

6种植物油料油脂的品质及氧化稳定性研究

王亚萍, 姚小华, 曹永庆, 常君, 任华东, 张成才, 王开良

(中国林业科学研究院 亚热带林业研究所, 杭州 311400)

摘要:为拓宽我国植物油料的开发利用途径,测定了薄壳山核桃、油茶、香榧、核桃、花生、油菜等6种植物种子的含油率及其油脂的总酚、生育酚含量和脂肪酸组成,并采用加速氧化试验对其油脂的氧化稳定性进行评价,探究了各项品质指标与氧化稳定性指标的相关性。结果表明:薄壳山核桃仁的含油率最高(73.07%),且其油脂的总酚含量最高(12.6 mg/kg),香榧籽油的生育酚总量最高(114.90 mg/100 g);6种植物油中有5种共同脂肪酸,分别为棕榈酸、硬脂酸、油酸、亚油酸和花生烯酸;6种植物油中,薄壳山核桃油的氧化稳定性最强,其酸值、过氧化值、共轭二烯值、共轭三烯值、羰基值的变化幅度均较小,氧化诱导时间(OSI值)处于最高水平,核桃油的变化幅度较大;加速氧化过程中6种植物油的油酸、亚油酸、不饱和脂肪酸、饱和脂肪酸含量均无明显变化;油脂的OSI值与油酸、生育酚、总酚含量呈显著正相关,与亚油酸、亚麻酸含量呈显著负相关。综上,薄壳山核桃含油率高,薄壳山核桃油含有较高的总酚含量和较好的氧化稳定性,是一种优质的食用油,可作为营养保健油开发利用。

关键词:木本植物油;品质指标;加速氧化试验;氧化稳定性;相关性分析

中图分类号:TS225;TS227

文献标识码:A

文章编号:1003-7969(2024)09-0050-10

Quality and oxidation stability of the oils from six vegetable oilseeds

WANG Yaping, YAO Xiaohua, CAO Yongqing, CHANG Jun, REN Huadong,
ZHANG Chengcai, WANG Kailiang

(Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Hangzhou 311400, China)

Abstract:In order to broaden the development and utilization of vegetable oilseeds in China, the oil contents of six vegetable oilseeds, including *Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch, *Camellia oleifera* Abel. seed, *Torreya grandis* seed, walnut, peanut and rapeseed, as well as the total phenol content, the tocopherol content and the fatty acid composition of their oils were determined, the oxidation stability of their oils was evaluated by the accelerated oxidation test, and the correlation between the quality indexes and the oxidation stability indexes was explored. The results showed that *Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch kernel had the highest oil content (73.07%) and the highest total phenol content in its oil (12.6 mg/kg), and total tocopherol content in *Torreya grandis* seed oil (114.90 mg/100 g) was the highest. There were five common fatty acids in the six vegetable oils, which were palmitic acid, stearic acid, oleic acid, linoleic acid, and arachidonic acid; and among the six vegetable oils, *Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch oil had the strongest oxidative stability, with small changes in acid value, peroxide value, conjugated diene value, conjugated triene value and carbonyl value, and the oxidation induction time (OSI value) was at the highest level, and larger change was found in walnut oil.

收稿日期:2024-01-09;修回日期:2024-04-17

基金项目:林业和草原科技成果国家级推广项目(2020133148);
浙江省林业科研成果推广项目(2020B05)

作者简介:王亚萍(1978),女,副研究员,硕士,研究方向为
经济林采后质量控制技术(E-mail)wypeasy@163.com。

通信作者:王开良,研究员(E-mail)wangkl163@163.com。

There was no significant change in the contents of oleic acid, linoleic acid, unsaturated fatty acid and saturated fatty acid of the six vegetable oils during accelerated oxidation. There was a significant positive correlation between the OSI value of the oils and the contents of oleic acid,

tocopherol and total phenol, and a significant negative correlation with the content of linoleic acid and linolenic acid. In conclusion, *Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch has high oil content, its oil has high total phenol content and high oxidative stability, so *Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch oil is a high-quality edible oil and can be developed and utilized as a nutritional and health care oil.

Key words: woody vegetable oil; quality index; accelerated oxidation test; oxidation stability; correlation analysis

植物油是由植物油料的种子经过压榨或萃取而得,是人体重要的能量和营养来源。植物油的品种与人类健康有着密切关系,不同植物油的脂肪酸组成、油脂伴随物含量和比例不同^[1]。植物油料分为草本和木本油料两类,我国木本油料种质资源丰富,其中种子含油率在40%以上的有150多种,可食用的有50多种^[2]。薄壳山核桃,又名美国山核桃,是胡桃科山核桃属植物,是世界上珍贵的干果和木本油料树种。薄壳山核桃壳薄易剥,出仁率高,果仁中富含油脂、蛋白质、碳水化合物,还含有对人体有益的氨基酸、维生素和矿物质元素等^[3]。油茶是我国特有的食用木本油料树种,油茶籽仁的含油率较高,其油脂中不饱和脂肪酸含量高达80%以上,且富含人体必需的多种微量元素和活性成分^[4]。香榧,属于红豆杉科常绿乔木,是我国特有的经济树种,种仁含油率50%以上,其油脂不饱和脂肪酸含量在85%以上,且含有多种有益脂类伴随物,在降血脂、预防心脑血管疾病等方面具有重要作用^[5-6]。核桃属于胡桃科胡桃属植物,是世界四大坚果之一。我国是世界第一大核桃生产国,核桃年产量约占世界产量的48%^[7]。核桃仁中油脂含量高达65%左右,还含有多种对人体有益的维生素、矿物质元素和生物活性物质,具有很高的营养和保健价值^[8]。油菜和花生是世界四大油料作物中的两种,我国是全球油菜籽及菜籽油第一大生产国和消费国,菜籽油产量占全球的1/4,其消费量占全国植物油消费量的20%。我国花生油产量占全球的1/2^[9]。

植物油中不饱和脂肪酸含量较高,容易受温度、光照、空气、水分等因素的影响而发生氧化酸败,产生小分子物质如醛、酮、酸等,这些小分子物质会产生强烈的刺激味,并使油脂颜色加深,口感变差,而且油脂氧化产生的二级氧化产物在人体中难以代谢,会对肝脏造成损害^[10]。因此,油脂的抗氧化问题引起了油脂领域的重视^[11]。目前,关于大宗植物油氧化稳定性的研究很多^[12];而对油茶、核桃的研究主要集中在油脂加工、营养品质及副产物利用等

方面^[13-15];对香榧、薄壳山核桃的研究主要集中在繁殖培育、栽培技术、生长发育和化学成分等方面^[16-19],对其油脂氧化稳定性的研究相对较少。因此,本文对油茶、香榧、薄壳山核桃、核桃等木本油料油脂,以及花生油、菜籽油的营养及活性成分、氧化稳定性进行对比研究,以期对几种木本油料油脂加工利用及贮藏提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

