

全脂乳粉乳味不足物质基础及机制解析

宋莉莎¹, 刘兴海², 贺凯茹¹, 赵三军², 宁淼¹, 张淑丽³, 姚国新^{2*}, 武俊瑞^{1*}

(1. 沈阳农业大学食品学院, 辽宁省食品发酵技术工程研究中心, 沈阳市微生物发酵技术创新重点实验室, 辽宁沈阳 110866)(2. 内蒙古蒙牛乳业(集团)股份有限公司, 内蒙古呼和浩特 010010)
(3. 蒙牛乳业(沈阳)有限责任公司, 辽宁沈阳 100122)

摘要: 为探究全脂乳粉乳味不足的原因, 采用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用技术(Headspace Solid-phase Microextraction-gas Chromatography-mass Spectrometry, HS-SPME-GC-MS)对多种全脂乳粉样品中的挥发性香气成分进行测定, 并结合相对气味活度值(Relative Odor Activity Value, ROAV)进行分析。研究结果表明六份样品中, 共检出酸、酮、醛、醇、酯、芳香族化合物等 87 种挥发性成分。正常样品 R 中酮类物质含量为 9.65%, 乳味不足样品 R1-R5 中酮类物质有所增加, 分别增加了 1.11%、0.85%、2.97%、0.18%、8.95%; 同时, 酯类物质含量显著下降: 样品 R 中酯类物质的含量为 15.56%, 乳味不足样品 R1-R5 中酯类物质的含量分别下降了 12.09%、9.35%、7.14%、6.70%、6.20%, 由于大多数酯类物质具有花果香气, 对提升乳粉风味具有积极作用, 因此酯类物质含量的降低, 更易导致乳味不足的情况出现。其中乳味正常样品 R 独有的香气成分是香兰素, 含量为 7.30%, 提供了浓郁的奶香味且风味贡献突出, 同时 ROAV 值表明香兰素和 4-羟基-2,5-二甲基-3(2H)-呋喃酮对乳粉风味具有重要贡献, 该结果为今后进一步探究乳粉乳味不足的原因提供了物质基础及机制解析。

关键词: 全脂乳粉; 关键性风味物质; 顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用; 相对气味活度值; 物质基础

文章编号: 1673-9078(2025)10-352-363

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.10.1174

Analysis of the Material Basis and Mechanism of Milk Flavour Deficiency in Whole Milk Powder

SONG Lisha¹, LIU Xinghai², HE Kairu¹, ZHAO Sanjun², NING Miao¹,
ZHANG Shuli³, YAO Guoxin^{2*}, WU Junrui^{1*}

(1. College of Food Science, Shenyang Agricultural University, Liaoning Food Fermentation Technology Engineering Research Centre, Shenyang Key Laboratory of Microbial Fermentation Technology Innovation, Shenyang 110866, China)
(2. Inner Mongolia Mengniu Dairy (Group) Joint-stock Limited Liability Company, Hohhot 010010, China)
(3. Mengniu Dairy (Shenyang) Limited Liability Company, Shenyang 100122, China)

Abstract: In order to investigate the reasons for the lack of milky flavor in whole milk powder, headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS) was used for the determination of volatile aroma

引文格式:

宋莉莎,刘兴海,贺凯茹,等.全脂乳粉乳味不足物质基础及机制解析[J].现代食品科技,2025,41(10):352-363.

SONG Lisha, LIU Xinghai, HE Kairu, et al. Analysis of the material basis and mechanism of milk flavour deficiency in whole milk powder [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(10): 352-363.

收稿日期: 2024-08-10; 修回日期: 2024-12-01; 接受日期: 2024-12-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(32172279); 蒙牛乳业横向合作项目(202309186027032916); 沈阳市科技创新平台项目(批准号: 21-104-0-14; 21-104-0-28)

作者简介: 宋莉莎(2001-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品生物技术, E-mail: song012266@126.com

通讯作者: 武俊瑞(1977-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品科学, E-mail: junruiwu@126.com; 共同通讯作者: 姚国新(1978-)男, 硕士, 工程师, 研究方向: 食品质量管理, E-mail: yaoguoxin@mengniu.cn

components in a variety of whole milk powder. The volatile aroma components in the samples were determined in combination with Relative Odor Activity Value (ROAV). The results showed that a total of 87 volatile components including acids, ketones, aldehydes, alcohols, esters and aromatic compounds were detected in the six samples. The content of ketones was 9.65% in the normal sample R, and increased in R1-R5 samples with insufficient milky flavor (increased by 1.11%, 0.85%, 2.97%, 0.18%, and 8.95%, respectively); Meanwhile, the content of esters decreased significantly: the content of esters in sample R was 15.56%, and the content of esters in the R1-R5 samples with insufficient milky flavor decreased by 12.09%, 9.35%, 7.14%, 6.70% and 6.20%, respectively. Since most of the esters have floral and fruity aromas, which has a positive effect on the enhancement of milk powder's flavour. Therefore, a decrease in the ester content would more likely lead to insufficient milky flavour. Among them, the unique aroma component of the R sample with normal milky flavour was vanillin (its content: 7.30%), which provided a strong milky aroma and an outstanding flavour contribution. Meanwhile, the ROAV value indicated that vanillin and 4-hydroxy-2,5-dimethyl-3(2H)-furanone made important contributions to the flavour of the milk powder. These results provide a material basis and mechanistic explanation for further investigation on the causes of the lack of milky flavour in milk powders in the future.

Key words: whole milk powder; critical flavour substances; headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry; relative odour activity values; substance basis

全脂乳粉是含乳饮料、冷饮、复原乳、干法工艺婴幼儿配方奶粉等乳制品的主要原料^[1]。乳粉的风味特征是关乎乳粉品质的重要方面，很大程度上决定着消费者的购买意愿^[2]。对乳粉的挥发性风味物质进行测定，可明确影响食品香气的物质，评价其营养相关特性和新鲜度，从而影响对食品的全面评价。实验表明乳粉风味物质主要包括醛、酮、酸、醇、酯、烃等组分，其中醛类、酮类和酯类是乳粉中的主要挥发物^[3]。

挥发性风味物质成分萃取方法有：同时蒸馏萃取法（需要在相对较高的温度下萃取风味物质，可能使得部分物质发生反应而损失）、减压蒸馏萃取法、超临界流体萃取，顶空固相微萃取法等^[4]。不同方法各有优缺点，其中同时蒸馏萃取法和顶空固相微萃取法应用较广。目前，国内外对于食品中挥发性成分的分离鉴定主要采用气相色谱-质谱联用（Gas Chromatograph-Mass Spectrometer, GC-MS）技术^[5]。在乳制品中的应用主要是对巴氏杀菌乳、超高温灭菌乳等进行分析 and 检测^[6]。例如罗叶名^[7]、韩亚平^[8]、赵晓璇等^[9]在对发酵乳、驴乳及调制乳所进行的研究。

由于涉及到乳粉的相关试验较少，所以对于乳粉乳味不足的研究鲜有发现。本次主要针对全脂乳粉乳味不足的问题，并结合相对气味活度值^[10]进一步分析乳粉中的关键风味物质，对探究乳粉乳味不足的原因提供了参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

