

基于多元统计分析藏羊不同部位肉的品质特性

赵天霞, 李升升*, 张强龙, 孙武
(青海大学畜牧兽医科学院, 青海西宁 810000)

摘要: 为明确藏羊不同部位肉的品质差异, 提升藏羊肉的附加值。比较分析了藏羊上脑、眼肉、小黄瓜、尾龙扒、针扒、羊腩、烩扒、前腱子、脖肉、肩肉、胸肉、辣椒条、后腱子、金钱腱、霖肉、外脊、上三筋、里脊、板腱、肋肉等 20 个部位肉的品质和组织学特性, 并进行了多元统计分析。结果表明, 藏羊不同部位肉间的质构特性、pH、蒸煮损失、肉色、肌原纤维蛋白特性、组织学特性均存在差异性。相关性分析表明, 藏羊部位肉的硬度与单个肌纤维横截面积、肌纤维直径、剪切力、咀嚼性呈极显著正相关 ($P \leq 0.01$); pH 与蒸煮损失呈显著负相关 ($P \leq 0.05$)。主成分分析提取了 5 个主成分因子, PC₁ 质地因子 (27.07%), PC₂、PC₅ 色度因子 (25.57%、8.66%), PC₃ 持水因子 (12.09%), PC₄ 硬度因子 (8.81%), 建立了藏羊部位肉的综合品质评价模型。综合得出质地和色度是评价藏羊部位肉品质的主要指标。研究结果为藏羊部位肉的品质评价、精深加工提供了理论依据。

关键词: 藏羊; 部位肉; 组织学特性; 主成分分析; 聚类分析

文章编号: 1673-9078(2025)09-276-288

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.9.0820

Quality Characteristics of Meat from Different Parts of Tibetan Sheep Based on Multivariate Statistical Analysis

ZHAO Tianxia, LI Shengsheng*, ZHANG Qianglong, SUN Wu

(College of Animal Husbandry and Veterinary Science, Qinghai University, Xining 810000, China)

Abstract: To clarify the quality differences of meat from different parts of Tibetan sheep and enhance the added value of Tibetan sheep meat, the meat quality and histological characteristics of 20 parts of Tibetan sheep were examined and compared. The parts analyzed included chuck roll, ribeye, thin flank, sirloin tip, blade chop, lamb belly, stew meat cut, front shank, neck meat, shoulder meat, brisket, shoulder strip, hind shank, round tendon, knuckle, striploin, tri-tip, blade steak, and rib meat. Multivariate statistical analysis of these parts was also conducted. The results revealed variability in the textural properties, pH, cooking loss, meat color, myofibrillar protein properties, and histological characteristics among different parts of meat from Tibetan sheep. Correlation analysis showed that the hardness of meat from Tibetan sheep parts was highly significantly positively correlated with the cross-sectional area of individual myofibers, myofiber diameter, shear force, and chewability ($P \leq 0.01$); pH was significantly negatively correlated with cooking loss ($P \leq 0.05$). According to principal component analysis, five principal component factors were identified, comprising PC₁: texture factor (27.07%), PC₂ and PC₅:

引文格式:

赵天霞,李升升,张强龙,等.基于多元统计分析藏羊不同部位肉的品质特性[J].现代食品科技,2025,41(9):276-288.

ZHAO Tianxia, LI Shengsheng, ZHANG Qianglong, et al. Quality characteristics of meat from different parts of Tibetan sheep based on multivariate statistical analysis [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(9): 276-288.

收稿日期: 2024-06-11; 修回日期: 2024-08-08; 接受日期: 2024-08-08

基金项目: 中国农业科学院农产品加工研究所“国之大者”重点科技行动专项 (G2022-IFST-04); 农业农村部农产品加工与贮藏重点实验室开放课题 (S2022KFKT-05); 青海省科技特派员专项 (2024-NK-P43)

作者简介: 赵天霞 (2000-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 畜产品加工, E-mail: 1668318193@qq.com

通讯作者: 李升升 (1984-), 男, 博士, 副研究员, 研究方向: 畜产品科学与工程, E-mail: lishsh123@163.com

color factors (25.57% and 8.66%), PC_3 : water holding factor (12.09%), and PC_4 : hardness factor (8.81%). Subsequently, a comprehensive quality evaluation model from different meat parts of Tibetan sheep was established. The results showed that texture and color were the main indices useful for evaluating the quality of Tibetan sheep meat. These results provide a theoretical basis for the quality evaluation and deep processing of Tibetan sheep meat.

Key words: Tibetan sheep; meat parts; histological characteristic; principal component analysis; cluster analysis

藏羊又名西藏羊、藏系羊，哺乳纲偶蹄目牛科脊索动物。藏羊主要分布在海拔 3 000 m 以上的高寒地区，青海是主要产区，其具有适应高海拔、抗严寒、善于爬高、行动敏捷等特点，藏羊肉的特征是低脂肪、高蛋白、富含多种微量元素及氨基酸，具有较高的营养价值^[1]。藏羊作为青藏高原的优势畜种，对青藏高原的乡村产业发展具有重要的意义。据报道 2023 年青海省藏羊的存栏量约 1 200 万只，出栏约 710 万只，产肉约 13 万 t，位居全国第一。为了提高畜产品的附加值及生产优质分割肉，需对畜禽胴体进行精细分割^[2]。目前，市场上藏羊肉的销售形式主要以整个胴体、二分体，或者以四分体为主，不能反映出藏羊不同部位肉的品质特点，因此对藏羊肉进行精细分割和品质评价有助于促进藏羊产业的发展。

不同部位畜禽肉具有不同的品质特性及加工性能。窦玉琴等^[3]研究发现不同地区及不同部位藏羊肉的品质特性具有较大差异，其中肩肉的脂肪、蛋白质含量高，臀腰肉的肉质最嫩。张燕等^[4]研究表明藏羊部位肉的色差、质构、剪切力、持水力等指标均存在显著差异。张文兰等^[5]研究表明阿拉善蒙古牛不同部位肉所含蛋白质、脂肪含量、维生素种类不同。羊肉品质受多重因素的影响，如饲料种类与添加物、性别、品种及年龄、不同部位、加工方式及加工条件、外源佐料、新陈代谢差异等^[6]。肌原纤维蛋白在肌肉蛋白质中约占 55%~65%，肌纤维的面积、数目和直径影响肉的保水性、嫩度、风味等^[7]。肌红蛋白能够直接影响肉色，肉色由氧合肌红蛋白、脱氧肌红蛋白及高铁肌红蛋白的相对含量决定^[8]。不同部位肉间蛋白质含量、脂肪含量、结缔组织及肌纤维类型的差异都会影响肌肉的代谢反应，进而引起肉色泽、嫩度、质构、风味、多汁性等食用品质的差异^[9]。闫忠心^[10]研究表明牦牛不同部位肉的品质指标存在一定的差异，肩肉的嫩度、 a^* 值等品质参数要优于小黄瓜。然而，对于藏羊部位肉精细分割后进行品质评价却鲜见报道。

本研究分析了藏羊 20 个部位肉的质构、pH 值、

蒸煮损失率、色度值等特性，并与其组织学特性进行了多元统计分析，以期对藏羊肉的精细分割和精深加工提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 主要材料

参照农业行业标准 NY/T1564-2021《畜禽肉分割技术规程 羊肉》和青海企业普遍采用的胴体分割方法将 12 月龄藏羊进行分割，分割为上脑、眼肉、小黄瓜、尾龙扒、针扒、羊腩、烩扒、前腱子、脖肉、肩肉、胸肉、辣椒条、后腱子、金钱腱、霖肉、外脊、上三筋、里脊、板腱、肋肉 20 个部位肉，运回实验室，测定质构、蒸煮损失、色度值、乳化特性、凝胶特性、起泡特性，并用 4% 多聚甲醛溶液处理后进行组织学特性分析。

1.2 试剂与设备

盐酸、磷酸氢二钾、磷酸二氢钾，均为分析纯，上海源叶生物科技有限公司；4% 多聚甲醛溶液，上海尚宝生物科技有限公司。

ADCI-60-C 全自动测色色差计，北京辰泰克仪器技术有限公司；C-LM3B 质构仪，美国 Brookfield 公司；JM-B3003 电子称，诸暨市超泽衡器设备有限公司；pH 计（PHS-3C），上海越平科学仪器制造有限公司；TP-3001 中心温度计，苏州市沧浪区泰式电子经营部；正置白光拍照显微镜（Eclipse Ci-L Nikon），上海光学仪器五厂有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 pH测定

pH 的测定按照 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。

1.3.2 蒸煮损失的测定

蒸煮损失参照 Qin 等^[11]方法测定，将截取好的藏羊部位肉（长宽厚度约为 6 cm×3 cm×1 cm）称量后放入蒸煮袋，再放入 80 ℃ 的恒温水浴锅，用热

电偶测温仪测量肉样中心温度达到 70 ℃ 时, 将肉样取出冷却至室温。蒸煮损失按下式计算蒸煮损失记作 CL。

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

式中:

C ——蒸煮损失 (CL), %;

m_1 ——蒸煮前的质量, g;

m_2 ——蒸煮后的质量, g。

1.3.3 质构特性的测定

质构测定、剪切力的测定参照张燕等^[4]的方法进行测定。

1.3.4 肉色测定

1.3.4.1 L^* 、 a^* 、 b^* 值测定

肉色测定用色差计测定肉色, 结果以 L^* 值 (亮度)、 a^* 值 (红色度)、 b^* 值 (黄色度) 表示, 测定 3 次取平均值。

1.3.4.2 肌红蛋白浓度和状态的测定

肌红蛋白 (Mb) 浓度、高铁肌红蛋白 (MetMb)、氧合肌红蛋白 (OxyMb)、脱氧肌红蛋白含量 (DeoMb) 的测定参考周力等^[8]的方法, 采用紫外可见分光光度计分别在 525、545、565 和 572 nm 波长处测量其吸光度, 计算肌红蛋白浓度、脱氧肌红蛋白、氧合肌红蛋白与高铁肌红蛋白的相对含量。

$$\begin{aligned} B &= -0.1664A_{572\text{ nm}} + 0.086A_{565\text{ nm}} + 0.088A_{545\text{ nm}} \\ &\quad + 0.099A_{525\text{ nm}} \\ B_1 &= (0.369R_1 + 1.140R_2 + 0.941R_3 + 0.015) \times 100\% \\ B_2 &= (0.882R_1 - 1.267R_2 + 0.809R_3 - 0.361) \times 100\% \\ B_3 &= (-2.514R_1 - 0.777R_2 + 0.800R_3 + 1.098) \times 100\% \end{aligned} \quad (2)$$

