

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20240914003

引用格式: 温娅晴, 郭梦姚. 超临界二氧化碳萃取技术及其在油脂中的应用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(2): 286–295.

WEN YQ, GUO MY. Research progress of supercritical carbon dioxide extraction technology and its application in oil [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(2): 286–295. (in Chinese with English abstract).

超临界二氧化碳萃取技术及其在油脂中的应用研究进展

温娅晴, 郭梦姚*

(中央储备粮邓州直属库有限公司, 邓州 474100)

摘 要: 超临界二氧化碳萃取技术作为一种独特、清洁、高效、节能的分离方法, 可以解决传统提取技术中存在的诸多缺陷, 如使用有毒的有机试剂、高能源的使用以及低萃取得率等, 因此在食品加工中有较好的应用前景。油脂作为人体的 3 大营养素之一, 在维持人体正常生理机能的同时, 也具有诸多有益的生理功能, 对改善人体健康、预防疾病具有重要价值。因此本文聚焦超临界二氧化碳萃取技术, 系统地总结了超临界二氧化碳萃取的概念、作用机制、工艺流程及特点和影响因素, 以及近几年在如小麦胚芽油、米糠油、大豆胚芽油等植物油脂和鱼油、昆虫油等动物油脂方面应用的研究现状, 旨在为超临界二氧化碳萃取技术在科学研究和食品加工应用提供一定的理论参考。

关键词: 超临界二氧化碳; 萃取; 油脂

Research progress of supercritical carbon dioxide extraction technology and its application in oil

WEN Ya-Qing, GUO Meng-Yao*

(Sinograin Dengzhou Deport Directly Under Company, Dengzhou 474100, China)

ABSTRACT: Supercritical carbon dioxide extraction technology, as a unique, clean, efficient, and energy-saving separation method, can solve many defects in traditional extraction techniques such as the use of toxic organic reagents, high energy consumption, and low extraction yield. Therefore, it has good application prospects in food processing. As one of the 3 kinds of major nutrients of human body, oil not only maintains the normal physiological function of human body, but also has many beneficial physiological functions, which is of great value to improve human health and prevent diseases. Therefore, this article focused on supercritical carbon dioxide extraction technology, systematically summarized supercritical carbon dioxide extraction's concept, mechanism, process flow, characteristics and influencing factors, as well as the research status in recent years regarding its application in plant oils such as wheat germ oil, rice bran oil, and soybean germ oil, as well as animal fats like fish oil and insect oil,

收稿日期: 2024-09-14

第一作者: 温娅晴(1996—), 女, 助理工程师, 主要研究方向为食品科学与工程。E-mail: 2458691712@qq.com

*通信作者: 郭梦姚(1994—), 男, 助理工程师, 主要研究方向为粮食储藏。E-mail: 18848967767@163.com

aimed to provide a theoretical reference for the scientific research and food processing applications of supercritical carbon dioxide extraction technology.

KEY WORDS: supercritical carbon dioxide; extraction; oil

0 引言

近年来,随着生活水平的提升以及人们健康意识的增强,许多新兴的非热处理技术逐渐受到关注。这些技术相较于传统的热加工方法,能够更好地保留食品的固有风味、色泽、质地、营养成分和新鲜度。诸如脉冲电场技术^[1-2]、欧姆加热^[3-4]、紫外辐照^[5-6]、脉冲强光^[7-8]、超声波^[9-10]、冷等离子体^[11-12]、高静水压技术^[13-14]、超高压均质^[15-16]等技术,已在食品行业引发了国内外学者的广泛研究。其中,超临界二氧化碳(CO₂)萃取技术,作为一种独特、清洁、高效、节能的分离方法,可以解决传统提取技术中存在的如使用有毒的有机试剂、高能源的使用以及低萃取得率等诸多缺陷^[17],满足消费者对“绿色食品”“天然产物”的高纯优质产品的追求。

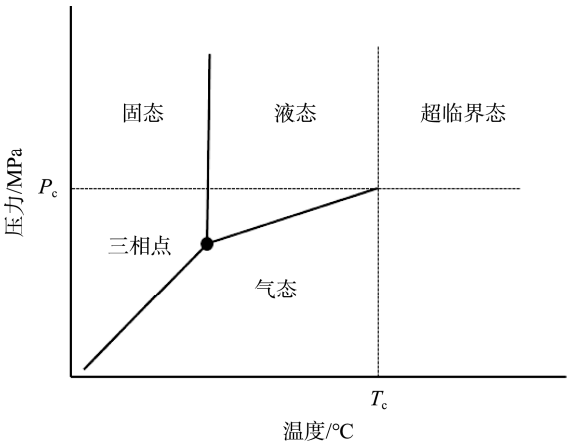
蛋白质、碳水化合物和油脂并称人体所需 3 大营养素。其中,油脂不仅为身体提供能量和必需脂肪酸,还能提供多种功能性成分,如脂溶性维生素、甾醇、角鲨烯和多酚等^[18]。近年来,超临界 CO₂ 萃取技术在油脂加工过程中的应用明显增加,使用超临界 CO₂ 萃取油脂,回收率高,并可调节萃取条件,对不饱和脂肪酸等功能性成分可以实现选择性分离,既符合绿色发展需要,又可以分离油脂中有害或有益成分,成为当今热门的研究话题之一。因此本文聚焦超临界 CO₂ 萃取技术,较系统地整理了其在油脂中的应用状况,并针对现有问题提出改善建议,旨在为后期的研究提供一定的理论支撑。

1 超临界 CO₂ 萃取技术简介

1.1 超临界流体的概念

图 1 为物质的 3 相图^[19],由图 1 可知,物质以气态、液态、固态 3 种状态存在,压力和温度的变化可使其发生 3 相变化。物质的 T_c 是指物质由气态转变为液态的最高温度,在这个温度之上,气态物质不会随着压强的增大转变为液态。而在 T_c 时,气体液化所需要的最低压强即为 P_c 。当物质温度超过 T_c 、压力超过 P_c 时,便进入了图 1 中右上角的超临界状态,此时的物质不同于 3 相,属于新的单一相;对该状态的气体加压,气体并不会液化,只是密度变大,同时兼具类似液体的性质和保留气体的性能,被称为超临界流体。由表 1 可以看出,超临界流体的性质与气体、液体均不完全相同,而是介于液相与气相之间,是一种气液不分的状态,其密度和溶解能力与液体相仿,黏度等性质与气体更加接近。超临界流体具有对溶质有较大溶解度

的液体特点,又具有易于扩散和运动的气体特点;同时,超临界流体的黏度、密度、扩散系数、溶剂化能力等许多性质易受到温度和压力的影响,因此对选择性分离非常敏感^[20]。萃取过程中采用超临界流体作为溶剂的方法,称之为超临界流体萃取。



注: T_c 为临界温度; P_c 为临界压力。

图 1 超临界流体与固态、液态、气态关系示意图

Fig.1 Schematic diagram of the relationship between supercritical fluid and solid, liquid and gas states

表 1 超临界流体与气体、液体性质对比
Table 1 Comparison of supercritical fluids with gas and liquid properties

	密度/(kg/cm ³)	黏度/(μPa · s)	扩散系数/(mm ² /s)
气体	1	10	1.000~10.000
超临界流体	100~1000	50~100	0.010~0.100
液体	1000	500~1000	0.001

1.2 超临界 CO₂ 萃取技术的基本原理

当物质处于超临界状态,压力和温度对超临界流体中物质的溶解度具有显著性影响,因此通过增加温度,或者减小压力的手段(或两者同时使用),可以使溶解于超临界流体中的物质分离出来,从而达到分离纯化的目的^[21]。

