DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250811004
引用格式: 靳安文, 史波林, 解庆刚, 等. 气相色谱-离子迁移谱法快速表征婴幼儿奶粉香气特征并解析决定消费者喜好的感官驱动因素[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(2): 248–260.
JIN ANW, SHI BL, XIE QG, *et al*. Rapid characterization of the aroma characteristics of infant formula and assessment of sensory drivers determining consumer preferences by gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(2): 248–260. (in Chinese with English abstract).

气相色谱-离子迁移谱法快速表征婴幼儿奶粉香气特征并解析决定消费者喜好的感官驱动因素

靳安文[1], 史波林[2,3], 解庆刚[1], 钟 葵[2,3], 刘桂荣[1], 赵 镭[2,3], 高利鹏[1], 汪厚银[2,3*]

[1. 黑龙江飞鹤乳业有限公司, 齐齐哈尔 164800; 2. 中国标准化研究院农业食品标准化研究所, 北京 100091; 3. 国家市场监督管理总局重点实验室(食品感官分析), 北京 100091]

摘 要: 目的 探究影响三段婴幼儿奶粉消费者喜好的感官驱动因素。**方法** 分别采用气相色谱-离子迁移谱法(gas chromatography-ion mobility spectrometry, GC-IMS)、定量描述性分析(quantitative descriptive analysis, QDA)和消费者测试对婴幼儿奶粉的香气化合物、感官特征和消费者喜好进行分析, 并对分析结果进行相关性分析同时建立相关性网络。**结果** 通过 GC-IMS 共检测到 62 个香气物质, 且不同储藏时间奶粉香气构成存在显著差异。消费者测试结果表明随着储藏时间的延长, 消费者喜好度显著下降。感官评价结果表明甜味、奶香味、奶油味、蛋黄味是三段奶粉的典型感官特征, 而鱼腥味和氧化味则是主要异味, 且随着储藏时间的延长两个异味得分显著增高而其他典型香气得分则略有降低。相关性分析结果表明奶香味、奶油味和甜味代表了影响消费者喜好的关键感官因素, 而醛类化合物己醛(A7)、2-己烯醛(A8)、(*Z*)-4-庚烯醛(A11)、丁醛(A23); 酮类化合物 2,3-丁二酮(B2)、3-羟基-2-丁酮(B6)、3-辛酮(B9); 醇类化合物 1-戊醇单体(C3)、1-戊醇二聚体(C4); 烯烃类化合物 *α*-水芹烯(G5)、*p*-伞花烃(G9)是引起奶粉感官特征变化的标志性化合物。**结论** 感官属性是消费者对产品最直观的感知, 直接决定其对产品的喜好。对于婴幼儿奶粉, 消费者对产品的典型风味比对异味更感兴趣。此外, 可以采用 GC-IMS 对婴幼儿奶粉储藏过程中可以引起感官特征变化的标志性化合物快速检测, 从而分析产品的感官特征并预测消费者喜好。本研究旨在为婴幼儿奶粉质量控制和消费者喜好维持提供数据基础, 并为相关企业提供稳定、快速的香气化合物分析流程。

关键词: 婴幼儿奶粉; 气相色谱-离子迁移谱法; 消费者喜好; 感官特征; 相关性分析

收稿日期: 2025-08-11
基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(562025Y-12492)

第一作者: 靳安文(1994—), 女, 主要研究方向为食品质量与安全。E-mail: jinanwen@feihe.com
***通信作者:** 汪厚银(1974—), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要研究方向为食品感官分析标准化。E-mail: houyinw@126.com

Rapid characterization of the aroma characteristics of infant formula and assessment of sensory drivers determining consumer preferences by gas chromatography-ion mobility spectrometry

JIN An-Wen[1], SHI Bo-Lin[2,3], XIE Qing-Gang[1], ZHONG Kui[2,3], LIU Gui-Rong[1], ZHAO Lei[2,3], GAO Li-Peng[1], WANG Hou-Yin[2,3*]

(1. *Heilongjiang Feihe Dairy Co*., *Ltd*., *Qiqihar* 164800, *China*; 2. *Sub-institute of Food and Agriculture Standardization, China National Institute of Standardization*, *Beijing* 100091, *China*; 3. *Key Laboratory of Food Sensory Analysis*, *State Administration for Market Regulation*, *Beijing* 100091, *China*)

ABSTRACT: Objective To explore the sensory drivers influencing consumer preferences for three-stage infant formula. **Methods** Gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS), quantitative descriptive analysis (QDA) and consumer tests were employed to conduct an analysis of the aroma compounds, sensory characteristics and consumer preferences of infant formulas, respectively. Subsequently, the obtained results were correlated to establish a correlation network. **Results** A total of 62 aroma substances were detected by GC-IMS, and notable differences existed in the aroma composition characteristics of infant formula with varying storage durations. The results of the consumer test showed that the consumer preference decreased significantly with the increase of storage time. And the results of sensory evaluation indicated that T-sweet, milky, creamy and eggy were the main characteristic attributes of the 3-stage infant formula. Conversely, fishy and oxidization odors were identified as the primary off-flavors. Moreover, the scores of these two off-flavors increased notably as the storage extended, whereas the scores of the other characteristic aromas decreased marginally. The findings of the correlation analysis demonstrated that milky, creamy and T-sweet were the primary sensory drivers affecting consumer preferences. Meanwhile, aldehydes, namely 1-hexanal (A7), 2-hexenal (A8), (*Z*)-4-heptenal (A11) and butanal (A23); ketones, specifically 2,3-butanedione (B2), acetoin (B6) and 3-octanone (B9); alcohol compounds 1-pentanol (C3), 1-pentanol (C4); and olefin compounds *α*-phellandrene (G5), *p*-cymene (G9) could serve as sensory-markers leading to alterations in the sensory profiles of infant formula. **Conclusion** Sensory attributes represent the most direct and intuitive way through which consumers perceive a product, and they directly influence consumers' preferences for the product. Regarding infant formula, consumers exhibit a greater interest in the typical flavor of the product than in the off-flavor. Therefore, GC-IMS can be employed for the rapid detection of sensory-markers. These compounds can be utilized to analyze the sensory characteristics of products and, consequently, forecast consumer preferences. This study will provide a data base for the quality control of infant formula and the maintenance of consumer preference, and provide a stable and rapid testing and analyzing process for aroma compounds to related enterprises.

KEY WORDS: infant formula; gas chromatography-ion mobility spectrometry; consumer preferences; sensory characteristics; correlation analysis

0 引 言

刚出生的新生儿肠胃系统发育尚不成熟(比如胰腺酶分泌不足、肠道菌群不稳定、胃肠蠕动能力弱), 直到 3 岁才会发育至接近成人水平[1]。儿童营养学也强调"生命早期 1000 d(包括产前时期和出生后的头两年)"的关键作用, 因而新生儿早期营养摄入尤其重要, 直接影响随后的认知活动和社会情感发育[2]。母乳通常被认为是婴幼儿喂养的黄金标准, 然而由于各种原因(例如母乳不合适或不足, 母亲需要上班等), 许多婴儿无法实现完全母乳喂养。此时, 婴幼儿奶粉作为一种即时替代品为婴儿生长发育提供营养物质, 也是大多数婴儿成长早期的唯一营养来源。

目前市面上主要有 3 类婴幼儿奶粉以满足不同生长发育阶段婴儿的营养需求, 其中一段奶粉适用于 0~6 个月大的婴儿, 二段奶粉适用于 6~12 个月大的婴儿, 三段奶粉适用于 12~36 个月大的幼儿[3–4]。消费者的脆弱性使婴幼儿奶粉的生产明显区别于其他加工产品或乳制品, 不仅有相当严格的执行标准还需接受严格的监管。我国也相应地制定了多项婴幼儿食品的国家标准, 包括 GB 10765—2021《食品安全国家标准 婴儿配方食品》、GB 10766—2021《食品

安全国家标准 较大婴儿配方食品》、GB 10767—2021《食品安全国家标准 幼儿配方食品》。根据要求，婴幼儿奶粉必须含有充足的营养物质以保证婴儿生长发育过程中能量和营养需求，包括主要营养物质(蛋白质，脂肪和碳水化合物)以及多种微量元素。通常婴幼儿奶粉中还会添加功能性多不饱和脂肪酸，如二十二碳六烯酸(docosahexaenoic acid, DHA)和花生四烯酸(arachidonic acid, ARA)以提高奶粉的质量和营养成分[5]。然而这些化合物并不稳定，在生产、运输、储存过程中会引起品质变化，如受自由基引发的蛋白质氧化反应[6]、长链多不饱和脂肪酸引发的脂质氧化反应[5,7–8]、乳糖和赖氨酸引发的美拉德反应[9–10]等。刘成龙等[11]和李玮[12]对婴幼儿奶粉中营养素损失率进行研究，结果表明 3 大营养物质在储藏 6 个月后含量均有不同程度降低，说明这些化合物在储藏过程中存在不同程度的氧化，通常会产生一些醛酮醇类物质[13–16]。这些物质的香气阈值都很低，因而微弱的变化就会被消费者察觉。这就导致保质期内产品在营养物质含量明显变化之前感官特征就发生了明显变化，此时消费者就会拒绝购买产品，进而造成浪费，甚至影响消费者对品牌的印象。这说明解析婴幼儿奶粉在储存过程中香气化合物变化有助于评估产品质量，了解消费者喜好。

