DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260407003
引用格式: 曾朝珍, 苟丽娜, 李闻娟, 等. 焙炒预处理及不同制油工艺对亚麻籽油品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(18): 231–240.
Zeng Chaozhen, Gou Lina, Li Wenjuan, et al. Effects of roasting pretreatment and different oil-extraction processes on flaxseed oil quality [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(18): 231–240. (in Chinese with English abstract).

焙炒预处理及不同制油工艺对亚麻籽油品质的影响

曾朝珍[1*], 苟丽娜[1], 李闻娟[2], 宋 娟[1], 刘 东[1]

(1. 甘肃省农业科学院农产品贮藏加工研究所, 兰州 730070; 2. 甘肃省农业科学院作物研究所, 兰州 730070)

摘 要: 目的 比较焙炒预处理结合不同制油工艺对生、熟亚麻籽油品质、抗氧化活性及挥发性香气的影响。**方法** 以生、熟亚麻籽为原料, 采用超临界 CO_2 萃取(supercritical CO_2 extraction, SC-CO_2)和螺旋压榨(spiral pressing, SP)制备油样, 测定其基础理化指标、脂肪酸组成、总酚和生育酚含量、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl radical, DPPH)、2,2'-联氮-双(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)阳离子[2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonate acid)diammonium salt cation, $ABTS^+$]及铁还原能力(ferric reducing antioxidant power, FRAP)等抗氧化活性及挥发性香气成分, 并分析不同加工方式对油品质量的影响。**结果** 不同制油工艺及焙炒预处理均显著影响亚麻籽油品质。SP 焙炒组碘值、过氧化值、多不饱和脂肪酸和总不饱和脂肪酸相对含量最高, 分别为 178.00 g/100 g、0.13 g/100 g、69.56%和 89.61%; SC-CO_2 未处理组酸价和生育酚含量最高, 分别为 2.00 mg/g 和 3.96 mg α-TE/100 g; SP 焙炒组总酚含量最高, 为 0.62 mg/g, 与 SC-CO_2 未处理组(0.60 mg/g)差异不显著(P>0.05)。抗氧化活性方面, SP 未处理组 $ABTS^+$自由基清除能力最强, SP 焙炒组 FRAP 最高。挥发性香气分析表明, 焙炒结合 SP 有利于醛类、酮类、醇类及吡嗪类等挥发性成分积累。**结论** 焙炒预处理及不同制油工艺显著影响亚麻籽油的营养品质、抗氧化活性及挥发性香气特征, 本研究为亚麻籽油生产工艺优化及高值化利用提供了理论依据。

关键词: 亚麻籽油; 加工方式; 理化成分; 抗氧化活性; 风味物质
中图分类号: TS225.1 **文献识别码:** A **文章编号:** 2095–0381(2026)18–0231–10

Effects of roasting pretreatment and different oil-extraction processes on flaxseed oil quality

ZENG Chao-Zhen[1*], GOU Li-Na[1], LI Wen-Juan[2], SONG Juan[1], LIU Dong[1]

(1. *Agricultural Product Storage and Processing Research Institute*, *Gansu Academy of Agricultural Sciences*, *Lanzhou* 730070, *China*; 2. *Institute of Crop Sciences*, *Gansu Academy of Agricultural Sciences*, *Lanzhou* 730070, *China*)

ABSTRACT: Objective To compare the effects of roasting pretreatment combined with different oil-extraction methods on the quality, antioxidant activity and volatile aroma of raw and roasted flaxseed oils. **Methods** Raw and roasted flaxseeds were used as materials, and oil samples were prepared by supercritical CO_2 extraction (SC-CO_2) and spiral pressing (SP). Their basic physicochemical properties, fatty acid composition, total phenol and tocopherol content,

收稿日期: 2026-04-07
基金项目: 甘肃省现代寒旱特色农业油料产业技术体系项目(GSARS-09)
第一作者/*通信作者: 曾朝珍(1981—), 男, 硕士, 研究员, 主要研究方向为农产品加工。E-mail: 231531680@qq.com

antioxidant activities [1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl radical (DPPH), 2,2'-azino-bis(3- ethylbenzothiazoline-6-sulfonate acid)diammonium salt cation ($ABTS^+$) and ferric reducing antioxidant power (FRAP)] and volatile aroma components were determined, and the effects of different processing methods on oil quality were analyzed. **Results** Both different oil-extraction methods and roasting pretreatment significantly affected the quality of flaxseed oil. The SP roasted group showed the highest iodine value, peroxide value and relative content of polyunsaturated fatty acids and total unsaturated fatty acids, reaching 178.00 g/100 g, 0.13 g/100 g, 69.56% and 89.61%, respectively. The untreated SC-CO_2 group exhibited the highest acid value and tocopherol content, at 2.00 mg/g and 3.96 mg α-TE/100 g, respectively. The roasted SP group had the highest total phenolic content (0.62 mg/g), which was not significantly different from that of the untreated SC-CO_2 group (0.60 mg/g, P>0.05). In terms of antioxidant activity, the untreated SP group exhibited the strongest $ABTS^+$ radical scavenging capacity, whereas the SP roasted group showed the highest FRAP. Volatile aroma analysis indicated that roasting combined with SP promoted the accumulation of volatile compounds such as aldehydes, ketones, alcohols and pyrazines. **Conclusion** Roasting pretreatment and different oil-extraction methods significantly affects the nutritional quality, antioxidant activity and volatile aroma characteristics of flaxseed oil, providing a theoretical basis for optimizing flaxseed oil processing technology and its high-value utilization.

KEY WORDS: flaxseed oil; processing methods; physicochemical components; antioxidant activity; flavor compounds

0 引 言

亚麻籽油作为一种营养丰富的植物油，因其富含不饱和脂肪酸，尤其是 α-亚麻酸，以及其独特的抗氧化、抗炎和心血管保护等生理功能，在食品与保健品领域具有广泛应用价值[1–5]。亚麻籽油中的 α-亚麻酸含量高达 50%以上，具有降血脂、调节血糖、预防心血管疾病等多重健康效益[6–9]。此外，亚麻籽油还富含生育酚、植物甾醇和多酚等抗氧化成分，这些成分不仅增强了其抗氧化特性，还进一步提升了其对心血管疾病、糖尿病等慢性病的预防作用[10–12]。

近年来，随着消费者对植物油功能性的关注不断增加，亚麻籽油的生产工艺也逐渐成为研究的热点。目前，亚麻籽油的传统提取方法主要包括压榨法和溶剂提取法，但随着环保和健康要求的提升，超临界 CO_2 萃取(supercritical CO_2 extraction, SC-CO_2)作为一种新兴的提取技术，逐渐受到关注[13–16]。SC-CO_2 因操作温度较低且氧气暴露有限，能够减少热敏性成分的降解，提取出的油通常无须进一步精炼，并保持原有的营养和风味特性，因此在保留油脂营养与风味特性方面具有一定优势，有助于提高油脂的营养价值和抗氧化性[17–18]。

亚麻籽油的质量不仅与提取方法密切相关，还与原料的处理状态密切相关。研究表明，经过高温处理的熟制亚麻籽在提取油脂时，部分抗氧化成分(如多酚和类黄酮)可能因高温而降解，从而降低油脂的抗氧化活性[19–20]。相比之下，未经热处理的生亚麻籽保留了更多天然活性成分，如 α-亚麻酸和多酚类化合物，因而在制油过程中更有利于维持油脂的抗氧化活性[21]。

