

# 食用植物油脂制取与精炼技术研究进展

叶展<sup>1,2</sup>, 徐勇将<sup>1,2</sup>, 刘元法<sup>\*1,2</sup>

(1. 江南大学食品学院, 江苏无锡 214122; 2. 食品科学与技术国家重点实验室, 江南大学, 江苏无锡 214122)

**摘要:** 我国近代油脂工业发展至今已超过半个多世纪, 随着新一轮科技革命和产业革命的到来, 食用植物油脂制取与精炼新技术研究受到广泛关注。基于低碳绿色、高效低耗以及产品个性化、营养健康化新需求的油料与油脂柔性加工和精准适度加工技术, 是实现产业转方式、调结构、促发展的重要途径。作者从油料预处理技术、油脂制取技术和油脂精炼技术 3 个方面对当前的新技术研究进行了简要总结, 分析当前存在的应用问题, 并展望未来发展趋势, 旨在为我国未来油脂科技发展提供一定参考。

**关键词:** 未来油脂; 油脂制取; 油脂精炼; 适度加工

中图分类号: TS 224 文章编号: 1673-1689(2022)06-0001-12 DOI: 10.3969/j.issn. 1673-1689.2022.06.001

## Research Progresses on Technologies for Edible Vegetable Oil's Preparation and Refining

YE Zhan<sup>1,2</sup>, XU Yongjiang<sup>1,2</sup>, LIU Yuanfa<sup>\*1,2</sup>

(1. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. State Key Laboratory of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

**Abstract:** The modern edible oil manufacturing technology has been developed for more than half a century in China. With the advent of a new round of scientific and technological revolution and industrial revolution, the research of new technologies of edible vegetable oil preparation and refining has attracted extensive attention. The important way to realize the industrial transformation, structural readjustment and development facilitation was through the flexible processing and accurate and appropriate processing technology of oils and greases based on the low-carbon and green manufacturing, high efficiency and low energy consumption, individualization of products, and new demands of nutrition and health. The authors briefly summarized the current research progress of novel technologies from three aspects, i.e. the oil-bearing materials pretreatment technology, the oil manufacturing technology, and the oil refining technology. The current application problems have been analyzed, and the future development trends have been prospected, providing the references of future oil technology development in China.

**Keywords:** future oils and fats, oil extraction, oil refining, appropriate processing

收稿日期: 2022-01-22

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD2100300); 山东省重点研发计划(重大科技创新工程)项目(2021CXGC010808); 江苏省重点科技项目(BE2021306)。

作者简介: 叶展(1989—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事油脂营养与加工安全研究。E-mail: yezhan@jiangnan.edu.cn

\* 通信作者: 刘元法(1974—), 男, 博士, 教授, 博士研究生导师, 主要从事油脂营养安全与绿色制造研究。E-mail: yfliu@jiangnan.edu.cn

油脂是人类食物中不可缺少的重要成分。作为食品加工的重要原辅料,油脂赋予食品良好的口感、风味和形态,并且还有多种重要的工业用途。在油脂工业中,一般将从油料中获得毛油的过程称为油脂制取,将毛油精炼成为商品油的过程称为油脂加工,油脂的制取和加工是食用油生产过程中的主要环节。我国现代油脂工业发展始于20世纪50年代,随着工业技术水平和设备制造能力不断提升,我国油脂工业目前已基本实现现代化。油料油脂加工技术的水平得到显著提升,不仅极大促进了油脂与植物蛋白相关产品营养品质和食用安全性的改善,而且促使油料油脂加工工艺的精准度、适用性等产生质的飞跃,取得了一系列新的技术突破。大型连续式油脂浸出工艺与配套装备,如膜式蒸发器、高料层蒸脱机等的应用,极大提高了油料处理能力和制油效率,降低溶剂残留;现代化大豆脱皮—湿热酶钝化技术,不仅因降低油脂中非水化磷脂含量而提升了后续油脂脱胶的效果,还可有效降低浸出溶剂损耗,并改善大豆饼粕的品质,为蛋白质副产物利用提供优良原料。

2020年9月,习近平总书记提出我国二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值,争取2060年前实现碳中和,同年10月在十九届五中全会上,习近平总书记首次对科技创新提出了“面向人民生命健康”的新方向。在新时代工业产品加工节能降耗、安全健康的双重诉求下,传统油脂加工方式弊端凸显。油料油脂过度加工仍然普遍,造成原辅料消耗大,能耗、水耗及排放高,资源利用率低等突出问题,导致严重的资源和能源浪费,加剧环境污染。油脂中绝大部分天然、有益微量营养素,还不可避免地产生新的有害物,伴生新的食品安全问题。随着人们对健康、营养油脂的需求不断提升,油料油脂加工工艺和设备也不断推陈出新,未来油脂的发展不仅聚焦食用油营养安全性的提升,还重视低碳绿色、低耗高效的适度加工工艺的开发。近些年,食用植物油脂制取与精炼新技术在油料预处理、油脂制取、油脂加工等方面均得到体现,为未来油脂科技发展奠定基础。因此,作者从处理、制取和精炼技术3个方面,重点介绍当前新技术研究进展。

## 1 油料预处理技术

在植物油生产加工中,油料预处理直接影响制

油效率与产品质量。理想的预处理工艺不仅在于提高油脂和饼粕质量,还应增加设备处理能力。随着油脂加工规模的扩大和市场对油脂安全及营养品质需求的提升,油料预处理技术得到新的发展。

### 1.1 油料挤压膨化技术

挤压膨化技术始于20世纪60年代中期,最初应用在米糠制油工艺中。70年代开始应用于大豆、菜籽、棉籽等油料加工方面。目前油料挤压膨化浸出技术和设备取得突破性进展,油料膨化机的样式增多、用途拓宽、单机产量提高,在油脂工业得到广泛应用。一般认为,现代油脂工业中,近几十年来在制取工艺上的最大进展,即采用了油料挤压膨化浸出技术<sup>[1]</sup>。油料经过挤压膨化后,料粒的容重增大,油料细胞组织被彻底破坏,油料内部空隙度增加。在浸出制油时,浸出溶剂的渗透性得到极大改善,浸出速率提高;在湿粕脱溶时,混合蒸汽中粕末含量减少,粕末捕集的负荷降低。由于湿粕含量的减少和混合油浓度的提高,溶剂损耗也显著降低。另外,油料挤压膨化过程还钝化了油料中的酶活性,使得浸出毛油的酸价降低、非水化磷脂含量减少,毛油的品质得到有效提升<sup>[2]</sup>。植物油料的挤压膨化工艺关键在于控制入料的水分、膨化温度、膨化时间与膨化压力等主要参数,需要根据油料特征进行针对性调整。在油料膨化过程中,可通过控制直接和间接蒸汽量,配合调整膨化压力,促进非水化磷脂向水化磷脂转化,以提高后续毛油脱胶效率<sup>[3]</sup>。

### 1.2 物理场辅助预处理技术

近年来,基于物理场辅助的新型油料预处理技术在油脂加工领域得到较广泛应用,并且效果良好。物理场辅助油料预处理技术具有省时、高效和绿色等优势,可实现油料适度加工。

**1.2.1 微波预处理技术** 微波是频率为300 MHz至300 GHz的高频段电磁波。微波热效应区别于传统加热方式,微波加热时物料内部极性分子反复极化,瞬间将电磁能转变为热能。在微波加热过程中,热量从物料内部向外部迁移,具有加热速度快、物料受热均匀、能量利用率高、加热选择性强等特点<sup>[4]</sup>。微波可穿透油料,使油料温度迅速升高,产生胞内压力,促使油料细胞壁破裂,进而促进油脂释放<sup>[5]</sup>。微波可提升油料预处理效果,但由于微波具有极强热效应,对油脂品质可能产生影响。研究发现,紫苏籽经微波预处理后,油脂的酸价、过氧化值均

