品机械属性的食品质地评估也存在一定的局限性,由于受到主观因素的影响,TPA所测量参数不能完全代表食物在口腔中的真实口感,测量结果也会受到材料机械性能的影响^[65-66]。

2.2 测定肌肉结构特性

2.2.1 光谱检测技术

常用于食品分析的光谱检测技术包括近红外光谱(near infrared spectroscopy, NIRS)、拉曼光谱、高光谱成像技术、荧光光谱技术等。光谱检测技术可以深入了解食品的组成结构、分子间相互作用及各向异性。NIRS分析广泛应用于肉嫩度检测中,其根据吸收峰在光谱中的位置和强度进行定性和定量分析,可以测得肌肉的基本成分,如水、蛋白质、脂肪、灰分和结缔组织含量。

近年来,研究人员将NIRS在肉类研究中的应用进行扩展,不仅用于肉品成分分析,还通过建立预测模型预测肉品质量。de Nadai Bonin等^[67]通过偏最小二乘回归模型成功预测剪切力和嫩度;Tejerina等^[68]利用NIRS进行肉

质分级，其设计的近红外定量预测模型在肉品色度和色相角中表现出良好的预测效果；Balage等^[69]通过可见光/NIRS (Vis/NIRS) 技术预测猪肉样品的最终pH值和颜色等品质指标。一些研究报告也指出，NIRS在预测肉的质量性状方面仍存在一定的缺陷，Balage等^[69]研究发现，Vis/NIRS在定量预测猪肉肌肉脂肪方面效果较差，WBSF预测的准确性较低。目前近红外检测技术在肉品品质检测方面仍存在一定的局限性，需要进一步的研究来建立更加精准的预测模型。

2.2.2 肌原纤维小片化指数 (myofibril fragmentation index, MFI)

MFI是评估肌肉肌原纤维超微结构变化的关键指标，可直接反映肌原纤维的降解程度，并间接反映受肌原纤维蛋白降解影响的新鲜肉嫩度。通常情况下，MFI越高，表明肌原纤维结构破坏程度越高，肉品的嫩度越好。MFI的检测步骤较为复杂，耗时较长，需要精确称取样品（少量），进行2次离心，控制实验温度，在得到肌原纤维蛋白悬浊液后采用考马斯亮蓝法或双缩脲法测定溶液的蛋白质量浓度，再经调整蛋白质量浓度后测定吸光度^[49]。除肉样自身因素外，MFI也会受到匀浆速率、刀片类型等其他均质条件的影响^[67]。MFI一般在540 nm波长处进行吸光度测定^[70-71]。肉品在宰后成熟过程中，MFI持续升高，表明其Z线蛋白发生降解，肌原纤维细胞凋亡，嫩度升高。

MFI是测定宰后早期肉嫩度的有效工具，研究学者发现，其与WBSF之间存在显著的正相关性 ($P < 1.8$)^[72]。Aroeira等^[73]研究发现，肌原纤维的碎裂程度还可以通过WBSF、MFI等不同方法来进行检测，目前大部分学者将MFI作为肉嫩度的检测指标之一。在未来的研究中，可以对MFI与嫩化相关的蛋白质表达量进行相关性分析，筛选出影响MFI的关键蛋白质，研究其在蛋白质降解和细胞凋亡中发挥的作用，对于几种关键蛋白间的协同作用也可进行进一步的研究。

2.2.3 成像技术

肉中蛋白质、脂肪的分布会直接影响肉品嫩度。宰后成熟期间，肌肉蛋白质的降解会导致肌纤维结构发生改变，成像技术能够直接观察肌肉纤维微观结构以及肌肉蛋白质的变化。目前常见的成像技术包括透射电子显微镜 (transmission electron microscopy, TEM)、扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM)、原子力显微镜、X射线断层扫描等，这些技术能够快速、直观地得到不同长度尺度的图像，但与NIRS等光谱技术相比，这些成像技术的缺陷是需要制备大量样品且通常对样品具有一定的破坏性^[57]。

SEM可以揭示肉类结构中过程相关的变化，SEM在明场不同视线下拍取样品图像，用图像处理软件测定

肌原纤维直径 (myofibril diameter, MYD)、肌原纤维间距 (myofibril spacing, MYS)、肌纤维直径 (muscle fibre diameter, MFD)、肌纤维间距 (muscle fibre spacing, MFS)、肌节长度 (sarcomere length, SL) 等指标^[74]，观察肌肉表面结构变化、肌纤维分离以及收缩和舒张状态等情况。当纤维束结构变得松散，肌纤维间密度降低时，会引起肌肉硬度和剪切力下降，肉品持水性部分降低，蒸煮损失率增加，肉品嫩度增加^[75]。Nishimura等^[76]通过SEM观察肌肉内结缔组织 (intramuscular connective tissue, IMCT) 结构的变化，证实IMCT的降解有助于猪肉在宰后成熟期间嫩度的提高。Soji等^[77]将测得的MYD、MYS、MFD、MFS、SL与WBSF进行相关性分析，确定肌纤维束特征对提高肉嫩度具有正向作用。

