# 不同地区放牧藏羊腿肉氨基酸、脂肪酸及挥发性物质的比较分析

贾玉姣，韩丽娟*，张玥，侯生珍，院珍珍，桂林生，孙胜男，杨超

（青海大学农牧学院，青海西宁 810016）

**摘要：**为明确在不同地区放牧对藏羊腿肉中氨基酸、脂肪酸及风味的影响，实验以藏羊为研究对象，将 60 只藏羊分为两组，分别放牧在盐碱地区和非盐碱地区的天然牧场，150 d 后，分别采集两组藏羊的臂三头肌和股二头肌，测定氨基酸、脂肪酸以及挥发性风味物质。结果显示，盐碱地藏羊前腿肉中的总氨基酸含量更高，为 48 905.77 μmol·kg$^{-1}$，而后腿肉中的总氨基酸含量更低，为 29 677.35 μmol·kg$^{-1}$；与非盐碱地的藏羊腿肉相比，盐碱地的藏羊腿肉中的 N3 多不饱和脂肪酸较高而饱和脂肪酸较低；气相色谱-离子迁移谱结果表明，两组藏羊腿肉中共检测出 41 种挥发性成分，大部分挥发性物质在非盐碱地藏羊腿肉中含量更高；确定了庚醛单体等 9 种挥发性物质是两组藏羊前腿肉中的关键风味物质，3-甲基丁醇等 11 种挥发性物质是两组藏羊后腿肉中的关键风味物质；通过 Pearson 相关性发现，庚醛、己醛、1-戊醇与油酸呈正相关，2-甲基丁醛与异亮氨酸呈正相关。该研究揭示了不同地区藏羊腿肉间的差异，为盐碱地畜牧业的发展提供理论参考。

**关键词：**盐碱地；藏羊；氨基酸；脂肪酸；挥发性物质

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.8.0698

# Comparative Analysis of Amino Acids, Fatty Acids, and Volatile Compounds in Tibetan Sheep Leg Meat from Different Grazing Regions

**JIA Yujiao, HAN Lijuan*, ZHANG Yue, HOU Shengzhen, YUAN Zhenzhen, GUI Linsheng, SUN Shengnan, YANG Chao**

(College of Agriculture and Animal Husbandry, Qinghai University, Xining 810016, China)

**Abstract:** To clarify the effects of grazing in different regions on the amino acids, fatty acids, and flavor of Tibetan sheep leg meat, an experiment was conducted using Tibetan sheep as the research subjects. Sixty Tibetan sheep were divided into two groups, which were grazed on natural pastures in either saline-alkali or non-saline-alkali regions. After 150 d, the triceps brachii and biceps femoris muscles were collected from both groups. The amino acids, fatty acids, and volatile flavor compounds were then measured. The results showed that a higher total amino acid content was observed in the foreleg meat of Tibetan sheep grazed in saline-alkali areas (48 905.77 μmol·kg$^{-1}$), while a lower content was detected in the hindleg meat (29 677.35 μmol·kg$^{-1}$). Compared with the leg meat of Tibetan sheep from non-saline-alkali regions, higher levels of N3 polyunsaturated fatty acids and lower levels of saturated fatty acids were found in the leg meat of sheep from saline-alkali areas. The results of gas chromatography-ion mobility spectrometry indicated that a total of 41 volatile compounds were detected in the leg muscles of the two groups of Tibetan sheep, with most volatile substances being present in higher amounts in the leg muscles of Tibetan sheep from non-saline-alkali areas. Heptanal and nine other volatile compounds were identified as key flavor compounds in the foreleg muscles of both groups of Tibetan sheep, while 3-methylbutanol and 11 other volatile compounds were identified as key flavor compounds in the hindleg muscles of both groups of Tibetan sheep. The Pearson correlation analysis revealed that positive correlations were observed between heptanal, hexanal, 1-pentanol and oleic acid, as well as between 2-methylbutanal and isoleucine. This study has demonstrated the differences in leg meat quality of Tibetan sheep from different regions, providing theoretical references for the development of animal husbandry in saline-alkali areas.

**Key words:** saline alkali land; tibetan sheep; amino acids; fatty acids; volatile flavor compounds

收稿日期：2025-05-19；修回日期：2025-07-23；接受日期：2025-07-28

基金项目：青海省科技厅重大研发科技专项（2022-NK-169）

作者简介：贾玉姣（2002-），女，硕士研究生，研究方向：畜产品加工，E-mail：3158098259@qq.com

通讯作者：韩丽娟（1988-），女，博士，副教授，研究方向：畜产品加工，E-mail：hlj880105@163.com

藏羊，学名藏系羊，是我国三大原始绵羊品种之一[1]。藏羊是我国青藏地区特有的地方品种[2]，其营养丰富，蛋白质、氨基酸以及脂肪酸含量高，而且肉质鲜嫩，膻味轻[3]，广受消费者的关注和喜爱。许多研究表明，藏羊肉的品质因生长地区的影响而存在差异，例如，中拉毛草等[4]将甘南藏羊和海北藏羊肉进行比较，发现甘南藏羊肉蛋白质含量更高，而且加工特性和风味更佳。同时，窦玉琴等[5]以祁连、同仁和大通这三个地区的藏羊肉为研究对象，探究其品质差异，结果发现大通的藏羊肉蛋白质和脂肪含量更高，蒸煮损失更低，而且色泽和质构特性也更好。此外，Ma 等[6]发现盐碱地区的藏羊肉品质更好，相较于生长在非盐碱地区的藏羊，盐碱地的藏羊体内 pH 值下降更加缓慢，解冻损失更少，同时肌肉中不饱和脂肪酸的含量更高。因此，不同的地区由于饲养环境、饮食等方面的差异将影响到藏羊肉的品质。

对于消费者而言，风味是评判羊肉品质和购买意愿的主导因素[7]，然而影响羊肉风味的因素是多样的，如饮食、年龄、性别、品种、加工方式等[8-12]。风味包括香味和滋味，滋味通过肉品中的非挥发性呈味物质表现出来，而香味是由风味前体物质通过脂质氧化、硫胺素降解、美拉德反应等化学反应产生的[13,14]。氨基酸作为风味前体通过 strecker 降解和美拉德反应对肉品风味的形成做出贡献[15]，同时氨基酸本身具有不同的风味特性，如鲜味、甜味、苦味等[16]。Su 等[17]发现藏羊肌肉中更高含量的天冬氨酸、赖氨酸、亮氨酸、异亮氨酸等风味氨基酸能为肉类带来更好的风味。Wang 等[18]表明鲜味氨基酸、甜味氨基酸等游离氨基酸的含量对羊肉的质量和风味具有重要意义。另外，脂肪酸作为挥发性风味物质的关键直接前体物质，是影响肉品风味的重要因素[19]。张利平等[20]研究发现肉羊中的脂肪酸与羊肉的风味相关，尤其是与膻味的形成有重要关联。王莉等[19]指出不饱和脂肪酸的氧化反应是牦牛肉中挥发性风味物质形成的有效途径，具体来看，不饱和脂肪酸由于氧化产生的氢过氧化物，在氢裂解酶的作用下碳碳双键被打断，从而产生醛类、酮类、醇类等呈香物质。此外，王芳等[21]的研究表明游离脂肪酸的降解产物是构成滩羊肉风味的主要化合物。然而目前，对于不同地区藏羊腿肉中氨基酸、脂肪酸与挥发性风味物质的对比研究鲜有报道，因此本研究以藏羊为研究对象，探究分别在盐碱地区和非盐碱地区放牧对藏羊腿肉中氨基酸、脂肪酸以及挥发性风味物质的影响，为盐碱地藏羊肉风味的研究提供理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验原料

试验地点位于青海省海南藏族自治州共和县（36°28'2" N，99°16'26" E，海拔：3 168.1 m）和青海省海北藏族自治州海晏县（36°59'36" N，100°55'53" E，海拔：3 111.0 m）。选择体况相似，2 月龄公藏羊 60 只，随机分为 2 组。在历经驱虫防疫以及 14 d 适应期后，一组藏羊于青海省共和县放牧，试验期间，藏羊于每天 8:00~18:00 自由采食当地的天然盐生牧草，为盐碱地区组（GC），饲草主要包括碱茅（*Puccinellia distans* (L.) Parl.）、刺砂蓬（*Salsola ruthenica* Iljin）、白刺（*Nitraria tangutorum* Bobr.）、驼绒藜（*Ceratoides lateens*）、芨芨草（*Achnatherum sPlendens*）等。另一组藏羊于青海省海晏县放牧，自由采食当地的天然牧草，为非盐碱地区组（HC），饲草主要包括龙胆（*Gentiana*）、西北针茅（*StiPa sarePtana var.krylovii*）、赖草（*Leymus secalinus*）、垂穗披碱草（*Elymus nutans*）、早熟禾（*Poa*）等。两组藏羊的饲养管理方式和放牧时间均相同，试验期间不进行补饲，只提供充足饮水，试验期共 150 d。

甲醇，美国 Fisher Chemical 公司；乙腈，美国 Fisher Chemical 公司；甲酸，美国 Honeywell 公司；甲酸铵，德国 Sigma 公司；二氯甲烷，德国 Sigma 公司；正十九酸甲酯，美国 NU-CHEK 公司；正己烷，德国 Sigma 公司。

### 1.2 仪器与设备

QT-1 涡旋仪，上海琪特分析仪器有限公司；JP-100 超声仪，深圳市洁盟清洗设备有限公司；5430R 离心机，德国 Eppendorf 公司；1290 Infinity 超高效液相色谱仪，美国 Agilent 公司；7890B-5977B 气相色谱-质谱联用仪，美国 Agilent 公司；FlavourSPec®气相离子迁移谱，德国 G.A.S.公司。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 样品采集

试验结束后，分别从两组藏羊中随机挑选出 6 只，运送至附近的商业屠宰场，于同一天同一屠宰场中，根据

动物福利程序禁食 24 h，禁水 2 h 后屠宰所有试验动物。分别采集藏羊的臂三头肌（Q）和股二头肌（H），得到盐碱地藏羊前腿肉样品（GCQ）、盐碱地藏羊后腿肉样品（GCH）、非盐碱地藏羊前腿肉样品（QHC）以及非盐碱地藏羊后腿肉样品（HHC），所有样品储存在实验室-80 ℃冰箱中，以待进一步分析。

#### 1.3.2 游离氨基酸测定

游离氨基酸含量的测定参考 Liu 等[22]的方法并稍作修改。准确称取 60 mg 样品加 50 μL 水，涡旋 60 s 后加入 400 μL 甲醇乙腈溶液（1:1），再加 50 μL 同位素内标混合溶液，涡旋 60 s 后进行两次低温超声，每次 30 min，再将样品在-20 ℃放置 1 h 以沉淀蛋白，然后 4 ℃，14 000 *g* 离心 20 min，取上清液加入进样瓶，采用 1290 Infinity UHPLC 和 6500/5500 QTRAP 质谱仪检测藏羊腿肉样品中的氨基酸。色谱条件：色谱柱为 ACQUITY UPLC BEH Amide（1.7 μm，2.1 mm×150 mm column），自动进样器温度为 4 ℃，柱温 35 ℃，流动相 A:25 mM 的甲酸铵 0.1%甲酸水溶液，流动相 B:0.1%甲酸乙腈溶液，流量 300 μL·min$^{-1}$，进样量 2 μL。液相梯度：0~1 min:B 相为 85%；1~11 min:B 相从 85%线性变化至 50%；11.1~12 min: B 相维持在 40%；12~12.1:B 相从 40%变化至 75%；12.1~19 min:B 相维持在 75%。质谱条件：正离子模式下分析，ESI 源，MRM 扫描模式。采用 Multiquant 3.0.2 软件提取色谱峰面积和保留时间，并用标准品校正保留时间，进行定性定量分析。

