

α -亚麻酸分离纯化技术研究进展

唐佳芮, 魏冰, 石珊珊

(中粮工科(西安)国际工程有限公司, 西安 710082)

摘要: α -亚麻酸属 $n-3$ 系不饱和脂肪酸, 具有降低血脂血压、改善心血管疾病、提高记忆力、保护神经组织、预防过敏性疾病、抑制肿瘤细胞转移、延缓衰老等功能。目前, α -亚麻酸的分离纯化方法主要有尿素包合法、低温冻结结晶法、分子蒸馏法、银离子络合法、柱层析法、 β -环糊精包合法及耦合法。综述了 α -亚麻酸分离纯化技术的研究进展, 总结了各种分离纯化方法的原理及优缺点。从现有的研究结果可看出, 单一分离纯化方法由于其各自的弊端很难得到高纯度的 α -亚麻酸, 采用两种及两种以上分离纯化技术耦合是获得高纯度 α -亚麻酸的有效途径。

关键词: α -亚麻酸; 分离纯化; 研究进展

中图分类号: TS202.3; TQ645.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-7969(2020)08-0028-05

Progress on separation and purification technology of α -linolenic acid

TANG Jiarui, WEI Bing, SHI Shanshan

(COFCO ET (Xi'an) International Engineering Co., Ltd., Xi'an 710082, China)

Abstract: α -Linolenic acid is an $n-3$ series unsaturated fatty acid, which has functions of reducing blood lipid and blood pressure, improving cardiovascular disease, improving memory, protecting nerve tissue, preventing allergic diseases, inhibiting tumor cell metastasis and delaying aging. The separation and purification technologies mainly included urea adduction fractionation, freezing crystallization, molecular distillation, silver ion complexation, column chromatography and β -cyclodextrin adduction and combined method. The research progress on separation and purification technology of α -linolenic acid was reviewed, and the principles, advantages and disadvantages of various separation and purification technologies were summarized. From the existing research results, it could be seen that a single separation and purification method was difficult to obtain high purity α -linolenic acid due to its own disadvantages, while the combination of two or more separation and purification techniques was an effective way to obtain high purity α -linolenic acid.

Key words: α -linolenic acid; separation and purification; research progress

α -亚麻酸为全顺 9,12,15-十八碳三烯酸, 属 $n-3$ 系不饱和脂肪酸^[1]。国内外研究表明, α -亚麻酸作为人体必需脂肪酸, 具有降低血脂血压、改善心血管疾病、提高记忆力、保护神经组织、预防过敏性疾病、抑制肿瘤细胞转移、延缓衰老等功能^[2-4]。

α -亚麻酸以脂肪酸甘三酯的形式存在于植物油脂中, 亚麻籽油、牡丹籽油、紫苏籽油等是制备开发 α -亚麻酸产品的理想原料^[5]。目前, 对于 α -亚麻酸的分离纯化方法主要有尿素包合法、低温冻结结晶法、分子蒸馏法、银离子络合法、柱层析法、 β -环糊精包合法、耦合法等^[6]。本文就这些方法的优缺点及研究进展进行详细介绍, 以期对相关研究提供参考。

1 尿素包合法

尿素包合法是利用尿素分子在结晶过程中可与饱和、单不饱和脂肪酸形成包合物, 而不易与多不饱和脂肪酸包合的原理, 达到对多不饱和脂肪酸分离

收稿日期: 2019-12-02; 修回日期: 2020-03-26

基金项目: 陕西省 2018 年重点研发计划项目 (2018NY-130)