已有多项研究采用气相色谱-质谱法(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)或气相色谱-嗅闻-质谱法(gas chromatography-olfactometry-mass spectrometry, GC-O-MS)对不同贮藏期的香气化合物进行定性定量分析以研究影响香气变化的因素[15,17–21]，这些研究结果表明婴幼儿奶粉中香气物质主要为醛、酮、醇、酯、呋喃以及含硫化合物等物质。尽管 GC-MS 可以准确地对香气物质进行定性定量，但其对多组分体系分析需要较长的分析时间(通常≥60 min)导致分析效率低，不能满足企业质量监控时大批量样品检测需求，因而有必要建立一套适用于企业的批量产品检测的分析流程。气相色谱-离子迁移谱法(gas chromatography-ion mobility spectrometry, GC-IMS)的双重分离机制(气相色谱分离和离子迁移谱分离)可以大大缩短分析时间(通常可以缩短至 30 min)，常用于香气物质的快速追踪。GC-IMS 作为一种新型香气分析技术，结合了 GC 和 IMS 的优点，具有快速、灵敏和预处理简单的特点[22]，并被广泛用于香气物质的快速追踪和细微差别区分[23–25]。且 GC-IMS 在酯、醇、酮、醛等物质的检测中有很好的表现，同时简单的样品前处理使检测到的香气化合物更贴合消费者感知情况。此外，GC-IMS 高分辨率、高精度的可视化指纹图谱分析也使婴幼儿奶粉的批量监控更容易。因此，使用 GC-IMS 对不同储藏时间下婴幼儿奶粉香气化合物进行表征有助于快速评估产品质量，同时预测消费者喜好。

虽然婴儿在 6 个月后便开始逐渐添加辅食进行喂养[4]，但婴幼儿奶粉仍是主要的营养摄入途径。由于此阶段的婴儿开始接触其他食物，因而保证奶粉保质期内稳定的感官特征对婴儿的稳定进食更为重要(尤其是 12 个月龄后婴儿，因为此时需要逐步培养婴儿规律的进食模式，以达到“三餐两点”的稳定进食模式)。因而本研究以三段婴幼儿奶粉为研究对象，通过 GC-IMS 对其香气成分快速表征，同时分析不同储藏时间奶粉感官特征及消费者喜好进而评估香气成分对感官特征及消费者喜好的影响。本研究以期为维持货架期内婴幼儿奶粉感官质量的稳定性和消费者喜好提供指导，同时也为新产品开发过程中的有益风味物质控制和储存期间质量控制提供了数据支持。

1 材料与方法

1.1 样品、试剂与仪器

本研究以飞鹤星飞帆三段婴幼儿奶粉(适合 12~36 个月幼儿食用)作为试验样品。所有样品均由黑龙江飞鹤乳业有限公司提供。共选取储存时间介于 0~14 个月的 12 个批次样品，产品的生产日期及规格见表 1，其中新鲜样品(0 个月)作为对照。所有样品均在室温(温度保持 25 ℃±2 ℃，湿度保持 55%±5%)下储存，并在实验开始时统一打开。

纯牛奶(君乐宝食品有限公司)；动物稀奶油(上海妙可蓝多公司)；脱脂牛奶[内蒙古蒙牛乳业(集团)股份有限公司]；DHA 粉末(纯度≥7%)、ARA 粉(纯度≥10%)[佳必优生物技术(武汉)有限公司]；蛋黄香精(泛亚食品科技有限公司)；白砂糖(北京糖业烟酒集团有限公司)；2,4-壬二醛(纯度≥89%)、3-甲基丁醛(纯度≥87%)(美国 Sigma-Aldrich 公司)。

ME204 型电子天平[精度 0.0001 g，梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司]；IFEX 自动顶空萃取系统(瑞士思特斯分析仪器有限公司)；FlavourSpec®GC-IMS(德国 G.A.S 公司)；MXT-5 石英毛细管柱(15 m×0.53 mm, 1 μm，美国瑞思泰康科技有限公司)。

1.2 GC-IMS 分析

在 20 mL 顶空瓶中准确称取 2 g 婴幼儿奶粉样品进行分析，每个样品重复两次。顶空温度为 70 ℃，孵化时间为 20 min，振荡速率为 500 r/min，进样针温度为 85 ℃，进样量为 500 μL，清洗时间为 0.5 min。色谱柱为 MXT-5 (15 m×0.53 mm, 1 μm)石英毛细管柱，柱温为 60 ℃，载气为 N_2(纯度为 99.999%)。分析程序如下：初始流速为 2.0 mL/min，保持 2 min；然后在 10 min 内增至 10 mL/min；再在 10 min 内增至 100 mL/min；最后在 10 min 内增至 150 mL/min，总运行时间为 30 min。IMS 条件如下：漂移管长度为 98 mm，电压为 500 V/cm，温度为 45 ℃，漂移气体为 N_2(纯度为 99.999%)，流速为 150 mL/min，电离模式为正离子。

表 1 婴幼儿奶粉样品的具体信息

Table 1 Specific informations of the infant formula samples

序号	样品编号	储存时间/月	生产日期	产品规格/(g/罐)
1	IF-0M	0	20220908	700
2	IF-1M	1	20220810	700
3	IF-2M	2	20220702	700
4	IF-3M	3	20220626	700
5	IF-4M	4	20220503	700
6	IF-5M	5	20220417	700
7	IF-6M	6	20220304	700
8	IF-7M	7	20220214	700
9	IF-8M	8	20220129	700
10	IF-9M	9	20211221	700
11	IF-10M	10	20211109	700
12	IF-11M	11	20211020	700
13	IF-14M	14	20210711	700

1.3 感官评价和消费者测试

1.3.1 样品处理

所有样品均在同一天打开, 并立即分装至 250 mL 聚对苯二甲酸乙二醇酯(polyethylene terephthalate, PET)盒中(50 g/盒), 以避免频繁开罐对样品风味的影响。根据说明书, 样品用 45 ℃温水进行冲调。然后将 10 mL 冲调好的样品置于 20 mL 标有 3 位随机编码的食品级 PET 瓶中, 并于 45 ℃下保温备用。

1.3.2 消费者测试

考虑到妈妈是婴幼儿喂养及相关食品采购的主力军, 因而本研究对 100 名在过去 3 年内于北京各区购买过三段婴幼儿奶粉的妈妈进行了消费者测试。使用 9 点喜好度量表进行消费者测试(1-极不喜欢, 2-非常不喜欢, 3-不喜欢, 4-有点不喜欢, 5-不太喜欢, 6-有点喜欢, 7-喜欢, 8-非常喜欢, 9-极喜欢), 并在测试中遵循 GB/T 39501—2020《感官分析 定量响应标度使用导则》要求。样品按照完全随机区组设计提供以平衡位置效应。

1.3.3 感官评价

在感官评价之前, 采用 ISO 3972: 1991 对感官评价员进行感官敏感度筛选, 然后采用 ISO 4212(2003)对筛选到的评价员进行培训, 最终得到由 12 名评价员(5 男 7 女, 平均年龄为 23.3 岁±2.68 岁)组成的评价小组。进而对评级小组进行为期 3 个月的培训。

在正式实验之前, 共定义了 6 个感官描述词及其参比样并对其进行释义。每个描述词的详细信息见表 2。采用 9 点标度(1~2 代表“非常弱”, 3~4 代表“轻微弱”, 5~6 代表“中等”, 7~8 代表“稍强”, 9 代表“非常强”)对每个样品的感官强度进行评价, 每个样品重复评价 2 次, 样品按照完全随机区组设计提供以平衡位置效应。每个样品评价完需采取嗅闻手臂、衣袖, 食用苏打饼干, 喝纯净水等方法消除香气和味道干扰, 缓解感官疲劳。

1.4 数据处理

采用 R(3.6.3)进行方差分析, 主成分分析(principal components analysis, PCA)使用 GC-IMS 内置软件分析, 使用 chiplot (http://www.chiplot.online)进行相关性分析和相关网络分析, 使用 Origin 2021 进行图形绘制。

2 结果与分析

2.1 婴幼儿奶粉香气化合物分析结果

本研究采用 GC-IMS 对不同储藏时间婴幼儿奶粉香气物质进行快速表征, 并评估其在货架期内婴幼儿奶粉品质判定中的适用性。由于婴幼儿奶粉在送至消费者手上之前通常会经历长时间长距离的运输和分销[30], 因而对储存 1 个月(IF-1M)至 14 个月(IF-14M)的婴幼儿奶粉香气物质特征进行分析, 结合保留时间和迁移时间对香气物质进行定性分析, 结果见表 3。在不同储藏时期的样品中共检测到 62 个香气化合物(包括单体和二聚体)。这些化合物包括 23 个(37%)醛类物质, 11 个(18%)酮类物质, 9 个(15%)醇类物质, 9 个(15%)烯烃类物质, 4 个(6%)酯类物质, 2 个(3%)酸类物质以及 4 个(6%)其他物质。这与之前的研究一致, WANG 等[31]也用 GC-IMS 在婴幼儿奶粉中检测到大量的醛, 酮, 醇, 酸类物质。图 1 呈现的是检测到的香气化合物和已报道化合物[31−32]的比对结果。对于检测到的 62 个香气化合物, 37%的化合物也可以通过 GC-MS[17]检测到, 主要为

