

王雪, 于有强, 郑晓阳, 等. 大豆处理工艺对植物基复合乳贮藏期挥发性风味物质的影响 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(4): 270–278.
doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024020048

WANG Xue, YU Youqiang, ZHENG Xiaoyang, et al. Effects of the Treatment Technology of Soybean on Volatile Flavor Compounds of Plant-based Compound Milk during Storage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(4): 270–278. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024020048

· 分析检测 ·

大豆处理工艺对植物基复合乳贮藏期挥发性风味物质的影响

王 雪^{1,2}, 于有强³, 郑晓阳³, 马洪江^{1,2}, 刘士伟³, 王文鑫³, 周 芳³, 段盛林^{3,*}

(1.黑龙江飞鹤乳业有限公司, 北京 100015;

2.黑龙江北纬四十七植物蛋白有限公司, 黑龙江齐齐哈尔 161002;

3.中国食品发酵工业研究院有限公司, 北京 100015)

摘 要:本研究旨在探究两种产业化工艺对所制备的植物基复合乳风味的影响。采用顶空固相微萃取-气质联用技术 (Headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry, HS-SPME-GC-MS) 与电子鼻、人体感官评价相结合的方式, 比较分析采用两种大豆处理工艺 (隔氧磨浆/高温灭酶, 灭酶后磨浆) 制备的植物基复合乳在贮藏期 (0、90、180 和 360 d) 内挥发性风味物质的差异。人体感官和电子感官结果表明, 贮藏期植物基复合乳 1# 和 2# 的奶香味、花香味、果香味、谷物香味逐渐增强, 异味逐渐减弱, 植物基复合乳 1# 的风味优于植物基复合乳 2#, 且在各个风味维度上变化幅度小于植物基复合乳 2#。采用 HS-SPME-GC-MS 方法共检测出 46 种挥发性风味成分, 包括 15 种醇、7 种醛、3 种酸、7 种酯、6 种酮和 8 种其他成分。主成分分析结果表明, 己醇、1-十四烷醇、1-十六烷醇、吡啶、己酸乙酯、棕榈酸乙酯、2-庚酮、2-辛酮、2-乙酰基噻唑等是影响植物基复合乳 1# 贮藏期风味变化的关键因子, 2,3 丁二醇、正己醛、麦芽酚、苯甲醛、乙酸乙酯、3-乙基-2,5-二甲基吡嗪等是植物基复合乳 2# 贮藏期风味变化的关键因子。因此, 采用隔氧磨浆/高温灭酶工艺制备的植物基复合乳香味较明显, 且贮藏期变化较小, 表明隔氧磨浆/高温灭酶工艺在改善植物复合乳风味、提高风味稳定性方面具有优势。

关键词:植物基复合乳, 电子鼻, 感官分析, 气相色谱-质谱, 风味

中图分类号: TS210.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)04-0270-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024020048



本文网刊:

Effects of the Treatment Technology of Soybean on Volatile Flavor Compounds of Plant-based Compound Milk during Storage

WANG Xue^{1,2}, YU Youqiang³, ZHENG Xiaoyang³, MA Hongjiang^{1,2}, LIU Shiwei³, WANG Wenxin³,
ZHOU Fang³, DUAN Shenglin^{3,*}

(1. Heilongjiang Feihe Dairy Co., Ltd., Beijing 100015, China;

2. Heilongjiang 47°N Plant Protein Co., Ltd., Qiqihar 161002, China;

3. China National Research Institute of Food & Fermentation Industries Co., Ltd., Beijing 100015, China)

Abstract: To explore the effects of two industrial processes on the flavor of plant-based compound milk. Headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS) combined with electronic nose and human sensory evaluation were used to analyze the differences of volatile flavor substances in the plant-based compound milk, that prepared by two soybean treatment technologies (oxygen separation grinding/enzyme inactivation with high temperature, grinding after enzyme inactivation) at different storage time (0, 90, 180 and 360 d). The results of human and electronic senses showed that the milk, flower, fruit and cereal flavors of plant-based compound milk 1# and 2# gradually

收稿日期: 2024-02-19

作者简介: 王雪 (1985-), 女, 博士, 高级工程师, 研究方向: 功能食品开发, E-mail: wangxue1@feihe.com。

* 通信作者: 段盛林 (1968-), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 研究方向: 功能食品开发, E-mail: dslbeijing@163.com。

increased during storage, and the peculiar smell gradually weakened. Furthermore, compared to plant-based compound milk 2#, the plant-based compound milk 1# displayed better flavor and smaller change ranges in five flavor dimensions. A total of 46 volatile flavor components were detected by HS-SPME-GC-MS, including 15 alcohols, 7 aldehydes, 3 acids, 7 esters, 6 ketones and 8 other components. The results of principal component analysis showed that hexanol, 1-tetradecanol, 1-hexanol, pyridine, ethyl caproate, ethyl palmitate, 2-heptanone, 2-octanone, 2-acetylthiazole were the key factors affecting the flavor change of plant-based composite milk 1#, while 2,3 butanediol, n-hexanal, maltol, benzaldehyde, ethyl acetate, 3-ethyl-2,5-dimethylpyrazine were the key factors affecting the flavor change of plant-based composite milk 2# during storage. In conclusion, the plant-based compound milk prepared by oxygen separation grinding/enzyme inactivation with high temperature had more pronounced aroma, and exhibited smaller changes during storage, which proved that the treatment technology of oxygen separation grinding/enzyme inactivation with high temperature displayed more advantages in improving flavor and flavor stability of plant-based compound milk.

Key words: plant-based compound milk; electronic nose; sensory analysis; gas chromatography-mass spectrometry; flavor

近年来,随着消费者对健康、环保等方面关注度持续上升,植物性食品受到越来越多的青睐,植物性食品产业也显示出巨大的发展潜力。在众多植物性食品中,以豆类、坚果类、谷物类等为原料制成的植物乳产品高度契合天然健康、绿色环保的消费理念,且口感风味独特,已成为食品消费领域的重要品类。然而,目前国内市场上的调制植物乳产品多以一种或多种谷物组合为原料,并未对营养、功效进行强化,已经不能很好地满足当代消费者对营养、健康产品的旺盛需求,开发相关产品具有巨大的市场潜力。

大豆、糙米及其发芽、发酵产物是纯植物基原料,且具有突出的营养价值^[1-9],将二者有机组合,可开发出具备营养和功效强化特点的复合饮品。有研究报道,对大豆、糙米进行发芽、酶解等工艺处理,可以实现 γ -氨基丁酸的富集^[10],且在低氧条件下对大豆进行发芽处理,可以进一步富集大豆多肽和 γ -氨基丁酸^[11]。尽管这些研究为相关产品产业化提供了必要的理论支撑,但对于风味这种决定产品品质的重要因素却研究不足。加工工艺和贮藏时间是影响植物乳风味的重要因素。通过对四种不同巴氏杀菌条件下发酵豆乳的主要风味物质组成及含量变化进行研究分析,发现杀菌加热强度提高,正己醛等大多数挥发性风味物质相对含量呈下降的趋势,而赋予发酵豆乳香味的 2,3-丁二酮相对含量逐渐增大,发酵豆乳豆腥味减弱,豆香味提升^[12],且发酵豆乳中各类挥发性风味物质的含量也会随储藏时间延长而发生变化^[13]。

豆腥味是以大豆为原料制备的各类植物乳中异味的重要组成部分。大豆中的脂肪氧化酶被氧气和水激活,进而催化多不饱和脂肪酸氧化,即可生成醇、醛、酮、呋喃等具有豆腥味的挥发性风味物质。因此,抑制脂肪氧化酶的活性是消除豆腥味的关键。目前,工业生产中普遍采用热处理方法达到灭酶去腥的目的。根据磨浆与加热的先后顺序,大豆处理工艺可分为生浆法和熟浆法,其中熟浆法在去除豆腥味方面效果更佳。然而,为进一步改善产品风味,近年来已有学者提出了将灭酶与磨浆统一起来的改良方案^[14]。本研究在已有研究的基础上,分别采用将灭酶

