

核桃油加工及抗氧化技术研究进展

徐影影^{1,2}, 苗永军³, 赵文革⁴, 杜建⁴, 郑畅¹, 刘昌盛¹, 陈洪建⁵, 邓乾春¹

(1. 中国农业科学院油料作物研究所, 武汉 430062; 2. 武汉轻工大学食品科学与工程学院, 武汉 430023;

3. 湖南亚美茶油股份有限公司, 湖南 株洲 412300; 4. 阿克苏浙疆果业有限公司,

新疆 阿克苏 843000; 5. 湖北大学健康科学与工程学院, 武汉 430062)

摘要:核桃油营养丰富, 富含不饱和脂肪酸及多种对人体有益的微量营养物质, 但其稳定性差, 在加工时易氧化酸败, 极大地影响了核桃油产品的品质与安全, 制约了核桃油产业的发展。为了改善核桃油品质, 延长其货架期, 重点综述了近年来有关核桃油加工技术对其氧化稳定性的影响和核桃油抗氧化技术的研究进展。核桃油加工技术主要包括前处理、提取和精炼, 适宜的加工工艺有利于提高核桃油品质、保留微量营养成分及提高氧化稳定性。在抗氧化方面, 可以采用添加抗氧化剂、制备调和油、将其制成微胶囊和油凝胶等延缓核桃油的氧化酸败。未来仍需探索合适的核桃油加工及抗氧化技术, 以延长其货架期。

关键词:核桃油; 前处理; 提取; 精炼; 氧化稳定性

中图分类号: TS225.1; TS224 文献标识码: A 文章编号: 1003-7969(2025)03-0014-08

Research progress on walnut oil processing and antioxidant technology

XU Yingying^{1,2}, MIAO Yongjun³, ZHAO Wenge⁴, DU Jian⁴,

ZHENG Chang¹, LIU Changsheng¹, CHEN Hongjian⁵, DENG Qianchun¹

(1. Institute of Oil Crops, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430062, China; 2. College of Food Science and Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China; 3. Hunan Yamei Tea Oil Co., Ltd., Zhuzhou 412300, Hunan, China; 4. Aksu Zhejiang Fruit Industry Co., Ltd., Aksu 843000, Xinjiang, China; 5. School of Health Science and Engineering, Hubei University, Wuhan 430062, China)

Abstract: Walnut oil is rich in nutrients, containing unsaturated fatty acids and a variety of beneficial trace nutrients for the human body. However, walnut oil has poor stability and is prone to oxidative rancidity during processing, which greatly affects the quality and safety of walnut oil products and constrains the development of the walnut oil industry. To improve the quality of walnut oil and extend its shelf life, the research progress in recent years on the impact of walnut oil processing technologies on its oxidative stability and the development of antioxidant technologies for walnut oil were reviewed. Walnut oil processing technologies mainly include pretreatment, extraction and refining. Appropriate processing technologies are beneficial for enhancing the quality of walnut oil, retaining trace nutrients, and improving oxidative stability. In terms of antioxidation, methods such as adding antioxidants, preparing blended oils, and forming microcapsules and oleogels can be used to delay the oxidative rancidity of walnut oil. There is still a need to explore suitable processing and antioxidant technologies to extend the shelf life of walnut oil in the future.

Key words: walnut oil; pretreatment; extraction; refining; oxidative stability

收稿日期: 2023-09-12; 修回日期: 2024-09-30

基金项目: 新疆维吾尔自治区重大科技专项项目(2022A02009)

作者简介: 徐影影(1999), 女(土家族), 硕士研究生, 研究方向为油脂营养与安全(E-mail)17385609862@163.com。

通信作者: 陈洪建, 助理研究员(E-mail)chenhongjian@hubu.edu.cn。

核桃又名胡桃、羌桃, 是胡桃科核桃属植物, 属于我国四大木本油料植物之一, 也是我国种植面积较大的重要油料作物^[1]。核桃仁含有 65% ~ 70% 的油脂, 且每 100 kg 带壳核桃仁可提取 25 ~ 30 kg 核桃油^[2]。核桃油富含不饱和脂肪酸(UFA), 其含

量占总脂肪酸含量的90%以上,其中主要脂肪酸是亚油酸(52.5%~60.2%)、油酸(20%左右)和 α -亚麻酸(8.1%~15.2%)^[3]。核桃油还含有维生素E、植物甾醇、黄酮类化合物、磷脂以及锌、锰、铁等多种微量营养物质。因此,核桃油具有极高的营养价值,近年来已逐渐成为研究热点^[4-6]。

然而,由于核桃油富含不饱和脂肪酸,在其加工时暴露于高温、高氧和强光线等环境条件下,会通过自动氧化等反应生成氢过氧化物和二级氧化产物(如醛、酮、酸、醇环氧化物等),导致核桃油品质和营养价值降低,货架期缩短,同时这些氧化产物存在潜在毒性,可能对人体健康有害^[7]。因此,本文对核桃油加工技术及其对核桃油氧化稳定性的影响进行重点综述,并对核桃油抗氧化技术的研究进展进行总结,以期为高品质核桃油加工及安全保障提供参考。

1 核桃油加工技术及其对核桃油氧化稳定性的影响

1.1 前处理技术

在提取核桃油之前,需对核桃进行前处理,主要包括脱青皮、破壳、去种皮和干燥,以上前处理对油脂氧化稳定性存在影响。

1.1.1 脱青皮、破壳

核桃青皮含水率极高,采收后应及时脱去,以避免影响核桃仁及其副产品品质^[8],主要有手工、化学药剂及机械去青皮3种方法。传统的手工取核桃仁耗时耗力,效率低下,目前的核桃破壳和壳仁分离系统可实现快速破壳取仁^[9]。