作者简介: 唐佳芮 (1990), 女, 工程师, 主要从事油脂工艺技术的研究工作 (E-mail) 1978597158@qq.com。

通信作者: 魏冰, 高级工程师 (E-mail) 75347133@qq.com。

纯化的目的。

胡小华等^[7]以亚麻籽油为原料,以NaOH为催化剂催化亚麻籽油乙酯化得到粗亚麻酸乙酯,再采用尿素一次包合法富集亚麻酸乙酯,在包合温度2℃下包合17h后通过有机溶剂萃取工艺和酸法工艺分别回收亚麻酸乙酯,得率分别为15%和11.4%,亚麻酸含量分别为80.57%和86.17%。吕秋楠等^[8]以干蚕蛹为原料,采用超声波技术提取蚕蛹油,经皂化酸解制得混合脂肪酸,再采用尿素包合法分离提纯其中的 α -亚麻酸。通过单因素试验确定最优的尿素包和条件为脂肪酸质量、尿素质量与甲醇体积比1:3:8,包合温度0℃,包合时间12h,在此条件下进行一次包合, α -亚麻酸的含量为37.45%,得率约为30%,二次包合后, α -亚麻酸的含量提高到83.87%,得率为18.26%,而三次包合时 α -亚麻酸的含量和得率反而降低。刘旭等^[9]将紫苏籽油 α -亚麻酸乙酯粗品与1 mol/L尿素-乙醇溶液按体积比1:50混合,于设定温度下包合不同时间,抽滤分离尿素结晶包合物,采用酸法回收 α -亚麻酸乙酯,得到最优包合条件为包合温度-20℃、包合时间18.5h,在此条件下 α -亚麻酸提取率为77.23%。张海满等^[10-11]研究了尿素包合分离提纯亚麻籽油中 α -亚麻酸的影响因素,结果发现:随温度升高 α -亚麻酸的纯度降低但得率提高;延长包合时间, α -亚麻酸的纯度提高但得率变化不大;包合次数增加, α -亚麻酸的纯度提高但得率下降,进行两次包合具有实际应用价值;得到最优的包和条件为脂肪酸质量、尿素质量与甲醇体积比1:3:8,包合温度-10℃,包合时间15h,在此条件下 α -亚麻酸纯度在87%以上。孙兰萍等^[12]采用二次正交旋转组合设计对尿素包合法富集纯化杜仲籽油中 α -亚麻酸的工艺进行了优化研究,得到 α -亚麻酸最佳富集工艺条件:尿素与脂肪酸质量比3:1,95%乙醇与脂肪酸质量比9:1,包合温度-9.0℃,包合时间17.0h。在最佳富集条件下, α -亚麻酸纯度可达到82.63%。

尿素包合法是大规模分离、纯化、富集多不饱和脂肪酸的理想方法,其设备简单、操作方便,尿素价廉易于回收,适用于工业化生产;同时操作温度低,可确保多不饱和脂肪酸的营养成分和生理活性;但尿素包合法单独使用时,难以将不同碳链长度而饱和度相同或相近的脂肪酸分开,对低不饱和脂肪酸去除不彻底,产品纯度较低,通常需要与低温冻结结晶法、分子蒸馏法等结合以进一步纯化产品^[13]。根据以上研究可以看出,得率与纯度呈负相关, α -亚

麻酸含量提高,但得率下降,因此根据目标产品纯度、得率及生产成本情况,企业应结合工业生产中的实际情况进行衡量,以获得最佳经济效益。

2 低温冻结结晶法

在低温条件下,不同的脂肪酸在有机溶剂中的溶解度及凝固点不同,一般情况下,溶解度随碳链的增长而减小,随双键数的增加而增加,且温度越低其表现越显著。因此,将富含 α -亚麻酸的混合脂肪酸溶解在低温状态下的有机溶剂中,控制冷冻温度,可达到富集和纯化 α -亚麻酸的目的。

