

# 姜酮酚复配脂质伴随物对菜籽油 氧化稳定性的影响

刘梦梦<sup>1,2</sup>, 张 炉<sup>1,2</sup>, 肖 航<sup>1,3</sup>, 郭时印<sup>1,2</sup>, 唐忠海<sup>1,2</sup>, 范 伟<sup>1,2</sup>

(1. 湖南农业大学 食品科学技术学院, 长沙 410128; 2. 湖南省菜籽油营养健康与深度开发工程技术研究中心, 长沙 410128; 3. 麻省大学阿莫斯特分校 食品科学系, 美国马萨诸塞州 阿莫斯特 01003)

**摘要:** 为了促进天然抗氧化剂的开发与利用, 以脱除脂质伴随物多酚、甾醇和生育酚的菜籽油(空白油样)为研究对象, 以 DPPH 自由基清除率为指标, 采用正交试验优化甾醇、 $\alpha$ -生育酚与姜酮酚复配抗氧化剂的配方。随后通过 Rancimat 法测定添加最优配方复配抗氧化剂的油样(简称添加姜酮酚的油样)的氧化诱导时间, 并通过 Schaal 烘箱法考察添加姜酮酚油样的酸值、过氧化值、茴香胺值、丙二醛含量、共轭二烯含量( $K_{232}$ )、共轭三烯含量( $K_{270}$ )、总酚含量、DPPH 自由基清除率和脂肪酸组成的变化, 并与添加 BHT 的油样(以 0.2 g/kg BHT 代替姜酮酚)和空白油样进行了对比。结果表明: 复配抗氧化剂最优配方为 0.4 g/kg 甾醇、0.05 g/kg  $\alpha$ -生育酚和 0.05 g/kg 姜酮酚; 与空白油样相比, 添加姜酮酚的油样与添加 BHT 的油样其氧化诱导时间均延长; 随着加速氧化储藏时间的延长, 菜籽油的各项理化指标均发生一定程度的劣变, 各油样的氧化稳定性排序为添加 BHT 的油样 > 添加姜酮酚的油样 > 空白油样。综上, 姜酮酚复配脂质伴随物对于提高菜籽油的氧化稳定性有一定效果。

**关键词:** 姜酮酚; 菜籽油; 氧化稳定性; 脂质伴随物

中图分类号: TQ646.2; TQ645.1 文献标识码: A 文章编号: 1003-7969(2023)04-0081-07

## Effect of 6 - paradol coordination with lipid concomitant on oxidative stability of rapeseed oil

LIU Mengmeng<sup>1,2</sup>, ZHANG Lu<sup>1,2</sup>, XIAO Hang<sup>1,3</sup>,  
GUO Shiyin<sup>1,2</sup>, TANG Zhonghai<sup>1,2</sup>, FAN Wei<sup>1,2</sup>

(1. College of Food Science and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2. Hunan Engineering Technology Research Center for Rapeseed Oil Nutrition Health and Deep Development, Changsha 410128, China; 3. Department of Food Science, University of Massachusetts - Amherst, Amherst 01003, Massachusetts, USA)

**Abstract:** In order to promote the development and utilization of natural antioxidants, the DPPH radical scavenging rate was used as an index, and the formulation of compound antioxidants with sterols,  $\alpha$ -

收稿日期: 2022-02-27; 修回日期: 2022-11-17

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31671858); 湖南省自然科学基金青年项目(2017JJ3107); 湖南省自然科学基金面上项目(2019JJ40114); 湖南省教育厅优秀青年项目(20B286); 湖南省高新技术产业科技创新引领计划项目(2020NK2005)

作者简介: 刘梦梦(1997), 女, 硕士研究生, 研究方向为食品科学(E-mail) Liu1318291279@163.com。

通信作者: 唐忠海, 教授, 博士(E-mail) tangzh@hunau.edu.cn; 范 伟, 博士(E-mail) weifan@hunau.edu.cn。

tocopherols and 6 - paradol was optimized by orthogonal experiment with the rapeseed oil stripped of lipid concomitant polyphenols, sterols and tocopherols as a blank oil sample. The oxidation induction time of the oil samples added with the optimum formulation of compound antioxidants (referred to as 6 - paradol - added oil samples) was measured by the Rancimat method, and the changes of acid value, peroxide value, anisidine value, malondialdehyde content,

conjugated diene content ( $K_{232}$ ), conjugated triene content ( $K_{270}$ ), total phenol content, DPPH radical scavenging rate and fatty acid composition of 6 - paradol oil samples were investigated through the Schaal oven method. These parameters were compared with those of the BHT - added oil samples (0.2 g/kg BHT instead of 6 - paradol) and the blank oil samples. The results showed that the best formulation of compound antioxidant was 0.4 g/kg sterols, 0.05 g/kg  $\alpha$  - tocopherol and 0.05 g/kg 6 - paradol. Compared with the blank oil samples, the oxidation induction time of both the 6 - paradol - added oil samples and the BHT - added oil samples were prolonged. With the prolonging of the accelerated oxidation storage time, all the physicochemical parameters of the rapeseed oil deteriorated in a certain extent, and the oxidative stability of the oil samples was reduced in the order: BHT - added oil samples > 6 - paradol - added oil samples > blank oil samples. Therefore, the combination of 6 - paradol with lipid concomitants can improve the oxidation stability of rapeseed oil.

