

真空冷冻干燥和超声波预处理 对植物油品质特性的影响

王淑珍¹, 王进英¹, 雷 风¹, 甘生睿¹, 苏学民², 白 琴², 陈 霞¹, 王树林¹

(1. 青海大学农牧学院, 西宁 810016; 2. 青海通达油脂加工有限责任公司, 青海 海东 810500)

摘要:为探究低温预处理技术对植物油品质的影响,以油菜籽、亚麻籽、花生、葵花籽、芝麻为原料,进行超声波和真空冷冻干燥预处理,采用螺旋榨油机压榨制油,分析植物油感官指标(色泽、气味、黏度、透明度、滋味)、理化指标(酸值、过氧化值、色泽、水分及挥发物)、营养组分(脂肪酸、甘油三酯、总酚、维生素E)及挥发性组分的变化。结果表明:经超声波预处理,植物油的透明度、滋味和气味较好,而真空冷冻干燥预处理植物油的黏度、气味和滋味与未处理组相比变化不明显;经2种方式预处理后,5种植物油的酸值和过氧化值均符合食品安全国家标准,脂肪酸和甘油三酯组成及含量无显著性变化($p > 0.05$),但挥发性成分有明显变化;经真空冷冻干燥和超声波预处理,除超声波预处理葵花籽油外,植物油中总酚含量分别是未处理组的1.04~1.90倍和1.10~1.55倍,除菜籽油外,植物油中维生素E含量分别比未处理组增加了0.50%~26.56%和1.40%~49.99%。总体而言,超声波和真空冷冻干燥预处理不会造成植物油感官品质、脂肪酸和甘油三酯含量的下降,且能提高微量营养组分的含量,获得综合品质较好的植物油。

关键词:植物油;真空冷冻干燥;超声波;预处理;品质

中图分类号:TS224.2;TS225.1 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2023)10-0025-08

Effect of vacuum freeze-drying and ultrasonic pretreatments on quality characteristics of vegetable oils

WANG Shuzhen¹, WANG Jinying¹, LEI Feng¹, GAN Shengrui¹,
SU Xuemin², BAI Qin², CHEN Xia¹, WANG Shulin¹

(1. College of Agriculture and Animal Husbandry, Qinghai University, Xining 810016, China;
2. Qinghai Tongda Oil Processing Co., Ltd., Haidong 810500, Qinghai, China)

Abstract: In order to investigate the effect of low-temperature pretreatment technology on the quality of vegetable oils, rapeseed, flaxseed, peanut, sunflower seed and sesame were used as raw materials, they were pretreated with ultrasonic and vacuum freeze-drying, the oil was extracted by screw press, and the changes of sensory indexes (colour, odour, viscosity, transparency, taste), physicochemical indexes (acid value, peroxide value, colour, moisture and volatile compounds), nutritional components (fatty acids, triglycerides, total phenols, vitamin E) and volatile components of vegetable oils were analyzed. The results showed that the transparency, taste and odour of the vegetable oils were better after ultrasonic pretreatment, while the viscosity, odour and taste of the vacuum freeze-drying pretreated vegetable oils

did not change significantly compared with those of untreated group. The acid value and peroxide value of the five vegetable oils after the two pretreatments complied with the national standards for food safety, and there were no significant changes in the fatty acid and triglyceride composition and content ($p > 0.05$), but there

收稿日期:2022-07-23;修回日期:2023-07-13

基金项目:青海省企业研究转化与产业化专项(2021-NK-C19)

作者简介:王淑珍(1998),女,在读硕士,研究方向为油脂加工与利用(E-mail)1824115809@qq.com。

通信作者:王进英,副教授,硕士生导师,博士(E-mail) wangjinying0128@126.com。

were significant changes in the volatile compounds. After vacuum freeze - drying and ultrasonic pretreatment, the total phenol content of vegetable oils, except ultrasonic pretreated sunflower seed oil, was 1.04 - 1.90 times and 1.10 - 1.55 times that of the untreated group, respectively; and the vitamin E content of vegetable oils, except rapeseed oil, was increased by 0.50% - 26.56% and 1.40% - 49.99%, respectively, compared with that of the untreated group. In general, ultrasonic and vacuum freeze - drying pretreatment don't cause the decrease of sensory quality, fatty acid and triglyceride content of vegetable oils, and increase the content of micronutrient components to obtain vegetable oil with better comprehensive quality.

Key words: vegetable oil; vacuum freeze - drying; ultrasound; pretreatment; quality

植物油是日常饮食和食品工业生产的重要组成部分,不仅提供了脂肪酸等主体营养成分,而且富含甾醇、生育酚、角鲨烯和多酚等微量营养成分,这些营养成分被证明具有预防心脑血管疾病^[1]、改善胆固醇水平、降血脂^[2]、抗氧化^[3]和调节炎症^[3]的作用。近年来,我国主要植物油消费总量持续增长,其中大豆油、菜籽油、棕榈油和花生油消费量较大,占总消费量的 94.50%^[4],以米糠油、玉米胚芽油、葵花籽油、芝麻油和油茶籽油为主的小品种植物油快速发展,呈现出相对较快的消费增长势头。

为满足不断增长的植物油需求,迫切需要寻找高出油率且保持植物油优良品质的制油方法。在我国,溶剂浸提和机械压榨是商品化生产植物油的主要方法,溶剂浸提法提油率高,但存在环境污染的缺点^[5],与之相比,机械压榨法提油率低,但操作简单,无溶剂污染。压榨分低温压榨和热榨两种工艺,热榨比低温压榨出油率高,但会导致油料的蛋白质变性和溶解性降低,从而限制其在食品工业中的应用。在低温压榨工艺中,低温限制了酶的活性,阻止油料中次要成分(芥子苷和棉酚等)转移到油中,可以保留更多的热敏性生物活性成分^[6]。此外,低温压榨工艺可以避免蛋白质的变性。然而,低温压榨工艺的低出油率是限制其广泛应用的关键问题。

