

# 基于多元统计分析的牦牛红脏品质评价

候小鹏<sup>1</sup>, 李升升<sup>1,2,3\*</sup>, 张艳<sup>2</sup>, 马纪兵<sup>1,2</sup>

(1. 青海大学农牧学院, 青海西宁 810000) (2. 青海大学畜牧兽医科学院, 青海西宁 810000)

(3. 国家牦牛肉加工专业技术研发中心, 青海西宁 810000)

**摘要:** 为明确牦牛红脏的品质特性, 以牦牛心脏、肝脏、肺脏及肾脏4种红脏为原料, 分析不同红脏剪切力、pH值、蒸煮损失、色差、质构、营养成分、凝胶特性、乳化特性、起泡特性及微观结构的差异, 并对其进行相关性分析、主成分分析和聚类分析。结果表明: 心脏蛋白质含量、乳化性、起泡性和凝胶特性显著高于其它红脏 ( $P<0.05$ ); 肝脏嫩度优于其他红脏 ( $P<0.05$ ); 肺脏肉色、保水性优于其他红脏 ( $P<0.05$ ); 肾脏水分和脂肪含量显著高于其他红脏 ( $P<0.05$ ); 从微观结构来看: 牦牛心脏的心肌纤维排列致密且均匀; 肝脏组织结构清晰, 排列整齐; 肺脏组织排列较松散; 肾脏组织结构清晰, 排列紧密。主成分提取了3个主成分因子, 营养因子PC1 (35.38%), 质构因子PC2 (27.17%), 乳化因子PC3 (22.64%)。结合聚类分析的结果来看, 肺脏适宜蒸煮类加工; 心脏和肾脏适宜肉糜类产品加工; 肝脏适宜炒制类加工。综上所述, 牦牛红脏品质各有特点, 该研究结果为牦牛红脏的精深加工提供了理论依据和数据支持。

**关键词:** 牦牛红脏; 品质; 主成分; 聚类分析; 微观结构

文章编号: 1673-9078(2025)03-234-242

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.3.0206

## Quality Evaluation of Yak Red Viscera Based on Multivariate Statistical Analysis

HOU Xiaopeng<sup>1</sup>, LI Shengsheng<sup>1,2,3\*</sup>, ZHANG Yan<sup>2</sup>, MA Jibing<sup>1,2</sup>

(1.College of Agriculture and Animal Husbandry, Qinghai University, Xining 810000, China)

(2.Academy of Animal and Veterinary Sciences, Qinghai University, Xining 810000, China)

(3.National Yak Meat Processing Technology Research and Development Professional Center, Xining 810000, China)

**Abstract:** To clarify the quality characteristics of yak red viscera, four kinds of red viscera, including yak heart, liver, lungs, and kidneys, were used as the raw materials to analyze the discrepancies in shear force, pH, cooking loss, color difference, texture, nutrient composition, gel property, emulsifying property, foaming property and microstructure of various red viscera, and then the correlation analysis, principal component analysis, and cluster analysis were carried out. The results showed that the protein content, emulsifying property, foaming and gel properties of the heart were significantly higher than those of other red organs ( $P<0.05$ ). The tenderness of the liver was better than that of other red organs ( $P<0.05$ ). The flesh color and water-retentive capacity of the lung were better than those of other red organs ( $P<0.05$ ). The water and fat contents of the kidney were significantly higher than those of other red organs ( $P<0.05$ ); From the perspective of microstructure: the myocardial fibers of the yak heart were arranged densely and evenly; the liver tissue structure was clear and neatly arranged; the lung tissue was loosely arranged; the kidney tissue structure was clear and closely arranged. Three principal component

引文格式:

候小鹏,李升升,张艳,等.基于多元统计分析的牦牛红脏品质评价[J].现代食品科技,2025,41(3):234-242.

HOU Xiaopeng, LI Shengsheng, ZHANG Yan, et al. Quality evaluation of yak red viscera based on multivariate statistical analysis [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(3): 234-242.

收稿日期: 2024-02-22

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFD1602301)

作者简介: 候小鹏 (1999-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 畜产品加工的研究, E-mail: 2327350646@qq.com

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

factors were extracted, including nutritional factor PC1 (35.38%), texture factor PC2 (27.17%), and emulsifying factor PC3 (22.64%). Combined with the results of cluster analysis, it can be concluded that the lungs were suitable for steam cooking; the heart and kidneys were suitable for processing into minced meat products; the liver was suitable for stir-frying. In summary, t yak red viscera products have their own characteristics. The results of this study provide a theoretical basis and data support for deep processing of yak red viscera.

**Key words:** yak red viscera; quality; principal component; cluster analysis; microstructure

牦牛是生活在青藏高原及其沿线的哺乳动物，能够适应高海低氧的气候<sup>[1,2]</sup>。目前，我国约有 1 600 万头牦牛，占世界牦牛总数的 95%，其中国内的牦牛主要分布在青海、西藏、四川、甘肃、新疆、云南等地<sup>[3-5]</sup>。牦牛心、肝、肺、肾等红脏，具有高蛋白、低热量、低脂肪、富含维生素和矿物质等特点，是优质的肉类资源，深受消费者喜欢<sup>[6,7]</sup>。