1.1.2 去种皮

核桃内种皮的成分主要包括单宁、色素及纤维素等,而其中的单宁是导致产品苦涩及变色的主要原因,为避免其影响核桃产品的口感和色泽,在核桃油加工过程中,需去除核桃内种皮^[10]。但另有研究表明,核桃内种皮的多酚化合物含量丰富,表现出了较高的抗氧化活性,且强于天然抗氧化剂维生素C^[11],从而可抑制核桃油氧化酸败。孙俪娜等^[12]采用4% Na₂CO₃溶液浸泡去除核桃内种皮后制油,通过与带种皮核桃油比较发现,去种皮核桃油的过氧化值和酸值明显高于带种皮核桃油的;赵鑫丹^[13]研究发现,核桃内种皮提取物中总酚含量最高,为536.80 mg/g(以没食子酸当量计),且具有较强的DPPH、ABTS自由基清除能力及铁离子还原能力。故可从口感、色泽及氧化稳定性方面综合考虑内种皮的去留。

1.1.3 干燥

干燥处理可减少核桃含水量和水分活度,抑制

微生物的生长和繁殖,使导致核桃变质的酶失去活性,从而延长其保质期,也可增加核桃油风味以及提高其氧化稳定性^[14]。在前处理技术中,干燥对核桃油氧化稳定性的影响最大。徐月华等^[15]研究表明,烘烤干燥不仅使核桃油抗氧化活性因美拉德反应产物的生成而得到改善,而且不会造成生育酚的大量损失,即推测核桃油的抗氧化能力与美拉德反应程度密切相关。Elouafy等^[16]采用常规烘烤干燥处理后进行低温压榨制油,通过与未烘烤干燥处理制得的核桃油相关理化指标比较,探究烘烤对核桃油氧化稳定性的影响,结果发现,经烘烤干燥处理的核桃油总生育酚含量增加了11.05 mg/kg,核桃油氧化稳定性得到明显改善。同时,不同品种的核桃在不同的温度下烘烤也会影响核桃油的氧化稳定性,研究发现,3个品种(“希尔”“香玲”和“老树”)的核桃经过适当温度烘烤处理可促进核桃中氢过氧化物解聚,进而将核桃油的氧化诱导时间分别延长为对照组的6.4、4.4倍和7.4倍,研究者认为其主要原因是烘烤后水分减少,多酚和 β -谷甾醇含量升高,同时也可能是美拉德反应产生了具有抗氧化活性的物质^[17]。干燥方式同样对核桃油理化品质存在影响,罗凡等^[18]使用3种干燥方式(红外、微波辐射及热风)处理核桃仁后制取核桃油,并测定核桃油相关指标,结果发现,经干燥处理后核桃油的过氧化值和酸值均出现短时间的降低,干燥初期核桃油的氧化稳定性均得到提高,可能是加热后产生了具有抗氧化活性的美拉德反应产物,提高了核桃油的抗氧化能力。Gao等^[19]采用不同的干燥方式(微波焙烤、烤箱烘烤、蒸烤)对核桃仁进行处理后制取核桃油,研究干燥方式对核桃油品质的影响,结果发现,微波焙烤处理后核桃油中总生育酚含量最高,达到(419.85±15.01)mg/kg,且其他干燥方式的总生育酚含量均显著高于对照组,说明干燥处理可提高核桃油中天然抗氧化剂生育酚的含量,进而延长其货架期。故在核桃油加工过程中,应适当加热干燥核桃仁,促进生育酚等天然抗氧化物质溶出,且可通过美拉德反应生成具有抗氧化活性的成分,以提高核桃油氧化稳定性。

1.2 核桃油提取技术

核桃油提取技术主要包括压榨法、水代法、水酶法、溶剂浸出法、超声辅助提取法、微波辅助萃取法、超临界流体萃取法和亚临界流体萃取法等,各提取方法各有其优缺点,同时也可将多种方法联用以提高核桃油的产率。此外,不同提取技术对核桃油微量成分(生育酚、多酚等)含量存在影响,进而影响

其氧化稳定性,故在核桃油加工过程中需选择合适的提取技术^[20]。

1.2.1 压榨法

压榨法是指利用外力挤压使油脂从油料中释放出来的一种传统制油方法,具有操作简单灵活、适应性强等优点,且在提取过程中无溶剂残留,是一种绿色无污染的提油工艺。压榨法制油主要包括热榨和低温压榨两种方法。热榨法虽出油率高,但经高温操作,油料蛋白易发生热变性,原油的过氧化值和酸值均较高,易氧化变质,进而导致货架期缩短,同时高温压榨也易造成核桃油中微量营养物质损失^[21]。低温压榨法可较好地保证油脂品质,且油料蛋白不易变性。蔡达等^[22]采用低温压榨法制取核桃油,并与溶剂浸出法制取的核桃油品质指标进行对比,结果发现,与浸出法相比,低温压榨核桃油氧化诱导时间较长(延长 0.39 h),过氧化值(1.44 mmol/kg)和酸值(KOH)(0.69 mg/g)较低,油酸含量也较高,但其生育酚和植物甾醇含量低于浸出法的,可能是因为脂溶性抗氧化物质更易溶解在溶剂中,而压榨时则会残留于饼中。

1.2.2 水代法

水代法即以水代油法,是我国一种传统制油方法,不用挤压,也不需溶剂浸提,在一定条件下,利用油料中的非油成分对油和水亲和性的差异,采用物理方法分离出油脂。水代法操作条件温和,可获得高品质油脂。刘森等^[23]通过水代法提取核桃油,出油率可达 90% 以上,核桃油中黄酮含量达到 30.37 mg/100 g。但采用水代法提取核桃油时,会形成一定量的乳状液,油水分离较困难^[24],且目前水代法提取核桃油的研究较少。

