

基于HS-SPME-GC-MS和OAV分析西藏不同地区牦牛乳拉拉关键呈香物质

董 闯, 续 辉, 祝亚辉, 杨 林

Analysis of Key Aroma Presenting Substances in Yak Milk Lala from Different Regions of Tibet Based on HS-SPME-GC-MS and OAV

DONG Chuang, XU Hui, ZHU Yahui, and YANG Lin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024060151>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

董闯, 续辉, 祝亚辉, 等. 基于 HS-SPME-GC-MS 和 OAV 分析西藏不同地区牦牛乳拉拉关键呈香物质 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(10): 281–290. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024060151

DONG Chuang, XU Hui, ZHU Yahui, et al. Analysis of Key Aroma Presenting Substances in Yak Milk Lala from Different Regions of Tibet Based on HS-SPME-GC-MS and OAV[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(10): 281–290. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024060151

· 分析检测 ·

基于 HS-SPME-GC-MS 和 OAV 分析西藏 不同地区牦牛乳拉拉关键呈香物质

董 闯, 续 辉, 祝亚辉, 杨 林*
(西藏农牧学院食品科学学院, 西藏林芝 860000)

摘 要: 以西藏四个地区牦牛乳拉拉为研究对象, 采用顶空固相微萃取结合气相色谱-质谱 (Headspace-Solid Phase Microextraction-Gas Chromatography-Mass Spectrometry, HS-SPME-GC-MS) 联用技术, 通过香气活度值 (Odor Activity Value, OAV) 找出关键呈香物质, 并运用偏最小二乘判别分析 (Partial Least Squares Discriminant Analysis, OPLS-DA), 探究不同地区拉拉的关键香气和差异成分, 旨在解析西藏地区牦牛乳拉拉的关键呈香物质。结果表明: 四个地区牦牛乳拉拉共检测出 88 种挥发性成分, 主要为酸类、醇类、醛类、酯类和酮类以及芳香族化合物; 利用阈值筛选出 29 种 $OA \geq 1$ 的挥发性成分; 结合 $OA \geq 1$ 且投影变量影响分析 (Impact Analysis of Projection Variables, VIP) > 1 进一步筛选出 9 种特征挥发性物质为四个地区牦牛乳拉拉风味的差异性标志物, 分别为 2R,3R-丁二醇、壬酮、丁二醇、异戊酸、N-甲基-2-吡咯甲醛、乙酸、异丁酸、麦芽酚和肉豆蔻酸。通过 OAV、聚类热图、OPLS-DA 表明: 不同海拔高度的牦牛乳拉拉关键香气成分存在差异, 根据 VIP 筛选出的 9 种特征挥发性物质较好地地区分了四个地区拉拉的特征风味; 9 种风味物质中 2R,3R-丁二醇、壬酮、丁二醇、N-甲基-2-吡咯甲醛、乙酸分别赋予 DXLL 香甜、青草、烤坚果和淡淡的酸甜味; 异戊酸、乙酸、麦芽酚和肉豆蔻酸分别赋予 DILL 特殊酸味、焦奶油和椰子香味; 异戊酸、异丁酸赋予 BGLL 酸味。本研究揭示了牦牛乳拉拉关键呈香物质组成, 为牦牛乳拉拉特征香气形成机理提供数据支撑, 同时也为牦牛乳拉拉的工业化生产提供理论指导。

关键词: 拉拉, 顶空固相微萃取-气相色谱-质谱 (HS-SPME-GC-MS), 香气活度值 (OA), 偏最小二乘判别分析 (OPLS-DA)

中图分类号: TS252.53

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)10-0281-10

本文网刊:

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024060151



Analysis of Key Aroma Presenting Substances in Yak Milk Lala from Different Regions of Tibet Based on HS-SPME-GC-MS and OAV

DONG Chuang, XU Hui, ZHU Yahui, YANG Lin*

(College of Food Science, Tibet Agricultural and Animal Husbandry University, Nyingchi 860000, China)

Abstract: The yak milk Lala (YMLL) from four regions of Tibet were used as the research object, and the headspace-solid phase microextraction combined with gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS) and odor activity value (OA) were used to identify the key aromatic substances. Additionally, partial least squares discriminant analysis (OPLS-DA) was utilized to explore the key aroma and different components of Lala at different regions, which aimed to analyze the key aroma substances of YMLL in Tibet. The results revealed that 88 volatile components were detected in YMLL at the four regions, which were primarily acids, alcohols, aldehydes, esters, ketones and aromatic compounds. Twenty-nine

收稿日期: 2024-06-12

基金项目: 西藏自治区自然科学基金项目 (XZ202201ZR0025G); 西藏自治区科技重大专项 (XZ202201ZD0001N); 四川省科技计划项目 (2023NZZJ0033)。

作者简介: 董闯 (2001-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 乳品科学与技术, E-mail: 2384235663@qq.com。

* 通信作者: 杨林 (1981-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 西藏特色畜产品加工与贮藏, E-mail: yanglin@xza.edu.cn。

volatile components with $OAV \geq 1$ by threshold value were screened. Furthermore, through a combination of $OAV \geq 1$ and impact analysis of projection variables ($VIP > 1$), 9 characteristic volatile substances as the difference markers of YMLL flavor in the four regions were further identified, that included 2R,3R-butanediol, nonone, butanediol, isovaleric acid, n-methyl-2-pyrrolidine, acetic acid, isobutyric acid, maltol and myristic acid, respectively. The OAV, cluster heat map and OPLS-DA was used to indicate differences in key aroma components of YMLL at different altitudes. The characteristic flavors of Lala in four regions were well distinguished according to these 9 characteristic volatile substances selected by VIP, 2R,3R-butanediol, nonone, butanediol, n-methyl-2-pyrrole formaldehyde and acetic acid gave DXLL sweet taste with grassy notes along with roasted nuts and light sweet-and-sour taste respectively. Isovaleric acid, acetic acid, maltol and myristic acid gave DLLL special sour taste, burnt cream and coco nut aroma respectively. Isovaleric acid and isobutyric acid gave BGLL sour taste. The key aroma composition of YMLL was unveiled in this study, while data support was provided for the elucidation of its characteristic aroma formation, theoretical guidance was additionally offered for the industrial-scale production of YMLL through systematic biochemical characterization.

Key words: Lala; headspace-solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS); odor activity value (OAV); partial least squares discriminant analysis (OPLS-DA)

牦牛是青藏高原特有优势物种,生存在高海拔高寒地带,被誉为青藏高原的“生命之舟”^[1-2]。牦牛乳蕴含丰富的蛋白质、脂肪、乳糖、干物质等营养成分,有“天然浓缩奶”的美誉。牦牛乳主要制品有酥油、拉拉、曲拉等。拉拉是众多干酪制品中的一员,具有高营养,便于运输、保存等优点^[3],作为我国西藏地区特色传统乳制品,其独特的风味与极高的营养价值深受农牧民喜爱。干酪中的蛋白质在凝乳酶的作用下容易被胃蛋白酶等消化酶分解成肽、氨基酸等可溶性物质,易被人体吸收。拉拉成熟过程中,大部分乳糖随乳清一起排出,残留的乳糖在发酵剂和微生物的作用下代谢成乳酸,进而代谢成乙醇、乙酸、乙醛和二氧化碳等^[4],组成了牦牛乳拉拉的特有风味。