与磨浆统一的隔氧磨浆/高温灭酶工艺和熟浆法的灭酶后磨浆工艺对发芽大豆进行处理,制备了两款植物基复合乳。在此基础上,采用人体感官评价和电子鼻技术对贮藏期内两款植物基复合乳的风味特征进行比较分析,同时采用顶空固相微萃取-气质联用技术(Headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry, HS-SPME-GC-MS)分析了贮藏期内两款植物基复合乳中挥发性风味物质的变化情况。以期对植物乳产品中大豆加工工艺的选择及其相关产品产业化和感官品质提升提供一定的理论依据和应用参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

大豆为种子级大豆 采自黑龙江省依安县;糙米为粳米糙米 采自黑龙江省泰来县黑龙江六水香生态农业有限公司;2-甲氧基-3-甲基吡嗪(内标) 色谱纯,上海安谱实验科技股份有限公司;安琪甜酒曲(甜味型) 安琪酵母股份有限公司。

HTD-9001 豆芽机 中山市荣威电器有限公司;DL-CJ2NDI 型超净工作台 北京东联哈尔仪器制造有限公司;F50 型胶体磨 沈阳航天新光超微粉碎机械有限公司;T25 基本型 ULTRA-TURRAX 分散机 德国 IKA 公司;Homelab 型高压均质机 意大利 FBF 公司;NS2002H 型高压均质机 GEA 工程技术(中国)有限公司;HP-DSI-30 型蒸汽注入式超高温瞬时杀菌机 上海浩鹏机电科技有限公司;GCMS-QP2010 Plus 气相色谱-质谱联用仪 日本岛津公司;色谱柱:ZB-WAX plus(60 m×0.25 μ m×0.25 mm)

美国 Phenomenex 公司;SPME 萃取头:DVB/CAR/PDMS, 2 cm, 50/30 μ m 美国 Supelco 公司;FOX 4000 型电子鼻(配 MOS 传感器),配 HS-100 型自动进样器、AG 2301 型高纯空气发生器、Alpha Soft 12.45 版软件 法国 Alpha MOS 公司;ME400 ZTE 型电子天平 梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 植物基复合乳制备工艺 发芽大豆制备工艺:

大豆清洗除杂,于 25 ℃ 水中浸泡 4 h 后取出,置于 25 ℃ 发芽 18 h。

糙米发酵物制备工艺:糙米清洗除杂,于 25 ℃ 水中浸泡 10 h,然后 100 ℃ 蒸制 1 h,添加 0.5% 的甜酒曲混合均匀,30±1 ℃ 条件下发酵 48 h,100 ℃ 条件下蒸制 30 min 灭菌。

发芽大豆隔氧磨浆/高温灭酶工艺:将发芽大豆室温水清洗,85 ℃ 热水磨浆,料液 85 ℃ 保温 120 s,温度升至 121 ℃ 保持 60 s(蒸汽直喷)得到发芽大豆料浆(用于制备植物基复合乳 1#)。

发芽大豆沸水灭酶后磨浆工艺:将发芽大豆室温水清洗,沸水煮 5 min(保留煮豆沸水,用于磨浆),胶体磨磨浆得到发芽大豆料浆(用于制备植物基复合乳 2#)。

除了发芽大豆磨浆工艺不同,均采用相同加工工艺制备两款植物基复合乳,具体工艺流程如下:采用胶体磨分别对发芽大豆(20%)和糙米发酵物(5%)进行磨浆处理,磨浆后混合并用 5% 碳酸氢钠溶液调节 pH 至 7.0,物料浆经高压均质(40 MPa,两次)和超高温瞬时杀菌(142 ℃,4 s)处理,采用无菌灌装入利乐无菌包装,得到植物基复合乳样品。

1.2.2 植物基复合乳贮藏和样品采集 两款植物基复合乳于室温条件下贮藏,分别在贮藏的第 0、90、180 和 360 d 时取样,用于感官品评、电子鼻以及 GC-MS 分析。

1.2.3 感官评价 依据 GB/T 29605-2013 感官分析食品感官质量控制准则中讲述的办法^[15],对不同工艺制备的复合乳在储藏期建立感官评价的评价集,从复合乳的奶香味、花香味、果香味、谷物香味、异味 5 个方面进行感官品评打分,采用 10 分制,风味强度高则得分高,香味评分高、异味评分低则风味较好。评价集见表 1。

选取 5 名专业评价员,5 名初级评价员,评价人员经挑选、培训后,具有一定感官分析能力且有一定的感官分析经验。采取强制决策法对两类评价人员的品评结果赋予不同的权重,即: {专业评价员,初级评价员}=[0.6,0.4]。

1.2.4 电子鼻分析 参考高铭等^[16]的方法并进行调整,具体方法内容如下。称取 2 g 待测样品于 20 mL 顶空瓶内,采用顶空取样进行风味测定。电子鼻主机参数:采集时间 120 s;数据采集延迟 1080 s;进样量 5000 μL;进样速度 1000 μL/s。自动进样仪参数:孵化器 120 s,孵化温度 60 ℃,注射器温度 70 ℃。每个样品做 3 组平行。电子鼻传感器性能见表 2。

1.2.5 挥发性风味成分测定 参考王晨慧等^[17]的方法并进行调整,具体方法内容如下。

前处理方法:量取 5 mL 样品于 15 mL 顶空瓶内,加入内标(2-甲氧基-3 甲基-吡嗪,终质量浓度 12.15 μg/L),密封,在 50 ℃ 水浴锅中平衡 20 min,将萃取头插入顶空瓶内,置于 50 ℃ 水浴锅中萃取

表 1 植物基复合乳感官评分表

Table 1 Sensory score of plant-based compound milk

项目	评分标准	分数(分)
奶香味	浓郁的奶香味	9~10
	清淡的奶香味	6~8
	微弱的奶香味	3~5
	无奶香味	0~2
花香味	浓郁的花香味	9~10
	清淡的花香味	6~8
	微弱的花香味	3~5
	无花香味	0~2
果香味	浓郁的果香味	9~10
	清淡的果香味	6~8
	微弱的果香味	3~5
	无果香味	0~2
谷物香味	浓郁的谷物香味	9~10
	清淡的谷物香味	6~8
	微弱的谷物香味	3~5
	无谷物香味	0~2
异味	有强烈的酸味、苦味、辣味、豆腥味等	9~10
	有明显的酸味、苦味、辣味、豆腥味等	6~8
	有微弱的酸味、苦味、辣味、豆腥味等	3~5
	无酸味、苦味、辣味、豆腥味等	0~2

表 2 传感器性能及其对应的香气类型

Table 2 Sensors performance and the corresponding aroma types

传感器名称	性能	参考物质
LY2/LG	对氧化性较强的气体灵敏	氯、氟、氮、氧化合物
LY2/G	对有毒气体灵敏	氨、胺类化合物、碳氧化合物
LY2/AA	对有机化合物灵敏	乙醇
LY2/gCT	对易燃气体灵敏	丙烷、丁烷
LY2/gCTL	对有毒气体灵敏	硫化氢
P10/1	对可燃气体灵敏	碳氢化合物
P10/2	对易燃气体灵敏	甲烷
PA/2	对有机化合物、有毒气体灵敏	乙醇、氨水、胺类化合物
P40/1	对氧化能力较强的气体灵敏	氟
P40/2	对氧化能力较强的气体灵敏	氯
P30/1	对可燃气体、有机化合物灵敏	碳氢化合物燃烧产物
P30/2	对有机化合物灵敏	乙醇、燃烧产物
T30/1	对有机化合物灵敏	有机化合物
T70/2	对芳香族化合物灵敏	甲苯、二甲苯
T40/1	对氧化能力较强的气体灵敏	氟
T40/2	对氧化能力较强的气体灵敏	氯、氟、氮、氧化合物
TA/2	对有机化合物灵敏	乙醇