尽管已有研究对不同工艺处理的亚麻籽油进行了探讨，但现有研究多侧重于单一原料处理方式或单一制油工艺，对焙炒预处理与不同制油工艺组合条件下油脂品质变化的系统比较仍不充分。焙炒处理可能改变亚麻籽油的风味形成和活性成分保留，而不同制油工艺在温度、压力及氧暴露等方面存在差异，二者共同作用下亚麻籽油品质形成规律尚需进一步明确。因此，本研究以熟制和生亚麻籽为原料，采用 SC-CO_2 和螺旋压榨(spiral pressing, SP)两种制油工艺，系统比较不同处理条件下所得亚麻籽油在理化指标、脂肪酸组成、挥发性香气成分及抗氧化活性等方面的差异，以期阐明不同加工工艺对亚麻籽油品质的影响，为亚麻籽油生产工艺优化及高值化利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

亚麻籽购买自甘肃省白银市会宁县。

甲醇、正己烷、过硫酸钾、硫酸亚铁、碳酸钠(Na_2CO_3)、醋酸、三氯化铁($FeCl_3$)(分析纯，国药集团化学试剂有限公司)；1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl radical, DPPH)、2,2'-联氮-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸 [2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid), ABTS]、2,4,6-三吡啶基三嗪 [2,4,6-tri(2-pyridyl)-s-triazine, TPTZ]、维生素 E(分析纯)、没食子酸标准品(纯度 97.7%)(上海源叶生物科技有限公司)；福林

-酚试剂(浓度 1 mol/L, 北京索莱宝科技有限公司)。

1.2　仪器与设备

ZJ-606 螺旋压榨机(东莞市宏太电器有限公司); HA221-50-06 SC-CO_2 装置(南通市华安超临界萃取有限公司); ThermoTrace 1310气相色谱仪(美国赛默飞世尔科技公司); Waters 2695 型高效液相色谱仪(美国沃特斯公司); CARY 300 紫外可见分光光度计(美国瓦里安公司); TG-WAXA 毛细管柱(60 m×0.25 mm, 0.25 μm)[赛默飞世尔科技(中国)有限公司]; ME203E 分析天平[精度 0.001 g, 梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司]。

1.3　实验方法

1.3.1　亚麻籽油的制备

本研究以 SC-CO_2 提取法和 SP 法分别代表低温非溶剂萃取和机械热压榨两类典型制油方式, 以评价生料和焙炒料在不同制油条件下亚麻籽油品质及营养特性的变化。具体制备过程如下。

亚麻籽焙炒预处理: 以未处理亚麻籽为对照, 将亚麻籽除杂分拣后, 每次取 2000 g 原料, 置于恒温电炒锅中, 在 130 ℃条件下焙炒 20 min, 炒锅转速为 20 r/min。焙炒结束后, 将样品冷却静置至室温, 备用。

SC-CO_2 提取法: 采用 SC-CO_2 设备提取油脂。萃取条件为: 温度 45 ℃, 压力 30 MPa, 流量 40 kg/h, 萃取 4 h。提取所得油脂储存于深色瓶中, 4 ℃保存备用。

SP 法: 采用螺旋压榨机在螺旋筒段温度 140 ℃下进行SP。SP所得油脂收集后, 冷却至室温后置于深褐色瓶中, 4 ℃保存备用。

1.3.2　亚麻籽油品质指标测定

(1)理化指标测定

碘值参照 GB/T 5532—2022《食品安全国家标准 动植物油脂碘值的测定》测定; 酸价参照 GB 5009.229—2025《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—2023《食品安全国家标准 食品中过氧化值的测定》测定; 皂化值参照 GB/T 5534—2024《食品安全国家标准 动植物油脂皂化值的测定》测定。

(2)脂肪酸含量测定

参照 GB 5009.168—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪酸的测定》采用归一化法测定脂肪酸的百分含量。

(3)总酚含量测定

参照赵丹等[22]的方法并有所修改。具体操作流程如下: 标准曲线的绘制: 精确称量 0.500 g 没食子酸标准品, 用蒸馏水在 100 mL 容量瓶中定容, 得到质量浓度为 5 mg/mL 没食子酸母液。分别吸取 1.0、2.0、3.0、4.0、5.0 mL 没食子酸母液于 10 mL 容量瓶中, 再用蒸馏水定容, 摇匀静置, 得到不同质量浓度的没食子酸标准溶液。分别吸取 1 mL 没食子酸标准溶液置于 50 mL 容量瓶中, 加入 10 mL 蒸馏水, 再加入 1.5 mL 福林-酚试剂, 充分振荡摇匀, 在 1~8 min 内加入 6 mL 10% Na_2CO_3 溶液, 蒸馏水定容, 充分混匀。将混合液于 30 °C下避光放置反应 2 h, 以空白试剂为参比, 在 765 nm 下测定吸光度。

样品总酚含量的测定: 准确称取 10.00 g 待测样品于 250 mL 三角瓶中, 加入 140 mL 甲醇, 混合后 65 °C 冷凝回流提取, 90 min 后将三角瓶取出冷却至室温, 用正己烷萃取, 直至液体变为浅黄色或无色, 再用甲醇定容至 50 mL。按上述总酚测定方法测定样品溶液的吸光度。

(4)生育酚含量测定

参照 GB 5009.82—2016《食品安全国家标准 食品中维生素 A、D、E 的测定》测定生育酚含量。

(5)抗氧化活性测定

DPPH 自由基清除活性测定: 参照刘贵涛等[23]的方法并有所修改。具体操作流程如下: 取 1.0 mL 样品溶液(油脂样品以乙醇溶解)于试管中, 加入 4.0 mL DPPH 溶液, 混匀后避光反应 30 min, 于 518 nm 处测定吸光度, 记为 A_s。以 4.0 mL DPPH 溶液和 1.0 mL 95%乙醇混合作为对照, 于 518 nm 处测定吸光度, 记为 A_0。以 4.0 mL 95%乙醇与 1.0 mL 样品溶液混合作为样品空白, 于 518 nm 处测定吸光度, 记为 A_r。按公式(1)计算 DPPH 自由基清除率。

$$\text{DPPH 自由基清除率}/\% = \left(1-\frac{A_s - A_r}{A_0}\right)\times 100\% \quad (1)$$

以样品质量浓度为横坐标(X, mg/mL)、DPPH 自由基清除率为纵坐标(Y)绘制回归曲线, 计算清除率达到 50%时对应的样品质量浓度, 即 DPPH 自由基清除活性的半数抑制浓度(half maximal inhibitory concentration, IC_{50}, 单位为 mg/mL)。

$ABTS^+$自由基清除能力测定: 参照韩乐等[24]的方法并稍作修改。具体步骤如下: 首先配制 $ABTS^+$自由基母液: 将 7.00 mmol/L ABTS 水溶液(0.028 g ABTS+7.5 mL 水)与 2.45 mmol/L 过硫酸钾水溶液(0.02 g 过硫酸钾+30 mL 水)按 1:1 体积混合, 暗处反应 12~16 h。然后用无水乙醇稀释母液, 使其吸光度达到 0.70±0.02, 作为 $ABTS^+$自由基工作液。测定时, 于试管中加入 180 μL $ABTS^+$工作液和 20 μL 样品待测液, 涡旋混匀后避光反应 6 min, 于 734 nm 处测定吸光度。以不同浓度 Trolox 标准工作液代替样品待测液, 在相同条件下测定吸光度并绘制标准曲线。将样品吸光度代入标准曲线方程, 计算样品待测液的 $ABTS^+$自由基清除能力, 结果以 Trolox 当量表示, 单位为 μmol/L。