随着我国对牛副产物开发的重视，一些学者对牦牛红脏的营养特性和食用品质进行了研究报道，张玉卿等<sup>[8]</sup>的研究表明，西藏斯布牦牛的红脏营养特性、食用品质及生物活性物质存在差异。孔祥颖等<sup>[9]</sup>将海北州牦牛和普通黄牛的营养成分进行比较，发现海北州牦牛肝脏的蛋白质、脂肪、灰分分别为 19.82、2.02、1.35 g/100 g，其糖原含量为 4.82 g/100 g，均显著高于普通黄牛，而海北州牦牛心脏的蛋白质、脂肪、灰分分别为 14.57、1.88、1.14 g/100 g，整体食用品质较高。祁兴磊等<sup>[10]</sup>的研究表明夏南牛心脏熟肉率高达 87.35%，嫩度为 1.52 kgf，整体食用品质较好。邝吉卫等<sup>[11]</sup>研究表明在 4 ℃条件下，牛肺和牛肝保水性逐渐下降，嫩度变差，硬度和咀嚼性增大，整体食用品质变差，而牛心在第五天时整体食用品质较好。综上可知，牦牛红脏含有丰富的营养物质，且整体食用品质较高，是优质的肉类资源。然而，对牦牛不同红脏品质评价鲜见报道，因此，有必要开展牦牛红脏品质评价的研究，以促进牦牛副产物的综合利用。

为此，本实验研究牦牛不同红脏的理化特性、营养特性、加工特性及微观结构，以期明确牦牛红脏的品质特性，为牦牛红脏的精深加工提供理论依据和数据支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

牦牛红脏购自青海夏华清真肉类食品有限公

司，选取 36±6 月龄牦牛的红脏，洗去表面血迹和污物，除去结缔组织和筋膜，沥干，在 3±1 ℃下运回实验室，待测。

### 1.2 主要设备与仪器

C-LMBB 质构仪，美国 Brokifeld 公司；ADC-50-C 全自动测色色差计，北京辰泰克仪器技术有限公司；SY-4 电热恒温水浴锅，北京泰克仪器有限公司；TP-301 中心温度计，苏州市沧浪区泰式电子经营部；JM-B3003 电子称，诸暨市超泽衡器设备有限公司；FSH-2A 可调速高速匀浆机，杭州研和实验仪器有限公司；HJ-3 数显恒温磁力搅拌器，上海梅香仪器有限公司；848-pH 测定仪，东苑市希玛仪表有限公司；H/T16MM- 台式高速离心机，湖南赫西离心机仪器有限公司；QSJ-D03A1 可调粗绞绞肉机，小熊电器股份有限公司。

### 1.3 试验与方法

#### 1.3.1 pH值测定

红脏 pH 值采用 GB 5009.237-2016 法测定，每个脏器样品测定三次，结果取平均值。

#### 1.3.2 色泽测定

采用色差仪进行肉色测定。 $L^*$  为亮度， $a^*$  为红度， $b^*$  为黄度。重复测定 3 次，取平均值。 $\Delta E$ （总色差）计算公式如下：

$$\Delta E=\sqrt{L^{*2}+a^{*2}+b^{*2}} \tag{1}$$

式中：

$L^*$ ——亮度；

$a^*$ ——红度；

$b^*$ ——黄度。

#### 1.3.3 蒸煮损失测定

取 100 g 的新鲜样品，在 85 ℃水浴中加热至中心温度 70 ℃，取出吸干水分待其温度降至 4 ℃，然后再次称重。每个部位样品测定三次，结果取平均值，计算公式如下：

$$C = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \quad (2)$$

式中:

$C$ ——蒸煮损失 (CL), %;

$m_1$ ——新鲜肉样质量, g;

$m_2$ ——蒸煮后肉样质量, g。

### 1.3.4 剪切力测定

参考邝吉卫等<sup>[11]</sup>的方法进行测定。

### 1.3.5 质构测定

参考邝吉卫等<sup>[11]</sup>的方法进行测定。

### 1.3.6 营养含量测定

红脏水分采用 GB 9695.15-2008、脂肪采用 GB 5009.6-2016、蛋白质采用 GB/T 5009.5-2016、灰分采用 GB 5009.4-2016 和胶原蛋白采用 GB/T 9695.23-2008《肉与肉制品羟脯氨酸含量测定》。

### 1.3.7 天狼猩红染色

参考史佳龙等<sup>[12]</sup>的方法。

### 1.3.8 肌红蛋白测定

参照 Krzywicki 等<sup>[13]</sup>的方法。

### 1.3.9 红脏肉糜凝胶特性

红脏肉糜制备参考计红芳等<sup>[14]</sup>的方法。

#### 1.3.9.1 肉糜持水性的测定

将红脏肉糜切成厚约 1 cm、质量约 5.0 g 的块状, 用 3 层滤纸包裹后置于 50 mL 离心管中, 4℃、7 500 r/min 离心 15 min, 称取离心后的质量, 持水性按以下公式计算:

$$B = \frac{m_3}{m_4} \times 100\% \quad (3)$$

式中:

$B$ ——持水性 (WRC), %;

$m_3$ ——离心前的质量, g;

$m_4$ ——离心后的质量, g。

#### 1.3.9.2 肉糜质构特性的测定

肉糜质构特性测定参考栗广俊等<sup>[15]</sup>的方法。

### 1.3.10 蛋白提取

参考 Young 等<sup>[16]</sup>和 Lawrie 等<sup>[17]</sup>的方法。

### 1.3.11 乳化特性

参照 Pearce 等<sup>[18]</sup>的方法。计算公式如下:

$$E = \frac{A_0}{A_{10}} \times \Delta t \quad (4)$$

式中:

$E$ ——乳化稳定性 (ES), %;

$A_0$ ——0 min 时的吸光度;

$A_{10}$ ——10 min 时的吸光度;

$\Delta t$ ——时间间隔, 10 min。

### 1.3.12 起泡特性

参照 Ivander 等<sup>[19]</sup>的方法。计算公示如下:

$$D_1 = \frac{V_0}{V} \times 100\% \quad (5)$$

$$D_2 = \frac{V_{30}}{V} \times 100\% \quad (6)$$

式中:

$D_1$ ——起泡性 (FA), %;

$D_2$ ——泡沫稳定性 (FS), %;

$V$ ——初始液的体积, mL;

$V_0$ ——0 min 时的体积, mL;

