

梁万森, 袁媛, 贾一鸣, 等. 南疆地区不同品种及部位绵羊肉氨基酸及肌原纤维蛋白特性分析 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(10): 311–321. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024070072

LIANG Wansen, YUAN Yuan, JIA Yiming, et al. Analysis of Amino Acids and Myofibrillar Protein Characteristics in Different Breeds and Cuts of Sheep Meat from the Southern Xinjiang Region[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(10): 311–321. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024070072

· 分析检测 ·

南疆地区不同品种及部位绵羊肉氨基酸及肌原纤维蛋白特性分析

梁万森, 袁媛, 贾一鸣, 韩喆, 陆健康, 李舒婷, 牛希跃, 许倩*, 李婕*

(塔里木大学食品科学与工程学院, 南疆特色农产品深加工兵团重点实验室, 新疆阿拉尔 843300)

摘要: 为分析南疆地区 3 个不同品种羊肉中的氨基酸以及蛋白特性, 本研究对多浪羊、和田羊与策勒黑羊的外脊、颈肉及后腿肉的氨基酸含量以及它们肌原纤维蛋白 (Myofibrillar protein, MP) 的水合特性、乳化特性及凝胶特性进行研究。结果表明: 9 个样品中多浪羊后腿总氨基酸含量最高, 和田羊颈肉的婴儿必需氨基酸比重 (BEAA/TAA) 高于其他样品, 三个品种羊肉的氨基酸评分 (Amino acid score, AAS) 均超过 FAO/WHO 推荐值; 在氨基酸化学评分 (Chemical score, CS) 中, 三者第一限制性氨基酸均为蛋氨酸与胱氨酸。9 个样品均含有较高的营养价值, 赖氨酸 (Lys)、苯丙氨酸 (Phe) 与酪氨酸 (Tyr) 的氨基酸比值系数 (Ratios coefficient amino acid, RCAA) 均大于 1。多浪羊后腿 MP 的疏水性显著高于其他样品 ($P < 0.05$), 其所含非极性氨基酸含量也相对较高。此外, 多浪羊后腿的 MP 还具有较好的乳化活性 (Emulsifying properties, EAI) 及乳化稳定性 (Emulsion stability, ESI)。对比外脊、颈肉与后腿 MP 的凝胶特性, 发现三个品种羊肉后腿均具有较好的凝胶品质, 其中多浪羊后腿 MP 凝胶品质最优。本研究明确了南疆地区不同品种及部位绵羊肉的营养品质以及肌原纤维蛋白特性间的差异性, 为肉羊养殖及羊肉加工提供参考。

关键词: 不同品种, 不同部位, 氨基酸, 肌原纤维蛋白特性

中图分类号: TS254.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)10-0311-11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024070072

本文网刊:



Analysis of Amino Acids and Myofibrillar Protein Characteristics in Different Breeds and Cuts of Sheep Meat from the Southern Xinjiang Region

LIANG Wansen, YUAN Yuan, JIA Yiming, HAN Zhe, LU Jiankang, LI Shuting,
NIU Xiyue, XU Qian*, LI Jie*

(College of Food Science and Engineering, Production & Construction Group Key Laboratory of Special Agricultural Products Further Processing in Southern Xinjiang, Tarim University, Alar 843300, China)

Abstract: The amino acid composition and protein characteristics of three Xinjiang lamb breeds (Duolang, Hetian, Qira Black) were systematically analyzed to compare their biochemical profiles. Hydration capacity, emulsifying activity, and gelation properties of myofibrillar proteins (MP) were investigated in muscle tissues from longissimus lumborum, cervical, and semimembranosus anatomical regions. Among the nine samples, the hind leg of Duolang sheep was found to have the highest total amino acid content. The proportion of basic essential amino acids (BEAA/TAA) in the neck meat of Hetian sheep was significantly higher than that of other samples, while the amino acid scores (AAS) for all three breeds

收稿日期: 2024-07-08

基金项目: 新疆生产建设兵团指导性计划 (TDZKCX202007); 兵团英才支持计划骨干项目。

作者简介: 梁万森 (1998-), 男, 硕士, 研究方向: 畜产品科学及加工技术, E-mail: 1647145262@qq.com。

* 通信作者: 许倩 (1980-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 微生物资源发掘及安全性评价、畜产品加工及品质控制, E-mail: xuqiantaru@126.com。

李婕 (1991-), 女, 硕士, 讲师, 研究方向: 畜产品加工与品质控制, E-mail: ljgsau@163.com。

consistently exceeded the FAO/WHO recommended values. In chemical score (CS) evaluation, methionine and cysteine were identified as the first limiting amino acids across all three breeds. All nine samples exhibited nutritional richness, with the ratio coefficient of amino acids (RCAA) for lysine (Lys), phenylalanine (Phe), and tyrosine (Tyr) exceeding 1. The hydrophobicity of MP isolated from the hind leg of Duolang sheep was found to be significantly higher than that of other samples ($P<0.05$), with a corresponding elevation in non-polar amino acid content. Furthermore, MP of the hind leg of Duolang sheep demonstrated superior emulsifying activity (EAI) and emulsion stability (ESI). When the gelation properties of MP from the external loin, neck, and hind leg were compared, the hind leg MP of all three breeds was identified to exhibit excellent gel quality, with the highest gel characteristics observed in Duolang sheep's hind leg MP. This study elucidated the nutritional quality and differences in myofibrillar protein characteristics of lamb from various breeds and cuts in southern Xinjiang, providing valuable insights for lamb farming and meat processing.

Key words: different breeds; different cuts; amino acids; characteristics of myofibrillar proteins

多浪羊是优良的新疆绵羊品种,具有体型大、产肉量多、肉质鲜嫩、繁殖率高等优良特性^[1]。和田羊产区分布于新疆南疆地区,具有体格小、产毛量、产肉率及繁殖率低等特性^[2]。策勒黑羊的产区主要位于塔克拉玛干大沙漠南缘昆仑山北麓的策勒县,其具有肉质细嫩、味道鲜美浓郁、膻味淡等特性^[3]。2022 年中国羊肉年产量达 524.5 万吨^[4]。随着人们对食品安全和营养健康关注度的日益提高,高蛋白、低脂肪和低胆固醇的羊肉需求量逐年增加,对于羊肉品质特性的研究也引起了广泛关注。现如今国内外对肉品品质的研究也进一步深入,研究内容倾向于肉品组织结构^[5]、肌原纤维蛋白特性^[6]、功能性基因组学分析^[7];如肌纤维结构,肌原纤维蛋白的水合、乳化、凝胶特性,差异基因表达量对肉品质影响等方面。目前我国专家和学者研究比较深入的肉羊品种主要为湖羊、宁夏滩羊和小尾寒羊等^[8],但对南疆地区绵羊肉品质进行系统性比较与分析的研究较少,因此,加强完善南疆肉羊品种的比较分析,对畜牧业发展有着极其重要的意义。

影响羊肉品质的因素有内在因素与外在因素,内在因素主要包括品种、年龄、性别、肌纤维类型及遗传基因型等^[9-10];其中,品种是肉品质间差异的关键因素,因控制肉品性状的基因不同,每个品种的羊肉所表达出来肉品质的物理形态及化学成分也有所不同。王莉梅等^[11]比较了戈壁羊与察哈尔羊的肌肉嫩度、蛋白质含量和氨基酸组成,发现戈壁羊优势明显($P<0.05$),但察哈尔羊的胴体重及肌肉色泽与戈壁羊相比优势明显($P<0.05$)。Migdal 等^[12]对喀尔巴阡山羊和萨南山羊肉品质分析的研究表明,喀尔巴阡山羊肉中的苯丙氨酸、组氨酸、脯氨酸、丙氨酸和酪氨酸含量均显著高于萨南山羊肉,并且喀尔巴阡山羊肉的剪切力、硬度也较低($P<0.05$),具有较好的咀嚼性,肉质更细腻。外在因素主要为饲养水平、应激反应、宰后处理等^[13]。肌肉总蛋白中肌原纤维蛋白(Myofibrillar Proteins, MP)约占比 50%~60%,是重要的结构蛋白。肉的种类、部位以及提取条件等影响肌原纤维蛋白提取量,其蛋白质的性能和特定蛋白质含量的不同及肉品间 pH 的差异,导致肌原纤维蛋

白乳化特性具有一定差异^[14],也是食品加工过程中产生差异的原因。

本研究中,外脊取自从通脊第 10 胸椎处切开所得的后半部分肉块,颈肉取自于羊脖两侧,羊后腿肉取自半腱肌股骨至后腿膝关节之间。这三个部位分别位于羊胴体的前、中、后三个部位,所测数据也更能体现肉羊品种的整体性能。目前针对多浪羊、和田羊及策勒黑羊营养品质与加工品质的研究较少。本研究通过对这三个品种羊的三个部位肉营养成分以及蛋白特性进行综合比较评价,探讨了品种和部位因素对其肉品品质特性成分的差异,以期后续肉羊的养殖及加工提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

EGTA、氯化钾、磷酸氢二钾、磷酸二氢钾等(均为分析纯) 国药集团化学试剂有限公司;大豆油 上海福临门食品有限公司;尿素 上海阿拉丁生化科技股份有限公司;溴酚蓝(BPB) 上海麦克林生化科技股份有限公司。

AM-3 高速匀浆机 日本 Nihonseiki Kaisha 公司;PHS-2F 型 pH 计 上海仪电科学仪器有限公司;TMS-PILOT 质构仪 北京盈盛恒泰科技有限责任公司;TGL-20bR 高速冷冻离心机 上海安亭科学仪器厂;UV-2450 紫外分光光度计 岛津企业管理(中国)有限公司;27368 荧光光度计 赛默飞世尔科技公司;LA8080 全自动氨基酸分析仪 日立科学仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 样品采集 从新疆津垦奥群农牧科技有限公司随机选取健康无病的 6 月龄的多浪羊、和田羊、策勒黑羊,均为公羊,每个品种取样 6 只,每只绵羊体重相近。均以青贮牧草、苜蓿、三叶草,并添加豆粕精料进行饲喂。宰前禁食 24 h,禁水 2 h。测试样品均按 GB/T 39918-2021《羊胴体及鲜肉分割》对原料羊进行屠宰和分割处理,将多浪羊颈肉(DJ)、多浪羊外脊(DW)、多浪羊后腿(DH)、和田羊颈肉(HJ)、和田羊外脊(HW)、和田羊后腿(HH)、策勒黑羊颈肉(CJ)、策勒黑羊外脊(CW)、策勒黑羊后腿(CH)肉样

