

# 顶空固相微萃取/气相色谱-质谱联用监测生产过程中婴幼儿配方奶粉的风味变化

杨舒雅<sup>1</sup>, 魏博琛<sup>1</sup>, 杜振霞<sup>1\*</sup>, 张凤霞<sup>2\*</sup>

(1. 北京化工大学 化学学院, 北京 100019; 2. 北京兴工科技有限公司, 北京 100019)

**摘要:** 该研究采集了奶粉生产线全链条的产品, 涵盖乳基、灭菌乳、湿混乳、干燥粉末、成品乳粉, 采用顶空固相微萃取/气相色谱-质谱联用(HS-SPME/GC-MS)技术对挥发性化合物进行定性定量分析, 并借助相对气味活度值(ROAV)剖析风味变化。结果共检出46种挥发性气味物质, 包括醛、酮、酸、醇、内酯、呋喃、硫化物和萜烯八大类。其中醛类种类最多(18种), 是奶粉风味的核心贡献物质, 关键挥发性气味物质为己醛、壬醛、辛醛、2-壬烯醛, 醛类低浓度即可呈现青草、果香等愉悦香气; 经湿法混合工艺后挥发性气味物质发生较大改变, 干燥工艺也对挥发性气味物质的含量有影响。成品乳粉较乳基而言, 关键挥发性气味物质组成与含量差异显著, 醛类总量提升可能是热处理导致, 另外也与营养添加相关, 生产厂家或需采取额外措施确保配方奶粉风味在生产期间稳定, 减少异味产生, 增强婴幼儿接受程度。该研究可为婴幼儿配方奶粉生产过程的风味调控提供理论参考。

**关键词:** 婴幼儿配方奶粉; 风味; 热处理; 气相色谱-质谱联用; 顶空固相微萃取

**中图分类号:** O657.7; TS207.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4957(2026)06-0001-09

## Monitoring Flavor Changes in Infant Formula During Production Using Headspace Solid-phase Microextraction/Gas Chromatography-Mass Spectrometry

YANG Shu-ya<sup>1</sup>, WEI Bo-Chen<sup>1</sup>, DU Zhen-Xia<sup>1\*</sup>, ZHANG Feng-Xia<sup>2\*</sup>

(1. College of Chemistry, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100019, China; 2. Beijing Xingong Technology Co., Ltd., Beijing 100019, China)

**Abstract:** This study aims to monitor the flavor evolution of infant formula throughout the production process, thereby providing a scientific basis for optimizing flavor quality and enhancing infant acceptance. Representative samples were collected across the entire infant formula production line, encompassing milk base, sterilized milk, wet-mixed milk, dried powder, and final formula powder. Volatile compounds were qualitatively and quantitatively analyzed using headspace solid-phase microextraction/gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME/GC-MS), and flavor changes were characterized by relative odor activity value (ROAV). A total of 46 volatile odor substances were identified, belonging to eight classes: aldehydes, ketones, acids, alcohols, lactones, furans, sulfides, and terpenes. Among these, aldehydes (18 species) were the most abundant and served as the core contributors to the flavor profile. The key volatile odorants were identified as hexanal, nonanal, octanal, and 2-nonenal. Aldehydes exhibit pleasant grassy and fruity aromas at low concentrations. Notably, the wet-mixing process induced significant alterations in the profile of volatile compounds, while the drying process also impacted their contents. Compared with the milk base, the final formula powder showed distinct differences in the composition and content of key volatile substances. The increase in the total content of aldehydes may be attributed to heat treatment and is also related to the addition of nutrients. Therefore, manufacturers are advised to implement additional measures to ensure flavor stability during production, reduce off-flavors, and further improve infant acceptance. This study provides theoretical references for flavor regulation in the production process of

收稿日期: 2026-03-12; 修回日期: 2026-04-17

\* 通讯作者: 杜振霞, 教授, 研究方向: 天然产物、食品营养成分及功效、食品组学、代谢组学等, E-mail: duzx@mail.buct.edu.cn  
张凤霞, 高级工程师, 研究方向: 食品分析技术, E-mail: zfxly@163.com

infant formula.

**Key words:** infant formula; flavor; heating process; gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS); headspace solid-phase microextraction(HS-SPME)

婴幼儿处于快速生长发育期,充足且均衡的营养是其健康成长的基础保障。母乳作为天然的理想喂养来源,不仅营养全面,同时含有大量功能性生物活性组分,既能满足婴幼儿生长所需,又可构筑机体免疫屏障<sup>[1]</sup>。但受母体身体状况等多重现实条件限制,无法完全母乳喂养<sup>[2-3]</sup>,因此可通过婴幼儿配方奶粉缓解这一问题<sup>[4-5]</sup>。现阶段行业对婴幼儿配方奶粉的探索,多聚焦营养配方优化与食用安全评价两大方向,而风味气味品质近年备受关注,现已纳入奶粉品质评价与生产质控的核心范畴。

新生儿嗅觉系统已具备灵敏的气味识别与感知能力<sup>[6]</sup>。婴幼儿可清晰辨别母乳与配方奶粉的气味区别,并倾向于母乳的独有风味<sup>[7]</sup>。这也意味着,配方奶粉的气味特质直接决定婴幼儿的进食接受度,同时影响产品市场适配度与消费体量<sup>[7-9]</sup>。

婴幼儿配方奶粉的风味包括甜味、奶味、香味、膻味和腥味等。多种因素可能导致配方奶粉的风味发生变化,如原料质量、储存条件,特别是加工工艺中的热处理。热处理会加速脂质氧化、美拉德反应、Strecker降解等反应,导致风味劣变<sup>[10-11]</sup>。为使配方奶粉的营养成分与母乳保持一致,需要添加多不饱和脂肪酸,而该类脂肪酸易发生氧化<sup>[12]</sup>,是奶粉腥味的主要来源。因此探究母乳气味组成,研发接近母乳的婴幼儿配方奶粉具有重要意义。当前婴幼儿配方奶粉的气味研究集中于终产品挥发性气味物质鉴定、储存期风味劣变、不同品牌及段位产品风味对比、氧化异味物质溯源,目前尚无针对奶粉生产全链条开展风味动态监测的研究,且未阐明湿法混合、流化床干燥等核心工艺对挥发性气味物质形成与演变的具体影响。