$V_{30}$ ——30 min 时的体积, mL。

### 1.3.13 数据分析

采用 SPSS 26.0 进行数据统计分析, 结果表示为平均值 ± 标准差, 采用 Duncan 多重比较法进行数据间的差异显著分析,  $P < 0.05$  表示差异显著。采 SPSS 26.0 进行数据间的相关性、主成分和聚类分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 牦牛红脏色差值和肌红蛋白含量比较分析

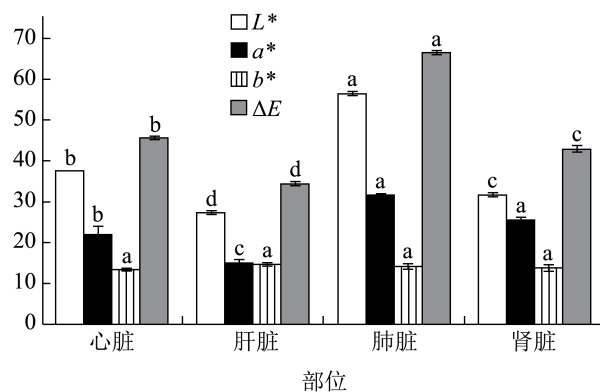


图 1 牦牛红脏色差值分析

Fig.1 Analysis of different red viscera color difference values

注: 图中小写字母表示不同脏器差异显著 ( $P < 0.05$ )。

下同。

表 1 牦牛红脏肌红蛋白差异  
Table 1 Differences of myoglobin in yak red viscera

| 部位 | 肌红蛋白浓度/<br>(mmol/L)        | 氧合肌红蛋白/%                  | 脱氧肌红蛋白/%                  | 高铁肌红蛋白/%                  |
|----|----------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 心脏 | 0.504 ± 0.006 <sup>a</sup> | 10.42 ± 2.42 <sup>b</sup> | 38.87 ± 1.68 <sup>a</sup> | 40.49 ± 2.73 <sup>a</sup> |
| 肝脏 | 0.372 ± 0.001 <sup>c</sup> | 8.28 ± 0.30 <sup>b</sup>  | 39.60 ± 0.20 <sup>a</sup> | 39.49 ± 0.38 <sup>a</sup> |
| 肺脏 | 0.527 ± 0.019 <sup>a</sup> | 23.05 ± 2.08 <sup>a</sup> | 26.27 ± 2.37 <sup>b</sup> | 40.18 ± 3.54 <sup>a</sup> |
| 肾脏 | 0.450 ± 0.010 <sup>b</sup> | 24.50 ± 0.69 <sup>a</sup> | 23.50 ± 1.02 <sup>b</sup> | 40.50 ± 1.52 <sup>a</sup> |

注: 表中同列小写字母表示不同脏器差异显著 ( $P<0.05$ )。下同。

表 2 红脏食用品质分析  
Table 2 Analysis of edible quality of red viscera

| 项目     | 心脏                          | 肝脏                          | 肺脏                        | 肾脏                          |
|--------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| pH     | 5.85 ± 0.12 <sup>c</sup>    | 6.41 ± 0.16 <sup>b</sup>    | 6.81 ± 0.04 <sup>a</sup>  | 6.63 ± 0.11 <sup>ab</sup>   |
| 剪切力/N  | 22.33 ± 0.49 <sup>a</sup>   | 6.17 ± 0.51 <sup>c</sup>    | 14.10 ± 2.23 <sup>b</sup> | 12.63 ± 0.61 <sup>b</sup>   |
| 硬度/N   | 20.43 ± 2.52 <sup>a</sup>   | 16.57 ± 0.91 <sup>b</sup>   | 9.03 ± 0.56 <sup>c</sup>  | 15.58 ± 1.55 <sup>b</sup>   |
| 内聚性    | 0.79 ± 0.19 <sup>a</sup>    | 0.70 ± 0.01 <sup>a</sup>    | 0.83 ± 0.03 <sup>a</sup>  | 0.66 ± 0.1 <sup>a</sup>     |
| 胶着性/N  | 12.50 ± 2.24 <sup>a</sup>   | 13.13 ± 1.54 <sup>a</sup>   | 7.86 ± 1.27 <sup>b</sup>  | 12.48 ± 1.22 <sup>a</sup>   |
| 咀嚼性/mJ | 1 276 ± 149.36 <sup>a</sup> | 1 109 ± 101.23 <sup>a</sup> | 704 ± 58.23 <sup>b</sup>  | 1 336 ± 170.17 <sup>a</sup> |
| 蒸煮损失/% | 16.24 ± 1.14 <sup>b</sup>   | 7.55 ± 0.87 <sup>c</sup>    | 7.21 ± 0.82 <sup>c</sup>  | 26.42 ± 1.24 <sup>a</sup>   |

肉的颜色能直接反应肉的品质,是影响消费者购买的主要因素之一<sup>[20]</sup>。肌红蛋白和血红蛋白的数量决定肉的颜色,而其含量决定肉颜色的深浅。胴体经充分放血之后,主要由肌红蛋白含量决定其颜色的深浅<sup>[21]</sup>。图 1、表 1 分别反映了不同红脏肉色和肌红蛋白含量的差异,不同红脏的  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ 、 $\Delta E$  和肌红蛋白含量存在显著差异 ( $P<0.05$ )。由图 1 可知,肺脏的亮度值和红度值最高,分别为 56.25 和 29.18;肝脏的亮度值和红度值最低分别为 27.25 和 15.11。肝脏的黄度值最高为 14.44,心脏的黄度值最低为 13.44,且各脏器间差异不显著 ( $P>0.05$ );肺脏的总色差值 ( $\Delta E$ ) 最高为 66.54,显著高于其他部位 ( $P<0.05$ ),肝脏的总色差值 ( $\Delta E$ ) 最低为 34.36。由表 2 可知,心脏和肺脏肌红蛋白浓度显著高于其它脏器 ( $P<0.05$ ),而肝脏肌红蛋白浓度显著低于其它脏器 ( $P<0.05$ )。  $a^*$  值的差异可能与各脏器间氧合肌红蛋白的含量有关<sup>[22]</sup>,由表 2 可知,肺脏和肾脏的氧合肌红蛋白含量最高,显著高于其它脏器 ( $P<0.05$ ),肝脏氧合肌红蛋白含量最低,显著低于其它脏器 ( $P<0.05$ ),这与图一结果相一致;  $b^*$  值的差异可能与各脏器间高铁肌红蛋白含量有关<sup>[23]</sup>,由表 2 可知,各脏器间高铁肌红蛋白含量差异不显著 ( $P>0.05$ ),这与图一结果相一致;  $L^*$  的差异可能与各脏器表面水分含

