

6种食品专用油脂的风味特征研究

杨羽婧¹, 俞乐², 金俊¹, 邢志强², 赵晨伟¹,

张建文², 金青哲¹, 柳新荣², 王兴国¹

(1. 江南大学食品学院, 江苏无锡 214122; 2. 佳禾食品工业有限公司, 江苏苏州 215004)

摘要:旨在为食品专用油脂的风味提升提供参考, 采用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用(HS-SPME-GC-MS)技术和感官评定分析黄油、椰子油、全氢化棕榈仁油、全氢化棕榈仁油硬脂、部分氢化大豆油和全氢化大豆油6种代表性食品专用油脂的挥发性成分和感官特征, 并结合相对气味活度值(ROAV)及其聚类分析确定关键风味化合物。结果显示: 椰子油的挥发性成分最为丰富, 共鉴定出13个关键风味化合物, 主要为内酯类、醛类化合物, 椰子香和奶油香风味浓郁; 黄油共鉴定出8个关键风味化合物, 主要为内酯类、酮类和醛类化合物, 具有果香、奶油香和青香; 部分氢化大豆油共鉴定出6个关键风味化合物, 主要为醛类和酮类化合物, 主要呈果香、蜜蜡香、脂肪气味和奶油香; 全氢化棕榈仁油、全氢化大豆油和全氢化棕榈仁油硬脂检出的关键风味化合物种类较少, 分别为5个、2个和4个, 主要为醛类和甲酯类/酸类化合物, 主要呈果香风味和脂肪气味; 感官评价结果和关键风味化合物分析结果存在一定联系。综上, 6种食品专用油脂中, 黄油、椰子油和部分氢化大豆油风味化合物较为丰富, 具有突出的感官特征。

关键词:食品专用油脂; 挥发性成分; 关键风味化合物; 感官评定

中图分类号: TS225.1; TS225.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-7969(2023)12-0045-06

Flavor characteristics of six kinds of food – special oils and fats used in food industry

YANG Yujing¹, YU Le², JIN Jun¹, XING Zhiqiang², ZHAO Chenwei¹,
ZHANG Jianwen², JIN Qingzhe¹, LIU Xinrong², WANG Xingguo¹

(1. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, China;
2. Jiahe Foods Industry Co., Ltd., Suzhou 215004, Jiangsu, China)

Abstract: Aiming to provide a reference for the flavor enhancement of food – special oils and fats, headspace solid – phase microextraction – gas chromatography – mass spectrometry (HS – SPME – GC – MS) and sensory evaluation were used to analyze the volatile components and sensory characteristics of six representative food – special oils and fats, namely butter, coconut oil, fully hydrogenated palm kernel oil, fully hydrogenated palm kernel oil stearin, partially hydrogenated soybean oil, and fully hydrogenated soybean oil, and combined with the relative odor activity value (ROAV) and its cluster analysis to identify their key flavor compounds. The results showed that coconut oil had the most abundant volatile components, and a total of 13 key flavor compounds were identified, mainly lactones and aldehydes, with a strong coconut and creamy aroma; butter had a total of 8 key flavor compounds, mainly

收稿日期: 2022-10-27; 修回日期: 2023-08-31

基金项目: 中国博士后科研基金面上资助(2021M691291)

作者简介: 杨羽婧(1998), 女, 硕士研究生, 研究方向为食品专用油脂风味(E-mail) mt5373183@163.com。

通信作者: 金俊, 副研究员, 博士(E-mail) junjin@jiangnan.edu.cn。

lactones, ketones and aldehydes, with fruity, creamy and green aroma; partially hydrogenated soybean oil had a total of 6 key flavor compounds, mainly aldehydes and ketones, with fruity, beeswax, fat and creamy aroma; fully hydrogenated palm kernel oil, fully hydrogenated

soybean oil and fully hydrogenated palm kernel oil stearin detected 5, 2 and 4 of key flavor compounds respectively, mainly aldehydes and methy esters/acid, with fruity and fat aroma; the results of the sensory evaluation were related to the results of the analysis of the key flavor compounds to a certain extent. In conclusion, among the six food - special oils and fats, butter, coconut oil and partially hydrogenated soybean oil are richer in flavor compounds and have prominent sensory characteristics.

