

# 亚麻籽油挥发性风味物质研究进展

袁彬宏<sup>1,2</sup>, 陈亚淑<sup>1</sup>, 周琦<sup>1,2,\*</sup>, 邓乾春<sup>1,2,\*</sup>

(1. 中国农业科学院油料作物研究所, 油料脂质化学与营养湖北省重点实验室, 油料油脂加工技术国家地方联合工程实验室, 湖北 武汉 430062; 2. 武汉轻工大学食品科学与工程学院, 湖北 武汉 430023)

**摘要:** 亚麻籽是我国八大油料作物之一, 亚麻籽油是富含 $\alpha$ -亚麻酸( $\alpha$ -linolenic acid, ALA)的健康植物油, 备受人们的青睐。挥发性风味物质是影响亚麻籽油品质和消费者喜爱度的关键因素。本文对亚麻籽油挥发性风味物质研究的最新进展进行了系统概述, 重点从分子感官科学的角度介绍了亚麻籽油挥发性风味物质的提取技术、分析和检测方法, 亚麻籽油挥发性风味的物质基础与呈香特征, 以及影响亚麻籽油风味形成的因素; 总结了亚麻籽油加工过程中的一些关键风味物质的可能形成途径, 为从风味导向角度改善亚麻籽油风味, 从而控制和提升亚麻籽油的品质提供理论依据。

**关键词:** 亚麻籽油; 挥发性风味物质; 关键香气; 形成途径; 影响因素

## Advances in the Study of Volatile Flavor Substances in Flaxseed Oil

YUAN BinHong<sup>1,2</sup>, CHEN YaShu<sup>1</sup>, ZHOU Qi<sup>1,2,\*</sup>, DENG QianChun<sup>1,2,\*</sup>

(1. Hubei Key Laboratory of Lipid Chemistry and Nutrition, Oil Crops and Lipids Process Technology National & Local Joint Engineering Laboratory, Oil Crops Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430062, China; 2. College of Food Science and Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China)

**Abstract:** Flaxseed is one of the eight major oil crops in China, and flaxseed oil is a healthy vegetable oil rich in  $\alpha$ -linolenic acid, which is highly favored by consumers. Volatile flavor substances are a key attribute affecting the quality of flaxseed oil and its popularity among consumers. This article provides a systematic overview of recent advances in the research on volatile flavor substances in flaxseed oil, with a focus on the techniques and methods for the extraction, analysis and detection of volatile flavor substances in flaxseed oil from the perspective of molecular sensory science, the material basis and aroma characteristics of volatile flavor in flaxseed oil, and the factors affecting the flavor formation of flaxseed oil. Moreover, it also summarizes the possible formation pathways of some key flavor substances during the processing of flaxseed oil. It is hoped that this review will provide a theoretical basis for improving the flavor of linseed oil.

**Keywords:** flaxseed oil; volatile flavor substances; key aromas; formation pathways; influential factors

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20221021-216

中图分类号: TS255.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2023)19-0290-09

引文格式:

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. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20221021-216. <http://www.spkx.net.cn>

YUAN BinHong, CHEN YaShu, ZHOU Qi, et al. Advances in the study of volatile flavor substances in flaxseed oil[J]. Food Science, 2023, 44(19): 290-298. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20221021-216. <http://www.spkx.net.cn>

收稿日期: 2022-10-21

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项(CARS-14)

第一作者简介: 袁彬宏(1999—)(ORCID: 0000-0002-7571-5604), 女, 硕士研究生, 研究方向为食品风味化学。

E-mail: ybh1553711696@163.com

\*通信作者简介: 周琦(1985—)(ORCID: 0000-0002-3369-1149), 女, 特聘研究员, 博士, 研究方向为食品风味化学。

E-mail: zhouqi01@caas.cn

邓乾春(1979—)(ORCID: 0000-0002-5044-9047), 男, 研究员, 博士, 研究方向为脂质化学与营养。

E-mail: dengqianchun@caas.cn

亚麻 (*Linum usitatissimum* L.) 又称胡麻, 其主产区为加拿大、中国、印度、美国、埃塞俄比亚和俄罗斯等国家<sup>[1]</sup>, 是我国重要的特色油料作物。目前我国亚麻籽年产量稳定在38~40万 t, 居世界第四, 主要分布在华北和西北地区, 种植面积最大的省区是甘肃、内蒙、山西和宁夏, 产量最高的省区是甘肃、宁夏、陕西和内蒙<sup>[2]</sup>。亚麻籽油中的脂肪酸主要包括油酸 (13.44%~19.39%)、亚油酸 (12.25%~13.44%)、 $\alpha$ -亚麻酸 ( $\alpha$ -linolenic acid, ALA) (39.00%~60.42%)、棕榈酸 (4.90%~8.00%) 和硬脂酸 (2.24%~4.59%)<sup>[3]</sup>, 亚麻籽油是ALA最主要的植物来源, 具有降血压、降血脂、抗炎等多种功效, 被誉为“液体黄金”<sup>[4]</sup>。此外, 亚麻籽油还含有丰富的生育酚和类胡萝卜素, 是一种具有保健作用的健康食用油<sup>[5]</sup>。

风味是评价油脂品质的重要指标之一<sup>[6]</sup>, 对于油脂而言, 通常来说风味是指具有挥发性的香气或者异味, 而不同的油脂则具有不同的风味轮廓和属性<sup>[7]</sup>, 例如菜籽油具有焙烤味、焦糖味、辛辣味等独特风味<sup>[8]</sup>; 橄榄油具有典型的清新果香; 葵花籽油具有独特的清香、坚果味、焙烤味等气味特征<sup>[9]</sup>; 花生油具有烤花生味、脂肪味和坚果味<sup>[10]</sup>; 而亚麻籽油主要呈现青草味、海腥味、烤香味和坚果味等。亚麻籽油一般采用压榨制取, 主要分为冷榨亚麻籽油和热榨亚麻籽油, 杨金娥等<sup>[11]</sup>研究表明, 冷榨亚麻籽油带有一种固有的清香气味, 热榨亚麻籽油则带有一种浓香烤香味。亚麻籽油挥发性风味形成的物质基础繁多, 主要包括醛酮类、醇类、杂环类、酸类、脂类、烷烃类等, 本文主要从分子感官科学的角度, 重点介绍亚麻籽油风味提取技术、分析和检测方法, 亚麻籽油挥发性风味的物质基础与呈香特征, 以及亚麻籽原料产地品种、生产工艺、储存等因素对亚麻籽油风味形成的影响, 旨在更深入地了解亚麻籽油的风味特性, 为获得高品质亚麻籽油产品提供科学基础。

## 1 亚麻籽油挥发性风味物质的分析和评价方法

### 1.1 亚麻籽油挥发性风味物质的提取技术

亚麻籽油因富含较高的不饱和脂肪酸而易被氧化, 因此油脂风味物质的提取不同于其他食品, 如何真实、完整、高效地提取挥发性风味物质是亚麻籽油风味提取的重点和难点。挥发性风味物质的提取方法主要包括静态顶空萃取 (static headspace extraction, SHS)、动态顶空萃取 (dynamic headspace extraction, DHS)、顶空固相微萃取 (headspace solid phase microextraction, HS-SPME) 和搅拌棒吸附 (stir bar sorptive extraction, SBSE) 技术等。HS-SPME结合气相色谱-嗅闻-质谱 (gas chromatography-olfactometry-mass spectrometry,