#### 1.3.3 脂肪酸测定

脂肪酸含量的测定参考 Liu 等[22]的方法并稍作修改。称取适量样品加入 5 mL 二氯甲烷-甲醇溶液（2:1），涡旋混匀，加入 2 mL 纯水洗涤，取下层溶液氮气吹干，再加入 2 mL 正己烷，加入内标：正十九酸甲酯（≥98% GC），甲酯化 30 min。然后再加入 2 mL 纯水，取 2 000 μL 上清液氮气吹干，再加入正己烷复溶。取上清液加入进样瓶，采用 7890B 型气相色谱仪（美国，Agilent）和 5977B 型质谱仪（美国，Agilent）检测藏羊腿肉样品中的脂肪酸。色谱条件：色谱柱为毛细管柱 19091S—433UI:HP-5ms（30 m×250 μm×0.25 μm），进样量 1 μL，分流比 10:1，分流进样。程序升温：初始温度 80 ℃，以 20 ℃·min$^{-1}$ 升温至 180 ℃并维持 8 min；再以 5 ℃·min$^{-1}$ 升温至 280 ℃并维持 3 min。载气为氦气，载气流速 1.0 mL·min$^{-1}$。质谱条件：进样口温度 280 ℃；离子源温度 230 ℃；传输线温度 250 ℃。EI 源，SIM 扫描模式，电子能量 70 eV。采用 MSD ChemStation 软件提取色谱峰面积和保留时间，并用标准品校正保留时间，进行定性定量分析。

#### 1.3.4 挥发性风味物质测定

采用 FlavourSPec® 气相离子迁移谱检测藏羊腿肉样品中的挥发性风味物质。准确称取 5.0 g 样品于 20 mL 顶空瓶中，顶空进样条件：60 ℃孵化 15 min，进样针（PAL RSI 专用，1 mL 气密针）温度为 85 ℃，进样体积 500 μL，不分流进样；气相色谱条件：色谱柱为 MXT-5 毛细管色谱柱（1.0 μm，15 m×0.53 mm），色谱柱温 60 ℃；漂移载气为高纯氮气（≥99.999%）；分析时间 20 min；进样口温度 80 ℃；程序升压：初始漂移气流量 2 mL·min$^{-1}$，保持 2 min 后在 8 min 内线性增至 10 mL·min$^{-1}$，紧接着在 10 min 内线性增至 100 mL·min$^{-1}$。

### 1.4 统计分析

采用 IBM SPSS Statistic 26.0 统计软件对氨基酸、脂肪酸和挥发性风味物质数据进行独立样本 T 检验，结果以平均数±标准差表示，$P$<0.05 表示数据差异显著。使用 VOCal 软件内置的 NIST 和 IMS 数据库进行物质定性分析，同时，使用 RePorter 插件创建挥发性成分的差异谱图，Gallery Plot 插件生成指纹图谱。采用 SCIMA14.1 软件建立 OPLS-DA 模型。此外，使用 OmicStudio 工具（https://www.omicstudio.cn/tool）对氨基酸、脂肪酸和挥发性风味物质进行 Pearson 相关性分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同地区藏羊腿肉氨基酸组成对比分析

不同地区藏羊腿肉中氨基酸组成及含量分析见表 1。两组藏羊前腿肉中共检测出 28 种氨基酸，具有显著性差异的氨基酸有 17 种，其中，在盐碱地藏羊前腿肉（GCQ）中，精氨酸、天冬氨酸等氨基酸的含量显著高于（$P$<0.05）非盐碱地藏羊前腿肉（QHC），而氨基己二酸、半胱氨酸等氨基酸的含量则显著低于 QHC 组（$P$<0.05）。另外，甜味氨基酸（SAAs）、鲜味氨基酸（UAAs）、非必需氨基酸（NEAAs）和总氨基酸（TAAs）含量在 GCQ 中显著更高（$P$<0.05），其中 SAAs 和 UAAs 含量占 TAAs 含量的比例分别为 15.82%和 4.74%，低于甘南藏羊肉中 SAAs

（22.72%）和 UAAs（16.60%）的占比[23]。同时苦味氨基酸（BAAs）和必需氨基酸（EAAs）含量也在 GCQ 中更高（$P$>0.05）。两组藏羊后腿肉中有 19 种氨基酸存在显著性差异。在盐碱地藏羊后腿肉（GCH）中，瓜氨酸、异亮氨酸等氨基酸的含量显著高于（$P$<0.05）非盐碱地藏羊后腿肉（HHC），而谷氨酸、甘氨酸等氨基酸的含量则显著低于 HHC 组（$P$<0.05）。总体来看，UAAs、NEAAs 和 TAAs 含量在 HHC 组中显著更高（$P$<0.05），同时 SAAs 和 EAAs 含量也在 HHC 组中更高（$P$>0.05），而 BAAs 含量在 GCH 组中更高（$P$>0.05）。

在不同地区放牧的藏羊之间，可以观察到氨基酸的含量存在较大差异，盐碱地藏羊前腿肉中的的氨基酸（SAAs、UAAs、NEAAs 和 TAAs）含量更高（$P$<0.05），然而后腿肉中的氨基酸（UAAs、NEAAs 和 TAAs）含量更低（$P$<0.05）。饲料是影响动物体内氨基酸含量的重要因素[24]，Nguyen 等[25]指出与普通植物相比，耐盐碱植物体内会积累特定的氨基酸以应对盐碱胁迫，因此饮食差异可能是造成两组藏羊腿肉中氨基酸沉积存在差异的主要原因，然而两组藏羊前后腿中氨基酸的分布也存在差异，推测可能是由前后腿的肌肉纤维类型和代谢方式不同造成[26]。SAAs、UAAs 和 BAAs 作为呈味物质，能够影响羊肉的风味特征[11]，Zhang 等[9]也发现高水平的甘氨酸和丝氨酸赋予藏羊肉甜味，谷氨酸合成的增加使羊肉的鲜味得到提升。另外，氨基化合物（如氨基酸和肽）与还原糖（如葡萄糖）发生美拉德反应，从而主要产生挥发性含硫化合物（硫醇、硫化物、噻吩、噻唑类和噻唑啉等）、含氮化合物（吡嗪、吡啶、吡咯、吲哚）和含氧化合物（醇、酮、呋喃、醛、酸和酯），对羊肉的风味产生影响[27]，例如亮氨酸经脱氨-脱羧反应产生 3-甲基丁醛[28]，甲硫氨酸和半胱氨酸通过美拉德反应形成含硫挥发性化合物[29]。

表 1 不同地区藏羊腿肉氨基酸组成对比分析

**Table 1 Comparative analysis of amino acid composition in the leg meat of Tibetan sheep from different regions (μmol·kg$^{-1}$)**

| 项目 | Q | | $P$ 值 | H | | $P$ 值 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | GC | HC | | GC | HC | |
| 丙氨酸 Ala | 4 090.62±99.79 | 4 354.96±224.31 | 0.17 | 4 769.67±135.26 | 4 630.81±64.43 | 0.21 |
| 氨基己二酸 ADD | 153.92±5.96 | 465.52±29.49** | 0.00 | 78.61±0.47 | 145.86±3.26** | 0.00 |
| 精氨酸 Arg | 1 624.52±66.80** | 1 268.65±2.76 | 0.01 | 1 384.49±12.41 | 1 456.66±10.98** | 0.00 |
| 天冬酰胺 Asn | 334.65±37.97 | 324.81±39.40 | 0.77 | 205.02±3.22 | 203.02±10.00 | 0.77 |
| 天冬氨酸 Asp | 1 228.40±178.17* | 595.46±3.43 | 0.03 | 427.56±4.78 | 621.12±33.97** | 0.01 |
| 胆碱 Cho | 26 441.62±47.42* | 17 837.10±1043.67 | 0.01 | 10 689.22±369.43 | 17 596.18±282.24** | 0.00 |
| 瓜氨酸 Cit | 129.88±7.37** | 69.38±5.43 | 0.00 | 280.44±55.99* | 66.40±3.00 | 0.02 |
| 半胱氨酸 Cys | 0.37±0.16 | 1.84±0.29** | 0.00 | 0.70±0.51 | 1.02±0.04 | 0.39 |
| 谷氨酸 Glu | 1 088.35±26.06 | 1 149.08±28.54* | 0.05 | 376.60±30.25 | 571.33±57.81** | 0.01 |
| 谷氨酰胺 Gln | 344.62±89.59 | 332.36±15.83 | 0.84 | 271.01±5.23 | 238.04±24.14 | 0.14 |
| 甘氨酸 Gly | 1 764.81±113.51** | 788.15±138.84 | 0.00 | 1 167.47±83.82 | 1 409.07±39.55* | 0.02 |
| 组氨酸 His | 688.22±43.98 | 810.32±0.05* | 0.04 | 1 036.59±89.97 | 921.76±75.78 | 0.17 |
| 羟脯氨酸 Hyp | 65.21±0.20 | 55.41±6.76 | 0.13 | 54.37±0.38** | 37.22±1.14 | 0.00 |
| 异亮氨酸 Ile | 127.58±5.30 | 136.04±4.65 | 0.11 | 136.77±5.62** | 98.55±5.51 | 0.00 |
| 亮氨酸 Leu | 461.72±1.55 | 472.31±8.09 | 0.15 | 435.16±12.33 | 401.61±24.83 | 0.13 |
| 赖氨酸 Lys | 686.83±78.42* | 440.15±34.27 | 0.02 | 283.00±37.66 | 413.13±28.55** | 0.01 |
| 甲硫氨酸 Met | 55.76±1.04 | 47.77±3.77 | 0.06 | 55.36±0.31* | 41.72±3.71 | 0.02 |
| 鸟氨酸 Orn | 174.42±18.94 | 1 478.38±318.66** | 0.02 | 96.48±4.07 | 456.81±17.45** | 0.00 |
| 苯丙氨酸 Phe | 113.51±6.22 | 122.04±17.82 | 0.50 | 118.42±2.43** | 85.22±7.16 | 0.01 |
| 脯氨酸 Pro | 79.65±1.70 | 97.93±3.67** | 0.01 | 65.37±0.73 | 79.15±0.89** | 0.00 |
| 丝氨酸 Ser | 664.67±123.18 | 452.79±20.25 | 0.09 | 407.09±46.22 | 425.26±22.29 | 0.59 |
| 氨基乙磺酸 Tau | 3 746.89±304.20 | 4 571.37±80.29* | 0.04 | 2 168.69±164.35 | 4 382.10±122.91** | 0.00 |
| 苏氨酸 Thr | 450.13±1.21 | 490.28±60.17 | 0.37 | 354.47±16.49 | 412.64±15.09** | 0.01 |
| 色氨酸 Trp | 170.68±21.09 | 134.69±2.82 | 0.10 | 184.68±3.55 | 184.53±5.78 | 0.97 |
| 酪氨酸 Tyr | 105.40±5.15* | 69.17±13.67 | 0.03 | 80.77±1.48 | 82.65±4.79 | 0.57 |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 缬氨酸 Val | 366.55±0.79 | 439.26±3.64** | 0.00 | 384.70±23.87* | 335.68±11.30 | 0.05 |
| 甜味氨基酸 SAAs | 7 736.70±98.59** | 6 624.26±129.84 | 0.00 | 7 047.07±288.94 | 7 370.05±44.41 | 0.19 |
| 鲜味氨基酸 UAAs | 2 316.75±192.53* | 1 744.55±25.11 | 0.03 | 804.15±28.16 | 1 192.44±91.78** | 0.01 |
| 苦味氨基酸 BAAs | 3 713.92±103.39 | 3 500.24±6.40 | 0.07 | 3 816.94±116.57 | 3 608.38±68.34 | 0.07 |
| 必需氨基酸 EAAs | 2 432.74±101.61 | 2 282.53±44.11 | 0.11 | 1 952.56±44.58 | 1 973.08±81.30 | 0.73 |
| 非必需氨基酸 NEAAs | 42 726.36±439.04** | 34 722.69±908.86 | 0.00 | 23 560.14±583.49 | 33 324.45±305.26** | 0.00 |
| 总氨基酸 TAAs | 45 159.11±473.52** | 37 005.22±946.54 | 0.00 | 25 512.70±610.67 | 35 297.53±379.02** | 0.00 |