铁离子还原能力(ferric reducing antioxidant power, FRAP)测定: 参照刘颖等[25]的方法并稍作修改。具体步骤如下: 油脂样品的铁离子还原能力通过 FRAP 方法测定。准确称取 0.0278 g 硫酸亚铁七水合物($FeSO_4 \cdot 7H_2O$), 用蒸馏水溶解并定容至 100 mL, 配制成 1.0 mmol/L Fe^{2+}母液, 再按需要配制不同浓度 Fe^{2+}标准溶液, 用于绘制标准曲线。

FRAP 工作液由 0.3 mol/L、pH 3.6 的醋酸缓冲液、10 mmol/L TPTZ 溶液和 20 mmol/L $FeCl_3$ 溶液按 10:1:1 (*V*:*V*:*V*)混合配制。测定时, 取 0.2 mL 样品溶液(油脂样品以乙醇溶解)或不同浓度 Fe^{2+}标准溶液于 10 mL 比色管中, 加入 3.0 mL FRAP 工作液和 0.3 mL 蒸馏水, 混匀后于 37 ℃水浴反应 10 min, 以蒸馏水作空白对照, 于 593 nm 处测定吸光度。将样品吸光度代入标准曲线回归方程, 计算其对应的 Fe^{2+}当量浓度, 结果以 Fe^{2+}当量表示, 单位为 μmol/mL。

(6)挥发性物质含量测定

参照于文龙等[26]的方法进行适当修改。样品处理: 取 8 mL 亚麻籽油样品, 加入 2 g NaCl, 置于 20 mL 顶空瓶中。使用 50 μm/30 μm CAR/DVB/PDMS 的固相微萃取(solid-phase microextraction, SPME)纤维进行挥发性化合物的提取。样品在 55 ℃下孵育 15 min, 以平衡挥发性物质, 随后进行 30 min 的萃取吸附。萃取完成后, 将 SPME 纤维迅速插入气相色谱(gas chromatography, GC)仪进样口, 在 250 ℃下进行 0.5 min 热解吸, 释放吸附的挥发性成分用于分析。

色谱条件: 使用 ThermoTrace 1310 气相色谱仪, 配备 TG-WAXA 毛细管柱(60 m×0.25 mm, 0.25 μm)。色谱程序为: 初始温度 40 ℃, 以 3 ℃/min 升至 180 ℃; 再以 20 ℃/min 升至 230 ℃, 并保持 15 min。载气为氦气(纯度 99.999%), 流速 1.2 mL/min; 进样口温度 250 ℃。

质谱条件: 使用 Thermo ISQ LT 质谱检测器, 离子源温度 260 ℃, 电子电离能 70 eV。扫描范围为 *m*/*z* 20~450, 记录总离子电流(total ion current, TIC)。通过与美国国家标准与技术研究院 2014 版质谱数据库(National Institute of Standards and Technology Mass Spectral Library 2014, NIST 14)中的标准谱图比对, 获得化合物定性结果, 并采用峰面积归一化法进行相对定量。

1.4 数据处理

所有实验均设 3 次重复, 结果以平均值±标准偏差表示。实验数据使用 Excel 2016 进行整理, 图表绘制采用 Origin 2021 软件。统计分析在 DPS 9.01 软件中进行, 采用单因素方差分析, 并结合 Duncan 多重比较法进行组间显著性检验。显著性水平设定为 $P<0.05$。

2 结果与分析

2.1 不同加工方式对熟制与生亚麻籽油基本理化指标的影响

不同加工方式对熟制与生亚麻籽油基本理化指标的影响如表 1 所示。由表 1 可见, 不同制油工艺及焙炒预处理对熟制与生亚麻籽油基础理化指标具有显著影响($P<0.05$)。碘值方面, 在 SP 条件下, 焙炒预处理组最高为 178.00 g/100 g, 显著高于未处理组的 171.00 g/100 g ($P<0.05$); 在 SC-CO_2 条件下, 焙炒预处理后碘值下降至 171.00 g/100 g。酸价方面, SC-CO_2 未处理组最高为 2.00 mg/g, 焙炒预处理后降至 1.80 mg/g; SP 条件下酸价整体较低, 两组分别为 1.30 mg/g 和 1.40 mg/g。过氧化值方面, 在 SP 条件下, 焙炒预处理组最高为 0.13 g/100 g, 显著高于其他组($P<0.05$), 而 SC-CO_2 未处理组最低为 0.04 g/100 g。皂化值在各组间差异不显著, 均维持在 190.80~191.80 mg/g 之间。上述结果表明, 焙炒预处理对亚麻籽油理化指标的影响在不同制油工艺下存在差异。Khattab 等[27]研究表明, 超临界流体萃取亚麻籽油具有较低的过氧化值、较高的碘值和较高的多不饱和脂肪酸含量, 说明提取方式会影响亚麻籽油的不饱和程度和氧化状态。Pradhan 等[28]比较 SC-CO_2、SP 和溶剂提取发现, 超临界 CO_2 可在较低温度下提取亚麻籽油, 并有利于获得较高比例的 *ω*-3 和 *ω*-6 脂肪酸。Waszkowiak 等[29]指出, 焙炒会改变亚麻籽细胞结构, 并可能提高油脂组分对热诱导变化的敏感性, 同时焙炒温度会影响亚麻籽油营养品质和氧化稳定性。因此, 本研究中不同处理组碘值、酸价和过氧化值的差异, 可能与制油方式对不饱和脂质保留及焙炒预处理对籽粒结构和油脂氧化稳定性的影响有关。

2.2 不同加工方式对熟制与生亚麻籽油脂肪酸组成及含量的影响

不同加工方式对熟制与生亚麻籽油脂肪酸组成及含量的影响如表 2 所示。由表 2 可见, 不同制油工艺及焙炒预处理对熟制与生亚麻籽油部分脂肪酸含量具有显著影响($P<0.05$)。不同处理油样脂肪酸组成总体一致, 均以 *α*-亚

表 1 不同加工方式对熟制与生亚麻籽油基础理化指标的影响

Table 1 Effects of different processing methods on the basic physicochemical properties of roasted and raw flaxseed oil

制油工艺	预处理	碘值/(g/100 g)	酸价/(mg/g)	过氧化值/(g/100 g)	皂化值/(mg/g)
SC-CO_2	未处理	175.00±2.83^{ab}	2.00±0.06^{a}	0.04±0.01^{c}	190.80±4.41^{a}
	焙炒	171.00±1.41^{b}	1.80±0.07^{b}	0.09±0.00^{b}	191.30±4.31^{a}
SP	未处理	171.00±1.41^{b}	1.30±0.06^{c}	0.09±0.01^{b}	191.80±5.03^{a}
	焙炒	178.00±1.41^{a}	1.40±0.04^{c}	0.13±0.01^{a}	191.80±6.05^{a}