由 Z 品牌 M 工厂提供经过 10 人感官鉴评后的乳

粉样品 6 份（生产日期为 2023 年 10 月）。其中乳味浓郁的全脂乳粉 1 份，编号为 R；乳味相对不足的全脂乳粉 5 份，分别编号为 R1、R2、R3、R4、R5。

0.01 mol/L 的碘标准溶液、饱和碘化钾溶液、氯仿-冰乙酸混合液（4:6），国药集团化学试剂有限公司。

BSM-220.4 万分之一天平，上海卓精电子科技有限公司；Zetasizer Nano ZSE 纳米粒度及 Zeta 电位分析仪，英国 Malvern Panalytical 公司；Eon 酶标仪，美国 BIO-TEK 公司；D799801 脂肪酶（Lipase, LPS）活性检测试剂盒，生工生物工程（上海）股份有限公司；7890A-5975C 型气相色谱-质谱联用仪，美国 Agilent 公司；50/30 μm DVB/CAR/PDMS 萃取头，美国 Supelco 公司。

1.2 检测方法

1.2.1 感官评价

将 6 份全脂乳粉用温水冲泡，并按照表 1 的评分标准进行评价^[11]。评分依次为 R（47.4），R1（40.6），R2（40.3），R3（39.3），R4（40.4），R5（38.2）。

1.2.2 水分含量

根据 GB 5009.3-2016《食品中水分的测定》^[12]中的第一法，直接干燥法，来测定样品中的水分含量。

1.2.3 溶解度

根据 GB 5413.29-2010《食品安全国家标准婴幼儿食品和乳品溶解性的测定》^[13]中的第二法测定样品的溶解度。

1.2.4 过氧化值

根据 Li 等^[14]的方法测定样品的过氧化值。

表 1 感官评价标准及评分
Table 1 Sensory evaluation criteria and scores

项目	评分标准	评分 / 分					
		R	R1	R2	R3	R4	R5
气味	具有牛乳纯正的乳香味，无其他异味（17~20 分）						
	乳香味平淡或者有轻微异味（9~16 分）	18.9	15.2	14.8	14.4	15.1	12.8
	基本无奶香味或有异味等（1~8 分）						
口感	口感丝滑且具有牛乳纯正的乳香味（8~10 分）						
	口感稍差，乳香味平淡（5~7 分）	9.5	7.1	7.2	6.9	7.3	6.8
	口感黏腻且有异味（1~4 分）						
组织状态	颗粒均匀、适中，松散，流动性好（8~10 分）						
	颗粒较大，不松散，流动性一般（5~7 分）	9.6	9.1	8.9	9.2	9.1	9.3
	颗粒不均匀，流动性差（1~4 分）						
色泽	色泽均一，有光泽（8~10 分）						
	色泽基本均一，略有光泽（5~7 分）	9.4	9.2	9.4	8.8	8.9	9.3
	色泽基本均一，无光泽（1~4 分）						

1.2.5 粒径

样品经超纯水稀释 100 倍之后过膜使用，再使用粒径分析仪测定乳粉粒径。测试时保持温度为 25 ℃ 恒温；测试参数：水的折光指数为 1.33，实际折射率为 1.59。

1.2.6 脂肪酶活性

脂肪酶（LPS）活性检测试剂盒——比色法。
以油酸标准溶液浓度为横坐标，其 710 nm 吸光度为纵坐标，绘制标准曲线 $y=0.017\ 7x+0.066\ 3$ ($R^2=0.991\ 6$)，计算公式：

$$B = \frac{x}{T}$$
(1)

式中：

B——脂肪酶活性，U/mL；
T——催化反应时间，10 min；
x——油酸浓度，μmol/mL。

1.2.7 挥发性风味物质

1.2.7.1 样品前处理

将 18 份乳粉（6 份乳粉取 3 次进行 3 次平行）与 40 ℃ 的去离子水以质量比 1:10 配制于离心管中，充分溶解并以 10 000 r/min 的转速离心 10 min，取上层脂肪于顶空瓶中。在 60 ℃ 水浴中加热平衡 10 min 后再萃取 20 min。在进样口 250 ℃ 的条件下迅速解吸 5 min，抽出萃取头，同时启动仪器采集数据。

1.2.7.2 GC 条件

HP-FFAP 毛细管柱（30 μm×0.25 m×0.25 mm）；进样口 250 ℃；起始温度 40 ℃，保持 3 min，以 5 ℃/min 升温至 60 ℃，然后以 3 ℃/min 升温至 150 ℃，保持 2 min，最后以 10 ℃/min 升温至 230 ℃。载气为

He，流量：1 mL/min；进样量 1 μL，不分流进样。

1.2.7.3 MS 条件

电离源为 EI，电子能量 70 eV，离子源温度 230 ℃，四级杆温度 150 ℃；扫描范围： m/z 41~520。

1.2.7.4 定性定量分析

所有样品进行的测定，取测得各样品物质的三次数据平均值进行分析。

定性定量分析：将色谱图中的每个峰与安捷伦系统图谱库（W10 N14.L 和 NIST14.L）中已知化合物的质谱数据进行比对，保留相似度大于 80 的化合物。被测组分的相对含量计算公式为：

$$D = \frac{m_1}{m} \times 100\%$$
(2)

式中：

D——挥发性物质相对含量，%；
 m_1 ——挥发性物质峰面积；
m——挥发性物质峰面积总和。

1.2.7.5 ROAV 值计算

定义对样品风味贡献最大的组分为 $ROAV_{max}=100$ ，其他香气成分则有：

$$ROAV = \frac{C_i}{C_{max}} \times \frac{T_{max}}{T_i} \times 100$$
(3)

式中：

C_i ——香气成分的相对含量，%；
 T_i ——香气成分的感觉阈值，μg/kg；
 C_{max} ——对香气贡献最大组分的相对含量，%；
 T_{max} ——对香气贡献最大组分相对应的感觉阈值，μg/kg。

1.3 数据处理

试验数据取 3 次重复结果的平均值，使用 Origin 2022 进行绘图，SPSS Statistic 27 进行数据分析。

表 2 理化指标数据
Table 2 Physical and chemical indicator data

编号	水分含量/%	溶解度/(g/100 g)	过氧化值/(mmol/kg)	粒径/nm	脂肪酶活性/(U/mL)
R	3.47 ± 0.03 ^b	99.75 ± 0.33 ^a	10.31 ± 0.01 ^c	224.6 ± 4.0 ^b	0.17 ± 0.03 ^d
R1	3.48 ± 0.01 ^b	99.38 ± 0.16 ^b	8.02 ± 0.01 ^f	175.2 ± 2.3 ^c	0.59 ± 0.03 ^b
R2	3.63 ± 0.03 ^a	99.78 ± 0.18 ^a	9.14 ± 0.00 ^c	171.4 ± 1.7 ^c	1.11 ± 0.00 ^a
R3	2.49 ± 0.07 ^c	99.89 ± 0.09 ^a	10.72 ± 0.01 ^b	224.5 ± 8.9 ^a	0.32 ± 0.00 ^c
R4	2.29 ± 0.08 ^d	99.80 ± 0.09 ^a	10.18 ± 0.02 ^d	246.2 ± 7.8 ^a	0.34 ± 0.03 ^c
R5	2.55 ± 0.01 ^c	99.84 ± 0.04 ^a	11.73 ± 0.00 ^a	217.4 ± 6.5 ^b	0.10 ± 0.00 ^c