**Key words:** 6 - paradol; rapeseed oil; oxidation stability; lipid concomitant

菜籽油作为我国主要食用油之一,其风味独特,营养丰富。菜籽油中不饱和脂肪酸含量较高,通常会加入一定量的抗氧化剂来延长货架期。研究表明,酚类化合物和黄酮类化合物作为天然抗氧化剂,具有提高油脂氧化稳定性的能力<sup>[1]</sup>。

姜酮酚(6 - paradol)是草本植物姜(*Zingiber officinale* Roscoe)中的姜烯酚生物转化产生的不饱和酮<sup>[2-5]</sup>,具有抗氧化、抗炎、降血糖、抗癌和减肥等作用<sup>[6-10]</sup>。生育酚和甾醇是植物油中常见的脂质伴随物,具有清除自由基的作用,可提高油脂的氧化稳定性<sup>[11]</sup>。

植物油的氧化稳定性是多组分协同作用的结果,而非单个化合物贡献的加和。目前,关于外源添加天然抗氧化剂与脂质伴随物之间复配作用的相关研究较少,对其作用效果及作用机制的解析尚未明确。本研究以姜酮酚作为外源天然抗氧化剂,探究其复配脂质伴随物对菜籽油氧化稳定性的影响,以期外源天然抗氧化剂的开发利用以及油脂抗氧化剂的进一步复配优化提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

油菜籽,湖南长沙;姜酮酚,上海源叶生物科技有限公司; $\alpha$  - 生育酚(纯度 > 98%)、甾醇(以谷甾醇计,纯度 > 75%),麦克林公司;没食子酸,中国食品药品检定研究院;二丁基羟基甲苯(BHT)、氯化亚铁、硫氰酸钾、三氯甲烷、甲醇、硫代巴比妥酸(TBA)、三氯乙酸、1,1,3,3 - 四氧乙基丙烷、异辛烷、冰醋酸、氢氧化钠、正己烷、1,1 - 二苯基 - 2 - 三硝基苯胍、乙酸乙酯、福林酚、2,4 - 二硝基苯胍,均为分析纯。

892 油脂氧化稳定测试仪,瑞士万通公司;101A -

3AB 型数显电热鼓风干燥箱,北京永光明医疗仪器有限公司;YJY - Z260 型榨油机,益加益(湖北)机械设备集团有限公司;KS - 600DV 超声机,昆山洁力美超声仪器有限公司。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 空白菜籽油的制备

以油菜籽为原料,通过榨油机压榨制取新鲜菜籽油。参考 Liu 等<sup>[12]</sup>的方法以新鲜菜籽油为原料制备空白菜籽油,采用柱层析技术脱除脂质伴随物,填料自下而上依次为硅胶、活性炭、氧化铝、硅酸、硅酸镁(质量比 1:1.5:4:4:4.5)。处理后,空白菜籽油中总酚、 $\alpha$  - 生育酚和甾醇含量均低于定量水平(< 0.5 mg/kg)。

#### 1.2.2 复配抗氧化剂的添加

取空白菜籽油,加入一定量的复配抗氧化剂,然后放入超声机中,在功率 100 W、温度 25 °C 的条件下处理 30 min,使抗氧化剂充分溶解于油样中。

#### 1.2.3 油样氧化稳定性的评价

##### 1.2.3.1 Rancimat 法

采用 Rancimat 法测定油样的氧化诱导时间,具体参照 Cierniewska - Żytkiewicz 等<sup>[13]</sup>的方法并略作修改。将 3 g 油样置于空气流量为 20 L/h 的通风管中,分别在 90、100、120、130 °C 下进行加速氧化试验,所产生的挥发性成分由 60 mL 去离子水吸收。

##### 1.2.3.2 Schaal 烘箱法

参照 Malcolmson 等<sup>[14]</sup>的方法,将油样封装于 100 mL 深色圆形玻璃瓶中,再置于(62 ± 1) °C 的恒温器中,于 0、3、6、9、12、15 d 分别取样对其理化指标进行检测。