注：*$P$<0.05 表示差异显著；**$P$<0.01 表示差异极显著。SAAs=Gly+Ala+Ser+Thr+Pro+Lys. UAAs=Glu+Asp. BAAs=Tyr+Arg+His+Val+Met+Ile+Leu+Trp+Phe. EAAs=Ile+Leu+Lys+Met+Phe+Thr+Trp+Val。

## 2.2 不同地区藏羊腿肉脂肪酸组成对比分析

不同地区藏羊腿肉中脂肪酸组成及含量分析见表 2。两个地区的藏羊前腿肉中总共检测出脂肪酸 39 种，其中差异显著的（$P$<0.05）有 29 种，包括 12 种饱和脂肪酸（SFA），9 种单不饱和脂肪酸（MUFA），以及 8 种多不饱和脂肪酸（PUFA），其中棕榈酸（c16:0）和硬脂酯酸（c18:0）是主要 SFA，油酸（c18:1n9）是主要 MUFA，亚油酸（c18:2n6）是主要 PUFA，这与王宇等[30]检测小尾寒羊中主要的 SFA、MUFA、PUFA 的结果基本一致。从表中可以看出，除十五碳烯酸（c15:1n5）、二十碳五烯酸（c20:5n3）、二十二碳六烯酸（c22:6n3）、木蜡酸（c24:0）、神经酸（c24:1n9）在 GCQ 中含量更高外（$P$<0.05），其余脂肪酸含量在 QHC 中显著更高（$P$<0.05）。相较于 GCQ 组，QHC 组中总饱和脂肪酸（SFA）、总单不饱和脂肪酸（MUFA）、总多不饱和脂肪酸（PUFA）、总 n6 多不脂肪酸（n6 PUFA）的含量显著更高（$P$<0.05），而总 n3 多不饱和脂肪酸（n3 PUFA）的含量更低（$P$>0.05）。在藏羊后腿肉中检测出的 18 种差异显著的（$P$<0.05）脂肪酸中，SFA 4 种，MUFA 7 种，PUFA 7 种，主要 SFA、MUFA 和 PUFA 与前腿肉中基本一致，分别是 c16:0、c18:1n9 和 c18:2n6。GCH 中 n3 PUFA 的含量显著高于（$P$<0.05）HHC 组，而 SFA、MUFA、以及 n6 PUFA 的含量显著低于 HHC（$P$<0.05）。

为了适应盐碱胁迫环境，植物通过调整生理机能来改善自身的耐盐碱性，例如 Cui 等[31]观察到在盐胁迫下百慕大草叶片中的粗蛋白含量显著增加而脂肪含量降低，另外，Madziga 等[32]表明羔羊肌肉中的脂肪酸含量受到饲料中脂质种类的影响，Ma 等[6]的研究同样发现饲喂盐碱牧草改变了藏羊肌肉的脂肪酸谱。本试验发现，放牧在天然盐碱牧场的藏羊（GC），长期食用盐碱牧草，使得其腿肉中的 n3 PUFA 的含量高于非盐碱地区放牧的藏羊（HC），然而 SFA、MUFA、PUFA、n6 PUFA 的含量则低于 HC 组。肉类中的脂肪酸含量能够影响人体健康，例如 SFA 含量增加容易引发心脑血管疾病，n3 与 n6 PUFA 都与免疫调节相关，然而高比例的 n6/n3 更容易患心血管和慢性疾病[22,33,34]，这表明盐碱地放牧的藏羊肉于人体健康更加有益。众所周知，羊肉中脂肪酸的含量和组成与其风味密切相关，然而 SFA 对香气的形成贡献较小，不饱和脂肪酸（USFA），包括 MUFA 和 PUFA 由于极易氧化，通常是挥发性风味化合物形成的最重要的前体物质[29]，例如 2-酮（2-丁酮、2-戊酮、2-庚酮等）的主要生成途径就是游离脂肪酸的脂质氧化反应，这类酮为肉制品提供独特的香味[28]。Sohail 等[27]也发现羊肉的风味物质变化主要是由于脂肪降解引起的，脂质降解通常产生醛类、酮类、醇类、酸类、酯类等风味物质，是羊肉特异性肉香味的来源。因此，非盐碱地藏羊腿肉中更高含量的 MUFA 和 PUFA 表明其可能具有更加复杂的风味。

表 2 不同地区藏羊前腿肉脂肪酸组成对比分析

**Table 2 Comparative analysis of fatty acid composition in the leg meat of Tibetan sheep from different regions (μg·g$^{-1}$)**

| 项目 | Q | | $P$ 值 | H | | $P$ 值 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | GC | HC | | GC | HC | |
| c6:0 | 0.08±0.00 | 0.09±0.01 | 0.41 | 0.10±0.00 | 0.15±0.01** | 0.00 |
| c8:0 | 0.72±0.03 | 1.01±0.05** | 0.00 | 1.32±0.01** | 1.18±0.01 | 0.00 |
| c10:0 | 1.50±0.12 | 14.69±3.32* | 0.02 | 7.99±0.58 | 8.31±0.80 | 0.60 |
| c11:0 | 0.09±0.02 | 0.49±0.09* | 0.02 | 0.46±0.02* | 0.35±0.05 | 0.04 |
| c12:0 | 3.24±0.96 | 40.08±4.29** | 0.00 | 31.01±0.04 | 27.96±3.78 | 0.30 |
| c13:0 | 0.33±0.05 | 2.22±0.39** | 0.01 | 2.18±0.00* | 1.61±0.19 | 0.03 |
| c14:0 | 51.72±10.58 | 465.08±36.99** | 0.00 | 359.01±11.00 | 375.92±41.46 | 0.58 |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| c14:1n5 | 1.83±0.52 | 21.43±1.49** | 0.00 | 8.21±1.13 | 17.91±0.15** | 0.00 |
| c15:0 | 13.30±1.29 | 70.06±9.75** | 0.01 | 55.96±2.39 | 53.56±5.08 | 0.52 |
| c15:1n5 | 1.11±0.00** | 0.29±0.05 | 0.00 | 0.08±0.01 | 0.18±0.03* | 0.02 |
| c16:0 | 777.06±70.17 | 2 531.22±5.03** | 0.00 | 1 684.14±169.39 | 2 298.65±131.55 | 0.10 |
| c16:1n7 | 43.03±2.46 | 278.40±4.53** | 0.00 | 101.23±4.40 | 247.77±10.88** | 0.00 |
| c17:0 | 46.13±1.39 | 156.80±12.71** | 0.00 | 101.10±6.61 | 108.52±9.69 | 0.34 |
| c17:1n7 | 29.09±0.67 | 94.70±2.20** | 0.00 | 50.96±2.21 | 89.76±6.44** | 0.01 |
| c18:0 | 955.38±5.12 | 1 913.66±124.53** | 0.01 | 1 606.45±98.30 | 1 685.88±123.29 | 0.43 |
| c18:1tn9 | 10.79±1.90 | 60.50±8.47** | 0.01 | 40.66±3.99 | 50.38±2.62* | 0.03 |
| c18:1n9 | 1 380.62±48.27 | 3 859.54±27.97** | 0.00 | 2 549.80±80.43 | 3 646.08±145.41** | 0.00 |
| c18:2ttn6 | 2.35±0.40 | 8.00±1.68* | 0.02 | 11.94±0.04* | 7.21±1.62 | 0.04 |
| c18:2n6 | 531.27±29.75 | 915.08±30.86** | 0.00 | 713.41±39.16 | 869.22±4.10* | 0.02 |
| c18:3n6 | 3.46±0.42 | 5.33±0.06* | 0.02 | 3.83±0.38 | 5.68±0.42** | 0.01 |
| c18:3n3 | 246.84±48.63 | 295.91±0.65 | 0.22 | 353.67±7.19** | 281.01±3.10 | 0.00 |
| c20:0 | 13.27±1.89 | 16.43±2.42 | 0.15 | 11.29±1.64 | 11.07±2.86 | 0.92 |
| c20:1n9 | 8.21±1.28 | 18.03±1.98** | 0.00 | 7.96±0.04 | 12.58±3.37 | 0.14 |
| c20:2n6 | 35.30±2.73 | 29.91±4.32 | 0.16 | 27.56±2.98 | 30.43±1.15 | 0.23 |
| c20:3n6 | 24.51±0.46 | 28.06±0.94** | 0.01 | 19.58±1.46 | 25.83±3.21 | 0.06 |
| c20:3n3 | 4.74±0.05 | 6.26±0.02** | 0.00 | 5.23±0.65 | 6.26±1.00 | 0.22 |
| c20:4n6 | 298.43±0.40 | 315.51±3.32** | 0.01 | 317.14±23.69 | 295.75±8.32 | 0.25 |
| c20:5n3 | 159.01±10.29** | 97.86±17.72 | 0.01 | 167.36±12.29 | 111.38±1.29 | 0.02 |
| c21:0 | 1.11±0.05 | 1.75±0.13** | 0.01 | 1.75±0.22 | 1.59±0.15 | 0.36 |
| c22:0 | 7.37±1.37 | 6.89±0.33 | 0.61 | 7.87±1.05 | 6.14±0.52 | 0.08 |
| c22:1n9 | 1.38±0.30 | 3.14±0.45** | 0.01 | 0.89±0.03 | 1.84±0.51 | 0.08 |
| c22:2n6 | 0.45±0.19 | 0.07±0.04 | 0.07 | 0.11±0.02 | 0.20±0.11 | 0.31 |
| c22:4n6 | 9.77±1.63 | 10.06±0.56 | 0.79 | 7.94±0.37 | 9.60±0.62* | 0.02 |
| c22:5n3 | 176.99±24.07 | 153.53±7.36 | 0.23 | 136.80±7.25 | 152.98±9.29 | 0.08 |
| c22:5n6 | 2.64±0.63 | 2.97±0.16 | 0.47 | 2.32±0.73 | 3.43±0.14 | 0.11 |
| c22:6n3 | 44.87±0.54** | 35.25±0.58 | 0.00 | 40.29±1.30** | 34.69±1.76 | 0.01 |
| c23:0 | 0.46±0.18 | 0.39±0.08 | 0.58 | 0.46±0.05 | 0.59±0.07 | 0.07 |
| c24:0 | 1.11±0.04** | 0.41±0.15 | 0.01 | 0.60±0.04 | 0.42±0.11 | 0.09 |
| c24:1n9 | 9.96±0.37** | 7.86±0.17 | 0.00 | 8.53±0.38* | 7.46±0.41 | 0.03 |
| SFA | 1 872.87±91.42 | 5 221.25±199.18** | 0.00 | 3 872.59±271.04 | 4 581.89±301.91* | 0.04 |
| MUFA | 1 486.02±53.65 | 4 343.89±18.66** | 0.00 | 2 768.32±80.42 | 4 073.96±166.79** | 0.00 |
| PUFA | 1 540.66±91.53 | 1 903.80±2.01* | 0.02 | 1 807.19±61.65 | 1 833.67±27.85 | 0.55 |
| n6 PUFA | 908.19±30.17 | 1 315.00±23.29** | 0.00 | 1 103.85±56.63 | 1 247.35±15.69* | 0.04 |
| n3 PUFA | 632.47±63.80 | 588.81±22.90 | 0.36 | 703.34±8.33** | 586.32±12.29 | 0.00 |

注：*$P$<0.05 表示差异显著；**$P$<0.01 表示差异极显著。

## 2.3 不同地区藏羊腿肉风味物质差异对比分析

### 2.3.1 不同地区藏羊前腿肉风味物质对比分析

#### 2.3.1.1 不同地区藏羊前腿肉特征风味 GC-IMS 谱图对比分析

采用 GC-IMS 检测的不同地区藏羊前腿肉样品的挥发性成分三维图谱见图 1A，图中 X 轴、Y 轴和 Z 轴分别表示用于鉴别的离子相对迁移时间、气相色谱仪的保留时间和离子峰信号强度[35]。从图中可知，不同地区的藏羊