显著升高,色泽加深,而水分及挥发物含量降低,但微波预处理并不影响脂肪酸组成,而且,经过微波处理后,油脂中维生素E和植物甾醇含量显著提高,有效改善了油脂的抗氧化能力<sup>[6]</sup>。此外,通过对不同油菜籽样品在微波预处理前后冷榨菜籽油脂肪酸组成的情况,研究者发现,微波预处理不会显著影响油菜籽和菜籽油中的脂肪酸组成和含量,菜籽油中也不会产生典型反式脂肪酸。与传统预处理方式相比,更容易获得健康、营养的高品质菜籽油<sup>[7]</sup>。这表明微波处理是一种安全、高效、绿色的油料预处理方式。

**1.2.2 红外预处理技术** 红外预热处理是通过红外辐射,直接以电磁波的方式加热物料,不仅传热效率高、无污染,且能避免热传导引起的热量损失,具有可控性好等优良特性<sup>[8]</sup>,是一种高效的预热处理方式,近年来在食品物料干燥和贮藏保鲜等方面得到广泛应用。研究表明,紫苏籽经过红外预热处理后,由压榨制备的紫苏籽油的理化品质、脂肪酸组成均符合国家标准,在一定范围内,不同红外处理温度和时间对脂肪酸组成无显著影响;并且紫苏籽经180℃红外预热处理30 min,还能够显著提高紫苏籽油中多酚和黄酮含量,制备的油脂呈浅棕褐色,表现出良好的抗氧化活性和氧化稳定性,油脂品质良好<sup>[9]</sup>。有研究者对比了红外和微波两种方式预处理的油茶籽,探讨其对后续油茶籽油品质的影响,结果表明,两种处理方式均加速了油茶籽中维生素E的溶出和转化,但微波处理比红外处理对维生素E影响更大;在130℃下,经红外预处理90 min,油茶籽油中维生素E含量最高,是最优处理条件<sup>[10]</sup>。这些研究说明红外预处理对于提升油料加工适应性,提高油脂营养活性物质含量,保证油脂营养品质具有显著作用,是一种绿色的油料预处理方式。

## 2 油脂制取技术

目前,植物油制取主要有机械压榨法和溶剂浸出法<sup>[11]</sup>,此外还有水酶法、水剂法等,但这些制油方法存在适用性不高、出油率低、分离困难、废水产生大等缺点<sup>[12]</sup>。这些不同制油方式有的已被应用了十几年,甚至数十年,虽在不断更新进步,但依然未有大规模应用。近些年,为进一步提高油脂品质和产率,人们对改善油脂制取工艺进行了大量探索。

### 2.1 物理场辅助制油技术

**2.1.1 超声波** 超声波技术作为近代发展起来的一项新技术,常应用于工业萃取。超声波由于空化作用,可产生高能量气泡,在物料表面破碎,可间接破坏油料细胞壁结构、减小颗粒尺寸和增强细胞内外的能量传递<sup>[13]</sup>。因此,超声波技术与传统浸出制油工艺相结合,可显著提高油脂提取效率。超声波辅助油脂浸出,不仅有利于细胞内部油脂和其他生物活性物质的析出,还能减少浸出时间、降低溶剂和能源消耗,可满足油脂的柔性适度加工<sup>[14]</sup>。Moradi等采用正己烷作为浸出溶剂,利用超声波辅助提取葵花籽油,在最优条件下,出油率达到49.41%(质量分数),而采用索氏抽提法所得出油率为49.25%(质量分数)<sup>[15]</sup>。相比之下,超声波辅助萃取可将提取时间缩短5倍,溶剂节省70%,并大大降低萃取温度,具有诸多优势。目前超声波辅助浸出技术已部分走向工业化,用于某些植物油的制取,但在配套装备开发、工艺适应性改善和加工成本控制等方面,需要进行深入研究并优化。

**2.1.2 脉冲电场(PEF)** 脉冲电场是一种将短脉冲电施加于两个电极之间的电场技术,其脉宽往往在几纳秒到几毫秒之间,电场强度一般为0.1~100 kV/cm。脉冲电场技术可实现对物料特征风味的保护,几乎可以应用于任何对温度敏感的食物基料的处理<sup>[16]</sup>。将油料置于电极之间进行脉冲电场处理,细胞膜上的电荷分离,产生跨膜电位差,当升高到细胞膜临界电势时,细胞膜破裂,半渗透功能损失,细胞的内含物流出,实现油料细胞内部油脂的高效释放,这是脉冲电场辅助油脂制取的原理<sup>[17]</sup>。Shorstkii等采用脉冲电场辅助预处理葵花籽,发现在电场频率15 Hz,电场强度7.0 kV/cm,溶剂含量40%(质量分数),脉冲宽度30 μs的条件下,脉冲电场可使葵花籽的出油率提高9.1%(质量分数),并有效保留了油脂中生育酚、茶多酚和植物甾醇等功能性成分,提升了营养品质<sup>[18]</sup>。也有研究者采用脉冲电场处理油菜籽,发现经脉冲电场处理后,菜籽油中总酚、 $\alpha$ -生育酚和 $\gamma$ -生育酚含量均极显著增加,碘值极显著降低,皂化值无显著变化;虽然油脂的酸值、过氧化值和 $p$ -茴香胺值增加,但仍符合菜籽原油国家标准。菜籽油清除DPPH·的能力提高,清除·OH和O<sub>2</sub>·的能力下降,表明脉冲电场处理并不会对油脂品质产生不良影响,反而促进了活性物质析出,提

高油脂的品质和氧化稳定性,是一种优良的油脂制取辅助手段<sup>[19]</sup>。但基于目前的工业应用情况,未来需要在开发高功率高压脉冲电源,制造具有工业规模的高强度脉冲电场设备等方面继续深入研究。

## 2.2 生物酶法制油技术

水酶法制油是采用生物酶对油料细胞结构进行酶解,降解植物油料细胞壁的纤维素骨架,增加油料组织中油的流动性,使细胞内的油脂游离出来,再利用油水不相溶原理,以及油和水对其他非油成分亲和力的差异将油脂分离<sup>[20-21]</sup>。水酶法可用于植物油脂、动物油脂和微生物油脂的制取,具有反应条件温和、工艺简单、设备要求低等优点。研究者对水酶法提取米糠油的理化性质、脂肪酸组成、微量活性成分和抗氧化活性进行了评价,结果发现,与浸出法相比,水酶法提取米糠油的碘值和皂化值更高,而酸价和过氧化值降低,水酶法米糠油中磷脂含量降低,而其中的不饱和脂肪酸、生育酚和生育三烯酚、植物甾醇、角鲨烯、谷维素等含量均升高,油脂表现出良好的抗氧化活性<sup>[22]</sup>。程倩等对水酶法提取葵花籽仁油的工艺和效果进行了研究,结果表明,在最佳条件下,水酶法制取油脂的提取率达 90.17%(质量分数),过氧化值低于浸出法,水酶法、压榨法和浸出法制取毛油的脂肪酸组成无显著差异<sup>[23]</sup>。王亚萍等研究发现,在最优条件下,薄皮山核桃油水酶法提取率为 68.44%(质量分数),油酸、生育酚、总酚、 $\beta$ -谷甾醇和角鲨烯含量均显著提高,油脂品质相对更好<sup>[24]</sup>。水酶法制油提取率高,且在提高脂溶性微量营养素含量、保护油脂脂肪酸组成、节能降耗等方面也表现出显著优势。其工艺的效率取决于酶解温度、pH、酶浓度、酶解时间、油料粒径、料液比和搅拌速率等因素,多因素的不可控性是限制其在工业上规模化应用的主要原因<sup>[25]</sup>。酶法制油的局限性还体现在酶成本较高以及配套的加工装备研发不足等方面,因此,未来需在这些方面进一步深入。