超临界流体萃取技术将传统蒸馏技术与有机溶剂萃取相结合,超临界流体作为溶剂与被萃取物料接触,超临界流体溶解并携带物料中的某些组分(萃取物),从而使物料中的其他组分(萃余物)被分离,因压力和温度对超临界流体中物质的溶解度具有显著性影响,便可通过减小压力、改变温度的手段(或两者同时使用),使超临界流体的密度下降,溶解能力变小,超临界流体所携带的萃取物便被

解析出,由此达到萃取分离的目的。当超临界流体与被萃取物混合后,超临界流体会根据各物质的不同极性、沸点等性质进行萃取分离。

表 2 列举了部分常见的如 CO₂、水、一氧化氮、乙烷、乙烯、丙酮等超临界流体及其临界参数。从表中可知,CO₂ 的 T_c 为 30.98 °C 接近室温, P_c 为 7.38 MPa 适中,操作条件温和,可以防止热敏性物质的氧化分解,避免有效成分被破坏;同时 CO₂ 临界密度(0.468 g/cm³)高于常用的超临界溶剂,因此具有较强的有机物溶解能力。此外,CO₂ 价格低廉易于得到、稳定、安全无毒、低运行成本、易于分离、高效萃取速率、工艺简单,有利于保证和提高天然产物的质量,被称为最理想的超临界流体,广泛应用于食品香料、植物油和生物碱的优良萃取以及医药、化妆品等各个领域。

表 2 常见萃取剂及其临界参数

Table 2 Common extractants and their critical parameters

萃取溶剂	化学式	相对分子质量 /(g/mol)	$T_c/^\circ\text{C}$	P_c /MPa	临界密度 /(g/cm ³)
二氧化碳	CO ₂	44.01	30.98	7.38	0.468
氨	NH ₃	17.03	132.25	11.33	0.225
一氧化二氮	N ₂ O	44.01	36.37	7.25	0.452
水	H ₂ O	18.02	373.95	22.06	0.322
甲烷	CH ₄	16.04	-82.59	4.60	0.163
乙烷	C ₂ H ₆	30.07	32.17	4.87	0.206
丙烷	C ₃ H ₈	44.10	96.74	4.25	0.221
乙烯	C ₂ H ₄	28.05	9.20	5.04	0.214
丙烯	C ₃ H ₆	42.08	91.06	4.56	0.230
甲醇	CH ₃ OH	32.04	239.45	8.10	0.276
乙醇	C ₂ H ₅ OH	46.07	240.75	6.15	0.276
丙酮	C ₃ H ₆ O	58.08	234.95	4.70	0.273

1.3 超临界 CO₂ 萃取工艺流程及特点

1.3.1 超临界 CO₂ 萃取的主要工艺流程

萃取和分离 2 个阶段是超临界 CO₂ 萃取的基本流程,萃取阶段是指溶质由物质转移到 CO₂ 流体中的过程。调节温度和压力至 CO₂ 的 T_c 和 P_c 以上时,其对物质中的某些特定溶质具有足够大的溶解度而进行溶解;分离阶段是指溶质与 CO₂ 分离及不同溶质间的分离。将溶解有溶质的 CO₂ 流体进行节流减压,然后在热交换器中通过调节温度转变为气体,降低溶质的溶解度,使其析出;当析出的溶质和气体同时进入萃取釜后,溶质与气体分离而沉降于萃取釜底部,进入冷凝器的气体冷凝液化,然后经高压泵增压至压力超过 P_c 。在流经换热器时被加热至温度超过 T_c ,再次达到超临界状态,进入萃取釜中再次提取。图 2 为超临界 CO₂ 萃取工艺流程示意图。

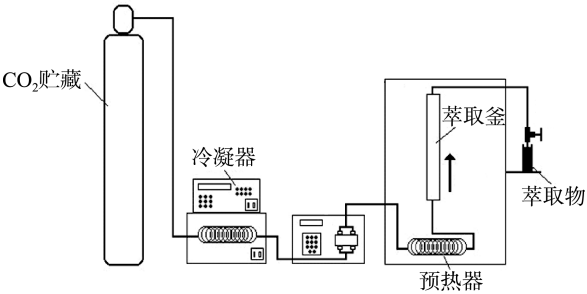


图 2 超临界 CO₂ 萃取工艺流程示意图^[22]

Fig.2 Schematic diagram of supercritical carbon dioxide extraction apparatus^[22]

1.3.2 超临界 CO₂ 萃取的特点

超临界 CO₂ 萃取技术相较于一般液体萃取技术,具有更为理想的萃取速率和适用范围。温度和压力的改变可以控制与溶质的亲和性而实现萃取过程中的分离,具有许多优良特性: (1)通过温度和压力的变化可提取较高纯度的有效成分或脱出有害成分; (2)所需操作条件温和,适用于热敏性物质和易氧化物质的分离、精制; (3)超临界 CO₂ 萃取技术良好的渗透性和溶解性,对于固体或黏稠原料中的有效成分可以快速提取; (4)当超临界 CO₂ 的密度减小时,溶剂易于从产品中分离出来,不产生污染,可回收使用溶剂,降低能耗; (5)超临界 CO₂ 萃取同时具有萃取和蒸馏的双重功效,同样适用于分离、精制有机物。

1.4 超临界 CO₂ 萃取的影响因素

超临界萃取过程中的影响因素有很多,原料的相对分子质量、极性、等原料性质则是影响超临界 CO₂ 萃取的内部因素;从萃取速率和萃取产品的成分与纯度的角度来说,萃取和分离的温度与压力、CO₂ 的流量、萃取时间、物料颗粒的大小和是否加入夹带剂等,则是外部可控因素^[17]。

2 超临界 CO₂ 萃取在植物油脂中的应用

植物油的提取常见有压榨法、溶剂浸出法和水酶法等方法。压榨法主要采用机械压力将植物油料中的油脂提取出来,具有工艺简单易操作、生产成本低、适合工业化生产等优点,但高强度机械压力会引起蛋白质变性,且提油率低;使用有机溶剂把油料作物中的油脂提取出来的方法称为浸出法,又叫溶剂萃取法,该方法的提油率可高达 95% 以上,同时所产生的副产物在一定程度上可以被利用,但使用的溶剂易燃易爆、安全性不高、污染环境,且蛋白质变性严重^[23];水酶法是以水作为溶剂,用酶作为辅助,油脂的提取率得到提升,具有绿色、环保、安全等优点,但酶制剂的成本较高,且使用水酶法提取植物油的过程中容易形成稳定的乳状液,从而降低总油提取率^[24]。超临界 CO₂ 萃取率高,选择性好,无溶剂残留,无污染,只需控制压力和温度等主要参数即可达到提取混合物中不同组分的

目的, 工艺简单, 萃取剂无毒易回收。

2.1 小麦胚芽油

小麦是世界上最重要的 3 大粮食作物之一, 通常被用来磨粉后制作面粉以及其他面制品。在小麦制粉过程中产生的小麦胚芽(约占小麦质量的 2.5%~3.8%)作为一种副产物, 含有丰富的营养物质如蛋白质、脂肪、矿物质、维生素、微量元素等, 广泛应用于食品、药品以及生物制剂等。从小麦胚芽中提取的谷物胚芽油称作小麦胚芽油, 富含大量维生素 E (vitamin E, VE), 以及高不饱和脂肪酸、植物甾醇、磷脂、二十八烷醇等多种生理活性成分, 被公认为是一种极具营养保健作用的功能性油脂, 颇具开发前景^[25]。