前腿肉样品中的挥发性化合物非常相似，但各样品的峰信号强度存在一定差异，这表明不同样品中挥发性风味物质的含量存在差异。图 1B 是不同地区藏羊前腿肉的 GC-IMS 二维图谱。整个光谱代表样品的所有挥发性化合物，图中反应离子峰两侧的每一个点代表一种挥发性有机化合物，其峰强度通过颜色表示，从蓝色到红色，颜色越深表示峰强度越大。如图所示，两组藏羊前腿肉的挥发性物质的含量均存在差异。为进一步对比不同地区藏羊前腿肉中挥发性成分的差异，选取 GCQ 样品的谱图作为参比，QHC 样品的谱图扣减参比，得到不同地区藏羊前腿肉样品的差异对比图（图 1C）。谱图中大部分挥发性化合物的信号峰保留时间范围为 0~700 s，漂移时间范围为 1.0~1.75 ms。该谱图更加直观的反映了在不同地区放牧时，藏羊腿肉中挥发性成分的含量存在较明显的差异。

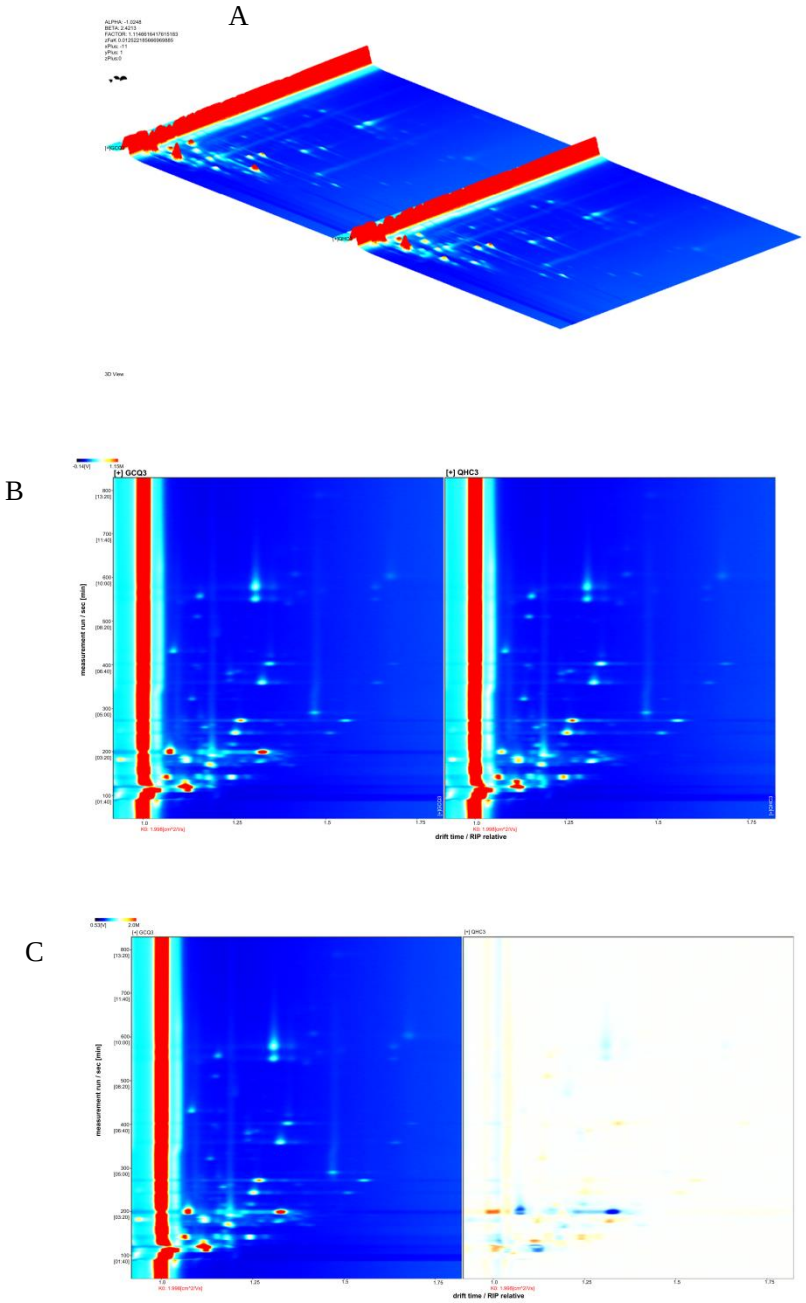



图 1 A. 不同地区藏羊前腿肉特征风味气相色谱-离子迁移谱 3D 图；B. 不同地区藏羊前腿肉特征风味气相色谱-离子迁移谱 2D 图；C. 不同地区藏羊前腿肉的特征风味白板对比对比 GC-IMS 谱图

**Fig.1 A. 3D diagram of GC-IMS spectrum of characteristic flavor compounds in the foreleg meat of Tibetan sheep from different regions. B. 2D diagram of GC-IMS spectrum of characteristic flavor compounds in the foreleg meat of Tibetan sheep from different regions. C. Comparative GC-IMS fingerprint analysis of characteristic flavor compounds in the foreleg meat of Tibetan sheep from**

**different regions**

2.3.1.2 不同地区藏羊前腿肉挥发性化合物定性、定量分析

不同地区藏羊前腿肉中的特征风味物质的 GC-IMS 分析结果见表 3。两种藏羊前腿肉中共鉴定出 41 种已知挥发性化合物（包括单体和二聚体），其中包括 9 种醇类、14 种酮类、11 种醛类、3 种酸类、3 种酯类，以及 1 种硫醇类，GCQ 组和 QHC 组的主要挥发性成分都是酮类，分别为 59.69%和 50.24%，其次是醇类，分别为 16.81%和 21.20%，接下来是醛类，分别为 14.98%和 18.73%，这与大部分研究得出羊肉中的挥发性风味物质大多为醛类的结果存在差异[8,36,37]，有研究认为有些酮类物质来源于饮食[38]，因此这种差异可能归因于两组藏羊在放牧期间采食的牧草。由于某些化合物本身可能具有高质子亲和力，因此它们在迁移过程中会形成二聚体[39]，如 1-己醇、1-戊醇、2-丁酮、2-甲基丁醛、2-戊酮、4-羟基-4-甲基-2-戊酮、乙酰、庚醛、己醛、己酸。不同地区藏羊前腿肉中的挥发性物质相对含量差异显著，除 1-戊烯-3-醇、2-辛醇、3-甲基丁醇、1-羟基-2-丙酮、丙酮、乙酰二聚体、乙酰的浓度在 GCQ 组中显著更高（$P$<0.05）外，其余大多数化合物的相对含量在 QHC 组中显著更高。由于在藏羊腿肉中检测到的挥发性化合物为酮类、醛类、醇类、酸类和酯类，这些挥发性物质主要源自脂肪酸的氧化降解[27]，同时脂肪酸的含量在 QHC 组中含量更高，因此导致了该组的挥发性风味物质含量相对更高。

表 3 不同地区藏羊前腿肉特征风味物质 GC-IMS 分析结果

**Table 3 GC-IMS analysis results of characteristic flavor compounds in the foreleg meat of Tibetan sheep from different regions**

| | 挥发性物质 | CAS 号 | 保留指数 | 保留时间/s | 迁移时间/ms | 相对含量/% | | *P* 值 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | GCQ | QHC 值 | |
| 醇类 | 1-己醇二聚体 | C111273 | 874.5 | 359.352 | 1.642 25 | 0.30±0.01 | 0.35±0.00** | 0.01 |
| | 1-己醇 | C111273 | 874.1 | 358.82 | 1.325 19 | 3.06±0.19 | 3.42±0.31 | 0.18 |
| | 1-辛烯-3-醇 | C3391864 | 986.5 | 551.901 | 1.156 55 | 1.30±0.03 | 1.85±0.16* | 0.02 |
| | 1-戊醇二聚体 | C71410 | 766.4 | 244.328 | 1.512 37 | 0.58±0.01 | 0.94±0.05** | 0.00 |
| | 1-戊醇 | C71410 | 767 | 244.861 | 1.252 61 | 3.91±0.03 | 5.57±0.23** | 0.01 |
| | 1-戊烯-3-醇 | C616251 | 688.2 | 183.124 | 0.936 23 | 2.42±0.01** | 2.12±0.06 | 0.01 |
| | 1-丙醇 | C71238 | 570 | 130.634 | 1.118 1 | 4.33±0.16 | 6.30±0.15** | 0.00 |
| | 2-辛醇 | C123966 | 992.1 | 563.816 | 1.435 48 | 0.14±0.00** | 0.11±0.00 | 0.00 |
| | 3-甲基丁醇 | C123513 | 732.2 | 215.37 | 1.243 53 | 0.76±0.04** | 0.54±0.03 | 0.00 |
| 酮类 | 1-羟基-2-丙酮 | C116096 | 707.2 | 196.349 | 1.233 41 | 3.25±0.10** | 1.89±0.05 | 0.00 |
| | 2-丁酮二聚体 | C78933 | 593.3 | 140.693 | 1.246 71 | 3.28±0.19 | 5.10±0.24** | 0.00 |
| | 2-丁酮 | C78933 | 588.8 | 138.918 | 1.059 22 | 6.70±0.10 | 7.45±0.48 | 0.11 |
| | 2-庚酮 | C110430 | 893.7 | 384.913 | 1.264 07 | 0.24±0.00 | 0.44±0.02** | 0.00 |
| | 2-戊酮二聚体 | C107879 | 688.5 | 183.297 | 1.372 21 | 0.36±0.01 | 0.64±0.02** | 0.00 |
| | 2-戊酮 | C107879 | 683.8 | 180.93 | 1.118 1 | 2.95±0.07 | 4.24±0.09** | 0.00 |
| | 3-己酮 | C589388 | 783.9 | 260.623 | 1.168 89 | 1.00±0.00 | 0.96±0.03 | 0.06 |
| | 3-戊酮 | C96220 | 697.7 | 189.598 | 1.113 41 | 1.81±0.11 | 2.10±0.05* | 0.03 |
| | 4-羟基-4-甲基-2-戊酮二聚体 | C123422 | 842.2 | 320.478 | 1.525 1 | 0.10±0.00 | 0.14±0.00** | 0.00 |
| | 4-羟基-4-甲基-2-戊酮 | C123422 | 843.6 | 322.076 | 1.134 19 | 0.57±0.03 | 1.00±0.09** | 0.01 |
| | 丙酮 | C67641 | 539.8 | 118.306 | 1.109 96 | 20.20±0.84* | 17.55±0.20 | 0.03 |
| | 环己酮 | C108941 | 898.7 | 392.368 | 1.153 29 | 0.41±0.01 | 0.55±0.04* | 0.02 |
| | 乙酰二聚体 | C513860 | 710.4 | 198.682 | 1.331 93 | 8.48±0.46** | 1.81±0.02 | 0.00 |
| | 乙酰 | C513860 | 714.4 | 201.641 | 1.071 62 | 10.36±0.31** | 6.41±0.12 | 0.00 |
| 醛类 | 2-甲基丁醛二聚体 | C96173 | 664.3 | 171.385 | 1.403 17 | 0.18±0.01** | 0.13±0.01 | 0.00 |
| | 2-甲基丁醛 | C96173 | 665.9 | 172.135 | 1.184 22 | 4.18±0.16 | 3.99±0.26 | 0.35 |
| | 苯甲醛 | C100527 | 964.4 | 506.414 | 1.146 03 | 0.47±0.00 | 1.03±0.01** | 0.00 |
| | 正丁醛 | C123728 | 597.5 | 142.362 | 1.287 04 | 0.58±0.00 | 1.06±0.05** | 0.00 |
| | 庚醛二聚体 | C111717 | 904.9 | 401.954 | 1.693 18 | 0.20±0.01 | 0.35±0.01** | 0.00 |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 庚醛 | C111717 | 906.2 | 404.084 | 1.345 56 | 1.69±0.01 | 2.69±0.22* | 0.02 |
| | 己醛二聚体 | C66251 | 796.5 | 272.552 | 1.556 93 | 0.98±0.01 | 1.41±0.13* | 0.03 |
| | 己醛 | C66251 | 795.9 | 272.019 | 1.267 89 | 3.87±0.29 | 4.53±0.23* | 0.04 |
| | 正壬醛 | C124196 | 1109 | 789.188 | 1.485 38 | 0.48±0.02 | 0.45±0.02 | 0.12 |
| | 正辛醛 | C124130 | 1016.8 | 607.646 | 1.417 61 | 0.42±0.01 | 0.48±0.03 | 0.10 |
| | 正戊醛 | C110623 | 698.5 | 190.195 | 1.187 88 | 1.93±0.08 | 2.62±0.04** | 0.00 |
| | 醋酸 | C64197 | 600.3 | 143.464 | 1.153 16 | 1.54±0.05 | 2.03±0.07** | 0.00 |
| 酸类 | 己酸二聚体 | C142621 | 986.4 | 551.64 | 1.639 81 | 0.22±0.00* | 0.17±0.01 | 0.02 |
| | 己酸 | C142621 | 985.7 | 550.179 | 1.308 77 | 2.84±0.06* | 2.44±0.12 | 0.01 |
| | 异戊酸乙酯 | C108645 | 858.6 | 339.649 | 1.251 33 | 0.11±0.01 | 0.11±0.00 | 0.85 |
| 酯类 | γ-丁内酯 | C96480 | 921.8 | 429.247 | 1.082 95 | 2.32±0.13 | 2.50±0.17 | 0.23 |
| | 乙酸甲酯 | C79209 | 545.7 | 120.602 | 1.184 22 | 0.83±0.01 | 1.09±0.04** | 0.01 |
| 其他 | 2-甲基-3-呋喃硫醇 | C28588741 | 872 | 356.157 | 1.136 73 | 0.18±0.01 | 0.24±0.01** | 0.00 |