顶空固相微萃取结合气相色谱-质谱(Headspace-Solid Phase Microextraction-Gas Chromatography-Mass Spectrometry, HS-SPME-GC-MS)技术被广泛应用于水果^[5-6]、茶类^[7-8]和乳制品^[9-10]的风味分析。其在乳制品中的应用主要为区分风味差异及特征风味,陈臣等^[11]研究发现 5 种中式酸凝奶酪具有显著风味差异,同时还找出了 5 种奶酪风味的主要贡献物质。牛捷等^[12]采用 SPME-GC-MS 对不同成熟时期牦牛乳软质干酪挥发性风味物质进行分离鉴定,共检测出 45 种挥发性化合物,其中酸类物质构成了牦牛乳软质干酪的主体特征风味,乙酸、丁酸、己酸成为干酪中的优势风味物质。巨玉佳等^[13]通过电子鼻技术辅助 GC-MS 对比了牦牛乳硬质干酪与软质干酪中的挥发性风味物质。结果表明,牦牛乳硬质干酪中的主要挥发性风味物质为己酸和 2-丁醇;软质干酪的主要挥发性风味物质为丁酸和己酸。郑晓吉等^[14]对来自新疆哈萨克族不同地区 20 种奶酪样品中挥发性风味组分进行研究,共检测出 52 种主要挥发性化合物,并运用主成分分析对不同地区奶酪进行了归类划分。卢灏泽等^[15]对西藏不同地区牦牛奶酪中挥发性物质进行了测定,发现西藏牦牛奶酪中有 43 种挥发性成分,其中主要风味物质为己醛、

辛醛、壬醛、癸醛、2-壬酮、辛酸乙酯、1-庚醇、2,3-丁二醇等,另外发现风味物质构成与微生物群落具有一定的相关性。

目前,关于西藏牦牛乳拉拉挥发性成分的研究相对较少,本研究采用 HS-SPME-GC-MS 结合香气活度值(Odor Activity Value, OAV)和偏最小二乘判别分析(Partial Least Squares Discriminant Analysis, OPLS-DA)对西藏四个地区牦牛乳拉拉中挥发性风味物质进行阐述,详细剖析了各个地区的关键香气成分和差异性风味物质,为揭示了不同地区牦牛乳拉拉的关键香气物质及其质量体系构建和产业开发提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

采集西藏林芝市巴宜区(BYLL;海拔 2900 m)、拉萨市当雄县(DXLL;海拔 4300 m)、拉萨市堆龙德庆区(DLLL;海拔 4500 m)、那曲市班戈县(BGLL;海拔 4877 m)四个不同海拔高度的牦牛乳拉拉。拉拉采样情况:分别取 3 户农牧民自制、成熟期为 15 d 左右的拉拉,各取 2 kg 样品运输至实验室,称取相同质量的拉拉粉碎混匀后进行检测; C_7 - C_{30} 正构烷烃标准品、2-甲基-3-庚酮 色谱纯,美国 sigma 公司;氯化钠 分析纯,广州化学试剂厂。

08-2T 恒温磁力搅拌器 上海梅颖浦仪器仪表制造有限公司;57330-U 固相微萃取装置、57348-U 固相微萃取针、50/30 μm DVB/CAR/PDMS 美国 Supelco 公司;Agilent 7890A-5975C GC-MS 气相色谱质谱联用仪、HP-INNOWax 气相色谱柱 Polyethylene Glyco (50 m $\times$ 200 μm $\times$ 0.2 μm) 美国安捷伦公司。

1.2 实验方法

1.2.1 萃取条件 准确称取 5.00 g 粉碎后的样品置于 20 mL 萃取瓶中,加入 100 μg 苯乙酸异戊酯(溶于正己烷,5 mg/mL,取 20 μL 加入),密封,置于 60 $^{\circ}\text{C}$ 水浴中,平衡 20 min 后,插入萃取针萃取 30 min。

萃取针使用前,在气质进样口活化 20 min(250 ℃)。

1.2.2 GC-MS 分析

1.2.2.1 GC 条件 根据 Urgeghe 等^[16] 方法,稍作修改。进样口温度 250 ℃,气质接口温度 250 ℃,载气流速 1.5 mL/min。不分流进样。进样:萃取针在进样口解析附 5 min;升温程序:初始 50 ℃,保持 1 min,以 5 ℃/min 升温到 100 ℃ 保持 5 min;4 ℃/min 升温到 140 ℃ 保持 4 min;4 ℃/min 升温到 180 ℃ 保持 2 min;10 ℃/min 升温到 250 ℃ 保持 10 min。

1.2.2.2 MS 条件 离子源温度 230 ℃,四级杆温度 150 ℃,EI 电离 70 eV,全扫描 50~550 Da。

1.2.2.3 定性定量分析 挥发性物质定性基于 NIST 17 质谱数据库,使用 AMDIS 软件进行双向检索,并结合保留指数值进行定性。挥发性物质定量用苯乙酸异戊酯作为内标化合物,采用内标半定量法计算拉拉中挥发性化合物的含量,单位为 μg/g。

1.2.3 关键香气成分分析 根据得到的结果和各挥发性成分在水中的嗅觉阈值^[17] 来确定关键香气成分。气味活度值(OAV,OAV≥1.0 为关键风味物质,0.1≤OAV<1.0 为修饰性风味物质,OAV<0.1 为潜

在修饰风味物质)^[18],计算公式如下:

$$OAV = \frac{c}{OT}$$

式中:c 表示挥发性化合物的含量,mg/kg;OT 表示该化合物在水中的嗅觉阈值,mg/kg。

1.3 数据处理

采用 Microsoft Excel 2010 处理数据,数值以“平均值±标准差”表示,以 SPSS 21.0 进行显著性分析($P<0.05$),同时用 Origin 2021 和 SIMCA 14.1 进行绘图,每组实验测定 3 次。

2 结果与分析

2.1 四个地区牦牛乳拉拉挥发性成分分析

由表 1 和图 1 可知,西藏四个地区牦牛乳拉拉中共鉴定出 88 种挥发性风味物质,主要为酸类 24 种、醛类 15 种、酯类 15 种、醇类 12 种、酮类 7 种、酚类 4 种及其他类 11 种。由此可知牦牛乳拉拉的挥发性物质的种类以酸类、醛类和酯类为主,其中乳酸菌代谢是形成拉拉酸类风味物质的主要原因,由此可知拉拉中可能蕴含较多种类和数量的乳酸菌;醛类和酯类化合物的种类较多可能是由于拉拉中所含酶类的活性较高所致。另外张兰俊等^[19] 研发新品

表 1 四个地区牦牛乳拉拉中挥发性成分及含量
Table 1 Volatile components and contents in yak milk Lala from four regions

类别	序号	化合物名称	CAS号	含量(μg/g)			
				BYLL	DLLL	DXLL	BGLL
醇类化合物	1	己醇	111-27-3	—	—	0.47±0.06 ^a	0.32±0.09 ^b
	2	戊醇	71-41-0	—	0.84±0.07	—	—
	3	异戊醇	123-51-3	—	—	—	1.87±0.12
	4	丁二醇	513-85-9	1.19±0.02 ^d	21.97±0.82 ^b	70.09±0.16 ^a	3.97±0.12 ^c
	5	2R,3R-丁二醇	024347-58-8	1.86±0.06 ^d	16.69±0.33 ^b	27.84±0.35 ^a	5.15±0.14 ^c
	6	正辛醇	111-87-5	0.30±0.01 ^c	2.10±0.03 ^a	0.40±0.02 ^b	0.40±0.01 ^b
	7	糠醇	98-00-0	15.86±0.16 ^a	7.16±0.02 ^c	12.98±0.49 ^b	1.99±0.02 ^d
	8	苯甲醇	100-51-6	—	—	0.06±0.01 ^b	1.08±0.41 ^a
	9	苯乙醇	60-12-8	—	0.35±0.00 ^b	—	0.83±0.09 ^a
	10	柏木油醇	77-53-2	—	—	—	0.27±0.11
	11	丙二醇	57-55-6	—	—	0.87±0.06	—
	12	5-甲基-2-呋喃甲醇	3857-25-8	—	0.14±0.08 ^b	0.26±0.01 ^a	—
醛类化合物	1	庚醛	111-71-7	0.37±0.02 ^c	4.85±0.11 ^a	—	1.39±0.12 ^b
	2	壬醛	124-19-6	2.76±0.02 ^c	8.04±0.12 ^a	0.78±0.15 ^d	3.12±0.29 ^b
	3	己醛	66-25-1	0.10±0.01 ^b	3.23±0.20 ^a	—	—
	4	辛醛	124-13-0	0.62±0.01 ^b	—	0.86±0.00 ^a	—
	5	癸醛	112-31-2	—	0.26±0.00	—	—
	6	糠醛	98-01-1	0.35±0.00 ^b	0.39±0.01 ^b	0.77±0.07 ^a	0.28±0.09 ^b
	7	苯甲醛	100-52-7	0.11±0.01 ^d	1.62±0.04 ^a	0.32±0.02 ^c	0.65±0.15 ^b
	8	十一烯醛	1337-83-3	0.46±0.01 ^b	3.17±0.07 ^a	0.05±0.02 ^d	0.14±0.01 ^c
	9	月桂醛	112-54-9	—	0.32±0.02	—	—
	10	肉豆蔻醛	124-25-4	—	1.02±0.09	—	—
	11	2-十二烯醛	4826-62-4	0.21±0.01 ^b	2.46±0.05 ^a	0.06±0.01 ^d	0.14±0.00 ^c
	12	5-甲基糠醛	620-02-0	—	—	0.07±0.03	—
	13	5-羟甲基糠醛	67-47-0	—	0.10±0.01	—	—
	14	N-甲基-2-吡咯甲醛	1192-58-1	—	—	0.11±0.02	—
	15	反,反-2,4-癸二烯醛	25152-84-5	—	1.08±0.03	—	—

