

HS-SPME-GC-MS结合ROAV分析不同包装材料对乳粉品质的影响

张钰欣, 咎成顺, 贺凯茹, 王海斌, 刘迎雪, 宁 森, 乌日娜, 张淑丽, 武俊瑞

HS-SPME-GC-MS Combined with ROAV to Analyze the Effect of Different Packaging Materials on the Quality of Milk Powder

ZHANG Yuxin, ZAN Chengshun, HE Kairu, WANG Haibin, LIU Yingxue, NING Miao, WU Rina, ZHANG Shuli, and WU Junrui

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024040210>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于HS-SPME-GC-MS比较分析不同原料对葱香油风味品质的影响

Comparative Analysis of Effects of Different Raw Materials on Flavour Quality of Scallion Oil Based on HS-SPME-GC-MS

食品工业科技. 2025, 46(2): 250-257 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024020116>

基于HS-SPME-GC-MS分析茶叶提取物对奶酪挥发性风味的影响

Effect of Tea Extract on Volatile Flavor Compounds of Cheese Based on HS-SPME-GC-MS

食品工业科技. 2020, 41(2): 207-212 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.02.033>

SPME-GC-MS结合ROAV分析腌制时间对大河乌猪火腿挥发性风味物质的影响

Analysis of the Effect of Curing Time on the Volatile Flavor Compounds of Dahe Black Pig Ham by SPME-GC-MS and ROAV

食品工业科技. 2021, 42(18): 317-324 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021010250>

HS-SPME-GC-MS结合GC-O分析不同叶位桑叶挥发性风味物质

Analysis of Volatile Flavor Substances in Different Leaf Positions of Mulberry Leaves Using HS-SPME-GC-MS Combined with GC-O

食品工业科技. 2024, 45(16): 282-291 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023090232>

HS-SPME-GC-MS结合多元统计分析初榨椰子油常温储藏过程中挥发性风味成分

Analysis of Volatile Flavor Components of Virgin Coconut Oil during Normal Temperature Storage based on HS-SPME-GC-MS and Multivariate Statistical Analysis

食品工业科技. 2022, 43(10): 314-322 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021080199>

基于电子鼻、HS-GC-IMS和HS-SPME-GC-MS分析五种水产原料的风味特征

Analysis of Flavor Characteristics of Five Aquatic Raw Materials Based on Electronic Nose, HS-GC-IMS and HS-SPME-GC-MS

食品工业科技. 2021, 42(19): 106-117 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021030193>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

张钰欣, 管成顺, 贺凯茹, 等. HS-SPME-GC-MS 结合 ROAV 分析不同包装材料对乳粉品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(9): 243–252. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024040210

ZHANG Yuxin, ZAN Chengshun, HE Kairu, et al. HS-SPME-GC-MS Combined with ROAV to Analyze the Effect of Different Packaging Materials on the Quality of Milk Powder[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(9): 243–252. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024040210

· 分析检测 ·

HS-SPME-GC-MS 结合 ROAV 分析不同包装材料对乳粉品质的影响

张钰欣¹, 管成顺^{2, *}, 贺凯茹¹, 王海斌³, 刘迎雪³, 宁 淼¹, 乌日娜¹, 张淑丽^{3, *}, 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: 为探究包装材料差异对于乳粉品质的影响, 本研究选取使用三种常见包装材料的乳粉(普通塑料包装-聚丙烯(polypropylene, PP), 高阻隔材料包装-聚乙烯/聚乙烯醇/聚乙烯(polyethylene/polyvinyl alcohol/polyethylene, PE/PVA/PE), 铝塑包装-聚酯/聚酰胺/铝箔/聚乙烯(polyethylene terephthalate/polyamide/aluminum foil/polyethylene, PET/PA/AL/PE)), 对其多种理化指标及挥发性风味物质进行测定。基于顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用法(headspace solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry, HS-SPME-GC-MS)测定挥发性物质组成, 结合相对气味活度值法(relative odor activity value, ROAV)鉴定关键风味化合物。结果表明, 高阻隔及铝塑包装维持乳粉原有理化性质(水分含量、溶解度、粒径、色泽及脂肪含量)的能力较强。GC-MS 检出所有样品共有 53 种挥发性物质。对比其他类型包装, 普通塑料包装乳粉中脂肪氧化程度高致使其酸类物质相对含量上升, 油酸发生较大程度氧化及产生正癸酸, 致使乳粉出现酸腐味。高阻隔及铝塑包装可有效抑制糠醛、5-羟甲基糠醛、2(5H)-呋喃酮、糠醇及麦芽酚等热加工阶段产生的挥发性物质释放, 这些物质赋予乳粉焦糖香及黄油香等积极气味。普通包装气密性差造成储存过程中风味物质大量逸散, 使乳粉风味单一及乳味淡薄。经 ROAV 分析可知所有样品共有 24 种挥发性组分贡献香气, 铝塑(14、15 种)包装乳粉相较于普通(12 种)及高阻隔(各 13 种)包装乳粉所含正向香气物质种类更为丰富。本研究为企业选择合适的包装工艺, 改善乳粉风味, 提高其营养价值和质量安全水平, 提供一定的参考。

关键词: 包装材料, 乳粉, 理化指标, 挥发性风味物质, HS-SPME-GC-MS, ROAV

中图分类号: TS252.51

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)09-0243-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024040210

本文网刊:



HS-SPME-GC-MS Combined with ROAV to Analyze the Effect of Different Packaging Materials on the Quality of Milk Powder

ZHANG Yuxin¹, ZAN Chengshun^{2, *}, HE Kairu¹, WANG Haibin³, LIU Yingxue³, NING Miao¹, WU Rina¹,
ZHANG Shuli^{3, *}, WU Junrui^{1, *}

(1. College of Food Science and Technology, Shenyang Agricultural University, Liaoning Food Fermentation Technology Engineering Research Center, Shenyang Key Laboratory of Microbial Fermentation Technology Innovation, Shenyang 110866, China;

收稿日期: 2024-04-22 +并列第一作者

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

作者简介: 张钰欣(2001-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 乳制品加工, E-mail: Beatrice010720@163.com。

管成顺(1989-), 男, 本科, 中级工程师, 研究方向: 食品科学与工程, E-mail: zanchengshun@mengniu.cn。

*** 通信作者:** 张淑丽(1981-)(ORCID: 0009-0002-6141-8518), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 食品加工与检验, E-mail: zhangshuli@mengniu.cn。

武俊瑞(1977-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品科学, E-mail: junruiwu@126.com。

2.Inner Mongolia Mengniu Dairy (Group) Co., Ltd., Hohhot 010010, China;
3.Mengniu Dairy (Shenyang) Limited Liability Company, Shenyang 100122, China)

Abstract: In order to investigate the effects of packaging materials on the quality of milk powder, three common packaging materials were selected in this study (ordinary plastic packaging (polypropylene, PP), high barrier material packaging (polyethylene/polyvinyl alcohol/polyethylene, PE/PVA/PE), and aluminum-plastic packaging (polyethylene terephthalate/polyamide/aluminum foil/polyethylene, PET/PA/AL/PE)), and a variety of physicochemical indexes and volatile flavor substances were determined. The volatile compositions were determined using headspace solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS) and combined with the relative odor activity value (ROAV) method for the identification of key aroma substances. The results showed that high barrier and aluminum-plastic packaging demonstrated strong efficacy in preserving the original physicochemical properties (moisture content, solubility, particle size, color, and fat content) of milk powder. A total of 53 volatiles were identified through GC-MS analysis. The ordinary plastic-packed milk powder exhibited a high degree of fat oxidation, leading to an increase in acid relative content. Additionally, there was extensive oxidation of oleic acid and the detection of capric acid in this sample, resulting in the development of rancidity taste. High barrier and aluminum-plastic packaging effectively inhibited the release of volatile substances such as furfural, 5-hydroxymethylfurfural, 2(5H)-furanone, furfuryl alcohol, and maltol generated during heat processing. These compounds imparted positive aromas to the milk powder including caramel aroma and butterscotch aroma. Conversely, ordinary plastic packaging with poor airtightness resulted in significant loss of flavor compounds during storage leading to a monotonous flavor profile. The ROAV analysis revealed that all samples contained 24 types of volatile components contributing to aroma. In comparison with ordinary packaging milk powder (12 types) and high barrier packaging milk powder (13 types), aluminum-plastic packaging milk powder (14, 15 types) exhibited a greater variety of positive aroma compounds. This study offered valuable insights for enterprises in selecting appropriate packaging technology to enhance the flavor, nutritional value, and quality safety level of milk powder.

