

# 不同加热条件对文冠果油脂肪酸 和生育酚含量的影响

赵思阳<sup>1</sup>, 杨伞伞<sup>1</sup>, 管文轲<sup>2</sup>, 赵振<sup>3</sup>, 阮成江<sup>1</sup>

(1. 大连民族大学 资源植物研究所, 辽宁 大连 116600; 2. 新疆林业科学院, 乌鲁木齐 830092;  
3. 吴忠市嘉誉农林科技有限公司, 宁夏 吴忠 751100)

**摘要:**为考察文冠果油在高温加热条件下品质的变化, 将文冠果油在 140、160、180、200、220 °C 下分别加热 5、10、15、20 min, 采用 GC-MS、HPLC 分别测定不同加热条件下文冠果油中脂肪酸和生育酚含量的变化。结果表明: 文冠果油中油酸相对含量随加热温度的升高及加热时间的延长而增加, 220 °C 加热 5 min 时, 文冠果油油酸相对含量从未加热时的 21.31% 升高至 26.78%, 升高了 25.67%; 亚油酸相对含量随加热温度的升高出现不同程度的增加; 神经酸相对含量随加热温度的升高而下降, 140~220 °C 加热 5~20 min 文冠果油的神经酸相对含量较未加热时下降了 1.62%~66.13%; 亚油酸和神经酸相对含量随加热时间延长呈波动变化, 无规律性; 高温长时间加热均会导致文冠果油中  $\alpha$ -生育酚和 ( $\beta + \gamma$ )-生育酚的损失, 而  $\delta$ -生育酚含量随加热时间延长而升高。因此, 若想充分利用文冠果油中的神经酸, 可将烹饪条件控制在 140 °C 加热 5 min 以内或不加热食用。

**关键词:**文冠果油; 加热温度; 加热时间; 脂肪酸; 生育酚

中图分类号: TS225.6; TQ646.4 文献标识码: A 文章编号: 1003-7969(2022)10-0039-05

## Effects of different heating conditions on the content of fatty acids and tocopherols of *Xanthoceras sorbifolia* Bunge. oil

ZHAO Siyang<sup>1</sup>, YANG Sansan<sup>1</sup>, GUAN Wenke<sup>2</sup>, ZHAO Zhen<sup>3</sup>, RUAN Chengjiang<sup>1</sup>

(1. Institute of Plant Resources, Dalian Minzu University, Dalian 116600, Liaoning, China; 2. Xinjiang Academy of Forestry, Urumqi 830092, China; 3. Wuzhong Jiayu Agriculture and Forestry Technology Co., Ltd., Wuzhong 751100, Ningxia, China)

**Abstract:** In order to investigate the changes of the quality of *Xanthoceras sorbifolia* Bunge. oil under high temperature heating conditions, *Xanthoceras sorbifolia* Bunge. oil was heated at 140, 160, 180, 200 °C and 220 °C for 5, 10, 15 min and 20 min, respectively, and the content changes of fatty acids and tocopherols in *Xanthoceras sorbifolia* Bunge. oil under different heating conditions were detected by GC-MS and HPLC, respectively. The results showed that the relative content of oleic acid in *Xanthoceras sorbifolia* Bunge. oil increased with the increase of heating temperature and the prolonging of heating time. When heated at 220 °C for 5 min, the relative content of oleic acid increased from 21.31%

(without heating) to 26.78%, with an increase of 25.67%. The relative content of linoleic acid increased to different degrees with the increase of heating temperature. The relative content of neuronc acid decreased with the increase of heating temperature, and when heated at 140-220 °C for 5-20 min decreased by 1.62%-66.13% compared with that without heating. The relative contents of linoleic acid and neuronc acid

收稿日期: 2021-07-26; 修回日期: 2022-04-28

基金项目: 国家自然科学基金(31760213); 中央财政林业科技推广示范项目([2018]ZY04号); 辽宁省重点研发计划(2020JH2/10200042)共同资助

作者简介: 赵思阳(1990), 女, 硕士, 研究方向为资源植物分子育种与开发利用(E-mail) dzzy1314@163.com。

通信作者: 阮成江, 教授, 博士生导师(E-mail) ruan@dlnu.edu.cn。

fluctuated with the prolonging of heating time, without regularity. High temperature for long time heating could result in the loss of  $\alpha$ -tocopherol and  $(\beta + \gamma)$ -tocopherol in *Xanthoceras sorbifolia* Bunge. oil, but  $\delta$ -tocopherol content increased with prolonging of heating time. The final conclusion is that to fully absorb the neuronic acid from *Xanthoceras sorbifolia* Bunge. oil, the cooking conditions should be controlled at 140 °C for 5 min or less or without heating.