Key words: food - special oils and fats; volatile component; key flavor compound; sensory evaluation

食品专用油脂是由精炼动植物油脂经分提、酯交换、氢化、复配等工艺制得的油脂制品,广泛应用于商业煎炸、烘焙、冷冻饮品等食品加工领域^[1]。近年来食品专用油脂在我国消费量呈稳定增长趋势,年均增长率为5%~10%^[2]。风味是食品专用油脂最重要的品质之一,理想的风味能提高食品的感官品质和食用价值。食品专用油脂的种类不同所呈现的风味也不相同。黄油属于动物油脂,拥有宜人的乳香味,是淡奶油、糕点、面包等含油制品的理想用油,但也存在价格高、存量少、高温易软化等问题,有时需要与其他油脂配合使用^[3];椰子油属于植物油脂,其风味清香,夹带果香味,常用于糖果、冰淇淋等休闲食品^[4];部分氢化油则呈现出一种混杂着蜡香、甜味、花香、果香的特殊奶香风味^[5],但部分氢化油反式脂肪酸含量较高,可能导致冠心病风险和血清甘油三酯水平的增加^[6-7]。2018年5月,世界卫生组织发布全球禁反意见:全球食品供应中停用工业反式脂肪,并在2023年消除这类物质^[8]。目前,全球食品加工企业已采取了包括复配、分提、酯交换等在内的一系列技术手段生产不含反式脂肪酸的全氢化油^[9-10]。全氢化油二次加工制品虽然可在质构、口感上替代甚至超越部分氢化油,但在风味方面仍有较大提升空间^[11]。以上几种油脂均是具有典型特征风味的食品专用油脂,然而目前对于其风味差异的研究却较少。

本文采用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用(HS-SPME-GC-MS)技术和感官评定,全面分析黄油、椰子油、全氢化棕榈仁油、全氢化棕榈仁油硬脂、部分氢化大豆油 and 全氢化大豆油6种代表性食品专用油脂的挥发性成分和感官特征,并结合相对气味活度值(ROAV)及其聚类分析确定关键风味化合物,以明确它们的风味轮廓,为食品专用油脂关键风味物质的组合效应研究提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

黄油,双城雀巢有限公司;椰子油、全氢化棕榈

仁油、全氢化棕榈仁油硬脂、部分氢化大豆油、全氢化大豆油,上海某专用油脂公司。

TSQ Quantum XLS 气相色谱质谱联用仪,美国赛默飞世尔科技公司;固相微萃取纤维头(50/30 μm, DVB/CAR/PDM),美国 Supelco 公司;DF-101SZ 集热式恒温加热磁力搅拌器,巩义科华仪器设备有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 挥发性成分的检测

采用 HS-SPME-GC-MS 技术检测 6 种食品专用油脂的挥发性成分。

HS-SPME 条件:称取 3 g 油样于 20 mL 棕色顶空瓶中,加入 20 μL 0.05 μg/μL 的邻二氯苯作为内标,磁性螺旋盖盖紧;样品在 60 °C 搅拌条件下平衡 15 min 后,将萃取纤维头插入顶空瓶中,萃取挥发性成分 30 min 后,将萃取纤维头插入 GC 进样口,在 240 °C 下解吸 4 min。

GC 条件:DB-WAX 气相色谱柱(30 m × 0.25 mm × 0.25 μm);升温程序为初温 50 °C 保持 2 min,以 5 °C/min 升至 80 °C,保持 10 min,再以 10 °C/min 升至 230 °C,保持 12 min,最后以 10 °C/min 升至 240 °C,保持 2 min;载气为高纯氮气,流速 1.2 mL/min;进样口温度为 240 °C。

MS 条件:进样口温度 250 °C,离子源温度 240 °C,四级杆温度 150 °C,电子轰击离子源(EI),电离电压 70 eV,质量扫描范围 35~600。