注：同列字母不同表示显著差异（ $P<0.05$ ）。

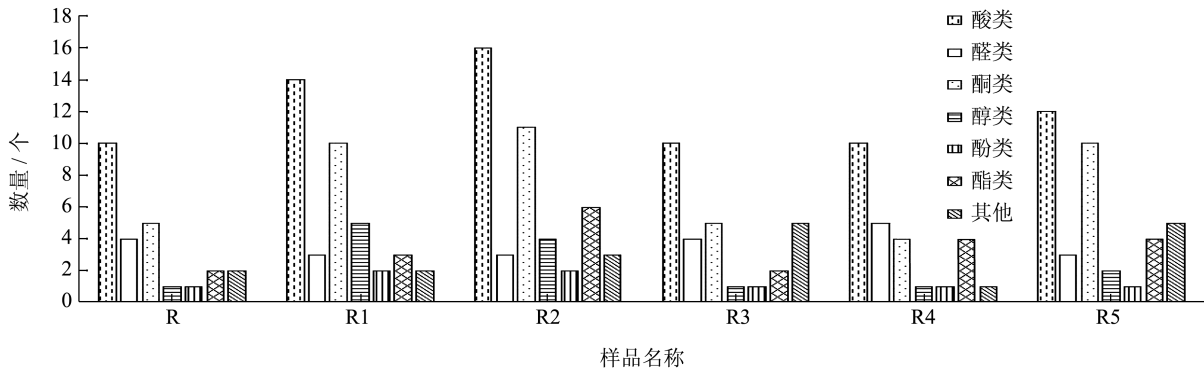


图 1 挥发性风味物质种类组成
Fig.1 Volatile flavour composition

2 结果与讨论

2.1 全脂乳粉理化指标分析

水分含量会影响美拉德反应和脂肪氧化速度：一方面，水分含量过高易发生结块的现象，导致粉末氧化变质速率加快，促进美拉德反应。当水分含量升至5%以上时，蛋白质容易发生变性、且容易与糖类发生美拉德反应，最终导致乳粉出现结块、褐变、溶解性下降的现象并产生不良风味^[15]。本次试验所有样品的水分含量均低于5%，从外观及溶解度上来看，并没有出现上述情况。另一方面，水分含量过低则会造成乳复原困难，易发生脂肪氧化反应。研究表明若水分低于1.88%容易引起奶粉的氧化变质^[16]。奶粉中的水分含量过低会导致奶粉变得非常干燥，更容易吸收空气中的水分，导致奶粉出现结块、变质和氧化^[17]。如表2所示，样品R3、R4、R5水分含量均低于R，可能会对乳粉品质造成一定影响。

乳粉的溶解度是代表乳粉质量优劣的重要指标之一^[18]。水分含量较高时，一方面会导致乳粉颗粒膨胀，降低其溶解度；另一方面还会促进乳粉中的成分发生化学反应，形成不易溶解的物质，从而对乳粉品质造成不良影响。

过氧化值是指在脂肪氧化时生成的过氧化物的含量，它可以作为一种衡量初期脂肪氧化程度的一个重要标志。测定乳粉的过氧化值对于监测其货架期具有重要意义^[19]。乳粉中不饱和脂肪酸的氧化包括诱导期、传播期和终止期，生成包括氢过氧化物在内的一系列物质，氢过氧化物会分解形成大量低分子产物如醛、酮、酸和醇等，这些都可能使乳粉出现不良气味^[20]。样品R5同样品R相比过氧化值显著较高，可能是由于在加热过程和贮藏过程中，不饱和脂肪酸易与空气接触被氧化导致^[21]。

乳粉的粒径分布决定其外观、复溶性能、颗粒沉降速率等^[22]。乳粉粒径的变化不仅与乳糖的结晶有关，而且还与贮藏温度、时间和Aw等因素有关。乳粉粒径大会降低稳定性，乳粉粒径小会使乳粉颗粒比表面积大，增加脂肪与氧气的接触面积，加速脂肪的氧化过程，产生氧化味、陈旧感^[23]。粒径较小的例如样品R1、R2的乳粉粒径分别为175.2 nm和171.4 nm，远远小于其他样品。因此，在贮藏过程中，更容易和氧气发生反应，使乳粉乳味不足。

脂肪酶将脂肪分解为甘油和脂肪酸，影响乳制品感官如质地、味道、香气和营养价值。大多数嗜冷菌和耐热菌可以产生脂肪酶、蛋白酶和磷脂酶，而这些酶大部分属于金属蛋白酶，对热处理有极好的耐受性。

研究发现奶粉中分离出的耐热菌，其产生的胞内和胞外蛋白酶和脂肪酶热处理后并未完全失活，残留的脂肪酶可以使其产生哈喇味和脂肪酸败味等不良风味。本试验中，样品 R 的脂肪酶活性远低于样品 R1、R2、R3、R4。

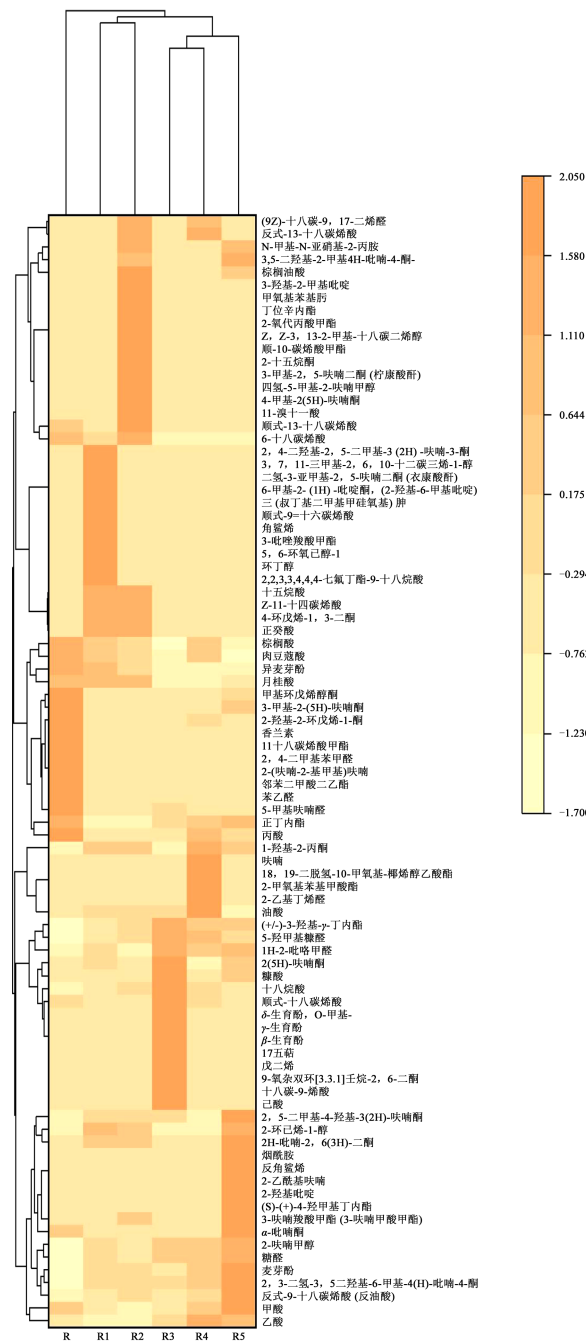


图 2 挥发性风味物质聚类热图

Fig.2 Heat map of volatile flavour substances clustering

乳粉的各项理化指标之间相互联系，又互相影响。水分含量直接影响乳粉的溶解度，在本次试验中当水分含量在 2.49%~3.48% 呈负相关关系。乳粉粒径的变

化既受到贮藏温度、时间和水分活度等因素的影响，同时粒径又会影响乳粉的氧化。

2.2 乳粉挥发性风味物质组成分析

2.2.1 挥发性风味物质种类组成分析

由图 1 可知，样品 R、R1、R2、R3、R4、R5 挥发性风味物质种类数量分别为 25、39、45、28、26、37 种。不同样品间差异较大，所有样品中种类最多的物质是酸类、最少的物质是酚类。

