

风味组学技术在乳及其制品中应用的研究进展

陈涵, 任薇, 孙玲云, 秦华秀, 朱明霞, 王长法*, 李孟孟*

(聊城大学农学与农业工程学院, 聊城毛驴高效繁育与生态饲养研究院, 山东聊城 252000)

摘要: 乳及其制品是目前不可缺少的饮品, 品类众多且气味独特。乳中奶香味、果香味、甜味、酸味等特征风味由挥发性物质决定。挥发性物质包括醇类、醛类、酮类、酸类、酯类、内酯类、含硫、氮化合物及萜类等, 主要由生物体内微生物降解以及成熟过程中生化反应产生。风味组学为组学技术中的新兴领域, 是跟踪鉴定食品风味化合物的组学技术, 可探究挥发性物质对食品风味的贡献程度以及影响机制。该综述乳中的主要风味物质、成分及其来源, 从风味组学技术方面鉴别乳的品质和质地, 为乳及其制品风味调控提供理论依据。

关键词: 乳; 乳制品; 风味组学; 风味物质

文章编号: 1673-9078(2024)05-290-298

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.5.0657

Research Progress on the Application of Flavoromics Technology in Dairy and Its Products

CHEN Han, REN Wei, SUN Lingyun, QIN Huaxiu, ZHU Mingxia, WANG Changfa*, LI Mengmeng*

(School of Agricultural Science and Engineering, Liaocheng Research Institute of Donkey High-Efficiency Breeding and Ecological Feeding, Liaocheng University, Liaocheng 252000, China)

Abstract: Milk and its products, as currently indispensable beverages, have many categories and unique odors. The characteristic flavors of milk, such as milky aroma, fruit aroma, sweetness, and acidity, are determined by volatile substances. Volatile substances (including alcohols, aldehydes, ketones, acids, esters, lactones, sulfur-containing compounds, nitrogen-containing compounds, and terpenoids) are mainly produced by microbial degradation in organisms and biochemical reactions during the ripening process. Flavoromics is an emerging field in omics technology that tracks and identifies food flavor compounds, explores the contribution to volatile components to food flavor and underlying working mechanisms. This article reviews the main flavor substances, components, and sources in milk, and determines the quality and texture of milk from the perspective of flavoromics technology, thereby providing a theoretical basis for flavor regulation of milk and its products.

Key words: milk; dairy products; flavoromics; flavor

引文格式:

陈涵,任薇,孙玲云,等.风味组学技术在乳及其制品中应用的研究进展[J].现代食品科技,2024,40(5):290-298.

CHEN Han, REN Wei, SUN Lingyun, et al. Research progress on the application of flavoromics technology in dairy and its products [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(5): 290-298.

收稿日期: 2023-06-01

基金项目: 国家重点研发计划资助(2022YFD1600103); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2022QC130); 山东省现代农业产业技术体系项目(SDAIT-27); 山东省重点研发计划(重大科技创新工程)项目(2021TZX012); 大学生创新创业训练计划创新项目(CXCXY2023261; CXCXY2022381)

作者简介: 陈涵(2002-), 女, 本科生, 研究方向: 动物营养与饲料科学, E-mail: chenhan135246@163.com; 共同第一作者: 任薇(1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 动物遗传育种与繁殖, E-mail: weiren0214@163.com

通讯作者: 王长法(1967-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 动物遗传育种与繁殖, E-mail: wangcf1967@163.com; 共同通讯作者: 李孟孟(1990-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 动物营养与畜产品调控, E-mail: mmli@lcu.edu.cn

风味是影响食品品质的关键因素之一，是味觉、嗅觉和口感的统一，也是影响消费者接受和喜爱产品的重要指标。食品风味来源于其自身气味以及加工过程中蛋白质、脂肪、乳糖的美拉德反应、脂质氧化与降解、焦糖化反应中产生的代谢物^[1]，代谢物为极易不稳定的挥发性物质，对食品风味的呈现有决定性作用^[2-4]。挥发性物质主要包括脂肪酸、醇类、醛类、酮类、酯类、内酯类、含硫、氮化合物及萜类等^[5]。在丰富的挥发性物质中筛选和鉴定对食品风味有贡献的成分是风味组学研究的重要任务。风味组学技术作为新兴领域，是跟踪鉴定影响食品风味化合物的技术，并采用多元分析精准辨别与风味相关的代谢物质，为风味物质的全面解析提供技术支撑^[6-8]。

乳及其制品由于具有营养物质丰富、品类繁多、且气味独特的特点，深受消费者喜爱，已成为目前不可缺少的饮品。乳及其制品中的奶香味、果香味、甜味、酸味等独特风味由挥发性物质影响。乳中特征挥发性物质对整体风味起着决定性作用，赋予其独特香气与口感，是区别不同乳、乳制品的感官特征，主要包括醛类、酮类、酯类、含氮化合物、含硫化合物和萜烯类化合物等^[9,10]。乳的独特风味不仅与挥发性物质的浓度及其气味阈值有关，还受其品种、储存方式和加工方式等的影响。研究报道，通过采用气相色谱-质谱（Gas Chromatography-Mass Spectrometry, GC-MS）、气相色谱-质谱-嗅闻（GC-MS-Olfactometry, GC-MS-O）及电子鼻技术对不同（生食、微波、油炸、焙烤）处理后乳扇的挥发性成分分析，发现微波处理后酸味增强，油炸和焙烤后产生焦香味和坚果香味^[1]。利用 GC-MS 对热处理驼乳进行分析，结果表明超高温瞬时杀菌乳的烷烃类和醛类化合物增加，涩味、苦味比鲜驼乳显著增加^[11]。这进一步表明乳及其制品经加工后挥发性成分改变，整体风味也随之发生改变。

