

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2024.80471

制油工艺对山桐子油风味的影响

胡伯凯^{1,2,3} 税会霞^{1,2,3} 耿阳阳^{1,2,3} 张东亚⁴ 杨小红^{1,2,3}

(1. 贵州省林业科学研究院, 贵州 贵阳 550005; 2. 贵州省核桃研究所, 贵州 贵阳 550005; 3. 贵州省核桃工程技术研究中心, 贵州 贵阳 550005; 4. 贵州轻工职业技术学院, 贵州 贵阳 561113)

摘要: [目的]探究制油工艺对山桐子油挥发性风味物质的影响。[方法]采用顶空—固相微萃取—气相色谱—质谱(HS-SPME-GC-MS)法分析螺杆压榨法、液压压榨法、水代法和石油醚浸提法制取的山桐子油挥发性风味物质组成,以相对气味活度值(ROAV)确定主体挥发性香气成分。[结果]共检出 8 类 114 种挥发性风味成分,其中共有成分 12 种,相对含量之和为 9.92%~24.21%,特有成分相对含量为 7.50%~47.99%;结合 ROAV 值共筛选出 18 种关键香气化合物、13 种风味修饰化合物和 6 种潜在气味成分。液压压榨和水代法提取油中对总体风味贡献最大的关键香气化合物为(*E,E*)-2,4-壬二烯醛,呈坚果、油炸味,而螺杆压榨和石油醚浸提油中的为 3-辛醇,呈蘑菇、稻草味。[结论]液压压榨山桐子油的特有风味物质种类多且含量高、关键香气化合物种类丰富、香味阈值风味物质含量最大,其挥发性风味特点突出且识别度高,类似于坚果、蒲公英、水果的特征香气更浓郁。

关键词: 山桐子;制油工艺;挥发性风味物质;相对气味活度值;关键香气化合物

Effect of oil extraction process on the flavor of *Idesia polycarpa* oil

HU Bokai^{1,2,3} SHUI Huixia^{1,2,3} GENG Yangyang^{1,2,3} ZHANG Dongya⁴ YANG Xiaohong^{1,2,3}

(1. Guizhou Academy of Forestry, Guiyang, Guizhou 550005, China; 2. Guizhou Institute of Walnut, Guiyang, Guizhou 550005, China; 3. Engineering Technology Research Center for Walnut of Guizhou Province, Guiyang, Guizhou 550005, China; 4. Guizhou Institute of Light Industry, Guiyang, Guizhou 561113, China)

Abstract: [Objective] This study aimed to investigate the influence of different oil extraction methods on the volatile flavor compounds of *Idesia polycarpa* oil. [Methods] The volatile flavor compounds of *Idesia polycarpa* oil extracted by screw pressing, hydraulic pressing, water extraction, and petroleum ether extraction methods were analyzed using headspace-solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS). The main volatile aroma compounds were determined based on their relative odor activity values (ROAV). [Results] A total of 8 classes and 114 volatile flavor compounds were detected in *Idesia polycarpa* oil, with 12 common compounds comprising 9.92% to 24.21% of the total content, and specific compounds accounting for 7.5% to 47.99% of the total content. Through the evaluation of ROAV values, 18 key aroma compounds, 13 flavor modifier compounds, and 6 potential odorants were identified. The key aroma compound that contributed the most to the overall flavor of *Idesia polycarpa* oil extracted by hydraulic pressing and water replacement method was (*E,E*)-2,4-decadienal, which presented a nutty and fried aroma. On the other hand, in the oil extracted by screw pressing and petroleum ether immersion, the main aroma compound was 3-octanol, providing mushroom and straw aromas. [Conclusion] The unique flavor substances of hydraulic pressed *Idesia polycarpa* oil were diverse and high in content, with a wide variety of key aroma compounds. It had a high content of volatile flavor compounds, with a distinct and high recognition of aroma threshold. The aroma was reminiscent of nuts, dandelions, and fruits, suggesting potential for wider application.

Keywords: *Idesia polycarpa*; oil production process; volatile flavor compounds; relative odor activity values; key aroma compounds

基金项目: 贵州省林业科研项目(编号:黔林科合J字[2024]09号,黔林科合[2023]04号);贵州省科技计划定向重点项目(编号:黔科合支撑[2022]重点014号)

通信作者: 张东亚(1994—),女,贵州轻工职业技术学院工程师,硕士。E-mail: 1689774145@qq.com

收稿日期: 2024-05-20 **改回日期:** 2024-11-11

引用格式: 胡伯凯,税会霞,耿阳阳,等. 制油工艺对山桐子油风味的影响[J]. 食品与机械, 2025, 41(6): 217-227.

Citation: HU Bokai, SHUI Huixia, GENG Yangyang, et al. Effect of oil extraction process on the flavor of *Idesia polycarpa* oil[J]. Food & Machinery, 2025, 41(6): 217-227.

山桐子又名油葡萄,为大风子科山桐子属落叶乔木^[1],其果实含油率为 38.83%^[2]。山桐子油中含大量不饱和脂肪酸,主要为亚油酸、硬脂酸和棕榈酸等^[3-4],具有降血脂、软化血管、促进微循环的作用^[5];其天然活性成分主要为甾醇、生育酚和 β -谷甾醇^[6-7]等,具有抗氧化、促进发育、调节胆固醇水平等功效^[8]。

山桐子油有长期食用的历史,国家卫健委已将其纳入普通食品管理^[9-10]。汪雪瑞^[11]发现,螺杆压榨山桐子油中含量最高且对整体气味影响最大的物质为(*E,E*)-2,4-癸二烯醛;庞贵尹^[12]发现,精炼后的山桐子油中酚、醛和醇类物质大幅度减少;陈耀兵等^[13]认为,热加工会导致山桐子挥发性成分中的不饱和化合物逐步被损耗,而饱和烷烃类的香气成分逐步凸显。

目前,有关常见的工业化制油工艺对挥发性风味物质的影响研究较少,叶扬等^[14]研究证实,水蒸气蒸馏和正己烷提取的山桐子油中共有化合物为 38 种。研究拟以山桐子果实为原料,探究螺杆压榨法^[15]、液压压榨法^[16]、水代法^[17]、石油醚浸提法^[18]等工业化制油技术对山桐子油中挥发性风味物质组成的影响,分析各工艺制取山桐子油挥发性风味的异同点和优劣性,以期如山桐子制油工艺的选择和产业化应用提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

山桐子:网购;

异辛烷:色谱纯,重庆川东化工集团有限公司;

石油醚(沸程 30~60℃)、甲醇、硫酸氢钠:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

37 种脂肪酸甲酯混合标准溶液:上海安谱实验科技股份有限公司。

1.1.2 主要仪器设备

电热鼓风干燥箱:DHG-9145A 型,上海一恒科学仪器有限公司;

自动液压榨油机:LH-426 型,山东彩连机械有限公司;

商用榨油机:S03 小型,乐清市韩皇电器科技有限公司;

万分之一电子天平:MS 104 TS 型,梅特勒—托利多仪器有限公司;

高速粉碎机:FW100 型,天津市泰斯特仪器有限公司;

台式高速冷冻离心机:3-18R 型,湖南可成仪器设备有限公司;

气相色谱仪:GC 9720 型,配备氢火焰离子化检测器,浙江福立分析仪器股份有限公司;

GC-MS 联用仪:8890/7000D 型,配备 EI 离子源、HP-5MS 弹性石英毛细管柱(30 m×250 μ m,0.25 μ m)、CP-Sil 88 毛细管柱(100 m×250 μ m,0.20 μ m),安捷伦科技(中国)有限公司。