续表 1

类别	序号	化合物名称	CAS号	含量(μg/g)			
				BYLL	DLLL	DXLL	BGLL
酸类化合物	1	乙酸	64-19-7	21.29±0.39 ^d	112.08±0.53 ^b	129.97±0.09 ^a	24.80±1.27 ^c
	2	甲酸	64-18-6	1.33±0.05 ^b	0.82±0.02 ^c	6.70±0.05 ^a	0.82±0.01 ^c
	3	丙酸	79-09-4	0.21±0.01 ^d	4.09±0.04 ^a	3.50±0.03 ^b	0.61±0.04 ^c
	4	丁酸	107-92-6	0.59±0.03 ^c	1.17±0.03 ^c	3.61±0.09 ^b	14.66±0.64 ^a
	5	异丁酸	79-31-2	0.14±0.01 ^c	0.60±0.01 ^b	0.50±0.00 ^b	0.81±0.12 ^a
	6	戊酸	109-52-4	—	—	—	0.13±0.03
	7	异戊酸	503-74-2	—	0.57±0.01 ^a	0.49±0.01 ^a	0.53±0.12 ^a
	8	己酸	142-62-1	0.81±0.02 ^c	2.30±0.56 ^b	2.38±0.02 ^b	29.89±0.38 ^a
	9	庚酸	111-14-8	—	0.33±0.00 ^b	0.06±0.01 ^c	0.68±0.03 ^a
	10	辛酸	124-07-2	1.34±0.02 ^c	2.54±0.01 ^b	3.38±0.02 ^b	65.47±1.22 ^a
	11	壬酸	112-05-0	0.47±0.03 ^c	1.50±0.11 ^b	0.62±0.15 ^b	2.12±0.22 ^a
	12	乳酸	79-33-4	—	27.62±0.25 ^b	30.02±0.22 ^a	10.69±0.41 ^c
	13	癸酸	334-48-5	4.21±0.02 ^d	5.98±0.08 ^c	9.51±0.04 ^b	138.91±1.45 ^a
	14	9-癸烯酸	14436-32-9	0.21±0.01 ^c	0.44±0.03 ^b	0.41±0.02 ^{bc}	4.25±0.22 ^a
	15	十一酸	112-37-8	—	—	0.13±0.00 ^b	0.72±0.03 ^a
	16	苯甲酸	65-85-0	1.20±0.01 ^d	4.81±0.01 ^c	7.85±0.04 ^b	14.59±0.51 ^a
	17	月桂酸	143-07-7	1.04±0.04 ^c	2.56±0.02 ^b	3.47±0.10 ^b	35.78±1.04 ^a
	18	十三酸	638-53-9	—	—	0.32±0.00 ^b	0.43±0.00 ^a
	19	十五酸	1002-84-2	—	—	1.86±0.01 ^a	0.52±0.06 ^b
	20	棕榈酸	57-10-3	0.60±0.02 ^d	1.14±0.02 ^c	5.00±0.00 ^a	3.12±0.11 ^b
	21	苯乙酸	103-82-2	—	—	0.31±0.04	—
	22	肉豆蔻酸	544-63-8	1.26±0.10 ^d	2.98±0.11 ^c	6.38±0.02 ^b	12.68±0.28 ^a
	23	肉豆蔻油酸	544-64-9	—	—	0.29±0.02	—
	24	油酸	112-80-1	—	—	1.11±0.14	—
酮类化合物	1	壬酮	821-55-6	—	—	0.24±0.02 ^a	0.11±0.00 ^b
	2	呋喃酮	3658-77-3	0.22±0.02 ^c	0.29±0.02 ^b	0.48±0.03 ^a	0.31±0.01 ^b
	3	羟基丙酮	116-09-6	0.75±0.04 ^b	—	1.75±0.14 ^a	0.94±0.20 ^b
	4	甲基辛基酮	693-54-9	0.11±0.01	—	—	—
	5	2-(5H)-呋喃酮	497-23-4	0.20±0.01 ^c	0.74±0.03 ^a	0.77±0.02 ^a	0.42±0.02 ^b
	6	3-羟基-2-丁酮	513-86-0	1.45±0.11 ^c	14.95±0.60 ^a	1.89±0.21 ^c	5.45±0.34 ^b
	7	反,反-3,5-辛二烯酮	30086-02-3	—	—	—	0.19±0.02
酯类化合物	1	乙酸仲丁酯	105-46-4	—	—	—	0.70±0.06
	2	辛酸乙酯	106-32-1	—	—	—	0.17±0.01
	3	丁二醇二乙酸酯	1114-92-7	—	—	—	0.13±0.01
	4	γ-丁内酯	96-48-0	0.11±0.00 ^d	0.54±0.02 ^a	0.39±0.02 ^b	0.18±0.01 ^c
	5	癸酸乙酯	110-38-3	—	—	—	0.49±0.01
	6	乙酸苯乙酯	103-45-7	—	—	—	0.99±0.02
	7	2-糠酸甲酯	611-13-2	0.32±0.02 ^b	—	1.07±0.07 ^a	0.17±0.01 ^c
	8	马来酸二丁酯	105-76-0	—	—	—	0.10±0.00
	9	丁位癸内酯	705-86-2	—	0.26±0.02 ^a	0.07±0.00 ^c	0.18±0.01 ^b
	10	二氢茉莉酮酸甲酯	24851-98-7	—	—	—	0.27±0.03
	11	丁位十二内酯	713-95-1	0.14±0.01 ^c	0.60±0.02 ^b	0.52±0.02 ^b	1.10±0.09 ^a
	12	月桂酸乙酯	106-33-2	—	0.35±0.03	—	—
	13	丙位十一内酯	104-67-6	0.06±0.01	—	—	—
	14	(+/-)-β-羟基-γ-丁内酯	5469-16-9	0.91±0.01 ^b	2.09±0.08 ^a	0.69±0.01 ^c	—
	15	对甲氧基桂酸-2-乙基己酯	5466-77-3	—	—	—	0.39±0.10
芳香族和杂环类化合物	1	萘	91-20-3	—	0.18±0.02 ^b	0.08±0.03 ^c	0.34±0.06 ^a
	2	1-甲基萘	90-12-0	—	—	0.10±0.03 ^b	0.40±0.09 ^a
	3	2-甲基萘	91-57-6	—	—	—	0.21±0.01
	4	麦芽酚	118-71-8	2.60±0.02 ^c	10.95±0.83 ^a	10.07±0.18 ^b	2.50±0.11 ^c
	5	苯酚	108-95-2	—	—	—	0.16±0.01
	6	对甲酚	106-44-5	—	—	—	0.38±0.02
	7	2,6-二叔丁基对甲酚	128-37-0	—	—	0.89±0.01	—