### 1.2.4 常规理化指标的测定

酸值的测定,参照 GB 5009. 229—2016 中第二法;过氧化值的测定,参照 GB/T 5009. 37—2003 中第二法;茴香胺值的测定,参照 GB/T 24304—2009;  $K_{232}$ 、 $K_{270}$ 的测定,参照 GB/T 22500—2008。

### 1.2.5 丙二醛的测定

称取 0.5 g 样品于试管中,加入 200  $\mu\text{L}$  0.02 mol/L TBA 和 500  $\mu\text{L}$  质量浓度为 0.1 g/mL 的三氯乙酸溶液,于 95  $^{\circ}\text{C}$  加热 30 min。取下层反应液 500  $\mu\text{L}$  于离心管中,加入 500  $\mu\text{L}$  三氯甲烷混匀。取上层反应液 200  $\mu\text{L}$  加入 96 孔板中在 532 nm 处测定吸光度,再根据绘制的标准曲线(吸光度与丙二醛质量浓度的关系曲线)计算丙二醛含量。

### 1.2.6 总酚的测定

参考文献[15]的方法并作适当修改。准确称取 1 g 油样于塑料离心管中,加入 1.5 mL 正己烷和 1.5 mL 体积分数 80% 的甲醇溶液,涡旋混合 5 min,再在 5 000 r/min 条件下离心 10 min,将上层油相转移至另一个塑料离心管,在相同的条件下重复提取 3 次,合并、混匀提取液。取 1.0 mL 提取液于 25 mL 比色管中,加入 5 mL 体积分数 10% 的福林酚试剂,混合均匀,放置 3 min,再加入 4 mL 质量浓度 7.5 g/100 mL 的碳酸钠溶液、混匀,然后于 30  $^{\circ}\text{C}$  水浴锅中反应 60 min,在 765 nm 处测定吸光度,再根据以没食子酸为标准品绘制的标准曲线计算总酚含量(结果以没食子酸含量计)。

### 1.2.7 DPPH 自由基清除率的测定

取 0.20 g 待测样品,加入 10 mL 乙酸乙酯溶解。使用移液枪吸取 100  $\mu\text{L}$  样品溶液至 96 孔板中,每个样品吸取 4 份,其中 1 份加入 100  $\mu\text{L}$  乙酸乙酯,另外 3 份加入 100  $\mu\text{L}$  0.1 mmol/L DPPH 乙酸乙酯溶液,中速振荡 10 s,于 25  $^{\circ}\text{C}$  孵育 30 min,然后在 517 nm 下测吸光度。同等条件下测量 100  $\mu\text{L}$  乙酸乙酯加 100  $\mu\text{L}$  0.1 mmol/L DPPH 乙酸乙酯溶液的吸光度。根据式(1)计算 DPPH 自由基清除率( $Y$ )。

$$Y = \left(1 - \frac{A_1 - A_2}{A_0}\right) \times 100\% \quad (1)$$

式中: $A_1$ 为样品 + DPPH 的吸光度; $A_2$ 为样品 + 乙酸乙酯的吸光度; $A_0$ 为乙酸乙酯 + DPPH 的吸光度。

### 1.2.8 脂肪酸组成的测定

参照 GB 5009. 168—2016 中第三法并稍作调整。色谱条件:升温程序为初始温度 100  $^{\circ}\text{C}$ ,保持 5 min,以 10  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  升至 180  $^{\circ}\text{C}$ ,保持 6 min,然后以

2  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  升至 200  $^{\circ}\text{C}$ ,保持 10 min,最后以 5  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  升至 230  $^{\circ}\text{C}$ ,保持 5 min;进样口温度 270  $^{\circ}\text{C}$ ;FID 检测器温度 280  $^{\circ}\text{C}$ ;进样量 1  $\mu\text{L}$ 。以标准品保留时间对脂肪酸进行定性,采用峰面积归一法定量。

### 1.2.9 数据分析

所有试验均重复 3 次,结果以“平均值  $\pm$  标准偏差”表示,使用 Origin 9.0 进行统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 复配抗氧化剂的优化

根据预试验结果,以  $\alpha$ -生育酚、姜酮酚和甾醇添加量为因素,以油样的 DPPH 自由基清除率( $Y$ )为指标,采用正交试验优化复配抗氧化剂的配方。正交试验因素水平见表 1,正交试验设计及结果见表 2。

表 1 正交试验因素水平

水平	添加量/(g/kg)		
	A $\alpha$ -生育酚	B 姜酮酚	C 甾醇
1	0.05	0.20	4.0
2	0.02	0.05	1.0
3	0.005	0.02	0.8
4	0.002	0.01	0.4
5	0.001	0.001	0.2

