

# 基于微波预处理压榨文冠果油储藏期间的品质研究

李 信,上官慧娟,杨 博,李文林

(中国农业科学院 油料作物研究所,油料油脂加工技术国家地方联合工程实验室,农业部油料加工重点实验室,油料脂质化学与营养湖北省重点实验室,武汉 430062)

**摘要:**利用 Schaal 烘箱法,研究测定了由微波预处理种仁冷榨制取的文冠果油储藏期间酸价、过氧化值、 $p$ -茴香胺值、生育酚含量、脂肪酸组成及含量的变化,评价了微波预处理对油脂氧化稳定性的影响,并对文冠果油理化指标进行了相关性分析。结果表明:文冠果油在储藏期间,过氧化值和  $K_{232}$  在前期快速增高,中期趋于平缓,后期又快速增长;酸价、 $p$ -茴香胺值及  $K_{270}$  则持续增长;生育酚含量与氧化诱导时间在前、后期快速降低,中期降低较缓慢;不饱和脂肪酸与饱和脂肪酸的比值降低;相关性分析表明文冠果油在储藏期间的氧化稳定性与生育酚含量及过氧化值、酸价、 $p$ -茴香胺值、 $K_{232}$ 、 $K_{270}$  密切相关。此外,适当的微波预处理有助于增强文冠果油的氧化稳定性。

**关键词:**Schaal 烘箱法;文冠果油;微波预处理;储藏品质;氧化稳定性

中图分类号:TS224.6;TQ644.1 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2020)04-0041-06

## Quality of pressed *Xanthoceras sorbifolia* oil during storage based on microwave pretreatment

LI Xin, SHANGGUAN Huijuan, YANG Bo, LI Wenlin

(Hubei Key Laboratory of Lipid Chemistry and Nutrition, Key Laboratory of Oilseeds Processing, Ministry of Agriculture, Oil Crops and Lipids Process Technology National & Local Joint Engineering, Oil Crops Research Institute of the Chinese Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430062, China)

**Abstract:** Schaal oven method was used to study changes of acid value, peroxide value,  $p$ -AV, tocopherol content and fatty acid composition and content of *Xanthoceras sorbifolia* oil obtained by cold pressing from microwave-pretreated *Xanthoceras sorbifolia* seed kernel during storage, and the effect of microwave pretreatment on the oxidation stability of *Xanthoceras sorbifolia* oil was evaluated. The correlation between these indexes was analyzed. The results showed that the peroxide value and  $K_{232}$  of *Xanthoceras sorbifolia* oil increased rapidly in the early storage period, tended to be flat in the middle storage period, and increased rapidly in the late storage period, while the acid value,  $p$ -AV and  $K_{270}$  increased continuously. The tocopherol content and oxidative induction time decreased rapidly in the early and late storage periods, but slowly in the middle storage period. The ratio of unsaturated fatty acid to saturated fatty acid decreased. The correlation analysis showed that the oxidation stability of *Xanthoceras sorbifolia* oil during storage was closely related to the tocopherol content, peroxide value, acid value,  $p$ -AV,  $K_{232}$  and  $K_{270}$ . In addition, appropriate microwave treatment was beneficial to enhance the oxidation stability of *Xanthoceras sorbifolia* oil.

**Key words:** Schaal oven method; *Xanthoceras sorbifolia* oil; microwave pretreatment; storage quality; oxidation stability

收稿日期:2019-06-28;修回日期:2019-10-21

基金项目:湖北省技术创新专项(2017ABA142)

作者简介:李 信(1995),男,硕士研究生,研究方向为粮食、油脂及蛋白工程(E-mail)574494830@qq.com。

通信作者:李文林,研究员(E-mail)wenlinli2005@163.com。

文冠果是我国北方特有的木本油料树种,因其具有很强的耐旱、耐寒以及耐土壤贫瘠的特性,经常被种植在环境条件恶劣的山区地段,用于绿化山区、防风固沙<sup>[1]</sup>。2015年国家《关于加快木本油料产业

发展意见》中提倡大力发展文冠果等木本油料。文冠果种子含油率 30% 以上,仁含油率 60% 以上,油中不饱和脂肪酸含量 90% 以上,其中亚油酸含量丰富,被用作中药“益寿宁”的主要原材料<sup>[2]</sup>。文冠果油营养丰富,含有丰富的  $V_E$ 、植物甾醇及矿物元素等<sup>[3]</sup>。据报道文冠果油中含有少量神经酸,神经酸是大脑神经系统生长发育及修复的必需物质<sup>[4]</sup>。此外,文冠果油可以用于制备生物柴油<sup>[5]</sup>。

