

绵羊脂与山羊脂品质特性差异分析

翟争妍^{1,3}, 朱新鹏², 涂翰卿², 贺子珊¹, 陶宁萍^{1,3}

(1. 上海海洋大学 食品学院, 上海 201306; 2. 江苏中洋集团 长江珍稀鱼类开发与保护工程技术研究中心, 江苏 海安 226600; 3. 上海水产品加工及贮藏工程技术研究中心, 上海 201306)

摘要:旨在为羊脂的精深加工提供参考,以绵羊脂和山羊脂为研究对象,分析了两种羊脂理化性质、营养品质与风味特性的差异。两种羊脂的理化性质按国标方法测定,脂肪酸组成及胆固醇的含量由气相色谱测定,甘油三酯组成由超高效液相色谱联用 Q-Exactive HFX 高分辨轨道阱质谱仪测定,挥发性风味物质采用顶空-固相微萃取结合全二维气相色谱-飞行时间质谱法测定。结果表明:绵羊脂与山羊脂均检测出 22 种脂肪酸,主要脂肪酸均为 C16:0、C18:1n-9c 和 C18:0,饱和脂肪酸含量分别为 38.69、54.39 g/100 g;两种羊脂均检测出 30 种甘油三酯,绵羊脂中三饱和、单饱和、单饱和与三不饱和脂肪酸甘油三酯含量分别占总甘油三酯含量的 2.66%、26.76%、36.89% 和 33.69%,山羊脂的分别为 15.87%、45.59%、26.47% 和 12.07%;绵羊脂与山羊脂鉴定出挥发性化合物共 95 种,含量分别为 122.11、32.68 μg/g,关键风味化合物 34 种,其中癸醛、6-甲基-2-庚酮、乙酸戊酯、2-正丁基呋喃仅在绵羊脂中被检测出,3-甲基-2-戊酮仅在山羊脂中被检测出,主成分分析表明两种羊脂可完全分离,差异显著。综上,两种羊脂具有一定的品质差异,绵羊脂的营养与食用价值高于山羊脂,其特征风味强度显著高于山羊脂。

关键词:绵羊脂;山羊脂;理化性质;脂肪酸;甘油三酯;挥发性物质

中图分类号:TS225.2;O657.63 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2023)02-0017-08

Comparative analysis of quality and characteristics in sheep fat and goat fat

ZHAI Zhengyan¹, ZHU Xinpeng², TU Hanqing², HE Zishan¹, TAO Ningping^{1,3}

(1. College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Development and Protection Engineering Technology Research Center of Yangtze Rare Fish, Jiangsu Zhongyang Group Co., Ltd., Haian 226600, Jiangsu, China; 3. Shanghai Engineering Research Center of Aquatic-Product Processing & Preservation, Shanghai 201306, China)

Abstract: In order to provide a reference for the deep processing of mutton fat, the differences in physical and chemical properties, nutritional qualities and flavor characteristics of sheep fat and goat fat were investigated. The physical and chemical properties of two mutton fats were determined according to the national standard method. The content of fatty acids and cholesterol content were analyzed using gas chromatography. The composition of triglycerides of two mutton fats was evaluated by ultra performance liquid chromatography-Q-Exactive HFX orbitrap mass spectrometer. Furthermore, headspace-solid phase microextraction combined with comprehensive two dimensional gas chromatography-time of flight mass spectrometry was used to analyze the differences in volatile flavor compounds of two mutton fats. The

results showed that 22 kinds of fatty acids were detected in two kinds of mutton fats, the main fatty acids were C16:0, C18:1n-9c and C18:0. The content of saturated fatty acids of sheep fat and goat fat were 38.69 g/100 g and 54.39 g/100 g, respectively. Thirty kinds of triglycerides were detected in two mutton fats. The

收稿日期:2021-12-28;修回日期:2022-11-01

基金项目:国家重点研发计划“蓝色粮仓”项目资助(2020YFD0900905)

作者简介:翟争妍(1997),女,硕士研究生,研究方向为食品营养与品质评价(E-mail)zy_zhai@qq.com。

通信作者:陶宁萍,教授,博士生导师(E-mail)nptao@shou.edu.cn。

triglycerides of SSS, SSU, SUU and UUU in sheep fat accounted for 2.66%, 26.76%, 36.89% and 33.69%, respectively, and goat fat was 15.87%, 45.59%, 26.47% and 12.07%, respectively. The content of volatile compounds in sheep fat and goat fat were 122.11 $\mu\text{g/g}$ and 32.68 $\mu\text{g/g}$, respectively. A total of 95 volatile compounds and 34 key aroma compounds were identified. Decanal, 6-methyl-2-heptanone, amyl acetate and 2-n-butyl furan were only detected in sheep fat, 3-methyl-2-pentanone was only detected in goat fat. The two kinds of mutton fats were completely separated by principal component analysis, which had significant difference. In conclusion, the two kinds of mutton fats have certain quality differences. The nutritional and edible value of sheep fat is higher than that of goat fat, and its characteristic flavor intensity is significantly higher than that of goat fat.

