

核桃油组分及其在氧化过程中的变化研究进展

于佳晔¹, 张 咪², 彭 越¹, 杜 晶¹, 秦兰霞¹, 于殿宇¹, 廖长保³

(1. 东北农业大学 食品学院, 哈尔滨 150030; 2. 河南工业大学 粮油食品学院, 郑州 450001;

3. 黑龙江红星集团食品有限公司, 黑龙江 牡丹江 157000)

摘要:旨在为核桃油氧化机制和抗氧化研究提供参考, 综述了核桃油中脂肪酸、甘油三酯、主要微量伴随物、挥发性成分及其在核桃油氧化过程中的变化情况。核桃油氧化除了受到外界因素如温度、光照和包装等的影响, 与其本身组分关系密切, 如脂肪酸组成、甘油三酯组分和内生性微量伴随物, 可通过品种选育、优化加工工艺、添加活性成分、改进包装形式等方式来延缓核桃油的氧化。

关键词:核桃油; 组分; 氧化; 脂肪酸; 甘油三酯; 微量伴随物

中图分类号: TS225.1; TQ641 文献标识码: A 文章编号: 1003-7969(2023)11-0052-05

Research progress on components of walnut oil and their changes during oxidation

YU Jiaye¹, ZHANG Mi², PENG Yue¹, DU Jing¹, QIN Lanxia¹,
YU Dianyu¹, LIAO Changbao³

(1. College of Food Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 2. College of Food Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China; 3. Heilongjiang Red Star Group Food Co., Ltd., Mudanjiang 157000, Heilongjiang, China)

Abstract: In order to provide reference for the study of walnut oil oxidation mechanism and antioxidant, the fatty acids, triglycerides, main trace concomitants and volatile components in walnut oil and their changes in walnut oil oxidation process were reviewed. In addition to external factors such as temperature, light and packaging, etc., the oxidation of walnut oil is closely related to its own components, such as fatty acid composition, triglyceride components and endogenous trace concomitants. Varieties breeding, optimizing processing technology, adding active ingredients and improving packaging forms, etc. can be used to delay the oxidation of walnut oil.

Key words: walnut oil; component; oxidation; fatty acid; triglyceride; trace concomitant

核桃(*Juglans regia* L.)是世界四大干果之一,属于胡桃科胡桃属,在60多个国家和地区均有种植^[1-2]。我国是世界核桃生产第一大国,核桃种植面积达 8×10^6 hm²以上,产量占全球50%以上,主要分布在东部沿海、西北和西南地区^[3-4]。核桃仁经过压

榨或溶剂浸提等工艺得到核桃油,核桃油作为一种保健油深受消费者的喜爱,其产量和需求量也逐年上升^[5]。核桃油中不仅含有丰富的油酸等单不饱和脂肪酸(MUFA),还含有较高的亚油酸和亚麻酸等多不饱和脂肪酸(PUFA)。核桃油在加工、储藏和销售过程中极易发生氧化酸败,导致其风味劣变、营养价值降低,甚至产生对人体有毒有害的物质^[6]。因此,延缓核桃油的氧化是研究热点之一。本文主要综述核桃油组分及其在氧化过程的变化情况,以期核桃油氧化机制和抗氧化研究提供参考。

1 核桃油基本组分

1.1 脂肪酸

核桃油中不饱和脂肪酸(UFA)约占90%,其中

收稿日期:2022-11-28;修回日期:2023-08-02

基金项目:黑龙江省重点研发计划项目“含OPO母乳化脂肪酸高端有机婴幼儿配方奶粉研发”(GA22B017)