目前,文冠果油的提取多采用传统压榨法、溶剂提取法、超临界  $CO_2$  萃取法等<sup>[6]</sup>。传统压榨法出油率低;溶剂提取法出油率高,但存在溶剂残留等问题;超临界  $CO_2$  萃取法出油率高,但设备昂贵,工业化生产成本高。微波技术应用于油脂加工业,具有加热速度快、受热均匀、操作简单及节约能源等特点,可以在一定程度上改变油料作物的细胞壁结构,扩张油脂通路,提高出油率,且能钝化脂肪酶和脂肪氧化酶,提高油的氧化稳定性,并对油脂品质有一定影响<sup>[7]</sup>。文冠果油中富含油酸、亚油酸等不饱和脂肪酸,容易发生氧化酸败,影响油脂的储藏期<sup>[8]</sup>。油脂氧化会产生小分子的醛、酮等物质,进而使油脂发生劣变,产生不愉快气味,色泽加深,油脂营养价值降低<sup>[9]</sup>。本实验将微波预处理的冷榨文冠果油在 60 °C 恒温避光条件下储藏 50 d,测定其在储藏期间酸价(AV)、过氧化值(POV)、 $p$ -茴香胺值( $p$ -AV)、 $K_{232}$ 、 $K_{270}$ 、生育酚含量及脂肪酸组成等的变化,探究微波预处理对文冠果油储藏期间的品质劣变及氧化稳定性的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

文冠果,于 2018 年秋产自山西霍州。

CA59G 型冷榨机,德国 Komet 公司;MARS Xpress 密闭式微波消解仪,美国 CEN 公司;LC-6AD 高效液相色谱仪,7890A 气相色谱仪,美国 Agilent 公司;743 型氧化稳定性测定仪,瑞士 Metrohm 公司;UV-1900 紫外分光光度计,日本 Shimadzu 公司;Q2000 差式扫描量热仪,美国 TA 公司。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 微波预处理冷榨文冠果油的制备

考虑到微波预处理时文冠果种仁水分的损失情况,将清理挑选好的文冠果种仁水分调至 8% 和 10%,待水分平衡后,将其放置于微波消解仪中,分别在微波功率 800 W 和 1 200 W 下处理 6 min,然后置于干燥器中冷却至室温,利用 CA59G 型冷榨机压榨制油,榨油机的转速设置为 1 档,榨膛温度控制在

65 °C 以下,所得油相经离心除杂后即得微波预处理冷榨文冠果油。每个实验条件下做两份平行实验。

#### 1.2.2 文冠果油 Schaal 烘箱法实验

分别称取不经微波预处理的文冠果油(对照),800 W、6 min 微波预处理的文冠果油(油样 1)和 1 200 W、6 min 微波预处理的文冠果油(油样 2) 30 g 于 30 mL 棕色玻璃瓶中,各分装 30 瓶,密封后放置在 60 °C 恒温箱中,每隔 3 d 取样测试。

#### 1.2.3 理化指标测定

酸价、过氧化值、脂肪酸分别参照 GB 5009.229—2016、GB 5009.227—2016、GB 5009.168—2016 的方法测定; $p$ -茴香胺值参照 AOCS.cd18-90 的方法测定; $K_{232}$ 、 $K_{270}$  参照 GB/T 22500—2008 的方法测定;生育酚参照 AOCS.ce8-89 的方法测定;氧化起始温度参照文献[10]的方法测定;氧化诱导时间(OSI)参照文献[11]的方法测定。

#### 1.2.4 数据处理

实验数据采用 Origin 9.1 和 IBM SPSS statistics 20 进行作图及分析。用 Duncan 法进行各组间的差异显著性分析, $P < 0.05$  为差异显著, $P < 0.01$  为差异极显著。

## 2 结果与分析

### 2.1 储藏时间对文冠果油酸价、过氧化值及 $p$ -茴香胺值的影响

油脂在储藏过程中,由于发生氧化、水解等反应,会产生氢过氧化物、游离脂肪酸等小分子物质。通过检测文冠果油在储藏过程中的酸价及过氧化值,可以在一定程度上反映文冠果油的氧化酸败程度。由于油脂氧化初期产生的产物具有不稳定性,会进一步反应,生成小分子的醛、酮等二级氧化产物, $p$ -茴香胺值可以表示油脂氧化过程中产生的二级氧化产物含量<sup>[12]</sup>。文冠果油储藏期间酸价、过氧化值及  $p$ -茴香胺值的变化见图 1~图 3。