乳及其制品中的独特风味由挥发性物质影响，挥发性物质需要质谱、色谱等技术研究^[3]。近年来，风味组学技术应运而生，其研究挥发性成分对食品风味的贡献程度以及影响机制，以全面解析食品中风味的特征谱图^[12]。因此，本文综述了乳中的主要风味物质、成分及其来源，以及风味组学技术在乳的品质和质地等方面应用，为乳及其制品风味调控提供理论依据和技术支持。

1 乳中风味物质及来源

风味物质是决定乳风味和品质的关键因素，是引起乳及其制品产生特别风味的化合物^[13]。乳中风味物质主要有烃类、醇类、酸类、醛类、酯类、游离脂肪酸、酮类、醚类以及杂环化合物等^[9]。乳中蛋白质分解氨基酸，氨基酸进一步分解为醛、氨、酮酸；脂类分解为醇、醛、酮、脂肪酸、内酯；糖类可作为前体物质再次分解为醇、醛、酮、呋喃等^[13]。挥发性物质在形成过程中发生一系列真菌、细菌及其他微生物的生化反应，是构成乳风味的基础^[14]。其中，游离脂肪酸通过微生物水解产生，可作为前体物质通过生化反应生成醇、醛、酯和酮类等物质^[15]；醇类物质主要由氨基酸通过 Strecker 降解、甲基酮还原以及微生物中乳糖代谢的磷酸戊糖途径产生^[16,17]；醛类物质主要包括由 Strecker 反应或氨基酸转氨作用产生的支链醛以及脂肪酸代谢产生的直链醛^[18]；酯类物质主要由加工过程中酯化反应以及乙醇和甘油酯发生的酯交换反应生成^[19]；酮类化合物由饱和脂肪酸的 β -氧化反应、 β -酮酸脱羧与脱羧反应生成^[19]。挥发性物质的来源途径及形成机制各不相同，对乳及其制品整体风味的调控提供理论基础。

2 风味组学技术

基于风味组学对乳及其制品中的挥发性物质定性、定量分析并研究其相互作用机制，从而在分子水平上影响人体感官，助力风味良好的乳产品产生^[20]。目前广泛应用于乳和乳制品挥发性成分的检测步骤主要包括挥发性物质的提取、分离鉴定等。

挥发性物质提取包括顶空固相微萃取（Headspace-Solid Phase Micro-Extraction, HS-SPME）、同时蒸馏萃取（Simultaneous Distillation Extraction, SDE）、溶剂辅助蒸馏萃取（Solvent Assisted Flavor Evaporation, SAFE）和吹扫/捕集-热脱附（Purge and Trap Thermal Desorption System, P&T-TDS）等技术应用于表征乳中风味组分的提取；分离鉴定技术如 GC-MS、GC-MS-O、气相色谱-离子迁移色谱（Gas Chromatography-Ion Mobility Spectrometry, GC-IMS）、质子转移反应-飞行时间质谱（Proton Transfer Reaction-Time Of Flight-Mass Spectrometry, PTR-TOF-MS）和高效液相色谱-质谱联用技术（High Performance Liquid

Chromatography-Mass Spectrometry, HPLC-MS) 对乳中风味组分进行综合分析^[3,10]。各种技术的特点、作用以及应用范围见表 1。其中, 顶空固相微萃取具有减少时间、成本以及溶剂使用, 有效提取低分子量和挥发性化合物, 对酯和挥发性化合物高效回收等特点, 主要应用于大豆、橄榄油、干酪等食品分析^[10,21,22]; 同时蒸馏萃取适用于较高沸点和疏水性的化合物, 蒸馏与提取同时进行, 溶剂的消耗量少, 挥发性成分浓缩效率高, 但会在样品色谱图中产生伪峰相, 是被误认为产生异味的原因, 常用于干酪、奶酪、奶粉和发酵奶等乳制品的成分分析^[23-25]; 溶剂辅助蒸馏萃取技术对于极性高的挥发性物质回收率高, 缺点在于复杂食品基质中痕量挥发物提取不充分, 需准备大量样品, 应用于奶制品、水果、咖啡等新鲜食品领域^[10,26-28]。吹扫/捕集-热脱附是一种挥发性成分富集方法, 其特点为简单易操作、溶剂污染少、吸附率高、灵敏度高^[29,30], 应用于天然植物香气提取^[31]、食品分析^[32]等方面。分离鉴定方法中 GC-MS 灵敏度、精确度高, 同时具有稳定性, 是风味物质进行组分分析的重要手段^[33], 常应用于乳品质鉴别^[34]和奶粉^[35]的挥发性成分的检测中。GC-MS-O 是对 GC-MS 的补充方法, 可检测 GC-MS 无法鉴定的浓度低且气味强度高的挥发性物质^[36], 常用于检测奶扇^[37]、奶酪^[38]等奶制

