白如珍, 辜雪冬, 刘磊, 等. 西藏黑山羊不同性别个体肌肉中脂肪酸组成与特征风味物质差异分析 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(10): 343−354. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060302
BAI Ruzhen, GU Xuedong, LIU Lei, et al. Analysis of the Differences in Fatty Acid Composition and Characteristic Flavor Substances in the Muscles of Different Gender Individuals of Tibetan Black Goats[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(10): 343−354. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060302

· 分析检测 ·

西藏黑山羊不同性别个体肌肉中脂肪酸组成与特征风味物质差异分析

白如珍[1], 辜雪冬[1,*], 刘　磊[1,*], 朱慧芳[1], 周　雨[2], 蔡宛霖[2], 李赵敏[2], 洛桑扎西[3]
（1.西藏农牧大学食品科学学院, 西藏特农牧资源研发省部共建协同创新中心, 西藏林芝 860000;
2.西藏自治区农牧科学研究院农产品开发与食品研究所, 西藏拉萨 850000;
3.昌都市边坝县农牧科技推广服务中心, 西藏昌都 854000）

摘　要: 为探究不同性别西藏黑山羊肌肉品质特性的差异，本研究选取西藏黑山羊公羊和母羊为研究对象，分析其不同部位（前腿、后腿和背最长肌）肌肉中脂肪酸组成及挥发性风味物质的差异。结果表明：不同部位的肌肉中，C18:1、C18:0 和 C16:0 是主要的脂肪酸成分，其中公羊背最长肌的 C6:0、C8:0、C18:0、C20:0、C21:0 和 C14:1 含量均显著高于母羊（P<0.05），而公羊后腿的 C20:1 含量也显著高于母羊（P<0.05）。此外，公羊肌肉中的单不饱和脂肪酸（MUFA）含量（2.06±1.22 g/100 g）显著高于母羊（1.57±0.51 g/100 g）。采用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用技术（HS-SPME-GC-MS）分析挥发性风味物质，共鉴定出 75 种化合物，包括醛类（18 种）、酯类（13 种）、酮类（6 种）、酸类（5 种）、烷烃类（3 种）、烯烃类（3 种）、醇类（2 种）及其他类（25 种）。母羊肉中醛类物质总体含量显著高于公羊（P<0.05），而公羊肉中酯类和醇类物质含量则显著高于母羊（P<0.05）。通过主成分分析（PCA）、聚类热图分析及正交偏最小二乘判别分析（OPLS-DA）发现，正己醛、正庚醛、苯甲醛、3-羟基-2-丁酮、2-乙基呋喃、甲苯、乳酸乙酯和正壬醛等物质是西藏黑山羊肉特征风味的关键贡献成分。公羊由于脂肪酸、风味前体物质含量适中，在风味接受度及营养价值方面显著优于母羊（P<0.05）。本研究为西藏黑山羊肉质评价及风味调控提供了理论依据。

关键词: 西藏黑山羊, 性别差异, 脂肪酸, 挥发性风味物质, 特征风味
中图分类号: TS251.1　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)10−0343−12
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060302
本文网刊:

Analysis of the Differences in Fatty Acid Composition and Characteristic Flavor Substances in the Muscles of Different Gender Individuals of Tibetan Black Goats

BAI Ruzhen[1], GU Xuedong[1,*], LIU Lei[1,*], ZHU Huifang[1], ZHOU Yu[2], CAI Wanlin[2], LI Zhaomin[2], LUOSANG Zhaxi[3]
（1.College of Food Science, Xizang Agricultural and Animal Husbandry University, Collaborative Innovation Center of Special Agricultural and Animal Husbandry Resources Research and Development, Nyingchi 860000, China;
2.Institute of Agricultural Products Development and Food, Xizang Autonomous Region Academy of Agriculture and Animal Husbandry, Lhasa 850000, China;
3.Agricultural Science and Technology Extension Service Center of Bian Ba County, Changdu 854000, China）

收稿日期: 2025−06−25
基金项目: 西藏自治区重大科技专项（XZ202201ZD0001N）。
作者简介: 白如珍（1997−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 畜产食品加工与安全, E-mail: 2643136778@qq.com。
*** 通信作者:** 辜雪冬（1978−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 畜产食品科学, E-mail: xuedonggu@xza.edu.cn。
刘磊（1993−）, 男, 硕士, 讲师, 研究方向: 特色肉制品加工与营养的研究, E-mail: liulei@xzna.edu.cn。

Abstract: To explore the differences in muscle quality characteristics between male and female Tibetan black goats, this study selected male and female Tibetan black goats as research subjects and analyzed the differences in fatty acid composition and volatile flavor substances in different muscle parts (front legs, hind legs, and longissimus dorsi). The results showed that C18:1, C18:0, and C16:0 were the main fatty acid components in different muscle parts. The contents of C6:0, C8:0, C18:0, C20:0, C21:0, and C14:1 in the longissimus dorsi of male goats were significantly higher than those of female goats (P<0.05), and the content of C20:1 in the hind legs of male goats was also significantly higher than that of female goats (P<0.05). In addition, the content of monounsaturated fatty acids (MUFA) in the muscle of male goats (2.06±1.22 g/100 g) was significantly higher than that of female goats (1.57±0.51 g/100 g). Using headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS) to analyze volatile flavor substances, a total of 75 compounds were identified, including aldehydes (18), esters (13), ketones (6), acids (5), alkanes (3), alkenes (3), alcohols (2), and others (25). The total content of aldehydes in female goat meat was significantly higher than that in male goat meat (P<0.05), while the contents of esters and alcohols in male goat meat were significantly higher than those in female goat meat (P<0.05). Principal component analysis (PCA), cluster heatmap analysis, and orthogonal partial least squares discriminant analysis (OPLS-DA) showed that hexanal, heptanal, benzaldehyde, 3-hydroxy-2-butanone, 2-ethylfuran, toluene, ethyl lactate, and nonanal were the key contributing components to the characteristic flavor of Tibetan black goat meat. Male goats due to their moderate content of fatty acids and flavor precursor substances, were significantly superior to female goats in terms of flavor acceptance and nutritional value (P<0.05). This study provides a theoretical basis for the evaluation of the meat quality and flavor regulation of Tibetan black goats.

Key words: Tibetan black goat; gender difference; fatty acid; volatile flavor substances; characteristic flavor

西藏作为我国重要的高原牧区，其畜牧业在区域经济和文化传承中占据核心地位。其中，西藏黑山羊作为地方特色畜种资源，因其优异的适应性和独特的肉品质特性而备受关注。现有研究表明，该品种具有生长发育快、屠宰性能优良的特点，其肌肉组织以高蛋白、低脂肪和低膻味特征显著区别于普通山羊品种[1−2]。随着西藏畜牧业从传统散养向规模化加工转型，系统解析黑山羊肉品质形成机制对产业升级具有重要科学价值。

肉品风味与营养品质的核心评价指标集中于脂肪酸组成与挥发性风味物质特征，同时风味也是直接影响肉类市场竞争力的重要因素之一[3]。现有研究证实，羊肉风味前体物质主要来源于脂肪组织中的支链脂肪酸、硬脂酸及其衍生物，其含量及比例受品种、饲养方式和性别等因素显著调控[4]。例如，刘冀黔等[5]通过对比不同月龄（6、12、24 月）黑藏羊发现，6 月龄个体表现出更优的风味，管凇等[6]对海南黑山羊、努比亚山羊及其杂交羊 1 代的脂肪酸和挥发性风味物质分析发现，海南黑山羊和努比亚羊杂交后，羊肉膻味更小，脂肪酸含量更加丰富。此外，王芳等[7]对滩羊不同部位肌肉脂肪酸及特征风味分析发现，不同部位的羊肉特征风味物质具有明显的差异。滩羊肉中不同部位饱和脂肪酸/不饱和脂肪酸均接近营养协会推荐人体摄入脂肪酸的组成比例 1:1。李文博等[8]证实不同饲养方式对苏尼特羊肉挥发性风味成分和脂肪酸组成具有重要影响，主要表现为放牧羊肉中合成并沉积了更多的脂肪酸，促使放牧羊肉中有更丰富的风味物质成分。

目前，针对西藏黑山羊的研究多集中于遗传性能和繁殖性能方面[9]，对其肉品质的系统评价，尤其是性别因素对风味物质的影响尚未见报道。为此，本实验参考王翻兄等[10]研究选取 3 岁西藏黑山羊公母羊各 3 只（该年龄已完成高原低氧适应性调整，排除幼龄动物生长波动或老龄动物代谢衰退的干扰）进行肉品质比对分析，并基于顶空-固相微萃取-气相色谱-质谱（HS-SPME-GC-MS）技术分析黑山羊不同部位的风味物质组成，通过 VIP 分析方法以及差异性分析筛选出不同性别黑山羊的共性风味物质和差异特征风味物，揭示其性别对于挥发性风味物质的影响，为西藏黑山羊肉的产业化加工和营养品质提升提供理论依据，也为西藏黑山羊养殖产业提供科学依据，对提高藏区牧民养殖积极性和增加羊肉产业经济收益具有重要的现实意义。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