TEM能够提供有关肉类内部结构的信息，通过TEM能够观察到由肌原纤维蛋白降解引起的肌原纤维中Z盘和M线的超微结构变化，观察肌原纤维排列，肌原纤维中肌节、A带、I带、Z线、M线的长度、宽度及清晰程度。在宰后成熟过程中，肌原纤维结构受损严重，大部分Z线扭曲断裂，H区模糊难辨，明暗带边界消失。当Z线明显断裂、肌节长度缩小时，肌肉发生自溶^[78]。

SEM和TEM作为研发早、使用广泛的成像技术，揭示了肉品微观结构中的重要信息。近年来，研究者通过将激光、红外光谱等技术与显微镜进行结合开发了适用范围更广、精确度更高的成像技术。例如，朱瑶迪等^[79]基于高光谱成像和激光共聚焦显微镜技术进行猪肉嫩度的快速测定；环境扫描电子显微镜能够减少溶液对显示图像的影响，应用于观察各类肌肉的微观结构^[80]。

用于肉嫩度测定的光学传感技术如表1所示。

表1 用于肉嫩度测定的光学传感技术

Table 1 Optical sensing techniques used for meat tenderness testing

光学传感技术	技术参数	优点	缺点	参考文献
NIRS	成分测定、嫩度、持水能力、色度、pH值	快速、多参数分析、处理简单、成本较低、环境友好	校准和预测性能不足	[81]
拉曼光谱	组成结构、嫩度、多汁性、咀嚼性、微生物鉴定	实时检测、操作简单、快速准确、干扰小	重现性和选择性较差，价格昂贵	[82]
高光谱成像	组成结构、纹理特征、嫩度、色度	结合光谱学和计算机视觉，具有快速、无损、非接触的优势	需进一步改进算法，提高评估预测水平	[83]
荧光光谱	结构组织、蛋白和脂质含量、新鲜度、热变化	高选择性、高灵敏度、快速无损检测	稳定性和准确性易受多个参数影响	[84]
SEM	微观组织结构及其变化	制样简单、不同处理条件下可以进行动态观察	大量样品制备、存在成像伪影	[57]
TEM	超微结构分析、样品形貌及分布	高分辨率、高放大倍数	样品制备要求高、样品数量多	[57]
原子力显微镜	表面表征、机械性能、分子结构	高分辨率、制样简单、不受环境限制、提供三维表面轮廓	成像速度慢、动态观察以及原位实时成像受限、操作及分析复杂	[85]
X射线断层扫描	微观结构表征、硬度、嫩度、胴体成分、肉质性状	高分辨率、无损检测、可视化、无需样品制备	图像采集处理耗时长、存在成像伪影、主观因素影响分析结果	[86]

2.3 测定肌肉蛋白质特性

2.3.1 免疫印迹技术 (Western blotting, WB)

肌肉宰后成熟过程中肌纤维蛋白和结缔组织蛋白发生降解, 其中肌钙蛋白-T和肌间线蛋白是导致肌肉成熟过程中嫩度变化最关键的蛋白质^[87]。通过免疫印迹技术检测关键蛋白的降解程度差异可以判断肉的嫩化进程, 从而确定肉的嫩度。WB是检测蛋白质和蛋白质翻译后修饰的常用方法, 将十二烷基硫酸钠聚丙烯酰胺凝胶电泳 (sodium dodecylsulphate polyacrylamide gel electrophoresis, SDS-PAGE) 和酶联免疫技术结合, 可以在简单或复杂的生物样本中对相关目的蛋白进行半定量或定量分析检测^[88-89]。

WB作为一门新兴的肉嫩度检测手段, 在蛋白质组学研究中得到广泛应用。Onopiuk等^[71]使用SDS-PAGE和WB评估牛肉pH值、肌节长度、MFI、WBSF等数据, 并观测到MFI与WBSF和肌钙蛋白T降解值密切相关。孙金龙等^[90]通过聚丙烯酰胺变性凝胶电泳和免疫印迹分析方法检测到宰后肉品成熟过程中热休克蛋白对肌原纤维降解的抑制作用。WB具有高分辨率、高敏感性和特异性的特点, 能够同时对不同蛋白质进行定性和定量比较, 也可用于微量级蛋白质的检测分析。但该技术涉及一系列复杂且连续的操作步骤, 需要先通过SDS-PAGE将蛋白质进行分离, 电泳后将分离的蛋白质转移到固相载体 (聚偏氟乙烯膜或硝酸纤维素膜) 上, 再使用抗体进行分析, 以进行特异性蛋白质检测^[91]。实验结果会受到实验设计及操作精度的影响, 包括样品上样量、样品分级分离等因素, 因此如何提升检测结果的精密度和重现性也是该研究领域持续关注的问题^[92]。Murphy等^[93]提出, 少量上样可以更好地检测低表达量蛋白, 使蛋白质印迹结果更加可靠。

2.3.2 羰基含量的测定

在宰后肉类贮藏和加工过程中常会发生蛋白质氧化, 研究表明, 蛋白质的氧化作用是影响肉嫩度的重要因素之一^[94]。蛋白质的氧化损伤会使氨基酸残基中衍生出羰基化合物, 而羰基化通常被认为是氧化蛋白质中最显著的化学修饰之一^[95], 因此羰基含量也常被作为评估蛋白质氧化和鉴定蛋白质嫩化作用的可靠指标。