Key words: packaging materials; milk powder; physicochemical index; volatile flavor substances; HS-SPME-GC-MS; ROAV

乳粉是鲜乳经标准化、杀菌、浓缩、喷雾干燥等一系列生产加工过程制得的粉状产品^[1],被广泛应用于食品工业。乳粉营养丰富,富含乳脂及乳糖等营养素,受乳粉本身水分含量、水分活度及光照、环境潮湿、储藏环境不洁等外界因素的影响,乳粉内的不饱和脂肪易发生氧化产生有害产物,乳糖结晶也会导致乳粉结块及褐变加速等,最终会使得乳粉整体品质下降^[2-3],可采取一系列针对性措施来进行遏制,包括但不限于改善储藏环境条件、惰性气体替换包装内氧气及优化包装材料等手段。不同包装材料对温度、湿度、氧气和光线等外界因素的阻隔能力有所差异^[4],优质包装材料阻隔气体性能强、热成型性好且密封条件可靠^[5],选用优质包装可更有效地维持乳粉产品品质,延长产品货架期。

近年来,国内外对乳粉品质的研究多见于探究不同生产加工工艺对乳粉品质的影响^[6-9]、探究乳粉中重要挥发性物质^[10-13]、追踪乳粉货架期内品质劣变^[14-16]等方面。针对包装对乳粉品质影响的研究较少,赵春燕等^[17]研究不同透紫外光性包装材料(ONY/PE、PET/ONY/PE、PET/vmPET/PE)对乳粉中维生素C降解的影响,发现不同包材与维生素C降解关系显著;周梦瑶等^[18]研究包装残氧量对乳粉品质的影响,发现较低的包装内氧气体积分数能够提高乳粉品质;贾宏信等^[19]测定不同包材乳粉(铝箔袋、复合材料胶囊、PP材料胶囊)经加速试验后,其中水分含量、水分活度、色泽及硫代巴比妥酸值的变化,结果

发现铝箔袋对乳粉保护性能最佳,复合材料胶囊次之,PP材料胶囊最差;但目前未见针对不同包装对乳粉品质(理化性质及挥发性风味物质)影响的研究,因此本研究选取B工厂生产的三种不同包装乳粉(包材分别为普通塑料、高阻隔复合材料及铝塑材料,三种乳粉除包装不同外,其原料、加工工艺、贮存条件等均相同),研究不同包装材料对乳粉理化性质及挥发性风味物质的影响。

本研究采用国标及行业常用规范来测定乳粉的多种理化指标。通过HS-SPME-GC-MS来解析乳粉中挥发性成分的组成,该方法与分光光度法或液相色谱法相比,所得结果更为精准可靠^[20]。引入相对气味活性值的概念,旨在明确不同包装类型乳粉中的关键风味化合物。通过对上述数据结果的分析来评估不同包装材料的性能优劣,以协助企业精准选择包装工艺,为新型包装材料的研发及使用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

普通塑料包装乳粉一包(聚丙烯(polypropylene, PP))、同批次高阻隔包装材料乳粉两包(聚乙烯/聚乙烯醇/聚乙烯(polyethylene/polyvinyl alcohol/polyethylene, PE/PVA/PE))、同批次铝塑包装乳粉两包(聚酯/聚酰胺/铝箔/聚乙烯(polyethylene terephthalate/polyamide/aluminum foil/polyethylene, PET/PA/AL/PE)) B公司提供,五份样品均于工厂内直

接完成包装,净含量均为 500 g,除包装材料不同外,无任何原料及加工工艺上的不同,下文简称这三种包装分别为 PT、GZG 及 LS;氨水、无水乙醇、无水乙醚、石油醚、三氯甲烷、乙酸、碘化钾、氯化钠、淀粉(所用试剂均为分析纯) 国药集团化学试剂有限公司;实验用水均为去离子水。

LHS-70HC(70L)恒温恒湿培养箱 上海捷呈实验仪器有限公司;Zetasizer Nano ZSE 纳米粒度及 Zeta 电位分析仪 英国 Malvern Panalytical 公司;BSM-220.4 万分之一天平 上海卓精电子科技有限公司;50/30 μm DVB/CAR/PDMS 萃取头 美国 Supelco 公司;7890A-5975C 气相色谱-质谱联用仪 美国 Agilent 公司;Synergy H1 多功能酶标仪 美国 BIO-TEK 公司;CR-400 色彩色差计 日本 Konica Minolta 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 加速试验 仿照《婴幼儿配方乳粉产品稳定性研究指南》中加速试验方法的条件^[21],将全部原包装样品直接置于温度 $37\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、湿度 RH $75\%\pm 5\%$ 的恒温恒湿箱中保存 3 个月,于加速试验结束之际对乳粉的理化指标及挥发性风味物质进行测定。

1.2.2 乳粉样品理化指标的测定

1.2.2.1 水分含量、溶解度及脂肪含量 采用《GB 5009.3-2016 食品安全国家标准 食品中水分的测定》中的直接干燥法测定乳粉水分含量;采用《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》中的第二法测定乳粉溶解度;采用《GB 5009.6-2016 食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》中的碱水解法测定乳粉脂肪含量。

1.2.2.2 色泽 利用色差仪进行测定。将乳粉均匀平铺于平底托盘中,用遮光布罩住色差计的探头和乳粉,每个样品重复摆放 3 次,每次取 5 个不同部位测定,以所有测定值的均值表示乳粉色泽。

1.2.2.3 粒径 用粒径分析仪测定乳粉粒径。

测试参数:水折光指数为 1.33,实际折射率为 1.59,测试温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 恒温,样品用超纯水稀释 1000 倍后,过膜使用。

1.2.2.4 过氧化值(peroxide value, POV) 采用 Li 等^[22]使用的分光光度法测定。

样品测定:取 5 g 乳粉与 5 mL 氯仿-冰乙酸(4:6)溶液混合,加入饱和碘化钾溶液 1 mL 摇匀,暗处反应 3 min,加水稀释至 50 mL,加入淀粉溶液 1 mL,摇匀静置 5 min,以空白作参比,取上清液于 585 nm 测吸光度。

绘制标准曲线:取 0.01 mol/L 碘标准溶液 0.1、0.2、0.5、1.0、2.0 mL 稀释至 50 mL,分别吸取 5 mL 与 5 mL 氯仿-冰乙酸溶液混合,随后按上述样品测定步骤进行后续处理。测定完成后,以吸光度 A 为纵坐标, I_2 的质量 m 为横坐标绘制标准曲线。

计算公式:

$$X_1 = \frac{m}{m_1 \times 10}$$

$$X_2 = X_1 \times 39.4$$

式中: X_1 -样品过氧化值, g/100 g; X_2 -样品过氧化值, mmol/kg; m-样品吸光值对应碘的质量, mg; m_1 -样品质量, g; 39.4-换算因子。

1.2.3 乳粉样品挥发性风味物质的测定

1.2.3.1 样品前处理 综合张晓梅等^[23]的方法并稍作优化。

取 1 g 乳粉、10 mL $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 去离子水、5 g 氯化钠,置于 20 mL 顶空瓶中, $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 水浴 10 min 并不时轻轻振荡,将进样器固定于 SPME 搭载装置上,将萃取针头插入顶空瓶中,推出萃取纤维至瓶内液面约 1 cm 距离处,继续萃取 20 min 后将其抽出,快速插入 GC-MS 进样口解吸 5 min。

1.2.3.2 色谱及质谱条件 结合葛丽琴等^[24]色谱及质谱条件并适当优化。

色谱条件:HP-FFAP 毛细管柱(30 m $\times$ 0.25 μm $\times$ 0.25 mm);进样口温度: $250\text{ }^{\circ}\text{C}$;升温程序:起始温度 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 保持 3 min,以 $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升温至 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$,然后以 $3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升温至 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$,保持 2 min,最后以 $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升温至 $230\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