式中:

B ——肌红蛋白 (Mb) 浓度, mmol/L;

B_1 ——脱氧肌红蛋白 (DeoMb) 含量, %;

B_2 ——氧合肌红蛋白 (OxyMb) 含量, %;

B_3 ——高铁肌红蛋白 (MetMb) 含量, %;

R_1 —— $A_{572\text{ nm}}/A_{525\text{ nm}}$;

R_2 —— $A_{565\text{ nm}}/A_{525\text{ nm}}$;

R_3 —— $A_{545\text{ nm}}/A_{525\text{ nm}}$ 。

1.3.5 肌原纤维蛋白特性的测定

1.3.5.1 蛋白提取方法

蛋白的提取方法参考师希雄等^[12]的方法提取。

1.3.5.2 乳化活性和乳化稳定性

乳化活性和乳化稳定性参考张维农等^[13]的方

法测定, 在高速分散器中剪切乳化 1 min, 吸取 200 μL 乳化 0 min 和 10 min 时的蛋白溶液, 用 0.1% SDS (m/V) 将稀释到 10 mL, 以 SDS 作为空白组, 在 500 nm 下测定吸光值。计算方法如下式, 每个藏羊不同部位肉的样品重复测定三次, 取平均值。

$$\begin{aligned} EA &= A_0 \\ ES &= \frac{A_0}{A_{10}} \times \Delta t \end{aligned} \quad (3)$$

式中:

EA ——乳化活性, %;

ES ——乳化稳定性, %;

A_0 ——乳化 0 min 后在 500 nm 处的吸光值;

A_{10} ——乳化 10 min 后在 500 nm 处的吸光值;

Δt ——时间间隔, 10 min。

1.3.5.3 凝胶特性

凝胶保水性的测定参考吴丹璇等^[14]的方法, 先将藏羊部位肉提取后的肌原纤维蛋白匀浆液装入 10 mL 的离心管, 再在 5 000 r/min 条件下离心 10 min, 用滤纸将水分吸出, 计算其保水性, 计算方法如下式, 每个样品平行测定三次, 重复三次试验, 结果取平均值。

$$D = \frac{m_1 - m}{m_2 - m} \times 100\% \quad (4)$$

式中:

D ——藏羊部位肉凝胶保水性 (WHC), %;

m ——藏羊部位肉匀浆物质量, g;

m_1 ——装入匀浆物的离心管, g;

m_2 ——吸出水分后离心管质量, g。

凝胶质构测定参考 Yu 等^[15]的方法, 将质构仪调为 TPA 模式, 探针型号 TA₃/100。

1.3.5.4 起泡性和泡沫稳定性

起泡性和起泡稳定性参考张维农等^[13]的方法测定, 在室温件下, 将一定浓度的蛋白液调节 pH 值至 7.0, 取 100 mL 在高速分散器中 (15 000 r/min) 间歇搅打 2 min, 静置 30 min。按下列公式计算:

$$\begin{aligned} E_1 &= \frac{V_0 - 100}{100} \times 100\% \\ E_2 &= \frac{V_{30} - 100}{V_0 - 100} \times 100\% \end{aligned} \quad (5)$$

式中:

E_1 ——起泡能力 (FC), %;

E_2 ——泡沫稳定性 (FS), %;

V_0 ——均质后的液面高度, mL;

A_{30} ——静置 30 min 后液面高度, mL。

1.3.6 组织学测定

天狼星红染色：对经过前处理后的不同部位藏羊肉洗脱制成组织切片，组织切片经天狼星红溶液染色制成切片标本，在光学显微镜下放大拍照，观察不同部位藏羊肉的微观结构变化。

1.4 数据处理

结果用 SPSS 26.0 进行单因素方差及聚类分析，结果以平均值 ± 标准差的形式表示，采用 Origin 22.0 软件对试验结果进行绘图并进行相关性分析。

2 结果分析

2.1 藏羊不同部位肉的质构特性分析

嫩度与质地是反映鲜肉品质的重要指标之一，实验室中剖面质构分析是分析肉的最常用方法，从硬度、弹性、内聚性、胶着性、咀嚼性等方面描述肉的质构特性。藏羊不同部位肉的质构特性如表 1 所示。

肉嫩度是反映肉品质的重要指标之一，如肌肉中肌纤维的组成、数量、排列顺序及肌纤维酶代谢活力的差异、结缔组织的数量、蛋白溶解度的

差异等都是导致肌肉嫩度差异的原因^[16]。此外藏羊不同部位肉的嫩度还可能受肌肉运动量的影响。由表 1 可知，藏羊肉的平均硬度为 34.73 N，说明藏羊肉整体的嫩度较好，肋肉（64.35 N）、金钱腱（55.72 N）、羊腩（61.49 N）的硬度显著高于其他部位（ $P<0.05$ ），上脑的硬度（21.64 N）最低（ $P<0.05$ ），这主要与肌纤维的分布及肌肉的运动量有关。脖肉的弹性（5.17 mm）最高（ $P>0.05$ ），上三筋的弹性（2.67 mm）最低（ $P>0.05$ ），这可能与不同部位肉中水分含量有关。前腱子的内聚性（0.61）最高（ $P<0.05$ ），辣椒条的内聚性（0.43）最低（ $P>0.05$ ）；金钱腱的胶着性（30.59 N）除了与肋肉差异不显著之外，显著高于其他部位，肋肉的咀嚼性（180 N）显著高于其他部位（ $P<0.05$ ）。剪切力是评价肉品质的重要指标，它直接反映了肉的嫩度，通常情况下，剪切力越小，说明肉的口感越嫩，更受人们喜爱。藏羊部位肉的剪切力范围在 12.06~51.95 N 之间，其中脖肉的剪切力较大（51.95 N），原因可能与肉的表面筋膜数量、肌纤维直径及肉质紧实程度有关，里脊剪切力较小，说明其嫩度较大^[3]。

表 1 藏羊不同部位肉的质构特性

Table1 Textural characteristics of meat in different parts of Tibetan sheep						
部位	硬度/N	弹性/mm	内聚性	胶着性/N	咀嚼性/mJ	剪切力/N
上脑	21.64 ± 0.32 ^j	3.32 ± 0.43 ^{efg}	0.48 ± 0.01 ^{fgh}	11.39 ± 0.09 ^l	4.97 ± 0.93 ^m	23.18 ± 1.55 ^{fgh}
眼肉	15.39 ± 0.95 ^h	3.18 ± 0.24 ^{fg}	0.45 ± 0.01 ^{hi}	17.48 ± 0.90 ^{ijk}	23.60 ± 4.29 ^{klm}	26.20 ± 1.79 ^a
小黄瓜	34.74 ± 3.70 ^f	3.89 ± 0.07 ^{cdef}	0.57 ± 0.01 ^{ab}	20.88 ± 0.62 ^{cd}	145.33 ± 11.37 ^{ab}	16.21 ± 0.40 ^{jk}
尾龙扒	26.64 ± 2.62 ^g	3.93 ± 0.28 ^{cdef}	0.47 ± 0.02 ^{ghi}	13.29 ± 1.36 ^{fgh}	150.10 ± 10.19 ^{hijk}	25.95 ± 0.16 ^b
针扒	21.72 ± 1.86 ^f	3.45 ± 0.36 ^{efg}	0.45 ± 0.02 ^{hi}	20.72 ± 2.47 ^{cde}	92.83 ± 9.72 ^{cde}	22.24 ± 2.50 ^c
羊腩	61.49 ± 4.94 ^b	3.71 ± 0.19 ^{defg}	0.54 ± 0.03 ^{bc}	31.29 ± 5.29 ^a	116.77 ± 28.25 ^{bc}	48.79 ± 0.85 ^f
烩扒	10.70 ± 1.74 ⁱ	4.46 ± 0.11 ^{sde}	0.57 ± 0.00 ^{ab}	15.50 ± 1.08 ^{kl}	35.73 ± 18.07 ^{ijkl}	21.53 ± 1.40 ^g
前腱子	25.32 ± 1.07 ^g	4.94 ± 0.20 ^c	0.61 ± 0.06 ^a	11.04 ± 0.66 ^{ghi}	55.90 ± 1.08 ^{ghij}	13.96 ± 1.36 ^{kl}
脖肉	34.38 ± 2.07 ^{hi}	5.17 ± 2.12 ^b	0.50 ± 0.02 ^{defg}	17.27 ± 0.77 ^{ijk}	150.13 ± 21.56 ^{cd}	51.95 ± 2.32 ^c
肩肉	22.95 ± 2.11 ^f	3.20 ± 0.01 ^h	0.55 ± 0.01 ^{bc}	26.54 ± 5.37 ^{ab}	120.83 ± 25.09 ^{efg}	22.23 ± 2.15 ^{fgh}
胸肉	44.25 ± 1.72 ^g	3.64 ± 0.08 ^{defg}	0.49 ± 0.01 ^{efg}	13.24 ± 2.65 ^{fgh}	143.17 ± 13.34 ^{ab}	43.68 ± 1.12 ^{bc}
辣椒条	23.28 ± 0.83 ^g	3.32 ± 0.19 ^{efg}	0.43 ± 0.01 ⁱ	12.23 ± 2.51 ^{ghi}	47.13 ± 6.07 ^{klm}	17.84 ± 0.75 ^d
后腱子	11.08 ± 0.84 ^{hi}	3.75 ± 0.24 ^{defg}	0.56 ± 0.02 ^b	15.43 ± 3.67 ^{efg}	70.67 ± 15.01 ^{efgh}	32.20 ± 0.94 ^c
金钱腱	55.72 ± 2.6 ^c	4.77 ± 0.45 ^{cd}	0.53 ± 0.02 ^{bcde}	30.59 ± 1.39 ^a	166.93 ± 2.22 ^{def}	44.96 ± 1.78 ^{ij}
霖肉	46.40 ± 0.69 ^d	3.22 ± 0.11 ^{fg}	0.47 ± 0.01 ^{ghi}	23.33 ± 3.62 ^{bcd}	163.67 ± 11.93 ^a	45.99 ± 2.22 ^b
外脊	47.76 ± 2.97 ^a	3.12 ± 1.00 ^a	0.46 ± 0.01 ^{ghi}	24.04 ± 3.39 ^{bc}	78.10 ± 24.69 ^{efg}	19.69 ± 1.18 ^{hi}
上三筋	24.79 ± 3.97 ^g	2.67 ± 0.13 ^g	0.54 ± 0.02 ^{bed}	14.75 ± 3.77 ^{fg}	45.27 ± 9.14 ^{klm}	12.06 ± 1.78 ^l
里脊	20.50 ± 123 ^f	3.74 ± 0.03 ^{defg}	0.52 ± 0.02 ^{cdef}	18.44 ± 0.32 ^{def}	21.83 ± 4.88 ^{fghi}	12.89 ± 0.45 ^l
板腱	35.40 ± 1.66 ^h	4.79 ± 0.15 ^{cd}	0.54 ± 0.03 ^{bcd}	8.74 ± 0.49 ^{bij}	39.33 ± 5.51 ^{ijkl}	24.55 ± 2.45 ^{fg}
肋肉	64.36 ± 1.66 ^{ij}	3.37 ± 0.16 ^{efg}	0.53 ± 0.01 ^{bcde}	12.76 ± 0.78 ^{kl}	180.00 ± 3.60 ^{lm}	46.99 ± 0.85 ^{ijk}