1.2.3 水酶法

水酶法提油是指在机械破碎的基础上,加入水以及酶制剂处理油料,通过酶降解油料组织,使油突破油料细胞释放出来。赵慧博等^[25]采用不同破碎方式处理核桃仁后,用水酶法提取核桃油,所得核桃油酸值(KOH)(0.19 ~ 0.34 mg/g)和过氧化值(0.028 ~ 0.063 g/100 g)均远低于 GB 2716—2018 规定限值。水酶法制备核桃油反应条件温和,能够有效保护核桃油中的微量抗氧化物质,改善核桃油氧化稳定性。但易建华等^[26]研究发现,水酶法提取的核桃油氧化稳定性较低,并认为水酶法存在水分残留,而水分易导致油脂的氧化酸败,需要添加抗氧化剂以提高油脂在贮藏过程中的氧化稳定性。

1.2.4 溶剂浸出法

溶剂浸出法是油脂加工中使用较为普遍的方

法,其采用油脂与溶剂的相似相溶性将油脂从油料细胞中提取出来,出油率高。易建华等^[26]采用溶剂浸出法提取核桃油,所得核桃油酸值(KOH)为 0.33 mg/g,且其氧化稳定性优于水酶法核桃油的,这可能与溶剂浸出法核桃油中生育酚含量更高有关。但另有研究表明,溶剂浸出法会促进油脂成分的氧化^[27]。不同的浸出溶剂会对核桃油品质产生不同影响,Gao 等^[3]研究发现,以正己烷为溶剂提取的核桃油单不饱和脂肪酸含量较高,以氯仿和甲醇混合液为溶剂提取的核桃油维生素 E 含量较高,以丙酮为溶剂提取的核桃油多酚含量最高,且氧化诱导时间最长,自由基清除能力最强。溶剂浸出法提取的核桃油存在溶剂残留的现象,且其酸值、过氧化值等较高,需要进一步精炼才能满足食用标准^[28]。

1.2.5 超声辅助提取法

在核桃油提取中,超声一般是作为辅助手段以提高提取效率,其主要是通过超声波(频率大于 20 kHz 的声波)来实现,该声波能产生和传递强大的能量,且产生空化现象,加速分子的扩散,从而加速油脂的渗出,提高出油率。Ghasemi 等^[29]以正己烷为溶剂采用超声辅助酶法提取核桃油,发现提取的核桃油产率高、总酚含量高,且氧化稳定性好;Liu 等^[30]采用超声-微波辅助法提取核桃油,发现此方法提取的核桃油对 DPPH 自由基清除能力和铁还原能力较正己烷浸出法和压榨法制取的核桃油强。超声辅助提取法效率高,且提取的核桃油营养丰富、品质优良,对油脂氧化稳定性也有改善。但是孙丽娜等^[12]发现超声处理后核桃油酸值和过氧化值分别是对照组的 2.89 倍和 2.88 倍,氧化速率明显高于未经超声处理核桃油的,即超声处理在一定程度上会促进核桃油的氧化。因此,采用超声辅助提取核桃油过程中还需注意工艺条件对油脂品质的影响。

1.2.6 微波辅助萃取法

微波辅助萃取的原理是微波能量在样品中产生的热量导致细胞壁和细胞器上的压力升高,引起细胞结构的物理变化,从而促进溶剂在样品基质中的扩散,加速溶质从样品基质中释放到溶剂中,进而提高萃取效率;同时,微波照射也会促进样品结构的破坏,减少生物活性物质的相互作用,使其迅速释放到油脂中,进而提取出更多的微量营养成分(生育酚、总酚、植物甾醇和磷脂)^[31]。因此,通过微波辅助萃取法得到的油脂品质更佳,氧化稳定性更强。但目前微波辅助萃取在核桃油中应用较少。

1.2.7 超临界流体萃取法

超临界流体萃取法是利用超临界流体密度与其

溶解能力关系,通过调整压力和温度提取油脂,主要使用的萃取溶剂为 CO_2 。张丽等^[32]采用超临界 CO_2 萃取法提取核桃油,所得油脂酸值及过氧化值低,总黄酮含量高达 $31.64 \text{ mg}/100 \text{ mL}$,其品质明显优于水代法、索氏抽提法的。朱振宝等^[33]采用超临界 CO_2 萃取法提取核桃油,相比压榨法和溶剂浸出法,其所得油脂色浅,酸值、皂化值、过氧化值均较低,品质较好。此外,在光照条件下超临界 CO_2 萃取的核桃油具有较好的氧化稳定性,且优于低温压榨油,而在黑暗条件下其氧化稳定性低于低温压榨油,这与油脂中叶绿素和维生素 E 的含量有关^[34]。超临界 CO_2 萃取法在低温隔氧条件下得到的核桃油氧化程度低,但也有研究表明此法制得的核桃油氧化稳定性低于其他方法,如 Oliveira 等^[35]采用超临界 CO_2 萃取法提取核桃油,通过测定不同提取方法所得核桃油的氧化稳定性发现,超临界 CO_2 萃取法提取的核桃油的氧化稳定性低于溶剂浸出法的。

1.2.8 亚临界流体萃取法

亚临界流体萃取是以亚临界流体(丙烷、正丁烷)作为萃取溶剂,在低于临界温度和压力下进行提取,可以有效地从植物、动物或其他原料中提取目标成分,从而得到高质量的产品。与传统的萃取方法相比,亚临界流体萃取法萃取时间更短、溶剂体积更小、效率和安全性更高,并且由于萃取温度较低而更好地保留了油脂中的营养物质^[36-37]。但目前采用亚临界流体萃取技术提取核桃油研究较少,以后可进行相关研究。