续表 1

类别	序号	化合物名称	CAS号	含量(μg/g)			
				BYLL	DLLL	DXLL	BGLL
	8	2-戊基呋喃	3777-69-3	—	2.06±0.00 ^a	0.49±0.11 ^b	—
	9	2-乙酰基呋喃	1192-62-7	—	1.51±0.01	—	—
	10	2-甲酰吡咯	1003-29-8	—	1.45±0.05 ^a	0.08±0.04 ^b	—
	11	2,3,5,6-四甲基吡嗪	1124-11-4	—	—	—	0.39±0.02
	12	罗汉柏烯	470-40-6	—	—	—	0.41±0.06
	13	二甲基砷	67-71-0	—	—	0.32±0.04 ^b	0.60±0.03 ^a
	14	甘油	56-81-5	—	—	0.23±0.01 ^b	0.49±0.07 ^a
	15	乙酰胺	60-35-5	—	—	0.08±0.03	—

注: “—”表示未检出;同行不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

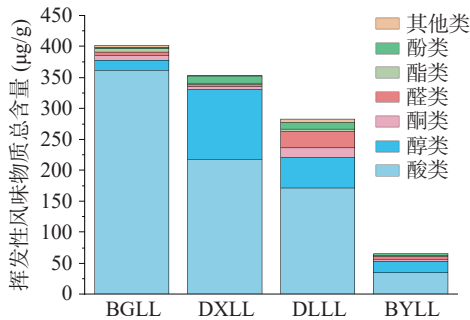


图 1 四个地区牦牛乳拉拉中挥发性风味物质含量及分布
Fig.1 Contents and distribution of volatile flavor substances in yak milk Lala in four regions

种牦牛乳干酪时,发现关键风味物质主要为酸类、醇类,本研究结果与之类似。BGLL 共检测出 64 种挥发性风味物质,香气总量最高为 401.96 μg/g,其次是 DXLL 共检测出 58 种挥发性风味物质,香气总量为 354.07 μg/g; DLLL 共检测出 49 种挥发性风味物质,香气总量为 283.31 μg/g,最后是 BYLL,共检测出 37 种挥发性风味物质,香气总量为 65.75 μg/g。因拉拉的制作原料为牦牛乳,而四个地区牦牛乳的营养成分区别较大,导致四个地区牦牛乳拉拉的挥发性化合物相差较大;另外也可能与拉拉的传统制作工艺,开放式晾晒贮存方式有关。

总的来说,四个地区牦牛乳拉拉中酸类化合物含量最高。其次是醇类化合物,醛类和酮类化合物含量大致相同。牦牛乳干酪中乙酸、丁酸、己酸等为干酪中特殊的优势风味物质^[20],乙酸在拉拉发酵过程中产生,是牦牛乳拉拉具有酸味的原因, BYLL、DLLL 和 DXLL 中酸类化合物含量最高的均为乙酸,与牛犍等^[12]报道的牦牛乳软质干酪中的优势风味物质结果相似,而 BGLL 含量最高的酸类化合物为癸酸,在酸类风味上有别于另外三个地区;醛类物质的风味阈值一般最低,己醛、庚醛、壬醛等是奶酪中常见的醛类化合物,其中壬醛为奶酪贡献花香和柑橘类水果香气^[20],卢灏泽等^[15]在研究西藏牦牛乳奶酪风味物质时发现壬醛含量较高。同样,本研究中 BYLL、DLLL 和 BGLL 中醛类化合物含量最高的为壬醛,而 DXLL 含量最高的醛类化合物为辛醛,辛醛可能是形成 DXLL 拉拉独特风味的原因;3-羟基-

2-丁酮呈现奶油、黄油味^[21],是发酵乳制品中典型的风味物质,四个地区含量最高的酮类化合物均为 3-羟基-2-丁酮;醇类化合物中 DLLL 和 DXLL 含量最高的为丁二醇, BGLL 为 2R,3R-丁二醇, BYLL 为糠醇,糠醇具有甜香、焦糖香,可能是形成 BYLL 拉拉独特风味的原因。

如图 2 所示,四个地区共有成分 19 种, BYLL 中特有成分 2 种, DLLL 中特有成分有 8 种, DXLL 特有成分 11 种, BGLL 特有成分 20 种。牦牛乳经过发酵、凝乳、热烫拉伸后形成拉拉,叶丹^[22]探究了西藏三个不同海拔高度牦牛乳中的挥发性风味物质,其中那曲市班戈县牦牛乳中的种类和含量最多,林芝市巴宜区和拉萨市堆龙德庆牦牛乳中的种类和含量无显著差异。所以总体风味物质的种类和数量还是取决于牦牛乳本身,发酵、凝乳等步骤可能改变了拉拉的风味组成。另外这些共有成分可能是鉴别拉拉与其他干酪制品具有不同风味的原因,而特有成分可能是区分四个地区牦牛乳拉拉的关键挥发性风味物质。

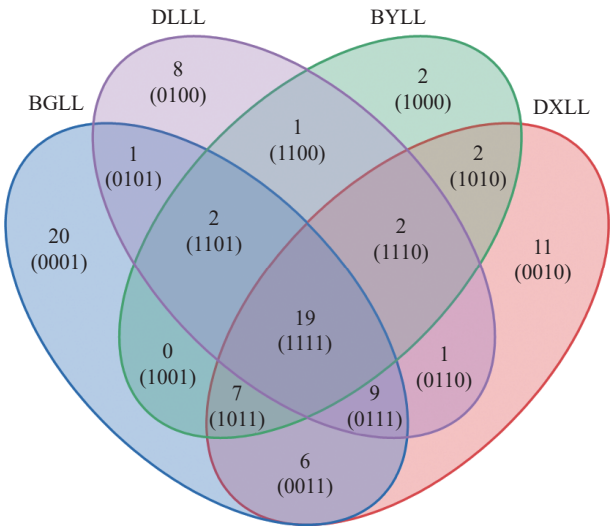


图 2 四个地区牦牛乳拉拉中挥发性物质韦恩图
Fig.2 Venn diagram of volatiles in yak milk Lala from four regions

对四个地区检测出的 88 种挥发性化合物进行相关性分析,如图 3 所示, BGLL 中挥发性成分与其

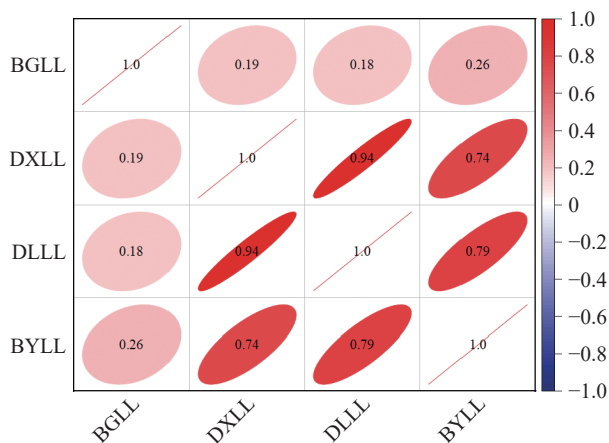


图3 四个地区牦牛乳拉拉中挥发性物质相关性热图

Fig.3 Thermogram of volatiles correlation in yak milk Lala in four regions

他三个地区相关性较低,因BG海拔较高,同时BG牦牛乳中挥发性成分与BY和DL的种类和含量差异显著^[22],是相关性低的主要原因。BYLL与DLLL和DXLL的皮尔逊相关系数分别为0.74和

