

# 基于指纹图谱的欧拉羊肉挥发性风味物质定量分析

陈学敏<sup>1</sup> 朱国茵<sup>1</sup> 罗海玲<sup>2,3</sup> 余忠祥<sup>4</sup> 罗洁<sup>5</sup> 张昊<sup>1,6</sup>

(1. 中国农业大学食品科学与营养工程学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学动物科学技术学院, 北京 100193;  
3. 中国农业大学动物营养学国家重点实验室, 北京 100193; 4. 青海大学畜牧兽医科学院, 西宁 810016;  
5. 湖南农业大学食品科学技术学院, 长沙 410128; 6. 中国农业大学北京食品营养与人类健康高精尖创新中心, 北京 100083)

**摘要:** 欧拉羊分布在青藏高原东部, 生活环境特殊, 羊肉品质独特, 但其挥发性风味物质组成尚不明确。为研究欧拉羊肉熟制时的挥发性风味物质, 并构建相应指纹图谱, 以欧拉羊、湖羊、杜泊羊和滩羊羊肉为研究对象, 利用顶空固相微萃取-结合气相色谱质谱联用法, 对羊肉挥发性风味物质进行定性定量分析, 并通过嗅辨仪鉴定出呈香化合物。运用主成分分析和聚类分析, 将欧拉羊与湖羊、杜泊羊、滩羊羊肉的风味进行比较, 从而明确欧拉羊肉的挥发性风味物质, 并建立指纹图谱。结果表明, 在欧拉羊肉中检测到醛类、酮类、醇类、杂环类、烷烃类等共 53 种挥发性物质, 其中 77% 具有气味活性。所有物质中醛类有 20 种, 在整体风味物质中的相对含量占比达 62%, 对风味贡献最大。欧拉羊肉整体风味物质轮廓与其他 3 种羊肉有显著区别, 其特征性风味物质主要包括 (E)-2-己烯醛、(E, E)-2, 4-庚二烯醛、(E, E)-2, 4-辛二烯醛、3-辛烯-2-酮等不饱和醛酮, 4-异丙基甲苯等烷烃类, 以及苯并噻唑等其他呈味物质, 它们共同贡献了水果香、坚果味、青草味等令人愉悦的气味。

**关键词:** 欧拉羊; 挥发性风味; 气相色谱-质谱法; 指纹图谱

中图分类号: TS251.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)05-0349-07

OSID:



## Quantitative Analysis of Oula Lamb Meat Volatile Compounds Based on Fingerprint

CHEN Xuemin<sup>1</sup> ZHU Guoyin<sup>1</sup> LUO Hailing<sup>2,3</sup> YU Zhongxiang<sup>4</sup> LUO Jie<sup>5</sup> ZHANG Hao<sup>1,6</sup>

(1. College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. College of Animal Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China

3. State Key Laboratory of Animal Nutrition, China Agricultural University, Beijing 100193, China

4. Academy of Animal and Veterinary Science, Qinghai University, Xining 810016, China

5. College of Food Science and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China

6. Beijing Advanced Innovation Center for Food Nutrition and Human Health, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Distributed in the eastern Qinghai-Tibet plateau where the environmental condition is unique, Oula lamb is of distinction owing to the quality of its meat. Aiming to establish the fingerprint of volatile flavor for Oula lamb meat. The lamb meat was obtained from four kinds of lamb: Oula lamb, Hu lamb, Dorper lamb and Tan lamb. Extraction and analysis of the volatile compounds were carried out by headspace solid-phase microextraction and gas chromatography-mass spectrometry respectively. At the same time, gas chromatography-olfactometry was used to assess the fragrant compounds. Principal component analysis and cluster analysis were applied to determine the chemical variability among four kinds of lamb meat. The results showed that 53 volatile components of Oula lamb meat were identified and quantified, including aldehydes, heterocycles, hydrocarbons, alcohols and ketones, among which 77% possessed perceptible aromas. Totally 20 kinds of aldehydes with their content accounting for 62% contributed the most to flavor. Grouping of samples highlighted a good classification of the results, providing a significant separation between Oula lamb meat and other three kinds of lamb meat. Characteristic flavor compounds of Oula lamb meat mainly included (E)-2-hexenal, (E, E)-2, 4-heptadienal, (E, E)-2, 4-octadienal, 3-octen-2-one and other unsaturated aldehydes and ketones,

收稿日期: 2020-01-23 修回日期: 2020-02-22

基金项目: 国家级大学生创新创业训练计划项目(201910019084)和国家肉羊产业技术体系项目(CARS-38)

作者简介: 陈学敏(1998—), 女, 博士生, 主要从事畜产品加工研究, E-mail: 2017306100614@cau.edu.cn

通信作者: 张昊(1984—), 男, 副教授, 博士, 主要从事畜产品加工研究, E-mail: zhanghaocau@cau.edu.cn

together with some hydrocarbons, such as p-cymene, and other flavor compounds such as benzothiazole, providing fruits, nuts and grass odors. The findings provided the volatile fingerprint of Oula lamb meat, which can promote the development of related products of Oula lamb.

