祝亚辉, 张俊龙, 董闯, 等. 不同热处理对牦牛和娟姗牛乳挥发性风味物质的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(2): 1−13. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024110431
ZHU Yahui, ZHANG Junlong, DONG Chuang, et al. Effect of Different Heat Treatments on the Volatile Flavor Compounds in Yak and Jersey Milk[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(2): 1−13. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024110431

·特邀主编专栏—地方特色食品: 加工技术、感官品质、风味特性和营养健康（客座主编: 易俊洁、和劲松、郭超凡）·

不同热处理对牦牛和娟姗牛乳挥发性风味物质的影响

祝亚辉[1,2,3], 张俊龙[1,2,3], 董　闯[1,2,3], 池福敏[1,2,3], 辜雪冬[1,2,3], 杨　林[1,2,3,*]
（1.西藏农牧大学食品科学学院, 西藏林芝 860000;
2.西藏农牧大学食品科学与工程重点实验室, 西藏林芝 860000;
3.西藏特色农牧资源研发省部共建协同创新中心, 西藏林芝 860000）

摘　要: 为探究低温长时杀菌（63 ℃、30 min）、高温短时杀菌（75 ℃、15 s）、高温短时杀菌（85 ℃、15 s）、煮沸处理（90 ℃、15 s）对牦牛乳和娟姗牛乳挥发性风味物质的影响，试验以新鲜牦牛乳和娟姗牛乳为原料，采用电子鼻、顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用（Headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometr，HS-SPME-GC/MS）结合雷达图、主成分分析和气味活度值（odor activity value，OAV）探究不同热处理后牦牛乳和娟姗牛乳风味物质变化规律。结果表明：电子鼻能够将两种乳进行区分，且不同热处理对娟姗牛乳风味的影响比牦牛乳更明显。不同热处理乳样中共检测出 102 种挥发性物质，包括：10 种酮类、9 种醛类、32 种酯类、25 种醇类、14 种酸类、3 种酚类及 9 种其他类。鲜牦牛乳和娟姗乳中挥发性物质分别以醇类、酸类和酮类、酸类为主，且不同热处理对两种乳样挥发性物质组成和含量均有明显的影响。通过气味活度值法确定了鲜牦牛乳和娟姗牛乳关键风味物质，分别为 3-羟基-2-丁酮、1-辛烯-3-醇、2-壬基醇和 3-羟基-2-丁酮、2-壬基醇、丁酸。75 ℃ 处理 15 s 增加了牦牛乳和娟姗牛乳关键风味物质种类，且该处理条件对关键风味物质的生成更为有利。研究结果可为优化乳品加工中的热处理条件及提升乳制品的风味品质提供参考。

关键词: 牦牛乳, 娟姗牛乳, 热处理, 电子鼻, 顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用, 气味活度值
中图分类号: TS252.41　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)02−0001−13
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024110431
本文网刊:

Effect of Different Heat Treatments on the Volatile Flavor Compounds in Yak and Jersey Milk

ZHU Yahui[1,2,3], ZHANG Junlong[1,2,3], DONG Chuang[1,2,3], CHI Fumin[1,2,3], GU Xuedong[1,2,3], YANG Lin[1,2,3,*]
（1.College of Food Science, Xizang Agriculture & Animal Husbandry University, Nyingchi 860000, China;
2.Key Laboratory of Food Science and Engineering of Xizang Agriculture & Animal Husbandry University, Nyingchi 860000, China;
3.The Provincial and Ministerial Co-founded Collaborative Innovation Center for R&D in Tibet Characteristic Agricultural and Animal Husbandry Resources, Nyingchi 860000, China）

Abstract: To explore the changes in volatile compounds of yak and Jersey cow milk at different heat treatments (63 ℃/30 min, 75 ℃/15 s, 85 ℃/15 s, 90 ℃/15 s), electronic nose, HS-SPME-GC/MS combined with radar charts, principal

收稿日期: 2024−12−02
基金项目: 国家自然科学基金（32260620）; 西藏自治区科技厅自然基金项目（XZ202101ZR0115G）; 四川省科技计划项目（2023NZZJ0033）; 西藏农牧学院研究生创新计划资助项目（YJS2025-37）。
作者简介: 祝亚辉（1990−）, 男, 硕士, 讲师, 研究方向: 西藏特色畜产品加工与贮藏, E-mail: 1097891728@qq.com。
*** 通信作者:** 杨林（1981−）, 男, 硕士, 教授, 研究方向: 西藏特色畜产品加工与贮藏, E-mail: 94157472@qq.com。

component analysis and OAV, were utilized to explore the odor variation patterns of yak and Jersey cow milk at different heat treatments. The results demonstrated that electronic nose effectively discriminated between the two milk types, with Jersey milk exhibiting greater sensitivity to heat-induced flavor alterations. A total of 102 volatile compounds were identified across all samples, categorized as 10 ketones, 9 aldehydes, 32 esters, 25 alcohols, 14 acids, 3 phenols, and 9 miscellaneous compounds. Fresh yak milk was characterized by dominant alcohols and acids, whereas fresh Jersey milk was rich in ketones and acids. Heat treatments significantly modified both the composition and concentration of volatile compounds in both milk types. Key flavor compounds, determined by OAV>1, were 3-hydroxy-2-butanone, 1-octen-3-ol, and 2-nonanol in fresh yak milk, and 3-hydroxy-2-butanone, 2-nonanol, and butyric acid in fresh Jersey milk. Notably, The 75 ℃/15 s treatment augmented the variety of key flavor compounds in both yak and Jersey milk, and this processing condition was more conducive to the formation of these key flavor substances. These findings can provide valuable insights for optimizing thermal processing parameters to improve flavor quality in dairy products derived from these distinct milk sources.

Key words: yak milk; jersey milk; heat treatments; electronic nose; HS-SPME-GC/MS; OAV

牦牛是青藏高原极具代表性的反刍动物，通常生活在海拔 2500~6000 m 无污染地区，能适应高寒、严重缺氧的恶劣环境，有“高原之舟”之称[1]。青藏高原作为世界上最大和最高的放牧区[2]，随着畜牧业的发展，除牦牛养殖外，还引进了娟姗牛等牛种。牦牛作为青藏高原特有的品种，生存环境使牦牛乳与普通牛乳在营养物质含量方面存在明显差异[3]。然而，娟姗牛因其优良的泌乳性能[4]，正日益成为高原地区乳品企业重要的奶源。乳及乳制品营养成分丰富，且易于消化吸收，深受消费者喜爱，消费者对牛乳的选择和影响牛乳品质的因素有很多，主要包括感官品质和营养价值。风味是牛乳感官品质的一项重要指标，也是消费者对于牛乳选择最直接的因素之一[5]。挥发性风味化合物在牛乳风味的形成中起着重要作用，包括大量具有特征气味的物质，如醇类、挥发性脂肪酸、酯类类、醛类、酚类、酮类和酸类等。牛乳中挥发性风味化合物的形成途径比较复杂，主要来源于动物饮食及体内物质代谢。脂质、蛋白质等物质在体内的降解均可在牛乳中产生上述挥发性风味化合物[6]，已有研究表明，相对于牛乳中蛋白质等物质，脂质对其挥发性风味的影响更为明显[5]。

热处理是乳制品生产过程中的一个关键环节，可以杀死乳中致病微生物，达到预防食源性疾病的目的，也是确保鲜乳和乳制品在保质期内直至消费期间微生物安全与产品质量的最普遍方法。但不同的热处理会在一定程度上会改变鲜乳风味物质的组成和含量，也会直接或间接地影响乳制品的风味和产品质量[7−9]，例如热处理过程中伴随的脂肪氧化、美拉德和焦糖化反应等，还可能产生一些类似氧化味、焦糊味、蒸煮味等不良风味[9]，会直接影响产品感官品质及消费者可接受度。

随着风味检测技术的发展，电子鼻和顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用（Headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-massspectrometr, HS-SPME-GC/MS）技术更广泛地应用于乳品风味检测[10−12]。目前，关于生鲜牦牛乳风味物质的研究已有报道[5,13−15]，多为有机化合物，包括醇类、酯类、内酯类、醛类、酮类、酚类、醚类、含硫化合物及萜类化合物等；针对热处理如何系统性影响牦牛乳挥发性风味物质的研究尚不够深入。对于娟姗牛乳，特别是在高原特定环境下所产牛乳的风味物质基础研究相对匮乏。因此，系统比较这两种具有地域特色和经济价值的牛乳风味特性，并探究不同热处理对其挥发性物质的影响，对于揭示热处理过程中乳品风味形成和变化规律具有重要意义。

本研究以新鲜牦牛乳和娟姗牛乳为原料，采用电子鼻、HS-SPME-GC/MS 结合雷达图、主成分分析和气味活度值（odor activity value, OAV），识别乳样在热处理过程中整体风味轮廓，鉴定乳样热处理过程中的挥发性物质，分析其主要香气物质及差异，以期为乳品加工过程中热处理条件的优化及乳品风味调控提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

牦牛　传统放牧，乳采集于西藏墨竹工卡斯布牧场；娟姗牛　舍饲，乳采集于西藏林芝市乡兴牧业有限责任公司，奶站收奶结束后进行采样，乳样采集后迅速用冰袋保存，运送至实验室（采样时间：2024 年 7 月），样本牛基本信息见表 1。C7~C30 正构烷烃、对溴氟苯标品　色谱纯，Sigma；其他试剂均为分析纯。

表 1　样本牛基本信息

Table 1　Basic information of cattle breeds from which milk samples were collected

牛种	样本数	胎次	泌乳期	产量(kg/d)
牦牛	308	1~2	高峰期	1.52±0.36[16]
娟姗牛	1180	0~1	高峰期	12.09±0.45（公司提供）

JA1003 型精密电子天平　上海舜宇恒平科学仪器有限公司；HH-1 型数显恒温水浴锅　常州澳华仪器有限公司；cNose-10 型电子鼻　上海保圣实业发展有限公司；GCMS-TQ8050 NX+AOC-6000 型气质联用仪　日本岛津公司。