品的气味。GC-IMS 可用于鉴定风味特征物质^[39], 其特点为操作简单、分辨率高^[40], 应用于牦牛干酪、益生菌发酵乳等^[41,42], 食品风味成分分析^[43], 食品分类以及食品掺假^[44]等领域。PTR-TOF-MS 可检测痕量挥发性有机化合物, 特点为时间短、灵敏度高、简单易操作、分辨率高等^[45-47], 应用于大气科学^[48]、医学和生物技术^[49]、食品科学^[50]等领域。HPLC-MS 是一种分离有机化合物的常用方法, 其特点为灵敏度高、精确度高、安全环保、方便快捷、具有良好的选择性^[51], 应用于乳制品^[52]、禽肉^[53]等领域。

3 风味组学在乳及其制品的应用

3.1 成分分析

风味物质中含有多种挥发性成分, 主要包括酸类、醇类、酯类、内酯、醛类、酮类、芳香及杂环类、含硫化合物及萜类等^[54]。本综述收集不同文献中乳与乳制品中挥发性成分, 化合物的气味品质和气味阈值, 通过将山羊乳^[55]、驴乳酸奶^[56]、人乳^[57]、生牛乳^[58]、乳扇^[1]、牦牛酸奶^[59]、发酵牛乳^[60]、宫廷奶酪^[61]、切达奶酪^[62]、百合发酵乳^[63]、果味奶^[64]对比, 发现乳和乳制品中挥发性成分存在显著差异, 品质不同, 风味阈值含量不同, 使乳的整体风味各不相同(见表 2)。

表 1 风味物质的研究方法、作用及特点

Table 1 Research methods, roles and characteristics of flavor substances

方法	作用	特点	参考文献
HS-SPME	检测乳及其制品中挥发性物质	节约时间、成本、溶剂, 有效提取成分, 回收率高	[10]
SDE	对挥发性物质进行萃取、分离、检测、分析	效率高, 减少时间、溶剂使用; 易产生伪峰相	[24]
SAFE	从复杂食品中分离提取挥发性成分	极性成分回收率高; 复杂基质中提取不充分	[10]
P&T-TDS	富集挥发性成分	简单易操作、溶剂污染少、吸附率高、灵敏度高	[29,30]
GC-MS	挥发性成分分析及检测	稳定、灵敏度高、动态范围大	[33]
GC-MS-O	检测乳中挥发性成分及气味	可检测 GC-MS 无法鉴定的浓度低且气味强度高的挥发性物质	[36]
GC-IMS	鉴定风味特征物质	易操作、分辨率高	[39,40]
PTR-TOF-MS	检测痕量挥发性有机化合物	时间短、灵敏度高、简单易操作、分辨率高	[45-47]
HPLC-MS	分离有机化合物	灵敏度高、精确度高、安全环保、方便快捷、具有良好的选择性	[51]

表 2 乳及其制品挥发性成分的气味品质和气味阈值

Table 2 Odor quality and thresholds of volatile components of milk and its products

分类	挥发性成分	气味品质	气味阈值 ($\mu\text{g/L}$)	乳及乳制品	参考文献
酸类	丁酸	干酪味、汗味、水果味	2 400	山羊乳、驴乳酸奶、生牛乳、乳扇、牦牛酸奶、发酵牛乳、宫廷奶酪、切达奶酪、果味奶	[1,55,56,58-62,64,65]
	戊酸	干酪味、汗味	—	山羊乳、驴乳酸奶、生牛乳、乳扇、发酵牛乳、切达奶酪	[1,55,56,58,61,62]
	己酸	尿味	890	山羊乳、驴乳酸奶、生牛乳、乳扇、牦牛酸奶、发酵牛乳、宫廷奶酪、切达奶酪、果味奶	[1,55,56,58-61,64,65]
	辛酸	脂肪味、药味、霉味	5.1	山羊乳、驴乳酸奶、乳扇、牦牛酸奶、发酵牛乳、宫廷奶酪、切达奶酪	[1,55,56,58,59,61,62,65]
	壬酸	脂肪味、粪便味	4 600~9 000	山羊乳、驴乳酸奶、生牛乳、乳扇、牦牛酸奶、切达奶酪	[1,55,56,58,59,61,65]
	癸酸	脂肪味、皮革味	10 000	山羊乳、驴乳酸奶、人乳、生牛乳、乳扇、牦牛酸奶、发酵牛乳、宫廷奶酪、切达奶酪	[1,58-62,65]
	十二烷酸	肥皂味、粪便味	—	山羊乳、驴乳酸奶、人乳、生牛乳、乳扇、发酵牛乳	[1,55-58,60]
	苯醋酸	蜂蜜味、花香、甜味	—	山羊乳、人乳	[55,57]
	庚酸	—	640	驴乳酸奶、生牛乳、乳扇、发酵牛乳	[1,56,58,60,65]
	乙酸	刺激性气味、尖酸味	22 000	驴乳酸奶、人乳、牦牛酸奶、宫廷奶酪、切达奶酪、果味奶	[56,57,59,61,62,64,66]
醛类	9-癸烯酸	蜡香、花香、甜味	—	驴乳酸奶、切达奶酪	[56,62]
	丙酸	酸败味、大豆味	—	生牛乳、乳扇、发酵牛乳、切达奶酪	[1,55,62,67]
	己醛	青草味	11	人乳、生牛乳、乳扇、切达奶酪、宫廷奶酪、果味奶	[1,57,58,61,62,64,65]
	(E)-2-壬烯醛	脂肪味	0.2	山羊乳、人乳、驴乳酸奶、乳扇	[55,57,65]
	辛醛	青草味、橙子味	0.9	人乳、生牛乳、乳扇、发酵牛乳、切达奶酪、宫廷奶酪	[1,57,58,60-62,65]
	3-甲硫基丙醛	煮熟土豆味	—	山羊乳、人乳	[55,57]
	苯甲醛	坚果香味	85	乳扇、生牛乳、切达奶酪、宫廷奶酪、驴乳酸奶	[56,58,60-62,68,69]
	壬醛	花香味	1.1	乳扇、发酵牛乳、切达奶酪、宫廷奶酪	[60-62,65]
	庚醛	—	3	生牛乳、发酵牛乳、切达奶酪	[58,60,62,70]
	乙醛	—	—	发酵牛乳、生牛乳、牦牛酸奶	[58,60]
酮类	癸醛	花香味、青草味	—	切达奶酪、宫廷奶酪、生牛乳	[58,61,62]
	2-戊酮	甜味、香蕉味	98	乳扇、百合发酵乳、生牛乳、发酵牛乳、切达奶酪、果味奶	[1,58,60,62-65]
	2-庚酮	肥皂味	140	驴乳酸奶、乳扇、发酵牛乳、牦牛酸奶、宫廷奶酪、切达奶酪、百合发酵乳	[1,56,59-63,65]
	2-壬酮	奶油味、果味	32	乳扇、驴乳酸奶、发酵牛乳、牦牛酸奶、宫廷奶酪、切达奶酪	[1,56,59-62,65]
	2,3-戊二酮	焦糖味、奶香味	378	乳扇、驴乳酸奶、发酵牛乳、牦牛酸奶、百合发酵乳、果味奶	[1,56,59,60,63,64,71]
	苯乙酮	鲜花味、杏仁味	65	乳扇、生牛乳、发酵牛乳、宫廷奶酪、切达奶酪	[1,58,60-62,65,72]
	2,3-丁二酮	黄油味	—	山羊乳、生牛乳、发酵牛乳、牦牛酸奶、切达奶酪、果味奶	[58-60,62,64]
	1-辛烯-3-酮	蘑菇味、金属味	—	山羊乳、人乳	[55,57]
	丙酮	辛辣甜味	—	生牛乳、发酵牛乳	[58,60]