GC-O-MS) 技术是目前亚麻籽油挥发性风味物质研究中使用最广泛的一种样品制备和检测技术<sup>[12]</sup>, 具有简单、快速、灵敏度高、选择性好的优点。亚麻籽油的挥发性风味物质多以醛类、酮类、杂环类和醇类等物质构成, 种类较为复杂。前人在利用固相微萃取 (solid phase microextraction, SPME) 技术对亚麻籽油风味进行萃取时, 通常选择二乙烯基苯/碳分子筛/聚二甲基硅氧烷 (divinylbenzene/carboxen/polydimethylsiloxane, DVB/CAR/PDMS) 材料的复合型萃取头, DVB/CAR/PDMS 因其带有多孔颗粒聚合物涂层DVB, 并且复合涂层中固定相涂层的高分子材料性质不同, 因此对挥发性物质吸附富集效果更佳<sup>[13-16]</sup>。以往研究一般将萃取温度设定在40~60 °C之间, 因为温度过低会影响萃取效果, 温度过高又可能导致油脂氧化, 造成一些物质鉴定的假阳性, 因此亚麻籽油挥发性风味物质的推荐萃取温度应低于50 °C。除了HS-SPME吸附萃取以外, 一些新的吸附萃取方式具有吸附表面积大、吸附物质多, 选择强等特点, 例如SBSE是从液体样品中萃取香味成分非常有效的方法, 已成功应用于果汁、茶叶等食品中, 与SPME相似, 其也是通过聚合物涂层吸附样品分子的方式完成的<sup>[17]</sup>, 但是目前商业化的SBSE的吸附涂层只有DVB、CAR和PDMS这几种单涂层, 而亚麻籽油挥发性风味物质种类较多, 更适合DVB/CAR/PDMS材料的复合型涂层, 未来复合涂层如果应用于SBSE的方法上, 或者采用顺序搅拌子方式将单涂层逐一萃取, 将会有利于将该方法拓展到亚麻籽油风味研究的体系中。

除了顶空萃取外, 液-液微萃取 (liquid-liquid microextraction, LLME) 和超临界流体萃取 (supercritical fluid extraction, SFE) 技术也曾应用于油脂风味物质的提取中, 但是有机溶剂的使用可能会引入其他杂质, 可能会改变食品中挥发性风味物质的原有性质<sup>[18]</sup>。而溶剂辅助风味蒸发 (solvent assisted flavor evaporation, SAFE) 技术是一种新型的风味物质提取分离技术, 对挥发性风味物质的破坏较小, 热敏性风味成分损失少, 提取的风味物质更接近于真实样品, 既可以从高脂肪的食品基质中获取到较高得率的风味物质, 也可以应用于提取乳制品、啤酒、橙汁、果浆等食品中的风味物质<sup>[12]</sup>。Yang Yini等<sup>[19]</sup>采用SAFE结合GC-O-MS对亚麻籽粉中的挥发性风味物质进行分析, 共鉴定出52种气味活性化合物, 发现己醛、D-柠檬烯、1-己醇、 $\beta$ -水芹烯、 $\alpha$ -水芹烯和壬醛具有青草、新鲜的薄荷气味等特征, 是亚麻籽粉中典型的风味。Yin Wenting等<sup>[20]</sup>采用SAFE和HS-SPME提取葵花籽油中的挥发性化合物, 并采用GC-O-MS技术和香气提取物稀释分析 (aroma extract dilution analysis, AEDA) 对香气进行了表征, 发现SAFE方法萃取能进一步补充HS-SPME萃取的不足。总而言之,

HS-SPME是目前应用较多的技术,同时SAFE亦可以作为新的提取手段应用于亚麻籽油风味的提取中。

### 1.2 亚麻籽油挥发性风味物质的分离检测技术

挥发性风味物质的分离检测技术是风味研究不可或缺的技术手段,主要有气相色谱-质谱联用(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)、全二维气相色谱(comprehensive two-dimensional gas chromatography, GC×GC)、气相色谱-串联四极杆质谱(gas chromatography-tandem quadrupole mass spectrometry, GC-MS/MS)、气相-离子迁移谱(gas phase-ion mobility spectrometry, GC-IMS)、液相色谱-质谱联用(liquid chromatography-mass spectrometry, LC-MS)等。目前在亚麻籽风味的分析检测中GC-MS使用广泛,Wei Changqing等<sup>[21]</sup>利用HS-SPME-GC-MS对不同焙炒程度的亚麻籽油挥发性风味物质进行分析,在不同的亚麻籽油中共检测出69种挥发性成分,并发现随焙炒温度升高而增多,然而不是所有挥发性风味物质都有实际贡献,因此还需借助嗅觉技术才能进一步明确其特征风味化合物;于文龙等<sup>[16]</sup>运用GC-O-MS技术对热榨和冷榨工艺的亚麻籽油关键香气成分进行分析,分别检测出16种和14种特征香气成分。除了传统的GC-O-MS技术外,全二维气相色谱-嗅觉-质谱(comprehensive two-dimensional gas chromatography-olfaction-mass spectrometry, GC×GC-O-MS)技术可以在一维和二维分析模式之间切换,对于一维上的重叠峰可以再次进行分离,实现二维分析条件下的嗅觉功能。例如Zhao Mu等<sup>[22]</sup>考虑到花椒香气的复杂性,采用GC-MS对汉源花椒的挥发性风味物质和关键芳香活性成分进行了研究,利用GC-O-MS共鉴定出72种挥发性风味物质,其中28种物质具有风味贡献,利用GC×GC-O-MS共鉴定出116种挥发性风味物质,其中43种具有风味贡献,相对常规GC-O-MS能鉴定出更多的关键风味物质。

另外,代谢组学是基于核磁共振、GC-MS、LC-MS、毛细管电泳-质谱等技术手段发展起来的用于识别和量化生物系统中所有代谢产物的系统方法<sup>[23]</sup>,在食品风味领域主要用于确定非挥发性风味前体物和追踪反应途径,确定挥发性风味物质的贡献度和建立预测模型等<sup>[12]</sup>。Zhang Dong等<sup>[24]</sup>采用脂质组学方法对未焙炒和焙炒亚麻籽油的脂质组变化进行了对比分析,共鉴定出238种单体脂质,通过生物信息学分析,确定了浅色和深色亚麻籽油中23种结构显著不同的脂质,为了解焙炒工艺对亚麻籽油脂质谱变化的影响提供了基础。Hu Qian等<sup>[25]</sup>采用脂质组学、风味组学和模拟分析相结合的方法,比较了4种植物油(棕榈油、大豆油、菜籽油和亚麻籽油)在热加工过程中的氧化产物,发现高棕榈酸含量的植物油的潜在标记物为十一烷烃、十二烷烃和2-己酮;