王振等^[14]采用低温冻结结晶法对以亚麻籽油为原料制备的 α -亚麻酸乙酯进行纯化,以 α -亚麻酸乙酯含量为考察指标,利用单因素试验考察了冷冻温度和冷冻时间对 α -亚麻酸乙酯的纯化效果,结果表明,最佳的冷冻温度和冷冻时间分别为-30℃和20h,此条件下 α -亚麻酸乙酯含量达到80%以上。进一步采用两种不同的降温方法纯化 α -亚麻酸乙酯,一种是直接快速冷冻至目标温度,产率约为72%,一种是以5℃为梯度的梯度降温法,产率约为76%,发现梯度降温可以提高 α -亚麻酸乙酯的产率。谢静^[15]对花椒籽油混合脂肪酸采用冷冻丙酮法分离纯化 α -亚麻酸,得到最佳的分离纯化工艺条件为料液比1:6、冷冻温度-30℃、冷冻时间5h,在此条件下可将 α -亚麻酸含量由33.3%提高到61.5%。雍梁敏等^[16]采用二次双溶剂冻结结晶法分离纯化橡胶籽油中的 α -亚麻酸。以乙腈和丙酮为混合溶剂,在混合溶剂体积与脂肪酸质量比18:1、乙腈与丙酮体积比1.5:1、冷冻时间9h条件下冷冻结晶,然后于-18℃、7 000 r/min冷冻离心3min进行固液分离,产物中 α -亚麻酸含量可达45.41%。

低温冻结结晶法工艺简单、操作方便、分离效率高, α -亚麻酸等营养成分不易发生氧化、聚合、异构化等其他反应;缺点是对操作温度要求严格,能耗高,工业生产中温度一般选择-20~-30℃,但是得到的 α -亚麻酸纯度不高,这是因为冻结结晶法不能将相近碳链长度和不饱和程度的脂肪酸分离,因此若想得到高纯度的 α -亚麻酸产品,需要与其他方法联合使用。

3 分子蒸馏法

分子蒸馏技术是利用脂肪酸相对分子质量大小及分子平均自由程的差别,使液体在真空等条件下,在远低于其沸点的温度实现分离的一项特殊的蒸馏技术^[17]。在一定条件下,分子运动平均自由程较大的饱和脂肪酸首先被蒸出,单不饱和脂肪酸次之,而

多不饱和脂肪酸最后被蒸出,通过多级分子蒸馏可以有效地将混合脂肪酸中的不同饱和度组分进行分离,从而达到分离纯化的目的。

陈乐清等^[18]先将亚麻籽油甲酯化,再采用分子蒸馏法对其中 α -亚麻酸进行分离纯化,经单因素试验及响应面分析,得到提纯 α -亚麻酸的优化工艺条件为蒸馏温度 $91\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、刮膜转速 250 r/min 、预热温度 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、操作压力 1 Pa 、进料速度 57 mL/h ,在此条件下 α -亚麻酸的含量从 53.36% 提高至 80.27% 。张运辉^[19]利用分子蒸馏法纯化亚麻籽油中的 α -亚麻酸,在进料温度 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、进料速度 $90\sim 100\text{ mL/h}$ 、刮膜转速 150 r/min 、操作压力 $0.3\sim 1.8\text{ Pa}$ 、蒸馏温度 $90\sim 105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下,通过四级分子蒸馏, α -亚麻酸的含量由 67.5% 提高至 82.3% 。车怀智等^[20]对亚麻籽油 α -亚麻酸乙酯进行了分离提纯的研究,适宜的分离条件为蒸馏温度 $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、真空度 $1.0\sim 1.5\text{ Pa}$ 、进料温度 $60\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$,经过四级分子蒸馏,可以将原料中的 α -亚麻酸乙酯含量由 55.8% 提纯至 59.2% 。

分子蒸馏法的蒸馏温度低、受热时间短,适用于分离一些常规蒸馏不能分离的、热稳定性差的、高相对分子质量、高沸点、高黏度、易氧化、高附加值和具有生物活性的原料,并在食品、化工、医药等领域实现了工业化^[21]。采用该方法分离纯化 α -亚麻酸,可有效防止 α -亚麻酸受热氧化分解,保证产品的品质及得率。但分子蒸馏法需高真空设备,设备投资大,生产成本较高且生产能力有限。

4 银离子络合法

银离子络合法是根据银离子与有机物中的碳碳双键进行可逆的电荷转移配位作用,形成银离子极性络合物,且络合作用随有机物中双键数增加而增强。采用该方法分离纯化 α -亚麻酸, α -亚麻酸与银离子络合形成很稳定的亲水性络合物进入水相,而其他饱和脂肪酸和单不饱和脂肪酸则进入有机相,从而达到分离富集 α -亚麻酸的目的。