**Key words:** Oula lamb; volatile flavor; gas chromatography – mass spectrometry; fingerprint

## 0 引言

相比于食物的味道和质地,挥发性风味是更能区别肉类食品的重要质量特征<sup>[1-2]</sup>。肉类食品风味物质的前体主要包括水溶性的氨基酸、还原糖、核糖、硫胺素等小分子物质以及肌间和皮下脂肪<sup>[3]</sup>。在一定熟制条件下,前者通过美拉德反应或热降解,后者通过脂肪氧化分解等途径,产生杂环化合物、醛、酮、酯和酸等挥发性风味物质。羊肉的特征风味成分主要包括支链脂肪酸(如4-甲基辛酸、4-乙基辛酸、4-甲基壬酸等致膻类物质<sup>[4]</sup>)和短链脂肪醛(如己醛、辛醛等具有水果和青草气味特征的物质)<sup>[5]</sup>。目前,我国已成为世界上绵羊和山羊饲养量、出栏量、羊肉产量最多的国家<sup>[6]</sup>,肉羊品种繁多,其中滩羊、湖羊和杜泊羊都是优良绵羊品种。滩羊是我国宁夏地区特有的肉裘兼用型地方良种,湖羊在全国主要养羊产区作为肉用羊或作为母羊进行杂交改良,两者在我国的饲养量均超过百万只<sup>[7-8]</sup>。杜泊羊自南非引入我国,其适应性强、生长发育快、生产稳定<sup>[9]</sup>,国内大部分地区利用羊的生物学特性与地方绵羊品种进行杂交利用<sup>[10]</sup>。羊的品种及相关遗传因素对羊肉挥发性风味物质组成具有重要影响<sup>[11-12]</sup>,因此需对不同品种羊肉挥发性风味物质的组成特点进行研究。

欧拉羊属藏系绵羊,生活在青藏高原,其羊肉符合消费者对天然、绿色高端羊肉产品的需求。目前对欧拉羊的研究主要集中于营养品质方面<sup>[13-14]</sup>,缺乏对其特征风味的研究。本文利用顶空固相微萃取(Solid-phase microextraction, SPME)对羊肉风味物质进行吸附,继而通过气相色谱质谱联用法(Gas chromatography – mass spectrometry, GC – MS)对这些物质进行定性定量分析,最后采用嗅觉检测器鉴定呈香化合物,并与国内具有代表性的主要肉用绵羊品种的羊肉挥发性风味成分进行比较,明确欧拉羊肉的特征风味,并建立相应指纹图谱,以促进欧拉羊肉产品的进一步开发。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

从青海省黄南州河南蒙古族自治县随机选取自由放牧的10只欧拉羊,皆为1.5岁龄羯羊,当地天

然草场植被以高寒草甸类为主,植被以线叶嵩草、小嵩草、火绒草、萎陵菜、披碱草、早熟禾、风毛菊等为主。同时选取相同年龄、性别,且自由放牧的滩羊、湖羊、杜泊羊各10只作为对照。宰前禁食24 h、停水2 h,宰后取背最长肌300 g,装入自封袋于-18℃保存。

C7 – C30 正构烷烃混标,美国 Sigma 公司;邻二氯苯标准品、正己烷(色谱纯),中国百灵威公司;氯化钠(分析纯),天津市永大化学试剂有限公司。

### 1.2 仪器与设备

手动 SPME 进样器,75 μm 碳分子筛/聚二甲甲基硅氧烷(CAR/PDMS)萃取头,美国 Supelco 公司;7890B – 5977B 型气质联用仪、DB – WAX UI 型色谱柱(30 m × 0.250 mm),美国 Agilent 公司;ODP3 型嗅觉检测器,德国 Gerstel 公司。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 样品制备

参照文献[15]的方法并稍作修改,将羊肉自然解冻,除去筋膜并绞碎,取10 g 样品置于40 mL 顶空瓶中,加入2 g 氯化钠固体,再加入50 μL 质量浓度为 $5 \times 10^{-7}$  g/mL 的邻二氯苯溶液作为内标。封口后在120℃下加热30 min,冷却至室温(20℃),60℃恒温水浴,以 SPME 进样器吸附30 min,吸附过程保持密封状态,吸附完毕后进样。

#### 1.3.2 GC – MS 分析和呈香物质的鉴定

色谱条件:萃取头解吸5 min,进样口温度250℃,不分流,载气为氦气,流速0.8 mL/min。色谱柱采用程序升温,起始柱温40℃,保持3 min,以6℃/min 升至230℃,保留3 min。

质谱条件:电离方式 EI(70 eV),离子源温度230℃,灯丝电流200 μA,检测电压350 V,接口温度240℃,扫描速度1 562 u/s,扫描质量(质荷比)范围为45 ~ 350。

嗅辨仪分析:气相色谱仪流出物在毛细管末端以1:1的分流比分别流入氢焰离子化检测器和嗅觉检测器。在嗅觉检测器的嗅闻端口由8名经过培训的感官评价员进行嗅闻评定实验,同一相对嗅闻时间内可以同时被4名及以上人员感觉到时记录结果,鉴定出呈香化合物。

定性方法:根据 Mainlib/NIST/Wiley 7 质谱库对风味物质进行初步定性(匹配度大于800),然后

计算待测物质的保留指数并与该物质的文献参考值比较,相差在100以内则认为定性结果准确。

正构烷烃标品在以上色谱与质谱条件下进样分析,待测物质的保留指数计算公式为

$$R_x = 100N + \frac{T_x - T_y}{T_z - T_x} \times 100$$

式中  $N$ ——保留时间小于且最接近待测物质的正构烷烃碳数

$T_x$ ——待测物质的保留时间, min

$T_y$ ——小于且最接近待测物质的正构烷烃保留时间, min

$T_z$ ——大于且最接近待测物质的正构烷烃保留时间, min

定量方法:根据各风味物质峰面积与内标峰面积比计算相对含量,响应因子取1<sup>[11,16]</sup>。

#### 1.4 数据分析

采用SPSS软件进行 $t$ 检验或单因素方差分析,同时用Dunnnett法进行多重比较,显著性水平均设为0.05,并对风味物质进行主成分分析。采用Matlab对风味物质进行系统聚类分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 定性分析