续表 2

分类	挥发性成分	气味品质	气味阈值 ($\mu\text{g/L}$)	乳及乳制品	参考文献	
醇类	苯乙醇	玫瑰花味	21	乳扇、牦牛酸奶	[1,59,65]	
	苯甲醇	甜味、草本味、果味、辛辣味	250	乳扇、切达奶酪	[1,62,65]	
	1-戊醇	—	20	乳扇、生牛乳、	[1,58,65]	
	己醇	花香味、树脂味	5.6	乳扇、驴乳酸奶、生牛乳、发酵牛乳、百合发酵乳	[1,56,58,60,63,65]	
	正庚醇	芳香味	—	驴乳酸奶、发酵牛乳、	[56,60]	
	辛醇	青草味、橙子味	—	驴乳酸奶、生牛乳、乳扇、牦牛酸奶、	[1,56,58,59]	
	乙醇	酒香味	—	生牛乳、宫廷奶酪、牦牛酸奶	[58,59,61,73]	
	1-壬醇	—	—	发酵牛乳、驴乳酸奶	[56,60]	
	酯类	乙酸乙酯	水果味、甜味	340	乳扇、百合发酵乳、牦牛酸奶、发酵牛乳、切达奶酪、宫廷奶酪	[1,59,60,62,63,65]
		丁酸乙酯	菠萝芳香味	400	乳扇、百合发酵乳、牦牛酸奶、切达奶酪	[1,59,62,63,65]
丙酸乙酯		水果味、甜酒味	10	乳扇、百合发酵乳	[1,63,65]	
乙酸戊酯		—	43	切达奶酪、乳扇	[1,61,65]	
辛酸乙酯		杏仁味、香蕉味	700	切达奶酪、乳扇、生牛乳	[1,62,74]	
癸酸乙酯		葡萄酒香气	—	切达奶酪、生牛乳	[58,62]	
内酯		δ -十二内酯	桃味、甜味	8.5	山羊乳、人乳、切达奶酪	[55,57,62,74]
	Γ -十二内酯	桃味、甜味	—	人乳、切达奶酪	[57,62]	
	δ -癸内酯	椰子味、甜味	—	人乳、切达奶酪	[57,62]	
芳香及杂环类	甲苯	水果味	—	切达奶酪、宫廷奶酪、生牛乳	[58,61,62,75]	
	乙苯	—	—	切达奶酪、发酵牛乳	[60,62]	
	对二甲苯	—	—	切达奶酪、发酵牛乳、生牛乳	[58,60,62]	
	2-甲基呋喃	—	200	生牛乳、乳扇	[1,58,65]	
	2-戊基呋喃	焦糖味	19	切达奶酪、乳扇、生牛乳	[1,58,62,65,76]	
萜烯类	D-柠檬烯	—	200	发酵牛乳、乳扇	[1,60,65]	
含硫类	二甲基硫	椰子味、奶油味	—	切达奶酪、驴乳酸奶、宫廷奶酪	[56,61,62]	

