

不同种类动物肉结构、质构及营养特性的对比研究

孙翠霞, 高翊鑫, 杨语艳, 扶佳玲, 方亚鹏*

(上海交通大学农业与生物学院 上海 200240)

摘要 以猪里脊、鸡胸肉和 4 个部位的牛肉(牛里脊、牛腩、牛小黄瓜条、牛肩)为研究对象,表征肉的多级结构、质构特性、水分分布、营养组成及体外模拟消化特性,解析肉的多级结构与质构及消化的内在关系,旨在为建立植物肉对标动物肉的品质评价体系提供理论基础。结果表明,肉是典型的多级结构,肌纤维、肌外膜、肌束膜以及肌内膜分层排列在复杂的网络结构中。不同动物肉肌纤维束的形态、粗细、排列紧密度差异较大,鸡纤维束的形态种类最丰富,猪里脊的纤维束直径最大(75.21 μm),其次是牛腩(57.09 μm)、牛小黄瓜条(54.41 μm)和鸡胸肉(52.78 μm),牛里脊的纤维束直径最小(33.58 μm),牛小黄瓜条、牛肩、牛腩的肌纤维束排列较为致密,鸡胸肉、猪里脊和牛里脊排列较为疏松。核磁成像结果表明,6 种动物肉均含有 3 种形式的水分,包括蛋白结合水、固定水(肌原纤维内水)、自由水(肌原纤维外水)。鸡胸肉和猪里脊的水分分布均一,固定水含量高。4 个部位的牛肉水分分布不均匀,且牛肉内部的脂肪较多。动物肉不同形式水分含量以及分布影响其质构特性。肉的微观结构和质构及消化性具有一定相关性,纤维束排列紧密的肉硬度和咀嚼度较大,消化率较低。基于动物肉结构、质构及营养特性解析的结果,可为植物肉产品品质评价标准的建立提供科学依据。

关键词 动物肉; 多级结构; 水分分布; 质构特性; 营养组成

文章编号 1009-7848(2024)09-0018-13 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2024.09.002

蛋白质是人类健康生活必需的营养元素,主要包括动物蛋白和植物蛋白两大类。动物源肉制品是人体补充蛋白质的主要来源。目前全球人口快速增长,环境压力持续加重,动物蛋白供给紧张。以植物蛋白为基料,通过一定的技术手段制备具有动物肉的纤维结构、质构、颜色、风味、口感、外观的仿生肉制品,是动物蛋白理想的替代品,也是目前替代蛋白领域的研究热点。然而,目前对于植物肉的研究侧重于产品质构和口感的优化,有关植物肉营养特性的研究较少,且植物肉产品品质评价标准尚待确立。解析动物肉的结构和营养特性,对提升植物蛋白仿生肉的品质具有重要研究意义。

猪肉一直在全球肉类饮食中占据主导地位^[1]。此外,禽肉(鸡肉、鸭肉和特色禽类等)的消费在全球 50 多个国家具有重要的经济意义。早在 1996 年,家禽就超过牛肉变成全球第二大消费的肉类^[1]。中国目前在肉类生产和消费位于全球第一^[2],并且未来需求还会进一步增加^[3]。2012 年,中国鸡

肉总消费量(1 300 万 t)首次超过美国。最新的肉类消费研究表明,国内牛肉和家禽消费的增长速度相对高于猪肉^[2]。基于人们日常的肉类消费倾向,植物肉公司推出的产品侧重于模拟大众消费最多的猪肉、鸡肉、牛肉。如 Beyond Meat 和肯德基合作的植物蛋白无骨“鸡翅”,Impossible Foods 的“猪肉”以及其他公司推出的基于豌豆蛋白的“碎牛肉”“汉堡肉饼”和其植物蛋白仿生肉产品。然而,目前的产品从质地和结构上与真实的动物肉仍有一定差距,而且评价体系各有不同。因此,建立系统、科学的动物肉参数标准迫在眉睫。

本研究选取 6 种常见的动物肌肉组织,包括鸡胸肉、猪里脊和 4 个部位的牛肉(牛小黄瓜条、牛肩、牛腩、牛里脊),表征它们的质构特性、组织化度、微观结构以及水分分布情况,定量分析肌纤维束信息,测定动物肉的营养组成,解析其体外模拟消化特性,并对动物肉的结构与质构及消化特性进行相关性分析,旨在为建立以动物肉参数为基准的植物肉评价标准提供科学依据。

收稿日期: 2023-09-01

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(32272260)

第一作者: 孙翠霞,女,博士,副研究员

通信作者: 方亚鹏 E-mail: ypfang@sjtu.edu.cn

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

新鲜鸡胸肉、猪里脊、牛小黄瓜条、牛肩、牛

脯、牛里脊均购于上海市闵行区东川路欧尚超市。猪胃黏膜胃蛋白酶(P7125),美国 Sigma-Aldrich 公司;猪胰腺胰蛋白酶(P7545),美国 Sigma-Aldrich 公司;猪胆汁提取物(B8631),美国 Sigma-Aldrich 公司。

1.2 仪器与设备

ME2002 分析天平,瑞士梅特勒-托利多有限公司;HK-UP-111-40 多参数水质分析仪,成都浩康科技有限公司;TA-XT2i 质构分析仪,英国 Stable Micro Systems 公司;全自动氨基酸分析仪,美国日立公司;高效液相色谱仪-UV,中国安捷伦公司;DF-101S 恒温加热磁力搅拌器,上海仪昕科学仪器公司;SCIENTZ-18ND 冷冻干燥机,宁波新芝生物科技股份有限公司;RISE-MANGA 拉曼图像扫描电子显微镜联用仪,捷克 Tescan 公司;Kjeltec 凯氏定氮仪,丹麦 Foss 公司。

1.3 试验方法

1.3.1 微观结构 利用扫描电子显微镜(Scanning electron microscope, SEM)拍摄了动物肉的微观结构^[4]。样品首先在液氮中快速冷冻,而后进行真空干燥。样品喷金处理 45 s。图像的加速电压恒定 5 kV,样品于 300 倍和 3 000 倍下进行图像拍摄采集。

1.3.2 纤维束结构定量解析 将 SEM 图片载入 image J 软件中,把图片转化为 8-bit 图像,设置比例尺(Analyze-Set Scale),调用 ROI manager(Analyze-Tools-ROI Manager)选区管理器,用于记录和调用选取的区域。在圆形选取工具处,单击右键,选择 Selection Brush Tool,随机选取 100 根纤维束,分别添加到 ROI Manager。点击 measure,测定动物肉纤维束的直径、面积以及长径比信息。

1.3.3 质构分析 根据 Fang 等^[5]报道的方法,适当修改后使用 TA-XT2i 质地分析仪对煮熟后 6 种动物肉的质构特性进行了测定,动物肉被切割成 20 mm×20 mm 的方形,便于测定。仪器使用 1 kg 的砝码进行校准,仪器模式选择 TPA,探头为 P/50。测试前的速度为 2 mm/s,测试的速度为 1 mm/s,测试后的速度为 2 mm/s,下压样品的程度为 50%,探头往复 2 次进行下压,时间间隔为 5 s。记录硬度、弹性和咀嚼度数据,每种动物肉平行测定 8 次。