注：*P<0.05 表示差异显著；**P<0.01 表示差异极显著。

2.3.1.3 不同地区藏羊前腿肉特征风味物质指纹图谱分析

为进一步分析两组藏羊前腿肉间挥发性化合物的差异，根据峰信号构建了指纹图谱（图 2）。在图 2 中，每行表示一个样品的所有信号峰，每列表示不同样品中相同的挥发性化合物信号峰，颜色代表挥发性化合物的浓度，颜色越亮，则浓度越高。从图中可以看出，不同地区的藏羊前腿肉有各自的特征挥发性化合物，A 区域代表 GCQ 中相对含量较高的挥发性物质，包括丙酮、8 种未准确定性物质、2-甲基丁醛、 γ-丁内酯、壬醛、己酸等 23 种；B 区域代表 QHC 中相对含量较高的挥发性物质，包括 2-丁酮、1 种未准确定性物质、乙酸甲酯、己醛、辛醛、丁醛、2-甲基-3-呋喃硫醇等 24 种。

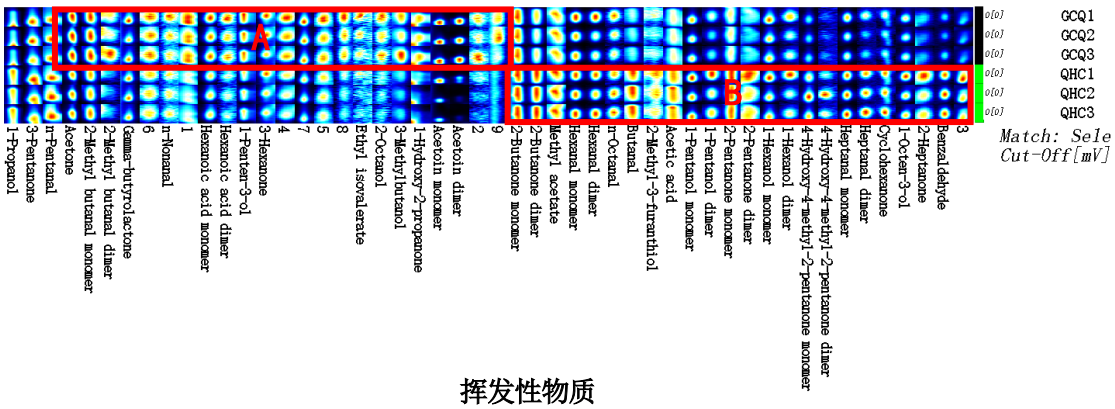



图 2 不同地区藏羊前腿肉特征风味物质指纹图谱

**Fig.2 Characteristic flavor compound fingerprint profiles of foreleg meat from Tibetan sheep in different regions**

2.3.1.4 基于 OPLS-DA 分析不同地区藏羊前腿肉中挥发性化合物的差异

为有效区分不同地区藏羊前腿肉中的挥发性化合物，建立 GCQ 组和 QHC 组的 OPLS-DA 模型。拟合优度（$R^2$）与预测能力（$Q^2$）是评价 OPLS-DA 模型优劣的关键指标，一般而言，$R^2$ 值和 $Q^2$ 值大于 0.5 且越接近 1，表示模型的解释能力和预测能力越强[40]。如图 3A 的评分图所示，模型解释能力参数 $R^2$X=0.967，$R^2$Y=1，预测能力参数 $Q^2$=0.998，均大于 0.5，且接近于 1，说明构建的 OPLS-DA 模型具有较强解释力和预测力。从评分图中可知，GCQ 与 QHC 组样品组内差异较小，而组间完全分离，说明 OPLS-DA 方法可以很好地区分这两种藏羊前腿肉样品。此外，为检验构建的 OPLS-DA 模型是否存在过拟合现象，对模型进行 200 次交叉验证，得到图 3B 所示的置换检验图。模型的 $Q^2$ 回归线与横坐标相交，且与纵坐标相交的截距为负，说明模型真实可靠，没有过拟合。

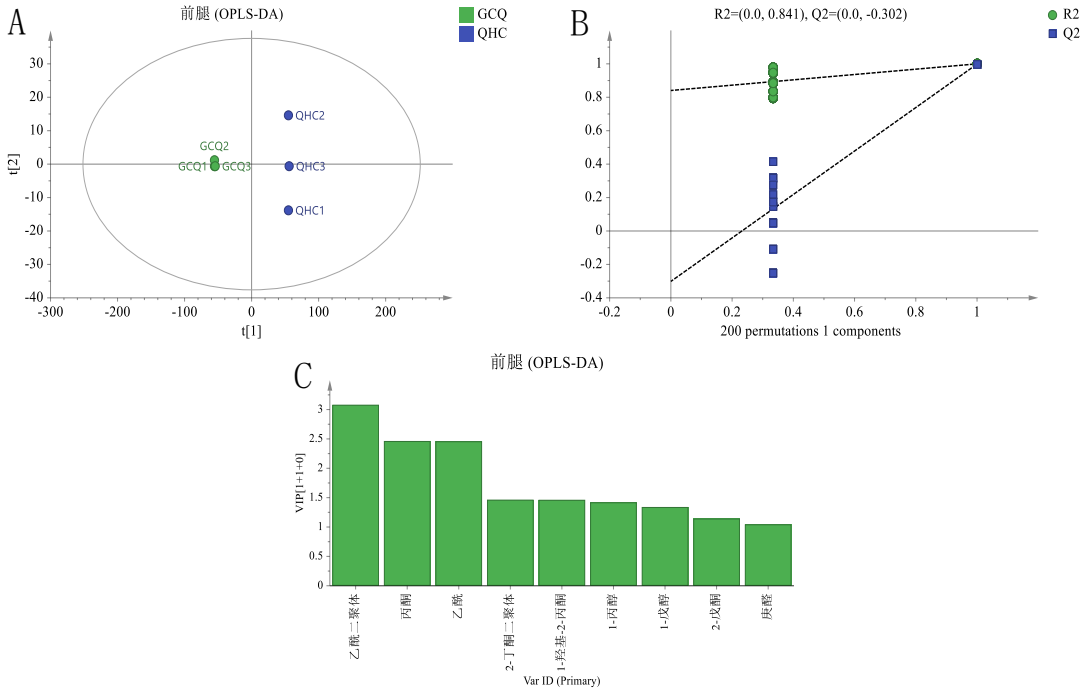



图 3 不同地区藏羊前腿肉中挥发性风味化合物的 OPLS-DA 评分图

**Fig.3 OPLS-DA analysis of volatile flavor compounds in Tibetan sheep foreleg meat across different regions**

注：A.评分图；B.置换检验图；C.VIP 值分布图。

最后，为确定两种藏羊前腿肉中对香气变化有贡献的主要挥发性物质，还计算了 VIP 值（变量投影重要度），通常认为 VIP>1 的挥发性化合物是潜在的关键香气化合物[41]。不同挥发性风味物质的 VIP 值计算结果如图 3C 和表 4 所示，共筛选出了 9 种 VIP>1 的挥发性化合物作为两组藏羊前腿肉的关键香气化合物，它们分别是乙酰二聚体、丙酮、乙酰、2-丁酮二聚体、1-羟基-2-丙酮、1-丙醇、1-戊醇、2-戊酮、庚醛。可以发现酮类物质对两组藏羊前腿的风味形成贡献较大，大多数酮类物质具有清新的，水果风味，对藏羊前腿的整体风味形成起到重要作用。庚醛是羊肉风味中的关键香气成分之一[42]，赋予羊肉新鲜，醛，脂肪，青香草药，酒，果香的味道。据报道，气味阈值较低的不饱和醇对肉类的风味影响较大[43]，本研究中 1-戊醇和 1-丙醇的含量在 QHC 组中显著升高，其中 1-戊醇具有香膏风味，1-丙醇赋予 QHC 组酒精、刺激性气味。

表 4 不同地区藏羊前腿肉中关键挥发性化合物（VIP>1）

**Table 4 Key volatile compounds (VIP>1) in foreleg meat of Tibetan sheep from different regions**

| 挥发性化合物 | VIP 值 | 风味描述 |
|---|---|---|
| 乙酰二聚体 | 3.08 | 黄油味、奶油味 |
| 丙酮 | 2.46 | 丙酮气味，清新的，甜果味，酒香 |
| 乙酰 | 2.46 | 黄油味、奶油味 |
| 2-丁酮二聚体 | 1.46 | 果香，樟脑香味 |
| 1-羟基-2-丙酮 | 1.46 | 刺激性气味，焦糖味，清新 |
| 1-丙醇 | 1.42 | 酒精、刺激性气味 |
| 1-戊醇 | 1.34 | 香膏 |
| 2-戊酮 | 1.14 | 丙酮气味，清新的，甜果味，酒香 |
| 庚醛 | 1.04 | 新鲜，醛，脂肪，青香草药，酒，果香 |

### 2.3.2 不同地区藏羊后腿肉风味物质对比分析

#### 2.3.2.1 不同地区藏羊后腿肉特征风味 GC-IMS 谱图对比分析

利用 GC-IMS 技术探究不同地区藏羊后腿肉的特征风味差异，检测到的三维图谱、二维图谱和差异对比分析图见图 4。由图 4 可知，不同地区的藏羊后腿肉样品间挥发性风味物质的种类大致相同，但含量存在一定差异。

如图 4C 所示，HHC 样品谱图中蓝色斑块较参比明显更多，说明放牧地区的不同对藏羊后腿肉挥发性风味物质含量的影响较大，且盐碱地藏羊后腿肉中部分挥发性成分含量相对更高。