随着宰后贮藏时间的延长, 肌肉中羰基含量呈整体上升趋势。肌肉中蛋白质的氧化作用对肉嫩度的影响是复杂的。Chen Qianqian等^[96]研究发现, 蛋白质氧化可以通过抑制蛋白水解酶 (特别是 μ -钙蛋白酶) 的活性来降低肌原纤维蛋白的降解程度, 不利于肉的嫩化。然而, Malheiros等^[94]研究发现, 活性氧的产生可能导致肌原纤维蛋白的损伤并激活蛋白酶体, 可能有助于结构蛋白的降解, 从而提高肉嫩度。Lei Yongdong等^[97]通过观察氧化作用对不同肌原纤维蛋白降解的影响, 发现随着氧化程度的增加, 肌动蛋白降解程度增加, 肌钙蛋白-T和肌间线蛋白的降解受到抑制。因此, 目前从蛋白组学角度证

明不同类别蛋白质的氧化修饰作用对肌肉嫩度的影响尚未达成共识, 仍有待进一步研究。

2.3.3 胶原蛋白含量及溶解度测定

胶原蛋白是结缔组织的重要组成部分, 胶原蛋白的含量及溶解度会影响肉的质构, 从而影响肉品嫩度, 因此测定胶原蛋白含量及其溶解度对于检测肉品嫩度、判断嫩度影响因素具有重要作用。胶原蛋白中的羟脯氨酸含量相对稳定, 占总蛋白质的13%~14%, 因此生肉样品中总胶原蛋白含量可以通过羟脯氨酸含量进行确定。生肉中的胶原蛋白含量受性别和动物年龄等因素的影响, 胶原蛋白溶解度受性别、品种和动物年龄等因素的影响^[98]。胶原蛋白溶解度可以通过测量肉品中总胶原蛋白和可溶性胶原蛋白的含量来获得^[99]。

肌内结缔组织中蛋白质在肉嫩化中发挥的作用一直是许多研究的重点。目前Li Xiyang等^[100]通过荟萃分析建立统计学模型, 确定胶原蛋白含量及溶解度对嫩度的影响, 研究发现, 胶原蛋白特性与肉嫩度的关系受到物种因素的影响, 仅在牛肉中可以观察到其胶原蛋白特性与嫩度的显著相关性, 在猪肉和羊肉中胶原蛋白特性与嫩度属性之间的相关性不显著。Torrescano等^[101]对肌肉剪切力及胶原蛋白特性的关系进行研究, 指出胶原蛋白总量和剪切力的相关性受到肉状态的影响, 二者在生肉中呈现很强的正相关性, 在熟肉中相关性较低。Zheng Yanyan等^[102]对不同类型胶原蛋白的热诱导效应进行评估, 发现I型胶原蛋白的降解是熟猪肚质构改善的主要原因, 可能对肌肉嫩度产生影响。在肉的蒸煮过程中, 研究者也通过提高烹饪温度、延长加热时间、真空低温烹调等方法改变胶原蛋白溶解程度和结缔组织强度, 以提高肉品食用品质, 改善肉嫩度^[103-104]。

3 结 语

嫩度作为评价肉品食用品质的重要指标之一, 会影响消费者的选择。在宰后成熟过程中, 肌肉蛋白质的一系列变化会对肉的结构及品质产生较大影响。嫩度可以通过感官评定和仪器分析的方式进行检测, 在研究中将感官评定和仪器分析相结合进行相关性分析可以使检测结果更加全面、客观。在进行嫩度测定时, 使用多样化的检测技术, 如质构测定、NIRS分析、免疫印迹技术等, 对肌肉的品质变化、组成结构及蛋白质特性进行分析, 能够找到影响肉嫩度的关键因素并进行肉质判定。不过目前现有检测技术也存在一定的局限性, 如操作复杂、可重复性低、破坏性检测等。因此, 有必要在现有嫩度检测技术的基础上进行改进完善, 开发新型肉品嫩度无损检测技术, 并结合数学模型及统计学模型进行分析, 实现智能化、精确化检测。



参考文献:

- [1] 周光宏, 李春保, 徐幸莲. 肉类食品品质评价方法研究进展[J]. 中国科技论文在线, 2007(2): 75-82.
- [2] 丁武, 寇莉萍, 张静, 等. 质构仪穿透法测定肉制品嫩度的研究[J]. 农业工程学报, 2005(10): 138-141.
- [3] 崔薇, 邱燕, 陈韬. 宰后肌肉蛋白质变化与嫩度的关系[J]. 肉类研究, 2009, 23(4): 7-9.
- [4] 葛庆联, 章双杰, 吕晓娟, 等. 禽肉嫩度检测方法的探讨[J]. 中国家禽, 2007(14): 15-17. DOI:10.16372/j.issn.1004-6364.2007.14.001.
- [5] 时海波, 诸永志, 方芮, 等. 宰后肉品嫩化技术及其作用机理研究进展[J]. 食品科学, 2020, 41(23): 311-321. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20191106-075.
- [6] 张宏博. 宰前因素和宰后处理对商品猪生长发育、屠宰及胴体质量和猪肉品质影响的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2015: 39-80.
- [7] 曹宪福, 杨志成, 姜廷波, 等. 肌肉嫩度的影响因素分析[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2016(21): 60-63. DOI:10.13881/j.cnki.hljxmsy.2016.2085.
- [8] 王颂萍, 王雪羽, 杨欣悦, 等. 超声波技术嫩化机理及其在肉制品中应用效果的研究进展[J]. 食品工业科技, 2022, 43(9): 423-431. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2021040166.
- [9] 张坤, 王道营, 张淼, 等. 高强度超声对鹅胸肉嫩度及品质的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(15): 122-127. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201815018.
- [10] HUANG Feng, HUANG Ming, ZHOU Guanghong, et al. *In vitro* proteolysis of myofibrillar proteins from beef skeletal muscle by caspase-3 and caspase-6[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2011, 59(17): 9658-9663. DOI:10.1021/jf202129r.
- [11] 王新怡, 张一敏, 梁荣蓉, 等. 过氧化物氧化还原酶6调控肉品嫩度的研究进展[J]. 食品科学, 2021, 42(11): 236-243. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20200427-355.
- [12] HUANG Ming, HUANG Feng, MA Hanjun, et al. Preliminary study on the effect of caspase-6 and calpain inhibitors on postmortem proteolysis of myofibrillar proteins in chicken breast muscle[J]. Meat Science, 2012, 90(3): 536-542. DOI:10.1016/j.meatsci.2011.09.004.
- [13] KOOHMARAIE M, SEIDEMANN S C, SCHOLLMEYER J E, et al. Effect of post-mortem storage on Ca²⁺-dependent proteases, their inhibitor and myofibril fragmentation[J]. Meat Science, 1987, 19(3): 187-196. DOI:10.1016/0309-1740(87)90056-8.
- [14] SEIDEMANN S C. Methods of expressing collagen characteristics and their relationship to meat tenderness and muscle fiber types[J]. Journal of Food Science, 1986, 51(2): 273-276. DOI:10.1111/j.1365-2621.1986.tb11107.x.
- [15] KING D A, WHEELER T L, SHACKELFORD S D, et al. Comparison of palatability characteristics of beef *Gluteus medius* and *Triceps brachii* muscles[J]. Journal of Animal Science, 2009, 87(1): 275-284. DOI:10.2527/jas.2007-0809.
- [16] RHEE M S, WHEELER T L, SHACKELFORD S D, et al. Variation in palatability and biochemical traits within and among eleven beef muscles[J]. Journal of Animal Science, 2004, 82(2): 534-550.
- [17] SHACKELFORD S D, WHEELER T L, KOOHMARAIE M. Relationship between shear force and trained sensory panel tenderness ratings of 10 major muscles from *Bos indicus* and *Bos taurus* cattle[J]. Journal of Animal Science, 1995, 73(11): 3333-3340. DOI:10.2527/1995.7311333x.
- [18] WHEELER T L, KOOHMARAIE M. Prerigor and postrigor changes in tenderness of ovine *Longissimus* muscle[J]. Journal of Animal Science, 1994, 72(5): 1232-1238. DOI:10.2527/1994.7251232x.
- [19] ERTBJERG P, PUOLANNE E. Muscle structure, sarcomere length and influences on meat quality: a review[J]. Meat Science, 2017, 132: 139-152. DOI:10.1016/j.meatsci.2017.04.261.
- [20] JEACOCKE R E. The kinetics of rigor onset in beef muscle fibres[J]. Meat Science, 1984, 11(4): 237-251. DOI:10.1016/0309-1740(84)90055-X.
- [21] ILIAN M A, BEKHIT A E, BICKERSTAFFE R. The relationship between meat tenderization, myofibril fragmentation and autolysis of calpain 3 during post-mortem aging[J]. Meat Science, 2004, 66(2): 387-397. DOI:10.1016/S0309-1740(03)00125-6.
- [22] TANABE R, TATSUMI R, TAKAHASHI K. Purification and characterization of the 1 200 kDa subfragment of connectin filaments produced by 0.1 mmol/L calcium ions[J]. The Journal of Biochemistry, 1994, 115(2): 351-355. DOI:10.1093/oxfordjournals.jbchem.a124341.
- [23] KOOHMARAIE M, KENT M P, SHACKELFORD S D, et al. Meat tenderness and muscle growth: is there any relationship?[J]. Meat Science, 2002, 62(3): 345-352. DOI:10.1016/S0309-1740(02)00127-4.
- [24] BASSON A, STRYDOM P E, VAN MARLE-KÖSTER E, et al. Sustained effects of muscle calpain system genotypes on tenderness phenotypes of South African beef bulls during ageing up to 20 days[J]. Animals, 2022, 12(6): 686. DOI:10.3390/ani12060686.
- [25] JÄRVINEN T A H, JÄRVINEN T L N, KÄÄRIÄINEN M, et al. Muscle injuries: biology and treatment[J]. The American Journal of Sports Medicine, 2005, 33(5): 745-764. DOI:10.1177/0363546505274714.
- [26] LEFAUCHEUR L. A second look into fibre typing: relation to meat quality[J]. Meat Science, 2010, 84(2): 257-270. DOI:10.1016/j.meatsci.2009.05.004.
- [27] BROOKE M H, KAISER K K. Muscle fiber types: how many and what kind?[J]. Archives of Neurology, 1970, 23(4): 369-379. DOI:10.1001/archneur.1970.00480280083010.
- [28] 王勇峰, 丰永红, 万红兵, 等. 新疆褐牛不同部位牛肉肌纤维类型及品质差异研究[J]. 食品工业科技, 2018, 39(6): 19-24; 37. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2018.06.004.
- [29] OKITANI A, ICHINOSE N, ITOH J, et al. Liberation of actin from actomyosin in meats heated to 65 °C[J]. Meat Science, 2009, 81(3): 446-450. DOI:10.1016/j.meatsci.2008.09.008.
- [30] WATERMAN-STORER C M. The cytoskeleton of skeletal muscle: is it affected by exercise? A brief review[J]. Medicine and Science in Sports and Exercise, 1991, 23(11): 1240-1249.
- [31] 常海军, 徐幸莲, 周光宏. 肌肉结缔组织与肉嫩度关系研究[J]. 肉类研究, 2009, 23(7): 9-14.
- [32] 常海军, 王强, 徐幸莲, 等. 肌肉胶原蛋白与肉品质关系研究进展[J]. 食品科学, 2011, 32(1): 286-290.
- [33] 李春保. 牛肉肌肉结缔组织变化对其嫩度影响的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2006: 15-21.
- [34] WHEELER T L, SHACKELFORD S D, KOOHMARAIE M. Variation in proteolysis, sarcomere length, collagen content, and tenderness among major pork muscles[J]. Journal of Animal Science, 2000, 78(4): 958-965.
- [35] LEPETIT J. A theoretical approach of the relationships between collagen content, collagen cross-links and meat tenderness[J]. Meat Science, 2007, 76(1): 147-159. DOI:10.1016/j.meatsci.2006.10.027.
- [36] BURKE R M, MONAHAN F J. The tenderisation of shin beef using a citrus juice marinade[J]. Meat Science, 2003, 63(2): 161-168. DOI:10.1016/S0309-1740(02)00062-1.
- [37] CHANG Haijun, XU Xinglian, ZHOU Guanghong, et al. Effects of characteristics changes of collagen on meat physicochemical properties of beef *Semitendinosus* muscle during ultrasonic processing[J]. Food