高油酸含量的植物油的潜在标记物为2-十一烯醛;而(E,E)-2,4-壬二烯醛、3-辛烯-2-酮和3-壬烯-2-酮则是高亚油酸含量植物油的潜在标记物;高亚麻酸类植物油的潜在标记物为1-戊烯-3-醇、(E)-2-丁烯醛、(E)-2-戊烯醛、(E,E)-2,4-庚二烯醛、2-乙基呋喃、2-戊酮和3-己烯-2-酮。Sun Jiayang等<sup>[26]</sup>采用超高液相色谱串联四极杆飞行时间质谱动态检测榛子油加速储藏24 d过程中的脂质组成,鉴定出103种脂类中的10个亚类,证实了储藏对榛子油脂类的影响,并且基于生物信息学分析检测出榛子油在储藏过程中的7个最重要的代谢途径,阐明了榛子油的脂质组成及储藏对植物油脂质组成的影响。就脂质代谢组学而言,亚麻籽油富含多不饱和脂肪酸,在焙炒过程中,脂肪酸总含量会随着焙炒温度的升高和时间的延长而显著降低,其中油酸、亚油酸和ALA等不饱和脂肪酸的降解会产生(E)-2-庚烯醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛、(E,E)-2,4-庚二烯醛、1-戊烯-3-醇等风味物质,其中ALA降解对风味形成的贡献较大。最新研究表明磷脂酰胆碱、磷脂酰乙醇胺、磷脂酰甘油、磷脂酰肌醇、溶血磷脂酰胆碱含量呈现先增加后降低的趋势;甘油三酯(18:3/18:3/18:3)和甘油三酯(18:2/18:3/18:2)含量下降,而其他甘油三酯含量变化差异不明显,氧化脂肪酸的含量先增加后减少,表明它们在焙炒初期积累,后期随着焙炒的进行而降解,说明脂质代谢物中有多种脂质成分参与了亚麻籽油风味的形成<sup>[23-24,27-28]</sup>。未来脂质代谢组学用于亚麻籽油风味的研究难度在于,首先关于亚麻籽原料的全脂质组分析还有待进一步挖掘,需要建立相关的脂质代谢组学标准库,才能明晰脂质氧化与亚麻籽关键风味物质生成的关联;其次,脂质代谢组学获得的大量数据,需要进一步通过靶向代谢物的精准定量进行差异物的挖掘,将有助于理清前体物与风味产物直接的量效与呈香之间的关系。最后,风味组学、脂质代谢组学等多组学的联合分析也为更精准地开展调控油脂风味提供思路。

### 1.3 亚麻籽油中关键风味物质的确定方法

#### 1.3.1 挥发性风味物质的鉴定

挥发性风味物质的准确鉴定往往通过4个层面,即保留指数、标准品、嗅觉和质谱。同时,并不是所有化合物都对食品风味有贡献,各风味物质的贡献大小不仅取决于含量,还与其阈值有关<sup>[29]</sup>。通过比较各化合物对食物香气的贡献度,可以确定食品中的重要关键风味物质。当气味活性值(odor activity value, OAV)≥1时,表示该化合物对物质整体风味有明显贡献,即可判定为重要风味化合物,且OAV越高,贡献越大<sup>[30]</sup>。现今关于亚麻籽油阈值的测定并不是基于亚麻籽油基质本身<sup>[16,31-33]</sup>,所以亚麻籽油的阈值还需要进一步测定,以期获得更加准确的OAV,从而有利于进行关键风味物质的筛选。

关键风味物质是食品复杂挥发物中的一小部分,但是决定了食品整体气味。关于关键风味物质的鉴定方法主要包括香气提取物稀释分析法和动态顶空稀释分析(dynamic headspace dilution analysis, DHDA)法。AEDA法是气相色谱嗅闻(gas chromatography-olfactometry, GC-O)检测技术中比较常用的一种分析方法,通过逐步稀释萃取物,然后再由一组经过专业培训的评价员对经GC-O分析的每个稀释度下的样品进行评价,直到不能嗅闻出气味为止,能够被嗅闻到的最高稀释值即为风味化合物的风味稀释(flavour dilution, FD)因子,一般来说FD因子值越高说明其浓度越大或者其香味强度越大,属于重要的风味化合物<sup>[34]</sup>;而DHDA是针对DHS设计的一种香气稀释分析方法,其结果可以直接反映气味化合物对样品风味的贡献。

### 1.3.2 挥发性风味物质的定量分析

风味物质的定量分析方法主要有面积归一化法、内标法、外标法和稳定同位素稀释分析(stable isotope dilution analysis, SIDA)法。段旭林等<sup>[35]</sup>对浓香菜籽油、浓香花生油、浓香亚麻籽油的挥发性成分进行分析,并用峰面积归一化法对匹配度不低于80的物质进行了定量,共检测出66种挥发性物质,其中浓香菜籽油35种、浓香花生油8种、浓香亚麻籽油32种。刘国琴等<sup>[15]</sup>采用内标法对热榨和冷榨亚麻籽油中的醇类、醛类、酮类等挥发性物质的含量及其占总挥发性物质含量的比例进行探讨,发现冷榨亚麻籽油中醇类物质含量相对较高,而热榨亚麻籽油中醛类物质含量相对较高。Yang Yini等<sup>[19]</sup>利用外标法定量了亚麻籽粉中的33种挥发性风味物质,其中有24种化合物的OAV大于1。Matheis等<sup>[36]</sup>以分子感官科学的系统研究方法为基础,通过AEDA、GC-O-MS鉴定实验,利用SIDA法对冷榨菜籽油中关键风味物质进行了定量,该方法是采用与待测物具有相同分子结构的某种浓缩同位素物质作为稀释剂,通过同位素丰度的精确质谱测量和所加稀释剂的准确称量,经数学计算求得样品中待测物绝对量的一种灵敏、准确的定量分析方法<sup>[29]</sup>。目前,由于SIDA法所需要的标准品成本较高,且很多物质需要重新合成,因此还未广泛应用于食品风味物质的定量中。目前亚麻籽油挥发性风味物质的定量多采用面积归一化法和内标法这两种相对定量的方法,但未来对于一些重要风味物质的研究,如果需要进一步了解其加工过程中准确的含量变化,有必要通过SIDA法进行精准定量分析。

### 1.3.3 亚麻籽油香气的重组与还原

在风味分离萃取和检测的实验过程中,香气化合物难免会有损失,因此,可以通过香气回填重组实验,在模拟体系或物质真实体系中验证该物质的呈香属性,

通过一一缺失从而判断各种香气化合物对整体香气的贡献。在油脂风味的重组研究中,Yin Wenting等<sup>[37]</sup>通过分子感官科学的方法,对焙炒花生油和冷榨花生油的关键芳香活性化合物和感官品质进行表征和比较,在精制无味的花生油中将关键香气化合物进行了重组,分析验证了花生油的特征香气。Jia Xiao等<sup>[38]</sup>对甘蓝型和芥菜型两种浓香菜籽油的香气化合物进行了重组实验,重组体的脂肪味和青草味与原始样品一致,而鱼腥味和坚果味与真实样品有微小差异。因此,需要进一步对亚麻籽油的香气物质进行重组与还原实验,以建立亚麻籽油香气的关键靶标,从而应用于原料筛选、工艺优化和质量控制中。

## 2 亚麻籽油风味构成的物质基础及形成途径

植物油中的风味物质主要包括由脂氧合酶途径、支链氨基酸降解、美拉德反应、糖(蛋白质)热分解和维生素降解途径产生的小分子醇类、醛类、酮类、酯类、吡嗪类、呋喃类和吡咯类<sup>[39]</sup>。从整体工艺上来看,亚麻籽油一般可分为冷榨亚麻籽油和热榨亚麻籽油,近年来关于冷榨和热榨亚麻籽油风味物质差别的研究也较多。杨金娥等<sup>[11]</sup>研究表明,冷榨亚麻籽油带有一种固有的清香气味,热榨亚麻籽油则带有一种浓香烤香味。郝楠<sup>[40]</sup>对不同烘烤温度下的亚麻籽油挥发性成分进行分析发现,随温度升高醛类物质含量也不断增加,并伴有大量杂环类物质生成,赋予热榨亚麻籽油烤香以及坚果香,但是当温度升高到200℃时,就会产生焦糊味等不愉快的味感。韩玉泽等<sup>[41]</sup>对青海亚麻籽油风味进行研究发现,醛类化合物对整体风味起主导作用;烷烯类化合物具有植物固有的清香味,但其性质不稳定且阈值较高,对亚麻籽油风味贡献不大;同时相对含量较低的醇类、酯类也因阈值较高而对亚麻籽油风味贡献较低。本文通过总结前人研究,梳理了文献中常见的亚麻籽油挥发性风味物质及其代谢途径,并分别对各类物质的香气特征进行论述。

