

预处理方法对亚麻籽油中挥发性化合物及活性成分的影响

朱丽君¹ 陈凤真² 张成爽³ 赵宝义¹ 孟令军⁴

(1. 菏泽市食品药品检验检测研究院, 山东 菏泽 274000; 2. 菏泽学院, 山东 菏泽 274000; 3. 山东省科技服务发展推进中心, 山东 济南 250101; 4. 菏泽市牡丹区畜牧水产服务中心, 山东 菏泽 274000)

摘要: [目的] 探究微波和焙烤预处理方法对亚麻籽油中挥发性化合物及活性成分的影响。[方法] 亚麻籽经微波 (720 W, 2~8 min) 和焙烤 (140~200 °C, 30 min) 预处理后通过冷榨制备亚麻籽油, 以未经预处理的冷榨亚麻籽油为对照, 通过顶空—气相色谱—离子迁移谱 (HS-GC-IMS) 和电子鼻分析各挥发性化合物差异, 并测定生育酚、植物甾醇及总酚含量。[结果] 经 HS-GC-IMS 分析共鉴定出 72 种挥发性化合物, 包括醛类 (20 种)、酮类 (8 种)、杂环类 (14 种) 等。冷榨亚麻籽油以醇类 (53.11%) 和醛类 (20.08%) 为主, 赋予青草和果香气味; 微波和焙烤处理后, 杂环类和酮类显著增加 (最高增幅 16.71% 和 11.22%), 其中 200 °C 焙烤亚麻籽油中杂环类 (21.37%) 是冷榨油的 4.6 倍, 显著提升了坚果和焙烤气味。通过电子鼻可有效区分不同预处理油样, 主成分分析 (PCA) 显示冷榨组与热处理组 (微波、焙烤) 显著分离, 焙烤对气味影响大于微波。适度微波和焙烤处理后制备的亚麻籽油富含更高的 γ -生育酚、植物甾醇和总酚; 而过度微波或焙烤不利于活性成分的保留。[结论] 采用中低温焙烤 (160~180 °C) 或中短时间微波 (4~6 min) 预处理不仅能改善风味品质, 还能减少活性成分的损失, 适用于亚麻籽压榨加工。

关键词: 亚麻籽油; 预处理; 焙烤; 微波; 挥发性风味物质; HS-GC-IMS; 电子鼻; 营养成分

Effects of pretreatment methods on volatile compounds and active ingredients in flaxseed oil

ZHU Lijun¹ CHEN Fengzhen² ZHANG Chengshuang³ ZHAO Baoyi¹ MENG Lingjun⁴

(1. Heze Food and Drug Inspection and Testing Research Institute, Heze, Shandong 274000, China; 2. Heze University, Heze, Shandong 274000, China; 3. Shandong Science and Technology Service Development and Promotion Center, Jinan, Shandong 250101, China; 4. Animal Husbandry and Fishery Service Center of Mudan District, Heze City, Heze, Shandong 274000, China)

Abstract: [Objective] This paper aims to investigate the effects of microwave and roasting pretreatment methods on volatile compounds and active ingredients in flaxseed oil. [Methods] Flaxseeds were pretreated by microwave (720 W, 2~8 min) and roasting (140~200 °C, 30 min), and then flaxseed oil was prepared by cold pressing. Using untreated cold-pressed flaxseed oil as a control, the differences in volatile compounds were analyzed by headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry (HS-GC-IMS) and an electronic nose. Additionally, the contents of tocopherols, phytosterols, and total phenolics were determined. [Results] A total of 72 volatile compounds are identified by HS-GC-IMS analysis, including aldehydes (20 types), ketones (8 types), and heterocyclic compounds (14 types). Cold-pressed flaxseed oil is dominated by alcohols (53.11%) and aldehydes (20.08%), conferring grassy and fruity aromas. After microwave and roasting

基金项目: 山东省科技型中小企业创新能力提升工程计划项目 (编号: 2023TSGC076); 山东省创新平台项目“健康粮油创新技术应用山东省工程研究中心” (编号: 2023981)

通信作者: 陈凤真 (1980—), 女, 菏泽学院教授, 博士。E-mail: 308768305@qq.com

收稿日期: 2025-09-04 **改回日期:** 2026-05-24

引用格式: 朱丽君, 陈凤真, 张成爽, 等. 预处理方法对亚麻籽油中挥发性化合物及活性成分的影响[J]. 食品与机械, 2026, 42(6): 29-38.

Citation: ZHU Lijun, CHEN Fengzhen, ZHANG Chengshuang, et al. Effects of pretreatment methods on volatile compounds and active ingredients in flaxseed oil[J]. Food & Machinery, 2026, 42(6): 29-38.

treatments, heterocyclic compounds and ketones increase significantly (with maximum increases of 16.71% and 11.22%, respectively). Among them, the content of heterocyclic compounds in flaxseed oil roasted at 200 °C (21.37%) is 4.6 times that of cold-pressed oil, significantly enhancing the nutty and roasted aromas. Different pretreated oil samples can be effectively distinguished by the electronic nose. Principal component analysis (PCA) shows a significant separation between the cold-pressed group and heat-treated groups (microwave and roasting), and roasting exerts a greater impact on the aroma than microwave treatment. Flaxseed oil prepared after moderate microwave and roasting treatments is rich in higher levels of γ -tocopherol, phytosterols, and total phenolics; however, excessive microwave or roasting is detrimental to the retention of active ingredients. **[Conclusion]** Pretreatment using moderate-low temperature roasting (160~180 °C) or moderate-short duration microwave (4~6 min) not only improves the flavor quality but also reduces the loss of active ingredients, which is suitable for flaxseed pressing processing.

Keywords: flaxseed oil; pretreatment; roasting; microwave; volatile flavor compound; HS-GC-IMS; electronic nose; nutritional component

亚麻籽油作为现代食用油市场中的新兴油品,凭借其富含 α -亚麻酸的优势,成为营养型植物油的典型代表^[1-3]。冷榨亚麻籽油因具有独特的绿色刺激性气味,不易被大多数消费者接受,制约了市场普及。目前已有学者对预处理工艺与亚麻籽油风味形成展开了相关研究,比如,Chen 等^[4]采用气相色谱—质谱(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)比较研究了不同焙烤预处理(120, 160, 200, 240 °C)亚麻籽油与冷榨亚麻籽油中挥发性化合物的差异,发现吡嗪类物质含量随温度升高显著增加,揭示了高温诱导美拉德反应生成特征香气的分子机制,为风味改善提供了理论基础。除高温焙烤处理外,微波技术也被认为是改善亚麻籽油的功能特性和香气品质的有效预处理技术^[5-6]。