薄壳山核桃,购于建德市敏捷家庭农场有限公司;油茶籽,采自浙江省金华市东方红林场油茶种质资源基地;香榧籽,采自杭州市富阳区千家村香榧种植基地;核桃,采自新疆阿克苏地区的薄皮核桃;油菜籽、花生仁,购于杭州本地联华超市。

ZYJ-9018家用榨油机,江门贝尔斯顿电器有限公司;180E-Y耐欧小型粉碎机,慈溪耐欧贸易有限公司;R-3旋转蒸发仪、B-811索氏提取仪,瑞士布奇公司;BS-1F全温度振荡培养摇床,常州金坛精达仪器制造有限公司;Agilent 1290高效液相色谱仪,美国安捷伦公司;GC-2010 Plus气相色谱仪,UV-2550紫外分光光度计,日本岛津公司;Rancimat 743油脂氧化稳定性分析仪,北京海富达科技有限公司;Avanti J-E高速冷冻离心机,德国贝克曼公司。

1.2 试验方法

1.2.1 植物油料含油率的测定

含油率参照GB 5009.6—2016中索氏抽提法测定。

1.2.2 油脂的制备

薄壳山核桃、油茶籽、香榧籽、核桃去掉外壳后,与花生仁和油菜籽一起低温干燥至含水量4%左右,选择低温压榨模式分别对6种植物油料直接压榨,得到的植物油过滤后用无水硫酸钠脱水,除去无水硫酸钠后将得到的薄壳山核桃油、油茶籽油、香榧籽油、核桃油、花生油和菜籽油分别于4℃冷藏备用。

1.2.3 植物油中营养及活性成分的测定

1.2.3.1 脂肪酸组成及含量

参照 GB 5009.168—2016 对油样进行甲酯化,并采用气相色谱法测定脂肪酸组成及含量。色谱条件: Fameswax 石英毛细管柱(30 m × 0.32 mm × 0.25 μm); 升温程序为起始温度 150 °C, 保持 1 min, 以 5 °C/min 升至 190 °C, 保持 20 min; 分流进样, 分流比 1:10; 进样口温度 220 °C; 进样量 1 μL; 载气为 N₂, 流速 2 mL/min; H₂ 流速 30 mL/min; 空气流速 400 mL/min; 尾吹气流速 25 mL/min; FID 检测器温度 220 °C。根据色谱峰保留时间定性, 采用峰面积归一化法定量。

1.2.3.2 总酚含量

采用福林酚法测定总酚含量。参照文献[20]的方法并稍作修改提取油脂中的总酚。准确称取 1.00 g 油样, 加入 20 mL 70% 甲醇溶液, 分两次进行涡旋振荡提取 1 min 后再超声波提取 5 min, 于 2 000 × g 离心 10 min, 取出甲醇相(提取液)避光存放。取 1 mL 提取液于试管中, 加入 5 mL 5% 福林酚试剂和 4 mL 7.5% 碳酸钠溶液, 涡旋振荡 1 min, 于黑暗处静置 30 min 后于 765 nm 处测吸光度, 代入没食子酸-吸光度标准曲线方程中进行定量。

1.2.3.3 生育酚含量

准确称取 1.00 g 油样, 用正己烷溶解并定容至 10 mL 棕色容量瓶中, 用 0.22 μm 聚四氟乙烯过滤器过滤, 进高效液相色谱仪进行分析。

色谱条件: 硅胶色谱柱(250 mm × 4.6 mm × 5 μm), 柱温 30 °C; 流动相为正己烷-异丙醇(体积比 98.5:1.5), 流速 1.2 mL/min; 进样量 10 μL; 荧光检测器激发波长 295 nm, 发射波长 333 nm。对应峰面积代入以 α-、β-、γ-、δ-生育酚为标样绘制的浓度-峰面积标准曲线方程中对生育酚进行定量。

1.2.4 植物油的加速氧化试验

分别取 20 mL 薄壳山核桃油、核桃油、油茶籽油、香榧籽油、花生油和菜籽油, 分别装入 20 mL 棕色玻璃瓶, 敞口置于 60 °C 恒温干燥箱贮藏, 分别于 0、1、3、5、7、9、11 d 取样, 于 -18 °C 冰箱保存, 待取样全部结束后集中测定各项指标, 每个油样设置 3 组平行。

1.2.5 植物油氧化指标的测定

1.2.5.1 酸值和过氧化值

酸值参照 GB 5009.229—2016 测定; 过氧化值参照 GB 5009.227—2016 测定。

1.2.5.2 共轭二烯值和共轭三烯值

准确称取 0.1 g 油样于 25 mL 容量瓶中, 加入

异辛烷溶解并稀释至刻度, 以异辛烷作为参比, 用石英比色皿测定波长 232 nm 和 270 nm 处试样的吸光度, 并按公式(1)计算共轭二烯值(232 nm)和共轭三烯值(270 nm)。

$$Y = A/c \quad (1)$$

式中: Y 为共轭二烯值(共轭三烯值); A 为相应波长处的紫外吸光度; c 为样品质量浓度, g/100 mL。

1.2.5.3 羰基值

准确称取 0.1 g 油样于 25 mL 具塞试管中, 加 5 mL 苯溶解油样, 加 3 mL 0.043 mg/mL 三氯乙酸-苯溶液及 5 mL 0.000 5 g/mL 2,4-二硝基苯肼溶液, 摇匀; 于 60 °C 水浴中加热 30 min, 用流水冷却至室温, 沿试管壁缓慢加入 10 mL 0.04 g/mL 氢氧化钾-乙醇溶液, 涡旋振荡混匀后静置 10 min, 于波长 440 nm 处测吸光度, 按照公式(2)计算羰基值。

$$X = \frac{A}{854 \times m} \times 1\,000 \quad (2)$$

式中: X 为羰基值, meq/kg; A 为样液的吸光度; m 为油样质量, g。

1.2.6 植物油氧化稳定性的测定

油脂的氧化稳定性可以通过测定油脂的氧化诱导时间(OSI值)来反映。准确称取 3.00 g 油样, 采用 Rancimat 743 油脂氧化稳定性分析仪测定植物油的 OSI 值。测定参数: 温度 110 °C, 空气流量 10 L/h, 测量池中去离子水用量 60 mL。