### 2.1 醛酮类

醛酮类化合物是油脂分解或氧化的产物,植物油的氧化会导致碳氢过氧化物的形成,从而生成各种易挥发的短链次生氧化产物,其中有些产物易挥发,形成不愉快的气味而影响植物油的整体风味<sup>[42]</sup>。表1总结了亚麻籽油中常见的醛类物质,醛类物质的阈值相对较低,所以对亚麻籽油整体的风味贡献很大,且多数起到积极贡献作用,呈现出油脂味、坚果味和青草味<sup>[13]</sup>。己醛呈现油脂香、青草香,可由亚油酸或花生四烯酸氧化产生,对热榨亚麻籽油香气成分有突出贡献;辛醛呈现油脂香、蜂蜜香,可由油酸氧化产生;壬醛呈现花生香、香草香,可由油酸氧化产生;(E)-2-己烯醛呈现油脂香、杏仁香,

可由亚麻酸氧化产生；(E,E)-2,4-庚二烯醛呈现油脂香、果香，是亚麻酸的主要氧化产物，也是浓香亚麻籽油中的特征风味物质<sup>[40-41,43]</sup>。苯甲醛是芳香氨基酸苯丙氨酸的降解产物，苯丙氨酸具有宜人的杏仁香气，是亚麻籽油中的特征风味<sup>[44]</sup>。

表1 亚麻籽油中已鉴定出的醛类风味物质<sup>[5,8,11,13-16,40,45-50]</sup>  
Table 1 Common aldehydes identified in flaxseed oil<sup>[5,8,11,13-16,40,45-50]</sup>

化合物	CAS	代谢途径	气味描述
己醛	66-25-1	亚油酸/花生四烯酸降解	油脂味、青草味
庚醛	111-71-7	油酸降解	坚果味、腐臭味
辛醛	124-13-0	油酸降解	油脂味、蜂蜜味
壬醛	124-19-6	油酸降解	花生味、香草味
癸醛	112-31-2	油酸降解	甜橙味、玫瑰香
(E)-2-己烯醛	6728-26-3	亚麻酸降解	油脂味、杏仁味
(E)-2-庚烯醛	18829-55-5	油酸降解	油脂味、橘子味
(E)-2-癸烯醛	3913-81-3	油酸降解	脂肪味、蘑菇味
(E,E)-2,4-庚二烯醛	4313-03-5	亚麻酸降解	油脂味、果香味
(E,E)-2,4-癸二烯醛	25152-84-5	亚油酸降解	油脂味、黄瓜味
2-辛烯醛	2363-89-5	亚麻酸降解	脂肪味、青草味
苯甲醛	100-52-7	苯丙氨酸降解	杏仁味

酮类物质对亚麻籽油香气的形成也有重要影响<sup>[44]</sup>。

亚麻籽油中主要的酮类挥发性物质有2-丁酮、(E,E)-3,5-辛二烯-2-酮、3,5-辛二烯-2-酮、6-羟基-2-己酮、(E)-3-辛烯-2-酮等。酮类物质通常具有甜味和果香味，这使得焙炒油及其制品具有一定的果香<sup>[6]</sup>。(E,E)-3,5-辛二烯-2-酮和(E)-3-辛烯-2-酮都是亚麻籽油挥发性物质中最常见的酮类物质，前者主要呈现出杏仁味和轻微的酸味，后者主要呈现青草香和蘑菇香。酮类物质可能是非端位羟基醇的氧化产物，也可能是酯类物质分解的产物<sup>[32]</sup>。另外，ALA作为亚麻籽油中含量最高的不饱和脂肪酸，在有氧条件下发生热反应，并通过酯氧合酶途径降解生成氢过氧化物<sup>[51]</sup>。研究显示，ALA与亚油酸等不饱和脂肪酸的降解途径非常相似，在进入脂氧合酶途径后，经立体定向氧化，形成9-氢过氧化物和13-氢过氧化物中间产物，9-氢过氧化物和13-氢过氧化物在裂解酶的作用下生成烯醛，再进一步形成烯醇、烯酯等物质<sup>[52]</sup>，这些物质相互作用或参与美拉德反应形成更多的挥发性风味物质。但是目前关于ALA降解途径、降解产物与亚麻籽油风味之间的具体关联还有待进一步研究。

## 2.2 醇类

在挥发性成分中，醇类物质气味阈值较高，所以其对亚麻籽油整体风味的贡献率相对较低<sup>[15]</sup>。由表2可知，亚麻籽油常见的醇类关键挥发性物质有1-戊醇、己醇、庚醇、辛醇、壬醇、1-辛烯-3-醇、1-戊烯-3-醇等。醇类挥发性物质通常是由油脂中不饱和脂肪酸生物降解形成，

并且是生成酯类物质的主要前体物质，一般在果类产品特征香气中较为常见<sup>[13]</sup>，主要呈现清香、清淡、甜香等。热榨工艺对醇类挥发性有一定破坏作用，会明显地降低亚麻籽油产生的酒香、果香、清香、清淡、甜香、醇香等气味特征。己醇、1-辛烯-3-醇是由亚油酸降解产生，分别呈现青草香和蘑菇香，赋予热榨亚麻籽油令人愉悦的味感<sup>[40]</sup>。1-戊醇、庚醇、壬醇由油酸降解产生，2-丁醇是由亚麻酸降解产生，呈现出甜杏味。除此之外，常见的醇类挥发性物质还有(E)-2-己烯-1-醇、糠醇等，(E)-2-己烯-1-醇具有青草、水果的香味，对油脂香气的贡献是中性的，糠醇仅存在于未加热的亚麻籽油中，可由糖前体转化或糠醛的酶促/化学还原方式形成<sup>[31]</sup>。

表2 亚麻籽油中已鉴定出的醇类风味物质<sup>[5,8,11,13-16,40,45-50]</sup>  
Table 2 Common alcohols identified in flaxseed oil<sup>[5,8,11,13-16,40,45-50]</sup>

化合物	CAS	代谢途径	气味描述
1-戊醇	71-41-0	油酸降解	甜味、酒精味
己醇	111-27-3	亚油酸降解	青草味、甜味
庚醇	111-70-6	油酸降解	芳香味、油脂味
壬醇	143-08-8	油酸降解	玫瑰香、柠檬香
2-丁醇	78-92-2	亚麻酸降解	甜杏味
1-辛烯-3-醇	3391-86-4	亚油酸降解	蘑菇香
1-戊烯-3-醇	616-25-1	亚麻酸降解	奶油味、萝卜味
2-甲基丁醇	137-32-6	异亮氨酸Strecker降解	酒精味、脂肪味
3-甲基-1-丁醇	123-51-3	亮氨酸Strecker降解	奶酪味、酒精味
2-甲基丙醇	78-83-1	缬氨酸Strecker降解	酒精味