## 2.3 超临界流体制油技术

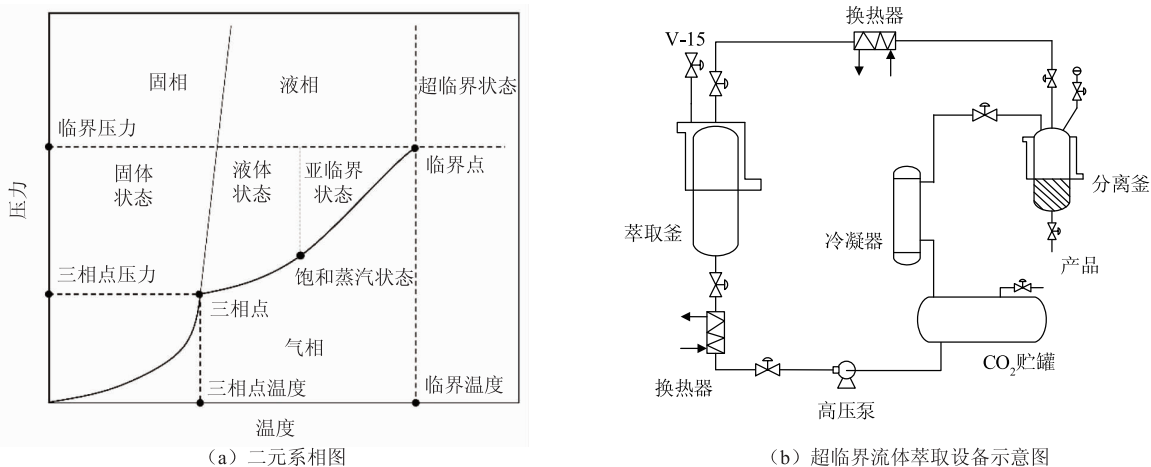
在二元系相图中,温度及压力均处于临界点以上的区域称为超临界区,该区域状态的流体称为超临界流体(见图 1(a))。超临界流体萃取制油技术是在超临界状态下,以流体作为溶剂,通过调节温度和压力来控制其密度、黏度和扩散系数,实现油脂高效选择性提取的新技术<sup>[26]</sup>。CO<sub>2</sub>的临界压力(7.38

MPa)和临界温度(31.1 °C)较低,可实现低温下的分离,是油脂制取领域最常用到的超临界流体。典型的超临界流体萃取设备见图 1(b)。

超临界 CO<sub>2</sub>既有液体的渗透性和溶解能力,又有气体的流动性和传递性,可将物料中的目标组分溶解到流体中,然后借助减压、升温的方法使超临界液体转变为气体,将目标组分析出来,具有提取效率高、易分离、无污染、无残留等优势<sup>[27]</sup>。超临界 CO<sub>2</sub>流体萃取还可提升油脂品质,保留油脂中微量活性成分。研究发现,超临界 CO<sub>2</sub>流体制油可有效克服油脂易氧化酸败、有机溶剂残留、油品色泽不理想等问题<sup>[28]</sup>。Wang 等采用超临界 CO<sub>2</sub>流体萃取技术提取翅果油并考察其抗氧化能力,发现在最佳工艺条件下得到的翅果油不饱和脂肪酸、维生素 E 和总甾醇质量分数均较高,表现出更好的抗氧化活性<sup>[29]</sup>。Hao 等研究了超临界 CO<sub>2</sub>流体提取紫苏籽油工艺,发现紫苏籽油的亚麻酸含量高达 78.7%(相对质量分数),且保留了更多的总酚类物质(130.4 mg/hg)和黄酮类物质(35.3 mg/hg),具有优良的抗菌活性、抗氧化活性和贮存稳定性<sup>[30]</sup>。Chan 等采用超临界 CO<sub>2</sub>流体萃取火麻籽油,也发现其比市售火麻籽油的抗氧化活性更好<sup>[31]</sup>。超临界 CO<sub>2</sub>流体萃取技术虽然具备多种优势,但成本较高,并未得到大规模应用,目前仅在某些小品种活性油脂的制取方面得到应用<sup>[32]</sup>。一方面是因为超临界流体萃取设备需要耐受较高的压力,对于装备材质、加工及自动化控制要求高,配套装备研发技术成本较高,难以实现较大规模工业生产;另一方面,超临界流体萃取技术自动化连续生产难,给设备维护等操作带来不便;另外超临界流体的制备、存储、运输等中间环节的配置也不太理想,这些仍需要进一步研究解决。

## 2.4 亚临界流体制油技术

亚临界状态是溶剂在温度高于其沸点,而又低于其临界温度的温度区间内,在一定压力下以液体存在的状态<sup>[33]</sup>。亚临界流体萃取技术是继超临界流体萃取技术之后发展起来的一种高效分离技术<sup>[34]</sup>,原理与超临界流体萃取技术类似,只是在亚临界流体萃取过程中,萃取溶剂处于沸点和临界温度之间,溶剂保持液态<sup>[35]</sup>。亚临界流体萃取具有时间短、操作温度和压力低、选择性好等特点,可有效保护油脂中的营养成分,而且可节省设备制造和维护成本<sup>[36]</sup>。Liu 等采用亚临界流体萃取技术从枸杞籽中提

图1 超临界流体萃取二元系相图及设备示意图<sup>[26]</sup>Fig. 1 Binary phase diagram and the schematic diagram of typical supercritical fluid extraction equipment<sup>[26]</sup>

取油脂,并与传统方式对比,结果表明,亚临界流体萃取技术提取率最高、萃取时间最短、压力小、温度低,并且还保留了油脂中的特征性不饱和脂肪酸、 $\beta$ -胡萝卜素、生育酚等,制备的油脂产品也表现出优良的体外抗氧化活性<sup>[37]</sup>。Zhang 等对亚临界流体提取辣椒籽油的工艺进行了研究,发现亚临界丙烷表现出提取率高、提取时间短等优势,还有利于保留辣椒籽油中的生育酚、植物甾醇和挥发性黄酮等活性物质,油脂表现出良好的热稳定性,而萃取时间对油脂的脂肪酸组成无显著影响<sup>[38]</sup>。亚临界流体萃取对于实现油脂绿色、高效的精准适度加工具有重要意义,但目前应用还存在一定问题。目前亚临界丁烷和 R134 溶剂体系作为萃取溶剂用于油脂提取研究较多,但其他较少,不同亚临界溶剂对油脂萃取的适应性和机制,以及原料组分间互作对萃取工艺效果影响等还需要深入研究<sup>[34]</sup>;另外,亚临界流体制油成本依然较高,连续化、智能化和自动化配套装备需要进一步突破。

## 2.5 新型溶剂制油技术

浸出制油法仍是当今最常用的油脂制取方法之一,目前食用植物油浸出溶剂主要有工业己烷和 6 号溶剂油,它们的主要成分均为正己烷<sup>[39]</sup>。随着人们对食品安全要求和环境保护意识的提高,以正己烷为主要浸出溶剂的传统浸出制油技术受到挑战。人们对新型替代溶剂的开发做了大量工作,主要集中于开发单一溶剂和混合溶剂等方面。刘大川对异丙醇、二氯甲烷、环己烷、糠醛用作植物油浸出溶剂进行了研究,结果表明,它们各有优缺点,异丙醇和

二氯甲烷已用于油脂浸出中试试验,但距离推广应用仍有许多问题尚需解决<sup>[40]</sup>。刘方波等对正戊烷用于大豆油浸出进行了相关研究,发现正戊烷的浸出率比正己烷略高,浸出大豆油色泽浅,大豆粕脱溶温度(40 ℃)显著低于正己烷(105 ℃)脱溶温度,大豆蛋白溶解度高、品质好,整个浸出过程能耗低,表明其可作为一种优良的油脂浸出溶剂<sup>[41]</sup>。陆啸天等研究了甲基戊烷与正己烷浸出大豆油工艺,发现两种溶剂制备毛脂肪酸组成无显著差异,前者的毛油酸价、总含磷量、溶剂残留量等均较低,但角鲨烯含量较高,甲基戊烷浸出具有精炼损失少、节能等优势,说明其具有替代正己烷用于油脂浸出的潜力<sup>[42]</sup>。也有研究将不同溶剂进行混合配比作为油脂提取溶剂,其中己烷-乙醇-水混合溶剂在油脂工业界取得相对较广泛的应用,用于大豆油浸出可较好地脱除豆粕的豆腥味,并避免己烷浸出豆油带来的不良风味,改善大豆蛋白水溶性<sup>[39]</sup>。后续研究在新型溶剂对不同油料浸出应用的适应性,对料粕和油脂品质的影响,以及相关配套装备研发制造等方面需要进行深入研究。