Key words: sheep fat; goat fat; physical and chemical property; fatty acid; triglycerides; volatile compound

羊脂作为羊肉的副产物之一,是一种丰富的动物油脂资源,具有较好的起酥性和稳定性,可作为食用油脂;羊脂主要组成为甘油三酯,富含脂肪酸,可为人体供能。但目前在我国市场上多是以牛脂、猪脂为代表的动物来源基料油脂,相对来说羊脂的开发与利用不足,经济效益低。因此,探究羊脂的营养与风味品质,对最大化合理利用羊脂资源具有重要意义。

目前,羊脂研究的热点是其脂肪酸组成与挥发性化合物组成。已有研究报道 C16:0、C18:1、C18:0 为羊脂中主要的 3 种脂肪酸,但对于不同品种的羊,羊脂中脂肪酸组成及含量具有一定的差异^[1-3]。甘油三酯是油脂的主要成分,已有学者采用不同的检测方法测定羊脂中甘油三酯的组成,如张东等^[4]利用高效液相色谱-四极杆飞行时间质谱法鉴定出精炼羊脂中含量最高的甘油三酯为 C18:0/C18:0/C18:2(SSL),而采用高效液相色谱-蒸发光散射法测得羊脂中含量最高的甘油三酯为 C18:1/C16:0/C18:1(OPO)^[5],检测方法和羊的品种、生长环境等因素的差异可能是造成研究结果不同的原因。膻味是羊脂显著的品质特征,在有关羊脂挥发性风味物质的研究中,Du 等^[6]采用溶剂辅助风味蒸发法结合气相色谱-质谱联用技术(GC-MS)和气相色谱嗅觉测定法(GC-O)鉴定出羊肉串中 57 种挥发性化合物,并且涂刷羊板油的羊肉串比未涂刷的具有更强的脂肪味和羊肉味;刘成江等^[7]利用顶空固相微萃取(HS-SPME)结合 GC-MS 确定新疆肥尾羊羊脂中环丁醇、环己烷、乙酸乙酯等为重要的挥发性物质。

山羊与绵羊因染色体数的不同而存在生殖隔离,属于两个物种,另外生长环境等外界因素的影响,使得来源不同的两种羊脂呈现不同的品质特性,然而对不同品种的羊脂品质差异鲜有研究。本研究

以绵羊(内蒙古细毛羊)与江苏南通海门山羊的羊脂为研究对象,通过气相色谱(GC)测定其脂肪酸组成及含量;采用超高效液相色谱联用 Q-Exactive HFX 高分辨轨道阱质谱仪(UPLC-QE HFX-MS/MS)测定羊脂甘油三酯的组成,再利用正交偏最小二乘法判别分析(OPLS-DA)与变量投影重要性分析(VIP)得分图分析鉴定两种羊脂差异性甘油三酯;采用 HS-SPME 结合全二维气相色谱-飞行时间质谱联用仪(GC \times GC-TOFMS)鉴定两种羊脂挥发性风味物质并定量分析。结合两种羊脂的理化特性差异,分析两种羊板油的营养价值,鉴定羊脂中脂肪酸、甘油三酯组成和筛选关键风味化合物进而分析两者间品质特性差异,以期对羊脂的精深加工、经济价值的提高与营养健康功能性的开发提供一定的理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 原料与试剂

绵羊板油(内蒙古细毛羊)与山羊板油(江苏南通海门山羊),熟龄羊经宰杀后取板油,冷冻后运输至实验室置于 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱储存。

氢氧化钠、氯化钠均为分析纯,三氯甲烷、甲醇、正己烷、三氟化硼甲醇溶液、异丙醇、乙腈、醋酸铵溶液均为色谱纯,十九烷酸、十九烷酸甲酯、37 种脂肪酸甲酯标准品、C7~C40 正构烷烃,上海安谱实验科技股份有限公司;2,4,6-三甲基吡啶(TMP)标准品,美国 Sigma-Aldrich 公司;C3~C9 正构烷烃,北京百灵威科技有限公司。

1.1.2 仪器与设备

毛细管(0.9~1.1 mm \times 80 mm),南通苏睿实验器材有限公司;精密水银温度计(0~50 $^{\circ}\text{C}$,精度 0.1 $^{\circ}\text{C}$)、辅助水银温度计(0~50 $^{\circ}\text{C}$,精度 1 $^{\circ}\text{C}$),河

北星海仪表仪器有限公司;分析天平,北京赛多利斯科学仪器有限公司;HWS-24 恒温水浴锅,上海恒科学仪器有限公司;R250 旋转蒸发仪,德国 IKA 公司;TRACE GC ULTRA 气相色谱仪、Dionex 3000 超高效液相色谱联用 Q-Exactive HFX 高分辨轨道阱质谱仪,美国 Thermo Fisher 公司;DHG-9140A 鼓风干燥箱,上海慧泰有限公司;7890A 型全二维气相色谱-飞行时间质谱联用仪,美国 Leco 公司;50/30 μm DVB/CAR/PDMS 萃取头,美国 Supelco 公司。

1.2 试验方法

1.2.1 羊板油基本营养成分测定

水分按照 GB 5009.3—2016 第一法测定;脂肪按照 GB 5009.6—2016 测定;蛋白质按照 GB 5009.5—2016 测定;灰分按照 GB 5009.4—2016 测定。

1.2.2 羊脂的提取

参考 Folch 等^[8]的方法提取羊脂。

1.2.3 羊脂理化性质的测定

碘值按照 GB/T 5532—2008 测定;皂化值按照 GB/T 5534—2008 测定;过氧化值按照 GB 5009.227—2016 测定;酸值按照 GB 5009.229—2016 测定;熔点按照 GB/T 12766—2008 测定。