本研究聚焦婴幼儿配方奶粉生产全流程的风味实时变化,旨在弥补现有研究仅关注终产品的不足,阐明工艺与风味的关联机制。收集婴幼儿配方奶粉在生产线上的原料、样品及不同储存时间的样品,采用顶空固相微萃取/气相色谱-质谱联用(HS-SPME/GC-MS)技术检测生产过程和储存过程中上述样品的挥发性气味物质及变化,揭示风味变化规律和潜在影响因素,为优化生产工艺、提高产品质量和保障婴幼儿健康提供科学依据。

## 1 实验部分

### 1.1 样品采集

本研究所用婴幼儿配方奶粉及其各生产环节半成品,涵盖原料乳基、灭菌乳、湿混乳、干燥粉末及成品乳粉,均由某乳业集团提供,且所有样品取自同一生产批次。样品接收后,液态样品即刻置于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下冷冻封存,固体粉末样品则存放于避光阴凉环境中备用。

### 1.2 化学品与试剂

氯化钠(分析纯,阿拉丁试剂公司),内标物 2-甲基-3-庚酮(纯度 $>99.8\%$ ,上海泰坦科技股份有限公司);超纯水由 TP301 超纯水机(时代新维)制备,高纯氮气及氩气(纯度 $99.999\%$ ,北京京高气体有限公司)。

### 1.3 仪器与设备

气相色谱-质谱联用仪(7010B-8890A,美国安捷伦公司),固相微萃取套装及 DVB/CAR/PDMS 纤维(美国 Sigma 公司),MX-S 型涡旋混合器(万顺仪器公司),GP225D 型电子天平(精度为十万分之一,德国 Sartorius 公司)。

### 1.4 实验方法

**1.4.1 挥发性气味物质富集** 液态原料样品处理:精确量取 5 mL 样品装入 20 mL 顶空瓶,加入 2  $\mu\text{L}$  质量浓度 20 mg/mL 的 2-甲基-3-庚酮作为内标,再加入 1 g 氯化钠,以减弱挥发性风味物质在基质中的溶解作用。放入磁力搅拌子后加盖密封顶空瓶,设置搅拌转速 800 r/min;置于  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  水浴条件下恒温平衡 30 min,随后插入 SPME 萃取纤维,在顶空上层空间吸附萃取 30 min。萃取结束后,迅速将萃取纤维插入气相色谱进样口,于  $250\text{ }^{\circ}\text{C}$  条件下热解吸 5 min。粉体样品处理:称取 0.9 g 奶粉样品置于 10 mL 离心管,加入 6 mL 纯水充分溶解混匀,量取 5 mL 混匀液转移至 20 mL 顶空瓶,后续前处理及萃取、解吸

条件均与液态样品保持一致。

**1.4.2 气相色谱-质谱分析** 采用安捷伦 8890A-7010B 型气相色谱-质谱联用仪对挥发性气味物质进行分离鉴定, 选用极性 VF-WAXms 色谱柱(30 m×0.25 mm×0.25 μm), 以高纯氮气为载气, 恒定流速设定为 1 mL/min。

柱温程序: 初始温度 40 °C 恒温维持 5 min, 先以 5 °C/min 升至 65 °C, 再以 3 °C/min 升至 145 °C, 随后以 5 °C/min 升至 185 °C, 最后以 10 °C/min 升至 250 °C 并恒温保持 8 min。

仪器进样口温度恒定为 250 °C, 质谱采用电子轰击电离模式, 电离能量 70 eV, 采用一级全扫描方式, 质量扫描区间设定 25~350。离子源、四极杆温度分别控制在 230 °C、150 °C, 进样分流比设置为 2:1。

**1.4.3 挥发性气味物质的定性定量分析** 利用 NIST 标准质谱数据库对所检出的挥发性气味物质开展定性鉴定, 将样品各组分质谱图谱与 NIST 14 谱库的标准化合物图谱及结构信息进行比对筛选, 匹配度不低于 700 的组分判定为有效鉴定物质。

选取 2-甲基-3-庚酮作为内标, 采用内标法进行挥发性成分的半定量计算。按下式计算各挥发性组分的相对含量:

$$C_i = \frac{A_i \times C_{IS} \times V_{IS}}{A_{IS} \times V}$$

其中,  $C_i$  为待测组分的含量,  $A_i$  为待测组分的峰面积,  $A_{IS}$  为加入内标物的峰面积,  $C_{IS}$  为加入内标物的浓度,  $V_{IS}$  为加入内标物的体积,  $V$  为总体积。

**1.4.4 相对气味活度值分析** 为筛选关键气味活性物质, 计算各化合物的相对气味活度值(ROAV), 计算方法<sup>[13]</sup>如下:

$$ROAV_i = \frac{C_i}{C_{max}} \times \frac{T_{max}}{T_i} \times 100$$

其中,  $ROAV_i$  为组分  $i$  的 ROAV 值,  $C_i$  为组分  $i$  的浓度,  $T_i$  为组分  $i$  的气味阈值,  $C_{max}$  为体系中气味活度值(OAV)最大物质的浓度,  $T_{max}$  为体系中 OAV 最大物质的气味阈值。