采用红外烘烤、焙炒、微波、超声波和真空冷冻干燥等油料预处理技术不仅可提高出油率和油脂品质指标,还可缩短榨油时间,减少溶剂的使用。油料经过高温预处理会导致饼粕蛋白质变性、油脂氧化以及脂肪酸、甾醇、酚类化合物和生育酚含量的变化^[7]。然而,低温预处理能最大程度地避免高温预处理引起的营养物质损失和脂肪酸败,如超声波预处理通过机械、声空化和海绵效应(组织的连续扩张和压缩)破坏植物基质的细胞壁,使液体从植物内部释放到表面,产生的微观通道更有利于物质的

交换^[8]。Panadare 等^[9]研究表明,超声波预处理缩短了苹果籽油的提取时间,提高了 2.53% 的产率。Esposito 等^[10]研究表明,超声波预处理提高了火麻籽油得率,且对压榨饼的质构及油脂抗氧化活性有积极影响。真空冷冻干燥(冻干)可以通过低压诱导水分蒸发,低氧分压的环境有利于减缓油料中油脂的氧化^[11],而且低温处理可以最大限度地保留物料原有的性质,如抗氧化活性、风味和形状等^[12]。贾雪峰等^[13]研究表明,经真空冷冻干燥预处理,番茄籽油饱和脂肪酸含量较低(22.33%),而不饱和脂肪酸含量较高(77.67%),且抗氧化活性最高。

本文以感官指标(色泽、气味、透明度、黏度、滋味)、理化指标(酸值、过氧化值、水分及挥发物、色泽)、营养成分(脂肪酸、甘油三酯、总酚、维生素 E)和挥发性组分为评价依据,研究了真空冷冻干燥和超声波预处理对 5 种植物油品质的影响,以期获得高品质植物油的低温预处理技术。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 原料与试剂

油菜籽(青杂 12 号),产自青海西宁;亚麻籽(定亚 18 号),产自青海贵德;花生(豫花),产自河南省;葵花籽(油葵 562 号),产自内蒙古巴彦淖尔市;芝麻(小颗粒油麻),产自河南省。

异丙醇、甲醇、乙腈,均为色谱纯,山东禹王和天下新材料有限公司;没食子酸,天津市大茂化学试剂厂;十一酸甲酯、棕榈酸甲酯、硬脂酸甲酯、油酸甲酯、亚油酸甲酯、亚麻酸甲酯对照品,西格玛奥德里奇(上海)贸易有限公司; α -生育酚标准品(纯度 99.5%),成都德思特生物技术有限公司。

1.1.2 仪器与设备

CS55-9 型真空冷冻干燥机;SB-3200DTD 型超声波清洗机,宁波新芝生物科技股份有限公司;XZ-Z505W 型卧式螺旋榨油机,广州旭众食品机械

有限公司;GC-2030型气相色谱仪[配有火焰离子化检测器(FID)及LabSolutions Version 5.97色谱工作站]、GC MS-QP2020NX型气相色谱质谱联用仪[配有火焰离子化检测器(FID)及GCMSsolution 4.50 SP1数据处理系统]、SFC/U HPLC型高效液相色谱仪[配有示差折光检测器(RID)和LabSolutions Version 5.96色谱工作站],日本岛津仪器有限公司;50/30 μm 二乙烯基苯/碳分子筛/聚二甲基硅氧烷(DVB/CAR/PDMS)萃取纤维头,美国Supelco公司。

1.2 试验方法

1.2.1 油料的预处理

1.2.1.1 真空冷冻干燥

油料清理除杂后,于 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱预冻过夜,置于真空冷冻干燥机中处理10 h,干燥至水分含量小于3%^[14]。

1.2.1.2 超声波

油料清理除杂后,在超声功率60 W、超声时间60 min、料液(水)质量比1:12条件下超声波处理,纱布过滤后于 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘箱干燥至水分含量小于3%^[15]。

1.2.2 植物油的制取

采用螺旋榨油机在压榨温度 $150\sim 165\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、压榨时间2~3 min条件下压榨制油,以4000 r/min离心15 min得到原油,置于250 mL棕色玻璃瓶中, $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 储存备用。

1.2.3 植物油感官指标测定

参考李燕杰等^[16]的油脂等级评价法,以色泽、气味、透明度、黏度和滋味为评价指标进行感官评价。

1.2.4 植物油理化指标测定

酸值参照GB 5009.229—2016《食品安全国家标准 食品中酸价的测定》测定;过氧化值参照GB 5009.227—2016《食品安全国家标准 食品中过氧化值的测定》测定;水分及挥发物参照GB 5009.236—2016《食品安全国家标准 动植物油脂水分及挥发物的测定》测定;色泽参照GB/T 22460—2008《动植物油脂 罗维朋色泽的测定》测定。

1.2.5 植物油营养组分分析

1.2.5.1 脂肪酸

样品制备:脂肪酸甲酯化参照Wang等^[17]的方法。向 $(100.0\pm 0.1)\text{ mg}$ 油样中加入40 mL甲醇、1 mL KOH-甲醇(1 mol/L)和0.5 mL十一酸甲酯内标溶液(10 mg/mL),混合均匀, $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷凝回流1 h,反应结束后冷却至室温,分别加10 mL正庚烷和蒸馏水,充分振摇后静置分层,取上清液,下层溶

液用10 mL正庚烷再萃取1次,合并两次的上清液后用10 mL蒸馏水洗涤,分离出上层,加无水硫酸钠干燥后过滤,用正庚烷将滤液定容于25 mL棕色容量瓶中,经 $0.22\text{ }\mu\text{m}$ 过滤膜注入进样瓶,待GC分析。

GC条件:Wonda Cap WAX色谱柱($60\text{ m}\times 0.25\text{ mm}\times 0.25\text{ }\mu\text{m}$);检测器为FID;进样口、检测器温度 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$;载气为氮气,流速1 mL/min;分流比46:1;进样量1 μL ;升温程序为 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 保持13 min,以 $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至 $180\text{ }^{\circ}\text{C}$,保持6 min,再以 $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$,保持20 min,再以 $4\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至 $230\text{ }^{\circ}\text{C}$,保持10.5 min。

