DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251016002
引用格式: 周妍菲, 安惠琳, 徐燕南, 等. 种籽类油脂制取工艺与品质评价技术的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(3): 68–79.
ZHOU YF, AN HL, XU YN, *et al*. Research progress on the production process and quality evaluation technology of seed oils [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(3): 68–79. (in Chinese with English abstract).

种籽类油脂制取工艺与品质评价技术的研究进展

周妍菲[1#], 安惠琳[1#], 徐燕南[1], 姚玉娇[1], 刘媛媛[1], 陈 冉[3], 蒋 颖[3], 曹锦轩[1], 王 颖[1*], 张月美[1,2*]

[1. 北京工商大学食品与健康学院, 老年营养与健康教育部重点实验室, 北京 100080; 2. 晨光生物科技集团股份有限公司, 邯郸 057250; 3. 湖北省食品质量安全监督检验研究院(湖北食品、保健食品、化妆品质量安全检测中心), 武汉 430075]

摘 要: 种籽类油脂是人类膳食脂质的重要来源, 其加工工艺与品质评价技术直接关系到营养价值与食品安全。本文系统梳理了近年来国内外种籽类油脂制取工艺与品质评价技术的研究进展。首先, 对传统机械压榨、溶剂浸出等传统制油工艺的应用现状与关键参数进行了总结, 指出其在能耗、出油率及品质保持方面的优势与局限。其次, 重点介绍了超临界流体萃取、酶辅助联合工艺、微波/超声强化以及低温冷榨、微生物发酵等现代制油技术在提升出油效率、保持活性成分及绿色化生产方面的最新进展。围绕品质控制与评价, 本文重点归纳了理化指标(酸值、过氧化值、皂化值)、感官特性(色泽与气味)、脂肪酸组成、植物甾醇与多酚含量等关键参数, 以及安全性与氧化稳定性的多维度评价体系。研究表明, 工艺优化与多指标协同评价是保障种籽类油脂营养与安全的核心方向。最后, 本文提出未来应加强绿色加工与数字化智能检测的融合研究, 以实现高品质、可持续的种籽类油脂产业升级。

关键词: 种籽类油脂; 制取工艺; 品质控制; 评价指标; 绿色加工

Research progress on the production process and quality evaluation technology of seed oils

ZHOU Yan-Fei[1#], AN Hui-Lin[1#], XU Yan-Nan[1], YAO Yu-Jiao[1], LIU Yuan-Yuan[1], CHEN Ran[3], JIANG Ying[3], CAO Jin-Xuan[1], WANG Ying[1*], ZHANG Yue-Mei[1,2*]

[1. *Key Laboratory of Geriatric Nutrition and Health*, *College of Food and Health Sciences*, *Beijing Technology and Business University*, *Beijing* 100080, *China*; 2. *Chenguang Biotechnology Group Co*., *Ltd*., *Handan* 057250, *China*; 3. *Hubei Provincial Institute for Food Supervision and Test* (*Hubei Food*, *Health Food and Cosmetics Quality and Safety Testing Center*), *Wuhan* 430075, *China*]

收稿日期: 2025-10-16
基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFF1104003)
#周妍菲和安惠琳为共同第一作者
第一作者: 周妍菲(2005—), 女, 主要研究方向为食品营养与健康。E-mail: fei20050226@qq.com
安惠琳(2005—), 女, 主要研究方向为食品营养与健康。E-mail: 3139665561@qq.com
***通信作者:** 王颖(1987—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为畜产品加工与资源功能化利用。E-mail: wang-ying@btbu.edu.cn
张月美(1991—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为畜产品蛋白质化学特性。E-mail: zhangyuemei@btbu.edu.cn

ABSTRACT: Seed oils are an important source of dietary lipids for humans. Their processing technologies and quality evaluation techniques are directly related to nutritional value and food safety. This paper systematically reviewed the research progress in the extraction processes and quality control of seed oils in recent years. Firstly, the application status and key parameters of traditional oil extraction processes, including mechanical pressing and solvent extraction, were summarized, with a focus on their respective advantages and limitations regarding energy consumption, oil yield, and quality retention. Secondly, the latest progress in modern oil extraction technologies, such as supercritical fluid extraction, enzyme-assisted processes, microwave/ultrasound enhancement, low-temperature cold pressing and microbial fermentation, were emphasized with respect to their roles in enhancing extraction efficiency, preserving bioactive compounds and supporting sustainable production. Regarding quality control and evaluation, this paper summarized key parameters including physicochemical indicators (acid value, peroxide value, saponification value), sensory attributes (color and odor), fatty acid composition, phytosterol and polyphenol contents, as well as a multidimensional evaluation system for safety and oxidative stability. Research indicated that process optimization and multi-parameter collaborative evaluation were central to ensuring the nutritional quality and safety of seed oils. The study further highlighted the need for integrating green processing with digital intelligent detection to drive the sustainable production of high-quality seed oils.

KEY WORDS: seed oils; extraction technology; quality control; evaluation index; green processing

0　引　言

种籽类油脂是从植物种子中提取的油脂, 主要由甘油三酯组成, 同时含有少量游离脂肪酸、磷脂、甾醇、维生素等成分。作为重要的食用油和工业原料, 种籽类油脂广泛应用于食品、医疗保健、化妆美容、化工、生物能源等领域。根据王涛[1]统计数据显示, 我国已知油料植物多达 151 科 697 属 1553 种, 约占全国种子植物总数的 5%, 资源基础十分丰富。目前主要食用种籽油脂包括大豆、油菜籽、花生、棉籽、葵花籽、芝麻、亚麻籽等。近年来, 随着绿色高效制油理念的兴起, 如何实现种籽类油脂的可持续开发与高值化利用已成为国内外研究的热点[2–3]。

植物种子, 尤其是油料作物的种子, 普遍富含脂质, 经常通过机械压榨或有机溶剂萃取等方法获得液态植物油。根据赵晨伟等[3]对国内外食用植物油安全标准的对比研究, 种籽类油脂按照功能可分为食用油、功能性油脂和工业用油等类型。其中, 食用油又可按加工深度细分为植物原油、精炼油、调和油及煎炸油等[4]。常见的种籽来源植物油脂包括核桃油、花生油、菜籽油、大豆油、葵花籽油、亚麻籽油、番茄籽油、玉米油、葡萄籽油等, 这些油脂因其独特的脂肪酸组成和良好感官品质, 在食品及营养保健领域具有重要价值。种籽类油脂富含多不饱和脂肪酸、生育酚、植物甾醇和多酚等活性成分, 是人体必需脂肪酸的重要膳食来源[2]。多不饱和脂肪酸(如亚油酸、α-亚麻酸等)在种籽油中含量最为丰富, 是维持人体正常生命活动不可或缺的营养素, 在调节血脂、降低血压、提高细胞膜流动性、维持免疫功能等方面发挥重要作用[5]。植物甾醇是种籽油中另一类关键营养因子, 主要包括豆甾醇、β-谷甾醇和菜油甾醇等, 能够竞争性抑制肠道对胆固醇的吸收, 从而降低血清胆固醇水平, 预防动脉粥样硬化和心血管疾病[6]。多酚类物质具备出色的抗氧化和清除自由基能力, 能够减缓油脂氧化、延长货架期, 同时在抗癌、抗炎、调节糖脂代谢等方面表现出潜在功能价值[7]。因此, 种籽类油脂不仅是优质的植物性营养来源, 更在功能食品、营养保健和疾病干预等领域展现出广阔的应用前景。

近年来, 随着城市化进程加快、人均收入提升以及饮食结构向高脂饮食转变, 全球食用植物油消费呈持续增长态势。MINGKE 等[5]研究指出, 富含不饱和脂肪酸的种籽类植物油, 如紫苏籽油、沙棘籽油、核桃油等多烯植物油等, 因其对心血管健康的显著益处而备受关注。在技术层面, 我国已初步建立以营养与安全为核心的精准适度加工体系, 零反式脂肪酸制备技术取得突破, 功能性油脂产品实现量产, 逐步打破部分跨国公司在高端油脂领域的技术垄断[8]。此外, 新油源开发、植物蛋白-油脂协同研究、绿色储油技术与智能工厂建设持续推进, 进一步支撑了我国油脂加工产业的技术升级和国际竞争力。未来, 种籽类油脂行业将向精深加工、高附加值产品开发及全产业链融合方向转型, 推动油脂行业向“绿色、健康、智能”方向高质量发展。

作为全球主要的油料生产国, 我国油菜籽、花生、棉籽及芝麻的产量均居世界首位, 大豆与葵花籽的产量亦保持领先, 但受庞大的人口基数以及植物油消费量攀升的影响, 国内油脂产出仍难以满足消费需求, 长期依赖进口的局面短期内难以改变[2]。传统制油方法如压榨法和有机溶剂浸出法在国内外应用广泛, 工艺成熟, 但普遍存在资源利用率低、溶剂残留风险和环境污染问题[8], 难以满足消费者对天然、绿色、功能性油脂日益增长的需求。近年来,

