

# 鼠尾草酸对椰子油热加工过程中主要理化性质、脂肪酸组成与自由基的影响研究

姚梦莹, 匡婷, 云永欢, 曹君, 张伟敏

(海南大学食品科学与工程学院, 海口 570228)

**摘要:**以叔丁基对苯二酚(TBHQ)为对照,对比分析鼠尾草酸(CA)对椰子油热加工过程(180℃)中主要理化指标(酸价、游离脂肪酸含量、过氧化值、总氧化值、茴香胺值)、脂肪酸组成及自由基含量的影响。结果表明:加入抗氧化剂能够显著降低椰子油的主要理化指标,CA与TBHQ效果基本相当;加入CA和TBHQ可以抑制和延缓反式油酸、反式亚油酸的产生;CA和TBHQ对椰子油热加工过程中自由基含量的增加具有明显的抑制作用,且CA的抑制效果与TBHQ相差不大。因此,可以考虑将CA作为TBHQ在油脂热加工过程中的替代抗氧化剂使用。

**关键词:**鼠尾草酸;椰子油;脂肪酸组成;热稳定性;自由基

中图分类号:TS225.1;TS201.2 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2020)08-0039-06

## Effects of carnosic acid on main physicochemical properties, fatty acid composition and free radicals in coconut oil thermal processing

YAO Mengying, KUANG Ting, YUN Yonghuan, CAO Jun, ZHANG Weimin

(College of Food Science and Engineering, Hainan University, Haikou 570228, China)

**Abstract:** With *tert*-butyl hydroquinone (TBHQ) as contrast, the effects of carnosic acid (CA) on the main physicochemical indicators (acid value, free fatty acid content, peroxide value, total oxidation value and anisidine value) in the thermal processing (at 180℃), fatty acid composition and free radical content were studied. The results showed that the addition of antioxidants could significantly reduce the main physicochemical indicators of coconut oil samples, and the effects of CA and TBHQ were basically the same. TBHQ and CA could inhibit and delay the production of *trans*-oleic acid and *trans*-linoleic acid. CA and TBHQ had obvious inhibitory effect on the increase of free radicals in coconut oil thermal processing, and the inhibitory effect of CA was not much different from TBHQ. It was concluded that CA could be considered as an alternative antioxidant for TBHQ used in oil thermal processing.

**Key words:** carnosic acid; coconut oil; fatty acid composition; thermal stability; free radical

椰子与油茶、橄榄、棕榈并称为世界四大木本油料植物<sup>[1]</sup>。新鲜椰肉含油可达33%,椰干含油高达63%。椰子产品如椰干、椰奶、椰子油等加工过程会使其油脂发生热氧化、热水解、聚合等化学反应而影响产品的品质和消费者的身体健康。因此,如何抑

制椰子产品加工过程中椰子油热氧化等反应的发生是制备高品质椰子产品和延长其货架期的关键所在。

鼠尾草酸(Carnosic acid, CA)是迷迭香抗氧化剂中含量最高、活性最强的抗氧化成分,也是目前发现的热稳定性最好的天然脂溶性自由基清除剂,作为一种食品添加剂越来越被人们所接受<sup>[2]</sup>。CA提高油脂氧化稳定性的效果远比PG、BHT、BHA、V<sub>E</sub>和 $\alpha$ -生育酚强得多<sup>[3-7]</sup>。鉴于鼠尾草酸与TBHQ的结构类似,以及TBHQ在常温与高温条件下的抗

收稿日期:2019-09-26;修回日期:2020-03-27

基金项目:国家自然科学基金项目(31660495)

作者简介:姚梦莹(1995),女,硕士研究生,研究方向为油脂营养与安全(E-mail)849995732@qq.com。

通信作者:张伟敏,副教授(E-mail)zhwm1979@163.com。

氧化性能均优于其他合成抗氧化剂<sup>[8-11]</sup>,因此本文选择 TBHQ 作为 CA 的参照物,通过对比分析 CA 和 TBHQ 对椰子油热加工过程中主要理化指标、脂肪酸组成以及自由基含量的影响,探讨 CA 对椰子油热稳定性的影响,以便为高品质的椰子产品生产提供理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