## 2.3 杂环类

杂环类物质主要包括吡嗪、呋喃、吡咯等，对热榨亚麻籽油的香气具有重要贡献，是美拉德反应的产物<sup>[40]</sup>。吡嗪类化合物阈值极低，呈现典型焙烤坚果香气，是构成亚麻籽油风味的主要贡献物质。此外，呋喃、噻唑、吡咯、吡啶类化合物的不同香气对亚麻籽油的风味也有一定贡献，如某些呋喃类化合物具有各种果香和烤香，吡咯类化合物一般呈坚果香味，但是这类物质在一定浓度下可能具有安全性问题<sup>[42]</sup>。表3总结了亚麻籽油中常见杂环类风味物质的代谢途径及其气味描述。热榨工艺能够促进2-乙基呋喃的生成，减少2-甲基呋喃的生成，呋喃类物质呈焦甜气息，通常是由果糖和葡萄糖等糖的热降解产生<sup>[31]</sup>，含有这种物质的食品具有浓郁的烤芝麻油香甜味，所以热榨工艺能影响亚麻籽油的焦甜和香甜味<sup>[15]</sup>。吡嗪类化合物由美拉德反应生成，通常呈现出坚果香和焙烤香<sup>[40]</sup>。2-乙基呋喃、2-戊基呋喃、2-甲基吡嗪、2,5-二甲基吡嗪、2,3,5-三甲基吡嗪、3-乙基-2,5-二甲基吡嗪的阈值都特别低，对热榨亚麻籽油风味的形成有很大贡献，构成了热榨亚麻籽油特有的烤香味、焦糊味和金属味。

表3 亚麻籽油中已鉴定出的杂环类风味物质<sup>[5,8,11,13-16,40,45-50]</sup>

Table 3 Common heterocyclic substances identified in linseed oil<sup>[5,8,11,13-16,40,45-50]</sup>

化合物	CAS	代谢途径	气味描述
2-乙基呋喃	3208-16-0	糖的热降解/亚麻酸降解	咖啡味、焦糊味
2-戊基呋喃	3777-69-3	亚油酸降解	青豆味、金属味
2,5-二甲基吡嗪	123-32-0	美拉德反应	炒籽香、烤香
2,6-二甲基吡嗪	108-50-9	美拉德反应	咖啡香、炒花生味
2,3,5-三甲基吡嗪	14667-55-1	美拉德反应	炒籽香、坚果香
3-乙基-2,5-二甲基吡嗪	13360-65-1	美拉德反应	炒籽香、薯片味

#### 2.4 其他类：酸类、脂类、烷烃等

表4列举了其他几类亚麻籽油中常见的风味物质，常见的酸类挥发性物质有乙酸、己酸、丙酸、戊酸、辛酸、壬酸等。乙酸是冷榨亚麻籽油特有的香气成分，赋予其辛辣味；己酸主要是由亚油酸降解产生，具有干酪味和腥味，且在冷榨亚麻籽油中含量较高，可能与亚麻籽油青腥味有关<sup>[40]</sup>。酯类的阈值一般较低，对植物油的整体气味既可能起促进作用，也可能起抑制作用。大多数酯类具有果味和甜味<sup>[53]</sup>。亚麻籽油中的主要酯类挥发性物质有 $\gamma$ -己内酯、 $\gamma$ -丁内酯、乙酸乙酯，其中， $\gamma$ -己内酯在亚麻籽油中呈现甜香、中药香， $\gamma$ -丁内酯呈现甜香、焦糖香，乙酸乙酯呈现果香和甜香。烷烃类化合物主要由脂肪酸烷氧自由基均裂产生，此类化合物阈值较高，一般认为难以对植物油风味产生较大影响<sup>[54]</sup>。此外，甲基苯、 $\alpha$ -蒎烯、 $\beta$ -蒎烯、*D*-柠檬烯、二甲基亚砷、2-丁烯腈、二甲基硫醚等在亚麻籽油中也是较为常见的物质。腈类是在油脂风味中比较少见的一种挥发性物质，杨金娥等<sup>[11]</sup>仅在经140℃烤籽处理后的压榨亚麻籽油挥发性物质中检测到了2-丁烯腈和3-丁烯腈这两种腈类物质，并认为是由亚麻籽中毒性化合物生氰糖苷分解产生的。刘国琴等<sup>[15]</sup>认为热榨工艺能够促进亚麻籽油中二甲基硫醚的生成，二甲基硫醚呈青草味、湿土味、腥味，由甲硫氨酸降解产生，能明显增强亚麻籽油的青草味和腥味。

表4 亚麻籽油中已鉴定出的其他类风味物质<sup>[5,8,11,13-16,40,45-50]</sup>

Table 4 Common other flavor substances identified in linseed oil<sup>[5,8,11,13-16,40,45-50]</sup>

化合物	CAS	代谢途径	气味描述
己酸	142-62-1	亚油酸降解	干酪味、腥味
辛酸	124-07-2	亚麻酸降解	油脂味
$\gamma$ -己内酯	695-06-7	醛类氧化	甜味、中药味
乙酸乙酯	141-78-6	亚油酸降解	果香味、甜味
二甲基硫醚	75-18-3	甲硫氨酸降解	青草味、湿土味

### 3 亚麻籽油挥发性风味物质的影响因素

#### 3.1 亚麻籽品种与产地

亚麻籽的品种会因其种植区域气候、土壤等因素的差异而不同，目前我国的亚麻籽主要种植于甘肃、宁夏、内蒙、山西和河北等地区，且各个地区均有其比较

经典的系列品种，例如甘肃省主要栽培品种有‘陇亚’‘定亚’‘张亚’等系列，宁夏地区有‘宁亚’系列，内蒙古地区有‘内亚’和‘小黄籽’系列。亚麻籽油的挥发性成分也会因其品种和果实成熟度的不同而有所差异，甚至同一区域种植不同品种或者同一品种在不同区域种植得到的油料在同一工艺条件下制得的油脂的特征香气物质也会存在差异<sup>[55]</sup>。Krist等<sup>[49]</sup>采用HS-SPME-GC-MS对不同产地、不同生产条件的亚麻籽油和亚麻荠油样品进行挥发性成分分析，发现在亚麻荠油中可检测出31种挥发性成分，而亚麻籽油中可检测出54种挥发性成分，并且两个品种的特征香气成分也有所差异。魏长庆<sup>[56]</sup>采用HS-SPME-GC-MS对新疆3个品种的亚麻籽油进行分析，共鉴定出60种挥发性物质，其中，对亚麻籽油整体香气影响比较显著的有醛类、醇类、杂环类及少数酸类，3个不同品种之间亚麻籽油整体香气强度不同，并且香气属性也存在显著性差异。韩玉泽等<sup>[41,57]</sup>对青海40种亚麻籽油中挥发性成分进行测定，共鉴定出58种挥发性组分，其中醛类物质对亚麻籽油风味起主导作用。根据聚类分析，将40个品种分为3个类群，发现同一类群之间挥发性成分组成类似，不同类群之间存在差异，这可能与亚麻籽油品种、成熟度、种植条件相关。