1 h,萃取结束后萃取头于进样口解吸 5 min,进行 GC-MS 检测分析。

GC-MS 条件: ZB-WAXplus 色谱柱(60 m×0.25 mm×0.25 μm),进样口温度: 250 ℃;柱流速: 1 mL/min;分流模式: 不分流;接口温度: 250 ℃;离子源温度: 230 ℃;数据采集模式: SIM 模式;升温程序: 初始温度 35 ℃,保持 3 min,以 5 ℃/min,升温至 200 ℃,以 10 ℃/min,升温至 230 ℃,保持 10 min。

GC-MS 分析得到的质谱图与计算机中 NIST

14 标准谱库比对匹配,然后再通过计算所测物质的保留指数(RI),按照公式(1)计算 RI,并与文献中报道的 RI 值进行比对定性,采用单个化合物的相对含量与其内标响应值的比进行半定量分析。

$$RI = 100n + 100 \times \frac{t - t_n}{t_{n+1} - t_n}$$

式 (1)

式中: n 和 n+1 分别为待测物出峰前后正构烷烃的碳原子数, t_n 和 t_{n+1} 分别为对应正构烷烃的保留时间; t 为待测化合物在 GC-MS 中的保留时间 ($t_n < t < t_{n+1}$)。

1.3 数据处理

数据结果由平均值±标准偏差表示。利用 SPSS 26.0 软件进行数据统计分析, $P < 0.05$ 表示差异显著,应用 Origin 2022 软件进行电子鼻主成分分析和电子鼻雷达图分析。

2 结果与分析

2.1 贮藏期内两款植物基复合乳的感官评价分析

由表 3 可知,贮藏过程中植物基复合乳 1#和 2#的奶香味、花香味、果香味、谷物香味逐渐增强,异味逐渐减弱。植物基复合乳 1#的风味优于植物基复合乳 2#,且在贮藏期内,植物基复合乳 1#各个风味维度的变化程度均小于植物基复合乳 2#,说明隔氧磨浆/高温灭酶在改善产品风味及保持风味稳定性方面具有优势。

2.2 贮藏期内植物基复合乳的电子鼻分析

电子鼻分析结果如图 1 所示, PA/2(乙醇、氨

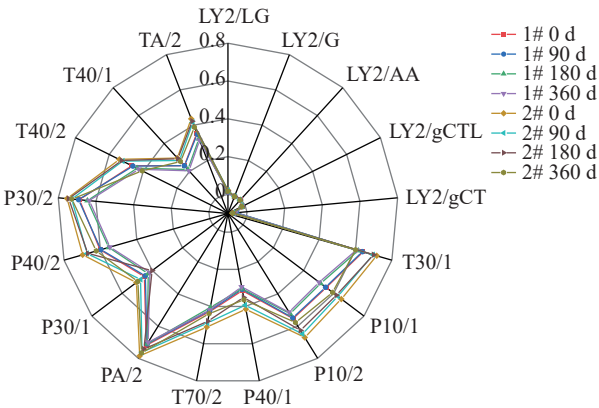


图 1 两款植物基复合乳电子鼻响应信号雷达图
Fig.1 Radar graph for E-nose odor intensity of two plant-based compound milk

水、胺类化合物)、P30/2(乙醇、燃烧产物)、T30/1(有机化合物)对两款植物基复合乳香气响应显著。总体来看,贮藏期内植物基复合乳 1#和 2#在各传感器上的响应值均呈现出减小趋势,且植物基复合乳 1#的响应值及其变化幅度均小于植物基复合乳 2#。

两款植物基复合乳电子鼻检测主成分分析 PCA 结果如图 2 所示,第 1 主成分区分贡献率为 75.7%,第 2 主成分区分贡献率为 10.6%,2 个主成分累计贡献率 86.3%,总贡献率超过 85%,包含了 PCA 转换中绝大部分的贡献率,能够较好地反映多指标信息,这表明电子鼻检测方法是可行的。同时,从图中可以看出,在 PCA 第 1 主成分上,植物基复合乳 1#与 2#可以很好区分,说明植物基复合乳 1#和 2#的风味区别明显。在 PCA 第 2 主成分上,贮藏期内植物基复合乳 1#和 2#风味存在差异,其中植物基复合乳 1#分布较为集中,再次说明贮藏期内植物基复合乳 1#的风味变化较小。

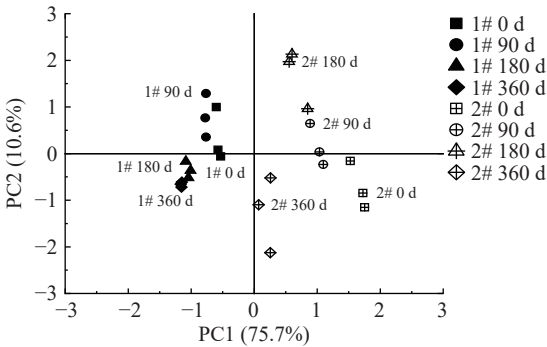


图 2 两款植物基复合乳电子鼻的 PCA 分析图谱
Fig.2 PCA analysis of two plant-based compound milk for E-nose

2.3 贮藏期内两款植物基复合乳的挥发性风味物质分析

2.3.1 贮藏期内两款植物基复合乳的挥发性风味物质组成分析 利用 HS-SPME-GC-MS 技术对植物基复合乳 1#和 2#中的挥发性风味物质进行检测,共检测出 46 种挥发性风味物质,如表 4 所示。这些化合物分为 6 大类,其中醇类 15 种、醛类 7 种、酸类 3 种、酯类 7 种、酮类 6 种以及 8 种其他成分(主要是芳香族化合物)。有研究报道,豆乳中可检测到的

表 3 两款植物基复合乳感官评分
Table 3 Sensory scores of two plant-based compound milk

项目评分	复合乳1#				复合乳2#			
	0 d	90 d	180 d	360 d	0 d	90 d	180 d	360 d
奶香味	6.80±0.63 ^b	6.90±0.32 ^b	8.20±0.63 ^a	8.40±0.52 ^a	4.30±0.67 ^c	4.80±0.79 ^{de}	5.60±0.52 ^c	5.30±0.48 ^{cd}
花香味	7.40±0.70 ^a	7.50±0.53 ^a	7.70±0.48 ^a	7.80±0.63 ^a	4.20±0.63 ^c	4.30±0.67 ^c	5.10±0.74 ^b	5.50±0.85 ^b
果香味	6.80±0.63 ^b	7.00±0.67 ^b	7.80±0.63 ^a	7.70±0.48 ^a	5.00±0.67 ^c	4.90±0.32 ^c	6.40±0.52 ^b	6.70±0.82 ^b
谷物香味	5.00±0.47 ^b	5.40±0.52 ^b	7.00±0.82 ^a	7.40±0.52 ^a	5.00±0.47 ^b	5.10±0.57 ^b	6.60±0.70 ^{ab}	6.80±0.63 ^a
异味	3.80±0.63 ^c	3.70±0.67 ^c	2.80±0.42 ^d	2.50±0.53 ^d	8.10±0.74 ^a	7.80±0.63 ^a	6.50±0.53 ^b	6.70±0.67 ^b

注: 同一行中不同小写字母表示存在显著性差异($P < 0.05$)。

表 4 两款植物基复合乳在贮藏过程中气味活性化合物的相对含量

Table 4 Relative content of odorant active compounds in two plant-based compound milk during storage