1.3 核桃油精炼技术

核桃原油中含有大量的杂质(磷脂、游离脂肪酸、色素等),不仅影响油脂品质,还会促使油脂氧化酸败,不利于其长期保存,故需进行精炼(脱胶、脱酸、脱色、脱臭)处理。

1.3.1 脱胶

目前脱胶方法有酸法、水化法以及膜法脱胶等。李书国等^[38]采用酸法脱胶处理核桃油,不仅可以脱除磷脂,还能去除金属离子,脱胶后显著改善了核桃油的氧化稳定性。乔雪^[39]采用水化法和膜法两种方法对铁核桃油进行脱胶,发现两种方法均可延长铁核桃油的氧化诱导时间,且膜法脱胶的核桃油含有更多的生育酚和植物甾醇,其氧化诱导时间也比水化法脱胶的长。

1.3.2 脱酸

脱酸的主要目的是脱除油脂中游离脂肪酸,延缓油脂氧化酸败。通常采用碱炼法和物理法脱酸。

周力等^[40]采用碱炼法对铁核桃油进行脱酸处理,结果发现,碱炼脱酸后铁核桃油的过氧化值由 $3.47 \text{ mmol}/\text{kg}$ 降至 $2.86 \text{ mmol}/\text{kg}$,酸值(KOH)由 $5.43 \text{ mg}/\text{g}$ 降至 $0.55 \text{ mg}/\text{g}$,其氧化稳定性显著提高,货架期延长。孟佳等^[41]采用分子蒸馏法脱除核桃油中游离脂肪酸,使酸值(KOH)从 $1.08 \text{ mg}/\text{g}$ 降至 $0.057 \text{ mg}/\text{g}$,且较好地保留了生育酚和植物甾醇,其综合保留率可达 82.77% 。

1.3.3 脱色

脱色的作用是除去油脂中的色素杂质,以获得高品质的油脂产品,且脱色前需要进行干燥以去除水分。目前应用最广泛的脱色方法是吸附法,它利用吸附剂除去油脂内色素及其他杂质。张丽^[42]在精炼核桃油时发现脱酸后油脂的酸值明显降低,过氧化值却显著升高,而在脱色处理后过氧化值降低。缪福俊等^[43]认为脱色剂的使用会使油脂的酸值升高,其进一步研究发现低温浓碱技术兼有脱色效果,采用低温浓碱和盐脱胶技术,可以省去脱色和脱臭过程,不仅可以提高核桃油的氧化稳定性,而且还简化了油脂精炼工序。

1.3.4 脱臭

脱臭可将油脂中特有的臭味组分(油脂加工过程中产生的氧化产物以及脱胶、脱酸过程中残留的异味)去除,目前常用的脱臭方法是利用水蒸气在真空条件下与油脂中臭味物质结合,从而达到脱除油脂中臭味的目的。需要注意的是,在此过程中温度较高,核桃油不稳定,且油脂中天然抗氧化物质维生素 E 大量损失,导致油脂抗氧化能力降低,故脱臭过程中要严格控制脱臭条件^[44]。

2 核桃抗氧化技术研究进展

2.1 添加抗氧化剂

核桃油极易氧化酸败,而添加食品抗氧化剂是改善核桃油氧化稳定性的有效措施,食品抗氧化剂具有经济、效果好等优点。利用抗氧化剂可以淬灭自由基的产生,进而防止脂质氧化,延长油脂的货架期。在核桃油生产过程中,可以利用化学合成抗氧化剂或天然抗氧化剂来保持油脂品质和延长其货架期。

2.1.1 合成抗氧化剂

在核桃油中较常使用的合成抗氧化剂主要有叔丁基对苯二酚(TBHQ)、二丁基羟基甲苯(BHT)、没食子酸丙酯(PG)、抗坏血酸棕榈酸酯(AP)和丁基羟基茴香醚(BHA)等,且复合抗氧化剂的抗氧化效果优于单一抗氧化剂^[45-46]。卢付青等^[47]采用 Schaal 烘箱法研究了多种抗氧化剂及增效剂对核桃

油的抗氧化效果。结果表明:单一抗氧化剂 TBHQ 的抗氧化效果最好,在 60℃ 烘箱实验中,核桃油保质期 96 h;复合抗氧化剂 TBHQ + BHT 的抗氧化效果较好,且柠檬酸和抗坏血酸均能显著提高复合抗氧化剂 TBHQ + BHT 的抗氧化作用,筛选出抗氧化效果最优组合为 0.017% 复合抗氧化剂(TBHQ 与 BHT 质量比 1:1) + 0.012% 柠檬酸 + 0.010% 抗坏血酸,在 20℃ 下核桃油的理论货架期可延长至 288 d。此外,通过添加具有抗氧化活性的肽也可增强油脂的氧化稳定性。研究发现,将肽加入核桃油中后,脂质过氧化物的荧光强度降低,油脂自由基的衍生减少了 23%,即该肽阻止了过氧化物形成;且含有谷氨酰胺的肽可以增强酸性肽的超氧自由基清除活性,减少脂质过氧化物的形成,故研究者推测含有酸性氨基酸残基的肽具有较高的抗氧化活性^[48],这也为提高核桃油的氧化稳定性提供了指导。