作者简介:于佳晔(2003),女,在读本科,食品科学与工程专业(E-mail)1958246819@qq.com。

通信作者:秦兰霞,副教授,博士(E-mail)xia3688@163.com;于殿宇,教授,博士(E-mail)dyyu2000@126.com。

亚油酸(C18:2)含量最高,为48.55%~68.97%,其次为油酸(C18:1)和亚麻酸(C18:3),含量分别为12.56%~26.04%、6.70%~16.80%^[1,7-10]。油酸具有调节血糖、血脂,预防动脉硬化等保健功能;亚油酸和亚麻酸属于必需脂肪酸,是维持生命的重要物质,具有消炎、免疫调节、降血压、提高记忆力等作用^[11-12]。核桃油还含有3.05%~8.27%的棕榈酸、1.01%~3.53%的硬脂酸、0%~0.10%的棕榈油酸和0%~0.55%的花生一烯酸等^[10,13-14]。此外,我国不同产区和品种间核桃油脂肪酸组成存在较大差异,高盼^[4]研究发现,16种薄皮核桃中山东鲁光核桃油PUFA含量最高,西南产区核桃油的PUFA含量略低于东部沿海和西北产区的。

1.2 甘油三酯

甘油三酯是核桃油中最主要的成分,在原油中可达95%以上,精炼油中高达99%。在核桃油中大约鉴定出20种甘油三酯,含量最高的是三亚油酸甘油三酯(LLL),占总甘油三酯含量的26.44%~39.77%,其次为油酸亚油酸亚麻酸甘油三酯(OLLn)、二油酸亚油酸甘油三酯(OOL)、二亚油酸棕榈酸甘油三酯(PLL)和二亚油酸亚麻酸甘油三酯(LLLn),这5种主要甘油三酯共占总甘油三酯含量的80%左右^[4]。我国核桃油与西班牙、葡萄牙等地的核桃油在甘油三酯种类和含量上均存在一定差异。西班牙核桃油中含有棕榈油酸亚油酸油酸甘油三酯(PoLO)、二油酸亚麻酸甘油三酯(LnOO)、硬脂酸油酸亚油酸甘油三酯(SOL)、棕榈酸亚油酸硬脂酸甘油三酯(PLS)等,而其在我国核桃油中比较少见^[15-16]。同时,我国不同产区和品种间核桃油甘油三酯组成也存在一定差异,东部沿海和西北产区核桃油中PLL和OOL含量均值低于西南产区核桃油,而东部沿海产区的核桃油LLLn含量较高^[4]。

甘油三酯是参与酸败反应的主要物质,核桃油氧化进程与其甘油三酯的组成及分布密切相关。张巧智等^[17]通过分析油脂热氧化特性与其甘油三酯组成及分布间的相关性发现,氧化进程中起始温度和活化能多与高饱和甘油三酯含量呈正相关,而与高不饱和甘油三酯含量呈负相关,且相关性与甘油酯中脂肪酸链的种类有关,与甘油骨架上脂肪酸链的种类也有关。核桃油中不饱和甘油三酯含量高达80%以上,这也进一步表明核桃油氧化稳定性较差。

1.3 微量伴随物

1.3.1 生育酚

生育酚是一种天然的脂溶性抗氧化剂。不同构

型的生育酚抗氧化能力不同,这与甲基在色胺环上的数量和位置有关,4种构型生育酚抗氧化能力大小为 α -生育酚< β -生育酚< γ -生育酚< δ -生育酚^[18-20]。此外,生育酚的抗氧化作用还取决于其所在的基质和浓度。

我国核桃油中 γ -生育酚含量最高(69.80~484.00 mg/kg),其次是 δ -生育酚(4.20~465.72 mg/kg)和 α -生育酚(3.00~144.21 mg/kg), β -生育酚含量较低(0~1.21 mg/kg)^[1,4]。生育酚含量与核桃油品种、产地及加工工艺存在一定相关性,对品种有依赖性且品种间差异明显,研究发现,我国东部沿海产区的核桃油生育酚含量高于西北和西南产区的,同时明显高于西班牙、加拿大、塞尔维亚和阿根廷产的^[1,4,21-22]。