注：“—”表示文献中未报道。

3.2 品质鉴别

风味组学技术可鉴别乳及其制品的品质，对乳食用质量进行判定是保证乳质量、卫生和贮藏的基础。研究表明，采用 HS-SPME-GC-MS 对含有大量革兰氏阴性嗜好菌的生乳鉴别，发现 2-丙酮、3-羟基-2-丁酮、2,3-丁二酮、乙酸乙酯、丁酸乙酯、二甲基硫醚、二甲基硫和硫化氢含量高^[77]。基于 GC-MS 对储存 4 周的全脂奶粉制作的奶油奶酪鉴别，其中辛酸、苯甲酸、十二烷酸、十四烷酸含量高，而正十六烷酸含量低于去胆固醇奶油奶酪，两种奶

油奶酪中酮类物质增加，但总体浓度差异不显著，两种方式制作奶酪对整体风味的影响不明显。采用 HS-SPME-GC-MS 对患有乳腺炎的乳进行分析，其乳中含有 2,3-丁二酮、乙酸乙酯、2-甲基-丁醛、2-戊酮、异戊醇、丙酮、2-丁酮、丁酸乙酯和己酸乙酯等物质，且乙醛、3-甲基-丁醛含量比未感染乳低^[78]。采用 HS-SPME-GC-MS 分析喂食青贮饲料 30 分钟后的牛乳，发现乙醇、2-丙酮、二甲基硫、2-丁酮、己醛、庚醛和 2,3-辛二酮的浓度升高；3 h 后 2-丙酮、二甲基硫、2-丁酮、己醛浓度高于上

述其他挥发性物质^[79]。研究报道,通过 HS-SPME-GC-MS 对 4 个含有饲料异味和 1 个正常气味的牛乳挥发性成分研究,含有饲料异味与未含饲料异味的乳均含有 75 种挥发性成分,表明饲料异味是由挥发性物质的浓度决定的,而不是数量及种类^[79]。采用 GC-MS 对超高温灭菌技术处理乳和品质劣变乳分析,劣变乳中检测出 3-环己基-2-甲基-丙醛、柠檬醛 B、2-环己烯-1-酮、反式-4-二甲氨基-4'-甲氧基查尔酮、1,7,7-三甲基-双环^[2.2.1]庚烷-2,5-二酮、异氰酸酯等物质含量明显降低,而香茅醛、2-甲基-1-丁醛、2-甲基丁酸酐和 2-十二碳烯-1-基(-)琥珀酸酐等主要存在于劣变乳中^[80]。风味组学技术可鉴别患病乳、异味乳、劣变乳与正常乳中的挥发性物质含量有明显差异,为检测乳品质提供技术支持。

3.3 质地品质

乳及其制品的质地品质是一种复合感官属性,与消费者的视觉、听觉和触觉等物理特性密切相关^[81]。乳及其制品地区、制作方式、保存方式不同,质地品质具有显著差异。研究表明,采用 GC-MS 和 GC-O 对云南山羊奶糕中挥发性成分检测,结果表明丁酸、己酸、辛酸、壬酸、癸酸等脂肪酸的含量显著高于其他样品,使得云南山羊奶糕中的酸味和馊味高于其他地区山羊乳制品^[82]。采用 GC-MS 和 GC-O 对生食、微波、油炸、焙烤四种加工方式处理的乳扇分析,结果表明,微波处理后的乳扇中丙酸、辛酸和丁酸含量升高,酸味增大;油炸和焙烤后的风味与生食差异明显,处理过程中发生美拉德反应及焦糖反应,生成 2-甲基丁醛、3-甲基丁醛和糠醛等物质,使乳扇生成焦香味和坚果香味,焙烤生成甲基麦芽酚,使乳扇增加焦香味^[1]。采用 GC-MS 对冷藏前后牦牛酸奶检测,冷藏后醇类、酸类、烯类、酯类物质含量明显增加,酮类、醛类物质减少,促进酸奶中特殊风味物质的生成,适度的冷藏环境有利于牦牛酸奶风味形成^[83]。乳及乳制品的质地品质是消费者感官评分的重要指标,也是提高产品风味品质的依据,可用风味组学技术分析辨别,生产出适合消费者感官体验的产品,为乳和乳制品行业发展提供技术支持。

4 总结与展望

本文主要介绍了乳及其制品中挥发性物质的来

源和成分,以及风味组学技术在乳及其制品中应用。风味组学技术作为一门新兴学科,起步较晚,其方法的快速发展已在乳成分分析、品质鉴别与质地品质分析等研究方面显示出巨大的潜力。通过风味组学在乳及其制品中的应用,确定偏好的风味相联系的挥发性物质,生产出感官质量良好的乳制品。乳及其制品的挥发性风味物质结构复杂、种类繁多,其风味不仅取决于单个成分的浓度及其气味阈值,还取决于各个物质的相互作用,导致其解析和辨别困难。另外,风味组学技术中样本前处理过程繁杂、缺少标准化技术流程和数据库缺乏以及加工过程风味中间产物标品缺乏等问题,严重阻碍样品中风味的解析和调控机制研究。未来,需要科技工作者的共同探索和实践,继续围绕挥发性物质的提取、分离鉴定以及信息学处理等方面进一步完善风味组学技术在乳制品领域的应用。在乳风味研究中,将基于质谱的风味组学与嗅闻或电子鼻有机结合以及有效使用,多方位分析、应用,生产符合消费者口味与高营养价值的乳及其制品,其调控机制的成果可运用于整个乳业,使本领域得到升级和健康持续发展。

