徐梦婷, 郝艳宾, 齐建勋, 等. 核桃油营养特性及其制备方法研究进展 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(8): 380−387. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023050309

XU Mengting, HAO Yanbin, QI Jianxun, et al. Research Progress on Nutritional Characteristics and Preparation Methods of Walnut Oil[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(8): 380−387. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023050309

· 专题综述 ·

核桃油营养特性及其制备方法研究进展

徐梦婷[1,2], 郝艳宾[2], 齐建勋[2], 张赟齐[2], 丁保淼[1,*], 陈永浩[2,*]

（1.长江大学生命科学学院, 湖北荆州 434025;
2.北京市农林科学院林业果树研究所, 北京 100093）

摘　要: 核桃油是重要的木本粮油，具有较高的营养价值和良好的保健功能活性，但易产生氧化哈败等问题，其化学组成和制备方法对核桃油的氧化稳定性具有重要影响。本文综述了核桃油中脂肪酸、酚类化合物、植物甾醇、角鲨烯等组分的种类、含量及功能作用，并对核桃油的抗炎、抗氧化、抗肿瘤、免疫调节、神经保护等生物活性进行了分析，对常见制备方法和工艺创新的优缺点进行了综述，分析了核桃油化学组成和制备方法对核桃油氧化稳定性的影响，并对核桃油的功能活性、高效制备技术和专用品种加工适宜性等研究方向进行了展望，以期为核桃油产品的开发利用提供参考。

关键词: 核桃油, 化学组成, 功能活性, 制备方法, 氧化稳定性

中图分类号: TS225.1　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2024)08−0380−08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023050309

本文网刊:

Research Progress on Nutritional Characteristics and Preparation Methods of Walnut Oil

XU Mengting[1,2], HAO Yanbin[2], QI Jianxun[2], ZHANG Yunqi[2], DING Baomiao[1,*], CHEN Yonghao[2,*]

（1.School of Life Sciences, Yangtze University, Jingzhou 434025, China;
2.Institute of Forestry and Pomology, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100093, China）

Abstract: Walnut oil is a valuable woody grain oil with high nutritional content and excellent health function activity, but it is susceptible to issues such as oxidative deterioration. The chemical composition and manner of production of walnut oil have a considerable influence on its oxidative stability. The types, content, and functional effects of fatty acids, phenolic compounds, phytosterols, squalene, and other components in walnut oil are discussed in this article. It also investigates walnut oil's anti-inflammatory, antioxidant, antitumor, immunoregulatory, neuroprotective, and other biological activities. It examines the benefits and drawbacks of conventional extraction methods and technical advancements, as well as the influence of walnut oil chemical composition and preparation methods on oxidative stability. In addition, possibilities for walnut oil research directions, such as functional activity, efficient preparation technology, and suitability for processing specific types are created in order to provide a reference for the development and utilization of walnut oil products.

Key words: walnut oil; chemical composition; functional activity; preparation methods; oxidative stability

目前, 我国食用油对外依存度高达 70%, 食用油安全面临严峻挑战[1]。2022 年 2 月国家林草局发布《林草产业发展规划（2021~2025 年）》指出到 2025 年木本油料种植面积达 2.7 亿亩左右, 木本食用油年产量达 250 万吨。据初步统计, 木本食用油产量占国产植物食用油生产总量的 8% 左右, 占全国植物食用油消费量的近 3%。核桃是重要的木本油料, 也是世界上含油量最高的坚果之一, 核桃仁含油量高达

收稿日期: 2023−05−29

基金项目: 新疆维吾尔自治区重点研发计划项目（2022B02048）; 北京市农林科学院科技创新能力建设专项（KJCX20230118）。

作者简介: 徐梦婷（1999−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: 2645386564@qq.com。

*** 通信作者:** 丁保森（1980−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 功能食品, E-mail: bmding@126.com。

陈永浩（1979−）, 男, 博士, 副研究员, 研究方向: 核桃深加工与高值化利用研究, E-mail: cyh2010@126.com。

60%~70%[2]，是大豆的 3~4 倍，花生的 1.5 倍。因此发展以核桃为代表的木本油料，对于缓解我国粮油供需矛盾和进口压力、实施国家粮油安全战略具有重要意义。核桃油具有良好的脂肪酸组成和丰富的植物化学物质，对人体健康有益。目前研究表明，核桃油中多酚类化合物具有抗炎和清除自由基的作用，对心血管疾病、动脉粥样硬化和代谢综合征具有积极的影响[3]。核桃油中磷脂可维护细胞正常代谢，增强细胞活力，防止脑细胞的衰退[4]。因此，核桃油是一种保健价值很高的特种油脂，也是人们日常生活中理想的高级食用油[5]。

核桃油的原料主要包括核桃或泡核桃。目前研究报道了许多提取核桃油的方法，如超临界二氧化碳萃取、溶剂浸提、超声辅助提取、酶辅助提取、索氏提取、液压冷榨等方法[6]。国内外研究表明，核桃油中生物活性成分的类型和含量取决于提取方法。例如，Ahmed 等[7] 研究发现冷榨和索氏提取法获得的核桃油的化学组成含量略有不同，冷榨的油样中脂肪酸和生育酚含量较高。此外，许多研究报告了核桃油的抗氧化作用，并证实核桃油中的多酚类物质发挥了主要作用[8−9]。本文系统总结了核桃油化学组成、生物活性、制备方法、氧化稳定性等方面的最新研究进展，以期为进一步提高核桃油作为功能性食品和医药产品领域的应用价值提供理论参考。

1　核桃油化学组成

核桃油的主要化学组成包括脂肪酸、多酚类、植物甾醇、角鲨烯、维生素和矿物质等物质（表 1）。这些生物活性物质具有潜在的保健价值，如抗氧化、抗肿瘤和降低胆固醇等作用。