1.2 方法

1.2.1 样品预处理 将山桐子于 45℃烘干至水分含量<10%,经螺杆压榨法、液压压榨法、水代法和石油醚浸提法获取原油。

1.2.1 山桐子油样制备条件

(1) 螺杆压榨法制山桐子油(LG):设定螺杆压榨机榨膛温度为 120℃,饼粕厚度 3~5 mm,向下料筒中倒入山桐子果实,由出油口接收山桐子油,经 5 μ m 膜过滤后于 4℃冰箱保存。

(2) 液压压榨法制山桐子油(YY):设定液压压榨机压力为 60~70 MPa,自动运行参数设置为压榨时间 0.4 s,间歇时间 0.8 s,向填料桶中倒入山桐子果实,手动调节液压机下压至开始出油后调至自动运行模式,连续压榨 4 h,从接油桶中回收山桐子油,经 5 μ m 膜过滤后于 4℃冰箱保存。

(3) 水代法制山桐子油(SD):参照王亚娟^[19]的方法。

(4) 石油醚浸提法制山桐子油(SYM):将山桐子果实以高速粉碎机粉碎,剔除 2 mm 以上颗粒物,按 $m_{\text{粉末}}:V_{\text{石油醚}}$ 为 1:3 (g/mL) 加入石油醚,浸提 10 h 后倾出上清液,通过旋转蒸发仪回收有机溶剂,获得山桐子油,经 5 μ m 膜过滤后置于 4℃冰箱保存。

1.2.3 脂肪酸含量测定 参照 GB 5009.168—2016,对比待测样与 37 种混合脂肪酸标准溶液的出峰时间确定其脂肪酸种类,以峰面积归一化法进行定量。

1.2.4 挥发性风味物质含量测定 将样品置于固相微萃取仪采样瓶中,插入装有 2 cm,50/30 μ m DVB/CAR/PDMS StableFlex 纤维头的手动进样器,60℃加热萃取 40 min,移出萃取头并立即插入气相色谱仪进样口中,热解析 5 min,进样。GC-MS 联用仪设置离子源温度 230℃;四极杆温度 150℃;电子能量 70 eV;发射电流 34.6 μ A;倍增器电压 1 670 V;接口温度 280℃;质量范围 29~500 amu;设置汽化室温度 250℃;载气为高纯 He (99.999%);柱前压 48.68 kPa,载气流量 1.0 mL/min,不分流,溶剂延迟时间 1 min;设置色谱柱初始温度 40℃(保留 5 min),以 3.5℃/min 升温至 180℃,再以 10℃/min 升温至 240℃。总离子流图中各峰经质谱计算机数据系统检索并核对 MassHunter/Library/Nist20 标准质谱图,确定其挥发性化学成分,以峰面积归一化法计算各化学成分的相对质量分数。

1.2.5 关键香气化合物的筛选 相对气味活度值(ROAV)法^[20]是表征香气贡献的重要分析方法之一,定义对样品总体风味贡献最大的组分 $ROAV_{\text{max}}=100$, $ROAV>1$ 的挥发性物质对香气贡献较大,为关键香气化合物, $0.1<ROAV<1$ 的组分对样品的总体风味具有重要的修饰作用,为风味修饰化合物, $ROAV<0.1$ 的物质为潜在气味成分^[21-22]。按式(1)计算 ROAV。

$$ROAV_i = \frac{C_i}{C_{\text{stan}}} \times \frac{T_{\text{stan}}}{T_i} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

ROAV_i——相对气味活度值;

C_i ——挥发性组分 i 相对含量, %;

T_i ——挥发性组分 i 的感官阈值, $\mu\text{g}/\text{kg}$;

C_{stan} ——对样品整体风味贡献最大组分的相对含量, %;

T_{stan} ——对样品整体风味贡献最大组分感觉阈值, $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。

1.2.6 数据处理 所有试验重复3次,结果以平均值±标

准偏差表示;采用 Origin 2019 软件绘图;采用 SPSS 26.0 软件进行数据统计分析。

2 结果与分析

2.1 山桐子油中脂肪酸分析

由表1可知,山桐子油的主要脂肪酸为棕榈酸、棕榈油酸、硬脂酸、油酸、亚油酸和 α -亚麻酸,各工艺之间的棕榈油酸、硬脂酸、油酸含量差异显著,这与油脂制取过程中的温度、氧气接触、溶剂极性等有关。^[23-24]

表1 不同工艺制取山桐子油的主要脂肪酸组成[†]

脂肪酸	LG	YY	SD	SYM	%
棕榈酸($C_{16:0}$)	15.60±0.13 ^c	15.91±0.21 ^b	16.01±0.16 ^b	16.36±0.13 ^a	
棕榈油酸($C_{16:1, \text{cis-9}}$)	5.38±0.03 ^d	5.72±0.06 ^c	5.98±0.03 ^a	5.85±0.08 ^b	
硬脂酸($C_{18:0}$)	1.53±0.03 ^b	1.97±0.01 ^a	1.48±0.02 ^c	1.43±0.02 ^d	
油酸($C_{18:1, \text{cis-9}}$)	5.48±0.07 ^a	5.05±0.05 ^d	5.22±0.03 ^c	5.31±0.03 ^b	
亚油酸($C_{18:2, \text{cis-9, 12}}$)	68.65±0.33 ^a	67.10±0.87 ^b	68.04±1.13 ^{ab}	66.81±0.27 ^b	
α -亚麻酸($C_{18:3, \text{cis-9, 12, 15}}$)	1.26±0.01 ^b	1.35±0.02 ^a	1.22±0.02 ^c	1.23±0.01 ^{bc}	

[†] 小写字母不同表示同行之间差异显著($P<0.05$)。

2.2 山桐子油中挥发性风味物质分析

由表2可知,不同工艺制取山桐子油样品中共检出114种挥发性风味成分,包括烷烃类28种、芳香族类26种、醛类22种、醇类12种、酮类11种、酯类8种、酸类5种、呋喃类2种。

烷烃类物质是形成醛、酮类物质的主要前体物质,主要来自脂质氧化分解或脂肪酸烷氧自由基的断裂^[28],其阈值较高难以对植物油风味产生较大影响^[29-30]。山桐子油中的烷烃类物质大部分不具备香气阈值,其余的为潜在气味成分,可为山桐子油贡献柑橘、花香、烷烃等特征风味,其相对含量为0.98%~11.50%,种类虽多但平均含量较低,其中YY中的烷烃含量和种类最少。山桐子油中芳香族类物质相对含量为0.32%~30.33%,具有香草、焦味、油漆或木材味,愈创木酚来源于木质素降解^[31-32],其含量和ROAV值在各工艺中表现不同,在SD中的含量最高,在LG中的ROAV值最高,在YY中的含量和ROAV值最低,因而YY的苯酚、木材味最轻。各制油工艺中,烷烃和芳香族类物质在水代法中的种类最多,与芝麻油工艺对比结果相类似^[33]。

醛类物质在植物油中分布较广,是油茶、山桐子、核桃等木本植物油脂的主要成分^[9, 34-35],常常呈现青草味和腥味^[36-37]。山桐子油中醛类物质的相对含量为13.68%~36.21%,以辛醛、壬醛、苯甲醛和己醛等物质的含量较高,结合阈值来看,对山桐子油香气贡献较大的为(E, E)-2,4-壬二烯醛、辛烯醛、(E, Z)-2,4-癸二烯醛,赋予山桐子油类似于坚果、蒲公英、水果的特征香气^[38-39],YY中同时含有这3种物质且ROAV值较大($\text{ROAV}>50$),因而风味更加协调、醇和。YY和SD中对总体风味贡献最大的关键香