参考文献

- [1] 陈臣,刘政,黄轲,等.基于GC-MS、GC-O及电子鼻评价不同加工方式对乳扇风味的影响[J].食品科学,2021,42(16):108-117.
- [2] NURSTEN H E. Flavor science: Sensible principles and techniques [J]. Carbohydrate Research, 1995, 270(2): 22-23.
- [3] 张海朋,彭昭欣,石梅艳,等.柑橘果实风味组学研究进展[J].华中农业大学学报,2021,40(1):32-39.
- [4] 庞雪莉,孙钰清,孔凡玉,等.农产品挥发性风味品质研究现状与展望[J].中国农业科学,2019,52(18):3192-3198.
- [5] 顾小卫,徐伟,郭鹏.影响牛奶风味的因素[J].当代畜禽养殖业,2011,9:17-20.
- [6] 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.
- [7] 陈华磊,黄克兴,郑敏,等.基于非靶向风味组学分析3种品牌啤酒的风味差异[J].食品科学,2021,42(6):223-228.
- [8] GRACKA A, JELEN H H, MAJCHER M, et al. Flavoromics approach in monitoring changes in volatile compounds of virgin rapeseed oil caused by seed roasting [J]. Journal of Chromatography A, 2016, 1428: 292-304.
- [9] 赵军,卢德勋,马燕芬.牛奶中风味物质及其影响因素[J].中国奶牛,2008,1:47-49.
- [10] 迟雪露,刘慧敏,叶巧燕,等.奶中风味物质检测技术研究进展[J].中国乳品工业,2022,50(4):40-45.

- [11] 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.
- [12] 孙优兰,钟方达,韦露露,等.中国白酒风味组学研究进展[J].酿酒科技,2021,5:50-55.
- [13] 代敏.保鲜乳挥发性风味物质的分析与调控[D].哈尔滨:东北农业大学,2006.
- [14] GALLARDO E F J, KELLY A L, DELAHUNTY C M. Influence of starter culture on flavor and headspace volatile profiles of fermented whey and whey produced from fermented milk [J]. Journal of Dairy Science, 2005, 88(11): 3734-3753.
- [15] ANJUM M M, SALIM U, MUHAMMAD A F, et al. Cheddar cheese ripening and flavor characterization: a review [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2014, 54(10): 1309-1321.
- [16] GULER Z. Changes in salted yoghurt during storage [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2007, 42(2): 235-245.
- [17] 宫俐莉,王蓓,王绒雪,等.奶豆腐发酵期间挥发性风味组分变化及其感官品质分析[J].食品科学,2017,38(24):81-86.
- [18] SMIT A B, ENGELS W J M, GERRIT S. Branched chain aldehydes: production and breakdown pathways and relevance for flavour in foods [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2009, 81(6): 987-999.
- [19] 马艳丽,曹雁平,郑福平,等.奶酪的风味组分研究进展[J].中国乳品工业,2013,41(5):36-39.
- [20] 毛世红.基于风味组学的工夫红茶品质分析与控制研究[D].重庆:西南大学,2018.
- [21] CAVALLI J, FERNANDEZ X, LIZZANI C L, et al. Characterization of volatile compounds of French and Spanish virgin olive oils by HS-SPME: Identification of quality-freshness markers [J]. Food Chemistry, 2004, 88(1): 151-157.
- [22] CAI J S, ZHU Y Y, MA R H, et al. Effects of roasting level on physicochemical, sensory, and volatile profiles of soybeans using electronic nose and HS-SPME-GC-MS [J]. Food Chemistry, 2021, 340: 127880.
- [23] 衣宇佳,田怀香,郑小平,等.同时蒸馏萃取和固相微萃取法提取国产干酪中风味物质[J].食品与机械,2008,124(2):65-69.
- [24] 孙昕萌,袁惠萍,赵钜阳.发酵乳风味及其分析技术研究进展[J].食品安全质量检测学报,2021,12(15):6111-6117.
- [25] 艾对,张富新,于玲玲,等.同时蒸馏萃取法和固相微萃取法提取羊奶粉挥发性风味物质[J].食品工业科技,2015,36(8):49-52.
- [26] INGA M, GARCIA J M, AGUILAR G A, et al. Chemical characterization of odour-active volatile compounds during lucuma (*Pouteria lucuma*) fruit ripening [J]. CyTA-Journal of Food, 2019, 17(1): 494-500.
- [27] GARDINI F, LANCIOTTI R, GUERZONI M E, et al. Evaluation of aroma production and survival of *Streptococcus thermophilus*, *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* and *Lactobacillus acidophilus* in fermented milks [J]. International Dairy Journal, 1999, 9(2): 125-134.
- [28] NING L, ZHENG F P, CHEN H T, et al. Identification of volatile components in Chinese Sinkiang fermented camel milk using SAFE, SDE, and HS-SPME-GC/MS [J]. Food Chemistry, 2011, 129(3): 1242-1252.
- [29] 雷春妮,王波,解迎双,等.吹扫捕集-气相色谱/质谱联用分析玫瑰花水香气成分[J].食品工业科技,2020,41(2): 201-206.
- [30] LV Y C, SONG H L, LI X, et al. Influence of blanching and grinding process with hot water on beany and non-beany flavor in soymilk [J]. Journal of Food Science, 2011, 76(1): S20-S25.
- [31] 汪雨,刘学锋,刘聪,等.吹扫捕集-气相色谱/质谱法测定巴山箬竹叶中挥发性成分[J].质谱学报,2012,33(2):104-108.
- [32] 曲超,张顺亮,王守伟,等.吹扫/捕集-热脱附-气质联用仪分析新鲜羊肉在冷藏过程中挥发性物质的变化[J].肉类研究,2016,30(1):25-29.
- [33] MURGIA A, SCANO P, CACCIABUE R, et al. GC-MS metabolomics comparison of yoghurts from sheep's and goats' milk [J]. International Dairy Journal, 2019, 96: 44-49.
- [34] 张宇,王立娜,张宏达,等.母乳、牛乳及山羊乳脂肪酸组成的差异分析[J].食品工业科技,2019,40(4):21-26.
- [35] 章建辉,李莎,黄辉,等.液液萃取-接受相固化-反萃取-气相色谱/质谱法测定奶粉中的香兰素[J].食品与机械,2015,31(2):98-101,105.
- [36] SONG H L, LIU J B. GC-O-MS technique and its applications in food flavor analysis [J]. Food Research International, 2018, 114: 187-198.
- [37] TIAN H X, XU X L, CHEN C, et al. Flavoromics approach to identifying the key aroma compounds in traditional Chinese milk fan [J]. Journal of Dairy Science, 2019, 102(11): 9639-9650.
- [38] FUCHSMANN P, STERN M T, BRUGGER Y A, et al. Olfactometry profiles and quantitation of volatile sulfur compounds of swisstilsit cheeses [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2015, 63(34): 7511-7521.
- [39] GERHARDT N, BIRKENMEIER M, SANDERS D, et al. Resolution-optimized headspace gas chromatography-ion mobility spectrometry (HS-GC-IMS) for non-targeted olive oil profiling [J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2017, 409(16): 3933-3942.
- [40] 杨秉坤,剧柠,丁雨红,等.沙棘酸奶挥发性风味物质的GC-IMS表征[J].食品工业科技,2023,44(13):308-315.
- [41] 霍尚蕾,乔海军,贾志龙,等.基于HS-GC-IMS和化学计量学分析牦牛乳干酪成熟过程中挥发性风味物质的变化[J].食品与发酵科技,2022,58(4):1-7,24.
- [42] 闫瑞宇,张锦锦,陈孟涵,等.基于GC-IMS技术分析荞麦益