1.2.4 羊脂胆固醇含量的测定

按照 GB 5009.128—2016 第一法测定。

1.2.5 羊脂脂肪酸组成及含量的测定

按照 Zhang 等^[9]的方法测定。

1.2.6 羊脂甘油三酯组成及相对含量的测定

采用 UPLC-Q E HFX-MS/MS 测定羊脂的甘油三酯组成及含量。

UPLC 条件:C18 色谱柱(2.1 mm \times 100 mm \times 0.5 μm);使用二元溶剂系统,流动相 A 由乙腈-水(体积比 60:40)与 10 mmol/L 醋酸铵混合组成,流动相 B 由异丙醇-乙腈(体积比 90:10)与 10 mmol/L 醋酸铵混合组成;梯度洗脱 35 min,流速 220 $\mu\text{L}/\text{min}$;柱温 40 $^{\circ}\text{C}$;样品盘温度 10 $^{\circ}\text{C}$ 。

MS 条件:正离子扫描模式质量范围 m/z 为 240 ~ 2 000;负离子扫描模式质量范围 m/z 为 200 ~ 2 000;喷雾电压 3 000 V;毛细管温度 320 $^{\circ}\text{C}$;加热器温度 300 $^{\circ}\text{C}$;保护气流速 35 Arb;辅助气体流速 10 Arb;全扫描光谱分辨率 70 000;碎片光谱分辨率 17 500。

采用 Lipidsearch 软件进行定性分析,采用峰面积归一化法进行定量分析。

1.2.7 羊脂挥发性成分的测定

采用 HS-SPME 结合 GC \times GC-TOFMS 测定羊脂的挥发性成分。

1.2.7.1 HS-SPME 条件

将羊板油用匀浆机打匀,装入棕色西林瓶中,于 130 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱中加热 20 min,熔出的液体状羊脂趁热迅速倒入干净棕色西林瓶中并封口,冷却至室温后于 -80 $^{\circ}\text{C}$ 冰箱中储存待用。取 5.00 g 羊脂于样品瓶中,在萃取温度 65 $^{\circ}\text{C}$ 、平衡时间 10 min、萃取时间 40 min 条件下萃取挥发性成分,待测。

1.2.7.2 GC \times GC-TOFMS 条件

色谱条件:第一维柱为 TG-WAX 弹性毛细管色谱柱(30 m \times 250 μm \times 0.25 μm);不分流进样;进样口温度 250 $^{\circ}\text{C}$;载气 He(99.999 9%),流速 1.0 mL/min;升温程序为起始温度 40 $^{\circ}\text{C}$ 保持 2 min,以 4 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至 100 $^{\circ}\text{C}$,保持 2 min,最后以 4 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至 250 $^{\circ}\text{C}$,保持 2 min。第二维柱为 DB-17MS(2 m \times 100 μm \times 0.10 μm),柱温始终高于第一维柱 5 $^{\circ}\text{C}$,调制解调器温度始终高于第二维柱 15 $^{\circ}\text{C}$;调制周期 4.0 s,热吹时间 0.8 s,冷却时间 1.2 s,接口温度 270 $^{\circ}\text{C}$ 。

质谱条件:电子轰击源 70 eV;离子源温度 230 $^{\circ}\text{C}$;采集电压 1 700 V;采集频率 50 spectra/s;采集质量数 33 ~ 450 u。

1.2.7.3 定性定量分析和关键风味化合物的确定

定性分析:原始数据先经 ChromaTOF 工作站处理,再与 NIST17 和 Wiley9 质谱库进行比对确定(MS 定性);在相同条件下进样正构烷烃,计算保留指数(RI)比对确定(RI 定性)。

定量分析:以甲醇稀释 TMP 制备内标,假定校准因子为 1.00,计算挥发性化合物的含量。

关键风味化合物的确定:采用气味活度值(OAV)法,当 OAV ≥ 1 时认为该物质为关键风味化合物。

1.2.8 数据处理

检测结果以“平均值 \pm 标准偏差”(n=3)表示;采用 SPSS 26.0 对数据进行统计分析,差异显著性采用独立样本 t 检验,p < 0.05 表示具有显著性差异,p \geq 0.05 表示无显著性差异。

2 结果与分析

2.1 两种羊板油的基本营养成分(见表 1)及两种羊脂基本理化指标(见表 2)

表 1 两种羊板油的基本营养成分 %

成分	绵羊板油	山羊板油
水分	7.48 \pm 0.07 ^b	11.94 \pm 0.12 ^a
蛋白质	1.44 \pm 0.30 ^a	1.35 \pm 0.27 ^a
脂肪	87.99 \pm 0.03 ^a	82.12 \pm 0.05 ^b
灰分	0.33 \pm 0.01 ^a	0.28 \pm 0.02 ^a

注:同行不同小写字母表示具有显著性差异(p < 0.05)。下同

表2 两种羊脂基本理化指标

指标	绵羊脂	山羊脂
酸值(NaOH)/(mg/g)	1.40 ± 0.06 ^a	0.66 ± 0.03 ^b
过氧化值/(g/100 g)	0.03 ± 0.01 ^a	0.02 ± 0.01 ^a
碘值(I)/(g/100 g)	47.35 ± 0.66 ^a	43.23 ± 0.81 ^b
皂化值(KOH)/(mg/g)	355.33 ± 24.30 ^a	204.56 ± 8.36 ^b
熔点/°C	24.90 ± 0.17 ^b	38.70 ± 0.26 ^a
胆固醇/(mg/100 g)	120.90 ± 0.07 ^b	131.70 ± 0.38 ^a