定性与定量:根据5种脂肪酸甲酯标准品保留时间定性,内标法定量。

1.2.5.2 甘油三酯

样品制备:取 $(1.0\pm 0.1)\text{ g}$ 油样于10 mL容量瓶中,用流动相乙腈-异丙醇(体积比30:70)定容,涡旋1 min后经 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 尼龙过滤膜注入进样瓶待测。

HPLC条件:C18色谱柱($4.6\text{ mm}\times 250\text{ mm}\times 5.0\text{ }\mu\text{m}$);柱温 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$;流动相为乙腈-异丙醇(体积比30:70);洗脱时间30 min;流速0.5 mL/min;进样量5 μL ;检测器为RID,检测器温度 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

定性与定量:基于甘油三酯按照等价碳原子数(ECN)由小到大分离的规律划分ECN分区,通过出峰顺序对每种甘油三酯定性,峰面积归一化法定量。

1.2.5.3 总酚

参照赵丹等^[18]的方法绘制没食子酸标准曲线,并用福林酚法提取总酚, 765 nm 处测吸光度,根据标准曲线方程计算出总酚含量。

1.2.5.4 维生素E

采用HPLC法测定维生素E含量。HPLC条件:Thermo Scientific Synchronis色谱柱($250\text{ mm}\times 4.6\text{ mm}\times 5\text{ }\mu\text{m}$);预柱($3.9\text{ mm}\times 20\text{ mm}\times 5\text{ }\mu\text{m}$);检测器为可变波长扫描紫外检测器(VWD);检测波长 300 nm ;柱温 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$;进样量10 μL ;流动相为甲醇-水(体积比92:8);洗脱方式为等度洗脱。

定性与定量:根据维生素E标准溶液的保留时间进行定性,外标法定量。

1.2.6 植物油挥发性组分分析

采用固相微萃取(SPME)对植物油进行前处理,具体参照韩玉泽等^[19]的方法。取 $(6.0\pm 0.1)\text{ g}$ 油样于15 mL采样瓶中, $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 磁力搅拌20 min,转速400 r/min,推出纤维头顶空萃取40 min。手动进样,于GC进样口 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 解吸5 min后分析。

GC 条件: InertCap pure - wax 色谱柱(30 m × 0.25 mm × 0.25 μm); 升温程序为初始温度 40 °C, 保持 2 min, 以 5 °C/min 升至 220 °C, 保持 10 min; 载气为高纯氮气(纯度 ≥ 99.999%), 流速 1.0 mL/min; 分流比 50:1; 进样口温度 250 °C。

MS 条件: 电子电离源; 离子源温度 150 °C; 灯丝发射电流 200 μA; 电子能量 70 eV; 传输线温度 260 °C; 扫描范围(*m/z*) 35 ~ 350。

定性与定量: NIST 14 标准谱库检索化合物, 与

标准谱图进行对照, 得到定性结果, 峰面积归一化法定量。

1.2.7 数据处理

所有数据平行测定 3 次, 采用 SPSS 26 软件对数据进行统计分析, 使用 Origin 2018 软件作图。

2 结果与分析

2.1 植物油感官指标分析

真空冷冻干燥和超声波预处理对植物油感官品质的影响见图 1。

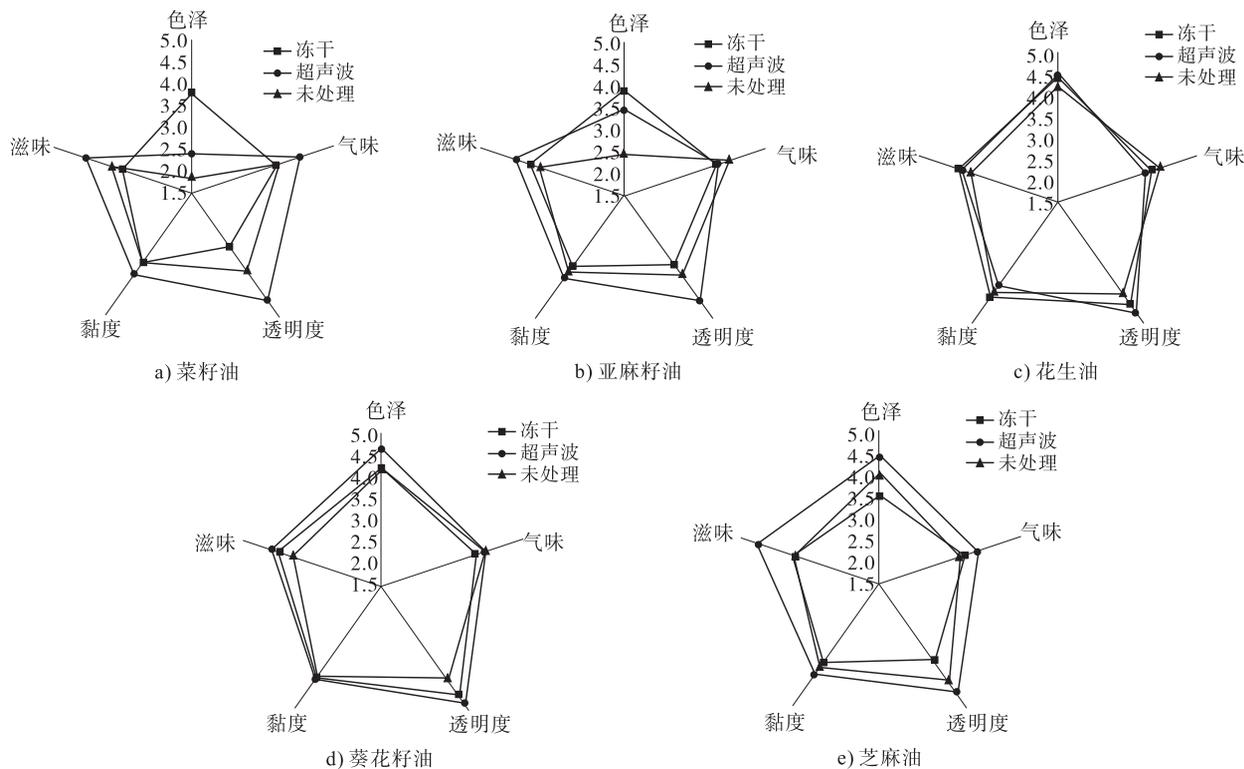


图 1 不同植物油的感官评分

由图 1 可知, 经超声波预处理, 植物油的透明度、滋味和气味较好, 因此超声波预处理能获得感官品质较好的植物油, 这与张雅娜等^[20]所得出的超声波预处理制得的芝麻油透明度好、无异味略带生芝麻味及口感好的研究结果相类似。真空冷冻干燥预处理植物油的黏度、气味及滋味与未处理组相比变