**Key words:** *Xanthoceras sorbifolia* Bunge. oil; heating temperature; heating time; fatty acid; tocopherol

文冠果(*Xanthoceras sorbifolia* Bunge.)为无患子科文冠果属落叶灌木或小乔木,具有耐寒、耐旱、耐瘠薄、耐盐碱等特性,是我国北方重要的木本油料树种<sup>[1]</sup>。文冠果种仁含油率达55%~70%,文冠果油富含油酸(28.29%~32.88%)、亚油酸(39.71%~44.44%)等不饱和脂肪酸,其中亚油酸是组成细胞的必需物质,参与人体代谢活动且人体自身无法合成<sup>[2-4]</sup>,具有较强的抗氧化和自由基清除能力,具有抗心血管疾病、降低胆固醇浓度的作用,是对身体有益的不饱和脂肪酸<sup>[5]</sup>。与一般植物油不同的是,文冠果油还含有3%~5%的神经酸<sup>[6-7]</sup>。神经酸是大脑神经细胞和神经组织的天然核心成分,可以提高神经元细胞的活力,促进受损神经组织修复和再生<sup>[8]</sup>。文冠果油富含维生素E,其含量高达51.24 mg/100 g<sup>[9]</sup>。

油脂在烹饪过程中,会发生一系列的物理和化学反应,常会导致油脂品质降低,同时会产生对人体健康不利的有害物质<sup>[10]</sup>。为考察文冠果油作为食用植物油在烹饪中品质的变化,本文以辽宁朝阳种源“辽冠1号”文冠果油为原料,考察在不同加热温度和加热时间下文冠果油中油酸、亚油酸、神经酸及生育酚含量的变化情况,旨在为文冠果油的食用提供科学参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

#### 1.1.1 原料与试剂

文冠果油,由来自辽宁朝阳的“辽冠1号”文冠果经索氏提取法制备。

脂肪酸甲酯标准品, $\alpha$ -、 $\beta$ -、 $\gamma$ -、 $\delta$ -生育酚标准品(纯度>95%),抗坏血酸,2,6-二叔丁基对甲基苯酚,无水硫酸钠、氯化钠、石油醚、无水乙醇、氢氧化钾、三氟化硼甲醇溶液均为分析纯,甲醇、正己烷均为色谱纯。

#### 1.1.2 仪器与设备

PerkinElmer 高效液相色谱仪,PerkinElmer 气相色谱串联质谱仪,DB-23 气相色谱柱,岛津 C18 色谱柱,PL203 型电子天平,DK-S26 型电热恒温水浴

锅,WJ-804 电炸炉,MX-S 涡旋混匀仪,摇床。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 文冠果油的加热处理

模拟烹饪条件,将同一批次的文冠果油分别在140、160、180、200、220 °C下加热5、10、15、20 min,冷却至室温后置于棕色样品瓶中,于4 °C冰箱保存,备用。

#### 1.2.2 脂肪酸含量的测定

根据丁健等<sup>[11]</sup>的方法并适当改进,进行甲酯化。取待测油样1  $\mu$ L于4 mL贮样瓶,加200  $\mu$ L正己烷,振荡溶解样品,再加500  $\mu$ L 1 mol/L 氢氧化钾甲醇溶液(现配),充分振荡;密封后,60 °C水浴加热30 min,期间振荡2~3次,冷却;加入1 mL三氟化硼甲醇溶液,密封后,再于60 °C水浴加热30 min,期间振荡2~3次,冷却;加入1 mL饱和氯化钠溶液和2 mL正己烷,剧烈振荡1 min,静置分层后,收集上层于新离心管;加入适量无水硫酸钠,振荡,静置;抽取上层清液过0.22  $\mu$ m有机滤膜,待GC-MS分析。