质谱条件:电子轰击电离源(EI),电子能量 70 eV,传输线温度 $285\text{ }^{\circ}\text{C}$,离子源温度 $230\text{ }^{\circ}\text{C}$,四级杆温度 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$;质量扫描范围: m/z 41~520。

所有样品进行至少两次不等的测定,取测得各样品物质总数最多的单次数据进行分析。

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:

$$\text{挥发性组分相对含量}(\%) = \frac{\text{挥发性物质峰面积}}{\text{挥发性物质峰面积总和}} \times 100$$

1.2.4 结合 ROAV 分析关键风味化合物 确定乳粉中关键风味化合物参照王金源等^[25]的方法。ROAV 计算公式为:

$$\text{ROAV}_A = \frac{C_A}{C_{\max}} \times \frac{T_{\max}}{T_A} \times 100$$

式中: C_A -各挥发性组分的相对含量,%; T_A -各挥发性组分的感知阈值, $\mu\text{g}/\text{L}$; $C_{\max}$ -对香气贡献最大的组分含量,%; $T_{\max}$ -对香气值贡献最大的组分的感知阈值, $\mu\text{g}/\text{L}$ 。

一般认为某一种组分其 ROAV 值与其对总体风味的贡献成正比, $0.1 \leq \text{ROAV} < 1$ 的组分对样品总体风味起重要修饰作用,关键风味化合物为 $\text{ROAV} \geq 1$ 的组分^[15]。

1.3 数据处理

重复测定样品中所有理化指标 3 次,测定结果

表示为“平均值±标准偏差”。采用 IBM SPSS Statistics 27.1.1 单因素方差分析中 Duncan 多重比较法 ($P<0.05$) 对理化指标进行差异显著性分析。采用 WPS Office Excel 对各样品挥发性物质组成进行筛选分析及 ROAV 的计算。采用 Origin 2019 绘制不同包装样品中挥发性物质组成及相对含量的堆积图。

2 结果与分析

2.1 不同包装乳粉的理化性质比较

由表 1 可知, 乳粉水分含量: PT>LS>GZG。这表明 GZG 及 LS 包材密封性强, 能更好地隔绝外部水蒸气渗入, 其中 GZG 的阻隔水蒸气能力最佳。水分含量是影响乳粉质量的关键因素, 超过 5% 易导致蛋白质变性、结块、褐变、溶解度下降和风味异常^[26]。GZG 和 LS 包装较高的阻隔水蒸气能力对于乳粉品质的维持有积极作用。

乳粉粒径: PT<LS<GZG。有研究表明^[27], 相同条件下同种样品中的水分含量和水分活度呈正相关。本研究所用到的三种乳粉, 除包材有所差异外, 其余条件均一致, 因此水分活度呈现 PT>LS>GZG。Tham 等^[28]通过实验测得随着 A_w 的增加, D_{90} 值(样品累计粒径分布数达到 90% 时所对应的粒径)呈下降趋势, 即非结晶乳糖在较高的 A_w 环境下, 容易吸收可利用的游离水, 进而发生明显的塑化并形成结晶, 导致乳粉颗粒结构变形, 最终导致乳粉粒度降低。因此两种升级包装乳粉所呈现的较高粒径, 可能是由其水分含量较低所导致。

乳粉溶解度: PT<LS<GZG, PT 包装乳粉的溶解度指标与其他乳粉相比呈现显著差异($P<0.05$)。该结果是由乳粉的水分含量及粒径两个因素共同影响所得。依据杜管利等^[26]的研究结果, 乳粉中微生物生长繁殖会产生乳酸, 此过程会因水分含量的增加而加速。乳酸的存在会导致酪蛋白变性成为不溶性物质, 从而降低乳粉溶解度。本研究结果与上述结论相符, 即两种升级包装样品中较低的水分含量可有效抑制溶解度的降低。此外, 乳粉的粒径大小亦对其溶解性能有显著影响。乳粉粒径越大, 颗粒间空隙更宽, 分散性越好, 水分更易渗透^[29]。贾宏信等^[30]的研究表明, 同种工艺下生产的乳粉, 其粒径的增大有助于溶解速率提升。因此 LS 及 GZG 包装乳粉较大的粒径对溶解度提高有积极作用。

乳粉脂肪含量: LS>GZG>PT, PT 包装乳粉的脂肪含量与其他乳粉相比呈现显著差异($P<0.05$), 说明乳粉脂肪分解程度 PT>GZG>LS。包材的透光性对于产品品质有显著影响, 可见光及紫外光均能促进脂肪氧化, 进而降低食品品质。据刘志明等^[31]的研究, 黑暗条件下储藏的样品相较于光照条件下氧化程度低。降低紫外线透射率可延缓食品氧化过程, 同时保持食品的感官品质^[32]。GZG 和 LS 包装材料具备优异的遮光性能, 能显著减少乳粉与可见光及紫外光的接触, 进而减缓脂肪氧化速率, 抑制脂肪含量的降低。铝塑包材中铝箔层的存在使得其遮光性最强, 抑制脂肪氧化能力最优。

GZG 和 LS 样品的 POV 均大于 PT 样品。全脂乳粉中的多不饱和脂肪酸易被氧化, 产生过氧化物^[33], 导致 POV 升高。基于前述研究, 两种新型包装样品中脂肪分解量较普通包装低, 理论上应呈现较低的 POV。而实际测定结果显示, 普通包装样品的 POV 最低。其原因可能为 POV 仅宜用于衡量脂肪初期氧化程度, 在加速试验条件下, 阻隔性较低的普通包装乳粉发生较深度的油脂氧化, 这一过程中氢过氧化物的分解速度超过了氢过氧化物生成的速度, 使得脂肪氧化程度最高的 PT 乳粉 POV 降低。

PT 样品 L^* 呈现最高, 且 PT 包装乳粉的 L^* 值与其他乳粉相比呈现显著差异($P<0.05$), a^* 及 b^* 较其他包装样品偏低, 说明 PT 样品色泽偏白, 其他乳粉色泽偏黄, 即 GZG 及 LS 包装在维持乳粉原有偏黄色泽方面表现更佳。色泽是评估产品品质变化的重要指标, 其变化一般归因于美拉德反应, 这是一种涉及羰基化合物与氨基化合物反应生成褐色或棕色聚合物的化学反应过程^[34]。该反应主要发生于乳粉生产的热加工过程中。在本研究中, 由于所有样品均经历了一致的生产加工过程, 因此色泽差异与美拉德反应关联不大。因此, 推测乳粉色泽差异与其中的色素含量变化有关。乳粉样品的乳源牧场使用新鲜牧草饲喂奶牛, 其中的核黄素(V_{B2})、叶黄素及胡萝卜素等色素赋予牛乳偏黄色调。这三种物质均对光照敏感^[35-37], 易在光照条件下分解导致颜色损失。特别是叶黄素, 其含有的不饱和双键及连有羟基的紫罗酮环使其易于氧化。GZG 及 LS 包装因其优越的阻隔性及遮光性, 能够显著抑制色素的氧化分解过程, 更有

表 1 不同包装乳粉的理化性质比较

Table 1 Comparison of physicochemical properties of different packaged milk powders

样品	水分含量(g/100 g)	粒径(nm)	溶解度(g/100 g)	脂肪含量(g/100 g)	过氧化值(mmol/kg)	色泽		
						L^*	a^*	b^*
PT	2.597±0.023 ^a	224.8±5.8 ^c	99.456±0.097 ^c	27.800±0.300 ^d	9.58±0.004 ^c	97.81±0.18 ^a	-9.05±0.01 ^d	16.46±0.05 ^c
GZG-1	2.491±0.072 ^b	244.5±8.9 ^{ab}	99.881±0.093 ^{ab}	28.367±0.058 ^{bc}	10.71±0.009 ^a	96.60±0.38 ^b	-8.54±0.03 ^a	16.66±0.10 ^{bc}
GZG-2	2.290±0.072 ^c	246.2±7.8 ^a	99.795±0.091 ^b	28.233±0.058 ^c	10.18±0.018 ^c	96.20±0.49 ^b	-8.84±0.06 ^c	17.20±0.27 ^a
LS-1	2.534±0.022 ^{ab}	230.5±5.1 ^c	99.750±0.141 ^b	28.500±0.000 ^b	10.53±0.012 ^b	96.33±0.53 ^b	-8.73±0.05 ^b	16.89±0.21 ^{ab}
LS-2	2.544±0.017 ^{ab}	239.4±9.8 ^{abc}	99.967±0.005 ^a	28.867±0.058 ^a	9.86±0.004 ^d	96.57±0.43 ^b	-8.61±0.06 ^a	16.88±0.21 ^{ab}