化不明显, 原因可能是真空冷冻干燥预处理能最大限度地保留油脂原本的活性、风味和形状等特性^[12]。

2.2 植物油理化指标分析

真空冷冻干燥和超声波预处理对植物油基本理化指标的影响见表 1。

表 1 不同植物油的理化指标

油样	预处理	酸值(KOH)/ (mg/g)	过氧化值/(mmol/kg)	水分及挥发物/%	色泽	
					R	Y
菜籽油	冻干	0.56 ± 0.04 ^e	0.66 ± 0.04 ^{ab}	0.06 ± 0.00 ^a	1.7	35.5
	超声波	0.20 ± 0.00 ^{gh}	0.57 ± 0.06 ^{cd}	0.03 ± 0.02 ^a	1.5	30.0
	未处理	0.56 ± 0.00 ^e	0.63 ± 0.04 ^{bc}	0.20 ± 0.05 ^a	2.5	30.3
亚麻籽油	冻干	1.01 ± 0.00 ^c	0.52 ± 0.01 ^{de}	0.05 ± 0.01 ^a	1.5	37.4
	超声波	0.27 ± 0.02 ^g	0.41 ± 0.01 ^{ef}	0.05 ± 0.01 ^a	1.7	35.0
	未处理	1.54 ± 0.04 ^a	0.85 ± 0.06 ^a	0.17 ± 0.01 ^a	2.9	29.9
花生油	冻干	0.22 ± 0.00 ^{gh}	0.35 ± 0.00 ^{fg}	0.09 ± 0.00 ^a	0.1	1.3
	超声波	0.63 ± 0.01 ^e	0.26 ± 0.02 ^b	0.10 ± 0.02 ^a	0.2	1.3
	未处理	0.23 ± 0.01 ^{gh}	0.63 ± 0.02 ^{bc}	0.18 ± 0.10 ^a	0.3	2.3

续表 1

油样	预处理	酸值(KOH)/ (mg/g)	过氧化值/(mmol/kg)	水分及挥发物/%	色泽	
					R	Y
葵花籽油	冻干	0.23 ± 0.00 ^{sh}	0.49 ± 0.00 ^{de}	0.07 ± 0.03 ^a	2.0	21.1
	超声波	1.10 ± 0.04 ^b	0.79 ± 0.02 ^{ab}	0.05 ± 0.01 ^a	2.0	20.0
	未处理	0.14 ± 0.01 ^h	0.47 ± 0.03 ^{de}	0.12 ± 0.01 ^a	2.9	29.9
芝麻油	冻干	0.75 ± 0.06 ^d	0.31 ± 0.02 ^{sh}	0.05 ± 0.00 ^a	2.1	30.2
	超声波	0.44 ± 0.02 ^f	0.75 ± 0.02 ^{ab}	0.10 ± 0.01 ^a	2.5	30.0
	未处理	0.56 ± 0.00 ^e	0.73 ± 0.13 ^{ab}	0.10 ± 0.01 ^a	2.5	30.3

注:同一列中不同字母代表差异显著($p < 0.05$)

由表 1 可知,2 种预处理技术对不同植物油的过氧化值和酸值有显著性影响($p < 0.05$)。植物油酸值(KOH)范围为 0.20 ~ 1.54 mg/g,过氧化值范围为 0.26 ~ 0.85 mmol/kg,均符合 GB 2716—2018《食品安全国家标准 植物油》的要求。植物油水分及挥发物含量范围为 0.03% ~ 0.20%。水分过高,则水解反应速率加快,产生较多的游离脂肪酸,导致酸值升高,同一植物油未处理组水分含量总体均大于处理组,原因可能是超声波预处理过程的空化现象和海绵效应使得植物组织内部形成微观通道,这些结构的改变有利于缩短干燥时间,降低传质

阻力,促进干燥过程中水分的蒸发^[21],真空冷冻干燥能排除组织中 90% 以上的水分,尤其是在干燥过程的解析干燥阶段能够将第一阶段未去除的约 10% 的结合水以升华的方式除去^[22]。此外,2 种预处理技术植物油的红值(R)和黄值(Y)总体低于未处理组,说明真空冷冻干燥和超声波预处理的植物油色泽浅,外观品质较好。