气化合物为(E, E)-2,4-壬二烯醛,两者风味的差异在于ROAV值稍小的物质,分别为辛烯醛(蒲公英、脂肪、水果香)和(E, Z)-2,4-癸二烯醛。醇类物质来源于不饱和脂肪酸的降解,是生成酯类物质的主要前体物质^[40],山桐子油中检出的醇类物质相对含量为0.98%~22.39%,主要为芳樟醇、苯甲醇、顺-1,2-环己二醇和苯乙醇等物质,3-辛醇、芳樟醇和苯乙醇为醛类物质中的关键香气化合物,3-辛醇为LG和SYM中对样品总体风味贡献最大的组分,其特有的蘑菇和稻草特征风味较其他工艺的更加明显。

山桐子油中常见的酮类物质为二氢-2(3H)-呋喃酮、2-庚酮和丙酮等^[41-42],可能是非端位羟基醇和酯类物质氧化分解的产物^[43],各样品中检出的酮类物质相对含量为0.18%~11.25%,为山桐子油贡献花香、蓝纹奶酪、杏仁和水果等特征风味,仅在YY中检出1种风味修饰化合物和2种潜在气味成分。酯类物质多数具有果甜香^[44-45],对整体气味有一定的协同作用,各样品中检出的酯类物质相对含量为1.17%~4.81%,呈现杏仁、椰子和果香味,仅在YY中检出2种风味修饰化合物(丙位辛内酯和丙位癸内酯)。因此,各样品中检出的酮类和酯类物质对山桐子油特征风味的贡献较小。

山桐子油样品中,只有YY和SD中检出酸类物质(辛酸、己酸、壬酸、庚酸和戊酸),其相对含量之和分别为45.70%和0.58%,而庚酸、辛酸是仅在YY中检出的关键香气化合物,呈现杏子、花香和水果香。山桐子油中检出的呋喃类物质为2-戊基呋喃和2,3-二氢苯并呋喃,其中2-戊基呋喃为LG和YY的关键香气化合物,来自亚油酸降解^[46-47],具有黄油、花香及水果香。综上,相对于其他工艺,YY具有更浓郁的坚果、蒲公英和水果特征香气。

表 2 不同工艺制取山桐子油中挥发性风味物质的相对含量[†]
Table 2 Relative content of volatile flavor compounds in *Idesia polycarpa* oil extracted using different techniques varies

名称	保留时 间/min	相对含量/%				名称	保留时 间/min	相对含量/%			
		LG	YY	SD	SYM			LG	YY	SD	SYM
2,2,4-三甲基戊烷	3.177	1.878	—	—	—	水化香桉烯 ^[25]	18.265	—	—	0.343	0.481
戊醛	3.364	0.240	1.684	1.179	—	3-甲基癸烷	18.472	—	—	0.944	0.665
甲苯	5.045	0.043	—	0.046	—	(3 <i>E</i> ,5 <i>E</i>)-辛-3,5-二烯-2-酮	18.513	—	0.183	—	—
戊醇	5.156	0.077	0.104	0.234	—	4-乙基间二甲苯	18.684	—	—	0.569	—
己醛	6.216	1.997	2.596	5.186	0.619	2-乙基对二甲苯	18.755	—	—	1.063	—
糠醛	7.579	0.291	—	—	—	甲酸苄酯	18.755	0.311	—	—	—
糠醇	8.644	0.134	—	—	—	3-乙基邻二甲苯	19.037	—	—	2.308	0.429
乙苯	8.715	0.127	—	0.269	0.844	愈创木酚	19.285	1.057	0.192	2.095	1.371
对二甲苯	9.078	0.265	0.064	1.515	7.742	2-壬酮	19.477	—	0.371	—	—
己醇	9.250	0.246	0.037	0.103	—	苯甲酸甲酯	19.512	1.544	—	—	3.495
苯乙烯	10.027	1.636	0.033	—	—	芳樟醇	19.815	1.677	—	1.751	13.702
间二甲苯	10.108	—	—	—	6.207	壬醛	19.997	1.032	9.874	3.490	1.546
邻二甲苯	10.113	—	—	1.338	—	庚酸	20.008	—	6.565	—	—
2-庚酮	10.184	—	0.053	—	—	苯乙醇	20.335	2.401	0.388	—	4.623
庚醛	10.638	0.244	0.952	1.708	0.115	1,2,4,5-四甲苯	20.375	—	—	5.022	—
戊酸	11.325	—	1.751	—	—	异杜烯	20.567	—	—	6.198	1.950
α -侧柏烯	11.753	0.194	—	0.131	0.204	戊基环己烷	21.183	—	—	0.196	—
3-(1-甲基乙基)环己烯-	12.652	—	0.087	—	—	2,3-二氢-5-甲基-1 <i>H</i> -茚	21.334	—	—	0.814	—
γ -戊内酯	13.066	0.035	—	—	—	(<i>E</i>)-4-(异丙基)-1-甲基环	21.456	0.405	—	0.360	0.282
(<i>E</i>)-2-庚烯醛	13.187	0.358	0.465	—	0.243	己-2-烯-1-醇					
苯甲醛	13.263	1.445	0.834	4.099	4.065	3-壬烯-2-酮	21.536	—	0.145	—	—
桉烯	13.919	0.243	0.299	0.138	0.320	3,5-二乙基甲苯	21.637	—	—	0.333	—
3-辛醇	14.353	0.330	0.117	0.271	1.450	3,5-二羟基-6-甲基-2,3-二	21.668	0.859	—	—	—
正庚醇	14.373	—	0.332	—	—	氢吡喃-4-酮					
2-戊基呋喃	14.873	5.897	1.204	0.722	—	连四甲苯	21.915	—	—	1.634	0.237
1,2-环己二酮	15.141	10.393	—	—	—	(<i>E</i>)-2-壬醛	22.379	0.602	2.020	1.075	0.601
癸烷	15.246	—	—	0.495	0.720	4-乙基苯酚	22.707	0.183	—	—	—
水芹烯	15.342	—	—	0.113	0.230	4-萜烯醇	23.056	0.366	—	0.599	0.456
辛醛	15.449	—	5.512	—	—	萘	23.176	—	—	1.816	1.289
己酸	15.449	—	13.215	0.575	—	α -松油醇	23.626	—	—	—	0.304
(<i>E</i> , <i>E</i>)-2,4-庚二烯醛	15.726	—	0.618	—	—	(<i>Z</i> , <i>Z</i>)-5,11-二十碳二烯酸	23.737	0.563	—	—	—
邻-异丙基苯	16.377	0.692	—	0.317	0.982	水杨酸甲酯	23.757	0.802	—	1.754	3.836
柠烯	16.499	2.041	—	0.866	2.590	2,3-二氢-2,2,6-三甲基苯	23.990	0.828	—	—	—
苯甲醇	16.917	8.696	—	1.676	1.573	甲醛					
水杨醛	17.099	1.549	—	2.970	3.130	十二烷	24.080	—	—	3.381	2.867
苯乙醛	17.230	0.628	—	7.090	1.676	邻苯二酚	24.197	10.507	—	—	—
1-甲基-2-丙基苯	17.720	—	—	0.251	—	癸醛	24.318	—	2.202	—	—
辛烯醛	17.912	1.121	1.191	—	—	辛酸	24.318	—	14.931	—	—
2-甲基癸烷	18.033	—	—	0.231	0.299	(<i>E</i> , <i>E</i>)-2,4-壬二烯醛	24.616	—	0.719	2.932	—
(<i>Z</i>)-1,2-环己二醇	18.134	3.154	—	—	—	2,3-二氢苯并呋喃	24.858	1.269	—	—	—
苯乙酮	18.195	—	0.080	—	—	β -环柠檬醛	24.883	—	0.149	—	0.281