1.2.7 数据处理

采用 Excel 2016 软件进行基础数据处理、分析与作图。采用 SPSS 19.0 统计软件进行显著性及相关性分析。

2 结果与分析

2.1 6种植物油料的含油率

6种植物油料(除油菜籽外,其余为种仁)的含油率见图1。

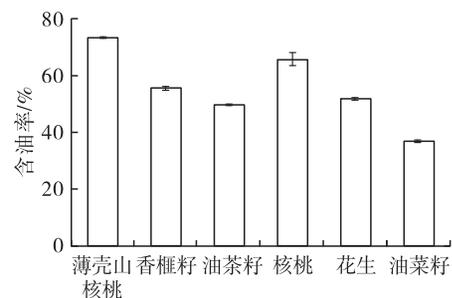


图1 6种植物油料的含油率

由图1可知,6种植物油料含油率有一定差异,其中薄壳山核桃仁的含油率最高,达73.07%,其次是核桃仁(65.48%)、香榧籽仁(55.28%)、花生仁

(51.68%)和油茶籽仁(49.34%),油菜籽的含油率最低,为36.56%。

2.2 6种植物油中营养及活性成分含量

2.2.1 脂肪酸组成及含量

脂肪酸组成是植物油营养品质的重要评价指标。6种植物油的脂肪酸组成及相对含量见表1。

由表1可知:6种植物油均含有棕榈酸、硬脂酸、油酸、亚油酸、花生烯酸等5种脂肪酸,其中油酸和亚油酸含量较高,为主要脂肪酸;除花生油外,其余5种植物油中均含有亚麻酸。此外,香榧籽油中含有2.89%的反-6,11-二十碳二烯酸和8.70%的顺-5,11,14-二十碳三烯酸。顺-5,11,14-二十碳三烯酸是香榧籽油的特征脂肪酸,有较高的生理活性^[21];菜籽油中还含有11.96%芥酸;薄壳山核桃油、香榧籽油、花生油和菜籽油中含有少量花生酸,花生油和菜籽油中含有少量山萘酸。6种植物

油的饱和脂肪酸中,棕榈酸的含量最高,其次是硬脂酸,6种植物油中饱和脂肪酸总量由高到低的顺序依次为花生油>香榧籽油>油茶籽油>核桃油>薄壳山核桃油>菜籽油。不饱和脂肪酸含量由高到低的顺序依次为菜籽油>薄壳山核桃油>核桃油>油茶籽油>香榧籽油>花生油。除花生油中的不饱和脂肪酸含量相对较低(79.19%)外,其余5种植物油的不饱和脂肪酸含量均在90%左右,其中菜籽油和薄壳山核桃油的不饱和脂肪酸含量显著高于其余4种植物油($p < 0.05$),油茶籽油、香榧籽油和核桃油的不饱和脂肪酸含量差异不显著($p > 0.05$)。虽然从不饱和脂肪酸总量来看菜籽油呈最高水平,但由于菜籽油中含有较高含量的芥酸(11.96%),长期过量摄入对人体健康不利,可导致肾胆固醇增高,影响生长发育^[22],因此不能单以不饱和脂肪酸含量的高低来判断油脂品质的好坏。

表1 6种植物油的脂肪酸组成及相对含量

脂肪酸	薄壳山核桃油	油茶籽油	香榧籽油	核桃油	花生油	菜籽油
棕榈酸 C16:0	6.06 ± 0.06	8.95 ± 0.10	7.73 ± 0.10	7.38 ± 0.09	11.21 ± 0.12	3.85 ± 0.07
棕榈油酸 C16:1	0.09 ± 0.02	-	-	0.14 ± 0.03	-	0.17 ± 0.01
硬脂酸 C18:0	2.48 ± 0.01	2.15 ± 0.03	3.31 ± 0.04	2.72 ± 0.01	5.06 ± 0.00	2.06 ± 0.01
油酸 C18:1	70.92 ± 0.02	78.81 ± 0.07	35.38 ± 0.01	14.42 ± 0.01	46.37 ± 0.06	48.13 ± 0.12
亚油酸 C18:2	18.97 ± 0.02	8.94 ± 0.02	40.61 ± 0.11	62.92 ± 0.09	32.11 ± 0.04	15.76 ± 0.03
亚麻酸 C18:3	0.91 ± 0.02	0.42 ± 0.01	0.46 ± 0.01	12.19 ± 0.05	-	8.49 ± 0.01
花生酸 C20:0	0.14 ± 0.01	-	0.16 ± 0.00	-	1.87 ± 0.01	0.75 ± 0.01
花生烯酸 C20:1	0.29 ± 0.03	0.51 ± 0.01	0.60 ± 0.00	0.15 ± 0.00	0.70 ± 0.01	8.19 ± 0.06
反-6,11-二十碳二烯酸 C20:2	-	-	2.89 ± 0.00	-	-	0.24 ± 0.01
顺-5,11,14-二十碳三烯酸 C20:3	-	-	8.70 ± 0.08	-	-	-
山萘酸 C22:0	-	-	-	-	2.59 ± 0.02	0.34 ± 0.01
芥酸 C22:1	-	-	-	-	-	11.96 ± 0.15
不饱和脂肪酸	91.19 ± 0.06	88.69 ± 0.08	88.65 ± 0.13	89.81 ± 0.13	79.19 ± 0.09	92.95 ± 0.07
饱和脂肪酸	8.68 ± 0.07	11.09 ± 0.10	11.20 ± 0.12	10.10 ± 0.09	20.73 ± 0.09	7.00 ± 0.07

注: - 表示未检出。下同

油酸含量是评定食用油品质的重要指标,营养界也把油酸称为安全脂肪酸^[23]。亚油酸和亚麻酸是人体必需脂肪酸,亚油酸具有降低血清胆固醇、抑制动脉血栓、预防动脉粥样硬化和骨质疏松等作用^[24],亚麻酸具有增强智力、增加免疫力和增强视力等重要生理功能^[25],但这两种脂肪酸都易氧化,其中亚麻酸的氧化速度是亚油酸的2倍,是油酸的25倍^[26]。6种植物油中,油酸含量最高的是油茶籽油(78.81%),其次是薄壳山核桃油(70.92%),二者的油酸含量显著高于其余4种植物油($p < 0.01$);亚油酸含量最高的是核桃油(62.92%),其次是香榧籽油(40.61%)和花生油(32.11%);亚麻酸含量较高的是核桃油和菜籽油,含量分别为12.19%和8.49%。

2.2.2 总酚含量

植物油中的酚类化合物不仅可以作为抗氧化剂,还具有抗癌、抗辐射、降血压等多种生理功能,对人体健康有重要作用^[27]。6种植物油的总酚含量如图2所示。

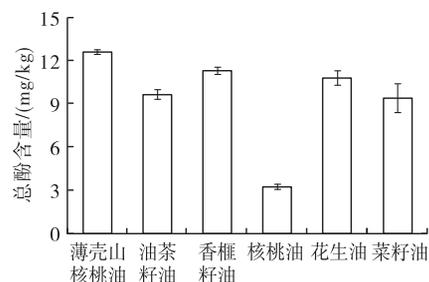


图2 6种植物油的总酚含量

由图2可知,薄壳山核桃油的总酚含量最高

(12.6 mg/kg),其次是香榧籽油、花生油、油茶籽油和菜籽油,总酚含量分别为 11.3、10.8、9.7 mg/kg 和 9.4 mg/kg,核桃油的总酚含量最低,仅为 3.2 mg/kg。有研究表明,酚类物质是山核桃仁中主要的抗氧化物质之一^[28],另有学者对多种蔬菜和坚果进行对比发现,薄壳山核桃的总酚含量最高,抗氧化