#### 3.2 亚麻籽油的加工工艺

##### 3.2.1 预处理方式

油料预处理是指在制油之前对油料进行清理除杂，并将其制成具有一定结构性能的物料<sup>[58]</sup>。油料常见的预处理方式有焙炒、烘烤、湿热、微波辐射、红外辐射等。预处理之所以能提高油料的出油率、油脂的氧化稳定性，同时增加其挥发性风味物质种类，是因为预处理过程中物料内部会发生一系列物理和化学变化，如细胞结构破坏、水分散失、活性成分溶出、还原糖和蛋白质反应生成美拉德反应产物等<sup>[59-62]</sup>。焙炒不仅能提高油脂出油率，赋予植物油特殊的风味，还能增加游离多酚等脂质伴随物的含量，提高抗氧化活性，是亚麻籽最常用、最主要的一种预处理方式。方昭西<sup>[63]</sup>研究了不同的炒籽条件对亚麻籽油挥发性物质的影响，认为亚麻籽的含水率、炒籽时间、炒籽温度对亚麻籽油的风味物质具有显著的影响，通过控制炒籽条件能够控制亚麻籽油中二甲基硫醚等关键性风味物质的生成，从而进一步对亚麻籽油“青草味或腥味”的程度进行调控。湿热处理是在一定的压力下，系统加热而产生的蒸汽作用对油料造成实质性的结构损伤，如压碎细胞膜<sup>[58]</sup>。烘烤是热榨亚麻籽油风味物质形成的主要途径，对其香气成分的探究可实现对亚麻籽油品质的控制<sup>[40]</sup>。王淑珍等<sup>[64]</sup>对青海亚麻籽分别进行焙炒、烘烤、高压高温湿热、脱胶、真空冷冻干燥前处理，再分别采用螺旋压榨法和液态静压法制油，结果表明不同制油方法对挥发性风味物质的相对含量

有明显的影响,其中焙炒螺旋压榨处理组的挥发性组分种类最多,为72种,其他处理组为40~60种。杂环类化合物是美拉德反应的产物,主要存在于焙炒螺旋压榨法、脱胶螺旋压榨法、焙炒液压榨法制备的亚麻籽油中。

### 3.2.2 油脂提取方式

目前,亚麻籽油的提取方式主要有压榨法、溶剂浸提法、水酶法、超临界CO<sub>2</sub>萃取法和亚临界萃取等,不同的提取方法对油脂品质有着不同程度的影响,我国主要以焙炒压榨法和溶剂浸提法为主<sup>[55]</sup>。不同的提取方式对亚麻籽油的风味物质有较大的影响,超临界CO<sub>2</sub>萃取和低温压榨工艺能够使亚麻籽油挥发性物质中具有更多的醛类,而热榨工艺则使其具有较多的吡嗪类、吡啶类物质<sup>[43]</sup>,索氏抽提法提取油中主要的挥发性物质是醛类、醇类、烯炔类和烷烃类,烷烃类物质在索氏抽提法提取油中含量丰富可能是基于相似相溶原理,导致此类物质在正己烷中具有良好的溶解度<sup>[54]</sup>。Zeng Junpeng等<sup>[65]</sup>研究了溶剂萃取、热榨、低温压榨和水酶法4种不同工艺对亚麻籽油品质的影响,发现溶剂萃取得到的亚麻籽油因为有机试剂残留而具有轻微的刺激性气味,热榨的亚麻籽油具有浓烈的烘烤香,低温压榨的亚麻籽油具有淡淡的亚麻香,并且热榨和低温压榨得到的亚麻籽油环肽含量几乎是溶剂萃取和水酶萃取的2倍,使亚麻籽油在后续储存过程中更易产生苦味。在生产过程中,需综合考虑亚麻籽油的出油率、品质、风味、营养等因素,根据需求和目的选择不同的亚麻籽油提取方法。

### 3.3 亚麻籽油的储存

亚麻籽油富含不饱和脂肪酸,尤其是富含ALA,所以在储存过程中容易氧化酸败,使亚麻籽油原有的品质和风味改变。鲜榨的亚麻籽油以清郁芳香的坚果味道和浓厚的烤香味为主,带有一丝鱼腥味,在常温下仅储藏1 d后就会释放苦涩味;精炼的亚麻籽油在存放几个月后会氧化产生令人难以接受的酸败哈喇味<sup>[66]</sup>,须添加外源抗氧化剂改善。除了氧化酸败带来的异味外,亚麻籽油在储藏过程中产生的苦味物质也是影响其风味劣变和品质下降的主要原因。目前认为造成亚麻籽油苦味的原因有3种:1) 亚麻籽中含有内源性生氰糖苷物质(如亚麻苦苷、龙胆二糖甲乙酮氰醇、百脉根苷等);2) 在亚麻籽皮中分离出的木酚素成分(如马台树酯醇、落叶松树脂醇、异落叶松脂素等物质)造成了这种苦味;3) 大多数研究认为,环亚油肽E(cyclolinopeptide E, CLE)是亚麻籽油苦味的主要来源,环肽是亚麻籽油重要的副产物,和普通直链小分子肽相比,环肽化学性质更加稳定,在体外具有高效的抗菌活性以及其他生理活性,如抗肿瘤、消炎、护肝等<sup>[67-68]</sup>。

Brühl等<sup>[69]</sup>首次报道冷榨亚麻籽油中形成的苦味化合物是CLE,其阈值浓度为12.3 μmol/L(水),而Lang等<sup>[70]</sup>利用制备高效液相色谱-质谱联用技术和核磁共振技术对新鲜和储存的亚麻籽油和亚麻籽中环肽进行了分析,对纯化的化合物进行了所有(25种)人类苦味受体的激活测试,最终认为蛋氨酸亚砷环素肽-4是亚麻油产生苦味的主要决定因素。也有研究者发现低温压榨亚麻籽油的苦味不只取决于环肽,因为环肽也可能会随着亚麻籽油的氧化发生氧化,并且氧化后的小分子挥发物是否会与大分子产生相互作用从而影响风味也不清楚,因此亚麻籽油的苦味形成机理还需进一步深入研究<sup>[71-72]</sup>。

## 4 结语

亚麻籽油风味独特,主要由醛类、酮类、醇类、杂环类、酯类、酸类等物质构成,一般可以采用HS-SPME或SAFE方法进行风味物质的提取,结合GC-O-MS和标准品对其进行准确定性,通过计算OAV和FD因子对亚麻籽油中风味物质的贡献进行排序,然而目前尚未通过分子感官科学中的重组与还原技术来实现关键风味物质的确证。本文通过梳理以往研究进展,发现亚麻籽油中醛类物质种类最多、阈值低,是亚麻籽油风味构成的主要来源,而杂环类化合物则提供重要的焙烤味。焙炒压榨是最常见的亚麻籽预处理和制油方法,炒制温度和压榨方式是影响亚麻籽油风味的重要条件,低温压榨亚麻籽油带有清香味,而热榨亚麻籽油带有海腥味、烤香味和坚果味。亚麻籽油在储存过程中产生的异味除了有氧化酸败产生的因素外,还有亚麻籽油中重要副产物环肽带来的苦味。

随着风味组学和脂质代谢组学的不断发展,对于油脂风味的研究也愈渐深入,但是关于亚麻籽油风味的研究还存在着许多问题。首先,目前关于亚麻籽油挥发性风味物质的提取方法还具有一定的局限性,导致风味构成的物质基础研究还不够全面,新的吸附材料的应用可能有助于发现更多新的风味物质,关于亚麻籽油风味相关的可标准化的指标和检测方法也暂未建立;其次,脂质代谢组学将有助于提供更为全面的风味前体物的挖掘,例如ALA极易氧化,它的初级氧化产物是许多挥发性风味物质的前体物,但目前对于ALA及其相关脂质在亚麻籽油整体风味形成中的作用仍不清楚,特征风味物质的产生途径、产生条件、相互作用关系的研究也较为薄弱;最后,如何结合消费者的喜好度对亚麻籽油的风味特征进行分类和精准调控,如何平衡其风味和营养,如何减少亚麻籽油在储存过程中产生的异味和苦味,这些问题都需要开展更深层次的探索。

