

热处理延长油茶籽油氧化稳定性研究

罗凡¹, 费学谦¹, 杨楠^{1,2}, 钟海雁²

(1. 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 杭州 311400; 2. 中南林业科技大学林学院, 长沙 410004)

摘要:研究了油茶籽经过不同条件加热后其压榨油氧化稳定性的变化规律, 并通过测定压榨油过氧化值、酸值、水分、脂肪酸、油脂伴随物等指标探讨影响油茶籽油氧化稳定性变化的主要因素。结果表明, 油茶籽经过不同温度加热 20 min 后, 其压榨油的氧化稳定时间显著延长, 30、60、90、120、150 °C 加热条件下分别比初始延长了 1.1、4.2、5.2、3.5、3.9 倍, 随着加热时间的延长, 60、90 °C 和 120 °C 的加热温度下油茶籽油的氧化稳定性变化趋于平缓, 30 °C 和 150 °C 下加热 40 min 后氧化稳定性仍有提高, 在加热 60 min 时, 5 种温度氧化稳定时间分别比初始延长了 4.4、5.0、4.4、3.1、5.8 倍。水分、酸值、过氧化值、角鲨烯含量、 β -谷甾醇含量与油茶籽油的氧化稳定性的变化呈现负相关, 说明水分、酸值、过氧化值低的油茶籽油的氧化稳定性好, 角鲨烯和 β -谷甾醇等抗氧化物质并不是提高油茶籽油氧化稳定性的活性成分。总酚、5-丁基二氢-2(3H)-呋喃酮、3,4-二甲基-2,5-二氢呋喃、正辛醇、苯甲醛、戊酸、辛酸、苯乙醛、壬醛等物质的含量与油茶籽油的氧化稳定性呈现正相关, 说明总酚和美拉德反应产物可能是延长油茶籽油氧化稳定性的主要因素。

关键词:热处理; 油茶籽油; 氧化稳定性; 理化性质; 总酚; 美拉德反应

中图分类号: TS201.2; TQ646 文献标识码: A 文章编号: 1003-7969(2018)09-0017-07

Prolonging oxidation stability of oil – tea camellia seed oil by heat treatment

LUO Fan¹, FEI Xueqian¹, YANG Nan^{1,2}, ZHONG Haiyan²

(1. Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Hangzhou 311400, China; 2. College of Forestry, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: The oxidation stability of oil – tea camellia seed oil after being heated under different conditions was studied. The main factors affecting oil oxidation stability were also explored by measuring and analyzing the peroxide value, acid value, moisture content, fatty acids, and oil companyment of the pressed oil. The results showed that the induction periods of the pressed oil prolonged significantly, which increased by 1.1, 4.2, 5.2, 3.5 times and 3.9 times than the initial respectively, after heating 20 min at 30, 60, 90, 120, 150 °C respectively. The change of oxidation stability of oil – tea camellia seed oil tended to slow at 60, 90 °C and 120 °C with the heating time prolonging. The oxidation stability was still improved after heating 40 min at 30 °C and 150 °C. The induction periods increased by 4.4, 5.0, 4.4, 3.1 times and 5.8 times than the initial respectively after heating 60 min under the above five different temperatures. The moisture content, acid value, peroxide value, squalene and β -sitosterol contents were negatively related with the induction period, which meant when the moisture content, acid value and peroxide value were low, the oxidation stability of oil – tea camellia seed oil was better. The active ingredi-

ents such as squalene and β -sitosterol could not improve oxidation stability of oil – tea camellia seed oil. The contents of total phenol, 5-butylidihydro-2(3H)-furanone, 3,4-dimethyl-2,5-dihydrofuran, 1-octanol, benzaldehyde, pentanoic acid, octanoic acid, benzeneacetaldehyde and nonanal were positively related with the induction period of oil – tea camellia seed oil. It

收稿日期: 2017-12-12; 修回日期: 2018-05-21

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(CAFYBB2017ZA004-10); 浙江省科技计划项目(2017C02003); 国家重点研发计划课题(2016YFD0600803)

作者简介: 罗凡(1980), 女, 助理研究员, 博士, 主要从事经济林产品加工利用的研究工作(E-mail) luofan329@163.com。

was suggested that total phenol and Maillard reaction product could be the main factors which improved the oxidation stability of oil – tea camellia seed oil.