1.2　实验方法

1.2.1　样品制备　采集的鲜乳为对照组，其余组别按照乳品工业中常用的热处理方法[7,17]处理，然后保存于−4 ℃ 冰箱中待测。分组情况如表 2 所示。

表 2　不同热处理样品分组

Table 2　Grouping of samples by different thermal treatments

序号	不同热处理	组别	序号	不同热处理	组别
1	鲜牦牛乳	M1	6	鲜娟姗牛乳	J1
2	牦牛乳63 ℃/30 min	M2	7	娟姗牛乳63 ℃/30 min	J2
3	牦牛乳75 ℃/15 s	M3	8	娟姗牛乳75 ℃/15 s	J3
4	牦牛乳85 ℃/15 s	M4	9	娟姗牛乳85 ℃/15 s	J4
5	牦牛乳煮沸(90 ℃)/15 s	M5	10	娟姗牛乳煮沸(90 ℃)/15 s	J5

1.2.2　电子鼻检测　参考陈宝蓉等[18]方法，略作修改：取 5.0 mL 不同热处理的乳样，置于 20 mL 顶空瓶中，密封后在 40 ℃ 水浴中平衡 30 min，用电子鼻进行测定，载气为空气，样品检测时间 90 s，清洗时间 120 s，进样流量 200 mL/min，每个样品重复 5 次，选取 3 个样品作为平行。电子鼻传感器类型如表 3 所示。

表 3　电子鼻不同传感器对应物质种类

Table 3　Corresponding aroma tyres of different sensors of electronic nose

阵列序号	传感器	响应物质	类别物质
1	Sensor_1	烷烃、烟雾类	丙烷、天然气、烟雾类
2	Sensor_2	醇类、醛类、短链烷烃类	酒精、烟雾、异丁烷、甲醛
3	Sensor_3	臭氧	–
4	Sensor_4	硫化物	硫化氢
5	Sensor_5	有机胺	氨气、甲胺、乙醇胺
6	Sensor_6	有机气体、苯酮类、醇醛类、芳香化合物	甲苯、丙酮、乙醇、氢气、其他有机蒸汽
7	Sensor_7	短链烷烃类	甲烷、天然气、沼气
8	Sensor_8	芳香化合物、醇醛类	甲苯、甲醛、苯、酒精、丙酮
9	Sensor_9	含氢气体	氢气
10	Sensor_10	可燃气体类	甲烷

注：“–”表示无。

1.2.3　挥发性风味成分的测定　参考 Chi 等[19]方法，略作修改：取 5.0 mL 乳样置于 20 mL 顶空进样瓶中，加入 100 μL 对溴氟苯溶液（100 μg/mL），混匀，60 ℃ 水浴锅中保温 20 min，然后插入老化之后的萃取头，于 60 ℃ 顶空吸附 35 min，解吸 2 min，进行 GC-MS 分析。

气相色谱条件：色谱柱 SH-Polar Wax（60 m×0.25 mm×0.25 μm）；程序升温：从 40 ℃ 开始，保持 5 min，以 3 ℃/min 升至 250 ℃，保持 15 min；载气为高纯 He，柱流量 1.0 mL/min，进样口温度 250 ℃，分流比 5∶1。

质谱条件：接口温度 250 ℃，EI 源，电离电压 70 eV，离子源温度 200 ℃，扫描范围 35~400 amu。

定性分析：在相同色谱条件下，通过正构烷烃（C7~C40）的保留时间，计算目标化合物的保留指数，采用 NIST20 谱库进行化合物检索，结合匹配度和保留指数进行物质定性分析，目标化合物保留指数计算公式（1）为：

$$RI = 100n + \frac{100\times(t_i - t_n)}{t_{n+1} - t_n} \qquad 式（1）$$

式中：RI 为目标化合物保留指数；n 为碳原子数；t_i 为目标化合物的保留时间，min；t_n 和 t_{n+1} 分别为碳原子数为 n 和 n+1 的正构烷烃保留时间，min。

定量分析：根据内标物的质量浓度、样品中各组分峰面积与内标物峰面积，按照公式（2）计算样品中各组分含量。

$$W_i = \frac{W_0\times V_0\times A_i}{V_i\times A_0} \qquad 式（2）$$

式中：W_i 为目标化合物质量浓度，μg/L；W_0 为内标物质量浓度，μg/mL；V_0 为所加内标物体积，mL；A_0 为内标物峰面积；V_i 为所加奶样体积，mL；A_i 为目标化合物峰面积。

1.2.4　挥发性化合物气味活性值　气味活度值是评价食品中各挥发性风味物质对样品整体香味贡献的常用评价指标。OAV 的计算参考 Zheng 等[20]的方法，如公式（3）所示：

$$OAV_i = \frac{C_i}{T_i} \qquad 式（3）$$

式中：OAV_i 为化合物的气味活性值；C_i 为化合物的浓度（μg/L）；T_i 为化合物在水中的阈值（μg/L）。

1.3　数据处理

所有数据采用 Excel 进行处理，各检测结果采用 3 次重复的“平均值±标准差”表示，利用 Origin 2019 作图，SPSS 22.0 进行显著性分析，$P<0.05$。

2　结果与分析

2.1　不同热处理乳样品电子鼻分析

不同热处理乳样电子鼻检测结果雷达图如图 1 所示。不同热处理样品对传感器响应强度存在差异，其中鲜牦牛乳（M1）在 Sensor_8 传感器上的响应值最大，其次是 Sensor_1、Sensor_2 和 Sensor_7，表明鲜牦牛乳中芳香类、醇醛类和（短链）烷烃类化合物风味特征明显。不同热处理对牦牛乳在传感器上的响应值有影响：相较于鲜牦牛乳，热处理条件为 63 ℃/30 min（M2）和 75 ℃/15 s（M3）时，Sensor_1、Sensor_2 和 Sensor_8 传感器响应值下降，表明这两种热处理对牦牛乳中烷烃类、醇醛类和芳香类化合物有一定的影响。而 85 ℃/15 s（M4）和 90 ℃/15 s（M5）处理时，牦牛乳风味无明显变化。娟姗牛乳（J1）在 sensor_8 传感器上的响应值最大，其次是 Sensor_1、Sensor_2、Sensor_4、Sensor_5、Sensor_10、Sensor_6 和 Sensor_7，对应的敏感物质分别是芳香类、醇醛类、（短链）烷烃类、硫化物、有机胺和苯酮类化合物。75 ℃/15 s（J3）处理时，Sensor_1、Sensor_2、Sensor_4，

Sensor_5 和 Sensor_8 传感器响应值有所增加，表明此种热处理对增强了娟姗牛乳中烷烃类、醇醛类、硫化物、有机胺和芳香类化合物的响应。85 ℃/15 s(J4)热处理与 75 ℃/15 s(J3)处理结果相反，而 63 ℃/30 min(J2)和 90 ℃/15 s(J5)热处理对娟姗牛乳风味影响不明显。总体而言，娟姗牛乳及不同处理组(不包括 J4)在传感器上的响应值均明显大于牦牛乳及不同处理组，且不同热处理对娟姗牛乳在传感器上的响应值比牦牛乳的影响更强。牦牛乳和娟姗牛乳在不同热处理条件下的风味变化差异显著。牦牛乳在 85 ℃/15 s 和 90 ℃/15 s 的短时高温处理时，由于其脂肪球膜可包埋挥发性物质及稳定的酪蛋白结构，促使风味物质损失较少，传感器响应变化不明显。然而，在 63 ℃/30 min 的长时间处理时，热敏物质如烷烃和醇醛显著降解，导致相关传感器响应下降。娟姗牛乳则因含有丰富的含硫前体物和热敏性的 β-乳球蛋白，在 75 ℃/15 s 处理时挥发性物质显著增强，传感器响应上升；但在 85 ℃/15 s 处理时，蛋白质变性与小分子风味物质结合，抑制了挥发，导致传感器响应下降。75 ℃/15 s 是乳样风味显现差异的临界点，两种乳品在相同处理条件下呈现相反的电子鼻响应趋势，这表明乳源基质成分在热处理响应中起着一定的调控作用。

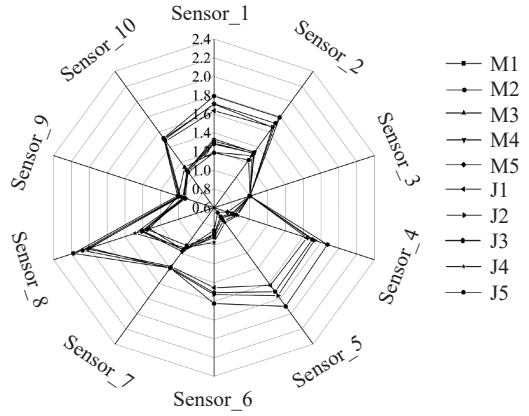


图 1 电子鼻分析雷达图

Fig.1 Radar chart of electronic nose

通过电子鼻传感器响应值大小可以初步判定不同乳样气味物质之间的差异，但无法明确各样品之间的相似性，所以对电子鼻数据进行了主成分分析。电子鼻主成分(PCA)分析结果如图 2 所示。图中第一主成分(PC1)和第二主成分(PC2)贡献率分别为 89.6% 和 7.0%，累计贡献率为 96.6%，能够表达不同乳样挥发性物质的主要信息[21]。乳样分布于不同区域，其中 M1、M3、M4、M5 组与 M2 组位于不同象限，即 M2 处理组风味明显区别于其余牦牛乳样品，表明 63 ℃ 长时间热处理的牦牛乳与鲜牦牛乳能够明显区别，过高温度短时热处理乳样与鲜牦牛乳无明显差异；J1、J2、J3、J5 组与 J4 组位于不同象限且距离较远，说明 85 ℃/15 s 处理组风味与其余娟姗牛乳气味有明显区别。新鲜牦牛乳和娟姗牛乳风味也能够明显区分。