由表1可知,欧拉羊肉中共检测到挥发性风味成分53种,其中具有气味活性的成分41种,占总物质数目77%。湖羊、杜泊羊、滩羊羊肉中分别检测到24、31、28种挥发性成分。在检测到的欧拉羊肉风味成分中,大部分为醛类风味物质,共20种,它们主要是不饱和脂肪酸的衍生物。已有研究表明,欧拉羊肉的不饱和脂肪酸水平较高<sup>[14,17]</sup>,为其风味形成提供了良好的物质基础。与其他3种羊肉类似,欧拉羊肉挥发性风味物质中具有庚醛、壬醛、己醛等直链醛,分别具有油脂、青草味,是构成羊肉挥发性风味的主要物质。在4种羊肉中均检测到了由苯丙氨酸通过Strecker途径降解形成的苯乙醛<sup>[18]</sup>,具有蜂蜜甜味,气味阈值较低。不同之处在于,欧拉羊肉风味物质中含有特征性的癸醛、4-乙基苯甲醛以及更多种单不饱和、多不饱和醛,具体包括(E)-2-己烯醛、(E)-2-庚烯醛、(E,E)-2,4-庚二烯醛、(E,Z)-2,6-壬二烯醛、(E,E)-2,4-辛二烯醛。其中,(E,E)-2,4-庚二烯醛(坚果味)、(E,Z)-2,6-壬二烯醛(黄瓜味)是 $\alpha$ -亚麻酸衍生物<sup>[19]</sup>,这些风味成分的差异主要是由羊脂肪酸组成差异所致。

在检测到的呈味杂环类化合物中,烷基衍生物大多是脂肪的降解产物,如2-正戊基呋喃、2-乙基吡啶分别是亚油酸<sup>[20]</sup>和二十碳五烯酸<sup>[7]</sup>的氧化

分解产物,二者分别提供了烤肉味和焦糖味,其中2-乙基吡啶是欧拉羊肉中的特征风味物质。含硫杂环化合物大多是含硫氨基酸参与美拉德反应得到的衍生物,如2-乙酰基吡咯是谷胱甘肽-葡萄糖反应体系的产物<sup>[21]</sup>,其具有坚果味和面包香。同时,在欧拉羊肉挥发性风味物质中检测到特征性的苯并噻唑,属于熟肉的关键风味物质之一<sup>[22]</sup>,主要来源于半胱氨酸和葡萄糖反应体系,气味阈值较低<sup>[23]</sup>,对羊肉油脂香味有很大贡献。此外,区别于湖羊,没有在欧拉羊肉中发现糠醇这一物质,其具有焦味。

与其他3种羊不同,在欧拉羊肉挥发性风味物质中检测到了沉香醇,属于链状萜烯醇类,具有柑橘味。其他特征性风味物质包括烷烃类的柠檬烯、4-异丙基甲苯和酮类的6-甲基-5-庚烯-2-酮、3-辛烯-2-酮、3,5-辛二烯-2-酮、苯乙酮等。另一方面,没有在欧拉羊肉中检测到具有气味活性的戊醇和2-十一酮,也没有发现辛酸、己酸等膻味物质。

图1展示了4种羊肉不同种类挥发性风味物质种类数量所占百分比情况。欧拉羊肉挥发性成分中醛类数目占比最高,超过1/3的物质为醛类,所含杂环类、烷烃类和醇类的数目占比次之,均占15%左右。与其他品种羊肉相比,欧拉羊肉风味中杂环类和酮类物质种类占比相对较高,醇类物质数目占比相对较低,并且没有发现酸类物质。羊肉风味物质中大多数酸类物质是脂肪酸等前体物质在绵羊体内经过一系列代谢形成的<sup>[24]</sup>,这些代谢途径受到细胞色素P450(Cytochrome P450 2A6, CYP2A6)、驱动蛋白样蛋白KIF12(Kinesin-like protein 12, KIF12)、细胞溶质磺基转移酶1C1(Sulfotransferase 1C1, SULT1C1)等关键酶和蛋白的调控<sup>[25]</sup>,欧拉羊肉挥发性风味物质中未发现酸类物质可能与其体内相应酶和蛋白的基因表达程度有关。

### 2.2 定量分析

图2(图中\*表示与欧拉羊相比差异显著, $p < 0.05$ )显示了相对含量占比大于5%的4类风味物质对羊肉整体风味的贡献。醛类物质在4种羊肉风味物质中的相对含量均超过50%,在欧拉羊中占62%,在湖羊中最高达72%。与其他羊相比,欧拉羊肉挥发性风味物质组成中杂环类化合物含量占比相对较大,相对含量为10%,烷烃类物质含量占比相对较低,相对含量为20%。由表1可知,欧拉羊肉中每类化合物含量较高的代表性物质分别为己醛((2004 ± 614) ng/(100 g))、2-正戊基呋喃((672 ± 164) ng/(100 g))、辛醇((251 ± 67) ng/(100 g))、苯乙烯((1014 ± 264) ng/(100 g))、3-辛烯-2-酮