1.3.2 植物甾醇

植物甾醇是植物性甾体化合物,以环戊烷全氢菲为主架结构,具有消炎、调节胆固醇、预防心脑血管疾病等作用^[23-24]。核桃油中植物甾醇含量为414.30~1608.23 mg/kg,主要为 β -谷甾醇、菜油甾醇、豆甾醇、燕麦甾醇等,其中 β -谷甾醇含量最高^[4]。核桃油中植物甾醇含量与核桃品种、产地有关,研究表明,西南产区核桃油中植物甾醇含量远低于西北和东部沿海产区,在16种薄皮核桃中陕西香玲核桃油植物甾醇含量最高^[1,4,25]。

1.3.3 其他

角鲨烯中含有多个双键,可与自由基等过氧化物质反应,具有抗氧化、预防动脉粥样硬化等作用,核桃油中角鲨烯的含量为2.89~5.21 mg/kg^[4]。植物多酚是一类具有多元酚结构物质的统称,大分子多酚主要是水解单宁和缩合单宁,小分子多酚包括花青素、儿茶素、没食子酸、阿魏酸等,具有抗氧化、消炎、抗菌、抗肿瘤等多种功效^[26-27]。但核桃多酚大多为水溶性多酚,在榨油过程中难以随油提取,大多残留在饼粕中,因此核桃油中多酚含量较低(1.35~64.61 mg/kg)^[4]。此外,核桃油中含有1.88 mg/100 mL黄酮和1.34 μ g/mL β -胡萝卜素,黄酮可抑制各种自由基的产生,具有抗衰老、增强机体免疫力等作用, β -胡萝卜素是维生素A的前体物质,具有提高免疫力、抑制癌细胞增殖等作用^[13]。

1.4 挥发性成分

受核桃品种、提油工艺和色谱检测条件等影响,新鲜核桃油挥发性成分及含量存在一定差异,并形成各自独特风味^[28-29]。在新鲜核桃油中,可检测到少量的醛类、酸类和醇类等挥发性物质,如己醛、己

酸、壬醛、2-庚烯醛、1-辛烯-3-醇等^[30]。

2 核桃油氧化过程中各组分的变化

因核桃油本身 UFA 含量较高,特别是亚油酸和亚麻酸等 PUFA 含量在 70% 以上,导致其比菜籽油、花生油、大豆油、橄榄油等植物油更容易发生氧化酸败^[4,13]。核桃油氧化酸败不仅影响其营养价值和口感风味,且会生成一些有毒有害物质,对人体健康产生不利影响^[31-32]。为此,核桃油氧化过程中各组分变化备受关注。

2.1 脂肪酸组成变化

脂肪酸的双键位置与数量、顺反构型等都会影响油脂氧化。油脂氧化稳定性受 PUFA 影响较大,PUFA 含量高的油脂氧化稳定性差^[33]。研究表明:核桃油氧化稳定指数(OSI)与硬脂酸、棕榈酸及油酸含量呈显著正相关($p < 0.05$),与亚油酸和亚麻酸含量呈显著负相关($p < 0.05$)。

温度是影响脂肪酸氧化的重要因素。孟阿会^[7]将核桃油在 120 °C 下加热 15 h,其中的油酸、棕榈酸和硬脂酸的相对含量分别升高了 20.46%、5.13%、1.79%,亚油酸和亚麻酸相对含量分别降低了 19.13%、7.68%。朱冉等^[34]将核桃油在 60 ~ 150 °C 范围内加热 5 min 和 10 min,亚油酸和亚麻酸含量随温度升高而降低。Rabadán 等^[35]在避光条件下,将核桃油分别在 5、10、20 °C 和室温下储存 16 个月,发现 PUFA 含量仅下降 0.2%,亚油酸含量变化不明显,亚麻酸含量降低了 0.4%。此外,由于核桃油储存和销售为室温条件,探究室温下核桃油脂脂肪酸变化更具有现实意义,而不同产区 and 品种间核桃油脂脂肪酸组成存在差异,对核桃油氧化稳定性产生不同影响,在研究过程中同样值得关注。