1.1　脂肪酸

核桃油最重要的特征之一是它们的脂质组成。脂肪酸是脂类的重要组成部分，是人体重要的能量来源。目前研究报道核桃油中共检测到 525 种脂类，其中甘油三酯和甘油二酯是主要的甘油脂类。而必需脂肪酸，如亚油酸和 α-亚麻酸是甘油三酯和甘油二酯脂肪酸链的主要组成部分[10]。此外，核桃油中含有 5 种常见的脂肪酸组分，包括了棕榈酸、硬脂酸这类饱和脂肪酸以及油酸、亚麻酸和亚油酸这类不饱和脂肪酸，其中不饱和脂肪酸中的多不饱和脂肪酸在碳链上包含两个或多个双键，占总脂肪酸的 66.00%~76.46%[11]。在核桃油中，亚油酸占总脂肪酸的含量最高（51.21%~68.97%）[12]，其次是油酸和亚麻酸，分别占总脂肪含量的 12.56%~26.03%、6.83%~15.01%。此外，核桃油中亚油酸和 α-亚麻酸（ALA）的比例约为 4∶1~6∶1，对心脑血管疾病具有一定的预防作用，能有效降低 II 型糖尿病患者并发症的发生[13]。此

表 1　核桃油化学组成及其功能作用

Table 1　Chemical compositions and functional properties of walnut oil

种类		含量	功能作用
脂肪酸	棕榈酸	3.05%~8.25%	抗病毒、抗炎、镇痛，抑制前列腺癌细胞、乳腺癌症细胞和肝癌细胞增殖和转移[25]
	硬脂酸	1.00%~3.53%	降低心房颤动的风险[26]
	油酸	12.56%~26.03%	软化血管，避免血管硬化、心脑血管类疾病的发生，降低体内胆固醇，抑制肿瘤发生，改善炎症性疾病[26]
	亚油酸	51.21%~68.97%	降低血液中的胆固醇，预防心血管疾病，降低血脂、软化血管、降低血压，促进微循环，防止人体血清胆固醇在血管壁沉积[27]
	亚麻酸	6.83%~15.01%	促进胆固醇的转化和排泄，降低血液黏度，改善血液循环，保持血管弹性，预防动脉硬化和心脑血管疾病，调节血压和胆固醇、防止性功能退化[14]
植物甾醇	总植物甾醇	540.00~1594.07 mg/kg	较强抗炎作用，用于预防治疗冠状动脉粥样硬化类的心脏病，促进新陈代谢、抑制炎症[23]
	菜油甾醇	16.32~142.35 mg/kg	
	豆甾醇	0.25~20.96 mg/kg	
	β-谷甾醇	453.71~1340.76 mg/kg	
	Δ5-燕麦甾醇	16.45~138.98 mg/kg	
	其它少量甾醇	0~28.24 mg/kg	
角鲨烯		2.89~5.21 mg/kg	皮肤润肤剂，降低患某些癌症的风险，抑制肿瘤的形成[28]
生育酚	总生育酚	211.10~850.80 mg/kg	预防和治疗癌症、中枢神经系统、免疫功能和心血管疾病等[29]
	α-生育酚	10.04~136.73 mg/kg	
	β-生育酚	0~8.20 mg/kg	
	γ-生育酚	138.98~603.70 mg/kg	
	δ-生育酚	3.20~106.70 mg/kg	
矿物质	镁	15.90 mg/kg	防止骨骼脱矿，改善偏头痛、阿尔茨海默病、脑血管意外（中风）、高血压、心血管疾病和 II 型糖尿病症状[30]
	锌	32.70 mg/kg	调节基因表达、DNA代谢、染色质结构、细胞增殖、成熟、死亡、免疫反应和抗氧化防御[31]
	磷	45.50 mg/kg	抑制破骨细胞的分化和活性，有助于骨矿化、信号转导和ATP合成[32]
	铜	0.008~0.017 mg/kg	细胞增殖、血管生成和转移的信号通路的中心枢纽，促进心脏健康，维持骨骼，神经和免疫系统功能[33]
	铁	0.17~0.34 mg/kg	输送氧和贮存氧，合成肌红蛋白和很多重要酶类[34]
色素	类胡萝卜素	0.52~7.30 mg/kg	预防衰老、心脑血管疾病和肿瘤，抗癌作用，增强机体的免疫功能[35]
	叶绿素	0.19~12.9 mg/kg	清除自由基，防止自由基对机体过氧化损伤，延缓衰老，体内分解转变成维生素A调节免疫等[36]
褪黑激素		3.54 μg/kg	一种自由基清除剂和抗氧化剂，调节神经、抗癌、抗衰老等活性细胞免受氧化损伤[37]

外，国内外研究表明，α-亚麻酸可通过降低机体的血脂、胆固醇、低密度蛋白胆固醇等含量，抑制血小板凝聚和血栓形成，从而防止动脉粥样硬化及其并发症发生[14]。同时，α-亚麻酸和油酸协同作用可降低食管腺癌细胞的增殖、黏附和迁移能力，对食管癌细胞起到抗癌作用[15]。除此之外，油酸作为典型的单不饱和脂肪酸，可降低体内胆固醇含量，加速新陈代谢，还可通过抑制内质网应激和炎症程序性细胞死亡来预防肝细胞脂毒性。