椰子油(可食用),购于海南南国食品实业有限公司;TBHQ(纯度 > 98%),上海阿拉丁生化科技股份有限公司;鼠尾草酸(纯度 > 98%),上海源叶生物科技有限公司;硫代巴比妥酸(分析纯);*p*-茴香胺、2,4-二硝基苯肼(分析纯),麦克林试剂;异辛烷、异丙醇、乙腈(色谱纯),麦克林试剂。

EF-101V 台式电炸炉,广州拓奇厨房设备有限公司;754NPC 紫外可见分光光度计,上海奥谱勒仪器有限公司;HP6890/5975C GC-MS 联用仪,美国安捷伦公司;JES FA200 电子自旋共振仪,日本电子株式会社 JEOL 公司。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 椰子油热加工处理

准确称量 400 mg TBHQ 混匀在 50 g 椰子油中,装入磨口玻璃三角瓶并剧烈振荡摇匀 30 min,倒入 1 950 g 椰子油中,振荡摇匀 30 min 后,配制添加 0.02% TBHQ 的椰子油样品。同法配制 0.02% 鼠尾草酸椰子油样品。倒入电炸锅中,在 180 °C 下连续加热。分别在加热 1、2、4、8、12、16、20、24 h 取油样约 50 mL,冷却至室温后,贮于棕色样品瓶中,-18 °C 下避光保存。

#### 1.2.2 理化指标测定

酸价、过氧化值测定参考 GB/T 5009.37—2003;茴香胺值测定参考 GB/T 24304—2009;总氧化值(TOTOX)测定参考 Shahidi 等<sup>[12]</sup>的方法,计算公式为总氧化值 = 2 × 过氧化值 + 茴香胺值;游离脂肪酸(FFA)含量计算公式为 FFA 含量 = 酸价/2。

#### 1.2.3 脂肪酸组成测定

参照姬彦羽<sup>[11]</sup>的方法进行测定。

#### 1.2.4 反式脂肪酸测定

参考 GB/T 17376—2008 对油脂样品进行甲酯化,然后参考郭丽莉<sup>[13]</sup>的方法进行气相色谱检测。

#### 1.2.5 自由基含量测定

采用电子自旋共振法(ESR)测定自由基含量,具体参考文献[14]。

#### 1.2.6 统计学分析

采用 GraphPad Prism 5.0、Origin 9.4 和 SPSS

12.0 对数据进行分析处理以及绘图。采用 SPSS 12.0 软件进行显著差异性分析,图和表中不同字母表示在  $p < 0.05$  水平上差异显著。

## 2 结果与分析

### 2.1 鼠尾草酸对椰子油热加工过程中主要理化指标的影响

#### 2.1.1 椰子油热加工过程中酸价变化(见图 1)

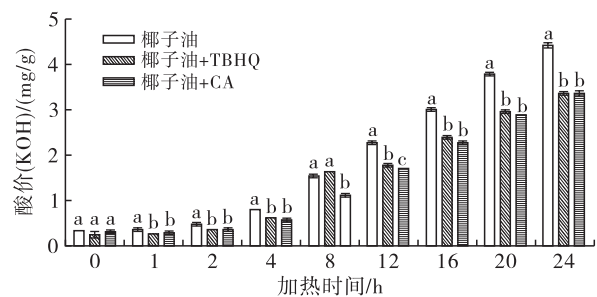


图 1 鼠尾草酸对椰子油热加工过程中酸价的影响

如图 1 所示,3 组椰子油酸价随着加热时间的延长前期(4 h 内)增加较慢,后期增速较快。加热 4 h 时油样酸价为 0 h 的 2~3 倍;连续加热 24 h 时,空白椰子油、添加抗氧化剂 TBHQ 和 CA 椰子油样品的酸价分别为 0 h 的 14、12、11 倍左右,但均未超过 GB 2716—2018 规定的煎炸过程中食用植物油酸价(KOH)标准( $\leq 5$  mg/g),说明椰子油有较好的热稳定性。与空白组相比,CA 整体显著降低了椰子油的酸价( $p < 0.05$ ),且与 TBHQ 效果相当。