2.2.2 挥发性风味物质聚类热图分析

为明确不同样品之间的风味物质差异，将 6 份样品的挥发性风味物质绘制成热图。由图 2 可知，可以直观地看到不同样品之间相对含量及醛类、酯类、醇类等香气成分存在差异性。样品 R1 和 R2，R3 和 R4 之间纵向聚类，有一定的相似性。黄色代表低含量，橙色代表高含量，热图中颜色越深代表该成分含量越高。

2.3 挥发性风味物质分析

由图 3 可知，酸类物质是乳粉挥发性风味的主要组成部分，占比最高。特别是在样品 R1 和 R2 中，分别占比 62.37% 和 62%。在乳味正常样品 R 中，酯类物质是除酸类物质之外的第二大类物质，含量为 15.55%，远高于乳味不足样品。样品 R 中酮类物质的含量为 9.65%，低于样品 R1、R2、R3、R4、R5。

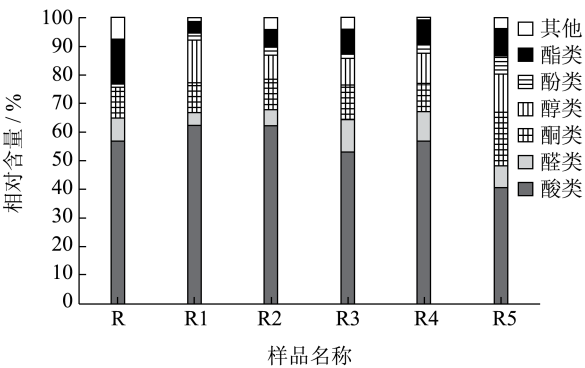


图 3 挥发性风味物质含量组成

Fig.3 Volatile flavour content composition

2.3.1 酸类化合物

酸类物质是乳粉的主要风味物质，也是含量最丰富的挥发性物质，由乳粉中游离脂肪酸挥发而形成。它们一方面是挥发性成分，另一方面是醇、醛和酯等其他化合物的前体。酸类物质通常具有较高的阈值，不容易被人体嗅觉器官捕获^[24]。脂肪酸类化合物风味阈值低并且风味特征显著^[25]。

表 3 挥发性风味物质总表

Table 3 Summary table of volatile flavouring substances

分类	中文名称	CAS 编号	保留时间/min	相对含量/%					
				R	R1	R2	R3	R4	R5
酸类	乙酸	64-19-7	18.91	4.82 ± 0.11	4.68 ± 0.08	4.22 ± 0.09	6.36 ± 0.07	8.89 ± 0.04	7.94 ± 0.14
	甲酸	64-18-6	20.59	3.84 ± 0.18	1.91 ± 0.03	1.1 ± 0.15	2.25 ± 0.01	3.66 ± 0.06	5.95 ± 0.07
	丙酸	79-09-4	22.44	1.03 ± 0.01	—	—	—	0.69 ± 0.04	0.25 ± 0.01
	己酸	142-62-1	34.07	—	—	—	0.7 ± 0.02	—	—
	正癸酸	334-48-5	45.07	—	1.04 ± 0.04	1.03 ± 0.06	—	—	—
	6-十八碳烯酸	1000336-66-8	45.81	1.38 ± 0.03	0.41 ± 0.05	1.6 ± 0.05	—	—	—
	糠酸	88-14-2	46.16	—	—	—	5.4 ± 0.03	—	1.97 ± 0.03
	月桂酸	143-07-7	47.82	2.87 ± 0.01	2.42 ± 0.01	2.62 ± 0.06	—	—	1 ± 0.02
	十八碳-9-烯酸	1000190-13-7	48.99	—	—	—	3.22 ± 0.02	—	—
	11-溴十一酸	2834-05-1	50.81	—	—	2.37 ± 0.04	—	—	—
	肉豆蔻酸	544-63-8	51.95	9.4 ± 0.12	7.28 ± 0.02	5.84 ± 0.02	4.39 ± 0.03	7.67 ± 0.14	3.61 ± 0.07
	反式-9-十八碳烯酸	112-79-8	52.05	—	0.38 ± 0.02	1.11 ± 0.06	0.45 ± 0.03	1.15 ± 0.02	3.07 ± 0.03
	Z-11-十四碳烯酸	1000130-83-3	52.58	—	0.98 ± 0.01	0.91 ± 0.03	—	—	—
	十八烷酸	57-11-4	53.18	—	2.71 ± 0.03	4.65 ± 0.03	18.31 ± 0.16	3.57 ± 0.04	2.69 ± 0.03
	顺式-十八碳烯酸	506-17-2	53.45	1.1 ± 0.02	—	—	7.47 ± 0.02	1.02 ± 0.02	—
	顺式-13-十八碳烯酸	13126-39-1	54.02	1.62 ± 0.01	—	3.46 ± 0.02	—	—	—
	油酸	112-80-1	54.21	2.55 ± 0.02	4.95 ± 0.2	4.74 ± 0.04	4.65 ± 0.03	9.59 ± 0.08	1.45 ± 0.02
	十五烷酸	1002-84-2	55.03	—	3.59 ± 0.1	3.41 ± 0.03	—	—	1.85 ± 0.03
	2,2,3,3,4,4,4-七氟丁酯-9-十八烷酸	1000376-61-4	55.74	—	1.22 ± 0.03	—	—	—	—
	反式-13-十八碳烯酸	693-71-0	57.14	—	—	1.59 ± 0.03	—	1.47 ± 0.02	—
醛类	棕榈酸	57-10-3	59.18	28.24 ± 0.26	21.69 ± 0.14	16.35 ± 0.16	—	19.16 ± 0.19	7.8 ± 0.08
	棕榈油酸	373-49-9	60.07	—	—	6.97 ± 0.08	—	—	3.06 ± 0.03
	顺式-9-十六碳烯酸	1000333-19-5	60.10	—	9.09 ± 0.04	—	—	—	—
	糠醛	98-01-1	19.88	1.28 ± 0.02	2.21 ± 0.04	1.85 ± 0.01	2.58 ± 0.05	2.7 ± 0.04	3.32 ± 0.04
	5-甲基呋喃醛	620-02-0	24.62	4.35 ± 0.07	—	—	1.16 ± 0.04	—	—
	2-乙基丁烯醛	19780-25-7	24.68	—	—	—	—	0.17 ± 0.01	—
	苯乙醛	000122-78-1	27.15	0.63 ± 0.01	—	—	—	—	—
	2,4-二甲基苯甲醛	15764-16-6	34.25	1.82 ± 0.03	—	—	—	—	—
	1H-2-吡咯甲醛	1003-29-8	39.67	—	0.11 ± 0.03	—	0.27 ± 0.02	0.14 ± 0.01	0.19 ± 0.01
	5-羟甲基糠醛	67-47-0	47.13	—	2.1 ± 0.02	3.04 ± 0.03	7.01 ± 0.16	6.47 ± 0.09	4.18 ± 0.04
	(9Z)-十八碳-9,17-二烯醛	56554-35-9	57.90	—	—	1.23 ± 0.02	—	1.02 ± 0.02	—