## 2 结果与讨论

### 2.1 挥发性气味物质的 HS-SPME/GC-MS 分析

**2.1.1 挥发性气味物质的检出情况** 采用顶空固相微萃取结合气相色谱-质谱联用技术, 系统分析婴幼儿配方奶粉及其生产各阶段半成品的挥发性气味物质。与谱库中的标准谱图进行比对分析, 并采用内标法开展半定量检测, 相关结果汇总于表 1。本研究共鉴定出 46 种挥发性化合物, 涵盖醛类 18 种、醇类 4 种、酮类 6 种、酸类 8 种、内酯类 3 种、呋喃类 3 种、硫化物及萜烯类各 2 种; 对比发现, 成品配方奶粉检测到的挥发性组分种类最为丰富。

表 1 半成品及成品乳粉中挥发性气味物质含量

Table 1 Contents of volatile compounds in semi-finished and finished milk powder

Category	No.	Name	Concentration/(μg·L <sup>-1</sup> )				Flavor profile <sup>[14-18]</sup>	
			Milk base	Sterilized milk	Wet-mixed milk	Dried powder		Finished formula powder
醛	1	戊醛	n. d.	n. d.	71.11	165.91	164.00	杏仁、麦芽香、辛辣
	2	己醛	14.48	20.18	119.48	760.23	684.50	青草香、油脂香
	3	庚醛	n. d.	n. d.	n. d.	80.13	73.15	油脂香
	4	辛醛	n. d.	n. d.	44.23	97.72	101.58	青草香、果香、脂香
	5	壬醛	23.92	28.91	137.59	310.13	387.11	花香、柑橘香
	6	癸醛	n. d.	n. d.	7.09	12.63	6.85	脂香、柑橘香
	8	2-己烯醛	n. d.	n. d.	n. d.	16.91	8.37	脂肪味
	9	2-庚烯醛	n. d.	n. d.	38.45	112.65	100.40	脂肪味、辛辣
	10	2-辛烯醛	n. d.	n. d.	12.14	45.36	16.54	黄瓜、柑橘皮、甜味
	11	2, 4-庚二烯醛	n. d.	n. d.	n. d.	11.73	7.88	脂肪味
	12	2-壬烯醛	n. d.	n. d.	8.08	38.18	23.48	脂肪味
	13	2-癸烯醛	n. d.	n. d.	8.88	27.61	11.69	蜡味、泥土味
	14	2, 4-壬二烯醛	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	2.63	坚果、油炸、脂肪味

(续表 1)

Category	No.	Name	Concentration/( $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )					Flavor profile <sup>[14-18]</sup>
			Milk base	Sterilized milk	Wet-mixed milk	Dried powder	Finished formula powder	
	15	2-十一烯醛	n. d.	n. d.	10.35	19.62	5.84	辛辣、脂肪味
	16	2, 4-十二烯醛	n. d.	n. d.	38.80	n. d.	n. d.	脂肪味、柑橘香
	17	苯甲醛	n. d.	n. d.	288.63	311.05	395.41	杏仁香
	18	二甲基苯甲醛	n. d.	n. d.	n. d.	27.57	20.95	-
醇	19	1-戊醇	n. d.	n. d.	n. d.	8.21	3.94	-
	20	1-己醇	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	2.93	-
	21	1-辛醇	n. d.	n. d.	n. d.	16.84	8.05	脂肪香
酮	22	1-辛烯-3-醇	n. d.	n. d.	n. d.	8.41	4.89	蘑菇香、玫瑰香
	23	2-庚酮	43.47	37.00	262.87	7.72	6.54	果味、辛辣、甜味
	24	2-辛酮	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	2.12	-
	25	2-壬酮	13.50	12.89	73.13	4.98	4.52	泥土、青草味
	26	2, 3-辛二酮	n. d.	n. d.	6.28	8.70	9.71	-
	27	2-十一烷酮	n. d.	n. d.	n. d.	10.50	3.03	果味
酸	28	3, 5-辛烯-2-酮	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	4.97	-
	29	丁酸	7.37	5.95	n. d.	n. d.	n. d.	奶香味
	30	己酸	35.96	3.76	8.10	n. d.	6.82	酸味、油脂味
	31	辛酸	183.90	252.52	27.50	15.36	7.31	酸味、油脂味
	32	癸酸	385.49	27.11	75.12	16.85	15.10	酸味、油脂味
	33	9-癸烯酸	6.21	9.09	n. d.	n. d.	n. d.	-
	34	十一烷酸	2.33	1.68	n. d.	n. d.	n. d.	-
	35	十二烷酸	54.76	75.41	30.94	n. d.	n. d.	-
	36	十四烷酸	16.51	20.82	11.88	n. d.	n. d.	-
	内酯	37	$\delta$ -壬内酯	n. d.	n. d.	n. d.	5.29	2.12
38		$\delta$ -癸内酯	5.64	7.83	13.92	14.11	16.34	奶油香、椰子香、桃子香
	39	$\delta$ -十二内酯	2.58	3.79	8.01	6.58	10.01	奶油香
呋喃	40	2-戊基呋喃	n. d.	1.71	4.28	10.35	13.52	坚果香、焦糖香
	41	糠醛	n. d.	0.88	24.40	33.23	36.85	焦糖香、面包香
	42	糠醇	n. d.	0.58	100.01	95.86	37.87	-
硫化物	43	二甲基二硫醚	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	9.96	卷心菜味、硫磺味
	44	二甲基三硫醚	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	1.99	卷心菜味、鱼腥味
萜烯	45	3-乙基-2-甲基-1, 3-己二烯	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	1.76	-
	46	藏红花醛	n. d.	n. d.	n. d.	9.55	7.20	-

n. d. : indicates that the compound was not detected. The symbol "-" represents volatile odor compounds with OAV<1 and ROAV<0.1 (n. d. : 表示该物质未检出。- : 表示 OAV<1 及 ROAV<0.1 的挥发性气味物质)