装入干净的密封袋中,真空包装贮存于 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下,备用。

1.2.2 羊肉品质指标测定

1.2.2.1 pH 测定 按照 GB 5009.237-2016《食品安全国家标准食品 pH 值的测定》中的方法进行测定。

1.2.2.2 氨基酸含量测定 按照 GB 5009.124-2016《食品中氨基酸的测定》中的方法进行测定。

1.2.2.3 氨基酸营养价值评价 氨基酸评分(AAS)通过比较食物蛋白质中的必需氨基酸含量与 FAO/WHO 评分标准模式中相应氨基酸的含量来评估蛋白质的营养价值。计算公式为:

$$\text{AAS} = \frac{\text{样品蛋白质中氨基酸含量}(\text{mg/g})}{\text{FAO/WHO 式中相应氨基酸含量}(\text{mg/g})} \times 100$$

氨基酸化学评分(CS)以样品中某种氨基酸的含量与鸡蛋的蛋白质中每克该种氨基酸的含量的比值乘以 100 来表示。计算公式为:

$$\text{CS} = \frac{\text{样品中某种氨基酸的含量}(\text{mg/g})}{\text{鸡蛋蛋白质中相应的氨基酸的含量}(\text{mg/g})} \times 100$$

氨基酸比值系数(RCAA)通过计算食物蛋白质中各种氨基酸的 AAS 与所有氨基酸 AAS 的平均值的比值来评估蛋白质的营养价值。它考虑了所有氨基酸的平衡情况。计算公式为:

$$\text{RCAA} = \frac{\text{样品蛋白质中某种氨基酸的 AAS}}{\text{各种氨基酸 AAS 的平均值}}$$

1.2.3 肌原纤维蛋白特性测定

1.2.3.1 肌原纤维蛋白提取 参考李思蕾等^[15]的提取分离的方法并稍加调整。将解冻后的羊肉剔除脂肪、结缔组织并切碎,放入绞肉机以 3500 r/min 绞制 3 min。绞制后,取约 500 g 肉糜与 4 倍体积标准盐溶液(0.1 mol/L KCl、1 mmol/L EGTA、2 mmol/L MgCl_2 、20 mmol/L K_2HPO_4 、20 mmol/L KH_2PO_4)混合;在 12000 r/min 条件下均质 3 min。将均质后的肉糜混合液用 4 层纱布过滤,4 $^{\circ}\text{C}$ 条件下 6000 r/min 离心 20 min;离心后去除上清液。将沉淀与 4 倍体积(肉原始质量的 4 倍)标准盐溶液混合;重复上述步骤均质及离心 2 次;离心后去除上清液,将沉淀与 4 倍体积(肉原始质量的 4 倍)KCl 溶液混合;均质机均质 2 次,转速 6700 r/min,时间为 30 s/次;将均质后的肉糜混合液用四层纱布过滤,4 $^{\circ}\text{C}$ 条件下 6000 r/min 离心 20 min;离心后去除上清液,将沉淀重复上述步骤均质及离心 1 次;去除上清液后取出离心瓶底部沉淀,即为肌原纤维蛋白。

1.2.3.2 肌原纤维蛋白紫外吸收光谱扫描 参照 Li 等^[16]的方法,将提取出的蛋白质溶液进行稀释,使浓度为 1 mg/mL,用紫外分光光度计对蛋白进行紫外吸收光谱扫描,紫外波长为 200~360 nm,狭缝宽度 2 nm,中速扫描,每组样品扫描三次。

1.2.3.3 内源性色氨酸荧光检测 参考 Ji 等^[17]的方法并稍加修改。将提取出的蛋白质溶液进行稀释,使蛋白浓度为 0.1 mg/mL。用荧光光度计对其进行荧光光谱扫描,波长范围设置为 300~400 nm,激发波长设为 280 nm,扫描速度设为 1200 nm/min,狭缝宽度设为 5 nm,扫描间隔设为 20 ms,反应时间设为 0.1 s,每组样品进行三次扫描。

1.2.3.4 溶解度测定 参照 Zhang 等^[18]的方法。将 MP 配制成 5 mg/mL 的蛋白溶液。4 $^{\circ}\text{C}$ 静置 1 h 后,以 8000 r/min 离心 15 min,测定上清液的蛋白质量浓度,按下列公式计算蛋白溶解度:

$$\text{蛋白溶解度}(\%) = \frac{C_1}{C_2} \times 100$$

式中, C_1 为离心后上清液蛋白质量浓度(mg/mL); C_2 为离心前蛋白质量浓度(mg/mL)。

1.2.3.5 表面疏水性测定 参考 Na 等^[19]的方法稍加修改。吸取 1 mL、5 mg/mL 的蛋白质溶液,加入 200 μL 、1 mg/mL 的溴酚蓝溶液,混匀后反应 10 min,10000 $\times$ g 离心 5 min(4 $^{\circ}\text{C}$),取上清液稀释 10 倍后,置于 595 nm 波长处测定吸光度。未加样品的磷酸盐缓冲溶液为空白组。以溴酚蓝结合量表示表面疏水性。

$$\text{BPB 结合量}(\mu\text{g}) = \frac{200 \times (A_{\text{空白}} - A_{\text{样品}})}{A_{\text{空白}}}$$

1.2.3.6 乳化活性及乳化稳定性测定 参考 Tao 等^[20]的方法并略微修改。用磷酸盐缓冲溶液稀释蛋白溶液至 1 mg/mL,取 20 mL 蛋白质溶液与 5 mL 大豆油混合,13600 r/min 均质 2 min,于离心管底部取 50 μL 蛋白,加入 5 mL 0.1% SDS 溶液,涡旋使其混合,以 0.1% SDS 溶液作为空白对照,将紫外分光光度计波长设置为 500 nm,测定其吸光值(记为 A_0),乳状液静置 10 min 后,按照上述方法测定乳状液吸光值(记为 A_{10})。

$$\text{EAI}(\%) = \frac{2 \times 2.303 \times A_0 \times N}{10000 \times C \times (1 - \varphi)} \times 100$$

$$\text{ESI}(\%) = \frac{A_{10}}{A_0} \times 100$$

式中, φ : 油相体积分数(油的体积/乳浊液体积); C: 蛋白质浓度(g/mL); N: 稀释倍数。

1.2.3.7 巯基及二硫键含量的测定 参考 Liu 等^[21]的方法并稍加修改。用磷酸缓冲液(10 mmol/L, pH 7.0)将 MP 溶液稀释至 1 mg/mL,取 0.5 mL 蛋白质溶液与 4.5 mL 缓冲液(8 mol/L 尿素, 0.01 mol/L EDTA, 0.1 mol/L KH_2PO_4 , pH6.0)于离心管中混合,再加入 100 μL Ellman 试剂(0.01 mol/L 2-硝基苯甲酸, 0.01 mol/L KH_2PO_4 , pH6.0),振荡 30 s,使其充分混合,静置 25 min,最后在 412 nm 处测其吸光值,消光系数为 13600 L/(mol $\cdot$ cm);活性巯基的测定:除缓冲液中没有尿素外,其他方法和总巯基一样。计算公

式如下:

$$\text{巯基含量}(\mu\text{mol/g pro})=73.53 \times \frac{A}{C}$$

式中: C 为蛋白质量浓度, mg/mL; A 为样品吸光度值; 73.53 为常数。

$$\text{二硫键含量}(\mu\text{mol/g pro}) = \frac{\text{总巯基含量} - \text{活性巯基含量}}{2}$$

1.2.3.8 凝胶质构特性测定 参考 Xia 等^[22]的方法并稍加修改。使用质构仪测定凝胶的硬度、弹性、内聚性、咀嚼性等指标。测定参数为: P/0.5R 探头、测试前速率 1.0 mm/s、测试速率 0.5 mm/s、测后速率 1.0 mm/s、压缩变形率 50 %, 测试实验重复 5 次, 结果取平均值。

1.2.3.9 凝胶保水性测定 参考刘旺等^[23]的方法, 并稍加修改。称取 MP 蛋白凝胶质量为 m_1 , 并用滤纸包裹, 4 ℃、6000×g 离心 10 min, 去除离心管中的水分后称量凝胶质量 m_2 。保水性计算公式如下:

$$\text{保水性}(\%) = \frac{m_2}{m_1} \times 100$$

1.3 数据处理

实验各指标均测定 3 次, 实验数据用 Excel 软件进行处理, 计算平均值与标准差, 采用 SPSS 26.0 软件进行显著性差异分析, 以 $P < 0.05$ 为显著性检验标准, 采用 Origin 2021 进行作图。

2 结果与分析

2.1 不同品种和部位绵羊肉 pH 分析

pH 是肉品质重要指标之一, 动物屠宰后, 肌肉中肌糖原的无氧酵解产生乳酸, ATP 分解产生的磷酸根离子等会造成 pH 下降^[24]。新鲜肉的 pH 约在 5.8~6.2 之间, 次新鲜肉的 pH 在 6.3~6.6 之间, 变质肉的 pH 高于 6.7^[25]。本实验中, 所测多浪羊、和田羊、策勒黑羊的 pH 范围分别为: 5.45~5.96、5.77~5.85、5.61~5.86, 属于新鲜羊肉。由表 1 可知, 三个品种羊肉的外脊的 pH 大小依次为: 和田羊(5.82)>策勒黑羊(5.73)>多浪羊(5.53); 在颈肉中 pH 大小为: 多浪羊(5.96)>策勒黑羊(5.86)>和田羊(5.85); 这

表 1 不同品种及部位羊肉 pH 比较

Table 1 Comparison of pH of different varieties and parts of mutton

品种	部位	pH
多浪羊	外脊	5.53±0.04 ^{Cb}
	颈肉	5.96±0.02 ^{Aa}
	后腿	5.45±0.04 ^{Cc}
和田羊	外脊	5.82±0.05 ^{Aab}
	颈肉	5.85±0.02 ^{Ba}
	后腿	5.77±0.02 ^{Ab}
策勒黑羊	外脊	5.73±0.02 ^{Bb}
	颈肉	5.86±0.02 ^{Ba}
	后腿	5.61±0.01 ^{Bc}