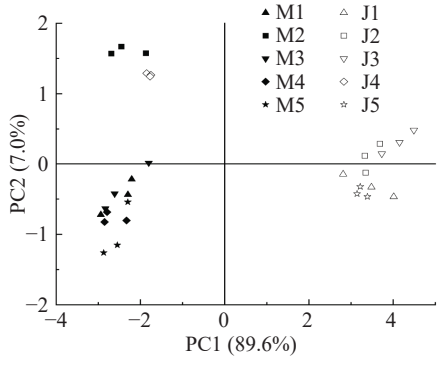


图 2 电子鼻主成分分析

Fig.2 Principal component analysis of electronic nose

2.2 不同热处理乳样品挥发性物质分析

通过 HS-SPME-GC/MS 对不同热处理乳样挥发性风味物质种类及百分比进行分析，结果如图 3 和表 4 所示。不同热处理乳样中共检测出 102 种挥发性风味物质，分为 7 类，包括酮类物质 10 种、醛类 9 种、酯类 32 种、醇类 25 种、酸类 14 种、酚类 3 种和其他 9 种。其中，M1、M2、M3、M4、M5、J1、J2、J3、J4 和 J5 分别含有 53、31、54、49、48、53、54、63、49 和 57 种挥发性物质。鲜牦牛乳中挥发性物质以醇类和酸类为主，而鲜娟姗牛乳以酮类和酸类为主，且不同热处理对两种乳样挥发性物质含量和组成均有明显的影响。

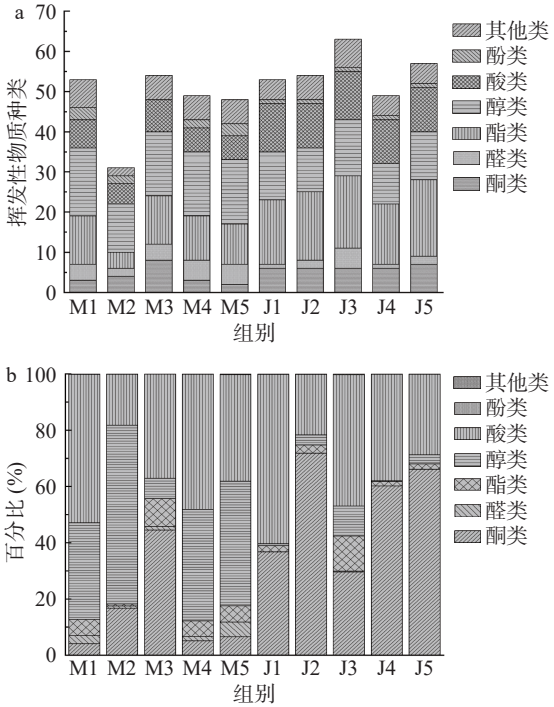


图 3 不同处理组乳样挥发性风味物质种类及百分比

Fig.3 Varieties and percentage of volatile flavor compounds in milk samples from different treatment groups

注：a：挥发性化合物种类；b：挥发性化合物百分比。

2.2.1 酮类化合物 酮类化合物是乳风味物质主要

表 4　不同热处理乳样挥发性物质含量(μg/L)

Table 4　Volatile substances content in milk samples from different treatment groups(μg/L)

序号	化合物名称	保留时间(min)	含量									
			M1	M2	M3	M4	M5	J1	J2	J3	J4	J5
1	2-丁酮	7.746	–	–	2.06±0.01	–	–	–	–	–	–	–
2	2-戊酮	10.166	0.25±0.00^{h}	0.22±0.00^{h}	3.58±0.03^{b}	0.31±0.00^{g}	–	1.98±0.00^{d}	2.05±0.00^{c}	7.24±0.07^{a}	1.75±0.00^{f}	1.80±0.00^{e}
3	2,3-戊二酮	13.637	–	2.38±0.17^{b}	14.64±0.05^{a}	–	–	–	–	–	–	–
4	2-庚酮	19.241	–	–	15.77±0.74^{a}	–	–	6.76±0.15^{c}	6.75±0.08^{c}	7.42±0.09^{b}	4.89±0.14^{d}	4.86±0.10^{d}
5	3-辛酮	23.085	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0.21±0.00
6	3-羟基-2-丁酮	24.54	36.86±0.39^{f}	51.67±0.47^{f}	779.87±4.51^{e}	39.32±2.04^{f}	35.78±1.67^{f}	1307.53±17.51^{c}	5264.84±49.41^{a}	1130.64±23.86^{d}	4300.00±51.39^{b}	5260.79±49.86^{a}
7	1-辛烯-3-酮	25.084	–	–	0.38±0.00	–	–	–	–	–	–	–
8	2-壬酮	29.093	–	–	5.48±0.02^{b}	–	–	4.51±0.04^{d}	4.95±0.02^{c}	5.85±0.03^{a}	3.70±0.01^{f}	4.05±0.10^{e}
9	二氢-2-甲基-3(2H)-噻吩酮	35.444	0.84±0.02^{d}	0.87±0.00^{c}	–	0.92±0.00^{b}	0.93±0.00^{b}	0.41±0.00^{f}	0.45±0.00^{e}	1.49±0.00^{a}	0.33±0.00^{h}	0.38±0.00^{g}
10	甲基壬基甲酮	38.142	–	–	0.55±0.00^{f}	–	–	1.18±0.02^{a}	0.95±0.00^{d}	0.84±0.00^{e}	1.06±0.00^{b}	1.04±0.00^{c}
	酮类		37.94±0.21^{f}	55.13±0.64^{f}	822.32±5.35^{e}	40.55±2.04^{f}	36.71±1.67^{f}	1322.37±17.71^{c}	5279.99±49.51^{a}	1153.48±24.05^{d}	4311.74±51.54^{b}	5273.12±50.06^{a}
11	2-甲基丁醛	8.074	1.43±0.05^{b}	–	–	0.76±0.02^{c}	1.70±0.00^{a}	–	–	–	–	–
12	异戊醛	8.212	23.64±0.62^{a}	2.63±0.19^{d}	–	10.00±0.37^{b}	23.91±1.35^{a}	–	–	6.50±0.11^{c}	–	–
13	正戊醛	10.185	–	–	1.61±0.00^{b}	–	0.25±0.00^{c}	–	–	2.41±0.00^{a}	–	–
14	正己醛	14.501	0.80±0.00^{c}	–	–	0.81±0.00^{b}	2.91±0.02^{a}	–	–	–	–	–
15	(E)-2-戊烯醛	16.46	–	–	12.84±0.37^{a}	0.28±0.00^{cd}	–	–	0.39±0.00^{c}	0.87±0.00^{b}	–	0.15±0.00^{d}
16	(E)-2-庚烯醛	26.387	–	–	3.62±0.02	–	–	–	–	–	–	–
17	苯甲醛	35.303	0.50±0.00^{b}	0.16±0.00^{e}	5.32±0.03^{a}	0.40±0.00^{d}	0.50±0.00^{b}	–	–	0.44±0.00^{c}	–	–
18	苯乙醛	40.224	–	–	–	–	–	–	–	2.01±0.00	–	–
19	十六醛	56.928	–	–	–	–	–	0.21±0.00^{a}	0.18±0.00^{b}	–	0.18±0.00^{b}	0.21±0.00^{a}
	醛类		26.37±0.72^{b}	2.79±0.19^{e}	23.39±0.44^{c}	12.25±0.38^{d}	29.27±1.36^{a}	0.21±0.00^{f}	0.57±0.00^{f}	12.22±0.11^{d}	0.18±0.00^{f}	0.36±0.00^{f}
20	丙酸乙酯	9.475	2.73±0.08^{h}	–	2.89±0.00^{g}	6.90±0.21^{a}	5.29±0.02^{b}	3.26±0.00^{f}	3.45±0.03^{e}	1.94±0.00^{i}	3.67±0.01^{d}	4.56±0.14^{c}
21	异丁酸乙酯	9.74	–	–	–	–	–	0.24±0.00^{b}	–	–	0.27±0.00^{a}	0.28±0.00^{a}
22	乙酸丙酯	10.075	0.98±0.00^{c}	0.37±0.00^{e}	–	4.27±0.05^{a}	1.96±0.00^{b}	–	0.60±0.00^{d}	–	–	–
23	乙酸异丁酯	11.545	2.91±0.04^{a}	–	–	1.18±0.01^{b}	–	–	–	–	–	–
24	丁酸乙酯	12.515	0.64±0.00^{c}	0.73±0.00^{c}	26.46±0.50^{a}	1.34±0.02^{b}	1.54±0.01^{b}	0.23±0.00^{d}	0.19±0.00^{d}	0.58±0.00^{c}	0.22±0.00^{d}	0.21±0.00^{d}