Key words: heat treatment; oil – tea camellia seed oil; oxidation stability; physicochemical property; total phenol; Maillard reaction

油茶 (*Camellia oleifera*), 山茶科 (Theaceae) 山茶属 (*Camellia* L.) 植物, 是我国特有经济效益和生态效益俱佳的木本油料树种, 油茶籽油中除了含有 90% 以上的不饱和脂肪酸, 更富含多种维生素、微量元素、甾醇、角鲨烯和多酚等营养成分, 是联合国粮农组织重点推广的健康食用油。随着政府和社会的广泛重视以及人们对油茶籽油营养保健价值的认可, 其市场价值也日渐升高, 目前油茶籽油年产量已达 50 多万 t, 位列国家重点发展的四大油种之一。

在油茶籽干燥、炒(蒸)制和压榨过程中, 温度不可避免地会对油茶籽的内部形态及营养成分产生重要影响。热处理对油料的影响包括导致其内部微结构的物理改变和化学变化, 例如水分的降低、脂质修饰、颜色的变化和经美拉德反应产生新的香味物质等, 而微结构和脂质修饰也可能导致敏感脂类的氧化以及抗氧化剂等代谢物含量的变化^[1]。本研究组在前期对压榨条件影响油茶籽油品质的研究中发现, 在压榨前对油茶籽进行不同温度炒制处理, 压榨后油茶籽毛油中总酚、 V_E 、 β -谷甾醇、角鲨烯等营养成分的含量呈现不同程度变化, 而氧化稳定性均有所延长^[2]。本文旨在摸清油茶籽在烘制过程中温度对油茶籽油内部氧化稳定性、营养品质及理化指标的影响规律, 为探索油茶籽理化变化机理提供理论基础, 为油茶籽油加工工艺提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 原料与试剂

油茶籽样品于 2016 年 10 月底采自浙江康能食品有限公司油茶基地, 在原料清理时除去未成熟粒、破损粒和霉变粒, 油茶籽仁含水率 7.8%, 含油率 49.93%。

福林酚试剂; 乙腈(色谱级): 美国 Merk 公司; 其他试剂均为分析纯; 实验用水为超纯水。

1.1.2 仪器与设备

二醇基固相萃取小柱 (Diol – SPE) (500 mg, 3 mL): Agela 公司; UV – 2550 紫外分光光度计: 日本岛津公司; DGG – 9140 电热恒温鼓风干燥箱; S – 114 万分之一电子天平; XW – 80A 旋涡混合仪; RE – 5298 旋转蒸发仪; Avanti J – E 离心机: 美国贝

克曼库尔特公司; ASE – 12 固相萃取仪; MTN – 2800D 氮吹仪; 6YY – 190 自动液压榨油机: 洛阳金厦液压机械有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 油茶籽油的制备

称取 5 份油茶籽各 2.0 kg, 平铺于托盘中并分别在 30、60、90、120、150 °C 烘箱中加热 0、20、40、60 min (0 min 即未加热处理样为对照), 烘后自然冷却至室温, 去壳液压榨油, 冷藏备用。

1.2.2 理化指标测定

氧化稳定性测定参考 GB/T 21121—2007 方法; 水分测定参考 GB 5009. 236—2016 方法; 脂肪酸组成测定参考 GB/T 17376—2008 和 GB/T 17377—2008 方法; 酸值和过氧化值测定参考 GB/T 5009. 37—2003 方法。

1.2.3 营养成分测定

维生素 E 测定参考 GB/T 5009. 82—2003 方法; 角鲨烯测定参考文献[3]; β -谷甾醇测定参考文献[4]; 总酚测定采用福林酚比色法^[5]。

1.2.4 挥发性成分测定

油茶籽油中的挥发性成分采用气质联用法测定^[6]。

1.2.5 数据处理

采用 Microsoft Excel 2016 软件进行数据整理, OriginPro 9.1 软件进行作图, SPSS22.0 软件对实验数据进行单因素方差分析和回归分析, 采用最小显著极差法 (LSD 法) 进行多重比较, 显著水平 $P < 0.05$, 极显著水平 $P < 0.01$ 。

2 结果与讨论

2.1 加热对油茶籽油氧化稳定性的影响

油茶籽分别经过不同温度加热后测定其压榨油的氧化稳定性, 结果如图 1 所示。

从图 1 可以看出, 油茶籽经过不同条件加热后, 压榨油茶籽油的氧化稳定性均有不同程度延长; 经 SPSS 分析得知, 时间和温度对油茶籽油氧化稳定性都有极显著影响, 且温度和时间的交互效应对氧化稳定性的影响也极显著。油茶籽经过不同温度加热 20 min 后, 压榨毛油的氧化稳定时间有显著延长, 30、60、90、120、150 °C 条件下分别比对照延长了 1.1、

