

母乳的风味物质组成、分析方法 及其对婴儿影响的研究进展

胡新颖¹,王青云²,王利²,王帅²,韦伟¹,王兴国¹

(1. 江南大学食品学院,江苏无锡 214122; 2. 北大荒完达山乳业股份有限公司,哈尔滨 150090)

摘要:母乳被誉为“白色血液”,是婴儿生长发育的最佳营养来源。除了营养物质组成,母乳的风味对婴幼儿的影响也十分重要。旨在为母乳风味的深入研究及其在婴儿食品中的应用提供理论依据,综述了母乳的风味物质组成、风味物质提取和检测方法,并分析了现有提取和检测方法的优势与局限,探究了母乳风味对婴儿饮食偏好、行为反应和疼痛干预的影响,并讨论了现有研究的局限性及未来的发展方向。母乳中挥发性风味物质主要包括醛类、酮类、酸类、酯类和其他化合物,现有分析方法各有利弊,未来可将电子鼻和电子舌技术应用于母乳风味研究领域。母乳风味会影响婴儿的饮食偏好,具有促进婴儿吮吸、缓解疼痛等重要作用。

关键词:母乳;风味;检测方法;干预实验

中图分类号:TS252.2;TS201.2 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2024)12-0044-08

Research progress on flavor compounds composition, analytical methods of breast milk and its effects on infants

HU Xinying¹, WANG Qingyun², WANG Li², WANG Shuai²,
WEI Wei¹, WANG Xingguo¹

(1. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, China;
2. Beidahuang Wondersun Dairy Limited Company, Harbin 150090, China)

Abstract: Breast milk, known as the "white blood", is the best source of nutrition for infant growth and development. In addition to nutrient composition, the flavor of breast milk is also important for infants and young children. Aiming to provide a theoretical basis for the deep exploration of breast milk flavor and its application in infant food, the composition of flavor compounds in breast milk was summarized, as well as the extraction and detection methods of these flavor compounds, also the advantages and limitations of existing extraction and detection methods were analyzed, the research progress on the impact of breast milk flavor on infants' dietary preferences, behavioral responses, and pain intervention was explored, and the limitations of current research and future directions for development were discussed. The primary volatile flavor compounds in breast milk encompass aldehydes, ketones, acids, esters, and other compounds. Current analytical methods have their own strengths and limitations, and electronic nose and electronic tongue technologies can be used in breast milk flavor research in the future. Furthermore, the flavor of breast milk not only influences infants' dietary preferences, but also plays pivotal roles in promoting sucking behavior and alleviating pain.

Key words: breast milk; flavor; detection method; intervention experiment

收稿日期:2023-12-12;修回日期:2024-08-01

作者简介:胡新颖(2000),女,在读硕士,研究方向为母乳风味(E-mail)3233065308@qq.com。

通信作者:王兴国,教授,博士生导师(E-mail)wxg1002@qq.com;王利,正高级工程师(E-mail)xia3688@163.com。

婴儿是处于特殊生长发育阶段、具有特殊营养需求的一类群体,在这一关键时期进行合理的喂养,使婴儿摄入足够的能量和营养素,对婴儿的生长发育至关重要。母乳中的多种营养素和生物活性物质

构成一个特殊的系统,具有营养、免疫抗病和促进生长代谢的功能,能为婴儿提供充足而适量的能量,使婴儿健康成长^[1]。因此,母乳是婴儿最理想的食物。

行为学研究表明,早期的风味感知会影响人们以后的风味偏好和食物摄取^[2]。尽管人类的一些口味偏好(例如偏爱甜、咸和鲜而不喜欢苦味)是天生的,但早期的风味感知和学习可以改变这些先天倾向^[3]。婴儿在出生前后会接触到各种不同的味道,特别是从羊水到母乳阶段的风味暴露会增加其对类似风味的接受度^[4],甚至会影响其以后的健康^[5]。研究表明,与婴儿配方奶粉相比,母乳喂养的婴儿断奶后的口味更加多样化^[6]。此外,新生儿对母乳的风味具有很高的识别度,能区分母乳和婴儿配方奶粉的气味^[7],当新生儿闻到母乳的气味时,他们会表现出食欲增加^[8]、更积极地吮吸和摄食等^[9-10]生理反应。同时,母乳的气味还能增加婴儿脑部氧气的供应^[7],促进新生儿的生长发育。母乳气味的刺激对新生儿操作性疼痛干预、早产儿母乳喂养等方面也有较好效果^[11-12]。可见,母乳风味对婴儿的影响不容忽视。

目前关于母乳的研究主要集中在母乳中特定的营养成分上,如脂肪^[13]、营养素和生物活性因子^[14]等。事实上,除了营养成分,风味也应“母乳化”,但针对母乳风味的研究仍处于初级阶段。因此,本文分析了母乳中风味物质组成,系统归纳了相关的分析方法,并将母乳风味对婴儿的影响进行总结,以期母乳风味表征研究及接近母乳风味的婴儿配方奶粉的开发提供参考。