0.79,同时DLLL和DXLL挥发性风味化合物种类最为相似,呈现正相关,皮尔逊相关系数高达0.94,BY与DL和DX的海拔相差1000米左右,同时BY和DL牦牛乳中挥发性化合物种类和含量差异不显著^[22],是BYLL和DLLL相关性较高的主要原因。此外,同海拔地区牦牛乳中挥发性成分的种类和含量相似,DL与DX海拔相差不大,牦牛乳挥发性化合物成分相似,另外DL和DX地区牧民制作拉拉的工艺相似。所以DLLL与DXLL中的挥发性化合物具有极高的相关性。

2.2 四个地区牦牛乳拉拉中关键香气成分分析

OAV能够体现挥发性风味物质对整体风味的贡献,通常认为OAV>1的化合物是该样品的特征风味物质,若OAV>10,则认为该香气化合物对牦牛乳拉拉整体香气产生了显著影响^[23-24]。根据气味阈值得到OAV≥1的29种关键香气成分,OAV>10的14种关键香气成分,赋予了牦牛乳拉拉典型的干酪香气。结果见表2,所列化合物均至少有一个样品的OAV>1。

表2 不同地区牦牛乳拉拉特征香气成分OAV及其阈值

Table 2 Characteristic aroma components of yak milk Lala OAV and their thresholds in different regions

序号	化合物名称	香气阈值(mg/kg)	气味活度值(OAV)			
			BGLL	DXLL	DLLL	BYLL
1	异戊酸	0.49	1.08	1.00	1.16	—
2	异戊醇	0.004	468.55	—	—	—
3	异丁酸	0.3	2.71	1.66	1.99	<1
4	乙酸仲丁酯	0.006	115.96	—	—	—
5	乙酸	22	1.13	5.91	5.09	<1
6	辛酸乙酯	0.0193	8.81	—	—	—
7	辛酸	3	21.82	1.13	<1	<1
8	辛醛	0.0008	—	1080.28	—	770.75
9	十二醛	0.01	—	—	32.40	—
10	肉豆蔻酸	10	1.27	<1	<1	<1
11	肉豆蔻醛	0.11	—	—	9.23	—
12	壬酮	0.2	<1	1.20	—	—
13	壬醛	0.0011	2839.11	707.54	7311.68	2508.09
14	麦芽酚	1.24	2.02	8.12	8.83	2.10
15	糠醇	4.5005	<1	2.88	1.59	3.52
16	己酸	3	9.96	<1	<1	<1
17	己醛	0.0615	—	—	52.54	1.58
18	癸酸	10	13.89	<1	<1	<1
19	癸醛	0.003	—	—	86.83	—
20	庚醛	0.003	461.71	—	1616.87	121.83
21	对甲酚	0.0039	96.81	—	—	—
22	丁二醇	70	<1	1.00	<1	<1
23	苯乙醇	0.56423	1.47	—	<1	—
24	苯甲醛	0.75	<1	<1	2.16	<1
25	N-甲基-2-吡咯甲醛	0.037	—	2.92	—	—
26	3-羟基-2-丁酮	0.04	136.20	47.14	373.76	36.29
27	2-正戊基呋喃	0.0058	—	—	355.75	—
28	2-十二烯醛	0.0014	102.03	45.07	1759.93	147.64
29	2R,3R-丁二醇	20	<1	1.39	<1	<1

注:“—”表示未检测出。

醛类主要由 Strecker 降解反应过程中脂肪和氨基酸的氧化产生^[25], 壬醛有甜奶油、黄油味, 主要是油酸氧化所致; 辛醛有类似甜橙的香气^[26]; 这两种化合物通常都具有较高的 OAV, 是牦牛乳拉拉中重要的风味化合物, 辛醛是 DXLL 和 BYLL 样品特有的风味物质, 而四个地区拉拉中的壬醛 OAV 均较高, 是拉拉的特征风味物质。庚醛具有强烈、不愉快的油脂刺鼻气味^[27], 是 DLLL、BGLL 的特征风味物质。己醛呈现出青草香味^[28], 是 DLLL 和 BYLL 的特征风味物质。苯甲醛相对含量较低但具有令人愉快的杏仁香, 是 DLLL 特有的风味物质。这些醛类对牦牛乳拉拉的整体风味起着积极作用。

醇类一般具有较高的气味阈值, 由多不饱和脂肪酸氧化形成, 在乳制品的风味中起着关键作用。苯乙醇赋予牦牛乳拉拉玫瑰香味^[29]; 糠醇具有甜香、焦糖香, 除 BGLL 以外, 糠醇是其他三个地区拉拉的特有风味物质; 异戊醇具有香蕉和醇香^[12], 是 BGLL 独特的风味物质; 2R,3R-丁二醇有苦杏仁甜八角的味道^[21], 是 DXLL 独特的风味物质。这些醇类能够更好的修饰牦牛乳拉拉的风味。酮类物质阈值低、气味贡献较大且风味独特, 主要在脂肪酸的 β -氧化过程产生, 赋予拉拉花香、果香和奶香味^[30], 通常是干酪中风味物质的重要组成部分。3-羟基-2-丁酮呈现奶油、黄油味^[21], 在四个地区拉拉中 OAV 均大于 10, 是干酪典型的风味物质。壬酮具有乳酪、奶香味^[12], 是 DXLL 所具有的独特风味物质。

酸类化合物是牦牛乳拉拉中的重要挥发性风味化合物之一, 也是酮类、醛类和酯类等化合物的重要前体物质^[31]。酸类对发酵乳制品风味具有重要影响, 己酸呈现出奶酪香和脂肪香味^[32], 是 BGLL 独有的特征气味物质, 拉拉与乳扇制作方式相似, 马艳丽等^[10] 同样检测出云南乳扇中己酸是乳扇中重要的特征风味组分; 异戊酸和乙酸分别呈现酒香和淡淡的酸甜味^[22], 是 BGLL、DXLL 和 DLLL 的特征风味物质; 辛酸呈现汗臭味, 是 BGLL 和 DXLL 的特征风味物质, 对干酪整体香气起着积极促进作用^[33]。

酯类物质是由乳脂肪降解产生的。脂肪酸与发酵的过程中, 乳糖代谢产生的醇类发生酯化反应^[30]。酯类是奶酪中的重要风味成分, 具有花香、果香且阈值低, 可调节由酸类浓度过高而引起的刺激性气味, 使风味更加柔和, 对整体风味起着修饰作用^[34-35]。四个地区牦牛乳拉拉中仅有两种酯类物质, 即乙酸仲丁酯、辛酸乙酯为特征风味物质; 对甲酚和麦芽酚分别呈现出烟熏香味和甜味、棉花糖香气, 对甲酚是 BGLL 独有的特征风味物质, 而麦芽酚是四个地区共同的特征风味物质。酚类、呋喃以及杂环聚合物对牦牛乳拉拉的风味均具有良好的修饰作用。

为了更加直观地比较不同地区关键香气成分的差异, 基于热图可视化层次聚类分析 29 种特征挥发

性物质(图 4), 颜色从深蓝到深红代表含量由低到高。结果表明, BGLL 和 DLLL 的关键香气成分要比 DXLL 和 BYLL 高, 其中 BYLL 的关键香气成分最少; 其中 BGLL 的关键香气物质主要由酸类和酯类组成, DLLL 的关键香气物质主要由醛类组成, DXLL 和 BYLL 的关键香气物质主要为醇、醛类。四个地区的牦牛乳拉拉可以聚为 3 类, 其中 BYLL 和 DXLL 可以聚为一类, BGLL 和 DLLL 分别单独聚为一类, 说明 BYLL 和 DXLL 的关键香气成分相似, 而 BGLL、DLLL 与 BYLL 和 DXLL 差别较大, 另外 BGLL 和 DLLL 的关键香气物质组成差异明显, 可能与原料乳品质、海拔和成熟环境有关。异戊酸、异戊醇、异丁酸、乙酸仲丁酯、辛酸乙酯、对甲酚、辛酸、己酸、肉豆蔻酸、苯乙醇和癸酸组成了 BGLL 的关键香气; 壬酮、丁二醇、2R,3R-丁二醇和 N-甲基-2-吡咯甲醛香气成分能区分出 DXLL; 糠醇能识别出 BYLL; 肉豆蔻醛、癸醛、2-正戊基呋喃、己醛、2-十二烯醛、庚醛、3-羟基-2-丁酮、苯甲醛和壬醛香气成分能够更好地辨别 DLLL。