由图 1~图 3 可知:文冠果油在储藏期间,酸价逐渐增加,且增长速率平稳,高微波功率预处理的文冠果油(油样 2)酸价较高,且增长速率较快;3 种油样的过氧化值增长趋势相似,前 10 d 内过氧化值增长较快,中期趋于平缓,40 d 后又快速增大,50 d 文冠果油的过氧化值已从 0.16 mmol/kg 增长到 14 mmol/kg;各油样的  $p$ -茴香胺值在储藏期间持续快速增长,在 50 d 内对照的  $p$ -茴香胺值从 0.02 增加到 2.0,表明文冠果油中的二级氧化产物持续增多,高微波功率预处理的文冠果油(油样 2)的  $p$ -茴香胺值较对照的高。显著性分析表明,文冠果油的酸价、过氧化值和  $p$ -茴香胺值随储藏时间的

延长而变化极显著( $P < 0.01$ )。

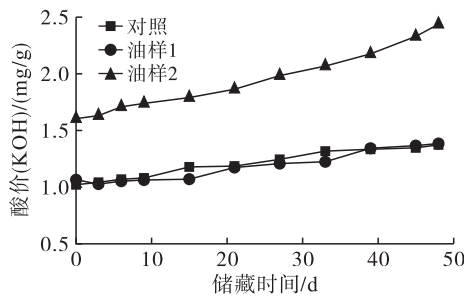


图1 储藏期间文冠果油酸价的变化

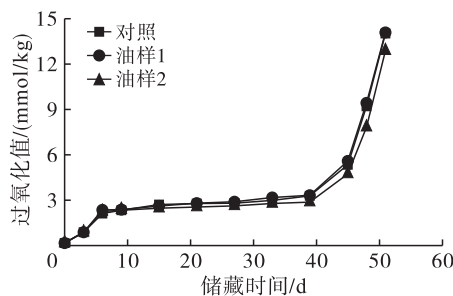


图2 储藏期间文冠果油过氧化值的变化

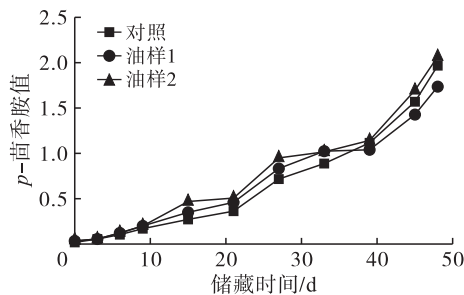


图3 储藏期间文冠果油p-茴香胺值的变化

## 2.2 储藏时间对文冠果油 $K_{232}$ 及 $K_{270}$ 的影响

油脂自动氧化产生的初级氧化产物,通过双键的重排可形成稳定的共轭结构,在紫外 232 nm 和 270 nm 处有特征吸收峰。因此,  $K_{232}$  和  $K_{270}$  分别表示油脂氧化过程中初级氧化产物共轭二烯及次级氧化产物共轭三烯的累积量,可作为判定油脂氧化程度的重要指标,其数值越大,表明油脂的氧化程度越高<sup>[13]</sup>。文冠果油储藏期间  $K_{232}$  及  $K_{270}$  的变化见图 4、图 5。

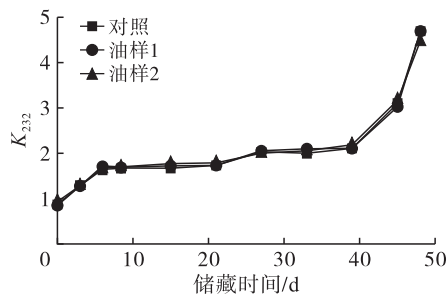


图4 储藏期间文冠果油  $K_{232}$  的变化

由图 4、图 5 可知,各组文冠果油在储藏期间

$K_{232}$  及  $K_{270}$  都呈增长趋势。 $K_{232}$  在前 10 d 内增长较快,中期趋于平缓,40 d 后又快速增大,其增长趋势与过氧化值的变化趋势相近。各组文冠果油的  $K_{270}$  在储藏期间增长较平稳,40 d 后快速增高,且微波预处理的文冠果油(油样 1、油样 2)  $K_{270}$  较对照组的高。由于微波会使原料加热,导致  $K$  值变大。显著性分析发现不同微波预处理的文冠果油  $K_{270}$  具有显著性差异( $P < 0.05$ ),储藏时间对文冠果油  $K_{232}$ 、 $K_{270}$  的影响极显著( $P < 0.01$ )。