1 母乳风味物质组成

风味包括气味、滋味和口感,目前母乳风味研究集中在香气物质组成上。母乳的香气物质主要来源于脂质的氧化降解和母亲的饮食^[15],其中脂肪酸分解是产生母乳风味最重要的途径之一^[16]。研究表明,母乳中含有的14碳以下的挥发性脂肪酸是母乳香气的重要前体物质^[17],这些脂肪酸会发生自动氧化、水解、脱水和脱羧反应,形成醇类、烃类、羰基类、酯类、内酯类和呋喃类化合物^[18],尤其是不饱和脂肪酸的过氧化易产生醛类、内酯类和甲基酮类化合物^[19]。此外,母亲经皮肤、口腔或者鼻子吸入的气味物质也可能会转移到乳汁中,如芳樟醇^[20]。然而,并不是所有的挥发性化合物都会对母乳整体香气有贡献^[21],仅有一小部分具有香气活性。本文汇总了已鉴定出的新鲜母乳中的风味化合物,并分别对各类物质的香气特征进行论述。

1.1 醛类和酮类

醛类和酮类化合物主要通过脂肪的氧化和降解产生,特别是一些多不饱和脂肪酸的过氧化反应,其形成途径如图1所示。Spitzer等^[16]研究发现,亚油酸的氢过氧化物进一步氧化产生(*E*)-2-壬烯醛、(*E*)-2-癸烯醛、(*E, E*)-2,4-壬二烯醛和(*E, E*)-2,4-癸二烯醛;Zhang^[22]、Yu^[23]等从母乳中检出(*E*)-2-辛烯醛和(*E, E*)-2,4-癸二烯醛,含量范围分别为0~3.09 μg/kg和0~6.96 μg/kg,二者都具有脂肪味,且气味活性值(OAV)大于1,对母乳整体香气贡献较大;Zhang等^[22]从6个新鲜母乳样品中均检测到己醛、辛醛、壬醛、癸醛和苯甲醛等8种气味化合物,其中己醛是亚油酸氧化的产物,壬醛是*n*-9脂肪酸(如油酸)氧化的产物,分别赋予母乳青草味和脂肪味^[24]。酮类物质在母乳中含量较少,如1-辛烯-3-酮,其具有金属味、蘑菇味,平均OAV为20。因此,1-辛烯-3-酮可能是导致母乳产生金属味最重要的气味活性化合物^[25]。

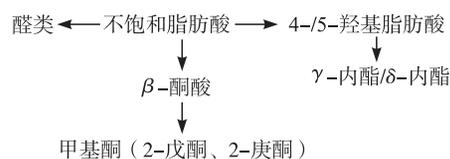


图1 不饱和脂肪酸氧化产物形成途径^[19]

Fig. 1 Unsaturated fatty acid oxidation product formation pathways^[19]

总之,醛类和酮类化合物贡献脂肪、杏仁、青草等香气,特别是醛类物质在母乳风味物质中种类最多,且其具有相对较低的气味阈值,即使在低含量下也可以被感知。表1为母乳中已鉴定出的醛类和酮类风味物质^[22-24,26-27]。

表1 母乳中已鉴定出的醛类和酮类风味物质及气味描述
Table 1 Aldehydes and ketones flavor compounds identified in breast milk and odour descriptions

化合物	含量范围 (平均值)/(μg/kg)	气味描述
己醛	13.9~254(59.5)	青草味
庚醛	0~34.1(7.72)	草本味,脂肪味
(<i>E</i>)-2-己烯醛	0~3.81(0.49)	脂肪味,新鲜味
(<i>Z</i>)-3-己烯醛	0.44~0.45(0.45)	青草味
(<i>Z</i>)-4-庚烯醛	0~3.82(1.46)	鱼腥味,脂肪味
辛醛	2.6~41.1(13.6)	橙子味,脂肪味
(<i>E</i>)-2-庚烯醛	0~10.5(1.04)	脂肪味,肥皂味
壬醛	2.05~32.6(6.7)	玫瑰味,脂肪味
(<i>E, E</i>)-2,4-己二烯醛	-	甜味
(<i>E</i>)-2-辛烯醛	0~3.09(1.37)	草本味,脂肪味

续表 1

化合物	含量范围 (平均值)/(μg/kg)	气味描述
3-甲硫基丙醛	0.76~2.02(1.07)	熟土豆味
2-呋喃甲醛	-	焙烤味
(<i>E,E</i>)-2,4-庚二烯醛	0~4.32(0.62)	脂肪味,青草味
癸醛	4.13~137(33.3)	花香味,肥皂味
苯甲醛	1.24~105(15.8)	杏仁味
(<i>E</i>)-2-壬烯醛	0~6.25(1.94)	黄瓜味,脂肪味
(<i>Z</i>)-2-壬烯醛	-	脂肪味,青草味
(<i>E,E</i>)-2,4-辛二烯醛	-	脂肪味
(<i>E</i>)-2-癸烯醛	0~31.6(6.98)	脂肪味
(<i>E,E</i>)-2,4-壬二烯醛	0~24.3(3.58)	脂肪味,西瓜味
十一醛	-	橙子味
(<i>E,E</i>)-2,4-癸二烯醛	0~6.96(1.05)	脂肪味
反式-4,5-环氧-2-癸烯醛	0.09~2.31(0.63)	金属味
十二醛	0~5.35(0.6)	花香味
苯乙酮	0~104(16.2)	杏仁味
3-辛酮	0~9.95(1.94)	草本味
6-甲基-5-庚烯-2-酮	0.69~65.1(14.9)	橡胶味
3-壬酮	0~12.4(2.84)	草本味
3-辛烯-2-酮	0~2.18(0.39)	坚果味
1-辛烯-3-酮	0.06~0.97(0.21)	蘑菇味,金属味
2-十一酮	-	果香味,橙皮味
2(5H)-呋喃酮	0~12.19(2.52)	黄油味