超临界流体萃取、水酶法提取、冷榨技术等绿色、高效制油新技术不断涌现，在提高油脂品质、产率和安全性方面展现出广阔应用前景。然而，这些技术在工程化应用、成本控制及技术普及方面仍面临挑战。因此，深入研究并优化种籽类油脂的绿色制取工艺，不仅有助于提升产品竞争力，也对推动我国油脂工业的高质量发展、保障食用油安全具有重要现实意义。本文综述了种籽类油脂制取技术与品质评价指标的研究现状，如表 1 所示，针对不同制油工艺的应用现状及其对质量控制指标的影响进行了归纳与分析，为后续探讨其技术优化方向和产业化前景提供了依据。

表 1 目前现有制油原料的归纳总结

Table 1 Summary of the current raw materials for oil production

原料	制油工艺	质量控制指标	参考文献
大豆	压榨法、萃取法、溶液浸提法、发酵法、生物分离法、水酶法、辅助萃取法	酸价、水分、过氧化值、杂质、色泽、脂肪酸组成、碘值、磷脂	[9–10]
花生	低温压榨法、高温压榨法、水酶法、微波辅助压榨、有机溶剂浸提、超临界、亚临界流体萃取、新型射频烘烤	酸价、过氧化值、色泽、氧化稳定性、脂肪酸组成、生育酚含量、多酚含量、角鲨烯含量	[11–13]
玉米	压榨法、水酶法、溶剂萃取法、酶法辅助低温压榨、过热蒸汽预处辅助法	色泽、透明折光指数、水分及挥发物含量、酸值、碘值、过氧化值、皂化值	[14–16]
菜籽	热榨法、水酶法、浸出法、毛油精炼技术、冷榨法、超临界 CO_2 萃取	过氧化值、酸值、磷脂含量、色泽、植物多酚、植物甾醇、生育酚及 β-胡萝卜素含量	[17–18]
南瓜籽	压榨法、萃取法、水酶法、超声波辅助法、微波辅助法、超临界 CO_2 流体萃取法、亚临界流体萃取法	酸价、过氧化值、p-茴香胺值、总酚含量、总甾醇含量、总生育酚含量、角鲨烯含量、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)自由基清除能力	[19–20]
核桃	低温压榨法、水代法、有机溶剂萃取法、超临界 CO_2 流体萃取法、亚临界提取法、超声波辅助法、酶辅助提取法	碘值、皂化值、折光指数、相对密度、烟点、色泽、滋味、气味、脂肪酸组成、过氧化值、酸价、角鲨烯、维生素 E、植物甾醇、茴香胺值	[21–23]
亚麻籽	冷榨、微波辅助冷榨、加速溶剂萃取、超临界 CO_2 萃取、亚临界流体萃取、焙炒、蒸汽爆破、低共熔溶剂(deep eutectic solvents, DES)超声辅助法	磷脂含量、酸价、过氧化值、羰基价、微量活性成分、生育酚、甾醇、角鲨烯、微量活性成分总含量、脂肪酸含量	[24–28]
芝麻	机械压榨法、石磨水代法、冷榨法、超临界 CO_2 萃取、酶解法、超声辅助、冷冻-微波解冻	酸值、色泽、含磷量、风味、出油率、感官评价	[29–30]
番茄籽	压榨法、溶剂浸出法、水酶法、超临界 CO_2 流体萃取法、冷榨法、微波辅助水酶法、超声波辅助提取法、脉冲电场预提取	色泽、出油率、水分、比重、折光率、皂化值、过氧化值、碘值、酸价、番茄红素	[31–36]
茶叶籽	压榨法、超临界 CO_2 流体萃取技术、水剂法、发酵法、超声波辅助水剂法	脂肪酸组成、酸价、过氧化值、多酚类、生育酚、甾醇、角鲨烯含量	[37–38]

1 种籽类传统和现代制油工艺的应用现状

1.1 传统制油工艺

1.1.1 压榨法

压榨法是最早应用的传统制油技术之一，其基本原理是通过螺旋压榨机中旋转螺杆在榨笼内产生的推力，将油料逐渐压紧，使油脂从果皮细胞中释放出来。随后，通过淋洗、油水分离和除杂处理，获得毛油产品[31]。其主要的工艺流程包括：种籽→清理→软化→(烘干)→轧坯→加热调节→种籽坯料→磨碎→压榨→精制→滤过→毛油。该方法工艺成熟，设备配置相对简单，对不同类型油料适应性较强，因而广泛应用于中小型油脂加工企业[31]。然而，压榨法也存在明显局限性，如饼粕残油率较高、出油率偏

低、饼粕品质较差以及能耗较大[14], 难以满足现代工业对高效、低耗和绿色生产的要求。周靖等[31]对比不同制备工艺对番茄籽油品质的影响, 结果显示热榨番茄籽油具有最高的总酚含量(88.43 mg/kg), 且产生的挥发性成分种类(42 种)和含量(32.59 μg/g)最多; 但同时存在诱导醛、酮、酸等其他次级氧化产物产生的问题。

1.1.2　溶剂萃取法

溶剂萃取法是一种基于不同组分在特定溶剂中溶解度差异进行分离的传统制油技术。该方法利用油脂在两种互不相溶(或微溶)溶剂之间的分配系数不同, 将油脂从油料中有效提取出来。通过多次萃取操作, 可大幅提高油脂的回收率[31]。其主要工艺流程包括: 种籽→清理→软化→(烘干)→轧坯→加热调节→种籽坯料→浸出→混合油→蒸发脱溶→毛油。与压榨法相比, 溶剂萃取法具有出油率高、粕中残油率低、粕质量较好、加工成本低等显著优势, 因而被广泛应用于大型油脂加工企业。然而, 该工艺也存在一定的安全和环境风险, 所用有机溶剂(如己烷)易燃易爆, 具有一定毒性, 且毛油品质相对较差, 需要后续精炼处理以满足食品安全和营养品质要求[31–32]。

HUANG 等[32]利用 DES 提取橄榄油, 该提取物在 0.5 mg/mL 下去除 79.8%的 DPPH 自由基、87.2%的 2,2-联氮-二(3-乙基-苯并噻 -6- 磺 酸) 二 铵 盐 [2,2’-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid), ABTS]阳离子自由基和 96.0%的羟基自由基, 表现出优异的自由基清除活性。酚类显著降低了 24%~34%的乙二醛水平, 同时上调超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)活性增加 1.1 倍, 显示出细胞抗氧化保护潜力。

1.2　现代制油技术

1.2.1　超临界 CO2 流体萃取法

超临界 CO_2 流体萃取是一种利用超临界流体在特定温度与压力条件下的可调溶解能力从而实现分离提取的现代技术。在超临界状态下, CO_2 同时具有气体的扩散性和液体的溶解性, 其密度及溶解能力可通过调控温度与压力进行精确控制, 从而实现对目标物质的高效选择性萃取[39]。其典型工艺流程如(图 1)所示。作为一种绿色、安全、高效、节能的提取方法, 超临界 CO_2 萃取技术在食品、保健品和天然产物领域展现出广阔的应用前景[40]。CHABNI 等[34]通过对比连续的传统两相萃取、挤压机萃取和超临界 CO_2 萃取, 发现通过超临界 CO_2 提取获得的油具有更高的酚类含量和更长的保质期, 这使得其在长期储存和使用方面具有潜在优势。然而, 尽管超临界 CO_2 萃取在技术性能上具有显著优势, 但其在推广应用中仍面临设备投资高、运行成本大、维护复杂等问题, 限制了其在常规油脂工业中的广泛使用。目前主要用于高端产品的提取及科研领域。

1.2.2　冷榨技术

冷榨制油技术是指在不经过高温蒸炒预处理的条件下, 直接对油料进行机械压榨以获取油脂的工艺[39]。石珊珊等[25]通过对比亚麻籽冷榨制油工艺与传统热榨制油工艺, 发现经冷榨工艺得到成品亚麻籽油中活性成分 α-亚麻酸含量高, 且成品油品质优、风味好。冷榨制油的工艺流程通常在传统压榨工艺基础上进行改良, 主要包括: 毛油→加热→水化→加热→干燥→脱苦→过滤→冷却→冷冻结晶→过滤→精滤→成品油。与传统热榨工艺相比, 冷榨工艺具有流程简洁、毛油品质优良、节能环保、设备投资少等优势[10]。由于压榨过程避免了高温处理, 最大程度保留了油脂中的天然活性物质和营养成分(如维生素 E、多酚类、甾醇等), 使得冷榨油脂具有较高的营养价值[10]。然而, 冷榨技术也存在出油率相对较低、生产成本较高、对原料品质要求严格等问题[25], 限制了其在大规模工业化生产中的推广。

1.2.3　水酶法

水酶法制油是一种绿色、高效的植物油提取技术。根据不同油料种类, 通过机械力将植物种籽破碎至合适粒径, 在油料细胞结构破碎的基础上, 添加果胶酶、纤维素酶、半纤维素酶及蛋白酶等生物酶, 定向破坏细胞壁结构或水解脂蛋白、脂多糖等大分子复合物, 从而释放包埋于细胞结构中的油脂[34]。典型的工艺流程包括: 粉碎→称取粉末→加水→调 pH→热处理→添加酶制剂(恒温振荡器)→酶解→离心→收集游离油→称重。水酶法制油具有操作条件温和、过程安全、能耗低、油脂纯度高、色泽浅淡等显著优势, 同时还可实现原料中蛋白质和碳水化合物的高效回收利用, 符合当前油脂工业对绿色环保和资源综合利用的要求[34]。ZHANG 等[40]通过对比溶剂萃取、冷压、水酶法提取,