1.3.4 水分分布测定

1) 横向弛豫时间 T2 的获得与反演 通过低场核磁成像仪表征了 6 种动物肉的水分分布^[6]。首先确定样品中心频率,选择硬脉冲自由感应衰减序列 FID。再选择 Carr-Purcell-Meiboom-Gill (CPMG)序列,测定样品的横向弛豫时间(T2)。软件记录了 3 个不同的弛豫时间 (T2b、T21 和 T22) 及其相应的弛豫信号分量(M2b 和 M21 和 M22)。所有弛豫测量均在 25 ℃下进行。设定低场核磁共振参数为:磁场强度为 0.5T,射频信号频率主值为 21 MHz,采集点数 TD 为 49 996,射频信号频率偏移量 O1 为 239.4921 kHz,回波间隔 TE=0.5 ms,回波个数 NECH 为 1 000 个,重复采样 4 次。T2 的值是通过低场核磁测定仪配套的分析软件 MultiExpInv Analysis 对 CPMG 指数衰减曲线进行反演得到,经质量归一化处理后得到最终结果。

2) MRI 成像 首先进行预扫描:样品放于样本板中心位置,推入低场核磁测定室。通过调整样品在样品板的位置使其图像位于成像的视野中央。样品的氢质子密度成像采用的序列为多层自旋回波序列 MSE,成像软件为纽迈核磁软件。选层的层厚为 2.5 mm,层间隙 0.5 mm。成像后样品统一映射处理,而后图像通过伪彩处理从灰度转变为彩色图像,最后图像以 BMP 格式进行导出。

1.3.5 营养成分的测定 根据中华人民共和国国家标准的方法进行营养分析,以比较动物肉和植物蛋白肉之间的营养差异,主要包括:水分含量、蛋白质、脂肪、灰分、胆固醇、矿物质元素(Na、Fe、Ca)等。水分含量:参考 GB 5009.3-2016《食品中水分的测定》直接干燥法;蛋白质含量:参考 GB 5009.5-2016《食品中蛋白质的测定》凯氏定氮法(N×6.25);总脂肪含量:参考 GB 5009.6-2016《食品中脂肪的测定》索氏抽提法;灰分:参考 GB 5009.4-2016《食品中灰分的测定》马弗炉灼烧法;胆固醇含量:参考 GB 5009.128-2016《食品中胆固醇的测定》高效液相色谱法;Na、Fe、Ca 含量:参考 GB 5009.268-2016《食品中多元元素的测定》电感耦合等离子体发射光谱法。

1.3.6 脂肪酸的测定 参考 GB 5009.168-2016《食品中脂肪酸的测定》归一化法,其主要流程如下:将样品(约 3 g)用 10 mL 8.3 mol/L HCl 在 70~

80℃的水浴温度下进行酸水解处理40 min。酸水解后,用乙醚:石油醚(体积比1:1)提取脂肪,然后用2%氢氧化钠-甲醇溶液和15%三氟化硼-甲醇溶液进行脂肪的皂化和脂肪酸的甲酯化。将处理好的样品注入气相色谱仪进行分析,试验条件如下:载气为氮气;分流比为100:1;进样体积为1.0 μL;进样温度为270℃;检测温度为280℃。程序升温:初始温度100℃(13 min),以10℃/min的速度升温至180℃(13 min),以1℃/min的速度升温至200℃(20 min),以20℃/min升温至240℃(2 min)。

1.3.7 氨基酸的测定 采用酸水解法(除色氨酸)和全自动氨基酸分析仪分析肉的氨基酸组成,具体步骤如下:称取50 mg样品置于水解管中,加入6 mol/L的盐酸5 mL和0.1%的苯酚20 μL,然后通入高纯氮气5 min以排空空气,在充满氮气的状态下封口并放入(110±1)℃的烘箱进行水解。水解22 h后,将水解管取出冷却至室温,取1 mL水解液在12 000 r/min下离心20 min,取200 μL上清液置于玻璃试管中并通入氮气直至样品完全干燥。用400 μL 0.02 mol/L的盐酸将样品复溶后在12 000 r/min下离心20 min,将上清液装入样品以备测定。

色氨酸的测定采用碱水解法,具体步骤如下:称取50 mg样品置于水解管中,加入4 mol/L的氢氧化钠0.8 mL,密封后放入(110±1)℃的烘箱进行水解。水解20 h后,将水解管取出冷却至室温,加入4 mol/L的盐酸0.8 mL以中和氢氧化钠,涡旋混匀后在12 000 r/min下离心20 min。取0.1 mL上清液,加入0.9 mL蒸馏水进行稀释,涡旋混匀后在12 000 r/min下离心20 min,将上清液装入样品以备测定。

1.3.8 体外模拟消化试验 根据Brodkorb等^[7]和Wen等的^[8]方法,进行适当调整后进行体外模拟胃肠道消化试验。1 g(精确到0.0001 g)样品,加入4 mL PBS缓冲液,以10 000 r/min的速度均质1 min,间隔1 min后再以12 000 r/min的速度均质1 min,该步骤用来模拟食物在口腔中被咀嚼的过程。根据Minekus等^[9]的报告制备模拟胃液和模拟肠液,由于蛋白质的消化主要发生在胃和肠道中,因此本试验不考虑口腔的消化作用。将均质液和

模拟消化液预热至37℃。

胃阶段:用2 mol/L的HCl将均质液的pH值调至2.0±0.1。将5 mL含有胃蛋白酶的模拟胃液(最终活性达到2 000 U/mL)加到均质液(约5 mL)中。将混合液置于37℃的恒温水浴振荡器中以150 r/min的速度的进行2 h摇晃反应。用1 mol/L的NaOH将混合液的pH值迅速调至7.5±0.1,终止胃蛋白酶的酶解反应并进行模拟肠道消化试验。

肠道阶段:将10 mL含有胰酶(胰蛋白酶的最终活性达到100 U/mL)和胆盐(最终浓度为10 mmol/L)的模拟肠液加入上述混合液(约10 mL)中。同样地,混合液在37℃的条件下以150 r/min的速度的进行2 h摇晃反应。将混合液在95℃的水浴锅中加热5 min,终止酶切反应。

1.3.9 蛋白质消化率的测定 所有肉样各称取两份1 g的样品,根据1.3.7节的方法进行模拟体外消化试验。一份样品只进行模拟胃消化试验,另一份样品进行模拟胃肠消化试验。消化后的混合液在4℃条件下过夜静置后离心(10 000 g,4℃,20 min),弃上清液。沉淀物在50℃的烘箱中干燥至恒重,采用凯氏定氮法测定样品消化前后的蛋白质含量。蛋白质消化率计算如下:

$$DT(\%) = \frac{m_2 \times V_2}{m_1 \times V_1} \times 100 \quad (1)$$

式中:DT为蛋白质消化率,%; m_1 为消化前样品的质量,g; m_2 为消化后烘干沉淀物的质量,g; V_1 为消化前样品的蛋白质含量,%; V_2 为消化后烘干沉淀物的蛋白质含量,%。

1.3.10 数据统计分析 用SPSS软件对试验数据进行单因素方差分析和Duncan's multiple-range test进行多重比较。结果以平均值±标准差表示,在 $P<0.05$ 时,差异具有统计学意义。

2 结果与分析

2.1 肉的宏观及微观结构

哺乳动物(牛肉、猪肉、羊肉等)和禽类(鸡、火鸡等)的骨骼肌由细长的纤维细胞组成,这些纤维细胞分层排列在复杂的结构中。单个肌肉纤维长度和直径具体取决于动物种类和肌肉类型^[10]。肉是非常典型的多级结构,肌纤维由肌原纤维组成,