黑山羊　西藏自治区昌都市边坝县。本研究随机挑选了西藏自治区昌都市边坝县地区半牧半饲养的 3 岁体况健康良好的黑山羊公、母羊各 3 只，进行屠宰。所选羊宰前均进行正常免疫。所有试验黑山羊均按照《畜禽屠宰卫生检疫规范》（NY467-2001）[11]要求于 2023 年 11 月份在昌都市边坝县定点屠宰场进行屠宰。宰前禁食 24 h。均选取每只羊的前腿、后腿以及胴体 12~13 肋骨间背最长肌部位进行试验，其中一部分用于测定食用品质指标和营养品质指标，剩余部分则迅速转移贮藏在−20 ℃ 冷藏条件下，用于测定脂肪酸及挥发性风味组成；氯化钠、氢氧化钾、硫酸、正己烷、无水乙醇、2-甲基-3-庚酮（均为分析纯）　天津市科密欧化学试剂有限公司；37 种混合脂肪酸甲酯标准品　纯度≥99%，美国 NU-CHEK 公司；正庚烷、异辛烷、三氟化硼、焦性没食子酸、无水硫酸钠　均为色谱纯，上海远慕生物科技有限公司。

Agilent 6890 GC-5975C 气相色谱-质谱联用仪

美国 Agilent 公司；毛细柱 DB-23（60.00 m×250.0 μm×0.15 μm）、OV-1701 色谱柱（60 m×0.25 mm，0.5 μm）　日本岛津公司；7890A-5975C 型顶空固相微萃取仪（HS-SPME）、50/30 μm DVB/CAR/PDMS 固相微萃取纤维　美国 Supelco 公司；HHWO 恒温数显水浴锅、85-2A 型测速数显恒温磁力搅拌器　上海弘懿仪器设备有限公司；MJ-BL90R03 型绞肉机　广东美的生活电器制造有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　样品处理　分别选取前腿、后腿和背最长肌三个部位各 450 g。样品于−20 ℃ 贮藏条件下保藏备用，测定前样品在 5 ℃ 下解冻 24 h。

1.2.2　脂肪酸含量测定

1.2.2.1　脂肪酸提取及甲酯化　脂肪酸的提取参照刘志红等[12] 的方法，稍作修改。将黑山羊不同部位肌肉样品用粉碎机打成粉碎肉沫，准确称取粉碎肉沫 0.5 g，置于水解管中，依次加入 5.3 mL 甲醇溶液和 0.7 mL 10 mol/L KOH；随后将水解管置于 55 ℃ 水浴中加热 1 h，期间每隔 20 min 轻轻振摇 10 s，以确保样品与试剂充分反应。反应结束后，冷却至室温，加入 0.6 mL 48 mol/L 硫酸，继续在 55 ℃ 水浴中加热 1.5 h，每隔 20 min 剧烈涡旋混合 10 s。待冷却后，加入 3 mL 正己烷，涡旋振荡 6 min，使其充分混匀。将混合液转移至 15 mL 无菌无酶离心管中，在 3000 r/min 条件下离心 5 min，分离出正己烷层，并将其转移至气相色谱分析小瓶中，密封后置于−20 ℃ 环境中保存，待进一步分析。

1.2.2.2　脂肪酸测定　脂肪酸的测定参照刘志红等[12] 的方法，稍作修改。

色谱条件：DB-23 石英毛细管柱；柱流速 1 mL/min；进样量 1 μL；升温程序为初温 50 ℃ 保持 4 min，10 ℃/min 升温至 150 ℃ 保持 4 min，5 ℃/min 升温至 230 ℃ 并保持 5 min。

质谱（MS）条件：离子源温度 230 ℃，四级杆温度 150 ℃，电子轰击能 70 eV，扫描范围（m/z）为 15~550，辅助温度为 230 ℃。定性及定量依据脂肪酸标准品色谱峰的保留时间，结合 NIST Library 谱库的标准质谱图，对样本中不同脂肪酸进行分析。

1.2.3　挥发性风味物质测定

1.2.3.1　样品前处理　风味物质的萃取参照汪修意等[13] 的方法，稍作修改。称取 3.0 g 粉碎肉沫置于 20 mL 顶空瓶中，加入 10 μL 内标（2-甲基-3-庚酮，5 μg/mL），拧紧瓶盖，将顶空瓶放入 55 ℃ 恒温水浴锅中加热 20 min，使顶空瓶中的挥发性气体达到平衡。将已老化好的固相微萃取针头插入顶空瓶中，对顶空瓶中的挥发性气体进行吸附。吸附 30 min 后收回纤维头，拔出萃取针，插入 GC-MS 进样口，解吸 3 min，进样。

1.2.3.2　色谱条件　风味物质的测定参照汪修意等[13] 的方法，稍作修改。

GC 色谱条件：HP-INNOWAX 毛细管色谱柱（60 m×0.25 mm，0.25 μm）；升温程序：40 ℃ 保持 2 min，以 10 ℃/min 升至 100 ℃，以 4 ℃/min 升至 230 ℃，保持 5 min；进样口温度 250 ℃，载气（He）流速 1.0 mL/min，压力 0.5 MPa，进样量 1.0 μL，不分流。

MS 质谱条件：扫描模式 Full MS；离子化方式 EI；电子能量 70 eV；传输线温度 250 ℃；离子源温度 280 ℃；激活电压 1.5 V；质量扫描范围（m/z）30~400。

定性及定量分析：将总离子流色谱图中的各组分与 NIST 14 标准谱库进行对照分析，用匹配度进行定性，筛选匹配度大于 80 的化合物，采用峰面积归一化法计算各组分的相对含量。

1.3　数据处理

所有数据分析均采用 SPSS 26.0 软件中 t 检验，所有指标均平行测定 3 次，试验数据以平均值±标准差表示，$P<0.05$ 表示差异显著（小写字母表示），$P<0.01$ 表示差异极显著（大写字母表示）；风味物质数据：采用 Origin 2021 软件进行 PCA 和热图聚类分析。GC-IMS 数据分析：利用软件内置的 GC-IMS Library Search 数据库对物质进行定性分析；并通过 Origin 2021 软件及插件对不同性别及部位进行差异分析。

2　结果与分析

2.1　脂肪酸分析

由表 1 可知，西藏黑山羊肌肉中共鉴定出 19 种挥发性脂肪酸，包括 12 种饱和脂肪酸（saturated fatty acid，SFA）、3 种单不饱和脂肪酸（monounsaturated fatty acid，MUFA）和 4 种多不饱和脂肪酸（polyunsaturated fatty acid，PUFA）。现有研究证实，MUFA 在调节血脂代谢和抑制全身炎症反应方面具有重要作用[14]；PUFA 则表现出促进生长发育、改善血管弹性、增强认知功能及调节免疫应答等生理功能[15]。本研究发现，西藏黑山羊肌肉脂肪的主要脂肪酸含量由高到低分别是 C18:1、C16:0、C18:0、C16:1、C14:0、C17:0、C17:1，其公羊的累计含量占肌肉总脂肪酸的 80.90%，母羊的占比 80.30%。值得注意的是，YANG 等[16] 研究发现 C18:1 作为庚醛、壬醛等风味物质的关键前体，不仅赋予肉类特征性风味，还能通过调节低密度脂蛋白胆固醇水平降低冠心病发病风险。本研究显示 C18:1 在西藏黑山羊肉脂肪酸组成中占比最高，其公羊的部位平均含量占肌肉总脂肪酸的 15.88%，母羊的占比 16.08%。提示其可能兼具优良的风味特性和潜在的心血管保护作用。进一步分析发现，西藏黑山羊不同性别间脂肪酸组成存在显著差异（$P<0.05$）：在 SFA 中，公羊背最长肌的 C6:0、C8:0、C18:0、C20:0 和 C21:0 含量显著高于母羊（$P<0.05$）；MUFA 中公羊背最长肌 C14:1 含量以及 PUFA 中公羊后腿肌 C20:1 含量均显著高于母羊（$P<0.05$）。鉴于不饱和脂肪酸已被证实具有免疫调