由表1可见:两种羊板油中水分与脂肪含量具有显著性差异;水分、灰分与蛋白质占比均较低。羊板油中的非脂类物质并不是人体获取有关营养的优质来源,但会对羊脂的风味产生一定的影响,它们可在羊脂的加工中发生降解,产生小分子物质或与其他物质发生反应形成构成整体特征风味的重要化合物,如:蛋白质及其降解产物氨基酸,是食品风味的前体物质,氨基酸 Strecker 降解还可生成阈值较低、对风味贡献较大的含硫化合物^[10],氨基酸与还原糖的美拉德反应还可生成呋喃等含氧化合物;水分可通过影响美拉德反应从而影响羊脂风味特征;无机盐及其氧化物可通过干预脂质的氧化降解从而影响产生的挥发性风味物质。

由表2可见,两种羊脂的酸值与过氧化值均符合国家食用动物油脂标准。绵羊脂的酸值与过氧化值均高于山羊脂,说明绵羊脂中游离脂肪酸等物质含量高于山羊脂;绵羊脂的碘值亦高于山羊脂,表明其脂肪酸的不饱和度高于山羊脂。熔点是动物油脂加工的一个重要指标。山羊脂的熔点显著高于绵羊脂,主要原因在于两者脂肪酸的性质(如不饱和度、支链与直链、链长等)与甘油三酯的组成不同。一般熔点越高的油脂,人体消化吸收与利用能力越差,因此绵羊脂食用价值优于山羊脂。山羊脂的胆固醇含量高于绵羊脂。人体需要适当摄取外源胆固醇以维持正常的脂类代谢平衡,但这一需求量很低,可按需采用物理吸附、胆固醇氧化酶氧化等方法,开发低胆固醇的食用羊脂。

2.2 两种羊脂的脂肪酸组成及含量(见表3)

由表3可见,两种羊脂中均检测出 SFA 与不饱和脂肪酸(MUFA 6种,PUFA 5种)各11种。从脂肪酸组成上看,绵羊脂中 SFA 含量显著低于山羊脂, MUFA 含量显著高于山羊脂,因此单从脂肪酸组成来说,山羊脂的氧化稳定性要强于绵羊脂。SFA 摄入过多易造成血清中总胆固醇含量升高,引发心血管疾病。MUFA 具有降胆固醇、降血糖、调节血脂的作用。PUFA 具有降低心脑血管疾病发病率、促进生长发育、保护视力的作用,两种羊脂的 PUFA 含

量均较低,且均检测出总含量不足 2.5% 的反式脂肪酸。C16:0、C18:1n-9c 和 C18:0 是两种羊脂中主要的脂肪酸,绵羊脂中含量最高的为 C18:1n-9c,而山羊脂中 C16:0 含量最高。C16:0 摄入过量会导致肥胖、肝功能紊乱等健康问题^[11-12];C18:1n-9c 可起到降低胆固醇含量,调节免疫的作用。因此,绵羊脂的脂肪酸组成更佳。

表3 两种羊脂的脂肪酸组成及含量 g/100 g

脂肪酸	绵羊脂	山羊脂
C4:0	1.03 ± 0.36 ^a	0.19 ± 0.05 ^b
C6:0	0.28 ± 0.09 ^a	0.06 ± 0.02 ^b
C10:0	0.49 ± 0.07 ^a	0.09 ± 0.01 ^b
C12:0	0.65 ± 0.08 ^a	0.06 ± 0.01 ^b
C14:0	5.92 ± 0.39 ^a	2.27 ± 0.12 ^b
C15:0	0.63 ± 0.03 ^a	0.54 ± 0.03 ^b
C16:0	18.53 ± 0.77 ^b	29.00 ± 0.88 ^a
C17:0	1.10 ± 0.04 ^b	1.58 ± 0.06 ^a
C18:0	8.68 ± 0.34 ^b	20.31 ± 0.81 ^a
C20:0	0.11 ± 0.05 ^a	0.13 ± 0.00 ^a
C21:0	1.29 ± 0.03 ^a	0.17 ± 0.01 ^b
C14:1	0.45 ± 0.03 ^a	0.02 ± 0.00 ^b
C16:1	5.17 ± 0.59 ^a	4.07 ± 0.07 ^b
C17:1	1.01 ± 0.03 ^a	0.48 ± 0.02 ^b
C18:1n-9t	1.89 ± 0.17 ^a	1.84 ± 0.08 ^a
C18:1n-9c	38.90 ± 1.06 ^a	24.81 ± 0.97 ^b
C20:1	0.15 ± 0.01 ^a	0.16 ± 0.01 ^a
C18:2n-6t	0.19 ± 0.13 ^a	0.12 ± 0.00 ^a
C18:2n-6c	3.40 ± 0.04 ^a	3.31 ± 0.08 ^a
C18:3n-3	0.36 ± 0.01 ^b	0.63 ± 0.03 ^a
C20:4n-6	0.02 ± 0.02 ^b	0.08 ± 0.01 ^a
C22:6n-3	0.03 ± 0.03 ^a	0.07 ± 0.00 ^a
SFA	38.69 ± 1.72 ^b	54.39 ± 1.96 ^a
MUFA	47.56 ± 1.26 ^a	31.39 ± 1.09 ^b
PUFA	4.01 ± 0.17 ^b	4.21 ± 0.12 ^a