## 2.6 混合油膜法分离技术

膜分离技术是一种利用半透膜,以外界能量或化学位差为推动力,对双(多)组分流质和溶剂进行分离、分级、提纯和富集的操作技术,具有高效节能、装置简单、易于操作等优势<sup>[43]</sup>。膜分离技术在油脂工业中的应用起步较晚,但发展迅速。采用无热量消耗的膜分离技术作为混合油的预脱溶处理来替代蒸发操作,可取得良好效果。Ribeiro 等采用

Osmonics 的 SEPA 系列反渗透和纳滤膜, 从大豆油和正己烷混合油中回收正己烷, 在实验的温度和压力范围内, 截留相对分子质量为 1 000 的 SEPA GH 聚酰胺纳滤膜通量最大, 为 6.9~30.3 L/(m<sup>2</sup>·h), 对油脂的截留率为 36.6%~67.1%<sup>[44]</sup>。Firman 等采用特制的平面复合膜(即 PVDF)作为载体, 聚二甲基硅氧烷或醋酸纤维素作为涂层制备不同平面复合膜, 用于去除大豆油和正己烷混合油中的溶剂和游离脂肪酸, 发现 PVDF-硅氧烷复合纳滤膜的效果最佳, 其在正己烷溶剂中性质稳定, 对混合物具有良好的渗透选择性。当混合油体积分数为 25%, 过膜压力 2 Mpa, 温度为 30 °C 时, 渗透通量达到最高, 为 20.3 L/(m<sup>2</sup>·h), 此时, 大豆油保留率达到 80%, 游离脂肪酸去除率达到 58%<sup>[45]</sup>。Pagliero 等采用两种合成的平面复合膜, 即聚偏氟乙烯(PVDF-Si 和 PVDF-CA) 和一种商用复合膜(MPF-50), 对葵花籽油-己烷混合物进行处理, 发现 PVDF-Si 膜的效果最佳, 稳定性好且对混合油具有良好的渗透选择性, 在混合油体积分数为 25%, 过膜压力为 0.78 Mpa, 温度为 30 °C, 横流速率为 0.8 m/s 时, 渗透通量达到 12 L/(m<sup>2</sup>·h), 油脂截留率为 46.2%, 并且在该实验条件下, 膜污染较低<sup>[46]</sup>。近年来国内关于采用膜分离技术进行溶剂回收相关研究较少。解决膜的污染问题, 以及开发出寿命长、耐溶剂、截留率和通量高的膜材料, 是目前混合油膜法分离技术面临的重要挑战。

### 3 油脂精炼技术

油脂精炼目的在于去除油脂中所含杂质, 进而提升油脂的食用安全性、感官品质和贮藏稳定性<sup>[47]</sup>。油脂精炼工艺一般分为脱胶、脱酸、脱色和脱臭。为了改善传统精炼工艺中存在的不足, 实现油脂适度、绿色加工, 国内外研究者对新型油脂精炼技术进行了广泛研究。

#### 3.1 脱胶

**3.1.1 膜过滤脱胶** 膜分离技术在油脂脱胶和脱酸工艺中具有极大的应用潜力。与传统脱胶方式相比, 膜分离技术具有工艺环节简单、节能高效、经济性好、无二次污染等优点, 其在油脂领域适用性广, 经过膜法脱胶和脱酸后, 油脂品质可得到显著提升<sup>[48]</sup>。在油脂脱胶工艺中, 膜分离技术常被用来分离磷脂胶束。传统的水化脱胶一般只能除去毛油中 80%~90% (相对质量分数) 总磷脂, 很难去除非水化

磷脂。由于磷脂同时具有亲水和疏水末端, 在非溶液环境中会形成球状结构的反向胶束, 导致其相对分子质量增加, 因此可应用超滤膜将磷脂分离。Doshi 等制备了一种 PVDF 膜, 对其应用于混合油脱胶的性能进行了表征, 结果发现, 在室温以及 1 Mpa 压力下, 正己烷和混合油样的渗透通量分别为 70 L/(m<sup>2</sup>·h) 和 46 L/(m<sup>2</sup>·h) 时, PVDF 膜对磷脂的截取得率可达 95%<sup>[49]</sup>。对于新型膜材料的开发, 提升膜的适用性、耐用性和回收再利用, 并解决使用过程中的污染问题, 是目前膜法脱胶工艺有待解决的重点和难点。

**3.1.2 酶法脱胶** 酶法脱胶是 20 世纪 90 年代左右出现的一种生物脱胶技术, 是采用磷脂酶特异性水解油脂中的磷脂分子, 进而达到脱胶效果的一种方法。脱胶磷脂酶主要有磷脂酶 A1(PLA1)、磷脂酶 A2(PLA2)、磷脂酶 B(PLB)、磷脂酶 C(PLC) 和磷脂酶 D(PLD), 磷脂酶种类不同, 其特异性脱胶位点不同<sup>[50]</sup>。不同磷脂酶作用于磷脂分子的作用位点见图 2。

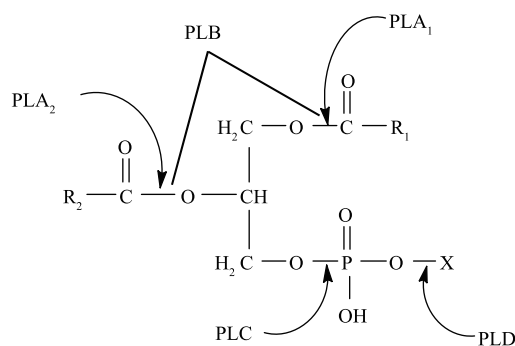


图 2 不同磷脂酶作用于磷脂分子的作用位点

Fig. 2 Action sites of different phospholipases on phospholipid molecules

PLA1、PLA2 和 PLB 的脱胶原理是通过磷脂酶水解掉非水化磷脂分子中的一个脂肪酸, 生成具有较强亲水性的溶血磷脂, 进而通过水化作用除去; PLC 则是直接水解掉磷脂分子中的有机磷酸酯, 生成甘二酯和不具乳化性的磷酸基化合物, 含磷化合物随后通过水洗去除<sup>[51]</sup>。酶法脱胶工艺可将磷含量降低至 10 mg/kg 以下, 更适合油脂后续的物理精炼, 具有经济效益高、油脂品质好、绿色环保等优点。Sampaio 等采用商品化 Purifine<sup>®</sup> PLC 酶在 60 °C, pH 为 5.7 的条件下对玉米油进行脱胶 120 min, 结果发现, 其可使油脂中磷脂降低至 27 mg/kg, 效果显著优于水法脱胶, 并且 Purifine<sup>®</sup> PLC 能有效地