表 3 为国内外专家针对超临界 CO₂ 萃取小麦胚芽油工艺流程所做的研究。由表 3 可以看出, 不同学者得出不同结论。这可能因为在提取小麦胚芽油的过程中, 除了超临界 CO₂ 萃取的工艺条件对提取有影响外, 小麦胚芽的产地及品质、收获后的加工方式等也会对小麦胚芽油的提取率产生影响。目前学者也将研究方向放在了不同萃取方式对小麦胚芽油品质的影响上^[34-35]。TESLIĆ 等^[26]认为, 超临界 CO₂ 萃取的小麦胚芽油富含 VE, 具有较高的抗氧化能力; 与索式抽提、微波萃取和超声波萃取技术相比, 超临界 CO₂ (250 bar、60 °C、0.3 kg/h CO₂) 萃取的小麦胚芽油中 α-VE 和总 VE 的含量最高, 分别为 2.90 mg/g、5.21 mg/g。ÖZCAN 等^[36]发现无论采用超临界 CO₂ 还是冷榨法萃取小麦胚芽油, 对油脂的脂肪酸组成没有显著性影响; 超临界 CO₂ 萃取得到的 β-VE 的含量 (49.39%) 高于冷榨法 (26.82%)。

2.2 米糠油

在糙米碾磨过程中产生的米糠(占总谷物的 5%~10%)是一种无法充分利用的副产物, 含有丰富的脂质、蛋白质、碳水化合物等以及非淀粉多糖、生育酚、类黄酮、植酸等; 此外还含有 12%~23% 的脂质, 经提取后制备米糠油 (rice bran oil, RBO)^[37]。RBO 是一种淡黄色、半透明状的油, 通

常含有 81%~84% 的甘油三酯、1%~2% 单酰甘油、2%~3% 二酰甘油、2%~6% 游离脂肪、1%~2% 磷脂、0.8% 糖脂、3%~4% 蜡和 4% 不皂化物^[38]。世界卫生组织、中国粮油协会一致认为 RBO 是一种“健康型”的食用油^[39], 受到人们的广泛欢迎。

MINGYAI 等^[40]以 3 种不同的稻谷为原料对比冷榨法、溶剂萃取法和超临界 CO₂ 萃取 RBO, 结果发现采用超临界 CO₂ 萃取技术的提取率为 14.76%~18.16%, 且黑米采用超临界 CO₂ 萃取具有最佳的理化品质和抗氧化性能。JUCHEN 等^[41]采用乙醇作为夹带剂, 探究不同温度 (40、60、80 °C)、压力 (100、150、200 bar)、固液比 (0:1.0、0.5:1.0、1.0:1.0、2.0:1.0) 的超临界 CO₂ 提取 RBO 的效果, 认为超临界 CO₂ 萃取技术可用于降低操作成本、提高 RBO 的提取率。SOARES 等^[42]提出使用超声强化超临界 CO₂ 提取 RBO, 得出超声的频率和时间为 160 W、40 min 时, 萃取率高达 12.65 wt%; 在不使用超声波协助的情况下, 全球 RBO 出产率下降至 9.94 wt%, 表明超声技术-超临界 CO₂ 的应用可以使 RBO 的全球产率增加 27%。采用超临界 CO₂ 萃取所得的小 RBO, 色泽橙黄、风味纯正、组织均匀不分层, 无需进行脱胶脱色脱臭处理, 可作为功能性油脂应用; 当萃取压力为 25 MPa 时, 8% 含水量的小米糠在 35 °C 萃取 4 h, RBO 的萃取率可高达 91.5%^[43]。尽管一些文献报道采用超临界 CO₂ 萃取技术会制得品质好、色泽浅的 RBO, 但该方法成本较高, 目前还没有实现大规模工业化生产。

2.3 大豆胚芽油

在大豆制油和蛋白工业过程中产生的大豆胚芽(占大豆质量的 2.0%~2.5%)作为一种副产物, 含有丰富的不饱和脂肪酸、蛋白质、植物甾醇、VE 等营养物质, 通常用于动物饲料, 造成资源浪费^[44]。大豆胚芽油中的 VE、β-谷甾醇、磷脂等生理活性物质的含量远高于一般性植物油; 且亚麻酸含量是所有胚芽油中最高的^[45]。因此, 大豆胚芽油有很好的保健功能, 具有很高的开发利用价值。

表 3 小麦胚芽油超临界 CO₂ 萃取优化工艺
Table 3 Optimization of supercritical carbon dioxide process for wheat germ oil

最佳工艺参数				提取率/%	参考文献
压力	温度/°C	萃取时间	CO ₂ 流量		
350 bar	50	/	0.4 kg/h	10.94	[26]
50 MPa	60	/	30 g/min	8.87	[27]
25 Mpa	40	141 min	30 L/h	82.79	[28]
30 MPa	50	2 h	/	11.05	[29]
300 bar	40	8 h	/	9.00	[30]
336 bar	58	10 min	2 g/min	5.30	[31]
35 MPa	50	1 h	22.5~25 L/h	10.15	[32]
30 MPa	50	3 h	8 L/h	10.50	[33]

注: /表示文献中并未涉及此工艺条件研究。

黄雨洋等^[46]通过响应面来优化超声强化超临界 CO₂ 萃取大豆胚芽油的工艺, 得出: 在 37 °C 萃取温度、26.3 MPa 萃取压力、300 W 超声波功率、29 min 超声波时间下萃取 138 min 时, 可得到萃取率为 87.24% 的大豆胚芽油。宋玉卿等^[47]则指出超临界 CO₂ 法得到的大豆胚芽油中亚油酸和亚麻酸含量之和明显高于索式法, 碘值也高于索式法, 且大豆胚芽油的品质较好。于殿宇等^[48]则以高营养价值的冷榨大豆油为原料, Pd/C 为催化剂, 对超临界 CO₂ 状态下冷榨大豆胚芽油氢化工艺进行研究。目前学者也加强了亚

临界流体萃取法制备大豆胚芽油的研究^[49-50]。

2.4 其他植物性原料

植物籽油中含有丰富的不饱和脂肪酸和生物活性成分, 可作为一些功能性食品的重要原料。在高效获取植物籽油领域中, 超临界 CO₂ 萃取技术展现了得天独厚的优势。

表 4 仅列举的部分植物油脂使用超临界 CO₂ 萃取, 目前, 超临界 CO₂ 萃取同样广泛应用于如莢欧鼠尾草油^[63]、树番茄油^[64]、黑杨树芽油^[65]等油脂的提取。

表 4 植物油超临界 CO₂ 萃取研究
Table 4 Research on supercritical carbon dioxide of plant oil