量不同,造成对光的折射能力不同所导致的。

2.2 牦牛红脏食用品质分析

pH 值是判断肉品质的重要指标之一,它与肉的颜色、保水性等品质密切关系<sup>[24]</sup>。由表 2 可知,不同红脏的 pH 值均在 5.85~6.81 范围内波动,其中肺脏最高。在不同的红脏中糖原和糖原酵解酶含量不同,宰后糖酵解的速率也有差异,导致红脏 pH 值下降速率的差异。

嫩度是肉的主要食用品质之一,是影响消费者购买与否的主要衡量指标和其市场接受性的关键因素<sup>[25]</sup>。由表 2 可知心脏的剪切力最大为 22.33 N;肝脏的剪切力最小为 6.17 N,说明肝脏的嫩度好;肺脏和肾脏剪切力差异不显著 ( $P>0.05$ ),分别为 14.10 N 和 12.60 N。张玉卿等<sup>[11]</sup>研究牦牛红脏嫩度差异中发现心脏的剪切力值高于肝脏的剪切力值,分析其原因可能是,心脏中含有大量弹性纤维,使剪切力值增大。

由表 2 可知,不同红脏的硬度存在差异显著 ( $P<0.05$ ),其中心脏的硬度最大为 20.43 N,肺脏的硬度最小为 9.03 N。各脏器间的内聚性差异不显著 ( $P>0.05$ )。肺脏的胶着性和咀嚼性分别为 7.86 N 和 704 mJ,显著低于其它脏器 ( $P<0.05$ ),而其它脏器之间差异不显著 ( $P>0.05$ )。



表 3 牦牛红脏肉糜凝胶特性分析

Table 3 Gel characteristics analysis of yak red viscera meat minced

| 部位 | 凝胶硬度/N                   | 凝胶内聚性                    | 凝胶胶着性/N                  | 凝胶咀嚼性/mJ                  | 凝胶持水性/%                   |
|----|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 心脏 | 1.07 ± 0.13 <sup>a</sup> | 0.32 ± 0.07 <sup>a</sup> | 0.33 ± 0.02 <sup>c</sup> | 38.96 ± 1.05 <sup>c</sup> | 69.86 ± 2.27 <sup>a</sup> |
| 肝脏 | 0.52 ± 0.01 <sup>c</sup> | 0.25 ± 0.05 <sup>a</sup> | 0.47 ± 0.02 <sup>b</sup> | 48.76 ± 1.97 <sup>b</sup> | 57.77 ± 2.61 <sup>b</sup> |
| 肺脏 | 0.79 ± 0.03 <sup>b</sup> | 0.24 ± 0.01 <sup>a</sup> | 1.11 ± 0.06 <sup>a</sup> | 58.40 ± 2.16 <sup>a</sup> | 63.64 ± 1.78 <sup>a</sup> |
| 肾脏 | 0.51 ± 0.04 <sup>c</sup> | 0.24 ± 0.02 <sup>a</sup> | 0.12 ± 0.02 <sup>d</sup> | 10.00 ± 0.17 <sup>d</sup> | 56.53 ± 1.25 <sup>b</sup> |

保水性是指肉在贮藏和蒸煮过程中对水分的保持能力，蒸煮损失的高低直接反应原料肉保水性的大小<sup>[26]</sup>。由表 2 可知，肾脏的蒸煮损失最大为 26.42%，肺脏的蒸煮损失最小为 7.21%，说明肾脏的保水性较差，肺脏的保水性较好。

2.3 牦牛红脏营养品质分析

不同红脏水分、蛋白质、脂肪、灰分和胶原蛋白含量差异结果如图 2 所示。各脏器间的含水量有差异，肾脏的含水量为四脏器间最高，为 77.11%，心脏和肺脏次之（76.45%、74.87%），肝脏最低为 70.53%；蛋白质含量心脏最高为 20.74%，肝脏、肺脏和肾脏分别为 18.92%、17.38%、16.10%；肾脏的脂肪含量最高为 4.93%，其次为心脏 3.6%，肝脏和肺脏最低分别为 2.42% 和 2.50%，且差异不显著（ $P>0.05$ ），红脏的灰分含量在 1.66%~0.97% 之间，其中，肝脏最高，肾脏最低；红脏的胶原蛋白含量在 2.35%~0.75% 之间，其中肺脏最高，为 2.35%，肝脏最低，为 0.75%。

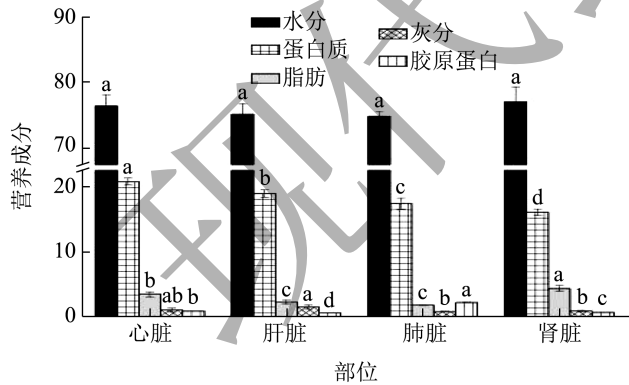


图 2 牦牛红脏营养品质分析

Fig.2 Analysis of nutritional quality of yak red viscera

2.4 牦牛红脏肉糜凝胶特性分析

肉糜类产品是以畜禽、水产品及其制品等为原料，经搅碎后，配以调味料等辅料，经搅拌、乳化、加热、冷却、速冻等工序制成<sup>[27]</sup>。肉糜凝胶稳定性越高，产品出品率就高，产品多汁性就越好<sup>[28]</sup>。肉