续表 3									
分类	中文名称	CAS 编号	保留时间/min	相对含量/%					
				R	R1	R2	R3	R4	R5
酮类	1-羟基-2-丙酮	116-09-6	14.22	—	1.38 ± 0.03	1.19 ± 0.02	—	2.05 ± 0.04	1.52 ± 0.02
	3-甲基-2-（5H）-呋喃酮	22122-36-7	21.31	0.35 ± 0.07	—	—	—	—	0.13 ± 0.02
	4-甲基-2(5H)-呋喃酮	6124-79-4	21.43	—	—	0.27 ± 0.02	—	—	—
	2,4-二羟基-2,5-二甲基-3（2H）-呋喃-3-酮	10230-62-3	22.87	—	0.67 ± 0.02	—	—	—	—
	4-环戊烯-1,3-二酮	930-60-9	24.52	—	0.72 ± 0.02	0.75 ± 0.02	—	—	—
	α-吡喃酮	504-31-4	28.87	0.25 ± 0.01	—	—	—	—	0.56 ± 0.03
	3-甲基-2,5-呋喃二酮	616-02-4	29.12	—	—	0.1 ± 0.02	—	—	—
	二氢-3-亚甲基-2,5-呋喃二酮	2170-03-8	29.12	—	0.09 ± 0.02	—	—	—	—
	2(5H)-呋喃酮	497-23-4	30.22	0.87 ± 0.01	1.21 ± 0.04	0.95 ± 0.02	2.09 ± 0.02	0.82 ± 0.01	1.46 ± 0.04
	2-羟基-2-环戊烯-1-酮	10493-98-8	30.89	7.44 ± 0.04	1.4 ± 0.02	1.02 ± 0.01	0.95 ± 0.04	1.93 ± 0.02	1.47 ± 0.05
	甲基环戊烯醇酮	80-71-7	33.03	0.75 ± 0.02	—	—	—	—	0.17 ± 0.01
	2H-吡喃-2,6(3H)-二酮	5926-95-4	38.35	—	0.89 ± 0.02	0.9 ± 0.03	—	—	2.36 ± 0.05
	4-羟基-2,5-二甲基-3(2H)-呋喃酮	3658-77-3	39.92	—	0.45 ± 0.01	0.5 ± 0.01	0.56 ± 0.02	—	1.39 ± 0.03
	2-十五烷酮	2345-28-0	43.85	—	—	0.56 ± 0.04	—	—	—
	2,3-二氢-3,5二羟基-6-甲基-4(H)-吡喃-4-酮	28564-83-2	44.25	—	3.34 ± 0.12	3.51 ± 0.03	4.15 ± 0.05	5.04 ± 0.01	8.62 ± 0.05
	3,5-二羟基-2-甲基 4H-吡喃-4-酮-	1073-96-7	44.70	—	—	0.76 ± 0.01	—	—	0.93 ± 0.02
	2-羟基-6-甲基吡啶	3279-76-3	44.90	—	0.62 ± 0.02	—	—	—	—
	9-氧杂双环[3.3.1]壬烷-2,6-二酮	20797-79-9	46.01	—	—	—	4.87 ± 0.12	—	—
醇类	2-呋喃甲醇	98-00-0	27.04	1.49 ± 0.06	8.53 ± 0.01	6.29 ± 0.04	8.98 ± 0.22	10.43 ± 0.14	12.84 ± 0.1
	2-环己烯-1-醇	822-67-3	32.00	—	0.63 ± 0.03	0.48 ± 0.01	—	—	0.96 ± 0.02
	环丁醇	2919-23-5	41.25	—	4.39 ± 0.03	—	—	—	—
	四氢-5-甲基-2-呋喃甲醇	6126-49-4	46.84	—	—	1.19 ± 0.03	—	—	—
	5,6-环氧己醇-1	21915-57-1	46.84	—	1 ± 0.02	—	—	—	—
	3,7,11-三甲基-2,6,10-十二碳三烯-1-醇	4602-84-0	56.48	—	0.18 ± 0.01	—	—	—	—
	Z, Z-3,13-2-甲基-十八碳二烯醇	1000130-90-5	56.65	—	—	0.53 ± 0.04	—	—	—
酚类	异麦芽酚	3420-59-5	26.13	0.83 ± 0.02	0.57 ± 0.02	0.27 ± 0.03	—	—	—
	麦芽酚	118-71-8	37.90	—	1.95 ± 0.03	2.28 ± 0.02	1.92 ± 0.03	2.92 ± 0.13	5.9 ± 0.06

续表 3									
分类	中文名称	CAS 编号	保留时间/min	相对含量/%					
				R	R1	R2	R3	R4	R5
酯类	2-氧代丙酸甲酯	600-22-6	19.66	—	—	1.06 ± 0.02	—	—	—
	正丁内酯	96-48-0	26.01	1.74 ± 0.03	0.27 ± 0.01	0.21 ± 0.02	0.98 ± 0.03	1.16 ± 0.06	1.34 ± 0.01
	3-呋喃羧酸甲酯	13129-23-2	38.85	—	—	0.42 ± 0.04	—	—	1.36 ± 0.02
	3-吡唑羧酸甲酯	15366-34-4	38.85	—	0.42 ± 0.03	—	—	—	—
	2-甲氧基苯基甲酸酯	1000368-70-7	39.60	—	—	—	—	1.13 ± 0.02	—
	丁位辛内酯	698-76-0	44.51	—	—	0.41 ± 0.02	—	—	—
	顺-10-碳烯酸甲酯	1000333-62-1	45.87	—	—	0.65 ± 0.04	—	—	—
	邻苯二甲酸二乙酯	84-66-2	46.24	8.56 ± 0.06	—	—	—	—	—
	(S)-(+)-4-羟甲基丁内酯	32780-06-6	46.84	—	—	—	—	—	1.39 ± 0.01
	(+/-)-3-羟基-γ-丁内酯	5469-16-9	48.33	—	2.78 ± 0.05	3.47 ± 0.03	7.44 ± 0.08	5.75 ± 0.04	5.27 ± 0.13
	11 十八碳烯酸甲酯	52380-33-3	49.94	5.25 ± 0.03	—	—	—	—	—
	18,19-二脱氢-10-甲氧基-椰烯醇乙酸酯	56053-13-5	55.76	—	—	—	—	0.83 ± 0.01	—
其他	2-乙酰基呋喃	1192-62-7	21.68	—	—	—	—	—	0.22 ± 0.04
	2-(呋喃-2-基甲基)呋喃	1197-40-6	26.46	0.24 ± 0.01	—	—	—	—	—
	戊二烯	591-95-7	28.84	—	—	—	1.07 ± 0.01	—	—
	呋喃	110-00-9	28.94	—	—	—	—	0.57 ± 0.03	—
	甲氧基苯基肼	1000222-86-6	31.12	—	—	1.57 ± 0.02	—	—	—
	三(叔丁基二甲基甲硅氧基)肼	1000366-57-5	33.77	—	1.09 ± 0.01	—	—	—	—
	香兰素	121-33-5	43.78	7.3 ± 0.02	—	—	—	—	—
	3-羟基-2-甲基吡啶	1121-25-1	44.90	—	—	0.62 ± 0.03	—	—	—
	N-甲基-N-亚硝基-2-丙胺	30533-08-5	45.19	—	—	1.95 ± 0.06	—	—	1.54 ± 0.06
	2-羟基吡啶	142-08-5	46.09	—	—	—	—	—	0.6 ± 0.02
	17-五萜	6971-40-0	47.07	—	—	—	2.51 ± 0.01	—	—
	烟酰胺	98-92-0	56.46	—	—	—	—	—	0.34 ± 0.01
	反角鲨烯	7683-64-9	56.61	—	—	—	—	—	1.3 ± 0.03
	角鲨烯	111-02-4	57.90	—	0.65 ± 0.02	—	—	—	—
	δ-生育酚, O-甲基-	1000374-72-8	59.95	—	—	—	0.1 ± 0.02	—	—
	β-生育酚	148-03-8	60.34	—	—	—	0.13 ± 0.01	—	—
	γ-生育酚	7616-22-0	60.70	—	—	—	0.03 ± 0.01	—	—