续表 4

序号	化合物名称	保留时间(min)	含量									
			M1	M2	M3	M4	M5	J1	J2	J3	J4	J5
25	异戊酸乙酯	13.871	1.42±0.02^{a}	–	–	–	0.50±0.00^{b}	–	–	–	–	–
26	乙酸丁酯	13.872	0.59±0.00	–	–	–	–	–	–	–	–	–
27	2-甲基丁基乙酸酯	16.255	21.26±0.15^{e}	–	0.98±0.00^{h}	15.03±0.41^{f}	11.29±0.46^{g}	12.55±0.45^{g}	67.47±1.50^{b}	230.49±2.77^{a}	26.70±0.75^{d}	44.68±2.41^{c}
28	乙酸异戊酯	16.256	12.97±0.28^{e}	–	–	11.91±0.60^{e}	6.87±0.10^{g}	8.73±0.30^{f}	51.08±1.52^{b}	176.11±2.52^{a}	19.10±0.62^{d}	32.22±1.35^{c}
29	戊酸乙酯	16.726	–	–	3.46±0.00	–	–	–	–	–	–	–
30	乙酸戊酯	18.742	0.16±0.00^{c}	–	–	0.37±0.00^{a}	0.20±0.00^{b}	–	–	–	–	–
31	异己酸乙酯	19.416	–	–	0.66±0.00	–	–	–	–	–	–	–
32	乙酸-3-甲基-3-丁烯-1-醇酯	19.853	–	–	–	0.08±0.00^{c}	–	–	0.11±0.00^{b}	0.78±0.00^{a}	–	–
33	正己酸乙酯	21.67	2.04±0.01^{b}	1.20±0.01^{b}	129.08±3.05^{a}	1.44±0.02^{b}	1.67±0.02^{b}	1.76±0.00^{b}	1.55±0.00^{b}	1.53±0.00^{b}	1.52±0.00^{b}	1.48±0.00^{b}
34	梨醇酯	23.089	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0.18±0.00
35	丁酸异戊酯	23.092	–	–	0.30±0.00^{b}	–	–	0.14±0.00^{d}	0.26±0.00^{c}	0.75±0.00^{a}	–	0.13±0.00^{d}
36	乙酸己酯	23.594	–	–	–	–	–	0.59±0.00^{b}	0.40±0.00^{d}	0.43±0.00^{c}	1.17±0.00^{a}	1.19±0.00^{a}
37	乙酸庚酯	28.332	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0.13±0.00
38	己酸丙酯	25.671	–	–	0.45±0.00	–	–	–	–	–	–	–
39	庚酸乙酯	26.386	–	–	5.12±0.02	–	–	–	–	–	–	–
40	辛酸乙酯	31.104	0.46±0.00^{c}	0.22±0.00^{d}	13.63±0.06^{a}	0.21±0.00^{d}	0.26±0.00^{c}	0.24±0.02^{c}	0.95±0.00^{b}	0.20±0.00^{d}	0.14±0.00^{e}	0.12±0.00^{e}
41	己酸异戊酯	32.162	–	–	–	–	–	–	0.22±0.00^{b}	0.35±0.00^{a}	–	–
42	醋酸辛酯	33.342	–	–	0.27±0.00^{a}	–	–	–	–	–	–	0.11±0.00^{b}
43	3-羟基丁酸乙酯	35.093	–	–	–	–	–	–	–	0.41±0.00	–	–
44	癸酸乙酯	39.654	–	–	0.38±0.00^{a}	–	–	0.27±0.00^{b}	–	–	0.20±0.00^{c}	0.18±0.00^{c}
45	乙酸苯乙酯	46.673	7.72±0.03^{f}	–	–	1.24±0.00^{g}	2.45±0.00^{g}	44.19±1.55^{e}	86.53±1.05^{a}	71.48±1.50^{b}	50.49±1.50^{d}	59.39±2.01^{c}
46	丁位辛内酯	52.245	–	–	–	–	–	0.67±0.00^{e}	0.70±0.00^{d}	0.75±0.00^{c}	0.78±0.00^{b}	0.86±0.00^{a}
47	(Z)-威士忌内酯	52.256	–	–	–	–	–	–	–	0.45±0.00	–	–
48	丁位癸内酯	59.57	–	–	–	–	–	1.27±0.00^{b}	1.08±0.00^{d}	1.28±0.02^{b}	1.21±0.01^{c}	1.51±0.00^{a}
49	丁位十二内酯	66.39	–	–	–	–	–	0.41±0.00^{c}	0.32±0.00^{e}	0.35±0.00^{d}	0.51±0.00^{b}	0.54±0.00^{a}
50	丁位十一内酯	63.333	–	–	–	–	–	3.25±0.02^{b}	2.34±0.01^{d}	0.85±0.00^{e}	8.68±0.11^{a}	3.06±0.02^{c}
51	γ-十二内酯	64.901	–	–	–	–	–	0.51±0.00^{a}	0.30±0.00^{c}	0.28±0.00^{d}	0.41±0.00^{b}	0.50±0.00^{a}

续表 4

序号	化合物名称	保留时间（min）	含量									
			M1	M2	M3	M4	M5	J1	J2	J3	J4	J5
	酯类		53.87±0.63^{g}	2.52±0.02^{j}	183.68±3.69^{c}	43.97±1.32^{h}	32.02±0.60^{i}	78.31±2.34^{f}	217.55±4.11^{b}	489.01±6.80^{a}	115.07±3.01^{e}	151.31±5.93^{d}
52	仲丁醇	11.959	2.38±0.04^{a}	0.89±0.00^{d}	–	1.51±0.02^{c}	1.83±0.00^{b}	–	–	–	–	–
53	异丁醇	14.5	1.12±0.03^{c}	–	–	1.61±0.02^{b}	3.43±0.02^{a}	0.63±0.00^{d}	–	–	–	–
54	2-戊醇	16.681	0.65±0.00^{a}	–	–	0.50±0.00^{b}	–	0.35±0.00^{c}	–	–	0.48±0.00^{b}	–
55	正丁醇	17.702	–	–	–	–	–	0.38±0.00	–	–	–	–
56	异戊醇	20.564	268.87±4.51^{a}	65.18±2.11^{e}	43.79±2.05^{g}	118.87±3.52^{d}	170.12±4.00^{c}	12.09±0.40^{i}	55.11±0.80^{f}	183.00±2.28^{b}	10.60±0.25^{i}	18.47±0.82^{h}
57	2-甲基丁醇	20.816	–	64.77±1.09^{c}	43.52±1.61^{e}	118.13±3.00^{b}	–	0.32±0.00^{f}	54.77±1.10^{d}	181.86±2.06^{a}	–	–
58	1-戊醇	22.62	0.50±0.00^{e}	0.71±0.00^{d}	0.72±0.00^{c}	1.03±0.00^{a}	0.87±0.00^{b}	–	–	0.15±0.00^{f}	–	–
59	2-庚醇	25.847	1.90±0.02^{b}	1.33±0.02^{e}	2.70±0.02^{a}	1.61±0.02^{d}	1.76±0.01^{c}	0.43±0.00^{f}	0.36±0.00^{g}	0.34±0.00^{g}	0.18±0.00^{h}	0.16±0.00^{h}
60	异戊烯醇	25.993	0.24±0.00^{a}	–	0.22±0.00^{bc}	–	0.24±0.00^{ab}	0.20±0.00^{c}	–	–	0.18±0.00^{d}	0.15±0.00^{d}
61	正己醇	27.394	1.45±0.02^{c}	1.46±0.02^{c}	0.85±0.00^{d}	1.95±0.02^{b}	2.07±0.02^{a}	0.63±0.00^{e}	–	0.24±0.00^{g}	–	0.28±0.00^{f}
62	叶醇	29.121	–	–	–	–	–	–	–	0.75±0.00	–	–
63	仲辛醇	30.399	–	–	0.11±0.00	–	–	–	–	–	–	–
64	1-辛烯-3-醇	31.765	0.30±0.00^{b}	0.21±0.00^{c}	0.19±0.00^{c}	0.31±0.00^{b}	0.41±0.00^{a}	–	–	–	–	–
65	正庚醇	31.967	0.52±0.00^{d}	0.60±0.00^{c}	0.44±0.00^{f}	0.82±0.00^{a}	0.69±0.00^{b}	–	–	–	–	–
66	2-乙基己醇	33.462	–	–	–	–	–	–	–	0.29±0.00	–	–
67	2-壬基醇	34.71	0.50±0.00^{c}	–	1.98±0.01^{a}	0.36±0.00^{f}	0.39±0.00^{e}	0.54±0.00^{b}	0.33±0.00^{g}	–	0.51±0.00^{c}	0.43±0.00^{d}
68	2,3-丁二醇异构体 -1	35.661	24.55±0.12^{g}	49.69±1.37^{c}	33.86±1.46^{e}	44.17±1.55^{d}	44.73±1.66^{d}	–	137.71±1.50^{b}	30.51±0.65^{f}	–	207.33±2.50^{a}
69	辛醇	36.327	0.18±0.00^{ef}	0.18±0.00^{f}	0.23±0.00^{c}	0.22±0.00^{cd}	0.21±0.00^{de}	0.35±0.00^{a}	0.28±0.00^{b}	0.21±0.00^{cde}	0.20±0.00^{def}	0.27±0.00^{b}
70	2,3-丁二醇异构体 -2	37.155	15.54±0.07^{d}	25.08±0.85^{a}	3.32±0.03^{g}	22.85±1.00^{b}	19.90±0.66^{c}	–	10.04±0.16^{f}	11.35±0.51^{e}	–	22.21±0.53^{b}
71	（E）-2-辛烯-1-醇	38.139	–	–	0.16±0.00^{d}	–	–	–	0.37±0.00^{a}	0.34±0.00^{b}	0.31±0.00^{c}	0.34±0.00^{b}
72	1-壬醇	40.459	0.22±0.00^{a}	0.17±0.00^{cd}	0.15±0.00^{d}	0.17±0.00^{c}	0.19±0.00^{b}	–	–	–	–	–
73	3-甲硫基丙醇	42.863	–	–	–	–	–	–	–	0.30±0.00	–	–
74	苯甲醇	48.827	0.07±0.00^{ab}	–	–	–	0.06±0.00^{ab}	–	0.07±0.00^{a}	–	0.05±0.00^{bc}	0.05±0.00^{c}
75	苯乙醇	50.06	1.74±0.02^{e}	–	0.63±0.00^{g}	0.47±0.00^{h}	0.93±0.00^{f}	3.72±0.00^{b}	2.30±0.02^{d}	2.49±0.02^{c}	2.32±0.00^{d}	3.85±0.00^{a}
76	法尼醇	63.333	–	–	–	–	–	4.43±0.01^{a}	1.83±0.00^{d}	1.35±0.00^{e}	4.10±0.00^{b}	3.91±0.00^{c}
	醇类		320.72±4.90^{b}	210.27±5.46^{e}	132.87±5.19^{f}	314.58±9.13^{b}	247.85±6.37^{d}	24.06±0.41^{g}	263.17±3.58^{c}	413.17±5.52^{a}	18.92±0.25^{g}	257.43±3.85^{c}
77	丙酸	35.835	–	–	–	–	–	5.17±0.02	–	–	–	–