2.3 植物油营养成分分析

2.3.1 脂肪酸

2 种预处理技术对植物油 5 种主要脂肪酸(棕榈酸、硬脂酸、油酸、亚油酸和亚麻酸)含量的影响见表 2。

表 2 不同植物油的脂肪酸组成及含量

油样	预处理	脂肪酸含量/(g/100 g)					SFA	UFA	SFA/UFA
		棕榈酸	硬脂酸	油酸	亚油酸	亚麻酸			
菜籽油	冻干	3.31 ± 0.12 ^a	2.69 ± 0.09 ^a	64.93 ± 1.76 ^a	15.11 ± 0.16 ^a	8.77 ± 0.38 ^a	6.00 ± 0.21 ^a	88.82 ± 2.31 ^a	0.064
	超声波	3.46 ± 0.03 ^a	2.67 ± 0.01 ^a	66.29 ± 1.21 ^a	14.85 ± 0.29 ^a	8.69 ± 0.06 ^a	6.13 ± 0.04 ^a	89.83 ± 1.56 ^a	0.068
	未处理	3.66 ± 0.01 ^a	2.76 ± 0.00 ^a	67.20 ± 0.07 ^a	14.55 ± 0.05 ^a	8.59 ± 0.24 ^a	6.43 ± 0.01 ^a	90.34 ± 0.37 ^a	0.069
亚麻籽油	冻干	5.44 ± 0.02 ^a	4.85 ± 0.01 ^a	24.58 ± 0.04 ^a	13.58 ± 0.06 ^a	50.99 ± 0.15 ^a	10.28 ± 0.03 ^a	89.15 ± 0.25 ^a	0.115
	超声波	5.12 ± 0.05 ^a	4.81 ± 0.05 ^a	24.89 ± 0.27 ^a	13.66 ± 0.09 ^a	48.58 ± 0.42 ^a	9.94 ± 0.10 ^a	87.12 ± 0.78 ^a	0.114
	未处理	5.42 ± 0.36 ^a	4.96 ± 0.33 ^a	24.53 ± 1.18 ^a	13.72 ± 0.90 ^a	51.01 ± 3.35 ^a	10.39 ± 0.69 ^a	89.26 ± 5.42 ^a	0.116
花生油	冻干	10.11 ± 0.08 ^a	2.44 ± 0.22 ^a	35.33 ± 0.27 ^a	47.16 ± 0.34 ^a	1.87 ± 0.06 ^a	12.55 ± 0.30 ^a	84.36 ± 0.67 ^a	0.149
	超声波	9.58 ± 0.57 ^a	2.72 ± 0.08 ^a	34.81 ± 0.97 ^a	47.09 ± 0.26 ^a	1.70 ± 0.06 ^a	12.31 ± 0.65 ^a	83.51 ± 1.29 ^a	0.147
	未处理	10.10 ± 0.04 ^a	2.66 ± 0.10 ^a	34.32 ± 0.93 ^a	47.20 ± 0.38 ^a	1.75 ± 0.01 ^a	12.76 ± 0.15 ^a	83.27 ± 1.32 ^a	0.153
葵花籽油	冻干	4.08 ± 0.01 ^a	4.61 ± 0.00 ^a	56.06 ± 0.34 ^a	34.73 ± 0.09 ^a	0.47 ± 0.01 ^a	8.69 ± 0.00 ^a	91.26 ± 0.42 ^a	0.095
	超声波	4.00 ± 0.10 ^a	4.41 ± 0.14 ^a	55.60 ± 1.69 ^a	32.91 ± 0.69 ^a	0.58 ± 0.06 ^a	8.41 ± 0.24 ^a	89.09 ± 2.44 ^a	0.094
	未处理	4.06 ± 0.02 ^a	4.55 ± 0.36 ^a	57.97 ± 1.33 ^a	32.79 ± 1.03 ^a	0.44 ± 0.06 ^a	8.60 ± 0.38 ^a	91.20 ± 2.42 ^a	0.094
芝麻油	冻干	8.89 ± 0.80 ^a	4.64 ± 0.52 ^a	35.97 ± 1.33 ^a	50.41 ± 3.75 ^a	0.53 ± 0.24 ^a	13.53 ± 1.32 ^a	86.91 ± 7.31 ^a	0.156
	超声波	9.04 ± 0.19 ^a	4.66 ± 0.10 ^a	36.00 ± 0.76 ^a	51.18 ± 1.04 ^a	0.47 ± 0.01 ^a	13.69 ± 0.29 ^a	87.65 ± 1.79 ^a	0.156
	未处理	9.19 ± 0.05 ^a	4.78 ± 0.05 ^a	36.91 ± 0.18 ^a	51.24 ± 0.27 ^a	0.39 ± 0.03 ^a	13.96 ± 0.10 ^a	88.54 ± 0.45 ^a	0.158

注:同列中同一植物油不同字母代表差异显著($p < 0.05$)。下同

由表 2 可知,5 种植物油中除亚麻籽油以亚麻酸和油酸为主外,其他 4 种植物油以油酸和亚油酸为主。亚麻籽油中亚麻酸含量(48.58 ~ 51.01 g/100 g)最高。菜籽油和葵花籽油中油酸含量最高,分别为 64.93 ~ 67.20 g/100 g 和 55.60 ~ 57.97 g/100 g。花生油和芝麻油中亚油酸含量最高,分别为 47.09 ~ 47.20 g/100 g 和 50.41 ~ 51.24 g/100 g。

5 种植物油中的饱和脂肪酸(SFA)含量较低,在 6.00 ~ 13.96 g/100 g 之间,不饱和脂肪酸(UFA)含量在 83.27 ~ 91.26 g/100 g 之间。5 种植物油的饱和脂肪酸与不饱和脂肪酸的比值(SFA/UFA)在 0.064 ~ 0.158 之间,与 Yuenyong 等^[23]的研究结果相似,其不同植物油样品中 SFA/UFA 为 0.129 ~ 0.230。与未处理组相比,本文研究的 5 种植物油的

SFA/UFA 在真空冷冻干燥和超声波预处理后总体均较低,在脂肪酸组成上更具优势。此外,真空冷冻干燥和超声波预处理对植物油的脂肪酸组成及含量无显著性影响($p > 0.05$),与 Zhang 等^[24]的研究结果相类似,其研究表明酸性水分调节加低温干燥预