注: 表中数据不同大写字母表示同部位不同品种间差异显著($P < 0.05$), 不同小写字母表示同品种不同部位间差异显著($P < 0.05$), 表 2、表 6 同。

可能是因为不同品种肉的糖酵解程度不同^[26]。且在同一品种羊肉中, 不同部位间的 pH 也存在显著差异, 其中多浪羊颈肉的 pH 显著高于外脊与后腿($P < 0.05$), 这可能是因为不同部位肌肉中, 快速酵解型肌纤维与慢速氧化型肌纤维组成比例不同, 使得肌肉间糖酵解潜力不同, 从而导致肉品间 pH 差异^[26]。

2.2 氨基酸含量分析

氨基化合物(氨基酸和蛋白质)和羰基化合物(还原糖类)发生的美拉德反应是形成风味物质的重要途径^[27]。多浪羊、和田羊与策勒黑羊三个部位氨基酸总量排序均为: 后腿>外脊>颈肉。其中, 多浪羊外脊的成人必需氨基酸(Adult essential amino acids, AEAA)含量显著高于和田羊与策勒黑羊($P < 0.05$)。策勒黑羊颈肉的婴儿必需氨基酸(Baby essential amino acids, BEAA)含量显著高于和田羊($P < 0.05$)。和田羊后腿的鲜味氨基酸含量显著高于外脊与颈肉($P < 0.05$), 在甜味氨基酸含量中, 多浪羊的外脊(11.55%)显著高于策勒黑羊(9.60%)与和田羊(9.31%)($P < 0.05$)。因此, 相较于和田羊与策勒黑羊, 多浪羊的外脊肉质更加鲜甜。表 2 中必需氨基酸含量最高的是亮氨酸和赖氨酸, 非必需氨基酸含量最高的是天冬氨酸和谷氨酸。这与俞彭欣等^[28]对和田羊、任晓璞等^[29]对多浪羊和王晶等^[30]对策勒黑羊的研究结果一致。此外, 三个品种羊肉中 AEAA/TAA 为 38.85%~43.16%, AEAA/NEAA 为 76.14%~89.77%, BEAA/TAA 为 48.90%~51.92%, BEAA/NEAA 为 99.51%~108.01%。FAO/WHO 将 EAA/TAA 在 40% 左右、EAA/NEAA 在 60% 以上的蛋白质定义为优质蛋白。本研究 9 个样品的成人必需氨基酸比重均达到 FAO/WHO 推荐值。此外, 三个品种羊肉的 BEAA/TAA 与 BEAA/NEAA 远超 FAO/WHO 推荐值。所以, 三者均为优质蛋白质肉类。

2.3 氨基酸营养评价结果

AAS 越高, 表示蛋白质的营养价值越高。由表 3 可知, 多浪羊外脊与后腿中 Thr 与 Leu 的 AAS 均高于和田羊与策勒黑羊。和田羊后腿中 Val、Met、Cys、Ile、Phe、Tyr 的 AAS 均高于其他品种。策勒黑羊颈肉的 AAS 均高于和田羊, 说明策勒黑羊颈肉的营养价值优于和田羊。此外, 从表 3 可知, Val 均为最低, 故而 Val 为多浪羊、和田羊与策勒黑羊共同的第一限制性氨基酸, AAS 值范围为 67.87~104.88。

CS 越高, 表示蛋白质的营养价值越高。由表 4 可知, 多浪羊、和田羊与策勒黑羊三个部位肉的第一限制氨基酸均为蛋氨酸+胱氨酸, CS 值范围为 47.80~75.86。不同品种间 CS 值大小均不相同, 其中, 后腿肉 Met+Cys 的 CS 值大小依次为: 和田羊(75.86)>多浪羊(75.24)>策勒黑羊(64.34), 说明策勒黑羊肠道消化率低于和田羊与多浪羊, 姜博^[31]也曾在对膨化大豆对仔猪的营养价值评定中持相同研究

表 2 多浪羊、和田羊、策勒黑羊各部位被测肌肉氨基酸含量(%)

Table 2 Muscle amino acid content measured in each part of Duolang sheep, Hetian sheep and Qira Black sheep (%)