注: 每列中不同的小写字母代表样品之间存在显著性差异($P<0.05$), 表 3~4 同。

麻酸、油酸、亚油酸和棕榈酸为主要脂肪酸, 其中 α-亚麻酸相对含量最高, 为 50.77%~53.90%; 油酸和亚油酸分别为 19.87%~20.83%和 15.13%~15.66%。此外, 各处理组饱和脂肪酸、单不饱和脂肪酸、多不饱和脂肪酸和总不饱和脂肪酸含量分别为 10.34%~13.27%、20.06%~21.04%、65.92%~69.56%和 86.69%~89.61%。其中, SP 焙炒组多不饱和脂肪酸和总不饱和脂肪酸相对含量最高, 分别为 69.56%和 89.61%, 而 SC-CO_2 未处理组饱和脂肪酸含量最高为 13.27%。总体来看, 不同处理组脂肪酸组成差异较小, 表明焙炒预处理和制油工艺未改变亚麻籽油以不饱和脂肪酸为主的基本组成特征。Khattab 等[27]比较不同提取方式所得亚麻籽油发现, 其脂肪酸组成总体相近, 但超临界流体萃取油具有较低饱和脂肪酸和较高多不饱和脂肪酸含量; Pradhan 等[28]也指出, SC-CO_2 处理组油与 SP 处理组油化学组成接近, 且超临界 CO_2 可获得较高比例的 ω-3 和 ω-6 脂肪酸。亚麻籽油富含 α-亚麻酸和亚油酸, 是植物源 ω-3 多不饱和脂肪酸的重要来源[30]。此外, Suri 等[31]研究表明, 焙炒处理仅引起亚麻籽油中硬脂酸、棕榈酸、油酸、亚油酸和 α-亚麻酸等主要脂肪酸含量的轻微变化, 并可通过改变细胞壁结构、增加细胞孔隙度促进油脂释放。因此, 本研究中各处理组脂肪酸组成总体稳定, 而 SP 焙炒组多不饱和脂肪酸和总不饱和脂肪酸相对含量略高, 可能与焙炒促进油脂释放及不同制油方式对脂质组分提取差异有关。

2.3　不同加工方式对熟制与生亚麻籽油总酚和生育酚含量的影响

不同加工方式对熟制与生亚麻籽油总酚和生育酚含量的影响如表 3 所示。由表 3 可见, 不同制油工艺及焙炒预处理对熟制与生亚麻籽油的总酚和生育酚含量均产生显著影响(P<0.05)。在总酚含量方面, SC-CO_2 未处理组为 0.60 mg/g, 高于 SP 未处理组的 0.55 mg/g, 焙炒预处理后, SC-CO_2 组总酚含量显著下降至 0.43 mg/g, 而 SP 焙炒组总酚增加至 0.62 mg/g, SC-CO_2 未处理组差异不显著(P>0.05)。在生育酚含量方面, 未处理组在两种制油工艺下均高于焙炒组。SC-CO_2 未处理组最高, 为 3.96 mg α-TE/100 g, 焙炒组下降至 2.61 mg α-TE/100 g; SP 未处理组为 3.62 mg α-TE/100 g, 焙炒组下降至 2.86 mg α-TE/100 g。上述结果表明, 总酚和生育酚对焙炒预处理及制油工艺的响应存在差异。未处理条件下, SC-CO_2 组总酚含量高于 SP 组, 这与超临界流体萃取亚麻籽油中酚酸含量较高的报道一致[27]。焙炒处理可改变亚麻籽细胞结构, 并提高油脂活性成分对热诱导变化的敏感性[29]; 同时, 烘烤过程中总酚含量可能受酚类物质释放及其与蛋白质等大分子结合状态变化的共同影响, 而 γ-生育酚在 120 ~ 160 ℃烘烤条件下呈下降趋势[32]。此外, 不同制油工艺对亚麻籽油中典型脂质伴随物具有特异性影响[33]。因此, 本研究中总酚含量在不同工艺下呈差异性变化, 而焙炒后生育酚含量整体下降, 可能与焙炒诱导的籽粒结构变化、活性成分热敏性及不同制油方式下油相迁移差异有关。

表 2　不同加工方式对熟制与生亚麻籽油脂肪酸组成及含量的影响(%)

Table 2　Effects of different processing methods on the fatty acid composition and content of roasted and raw flaxseed oil (%)

脂肪酸	SC-CO_2		SP	
	未处理	焙炒	未处理	焙炒
十五烷酸	0.02±0.00^{a}	0.02±0.00^{a}	0.02±0.00^{a}	0.02±0.00^{a}
棕榈酸	5.19±0.20^{b}	6.06±0.22^{a}	5.55±0.20^{ab}	5.74±0.17^{ab}
棕榈油酸	0.07±0.01^{a}	0.08±0.00^{a}	0.07±0.00^{a}	0.07±0.01^{a}
十七烷酸	0.04±0.00^{c}	0.04±0.00^{c}	0.06±0.00^{a}	0.05±0.00^{b}
顺-10-十七烯酸	0.03±0.00^{a}	0.04±0.00^{a}	0.04±0.00^{a}	0.03±0.00^{a}
硬脂酸	7.83±0.23^{a}	5.14±0.22^{c}	5.82±0.20^{b}	4.42±0.18^{d}
油酸	20.60±0.86^{a}	20.83±0.90^{a}	20.81±0.88^{a}	19.87±0.97^{a}
亚油酸	15.15±0.64^{a}	15.13±0.67^{a}	15.25±0.73^{a}	15.66±0.67^{a}
α-亚麻酸	50.77±1.87^{a}	52.40±2.00^{a}	52.10±2.08^{a}	53.90±1.98^{a}
花生酸	0.20±0.01^{a}	0.12±0.01^{c}	0.14±0.00^{b}	0.12±0.01^{c}
十一烯花生酸	0.07±0.00^{c}	0.10±0.01^{ab}	0.11±0.01^{a}	0.08±0.00^{bc}
饱和脂肪酸	13.27±0.56^{a}	11.38±0.45^{b}	11.58±0.41^{b}	10.34±0.35^{b}
单不饱和脂肪酸	20.77±0.52^{a}	21.04±0.92^{a}	21.03±0.89^{a}	20.06±0.98^{a}
多不饱和脂肪酸	65.92±2.47^{a}	67.54±2.68^{a}	67.35±2.81^{a}	69.56±2.65^{a}
总不饱和脂肪酸	86.69±3.49^{a}	88.58±3.59^{a}	88.38±3.70^{a}	89.61±3.63^{a}

注: 每行中不同的小写字母代表样品之间存在显著性差异(P<0.05), 表 5 同。

表 3 不同加工方式对熟制与生亚麻籽油总酚和生育酚含量的影响
Table 3 Effects of different processing methods on the total phenol and tocopherol content of roasted and raw flaxseed oil

制油工艺	预处理	总酚/(mg/g)	生育酚/(mg α-TE/100 g)
SC-CO_2	未处理	0.60±0.02^{a}	3.96±0.08^{a}
	焙炒	0.43±0.01^{c}	2.61±0.13^{c}
SP	未处理	0.55±0.03^{b}	3.62±0.11^{b}
	焙炒	0.62±0.02^{a}	2.86±0.10^{c}