处理对亚麻籽油的脂肪酸组成及含量无显著性影响。

2.3.2 甘油三酯

2种预处理技术对植物油甘油三酯组成及含量的影响见表3。

表3 不同植物油甘油三酯组成及含量

油样	预处理	甘油三酯含量/%								
		LnLnLn	LLnLn	OLnLn	LLL	OLL	OOL	OOO	POO	SOO
菜籽油	冻干	ND	0.82 ± 0.21 ^a	2.45 ± 0.05 ^a	5.76 ± 0.04 ^a	16.79 ± 0.07 ^a	21.29 ± 0.20 ^a	40.34 ± 0.40 ^a	6.14 ± 0.11 ^a	1.83 ± 0.25 ^a
	超声波	ND	0.80 ± 0.06 ^a	2.36 ± 0.01 ^a	5.45 ± 0.11 ^a	17.20 ± 0.12 ^a	22.24 ± 0.08 ^a	41.92 ± 0.42 ^a	6.25 ± 0.02 ^a	1.89 ± 0.20 ^a
	未处理	ND	0.78 ± 0.13 ^a	2.26 ± 0.21 ^a	5.35 ± 0.04 ^a	17.66 ± 0.87 ^a	22.54 ± 0.68 ^a	40.82 ± 1.80 ^a	6.19 ± 0.06 ^a	1.90 ± 0.33 ^a
亚麻籽油	冻干	15.77 ± 0.37 ^a	9.65 ± 0.21 ^a	22.08 ± 0.43 ^a	13.43 ± 0.14 ^a	17.24 ± 0.26 ^a	8.36 ± 0.42 ^a	9.96 ± 0.33 ^a	2.36 ± 0.12 ^a	0.62 ± 0.12 ^a
	超声波	15.37 ± 0.54 ^a	9.08 ± 0.33 ^a	21.89 ± 0.84 ^a	13.54 ± 0.12 ^a	17.58 ± 0.01 ^a	8.59 ± 0.19 ^a	9.78 ± 1.34 ^a	2.64 ± 0.07 ^a	0.60 ± 0.03 ^a
	未处理	15.77 ± 0.18 ^a	9.63 ± 0.12 ^a	22.03 ± 0.30 ^a	13.43 ± 0.01 ^a	17.06 ± 0.01 ^a	8.16 ± 0.06 ^a	9.88 ± 0.47 ^a	2.39 ± 0.05 ^a	0.58 ± 0.13 ^a
花生油	冻干	0.12 ± 0.02 ^a	0.32 ± 0.01 ^a	0.34 ± 0.06 ^a	3.99 ± 0.19 ^a	26.01 ± 0.21 ^a	32.68 ± 0.41 ^a	23.81 ± 0.28 ^a	6.70 ± 0.06 ^a	4.38 ± 0.09 ^a
	超声波	0.14 ± 0.06 ^a	0.30 ± 0.06 ^a	0.36 ± 0.09 ^a	4.03 ± 0.02 ^a	26.56 ± 0.55 ^a	31.59 ± 0.46 ^a	23.56 ± 0.09 ^a	6.94 ± 0.01 ^a	4.54 ± 0.04 ^a
	未处理	0.10 ± 0.08 ^a	0.30 ± 0.05 ^a	0.33 ± 0.02 ^a	4.40 ± 0.69 ^a	26.36 ± 0.50 ^a	31.51 ± 1.81 ^a	23.39 ± 0.12 ^a	6.54 ± 0.33 ^a	4.50 ± 0.03 ^a
葵花籽油	冻干	ND	ND	0.58 ± 0.05 ^a	12.54 ± 0.19 ^a	17.49 ± 0.26 ^a	18.28 ± 0.00 ^a	41.36 ± 0.82 ^a	7.42 ± 0.22 ^a	1.45 ± 0.12 ^a
	超声波	ND	ND	0.57 ± 0.06 ^a	11.43 ± 0.37 ^a	17.60 ± 0.59 ^a	18.66 ± 1.06 ^a	42.93 ± 1.45 ^a	7.54 ± 0.01 ^a	1.48 ± 0.11 ^a
	未处理	ND	ND	0.67 ± 0.14 ^a	12.77 ± 0.06 ^a	17.83 ± 0.01 ^a	18.58 ± 0.20 ^a	41.57 ± 0.16 ^a	7.27 ± 0.07 ^a	1.46 ± 0.18 ^a
芝麻油	冻干	ND	ND	2.89 ± 0.07 ^a	12.21 ± 0.26 ^a	27.57 ± 0.02 ^b	30.75 ± 0.17 ^a	20.06 ± 0.04 ^a	4.72 ± 0.03 ^a	1.07 ± 0.11 ^a
	超声波	ND	ND	2.68 ± 0.15 ^a	13.38 ± 0.44 ^a	28.39 ± 0.18 ^a	29.76 ± 1.28 ^a	19.32 ± 0.59 ^a	4.38 ± 0.04 ^a	1.21 ± 0.18 ^a
	未处理	ND	ND	2.87 ± 0.08 ^a	12.08 ± 0.40 ^a	27.56 ± 0.11 ^b	30.76 ± 0.16 ^a	19.98 ± 0.02 ^a	4.75 ± 0.10 ^a	1.09 ± 0.08 ^a

注:P. 棕榈酸;S. 硬脂酸;O. 油酸;L. 亚油酸;Ln. 亚麻酸。ND表示未检出

由表3可知,5种植物油中主要的甘油三酯分别是 LLL (3.99% ~ 13.54%)、OLL (16.79% ~ 28.39%)、OOL (8.16% ~ 32.68%)、OOO (9.78% ~ 42.93%) 和 POO (2.36% ~ 7.54%), 亚麻籽油中主要的甘油三酯还包括 LnLnLn (15.37% ~ 15.77%)、LLnLn (9.08% ~ 9.65%) 和 OLnLn (21.89% ~ 22.08%), 而其他植物油中这3类甘油三酯含量较低 (0.10% ~ 2.89%), 这与脂肪酸测定结果相一致。数据分析表明,真空冷冻干燥和超声波预处理对植物油中甘油三酯组成及含量无显著性影响($p > 0.05$),这与 Lee 等^[25]的研究结果相似,其研究表明紫苏籽油主要由甘油三酯组成,且冻融预处理组和对照组的甘油酯组成无明显差异。

2.3.3 总酚

图2是真空冷冻干燥和超声波预处理植物油中总酚含量的测定结果。

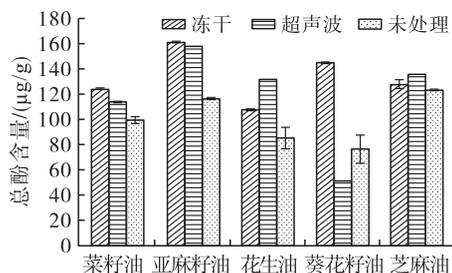


图2 不同植物油的总酚含量

由图2可知,除超声波预处理葵花籽油外,真空冷冻干燥和超声波预处理植物油中总酚含量分别是未处理组的1.04 ~ 1.90倍和1.10 ~ 1.55倍,原因在于真空冷冻干燥过程中较高的真空度使样品很容易形成多孔蜂窝状结构^[26],超声波预处理的空化作用使样品细胞壁及细胞膜破裂而形成微通道,使植物细胞内生物活性成分更易于溶出。这与 Chanioti 等^[27]的研究结果一致,其研究表明超声波辅助提取技术不仅提高了橄榄渣油的抗氧化活性还增加了皂化物和总酚物质的含量。Tseng 等^[28]研究也表明,冷冻干燥后的酿酒葡萄渣中总酚含量比对流干燥高35%。