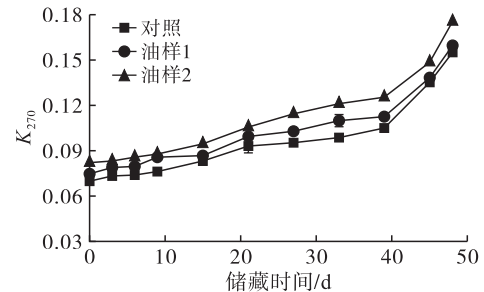


图5 储藏期间文冠果油  $K_{270}$  的变化

## 2.3 储藏时间对文冠果油中生育酚含量的影响

生育酚是一类脂溶性维生素,包括  $\alpha$ -、 $\beta$ -、 $\gamma$ -、 $\delta$ -生育酚 4 种单体,是天然的抗氧化剂,在油脂的氧化稳定性中起十分重要的作用<sup>[14]</sup>。通过检测,文冠果油含有  $\alpha$ -、 $\gamma$ -、 $\delta$ -生育酚,总量达 450 mg/kg 以上,其中  $\gamma$ -生育酚占 80% 左右。生育酚总量及各单体在文冠果油储藏期间的变化见图 6 ~ 图 9。

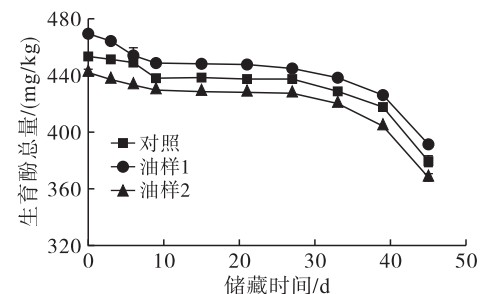


图6 文冠果油储藏期间生育酚总量的变化

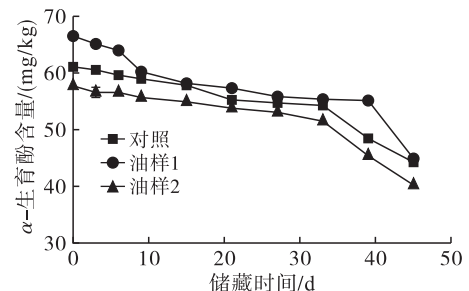


图7 文冠果油储藏期间  $\alpha$ -生育酚含量的变化

由图 6 ~ 图 9 可知,800 W 预处理 6 min 可以提高文冠果油(油样 1)的生育酚含量,原因是微波预处理后,文冠果种仁的内部结构被破坏,使生育酚更

容易随油脂析出,含量增加;但是1 200 W 预处理6 min 可能造成生育酚受热分解,使得文冠果油(油样2)中生育酚含量降低<sup>[15]</sup>。在文冠果油储藏期间,各油样的生育酚总量随储藏时间延长逐渐降低,前10 d 明显下降,中期平缓,后期则快速下降。从图7~图9 的变化趋势可以看出, $\alpha$ -生育酚和 $\gamma$ -生育酚下降较快, $\delta$ -生育酚则下降较缓慢,这与文献[16]报道的一致。显著性分析发现,微波预处理对文冠果油的生育酚含量有显著影响( $P < 0.05$ ),储藏时间对各油样的生育酚含量有极显著影响( $P < 0.01$ )。

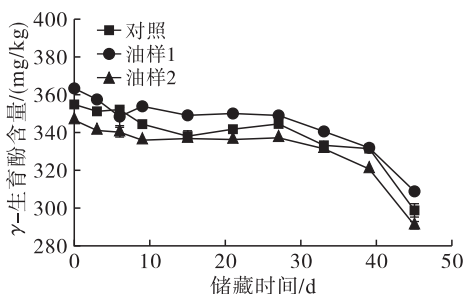


图8 文冠果油储藏期间 $\gamma$ -生育酚含量的变化

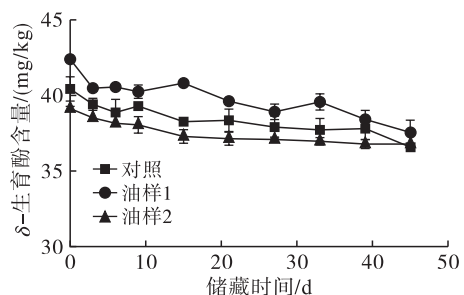


图9 文冠果油储藏期间 $\delta$ -生育酚含量的变化

#### 2.4 储藏时间对文冠果油氧化起始温度的影响

差式扫描量热法(DSC)可在系统控制温度下,测量物质与参比物之间的能量差随温度的变化关系。通过DSC 可以确定油脂的氧化起始温度,氧化起始温度越高,油脂的稳定性越好<sup>[17]</sup>。文冠果油DSC 曲线见图10,文冠果油储藏期间氧化起始温度的变化见图11。