糜凝胶质构特性主要包括硬度、内聚性、胶着性、咀嚼性等。由表 3 可知，红脏的肉糜凝胶各有特点，其中心脏形成的肉糜凝胶硬度较好，为 1.07 N，显著高于其它脏器（ $P<0.05$ ），其次是肺脏，为 0.79 N，肝脏和肾脏制成的肉糜硬度显著低于其它脏器（ $P<0.05$ ），分别为 0.52 N 和 0.51 N。红脏凝胶内聚性差异不显著（ $P>0.05$ ）。凝胶胶着性差异显著（ $P<0.05$ ），其中肺脏的凝胶胶着性显著高于其它脏器（ $P<0.05$ ），为 1.11 N；肾脏凝胶胶着性最低，为 0.12 N。红脏凝胶咀嚼性差异显著（ $P<0.05$ ），其中肺脏凝胶咀嚼性最高，为 58.40 mJ，肾脏凝胶咀嚼性最低，为 10.00 mJ。心脏和肺脏凝胶保水性最好，分别为 69.86% 和 63.64%。肝脏和肾脏的保水性最差，分别为 57.77% 和 56.53%。综上所述，心脏制成的凝胶具有较好的咀嚼性和持水性；肺脏制成的凝胶有较好的胶着性、咀嚼性和保水性；肝脏和肾脏制成的凝胶肉糜质量较差，可能不适合加工肉糜和凝胶类产品。

2.5 牦牛红脏乳化特性分析

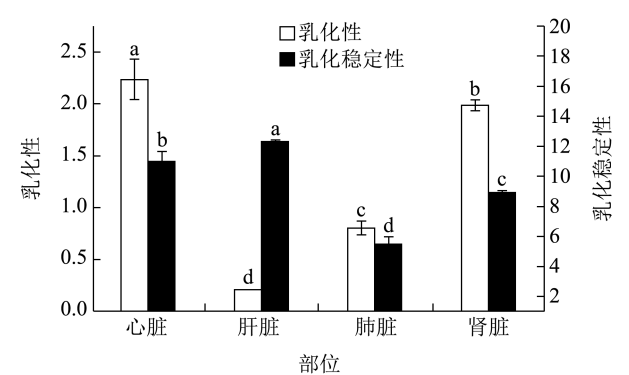


图 3 红脏乳化特性分析

Fig.3 Analysis of emulsification characteristics of red viscera

在肉糜类产品中，脂肪是以水包油的形式被肌肉蛋白等亲水层包裹，从而呈现出稳定状态<sup>[29]</sup>。由图 3 可知，红脏乳化性差异显著（ $P<0.05$ ），其中，心脏的乳化性最高，为 2.24；肺脏、肝脏和肾脏的乳化性分别为 0.20、0.81 和 1.98。红脏乳化稳定性

差异显著 ( $P<0.05$ ), 其中, 肝脏乳化稳定性最高, 为 12.35; 其次是心脏, 为 11.00; 肺脏和肾脏的乳化稳定性显著低于其它脏器 ( $P<0.05$ ), 分别为 5.45 和 8.93。

2.6 牦牛红脏起泡特性分析

起泡特性是指它在汽-液界面形成坚韧的薄膜使大量气泡并入和稳定的能力<sup>[30]</sup>。蛋白质的起泡能力与其产品口感等相关<sup>[31]</sup>。由图 4 可知, 心脏的起泡能力最好为 74.28%, 显著高于其它脏器 ( $P<0.05$ ), 其泡沫稳定性也显著高于其它脏器 ( $P<0.05$ ); 其它三种脏器的起泡能力在 62.21%~55.55% 之间, 且差异不显著 ( $P>0.05$ ), 肾脏的泡沫稳定性最差为 49.94% ( $P<0.05$ )。