2.3.4 维生素E

图3是真空冷冻干燥和超声波预处理植物油中维生素E含量的测定结果。

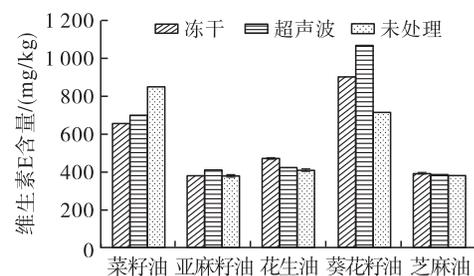


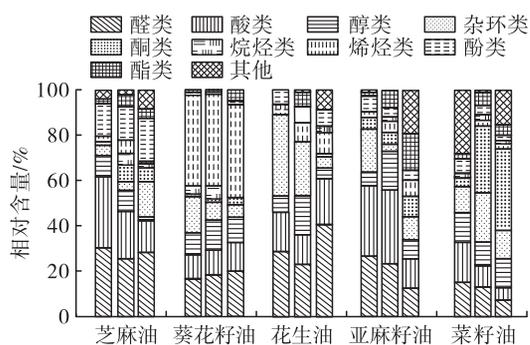
图3 不同植物油的维生素E含量

由图3可知,葵花籽油和菜籽油中维生素E含

量较高,分别为714.6~1071.8 mg/kg和661.3~849.3 mg/kg,其次是花生油(428.2~474.7 mg/kg)、亚麻籽油(377.8~414.4 mg/kg)和芝麻油(383.9~395.8 mg/kg)。除菜籽油外,真空冷冻干燥和超声波预处理植物油中维生素E含量分别比未处理组增加了0.50%~26.56%和1.40%~49.99%,原因在于真空冷冻干燥和超声波预处理过程处于低温,能最大程度地保护热敏性成分不被破坏。

2.4 植物油挥发性组分分析

5种植物油的挥发性组分分析结果见图4。



注:每种油样的先后顺序为未处理的、超声波预处理的和真空冷冻干燥预处理的

图4 不同植物油的挥发性组分

由图4可知,5种植物油中的挥发性物质包括醛类、酸类、醇类、杂环类、酮类、烷烃类、烯烃类、酚类和酯类。菜籽油中杂环类和酮类物质含量较高,其中杂环类物质主要是吡嗪类(5.23%~12.07%),具有焙烤香、坚果香等香气特征^[29],真空冷冻干燥及超声波预处理提高了菜籽油中酮类物质的含量,分别是未处理组的8.90倍和7.43倍。亚麻籽油中醛类以(*E,E*)-2,4-庚二烯醛(3.41%~9.61%)和(*E,E*)-2,4-癸二烯醛(1.34%~4.85%)为主,呈现坚果和油脂等气味特征。正己酸(3.71%~15.15%)是亚麻籽油中主要的酸类物质,具有酸败味。花生油中含有较多的杂环类物质,主要是吡嗪类(4.43%~13.79%)和呋喃类(8.70%~21.91%),与袁桃静等^[30]的研究结果一致,其研究表明花生油的主要挥发性化合物为醛酮类、醇类和吡嗪类物质,种类多且相对含量高。不同预处理对花生油中杂环类物质相对含量有一定影响,其中真空冷冻干燥预处理组花生油中杂环类物质含量最低,其他处理组中杂环类物质含量是真空冷冻干燥预处理组的5.40~8.10倍。与其他植物油明显不同的是葵花籽油中烯烃类物质含量非常丰富,主要是 α -蒎烯(25.29%~30.22%),呈现松针味,与师瑞等^[31]的研究结果一致,其研究表明葵花籽油的挥

发性成分中萜烯类含量为26.79%,具有植物清香。此外,芝麻油中酚类物质含量明显高于其他植物油,主要是4-乙烯基-2-甲氧基苯酚(12.28%~13.00%),呈现油脂味^[32]。总的来说,真空冷冻干燥和超声波预处理对5种植物油中的挥发性组分存在影响,使植物油呈现不同的风味。

3 结论

总体而言,真空冷冻干燥和超声波预处理技术未导致植物油感官品质、脂肪酸和甘油三酯含量等降低,且能够明显提高植物油微量营养素的含量,有利于油脂在功能性食品和保健食品配方中的应用。

参考文献:

- [1] GILLINGHAM L G, HARRIS - JANZ S, JONES P J. Dietary monounsaturated fatty acids are protective against metabolic syndrome and cardiovascular disease risk factors [J]. *Lipids*, 2011, 46(3): 209-228.
- [2] GLADINE C, COMBE N, VAYSSE C, et al. Optimized rapeseed oil enriched with healthy micronutrients; a relevant nutritional approach to prevent cardiovascular diseases. Results of the Optim'Oils randomized intervention trial [J]. *J Nutr Biochem*, 2013, 24(3): 544-549.
- [3] SEIQUER I, RUEDA A, OLALLA M, et al. Assessing the bioavailability of polyphenols and antioxidant properties of extra virgin argan oil by simulated digestion and Caco-2 cell assays. Comparative study with extra virgin olive oil [J]. *Food Chem*, 2015, 188(2): 496-503.
- [4] 孟桂元,涂洲溢,詹兴国,等.我国植物油油脂生产、消费需求分析及发展对策[J].*中国油脂*,2020,45(10):1-4,27.
- [5] RAHMAN M S, GUL K, YANG H S, et al. Thermal and functional characteristics of defatted bovine heart using supercritical CO₂ and organic solvent [J]. *J Sci Food Agric*, 2019, 99(2): 816-823.
- [6] CHEW S C. Cold-pressed rapeseed (*Brassica napus*) oil: chemistry and functionality [J/OL]. *Food Res Int*, 2019, 131: 108997 [2022-07-23]. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.108997>.
- [7] KOUBAA M, MHEMDI H, BARBA F J, et al. Oilseed treatment by ultrasounds and microwaves to improve oil yield and quality: an overview [J]. *Food Res Int*, 2016, 85: 59-66.
- [8] CÁRCEL J A, GARCÍA - PÉREZ J V, BENEDITO J, et al. Food process innovation through new technologies: use of ultrasound [J]. *J Food Eng*, 2012, 110(2): 200-207.
- [9] PANADARE D C, GONDALIYA A, RATHOD V K. Comparative study of ultrasonic pretreatment and ultrasound assisted three phase partitioning for extraction of custard