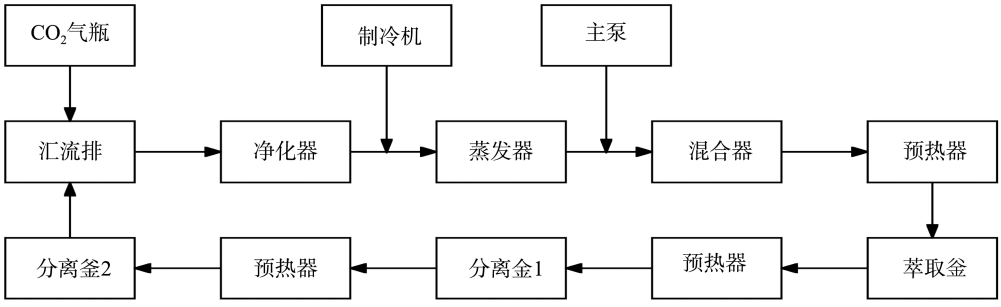


图 1　超临界 CO_2 流体萃取工艺流程

Fig.1　Process flow of supercritical CO_2 fluid extraction

发现通过水酶法提取获得的甜瓜籽油具有较高的生育酚含量和抗氧化稳定性，说明水酶法提油能够很好保存油脂的营养物质。然而，该方法在实际应用中仍存在很多挑战，如酶解反应时间长、酶制剂消耗大、部分油料风味成分可能发生改变等问题。

1.2.4 微波辅助水酶法

微波辅助提取技术是一种新兴的油脂提取方法，通过微波能加热作用，利用合适的溶剂在微波反应器中从天然植物、矿物或动物组织中提取化学成分。该技术利用微波辐射在极短时间内对油料组织进行均匀快速加热，使细胞内部温度升高、压力迅速增加，从而导致细胞壁和细胞膜破裂或溶解，促进油脂的快速释放[29,35]。王强等[35]通过对比微波辅助水酶法与索氏提取番茄籽油的研究发现，微波辅助水酶法提取番茄籽油含有较高的生育酚，同时表现出较强的抗氧化活性，在 DPPH 和 β-胡萝卜素-亚油酸测试体系中其半数抑制浓度(half maximum inhibitory concentration, IC_{50})分别为 9.52 mg/mL 和 10.64 mg/mL，说明该方法具有较高的氧化稳定性和抗氧化能力。微波辅助水酶法的典型工艺流程主要包括：称量→洗净→晾干→焙烤→粉碎→加水兑浆→微波处理→冷却→调节 pH→酶解→加热灭酶→冷却→离心→油水分离→除水→抽滤→烘干至恒重→油脂。这种方法因具备处理温和、提取效率高、适用范围广、提取时间短、油脂耐贮藏性等优势，越来越多地应用于植物油的绿色提取中[35]。然而，该方法亦存在一定局限性，如规模化困难以及设备投资成本高等[41]。因此，未来研究可进一步优化微波功率、处理时间与酶解条件的协同作用机制，提升油脂得率与功能保留度，以实现其在规模化油脂提取中的高效应用。

1.2.5 冷冻-微波辅助水酶法

冷冻-微波解冻预处理主要借助缓冻工艺，其原理是缓冻过程中能够形成大而少的冰晶，这些锐利的冰晶可以刺破细胞组织，破坏细胞的完整结构，使细胞内容物(包括油脂)释放，提高细胞的破碎度，从而提高油脂的提取率[30]。其主要工艺流程如下(图 2)。研究表明，冷冻-微波解冻预处理有着加热速度快、解冻时间短、节能高效、安全无害、容易瞬时控制、选择性和穿透性好的优点。但其设备成本较高，工艺较为复杂。

1.2.6 超声波辅助水酶法

超声波辅助提取技术主要是依据物质中有效成分的存在状态、极性、溶解性等在超声波作用下快速地进入溶剂中，得到多成分混合的提取液，再将提取液以适当方法分开、精制、纯化处理，最后得到所需单体化学成分的一项新技术[30,42]。工艺流程包括：筛选→除杂→烘烤→粉碎→超声波辅助溶液萃取→离心→蒸发→成品油[28]。LONG 等[42]在对亚麻籽油的研究中发现，超声辅助水酶法提取油脂中不饱和脂肪酸含量较溶剂萃取油脂增加 1.5%。可见微波辅助提取法相比于传统的水酶法有着易于操作、提取率高、保持提取物完整性的优点[43]，但其提取过程中所需动力消耗较大，仍需要进一步优化工艺，降低能耗[30]。HAYYAN 等[28]证明在有机溶剂中加入少量 DES 作为共溶剂，可以通过降低亚麻籽油的萃取温度来改善亚麻籽油的提取效率，从而降低使用 N-己烷相关能耗和环境等问题，为超声辅助水酶法提供新的优化思路。

1.2.7 固定化酶辅助水酶法

固定化酶的制备方法包括化学法、物理法、交联法和共价键结合法。李倩[15]通过固定化酶柱制备玉米胚芽油，发现经固定化的纤维素酶因载体的保护，表现出较强的耐热性及热稳定性，最高可以在 60 ℃下发挥酶活力，固定化酶的重复利用次数可达 5 次，且可在 20 d 保持相对酶活力。物理法固定酶是将酶通过一定的物理手段直接固定在载体上，因此并不会改变酶本身的结构。化学法是通过一定的化学方法将酶通过化学键连接到天然或人工高分子载体的官能团上，且使用交联剂把酶表面的官能团和载体表面的官能团牢牢结合起来，使其形成相对分子量更大的固定化酶[9]。固定化酶辅助水酶法利于提高酶稳定性以及简化生物催化剂的回收使用，更为经济省钱[44]。同时，固化酶具有提升催化活性、增强热和 pH 稳定性等优势[45]。但其适用性有限，物理法适用范围有限且不牢固，化学法易干扰特异性识别分子的过程。

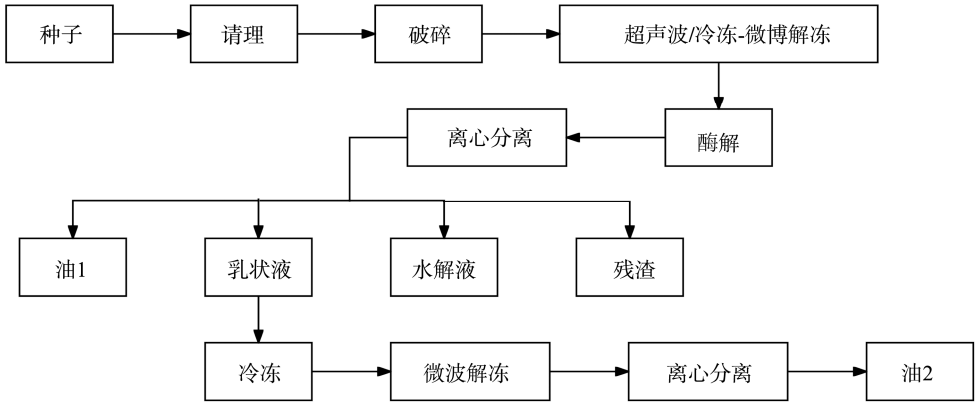


图 2 冷冻-微波辅助水酶法工艺流程

Fig.2 Process flow of freeze-microwave-assisted hydroenzymatic method

1.2.8　*微生物发酵法*

微生物发酵法是一种利用微生物发酵过程提取油脂的绿色生物技术。该方法主要依赖特定微生物在发酵过程中产生的蛋白酶类物质, 分解油料中的蛋白质结构, 从而破坏细胞壁、细胞膜及油脂与其他成分的复合体, 显著提高油脂的释放率和分离效率[38]。该方法在油脂提取过程中不引入有毒有害化学成分, 具有较高的安全性与环保性。其典型工艺流程主要包括: 种子→清洗→干燥→粉碎→灭菌→发酵→离心分离→油脂回收。微生物发酵法具有诸多优势, 如操作温和、过程绿色环保、安全系数高、节水, 即便油品中残留微生物, 也可通过后续的高温处理灭活, 确保产品安全性[46]。然而, 其单次出油率通常低于压榨或溶剂萃取法, 且发酵周期较长、生产效率有限, 因此尚难以单独应用于大规模油脂工业化生产。目前研究多倾向于将发酵法与挤压膨化、酶解、水酶法等其他技术联合应用, 形成协同提取机制, 不仅可提高出油率, 还可优化油脂品质与资源利用效率。

1.3　传统制油工艺与现代制油工艺的比较分析

目前, 文献已报道多种种子类作物的制油工艺。为了系统展示各类技术的特点及应用情况, 表 2 对我国典型制油工艺的优缺点进行了汇总与分析。传统制油工艺技术成熟, 在设备升级和参数优化的推动下, 其出油率和油脂品质已有一定提升。然而, 传统工艺仍存在能耗高、资源利用效率低及环境负担大等问题, 难以满足现代油脂工业绿色高效发展的要求。为应对这些问题, 超临界 CO_2 萃取、水酶法及微波辅助水酶法等绿色新兴技术正在逐步推广应用。其中, 超临界 CO_2 萃取具有低温、无毒和高选择性等优势, 适用于高附加值、热敏性油脂的提取; 微波辅助水酶法能够更好地保留油脂中活性成分, 使产油品质优良、耐储藏, 同时推动工艺向绿色化、节能化方向发展。通过对传统与现代工艺的对比分析, 可为工艺优化和技术选择提供参考, 推动种子类油脂产业的可持续升级。