表1 欧拉羊肉及其他品种羊肉挥发性风味组成

Tab.1 Identified volatile compounds of Oula lamb meat and other kinds of lamb meat

成分	保留 指数	相对含量/(ng·(100 g) <sup>-1</sup> )				气味特征
		欧拉羊	湖羊	杜泊羊	滩羊	
己醛	1 081	2 004 ± 614	616 ± 47 *	2 567 ± 1 155	2 015 ± 384	药草味
庚醛	1 183	1 685 ± 514	913 ± 120	6 334 ± 1 151 *	1 694 ± 320	油脂味
(E)-2-己烯醛	1 266	111 ± 56				苹果香味
(E,E)-2,4-己二烯醛	1 267	47 ± 10	2 ± 0 *	17 ± 2 *	6 ± 1 *	青草味
辛醛	1 290	921 ± 186	254 ± 22 *	2 003 ± 399 *	1 492 ± 286 *	柑橘味
(E)-2-庚烯醛	1 323	357 ± 88				油脂味
壬醛	1 394	1 322 ± 305	515 ± 96 *	1 352 ± 286	1 631 ± 374	油脂味
(E)-2-辛烯醛	1 408	191 ± 48	40 ± 8 *	1 007 ± 104 *	325 ± 124	坚果味
(E,E)-2,4-庚二烯醛	1 495	59 ± 3				坚果味
苯甲醛	1 495	569 ± 135	100 ± 13 *	799 ± 150 *	1 159 ± 274 *	杏仁、焦糖味
癸醛	1 498	65 ± 15				油脂味、焦味
(E)-2-壬烯醛	1 538	433 ± 124		153 ± 24 *		青草味
(E,Z)-2,6-壬二烯醛	1 587	9 ± 2				清新、黄瓜味
(E,E)-2,4-辛二烯醛	1 603	12 ± 1				青草味
(E)-2-癸烯醛	1 621	183 ± 50	30 ± 4 *	179 ± 42	161 ± 33	油脂味
苯乙醛	1 639	63 ± 15	6 ± 1 *	156 ± 29 *	100 ± 21 *	蜂蜜甜味
(E,E)-2,4-壬二烯醛	1 702	22 ± 5				油脂味
4-乙基苯甲醛	1 707	32 ± 5		40 ± 8		甜味
(E)-2-十一烯醛	1 754	88 ± 24		192 ± 41 *	34 ± 6 *	甜味
(E,E)-2,4-癸二烯醛	1 811	66 ± 15		171 ± 33 *		油脂味
2-乙基呋喃	955	165 ± 21				
糠醇	1 199		31 ± 5			焦味
2-正戊基呋喃	1 224	672 ± 164		668 ± 63	1 202 ± 327 *	烤肉、黄油味
2-乙基吡啶	1 386	16 ± 5				焦糖味
苯并噻吩	1 692	13 ± 3				
3-(1-环戊烯基)呋喃	1 707	33 ± 8				
3-噻吩甲醛	1 800	49 ± 9	14 ± 3 *	72 ± 12 *	19 ± 4 *	
2-甲基苯并噻唑	1 943	46 ± 11				
苯并噻唑	1 958	201 ± 57				油脂味
2-乙酰基吡咯	1 974	70 ± 5	17 ± 4 *	64 ± 14	61 ± 13	坚果味、面包香
戊醇	1 255		38 ± 25	513 ± 53	164 ± 33	香油味
己醇	1 360	145 ± 35	35 ± 8 *	198 ± 33	153 ± 36	松香
1-辛烯-3-醇	1 453	203 ± 46	74 ± 14 *	1 172 ± 256 *	617 ± 94 *	蘑菇味
庚醇	1 461	179 ± 42	66 ± 15 *	223 ± 40	183 ± 40	青草味
2-乙基己醇	1 491	164 ± 34	77 ± 16 *	154 ± 37		玫瑰味
沉香醇	1 551	84 ± 23				花香
辛醇	1 564	251 ± 67	16 ± 3 *	292 ± 28	246 ± 58	焦味
(E)-2-辛烯醇	1 620	23 ± 9	12 ± 2	126 ± 26 *	71 ± 14 *	油脂味
苯甲醇	1 806	24 ± 3	187 ± 46 *	110 ± 32 *	90 ± 12 *	甜味、花香
甲苯	1 038	353 ± 102				
对二甲苯	1 121	314 ± 19	14 ± 1 *	1 591 ± 364 *	1 199 ± 430 *	
乙苯	1 129	149 ± 48		2 830 ± 761 *	1 945 ± 598 *	
间二甲苯	1 133	243 ± 52		1 952 ± 879 *	1 463 ± 1 095 *	
邻二甲苯	1 170	47 ± 13	400 ± 12 *	1 886 ± 355 *	2 035 ± 642 *	天竺葵香
柠檬烯	1 197	277 ± 59				柠檬、柑橘味
苯乙烷	1 251	1 014 ± 264		1 166 ± 187	1 619 ± 282 *	香油味
4-异丙基甲苯	1 264	184 ± 46				柑橘味
1,3-二叔丁基苯	1 421	89 ± 20				
3,3-二甲基-2-丁酮	1 060	47 ± 2				
6-甲基-5-庚烯-2-酮	1 336	30 ± 6				蘑菇味
3-辛烯-2-酮	1 413	72 ± 1				坚果味
2-十一酮	1 543		6 ± 1	40 ± 6	31 ± 7	柑橘、青草味
3,5-辛二烯-2-酮	1 572	26 ± 7				水果香
苯乙酮	1 651	58 ± 16				花香
己酸	1 803			72 ± 8	115 ± 30	汗味、膻味
辛酸	2 083		7 ± 1		17 ± 2	奶酪味、膻味
二甲基三硫醚	1 377	15 ± 2				甘蓝味
N,N-二丁基酰胺	1 781	59 ± 9				