- 生菌发酵乳的风味物质[J].食品科技,2022,47(4):303-309.
- [43] ZHANG K, ZHANG C, GAO L, et al. Analysis of volatile flavor compounds of green wheat under different treatments by GC-MS and GC-IMS [J]. Journal of Food Biochemistry, 2022, 46(6): e13875.
- [44] CHEN T, CHEN X Y, LU D L, et al. Detection of adulteration in canola oil by using GC-IMS and chemometric analysis [J]. International journal of analytical chemistry, 2018, 23: 3160265.
- [45] BIASIOLI F, GASPERI F, YERETZIAN C, et al. PTR-MS monitoring of VOCs and BVOCs in food science and technology [J]. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 2011, 30(7): 968-977.
- [46] SULZER P, AGARWAL B, JÜRSCHIK S, et al. Applications of switching reagent ions in proton transfer reaction mass spectrometric instruments for the improved selectivity of explosive compounds [J]. International Journal of Mass Spectrometry, 2013, 354-355: 123-128.
- [47] JOBSON B T, MCCOSKEY J K. Sample drying to improve HCHO measurements by PTR-MS instruments: Laboratory and field measurements [J]. Atmospheric chemistry and physics, 2010, 10(4): 1821-1835.
- [48] WANG X, CAI Y, WANG J, et al. Concentration monitoring of volatile organic compounds and ozone in Xi'an based on PTR-TOF-MS and differential absorption lidar [J]. Atmospheric Environment, 2021, 245: 118045.
- [49] TELAGATHOTI A, PROBST M, KHOMENKO I, et al. High-Throughput volatilome fingerprint using PTR-ToF-MS shows species-specific patterns in mortierella and closely related genera [J]. Journal of Fungi, 2021, 7(1): 66.
- [50] ZANIN R C, SMRKE S, KUROZAWA L E, et al. Modulation of aroma release of instant coffees through microparticles of roasted coffee oil [J]. Food Chemistry, 2020, 341(Pt 1): 128193.
- [51] 胡雪,段国霞,刘丽君,等.乳及乳制品中磷脂的含量、功能、分离及检测技术研究进展[J].食品科学,2021,42(19):350-361.
- [52] 杨余语,刘飞,温林凤,等.HPLC-MS/MS法检测奶粉中酪蛋白磷酸肽的含量[J].现代食品,2022,28(23):189-194.
- [53] 何晓娜,席斌,王芳,等.畜禽肉中风味物质检测方法研究进展[J].保鲜与加工,2021,21(4):139-145.
- [54] 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.
- [55] CAROLINE S, ANDREA B. The aroma of goat milk: seasonal effects and changes through heat treatment [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2014, 62(49): 11805-11817.
- [56] 苟小刚,杨行,张明,等.驴乳酸奶冷藏期间挥发性风味物质成分分析[J].食品安全质量检测学报,2022,13(2):585-592.
- [57] SPITZER J, BUETTNER A. Characterization of aroma changes in human milk during storage at 19 °C [J]. Food Chemistry, 2010, 120(1): 240-246.
- [58] CLARKE H J, FITZPATRICK E, HENNESSY D, et al. The influence of pasture and non-pasture-based feeding systems on the aroma of raw bovine milk [J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 841454.
- [59] 陈娟,李键,唐俊妮,等.川西高原牧区传统发酵牦牛酸奶挥发性风味成分的分析[J].食品工业科技,2016,37(14): 59-62.
- [60] 胡海敏,田佳乐,孙思霖,等.固相微萃取-气相色谱-质谱结合电子鼻技术分析发酵乳中挥发性风味物质[J].微生物学通报,2022:1-17.
- [61] 罗天洪,张健,余志坚,等.传统宫廷奶酪挥发性风味物质研究[J].中国乳品工业,2019,47(4):14-19.
- [62] 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.
- [63] 袁志鹰,黄惠勇,谢梦洲,等.应用顶空-气相离子迁移谱分析百合发酵乳的风味物质[J].理化检验(化学分册),2020,56(1):78-83.
- [64] 马燕芬,郭文华,高民,等.奶牛日粮添加果香味剂对果味奶感官品质和综合风味的影响[J].饲料工业,2014,35(5):48-51.
- [65] GEMERT L J V. Compilations of odour threshold values in air, water and other media (second enlarged and revised edition) [D]. Karaat Grafimedia BV, Houten, The Netherlands, 2011.
- [66] 丹彤,包秋华,孟和毕力格,等.发酵乳风味物质乙醛、双乙酰的合成途径及其调控机制[J].食品科技,2012,37(7):75-79.
- [67] 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.
- [68] 牧其尔,徐伟良,李春冬,等.发酵乳制品风味物质种类、形成途径以及提取和检测方法的研究进展[J].中国酿造,2022,41(7):6-10.
- [69] MOID L, ETIEVANT P, LANGLOIS D, et al. Detection of powerful odorants in heated milk by use of extract dilution sniffing analysis [J]. Journal of Dairy Research, 1994, 61(3): 385-394.
- [70] LIU H, WANG Z, ZHANG D, et al. Characterization of key aroma compounds in Beijing Roasted Duck by gas chromatography-olfactometry-mass spectrometry, odor-activity values, and aroma-recombination experiments [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67(20): 166-189.
- [71] SINGH T K, DRAKE M A, CADWALLADER K R. Flavor of cheddar cheese: A chemical and sensory perspective [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety,