王远等^[22]运用银离子络合法对紫苏籽中的 α -亚麻酸进行纯化,应用响应面分析得到的最佳工艺条件为:紫苏籽混合脂肪酸与硝酸银溶液体积比 $1:1$,硝酸银浓度 4 mol/L ,络合时间 2 h ,络合温度 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在最佳工艺条件下, α -亚麻酸含量为 84.63% 。司秉坤等^[23]以亚麻籽油为原料,采用硝酸银络合纯化 α -亚麻酸,对纯化工艺条件进行优化。结果表明,提纯 α -亚麻酸的最佳条件为硝酸银浓度 6 mol/L 、络合温度 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、络合时间 3 h ,此条件下 α -亚麻酸纯度可达 97.53% 。

银离子络合法操作工艺简单、分离效果好、产品纯度高,且硝酸银溶液可以反复回收利用。但是,该方法仅限于实验室提取研究,产量小,难于实现大规模生产;硝酸银溶液具有一定的腐蚀性,且价格昂贵,重金属污染及残留的问题有待进一步解决。

5 柱层析法

柱层析法是利用脂肪酸极性大小的不同而达到分离的目的,是目前获取高纯度多不饱和脂肪酸的有效方法之一,可用于生产高含量 $n-3$ 多不饱和脂肪酸产品。

Guo等^[24]通过硝酸银-硅胶柱层析法纯化亚麻籽油中的 α -亚麻酸,通过条件优化, α -亚麻酸含量从 61% 提高到 94.7% 。周印羲等^[25]采用氯化亚铜-氧化铝吸附柱对亚麻籽油中的 α -亚麻酸进行分离纯化,结果表明,氯化亚铜络合吸附柱分离多不饱和脂肪酸乙酯有良好的效果,通过吸附柱的分离可得到含量高于 90% 的 α -亚麻酸乙酯产品。

柱层析法设备简单、容易操作,分离纯化效果好,产品纯度高,适用于实验室操作;但溶剂使用量大,分离时间较长,能耗大,洗脱过程中使用的洗脱剂容易对产品造成二次污染,吸附柱载体价格贵、成本高、制备量少,难于进行规模化生产。

6 β -环糊精包合法

β -环糊精是由7个葡萄糖分子在酶的催化作用下形成的环形低聚糖化合物,其圆柱形的分子结构中腔为疏水基,外围含大量的亲水性醇羟基,可以对外来的疏水性物质进行选择性的包合,从而达到分离纯化的目的。

林非凡等^[26]通过响应面分析法对 β -环糊精包合法分离亚麻籽油中的 α -亚麻酸工艺进行了优化,得到最佳工艺条件为 β -环糊精与混合脂肪酸+无水乙醇比例 $7:1$ 、包合时间 2.7 h 、包合温度 $59\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、冷冻时间 14.26 h ,此条件下 α -亚麻酸的含量可以达到 70.01% 。徐丽萍等^[27]采用 β -环糊精包合法分离纯化亚麻籽油中 α -亚麻酸,采用单因素试验和响应面分析法确定了 β -环糊精包合法分离纯化 α -亚麻酸的最佳工艺条件为:包合温度 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、包合时间 2.2 h 、 β -环糊精与混合脂肪酸+无水乙醇质量比 $7.14:1$ 。在最佳条件下, α -亚麻酸含量为 71.45% 。

β -环糊精包合法作为分离多不饱和脂肪酸的一种方法,具有经济、简便、高效等特点,但多用于实验室,工业化应用有待进一步开发研究。

7 耦合法

单一的 α -亚麻酸纯化方法存在局限性,很难

在得率和纯度方面达到两全,或者仅适用于实验室小试,不适用于工业化生产。考虑到成本、能耗、环保等问题,对现有的单一的分离纯化技术进行耦合,取长补短,将两种或两种以上方法结合起来分离纯化 α -亚麻酸,以提高其得率和纯度。