将磷脂酰胆碱和磷脂酰乙醇胺转化为甘油二酯,而不会将磷脂酰肌醇和磷脂酸转化为甘油二酯<sup>[52]</sup>。由

瑞典 Alfa Laval 公司开发的一种酶法脱胶工艺流程见图 3。

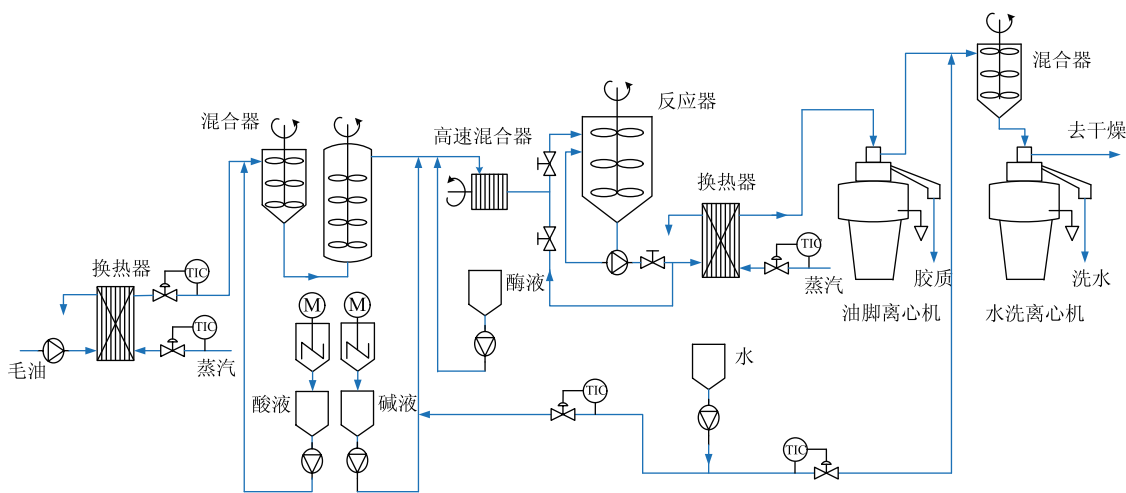


图 3 瑞典 Alfa Laval 公司开发的一种酶法脱胶工艺流程简图

Fig. 3 Simplified scheme of enzymatic degumming process developed by Alfa Laval, Sweden

酶法脱胶是一种具有替代传统脱胶法潜能的新型油脂加工工艺。但考虑到脱胶时间和酶制剂成本问题,后续需要在高催化活性、低成本的磷脂酶开发以及酶制剂重复利用等方面进行突破。

### 3.2 脱酸

传统油脂精炼过程中,通常采用化学精炼和物理精炼脱除油脂中的游离脂肪酸,其中前者更为普遍。化学碱炼法虽脱酸彻底,但是需要消耗大量的酸、碱等辅助原料,同时伴生有机废水污染环境,中性油和功能性脂类伴随物损失大,且不适用于高酸价油脂脱酸等问题。蒸馏脱酸虽然中性油损失较少,但能耗大、精炼率低,对原料油含磷量要求高,活性伴随物损失大,油脂风险因子增加,工艺对设备的要求严格<sup>[52]</sup>。因此研究者们对新型脱酸工艺进行了不少探索。

**3.2.1 酶法脱酸** 酶法脱酸主要是脂肪酸和醇在脂肪酶的催化作用下发生酯化反应,将游离脂肪酸转变成酯的形式,从而达到降低酸价的目的,特别适用于高酸价油脂脱酸。脱酸脂肪酶分为甘油三酯脂肪酶和偏甘油酯脂肪酶两类,偏甘油酯脂肪酶是一种新型脂肪酶,仅选择性作用于单甘酯或甘油二酯,但甘油三酯脂肪酶目前应用更为普遍<sup>[53]</sup>。Makasci 等采用固定化 Novozym 435 酶作为催化剂,甘油作酰基受体,在 2.67 kPa 的条件下催化高酸价橄榄油脱酸,使游离脂肪酸含量由 32.0%降至 3.7%

(相对质量分数)<sup>[54]</sup>。万聪等采用 Lipozyme RMIM 和 Lipozyme 435 两种固定化脂肪酶对高酸价米糠油进行酯化脱酸,结果发现,脂肪酶 Lipozyme 435 的脱酸效果优于脂肪酶 Lipozyme RMIM,在最优条件下,前者可将米糠油酸价从 39.81 mg/g 降至 2.06 mg/g,脱酸率达到 94.83%,同时,米糠油中谷维素保留率为 92.44%、维生素 E 保留率为 77.94%、植物甾醇保留率为 82.34%<sup>[55]</sup>。这说明酶法脱酸效果良好,还可有效保留脂溶性微量营养素,提升油脂营养品质。采用生物酶法代替传统的物理和化学脱酸技术可实现油脂脱酸工艺的节能减排,达到绿色环保之目的,但未来在酶资源挖掘和固定化酶技术开发等方面需进一步深入。

**3.2.2 分子蒸馏脱酸** 分子蒸馏是一种在高真空度下进行分离操作的连续蒸馏过程,具有真空度高、物料不易氧化损伤、操作温度低、物料受热时间短、传热效率高、分离程度高、分离彻底等优点,主要应用于高沸点、热敏性和易氧化物质的分离<sup>[56]</sup>。闫亚鹏等采用分子蒸馏脱酸技术对美藤果油进行脱酸,结果发现,在最优条件下,美藤果油的酸价由 4.7 mg/g 降至 1.1 mg/g,脱酸效果明显,还可以有效地脱除 3-氯丙醇酯和缩水甘油酯,提升成品油的食用安全性<sup>[57]</sup>。李龙英等采用分子蒸馏技术对茶叶籽油进行脱酸处理,结果表明,在最优条件下,可将酸价从 5.06 mg/g 降低至 0.38 mg/g,脱酸率达到

92.49%,并且与传统碱炼脱酸工艺相比,还能有效提高茶叶籽油中生育酚与植物甾醇的保留率<sup>[58]</sup>。分子蒸馏技术具有多种优势,特别适合于特色油脂的精炼,在高效脱除游离脂肪酸的同时,还能够有效保留微量活性成分<sup>[59]</sup>。目前,分子蒸馏技术在国内油脂脱酸方面已得到部分应用,表现出较好的效果,未来具有良好发展前景。

**3.2.3 纳米中和脱酸** 纳米中和技术是利用高压泵,使脱胶后的油脂和碱液在高压下进入纳米反应器形成高速湍流,液体层间产生高剪切力,使得油脂与碱液在纳米反应器中充分混合,破坏其中的分子团,促使快速高效地完成酸碱中和反应,从而达到去除游离脂肪酸的目的。纳米中和脱酸是一项新技术,可以提高油脂得率,并在保证脱酸效果的同时,降低酸、碱等化学品消耗,在油脂精炼工艺中已有成功应用,但是这一技术在国内应用尚不广泛。

研究发现,在纳米中和脱酸工艺中,磷酸和柠檬酸的用量显著降低(降低达 90%),碱的用量也显著减少(超过 30%)。这是由于在纳米反应器中,高压和高剪切力作用促进了毛油与碱液的高效混合,相比于常规的机械搅拌混合,可使中和反应充分进行,油脂中的游离脂肪酸几乎被完全中和,极大地降低了碱用量。此外,这一新的脱酸工艺还可使非水化磷脂更容易被去除<sup>[60]</sup>。因此,纳米中和脱酸技术在油脂精炼工艺中的广泛应用将会给油脂行业带来技术性变革,不仅脱酸效果优异,还能够进一步减少后续脱色过程中白土的消耗,提高油脂的精炼率,节约能源,为企业带来良好的经济效益<sup>[47]</sup>。

### 3.3 脱色

油脂中的色素主要分为天然有机色素、油料降解产物和加工产生色素等<sup>[61]</sup>。吸附脱色是当前油脂工业中应用最普遍的脱色方法,但是传统的脱色方法一般都存在脱色剂用量大、脱色油返酸严重、脱色时间长等问题,不仅造成油脂中营养物质的大量损失,还伴生反式脂肪酸、三氯丙醇酯等有害物质,影响油脂的营养品质和食用安全性<sup>[62]</sup>。因此,近些年新型油脂脱色技术被广泛研究。