- 2003, 2(4): 166-189.
- [72] 邓海莲,胡蝶,邹婷婷,等.酶解对鸡骨素美拉德反应挥发性风味成分的影响[J].食品工业科技,2018,39(16):236-242.
- [73] 郭婷,张健,杨贞耐.基于不同发酵方法制作的曲拉中挥发性风味物质分析[J].食品工业科技,2017,38(8):209-213.
- [74] PU D, ZHANG H, ZHANG Y, et al. Characterization of the key aroma compounds in white bread by aroma extract dilution analysis, quantitation, and sensory evaluation experiments [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2019, 43(5): 1-15.
- [75] 刘笑生,杨政茂,杜闪,等.金华火腿皮下脂肪中气味活性化合物研究[J].中国食品学报,2014,14(9):239-246.
- [76] LI Y, WANG W J. Short communication: Formation of oxidized flavor compounds in concentrated milk and distillate during milk concentration [J]. *Journal of Dairy Science*, 2016, 99(12): 372-375.
- [77] PANSERI S, CHIESA L M, BIONDI P A, et al. Head Space-Solid Phase Microextraction for characterization of volatile compounds and microbiological parameters in milk tainted with off-flavour [J]. *Milchwissenschaft-milk Science International*, 2009, 64(4): 372-375.
- [78] HETTINGA K A, VALENBERG H J F V, LAM T J G M, et al. Detection of mastitis pathogens by analysis of volatile bacterial metabolites [J]. *Journal of Dairy Science*, 2008, 91(10): 3834-3839.
- [79] MOUNCHILI A, WICHTEL J J, BOSSET J O, et al. HS-SPME gas chromatographic characterization of volatile compounds in milk tainted with off-flavour [J]. *International Dairy Journal*, 2005, 15(12): 1203-1215.
- [80] 贺凯茹,刘至立,薛瑞霞,等.货架期内品质劣变UHT乳的理化特性及风味品质特性研究[J].中国乳品工业,2023, 51(1):19-25.
- [81] PINHO O, MENDES E, ALVES M M, et al. Chemical, physical, and sensorial characteristics of "Terrincho" ewe cheese: changes during ripening and intravarietal comparison [J]. *Journal of Dairy Science*, 2004, 87(2): 249-257.
- [82] TIAN H, SUN X, YU H, et al. Characterization of the key aroma compounds in Yunnan goat milk cake using a sensory-directed flavor analysis [J]. *Journal of Food Science*, 2020, 85(11): 3981-3997.
- [83] 李升升,刘书杰.冷藏对牦牛酸奶营养成分及挥发性物质的影响[J].食品与机械,2020,36(11):112-117.