注:同一行中\*表示与欧拉羊相比差异显著( $p < 0.05$ )。

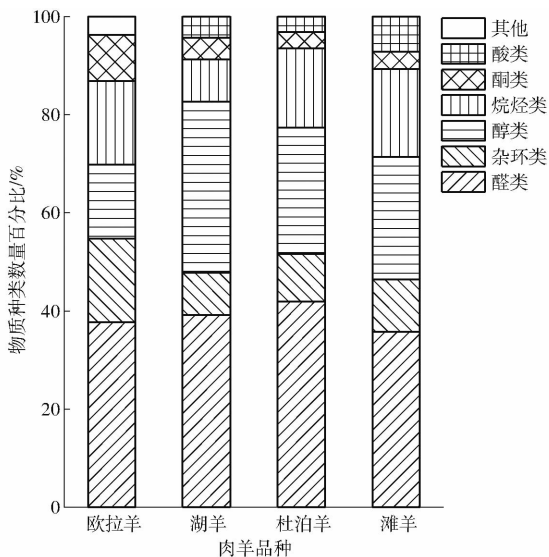


图1 4种羊肉挥发性风味中各类物质种类数量占比  
Fig. 1 Distribution of amount of each volatile compound class in four kinds of lamb meat

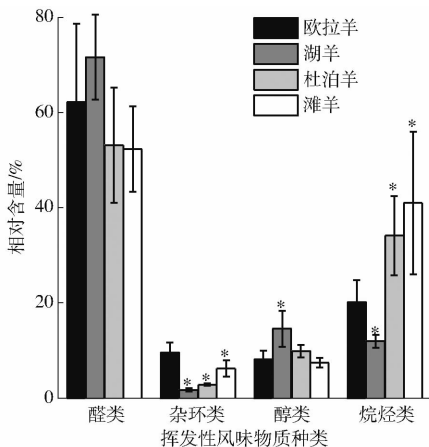


图2 4种羊肉主要挥发性风味物质种类的相对含量  
Fig. 2 Percentage of main volatile compound classes content in four kinds of lamb meat

((72 ± 1) ng/(100 g))等,其中己醛是所有挥发性风味物质中含量最高的,它们均有气味活性。欧拉羊肉挥发性风味物质中(E,E)-2,4-己二烯醛含量显著高于其他3种羊,增强了风味中的青草气味。邻二甲苯含量显著低于其他3种羊,辛醛、苯甲醛、苯乙醛、苯甲醇和1-辛烯-3-醇水平较低,显著低于杜泊羊和滩羊,这可能与绵羊体内脂肪酸、氨基酸等前体物质的组成有关<sup>[26]</sup>。

## 2.3 主成分分析和聚类分析

### 2.3.1 主成分分析

以4种羊肉挥发性风味物质含量原始数据矩阵进行主成分分析,降维后提取前两个主成分,累积贡献率为87.709%,表明信息保留程度较为完整,且可以通过前两个主成分较好地地区分4种羊肉风味。将旋转后的成分矩阵投影到二维空间平面图内,直接观察样本点之间的相似关系及分布特点<sup>[27]</sup>,根据主成分分析原则,

样品点间距离越接近,其挥发性风味组成越相似<sup>[28]</sup>。由图3可知,绝大多数欧拉羊肉样品区别于其他3种羊肉样品单独聚集在一起,说明在整体风味轮廓上欧拉羊肉与其他品种羊肉存在明显差异。

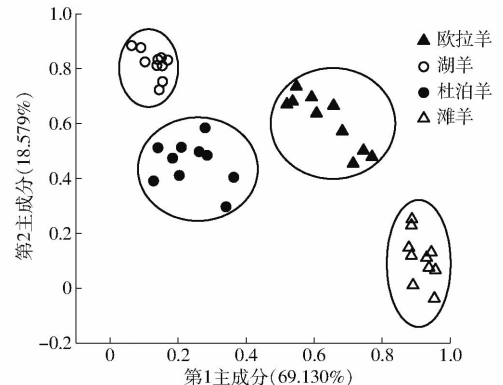


图3 4种羊肉挥发性风味物质主成分分析  
Fig. 3 PCA loadings plot of volatile compounds of lamb meat

### 2.3.2 聚类分析

为了进一步观察4种羊肉样品组内和组间的相似程度与差异,并且在建立欧拉羊肉挥发性风味物质指纹图谱时,排除组内差异较大样本的干扰,得到更为标准化的信息<sup>[29]</sup>,因此对4个品种羊肉挥发性风味物质进行聚类分析。方法上采用组间联接法,对原始变量采用Z得分法进行标准化的预处理,以欧氏距离为度量标准,得到聚类谱系图。根据聚类原则,样本间欧氏距离越短其相似性越高。由图4(编号1~10、11~20、21~30、31~40分别表示欧拉羊、湖羊、杜泊羊、滩羊样本)可知,在欧氏距离小于12时,10个湖羊样本、9个杜泊羊样本、10个滩羊样本、8个欧拉羊样本分别聚为一类,形成4个组,说明4种羊肉挥发性风味各自具有一定区别度,这与PCA分析结果一致。当欧氏距离为10.5时,前3组,即其他3种羊肉样本共同聚为一大类,说明欧拉羊肉挥发性风味物质与其他3种羊具有一定差异。对于欧拉羊来说,第一大类具有8个样本,欧氏距离最大差值为11.5,随着距离的继续增大,样本5和样本4才相继并入第一大类,说明样本5和样本4与其余样本之间相似度低,不宜将其纳入后续指纹图谱信息的计算中,以免影响对共有峰识别结果的可信度。