顶空—气相色谱—离子迁移谱(headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry, HS-GC-IMS)作为风味物质分析的一种新型手段,具有无需溶剂、操作简便、灵敏度高、操作简单等优点,已逐渐被应用于各种植物油中挥发性化合物的分析。例如,袁桃静等^[7]基于 HS-GC-IMS 建立了花生油、大豆油、玉米油、油茶籽油、棕榈油中挥发性化合物的差异图谱和指纹图谱。陈通等^[8]基于 HS-GC-IMS 中挥发性物质的特征峰强度结果,将不同植物油(芝麻油、菜籽油、山茶油)进行有效区分。Dou 等^[9]结合 HS-GC-IMS 和化学计量学方法成功将真品芝麻油与掺入芝麻精的假冒产品清晰分离为两组。Sun 等^[10]基于 HS-GC-IMS 建立了不同焙烤温度(120, 180, 240 °C)亚麻籽油的风味指纹图谱。尽管 HS-GC-IMS 在挥发性化合物的定性分析方面表现出色,但为了从整体感官维度进一步表征油脂的风味特征,电子鼻技术常被作为一种互补手段引入研究中。例如,He 等^[11]采用电子鼻比较不同微波时间茶籽油中挥发性化合物的差异,发现茶籽油样品的传感器响应值(W1W、W2W 和 W5S)随着微波预处理时间的延长而增加,表明茶籽油挥发性化合物中的硫化物、有机硫化物和氮氧化物含量随微波预处理时间的延长而增加。因此,结合以上两种风味分析方法有助于全面解析预处理方法对植物油挥发性化合物的影响。

研究拟通过 HS-GC-IMS 和电子鼻分析冷榨亚麻籽油(未经预处理直接压榨样品)、微波亚麻籽油(720 W 下分别处理 2, 4, 6, 8 min 的样品)和焙烤亚麻籽油(分别于 140, 160, 180, 200 °C 下处理 30 min 的样品)中挥发性化合物的组成与特征气味差异,同时分析不同加工预处理条件对活性成分(生育酚、植物甾醇、多酚)的影响,旨在为浓香亚麻籽油的工艺优化提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

亚麻籽:产地甘肃永昌;

正己烷:色谱纯,德国 Meker 公司;

正构烷酮(C₃~C₈)、2-甲基-3-庚酮:色谱纯,美国 Sigma 公司。

1.2 仪器与设备

微波仪:MARS-X 型,美国 CEM 公司;

烘炒机:MS-5 型,常州市金坛迈斯机械有限公司;

榨油机:CA59D 型,科美特(常州)机械设备有限公司;

CTC 气相色谱自动进样器:PAL3 型,瑞士思特斯分析仪器有限公司;

气相色谱:490 型,美国安捷伦公司;

离子迁移谱:FlavorSpec®型,德国 GAS 公司;

MXT-WAX 色谱柱:30 m×0.53 mm, 1.00 μ m, 美国 RESTEK 公司;

电子鼻:PEN3 型,德国 AIRSENSE 公司;

高效液相色谱仪:LC-20A 型,日本岛津公司;

SIL100A 色谱柱:250 mm×4.6 mm, 5 μ m, 日本岛津公司;

DB-5HT 色谱柱:30 m×0.32 mm, 0.1 μ m, 美国安捷伦公司;

紫外可见分光光度计:TU-1901 型,北京普析通用仪器有限责任公司;

电热恒温鼓风干燥箱:DHG-9648A 型,苏州纳冠电子设备有限公司。

1.3 亚麻籽油制备

分别称取若干份亚麻籽(每份 500 g)进行以下不同预处理:①未预热;②微波处理(微波功率 720 W,处理时间 2,4,6,8 min);③焙烤处理(焙烤温度 140,160,180,200 °C,焙烤时间 30 min)。所有处理后的亚麻籽,通过添加蒸馏水将亚麻籽水分含量调节至 7%,并置于 4 °C 环境中过夜以平衡水分,使用榨油机进行冷榨处理。压榨后的亚麻籽油经 8 000 r/min 离心 15 min,得到澄清的冷榨亚麻籽油、微波亚麻籽油和焙烤亚麻籽油。

1.4 亚麻籽油挥发性化合物鉴定

1.4.1 顶空进样条件 准确称取 2.0 g 样品到 20 mL 顶空瓶中,60 °C 孵育 20 min 后进样。采用自动顶空进样方式,不分流进样,进样体积 500 μ L,进样针温度 85 °C,孵化转速 500 r/min^[12]。

1.4.2 GC 条件 选用 MXT-WAX 毛细管色谱柱,柱温设置为 60 °C;载气为高纯氮气(纯度 $\geq$ 99.999%);载气流量程序:初始流量 5 mL/min,保持 2 min;8 min 内线性升至 15 mL/min,10 min 内线性升至 100 mL/min,保持 10 min。

1.4.3 IMS 条件 电离源为氚源(³H);迁移管长度 53 mm;电场强度 500 V/cm;迁移管温度 45 °C;漂移气为高纯氮气(纯度 $\geq$ 99.999%);流量 75.0 mL/min;正离子模式。

1.4.4 数据处理 采用上述条件测试 6 种烷酮混标,建立保留时间和保留指数的校准曲线,随后通过目标物的保留时间计算出该物质的保留指数,使用 VOCal 软件内置的 GC 保留指数(NIST 2020)数据库和 IMS 迁移时间数据库检索和比对,对目标物进行定性分析。利用 VOCal 数据处理软件中的 Reporter 和 Gallery Plot 等插件分别生成挥发性成分的二维谱图、差异谱图及指纹图谱,用于样品间挥发性有机物的对比。采用软件 Excel 对数据进行处理。化合物的相对含量为归一化后的相对峰面积。

1.5 电子鼻分析

使用电子鼻对不同加工预处理亚麻籽油中气味差异进行分析,传感器阵列由 10 个金属氧化物传感器组成,传感器对应的敏感类型挥发性化合物见表 1^[2]。称取 1 g 亚麻籽油到 10 mL 进样瓶中,60 °C 下加热并以 500 r/min 的转速搅拌 600 s。然后,从顶空抽出气体注入传感器腔室,记录数据的时间为 120 s。

1.6 营养成分分析

1.6.1 生育酚测定 参照文献[13]。

1.6.2 植物甾醇测定 参照文献[13]。

1.6.3 总酚测定 采用 Folin-Ciocalteu 比色法^[13]。

1.7 数据统计与分析

所有试验均重复测定 3 次,结果以“平均值 $\pm$ 标准差”表示。采用 SPSS 26.0 软件进行 ANOVA 分析,并进行显著性差异分析($P < 0.05$)。

表 1 电子鼻传感器阵列及其敏感挥发性化合物描述

Table 1 Description of electronic nose sensor array and its sensitive volatile compounds

序号	传感器名称	主要响应物质
1	W1C	芳香族有机化合物
2	W5S	氮氧化物类化合物
3	W3C	氨类化合物及部分芳香族化合物
4	W6S	氢气等小分子气体
5	W5C	烷烃类及部分芳香族化合物
6	W1S	甲烷等短链烃类化合物
7	W1W	硫化物类化合物
8	W2S	醇类及部分含氧挥发性化合物
9	W2W	芳香族化合物及有机硫化物
10	W3S	甲烷及脂肪族有机化合物