2.1.2 天然抗氧化剂

常见的天然抗氧化剂有生育酚、L-抗坏血酸棕榈酸酯、迷迭香提取物、茶多酚、百里酚、香芹酚、马齿苋提取物等。杨进芳等^[49]探究了天然抗氧化剂(生育酚、迷迭香提取物及茶多酚)及其复配组合对核桃油的抗氧化效果,结果发现:单一使用时迷迭香提取物的抗氧化效果最好,其次是茶多酚、生育酚;复合天然抗氧化剂的抗氧化效果明显强于单一抗氧化剂的,添加三者最优复配组合(生育酚、迷迭香提取物和茶多酚的添加量分别为 880、690 mg/kg 和 340 mg/kg)的核桃油在常温下的理论货架期是空白组的 5.6 倍,有效延长了油脂的货架期。Gursul 等^[50]研究了百里香酚和香芹酚对核桃油微胶囊抗氧化活性的影响,结果发现,两者对核桃油微胶囊均具有良好的抗氧化效果,且百里香酚的抗氧化效果优于香芹酚,百里香酚添加量为 0.20% 时对核桃油微胶囊的抗氧化效果最佳。陈凌等^[51]研究了不同马齿苋提取物对核桃油的抗氧化作用,结果发现,添加 0.02% 马齿苋多糖提取物时核桃油氧化稳定性最好,在(50 ± 1)℃ 储存 8 d 核桃油过氧化值仅是空白组的 15.9%。此外,其他天然抗氧化成分也可延长核桃油货架期。田雨等^[52]研究了橄榄叶提取物橄榄苦苷对核桃油的抗氧化效果,结果发现,橄榄苦苷对核桃油有较强的抗氧化和清除自由基的能力,当橄榄苦苷添加量为 200 mg/kg 时,核桃油过氧化值为(12.6 ± 0.49) mmol/kg, DPPH 自由基清除率、羟自由基清除率分别为(72.5 ± 0.38)%、(76.0 ± 0.62)%,总抗氧化能力为(69.6 ± 0.55)%。也有研究发现油茶黄酮化合物对核桃油的抗氧化效果比

BHA 和生育酚强,可有效延长核桃油货架期^[53],此结果可为开发绿色安全的核桃油抗氧化剂提供新思路。

2.2 制备核桃调和油

核桃油易氧化酸败,故可将其与其他具有较强氧化稳定性的植物油复配,该方法不仅可以增强核桃油氧化稳定性,而且可以向核桃油中引入新的营养物质,有利于人体健康^[54]。美藤果油富含多不饱和脂肪酸(PUFA),还含有生育酚、多酚和植物甾醇等多种天然抗氧化物质,具有较强的抗氧化活性^[55]。李清清等^[56]在核桃油中加入 20% 美藤果油后,核桃油的过氧化值和酸值均降低,且调和油中天然抗氧化成分多酚和生育酚含量也显著增加,分别比对照组提高了 46.25% 和 32.89%,即美藤果油明显增强了核桃油的氧化稳定性。杏仁油是一种高价值产品,其单不饱和脂肪酸含量占总脂肪酸含量的 50% 以上,此外,还富含生育酚、甾醇等天然抗氧化成分,因此杏仁油具有良好的氧化稳定性^[57]。Pan 等^[58]配制了核桃油与杏仁油的调和油,在相同的条件下,含 30% 杏仁油的调和油初、次级氧化产物浓度最低,且其中生育酚、植物甾醇和角鲨烯的含量高于纯核桃油,氧化稳定性得到有效改善。同时,在核桃油中添加 6% 的天然葡萄籽油进行复配后,调和油的氧化稳定性指数升高约 5.5 倍,说明葡萄籽油的添加可提高核桃油的氧化稳定性,延长其货架期^[59]。油茶籽油富含天然抗氧化成分多酚及生育酚,氧化稳定性好。刘云等^[60]研究了油茶籽油对核桃油抗氧化活性的影响,发现添加油茶籽油的核桃油在加速氧化 10 d 后过氧化值仅为 30.633 6 mmol/kg,是对照组过氧化值的 1/2,说明油茶籽油的添加可显著提高核桃油的氧化稳定性。虾青素是一种超级天然抗氧化剂,其抗氧化活性是生育酚的 1 000 倍,对自由基的清除能力优于 β -胡萝卜素和生育酚^[61]。邢海亮等^[62]研究发现,在核桃油中添加 2% 的虾青素油后,调和油的货架期延长了 16 d,且其中的天然抗氧化成分(生育酚、多酚等微量物质)也有所增加。今后的研究中可探索更多适合复配核桃油的油脂,以提高其氧化稳定性。

2.3 制备核桃油微胶囊

核桃油易氧化,采用微胶囊技术对其进行包埋可延缓核桃油的氧化。毕会敏等^[63]以纳米 SiO₂/改性大豆分离蛋白为壁材,通过喷雾干燥法制备核桃油微胶囊,可以阻断核桃油与氧气、光、热反应,极显著增强了核桃油的氧化稳定性。Calvo 等^[64]通过冷冻干燥法制备核桃油微胶囊,不但可以延缓核桃油

氧化酸败,且保持了核桃油的风味。Lin等^[65]以低聚果糖和大豆分离蛋白为壁材制备核桃油微胶囊,考察微胶囊化前后核桃油的品质变化,结果表明,核桃油的过氧化值是微胶囊核桃油的2.8倍,在加速氧化实验中,微胶囊核桃油的过氧化值和硫代巴比妥酸值均明显低于核桃油,说明核桃油的氧化稳定性显著增强。Li等^[66]采用分子包埋法和冷冻干燥技术对核桃油进行微胶囊化,发现采用不同的淀粉基聚合物作为壁材可以更好地隔离氧气并阻止微生物进入,在光、氧等条件下可延缓核桃油过氧化值和酸值增长,二者增幅显著低于核桃油。但另有研究发现,虽然微胶囊化可以提高核桃油的氧化稳定性,但制备微胶囊过程中会采用热处理,进而加速核桃油氧化,导致其过氧化值升高,货架期缩短,故在制备微胶囊时,可以利用抗氧化剂来改善其氧化稳定性^[67]。