- and Bioprocess Technology, 2012, 5(1): 285-297. DOI:10.1007/s11947-009-0269-9.
- [38] KIM H, CHOI Y, CHOI J, et al. Tenderization effect of soy sauce on beef *M. biceps femoris*[J]. Food Chemistry, 2013, 139(1): 597-603. DOI:10.1016/j.foodchem.2013.01.050.
- [39] NISHIMURA T, HATTORI A, TAKAHASHI K. Relationship between degradation of proteoglycans and weakening of the intramuscular connective tissue during post-mortem ageing of beef[J]. Meat Science, 1996, 42(3): 251-260. DOI:10.1016/0309-1740(95)00051-8.
- [40] NISHIMURA T, HATTORI A, TAKAHASHI K. Structural weakening of intramuscular connective tissue during conditioning of beef[J]. Meat Science, 1995, 39(1): 127-133. DOI:10.1016/0309-1740(95) 80014-X.
- [41] ANDERSON M J, LONERGAN S M, HUFF-LONERGAN E. Differences in phosphorylation of phosphoglucomutase 1 in beef steaks from the *Longissimus dorsi* with high or low star probe values[J]. Meat Science, 2014, 96(1): 379-384. DOI:10.1016/j.meatsci.2013.07.017.
- [42] CARLSON K B, PRUSA K J, FEDLER C A, et al. Proteomic features linked to tenderness of aged pork loins[J]. Journal of Animal Science, 2017, 95(6): 2533-2546. DOI:10.2527/jas.2016.1122.
- [43] 翟小波. 低脂兔肉灌肠加工工艺及品质变化研究[D]. 重庆: 西南大学, 2017: 23-38.
- [44] 李乔, 马纪兵, 余群力, 等. NO对宰后牛肉成熟过程中AMPK活性、糖酵解及持水力的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(12): 17-23. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20200425-327.
- [45] 郭雨轩, 陈骋, 师希雄, 等. 活性氧激活缺氧诱导因子-1 α 加速宰后成熟初期牛肉能量代谢[J]. 食品科学, 2023, 44(4): 9-16. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220407-072.
- [46] WANG Chengcheng, MATARNEH S K, GERRARD D, et al. Contributions of energy pathways to ATP production and pH variations in postmortem muscles[J]. Meat Science, 2022, 189: 108828. DOI:10.1016/j.meatsci.2022.108828.
- [47] DIESBOURG L, SWATLAND H J, MILLMAN B M. X-ray diffraction measurements of postmortem changes in the myofilament lattice of pork[J]. Journal of Animal Science, 1988, 66(4): 1048-1054.
- [48] 吴菊清, 李春保, 周光宏, 等. 宰后成熟过程中冷却牛肉、猪肉色泽和嫩度的变化[J]. 食品科学, 2008, 29(10): 136-139.
- [49] 罗辉, 杨波, 李亚蕾, 等. 宰后成熟期间能量物质、pH值和肌原纤维小片化指数对秦川牛肉嫩度的影响及其机理[J]. 食品科学, 2022, 43(11): 171-179. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20210526-318.
- [50] 扶庆权, 张万刚, 王海鸥, 等. 3种包装方式对宰后牛肉成熟过程中颜色影响的机制研究[J]. 食品科技, 2018, 43(7): 127-133. DOI:10.13684/j.cnki.spkj.2018.07.024.
- [51] SCHULTE M D, HOCHMUTH K G, STEADHAM E M, et al. Early postmortem muscle proteome and metabolome of beef *Longissimus thoracis* muscle classified by pH at 6 hours postmortem[J]. Journal of Proteomics, 2022, 271: 104756. DOI:10.1016/j.jprot.2022.104756.
- [52] WANG Chengcheng, MATARNEH S K, GERRARD D, et al. Modelling of energy metabolism and analysis of pH variations in postmortem muscle[J]. Meat Science, 2021, 182: 108634. DOI:10.1016/j.meatsci.2021.108634.
- [53] WHEELER T L, PAPADOPOULOS L S, MILLER R K. Research guidelines for cookery, sensory evaluation and instrumented tenderness measurements of fresh meat[M]. Chicago, IL: American Meat Science Association and National Live Stock and Meat Board, 1995.
- [54] ZUO Huixin, HAN Ling, YU Qunli, et al. Proteome changes on water-holding capacity of yak *Longissimus lumborum* during postmortem aging[J]. Meat Science, 2016, 121: 409-419. DOI:10.1016/j.meatsci.2016.07.010.