**2.1.2 各类挥发性气味物质的特征分析及溯源** 醛类是检出种类最多的挥发性气味物质, 主要源自脂质氧化<sup>[19]</sup>。醛类化合物是影响婴幼儿配方奶粉风味特征的关键物质之一, 适量己醛能够遮蔽游离脂肪酸带来的酸、苦涩异味, 优化奶粉整体风味; 但若含量过高, 则会呈现出油哈味与酸败感, 反而破坏奶粉气味品质<sup>[20]</sup>。成品配方奶粉中醛类物质总量达 1 853.58  $\mu\text{g}/\text{L}$ , 其中己醛作为关键挥发性风味组分, 自带果香与青草香特征, 且风味阈值偏低, 即便在微量条件下也易被识别。己醛是亚油酸氧化的主要分解产物, 常被作为评价脂质氧化程度的指标<sup>[21]</sup>。

酮类在所有检出挥发性组分中种类数量位列第二, 以甲基酮类为主。该类物质整体含量偏低, 在成品配方奶粉中仅为 30.89  $\mu\text{g}/\text{L}$ 。酮类既可天然存在于乳体系中, 也可由脂肪酸转化生成: 脂肪酸经酶促氧化生成 $\beta$ -酮酸, 再通过脱羧反应生成甲基酮; 脂质氧化产生的氢过氧化物中间体发生分解, 同样会生成甲基酮<sup>[22]</sup>。作为配方奶粉中重要的挥发性气味物质, 酮类具有花香、果香等怡人香气<sup>[23]</sup>, 有助于提升产品风味接受度。

本实验共鉴定出 8 种碳链长度处于  $\text{C}_4\sim\text{C}_{14}$  范围的羧酸类物质。乳体系内天然存在内源性脂肪酶, 可将脂质水解为游离脂肪酸<sup>[24]</sup>; 同时, 脂质氧化也会产生短链脂肪酸。羧酸类多带有酸败异味, 适量存在可丰富奶粉风味层次, 例如低浓度丁酸能够呈现浓郁乳香, 含量过高则会引发明显酸味缺陷。数据显示, 乳基样品中羧酸含量最高, 达 692.53  $\mu\text{g}/\text{L}$ , 而经过加工后的成品配方奶粉中其含量显著下降至 29.23  $\mu\text{g}/\text{L}$ 。

醇类挥发性成分主要来源于醛类还原、氨基酸代谢及乳糖发酵过程, 其生成与脂质氧化、酮类还

原反应有关<sup>[25]</sup>，酶促还原与醛脱氢作用均能促进醇类生成。本研究仅检出5种醇类组分，原因在于醇类易被进一步氧化为醛或酮，导致检出种类偏少。同时醇类气味阈值偏高，对配方奶粉整体气味轮廓的贡献相对有限。

内酯属于羟基脂肪酸经脱水环化形成的环状化合物<sup>[26]</sup>，可使奶粉具有奶油香、甜香等特征风味，有效改善奶粉气味品质。本研究共检测到3种内酯组分，虽然其在配方奶粉中含量不高，但因气味阈值较低，仍对整体风味构成明显影响。

硫化物与呋喃类主要由美拉德反应及热处理降解过程生成。其中硫化物多带有刺激性异味，易对奶粉风味造成负面影响；呋喃类可呈现焦糖香气，但存在潜在致癌风险，需重视婴幼儿摄入后的安全隐患<sup>[27]</sup>。

## 2.2 生产过程中挥发性气味物质的含量变化

### 2.2.1 挥发性气味物质变化的核心影响因素

乳脂肪易氧化分解，生成羰基化合物、内酯类、酸类、酯类、醇类等化合物，是决定奶粉气味关键因素<sup>[28]</sup>。婴幼儿配方奶粉生产过程普遍采用热处理工艺，该工艺虽能保证产品品质，但会诱发脂质氧化反应，进而产生异味<sup>[29]</sup>。本研究选取生产流程中经热处理的半成品，系统分析了其挥发性风味组分，探究奶粉加工全程挥发性气味物质的动态变化规律<sup>[30]</sup>。

### 2.2.2 婴幼儿配方奶粉湿法生产工艺流程

本研究采用湿法混合工艺，其标准流程为：原料乳基经标准化处理后，在液相体系中充分混匀，随后依次进行高压均质、高温灭菌、真空浓缩、喷雾干燥、流化床二次干燥与冷却，最终得到成品乳粉。湿法工艺是在生鲜牛乳中加入乳清蛋白、乳糖、植物油等基础营养物质，均质混合，使营养素分散均匀。该方法最大程度地保留了生鲜乳天然营养分子，更利于婴幼儿肠道消化吸收，因此是当前婴幼儿配方奶粉工业化生产的主流核心工艺。

### 2.2.3 不同生产阶段挥发性气味物质含量的变化特征

如图1所示，在奶粉加工各工序推进过程中，各半成品的挥发性气味物质总含量呈现动态变化。经灭菌处理后，生成了其他类别的挥发性气味物质(如呋喃类)，但由于羧酸类化合物的含量下降明显，总体含量降低。经湿法混合工艺后，挥发性气味物质的含量明显增加，且呋喃类化合物的含量明显增多。经干燥处理后，醛类含量显著增加，并生成了其他类别的挥发性气味物质，整体含量上升。经过加工处理后，成品奶粉的挥发性气味物质含量出现小幅下降，可能由于添加了热敏性营养素，对干燥后的半成品粉末进行了稀释。为进一步探究配方奶粉生产各工艺阶段中半成品挥发性气味物质的动态变化特征，进行了热图分析(图2)。

在乳基中，挥发性气味物质由大量的C<sub>4</sub>~C<sub>14</sub>脂肪酸以及少量的醛、酮类和内酯化合物构成。酸类为含量最高的挥发性气味物质，主要源自乳基内天然存在的游离脂肪酸，以及甘油酯发生水解反应所生成<sup>[31]</sup>。本研究共检出4种醛酮类化合物，整体浓度处于14.48~43.47 μg/L