表 2 正交试验设计及结果

试验号	A	B	C	$Y/\%$
1	1	3	3	91.1
2	1	2	2	95.9
3	2	3	1	67.5
4	3	1	2	71.7
5	4	3	2	24.5
6	3	5	1	50.2
7	3	3	4	61.1
8	4	4	3	30.0
9	5	4	1	31.4
10	2	4	2	71.1
11	3	4	5	28.8
12	4	1	5	66.9
13	5	2	4	79.7
14	5	3	5	39.5
15	2	5	3	60.0
16	5	5	2	18.6
17	1	4	4	95.8
18	1	5	5	82.2

续表 2

试验号	A	B	C	Y/%
19	1	1	1	96.4
20	4	5	4	29.4
21	5	1	3	67.5
22	2	2	5	82.7
23	3	2	3	89.1
24	4	2	1	84.2
25	2	1	4	72.3
$k_1$	92.28	74.96	65.94	
$k_2$	70.72	86.32	56.36	
$k_3$	60.18	56.74	67.54	
$k_4$	47.00	51.42	67.66	
$k_5$	47.34	48.08	60.02	
R	45.28	38.24	11.30	

由表 2 可以看出,复配抗氧化剂最优组合方案为  $A_1B_2C_4$ ,即 0.05 g/kg  $\alpha$ -生育酚、0.05 g/kg 姜酮酚和 0.4 g/kg 甾醇,3 个因素对复配抗氧化剂抗氧化效果影响的主次顺序为  $A > B > C$ ,即  $\alpha$ -生育酚 > 姜酮酚 > 甾醇。

## 2.2 Rancimat 法评价抗氧化效果

按照 1.2.3.1 的方法,采用 Rancimat 法测定空白油样,添加 0.4 g/kg 甾醇、0.05 g/kg  $\alpha$ -生育酚与 0.2 g/kg BHT 的油样(简称添加 BHT 的油样),以及添加 0.4 g/kg 甾醇、0.05 g/kg  $\alpha$ -生育酚与 0.05 g/kg 姜酮酚的油样(简称添加姜酮酚的油样)的氧化诱导时间,结果见图 1。

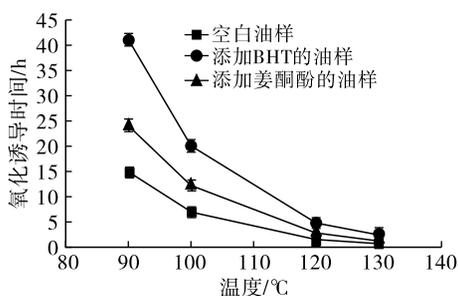


图 1 油样在不同温度下的氧化诱导时间

由图 1 可以看出,90℃时空白油样、添加 BHT 的油样和添加姜酮酚的油样的氧化诱导时间分别为  $(14.85 \pm 0.10)$  h、 $(41.1 \pm 0.73)$  h 和  $(24.09 \pm 0.86)$  h,130℃时 3 个油样的氧化诱导时间分别缩短至  $(0.68 \pm 0.01)$  h、 $(2.43 \pm 0.12)$  h 和  $(1.34 \pm 0.01)$  h。添加姜酮酚的油样在测试温度下的氧化诱导时间均长于空白油样,但均短于添加 BHT 的油样,说明姜酮酚的抗氧化效果逊于 BHT。

## 2.3 Schaal 烘箱法评价抗氧化效果

按照 1.2.3.2 方法,采用 Schaal 烘箱法对油样进行加速氧化试验,分析加速氧化过程中油样理化指标的变化。

### 2.3.1 酸值的变化(见图 2)

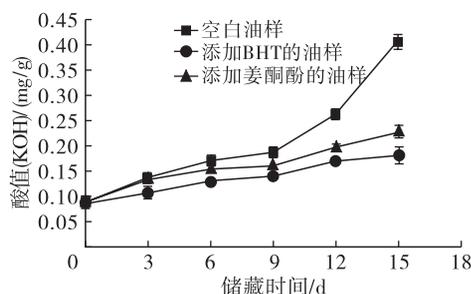


图 2 油样在加速氧化过程中酸值的变化

由图 2 可以看出,油样初始酸值(KOH)均为  $(0.08 \pm 0.01)$  mg/g,加速氧化过程中油样酸值均随着储藏时间的延长而逐渐增加,但增加速率不同,添加 BHT 的油样增加速率最慢,储藏 15 d 其酸值(KOH)增至  $(0.18 \pm 0.01)$  mg/g,空白油样增加速率最快,储藏 15 d 其酸值(KOH)增至  $(0.41 \pm 0.01)$  mg/g,而添加姜酮酚的油样酸值增加速率介于两者之间,储藏 15 d 其酸值(KOH)增至  $(0.22 \pm 0.01)$  mg/g。可见,添加 BHT 或姜酮酚的油样酸值相较空白油样在一定程度上有所降低,但添加姜酮酚的油样酸值高于添加 BHT 的油样,说明在降低菜籽油酸值增加速率方面,BHT 效果略强于姜酮酚。