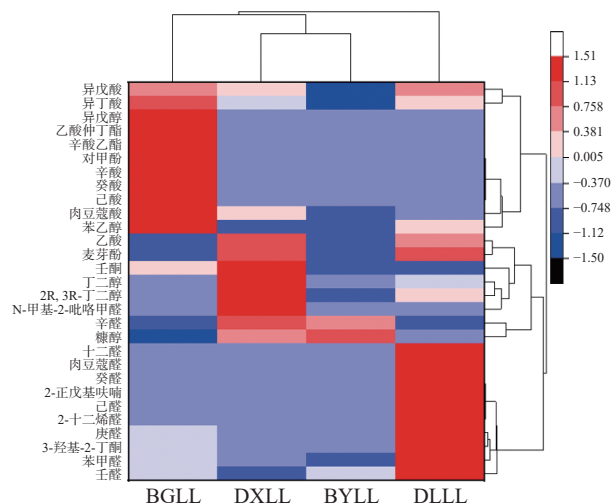
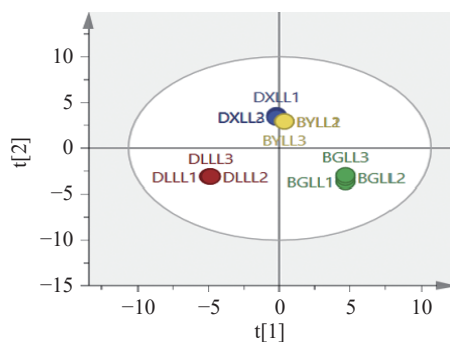


图 4 四个地区牦牛乳拉拉关键香气成分聚类热图

Fig.4 Clustering heat map of key aroma components of yak milk Lala in four regions

2.3 四个地区牦牛乳拉拉关键香气成分差异分析

采用 OPLS-DA 和投影变量影响分析 (Impact



$R^2x[1]=0.435$ $R^2x[2]=0.383$ Ellipse: Hotelling's T2 (95%)

图 5 四个地区牦牛乳拉拉 OAV 的 OPLS-DA

Fig.5 OPLS-DA of yak milk Lala OAV in four regions

Analysis of Projection Variables, VIP) 结合 OAV 来探究不同地区间拉拉的差异性并确定出各个地区牦牛乳拉拉特色风味成分。其中 OPLS-DA 作为一种监督的多元判别分析统计方法,能有效筛选关键标志性差异物质^[36-37]。

以 $OA\bar{V} \geq 1$ 的 29 种香气成分作为因变量,以西藏四个地区牦牛乳拉拉作为自变量。四个地区牦牛乳拉拉关键香气 OPLS-DA 得分图如图 5 所示。本次分析中的自变量拟合指数(R^2_x)为 0.995,因变量拟合指数(R^2_y)为 0.998,模型预测指数(Q^2)为 0.998, R^2 和 Q^2 超过 0.5 表示模型拟合结果可接受^[38]。四个地区分别经过 200 次置换检验,进行模型验证。由图 6 可知,四个地区模型中 Q^2 回归线与纵轴的相交点均小于 0,说明模型不存在过拟合,模型验证有效,认为该结果用于分析不同地区牦牛乳拉拉香气特

征具有良好的预测性和可行性,可以用于各个地区牦牛乳拉拉的判别分析。

VIP 是 OPLS-DA 模型变量的权重值,可用于衡量各组分积累差异对各组样本分类判别的影响强度和解释能力,VIP 值越大,贡献率越大,通常 $VIP > 1$ 为常见的差异代谢物筛选标准^[39]。结合表 2 和图 7,进一步筛选出 $OA\bar{V} \geq 1$ 且 $VIP > 1$ 的挥发性物质共 9 种,认定为四个样品的差异性标志物,可作为区分四个地区拉拉的重要指标。包括 4 种酸类、2 种醇类、1 种酮类、1 种醛类和 1 种酚类,分别为 2R,3R-丁二醇、壬酮、丁二醇、异戊酸、N-甲基-2-吡咯甲醛、乙酸、异丁酸、麦芽酚和肉豆蔻酸。在 9 个差异性标志物中 2R,3R-丁二醇、壬酮、丁二醇、N-甲基-2-吡咯甲醛、乙酸赋予 DXLL 香甜、青草、烤坚果^[40]以及淡淡的酸甜味^[21];异戊酸、乙酸、麦芽酚和肉豆