1.2 酚类化合物

酚类化合物是植物在正常发育过程中合成的次级代谢物，根据其酚基和结构元素的数量可分为四类，分别为黄酮类、芪类、木脂素类和酚酸。其中生育酚、酚酸和类黄酮是酚类化合物的主要类型[16]。核桃油中主要的酚类化合物是生育酚，存在四种形式的生育酚：α、β、γ 和 δ-生育酚。γ-生育酚是核桃油中的主要生育酚形式，含量为 138.98~603.70 mg/kg，占生育酚含量 55% 以上[12]。此外，核桃油中还存在八种酚酸、九种黄酮类化合物和一种二苯乙烯。核桃油中的生育酚含量主要取决于核桃品种，例如，Gao 等[11] 研究发现，铁核桃油中 α-生育酚的含量（36.94~92.40 mg/kg）低于普通核桃油（115.48~144.21 mg/kg），而 δ-生育酚（75.59~88.46 mg/kg）的含量是普通核桃油（20.68~28.22 mg/kg）的 3~4 倍。除此之外生育酚含量还与来源[17]、收获期[18] 和提取方式有关。目前研究表明，提取方式对生育酚含量有直接影响，通过冷榨获得油的总生育酚含量最高，为 851.64 mg/kg，其次是索氏提取法和超声辅助提取法，总生育酚含量分别为 454.97 和 146.31 mg/kg[6]。生育酚作为亲脂性抗氧化剂，具有良好的抗氧化活性和清除自由基的功能，是抑制植物油中脂质氧化的天然抗氧化剂[19]。其中 δ-生育酚的抗氧化能力最强，γ-生育酚的抗氧化能力次之，α-生育酚的抗氧化能力最弱[20]。

1.3 植物甾醇

植物甾醇是具有生理活性的化合物，构成了大部分不可皂化的化学物质。核桃油中总植物甾醇的含量范围为 540.00~1594.07 mg/kg，β-谷甾醇、菜油甾醇和Δ5-燕麦甾醇是核桃油中主要的植物甾醇。其中 β-谷甾醇含量最高，占总植物甾醇含量的 85% 以上[21]。此外，核桃油中还检测到其它少量甾醇，如豆甾醇、胆甾醇、Δ7-燕麦甾醇等（表 1）。国内外研究表明，核桃收获期和提取方式均会对核桃油中植物甾醇含量产生影响。例如，Matthaus 等[18] 研究发现，β-谷甾醇含量随采收期不同产生较大波动，β-谷甾醇含量从第 1 次采收期 4426.4 mg/kg 降至第 5 次采收期 1801 mg/kg。Gao 等[22] 发现，亚临界丁烷萃取获得的植物甾醇含量最高（106.51 mg/100 g），其次是冷榨和己烷萃取获得的植物甾醇含量，分别为 97.34 mg/100 g 和 94.16 mg/100 g。植物甾醇作为植物细胞膜的重要组成成分，可用于治疗炎症性疾病，如类风湿性关节炎、炎症性肠病、多发性硬化症、哮喘和心血管疾病[23]。其中，β-谷甾醇作为一种有效的细胞凋亡促进剂，可成为缓解某些癌症如结肠癌、乳腺癌和前列腺癌的良好候选药物[24]。

1.4 其它化合物

角鲨烯是人体生物合成维生素 D、类固醇激素和胆固醇的三萜前体[38]，存在于许多食用植物油的不皂化物中，对皮肤有很好的亲和力，可用作皮肤润肤剂。核桃油中角鲨烯含量范围为 2.89~5.21 mg/kg，可与多不饱和脂肪酸协同作用，保持皮肤弹性。目前研究表明，角鲨烯具有多种生理功能，可降低患各种癌症的风险、降低血清胆固醇水平和增强免疫反应[28]。类胡萝卜素是存在于植物和其它光合生物叶绿体中的有机色素，有助于预防慢性病、癌症、糖尿病和心血管疾病。其中 β-胡萝卜素可作为抗氧化剂清除自由基，防止脂质氧化[39]。核桃油中类胡萝卜素的含量为 0.52~7.30 mg/kg，可与生育酚协同作用增强抗氧化能力。除此之外，核桃油还含有多种必需矿物质，磷、锌和镁是核桃油中的主要矿物质，这些矿物质对心血管和神经系统健康具有积极作用。

2 核桃油生物活性

核桃油具有显著的生物活性，如抗炎、抗氧化、抗肿瘤、免疫调节、神经保护和心脏保护活性。大量研究证实核桃油具有显著的抗炎作用，主要通过抑制炎症途径的活化，调节炎症相关基因和蛋白质的表达水平来提高抗炎活性。例如，Miao 等[40] 研究发现，核桃油通过降低血清肿瘤坏死因子 α（TNF-α）、白细胞介素-6（IL-6）、白细胞介素-1β（IL-1β）的表达水平，抑制过度凋亡和激活脂多糖，缓解脂多糖诱导的小鼠肠道上皮细胞损伤。Miao 等[41] 进一步研究发现，核桃油可通过降低酒精性肝病小鼠肝脏中的库普弗细胞标记蛋白（F4/80）的表达水平，抑制酒精性肝病小鼠 toll 样受体 4（TLR4）/核转录因子（NF-κB）信号通路中关键基因的表达水平来对抗肝脏炎症损伤。

此外，核桃油还可抑制促炎因子的释放，例如，核桃油可通过抑制 NLRP3 炎症小体的激活和相关的促炎细胞因子的产生，从而对葡聚糖硫酸钠诱导的小鼠结肠炎发挥抗炎作用[42]。进一步的研究表明，核桃油还可以通过调节核转录因子 NF-κB 和表皮生长因子（EGF）途径减少炎症细胞的数量[43]。

核桃油富含酚类等活性抗氧化成分，可通过调节抗氧化指数、酶活性和相关基因表达来减少氧化应激损伤，提高抗氧化能力。此外，核桃油在各种人类癌细胞中显示出显著的抗肿瘤活性，例如乳腺癌细胞 MCF-7、食管癌细胞 OE19、前列腺肿瘤 PC3 细胞、肾癌和口腔癌细胞等[44]。研究表明，核桃油通过调节癌细胞相关通路基因，抑制癌细胞的粘附、迁移和克隆增生的能力发挥抗肿瘤作用。例如，Batirel 等[15] 发现，短期高剂量服用核桃油可降低食管癌细胞的细胞活力和转移能力，同时通过抑制核转录因