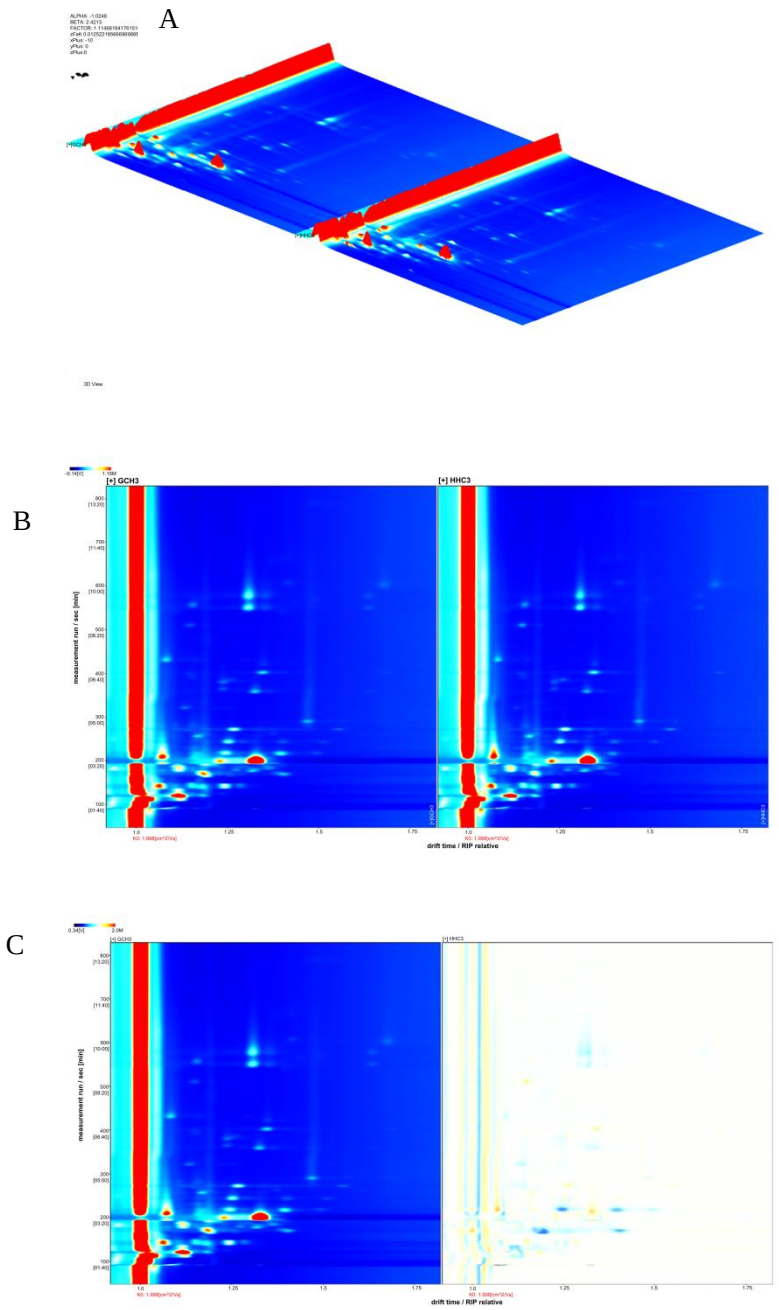



图 4 A. 不同地区藏羊后腿肉特征风味气相色谱-离子迁移谱 3D 图；B. 不同地区藏羊后腿肉特征风味气相色谱-离子迁移谱 2D 图；C. 不同地区藏羊后腿肉的特征风味白板对比对比 GC-IMS 谱图

**Fig.4 A. 3D diagram of GC-IMS spectrum of characteristic flavor compounds in the hind leg meat of Tibetan sheep from different regions. B. 2D diagram of GC-IMS spectrum of characteristic flavor compounds in the hind leg meat of Tibetan sheep from different regions. C. Comparative GC-IMS fingerprint analysis of characteristic flavor compounds in the hind leg meat of Tibetan sheep from different regions**

2.3.2.2 不同地区藏羊后腿肉挥发性化合物定性、定量分析

不同地区藏羊后腿肉中的特征风味物质的 GC-IMS 分析结果见表 5。在 GCH 和 HHC 组总共鉴定出的 41 种挥发性化合物中，主要挥发性成分是酮类，分别为 72.14%和 74.37%，其次是醛类，分别为 11.17%和 10.80%，接下来是醇类，分别为 9.75%和 8.23%。1-己醇、1-戊烯-3-醇等 10 种挥发性化合物在 GCH 中含量显著更高（$P$<0.05），

而 1-辛烯-3-醇、1-戊醇二聚体等 16 种挥发性化合物在 HHC 中含量显著更高（$P$<0.05）。

表 5 不同地区藏羊后腿肉特征风味物质 GC-IMS 分析结果

**Table 5 GC-IMS analysis results of characteristic flavor compounds in the hind leg meat of Tibetan sheep from different regions**

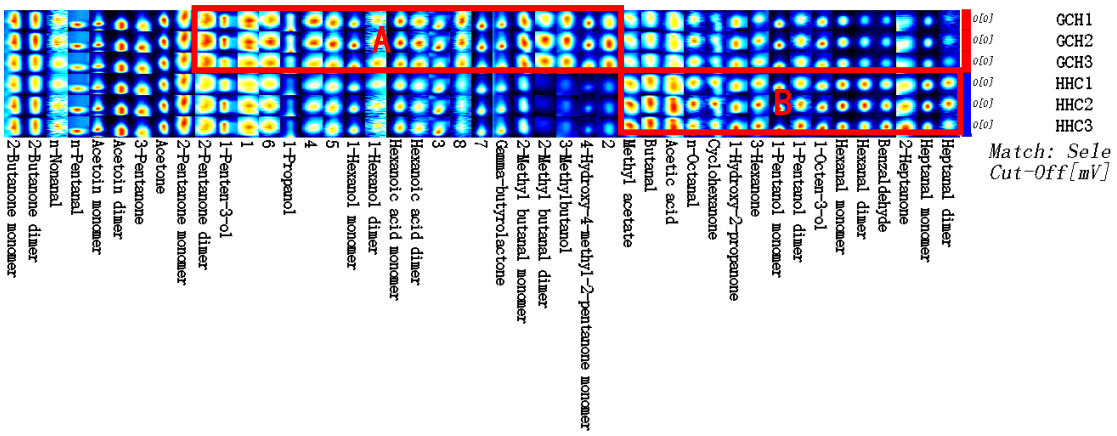
| | 挥发性物质 | CAS 号 | 保留指数 | 保留时间/s | 迁移时间/ms | 相对含量/% | | $P$ 值 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | GCH | HHC | |
| 醇类 | 1-己醇二聚体 | C111273 | 874.5 | 359.352 | 1.642 25 | 0.12±0.01 | 0.11±0.01 | 0.18 |
| | 1-己醇 | C111273 | 874.1 | 358.82 | 1.325 19 | 1.19±0.04* | 1.01±0.00 | 0.02 |
| | 1-辛烯-3-醇 | C3391864 | 986.5 | 551.901 | 1.156 55 | 0.74±0.02 | 0.82±0.01** | 0.00 |
| | 1-戊醇二聚体 | C71410 | 766.4 | 244.328 | 1.512 37 | 0.19±0.00 | 0.24±0.01** | 0.01 |
| | 1-戊醇 | C71410 | 767 | 244.861 | 1.252 61 | 1.91±0.03 | 2.11±0.02** | 0.00 |
| | 1-戊烯-3-醇 | C616251 | 688.2 | 183.124 | 0.936 23 | 1.29±0.01** | 1.17±0.01 | 0.00 |
| | 1-丙醇 | C71238 | 570 | 130.634 | 1.118 1 | 2.66±0.07** | 1.96±0.07 | 0.00 |
| | 2-辛醇 | C123966 | 992.1 | 563.816 | 1.435 48 | 0.080±0.003 | 0.078±0.000 | 0.43 |
| | 3-甲基丁醇 | C123513 | 732.2 | 215.37 | 1.243 53 | 1.58±0.01** | 0.73±0.01 | 0.00 |
| 酮类 | 1-羟基-2-丙酮 | C116096 | 707.2 | 196.349 | 1.233 41 | 6.14±0.07 | 6.38±0.14 | 0.08 |
| | 2-丁酮二聚体 | C78933 | 593.3 | 140.693 | 1.246 71 | 2.47±0.02* | 2.37±0.04 | 0.05 |
| | 2-丁酮 | C78933 | 588.8 | 138.918 | 1.059 22 | 5.76±0.11 | 5.66±0.09 | 0.30 |
| | 2-庚酮 | C110430 | 893.7 | 384.913 | 1.264 07 | 0.16±0.00 | 0.19±0.00** | 0.00 |
| | 2-戊酮二聚体 | C107879 | 688.5 | 183.297 | 1.372 21 | 0.46±0.02 | 0.44±0.01 | 0.14 |
| | 2-戊酮 | C107879 | 683.8 | 180.93 | 1.118 1 | 2.51±0.02 | 2.78±0.08* | 0.02 |
| | 3-己酮 | C589388 | 783.9 | 260.623 | 1.168 89 | 0.76±0.02 | 0.89±0.01** | 0.00 |
| | 3-戊酮 | C96220 | 697.7 | 189.598 | 1.113 41 | 1.58±0.07 | 1.57±0.07 | 0.77 |
| | 4-羟基-4-甲基-2-戊酮二聚体 | C123422 | 842.2 | 320.478 | 1.525 1 | 0.07±0.00 | 0.06±0.00 | 0.15 |
| | 4-羟基-4-甲基-2-戊酮 | C123422 | 843.6 | 322.076 | 1.134 19 | 0.34±0.02** | 0.21±0.01 | 0.00 |
| | 丙酮 | C67641 | 539.8 | 118.306 | 1.109 96 | 13.58±0.23 | 13.08±0.36 | 0.13 |
| | 环己酮 | C108941 | 898.7 | 392.368 | 1.153 29 | 0.26±0.02 | 0.29±0.01 | 0.16 |
| | 乙酰二聚体 | C513860 | 710.4 | 198.682 | 1.331 93 | 25.75±0.28 | 27.34±0.53* | 0.02 |
| | 乙酰 | C513860 | 714.4 | 201.641 | 1.071 62 | 12.31±0.21 | 13.11±0.09** | 0.01 |
| 醛类 | 2-甲基丁醛二聚体 | C96173 | 664.3 | 171.385 | 1.403 17 | 0.58±0.00** | 0.13±0.02 | 0.00 |
| | 2-甲基丁醛 | C96173 | 665.9 | 172.135 | 1.184 22 | 4.76±0.09** | 3.08±0.05 | 0.00 |
| | 苯甲醛 | C100527 | 964.4 | 506.414 | 1.146 03 | 0.38±0.00 | 0.58±0.02** | 0.00 |
| | 正丁醛 | C123728 | 597.5 | 142.362 | 1.287 04 | 0.51±0.02 | 0.69±0.01** | 0.00 |
| | 庚醛二聚体 | C111717 | 904.9 | 401.954 | 1.693 18 | 0.13±0.01 | 0.18±0.01** | 0.01 |
| | 庚醛 | C111717 | 906.2 | 404.084 | 1.345 56 | 1.02±0.06 | 1.65±0.02** | 0.00 |
| | 己醛二聚体 | C66251 | 796.5 | 272.552 | 1.556 93 | 0.26±0.02 | 0.44±0.01** | 0.00 |
| | 己醛 | C66251 | 795.9 | 272.019 | 1.267 89 | 1.67±0.06 | 2.17±0.15* | 0.02 |
| | 正壬醛 | C124196 | 1109 | 789.188 | 1.485 38 | 0.25±0.04 | 0.29±0.00 | 0.18 |
| | 正辛醛 | C124130 | 1016.8 | 607.646 | 1.417 61 | 0.24±0.03 | 0.25±0.00 | 0.68 |
| | 正戊醛 | C110623 | 698.5 | 190.195 | 1.187 88 | 1.39±0.09 | 1.35±0.02 | 0.46 |
| 酸类 | 醋酸 | C64197 | 600.3 | 143.464 | 1.153 16 | 1.38±0.00 | 1.64±0.01** | 0.00 |
| | 己酸二聚体 | C142621 | 986.4 | 551.64 | 1.639 81 | 0.19±0.01 | 0.18±0.00 | 0.37 |
| | 己酸 | C142621 | 985.7 | 550.179 | 1.308 77 | 2.64±0.01** | 2.30±0.01 | 0.00 |
| 酯类 | 异戊酸乙酯 | C108645 | 858.6 | 339.649 | 1.251 33 | 0.075±0.005 | 0.073±0.004 | 0.61 |
| | γ-丁内酯 | C96480 | 921.8 | 429.247 | 1.082 95 | 2.02±0.05* | 1.83±0.08 | 0.04 |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 乙酸甲酯 | C79209 | 545.7 | 120.602 | 1.184 22 | 0.63±0.03 | 0.71±0.02* | 0.03 |
| 其他 | 2-甲基-3-呋喃硫醇 | C28588741 | 872 | 356.157 | 1.136 73 | 0.089±0.002 | 0.088±0.004 | 0.73 |