氨基酸种类	呈味	多浪羊			和田羊			策勒黑羊		
		外脊	颈肉	后腿	外脊	颈肉	后腿	外脊	颈肉	后腿
苏氨酸(Thr)▲	甜(+)	0.92±0.03 ^{Ab}	0.74±0.03 ^{Ac}	0.99±0.03 ^{Aa}	0.76±0.03 ^{Bb}	0.60±0.04 ^{Bc}	0.87±0.02 ^{Ba}	0.72±0.05 ^{Bb}	0.72±0.03 ^{Aab}	0.81±0.04 ^{Ba}
缬氨酸(Val)▲	甜/苦(-)	1.02±0.03 ^{Aa}	0.69±0.05 ^{Ab}	1.00±0.02 ^{Aa}	0.76±0.05 ^{Bb}	0.66±0.05 ^{Ac}	0.95±0.05 ^{Aa}	0.76±0.02 ^{Bb}	0.75±0.04 ^{Ab}	0.88±0.02 ^{Ba}
蛋氨酸(Met)▲	苦/甜(-)	0.57±0.06 ^{Aa}	0.37±0.01 ^{Bb}	0.57±0.08 ^{Aa}	0.43±0.02 ^{Bb}	0.37±0.02 ^{Bc}	0.56±0.04 ^{Aa}	0.40±0.01 ^{Bb}	0.43±0.04 ^{Ab}	0.51±0.02 ^{Aa}
异亮氨酸(Ile)▲	苦(-)	0.92±0.03 ^{Aa}	0.62±0.04 ^{Ab}	0.96±0.03 ^{Aa}	0.70±0.04 ^{Bb}	0.59±0.03 ^{Ab}	0.89±0.08 ^{Aa}	0.70±0.08 ^{Bab}	0.65±0.03 ^{Ab}	0.84±0.08 ^{Aa}
亮氨酸(Leu)▲	苦(-)	1.74±0.05 ^{Aa}	1.24±0.10 ^{Ab}	1.68±0.08 ^{Aa}	1.35±0.07 ^{Bb}	1.23±0.05 ^{Ab}	1.56±0.08 ^{ABa}	1.43±0.05 ^{Ba}	1.33±0.01 ^{Ab}	1.47±0.06 ^{Ba}
苯丙氨酸(Phe)▲	苦(-)	0.81±0.04 ^{Aa}	0.57±0.01 ^{Cb}	0.83±0.05 ^{Aa}	0.62±0.06 ^{Bb}	0.73±0.03 ^{Aa}	0.77±0.01 ^{ABa}	0.83±0.01 ^{Aa}	0.63±0.01 ^{Bc}	0.72±0.03 ^{Bb}
赖氨酸(Lys)▲	甜/苦(-)	1.62±0.05 ^{Bb}	1.75±0.03 ^{Aa}	1.63±0.02 ^{Ab}	1.78±0.02 ^{Aa}	1.63±0.01 ^{Bb}	1.52±0.01 ^{Bc}	1.79±0.04 ^{Aa}	1.79±0.09 ^{Aa}	1.41±0.01 ^{Cb}
色氨酸(Trp)▲	苦(-)	0.28±0.04 ^{Aa}	0.27±0.03 ^{Aa}	0.27±0.02 ^{Aa}	0.27±0.04 ^{Aa}	0.26±0.02 ^{Aa}	0.25±0.01 ^{ABa}	0.26±0.03 ^{Aa}	0.24±0.02 ^{Aa}	0.23±0.01 ^{Ba}
天冬氨酸(Asp)	甜/鲜(+)	1.88±0.08 ^{Aa}	1.43±0.01 ^{Ab}	1.95±0.10 ^{Aa}	1.40±0.10 ^{Bb}	1.24±0.02 ^{Bc}	1.86±0.01 ^{Aa}	1.50±0.01 ^{Bb}	1.50±0.07 ^{Ab}	1.69±0.01 ^{Ba}
丝氨酸(Ser)	甜(+)	0.84±0.01 ^{Aa}	0.81±0.02 ^{Aa}	0.84±0.05 ^{Aa}	0.66±0.02 ^{Bb}	0.68±0.03 ^{Bab}	0.79±0.10 ^{Aa}	0.82±0.10 ^{Aa}	0.84±0.02 ^{Aa}	0.73±0.03 ^{Aa}
谷氨酸(Glu)	鲜(+)	3.21±0.04 ^{Ab}	2.56±0.03 ^{Ac}	3.35±0.04 ^{Aa}	2.61±0.07 ^{Bb}	2.17±0.02 ^{Bc}	3.04±0.12 ^{Ba}	2.56±0.07 ^{Bb}	2.56±0.01 ^{Ab}	2.79±0.04 ^{Ca}
甘氨酸(Gly)	甜(+)	0.96±0.04 ^{Ab}	0.91±0.02 ^{Ab}	1.11±0.03 ^{Aa}	0.75±0.02 ^{Bb}	0.59±0.05 ^{Cc}	0.86±0.01 ^{Ba}	0.80±0.02 ^{Ba}	0.82±0.02 ^{Ba}	0.82±0.01 ^{Ca}
丙氨酸(Ala)	甜(+)	1.21±0.02 ^{Ab}	0.96±0.02 ^{Ac}	1.26±0.02 ^{Aa}	0.97±0.08 ^{Bb}	0.78±0.02 ^{Bc}	1.13±0.02 ^{Ba}	0.99±0.04 ^{Bab}	0.96±0.01 ^{Ab}	1.03±0.02 ^{Ca}
胱氨酸(Cys)	甜/苦(+)	0.24±0.03 ^{Aa}	0.15±0.01 ^{Ab}	0.25±0.06 ^{Aa}	0.16±0.02 ^{Bb}	0.16±0.03 ^{Ab}	0.23±0.04 ^{ABa}	0.17±0.03 ^{Ba}	0.15±0.01 ^{Aa}	0.16±0.03 ^{Ba}
酪氨酸(Tyr)	苦(-)	0.74±0.05 ^{Aa}	0.57±0.04 ^{Ab}	0.72±0.01 ^{Aa}	0.63±0.03 ^{Ba}	0.68±0.09 ^{Aa}	0.70±0.05 ^{Aa}	0.75±0.05 ^{Aa}	0.56±0.07 ^{Ab}	0.66±0.05 ^{ABa}
脯氨酸(Pro)	甜/苦(+)	0.85±0.03 ^{Ab}	0.67±0.01 ^{Ac}	0.93±0.02 ^{Aa}	0.58±0.03 ^{Bb}	0.46±0.05 ^{Cc}	0.73±0.01 ^{Ba}	0.60±0.01 ^{Bab}	0.58±0.05 ^{Bb}	0.67±0.05 ^{Ba}
精氨酸(Arg)▼	甜/苦(+)	1.43±0.02 ^{Ab}	1.05±0.04 ^{Ac}	1.51±0.02 ^{Aa}	1.07±0.05 ^{Bb}	0.86±0.02 ^{Bc}	1.35±0.01 ^{Ba}	1.06±0.06 ^{Bb}	1.08±0.01 ^{Ab}	1.22±0.01 ^{Ca}
组氨酸(His)▼	苦(-)	0.68±0.02 ^{Aa}	0.41±0.01 ^{Ac}	0.55±0.04 ^{Bb}	0.35±0.01 ^{Bb}	0.37±0.06 ^{ABb}	0.70±0.02 ^{Aa}	0.36±0.03 ^{Bb}	0.32±0.03 ^{Bb}	0.48±0.02 ^{Ca}
氨基酸总量(TAA)		19.92±0.20 ^{Ab}	15.76±0.23 ^{Ac}	20.40±0.18 ^{Aa}	15.84±0.19 ^{Cb}	14.02±0.31 ^{Bc}	18.76±0.15 ^{Ba}	16.48±0.17 ^{Bb}	15.90±0.24 ^{Ac}	17.11±0.16 ^{Ca}
成人必需氨基酸(AEAA)		7.89±0.15 ^{Aa}	6.25±0.14 ^{ABb}	7.92±0.06 ^{Aa}	6.67±0.05 ^{Cb}	6.05±0.24 ^{Bc}	7.37±0.09 ^{Ba}	6.88±0.04 ^{Ba}	6.54±0.13 ^{Ab}	6.86±0.03 ^{Ca}
婴儿必需氨基酸(BEAA)		9.99±0.17 ^{Aa}	7.71±0.16 ^{Ab}	9.99±0.07 ^{Aa}	8.08±0.08 ^{Bb}	7.28±0.18 ^{Bc}	9.42±0.08 ^{Ba}	8.30±0.06 ^{Bb}	7.93±0.17 ^{Ac}	8.56±0.02 ^{Ca}
非必需氨基酸(NEAA)		9.93±0.09 ^{Ab}	8.06±0.11 ^{Ac}	10.41±0.22 ^{Aa}	7.76±0.13 ^{Cb}	6.74±0.14 ^{Bc}	9.34±0.12 ^{Ba}	8.19±0.11 ^{Bb}	7.97±0.08 ^{Ab}	8.55±0.14 ^{Ca}
鲜味氨基酸(FAA)		5.09±0.04 ^{Ab}	3.98±0.04 ^{Ac}	5.30±0.07 ^{Aa}	4.01±0.11 ^{Bb}	3.41±0.04 ^{Bc}	4.90±0.12 ^{Ba}	4.06±0.06 ^{Bb}	4.06±0.08 ^{Ab}	4.47±0.03 ^{Ca}
甜味氨基酸(SAA)		11.55±0.07 ^{Ab}	9.53±0.12 ^{Ac}	12.04±0.35 ^{Aa}	9.31±0.23 ^{Bb}	8.01±0.13 ^{Bc}	10.84±0.20 ^{Ba}	9.60±0.12 ^{Bb}	9.61±0.14 ^{Ab}	9.92±0.08 ^{Ca}
AEAA/TAA		39.59±0.40 ^{Ba}	39.64±0.51 ^{Ca}	38.85±0.42 ^{Ba}	42.12±0.30 ^{Aa}	43.16±0.72 ^{Aa}	39.29±0.44 ^{Bb}	41.72±0.56 ^{Aa}	41.14±0.27 ^{Ba}	40.12±0.17 ^{Ab}
BEAA/TAA		50.14±0.47 ^{Ba}	48.90±0.51 ^{Cb}	48.97±0.65 ^{Bb}	51.02±0.31 ^{Ab}	51.92±0.24 ^{Aa}	50.22±0.37 ^{Ac}	50.34±0.16 ^{ABa}	49.88±0.35 ^{Ba}	50.04±0.37 ^{Aa}
NEAA/TAA		49.86±0.47 ^{Ab}	51.10±0.51 ^{Aa}	51.03±0.65 ^{Aa}	48.98±0.31 ^{Bb}	48.08±0.24 ^{Cc}	49.78±0.37 ^{Ba}	49.67±0.16 ^{ABa}	50.12±0.35 ^{Ba}	49.96±0.37 ^{Ba}
FAA/TAA		25.57±0.41 ^{Aa}	25.26±0.48 ^{Aa}	25.98±0.15 ^{Aa}	25.32±0.73 ^{ABa}	24.30±0.31 ^{Bb}	26.14±0.74 ^{Aa}	24.66±0.59 ^{Ab}	25.54±0.11 ^{Aa}	26.12±0.17 ^{Aa}
SAA/TAA		57.97±0.22 ^{Ab}	60.47±0.17 ^{Aa}	59.02±1.25 ^{ABa}	58.80±0.75 ^{Aa}	57.09±0.34 ^{Bb}	57.80±0.73 ^{ABa}	58.26±0.15 ^{Ab}	60.46±0.16 ^{Aa}	58.02±0.09 ^{Ab}
AEAA/NEAA		79.42±1.53 ^{Ba}	77.58±1.75 ^{Ca}	76.14±1.78 ^{Ba}	85.98±1.12 ^{Ab}	89.77±1.71 ^{Aa}	78.93±1.46 ^{ABc}	84.01±1.35 ^{Aa}	82.07±1.08 ^{ABa}	80.30±0.94 ^{ABa}
BEAA/NEAA		100.58±1.86 ^{Bb}	104.16±1.39 ^{Ca}	101.35±0.66 ^{Bab}	104.16±1.29 ^{ABa}	108.01±1.05 ^{Aa}	100.88±1.47 ^{Ac}	101.35±0.66 ^{ABa}	99.51±1.37 ^{Ba}	100.15±1.50 ^{Aa}
非极性氨基酸比例		42.01±0.50 ^{Aa}	40.00±0.54 ^{Ab}	42.17±0.38 ^{Aa}	40.60±0.94 ^{Ba}	40.30±0.50 ^{Aa}	41.03±0.24 ^{Ba}	41.04±0.32 ^{ABb}	40.21±0.50 ^{Ac}	41.93±0.18 ^{Aa}

注: ▲表示必需氨基酸, ▼表示非必需氨基酸。

表 3 多浪羊、和田羊、策勒黑羊各部位氨基酸评分(AAS)对比

Table 3 Comparison of amino acid scores (AAS) in different parts of Duolang sheep, Hetian sheep and Qira Black sheep

氨基酸种类	FAO/WHO模式(mg/g蛋白质)	多浪羊			和田羊			策勒黑羊		
		外脊	颈肉	后腿	外脊	颈肉	后腿	外脊	颈肉	后腿
苏氨酸(Thr)	40	125.42	94.97	125.20	97.94	77.12	119.05	94.14	92.78	102.32
缬氨酸(Val)	50	104.88 [*]	72.18 [*]	104.60 [*]	83.19 [*]	67.87 [*]	104.88 [*]	79.50 [*]	83.19 [*]	96.33 [*]
蛋氨酸+胱氨酸(Met+Cys)	35	118.98	79.26	122.54	92.27	77.85	123.54	85.18	90.70	104.78
异亮氨酸(Ile)	40	118.25	81.07	113.80	95.78	75.83	121.79	91.53	88.94	114.95
亮氨酸(Leu)	70	127.80	92.64	125.52	105.56	90.34	121.98	106.85	103.99	114.94
苯丙氨酸+酪氨酸(Phe+Tyr)	60	132.82	99.37	135.11	114.03	120.82	139.25	137.73	108.55	125.89
赖氨酸(Lys)	55	151.44	166.41	155.01	177.14	152.37	151.27	170.22	178.13	140.32

注: * 表示第一限制性氨基酸, 表4同。

结果。

当 RCAA>1, 则表明该种必需氨基酸相对过剩; 若 RCAA<1, 表明该种必需氨基酸相对缺乏; RCAA 最小者为该食物中的限制性氨基酸。由表 5 可知, 三个品种羊肉苯丙氨酸与酪氨酸的 RCAA 值范围分别为: 1.01~1.07、1.04~1.28、1.02~1.26, 赖氨酸的

RCAA 值范围分别为: 1.21~1.70、1.20~1.62、1.23~1.67。9 个样品中 Phe、Tyr 与 Lys 的 RCAA 值均大于 1, 说明三者均含有丰富的 Phe、Tyr 与 Lys。因此, 日常饮食中适当加入该三个品种的羊肉有助于平衡膳食结构, 可以减少机体对 Lys、Phe 与 Tyr 缺乏的可能。

表 4 多浪羊、和田羊、策勒黑羊各部位氨基酸化学评分(CS)对比

Table 4 Comparison of amino acid chemical scores (CS) of different parts of Duolang sheep, Hetian sheep and Qira Black sheep

氨基酸种类	卵清蛋白(mg/g蛋白质)	多浪羊			和田羊			策勒黑羊		
		外脊	颈肉	后腿	外脊	颈肉	后腿	外脊	颈肉	后腿
苏氨酸(Thr)	47	106.74	80.83	106.55	83.35	65.63	101.32	80.12	78.96	87.08
缬氨酸(Val)	66	79.46	54.68	79.24	63.03	51.41	79.45	60.23	63.03	72.98
蛋氨酸+胱氨酸(Met+Cys)	57	73.06*	48.67*	75.24*	56.66*	47.80*	75.86*	52.30*	55.70*	64.34*
异亮氨酸(Ile)	54	87.59	60.05	84.30	70.95	56.17	90.21	67.80	65.88	85.15
亮氨酸(Leu)	86	104.03	75.41	102.17	85.92	73.53	99.29	86.97	84.65	93.56
苯丙氨酸+酪氨酸(Phe+Tyr)	93	85.69	64.11	87.17	73.56	77.95	89.84	88.86	70.03	81.22
赖氨酸(Lys)	70	118.99	130.75	121.79	139.18	119.72	118.85	133.74	139.96	110.25