### 2.3.2 过氧化值的变化(见图 3)

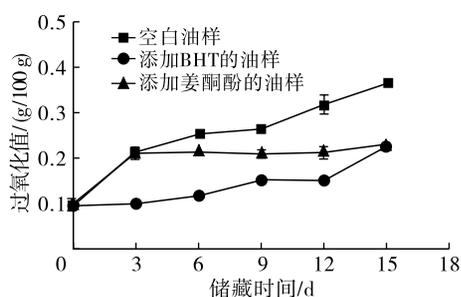


图 3 油样在加速氧化过程中过氧化值的变化

由图 3 可以看出,油样初始过氧化值均为  $(0.095 \pm 0.002)$  g/100 g,加速氧化过程中油样的过氧化值均随着储藏时间的延长而增加,在试验期内,空白油样的过氧化值最高,储藏 15 d 其过氧化值增加至  $(0.367 \pm 0.020)$  g/100 g,添加 BHT 的油样过氧化值增加至  $(0.220 \pm 0.002)$  g/100 g,添加姜酮酚的油样过氧化值增加至  $(0.230 \pm 0.001)$  g/100 g,说明在延缓菜籽油氧化方面,BHT 的效果强于姜酮酚。

### 2.3.3 丙二醛含量的变化(见图4)

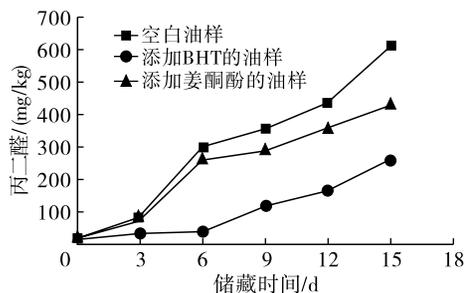


图4 油样在加速氧化过程中丙二醛含量的变化

由图4可以看出,在加速氧化过程中,油样中的丙二醛含量随着储藏时间的延长而增加,其变化趋势与过氧化值的一致。储藏15 d时,空白油样的丙二醛含量为(613.70 ± 5.65) mg/kg,添加姜酮酚的油样丙二醛含量为(430.02 ± 2.42) mg/kg,而添加BHT的油样丙二醛含量为(261.01 ± 8.50) mg/kg。可见,添加姜酮酚和添加BHT的油样氧化稳定性均高于空白油样的。

### 2.3.4 茴香胺值的变化(见图5)

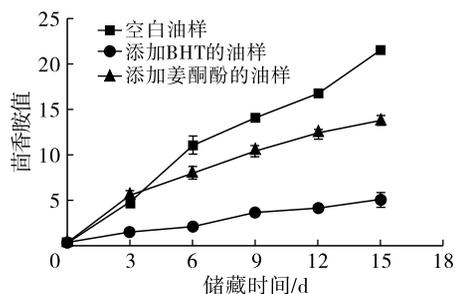


图5 油样在加速氧化过程中茴香胺值的变化

由图5可以看出,新鲜制备的菜籽油茴香胺值非常低,只有 $0.4 \pm 0.1$ ,随着加速氧化试验的进行,空白油样的茴香胺值不断增加,储藏15 d时达到了 $21.6 \pm 0.5$ ,添加姜酮酚的油样在储藏3 d时其茴香胺值为 $5.6 \pm 0.3$ ,高于空白油样的 $4.7 \pm 0.4$ ,造成该结果的原因可能是在加速氧化初始阶段,脂质过氧自由基浓度低, $\alpha$ -生育酚过氧自由基从脂质中提取氢,产生 $\alpha$ -生育酚和脂质烷基自由基,脂质烷基自由基参与链式氧化反应,加速脂质氧化<sup>[16]</sup>。随后添加姜酮酚的油样其茴香胺值增加趋势放缓,表明复配抗氧化剂已经产生抗氧化效果,但姜酮酚的抗氧化效果低于BHT的。

### 2.3.5 $K_{232}$ 、 $K_{270}$ 的变化(见图6)

油脂自动氧化产生的初级氧化产物十八碳二烯氢过氧化物,通过双键重排可形成稳定的共轭二烯结构,而共轭二烯在232 nm处会有明显的吸收峰,因此在232 nm处测定油脂的吸光度,可以反映油脂

的初级氧化程度<sup>[17]</sup>。油脂在270 nm处的吸光度可表示油脂氧化过程中次级氧化产物共轭三烯的累积含量,可作为判定油脂次级氧化程度的重要指标。由图6可以看出,在加速氧化过程中,空白油样的 $K_{232}$ 呈逐渐上升的趋势,添加BHT的油样 $K_{232}$ 则先上升,在6 d后保持平缓,而添加姜酮酚的油样 $K_{232}$ 先缓慢增加,在6 d后上升速度加快,在12 d后趋于平缓。添加BHT或姜酮酚的油样其次级氧化程度均低于空白油样。