4.2、5.2、3.5、3.9倍,随着加热时间的延长,60、90、120℃的加热温度下油茶籽油的氧化稳定性变化趋于平缓,30、150℃下加热40 min后氧化稳定时间仍有提高,在加热60 min时,5种温度条件下氧化稳定时间分别比对照延长了4.4、5.0、4.4、3.1、5.8倍。研究结果表明适当加热处理能明显提高油茶籽油的氧化稳定性,与Schlörmann等^[7]的研究结果类似。

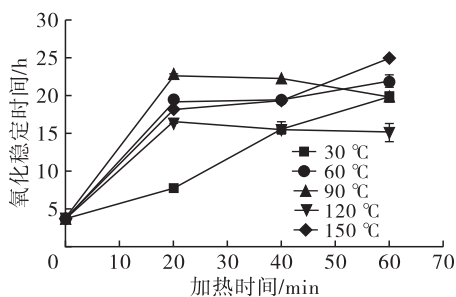


图1 加热对油茶籽油氧化稳定性的影响

2.2 油茶籽油理化指标的变化

2.2.1 加热对油茶籽油水分的影响

水分是油脂的主要杂质之一,往往通过加速甘油三酯的水解影响油脂品质。油茶籽经过不同温度加热后其压榨油中水分的变化如图2所示。

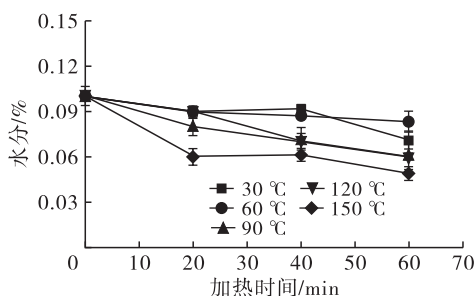


图2 加热对油茶籽油水分的影响

从图2可以看出,对油茶籽加热可以降低压榨油茶籽油的水分,尤其在加热初期(20 min),不同加热温度油茶籽油中水分的变化趋势相同;经SPSS分析得知,温度对油茶籽油水分有极显著影响,但时间对油茶籽油水分影响不显著;当在30、60、90、120℃和150℃下加热60 min后,油茶籽油中的水分分别降至0.07%、0.08%、0.06%、0.06%和0.05%,分别比加热前降低了28.9%、16.7%、40.0%、39.7%和51.0%。

2.2.2 加热对油茶籽油酸值和过氧化值的影响

测定了不同温度加热后压榨油茶籽油的酸值和过氧化值,结果如图3和图4所示。

从图3可以看出,油茶籽经不同条件加热后,其压榨毛油的酸值均有所降低,尤其是加热初期(20 min),但随加热时间的延长,不同加热温度下酸值的变化趋势略有不同。当加热温度为30、60℃和

120℃时,随加热时间的延长,酸值呈现先降低后升高又降低的变化趋势,均在加热60 min时酸值(KOH)有最低值,分别为0.49、0.54、0.55 mg/g,比对照降低了27.7%、19.9%和19.0%;当加热温度为90、150℃时,随加热时间的延长,酸值呈现先降低后升高的变化趋势,酸值(KOH)最低值分别出现在加热40 min和20 min时,为0.46 mg/g和0.52 mg/g,分别比对照降低了32.0%和24.1%。加热初期油茶籽油中酸值下降的趋势可能和油茶籽油中水分降低有关,随后由于加热可能导致油茶籽油中部分游离脂肪酸的增加,而两者的共同作用导致了油茶籽油酸值的波动。