**3.3.1 复合吸附剂脱色技术** 吸附剂的种类和用量是影响油脂脱色效果的主要因素,常用吸附剂有活性白土、活性炭、凹凸棒土等。不同吸附剂对油脂中杂质的特异性吸附作用不同,成本也有差异。通过不同脱色剂进行合理配比,不仅能有效解决脱色

效率低、吸附剂利用不充分等问题,还可以减少用量、降低脱色成本。郭少海等采用由 7.5%膨润土、2.5%凹凸棒土和 0.5%活性炭(均为质量分数)组成的复合脱色剂,对油茶籽化妆品基料油进行脱色处理,优化工艺后每种脱色剂的用量均降低,脱色时间有效缩短,脱色后油脂色泽 $R$  小于 0.1, $Y$  小于 2.5,并且油脂中多酚、维生素 E、角鲨烯、谷甾醇等活性成分得到有效保留,油脂的酸价、过氧化值和磷含量与常规脱色技术相比未有显著性差异<sup>[63]</sup>。叶展等通过将活性白土与凹凸棒土进行复配,用于菜籽油脱色,工艺优化结果显示,复合脱色剂用量为 3.4%(质量分数)时,可在 27 min 内使菜籽油脱色率达到 97.2%,同时,油脂中维生素 E 和植物甾醇的含量高于采用常规白土的脱色工艺<sup>[62]</sup>。由此可知,后续在开发新型脱色剂的同时,也应该对复合脱色剂的配比组成进一步优化,并探讨不同脱色剂的协同机制,进一步提高脱色效果和产品质量,降低脱色成本。

**3.3.2 物理场辅助脱色技术** 物理场辅助脱色是一种有效地增强脱色效果的手段,其中超声波辅助油脂脱色最为常用。由于超声波的空化作用,在吸附脱色过程中,可使脱色剂微粒在油脂中剧烈运动和翻滚,让脱色剂均匀分布在油脂中,增加脱色剂与待脱色油脂的接触面积,进而提高油脂脱色效率和脱色剂利用率,有效缩短脱色时间、降低脱色温度<sup>[14]</sup>。Su 等对菜籽油采用超声波辅助脱色技术,结果发现,超声波可以增强吸附剂对色素吸附效率,高功率超声波在一定程度上还可促进色素的降解,脱色油的磷脂、钙离子以及其他金属离子均得到降低,油脂品质得到提升<sup>[64]</sup>。Abedi 等对大豆油的超声波辅助脱色条件进行了优化,在 85%超声功率(最大功率 400 W)下,大豆油的脱色率达到 74.44%,油脂中胡萝卜素和叶绿素分别减少 81.19%和 94.66%<sup>[65]</sup>。尽管超声波辅助脱色效果良好,然而后续在专用设备开发,超声辅助脱色工艺应用适应性等方面需要进一步研究,进而促进其规模化工业应用。

**3.3.3 二氧化硅多级吸附脱色技术** 二氧化硅水凝胶是由完全酸活化或部分酸活化的二氧化硅和水分(质量分数 50%~65%)形成的可自由流动性白色粉料。这种吸附剂对油溶性色素的亲合力较低,但可有效除去油脂中的磷脂、皂脚和微量金属等极性杂质。在 20 世纪 80 年代中期,即被引入油脂精



炼领域<sup>[66]</sup>。后来研究者发现,二氧化硅水凝胶和活性白土按照一定顺序加入进行脱色时,基于两者的相互作用效应,可以大大降低脱色温度和时间,二氧化硅水凝胶对油脂还有良好的预过滤效果,人们将这种工艺称为二氧化硅多级吸附脱色。因为二氧化硅水凝胶对油脂的预处理作用有效提升了白土对色素的吸附能力,因此可以将白土用量减少40%(质量分数)以上。这种工艺在国外已有规模化应用,可适用于普通植物油、鱼油、牛油和某些特殊油脂的脱色<sup>[67]</sup>。在国内该技术并未普及,可能主要在于设备投资和改造成本较高,此外,国内用于油脂脱色的二氧化硅水凝胶产品尚不多见。另外,该工艺的优点在于可高效脱除磷脂、皂脚和微量金属元素,而对于色素的脱除能力仍存在一定不足,后续需要继续深入的优化。

### 3.4 脱臭

近现代油脂工业的飞速发展得益于机械制造技术的巨大进步。当前油脂脱臭工艺存在能耗高、微量营养素损失多、风险因子伴生严重等问题,随着国家“双碳”政策的提出以及人们对健康油脂需求的不断提升,传统精炼技术的弊端越发突出。通过工艺设备创新,降低能耗,提升安全性,在一定程度上可实现油脂的绿色脱臭。

**3.4.1 干式-冷凝真空脱臭系统** 目前大部分油脂脱臭工艺中均采用传统蒸汽喷射泵真空脱臭系统,尽管前期投入费用低,但是仅脱臭阶段所需蒸汽消耗约占总量的60%~85%,能耗极高。干式-冷凝真空脱臭技术是在水的三相点参数条件以下,将从脱臭塔中吸入的水蒸气与游离脂肪酸等物质,采用干式-冷凝的方式,使之不经过液相状态,在冷凝器冷却管传热面上直接冻结成固相而附着在冷凝管表面,然后再将其除去,经过冷凝器后,实际上流向喷射泵的仅有空气<sup>[68]</sup>。与传统系统相比,具有真空度高、启动时间短、成本低等优点。段书平等对干式-冷凝真空脱臭系统进行生产实践,结果表明,系统真空度可达120 pa,系统启动时间为10.5 h,蒸汽成本仅为传统四级蒸汽喷射泵真空系统的21.3%,年均总成本节约34.95%<sup>[69]</sup>。万辉等的研究也表明,食用油干式-冷凝真空脱臭工艺在能耗、环保、操作和土建维护等方面具有显著优势,可应用在油脂脱臭、脂肪酸蒸馏、甘油蒸馏工段和冷冻干燥工段等不同领域<sup>[70]</sup>。总之,不仅可实现节能减排,还能降低

企业生产成本,是一种经济环保型脱臭技术。

**3.4.2 双温集成汽提脱臭技术** 双温集成汽提脱臭技术是利用不同温度的水蒸气对油脂进行两次脱臭处理,第一阶段在较低温度下,脱除大部分较低馏分臭味组分,时间较长;第二阶段在较高温度下,脱除高馏分臭味组分和热脱色成分,时间很短。这种组合塔和独立填料塔相结合的设备形式和优化的工艺条件,可保证良好的脱臭效果,也减少由于长时间高温、高真空条件处理导致的反式脂肪酸的形成,以及维生素E和植物甾醇等活性物质的损失。不仅如此,两次蒸汽处理可以实现热量的回收和循环利用,可显著降低脱臭能耗<sup>[71]</sup>。双温集成汽提脱臭塔还具有降低负热效应,有效脱除有害因子和挥发性臭味成分等效果。Oey等研究了中试规模的双循环精炼(重复单次脱臭)、高低温脱臭二次精炼(重复第一次脱臭,但降低温度)、高低温脱臭单次精炼(重复低温脱臭)3种脱臭方式对2-MCPDE、3-MCPDE和GE含量的影响,结果发现,3种脱臭方式均无法有效脱除2-MCPDE和3-MCPDE,只能通过前期处理减少其后续生成,但是双温脱臭技术可以显著降低GE含量<sup>[72]</sup>,这为双温集成汽提脱臭技术的应用提供了参考。目前双温集成汽提脱臭工艺虽然在国内已有应用,但也不太普及。脱臭工艺革新对设备依赖程度大,当前油脂脱臭工艺虽然可以显著提升油脂烟点、气滋味等品质,但是活性成分同样几乎被完全脱除,加上工艺的高能耗,这既不符合适度精炼的要求,也没有达到提升产品营养品质的诉求,因此,新的脱臭技术依然有待挖掘。

## 4 展望

植物油脂制取与精炼的目的是通过一系列高效加工手段,获得食用安全性高、营养功能和储存稳定性好的油脂产品,但是传统油脂加工工艺原辅料、助剂等消耗高,废水、废渣排放大,过度加工严重,风险因子伴生等问题依然突出。