注: —. 未检测出该物质, 表 4 同。

如表3所示,在六种样品所测得的酸类物质中,都含有乙酸、甲酸、肉豆蔻酸、油酸。在样品R1、R2中检测到正癸酸,含量分别是1.03%、1.04%,其具有酸腐味,脂肪味等令人不愉快的味道,对乳粉风味有不良影响。样品R1、R2、R3、R4和样品R相比油酸含量较高,分别为4.95%、4.74%、4.65%、9.59%,其具有猪油气味、腐败哈喇味,在一定程度上能够反应乳粉氧化程度,影响乳粉风味。肉豆蔻酸具有奶酪以及油脂的味道,有利于乳粉风味的提升。这和本试验结果数据相吻合。它在乳味正常样品中的含量为9.40%,在所有样品中的含量最高;在样品R1、R2、R3、R4、R5中含量分别为7.28%、5.84%、4.39%、7.67%、3.61%。

2.3.2 醛酮类化合物

乳制品中的醛主要来源于不饱和脂肪酸的氧化、甘油三酯的水解或美拉德反应中的Strecker降解^[26]。在乳制品中,醛类物质的形成主要通过美拉德反应和脂肪酸氧化两条路径产生。醛类阈值相对较低,对风味贡献较大^[27]。在六份样品所测得的醛类物质中,都含有糠醛^[28]。仅在R样品中检出苯乙醛和2,4-二甲基苯甲醛等芳香醛,含量分别为0.63%、1.82%。苯乙醛可以提调香气,2,4-二甲基苯甲醛具有芳香,这两种物质可以赋予乳粉较好的风味。在样品R4中检出2-乙基丁烯醛,是一种 α 、 β -不饱和醛,其具有较为浓郁的香味。1H-2-吡咯甲醛在样品R1、R3、R4、R5中检出,可能为亮氨酸在美拉德反应中间阶段生成二羰基化合物,并经Strecker降解反应生成,增加了乳粉的烟草风味,使乳粉风味变差。5-羟甲基糠醛具有焦糊味,在乳味不足的样品中均被检出,是醛类化合物中占比最多的物质,占比基本超过50%,对乳粉风味产生不良影响。

酮类物质主要由美拉德反应与不饱和脂肪酸受热氧化分解产生,其风味特征明显且感知阈值低,是牛乳中典型的挥发性风味物质^[29]。乳味正常样品R中酮类物质含量为9.65%,均低于乳味不足样品。样品R1、R2、R3、R4、R5酮类物质含量分别为10.76%、10.50%、12.62%、9.83%、18.60%。这表明乳味不足样品脂肪过度氧化进入第二阶段,产生异味的醛类、酮类,乳香味变淡。六份样品中均含有2-羟基-2-环戊烯-1-酮,它具有焦糖味,有利于乳粉风味的提升,在样品R中含量远高于其他样品。2,3-二氢-3,5-二羟基-6-甲基-4(H)-吡喃-4-酮在乳味不足样品R1、R2、R3、R5中均被检出,含量分别为0.45%、0.50%、0.56%、1.39%。它是一种吡喃烯醇酮类化合物,是美拉德反

应关键中间体之一,在美拉德反应产物调控中起到重要作用,在结构上与常用焦糖香物质麦芽酚、呋喃酮等类似,具有挥发性,同时兼具较高的脂溶性和水溶性。主要作用是增加奶粉的甜味和乳味,改善口感。但是样品出现乳味不足的现象,一方面可能是含量较低,一方面可能是由于香气成分之间的感知相互作用,限制了乳粉的乳香味^[30]。

2.3.3 醇酚类化合物

醇类物质主要是由醛类还原、氨基酸代谢、乳糖发酵或物理作用而形成的一种风味物质^[31],主要以多不饱和脂肪酸为前体物质,温度升高,醇类化合物会损失或者转化为其它物质。醇类物质气味较弱,阈值比醛、酮类化合物更高。所有样品共有的醇类物质是2-呋喃甲醇(糠醇),是乳粉中含量最多的醇类物质。当其含量过高时,可导致乳粉产生氧化味,对乳粉风味产生不良影响。本次试验中,样品R糠醇含量为1.49%;R1、R2、R3、R4、R5糠醇含量分别为8.53%、6.29%、8.98%、10.43%、12.84%。另外,乳味不足样品中含有的醇类物质含量远高于正常样品,也不利于乳粉风味。样品R中醇类物质含量为1.49%;R1、R2、R3、R4、R5中醇类物质含量分别为14.73%、8.48%、8.98%、10.43%、13.80%。

六份样品中均检测出美拉德反应会形成的麦芽酚(糖类焦糖化)和异麦芽酚。它们具有焦奶油硬糖的特殊香气。

2.3.4 酯类化合物

当酯类物质含量较少时,更易出现乳味不足的情况。乳味正常样品R中酯类物质的含量为15.56%,乳味不足样品R1、R2、R3、R4、R5中酯类物质的含量分别为3.47%、6.21%、8.42%、8.86%、9.36%。六份样品中均检测出正丁内酯,其主要赋予乳粉以甜香和焦糖香。另外,仅在乳味正常样品R中检测出邻苯二甲酸二乙酯,且含量较高(8.56%),其具有芳香味,有利于乳粉风味的提升。其他酯类物质也具有独特的风味,例如丁位辛内酯具有椰子味的水果香气、豆香和奶油脂肪味,(+/-)-3-羟基- γ -丁内酯具有香甜的水果味道。

2.3.5 其他物质

在样品R2中检测到甲氧基苯基胍,其腥气强度较高,具有土腥、哈喇味,不利于乳粉风味。在样品R3中检测出少量 γ -生育酚、O-甲基- δ -生育酚和 β -生育酚几种维生素E,可以使乳粉具备一定的抗氧化功能。在样品R4中检测出少量呋喃,一种食品热加工过程产生的污染物。