注：同列不同小写字母表示差异显著（ $P<0.05$ ）。下表同。

2.2 藏羊不同部位肉的pH分析

肉的 pH 值直接影响肉的风味、嫩度、色泽、口感和货架期，是评价肉品质的重要指标之一，有研究指出鲜肉的 pH 值在 5.8~6.2 为最优品，pH 值在 6.2~6.6 为优等品，pH 值大于 6.6 为变质肉^[17]。由图 1 可知，藏羊部位肉的 pH 均在 5.8~6.2 之间属于最优品，羊肉的糖原含量比猪肉和牛肉的低，pH 值相对较高，这可能是由于肌肉本身糖原含量较低或动物因为长时间的运输、禁食导致肌肉中的肌糖原耗尽不产生乳酸^[18]。其中上三筋、前腱子、羊腩的 pH 较高，外脊的 pH 较低，这是因为藏羊不同部位肉中肌肉的糖酵解能力不同或者肌肉中快速酵解型和慢氧化型肌原纤维的比列不同而造成的^[19]。

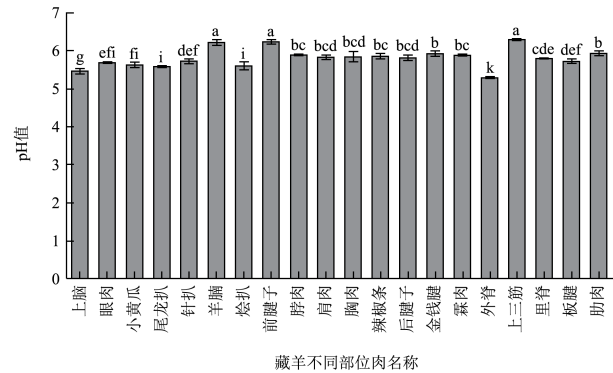


图 1 藏羊不同部位肉的 pH 值

Fig.1 pH of meat in different parts of Tibetan sheep

注：图中不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。下同。

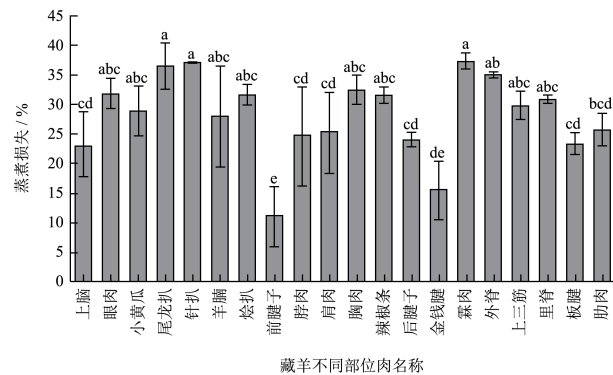


图 2 藏羊不同部位肉的蒸煮损失

Fig.2 Steaming losses of meat in different parts of Tibetan sheep

2.3 藏羊不同部位肉的蒸煮损失分析

由图 2 可知，蒸煮损失是反映肉保水性能的重要指标之一，蒸煮损失越大说明肉的保水性越小，外脊 (35.03%)、里脊 (30.88%) 的蒸煮损失率最高 ($P>0.05$)，由此得出里脊、外脊的保水性较小，

不适合长时间的蒸煮加工，金钱腱 (15.65%)、前腱子 (11.22%) 蒸煮损失率最小 ($P<0.05$)，则保水性较大。加热过程中肌肉中蛋白质变性和肌纤维收缩都会影响肉的蒸煮损失^[20]。本研究中藏羊部位肉的蒸煮损失平均值为 28.19%，较国内其他品种羊，蒸煮损失率较低，说明藏羊肉整体保水性较好^[21]。

2.4 藏羊不同部位肉的肉色分析

肉色是评定新鲜肉等级的重要指标，肉色的形成主要与两方面的因素有关，一是肌肉的微观结构，其影响肉品对光线的反射特性，二是肌肉中色素物质的含量和化学状态，是肉色形成的物质基础。

a^* 值代表红度，反映肌肉中血红蛋白的含量，其含量越高表明肉色越鲜红^[22]。由图 3 可知，藏羊部位肉的 a^* 值的范围在 20.2~31.76 之内，其中肋肉 (30.10)、尾龙扒 (29.88)、针扒 (31.76)、后腱子 (31.29) 的 a^* 值较高 ($P<0.05$)，辣椒条的 a^* 值 (18.01) 较低 ($P>0.05$)， a^* 值的差异可能是由于不同部位肉间氧合肌红蛋白的相对含量不同而导致的。 L^* 值代表明亮度，越低表明肉色越好， L^* 值的范围在 53.47~40.05 之间，其中板腱 (53.47)、肋肉 (49.10) 具有较高的 L^* 值 ($P<0.05$)， L^* 值的差异可能是由于不同部位肉中肌原纤维的排列顺序和水分含量的不同，从而使其对光的散射性质发生了变化^[23]。 b^* 值代表黄度，反映肉的新鲜程度， b^* 值越高肉越不新鲜。 b^* 值的范围在 2.94~9.69 之内，上三筋的 b^* 值 (9.69) 最高 ($P>0.05$)，前腱子的 b^* 值 (2.94) 最低 ($P>0.05$)，说明藏羊不同部位肉的肉色存在差异性。

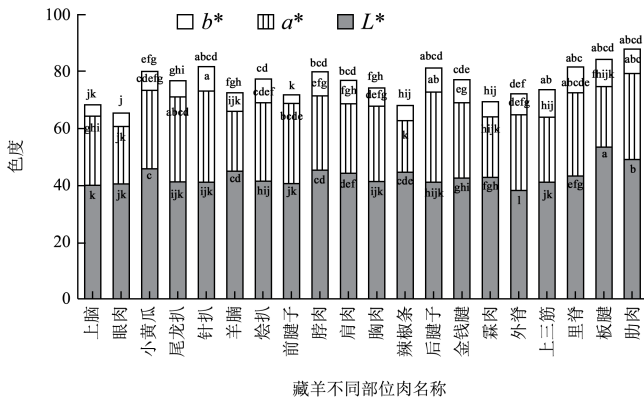


图 3 藏羊不同部位肉的 L^* 、 a^* 、 b^* 值

Fig.3 L^* , a^* and b^* values of meat in different parts of Tibetan sheep

肉色是评价肉品质的最有效方法。肌肉内的呈色物质包括细胞色素、肌红蛋白和血红蛋白的相对

含量，而肌红蛋白的相对含量是保持肉色稳定性的关键，肌红蛋白在肉中有三种氧化还原形态，高铁肌红蛋白、氧合肌红蛋白、脱氧肌红蛋白，表现出的肉色分别为深褐色、鲜红色、红紫色，这三种肌红蛋白间可以相互转化^[24]。肌肉中氧气消耗速率会影响肉色的稳定性，当肌体内氧气消耗增多时会加快肌红蛋白脱氧生成脱氧肌红蛋白，而脱氧肌红蛋白较容易氧化成高铁肌红蛋白，高铁蛋白的形成会降低肉制品的保质期。有研究发现，引起肌肉颜色变化的主要是因红色氧合肌红蛋白被氧化成了深褐色的高铁肌红蛋白^[25]。由于反刍动物各部位的肌肉具有特殊的生理功能，其解剖位置以及不同部位的肌纤维氧化类型、酵解方式等的不同，因此，它们的代谢及化学成分也会发生变化，从而导致不同部位肉色稳定性和屠宰后的生化特征也会有差异^[26]。王琳琳等^[23]得出牛肉在成熟过程中部位和肌纤维类型对肉色稳定存在显著影响。由图 4 可知，板腱、上三筋肌红蛋白浓度含量显著高于其他部位 ($P<0.05$)，羊腩、胸肉的肌红蛋白含量低于其他部位 ($P<0.05$)，藏羊不同部位肉中肌红蛋白的浓度存在差异性。由图 5 可知，藏羊部位肉中前腱子的肉色稳定性优于其他部位肉，上三筋、烩扒的肉色稳定性较差。图 6 为云雨图能够直观的反映数据的分布，由图可知藏羊不同部位肉中脱氧肌红蛋白含量范围在 0.15~0.4 之间，氧合肌红蛋白含量范围在 0.1~0.5 之间，高铁肌红蛋白含量范围在 0.05~0.35 之间。肌红蛋白的状态和相对比例往往是影响肉色的主要因素，较高的含量高铁肌红蛋白会引起肉类产品的货架期缩短^[27]，由图 6 可知，高铁肌红蛋白含量显著低于脱氧肌红蛋白、氧合肌红蛋白，说明藏羊整体肉色较稳定。