续表 2

名称	保留时间/min	相对含量/%				名称	保留时间/min	相对含量/%			
		LG	YY	SD	SYM			LG	YY	SD	SYM
1-环己烯-1-羧酸,2,6,6-三甲基-甲酯	25.509	—	—	—	0.807	邻苯二甲酸二甲酯	33.782	—	—	0.187	—
丙位辛内酯	26.418	—	0.686	—	—	β -石竹烯	33.853	0.136	—	—	0.710
(<i>E</i>)-2-癸烯醛	26.569	—	2.453	—	—	丙位癸内酯	34.237	—	0.295	—	—
1-十三烯	27.735	—	—	0.557	0.336	花柏烯	34.318	0.126	—	—	—
(<i>E,Z</i>)-2,4-癸二烯醛	27.806	0.805	0.997	1.090	0.339	β -紫罗酮	34.893	—	0.453	—	0.445
壬酸	27.811	—	9.235	—	—	十五烷	35.338	—	0.034	0.366	0.266
正十三烷	28.048	—	—	0.277	0.570	1,2,4a,5,6,8a-六氢-4,7-二甲基-1-(1-甲基乙基)萘	35.383	0.175	—	—	—
(<i>E,E</i>)-2,4-癸二烯醛	28.679	1.773	1.749	2.008	0.950	β -红没药烯	35.671	0.227	—	0.341	—
庚基环己烷	29.602	—	—	0.371	0.167	2,4-二叔丁基酚	35.797	—	0.034	—	—
δ -榄香烯	29.951	0.096	—	—	—	2,6-二叔丁基对甲酚	35.816	—	—	0.756	—
丁香酚	30.224	0.731	—	1.565	0.592	二氢猕猴桃内酯	36.347	—	0.319	0.612	0.166
2-十一烯醛	30.476	—	2.194	—	—	8-羟基-3-甲基-3,4-二氢-1 <i>H</i> -2-苯并吡喃-1-酮	36.847	0.558	—	2.238	0.498
十四烷	31.794	0.132	0.267	1.538	0.701	壬基环己烷	37.018	—	—	0.309	—
IONONE ^[26]	32.829	—	0.266	0.181	—	十六烷	38.689	—	0.127	0.167	0.105
(<i>Z</i>)- α -佛手柑 ^[27]	33.106	—	0.164	—	—	十一烷基环戊烷	40.420	—	—	0.209	—
二氢- β -紫罗兰酮	33.202	—	—	—	0.365	十五醛	42.324	0.851	—	1.120	0.112
橙化基丙酮	33.717	—	0.103	—	—	邻苯二甲酸二丁酯	48.402	0.023	—	0.670	—
α -律草烯	33.722	—	—	—	0.266						

† “—”表示该物质未检出。

由图 1 可知,不同工艺制取的山桐子油中挥发性风味物质种类占比不同,在 LG、SD 和 SYM 中,前 3 种物质依次为烷烃类、芳香族类和醛类物质,种类占比之和分别为 67.27%, 79.69%, 77.36%;在 YY 中,前 3 种物质依次为醛类、酮类和烷烃类物质,种类占比之和为 63.26%。不同工艺制取的山桐子油中挥发性风味物质的相对含量占比不同,可识别的各类挥发性风味物质相对含量为 73.99%~88.34%,在 SD 和 SYM 中,主要为烷烃类、芳香族类、醛类和醇类物质,相对含量之和分别为 80.25% 和 73.20%;在 YY 中,主要为酸类、醛类、酮类和醇类物质,相对含量之

和为 84.86%;在 LG 中,主要为醇类、芳香族类、醛类和酮类物质,相对含量之和为 59.84%。说明不同工艺对挥发性风味物质的溶解性及破坏程度不同,例如,在比较香榧籽油压榨工艺时,张晨曦等^[48]发现 3-甲基-2,4-辛二烯酸甲酯、4-羟基环己酮和 16,17-环氧黄体酮等仅在液压压榨油中存在,而 α -衣兰油烯仅在螺杆压榨油中检出。

2.3 不同工艺制取的山桐子油中挥发性风味物质比较

由图 2 可知, LG、YY、SD、SYM 中分别检出 55, 49, 64, 53 种挥发性风味物质,共有挥发性风味物质有 12 种,含醛类 7 种、醇类 1 种、烷烃类和芳香族各 2 种,其相对含

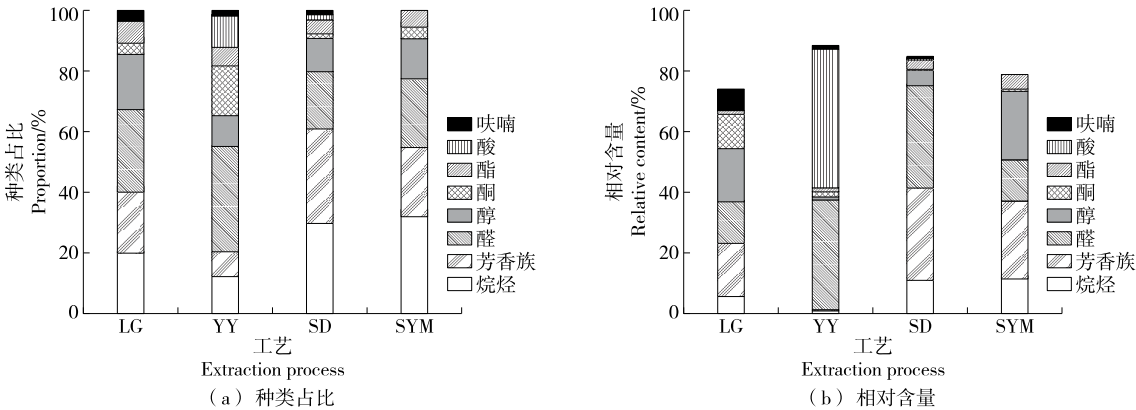


图 1 不同工艺制取山桐子油挥发性风味物质占比堆积图

Figure 1 Stacking chart of the proportion of volatile flavor compounds in *Idesia polycarpa* oil with different techniques

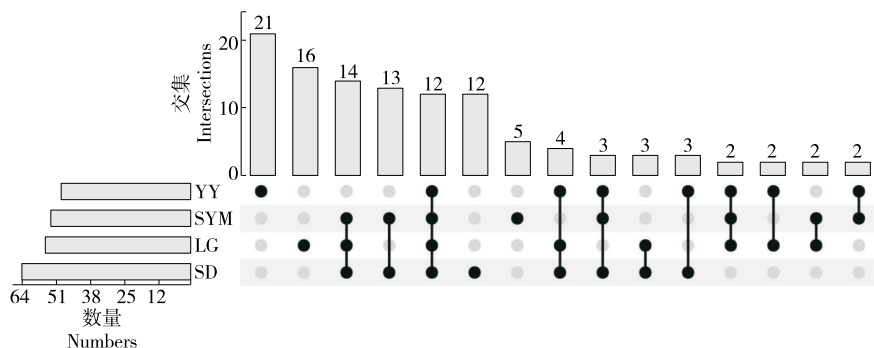


Figure 2 Upset diagram of volatile flavor compounds in *Idesia polycarpa* oil with different techniques

量之和为 9.92%~24.21%;特有挥发性风味物质种类排序依次为 YY(21 种)、LG(16 种)、SD(12 种)和 SYM(5 种), 相对含量分别为 47.99%, 30.80%, 11.04%, 7.5%, 具 ROAV 值的特有挥发性风味物质仅在 YY 和 LG 中检出, 分别为 12, 1 种, 除庚酸、辛醛和辛酸在 YY 中为关键香气化合物