GC-MS条件:DB-23色谱柱(60 m  $\times$  0.25 mm, 0.25  $\mu$ m);进样口温度230 °C;载气流速1 mL/min;进样量1  $\mu$ L;分流比40:1;柱箱升温程序为初始温度50 °C,以15 °C/min升温至200 °C,保持15 min,以3 °C/min升温至215 °C,保持10 min,以3 °C/min升温至230 °C,保持5 min;离子源(EI)温度230 °C;传输线温度245 °C;检测电压1 700 V;溶剂延迟5 min;质量扫描范围( $m/z$ )45~400 u。

根据37种脂肪酸甲酯标准品建立的质谱库进行定性分析,采用峰面积归一化法进行定量分析。

#### 1.2.3 生育酚含量的测定

根据GB 5009.82—2016,采用反相高效液相色谱法测定文冠果油中的4种生育酚含量。准确称取1 g油样于50 mL螺旋口离心管中,分别加入抗坏血酸0.25 mg和BHT 0.025 mg,再加入7.5 mL无水乙醇和2.5 mL 50%的氢氧化钾溶液,摇匀后于45 °C摇床中皂化60 min,皂化后立即用冷水冷却至室温。加入7.5 mL蒸馏水,再加入12.5 mL石油醚,振荡萃取5 min,将上层醚层移入新的离心管中,

下层溶液加入 12.5 mL 石油醚再次萃取,合并 2 次醚层。用 13 mL 超纯水洗涤醚层,重复 3 次,直至将醚层洗至中性。再加入无水硫酸钠(约 3 g)干燥后过滤,滤液于旋转蒸发仪中挥发至近干,用甲醇定容至 2 mL。溶液过 0.22  $\mu\text{m}$  微孔滤膜后待测。

色谱条件:岛津 C18 色谱柱(150 mm  $\times$  4.6 mm, 5  $\mu\text{m}$ );流动相为 100% 甲醇,流速 0.8 mL/min;检测波长 294 nm;进样量 10  $\mu\text{L}$ ;柱温 20  $^{\circ}\text{C}$ 。

标准溶液配制:分别准确称取已标定质量浓度(1 mg/mL)的  $\alpha$ -、 $\beta$ -、 $\gamma$ -、 $\delta$ -生育酚标准溶液 2、5、10、20、40、60  $\mu\text{L}$ ,用甲醇定容至 1 mL,配成 2、5、10、20、40、60  $\mu\text{g}/\text{mL}$  梯度混标溶液。

根据 HPLC 分析结果,结合标准溶液 HPLC 色谱峰的保留时间、对称性和峰高,确认文冠果油中的生育酚种类,以梯度混标溶液绘制标准曲线,外标法计算 4 种生育酚的含量。

#### 1.2.4 数据处理

每个油样重复测定 3 次,试验数据用“平均值  $\pm$  标准差”表示,采用 SPSS 20.0 软件对数据进行统计分析,用邓肯检验分析组间差异性。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同加热条件下文冠果油主要脂肪酸相对含量变化

采用 GC-MS 测定文冠果油脂肪酸组成,共检测出 11 种脂肪酸,分别为棕榈酸、硬脂酸、油酸、亚油酸、亚麻酸、花生酸、花生一烯酸、顺-11,14-二十碳二烯酸、山嵛酸、芥酸和神经酸,其中相对含量较高的是油酸和亚油酸。表 1 为不同加热条件下文冠果油 3 种主要脂肪酸相对含量变化情况。

由表 1 可知:未加热油样的油酸相对含量为 21.31%;140、160、180、200、220  $^{\circ}\text{C}$  加热 5 min 时油酸相对含量分别为 20.67%、22.50%、24.04%、24.84% 和 26.78%,是未加热油样的 0.97、1.06、1.13、1.17 倍和 1.26 倍;140、160、180、200、220  $^{\circ}\text{C}$  加热 10 min 时油酸相对含量分别为 21.76%、22.47%、24.83%、24.68% 和 24.97%,是未加热油样的 1.02、1.05、1.16、1.16 倍和 1.17 倍;140、160、180、200、220  $^{\circ}\text{C}$  加热 15 min 时油酸相对含量分别为 21.02%、23.47%、24.23%、26.64% 和 26.75%,是未加热油样的 0.99、1.10、1.14、1.25 倍和 1.26 倍;140、160、180、200、220  $^{\circ}\text{C}$  加热 20 min 时油酸相对含量分别为 22.72%、23.16%、25.01%、21.61% 和 24.73%,是未加热油样的 1.07、1.09、1.17、1.01 倍和 1.16 倍。可以看出,油酸相对含量随加热温度的升高和加热时间的延长总体呈上升趋势。