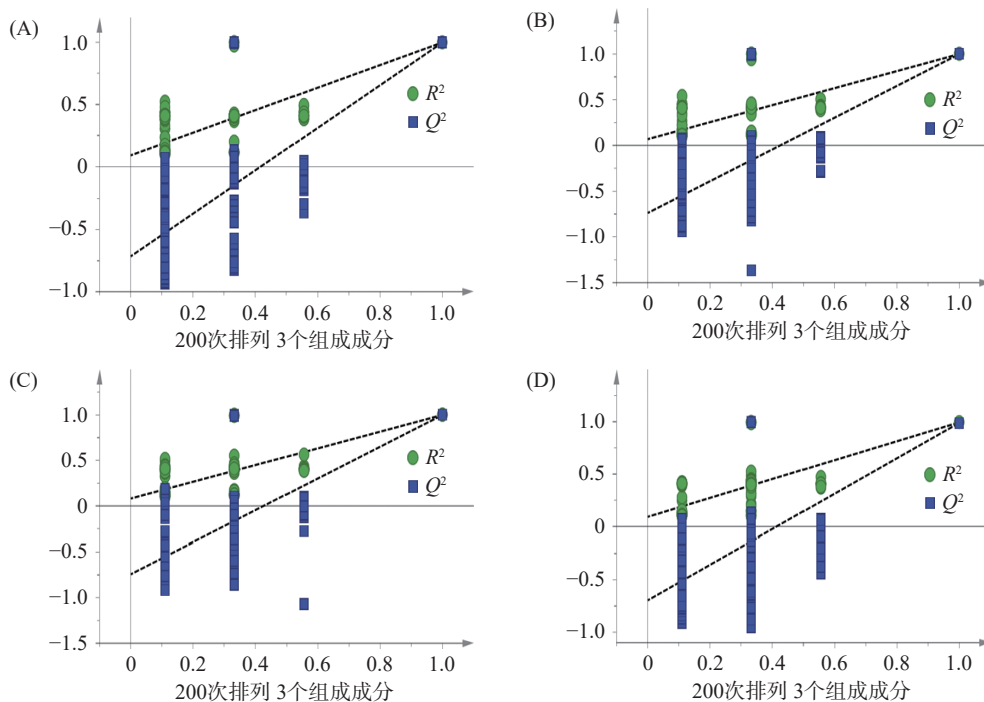


图 6 四个地区牦牛乳拉拉 OAV 的 OPLS-DA 模型交叉验证

Fig.6 Cross validation of OPLS-DA model for yak milk Lala OAV in four districts

注: (A): BGLL; (B): DXLL; (C): DLLL; (D): BYLL。

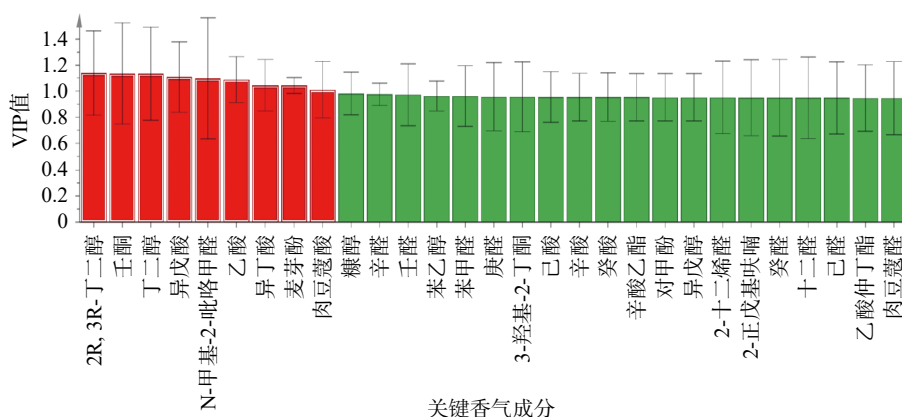


图 7 四个地区牦牛乳拉拉 OAV 的 VIP 值

Fig.7 VIP values of yak milk Lala OAV in four regions

蔻酸赋予 DLLL 刺激酸味、焦奶油硬糖^[41] 和椰子香味; 异戊酸、异丁酸赋予 BGLL 刺激性酸败味。

3 结论

为解析西藏地区牦牛乳拉拉的关键呈香物质, 通过 HS-SPME-GC-MS、OAV 及 OPLS-DA 研究西藏不同地区拉拉中挥发性化合物组成以及关键呈香物质。四个地区拉拉中共检测出 88 种挥发性化合物, 包括酸类 24 种、醛类 15 种、酯类 15 种、醇类 12 种、酮类 7 种、酚类 4 种及其他类 11 种, 其中酸类、醛类和酯类在拉拉呈香方面发挥重要作用。运用 OAV 分析确定了 29 种拉拉关键香气成分, 其中 BGLL 和 DLLL 中的关键香气成分最多, 说明两个地区拉拉的特征风味更明显。基于 VIP 值建立不同地区牦牛乳拉拉的 OPLS-DA 分析模型, 筛选出 9 种差异性标志物, 包括 2R,3R-丁二醇、壬酮、丁二醇、异戊酸、N-甲基-2-吡咯甲醛、乙酸、异丁酸、麦芽酚和肉豆蔻酸, 这些物质赋予拉拉特殊风味同时也较好区分了四个地区的牦牛乳拉拉。

目前, 西藏不同地区牦牛乳拉拉的特性风味解析、关键香气物质和差异性标志化合物的研究未见报道, 本研究为牦牛乳拉拉工艺研制和香气形成机制提供理论依据。由于牦牛乳拉拉的风味形成机制尚不明确, 导致拉拉工艺不成熟, 后续可以运用组学技术进一步探究来优化牦牛乳拉拉生产工艺。

© The Author(s) 2025. 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] 曹兵海, 张越杰, 李俊雅, 等. 2021 年肉牛牦牛产业发展趋势与政策建议[J]. 中国畜牧杂志, 2021, 57(3): 246–251, 257. [CAO Binghai, ZHANG Yuejie, LI Junya, et al. Development trend and policy suggestions of beef yak industry in 2021[J]. Chinese Journal of Animal Science, 2021, 57(3): 246–251, 257.]
- [2] 李升升, 靳义超. 基于标准化法评估的牦牛酸奶加工工艺[J]. 食品与生物技术学报, 2018, 37(3): 297–302. [LI Shengsheng, JIN Yichao. Study on the producing technology of yak yogurt based on standardization analysis[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2018, 37(3): 297–302.]
- [3] 张健, 杨贞耐. 产业链视角下我国干酪产业的发展与建议[J]. 中国奶牛, 2020(3): 1–4. [ZHANG Jian, YANG Zhennai. Development and suggestions on the Chinese cheese industry from the perspective of industry chain[J]. China Dairy Cattle, 2020(3): 1–4.]
- [4] EBRINGER L, FERENCIK M, KRAJCOVIC J. Beneficial health effects of milk and fermented dairy products-review[J]. Folia Microbiol (Praha), 2008, 53(5): 378–394.
- [5] DOU T X, SHI J F, LI Y, et al. Influence of harvest season on volatile aroma constituents of two banana cultivars by electronic nose and HS-SPME coupled with GC-MS[J]. Scientia Horticulturae, 2020, 265: 109214.
- [6] 任二芳, 李建强, 黄燕婷, 等. 不同采收成熟度沃柑制汁品质评价与分析[J]. 食品工业科技, 2023, 44(8): 61–70. [REN Er-

- fang, LI Jianqiang, HUANG Yanting, et al. Evaluation and analysis of juice quality of orah mandarin with different harvest maturity[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(8): 61–70.]
- [7] 徐玉雪, 李婷, 李利君, 等. SDE-GC-MS 结合 GC-O 分析速溶滇红茶的挥发性风味物质[J]. 现代食品科技, 2019, 35(11): 277–284, 276. [XU Yuxue, LI Ting, LI Lijun, et al. An analysis of volatile components in the instant dianhong tea by SDE-GC-MS and GC-O[J]. Modern Food Science and Technology, 2019, 35(11): 277–284, 276.]
- [8] 陈倩莲, 刘仕章, 占仕权, 等. 基于 HS-SPME-GC-MS 和 OAV 鉴定 4 种武夷岩茶关键呈香物质[J]. 食品工业科技, 2023, 44(14): 296–303. [CHEN Qianlian, LIU Shizhang, ZHAN Shi-quan, et al. Identification of four kind key aroma components of wuyi rock tea based on HS-SPME-GC-MS and OAV[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(14): 296–303.]
- [9] CHI X L, ZHANG Y D, ZHENG N, 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.
- [10] 马艳丽, 曹雁平, 杨贞耐, 等. SPME-GC-MS 检测不同中西方奶酪的挥发性风味物质及比较[J]. 食品科学, 2013, 34(20): 103–107. [MA Yanli, CAO Yanping, YANG Zhennai, et al. Comparative analysis of volatile compounds in different cheese samples by SPME-GC-MS[J]. Food Science, 2013, 34(20): 103–107.]
- [11] 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.]
- [12] 牛捷, 甘伯中, 乔海军, 等. 牦牛乳软质干酪成熟期挥发性风味成分分析[J]. 食品科学, 2010, 31(18): 278–282. [NIU Jie, GAN Bozhong, QIAO Haijun, et al. Analysis of volatile compounds in yak s milk soft cheese during ripening[J]. Food Science, 2010, 31(18): 278–282.]
- [13] 巨玉佳, 梁琪, 张炎, 等. 电子鼻联合 GC-MS 分析不同牦牛乳干酪中特征挥发性成分[J]. 食品与机械, 2014, 30(4): 14–17. [JU Yujia, LIANG Qi, ZHANG Yan, et al. Analysis of volatile components in yak milk cheese with GC-MS assisted by electronic nose technology[J]. Food & Machinery, 2014, 30(4): 14–17.]
- [14] 郑晓吉, 刘飞, 任全路, 等. 基于 SPME-GC-MS 法比较新疆哈萨克族不同居住区奶酪风味差异[J]. 食品科学, 2018, 39(8): 83–89. [ZHENG Xiaoji, LIU Fei, REN Quanlu, et al. Comparative analysis of volatile compounds in kazak cheeses from different regions of xinjiang by SPME-GC-MS[J]. Food Science, 2018, 39(8): 83–89.]
- [15] 卢泽泽, 吕嘉伟, 杨帆, 等. 西藏牦牛奶酪的微生物群落结构与风味物质分析[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(6): 179–185. [LU Haoze, LÜ Jiawei, YANG Fan, et al. Microbial community structure and flavor analysis of Tibetan yak cheese[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(6): 179–185.]
- [16] URGEGHE P P, PIGA C, ADDIS M, et al. SPME/GC-MS characterization of the volatile fraction of an italian PDO sheep cheese to prevalent lypolitic ripening: The case of fiore sardo[J]. Food Analytical Methods, 2012, 5(4): 723–730.
- [17] 范海默特(荷兰). 化合物嗅觉阈值汇编[M]. 北京: 科学出版社, 2018. [VAN GEMERT L J. Compilations of flavour threshold values in water and other media[M]. Beijing: Science Publish-

ing House, 2018.]