## 参考文献:

- [1] 周政. 我国亚麻籽油产业发展现状及存在问题[J]. 中国油脂, 2020, 45(9): 134-136. DOI:10.12166/j.zgyz.1003-7969/2020.09.025.
- [2] 王瑞元. 我国亚麻籽油的消费市场前景看好[J]. 中国油脂, 2018, 43(1): 1-3. DOI:10.3969/j.issn.1003-7969.2018.01.001.
- [3] 祁惠芳, 程子良, 孔维宝, 等. 亚麻籽有效成分的提取及其综合利用研究进展[J]. 中国油脂, 2019, 44(11): 102-107. DOI:10.12166/j.zgyz.1003-7969/2019.11.020.
- [4] 汪婷, 李一唯, 柳媛媛, 等. 亚麻籽油对多囊卵巢综合征大鼠炎症细胞的调节作用[J]. 现代食品科技, 2022, 38(9): 27-37. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.9.1425.
- [5] 谢亚萍, 张建平, 王利民, 等. 亚麻籽油营养特性、感官评价及主要挥发性物质分析[J]. 中国油脂, 2023, 48(7): 103-108. DOI:10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.220387.
- [6] LI C C, HOU L X. Review on volatile flavor components of roasted oilseeds and their products[J]. Grain & Oil Science and Technology, 2018, 1(4): 151-156. DOI:10.3724/SP.J.1447.GOST.2018.18052.
- [7] 尹文婷, 师瑞, 马雪婷, 等. 葵花籽油挥发性风味物质研究进展[J]. 中国油脂, 2021, 46(1): 42-47. DOI:10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.2021.01.008.
- [8] ZHANG Y F, WU Y Q, CHEN S R, et al. Flavor of rapeseed oil: an overview of odorants, analytical techniques, and impact of treatment[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2021, 20(4): 3983-4018. DOI:10.1111/1541-4337.12780.
- [9] GENOVESE A, CAPORASO N, SACCHI R. Flavor chemistry of virgin olive oil: an overview[J]. Applied Sciences, 2021, 11(4): 1639. DOI:10.3390/app11041639.
- [10] DUN Q, YAO L, DENG Z Y, et al. Effects of hot and cold-pressed processes on volatile compounds of peanut oil and corresponding analysis of characteristic flavor components[J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 112: 107648. DOI:10.1016/j.lwt.2018.11.084.
- [11] 杨金娥, 黄庆德, 周琦, 等. 冷榨和热榨亚麻籽油挥发性成分比较[J]. 中国油料作物学报, 2013, 35(3): 321-325. DOI:10.7505/j.issn.1007-9084.2013.03.016.
- [12] 高凤泽, 王治同. 食品挥发性化合物的提取与分析技术[J]. 中国果菜, 2022, 42(5): 45-53. DOI:10.19590/j.cnki.1008-1038.2022.05.008.
- [13] 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. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201714023.
- [14] 杨金娥, 黄庆德, 黄凤洪, 等. 冷榨亚麻籽油吸附精炼工艺研究[J]. 中国油脂, 2012, 37(9): 19-22. DOI:10.3969/j.issn.1003-7969.2012.09.005.
- [15] 刘国琴, 方昭西, 李琪. 热榨与冷榨对亚麻油风味物质的影响及风味特征成分分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2015, 43(11): 1-7. DOI:10.3969/j.issn.1000-565X.2015.11.001.
- [16] 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. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20181009-073.
- [17] 谢建春. 香味分析原理与技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2020: 154-158.
- [18] 马丽鑫, 郑旭, 黄旭辉, 等. 不同顶空进样技术结合多同位素内标法对香气物质定量分析的选择性差异[J]. 食品科学, 2021, 42(24): 261-268. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20201215-183.
- [19] YANG Yini, DENG Qianchun, JIA Xiao, 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. DOI:10.1016/j.lwt.2020.110724.
- [20] YIN Wenting, SHI Rui, LI Shijia, et al. Changes in key aroma-active compounds and sensory characteristics of sunflower oils induced by seed roasting[J]. Journal of Food Science, 2022, 87(2): 699-713. DOI:10.1111/1750-3841.16044.
- [21] WEI Changqing, ZHOU Qi, HAN Bo, et al. Changes occurring in the volatile constituents of flaxseed oils (FSOs) prepared with diverse roasting conditions[J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2019, 121(1): 1800068. DOI:10.1002/ejlt.201800068.
- [22] ZHAO Mu, LI Ting, YANG Fan, et al. Characterization of key aroma-active compounds in Hanyuan *Zanthoxylum bungeanum* by GC-O-MS and switchable GC × GC-O-MS[J]. Food Chemistry, 2022, 385: 132659. DOI:10.1016/j.foodchem.2022.132659.
- [23] SHU N X, CHEN X Y, SUN X, et al. Metabolomics identify landscape of food sensory properties[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, (2022-04-18)[2022-10-20]. DOI:10.1080/10408398.2022.2062698.
- [24] ZHANG Dong, LI Xiujuan, DUAN Xiaoliang, et al. Lipidomics reveals the changes in lipid profile of flaxseed oil affected by roasting[J]. Food Chemistry, 2021, 364: 130431. DOI:10.1016/j.foodchem.2021.130431.
- [25] HU Qian, ZHANG Jiukai, HE Lei, et al. New insight into the evolution of volatile profiles in four vegetable oils with different saturations during thermal processing by integrated volatolomics and lipidomics analysis[J]. Food Chemistry, 2022, 403: 134342. DOI:10.1016/j.foodchem.2022.134342.
- [26] SUN Jiayang, HU Pengpeng, LYU C, et al. Comprehensive lipidomics analysis of the lipids in hazelnut oil during storage[J]. Food Chemistry, 2022, 378: 132050. DOI:10.1016/j.foodchem.2022.132050.
- [27] ZHANG D, DUAN X L, SUN H. Phospholipidomics and quantum chemistry calculation unravel the changes in phospholipid molecules of flaxseed oil during roasting[J]. Food Chemistry, 2023, 404: 134579. DOI:10.1016/j.foodchem.2022.134579.
- [28] HU Q, ZHANG J K, HE L, et al. New insight into the evolution of volatile profiles in four vegetable oils with different saturations during thermal processing by integrated volatolomics and lipidomics analysis[J]. Food Chemistry, 2023, 403: 134342. DOI:10.1016/j.foodchem.2022.134342.
- [29] 宋焕禄, 王丽金. 食品风味化学与分析[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2021: 66-92.
- [30] 张晓婕, 邱树毅, 王晓丹, 等. 白酒挥发性风味物质气相分析方法及研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(14): 313-320. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.026191.
- [31] SUN X L, WANG Y J, LI H K, et al. Changes in the volatile profile, fatty acid composition and oxidative stability of flaxseed oil during heating at different temperatures[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 151: 112137. DOI:10.1016/j.lwt.2021.112137.
- [32] 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. DOI:10.3969/j.issn.1008-9578.2022.03.022.
- [33] 卢银洁. 胡麻油贮存品质的研究[D]. 晋中: 山西农业大学, 2017: 31.
- [34] 吴容, 陶宁萍, 刘源, 等. GC-O-AEDA法在食品风味分析中的应用[J]. 食品与机械, 2011, 27(4): 163-168; 176. DOI:10.3969/j.issn.1003-5788.2011.04.048.
- [35] 段旭林, 胡容, 王瑞, 等. 浓香菜籽油、浓香花生油和浓香亚麻籽油的风味特性及氧化稳定性[J]. 中国油脂, 2022, 47(9): 71-75. DOI:10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.210500.
- [36] MATHEIS K, GRANVOGL M. Characterisation of the key aroma compounds in commercial native cold-pressed rapeseed oil by means of the Sensomics approach[J]. European Food Research and Technology, 2016, 242(9): 1565-1575. DOI:10.1007/s00217-016-2657-5.
- [37] YIN Wenting, MARADZA W, XU Yifan, et al. Comparison of key aroma-active composition and aroma perception of cold-pressed and roasted peanut oils[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2022, 57(5): 2968-2979. DOI:10.1111/ijfs.15615.