表 2 婴幼儿奶粉感官描述词、定义、参比样及相应参比强度

Table 2 Sensory description words, definitions, reference samples and corresponding reference intensities for infant formula

描述词	定义	参比样	参比样香气强度
奶香味[26]	类似于生牛乳的香气	君乐宝纯牛奶	*n*=8
奶油味[27]	类似于奶油和全脂牛奶的香气	于 30 mL 蒙牛脱脂奶中加入 0.5 mL 稀奶油	*n*=5
鱼腥味[28]	活鱼的气味	20 mL 纯净水+0.4 g DHA +0.2 g ARA	*n*=7
蛋黄味[28]	咸蛋黄的香气	于 30 mL 纯净水中加入 0.01 g 蛋黄香精	*n*=5
氧化味	油脂酸败的气味	30 mL 纯净水+0.2 μL 2,4-壬二醛+0.7 μL 3-甲基丁醛	*n*=6
甜味[29]	无描述	质量浓度为 64 g/L 的白砂糖溶液	*n*=9

表 3 不同储存时间婴幼儿奶粉 GC-IMS 定性结果

Table 3 Qualitative results of GC-IMS for infant formula at different storage times

类别	序号	化合物英文名	化合物中文名	CAS	分子式	分子量/(g/mol)	保留时间/s	迁移时间/ms	注释[a]	香气描述[b]
醛	A1	nonanal	壬醛	C124196	$C_9H_{18}O$	142.2	1089.2	799.498	单体	脂肪香
	A2	nonanal	壬醛	C124196	$C_9H_{18}O$	142.2	1084.7	788.838	二聚体	脂肪香
	A3	2-methyl butanal	2-甲基丁醛	C96173	$C_5H_{10}O$	86.1	634.8	161.492	-	/
	A4	*trans*-2-pentenal	反式-2-戊烯醛	C1576870	C_5H_8O	84.1	747.8	233.369	单体	清香、果香
	A5	*trans*-2-pentenal	反式-2-戊烯醛	C1576870	C_5H_8O	84.1	744.3	230.547	二聚体	清香、果香
	A6	1-hexanal	己醛	C66251	$C_6H_{12}O$	100.2	796.6	277.101	单体	青草香、清香
	A7	1-hexanal	己醛	C66251	C_6H_{12}	100.2	790.2	269.919	二聚体	青草香、清香
	A8	2-hexenal	2-己烯醛	C505577	$C_6H_{10}O$	98.1	847.5	334.682	单体	杏仁香、果香
	A9	2-hexenal	2-己烯醛	C505577	$C_6H_{10}O$	98.1	847.0	334.108	二聚体	杏仁香、果香
	A10	2-furaldehyde	糠醛	C98011	$C_5H_4O_2$	96.1	822.7	306.673	-	塑料味、涂料味
	A11	(*Z*)-4-heptenal	(*Z*)-4-庚烯醛	C6728310	$C_7H_{12}O$	112.2	892.5	385.858	-	脂肪香、奶香
	A12	heptanal	庚醛	C111717	$C_7H_{14}O$	114.2	901.3	402.507	单体	脂肪香、奶香
	A13	heptanal	庚醛	C111717	$C_7H_{14}O$	114.2	900.0	400.09	二聚体	脂肪香、奶香
	A14	(*E*)-2-heptenal	(*E*)-2-庚烯醛	C18829555	$C_7H_{12}O$	112.2	955.9	505.629	单体	脂肪香、清新香气、肥皂香
	A15	(*E*)-2-heptenal	(*E*)-2-庚烯醛	C18829555	$C_7H_{12}O$	112.2	954.5	502.932	二聚体	脂肪香、清新香气、肥皂香
	A16	benzaldehyde	苯甲醛	C100527	C_7H_6O	106.1	969.1	530.566	单体	杏仁香
	A17	benzaldehyde	苯甲醛	C100527	C_7H_6O	106.1	969.4	531.123	二聚体	杏仁香
	A18	2,4-heptadienal	2,4-庚二烯醛	C5910850	$C_7H_{10}O$	110.2	994.6	578.654	-	坚果香
	A19	octanal	辛醛	C124130	$C_8H_{16}O$	128.2	1007.7	608.547	单体	清新香气、清香、柑橘香
	A20	octanal	辛醛	C124130	$C_8H_{16}O$	128.2	1006.8	606.319	二聚体	清新香气、清香、柑橘香
	A21	pentanal	戊醛	C110623	$C_5H_{10}O$	86.1	693.2	188.909	单体	杏仁香、豆香
	A22	pentanal	戊醛	C110623	$C_5H_{10}O$	86.1	690.3	186.495	二聚体	杏仁香、豆香
	A23	butanal	丁醛	C123728	C_4H_8O	72.1	563.8	130.226	-	巧克力味、麦芽香
酮	B1	acetophenone	苯乙酮	C98862	C_8H_8O	120.2	1058.1	726.594	-	/
	B2	2,3-butanedione	2,3-丁二酮	C431038	$C_4H_6O_2$	86.1	574.9	135.103	-	黄油香、甜味、奶油味
	B3	2-butanone	2-丁酮	C78933	C_4H_8O	72.1	574.2	134.781	单体	酸奶味
	B4	2-butanone	2-丁酮	C78933	C_4H_8O	72.1	588.1	140.896	二聚体	酸奶味
	B5	1-penten-3-one	1-戊烯-3-酮	C1629589	C_5H_8O	84.1	689.1	185.559	-	涂料味、汽油味
	B6	acetoin	3-羟基-2-丁酮	C513860	$C_4H_8O_2$	88.1	729.3	218.364	单体	奶香
	B7	acetoin	3-羟基-2-丁酮	C513860	$C_4H_8O_2$	88.1	722.6	212.849	二聚体	奶香
	B8	1-octen-3-one	1-辛烯-3-酮	C4312996	$C_8H_{14}O$	126.2	979.7	550.618	-	蘑菇香
	B9	3-octanone	3-辛酮	C106683	$C_8H_{16}O$	128.2	985.9	562.315	-	蘑菇香
	B10	2-pentanone	2-戊酮	C107879	$C_5H_{10}O$	86.1	665.3	174.909	-	果香
	B11	2-heptanone	2-庚酮	C110430	$C_7H_{14}O$	114.2	892.1	385.167	-	肥皂香、奶油味
醇	C1	ethanol	乙醇	C64175	C_2H_6O	46.1	461.2	85.059	-	/
	C2	2-methylbutanol	2-甲基-1-丁醇	C137326	$C_5H_{12}O$	88.1	733.7	221.954	-	果香
	C3	1-pentanol	1-戊醇	C71410	$C_5H_{12}O$	88.1	766.9	249.015	单体	芳香
	C4	1-pentanol	1-戊醇	C71410	$C_5H_{12}O$	88.1	764.7	247.219	二聚体	芳香

表 3(续)