表 5 多浪羊、和田羊、策勒黑羊各部位氨基酸比值系数(RC)对比

Table 5 Comparison of amino acid ratio coefficients (RC) of different parts of Duolang sheep, Hetian sheep and Qira Black sheep

氨基酸种类	多浪羊			和田羊			策勒黑羊		
	外脊	颈肉	后腿	外脊	颈肉	后腿	外脊	颈肉	后腿
苏氨酸(Thr)	1.00	0.97	0.99	0.90	0.82	0.95	0.86	0.87	0.90
缬氨酸(Val)	0.83	0.74	0.83	0.76	0.72	0.83	0.73	0.78	0.84
蛋氨酸+胱氨酸(Met+Cys)	0.95	0.81	0.97	0.84	0.82	0.98	0.78	0.85	0.92
异亮氨酸(Ile)	0.94	0.83	0.90	0.88	0.80	0.97	0.84	0.83	1.01
亮氨酸(Leu)	1.02	0.95	1.00	0.96	0.95	0.97	0.98	0.98	1.01
苯丙氨酸+酪氨酸(Phe+Tyr)	1.06	1.01	1.07	1.04	1.28	1.11	1.26	1.02	1.10
赖氨酸(Lys)	1.21	1.70	1.23	1.62	1.61	1.20	1.56	1.67	1.23

2.4 紫外吸收光谱分析

氨基酸 R 基侧链含有芳香环的有 Tyr、Trp 和 Phe 这 3 种芳香族氨基酸。当蛋白质发生变性或展开时,包藏在蛋白质内部的芳香族氨基酸会暴露于表面,当残基侧链基团通过紫外区波段时则会产生特征光谱,依据紫外吸收光谱的变化可反映这些基团所处的微环境与蛋白质结构^[32]。如图 1 所示,样品的紫外吸收二阶导光谱在 287 nm、295 nm 附近有两个正吸收峰,也有两个负吸收峰在 284 nm、292 nm 附近。其中 287 nm 处的峰为 Tyr 特征吸收峰^[16],而

295 nm 处的峰为 Trp 特征吸收峰^[33]。紫外光谱的二阶导数图谱相较于紫外原始图谱更能反映出对应波长的氨基酸含量。由图 1 可知,多浪羊、和田羊、策勒黑羊各部位肌原纤维蛋白的紫外吸收光谱在波长为 287 nm 附近的峰值由高到低的顺序为: CW>DW>DH>HH>HJ>CH>HW>DJ>CJ。在表 2 中, CW 的 Tyr 含量最高,其中 HW、DJ、CJ 的 Tyr 含量均明显低于其他样品, CW、DW、DH 的 Tyr 含量则相对较高。这与紫外吸收光谱的分析结果一致。

2.5 荧光光谱分析

9 种肌原纤维蛋白中含有芳香结构的氨基酸在 280 nm 激发波长下会发射荧光,以此可分析其蛋白质的空间构象。如图 2 所示,9 种肌原纤维蛋白的最大吸收波长都在 335 nm 附近。Wu 等^[34]曾表明 Trp 残基是蛋白质所有氨基酸残基中单电子氧化电位最低的氨基酸, Trp 荧光的最大发射波长($\lambda_{\max}$)小于 331 nm,表明大部分 Trp 残基在内部,即处于非极性环境中,反之, Trp 则处于外部极性环境中。因此,9 种肌原纤维蛋白 Trp 所处微环境基本相似,都处于外部极性环境中,说明 9 种肌原纤维蛋白的结构较松散,蛋白内部的 Trp 容易转移到外部极性环境中;虽然 9 种肌原纤维蛋白的 $\lambda_{\max}$ 相近,但不同品种及部位肌原纤维蛋白的荧光强度存在差异,是因为不同品种及部位肌原纤维蛋白表面所暴露的 Trp 含量不同,荧光强度越大,其表面暴露的 Trp 含量越多^[15]。由表 2 可知,多浪羊、和田羊、策勒黑羊各部位的 Trp 含量由高到低的顺序为: DW>HW>DJ>CW>DH>HJ>CJ>HH>CH,其中 DW 的 Trp 含量最

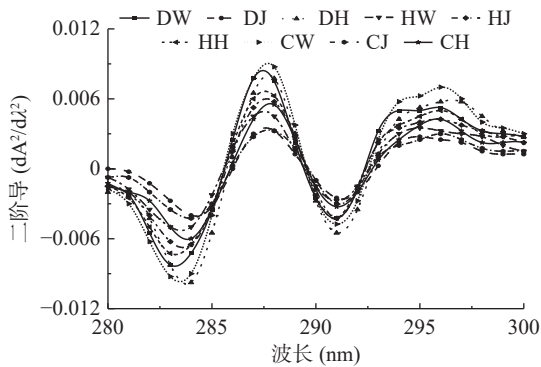


图 1 多浪羊、和田羊、策勒黑羊各部位肌原纤维蛋白紫外光谱的二阶导数图谱

Fig.1 Second derivative UV spectrum of myofibrillar protein in different parts of Duolang sheep, Hotan sheep and Qira Black sheep

注: 图中各曲线表示为, DW: 多浪羊外脊, DJ: 多浪羊颈肉, DH: 多浪羊后腿, HW: 和田羊外脊, HJ: 和田羊颈肉, HH: 和田羊后腿, CW: 策勒黑羊外脊, CJ: 策勒黑羊颈肉, CH: 策勒黑羊后腿, 图 2、图 5~图 6 同。

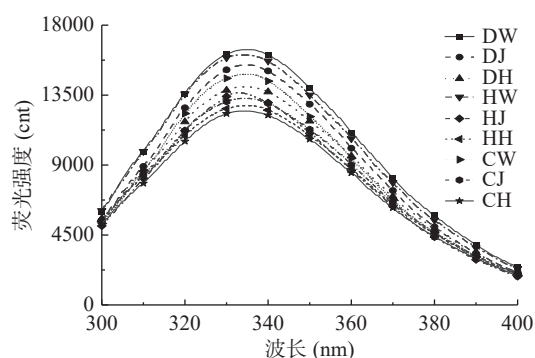


图2 多浪羊、和田羊、策勒黑羊各部位肌原纤维蛋白荧光光谱

Fig.2 Fluorescence spectra of myofibrillar protein in different parts of Duolang sheep, Hotan sheep and Qira Black sheep

高, CH 的 Trp 含量最低, 其分析结果与荧光光谱相似。结果表明 DW 的三级结构最不稳定。另外, 疏水性 Trp 的含量变化不能代表蛋白质的表面疏水性, 蛋白质的表面疏水性是蛋白质表面的所有疏水性基团含量^[35], 其中包含 Trp, 因此 Trp 的含量与表面疏水性结果有不同之处也有相似之处。

2.6 表面疏水性分析

疏水基团的暴露程度是反映蛋白质疏水性的重要因素, 也是对蛋白质表面活性进行评估的重要指标。李艳等^[36]曾发现非极性氨基酸含量影响蛋白质的表面疏水性, 当蛋白中非极性氨基酸比例较高时则表现出较高的表面疏水性。由表 3 可知, 多浪羊、和田羊与策勒黑羊三个部位肉非极性氨基酸比例范围分别为: 40.00%~42.17%、40.30%~41.03%、40.21%~41.93%, 多浪羊后腿肉的非极性氨基酸比例显著高于和田羊($P<0.05$), 对比图 3, 在溴酚蓝与蛋白质表面疏水基团结合量中, 发现多浪羊后腿 MP 的疏水性也显著高于和田羊($P<0.05$), 可能是由于其所含非极性氨基酸较高。此外, 同品种不同部位

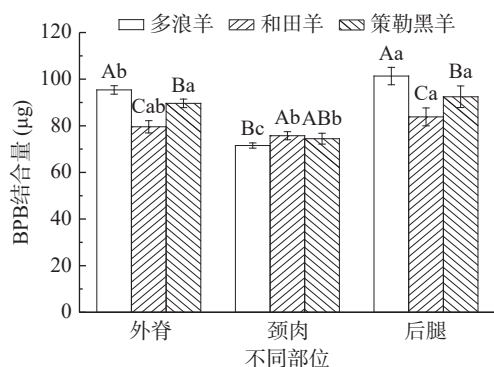


图3 多浪羊、和田羊、策勒黑羊各部位肌原纤维蛋白的表面疏水性

Fig.3 Surface hydrophobicity of myofibrillar protein in different parts of Duolang sheep, Hetian sheep and Qira Black sheep

注: 不同大写字母表示同部位不同品种间差异显著($P<0.05$), 不同小写字母表示同品种不同部位间差异显著($P<0.05$), 图4~图8同。

间的结合量也存在差异, 策勒黑羊三个部位 BPB 结合量大小依次为: 后腿(92.45)>外脊(89.63)>颈肉(74.47), 后腿的疏水性显著高于颈肉($P<0.05$)。这可能是因为蛋白质分子链伸展引起疏水侧链(芳香族氨基酸及疏水性脂肪族氨基酸)的暴露程度不同, 使肽链螺旋结构发生不同变化引起的^[37-38]。