#### 2.1.2 椰子油热加工过程中 FFA 变化(见图 2)

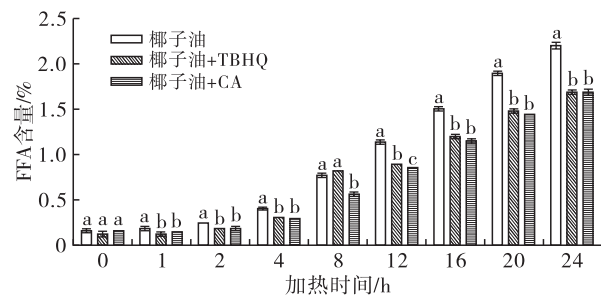


图 2 鼠尾草酸对椰子油热加工过程中游离脂肪酸的影响

如图 2 所示,3 组椰子油 FFA 含量的变化趋势与酸价一致。在短时间的加热过程中( $< 4$  h),FFA 含量变化较慢,加热 8 h 之后,FFA 含量变化较大。整体上,与空白组相比,添加抗氧化剂 TBHQ、CA 对抑制 FFA 的产生有较好的效果,且 CA 与 TBHQ 的效果相当。

#### 2.1.3 椰子油热加工过程中过氧化值变化(见图 3)

如图 3 所示:添加抗氧化剂的油样过氧化值变化趋势为先快速上升后缓慢降低,峰值出现在加热 4 h;空白组过氧化值为先快速上升后处于波动状

态,最高点出现在加热2 h。过氧化值表征油脂初级氧化产物氢过氧化物的含量,加热过程中易进一步氧化为次级氧化产物<sup>[15]</sup>。因此,后期过氧化值有所降低是初级氧化产物进一步氧化成次级氧化产物的缘故。次级氧化产物的生成,标志着椰子油此时已经开始氧化酸败<sup>[16]</sup>。从图3可以看出,CA具有延缓油脂氧化的能力,且整体略优于TBHQ。

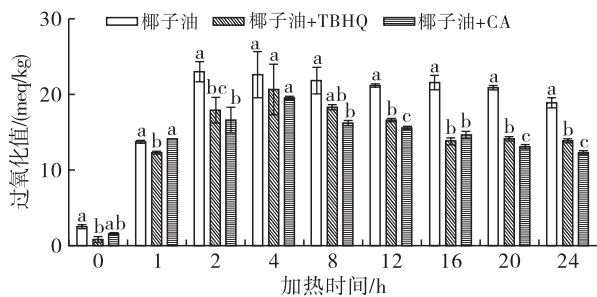


图3 鼠尾草酸对椰子油热加工过程中过氧化值的影响

#### 2.1.4 椰子油热加工过程中茴香胺值变化(见图4)

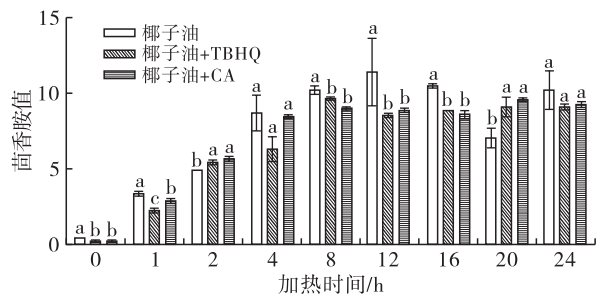


图4 鼠尾草酸对椰子油热加工过程中茴香胺值的影响

茴香胺值代表高温下油脂中醛、酮等化合物含量,用于评价次级氧化。一般情况下,茴香胺值越大,油脂中的醛、酮类物质含量越高,油脂的氧化劣变程度越严重。如图4所示,椰子油茴香胺值在加热8 h之内变化较大,8 h之后趋于平稳。整体上添加抗氧化剂的油样茴香胺值小于空白组的,且CA效果与TBHQ相当。