表 1 不同加热条件下文冠果油 3 种主要脂肪酸相对含量

温度/ $^{\circ}\text{C}$	时间/min	相对含量/%			
		油酸	亚油酸	神经酸	
未加热	0	21.31 $\pm$ 2.08	30.53 $\pm$ 0.44	4.31 $\pm$ 1.51	
	140	20.67 $\pm$ 1.05	31.31 $\pm$ 1.10	4.23 $\pm$ 0.32	
	10	21.76 $\pm$ 1.19	30.48 $\pm$ 1.07	4.00 $\pm$ 0.79	
	15	21.02 $\pm$ 1.05	30.87 $\pm$ 1.18	4.24 $\pm$ 0.63	
	20	22.72 $\pm$ 0.42	30.55 $\pm$ 0.38	3.66 $\pm$ 0.51	
160	5	22.50 $\pm$ 2.49	31.52 $\pm$ 1.91	3.92 $\pm$ 0.29	
	10	22.47 $\pm$ 0.87	30.47 $\pm$ 0.72	3.35 $\pm$ 0.62	
	15	23.47 $\pm$ 0.18	30.43 $\pm$ 0.45	3.52 $\pm$ 0.14	
	20	23.16 $\pm$ 0.65	30.92 $\pm$ 0.95	3.57 $\pm$ 0.26	
	180	5	24.04 $\pm$ 0.80	32.16 $\pm$ 0.60	3.86 $\pm$ 0.32
180	10	24.83 $\pm$ 1.52	32.45 $\pm$ 0.81	2.74 $\pm$ 0.03	
	15	24.23 $\pm$ 0.30	33.54 $\pm$ 1.30	1.55 $\pm$ 0.27	
	20	25.01 $\pm$ 0.68	33.14 $\pm$ 0.01	2.62 $\pm$ 0.84	
	200	5	24.84 $\pm$ 1.45	32.71 $\pm$ 3.35	2.05 $\pm$ 0.21
	10	24.68 $\pm$ 1.23	32.82 $\pm$ 1.97	2.56 $\pm$ 1.12	
200	15	26.64 $\pm$ 0.49	33.97 $\pm$ 2.55	1.55 $\pm$ 0.96	
	20	21.61 $\pm$ 1.13	30.53 $\pm$ 1.14	2.31 $\pm$ 0.04	
	220	5	26.78 $\pm$ 0.14	33.29 $\pm$ 0.14	1.83 $\pm$ 0.01
	10	24.97 $\pm$ 0.12	32.75 $\pm$ 0.90	2.03 $\pm$ 0.96	
	15	26.75 $\pm$ 0.67	34.19 $\pm$ 1.36	1.46 $\pm$ 0.08	
20	24.73 $\pm$ 0.20	33.32 $\pm$ 0.98	2.26 $\pm$ 0.78		

未加热油样的亚油酸相对含量为 30.53%,与汤成龙等<sup>[12]</sup>的研究结果(29.45%)接近。140、160、180、200、220  $^{\circ}\text{C}$  加热 5 min 时亚油酸相对含量分别为 31.31%、31.52%、32.16%、32.71% 和 33.29%,是未加热油样的 1.03、1.03、1.05、1.07 倍和 1.09 倍;140、160、180、200、220  $^{\circ}\text{C}$  加热 10 min 时亚油酸相对含量分别为 30.48%、30.47%、32.45%、32.82% 和 32.75%,是未加热油样的 1.00、1.00、1.06、1.08 倍和 1.07 倍;140、160、180、200、220  $^{\circ}\text{C}$  加热 15 min 时亚油酸相对含量分别为 30.87%、30.43%、33.54%、33.97% 和 34.19%,是未加热油样的 1.01、1.00、1.10、1.11 倍和 1.12 倍;140、160、180、200、220  $^{\circ}\text{C}$  加热 20 min 时亚油酸相对含量分别为 30.55%、30.92%、33.14%、30.53% 和 33.32%,是未加热油样的 1.00、1.01、1.09、1.00 倍和 1.09 倍。可以看出,随着加热温度升高,文冠果油的亚油酸相对含量总体出现不同程度的增加,而加热时间对文冠果油亚油酸相对含量的影响无规律性。