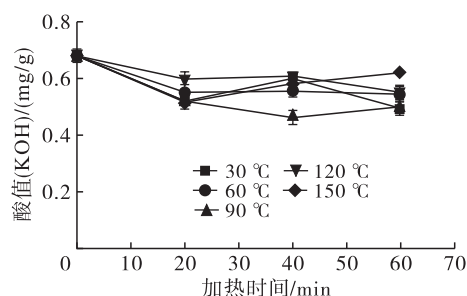


图3 加热对压榨油茶籽油酸值的影响

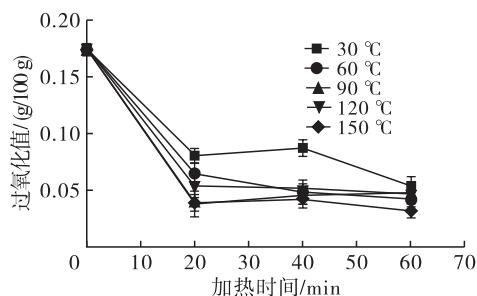


图4 加热对压榨油茶籽油过氧化值的影响

从图4可以看出,油茶籽加热后其压榨毛油过氧化值均低于GB 11765—2003《油茶籽油》中压榨油茶籽油过氧化值6.0 mmol/kg(0.152 g/100 g)的限值。加热初期(20 min),油茶籽油的过氧化值呈现明显的下降趋势,随加热温度的升高,过氧化值分别比初始下降了53.7%、62.9%、78.2%、69.0%和77.6%;超过20 min时,随加热时间的延长不同加热温度油茶籽油的过氧化值出现波动,当加热温度为30℃和150℃时,过氧化值先上升后下降,当加热温度为60℃和120℃时,过氧化值呈现持续下降的趋势。30、60、120、150℃加热温度下油茶籽油过氧化值的最低值均出现在加热60 min时,分别比对照降低了69.2%、76.0%、73.1%和81.7%;当加热温度为90℃,加热时间为20~60 min时,油茶籽油过氧化值呈现持续上升的趋势,加热60 min时,过氧化值为0.046 g/100 g,比对照低73.3%。油脂氧

化过程是一个动态平衡过程,在油脂氧化生成氢过氧化物的同时,还存在着氢氧化物分解和聚合。本研究的结果表明加热可以促进油茶籽中氢过氧化物的分解和聚合,从而降低油茶籽油的过氧化值。

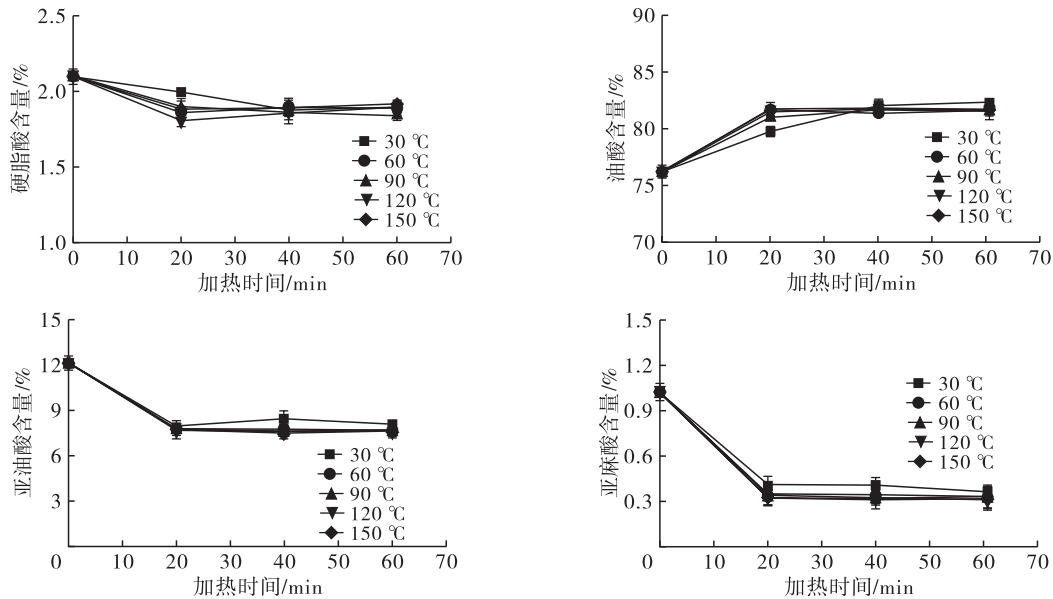


图5 加热对油茶籽油中C18脂肪酸含量的影响

从图5可以看出,经过不同温度加热后,油茶籽油中硬脂酸、亚油酸和亚麻酸的含量都呈现下降趋势,且拐点基本出现在加热20 min时,之后趋于稳定;而油酸含量的变化规律相反,在不同温度下加热20 min后,压榨油茶籽油中的油酸含量上升并趋于稳定。亚麻酸和亚油酸含量的降低可能由于多不饱和脂肪酸对单不饱和脂肪酸具有一定的保护作用^[8]。其中30、60、90、120、150 °C分别加热60 min后,油茶籽油中油酸的含量分别增加了6.1、5.4、5.4、5.5、5.4个百分点,而硬脂酸、亚油酸和亚麻酸的损失之和分别为4.9、5.4、5.4、5.5、5.4个百分点,说明油酸含量的增加不仅来自于硬脂酸、亚油酸和亚麻酸的转化。

2.4 油茶籽油中营养成分的变化

2.4.1 加热对油茶籽油 V_E 含量的影响

油茶籽经过不同温度加热后测定其压榨油中 V_E 的含量,结果如图6所示。

从图6可以看出,油茶籽经过不同温度加热后,压榨油茶籽油中 V_E 含量几乎都随着加热温度的升高呈现下降的趋势,这与Bada^[9]、Lee^[10]等的研究结果一致。当在30、60、90、120 °C和150 °C下加热60 min后,油茶籽油中的 V_E 含量分别降至28.5、29.2、30.2、30.0 mg/100 g和28.0 mg/100 g,比加热前分别降低了7.3%、4.9%、1.8%、2.5%和9.0%,其中90 °C加热温度下损失较低的原因可能