注: - 表示化合物在母乳中含量未确定。下同

Note: "-" indicates that the amount of the compound in breast milk was not determined. The same below

1.2 酸类和酯类

酸类和酯类化合物是母乳特殊风味的重要成分^[17]。其中脂肪酸和脂肪酸酯是由新鲜母乳中有活性的脂肪酶作用产生的^[23],大多数脂肪酸是重要的气味活性化合物,具有脂肪味和奶酪味,但气味感知阈值很高(百万分之一)^[28]。例如,辛酸是母乳中检测到的主要脂肪酸,在低含量下具有奶酪味^[23]。脂肪酸酯的感知阈值较低(十亿分之一),其在低含量下赋予母乳果香味,但含量过高可能会产生令人不愉快的风味^[29],如 γ - δ -内酯类由少量存在的4- δ -羟基脂肪酸内酯化生成,具有椰子味、桃子味等果香味^[30]。表2为母乳中已鉴定出的酸类和酯类风味物质^[22-24, 26-27]。

表2 母乳中已鉴定出的酸类和酯类风味物质及气味描述

Table 2 Acids and esters flavor compounds identified in breast milk and odour descriptions

化合物	含量范围 (平均值)/(μg/kg)	气味描述
2-甲基丙酸	0~1 335 (133)	腐臭味,奶酪味
丁酸	0~1 630 (323)	奶酪味,汗味
戊酸	-	汗味
己酸	0~2 933 (456)	汗味
辛酸	0~3 238 (432)	奶酪味
壬酸	0~1 797 (285)	脂肪味
月桂酸	-	金属味,轻微脂肪味
苯乙酸	-	蜂蜜味
3-苯基丙酸	-	蜂蜡味,奶酪味
丙酸丁酯	0~2.86 (0.11)	果香味,甜味
甲酸庚酯	0~1.75 (0.14)	青草味
甲酸己酯	0~6.21 (0.51)	果味,甜味
γ -丁内酯	0~14.9 (1.93)	奶油味
γ -壬内酯	0~97.4 (12.2)	椰子味
γ -癸内酯	0~1.95 (0.28)	桃子味,果香味
δ -癸内酯	0.27~4.07(1.36)	椰子味
γ -十二内酯	0~8.21 (0.84)	桃子味,甜味

1.3 其他风味化合物

大多数的醛、酮、酸类和酯类风味物质都可在母乳中鉴定出来,而其他风味化合物则存在较大差异,这与母亲和外界环境的接触有关。例如:萜烯是广泛存在于水果、蔬菜、香料和饮料中的芳香化合物,仅能在植物和微生物中合成,已被证明可以直接传播或渗透人体皮肤从而传播到母乳中,说明母乳中的萜烯如 γ -松油烯(0~5.36 μg/kg,柑橘味)和 β -石竹烯(0~9.65 μg/kg,木香味)可能是源于母亲的饮食或者化妆品(如富含萜烯的精油)^[31-32];芳樟醇(0.18~13.2 μg/kg,花香味)和桉树醇(0~5.09 μg/kg,薄荷味)也可能源于母亲的饮食或皮肤接触,这是因为许多植物和精油含有芳樟醇和桉树醇^[33-34]。母乳中其他风味化合物与母亲所处环境相关,因此其不同母乳样本中的含量不尽相同,对整体风味的贡献大小也不一样,这也是不同母乳之间存在风味差异的重要原因之一。表3为母乳中已鉴定出的其他风味物质^[22-24, 26-27]。

表3 母乳中已鉴定出的其他风味物质及气味描述

Table 3 Other flavor compounds identified in breast milk and odour descriptions

化合物	含量范围 (平均值)/(μg/kg)	气味描述
D-柠檬烯	0~151 (34.3)	柑橘味
2-甲氧基苯酚	-	烟熏味

续表 3

化合物	含量范围 (平均值)/(μg/kg)	气味描述
2-戊基呋喃	0~9.91 (3.41)	青草味
桉树醇	0~5.09 (0.87)	柑橘味,薄荷味
γ-松油烯	0~5.36 (0.96)	柑橘味
β-石竹烯	0~9.65 (0.85)	木香味
芳樟醇	0.18~13.2 (1.46)	花香味
α-松油醇	-	柑橘味,薄荷味
香草醛	-	香草味,甜味