未加热油样的神经酸相对含量为 4.31%,高于唐东慧等<sup>[13]</sup>的研究结果(1.28% ~ 3.77%)。同一加热时间下,文冠果油的神经酸相对含量随加热温度的升高呈逐渐下降趋势。与未加热油样相比,加热 20 min 时,140、160、180、200、220  $^{\circ}\text{C}$  下神经酸相对含量分别降低至 3.66%、3.57%、2.62%、2.31%

和 2.26% ,分别降低了 15.08%、17.17%、39.21%、46.40%、47.56%。随加热时间的延长,文冠果油神经酸相对含量呈波动变化,无规律性,但均低于未加热文冠果油的。

文冠果油油酸相对含量随加热温度的升高与加热时间的延长呈增加趋势。罗凡等<sup>[14]</sup>研究发现 30~150℃条件下加热油茶籽油,在加热 0~20 min 内油酸含量逐渐上升并在 20 min 后趋于稳定。高温下油脂有可能发生脂质过氧化反应和热聚合反应,生成过氧化物和聚合物,造成脂肪酸总含量的降

低,进而引起油酸相对含量的升高<sup>[15]</sup>。文冠果油亚油酸相对含量随温度的升高出现不同幅度的增加,原因有待进一步研究。高温及长时间加热均导致文冠果油神经酸含量下降,与阮瑜琳<sup>[16]</sup>研究结果一致。140~220℃下加热 5~20 min 文冠果油神经酸相对含量较未加热时下降了 1.62%~66.13%,神经酸有可能在高温过程中分解或转化为其他脂肪酸<sup>[17]</sup>。

2.2 不同加热条件下文冠果油生育酚含量变化 (见图 1)

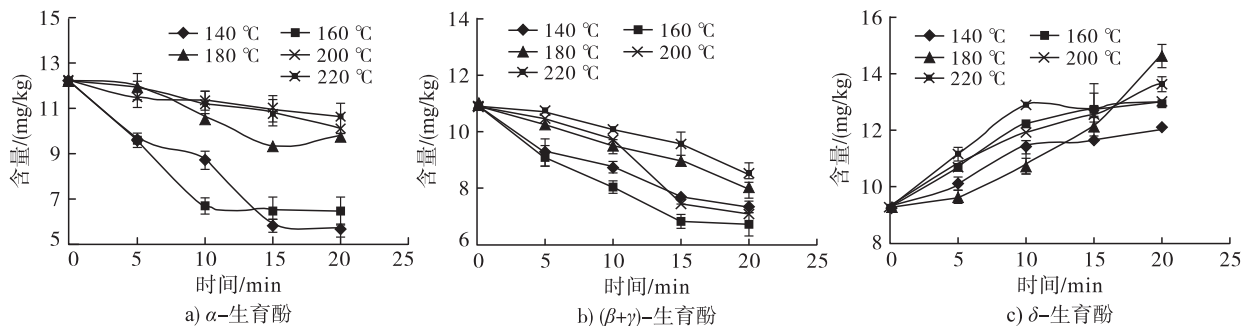


图 1 不同加热条件下文冠果油生育酚含量变化

由图 1 可看出,文冠果油生育酚含量随加热温度的升高变化无规律性,因此主要分析不同加热温度下,文冠果油生育酚含量随加热时间延长的变化情况。由图 1a 可知:未加热文冠果油的  $\alpha$ -生育酚含量为 12.34 mg/kg;140、160、180、200、220℃加热 5 min 时  $\alpha$ -生育酚含量分别为 9.70、9.65、12.09、11.99、11.55 mg/kg,分别降低了 21.39%、21.80%、2.03%、2.84%、6.40%;140、160、180、200、220℃加热 10 min 时  $\alpha$ -生育酚含量分别为 8.74、6.72、10.72、11.34、11.46 mg/kg,分别降低了 29.17%、45.54%、13.13%、8.10%、7.13%;140、160、180、200、220℃加热 15 min 时  $\alpha$ -生育酚含量分别为 5.90、6.61、9.40、10.89、11.04 mg/kg,分别降低了 52.19%、46.43%、23.82%、11.75%、10.53%;140、160、180、200、220℃加热 20 min 时  $\alpha$ -生育酚含量分别为 5.71、6.45、9.86、10.13、10.68 mg/kg,分别降低了 53.73%、47.73%、20.10%、17.91%、13.45%。可以看出,在同一加热温度下,文冠果油的  $\alpha$ -生育酚含量随加热时间延长而降低,这与 Bruscatto 等<sup>[18]</sup>研究 180℃条件下米糠油中  $\alpha$ -生育酚含量的变化结果相似。