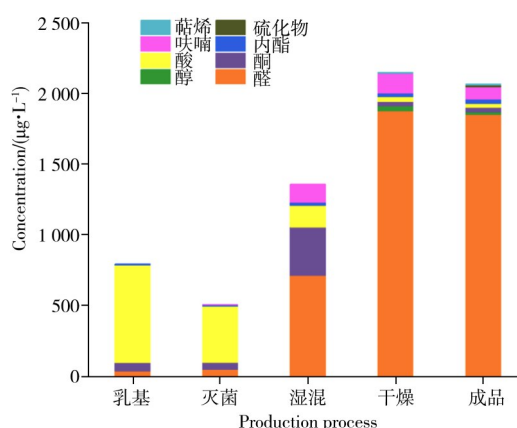


图1 挥发性气味物质含量随生产过程中的变化  
Fig. 1 Changes in content of volatile odor compounds during the production process

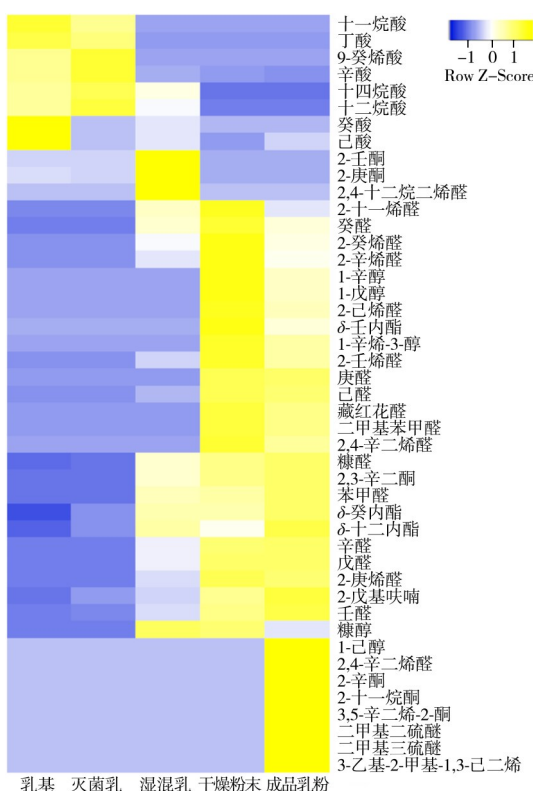


图2 经不同生产过程后挥发性气味物质的热图分析  
Fig. 2 Thermographic analysis of volatile compounds after different production processes  
cold to warm indicates an increase in content from low to high

之间, 含量整体偏低。该类物质少量天然存在于原料乳中, 其余则多由原料在采集、储运环节发生轻微脂质氧化所产生。

灭菌后, 己酸和癸酸的含量降低约 1/10, 可能由于部分脂肪酸参与氧化反应等转化过程, 使游离脂肪酸的含量降低<sup>[32-33]</sup>。而辛酸、十二烷酸和十四烷酸的含量上升, 可能是由于脂质中的脂肪酸链脱落或长链脂肪酸氧化生成短链脂肪酸所致。由于灭菌工艺涉及热处理, 导致己醛、壬醛的含量略有增加, 此外热处理过程中涉及美拉德反应, 在灭菌工艺后检出了 3 种呋喃类化合物。

湿法混合工艺后的半成品乳粉中挥发性气味物质成分发生了显著变化: 2-十一烷酮、2-庚酮、2, 4-十二烷二烯醛、2, 3-辛二酮、糠醇、苯甲醛、 $\delta$ -癸内酯及 $\delta$ -十二内酯的含量显著升高。特别是 2-庚酮和糠醇, 含量分别从 37.00  $\mu\text{g/L}$  和 0.58  $\mu\text{g/L}$  增至 262.87  $\mu\text{g/L}$  和 100.01  $\mu\text{g/L}$ 。羧酸类物质的含量显著下降, 辛酸含量下降约 10 倍, 丁酸、9-癸烯酸、十一烷酸在湿法混合后的样品中未检出。为保留配方奶粉原有营养活性成分, 常以湿法或干法在乳基的基础上添加其他营养成分, 湿法混合工艺后挥发性气味物质的含量增加可能源于新添加的营养物质, 如植物油及乳清蛋白等<sup>[2]</sup>。

混合后的乳液需经干燥除水, 最终形成配方奶粉粉末。喷雾干燥通常在进风温度 180~200  $^{\circ}\text{C}$  及出风温度 80~100  $^{\circ}\text{C}$  下进行<sup>[34]</sup>, 此外, 还需经过流化床二次干燥制成粉体, 该过程伴随高温热处理, 会显著影响体系内挥发性气味物质。本研究结果显示, 干燥工序后大部分挥发性气味物质含量明显上升, 究其原因, 高温条件与较长热处理时长会促使脂质氧化加剧, 进而生成更多种类的挥发性气味物质。少数物质含量下降(如 2-壬酮、2-庚酮、2, 4-十二烷二烯醛), 可能发生了进一步氧化, 十二烷酸和十四烷酸在干燥后未检出。

乳粉干燥至成品过程中不涉及热处理, 但观察到挥发性成分发生变化。相较于干燥后的乳粉, 成品乳粉中部分醛类及烯醛类、醇类、羧酸类、糠醇及萜类的含量降低, 而糠醛、2, 3-辛二酮、苯甲醛、 $\delta$ -十一内酯、 $\delta$ -十二内酯、2-戊基呋喃及壬醛的含量提高。成品乳粉中含有独特的挥发性成分, 如 1-己醇、2, 4-壬二烯醛、2-辛酮、2-十一烷酮、3, 5-辛二烯-2-酮、二甲基二硫醚、二甲基三硫醚, 及 3-乙基-2-甲基-3, 5-己二烯。