2.3 油茶籽油中脂肪酸组成的变化

油茶籽经过不同温度加热后测定其压榨油中C18脂肪酸含量,结果如图5所示。

由于该温度下其他抗氧化物质优先作用,从而保护了 V_E 。Vaidya等^[11]在160 °C下加热核桃15 min后,在暗处60 °C贮藏期间观察其油脂氧化稳定性和生育酚含量变化,发现加热提取的油中总生育酚含量低于未加热提取的油,但贮藏期间前者的氧化诱导时间明显长于后者,结果与本文相似。

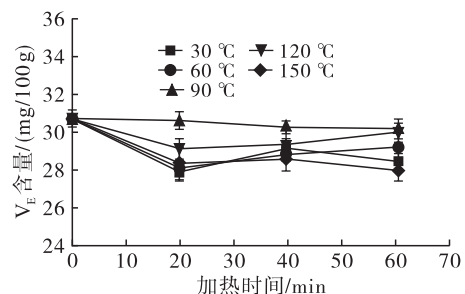


图6 加热对油茶籽油中 V_E 含量的影响

2.4.2 加热对油茶籽油角鲨烯和 β -谷甾醇含量的影响

油茶籽经过不同温度加热后测定其压榨油中角鲨烯和 β -谷甾醇的含量,结果如图7和图8所示。

从图7和图8可以看出,油茶籽经过不同温度加热后,其油中角鲨烯和 β -谷甾醇的含量随加热时间的延长均呈现下降趋势,尤其是加热初始的20 min左右,下降幅度最大,后趋于稳定,其中在30、60、90、120 °C和150 °C温度下加热20 min后,角鲨烯含量分别比初始下降了46.73%、37.51%、44.82%、41.61%和46.78%; β -谷甾醇含量分别

下降了 51.86%、47.15%、54.24%、49.59% 和 43.98%；加热温度和加热时间都对角鲨烯的含量产生影响，在 30、60、90、120 °C 和 150 °C 加热 60 min 后，角鲨烯的含量分别减少了 40.83%、38.61%、47.83%、55.47% 和 58.20%，温度越高角鲨烯的损失越大；油茶籽油中 β -谷甾醇的含量主要受加热时间的影响，但 60 °C 加热 40 min 时 β -谷甾醇含量低于其他温度，具体原因有待进一步考察。

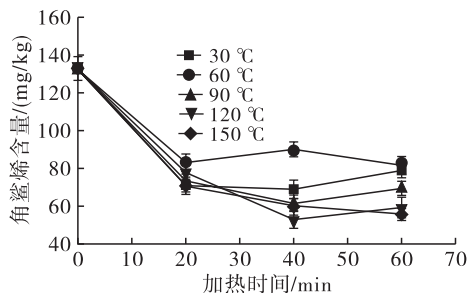


图7 加热对油茶籽油中角鲨烯含量的影响

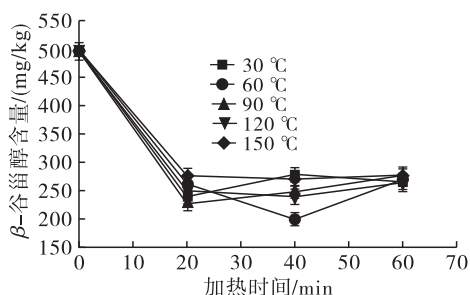


图8 加热对油茶籽油中 β -谷甾醇含量的影响

2.4.3 加热对油茶籽油总酚含量的影响

油茶籽经不同温度加热后测定其压榨油中总酚的含量，结果如图9所示。

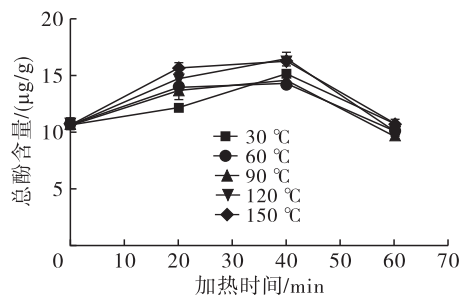


图9 加热对油茶籽油中总酚含量的影响

从图9可以看出，油茶籽加热后压榨油茶籽油中总酚含量随加热时间的延长呈现先升高后下降的变化趋势，最高点出现在加热 40 min 左右，此时分别比初始增加了 41.6%、34.3%、36.3%、53.9% 和 52.1%。总酚含量的升高有可能是加热强度的适度增加(时间延长或温度升高)，促进了油茶籽中极性多酚物质转移到油中^[12]，也可能是由于热处理会导致细胞内水分的蒸发，触动导致木质纤维素结构变化的化学反应，促进蛋白质变性，而这些变化提高了