注:SFA. 饱和脂肪酸; MUFA. 单不饱和脂肪酸; PUFA. 多不饱和脂肪酸

2.3 两种羊脂的甘油三酯组成及相对含量(见表4)

由表4可知,两种羊脂均检测出30种甘油三酯,其中 SSS、SSU、SUU、UUU 均分别有4、7、5、14种。山羊脂中 SSS、SSU 的含量显著高于绵羊脂的,分别为绵羊脂的5.97倍和1.70倍,而绵羊脂中 SUU 和 UUU 的含量显著高于山羊脂的,分别为山羊脂的1.39倍和2.79倍。甘油三酯上连接 SFA 的个数与其熔点有着密切的关联, SFA 个数越多,则熔点越高,结合2.1中绵羊脂熔点低于山羊脂的检测结果,甘油三酯组成应是引起两种羊脂熔点差异的一个重要原因。

表4 两种羊脂的甘油三酯组成及相对含量

甘油三酯	[M + NH ₄] ⁺ (m/z)	相对含量/%	
		绵羊脂	山羊脂
16:0/10:0/18:1	766.691 92	1.21 ± 0.01 ^a	0.39 ± 0.02 ^b
16:0/18:1/18:1	876.801 47	15.39 ± 0.41 ^a	13.26 ± 0.34 ^b
18:3/18:2/18:2	894.754 52	0.03 ± 0.01 ^a	0.02 ± 0.01 ^a
18:0/18:0/18:0	908.864 07	0.30 ± 0.01 ^b	2.79 ± 0.06 ^a
17:0/18:1/18:1	890.817 12	4.86 ± 0.10 ^a	3.40 ± 0.18 ^b
16:1/18:2/18:2	870.754 52	0.54 ± 0.11 ^a	0.28 ± 0.11 ^b
18:2/18:2/18:2	896.770 17	0.33 ± 0.12 ^a	0.27 ± 0.12 ^a
18:0/16:0/18:0	880.832 77	0.83 ± 0.03 ^b	5.58 ± 0.15 ^a
16:0/16:0/18:3	846.754 52	3.89 ± 0.14 ^a	1.37 ± 0.20 ^b
16:0/16:0/16:0	824.770 17	1.34 ± 0.02 ^b	5.41 ± 0.13 ^a
16:1/14:0/18:1	820.738 87	4.28 ± 0.02 ^a	1.04 ± 0.05 ^b
16:0/14:0/18:3	818.723 22	0.86 ± 0.04 ^a	0.22 ± 0.04 ^b
16:1/16:1/18:1	846.754 52	3.89 ± 0.14 ^a	1.37 ± 0.20 ^b
18:1/18:2/18:2	898.785 82	1.83 ± 0.31 ^a	1.12 ± 0.40 ^a
18:0/18:0/18:1	906.848 42	3.11 ± 0.08 ^b	9.14 ± 0.25 ^a
16:0/14:0/18:1	822.754 52	5.83 ± 0.16 ^a	5.74 ± 0.24 ^a
16:0/18:1/18:3	872.770 17	3.29 ± 0.32 ^a	1.52 ± 0.13 ^b
18:1/18:1/18:2	900.801 47	4.90 ± 0.26 ^a	1.78 ± 0.87 ^b
16:0/16:0/18:1	850.785 82	6.28 ± 0.13 ^b	12.97 ± 0.37 ^a
18:0/18:1/18:1	904.832 77	9.08 ± 0.28 ^a	7.25 ± 0.25 ^b
18:0/16:0/18:1	878.817 12	5.57 ± 0.19 ^b	15.75 ± 0.62 ^a
18:1/18:1/18:1	902.817 12	10.71 ± 0.26 ^a	1.33 ± 0.13 ^b
18:0/17:0/18:0	894.848 42	0.20 ± 0.01 ^b	2.10 ± 0.12 ^a
16:1/18:1/18:1	874.785 82	9.73 ± 0.04 ^a	4.92 ± 0.32 ^b
19:1/18:1/18:1	916.832 77	0.66 ± 0.01 ^a	0.25 ± 0.01 ^b
19:1/18:1/18:2	914.817 12	0.22 ± 0.01 ^a	0.11 ± 0.01 ^b
20:1/18:1/18:1	930.848 42	0.39 ± 0.02 ^a	0.31 ± 0.03 ^b
20:1/18:1/18:2	928.832 77	0.38 ± 0.02 ^a	0.24 ± 0.09 ^a
16:1/18:2/18:3	868.738 87	0.04 ± 0.01 ^a	0.02 ± 0.01 ^b
18:1/18:1/22:1	958.879 72	0.04 ± 0.01 ^a	0.05 ± 0.01 ^a
SSS		2.66 ± 0.04 ^b	15.87 ± 0.65 ^a
SSU		26.76 ± 0.33 ^b	45.59 ± 1.77 ^a
SUU		36.89 ± 0.41 ^a	26.47 ± 0.81 ^b
UUU		33.69 ± 0.77 ^a	12.07 ± 3.23 ^b