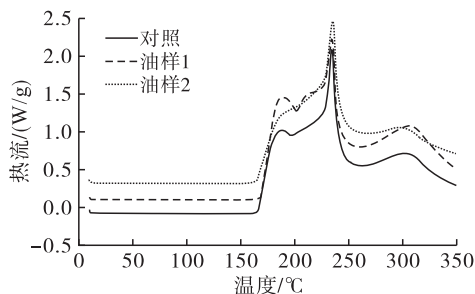


图10 储藏前文冠果油DSC 曲线

由图10 可知,文冠果油的氧化起始温度是DSC 曲线中首次出现拐点时的温度。由图11 可知,适当

的微波预处理有助于提高文冠果油(油样1)的氧化起始温度。文冠果油的氧化起始温度随着储藏时间的延长逐渐降低,前10 d 下降快速,中期平缓,30 d 后又快速降低。显著性分析发现不同储藏时间油样1 与油样2、对照的氧化起始温度有极显著性差异( $P < 0.01$ ),储藏时间对文冠果油的氧化起始温度有极显著影响( $P < 0.01$ )。

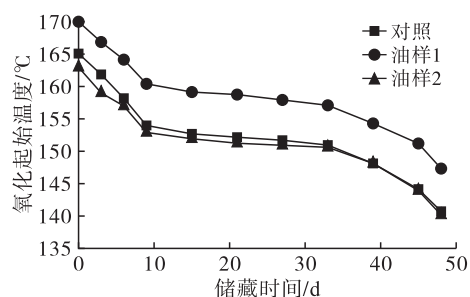


图11 文冠果油储藏期间氧化起始温度的变化

#### 2.5 储藏时间对文冠果油氧化稳定性的影响

Rancimat 法测定油脂的氧化稳定性,是向加热条件下的油样中通入定量的空气,加速油脂的氧化,并将油脂氧化过程中产生的挥发性醛、酮、酸等小分子物质导入蒸馏水中,通过测定水的电导率变化,来反映油脂的氧化情况<sup>[18]</sup>。油脂的氧化诱导时间越长,表明其氧化稳定性越强。文冠果油在储藏期间氧化诱导时间变化趋势见图12。

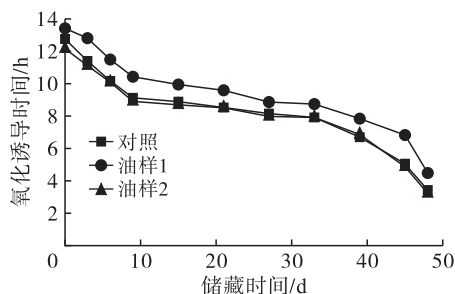


图12 文冠果油储藏期间氧化诱导时间的变化

由图12 可知,800 W 微波预处理文冠果种仁6 min,有助于提高文冠果油(油样1)的氧化稳定性。原因可能是:一方面适当的微波处理使文冠果种仁内部结构被破坏,导致具有抗氧化性的脂质伴随物更容易随油脂溢出;另一方面微波处理使脂肪酶钝化,活性降低,从而增强了油脂的氧化稳定性。但是微波功率过高(油样2)可能破坏内源性脂质伴随物,使油脂的氧化稳定性下降<sup>[19]</sup>。各油样氧化诱导时间均随着储藏时间的延长逐渐降低,前10 d 明显下降,中期平缓,后期下降加快。显著性分析发现,不同储藏时间油样1 与油样2、对照的氧化诱导时间有显著差异( $P < 0.05$ ),文冠果油的氧化诱导时间随储藏时间的延长变化极显著( $P < 0.01$ )。

## 2.6 文冠果油储藏期间有关指标的相关性分析

采用 IBM SPSS statistics 20 对 800 W 微波预处理 6 min 的文冠果油(油样 1)储藏期间有关指标如氧化诱导时间、过氧化值、酸价等理化指标及生育酚含量进行相关性分析,结果见表 1。

表 1 文冠果油储藏期间有关指标的相关性分析

项目	生育酚	OSI	POV	p-AV	AV	K <sub>270</sub>
OSI	0.893**					
POV	-0.911**	-0.936**				
p-AV	-0.931**	-0.944**	0.910**			
AV	-0.800**	-0.918**	0.781**	0.919**		
K <sub>270</sub>	-0.962**	-0.945**	0.950**	0.981**	0.871**	
K <sub>232</sub>	-0.934**	-0.925**	0.993**	0.925**	0.772**	0.958**

注:\*\*表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

由表 1 可知:文冠果油在储藏期间,其 OSI 与生育酚含量呈显著正相关,与 POV、AV、p-AV、K<sub>270</sub>、

K<sub>232</sub>呈显著负相关;POV 与 AV、p-AV、K<sub>232</sub>、K<sub>270</sub>呈显著正相关。表明文冠果油在储藏期间的氧化稳定性与生育酚含量、POV、AV、p-AV 等密切相关。

## 2.7 储藏时间对文冠果油脂肪酸组成的影响

采用气相色谱对文冠果油的脂肪酸组成进行分离鉴定,结果见表 2。由表 2 可知,文冠果油共分离鉴定出 10 种主要脂肪酸,其中油酸约占 32%,亚油酸约占 40%,神经酸约占 2.5%,不饱和脂肪酸高达 91% 以上。