植物油脂	方法	结论	参考文献
葵花籽油	采用超临界 CO ₂ 和以乙醇为溶剂的加压液体萃取两种绿色技术, 探究富含 VE 葵花籽油的最佳提取条件	在 60 °C、18 MPa 条件下, 超临界 CO ₂ 萃取的葵花籽油中总酚含量高达 91.17 mg/100 g; 在超临界 CO ₂ 萃取过程中, 温度影响 α -VE 含量, 压力影响 γ -VE 和 δ -VE 含量	[51]
	采用超临界 CO ₂ 在半流动萃取器中萃取葵花籽油, 萃取温度为 313~343 K, 萃取压力为 20~40 MPa	高压下, 葵花籽油的提取率随着温度的升高而升高, 低压下则随着温度升高逐渐降低; 这可能是因为低压下尽管温度高, 油脂溶解度在超临界 CO ₂ 中溶解受到交叉效应的作用	[52]
葡萄籽油	采用超临界 CO ₂ 萃取技术和脉冲电场辅助超临界 CO ₂ 萃取葡萄籽油, 与传统的冷榨法进行对比, 提高葡萄籽出油率和营养价值, 提升葡萄酒渣附加值	当 CO ₂ 流量为 45 g/min, 35 MPa, 45 °C 条件下可获得最高提取率; 50 MPa, 35 °C 条件下可获得最大抗氧化活性; 脉冲电场预处理后超临界 CO ₂ 萃取的葡萄籽油的提取量高达(81.8±1.0) g/kg	[53]
	研究中试超临界 CO ₂ 萃取葡萄籽油中各因素对萃取效果的影响, 对中试工艺参数进行优化, 得出萃取效果最佳的萃取条件, 设计出一种新型超临界萃取装置	对葡萄籽油萃取率影响的顺序依次是萃取压力>CO ₂ 流量>萃取时间>萃取温度; 试验预测得到萃取压力 23 MPa, 萃取温度 45 °C, 萃取时间 186 min, CO ₂ 流量 550 L/h, 在此最佳条件下, 葡萄籽油的萃取率为 8.87%	[54]
苹果籽油	使用超临界 CO ₂ 在超高压(30~130 MPa)条件下萃取苹果籽油	苹果籽油在 CO ₂ 中的溶解度随着压力的增加而增加; 在 130 MPa、63 °C 条件下, 苹果籽油在 CO ₂ 中的溶解度最高为 191 g/kg	[55]
	研究了高压(10~30 MPa)下苹果籽油的超临界 CO ₂ 萃取技术, 填补了在 30 MPa 以下压力下使用超临界 CO ₂ 萃取苹果籽油的空白	提取苹果籽油的最佳工艺为: 压力 24 MPa、温度 40 °C、CO ₂ 流量 1 L/h、萃取时间 140 min, 提取率为 (20.5±1.5)%	[56]
杏仁油	选取萃取压力(15、20、25 MPa)、萃取温度(303.15、318.15、333.15 K)、CO ₂ 流量(2、3、5 g/min)为自变量, 以杏仁油的提取率为响应值, 进行 3 因素 3 水平响应面优化实验, 并对实验数据进行分析, 从而确定最佳的提取巴西油桃木杏仁油工艺参数	最佳工艺为: 温度 318.15 K、压力 25 MPa、CO ₂ 流量 5.0 g/min 时, 萃取得率为 27.6 wt%, 且此条件下获得的杏仁油富含丰富的角鲨烯、豆甾醇、油酸、棕榈酸	[57]
	通过单因素试验和正交试验对采用超临界 CO ₂ 萃取法提取野生杏仁油的提取工艺进行优化	影响杏仁油萃取率的因素依次为: 萃取压力>萃取温度>萃取时间; 40 目的原料颗粒度在萃取压力和温度分别为 26 MPa、45 °C 条件下萃取 3 h, 杏仁油萃取率达到 42%~45%, 此流程为最佳工艺条件	[58]

表 4(续)

植物油脂	方法	结论	参考文献
茶籽油	基于中心复合设计-响应面法确定超临界 CO ₂ 萃取阿萨姆茶籽油的最佳工艺, 探究所提取茶籽油的理化特性和抗氧化特性	阿萨姆茶籽在 50 ℃、220 bar 的超临界 CO ₂ 中萃取 4 h, 将获得最高的原油提取率和油脂回收率; 通过超临界 CO ₂ 萃取得到的阿萨姆茶籽油具有较强的抗氧化活性, 富含黄酮类化合物、鞣酸类成分和皂苷类化合物, 主要脂肪酸为油酸、亚油酸和棕榈酸	[59]
	综述了茶籽油的一些提取技术发展中涌现的新工艺, 比较了各种提油技术的优缺点	超临界 CO ₂ 萃取条件温和, 生物活性成分损失少, 能提高茶油的营养价值和保健功能, 同时减少精炼工序, 是生产高品质、高效益茶油的理想方法	[60]
薄荷油	对薄荷油的传统和新兴提取技术进行总结, 探讨当前技术的优势与局限	超临界 CO ₂ 萃取可以解决传统提取方式的费时、高能耗等缺点, 以及薄荷油在高温状态下会发生氧化、水解、异构化作用, 导致化学组分的变化; 对超临界 CO ₂ 萃取薄荷油的研究现状展开综述, 为薄荷油的高效、环保提取提供参考和启示	[61]
	通过单因素试验及正交试验进行比对, 并根据国家标准对油品理化性质进行检测, 探究 CO ₂ 超临界萃取薄荷油的工艺	当萃取压力、萃取温度、萃取时间和流体流量分别为 40 MPa、50 ℃、1.5 h、40 kg/h 时, 薄荷油的出油率为 3.32%, 为最佳工艺条件	[62]

3 超临界流体在动物油脂中的应用

3.1 鱼 油

在鱼类加工过程中的副产物(占原料的 20%~80%), 可以通过将其进行生物炼制转化为脂质、蛋白质、多糖、动物饲料、生物燃料等生物基产品, 从而减少环境污染, 提高附加值^[66]。其中, 从鱼类及其加工副产物提取的脂质成分, 即鱼油, 是自然界中二十碳五烯酸(eicosapentaenoic acid, EPA)和二十二碳六烯酸(docosahexaenoic acid, DHA)等 ω -3 多不饱和脂肪酸(polyunsaturated fatty acids, PUFA)的主要来源之一^[67]。EPA 和 DHA 能够促进婴儿的大脑和视网膜发育, 对心脑血管疾病、神经系统疾病、癌症等多种疾病具有预防和治疗作用^[68]。

采用超临界 CO₂ 提取鱼油, 不仅在降低重金属等有害杂质含量、防止脂质氧化、保留脂溶性维生素等功能性物质方面具有明显的优势, 同时可获得高效、优质的富含 ω -3 PUFA 鱼油且环境友好^[69]; 而温度、压力、CO₂ 流量、提取时间等提取条件和原料自身性质会影响鱼油在超临界 CO₂ 中的溶解能力, 从而改变提取效率^[70]。RUBIO-RODRÍGUEZ 等^[71]研究发现当鳕鱼的水分含量超过 20%时, 鱼油提取率与水分含量之间呈负相关。这可能是因为样品中水分含量高时不利于细胞中的脂肪扩散和超临界 CO₂ 的进入, 从而缩短了溶剂与溶质之间的接触时间^[72]。对于原料的粒径, 大部分学者选择 0.25~1.00 mm, 这是因为原料粒径大时, 会降低样品的表面积, 增大扩散路径和

扩散阻力, 不利于超临界 CO₂ 与鱼油的充分接触^[70]; 但粒径过小时则会影响流体通过颗粒床, 使萃取釜中物料的堆积密度增加造成通道效应, 影响溶剂的传质速率^[72]。因此专家学者在研究鱼油的超临界 CO₂ 萃取过程中, 应综合考虑各方面因素以提高鱼油提取率。

3.2 昆虫油

在所有动物种类中昆虫约占 60%, 是地球上最大的生物类群; 且昆虫具有摄食简单、繁殖速度快、生长周期短、资源数量大等特点, 因此昆虫资源是一种可持续利用的潜在生物资源^[73]。昆虫中油脂含量丰富, 脂肪酸组成合理, 大多包含软脂酸和不饱和脂肪酸, 具有较好的消化性能^[74]。

蚕蛹油含有丰富的油酸、亚油酸、 α -亚麻酸, 具有降血脂、降血糖、抗氧化、改善记忆力等功效, 可用于生物制药, 制作肥皂、表面活性剂、增塑剂等, 具有广阔的开发前景^[75]。超临界 CO₂ 萃取技术用于萃取蚕蛹油脂时提取率一般可以达到 80%以上^[76]; 而蚕蛹粉碎粒度、含水量、萃取时间、CO₂ 流量、萃取压力、萃取温度等因素影响着蚕蛹粉萃取的得率和效果^[75]。张郁松^[77]指出超临界法萃取的蚕蛹油呈浅金黄色, 色泽清亮, 晶莹透明, 无异味; 而石油醚萃取的蚕蛹油呈黄褐色, 有轻微的异味; 且超临界 CO₂ 萃取蚕蛹油的过氧化值和酸值要比石油醚提取的低。尽管学者对于超临界 CO₂ 萃取蚕蛹油做了一些研究, 但由于超临界 CO₂ 萃取过程复杂, 生产成本低, 目前尚未在工业上应用于蚕蛹油的萃取^[78]。