表 2　不同现代制油技术的优缺点总结

Table 2　Summary of the advantages and disadvantages of different modern oil extraction technologies

制油技术	优点	缺点	参考文献
压榨法	工艺简单, 配套设备少, 对油料品种适应性强	饼残油量高, 出油效率低, 饼粕质量差, 动力消耗大、能耗高	[14,31–32]
溶剂萃取法	出油率高, 粕的质量好, 加工成本低	毛油质量差, 采用的萃取溶剂易燃易爆, 有毒性	[14,31–32,39]
水酶法	条件温和, 能耗低, 油脂纯度高, 色泽浅, 可回收蛋白质及碳水化合物, 操作简单	可能对风味有影响, 酶解时间长、酶制剂用量大、出油率低	[33,39]
超临界CO_2流体萃取法	操作条件温和、提油率高、毛油品质好、无溶剂残留、污染极小、能耗低	设备投资大、维护成本高	[34,39–40]
冷榨技术	工艺简单、毛油质量好、节省能源、成品油营养价值高	出油率低, 生产成本高	[10,25,39]
微波辅助水酶法	处理条件温和、提取时间短、范围广、毛油质量好, 油脂更耐贮藏、出油率增高	规模化困难, 设备投资成本高	[29,35,41]
冷冻-微波辅助水酶法	加热速度快、解冻时间短、节能高效、安全无害、容易瞬时控制、选择性和穿透性好、出油率增高	设备成本较高, 工艺复杂	[30]
超声波辅助提取法	易于操作、提取率高、保持提取物完整性、出油率增高	动力消耗大, 设备成本高	[28,30,37,42–43]
固定化酶辅助水酶法	提高酶催化反应效率, 利于提高酶稳定性以及简化生物催化剂的回收使用, 省钱	物理法适用范围有限且不牢固, 化学法易干扰特异性识别分子的过程	[9,15,44–45]
发酵法	安全系数极高, 即使油中仅残留少部分微生物, 在使用时也可以高温杀死、能耗低、成本低	出油率低、单独使用一种发酵法无法满足生产需要	[38,46]

2　种籽类油脂品质控制与评价指标的研究现状

2.1　酸值、过氧化值和皂化值

酸价通常反映油脂的精炼程度以及其储藏过程中品质的变[47]。根据 GB 2716—2018《食品安全国家标准 食用油》指标要求, 食用植物油的酸价应小于等于 3 mg/g。目前测定油脂的酸价多采用冷溶剂指示剂滴定法、冷溶剂自动电位滴定法和热乙醇指示剂滴定法。研究表明, 不同加工方式与烘焙条件对酸价影响显著。曾晶等[48]发现低温压榨法制得的油茶籽油酸价高于热榨法和浸出法。番茄籽

油和葵花籽油的酸价随着烘焙温度升高而增加[49−50]。储藏过程中，油脂的酸价通常随时间推移而升高，其中浸出法制得的油脂酸价升高幅度大于压榨法[48]。

过氧化值是衡量油脂酸败程度的重要理化指标[47]，目前多采用电位滴定法进行检测。根据 GB 2716—2018 指标要求，种籽类油脂的过氧化值应小于等于 0.25 g/100 g。目前研究显示，不同油料来源及提取工艺对油脂的过氧化值有显著影响。ALMUHAYAW 等[51]、CHENG 等[52]的研究指出，压榨法制得的水芹籽油与牡丹籽油的过氧化值均较低，优于部分菜籽油样品。亚麻籽油在烘焙处理后，其过氧化值于氧化初期略有上升，但短期内仍可满足国家安全标准[53]。

皂化值指 1 g 油脂完全皂化所需的氢氧化钾的毫克数，与油脂中脂肪酸链的平均分子量成反比，即皂化值越高，说明脂肪酸链越短；反之，则脂肪酸链较长。研究发现，皂化值受原料种类与预处理方式影响显著。根据崔彩芳等[54]的研究，牡丹籽油经轻微微波和烘烤后皂化值会明显增高，其中微波处理后牡丹籽油的皂化值为 154.82~169.41 mg/g，而烘烤后牡丹籽油的皂化值为 173.35 mg/g 左右。对于苹果籽油，苟丽娜等[55]研究发现超临界 CO_2 萃取后得到的油脂皂化值为 189 mg/g，显著高于石油醚萃取。在冯红霞等[56]的研究报道，不同精炼温度下的山桐子油的皂化值约在 137.02~203.49 mg/g 之间。EL-BELTAGI 等[57]研究发现，烘烤处理可提高芝麻籽油的皂化值，烘烤可使芝麻油皂化值由 189.8 mg/g 升至 195.3 mg/g，表明短链脂肪酸比例增加。

综上所述，酸价、过氧化值和皂化值作为衡量油脂品质的重要指标，在评估油脂的加工适宜性、储藏稳定性及营养特性等方面具有重要意义。未来应进一步从原料处理、加工工艺及贮藏条件等多方面协同优化，以全面提升种籽类油脂的品质与安全性。

2.2 油脂色泽与气味

种籽油的生产工艺流程和质量要求整体较为一致，所得油脂形态多为黄色、金黄色或淡黄色的透明油状液体[58]。目前研究显示，不同加工工艺会影响油脂的色泽和清亮度，如冷榨菜籽油呈深黄色，而精炼后的葵花籽油则清亮透明、色泽为青黄色或淡黄色[59−60]。油脂的气味与口感特征受原料预处理方式和制油工艺影响显著。烘烤作为常见的前处理方式，可促使种籽原料发生美拉德反应，释放出一系列挥发性呈味物质，从而赋予油脂独特的风味。陈艳萍等[61]总结前人研究成果发现，经炒制后的芝麻油具有甜香与烧烤风味，这是由于高温条件下芝麻中部分氨基化合物与还原糖发生美拉德反应，释放出典型的香气成分。类似地，烘烤处理会赋予番茄籽油更好的风味与的口感[62]。微波预处理与烘烤类似，但微波预处理可以增加吡嗪类、呋喃类、Strecker 醛类、吡咯类和挥发性含硫化合物的产生，也可以诱导羰基化合物与氨基化合物产生美拉德反应，从而改善植物油的风味表现[63]。鞠阳[64]研究发现，微波处理可增强紫苏籽油与葵花籽油的香气浓度，其油脂整体风味表现优于未处理样品，而亚麻籽油在经微波或烘烤处理后也展现出更佳的感官品质[26]。冷榨法制取的油料表现出新鲜的坚果味，而热榨法呈现出的风味则更加丰富，除坚果味外，还包括典型的烘烤香气。相比之下，溶剂浸出法制得的油脂在风味物质方面较为单一，且部分产品可能残留轻微的有机溶剂异味。而超临界流体萃取法尽管能较好保留植物油中的天然呈味成分，但由于其能耗高、成本大，目前在大规模工业生产中的应用仍受限制[65]。

2.3 功能性与营养价值

2.3.1 脂肪酸组成

食用油脂中含有不饱和脂肪酸与饱和脂肪酸。饱和脂肪酸分子结构较为刚性，摄入过多可能增加血清胆固醇水平、导致细胞膜硬化等不良健康效应。不饱和脂肪酸拥有双键结构，在体内可参与调节脂质代谢，具有预防心脑血管疾病、促进生长发育、改善免疫功能等生理作用。此外，不饱和脂肪酸对抗癌、调节免疫、预防心血管疾病、预防高血压、减肥瘦身、美容养颜等方面也具有重要的生理作用[66]。研究指出，人体必需脂肪酸——亚油酸与亚麻酸不能自行合成，必须通过膳食摄入[67]。亚油酸是人体必需脂肪酸之一，可在体内经一系列反应转化为前列腺素，具有降低血脂、防止动脉硬化和心肌梗死的作用。亚麻酸分为 α-亚麻酸和 γ-亚麻酸，其中 α-亚麻酸有助于调节免疫功能、改善血脂状况，而 γ-亚麻酸则可在体内合成具有抗炎和抗凝功能的前列腺素、凝血烷等，发挥心血管保护作用。