注: 同列肩标字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

效地保持乳粉原有色泽。

经对比分析, GZG 与 LS 两种包材在维持乳粉理化指标方面均表现出优于 PT 包装的效果(GZG 包材在维持乳粉水分含量及溶解度方面能力最强; LS 包材在维持乳粉脂肪含量方面效果最佳; 二者均能较好地维持乳粉原有色泽)。

2.2 不同包装乳粉中挥发性风味物质分析

通过 HS-SPME-GC-MS 法, 5 组样品共检出 53 种挥发性物质, 分别为酸类 18 种, 醛类 7 种, 酮类 8 种, 醇类 2 种, 酚类 2 种, 酯类 5 种及其他类物质 11 种(表 2)。与刘晓凤^[38]采用相同方法检测乳粉中挥发性物质的结果相比, 本研究检出的挥发性物

表 2 不同包装样品挥发性物质组成及相对含量
Table 2 Composition and relative content of volatile substances in different packaging samples

分类	物质	香气特征	分子量	CAS编号	相对含量(%)				
					PT	GZG-1	GZG-2	LS-1	LS-2
酸类	乙酸	清香、水果香、花香、醋酸味	60.05	64-19-7	4.67	6.25	8.89	11.01	9.18
	甲酸	刺激性气味	46.03	64-18-6	0.21	2.03	3.66	4.56	3.70
	丙酸	刺激性气味	74.08	79-09-4	—	—	0.69	0.64	0.44
	己酸	干酪味、甜香、刺激味	116.16	142-62-1	—	0.22	—	—	0.21
	正癸酸	酸腐味、脂肪味、马棚味	172.26	334-48-5	1.48	—	—	—	—
	糠酸		112.08	88-14-2	—	5.48	—	—	—
	月桂酸	脂肪味、微弱的月桂油味	200.32	143-07-7	3.29	—	—	1.51	1.02
	十八碳-9-烯酸	猪脂味	282.46	1000190-13-7	11.53	3.22	—	—	2.45
	肉豆蔻酸	微弱的奶酪味、油脂味	229.36	544-63-8	7.41	4.39	7.67	0.87	0.76
	反式-9-十八碳烯酸		282.46	112-79-8	—	0.45	1.15	—	1.42
	十八烷酸	牛油味	284.48	57-11-4	5.68	11.08	3.57	2.76	2.55
	顺式-十八碳烯酸		282.46	506-17-2	—	1.47	1.02	—	2.95
	顺式-13-十八碳烯酸		282.46	13126-39-1	—	—	—	6.30	3.17
	油酸	动物油或植物油气味	282.46	112-80-1	0.47	4.65	9.59	1.13	3.18
	十五烷酸	特殊蜡样气味	242.40	1002-84-2	2.06	—	—	—	—
	反式-13-十八碳烯酸		282.461	693-71-0	—	—	1.47	—	4.50
	棕榈酸	特殊蜡样气味	256.42	57-10-3	25.95	17.22	19.17	17.13	14.28
醛类	棕榈油酸	蜡烛味、奶酪味、旧书味	254.4082	373-49-9	3.62	—	—	—	—
	糠醛	焦糖味、面包味、苦杏仁味	96.08	98-01-1	1.31	2.58	2.70	4.78	3.57
	5-甲基呋喃醛	浓的甜香味、焦糖味	110.11	620-02-0	0.61	1.16	—	1.75	2.72
	2-乙基丁烯醛		98.14	19780-25-7	—	—	0.17	—	—
	2-吡咯甲醛	烟草味	95.10	1003-29-8	—	0.27	0.14	—	—
	戊二醛	微弱甲醛臭、刺激性气味	100.12	111-30-8	2.02	—	—	—	—
	5-羟甲基糠醛	春黄菊花气味	126.11	67-47-0	1.77	7.01	6.47	3.62	3.71
	(9Z)-十八碳-9,17-二烯醛	甜香、柑橘香、橙子香	264.45	56554-35-9	—	—	1.02	—	—
	羟基丙酮	微甜、轻微的果香味	74.08	116-09-6	1.43	—	2.05	3.05	2.25
	2(5H)-呋喃酮	黄油香味	98.10	22122-36-7	2.10	2.09	0.82	2.48	3.12
酮类	2-羟基-2-环戊烯-1-酮		98.10	10493-98-8	—	0.95	1.93	1.31	1.07
	3-甲基环戊烷-1,2-二酮	甜味、木香味	112.13	765-70-8	—	—	—	0.27	—
	2H-吡喃-2,6(3H)-二酮		112.08	5926-95-4	—	—	—	1.43	—
	2,5-二甲基-4-羟基-3(2H)-呋喃酮	浓郁焦糖香、略带淡蚕豆花香	128.13	3658-77-3	0.53	0.56	—	1.16	0.95
	2,3-二氢-3,5-二羟基-6-甲基-4(H)-吡喃-4-酮	焦糖香、融化黄油味	144.13	28564-83-2	1.89	4.35	5.04	3.31	3.15
	9-氧杂双环[3.3.1]壬烷-2,6-二酮		154.16	20797-79-9	—	4.87	—	—	—
	糠醇	芳香味、焦糖香、椰子味、焦土豆味	98.10	98-00-0	4.52	8.98	10.43	14.92	12.51
醇类	3,6,6-三甲基2-诺品醇		154.25	29548-09-2	—	—	—	1.60	1.31
	麦芽酚	焦糖香	126.11	118-71-8	1.27	1.92	2.92	4.34	3.55
酚类	对氨基苯酚	强烈芳香	144.13	123-30-8	—	—	—	1.78	1.22
	正丁内酯	微弱的甜香、焦糖香	86.09	96-48-0	—	0.98	1.16	0.86	2.92
酯类	3-呋喃羧酸甲酯		126.11	13129-23-2	—	—	—	0.76	—
	2-甲氧基苯基甲酸酯		152.15	1000368-70-7	—	—	1.13	—	1.61
	(+/-)-3-羟基-γ-丁内酯	香甜水果味	102.09	5469-16-9	3.10	7.44	5.75	4.30	4.19
	18,19-二脱氢-10-甲氧基-椰烯醇乙酸酯		368.47	56053-13-5	—	—	0.83	—	—

续表 2

分类	物质	香气特征	分子量	CAS编号	相对含量(%)				
					PT	GZG-1	GZG-2	LS-1	LS-2
其他	吡咯	果仁味、酯类暖的甜果味	67.09	109-97-7	—	—	—	0.81	0.74
	2-乙酰基呋喃	甜味、坚果味、烟熏香	110.11	1192-62-7	—	—	—	0.37	0.23
	戊二烯	辛辣气味	68.12	591-95-7	—	1.07	—	—	—
	呋喃	类似氯仿的气味、温和香味	68.07	110-00-9	—	0.44	0.57	0.36	0.33
	甲氧基苯基酚	霉味、肉香、土腥、哈喇味	151.063	1000222-86-6	12.90	—	—	—	—
	2,3-二氢呋喃	类似乙醇的气味	70.09	1191-99-7	—	—	—	0.83	0.27
	三(叔丁基二甲基甲硅氧基)肼		468.189	1000366-57-5	0.17	—	—	—	—
	17五萜		490.93	6971-40-0	—	2.51	—	—	—
	O-甲基 δ -生育酚		416.365	1000374-72-8	—	0.10	—	—	—
	β -生育酚		416.68	148-03-8	—	0.13	—	—	—
	γ -生育酚		416.68	7616-22-0	—	0.03	—	—	—