PURSCHKE 等^[79]为了促进可使用昆虫的工业化加工

进程,对黄粉虫幼虫油的超临界 CO₂ 萃取工艺进行了研究,认为萃取压力与黄粉虫幼虫在超临界 CO₂ 中的溶解度呈正相关,提高萃取压力可以加快萃取速率;萃取条件对黄粉虫幼虫的油脂组成成分具有重要影响,在 250 bar、65 °C 条件下缓慢萃取黄粉虫幼虫油,低分子量和游离脂肪酸含量将达到最高,因此可以通过改变提取条件从而实现不同脂肪酸的分馏以及后续脂肪酸的精炼。MUANGRAT 等^[80]则用超临界 CO₂ 萃取法提取黑水虻幼虫油,提取率约为 20.18%~25.94%,萃取的油脂主要成分为月桂酸、亚麻酸、油酸和棕榈酸。

3.3 微生物油

微生物油脂又称单细胞油脂,是由产油微生物如酵母、细菌、霉菌和藻类等在一定条件下利用碳水化合物、碳氢化合物和普通油脂为碳源,在菌体内大量积累油脂。目前工业化生产的多不饱和脂肪酸主要从动植物组织中提取,易受到原料、气候、产地等因素的影响,生产性差,油脂含量不稳定,不能满足社会需要;而微生物油脂生产周期短,不受气候和土地限制,是一种有潜力的新型油脂生产方式^[81]。

微藻被称为第 3 代优质可再生能源原料,相较于其他油料作物具有生长速率快、生产成本低、不受季节影响等特点,可以高效地利用太阳能和 CO₂,在有机体中实现能量转化和储存。PATEL 等^[82]讨论了超临界 CO₂ 提取微藻脂质的方法,并与其他提取方法进行对比。林锡煌等^[83]则致力于筛选具有高产油潜能的微藻,开发经济高效的微藻油脂提取工艺和检测方法,对 7 种富油微藻进行超临界 CO₂ 提取,发现小球藻、三角褐指藻和青岛大扁藻的单不饱和脂肪酸含量分别为 36.25%、31.81%和 26.85%,是生物柴油理想的替代品;牟氏角毛藻的不饱和脂肪酸含量达到 91.15%,可作为绿色医疗保健品的重要来源。

产油真菌多产 C₁₆ 和 C₁₈ 系列不饱和脂肪酸,可以适应不同的环境,具有发酵产油周期短、不受产地限制等优势^[84]。ONG 等^[85]通过响应面法研究发现萃取压力是影响超临界 CO₂ 萃取被孢霉油脂提取率的最主要因素,萃取温度和压力与料液比之间存在互作效应;在萃取压力为 201 bar、萃取温度 58.9 °C、料液比为 1:15 (g:mL) 时,被孢霉油脂提取率为 92.86%。MILANESIO 等^[86]用乙醇作为共溶剂采用超临界 CO₂ 萃取法提取解脂耶氏酵母油脂,发现在 20 MPa、40 °C、120~180 min 的萃取条件下,脂耶氏酵母油脂的提取率达到 25.4%(以干物质计)。

4 结束语

本文聚焦超临界 CO₂ 流体萃取技术,总结了其在如薄荷油、茶籽油等植物油和如鱼油、昆虫油等动物油油脂工业加工领域的应用。相较于传统的提取技术,超临界 CO₂

萃取技术展现出诸多的优势,萃取率高,选择性好,无溶剂残留,无污染,只需控制压力和温度等主要参数即可达到提取混合物中不同组分的目的,工艺简单,萃取剂无毒易回收,满足消费者对新鲜、营养和健康油脂的需求。然而,由于处理过程中的环境条件,对加工设备的空间尺寸、承装容器及密封材料的耐受性有较为严格的要求,设备的维修成本较为昂贵。随着科技水平的发展,新型复合成型、耐压材料的出现,将有助于解决这一技术应用上的限制。超临界 CO₂ 萃取作为一种绿色、高效的食品加工技术,受到国内外学者的广泛关注。在今后的研究中,专家学者可比较协同其他萃取方法(如超声-超临界 CO₂、脉冲电场-超临界 CO₂、高压-超临界 CO₂ 萃取等)与常规或单一萃取的差异,以便采用更有效经济的加工方式。

参考文献

- [1] ZHANG C, LYU X, ARSHAD RN, *et al.* Pulsed electric field as a promising technology for solid foods processing: A review [J]. Food Chemistry, 2023, 403: 134367.
- [2] 刘品品, 周家华, 张超, 等. 脉冲电场辅助低温解冻对猪肉品质的影响 [J/OL]. 食品工业科技, 1-9. [2024-10-13]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024010184>
- [3] LIU PP, ZHOU JH, ZHANG C, *et al.* Effect of pulsed electric field assisted low temperature thawing on pork quality [J/OL]. Science and Technology of Food Industry, 1-9. [2024-10-13]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024010184>
- [4] SAIN M, MINZ PS, JOHN H, *et al.* Effect of ohmic heating on food products: an in-depth review approach associated with quality attributes [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2024, 2024(1): 2025937.
- [5] 丁辛亭, 熊秀芳, 李树旺, 等. 欧姆加热对米饭蒸煮过程能耗及其品质的影响 [J]. 农业工程学报, 2020, 36(24): 310-318.
- [6] DING XT, XIONG XF, LI SW, *et al.* Effects of ohmic heating on the cooking process energy consumption and quality of cooked rice [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(24): 310-318.
- [7] DELORME MM, GUIMARES JT, COUTINHO NM, *et al.* Ultraviolet radiation: An interesting technology to preserve quality and safety of milk and dairy foods [J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 102(1). DOI: 10.1016/j.tifs.2020.06.001
- [8] 胡代花, 李翠丽, 陈旺, 等. 3 种紫外辐照处理食用菌粉中维生素 D₂ 及麦角甾醇热稳定性分析 [J]. 食品研究与开发, 2020, 41(16): 31-38.
- [9] HU DH, LI CL, CHEN W, *et al.* Thermal stability of vitamin D₂ and ergosterol in three edible mushrooms powder treated by UV irradiation [J]. Food Research and Development, 2020, 41(16): 31-38.
- [10] MANDAL R, MOHAMMADI X, WIKTOR A, *et al.* Applications of pulsed light decontamination technology in food processing: An overview [J]. Applied Sciences, 2020, 10(10): 3606.
- [11] 高恬依, 杨华, 颜金鑫, 等. 脉冲强光处理对番茄汁抗氧化活性及功能成分的影响 [J/OL]. 食品与发酵工业, 1-12. [2024-10-13]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.039115>
- [12] GAO TY, YANG H, YAN JX, *et al.* Effect of pulsed light treatment on antioxidant activity and functional components of tomato juice [J/OL]. Food and Fermentation Industries, 1-12. [2024-10-13]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.039115>