序号	名称	CAS	RI ^[18] (文献/计算)	风味 ^[19-20]	植物基复合乳1#				植物基复合乳2#			
					0 d	90 d	180 d	360 d	0 d	90 d	180 d	360 d
醇类												
1	乙醇	64-17-5	929/925	酒精味	3510.80±153.94 ^a	3464.33±27.63 ^{ab}	3117.42±55.23 ^c	3086.99±36.83 ^c	3336.93±149.68 ^{abc}	3307.20±86.62 ^{bc}	3183.53±86.02 ^{cd}	3158.79±120.74 ^{cd}
2	异丁醇	78-83-1	1099/1092	葡萄酒	42.01±0.25 ^a	40.07±1.39 ^a	25.91±0.23 ^b	14.08±0.16 ^c	68.09±3.13 ^{a*}	67.81±3.31 ^{a*}	65.53±2.87 ^{ab*}	63.55±2.04 ^{ab*}
3	1-戊烯-3-醇	616-25-1	1157/1151	黄油味、草味	10.66±0.42 ^a	10.30±0.48 ^a	9.20±0.41 ^{ba}	9.11±0.01 ^{ba}	12.03±0.12 ^{a*}	11.53±0.05 ^{ba}	3.06±0.04 ^c	0 ^d
4	3-甲基-1-丁醇	123-51-3	1205/1209	发酵味、油味、果味	194.57±5.59 ^a	190.77±9.00 ^a	175.48±7.11 ^b	173.19±0.64 ^b	327.72±16.01 ^{a*}	320.76±5.96 ^{ab*}	309.89±11.53 ^{ba}	309.38±5.78 ^{ba}
5	正戊醇	71-41-0	1255/1261	甜香脂类	31.02±0.15 ^{ab}	30.76±1.37 ^{abc}	29.87±0.37 ^{bc*}	29.20±1.00 ^{a*}	31.88±1.56 ^a	31.27±0.51 ^{ab}	27.57±0.34 ^c	26.91±0.89 ^c
6	1-己醇	111-27-3	1360/1354	花香味、青草味	49.65±0.04 ^{a*}	49.35±0.77 ^{a*}	47.70±1.57 ^{ab*}	47.08±0.54 ^{bc*}	46.59±0.28 ^{ab}	46.33±0.30 ^{ab}	44.98±2.21 ^{bc}	43.79±1.79 ^c
7	叶醇	928-96-1	1391/1388	草味	1.66±0.01 ^{a*}	1.65±0.08 ^{a*}	1.63±0.05 ^{a*}	1.61±0.05 ^{a*}	0.71±0.02 ^b	0.80±0.01 ^a	0.73±0.02 ^b	0.68±0.00 ^b
8	1-辛烯-3-醇	3391-86-4	1394/1396	蘑菇味	337.14±4.63 ^{a*}	333.24±2.54 ^{a*}	314.15±8.82 ^{a*}	304.27±11.98 ^{bc*}	300.94±3.03 ^a	297.56±9.42 ^a	261.03±7.35 ^b	249.97±1.56 ^b
9	正庚醇	111-70-6	1467/1478	脂香味、辛辣味、柑橘香气	4.17±0.14 ^a	4.15±0.00 ^a	3.85±0.09 ^{bc}	3.66±0.18 ^c	4.34±0.07 ^{ab}	4.49±0.21 ^{ab}	3.99±0.07 ^c	3.62±0.11 ^d
10	2-乙基己醇	104-76-7	1487/1494	花香味	191.40±8.07 ^{a*}	191.39±2.41 ^{a*}	190.27±9.06 ^{a*}	189.59±7.52 ^{a*}	6.45±0.08 ^a	6.43±0.08 ^a	5.73±0.22 ^a	5.72±0.08 ^a
11	2,3-丁二醇	513-85-9	1583/1586	果香味	17.62±0.16 ^a	15.44±0.47 ^b	5.84±0.19 ^c	5.37±0.03 ^c	33.38±0.95 ^{a*}	19.24±0.85 ^{ba}	10.07±0.01 ^c	5.26±0.12 ^d
12	糠醇	98-00-0	1829/1825	焦糖味	2.50±0.01 ^c	2.62±0.07 ^c	2.96±0.07 ^b	3.28±0.15 ^a	4.74±0.01 ^{a*}	6.05±0.04 ^{a*}	7.31±0.06 ^{ba}	7.53±0.23 ^{a*}
13	苯乙醇	60-12-8	1925/1923	花香味	33.10±1.14 ^a	32.78±0.18 ^a	30.83±0.63 ^a	30.73±1.20 ^a	146.90±4.29 ^{a*}	152.89±2.32 ^{ba}	160.75±0.98 ^{a*}	162.47±3.47 ^{a*}
14	1-十四烷醇	112-72-1	2177/2189	椰子味	0.46±0.00 ^d	0.60±0.00 ^c	1.32±0.00 ^a	1.56±0.07 ^{a*}	0.93±0.05 ^{a*}	0.53±0.01 ^b	0.32±0.00 ^c	0.31±0.00 ^c
15	1-十六烷醇	36653-82-4	2378/2380	花香味	1.18±0.02 ^{ba}	1.18±0.04 ^a	1.48±0.04 ^a	1.53±0.05 ^{a*}	0.81±0.04 ^b	1.18±0.04 ^a	0.41±0.01 ^c	0.33±0.02 ^d
醛类												
16	3-甲基丁醛	590-86-3	910/918	麦芽味、巧克力味	8.42±0.10 ^a	8.37±0.37 ^{a*}	6.84±0.10 ^{ba}	6.27±0.05 ^{a*}	8.86±0.30 ^{a*}	7.92±0.04 ^b	4.64±0.19 ^c	4.37±0.13 ^c
17	正己醛	66-25-1	1084/1077	草味、脂肪味	42.25±0.58 ^a	39.79±0.50 ^b	30.51±1.09 ^c	26.80±0.43 ^d	98.24±2.03 ^{a*}	55.63±1.52 ^{ba}	42.03±0.99 ^{a*}	38.73±1.45 ^{a*}
18	1-辛醛	124-13-0	1280/1284	果香味	0.39±0.01 ^c	0.42±0.01 ^c	0.67±0.01 ^{ba}	0.91±0.03 ^{a*}	0.84±0.00 ^{a*}	0.81±0.03 ^{ba}	0.54±0.03 ^c	0.47±0.00 ^d
19	顺-2-庚烯醛	57266-86-1	1319/1325	类似辣椒香味	1.34±0.04 ^c	1.41±0.07 ^{bc}	1.65±0.04 ^{ba}	1.83±0.03 ^a	7.77±0.30 ^{a*}	7.25±0.25 ^{a*}	3.17±0.04 ^c	3.05±0.11 ^c
20	糠醛	98-01-1	1455/1448	甜玉米味、木材味	1.24±0.02 ^a	1.26±0.03 ^a	1.32±0.06 ^a	1.35±0.03 ^a	2.75±0.06 ^{a*}	2.26±0.02 ^{a*}	3.63±0.03 ^{ba}	4.61±0.14 ^{a*}
21	癸醛	112-31-2	1484/1493	果香味	0.70±0.01 ^{da}	0.75±0.04 ^{a*}	0.97±0.02 ^{a*}	1.02±0.04 ^{a*}	0.56±0.01 ^a	0.55±0.00 ^a	0.48±0.01 ^b	0.47±0.01 ^b
22	苯甲醛	100-52-7	1495/1501	苦杏仁味	30.12±0.66 ^{a*}	29.55±0.35 ^{ba}	27.31±0.09 ^c	26.03±0.26 ^d	25.14±0.48 ^c	28.68±0.28 ^b	29.03±0.97 ^{ab*}	29.27±1.35 ^{ab*}
酸类												
23	辛酸	124-07-2	2083/2078	汗味、奶酪味	1.11±0.05 ^a	1.08±0.04 ^a	0.81±0.01 ^{ba}	0.74±0.00 ^{a*}	1.72±0.06 ^{a*}	1.54±0.07 ^{ba}	0.19±0.01 ^c	0 ^d