2.4 制备核桃油凝胶

油凝胶是指在液态油中直接添加适量安全可靠的凝胶剂而形成的一种塑性脂肪,在油凝胶制备过程中,凝胶剂形成的三维网络结构可以限制液体油的流动,从而起到保护液体油的作用,目前常使用羟丙基甲基纤维素、植物甾醇、植物蜡等作为凝胶剂。Yu等^[68]以米糠蜡形成的三维网络体系作为内部结构,在内部结构的基础上加入大豆分离蛋白和磷脂酰丝氨酸形成外部结构制备核桃油凝胶,该核桃油凝胶在储藏50 d后过氧化值比核桃油低8.3 mmol/kg,这是因为核桃油凝胶内部结构形成的三维网络系统限制了核桃油的自由流动,对其稳定性起到了显著的保护作用^[69]。同时,García-Ortega等^[70]以乙基纤维素为凝胶剂制备了核桃油凝胶,延缓了核桃油的氧化酸败,有助于延长核桃油的货架期。

3 展望

通过对国内外核桃油加工技术及抗氧化技术的研究综述发现,核桃油的加工及抗氧化技术已取得一定进展,但仍需深入研究,在核桃油加工方面,不同的加工工艺对核桃油品质及氧化稳定性有不同的影响,应探索合适的加工技术以提高核桃油品质及延长其货架期。在抗氧化技术方面,天然抗氧化剂在提高核桃油氧化稳定性中发挥着积极作用。首先可以通过生物育种和基因改良等方法选取抗氧化物质含量高的核桃品种,保持核桃油的优良品质;其次应努力将更多天然、高效、安全的食品天然抗氧化剂应用到核桃油中,以满足更多的需求;此外,还需探究新技术的应用,如应尽快改进和完善核桃油微胶

囊及油凝胶制备工艺,以提高核桃油抗氧化能力。

参考文献:

- [1] 王瑞元. 我国木本油料产业发展现状、问题及建议[J]. 中国油脂, 2020, 45(2): 1-2, 20.
- [2] 马莺,王振宇,于殿宇. 野生食用植物资源加工技术[M]. 北京:中国轻工业出版社,2009.
- [3] GAO P, LIU R, JIN Q, et al. Comparison of solvents for extraction of walnut oils; Lipid yield, lipid compositions, minor - component content, and antioxidant capacity[J]. LWT - Food Sci Technol, 2019, 110: 346-352.
- [4] BAKKALBAŞI E. Oxidative stability of enriched walnut oil with phenolic extracts from walnut press - cake under accelerated oxidation conditions and the effect of ultrasound treatment[J]. J Food Meas Charact, 2019, 13(1): 43-50.
- [5] LIAO J, NAI Y, FENG L, et al. Walnut oil prevents scopolamine - induced memory dysfunction in a mouse model[J/OL]. Molecules, 2020, 25(7): 1630 [2023-09-12]. <https://doi.org/10.3390/molecules25071630>.
- [6] MIAO F, SHAN C, 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/OL]. J Food Biochem, 2021, 45(1): e13567 [2023-09-12]. <https://doi.org/10.1111/jfbc.13567>.
- [7] 梁燕理. 核桃油储藏氧化稳定性研究进展[J]. 粮食科技与经济, 2018, 43(6): 112-113.
- [8] ZHOU Y, YAN L, HOU J. Nanosheets with high - performance electrochemical oxygen reduction reaction revived from green walnut peel[J/OL]. Molecules, 2022, 27(1): 328 [2023-09-12]. <https://doi.org/10.3390/molecules27010328>.
- [9] 陈朝银,赵声兰,马雅鸽,等. 核桃初加工工艺设备现状研究[J]. 包装与食品机械, 2021, 39(2): 45-51.
- [10] 蒲成伟,阚欢,刘云. 核桃仁不同去皮工艺的对比研究[J]. 农产品加工, 2017(6): 33-35.
- [11] 周晔,王伟,陶冉,等. 超声波提取核桃内种皮多酚的响应面优化及其抗氧化研究[J]. 林产化学与工业, 2013, 33(4): 73-78.
- [12] 孙俪娜,李忠新,李媛,等. 前处理方法对冷榨提取核桃油的影响[J]. 保鲜与加工, 2017, 17(4): 51-55.
- [13] 赵鑫丹. 核桃内种皮抗氧化成分的提取分离及其活性研究[D]. 陕西 杨凌:西北农林科技大学,2021.
- [14] 刘澄谕. 干燥技术在核桃加工中的应用[J]. 农产品加工, 2021(11): 61-65.
- [15] 徐月华,蒋将,孟宗,等. 烘烤条件对核桃油品质的影响[J]. 中国油脂, 2014, 39(7): 9-12.
- [16] ELOUAFY Y, EL IDRISI Z L, YADINI A E, et al. Variations in antioxidant capacity, oxidative stability, and physicochemical quality parameters of walnut (*Juglans regia*) oil with roasting and accelerated storage conditions