注:“—”表示未检出。气味描述来自在线数据库(<http://www.ichemistry.cn/>, <https://www.chemicalbook.com/ProductIndex.aspx>, <https://www.chemsrc.com/>)。

质数量多出 13 种,乳粉挥发性物质组成更丰富。

2.2.1 酸类 乳粉中除乙酸外,多数酸类物质源于乳脂降解^[39],该过程受贮藏期间空气和水分存在、温度以及光照等多种因素共同影响^[40]。酸类化合物风味阈值低并且风味特征显著^[34],由图 1 知,PT 样品中酸类物质相对含量最多(PT: 66.37%、GZG-2: 56.88%、GZG-1: 56.46%、LS-2: 50.58%、LS-1: 45.91%),说明其乳脂氧化程度最高,PT 样品较高的脂肪酸浓度会带来腐臭味。此外,仅在 PT 样品中检出正癸酸,其阈值较低且风味特征明显,具有酸腐味及马棚味^[40],由乳脂氧化产生。油酸是乳中天然存在的长链脂肪酸。室温下,活化的含烯底物油酸易和氧气自发进行氧化反应^[41],发出腐败臭味。油酸相对含量: GZG>LS>PT,说明 PT 包装气密性差,易与氧气接触造成油酸大量氧化进而含量下降。结果表明,PT 包装因气密性差而造成的酸类物质相对含量上升、正癸酸的产生及油酸的高度氧化,为 PT 乳粉带来腐臭味等负面气味。GZG 及 LS 样品中的甲酸、乙酸、丙酸及己酸相对含量较 PT 样品高,可能因其气密性好,抑制了这些乳粉中原有的短链脂肪酸逸散。乙酸具有醋味、清香、水果花香^[40];丙酸含量过高会赋予食物强烈刺激性气味,而适量的丙酸是构成乳粉风味的关键组分^[8,42];己酸易挥发且风味阈值较低,可赋予乳

粉奶油香气^[38],三者均为 GZG 和 LS 样品风味带来正向影响。甲酸有刺激性气味,但甲酸阈值较高不易被感知,因此其对乳粉风味影响不大。

2.2.2 醛酮类 醛酮类物质是乳粉风味的重要贡献者,其风味阈值较低,对挥发性风味贡献较大,是乳粉风味的常见组分^[43],其生成途径主要包括美拉德反应^[44]和脂肪酸的氧化反应^[45]。乳粉加工过程中涉及多种高温处理(如杀菌、浓缩、喷雾干燥等),易于促进美拉德反应的发生,适度的反应能产生大量香气物质,显著提升食品风味。糠醛是美拉德反应中期产物,是重要的食品风味剂,可赋予乳粉面包味及焦糖味(糠醛相对含量: LS>GZG>PT)。仅在 GZG 样品中检出 2-吡咯甲醛,其源于亮氨酸在美拉德反应中间阶段产生的二羰基化合物经过 Strecker 降解反应产生^[46],其存在可丰富乳粉风味。美拉德反应初级阶段生成的 Amadori 产物,在 pH≤7 条件下通过 1,2-烯醇化反应生成 1,2-烯氨酚,经脱水产生 3-脱氧奥苏糖,进一步脱水环化生成春黄菊花气味的 5-羟甲基糠醛^[47-48],其在 GZG 样品中相对含量最高。美拉德反应产物 5-甲基呋喃醛在 LS 样品中含量高,它赋予乳粉浓的甜香味及焦糖味。仅在 PT 样品中检出戊二醛,其存在会使乳粉有甲醛臭味及刺激性气味。

所有样品中均检出有黄油香气的 2(5H)-呋喃酮,其在微生物作用下与糠醛反应,能产生谷物香气及咖啡香气^[49],LS 样品中糠醛及 2(5H)-呋喃酮相对含量均较高,二者发生化学反应可进一步增强 LS 样品的风味特性。2,3-二氢-3,5-二羟基-6-甲基-4(H)-吡喃-4-酮是美拉德反应的关键中间体之一,能够赋予乳粉焦糖香味和融化黄油味,丰富奶粉风味,该物质在 GZG 样品中相对含量较高。美拉德反应产物 2,5-二甲基-4-羟基-3(2H)-呋喃酮在 LS 样品中相对含量较高。

上述挥发性美拉德反应产物均能较好地被阻隔性强的 LS 及 GZG 包装截留,导致这两种包装中醛酮类物质相对含量较高(醛类: GZG-1: 11.02%>

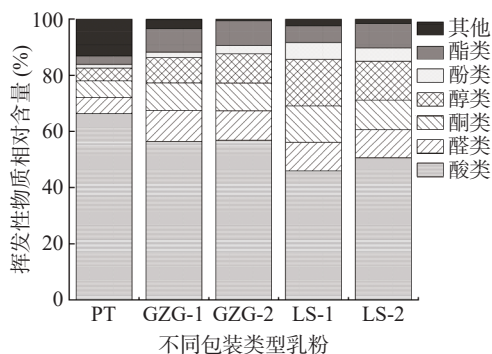


图 1 不同包装类型样品中挥发性物质组成及相对含量

Fig.1 Composition and relative content of volatile substances in different packaging samples

GZG-2; 10.5%>LS-1; 10.15%>LS-2; 10%>PT; 5.71%) (酮类: LS-1; 13.01%>GZG-1; 12.82%>LS-2; 10.54%>GZG-2; 9.84%>PT; 5.95%)。这些物质赋予 GZG 样品春黄菊花气味、焦糖香味及融化黄油味等正向气味,为 LS 样品增添了甜香味、焦糖味及谷物香气等正面香气。而 PT 样品中醛酮类物质种类少相对含量低,致使乳香浓郁度降低。

2.2.3 醇酚类 糠醇及麦芽酚为所有样品中共有物质。醇类化合物具有特殊的花香、果香和木香^[50],可由醛类还原、氨基酸代谢或者乳糖发酵形成^[23]。在乳粉热加工阶段,糠醇及麦芽酚可由美拉德反应产生。包装的气密性差异导致二者于 LS 及 GZG 包装中相对含量较高。麦芽酚是一种广谱高效增香剂,可由糠醇经氧化反应转化而成,其在 LS 样品中相对含量最高,可能与加速试验阶段,LS 样品中相对含量较高的糠醇部分转化为麦芽酚有关。仅在 LS 样品中检出有强还原性,对空气及阳光敏感的对氨基苯酚,其存在与 LS 包装中铝箔层极佳的遮光性抑制其降解有关。LS 及 GZG 样品中醇酚类物质相对含量较 PT 高,这些物质的存在进一步丰富乳粉的风味层次。

2.2.4 酯类 酯类物质为乳粉增添了独特的果香及清甜风味,可提升乳粉的感官品质^[25]。酯类物质是在热反应、机械处理和微生物作用等多种因素共同作用下,由乳脂肪酸和醇发生酯化反应产生^[51]。GZG 和 LS 样品中均检出具有微弱甜香及焦糖香的正丁内酯。此外,具有水果香气的(+/-)-3-羟基- γ -丁内酯在 GZG 乳粉中相对含量最高,LS 乳粉中相对含量次之。乳粉储存过程中,GZG 及 LS 包装能有效将这两种酯类物质截留于袋中。

2.2.5 其他类 在 GZG 和 LS 样品中检出少量呋喃,其常通过硫胺素降解、糖裂解反应和美拉德反应产生^[52]。仅在 LS 中检测出少量有甜果味的吡咯,是美拉德反应的中间产物。当食品采用听装、罐装等阻隔性较好的包材时,食品中的呋喃及吡咯因无法挥发而被密封于食品中^[53],因此二者在阻隔性好的 LS 及 GZG 中相对含量高。呋喃和吡咯可通过缩合反应形成褐色或黑色的类黑精,由前文对色泽的测定得 LS 样品相较于 PT 样品色泽偏黄,该反应可能是使得 LS 包装乳粉颜色较深的原因之一。仅在 LS 样品中检出少量 2-乙酰基呋喃,其天然存在于食品中,也是美拉德反应产物之一,经加速试验后,阻隔性好的 LS 包装使得该挥发性物质仍有少量剩余,其可赋予乳粉甜香、坚果香及烤香。仅在 PT 样品中检出相对含量较高的甲氧基苯基酚,其会赋予乳粉霉味、土腥味及哈喇味等负面风味。