#### 2.1.5 热加工过程中TOTOX变化(见图5)

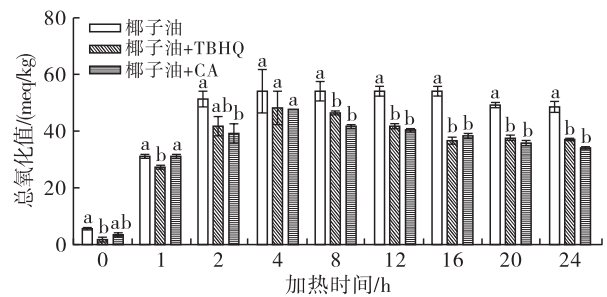


图5 鼠尾草酸对椰子油热加工过程中总氧化值的影响

如图5所示,3组椰子油TOTOX随加热时间的延长先快速增加后缓慢降低。且空白组在加热2~16 h之间TOTOX都处于峰值,峰值区间时间较长。抗氧化剂对椰子油加热过程中TOTOX影响显著,且CA与TBHQ的效果相当。

#### 2.2 鼠尾草酸对椰子油热加工过程中脂肪酸组成的影响

3组椰子油脂肪酸组成结果见表1~表3。

表1 椰子油热加工过程中脂肪酸组成的变化

脂肪酸	含量/%									
	0 h	1 h	2 h	4 h	8 h	12 h	16 h	20 h	24 h	
己酸	0.54	0.57	0.55	0.54	0.56	0.65	0.70	0.68	0.72	
辛酸	7.16	7.29	7.23	7.27	7.44	7.84	8.07	8.11	8.32	
癸酸	6.08	6.13	6.14	6.21	6.33	6.43	6.55	6.64	6.74	
月桂酸	48.78	48.26	48.34	48.84	49.49	49.93	50.69	50.96	51.45	
肉豆蔻酸	18.78	18.85	18.98	19.16	19.34	19.36	19.42	19.48	19.44	
棕榈酸	8.64	8.69	8.73	8.79	8.84	8.84	8.83	8.78	8.69	
硬脂酸	3.41	3.45	3.46	3.49	3.50	3.48	3.43	3.43	3.38	
油酸	5.56	5.14	4.91	4.28	3.13	2.32	1.62	1.12	0.81	
亚油酸	0.94	0.73	0.57	0.33	0.14	-	-	-	-	
亚麻酸	0.10	0.10	0.10	0.08	0.07	0.05	-	-	-	
饱和脂肪酸	93.39	93.24	93.43	94.30	95.50	96.53	97.69	98.08	98.74	
单不饱和脂肪酸	5.56	5.14	4.91	4.28	3.13	2.32	1.62	1.12	0.81	
多不饱和脂肪酸	1.04	0.83	0.67	0.41	0.21	0.05	-	-	-	
不饱和脂肪酸	6.60	5.97	5.58	4.69	3.34	2.37	1.62	1.12	0.81	