种籽类油脂中普遍含有多种饱和脂肪酸与不饱和脂肪酸，其中，饱和脂肪酸主要包括硬脂酸、棕榈酸及肉豆蔻酸等[49]，不饱和脂肪酸则以油酸、亚油酸和亚麻酸为主要组成成分[50]。相较于动物油，种籽类油脂不饱和脂肪酸含量普遍较高，范围为 48.90%~97.27%[68]。研究表明，多数种籽油脂均富含油酸、亚油酸和亚麻酸，是优质的不饱和脂肪酸来源。其中，亚油酸含量普遍高于 50%，展现出较高的营养价值。然而，不同品种植物油的脂肪酸组成含量存在一定差异。彭雅丽等[68]研究发现，月见草油的油酸含量为 8.78%，而油茶籽油的油酸含量则高达 80.50%。吴晶晶等[69]对市售葵花籽油与棉籽油检测结果表明，其主要脂肪酸成分均为亚油酸；而亚麻籽油、紫苏籽油及盐生草种子油则以亚麻酸为主要的不饱和脂肪酸。马艺方等[60]报道牡丹籽油的不饱和脂肪酸含量高达 92.47%，且其脂肪酸组成与亚麻籽油相似，主要以 α-亚麻酸为主。葡萄籽油、葵花籽油、石榴籽油和紫苏籽油的主要不饱和脂肪酸则被发现为亚油酸[58]。此外，种籽的预处理方式也会影响油脂中不饱和脂肪酸的含量和组成。研究表明，湿热处理和微波烘烤处理都会导致芝麻籽油中不饱和脂肪酸含量降低而饱和脂肪酸含量升高，说明多不包含脂肪酸具有不稳定性

暴露在热、光、氧气的环境下易被氧化[70]。

2.3.2　植物甾醇与多酚含量

植物甾醇是种籽油中重要的生物活性成分, 主要包括豆甾醇、*β*-谷甾醇和菜油甾醇等。研究表明, 植物甾醇具有良好的自由基清除能力和氧化稳定性, 可抑制癌细胞迁移。种籽类油脂是人体获取植物甾醇的重要来源之一。多项研究证实, 紫苏籽油和茶籽油等种籽类油脂中含有丰富的豆甾醇和谷甾醇[71]。*β*-谷甾醇因其在降血糖、抗炎和抗肿瘤等方面表现出显著活性, 成为当前研究最为深入的甾醇类物质; 豆甾醇则具有抗氧化、抗衰老和降低血胆固醇的作用。在多种种籽油中, *β*-谷甾醇含量普遍高于菜油甾醇和豆甾醇[72]。

除甾醇外, 种籽类油脂中还含有多种酚类物质。植物多酚不仅具有较强的抗氧化能力, 还兼具抗菌、抗癌、抗老化以及调控胆固醇水平等功能, 既有益于人体健康, 又能显著提升植物油的氧化稳定性, 有助于延长油脂的贮存期限[73]。生育酚即维生素 E 是食用种籽油中的一类重要活性成分, 具有抗氧化作用, 能够保护细胞膜和脂蛋白中不饱和脂肪酸, 预防慢性疾病, 提高免疫力[74]。研究表明, 芝麻油、菜籽油、葵花籽油和茶籽油中均含有丰富的生育酚, 其中以菜籽油的总生育酚含量最高, 为 825.41 mg/kg; 茶籽油总酚含量最低, 为 198.51 mg/kg[72]。制油工艺对酚类物质的保留具有显著影响[63,75]。刘乐乐等[76]研究发现, 对于茶叶籽油, 热榨法、溶剂浸提法、水剂法和水酶法提取的油中 *α*-生育酚的含量范围在(199.98±16.71) mg/kg 至(249.78±15.84) mg/kg 之间, 其中溶剂浸提法制备的茶叶籽油 *α*-生育酚含量最高, 热榨法最低。此外, 精炼过程也会导致种籽类油脂中的生育酚含量降低。王玫[49]研究发现, 在精炼阶段, 油茶籽油中生育酚含量随精炼过程逐渐降低, 经脱色处理后油茶籽油生育酚含量降为 75.73 mg/kg, 仅为油茶籽原油的 58.60%。HUANG 等[32]经研究发现, 使用低共熔溶剂萃取橄榄中的多酚, 其抗氧化活性与多酚的含量都明显升高。

2.4　安全性与稳定性

2.4.1　热氧化稳定性

油脂的热氧化稳定性是衡量其在高温处理过程中抵抗氧化变质能力的重要指标。其稳定性与油脂中脂肪酸的组成密切相关: 通常, 饱和脂肪酸含量较高的油脂具有较强的氧化稳定性, 而不饱和脂肪酸含量越高, 则越容易发生氧化反应, 从而降低其热稳定性。目前, 油脂热氧化稳定性的评价中, 油脂的活化能常被用作关键参数之一[77]。研究表明, 活化能越高, 表示油脂分子在热诱导氧化反应中所需克服的能垒越大, 因而其热氧化稳定性也越强[78]。种籽油中含有天然抗氧化成分, 如维生素 E 和多酚等, 这些物质在高温加热过程中可对油脂起到一定的保护作用。适度的精炼处理有助于去除部分促氧化成分, 从而改善油脂的氧化稳定性, 但在持续加热过程中, 油脂中自由基的含量会逐渐升高, 氧化程度亦随之加深[49]。除了依赖油脂自身含有的天然抗氧化物质外, 实际应用中也常通过添加外源抗氧化剂, 如丁基羟基茴香醚、没食子酸丙酯等, 进一步增强种籽油的抗氧化能力。

2.4.2　有害物质评价

目前影响食用油品质的因素主要包括农药残留、重金属污染、霉菌污染等[79]。此外, 精炼不彻底也会导致油脂中包含大量胶质物质、机械杂质等。依据 GB 2716—2018 规定, 食用植物油中的游离棉酚含量应低于 200 mg/kg; GB 2762—2022《食品安全国家标准 食品中污染物限量》要求, 油脂及其制品中铅含量(以 Pb 计)不得高于 0.1 mg/kg, 镍含量不得高于 1.0 mg/kg; GB 2761—2017《食品安全国家标准 食品中真菌毒素限量》表明, 植物油脂中黄曲霉毒素 B_1 含量不得高于 10 mg/kg, 花生油和玉米油则不应高于 20 μg/kg。此外, 由于种籽类油脂中普遍富含多不饱和脂肪酸, 其在光、热和氧气作用下极易发生自动氧化[70]。而氧化酸败不仅会导致必需脂肪酸损失、营养价值显著降低, 同时还会产生哈败味等不良变化, 严重影响食用品质。通常通过测定酸价和过氧化值来评估油脂的氧化程度, 以此判断其品质变化。在加工油脂时, 如果加工过度也会破坏油脂中富含的营养成分, 甚至产生对人体有害的物质[80]。

在浸出工艺制油过程中, 溶剂残留问题亦不容忽视。若工艺控制不当, 易造成残留溶剂超标。目前常用的油脂质量安全检测法包括气相色谱法(gas chromatography, GC)、液相色谱法(liquid chromatography, LC)、气相色谱-质谱法(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)和液相色谱-质谱法(liquid chromatography-mass spectrometry, LC-MS)[79]。GB 2716—2018 标准规定, 食用植物油(包括调和油)中溶剂残留量应控制在 20 mg/kg 以下。在油脂的储存和流通环节中, 还存在被真菌等微生物污染的风险, 可能产生黄曲霉毒素等有害物质。GB 2761—2017 规定, 食用植物油中黄曲霉毒素 B_1 含量不得超过 10 μg/kg, 其中花生油和玉米油限量为 20 μg/kg。此外, 油脂中苯并[a]芘的限量应不超过 10 μg/kg, 该物质具有较强的致癌性, 须严格监控。

3　种籽类制油产业的挑战与未来展望

3.1　当前工艺与评价体系的主要局限性

3.1.1　传统种籽油工艺的资源利用瓶颈与环境挑战

目前我国粮油绿色低碳加工前沿技术和智能化装备水平总体发展滞后, 加工过程中仍普遍存在过度精炼、能耗与水耗高、原料利用率低、废弃物排放大及环境污染等问题, 生产总效率与国际先进水平尚存在显著差距[81]。但过度追求精加工油也会导致过度加工, 造成资源浪费和环境污染等问题[82]。传统制油方式如压榨法和浸提法在资源

利用效率方面均存在不足。以压榨法为例，残余压榨饼在后续浸出过程中因渗透性差，易造成粕中残油率偏高。冷榨虽能避免高温对油脂中营养成分的破坏，但本质仍属物理压榨方式，残油率未能明显改善。而浸提法虽能提高出油率，但存在明显的溶剂残留风险。该工艺不仅使部分蛋白质等有价值组分难以高效利用，还易在加工过程中释放挥发性有机化合物，增加环境负担[50]。因此，传统工艺在实现资源高效利用与环境友好之间仍面临巨大挑战。

3.1.2 工艺经济性制约

近年来，超临界流体萃取、水酶法等新兴绿色制油技术因其提取效率高、产品品质优而受到关注。但这些技术尚未在工业化中大规模应用，主要受限于其高昂的经济成本。以超临界 CO_2 萃取技术为例，其设备投资大、能耗高，运行维护成本亦远高于传统工艺。水酶法同样存在酶制剂价格昂贵、酶解废水处理成本高等问题，限制了其在大规模工业应用中的推广。因此，当前制油技术在经济可行性与技术先进性之间的权衡仍是一大难题。

3.2 未来研究方向与建议

3.2.1 智能化与数字化技术应用

随着人工智能、大数据与工业自动化的迅速发展，智能化技术在种籽制油产业的应用潜力日益凸显。人工智能可实现对压榨温度、溶剂流速、原料供给等关键参数的精准调控，实现全流程动态优化，提升生产效率和产品一致性。研究表明，机器视觉系统可用于实时捕捉油料外观、杂质含量和颜色等质量指标，并与人机协作系统结合，有效提升生产线自动化水平[83]。此外，基于区块链的全程追溯系统、智能包装材料、纳米检测技术等新兴手段，也将在制油产品的品质控制、安全监管和市场流通环节中发挥关键作用，从而推动食用油加工体系的数字化、透明化和智能化升级[81]。