续表 4

序号	化合物名称	保留时间（min）	含量									
			M1	M2	M3	M4	M5	J1	J2	J3	J4	J5
78	异丁酸	37.028	5.75±0.23^{e}	1.17±0.02^{h}	–	2.38±0.02^{g}	3.43±0.01^{f}	30.63±1.06^{b}	13.22±0.63^{d}	12.66±0.35^{d}	17.68±0.80^{c}	31.78±1.10^{a}
79	丁酸	39.462	14.67±0.10^{h}	20.06±1.33^{g}	63.32±2.01^{f}	17.79±0.53^{gh}	17.42±0.50^{gh}	400.36±4.02^{a}	312.82±2.06^{d}	181.49±1.61^{e}	357.46±6.06^{c}	363.23±2.53^{b}
80	异戊酸	41.077	12.26±0.06^{e}	–	–	6.72±0.20^{f}	8.57±0.02^{f}	91.18±2.51^{b}	90.53±1.50^{b}	104.50±2.57^{a}	50.33±1.58^{d}	86.96±1.52^{c}
81	正戊酸	43.704	–	–	1.29±0.01^{f}	–	–	4.30±0.00^{a}	3.26±0.01^{d}	2.51±0.02^{e}	3.98±0.01^{b}	3.66±0.03^{c}
82	己酸	47.637	1.56±0.01^{d}	34.61±0.54^{c}	355.12±6.78^{b}	2.93±0.02^{d}	1.34±0.02^{d}	–	–	479.61±7.60^{a}	–	–
83	异庚酸	49.746	–	–	0.46±0.00	–	–	–	–	–	–	–
84	辛酸	54.918	0.65±0.00^{g}	3.41±0.02^{g}	153.59±1.80^{f}	0.34±0.00^{g}	0.37±0.00^{g}	540.08±8.02^{a}	354.24±3.53^{d}	175.52±3.02^{e}	494.69±4.02^{b}	453.63±2.58^{c}
85	壬酸	58.275	–	–	–	–	–	5.46±0.12^{a}	3.07±0.00^{d}	1.73±0.02^{e}	4.84±0.11^{c}	5.03±0.15^{b}
86	正癸酸	61.533	0.59±0.00^{g}	0.72±0.00^{g}	17.59±0.10^{f}	–	–	146.24±3.08^{a}	94.78±1.10^{d}	58.53±0.92^{e}	142.81±2.05^{b}	141.51±2.57^{c}
87	垅牛儿酸	63.333	–	–	–	–	–	9.41±0.02^{a}	4.88±0.02^{c}	2.57±0.02^{e}	3.15±0.02^{d}	8.59±0.23^{b}
88	十一烷酸	64.607	–	–	–	–	–	0.86±0.00^{c}	0.58±0.00^{d}	0.27±0.00^{e}	1.05±0.00^{a}	0.96±0.00^{b}
89	苯甲酸	66.529	456.10±6.03^{f}	–	92.77±1.51^{i}	350.64±2.50^{h}	180.86±3.59^{g}	912.19±2.51^{c}	690.24±2.45^{e}	798.36±2.01^{d}	1599.67±43.65^{a}	1164.80±25.57^{b}
90	月桂酸	67.59	–	–	0.59±0.03^{f}	–	–	20.97±1.44^{c}	13.36±0.17^{d}	5.31±0.01^{e}	33.60±1.63^{a}	22.94±1.00^{b}
	酸类		491.57±6.46^{g}	59.97±1.90^{j}	684.73±12.24^{f}	380.80±3.26^{h}	211.99±4.13^{i}	2166.85±22.79^{c}	1580.96±11.45^{e}	1823.07±18.13^{d}	2709.27±59.92^{a}	2283.08±37.29^{b}
91	邻甲酚	53.221	0.17±0.00^{a}	–	–	0.13±0.00^{b}	0.13±0.00^{b}	–	–	–	–	–
92	苯酚	53.339	0.08±0.00^{a}	0.05±0.00^{b}	–	–	0.07±0.00^{a}	–	–	–	–	–
93	对甲酚	55.822	0.58±0.00^{a}	0.32±0.00^{d}	–	0.43±0.00^{c}	0.46±0.00^{b}	0.15±0.00^{e}	0.17±0.00^{e}	0.11±0.00^{f}	0.15±0.00^{e}	0.17±0.00^{e}
	酚类		0.83±0.01^{a}	0.38±0.00^{d}	–	0.56±0.00^{c}	0.67±0.00^{b}	0.15±0.00^{e}	0.17±0.00^{e}	0.11±0.00^{f}	0.15±0.00^{e}	0.17±0.00^{e}
94	二甲基硫	5.165	–	–	–	–	–	4.93±0.02^{c}	4.82±0.01^{e}	6.39±0.12^{a}	4.86±0.08^{d}	5.05±0.07^{b}
95	二乙酰	10.286	–	–	–	–	–	1.78±0.00^{e}	8.98±0.13^{a}	4.05±0.04^{d}	7.19±0.12^{b}	6.15±0.15^{c}
96	2-正戊基呋喃	21.474	0.11±0.00^{b}	–	–	0.07±0.00^{c}	0.15±0.00^{a}	–	–	–	–	–
97	苯乙烯	22.926	0.10±0.00^{bc}	–	0.23±0.00^{a}	0.06±0.00^{d}	0.10±0.00^{b}	–	0.08±0.00^{cd}	0.04±0.00^{e}	–	–
98	4-异丙基甲苯	23.381	0.17±0.00^{a}	0.09±0.00^{d}	0.12±0.00^{c}	0.16±0.00^{ab}	0.15±0.00^{b}	–	–	–	–	–
99	1,2,4-三甲基苯	24.005	0.28±0.00^{a}	–	0.13±0.00^{b}	–	–	–	–	–	–	–
100	二甲硫基甲烷	24.346	–	–	–	–	–	–	–	0.04±0.00	–	–
101	1,2,4,5-四甲苯	30.777	0.33±0.00^{d}	–	0.35±0.00^{d}	0.32±0.00^{d}	0.17±0.00^{e}	0.69±0.00^{b}	0.42±0.00^{c}	0.77±0.00^{a}	0.15±0.00^{e}	0.12±0.00^{f}
102	萘	44.043	0.39±0.00^{c}	–	0.53±0.00^{a}	0.19±0.00^{e}	0.21±0.00^{e}	0.50±0.00^{b}	0.27±0.00^{d}	0.50±0.00^{ab}	0.14±0.00^{f}	0.12±0.00^{f}
	其他类		1.37±0.00^{f}	0.09±0.00^{h}	1.36±0.00^{f}	0.80±0.00^{g}	0.78±0.00^{g}	7.89±0.02^{e}	14.56±0.14^{a}	11.80±0.16^{c}	12.34±0.20^{b}	11.44±0.22^{d}

注：“–”表示未检出，同一行不同字母表示差异显著（P<0.05）。

组成成分，天然存在于生乳中，热处理过程中乳脂降解、不饱和脂肪酸的氧化都会促进酮类物质的形成[9,22−23]，其感知阈值较低，主要赋予奶制品花香、果香及奶香风味[24]。鲜牦牛乳（M1）中有 3 种酮类物质，含量为 37.94 μg/L；75 ℃/15 s（M3）处理时酮类物质增加到 8 种，含量为 822.32 μg/L，新产生的酮类物质分别为 2-丁酮、2,3-戊二酮、2-庚酮、1-辛烯-3-酮、2-壬酮和甲壬基甲酮，且与 M1 组共同含有的 2-戊酮及 3-羟基-2-丁酮在含量上存在显著差异（P<0.05），其中 2-壬酮和 2-庚酮主要贡献水果味、花香味，是牛乳中代表性挥发性风味物质[22,25−26]，3-羟基-2-丁酮具有较强的奶香、奶油香气[26]。63 ℃/30 min（M2）、85 ℃/15 s（M4）组和 90 ℃/15 s（M5）处理组酮类物质种类和含量分别为 4 种、3 种和 2 种，含量分别为 55.13、40.55、36.71 μg/L，种类和含量变化不大，可能由于牦牛乳中多不饱和脂肪酸含量较低，热处理过程中由不饱和脂肪酸的氧化生成的酮类物质较少所致。鲜娟姗牛乳（J1）比鲜牦牛乳（M1）酮类物质种类多 3 种，且酮类总含量为 1322.37 μg/L，与 M1 差异显著（P<0.05）；不同热处理对娟姗牛乳在酮类物质种类上影响不明显，但在含量上与鲜娟姗乳均存在显著差异（P<0.05），J2、J3、J4 和 J5 酮类物质含量分别为 5279.99、1153.48、4311.74 和 5273.12 μg/L，表明热处理对娟姗乳酮类化合物影响明显，尤其是 63 ℃/30 min（J2）、85 ℃/15 s（J4）和 90 ℃/15 s（J5）处理组显著增加了娟姗乳中酮类化合物含量（P<0.05）。虽然酮类物质可以赋予乳及乳制品良好的风味，但也有研究指出，酮类物质含量过高时会引入霉味[25]。有研究报道，原料乳中不存在酮类物质，其产生原因是由热处理导致的，且当温度达到 83 ℃时，酮类物质会基本消失[9]，与本研究结果不一致，可能是由于本研究所选乳中乳脂种类和含量不同所致，在热处理过程中，乳脂中的不饱和脂肪酸可能会发生氧化反应，生成酮类物质。

2.2.2　醛类化合物　乳及乳制品中存在多种直链（支链）醛及芳香醛，主要来源于乳中脂肪酸代谢和氨基酸分解，其阈值较低，化学性质比较活泼属于瞬时挥发性化合物[9]。鲜牦牛乳（M1）中有 4 种醛类物质，含量为 26.37 μg/L；各处理组对牦牛乳醛类物质种类影响不大，但 63 ℃/30 min（M2）处理显著降低醛类物质含量（P<0.05），降低至 2.79 μg/L。醛类物质不是鲜娟姗牛乳（J1）主要挥发性物质，仅有 1 种十六醛，且含量较低（0.21 μg/L）；75 ℃/15 s（J3）处理组对娟姗牛乳醛类物质种类及含量影响较大，处理后种类增加了 4 种，含量增至 12.22 μg/L，与电子鼻结果一致；其余处理组影响不明显。醛类物质中的正己醛和苯甲醛主要呈现青草气味和坚果类香气[11,26]。