能力最强^[29],这与本研究结果一致。Kortenska 等^[30]研究发现,酚类物质是通过向脂质过氧化自由基提供氢原子来干扰或阻断脂质氧化反应链的传播或启动,从而抑制了脂质的氧化。

2.2.3 生育酚含量

6种植物油的生育酚含量如表 2 所示。

表 2 6种植物油的生育酚含量

植物油	α -生育酚	β -生育酚	γ -生育酚	δ -生育酚	总量
薄壳山核桃油	0.44 ± 0.12	-	21.60 ± 0.21	-	22.04 ± 0.05
香榧籽油	12.90 ± 0.03	102.00 ± 0.32	-	-	114.90 ± 0.04
油茶籽油	19.30 ± 0.21	-	-	-	19.30 ± 0.21
核桃油	0.86 ± 0.15	-	15.00 ± 0.11	4.41 ± 0.05	20.27 ± 0.08
花生油	12.90 ± 0.00	-	11.00 ± 0.12	0.50 ± 0.12	24.40 ± 0.13
菜籽油	8.12 ± 0.11	-	27.80 ± 0.09	0.66 ± 0.22	36.58 ± 0.13

由表 2 可知:薄壳山核桃油中含有 α -、 γ -生育酚,且以 γ -生育酚为主导,其含量为 21.60 mg/100 g;香榧籽油中含有 α -、 β -生育酚, β -生育酚占主导,其含量为 102.00 mg/100 g;油茶籽油中仅含有 α -生育酚;核桃油、花生油和菜籽油均含有 α -、 γ -、 δ -生育酚,核桃油和菜籽油中以 γ -生育酚为主导,花生油中 α -生育酚与 γ -生育酚含量相当, δ -生育酚含量较低。6种植物油中, α -生育酚在油茶籽油中的含量最高,在薄壳山核桃油中的含量最低。6种植物油中生育酚总量由高到低依次为香榧籽油 > 菜籽油 > 花生油 > 薄壳山核桃油 > 核桃油 > 油茶籽油。

2.3 6种植物油加速氧化过程中氧化指标的变化

2.3.1 酸值

酸值主要表示油脂中游离脂肪酸含量的高低,可以反映油脂水解酸败的程度。6种植物油加速氧化过程中酸值的变化见图 3。

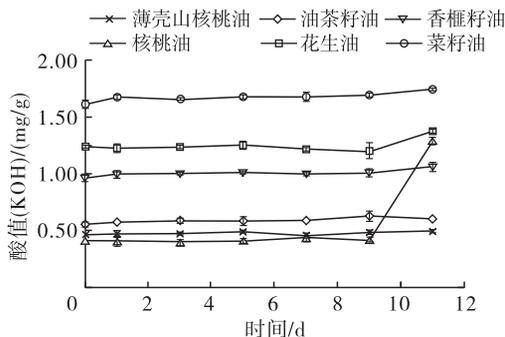


图 3 6种植物油加速氧化过程中酸值的变化

由图 3 可知,6种植物油的初始酸值由低到高的顺序依次为核桃油 < 薄壳山核桃油 < 油茶籽油 < 香榧籽油 < 花生油 < 菜籽油,随加速氧化时间的延长,6种植物油的酸值总体呈上升趋势,这是由于油

脂中的脂肪酸,尤其是不饱和脂肪酸在加热过程中发生氧化裂解,形成游离脂肪酸或者小分子化合物,小分子化合物进一步氧化产生有机酸^[31]。从上升趋势看,加速氧化过程中薄壳山核桃油的酸值变化趋势最平缓,与初始相比,加速氧化 11 d 时酸值升高了 7.78%;其次是油茶籽油和香榧籽油,加速氧化 11 d 时酸值分别升高了 8.23% 和 8.48%;核桃油在加速氧化前 9 d 时酸值的变化不大,9 d 后酸值快速升高,至 11 d 时酸值相比初始升高了 2 倍以上。可见,6种植物油加速氧化过程中,薄壳山核桃油的酸值变化最小,核桃油的酸值变化最大。

2.3.2 过氧化值

6种植物油加速氧化过程中过氧化值的变化见图 4。

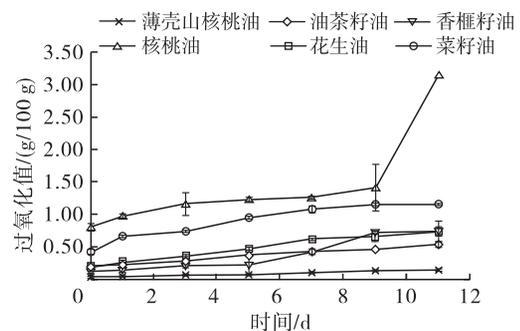


图 4 6种植物油加速氧化过程中过氧化值的变化

由图 4 可知,6种植物油的初始过氧化值由低到高的顺序依次为薄壳山核桃油 < 香榧籽油 < 花生油 < 油茶籽油 < 菜籽油 < 核桃油,其中,核桃油的初始过氧化值显著高于其余 5 种植物油 ($p < 0.01$)。随加速氧化时间的延长,6种植物油的过氧化值均有一定程度的上升,经线性拟合发现,薄壳山核桃油的变化趋势最平缓 ($y = 0.0097x + 0.0384$, $R^2 =$

0.981 1),其次是油茶籽油($y=0.030\ 3x+0.205\ 0$, $R^2=0.988\ 1$)、花生油($y=0.050\ 7x+0.208\ 6$, $R^2=0.985\ 6$)、香榧籽油($y=0.060\ 5x+0.058\ 1$, $R^2=0.902\ 9$)和菜籽油($y=0.065\ 3x+0.452\ 0$, $R^2=0.911\ 3$),核桃油的变化趋势最大($y=0.152\ 5x+0.646\ 2$, $R^2=0.633\ 4$),加速氧化9 d后其过氧化值