2 母乳风味物质分析方法

提取和检测方法是分析风味物质的关键。本文从以下两个方面对近年母乳风味物质分析方法进行综述。

2.1 风味物质提取方法

母乳风味物质的提取方法有顶空固相微萃取法(HS-SPME)^[17]、同时蒸馏萃取法(SDE)^[22]、搅拌棒吸附法(SBSE)^[35]、溶剂辅助风味蒸发法(SAFE)^[26]和动态顶空法(DHS)^[36],不同方法的比较见表4。HS-SPME无需溶剂且样品用量较少,是目前母乳研究中使用最广泛的提取方法。然而,由于母乳中风味物质种类多而含量低,一种提取方法可能不足以获得更详尽的风味物质,往往采用多种提取方法对多个样品进行重复提取^[24]。此外,母乳样本十分有限,从小样本中提取挥发性化合物的方法仍在不断完善,如Roy等^[37]在传统顶空提取法基础上进行创新,进一步实现了从少量母乳中提取多种挥发性化合物。

表4 风味物质提取方法的比较

Table 4 Comparison of flavor compounds extraction methods

提取方法	原理	优点	缺点
HS-SPME	基于萃取涂层与样品之间的吸附平衡原理,通过将有涂层的纤维萃取头置于顶空进行萃取,实现集取样、提取、浓缩、进样于一体	操作简单、高效快速、灵敏度高、易于自动化、不需要溶剂、绿色环保	成本高、热稳定性差、竞争性吸附等
SDE	在蒸馏过程中,样品中的挥发性成分与溶剂一起蒸发,并在冷凝器中重新凝结,从而实现挥发性成分的提取	可重复性高和效率高、可用于痕量挥发性成分提取	不利于热敏性物质提取、样品用量大、不适于定量分析
SBSE	利用涂有萃取涂层的搅拌棒搅拌吸附,再用溶剂洗脱吸附的成分,然后进行后续的色谱分析,是基于SPME的改进技术,适用于液体样品挥发性化合物的提取、富集	快速、样品用量小、萃取容量高、灵敏度高、重现性好	涂层种类有限、不利于极性化合物提取
SAFE	在高真空条件下,利用水或有机溶剂辅助挥发性风味物质快速蒸发再冷凝收集	回收率高、可提取极性挥发性物质、蒸馏温度较低(接近常温),是特别适合气相色谱-嗅觉探测法分析样品风味的前处理方法	装置复杂、含水样品的分离步骤多且效率低、样本量大
DHS	通过一个动态的气流将样品顶空中的挥发性成分带到吸附剂或冷阱中,实现目标成分的捕获	提取条件温和、灵敏度高、方便测定复杂基质中的超痕量分析物	耗时长、装置复杂、易引入外来物质

2.2 风味物质检测方法

2.2.1 气相色谱-质谱联用法(GC-MS)

GC-MS是风味物质分析最经典的方法,其将气相色谱的快速、高效分离与质谱的专一性、高灵敏性结构鉴定相结合,使气相色谱和质谱的优点得到充分利用。GC-MS首先通过气相色谱分离未知挥发性化合物,再利用质谱进行定性定量,分析准确、灵敏度高、操作简便^[38],在样品的差异分析方面的应用也越来越多。高雅慧等^[39]采用GC-MS测定了母乳中的挥发性成分,并对检测条件进行了优化。张闹等^[40]采用HS-SPME-GC-MS测定了3个泌乳期(初乳、过渡乳、成熟乳)母乳中挥发性成分的种类及含量,分别得到了39种、37种和41种挥发

性物质,并分析了3个时期母乳风味的差异。He等^[15]用GC-MS分析了母乳和婴儿配方奶粉的挥发性物质差异,发现母乳和婴儿配方奶粉间的挥发性化合物具有显著差异,婴儿配方奶粉中最丰富的风味物质是醛类,而母乳中的风味物质主要是酸类、醛类、碳氢化合物和酮类。

2.2.2 气相色谱-嗅觉探测法(GC-O)

形成风味的挥发性化合物往往有上百种,而仅有一小部分气味活性物质对整体风味有贡献。GC-O是利用人鼻子的高感知灵敏性嗅闻经气相色谱分离后的各个馏分,以检测食品风味组成的方法。GC-O能够描述风味物质的真实香气,并得出对食品风味特征贡献较大的化合物,是目前食品风

味常用的分析技术之一^[41-42]。Buettner^[35]采用高分辨气相色谱-嗅觉测定法(HRGC-O)鉴别了母乳中40多种特征风味物质。Spitzer等^[43]通过HRGC-O分析了母乳储藏过程中导致风味发生变化的关键化合物,主要有1-辛烯-3-酮(蘑菇味,金属味)和(*E,Z*)-2,4-壬二烯醛(脂肪味)等,奠定了探究母乳储藏条件的基础。

2.2.3 二维综合气相色谱-嗅觉-质谱法(GC×GC-O-MS)