注：*$P$<0.05 表示差异显著；**$P$<0.01 表示差异极显著。

2.3.2.3 不同地区藏羊后腿肉特征风味物质指纹图谱分析

两组藏羊后腿肉经 GC-IMS 测定后其指纹图谱见图 5。从图中可知，GCH 和 HHC 组之间的挥发性成分差异较大，GCH 组中 2-戊酮、1-戊烯-3-醇、丙醇、己醇、己酸、γ-丁内酯、2-甲基丁醛、3-甲基丁醇、4-羟基-4-甲基-2-戊酮的含量相对更高，HHC 组中乙酸甲酯、丁醛、乙酸、辛醛、环己酮、1-羟基-2-丙酮、3-己酮、戊醇、1-辛烯-3-醇、己醛、苯甲醛、庚酮、庚醛的含量相对更高。




挥发性物质

图 5 不同地区藏羊后腿肉特征风味物质指纹图谱

**Fig.5 Characteristic flavor compound fingerprint profiles of hind leg meat from Tibetan sheep in different regions**

2.3.2.4 基于 OPLS-DA 分析不同地区藏羊后腿肉中挥发性化合物的差异

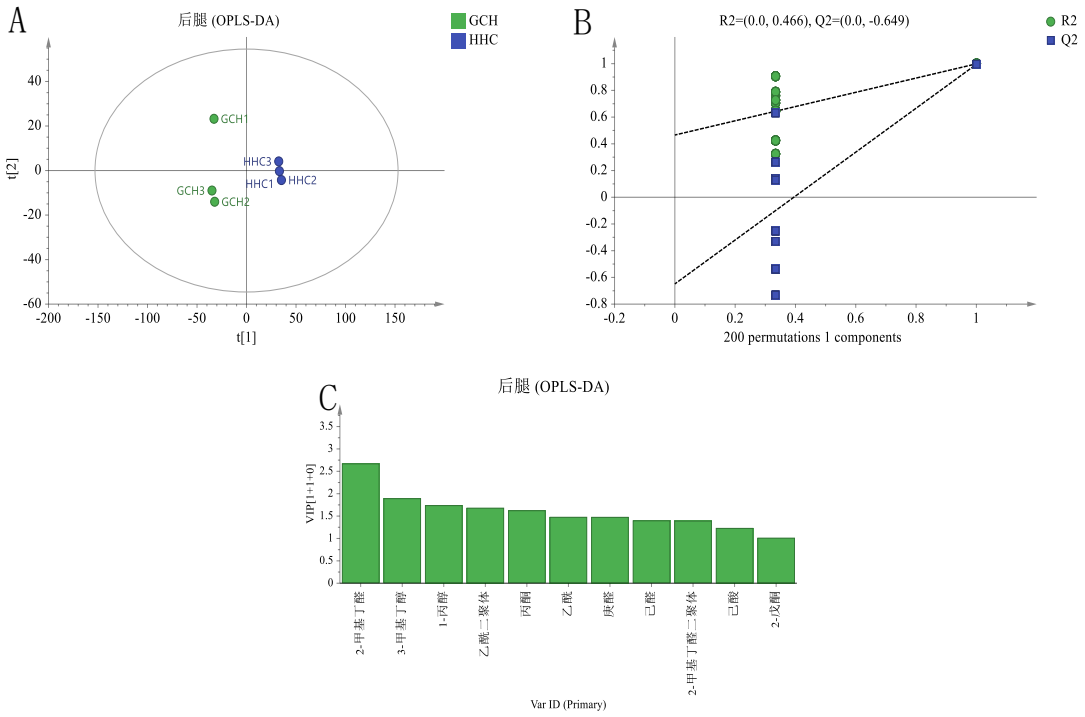



图 6 不同地区藏羊前后肉中挥发性风味化合物的 OPLS-DA 评分图

**Fig.6 OPLS-DA analysis of volatile flavor compounds in Tibetan sheep hind leg meat across different regions**

注：A.评分图；B.置换检验图；C.VIP 值分布图。

表 6 不同地区藏羊后腿肉中关键挥发性化合物（VIP> 1）

**Table 6 Key volatile compounds (VIP > 1) in hind leg meat of Tibetan sheep from different regions**

| 挥发性化合物 | VIP 值 | 风味描述 |
|---|---|---|
| 2-甲基丁醛 | 2.67 | 苦杏仁味、可可、麦芽 |
| 3-甲基丁醇 | 1.90 | 威士忌酒香，香蕉果香 |
| 1-丙醇 | 1.74 | 酒精、刺激性气味 |
| 乙酰二聚体 | 1.68 | 黄油味、奶油味 |
| 丙酮 | 1.63 | 丙酮气味，清新的，甜果味，酒香 |
| 乙酰 | 1.48 | 黄油味、奶油味 |
| 庚醛 | 1.48 | 新鲜，醛，脂肪，青香草药，酒，果香 |
| 己醛 | 1.40 | 新鲜的、青香、脂肪味、水果味 |
| 2-甲基丁醛二聚体 | 1.40 | 苦杏仁味、可可、麦芽 |
| 己酸 | 1.23 | 酸味，脂肪味，奶酪味，刺激性，大曲酒气味 |
| 2-戊酮 | 1.02 | 丙酮气味，清新的，甜果味，酒香 |

为更深入的探究不同地区藏羊后腿肉中的挥发性化合物，采用 OPLS-DA 模型对两组藏羊后腿肉中的挥发性有机物进行模拟。如图 6A 所示，构建的 OPLS-DA 模型表现出较高的解释性能和预测性能（$R^2X$=0.916，$R^2Y$=0.999，$Q^2$=0.995）。为验证模型的准确性，还进行了 200 次的排列检验，结果显示（图 6B）模型没有过拟合。

如图 6C 和表 6 所示，根据 VIP 值>1，共筛选出 11 种挥发性化合物作为两组藏羊后腿肉的关键香气化合物，它们分别是 2-甲基丁醛、3-甲基丁醇、1-丙醇、乙酰二聚体、丙酮、乙酰、庚醛、己醛、2-甲基丁醛二聚体、己酸、2-戊酮。醛类物质对不同地区藏羊后腿肉的风味贡献较大，这可能与它们具有较低的阈值有关[44]。2-甲基丁醛赋予 GCH 组苦杏仁味、可可、麦芽的味道，庚醛和己醛在 HHC 组中浓度更高，具有果味、脂肪香味和青草香味。3-甲基丁醇、1-丙醇、丙酮和己酸在 GCH 组中浓度更高，其中 3-甲基丁醇赋予 GCH 组酒香和香蕉果香，1-丙醇具有酒精、刺激性气味，丙酮具有清新的、甜果味和酒香，己酸具有酸味、脂肪味和刺激性味道。而乙酰在 HHC 组中浓度更高，具有黄油味和奶油味。

## 2.4 相关性分析

将藏羊腿肉样品中 $P$<0.01 的氨基酸、脂肪酸和 VIP>1 的挥发性风味物质进行 Pearson 相关性分析，从图 7 可以看出挥发性风味物质与氨基酸、脂肪酸之间相关性显著，这是因为氨基酸作为挥发性风味物质的前体物质，可以在一定程度上影响羊肉的风味[27]，同时羊肉脂肪酸的组成与含量也影响挥发性化合物的产生，并因此对风味产生影响[11,45]，例如醛类和醇类挥发性物质主要来源于脂肪酸的氧化降解，像己醛、庚醛、1-戊醇主要是由油酸、亚油酸、亚麻酸等脂肪酸氧化产生的[42,46,47]，甲基酮是由饱和脂肪酸经过 $\beta$-酮酸脱羧或 $\beta$-氧化而形成的[48]，2-甲基丁醛可能由异亮氨酸经 strecker 降解产生[49]，这些研究与本试验的结果一致，即庚醛和 1-戊醇与油酸和亚油酸呈正相关（图 7A），庚醛和己醛与油酸和 $\gamma$-亚麻酸呈正相关（图 7B），2-丁酮和 2-戊酮与辛酸（c8:0）、月桂酸（c12:0）、十七烷酸（c17:0）、肉豆蔻酸（c14:0）以及棕榈酸（c16:0）呈正相关（图 7A），丙酮与 c8:0 呈正相关（图 7B），从而很好的解释了这些氨基酸、脂肪酸与挥发性风味物质呈现正相关的原因，我们因此做出合理推测这些挥发性风味化合物可能源于脂肪酸的氧化降解，以及氨基酸的降解反应。结合上述分析，藏羊腿肉中的氨基酸与脂肪酸含量受到饲料的显著影响，相较于非盐碱牧草，富含更多活性物质的盐碱牧草影响了藏羊腿肉中氨基酸与脂肪酸的沉积，进而影响到了腿肉中的风味化合物，使其呈现出与非盐碱地藏羊不同的风味，然而具体的影响机制仍需进一步探究。

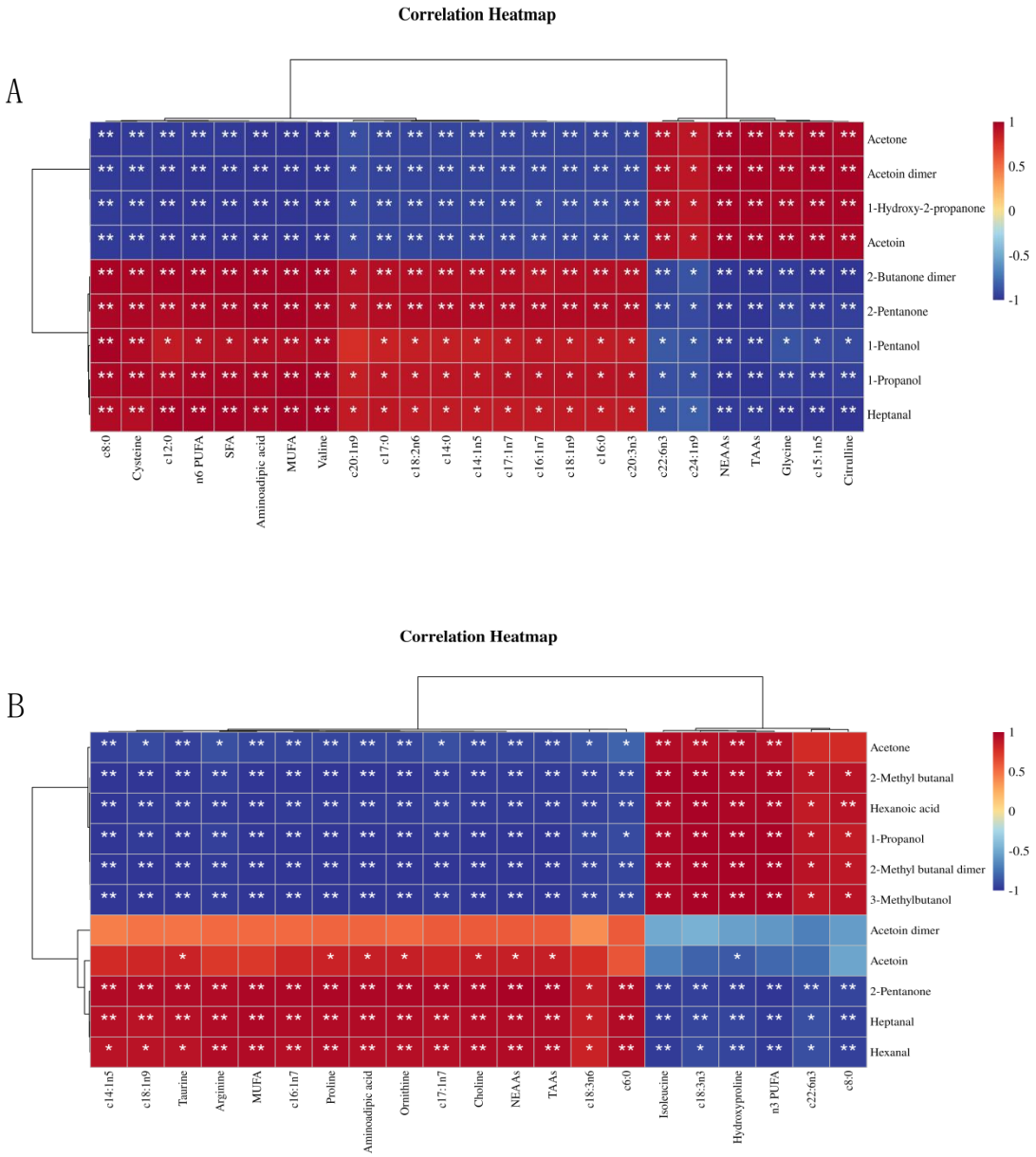



图 7 不同地区藏羊腿肉中氨基酸、脂肪酸和挥发性风味物质的相关性热图

**Fig.7 Correlation heatmap between amino acid, fatty acids and volatile flavor compounds in Tibetan sheep leg meat across different regions**