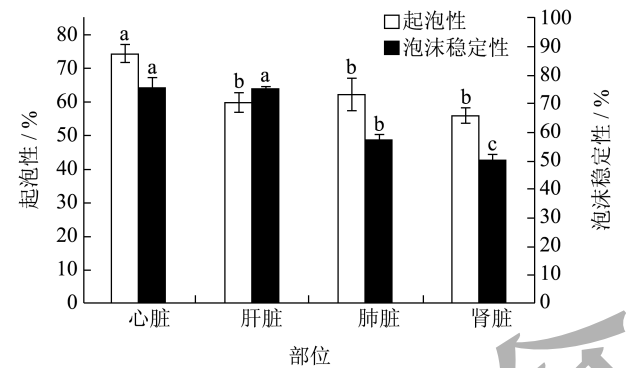


图 4 牦牛红脏起泡特性分析

Fig.4 Analysis of blistering characteristics of yak red viscera

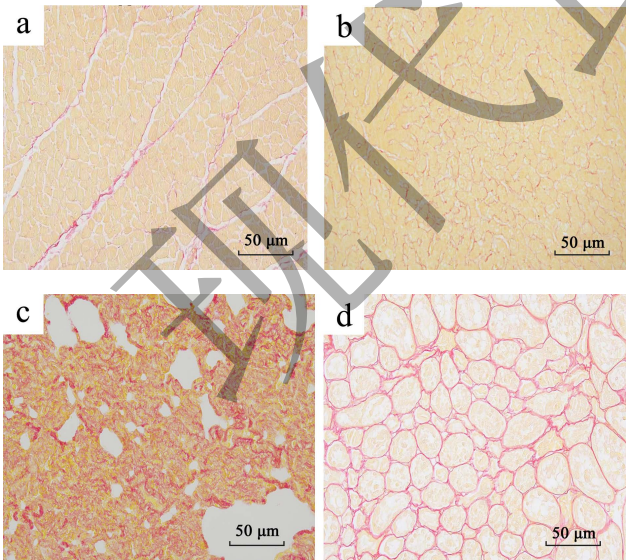


图 5 天狼猩红染色观察红脏微观结构

Fig.5 Sirius red staining to observe the microstructure of red viscera

注: (a) 心脏; (b) 肝脏; (c) 肺脏; (d) 肾脏。

2.7 牦牛红脏微观结构分析

图 5 显示了新鲜牦牛红脏天狼猩红染色微观结构图。新鲜的牛心肌纤维排列密致且均匀, 肌纤维之间缝隙小, 其切面多呈圆形或多边形; 新鲜牛肝组织结构清晰, 排列整齐, 缝隙较小; 肺脏组织排列较松散, 缝隙较大, 且排列混乱; 新鲜牛肾脏组织结构清晰, 排列紧密且缝隙较小, 切面多呈圆形和椭圆形。

2.8 牦牛红脏品质指标间的相关性

由图 6 可知, 不同红脏的 24 个品质指标, 存在显著或极显著相关性。其中剪切力与凝胶硬度、凝胶保水性、乳化性呈极显著正相关 ( $P<0.01$ ); 硬度与咀嚼性、乳化稳定性呈极显著正相关 ( $P<0.01$ ), 与 pH 值、胶原蛋白、凝胶胶着性呈极显著负相关 ( $P<0.01$ ); 胶着性与乳化稳定性呈极显著正相关 ( $P<0.01$ ), 与  $L^*$  值、胶原蛋白、凝胶胶着性呈极显著负相关 ( $P<0.01$ ); 咀嚼性与  $L^*$  值、胶原蛋白、凝胶胶着性、凝胶咀嚼性呈极显著负相关 ( $P<0.01$ );  $L^*$  值与胶原蛋白、凝胶胶着性呈极显著正相关 ( $P<0.01$ ), 与乳化稳定性呈极显著负相关 ( $P<0.01$ );  $a^*$  值与水分呈极显著正相关 ( $P<0.01$ ), 与灰分、乳化稳定性、泡沫稳定性呈极显著负相关 ( $P<0.01$ ); 蒸煮损失与脂肪、乳化性呈极显著正相关 ( $P<0.01$ ), 与凝胶胶着性、凝胶咀嚼性呈极显著负相关 ( $P<0.01$ ); 蛋白质与起泡性、泡沫稳定性呈极显著正相关 ( $P<0.01$ )。可见, 不同红脏品质指标间密切相关, 综合评价不同红脏品质的优劣, 应进行主成分降维分析。

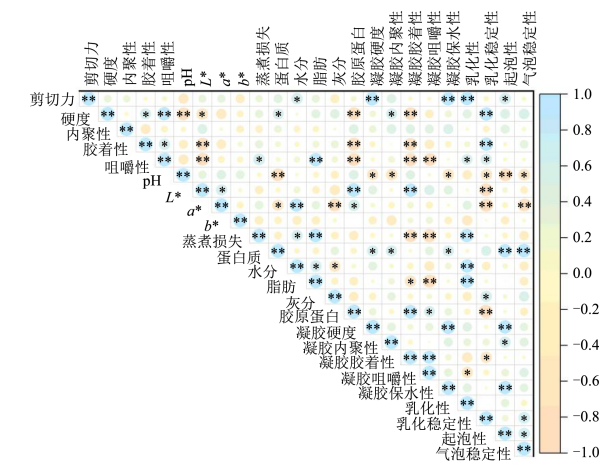


图 6 各指标间的相关性

Fig.6 The correlation between each index

注: \* $P\leq 0.05$ ; \*\* $P\leq 0.01$ 。

表 4 3 个主成分的特征向量、特征根和累计方差贡献率  
Table 4 The feature vector, characteristic root and cumulative variance contribution rate of the three principal components

| 指标      | 成分 1   | 成分 2   | 成分 3   |
|---------|--------|--------|--------|
| 乳化稳定性   | -0.956 | 0.192  | -0.134 |
| 胶原蛋白    | 0.954  | 0.268  | 0.116  |
| $L^*$   | 0.918  | 0.26   | 0.283  |
| 凝胶胶着性   | 0.893  | 0.421  | -0.105 |
| 凝胶硬度    | 0.892  | 0.377  | 0.223  |
| 凝胶咀嚼性   | 0.88   | 0.461  | -0.084 |
| 胶着性     | -0.838 | -0.197 | -0.121 |
| $a^*$   | 0.723  | -0.548 | 0.39   |
| pH      | 0.694  | -0.38  | -0.58  |
| 灰分      | -0.589 | 0.412  | -0.407 |
| 咀嚼性     | -0.099 | 0.974  | 0.068  |
| 蒸煮损失    | 0.316  | 0.832  | -0.421 |
| 泡沫稳定性   | -0.581 | 0.757  | 0.025  |
| 脂肪      | -0.287 | -0.745 | 0.493  |
| 蛋白质     | -0.56  | 0.717  | 0.318  |
| 硬度      | 0.369  | -0.551 | -0.111 |
| 内聚性     | 0.315  | 0.543  | 0.331  |
| 剪切力     | -0.036 | -0.097 | -0.957 |
| 乳化性     | -0.201 | -0.453 | 0.855  |
| 凝胶保水性   | 0.077  | 0.56   | 0.765  |
| 水分      | 0.194  | -0.555 | 0.709  |
| 起泡性     | -0.189 | 0.597  | 0.705  |
| $b^*$   | 0.046  | 0.123  | -0.661 |
| 凝胶内聚性   | -0.452 | 0.267  | 0.52   |
| 特征根     | 8.49   | 6.52   | 5.43   |
| 方差贡献率/% | 35.38  | 27.17  | 22.64  |
| 累计贡献率/% | 35.38  | 62.55  | 85.19  |