而肌原纤维又分别由大约 300 个肌球蛋白分子和 f-肌动蛋白共同组成的粗细肌丝结合而成^[9]。当食用熟肉时,纤维蛋白复合物与肌周膜和肌内膜一起赋予肉独特的质地感觉。对于最低限度加工的肉,即整块肌肉、肌肉块或粗碎肉,聚集的肌肉纤维和纤维束是熟肉特有的咀嚼性的原因。图 1 展示了不同动物肉的宏观结构和不同放大倍数横切面(a)和纵切面(b)结构。通过图 1a 宏观图片可以非常直观地看到纤维、脂肪等结构,由于种类和部位的不同,脂肪的分布和纤维的形态各有差异。在 SEM 图片下纤维束清晰可见,鸡胸肉、牛小黄瓜条、牛肩、牛腩的肌纤维束排列较为致密,猪里脊和牛里脊排列较为疏松。不同来源的动物肉展现出的纤维束形态也各有差异,整体来看,前 5 种肉的纤维束排列都相对有序,纤维沿同一个方向伸展,牛里脊的纤维排列略有杂乱。通过 3 000×放大,研究人员可以观察到单根纤维束的多级结构,即每根纤维束都是由多根纤维排列而成的。

通过肉的纵切面可以更好地展示肉的多层级结构(图 1b)。在解剖学上,单个肌肉通常通过作为结缔组织最外层的肌外膜附着在骨骼或骨骼上。在这个结缔组织鞘内,一组肌纤维束被肌束膜包围。每条肌纤维都由肌原纤维组成,并被肌内膜隔开,肌内膜直接附着在肌细胞膜上,肌外膜、肌周膜和肌内膜分层排列在复杂的网络结构中,支持肌肉的形态及其运动^[9]。宏观图示均可以看到纵切面存在不同大小的块状区域,即由肌束膜包被的区域。观察 SEM 图后,在 300 倍下,研究人员发现鸡胸肉、猪里脊、牛小黄瓜条的肌纤维束排列紧密,牛肩、牛腩的肌外膜结构较为突出,呈现出块状分布,在 3 000 倍放大下尤其明显,牛腩的肌束膜和肌纤维束之间存在明显空隙,说明其含水量较高,牛腩的多汁性因此而来,牛里脊则是由细小的纤维束排列而成。同样,3 000 倍下可以看到纤维束是由无数根肌纤维丝构成的。

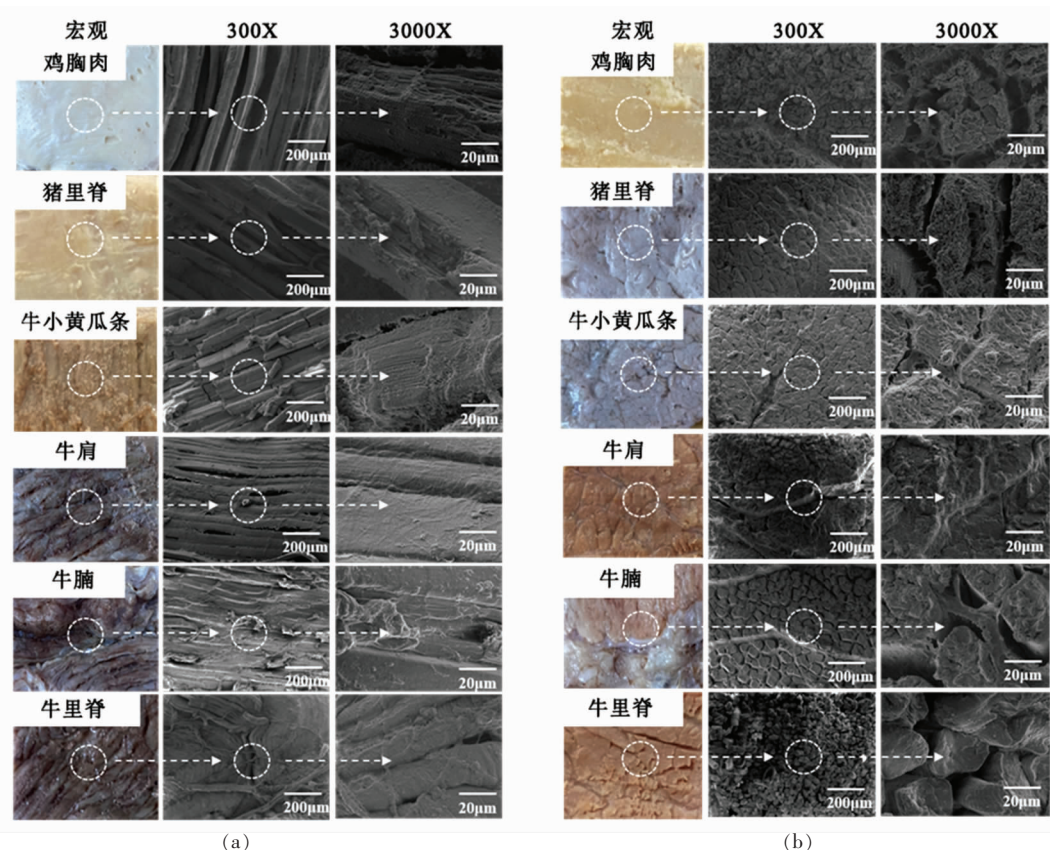


图 1 6 种动物肉的横切面(a)和纵切面(b)宏观及不同放大倍数的扫描电镜图(300×和 3 000×)

Fig.1 Macrostructure and SEM images of (a) transverse section and (b) longitudinal section of six kinds of animal meat (300× and 3 000×)

2.2 肉纤维结构的定量分析

通过 Image J 软件随机选取 SEM 图中的 100 根纤维束,对纤维束的直径进行定量计算分析,得到分布图。本研究分析了 6 种动物肉纤维束的 Feret 直径分布,如图 2 所示。Feret 直径(费雷特直径)是对不规则颗粒大小描述的常用参数,经过该颗粒的中心任意方向的直径称为一个费雷特直

径^[11]。因为纤维束的截面并不是规则的圆形,因此用 Feret 直径来描述更加科学。从图 2 可以看出,肉类的 Feret 直径和其种类很有大关系,猪肉的 Feret 直径最大,为 $(75.21\pm15.51)\mu\text{m}$,鸡胸肉、牛小黄瓜、牛腩的数值较为接近,分别为 $(52.78\pm10.87)\mu\text{m}$ 、 $(54.41\pm9.00)\mu\text{m}$ 、 $(57.09\pm9.07)\mu\text{m}$,牛肩的 Feret 直径为 $(46.63\pm7.08)\mu\text{m}$,牛里脊的 Fer-