### 2.4 指纹图谱构建

根据聚类分析的结果,选取相似性最高的8个欧拉羊样本为代表性样品,根据其GC-MS定性定量结果和嗅闻识别结果,在色谱峰分析过程中删除峰面积低于10 000(浓度过低)和保留时间大于35 min的峰(此类峰一般为高沸点化合物,没有香气)<sup>[30-31]</sup>,以40种具有气味活性物质的共有峰建立

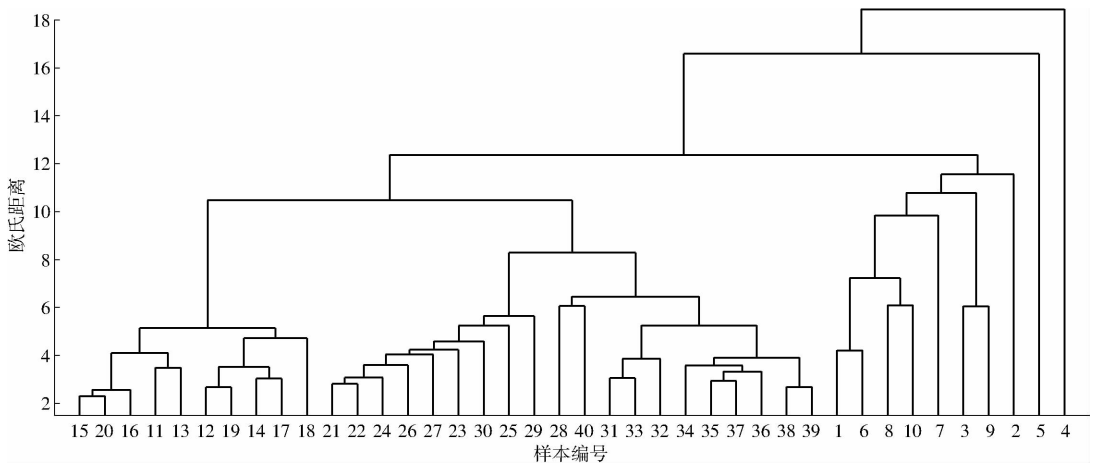


图4 4种羊肉挥发性风味物质聚类分析

Fig.4 Cluster pedigree diagram of volatile compounds of lamb meat

指纹图谱。如图5所示,大多数风味物质的保留时间集中在5~25 min。响应值较高的物质主要是己醛、庚醛、壬醛、辛醛等直链脂肪醛及2-正戊基呋喃、苯乙烯等杂环类和烷烃类物质,它们具有油脂

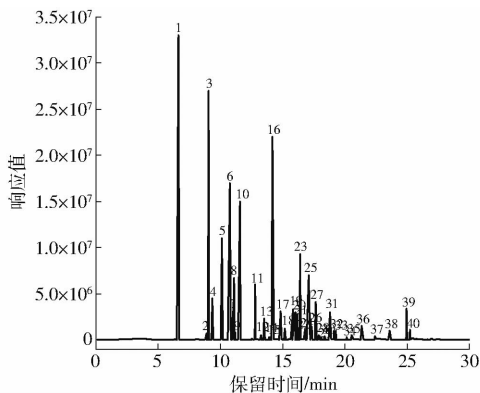


图5 欧拉羊肉挥发性风味物质指纹图谱

Fig.5 Fingerprint of volatiles of Oula lamb meat

1. 己醛 2. 邻二甲苯 3. 庚醛 4. 柠檬烯 5. 2-正戊基呋喃
6. 苯乙烯 7. 4-异丙基甲苯 8. (E)-2-己烯醛 9. (E,E)-2,4-己二烯醛 10. 辛醛 11. (E)-2-庚烯醛 12. 6-甲基-5-庚烯-2-酮
13. 己醇 14. 二甲基三硫醚 15. 2-乙基吡啶 16. 壬醛 17. (E)-2-辛烯醛 18. 3-辛烯-2-酮 19. 1-辛烯-3-醇 20. 庚醇 21. 2-乙基己醇
22. (E,E)-2,4-庚二烯醛 23. 苯甲醛 24. 癸醛
25. (E)-2-壬烯醛 26. 沉香醇 27. 辛醇 28. 3,5-辛二烯-2-酮
29. (E,E)-2,4-辛二烯醛 30. (E)-2-辛烯醇 31. (E)-2-癸烯醛
32. 苯乙醛 33. 苯乙酮 34. (E,E)-2,4-壬二烯醛 35. 4-乙基苯甲醛
36. (E)-2-十一烯醛 37. 苯甲醇 38. (E,E)-2,4-癸二烯醛
39. 苯并噻唑 40. 2-乙酰基吡咯