- [55] VAN OECKEL M J, WARNANTS N, BOUCQUÉ C V. Pork tenderness estimation by taste panel, Warner-Bratzler shear force and on-line methods[J]. Meat Science, 1999, 53(4): 259-267. DOI:10.1016/S0309-1740(99)00067-4.
- [56] LIU Rui, ZHANG Wangang. Chapter 4: Detection techniques of meat tenderness: state of the art[M]//BISWAS A K, MANDAL P K. Meat quality analysis. Salt Lake City: Academic Press, 2020: 53-65. DOI:10.1016/B978-0-12-819233-7.00004-5.
- [57] SCHREUDERS F K G, SCHLANGEN M, KYRIAKOPOULOU K, et al. Texture methods for evaluating meat and meat analogue structures: a review[J]. Food Control, 2021, 127: 108103. DOI:10.1016/j.foodcont.2021.108103.
- [58] 李乔, 马纪兵, 余群力, 等. NO-AMPK通路对牛肉宰后成熟过程中蛋白特性与肉品质的影响[J]. 核农学报, 2022, 36(7): 1413-1424. DOI:10.11869/j.issn.100-8551.2022.07.1413.
- [59] HOLMAN B W B, HOPKINS D L. The use of conventional laboratory-based methods to predict consumer acceptance of beef and sheep meat: a review[J]. Meat Science, 2021, 181: 108586. DOI:10.1016/j.meatsci.2021.108586.
- [60] HOLMAN B W B, COLLINS D, KILGANNON A K, et al. Using shear force, sarcomere length, particle size, collagen content, and protein solubility metrics to predict consumer acceptance of aged beef tenderness[J]. Journal of Texture Studies, 2020, 51(4): 559-566. DOI:10.1111/jtxs.12523.
- [61] SILVA D R G, DE MOURA A P R, RAMOS A L S, et al. Comparison of Warner-Bratzler shear force values between round and square cross-section cores for assessment of beef *Longissimus* tenderness[J]. Meat Science, 2017, 125: 102-105. DOI:10.1016/j.meatsci.2016.11.017.
- [62] 农业部畜禽产品质量监督检验测试中心, 北京国农工贸发展中心. 肉嫩度的测定 剪切力测定法: NY/T 1180—2006[S]. 北京: 中国农业出版社, 2006: 7-10.
- [63] 魏直升, 王勇峰, 余群力, 等. 新疆褐牛不同部位牛肉在成熟过程中的品质变化[J]. 食品工业科技, 2020, 41(2): 64-70. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2020.02.011.
- [64] DE HUIDOBRO F R, MIGUEL E, BLÁZQUEZ B, et al. A comparison between two methods (Warner-Bratzler and texture profile analysis) for testing either raw meat or cooked meat[J]. Meat Science, 2005, 69(3): 527-536. DOI:10.1016/j.meatsci.2004.09.008.
- [65] JONKERS N, VAN DOMMELEN J A W, GEERS M G D. Intrinsic mechanical properties of food in relation to texture parameters[J]. Mechanics of Time-Dependent Materials, 2022, 26(2): 323-346. DOI:10.1007/s11043-021-09490-4.
- [66] RUSTAGI S. Food texture and its perception, acceptance and evaluation[J]. Biosciences Biotechnology Research Asia, 2020, 17(3): 651-658. DOI:10.13005/bbra/2869.
- [67] DE NADAI BONIN M, DA LUZ E SILVA S, BÜNGER L, et al. Predicting the shear value and intramuscular fat in meat from Nelore cattle using Vis-NIR spectroscopy[J]. Meat Science, 2020, 163: 108077. DOI:10.1016/j.meatsci.2020.108077.
- [68] TEJERINA D, OLIVÁN M, GARCÍA-TORRES S, et al. Use of near-infrared spectroscopy to discriminate DFD beef and predict meat quality traits in autochthonous breeds[J]. Foods, 2022, 11(20): 3274. DOI:10.3390/foods11203274.
- [69] BALAGE J M, DA LUZ E SILVA S, GOMIDE C A, et al. Predicting pork quality using Vis/NIR spectroscopy[J]. Meat Science, 2015, 108: 37-43. DOI:10.1016/j.meatsci.2015.04.018.
- [70] HOPKINS D L, LITTLEFIELD P J, THOMPSON J M. A research note on factors affecting the determination of myofibrillar