2.2.3　酯类化合物　一般来说，酯类化合物来源于短链或游离脂肪酸发生的酯化反应，对牛乳风味的形成发挥着重要作用[27]，通常呈现出花香和果香味，能有效减弱脂肪酸类和胺类物质带来的辛辣和苦味[26,28]。鲜牦牛乳和娟姗牛乳含有较丰富的酯类化合物，种类和含量分别为 12 种 53.87 μg/L，16 种 78.31 μg/L，两种乳中酯类含量占比最高物质分别是 2-甲基丁基乙酸酯、乙酸异戊酯和乙酸苯乙酯，且在 M1 和 J1 中含量差异性显著（P<0.05）。63 ℃/30 min（M2）处理组使牦牛乳中酯类化合物种类和含量显著降低（4 种、2.52 μg/L）。对于娟姗牛乳，各处理组对鲜娟姗牛乳酯类物质种类影响不大，但均显著增加了酯类物质含量，其中 75 ℃/15 s（J3）处理组酯类增加的最多，含量为 489.01 μg/L，其次是 J2、J5 和 J4，酯类含量分别为 217.55、151.31、115.07 μg/L，其中含量变化最明显的有 2-甲基丁基乙酸酯、乙酸异戊酯和乙酸苯乙酯。生乳中的内酯类物质一般呈现甜味和果香味[28]。鲜牦牛乳及各处理组中均未检测到内酯类化合物，而鲜娟姗牛乳中检测到 5 种内酯类化合物，分别为丁位辛内酯、丁位葵内酯、丁位十二内酯、丁位十一内酯和 γ-十二内酯，其中含量比较高的为丁位十一内酯和丁位葵内酯，分别为 3.25 和1.27 μg/L，丁位癸内酯来源于脂质高温下的 β-氧化，主要贡献水果味和甜味[29]。

2.2.4　醇类化合物　醇类化合物阈值较高，只有浓度达到一定量时，才会影响乳的风味[18]。生鲜牦牛乳中醇类物质最多（17 种），主要是异戊醇（268.87 μg/L），热处理后的牦牛乳醇类种类减少，但会生成新的醇类物质，包括 2-甲基丁醇、仲辛醇和（E）-2-辛烯-1-醇。鲜牦牛乳中醇类物质含量最高（320.72 μg/L），热处理后醇类含量有所降低。鲜娟姗乳醇类含量较低（24.06 μg/L），63 ℃/30 min（J2）、75 ℃/15 s（J3）和 90 ℃/15 s（J5）处理组均显著增加了醇类物质含量（P<0.05），变化最大的是 75 ℃/15 s（J3）处理组中的异戊醇和 2-甲基丁醇，分别由原来的 12.09 和 0.32 μg/L 增至 183.00 和 181.86 μg/L。乳中醇类物质的来源有多种途径：有脂肪分解、糖代谢和蛋白质水解[25]。牦牛乳的风味几乎全部来源于乳脂肪，而 72 ℃/15 s 就可以灭活了大部分牛乳中的酶[30]，热处理灭活酶后抑制了主要生成途径，导致醇类减少。而娟姗乳风味形成可能以多途径代谢（美拉德反应、脂质氧化）为主，热处理激活了非酶反应，且初始含量低使其增量更显著（P<0.05）。

2.2.5　酸类化合物　酸类化合物主要来源于乳中脂肪分解和微生物代谢[28]。热处理对两种乳酸类化合物种类影响不明显，但对其含量影响显著（P<0.05）。鲜牦牛乳中酸类化合物总量为 491.57 μg/L，其中含量最多的为苯甲酸（456.10 μg/L），占总含量的 92.78%。鲜娟姗牛乳中酸类化合物总量为 2166.85 μg/L，其中含量最多的同样是苯甲酸（912.19 μg/L），占总酸含量的 42.10%，其次为辛酸（540.08 μg/L）、丁酸（400.36 μg/L）、正癸酸（146.24 μg/L）和异戊酸（91.18 μg/L），分别占酸类总量的 24.92%、18.48%、6.75% 和 4.21%。

75 ℃/15 s(M3、J3)处理会使两种乳中己酸含量显著升高(P<0.05),分别由原来的 1.56 和 0.00 μg/L 增至 355.12 和 479.61 μg/L,己酸在低浓度下贡献花香、奶香和甜味,而高浓度下会产生刺鼻、腐臭等异味[31]。63 ℃/30 min(J2)和 75 ℃/15 s(J3)较低温度处理降低了娟姗牛乳中酸类总含量,而 85 ℃/15 s(J4)和 90 ℃/15 s(J5)处理时酸类总含量有所上升,可能是随着热处理温度的升高,导致乳中更多的脂肪水解为脂肪酸所致[9]。酸类化合物的阈值较高,但多表现出不愉悦气味[26,32],例如辛酸具有典型的“肥皂”气味[28]。两种鲜乳中酸类化合物含量均最高,因此酸类对乳整体风味可能具有消极影响。

2.2.6 酚类化合物 有研究报道,鲜牛奶中含有苯酚、邻甲酚、间甲酚和对甲酚和香芹酚等多种酚类化合物,其中大多数以葡萄糖醛酸、硫酸盐和磷酸盐结合物的形式存在[33−34]。鲜牦牛乳中共检测出 3 种酚类化合物,为苯酚、邻甲酚和对甲酚,总含量仅为 0.83 μg/L,且随着不同热处理的含量呈下降趋势;鲜娟姗牛乳中只检测到对甲酚,含量为 0.15 μg/L,且不同热处理对其含量影响不明显。对甲酚具有独特的“谷仓”风味,且是牛奶中存在的主要酚类化合物[35]。

2.2.7 其他类化合物 鲜牦牛乳和娟姗牛乳中分别检测出 6 种、4 种其他类化合物,主要包括含硫化合物和含苯化合物。鲜牦牛乳特有的为 4-异丙基甲苯和 1,2,4-三甲基苯,鲜娟姗牛乳特有的为二甲基硫和二乙酰。一般生乳含有极少量的硫化物,但却因其低阈值可以对生乳风味产生显著影响[28],例如有研究称低浓度的二甲基硫是奶中强有力的风味化合物[34]。

2.3 不同热处理乳样品 OAV 分析

对不同热处理牛乳挥发性物质样品进行 OAV 分析,结果如表 5 所示。一般认为,挥发性化合物的含量及香气阈值决定了其对样品整体的风味贡献,且 OAV 值越大,对样品风味贡献越大,0.1<OAV<1 的物质被认为对样品风味有重要的修饰作用,1<OAV 的物质对样品风味影响较大,可作为关键风味化合物[37]。由表 5 可知,鲜牦牛乳中 OAV>1 的物质有 3-羟基-2-丁酮(2.63)、1-辛烯-3-醇(30.40)和 2-壬基醇(4.99),说明这三种物质对鲜牦牛乳香气形成有重要贡献,分别贡献黄油味、蘑菇味、生水果味、脂香和青香味。M3 样品 OAV>1 的物质有 10 种,分别为 2,3-戊二酮、3-羟基-2-丁酮、2-壬酮、苯甲醛、正己酸乙酯、辛酸乙酯、1-辛烯-3-醇、2-壬基醇、丁酸和己酸,说明 75 ℃/15 s(M2)处理组更有助于牦牛乳风味物质的生成。鲜娟姗乳样品 OAV>1 的物质有 3-羟基-2-丁酮(93.40)、2-壬基醇(5.37)、丁酸(25.02)和辛酸(1.08),说明鲜娟姗乳黄油味比较重,其次是奶酪味和酸味等。63 ℃/30 min(J2)、85 ℃/15 s(J4)和 90 ℃/15 s(J5)处理组在一定程度上增强了娟姗乳的黄油味、香蕉味和梨香味,减弱了奶酪味和酸味。75 ℃/15 s(J3)处理组 OAV>1 的物质有 6 种,分别为 3-羟基-2-丁酮(80.76)、2-壬酮(1.17)、乙酸异戊酯(5.87)、2-甲基丁醇(1.30)、丁酸(11.34)和己酸(9.99),与鲜娟姗乳相比较,3-羟基-2-丁酮和丁酸的 OAV 值有所降低,且呈香蕉味、梨香味的乙酸异戊酯 OAV 值增大,但同时呈酸味、奶酪味等的己酸 OAV 值增加更明显,整体风味表现上还是以黄油味和酸味为主。各处理组共有的关键风味物质有 4 种,分别为 3-羟基-2-丁酮、正己酸乙酯、辛酸乙酯和丁酸,且 OAV>1 的 3-羟基-2-丁酮和丁酸在娟姗乳处理组中的值远大于牦牛乳处理组,这可能与牛的品种、饲粮、饮用水水质、饲养方式及生活环境有关[28],也有报道表明,由于牧场管理不善等原因,可能会增加生乳中游离脂肪酸含量,从而导致奶中产生异味,特别是短链脂肪酸引起的酸败味[34]。

表 5 不同处理组乳样挥发性物质的 OAV

Table 5 OAV of volatile flavor substances in milk samples from different treatment groups