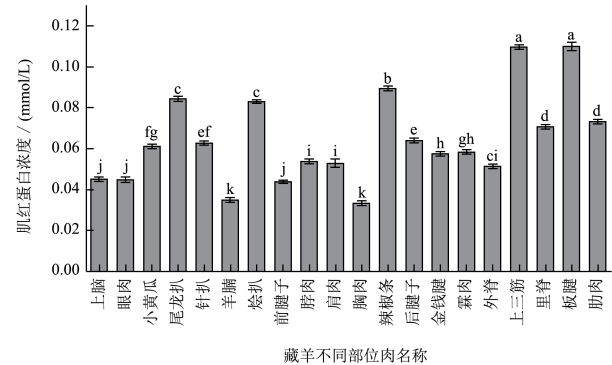


图 4 藏羊不同部位肉的肌红蛋白浓度

Fig.4 Myoglobin concentration of meat in different parts of Tibetan sheep

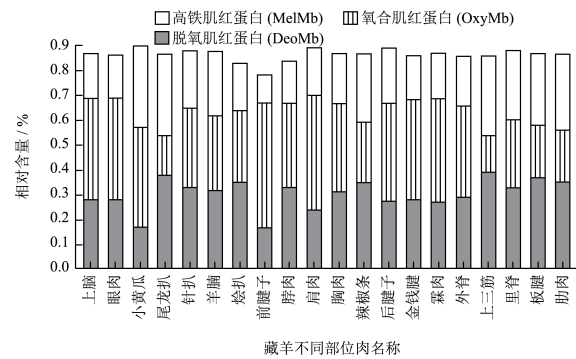


图 5 藏羊不同部位肉的高铁肌红蛋白 (MetMb)、氧合肌红蛋白 (OxyMb)、脱氧肌红蛋白相对含量 (DeoMb)

Fig.5 Relative content high iron myoglobin, oxygenated myoglobin, and deoxy myoglobin of meat in different parts of Tibetan sheep

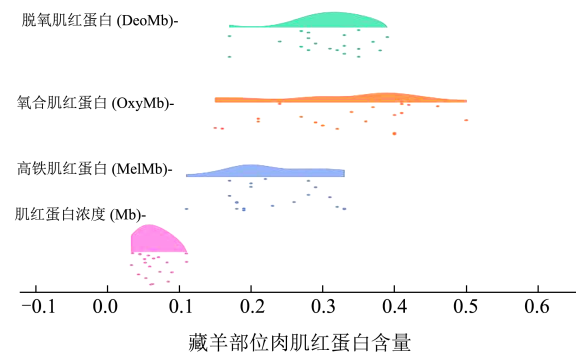


图 6 藏羊不同部位肉的肌红蛋白含量云雨图

Fig.6 Cloud and rain plot of myoglobin content of meat in different parts of Tibetan sheep

2.5 藏羊不同部位肉的肌原纤维蛋白特性分析

凝胶特性和乳化特性是指除营养价值以外蛋白质主要的功能特性，影响肉糜类产品的稳定性^[4]。在肉类加工中，凝胶特性对肉类产品的粘力、质构、保油性以及感官特性都有较大的影响^[10]。由表 2 可知，藏羊肉的凝胶保水性平均值为 49.27%，霖肉的凝胶保水性 (66.53%) 最高 ($P>0.05$)，羊腩的凝胶硬度 (637.67 g) 最高 ($P<0.05$)，比较适合肉糜和凝胶类产品的加工，眼肉 (102.33 g) 和板腱 (103.00 g) 的凝胶硬度较低。烩扒、霖肉和里脊的凝胶硬度、凝胶保水性和凝胶弹性等综合性能较好，这可能与蛋白质含量有关，当肉中蛋白质含量较高时，凝胶特性更稳定，凝胶结构表现良好^[28]。蛋白质的乳化性包括乳化活性和乳化稳定性，是影响肉质产品稳定性的重要因素之一，单位肌肉蛋白包裹的脂肪含量越多，则乳化活性越强、乳化稳定性越稳定，即乳化同等数量的产品越稳定^[29]。藏羊

不同部位肉间乳化活性和乳化稳定性存在差异性, 乳化活性的范围在 10%~31%; 乳化稳定性的范围在 2.33%~13.96%, 其中里脊的乳化活性 (31%) 最强 ($P>0.05$), 其次是肋肉 (22%, $P<0.05$)、辣椒条 (22%, $P>0.05$), 针扒的乳化活性 (7%) 较弱 ($P<0.05$)。乳化稳定性是指乳化液不产生两相分层且保持明显的稳定状态的现象^[30]。藏羊不同部位肉的乳化稳定性存在差异性, 其中里脊的乳化稳定性 (13.96%) 最好 ($P<0.05$), 较适合加工香肠、肉丸等肉糜类产品, 针扒的乳化稳定性 (2.33%) 较

差, 与除脖肉之外的其余各部位差异显著 ($P<0.05$)。起泡能力是研究肌原纤维蛋白性质的重要指标之一, 肌原纤维内部结构、排列顺序的改变都会对其起泡能力和稳定性产生影响^[31]。藏羊肉的起泡能力范围在 35%~90%, 其中脖肉的起泡能力 (90%) 最强 ($P>0.05$), 其次是肩肉 (89%, $P>0.05$), 针扒的最弱 (35%, $P>0.05$); 金钱腱、板腱的泡沫稳定性 (68%, 68%) 较强 ($P>0.05$), 后腱子的泡沫稳定性 (16%) 较弱 ($P<0.05$)。藏羊不同部位肉间凝胶特性、乳化特性、起泡特性存在差异性。

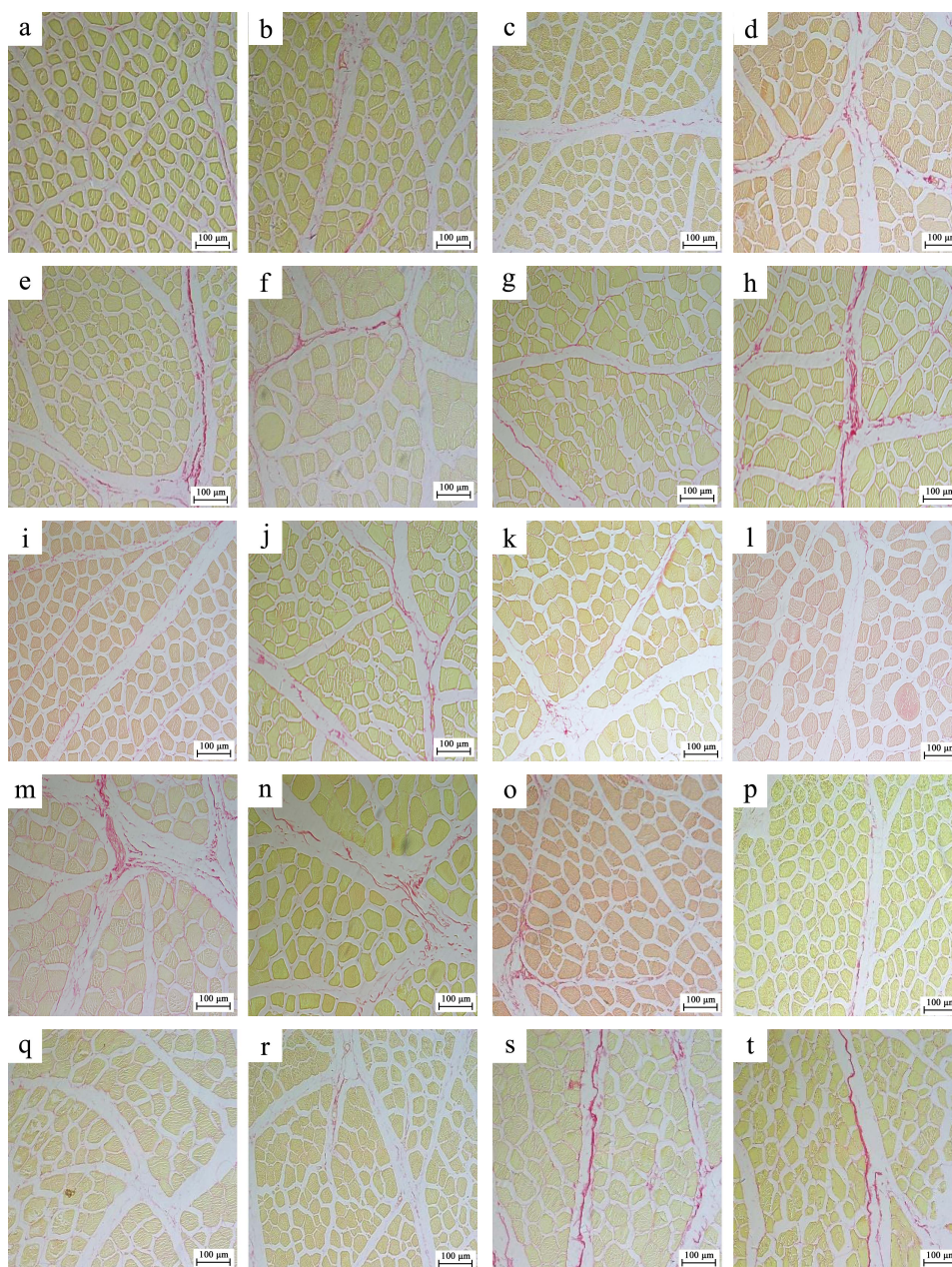


图 7 藏羊不同部位肉的天狼猩红染色结果 (200×)

Fig.7 Results of the staining of meat in different parts of Tibetan sheep with aspen scarlet (200×)

注: (a) 上脑; (b) 眼肉; (c) 小黄瓜; (d) 尾龙扒; (e) 针扒; (f) 羊腩; (g) 烩扒; (h) 前腱子; (i) 脖肉; (j) 肩肉; (k) 胸肉; (l) 辣椒条; (m) 后腱子; (n) 金钱腱; (o) 霖肉; (p) 外脊; (q) 上三筋; (r) 里脊; (s) 板腱; (t) 肋肉。