- [9] TAHA A, MEHANY T, PANDISELVAM R, *et al.* Sonoprocessing: Mechanisms and recent applications of power ultrasound in food [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2024, 64(17): 6016–6054.
- [10] 刘广琛, 孙红男, 张苗, 等. 超声波与过氧乙酸的杀菌机制及在食品保鲜中的应用进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2024, 15(9): 132–141.
LIU GC, SUN HN, ZHANG M, *et al.* Sterilization mechanism of ultrasound and peracetic acid and their application progress in food preservation [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2024, 15(9): 132–141.
- [11] LAROQUE DA, SEÓ ST, VALENCIA GA, *et al.* Cold plasma in food processing: Design, mechanisms, and application [J]. *Journal of Food Engineering*, 2022, 312: 110748.
- [12] 刘非凡, 温纪平, 展小彬, 等. 冷等离子体处理在食品中的应用研究进展[J]. *食品研究与开发*, 2024, 45(12): 181–188.
LIU FF, WEN JP, ZHAN XB, *et al.* Research progress on the application of cold plasma treatment in food [J]. *Food Research and Development*, 2024, 45(12): 181–188.
- [13] BONFIM RC, OLIVEIRA FA, GODOY R, *et al.* A review on high hydrostatic pressure for bivalve mollusk processing: Relevant aspects concerning safety and quality [J]. *Food Science and Technology*, 2019. DOI: 10.1590/FST.26918
- [14] 胡航伟, 段秋虹, 刘凌霄, 等. 高静水压技术及其在乳制品中应用研究进展[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(10): 423–429.
HU HW, DUAN QH, LIU LX, *et al.* Research progress of high hydrostatic pressure technology and its applications in dairy products [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(10): 423–429.
- [15] GAILLARD R, MARCINIAK A, BRISSON G, *et al.* Impact of ultra-high pressure homogenization on the structural properties of egg yolk granule [J]. *Foods*, 2022, 11(4): 512.
- [16] 谢宜桐. 超高压均质对大豆分离蛋白美拉德反应及乳化性质的影响研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2023.
XIE YT. Effect of high-pressure homogenization on maillard reaction and emulsifying properties of soybean protein isolates [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2023.
- [17] 郑晨明, 徐庆松, 李春胜, 等. 超临界 CO₂ 流体萃取技术应用综述[J]. *低温与特气*, 2024, 42(1): 12–16, 23.
ZHENG CM, XU QS, LI CS, *et al.* Review of the application of supercritical CO₂ fluid extraction technology [J]. *Low Temperature and Specialty Gases*, 2024, 42(1): 12–16, 23.
- [18] 黄艳芳, 阮海健, 李少华. 油脂营养成分及其对肠道健康影响的研究进展[J]. *中国油脂*, 2022, 47(8): 97–102.
HUANG YF, RUAN HJ, LI SH. Progress on nutrient of oil and fat and its influence on intestinal health [J]. *China Oils and Fats*, 2022, 47(8): 97–102.
- [19] AHANGARI H, KING JW, EHSANI A, *et al.* Supercritical fluid extraction of seed oils-a short review of current trends [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 111: 249–260.
- [20] 赵丹, 尹洁. 超临界流体萃取技术及其应用简介[J]. *安徽农业科学*, 2014, 42(15): 4772–4780.
ZHAO D, YIN J. Introduction to supercritical fluid extraction technology and its application [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2014, 42(15): 4772–4780.
- [21] 于娜娜, 张丽坤, 朱江兰, 等. 超临界流体萃取原理及应用[J]. *化工中间体*, 2011, 8(8): 38–43.
YU NN, ZHANG LK, ZHU JL, *et al.* Principles and applications of supercritical fluid extraction [J]. *Chemical Intermediate*, 2011, 8(8): 38–43.
- [22] JANGHEL A, DEO S, RAUT P, *et al.* Supercritical fluid extraction (SFE) techniques as an innovative green technologies for the effective extraction of the active phytopharmaceuticals [J]. *Research Journal of Pharmacy and Technology*, 2015, 8(6): 775–786.
- [23] 赵宇辉, 陈复生, 刘晨, 等. 水酶法提取花生油过程中乳状液性质研究进展[J]. *食品与机械*, 2022, 38(8): 222–226.
ZHAO YH, CHEN FS, LIU C, *et al.* Advance of progress on emulsion properties in aqueous enzymatic extraction of peanut oil [J]. *Food & Machinery*, 2022, 38(8): 222–226.
- [24] 关梦真, 陈复生, 赵宇辉. 水酶法制取植物油研究进展[J]. *食品与机械*, 2023, 39(12): 185–191.
GUAN MZ, CHEN FS, ZHAO YH. Research trends on the extraction of vegetable oil by aqueous enzymatic method [J]. *Food & Machinery*, 2023, 39(12): 185–191.
- [25] 陈明霞, 陈瑶, 郑海杰, 等. 小麦胚芽组成成分及小麦胚芽油理化性质分析 [J/OL]. *中国油脂*, 1–15. [2024-10-13]. <https://doi.org/10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.240340>
CHEN MX, CHEN Y, ZHENG HJ, *et al.* Analysis of wheat germ composition and physicochemical properties of wheat germ oil [J/OL]. *China Oils and Fats*, 1–15. [2024-10-13]. <https://doi.org/10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.240340>
- [26] TESLIĆ N, BOJANIĆ N, ČOLOVIĆ D, *et al.* Conventional versus novel extraction techniques for wheat germ oil recovery: Multi-response optimization of supercritical fluid extraction [J]. *Separation Science and Technology*, 2021, 56(9): 1546–1561.
- [27] SATYANNARAYANA S, ANJANEYULU B, NEEHARIKA TSVR, *et al.* Process optimization for the supercritical carbon dioxide (SC-CO₂) extraction of wheat germ oil with respect to yield, and phosphorous and tocol contents using a Box Behnken design [J]. *Grasas Y Aceites*, 2018, 69(3): 259.
- [28] 吴定, 谢惠惠, 黄卉卉, 等. 小麦胚芽油超临界 CO₂ 萃取影响因素筛选及工艺优化[J]. *中国粮油学报*, 2014, 29(12): 88–94.
WU D, XIE HH, HUANG HH, *et al.* Supercritical CO₂ extraction factors screening and process optimization of wheat germ oil [J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2014, 29(12): 88–94.
- [29] 何娇, 张正茂, 燕雯, 等. 超临界 CO₂ 萃取不同筋度小麦胚芽油及其脂肪酸成分分析[J]. *食品科学*, 2013, 34(8): 85–88.
HE J, ZHANG ZM, YAN W, *et al.* Optimization of supercritical CO₂ extraction and fatty acid composition of wheat embryo oil [J]. *Food Science*, 2013, 34(8): 85–88.
- [30] ALESSANDRA P, ANTONELLA R, DANILO F, *et al.* Extraction of oil from wheat germ by supercritical CO₂ [J]. *Molecules*, 2009, 14(7): 2573.
- [31] GELMEZ N, KINCAL NS, YENER ME. Optimization of supercritical carbon dioxide extraction of antioxidants from roasted wheat germ based on yield, total phenolic and tocopherol contents, and antioxidant activities of the extracts [J]. *The Journal of Supercritical Fluids*, 2009, 48(3): 217–224.
- [32] SHAO P, SUN P, YING Y. Response surface optimization of wheat germ oil yield by supercritical carbon dioxide extraction [J]. *Food & Bioproducts Processing*, 2008, 86(3): 227–231.
- [33] 杨靖. 超临界 CO₂ 流体萃取小麦胚芽油工艺研究[J]. *中国食品添加剂*, 2008(4): 87–89, 86.
YANG J. Extraction technology on wheat germ oil by supercritical CO₂ [J]. *China Food Additives*, 2008(4): 87–89, 86.
- [34] 王青, 刘超, 王新坤, 等. 不同提取工艺对小麦胚芽油品质的影响[J]. *食品工业*, 2019, 40(12): 85–88.