3.2.2 全面品质评价体系的建立

当前油脂品质评价体系主要依赖酸价、过氧化值等传统理化指标，虽可反映油脂新鲜度与氧化程度，但缺乏对其营养功能特性的系统评估。因此，亟需建立涵盖营养活性成分(如维生素 E、植物甾醇、亚油酸、α-亚麻酸等)的多维度评价标准，以更全面地衡量种籽油脂的品质与功能属性，如 HUANG 等[32]所采用的总酚含量与抗氧化活性测定也可尝试在油脂品质中使用；ZHENG 等[16]的研究中则已经开始通过测定酚类、植物甾醇以及 β-胡萝卜素的含量以评估油脂品质。同时，智能化检测技术的引入是完善评价体系的重要方向。近年来，近红外光谱、核磁共振、拉曼光谱、质谱成像及机器视觉检测[84]等快速无损分析手段与在线监测设备逐步成熟，结合物联网感知、云端数据平台和人工智能算法，可实现油脂加工与储运全流程的实时监控与大数据分析。未来，传统理化检测与智能化数字平台的深度融合，有望形成标准化、自动化的全面品质评价体系，为种籽类油脂产业的高质量与可持续发展提供技术支撑。

3.2.3 功能性开发与多领域应用拓展

种籽类油脂富含多种生物活性成分，如不饱和脂肪酸、多糖、植物甾醇与多酚类物质，具有良好的营养保健价值，不仅可作为食用油脂使用，还具备向保健食品、功能性营养品甚至药用产品延伸的潜力。例如，研究发现元宝枫籽油富含神经酸，具有潜在的神经修复与治疗作用，在医疗领域具有广阔前景[71,73]。为提升种籽油的应用价值，建议从以下方面加强研究与开发：(1)开展优质种质资源筛选与高功能性育种，提升油料原料的营养密度与功能组分含量；(2)研究天然抗氧化剂复配策略，改善易氧化问题，延长保质期；(3)推动“医食同源”背景下的油脂功能性开发与产业化转化。以茶籽油为例，已有研究表明其含有丰富的角鲨烯、皂苷和多酚类物质，具有抗氧化、抗炎、抗菌、抗肥胖、保护胃黏膜等生理功能，有望在农业生态、生物医药和功能食品等多领域实现深度开发与价值提升[85–86]。未来，种籽类油脂的研发将不仅关注食用品质，也将朝向精准营养与健康干预方向拓展，推动其产业链高质量发展。

4 结束语

当前，压榨法与溶剂浸出法仍为种籽类油脂提取的主流工艺，在设备更新与参数优化的推动下，出油率与油脂品质已实现一定提升。然而，传统工艺仍存在能耗高、资源利用效率低与环境负担重等问题，难以满足现代油脂工业绿色高效的发展要求。为此，超临界 CO_2 萃取、水酶法、微波辅助水酶法等绿色新兴技术逐步推广应用，显著提升了油脂提取效率与营养保留水平。其中，超临界 CO_2 萃取技术因具备低温、无毒、选择性强等优势，适用于高附加值、热敏性油脂的提取；水酶法则实现了油脂与蛋白质、碳水化合物等营养组分的协同分离，提高了原料综合利用率。与之配套的固定化酶技术、精准检测手段也不断完善，助力制油工艺向智能化、绿色化升级。

功能性油脂因富含 ω-3 脂肪酸、植物甾醇及多酚等活性成分，日益成为营养健康食品研发的重要方向。如亚麻籽油、紫苏籽油中的 α-亚麻酸具有调脂抗炎、保护心脑血管等功效，南瓜籽油、葡萄籽油则兼具抗氧化与代谢调节功能，展现出良好的膳食干预潜力。未来，应进一步加强功能性油脂的成分解析、生物活性评价及营养机制研究，推动其在精准营养、保健食品及特殊医学用途食品中的应用转化，实现由“食用油”向“营养油”与“功能油”的高质量跃升。

参考文献

[1] 王涛. 中国主要生物质燃料油木本能源植物资源概况与展望[J]. 科技导报, 2005(5): 12–14.
WANG T. A survey of the woody plant resources for biomass fuel oil in China [J]. Science & Technology Review, 2005(5): 12–14.

[2] 程小军. 中国油脂植物种子脂肪酸数据库的建立及数据分析[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
CHENG XJ. Establishment of the seed oil fatty acids database and analysis of Chinese oil plants [D]. Yangling: Northwest Agriculture & Forestry University, 2015.

[3] 赵晨伟, 金青哲, 王兴国. 食用植物油安全标准的国内外比较分析(一)—体系、结构、范围和分类对比[J]. 粮油食品科技, 2025, 33(4): 1–10.
ZHAO CW, JIN QZ, WANG XG. Comparison of domestic and foreign safety standards for edible vegetable oils (I)—comparison of system, framework, scope and classification [J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2025, 33(4): 1–10.

[4] 陈雅静, 赵路苹, 华欲飞, 等. 植物种子油体的提取及其性质的初步研究[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(5): 62–67.
CHEN YJ, ZHAO LP, HUA YF, *et al*. Preliminary study of extraction and properties of plant seed oil bodies [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2017, 32(5): 62–67.

[5] MINGKE T, YUCHEN B, HONGYU T, *et al*. The chemical composition and health-promoting benefits of vegetable oils-a review [J]. Molecules (Basel, Switzerland), 2023, 28(17): 6393.

[6] XU Y, FANG M, CHEN Z, *et al*. High-phytosterol rapeseed oil prevents atherosclerosis by reducing intestinal barrier dysfunction and cholesterol uptake in ApoE-mice [J]. Food Research International, 2025, 214: 116537.

[7] XU P, CAI Y, CHEN K, *et al*. *Camellia oleifera* oil: Unveiling health benefits and exploring novel applications [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2025, 1-21. https://doi.org/10.1080/10408398.2025.2519688

[8] 金青哲, 金俊, 赵晨伟, 等. 我国植物油料油脂加工技术新进展[J]. 中国油脂, 2024, 49(6): 1–5.
JIN QZ, JIN J, ZHAO CW, *et al*. Overview of new advances in vegetable oilseeds and oils processing technology in China [J]. China Oils and Fats, 2024, 49(6): 1–5.

[9] 韩佳旭, 王莉. 新型固定化酶技术的研究进展[J]. 江西化工, 2024, 40(2): 5–8.
HAN JX, WANG L. Research progress of new immobilized enzyme technology [J]. Jiangxi Chemical Industry, 2024, 40(2): 5–8.

[10] 房媛媛. 酶法冷榨大豆油高效制取技术开发[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2017.
FANG YY. Development of efficient production technology of enzymatic cold-pressed soybean oil [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2017.

[11] PENG Z, ZHANG Y, XU C, *et al*. Effect of novel radio frequency roasting on color appearance, volatile compounds, fatty acid composition, and storage stability of peanut oil [J]. Food Chemistry, 2025, 485: 144534.

[12] 初丽君, 张睿, 曲明磊, 等. 不同压榨工艺花生油储藏稳定性、风味及营养组成研究[J]. 粮食与食品工业, 2024, 31(5): 39–43.
CHU LJ, ZHANG R, QU ML, *et al*. Study on the storage stability, flavor and nutrient composition of peanut oil by different pressing techniques [J]. Cereal & Food Industry, 2024, 31(5): 39–43.

[13] LIU J, ZHANG Y, ASHFAQ T, *et al*. Flavor of peanut oil: An overview of odorants, analytical techniques, factors affecting flavor characteristics [J]. Food Chemistry, 2025, 483: 144283.

[14] 孙洋, 任健, 宋春丽, 等. 制油工艺对玉米胚芽油品质特性及风味成分的作用机制[J]. 食品科学, 2024, 45(18): 183–189.
SUN Y, REN J, SONG CL, *et al*. Effect of production processes on the quality characteristics and flavor of corn germ oil [J]. Food Science, 2024, 45(18): 183–189.

[15] 李倩. 实验室型固定化酶柱制备玉米胚芽油及水解蛋白液功能性的研究[D]. 锦州: 渤海大学, 2016.
LI Q. Study on the preparation of corn germ oil by laboratory immobilized enzyme column and the functional properties of corn germ hydrolysate protein [D]. Jinzhou: Bohai University, 2016.

[16] ZHENG L, MIN A, CHEN Y, *et al*. Superheated steam pretreatment as a promising technique to improve the physicochemical properties of corn germ oil [J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2025, 127(8): e70035–e70035.

[17] XU S, HUANG D, LIU C, *et al*. Development of nutrition-flavor dual process of rapeseed oil based on resource utilization of rapeseed cake [J]. Food Chemistry, 2025, 492(Pt 3): 145576.

[18] 马旋, 王未君, 郑畅, 等. 制油技术对菜籽油脂类伴随物影响的研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(13): 216–225.
MA X, WANG WJ, ZHENG C, *et al*. Research progress on the effect of oil preparation technology on lipid concomitants in rapeseed oil [J]. Food Science, 2023, 44(13): 216–225.