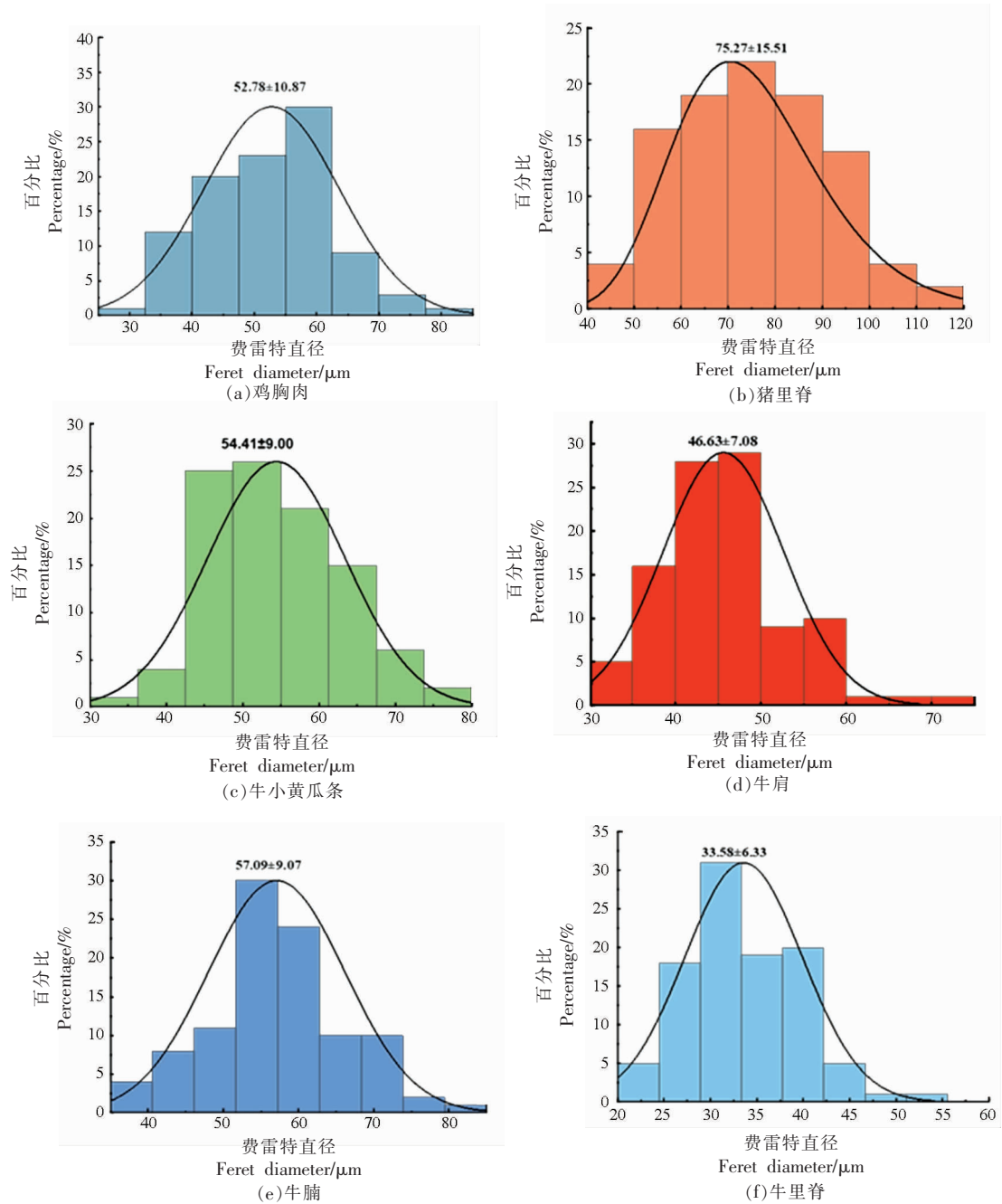


图 2 6 种动物肉肌纤维束的 Feret 直径分布图

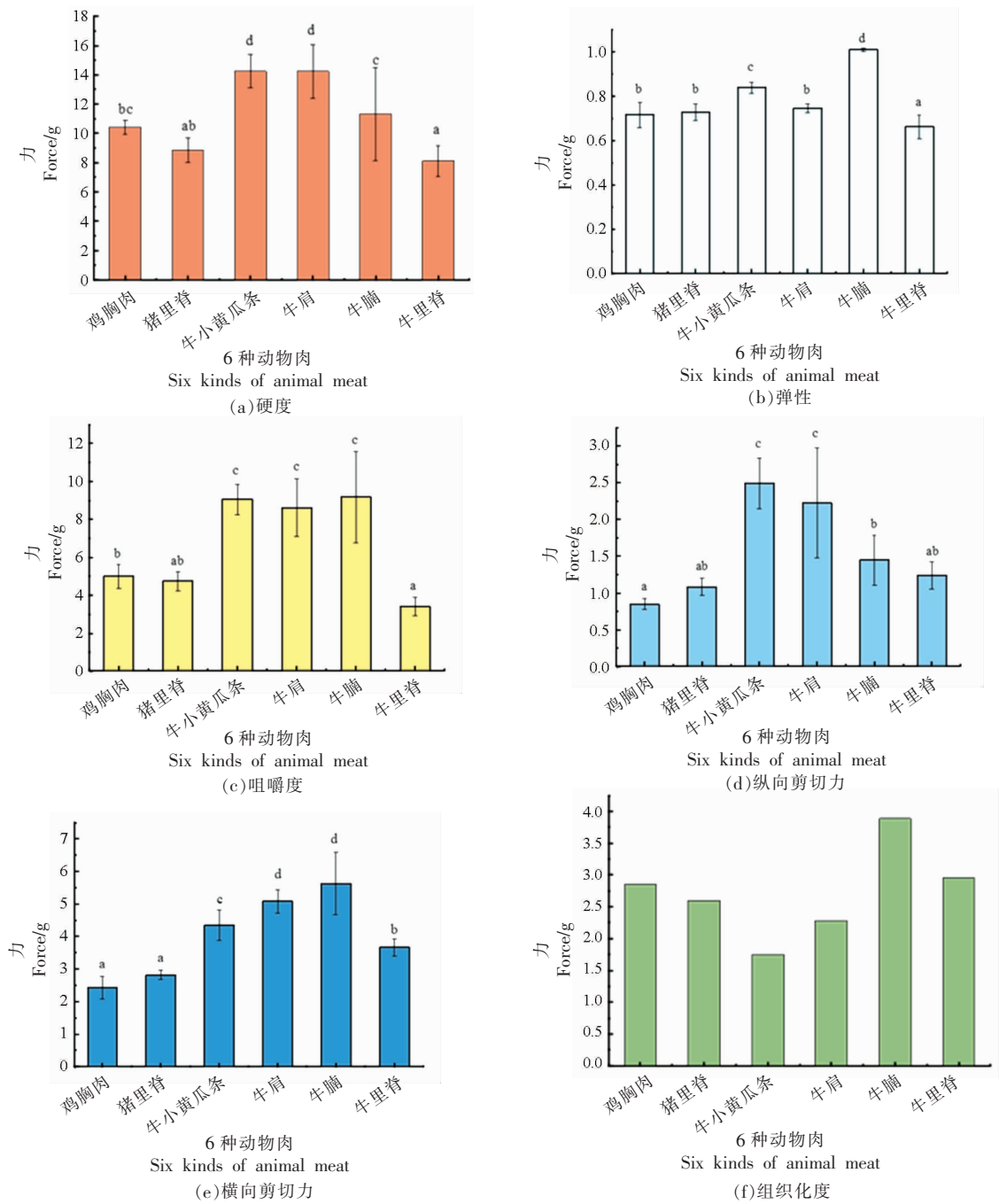
Fig.2 Feret diameter distribution curve of muscle fiber bundles of six kinds of animal meat

et 直径最小,为 $(33.58\pm6.33)\mu\text{m}$,整体的 Feret 直径排序为猪肉>牛腩>牛小黄瓜条>鸡胸肉>牛肩>牛里脊。

2.3 肉的质构特性

本研究对 4 个不同部位的牛肉 (牛里脊、牛腩、牛小黄瓜条、牛肩)和猪里脊、鸡胸肉进行肉的

质构测试。质构测试内容包括硬度、弹性、咀嚼度、横向剪切力、纵向剪切力。图 3 显示了不同动物肉的质构特性。硬度是第 1 次压缩时的最大力,咀嚼度和能量有关,是将固体食物咀嚼到可以吞咽的状态所需要的能量^[12]。牛里脊的硬度小于其它肉类,与猪里脊没有显著性差异。牛肩和牛小黄瓜条