组织中多酚物质的有效性^[13]，或是某些束缚态抗氧化多酚物质从细胞组织中的释放以及提高了酚类物质的可萃取率^[14-15]等；但是随着加热时间的延长，多酚损失超过以上过程，因此造成总酚含量减少。

2.5 油茶籽油挥发性成分的变化

利用 GC-MS 对加热前后油茶籽油样品中的主要挥发性成分进行了测定^[6]，结果发现，油茶籽油中的挥发性物质包括醇类、醛酮类、酯类、羧酸类、杂环类等。加热后油茶籽油中的苯乙烯、己酸、5-乙二氢-2(3H)-呋喃酮、庚酸和壬酸的含量明显增加；苯甲醛、苯乙醛、十一醇、3,4-二甲基-2,5-二氢呋喃酮、丁酸、丁香酚甲醚、5-己基二氢-2(3H)-呋喃酮的含量从无到有；随加热温度的升高和加热时间的延长，戊酸、正辛醇、壬醛、辛酸、甲氧基环辛烷和 5-丁基二氢-2(3H)-呋喃酮的含量逐渐增加。

其中随加热含量增加的杂环类 5-乙二氢-2(3H)-呋喃酮、3,4-二甲基-2,5-二氢呋喃酮等是美拉德反应产物，其阈值较低，对风味贡献较大^[16]，是优化坚果焙烤条件的重要指标^[17-18]；苯甲醛、苯乙醛和壬醛等醛类物质主要来源于脂肪氧化降解、斯特雷克儿氨基酸反应或美拉德反应的 Strecker 降解^[19]。

2.6 氧化稳定性变化的原因探索

通过研究发现，对油茶籽适度加热可以显著提高压榨油茶籽油的氧化稳定性，尤其是初始的 20 min 内变化更为明显，通过对油茶籽油中水分、酸值、过氧化值、脂肪酸含量、以及 V_E 、角鲨烯、 β -谷甾醇和总酚等营养成分以及挥发性物质的分析，探究加热后压榨油茶籽油氧化稳定性提高的原因。分别对不同加热温度下加热同一时间(20、40、60 min)处理后的油茶籽油氧化稳定时间和其他理化数据的线性关系(30、60、90、120 °C 和 150 °C 5 个点)以及同一温度(30、60、90、120、150 °C)不同加热时间后油茶籽油的氧化稳定性与理化数据的线性关系(0、20、40 min 和 60 min 4 个点)进行分析，其线性相关系数的结果如表 1 所示。

从表 1 可以看出，所考察的理化指标的变化多数随加热时间与油茶籽油的氧化稳定性有线性相关性，其中水分、酸值、过氧化值、角鲨烯含量、 β -谷甾醇含量变化与油茶籽油的氧化稳定性呈现负相关，说明水分、酸值、过氧化值低的油茶籽油的氧化稳定性好，而角鲨烯和 β -谷甾醇等抗氧化物质并不是提高油茶籽油氧化稳定性的活性成分；而总酚、5-丁基二氢-2(3H)-呋喃酮、3,4-二

甲基-2,5-二氢呋喃、正辛醇、苯甲醛、戊酸、辛酸、苯乙醛、壬醛等物质的含量与油茶籽油的氧化稳定性呈现正相关,说明在一定温度下总酚(60℃和120℃)和美拉德反应产物(60~150℃)可能是

提高油茶籽油氧化稳定性的主要因素,而影响油茶籽油氧化稳定性的主要多酚物质以及美拉德反应产物有待进一步研究。

表1 不同加热条件下油茶籽油氧化稳定性与其理化指标的线性关系分析

影响因素	相关系数							
	20 min	40 min	60 min	30℃	60℃	90℃	120℃	150℃
水分	-0.107	-0.122	-0.013	-0.712	-0.942	-0.652	-0.443	-0.988
总酚	0.045	0.058	0.198	0.519	0.860	0.260	0.983	0.064
酸值	-0.001	-0.829	-0.256	-0.410	-0.990	-0.924	-0.727	-0.303
过氧化值	-0.580	-0.406	-0.495	-0.676	-0.990	-0.979	-0.981	-0.924
油酸	0.531	-0.424	-0.042	0.875	0.977	0.951	0.991	0.895
角鲨烯	-0.120	-0.037	-0.000	-0.439	-0.980	-0.960	-0.866	-0.952
β -谷甾醇	-0.005	-0.071	-0.548	-0.421	-0.885	-0.998	-0.991	-0.887
5-丁基二氢-2(3H)-呋喃酮	0.097	0.326	0.445	0.337	0.818	0.777	0.933	0.704
3,4-二甲基-2,5-二氢呋喃	0.467	0.883	0.549	-	0.469	0.028	0.025	0.732
壬醛	0.125	0.485	0.520	0.958	0.987	0.841	0.821	0.189
正辛醇	0.263	0.303	0.069	0.719	0.987	0.913	0.996	0.861
苯甲醛	0.057	0.061	0.005	-	0.908	-	0.742	0.736
戊酸	0.536	-	0.179	0.371	-	0.933	0.744	0.928
辛酸	0.001	0.701	0.611	0.346	0.874	0.877	0.881	0.942
苯乙醛	-	-	0.617	-	-	-	0.977	0.948