子 NF-κB 表达，诱导 G0/G1 期细胞坏死和细胞周期停滞而表现出抗癌作用。Kim 等[45] 发现，核桃油通过抑制聚集在 AKT 上的转录激活因子 3（STAT3）和血浆胰岛素样生长因子 1（IGF-1）信号通路来抑制前列腺肿瘤细胞的生长。

另外，核桃油还具有神经保护活性，可以抑制大脑中的氧化应激，防止东莨菪碱诱导的海马 CA1 和 CA3 神经元的组织学变化，并通过抑制乙酰胆碱酯酶增强胆碱乙酰转移酶来预防脑胆碱能功能损害[46]。除了上述生物活性外，核桃油在调节肠道菌群方面具有潜在作用。目前研究发现，核桃油对肠道显示出很强的益生菌作用，可使肠黏膜中绒毛高度和隐窝深度比值显著增加，肠道菌群中益生菌-乳酸菌相对丰度增加，致病菌幽门螺杆菌相对丰度降低[47]。因此，核桃油在医药和功能食品领域均具有良好的应用前景。

3　核桃油制备方法

机械压榨和溶剂浸提是传统制备核桃油的方法。由于目前油脂工业中存在使用机械压榨副产物残油率高，以及使用溶剂浸提有毒有机溶剂残留等问题，促使水酶法提取、超临界流体萃取、亚临界流体萃取、微波辅助和超声波辅助提取等新技术逐步应用于核桃油的提取过程中[48]。在保持核桃油品质安全、提高核桃油氧化稳定性的同时，降低能源消耗、提高制备效率是核桃油制备方法不断改进提升的方向。

3.1　机械压榨

冷榨和热榨是两种常见类型的机械压榨方法。冷榨是一种比其它榨油方法能耗更低、对环境更有利的制备方法，一般是在不烘烤核桃仁的情况下，在低于 60 ℃ 的温度下通过液压机械压榨方式制备核桃油。但是目前冷榨技术存在连续性低、饼粕残油率高的缺点。而热榨是指将核桃仁先进行焙炒再采用螺旋压榨的方法，焙炒可以提高核桃油出油率、增加核桃油香气。冷榨优点在于不需要加热，使许多对温度敏感的酚类物质保留下来，保证了核桃油的质量和营养价值[49]，核桃蛋白在低温下未发生变性，可以再利用。与之相比，热榨由于焙炒和压榨过程中榨膛的高温使得油饼中蛋白质发生变性，饼粕的综合利用率降低。目前，为了实现效益最大化，一些企业通常以冷榨制备核桃油为主线，通过对核桃饼粕的再利用降低生产成本，实现核桃油制备加工的增值利用。

3.2　溶剂浸提

溶剂浸提是将油料中的油脂溶解在溶剂中，然后通过蒸馏从溶剂中回收油脂的方法。由于溶剂浸提具有低能源成本的优势，广泛应用于工业上从植物原料中提取油脂。溶剂浸提中常用溶剂有正己烷、乙醚、石油醚和乙醇。而溶剂的选择一般基于溶解度、溶剂-溶质比、油粘度和溶剂极性以及成本和市场可行性等[50]。乙醇一般被认为是安全的食品油萃取剂，但其浸提效率低于常规的正己烷溶剂。而正己烷是一种石油衍生的易燃有毒溶剂，对人类健康和环境有害。目前研究表明，用乙酸乙酯作溶剂浸提的核桃油有更高的脂质得率（68.32%），而用丙酮作溶剂浸提的核桃油比乙酸乙酯提取的核桃油具有更高的氧化稳定性指数和自由基清除能力[51]。

3.3　水酶法提取

水酶法提取基于机械粉碎，利用酶降解由脂蛋白、脂多糖和细胞壁组成的复合物，释放油脂。水酶法提取具有操作简单、条件温和等优点，是一种安全无污染的榨油方法，能较好地保证油品质量[52]。在水酶法提取植物油的过程中，纤维素酶、半纤维素酶、葡萄糖苷酶、果胶酶和中性蛋白酶等适当酶的存在会破坏细胞壁，从而增强油脂的释放[53]。然而由于酶的成本较高，同时受酶的类型、pH、温度和时间等因素的共同影响，水酶法提取的大规模工业应用仍然受到限制[54]。为了克服水酶法提取的局限性，通常结合超声波协同作用提高油的可萃取性。例如，陈炼红等[55] 采用超声波协同水酶法提取巴塘核桃油发现，在 pH 为 7，酶解温度 45 ℃，酶解时间 3.5 h，加酶量 1.4% 条件下，巴塘核桃油提取率高达 78.91%。汪锦等[56] 采用超声预处理协同水酶法从薄壳山核桃提取油，发现提取率高达 73.90%，油中总酚和油酸含量显著高于超临界流体萃取和冷榨提取的油。因此，结合超声波可有效改善水酶法提取的局限性。

3.4　超临界和亚临界流体萃取

超临界流体萃取是利用温度和压力高于临界点的流体作为溶剂在超临界状态下分离非极性物质的萃取方法。与有机溶剂相比，超临界流体具有更优越的输运性能和更高的基质穿透能力，因此可以更快、更有效地提取油脂[57]。二氧化碳、乙醇、丙烷、乙烷、丁烷和水一般可用作超临界流体溶剂，其中二氧化碳是最常用的流体溶剂。研究发现，超临界二氧化碳萃取得到的核桃油比正己烷萃取得到的核桃油清澈，表明超临界二氧化碳萃取具有一定的精炼效果。此外，还发现超临界二氧化碳萃取获得的核桃油与提取过程中的压力、温度、颗粒大小密切相关，表现为核桃油的产量与提取过程中的压力成正比，与温度成反比，并随着粒径的增加逐渐达到最佳值。