表 1 性别对黑山羊脂肪酸含量的影响

Table 1 Influence of gender on the fatty acid content of black goat

项目	性别	前腿	后腿	背最长肌
饱和脂肪酸				
己酸 C6:0	公	0.005±0.002[a]	0.01±0.005[a]	0.008±0.002[a]
	母	0.005±0.003[a]	0.004±0[a]	0.003±0.002[b]
辛酸 C8:0	公	0.004±0.002[a]	0.004±0.002[a]	0.003±0[a]
	母	0.004±0.004[a]	0.01±0.006[a]	0.001±0.006[b]
癸酸 C10:0	公	0.004±0.003[a]	0.007±0.003[a]	0.007±0.001[b]
	母	0.005±0.005[a]	0.004±0.002[a]	0.03±0.001[a]
月桂酸 C12:0	公	0.003±0.002[a]	0.004±0.002[a]	0.004±0.001[a]
	母	0.003±0.002[a]	0.003±0.001[a]	0.003±0.001[a]
豆蔻酸 C14:0	公	0.087±0.053[a]	0.125±0.069[a]	0.122±0.019[a]
	母	0.079±0.046[a]	0.088±0.019[a]	0.082±0.036[a]
十五烷酸 C15:0	公	0.021±0.018[a]	0.023±0.011[a]	0.022±0.002[a]
	母	0.017±0.011[a]	0.021±0.004[a]	0.016±0.007[a]
棕榈酸 C16:0	公	0.806±0.372[a]	1.582±0.847[a]	1.404±0.336[a]
	母	0.850±0.412[a]	0.898±0.199[a]	0.844±0.341[a]
十七烷酸 C17:0	公	0.038±0.023[a]	0.077±0.039[a]	0.072±0.012[a]
	母	0.049±0.028[a]	0.067±0.01[a]	0.048±0.021[a]
硬脂酸 C18:0	公	0.425±0.212[a]	1.082±0.597[a]	1.080±0.166[a]
	母	0.575±0.253[a]	0.803±0.248[a]	0.576±0.204[b]
花生酸 C20:0	公	0.004±0.002[a]	0.009±0.004[a]	0.008±0.001[a]
	母	0.005±0.003[a]	0.005±0.002[a]	0.004±0.002[b]
二十一烷酸 C21:0	公	0.004±0.002[a]	0.009±0.006[a]	0.008±0.001[a]
	母	0.004±0.003[a]	0.004±0.002[a]	0.003±0.001[b]
二十二烷酸 C22:0	公	0.004±0.001[a]	0.007±0.004[a]	0.004±0.001[a]
	母	0.005±0.001[a]	0.005±0.001[a]	0.005±0.001[a]
单不饱和脂肪酸				
肉豆蔻油酸 C14:1	公	0.004±0.004[a]	0.005±0.003[a]	0.004±0.002[a]
	母	0.003±0.003[a]	0.001±0.001[a]	0.001±0[b]
棕榈油酸 C16:1	公	0.068±0.049[a]	0.135±0.071[a]	0.118±0.035[a]
	母	0.097±0.052[a]	0.083±0.012[a]	0.1±0.05[a]
油酸 C18:1,cis(n9)	公	0.826±0.626[a]	2.514±1.322[a]	2.507±0.671[a]
	母	1.434±0.686[a]	1.590±0.262[a]	1.389±0.582[a]
多不饱和脂肪酸				
十七碳稀酸 C17:1	公	0.023±0.021[a]	0.048±0.024[a]	0.045±0.01[a]
	母	0.039±0.026[a]	0.041±0.005[a]	0.038±0.021[a]
亚油酸 C18:2,cis(n6)	公	0.018±0.004[a]	0.057±0.015[a]	0.033±0.012[a]
	母	0.039±0.016[a]	0.043±0.009[a]	0.034±0.006[a]
二十碳稀酸 C20:1 n9	公	0.003±0.002[a]	0.01±0.003[a]	0.005±0.001[a]
	母	0.004±0.002[a]	0.004±0.001[b]	0.003±0.002[a]
α-亚麻酸 C18:3 n3	公	0.001±0.001[a]	0.006±0.003[a]	0.002±0.001[a]
	母	0.004±0.005[a]	0.002±0.001[a]	0.002±0.002[a]

注: 小写字母表示不同性别之间差异显著(P<0.05), 大写字母表示不同性别之间差异极显著(P<0.01); 单位: g/100 g; 表2~表3同。

节、抗动脉粥样硬化及心血管保护等生理功能[17], 本研究结果说明西藏黑山羊公羊肉相对于母羊肉的营养价值更有优势。

MUFA 作为重要的脂肪酸组分, 其氧化稳定性直接影响肉制品的风味品质[18]。由表 2 可知西藏黑山羊肉公、母羊的 MUFA 含量分别为 2.06±1.22 g/100 g 和 1.57±0.51 g/100 g, 二者之间无显著性差异(P>0.05), 表明性别因素对 MUFA 积累的影响有限。值得注意的是, 该品种饱和脂肪酸(SFA)占总脂肪酸比例较高(公羊 60.59%, 母羊 59.26%), 这一特征可能与反刍动物瘤胃微生物群落结构及其对脂肪酸的氢化作用有关[19]。PUFA/SFA 比值作为重要的营养评价指标, 在本研究中显示母羊显著高于公羊(P<0.01), 提示不同性别个体在脂肪酸代谢方面存在潜在差异。这些差异可能由于性激素调控、代谢通路差异及组织特异性共同作用导致。特别需要指出的是, 西藏黑山羊肉中检测到具有重要生理功能的 ω-3 系列脂肪酸(0.003 g/100 g)和 ω-6 系列脂肪酸(0.04 g/100 g), 其含量在公母个体间无显著差异(P>0.05)。现有研究证实[20−21], ω-3 脂肪酸具有调节血脂、预防心血管疾病等功效, 而 ω-6 脂肪酸则在免疫调节和胆固醇代谢方面发挥重要作用。本研究中 ω-6/ω-3 比值为 14.21∶1, 虽高于理想比值(4~6∶1), 但考虑到其较高的 PUFA/SFA 比值及特殊脂肪酸组成, 西藏黑山羊肉仍显示出潜在的保健价值。

表 2 性别对黑山羊脂肪酸组成的影响

Table 2 Influence of gender on the fatty acid composition of black goat

项目	公	母	平均值
总脂肪酸TFA	5.43±2.90[a]	4.05±1.31[a]	4.74±0.98
饱和脂肪酸SFA	3.29±1.65[a]	2.40±0.81[a]	2.85±0.63
单不饱和脂肪酸MUFA	2.06±1.22[a]	1.57±0.51[a]	1.81±0.35
多不饱和脂肪酸PUFA	0.09±0.04[a]	0.08±0.02[a]	0.08±0.01
n-3 PUFA	0.003±0.003[a]	0.003±0.003[a]	0.003±0.001
n-6 PUFA	0.04±0.02[a]	0.04±0.01[a]	0.04±0.002
n-6/n-3	13.58±7.64[a]	14.84±12.72[a]	14.21±0.89
多不饱和脂肪酸/饱和脂肪PUFA/SFA	0.026±0.006[b]	0.037±0.003[a]	0.031±0.008

2.2 肉中挥发性风味物质分析

2.2.1 风味物质组分与含量分析 羊肉的特征风味是由多种风味前体物质通过复杂的化学反应共同作用形成的[22]。本研究采用气相色谱-质谱联用技术对西藏黑山羊肉的挥发性风味物质进行了系统分析, 共鉴定出 8 类 75 种挥发性化合物, 包括醛类(18 种)、酯类(13 种)、酮类(6 种)、酸类(5 种)、烷烃类(3 种)、烯烃类(3 种)、醇类(2 种)以及其他类化合物(25 种)。研究结果显示, 醛类物质在不同部位肌肉中的相对含量均超过 50%, 其中母羊前腿中含量最高(67.07%); 酯类物质的相对含量均大于 4%, 以公羊后腿含量最高(7.74%); 酮类物质的相对含量均超过 3%, 公羊背最长肌中含量最高(8.68%)。通过对不同性别黑山羊各类挥发性风味物质相对含量的占比分析, 结果显示如图 1, 母羊肉中醛类物质总体含量显著高于公羊(P<0.05), 而公羊肉中酯类和醇类物质含量则显著高于母羊(P<0.05)。值得注意的是, 醛类化合物作为西藏黑山羊肉中最主要的挥发性风味物质, 不仅种类最多、含量最高, 且由于其普遍较低的感官阈值, 即使在微量浓度下也能对肉品风味特征产生显著影响[23]。这一发现为阐明西藏黑山羊肉独

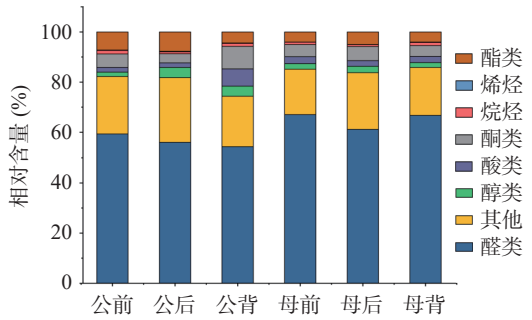


图 1　不同性别黑山羊各类挥发性风味物质相对含量占比

Fig.1　Relative content ratios of various volatile flavor substances in black goats of different genders

特风味的形成机制提供了重要理论依据。

采用气相色谱-质谱联用技术对西藏黑山羊肌肉中的挥发性风味成分进行分析鉴定。结果表明，共检测出 75 种挥发性风味化合物，可归类为醛类、酮类、酯类、醇类等 8 大类物质。如表 3 所示，醛类物质相对含量最高，这与已有研究结论一致[24]。醛类作为不饱和脂肪酸氧化降解的主要产物，因其低香气阈值和丰富的呈香特性，被认为是羊肉特征风味的重要贡献者[25−26]。其中，苯甲醛等物质在公羊后腿肌肉中的含量显著高于母羊（$P<0.05$），这一差异可能与性别相关的脂代谢差异有关。次要风味组分中，酯类物质主要通过脂肪氧化衍生的醇类与游离脂肪酸的酯化反应

表 3　性别对黑山羊肉中风味物质含量的影响（%）

Table 3　Influence of gender on the content of flavor substances in black goat mutton (%)