解析挥发性成分图谱,将获得的质谱与 NIST 谱库检索匹配,进行化合物定性。借助内标法(邻二氯苯作为内标)计算出各挥发性成分的含量,进行化合物定量。

1.2.2 主体风味成分评价

采用 ROAV 法分析各挥发性成分对样品整体风味的贡献程度,气味活度值(OAV)计算如式(1)所示^[12]。

$$V_{OA} = \frac{C_i}{T_i} \quad (1)$$

式中: V_{OA} 为 OAV; C_i 为各挥发性成分的含量,

mg/kg; T_i 为各挥发性成分在无味基质中的阈值, mg/L,挥发性成分的阈值数据来源于 Gemert 构建的数据库^[13]。

定义 OAV 最大的挥发性成分对样品总体风味贡献最大,并设其 ROAV 为 100。其他挥发性成分的 ROAV 计算如式(2)所示。ROAV 越大挥发性成分对样品整体风味的贡献程度越大,ROAV ≥ 1 的挥发性成分为所测样品的主体挥发性成分,即关键风味化合物;0.1 \leq ROAV < 1 的挥发性成分对样品整体风味起重要修饰作用^[12]。

$$V_{ROA} \approx 100 \times \frac{C_i}{C_{stan}} \times \frac{T_{stan}}{T_i} \quad (2)$$

式中: V_{ROA} 为 ROAV; C_{stan} 为对样品风味贡献最大(即 OAV 最大)的挥发性成分的含量,mg/kg; T_{stan} 为对样品风味贡献最大的挥发性成分无味基质中的阈值,mg/L。

1.2.3 感官评定

感官评定小组由 10 名富有经验的人员(5 男、5 女,20~30 岁)组成。参考 Thurer 等^[14]的方法选取 6 种食品专用油脂的感官特征描述词,并为每个描述词提供一种参考溶液。感官评定时,取 3 g 样品于顶空瓶中,在 60 °C 水浴下平衡 15 min 后再进行嗅闻。每次嗅闻时间控制在开盖后的 30 s 内,每个样品由每个成员按 0~3 线性尺度打分。

1.2.4 数据处理

所有试验均进行 3 次重复,采用 SPSS 20.0 进行显著性分析,采用 Origin 2021 绘制聚类热图和雷达图。

2 结果与分析

2.1 主体风味成分分析

2.1.1 挥发性成分分析

6 种食品专用油脂的挥发性成分的含量和 ROAV 见表 1。

表 1 6 种食品专用油脂的挥发性成分含量与 ROAV

挥发性成分	气味特征 ^[15-16]	黄油		椰子油		全氢化棕榈仁油		全氢化棕榈仁油硬脂		部分氢化大豆油		全氢化大豆油	
		C_i / (mg/kg)	ROAV	C_i / (mg/kg)	ROAV	C_i / (mg/kg)	ROAV	C_i / (mg/kg)	ROAV	C_i / (mg/kg)	ROAV	C_i / (mg/kg)	ROAV
己醛	草香,果香	-	-	-	-	-	-	-	-	0.07	6.10	-	-
庚醛	柑橘香,草味	0.14	25.22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
(E)-2-庚烯醛	脂肪气味,果香,草香	0.04	1.56	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
辛醛	类似甜橙和水果香,青草香	-	-	-	-	-	-	-	-	0.15	100.00	-	-
壬醛	青香,尖锐蜜蜡香	0.16	100.00	2.67	100.00	0.07	2.14	0.08	38.50	0.10	48.92	-	-
(E,E)-2,6-壬二烯醛	青香,叶香	-	-	-	-	-	-	0.09	100.00	-	-	-	-
(E)-2-癸烯醛	脂肪气味,橙香	-	-	-	-	0.08	8.40	-	-	0.04	60.75	-	-
(E,E)-2,4-癸二烯醛	油炸香	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.13	100.00
十一醛	蜡香,甜橙,玫瑰花香	-	-	-	-	-	-	0.08	8.50	-	-	0.01	0.44
(E)-2-十一烯醛	脂肪气味,青草香	-	-	0.09	71.10	-	-	-	-	0.07	25.49	-	-
月桂醛	强烈的气味,松叶油,橙油香	-	-	-	-	0.03	0.44	-	-	-	-	-	-
3-庚烯-2-酮	强烈尖刺青草香	-	-	0.16	0.11	-	-	-	-	-	-	-	-
2-庚酮	香蕉香,轻微药香	0.83	3.96	27.50	7.36	-	-	-	-	0.04	0.15	-	-
2-辛酮	奶油香,肥皂香	-	-	-	-	-	-	-	-	0.04	0.39	-	-
2,5-辛二酮	奶油香	-	-	-	-	-	-	-	-	0.11	21.41	-	-
2-壬酮	果香,甜香,青香,椰子香,奶油香	0.75	93.78	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3-己酮	甜香,果香,蜡香	-	-	-	-	-	-	-	-	0.01	0.12	-	-
2-十一酮	柑橘香,油脂香,芸香	0.46	44.27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
辛醇	脂肪气味,花香,青草香	-	-	-	-	-	-	-	-	0.07	0.33	-	-
己酸	汗臭味	2.19	0.47	29.16	0.36	-	-	2.49	0.45	-	-	1.61	0.12