快速升高,第11 d相比第9 d升高了123.78%。可见,6种植物油在加速氧化过程中,薄壳山核桃油的过氧化值变化最小,核桃油的过氧化值上升最快。

2.3.3 共轭二烯值和共轭三烯值

6种植物油加速氧化过程中共轭二烯值和共轭三烯值的变化如图5所示。

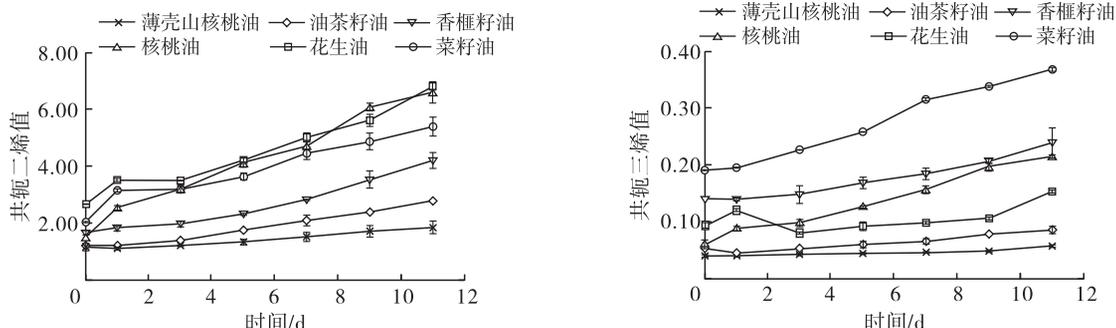


图5 6种植物油脂加速氧化过程中共轭二烯值和共轭三烯值的变化

由图5可知,随加速氧化时间的延长,6种植物油的共轭二烯值均呈上升趋势。薄壳山核桃油、油茶籽油和香榧籽油的共轭二烯值上升趋势较为平缓,其中薄壳山核桃油的上升速率最慢,加速氧化11 d时其共轭二烯值比初始增加了0.60倍($p<0.01$),油茶籽油和香榧籽油分别相比初始增加了1.31倍和1.53倍($p<0.01$);相比之下,菜籽油、花生油和核桃油的共轭二烯值上升较快,其中核桃油的上升速率最快,加速氧化11 d时其共轭二烯值相比初始增加了3.39倍。

由图5可知,随加速氧化时间的延长,6种植物油的共轭三烯值均呈上升趋势,加速氧化11 d时的共轭三烯值均显著高于初始的($p<0.01$)。薄壳山核桃油的共轭三烯值上升速率最慢,加速氧化11 d时共轭三烯值比初始增加了44%,其次是油茶籽油、花生油和香榧籽油,分别比初始增加了62.3%、63.5%和70.3%,核桃油和菜籽油的共轭三烯值上升速率较快,加速氧化11 d时相比初始分别增加了262.3%和93.2%。

2.3.4 羰基值

羰基值是表示油脂氧化生成的过氧化物进一步分解为含有羰基、酮基的脂肪酸或甘油酯及其聚合物的量,其数值大小可以反映油脂氧化酸败的产物(酮、醛等羰基化合物)含量以及油脂的劣变程度^[32]。6种植物油加速氧化过程中羰基值的变化如图6所示。

由图6可知,6种植物油初始羰基值由低到高的顺序依次为油茶籽油<薄壳山核桃油<花生油<核桃油<香榧籽油<菜籽油,且菜籽油和香榧籽油

的羰基值远高于其余4种植物油的($p<0.01$)。随着加速氧化时间的延长,6种植物油的羰基值总体均呈不同程度的上升趋势,加速氧化11 d时的羰基值均显著高于初始的($p<0.01$)。其中,花生油的羰基值增加速率最快,加速氧化11 d时较初始增加了3.47倍,其次是菜籽油和香榧籽油,核桃油的羰基值在加速氧化前期呈上升趋势,加速氧化7 d出现峰值后快速下降,11 d时为2.75 meq/kg,薄壳山核桃油和油茶籽油的羰基值上升速率较慢,加速氧化11 d时二者的羰基值仍呈现较低水平,分别为2.61 meq/kg和2.60 meq/kg,显著低于其余4种植物油的($p<0.01$),其中薄壳山核桃油的羰基值上升速率最慢。由此可见,随加速氧化时间的延长,薄壳山核桃油的羰基化合物生成速率最低,其次是油茶籽油。

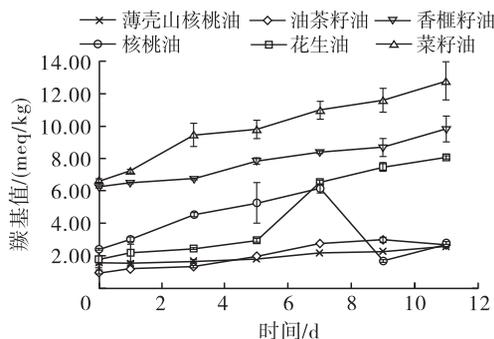


图6 6种植物油加速氧化过程中羰基值的变化

2.4 6种植物油的氧化稳定性

OSI值越大,油脂的氧化稳定性越好;反之,则氧化稳定性越差^[33]。6种植物油加速氧化过程中OSI值的变化如图7所示。

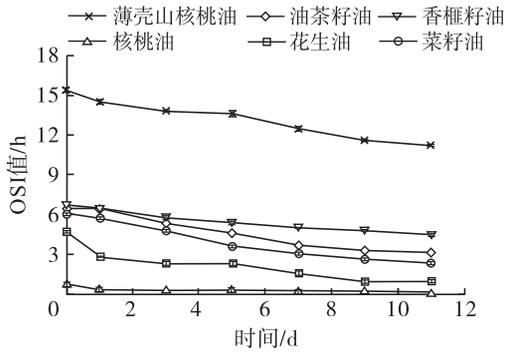


图7 6种植物油加速氧化过程中OSI值的变化

由图7可知,6种植物油初始的OSI值从大到小的顺序依次为薄壳山核桃油>香榧籽油>油茶籽油>菜籽油>花生油>核桃油,薄壳山核桃油的初始OSI值最大(15.06 h),远高于其余5种植物油的($p < 0.01$);香榧籽油、油茶籽油和菜籽油的初始OSI值差异不明显($p > 0.05$),核桃油的初始OSI值最小,仅为0.99 h。随着加速氧化时间的延长,6种植物油的OSI值呈现不同程度的下降趋势,加速氧化11 d时,薄壳山核桃油的OSI值下降速率最慢,下

降了27.09%,其OSI值仍表现为最高水平(10.98 h),其次是香榧籽油和油茶籽油,OSI值分别下降了32.94%和51.34%,菜籽油下降了61.32%,核桃油和花生油分别下降了81.07%和94.18%,核桃油的OSI值仅为0.15 h,仍处于最低水平。可见,6种植物油中,薄壳山核桃油的氧化稳定性最好,其次是香榧籽油、油茶籽油,核桃油和花生油的氧化稳定性相对较差。这可能是由于相比其余5种油脂,核桃油中含有较多的多不饱和脂肪酸(亚油酸和亚麻酸),极易在氧气和高温下氧化形成氢过氧化物,最终裂解成为挥发物,导致其更易发生酸败^[34]。6种植物油中,薄壳山核桃油具有较强的氧化稳定性可能与其单不饱和脂肪酸含量和总酚含量较高有关。