外,其他物质均为风味修饰化合物或潜在气味成分。

主成分分析(PCA)是一种多元统计分析方法,通过降维简化数据集以提取线性不相关的新变量^[49-50],将山桐子油样品中检出的挥发性风味物质的相对含量作为变量输入PCA中,获得图3(a)。由图3(a)可知,前两个主成

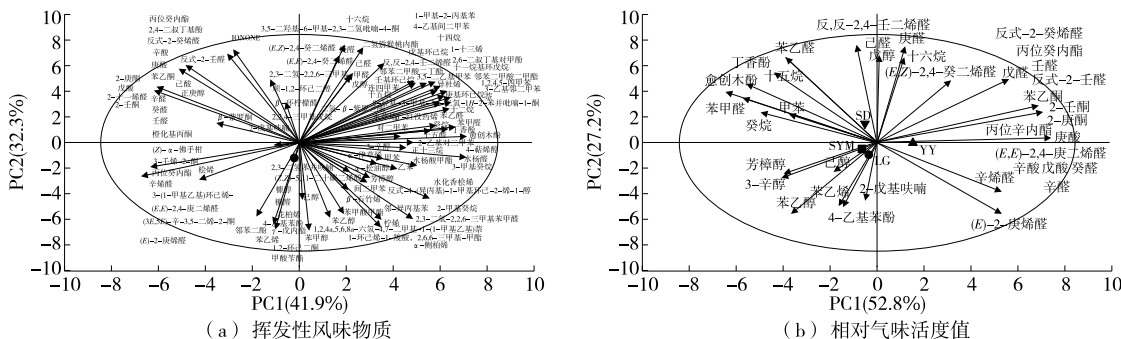


Figure 3 Principal component analysis of volatile flavor substances in *Idesia polycarpa* oil with different techniques using Bi-plots

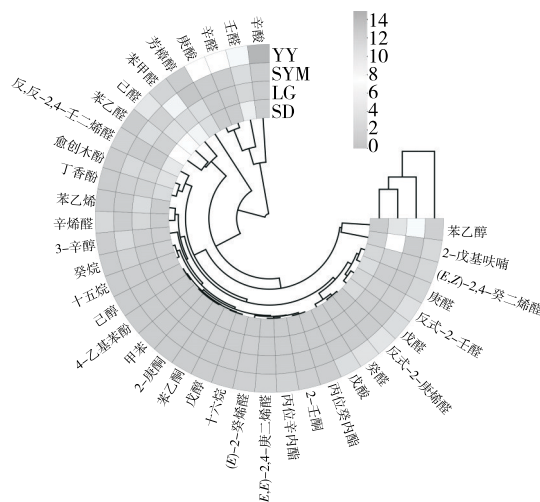
分之和为 74.20%,说明经过降维处理后,有效信息得到了较好的保留。SD、YY、LG、SYM 分别分布在第一、二、三、四象限,但各样品均较为靠近原点。将具有 ROAV 值的挥发性风味物质相对含量作为变量输入 PCA 中,获得图 3(b)。由图 3(b)可知,前两个主成分之和为 80.0%,说明以具有 ROAV 值的挥发性风味物质作为变量建立模型可保留更多有效信息,变量简化后仍可对原数据集进行表征。YY、SD 分别分布在第一、二象限, LG、SYM 则分布在第三象限,各样品仍较为靠近原点。

2.4 不同工艺制取的山桐子油中香气化合物聚类热图分析

聚类分析被广泛应用于样品分类中^[51-52],是根据个性特征对样品进行分类的分析方法。由图4可知,当山桐子油样品被分为两类时,YY为一类,其余聚为一类;当山桐子油样品被分为三类时,YY、SYM各聚为一类,其余聚为一类。对香气化合物进行聚类可知,当香气化合物被

图4 不同工艺制取的山桐子油中香气化合物聚类热图

Figure 4 Cluster heat map of aroma compounds extracted from *Idesia polycarpa* oil using different techniques



分为两类时,辛酸、壬醛、辛醛和庚酸聚为一类,其他香气物聚为一类。
化合物聚为一类;当香气化合物被分为三类时,芳樟醇聚为一类,辛酸、壬醛、辛醛和庚酸聚为一类,其余香气化合物聚为一类。

2.5 基于ROAV法的山桐子油中关键香气物质分析

由表3可知,山桐子油样品中共检出37种具有香气

表3 不同工艺制取的山桐子油中挥发性风味物质的ROAV值及气味
Table 3 ROAV value and odor of volatile flavor compounds in different techniques *Idesia polycarpa* oil

化合物	气味描述	香气阈值/(mg·kg ⁻¹)	ROAV 值			
			LG	YY	SD	SYM
戊醛	杏仁、苦味、麦芽香	0.240	0.30	1.46	0.25	—
甲苯	油漆味、甜味	0.330	0.04	—	<0.01	—
戊醇	脂肪气息、水果香	0.470	0.05	0.05	0.03	—
己醛	青草味、刺激性气味	0.075	8.06	7.22	3.54	0.57
己醇	松香味、水果香、青草味	0.400	0.19	0.02	0.01	—
苯乙烯	甜味、醋、花卉、塑胶	3.100	0.16	<0.01	—	—
2-庚酮	蓝纹奶酪、水果香、青草、坚果、香料	0.300	—	0.04	—	—
庚醛	油脂味、腥味、草味	0.250	0.30	0.79	0.35	0.03
戊酸	奶酪、刺激性	0.600	—	0.61	—	—
(E)-2-庚烯醛	杏仁、油脂、水果	0.050	2.17	1.94	—	0.33
苯甲醛	苦杏仁、焦糖、樱桃、麦芽、烤辣椒	0.060	7.29	2.90	3.49	4.67
3-辛醇	蘑菇味、稻草味	0.001	100.00	24.44	13.87	100.00
2-戊基呋喃	黄油、花香、水果香	0.100	17.86	2.51	0.37	—
癸烷	烷烃	4 000.000	—	—	<0.01	<0.01
辛醛	玫瑰、橙皮、柠檬香气	0.320	—	3.59	—	—
(E,E)-2,4-庚二烯醛	水果香、霉味、熟焦糖味	10.000	—	0.01	—	—
苯乙醛	浆果、天竺葵、蜂蜜、坚果、刺激性	0.154	1.24	—	2.36	0.75
辛烯醛	蒲公英、脂肪、水果香	0.004	84.88	62.09	—	—
苯乙酮	杏仁、花香、肉香、霉味	5.629	—	<0.01	—	—
愈创木酚	燃烧、苯酚、木材	0.010	32.01	4.01	10.72	9.46
2-壬酮	芳香、水果、绿色、热牛奶	0.100	—	0.77	—	—
芳樟醇	香菜、花香、薰衣草、柠檬、玫瑰	0.037	13.73	—	2.42	25.54
壬醛	玫瑰、柑橘味	0.150	2.08	13.73	1.19	0.71
庚酸	杏子、花香、酸味	0.100	—	13.69	—	—
苯乙醇	—	0.211	3.45	0.38	—	1.51
(E)-2-壬醛	纸味	0.150	1.22	2.81	0.37	0.28
4-乙基苯酚	皮革、苯酚、香料	0.200	0.28	—	—	—
癸醛	蜡质、脂肪、柑橘	0.650	—	0.71	—	—
辛酸	水果香	3.000	—	1.04	—	—
(E,E)-2,4-壬二烯醛	坚果味、油炸味、脂肪味	0.001 5	—	100.00	100.00	—
丙位辛内酯	椰子、水果	0.200	—	0.72	—	—
(E)-2-癸烯醛	脂肪、鱼、橙子	3.220	—	0.16	—	—
(E,Z)-2,4-癸二烯醛	—	0.004	60.92	51.99	13.94	5.85
丁香酚	烧焦的、丁香、香料	0.512	0.43	—	0.16	0.08
丙位癸内酯	脂肪、水果、内酯、桃	0.320	—	0.19	—	—
十五烷	—	13 000.000	—	<0.01	<0.01	<0.01
十六烷	—	13 000.000	—	<0.01	<0.01	<0.01