杜小暉^[28]对花椒籽油进行甲酯化后,采用先尿素包合后银离子络合对 α -亚麻酸甲酯进行纯化,研究表明:在混合脂肪酸甲酯与尿素、甲醇质量比1:3:8,包合温度 -10°C 、包合时间18 h下包合,再在反应温度 0°C 、络合时间1.5 h下采用45%的硝酸银溶液(40%甲醇水为溶剂)络合,得到的 α -亚麻酸纯度为82.98%,相比二次包合法(64.2%),尿素包合法与银离子络合法耦合的 α -亚麻酸纯度提高,相比单独银离子络合法(82.6%)虽然其纯度没有大幅度提高,但得到等质量的 α -亚麻酸产品的成本降低,是企业生产实际可行的方法。邱英华等^[29]将尿素包合技术与分子蒸馏技术结合,对蚕蛹油中的 α -亚麻酸进行了分离纯化。在混合脂肪酸、尿素、甲醇比例1:3:10,包合温度 $0\sim 5^{\circ}\text{C}$,包合时间12 h下对蚕蛹油混合脂肪酸进行尿素包合,之后在蒸馏温度 110°C 、蒸馏压力3.0 Pa、进料速度 $1.5\text{ mL}/\text{min}$ 、刮膜器转速 $450\text{ r}/\text{min}$ 条件下进行分子蒸馏, α -亚麻酸纯度达到88.7%;进行三级分子蒸馏后 α -亚麻酸纯度为86.5%,得率为61.3%,四级分子蒸馏后 α -亚麻酸纯度可以达到91.2%,得率下降至39.3%。邓小莉等^[30]采用低温冷冻结晶法和尿素包合法相结合的方法分离纯化紫苏籽油中的 α -亚麻酸。先将紫苏籽油放于 $-11\sim -18^{\circ}\text{C}$ 冰箱中 $36\sim 48\text{ h}$,过滤除去棕榈酸、硬脂酸等大部分饱和脂肪酸,再在冷冻后粗品与尿素、混合溶剂比例2:1:10、冷冻时间36 h下尿素包合进一步分离纯化,纯化后 α -亚麻酸含量从 $304\text{ mg}/\text{mL}$ 提高到 $644\text{ mg}/\text{mL}$ 。朱小燕等^[31]也采用先低温冷冻结晶后尿素包合的方法富集亚麻籽油 α -亚麻酸乙酯,获得的 α -亚麻酸乙酯纯度在89%以上,得率可以达到60%以上。

3 结束语

α -亚麻酸具有独特的生理活性和功能,可以预见, α -亚麻酸在人类未来的营养、保健、医药等方面将发挥重要作用。目前,单一的 α -亚麻酸分离纯化方法因各自的局限性对于高纯度的 α -亚麻酸产品的获得存在难度,两种或两种以上分离纯化技术耦合使用进行 α -亚麻酸的富集纯化,对实现工业化生产高纯度 α -亚麻酸产品,拓展其在食品、医药、保健品等领域的研究将具有广泛而深远的意义。

参考文献:

- [1] 刘玉兰. 油脂化学[M]. 北京:化学工业出版社,2005.
- [2] 陶国琴,李晨. α -亚麻酸的保健功效及应用[J]. 食品科学,2000,21(12):140-143.
- [3] SAN GIOVANNI J P, CHEW E Y. The role of *omega*-3 long-chain polyunsaturated fatty acids in health and disease of the retina [J]. Progress Retina Eye Res, 2005, 24(1):87-138.
- [4] PAN H N, ZHNAG H X. *Alpha*-linolenic acid is a potent neuroprotective agent against soman-induced neuropathology [J]. Neur Toxicol, 2012, 33:1219-1229.
- [5] 吴俏瑾,杜冰,蔡尤林,等. α -亚麻酸的生理功能及开发研究进展[J]. 食品工业科技,2016,37(10):386-390.
- [6] 闫晓松,谷克仁,马磊,等. α -亚麻酸纯化技术研究进展[J]. 粮食与油脂,2014,27(9):9-13.
- [7] 胡小华,杨帆,魏冰,等. 亚麻酸乙酯的制备及尿素包合富集工艺研究[C]//中国粮油学会油脂分会第二十届学术论文集. 北京:中国粮油学会油脂分会,2011.
- [8] 吕秋楠,史高峰,陈学福,等. 尿素包合法纯化蚕蛹油中 α -亚麻酸工艺研究[J]. 中国油脂,2009,34(8):32-35.
- [9] 刘旭,张秀玲,赵天彤,等. 尿素包合法提纯紫苏籽油中的 α -亚麻酸优化[J]. 食品工业,2016,37(3):152-156.
- [10] 张海满,刘福祯,戴玲妹,等. 尿素包合法纯化 α -亚麻酸工艺研究(I)—— α -亚麻酸纯化过程单因素实验研究[J]. 中国油脂,2001,26(2):41-44.
- [11] 张海满,刘福祯,戴玲妹,等. 尿素包合法纯化 α -亚麻酸工艺研究(II)—— α -亚麻酸纯化过程正交实验研究[J]. 中国油脂,2001,26(3):53-54.
- [12] 孙兰萍,许晖,马龙,等. 尿素包合法富集纯化杜仲籽油 α -亚麻酸的工艺研究[J]. 食品工业科技,2013,34(11):218-222.
- [13] 刘晓霞,蔡晨宁,苏平. 花椒籽油 α -亚麻酸提取技术的研究进展[J]. 粮油加工,2014,35(8):383-386.
- [14] 王振,胡淑珍,闫雪峰. α -亚麻酸乙酯纯化工艺研究[J]. 食品科技,2013,38(10):194-197.
- [15] 谢静. 花椒籽油及其 α -亚麻酸的分离纯化技术研究[D]. 重庆:西南大学,2010.
- [16] 雍梁敏,刘石生. 二次双溶剂冷冻结晶法分离纯化橡胶籽油中 α -亚麻酸的研究[J]. 海峡科技与产业,2017(4):161-162.
- [17] 郑弢,许松林. 分子蒸馏提纯 α -亚麻酸的研究[J]. 化学工业与工程,2004,21(1):25-28.
- [18] 陈乐清,林文,丁朝中,等. 分子蒸馏纯化亚麻籽油中 α -亚麻酸的研究[J]. 食品工业科技,2013,34(4):216-219.

3 结 论

采用2种传统工艺(蒸炒、压榨工艺和蒸炒、压榨、脱胶工艺)和1种新型工艺制备菜籽油,通过顶空固相微萃取与气相色谱-质谱联用技术对其挥发性风味成分进行鉴定。结果发现,3种工艺菜籽油理化指标均符合国家标准,脂肪酸组成及含量变化不大;蒸炒、压榨工艺和新型制备工艺的菜籽油整体感官风味评分相当,均略高于蒸炒、压榨、脱胶工艺的;3种工艺菜籽油分别鉴定出18、29、21种挥发性风味化合物,传统工艺菜籽油中腈类物质含量最高,而新型工艺菜籽油中醛类物质含量最高。通过计算相对活度值,得出3种工艺菜籽油中对香味贡献最大的物质分别为2-噻吩甲醛、3,5-二乙基-2-甲基吡嗪和3-甲基丁醛。

参考文献:

[1] 胡健华, 何东平, 刘培林. 美拉德反应与浓香植物油生产[J]. 武汉轻工大学学报, 2015, 34(1): 10-13.
 [2] 张谦益, 熊巍林, 李敏丽, 等. 菜籽油制取精制工艺实践[J]. 农产品加工(学刊), 2011(1): 80-81.
 [3] 张谦益, 包李林, 熊巍林. 不同产地菜籽油中特征风味物质的研究[J]. 中国油脂, 2018, 43(8): 23-28.
 [4] 胡健华, 吴建宝. 浓香油菜籽仁油制取新工艺技术研究[J]. 武汉轻工大学学报, 2016, 35(2): 106-108.
 [5] 何东平, 闫子鹏. 油脂精炼与加工工艺学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.