注:SSS. 三饱和脂肪酸甘油三酯;SSU. 单不饱和脂肪酸甘油三酯;SUU. 单饱和脂肪酸甘油三酯;UUU. 三不饱和脂肪酸甘油三酯

由表4可知:构成绵羊脂的主要甘油三酯为16:0/18:1/18:1、18:1/18:1/18:1、16:1/18:1/18:1和18:0/18:1/18:1,合计占总甘油三酯含量的44.91%;山羊脂中主要甘油三酯为18:0/16:0/18:1、16:0/18:1/18:1、16:0/16:0/18:1和18:0/18:0/18:1,合计占总甘油三酯含量的51.12%。结合2.2发现两种羊脂中均检测出一定含量的短链脂肪酸,但未检测出带有短链脂肪酸的甘油三酯,说明这些短链脂肪酸以非甘油三酯的形式存在于脂肪组

织中。另外,两种羊脂中未检测出中链甘油三酯,因此两种羊脂均不具备加工为特殊人群食用的功能油脂的价值。

对两种羊脂中检测出的30种甘油三酯建立OPLS-DA模型,发现模型拟合效果良好,两种羊脂的甘油三酯区分性较好,将该OPLS-DA模型第一主成分VIP值大于1且p值小于0.05的物质作为关键差异性甘油三酯,共筛选出了20种甘油三酯,结果见图1。

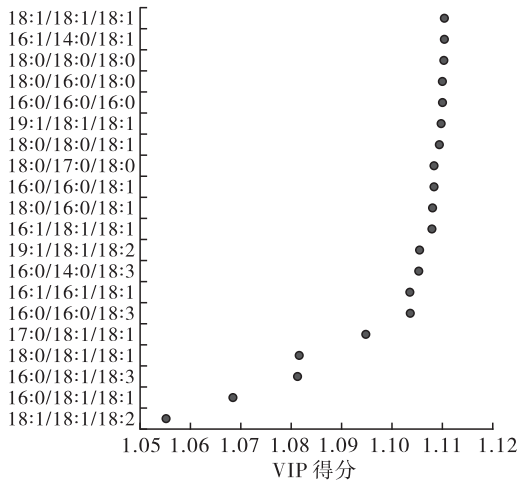


图1 两种羊脂 OPLS-DA VIP 得分图

由图1可知,18:1/18:1/18:1的得分最高,是两种羊脂中差异最显著的甘油三酯。

2.4 两种羊脂的挥发性成分

采用HS-SPME结合GC×GC-TOFMS对两种羊脂中挥发性物质种类与含量进行分析鉴定,检测出8大类共95种挥发性物质。其中酮类21种,烃类17种,酯类12种,醛类12种,酸类9种,醇类8种,醚类2种,酚类、呋喃类、含硫化合物等其他化合物14种。绵羊脂中挥发性物质总含量(122.11 μg/g)是山羊脂(32.68 μg/g)的3.74倍,说明在同一条件下绵羊脂的气味强度高于山羊脂,造成这一差异的原因可能是绵羊脂中的不饱和脂肪酸含量显著高于山羊脂,而不饱和脂肪酸的氧化降解是形成油脂特征性风味的重要途径,但也有研究表明这可能与C18:0、支链脂肪酸含量的高低有关^[13-14]。计算并筛选出34种关键风味化合物(OAV≥1),对其进行主成分分析,结果见图2。由图2可见:两种羊脂能完全分离,表明两种羊脂关键性风味物质差异显著。两种羊脂关键风味化合物风味特征与含量占比情况分别见表5、图3。值得注意的是,辛酸为绵羊脂中唯一一种酸类关键风味化合物(表5),但两

种羊脂的脂肪酸检测结果中均未发现辛酸,说明其并非来源于甘油三酯的水解,可能是通过脂肪酸氧化碳链变短或醛、酮的自动氧化等途径产生,但相对来说辛酸阈值较高,OAV较低,因此对羊脂的风味影响较小。绵羊脂中醛类是关键风味化合物中含量最高的,占总关键性风味物质含量的32.97%(图3),OAV最高的醛类物质为己醛,呈青味、脂肪味(表5);山羊脂中酮类含量最高,占总关键性风味物质含量的54.02%(图3),OAV较高的乙醛、己醛、壬醛、戊醛、(E)-2-壬烯醛和辛醛这6种醛类物质亦在几项羊肉挥发性化合物的研究中被检测出,并被认定为主体风味物质^[15-20]。两种羊脂中OAV最高的物质均为2,3-丁二酮,呈甜味、黄油味。结合图2可看出,山羊脂与两种酮类距离较近,说明酮类物质对山羊脂的风味贡献较大。酮类物质中既有表现出甜味、水果味、乳制品味等友好气味的化合物,又包含伴有辛辣味等负面气味的化合物。除己醛与2,3-丁二酮外,被描述为果味、甜味的乙酸乙酯,含量高、OAV大,其对两种羊脂的风味具有关键性作用。