2.2 甘油三酯组分变化

甘油三酯是油脂最主要的成分,其变化可代表油脂氧化进程。脂肪酸的链长、双键的位置和数量、脂肪酸在甘油骨架上的位置及含量等共同影响着甘油三酯的氧化稳定性,进而对整个油脂体系产生重要影响^[36]。

在油脂氧化过程中因氧化条件差异导致甘油三酯降解程度不同,高温加速其降解,在热氧化过程中会形成氧化甘油三酯单体、二聚物和寡聚物^[37]。而室温储存是油脂常见的储存形式,核桃油中甘油三酯在室温下的变化备受关注。温毓秀^[30]以不同产区 4 个品种核桃油(温-185、香玲、大麻和礼品)为原料,研究室温氧化条件下核桃油甘油三酯变化情况,结果表明,室温下甘油三酯含量无明显变化趋势,加速氧化(60 °C)条件下温-185、香玲、大麻、礼

品核桃油甘油三酯总量分别下降 32.27%、12.18%、19.22%、23.29%,其中三亚麻酸甘油三酯(LnLnLn)、二亚麻酸亚油酸甘油三酯(LnLnL)和 LLLn 下降幅度较大,LLL 绝对消耗量最大,其次是 OLLn,总不饱和度越高甘油三酯越易氧化,同一不饱和度甘油三酯含有 PUFA 越多越易氧化。由于不同产区和品种间核桃油甘油三酯组分存在差异,不同产区和品种间核桃油氧化过程中的甘油三酯变化以及其与氧化的相关性还有待进一步研究。

2.3 微量伴随物变化

2.3.1 生育酚

氧化过程中,生育酚通过与 PUFA 竞争性结合氧气从而保护 PUFA^[13,32,38],同时生育酚与 β -胡萝卜素、黄酮等之间具有一定协同增效作用^[28,39]。核桃油氧化过程中会伴随着生育酚的氧化降解,孟阿会^[7]研究表明,核桃油在 120 °C 氧化 15 h 后生育酚含量由 425.6 mg/kg 减少至 120.7 mg/kg。

2.3.2 植物甾醇

植物甾醇氧化以非酶氧化为主,包括自氧化和光氧化。自氧化机制,即自动催化的自由基链式反应,植物甾醇失去一个碳原子,呈自由基状态,与分子氧结合形成 7-氢过氧甾醇;光氧化是指激发态单线态氧将植物甾醇氧化,生成甾醇氧化物,如 5-氢过氧植物甾醇、7-羟基植物甾醇、7-酮基植物甾醇等^[24]。温度、加热时间、甾醇结构和脂质基质组成对植物甾醇的氧化均有影响,且脂质基质和温度之间的相互作用对植物甾醇氧化物的总含量和氧化反应途径有明显影响:高温下,不饱和脂质基质更容易被氧化,从而减缓植物甾醇氧化;在饱和基质中,高温迫使反应性更强的植物甾醇率先氧化^[40]。从核桃油脂脂肪酸组成角度看,其植物甾醇氧化机制应归属于前者。研究发现,室温氧化中甾醇含量呈现轻微下降,加速氧化中呈明显下降趋势,其中 β -谷甾醇、菜油甾醇、环木菠萝烯醇、豆甾醇含量分别下降 10.83% ~ 18.25%、12.86% ~ 23.45%、27.34% ~ 49.94%、9.36% ~ 57.64%,另外,不同品种中,温-185 核桃油植物甾醇降解最快^[30]。