GC×GC-O-MS是近年来新兴的一种分析技术,其将二维气相色谱-质谱与嗅觉探测系统结合使用,以分离复杂食品基质中的风味物质^[44]。与传统的全二维气相色谱法(GC×GC)相比,GC×GC-O-MS只需一次进样即可实现同时嗅闻和GC分析,减少了样品用量和研究人员的工作量,节省时间,且分析结果全面、准确^[45]。目前GC×GC-O-MS在母乳风味分析中的应用较少。Zhang等^[22]利用GC×GC-O-MS分析了母乳和婴幼儿配方奶粉的风味物质差异,结果表明,(*E*)-2-癸烯醛、芳樟醇、2-呋喃甲醇、2-戊基呋喃、(*E,E*)-2,4-庚二烯醛、壬醛、(*E*)-2-壬烯醛、1-辛烯-3-酮等化合物是造成母乳与婴幼儿配方奶粉风味差异的主要原因。Guo等^[24]通过GC×GC-O-MS测定了不同储藏条件下母乳风味的变化,结果表明,母乳在4℃下储存36h和20℃储存30d后其中的(*E*)-2-癸烯醛、辛醛、己醛、1-辛烯-3-醇、2-戊基呋喃、月桂酸、癸酸和己酸浓度显著增加。

2.2.4 电子鼻和电子舌

电子鼻和电子舌是模仿人的嗅觉和味觉系统鉴别食品风味的方法。与上述几种方法不同的是,电子鼻和电子舌不需要预处理即可进行检测,其得到的不是样品中某一种或某几种成分的定性与定量结果,而是样品风味的整体信息。电子鼻和电子舌通过传感器识别气味信号,然后通过计算机的信号处理对风味进行判断和识别,具有无损便捷、快速灵敏、客观等优点^[46]。目前,电子鼻和电子舌作为智能感官分析技术在食品风味研究中的应用越来越多,不仅可以与传统分析方法相结合表征食品风味,还可以用于鉴别物质等^[47]。研究表明,利用电子鼻、电子舌技术不仅可以分析不同热处理牛奶的风味特征^[48]、风味差异^[49]、加热过程的风味变化^[50-51],还可以成功检测羊奶中牛奶的掺入^[52]。目前,母乳风味的研究尚未用到电子鼻和电子舌技术,相信未来的研究会与智能感官相结合,以更好地诠释母乳风味。

3 母乳风味对婴儿的影响

母乳作为婴儿最理想的食物,不仅其营养成分和生物活性因子发挥着重要作用,其风味对婴儿的行为和发展也有较大影响。研究表明,婴儿在出生后几天内就能通过气味区分母亲的母乳、陌生人的母乳以及其他非母乳的食品^[53-54],而母乳的气味相较于婴儿配方奶粉对新生儿更具吸引力^[8],表明母乳风味在婴儿与母亲关系形成过程中起到了重要作用。此外,母乳风味还会影响婴儿的饮食偏好,调节婴儿饮食行为,并具有安抚婴儿情绪、促进婴儿吸吮行为和进食量以及缓解疼痛等作用。

3.1 母乳风味对婴儿饮食偏好的影响

婴儿时期是饮食偏好形成的关键期,因为婴儿首先通过羊水和母乳传递的味道进行味觉学习^[55],母乳喂养的婴儿会体验到母亲食用食物中的风味化合物,这些体验会影响婴儿日后对食物中这些风味的喜爱度和接受度^[3]。Spahn等^[56]研究发现,源自母亲饮食的风味,如酒精、茴香、胡萝卜、大蒜等,能通过羊水和母乳传给婴儿,这种早期的风味体验可能会增加婴儿对类似风味食物的接受程度。Perraud等^[57]研究了696名母亲产前、产后蔬菜摄入量与婴儿蔬菜摄入频率之间的关系,结果表明,母亲的蔬菜摄入量与婴儿蔬菜摄入频率相关,且母亲在产前和产后持续的高蔬菜摄入量会促进婴儿的蔬菜摄入量。

3.2 母乳风味对婴儿行为反应的影响

婴儿特别是新生儿的行为容易受到多种因素的影响,而母乳作为母婴互动的重要纽带,其风味是否能刺激婴儿的吸吮行为及是否有利于婴儿大脑和身体的功能发育,一直以来备受研究者的关注。

Raimbault等^[58]对胎龄30~33周出生的6例早产儿进行研究,与对照组相比,经常处于母乳气味中的婴儿表现出更长的最大吸吮持续时间和更频繁的长时间吸吮,并在以后的母乳喂养中摄入更多的乳汁。另一项研究探讨了母乳气味对通过试管喂养早产儿的影响,结果显示,母乳气味可以促进这些婴儿的非营养性吸吮行为,有助于改善他们的摄食状态和行为反应^[59]。而Hym等^[60]的研究表明,人类新生儿不仅可以识别母乳气味,而且可以根据这种气味改变他们的爬行效率,对促进有发育迟缓风险的婴儿的运动发育具有重要意义。

3.3 母乳风味对婴儿疼痛干预的影响

除了对婴儿生理行为的影响外,母乳味道或气味干预实验证明其可减轻新生儿疼痛。所有新生儿从出生开始都会面临与疼痛相关的采血、疫苗注射

等,因此采取干预措施来减轻新生儿的疼痛至关重要。药物和非药物干预均可用于控制新生儿疼痛,但由于药物干预有一些不良反应,使得非药物干预的使用持续增加。研究表明,母乳风味对婴儿的镇静作用是有效的非药物干预疼痛手段^[61]。Nishitani等^[62]研究了母乳和配方奶粉的气味对常规足跟采血的新生儿疼痛反应的影响,结果表明,相对于配方奶粉,闻到母乳气味的婴儿疼痛反应(哭泣、面部表情和运动状态)有所降低,并且体内的唾液皮质醇(疼痛反应生化指数)水平被抑制。此外,Badiee等^[63]通过疼痛评分、哭闹持续时间和唾液皮质醇水平来评估早产儿的疼痛反应,发现母乳气味可以降低早产儿对疼痛的行为反应,因此嗅觉干预可以作为减轻早产儿疼痛的替代方法。