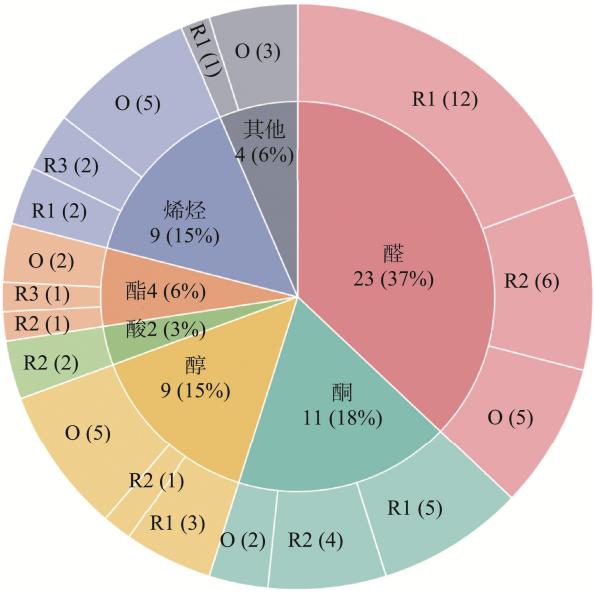
类别	序号	化合物英文名	化合物中文名	CAS	分子式	分子量/(g/mol)	保留时间/s	迁移时间/ms	注释[a]	香气描述[b]
醇	C5	(*Z*)-3-octen-1-ol	(*Z*)-3-辛烯-1-醇	C20125842	$C_8H_{16}O$	128.2	1052.1	712.417	-	蘑菇香
	C6	2-methylpropanol	2-甲基丙醇	C78831	$C_4H_{10}O$	74.1	640.1	163.807	-	果香
	C7	(*Z*)-2-penten-1-ol	(*Z*)-2-戊烯-1-醇	C1576950	$C_5H_{10}O$	86.1	767.4	249.420	-	/
	C8	3-methylpentanol	3-甲基-1-戊醇	C589355	$C_6H_{14}O$	102.2	847.0	334.105	-	可可香、清香、果香
	C9	1-phenylethanol	*α*-苯乙醇	C98851	$C_8H_{10}O$	122.2	1054.4	717.984	-	花香
酸	D1	propanoic acid	丙酸	C79094	$C_3H_6O_2$	74.1	697.5	192.409	-	/
	D2	butanoic acid	丁酸	C107926	$C_4H_8O_2$	88.1	772.3	253.402	-	/
酯	F1	ethyl propanoate	丙酸乙酯	C105373	$C_5H_{10}O_2$	102.1	702.3	196.301	-	/
	F2	3-methylbutyl butanoate	丁酸异戊酯	C106274	$C_9H_{18}O_2$	158.2	1065.8	744.500	-	/
	F3	butyl acetate	乙酸丁酯	C123864	$C_6H_{12}O_2$	116.2	784.7	263.606	-	果香
	F4	propyl acetate	乙酸丙酯	C109604	$C_5H_{10}O_2$	102.1	707.7	200.733	-	果香
烯烃	G1	*β*-pinene	*β*-蒎烯	C127913	$C_{10}H_{16}$	136.2	970.7	533.537	-	树脂味、松香
	G2	limonene	柠檬烯	C138863	$C_{10}H_{16}$	136.2	1025.5	650.255	单体	柑橘香
	G3	limonene	柠檬烯	C138863	$C_{10}H_{16}$	136.2	1026.2	651.926	二聚体	柑橘香
	G4	*γ*-terpinene	*γ*-萜品烯	C99854	$C_{10}H_{16}$	136.2	1063.3	738.818	-	柑橘香、柠檬香
	G5	*α*-phellandrene	*α*-水芹烯	C99832	$C_{10}H_{16}$	136.2	1006.5	605.786	-	药材香、木香
	G6	*p*-xylene	对二甲苯	C106423	C_8H_{10}	106.2	868.3	358.297	-	/
	G7	*α*-pinene	*α*-蒎烯	C80568	$C_{10}H_{16}$	136.2	936.0	468.033	单体	清新香气、樟脑香、松香
	G8	*α*-pinene	*α*-蒎烯	C80568	$C_{10}H_{16}$	136.2	934.8	465.741	二聚体	清新香气、樟脑香、松香
	G9	*p*-cymene	*p*-伞花烃	C99876	$C_{10}H_{14}$	134.2	1021.6	640.998		清新香气、柑橘香、烯萜类香气
其他	H1	2-pentylfuran	2-正戊基呋喃	C3777693	$C_9H_{14}O$	138.2	994.9	579.211	-	金属味、鱼腥味
	H2	diallyl disulfide	二烯丙基二硫醚	C2179579	$C_6H_{10}S_2$	146.3	1085.4	790.620	-	/
	H3	2-propanethiol	2-丙基硫醇	C75332	C_3H_8S	76.2	566.4	131.363	-	浓郁的熟洋葱味、硫磺味
	H4	diethyl disulfide	二乙基二硫醚	C110816	$C_4H_{10}S_2$	122.2	917.6	433.237	-	洋葱味、大蒜味

注: [a]表示 GC-IMS 对香气化合物进行分析时如果化合物含量过高则会形成二聚体甚至三聚体, 表中单体和二聚体分别表示该化合物在 GC-IMS 检测结果中分别以单体和二聚体的形式存在。-代表该化合物在 GC-IMS 检测结果中仅以单一形式存在。[b]表示香气描述均通过全风味信息系统(http://www.perflavory.com/index.html)检索, /代表此物质无香气特征, 对婴幼儿奶粉整体香气无贡献。

醛、酮、醇类物质。这些以醛和酮类为代表的羰基化合物被认为是乳制品中关键的香气活性成分[33]。这表明 GC-IMS 可以作为一种潜在的婴幼儿奶粉香气化合物的快速检测方法。此外, 28%的化合物(尤其是酸、酯类物质)与 CHI 等[32]和 WANG 等[31]通过 GC-IMS 检测到的香气物质重合, 这表明 GC-IMS 在婴幼儿奶粉中酸、酯类化合物的检测方面具有一定优势。这一现象可能归因于 GC-IMS 同时整合了 GC 和 IMS 这两种技术的高选择性分离能力, 从而拥有了更高灵敏度的分析可以突出样品香气中的细微差异[34]。在这方面, GC-IMS 对某些物质的检测性能优于 GC-MS。因此需要更深入地验证 GC-IMS 对不同储存时间婴幼儿奶粉的区分效果。

进一步采用全风味信息系统(http://www.perflavory.com/index.html)对检测到的化合物的香气特征进行检索。醛类物质主要呈现脂肪香、奶香、果香、清香等香气特征。这些醛类化合物主要为 C6~C9 的短链饱和醛, 如己醛(C6)、庚醛(C7)、苯甲醛(C7)、辛醛(C8)、壬醛(C9)等。短链饱和醛被认为是牛奶为原料的婴幼儿奶粉的主要物质[35]。甲基酮是脂肪酸 *β*-氧化的中间产物, 广泛存在于乳制品中[36]。婴幼儿奶粉中检测到的甲基酮主要有 2-丁酮、2-戊酮、2-庚酮, 呈现酸奶味、果香、黄油香等香气特征。此外, 还检测到呈现奶香的 3-羟基-2-丁酮, 奶油味的 2,3-丁二酮, 涂料和汽油味等异味的 1-戊烯-3-酮等物质。醛还原和氨基酸氧化会形成醇类物质[37], 包括呈现芳香的 1-戊醇和果香的 2-甲基

-1-丁醇等物质被检测到。此外，多种呈现柑橘、柠檬、松香等清新香气的烷烃类物质也有检测到。一些酯类、酸类、含硫化合物和呋喃类化合物也存在于婴幼儿奶粉中，这些物质同时决定了婴幼儿奶粉特有的香气特征。



注: R1 代表同时通过本研究和已报道的 GC-MS[17]同时检测到的香气化合物数量; R2 代表同时通过本研究和已报道的 GC-IMS[31]同时检测到的香气化合物数量; R3 代表同时通过本研究和已报道的 GC-IMS[32]同时检测到的香气化合物数量; O 代表仅在本研究中检测到的香气化合物数量。

图 1 婴儿配方奶粉中香气化合物的组成及与已报道研究的比较

Fig.1 Composition of volatile compounds in infant formula and comparison with reported studies

为了观察 GC-IMS 对不同储存时期样品的区分效果，根据化合物的信号强度对不同储藏时期样品进行 PCA 分析[图 2(a)]。从 PCA 得分图可以看到同一样品的两个重复分布比较紧凑，表明 GC-IMS 对样品响应的稳定性好。不同储藏时期样品可分为 3 类，大致可分为储藏初期样品(IF-1、IF-2、IF-3)、储藏中期样品(IF-4、IF-5、IF-6、IF-7)，和长期储藏样品(IF-8、IF-9、IF-10、IF-11、IF-14)。这表明 GC-IMS 可以作为一种婴幼儿奶粉快速且稳定检测方法用于检测货架期内奶粉品质。为了直观呈现不同样品之间的差异，绘制 gallery 图结果见图 2(b)。gallery 图中的每一行代表一个样品的所有信号峰，每一列代表不同样品对同一种香气物质的信号响应。从图 2(b)可以看出不同储藏时期样品香气组分存在明显差异。A 区域显示的是储藏初期样品区别于其他样品的特征化合物。此时期的优势香气物质主要有(*Z*)-4-庚烯醛(脂肪)、戊醛(杏仁，豆香)、3-甲基-1-戊醇(果香)、*α*-苯乙醇(花香)、乙酸丙酯(果香)等令人愉悦的香气特征，说明储藏初期样品整体呈现出令人愉悦的香气特征。B 区域显示的是储藏中期样品区别于其他样品的特征化合物，主要包括: 呈现柑橘、柠檬、松香等清新香气的烷烃类物质; 清香和果香的醛类物质; 奶香味的酮类物质; 以及呈现金属味和鱼腥味的 2-正戊基呋喃。表明此时期的奶粉就有异味的出现。C 区域显示的是长期储存样品区别于其他样品的物质，包括 2-己烯醛、庚醛、1-戊醇、(*Z*)-2-戊烯-1-醇。这些物质被认为是婴幼儿奶粉在储藏过程中反映脂质氧化的标志性化合物[19,38–39]。以上化合物[标记于图 2(b)的 A、B、C 区域]可作为判定婴儿奶粉储存时间的标志物。

总之，GC-IMS 作为一种稳定且快速的分析手段可以有效区分不同储藏时间婴幼儿奶粉样品，且可视化分析结果(gallery)可以呈现不同储藏时间样品的香气物质构成特征。化合物的构成特征可以直接反映在感官特征上，进而影响消费者喜好。因而进一步分析不同储藏时间样品消费者喜好和感官特征，以解析决定消费者喜好的感官驱动因素(香气化合物和感官特征)。