3 结论

本文探索了油茶籽不同加热条件下所榨油茶籽油氧化稳定性的变化规律,并通过测定油脂的理化指标对该变化规律的原因进行了初步分析。研究结果表明,加热后压榨油茶籽油的氧化稳定性明显延长,当在30、60、90、120℃和150℃下加热60 min后,油茶籽油的氧化稳定性分别比加热前延长了4.4、5.0、4.4、3.1倍和5.8倍。油茶籽油水分、酸值、过氧化值、角鲨烯含量、 β -谷甾醇含量变化与油茶籽油的氧化稳定性呈现负相关,说明水分、酸值和过氧化值低的油茶籽油的氧化稳定性好,同时也说明角鲨烯和 β -谷甾醇等抗氧化物质并不是提高油茶籽油氧化稳定性的活性成分;而总酚、5-丁基二氢-2(3H)-呋喃酮、3,4-二甲基-2,5-二氢呋喃、正辛醇、苯甲醛、戊酸、辛酸、苯乙醛、壬醛等物质的含量与油茶籽油的氧化稳定性呈现正相关,说明总酚和美拉德反应产物可能是提高油茶籽油氧化稳定性的主要因素,但是具体的多酚物质以及美拉德反应产物有待进一步研究。

参考文献:

- [1] CHANG S K, ALASALVAR C, BOLLING B W, et al. Nuts and their co-products: the impact of processing (roasting) on phenolics, bioavailability, and health benefits—a comprehensive review[J]. J Funct Foods, 2016, 26: 88–122.
- [2] 罗凡,费学谦,李康雄,等. 预处理条件对油茶籽液压榨油效率和品质的影响研究[J]. 中国粮油学报, 2016, 31(4): 94–99.
- [3] 毛多斌,贾春晓,孙晓丽,等. 几种功能性植物油中角鲨烯和维生素E分析[J]. 中国粮油学报, 2007, 22(2): 79–81.
- [4] 鲍忠定,许荣年,张颂红. 毛细管气相色谱法测定油中植物甾醇和胆固醇[J]. 分析化学, 2002, 30(12): 1490–1493.
- [5] ZHONG H Y, BEDGOOD D, BISHOP A, et al. Endogenous biophenols fatty acid and volatile profiles of selected oils[J]. Food Chem, 2007, 100: 1544–1551.
- [6] 罗凡,费学谦,沈丹玉,等. 加热前后油茶籽油气味特征变化的规律研究[J]. 中国油脂, 2018, 43(5): 21–27.
- [7] SCHLÖRMANN W, BIRRINGER M, BÖHM V, et al. Influence of roasting conditions on health-related compounds in different nuts[J]. Food Chem, 2015, 180: 77–85.
- [8] 郑博闻,陈文,叶磊,等. 核桃功能性成分制油与热加工稳定性研究进展[J]. 中国粮油学报, 2015, 30(11): 140–146.
- [9] BADA J, LÉON-CAMACHO M, PRIETO M, et al. Characterization of walnut oils (*Juglans regia* L.) from Asturias, Spain[J]. J Am Oil Chem Soc, 2010, 87: 1469–1474.

(下转第29页)