由上述分析可知,乳粉在高温生产工艺中产生多种易挥发风味物质,包括糠醛、2-吡咯甲醛、5-羟甲基糠醛、5-甲基呋喃醛、2(5H)-呋喃酮、2,3-二氢-3,5-二羟基-6-甲基-4(H)-吡喃-4-酮、糠醇、麦芽酚、(+/-)-3-羟基- γ -丁内酯、正丁内酯及 2-乙酰基呋喃

等,这些物质在阻隔性好的 GZG 及 LS 包装中相对含量较高,其存在使得风味更加丰富;PT 较差的阻隔能力造成风味物质大量挥发,使得 PT 乳粉风味较单一及乳味不足。此外,PT 样品中更易发生脂肪氧化导致酸类物质相对含量上升,正癸酸、戊二醛及甲氧基苯基酚的存在及油酸的大幅降解使该乳粉有酸腐味等负面气味。

2.3 ROAV 鉴定关键性风味物质

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。阈值由查阅资料获得,对确定不了阈值的香气不做分析。2,5-二甲基-4-羟基-3(2H)-呋喃酮对 PT、GZG-1 及 LS 乳粉的整体风味贡献最大;糠醇对 GZG-2 乳粉的整体风味贡献最大,因此分别定义这些物质在其相应的乳粉中 ROAV_{max} 为 100。经计算,不同挥发性物质 ROAV 值如表 3 所示。

由表 3 可知:经相对气味活度值法分析可知所有样品共有 24 种挥发性组分贡献香气,LS(14、15 种)包装乳粉相较于 PT(12 种)及 GZG(各 13 种)包装乳粉所含正向香气物质种类最多,风味更为丰富(ROAV $\geq$ 0.1,排除有负面气味的甲酸及正癸酸)。PT、GZG-1、GZG-2、LS-1 及 LS-2 乳粉分别含有 7、8、12、6、5 种关键风味化合物(ROAV $\geq$ 1),即 GZG-2 所含关键风味化合物数量多且贡献大,香气特征明显。

所有乳粉中共有 8 种正向香气成分,分别为:乙酸贡献清香、水果香及花香;肉豆蔻酸贡献奶酪味、油脂味;十八烷酸贡献牛油味;糠醛贡献焦糖味及面包味;5-羟甲基糠醛贡献春黄菊花气味;2,3-二氢-3,5-二羟基-6-甲基-4(H)-吡喃-4-酮贡献焦糖香味及融化黄油味;糠醇贡献芳香味、焦糖味、椰子味及焦土豆味;麦芽酚贡献焦糖味。其中棕榈酸、糠醛及糠醇在所有乳粉中均被视为关键风味化合物(ROAV $\geq$ 1),这些风味物质对三种乳粉的贡献大小均为 GZG>LS>PT;肉豆蔻酸及十八烷酸均在 PT 及 GZG 乳粉中视为关键风味化合物,对 LS 乳粉总体香气起重要修饰作用,二者对乳粉香气的贡献大小均为 GZG>PT>LS;麦芽酚仅在 GZG-2 中为关键风味化合物,于其他乳粉中对总体香气起重要修饰作用。

对于 PT 样品,正癸酸的 ROAV 值为 0.626,说明由脂肪氧化产生的正癸酸确实会带来酸腐味及蜡味等负面气味。3-甲基环戊烷-1,2-二酮仅为 LS-1 的关键风味化合物,赋予乳粉甜味级木香味。美拉德反应中期产物 2,5-二甲基-4-羟基-3(2H)-呋喃酮在乳粉中相对含量较低(于 GZG-2 中甚至未检出),但其阈值低(0.0223 $\mu\text{g/g}$),是除 GZG-2 以外乳粉中关键风味化合物,其存在可赋予乳粉焦糖味、融化黄油味和烤菠萝气味^[54]。1-羟基-2-丙酮在 GZG-2 中

表 3 不同挥发性物质的 ROAV 值
Table 3 ROAV values of different volatile substances

物质	ROAV					在水中的阈值 ($\mu\text{g/L}$)
	PT	GZG-1	GZG-2	LS-1	LS-2	
乙酸	0.200	0.251	3.875	0.214	0.221	99
甲酸	0.001	0.007	0.127	0.007	0.013	1240
丙酸	—	—	14.889	0.613	0.521	2
己酸	—	0.292	—	—	0.163	3
正癸酸	0.626	—	—	—	—	10
肉豆蔻酸	3.140	1.748	33.105	0.167	0.185	10
十八烷酸	1.436	2.206	7.692	0.266	0.305	20
十五烷酸	0.873	—	—	—	—	10
棕榈酸	2.8731	6.8573	82.684	3.292	3.593	10
糠醛	1.989	3.669	41.596	3.284	2.991	2.8
5-甲基呋喃醛	2.333	4.162	—	3.028	5.751	1.11
1H-2-吡咯甲醛	—	0.017	0.095	—	—	65
戊二醛	0.045	—	—	—	—	190
5-羟甲基糠醛	0.007	0.028	0.279	0.007	0.014	1000
1-羟基-2-丙酮	0.608	—	8.826	0.586	0.532	10
3-甲基环戊烷-1,2-二酮	—	—	—	1.756	—	0.3
2,5-二甲基-4-羟基-3(2H)-呋喃酮	100	100	—	100	100	0.0223
2,3-二氢-3,5-二羟基-6-甲基-4(H)-吡喃-4-酮	0.228	0.495	6.214	0.182	0.212	35
糠醇	4.255	7.946	100	6.371	6.534	4.5
麦芽酚	0.325	0.460	7.595	0.502	0.504	16.596
对氨基苯酚	—	—	—	0.097	0.082	35
正丁内酯	—	0.195	2.506	0.083	0.342	20
吡咯	—	—	—	0.078	0.094	20
呋喃	—	4.268	5.466	0.154	0.172	4.5

ROAV 值大于 1, 但是其味道相对较轻, 呈现微甜或轻微的果香味, 通常不会对乳粉的整体风味产生显著影响。GZG 和 LS 样品中均含有呈微弱的甜香、焦糖香的正丁内酯, 对乳粉风味具有正面贡献。

3 结论

本研究选取三种常见包装材料的乳粉, 测定其多种理化指标及挥发性风味物质。结果表明, 高阻隔及铝塑包装均展现出卓越的密封性能, 能更好地维持乳粉理化性质。相较之下, 普通包装维持乳粉理化性质能力差, 各项指标均发生一定程度劣变。铝塑包装可控制乳粉水分含量 $\leq 2.544 \text{ g/100 g}$, 高阻隔包装能进一步降低至 $\leq 2.491 \text{ g/100 g}$, 其较低的含水量可提升乳粉的粒径及溶解度。在抑制脂肪氧化分解方面, 高阻隔包装可确保脂肪含量 $\geq 28.233 \text{ g/100 g}$, 铝塑包装良好的遮光性可保持脂肪含量在 $\geq 28.500 \text{ g/100 g}$ 的水平。普通包装气密性差, 导致其中的脂肪及色素发生氧化分解程度高。

所有样品共检出 53 种挥发性物质。普通乳粉中酸类物质相对含量较高, 油酸发生较大程度氧化, 且仅在该样品中检出正癸酸, 多种因素共同造成该乳粉出现酸腐味。高阻隔及铝塑包装阻隔性较好, 能有效抑制热加工阶段产生的挥发性物质释放, 这些物质的存在赋予乳粉焦糖香及黄油香等积极气味。普通包装乳粉储存过程中风味物质大量逸散, 造成风味单

一及乳味淡薄。经 ROAV 分析可知铝塑包装乳粉相较于高阻隔及普通包装乳粉所含正向香气物质种类更为丰富。

鉴于高阻隔及铝塑包装在各方面性能上均优于普通包装, 建议在实际生产加工中采用这些性能更优越的新型包装替代普通塑料包装。本研究仅针对两种新型包装对乳粉理化指标及风味物质的影响进行了初步探讨, 其他方面如营养品质、感官品质等仍有待进一步深入研究。在实际生产过程中, 结合新型包装与特定的生产工艺, 有望实现乳粉品质的全面提升。