有关未来食品的研究正如火如荼,未来油脂将走向何处,可能需要通过广大油脂同行共同努力才能给出答案。实际上,油脂精炼核心即为去除毛油中影响食用安全、营养品质和贮存稳定性的非油杂质,基于此,未来油脂可能不仅仅需要对传统精炼工艺进行优化改造,还需要从根本上对传统油脂精炼的“三脱”或“四脱”工艺进行颠覆,例如,并非所

有油脂都需要经过高温、高真空脱臭,将烟点提升至超过 200 °C 甚至更高。基于中国居民烹饪和饮食特点,针对不同烹饪方式如爆炒、煎炸、凉拌等,不同应用场景如餐饮酒店业、家庭烹饪、食品工业等,选择合适的加工工艺,缩短加工链条,在满足油脂品质的前提下精准适度加工,或许是未来油脂加工需要重点考虑的地方。

总之,未来油脂科技首先应该致力于进一步提升油脂产品安全性,制造健康食用油脂。同时,随着

消费者对健康化、个性化产品需求的提升,针对不同用途、不同应用场景和人群制造不同品级、不同类型的定制化、个性化产品,横向拓宽应用范围。最后,适度绿色加工,降低排放,适应国家“双碳”战略。为达到这些要求,需要着力于加工新材料挖掘、新工艺研发、新设备制造以及新配套辅助措施的落地,最根本的是在油脂工业和食用油受众者中植入新油脂制造理念。

## 参考文献:

- [1] 任嘉嘉,相海,胡淑珍,等. 挤压膨化技术在油料加工中的应用研究;第十四届国际谷物科技与面包大会暨国际油料与油脂发展论坛论文摘要集[C]. 北京:[出版者不详],2012:448-449.
- [2] 李合,蔡红燕,沈汪洋,等. 挤压膨化技术在麦麸加工中应用及研究进展[J]. 食品工业,2020,41(11):271-274.
- [3] 左青,左晖. 试述我国油脂加工技术进展动态[J]. 粮食与食品工业,2018,25(2):3-12.
- [4] 从艳霞,郑明明,郑畅,等. 微波技术对油菜籽品质影响研究进展[J]. 中国油料作物学报,2019,41(1):151-156.
- [5] GABER M A F M, TUJILLO F J, MANSOUR M P, et al. Improving oil extraction from canola seeds by conventional and advanced methods[J]. *Food Engineering Reviews*, 2018, 10(4):198-210.
- [6] 黄颖,郑畅,刘昌盛,等. 微波预处理紫苏籽对其油脂品质及抗氧化特性的影响[J]. 粮食与油脂,2019,32(5):48-50.
- [7] 胡爱鹏,魏芳,黄凤洪,等. 微波预处理对油菜籽及其低温压榨油脂脂肪酸含量的影响[J]. 中国油料作物学报,2021,43(5):923-932.
- [8] 李树君,林亚玲,潘忠礼. 红外技术用于农产品灭酶和脱水干燥的研究综述[J]. 农业机械学报,2008(6):109-112.
- [9] 贾晓倩,张琪,刘和平,等. 红外预处理对压榨紫苏籽油品质及抗氧化活性的影响[J]. 中国油脂,2022,47(2):16-22.
- [10] 王龙祥,罗凡,郭少海,等. 微波和红外处理油茶籽对压榨油茶籽油中 VE 含量的影响[J]. 中国油脂,2020,45(3):58-61.
- [11] 陈复生,郝莉花,江连州,等. 酶技术制取植物油脂的研究进展[J]. 河南工业大学学报(自然科学版),2015,36(5):106-112.
- [12] 杨瑞金,倪双双,张文斌,等. 水媒法提取食用油技术研究进展[J]. 农业工程学报,2016,32(9):308-314.
- [13] BARBA F J, ZHU Z, KOU BAA M, et al. Green alternative methods for the extraction of antioxidant bioactive compounds from winery wastes and by-products: a review[J]. *Trends in Food Science and Technology*, 2016, 49:96-109.
- [14] 叶展,罗质,何东平,等. 超声波技术在油脂适度精炼中的应用研究进展[J]. 食品工业,2015,36(7):231-236.
- [15] MORADI N, RAHIMI M, MOEINI A, et al. Impact of ultrasound on oil yield and content of functional food ingredients at the oil extraction from sunflower[J]. *Separation Science and Technology*, 2018, 53(2):261-276.
- [16] 熊强,董智勤,朱芳州. 脉冲电场技术在食品工业上的应用进展[J]. 现代食品科技,2022,38(2):326-339,255.
- [17] MORADI N, RAHIMI M. Effect of simultaneous ultrasound/pulsed electric field pretreatments on the oil extraction from sunflower seeds[J]. *Separation Science and Technology*, 2018, 53(13):2088-2099.
- [18] SHORSTKII I, MIRSHEKARLOO M S, KOSHEVOI E, et al. Application of pulsed electric field for oil extraction from sunflower seeds: electrical parameter effects on oil yield[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2017, 40:1-7.
- [19] 张良,王丽娟,钱建亚. 脉冲电场处理油菜籽对菜籽油品质的影响[J]. 中国油脂,2017,42(11):33-37.
- [20] 沈玉平,周旭,张祖姣,等. 水酶法提取油脂研究进展[J]. 中国油脂,2021,46(2):14-19.
- [21] VERDASCO-MARTÍN C M, DÍAZ-LOZANO A, OTERO C. Advantageous enzyme selective extraction process of essential spirulina oil[J]. *Catalysis Today*, 2020(346):121-131.
- [22] DUOXIA X, JIA H, ZHENHUA W, et al. Physicochemical properties, fatty acid compositions, bioactive compounds, antioxidant activity and thermal behavior of rice bran oil obtained with aqueous enzymatic extraction[J]. *LWT—Food Science and Technology*, 2021, 149:1-8.