注：A. GCQ VS QHC；B. GCH VS HHC。“*”表示显著相关（$P$<0.05）；“**”表示极显著相关（$P$<0.01）。

## 3 结论

本研究发现，放牧在盐碱地区的藏羊，其前腿肉中的氨基酸含量更高，而后腿肉中氨基酸含量相对更低，另外，脂肪酸含量在非盐碱地区放牧的藏羊腿肉中的相对更高。同时，GC-IMS 结果表明，乙酰二聚体、丙酮、乙酰单体、2-丁酮二聚体、1-羟基-2-丙酮、1-丙醇、1-戊醇单体、2-戊酮单体、庚醛单体是区分两组藏羊前腿肉的关键风味物质，2-甲基丁醛单体、3-甲基丁醇、1-丙醇、乙酰二聚体、丙酮、乙酰单体、庚醛单体、己醛单体、2-甲基丁醛二聚体、己酸单体、2-戊酮单体是区分两组藏羊后腿肉的关键风味物质。同时相关性分析发现，部分关键风味物质与部分氨基酸和大多数脂肪酸之间呈显著正相关，因此可能来源于这些氨基酸和脂肪酸降解反应。本研究结果可为探究盐碱地藏羊肌肉的风味形成机理提供参考。

## 参考文献

[1] 李秀春.藏羊高效养殖技术与发展思路[J].畜牧兽医科技信息,2022,10:118-120.

[2] 丁红艳,院珍珍,闫光瑾,等.不同解冻方式对藏羊肉品质的影响[J].食品科技,2024,49(4):142-149.

[3] MA Y, HAN L, ZHANG S, et al. Insight into the differences of meat quality between Qinghai white Tibetan sheep and black Tibetan sheep from the perspective of metabolomics and rumen microbiota [J]. Food Chemistry: X, 2023, 19: 100843.

[4] 中拉毛草,张锐,林宇红,等.两种产地藏羊肉挥发性风味物质和脂肪酸组成比较研究[J].保鲜与加工,2024,24(1):48-57.

[5] 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.

[6] MA N, HAN L, HOU S, et al. Insights into the effects of saline forage on the meat quality of Tibetan sheep by metabolome and multivariate analysis [J]. Food Chemistry: X, 2024, 22: 101411.

[7] LU Z, LI J, YUAN C, 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.

[8] 马娜娜,旦正杰,韩丽娟,等.基于 GC-IMS 分析不同品种藏羊羔肉的风味特征成分[J].中国调味品,2024,49(7):145-151.

[9] ZHANG X, HAN L, HOU S, et al. Metabolomics approach reveals high energy diet improves the quality and enhances the flavor of black Tibetan sheep meat by altering the composition of rumen microbiota [J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 915558.

[10] WANG J, LIN H, WANG Q, et al. 4D DIA proteomic analysis of gender and age influences on meat quality and flavor in Hetian white sheep [J]. Food Chemistry, 2025, 464(3): 141851.

[11] LIU J, HAN L, HAN W, et al. Effect of different heat treatments on the quality and flavor compounds of black Tibetan sheep meat by HS-GC-IMS coupled with multivariate analysis [J]. Molecules, 2022, 28(1): 165.

[12] 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.

[13] 赵天霞,陈丽,王丽丽,等.基于 GC-IMS 藏羊部位肉挥发性物质差异性分析[J/OL].甘肃农业大学学报,2025: 1-17.

[14] 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.

[15] KHAN M I, JO C, TARIQ M R. Meat flavor precursors and factors influencing flavor precursors—A systematic review [J]. Meat Science, 2015, 110: 278-284.

[16] 张延龙,白天天,普宣宣,等.羊肉风味形成及影响因素的研究进展[J].动物营养学报,2025,37(2):784-793.

[17] SU Y, SUN X, ZHAO S, et al. Dietary alfalfa powder supplementation improves growth and development, body health, and meat quality of Tibetan sheep [J]. Food Chemistry, 2022, 396: 133709.

[18] WANG L W, SU S F, ZHAO J, et al. Effects of dietary oat supplementation on carcass traits, muscle metabolites, amino acid profiles, and its association with meat quality of Small-tail Han sheep [J]. Food Chemistry, 2023, 411: 135456.

[19] 王莉,魏健,吴斌,等.饲养方式对牦牛肌肉脂肪酸组成和挥发性风味物质的影响研究进展[J].动物营养学报,2025,37(1):87-100.

[20] 张利平,吴建平.肉羊体脂脂肪酸与肉品质关系的研究[J].甘肃农业大学学报,2000,4:363-369.

[21] 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.

[22] LIU J, HAN L, HOU S, et al. Integrated metabolome and microbiome analysis reveals the effect of rumen-protected sulfur-containing amino acids on the meat quality of Tibetan sheep meat [J]. Frontiers in Microbiology, 2024, 15: 1345388.

[23] 中拉毛草,周佳,江春德,等.甘南藏羊和海北藏羊肉品质比较研究[J].肉类研究,2023,37(9):14-20

[24] 于小杰,王净,白园园,等.放牧与舍饲饲养方式对小尾寒羊肉品质的影响[J].畜牧兽医学报,2021,8:2223-2232.

[25] NGUYEN H T T, DAS B S, LONG H, et al. Rapid accumulation of proline enhances salinity tolerance in Australian wild rice *Oryza* australiensis domin [J]. Plants (Basel, Switzerland), 2021, 10(10): 2044.

[26] 高玲玲,王振宇,张彩霞,等.欧拉型藏羊肉的涮制加工特性[J].肉类研究,2017,2:16-20.

[27] SOHAIL A, AL-DALALI S, WANG J, et al. Aroma compounds identified in cooked meat: A review [J]. Food Research International (Ottawa, Ont.), 2022, 157: 111385.

[28] MERLO T C, LORENZO J M, SALDANA E, et al. Relationship between volatile organic compounds, free amino acids, and sensory profile of smoked bacon [J]. Meat Science, 2021, 181: 108596.

[29] ZHAO L, ERASMUS S, YANG P, et al. Establishing the relations of characteristic aroma precursors and volatile compounds for authenticating Tibetan pork [J]. Food Chemistry, 2023, 427: 136717.

[30] 王宇,淑英,王慧婷,等.小尾寒羊不同部位风味物质与风味前体物的相关性分析[J].中国食品学报,2024,24(1):263-277.

[31] CUI X, CHEN J, LI S, et al. Growth and physiological characteristics of forage bermudagrass in response to salt stress [J]. BMC Plant Biology, 2025, 25: 269.

[32] MADZIGA I I, OTARU S M, OSUHOR C U, et al. Effect of hay type and breed on the fattening, centesimal and fatty acid composition of Nigerian sheep [J]. Tropical Animal Health and Production, 2024, 57(1): 11.

[33] 杨洋,王清峰,袁超,等.不同能量饲料对贵州黑山羊生长性能、屠宰性能、肉质性状、氨基酸及脂肪酸含量的影响[J].饲料研究,2024,7:1-6.

[34] MA Y, HAN L, HOU S, et al. Fatty acids and volatile flavor components of adipose tissue from local Tibetan sheep in Qinghai with dietary supplementation of Palm Kernel Meal (PKM) [J]. Animals: an open access journal from MDPI, 2024, 14(14): 2113.

[35] ZHANG H, SHEN H, YE Y, et al. Analysis of volatile components from different commercially available Fenugreek Tinctures based on GC-IMS and SPME-GC-MS and their correlation with sensory aroma [J]. Food Science & Nutrition, 2025, 13(4): e4763.

[36] TIAN X, LU Q, ZHAO S, et al. Purple corn Anthocyanin affects lipid mechanism, flavor compound profiles, and related gene expression o*f Longissimus Thoracis et Lumborum* muscle in goats [J]. Animals: an Open Access Journal from MDPI, 2021, 11(8): 2407.

[37] 管淞,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.

[38] ECHEGARAY N, DOMINGUEZ R, CADAVEZ V A P, et al. Influence of the production system (intensive vs. extensive) at farm level on proximate composition and volatile compounds of Portuguese lamb meat [J]. Foods, 2021, 10(7): 1450.

[39] HE S, ZHANG B, DONG X, et al. Differentiation of goat meat freshness using Gas Chromatography with Ion Mobility Spectrometry [J]. Molecules, 2023, 28(9): 3874.

[40] WANG Y, MA Y, DUAN J, et al. Discrimination and characterization of the volatile organic compounds in red and black raspberry wines fermented with different commercial Saccharomyces cerevisiae: An integrated analysis using E-nose, GC-MS, GC-IMS, and multivariate statistical models [J]. Food Chemistry, 2025, 478: 143678.

[41] SHI L, FU X, LIN M, et al. Analysis of the effect of three different blanching processes on the flavor profile of peeled and unpeeled broad beans [J]. Food Research International, 2025, 201: 115578.

[42] LIU C, HOU Y, SU R, et al. Effect of dietary probiotics supplementation on meat quality, volatile flavor compounds, muscle fiber characteristics, and antioxidant capacity in lambs [J]. Food Science & Nutrition, 2022, 10(8): 2646-2658.

[43] 王清,陈舜胜.油爆工艺对上海熏鱼风味物质的影响[J].食品科学,2019,40(2):171-179.

[44] SU T, FU Y, TAN J, et al. Effects of intramuscular fat on the flavor of fresh sheep and goat meat: Recent insights into pre-mortem and post-mortem factors [J]. Food Chemistry: X, 2025, 25: 102159.

[45] PIAO M Y, YONG H I, LEE H J, et al. Comparison of fatty acid profiles and volatile compounds among quality grades and their association with carcass characteristics in *Longissimus dorsi* and *Semimembranosus* muscles of Korean cattle steer [J]. Livestock Science, 2017, 198: 147-156.

[46] WANG F, GAO Y, WANG H, 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.

[47] WANG F, WANG H, LIANG Z, et al. Characterization of flavor compounds in Chinese indigenous sheep breeds using Gas Chromatography-Ion Mobility Spectrometry and Chemometrics [J]. Foods (Basel, Switzerland), 2024, 13(17): 2647.

[48] SHI Y, LI X, HUANG A. A metabolomics-based approach investigates volatile flavor formation and characteristic compounds of the Dahe black pig dry-cured ham [J]. Meat Science, 2019, 158: 107904.

[49] 张秀媛.沙葱及其提取物对肉羊脂质代谢和挥发性风味物质组成的影响及其相关机理[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2020.