各组油样随着储藏时间的延长,饱和脂肪酸(SFA)含量逐渐增加,不饱和脂肪酸(UFA)含量逐渐降低,在储藏 60 d 时,对照、油样 1 和油样 2 的 UFA/SFA 分别降低了 6.23%、2.00%、3.96%,油酸含量增加,亚油酸含量减少,多不饱和脂肪酸(PUFA)含量降低较明显。

表 2 储藏期间文冠果油脂肪酸组成及含量的变化

脂肪酸	对照的脂肪酸含量/%			油样 1 的脂肪酸含量/%			油样 2 的脂肪酸含量/%		
	0 d	30 d	60 d	0 d	30 d	60 d	0 d	30 d	60 d
C14:0	0.032 <sup>a</sup>	0.033 <sup>a</sup>	0.033 <sup>a</sup>	0.032 <sup>a</sup>	0.033 <sup>a</sup>	0.034 <sup>a</sup>	0.033 <sup>a</sup>	0.033 <sup>a</sup>	0.034 <sup>a</sup>
C16:0	5.409 <sup>b</sup>	5.469 <sup>c</sup>	5.593 <sup>e</sup>	5.414 <sup>b</sup>	5.478 <sup>d</sup>	5.503 <sup>e</sup>	5.396 <sup>a</sup>	5.473 <sup>c</sup>	5.541 <sup>f</sup>
C18:0	2.217 <sup>a</sup>	2.268 <sup>d</sup>	2.476 <sup>e</sup>	2.218 <sup>a</sup>	2.227 <sup>b</sup>	2.242 <sup>c</sup>	2.218 <sup>a</sup>	2.308 <sup>e</sup>	2.373 <sup>f</sup>
C18:1	32.686 <sup>b</sup>	32.764 <sup>c</sup>	32.930 <sup>f</sup>	32.680 <sup>b</sup>	32.773 <sup>d</sup>	32.972 <sup>e</sup>	32.644 <sup>a</sup>	32.765 <sup>c</sup>	32.869 <sup>e</sup>
C18:2	40.743 <sup>f</sup>	40.635 <sup>d</sup>	40.190 <sup>a</sup>	40.745 <sup>f</sup>	40.695 <sup>e</sup>	40.587 <sup>c</sup>	40.740 <sup>f</sup>	40.630 <sup>d</sup>	40.532 <sup>b</sup>
C18:3	0.385 <sup>c</sup>	0.375 <sup>c</sup>	0.358 <sup>a</sup>	0.387 <sup>f</sup>	0.378 <sup>d</sup>	0.364 <sup>b</sup>	0.384 <sup>e</sup>	0.374 <sup>c</sup>	0.358 <sup>a</sup>
C20:1	7.117 <sup>b</sup>	7.073 <sup>d</sup>	7.013 <sup>a</sup>	7.112 <sup>e</sup>	7.082 <sup>e</sup>	7.048 <sup>c</sup>	7.106 <sup>f</sup>	7.071 <sup>d</sup>	7.043 <sup>b</sup>
C22:0	0.521 <sup>a</sup>	0.535 <sup>d</sup>	0.575 <sup>b</sup>	0.524 <sup>b</sup>	0.532 <sup>c</sup>	0.562 <sup>e</sup>	0.539 <sup>e</sup>	0.546 <sup>f</sup>	0.546 <sup>f</sup>
C22:1	8.317 <sup>f</sup>	8.305 <sup>de</sup>	8.300 <sup>d</sup>	8.307 <sup>e</sup>	8.260 <sup>c</sup>	8.188 <sup>b</sup>	8.389 <sup>g</sup>	8.258 <sup>c</sup>	8.180 <sup>a</sup>
C24:1	2.575 <sup>f</sup>	2.545 <sup>d</sup>	2.535 <sup>c</sup>	2.583 <sup>g</sup>	2.545 <sup>d</sup>	2.501 <sup>a</sup>	2.553 <sup>e</sup>	2.543 <sup>d</sup>	2.527 <sup>b</sup>
SFA	8.179 <sup>a</sup>	8.305 <sup>d</sup>	8.676 <sup>b</sup>	8.188 <sup>b</sup>	8.269 <sup>c</sup>	8.341 <sup>e</sup>	8.185 <sup>b</sup>	8.359 <sup>f</sup>	8.493 <sup>g</sup>
UFA	91.821 <sup>b</sup>	91.696 <sup>c</sup>	91.325 <sup>a</sup>	91.813 <sup>g</sup>	91.732 <sup>f</sup>	91.660 <sup>d</sup>	91.816 <sup>g</sup>	91.641 <sup>c</sup>	91.508 <sup>b</sup>
MUFA	50.694 <sup>c</sup>	50.686 <sup>de</sup>	50.777 <sup>e</sup>	50.681 <sup>d</sup>	50.659 <sup>c</sup>	50.709 <sup>f</sup>	50.692 <sup>c</sup>	50.637 <sup>b</sup>	50.618 <sup>a</sup>
PUFA	41.127 <sup>fg</sup>	41.010 <sup>d</sup>	40.548 <sup>a</sup>	41.132 <sup>g</sup>	41.073 <sup>e</sup>	40.951 <sup>c</sup>	41.124 <sup>f</sup>	41.004 <sup>d</sup>	40.890 <sup>b</sup>