24	壬酸	112-05-0	2202/2198	脂肪味	1.20±0.02 ^c	1.22±0.04 ^c	1.30±0.05 ^{ba}	1.33±0.04 ^{ba*}	1.36±0.01 ^{a*}	1.21±0.05 ^b	0.14±0.00 ^c	0 ^d
25	正癸酸	334-48-5	2361/2369	腐败变质味、脂肪味	0.92±0.04 ^d	1.11±0.00 ^a	1.82±0.02 ^{ba}	2.10±0.00 ^{a*}	1.43±0.05 ^{a*}	1.10±0.05 ^b	0.29±0.01 ^c	0 ^d
酯类												
26	乙酸乙酯	141-78-6	907/901	果香味、甜味	60.02±1.63 ^{a*}	58.66±0.03 ^{ab*}	53.54±1.75 ^b	53.26±1.30 ^b	12.23±0.34 ^c	13.66±0.04 ^c	244.69±1.51 ^{ba}	366.40±8.08 ^{a*}
27	己酸乙酯	123-66-0	1220/1229	果香味、苹果味	34.38±0.96 ^{a*}	36.16±1.37 ^{a*}	43.05±0.91 ^{ba}	47.27±1.51 ^{a*}	9.49±0.26 ^a	8.76±0.23 ^a	3.81±0.16 ^b	1.51±0.02 ^c
28	乳酸乙酯	97-64-3	1358/1351	果香味	3.57±0.10 ^c	3.64±0.09 ^c	4.07±0.08 ^{ba}	4.32±0.21 ^{a*}	3.97±0.12 ^{a*}	3.64±0.04 ^b	1.47±0.03 ^c	0.50±0.01 ^d
29	辛酸乙酯	106-32-1	1436/1428	果香味、脂肪味	2.40±0.09 ^{a*}	2.37±0.05 ^{a*}	2.27±0.03 ^{ba}	2.21±0.06 ^{ba}	1.59±0.07 ^b	1.78±0.04 ^a	1.66±0.03 ^b	1.59±0.02 ^b
30	乙酸苯乙酯	103-45-7	1829/1840	甜味、花香味	0.93±0.04 ^{a*}	0.92±0.04 ^{a*}	0.73±0.01 ^b	0.68±0.01 ^b	0.37±0.01 ^c	0.38±0.02 ^c	3.30±0.07 ^{ba}	3.44±0.15 ^{a*}
31	丙位壬内酯	104-61-0	2042/2043	椰子香味、杏仁味、桃花香味	5.48±0.14 ^{a*}	5.46±0.17 ^{a*}	5.28±0.10 ^{a*}	5.24±0.13 ^{ba}	1.88±0.06 ^a	1.86±0.03 ^a	1.85±0.02 ^b	1.85±0.03 ^b
32	棕榈酸乙酯	628-97-7	2250/2243	蜡香、奶油香味	5.82±0.01 ^d	8.11±0.33 ^{a*}	15.24±0.54 ^{ba}	17.18±0.37 ^{a*}	5.40±0.18 ^{ab}	5.28±0.09 ^b	4.59±0.21 ^c	4.21±0.06 ^c
酮类												
33	2-庚酮	110-43-0	1170/1168	奶香味、椰子味	37.38±0.95 ^{ba}	38.31±1.82 ^{ba}	40.29±0.83 ^{a*}	41.47±0.55 ^{a*}	24.02±1.12 ^d	28.51±1.20 ^c	30.87±0.73 ^b	32.99±1.11 ^a
34	2-辛酮	111-13-7	1285/1289	牛奶味、乳酪味	5.13±0.19 ^{a*}	5.43±0.09 ^{ba}	7.12±0.26 ^{a*}	7.18±0.03 ^{a*}	2.99±0.10 ^d	4.16±0.02 ^c	4.67±0.14 ^b	5.06±0.07 ^a
35	3-羟基-2-丁酮 (乙偶姻)	513-86-0	1287/1293	奶油味	24.49±0.17 ^{a*}	24.15±0.07 ^{a*}	23.43±0.14 ^{ba}	22.89±0.47 ^{ba}	18.89±0.01 ^a	18.77±0.93 ^a	13.72±0.34 ^b	12.76±0.08 ^c
36	1-庚烯-3-酮	2918-13-0	1221/1230	金属味	3.57±0.10 ^{a*}	2.75±0.10 ^{a*}	1.86±0.04 ^c	0.16±0.00 ^d	2.59±0.11 ^a	2.59±0.09 ^a	1.87±0.03 ^b	1.75±0.06 ^{ba}
37	2-壬酮	821-55-6	1388/1396	果香味	1.17±0.04 ^{a*}	1.20±0.02 ^{a*}	1.43±0.02 ^{ba}	1.55±0.02 ^{a*}	1.03±0.00 ^c	1.08±0.05 ^c	1.37±0.03 ^b	1.47±0.04 ^a
38	(E,E)-3,5-辛二烯-2-酮	30086-02-3	1493/1499	脂肪味	2.63±0.07 ^a	2.40±0.10 ^b	2.01±0.03 ^{c*}	1.59±0.02 ^{da}	3.66±0.06 ^{a*}	2.49±0.01 ^b	1.52±0.01 ^c	1.40±0.04 ^d
其他												
39	邻二甲苯	95-47-6	1183/1180	刺激性甜味	2.39±0.11 ^c	2.67±0.11 ^c	3.89±0.18 ^b	5.19±0.16 ^{a*}	21.15±0.45 ^{a*}	11.01±0.49 ^{ba}	4.13±0.09 ^{c*}	0 ^d
40	吡啶	110-86-1	1170/1175	辣味	9.50±0.33 ^{a*}	9.31±0.34 ^{a*}	8.25±0.31 ^{ba}	7.75±0.21 ^{a*}	5.76±0.09 ^a	5.56±0.20 ^a	4.47±0.05 ^b	4.32±0.03 ^b
41	2-正戊基呋喃	3777-69-3	1240/1245	果香味、草味	115.53±0.19 ^{a*}	114.93±0.82 ^{a*}	113.15±3.89 ^a	112.71±4.21 ^a	84.51±0.70 ^c	84.68±0.12 ^c	113.45±0.60 ^b	136.64±3.52 ^{a*}
42	2,5-二甲基吡嗪	123-32-0	1253/1255	可可粉、烤坚果、烤牛肉	5.18±0.17 ^a	5.12±0.14 ^a	4.91±0.16 ^a	4.72±0.12 ^a	18.10±0.13 ^{a*}	25.42±1.22 ^{ba}	27.62±0.63 ^{a*}	28.56±1.43 ^{a*}
43	2,3,5-三甲基吡嗪	14667-55-1	1395/1402	坚果味、巧克力味	0.37±0.02 ^b	0.38±0.02 ^b	0.56±0.00 ^a	0.56±0.01 ^a	1.11±0.03 ^{a*}	1.13±0.02 ^{a*}	1.25±0.05 ^{ba}	1.34±0.03 ^{a*}
44	3-乙基-2,5-二甲基吡嗪	13360-65-1	1435/1427	马铃薯、烧烤	1.61±0.06 ^c	1.76±0.04 ^b	2.33±0.02 ^a	2.34±0.09 ^a	2.54±0.11 ^{a*}	3.15±0.08 ^{a*}	4.27±0.06 ^{a*}	4.32±0.08 ^{a*}
45	2-乙酰基噻唑	24295-03-2	1624/1619	烧烤味、坚果味	4.73±0.06 ^{a*}	4.75±0.09 ^{ba}	4.89±0.00 ^{ba}	5.03±0.14 ^{a*}	4.28±0.01 ^a	4.37±0.02 ^a	4.33±0.16 ^a	4.31±0.09 ^a
46	麦芽酚	118-71-8	1955/1963	焦香味	22.81±0.72 ^a	20.16±0.73 ^b	8.63±0.31 ^c	6.64±0.32 ^d	32.27±1.60 ^{a*}	24.09±0.92 ^{ba}	13.34±0.19 ^c	9.88±0.23 ^d