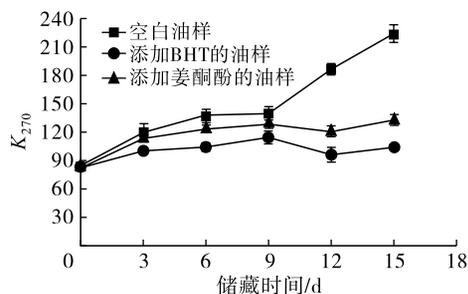
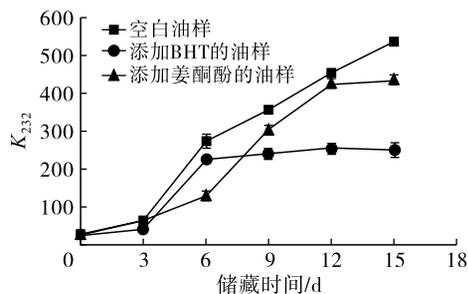


图6 油样在加速氧化过程中 $K_{232}$ 、 $K_{270}$ 的变化

### 2.3.6 总酚含量与DPPH自由基清除率的变化(见图7)

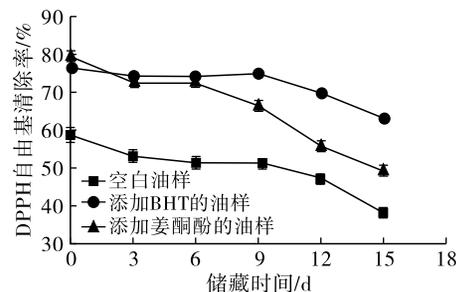
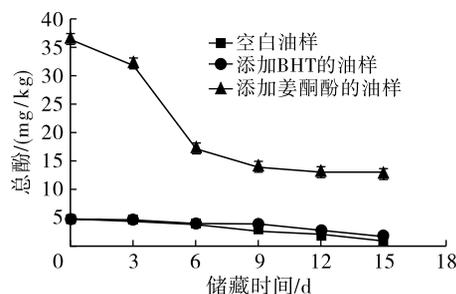


图7 油样在加速氧化过程中总酚含量和DPPH自由基清除率的变化

由图7可以看出,菜籽油经过柱层析处理之后,

总酚含量非常低。在加速氧化过程中,添加姜酮酚的油样其总酚含量随着储藏时间的延长呈下降趋势,这说明多酚物质在油脂氧化过程中可能起到了抗氧化作用,Zheng 等<sup>[18]</sup>研究发现 DPPH 法测定的抗氧化数据与菜籽油中的总酚含量呈显著的线性相关。本试验在加速氧化初期,添加姜酮酚的油样其 DPPH 自由基清除率略高于添加 BHT 的油样,说明在清除 DPPH 自由基方面,氧化初期时姜酮酚的效果强于 BHT。

### 2.3.7 脂肪酸组成的变化(见表 3)

表 3 油样加速氧化条件下脂肪酸组成及含量的变化 %

脂肪酸	原始油样	储藏 15 d 的油样			
		储藏 0 d 的空白油样	空白	添加 BHT	添加姜酮酚
C14:0	0.04	0.03	0.03	0.04	0.03
C16:0	3.38	3.10	3.58	3.31	3.31
C16:1	0.19	0.16	0.19	0.18	0.19
C17:0	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
C17:1	0.04	0.00	0.04	0.04	0.04
C18:0	1.48	1.45	1.51	1.48	1.50
C18:1 <sub>t</sub>	0.00	0.00	0.02	0.02	0.02
C18:1	57.48	57.13	58.31	57.93	58.23
C18:2	16.07	16.33	15.58	15.91	15.60
C20:0	0.44	0.47	0.46	0.45	0.27
C18:3	12.34	12.56	11.63	12.04	11.92
C20:2	0.13	0.14	0.13	0.14	0.13
C22:0	0.21	0.22	0.22	0.22	0.23
C22:1	7.73	7.94	7.81	7.75	8.01
C22:2	0.08	0.07	0.08	0.08	0.08
C24:0	0.10	0.11	0.11	0.10	0.11
C24:1	0.26	0.26	0.27	0.29	0.29
SFA	5.68	5.41	5.94	5.63	5.48
MUFA	65.70	65.49	66.64	66.21	66.78
PUFA	28.62	29.09	27.42	28.16	27.74