© The Author(s) 2025. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

- [1] 庄柯瑾, 冯晓涵, 满朝新, 等. 乳粉储藏期间的品质变化及主要影响因素[J]. 中国乳品工业, 2021, 49(4): 35-41. [ZHUAG K J, FENG X H, MAN C X, et al. Quality change of milk powder during storage and the main influencing factors[J]. Chinese Dairy Industry, 2021, 49(4): 35-41.]
- [2] 刘玲, LEIF H S, 蒋东华. 导致乳粉贮藏加工劣变的主要化学反应和物化因素的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2012, 38(11): 120-126. [LIU L, LEIF H S, JIANG D H. Research progress of the main chemical reactions and physicochemical factors leading to the deterioration of milk powder storage and processing[J]. Food and

- Fermentation Industries, 2012, 38(11): 120–126.]
- [3] 闫海峡. 水分活度对模拟乳粉中乳糖结晶与蛋白糖基化反应相互作用影响的研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2022. [YAN H X. Effect of water activity on the interaction between lactose crystallization and protein glycation in simulated milk powder[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2022.]
- [4] YU H, ZHENG Y, LI Y. Shelf life and storage stability of spray-dried bovine colostrum powders under different storage conditions[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2015, 52: 944–951.]
- [5] 全爽, 顾泽茂, 邹圣碧, 等. 不同包装材料对香酥虾球品质的影响研究[J]. 食品科技, 2022, 47(9): 107–115. [QUAN S, GU Z M, ZOU S B, et al. Effect of different packaging materials on the quality of crispy shrimp balls[J]. *Food Science and Technology*, 2022, 47(9): 107–115.]
- [6] 李琳瑶, 储小军, 华家才, 等. 干法工艺对婴幼儿配方乳粉品质的影响[J]. 乳业科学与技术, 2023, 46(6): 13–19. [LI L Y, CHU X J, HUA J C, et al. Influence of dry process on the quality of infant formula milk powder[J]. *Journal of Dairy Science and Technology*, 2023, 46(6): 13–19.]
- [7] 鱼喆喆, 付尚辰, 朱丽, 等. 冷冻贮藏对喷雾干燥羊乳粉品质特性的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2023, 42(9): 66–73. [YU Z Z, FU S C, ZHU L, et al. Effect of frozen storage on spray-dried goat milk powder quality characteristics[J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2023, 42(9): 66–73.]
- [8] DING H, WILSON D I, YU W, et al. An investigation of the relative impact of process and shape factor variables on milk powder quality[J]. *Food and Bioprocess Processing*, 2021, 126: 62–72.
- [9] FOURNAISE T, BURGAIN J, PERROUD C, et al. Impact of formulation on reconstitution and flowability of spray-dried milk powders[J]. *Powder Technology*, 2020, 372: 107–116.
- [10] 韩亚平, 苟永楨, 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. [HAN Y P, GOU Y Z, LI F, et al. Fingerprint analysis of volatile flavor compounds in donkey milk powder from different regions based on gas chromatography-ion mobility spectrometry[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2023, 14(23): 155–162.]
- [11] FRANCESCA I, PATRIZIA P, LUCA C, et al. Analysis of volatile compounds in powdered milk for infant nutrition by direct desorption (CIS4-TDU) and GC-MS[J]. *Talanta*, 2015, 141: 195–199.
- [12] 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.
- [13] FENG D, WANG J, JI X J, et al. Analysis of volatile organic compounds by HS-GC-IMS in powdered yak milk processed under different sterilization conditions[J]. *Journal of Food Quality*, 2021, 2021(1): 5536645.
- [14] 马雯, 储小军, 孔迎, 等. 婴幼儿配方乳粉加速试验营养素变化初探[J]. 食品工业, 2020, 41(6): 333–336. [MA W, CHU X J, KONG Y, et al. Preliminary study on nutrients in infant formula milk powder accelerated experiment[J]. *Food Industry*, 2020, 41(6): 333–336.]
- [15] 贾宏信, 苏米亚, 陈文亮, 等. 婴幼儿配方乳粉贮存过程中品质劣变的研究进展[J]. 食品工业科技, 2017, 38(23): 330–334. [JIA H X, SU M Y, CHEN W L, et al. Research progress on quality deterioration of infant formula during storage[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2017, 38(23): 330–334.]
- [16] JIANG Y, YANG X, JIN H, et al. Shelf-life prediction and chemical characteristics analysis of milk formula during storage[J]. *Food Science and Technology*, 2021, 144: 111268.
- [17] 赵春燕, 卢立新. 包装材料的光阻隔性对奶粉中维生素 C 降解影响的研究[J]. 包装工程, 2010, 31(23): 22–24. [ZHAO C Y, LU L X. Effect of light-barrier property of packaging material on the degradation of vitamin C in infant formula[J]. *Packaging Engineering*, 2010, 31(23): 22–24.]
- [18] 周梦瑶, 程莎莎, 田芳, 等. 包装残氧量对幼儿配方乳粉品质的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(22): 82–89. [ZHOU M Y, CHENG S S, TIAN F, et al. Effect of the residual oxygen inside the package on the quality of young child formula[J]. *Food Science*, 2022, 43(22): 82–89.]
- [19] 贾宏信, 苏米亚, 蒋雯瑶. 不同包装形式的乳粉的贮存稳定性[J]. 乳业科学与技术, 2016, 39(5): 25–28. [JIA H X, SU M Y, JIANG W Y. Storage stability studies of milk powder with different forms of packaging[J]. *Journal of Dairy Science and Technology*, 2016, 39(5): 25–28.]
- [20] XU X, WU B, ZHAO W, et al. Shifts in autochthonous microbial diversity and volatile metabolites during the fermentation of chili pepper (*Capsicum frutescens* L.)[J]. *Food Chemistry*, 2021, 335: 127512.
- [21] 中华人民共和国卫生部. 婴幼儿配方乳粉产品稳定性研究指南[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021. [Ministry of Health of the People's Republic of China. Guidelines for the study of the stability of infant formula milk powder products[S]. Beijing: China Standards Press, 2021.]
- [22] 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.
- [23] 张晓梅, 仝令君, 迟雪露, 等. 奶牛乳、水牛乳与牦牛乳的挥发性风味物质分析[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(18): 126–131. [ZHANG X M, TONG L J, CHI X L, et al. Analysis of volatile flavor components of cattle milk, buffalo milk and yak milk[J]. *Food Research and Development*, 2017, 38(18): 126–131.]
- [24] 葛丽琴, 孙雪枫, 王远兴. 速溶豆粉、牛奶粉及羊奶粉挥发性成分的比较[J]. 食品工业科技, 2019, 40(10): 248–254. [GE L Q, SUN X F, WANG Y X. Comparison of volatile components of instant soybean powder, milk powder and goat milk powder[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019, 40(10): 248–254.]
- [25] 王金源, 张佳慧, 庄莉萍, 等. HS-SPME-GC-TOF-MS 结合 ROAV 分析花果香型红茶特征香气成分[J]. 天然产物研究与开发, 2023, 35(12): 2015–2026. [WANG J Y, ZHANG J H, ZHUANG L P, et al. Analysis of characteristic aroma compounds of black tea with flowery-fruity flavour by HS-SPME-GC-TOF-MS combined with ROAV[J]. *Natural Products Research and Development*, 2023, 35(12): 2015–2026.]
- [26] 杜管利, 秦立虎. 乳粉常见的质量缺陷及其原因分析[J]. 食品安全导刊, 2014(15): 50–51. [DU G L, QIN L H. Common quality defects of milk powder and their causes[J]. *Food Safety Guide*, 2014(15): 50–51.]
- [27] 何光华, 姜慧萍, 黄燕, 等. 益生菌配方奶粉中水分活度的控制[J]. 中国乳品工业, 2012, 40(2): 30–32. [HE G H, JIANG H P, HUANG T, et al. Controlling water activity of probiotics formula powder[J]. *Chinese Dairy Industry*, 2012, 40(2): 30–32.]
- [28] THAM T W Y, YEOH A T H, ZHOU W. Characterisation of aged infant formulas and physicochemical changes[J]. *Food Chemistry*, 2017, 219: 117–125.