类别	中文名	保留时间(min)	保留指数	分子式	性别	部位		
						前腿	后腿	背最长肌
醛类	正己醛	12.473	1085	$C_6H_{12}O$	公	14.200±8.63^a	2.578±3.23^a	17.566±9.35^a
					母	28.294±7.13^a	18.674±2.51^a	17.126±12.13^a
	反式-2-戊烯醛	14.075	1133	C_5H_8O	公	0.109±0.03^a	0.068±0.03^a	0.121±0.04^a
					母	0.180±0.06^a	0.136±0.02^a	0.162±0.03^a
	正庚醛	15.766	1184	$C_7H_{14}O$	公	1.173±0.37^a	1.161±0.24^a	1.157±0.98^a
					母	2.584±0.64^a	1.603±0.39^a	12.802±18.07^a
	异戊烯醛	16.439	1202	C_5H_8O	公	0.161±0.08^a	0.080±0.07^a	0.119±0.10^a
					母	0.096±0.03^a	0.149±0.02^a	0.129±0.06^a
	正辛醛	19.35	1286	$C_8H_{16}O$	公	0.882±0.29^a	0.757±0.66^a	1.246±0.44^a
					母	1.676±0.53^a	1.293±0.39^a	0.859±0.76^a
	正壬醛	22.893	1389	$C_9H_{18}O$	公	2.533±0.88^a	5.046±1.43^a	3.185±0.54^a
					母	4.217±1.19^a	3.926±1.36^a	3.879±1.36^a
	3-甲硫基丙醛	24.855	1449	C_4H_8OS	公	0.545±0.32^a	0.497±0.21^a	0.468±0.49^a
					母	0.258±0.04^a	0.547±0.19^a	0.404±0.17^a
	反式-2,4-庚二烯醛	26.121	1488	$C_7H_{10}O$	公	0.088±0.02^a	0.081±0.01^a	0.090±0.03^a
					母	0.182±0.12^a	0.116±0.04^a	0.122±0.06^a
	癸醛	26.248	1492	$C_{10}H_{20}O$	公	0.122±0.03^a	0.328±0.21^a	0.139±0.06^a
					母	0.136±0.04^a	0.161±0.04^a	0.064±0.05^a
	苯甲醛	27.091	1518	C_7H_6O	公	37.501±3.96^a	43.345±5.85^a	27.833±9.39^a
					母	27.472±1.89^a	32.812±1.20^b	29.302±5.75^a
	苯乙醛	30.662	1634	C_8H_8O	公	0.531±0.49^a	0.559±0.49^a	0.617±0.75^a
					母	0.148±0.16^a	0.229±0.33^a	0.374±0.32^a
	正十六醛	43.42	2113	$C_{16}H_{32}O$	公	0.335±0.15^a	0.482±0.16^a	0.219±0.10^a
					母	0.277±0.02^a	0.287±0.06^a	0.231±0.11^a
	3-甲基丁醛	8.084	922	$C_5H_{10}O$	公	0.125±0.06^a	0.132±0.06^a	0.135±0.16^a
					母	0.058±0.02^a	0.106±0.04^a	0.087±0.05^a
	戊醛	9.499	985	$C_5H_{10}O$	公	0.583±0.2^a	0.258±0.20^a	0.924±0.64^a
					母	1.000±0.15^a	0.543±0.20^a	0.840±0.42^a
	5-甲基-2-噻吩甲醛	33.109	1718	C_6H_6OS	公	0.286±0.37^a	0.480±0.34^a	0.290±0.45^a
					母	0.388±0.13^a	0.426±0.17^a	0.271±0.30^a
	2-甲基丁醛	8.003	919	$C_5H_{10}O$	公	0.066±0.02^a	0.068±0.02^a	0.072±0.08^a
					母	0.031±0.01^a	0.054±0.02^a	0.044±0.02^a
	十二醛	32.566	1699	$C_{12}H_{24}O$	公	0.038±0.02^a	0.07±0.04^a	0.034±0.01^a
					母	0.048±0.01^a	0.048±0.01^a	0.05±0.04^a
	2-苯基-2-丁烯醛	38.457	1914	$C_{10}H_{10}O$	公	0.059±0.05^a	0.037±0.01^a	0.039±0.03^a
					母	0.034±0.01^a	0.062±0.03^a	0.026±0.01^a
	总计				公	59.336±7.2^a	56.026±4.75^a	54.253±7.21^b
					母	67.078±6.09^a	61.173±3.23^a	66.77±5.71^a

续表 3

类别	中文名	保留时间(min)	保留指数	分子式	性别	部位		
						前腿	后腿	背最长肌
酯类	甲酸辛酯	24.545	1439	$C_9H_{18}O_2$	公	0.154±0.02^a	0.156±0.03^a	0.342±0.19^a
					母	0.343±0.10^a	0.312±0.13^a	0.292±0.10^a
	乳酸乙酯	20.144	1310	$C_5H_{10}O_3$	公	3.611±3.34^a	1.091±0.79^a	0.488±0.61^a
					母	0.660±0.14^b	1.103±0.30^a	0.497±0.48^a
	癸酸甲酯	29.143	1584	$C_{11}H_{22}O_2$	公	0.377±0.13^a	0.810±0.95^a	0.272±0.26^a
					母	0.301±0.22^a	0.190±0.03^a	0.119±0.15^a
	苯甲酸甲酯	30.067	1614	$C_8H_8O_2$	公	0.110±0.01^a	0.130±0.04^a	0.060±0.01^a
					母	0.087±0.05^a	0.144±0.04^a	0.126±0.09^a
	4-羟基丁酸内酯	30.269	1621	$C_4H_6O_2$	公	0.451±0.05^a	0.465±0.35^a	0.672±0.19^a
					母	0.404±0.15^a	0.367±0.13^a	0.454±0.10^a
	月桂酸甲酯	35.016	1786	$C_{13}H_{26}O_2$	公	0.108±0.06^a	0.246±0.24^a	0.126±0.16^a
					母	0.09±0.02^a	0.068±0.02^a	0.071±0.07^a
	肉豆蔻酸甲酯	40.351	1989	$C_{15}H_{30}O_2$	公	0.355±0.25^a	0.929±1.31^a	0.263±0.34^a
					母	0.129±0.02^a	0.109±0.05^a	0.154±0.13^a
	丙酸甲酯	7.801	911	$C_4H_8O_2$	公	0.168±0.07^a	0.137±0.1^a	0.123±0.01^a
					母	0.126±0.04^a	0.159±0.07^a	0.171±0.05^a
	棕榈酸甲酯	45.242	2192	$C_{17}H_{34}O_2$	公	0.632±0.27^a	2.314±1.93^a	0.652±0.76^a
					母	0.406±0.14^a	0.633±0.19^a	0.629±0.29^a
	丁酸甲酯	9.661	991	$C_5H_{10}O_2$	公	1.113±0.30^a	1.196±0.73^a	1.262±0.50^a
					母	1.34±0.59^a	1.799±1.18^a	1.41±0.25^a
	丙位己内酯	32.416	1693	$C_6H_{10}O_2$	公	0.074±0.02^a	0.074±0.02^a	0.078±0.01^a
					母	0.077±0.01^a	0.081±0.01^a	0.084±0.02^a
	十五碳酸甲酯	42.855	2090	$C_{16}H_{32}O_2$	公	0.055±0.05^a	0.118±0.14^a	0.049±0.07^a
					母	0.021±0.01^a	0.021±0.01^a	0.026±0.02^a
	油酸甲酯	50.203	2415	$C_{19}H_{36}O_2$	公	0.025±0.02^a	0.074±0.08^a	0.033±0.04^a
					母	0.015±0.01^a	0.016±0.01^a	0.013±0.01^a
	总计				公	7.234±2.99^a	7.741±2.98^a	4.421±0.68^a
					母	4±0.73^a	5.001±1.5^a	4.045±0.83^a
酮类	2,3-辛二酮	20.493	1318	$C_8H_{14}O_2$	公	1.39±1.18^a	0.632±0.58^a	1.700±1.49^a
					母	2.202±1.66^a	1.659±0.75^a	2.016±2.00^a
	苯乙酮	30.911	1643	C_8H_8O	公	0.291±0.03^a	0.337±0.06^A	0.264±0.02^a
					母	0.221±0.05^a	0.224±0.02^B	0.262±0.03^a
	对甲基苯乙酮	34.406	1765	$C_9H_{10}O$	公	0.197±0.10^a	0.349±0.04^a	0.196±0.14^a
					母	0.154±0.04^a	0.158±0.02^b	0.122±0.03^a
	3-羟基-2-丁酮	19.28	1284	$C_4H_8O_2$	公	2.272±3.17^a	1.341±1.95^a	5.107±6.86^a
					母	1.056±1.25^a	2.813±1.68^a	0.833±0.79^a
	对羟基苯乙酮	35.162	1792	$C_8H_8O_2$	公	0.155±0.04^a	0.187±0.09^a	0.112±0.04^a
					母	0.064±0.02^a	0.097±0.05^a	0.115±0.04^a
	2-戊酮	9.387	981	$C_5H_{10}O$	公	1.047±0.44^a	0.788±0.42^a	1.573±0.60^a
					母	1.171±0.11^a	0.673±0.23^a	0.965±0.41^a
	总计				公	5.061±2.49^a	3.298±1.99^a	8.689±7.97^a
					母	4.647±0.55^a	5.4±2.64^a	4.051±3.21^a
酸类	冰乙酸	24.489	1438	$C_2H_4O_2$	公	0.983±0.28^a	0.896±0.52^a	5.641±4.89^a
					母	1.731±2.07^a	0.949±0.31^a	1.118±0.10^b
	正丁酸	29.885	1608	$C_4H_8O_2$	公	0.226±0.10^a	0.310±0.19^a	0.316±0.19^a
					母	0.334±0.19^a	0.629±0.52^a	0.412±0.20^a
	正己酸	35.928	1819	$C_6H_{12}O_2$	公	0.185±0.06^a	0.161±0.05^b	0.291±0.12^a
					母	0.287±0.04^a	0.344±0.08^a	0.318±0.07^a
	苯甲酸	49.841	2398	$C_7H_6O_2$	公	0.422±0.04^a	0.392±0.11^a	0.609±0.21^a
					母	0.371±0.10^a	0.334±0.03^a	0.537±0.07^a
	正癸酸	46.253	2236	$C_{10}H_{20}O_2$	公	0.069±0.06^a	0.049±0.03^a	0.059±0.01^a
					母	0.039±0.01^a	0.027±0.01^a	0.043±0.01^a
	总计				公	1.885±0.22^a	1.808±0.81^a	6.915±5.15^a
					母	2.761±2.38^a	2.283±0.89^a	2.428±0.32^b