2.2 消费者测试结果

消费者使用 9 点偏好量表对不同储藏时期的样品进行评价，结果如图 3 所示。图 3(a)呈现的是消费者对不同储藏时期样品的整体喜好度，不同储藏时间样品的消费者整体喜好度介于 5.41~7.24 之间。由图 3(a)可以看出，随着储藏时间的延长，消费者对婴幼儿奶粉的喜好度整体呈下降趋势。对于储藏期，大致可以分为短期储藏(1~5 个月)和长期储藏(6~14 个月)。短期储藏样品消费者喜好度在 6.25~7.24 之间波动，且样品之间无显著差异(P<0.05)，说明此时期样品较为稳定。而长期储藏样品消费者喜好度则波动较大，在 5.41~6.29 之间，说明储藏后期物质变化反应活跃。其中两个时间段内消费者喜好波动可能与相关物质(尤其是挥发性香气物质)的生成、富集、挥发有关。这说明有必要对影响消费者喜好的感官驱动因素进行分析。此外，从图 3(b)中可以观察到大多数消费者对新鲜样品(IF-0M)的喜好度都介于 7~8 之间，对短期储存样品(≤5 个月)的喜好度介于 6~8，而对于较长时间储存的样品(>5 个月)则会降低至 4~7。喜好度降至 4 则说明消费者已经有点不喜欢样品了。说明大多数消费者都有能力区分不同储藏时间的样品，且更喜欢储存时间较短的新鲜样品，这决定消费者的购买欲望。这种现象同样存在于消费者在鲜切西瓜[40]和果汁[41]的选择中，且与消费者优先选择新鲜产品或接近生产日期的产品的行为是一致的。HOPPU 等[42]认为消费者喜好度和产品购买及使用欲望强烈相关，而感官属性是食品选择的基础，是消费者对产品最直观的感知，直接决定他们对产品的喜好。因而消费者不喜欢长时间储存的产品可能与储存期间关键感官属性的丧失或不良特征的出现有关。因此，进一步对样品在不同贮存时间的感官特性进行研究，以阐明影响消费者喜好的感官因素。

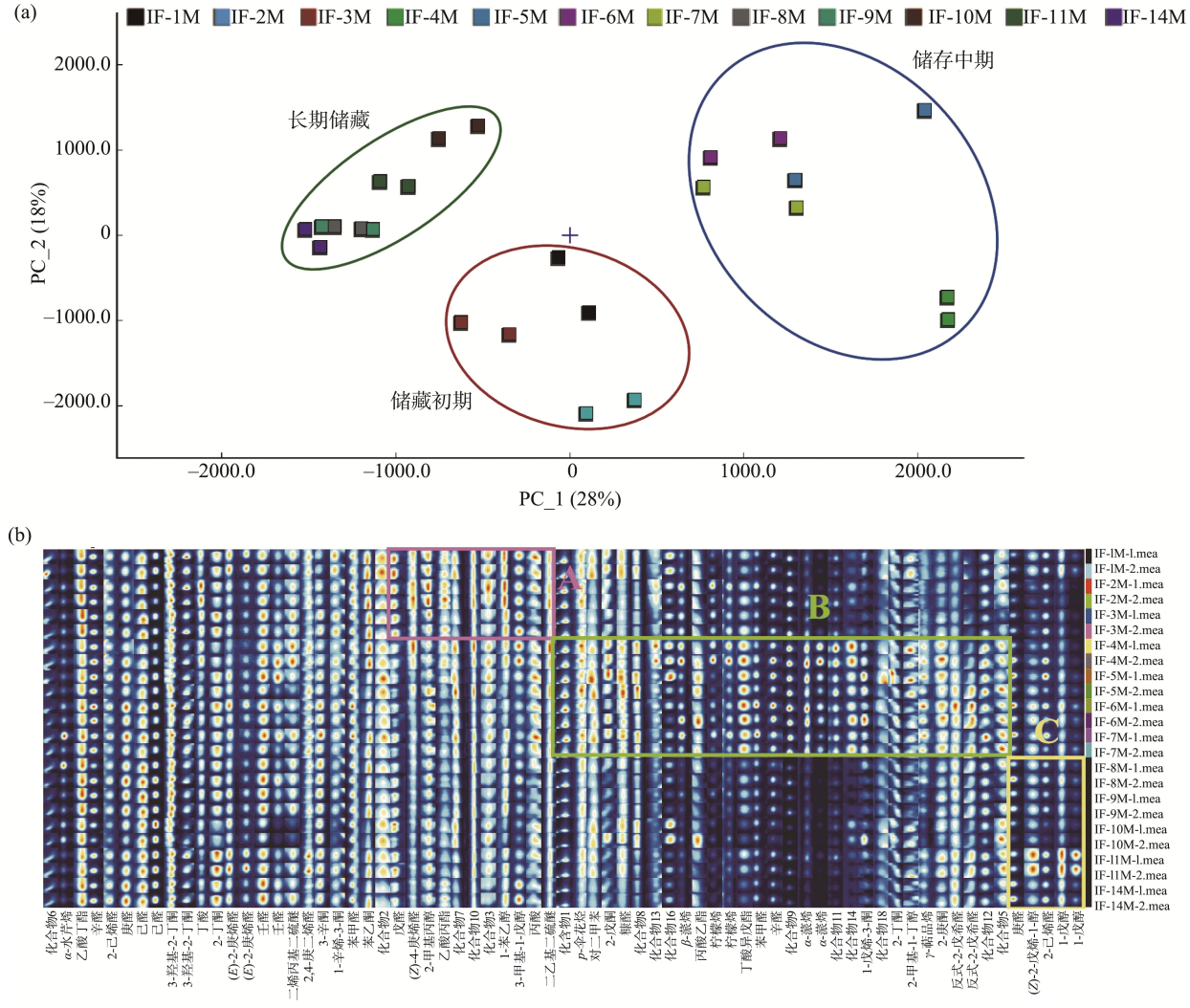
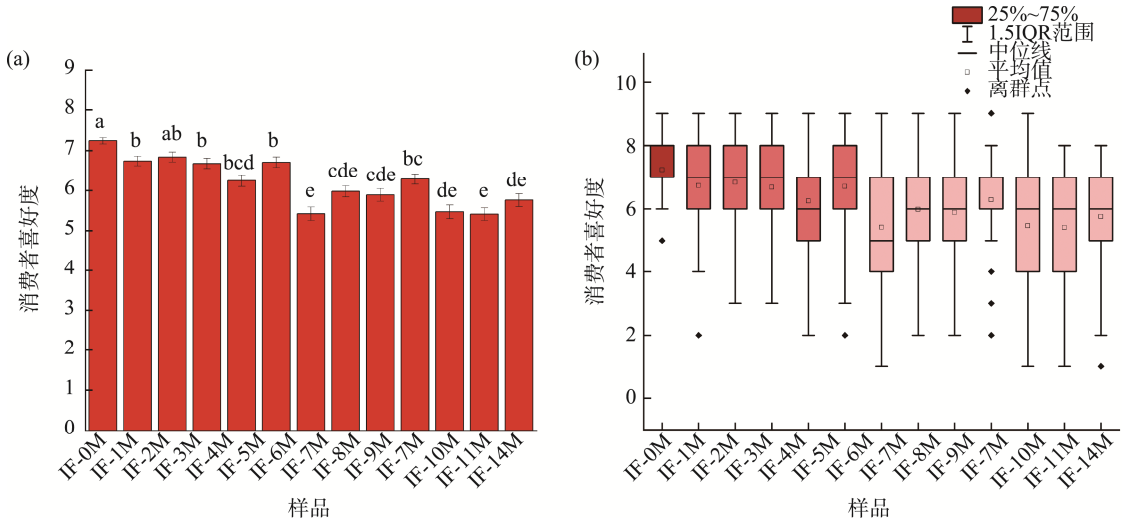


图 2 不同储存时间婴幼儿奶粉香气化合物 PCA 得分图(a)和 gallery 图(b)

Fig.2 PCA score plot (a) and the gallery plot (b) of volatile compounds of infant formula at different storage times



注: 不同字母表示组间具有显著性差异(P<0.05)。IQR(四分位数的间距, interquartile range)。

图 3 不同储藏时期婴幼儿奶粉消费者总体喜好(a)和箱图(b)(n=100)

Fig.3 Overall liking scores (a) and the box plot (b) of the infant formula at different storage periods (n=100)

2.3 感官评价结果

通常，感官描述词是由优选评价员组成的评价小组产生(GB/T 16861—1997《感官分析》 通过多元分析方法鉴定和选择用于建立感官剖面的描述词)。由于优选评价员的分析能力(感知灵敏度、感官评价技能等)明显超过普通消费者，因此感官小组产生的描述词并不适用于普通消费者[43]。为了更准确分析影响消费者喜好的感官因素，本研究从已报道的文献[26–29]中收集到 16 个感官描述词，然后由消费者进行筛选，最终得到 5 个消费者最认可的香气描述词，分别为奶香味、奶油味、鱼腥味、蛋黄味、氧化味。此外，由于婴儿更偏爱甜味[31]，因此将甜味也添加进了描述词清单最终得到 6 个代表性的感官描述词(表 2)。