- Chem, 2010, 122(1): 381–385.
- [3] CHOE E, MIN D B. Chemistry of deep – fat frying oils [J]. J Food Sci, 2007, 72(5): 77–86.
- [4] 张铁英, 姜元荣, 陈雅琼. 煎炸油在煎炸过程中脂肪酸组成的变化[J]. 食品科学, 2013, 34(5): 132–136.
- [5] RUIZ G M, TASIOULA – MARGARI M, DOBARGANES M C. Quantitation and distribution of altered fatty acids in frying fats [J]. J Am Oil Chem Soc, 1995, 72(10): 1171–1176.
- [6] MARMESAT S, MORALES A, VELASCO J, et al. Influence of fatty acid composition on chemical changes in blends of sunflower oils during thermoxidation and frying [J]. Food Chem, 2012, 135(4): 2333–2339.
- [7] FILLION L, HENRY C J K. Nutrient losses and gains during frying: a review [J]. Int J Food Sci Nutr, 1998, 49(2): 157–168.
- [8] LI J W, CAI W C, SUN D W, et al. A quick method for determining total polar compounds of frying oils using electric conductivity [J]. Food Anal Methods, 2016, 9(5): 1444–1450.
- [9] GIL B, CHO Y J, YOON S H. Rapid determination of polar compounds in frying fats and oils using image analysis [J]. LWT – Food Sci Technol, 2004, 37(6): 657–661.
- [10] 张瑜, 刘睿杰, 金青哲, 等. 低场核磁共振技术检测大豆煎炸油品质的研究 [J]. 中国粮油学报, 2014, 29(9): 115–119, 123.
- [11] GERTZ C. Routine analysis of deep – frying fats and oils [J]. Lipid Technol, 2001, 13: 44–47.
- [12] WEISSHAAR R. Quality control of used deep – frying oils [J]. Eur J Lipid Sci Technol, 2014, 116(6): 716–722.
- [13] KARAKAYA S, SIMSEK S. Changes in total polar compounds, peroxide value, total phenols and antioxidant activity of various oils used in deep fat frying [J]. J Am Oil Chem Soc, 2011, 88(9): 1361–1366.
- [14] 冯红霞. 大豆油煎炸过程中极性化合物的衍变规律及结构特性解析 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2016.
- [15] 李阳, 钟海雁, 李晓燕, 等. 煎炸用油品质变化及测定方法研究进展 [J]. 食品与机械, 2008, 24(6): 148–151.
- [16] 石永峰. 棕榈油在煎炸过程中的劣变及对生物机体的影响 [J]. 西部粮油科技, 1999, 24(5): 48–50.
- [17] ABDULKARIM S M, GHAZALI H M. Fatty acid ratios and their relative amounts as indicators of oil stability and extent of oil deterioration during frying [J]. J Food Agric Environ, 2012, 10(2): 33–38.
- [18] CHU B S, GHAZALI H M, LAI O M, et al. Performance of a lipase – catalyzed transesterified palm kernel olein and palm stearin blend in frying banana chips [J]. Food Chem, 2001, 74(1): 21–33.
- [19] ZHANG Q, SALEH A S M, CHEN J, et al. Chemical alterations taken place during deep – fat frying based on certain reaction products: a review [J]. Chem Phys Lipids, 2012, 165(6): 662–681.
- (上接第22页)
- [10] LEE Y C, CHANG J, KIM I H, et al. Chemical composition and oxidative stability of safflower oil prepared from safflower seed roasted with different temperatures [J]. Food Chem, 2004, 84: 1–6.
- [11] VAIDYA B, EUN J B. Effect of roasting on oxidative and tocopherol stability of walnut oil during storage in the dark [J]. Eur J Lipid Sci Technol, 2013, 115: 348–355.
- [12] 李志晓. 加工过程对油茶籽油微量营养成分和抗氧化性能的影响 [D]. 江苏 无锡: 江南大学, 2015.
- [13] XU B, CHANG S K. Total phenolics, phenolic acids, isoflavones, and anthocyanins and antioxidant properties of yellow and black soybeans as affected by thermal processing [J]. J Agric Food Chem, 2008, 56: 7165–7175.
- [14] PELVAN E, ALASALVAR C, UZMAN S. Effects of roasting on the antioxidant status and phenolic profiles of commercial Turkish hazelnut varieties (*Corylus avellana* L.) [J]. J Agric Food Chem, 2012, 60: 1218–1223.
- [15] YANG J J, ZHOU F, XIONG L N, et al. Comparison of phenolic compounds, tocopherols, phytosterols and antioxidant potential in Zhejiang pecan [*Carya cathayensis*] at different stir – frying steps [J]. LWT – Food Sci Technol, 2015, 62: 541–548.
- [16] 孙红梅, 李侠, 张春晖, 等. 鸡骨素及其酶解液的美拉德反应产物挥发性风味成分比较分析 [J]. 分析测试学报, 2013, 32(6): 661–667.
- [17] LIU X J, JIN Q Z, LIU Y F, et al. Changes in volatile compounds of peanut oil during the roasting process for production of aromatic roasted peanut oil [J]. J Food Sci, 2011, 76(3): C404–C412.
- [18] 李丽, 高彦祥, 袁芳. 坚果焙烤香气化合物的研究进展 [J]. 中国食品添加剂, 2011(3): 164–169.
- [19] 闫虹. 狭鳕鱼排美拉德反应制备肉香型风味物及其抗氧化活性研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015.