2.7 溶解度分析

蛋白质表面极性基团与水分子相互作用后, 蛋白质在水中分散的程度称为蛋白质的溶解性^[39]。高溶解性蛋白质通常具有良好的加工特性, 在食品加工中相较于不溶性蛋白的应用价值更广^[40]。图 4 中, 和田羊后腿肌原纤维蛋白的溶解度显著高于多浪羊($P<0.05$), 许多研究表明, 肉的 pH 与其溶解度呈正比, 较高 pH 的肉质的肌原纤维蛋白在水中分散程度更好^[41]。这是因为, pH 通过改变蛋白质氨基酸侧链电荷分布, 从而影响蛋白质分子间的相互作用, 与蛋白质的等电点相关。当介质 pH 远离蛋白质的等电点时, 该蛋白质带同种电荷, 在离子-偶极相互作用下, 带电的蛋白质增强了其与水分子之间的相互作用, 因此蛋白的溶解度增加^[42]。对比图 4 和表 1 中 pH 发现, 由于和田羊后腿的 pH 显著高于多浪羊($P<0.05$), 导致和田羊后腿 MP 的溶解度显著高于多浪羊($P<0.05$), 研究结果与上述结论相符。此外, 李梁宵^[43]在研究核桃蛋白结构时发现, 当球蛋白表面含有较多疏水性残基时, 蛋白质与水分子之间会产生斥力, 进而导致蛋白质发生聚集和沉淀, 从而降低蛋白质的溶解度。因此, 表面疏水性越大, 蛋白质的溶解度越小, 图 3 中和田羊颈肉的肌原纤维蛋白的疏水性显著高于多浪羊($P<0.05$), 图 4 中和田羊颈肉的肌原纤维蛋白的溶解度低于多浪羊, 与溶解度和疏水性呈负相关的结论相符。

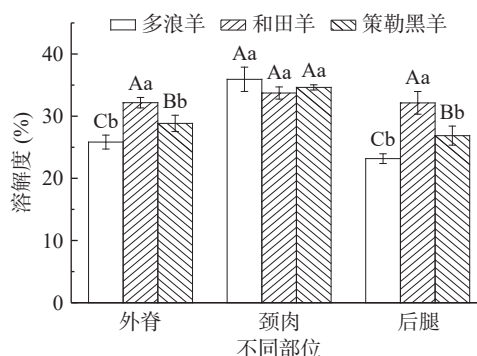


图4 多浪羊、和田羊、策勒黑羊各部位肌原纤维蛋白的溶解度

Fig.4 Solubility of myofibrillar protein in different parts of Duolang sheep, Hotan sheep and Qira Black sheep

2.8 乳化性及乳化稳定性分析

乳化活性(EAI)是指物质在液体介质中形成乳液的能力。乳化活性物质通常被称为乳化剂, 能够降低液体之间的表面张力, 从而使两种不相溶的液体(比如水和油)能够均匀地混合在一起形成乳液^[44]。

由图5可知,多浪羊后腿肌原纤维蛋白的EAI显著高于和田羊与策勒黑羊($P<0.05$)。陆健康等^[45]在对多浪羊肉肌原纤维蛋白乳化性的研究中发现,EAI随着pH的增大而减小。由表1可知,多浪羊后腿pH显著低于和田羊与策勒黑羊($P<0.05$),与其研究结论一致。表明等电点附近蛋白质不带电或带很少电,导致蛋白质的疏水基团暴露在外面,从而增加了蛋白质分子的吸油能力,使其更有利于体系乳化。吴菊清^[46]对猪肉肌原纤维蛋白乳化特性研究中发现,当蛋白质溶解能力相近时,肌原纤维蛋白的表面疏水性越高,其乳化能力就越强。对比图3与图4,本实验具有相同的研究结果。

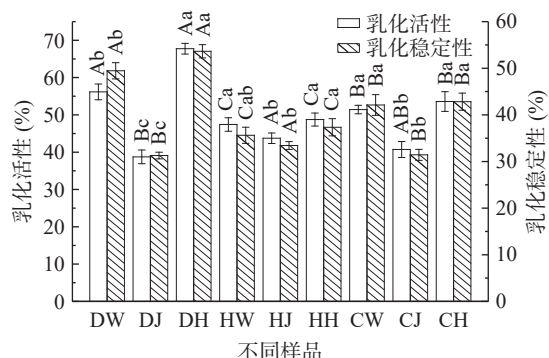


图5 多浪羊、和田羊、策勒黑羊各部位肌原纤维蛋白的EAI与ESI

Fig.5 EAI and ESI of myofibrillar protein in different parts of Duolang sheep, Hotan sheep and Qira Black sheep

乳化液保持明显稳定状态并且不产生两相分层不稳定现象的特性称为乳化稳定性(ESI)。由图5可知,多浪羊外脊肌原纤维蛋白ESI显著高于和田羊与策勒黑羊($P<0.05$),此外,多浪羊三个部位肌原纤维蛋白的ESI大小依次为:后腿(53.64%)>外脊(49.46%)>颈肉(31.28%),存在显著性差异($P<0.05$),和田羊颈肉肌原纤维蛋白的ESI显著高于多浪羊($P<0.05$)。与图5中乳化活性指数趋势一致。李琳^[47]在对驼肉肌原纤维蛋白乳化性的研究中也发现,ESI与EAI具有相同的趋势。本研究结果与之相近。

2.9 巯基含量分析

巯基基团也是与蛋白质功能特性密切相关的官能团之一^[48]。总巯基为埋藏在蛋白分子内部与暴露在蛋白分子表面的巯基之和,其中暴露于分子表面的巯基可以通过氧化相邻蛋白质链上的两个Cys残基形成二硫键,是维持蛋白质三级和四级结构的关键因素^[49]。由图6可知,9个样品MP的总巯基含量由高到低的顺序为:DH>DW>HH>CH>CW>DJ>CJ>HW>HJ,其中DH、DW、HH的MP总巯基含量显著高于其他样品($P<0.05$),CH、CW、DJ的次之。在图6中,9个样品MP的活性巯基含量的顺序依次为:DH>DW>HH>CH>CW>DJ>CJ>HW>HJ,趋势与总巯基含量相同。李可等^[50]曾研究表明,当MP

总巯基含量较多时,其分子表面的活性巯基也会更多,与本研究结果相似。蛋白质中的巯基可经过氧化反应转化形成二硫键,在巯基含量多的样品中二硫键含量少,呈现相反的趋势^[51]。在图7中,9个样品MP的二硫键含量大小依次为:DW>DH>CH>HH>CW>CJ>DJ>HW>HJ,实验结果所得趋势与其不符,可能是因为本研究实验材料为新鲜生肉,并未加热及氧化处理,MP的二硫键含量取决于不同样品间总巯基与活性巯基含量。糟龙^[52]曾对不同品种杏仁蛋白特性研究,本研究与之具有相同实验结果。

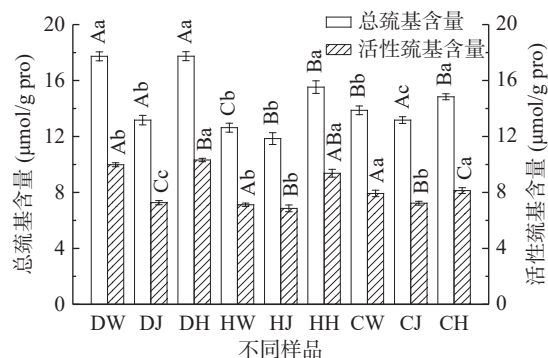


图6 多浪羊、和田羊、策勒黑羊各部位肌原纤维蛋白的巯基含量

Fig.6 Mercapto contents of myofibrillar protein in different parts of Duolang sheep, Hetian sheep and Qira Black sheep

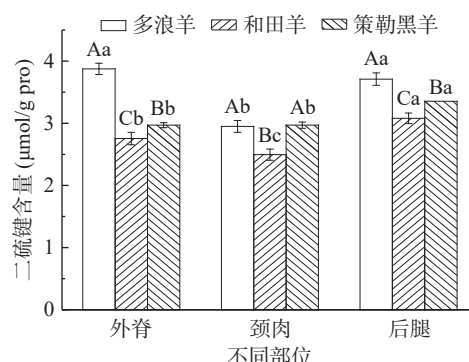


图7 多浪羊、和田羊、策勒黑羊各部位肌原纤维蛋白的二硫键含量

Fig.7 Disulfide bond contents of myofibrillar protein in different parts of Duolang sheep, Hetian sheep and Qira Black sheep

2.10 凝胶保水分析

风味颜色质地是影响感官评价的重要因素,凝胶保水性强弱对其具有一定的影响,因此保水性一定程度影响肉的经济价值^[53]。由图8可知,三个部位MP的凝胶保水性范围分别为:外脊(59.69%~64.02%)、颈肉(56.89%~58.95%)、后腿(61.29%~66.63%),三个品种羊肉后腿的凝胶保水性显著优于外脊与颈肉($P<0.05$),同部位不同品种间的凝胶保水性也均不相同。其中,多浪羊外脊凝胶保水性优于和田羊与策勒黑羊($P<0.05$),颈肉的凝胶保水性低于和田羊与策勒黑羊($P<0.05$)。Per等^[54]曾研究表明,肉制品的保水性与肌肉中肌浆与蛋白质的相互作用以

及静电排斥效应有重要关系。当肌原纤维蛋白发生氧化时, 蛋白凝胶化会被破坏, 肌原纤维蛋白的凝胶保水性也会随之下降^[55]。此外, 氨基酸衍生物的形成也会影响肉制品中水的状态和分布^[56]。所以, 肌原纤维蛋白氧化程度与氨基酸衍生物的存在可能是 9 个样品的凝胶保水性产生差异的原因。

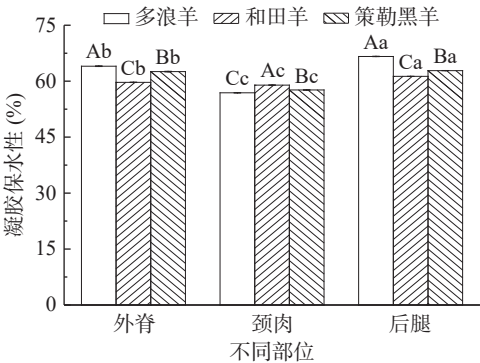


图 8 多浪羊、和田羊、策勒黑羊各部位肌原纤维蛋白的凝胶保水性

Fig. 8 Gel water retention of myofibrillar protein in different parts of Duolang sheep, Hetian sheep and Qira Black sheep