4 结语与展望

母乳的风味物质组成复杂,包括醛类、酮类、酸类、酯类以及其他与母亲饮食有关的物质,这些物质赋予母乳脂肪味、奶酪味、果香味和青草味等香气,其中,乳脂肪是影响母乳风味的重要成分。目前采用HS-SPME、SBSE和DHS等提取方法与GC-MS、GC-O等检测技术用于母乳中挥发性风味物质的分析。母乳风味对婴儿的饮食偏好、行为反应和疼痛干预方面有重要影响。现有关母乳风味分析存在以下局限:①检测手段复杂、设备价格昂贵等;②对母乳风味的研究大多集中在气味物质上,没有获得更加全面综合的风味信息;③母乳风味感官评价都是基于成人的感受分析,而成人和婴儿的嗅觉敏感度存在差异,可能造成母乳中某些有益于婴儿的风味物质难以被成人识别。未来可以进一步研究婴儿与成人对母乳风味的感知差异,探究乳脂肪组成和母乳风味的关系,将电子鼻和电子舌技术应用于母乳风味研究中,并结合传统感官分析手段表征母乳风味,为将来婴儿配方奶粉模拟母乳风味奠定基础。

参考文献:

- [1] 王兴国. 人乳脂及人乳替代脂[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [2] BEAUCHAMP G K, MENNELLA J A. Early flavor learning and its impact on later feeding behavior[J]. *J Pediatr Gastroenterol Nutr*, 2009, 48 (Suppl 1): S25-S30.
- [3] BEAUCHAMP G K, MENNELLA J A. Flavor perception in human infants: Development and functional significance[J]. *Digestion*, 2011, 83(Suppl 1): 1-6.
- [4] MENNELLA J A, JAGNOW C P, BEAUCHAMP G K. Prenatal and postnatal flavor learning by human infants[J/OL]. *Pediatrics*, 2001, 107(6): E88[2023-12-12]. <https://doi.org/10.1542/peds.107.6.e88>.
- [5] VENTURA A K. Does breastfeeding shape food preferences? Links to obesity[J]. *Ann Nutr Metab*, 2017, 70(Suppl 3): 8-15.
- [6] FORESTELL C A. Flavor perception and preference development in human infants[J]. *Ann Nutr Metab*, 2017, 70(Suppl 3): 17-25.
- [7] AOYAMA S, TOSHIMA T, SAITO Y, et al. Maternal breast milk odour induces frontal lobe activation in neonates: A NIRS study[J]. *Early Hum Dev*, 2010, 86(9): 541-545.
- [8] MARLIER L, SCHAAL B. Human newborns prefer human milk: Conspecific milk odor is attractive without postnatal exposure[J]. *Child Dev*, 2005, 76(1): 155-168.
- [9] COYLE S, ARNOLD H M, GOLDBERG-ARNOLD J S, et al. Olfactory conditioning facilitates diet transition in human infants[J]. *Dev Psychobiol*, 2000, 37(3): 144-152.
- [10] MUELBERT M, BLOOMFIELD F H, PUNDIR S, et al. Olfactory cues in infant feeds: Volatile profiles of different milks fed to preterm infants[J/OL]. *Front Nutr*, 2020, 7: 603090[2023-12-12]. <https://doi.org/10.3389/fnut.2020.603090>.
- [11] 王彤, 何婧, 于玲, 等. 母乳气味刺激用于新生儿疼痛干预的研究进展[J]. *护理学杂志*, 2021, 36(11): 13-15, 39.
- [12] 张明平, 张露平, 程家国. 母乳嗅觉刺激在早产儿喂养中的应用研究进展[J]. *中国初级卫生保健*, 2022, 36(9): 118-120, 123.
- [13] WEI W, JIN Q, WANG X. Human milk fat substitutes: Past achievements and current trends[J]. *Prog Lipid Res*, 2019, 74: 69-86.
- [14] BALLARD O, MORROW A L. Human milk composition: Nutrients and bioactive factors[J]. *Pediatr Clin North Am*, 2013, 60(1): 49-74.
- [15] HE Y, CHEN L, ZHENG L, et al. A comparative study of volatile compounds in breast milk and infant formula from different brands, countries of origin, and stages[J]. *Eur Food Res Technol*, 2022, 248(11): 2679-2694.
- [16] SPITZER J, BUETTNER A. Monitoring aroma changes during human milk storage at -19°C by quantification experiments[J]. *Food Res Int*, 2013, 51(1): 250-256.
- [17] HE Y, CHEN L, LIU W, et al. Comparative analysis of the volatile components in Chinese breast milk from three regions[J]. *Food Sci Biotechnol*, 2023, 32(7): 903-909.
- [18] SARANGAPANI C, RYAN KEOGH D, DUNNE J, et al.