表 2 藏羊不同部位肉的乳化特性、凝胶特性、起泡特性

Table 2 Emulsification properties, gel properties, foaming properties of meat in different parts of Tibetan sheep

部位	凝胶保水性/%	凝胶硬度/g	凝胶粘度/g	凝胶弹性/mm	凝胶内聚性	胶着性/g	咀嚼性/g	乳化活性 (EA)/%	乳化稳定性 (ES)/%	起泡能力 (FC)/%	泡沫稳定性 (FS)/%
上脑	23.93 ± 4.80 ^j	451.67 ± 19.85 ^b	2.17 ± 0.29 ^k	3.93 ± 0.11 ^f	0.51 ± 0.02 ^d	44.33 ± 1.53 ^b	6.60 ± 0.30 ^c	17.00 ± 1.00 ^{de}	7.64 ± 0.47 ^{ef}	54.00 ± 2.00 ^{hi}	28.00 ± 1.00 ^{hjk}
眼肉	44.86 ± 5.00 ^{lgh}	102.33 ± 1.20 ^j	8.67 ± 0.58 ^{de}	1.18 ± 0.02 ^{hi}	0.44 ± 0.02 ^{gh}	44.67 ± 0.58 ^g	0.97 ± 0.06 ^{lm}	10.00 ± 1.00 ^{ijk}	3.89 ± 0.53 ^{ij}	83.00 ± 7.00 ^{abc}	26.00 ± 1.00 ^k
小黄瓜	62.38 ± 2.36 ^{bcd}	118.00 ± 1.15 ^{ij}	3.33 ± 0.58 ^{ijk}	2.92 ± 0.10 ^e	0.46 ± 0.02 ^{efg}	54.33 ± 1.15 ^f	1.70 ± 0.10 ⁱ	11.00 ± 0.00 ^{ghi}	10.65 ± 0.10 ^b	85.00 ± 0.00 ^{ab}	33.00 ± 1.00 ^{df}
尾龙扒	52.96 ± 2.98 ^e	151.00 ± 3.61 ^{fg}	5.00 ± 1.00 ^{ghi}	29.32 ± 0.35 ^a	0.48 ± 0.01 ^{def}	62.33 ± 1.53 ^f	1.90 ± 0.10 ^h	23.00 ± 1.00 ^b	5.48 ± 0.14 ^h	52.00 ± 3.00 ^{hi}	33.00 ± 2.00 ^{def}
针扒	39.96 ± 0.52 ^{ghi}	335.67 ± 6.12 ^c	2.67 ± 0.58 ^{jk}	5.10 ± 0.16 ^c	0.47 ± 0.02 ^{efg}	24.33 ± 0.08 ^c	4.30 ± 0.10 ^d	7.00 ± 0.00 ⁱ	2.33 ± 0.18 ^k	35.00 ± 1.00 ^j	27.00 ± 1.00 ^{ijk}
羊腩	35.19 ± 3.93 ^{hi}	637.67 ± 15.60 ^a	57.00 ± 2.65 ^a	6.98 ± 0.78 ^d	0.35 ± 0.01 ^j	86.33 ± 7.77 ^a	10.50 ± 0.26 ^a	16.00 ± 0.00 ^e	5.87 ± 0.24 ^h	44.00 ± 3.00 ^{ij}	51.00 ± 1.00 ^b
烩扒	65.30 ± 9.32 ^{abc}	167.00 ± 1.53 ^f	10.00 ± 1.00 ^d	2.93 ± 0.25 ^g	0.49 ± 0.01 ^{de}	32.332.31 ^h	2.07 ± 0.06 ^{gh}	12.00 ± 1.00 ^{gh}	5.43 ± 0.20 ^h	56.00 ± 2.00 ^{gh}	30.00 ± 0.00 ^{ghi}
前腱子	45.68 ± 3.49 ^{fg}	121.33 ± 1.86 ^{hij}	3.00 ± 0.00 ^{ijk}	2.07 ± 0.25 ^{hi}	0.75 ± 0.04 ^b	15.00 ± 1.00 ^k	1.27 ± 0.06 ^{kl}	10.00 ± 0.00 ^{ijk}	5.97 ± 0.09 ^{gh}	79.00 ± 1.00 ^{abcd}	24.00 ± 1.00 ^{kl}
脖肉	40.07 ± 3.76 ^{ghi}	153.67 ± 6.96 ^g	15.00 ± 1.00 ^c	8.25 ± 0.09 ^e	0.64 ± 0.02 ^c	54.67 ± 1.53 ^f	1.73 ± 0.06 ⁱ	8.00 ± 0.00 ^m	3.03 ± 0.10 ⁱ	90.00 ± 3.00 ^a	38.00 ± 1.00 ^c
肩肉	50.94 ± 1.77 ^{ef}	240.67 ± 9.61 ^e	6.67 ± 1.15 ^{efg}	2.51 ± 0.31 ^{ghi}	0.47 ± 0.03 ^{defg}	115.33 ± 1.53 ^e	2.90 ± 0.10 ^f	11.00 ± 0.00 ^{hij}	4.47 ± 0.07 ⁱ	89.00 ± 5.00 ^a	50.00 ± 2.00 ^b
胸肉	60.09 ± 6.50 ^a	158.00 ± 4.73 ^g	7.00 ± 1.00 ^{efg}	1.27 ± 0.21 ^{ghi}	0.38 ± 0.01 ^{ij}	27.67 ± 1.53 ^{hi}	1.60 ± 0.10 ^j	10.00 ± 1.00 ^{ijk}	7.42 ± 0.65 ^{ef}	62.00 ± 2.00 ^{fgh}	34.00 ± 0.00 ^{cde}
辣椒条	64.04 ± 3.06 ^{abd}	158.00 ± 3.79 ^{fg}	6.33 ± 0.58 ^{gh}	3.69 ± 0.37 ^f	0.49 ± 0.01 ^{de}	24.00 ± 1.00 ^{hij}	1.33 ± 0.06 ^{jk}	22.00 ± 2.00 ^c	6.87 ± 0.84 ^{fg}	88.00 ± 3.00 ^a	25.00 ± 0.00 ^{kl}
后腱子	59.80 ± 2.39 ^d	104.00 ± 2.08 ^{ij}	8.00 ± 1.00 ^{def}	1.91 ± 0.06 ⁱ	0.41 ± 0.01 ^{hi}	32.67 ± 2.52 ^h	0.90 ± 0.00 ^{mn}	9.00 ± 1.00 ^k	9.12 ± 0.61 ^c	79.00 ± 4.00 ^{abcd}	16.00 ± 1.00 ^m
金钱腱	34.48 ± 1.11 ^{hi}	282.00 ± 4.04 ^d	4.33 ± 0.58 ^{hij}	2.65 ± 0.08 ^{gh}	0.34 ± 0.02 ^k	24.67 ± 1.53 ^{hij}	3.60 ± 0.26 ^e	14.00 ± 1.00 ^f	8.85 ± 0.22 ^{cd}	71 ± 1.00 ^{def}	68.00 ± 1.00 ^a
霖肉	66.53 ± 2.27 ^{ab}	134.67 ± 2.03 ^{ghi}	7.00 ± 1.00 ^{efg}	8.29 ± 0.65 ^c	0.48 ± 0.01 ^{def}	21.00 ± 1.73 ^{ijk}	2.37 ± 0.15 ^{gi}	12.00 ± 0.00 ^g	7.96 ± 0.08 ^{de}	36.00 ± 4.00 ^j	33.00 ± 1.00 ^{efg}
外脊	42.36 ± 0.64 ^{ghi}	334.33 ± 24.97 ^c	2.33 ± 0.58 ^{jk}	9.72 ± 0.60 ^b	0.62 ± 0.03 ^c	221.33 ± 14.22 ^d	7.73 ± 0.32 ^b	18.00 ± 0.00 ^d	5.75 ± 0.19 ^h	71.00 ± 2.00 ^{def}	37.00 ± 0.00 ^{de}
上三筋	41.59 ± 0.97 ^{hi}	158.00 ± 3.79 ^{fg}	6.33 ± 0.58 ^{gh}	3.70 ± 0.39 ^f	0.49 ± 0.01 ^{de}	24.00 ± 1.00 ^{hij}	1.33 ± 0.06 ^{jk}	16.00 ± 1.00 ^e	6.03 ± 0.34 ^{gh}	75.00 ± 4.00 ^{bode}	29.00 ± 0.00 ^{ghij}
里脊	64.48 ± 3.51 ^{de}	121.00 ± 1.15 ^{hij}	3.00 ± 0.00 ^{ijk}	8.44 ± 0.35 ^c	0.84 ± 0.01 ^a	17.00 ± 1.73 ^{jk}	1.37 ± 0.06 ^k	31.00 ± 1.00 ^a	13.96 ± 1.21 ^a	84.00 ± 4.00 ^{abc}	21.00 ± 1.00 ⁱ
板腱	33.78 ± 0.81 ⁱ	103.00 ± 1.53 ^h	3.33 ± 0.58 ^{ijk}	2.65 ± 0.20 ^{gh}	0.44 ± 0.02 ^{fgh}	44.33 ± 0.58 ^g	1.17 ± 0.15 ^{klm}	21.00 ± 0.00 ^c	8.62 ± 0.24 ^{cd}	74 ± 2.00 ^{cde}	68.00 ± 2.00 ^{efgh}
肋肉	56.98 ± 2.28 ^{ab}	107.33 ± 2.33 ^{ij}	17.33 ± 1.53 ^b	1.95 ± 0.03 ^{hi}	0.42 ± 0.01 ^h	45.33 ± 2.31 ^{fg}	1.27 ± 0.15 ^{ikl}	22.00 ± 1.00 ^{bc}	11.46 ± 0.25 ^b	66 ± 3.00 ^{efg}	33.00 ± 0.00 ^{efg}

表 3 藏羊不同部位肉的肌肉组织学特性

Table 3 Muscle histological characteristics of meat in different parts of Tibetan sheep