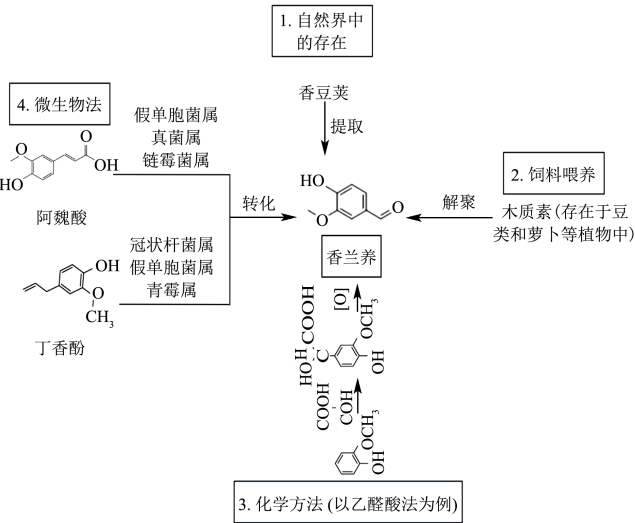


图 4 乳制品内源性香兰素合成途径

Fig.4 Endogenous vanillin synthesis pathway in dairy products

仅在乳味正常样品 R 中检测出香兰素，含量为 7.30%。香兰素也被称为香草醛，是一种天然有机化合物，是一种香气物质，呈淡黄色粉末状，有着强烈的乳香味和香草味^[32]。其香气稳定，在较高温度下不易挥发，在水中的阈值较低，更易被感官识别出来。目前乳制品香兰素的合成及来源主要分为四个方面^[33](如图 4 所示)：一是在自然界中天然存在，可以直接从香兰荚中提取。当动物食用后，则会使乳中含有香兰素。二是饲料投喂方面，一些饲料中可能含有木质素，如豆类和白萝卜等根茎蔬菜，植物种子类和大麦、燕麦、荞麦、小米等谷豆类。当动物食用后，饲料中含有的木质素可以解聚为少量香兰素，留在乳中。三是化学合成方面，虽然合成方法较多，例如松柏苷法，丁香酚法和 对甲酚法等，但是最常见的是愈创木酚-乙醛酸法。四是微生物法，以阿魏酸和丁香酚等为底物，利用微生物在一定条件下转化为香兰素。

表 4 挥发性分风味物质ROAV值
Table 4 Volatile flavour substances ROAV value

物质	R	R1	R2	R3	R4	R5	在水中的阈值 ^[34]
乙酸	0.02	0.24	0.19	0.25	3.88	0.13	99
甲酸	0.00	0.01	—	0.01	0.13	0.01	1 240
丙酸	0.19	—	—	—	14.89	0.20	2
己酸	—	—	—	0.93	—	—	3
正癸酸	—	0.52	0.46	—	—	—	10
肉豆蔻酸	0.34	3.62	2.63	1.73	33.10	0.58	10
十八烷酸	—	0.67	1.05	3.61	7.69	0.22	20
十五烷酸	—	1.79	1.53	—	—	0.30	10
棕榈酸	1.03	10.79	7.36	—	82.68	1.25	10
糠醛	0.33	3.92	2.97	3.64	41.60	1.90	2.8
5-甲基呋喃醛	2.85	—	—	4.14	—	—	1.11
1H-2-吡咯甲醛	—	0.01	—	0.02	0.10	0.00	65
5-羟甲基糠醛	—	0.01	0.01	0.03	0.28	0.01	1 000
1-羟基-2-丙酮	—	0.68	0.53	—	8.83	0.24	10
4-环戊烯-1,3-二酮	—	0.18	0.17	—	—	—	20
4-羟基-2,5-二甲基-3(2H)-呋喃酮	—	100.00	100.00	100.00	—	100.00	0.02
2,3-二氢-3,5-二羟基-6-甲基-4(H)-吡喃-4-酮	—	0.47	0.45	0.47	6.21	0.40	35
3,5-二羟基-2-甲基 4H-吡喃-4-酮-	—	—	0.34	—	—	0.15	10
2-呋喃甲醇	0.24	9.42	6.28	7.88	100.00	4.58	4.5
环丁醇	—	4.74	—	—	—	—	4.6
3,7,11-三甲基-2,6,10-十二碳三烯-1-醇	—	0.88	—	—	—	—	1
麦芽酚	—	0.58	0.62	0.46	7.59	0.57	16.60
正丁内酯	0.06	0.07	0.05	0.19	2.51	0.11	20
丁位辛内酯	—	—	4.40	—	—	—	0.42
呋喃	—	—	—	—	5.47	—	4.5
香兰素	100.00	—	—	—	—	—	0.05

2.4 挥发性风味物质ROAV值分析

挥发性气味物质的相对含量高低并不能直接说明物质对样品总体气味的贡献大小,人们对不同物质的嗅觉敏感性差异很大。因此,需将物质含量与其气味阈值结合来评价物质对整体气味的贡献。这也是ROAV被用于食品中关键风味化合物鉴别的原因。若 $ROAV \geq 1$,则认为是样品主要关键挥发性物质;若 $0.1 \leq ROAV < 1$,则认为其对于样品香气具有重要修饰作用。计算ROAV值可以使乳粉中不同化合物对香气的贡献更加客观。

由表4可知,乳粉的众多香气成分中,贡献率较高的仅是一部分,这一部分香气成分构成了独特的香气特征。结果表明,样品R中ROAV值大于1的物质有棕榈酸、5-甲基呋喃醛、香兰素。在本次试验中,香兰素ROAV值为100,是样品R中风味贡献最突出,也是最为关键的风味物质,提供了浓郁的奶香味。样品R1中ROAV值大于1的物质有肉豆蔻酸、十五烷酸、棕榈酸、糠醛、4-羟基-2,5-二甲基-3(2H)-呋喃酮、2-呋喃甲醇,环丁醇。样品R2中ROAV值大于1的物质有肉豆蔻酸、十八烷酸、十五烷酸、棕榈酸、糠醛、4-羟基-2,5-二甲基-3(2H)-呋喃酮、2-呋喃甲醇,丁位辛内酯;样品R3中ROAV值大于1的物质有肉豆蔻酸、十八烷酸、糠醛、5-甲基呋喃醛、4-羟基-2,5-二甲基-3(2H)-呋喃酮、2-呋喃甲醇;样品R4中ROAV值大于1的物质有乙酸、丙酸、肉豆蔻酸、十八烷酸、棕榈酸、糠醛、1-羟基-2-丙酮、4-羟基-2,5-二甲基-3(2H)-呋喃酮、2-呋喃甲醇、麦芽酚、正丁内酯,呋喃;样品R5中ROAV值大于1的物质有棕榈酸、糠醛、4-羟基-2,5-二甲基-3(2H)-呋喃酮、2-呋喃甲醇。这些香气物质可能是乳粉的关键香气成分,对总体香气贡献较大。

4-羟基-2,5-二甲基-3(2H)-呋喃酮的ROAV值较高,为风味贡献突出的化合物,其具有较低的阈值及宜人的风味特征。另外,己酸、正葵酸、4-环戊烯-1,3-二酮、3,5-二羟基-2-甲基-4H-吡喃-4-酮、2,6,10-十二碳三烯-1-醇在样品中ROAV值在0.10~1.0之间,对乳粉香气具有修饰作用。