续表 1

挥发性成分	气味特征 ^[15-16]	黄油		椰子油		全氢化 棕榈仁油		全氢化 棕榈仁油硬脂		部分氢化 大豆油		全氢化大豆油	
		$C_i/$ (mg/kg)	ROAV	$C_i/$ (mg/kg)	ROAV	$C_i/$ (mg/kg)	ROAV	$C_i/$ (mg/kg)	ROAV	$C_i/$ (mg/kg)	ROAV	$C_i/$ (mg/kg)	ROAV
辛酸	略不舒适的气味, 焦苦味,干酪味	0.61	0.44	25.14	0.58	8.65	0.28	5.88	1.05	-	-	1.67	0.13
癸酸	脂肪气味	0.94	0.59	27.33	5.15	-	-	1.31	0.70	-	-	3.09	0.73
月桂酸	-	-	-	25.33	0.28	5.17	0.15	4.48	0.24	-	-	8.99	0.22
癸酸甲酯	果香	-	-	10.16	86.56	1.45	9.93	-	-	-	-	0.10	5.63
癸酸乙酯	脂肪气味,类似椰子香	-	-	11.67	80.52	-	-	-	-	-	-	-	-
辛酸甲酯	葡萄酒和橙子香	-	-	67.30	10.37	1.72	18.85	-	-	-	-	-	-
辛酸乙酯	白兰地酒香,类似菠萝甜香	-	-	25.67	49.87	-	-	-	-	-	-	-	-
月桂酸甲酯	脂肪气味	-	-	-	-	5.08	100.00	-	-	-	-	-	-
丁位己内酯	椰子和奶油香, 焦香和果香	-	-	11.17	8.37	-	-	-	-	-	-	-	-
丁位庚内酯	椰子香	0.47	0.72	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
丁位辛内酯	可可香,椰子香,奶油香	-	-	91.33	9.50	-	-	-	-	-	-	-	-
γ -壬内酯	浓时有椰子香,稀释时 有杏仁香或桃花香	-	-	3.83	2.21	0.79	0.36	-	-	0.05	0.34	-	-
γ -十一内酯	甜奶油香	0.20	9.51	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
丁位癸内酯	强烈持久的奶油香	1.50	72.53	24.67	10.75	-	-	-	-	-	-	-	-
丁位十二内酯	奶油香,果香	-	-	2.17	14.25	-	-	-	-	0.01	0.71	-	-

注:表中只列出 ROAV \geq 0.1 的挥发性成分

由表 1 可知,黄油有 8 个挥发性成分的 ROAV 大于 1,按 ROAV 大小依次为壬醛、2-壬酮、丁位癸内酯、2-十一酮、庚醛、 γ -十一内酯、2-庚酮、(E)-2-庚烯醛。据报道,这 8 个挥发性成分的风味特征大多呈现强烈持久的奶油香和果香^[3]。Mallia 等^[17]指出内酯类化合物是导致黄油产生水果香和柔软滑腻感的主要成分。Budín 等^[18]采用气相色谱-嗅闻-质谱联用(GC-O-MS)技术分析黄油中的主要香气化合物,发现内酯、酮、醛、含硫化合物对黄油香气有重要贡献。另有研究指出非发酵黄油中的整体香气柔和香甜,是由 2,3-丁二酮含量低造成的^[19]。