[18] 申光辉, 覃小艳, 刘海娜, 等. 紫色马铃薯全粉加工的汁液腥味物质成分及酶解脱腥效果[J]. 华南农业大学学报, 2019, 40(4): 83-91. [SHEN Guanghui, QIN Xiaoyan, LIU Haina, et al. Off-flavor compounds of liquid from processing purple potato granules and enzymatic deodorization effect[J]. Journal of South China Agricultural University, 2019, 40(4): 83-91.]

[19] 张兰俊, 张岩, 陈炼红. Edam 牦牛干酪工艺优化及成熟过程中微观结构、挥发性风味物质的变化[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(5): 116-123. [ZHANG Lanjun, ZHANG Yan, CHEN Lianhong. Optimization of Edam yak cheese process, the changes of its microstructure and volatile flavor substances during ripening[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(5): 116-123.]

[20] 程晶晶, 陈会民, 罗洁, 等. 不同成熟期切达干酪的组分及特征风味物质的解析[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(15): 231-237. [CHENG Jingjing, CHEN Huimin, LUO Jie, et al. Analysis of components and characteristic flavor substances of cheddar cheese at different maturation stages[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(15): 231-237.]

[21] 卢晨曦, 张国治, 王赵改, 等. 大蒜产香细菌的筛选及香气成分分析[J/OL]. 保鲜与加工: 1-17[2024-08-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1330.S.20240510.1446.002.html>. [LU Chenxi, ZHANG Guozhi, WANG Zhaogai, et al. Isolation and identification of endophytic bacteria for garlic aroma production and optimisation of their fermentation[J/OL]. Storage and Process: 1-17[2024-08-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1330.S.20240510.1446.002.html>.]

[22] 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. [YE Dan. Comparative study on nutritional quality of raw milk of different varieties in Linzhi Tibet under the condition of artificial breeding[D]. Lhasa: Tibet University, 2020.]

[23] GUO X Y, WILFRIED S, HO C T, et al. Characterization of the aroma profiles of oolong tea made from three tea cultivars by both GC-MS and GC-IMS[J]. Food Chemistry, 2022, 376: 131933.

[24] HU W W, WANG G G, LIN S X, et al. Digital evaluation of aroma intensity and odor characteristics of tea with different types—based on OAV-splitting method[J]. Foods, 2022, 11(15): 2204.

[25] XIAO S Z, HONG W J, DI Z, et al. The identification of three phospholipid species roles on the aroma formation of hot-air-dried shrimp (*Litopenaeus vannamei*) by gas chromatography-ion mobility spectrometry and gas chromatography-mass spectrometry[J]. Food Research International, 2022, 162(PB): 112191.

[26] 李小林, 陈诚, 黄羽佳, 等. 顶空固相微萃取-气质联用分析 4 种野生食用菌干品的挥发性香气成分[J]. 食品与发酵工业, 2015, 41(9): 174-180. [LI Xiaolin, CHEN Cheng, HUANG Yujia, et al. Analysis of volatile flavors in 4 dried wild edible fungi by HS-SPME-GC-MS[J]. Food and Fermentation Industries, 2015, 41(9): 174-180.]

[27] 孙宝国, 陈海涛. 食用调香术[M]. 第三版. 北京: 化学工业出版社, 2015: 045-057. [SUN Baoguo, CHEN Haitao. The technology of food flavoring[M]. The third edition. Beijing: Chemical Industry Publishing Corporation, 2015: 045-057.]

[28] 赵泽伟, 丁筑红, 顾苑婷, 等. 基于 SPME-GC-MS 和电子鼻分析薏苡仁油加速氧化过程挥发性成分变化[J]. 食品科学, 2019, 40(16): 220-226. [ZHAO Zewei, DING Zhuhong, GU Yuanting, et al. Changes in volatile components of coix seed oil during accelerated oxidation analyzed by solid phase microextraction-

gas chromatography-mass spectrometry and electronic nose[J]. Food Science, 2019, 40(16): 220-226.]

[29] HONG Q, LIU X M, HANG F, et al. Screening of adjunct cultures and their application in ester formation in Camembert-type cheese[J]. Food Microbiology, 2018, 70: 33-41.

[30] 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.

[31] COLLINS F Y, MCSWEENEY L P, WILKINSON G M. Lipolysis and free fatty acid catabolism in cheese: A review of current knowledge[J]. International Dairy Journal, 2003, 13(11): 841-866.

[32] 王金华, 叶晓仪, 母艳, 等. 贵州 3 种代表性猕猴桃种间特征香气成分比较分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(19): 6190-6197. [WANG Jinhua, YE Xiaoyi, MU Yan, et al. Comparative analysis of characteristic aroma components of 3 kinds of representative *Actinidia chinensis* Planch species in Guizhou[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(19): 6190-6197.]

[33] RISNER D, TOMASINO E, HUGHES P, et al. Volatile aroma composition of distillates produced from fermented sweet and acid whey[J]. Journal of Dairy Science, 2019, 102(1): 202-210.

[34] NOGUEIRA L C M, LUBACHEVSKY G, RANKIN A S. A study of the volatile composition of Minas cheese[J]. LWT - Food Science and Technology, 2005, 38(5): 555-563.

[35] MILTON F J D, BRUNA K, ROGER W, et al. Key aroma compounds of Canastra cheese: HS-SPME optimization assisted by olfactometry and chemometrics[J]. Food Research International, 2021, 150(PA): 110788.

[36] SU D, HE J J, ZHOU Y Z, et al. Aroma effects of key volatile compounds in Keemun black tea at different grades: HS-SPME-GC-MS, sensory evaluation, and chemometrics[J]. Food Chemistry, 2022, 373(30): 131587.

[37] LIU W W, CHEN Y, LIAO R X, et al. Authentication of the geographical origin of Guizhou green tea using stable isotope and mineral element signatures combined with chemometric analysis[J]. Food Control, 2021, 125: 107954.

[38] YUN J, CUI C J, ZHANG S H, et al. Use of headspace GC/MS combined with chemometric analysis to identify the geographic origins of black tea[J]. Food Chemistry, 2021, 360: 130033.

[39] 李远彬. 基于色谱联用技术的沉香标志性差异成分分析研究[D]. 广州: 广州中医药大学, 2017. [LI Yuanbin. Application of GC-MS and LC-MS for screening and identification of different markers in agarwood[D]. Guangzhou: Guangzhou University of Traditional Chinese Medicine, 2017.]

[40] 张萌, 王鹏, 耿敬章, 等. 基于 HS-SPME-GC-MS 比较分析不同原料对葱香油风味品质的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 46(2): 250-257. [ZHANG Meng, WANG Peng, GENG Jingzhang, et al. Comparative analysis of the effects of different raw materials on the flavour quality of scallion oil based on HS-SPME-GC-MS[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 46(2): 250-257.]

[41] 谭伟, 贺保平, 樊启程, 等. 超高温瞬时杀菌对纯牛奶风味影响的研究进展[J]. 中国乳品工业, 2024, 52(6): 39-44. [TAN Wei, HE Baoping, FAN Qicheng, et al. Research progress on the effect of ultra-high temperature processing on the flavor of pure milk[J]. China Dairy Industry, 2024, 52(6): 39-44.]