表2 添加 TBHQ 椰子油热加工过程中脂肪酸组成的变化

脂肪酸	含量/%								
	0 h	1 h	2 h	4 h	8 h	12 h	16 h	20 h	24 h
己酸	0.58	0.56	0.52	0.54	0.61	0.60	0.62	0.64	0.71
辛酸	7.34	7.20	7.15	7.27	7.72	7.71	7.87	7.94	8.25
癸酸	6.14	6.10	6.13	6.21	6.46	6.46	6.57	6.62	6.73
月桂酸	48.44	48.68	49.23	49.53	50.94	50.96	51.41	51.60	51.82
肉豆蔻酸	18.71	18.87	19.00	19.16	19.42	19.39	19.44	19.47	19.41
棕榈酸	8.59	8.67	8.72	8.78	8.83	8.80	8.78	8.77	8.70
硬脂酸	3.41	3.44	3.45	3.48	3.46	3.46	3.44	3.43	3.36
油酸	5.55	5.28	4.97	4.31	2.27	2.33	1.58	1.19	0.88
亚油酸	0.84	0.81	0.63	0.33	0.15	-	-	-	-
亚麻酸	0.10	0.10	0.10	0.10	0.08	0.06	0.05	-	-
饱和脂肪酸	93.21	93.52	94.20	94.97	97.44	97.38	98.13	98.47	98.98
单不饱和脂肪酸	5.55	5.28	4.97	4.31	2.27	2.33	1.58	1.19	0.88
多不饱和脂肪酸	0.94	0.91	0.73	0.43	0.24	0.06	0.05	-	-
不饱和脂肪酸	6.49	6.19	5.70	4.74	2.50	2.39	1.63	1.19	0.88

表3 添加 CA 椰子油热加工过程中脂肪酸组成的变化

脂肪酸	含量/%								
	0 h	1 h	2 h	4 h	8 h	12 h	16 h	20 h	24 h
己酸	0.58	0.55	0.54	0.56	0.59	0.61	0.61	0.65	0.83
辛酸	7.31	7.22	7.21	7.34	7.62	7.67	7.81	7.96	9.06
癸酸	6.11	6.11	6.13	6.20	6.35	6.41	6.54	6.61	6.97
月桂酸	48.56	48.68	49.04	48.60	50.29	50.84	51.32	50.72	50.70
肉豆蔻酸	18.80	18.92	19.00	19.12	19.22	19.44	19.47	19.56	18.97
棕榈酸	8.68	8.67	8.76	8.75	8.79	8.87	8.83	8.83	8.36
硬脂酸	3.42	3.43	3.46	3.46	3.47	3.50	3.47	3.44	3.21
油酸	5.30	5.23	5.00	4.47	3.31	2.37	1.61	1.05	0.67
亚油酸	0.85	0.79	0.67	0.40	0.12	-	-	-	-
亚麻酸	0.10	0.10	0.10	0.10	0.09	0.08	0.04	-	-
饱和脂肪酸	93.46	93.58	94.14	94.03	96.33	97.34	98.05	97.77	98.10
单不饱和脂肪酸	5.30	5.23	5.00	4.47	3.31	2.37	1.61	1.05	0.67
多不饱和脂肪酸	0.95	0.89	0.77	0.50	0.21	0.08	0.04	-	-
不饱和脂肪酸	6.25	6.12	5.77	4.97	3.52	2.45	1.65	1.05	0.67

由表1~表3可以看出,椰子油脂肪酸由己酸、辛酸、癸酸、月桂酸、肉豆蔻酸、棕榈酸、硬脂酸、油酸、亚油酸、亚麻酸组成,主要以月桂酸、肉豆蔻酸为主,含量约占椰子油总脂肪酸含量的70%。

3组椰子油24h加热过程中,饱和脂肪酸含量增加,不饱和脂肪酸含量减少,说明椰子油发生了氧化分解。在24h加热过程中,空白组椰子油饱和脂肪酸含量由93.39%增到98.74%,不饱和脂肪酸含量由6.60%降到0.81%,降低了5.79个百分点;添加TBHQ的椰子油饱和脂肪酸含量由93.21%增到98.98%,不饱和脂肪酸含量由6.49%降到0.88%,降低了5.61个百分点;添加CA的椰子油饱和脂肪酸含量由93.46%增加到98.10%,不饱和脂肪酸含量由6.25%降到0.67%,降低5.58个百分点。添

加CA的椰子油不饱和脂肪酸含量降低最少,添加TBHQ的椰子油次之。

椰子油中亚麻酸含量较少,空白组椰子油在加热16h后未检出,添加抗氧化剂的油样使之延长到20h后。3组油样均从加热12h之后未检出亚油酸,说明180℃热加工椰子油中亚油酸完全被氧化分解,其热稳定性较差;空白组椰子油亚油酸含量从加热0~1h之内开始显著降低,添加抗氧化剂组油样中亚油酸从加热1h后开始显著降低,并且TBHQ油样中亚油酸快速降低的时间更早,说明在延缓亚油酸氧化分解上,CA的效果优于TBHQ。油酸的降低趋势也类似。