续表 3

类别	中文名	保留时间(min)	保留指数	分子式	性别	部位		
						前腿	后腿	背最长肌
烯烃	十七烯	34.863	1780	C17H34	公	0.045±0.03^{a}	0.045±0.03^{a}	0.028±0.01^{a}
					母	0.025±0.01^{a}	0.025±0.01^{a}	0.129±0.13^{a}
	2,4-辛二烯	8.131	926	C_8H_{14}	公	0.014±0.02^{a}	0.041±0.06^{a}	0.061±0.08^{a}
					母	0.012±0.01^{a}	0.017±0.01^{a}	0.012±0.01^{a}
	2-蒎烯	10.783	1030	$C_{10}H_{16}$	公	0.037±0.02^{a}	0.09±0.13^{a}	0.052±0.03^{a}
					母	0.043±0.03^{a}	0.028±0.02^{a}	0.036±0.02^{a}
	总计				公	0.107±0.01^{a}	0.176±0.09^{a}	0.141±0.06^{a}
					母	0.08±0.03^{a}	0.07±0.02^{a}	0.178±0.12^{a}
烷烃	环烷	33.609	1737	$C_{10}H_8$	公	0.349±0.14^{a}	0.390±0.07^{a}	0.306±0.05^{a}
					母	0.259±0.12^{a}	0.259±0.05^{a}	0.280±0.01^{a}
	正十一烷	12.63	1090	$C_{11}H_{24}$	公	0.643±0.53^{a}	0.129±0.09^{a}	0.471±0.13^{a}
					母	0.341±0.41^{a}	0.201±0.05^{a}	0.251±0.28^{a}
	正癸烷	10.123	1008	$C_{10}H_{22}$	公	0.461±0.23^{a}	0.277±0.22^{a}	0.406±0.24^{a}
					母	0.340±0.17^{a}	0.254±0.07^{a}	0.713±0.11^{a}
	总计				公	1.453±0.9^{a}	0.797±0.23^{a}	1.182±0.30^{a}
					母	0.94±0.69^{a}	0.714±0.16^{a}	1.244±0.17^{a}
醇类	正己酸甲醇	15.777	1184	$C_7H_{14}O_2$	公	0.434±0.28^{a}	0.511±0.69^{a}	0.531±0.22^{a}
					母	0.787±0.54^{a}	0.994±0.51^{a}	0.923±0.70^{a}
	7-辛烯-4-醇	24.385	1434	$C_8H_{16}O$	公	1.287±1.11^{a}	3.583±5.31^{a}	3.521±4.10^{a}
					母	1.403±0.29^{a}	1.567±0.48^{a}	0.993±0.40^{a}
	总计				公	1.721±1.30^{a}	4.094±4.94^{a}	4.053±4.12^{a}
					母	2.189±0.43^{a}	2.561±0.99^{a}	1.916±0.95^{a}
其他	2-乙酰基吡啶	29.427	1594	C_7H_7NO	公	0.353±0.13^{a}	0.746±0.26^{A}	0.114±0.19^{a}
					母	0.312±0.18^{a}	0.234±0.05^{B}	0.210±0.19^{a}
	2-甲基二硫醚	12.188	1076	$C_2H_6S_2$	公	0.713±0.25^{a}	0.619±0.53^{a}	0.55±0.05^{a}
					母	0.495±0.13^{a}	0.658±0.28^{a}	0.486±0.19^{a}
	2-乙酰基噻唑	30.684	1636	C_5H_5NOS	公	2.912±3.34^{a}	3.512±2.03^{a}	2.105±2.87^{a}
					母	2.169±0.79^{a}	2.406±0.43^{a}	2.264±1.31^{a}
	3-(甲硫基)噻吩	30.792	1639	$C_5H_6S_2$	公	0.345±0.10^{a}	0.889±0.21^{A}	0.071±0.12^{a}
					母	0.360±0.16^{a}	0.323±0.03^{B}	0.169±0.18^{a}
	3-乙基吡啶	22.506	1377	C_7H_9N	公	1.011±0.32^{a}	0.998±0.90^{a}	0.623±0.10^{a}
					母	0.873±0.21^{a}	0.889±0.41^{a}	0.937±0.34^{a}
	2-乙基呋喃	8.88	957	C_6H_8O	公	0.925±0.13^{a}	0.886±0.23^{B}	0.981±0.20^{a}
					母	1.306±0.30^{a}	3.989±1.71^{A}	1.736±0.47^{a}
	甲苯	11.259	1045	C_7H_8	公	10.140±1.60^{a}	10.062±2.70^{a}	6.907±2.06^{a}
					母	7.178±0.83^{a}	8.793±2.43^{a}	6.810±1.91^{a}
	2-乙酰基-2-噻唑啉	33.86	1746	C_5H_7NOS	公	0.808±0.82^{a}	1.298±0.44^{a}	0.764±1.14^{a}
					母	1.008±0.16^{a}	0.922±0.21^{a}	0.865±0.66^{a}
	N,N-二丁基甲酰胺	34.196	1757	$C_9H_{19}NO$	公	0.346±0.31^{a}	0.464±0.41^{a}	0.375±0.22^{a}
					母	0.300±0.21^{a}	0.326±0.16^{a}	0.277±0.11^{a}
	二甲基三硫	22.599	1380	$C_2H_6S_3$	公	0.508±0.18^{a}	0.472±0.33^{a}	0.306±0.07^{a}
					母	0.394±0.16^{a}	0.373±0.13^{a}	0.351±0.06^{a}
	对二甲苯	14.221	1138	C_8H_{10}	公	1.452±0.96^{a}	1.316±0.33^{a}	3.040±3.54^{a}
					母	0.966±0.36^{a}	0.517±0.13^{a}	1.035±0.84^{a}
	二甲基砜	37.53	1878	$C_2H_6O_2S$	公	0.687±0.22^{a}	0.805±0.6^{a}	0.915±0.26^{a}
					母	0.608±0.06^{a}	0.962±0.59^{a}	1.186±0.71^{a}
	苯酚	40.078	1977	C_6H_6O	公	0.219±0.04^{a}	0.198±0.05^{a}	0.251±0.04^{a}
					母	0.166±0.04^{a}	0.170±0.01^{a}	0.238±0.05^{a}
	3-甲基吲哚	51.267	2459	C_9H_9N	公	0.105±0.03^{a}	0.131±0.03^{a}	0.119±0.05^{a}
					母	0.067±0.05^{a}	0.056±0.03^{a}	0.134±0.06^{a}
	2,3-二甲基吡嗪	20.723	1325	$C_6H_8N_2$	公	0.367±0.55^{a}	0.603±0.65^{a}	0.451±0.78^{a}
					母	0.353±0.04^{a}	0.415±0.16^{a}	0.310±0.35^{a}
	乙基苯	13.887	1129	C_8H_{10}	公	0.68±0.28^{a}	1.029±0.43^{a}	1.224±1.51^{a}
					母	0.453±0.15^{a}	0.351±0.11^{a}	0.697±0.14^{a}

续表 3

类别	中文名	保留时间(min)	保留指数	分子式	性别	部位		
						前腿	后腿	背最长肌
	2-甲基吡嗪	18.615	1265	$C_5H_6N_2$	公	0.208±0.22^a	0.242±0.13^a	0.209±0.26^a
					母	0.171±0.05^a	0.164±0.03^a	0.188±0.10^a
	5-甲基-异噻唑	19.055	1278	C_4H_5NS	公	0.097±0.07^a	0.191±0.11^a	0.066±0.10^a
					母	0.103±0.02^a	0.11±0.04^a	0.121±0.10^a
	二甲基亚砜	28.257	1555	C_2H_6OS	公	0.216±0.02^a	0.182±0.12^a	0.212±0.10^a
					母	0.093±0.02^a	0.108±0.06^a	0.18±0.14^a
	二乙二醇乙醚	29.593	1600	$C_6H_{14}O_3$	公	0.271±0.01^a	0.297±0.05^a	0.316±0.11^a
					母	0.202±0.04^a	0.209±0.02^a	0.242±0.06^a
	苯甲腈	29.627	1599	C_7H_5N	公	0.184±0.02^a	0.159±0.07^a	0.195±0.05^a
					母	0.132±0.03^a	0.139±0.03^a	0.188±0.01^a
	对甲酚	41.939	2052	C_7H_8O	公	0.156±0.04^a	0.204±0.06^a	0.138±0.04^a
					母	0.155±0.06^a	0.224±0.10^a	0.242±0.08^a
	2-正丁基呋喃	13.842	1127	$C_8H_{12}O$	公	0.063±0.02^a	0.049±0.04^a	0.053±0.04^a
					母	0.097±0.01^a	0.119±0.03^b	0.052±0.04^a
	2,4-二甲基噻唑	19.137	1281	C_5H_7NS	公	0.086±0.06^a	0.246±0.15^a	0.063±0.09^a
					母	0.086±0.02^a	0.09±0.04^a	0.136±0.10^a
	2,6-二叔丁基对甲酚	37.869	1893	$C_{15}H_{24}O$	公	0.059±0.02^a	0.125±0.02^A	0.033±0.01^a
					母	0.039±0.02^a	0.028±0.01^B	0.055±0.03^a
	总计				公	23.203±4.98^a	26.061±5.72^a	20.346±5.84^a
					母	18.306±2.57^a	22.797±4.94^a	19.368±5.54^a