2.5 6种植物油加速氧化过程中主要脂肪酸变化

6种植物油加速氧化过程中主要脂肪酸(油酸、亚油酸)及饱和脂肪酸、不饱和脂肪酸相对含量变化如表3所示。

表3 6种植物油加速氧化过程中主要脂肪酸及饱和脂肪酸、不饱和脂肪酸相对含量变化

植物油	脂肪酸	相对含量/%						
		0 d	1 d	3 d	5 d	7 d	9 d	11 d
薄壳山核桃油	油酸	70.92	70.93	71.09	71.08	70.96	71.02	71.08
	亚油酸	18.97	18.91	18.91	18.98	18.99	18.94	18.87
	油酸+亚油酸	89.89	89.84	90.00	90.06	89.94	89.97	89.95
	饱和脂肪酸	8.68	8.69	8.67	8.61	8.57	8.60	8.67
	不饱和脂肪酸	91.19	91.24	91.20	91.31	91.30	91.29	91.24
油茶籽油	油酸	78.81	78.84	78.93	79.01	78.99	79.07	79.04
	亚油酸	8.94	8.92	8.90	8.85	8.88	8.78	8.74
	油酸+亚油酸	87.75	87.75	87.83	87.86	87.87	87.85	87.78
	饱和脂肪酸	11.09	9.45	9.37	9.36	9.37	9.35	9.42
	不饱和脂肪酸	88.69	88.68	88.74	88.76	88.79	88.79	88.71
香榧籽油	油酸	35.38	35.42	35.46	35.40	35.44	35.51	35.57
	亚油酸	40.61	40.74	40.71	40.68	40.68	40.62	40.52
	油酸+亚油酸	75.99	76.15	76.16	76.08	76.11	76.13	76.09
	饱和脂肪酸	11.20	11.30	11.16	11.08	11.12	11.19	11.24
	不饱和脂肪酸	88.65	88.57	88.72	88.78	88.77	88.71	88.64
核桃油	油酸	14.42	14.47	14.48	14.49	14.45	14.54	14.59
	亚油酸	62.92	62.95	62.98	62.91	62.93	62.77	62.61
	油酸+亚油酸	77.34	77.42	77.47	77.39	77.38	77.31	77.21
	饱和脂肪酸	10.10	10.08	10.07	10.10	10.06	10.14	10.17
	不饱和脂肪酸	89.81	89.88	89.91	89.82	89.87	89.69	89.56
花生油	油酸	46.37	46.44	46.53	45.20	46.54	46.60	46.66
	亚油酸	32.11	32.02	32.02	32.74	31.96	31.80	31.71
	油酸+亚油酸	78.49	78.46	78.54	78.54	78.51	78.40	78.37
	饱和脂肪酸	20.73	20.72	20.68	21.33	20.72	20.81	20.83
	不饱和脂肪酸	79.19	79.16	79.24	78.61	79.20	79.11	79.09

续表 3

植物油	脂肪酸	相对含量/%						
		0 d	1 d	3 d	5 d	7 d	9 d	11 d
菜籽油	油酸	48.13	48.35	48.38	48.30	48.27	48.29	48.52
	亚油酸	15.76	15.83	15.74	15.68	15.67	15.62	15.62
	油酸+亚油酸	63.90	64.18	64.13	63.98	63.94	63.91	64.13
	饱和脂肪酸	7.00	7.04	7.04	7.00	6.99	7.05	7.09
	不饱和脂肪酸	92.95	92.92	92.90	92.88	92.99	92.93	92.89

由表 3 可知,6 种植物油中油酸和亚油酸总含量由高到低的顺序依次为薄壳山核桃油 > 油茶籽油 > 花生油 > 核桃油 > 香榧籽油 > 菜籽油,且各植物油之间差异显著($p < 0.05$)。总体来看,随着加速氧化时间的延长,6 种植物油中油酸含量有少量上升,亚油酸含量有少许下降,油酸和亚油酸的总含量无明显变化,饱和脂肪酸和不饱和脂肪酸的含量亦无明显变化($p > 0.05$)。油脂的氧化稳定性受不饱和脂肪酸总量、单一脂肪酸的氧化特性、脂肪酸比例模

式等的影响^[35]。油脂在加速氧化过程中不饱和脂肪酸的双键被氧化,亚油酸、亚麻酸等不饱和脂肪酸的部分或全部双键被氧化饱和,形成硬脂酸或油酸,从而使得亚油酸含量降低而油酸含量增加。

2.6 油脂品质、氧化指标及 OSI 值之间的相关性分析

利用 SPSS 19.0 软件对油脂的品质、氧化指标及 OSI 值进行了相关性分析,结果如表 4 所示。

表 4 油脂的品质、氧化指标与 OSI 值之间的相关性

指标	棕榈酸	硬脂酸	油酸	亚油酸	亚麻酸	羰基值	共轭二烯值	共轭三烯值	酸值	过氧化值	生育酚	总酚	OSI 值
棕榈酸	1	0.76 **	0.02	0.18	-0.51 *	-0.60 **	0.34	-0.38	-0.18	-0.20	-0.06	0.03	-0.30
硬脂酸		1	-0.27	0.32	-0.38	-0.21	0.75 **	0.00	0.25	-0.20	0.13	0.39	-0.21
油酸			1	-0.92 **	-0.65 **	-0.37	-0.33	-0.18	-0.09	-0.71 **	-0.30	0.41	0.65 **
亚油酸				1	0.52 *	0.06	0.12	-0.16	-0.27	0.39	-0.22	0.45	-0.54 *
亚麻酸					1	0.25	-0.03	0.05	0.00	0.19	-0.25	0.68 **	-0.52 *
羰基值						1	0.18	0.86 **	0.63 **	0.05	-0.71 **	0.23	-0.07
共轭二烯值							1	0.44	0.75 **	0.04	0.05	-0.30	-0.39
共轭三烯值								1	0.84 **	-0.09	0.29	0.34	-0.12
酸值									1	-0.11	0.26	0.45	-0.16
过氧化值										1	-0.29	-0.64 **	-0.74 **
生育酚											1	0.08	0.83 **
总酚												1	0.55 *
OSI 值													1

注:**表示在 0.01 水平上显著相关,*表示在 0.05 水平上显著相关

由表 4 可知:棕榈酸含量与硬脂酸含量呈显著正相关,与亚麻酸含量、羰基值呈显著负相关;硬脂酸含量与共轭二烯值呈显著正相关;油酸含量与亚油酸、亚麻酸含量及过氧化值呈显著负相关,与 OSI 值呈显著正相关;亚油酸含量与亚麻酸含量呈显著正相关,与 OSI 值呈显著负相关,亚麻酸含量与总酚含量呈显著正相关,与 OSI 值呈显著负相关,由此可见,随着亚油酸和亚麻酸含量的增加,OSI 值减小,即油脂的氧化诱导时间缩短,说明较高的亚油酸和亚麻酸含量会降低油脂氧化稳定性,这与徐飞^[36]、朱雪梅^[37]等研究结果一致;羰基值与共轭三烯值、酸值呈显著正相关,与生育酚含量呈显著负相关;共