由图 1b 可知:未加热文冠果油的  $(\beta + \gamma)$ -生育酚含量为 11.22 mg/kg;140、160、180、200、220℃下加热 5 min 时  $(\beta + \gamma)$ -生育酚含量分别为 9.37、9.32、10.51、10.62、10.88 mg/kg,分别降低了 16.49%、16.93%、6.33%、5.35%、3.03%;140、

160、180、200、220℃下加热 10 min 时  $(\beta + \gamma)$ -生育酚含量分别为 8.86、8.10、9.72、9.90、10.23 mg/kg,分别降低了 21.03%、27.81%、13.37%、11.76%、8.82%;140、160、180、200、220℃下加热 15 min 时  $(\beta + \gamma)$ -生育酚含量分别为 7.75、6.75、9.09、7.51、9.75 mg/kg,分别降低了 30.93%、39.84%、18.98%、33.07%、13.10%;140、160、180、200、220℃下加热 20 min 时  $(\beta + \gamma)$ -生育酚含量分别为 7.38、6.78、8.08、7.20、8.57 mg/kg,分别降低了 34.22%、39.57%、27.99%、35.83%、23.62%。可以看出,同一加热温度下,文冠果油  $(\beta + \gamma)$ -生育酚含量随加热时间延长而降低。

由图 1c 可知:未加热文冠果油的  $\delta$ -生育酚含量为 9.11 mg/kg;140、160、180、200、220℃加热 5 min 时  $\delta$ -生育酚含量分别为 9.94、10.54、9.55、10.72、11.00 mg/kg,分别升高了 9.11%、15.70%、4.83%、17.67%、20.75%;140、160、180、200、220℃加热 10 min 时  $\delta$ -生育酚含量分别为 11.30、12.10、10.71、11.85、12.77 mg/kg,分别升高了 24.04%、32.82%、17.56%、30.08%、40.18%;140、160、180、200、220℃加热 15 min 时  $\delta$ -生育酚含量分别为 11.56、12.61、11.99、12.49、12.67 mg/kg,分别升高了 26.89%、38.42%、31.61%、37.10%、39.08%;140、160、180、200、220℃加热 20 min 时  $\delta$ -生育酚含量分别为 11.92、12.87、14.56、12.96、13.53 mg/kg,分别升高了 30.85%、41.27%、59.82%、42.26%、

48.52%。可以看出,同一加热温度下,文冠果油 $\delta$ -生育酚含量随加热时间延长而逐渐增加,这与董志文等<sup>[19]</sup>的研究结果一致。

油脂在加热过程中,生育酚会发生氧化和降解,导致其含量降低<sup>[20]</sup>。从以上结果可知,文冠果油 $\alpha$ -生育酚和 $(\beta+\gamma)$ -生育酚的含量随加热时间的延长呈下降趋势,说明高温长时间加热会加剧 $\alpha$ -生育酚和 $(\beta+\gamma)$ -生育酚的损失。140~220℃下加热20 min时,文冠果油 $\alpha$ -生育酚的损耗率为13.45%~53.73%, $(\beta+\gamma)$ -生育酚的损耗率为23.62%~39.57%。研究表明, $\alpha$ -生育酚不稳定,降解较快,而 $\beta$ -生育酚和 $\gamma$ -生育酚以中等速率降解<sup>[21-22]</sup>。油脂中 $\delta$ -生育酚主要以挥发和转化两种形式损耗,其中以转化为主,挥发为辅,其转化产物可能为5,6-环氧- $\delta$ -生育醌和2,3-环氧- $\delta$ -生育醌<sup>[23]</sup>。文冠果油加热后 $\delta$ -生育酚含量增加的机制有待进一步研究。

### 3 结论

“辽冠1号”文冠果油中油酸的相对含量随加热温度的升高与加热时间的延长而增加,神经酸含量随加热温度的升高而下降。如想充分利用神经酸,不宜加热食用或将烹饪条件控制在140℃加热5 min以内。随加热时间延长,文冠果油 $\alpha$ -生育酚和 $(\beta+\gamma)$ -生育酚含量逐渐下降,其中 $\alpha$ -生育酚的损耗率更高,而 $\delta$ -生育酚含量升高,其机制有待进一步研究。