3组油样中饱和脂肪酸己酸、辛酸、癸酸、月桂酸、肉豆蔻酸含量在加热24h内均呈增长的趋势。

这可能有两个原因:一是不饱和脂肪酸的氧化分解,使其含量增加;二是中长链脂肪酸分解为中短链脂肪酸。

### 2.3 反式脂肪酸组成变化

3组椰子油热加工过程中反式脂肪酸含量变化见表4~表6。

表4 椰子油热加工过程中反式脂肪酸组成的变化

反式脂肪酸	含量/%									
	0 h	1 h	2 h	4 h	8 h	12 h	16 h	20 h	24 h	
$tC_{18:1}$	-	-	-	-	0.16	0.19	0.19	0.17	0.13	
$tC_{18:2}$	-	-	-	-	-	0.06	-	-	-	
总量	-	-	-	-	0.16	0.25	0.19	0.17	0.13	

表5 添加TBHQ椰子油热加工过程中反式脂肪酸组成的变化

反式脂肪酸	含量/%									
	0 h	1 h	2 h	4 h	8 h	12 h	16 h	20 h	24 h	
$tC_{18:1}$	-	-	-	-	0.15	0.19	0.19	0.17	0.14	
$tC_{18:2}$	-	-	-	-	-	-	-	0.07	-	
总量	-	-	-	-	0.15	0.19	0.19	0.24	0.14	

表6 添加CA椰子油热加工过程中反式脂肪酸组成的变化

反式脂肪酸	含量/%									
	0 h	1 h	2 h	4 h	8 h	12 h	16 h	20 h	24 h	
$tC_{18:1}$	-	-	-	-	0.14	0.18	0.19	0.18	0.15	
$tC_{18:2}$	-	-	-	-	-	-	0.05	0.05	-	
总量	-	-	-	-	0.14	0.18	0.24	0.23	0.15	

在椰子油热加工过程中共检出两种反式脂肪酸,分别是反式油酸( $tC_{18:1}$ )和反式亚油酸( $tC_{18:2}$ )。由表4~表6可知,在整个热加工过程中,3组椰子油反式脂肪酸总量呈先上升后下降的趋势。前期反式脂肪酸含量增加,说明不饱和脂肪酸热异构化反应生成反式脂肪酸;后期反式脂肪酸含量减少,可能是因为随着加热时间延长,反式脂肪酸发生裂解造成的。3组椰子油都在加热4~8 h内开始产生反式油酸,空白组椰子油在加热8~12 h之内产生反式

亚油酸,添加TBHQ的油样加热16~20 h之间产生反式亚油酸,添加CA的油样在加热12~16 h之内产生反式亚油酸;3组椰子油反式脂肪酸含量最高的时间分别为加热12、20 h和16 h;说明添加抗氧化剂对反式脂肪酸的产生有延迟及抑制的作用。这与贺凡<sup>[17]</sup>研究的抗氧化剂对玉米油加热180℃致异构体形成的结果相似。