[19] 李晓宁, 薛雅琳, 郭咪咪, 等. 南瓜籽制油工艺研究进展[J]. 粮油食品科技, 2018, 26(4): 17–21.
LI XN, XUE YL, GUO MM, *et al*. Research advances on producing technology of pumpkin see oil [J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2018, 26(4): 17–21.

[20] SCHOSS K, GLAVAČ KN. Supercritical CO_2 extraction *vs.* hexane extraction and cold pressing: Comparative analysis of seed oils from six plant species [J]. Plants, 2024, 13(23): 3409–3409.

[21] 黄崇博, 黄颖, 马旋, 等. 核桃制油及其饼粕蛋白利用技术研究进展[J]. 中国油料作物学报, 2025, 1-13. https://doi.org/10.19802/j.issn.1007-9084.2024131
HUANG CB, HUANG Y, MA X, *et al*. Progress in walnut oil extraction technology and comprehensive utilization of its meal cake [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2025, 1-13. https://doi.org/10.19802/j.issn.1007-9084.2024131

[22] XU Y, DAI Y, ZHEN S, *et al*. Flavor enhancement pathways and mechanisms of cold-pressed walnut oil based on defatted cold-pressed walnut meal hydrolysates [J]. Food Chemistry, 2025, 482: 144190.

[23] ZHANG C, ZHANG L, ZHAO Y, *et al*. Effect of different heating pretreatment methods on physicochemical properties of pressed walnut oils and functional properties of walnut protein isolates [J]. LWT, 2025, 225: 117885.

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

[25] 石珊珊, 刘大良, 魏冰. 亚麻籽低温冷榨制油工艺研究[J]. 粮食与食品工业, 2014, 21(4): 34–37.
SHI SS, LIU DL, WEI B. Study on oil making technics of flaxseed by low temperature squeeze [J]. Cereal & Food Industry, 2014, 21(4): 34–37.

[26] YU G, JIA X. Unlocking key odor-active compounds in cold-pressed, roasted, microwaved and steam-exploded flaxseed oils using a sensomics approach [J]. LWT, 2025, 231: 118347.

[27] PIECHOWIAK T, BALAWEJDER M. Freeze-dried alginate beads as carriers of plant-based antioxidants to enhance the oxidative stability of cold-pressed linseed oil [J]. Journal of Stored Products Research, 2026, 115: 102824.

[28] HAYYAN A, SAMYUDIA AV., HASHIM MA, et al. Application of deep eutectic solvent as novel co-solvent for oil extraction from flaxseed using sonoenergy [J]. Industrial Crops & Products, 2022, 176: 114242

[29] 刘蒙佳, 周强, 黄玲玲. 微波辅助水酶法提取黑芝麻油脂的研究[J]. 保鲜与加工, 2019, 19(1): 95–101.
LIU MJ, ZHOU Q, HUANG LL. Study on extraction of oil from black sesame by microwave-assisted aqueous enzymatic method [J]. Storage and Process, 2019, 19(1): 95–101.

[30] 张雅娜, 郭丽, 苏悦, 等. 超声、冷冻-微波辅助水酶法提取芝麻油的研

究[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(20): 102–109.
ZHANG YN, GUO L, SU Y, *et al*. The process of ultrasound and freeze-microwave assisted aqueous enzymatic extraction of sesame oil [J]. Food Research and Development, 2019, 40(20): 102–109.

[31] 周靖, 刘文玉, 陈友志, 等. 制备工艺对番茄籽油品质的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(5): 76–83.
ZHOU J, LIU WY, CHEN YZ, *et al*. Effect of different processing methods on the quality of tomato seed oil [J]. Food Science, 2022, 43(5): 76–83.

[32] HUANG B, WANG H, ZHAO W, *et al*. Green extraction of bioactive phenolics from Chinese olive (*Canarium album* L.) using deep eutectic solvents: optimization, characterization, and antioxidant activities [J]. Journal of Food Science and Technology, 2025(prepublish): 1–16.

[33] 朱敏敏. 水酶法提取番茄籽油及其破乳工艺的研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2017.
ZHU MM. Study on extraction of tomato seed oil by aqueous enzymatic method and demulsification [D]. Shihezi: Shihezi University, 2017.

[34] CHABNI A, BAÑARES C, TORRES FC. Study of the oxidative stability via oxitest and rancimat of phenolic-rich olive oils obtained by a sequential process of dehydration, expeller and supercritical CO_2 extractions [J]. Frontiers in Nutrition, 2024, 11: 1494091.

[35] 王强, 王存, 王睿, 等. 微波辅助水酶法提取番茄籽油工艺优化及理化特性研究[J]. 中国粮油学报, 2015, 30(10): 43–48.
WANG Q, WANG C, WANG R, *et al*. Microwave-assisted aqueous enzymatic extraction of oil from tomato seed and evaluation of its physicochemical properties [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2015, 30(10): 43–48.

[36] MARKIĆ F, KRALJIĆ K, STULIĆ V, *et al*. Improving the extraction of tomato seed oil and the retention of bioactive substances using pulsed electric field technology [J]. Future Foods, 2025, 12: 100706.

[37] 肖龙艳, 齐玉堂, 张维农, 等. 超声波辅助水剂法提取茶叶籽油工艺的研究[J]. 中国油脂, 2011, 36(7): 5–8.
XIAO LY, QI YT, ZHANG WN, *et al*. Ultrasonic-assisted aqueous extraction of oil from tea seed [J]. China Oils and Fats, 2011, 36(7): 5–8.

[38] 杨鹏鸣, 蔡祖国, 姜金仲. 发酵法生产茶叶籽油中不同成分的分层机理[J]. 西北林学院学报, 2023, 38(5): 140–146.
YANG PM, CAI ZG, JIANG JZ. Layering mechanism of different components in tea seed oil manufacture by fermentation [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2023, 38(5): 140–146.

[39] 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.

[40] ZHANG G, LI Z, GUO Z, *et al*. Comparative extraction of melon seed (*Cucumis melo* L.) oil by conventional and enzymatic methods: Physicochemical properties and oxidative stability [J]. Journal of Agriculture and Food Research, 2024, 16: 101182.

[41] 丁文凤. 超声/微波辅助水热处理对相思木组分溶出的影响机制研究[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2025.
DING WF. Study on the mechanism of ultrasound/microwave-assisted hydrothermal treatment on the dissolution of acacia wood components [D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2025.

[42] LONG J, FU Y, ZU Y, *et al*. Ultrasound-assisted extraction of flaxseed oil using immobilized enzymes [J]. Bioresource Technology, 2011, 102(21): 9991–9996.

[43] KALKAN E, MASKAN M. Enzymatic aqueous cottonseed oil extraction with plackett-burman and central composite design method [J]. Food Biophysics, 2025, 20(4): 140–140.

[44] QUINTO GE, CAÑADA AR, GARCÍA GP, *et al*. Use of potential immobilized enzymes for the modification of liquid foods in the food industry [J]. Processes, 2023, 11(6): 1840.

[45] JOTHYSWARUPHA AK, VENKATARAMAN S, RAJENDRAN SD, *et al*. Immobilized enzymes: Exploring its potential in food industry applications [J]. Food Science and Biotechnology, 2024, 34(7): 1–23.

[46] DESSIE W, LUO X, WANG M, *et al*. Enhancing the valorization efficiency of Camellia oil extraction wastes through sequential green acid pretreatment and solid-state fermentation-based enzymatic hydrolysis [J]. Industrial Crops & Products, 2024, 217: 118893.

[47] YANG X, PEI J, HE X, *et al*. A novel method for determination of peroxide value and acid value of extra-virgin olive oil based on fluorescence internal filtering effect correction [J]. Food Chemistry, 2024, 441: 138342.

[48] 曾晶, 王卫飞, 陈莹, 等. 不同工艺山茶油在储藏过程中品质变化[J]. 中国油脂, 2023, 48(11): 8–13.
ZENG J, WANG WF, CHEN Y, *et al*. Quality changes of oil-tea camellia seed oil with different processing techniques during storage [J]. China Oils and Fats, 2023, 48(11): 8–13.

[49] 王玫. 轻度精炼加工对油茶籽油品质和热稳定性的影响研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2022.
WANG M. Study on the effect of light refining process on the quality and thermal stability of camellia oil [D]. Nanchang: Nanchang University, 2022.

[50] 季泽峰. 山核桃油水酶法制取工艺及其对油脂品质影响研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2018.
JI ZF. Aqueous enzymatic extraction of carya cathayensis oil and physicochemical properties of its oil [D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2018.

[51] ALMUHAYAW MS, ALRUHAILI MH, GATTAN HS, *et al*. In silico molecular modeling of cold pressed garden cress (*Lepidium sativum* L.) seed oil toward the binding pocket of antimicrobial resistance staphylococcus aureus DNA-gyrase complexes [J]. European Review for Medical and Pharmacological Sciences. 2023, 27(4): 1238–1247.

[52] CHENG A, CUI C, XU B, *et al*. Comparison of microwave and roasting pretreatments on peony seed oil: Compositions, physicochemical properties and emulsification characteristics [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2025, 139: 107071.