注:字母 a~e 表明数值之间存在显著差异 ($P < 0.05$)。

图 3 6 种动物肉的质构特性

Fig.3 Texture properties of six kinds of animal meat

的硬度较大,两者之间没有显著性差异。6种动物肉硬度大小排序为牛小黄瓜条>牛肩>牛腩>鸡肉>猪里脊>牛里脊。咀嚼度的大小和硬度呈现一致的趋势。

横向剪切力是垂直于平行纤维的切割力,纵向剪切力是沿纤维方向的切割力。组织化度是纤维结构形成的指示,是横向剪切力与纵向剪切力之比,它应该为大于1的无量纲值^[13]。这是由于纤维平行排列,垂直纤维方向需要更高的切割阻力。从图3可以看出,剪切力与肉的种类有很大关系,牛肉的横向剪切力和纵向剪切力整体都大于鸡胸肉和猪里脊,可能是由于牛肉中有较多的结缔组织所导致的。牛小黄瓜条的组织化度最小,这是由于其纤维排列紧密,且纤维束较大,横切力和纵切力都较大导致的。牛腩的组织化度最大,是由于它的纤维束之间有较多空隙,纵向剪切力较小,而横向切力最大,所以两者比值导致其组织化度的数值最大。牛里脊纤维束排列疏松,纵向切力较小。整体而言,组织化度的大小排序为牛腩>牛里脊>鸡胸肉>猪里脊>牛肩>牛小黄瓜条。

2.4 肉的质构与结构的相关性分析

如图4所示,肉的多级结构和质构存在紧密联系。一般来说,肉的直径越大,硬度越大。牛里脊的直径最小,其硬度也最小。但是猪肉的直径越大,其硬度却没有最大,这是由于它的纤维束排列疏松导致的。在SEM微观结构中,牛小黄瓜条和牛肩的纤维束排列都较为紧密,而猪里脊和牛里脊的纤维束排列较为疏松,故纤维束的排列影响

肉的硬度和咀嚼度,即纤维束排列越紧密,肉的硬度和咀嚼度越大,纤维束排列越疏松,肉的硬度和咀嚼度越小。就弹性而言,牛腩的弹性最大,可能是由于它存在较多的结缔组织,富有弹性,前文也提到过牛腩的肌束膜和肌外膜结构比较突出。

2.5 肉的水分分布分析

低场核磁共振 (Low-Field Nuclear Magnetic Resonance, LF-NMR) 是用于测量样品中水的物理和化学流动性经典的分析方法,也用于研究肉类基质的性质,如水分分布、隔间组织、水的流动性以及水与其它分子的相互作用^[14-15]。LF-NMR 近年来也多用于检测肌肉组织中的水分分布情况。T2是激发自旋-自旋质子与相邻质子进行能量交换后达到动态平衡所需的时间,体现了水在不同结合状态时自由度的差异^[16]。T2b(强结合质子)代表与大分子结合紧密的质子,T21(中度结合质子)和T22(弱结合质子)表示与固体的中度和弱结合水中的质子^[17]。如图5a所示,不同动物肉的T2图谱有多个峰,代表了肌肉内部主要的几组水分。0.1~10 ms 区间内的峰(T2b)可能是与大分子密切相关的水或位于水塑化结构中的大分子质子,和细胞结合紧密因此外加磁场难以对其进行激发^[18]。10~100 ms (T21)贡献了80%~95%的横向弛豫,最有可能反映位于组织化程度较高的蛋白质结构内的水,如高肌原纤维蛋白密度的三级和四级蛋白质结构、肌动蛋白和肌球蛋白丝结构(即肌原纤维内),这个区段也被称为快速弛豫时间。较慢的弛豫时间(T22)为100~1 000 ms,以自由水为主,存在于肌原纤维网络结构之外,自由水容易收到激发产生共振信号,因此有最长的横向弛豫时间^[18-19]。水分分布与蛋白质、肌原纤维和肌外纤维大分子密切相关^[15]。

6种动物肉的核磁成像如图5b所示。氢质子的分布情况结果可以通过观察动物肉的质子密度加权像得到,成像对应区域的亮度越大,则此区域的氢质子相对其它区域分布更密集^[20],不仅水分中的氢质子对加权像的明亮程度有贡献,其它来源的氢质子如脂肪,同样能使图像更加明亮^[21]。动物肉不同区域伪彩的颜色越趋近于橙色和红色,该表明区域的脂肪含量较高,伪彩颜色越趋近于深蓝色,说明水分含量越低。从MRI图像可以看

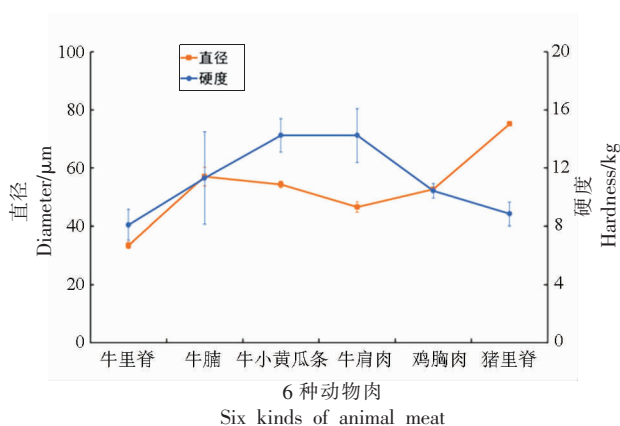


图4 6种动物肉的硬度与纤维束直径的相关性分析

Fig.4 Correlation analysis of the hardness and fiber bundle diameter of six kinds of animal meat

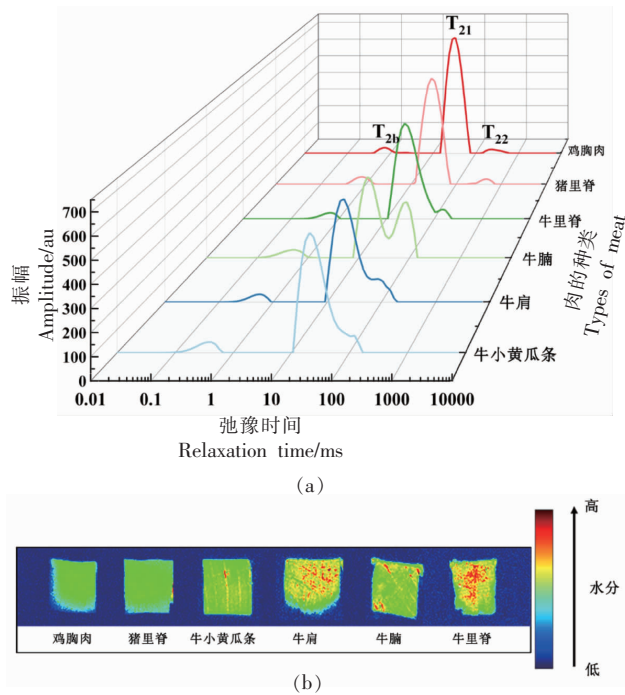


图 5 6 种动物肉的横向弛豫时间(T2)反演谱图(a)与水分均匀性分布比较图(b)

Fig.5 Inversion diagram (a) of relaxation time (T2) and moisture distribution (b) among different animal meats