注:同行数据上标不同小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。

## 3 结论

(1)通过 Schaal 烘箱法实验,发现文冠果油在储藏期间,过氧化值和 K<sub>232</sub>在前、后期快速增高,中期平缓增长,储藏 50 d,文冠果油的过氧化值已从 0.16 mmol/kg 增长到 14 mmol/kg, K<sub>232</sub>从 0.9 增加到 4.7;酸价、p-茴香胺值及 K<sub>270</sub>则持续增长;生育酚含量、氧化起始温度及氧化诱导时间在前、后期快速降低,中期降低较缓慢。

(2)适当的微波预处理提高了文冠果油中抗氧化物质的含量,有助于提高文冠果油的氧化稳定性,相关性分析表明文冠果油在储藏期间的氧化稳定性与生育酚含量、过氧化值、酸价、p-茴香胺值等密切相关。

(3)文冠果油在加速氧化实验期间,饱和脂肪

酸含量增加,不饱和脂肪酸含量降低,其中主要脂肪酸油酸含量增加,亚油酸含量减少,多不饱和脂肪酸含量降低较明显。

## 参考文献:

- [1] 孔维宝,梁俊玉,马正学,等.文冠果油的研究进展[J].中国油脂,2011,36(11):67-72.
- [2] 唐东慧,阮成江,孟婷,等.不同种质文冠果含油量及油中脂肪酸组成分析[J].中国油脂,2017,42(3):77-81.
- [3] VENEGAS-CALEÓN M, RUÍZ-MÉNDEZ M V, et al. Characterization of *Xanthoceras sorbifolium* Bunge seeds: lipids, proteins and saponins content [J]. Ind Crop Prod, 2017, 109: 192-198.
- [4] 郭莹莹,刘玉兰,梁绍全,等.尿素包合法富集文冠果油中神经酸的研究[J].中国油脂,2018,43(7):119-123.

(下转第 66 页)