(上接第31页)

[19] 张运辉. SFE-CO₂与分子蒸馏技术分离纯化亚麻籽油中的 α -亚麻酸[D]. 兰州: 兰州大学, 2013.
 [20] 车怀智, 魏冰. 分子蒸馏法 α -亚麻酸乙酯的中试制备[J]. 陕西科技大学学报, 2009, 27(5): 68-71.
 [21] 冯武文, 杨村, 于宏奇. 分子蒸馏技术及其应用[J]. 化工进展, 1998(6): 26-29.
 [22] 王远, 闫树军, 饶在生, 等. 响应面法优化紫苏子中 α -亚麻酸的纯化工艺[J]. 食品工业科技, 2012, 33(15): 229-232.
 [23] 司秉坤, 赵余庆. 硝酸银络合法提纯亚麻子中 α -LNA的工艺研究[J]. 亚太传统医药, 2005(3): 93-95.
 [24] GUO J X, WANG C L, WU Z J. Purification of α -linolenic acid from flaxseed oil by silver-silica gel chromatography column [J]. Adv Mat Res, 2012, 610-613: 3580-3586.

[6] 王斌. 冷榨芝麻粕美拉德反应制备浓香芝麻油的研究[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2016.
 [7] 毛程鑫, 李桂华, 薛武军, 等. 菜籽油酶法脱胶的研究[J]. 中国粮油学报, 2016(8): 75-79.
 [8] 涂梦婕. 浓香型菜籽油制备的研究[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2019.
 [9] 夏延斌. 食品风味化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
 [10] 刘登勇, 周光宏, 徐幸莲. 确定食品关键风味化合物的一种新方法: “ROAV”法[J]. 食品科学, 2008, 29(7): 370-374.
 [11] 党俊杰. 油脂烟点不合格的原因及控制措施[J]. 中国油脂, 2008, 33(11): 63-64.
 [12] ASHURST P R. 食品香精的化学与工艺学[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2005.
 [13] 林翔云. 调香术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.
 [14] FRANKEL E N. Lipid oxidation [J]. Prog Lipid Res, 1980, 19: 1-22.
 [15] NEFF W E, SELKE E, MOUNTS T L, et al. Effect of triacylglycerol composition and structures on oxidative stability of oils from selected soybean germplasm [J]. J Am Oil Chem Soc, 1992, 69(2): 111-118.
 [16] 张谦益, 包李林, 熊巍林, 等. 菜籽油挥发性风味成分的鉴定[J]. 粮食与油脂, 2017, 30(3): 78-80.
 [17] 周萍萍, 黄健花, 宋志华, 等. 浓香葵花籽油挥发性风味成分的鉴定[J]. 食品工业科技, 2012, 33(14): 128-131.
 [25] 周印羲, 侯相林, 齐永琴. 高含量 α -亚麻酸乙酯产品的制备[J]. 日用化学工业, 2005, 35(4): 216-218.
 [26] 林非凡, 谭竹钧. β -环糊精包合法分离亚麻油中 α -亚麻酸工艺研究[J]. 食品科技, 2012, 37(5): 144-148, 153.
 [27] 徐丽萍, 王鑫, 宫宇嘉. β -环糊精包合法纯化混合脂肪酸中 α -亚麻酸的工艺条件优化[J]. 食品工业科技, 2014, 35(19): 246-250.
 [28] 杜小晖. 花椒籽油中 α -亚麻酸提取工艺的研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2009.
 [29] 邱英华, 王玉海, 秦志喧, 等. 分子蒸馏法提纯蚕蛹 α -亚麻酸[J]. 粮食与油脂, 2012(2): 23-25.
 [30] 邓小莉, 李翠霞, 李畅, 等. 紫苏籽油中亚麻酸的纯化工艺研究[J]. 河南科技学院学报, 2013, 41(6): 1-5.
 [31] 朱小燕, 但建明, 代斌. α -亚麻酸乙酯的富集纯化及工艺研究[J]. 粮油加工, 2010(12): 37-41.