椰子油的关键风味化合物较复杂,有 13 个关键风味化合物,按 ROAV 大小依次为壬醛、癸酸甲酯、癸酸乙酯、(E)-2-十一烯醛、辛酸乙酯、丁位十二内酯、丁位癸内酯、辛酸甲酯、丁位辛内酯、丁位己内酯、2-庚酮、癸酸、 γ -壬内酯,其中,酯类和内酯类化合物是赋予椰子油椰子香气味的重要成分。石芬等^[4]发现己醛、2-庚酮、丁位己内酯、壬醛、辛酸乙酯、丁位辛内酯、2-十一酮、癸酸乙酯、丁位癸内酯等是初榨椰子油常温储藏过程中的关键风味化合物,而酯类是椰子油独特椰子香的来源。本文鉴定

的椰子油挥发性成分与文献报道的基本相同,但 ROAV 略有区别,可能与油脂的加工和储藏条件不同有关,部分小分子成分氧化生成的挥发性成分影响着食品的整体风味^[20]。

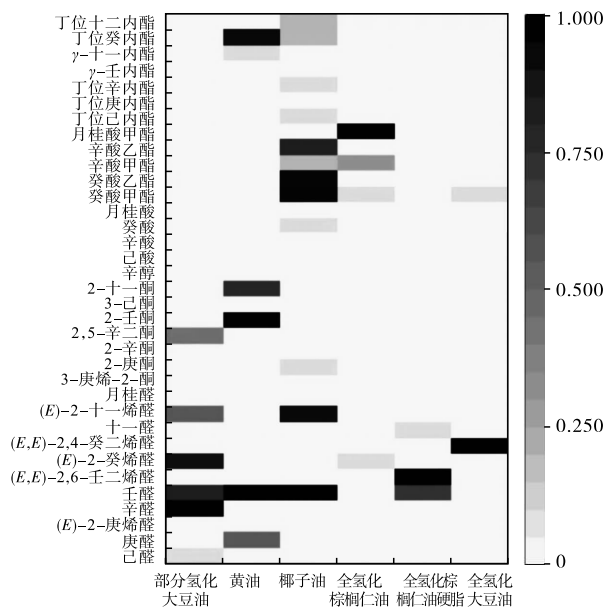
部分氢化大豆油共鉴定出 6 个关键风味化合物,按 ROAV 大小依次为辛醛、(E)-2-癸烯醛、壬醛、(E)-2-十一烯醛、2,5-辛二酮、己醛。醛类和酮类等羰基化合物在部分氢化大豆油中的含量并不高,但因其阈值低,成为部分氢化大豆油的关键风味化合物。丁位十二内酯、2-辛酮、 γ -壬内酯、辛醇、2-庚酮、3-己酮等 6 个挥发性成分的 ROAV 大于 0.1 但小于 1,对部分氢化大豆油整体风味起重要修饰作用。甲基酮类和少量内酯类物质为部分氢化大豆油贡献了突出的奶油香。尽管部分氢化大豆油中检出较高含量的烃类、长链酯类,但由于它们的阈值高,对特征风味的整体贡献程度低。

全氢化棕榈仁油、全氢化棕榈仁油硬脂和全氢化大豆油检出的关键风味化合物种类较少,分别为 5 个、4 个和 2 个。全氢化棕榈仁油的关键风味化合物为甲酯类和醛类,其中月桂酸甲酯贡献最大;全氢化棕榈仁油硬脂的关键风味化合物为醛类和酸类,其中(E,E)-2,6-壬二烯醛贡献最大;全氢化大