由表 3 可见:储藏 0 d 的空白油样中共鉴定出 15 种脂肪酸,其中饱和脂肪酸(SFA)7 种,单不饱和脂肪酸(MUFA)4 种,多不饱和脂肪酸(PUFA)4 种,SFA 含量为 5.41%,MUFA 含量为 65.49%,PUFA 含量为 29.09%;所有样品中主要脂肪酸均为油酸,其次是亚油酸、亚麻酸、芥酸、棕榈酸和硬脂酸。相比于储藏 0 d 的空白油样,添加 BHT 或姜酮酚的油样在(62±1)℃下储藏 15 d 后,SFA 和 MUFA 的含量略有增加,而 PUFA 的含量有所下降。这可能是因为加速氧化状态下不饱和双键的断裂导致 SFA 含量增加。添加 BHT 或姜酮酚的油样其 SFA 含量增加幅度均低于空白油样的,说明复配抗氧化剂起到了抗氧化作用。

### 3 结论

Rancimat 法或 Schaal 烘箱法试验都表明添加含有姜酮酚复配抗氧化剂的油样的氧化稳定性优于空白油样,说明姜酮酚复配抗氧化剂可以延长菜籽油的氧化诱导期,提高其氧化稳定性。虽然在 Schaal 烘箱法试验中添加姜酮酚复配抗氧化剂的油样在前 3 d 抗氧化效果不明显,3~15 d 才表现出抗氧化效果,但在实际应用过程中菜籽油储藏温度不会这么高,菜籽油氧化初速度较慢,因此后续可以考虑添加姜酮酚与菜籽油自身抗氧化剂形成复配体系以提高菜籽油抗氧化效果。

### 参考文献:

- [1] WANASUNDARA U N, SHAHIDI F. Stabilization of canola oil with flavonoids[J]. Food Chem, 1994, 50(4): 393-396.
- [2] KIM H J, KIM I S, REHMAN S U, et al. Effects of 6-paradol, an unsaturated ketone from gingers, on cytochrome P450-mediated drug metabolism[J]. Bioorg Med Chem Lett, 2017, 27(8): 1826-1830.
- [3] 李海平,刘宁,霍贵成. 生姜的抗动脉粥样硬化作用[J]. 国外医学:卫生学分册,2003,30(2):98-101.
- [4] 张永鑫,李俊松,陈丽华,等. 高效液相色谱法同时测定姜及其不同炮制品中 5 种姜辣素的含量[J]. 中国药理学杂志,2012,47(6):471-474.
- [5] SEMWAL R B, SEMWAL D K, COMBRINCK S, et al. Gingerols and shogaols: important nutraceutical principles from ginger[J]. Phytochemistry, 2015, 117: 554-568.
- [6] 李娅雯,李旭升,袁洋冰,等. 姜酮减肥降脂机制研究进展[J]. 食品科学,2022,43(5):356-362.
- [7] WEI C K, TSAI Y H, KORINEK M, et al. 6-Paradol and 6-shogaol, the pungent compounds of ginger, promote glucose utilization in adipocytes and myotubes, and 6-paradol reduces blood glucose in high-fat diet-fed mice [J/OL]. Int J Mol Sci, 2017, 18(1): 168 [2022-02-27]. <https://doi.org/10.3390/ijms18010168>.
- [8] NILE S H, PARK S W. Chromatographic analysis, antioxidant, anti-inflammatory, and xanthine oxidase inhibitory activities of ginger extracts and its reference compounds[J]. Ind Crop Prod, 2015, 70: 238-244.
- [9] 李雨竹,汪永,谢婷婷,等. 生姜和辣椒及其活性组分对卤煮牛肉中杂环胺生成的影响[J]. 肉类研究,2020,34(6):45-51.
- [10] 李岩溪,王永鹏,林涛,等. 6-姜酮酚对结直肠癌细胞增殖、凋亡和糖酵解的影响及机制研究[J]. 解剖科学进展,2020,26(3):280-283.
- [11] 高璃珑,唐瑞丽,袁先雯,等. 植物甾醇在大豆油储藏过程中抗氧化作用的研究[J]. 中国粮油学报,2016,31(11):74-80.

(下转第 93 页)