图 4(a)显示的是样品代表性的感官特征(以新鲜样品 IF-0M 为例)。甜味(7.59)是得分最高的属性，与 DIPASQUALE 等[44]研究结果一致。他们研究结果表明甜味是三段婴儿奶粉的特征属性，且通常三段婴儿奶粉的含糖量是牛奶的 2 倍。此外，奶香味的得分仅次于甜味为 5.59，奶油味和蛋黄味也是得分较高的属性略低于 4。甜味、奶香味、奶油味通常被认为是婴幼儿奶粉的特征属性[45–47]。由于婴幼儿奶粉中都会添加一定量的卵磷脂以保证婴幼儿生长发育，因而通常婴幼儿奶粉中也会存在明显的蛋黄味[47]。鱼腥味和氧化味在新鲜样品中几乎察觉不到，这表明新鲜样品的总体特征是新鲜和令人愉快的。总之，甜味、奶香味、奶油味、蛋黄味是三段奶粉的典型感官特征，而鱼腥味和氧化味则是主要异味，这共同决定了奶粉的品质。

进一步分析不同储藏时期婴幼儿奶粉感官特征变化趋势，结果见图 4(b)。定量描述性分析结果显示不同储藏时间样品的感官特征存在明显差异。两个异味得分明显增高[在图 4(b)中的表现是随着储藏时间延长颜色逐渐加深]，说明婴幼儿奶粉在运输储存时尽管没有打开包装仍然会发生氧化反应、美拉德反应等一些列反应从而产生异味。此外，蛋黄味得分也略有增加，这可能是储存过程中奶粉乳脂肪球结构分解导致卵磷脂风味进一步扩散引起[48]。随着储藏时间增加，其他典型香气得分略有降低，可能与相关化合物的挥发有关。这些感官特征的变化共同决定了消费对产品的喜好。虽然婴幼儿奶粉感官特征的整体变化趋势表现为两个异味得分明显增高，典型香气得分略有降低，但仍有个别观测点似乎有异常表现，如样品 IF-6M 和 IF-10M。由于感官特性由挥发性香气物质的综合作用决定，即一种化合物可能决定多种感官特征，同时一个感官特征也由多种化合物决定。此外挥发性香气化合物种可能含有掩盖剂，会影响感官特性的感知。这进一步说明有必要进一步分析决定婴幼儿奶粉感官特征的关键香气化合物。

2.4 决定消费者喜好的感官驱动因素

消费者测试结果表明随着储藏时间延长，消费者喜好度明显下降。食品感官属性尤其是香气特征是消费者对产品最直观的感受，直接决定消费者喜好。在本研究中，分别采用感官评价和 GC-IMS 对不同储藏时期婴幼儿奶粉香气特征进行分析，结果表明随着储藏时间的延长，婴幼儿奶粉感官特征和香气化合物构成特征均呈现明显变化。因而为了揭示决定消费者喜好的感官驱动因素，对消费者总体喜好度、感官属性、香气化合物进行联合分析。首先对感官属性与总体喜好度进行相关性分析，然后分析感官属性和香气化合物之间的相关性，最后构建香气化合物、感官属性和消费者喜好之间的关联网络。

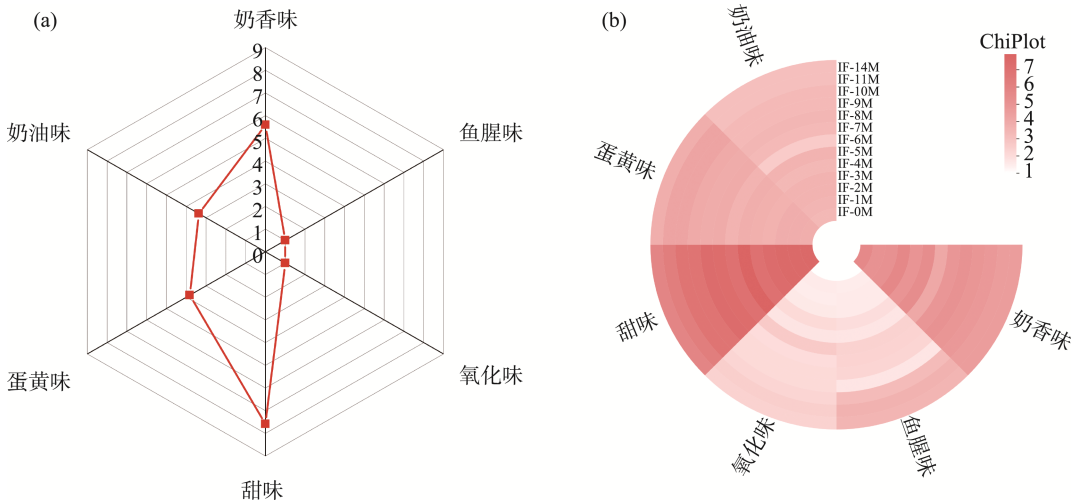


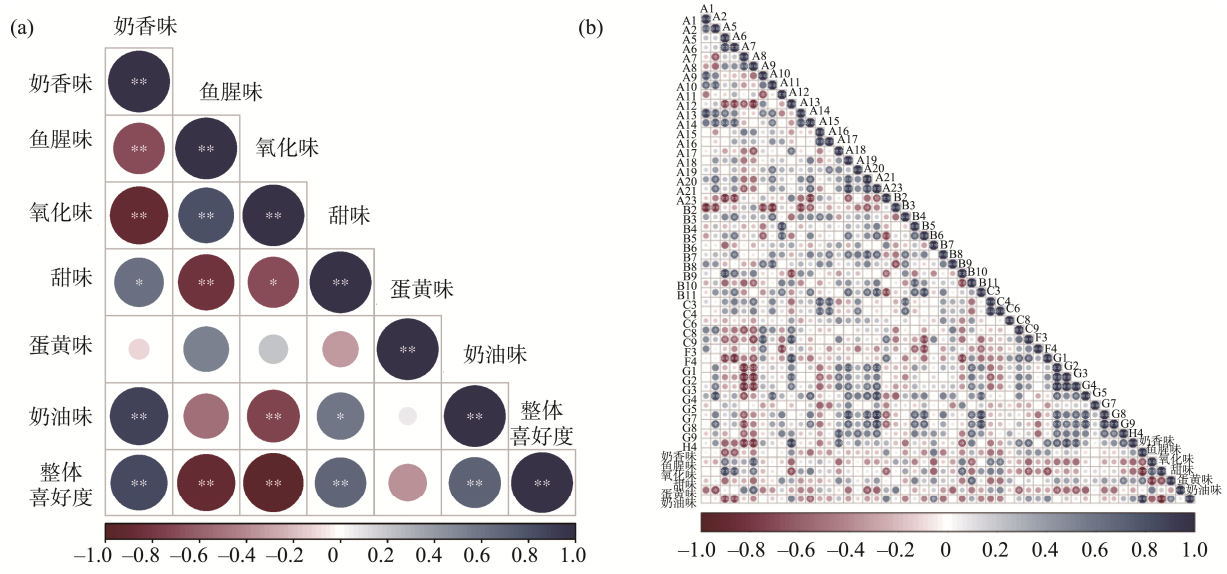
图 4 婴幼儿奶粉感官剖面图(a)和不同储藏时间感官变化趋势(b)(n=24)

Fig.4 Sensory profiles (a) and sensory attribute changes at different storage times (b) of infant formula (n=24)

图 5(a)显示了消费者喜好和感官属性之间的相关性, 蓝色和红色圆点分别表示两个属性之间呈现正相关和负相关, 圆点的颜色随着相关性的增加而变暗。整体喜好度与除了蛋黄味之外的其他属性均存在极显著相关性, 这表明感官属性显著影响消费者喜好。其中奶香味和奶油味与消费者喜好显著正相关, 即属性得分越高消费者对奶粉越喜欢, XI 等[45]研究结果也支持这一观点。相反, 鱼腥味和氧化味与消费者喜好显著负相关, KONG 等[49]也在研究中提到鱼腥味是客户投诉的主要原因, 此外婴幼儿奶粉相关企业也常接收到消费者关于奶粉氧化味的投诉。消费者喜好度降低主要是由产品香气特征变化引起的, 体现为主要感官属性的消失及异味的产生。因而香气特征可以作为产品品控的重要指标。

食品香气特征由多种香气化合物共同决定, 因而进一步分析感官属性和香气化合物之间的相关性结果见图 5(b)。其中与奶香味和奶油味等主要感官属性高度相关的化合物主要为(*E*)-2-庚烯醛(A14)、3-羟基-2 丁酮(B6)、反式-2-戊烯醛(A5)、己醛(A6)。YU 等[50]通过对母乳进行研究发现庚醛对乳酯气味的贡献很大。而本研究发现的其他与奶香味和奶油味高度相关可能是因为婴幼儿奶粉和母乳基质之间的差异引起的, 这意味着有必要对各种基质进行香气重组和省略实验的研究, 以更精确地确定感官特征产生的物质基础。2-己烯醛(A8)和丁醛(A23)与鱼腥味和氧化味存在显著相关性, 而这两种物质也通常被认为是奶粉氧化的标志物[13−16,19]。此外, 3-辛酮(B9)、2-戊酮(B10)、1-戊醇(C3)、*α*-苯乙醇(C9)也与两种异味强烈相关。ZHANG 等[33]也认为这些物质的混合物将表现为类似于鱼腥味或金属味等特征。说明可以通过对这些物质的监控来判断婴幼儿奶粉感官特征变化, 进而预测消费者喜好度。