出,鸡胸肉和猪里脊的水分分布比较均一,而两者均硬度较小。4 种牛肉均有多种伪彩颜色无规律排布,体现了样品内部水分的不均匀分布。牛小黄瓜条和牛腩以绿色伪彩为主,黄色伪彩沿肌纤维呈条状分布,纤维间隙的含水量较高。牛肩和牛里脊表面均有大面积点状红色区域指示脂肪的分布。

2.6 肉的营养组成分析比较

动物肉和肉制品作为人类营养的重要来源,

富含丰富的蛋白质、氨基酸、钙、铁等矿物质元素和维生素。由表 1 可知不同种类肉的营养组成大体相同,但来自不同品种或同一品种不同部位的肉类在各营养成分的含量上有一定差异,其中脂肪在不同肉类中的差异尤为显著。在牛肉中,牛小黄瓜条的脂肪含量最低(2.17 g/100 g)。牛小黄瓜条主要为牛后臀部位的半腱肌,沿臀股二头肌边缘分离出的净肉,这部分肉的运动量比较大,肌肉纤维较粗,故脂肪含量较低。牛腩和牛肩肉的脂肪含量较高,分别为 8.04 g/100 g 和 (16.82±1.75) g/100 g。牛腩位于牛的腹部,脂肪可以起到保暖,保护内脏的作用;而牛肩肉位于牛的前肩胛部,含有的间隙脂肪较多,这类脂肪的主要作用是缓冲外界压力。在不同品种的肉类中,鸡胸肉的脂肪含量最低,为 1.02 g/100 g。这 6 种肉的蛋白质含量较为接近,均在 30 g/100 g 左右,其中含量最低的是牛肩肉(26.06 g/100 g),最高的是牛小黄瓜条(32.43 g/100 g)。

膳食中用于维持人体铁平衡的“铁”主要由两种形式组成:血红素铁和非血红素铁。相比于非血红素铁,血红素铁更容易被肠细胞以完整分子形式吸收,具有更高的生物利用率^[22]。血红素铁来自血红蛋白和肌红蛋白,因此只存在与动物来源的食物中,而肉类所含的铁 26.2%~75.6%都以血红素铁的形式存在,是血红素铁的最佳来源。牛肉中牛里脊的血红素铁含量最高,高达 45%~77.58%^[23-24]。而鸡胸肉为白肉,血红素铁含量较低^[25]。猪肉则居于两者之间。除了牛肩肉的钙含量较高外,其余 5 种肉的钙含量没有显著性差异。这可能是由于钙主要分布于动物的骨骼和牙齿中。

表 1 6 种动物肉的营养组成分析比较

Table 1 The nutritional composition of six kinds of animal meat

产品	水分/%	蛋白质/ (g/100 g)	总脂肪/ (g/100 g)	灰分/ (g/100 g)	胆固醇/ (mg/100 g)	Na/ (mg/100 g)	Fe/ (mg/100 g)	Ca/ (mg/100 g)
牛里脊	66.12	28.60	4.07	1.55	63.47	42.80	2.46	4.25
牛小黄瓜条	60.12	32.43	2.17	1.45	53.50	40.35	1.34	4.33
牛肩肉	64.07	26.06	16.82	0.89	56.90	50.05	1.64	7.26
牛腩	59.90	30.90	8.04	1.00	48.40	53.80	2.05	4.79
鸡胸肉	70.18	27.40	1.02	1.60	75.80	49.33	4.49	5.05
猪里脊	67.18	28.21	3.22	1.40	69.80	51.04	1.17	4.76

注:每个样品测定 2 次,结果以平均值形式表示。

2.7 肉的脂肪酸组成分析

脂肪酸组成是脂肪营养价值的重要体现。通常,饱和脂肪酸(Saturated fatty acids,SFAs)与不饱和脂肪酸在人体的生理功能方面发挥着截然相反的作用。饱和脂肪酸会增加心血管疾病的患病风险,而不饱和脂肪酸对调节心血管功能相关的代谢过程有着积极作用^[26]。不同动物肉和植物蛋白肉的脂肪酸组成如表 2 所示。动物肉的脂肪酸

组成大致相同,主要脂肪酸包括棕榈酸(C16:0)、硬脂酸(C18:0)、油酸(C18:1n9c)和亚油酸(C18:2n6c)。各动物肉的饱和脂肪酸含量均在 50%以上,其中牛里脊最高(75.08%)。与牛肉(牛里脊、牛小黄瓜条、牛肩肉和牛腩)相比,鸡胸肉和猪里脊的多不饱和脂肪酸(Polyunsaturated fatty acids,PUFAs)含量更高,而单不饱和脂肪酸(Monounsaturated fatty acids,MUFAs)的占比较低。

表 2 6 种动物肉的脂肪酸组成分析

Table 2 Fatty acid composition of six kinds of animal meat						
脂肪酸/%	牛里脊	牛小黄瓜条	牛肩肉	牛腩	鸡胸肉	猪里脊
C12:0	—	—	0.07	—	—	—
C13:0	0.88	—	0.10	—	—	3.45
C14:0	13.55	7.64	4.22	6.05	0.46	0.93
C14:1	—	—	—	—	0.34	0.50
C14:1n5	1.34	0.75	0.41	0.87	—	—
C15:0	0.18	—	0.67	0.39	0.15	1.08
C16:0	35.42	32.07	30.03	30.57	33.80	31.48
C16:1	—	—	—	—	1.00	1.54
C16:1n7	0.92	3.11	2.55	2.96	—	—
C17:0	1.06	0.61	1.19	0.74	0.27	0.24
C17:1n7	0.18	—	—	—	—	—
C18:0	23.99	18.25	26.48	19.81	21.06	20.53
C18:1n9c	17.38	31.79	31.84	35.59	14.99	25.10
C18:2n6c	3.85	3.42	1.81	2.18	17.34	11.94
C18:3n3	—	0.14	0.13	0.22	0.20	0.51
C18:3n6	—	—	—	—	—	—
C20:0	—	—	0.18	—	0.22	0.18
C20:1	—	0.12	0.15	0.21	0.70	0.45
C20:2	—	—	—	—	1.43	0.43
C20:3n3	0.59	0.62	0.06	0.17	0.13	—
C20:3n6	—	0.26	0.03	—	1.18	0.18
C20:4n6	0.67	1.08	0.08	0.23	5.83	1.46
C22:1n9	—	—	—	—	0.11	—
C22:6n3	—	—	—	—	0.55	—
C24:0	—	0.14	—	—	0.25	—
SFAs	75.08	58.71	62.94	57.56	56.21	57.89
MUFA	19.82	35.77	34.95	39.63	17.14	27.59
PUFA	5.11	5.52	2.11	2.80	26.66	14.52

注:每个样品测定 2 次,结果以平均值形式表示。

2.8 肉的氨基酸组成

表 3 显示了 3 种不同来源的肉的氨基酸组成情况。结果显示 3 种动物蛋白的氨基酸组成大体相近。根据氨基酸组成的数据计算了几个用于评估蛋白质质量的营养参数。必需氨基酸与总氨基酸的比值(EAA/TAA)显示,牛肉、鸡肉和猪肉的

EAA/TAA 分别为 44.76%,44.78%和 45.17%。氨基酸评分(Amino acid score, AAS)是用于预测膳食蛋白质质量的简化模型,其值与蛋白质中的第一限制性氨基酸有关^[27]。3 种动物肉蛋白质的 AAS 值均大于 100,可以认为是完全蛋白。此外,蛋白质功效比值(Protein efficacy ratio, PER)是判断