2.4 不同加工方式对熟制与生亚麻籽油抗氧化活性的影响

不同加工方式对熟制与生亚麻籽油抗氧化活性的影响如表 4 所示。表 4 结果表明, 不同制油工艺及预处理方式对亚麻籽油抗氧化活性具有显著影响(P<0.05)。DPPH 自由基清除能力数值越低表示活性越强, 其中 SP 未处理组最低, 为 0.57 mg/mL, 表明其清除 DPPH 自由基能力最强; SC-CO_2 未处理组最高, 为 0.89 mg/mL, 抗氧化能力相对较弱。$ABTS^{+}$自由基清除能力和 FRAP 均以数值越高表示活性越强, 其中 SP 未处理组 $ABTS^{+}$自由基清除能力最高, 为 318.42 μmol/L, 显著高于其余各组(P<0.05); SP 焙炒组 FRAP 最高, 为 10.33 μmol/mL。总体来看, 不同处理组在 DPPH、$ABTS^{+}$和 FRAP 评价体系中的表现并不完全一致, 说明制油工艺和焙炒预处理对亚麻籽油抗氧化活性的影响具有指标依赖性。Mohamed 等[34]研究表明, 焙炒和提取方式会影响亚麻籽及其油脂中总酚、类黄酮等活性成分含量及抗氧化活性。Munteanu 等[35]指出, DPPH、$ABTS^{+}$和 FRAP 等抗氧化评价方法的反应机制不同, 其中 FRAP 主要反映电子转移能力, 而 DPPH 和 ABTS 涉及自由基清除反应, 因此抗氧化活性不宜仅依据单一方法评价。于坤等[33]关于不同制油工艺亚麻籽油的研究也表明, 不同制油工艺对体外抗氧化能力具有显著影响, 且 DPPH 自由基清除能力和 FRAP 的优势工艺并不完全一致。由此可见, 本研究中 SC-CO_2 未处理组虽具有较高的总酚和生育酚含量, 但其 DPPH 和 $ABTS^{+}$自由基清除能力未同步增强, 说明亚麻籽油抗氧化活性受活性成分组成、脂质伴随物协同作用及测定体系响应机制等多因素影响。因此, 对不同加工方式下亚麻籽油抗氧化活性的评价应结合 DPPH、$ABTS^{+}$自由基和 FRAP 等多指标综合分析。

表 4 不同加工方式对熟制与生亚麻籽油抗氧化活性的影响
Table 4 Effects of different processing methods on the antioxidant activity of roasted and raw flaxseed oil

制油工艺	预处理	DPPH 自由基清除能力/(mg/mL)	$ABTS^{+}$自由基清除能力/(μmol/L)	FRAP/(μmol/mL)
SC-CO_2	未处理	0.89±0.04^{a}	229.23±6.92^{c}	7.85±0.24^{c}
	焙炒	0.82±0.03^{ab}	204.54±5.52^{d}	9.26±0.21^{b}
SP	未处理	0.57±0.04^{c}	318.42±7.69^{a}	9.27±0.25^{b}
	焙炒	0.74±0.03^{b}	258.25±7.33^{b}	10.33±0.32^{a}

2.5 不同加工方式对熟制与生亚麻籽油挥发性成分的影响

不同加工方式对熟制与生亚麻籽油挥发性成分的影响如表 5 和图 1 所示。表 5 显示, 不同制油工艺及焙炒预处理对熟制与生亚麻籽油挥发性香气成分含量具有显著影响(P<0.05)。在醛类化合物中, 2,3-二甲基戊醛仅在 SP 焙炒组中检出, 巴豆醛在该组含量最高为 1.02%, 而 SC-CO_2 未处理组为 0.59%; 2-甲基-2-戊烯醛及(*E*,*E*)-2,4-庚二烯醛在焙炒处理后含量升高, 其余醛类化合物也呈增加趋势。酮类化合物中, 3,5-辛二烯-2-酮在焙炒处理后含量增加, 其中 SP 焙炒组最高为 3.69%; 2,3-戊二酮在 SP 未处理组含量相对较高为 0.59%, 其余酮类化合物在焙炒组中也呈总体上升趋势。在醇类化合物中, 1-戊烯-3-醇在 SP 焙炒组含量最高为 2.96%, 顺-2-戊烯醇在各组中均有检出, 且焙炒组略高于未焙炒组; 2-甲基-2,3-丁二醇仅在 SP 组中检出。酯类及部分其他醇类化合物在焙炒结合 SP 处理样品中均有检出。内酯类化合物中, γ-己内酯在 SC-CO_2 组和 SP 组中均可检测到, *DL*-泛酰内酯在焙炒后含量略有升高。在吡嗪及其他杂环化合物中, 2,3,5-三甲基吡嗪在 SP 焙炒组含量最高, 2-乙基-5-甲基吡嗪及其他吡嗪类化合物主要在焙炒组中检出; 二甲基亚砜仅在 SP 组中检出, 呋喃类化合物则主要存在于焙炒结合 SP 处理样品中。聚类热图结果进一步表明, SP 组在醛类、酮类及吡嗪类化合物中整体含量较高, 酯类、醇类及内酯类化合物分布也相对集中; 相比之下, SC-CO_2 组总体挥发性成分含量较低, 多数化合物处于中低水平。各处理组在热图上呈现明显的高低含量分布差异, 说明不同制油工艺及焙炒预处理可显著改变亚麻籽油的挥发性香气组成, 并形成较为清晰的香气谱分组特征。

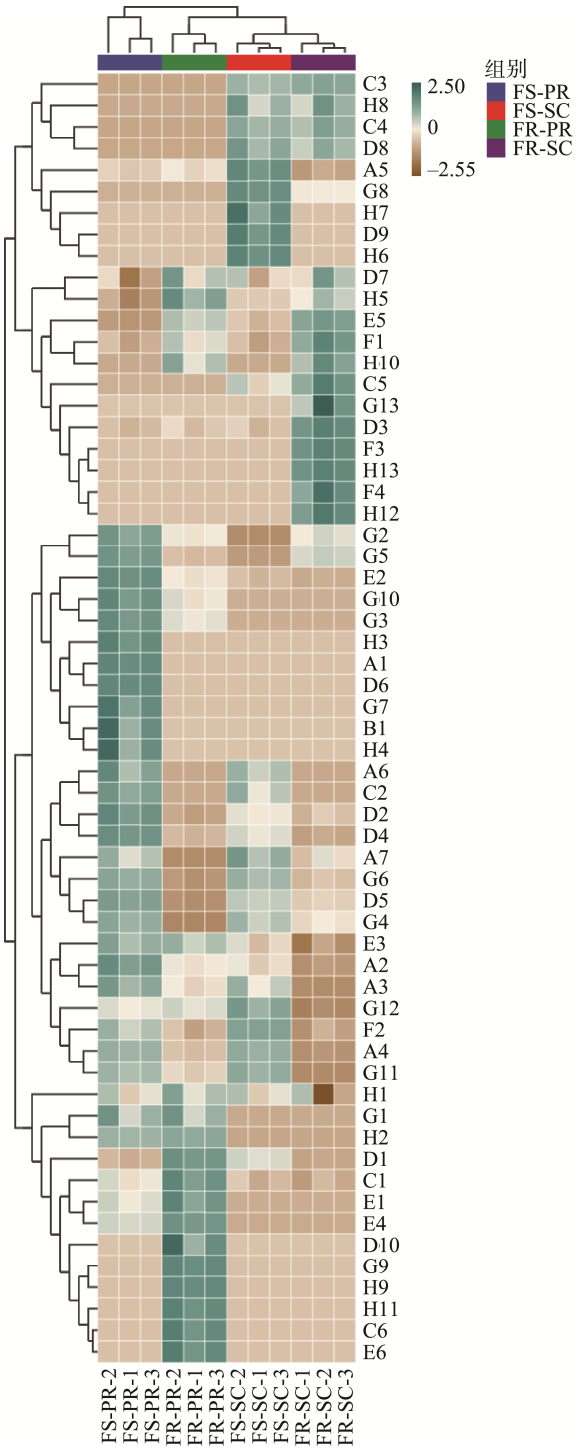
表 5 不同加工方式对熟制与生亚麻籽油挥发性成分相对含量的影响(%)
Table 5 Effects of different processing methods on the relative content of volatile compounds in roasted and raw flaxseed oil (%)