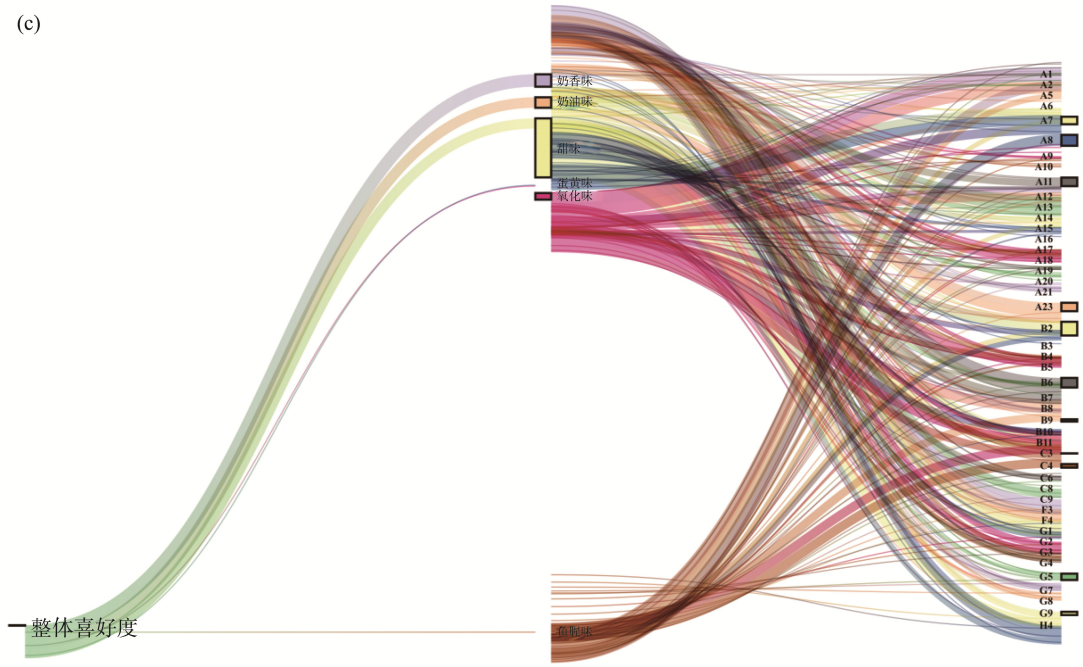
综合考虑消费者喜好、感官特征、香气化合物特征来分析决定婴幼儿奶粉消费者喜好的感官驱动因素进而构建相关网络。图 5(c)呈现了所构建的基于消费者总体喜好、感官属性和香气化合物的相关性网络。图中的线表示相邻指标之间的相关性, 其中线条越宽说明相关性越高。尽管先前的分析表明, 两种异味(鱼腥味和氧化味)与消费者喜好表现出强烈的负相关, 但相关网络分析结果显示, 消费者喜好与婴幼儿奶粉的优势感官属性(奶香味、奶油味、甜味)相关性更高, 在图中的表现为线更宽。因此, 消费者对产品的特征感官属性比异味更感兴趣, 可以通过提高产品的特征属性而提高消费者喜好度。相关性网络分析结果初步确定了影响婴幼儿奶粉感官特性的关键香气物质, 包括己醛(A7)、2-己烯醛(A8)、(*Z*)-4-庚烯醛(A11)、丁醛(A23)、2,3-丁二酮(B2)、3-羟基-2-丁酮(B6)、3-辛酮(B9)、1-戊醇(C3、C4)、*α*-水芹烯(G5)、*p*-伞花烃(G9)。这些物质可以用于预测婴幼儿奶粉感官特性及消费者喜好。因而可以通过 GC-IMS 对婴儿奶粉货架期内这些物质进行快速检测, 可以预测消费者对奶粉的喜好度。



注: (a). 整体喜好度和感官特征之间相关性; (b). 感官特征与香气物质之间相关性; (c). 消费者喜好、感官特征和香气物质之间相关性网络。*和**分别表示属性之间显著相关(P<0.05)和极显著相关(P<0.01)。

图 5 决定消费者喜好的感官驱动因素

Fig.5 Sensory-driven factors of determining consumer preferences



注: (a). 整体喜好度和感官特征之间相关性; (b). 感官特征与香气物质之间相关性; (c). 消费者喜好、感官特征和香气物质之间相关性网络。*和**分别表示属性之间显著相关(P<0.05)和极显著相关(P<0.01)。

图 5(续) 决定消费者喜好的感官驱动因素

Fig.5 Sensory-driven factors of determining consumer preferences

3 结 论

本研究利用 GC-IMS 对三段婴幼儿奶粉在室温下储存 14 个月内香气化合物进行快速检测。结果表明 GC-IMS 可以有效区分不同储藏时间的奶粉，且其图谱能清晰显示不同样品之间的香气物质构成特征。进一步地，分析了不同贮藏时间样品的消费者喜好和感官特征，同时分析其与香气物质之间相关性。奶香味、奶油味和甜味代表了影响消费者喜好的关键感官因素，表明消费者对产品的典型风味比对异味更感兴趣。而醛类化合物己醛(A7)、2-己烯醛(A8)、(*Z*)-4-庚烯醛(A11)、丁醛(A23)；酮类化合物 2,3-丁二酮(B2)、3-羟基-2-丁酮(B6)、3-辛酮(B9)；醇类化合物 1-戊醇单体(C3)、1-戊醇二聚体(C4)；烯烃类化合物 α-水芹烯(G5)、*p*-伞花烃(G9)可以用来判断婴幼儿奶粉感官特征，进而预测消费者喜好。由于本研究收集的样品数量有限，因此无法确定与不同贮藏时间的样品相关的化合物含量范围，计划在后续研究中完成这部分工作。此外，将通过标准化合物对未确定的化合物进行定性，以补充影响消费者喜好的关键化合物。

参考文献

[1] MAASAKKERS CM, HAGEMAN JHJ, MUNOZ OB, *et al*. A cross-sectional study on stool- and gastrointestinal-related outcomes of Mexican infants consuming different formulae [J]. BMC Pediatrics, 2023, 23(1): 634.

[2] YUE A, CUI M, YANG ZL, *et al*. Formula feeding: Evidence for health, nutrition and early childhood development during the critical first 1000 days from rural China [J]. Journal of Asian Economics, 2023, 85: 101580.

[3] LNNERDAL B, HERNELL O. An opinion on “staging” of infant formula: A developmental perspective on infant feeding [J]. Journal of Pediatric Gastroenterology and Nutrition, 2016, 62(1): 9–21.

[4] 戴志勇, 张荣彬, 胡伟, 等. 婴幼儿辅助食品分阶喂养体系的现状与前景[J]. 食品与机械, 2024, 40(8): 1–9.
DAI ZY, ZHANG RB, HU W, *et al*. Status and prospects of the infants and young children complementary foods step-feeding system [J]. Food & Machinery, 2024, 40(8): 1–9.

[5] GUADALUPE G, MNICA PR, RUANO RR, *et al*. Assessing conflict of interest reporting and quality of clinical trials on infant formula: A systematic review [J]. Journal of Clinical Epidemiology, 2024, 169: 111313.

[6] SCHEIDEGGER D, RADICI PM, VERGARA RVA, *et al*. Evaluation of milk powder quality by protein oxidative modifications [J]. Journal of Dairy Science, 2013, 96(6): 3414–3423.

[7] LIEN EL, RICHARD C, HOFFMAN DR. DHA and ARA addition to infant formula: Current status and future research directions [J]. Prostaglandins Leukotrienes and Essential Fatty Acids, 2018, 128: 26–40.

[8] MORISSETTE R, MIHALOV J, CARLSON SJ, *et al*. Trends in ingredients added to infant formula: FDA’s experiences in the GRAS notification program [J]. Food and Chemical Toxicology, 2023, 178:

113876.

[9] WANG SH, WANG MQ, WANG Y, *et al*. Control of the Maillard reaction and secondary shelf-life prediction of infant formula during domestic use. [J]. Journal of Food Science, 2023, 88(2): 681–695.

[10] WANG MQ, YUAN XW, ZHENG Y, *et al*. Maillard reaction indicators formation, changes and possible intake in infant formula produced by different thermal treatments during domestic use [J]. Food Chemistry, 2022, 395: 133576.

[11] 刘成龙, 王玉树, 宋飞. 婴幼儿配方奶粉中营养素损失率研究[J]. 食品工业, 2024, 45(11): 329–332.
LIU CL, WANG YS, SONG F. The study of nutrient loss rates in infant formula [J]. The Food Industry, 2024, 45(11): 329–332.