2.3.3 其他

王小清^[41]研究发现,核桃油在加速氧化条件下角鲨烯含量变化不大,这可能与含量较低有关。其他微量伴随物在核桃油氧化过程中变化的报道较少。

2.4 挥发性成分变化

受核桃品种、提油工艺和检测方法等影响,核桃油挥发性物质组成和含量存在差异,但确定的主要

挥发性氧化产物几乎都源自 UFA 的氧化,与氧化进程密切相关,如 $E-2$ -十一烯醛可能来自油酸的 8-氢过氧化物,壬醛可能来自油酸的 10-氢过氧化物, $E,E-2,4$ -癸二烯醛和 $E-2$ -癸烯醛可能来自亚油酸的 9-氢过氧化物, $E-2$ -庚烯醛可能来自亚油酸的 12-氢过氧化物,己醛可能来自亚油酸的 13-氢过氧化物, $E,E-2,4$ -庚二烯醛可能来自亚麻酸的 12-氢过氧化物,丙醛可能来自亚麻酸的 16-氢过氧化物等^[42-43]。由于挥发性氧化产物在氧化初期就会产生,一直伴随氧化全过程,可用于表征核桃油氧化进程。Mu 等^[29]通过偏最小二乘回归分析建立了核桃油挥发性氧化产物总量与氧化参数(过氧化值、酸值、茴香胺值)的定量预测模型,有效表征了核桃油氧化。另外,单一的挥发性氧化产物能预测核桃油新鲜度和品质,如周晔^[28]通过加速氧化实验表明 2-庚烯醛受品种影响较小且与氧化进程密切相关,可作为核桃油氧化标志物, $E-2$ -戊烯醛和 $E,E-2,4$ -庚二烯醛适合表征核桃油的新鲜程度。

3 结束语

核桃油自身组分及含量决定了其是一种易发生氧化酸败的油脂。目前,国内外对核桃油脂脂肪酸组成以及微量伴随物的检测、表征和其在核桃油氧化过程中变化等都有了较为深入的研究,但是对于核桃油组分与氧化的关系以及作用等研究有待深入展开,对于核桃油氧化与组分变化还可从以下几方面进行研究和进一步完善:①通过品种选育和育种手段来改变核桃油脂脂肪酸组成和甘油三酯结构以提高核桃油的氧化稳定性;②利用核桃油的不同加工工艺特点,优化核桃油的加工工艺和充分利用核桃资源(如核桃分心木等),最大限度保留有益伴随物成分,提高核桃油的氧化稳定性;③对核桃油微量伴随物的抗氧化活性进行研究,在核桃油中添加相关的活性成分以增强其氧化稳定性;④对核桃油的包装形式进行改进,特别是核桃油使用过程中的包装形式,以延长其使用期。

参考文献:

[1] 徐飞,石爱民,刘红芝,等. 核桃油中脂肪酸和内源抗氧化物质含量及其氧化稳定性相关性分析[J]. 中国粮油学报, 2015, 31(3): 53-58.

[2] 王健健. 基于傅立叶近红外光谱分析技术的南疆“温 185”核桃综合预测模型研究[D]. 新疆阿拉尔:塔里木大学, 2020.

[3] 郝荣庭,张毅萍. 中国果树志:核桃卷[M]. 北京:北京林业出版社, 2016: 1-50.

[4] 高盼. 我国核桃油的组成特征及其抗氧化和降胆固醇功效评估[D]. 江苏无锡:江南大学, 2019.

[5] 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.

[6] 于修焯. 食品脂类学[M]. 北京:科学出版社, 2021.

[7] 孟阿会. 核桃油成分及抗氧化性质研究[D]. 北京:北京林业大学, 2012.

[8] 朱振宝,刘梦颖,易建华,等. 不同产地核桃油理化性质、脂肪酸组成及氧化稳定性比较研究[J]. 中国油脂, 2015, 40(3): 87-90.

[9] GAO P, LIU R, JIN Q, 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 Chem, 2019, 279: 279-287.

[10] 周张涛,高盼,章景志,等. 我国不同产区核桃油组成成分与氧化稳定性研究[J]. 粮油食品科技, 2020, 28(1): 17-22.

[11] 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.