2 结果与分析

2.1 预处理方法对亚麻籽油挥发性化合物的影响

从亚麻籽油的二维图谱(图 1(a))可以观察到挥发性化合物主要出现在 0~1 000 s 的区间范围。冷榨亚麻籽油中红色点比较少,当焙烤温度达到 200 °C 时,红色点明显增多,说明挥发性化合物种类和相对含量增加。从差异谱图(图 1(b))可以看出,随着微波时间的增加或焙烤温度的增加,亚麻籽油中挥发性化合物的种类和相对含量逐渐增加。如表 2 所示,经不同预处理后加工制备的亚麻籽油中共检测出 72 种挥发性化合物,包括 20 种醛类、8 种酮类、14 种醇类、2 种酸类、7 种酯类、14 种杂环类和 7 种其他类化合物。预处理方式对亚麻籽油中挥发性化合物的相对含量影响显著,冷榨亚麻籽油中挥发性化合物以醇类(53.11%)为主,其次是醛类(20.08%),而酮类、酯类、杂环类等相对含量较低;经微波或焙烤预处理的亚麻籽油中醇类占比普遍下降,而酮类和杂环类占比明显上升。这表明冷榨工艺能较好保留亚麻籽油原始的气味特征(如清新、绿色气味),而加热预处理会促进油脂的氧化分解或美拉德反应,生成更多的挥发性化合物。

冷榨亚麻籽油中,己醛(单体+二聚体,7.75%)、丙醛二聚体(3.28%)和戊醛二聚体(1.90%)的相对含量较高,这些醛类物质主要赋予青草和油脂气味。2-丙醇(4.54%)、乙醇(4.41%)、2-甲基-1-丙醇(单体+二聚体,7.15%)和 1-己醇(单体+二聚体,8.93%)的相对含量显著高于微波亚麻籽油和焙烤亚麻籽油,醇类主要赋予果香和青草味。酸类物质中,乙酸单体(7.36%)占比最高,赋予油脂汗酸味;经微波和焙烤预处理后亚麻籽油中的酸类物质逐渐减少,可能是高温挥发或参与了酯化反应所致。冷榨亚麻籽油和微波处理 2~4 min 的亚麻籽油中含

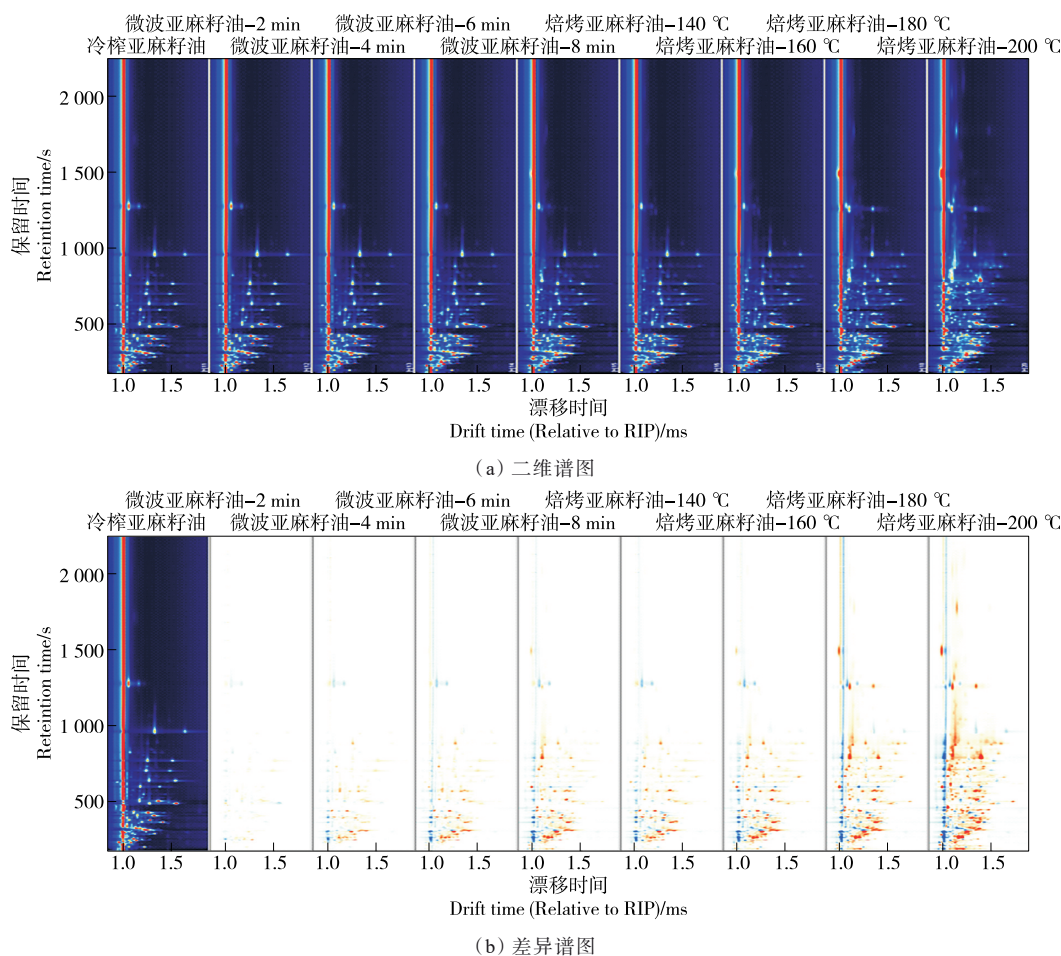


图1 不同预处理亚麻籽油的HS-GC-IMS分析

Figure 1 HS-GC-IMS analysis of flaxseed oils from different pretreatments

有少量的杂环化合物(吡嗪、呋喃、吡啶、噻唑类),而随着微波处理时间延长或焙烤温度升高,例如2-甲基吡嗪在微波处理8 min及200 °C焙烤下,占比分别达到3.17%和6.83%,200 °C焙烤下2,5-二甲基呋喃占比达1.39%。这些吡嗪类化合物也是赋予浓香亚麻籽油中爆米花、坚果和烤肉风味的重要组分。于文龙等^[14]也发现,乙酸是冷榨亚麻籽油特有挥发性化合物,而2,5-二甲基吡嗪、2,3,5-三甲基吡嗪是热榨亚麻籽油特有焙烤气味成分。

微波时间(2~8 min)也对微波亚麻籽油中挥发性化合物具有一定的影响,微波处理2 min的亚麻籽油中醛类的相对含量(18.94%)略低于冷榨亚麻籽油(20.08%),随微波处理时间的延长先逐渐升高,但微波处理时间为8 min时略有下降(22.22%)。微波处理2 min的亚麻籽油中主要是乙醇、1-丙醇-二聚体、2-丙醇、2-丁醇-单体、2-甲基-1-丙醇;微波处理4 min的亚麻籽油中主要是1-戊醇(单体+二聚体)、3-甲基-1-丁醇-单体、1-丁醇(单体+二聚体)、二甲基硫、乙缩醛、2-甲基丙醛;微波处理6~8 min的亚麻籽油中主要是3-甲基丁醛、己醛(单体+二聚体)和

丙酮。这种变化可能与短时间微波促进不饱和脂肪酸氧化生成醛类化合物,但过长时间(8 min)可能导致醛类化合物的相对含量降低。醛类作为中间产物参与进一步氧化或缩合形成其他挥发性化合物(如酮类、醇类),导致其浓度降低^[15-16]。冷榨亚麻籽油中杂环类的相对含量为4.36%,而微波处理8 min的亚麻籽油中杂环类显著增加(9.49%),这是由于微波处理过程中油脂中微量含氮/硫物质参与美拉德反应或环化反应,形成了具有焙烤气味、焦香气味的杂环类化合物^[5]。