† “—”表示该物质未检出或未检索到阈值或香气描述;部分香气描述来源于 <https://www.femaflavor.org/flavor-library/> 网站;阈值查询来自《化合物香味阈值汇编》^[53]。

阈值的挥发性风味物质,其中 18 种关键香气化合物,13 种风味修饰化合物,6 种潜在气味成分。关键香气化合物中,苯甲醛、3-辛醇、愈创木酚和(*E,Z*)-2,4-癸二烯醛为山桐子油的共有成分,呈现杏仁、蘑菇和木材的香气;风味修饰化合物中,庚醛为共有成分,呈现油脂味、腥味和草味;在潜在气味成分中未发现共有成分。

在具有香味阈值的挥发性风味物质中,相对含量之和排序依次为 YY(59.08%)、SD(35.67%)、SYM(32.03%)和 LG(22.75%),这可能是不同工艺制取山桐子油风味浓郁与否的判断依据^[54-55]。ROAV 值为 100 的关键香气化合物为 3-辛醇和(*E,E*)-2,4-壬二烯醛,3-辛醇在 LG 和 SYM 中呈现蘑菇和稻草味,(*E,E*)-2,4-壬二烯醛为 YY 和 SD 贡献坚果味、油炸味和脂肪味;ROAV 值为 100~50 的关键香气化合物为辛烯醛和(*E,Z*)-2,4-癸二烯醛,呈现蒲公英、脂肪、水果香。

各工艺制取的山桐子油呈现的风味差异体现在浓度和组成上,LG 的风味以蘑菇、稻草味为主,蒲公英、脂肪、水果香为辅,略带苯酚、木材味;YY 的风味以坚果、油炸、脂肪味为主,蒲公英、脂肪、水果香为辅,略带蘑菇、稻草味;SD 的风味以坚果、油炸、脂肪味为主,蘑菇、稻草味为辅,略带苯酚、木材味;LG 的风味以蘑菇、稻草味为主,花香、薰衣草、柠檬味为辅,略带苯酚、木材味。

3 结论

采用顶空固相微萃取结合气相色谱一质谱联用技术,对不同工艺制取的山桐子油中所含的挥发性风味物质进行检测和分析,共检出 8 类 114 种挥发性风味成分,不同工艺制取的山桐子油中挥发性风味物质的种类和相对含量占比不同,其共有挥发性风味物质 12 种,含量之和为 24.21%,而特有挥发性风味物质可达 47.99%(液压压榨山桐子油)。以相对气味活度值法共筛出 18 种关键香气化合物和 13 种风味修饰化合物,对样品总体风味贡献最大的组分为 3-辛醇和(*E,E*)-2,4-壬二烯醛,分别为山桐子油贡献蘑菇和稻草味,坚果和油炸香气。在各制取工艺中,以液压压榨山桐子油的特有风味物质种类多且含量高、关键香气化合物种类丰富、具有香味阈值的挥发性风味物质的相对含量最大,挥发性风味特点突出且识别度高,类似于坚果、蒲公英、水果的特征香气更浓郁。综上,建议将液压压榨法作为山桐子油的主要制油方式进行推广和应用。

参考文献

- [1] 李欣. 我国油葡萄(山桐子)产业的现状与前景[J]. 中国林业产业, 2019(Z2): 68-73.
- LI X. Current situation and prospects of china's oil grape (*Idesia*

polycarpa) industry[J]. China Forestry Industry, 2019(Z2): 68-73.

- [2] 杨塘榆, 闻乐嫣, 阙建全. 采收期对毛叶山桐子油脂脂肪酸组成的影响[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(10): 183-187.
- YANG T Y, WEN L Y, KAN J Q. The effect of harvest time on the fatty acid compositions of *I. polycarpa* oil[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(10): 183-187.
- [3] 尚祖飞, 徐甜甜, 邹康, 等. 山桐子鲜果干燥方式对山桐子油品质的影响[J]. 中国油脂, 2024, 49(1): 11-15.
- SHANG Z F, XU T T, ZOU K, et al. Effect of drying method of *Idesia polycarpa* fresh fruit on the quality of *Idesia polycarpa* oil[J]. China Oils and Fats, 2024, 49(1): 11-15.
- [4] GUO X N, ZHANG Q, CHEN Y B, et al. A systematic study on composition and antioxidant of 15 varieties of wild *Idesia polycarpa* fruits in China[J]. Frontiers in Sustainable Food Systems, 2023, 7: 1292746.
- [5] 张小平, 邓东周, 鄢武先, 等. 山桐子作为木本油料资源的开发潜力[J]. 四川林业科技, 2011, 32(2): 80-83.
- ZHANG X P, DENG D Z, YAN W X, et al. Great potential of *Idesia polycarpa* as a woody edible oil resource[J]. Journal of Sichuan Forestry Science and Technology, 2011, 32(2): 80-83.
- [6] ZHOU D, ZHOU X, SHI Q L, et al. High-pressure supercritical carbon dioxide extraction of *Idesia polycarpa* oil: evaluation the influence of process parameters on the extraction yield and oil quality[J]. Industrial Crops and Products, 2022, 188(PA): 115586.
- [7] LIU S S, HU H Y, YU Y P, et al. Simultaneous determination of tocopherols, phytosterols, and squalene in vegetable oils by high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Food Analytical Methods, 2021, 14(8): 1 567-1 576.
- [8] 宋明发. 山桐子油提取、精炼工艺优化及抗氧化研究[D]. 贵州: 贵州大学, 2021: 1-88.
- SONG M F. Optimization of extraction and refining process and antioxidant study on *Idesia polycarpa* oil[D]. Guiyang: Guizhou University, 2021: 1-88.
- [9] 艾前进, 艾佳, 王利. 油葡萄(山桐子)油被国家列入普通食品管理[J]. 中国林业产业, 2020(10): 40-41.
- AI Q J, AI J, WANG L. Oil grape (*Idesia polycarpa*) oil is included in the general food management by the state[J]. China Forestry Industry, 2020(10): 40-41.
- [10] 刘一. 油葡萄(山桐子)产业发展情况及市场前景分析[J]. 中国林业产业, 2022(2): 10-18.
- LIU Y. Analysis of the development and market prospects of oil grape (*Idesia polycarpa*) industry[J]. China Forestry Industry, 2022(2): 10-18.
- [11] 汪雪瑞. 山桐子油制备及品质评价[D]. 武汉: 华中农业大学, 2019: 1-107.