- [38] JIA Xiao, WANG Lifeng, ZHENG Chang, et al. Key odorant differences in fragrant *Brassica napus* and *Brassica juncea* oils revealed by gas chromatography-olfactometry, odor activity values, and aroma recombination[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(50): 14950-14960. DOI:10.1021/acs.jafc.0c05944.
- [39] ZHANG H J, YUAN Y S, ZHU X X, et al. The effect of different extraction methods on extraction yield, physicochemical properties, and volatile compounds from field muskmelon seed oil[J]. Foods, 2022, 11(5): 721. DOI:10.3390/foods11050721.
- [40] 郝楠. 亚麻籽油特征香气成分的初步探究[D]. 保定: 河北农业大学, 2018: 24-28.
- [41] 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. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2021010089.
- [42] 王笑园, 宋章弈, 张延琦, 等. 精炼过程对亚麻籽油风味物质的影响[J]. 食品工业科技, 2016, 37(18): 55-59. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2016.18.002.
- [43] 张丽涵. 亚麻籽油风味分析及其在肉制品中的应用[D]. 锦州: 渤海大学, 2021: 3-16.
- [44] WEI C Q, ZHOU Q, HAN B, et al. Changes occurring in the volatile constituents of flaxseed oils (FSOs) prepared with diverse roasting conditions[J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2019, 121(1): 1800068. DOI:10.1002/ejlt.201800068.
- [45] 魏长庆, 周琦, 陈卓, 等. 新疆亚麻籽油香气指纹图谱的构建与研究[J]. 中国粮油学报, 2018, 33(3): 104-111. DOI:10.3969/j.issn.1003-0174.2018.03.018.
- [46] 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. DOI:10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.210479.
- [47] SUN X L, ZHANG B, HAN J J, et al. Effect of roasting temperature and time on volatile compounds, total tocopherols, and fatty acids of flaxseed oil[J]. Journal of Food Science, 2022, 87(4): 1624-1638. DOI:10.1111/1750-3841.16073.
- [48] WEI C Q, XI W P, NIE X Y, et al. Aroma characterization of flaxseed oils using headspace solid-phase microextraction and gas chromatography-olfactometry[J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2013, 115(9): 1032-1042. DOI:10.1002/ejlt.201200397.
- [49] KRIST S, STUEBIGER G, BAIL S, et al. Analysis of volatile compounds and triacylglycerol composition of fatty seed oil gained from flax and false flax[J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2006, 108(1): 48-60. DOI:10.1002/ejlt.200500267.
- [50] JUITA D B Z, KENNEDY E M, MACKIE J C. Identification and quantitation of volatile organic compounds from oxidation of linseed oil[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2012, 51(16): 5645-5652. DOI:10.1021/ie202535d.
- [51] 滕迪克, 许洪高, 袁芳, 等. 脂质降解产物在肉类香气形成中的作用[J]. 中国调味品, 2008(6): 71-76. DOI:10.3969/j.issn.1000-9973.2008.06.016.
- [52] DUDAREVA N, KLEMPIEN A, MUHLEMANN J K, et al. Biosynthesis, function and metabolic engineering of plant volatile organic compounds[J]. New Phytologist, 2013, 198(1): 16-32. DOI:10.1111/nph.12145.
- [53] 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. DOI:10.1016/j.foodres.2019.01.064.
- [54] 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: 28-30.
- [55] 魏长庆, 刘文玉, 曹栋. 胡麻油挥发性香气提取分析研究进展[J]. 食品工业科技, 2015, 36(19): 379-384. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2015.19.069.
- [56] 魏长庆. 新疆胡麻油特征香气成分鉴别及其产生机制研究[D]. 无锡: 江南大学, 2015: 5-6.
- [57] 韩玉泽, 王兴瑞, 李应霞, 等. 基于SPME-GC-MS的青海亚麻籽油挥发性组分指纹图谱构建及掺伪识别[J]. 现代食品科技, 2021, 37(11): 364-371. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2021.11.0283.
- [58] 李应霞, 王进英, 董国鑫, 等. 焙炒和湿热预处理对5种植物油品质特性的影响[J]. 中国油脂, 2023, 48(7): 1-7; 38. DOI:10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.220255.
- [59] 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. DOI:10.1016/j.foodchem.2020.126974.
- [60] TUNCEL N B, UYGUR A, YÜCEER Y K. The effects of infrared roasting on HCN content, chemical composition and storage stability of flaxseed and flaxseed oil[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2017, 94(6): 877-884. DOI:10.1007/s11746-017-2982-2.
- [61] VAIDYA B, CHOE E. Effects of seed roasting on tocopherols, carotenoids, and oxidation in mustard seed oil during heating[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2011, 88(1): 83-90. DOI:10.1007/s11746-010-1656-0.
- [62] 龙婷, 吴雪辉, 容欧, 等. 油茶籽预处理方法对茶油品质的影响研究[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(7): 79-83. DOI:10.3969/j.issn.1003-0174.2017.07.013.
- [63] 方昭西. 加工及储存条件对亚麻油关键性风味物质及氧化稳定性影响的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015: 31-37.
- [64] 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. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20210409-127.
- [65] ZENG Junpeng, XIAO Ting, NI Xinggang, et al. The comparative analysis of different oil extraction methods based on the quality of flaxseed oil[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2022, 107: 104373. DOI:10.1016/j.jfca.2021.104373.
- [66] 邓乾春, 禹晓, 黄庆德, 等. 亚麻籽油的营养特性研究进展[J]. 天然产物研究与开发, 2010, 22(4): 715-721. DOI:10.3969/j.issn.1001-6880.2010.04.040.
- [67] 雷雨, 郑洋, 谢等等, 等. 亚麻籽环肽的制备工艺研究[J]. 农产品加工, 2023(8): 35-40. DOI:10.16693/j.cnki.1671-9646(X).2023.04.037.
- [68] 胡晓军, 刘超, 高忠东, 等. 酶法脱除胡麻油中苦味物质的工艺研究[J]. 农产品加工(学刊), 2014(9): 24-26. DOI:10.3969/j.issn.1671-9646(X).2014.05.009.
- [69] BRÜHL L, MATTHÄUS B, FEHLING E, et al. Identification of bitter off-taste compounds in the stored cold pressed linseed oil[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2007, 55(19): 7864-7868. DOI:10.1021/jf071136k.
- [70] LANG T, FRANK O, LANG R, et al. Activation spectra of human bitter taste receptors stimulated with cyclolinopeptides corresponding to fresh and aged linseed oil[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2022, 70(14): 4382-4390. DOI:10.1021/acs.jafc.2c00976.
- [71] 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. DOI:10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.210389.
- [72] 连莹君, 江紫琦, 陆学葺, 等. HPLC外标法测定亚麻籽油中4种环肽含量的研究[J]. 中国油脂, 2015, 40(5): 90-94. DOI:10.3969/j.issn.1003-7969.2015.05.020.