焙烤温度(140~200 °C)也对焙烤亚麻籽油中挥发性化合物具有显著的影响。从表2中可以发现,140 °C焙烤的亚麻籽油中己醛、庚醛、戊醛、1-戊烯-3-醇、丁酸甲酯的相对含量较高;160 °C焙烤的亚麻籽油中E-2-庚烯醛、E-2-戊烯醛、香茅醛、1-戊烯-3-酮的相对含量较高;180 °C焙烤的亚麻籽油中2-庚酮、(E)-2-己烯醛、(E)-2-辛烯醛、壬醛、辛醛的相对含量较高;大部分挥发性化合物富集在200 °C焙烤的亚麻籽油中,包括5-甲基-2-糠醛、糠醛、2,4-己二烯醛、1-辛烯-3-酮、 γ -丁内酯、(Z)-3-己烯醇、2-乙酰

表2 预处理方式对亚麻籽油挥发性化合物相对含量的影响

Table 2 Effects of pretreatment methods on relative content of volatile compounds in flaxseed oil

种类	化合物	气味描述	保留时间/s	化合物相对含量/%								
				冷榨亚麻籽油	微波处理				烘烤处理			
					2 min	4 min	6 min	8 min	140 °C	160 °C	180 °C	200 °C
醛类	丙醛-单体	刺鼻,辛辣	237.2	1.24	1.11	0.81	0.66	0.51	0.49	0.47	0.49	0.32
	丙醛-二聚体	刺鼻,辛辣	237.2	3.28	3.02	3.62	4.13	4.24	4.83	4.57	3.79	3.84
	2-甲基丙醛	辛辣,麦芽	242.7	0.30	0.70	1.08	0.94	0.61	0.80	0.82	0.64	0.17
	丁醛-单体	辛辣,青涩	278.3	0.48	0.51	0.59	0.56	0.36	0.56	0.41	0.22	0.16
	丁醛-二聚体	辛辣,青涩	278.7	0.26	0.30	0.61	0.79	0.68	1.03	0.92	0.70	0.31
	乙缩醛	果香,奶油	290.1	1.31	1.22	1.19	1.10	0.90	0.85	0.91	0.58	0.40
	3-甲基丁醛	麦芽	304.5	0.25	0.32	1.39	1.90	1.46	1.83	2.07	1.48	0.61
	戊醛-二聚体	杏仁、麦芽、辛辣	359.9	1.90	1.69	2.26	2.51	1.74	3.05	2.28	1.75	0.55
	戊醛-单体	杏仁、麦芽、辛辣	360.4	1.17	1.13	1.01	0.86	0.60	0.90	0.67	0.53	0.36
	己醛-单体	青草、牛脂、油脂	481.4	2.74	2.79	2.53	2.40	2.30	2.29	2.18	1.86	1.53
	己醛-二聚体	青草、牛脂、油脂	481.8	5.01	3.75	4.27	4.90	4.41	5.24	5.00	4.71	3.12
	(E)-2-戊烯醛-单体	草莓、果香、番茄	568.6	0.30	0.35	0.55	0.66	0.54	0.92	0.86	0.59	0.33
	(E)-2-戊烯醛-二聚体	草莓、果香、番茄	569.2	0.03	0.05	0.13	0.26	0.29	0.63	0.61	0.48	0.38
	庚醛	油脂、柑橘、酸败	662.9	0.11	0.11	0.15	0.21	0.20	0.30	0.25	0.20	0.16
	3-甲基-2-丁烯醛	果香	692.2	0.04	0.07	0.07	0.06	0.06	0.04	0.06	0.10	0.22
	(E)-2-己烯醛	青苹果	711.7	0.15	0.17	0.18	0.21	0.23	0.34	0.43	0.45	0.19
	(Z)-4-庚烯醛	饼干、奶油	745.0	0.02	0.02	0.02	0.02	0.04	0.02	0.02	0.04	0.36
	辛醛	油脂、柠檬	819.2	0.04	0.04	0.04	0.05	0.04	0.06	0.05	0.07	0.06
	(E)-2-庚烯醛	皂感、油脂、杏仁	878.9	0.19	0.26	0.82	0.97	0.80	1.15	1.19	1.01	0.44
	壬醛	油脂、柑橘、绿色	1 030.1	0.11	0.12	0.12	0.14	0.13	0.13	0.16	0.21	0.14
	2,4-己二烯醛	绿色	1 077.9	0.04	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03	0.05	0.20
	(E)-2-辛烯醛	绿色、坚果、油脂	1 112.8	0.24	0.22	0.21	0.24	0.22	0.26	0.24	0.27	0.19
	香茅醛	油脂	1 234.2	0.03	0.04	0.04	0.04	0.03	0.10	0.09	0.06	0.05
	糠醛-单体	面包,杏仁,甜	1 254.3	0.47	0.53	0.46	0.44	1.10	0.48	0.81	3.72	3.71
	糠醛-二聚体	面包,杏仁,甜	1 254.8	0.10	0.12	0.09	0.13	0.14	0.15	0.13	1.53	1.89
	5-甲基-2-糠醛	杏仁,焦糖,焦糖	1 767.4	0.27	0.27	0.37	0.33	0.55	0.43	0.50	0.86	2.72
	总相对含量			20.08	18.94	22.64	24.54	22.22	26.92	25.73	26.39	22.41
酮类	2-丁酮	乙醚	295.2	0.91	1.28	2.64	3.69	5.94	3.92	4.88	5.58	6.35
	2-戊酮	乙醚,果实	358.0	0.66	0.66	1.06	1.64	2.77	2.00	2.97	3.83	5.14
	1-戊烯-3-酮	鱼腥,刺鼻	406.3	0.64	0.68	0.81	1.24	1.26	1.55	1.67	1.36	0.47
	2-庚酮-二聚体	肥皂	655.7	0.03	0.02	0.03	0.10	0.16	0.24	0.50	0.45	0.25
	2-庚酮-单体	肥皂	656.4	0.27	0.27	0.28	0.30	0.36	0.45	0.59	0.50	0.37
	3-羟基-2-丁酮-二聚体	黄油,奶油	819.2	0.19	0.14	0.11	0.16	0.34	0.31	0.51	0.46	0.59
	3-羟基-2-丁酮-单体	黄油,奶油	820.1	1.31	0.97	0.80	0.84	1.26	0.67	0.97	1.77	1.60
	1-辛烯-3-酮	蘑菇,金属	849.3	0.10	0.08	0.18	0.32	0.26	0.27	0.30	0.22	0.34
	5-壬酮	刺鼻	885.8	0.06	0.05	0.05	0.06	0.05	0.05	0.05	0.03	0.05
	5-甲基-2-(3H)-呋喃酮	椰子	1 128.1	0.05	0.04	0.05	0.06	0.09	0.06	0.10	0.20	0.28
	总相对含量			4.22	4.19	6.01	8.41	12.49	9.52	12.54	14.40	15.44
醇类	2-甲基-2-丙醇	似樟脑	307.4	0.64	0.69	1.19	1.36	1.28	1.31	1.22	1.16	1.33
	2-丙醇	酒精、刺激性	309.3	4.54	4.51	3.69	3.00	2.41	2.68	2.18	1.73	1.67