豆油的关键风味化合物为(*E,E*)-2,4-癸二烯醛和癸酸甲酯。全氢化油的关键风味化合物主要呈现脂肪气味、果香等,与部分氢化大豆油的关键风味化合物差异较大。

2.1.2 聚类分析

聚类热图可更直观地比较各油脂样品风味物质的分布和差异情况,基于6种食品专用油脂的35个挥发性成分的ROAV制作聚类热图,如图1所示。



注:黑色代表挥发性成分的风味贡献程度最大,颜色越浅代表风味贡献程度越小

图1 6种食品专用油脂的ROAV聚类热图

由图1、表1可知,椰子油的关键风味化合物种类最为丰富,其次为黄油和部分氢化大豆油。椰子油呈现奶油香和浓郁椰子香,其中内酯、甲酯、乙酯类和醛类化合物对椰子油整体风味贡献最大。黄油具有果香、奶油香和青香,内酯、醛类和酮类化合物对其整体风味贡献较大。部分氢化大豆油则具有一种混合着类似果香、蜜蜡香、脂肪气味和奶油香的风味,醛类和酮类化合物对其整体风味贡献较大。全氢化棕榈仁油、全氢化棕榈仁油硬脂和全氢化大豆油的关键风味化合物较少,甲酯类化合物对全氢化棕榈仁油整体风味贡献最大,醛类化合物对全氢化棕榈仁油硬脂和全氢化大豆油整体风味贡献最大,主要呈现脂肪气味和果香风味。另有报道大豆油加氢过程中产生的挥发性成分主要为醛类、酮类和醇类^[21],与本研究结果相似。

2.2 感官评价

6种食品专用油脂共产生4个感官特征描述词,描述词及其参比样如表2所示。

表2 6种食品专用油脂的感官特征描述词及参比样

感官特征描述词	参比样品
青草香	辛醛
奶香	丁位十二内酯
油脂气味	(<i>E</i>)-2-癸烯醛
蜜蜡香	壬醛

以青草香、奶香、油脂气味、蜜蜡香为描述词,对6种食品专用油脂进行感官评价并绘制雷达图,如图2所示。

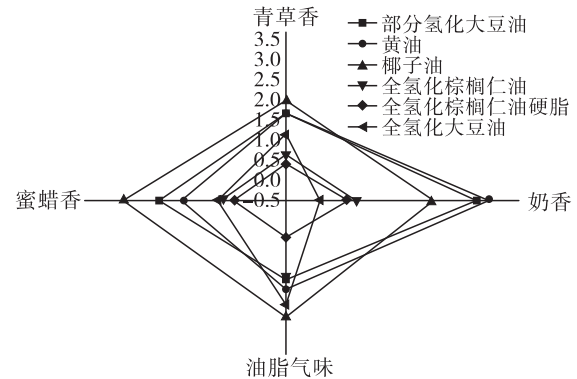


图2 6种食品专用油脂的感官评价雷达图

由图2可知,椰子油4种感官特征得分较为相近,其中蜜蜡香、油脂气味得分较高,使椰子油总体呈现清新风味。黄油和部分氢化大豆油的风味轮廓较为相近,其中黄油的奶香风味特征更强烈,与黄油中2-壬酮和丁位癸内酯的ROAV较高的分析结果相对应。尽管部分氢化大豆油的奶香得分与黄油十分接近,但黄油整体风味更偏向于柔和清爽的奶香气,部分氢化大豆油的奶香则类似于夹带着甜味、花香的干酪香气,上述区别也使得两者在整体风味上存在明显差异。全氢化大豆油 and 全氢化棕榈仁油具有较强的油脂气味,全氢化棕榈仁油硬脂并无突出的感官特征,且各感官特征得分较低,与椰子油、黄油、部分氢化大豆油的风味差异较大,与其关键风味化合物较少且ROAV相对较低分析结果一致。综上,GC-MS分析结果和感官评价结果存在一定联系。

3 结论

本文研究了6种食品专用油脂的关键风味化合物及其感官特征,其中黄油、椰子油和部分氢化大豆油风味化合物较为丰富,并且具有突出的感官特征。

椰子油有13个关键风味化合物,主要集中在酯类、醛类化合物,呈现椰子香和奶油香;黄油有8个关键风味化合物,包括酮类、内酯类、醛类化合物,呈现果香、奶油香和青香;部分氢化大豆油有6个关键风味化合物,主要为醛类和酮类化合物,具有果香、蜜蜡香、脂肪气味和奶油香的特征风味;全氢化棕榈

仁油、全氢化大豆油、全氢化棕榈仁油硬脂的关键风味化合物较少,主要为醛类和甲酯类/酸类,主要呈现果香风味和脂肪气味。综上,不同食品专用油脂的关键风味特征存在差异,且感官评价结果和关键风味化合物分析结果存在一定的联系,今后可继续深入研究,GC-MS分析结果和感官评价结果的相关性,为食品专用油脂风味的提升提供参考。

参考文献:

- [1] 刘元法. 食品专用油脂[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2017: 3-5.
- [2] 左青, 左晖, 李国荣, 等. 我国食品专用油脂行业动态[J]. 粮食与食品工业, 2017, 24(4): 1-4, 8.
- [3] 李扬, 李妍, 李栋, 等. 基于 ROAV 和嗅闻技术分析乳脂的关键风味化合物[J]. 食品科学, 2022(9): 1-14.
- [4] 石芬, 徐军, 姜宗伯, 等. 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[J]. 食品工业科技, 2022, 43(10): 314-322.
- [5] WARNER K, NEFF W E, LIST G R, et al. Electrochemical hydrogenation of edible oils in a solid polymer electrolyte reactor. Sensory and compositional characteristics of low *trans* soybean oils[J]. J Am Oil Chem Soc, 2000, 77(10): 1113-1117.
- [6] COLON-RAMOS U, MONGE-ROJAS R, CAMPOS H. Impact of WHO recommendations to eliminate industrial *trans*-fatty acids from the food supply in Latin America and the Caribbean[J]. Health Policy Plann, 2014, 29(5): 529-541.
- [7] LICHTENSTEIN A H. Dietary *trans* fatty acids and cardiovascular disease risk: past and present[J/OL]. Curr Atheroscler Rep, 2014, 16(8): 433 [2022-10-27]. <https://doi.org/10.1007/s11883-014-0433-1>.
- [8] World Health Organization. WHO plan to eliminate industrially-produced *trans*-fatty acids from global food supply[EB/OL]. [2022-10-27]. <https://www.who.int/news/item/14-05-2018-who-plan-to-eliminate-industrially-produced-trans-fat-acids-from-global-food-supply>.
- [9] NAGPAL T, SAHU J K, KHARE S K, et al. *Trans* fatty acids in food: a review on dietary intake, health impact, regulations and alternatives[J]. J Food Sci, 2021, 86(12): 5159-5174.
- [10] HUTCHINSON J, RIPPIN H L, JEWELL J, et al. Comparison of high and low *trans*-fatty acid consumers: analyses of UK national diet and nutrition surveys before and after product reformulation[J]. Public Health Nutr, 2018, 21(3): 465-479.
- [11] RIBEIRO A P B, GRIMALDI R, GIOIELLI L A, et al. Zero *trans* fats from soybean oil and fully hydrogenated soybean oil: physico-chemical properties and food applications[J]. Food Res Int, 2009, 42(3): 401-410.
- [12] 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.
- [13] GEMERT L J V. Compilations of odour threshold values in air, water and other media[M]. 2nd ed. Netherlands: Oliemans Punter & Partners BV, 2011.
- [14] THURER A, GRANVOGL M. Generation of desired aroma-active as well as undesired toxicologically relevant compounds during deep-frying of potatoes with different edible vegetable fats and oils[J]. J Agric Food Chem, 2016, 64(47): 9107-9115.
- [15] 徐立荣. 食品煎炸过程最佳风味区间的定义、表征及影响因素[D]. 江苏 无锡: 江南大学, 2021.
- [16] 贾潇, 周琦, 杨旖旎. 3种坚果油的挥发性成分提取及关键风味成分分析[J]. 中国油脂, 2020, 45(7): 35-41.
- [17] MALLIA S, ESCHER F. Aroma-active compounds of butter: a review[J]. Eur Food Res Technol, 2008, 226(3): 315-325.
- [18] BUDIN J T, MILO C, REINECCIUS G A. Perceivable odorants in fresh and heated sweet cream butters[M]// Food flavors and chemistry: advances of the new millennium. London: Royal Society of Chemistry, 2007: 85-96.
- [19] 李宁, 孙宝国. 乳品风味物质研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2016, 42(8): 240-251.
- [20] LING T. Oxidation of polyunsaturated fatty acids and its impact on food quality and human health[J]. Adv Food Technol Nutr Sci, 2015, 1(6): 135-142.
- [21] SILVEIRA A, MASUDA Y, CHANG S S. Chemical reactions involved in the catalytic hydrogenation of oils. II. Identification of some volatile by-products[J]. J Am Oil Chem Soc, 1965, 42(2): 85-86.