### 2.4 自由基含量变化(见图6)

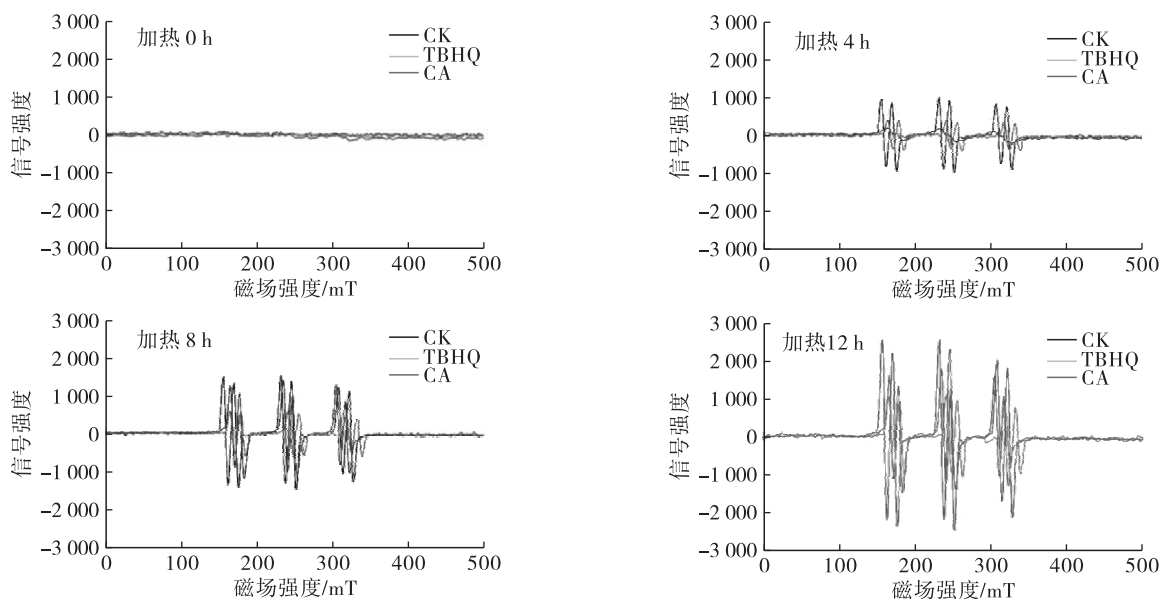


图6 椰子油热加工过程中自由基含量的变化情况

ESR 的信号强度代表在共振条件下样品所吸收的总能量,即信号强度与样品中自由基含量(即数目)呈正相关<sup>[14]</sup>。

由图 6 可知,添加抗氧化剂椰子油的 ESR 谱图的峰型非常相似,均为裂分的三重峰(即六重峰),这可能与采用 PBN 捕获的不同自由基加合物的谱图通常十分相似,且谱图多为自由基的混杂,难于区分和鉴别分子结构特征有关。图中综合谱图的  $g$  值(表征着核酸共振的位置)为 2.001 8,接近于自由电子的  $g$  值(2.003 0),符合自由基的基本特性,其超精细耦合分裂常数为  $\alpha N = 14.7 \text{ G}$ 、 $\alpha H = 20.7 \text{ G}$ ,属于多种碳中心自由基混杂的结果<sup>[18]</sup>。椰子油(CK)与添加 CA 和 TBHQ 的椰子油的谱图中的 ESR 峰信号强度随加热时间的延长呈上升趋势,其中添加 TBHQ 的椰子油的 ESR 峰信号强度随加热时间变化较小,CA 的次之,椰子油最大。说明椰子油的自由基含量随加热时间延长呈增加趋势,加入 CA 和 TBHQ 对椰子油自由基含量的产生有显著抑制效果,其中 TBHQ 效果略强于 CA。这可能与两者在椰子油热氧化过程中的作用阶段不同有关。

### 3 结论

鼠尾草酸对椰子油热加工过程中游离脂肪酸、酸价、茴香胺值和总氧化值的抑制作用与 TBHQ 差异不显著( $p > 0.05$ ),而对椰子油热加工过程中过氧化值的抑制作用略优于 TBHQ。椰子油脂肪酸组成随热加工过程变化不大,可能与椰子油饱和和脂肪酸含量较高有关。椰子油中反式脂肪酸含量随加热时间延长呈先升高后降低趋势,饱和脂肪酸含量逐渐增加,而不饱和脂肪酸含量呈逐步减少趋势。加入抗氧化剂能够延缓椰子油中不饱和脂肪酸的氧化分解,进而抑制反式脂肪酸的形成。自由基含量分析表明,椰子油热加工过程中自由基数量随着加热时间的延长而不断增加,加入抗氧化剂能够显著抑制自由基的产生,且 TBHQ 比 CA 的抑制效果略好。总体而言,CA 能很好地减缓椰子油热加工过程中油脂氧化劣变,且与 TBHQ 作用效果相差不大,因此可以考虑将 CA 作为 TBHQ 在油脂热加工过程中的替代抗氧化剂使用。