续表 2

种类	化合物	气味描述	保留时间/s	化合物相对含量/%								
				冷榨亚 麻籽油	微波处理				焙烤处理			
					2 min	4 min	6 min	8 min	140 ℃	160 ℃	180 ℃	200 ℃
醇类	乙醇	甜味	317.5	4.41	4.43	3.44	2.87	2.26	2.48	1.71	1.21	0.75
	2-丁醇-单体	酒	402.6	2.39	2.00	1.49	1.30	1.06	1.16	0.93	0.98	0.91
	2-丁醇-二聚体	酒	402.6	3.49	3.80	3.48	3.11	2.76	2.84	2.62	1.92	1.44
	1-丙醇-二聚体	酒精、辛辣	420.5	6.09	5.68	5.20	4.96	4.20	3.74	3.46	2.62	2.62
	1-丙醇-单体	酒精、辛辣	421.1	2.77	2.66	2.21	2.01	1.77	2.06	1.88	1.61	1.20
	2-甲基-1-丙醇-单体	酒、溶剂	497.5	2.76	2.74	2.29	1.93	1.54	1.93	1.45	1.07	0.74
	2-甲基-1-丙醇-二聚体	酒、溶剂	497.8	4.39	5.32	5.11	4.74	4.29	4.45	4.30	3.45	3.07
	3-戊醇	水果	520.6	0.28	0.35	0.32	0.33	0.27	0.31	0.28	0.19	0.11
	1-丁醇-单体	药、水果	592.6	2.45	2.63	2.50	2.20	1.44	2.16	1.29	0.72	0.50
	1-丁醇-二聚体	药、水果	593.2	0.67	0.78	0.74	0.60	0.18	0.60	0.13	0.02	0.05
	1-戊烯-3-醇	黄油、辛辣	623.1	0.61	0.57	0.65	0.77	0.82	1.17	1.16	0.95	0.77
	3-甲基-1-丁醇-单体	威士忌、麦芽	698.1	1.92	2.09	2.00	1.96	1.68	1.91	1.83	1.27	0.92
	3-甲基-1-丁醇-二聚体	威士忌、麦芽	698.1	1.43	2.00	2.08	2.13	1.76	2.02	1.88	1.26	0.74
	1-戊醇-单体	香醋	763.8	3.68	3.96	3.83	3.75	3.03	3.59	3.30	2.60	2.47
	1-戊醇-二聚体	香醋	763.8	1.88	2.35	2.40	2.47	2.10	2.37	2.29	1.83	0.76
	3-甲基-1-戊醇	发酵	838.0	0.05	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03
	1-己醇-单体	树脂、花香、青草	957.6	6.17	6.35	5.87	5.86	5.32	5.49	5.08	4.19	3.14
	1-己醇-二聚体	树脂、花香、青草	958.0	2.76	2.92	2.74	2.69	2.35	2.48	2.15	1.68	1.12
	(Z)-3-己烯醇	青草	1 036.3	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.17
	总相对含量			53.41	55.90	51.29	48.10	40.58	44.82	39.20	30.53	24.51
酸类	乙酸-单体	酸味	1 271.3	7.36	6.34	5.05	4.39	3.95	3.77	3.42	2.77	2.60
	乙酸-二聚体	酸味	1 272.7	1.15	0.79	0.47	0.35	0.32	0.27	0.24	0.25	0.29
	3-甲基丁酸	汗味、酸味	2 093.1	0.48	0.41	0.38	0.37	0.36	0.38	0.39	0.48	0.82
	总相对含量			8.99	7.54	5.90	5.11	4.63	4.42	4.05	3.5	3.71
酯类	乙酸甲酯	甜味	256.8	0.21	0.40	0.88	1.25	2.23	1.35	3.00	3.40	3.95
	乙酸乙酯-单体	菠萝	282.8	0.49	0.46	0.31	0.25	0.22	0.19	0.20	0.18	0.16
	乙酸乙酯-二聚体	菠萝	283.3	1.14	1.15	0.99	0.88	0.90	0.51	0.80	0.92	1.02
	乙酸丙酯-二聚体	水果	352.2	0.16	0.14	0.14	0.11	0.09	0.09	0.08	0.07	0.07
	乙酸丙酯-单体	水果	352.6	0.39	0.36	0.40	0.41	0.42	0.25	0.35	0.46	0.39
	丁酸甲酯	果香	386.8	0.47	0.64	0.95	1.02	0.91	1.09	0.98	0.80	0.64
	3-甲基丁酸乙酯	果味	454.6	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	0.03	0.56
	1-羟基-2-丙酮乙酸酯	黄油、坚果味	1 313.0	0.25	0.22	0.20	0.19	0.28	0.18	0.19	0.31	1.37
	γ-丁内酯	焦糖味、甜味	2 009.6	0.49	0.58	0.52	0.55	0.64	0.62	0.69	0.64	0.94
	总相对含量			3.62	3.97	4.41	4.69	5.72	4.30	6.31	6.81	9.10
杂环类	2,5-二甲基呋喃	烤肉	316.8	0.07	0.06	0.11	0.19	0.32	0.22	0.42	0.65	1.39
	2-乙基呋喃	坚果	332.6	1.35	1.27	1.05	0.94	0.84	0.91	0.77	0.65	1.20
	吡啶-单体	酸败	662.4	0.64	0.55	0.49	0.44	0.70	0.38	0.73	1.34	1.36
	吡啶-二聚体	酸败	662.9	0.03	0.03	0.04	0.08	0.09	0.12	0.13	0.13	0.30
	吡嗪-单体	焙烤	706.0	0.59	0.49	0.42	0.41	1.35	0.46	0.55	1.57	2.40
	吡嗪-二聚体	焙烤	706.5	0.10	0.11	0.10	0.08	0.08	0.08	0.07	0.10	0.65
	2-戊基呋喃	青豆、黄油	727.1	0.59	0.60	0.54	0.52	0.43	0.52	0.47	0.43	0.32