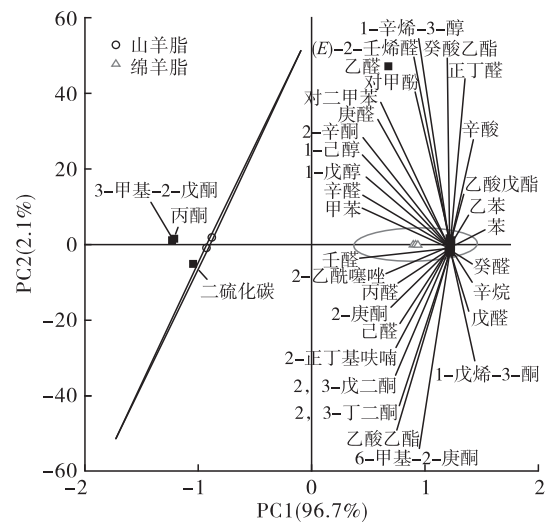


图2 两种羊脂中关键风味化合物主成分分析

表5 两种羊脂关键风味化合物风味特征

挥发性物质	保留指数	阈值/(μg/kg)	气味描述	OAV	
				绵羊脂	山羊脂
醛类					
乙醛	702	25.1	辛辣、清新味	258.09	33.08
丙醛	798	15.1	泥土、酒精味	272.81	6.44
正丁醛	877	2	青味	317.21	20.99
戊醛	979	12	葡萄酒、发酵味	457.58	66.15
己醛	1 083	5	青味、脂肪味	2 905.04	216.97
庚醛	1 184	2.8	青味、青草味	59.07	1.74
辛醛	1 289	0.6	青味、蜡味	1 203.52	68.17
壬醛	1 391	1	黄瓜、瓜果味	439.35	48.62

续表 5

挥发性物质	保留指数	阈值/($\mu\text{g}/\text{kg}$)	气味描述	OAV	
				绵羊脂	山羊脂
癸醛	1 498	0.1	蜡味、脂肪味	49.33	
(<i>E</i>)-2-壬烯醛	1 534	0.2	青味、肥皂味	724.81	14.97
酮类					
丙酮	819	832	NE	9.30	10.74
2,3-丁二酮	979	1	甜味、黄油味	5 175.00	1 116.52
3-甲基-2-戊酮	1 019	81	NE		1.57
1-戊烯-3-酮	1 019	23	辛辣、蒜味	156.57	8.80
2,3-戊二酮	1 058	30	烘烤、黄油味	248.90	11.53
2-庚酮	1 182	140	椰子味、蜡味	2.87	0.50
6-甲基-2-庚酮	1 237	24	NE	1.91	
2-辛酮	1 287	50.2	乳制品味、蜡味	1.28	0.60
醇类					
1-戊醇	1 250	150.2	发酵味、面包味	12.21	1.30
1-己醇	1 355	5.6	青味、果味	230.21	15.63
1-辛烯-3-醇	1 450	1.5	蘑菇味、蔬菜味	271.23	59.59
烃类					
辛烷	800	10	NE	476.96	60.25
苯	957	72	NE	22.46	13.15
甲苯	1 042	527	NE	10.84	1.43
乙苯	1 129	2 205	NE	4.13	0.58
对二甲苯	1 138	1 000	NE	3.44	0.25
酯类					
乙酸乙酯	888	5	果味、甜味	2 517.57	517.43
乙酸戊酯	1 176	43	果味、梨味	1.28	
癸酸乙酯	1 638	5	果味、甜味、苹果味	29.22	0.41
酸类					
辛酸	2 060	125.8	酸败味、奶酪味	1.28	0.11
其他					
二硫化碳	735	5	烂萝卜味	174.64	180.62
2-正丁基呋喃	1 123	5	NE	4.91	
2-乙酰噻唑	1 643	3	轻微霉味	1.85	0.13
对甲酚	2 080	3.9	NE	5.62	3.36

注:NE. 未查阅到气味描述;阈值查阅文献[21]获得

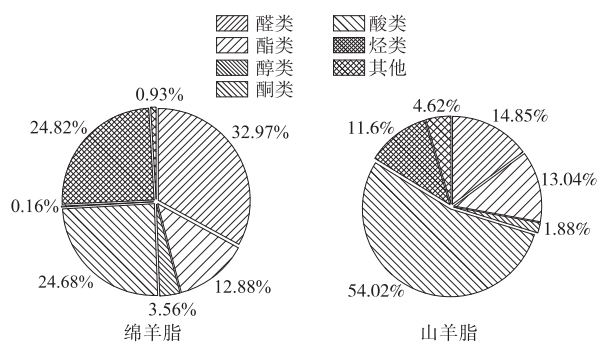


图 3 两种羊脂中关键风味化合物相对含量

3 结 论

绵羊脂中脂肪酸不饱和度、皂化值、碘值高于山羊脂,绵羊脂与山羊脂的熔点分别为 24.90、

38.70 $^{\circ}\text{C}$,山羊脂中脂肪酸饱和度与 SSS、SSU 型甘油三酯含量高于绵羊脂,是导致熔点差异的重要原因。两种羊脂均检测出 22 种脂肪酸和 30 种甘油三酯,主要脂肪酸均为 C16:0、C18:1 $n-9c$ 和 C18:0,短链脂肪酸主要以非甘油三酯的形式存在于脂肪组织中。OPLS-DA 表明,18:1/18:1/18:1 是两种羊脂中差异最显著的甘油三酯。两种羊脂共检测出 95 种挥发性化合物,其中关键风味化合物共 34 种,绵羊脂 33 种,山羊脂 23 种,绵羊脂中挥发性物质总含量是山羊脂的 3.74 倍。主成分分析结果表明两种羊脂可完全分离,差异显著。辛酸仅在绵羊脂中被鉴定为关键风味化合物,其来源可能为脂肪酸氧