序号	挥发性风味物质	香气阈值(μg/L)	香气描述	OAV									
				M1	M2	M3	M4	M5	J1	J2	J3	J4	J5
1	2,3-戊二酮	5[36]	奶香味[36]	−	0.48	2.93	−	−	−	−	−	−	−
2	3-羟基-2-丁酮	14[36]	黄油味[36]	2.63	3.69	55.70	2.81	2.56	93.40	376.06	80.76	307.14	375.77
3	2-壬酮	5[37]	青草[38]	−	−	1.10	−	−	0.90	0.99	1.17	0.74	0.81
4	苯甲醛	3[37]	果香[38]	0.17	0.05	1.77	0.13	0.17	−	−	0.15	−	−
5	2-甲基丁醛	1.5[39]	杏仁味、可可味[39]	0.95	−	−	0.51	1.13	−	−	−	−	−
6	乙酸异戊酯	30[40]	香蕉味、梨香味[41]	0.43	−	−	0.40	0.23	0.29	1.70	5.87	0.64	1.07
7	正己酸乙酯	8[41]	青苹果香、白兰地香[41]	0.25	0.15	16.14	0.18	0.21	0.22	0.19	0.19	0.19	0.18
8	辛酸乙酯	0.58[36]	菠萝香味[36]	0.79	0.38	23.51	0.37	0.45	0.42	1.64	0.35	0.25	0.21
9	1-辛烯-3-醇	0.01[42]	蘑菇味[43]	30.40	21.10	18.90	30.70	41.40	−	−	−	−	−
10	2-甲基丁醇	140[39]	香蕉味[39]	−	0.46	0.31	0.84	−	−	0.39	1.30	−	−
11	2-壬基醇	0.1[44]	生水果味、脂香、青香[44]	4.99	−	19.78	3.56	3.94	5.37	3.31	−	5.06	4.34
12	丁酸	16[39]	黄油、奶酪、腐臭、酸味、汗味[39]	0.92	1.25	3.96	1.11	1.09	25.02	19.55	11.34	22.34	22.70
13	己酸	48[39]	酸味、奶酪味、山羊味、辛辣味、腐臭味[39]	0.03	0.72	7.40	0.06	0.03	−	−	9.99	−	−
14	辛酸	500[39]	酸臭味[43]	−	0.01	0.31	−	−	1.08	0.71	0.35	0.99	0.91

注:“−”表示未检出。

2.4　不同处理组乳样香气成分 PCA

图 4 为不同处理组牦牛乳和娟姗牛乳香气成分 PCA 分析图，第一主成分贡献率分别为 77.1% 和 56.3%，第二主成分贡献率分别为 12.8% 和 25.0%，总贡献率分别为 89.9% 和 81.3%。不同处理组样本点之间的距离越近，说明样本的香气成分越相似。由图 4a 可知，当热处理为 75 ℃/15 s(M3)和 90 ℃/15 s(M5)时，乳样香气成分能与鲜牦牛乳明显区分，而 63 ℃/30 min(M2)和 85 ℃/15 s(M4)处理组香气成分与鲜牦牛乳比较无明显差异。75 ℃/15 s(M3)处理组乳样香气成分相关性较大的挥发性物质有 2-壬基醇、2-壬酮、2,3-戊二酮、3-羟基-2-丁酮、己酸、丁酸、辛酸乙酯、正己酸乙酯和苯甲醛，可赋予牦牛乳脂香、清草香、奶香味、黄油味、奶酪味、菠萝香味和果香味等风味。90 ℃/15 s(M5)处理组牦牛乳样香气成分相关性较大的挥发性物质有 2-甲基丁醛和 1-辛烯-3-醇，赋予乳样杏仁味、可可味和蘑菇味。由图 4b 可知，各热处理组乳样香气成分均能与鲜娟姗牛乳明显区分，而 63 ℃/30 min(J2)、85 ℃/15 s(J4)和 90 ℃/15 s(J5)处理组香气成分与 75 ℃/15 s(J3)处理组乳样区分也较明显。75 ℃/15 s(J3)处理组乳样香气成分相关性较大的挥发性物质有己酸、2-甲基丁醇、乙酸异戊酯和 2-壬酮，可赋予娟姗牛乳奶酪味、香蕉味、梨香味和青草味。其余处理组乳样香气成分相关性较大的挥发性物质有辛酸乙酯和 3-羟基-2-丁酮，赋予娟姗牛乳菠萝香味和黄油味。

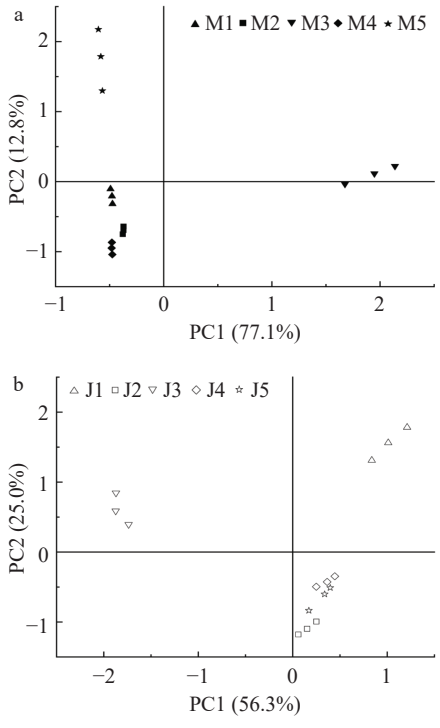


图 4　不同处理组乳样香气成分 PCA

Fig.4　PCA of aroma compounds in milk samples from different treatment groups

注：a. 牦牛乳及不同热处理组；b. 娟姗牛乳及不同热处理组。

3　结论

鲜牦牛乳以醇类和酸类物质为主，其关键风味物质为 3-羟基-2-丁酮、1-辛烯-3-醇及 2-壬基醇，赋予其黄油香与青草脂香特征；而鲜娟姗牛乳则以酮类和酸类物质为主，其中 3-羟基-2-丁酮与丁酸贡献了显著的黄油味及酸味，其挥发性物质含量显著高于牦牛乳(P<0.05)。75 ℃/15 s 处理可显著增加两种牛乳的关键风味物质种类，且娟姗牛乳对热处理更为敏感。所有样品共有的关键风味物质包括 3-羟基-2-丁酮、正己酸乙酯、辛酸乙酯和丁酸，其中娟姗牛乳的 3-羟基-2-丁酮和丁酸的 OAV 值高于牦牛乳，表明其更强烈的风味特征与牛种特性及乳脂代谢差异密切相关。综上，牦牛乳风味稳定性更优，而娟姗牛乳风味对热处理响应显著；75 ℃/15 s 处理是两种牛乳关键风味物质增加的关键工艺参数，可为高原特色乳加工中热处理条件优化及风味调控提供参考。

© 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] SINGH T P, ARORA S, BORAD S G, et al. Fatty acid and amino acid profiling, antioxidant activity and other quality characteristics of vacuum packed cheddar style-yak milk cheese during ripening[J]. Food Bioscience, 2023, 51: 102213.

[2] LI Yalan, ZONG Wanli, ZHAO Shanshan, et al. Nutrition and edible characteristics, origin traceability and authenticity identification of yak meat and milk: A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2023, 139: 104133.

[3] 杨静, 梁琪, 宋雪梅, 等. 牦牛乳与荷斯坦牛乳硬质干酪的抗氧化特性比较[J]. 食品科学, 2020, 41(15): 15−21. [YANG Jing, LIANG Qi, SONG Xuemei, et al. Comparison of antioxidant properties between yak milk and Holstein cow milk hard cheese[J]. Food Science, 2020, 41(15): 15−21.]

[4] 吴晓云, 刘东花, 梁春年, 等. 娟珊牛与牦牛杂交后代泌乳量和乳品质分析[J]. 中国草食动物科学, 2023, 43(1): 19−21. [WU Xiaoyun, LIU Donghua, LIANG Chunnian, et al. Analysis on the milk yield and quality of the hybrid offspring of jersey cattle and yak[J]. China Herbivore Science, 2023, 43(1): 19−21.]

[5] XIONG Lin, PEI Jie, WANG Xingdong, et al. Study of volatile flavor derived from lipids degeneration in yak milk based on semiquantitative lipidomics[J]. Food Chemistry: X, 2024, 23: 101715.

[6] SMITH T J, CAMPBELL R E, JO Y, et al. Flavor and stability of milk proteins[J]. Journal of Dairy Science, 2016, 99(6): 4325−4346.

[7] 何静, 阿拉腾萨其拉, 吉日木图. 热处理对驼乳营养成分与挥发性风味物质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(22): 208−213. [HE J, BATTULGA A, JI R. Effect of different heat treatment on the nutritional quality and volatile flavor compounds of camel milk[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(22): 208−213.]

[8] EISNER M D. Direct and indirect heating of milk–A technological perspective beyond time–temperature profiles[J]. Interna-