湿法工艺包含高温热处理环节, 热敏性营养组分无法在该工序中加入, 需采用干法方式与干燥后的乳粉粉体混配, 最终制得成品配方奶粉<sup>[14]</sup>。因此, 额外添加的营养物质可能会导致挥发性风味物质的种类及含量变化。

## 2.3 关键挥发性气味物质分析

2.3.1 关键挥发性气味物质 并非所有挥发性气味物质均具有香气。气味阈值是人鼻能够感知到气味物质的最低浓度, 只有组分浓度超出阈值时, 才能被嗅觉系统识别。一般而言, 气味阈值越高, 物质香气表现越微弱, 反之则香气越突出。OAV 可用于判定挥发性气味物质是否具备香气活性, ROAV 则用以筛选奶粉中的关键风味物质。通常 OAV>1 代表该组分具有香气贡献; ROAV>1 说明其为主体风味物质, 而 0.1<ROAV<1 的组分可对整体风味起到调和修饰作用<sup>[35]</sup>。加工各阶段样品中关键风味物质的 ROAV 计算结果如表 2 所示。

表 2 生产过程中主要香气物质的 ROAV 值  
Table 2 ROAV of key aroma substances during the production process

Category	Name	Odor threshold/ ( $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	Odor description <sup>[14-18]</sup>	Milk base	Sterilized milk	Wet-mixed milk	Dried powder	Finished for- mula powder
醛	戊醛	0.012	杏仁、麦芽香、辛辣	-	-	4.74	3.62	3.88
	己醛	0.005	青草香、油脂香	13.31	15.36	19.10	39.82	38.90
	庚醛	0.002 8	油脂香	-	-	-	7.50	7.42
	辛醛	0.000 587	青草香、果香、脂香	-	-	60.24	43.60	49.17
	壬醛	0.001 1	花香、柑橘香	100.00	100.00	100.00	73.84	100.00
	癸醛	0.003	脂香、柑橘香	-	-	1.89	1.10	0.65
	2-庚烯醛	0.04	脂肪味、辛辣	-	-	0.77	0.74	0.71
	2-辛烯醛	0.000 2	黄瓜、柑橘皮、甜味	-	-	48.53	59.40	23.50
	2-壬烯醛	0.000 1	脂肪味	-	-	64.60	100.00	66.72
	2-癸烯醛	0.001	蜡味、泥土味	-	-	7.10	7.23	3.32
	2, 4-壬二烯醛	0.000 05	坚果、油炸、脂肪味	-	-	-	-	14.95

(续表2)

Category	Name	Odor threshold/ ( $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	Odor description <sup>[14-18]</sup>	Milk base	Sterilized milk	Wet-mixed milk	Dried powder	Finished for- mula powder
	2-十一烯醛	0.001 4	辛辣、脂肪味	-	-	5.91	3.67	1.19
	2, 4-十二碳二 烯醛	0.001 4	脂肪味、柑橘香	-	-	22.16	-	-
醇	1-辛烯-3-醇	0.001 5	蘑菇香、玫瑰香	-	-	-	1.47	0.93
	2-庚酮	0.14	果味, 辛辣、甜味	1.43	1.01	1.50	0.01	0.01
	2-壬酮	0.041	泥土、青草味	1.51	1.20	1.43	0.03	0.03
	2-十一烷酮	0.005 5	果味	-	-	-	0.50	1.57
内酯	$\delta$ -癸内酯	0.000 43	奶油香、椰子、桃子香	60.30	69.28	25.88	8.59	10.80
呋喃	2-戊基呋喃	0.005 8	坚果香、焦糖香	-	1.12	0.59	0.47	0.66
硫化物	二甲基二硫醚	0.001 1	卷心菜味、硫磺味	-	-	-	-	2.57
	二甲基三硫醚	0.000 1	卷心菜味、鱼腥味	-	-	-	-	5.65

volatile odor compounds with OAV < 1 and ROAV < 0.1 are not included in the list

**2.3.2 不同生产阶段挥发性气味物质的变化特征** 乳基中只有5种气味物质具有活性, 分别为己醛、壬醛、2-庚酮、2-壬酮和 $\delta$ -癸内酯。己醛呈青草、脂香, 壬醛呈玫瑰、柑橘香, 2-庚酮和2-壬酮具有果味、辛辣、甜味和泥土、青草味, 而 $\delta$ -癸内酯具有奶油香和果香气味。乳基可挥发出高含量的 $C_4\sim C_{14}$ 脂肪酸, 但脂肪酸自身气味阈值较高, 对乳基整体风味的贡献相对有限。经杀菌工艺后, 2-戊基呋喃产生坚果香和焦糖香, 其余关键气味物质的ROAV有所提高, 香气更加浓郁。

在湿法混合过程中加入了多种营养素。共检出8种新的关键气味活性物质, 分别为戊醛、辛醛、癸醛、2-庚烯醛、2-辛烯醛、2-癸烯醛、2-十一烯醛和2, 4-十二烯醛, 2-庚烯醛对气味具有修饰作用。壬醛仍是最主要的挥发性气味物质, 但 $\delta$ -癸内酯的风味贡献显著降低, 新检出物质(如辛醛、2-辛烯醛、2-壬烯醛、2, 4-壬二烯醛)的风味贡献较为显著, 赋予配方奶粉较强的青草香、果香、黄瓜味、脂肪味、蜡味和泥土味。

干燥工艺因涉及较长时间的热处理, 对风味影响较大。经干燥处理后, 主要的挥发性气味物质由壬醛变为2-壬烯醛, 己醛对风味的影响提高, 脂肪味对配方奶粉气味的贡献明显提升,  $\delta$ -癸内酯的风味贡献进一步降低, 削弱了配方奶粉的果香。2, 4-十二碳二烯醛贡献的脂肪、柑橘香气降低。庚醛和1-辛烯-3-醇是新检出的关键气味活性物质, 二者可作为脂质氧化的指标, 分别呈现油脂香和蘑菇、玫瑰香气, 但由于其ROAV值低, 对风味的贡献不大<sup>[36]</sup>。