轭二烯值与酸值呈显著正相关;共轭三烯值与酸值呈显著正相关;过氧化值与总酚含量和 OSI 值呈显著负相关;OSI 值与生育酚、总酚含量呈显著正相关,即生育酚、总酚的含量越高,油脂的氧化诱导时间越长,可见较高的生育酚和总酚含量能够有效抑制油脂的氧化,该结果与佟云伟^[38]、刘阳^[1]、王亚杰^[39]等研究结果一致,这也进一步证实了酚类物质对油脂有一定的抗氧化作用。

3 结论

本文对 6 种植物油中的营养及活性成分、脂肪酸组成进行测定,通过油脂加速氧化试验评价 6 种植物油的氧化稳定性,并对品质与氧化指标之间的

相关性进行分析,得到的主要结论如下。

(1)6种植物油(薄壳山核桃油、香榧籽油、油茶籽油、核桃油、花生油、菜籽油)中含有5种共同脂肪酸,分别为棕榈酸、硬脂酸、油酸、亚油酸和花生烯酸;香榧籽油中含有顺-5,11,14-二十碳三烯酸,菜籽油中含有芥酸;6种植物油中,薄壳山核桃油的总酚含量最高;香榧籽油的生育酚总量最高。

(2)在加速氧化过程中,薄壳山核桃油的酸值、过氧化值、共轭二烯值、共轭三烯值、羰基值、OSI值等变化幅度均较小,核桃油的变化幅度较大,6种植物油的脂肪酸组成无明显变化。

(3)油脂的OSI值与油酸、生育酚、总酚含量呈显著正相关,与亚油酸、亚麻酸含量呈显著负相关。

综上,薄壳山核桃油有较好的脂肪酸组成,较高的总酚含量,较好的氧化稳定性,是一种优质的食用油,可作为营养保健油开发利用。

参考文献:

- [1] 刘阳,王春立,曹培让,等. 7种食用植物油物性及氧化稳定性评价[J]. 中国油脂, 2017, 42(10): 63-68.
- [2] 王兴国,金青哲,常明. 木本油料油脂的营养与健康[J]. 粮食与食品工业, 2017, 24(1): 8-12.
- [3] 姚小华,常君,王开良,等. 中国薄壳山核桃[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 27.
- [4] 王亚萍,费学谦,姚小华,等. 不同产地油茶籽脂肪酸及甘油三酯的主成分分析和聚类分析[J]. 中国油脂, 2021, 46(9): 112-119.
- [5] 王衍彬,刘本同,秦玉川,等. 不同品种香榧种子油脂脂肪酸及香味物质组成分析[J]. 中国油脂, 2016, 41(2): 101-105.
- [6] 肖铭慧,黄敏婕,董捷,等. 香榧籽油对高脂膳食SD大鼠代谢的影响及机理[J]. 中国油脂, 2022, 47(3): 71-77.
- [7] GAO P, LIU R, JIN Q, et al. Comparison of different processing methods of iron walnut oils (*Juglans sigillata*): Lipid yield, lipid compositions, minor components, and antioxidant capacity [J/OL]. Eur J Lipid Sci Technol, 2018, 120(9): 1800151 [2024-01-09]. <https://doi.org/10.1002/ejlt.201800151>.
- [8] CHOI Y, ABDELMEGEED M A, AKBAR M, et al. Dietary walnut reduces hepatic triglyceride content in high-fat-fed mice via modulation of hepatic fatty acid metabolism and adipose tissue inflammation[J]. J Nutr Biochem, 2016, 30: 116-125.
- [9] 农业部种植业管理司. 全国大宗油料作物生产发展规划(2016—2020年)[J]. 中国农业信息, 2017(1): 6-15.
- [10] SHADYRO O, SOSNOVSKAYA A, EDIMECHEVA I. Effect of biologically active substances on oxidative stability of flaxseed oil[J]. J Food Sci Technol, 2020, 57(1): 243-252.
- [11] 孙航,徐娟,刘祥义,等. 丽江野生植物油的脂肪酸组成及氧化稳定性研究[J]. 中国油脂, 2017, 42(1): 40-42, 69.
- [12] 黄雨洋,齐宝坤,赵城彬,等. 加速氧化过程中不同植物油的稳定性研究[J]. 中国食品学报, 2019, 19(1): 243-248.
- [13] 王金凤,谭新建,吴喜昌,等. 我国油茶产业发展现状与对策建议[J]. 世界林业研究, 2020, 33(6): 80-85.
- [14] 周晔,裴东. 核桃油品质及贮藏稳定性的影响因素探讨[J]. 中国油脂, 2016, 41(1): 60-63.
- [15] 郑悦雯,吴书天,沈丹玉,等. 10个品种核桃油品质比较[J]. 中国油脂, 2020, 45(10): 47-51.
- [16] 贾晓东,王涛,张计育,等. 美国山核桃的研究进展[J]. 中国农学通报, 2012, 28(4): 74-78.
- [17] 罗会婷,贾晓东,翟敏,等. 薄壳山核桃营养成分的研究进展[J]. 中国农学通报, 2017, 33(8): 39-46.
- [18] 曹永庆,任华东,王开良,等. 不同类型土壤栽培香榧种仁品质综合评价和分析[J]. 果树学报, 2022, 39(5): 836-845.
- [19] 朱杰丽,柴振林,吴翠蓉,等. 浙江省香榧及其油脂综合性状研究[J]. 中国粮油学报, 2019, 34(3): 67-73.
- [20] OJEDA-AMADOR R M, SALVADOR M D, GÓMEZ-ALONSO S, et al. Characterization of virgin walnut oils and their residual cakes produced from different varieties [J]. Food Res Int, 2018, 108: 396-404.
- [21] WANG Y, YAO X, YANG L, et al. Effects of harvest time on the yield, quality and active substance of *Torreya grandis* nut and its oil [J]. J Oleo Sci, 2021, 70(2): 175-184.
- [22] 周万平,郎春秀,熊鲜艳,等. 油菜籽芥酸含量遗传调控研究进展[J]. 核农学报, 2021, 24(3): 537-541.
- [23] YUAN J, WANG C, CHEN H, et al. Prediction of fatty acid composition in *Camellia oleifera* oil by near infrared transmittance spectroscopy (NITS) [J]. Food Chem, 2013, 138(2/3): 1657-1662.
- [24] 王建辉,王秀,陈奇,等. 氧化分解过程中亚油酸组成成分及挥发性物质的变化[J]. 食品与机械, 2016, 32(5): 5-10.
- [25] 娄毛闪,于海宁,沈生荣. 膳食亚油酸与肠道菌群和慢性代谢性疾病的关系[J]. 现代医药卫生, 2023, 39(21): 3611-3614, 3619.
- [26] 初丽君,王珊珊,张睿,等. 不同品种植物油氧化稳定性的研究[J]. 粮食与食品工业, 2013, 20(6): 3-5.
- [27] 马梦晴,高海生. 含油植物中酚类化合物的分布、鉴定和存在形态[J]. 河北科技师范学院学报, 2018, 32(1): 58-64.