tional Dairy Journal, 2021, 122: 105145.
[9] 杨姗姗, 丁瑞雪, 史海粟, 等. 热处理条件对巴氏杀菌乳风味品质的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(24): 131−136. [YANG Shanshan, DING Ruixue, SHI Haisu, et al. Effects of different heat treatment conditions on the flavor of pasteurized milk[J]. Food Science, 2020, 41(24): 131−136.]
[10] 李扬, 李妍, 李栋, 等. 基于 ROAV 和嗅闻技术分析乳脂的关键风味化合物[J]. 食品科学, 2023, 44(6): 262−267. [LI Yang, LI Yan, LI Dong, et al. Analysis of key flavor compounds in dairy fat products using relative odor activity value and olfactometry[J]. Food Science, 2023, 44(6): 262−267.]
[11] 廖紫玉, 魏光强, 田洋, 等. 基于 HS-SPME-GC-MS 分析加工方式对即食乳扇风味品质的影响[J]. 中国乳品工业, 2022, 50(3): 14−21. [LIAO Ziyu, WEI Guangqiang, TIAN Yang, et al. Based on HS-SPME-GC-MS analysis of the effect of processing methods on the flavor quality of instant Rushan[J]. China Dairy Industry, 2022, 50(3): 14−21.]
[12] 郭银萍, 赵晓璇, 姚萍, 等. 热处理对羊乳和骆驼乳中美拉德反应产物和挥发性风味物质的影响[J]. 中国乳品工业, 2023, 51(9): 4−9. [GUO Yinping, ZHAO Xiaoxuan, YAO Ping, et al. Effect of heat treatment on Maillard products and volatile flavor substances in goat milk and camel milk[J]. China Dairy Industry, 2023, 51(9): 4−9.]
[13] 李宏强, 王宏博, 杨晓玲, 等. 牦牛乳及乳制品中挥发性风味物质的研究进展[J]. 中国草食动物科学, 2023, 43(1): 43−47,63. [LI Hongqiang, WANG Hongbo, YANG Xiaoling, et al. Research progress of volatile flavor compounds in yak milk and dairy products[J]. China Herbivore Science, 2023, 43(1): 43−47,63.]
[14] 叶丹. 西藏不同海拔高度牦牛乳营养成分比较研究[D]. 拉萨: 西藏大学, 2020: 29−31. [YE Dan. Comparative study on nutritional quality of raw milk of different varieties in Linzhi Tibet under the condition of artificial breeding[D]. Lasa: Tibet University, 2020: 29−31.]
[15] 张晓梅, 仝令君, 迟雪露, 等. 奶牛乳、水牛乳与牦牛乳的挥发性风味物质分析[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(18): 126−131. [ZHANG Xiaomei, TONG Lingjun, CHI Xuelu, et al. Analysis of volatile flavor components of cattle milk, buffalo milk and yak milk [J]. Food Research and Development, 2017, 38(18): 126−131.]
[16] 文勇立, 赵佳琦. 牦牛的泌乳量测定及其乳特性[J]. 中国乳业, 2019(11): 12−18. [WEN Yongli, ZHAO Jiaqi. Determination of milk yield and milk characteristics of yak[J]. China Dairy, 2019 (11): 12−18.]
[17] 李逍遥. 巴氏杀菌乳风味改善影响因素及机理研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2023. [LI Xiaoyao. Study on the influencing factors and mechanism of flavor improvement of pasteurized milk [D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2023.]
[18] 陈宝蓉, 曹洪宇, 张雨萌, 等. 不同热处理对马乳中蛋白及风味物质的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(17): 191−198. [CHEN Baorong, CAO Hongyu, ZHANG Yumeng, et al. Effects of different heat treatments on proteins and volatile compounds in mare milk[J]. Food Science, 2024, 45(17): 191−198.]
[19] CHI Xuelu, ZHANG Yangdong, ZHENG Nan, et al. HS-GC-IMS and HS-SPME/GC-MS coupled with E-nose and E-tongue reveal the flavors of raw milk from different regions of China[J]. Current Research in Food Science, 2024, 8: 100673.
[20] ZHENG Anran, WEI Chaokun, WANG Mengsong, et al. Characterization of the key flavor compounds in cream cheese by GC-MS, GC-IMS, sensory analysis and multivariable statistics[J]. Current Research in Food Science, 2024, 8: 100772.
[21] BALDWIN E A, BAI J H, PLOTTO A, et al. Electronic noses and tongues: Applications for the food and pharmaceutical industries[J]. Sensors, 2011, 11(5): 4744−4766.
[22] LICÓN C C, HURTADO DE MENDOZA J, MAGGI L, et al. Optimization of headspace sorptive extraction for the analysis of volatiles in pressed ewes' milk cheese[J]. International Dairy Journal, 2012, 23(1): 53−61.
[23] VALERO E, VILLAMIEL M, MIRALLES B, et al. Changes in flavour and volatile components during storage of whole and skimmed UHT milk[J]. Food Chemistry, 2001, 72(1): 51−58.
[24] MATERA J, LUNA A S, BATISTA D B, et al. Brazilian cheeses: A survey covering physicochemical characteristics, mineral content, fatty acid profile and volatile compounds[J]. Food Research International, 2018, 108: 18−26.
[25] 迟雪露. 生牛乳风味活性物质解析及影响因素研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2023. [CHI Xuelu. Study on raw milk flavor profile and influenced factors[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2023.]
[26] 陈臣, 田同辉, 刘政, 等. 基于感官评价、GC-IMS 和 GC-MS 的中式酸凝奶酪挥发性风味比较[J]. 食品科学, 2023, 44(16): 228−236. [CHEN Chen, TIAN Tonghui, LIU Zheng, et al. Comparative study on volatile flavor of Chinese acid-curd cheese using sensory evaluation, gas chromatography-ion mobility spectrometry and gas chromatography-mass spectrometry[J]. Food Science, 2023, 44(16): 228−236.]
[27] 依胜男, 芦晶, 逄晓阳, 等. 热处理对牛乳美拉德反应程度及挥发性成分的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(14): 9−15. [YI Shengnan, LU Jing, PANG Xiaoyang, et al. Effect of heat treatment on Maillard reaction degree and volatile components of milk[J]. Food Science, 2021, 42(14): 9−15.]
[28] 陈银阁, 张养东, 李宁, 等. 生乳中风味物质特征及来源研究进展[J]. 中国畜牧兽医, 2024, 51(3): 1103−1110. [CHEN Yinge, ZHANG Yangdong, LI Ning, et al. Research progress on flavour substance characteristics and sources in raw milk[J]. China Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 2024, 51(3): 1103−1110.]
[29] KOHAMA-KUBOUCHI A, ISOGAI T, KOBAYASHI F, et al. The effect of mixing temperature on the flavour expression of processed cream cheese[J]. International Dairy Journal, 2020, 111: 104842.
[30] 张金亮, 李义恒, 杨晓丽, 等. 内源性脂蛋白脂肪酶及其对牦牛乳风味劣变的影响机制研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(3): 347−353. [ZHANG Jinliang, LI Yiheng, YANG Xiaoli, et al. Research progress of endogenous lipoprotein lipase and its effect yak milk mechanism on flavor deterioration[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(3): 347−353.]
[31] 王姣, 许凌云, 张晋华, 等. 不同成熟时间切达奶酪中挥发性香气成分及其电子鼻判别分析[J]. 食品科学, 2020, 41(20): 175−183. [WANG Jiao, XU Lingyun, ZHANG Jinhua, et al. Cheddar cheese with different ripening times: Analysis of volatile aroma components and electronic nose discrimination[J]. Food Science, 2020, 41(20): 175−183.]
[32] MAJCHER M A, MYSZKA K, GRACKA A, et al. Key odorants of lazur, a polish mold-ripened cheese[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66(10): 2443−2448.
[33] BENDALL J G. Aroma compounds of fresh milk from New Zealand cows fed different diets[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2001, 49(10): 4825−4832.
[34] 杨继勇, 张养东, 郑楠, 等. 牛奶感官特征及风味物质的研究进展[J]. 动物营养学报, 2022, 34(5): 2790−2797. [YANG Jiy-

ong, ZHANG Yangdong, ZHENG Nan, et al. Research progress on sensory characteristics and flavoring substances of milk[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2022, 34(5): 2790−2797.]
[35] MAGAN J B, O′CALLAGHAN T F, KELLY A L, et al. Compositional and functional properties of milk and dairy products derived from cows fed pasture or concentrate-based diets[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2021, 20(3): 2769−2800.
[36] 赵鹏鹏, 高腾琪, 唐海峰, 等. 基于 HS-SPME-GC-MS 技术分析发酵条斑紫菜酱风味物质变化[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(8): 175−183. [ZHAO Pengpeng, GAO Tengqi, TANG Haifeng, et al. Analysis of changes in flavor substances in fermented *Porphyra yezoensis* sauce based on HS-SPME-GC-MS technique[J]. Food Research and Development, 2024, 45(8): 175−183.]
[37] 李婷, 田佳乐, 刘洋, 等. 基于固相微萃取-气相色谱-质谱与电子鼻技术分析发酵乳中的挥发性风味物质[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(10): 233−241. [LI Ting, TIAN Jiale, LIU Yang, et al. Analysis of volatile flavor compounds in fermented milk by SPME-GC-MS and electronic nose technology[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(10): 233−241.]
[38] 曾小峰, 颜蜜, 盖智星, 等. 羊肚菌酶解工艺优化及酶解液挥发性风味物质分析[J]. 食品工业科技, 2025, 46(4): 147−154. [ZENG X F, YAN M, GE Z X, et al. Optimization of enzymatic hydrolysis process of *Morchella esculenta* and analysis of volatile flavor compounds in enzymatic hydrolysate[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(4): 147−154.]
[39] MU S, STIEGER M, BOESVELDT S. Olfactory discrimination of fat content in milks is facilitated by differences in volatile compound composition rather than odor intensity[J]. Food Chemistry, 2022, 393: 133357.
[40] 王娜. 基于组学技术的中国黄酒陈酿香气组分分析及酒龄识别的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2020. [WANG Na. Analysis of aging aromas and study on age discrimination of Chinese rice wine based on omics technology[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2020.]
[41] 赵宁, 魏新元, 樊明涛, 等. SPME-GC-MS 结合电子鼻技术分析不同品种猕猴桃酒香气物质[J]. 食品科学, 2019, 40(22): 249−255. [ZHAO Ning, WEI Xinyuan, FAN Mingtao, et al. Analysis of volatile components of kiwifruit wines made from different cultivars using solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry combined with electronic nose[J]. Food Science, 2019, 40(22): 249−255.]
[42] JIANG Kexin, YANG Aolin, ZHANG Zheting, et al. Identification of aroma-active compounds in milk by 2-dimensional gas chromatography-olfactometry-time-of-flight mass spectrometry combined with check-all-that-apply questions[J]. Journal of Dairy Science, 2024, 107(11): 9124−9134.
[43] 王姣, 许凌云, 张晋华, 等. SPME-GC-MS 和 GC-O 鉴定 3 种不同生产工艺马苏里拉奶酪的特征香气物质[J]. 食品科学, 2020, 41(18): 210−217. [WANG Jiao, XU Lingyun, ZHANG Jinhua, et al. Identification of characteristic aroma substances of three different mozzarella cheeses by solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry and gas chromatography-olfactometry[J]. Food Science, 2020, 41(18): 210−217.]
[44] 李昀哲, 陈瑞, 蒋成, 等. 基于 HS-SPME-GC-MS 和快速气相电子鼻技术对不同产地石榴酒挥发性成分的研究[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(16): 159−169. [LI Yunzhe, CHEN Rui, JIANG Cheng, et al. Study on volatile components of pomegranate wines from different regions based on HS-SPME-GC-MS and rapid gas-phase electronic nose[J]. Food Research and Development, 2024, 45(16): 159−169.]