成品奶粉中添加了较多热敏性营养素, 如DHA、ARA等多不饱和脂肪酸; 此外在奶粉成品过程中存在扩散效应, 对配方奶粉风味有影响。在成品配方奶粉中, 壬醛、2-壬烯醛和辛醛是主要的气味活性物质, 与经过湿法混合的样品类似。己醛对风味的贡献更高, 提供了更显著的青草香和油脂香。2-辛烯醛对气味的贡献明显下降, 削弱了配方奶粉的黄瓜味、柑橘皮和甜味。2, 4-壬二烯醛是仅在成品配方奶粉中检出的气味活性化合物, 且具有较高贡献, 提供了坚果、油炸和脂肪香气。二甲基二硫醚与二甲基三硫醚在成品奶粉中均有检出, 二者是牛奶蒸煮风味的核心来源。已有文献表明, 硫化物的生成与牛奶杀菌工艺存在关联<sup>[37]</sup>, 但本研究中这两种关键风味物质仅在成品乳粉中被检测到, 因此推测其来源并非杀菌工序, 而可能与干燥后添加的热敏性营养组分相关。

**2.3.3 生产工艺对风味的影响及优化建议** 在配方奶粉生产过程中, 灭菌工艺对风味的影响较小<sup>[38]</sup>, 而湿法混合工艺中产生了新的关键挥发性气味物质<sup>[39]</sup>。干燥过程及成品中, 关键挥发性气味物质对风味的贡献比例发生了明显改变, 导致成品乳粉的风味与乳基差异显著。湿法混合中通常添加非热敏性营养素, 但本研究结果表明在此步骤中发生了风味劣变。为减少配方奶粉生产过程中出现的风味劣变现象, 需进一步优化现有生产工艺参数, 同时可采用其他辅助手段(如对脂质进行包封处理、添加维生素C等生物源性抗氧化剂), 以减轻热处理环节引发的脂质氧化反应, 从而改善奶粉风味品质。

基于上述挥发性气味物质的变化规律, 本研究建议生产厂家采取以下措施: 一是精准调控灭菌、喷雾干燥及流化床干燥的温度与保温时间, 降低热处理强度以抑制脂质氧化、美拉德反应引发的风味劣变; 二是对植物油、DHA、ARA等易氧化致腥的风味敏感组分采用微囊包封技术, 减少其与氧气接触; 三是在生产中适量添加维生素C、维生素E等抗氧化剂, 从源头阻断氧化异味生成。通过上述方

法稳定生产全过程风味,减少异味产生。

### 3 结 论

本研究收集了婴幼儿配方奶粉生产过程中乳基、灭菌乳、湿混乳、干燥粉末、成品乳粉5个阶段的样品,采用HS-SPME/GC-MS分析其挥发性气味物质,并用ROAV分析风味随生产过程中的变化。共检出46种挥发性化合物,其中醛类种类最多(己醛、壬醛、辛醛、2-壬烯醛等),对风味影响较大。灭菌工艺使部分羧酸类含量改变但对风味的影响不大,湿法混合工艺后挥发性化合物成分发生变化,检测出更多的关键气味化合物;干燥工艺中的热处理可能导致脂质氧化,进而引起挥发性化合物含量变化,风味改变;成品乳粉中热敏性营养素添加及扩散效应导致风味进一步变化。生产过程中的热处理和营养素添加影响挥发性气味物质含量,导致成品与乳基风味不同。因此,未来研究应探索控制热处理条件、脂质包封或添加抗氧化剂等措施对抑制风味劣变的效果,为婴幼儿配方奶粉风味优化和婴幼儿接受度改善提供科学依据,为行业风味品质控制技术研发、工艺升级与标准完善奠定理论基础。