- Characterisation of cold plasma treated beef and dairy lipids using spectroscopic and chromatographic methods [J]. *Food Chem*, 2017, 235: 324–333.
- [19] 宋焕禄. 食品风味化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [20] DEBONG M W, N'DIAYE K, OWSIENKO D, et al. Dietary linalool is transferred into the milk of nursing mothers[J/OL]. *Mol Nutr Food Res*, 2021, 65(23): e2100507 [2023-12-12]. <https://doi.org/10.1002/mnfr.202100507>.
- [21] 谢建春. 香味分析原理与技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2020.
- [22] ZHANG H, ZHANG Y, WANG L, et al. Detection of odor difference between human milk and infant formula by sensory-directed analysis[J/OL]. *Food Chem*, 2022, 382: 132348 [2023-12-12]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132348>.
- [23] YU M, XIE Q, SUN H, et al. Characterization of odor properties of human milk: Effect of inter-individual nutrient differences on key odor-active compounds and odor attributes[J/OL]. *Food Chem*, 2024, 431: 137091 [2023-12-12]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137091>.
- [24] GUO K, ZHANG Y, ZHANG H, et al. Odor changes in breast milk during different storage temperatures and times using GC × GC-O-MS[J/OL]. *Food Res Int*, 2023, 168: 112792 [2023-12-12]. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.112792>.
- [25] YU M, LI T, WANG L, et al. Exploring the visualization of human milk odor profiles: Intuitive characterization and construction of the link between odor compounds and sensory attributes [J/OL]. *Food Chem*, 2024, 436: 137760 [2023-12-12]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137760>.
- [26] SANDGRUBER S, MUCH D, AMANN-GASSNER U, et al. Sensory and molecular characterisation of the protective effect of storage at -80 °C on the odour profiles of human milk[J]. *Food Chem*, 2012, 130(2): 236–242.
- [27] SPITZER J, BUETTNER A. Characterization of aroma changes in human milk during storage at -19 °C [J]. *Food Chem*, 2010, 120(1): 240–246.
- [28] POETTE J, MEKOUÉ J, NEYRAUD E, et al. Fat sensitivity in humans: Oleic acid detection threshold is linked to saliva composition and oral volume[J]. *Flavour Frag J*, 2014, 29(1): 39–49.
- [29] CLARKE H J, GRIFFIN C, RAI D K, et al. Dietary compounds influencing the sensorial, volatile and phytochemical properties of bovine milk [J/OL]. *Molecules*, 2019, 25(1): 26 [2023-12-12]. <https://doi.org/10.3390/molecules25010026>.
- [30] 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.
- [31] AGATONOVIC - KUSTRIN S, GEGECHKORI V I, MORTON D W. QSAR analysis of the partitioning of terpenes and terpenoids into human milk [J]. *Flavour Frag J*, 2022, 37(5): 302–312.
- [32] HAUSNER H, BREDIE W L, MØLGAARD C, et al. Differential transfer of dietary flavour compounds into human breast milk[J]. *Physiol Behav*, 2008, 95(1/2): 118–124.
- [33] LANE A, BOECKLEMANN A, WORONUK G N, et al. A genomics resource for investigating regulation of essential oil production in *Lavandula angustifolia* [J]. *Planta*, 2010, 231(4): 835–845.
- [34] KIRSCH F, BUETTNER A. Characterisation of themetabolites of 1, 8-cineole transferred into human milk: Concentrations and ratio of enantiomers [J]. *Metabolites*, 2013, 3(1): 47–71.
- [35] BUETTNER A. A selective and sensitive approach to characterize odour-active and volatile constituents in small-scale human milk samples[J]. *Flavour Frag J*, 2007, 22(6): 465–473.
- [36] YU M, XIE Q, SONG H, et al. Characterization of the odor compounds in human milk by DHS/GC × GC-O-MS: A feasible and efficient method[J/OL]. *Food Res Int*, 2023, 174: 113597 [2023-12-12]. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113597>.
- [37] ROY S L, FILLONNEAU C, SCHAAL B, et al. Comparative investigation of conventional and innovative headspace extraction methods to explore the volatile content of human milk [J/OL]. *Molecules*, 2022, 27(16): 5299 [2023-12-12]. <https://doi.org/10.3390/molecules27165299>.
- [38] 聂小林. 食品风味分析技术研究进展 [J]. *食品安全导刊*, 2023(4): 156–158.
- [39] 高雅慧, 李子杰. 母乳挥发性成分固相微萃取-气质联用检测条件的优化及测定[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(6): 199–203.
- [40] 张闹, 葛武鹏, 张艳, 等. 基于 HS/SPME-GC/MS 分析不同泌乳期母乳的挥发性成分差异[J]. *中国乳品工业*, 2023, 51(1): 9–14, 56.
- [41] 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.
- [42] 孙琳, 李瑞利, 周雪芳, 等. 气相色谱-嗅觉测量技术及其在茶叶活性香气化合物检测中应用的研究进展