[53] HASSANEIN MMM, ABDEL-RAZEK AG, AFIFI SM, *et al*. Characterization of new egyptian linseed varieties and the effects of roasting on their pigments, tocochromanols, phytosterols, omega-3 fatty acids, and stability [J]. Molecules, 2022, 27(23): 8526.

[54] 崔彩芳, 孙兆岳, 王云富, 等. 热处理时间对牡丹籽油理化性质及抗氧化活性的影响[J]. 南方农业学报, 2024, 55(4): 1118–1128.
CUI CF, SUN ZY, WANG YF, *et al*. Effects of heat treatment time on physicochemical properties and antioxidant activity of peony seed oil [J]. Journal of Southern Agriculture, 2024, 55(4): 1118–1128.

[55] 苟丽娜, 曾朝珍, 康三江. 超临界 CO_2 萃取苹果籽油工艺优化及其品质分析[J]. 寒旱农业科学, 2025, 4(5): 452–458.
GOU LN, ZENG CZ, KANG SJ. Optimization of supercritical CO_2 extraction of apple seed oil and its quality analysis [J]. Journal of Cold-Arid Agricultural Sciences, 2025, 4(5): 452–458.

[56] 冯红霞, 刘宇, 王文亲, 等. 山桐子油适度精炼温度优化及其对品质及货架期的影响[J]. 中国粮油学报, 2024, 39(10): 158–165.
FENG HX, LIU Y, WANG WQ, *et al*. Optimization of moderate refining temperature for idesia polycarpa maxim oil and its effects on quality and shelf life [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2024, 39(10): 158–165.

[57] EL-BELTAGI HS, MARAEI RW, EL-ANSARY AE, *et al*. Characterizing the bioactive ingredients in sesame oil affected by multiple roasting methods [J]. Foods, 2022, 11(15): 2261.

[58] 王萍, 张银波, 江木兰. 多不饱和脂肪酸的研究进展[J]. 中国油脂, 2008, 33(12): 42–46.
WANG P, ZHANG YB, JIANG ML. Research advance in polyunsaturated fatty acid [J]. China Oils and Fats, 2008, 33(12): 42–46.

[59] MARCINKOWSKI D, BOCHNIAK M, WEREŃSKA M, *et al*. The influence of storage conditions of cold-pressed rapeseed oil on its quality parameters [J]. Applied Sciences, 2023, 13(21): 11746.

[60] 马艺方, 蒋晴, 程恒光, 等. 10 种小宗植物油的脂肪酸组成及氧化稳定性[J]. 食品与生物技术学报, 2022, 41(6): 51–59.
MA YF, JIANG Q, CHENG HG, *et al*. Composition and oxidative stability of fatty acids in ten small trade vegetable oils [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2022, 41(6): 51–59.

[61] 陈艳萍, 阿丽雅, 刘源. 油脂的风味及感知[J]. 食品与生物技术学报, 2022, 41(6): 13–20.
CHEN YP, A LY, LIU Y. Flavor and sensory perception of oil and fat [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2022, 41(6): 13–20.

[62] NIU Z, ZHU Z, ZHOU J, *et al*. Effect of roasting on the chemical composition and oxidative stability of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) seed oil [J]. Foods, 2024, 13(11): 1682.

[63] WU L, XUE W, SHEN X, *et al*. Effects of microwave-assisted enzymatic treatment on the quality characteristics of sunflower seed oil: A comprehensive investigation based on lipidomics and volatile flavor compound profiling [J]. Food Chemistry, 2025, 491: 145217.

[64] 鞠阳. 微波处理对油料结构及油脂品质和风味的影响[D]. 郑州: 河南工业大学: 2015.
JU Y. Influence of microwave treatment on the structure of the oilseeds and the oil's quality and flavor [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2015.

[65] MOHAMMADI MA, SAFAVIZADEH V, YOUSEFI M, *et al*. A short review of supercritical fluid extraction of plant extracts [J]. Food Measure, 2024(18): 3651–3664.

[66] ISLAM F, IMRAN A, NOSHEEN F, *et al*. Functional roles and novel tools for improving-oxidative stability of polyunsaturated fatty acids: A comprehensive review [J]. Food Science & Nutrition, 2023, 11(6): 2471–2482.

[67] WOLFF J, COBER MP, HUFF KA. Essential fatty acid deficiency in parenteral nutrition: Historical perspective and modern solutions, a narrative review [J]. Nutrition in Clinical Practice, 2025, 40(2): 350–367.

[68] 彭雅丽, 彭思敏, 申超群. 我国 24 种植物油脂肪酸组成比较分析与评价[J]. 农产品加工, 2023(9): 56–59.
PENG YL, PENG SM, SHEN CQ. Comparison and evaluation of fatty acid composition of 24 plant oils in China [J]. Agricultural Products Processing, 2023(9): 56–59.

[69] 吴晶晶, 郎春秀, 王伏林, 等. 我国食用植物油的生产开发现状及其脂肪酸组成改良进展[J]. 中国油脂, 2020, 45(5): 4–10.
WU JJ, LANG CX, WANG FL, *et al*. Production and development status of edible vegetable oils and improvement progresses of their fatty acid compositions in China [J]. China Oils and Fats, 2020, 45(5): 4–10.

[70] XIANG P, ZHANG Z, WU L, *et al*. Effect of thermal pretreatments on the quality attributes and irradiation markers of sesame oil extracted from sesame seeds without and with gamma irradiation [J]. Food Chemistry, 2025, 463: 141401.

[71] 周士琦, 周亚西, 闫文杰. 七种籽油新食品原料的研究进展[J]. 食品工业科技, 2022, 43(21): 433–443.
ZHOU SQ, ZHOU YX, YAN WJ. Research progress on new food raw materials for seven seed oils [J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(21): 433–443.

[72] 刘慧敏. 不同植物油微量成分与抗氧化能力的相关性研究[D]. 无锡: 江南大学, 2015.
LIU HM. Study on the minor components in different vegetable oils and their relation with antioxidant capacity [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2015.

[73] VOON TP, NG MC, NG TY, *et al*. Health effects of various edible vegetable oil: An umbrella review [J]. Advances in nutrition (Bethesda, Md.), 2024, 15(9): 100276.

[74] PETKOVA Z, ANTOVA G, KULINA H, *et al*. Preliminary characterization of glyceride oil content and tocopherol composition in seeds from selected wild plant species of the bulgarian flora [J]. Molecules, 2025, 30(14): 2893.

[75] FAN L, XU J, GUAN X, *et al*. Developing radio frequency pretreatment technology for improving yield and quality of flaxseed oil extractions [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2023, 86: 103363.

[76] 刘乐乐, 潘瑶, 李红艳. 提取方式对茶叶籽油品质的影响及其油凝胶的制备与理化性质表征[J]. 食品工业科技, 2025, 1-18. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030169
LIU LL, PAN Y, LI HY. Effects of extraction methods on tea seed oil quality and physicochemical characterization of prepared oleogels [J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 1-18. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030169

[77] MAGDALENA WW, EWA OL, AGATA G, *et al*. Assessment of the nutritional potential and resistance to oxidation of sea buckthorn and rosehip oils [J]. Applied Science, 2024, 14(5): 1867.

[78] 姬彦羽. 棕榈油热加工过程中品质变化和氧化稳定性研究[D]. 海口: 海南大学, 2017.
JI YY. Study on the quality and oxidation stability of palm oil during heat processing [D]. Haikou: Hainan University, 2017.

[79] LI X, LIU W, XIAO L, *et al*. The application of emerging technologies for the quality and safety evaluation of oilseeds and edible oils [J]. Food Chemistry: X, 2025, 25: 102241.

[80] WANG J, MA X, WU S, *et al*. Comprehensive insights into the detoxification effects of refining process on hazardous PAHs in 13 crude vegetable oils [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2025, 145: 107809.

[81] 刘元法, 孙彦文, 徐勇将. 未来粮油食品科技的发展与挑战[J]. 粮油食品科技, 2023, 31(1): 1–5.
LIU YF, SUN YW, XU YJ. Food science and technology of future cereal and oil: development and challenges [J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2023, 31(1): 1–5.

[82] 姚专, 周政. 对油脂适度加工产业相关技术问题的研究及探讨[J]. 粮食与食品工业, 2020, 27(5): 1–3.
YAO Z, ZHOU Z. Research and discussion on the related technical issues in the oil appropriate processing industry [J]. Cereal & Food Industry, 2020, 27(5): 1–3.

[83] DENG R, GAO J, YI J, *et al*. Could peony seeds oil become a high-quality edible vegetable oil: The nutritional and phytochemistry profiles, extraction, health benefits, safety and value-added-products [J]. Food Research International, 2022, 156: 111200.

[84] XIAO Z, WANG J, HAN L, *et al*. Application of machine vision system in food detection [J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 1–7.

[85] ZHOU S, LI Z, SONG H, *et al*. Recent advances in tea seeds (*Camellia Sinensis* (L.) O. Kuntze): Active ingredients, health effects, and potential applications [J]. Trends in Food Science & Technology, 2023, 141: 104192.

[86] TANG Z, YING R, LV B, *et al*. Flaxseed oil: Extraction, health benefits and products [J]. Quality Assurance and Safety of Crops & Foods, 2021, 13(1): 1–19.

(责任编辑: 蔡世佳　韩晓红)