注: 同一行中不同小写字母表示同一样品在贮藏期不同时间点之间存在显著性差异($P<0.05$); *表示同一时间点不同样品之间存在显著性差异($P<0.05$)。

挥发性风味物质约有超过 70 种, 包括醛类、醇类、酮类、酸类、酯类、酚类、呋喃类、吡啶类、噻唑类等^[21-23], 本实验检测结果与之一致。同时, 发芽糙米乳中可检测到己醛、乙偶姻、1-庚醇、1-己醇、辛醛、

2-庚酮、3-甲基-1-丁醇等化合物^[24-25]。这些挥发性成分也存在于本实验的两种样品中。

醇类风味物质可能产生自脂肪酸氧化降解过程、氨基酸降解过程^[26]、美拉德反应^[27] 和糙米发酵

过程。己醇等醇类物质可能来自亚麻酸在 LOX 催化作用下氧化降解过程^[28]。3-甲基-1-丁醇可能是亮氨酸的降解产物^[29],苯乙醇可能是苯丙氨酸降解产物^[30]。与植物基复合乳 2#相比,植物基复合乳 1#中 3-甲基-1-丁醇和苯乙醇的初始含量均较低,可能是植物基复合乳 2#采用灭酶后磨浆工艺,未磨浆的大豆在沸水中传热效率较低,大豆中的生物酶起初仍有一定的活性,导致酶促反应产物较多。而植物基复合乳 1#是采用隔氧 85 ℃ 热磨浆,再加热至 120 ℃ 保持 60 s,传热效率高,灭酶更为迅速、彻底,酶促反应产物较少。1-辛烯-3-醇可能来自 1-辛烯-3-醇基- β -樱草糖苷的水解^[30],且其非酶水解的水解度随温度升高而升高,这可能是植物基复合乳 1#中 1-辛烯-3-醇含量初始值较大的原因。另一方面,两款植物基复合乳中 1-辛烯-3-醇含量随贮藏时间延长而下降,可能与蛋白质对 C8 醇的吸附有关^[31],也可能存在该物质的进一步转化。

醛类一般认为是油酸、亚油酸等不饱和脂肪酸经降解、氧化生成的产物。由于脂肪氧化酶(LOX)的作用,大豆、糙米中的亚油酸会氧化形成 13-或 9-羟基-亚油酸氢过氧化物,而后在氢过氧化物裂解酶(HPL)的进一步作用下,即可转化生成己醛等醛类物质。

酸类物质则可能是柠檬酸代谢产物。植物细胞中的柠檬酸在柠檬酸裂解酶催化作用下,可产生乙酸和草酰乙酸,草酰乙酸又在草酰乙酸脱羧酶催化下生成丙酮酸,而后再进一步降解为乳酸、乙酸等酸类物质,同时这一过程中也可能产生 2,3-丁二酮、乙偶姻等酮类物质^[32]。酯类产生自羧酸衍生物和醇的酯化。

2,5-二甲基-吡嗪、2,3,5-三甲基吡嗪、3-乙基-2,5-二甲基吡嗪、2-乙酰基噻唑、麦芽酚等可能是美拉德反应和 Strecker 降解反应产生的。植物基复合乳 1#中 2,5-二甲基-吡嗪、2-乙酰基噻唑初始值低于植物基复合乳 2#,可能是采用隔氧磨浆/高温灭酶工艺,虽然加热温度较高,但其传热效率高,加热时间短,美拉德反应总产物较少,而采用灭酶后磨浆工艺,大豆传热效率低,内部升温较慢,受热时间长,美拉德反应总产物较多。另一方面,贮藏期内,植物基复合乳 1#与 2#中 2,5-二甲基-吡嗪、2-乙酰基噻唑含量不断上升,可能是常温条件下美拉德反应仍在缓慢进行的结果,且在植物基复合乳 2#中的上升趋势更为显著,可能是由于初始植物基复合乳 2#中含有更多的美拉德反应中间产物,使得后续反应更易进行。2-戊基呋喃可能是脂肪非酶促氧化的产物。豆浆中的核黄素在光照后可产生单线态氧,而后通过特定氧化机制可催化亚油酸产生 2-戊基呋喃^[33]。植物基复合乳 1#与 2#中 2-戊基呋喃初始含量相近,但随着贮藏时间延长,植物基复合乳 1#中 2-戊基呋喃含量相对稳定,而植物基复合乳 2#则呈显著上升趋势,推测可

能是由于采用隔氧磨浆/高温灭酶工艺,豆浆处理温度较高,核黄素在碱性条件下损失较多,抑制了贮藏期单线态氧的生成,而植物基复合乳 2#核黄素较多,贮藏期更多的单线态氧生成,导致更多的油脂氧化。

通过对比可以看出,植物基复合乳 1#和 2#中挥发性风味物质的组成基本一致,与乳香味相关的物质可能包括棕榈酸乙酯、2-庚酮、2-辛酮、乙偶姻等,与花香味相关的物质可能包括 1-己醇、苯乙醇、1-十六烷醇等,与果香味相关的物质可能包括 2,3-丁二醇、1-十四烷醇、乙酸乙酯、己酸乙酯等,与谷物香味相关的物质可能包括 2,5-二甲基吡嗪、2,3,5-三甲基吡嗪、3-乙基-2,5-二甲基吡嗪、2-乙酰基噻唑、麦芽酚等,与异味相关的物质可能包括 1-辛烯-3-醇、正己醛、苯甲醛、吡啶等。初始条件下,两款植物复合乳中风味物质的含量及贮藏期内的变化趋势和变化幅度存在较大差异,植物基复合乳 2#中挥发性风味物质的变化幅度更大,这与感官评价中植物基复合乳 1#在各个风味维度上变化幅度小于植物基复合乳 2#的结论一致。在各类挥发性风味物质中,导致香味逐渐增强、异味逐渐减弱的原因可能包括三个方面:一是在贮藏过程中,植物基复合乳体系内各种风味物质的转化并未停止,起始阶段存在的各种挥发性风味物质会不断转变为其他物质,如醛类(己醛等)物质会进一步氧化生成酸,并与醇类物质作用生成酯类物质等;二是常温条件下美拉德反应仍在继续,而生产的吡嗪类等物质对豆腥味具有掩蔽作用;三是体系中的蛋白质等物质可能对 C8 醇(1-辛烯-3-醇等)等挥发性风味物质产生吸附作用。

2.3.2 贮藏期内两款复合乳挥发性风味物质主成分分析 对植物基复合乳 1#、2#中的挥发性物质进行主成分分析,结果如图 3 所示。第 1 主成分(PC1)为 51.3%,第 2 主成分(PC2)为 31.4%,第 1、第 2 主成分之和占比达到 82.7%。因此,主成分分析可以有效区分两种工艺处理的复合乳。每个样品的 3 次平行检测距离较近,而两种工艺制备的样品间距离较远,这说明加工工艺对植物基复合乳 1#、2#中挥发性风味物质的影响较大。植物基复合乳 1#、2#在第 1 主成分上能很好分离,植物基复合乳 1#集中在第 1 主成分的正半轴上,植物基复合乳 2#集中在第 1 主成分的负半轴上。在第二主成分上,贮藏期内两款植物基复合乳的风味存在差异,在贮藏期第 0 d 和 90 d 大多集中在第 2 主成分的正半轴上,而在贮藏期第 180 d 和 360 d 均集中在第 2 主成分的负半轴上。结合载荷图可以进一步看出,贮藏期第 0 d 和 90 d 的植物基复合乳 1#集中在第 1 主成分正半轴上,对应的特征物质主要有己醇(6)、1-十四烷醇(14)、1-十六烷醇(15)、吡啶(40)等。贮藏期第 180 d 和 360 d 的植物基复合乳 1#分布在第四象限上,与其相关的组分为己酸乙酯(27)、棕榈酸乙酯