部位	肌纤维直径/ μm	单个肌纤维横截面积/ μm^2	肌纤维密度/(N/ mm^2)	肌束膜厚度/ μm	肌内膜厚度/ μm
上脑	$34.58 \pm 1.11^{\text{gh}}$	$944.91 \pm 49.46^{\text{hij}}$	$1\,344.88 \pm 46.74^{\text{de}}$	$18.19 \pm 0.89^{\text{j}}$	$6.18 \pm 0.40^{\text{efg}}$
眼肉	$44.20 \pm 0.19^{\text{c}}$	$1\,441.88 \pm 8.21^{\text{cde}}$	$1\,272.41 \pm 37.62^{\text{ef}}$	$34.43 \pm 0.49^{\text{h}}$	$4.85 \pm 0.16^{\text{hi}}$
小黄瓜	$37.06 \pm 0.94^{\text{efg}}$	$1\,105.83 \pm 40.62^{\text{ghi}}$	$1\,305.20 \pm 29.97^{\text{i}}$	$43.49 \pm 1.53^{\text{f}}$	$5.32 \pm 0.07^{\text{ghi}}$
尾龙扒	$43.52 \pm 0.13^{\text{d}}$	$1\,506.33 \pm 43.95^{\text{cde}}$	$1\,301.73 \pm 31.19^{\text{e}}$	$45.02 \pm 0.06^{\text{b}}$	$7.05 \pm 0.02^{\text{cde}}$
针扒	$40.38 \pm 0.17^{\text{cdef}}$	$1\,298.66 \pm 11.11^{\text{degh}}$	$1\,478.72 \pm 4.28^{\text{d}}$	$85.24 \pm 0.19^{\text{ef}}$	$6.67 \pm 0.23^{\text{def}}$
羊腩	$44.94 \pm 0.44^{\text{cd}}$	$1\,612.33 \pm 77.93^{\text{cd}}$	$1\,631.22 \pm 14.73^{\text{c}}$	$37.18 \pm 0.41^{\text{b}}$	$3.43 \pm 0.41^{\text{j}}$
烩扒	$43.15 \pm 1.05^{\text{cd}}$	$1\,514.50 \pm 46.65^{\text{cd}}$	$1\,105.27 \pm 22.75^{\text{gh}}$	$65.69 \pm 1.06^{\text{de}}$	$10.42 \pm 0.41^{\text{a}}$
前腱子	$41.21 \pm 0.95^{\text{cde}}$	$1\,478.30 \pm 68.63^{\text{cde}}$	$1\,261.84 \pm 2.74^{\text{e}}$	$61.37 \pm 2.80^{\text{b}}$	$5.75 \pm 0.07^{\text{fgh}}$
脖肉	$40.42 \pm 1.66^{\text{cdef}}$	$1\,353.93 \pm 51.55^{\text{cdef}}$	$1\,135.24 \pm 29.44^{\text{g}}$	$48.00 \pm 0.89^{\text{cd}}$	$7.64 \pm 0.46^{\text{bcd}}$
肩肉	$33.49 \pm 1.23^{\text{gh}}$	$869.13 \pm 75.03^{\text{ij}}$	$1\,922.99 \pm 14.50^{\text{h}}$	$61.75 \pm 2.04^{\text{b}}$	$5.54 \pm 0.51^{\text{fgh}}$
胸肉	$45.24 \pm 1.43^{\text{cd}}$	$1\,739.44 \pm 99.16^{\text{cde}}$	$1\,035.99 \pm 30.01^{\text{d}}$	$40.10 \pm 1.04^{\text{fg}}$	$7.07 \pm 0.24^{\text{cde}}$
辣椒条	$36.86 \pm 0.97^{\text{fg}}$	$1\,124.10 \pm 63.45^{\text{fgh}}$	$1\,490.33 \pm 18.82^{\text{fg}}$	$51.92 \pm 1.45^{\text{cd}}$	$6.19 \pm 0.30^{\text{efg}}$
后腱子	$39.12 \pm 1.79^{\text{def}}$	$1\,266.07 \pm 122.99^{\text{efg}}$	$1\,114.58 \pm 24.31^{\text{gh}}$	$63.61 \pm 2.14^{\text{ef}}$	$7.88 \pm 0.47^{\text{bc}}$
金钱腱	$58.46 \pm 0.59^{\text{a}}$	$2\,700.30 \pm 53.41^{\text{a}}$	$1\,066.32 \pm 38.70^{\text{b}}$	$52.40 \pm 1.04^{\text{cd}}$	$8.66 \pm 0.16^{\text{b}}$
霖肉	$42.68 \pm 2.26^{\text{cd}}$	$1\,481.56 \pm 131.50^{\text{cde}}$	$1\,289.81 \pm 36.00^{\text{a}}$	$65.72 \pm 1.86^{\text{b}}$	$5.29 \pm 0.34^{\text{ghi}}$
外脊	$34.62 \pm 0.66^{\text{gh}}$	$957.51 \pm 11.25^{\text{hij}}$	$1\,605.20 \pm 29.97^{\text{i}}$	$43.49 \pm 1.53^{\text{f}}$	$5.32 \pm 0.07^{\text{ghi}}$
上三筋	$44.56 \pm 1.96^{\text{b}}$	$1\,631.93 \pm 31.54^{\text{b}}$	$1\,116.20 \pm 28.66^{\text{c}}$	$53.11 \pm 0.94^{\text{cd}}$	$5.70 \pm 0.08^{\text{fgh}}$
里脊	$31.13 \pm 0.72^{\text{h}}$	$780.33 \pm 6.58^{\text{j}}$	$2\,652.26 \pm 28.65^{\text{j}}$	$51.86 \pm 2.02^{\text{gh}}$	$6.19 \pm 0.13^{\text{efg}}$
板腱	$43.19 \pm 1.33^{\text{cd}}$	$1\,406.84 \pm 105.50^{\text{cde}}$	$1\,404.95 \pm 25.93^{\text{d}}$	$37.59 \pm 1.92^{\text{gh}}$	$6.72 \pm 0.43^{\text{cdef}}$
肋肉	$46.84 \pm 0.63^{\text{cd}}$	$1\,590.25 \pm 44.54^{\text{cde}}$	$910.83 \pm 35.26^{\text{i}}$	$61.35 \pm 0.75^{\text{b}}$	$10.91 \pm 0.61^{\text{a}}$

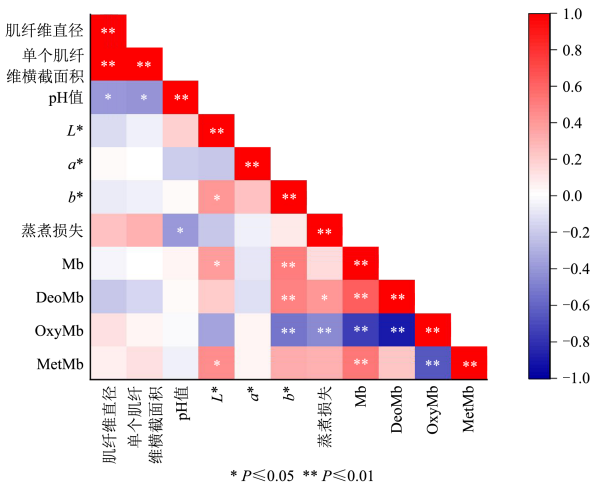


图 8 藏羊不同部位肉品质与组织学特性的相关性热图
Fig.8 Heat map of correlation between muscle quality and histological characteristics of meat in different parts of Tibetan sheep

2.6 藏羊不同部位肉的组织学特性分析

2.6.1 藏羊不同部位肉肌纤维组成的染色分析

家畜胴体主要由结缔组织、肌肉组织、骨组

织和脂肪组织等组成，其中肌肉组织占胴体组成的50%~60%^[32]。藏羊不同部位肉组织天狼猩红染色结果如图7所示，藏羊各部位肌纤维结构清晰，组织紧密。

2.6.2 藏羊不同部位肉的组织学特性差异分析

由表3可知，肋肉、金钱腱、胸肉、羊腩的肌纤维直径和单个肌纤维横截面积最大，有研究发现单个肌纤维横截面积与剪切力成正比，肌纤维直径、单个肌纤维横截面积越大，肉的嫩度就越差^[33]，结果表明肋肉、金钱腱、胸肉、羊腩嫩度较差。里脊的肌纤维密度较大（ $P>0.05$ ），肋肉、胸肉肌纤维密度较小（ $P>0.05$ ）。

2.7 藏羊不同部位肉品质特性相关性分析

2.7.1 藏羊不同部位肉品质特性与组织学特性相关性分析

肌肉组织学特性对肉品质有较大的影响，而单个肌纤维横截面积和肌纤维直径是肉品质的主要决定因素。藏羊不同部位肉品质与组织学特性的相关性热图见图8。

由图 8 可知, 藏羊不同部位肉的肌纤维直径与单个肌纤维横截面积呈极显著正相关 ($P\leq 0.01$), 与 pH 呈显著负相关 ($P\leq 0.05$); 单个肌纤维横截面积与 pH 呈显著负相关 ($P\leq 0.05$)。pH 与蒸煮损失呈显著负相关 ($P\leq 0.05$)。 L^* 值与 MetMb、Mb、 b^* 呈显著正相关 ($P\leq 0.05$)。 b^* 值与 DeoMb、Mb 呈极显著正相关 ($P\leq 0.01$), b^* 值与 OxyMb 呈极显著负相关 ($P\leq 0.01$)。蒸煮损失与 OxyMb 呈极显著负相关 ($P\leq 0.01$), 与 DeoMb 呈显著正相关 ($P\leq 0.05$)。Mb 与 OxyMb 呈极显著负相关 ($P\leq 0.01$), 与 MetMb、DeoMb 呈极显著正相关 ($P\leq 0.01$), DeoMb 与 OxyMb 呈极显著负相关 ($P\leq 0.01$), OxyMb 与 MetMb 呈极显著负相关 ($P\leq 0.01$)。