2.9 主成分分析

主成分分析是通过降维分析，用少量综合指标来代替原来多个指标的大部分重要信息，实现数据的简化。因此，对四种红脏的 24 个品质指标进行主成分分析，结果如表 4 所示，3 个主成分的特征值均大于 1，累计贡献率达 85.19%，基本解释了红脏品质指标的绝大部分信息，为此提取前 3 个主成分。其中，第一个主成分特征根为 8.49，方差贡献

率为 35.38%，第 1 主成分主要综合了  $L^*$  值、胶原蛋白和乳化稳定性的信息，其中胶原蛋白在第一主成分上呈正向分布，乳化稳定性呈负向分布，且  $L^*$  值特征值较小，所以主成分 1 可命名为营养品质因子；第二主成分的特征根为 6.52，方差贡献率为 27.17%，决定第二主成分的主要是咀嚼性、蒸煮损失、泡沫稳定性，其中咀嚼性的特征向量值最大，可称为质构因子；第 3 主成分的特征根为 5.43，方差贡献率为 22.64%，决定第三主成分的主要是乳化性、凝胶保水性、水分，其中乳化性的特征向量值最大，可称为乳化因子。综合来看，营养因子、质构因子、乳化因子是评价不同红脏品质的主要指标。

2.10 牦牛红脏品质的聚类分析

对牦牛红脏品质指标进行系统聚类分析（图 7）。从聚类分析图谱来看，当距离为 200 时，4 个样本被分为 3 类，第一类为肺脏，主要表现为具有较好的色差值及较低的蒸煮损失，可能适合蒸煮类加工；第二类是心脏和肾脏，其脂肪含量较高，且拥有较好的乳化性，可能适合肉糜类产品加工；第三类是肝脏，其剪切力最低，嫩度最好，可能适合炒制类加工。

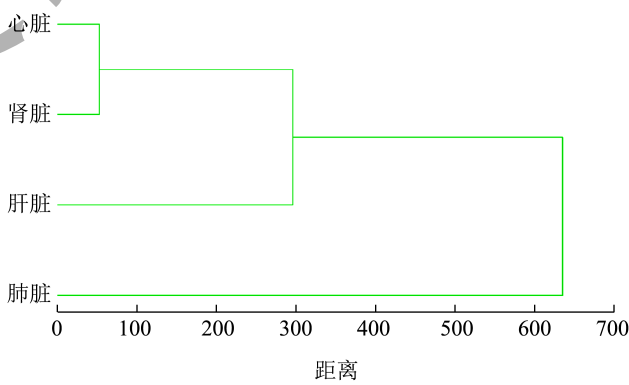


图 7 红脏聚类分析图

Fig.7 Red viscera cluster analysis plot

基于不同指标的系统聚类结果（图 8）表明，当距离为 1.0 时，可将红脏 24 个品质指标分为三类：第一类是水分、脂肪、乳化性、蒸煮损失及  $a^*$  值，因为蒸煮损失和水分、脂肪、乳化性呈显著和极显著相关性，因此第一类指标主要反应红脏的持水性能力；第二类指标主要包括凝胶咀嚼性、凝胶胶着性、胶原蛋白、 $L^*$  值、 $b^*$  值、咀嚼性及 pH 值，其中咀嚼性与凝胶胶着性、凝胶咀嚼性、胶原蛋白及  $L^*$  值呈显著或极显著相关性，因此第二类指



标主要反应红脏的质构特性；第三类为剪切力、凝胶保水性、起泡性、蛋白质、凝胶内聚性、凝胶硬度、泡沫稳定性、硬度、乳化稳定性、咀嚼性、胶着性及灰分，其中蛋白质与凝胶保水性、起泡性、泡沫稳定性、凝胶内聚性及凝胶硬度呈显著或极显著相关性，因此第三类指标主要反应红脏的营养品质。可见系统聚类法和 PCA 提取的 3 个主成分（表 4）结果一致。

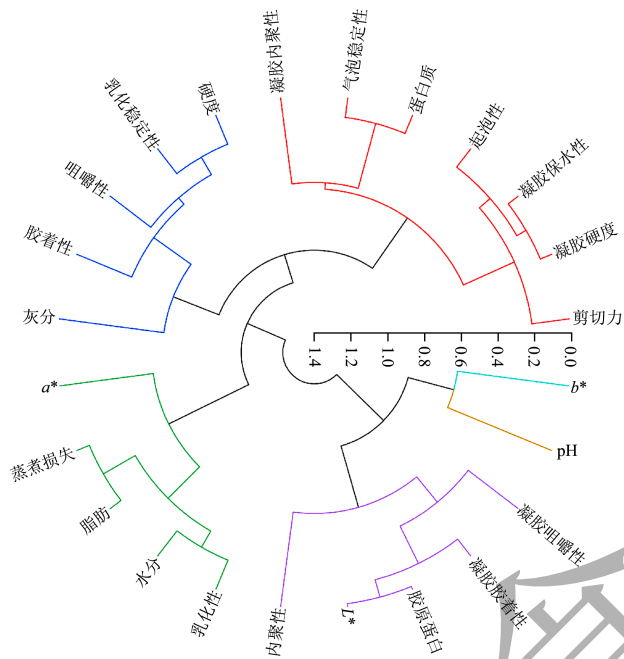


图 8 牦牛红脏品质指标系统聚类图

Fig.8 Clustering chart of yak red viscera quality index system

3 结论

对牦牛心脏、肝脏、肺脏及肾脏等红脏的品质指标进行相关性、主成分和聚类分析。结果表明，4 种脏器品质指标之间存在显著或极显著相关性，主成分分析表明，从 24 个品质指标中提取了前 3 个主成分，累计方差贡献率达到 85.19%，可分别归纳为营养因子、质构因子、乳化因子。结合不同红脏品质的聚类分析结果，判定牦牛肺脏肉色及保水性较好，适合蒸煮类加工；心脏和肾脏具有较好的营养品质和乳化性，适合肉糜类产品加工；肝脏嫩度最好，适合炒制类加工。因此，基于主成分和聚类分析，初步构建了牦牛红脏品质的评价体系，为我国牦牛红脏精深加工提供了理论依据。

参考文献

[1] WANG H, CHAI Z X, HU D, et al. A global analysis of CNVs

in diverse yak populations using whole-genome resequencing [J]. BMC Genomics, 2019, 20(1): 1-12.