- fragmentation[J]. Meat Science, 2000, 56(1): 19-22. DOI:10.1016/S0309-1740(00)00012-7.
- [71] ONOPIUK A, SZPICER A, POGORZELSKI G, et al. Analysis of the impact of exogenous preparations of cysteine proteases on tenderness of beef muscles *Semimembranosus* and *Longissimus thoracis et lumborum*[J]. Livestock Science, 2022, 258: 104866. DOI:10.1016/j.livsci.2022.104866.
- [72] RAJAGOPAL K, OOMMEN G T. Myofibril fragmentation index as an immediate postmortem predictor of Buffalo meat tenderness[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2015, 39(6): 1166-1171. DOI:10.1111/jfpp.12331.
- [73] AROEIRA C N, TORRES FILHO R A, FONTES P R, et al. Comparison of different methods for determining the extent of myofibrillar fragmentation of chilled and frozen/thawed beef across postmortem aging periods[J]. Meat Science, 2020, 160: 107955. DOI:10.1016/j.meatsci.2019.107955.
- [74] SOJI Z. Effect of the muscle nanostructure changes during post-mortem aging on tenderness of different beef breeds[J]. Asian-Australasian Journal of Animal Sciences, 2021, 34(11): 1849-1858. DOI:10.5713/ajas.20.0488.
- [75] 梁吉虹, 陈一萌, 侯娇, 等. Sous Vide加工方法对牦牛肉品质的影响[J]. 肉类研究, 2020, 34(3): 27-33. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20200113-008.
- [76] NISHIMURA T, FANG S, ITO T, et al. Structural weakening of intramuscular connective tissue during postmortem aging of pork[J]. Animal Science Journal, 2008, 79(6): 716-721. DOI:10.1111/j.1740-0929.2008.00585.x
- [77] SOJI Z, CHULAYO A Y. Beef tenderness evaluation using early post-mortem muscle nanostructure[J]. Asian-Australasian Journal of Animal Sciences, 2021, 00: 1-11. DOI:10.5713/ajas.20.0154.
- [78] 古扎努尔·艾斯卡尔, 巴吐尔·阿不力克木, 赵力男. 宰后不同成熟时间对马肉背最长肌超微结构的影响[J]. 肉类研究, 2020, 34(12): 7-10. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20201111-263.
- [79] 朱瑶迪, 申婷婷, 赵改名, 等. 基于高光谱图像和激光共聚焦显微镜技术快速测定猪肉嫩度[J]. 中国食品学报, 2017, 17(11): 239-244. DOI:10.16429/j.1009-7848.2017.11.031.
- [80] DURANTON F, SIMONIN H, CHÉRET R, et al. Effect of high pressure and salt on pork meat quality and microstructure[J]. Journal of Food Science, 2012, 77(8): E188-E194. DOI:10.1111/j.1750-3841.2012.02816.x.
- [81] PRIETO N, PAWLUCZYK O, DUGAN M E R, et al. A review of the principles and applications of near-infrared spectroscopy to characterize meat, fat, and meat products[J]. Applied Spectroscopy, 2017, 71(7): 1403-1426. DOI:10.1177/0003702817709299.
- [82] QU Cheng, LI Yuzhu, DU Shanshan, et al. Raman spectroscopy for rapid fingerprint analysis of meat quality and security: principles, progress and prospects[J]. Food Research International, 2022, 161: 111805. DOI:10.1016/j.foodres.2022.111805.
- [83] MA Ji, SUN Dawen, PU Hongbin, et al. Advanced techniques for hyperspectral imaging in the food industry: principles and recent applications[J]. Annual Review of Food Science and Technology, 2019, 10(1): 197-220. DOI:10.1146/annurev-food-032818-121155.
- [84] HASSOUN A, SAHAR A, LAKHAL L, et al. Fluorescence spectroscopy as a rapid and non-destructive method for monitoring quality and authenticity of fish and meat products: impact of different preservation conditions[J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 103: 279-292. DOI:10.1016/j.lwt.2019.01.021.
- [85] LI Mi, DANG Dan, LIU Lianqing, et al. Imaging and force recognition of single molecular behaviors using atomic force microscopy[J]. Sensors, 2017, 17(12): 200. DOI:10.3390/s17010200.
- [86] SCHOEMAN L, WILLIAMS P, DU PLESSIS A, et al. X-ray micro-computed tomography (μ CT) for non-destructive characterisation of food microstructure[J]. Trends in Food Science and Technology, 2016, 47: 10-24. DOI:10.1016/j.tifs.2015.10.016.