2.7.2 藏羊部位肉质构特性与组织学特性的相关性分析

由图 9 可知, 藏羊部位肉的硬度与单个肌纤维横截面积、肌纤维直径、剪切力、咀嚼性呈极显著正相关 ($P\leq 0.01$)。咀嚼性与单个肌纤维横截面积、肌纤维直径、剪切力呈极显著正相关 ($P\leq 0.01$)。剪切力与单个肌纤维横截面积、肌纤维直径呈极显著正相关 ($P\leq 0.01$)。肌纤维直径与单个肌纤维横截面积呈极显著正相关 ($P\leq 0.01$)。由以上结果可知, 藏羊部位肉的各项指标之间存在相关性。

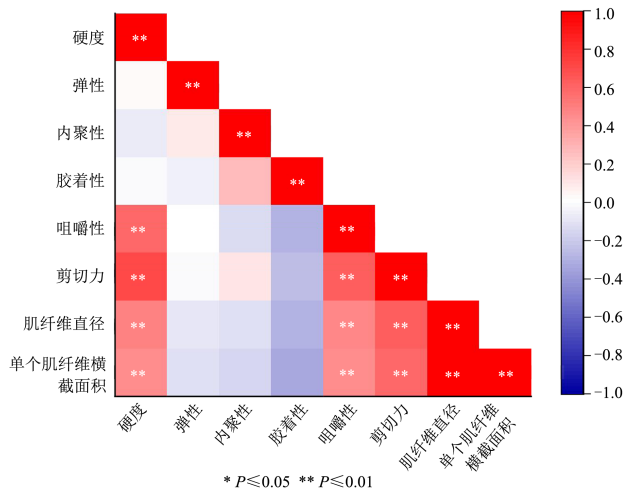


图 9 藏羊不同部位肉质构特性与组织学特性的相关性分析
Fig.9 Correlation analysis between textural and histological characteristics of meat in different parts of Tibetan sheep

2.8 藏羊不同部位肉品质的主成分分析

利用主成分分析方法, 可以在多个样本中, 对样本中存在的各种复杂关系进行进一步的分析^[3]。本研究利用主成分分析法分析了藏羊 20 个部位肉的 14 项品质指标。结合表 4、表 5 可知第一主成分的累计贡献率为 27.07%, 代表指标为肌纤维直径、DeoMb、单个肌纤维横截面积、硬度、OxyMb, 其中 OxyMb 在第一主成分上呈负向分布, 肌纤维直径、DeoMb、单个肌纤维横截面积、硬度呈正向分布, 肌纤维直径载荷值相对较大, 且其反映肉的嫩度, 故选择肌纤维直径作为第一主成分代表指标。第二主成分的累计贡献率 52.64%, 第二主成分主要综合了 Mb、OxyMb、MetMb, Mb、OxyMb 在第二主成分上呈正向分布, MetMb 呈负向分布, 因 Mb、OxyMb、MetMb 都反映肉色色度, 且载荷值相对较大, 故选择肉色作为第二主成分代表指标。第三主成分的累计贡献率为 64.73%, 第三主成分主要综合了蒸煮损失、咀嚼性、 L^* 值, 其中 L^* 呈负向分布, 蒸煮损失和咀嚼性呈正向分布, 且蒸煮损失反映肉的持水指标, 载荷值相对较大, 因此选择蒸煮损失作为第三主成分代表指标。第四主成分的累计贡献率为 73.55%, 第四主成分主要综合了硬度的信息, 呈正向分布, 因此选择硬度作为第四主成分代表指标。第五主成分主要综合了 a^* 值、 b^* 值, a^* 值呈正向分布, b^* 值呈负向分布, 因肉的颜色主要与肌肉的微观结构与肌肉中色素物质的含量和化学状态有关, 因此选择色度作为第五主成分代表指标。主成分结果显示指标前 5 个主成分特征值大于 1, 累计贡献率达到 82.21%, 能够反映大部分结果的信息, 因此选择前五个主成分进行分析。通过主成分分析和载荷分析, 可确定质地因子和色度因子是评价藏羊不同部位肉品质的主要指标。

综上所述, 选取藏羊部位肉的肌纤维直径、Mb 含量、蒸煮损失、硬度、 a^* 为藏羊部位肉的关键品质指标。结合表 6 通过层次分析确定评价指标的权重, 建立藏羊不同部位肉的综合品质评价模型 $Y=0.19 A_1+0.10A_2-0.01A_3+0.21A_4+0.12A_5$ ($A_1\sim A_5$ 分别表示肌纤维直径、Mb、蒸煮损失、硬度、 a^* 值), 其中硬度和肌纤维直径的权重最大, a^* 值和 Mb 次之, 蒸煮损失较小。

表 4 藏羊不同部位肉主成分因子特征值及方差贡献率

Table 4 Principal component factor characteristic values and variance contribution rate of meat in different parts of Tibetan sheep

成分	初始特征值		
	总计	方差百分比	累积/%
1	3.79	27.07	27.07
2	3.58	25.57	52.64
3	1.69	12.09	64.73
4	1.24	8.82	73.55
5	1.21	8.66	82.21
6	0.88	6.30	88.51
7	0.59	4.22	92.73
8	0.39	2.76	95.50
9	0.27	1.89	97.39
10	0.18	1.30	98.68
11	0.11	0.75	99.43
12	0.07	0.49	99.92
13	0.01	0.07	100.00

表 5 藏羊不同部位肉各品质指标的成分载荷矩

Table 5 Compositional loading moments for each quality index of meat in different parts of Tibetan sheep

成分	初始特征值				
	1	2	3	4	5
肌纤维直径	0.73	0.51	-0.07	-0.18	0.08
DeoMb	0.68	-0.49	0.38	-0.27	-0.12
单个肌纤维横截面积	0.67	0.55	-0.08	-0.23	0.12
硬度	0.63	0.36	-0.05	0.56	-0.09
b*	-0.50	0.46	0.02	-0.03	-0.48
Mb	-0.42	0.74	0.18	0.36	-0.04
OxyMb	-0.66	0.69	-0.15	0.05	0.08
MetMb	0.28	-0.68	-0.32	0.38	0.03
剪切力	0.58	0.60	0.21	0.38	-0.10
蒸煮损失	0.03	-0.49	0.66	0.22	-0.30
L*	0.50	-0.25	-0.56	0.35	-0.09
咀嚼性	0.53	0.44	0.54	-0.16	0.02
pH	-0.37	-0.31	0.50	0.36	0.08
a*	-0.08	-0.01	0.24	0.18	0.09

表 6 藏羊不同部位肉的关键品质权重

Table 6 Critical quality weights of meat in different parts of Tibetan sheep

	肌纤维直 径 (A ₁)	Mb (A ₂)	蒸煮损 失 (A ₃)	硬度 (A ₄)	a* (A ₅)
主成分分析权重	0.19	0.10	-0.01	0.21	0.12
归一化后的权重	0.31	0.16	-0.02	0.34	0.20

2.9 藏羊部位肉品质的聚类分析

本研究对藏羊不同部位肉的理化品质、加工特性、肌红蛋白含量及肌肉组织学特性进行聚类分析。聚类分析是一种统计方法，用于将具有相似性质的样品进行聚类，并将相似的样品分组在一起，通过对每个样品的多个指标进行综合分析，来研究样品之间的联系和差异^[34]。本研究对藏羊 20 个部位肉的品质指标采用瓦尔德法进行系统聚类分析。从图 10 聚类图谱来看当欧氏距离为 15 时，20 个部位肉被分为三类，第一类为肩肉、上脑、针扒、辣椒条、尾龙扒、烩扒、上三筋、前腱子、里脊、板腱、脖肉、小黄瓜、眼肉、后腱子、外脊，第二类为霖肉、羊腩，第三类为里脊、胸肉、金钱腱。

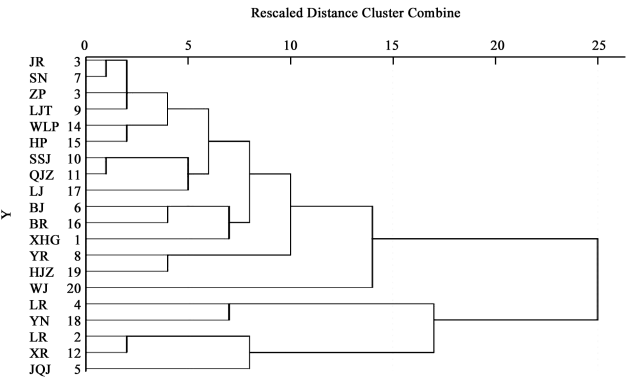


图 10 藏羊不同部位肉品质的聚类分析

Fig.10 Cluster analysis of meat quality o of meat in different parts of Tibetan sheep

注：JR 肩肉；SN 上脑；ZP 针扒；LJT 辣椒条；WLP 尾龙扒；HP 烩扒；SSJ 上三筋；QJZ 前腱子；LJ 里脊；BJ 板腱；BR 脖肉；XHG 小黄瓜；YR 眼肉；HJZ 后腱子；WJ 外脊；LR 霖肉；YN 羊腩；LR 里脊；XR 胸肉；JQJ 金钱腱。

3 讨论

藏羊不同部位肉间因肌纤维的类型、组成、直径、面积的差异都会影响肌肉的代谢反应，进而引起肉色泽、嫩度、质构、风味、多汁性等食用品质的差异。

单个肌纤维横截面积、肌纤维直径是决定肉品质的重要因素。本研究结果表明,藏羊不同部位肉的硬度与单个肌纤维横截面积、肌纤维直径、剪切力、咀嚼性呈极显著正相关($P \leq 0.01$),此结果与莫兹源等^[35]研究肌纤维类型影响牛肉品质相关指标的结果相同。剪切力与单个肌纤维横截面积、肌纤维直径呈极显著正相关($P \leq 0.01$),单个肌纤维横截面积越小,肌纤维直径越小,剪切力也越小,即肉质更为嫩。杨小林等^[36]研究发现阿坝藏鸡的肌纤维直径与嫩度呈正相关,与本研究结果相同。

pH值是反应畜禽宰后肌肉糖酵解的强度和速度,对肌肉的嫩度有影响^[18]。本研究表明藏羊部位肉的pH值,均在5.8~6.2之间属于最优品,单个肌纤维横截面积与pH呈显著负相关($P \leq 0.05$)。板腱(53.47)、肋肉(49.10)具有较高的 L^* 值,这与该部位肌肉的保水性能较好、水与蛋白结合较紧密及对光的反射较强有关^[37]。