编号	CAS 号	化合物	SC-CO_2		SP	
			未处理	焙炒	未处理	焙炒
A1	32749-94-3	2,3-二甲基戊醛	-	-	-	1.13±0.06^{a}
A2	123-73-9	巴豆醛	0.59±0.03^{c}	0.76±0.06^{b}	0.78±0.03^{b}	1.02±0.04^{a}
A3	623-36-9	2-甲基-2-戊烯醛	-	0.12±0.04^{ab}	0.08±0.01^{b}	0.16±0.03^{a}
A4	4313-03-5	(*E*,*E*)-2,4-庚二烯醛	2.17±0.08^{c}	4.29±0.08^{a}	2.83±0.07^{b}	4.23±0.10^{a}
A5	620-02-0	5-甲基糠醛	0.36±0.03^{c}	0.68±0.03^{a}	0.47±0.03^{b}	0.44±0.01^{b}
A6	23074-10-4	5-乙基-2-糠醛	-	0.06±0.01^{a}	-	0.08±0.03^{a}
A7	1003-29-8	2-吡咯甲醛	0.03±0.01^{ab}	0.06±0.01^{a}	-	0.05±0.01^{a}

表 5(续)

编号	CAS 号	化合物	SC-CO_2		SP	
			未处理	焙炒	未处理	焙炒
B1	3302-10-1	3,5,5-三甲基己酸	-	-	-	0.03±0.01^{a}
C1	13151-34-3	3-甲基癸烷	0.02±0.01^{c}	0.03±0.01^{bc}	0.12±0.01^{a}	0.06±0.01^{b}
C2	3760-54-1	1-甲酰吡咯烷	-	0.06±0.03^{a}	-	0.09±0.01^{a}
C3	13475-82-6	2,2,4,6,6-五甲基庚烷	0.72±0.03^{a}	0.61±0.04^{b}	-	-
C4	5911-04-6	3-甲基壬烷	0.12±0.03^{a}	0.12±0.01^{a}	-	-
C5	38401-84-2	2-乙基-1,6-二氧螺环[4.4]-壬烷	0.05±0.01^{a}	0.02±0.01^{b}	-	-
C6	5881-17-4	3-乙基辛烷	-	-	0.19±0.03^{a}	-
D1	600-14-6	2,3-戊二酮	0.06±0.01^{c}	0.33±0.03^{b}	0.59±0.03^{a}	0.10±0.03^{c}
D2	19093-20-0	(*E*)-5-辛烯-2-酮	0.27±0.03^{bc}	0.33±0.01^{b}	0.23±0.01^{c}	0.47±0.03^{a}
D3	5704-20-1	2-羟基-3-戊酮	0.39±0.03^{a}	0.20±0.03^{b}	0.21±0.03^{b}	0.19±0.01^{b}
D4	5077-67-8	1-羟基-2-丁酮	0.15±0.03^{c}	0.41±0.04^{b}	0.21±0.01^{c}	0.69±0.03^{a}
D5	30086-02-3	3,5-辛二烯-2-酮	2.32±0.07^{c}	3.02±0.07^{b}	1.46±0.06^{d}	3.69±0.10^{a}
D6	38284-27-4	(3*E*, 5*E*)-辛-3,5-二烯-2-酮	-	-	-	1.56±0.06^{a}
D7	20189-42-8	3-乙基-4-甲基-吡咯-2,5-二酮	0.04±0.01^{a}	0.03±0.01^{a}	0.04±0.01^{a}	0.02±0.01^{a}
D8	141-79-7	4-甲基-3-戊烯-2-酮	0.05±0.01^{a}	0.06±0.01^{a}	-	-
D9	616-45-5	2-吡咯烷酮	-	0.17±0.03^{a}	-	-
D10	1121-05-7	2,3-二甲基-2-环戊烯-1-酮	-	-	0.03±0.01^{a}	-
E1	6032-29-7	2-戊醇	-	-	0.13±0.03^{a}	0.06±0.01^{b}
E2	616-25-1	1-戊烯-3-醇	1.32±0.04^{c}	1.46±0.08^{c}	1.83±0.06^{b}	2.96±0.07^{a}
E3	1576-95-0	顺-2-戊烯醇	0.60±0.04^{b}	0.68±0.04^{ab}	0.74±0.03^{a}	0.76±0.03^{a}
E4	5396-58-7	2-甲基-2,3-丁二醇	-	-	0.95±0.04^{a}	0.49±0.03^{b}
E5	33467-79-7	2,4-庚二烯-1-醇	0.38±0.03^{a}	0.13±0.03^{c}	0.28±0.03^{b}	0.05±0.01^{d}
E6	111-46-6	二乙二醇	-	-	0.09±0.01^{a}	-
F1	695-06-7	*γ*-己内酯	0.44±0.04^{a}	0.27±0.03^{b}	0.35±0.04^{ab}	0.27±0.03^{b}
F2	79-50-5	*DL*-泛酰内酯	0.10±0.01^{b}	0.18±0.00^{a}	0.11±0.01^{b}	0.16±0.01^{a}
F3	108-29-2	*γ*-戊内酯	0.26±0.03^{a}	-	-	-
F4	104-50-7	丙位辛内酯	0.04±0.01^{a}	-	-	-
G1	75135-41-0	2-烯丙基呋喃	-	-	0.03±0.01^{a}	0.03±0.01^{a}
G2	70424-14-5	(*E*)-2-(2-戊烯基)呋喃	0.17±0.03^{b}	-	0.15±0.01^{b}	0.29±0.03^{a}
G3	108-50-9	2,6-二甲基吡嗪	-	-	0.12±0.01^{b}	0.29±0.03^{a}
G4	13925-00-3	2-乙基吡嗪	0.11±0.01^{b}	0.17±0.03^{a}	-	0.20±0.01^{a}
G5	13360-64-0	2-乙基-5-甲基吡嗪	0.31±0.03^{b}	-	0.11±0.01^{c}	0.52±0.03^{a}
G6	14667-55-1	2,3,5-三甲基吡嗪	0.44±0.04^{c}	0.76±0.04^{a}	0.29±0.03^{b}	0.81±0.03^{a}
G7	10599-69-6	2-甲基-5-丙酰呋喃	-	-	-	0.05±0.01^{a}
G8	13360-65-1	3-乙基-2,5-甲基吡嗪	0.42±0.03^{b}	1.30±0.06^{a}	-	-
G9	289-80-5	哒嗪	-	-	0.56±0.03^{a}	-
G10	110-86-1	吡啶	-	-	0.04±0.01^{b}	0.11±0.01^{a}
G11	109-97-7	吡咯	-	0.22±0.01^{a}	0.10±0.01^{b}	0.20±0.01^{a}
G12	137-00-8	4-甲基-5-羟乙基噻唑	0.06±0.01^{c}	0.27±0.03^{a}	0.20±0.01^{b}	0.19±0.01^{b}
G13	536-78-7	3-乙基吡啶	0.02±0.01^{a}	-	-	-
H1	75-05-8	乙腈	0.04±0.04^{a}	0.06±0.01^{a}	0.07±0.01^{a}	0.06±0.01^{a}
H2	67-68-5	二甲基亚砜	-	-	1.10±0.03^{a}	0.99±0.03^{a}
H3	63169-61-9	2-甲基戊酸酐	-	-	-	0.21±0.03^{a}
H4	631-66-3	丙酮酰胺	-	-	-	0.03±0.01^{a}
H5	67-71-0	二甲基砜	0.11±0.01^{ab}	0.09±0.00^{bc}	0.13±0.01^{a}	0.07±0.01^{c}
H6	60-35-5	乙酰胺	-	0.30±0.03^{a}	-	-
H7	563-83-7	异丁酰胺	-	0.04±0.01^{a}	-	-
H8	123-56-8	丁二酰亚胺	0.03±0.01^{a}	0.03±0.01^{a}	-	-
H9	127-91-3	*β*-蒎烯	-	-	0.70±0.03^{a}	-
H10	108-95-2	苯酚	0.04±0.01^{a}	-	0.03±0.01^{a}	-
H11	105-60-2	己内酰胺	-	-	0.13±0.01^{a}	-
H12	4025-37-0	2-(氮杂环丙烷-1-基)乙胺	0.06±0.01^{a}	-	-	-
H13	111-76-2	乙二醇单丁醚	0.26±0.03^{a}	-	-	-