续表 2

种类	化合物	气味描述	保留时间/s	化合物相对含量/%								
				冷榨亚麻籽油	微波处理				焙烤处理			
					2 min	4 min	6 min	8 min	140 ℃	160 ℃	180 ℃	200 ℃
杂环类	噻唑	焙烤	759.9	0.26	0.25	0.22	0.21	0.26	0.20	0.20	0.26	0.56
	2-甲基吡嗪-单体	爆米花	783.8	0.20	0.19	0.22	0.61	3.17	1.03	2.26	4.13	2.81
	2-甲基吡嗪-二聚体	爆米花	783.8	0.12	0.13	0.16	0.15	0.95	0.20	0.47	2.83	6.83
	2,5-二甲基吡嗪-单体	可可、焙烤坚果	868.6	0.02	0.02	0.04	0.12	0.34	0.11	0.40	0.66	0.81
	2,5-二甲基吡嗪-二聚体	可可、焙烤坚果	870.8	0.02	0.02	0.03	0.03	0.05	0.03	0.06	0.16	0.41
	2,3-二甲基吡嗪	坚果、花生酱	916.2	0.04	0.04	0.05	0.15	0.32	0.20	0.40	0.58	0.72
	2,4,5-三甲基噻唑	泥土	1 009.1	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.02	0.03	0.14
	2,3,5-三甲基吡嗪	焙烤、土豆、芥末	1 039.2	0.02	0.02	0.04	0.03	0.03	0.02	0.04	0.08	0.10
	2-乙基-3,5-二甲基吡嗪	土豆	1 194.6	0.07	0.08	0.06	0.05	0.06	0.07	0.09	0.11	0.21
	2-乙酰基呋喃	香醋	1 389.6	0.09	0.08	0.09	0.12	0.14	0.09	0.14	0.26	0.58
	2-乙酰基噻唑	焙烤、坚果、硫磺	2 024.2	0.12	0.29	0.74	0.82	0.32	0.30	0.35	0.41	0.58
	总相对含量			4.36	4.26	4.43	4.98	9.49	4.97	7.57	14.38	21.37
其他类	γ -萜品烯	汽油、松节油	751.1	0.03	0.03	0.03	0.03	0.05	0.03	0.05	0.13	0.20
	对伞花烃	溶剂、汽油、柑橘	800.4	0.05	0.07	0.06	0.06	0.05	0.04	0.05	0.03	0.03
	邻二甲苯	天竺葵	656.3	0.18	0.17	0.16	0.14	0.13	0.12	0.11	0.09	0.11
	吡咯烷	碱性	391.7	1.05	1.02	1.47	1.61	1.40	1.65	1.45	1.10	0.72
	3-丁烯腈	刺鼻	681.7	0.01	0.02	0.03	0.03	0.04	0.02	0.03	0.06	0.16
	二甲基硫	卷心菜、硫磺	223.1	3.85	3.82	3.91	3.56	3.12	3.13	2.84	2.52	2.00
	2-呋喃甲硫醇	咖啡、烘焙	1 155.3	0.07	0.08	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06	0.09	0.23
	总相对含量			5.24	5.21	5.73	5.49	4.85	5.05	4.59	4.02	3.45

基呋喃、2,5-二甲基呋喃、2-呋喃甲硫醇、2,3-二甲基吡嗪、2,5-二甲基吡嗪、2-甲基吡嗪、2,3,5-三甲基吡嗪、2-乙基-3,5-二甲基吡嗪、吡嗪、2-乙酰基噻唑、2,4,5-三甲基噻唑、噻唑、吡啶、3-甲基丁酸。200 ℃焙烤亚麻籽油中杂环类(21.37%)是冷榨亚麻籽油(4.97%)的4.6倍,且远高于微波亚麻籽油的(9.49%),推测高温(200 ℃)下油脂与微量氨基酸/还原糖发生美拉德反应,或油脂自身环化,使杂环类化合物大量生成。

综上,微波与焙烤处理均能显著降低醇类含量并提升杂环类含量,且加工强度越高,杂环类增加越显著,这与愉悦的焙烤香气密切相关。而热加工通过脂质降解、美拉德反应及Strecker降解等途径^[6,17-21],显著改变了亚麻籽油的挥发性成分谱,其中吡嗪类、醛类与酮类是构成热加工亚麻籽油特征风味(坚果、焙烤)的核心物质^[2,5,12]。

对亚麻籽油中挥发性化合物进行正交偏最小二乘法判别分析(orthogonal partial least squares-discriminant analysis,OPLS-DA),结果如图2(a)所示,冷榨亚麻籽油与短时间微波处理组聚集在第一、四象限,表明其风味特征相似。焙烤处理的亚麻籽油(160~180 ℃)和微波处理8 min的亚麻籽油在第二象限,200 ℃焙烤处理的亚麻籽

油在第三象限,说明高温处理显著改变了亚麻籽油的挥发性化合物组成。此外,置换检验($n=200$)证实模型不存在过拟合(右侧的 R^2 和 Q^2 值高于左侧),见图2(b),说明模型具有良好的解释能力和预测能力。从OPLS-DA中筛选出变量投影重要性(variable importance in projection,VIP)>1的差异标志物有28种,包括8种醛类、10种醇类、4种酮类、1种酸类、2种酯类、2种杂环类和1种属于其他类别的硫化物,详见图2(c)。

2.2 预处理方法对亚麻籽油气味的影响

基于电子鼻传感器分析经不同预处理后加工的亚麻籽油中气味差异,发现冷榨亚麻籽油中W5S、W1W、W2W出现弱响应,这是由于冷榨亚麻籽油中油脂氧化和热分解反应较弱,挥发性化合物以原料本身的特征成分为主,整体气味较清淡。微波处理因中等温度促进氧化,醛类和酮类成为主要气味来源;焙烤处理因高温长时间处理,引发美拉德反应从而生成大量的挥发性化合物,导致气味最复杂浓郁,见图3(a)。电子鼻传感器可通过W5S、W2W、W1W的响应强度,有效区分3种处理方式对油脂气味的影响。He等^[11]也发现了相似的规律,即通过电子鼻传感器(W1W、W2W和W5S)可以有效区分不同微波时间下茶籽油的风味差异。