亚临界流体萃取是一种使用中等温度和高压将溶剂保持在高于大气沸点的新型萃取技术。与传统制备方法相比，亚临界流体萃取具有提取时间更短、效率和安全性更高、提取温度更低、实用性和总投资成本更低等优点。正丙烷、正丁烷等溶剂可在较低的临界压力和温度下使用，并对亲脂性化合物具有极好的溶解性常被用作亚临界流体。例如，马燕等[58] 使用亚临界正丁烷流体萃取新疆薄皮核桃温 185，在萃取压力 0.5 MPa、温度 45 °C、时间 40 min 的条件下，提取率高达 65.11%。张庆等[59] 利用亚临界正丁烷流体萃取核桃油，发现在萃取时间 40 min、温度

50 ℃、料液比 0.2 g/mL 条件下，核桃油提取率达到 64.01%。

3.5 超声波和微波辅助提取

超声波是一种超越人类听觉的特殊声波，频率范围为 20~100 MHz。超声波产生的高频振动以及空化作用，破坏了细胞壁，有利于溶质向溶剂的传质机制，促进油释放到溶剂中[60]。与传统方法相比，超声波辅助提取可促进亲脂性抗氧化剂和色素的提取，具有提取率高、溶剂用量少、提取时间短等优点[61]。目前研究表明，超声波辅助提取油的效率与所使用的溶剂选择有关。Ghasemi 等[53]在超声时间 47.37 min，纤维素酶浓度 2.00%，孵育时间 110.91 min 条件下使用不同溶剂（水和正己烷）超声波辅助提取核桃油，发现使用正己烷溶剂比使用水溶剂的提取率提高了 132.66%。此外，超声波辅助提取核桃油能明显提高提取率，如在以正己烷为溶剂浸提巴塘核桃油的过程中应用超声波，发现提取率提高到 58.90%[62]。

微波辅助提取是一种将微波辐照与有机溶剂萃取相结合的强化萃取的方法。微波频率范围为 300 MHz~300 GHz，通过微波辐射使油籽的细胞膜破裂，形成永久性孔隙，造成溶剂扩散到油籽中，从而将油脂从油籽释放到溶剂中，使得提取效率提高[63]。微波辅助提取技术具有提高产量和酚类化合物含量的优点，但是也容易引起不均匀的加热。为了克服微波辅助提取的局限性，通常结合超声波协同作用提高油的提取效率。Liu 等[64]采用超声波和微波辅助提取相结合的方法提取满洲核桃油，发现提取率高达 59.30%，分别是超声波辅助提取和索氏提取的 1.85 倍和 1.24 倍。

4 核桃油的氧化稳定性

由于核桃油的脂肪酸组成中多不饱和脂肪酸含量高，易哈败变质，因而核桃油的氧化稳定性成为核桃油生产中关注的热点。核桃油氧化稳定性作为评价油脂质量的重要参数，主要取决于油中多酚和生育酚含量。目前研究发现多酚主要通过抑制核桃油的次级氧化提高核桃油的氧化稳定性[65]。而生育酚主要通过有效清除脂质过氧化基，并产生更稳定的生育酚自由基，从而增加核桃油的氧化稳定性。核桃油的一些次要成分如类胡萝卜素则通过捕获自由基来防止氧化。

此外，目前研究发现，不同溶剂萃取方法主要通过影响核桃油中抗氧化物质含量进而影响核桃油的氧化稳定性，如丙酮提取制备的核桃油中植物甾醇含量相对较低，但多酚含量较高，与正己烷、乙酸乙酯、石油醚或氯仿/甲醇萃取的核桃油相比具有更好的抗氧化能力[51]。此外，氯仿/甲醇萃取的油在加速自氧化和光氧化研究中都比己烷萃取的油更稳定[66]。同时一些研究表明，制备方法也会对核桃油的氧化稳定性产生影响。例如，与冷压萃取、热压萃取、亚临界丁烷萃取和超临界二氧化碳萃取相比，正己烷萃取的核桃油氧化稳定性更好[67]。

另外，核桃油的氧化稳定性主要通过过氧化值、酸价和茴香胺值等来体现。过氧化值代表核桃油和脂肪酸的氧化程度，可用于判断油的质量和变质程度，通常用来评估核桃油的不同氧化阶段，且过氧化值越高，油的氧化程度越大。如 Nosenko 等[68]通过测定过氧化值确定了核桃油氧化的诱导期（定义为过氧化物指数增加的开始）和自寿命（过氧化值达到 10 mequiv O/kg 油的时期），分别为 56 d 和 90 d。此外，由于油脂氧化是一个动态过程，为了更加直接评估油脂酸败，可通过加速氧化法来确定脂质的相对氧化稳定性。其中 Rancimat 方法作为一种加速氧化法广泛用于食用油，主要通过定义诱导期（二次氧化产物出现的时间）来测定油的抗氧化性。

5 结论与展望

本文综述了核桃油的化学组成、生物活性、制备方法和氧化稳定性。核桃油中主要化学组成包括脂肪酸、生育酚、植物甾醇、角鲨烯、类胡萝卜素和矿物质，对核桃油发挥抗炎、抗氧化、抗肿瘤、神经保护和调节肠道菌群等方面起着至关的重要作用。同时在核桃油加工过程中，制油方法的选择是最关键的步骤之一，适宜的制油方法可以最大限度地减少生物活性物质的损失，提高油的品质和氧化稳定性。同时氧化稳定性是反映核桃油品质的重要指标，关系到核桃油的品质和货架期。通过对提取油脂的常规方法（溶剂浸提和机械压榨）和改进方法（水酶法提取、超临界和亚临界流体萃取、超声波、微波辅助提取）的进展进行了综述，以期为提高出油率、缩短出油时间，并最大限度地减少油脂的劣变，保证油品品质提供参考。

在食用植物油短缺，核桃油作为重要木本粮油的大背景下，核桃油的研究方向将进一步扩大：a. 对核桃油化学组分的功能活性开展进一步研究，并为开发相关功能活性的核桃油产品奠定理论基础；b. 研发智能、高效制油工艺技术，如在液压冷榨萃取工艺中，如何提高其生产连续化水平已成为生产制备核桃油重点关注的方向；c. 核桃油的高品质离不开原料的高品质和专用品种的选用，开展核桃油加工适宜性评价、筛选适宜加工核桃油的专用品种，也是未来核桃油加工重点关注的研究方向。

© The Author(s) 2024. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] 曹娜, 夏飞. 我国核桃油产业创新发展机遇与路径[J/OL]. 中国油脂, 2024: 1−10[2024-01-17] doi:10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.230174. [CAO N, XIA F. Opportunities and paths for innovation-driven development of walnut oil industry in China[J/OL].