注: -表示未检出。



注: FS-PR-1、FS-PR-2、FS-PR-3 为熟亚麻籽 SP 样品; FR-PR-1、FR-PR-2、FR-PR-3 为生亚麻籽 SP 样品; FS-SC-1、FS-SC-2、FS-SC-3 为熟亚麻籽 SC-CO_2 样品; FR-SC-1、FR-SC-2、FR-SC-3 为生亚麻籽 SC-CO_2 样品。

图 1 不同加工方式熟制与生亚麻籽油挥发性香气的聚类热图分析

Fig.1 Cluster heatmap analysis of volatile aroma compounds in roasted and raw flaxseed oil under different processing methods

本研究表明，不同制油工艺及焙炒预处理显著影响亚麻籽油挥发性香气成分的组成。醛类、酮类、醇类及杂环化合物等在焙炒和 SP 组合中总体呈升高趋势，这与植物油脂热加工过程中挥发性成分的形成规律一致。脂肪酸氧化降解是挥发性香气形成的重要途径。不饱和脂肪酸在加热或储存过程中发生氧化，生成的氢过氧化物进一步裂解形成醛类、酮类和醇类等挥发性产物，这些化合物是油脂风味形成的重要挥发性组分[36]。除脂质氧化外，美拉德反应及其与脂质氧化产物的相互作用也是杂环类挥发物形成的重要途径。已有研究表明，热加工过程中脂类参与反应可显著促进挥发性香气化合物生成，其中脂质氧化-美拉德反应体系产生的挥发物种类更多，并与不饱和脂肪酸热降解密切相关[37]。

3 结 论

本研究表明，不同制油工艺及焙炒预处理显著影响熟制与生亚麻籽油的理化指标、脂肪酸组成、总酚和生育酚含量、抗氧化活性及挥发性香气成分。SP 结合焙炒有利于提高不饱和脂肪酸尤其是多不饱和脂肪酸的相对含量，并促进醛类、酮类、醇类及杂环化合物积累，从而增强油脂香气，但同时伴随一定氧化倾向；SC-CO_2 则更有利于保持热敏性脂肪酸及活性成分，维持油脂稳定性与抗氧化活性。不同加工条件下样品在挥发性香气谱上呈现明显聚类特征，表明制油工艺及焙炒预处理是影响亚麻籽油风味品质的重要因素。研究结果可为亚麻籽油加工工艺选择与产品开发提供参考。

参考文献

[1] 王淑珍, 李应霞, 王兴瑞, 等. 不同制油方法对青海亚麻籽油品质及货架期的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(11): 92–98.
Wang Shuzhen, Li Yingxia, Wang Xingrui, et al. Effects of different preparation methods on quality and shelf life of Qinghai flaxseed oil [J]. Food Science, 2022, 43(11): 92–98.

[2] 袁彬宏, 贾懿敏, 杨旖旎, 等. 不同品种浓香亚麻籽油的呈香特征解析[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(8): 90–100.
Yuan Binhong, Jia Yimin, Yang Yini, et al. Analysis of the aroma characteristics of different varieties of fragrant linseed oil [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(8): 90–100.

[3] 糟帆, 丁彩云, 马玉婷, 等. 不同制油工艺对亚麻籽油品质及抗氧化活性的影响[J]. 中国油脂, 2022, 47(9): 13–18, 25.
Zao Fan, Ding Caiyun, Ma Yuting, et al. Effects of different extraction processes on quality and antioxidant activity of linseed oil [J]. China Oils and Fats, 2022, 47(9): 13–18, 25.

[4] 罗萍, 祁昂, 李学红, 等. 凝胶因子及冷却温度对亚麻籽油基油凝胶特性的影响[J]. 粮食与油脂, 2025, 38(3): 67–73.
Luo Ping, Qi Ang, Li Xuehong, et al. Effects of gelator and cooling temperature on the properties of linseed oil-based oleogel [J]. Cereals & Oils, 2025, 38(3): 67–73.

[5] 杨婷婷, 孙万成, 罗毅皓, 等. 菜籽油、牦牛酥油和亚麻籽油调和油的制备及其稳定性研究[J]. 甘肃农业大学学报, 2026, 61(1): 274–279.
Yang Tingting, Sun Wancheng, Luo Yihao, et al. Development and

stability evaluation of a blended oil from rapeseed oil, yak chee and linseed oil [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2026, 61(1): 274–279.

[6] 甘生睿, 王进英, 杨芙蓉, 等. 不同制油工艺对亚麻籽油和亚麻籽饼粕蛋白品质影响研究[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(22): 270–277.
Gan Shengrui, Wang Jinying, Yang Furong, et al. Effect of different oil extraction methods on quality of flaxseed oil and protein extracted from flaxseed meal [J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(22): 270–277.

[7] 从光雷, 夏双双, 刘春雪, 等. 亚麻籽油营养价值及其在母猪生产中的应用研究进展[J]. 中国饲料, 2025(13): 30–35.
Cong Guanglei, Xia Shuangshuang, Liu Chunxue, et al. Research progress on the nutritional value of linseed oil and its application in sow production [J]. China Feed, 2025(13): 30–35.

[8] 孔梦茹, 杜艳丽, 陈小蝶, 等. 亚麻籽油热加工过程中 α-亚麻酸的异构化研究[J]. 中国粮油学报, 2025, 40(2): 135–145.
Kong Mengru, Du Yanli, Chen Xiaodie, et al. Investigation into isomerization reaction of α-linolenic acids in linseed oils during thermal processing [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2025, 40(2): 135–145.

[9] 陈福妮, 王卫飞, 穆利霞, 等. 6 种富含 α-亚麻酸食用油脂的主要组成成分及消化特征研究进展[J]. 中国油脂, 2024, 49(1): 60–66.
Chen Funi, Wang Weifei, Mu Lixia, et al. Progress on composition and digestive characteristics of 6 kinds of edible oils rich in α-linolenic acid [J]. China Oils and Fats, 2024, 49(1): 60–66.