2.11 凝胶质构特性分析

肉制品凝胶是溶胶中的蛋白质分子在一定条件下互相连接形成空间网状结构, 一定程度影响肉制品的外观、质地、保水性、保油性以及出品率等, 为肉制品加工过程中重要的加工品质之一^[57]。由表 6 可知, 9 个样品 MP 的凝胶硬度、凝胶弹性、凝胶内聚性、凝胶咀嚼性均存在差异。对比凝胶硬度发现, 三个品种颈肉 MP 凝胶硬度均高于同品种其他部位 ($P<0.05$), 而后腿均为最低, 说明后腿的嫩度优于外脊与颈肉。和田羊颈肉 MP 的凝胶弹性显著高于其他样品 ($P<0.05$), 说明和田羊颈肉的 MP 之间结合更紧密。对比同品种不同部位间 MP 的凝胶内聚性发现, 颈肉均高于其他部位, 说明在挤压变形过程中其不容易脱离或断裂。此外, 还发现外脊 MP 的凝胶内聚性均低于其他部位, 说明三个品种羊肉的外脊部位口感优于其他部位。9 个样品 MP 的凝胶咀嚼性大

表 6 多浪羊、和田羊、策勒黑羊各部位肌原纤维蛋白凝胶质构比较

Table 6 Comparison of gel texture of myofibrillar protein in different parts of Duolang sheep, Hetian sheep and Qira Black sheep

品种	部位	硬度(g)	弹性	内聚性	咀嚼性(g)
多浪羊	外脊	18.62±1.66 ^{Ab}	0.54±0.13 ^{Aa}	0.22±0.04 ^{Aa}	6.23±1.20 ^{Ab}
	颈肉	27.66±2.96 ^{Aa}	0.61±0.09 ^{Aa}	0.29±0.01 ^{Aa}	10.26±1.27 ^{Aa}
	后腿	17.37±3.33 ^{Ab}	0.40±0.07 ^{Aa}	0.23±0.05 ^{Ba}	5.68±1.71 ^{Ab}
和田羊	外脊	23.92±2.21 ^{Aa}	0.44±0.12 ^{Aa}	0.21±0.03 ^{Ab}	8.43±1.53 ^{Aa}
	颈肉	25.87±1.79 ^{Aa}	0.64±0.10 ^{Aa}	0.37±0.07 ^{Aa}	9.06±1.33 ^{Aa}
	后腿	22.45±2.01 ^{Aa}	0.51±0.08 ^{Aa}	0.32±0.03 ^{Aa}	8.37±1.54 ^{Aa}
策勒黑羊	外脊	21.67±3.94 ^{Aa}	0.54±0.06 ^{Aa}	0.23±0.05 ^{Ab}	8.01±1.11 ^{ABab}
	颈肉	26.09±4.31 ^{Aa}	0.60±0.11 ^{Aa}	0.35±0.07 ^{Aa}	9.13±0.89 ^{Aa}
	后腿	19.43±5.54 ^{Aa}	0.47±0.09 ^{Aa}	0.26±0.03 ^{ABab}	6.52±1.20 ^{Ab}

小依次为: DJ>CJ>HJ>HW>HH>CW>CH>DW>DH, 咀嚼性越大说明肉质嚼劲与韧性较高, 表中 MP 凝胶硬度大小趋势与咀嚼性一致, MP 凝胶咀嚼性与凝胶硬度呈正相关。由于多浪羊后腿 MP 相较于和田羊与策勒黑羊具有较好的凝胶硬度、弹性及咀嚼性, 且在图 8 中, 多浪羊后腿 MP 的凝胶保水性也显著优于其他样品 ($P<0.05$), 所以多浪羊的后腿肉具有更好的凝胶品质。

3 结论

实验研究表明, 9 个样品均含有丰富的氨基酸, 其中, 多浪羊与策勒黑羊颈肉较鲜甜, 所测 9 个样品均含有丰富的 Lys、Phe 与 Tyr, 所以三者可作为优质肉类食物。蛋白特性检测实验发现, 多浪羊后腿因其具有较好的 EAI 与 ESI, 所以更适宜用于加工成乳化型食品, 并且三个品种羊的后腿肉均具有较好的凝胶品质。总之, 多浪羊、和田羊、策勒黑羊的外脊、颈肉及后腿肉品质优异且具有良好的加工品质, 可作为羊肉食品加工的主要原料。

© The Author(s) 2025. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

[1] 刘云芳, 刘根强, 王新峰. 多浪羊 MHC-DRB3 基因座的 PCR-RFLP 多态性分析[J]. 遗传, 2004(1): 59–62. [LIU Y F, YAN G Q, WANG X F. PCR-RFLP polymorphism analysis of MHC-DRB3 locus in Duolang sheep[J]. Hereditas, 2004(1): 59–62.]

[2] 道良佐, 鄂璞, 郭功骑, 等. 和田羊调查报告(第三部分)[J]. 新疆农业科学, 1964(12): 491–493. [DAO L Z, E P, GUO G Q, et al. Survey report of Hetian sheep (Part III)[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 1964(12): 491–493.]

[3] 张好, 杨智, 杨会国, 等. 策勒黑羊的品种保护现状[J]. 黑龙江动物繁殖, 2023, 31(5): 17–20. [ZHANG Y, YANG Z, YANG H G, et al. Conservation status of Qira black sheep[J]. Heilongjiang Animal Breeding, 2023, 31(5): 17–20.]

[4] 国家统计局. 2023 年中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2023: 12–14. [National Bureau of Statistics. China Statistical Yearbook 2023[M]. Beijing: China Statistics Press, 2023: 12–14.]

[5] 李文博. 饲养方式对苏尼特羊宰后肌原纤维蛋白与肉品质的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2020. [LI W B. Effects of feeding methods on post-slaughter myofibrillar protein and meat quality of Sunit sheep[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2020.]

[6] 张哲奇, 臧明伍, 张凯华, 等. 国内外肉品品质变化机制机理研究进展[J]. 肉类研究, 2017, 31(2): 57–63. [ZHANG Z Q, ZANG M W, ZHANG K H, et al. Research progress on mechanism and mechanism of meat quality change at home and abroad[J]. Meat Research, 2017, 31(2): 57–63.]

[7] 赵利明. 整合转录组与蛋白质组技术筛选绵羊肉品质性状相关候选基因[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2023. [ZHAO L M. Screening of candidate genes related to quality traits in sheep meat by integrating transcriptome and proteome techniques[D].

Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2023.]

[8] 郭元, 李博. 小尾寒羊不同部位羊肉理化特性及肉用品质的比较[J]. *食品科学*, 2008(10): 143-147. [GUO Y, LI B. Comparison of physicochemical characteristics and meat quality of different parts of small tail Han Sheep[J]. *Food Science*, 2008(10): 143-147.]

[9] 赵娜, 安润新, 李益娟, 等. 影响羊肉品质因素的研究进展[J]. *饲料工业*, 2023, 44(13): 71-76. [ZHAO N, AN R X, LI Y J, et al. Research progress of factors affecting mutton quality[J]. *Feed Industry*, 2023, 44(13): 71-76.]

[10] 孙焕林, 张文举, 刘艳丰, 等. 影响羊肉品质因素的研究进展[J]. *饲料博览*, 2014(1): 8-12. [SUN H L, ZHANG W J, LIU Y F, et al. Research progress of factors affecting the quality of mutton[J]. *Feed Expo*, 2014(1): 8-12.]

[11] 王莉梅, 王德宝, 康连和, 等. 自然放牧条件下不同品种羊肉品质分析[J]. *畜牧与饲料科学*, 2019, 41(5): 58-62. [WANG L M, WANG D B, KANG L H, et al. Analysis of mutton quality of different breeds under natural grazing conditions[J]. *Animal Husbandry and Feed Science*, 2019, 41(5): 58-62.]

[12] MIGDAI W, KAWĘCKA A, SIKORA J, et al. Meat quality of the native carpathian goat breed in comparison with the saanen breed[J]. *Animals*, 2021, 11(8): 2220.

[13] APPLE J, UNRUH J, MINTON J, et al. Influence of repeated restraint and isolation stress and electrolyte administration on carcass quality and muscle electrolyte content of sheep[J]. *Meat science*, 1993, 35(2): 191-203.

[14] 谢心如. 宁夏滩羊肉中生物活性物质解析及其对肉品质影响研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2023. [XIE X R. Analysis of bioactive substances in Ningxia Tan Mutton and their effects on Meat quality[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2023.]

[15] 李思蕾, 王守伟, 赵冰, 等. Mg²⁺对羊肉肌原纤维蛋白结构和凝胶特性的影响[J]. *食品科学*, 2023, 44(8): 109-117. [LI S L, WANG S W, ZHAO B, et al. Effect of Mg²⁺ on Structure and gel properties of mutton myofibrillar protein[J]. *Food Science*, 2023, 44(8): 109-117.]

[16] LI S G, CHU S, LU J K, et al. Molecular and structural properties of three major protein components from almond kernel[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2018, 42(3): e13536.

[17] JI F Y, XU J J, LIU H H, et al. Improved water solubility, antioxidant, and sustained-release properties of curcumin through the complexation with soy protein fibrils[J]. *LWT*, 2023, 180(1): 114723.

[18] ZHANG R R, XING L J, KANG D C, et al. Effects of ultrasound-assisted vacuum tumbling on the oxidation and physicochemical properties of pork myofibrillar proteins[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, 74(prepublish): 105582.

[19] NA J, WANG L T, SHAO J H, et al. Changes in the structural and gel properties of pork myofibrillar protein induced by catechin modification[J]. *Meat Science*, 2017, 127: 45-50.

[20] TAO Y, WANG P, XU X L, et al. Effects of ultrasound treatment on the morphological characteristics, structures and emulsifying properties of genipin cross-linked myofibrillar protein[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2023, 97: 106467.

[21] LIU G, XIONG Y, BUTTERFIELD D A. Chemical, physical, and gel-forming properties of oxidized myofibrils and whey- and soy-protein isolates[J]. *Journal of Food Science*, 2000, 65(5): 811-818.

[22] XIA X F, KONG B H, XIONG Y L, et al. Decreased gelling and emulsifying properties of myofibrillar protein from repeatedly

frozen-thawed porcine longissimus muscle are due to protein denaturation and susceptibility to aggregation[J]. *Meat Science*, 2010, 85(3): 481-486.

[23] 刘旺, 冯美琴, 孙健, 等. 超高压条件下亚麻籽胶对猪肉肌原纤维蛋白凝胶特性的影响[J]. *食品科学*, 2019, 40(7): 101-107.