- [J]. 食品工业科技, 2012, 33(16): 396-399, 404.
- [43] SPITZER J, DOUCET S, BUETTNER A. The influence of storage conditions on flavour changes in human milk [J]. *Food Qual Prefer*, 2010, 21(8): 998-1007.
- [44] XU Y, BI S, NIU X, et al. Comparison of aroma active compounds in cold- and hot-pressed walnut oil by comprehensive two-dimensional gas chromatography-olfactory-mass spectrometry and headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry[J/OL]. *Food Res Int*, 2023, 163: 112208[2023-12-12]. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.112208>.
- [45] YU M, YANG P, SONG H, et al. Research progress in comprehensive two-dimensional gas chromatography-mass spectrometry and its combination with olfactometry systems in the flavor analysis field [J/OL]. *J Food Compos Anal*, 2022, 114: 104790 [2023-12-12]. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2022.104790>.
- [46] 廖美燕, 龙鸣, 洪晶, 等. 电子鼻在乳及其制品检测中的应用研究进展[J]. *中国乳业*, 2022(10): 57-64.
- [47] ZENG X, CAO R, XI Y, et al. Food flavor analysis 4.0: A cross-domain application of machine learning [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2023, 138: 116-125.
- [48] 叶美霞, 李荣, 姜子涛, 等. 基于超快速气相电子鼻研究不同类型 UHT 牛奶的挥发性风味特征[J]. *食品科学*, 2022, 43(10): 236-246.
- [49] 宋慧敏, 芦晶, 吕加平, 等. 基于电子鼻和电子舌对牛奶加热程度及风味变化的评价[J]. *中国乳品工业*, 2016, 44(2): 12-15.
- [50] 许凌云, 刁钢, 石小亮, 等. 基于 SPME-GC-MS 技术结合电子鼻电子舌分析不同热处理牛乳风味的差异[J]. *中国食品卫生杂志*, 2023, 35(1): 55-64.
- [51] YUAN N, CHI X, YE Q, et al. Analysis of volatile organic compounds in milk during heat treatment based on E-nose, E-tongue and HS-SPME-GC-MS [J/OL]. *Foods*, 2023, 12(5): 1071[2023-12-12]. <https://doi.org/10.3390/foods12051071>.
- [52] 金螺, 白丽娟, 彭小雨, 等. 采用电子鼻检测羊奶中的牛奶掺入[J]. *食品与发酵工业*, 2015, 41(4): 165-168.
- [53] SCHAAL B, SAXTON T K, LOOS H, et al. Olfaction scaffolds the developing human from neonate to adolescent and beyond[J/OL]. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, 2020, 375 (1800): 20190261 [2023-12-12]. <https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0261>.
- [54] MARLIER L, SCHAAL B, SOUSSIGNAN R. Neonatal responsiveness to the odor of amniotic and lacteal fluids: A test of perinatal chemosensory continuity [J]. *Child Dev*, 1998, 69(3): 611-623.
- [55] JULIE M. The flavor world of childhood [J/OL]. *Front Integr Neurosci*, 2015, 9: 7 [2023-12-12]. <https://doi.org/10.3389/conf.frint.2015.03.00007>.
- [56] SPAHN J M, CALLAHAN E H, SPILL M K, et al. Influence of maternal diet on flavor transfer to amniotic fluid and breast milk and children's responses: A systematic review [J]. *Am J Clin Nutr*, 2019, 109(Suppl 7): 1003S-1026S.
- [57] PERRAUD E, PARKER H W, TOVAR A, et al. The relationship between maternal prenatal and postnatal vegetable intake and repeated measures of infant vegetable intake frequency in a national U. S. sample [J/OL]. *Appetite*, 2022, 168: 105781 [2023-12-12]. <https://doi.org/10.1016/j.appet.2021.105781>.
- [58] RAIMBAULT C, SALIBA E, PORTER R H. The effect of the odour of mother's milk on breastfeeding behaviour of premature neonates [J]. *Acta Paediatr*, 2007, 96(3): 368-371.
- [59] BINGHAM P M, CHURCHILL D, ASHIKAGA T. Breast milk odor via olfactometer for tube-fed, premature infants [J]. *Behav Res Methods*, 2007, 39(3): 630-634.
- [60] HYM C, FORMA V, ANDERSON D I, et al. Newborn crawling and rooting in response to maternal breast odor [J/OL]. *Dev Sci*, 2021, 24(3): e13061 [2023-12-12]. <https://doi.org/10.1111/desc.13061>.
- [61] ÇAMUR Z, ERDOĞAN Ç. The effects of breastfeeding and breast milk taste or smell on mitigating painful procedures in newborns: Systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials [J]. *Breastfeed Med*, 2022, 17(10): 793-804.
- [62] NISHITANI S, MIYAMURA T, TAGAWA M, et al. The calming effect of a maternal breast milk odor on the human newborn infant [J]. *Neurosci Res*, 2009, 63(1): 66-71.
- [63] BADIEE Z, ASGHARI M, MOHAMMADIZADEH M. The calming effect of maternal breast milk odor on premature infants [J]. *Pediatr Neonatol*, 2013, 54(5): 322-325.