化碳链变短或醛、酮的自动氧化;己醛、2,3-丁二酮与乙酸乙酯等化合物对两种羊脂的风味起到了关键作用,赋予了羊脂主体风味。综上所述,两种羊脂间具有一定的品质差异,绵羊脂的营养与食用价值高于山羊脂,其特征风味强度显著高于山羊脂,在生产与应用中可根据两种羊脂的特性开发更具有价值的羊脂产品。

参考文献:

- [1] WANG B H, YANG L, LUO Y L, et al. Effects of feeding regimens on meat quality, fatty acid composition and metabolism as related to gene expression in Chinese Sunit sheep[J]. *Small Ruminant Res*, 2018, 169: 127-133.
- [2] AUROUSSEAU B, BAUCHART D, CALICHON E, et al. Effect of grass or concentrate feeding systems and rate of growth on triglyceride and phospholipid and their fatty acids in the *M. longissimus thoracis* of lambs [J]. *Meat Sci*, 2004, 66(3): 531-541.
- [3] 郭建宏,王彩霞,王松磊,等. 滩羊肉中特征脂肪酸含量的高光谱检测及可视化[J]. *中国食品学报*, 2021, 21(10): 188-196.
- [4] 张东,薛雅琳,朱琳,等. 高效液相色谱-四极杆飞行时间质谱法测定棕榈油和动物脂肪甘油三酯[J]. *粮油食品科技*, 2015, 23(5): 72-76.
- [5] 杨金部,金明,田秀,等. 高效液相色谱-蒸发光散射法分析动物油脂种属特征[J]. *食品安全质量检测学报*, 2020, 11(9): 2785-2791.
- [6] DU W B, ZHEN D W, WANG Y T, et al. Characterization of the key odorants in grilled mutton shashlik with or without suet brushing during grilling[J]. *Flavour Frag J*, 2021, 36(1): 111-120.
- [7] 刘成江,吴洪斌,王俊钢,等. 新疆肥尾羊脂肪特性研究[J]. *食品科学*, 2012, 33(6): 159-161.
- [8] FOLCH J, LEES M, SLOANE STANLEY G H. A simple method for the isolation and purification of total lipides from animal tissues [J]. *J Biol Chem*, 1957, 226(1): 497-509.
- [9] ZHANG J, TAO N P, WANG M F, et al. Characterization of phospholipids from pacific saury (*Cololabis saira*) viscera and their neuroprotective activity[J]. *Food Biosci*, 2018, 24: 120-126.
- [10] 张晶晶,王锡昌,施文正. 白姑鱼和小黄鱼肉中挥发性风味物质的鉴定[J]. *食品科学*, 2019, 40(14): 206-213.
- [11] KHODABANDEHLOO H, GORGANI - FIRUZJAEI S, PANAHI G, et al. Molecular and cellular mechanisms linking inflammation to insulin resistance and β - cell dysfunction[J]. *Transl Res*, 2016, 167(1): 228-256.
- [12] FRDOOS A F, SUSANN F, LUKASZ J, et al. Involvement of sphingosine 1 - phosphate in palmitate - induced non - alcoholic fatty liver disease [J]. *Cell Physiol Biochem*, 2016, 40(6): 1637-1645.
- [13] BRENNAND C P, LINDSAY R C. Distribution of volatile branched chain fatty acids in various lamb tissues [J]. *Meat Sci*, 1992, 31(4): 411-421.
- [14] SAMBRAUS H H, KEIL N M. Die konstanz der melkordnung von ziegen in groben gruppen [J]. *J Anim Breed Genet*, 1997, 114(16): 397-404.
- [15] BUENO M, CAMPO M, CACHO J, et al. A model explaining and predicting lamb flavour from the aroma - active chemical compounds released upon grilling light lamb loins [J]. *Meat Sci*, 2014, 98(4): 622-628.
- [16] LIU H, HUI T, ZHENG X C, et al. Characterization of key lipids for binding and generating aroma compounds in roasted mutton by UPLC - ESI - MS/MS and Orbitrap Exploris GC [J/OL]. *Food Chem*, 2022, 374: 131723 [2021 - 12 - 10]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131723>.
- [17] GRABEZ V, BJELANOVIC M, ROHLOFF J, et al. The relationship between volatile compounds, metabolites and sensory attributes: a case study using lamb and sheep meat [J]. *Small Ruminant Res*, 2019, 181: 12-20.
- [18] WANG F, GAO Y Q, WANG H B, et al. Analysis of volatile compounds and flavor fingerprint in Jingyuan lamb of different ages using gas chromatography - ion mobility spectrometry (GC - IMS) [J/OL]. *Meat Sci*, 2021, 175: 108449 [2021 - 12 - 10]. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2021.108449>.
- [19] BUENO M, RESCONI V C, CAMPO M M, et al. Gas chromatographic - olfactometric characterisation of headspace and mouthspace key aroma compounds in fresh and frozen lamb meat [J]. *Food Chem*, 2011, 129(4): 1909-1918.
- [20] 杜文斌,王羽桐,徐玉霞,等. 羊脂肪关键香气成分分析[J]. *食品科学*, 2022, 43(8): 198-203.
- [21] 范海默特. 化合物香味阈值汇编 [M]. 北京: 科学出版社, 2015.