[10] 赖玉萍, 姜福全, 黄思苑, 等. 亚麻籽油的营养成分、功能活性及应用研究进展[J]. 中国油脂, 2022, 47(8): 109–115.
Lai Yuping, Jiang Fuquan, Huang Siyuan, et al. Progress on nutritional components, functional activities and application of flaxseed oil [J]. China Oils and Fats, 2022, 47(8): 109–115.

[11] 王胜男, 张娜宁, 杨皓瑜, 等. 营养平衡调和油的配制及营养成分的测定[J]. 中国油脂, 2024, 49(3): 62–65, 81.
Wang Shengnan, Zhang Naning, Yang Haoyu, et al. Preparation of blend oil with balanced nutrition and itsnutritional components determination [J]. China Oils and Fats, 2024, 49(3): 62–65, 81.

[12] 廖振林, 李倩滢, 陈俊杰, 等. 亚麻籽油组分的功能活性研究进展[J]. 现代食品科技, 2021, 37(11): 379–389, 337.
Liao Zhenlin, Li Qianying, Chen Junjie, et al. Research progress on the functional activity of flaxseed oil components [J]. Modern Food Science & Technology, 2021, 37(11): 379–389, 337.

[13] Tang Zhenxing, Ying Ruifeng, Lv Binfeng, et al. Flaxseed oil: extraction, health benefits and products [J]. Quality Assurance and Safety of Crops & Foods, 2021, 13(1): 1–19.

[14] 刘婷婷, 石少侠, 段虎平, 等. 亚麻籽营养成分提取及其功能和应用研究进展[J]. 中国油脂, 2020, 45(3): 90–97.
Liu Tingting, Shi Shaoxia, Duan Huping, et al. Advances in nutrients extraction, functions and applications of flaxseed [J]. China Oils and Fats, 2020, 45(3): 90–97.

[15] 苏优拉, 张鼎, 孟祥雪, 等. 不同产地文冠果籽特性及其籽油理化指标差异分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(7): 314–322.
Su Youla, Zhang Ding, Meng Xiangxue, et al. Differential analysis of seed characteristics and physicochemical indexes of seed oil of *Xanthoceras sorbifolium* Bunge. from different provenances [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(7): 314–322.

[16] 周妍菲, 安惠琳, 徐燕南, 等. 种籽类油脂制取工艺与品质评价技术的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(3): 68–79.
Zhou Yanfei, An Huilin, Xu Yannan, et al. Research progress on the production process and quality evaluation technology of seed oils [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(3): 68–79.

[17] Čechovičienė I, Kazancev K, Hallmann E, et al. Supercritical CO_2 and conventional extraction of bioactive compounds from different cultivars of blackberry (*Rubus fruticosus* L.) pomace [J]. Plants, 2024, 13(20): 2931.

[18] Uwineza P A, Waśkiewicz A. Recent advances in supercritical fluid extraction of natural bioactive compounds from natural plant materials [J]. Molecules, 2020, 25(17): 3847.

[19] Waszkowiak K, Mikołajczak B. The effect of roasting on the protein profile and antiradical capacity of flaxseed meal [J]. Foods, 2020, 9(10): 1383.

[20] Zhang Zhenshan, Wei Yunyi, Guan Ni, et al. Changes in chemical composition of flaxseed oil during thermal-induced oxidation and resultant effect on DSC thermal properties [J]. Molecules, 2022, 27(20): 7135.

[21] Frolova Y, Sobolev R, Kochetkova A. Antioxidant activity and oxidative stability of flaxseed and its processed products: a review [J]. Sci, 2025, 7(4): 155.

[22] 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.
Zhao Dan, Wang Xuede, Zhang Runyang, et al. Effect of oil preparation process on oil quality [J]. China Oils and Fats, 2018, 43(6): 11–15.

[23] 刘贵涛, 权煜, 饶欢, 等. 亚麻籽粕蛋白多肽的制备及其抗氧化性[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(24): 84–91.
Liu Guitao, Quan Yu, Rao Huan, et al. Preparation of flaxseed meal peptides and their antioxidant properties [J]. Food Research and Development, 2024, 45(24): 84–91.

[24] 韩乐, 杨永晶, 王雨婷, 等. 树莓籽油工艺优化及抗氧化活性的研究[J]. 中国粮油学报, 2025, 40(12): 130–138.
Han Le, Yang Yongjing, Wang Yuting, et al. Process optimization and antioxidant activity of raspberry seed oil [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2025, 40(12): 130–138.

[25] 刘颖, 刘晓谦, 梁曜华, 等. 11 种植物油的脂肪酸组成与抗氧化活性比较[J]. 中国油脂, 2020, 45(10): 52–56, 61.
Liu Ying, Liu Xiaoqian, Liang Yaohua, et al. Comparison of fatty acid compositions and antioxidant activities of eleven vegetable oils [J]. China Oils and Fats, 2020, 45(10): 52–56, 61.

[26] 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 Wenlong, Hao Nan, Wu Kaijin, 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.

[27] Khattab R Y, Zeitoun M A. Quality evaluation of flaxseed oil obtained by different extraction techniques [J]. LWT-Food Science and Technology, 2013, 53(1): 338–345.

[28] Pradhan R C, Meda V, Rout P K, et al. Supercritical CO_2 extraction of fatty oil from flaxseed and comparison with screw press expression and solvent extraction processes [J]. Journal of Food Engineering, 2010, 98(4): 393–397.

[29] Waszkowiak K, Siger A, Rudzińska M, et al. Effect of roasting on flaxseed oil quality and stability [J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2020, 97(6): 637–649.

[30] Al-Madhagy S, Ashmawy N S, Mamdouh A, et al. A comprehensive review of the health benefits of flaxseed oil in relation to its chemical composition and comparison with other omega-3-rich oils [J]. European Journal of Medical Research, 2023, 28(1): 240.

[31] 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.

[32] 张东, 段晓亮, 王少甲, 等. 烘烤对亚麻籽油理化品质、化学组成和抗氧化活性的影响[J]. 中国食品学报, 2023, 23(12): 105–113.
Zhang Dong, Duan Xiaoliang, Wang Shaojia, et al. Effect of dry-air roasting on the physicochemical properties, chemical composition, and antioxidant activities of flaxseed oils [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(12): 105–113.

[33] 于坤, 禹晓, 程晨, 等. 制油工艺对亚麻籽油品质及脂质伴随物含量的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(16): 233–243.
Yu Kun, Yu Xiao, Cheng Chen, et al. Effects of processing techniques on the quality properties and lipid concomitants of flaxseed oil [J]. Food Science, 2020, 41(16): 233–243.

[34] Mohamed Ahmed I A, Değerli Z, Özcan M M, et al. Effect of different oil extraction methods on bioactive compounds, antioxidant capacity and phytochemical profiles of raw flaxseeds (*Linum usitatissimum*) and after roasting at different temperatures [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2023, 103(14): 7117–7126.

[35] Munteanu I G, Apetrei C. Analytical methods used in determining antioxidant activity: a review [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2021, 22(7): 3380.

[36] Shahidi F, Hossain A. Role of lipids in food flavor generation [J]. Molecules, 2022, 27(15): 5014.

[37] Ma Yingchuan, Zhang Kai, Xu Chunwei, et al. Contribution of lipid to the formation of characteristic volatile flavor of peanut oil [J]. Food Chemistry, 2024, 442: 138496.

(责任编辑: 安香玉 曹岱琳)