[12] 李玮. 婴幼儿配方奶粉营养素稳定性评估[J]. 上海轻工业, 2024(4): 130–132.
LI W. Nutrient stability assessment of infant formulae [J]. Shanghai Light Industry, 2024(4): 130–132.

[13] RODRGUEZ ALM, GARCA MMC, CACH F, *et al*. Changes in the lipid composition of powdered infant formulas during long-term storage [J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2007, 55(16): 6533.

[14] WANG WJ, LI YH, CAI LQ, *et al*. Characteristics on the oxidation stability of infant formula powder with different ingredients during storage [J]. Food Science & Nutrition, 2020, 33(1): 83–87.

[15] CLARKE HJ, O'SULLIVAN MG, KERRY JP, *et al*. Correlating volatile lipid oxidation compounds with consumer sensory data in dairy based powders during storage [J]. Antioxidants, 2020, 9(4): 338.

[16] PARKER TD, ADAMS DA, ZHOU K, *et al*. Fatty acid composition and oxidative stability of cold-pressed edible seed oils [J]. Journal of Food Science, 2010, 68(4): 1240–1243.

[17] LI YL, WANG HY, LIU GR, *et al*. An assessment of the sensory drivers influencing consumer preference in infant formula, assessed via sensory evaluation and GC-O-MS [J]. Food Chemistry, 2024, 455: 139881.

[18] SIEFARTH C, SERFERT Y, DRUSCH S, *et al*. Comparative evaluation of diagnostic tools for oxidative deterioration of polyunsaturated fatty acid-enriched infant formulas during storage [J]. Foods, 2013, 3(1): 30.

[19] CHENG H, ZHU RG, ERICHSEN H, *et al*. High temperature storage of infant formula milk powder for prediction of storage stability at ambient conditions [J]. International Dairy Journal, 2017, 73: 166–174.

[20] LI YL, WANG HY, LI RT, *et al*. Monitoring volatile changes in infant formula during long-term storage at room temperature [J]. Current Research in Food Science, 2023, 7: 100645.

[21] ZOU L, AKOH CC. Oxidative stability of structured lipid-based infant formula emulsion: Effect of antioxidants [J]. Food Chemistry, 2015, 178: 1–9.

[22] ZHANG MJ, ZHOU CL, SU W, *et al*. Dynamic effects of ultrasonic treatment on flavor and metabolic pathway of pumpkin juice during storage based on GC-MS and GC-IMS [J]. Food Chemistry, 2025, 469: 142599.

[23] 黄梅华, 梁晓君, 何全光, 等. 基于 GC-IMS 技术的不同产地红蓝草特征挥发性成分分析[J]. 中国食品学报, 2025, 25(7): 317–329.
HUANG MH, LIANG XJ, HE QG, *et al*. Analysis of volatile compounds in *Peristrophe bivalvis* (Linnaeus) merrill from different regions based on gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2025, 25(7): 317–329.

[24] 徐嘉成, 卢文静, 谌迪, 等. 基于 GC-MS 和 GC-IMS 分析不同配方五香调味油的挥发性物质差异[J/OL]. 食品工业科技, 1-17. [2026-01-02]. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025030296
XU JC, LU WJ, CHEN D, *et al*. Analysis of VOCs differences between different formulations of five-spice flavored oils based on GC-MS and GC-IMS [J/OL]. Science and Technology of Food Industry, 1-17. [2026-01-02]. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025030296

[25] 金阳, 刘亚峰, 刁春华, 等. 基于 GC-IMS 技术分析不同贮藏时间白茶挥发性风味物质[J]. 中国茶叶加工, 2025(2): 73–79.
JIN Y, LIU YF, DIAO CH, *et al*. Analysis of volatile flavor components in white tea with different storage durations based on GC-IMS technology [J]. China Tea Processing, 2025(2): 73–79.

[26] KOBAYASHI N, MIZOTA Y, KUMAZAWA K, *et al*. Character impact odorants of high-heat skim milk powder isolated by simultaneous distillation-extraction [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2008, 56(7): 2469–2476.

[27] KANG MW, CHEN DJ, RUAN R, *et al*. The effect of intense pulsed light on the sensory properties of nonfat dry milk [J]. Journal of Food Science, 2021, 86(9): 4119–4133.

[28] DRAKE MA, KARAGUL YY, CADWALLADER KR, *et al*. Determination of the sensory attributes of dried milk powders and dairy ingredients [J]. Journal of Sensory Studies, 2010, 18(3): 199–216.

[29] CLARKE HJ, GRIFFIN C, HENNESSY D, *et al*. Effect of bovine feeding system (pasture or concentrate) on the oxidative and sensory shelf life of whole milk powder [J]. Journal of Dairy Science, 2021, 104(10): 10654–10668.

[30] WAN LY, TU W, ZHANG JX, *et al*. Differences in storage stability of cow's milk-based and goat's milk-based infant formulas [J]. Food Chemistry: X, 2025, 26: 102275.

[31] WANG XX, QU XY, CUI DY, *et al*. Dynamic evolution of volatile organic compounds in infant formula during storage: Insights from gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. Journal of Agriculture and Food Research, 2023, 14: 100887.

[32] CHI XL, GUO HX, ZHANG YD, *et al*. E-nose, E-tongue combined with GC-IMS to analyze the influence of key additives during processing on the flavor of infant formula [J]. Foods, 2022, 11(22): 3708.

[33] ZHANG H, ZHANG Y, WANG LJ, *et al*. Detection of odor difference between human milk and infant formula by sensory-directed analysis [J]. Food Chemistry, 2022, (382): 132348.

[34] PARASTAR H, WELLER P. Towards greener volatilomics: Is GC-IMS the new swiss army knife of gas phase analysis? [J]. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 2024, 170: 117438.

[35] FENAILLE F, VISANI P, FUMEAUX R, *et al*. Comparison of mass

spectrometry-based electronic nose and solid phase micro extraction gas chromatography mass spectrometry technique to assess infant formula oxidation [J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2003, 51(9): 2790–2796.

[36] VAGENAS G, ROUSSIS IG. Fat-derived volatiles of various products of cows', ewes', and goats' milk [J]. International Journal of Food Properties, 2012, 15(3): 665–682.

[37] YUE J, ZHENG YR, LIU ZM, *et al*. Characterization of volatile compounds in microfiltered pasteurized milk using solid-phase microextraction and GC×GC-TOFMS [J]. International Journal of Food Properties, 2015, 18(9-12): 2193–2212.

[38] CHENG H, ERICHSEN H, SOERENSEN J, *et al*. Optimising water activity for storage of high lipid and high protein infant formula milk powder using multivariate analysis [J]. International Dairy Journal, 2019, 93: 92–98.

[39] ZHU RG, CHENG H, LI L, *et al*. Temperature effect on formation of advanced glycation end products in infant formula milk powder [J]. International Dairy Journal, 2017, 77: 1–9.

[40] MENDOZA E, STANLEY LM, FRANK RD. Linking consumer sensory acceptability to volatile composition for improved shelf-life: A case study of fresh-cut watermelon (*Citrullus lanatus*) [J]. Postharvest Biology and Technology, 2019, 154: 137–147.

[41] SONG Q, RUNE CJB, THYBO AK, *et al*. Sensory quality and consumer perception of high pressure processed orange juice and apple juice [J]. LWT, 2023, 173: 114303.

[42] HOPPU U, PRINZ M, OJANSIVU P, *et al*. Impact of sensory-based food education in kindergarten on willingness to eat vegetables and berries [J]. Food Nutrition Research, 2015, 59: 28795.

[43] ZHI RC, ZHAO L, SHI JY. Improving the sensory quality of flavored liquid milk by engaging sensory analysis and consumer preference [J]. Journal of Dairy Science, 2016, 99(7): 5305–5317.

[44] DIPASQUALE V, SERRA G, CORSELLO G, *et al*. Standard and specialized infant formulas in europe: Making, marketing, and health outcomes [J]. Nutrition in Clinical Practice, 2020, 35(2): 273–281.

[45] XI YM, ZHAO T, LIU RR, *et al*. Assessing sensory attributes and properties of infant formula milk powder driving consumers' preference [J]. Foods, 2023, 12(5): 997.

[46] ALIM A, SONG HL, RAZA A, *et al*. Identification of bitter constituents in milk-based infant formula with hydrolysed milk protein through a sensory-guided technique [J]. International Dairy Journal, 2020, 110: 104803.

[47] ZHU B, ZHANG XX, LIU SM, *et al*. Preparation of infant formula simulating the fat composition and structure of human milk based on MFGM and exogenous phospholipid to modulate lipid digestion [J]. Food Research International, 2025, 209: 116256.

[48] WEI W, CHENG J, YANG J, *et al*. Phospholipid composition and fat globule structure change during low temperature storage of human milk [J]. LWT, 2021, 150: 112050.

[49] KONG SW, SU YF, LI ZC, *et al*. The hotspot of consumers complaints on infant formula: Exploring the relationship among volatile components, sensory evaluation, and aroma recombination and omission experiment [J]. Journal of Food Composition & Analysis, 2024, 134: 106555.

[50] YU MG, XIE QG, 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]. Food Chemistry, 2024, 431: 137091.

(责任编辑: 韩晓红 于梦娇)