- WANG Q, LIU C, WANG XK, *et al.* Effects of different extraction processes on the quality of wheat germ oil [J]. *The Food Industry*, 2019, 40(12): 85–88.
- [35] 张磊, 芮家鑫, 周哈雨, 等. 不同萃取方式对小麦胚芽油品质的影响[J]. *江苏大学学报(自然科学版)*, 2018, 39(6): 678–682.
- ZHANG L, RUI JX, ZHOU HY, *et al.* Effects of different extraction technologies on wheat germ oil quality [J]. *Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition)*, 2018, 39(6): 678–682.
- [36] ÖZCAN MM, ÖREN D. Comparative of physico-chemical properties of wheat germ oil extracted with cold press and supercritical CO₂ extraction [J]. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering (IJCCE)*, 2019, 38(6): 167–174.
- [37] 樊振江, 孟楠, 栗亚琼, 等. 米糠油的提取工艺与营养价值的研究进展[J]. *食品科技*, 2023, 48(11): 171–177.
- FAN ZJ, MENG N, LI YQ, *et al.* Research progress on the extraction process and nutritional value of rice bran oil [J]. *Food Science and Technology*, 2023, 48(11): 171–177.
- [38] PUNIA S, KUMAR M, SANDHU KS, *et al.* Rice-bran oil: An emerging source of functional oil [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2021, 45(4): e15318.
- [39] 王雨洁, 刘敦华. 浅析米糠油的制备、健康功效及发展趋势[J]. *中国食品添加剂*, 2024, 35(2): 314–322.
- WANG YJ, LIU DH. Preparation, health effects, and development trends of rice bran oil [J]. *China Food Additives*, 2024, 35(2): 314–322.
- [40] MINGYAI S, KETTAWAN A, SRIKAEK K, *et al.* Physicochemical and antioxidant properties of rice bran oils produced from colored rice using different extraction methods [J]. *Journal of Oleo Science*, 2017, 66(6): 565–572.
- [41] JUCHEN PT, MICHELA N, FABIANECORAZZA, *et al.* Extraction of parboiled rice bran oil with supercritical CO₂ and ethanol as co-solvent: Kinetics and characterization [J]. *Industrial Crops and Products*, 2019, 139: 111506.
- [42] SOARES JF, PRÁ VD, BARRALES FM, *et al.* Extraction of rice bran oil using supercritical CO₂ combined with ultrasound [J]. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 2018, 35(2): 785–794.
- [43] 薛晋. CO₂ 超临界萃取小米糠油的工艺研究[J]. *食品工程*, 2017(1): 25–27, 47.
- XUE J. Study on small rice bran oil extraction technology by CO₂ supercritical extraction [J]. *Food Engineering*, 2017(1): 25–27, 47.
- [44] CHEN J, TANG G, ZHOU J, *et al.* The characterization of soybean germ oil and the antioxidative activity of its phytosterols [J]. *RSC Advances*, 2019, 9(68): 40109–40117.
- [45] 罗淑年, 王伟宁, 张星震, 等. 大蒜精油对大豆胚芽油抗氧化性的研究[J]. *粮食与食品工业*, 2020, 27(5): 52–55.
- LUO SN, WANG WN, ZHANG XZ, *et al.* Study on antioxidant activity of garlic essential oil on soybean germ oil [J]. *Cereal & Food Industry*, 2020, 27(5): 52–55.
- [46] 黄雨洋, 李杨, 解铁民, 等. 响应面优化超声强化超临界 CO₂ 萃取大豆胚芽油工艺[J]. *大豆科学*, 2009, 28(2): 317–320, 324.
- HUANG YY, LI Y, XIE TM, *et al.* Optimization of ultrasound assisted supercritical carbon dioxide extraction of soybean germ oil [J]. *Soybean Science*, 2009, 28(2): 317–320, 324.
- [47] 宋玉卿, 于殿宇, 张晓红, 等. 大豆胚芽油的超临界 CO₂ 萃取研究[J]. *食品科学*, 2007(10): 293–297.
- SONG YQ, YU DY, ZHANG XH, *et al.* Study on extraction of soy germ oil with supercritical carbon dioxide [J]. *Food Science*, 2007(10): 293–297.
- [48] 于殿宇, 刘丹怡, 葛洪如, 等. 超临界 CO₂ 状态下冷榨大豆胚芽油氢化工艺研究[J]. *东北农业大学学报*, 2015, 46(4): 44–50.
- YU DY, LIU DY, GE HR, *et al.* Hydrogenation of cold-pressed soybean germ oil under supercritical CO₂ condition [J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2015, 46(4): 44–50.
- [49] SUN J, SHI J, MU Y, *et al.* Subcritical butane extraction of oil and minor bioactive components from soybean germ: Determination of migration patterns and a kinetic model [J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2018, 41(5): e12697.
- [50] 张燕鹏, 许春芳, 孙晓梅, 等. 亚临界丁烷萃取法制备大豆胚芽油的研究[J]. *中国油脂*, 2016, 41(6): 1–4.
- ZHANG YP, XU CF, SUN XM, *et al.* Subcritical butane extraction of soybean germ oil [J]. *China Oils and Fats*, 2016, 41(6): 1–4.
- [51] VICENTINI-POLETTE CM. Extraction of sunflower seed oil (*Helianthus annuus*) by supercritical fluid and pressurized ethanol for enrichment of highly digestible dairy product [D]. Saint Paul: Universidade de São Paulo, 2022.
- [52] ROY BC, SASAKI M, GOTO M. Effect of temperature and pressure on the extraction yield of oil from sunflower seed with supercritical carbon dioxide [J]. *Journal of Applied Sciences*, 2006, 6(1). DOI: 10.3923/jas.2006.71.75.
- [53] ČURKO N, LUKIĆ K, TUŠEK AJ, *et al.* Effect of cold pressing and supercritical CO₂ extraction assisted with pulsed electric fields pretreatment on grape seed oil yield, composition and antioxidant characteristics [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2023, 184: 114974.
- [54] 张鑫. 超临界 CO₂ 萃取葡萄籽油的工艺研究及装置设计[D]. 银川: 宁夏大学, 2023.
- ZHANG X. The process research and device design of the supercritical CO₂ extraction of grape seed oil [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2023.
- [55] MONTAÑÉS F, CATCHPOLE OJ, TALLON S, *et al.* Extraction of apple seed oil by supercritical carbon dioxide at pressures up to 1300 bar [J]. *The Journal of Supercritical Fluids*, 2018, 141: 128–136.
- [56] FERRENTINO G, GIAMPICCOLO S, MOROZOVA K, *et al.* Supercritical fluid extraction of oils from apple seeds: Process optimization, chemical characterization and comparison with a conventional solvent extraction [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2020, 64: 102428.
- [57] MATEUS LS, DUTRA JM, FAVARETO R, *et al.* Optimization studies and compositional oil analysis of pequi (*Caryocar brasiliense* Cambess) almonds by supercritical CO₂ extraction [J]. *Molecules*, 2023, 28(3): 1030.
- [58] 王巨成. 超临界 CO₂ 萃取野生杏仁油的试验研究[J]. *食品工程*, 2019(2): 17–19.
- WANG JC. Study on extraction of wild almond oil by supercritical CO₂ [J]. *Food Engineering*, 2019(2): 17–19.
- [59] MUANGRAT R, JIRARATTANARANGSRI W. Physicochemical properties and antioxidant activity of oil extracted from Assam tea seeds (*Camellia sinensis* var. *assamica*) by supercritical CO₂ extraction [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2020, 44(3): e14364.
- [60] 刘金, 江敏, 岳希洁, 等. 茶籽油提取技术及研究进展[J]. *食品工业*, 2022, 43(4): 283–286.
- LIU J, JIANG M, YUE XJ, *et al.* Advances in research on extraction technologies of camellia seed oil [J]. *Food Industry*, 2022, 43(4): 283–286.
- [61] HEDAYATI S, TARAHI M, BAEGHBALI V, *et al.* Mint (*Mentha* spp.) essential oil extraction: From conventional to emerging technologies [J].