[2] 张燕,李升升,赵立柱,等.烹饪温度对牦牛肉蛋白质氧化和体外消化特性的影响[J].食品科学,2024,45(2):9-16.

[3] 余道宁,扎西塔,杨国武,等.祁连牦牛乳的品质分析[J].中国草食动物科学,2023,43(5):58-60,65.

[4] 木其勒,BAYARMAA GUN-AAJAV,刘国强,等.基于三重实时荧光聚合酶链反应构建黄牛和牦牛源性成分同步检测方法[J].食品安全质量检测学报,2023,14(16):187-195.

[5] 米晓丹.牛副产物灌肠制品研发及贮藏期品质变化分析[D].兰州:甘肃农业大学,2020.

[6] 江月.牛肉脯系列产品研发及其品质分析[D].兰州:甘肃农业大学,2020.

[7] 郭兆斌,余群力.牛副产物——脏器的开发利用现状[J].肉类研究,2011,25(3):35-37.

[8] 张玉卿,郭兆斌,韩玲,等.西藏斯布牦牛脏器品质及活性物质分析[J].甘肃农业大学学报,2015,50(4):115-120.

[9] 孔祥瑞,保善科,余群力,等.海北州牦牛主要副产物营养物质测定报告[J].青海畜牧兽医杂志,2014,44(6):20-21.

[10] 祁兴磊,赵连甫,王永祥,等.夏南牛脏器的食用品质和营养品质分析[J].中国牛业科学,2013,39(6):7-10.

[11] 邝吉卫.宰后牛脏器成熟过程中品质变化及烹调加工参数的研究[D].兰州:甘肃农业大学,2018.

[12] 史佳龙,贺稚非,杨莉,等.酶-碱联合处理对兔胃平滑肌食用品质及肌内结缔组织特性的影响[J].食品与发酵工业,2024,50(16):221-227.

[13] KRZYWICKI K L. The determination of haem pigments in meat [J]. Meat Science, 1982, 7(1): 29-36.

[14] 计红芳,李莎莎,张令文,等.添加面筋蛋白对猪肉热诱导凝胶品质及水分迁移特性的影响[J].食品科学,2020, 41(18):58-63.

[15] 栗俊广,张旭玥,李冰洁,等.脱乙酰魔芋葡甘聚糖对反复冻融猪肉糜凝胶特性的影响[J].食品研究与开发,2023, 44(11):1-6,20.

[16] YOUNG R H, LAWRIE R A. Utilization of edible protein from meat industry by-products and waste [J]. International Journal of Food Science & Technology, 1974, 9(2): 171-177.

[17] LAWRIE R A, LEDWARD D A. Lawrie's Meat Science [M]. CRC Press, Woodhead. 2006.

[18] PEARCE K N, KINSELLA J E. Emulsifying properties of proteins:Evaluation of a turbidimetric technique [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1978, 26(3): 716-723.

[19] IVANDER P, AVAN L, HENDRICKX M E. Foaming properties of egg white proteins affected by heat or high pressure treatment [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 78(4): 1410-1426.

[20] SHEN Y Q, GUO X X, LI X P, et al. Effect of cooking



- temperatures on meat quality, protein carbonylation and protein cross-linking of beef packed in high oxygen atmosphere [J]. LWT, 2022, 154: 112633.
- [21] 刘凡,殷志康,刘辉,等.藏猪与大白猪食用品质与肌纤维类型的相关性研究[J].食品工业科技,2021,42(24):271-277.
- [22] WANG B, BAI X, DU X, et al. Comparison of effects from ultrasound thawing, vacuum thawing and microwave thawing on the quality properties and oxidation of porcine *Longissimus lumborum* [J]. Foods, 2022, 11(9): 1368.
- [23] 咎博文,白婷,唐丽,等.热加工工艺对调理里脊肉色泽和质构特性的影响[J].中国调味品,2022,47(12):53-60.
- [24] HE L, ZOU L K, YANG Q R, et al. Antimicrobial activities of nisin, tea polyphenols, and chitosan and their combinations in chilled mutton [J]. Journal of Food Science, 2016, 81(6): M1466-M1471.
- [25] 喻倩倩,刘倩倩,谷雪静,等.干法成熟肉类品质形成机制研究进展[J].食品科学,2023,44(13):309-316.
- [26] 罗杰琼,张淼,贾洪锋,等.不同部位原切牛排品质对比分析[J].食品工业科技,2023,44(10):270-279.
- [27] 余康,邹俊,袁梦,等.纳米茶籽油微囊对低脂猪肉糜制品品质影响[J].食品工业科技,2024,45(4):61-69.
- [28] 闫艺,王静云,黄笠原,等.食盐添加量对马肉肉糜加工特性的研究[J].农产品加工,2020,18:32-36,40.
- [29] 赵改名,王可,祝超智,等.青海高原型牦牛不同部位肉的品质差异研究[J].食品研究与开发,2020,41(13):60-65.
- [30] 胡铁军,闫革华,邹尔新,等.全牛肉乳化香肠的研制[J].肉类工业,2000,11:29-33.
- [31] 何锦风,陈天鹏,卢蓉蓉,等.汉麻籽的综合利用及产业化研究[J].中国食品学报,2010,10(3):98-112.