- [J/OL]. *Molecules*, 2022, 27(22): 7693 [2023 - 09 - 12]. <https://doi.org/10.3390/molecules27227693>.
- [17] 罗凡, 费学谦, 戚雨婷, 等. 加热温度对核桃油理化品质的影响规律研究[J]. *中国粮油学报*, 2018, 33(6): 51 - 58.
- [18] 罗凡, 费学谦, 郭少海, 等. 不同干燥方式对核桃仁及核桃油理化品质的影响[J]. *中国油脂*, 2019, 44(2): 8 - 13.
- [19] GAO P, DING Y, CHEN Z, et al. Characteristics and antioxidant activity of walnut oil using various pretreatment and processing technologies [J/OL]. *Foods*, 2022, 11(12): 1698 [2023 - 09 - 12]. <https://doi.org/10.3390/foods11121698>.
- [20] 龚娣, 陈程莉, 常馨月, 等. 核桃油氧化及抗氧化调控研究进展[J]. *中国油脂*, 2021, 46(5): 58 - 62.
- [21] 任少东. 加热预处理对核桃油品质的影响[D]. 新疆阿拉尔: 塔里木大学, 2017.
- [22] 蔡达, 刘红芝, 刘丽, 等. 不同工艺制备核桃油品质比较及相关性分析[J]. *中国油脂*, 2014, 39(3): 80 - 84.
- [23] 刘森, 裘爱泳, 苗卓, 等. 水代法制取核桃油工艺的研究及有效成分分析[J]. *中国油脂*, 2004, 29(3): 13 - 16.
- [24] 程菁菁. WPI与表面活性剂相互作用对水包核桃油乳液的影响[D]. 西安: 陕西科技大学, 2015.
- [25] 赵慧博, 邓健康, 路敏, 等. 水酶法提取核桃油过程中不同破碎方式对核桃油品质的影响[J]. *现代食品科技*, 2023, 39(2): 272 - 279.
- [26] 易建华, 朱振宝. 水酶法和溶剂法提取核桃油理化性质比较[J]. *食品科学*, 2007, 28(12): 143 - 145.
- [27] TURKMEN N, SARI F, VELIOGLU Y S. Effects of extraction solvents on concentration and antioxidant activity of black and black mate tea polyphenols determined by ferrous tartrate and Folin-Ciocalteu methods [J]. *Food Chem*, 2006, 99(4): 835 - 841.
- [28] 肖仁显, 陈中海, 陈秋平, 等. 冷榨法、超临界 CO₂ 萃取法和有机溶剂浸出法提取山核桃油比较[J]. *食品科学*, 2012, 33(20): 51 - 55.
- [29] GHASEMI Y Z, TAGHIAN DINANI S. Optimization of ultrasound - assisted enzymatic extraction of walnut kernel oil using response surface methodology [J/OL]. *J Food Process Eng*, 2018, 41(5): 12696 [2023 - 09 - 12]. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12696>.
- [30] 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/OL]. *J Food Process Pres*, 2022, 46(7): 16603 [2023 - 09 - 12]. <https://doi.org/10.1111/jfpp.16603>.
- [31] HU B, ZHOU K, LIU Y, et al. Optimization of microwave - assisted extraction of oil from tiger nut (*Cyperus esculentus* L.) and its quality evaluation [J]. *Ind Crops Prod*, 2018, 115: 290 - 297.
- [32] 张丽, 陈计峦, 宋丽军, 等. 提取方法对核桃油理化特性及其脂肪酸组成的影响[J]. *粮油加工*, 2010(7): 23 - 26.
- [33] 朱振宝, 易建华, 田呈瑞. 提取方法对核桃油特性的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2005, 31(9): 56 - 59.
- [34] 王丰俊, 王建中, 王宪昌, 等. 冷榨制取与超临界 CO₂ 萃取核桃油的氧化稳定性比较研究[J]. *食品科学*, 2005, 26(5): 41 - 43.
- [35] OLIVEIRA R, FÁTIMA RODRIGUES M, GABRIELA BERNARDO - GIL M. Characterization and supercritical carbon dioxide extraction of walnut oil [J]. *J Am Oil Chem Soc*, 2002, 79(3): 225 - 230.
- [36] ZANQUI A B, DA SILVA C M, RESSUTTE J B, et al. Extraction and assessment of oil and bioactive compounds from cashew nut (*Anacardium occidentale*) using pressurized *n* - propane and ethanol as cosolvent [J/OL]. *J Supercrit Fluids*, 2020, 157: 104686 [2023 - 09 - 12]. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2019.104686>.
- [37] QI Z, XIAO J, YE L, et al. The effect of the subcritical fluid extraction on the quality of almond oils: Compared to conventional mechanical pressing method [J]. *Food Sci Nutr*, 2019, 7(7): 2231 - 2241.
- [38] 李书国, 李雪梅, 陈辉, 等. 精制核桃油生产工艺及其氧化稳定性的研究[J]. *中国油脂*, 2003, 28(10): 27 - 30.
- [39] 乔雪. 铁核桃油氧化稳定性及脱胶工艺的研究[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2017.
- [40] 周力, 刘祥龙, 何东平, 等. 响应面法优化冷榨铁核桃油脱胶工艺的研究[J]. *粮食与油脂*, 2016, 29(4): 48 - 51.
- [41] 孟佳, 刘建, 史宣明, 等. 核桃油的分子蒸馏法脱酸、脱塑工艺条件优化[J]. *中国油脂*, 2022, 47(8): 52 - 56.
- [42] 张丽. 核桃油脂提取及其稳定性的研究[D]. 新疆石河子: 石河子大学, 2010.
- [43] 缪福俊, 王洋, 肖良俊, 等. 云南铁核桃低温压榨及精炼工艺实践[J]. *食品工业*, 2018, 39(7): 102 - 104.
- [44] 姚英政, 董玲, 陈开燕, 等. 核桃油加工技术[J]. *四川农业科技*, 2017(9): 41 - 42.
- [45] 盛雪飞, 彭燕, 陈健初. 天然抗氧化剂之间的协同作用研究进展[J]. *食品工业科技*, 2010, 31(7): 414 - 417, 421.
- [46] 刘梁, 张煜, 方晓璞, 等. 不同抗氧化剂对核桃油氧化稳定性和预测货架期的影响[J]. *中国油脂*, 2023, 48(2): 55 - 57, 97.
- [47] 卢付青, 游敬刚, 潘红梅, 等. 响应面法优化核桃油复合抗氧化剂的研究[J]. *中国油脂*, 2019, 44(5): 114 - 117.
- [48] JIE Y, ZHAO H, ZHANG B. The role of an acidic peptide in controlling the oxidation process of walnut oil