- 10.1016/j.foodchem.2020.128109.
- [26] 王瑞元. 中国为全球芝麻产业的发展作出了重要贡献[J]. 中国油脂, 2019, 44(12): 1-2.
- [27] 魏晓博, 汪学德, 任勇. 非洲芝麻及其芝麻油品质的研究[J]. 粮食与油脂, 2017, 30(7): 73-76.
- [28] 马雪婷. 芝麻油香气活性的分子组成与影响因素及储藏稳定性研究[D]. 郑州:河南工业大学, 2021.
- [29] 万可慧, 彭增起, 邵斌, 等. 高效液相色谱法测定牛肉干制品中10种杂环胺[J]. 色谱, 2012, 30(3): 285-291.
- [30] 张晨霞, 马宇翔, 赵天培, 等. 超高效液相色谱-三重四级杆质谱法检测油脂和油炸食品中7种杂环胺类物质[J]. 色谱, 2020, 38(2): 224-231.
- [31] MATUSZEWSKI B K, CONSTANZER M L, CHAVEZ-ENG C M. Matrix effect in quantitative LC/MS/MS analyses of biological fluids: a method for determination of finasteride in human plasma at picogram per milliliter concentrations[J]. Anal Chem, 1998, 70(5): 882-889.
- [32] ZHAO T, XI J, ZHANG C, et al. Using *Adinandra nitida* leaf extract to prevent heterocyclic amine formation in fried chicken patties[J]. RSC Adv, 2021, 11(12): 6831-6841.
- [33] 潘晗, 张春晖, 王振宇, 等. 畜禽产品加工过程中有害物质的形成机制及抑制措施:以杂环胺为例[J]. 食品科学技术学报, 2013, 31(1): 24-29.
- [34] BORDAS M, MOYANO E, PUIGNOU L, et al. Formation and stability of heterocyclic amines in a meat flavour model system; effect of temperature, time and precursors[J]. J Chromatogr B, 2004, 802(1): 11-17.
- [35] 潘晗, 王振宇, 倪娜, 等. 不同前体物对酱肉中 $\beta$ -咔啉 norharman 和 harman 的影响[J]. 现代食品科技, 2014, 30(1): 81-86.
- [36] XUE C Y, CHEN Q C, HE Z Y, et al. Non-precursors amino acids can inhibit  $\beta$ -carbolines through free radical scavenging pathways and competitive inhibition in roast beef patties and model food systems[J/OL]. Meat Sci, 2020, 169: 108203[2022-03-17]. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2020.108203>.
- [37] LEAHY M M, WARTHESEN J J. The influence of Maillard browning and other factors on the stability of free tryptophan[J]. J Food Process Pres, 1983, 7(1): 25-39.
- [38] DIEM S, HERDERICH M. Reaction of tryptophan with carbohydrates: mechanistic studies on the formation of carbohydrate-derived  $\beta$ -carbolines[J]. J Agric Food Chem, 2001, 49(11): 5473-5478.
- [39] TAI C Y, LEE K H, CHEN B H. Effects of various additives on the formation of heterocyclic amines in fried fish fibre[J]. Food Chem, 2001, 75(3): 309-316.
- [40] LIU W, YANG Z, SHI L, et al. Degradation of  $\beta$ -carbolines harman and norharman in edible oils during heating[J/OL]. Molecules, 2021, 26(22): 7018[2022-03-17]. <https://doi.org/10.3390/molecules26227018>.
- [41] WANG S T, ZHUO W L, DAN Y Q, et al. Inhibitory effects of Chinese quince fruit proanthocyanidins with different polymerisation degrees on the formation of heterocyclic aromatic amines in chemical model systems[J]. Int J Food Sci Tech, 2022, 57(1): 330-341.
- 
- (上接第86页)
- [12] LIU R, XU Y, CHANG M, et al. Antioxidant interaction of  $\alpha$ -tocopherol,  $\gamma$ -oryzanol and phytosterol in rice bran oil[J/OL]. Food Chem, 2021, 343: 128431[2022-02-27]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128431>.
- [13] CIEMNIEWSKA-ŻYTKIEWICZ H, RATUSZ K, BRYŚJ, et al. Determination of the oxidative stability of hazelnut oils by PDSC and Rancimat methods[J]. J Therm Anal Calorim, 2014, 118(2): 875-881.
- [14] MALCOLMSON L J, VAISEY - GENSER M, PRZYBYLSKI R, et al. Sensory stability of canola oil: present status of shelf life studies[J]. J Am Oil Chem Soc, 1994, 71(4): 435-440.
- [15] SWAIN T, HILLIS W E. The phenolic constituents of *Prunus domestica*. I. The quantitative analysis of phenolic constituents[J]. J Sci Food Agric, 1959, 10(1): 63-68.
- [16] 唐川惠.  $\alpha$ -生育酚在四种植物油中的抗氧化规律研究[D]. 江苏 无锡:江南大学, 2020.
- [17] HERNÁNDEZ-CENTENO F, HERNÁNDEZ-GONZÁLEZ M, LÓPEZ-DELAPEÑA H Y, et al. Changes in oxidative stability, composition and physical characteristics of oil from a non-conventional source before and after processing[J]. Rev Mex Ing Quim, 2020, 19(3): 1389-1400.
- [18] ZHENG C, YANG M, ZHOU Q, et al. Changes in the content of canolol and total phenolics, oxidative stability of rapeseed oil during accelerated storage[J]. Eur J Lipid Sci Tech, 2014, 116(12): 1675-1684.