- apple seed oil [J/OL]. *Ultrason Sonochem*, 2020, 61: 104821 [2022 - 07 - 23]. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104821>.
- [10] ESPOSITO M, PIAZZA L. Ultrasound - assisted extraction of oil from hempseed (*Cannabis sativa* L.): part 1[J]. *J Sci Food Agric*, 2022, 102(2): 732 - 739.
- [11] SONG B, TAN H S, YANG J S. Effect of three drying methods on the drying kinetics and quality of acerola cherry[J/OL]. *J Food Process Pres*, 2020, 44(1): e14674 [2022 - 07 - 23]. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14674>.
- [12] HUANG J, ZHANG M. Effect of three drying methods on the drying characteristics and quality of okra [J]. *Dry Technol*, 2016, 34(8): 900 - 911.
- [13] 贾雪峰, 王强, 金新文, 等. 干燥方式对番茄籽油的得率、脂肪酸组成和抗氧化活性的影响[J]. *食品工业科技*, 2013, 34(6): 151 - 153, 158.
- [14] 高雅, 官孝瑶, 黄嘉文, 等. 真空冷冻干燥技术在功能性食品中的应用研究[J]. *现代食品*, 2018(22): 5 - 7.
- [15] BELHACHAT D, MEKIMENE L, BELHACHAT M, et al. Application of response surface methodology to optimize the extraction of essential oil from ripe berries of *Pistacia lentiscus* using ultrasonic pretreatment[J]. *J Appl Res Med Aromat Plants*, 2018, 9: 132 - 140.
- [16] 李燕杰, 高新亮, 甄成, 等. 植物油感官分析方法的研究[J]. *中国油脂*, 2008, 33(1): 68 - 71.
- [17] WANG X R, HAN Y Z, LI Y X, et al. Detection of Qinghai - Tibet Plateau flaxseed oil adulteration based on fatty acid profiles and chemometrics [J/OL]. *Food Control*, 2021, 130: 108332 [2022 - 07 - 23]. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108332>.
- [18] 赵丹, 汪学德, 张润阳, 等. 制油工艺对油脂品质的影响研究[J]. *中国油脂*, 2018, 43(6): 11 - 15.
- [19] 韩玉泽, 王兴瑞, 李应霞, 等. SPME - GC - MS分析与鉴别青海亚麻籽油挥发性组分[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(20): 255 - 260.
- [20] 张雅娜, 郭丽, 苏悦, 等. 超声、冷冻 - 微波辅助水酶法提取芝麻油的研究[J]. *食品研究与开发*, 2019, 40(20): 102 - 109.
- [21] MIANO A C, IBARZ A, AUGUSTO P E D. Mechanisms for improving mass transfer in food with ultrasound technology: describing the phenomena in two model cases [J]. *Ultrason Sonochem*, 2016, 29: 413 - 419.
- [22] 毕金峰, 冯舒涵, 金鑫, 等. 真空冷冻干燥技术与产业的发展及趋势[J]. *核农学报*, 2022, 36(2): 414 - 421.
- [23] YUENYONG J, POKKANTA P, PHUANGSAIJAI N, et al. GC - MS and HPLC - DAD analysis of fatty acid profile and functional phytochemicals in fifty cold - pressed plant oils in Thailand[J]. *Heliyon*, 2021, 7(2): 2405 - 8440.
- [24] ZHANG W B, PENG H Y, SUN H, et al. Effect of acidic moisture - conditioning as pretreatment for aqueous extraction of flaxseed oil with lower water consumption [J]. *Food Bioprod Process*, 2020, 121: 20 - 28.
- [25] LEE K Y, RAHMAN M S, KIM A N, et al. Effect of freeze - thaw pretreatment on yield and quality of perilla seed oil[J/OL]. *LWT - Food Sci Technol*, 2020, 122: 109026 [2022 - 07 - 23]. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109026>.
- [26] JIANG N, LIU A Q, LI D J, et al. Evaluation of freeze drying combined with microwave vacuum drying for functional okra snacks: antioxidant properties, sensory quality, and energy consumption [J]. *LWT - Food Sci Technol*, 2017, 82: 216 - 226.
- [27] CHANIOTI S, TZIA C. Optimization of ultrasound - assisted extraction of oil from olive pomace using response surface technology: oil recovery, unsaponifiable matter, total phenol content and antioxidant activity [J]. *LWT - Food Sci Technol*, 2017, 79: 178 - 189.
- [28] TSENG A, ZHAO Y Y. Effect of different drying methods and storage time on the retention of bioactive compounds and antibacterial activity of wine grape pomace (Pinot Noir and Merlot) [J]. *J Food Sci*, 2012, 77(9): H192 - H201.
- [29] SOMOZA V. The Maillard reaction in food and medicine [J]. *Mol Nutr Food Res*, 2010, 51(4): 381 - 382.
- [30] 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.
- [31] 师瑞, 尹文婷, 马雪婷, 等. SDE - GC - O - MS鉴定浓香葵花籽油香气活性物质[J]. *中国粮油学报*, 2021, 36(8): 113 - 117.
- [32] 尹文婷, 马雪婷, 汪学德. 不同工艺芝麻油的挥发性成分分析和感官评价[J]. *中国油脂*, 2019, 44(12): 8 - 13.