### 参考文献:

[1] SHANKAR P, AHUJA S, TRACCHIO A. Coconut oil: a review[J]. *Agro Food Ind Hi - Tech*, 2014, 24(5): 62 - 64.  
 [2] 杨磊, 刘芳, 王化, 等. 鼠尾草酸的抗氧化活性及对鱼油的氧化稳定性[J]. *中国食品学报*, 2010, 10(3): 33 - 39.

[3] SCHWARZ K, TERNES W. Antioxidative constituents of *Rosmarinus officinalis* and *Salvia officinalis*. II. Isolation of carnosic acid and formation of other phenolic diterpenes [J]. *Z Lebensm Untersu F A*, 1992, 195(2): 99 - 103.  
 [4] SCHWARZ K, HUANG S W, GERMAN J B, et al. Activities of antioxidants are affected by colloidal properties of oil - in - water and water - in - oil emulsions and bulk oils[J]. *J Agric Food Chem*, 2000, 48(10): 4874 - 4882.  
 [5] CHIPAULT J R, MIZUNO G R, LUNDBERG W O. Antioxidant properties of spices in oil - in - water emulsions [J]. *J Food Sci*, 1955, 20(5): 443 - 448.  
 [6] 夏田娟. 迷迭香叶中鼠尾草酸的分离纯化及其生物活性研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2015.  
 [7] GUITARD R, PAUL J F, NARDELLO - RATA J V, et al. Myricetin, rosmarinic and carnosic acids as superior natural antioxidant alternatives to  $\alpha$  - tocopherol for the preservation of *omega* - 3 oils[J]. *Food Chem*, 2016, 213: 284 - 295.  
 [8] NAVEENA B M, VAITHIYANATHAN S, MUTHUKUMAR M, et al. Relationship between the solubility, dosage and antioxidant capacity of carnosic acid in raw and cooked ground buffalo meat patties and chicken patties[J]. *Meat Sci*, 2013, 95(2): 195 - 202.  
 [9] 彭伟. 迷迭香精油和抗氧化剂的提取工艺研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.  
 [10] ERKAN N, AYRANCI G, AYRANCI E. A kinetic study of oxidation development in sunflower oil under microwave heating: effect of natural antioxidants[J]. *Food Res Int*, 2009, 42: 1171 - 1177.  
 [11] 姬彦羽. 棕榈油热加工过程中品质变化和氧化稳定性研究[D]. 海口: 海南大学, 2017.  
 [12] SHAHIDI F, WANASUNDARA U N, MIN D B, et al. *Food lipids: chemistry, nutrition and biotechnology*[M]. New York: Marcel Dekker, Inc., 2002.  
 [13] 郭丽莉. 加热过程中反式脂肪酸的变化[D]. 天津: 天津科技大学, 2011.  
 [14] 姬彦羽, 赵宏亮, 魏静, 等. 热加工过程中棕榈油理化特性、脂肪酸与自由基的变化研究[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(5): 66 - 70, 76.  
 [15] KOH E, SURH J. Food types and frying frequency affect the lipid oxidation of deep frying oil for the preparation of school meals in Korea [J]. *Food Chem*, 2015, 174: 467 - 472.  
 [16] 宋萧萧, 李杨, 马文君, 等. 鼠尾草酸对山茶油氧化稳定性的影响研究[J]. *中国油脂*, 2016, 41(2): 39 - 43.  
 [17] 贺凡. 玉米油热致异构产物分析及调控的研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.  
 [18] 姜寿浩. 电子自旋共振技术在评价油脂氧化稳定性中的应用研究[D]. 江苏 无锡: 江南大学, 2016.