- WANG X R. Preparation and quality evaluation of *Idesia polycarpa* Maxim oil[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2019: 1-107.
- [12] 庞贵尹. 新型pH指示膜的制备与应用和山桐子油风味及储藏研究[D]. 成都: 成都大学, 2023: 1-82.
- PANG G Y. Synthesis and application of new pH indicator films and study on flavor and storage of *Idesia polycarpa* Maxim. oil[D]. Chengdu: Chengdu University, 2023: 1-82.
- [13] 陈耀兵, 李美东, 夏兰欣, 等. 顶空固相微萃取结合GC-MS对山桐子(油葡萄)香气成分比较分析[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(3): 163-169.
- CHEN Y B, LI M D, XIA L X, et al. Comparison and analysis of aroma components of *Idesia polycarpa* Maxim. (butter grape) from different varieties by solid-phase microextraction combined with GC-MS[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2022, 37(3): 163-169.
- [14] 叶扬, 王晓萌, 卜贤鲜, 等. 不同提取方法对山桐子果实挥发油成分的影响[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2013, 50(1): 177-181.
- YE Y, WANG X M, BU G X, et al. The effects of different extraction methods on the constituents of volatile oil from *Idesia polycarpa* Maxim[J]. Journal of Sichuan University (Natural Science Edition), 2013, 50(1): 177-181.
- [15] 姚鉴芯, 张哲皓, 张帅, 等. 火麻油水解提取多酚工艺优化及多酚对线虫行为能力的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2022, 41(6): 60-66.
- YAO J X, ZHANG Z G, ZHANG S, et al. Process optimization of polyphenols extracted from hemp seed oil by hydrolysis and influence of *C. elegans* behavior[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2022, 41(6): 60-66.
- [16] 张群. 花生油高质化加工技术研究与应用[J]. 食品与生物技术学报, 2023, 42(5): 112.
- ZHANG Q. Research and application of high quality processing technology for peanut oil[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2023, 42(5): 112.
- [17] 关梦真, 陈复生, 赵宇辉. 水酶法制取植物油研究进展[J]. 食品与机械, 2023, 39(12): 185-191.
- GUAN M Z, CHEN F S, ZHAO Y H. Research trends on the extraction of vegetable oil by aqueous enzymatic method[J]. Food & Machinery, 2023, 39(12): 185-191.
- [18] 胡子聪, 李群和, 苏凤贤, 等. 梔子果油的提取技术、营养成分及健康功效研究进展[J]. 食品与机械, 2024, 40(7): 216-223.
- HU Z C, LI Q H, SU F X, et al. Research progress on extraction techniques, nutritional composition and health benefits of gardenia fruit oil[J]. Food & Machinery, 2024, 40(7): 216-223.
- [19] 王亚娟. 油茶籽油水法冷冻/解冻提取技术的研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2022: 1-70.
- WANG Y J. Study on freezing/thawing extraction of camellia oil by aqueous method[D]. Nanchang: Nanchang University, 2022: 1-70.
- [20] 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, 29(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, 29(7): 370-374.
- [21] 李丽, 蒋景龙, 胡佳乐, 等. HS-SPME-GC-MS与ROAV相结合的4种柑橘果皮精油关键香气物质分析[J]. 现代食品科技, 2024, 40(5): 221-230.
- LI L, JIANG J L, HU J L, et al. Analysis of key aroma compounds in essential oils from the fruit peels of four citrus varieties by HS-SPME-GC-MS combined with relative odor activity value[J]. Modern Food Science & Technology, 2024, 40(5): 221-230.
- [22] 汤海昆, 杨方慧, 张艳梅, 等. 基于HS-SPME-GC-MS分析不同茶树品种晒红茶的香气成分[J]. 食品工业科技, 2023, 44(7): 260-268.
- TANG H K, YANG F H, ZHANG Y M, et al. Analysis of the aroma composition of sun-dried black tea samples processed by different varieties based on HS-SPME-GC-MS[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(7): 260-268.
- [23] 张文龙. 山桐子果和籽的组成、特性与制炼油工艺研究[D]. 无锡: 江南大学, 2023: 1-52.
- ZHANG W L. Research on the composition, characteristics, oil production and refining process of *Idesia polycarpa* pulps and seeds[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2023: 1-52.
- [24] 辛江慧, 胡传双, 涂登云, 等. 影响油茶籽油品质的因素分析[J]. 林产工业, 2024, 61(3): 22-29.
- XIN J H, HU C S, TU D Y, et al. Analysis of factors affecting the quality of *Camellia oleifera* seed oil[J]. China Forest Products Industry, 2024, 61(3): 22-29.
- [25] 曹焰文. HS/SPME-GC×GC-TOFMS联用技术在药食同源食品产地鉴别的应用研究[D]. 广州: 暨南大学, 2021: 1-48.
- CAO L W. Application of headspace solid phase microextraction coupled with comprehensive two-dimensional gas chromatography mass spectrometry in identification of medicine and food homologous products region[D]. Guangzhou: Ji'nan University, 2021: 1-48.
- [26] 孙浩. 清水软枣猕猴桃嫩芽加工工艺优化及其营养品质特性研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2023: 1-51.
- SUN H. Optimization of processing technology for fresh water tender buds of *Actinidia arguta* and the study on nutritional quality characteristics[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural

- University, 2023: 1-51.
- [27] 才可欣. 不同品种草莓冻藏过程中挥发性有机物变化的研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2023: 1-59.
- CAI K X. Study on the changes of volatile organic compounds during freezing and storage of different varieties of strawberries[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2023: 1-59.
- [28] 李锦. 花椒及花椒籽风味油的制取及品质研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2020: 1-94.
- LI J. Study on preparation and quality of *Zanthoxylum bungeanum* and *Zanthoxylum bungeanum* seed flavor oil[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2020: 1-94.
- [29] 王帅. 亚麻籽油的亚临界萃取及氧化稳定性研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2021: 1-66.
- WANG S. Subcritical extraction and oxidative stability of flaxseed oil[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2021: 1-66.
- [30] 李官丽, 吴秋月, 陈锡霞, 等. 干燥方式对油茶粉品质及挥发性风味物质的影响[J]. 食品与机械, 2024, 40(3): 210-216.
- LI G L, WU Q Y, CHEN X X, et al. Effects of drying methods on the quality and volatile flavor compounds of oil tea powder [J]. Food & Machinery, 2024, 40(3): 210-216.
- [31] 朱磊, 黄煜琪, 胡军, 等. 木质素氧化降解衍生芳香族化合物的研究进展[J]. 中国造纸学报, 2024, 39(2): 52-60.
- ZHU L, HUANG Y Q, HU J, et al. Research progress on aromatic compounds derived from lignin oxidative depolymerization[J]. Transactions of China Pulp and Paper, 2024, 39(2): 52-60.
- [32] 黄贺敏, 吴丽香, 邓梅忠, 等. 不同品质烟叶微生物群落与其挥发性成分的关联研究[J]. 食品与生物技术学报, 2022, 41(12): 85-95.
- HUANG H M, WU L X, DENG M Z, et al. Study on the correlation between microbial communities and volatile aroma compounds in tobacco leaves of different qualities[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2022, 41(12): 85-95.
- [33] 周易枚, 吴达, 蒋林惠, 等. 两种工艺芝麻油中挥发性风味物质的鉴别分析[J]. 中国油脂, 2023, 48(10): 39-45.
- ZHOU Y M, WU D, JIANG L H, et al. Identification and analysis of volatile flavor compounds in sesame oils prepared by two different processes[J]. China Oils and Fats, 2023, 48(10): 39-45.
- [34] 刘海, 王进, 许杰, 等. 油茶籽油挥发性风味物质研究进展[J]. 中国油脂, 2023, 48(1): 42-47.
- LIU H, WANG J, XU J, et al. Review on volatile flavor components of oil-tea camellia seed oil[J]. China Oils and Fats, 2023, 48(1): 42-47.
- [35] 李述刚, 霍嘉颖, 欧阳辉, 等. 基于营养与风味双向的核桃油研究进展[J/OL]. 食品科学技术学报. (2023-11-23) [2024-06-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1151.ts.20231123.1014.002.html>.
- LI S G, HUO J Y, OUYANG H, et al. Research progress on walnut oil based on dual orientation of nutrition and flavor[J/OL]. Journal of Food Science and Technology. (2023-11-23) [2024-06-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1151.ts.20231123.1014.002.html>.
- [36] 姚敏, 谢国芳, 杨蓉, 等. 红烧肉制备过程中关键环节的风味化合物分析[J]. 食品与机械, 2022, 38(1): 15-23, 43.
- YAO M, XIE G F, YANG R, et al. Analysis of flavor compounds in the process of stewed pork at key stages[J]. Food & Machinery, 2022, 38(1): 15-23, 43.
- [37] 李东, 何新益, 李云, 等. 辣椒风味牛油加工工艺优化及挥发性物质分析[J]. 食品与机械, 2021, 37(12): 149-154, 214.
- LI D, HE X Y, LI Y, et al. Study on processing technology of chili flavor beef tallow and its volatile compounds analysis[J]. Food & Machinery, 2021, 37(12): 149-154, 214.
- [38] 陈则铭, 赵鑫鑫, 朱晓阳, 等. 基于浸出茶油香气成分压榨茶油掺伪模型及应用[J]. 食品与机械, 2022, 38(3): 51-59, 102.
- CHEN Z M, ZHAO X X, ZHU X Y, et al. Adulteration model establishment of camellia oil based on aroma components extracted from camellia oil and its application[J]. Food & Machinery, 2022, 38(3): 51-59, 102.
- [39] 刘忠英, 方仕茂, 李琴, 等. 加工处理对离蕊金花茶花朵不同部位挥发性组分的影响[J]. 食品与机械, 2023, 39(4): 135-141.
- LIU Z Y, FANG S M, LI Q, et al. Effects of processing on volatile components in different parts of the flowers from *Camellia liberofilamenta*[J]. Food & Machinery, 2023, 39(4): 135-141.
- [40] 魏长庆, 周琦, 刘文玉. HS-SPME-GC-MS 分析新疆胡麻油挥发性成分的技术优化[J]. 食品科学, 2017, 38(14): 151-157.
- WEI C Q, ZHOU Q, LIU W Y. Optimization of headspace solid phase microextraction (HS-SPME) for analysis of volatile constituents of flaxseed oil from Xinjiang by gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) [J]. Food Science, 2017, 38(14): 151-157.
- [41] 王金华, 刘雯玄, 陈佳妮, 等. 基于气相色谱-离子迁移法解析山桐子油挥发性风味物质成分及精炼过程中变化规律[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(8): 52-63.
- WANG J H, LIU W X, CHEN J N, et al. Analysis of volatile flavor components of oil of *Idesia polycarpa* and their changes during refining process based on gas chromatography-ion mobility spectrometry technique[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(8): 52-63.
- [42] 朱晓阳, 龙奇志, 钟海雁. 炒籽温度对茶油关键香气成分及