生成。尽管这类化合物普遍具有较高的香气阈值[27]，但本研究发现乳酸乙酯在公羊前腿中的含量显著高于母羊(P<0.05)，提示特定酯类可能对性别特征风味具有指示作用。酮类物质则来源于多不饱和脂肪酸氧化和氨基酸降解[28−29]，虽然其整体风味贡献率较低，但值得注意的是，对甲基苯乙酮和苯乙酮在公羊样本中分别呈现显著(P<0.05)和极显著(P<0.01)的富集现象。醇类物质主要由肌肉中的亚油酸被脂肪氧合酶和氢过氧化物酶氧化降解产生，其阈值较高，对羊肉风味有积极作用[30]。本研究检测到 2-乙基呋喃在母羊后腿中的含量极显著高于公羊(P<0.01)，而正己酸则呈现相同的性别分布趋势(P<0.05)。这些差异可能与西藏黑山羊高原适应性遗传、特殊饲养环境以及雌性动物特有的脂质代谢途径共同作用的结果，有待进一步研究论证。特别需要指出的是，3-(甲硫基)噻吩在公羊(0.889%)后腿中的含量极显著高于母羊(0.323%)(P<0.01)，含硫化合物这类强挥发性物质对西藏黑山羊的特征风味形成具有重要影响；试验还检测出了黑山羊纯肉中本身存在的 2,6-二叔丁基对甲酚，这类挥发性物质通常由天然香辛料卤煮后所得，进一步证实了黑山羊肉风味的独特性。其中公羊后腿(0.125%)的含量极显著高于母羊后腿(0.028%)(P<0.01)，此差异揭示了代谢能力的性别二态性，为黑山羊精细化养殖和肉质改良提供了依据。

2.2.2 OPLS-DA 模型分析 由于羊肉中风味物质众多，而且不同月龄、品种、性别羊肉中风味物质成分的含量和比例存在很大的差异，因此无法通过简单的数据分析来获得有效的论证[31]。多元统计分析方法可以帮助研究变量之间的联结关系、预测变量间的变化、发现变量的隐藏结构等，其中 PCA 是常见的分析手段之一[32]。本研究针对西藏黑山羊不同部位肌肉，采用现代分析化学与多元统计方法相结合的研究策略，系统考察了其挥发性风味物质的组成特征及性别差异。在分析方法的选择上，本研究采用正交偏最小二乘判别分析(OPLS-DA)这一多变量统计方法。该方法通过将 GC-MS 获得的复杂数据进行归一化处理和降维转换，实现了高维数据的可视化呈现和判别预测[33]。在模型中，R^2x 和 R^2y 分别用于衡量模型对自变量 x 和因变量 y 矩阵的解释程度，而 Q^2 则用于表示模型的预测能力；R^2 和 Q^2 的值越接近于 1.0，意味着模型的拟合效果越出色[34]。由图 2 可知，西藏黑山羊不同部位的挥发性风味物质被清晰分离出来。其中，模型的 R^2x 为 0.644、R^2y 为 0.399，预测指数 Q^2 为 0.141；表明对西藏黑山羊不同部位样品的区分预测准确率为 14.1%，这可能由于黑山羊

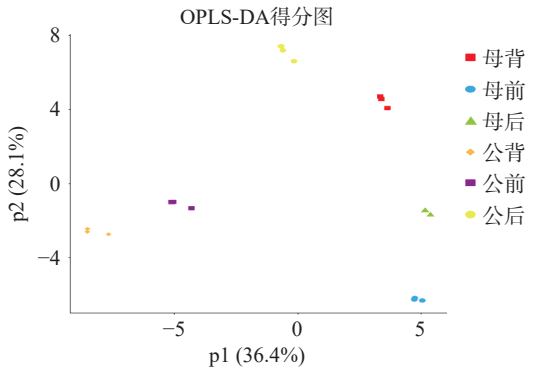


图 2 不同部位中挥发性风味物质的 OPLS-DA 结果

Fig.2 OPLS-DA results of volatile flavor substances in different parts

不同部位之间及性别之间均存在不同程度的差异性，这一结果充分说明了西藏黑山羊不同部位挥发性风味物质各组分性别之间存在差异。

为了评估所构建的 OPLS-DA 模型的可靠性和预测性能，对西藏黑山羊公羊和母羊各部位（前腿、后腿、背最长肌）的 VOC 进行了 200 次的响应置换检验。如图 3a 所示，置换检验的 R^2 为 0.673、Q^2 为 −0.702。Q^2 与 Y 轴的截距小于 0，这些数据表明，该模型没有出现过度拟合的情况，并且具备良好的稳定性和预测能力。通过变量重要性投影（VIP，variable importance in projection）分析，可以筛选出对西藏黑山羊不同部位风味物质区分具有显著贡献的组分。VIP 值>1 的风味物质组分意味着它们在样品组间区分上的贡献率较高[35]。如图 3b 所示，西藏黑山羊 VIP 值>1 的风味物质组分有 14 种，包括：正己醛、正庚醛、苯甲醛、3-羟基-2-丁酮、2-乙基呋喃、甲苯、乳酸乙酯、正壬醛、7-辛烯-4-醇、冰乙酸、对二甲苯、棕榈酸甲酯、2-乙酰基噻唑、2,3-辛二酮。以 VIP 值>1 作为筛选条件，识别出了黑山羊风味物质中含量显著的 14 种风味物质组分，其中醛类最为丰富（4 种），从而说明醛类是黑山羊肉独特风味的主要贡献者，其次是酯类（2 种）和酮类（2 种）。

2.2.3　挥发性成分含量热图聚类分析　热图聚类分析（Heatmap clustering analysis）是一种广泛应用于多维数据可视化分析的统计方法，其通过层次聚类算法将高维数据降维聚合，并利用渐变色阶直观展示数据间的相似性与差异性[36]。本研究基于西藏黑山羊公羊与母羊 3 个部位（前腿、后腿、背最长肌）的 75 种挥发性风味物质含量数据，进行了系统聚类热图分析。如图 4 所示，样品聚类结果呈现出清晰的区块化结构，数据被聚为若干组：公羊后腿样品自成一组，表现出独特的风味物质组成特征；公羊前腿与背最长肌样品聚为第二组；所有母羊样品（前腿、后腿及背最长肌）聚为第三组，显示母羊不同部位间风味物质组成具有较高相似性。该结果表明，西藏黑山羊风味物质组成及含量同时受部位和性别因素影响，此结论与主成分分析（PCA）结果相互印证。进一步结合两种分析方法发现，异戊醇、反-2-辛烯-1-醇、正辛醇及 3-甲基苯酚等关键风味物质对西藏黑山羊羊肉特征风味的形成具有决定性作用。

此外，羊肉膻味主要是因饲料中牧草衍生的 3-甲基吲哚和 4-甲基苯酚加剧引发支链脂肪酸结构变化，进而导致杂环类化合物的含量增加，但醛类、酮类和酯类等脂肪酸氧化产物同样也会对黑山羊肉风味产生负面影响[37−38]。本研究发现，西藏黑山羊肉中与膻味相关的挥发性风味物质种类少、含量低，这可能是其膻味较轻的重要原因[39−41]。通过主成分分析（PCA）和聚类热图分析表明，西藏黑山羊肉的特征风味物质主要包括正己醛、正庚醛、苯甲醛、3-羟基-2-丁酮、2-乙基呋喃、乳酸乙酯和正壬醛等，其中醛类和酯类物质对整体风味的贡献率最高（分别达到 42.3% 和 31.5%）。虽然公羊与母羊的风味轮廓较为相似，但在特征风味物质的组织分布和含量上存在显著差异（P<0.05）。具体而言：公羊的特征风味物质总含量较母羊高 28.7%，膻味相关物质分析显示，公羊肌肉中杂环类化合物相对含量（12.4%）显著高于母