- [23] 程倩,初柏君,杨潇,等. 水酶法提取葵花籽仁油工艺的优化及对油脂品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报,2021,12(17): 6969-6974.
- [24] 王亚萍,姚小华,常君,等. 水酶法提取薄壳山核桃油脂工艺优化及油脂营养品质分析[EB/OL]. (2021-08-06)[2022-04-22]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?doi=10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.210327>.
- [25] RICOCHON G, MUNIGLIA L. Influence of enzymes on the oil extraction processes in aqueous media[J]. **OCL – Oleagineux Corps Gras Lipides**, 2010, 17(6): 356-359.
- [26] 黄沅玮. 超临界流体萃取技术及其在植物油脂提取中的应用[J]. 食品工程, 2020, 3: 12-15.
- [27] 周端, 王晓宇, 赵锐洋, 等. 超临界流体萃取技术及其在油脂中的应用进展[J]. 农产品加工(学刊), 2012, 8: 39-42.
- [28] PRIYANK A, KHANAM S. Selection of suitable model for the supercritical fluid extraction of carrot seed oil: a parametric study [J]. **LWT–Food Science and Technology**, 2020, 119: 1-10.
- [29] WANG C, DUAN Z, FAN L, et al. Supercritical CO<sub>2</sub> fluid extraction of elaeagnus mollis diels seed oil and its antioxidant ability [J]. **Molecules**, 2019, 24(5): 1-12.
- [30] HAO L, LV C, CUI X, et al. Study on biological activity of perilla seed oil extracted by supercritical carbon dioxide[J]. **LWT–Food Science and Technology**, 2021, 146: 1-7.
- [31] CHAN K W, ISMAIL M. Supercritical carbon dioxide fluid extraction of *Hibiscus cannabinus* L. seed oil: a potential solvent-free and high antioxidative edible oil[J]. **Food Chemistry**, 2009, 114(3): 970-975.
- [32] 张立, 黄立平. 国内超临界 CO<sub>2</sub> 萃取技术工业化现状及存在问题研究: 第十二届全国超临界流体技术学术及应用研讨会暨第五届海峡两岸超临界流体技术研讨会论文摘要集[C]. 大连: [出版者不详], 2018: 44.
- [33] 王金顺, 侯晶晶, 杨倩, 等. 亚临界低温萃取技术装备和应用进展[EB/OL]. (2022-02-23)[2022-04-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1099.TS.20220222.1416.002.html>.
- [34] 郭婷婷, 万楚筠, 黄凤洪, 等. 亚临界流体萃取油脂及微量成分研究进展[J]. 中国油料作物学报, 2020, 42(1): 154-160.
- [35] LU J, FENG X, HAN Y, et al. Optimization of subcritical fluid extraction of carotenoids and chlorophyll a from *Laminaria japonica* Aresch by response surface methodology[J]. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, 2014, 94(1): 139-145.
- [36] 史嘉辰. 低温压榨菜籽饼的亚临界流体萃取技术研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2019.
- [37] LIU Z, LIU B, KANG H, et al. Subcritical fluid extraction of *Lycium ruthenicum* seeds oil and its antioxidant activity [J]. **International Journal of Food Science and Technology**, 2019, 54(1): 161-169.
- [38] ZHANG R, LIU H, MA Y, et al. Characterization of fragrant oil extracted from pepper seed during subcritical propane extraction [J]. **LWT–Food Science and Technology**, 2019, 110: 110-116.
- [39] 李昌. 新型油脂浸出溶剂的筛选[D]. 无锡: 江南大学, 2009.
- [40] 刘大川. 植物油浸出溶剂开发研究新进展[J]. 粮食与油脂, 1991, 2: 33-35.
- [41] 刘方波, 刘元法, 王兴国, 等. 新型制油溶剂正戊烷浸出大豆油的研究[J]. 中国油脂, 2008, 8: 11-13.
- [42] 陆啸天, 赵晨伟, 王兴国, 等. 甲基戊烷四级逆流浸出膨化大豆料[J]. 中国油脂, 2017, 42(9): 149-152.
- [43] 刘红波, 唐志书, 宋忠兴, 等. 膜分离技术对沙棘籽油精制的初步研究[J]. 膜科学与技术, 2017, 37(2): 124-130.
- [44] RIBEIRO A P B, MOURA J M L N, GONCALVES L A G, et al. Solvent recovery from soybean oil/hexane miscella by polymeric membranes[J]. **Journal of Membrane Science**, 2006, 282(1): 328-336.
- [45] FIRMAN L R, OCHOA N A, MARCHESE J, et al. Deacidification and solvent recovery of soybean oil by nanofiltration membranes[J]. **Journal of Membrane Science**, 2013, 431: 187-196.
- [46] PAGLIERO C, OCHOA N A, MARTINO P, et al. Separation of sunflower oil from hexane by use of composite polymeric membranes[J]. **Journal of the American Oil Chemists Society**, 2011, 88(11): 1813-1819.
- [47] 左青, 左晖. 油脂精炼工艺和设备的改进实践[J]. 中国油脂, 2020, 45(10): 22-27.
- [48] 罗世龙, 张中, 韩坤坤, 等. 膜分离技术在食品工业中的应用研究进展[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(6): 43-45.
- [49] DOSHI K, TRIVEDI Y, RAY P, et al. Degumming of crude vegetable oil by membrane separation: probing structure-performance and stability of PVDF membranes[J]. **Separation Science and Technology**, 2019, 54(3): 360-369.
- [50] 叶展, 罗质, 何东平, 等. 酶法脱胶及其在大豆油适度精炼中的应用[J]. 食品工业, 2015, 36(1): 258-261.
- [51] CERMINATI S, EBERHARDT F, ELENA C E, et al. Development of a highly efficient oil degumming process using a novel

- phosphatidylinositol-specific phospholipase C enzyme[J]. **Applied Microbiology and Biotechnology**, 2017, 101(11):4471-4479.
- [52] SAMPAIO K A, ZYAYKINA N, UITTERHAEGEN E, et al. Enzymatic degumming of corn oil using phospholipase C from a selected strain of *Pichia pastoris*[J]. **LWT—Food Science and Technology**, 2019, 107:145-150.
- [53] 施春阳, 石珑华, 李道明. 酶法脱酸的研究进展与发展展望[J]. **中国油脂**, 2021, 46(10):11-17.
- [54] MAKASCI A, ARISOY K, TELEFONCU A. Deacidification of high acid olive oil by immobilized lipase[J]. **Turkish Journal of Chemistry**, 1996, 20(3):258-264.
- [55] 万聪, 彭辉, 杨洁, 等. 无溶剂体系高酸值米糠油酶法酯化脱酸工艺优化研究[J]. **中国油脂**, 2016, 41(4):10-13.
- [56] 孟佳, 刘建, 张旋, 等. 分子蒸馏技术在油脂精炼中应用的研究进展[J]. **中国油脂**, 2021, 46(2):11-13.
- [57] 闫亚鹏, 马传国, 李加辛, 等. 分子蒸馏脱除美藤果油游离脂肪酸及其对 3-氯丙醇酯和缩水甘油酯的影响[J]. **食品安全质量检测学报**, 2021, 12(7):2738-2743.
- [58] 李龙英, 金青哲, 朱跃进, 等. 茶叶籽油分子蒸馏脱酸工艺研究[J]. **中国油脂**, 2014, 39(4):19-22.
- [59] 李进伟, 李李, 刘元法. 分子蒸馏脱酸对小麦胚芽油的影响[J]. **中国油脂**, 2016, 41(4):46-50.
- [60] SVENSON E, WILLITS J. Nano neutralization™[M]. USA: AOCS Press, 2014:147-157.
- [61] 张振山, 康媛, 刘玉兰. 植物油脂脱色技术研究进展[J]. **河南工业大学学报(自然科学版)**, 2018, 39(1):121-126.
- [62] 叶展, 罗质, 胡传荣, 等. 菜籽油复合脱色剂脱色工艺优化及其品质分析[J]. **中国粮油学报**, 2019, 34(1):117-124.
- [63] 郭少海, 罗凡, 王亚萍, 等. 油茶籽化妆品基础油复合脱色工艺的研究[J]. **中国油脂**, 2019, 44(7):59-63.
- [64] SU D, XIAO T, GU D, et al. Ultrasonic bleaching of rapeseed oil: effects of bleaching conditions and underlying mechanisms[J]. **Journal of Food Engineering**, 2013, 117(1):8-13.
- [65] ABEDI E, SAHARI M A, BARZEGAR M, et al. Optimisation of soya bean oil bleaching by ultrasonic processing and investigate the physico-chemical properties of bleached soya bean oil[J]. **International Journal of Food Science and Technology**, 2015, 50(4):857-863.
- [66] 马苏德. TriSyl 二氧化硅 + 饼 + 白土去除食用油脂中杂质和色素[J]. **中国油脂**, 2000, 25(6):69-71.
- [67] DEGREYT W. Oil refining: current and future technologies[M]. New Jersey: Wiley-Blackwell, 2013:127-151.
- [68] 周人楷, 郑茂强, 严有兵, 等. 干式 - 冷凝真空脱臭系统在食用油精炼过程中的应用[J]. **粮食与食品工业**, 2013, 20(1):8-10, 13.
- [69] 段书平. 干式冷凝真空系统在精炼脱臭中应用[J]. **石油和化工设备**, 2013, 16(5):68-70.
- [70] 万辉, 周人楷, 赵勇. 食用油干式—冷凝真空脱臭系统的研究开发[J]. 2010, 17(6):43-45.
- [71] 王月华, 杜雁冰, 刘红, 等. 营养玉米油及其关键精炼工艺技术[J]. **粮食与食品工业**, 2014, 21(5):9-11.
- [72] OEY S B, FELS-KLERX H J, FOGLIANO V, et al. Effective physical refining for the mitigation of processing contaminants in palm oil at pilot scale[J]. **Food Research International**, 2020, 138:1-7.