- Eur J Lipid Sci Tech, 2012, 114(4): 372 – 374.
- [6] LI D M, WANG W F, QIN X L, et al. A novel process for the synthesis of highly pure  $n-3$  polyunsaturated fatty acid (PUFA) – enriched triglycerides by combined transesterification and ethanolysis [J]. J Agric Food Chem, 2016, 64(34): 6533 – 6538.
- [7] SHEN Z P, WIJESUNDERA C. Effects of docosahexaenoic acid positional distribution on the oxidative stability of model triacylglycerol in water emulsion [J]. J Food Lipids, 2009, 16(1): 62 – 71.
- [8] 陈小娥, 方旭波, 陈洁, 等. 高纯度 EPA/DHA 甘油三酯的酶法合成[J]. 过程工程学报, 2009, 9(3): 552 – 557.
- [9] AKIMOTO M, IZAWA M, HOSHINO K, et al. Lipase – catalyzed interesterification of soybean oil with an  $\omega-3$  polyunsaturated fatty acid concentrate prepared from sardine oil [J]. Appl Biochem Biotech, 2003, 104(2): 105 – 118.
- [10] ZHANG Z, LIU F, MA X, et al. Two – stage enzymatic preparation of eicosapentaenoic acid (EPA) and docosahexaenoic acid (DHA) enriched fish oil triacylglycerols [J]. J Agric Food Chem, 2017, 66(1): 218 – 227.
- [11] 杨春芳, 王卫飞, 王永华, 等. 以隐甲藻油富集合成高含量 DHA – 甘油酯[J]. 中国油脂, 2012, 37(2): 42 – 45.
- [12] MORENO – PEREZA S, LUNAP, SEÑORANS F J, et al. Enzymatic synthesis of triacylglycerols of docosahexaenoic acid; transesterification of its ethyl esters with glycerol [J]. Food Chem, 2015, 187: 225 – 229.
- [13] SUN Z M, XUE C H, GUO Z X, et al. Preparation of triacylglycerols enriched in DHA from single cell glycerides via molecular distillation and enzymatic glycerolysis [J]. J Aquat Food Prod Technol, 2015, 24(8): 796 – 806.
- [14] 王海东, 丁斌, 郝凤岭, 等. 脂肪酸乙酯合成工艺研究[J]. 化工科技, 2015, 23(1): 35 – 37.
- [15] 程亚鹏, 毕艳兰, 刘伟, 等. 尿素包合法制备高纯度油酸乙酯的工艺条件优化[J]. 中国油脂, 2018, 43(9): 8 – 14.
- [16] YANG B J, ZHENG L, HAN X T, et al. Development of TLC – FID technique for rapid screening of the chemical composition of microalgae diesel and biodiesel blends [J]. Fuel, 2013, 111: 344 – 349.
- [17] 李桂华. 油料油脂检验与分析 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [18] 林虬, 宋永康, 苏德森, 等. 气相色谱法分析鱼油胶囊中的脂肪酸组成[J]. 现代科学仪器, 2005(1): 63 – 64.
- [19] 刘太宇, 陈竞男, 毕艳兰, 等. 酶促酯化合成甘油三酯工艺条件的研究[J]. 中国油脂, 2015, 40(5): 34 – 38.
- [20] LINDER M, KOCHANOWSKI N, FANNI J, et al. Response surface optimization of lipase – catalysed esterification of glycerol and  $n-3$  polyunsaturated fatty acids from salmon oil [J]. Process Biochem, 2005(40): 273 – 279.
- [21] KRALOVEC J A, WANG W, BARROW C J. Production of  $\omega-3$  triacylglycerol concentrates using a new food grade immobilized *Candida antarctica* lipase B [J]. Aust J Chem, 2010, 63(63): 922 – 928.
- .....
- (上接第 45 页)
- [5] LI J, FU Y J, QU X J, et al. Biodiesel production from yellow horn (*Xanthoceras sorbifolia* Bunge.) seed oil using ion exchange resin as heterogeneous catalyst [J]. Bioresource Technol, 2018, 108: 112 – 118.
- [6] 张祎, 胡珂青, 何梦, 等. 糖效应辅助水剂法提取文冠果籽油工艺优化及其特性分析 [J]. 中国油脂, 2017, 42(1): 1 – 5.
- [7] AZADMARD – DAMIRCHI S, HABIBI – NODEH F, HESARI J, et al. Effect of pretreatment with microwaves on oxidative stability and nutraceuticals content of oil from rapeseed [J]. Food Chem, 2010, 121: 1211 – 1215.
- [8] YU H Y, FAN S Q, BI Q X, et al. Seed morphology, oil content and fatty acid composition variability assessment in yellow horn (*Xanthoceras sorbifolium* Bunge) germplasm for optimum biodiesel production [J]. Ind Crop Prod, 2017, 97: 425 – 430.
- [9] 姜梦婷, 王秋岭, 周鑫, 等. 不同油料作物油脂体氧化稳定性差异的研究 [J]. 中国粮油学报, 2018, 33(10): 63 – 70.
- [10] OOMAH B D, SITTE L. Characteristics of flaxseed hull oil [J]. Food Chem, 2009, 114(2): 623 – 628.
- [11] 马素换, 张苗, 郭萍梅, 等. 微波预处理对山桐子果细胞结构及油脂品质的影响 [J]. 中国油脂, 2018, 43(7): 19 – 22.
- [12] 易志. 亚麻籽油储藏稳定性研究 [D]. 广州: 华南农业大学, 2016.
- [13] GÓMEZ – ALONSO S, MANCEBO – CAMPOS V, SALVADOR D. Evolution of major and minor components and oxidation indices of virgin olive oil during 21 months storage at room temperature [J]. Food Chem, 2007, 100: 36 – 42.
- [14] MIRALIKBARI H, SHAHIDI F. Antioxidant activity of minor components of tree nut oils [J]. Food Chem, 2008, 111: 421 – 427.
- [15] 鞠阳. 微波处理对油料结构及油脂品质和风味的影响 [D]. 郑州: 河南工业大学, 2015.
- [16] 毕艳兰. 油脂化学 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [17] 张逸. 沙棘油的提质制取及对青紫蓝视网膜光损伤的预防作用研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.
- [18] 朱振宝, 刘梦颖, 易建华. 2 种方法测定核桃油脂氧化稳定性相关性 [J]. 中国粮油学报, 2016, 31(4): 85 – 88.
- [19] NIU Y X, ROGIEWICZ A, WAN C Y, et al. Effect of microwave treatment on the efficacy of expeller pressing of *Brassica napus* rapeseed and *Brassica juncea* mustard seeds [J]. Food Chem, 2015, 63: 3078 – 3084.