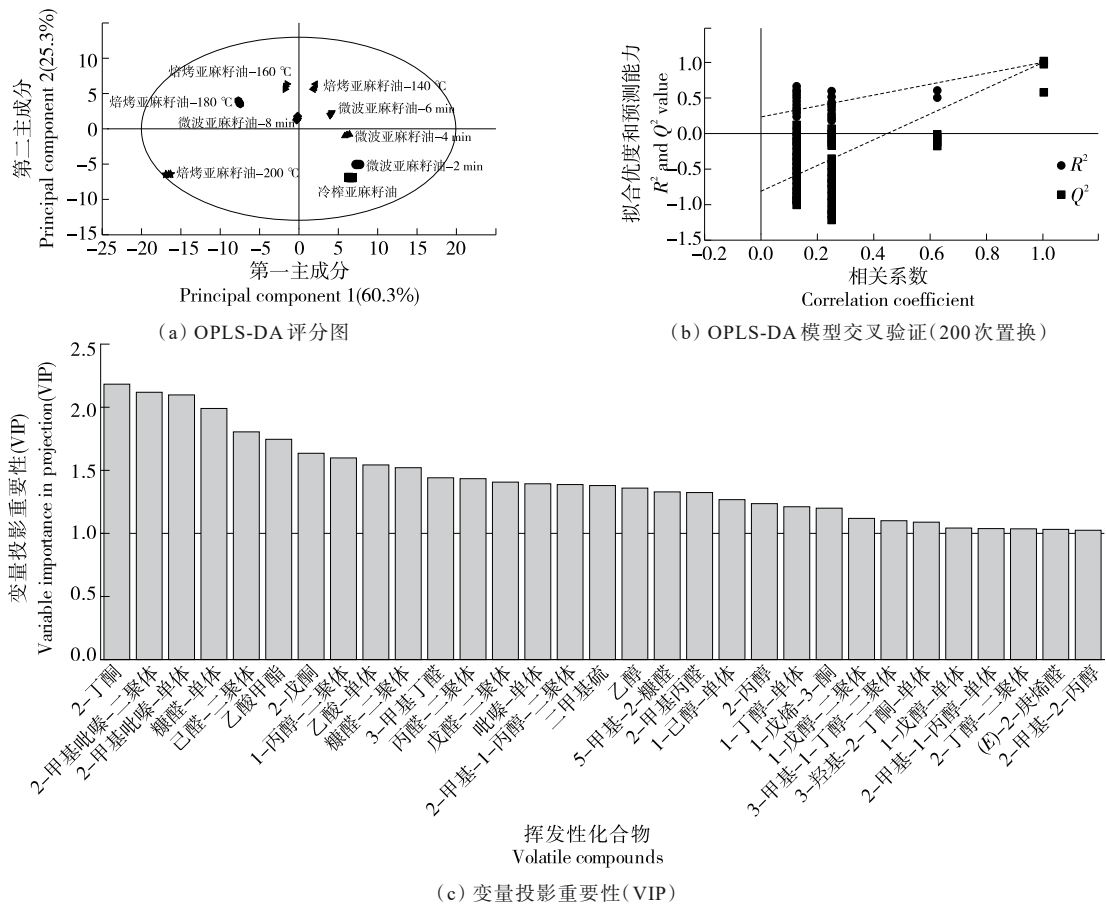


图 2 不同预处理亚麻籽油中挥发性化合物的多元统计分析

Figure 2 Multivariate statistical analysis of volatile compounds in flaxseed oils from different pretreatments

如图 3(b)所示,两主成分累计解释了原始数据 91.3% 的方差,表明降维效果良好,能够有效反映样本间的差异。随微波时间延长 (2~8 min),样本在第二主成分 (principal component 2, PC2) 轴上呈现从下向上逐渐偏移的趋势,表明微波时间变化能够显著影响焙烤亚麻籽油的气味。随温度升高 (140~200 °C),焙烤亚麻籽油在第一

主成分 (principal component 1, PC1) 轴上呈现从左向右逐渐偏移的趋势,表明焙烤温度显著影响焙烤亚麻籽油的气味。冷榨组亚麻籽油位于图中左下角,与所有热处理样本 (微波、焙烤) 显著分离,表明热处理均会导致亚麻籽油的特征指标发生显著改变。PC1 (71.5%) 主要区分焙烤组 (正半轴) 与微波/冷榨组 (负半轴),说明焙烤处理对亚

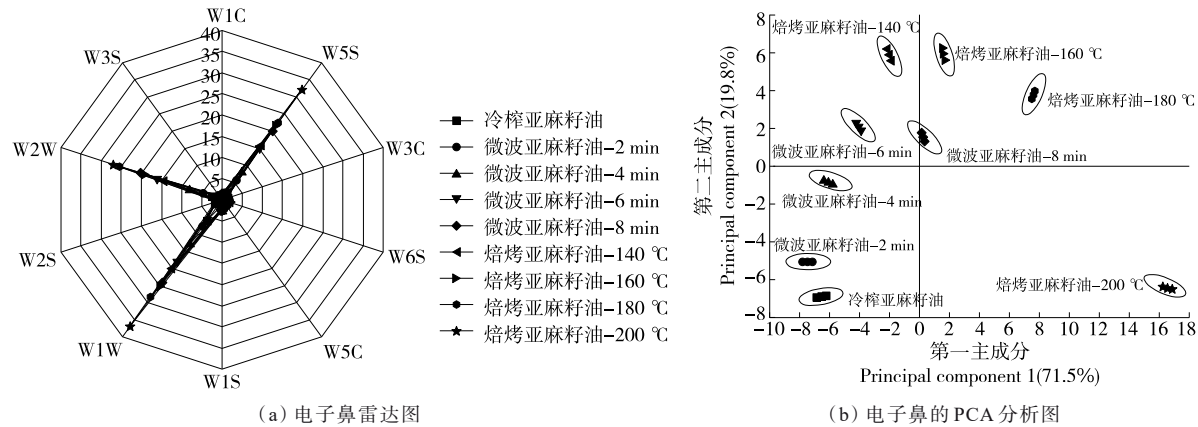


图 3 不同加工预处理亚麻籽油的气味评价

Figure 3 Odor evaluation of flaxseed oils with different processing pretreatments

麻籽油的整体特征影响更大,可能与长时间高温加热导致的氧化、分解反应更剧烈有关。

2.3 预处理方法对亚麻籽油活性成分的影响

活性成分是评价压榨亚麻籽油品质的重要指标。由表3可知, γ -生育酚、植物甾醇和总酚含量分别为29.8~43.7 mg/100 g、509.6~602.3 mg/100 g 和 158.1~255.3 mg GAE/100 g。相比冷榨亚麻籽油,适度的微波处理(2~6 min)和焙烤处理(140~180 °C),可以提高 γ -生育酚和植物甾醇含量;但微波时间过长(8 min)或焙烤温度过高(200 °C), γ -生育酚和植物甾醇含量下降,这可能与过度热处理过程中营养伴随物发生氧化或热降解有关^[22]。总酚含量随着微波时间的增加而增加,该变化趋势与Suri等^[16]的研究结果一致,但余盖文等^[22]却发现相比冷榨亚麻籽油,微波亚麻籽油中多酚含量降低。这可能与亚麻籽基因型、加工条件及酚类化合物测定技术存在差异有关。上述结果说明,适度预处理有利于促进亚麻籽中营养组分的释放及向油相迁移,但过度处理不利于其保留。

表3 不同预处理亚麻籽油中营养指标的含量[†]

Table 3 Content of nutritional indicators in flaxseed oils with different pretreatments mg/100 g

样品	γ -生育酚	植物甾醇	总酚
冷榨亚麻籽油	30.6±0.7 ^f	509.6±5.4 ^f	158.1±5.6 ^h
微波处理2 min	35.2±1.2 ^d	548.0±4.8 ^d	169.2±4.8 ^g
微波处理4 min	40.6±1.3 ^b	576.0±6.2 ^{bc}	192.4±5.3 ^e
微波处理6 min	39.4±0.8 ^{bc}	586.4±5.0 ^b	220.6±2.5 ^c
微波处理8 min	32.4±0.9 ^e	547.6±7.1 ^d	255.3±8.9 ^a
140 °C焙烤	34.0±1.4 ^{de}	540.8±4.2 ^{de}	170.7±6.1 ^g
160 °C焙烤	43.7±1.0 ^a	567.2±6.4 ^c	183.7±6.5 ^f
180 °C焙烤	38.2±1.2 ^c	602.3±5.8 ^a	213.5±5.0 ^d
200 °C焙烤	29.8±0.8 ^f	532.6±4.6 ^e	235.2±7.2 ^b

[†] 同列数据上标小写字母不同表示组间差异显著($P<0.05$)。

3 结论

采用顶空—气相色谱—离子迁移谱和电子鼻分析了冷榨亚麻籽油(未经预处理直接压榨样品)、微波亚麻籽油(720 W下分别处理2,4,6,8 min的样品)和焙烤亚麻籽油(分别于140,160,180,200 °C下处理30 min的样品)中的挥发性化合物,共鉴定出72种挥发性化合物,其中冷榨亚麻籽油以醇类和醛类为主。通过绘制顶空—气相色谱—离子迁移谱指纹图谱,获得了微波亚麻籽油和焙烤亚麻籽油的特征挥发性化合物。随着微波时间延长,醛类、酮类化合物含量先升后降,杂环类化合物含量在8 min时显著增加,可以通过控制时间(如6 min),避免醛类化合物过度氧化。焙烤预处理温度是关键影响因素,