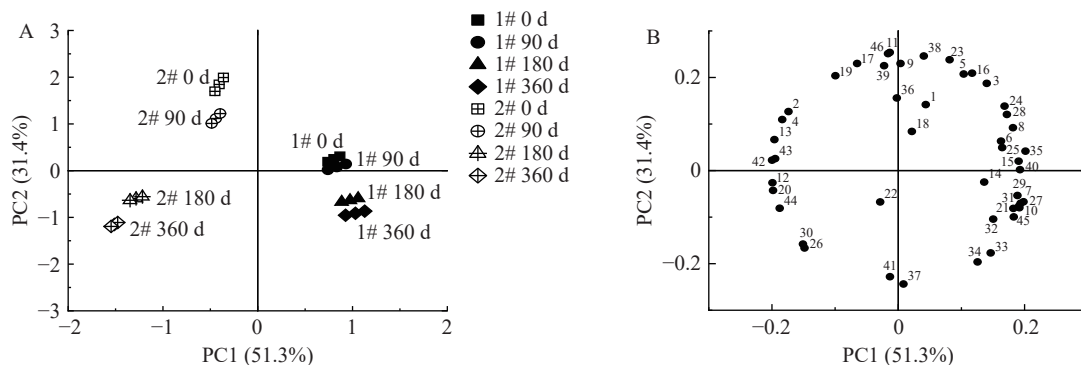


图3 两款植物基复合乳挥发性风味物质主成分得分图(A)与载荷图(B)

Fig.3 Principal component score diagram (A) and load diagram (B) of volatile flavor substances in two plant-based compound milk

(32)、2-庚酮(33)、2-辛酮(34)、2-乙酰基噻唑(45)等。贮藏期第0 d和90 d的植物基复合物2#分布在第二象限,与其高度相关的物质有2,3 丁二醇(11)、正己醛(17)、麦芽酚(46)等。贮藏期第180 d和360 d的植物基复合乳2#分布在第三象限,与其高度相关的特征物质有苯甲醛(22)、乙酸乙酯(26)、3-乙基-2,5-二甲基吡嗪(44)等。同时,从载荷图还可以发现,第一、四象限包含的特征物质多于第二、三象限,说明与植物基复合乳2#相比,贮藏期内植物基复合乳1#呈现出更丰富的风味。

2.3.3 贮藏期内两款植物基复合乳的挥发性风味物质聚类分析 由图4可以看出,贮藏期内,植物基复合乳1#、2#的3个平行样品分别聚为一类,说明两款植物基复合乳的同质性较好。采用两种大豆处理工艺制备的样品在0、90、180和360 d又分别聚为一大类,说明0~90 d、180~360 d两个时间段内,两款植物基复合乳的风味变化较为缓和。贮藏期内,植物基复合乳1#和2#的挥发性风味物质分别聚为一类,表明贮藏期内两种大豆处理工艺制备的植物基复合乳的风味存在明显差异。

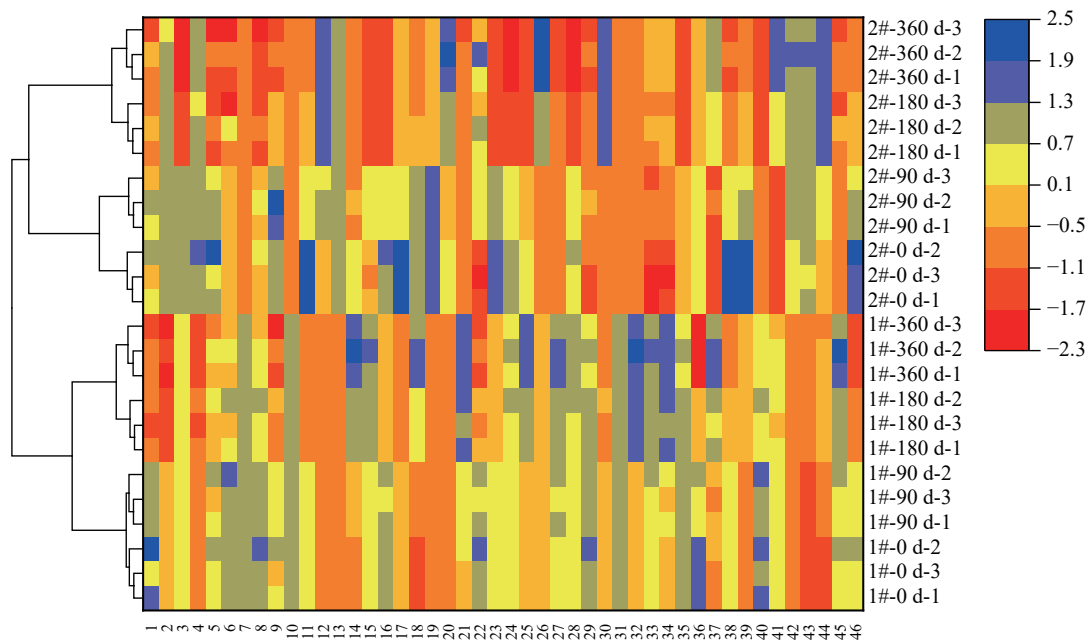


图4 两款植物基复合乳贮藏期挥发性风味物质聚类热图

Fig.4 Clustering heat map of the volatile flavor components of two plant-based compound milk at different storage time

注:横坐标数字对应于表4中的序号,代表相应的挥发性风味活性成分。

3 结论

本研究采用电子感官分析、人员感官评价与HS-SPME-GC-MS技术相结合的方式,考察了采用不同大豆处理工艺制备的两款植物基复合乳的初始风味及储藏过程中的风味变化。结果显示,两款植物基复合乳初始及贮藏期各时间点的风味均存在差异。综合来看,植物基复合乳1#的香味较明显,且贮

藏期内变化较小。因此,从植物复合乳风味特征及其稳定性角度来看,隔氧磨浆/高温灭酶工艺更具有优越性,这可能与该工艺条件下传热效率高、受热时间短等因素相关,为相关产品开发提供了一定借鉴。同时,由于本研究对各种挥发性风味物质的产生及变化机理的研究尚不深入,也为后期相关研究的开展指明了方向。