- [J/OL]. *Foods*, 2019, 8(10): E499[2023-09-12]. <https://doi.org/10.3390/foods8100499>.
- [49] 杨进芳, 彭丹, 陈名扬, 等. 复配天然抗氧化剂对核桃油抗氧化性能及货架期的影响[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2021, 42(5): 64-69.
- [50] GURSUL S, KARABULUT I, DURMAZ G. Antioxidant efficacy of thymol and carvacrol in microencapsulated walnut oil triacylglycerols[J]. *Food Chem*, 2019, 278: 805-810.
- [51] 陈凌, 骆卢佳, 曹巧巧, 等. 马齿苋不同溶剂提取物对核桃油的抗氧化动力学研究[J]. 中国粮油学报, 2018, 33(11): 39-44.
- [52] 田雨, 包媛媛, 林奇, 等. 橄榄苦苷对核桃油抗氧化稳定性的研究[J]. 中国粮油学报, 2019, 34(3): 53-60.
- [53] 邢江艳, 田洋, 成琴, 等. 油茶黄酮化合物对核桃油氧化稳定性的影响[J]. 中国粮油学报, 2023, 38(1): 101-107.
- [54] 徐婷婷, 李静, 阚丽娇, 等. 不同脂肪酸组成的食用油热氧化稳定性研究[J]. 食品工业科技, 2013, 34(24): 93-97.
- [55] 韩本勇, 周志梅, 赵鹏, 等. 美藤果油的组成、性质及功能特性研究进展[J]. 中国野生植物资源, 2019, 38(3): 59-64.
- [56] 李清清, 余旭亚, 耿树香, 等. 美藤果油对核桃油氧化稳定性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(1): 237-242.
- [57] 王小清. 核桃杏仁调和油贮藏稳定性及氧化规律研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
- [58] PAN F, WANG X, WEN B, et al. Development of walnut oil and almond oil blends for improvements in nutritional and oxidative stability [J/OL]. *Grasas Aceites*, 2020, 71(4): 381[2023-09-12]. <https://doi.org/10.3989/gya.0920192>.
- [59] 石磊, 沈凡樱, 贾有青, 等. 葡萄籽油的添加对山核桃油抗氧化能力改善的研究[J]. 粮食与食品工业, 2021, 28(2): 17-21, 24.
- [60] 刘云, 阚欢. 油茶籽油对核桃油抗氧化作用的影响[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(23): 14357-14359.
- [61] 赵晓燕, 孟昂, 刘红开, 等. 雨生红球藻中虾青素油树脂的稳定性研究[J]. 食品科技, 2018, 43(8): 285-289.
- [62] 邢海亮, 余旭亚, 耿树香, 等. 虾青素油对核桃油抗氧化性及货架期的影响[J]. 中国油脂, 2020, 45(5): 105-109.
- [63] 毕会敏, 范方宇, 杨宗玲, 等. 纳米 SiO₂/大豆分离蛋白为壁材的核桃油微胶囊特性[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(21): 147-153.
- [64] CALVO P, LOZANO M, ESPINOSA - MANSILLA A, et al. *In-vitro* evaluation of the availability of $\omega-3$ and $\omega-6$ fatty acids and tocopherols from microencapsulated walnut oil [J]. *Food Res Int*, 2012, 48(1): 316-321.
- [65] LIN D, XIAO L, LI S, et al. Effects of fructooligosaccharide and soybean protein isolate in the microencapsulation of walnut oil [J/OL]. *Ind Crops Prod*, 2022, 177: 114431 [2023-09-12]. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114431>.
- [66] LI Q, WANG L, ZHENG M, et al. Microencapsulation with different starch-based polymers for improving oxidative stability of cold-pressed hickory (*Carya cathayensis* Sarg.) oil [J/OL]. *Foods*, 2023, 12(5): 953 [2023-09-12]. <https://doi.org/10.3390/foods12050953>.
- [67] 李达, 李旭, 于日成, 等. 基于微胶囊技术的核桃油粉末油脂的研究进展[J]. 食品工业, 2021, 42(7): 239-244.
- [68] YU Y, WANG T, GONG Y, et al. Effect of ultrasound on the structural characteristics and oxidative stability of walnut oil oleogel coated with soy protein isolate - phosphatidylserine [J/OL]. *Ultrason Sonochem*, 2022, 83: 105945 [2023-09-12]. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.105945>.
- [69] WALKER R M, GUMUS C E, DECKER E A, et al. Improvements in the formation and stability of fish oil-in-water nanoemulsions using carrier oils: MCT, thyme oil, & lemon oil [J]. *J Food Eng*, 2017, 211: 60-68.
- [70] GARCÍA - ORTEGA M L, TORO - VAZQUEZ J F, GHOSH S. Development and characterization of structured water-in-oil emulsions with ethyl cellulose oleogels [J]. *Food Res Int*, 2021, 150: 110763 [2023-09-12]. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110763>.