味、青草味等令人愉悦的气味,对欧拉羊肉挥发性风味物质轮廓的构建贡献很大。此外,一些欧拉羊肉独有的特征性风味物质,包括具有花香味的苯乙酮、沉香醇,具有柑橘味的4-异丙基甲苯、柠檬烯,具有坚果味的(E,E)-2,4-庚二烯醛、3-辛烯-2-酮以及其他气味阈值较低的风味物质如苯并噻唑、二甲基三硫醚等,都使欧拉羊挥发性风味物质轮廓更加丰富,共同构成了欧拉羊肉的风味物质指纹图谱。

### 3 结束语

利用 SPME-GC-MS 和嗅闻技术对欧拉羊肉挥发性风味物质进行分析,检测到挥发性物质 53 种,同时检测到湖羊、杜泊羊、滩羊 3 种羊肉的挥发性风味物质分别为 24、31、28 种,与这 3 种羊肉相比,欧拉羊肉挥发性风味中杂环类含量占比高,烷烃类含量占比相对较低,未发现酸类物质。欧拉羊肉特征性风味物质主要包括(E)-2-己烯醛、(E,E)-2,4-庚二烯醛、(E,E)-2,4-辛二烯醛、3-辛烯-2-酮等不饱和醛酮,以及4-异丙基甲苯等烷烃类和苯并噻唑等其他呈味物质,它们共同贡献了水果香、坚果味、青草味等令人愉悦的气味。从主成分分析和聚类分析的结果可以看出,欧拉羊肉的整体风味物质轮廓与其他3种羊有显著性区别。最终建立了欧拉羊肉挥发性风味物质指纹图谱,以为后续相关产品的开发提供参考。

### 参 考 文 献

- [1] MATSUISHI M, IGETA M, TAKEDA S, et al. Sensory factors contributing to the identification of the animal species of meat [J]. *Journal of Food Science*, 2004, 69(6): S218 - S220.
- [2] 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/OL]. *农业机械学报*, 2019, 50(3): 336 - 344.  
WANG Debao, HU Guanhua, SU Rina, et al. Effects of artificial starter cultures on lipolysis, proteolysis and flavor formation in mutton sausages [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(3): 336 - 344. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20190338&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190338&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.03.038. (in Chinese)
- [3] HUANG Y C, LI H J, HE Z F, et al. Study on the flavor contribution of phospholipids and triglycerides to pork [J]. *Food Science and Biotechnology*, 2010, 19(5): 1267 - 1276.
- [4] GKARANE V, BRUNTON N P, HARRISON S M, et al. Volatile profile of grilled lamb as affected by castration and age at