China Oils and Fats, 2023: 1−10. [2024-01-17]. doi: 10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.230174.]
[2] GENG S X, NING D, MA T, et al. Comprehensive analysis of the components of walnut kernel (*Juglans regia* L.) in China[J]. Journal of Food Quality, 2021, 2021: 9302181.
[3] FREGAPANE G, GUISANTES-BATAN E, OJEDA-AMADOR R M, et al. Development of functional edible oils enriched with pistachio and walnut phenolic extracts[J]. Food Chemistry, 2020, 310: 125917.
[4] LI H K, HAN J J, ZHAO Z K, et al. Roasting treatments affect oil extraction rate, fatty acids, oxidative stability, antioxidant activity, and flavor of walnut oil[J]. Frontiers in Nutrition, 2023, 9: 1077081.
[5] 徐梦婷, 李俊, 郝艳宾, 等. 核桃膳食化-从膳食结构需求角度浅析核桃仁全利用[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(16): 362−368.
[XU M T, LI J, HAO Y B, et al. Dietary nutrition of walnuts-Analysis of the full utilization of walnut kernels from the perspective of dietary structure demand[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(16): 362−368.]
[6] ELOUAFY Y, EL YADINI A, EL MOUDDEN H, et al. Influence of the extraction method on the quality and chemical composition of walnut (*Juglans regia* L.) oil[J]. Molecules, 2022, 27(22): 7681−7692.
[7] AHMED I A M, AL-JUHAIMI F Y, ÖZCAN M M, et al. Effects of cold-press and Soxhlet extraction systems on antioxidant activity, total phenol contents, fatty acids, and tocopherol contents of walnut kernel oils[J]. Journal of Oleo Science, 2019, 68(2): 167−173.
[8] JAHANBAN-ESFAHLAN A, OSTADRAHIMI A, TABIBI-AZAR M, et al. A comparative review on the extraction, antioxidant content and antioxidant potential of different parts of walnut (*Juglans regia* L.) fruit and tree[J]. Molecules, 2019, 24(11): 2133−2172.
[9] SÁNCHEZ-GONZÁLEZ C, CIUDAD C J, NOÉ V, et al. Health benefits of walnut polyphenols: An exploration beyond their lipid profile[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2017, 57(16): 3373−3383.
[10] YAN S X, WANG X S, YANG C K, et al. Insights into walnut lipid metabolism from metabolome and transcriptome analysis [J]. Frontiers in Genetics, 2021, 12: 715731.
[11] GAO P, LIU R J, JIN Q Z, et al. Comparative study of chemical compositions and antioxidant capacities of oils obtained from two species of walnut: Juglans regia and Juglans sigillata[J]. Food Chemistry, 2019, 279: 279−287.
[12] GAO P, JIN J, LIU R J, et al. Chemical compositions of walnut (*Juglans regia* L.) oils from different cultivated regions in China[J]. Journal of the American Oil Chemists Society, 2018, 95(7): 825−834.
[13] WANG W Q, WEN H, JIN Q, et al. Comparative transcriptome analysis on candidate genes involved in lipid biosynthesis of developing kernels for three walnut cultivars in Xinjiang[J]. Food Science and Human Wellness, 2022, 11(5): 1201−1214.
[14] LIU P, LIU M, LIU X G, et al. Effect of alpha-linolenic acid (ALA) on proliferation of probiotics and its adhesion to colonic epithelial cells[J]. Food Science and Technology, 2022, 42: 71921−71927.
[15] BATIREL S, YILMAZ A M, SAHIN A, et al. Antitumor and antimetastatic effects of walnut oil in esophageal adenocarcinoma cells[J]. Clinical Nutrition, 2017, 37(6): 2166−2171.
[16] SONG H Y, CONG Z F, WANG C L, et al. Research progress on walnut oil: Bioactive compounds, health benefits, extraction methods, and medicinal uses[J]. Journal of Food Biochemistry, 2022, 46(12): 14504−14526.
[17] MITSIKARIS P D, KOKOKIRIS L, PRITSA A, et al. Investigating the tocopherol contents of walnut seed oils produced in different European countries analyzed by HPLC-UV: A comparative study on the basis of geographical origin[J]. Foods, 2022, 11(22): 3719−3728.
[18] MATTHAUS B, OZCAN M M, AL JUHAIMI F, et al. Effect of the harvest time on oil yield, Fatty acid, Tocopherol and sterol contents of developing almond and walnut kernels[J]. Journal of Oleo Science, 2018, 67(1): 39−45.
[19] NING N, HU B, BAI C Y, et al. Influence of two-stage harvesting on the properties of cold-pressed rapeseed (*Brassica napus* L.) oils[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2023, 22(1): 265−278.
[20] YANG R N, ZHANG L X, LI P W, et al. A review of chemical composition and nutritional properties of minor vegetable oils in China[J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 74: 26−32.
[21] OLIVEIRA R, FÁTIMA R M, GABRIELA B M. Characterization and supercritical carbon dioxide extraction of walnut oil[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2002, 79(3): 225−230.
[22] GAO P, LIU R J, JIN Q Z, et al. Key chemical composition of walnut (*Juglans regia*. L) oils generated with different processing methods and their cholesterol-lowering effects in HepG2 cells[J]. Food Bioscience, 2022, 45: 101436.
[23] CHENG Q, ZHANG Y J, LIN Q, et al. Study on the antioxidant activity of beta-sitosterol and stigmasterol from Sacha Inchi oil and Prinsepia oil added to walnut oil[J]. Food Science and Technology, 2022, 42: 69522−69534.
[24] VU D C, LEI Z T, SUMNER L W, et al. Identification and quantification of phytosterols in black walnut kernels[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2019, 75: 61−69.
[25] ZHU S, JIAO W H, XU Y L, et al. Palmitic acid inhibits prostate cancer cell proliferation and metastasis by suppressing the PI3K/Akt pathway[J]. Life Sciences, 2021, 286: 120046.
[26] ZHOU X J, LUO H Y, YU B L, et al. Genetic dissection of fatty acid components in the Chinese peanut (*Arachis hypogaea* L.) minicore collection under multi-environments[J]. PLoS One, 2022, 17(12): 0279650.
[27] AZEMI N A, AZEMI A K, ABU-BAKAR L, et al. Effect of linoleic acid on cholesterol levels in a high-fat diet-induced hypercholesterolemia rat model[J]. Metabolites, 2022, 13(1): 53−67.
[28] SHUAI X X, DAI T T, CHEN M S, et al. Characterization of lipid compositions, minor components and antioxidant capacities in macadamia (*Macadamia integrifolia*) oil from four major areas in China[J]. Food Bioscience, 2022, 50: 102009.
[29] RANARD K M, ERDMAN J W. Effects of dietary RRR alpha-tocopherol vs all-racemic alpha-tocopherol on health outcomes [J]. Nutrition Reviews, 2018, 76(3): 141−153.
[30] VOLPE S L. Magnesium in disease prevention and overall health[J]. Advances in Nutrition, 2013, 4(3): 378−383.
[31] COSTA M I, SARMENTO-RIBEIRO A B, GONCALVES A C. Zinc: From biological functions to therapeutic potential[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2023, 24(5): 4822−4847.
[32] CIOSEK Z, KOT K, KOSIK-BOGACKA D, et al. The effects of calcium, magnesium, phosphorus, fluoride, and lead on bone