蒸煮损失是反应肉保水性能的重要指标之一,本研究表明外脊(35.03%)、里脊(30.88%)的蒸煮损失较大,说明其保水性能较小,不适合长时间的蒸煮加工,这与窦玉琴等^[3]研究结果相同。本研究结果表明蒸煮损失与OxyMb呈极显著负相关($P \leq 0.01$),与DeoMb呈显著正相关($P \leq 0.05$),温度对肉色影响较大,这与张攀高等^[38]研究结果相同。

肉类制品的品质受到其凝胶特性和乳化特性的影响。在生产加工过程中,肉类制品的均匀状态、蒸煮损失与原料肉的乳化能力和凝胶能力密切相关,其特性在加工过程中起着重要作用,影响着最终产品的口感和质地^[7]。本研究表明霖肉的凝胶保水性(66.53%)最高,眼肉(102.33 g)和板腱(103.00 g)的凝胶硬度最低,不适合肉糜、凝胶类产品的加工,这与孙灵霞等^[39]研究巴西内洛尔牛部位肉品质特性分析的结果相同。烩扒、霖肉和里脊的凝胶硬度、凝胶保水性和凝胶弹性综合性能较好,这可能与蛋白质含量有关,当肉中蛋白质含量较高时,其凝胶特性更稳定,凝胶结构表现良好。肉加工肠类制品时,肠类制品的均匀状态和蒸煮损失与肉的凝胶能力和乳化能力密切相关^[12]。本研究表明藏羊不同部位肉间的凝胶特性、乳化特性、起泡特性存在差异性,因此,在加工藏羊肉糜类产品时,必须根据其凝胶特性、乳化性和泡沫特性等因素,选取适当的肉品进行加工。

4 结论

本研究运用多元统计分析比较分析了藏羊20个部位肉的品质和组织学特性,结果表明藏羊不同部位肉间的质构特性、pH、蒸煮损失、肉色、肌原纤维蛋白特性、组织学特性均存在差异性。相关性结果显示,藏羊部位肉的硬度与单个肌纤维横截面积、肌纤维直径、剪切力、咀嚼性呈现极显著正相关;单个肌纤维横截面积与pH呈显著负相关;pH与蒸煮损失呈显著负相关;蒸煮损失与OxyMb呈极显著负相关,与DeoMb呈显著正相关。主成分分析提取了5个主成分因子,PC1质地因子(27.07%),PC2、PC5色度因子(25.57%、8.66%),PC3持水因子(12.09%)、PC4硬度因子(8.81%),建立了藏羊部位肉的综合品质评价模型 $Y=0.19A_1+0.10A_2-0.01A_3+0.21A_4+0.12A_5$ 。研究结果为藏羊部位肉的精深加工提供了理论依据。

参考文献

- [1] REN Y, CIWANG R Z, WANG J, et al. Effect of different Feeds on the fungi microbiome of suffolk crossed with Tibetan Sheep [J]. Life, 2023, 13(11): 2210.
- [2] ZHAO S D, HAO G Z, ZHANG Y C, et al. A Real-time semantic segmentation method of sheep carcass images based on ICNet [J]. Journal of Robotics, 2021, 2021: 1-12.
- [3] 窦玉琴,孙万成,罗毅皓,等.不同部位及地区藏羊肉的肉品质及其组织学特性[J].食品研究与开发,2023,44(9):59-68.
- [4] 张燕,李升升,赵立柱.基于主成分和聚类分析的藏羊部位肉品质评价[J].食品科技,2022,47(4):128-133.
- [5] 张文兰,王静瑜,王筱珊,等.阿拉善蒙古牛不同部位肉品质特性研究[J].当代畜牧,2023,8:39-41.
- [6] 费雨婕,许芳瑞,廖锐,等.羊肉及其制品特征挥发性风味物质的研究进展[J].食品研究与开发,2023,44(24):201-207.
- [7] 马军,古丽孜亚·吐尔斯别克,祖木来提·热西提,等.不同腌制方式对羊肉肌原纤维蛋白结构和特性的影响[J].食品与发酵工业,2024,50(22):239-245.
- [8] 周力,柴琳瑞,马欣,等.不同精料水平饲料对青海藏绵羊肌肉抗氧化性能和肌红蛋白含量的影响[J].饲料研究,2021,44(21):1-4.
- [9] CHOI Y S, KU S K, LEE H J, et al. Study on processing quality of different parts of pork and beef [J]. Korean Journal of Food and Cookery Science, 2016, 32(2): 157-167.
- [10] 闫忠心.不同部位牦牛肉品质特性差异及机制研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2023.

- [11] QIN O Y, LIU L H, ZAREEF M, et al. Application of portable visible and near-infrared spectroscopy for rapid detection of cooking loss rate in pork: Comparing spectra from frozen and thawed pork [J]. LWT, 2022, 160: 113304.
- [12] 师希雄,王建忠,陈敬敬,等.超高压处理对藏羊肉肌原纤维蛋白特性的影响[J].食品与发酵工业,2022,48(16):169-174,181.
- [13] 张维农,刘大川,胡小泓.花生蛋白产品功能特性的研究[J].中国油脂,2002,5:60-65.
- [14] 吴丹璇.超声波结合燕麦膳食纤维对牛肉肌原纤维蛋白凝胶特性的改善机制及其应用研究[D].扬州:扬州大学,2024.
- [15] YU C L, CHEN L L, XU M S, et al. The effect of pH and heating on the aggregation behavior and gel properties of beef myosin [J]. LWT, 2024, 191: 115615.
- [16] 王莉.牦牛肉肌纤维类型组成及其代谢酶活力差异对宰后肉嫩度的影响[D].兰州:甘肃农业大学,2016.
- [17] SILVA S R, TEIXEIRA A, GUEDES C. Sheep and goat meat processing and quality [J]. Foods, 2023, 12(10): 2033.
- [18] 孙德鹏,彭安琪,谭金龙,等.干法成熟工艺对延边黄牛臀肉品质的影响[J].食品与机械,2023,5:159-165,172.
- [19] 李升升,靳义超.基于主成分和聚类分析的牦牛部位肉品质评价[J].食品与生物技术学报,2018,2:159-164.
- [20] 李升升,靳义超.加热介质和时间对牦牛肉品质的影响[J].食品与机械,2017,10:174-178.
- [21] 王琳琛.不同品种羊肉制肠适宜性研究[D].北京:中国农业科学院,2014.
- [22] CORLETT M T, PETHICK D W, KELMAN K R, et al. Lamb meat colour is minimally affected under reduced oxygen concentration in modified atmosphere packaging [J]. Food Packaging and Shelf Life, 2024, 43: 101291.
- [23] 王琳琳,陈炼红,张岩.不同部位牦牛肉宰后成熟过程中肉色稳定性研究[J].食品与发酵工业,2022,48(20):29-35.
- [24] 程丽娟.冷藏期间滩羊肉肌红蛋白变化的快速检测研究[D].银川:宁夏大学,2021.
- [25] LIMA L C S, SALIM A P A A, TREZEE I M M, et al. High-intensity ultrasound improves color and oxidative stability of beef from grain-fed and pasture-fed nellore cattle [J]. Meat Science, 2023, 206: 109324.
- [26] 刘成龙.气调包装对不同部位牛肉颜色稳定性影响及机理的探究[D].泰安:山东农业大学,2015.
- [27] 张尼庚,朱乐婷,李俊熙,等.不同植物多酚对牦牛肉冷藏过程品质特性的影响[J].食品与发酵工业,2024,50(21): 232-239.
- [28] LEE S, CHOI Y S, JO K, et al. Processing characteristics of freeze-dried pork powder for meat emulsion Gel [J]. Food Science of Animal Resources, 2021, 41(6): 997-1011.
- [29] LI K, LI S Y, HE Y Y, et al. Application of ultrasound-assisted alkaline extraction for improving the solubility and emulsifying properties of pale, soft, and exudative (PSE)-like chicken breast meat protein isolate [J]. LWT, 2022, 172: 114234.
- [30] ZHANG R, LIU J, CAO S, et al. Tailoring an egg white protein double network emulsion gel as a novel fat substitute for improving freeze-thaw stability of minced meat gel [J]. Food Hydrocolloids, 2024, 150: 109763.
- [31] 荣婧,仇超颖,胡晓,等.鸢乌贼肌原纤维蛋白糖基化产物功能特性研究[J].南方水产科学,2018,14(1):68-76.
- [32] 张艳梅,白晨,敖长金,等.不同饲养方式对肉羊胴体及肉品质影响的研究进展[J].中国畜牧杂志,2021,57(7):75-80,86.
- [33] 王亮,张宝善,李林强,等.猪牛羊肌肉组织质构特性差异比较及肌纤维分析[J].中国牛业科学,2016,42(3):34-38.
- [34] KATEKHAYE M A, KUMAR K S, REDDY K, et al. Comparison of chicken varieties: muscle fiber diameter, pH, color, tenderness in pectoralis major muscle [J]. Journal of Meat Science, 2018, 13(1): 60.
- [35] 莫兹源,谭昇,刘文友,等.肌纤维类型影响牛肉品质相关指标的研究进展[J].中国畜禽种业,2023,19(6):29-37.
- [36] 杨小林,苏元君,李星亮,等.阿坝藏鸡肌肉组织学特性与嫩度分析[J].湖北农业科学,2021,60(10):110-113.
- [37] T TAO Y M, MA L, LI D D, et al. Proteomics analysis to investigate the effect of oxidized protein on meat color and water holding capacity in tan mutton under low temperature storage [J]. LWT, 2021, 146: 111429.
- [38] 张攀高,师希雄,田铸,等.冰温贮藏调控藏羊肉脂质氧化对肉色稳定性的影响[J].甘肃农业大学学报,2021,56(4): 136-143,153.
- [39] 孙灵霞,李嘉辉,祝超智,等.巴西内洛尔牛不同部位肉品质特性分析[J].食品工业科技,2022,43(1):93-100.