- [29] 何湘丽, 湛艳红, 彭喜洋, 等. 婴幼儿配方乳粉溶解性的影响因素探讨[J]. 中国乳业, 2019(2): 74-76. [HE X L, ZHAN Y H, PENG X Y, et al. Influence factors on solubility of infant formula milk powder[J]. China Dairy, 2019(2): 74-76.]
- [30] 贾宏信, 周佳颖. 粒径法分析全脂乳粉再水化过程[J]. 乳业科学与技术, 2019, 42(1): 19-22. [JIA H X, ZHOU J Y. Rehydration process of whole milk powder investigated by particle size analysis[J]. Dairy Science and Technology, 2019, 42(1): 19-22.]
- [31] 刘志明, 唐彦君, 孙清瑞, 等. 光照强度对大豆调和油氧化的影响[J]. 食品科技, 2019, 44(4): 190-194. [LIU Z M, TANG Y J, SUN Q R, et al. Effect of light intensity on oxidation of blended soybean oil[J]. Food Science and Technology, 2019, 44(4): 190-194.]
- [32] 葛向珍. 大高良姜精油智能控释型活性包装复合膜的构建及在食品保鲜中的应用[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2023. [GE X Z. Construction of intelligent controlled-release active packaging composite film for *Alpinia galanga* oil and its application in food preservation[D]. Xianyang: Northwest A&F University, 2023.]
- [33] 邱小凤, 朱春燕, 袁鹏. 婴幼儿辅食营养包及速溶豆粉中过氧化值的检测方法 & 限值研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(4): 1210-1215. [QIU X F, ZHU C Y, YUAN P. Study on the detection method and limit of peroxide value in infant supplementary nutrition package and instant soybean powder[J]. Journal of Food Safety and Quality Inspection, 2022, 13(4): 1210-1215.]
- [34] NOOSHKAM M, VARIDI M, BASHASH M. The Maillard reaction products as food-born antioxidant and antibrowning agents in model and real food systems[J]. Food Chemistry, 2019, 275: 644-660.
- [35] 杨苗, 张伟刚, 杨萍果. 基于荧光光谱检测不同环境牛奶中维生素 B2 含量研究[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2014, 34(3): 273-276, 288. [YANG M, ZHANG W G, YANG P G. Effect of different treatments on the content of vitamin B2 in milk by the fluorescence spectroscopy[J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 2014, 34(3): 273-276, 288.]
- [36] SHANGGUAN H, ZHANG S, LI X, et al. Synthesis of lutein esters using a novel biocatalyst of *Candida antarctica* lipase B covalently immobilized on functionalized graphitic carbon nitride nanosheets[J]. RSC Advances, 2020, 10(15): 8949-8957.
- [37] 郑菲菲, 陶保华, 赖世云, 等. 高压液相色谱法同时测定婴幼儿配方乳粉中的叶黄素和 β -胡萝卜素[J]. 食品安全质量检测学报, 2014, 5(1): 227-234. [ZHENG F F, TAO B H, LAI S Y, et al. Simultaneous determination of lutein and β -carotene in infant formulas by high pressure liquid chromatography[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2014, 5(1): 227-234.]
- [38] 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. [LIU X F. Comparative study on bovine and goat milk fat and flavor substances of milk powder in accelerated oxidation[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science and Technology, 2023.]
- [39] WANG J, YANG Z J, WANG Y D, et al. The key aroma compounds and sensory characteristics of commercial Cheddar cheeses[J]. Journal of Dairy Science, 2021, 104(7): 7555-7571.
- [40] 程玉佳. 羊乳粉加工及贮藏过程中氧化风味物质的形成规律与控制技术研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2023. [CHENG Y J. Study on the formation rule and control technology of oxidized flavor compounds during the processing and storage of goat milk powder[D]. Xianyang: Northwest A&F University, 2023.]
- [41] 夏百根, 宁爱民, 郑先福, 等. 脂质在加热过程中的反应机理研究[J]. 河南农业大学学报, 2005(4): 124-126, 135. [XIA B G, NING A M, ZHENG X F, et al. Study on reaction mechanism of lipid in the pyrogenation process[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2005(4): 124-126, 135.]
- [42] 薛海燕, 李欣雨, 孟毅, 等. 基于顶空固相微萃取-气相色谱-质谱法分析加速氧化过程中全脂牛羊乳粉挥发性化合物[J]. 食品科学, 2024, 45(10): 272-280. [XUE H Y, LI X Y, MENG Y, et al. HS-SPME-GC-MS analysis of volatile compounds in whole-fat cow and goat milk powder during accelerated oxidation[J]. Food Science, 2024, 45(10): 272-280.]
- [43] SHAHIDI F, ZHONG Y. Lipid oxidation and improving the oxidative stability[J]. Chemical Society Reviews, 2010, 39(11): 4067-4079.
- [44] 吴琼. 乳品中糠醛类物质的形成规律及控制研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2021. [WU Q. Formation and control of furfural compounds in milk drinks[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2021.]
- [45] CONTADOR R, DELGADO F J, GARCÍA-PARRA J, et al. Volatile profile of breast milk subjected to high-pressure processing or thermal treatment[J]. Food Chemistry, 2015, 180: 17-24.
- [46] LI C, AL-DALALI S, WANG Z, et al. Investigation of volatile flavor compounds and characterization of aroma-active compounds of water-boiled salted duck using GC-MS-O, GC-IMS, and E-nose[J]. Food Chemistry, 2022, 386: 132728.
- [47] NGUYEN H T, VAN BOEKEL M. Acrylamide and 5-hydroxymethylfurfural formation during biscuit baking. Part II: Effect of the ratio of reducing sugars and asparagine[J]. Food Chemistry, 2017, 230: 14-23.
- [48] LEE C H, CHEN K T, LIN J A, et al. Recent advances in processing technology to reduce 5-hydroxymethylfurfural in foods[J]. Trends in Food Science & Technology, 2019, 93: 271-280.
- [49] 陈杰, 赵莹, 韩舜羽, 等. 17 种市售广式酱油中风味物质的检测分析[J]. 中国酿造, 2021, 40(12): 165-170. [CHEN J, ZHAO Y, HAN S Y, et al. Detection and analysis of flavor substances in 17 kinds of commercially available Cantonese soy sauce[J]. China Brewing, 2021, 40(12): 165-170.]
- [50] 刘登勇, 周光宏, 徐幸莲. 确定食品关键风味化合物的一种新方法: "ROAV" 法[J]. 食品科学, 2008(7): 370-374. [LIU D Y, ZHOU G H, XU X L. "ROAV" method: A new method for determining key odor compounds of rugao ham[J]. Food Science, 2008(7): 370-374.]
- [51] LEE S M, ZHENG L W, JUNG Y, et al. Effects of hydroxycinnamic acids on the reduction of furan and α -dicarbonyl compounds[J]. Food Chemistry, 2020, 312: 126085.
- [52] 石维妮, 刘晓毅, 田珺. 乳制品中呋喃含量的调研[J]. 食品科技, 2010, 35(9): 294-296. [SHI W N, LIU X Y, TIAN J. Research of the furan levels in dairy based products[J]. Food Science and Technology, 2010, 35(9): 294-296.]
- [53] 宫瑞泽, 霍晓慧, 张磊, 等. 美拉德反应对中药品质的影响及调控研究进展[J]. 中草药, 2019, 50(1): 243-251. [GONG R Z, HUO X H, ZHANG L, et al. Advances in effects and regulation of Maillard reaction on quality of Chinese materia medica[J]. Chinese Herbal Medicine, 2019, 50(1): 243-251.]
- [54] 崔和平. 美拉德反应中间体的水相制备及其加工风味形成规律研究[D]. 无锡: 江南大学, 2019. [CUI H P. Study on the regularity of aqueous preparation of Maillard reaction intermediates and its formation of processing flavors[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2019.]