[LIU W, FENG M Q, SUN J, et al. Effect of flaxseed gum on the gel properties of pork myofibrillar protein under ultra-high pressure[J]. *Food Science*, 2019, 40(7): 101-107.]

[24] 王芳. 不同品种、月龄和部位绵羊肉品质的比较与分析[D]. 北京: 中国农业科学院, 2021. [WANG F. Comparison and analysis of quality of different varieties, months and parts of sheep meat[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2021.]

[25] 郝婉名, 祝超智, 赵改名, 等. 西门塔尔杂交牛不同部位肉间的差异性[J]. *肉类研究*, 2019, 33(1): 14-18. [HAO W M, ZHU C Z, ZHAO G M, et al. Differences between different parts of Simmental hybrid cattle[J]. *Meat Research*, 2019, 33(1): 14-18.]

[26] 张亚芬, 张晓辉. 肉品检验中 pH 值测定的意义[J]. *吉林农业*, 2014(3): 47. [ZHANG Y F, ZHANG X H. Significance of pH value determination in meat inspection[J]. *Jilin Agriculture*, 2014(3): 47.]

[27] MAUGHAN C, TANSAWAT R, CORNFORTH D, et al. Development of a beef flavor lexicon and its application to compare the flavor profile and consumer acceptance of rib steaks from grass- or grain-fed cattle[J]. *Meat Science*, 2012, 90(1): 116-121.

[28] 俞彭欣, 刘黎, 阿布力克木·阿地力, 等. 南疆不同品种多胎肉羊品质特性差异分析[J]. *食品与发酵工业*, 2023, 49(14): 186-192. [YU P X, LIU L, A BU LI KE MU A D L, et al. Analysis on quality characteristics of different breeds of multi-litter mutton sheep in southern Xinjiang[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2023, 49(14): 186-192.]

[29] 任晓镁, 王群霞, 任少东, 等. 不同饲养方式对多浪羊肉矿物质、氨基酸含量及风味的影响[J]. *食品研究与开发*, 2023, 44(18): 25-32. [REN X P, WANG Q X, REN S D, et al. Effects of different feeding methods on mineral and amino acid contents and flavor of dolang mutton[J]. *Food Research and Development*, 2023, 44(18): 25-32.]

[30] 王晶, 王权锋, 刘黎, 等. 新疆和田地区 10 个不同品种羊肉品质特性差异性分析[J]. *肉类研究*, 2023, 37(4): 7-12. [WANG J, WANG Q F, LIU L, et al. Analysis on the difference of quality characteristics of 10 different mutton breeds in Hetian, Xinjiang[J]. *Meat Research*, 2023, 37(4): 7-12.]

[31] 姜博. 膨化大豆对仔猪的营养价值评定和有效养分预测[D]. 雅安: 四川农业大学, 2023. [JIANG B. Puffing of soybean of piglet nutritional value evaluation and available nutrients prediction[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2023.]

[32] ZHANG C, LI Y X, XIA X F, et al. Changes in protein oxidation, structure, and thermal stability of chicken breast subjected to ultrasound-assisted immersion freezing during frozen storage[J]. *Food Chemistry*, 2023, 398: 133874.

[33] ALISON K, OLIVER C C. Health benefits of almonds beyond cholesterol reduction[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2012, 60(27): 6694-6702.

[34] WU W, ZHANG C M, KONG X Z, et al. Oxidative modification of soy protein by peroxy radicals[J]. *Food Chemistry*, 2009, 116(1): 295-301.

[35] 劳梦甜, 曾璐瑶, 吴孟钊, 等. 冻结方式对黑斑蛙后腿肌肉持水性及肌原纤维蛋白结构特性的影响[J]. *食品科学*, 2024, 45(13): 264-274. [LAO M T, ZENG L Y, WU M Z, et al. Effects

- of freezing mode on water retention and structural properties of myofibrillar protein in hindleg muscle of *Rana nigromaculata*[J]. *Journal of Food Science*, 2024, 45(13): 264–274.]
- [36] 李艳, 李啸天, 郭文渊, 等. 椰麸组分蛋白的氨基酸组成、结构与乳化性分析[J]. *热带作物学报*, 2022, 43(3): 644–652. [LI Y, LI X T, GUO W Y, et al. Amino acid composition, structure and emulsification of coir bran component protein[J]. *Journal of Tropical Crops*, 2022, 43(3): 644–652.]
- [37] RIEBROY S, BENJAKUL S, VISESSANGUAN W, et al. Acid-induced gelation of natural actomyosin from Atlantic cod (*Gadus morhua*) and burbot (*Lota lota*) [J]. *Food Hydrocolloids*, 2007, 23(1): 26–39.
- [38] 荣建华, 甘承露, 丁玉琴, 等. 低温贮藏对脆肉鲩鱼肉肌球蛋白特性的影响[J]. *食品科学*, 2012, 33(14): 273–276. [RONG J H, GAN C L, DING Y Q, et al. Effects of low temperature storage on actomyosin properties of crisped grass carp[J]. *Food Science*, 2012, 33(14): 273–276.]
- [39] 李舒婷, 齐薇燕, 白鹏丽, 等. 吊干杏杏仁蛋白功能特性和结构特性[J]. *食品研究与开发*, 2024, 45(2): 87–95, 102. [LI S T, QI W Y, BAI P L, et al. Functional and structural properties of dried apricot almond protein[J]. *Food Research and Development*, 2024, 45(2): 87–95, 102.]
- [40] 朱玉. 高溶解性菠萝蜜种子糖基化改性蛋白的制备及其性能研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2022. [ZHU Y. Preparation and properties of glycosylated modified protein of highly soluble jackfruit seed[D]. Nanchang: Nanchang University, 2022.]
- [41] 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.
- [42] KARLSSON A H, KLONT R E, FERNANDEZ X. Skeletal muscle fibres as factors for pork quality[J]. *Livestock Production Science*, 1999, 60(2–3): 255–269.
- [43] 李梁宵. 我国四个品种核桃蛋白结构和功能特性的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2019. [LI L X. Study on protein structure and functional characteristics of four varieties of walnut in China[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019.]
- [44] 王雪, 郭兴凤. 蛋白质乳化性研究进展[J]. *粮食加工*, 2017, 42(1): 39–43. [WANG X, GUO X F. Research progress of protein emulsification[J]. *Food Processing*, 2017, 42(1): 39–43.]
- [45] 陆健康, 许倩, 孟亚娟, 等. 多浪羊肉肌原纤维蛋白乳化性的研究[J]. *食品工业科技*, 2014, 35(21): 91–93, 101. [LU J K, XU Q, MENG Y J, et al. Study on emulsification of Duolang mutton myofibrillar protein[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2014, 35(21): 91–93, 101.]
- [46] 吴菊清. 猪肉肌原纤维蛋白乳化特性研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2015. [WU J Q. Research on emulsification characteristics of pork myofibrillar protein[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2015.]
- [47] 李琳. 驼肉宰后成熟过程中营养品质与肌原纤维蛋白特性的变化研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023. [LI L. Study on the changes of nutritional quality and myofibrillar protein characteristics of camel meat during maturation after slaughter[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2023.]
- [48] 李长乐. 不同处理方式对鲢鱼肌原纤维蛋白性质与结构的影响[D]. 上海: 上海海洋大学, 2018. [LI C L. Effects of different treatments on the properties and structure of myofibrillar protein of Bonito[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2018.]
- [49] 周亚军, 张漫漫, 李宗坪, 等. 腌制方式对腌制过程中山黑猪肉肌原纤维蛋白特性及其叉烧肉食用品质的影响[J]. *食品科学*, 2023, 44(23): 86–94. [ZHOU Y J, ZHANG M M, LI Z P, et al. Effect of curing method on the characteristics of myofibrillar protein of Zhongshan Black Pork and the quality of barbecued meat[J]. *Food Science*, 2023, 44(23): 86–94.]
- [50] 李可, 孙立雪, 周彦芳, 等. 超声波处理对类 PSE 鸡肉肌浆蛋白与肌原纤维蛋白复合凝胶特性的影响[J]. *食品科学*, 2024, 45(22): 189–198. [LI K, SUN L X, ZHOU Y F, et al. Effect of ultrasonic treatment on the properties of PSE-like chicken myoplasm and myofibrillar protein composite gel[J]. *Food Science*, 2024, 45(22): 189–198.]
- [51] 陈振家, 杨雅婧, 陈琼玲, 等. 不同品种高粱醇溶蛋白理化性质的研究[J]. *中国粮油学报*, 2024, 39(12): 114–125. [CHEN Z J, YANG Y J, CHEN Q L, et al. Study on physicochemical properties of different Sorghum varieties of olein[J]. *Acta Cereals and Oils Sinica*, 2024, 39(12): 114–125.]
- [52] 糟龙. 不同品种杏仁蛋白特性及即食豆腐开发研究[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2022. [ZAO L. Different varieties of almond protein properties and ready-to-eat tofu development research[D]. Alar: University of Tarim, 2022.]
- [53] BAO Y L, PER E. Effects of protein oxidation on the texture and water-holding of meat: A review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2019, 59(22): 3564–3578.
- [54] PER E, EERO P. Muscle structure, sarcomere length and influences on meat quality: A review[J]. *Meat Science*, 2017, 132: 139–152.
- [55] 王俊鹏. 兔肉肌原纤维蛋白与肌浆蛋白热变性聚集行为及其凝胶化互作研究[D]. 重庆: 西南大学, 2021. [WANG J P. Study on thermal degeneration aggregation behavior and gelation interaction between myofibrillar protein and sarcoplasmic protein of rabbit[D]. Chongqing: Southwest University, 2021.]
- [56] ZHANG D, LI H, EMARA A M, et al. Effect of *in vitro* oxidation on the water retention mechanism of myofibrillar proteins gel from pork muscles[J]. *Food Chemistry*, 2020, 315: 126226.
- [57] 宋洁, 侯成立, 袁有云, 等. 不同部位羊肉烤制加工适宜性研究[J]. *食品科学*, 2017, 38(15): 108–114. [SONG J, HOU C L, YUAN Y Y, et al. Study on suitability of different parts of mutton for roasting[J]. *Food Science*, 2017, 38(15): 108–114.]