3 结论

从本次试验的结果看,样品过氧化值或脂肪酶活性较高时更容易出现乳味不足的情况。六份样品中检测出87种风味物质,包括酸类、酮类、醛类、醇类、酯类和芳香族类化合物等。经试验发现,乳粉乳味不足受多种因素影响。第一,酮类物质和酯类物质种类

和含量对乳粉风味影响较大。第二,酯类物质含量较低时,更容易导致乳味不足。第三,乳粉风味贡献突出的物质主要有两种:一种是香兰素,具有强烈乳香味,只在样品R中检出,ROAV值为100;另一种是4-羟基-2,5-二甲基-3(2H)-呋喃酮,在样品R1、R2、R3、R5中检出,ROAV值均为100,可以增加奶粉的甜味和乳味,改善口感。本研究明确了乳粉中的关键性风味物质,并考虑了理化指标对于乳粉风味的影响,基于本次进行试验的六份样品较为全面地分析了乳粉乳味不足的原因,对于解决乳粉乳味不足的问题提供了物质理论基础。其他方面如生产工艺、储存条件、原料差异等因素对于乳粉风味物质成分的产生和变化的影响有待进一步深入研究。

参考文献

- [1] 张蒙,张宝锁.国际全脂乳粉高位运行对国内原奶市场影响分析[J].畜牧产业,2022,11:41-46.
- [2] YANG Y, WANG B, FU Y, et al. HS-GC-IMS with PCA to analyze volatile flavor compounds across different production stages of fermented soybean whey tofu [J]. Food Chemistry, 2021, 346:128880.
- [3] WANG Z, WANG H, WANG C, et al. Volatile component analysis in infant formula using SPME coupled with GC×GC-TOFMS [J]. Analytical Methods, 2019, 11(39): 5017-5022.
- [4] 李璐,尹礼国,陆安霞,等.GC-MS结合电子鼻技术对不同茶区茉莉花茶香气的差异比较[J].现代食品科技,2024,40(2):302-311.
- [5] ZHANG S, ZHAO H, TANG Z, et al. Flavor characteristics of key aroma compounds in bayberry juice, fruit, and thinning fruit using HS-SPME coupled with GC/Q-TOF-MS [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2024, 128: 106032.
- [6] 陈增鑫,潘芸芸,闫译文,等.气相色谱-质谱联用技术在乳制品检测中的应用[J].中国乳业,2021,3:69-72.
- [7] 罗叶名,傅虹飞,索朗嘉措,等.枸杞酸奶的制备、质构品质和风味物质分析[J].现代食品科技,2024,40(1):249-261.
- [8] 韩亚平,苟永桢,李芬,等.基于气相色谱-离子迁移谱法的不同地区驴乳粉挥发性风味物质指纹图谱分析[J].食品安全质量检测学报,2023,14(23):155-162.
- [9] 赵晓璇,张书文,魏妙宏,等.调制乳加工及储藏过程中草莓香精挥发性成分的变化[J].中国食品学报,2023,23(8):254-262.
- [10] 王丹,丹彤,孙天松,等.SPME-GC-MS结合ROAV分析单菌及复配发酵牛乳中关键性风味物质[J].食品科学,2017,38(8):145-152.
- [11] 丛懿洁,马蕊,王丽丽,等.国内不同品牌婴幼儿配方奶粉感官品质的对比研究[J].食品工程,2019,2:27-32,55.
- [12] GB 5009.3-2016,食品安全国家标准 食品中水分的测定[S].
- [13] GB 5413.29-2010,食品安全国家标准 婴幼儿食品和乳品溶解性的测定[S].
- [14] LI Y H, WANG W J, GUO L, et al. Comparative study on the characteristics and oxidation stability of commercial milk powder during storage [J]. Journal of Dairy Science, 2019,102(10): 8785-8797.
- [15] 申晓琳,王恺.乳品加工技术[M].北京:中国轻工业出版社,2015.

- [16] 吴国强.基于均匀试验的奶粉水分改善研究[D].北京:清华大学,2018.
- [17] 蔡佳昂,卢立新,卢莉璟,等.全脂奶粉包装内外水分传质及其防潮包装货架期预测[J].包装工程,2022,43(17):42-48.
- [18] 陈春裕,纪坤发,何瑛,等.乳粉溶解度测定的不确定度评定[J].中国乳业,2022,12:110-114.
- [19] 贾宏信,蒋雯瑶,苏米亚.婴幼儿配方乳粉脂肪过氧化值的检测方法[J].乳业科学与技术,2017,40(3):7-10.
- [20] 段潇潇,张岩春,戴智勇,等.婴幼儿奶粉中脂肪氧化的影响因素及进展研究[J].中国乳品工业,2011,39(12):27-30.
- [21] 俞淑,张呈祥,印杰.一种快速提取乳粉中脂肪测定过氧化值的研究探讨[J].轻工标准与质量,2022,2:66-68,72.
- [22] 朱小朋,朱丽,付尚辰,等.低乳糖牛乳粉品质分析及蛋白特性研究[J].食品与发酵工业,2024,50(13):157-165.
- [23] TÜRKER D A, SARAÇ M G, DOĞAN M. Influence of particle size on powder flow behaviour, textural and viscoelastic properties of milk-based whippable emulsions [J]. International Dairy Journal, 2024, 148: 105806.
- [24] TANG Y, YU M, LIU C, et al. Sensory-directed characterization of key odor-active compounds in fermented milk [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2024, 126: 105904.
- [25] 孟繁宇,韩兆盛,姚欢,等.贮藏期间不同杀菌乳风味和理化性质的变化[J].食品与生物技术学报,2023,42(3):38-47.
- [26] 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.
- [27] MENG J, WANG J L, HAO Y P, et al. Effects of *Lactobacillus fermentum* GD01 fermentation on the nutritional components and flavor substances of three kinds of bean milk [J]. LWT, 2023, 184: 115006.
- [28] JO YBENOIST D M, BARBANO D M, et al. Flavor and flavor chemistry differences among miks processed by high-temperature short-time pasteurization or ultra-pasteurization [J]. Journal of Dairy Science, 2018, 101(5): 3812-3828.
- [29] 潘明慧,曹宏芳,王彩云,等.国内外典型常温纯牛奶的风味品质分析[J].中国食品学报,2022,22(5):271-281.
- [30] TIAN H, XU X, SUN X, et al. Evaluation of the perceptual interaction among key aroma compounds in milk fan by gas chromatography-olfactometry, odor threshold, and sensory analyses [J]. Journal of Dairy Science, 2020, 103(7): 5863-5873.
- [31] 刘晓凤.牛羊乳脂类及乳粉加速氧化风味物质比较研究[D].西安:陕西科技大学,2023.
- [32] LAMPRECHT G, BLOCHBERGER K. Protocol for isolation of vanillin from ice cream and yoghurt to confirm the vanilla beans origin by 13C-EA-IRMS [J]. Food Chemistry, 2009, 114(3): 1130-1134.
- [33] 党玥,陈雪峰,刘欢,等.香兰素生物合成的研究进展[J].微生物学通报,2020,47(11):3678-3688.
- [34] VAN GEMERT L J. Odour thresholds: Compilations of Odour Threshold Values in Air, Water and other Media [M]. Oliemans Punter, 2011.