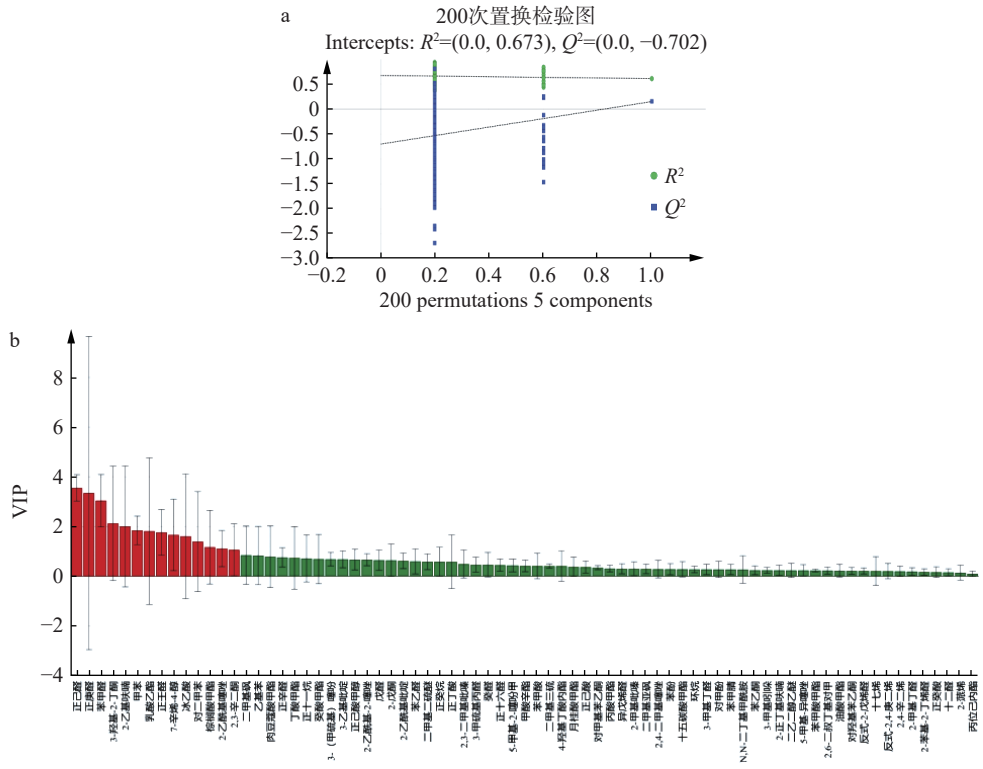


图 3　黑山羊样品 OPLS-DA 参数与 VIP 结果

Fig.3　OPLS-DA parameters and VIP results of black goat samples

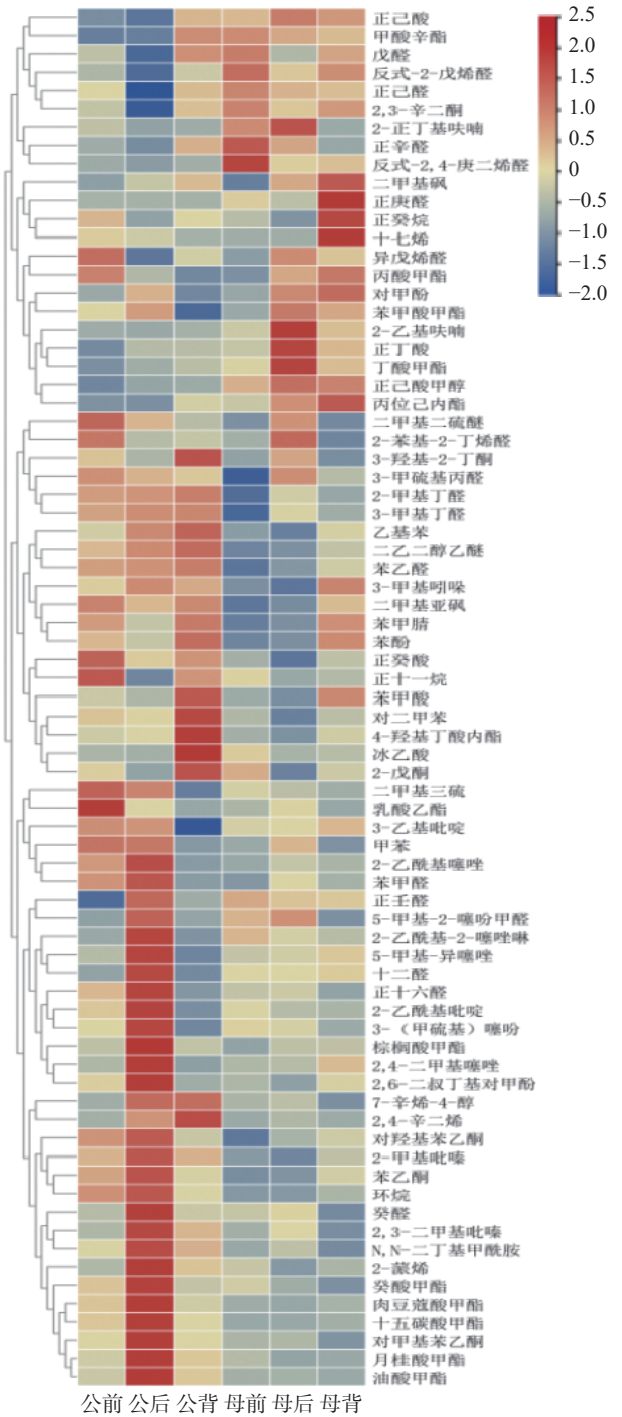


图 4 黑山羊不同部位肌肉中挥发性成分含量热图聚类分析

Fig.4 Heat map cluster analysis of volatile component content in different muscle parts of black goats

羊(8.7%)(P<0.05)。综合上述结果,西藏黑山羊公羊具有更为丰富的特征风味物质组成。

3 结论

本研究系统分析了西藏黑山羊不同部位肉的脂肪酸组成及挥发性风味物质特征,结果表明:部位共检出 19 种挥发性脂肪酸,包括饱和脂肪酸 12 种(占比 63.2%)、单不饱和脂肪酸 3 种(15.8%)和多不饱和脂肪酸 4 种(21.0%),其中公羊各部位饱和脂肪酸与不饱和脂肪酸含量均显著高于母羊(P<0.05),表明性别是影响脂肪酸组成的重要因素;采用 GC-MS 技术共鉴定出 75 种挥发性化合物,可归类为醛类(23.5%)、酯类(18.3%)、酮类(15.2%)等 8 大类,其中醛类、酯类和酮类化合物不仅种类丰富且相对含量较高,这可能是形成西藏黑山羊肉特征风味的关键组分;多元统计分析(PCA、聚类热图及 OPLS-DA)揭示正己醛、正庚醛、苯甲醛、3-羟基-2-丁酮等 14 种化合物为关键风味物质(VIP>1.0),其特殊的组成模式赋予了西藏黑山羊肉膻味轻、风味独特的品质特性;部位比较显示前腿肉和背最长肌具有最优的风味品质,而性别比较发现公羊由于脂肪酸、风味前体物质含量适中,在风味接受度及营养价值方面显著优于母羊(P<0.05)。本研究为西藏黑山羊的肉质评价及特色产品开发提供了理论依据。

© The Author(s) 2026. 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] 宋天增. 西藏边坝县藏东黑山羊育种工作存在的问题及对策[J]. 畜牧与饲料科学, 2018, 39(12): 109−112. [SONG T Z. Problems and countermeasures in breeding of Tibetan eastern black goats in Bian Ba County, Tibet[J]. Animal Husbandry and Feed Science, 2018, 39(12): 109−112.]

[2] 白如珍, 辜雪冬, 刘磊, 等. 西藏黑山羊屠宰性能及肉质特性的性别差异分析[J]. 食品工业科技, 2025, 46(19): 1−9. [BAI Ruzhen, GU Xuedong, LIU Lei, et al. Tibetan native goat slaughter performance and meat quality characteristics analysis of gender difference[J]. Food Industry Science and Technology, 2025, 46(19): 1−9.]

[3] 王德宝, 胡冠华, 苏日娜, 等. 发酵剂对羊肉香肠中蛋白、脂质代谢与风味物质的影响[J]. 农业机械学报, 2019, 50(3): 336−344. [WANG Debao, HU Guanhua, SU Rina, et al. The influence of fermentation agents on protein, lipid metabolism and flavor substances in mutton sausages[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3): 336−344.]

[4] 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. [FEI Yujie, XU Fangrui, LIAO Rui, et al. Research progress on characteristic volatile flavor substances of mutton and its products [J]. Food Research and Development, 2023, 44(24): 201−207.]

[5] 刘冀黔, 旦正杰, 韩丽娟, 等. 不同月龄黑藏羊肉品质及风味评价分析[J]. 饲料研究, 2024, 47(13): 105−111. [LIU Jiqian, DAN Zhengjie, HAN Lijuan, et al. Different months black hidden meat quality and flavor evaluation analysis[J]. Journal of Feed Research, 2024, 47(13): 105−111.]

[6] 管凇, 施力光, 林雨, 等. 海南黑山羊、努比亚山羊及其杂交羊 1 代的脂肪酸和挥发性风味物质鉴定和分析[J]. 中国饲料, 2025(3): 48−56. [GUAN Song, SHI Liguang, LIN Yu, et al. Identification and analysis of fatty acids and volatile flavor substances in the first generation of hainan black goats, nubian goats and their hybrids[J]. Feed in China, 2025(3): 48−56.]

[7] 王芳, 杨晓玲, 席斌, 等. 滩羊不同部位肌肉脂肪酸分析及特征风味指纹图谱的构建[J]. 食品科学, 2021, 42(24): 191−198. [WANG Fang, YANG Xiaoling, XI Bin, et al. Analysis of fatty acids in different muscle parts of tan sheep and construction of char-