tissue[J]. Biomolecules, 2021, 11(4): 506−531.
[33] WANG Z, JIN D K, ZHOU S S, et al. Regulatory roles of copper metabolism and cuproptosis in human cancers[J]. Frontiers in Oncology, 2023, 13: 1123420.
[34] YANG J C, LI Q M, FENG Y, et al. Irondeficiency and iron deficiency anemia: potential risk factors in bone loss[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2023, 24(8): 6891−6910.
[35] ABDALLAH I B, TLILI N, MARTINEZ-FORCE E, et al. Content of carotenoids, tocopherols, sterols, triterpenic and aliphatic alcohols, and volatile compounds in six walnuts (*Juglans regia* L.) varieties[J]. Food Chemistry, 2015, 173: 972−978.
[36] VIERA I, HERRERA M, ROCA M. *In vitro* bioaccessibility protocol for chlorophylls[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2021, 69(31): 8777−8786.
[37] REITER R J, MANCHESTER L C, TAN D X. Melatonin in walnuts: Influence on levels of melatonin and total antioxidant capacity of blood[J]. Nutrition, 2005, 21(9): 920−924.
[38] SHUAI X X, DAI T T, CHEN M S, et al. Comparative study of chemical compositions and antioxidant capacities of oils obtained from 15 macadamia (*Macadamia integrifolia*) cultivars in China [J]. Foods, 2021, 10(5): 1031−1044.
[39] YEBOAH A, YING S, LU J N, et al. Castor oil (*Ricinus communis*): a review on the chemical composition and physicochemical properties[J]. Food Science and Technology, 2021, 41: 399−413.
[40] MIAO F J, SHAN C L, SHAH S A H, et al. The protective effect of walnut oil on lipopolysaccharide-induced acute intestinal injury in mice[J]. Food Science & Nutrition, 2020, 9(2): 711−718.
[41] MIAO F J, SHAN C L, YANG W, et al. Protective effect of walnut oil on alcoholic liver disease in mice[J]. Pakistan Journal of Zoology, 2022, 54(3): 1123−1131.
[42] MIAO F J, SHAN C L, MA T, et al. Walnut oil alleviates DSS-induced colitis in mice by inhibiting NLRP3 inflammasome activation and regulating gut microbiota[J]. Microbial Pathogenesis, 2021, 154: 104866.
[43] MA Q, WU Y S, SHEN J Y, et al. Walnut oil promotes healing of wounds and skin defects in rats via regulating the NF-κB pathway[J]. Pharmazie. 2018, 73(12): 721-724.
[44] 缪福俊, 耿树香, 肖良俊, 等. 核桃油生物活性研究进展[J]. 中国油脂, 2021, 46(6): 85−88. [MIAO F J, GENG S X, XIAO L J, et al. Progress on bioactivity of walnut oil[J]. China Oils and Fats, 2021, 46(6): 85−88.]
[45] KIM H, YOKOYAMA W, DAVIS P A. TRAMP prostate tumor growth is slowed by walnut diets through altered IGF-1 levels, energy pathways, and cholesterol metabolism[J]. Journal of Medicinal Food, 2014, 17(12): 1281−1286.
[46] LIAO J Q, NAI Y F, FENG L, et al. Walnut oil prevents scopolamine-induced memory dysfunction in a mouse model[J]. Molecules, 2020, 25(7): 1630−1640.
[47] MIAO F J, SHAN C L, SHAH S A H, et al. Effect of walnut (*Juglans sigillata*) oil on intestinal antioxidant, anti-inflammatory, immunity, and gut microbiota modulation in mice[J]. Journal of Food Biochemistry, 2020, 45(1): 13567−13578.
[48] PAWAR K R, NEMA P K. Apricot kernel characterization, oil extraction, and its utilization: A review[J]. Food Science and Biotechnology, 2023, 32(3): 249−263.
[49] MASOODI L, GULL A, MASOODI F A, et al. An overview on traditional vs. green technology of extraction methods for producing high quality walnut oil[J]. Agronomy-Basel, 2022, 12(10): 2258−2275.
[50] NDE D B, FONCHA A C. Optimization methods for the extraction of vegetable oils: A review[J]. Processes, 2020, 8(2): 209−229.
[51] GAO P, LIU R J, JIN Q Z, et al. Comparison of solvents for extraction of walnut oils: Lipid yield, lipid compositions, minor-component content, and antioxidant capacity[J]. LWT, 2019, 110: 346−352.
[52] QIN H W, HU Y Y, CHENG D D, et al. Optimization of an aqueous enzymatic method and supercritical carbon dioxide extraction for Paeonia suffruticosa Andr. seed oil production using Response Surface Methodology (RSM)[J]. Agronomy-Basel, 2023, 13(2): 555−568.
[53] GHASEMI Y Z, TAGHIAN D S. Optimization of ultrasound-assisted enzymatic extraction of walnut kernel oil using response surface methodology[J]. Journal of Food Process Engineering, 2018, 41(5): 12696−12713.
[54] PENG L, YE Q, LIU X Y, et al. Optimization of aqueous enzymatic method for Camellia sinensis oil extraction and reuse of enzymes in the process[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2018, 128(6): 716−722.
[55] 陈炼红, 张岩, 王琳琳, 等. 超声波辅助水酶法提取巴塘核桃油工艺优化及其氧化稳定性[J]. 食品工业科技, 2019, 40(8): 158−162,169. [CHEN L H, ZHANG Y, WANG L L, et al. Ultrasonic assisted aqueous enzymatic extraction of Batang walnut oil and its oxidation stability[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(8): 158−162,169.]
[56] 汪锦, 应瑞峰, 王耀松, 等. 超声-水酶法对高品质薄壳山核桃油释放的影响[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(18): 177−182. [WANG J, YING R F, WANG Y S, et al. Effect of ultrasonic-assisted enzymatic extraction on the release of high-quality pecan nuts oil[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(18): 177−182.]
[57] FRATERRIGO G S, TOMMASI T, FINO D. A short review of green extraction technologies for rice bran oil[J]. Biomass Conversion and Biorefinery, 2020, 11(2): 569−587.
[58] 马燕, 张健, 许铭强, 等. 亚临界丁烷萃取核桃油工艺及脂肪酸成分分析研究[J]. 新疆农业科学, 2015, 52(6): 1077−1081. [MA Y, ZHANG J, XU M Q, et al. Research on the processing optimization and fatty acid composition analysis of walnut oil by subcritical butane[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2015, 52(6): 1077−1081.]
[59] 张庆, 袁源, 邓扬龙, 等. 响应面优化亚临界萃取核桃油工艺及品质评价[J]. 食品工业, 2019, 40(9): 44−47. [ZHANG Q, YUAN Y, DENG Y L, et al. Optimization of subcritical extraction of walnut oil by response surface and quality evaluation[J]. The Food Industry, 2019, 40(9): 44−47.]
[60] ZHANG Q A, SHI F F, YAO J L, et al. Effects of ultrasound irradiation on the properties of apricot kernels during accelerated debitterizing[J]. RSC Advances, 2020, 10(18): 10624−10633.
[61] THILAKARATHNA R C N, SIOW L F, TANG T K, et al. A review on application of ultrasound and ultrasound assisted technology for seed oil extraction[J]. Journal of Food Science and Technology, 2022, 60(4): 1222−1236.
[62] 王翔宇, 罗珍岑, 李键, 等. 超声波辅助溶剂浸出法提取巴塘核桃油工艺优化及脂肪酸组分分析[J]. 食品工业科技, 2018, 39(11): 173−176. [WANG X Y, LUO Z C, LI J, et al. Optimization of the oil extraction process of ultrasound assisted solvent leaching method applied for Batang walnuts and analysis of its fatty oil