[12] 屠越华. 富含单不饱和脂肪酸的饮食对血糖和血脂的影响[J]. 中国糖尿病杂志, 2012, 20(1): 72-74.

[13] 刘梦颖. 脂肪酸及微量组分对核桃油氧化稳定性的影响[D]. 西安:陕西科技大学, 2015.

[14] 杨歆萌,高盼,胡传荣,等. 我国 10 种铁核桃油的组成特性和氧化稳定性[J]. 中国油脂, 2021, 46(1): 112-116.

[15] BADA J C, LEÓN-CAMACHO M, PRIETO M, et al. Characterization of walnut oils (*Juglans regia* L.) from Asturias, Spain [J]. J Am Soc Brew Chem, 87(12): 1469-1474.

[16] BOUABDALLAH I, BOUALI I, MARTINEZ-FORCE E. Composition of fatty acids, triacylglycerols and polar compounds of different walnut varieties (*Juglans regia* L.) from Tunisia [J]. Nat Prod Res, 2014, 28(21): 1826-1833.

[17] 张巧智,丁俭, WANG T, 等. 基于热重法的植物油氧化动力学-甘油三酯相关性研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(8): 241-247, 254.

[18] ISNARDY B, WAGNER KH, ELMADFA I. Effects of α -, γ - and δ -tocopherols on the autoxidation of purified rapeseed oil triacylglycerols in a system containing low oxygen [J]. J Agric Food Chem, 2003, 51(26): 7775-7780.

[19] MARINOVA E, TONEVA A, YANISHLIEVA N. Synergistic antioxidant effect of α -tocopherol and myricetin on the autoxidation of triacylglycerols of sunflower oil [J]. Food Chem, 2008, 106(2): 628-633.

[20] KARMOWSKI J, HINTZE V, KSCHONSEK J, et al.