acteristic flavor fingerprint spectra[J]. Food Science, 2021, 42(24): 191−198.]
[8] 李文博, 罗玉龙, 刘畅, 等. 饲养方式对苏尼特羊肉挥发性风味成分和脂肪酸组成的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(24): 207−213. [LI Wenbo, LUO Yulong, LIU Chang, et al. The influence of feeding methods on the volatile flavor components and fatty acid composition of sunite mutton[J]. Food Science, 2019, 40(24): 207−213.]
[9] 阿旺措吉, 仁青措姆, 黄舒泓, 等. 基于重测序数据的昌都黑山羊遗传多样性及群体结构分析[J]. 家畜生态学报, 2022, 43(10): 30−35. [AWANG Chogyi, RENQING Chomu, HUANG Shuhong, et al. Genetic diversity and population structure analysis of Changdu black mountain sheep based on re-sequencing data[J]. Journal of Livestock Ecology, 2022, 43(10): 30−35.]
[10] 王翻兄, 徐英, 沙玉柱, 等. 不同年龄藏绵羊肌肉脂肪酸特征分析[J]. 中国农业科技导报, 2024, 26(8): 74-83. [WANG Fanxiang, XU Ying, SHA Yuzhu, et al. Analysis of muscle fatty acid characteristics in Tibetan sheep of different ages[J]. China Agricultural Science and Technology News, 2024, 26(8): 74-83.]
[11] 农业部动物检疫所, 甘肃农业大学. NY 467-2001, 畜禽屠宰卫生检疫规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2001. [Institute of Animal Quarantine, Ministry of Agriculture, Gansu Agricultural University. NY 467-2001, Code for Hygienic quarantine of livestock and poultry slaughtering[S]. Beijing: Standards Press of China, 2001.]
[12] 刘志红, 谢遇春, 奈日乐, 等. 内蒙古白绒山羊不同部位肌肉脂肪酸的研究[J]. 中国畜牧杂志, 2020, 56(5): 88−91. [LIU Zhihong, XIE Yuchun, NAI Rile, et al. Research on fatty acids in different muscle parts of Inner Mongolia white-wool goats[J]. Chinese Journal of Animal Husbandry, 2020, 56(5): 88−91.]
[13] 汪修意, 徐文泱, 陈同强, 等. 气相色谱-质谱联用与相对气味活度值法分析坛子肉风味物质的研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(24): 8450-8455. [WANG Xiuyi, XU Wenyang, CHEN Tongqiang, et al. Research on the analysis of flavor substances in jar meat by gas chromatography-mass spectrometry and relative odor activity value method[J]. Journal of Food Safety and Quality Testing, 2019, 10(24): 8450-8455.]
[14] JIN Danyao, TRICHIA E, ISLAM N, et al. Associations of circulating fatty acids with incident coronary heart disease: A prospective study of 89, 242 individuals in UK Biobank[J]. BMC Cardiovascular Disorders, 2023, 23(1): 365.
[15] HENRY G E, MOMIN R A, NAIR M G, et al. Antioxidant and cyclooxygenase activities of fatty acids found in food[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2002, 50(8): 2231−2234.
[16] YANG Xuelian, ZHANG Xiangyu, XIE Jianchun, et al. Correlation between the characteristic flavour of youtiao and trans fatty acids assessed via gas chromatography mass spectrometry and partial least squares regression analyses[J]. Journal of Food Quality, 2020, 2020: 8845401.
[17] 王柏辉, 杨蕾, 罗玉龙, 等. 饲养方式对苏尼特羊肠道菌群与脂肪酸代谢的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(17): 1−7. [WANG Baihui, YANG Lei, LUO Yulong, et al. The influence of feeding methods on the intestinal flora and fatty acid metabolism of Sunite sheep[J]. Food Science, 2018, 39(17): 1−7.]
[18] 罗玉龙, 王柏辉, 赵丽华, 等. 苏尼特羊和小尾寒羊的屠宰性能、肉品质、脂肪酸和挥发性风味物质比较[J]. 食品科学, 2018, 39(8): 103−107. [LUO Yulong, WANG Baihui, ZHAO Lihua, et al. Comparison of slaughter performance, meat quality, fatty acids and volatile flavor substances between Sunite sheep and small-tailed han sheep[J]. Food Science, 2018, 39(8): 103−107.]
[19] FRUET A P B, TROMBETTA F, STEFANELLO F S, et al. Effects of feeding legume-grass pasture and different concentrate levels on fatty acid profile, volatile compounds, and off-flavor of the M. longissimus thoracis[J]. Meat Science, 2018, 140: 112−118.
[20] ELAGIZI A, LAVIE C J, O'KEEFE E, et al. An update on omega-3 polyunsaturated fatty acids and cardiovascular health[J]. Nutrients, 2021, 13(1): 204.
[21] DJURICIC I, CALDER P C. Beneficial outcomes of omega-6 and omega-3 polyunsaturated fatty acids on human health: An update for 2021[J]. Nutrients, 2021, 13(7): 2421.
[22] 孔园园, 张雪莹, 李发弟, 等. 羊肉主要风味前体物质与羊肉风味的关系及影响因素的研究进展[J]. 农业生物技术学报, 2021, 29(8): 1612−1621. [KONG Yuanyuan, ZHANG Xueying, LI Fadi, et al. Research progress on the relationship between main flavor precursor substances of mutton and mutton flavor and its influencing factors[J]. Journal of Agricultural Biotechnology, 2021, 29(8): 1612−1621.]
[23] 王伦兴, 张洪礼, 陈德琴, 等. 黔北麻羊不同部位肌肉挥发性风味物质分析[J]. 肉类研究, 2021, 35(1): 47−52. [WANG L X, ZHANG H L, CHEN D Q, et al. Volatile flavor compounds inmuscles from different carcass cuts of Qianbei Ma Goat[J]. Meat Research, 2021, 35(1): 47−52.]
[24] 袁倩. 饲养方式对苏尼特羊 AMPK 途径脂肪代谢和肉品质的影响及机理研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018. [YUAN Qian. Research on the influence and mechanism of feeding methods on ampk pathway fat metabolism and meat quality in Sunite sheep[D] Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2018.]
[25] LU Zengkui, LI Jianye, YUAN Chao, et al. Evaluation of mutton quality characteristics of Dongxiang tribute sheep based on membership function and gas chromatography and ion mobility spectrometry[J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 852399.
[26] LI Jing, TANG Chaohua, YANG Youyou, et al. Characterization of meat quality traits, fatty acids and volatile compounds in Hu and Tan sheep[J]. Frontiers in Nutrition, 2023, 10: 1072159.
[27] 李鹏超, 顾学艳. 共轭亚油酸对脂质代谢和身体成分组成影响的研究进展[J]. 食品科学, 2022, 43(7): 373−380. [LI Pengchao, GU Xueyan. Research progress on the effects of conjugated linoleic acid on lipid metabolism and body composition composition[J]. Food Science, 2022, 43(7): 373−380.]
[28] GARCÍA-BÉJAR B, SÁNCHEZ-CARABIAS D, ALARCON M, et al. Autochthonous yeast from pork and game meat fermented sausages for application in meat protection and aroma developing[J]. Animals, 2020, 10(12): 2340.
[29] WANG Fang, GAO Yaqin, WANG Hongbo, et al. Analysis of volatile compounds and flavor fingerprint in Jingyuan lamb of different ages using gas chromatography–ion mobility spectrometry (GC–IMS)[J]. Meat Science, 2021, 175: 108449.
[30] 窦露, 罗玉龙, 孙雪峰, 等. 苏尼特羊、巴美肉羊和乌拉特山羊的肉品质和挥发性风味物质比较[J]. 食品工业科技, 2020, 41(15): 8−14. [DOU Lu, LUO Yulong, SUN Xuefeng, et al. Comparison of meat quality and volatile flavor substances of Sunite sheep, Baimei meat sheep and Ulaat mountain sheep[J]. Food Industry Science and Technology, 2020, 41(15): 8−14.]
[31] 陈佳欣, 张英杰. 羊肉风味的形成及影响因素研究[J]. 饲料工业, 2020, 41(23): 22−26. [CHEN J X, ZHANG Y J. Research on the formation and influencing factors of lamb flavor[J]. Feed Industry, 2020, 41(23): 22−26.]

［32］ 席嘉佩, 詹萍, 田洪磊, 等. 基于 SPME-GC-MS 和 PCA 的不同萃取头对新疆烤羊肉香气成分萃取效果比较[J]. 食品科学, 2018, 39(10): 234−241. ［XI Jiapei, ZHAN Ping, TIAN Honglei, et al. Comparison of the extraction effects of different extraction heads based on SPME-GC-MS and PCA on the aroma components of Xinjiang Grilled Mutton[J]. Food Science, 2018, 39(10): 234−241.］

［33］ TU Xinghao, LIU Yijun, YAO Yanli, et al. Effects of four drying methods on *Amomum villosum* Lour. ‘Guiyan1’ volatile organic compounds analyzed via headspace solid phase microextraction and gas chromatography-mass spectrometry coupled with OPLS-DA[J]. RSC Advances, 2022, 12(41): 26485−26496.

［34］ KREISSL J, SCHIEBERLE P. Characterization of aroma-active compounds in Italian tomatoes with emphasis on new odorants [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2017, 65(25): 5198−5208.

［35］ 张蕾蕾, 吴剑荣, 张洪涛, 等. 基于 GC-MS 结合化学计量学方法鉴定四川郫县豆瓣酱[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(13): 268−276. ［ZHANG L L, WU J R, ZHANG H T, et al. Identification of Sichuan Pixian bean paste based on GC-MS combined with chemometrics[J]. Food and Fermentation Industry, 2022, 48(13): 268−276.］

［36］ 岳丽, 庄红梅, 祖力皮牙·买买提, 等. 基于主成分分析与聚类分析的芜菁肉质根质地品质综合评价[J]. 浙江农业学报, 2025, 37(5): 1057−1071. ［YUE Li, ZHUANG Hongmei, ZULIPIYA Mamaiti, et al. Comprehensive evaluation of texture and quality of fleshy roots of turnip based on principal component analysis and cluster analysis[J]. Journal of Zhejiang Agricultural, 2025, 37(5): 1057−1071.］

［37］ SCHUMACHER M, DELCURTO-WYFFELS H, THOMSON J, et al. Fat deposition and fat effects on meat quality: A review[J]. Animals, 2022, 12(12): 1550.

［38］ 刘旺景, 敖长金. 羊膻味物质的合成机理及影响因素研究进展[J]. 动物营养学报, 2019, 31(12): 5412−5421. ［LIU Wangjing, AO Changjin. Research progress on the synthesis mechanism and influencing factors of sheep's muttony odor substances[J]. Journal of Animal Nutrition, 2019, 31(12): 5412−5421.］

［39］ 郭俊强, 徐晓锋, 谢忠奎, 等. 脂肪酸对羊肉品质的影响研究进展[J]. 中国饲料, 2019(23): 69−75. ［GUO J Q, XU X F, XIE Z K, et al. Research progress on the effects of fatty acids on mutton-quality[J]. China Feed, 2019(23): 69−75.］

［40］ 杨蕾, 王柏辉, 罗玉龙, 等. 饲养方式对苏尼特羊脂肪组织中脂肪代谢相关基因表达量的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(19): 13−18. ［YANG Lei, WANG Baihui, LUO Yulong, et al. The influence of feeding methods on the expression levels of fat metabolism-related genes in adipose tissue of Sunite sheep[J]. Food Science, 2018, 39(19): 13−18.］

［41］ YANG Yang, SUN Yangying, PAN Daodong, et al. Effects of high pressure treatment on lipolysis-oxidation and volatiles of marinated pork meat in soy sauce[J]. Meat Science, 2018, 145: 186−194.