### 参考文献:

- [1] 高洁. 文冠果丰产栽培技术[J]. 山西科技, 2007(5): 153-154, 145.
- [2] 于海燕, 周绍箕. 文冠果油制备生物柴油的研究[J]. 中国油脂, 2009, 34(3): 43-45.
- [3] ZHANG S, ZU Y G, FU Y J, et al. Supercritical carbon dioxide extraction of seed oil from yellow horn (*Xanthoceras sorbifolia* Bunge) and its antioxidant activity[J]. Bioresour Technol, 2010, 101(7): 2537-2544.
- [4] 刘玉兰, 郭莹莹. 不同产地原料和不同工艺制取文冠果油的综合品质研究[J]. 粮食与油脂, 2020, 33(6): 1-6.
- [5] 苏宁. 文冠果种实生长发育及油脂、皂苷等内含物变化规律[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- [6] 李信, 郑畅, 上官慧娟, 等. 响应面法优化微波预处理文冠果冷榨工艺的研究[J]. 中国油脂, 2020, 45(3): 8-12.
- [7] LIANG Q, FANG H, LIU J, et al. Analysis of the nutritional components in the kernels of yellowhorn (*Xanthoceras sorbifolium* Bunge) accessions [J/OL]. J Food Compos Anal, 2021, 100(3): 103925 [2021-07-26]. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2021.103925>.
- [8] 王性炎, 王姝清. 神经酸研究现状及应用前景[J]. 中国油脂, 2010, 35(3): 1-5.
- [9] 赵芳, 李桂华, 刘振涛, 等. 文冠果油理化特性及组成分析研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2011, 32(6): 45-49.
- [10] 金华丽, 谷克仁. 油炸食品安全性分析及危害预防[J]. 中国油脂, 2010, 35(9): 74-77.
- [11] 丁健, 关莹, 阮成江, 等. 沙棘果油提取工艺的正交试验优化及其脂肪酸组分测定[J]. 食品科学, 2016, 37(2): 13-18.
- [12] 汤成龙, 郝倩, 王世雷, 等. 文冠果籽油的索式萃取及其组成分析[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(29): 16501-16504.
- [13] 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.
- [14] 罗凡, 费学谦, 杨楠, 等. 热处理延长油茶籽油氧化稳定性研究[J]. 中国油脂, 2018, 43(9): 17-22, 29.
- [15] 王斐, 史闯, 殷钟意, 等. 牡丹籽仁油在加热过程中的脂肪酸组成、酸值和过氧化值变化研究[J]. 食品研究与开发, 2016, 37(17): 21-25.
- [16] 阮瑜琳. 文冠果油和蛋白的制备及油脂氧化稳定性的研究[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2016.
- [17] 王瑶瑶, 吴凡, 叶根军, 等. 不同加热条件对 $\omega$ -3鸡蛋中脂肪酸含量的影响[J]. 食品科学技术学报, 2021, 39(3): 111-121.
- [18] BRUSCATTO M H, ZAMBIAZI R C, SGANZERLA M, et al. Degradation of tocopherols in rice bran oil submitted to heating at different temperatures[J]. J Chromatogr Sci, 2009(9): 762-765.
- [19] 董志文, 张妮, 阮瑜琳, 等. 文冠果油在烹饪温度下性质与营养物质的变化[J]. 中国油脂, 2018, 43(4): 33-36.
- [20] VERLEYEN T, KAMAL-ELDIN A, DOBARGANES C, et al. Modeling of  $\alpha$ -tocopherol loss and oxidation products formed during thermoxidation in triolein and tripalmitin mixtures[J]. Lipids, 2001, 36(7): 719-726.
- [21] GORDON M H, KOURIMSKÁ L. Effect of antioxidants on losses of tocopherols during deep-fat frying[J]. Food Chem, 1995, 52(2): 175-177.
- [22] YOSHIDA H, HIROOKA N, KAJIMOTO G. Microwave heating effects on relative stabilities of tocopherols in oils[J]. J Food Sci, 2010, 56(4): 1042-1046.
- [23] 谭丹丹. 油脂中 $\delta$ -生育酚的抗氧化、热损耗规律及其与蛋白质作用的光谱学研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2016.