表 3 不同品种来源肉类的氨基酸组成
Table 3 Amino acid composition of meat
from different species

氨基酸	氨基酸含量/(g/100 g 蛋白质)			WHO/FAO 评分模式
	牛肉	鸡肉	猪肉	
Ile*	5.03	4.85	4.96	3.2
Leu*	8.83	8.39	8.67	6.6
Lys*	9.47	9.13	9.27	5.7
Met*	2.74	2.59	2.79	
Phe*	4.49	4.76	4.61	
Thr*	4.84	4.64	4.69	3.1
Val*	5.32	5.37	5.41	4.3
Trp*	0.82	0.91	0.90	0.8
His*	3.24	3.84	3.87	2.0
Cys	1.07	1.04	1.11	
Tyr	3.74	3.53	3.74	
Asp	9.76	9.68	9.60	
Ser	4.04	4.05	3.95	
Glu	16.37	15.17	15.55	
Gly	4.07	4.49	4.47	
Ala	6.01	6.07	6.05	
Arg	6.68	7.53	6.71	
Pro	3.49	3.97	3.65	
Met+Cys	3.81	3.62	3.90	2.7
Phe+Tyr	8.23	8.29	8.35	5.2
EAA/TAA ¹	44.76%	44.78%	45.17%	
AAS ²	102.09	114.24	112.87	
PER ₁ ³	3.22	2.99	3.13	
PER ₂ ⁴	3.15	2.97	3.07	
PER ₃ ⁵	3.42	3.33	3.44	

注：每个样品测定 2 次，结果以平均值形式表示；*：必须氨基酸；
¹ 必需氨基酸含量/总氨基酸含量；² AAS=样品中某必须氨基酸含量/FAO 推荐模式中该必需氨基酸含量×100；³ $PER_1 = -0.684 + 0.456 \times Leu - 0.047 \times Pro$ ；⁴ $PER_2 = -0.468 + 0.454 \times Leu - 0.105 \times Tyr$ ；
⁵ $PER_3 = -1.816 + 0.435 \times Met + 0.78 \times Leu + 0.211 \times His - 0.944 \times Tyr$ 。

蛋白质质量的良好参数。根据亮氨酸(PER₁)、亮氨酸和酪氨酸(PER₂)以及蛋氨酸、亮氨酸、组氨酸和酪氨酸(PER₃)的含量计算了 3 个理论的 PER 值，它们与实际 PER 值有良好的关系。低质量蛋白质的 PER 值小于 1.5，而高质量蛋白质的 PER 值大于 2^[27]。3 种动物肉的 PER 值均接近或大于 3，是

优质蛋白质的良好来源。

2.9 肉的体外模拟消化特性

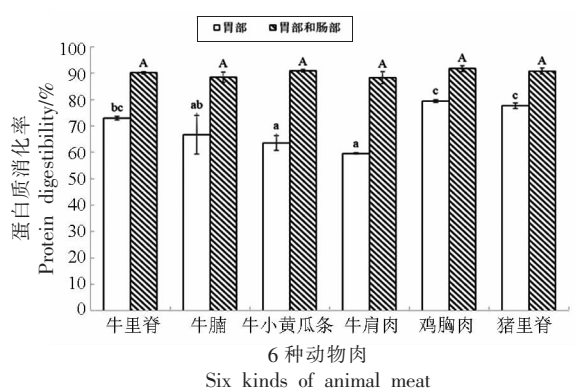
对于经过胃蛋白酶水解所得的蛋白质消化率，不同肉之间存在显著性差异($P < 0.05$ ，图 6)。牛肩肉 (59.58%±0.25%)，牛小黄瓜条 (63.46%±2.78%) 消化率较低；猪里脊 (77.59%±1.03%)，鸡胸肉 (79.43%±0.58%) 消化较高；牛腩 (66.69%±7.34%)，牛里脊 (72.95%±0.64%) 处于中间。对于经过胃蛋白酶和胰酶水解所得的蛋白质消化率，不同肉之间无显著性差异，牛里脊、牛小黄瓜、牛肩肉、牛腩、鸡胸肉和猪里脊的蛋白质消化率分别为 (90.14 ±0.46)%、(90.92 ±0.50)%、(88.32 ±2.29)%、(88.46±1.86)%、(91.75±1.11)%、(90.77±1.11)%。

2.10 肉的消化与质构特性的相关性分析

本课题研究发现，食品多级结构虽然对肉类蛋白质最终的消化率，即经过胃肠道消化后所得的消化率没有影响，但在一定程度上会影响肉类蛋白质在胃部的消化率。结合图 6 和肉的多级结构与肉的质构研究结果发现：肉的结构越致密，硬度越大，胃部蛋白质消化率越低；肉的结构越疏松，硬度越小，胃部蛋白质消化率越高。

3 结论

本文以猪里脊、鸡胸肉和 4 种不同部位的牛肉(牛里脊、牛腩、牛小黄瓜条、牛肩)为研究对象，表征了肉的多级结构、质构特性、水分分布、营养组成及体外模拟消化特性，解析了肉的多级结构与质构及消化的内在关系。研究结果表明，肉是典型的多级结构，肌纤维、肌外膜、肌束膜以及肌肉膜分层排列在复杂的网络结构中。不同动物肉肌纤维束的形态、粗细、排列紧密度差异较大。鸡纤维束的形态种类最丰富。猪里脊的纤维束直径最大，牛里脊的纤维束直径最小。牛小黄瓜条、牛肩、牛腩的肌纤维束排列较为致密，鸡胸肉、猪里脊和牛里脊排列较为疏松。6 种动物肉均含有 3 种形式的水分，蛋白结合水、固定水(肌原纤维内水)、自由水(肌原纤维外水)。具体水分的含量与肉的种类和部位均有关，鸡胸肉和猪里脊的水分分布均一，固定水含量高，硬度小，4 种牛肉水分分布不均匀，且牛肉内部的脂肪较多。动物肉不同形式



注:小写字母代表组内数据的显著性分析。

图6 6种动物肉的蛋白质消化率

Fig.6 Protein digestibility of six kinds of animal meat

水分含量以及分布影响其质构特性。肉的微观结构和质构及消化性具有一定相关性,纤维束排列紧密的肉硬度和咀嚼度较大,消化率较低。

参考文献

- [1] ROENIGK W P. Muscle growth and development. Keynote address: world poultry consumption[J]. Journal of Poultry Science, 1999, 78(5): 722-728.
- [2] BAI J, SEALE J L, WAHL T I. Meat demand in China: To include or not to include meat away from home?[J]. Australian Journal of Agricultural and Resource Economics, 2020, 64(1): 150-170.
- [3] SHIMOKAWA S. Sustainable meat consumption in China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2015, 14(6): 1023-1032.
- [4] PALANISAMY M, FRANKE K, BERGER R G, et al. High moisture extrusion of lupin protein: Influence of extrusion parameters on extruder responses and product properties[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2019, 99(5): 2175-2185.
- [5] FANG Y Q, ZHANG B, WEI Y M. Effects of the specific mechanical energy on the physicochemical properties of texturized soy protein during high-moisture extrusion cooking[J]. Journal of Food Engineering, 2014, 121: 32-38.
- [6] GUO Z W, TENG F, HUANG Z X, et al. Effects of material characteristics on the structural characteristics and flavor substances retention of meat analogs[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 105: 105752.
- [7] BRODKORB A, EGGER L, ALMINGER M, et al.