compositions[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(11): 173−176.]

[63] BAGADE S B, PATIL M. Recent advances in microwave assisted extraction of bioactive compounds from complex herbal samples: A review[J]. Critical Reviews in Analytical Chemistry, 2019, 51(2): 138−149.

[64] LIU C, NI H Y, CHANG Y H, et al. Effects of ultrasonic-microwave assisted extraction with green solvent on the chemical constituents, antioxidant, and hypolipidemic activities of Manchurian walnut oil[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(7): 16603−16613.

[65] 朱振宝, 刘梦颖, 易建华. 核桃油微量组分对其氧化稳定性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2014, 40(11): 70−75. [ZHU Z B, LIU M Y, YI J H, et al. The influence of trace compositional on oxidative stability of walnut oil[J]. Food and Fermentation Industries, 2014, 40(11): 70−75.]

[66] RÉBUFA C, ARTAUD J, LE DRÉAU Y. Walnut (*Juglans regia* L.) oil chemical composition depending on variety, locality, extraction process and storage conditions: A comprehensive review[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2022, 110: 104534.

[67] GAO P, LIU R J, JIN Q Z, et al. Effects of processing methods on the chemical composition and antioxidant capacity of walnut (*Juglans regia* L.) oil[J]. LWT, 2021, 135: 109958.

[68] NOSENKO T, KOROLUK T, USATUK S, et al. Comparative study of the biological value and oxidative stability of walnut and pumpkin-seed oils[J]. Food Science and Technology, 2019, 13(1): 60−65.