- 感官品质的影响[J]. 食品与机械, 2019, 35(5): 48-54.
- ZHU X Y, LONG Q Z, ZHONG H Y. Effects of roasted temperature to seed processing on the keyaroma components and sensory quality of camellia oil[J]. Food & Machinery, 2019, 35(5): 48-54.
- [43] 吕虹霞. 低温烘烤胡麻籽对胡麻油挥发性成分的影响[J]. 粮食与油脂, 2022, 35(3): 94-98.
- LYU H X. Effects of low temperature baking flaxseed on volatile components of flaxseed oil[J]. Cereals & Oils, 2022, 35(3): 94-98.
- [44] NIU Y W, WANG R L, XIAO Z B, et al. Characterization of ester odorants of apple juice by gas chromatography-olfactometry, quantitative measurements, odour threshold, aroma intensity and electronic nose[J]. Food Research International, 2019, 120: 92-101.
- [45] 杨芳, 邓凤琳, 贾洪锋, 等. 辣椒面颗粒度对辣椒油理化性质和挥发性风味物质的影响[J]. 食品与机械, 2023, 39(10): 157-165.
- YANG F, DENG F L, JIA H F, et al. Study on the effects of granularity of paprika on physicochemical properties and volatile flavor compounds of chili oil[J]. Food & Machinery, 2023, 39(10): 157-165.
- [46] TORRES M M, MARTÍNEZ M L, MAESTRI D M. A multivariate study of the relationship between fatty acids and volatile flavor components in olive and walnut oils[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2005, 82(2): 105-110.
- [47] 范海英, 袁灿, 乔明锋, 等. 炸制过程中糖醋脆皮鱼风味物质的变化[J]. 食品与机械, 2023, 39(11): 29-37.
- FAN H Y, YUAN C, QIAO M F, et al. The changes of flavor substances of sweet and sour crispy fish during the deep-frying process[J]. Food & Machinery, 2023, 39(11): 29-37.
- [48] 张晨曦, 方学智, 陈则铭, 等. 加工工艺对香榧籽油中挥发性物质组成的影响[J]. 中国油脂, 2024, 49(7): 22-28, 46.
- ZHANG C X, FANG X Z, CHEN Z M, et al. Effects of processing process on the composition of volatile substances in Torreya seed oil[J]. China Oils and Fats, 2024, 49(7): 22-28, 46.
- [49] 韩雪, 张磊, 赵雅菲, 等. 基于CNN和XgBoost的香蕉成熟度判别[J]. 食品与机械, 2024, 40(4): 127-135, 178.
- HAN X, ZHANG L, ZHAO Y F, et al. Banana ripeness determination based on CNN and XgBoost[J]. Food & Machinery, 2024, 40(4): 127-135, 178.
- [50] 陈万超, 吴迪, 肖敏生, 等. 组分差异分析结合智能感官对本草栽培银耳风味特征的分析[J]. 食品与机械, 2024, 40(3): 173-180.
- CHEN W C, WU D, XIAO M S, et al. Analysis of flavor characteristics of herbal cultivated Tremella fuciformis based on component difference analysis and intelligent sensory[J]. Food & Machinery, 2024, 40(3): 173-180.
- [51] 贾菲菲, 王钢力, 冯芳, 等. 基于脂肪酸指纹图谱的我国羊肉产地溯源研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(11): 4 638-4 646.
- JIA F F, WANG G L, FENG F, et al. Study on origin traceability of mutton in China based on fatty acid fingerprint[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(11): 4 638-4 646.
- [52] 邵国莉, 谭占明, 程云霞, 等. 12种马铃薯营养品质测定及综合评价[J]. 食品与机械, 2023, 39(10): 146-149, 174.
- SHAO G L, TAN Z M, CHENG Y X, et al. Determination and comprehensive evaluation of nutritional quality of 12 kinds of potatoes[J]. Food & Machinery, 2023, 39(10): 146-149, 174.
- [53] 范海默特. 化合物香味阈值汇编[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 1-658.
- LEO H. Compilations of flavour threshold values in water and other media[M]. Beijing: Science Press, 2015: 1-658.
- [54] 中拉毛草, 张锐, 林宇红, 等. 两种产地藏羊肉挥发性风味物质和脂肪酸组成比较研究[J]. 保鲜与加工, 2024, 24(1): 48-57.
- ZHONG LA M C, ZHANG R, LIN Y H, et al. Comparative study of volatile flavor substances and fatty acid compositions of tibetan mutton from two regions[J]. Storage and Process, 2024, 24(1): 48-57.
- [55] 何旭峰, 易良键, 郑容, 等. 基于HS-SPME-GC-MS对传统剁椒发酵过程中挥发性成分和关键香气物质分析[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(19): 296-303.
- HE X F, YI J L, ZHENG R, et al. Analysis of volatile components and key aroma substances in the fermentation process of traditional chopped pepper based on HS-SPME-GC-MS[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(19): 296-303.