高温(160~180 °C)显著促进酮类、酯类和杂环类化合物生成,尤其是杂环类化合物的增加赋予了油脂更复杂的焙烤香、坚果香,但200 °C下可能因醇类化合物过度损失和杂环类化合物过多导致风味失衡。电子鼻能够较好地区分不同预处理加工条件亚麻籽油。适度微波和焙烤处理有利于提高 γ -生育酚、植物甾醇和总酚等营养伴随物含量,但过度微波或高温焙烤不利于其保留。总之,若需保留亚麻籽油的天然风味,优先选择冷榨工艺;若需增强风味多样性,可采用中低温焙烤(160~180 °C)或中短时间微波(4~6 min),避免高温或长时间加热导致油脂过度氧化和风味劣变。

参考文献

- [1] 袁彬宏,陈亚淑,周琦,等. 亚麻籽油挥发性风味物质研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(19): 290-298.
YUAN B H, CHEN Y S, ZHOU Q, et al. Advances in the study of volatile flavor substances in flaxseed oil[J]. Food Science, 2023, 44(19): 290-298.
- [2] YU G W, JIA X. Unlocking key odor-active compounds in cold-pressed, roasted, microwaved and steam-exploded flaxseed oils using a sensomics approach[J]. LWT-Food Science and Technology, 2025, 231: 118347.
- [3] LI J L, XIAO Y Q, DU Y, et al. Enhancing sensory acceptance of roasted flaxseeds: the role of degumming and roasting conditions[J]. Food Chemistry, 2025, 474: 143128.
- [4] CHEN Z L, YANG J W, FU Y X, et al. Innovative insights into the roasting-driven transformation of volatile compounds and quality markers in flaxseed (*Linum usitatissimum* L.) oil[J]. Journal of Food Science, 2024, 89(9): 5 576-5 593.
- [5] YANG Y N, DENG Q C, JIA X, et al. Characterization of key odorants in peeled and unpeeled flaxseed powders using solvent-assisted flavor evaporation and odor activity value calculation [J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 138: 110724.
- [6] HOU L X, ZHANG Y J, CHEN L Y, et al. A comparative study on the effect of microwave and conventional oven heating on the quality of flaxseeds[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 139: 110614.
- [7] 袁桃静,赵笑颖,庞一扬,等. 基于电子鼻、HS-GC-IMS和HS-SPME-GC-MS对5种食用植物油挥发性风味成分分析[J]. 中国油脂, 2020, 45(9): 102-111.
YUAN T J, ZHAO X Y, PANG Y Y, et al. Detection of volatile flavor compounds in five edible vegetable oils by electronic nose, HS-GC-IMS and HS-SPME-GC-MS[J]. China Oils and Fats, 2020, 45(9): 102-111.
- [8] 陈通,陆道礼,陈斌. GC-IMS技术结合化学计量学方法在食用植物油分类中的应用[J]. 分析测试学报, 2017, 36(10): 1 235-1 239.
CHEN T, LU D L, CHEN B. Application of headspace/gas

- chromatography-tandem ion mobility spectrometry with chemometrics in classification of edible vegetable oils[J]. Journal of Instrumental Analysis, 2017, 36(10): 1 235-1 239.
- [9] DOU X J, ZHANG L X, YANG R N, et al. Adulteration detection of essence in sesame oil based on headspace gas chromatography-ion mobility spectrometry[J]. Food Chemistry, 2022, 370: 131373.
- [10] SUN X L, WAN Y L, HAN J J, et al. Analysis of volatile compounds and flavor fingerprint in hot-pressed flaxseed oil processed under different roasting conditions using headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry[J]. Food Analytical Methods, 2023, 16(5): 888-899.
- [11] HE J H, WU X H, YU Z L. Microwave pretreatment of camellia (*Camellia oleifera* Abel.) seeds: effect on oil flavor [J]. Food Chemistry, 2021, 364: 130388.
- [12] JIA X, ZHOU Q, HUANG D, et al. Insight into the comparison of key aroma-active compounds between camellia oils from different processing technology[J]. Food Chemistry, 2024, 430: 137090.
- [13] YU G W, GUO T T, HUANG Q D, et al. Preparation of high-quality concentrated fragrance flaxseed oil by steam explosion pretreatment technology[J]. Food Science & Nutrition, 2020, 8 (4): 2 112-2 123.
- [14] 于文龙, 郝楠, 吴凯晋, 等. HS-SPME-GC-MS-O 联用分析不同加工工艺亚麻籽油特征香气成分[J]. 食品科学, 2019, 40 (18): 266-272.
- YU W L, HAO N, WU K J, et al. Analysis of characteristic aroma components of flaxseed oils obtained by different processing techniques by HS-SPME-GC-MS-O[J]. Food Science, 2019, 40(18): 266-272.
- [15] SUN G H, SUN S D, ZHANG H, et al. Effect of roasting treatment on flavor and quality of fragrant corn oil[J]. Food Chemistry, 2025, 492: 145426.
- [16] SURI K, SINGH B, KAUR A, et al. Influence of microwave roasting on chemical composition, oxidative stability and fatty acid composition of flaxseed (*Linum usitatissimum* L.) oil[J]. Food Chemistry, 2020, 326: 126974.
- [17] XU S, GUO Q, JIN Y X, et al. Enzyme treatment combined with Maillard reaction modification of sunflower meal hydrolysates to prepare sunflower seed oil flavor enhancer[J]. Food Chemistry, 2025, 489: 144965.
- [18] 衡新蕊, 王天亮, 姚云平, 等. 冷榨亚麻籽油特征风味成分分析[J]. 食品科学, 2024, 45(2): 211-217.
- HENG X R, WANG T L, YAO Y P, et al. Analysis of characteristic flavor components in cold-pressed flaxseed oil [J]. Food Science, 2024, 45(2): 211-217.
- [19] YUAN B H, WEI X Y, YANG Y N, et al. Lipidomics reveals the formation of key aroma compounds in flaxseed oil during seed roasting[J]. Food Chemistry, 2025, 490: 145089.
- [20] 韩国玮, 吕虹霞, 田欢, 等. 焙烤和微波两种不同加工方式对亚麻籽品质的影响比较分析[J]. 中国调味品, 2024, 49(5): 71-75.
- HAN G W, LYU H X, TIAN H, et al. Comparative analysis of effects of two different processing methods roasting and microwave on quality of flaxseed[J]. China Condiment, 2024, 49(5): 71-75.
- [21] WEN Y J, WANG L H, ZHAI M, et al. Integrating HS-SPME-GCMS with chemometrics for identifying adulterated flaxseed oils and tracing origins of additives[J]. Food Control, 2025, 176: 111391.
- [22] 余盖文, 史训旺, 洪梦佳, 等. 炒籽温度对压榨亚麻籽油品质的影响[J]. 中国油脂, 2019, 44(6): 29-33.
- YU G W, SHI X W, HONG M J, et al. Effects of frying temperature of flaxseed on quality of pressed flaxseed oil[J]. China Oils and Fats, 2019, 44(6): 29-33.