© 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] HU C S, WONG W T, WU R Y, et al. Biochemistry and use of soybean isoflavones in functional food development[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2020, 60: 2098–2112.
- [2] GARBIEC E, PIONTEK J C, KOWALOWKA M, et al. Genistein—opportunities related to an interesting molecule of natural origin[J]. *Molecules*, 2022, 27(3): 815.
- [3] 陈波, 邓源喜, 高树叶, 等. 大豆的营养保健功能及其开发应用进展[J]. 广州化工, 2016, 44(2): 14–16. [CHEN B, DENG Y X, GAO S Y, et al. Advancement of health function of soybean and its utilization[J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2016, 44(2): 14–16.]
- [4] 高春霞, 王凤忠, 袁莉. 发芽过程中大豆活性物质、抗营养因子及抗氧化活性变化的综述[J]. 核农学报, 2019, 33(5): 962–968. [GAO C X, WANG F Z, YUAN L. Summary of changes of bioactive substances, anti-nutritional factors and antioxidant activity of soybean during germination[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2019, 33(5): 962–968.]
- [5] 王梦莉, 高美须, 姜小燕, 等. 大豆发芽过程中过敏原蛋白和脲酶活性的变化[J]. 核农学报, 2021, 35(1): 167–174. [WANG M L, GAO M X, JIANG X Y, et al. Reduction of allergenic proteins and urease activity during soybean germination[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2021, 35(1): 167–174.]
- [6] 安广杰, 靳颖, 张培旗, 等. 大豆发芽过程中抗原蛋白降解及营养特性变化[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(8): 42–47. [AN G J, JIN Y, ZHANG P Q, et al. Degradation of antigenic proteins and changes in nutritional characteristics during soybean germination[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2020, 35(8): 42–47.]
- [7] 王立, 段维, 钱海峰, 等. 糙米食品研究现状及发展趋势[J]. 食品与发酵工业, 2016, 42(2): 236–243. [WANG L, DUAN W, QIAN H F, et al. Research and development of brown rice products[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2016, 42(2): 236–243.]
- [8] CARCEA M. Value of wholegrain rice in a healthy human nutrition[J]. *Agriculture*, 2021, 11(8): 720.
- [9] 叶彦均, 谭斌, 乔聪聪, 等. 生物发酵对糙米品质影响研究进展[J]. 食品工业科技, 2022, 43(10): 466–474. [YE Y J, TAN B, QIAO C C, et al. Research progress on the effect of biological fermentation on brown rice quality[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(10): 466–474.]
- [10] 孟祥勇. 糙米、大豆发芽富集 γ -氨基丁酸及复合谷物饮料的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2009. [MENG X Y. Study on the enrichment conditions of γ -aminobutyric acid content in germinated brown rice or soybean and compound grain beverage[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2009.]
- [11] 王红霞. 功能性谷芽豆乳生产技术研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2016. [WANG H X. Study on the technology of functional cereals-soybean milk production[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2016.]
- [12] 刘容旭. 巴氏杀菌发酵豆乳生产关键技术研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2016. [LIU R X. The key technology in the processing of pasteurized fermented soybean milk[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2016.]
- [13] 董喜梅. 植物乳杆菌发酵豆乳风味物质的初步研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2016. [DONG X M. Preliminary study on aroma generation of fermented soymilk by lactobacillus plantarum[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural university, 2011.]
- [14] 王修坤, 吴嘉琪, 崔政伟. 大豆破碎耦合蒸汽灭酶工艺优化[J]. 食品与机械, 2019, 35(2): 157–162. [WANG X K, WU J Q, CUI Z W. Optimization of coupled pulping and steam blanching on lipoxygenase denaturation of soybeans[J]. *Food & Machinery*, 2019, 35(2): 157–162.]
- [15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 感官分析 食品感官质量控制导则: GB/T 29605-2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013. [General administration of quality supervision, inspection and quarantine of the People's Republic of China, Standardization administration. Sensory analysis-Guide for food sensory quality control: GB/T 29605-2013[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013.]
- [16] 高铭, 王晴, 雷蕾, 等. 5 种红曲发酵食物的电子感官评价与对比[J]. 中国果菜, 2021, 41(9): 6–12. [GAO M, WANG Q, LEI L, et al. Electronic sensory evaluation and comparison of five kinds of red yeast fermented foods[J]. *China Fruit & Vegetable*, 2021, 41(9): 6–12.]
- [17] 王晨慧, 许文亮, 梁磊, 等. 9 种酿造原料蒸煮过程中香气成分分析[J]. 酿酒科技, 2023, 10: 116–125. [WANG C H, XU W L, LIANG L, et al. Analysis of aroma components of 9 liquor-making raw materials during steaming[J]. *Liquor-making Science & Technology*, 2023, 10: 116–125.]
- [18] NIST Chemistry Webbook[DB/OL]. <https://webbook.nist.gov/chemistry>.
- [19] Flavornet and human odor space[DB/OL]. <http://flavornet.org/flavornet.html>.
- [20] 上海交通大学-食品风味创新团队-风味数据库[DB/OL]. <https://mffi.sjtu.edu.cn/database>. [Shanghai Jiao Tong University - Food Flavor Innovation Team - Flavor Database[DB/OL] <https://mffi.sjtu.edu.cn/database>.]
- [21] ACHOURI A, BOYE J I, ZAMANI Y. Identification of volatile compounds in soymilk using solid-phase microextraction-gas chromatography[J]. *Food Chemistry*, 2006, 99(4): 759–766.
- [22] KANEKO D, IGARASHI T, AOYAMA K. Reduction of the off-flavor volatile generated by the yogurt starter culture including *Streptococcus thermophilus* and *Lactobacillus delbrueckii* sub sp. *bulgaricus* in soymilk[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2014, 62(7): 1658–1663.
- [23] 施小迪, 郭顺堂. 豆乳风味物质的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2014, 5(10): 3079–3084. [SHI X D, GUO S T. Research developments of soymilk flavor compounds[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2014, 5(10): 3079–3084.]
- [24] 郭敏, 姜洋, 王承瑞, 等. 基于感官评价和气相色谱-质谱联用技术分析发芽糙米乳的挥发性风味特征[J]. 中国食品学报, 2020, 20(10): 290–296. [GUO M, JIANG Y, WANG C R, et al. The volatile flavor characteristics of germinated brown rice milk based on sensory evaluation and gas chromatography-mass spectrometry[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2020, 20(10): 290–296.]
- [25] 陈焱芳, 张名位, 张雁, 等. 发芽及挤压膨化对糙米挥发性风味物质的影响[J]. 中国农业科学, 2021, 54(1): 190–202. [CHEN Y F, ZHANG M W, ZHANG Y, et al. Effects of germination and extrusion on volatile flavor compounds in brown rice[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(1): 190–202.]
- [26] 陈臣, 周洁, 周琦, 等. 杏仁中的香气化合物及其风味品质影响因素研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(19): 320–329. [CHEN

- C, ZHOU J, ZHOU Q, et al. Research progress on aroma compounds in almonds and their influencing factors on flavor quality[J]. Food Science, 2023, 44(19): 320–329.]
- [27] KWOK K C, NIRANJAN K. Review: Effect of thermal processing on soymilk[J]. *Institute of Food and Technology*, 1995, 30: 263–295.
- [28] 岳杨, 汪超, 陈亚淑, 等. 植物乳的香气、异味及其影响因素研究进展[J/OL]. 食品科学: 1–16[2023-05-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20230111.1820.009.html>. [YUE Y, WANG C, CHEN Y S, et al. Research progress on aroma, off-odor, and influencing factors of plant milk[J/OL]. Food Science: 1–16[2023-05-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20230111.1820.009.html>.]
- [29] KAMINAGA Y, SCHNEPP J, PEEL G, et al. Plant phenylacetaldehyde synthase is a bifunctional homotetrameric enzyme that catalyzes phenylalanine decarboxylation and oxidation[J]. *Journal of Biological Chemistry*, 2006, 281(33): 23357–23366.
- [30] AUBERT C, BAUMANN S, ARGUEL H. Optimization of the analysis of flavor volatile compounds by liquid–liquid microextraction (LLME). application to the aroma analysis of melons, peaches, grapes, strawberries, and tomatoes[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2005, 53: 8881–8895.
- [31] 冯笑笑. 豆浆关键挥发性异味成分的形成机制及加工工艺对豆浆风味影响的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2021. [FENG X X. Study on the formation mechanism of key off-flavor compounds and the effect of processing on soymilk flavor[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021.]
- [32] MCSWEENEY P L H, SOUSA M J. Biochemical pathways for the production of flavour compounds in cheeses during ripening: A review[J]. *Le Lait*, 2000, 80(3): 293–324.
- [33] MIN D B, CALLISON A L, LEE H O. Singlet oxygen oxidation for 2-pentylfuran and 2-pentenylfuran formation in soybean oil[J]. *Journal of Food Science*, 2003, 68(4): 1175–1177.