- slaughter in two breeds [J]. *Journal of Food Science*, 2018, 83(10): 2466–2477.
- [5] ZHAN P, TIAN H L, SUN B G, et al. Quality control of mutton by using volatile compound fingerprinting techniques and chemometric methods [J]. *Journal of Food Quality*, 2017, 9(8): 1–8.
- [6] 李江鹏. 我国肉羊产业品牌发展研究 [J]. *当代畜牧*, 2018(21): 66–69.
- [7] 席斌, 高雅琴, 李维红. 我国湖羊的发展现状及前景 [J]. *中国兽医杂志*, 2007, 26(5): 37–41.
- [8] 朱雯静, 张吉清. 宁夏盐池滩羊产业发展现状分析 [J]. *现代畜牧科技*, 2016(9): 3–4.
- [9] 王生富, 刘荣. 肉羊不同杂交组合的生产性能分析 [J]. *当代畜禽养殖业*, 2019(5): 8–10.
- [10] 贾超, 李佳蓉, 姜怀志. 国内杜泊羊的利用状况分析研究进展 [J]. *中国畜牧兽医*, 2017, 44(11): 3257–3263.
- JIA Chao, LI Jiarong, JIANG Huaizhi. Research progress on utilization analysis of Dorper in China [J]. *China Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2017, 44(11): 3257–3263. (in Chinese)
- [11] ELMORE J S, MOTTRAM D S, ENSER M, et al. The effects of diet and breed on the volatile compounds of cooked lamb [J]. *Meat Science*, 2000, 55(2): 149–159.
- [12] 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. Slaughter performance, meat quality, fatty acids and volatile components of Sunit lambs and Small-Tailed Han lambs [J]. *Food Science*, 2018, 39(8): 103–107. (in Chinese)
- [13] 毛学荣. 欧拉型藏羊的肉质分析 [J]. *青海畜牧兽医杂志*, 2005, 35(3): 3–4.
- MAO Xuerong. Analysis mutton quality of Oula-type of tibetan sheep [J]. *Chinese Qinghai Journal of Animal and Veterinary Sciences*, 2005, 35(3): 3–4. (in Chinese)
- [14] 皮立, 胡凤祖, 星玉秀, 等. 青海欧拉羊肌肉脂肪酸组成的气相色谱-质谱分析 [J]. *食品科学*, 2012, 33(6): 190–193.
- PI Li, HU Fengzu, XING Yuxiu, et al. GC-MS analysis of muscle fatty acid composition of Oula sheep living in Qinghai Province [J]. *Food Science*, 2012, 33(6): 190–193. (in Chinese)
- [15] MACHIELS D, ISTASSE L. Evaluation of two commercial solid-phase microextraction fibres for the analysis of target aroma compounds in cooked beef meat [J]. *Talanta*, 2003, 61(4): 529–537.
- [16] 李伟, 罗瑞明, 李亚蕾, 等. 宁夏滩羊肉的特征香气成分分析 [J]. *现代食品科技*, 2013, 29(5): 1173–1177.
- LI Wei, LUO Ruiming, LI Yalei, et al. Analysis of characteristic aroma compounds of Ningxia Tan mutton [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2013, 29(5): 1173–1177. (in Chinese)
- [17] 张灿, 李鹤琼, 余忠祥, 等. 自然放牧方式下欧拉羊羊肉中矿物元素、脂肪酸及氨基酸含量分析 [J]. *中国畜牧杂志*, 2020, 56(1): 159–163, 167.
- ZHANG Can, LI Heqiong, YU Zhongxiang, et al. Meat mineral, fatty acid and amino acid profile of Oula lambs at pasture [J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2020, 56(1): 159–163, 167. (in Chinese)
- [18] LOTFY S N, FADEL H H M, EL-GHORAB A H, et al. Stability of encapsulated beef-like flavourings prepared from enzymatically hydrolysed mushroom proteins with other precursors under conventional and microwave heating [J]. *Food Chemistry*, 2015, 187: 7–13.
- [19] ELMORE J S, MOTTRAM D S. The role of lipid in the flavour of cooked beef [C] // BREDIE W L P, PETERSEN M A. *Developments in food science. 11th Weurman Flavour Research Symposium*, 2005, Roskilde, Denmark. Netherlands: Elsevier Science, 2006, 43: 375–378.
- [20] HOA V B, AMNA T, HWANG I. Significant influence of particular unsaturated fatty acids and pH on the volatile compounds in meat-like model systems [J]. *Meat Science*, 2013, 94(4): 480–488.
- [21] ZHAO J, WANG T Z, XIE J C, et al. Formation mechanism of aroma compounds in a glutathione-glucose reaction with fat or oxidized fat [J]. *Food Chemistry*, 2019, 270: 436–444.
- [22] MACHIELS D, VAN R S M, POSTHUMUS M A. Gas chromatography-olfactometry analysis of the volatile compounds of two commercial Irish beef meats [J]. *Talanta*, 2003, 60(4): 755–764.
- [23] 罗玉龙, 靳志敏, 刘夏炜, 等. 肉制品中香味物质形成原因研究进展 [J]. *食品与发酵工业*, 2015, 41(2): 254–258.
- LUO Yulong, JIN Zhimin, LIU Xiawei, et al. Development of research on aroma of mechanism in meat products [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2015, 41(2): 254–258. (in Chinese)
- [24] BUCCIONI A, DECANDIA M, MINIERI S, et al. Lipid metabolism in the rumen: new insights on the lipolysis and biohydrogenation with an emphasis on the role of endogenous plant factors [J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2012, 174(1–2): 1–25.
- [25] LISTYARINI K, JAKARIA, FURQON A, et al. Expression of CYP2A6, KIF12, and SULT1C1 in liver of sheep with divergent sheep meat flavour and odour [C] // IOP. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 1st International Conference on Food Security and Sustainable Agriculture in The Tropics*, 2017, Hasanuddin University, Makassar, Indonesia. England: IOP Publishing, 2018, 157: 012029.
- [26] 李敬, 杨媛媛, 赵青余, 等. 肉风味前体物质与风味品质的关系研究进展 [J]. *中国畜牧杂志*, 2019, 55(11): 1–7.
- LI Jing, YANG Yuanyuan, ZHAO Qingyu, et al. Research progress on the relationship between meat flavor precursors and flavor [J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2019, 55(11): 1–7. (in Chinese)
- [27] 张亚飞, 姚瑶, 杜林笑, 等. 基于主成分分析的新疆多地酿酒葡萄赤霞珠品质分析及最适采收期 [J]. *食品工业科技*, 2020, 41(2): 227–232.
- ZHANG Yafei, YAO Yao, DU Linxiao, et al. Quality analysis and optimal harvest period of cabernet sauvignon in Xinjiang based on principal component analysis [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(2): 227–232. (in Chinese)
- [28] JIAO L, XUE Z W, WANG G F, et al. Application of Fourier transform to preprocessing chromatographic fingerprints of traditional Chinese medicine [J]. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2015, 140: 141–148.
- [29] 王超群, 张晖, 钱海峰, 等. 气相色谱结合主成分分析和聚类分析用于裸燕麦脂肪酸标准指纹图谱的建立 [J]. *食品工业科技*, 2016, 37(10): 82–87, 93.
- WANG Chaoqun, ZHANG Hui, QIAN Haifeng, et al. Establishment of fatty acids standard fingerprints of naked oats by GC combined with cluster analysis and principal component analysis [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2016, 37(10): 82–87, 93. (in Chinese)
- [30] 詹萍, 田洪磊, 李卫国, 等. 羊肉特征风味指纹图谱的构建 [J]. *现代食品科技*, 2013, 29(10): 2522–2527.
- ZHAN Ping, TIAN Honglei, LI Weiguo, et al. Establishment of mutton characteristic flavor fingerprint [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2013, 29(10): 2522–2527. (in Chinese)
- [31] 王鹏, 田洪磊, 张海轮, 等. 基于 GC-MS 结合化学计量学方法的蟠桃鲜果指纹图谱的构建及应用 [J]. *现代食品科技*, 2016, 32(5): 258–263, 282.
- WANG Peng, TIAN Honglei, ZHANG Hailun, et al. Development of a chromatographic fingerprint for fresh flat peach by GC-MS combined with chemometric methods [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2016, 32(5): 258–263, 282. (in Chinese)