#### 参考文献:

- [1] Li J C, Zhu F. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.*, **2024**, 23(3): e13337.
- [2] Wang J F, Yang M Y, Xi Y M, Wang W Z, Zhao L, Xue S Y, Su Y F, Sun B G, Ai N S. *Food Chem.*, **2026**, 508: 148532.
- [3] Martin C, Ling P R, Blackburn G. *Nutrients*, **2016**, 8(5): 279.
- [4] Li Y L, Wang H Y, Li R T, Liu G R, Zhong K, Gao L P, Zhu B Q, Jin A W, Shi B L, Zhao L, Wang S S. *Curr. Res. Food Sci.*, **2023**, 7: 100645.
- [5] Masum A K M, Chandrapala J, Huppertz T, Adhikari B, Zisu B. *Dry. Technol.*, **2021**, 39(11): 1492–1512.
- [6] Jia H F, Li Y Y, Zhao T W, Li Z M, Yang X Y, Zhang W, Zhao Q Y, Jiang Y J. *Food Res. Int.*, **2025**, 221: 117428.
- [7] Chen Q X, Yin Q L, Xie Q G, Liu S B, Guo Z W, Li B L. *Food Chem.*, **2023**, 410: 135413.
- [8] Aoyama S, Toshima T, Saito Y, Konishi N, Motoshige K, Ishikawa N, Nakamura K, Kobayashi M. *Early Hum. Dev.*, **2010**, 86(9): 541–545.
- [9] Siefarth C, Serfert Y, Drusch S, Buettner A. *Foods*, **2013**, 3(1): 30–65.
- [10] Cao J X, Cui X L, Lu H, Wang H, Ma W, Yue Z, Zhen K M, Wei Q S, Li H M, Jiang S L, Ying W T. *Food Chem.*, **2025**, 465: 141981.
- [11] Lopez C, Cauty C, Guyomarc'h F. *Dairy Sci. Technol.*, **2015**, 95(6): 863–893.
- [12] Innis S M. *Proc. Nutr. Soc.*, **2007**, 66(3): 397–404.
- [13] Liu D Y, Zhou G H, Xu X L. *Food Sci.* (刘登勇, 周光宏, 徐幸莲. 食品科学), **2008**, 29(7): 370–374.
- [14] Zhang H, Zhang Y, Wang L J, Song H L, Li Z H. *Food Chem.*, **2022**, 382: 132348.
- [15] Cheng H, Zhu R G, Erichsen H, Soerensen J, Petersen M A, Skibsted L H. *Int. Dairy J.*, **2017**, 73: 166–174.
- [16] Daoud S, Bou-Maroun E, Waschatko G, Horemans B, Mestdagh R, Billecke N, Cayot P. *Foods*, **2020**, 9(10): 1432.
- [17] Salas Lorenzo I, Chisaguano Tonato A M, De La Garza Puentes A, Nieto A, Herrmann F, Dieguez E, Castellote A I, López-Sabater M C, Rodríguez-Palmero M, Campoy C. *Nutrients*, **2019**, 11(3): 602.
- [18] Yang P, Liu C, Song H L, Wang L J, Wang X Q, Hua J C. *LWT*, **2020**, 119: 108861.
- [19] Wu D, Zhang L, Zhang Y, Shi J, Tan C P, Zheng Z, Liu Y. *Foods*, **2023**, 12(3): 600.
- [20] Lloyd M A, Drake M A, Gerard P D. *J. Food Sci.*, **2009**, 74(7): S334–343.
- [21] Chávez-Servín J L, Castellote A I, López-Sabater M C. *Food Chem.*, **2008**, 107(1): 558–569.
- [22] Ye Q, Tan J R, He X R, Wang C X, Liu X Y, Li C, Fang Z F, Chen H, Liu Y T, Chen S Y, Zeng Z. *Int. J. Food Sci. Technol.*, **2024**, 59(3): 1248–1259.
- [23] Contador R, Delgado F J, García-Parra J, Garrido M, Ramírez R. *Food Chem.*, **2015**, 180: 17–24.
- [24] Muelbert M, Galante L, Alexander T, Harding J E, Pook C, Bloomfield F H. *Pediatr. Res.*, **2022**, 91(6): 1493–1504.
- [25] Yang Z H, Li J J, Guo X M. *Foods*, **2024**, 13(5): 648.
- [26] Vagenas G, Roussis I G. *Int. J. Food Prop.*, **2012**, 15(3): 665–682.
- [27] Knutsen H K, Alexander J, Barregård L, Bignami M, Brüschweiler B, Ceccatelli S, Cottrill B, Dinovi M, Edler L, Grasl-Kraupp B, Hogstrand C R, Hoogenboom L, Nebbia C S, Oswald I P, Petersen A, Rose M, Roudot A C, Schwerdtle T, Vleminckx C, Vollmer G, Chipman K, De Meulenaer B, Dinovi M, Mennes W, Schlatter J, Schrenk D, Baert K, Dujardin B, Wallace H. *EFSA J.*, **2017**, 15(10): 5005.

- [28] Custodio-Mendoza J A, Muñoz-Menendez L, España-Fariñas M P, Valente I M, Rodrigues J A, Almeida P J, Lorenzo R A, Carro A M. *Anal. Chim. Acta*, **2024**, 1288: 342164.
- [29] Thomsen M K, Lauridsen L, Skibsted L H, Risbo J. *J. Agric. Food Chem.*, **2005**, 53(18): 7082-7090.
- [30] Li Y L, Li R T, Hu X Y, Liu J N, Liu G R, Gao L P, Zhang Y J, Wang H Y, Zhu B Q. *Curr. Res. Food Sci.*, **2024**, 8: 100693.
- [31] Biolatto A, Grigioni G, Irurueta M, Sancho A M, Taverna M, Pensel N. *Food Chem.*, **2007**, 103(3): 960-967.
- [32] Wang S R, Zha L, Cui X, Yeh Y T, Liu R C, Jing J, Shi H D, Chen W P, Hanover J, Yin J, Yu L Q, Xue B Z, Shi H. *Adv. Sci.*, **2023**, 10(20): 2206068.
- [33] Pan Y J, Liu J W, Guan L, Luo Y T, Liu X, Zhang H. *Food Chem.*, **2026**, 501: 147639.
- [34] Masum A K M, Chandrapala J, Huppertz T, Adhikari B, Zisu B. *Int. Dairy J.*, **2020**, 105: 104696.
- [35] Shen C, Yu Y Y, Zhang X, Zhang H Q, Chu M J, Yuan B, Guo Y, Li Y P, Zhou J D, Mao J, Xu X. *Food Res. Int.*, **2024**, 198: 115319.
- [36] Wei B C. *Characterization of Phospholipid Profiles in Human Milk and Flavor Monitoring of Infant Formula Based on Chromatography-Mass Spectrometry Technology*. Beijing: Beijing University of Chemical Technology (魏博琛. 基于色谱质谱技术的母乳磷脂特征解析及婴幼儿配方奶粉风味监测研究. 北京: 北京化工大学), **2025**.
- [37] He Y Z, Chen L, Zheng L F, Cheng F, Deng Z Y, Luo T, Li J. *Eur. Food Res. Technol.*, **2022**, 248(11): 2679-2694.
- [38] Wang M Q, Yuan X W, Zheng Y, Wu Z Y, Li H B, Li H J, Yu J H. *Food Chem.*, **2022**, 395: 133576.
- [39] Wei X X, Zhu L L, Song Z X, Jing Y, Li H Z, Xie J H, Shen M Y. *Food Chem.*, **2026**, 508: 148400.

(责任编辑: 丁 岩)