- Antioxidant activities of tocopherols/tocotrienols and lipophilic antioxidant capacity of wheat, vegetable oils, milk and milk cream by using photochemiluminescence [J]. *Food Chem*, 2015, 175: 593–600.
- [21] 耿鹏飞, 彭吟雪, 胡传荣, 等. 八大核桃产地的核桃理化性质及油脂特性对比研究[J]. *中国油脂*, 2018, 43(9): 116–120.
- [22] PYCIA K, KAPUSTA I, JAWORSKA G, et al. Antioxidant properties, profile of polyphenolic compounds and tocopherol content in various walnut (*Juglans regia* L.) varieties[J]. *Eur Food Res Technol*, 2019, 245(3): 607–616.
- [23] 胡银洲, 黄伟素, 陆柏益. 食品中植物甾醇氧化物研究进展[J]. *中国粮油学报*, 2013, 28(11): 117–128.
- [24] 潘影. 食用油中甾醇的高温氧化特性及稳定性研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.
- [25] 朱琳, 薛雅琳, 张东, 等. 特种植物油中甾醇总量及组成分析[J]. *粮油食品科技*, 2015, 23(2): 49–52.
- [26] 王素君. 食用植物油微量营养成分同步检测及功能评价研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.
- [27] 张瑶, 吴邦富, 吕昕, 等. 油料作物中特异性脂类伴随物及其分析方法研究进展[J]. *中国油料作物学报*, 2021, 43(3): 530–534.
- [28] 周晔. 基于内源氧化特征的核桃油稳定性监测与改良[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2017.
- [29] MU H, GAO H, CHEN H, et al. Study on the volatile oxidation compounds and quantitative prediction of oxidation parameters in walnut (*Carya cathayensis* Sarg.) oil[J/OL]. *Eur J Lipid Sci*, 2019, 121(6): 1800521 [2022-11-28]. <https://doi.org/10.1002/ejlt.201800521>.
- [30] 温毓秀. 核桃油氧化过程标志物分析及抗氧化调控研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
- [31] 李书国, 李雪梅, 陈辉. 我国食用油质量安全现状、存在问题及对策研究[J]. *粮食与油脂*, 2005(12): 3–5.
- [32] CHOE E, MIN D B. Mechanisms and factors for edible oil oxidation[J]. *Compr Rev Food Sci F*, 2006, 5(4): 169–186.
- [33] 张建树, 王强, 刘红芝, 等. 脂肪酸、 V_E 、甾醇与植物油稳定性的关系研究进展[J]. *中国油脂*, 2011, 36(10): 38–41.
- [34] 朱冉, 周杰, 詹祎捷, 等. 不同温度和时间热加工处理对核桃油品质的影响[J]. *保鲜与加工*, 2015, 15(5): 47–51, 56.
- [35] RABADÁN A, ÁLVAREZ-ORTÍ M, PARDO J E, et al. Storage stability and composition changes of three cold-pressed nut oils under refrigeration and room temperature conditions[J]. *Food Chem*, 2018, 259: 31–35.
- [36] 毕艳兰. 油脂化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 60–90.
- [37] 陈洪建. 油脂热氧化脂氧自由基生成机制及极性甘油三酯聚合物自由基生成机制研究[D]. 江苏 无锡: 江南大学, 2019.
- [38] SAVAGE G P, DUTTA P C, MCNEIL D L. Fatty acid and tocopherol contents and oxidative stability of walnut oils[J]. *J Am Oil Chem Soc*, 1999, 9(76): 1059–1063.
- [39] 宋晓燕, 杨天奎. 天然维生素E的功能及应用[J]. *中国油脂*, 2000, 25(6): 45–47.
- [40] SOUPAS L, JUNTUNEN L, LAMPI A M, et al. Effects of sterol structure, temperature, and lipid medium on phytosterol oxidation[J]. *J Agric Food Chem*, 2004, 52(21): 6485–6491.
- [41] 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.
- [42] CROWE T D, WHITE P J. Oxidative stability of walnut oils extracted with supercritical carbon dioxide[J]. *J Am Oil Chem Soc*, 2003, 80(6): 575–578.
- [43] 江鑫. 食用油热加工过程中醛酮的形成机制[D]. 海口: 海南大学, 2019.

(上接第37页)

- [6] 林凤岩, 伊晓丽, 郭兴凤, 等. 醇法制备大豆浓缩蛋白大型智能化成套装备技术开发及产业化[J]. *中国油脂*, 2020, 45(4): 28–31.
- [7] 董季, 林凤岩. 醇法制备大豆浓缩蛋白工艺[J]. *中国油脂*, 2008, 33(6): 24–25.
- [8] 石彦国. 国内大豆分离蛋白产业现状与发展建议[J]. *食品与机械*, 2000(3): 25.
- [9] 金讯. 大豆蛋白行业发展前景广阔[J]. *中国油脂*, 2006, 31(10): 81.
- [10] 郑恒光, 杨晓泉, 唐传核, 等. 醇法大豆浓缩蛋白加工工艺及实践[J]. *中国油脂*, 2007, 32(4): 26–28.
- [11] CHAJUSS D. Soy protein concentrate: processing, properties and prospects[J]. *Inform*, 2001(12): 1176–1180.
- [12] 王少庸, 费英敏. 植物拉丝组织蛋白在红肠中的应用研究[J]. *大豆科技*, 2011(4): 54–55.
- [13] 孙月梅, 郝晓亮, 江连洲, 等. 大豆组织蛋白素食肉块的研制[J]. *大豆通报*, 2007(2): 23–25.
- [14] 王笛, 迟玉杰. 大豆组织蛋白丸子配方的优化研究[J]. *食品工业科技*, 2011(9): 110–115.
- [15] 王瑞元. 创新抢占大豆蛋白开发利用的至高点[J]. *中国油脂*, 2021, 46(3): 1–2.
- [16] 杨文. 添加剂对组织化小麦蛋白理化性质及结构影响的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.