- Phytochemistry Reviews, 2024: 1-22. DOI: 10.1007/s11101-024-10020-6
- [62] 高宇明, 刘健, 李国栋, 等. 二氧化碳超临界萃取薄荷油的工艺研究[J]. 皮革与化工, 2020, 37(3): 33-37.
- GAO YM, LIU J, LI GD, *et al.* Study on the technology of peppermint essential oil by supercritical CO₂ extraction [J]. Leather and Chemicals, 2020, 37(3): 33-37.
- [63] DĄBROWSKI G, KONOPKA I, CZAPLICKI S. Supercritical CO₂ extraction in chia oils production: Impact of process duration and co-solvent addition [J]. Food Science and Biotechnology, 2018, 27: 677-686.
- [64] ACHICANOY DD, BENAVIDES AH, MARTÍNEZ-CORREA HA. Study of supercritical CO₂ extraction of tamarillo (*Cyphomandra betacea*) seed oil containing high added value compounds [J]. Electrophoresis, 2018, 39(15): 1917-1925.
- [65] KUŠ PM, OKIŃCZYK P, JAKOVLJEVIĆ M, *et al.* Development of supercritical CO₂ extraction of bioactive phytochemicals from black poplar (*Populus nigra* L.) buds followed by GC-MS and UHPLC-DAD-QTOF-MS [J]. Journal of pharmaceutical and biomedical analysis, 2018, 158: 15-27.
- [66] ALFIO VG, MANZO C, MICILLO R. From fish waste to value: An overview of the sustainable recovery of omega-3 for food supplements [J]. Molecules, 2021, 26(4): 1002.
- [67] 郑振霄, 戴志远, 沈清, 等. 酶法富集 DHA、EPA 的研究进展及产业化展望[J]. 中国食品学报, 2019, 19(4): 301-309.
- ZHENG ZX, DAI ZY, SHEN Q, *et al.* Research progress of enzymatic enrichment of DHA and EPA and the prospect of the industrialization [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2019, 19(4): 301-309.
- [68] MANE S, KUMARI P, SINGH A, *et al.* Amelioration for oxidative stability and bioavailability of N-3 PUFA enriched microalgae oil: An overview [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2022, 64(9): 2579-2600.
- [69] 干森钰, 田方, 曹爱玲, 等. 超临界流体技术在鱼油加工中应用的研究进展[J]. 中国油脂, 2024, 49(9): 16-22.
- GAN MY, TIAN F, CAO AIL, *et al.* Research progress on the application of supercritical fluid technology in fish oil processing [J]. China Oils and Fats, 2024, 49(9): 16-22.
- [70] JAMALLUDDIN NA, ISMAIL N, MUTALIB SRA, *et al.* Sc-CO₂ extraction of fish and fish by-products in the production of fish oil and enzyme [J]. Bioresources and Bioprocessing, 2022, 9(1): 1-16.
- [71] RUBIO-RODRÍGUEZ N, DIEGO SMD, BELTRÁN S, *et al.* Supercritical fluid extraction of the omega-3 rich oil contained in hake (*Merluccius capensis*-*Merluccius paradoxus*) by-products: Study of the influence of process parameters on the extraction yield and oil quality [J]. Journal of Supercritical Fluids, 2008, 47(2): 215-226.
- [72] IVANOV K, BLUMBERG D. Extraction of fish oil using green extraction methods: A short review [J]. Energy Procedia, 2017, 128: 477-483.
- [73] SÁNCHEZ-MUROS MJ, BARROSO FG, MANZANO-AGUGLIARO F. Insect meal as renewable source of food for animal feeding: a review [J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 65: 16-27.
- [74] 徐歆歆, 王文韬, 薛荣荣, 等. 三种昆虫油脂理化性质及脂肪酸组成的初步研究[J]. 饲料工业, 2020, 41(14): 31-34.
- XU XX, WANG WT, XUE RR, *et al.* A preliminary study of physicochemical properties and fatty acid in three kinds of insects lipid [J]. Feed Industry, 2020, 41(14): 31-34.
- [75] 何珊珊, 吴婧婧, 李燕飞, 等. 蚕蛹油的提取与开发应用以及产业发展的现状[J]. 蚕学通讯, 2019, 39(2): 35-41.
- HE SS, WU JJ, LI YF, *et al.* Discussion on the extraction and application of silkworm pupa oil and its present situation of industrial development [J]. Newsletter of Sericultural Science, 2019, 39(2): 35-41.
- [76] WEI ZJ, LIAO AM, ZHANG HX, *et al.* Optimization of supercritical carbon dioxide extraction of silkworm pupal oil applying the response surface methodology [J]. Bioresource Technology, 2009, 100(18): 4214-4219.
- [77] 张郁松. 蚕蛹油超临界萃取与有机溶剂萃取的比较研究[J]. 粮油加工, 2009(2): 45-46.
- ZHANG YS. Comparative study on supercritical extraction and organic solvent extraction of silkworm pupa oil [J]. Cereals and Oils Processing, 2009(2): 45-46.
- [78] ZHAI M, WANG W, ZOU Y, *et al.* Function, composition, digestion, and processing and utilization of silkworm pupae oil: A review [J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2024, 126(2): 2300094.
- [79] PURSCHKE B, STEGMANN T, SCHREINER M, *et al.* Pilot-scale supercritical CO₂ extraction of edible insect oil from *Tenebrio molitor* L. larvae-influence of extraction conditions on kinetics, defatting performance and compositional properties [J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2017, 119(2): 1600134.
- [80] MUANGRAT R, PANNASAI S. Exploring the potential of black soldier fly larvae oil: Supercritical CO₂ extraction, physicochemical analysis, antioxidant properties, shelf life, and keratinocyte growth inhibition [J]. Journal of Agriculture and Food Research, 2024, 15: 101008.
- [81] ROBLES-IGLESIAS R, NAVEIRA-PAZOS C, FERNÁNDEZ-BLANCO C, *et al.* Factors affecting the optimisation and scale-up of lipid accumulation in oleaginous yeasts for sustainable biofuels production [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2023, 171: 113043.
- [82] PATEL A, MATSAKAS L, SARTAJ K, *et al.* Extraction of lipids from algae using supercritical carbon dioxide [J]. Green Sustainable Process for Chemical and Environmental Engineering and Science, 2020: 17-39. DOI: 10.1016/b978-0-12-817388-6.00002-7
- [83] 林锡煌, 尹希杰, 袁秋兰, 等. 7 种富油微藻的超临界提取及脂肪酸分布特征[J]. 中国粮油学报, 2024, 39(6): 127-132.
- LIN XH, YIN XJ, YUAN QL, *et al.* Supercritical extraction of lipid from 7 microalgae species and fatty acid distribution characteristics [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2024, 39(6): 127-132.
- [84] 罗国聪, 柴慧子, 雷晓凌, 等. 高产不饱和油脂海鞘真菌桔青霉 Asc-2-4 的诱变选育[J]. 微生物学杂志, 2020, 40(6): 7-12.
- LUO GC, CHAI HZ, LEI XL, *et al.* Mutation breeding of unsaturated lipid high-yielding penicillium citrinum Asc-2-4 from ascidian [J]. Journal of Microbiology, 2020, 40(6): 7-12.
- [85] ONG CC, CHEN YH. Investigation on cell disruption techniques and supercritical carbon dioxide extraction of mortierella alpina lipid [J]. Foods, 2022, 11(4): 582.
- [86] MILANESIO J, HEGEL P, MEDINA-GONZÁLEZ Y, *et al.* Extraction of lipids from *Yarrowia lipolytica* [J]. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 2013, 88(3): 378-387.

(责任编辑: 安香玉 韩晓红)