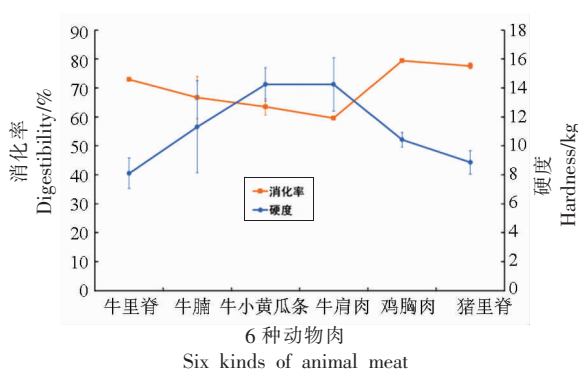


图7 6种动物肉的硬度与胃部蛋白质消化率的相关性分析

Fig.7 Correlation analysis between hardness and stomach protein digestibility of six kinds of animal meat

INFOGEST static *in vitro* simulation of gastrointestinal food digestion[J]. Nature Protocols, 2019, 14 (4): 991-1014.

- [8] WEN S Y, ZHOU G H, SONG S X, et al. Discrimination of *in vitro* and *in vivo* digestion products of meat proteins from pork, beef, chicken and fish [J]. Proteomics, 2015, 15(21): 3688-3698.
- [9] MINEKUS M, ALMINGER M, ALVITO P, et al. A standardised static *in vitro* digestion method suitable for food—an international consensus[J]. Food & Function, 2014, 5(6): 1113-1124.
- [10] SHA L, XIONG Y L. Plant protein-based alternatives of reconstructed meat: Science, technology, and challenges[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 102: 51-61.
- [11] DRAŽIĆ S, SLADOJE N, LINDBLAD J. Estimation of Feret's diameter from pixel coverage representation of a shape [J]. Pattern Recognition Letters, 2016, 80(1): 37-45.
- [12] CHIANG J H, LOVEDAY S M, HARDACRE A K, et al. Effects of soy protein to wheat gluten ratio on the physicochemical properties of extruded meat analogues[J]. Food Structure, 2019, 19: 100102.
- [13] CHEN F L, WEI Y M, ZHANG B, et al. System parameters and product properties response of soybean protein extruded at wide moisture range [J]. Journal of Food Engineering, 2010, 96(2): 208-213.
- [14] ASHKAR A, LAUFER S, ROSEN-KLIGVASSER J, et al. Impact of different oil gelators and oleogelation mechanisms on digestive lipolysis of canola oil oleogels[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 97: 105218.

- [15] ANTEQUERA T, CABALLERO D, GRASSI S, et al. Evaluation of fresh meat quality by hyperspectral Imaging (HSI), nuclear magnetic resonance (NMR) and magnetic resonance imaging (MRI): A review[J]. *Meat Science*, 2021, 172: 108340.
- [16] MATEUS M L, CHAMPION D, LIARDON R, et al. Characterization of water mobility in dry and wetted roasted coffee using low-field proton nuclear magnetic resonance[J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 81(3): 572–579.
- [17] SRIKAEK K, RAHMAN M S. Proton relaxation of waxy and non-waxy rice by low field nuclear magnetic resonance (LF-NMR) to their glassy and rubbery states[J]. *Journal of Cereal Science*, 2018, 82: 94–98.
- [18] PEARCE K L, ROSENVOLD K, ANDERSEN H J, et al. Water distribution and mobility in meat during the conversion of muscle to meat and ageing and the impacts on fresh meat quality attributes—a review[J]. *Meat Science*, 2011, 89(2): 111–124.
- [19] 黄国中, 王琴, 刘东杰. 基于 LF-NMR 及其成像技术探究冬枣贮藏过程中的水分变化[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(21): 319–324.
- HUANG G Z, WANG Q, LIU D J. Application of LF-NMR and its imaging technology in the study of winter jujube storage process[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(21): 319–324.
- [20] 宋平, 徐静, 马贺男, 等. 用低场核磁共振检测水稻浸种过程中种子水分的相态及分布特征[J]. *农业工程学报*, 2016, 32: 204–210.
- SONG P, XU J, MA H N, et al. Moisture phase state and distribution characteristics of seed during rice seed soaking process by low field nuclear magnetic resonance[J]. *Transactions of Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(6): 204–210.
- [21] 卢映洁, 任广跃, 续段, 等. 热风干燥过程中带壳鲜花生水分迁移特性及品质变化[J]. *食品科学*, 2020, 41(7): 86–92.
- LU Y J, REN G Y, XU D, et al. Moisture migration properties and quality changes of fresh in-shell peanuts during hot air drying[J]. *Food Science*, 2020, 41(7): 86–92.
- [22] SIMPSON R J, MCKIE A T. Regulation of intestinal iron absorption: the mucosa takes control? [J]. *Cell Metabolism*, 2009, 10(2): 84–87.
- [23] KONGKACHUICHAI R, NAPATTHALUNG P, CHAROENSIRI R. Heme and nonheme iron content of animal products commonly consumed in Thailand [J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2002, 15(4): 389–398.
- [24] LOMBARDI-BOCCIA G, MARTINEZ-DOMINGUEZ B, AGUZZI A. Total heme and non-heme iron in raw and cooked meats[J]. *Journal of Food Science*, 2002, 67(5): 1738–1741.
- [25] CLARK E M, MAHONEY A W, CARPENTER C E. Heme and total iron in ready-to-eat chicken[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1997, 45(1): 124–126.
- [26] BALTA I, STEF L, PET I, et al. Essential fatty acids as biomedicines in cardiac health [J]. *Biomedicines*, 2021, 9(10): 1466.
- [27] VIOQUE J, ALAIZ M, GIRÓN-CALLE J. Nutritional and functional properties of Vicia faba protein isolates and related fractions [J]. *Food Chemistry*, 2012, 132(1): 67–72.

Comparison Study of Structure, Texture and Nutrition of Animal Meat

Sun Cuixia, Gao Yixin, Yang Yuyan, Fu Jialing, Fang Yapeng*

(School of Agriculture and Biology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240)

Abstract Selecting pork loin, chicken breast and four different parts of beef (tenderloin, flank, eyeround and shoulder) as materials, the multi-level structural properties, texture characteristics, water distribution, nutrient composition and *in vitro* simulated digestion characteristics of meat were characterized, and the internal relationship between the multi-level structure, texture and digestion of meat was analyzed, aiming to provide a theoretical basis for establishing a quality evaluation system of plant-based meat analogues. The results show that meats had typically multi-hierarchical structures with muscle fibers, epicardium, sarcolemma and endocardium layered in a complex network structure at differ-

ent scales. The tightness and thickness of meat fiber fascicle showed differences for these six types of meats. The morphological types of chicken fiber were the richest. The fiber bundle diameter of pork was the largest (75.21 μm), followed by flank (57.09 μm), eyeround (54.41 μm) and chicken (52.78 μm). The fiber bundle diameter of tenderloin was the smallest (33.58 μm). The muscle fibers of beef flank, shoulder and eyeround were observed arranged compactly, while chicken breast, pork loin and beef tenderloin were arranged loosely. The results of magnetic resonance imaging showed that the six kinds of animal meats three different water types, including protein-binding water, freezable water (myofibril inner water), and free water (myofibril outer water). Water was evenly distributed in chicken and pork while unevenly distributed in four kinds of beef which contained more fat than others. Besides, the content and distribution of different water states affected the texture properties of meats. The microstructure of meat had a certain correlation with its texture and digestibility. The meat with closely arranged fiber bundles had higher hardness and chewability, and lower digestibility. The results in the current work provide scientific basis for the establishment of quality evaluation standards of plant-based meat analogue products.

Keywords meet; multi-level structure; water distribution; texture properties; nutrition composition