- [87] VEISETH-KENT E, PEDERSEN M E, RØNNING S B, et al. Can postmortem proteolysis explain tenderness differences in various bovine muscles?[J]. Meat Science, 2018, 137: 114-122. DOI:10.1016/j.meatsci.2017.11.011.
- [88] 章燕, 冯智田, 窦志勇, 等. 基于免疫学的微生物快速检测技术研究与应用现状[J]. 中国卫生监督杂志, 2020, 27(3): 253-256. DOI:10.3969/j.issn.1007-6131.2020.03.013.
- [89] TOWBIN H, STAHELIN T, GORDON J. Electrophoretic transfer of proteins from polyacrylamide gels to nitrocellulose sheets: procedure and some applications[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 1979, 76(9): 4350-4354. DOI:10.1073/pnas.76.9.4350.
- [90] 孙金龙, 师希雄, 黄峰, 等. 藏羊肉宰后成熟过程中热休克蛋白27对肌原纤维蛋白及细胞凋亡酶的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(3): 24-29. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20181203-038.
- [91] 杨明畅, 马俪珍, 李来好, 等. 蛋白质免疫印迹技术在水产品中的应用[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(20): 7914-7919. DOI:10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.2021.20.002.
- [92] PILLAI-KASTOORI L, SCHUTZ-GESCHWENDER A R, HARFORD J A. A systematic approach to quantitative Western blot analysis[J]. Analytical Biochemistry, 2020, 593: 113608. DOI:10.1016/j.ab.2020.113608.
- [93] MURPHY R M, LAMB G D. Important considerations for protein analyses using antibody based techniques: down-sizing Western blotting up-sizes outcomes[J]. The Journal of Physiology, 2013, 591(23): 5823-5831. DOI:10.1113/jphysiol.2013.263251.
- [94] MALHEIROS J M, BRAGA C P, GROVE R A, et al. Influence of oxidative damage to proteins on meat tenderness using a proteomics approach[J]. Meat Science, 2019, 148: 64-71. DOI:10.1016/j.meatsci.2018.08.016.
- [95] ESTÉVEZ M. Protein carbonyls in meat systems: a review[J]. Meat Science, 2011, 89(3): 259-279. DOI:10.1016/j.meatsci.2011.04.025.
- [96] CHEN Qianqian, HUANG Jichao, HUANG Feng, et al. Influence of oxidation on the susceptibility of purified desmin to degradation by μ -calpain, caspase-3 and -6[J]. Food Chemistry, 2014, 150: 220-226. DOI:10.1016/j.foodchem.2013.10.149.
- [97] LEI Yongdong, DENG Xiaorong, ZHANG Zhiwei, et al. Effects of oxidation on the physicochemical properties and degradation of mutton myofibrillar proteins[J]. Journal of Food Science, 2022, 87(7): 2932-2942. DOI:10.1111/1750-3841.16166.
- [98] CROSS H R, SCHANBACHER B D, CROUSE J D. Sex, age and breed related changes in bovine testosterone and intramuscular collagen[J]. Meat Science, 1984, 10(3): 187-195. DOI:10.1016/0309-1740(84)90021-4.
- [99] GOLL D E, BRAY R W, HOEKSTRA W G. Age-associated changes in muscle composition. The isolation and properties of a collagenous residue from bovine muscle[J]. Journal of Food Science, 1963, 28(5): 503-509. DOI:10.1111/j.1365-2621.1963.tb00234.x.
- [100] LI Xiyang, HA Minh, WARNER R D, et al. Meta-analysis of the relationship between collagen characteristics and meat tenderness[J]. Meat Science, 2022, 185: 108717. DOI:10.1016/j.meatsci.2021.108717.
- [101] TORRESCANO G, SÁNCHEZ-ESCALANTE A, GIMÉNEZ B, et al. Shear values of raw samples of 14 bovine muscles and their relation to muscle collagen characteristics[J]. Meat Science, 2003, 64(1): 85-91. DOI:10.1016/S0309-1740(02)00165-1.
- [102] ZHENG Yanyan, ZHOU Changyu, WANG Chong, et al. Evaluating the effect of cooking temperature and time on collagen characteristics and the texture of hog maw[J]. Journal of Texture Studies, 2021, 52(2): 207-218. DOI:10.1111/jtxs.12580.
- [103] 刘晶晶, 雷元华, 李海鹏, 等. 加热温度及时间对牛肉胶原蛋白特性及嫩度的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(5): 977-990. DOI:10.3864/j.issn.0578-1752.2018.05.015.
- [104] NAQVI Z B, THOMSON P C, HA M, et al. Effect of sous vide cooking and ageing on tenderness and water-holding capacity of low-value beef muscles from young and older animals[J]. Meat Science, 2021, 175: 108435. DOI:10.1016/j.meatsci.2021.108435.