(下转第65页)

- 食品工业, 2019, 26(4): 41-43.
- [8] 刘壮, 李钟, 刘萱, 等. 国内外米糠油的品质研究[J]. 中国油脂, 2023, 48(10): 143-149.
- [9] CHO Y H, LIM S Y, REHMAN A, et al. Characterization and quantification of γ -oryzanol in Korean rice landraces[J]. J Cereal Sci, 2019, 88: 150-156.
- [10] AKIHISA T, YASUKAWA K, YAMAURA M, et al. Triterpene alcohol and sterol ferulates from rice bran and their anti-inflammatory effects[J]. J Agric Food Chem, 2000, 48(6): 2313-2319.
- [11] CHOTIMARKORN C, USHIO H. The effect of *trans*-ferulic acid and *gamma*-oryzanol on ethanol-induced liver injury in C57BL mouse[J]. Phytomedicine, 2008, 15(11): 951-958.
- [12] 余诚玮, 邓施璐, 温志刚, 等. 米糠及其脂肪酶的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(2): 297-305.
- [13] 武家琪. 精炼工艺对高酸值米糠油谷维素含量及色泽的影响研究[D]. 沈阳: 沈阳师范大学, 2020.
- [14] 刘雄, 阚健全, 陈宗道. 高酸值植物油脱酸工艺探讨[J]. 中国油脂, 2002, 27(3): 24-26.
- [15] 王亚东. 米糠油物理脱酸工艺条件对谷维素含量的影响[D]. 郑州: 河南工业大学, 2013.
- [16] 陈园顺. 米糠混合油精炼及营养米糠油生产工艺研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2014.
- [17] 刘军海. 毛米糠油精炼对谷维素含量的影响[J]. 四川粮油科技, 2002(4): 13-16.
- [18] 王莹辉. 米糠油的煎炸应用研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2014.
- [19] 刘玉兰, 王莹辉, 李时军. 煎炸米糠油营养成分及煎炸油条品质分析[J]. 中国油脂, 2014, 39(3): 28-32.
- [20] MISHRA R, SHARMA H K. Effect of frying conditions on the physico-chemical properties of rice bran oil and its blended oil[J]. J Food Sci Technol, 2014, 51(6): 1076-1084.
- [21] 朱琳, 薛雅琳, 张东, 等. 高效液相色谱法测定米糠油中谷维素[J]. 粮油食品科技, 2016, 24(5): 38-43.
- [22] 曹小峰. 精炼过程及储存条件对高酸价米糠油品质的影响[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2014.
- [23] 陶建明. 基于谷维素热稳定性的稻米油炸品质变化研究[D]. 重庆: 西南大学, 2020.
- [24] NYSTRÖM L, ACHRENIUS T, LAMPI A M, et al. A comparison of the antioxidant properties of steryl ferulates with tocopherol at high temperatures[J]. Food Chem, 2007, 101(3): 947-954.
- [25] AKIYAMA Y, HORI K, TAKAHASHI T, et al. Free radical scavenging activities of *gamma*-oryzanol constituents[J]. Food Sci Technol Res, 2005, 11(3): 295-297.
- [26] RACZYK M, KMIECIK D, PRZYBYLSKI R, et al. Effect of fatty acid unsaturation on phytosteryl ester degradation[J]. J Am Oil Chem Soc, 2017, 94(5): 701-711.
- [27] KHUWJITJARU P, YUENYONG T, PONGSAWATMANIT R, et al. Effects of ferric chloride on thermal degradation of γ -oryzanol and oxidation of rice bran oil[J]. Eur J Lipid Sci Technol, 2011, 113(5): 652-657.
- [28] 王晓萍. 化学法合成 β -谷甾醇脂肪酸酯的研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2021.
- [29] 赵征美. 谷维素和生育酚对米糠油热氧化性能的影响研究[D]. 江苏 无锡: 江南大学, 2021.
- [30] 梁少华, 林敏刚, 赵西周, 等. 米糠油物理精炼过程中脱臭对其谷维素含量的影响[J]. 中国粮油学报, 2008, 23(2): 77-80.
-
- (上接第58页)
- [28] 陈杭君, 李兴飞, 郜海燕, 等. 山核桃仁多酚组分分析及抗氧化研究[J]. 核农学报, 2013, 27(1): 61-67.
- [29] WU X, BEECHER G R, HOLDEN J M, et al. Lipophilic and hydrophilic antioxidant capacities of common foods in the United States[J]. J Agric Food Chem, 2004, 52(12): 4026-4037.
- [30] KORTENSKA V D, YANISHLIEVA N V, KASAIKINA O T, et al. Phenol antioxidant efficiency in various lipid substrates containing hydroxy compounds[J]. Eur J Lipid Sci Technol, 2002, 104(8): 513-519.
- [31] 周婷, 李志健. 不同介质热处理对油脂酸值和羰基值的影响[J]. 粮油食品科技, 2015, 23(2): 40-43.
- [32] 陈锋亮, 魏益民, 钟耕. 大豆油高温煎炸变质过程的研究[J]. 中国油脂, 2006, 31(8): 19-22.
- [33] 张若梅. 油脂抗氧化稳定性测试[J]. 粮油食品科技, 2001, 9(4): 13-14.
- [34] GRILO F S, WANG S C. Walnut (*Juglans regia* L.) volatile compounds indicate kernel and oil oxidation[J/OL]. Foods, 2021, 10(2): 329 [2024-01-09]. <https://doi.org/10.3390/foods10020329>.
- [35] 庞晓慧, 李俊健, 吴俏瑾, 等. 美藤果油、亚麻籽油和紫苏籽油氧化稳定性对比研究[J]. 中国油脂, 2021, 46(1): 32-37.
- [36] 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, 2016, 31(3): 53-58.
- [37] 朱雪梅, 吴俊锋, 胡蒋宁, 等. α -生育酚在花生油、芝麻油和菜籽油中的抗氧化效能[J]. 食品与发酵工业, 2013, 39(10): 85-90.
- [38] 佟云伟, 陈凤香, 杨波涛. 不同食用植物油氧化稳定性的研究[J]. 中国油脂, 2009, 34(2): 31-34.
- [39] 王亚杰, 韩佳佳, 谭志发, 等. 制备工艺对油莎豆油理化性质、营养成分和氧化稳定性的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(11): 64-71.