

## 两种阿魏酸酰胺类物质的合成 及抗氧化性能研究

高亮, 张晋芳, 黄雅祺, 王小三, 黄健花

(江南大学食品学院, 食品科学与技术国家重点实验室, 食品安全与质量控制协同创新中心, 江苏无锡 214122)

**摘要:**以阿魏酸为原料, 采用化学法合成了阿魏酸苯乙酰胺和阿魏酸酪酰胺两种抗氧化剂, 采用液质联用和核磁共振氢谱对产物进行定性, 采用高效液相色谱进行定量分析。另外, 将合成的两种抗氧化剂与其他 8 种抗氧化剂的抗煎炸大豆油氧化效果进行比较。结果表明: 两种产物阿魏酸苯乙酰胺、阿魏酸酪酰胺纯度分别为 97.05% 和 94.55%; 两种阿魏酸酰胺类物质具有较强的抗氧化能力, 抗氧化能力均优于迷迭香提取物、谷维素、BHT、混合生育酚和茶多酚棕榈酸酯。

**关键词:**阿魏酸; 阿魏酸苯乙酰胺; 阿魏酸酪酰胺; 抗氧化剂

中图分类号: R914; R96

文献标识码: A

文章编号: 1003-7969(2021)03-0022-06

### Synthesis of two types of ferulic acid amides and their antioxidant properties

GAO Liang, ZHANG Jinfang, HUANG Yaqi,  
WANG Xiaosan, HUANG Jianhua

(Collaborative Innovation Center of Food Safety and Quality Control in Jiangsu Province,  
State Key Laboratory of Food Science and Technology, School of Food Science and  
Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, China)

**Abstract:** Two antioxidants feruloylphenethylamine (FPA) and feruloyltyramine (FTA) were synthesized from ferulic acid by chemical method. The product was characterized by liquid chromatography-mass spectrometry and nuclear magnetic resonance hydrogen spectroscopy, and quantified by high performance liquid chromatography. The antioxidant effects of the two synthesized antioxidants were compared with other eight antioxidants. The results showed that the purity of FPA and FTA were 97.05% and 94.55%, respectively. The two types of ferulic acid amides had excellent antioxidant capacity, which were superior to rosemary extract, oryzanol, BHT, tocopherols and tea polyphenol palmitate.

**Key words:** ferulic acid; feruloylphenethylamine; feruloyltyramine; antioxidant

阿魏酸是一种酚酸, 化学学名为 4-羟基-3-甲氧基肉桂酸。阿魏酸是一种具有良好抗氧化活性

收稿日期: 2020-06-07; 修回日期: 2020-10-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31701559, 31972035)

作者简介: 高亮(1993), 男, 在读硕士, 研究方向为脂质科学与技术(E-mail) gaoliangjiangnan@163.com; 张晋芳(1993), 女, 在读硕士, 研究方向为脂质科学与技术(E-mail) zhangjinfang1801@163.com。高亮与张晋芳共同为第一作者。

通信作者: 王小三, 副教授, 硕士生导师(E-mail) wxstongxue@163.com。

的天然抗氧化剂, 在化妆品和食品领域被广泛应用。但阿魏酸作为抗氧化剂稳定性较差, 在较低的煎炸温度下易分解<sup>[1-2]</sup>。相关研究表明, 阿魏酸酰胺类物质与阿魏酸相比, 抗氧化活性高, 且物理化学性质更佳<sup>[3]</sup>, 因此阿魏酸酰胺类物质增强了阿魏酸在食品添加剂领域的应用。

目前常用化学法合成阿魏酸酰胺类物质。Yang等<sup>[4]</sup>先以香草醛为原料制备了酰氯化物, 再与苯乙胺和酪胺分别反应, 最终合成了目标产物阿魏酸苯乙酰胺和阿魏酸酪酰胺。杨丽丽等<sup>[5]</sup>以阿魏酸为原料, 依次采用乙酰化、酰氯化和酯化, 合成了白藜芦醇乙酰阿魏酸酯。

天然抗氧化剂在延缓油脂劣变中的应用受到一些固有的缺点阻碍,如常见天然抗氧化剂生育酚的热稳定性较差从而限制了其在延长煎炸油使用寿命中的应用<sup>[6-7]</sup>。近年来,有学者发现在煎炸温度下,谷维素可降低煎炸油中聚合物的含量<sup>[8]</sup>。Winkler - Moser 等<sup>[9]</sup>在模拟煎炸条件下发现谷维素可以使煎炸油中聚合物的含量降低。然而谷维素是一种混合物,谷维素中不同成分的性质差异较大<sup>[10]</sup>。植物提取物在煎炸油中抗氧化效果的研究很多,迷迭香提取物已被证实在煎炸过程中具有较好的抗氧化效果<sup>[11]</sup>,但其活性取决于鼠尾草酚、鼠尾草酸、迷迭香酚、迷迭香醌和迷迭香二酚等活性物质的含量<sup>[12]</sup>。由于天然提取物成分相对复杂,大多来源于自然界的动植物或微生物,其含量很低,提取工艺困难,产率低且活性成分变异较大,从而限制了它们在油脂中的应用<sup>[13]</sup>。因此,研究以天然物质为前体化合物合成高抗氧化活性和热稳定性好的新型抗氧化剂或者将自然界中天然存在的抗氧化活性成分通过化学工艺合成应用于油脂中受到广泛关注。

本研究在现有研究<sup>[3]</sup>的基础上以阿魏酸为原料,采用化学法首先合成了两种阿魏酸酰胺类物质,通过液质联用、核磁共振氢谱对合成产物进行定性,高效液相色谱进行定量分析,再与现有的抗氧化剂在煎炸油中的抗氧化性能进行比较,以考察合成的阿魏酸酰胺类物质的抗氧化能力,这对提高煎炸油氧化稳定性的研究具有重要意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

一级大豆油(未添加抗氧化剂),汇福粮油提供;苯乙胺(纯度>99%)、阿魏酸(纯度>99%),购于上海国药试剂公司;阿魏酸乙酯(纯度>99%),购于梯希爱(上海)化成工业发展有限公司;谷维素(纯度>96%),购于浙江银河药业有限公司;抗坏血酸棕榈酸酯(纯度>98%)、酪胺(纯度>97%)、苯并三唑-1-基氧基三(二甲氨基)磷六氟磷酸盐(BOP),购于百灵威科技有限公司;茶多酚棕榈酸酯(纯度>70%)、迷迭香提取物(鼠尾草酚和鼠尾草酸含量约为6%),购于建明工业有限公司;90%混合生育酚( $\alpha$ -生育酚8%~10%, $\beta$ -生育酚1%~3%, $\gamma$ -生育酚62%~64%, $\delta$ -生育酚24%~26%),购于江苏科鼎生物制品有限公司;异丙醇、三乙胺、石油醚、碳酸氢钠、氢氧化钾、无水硫酸钠,购于上海国药试剂公司;甲醇、乙酸乙酯、四氢呋喃、正己烷均为色谱纯试剂,购于百灵威科技有限公司。

YF-81 单缸单筛电炸炉,广州市粤顺西厨设备有限公司;EL 204 电子天平,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;C-MAG HS 4 加热磁力搅拌器,艾卡(广州)仪器设备有限公司;全自动食用油极性组分分离系统,天津博纳艾杰尔科技公司;R204B 型旋转蒸发仪,上海申胜生物科技有限公司;Waters 2695 型高效液相色谱仪、Waters 2414 型示差折光检测器、Waters 1525 型高效液相色谱仪、Waters 2996 型二极管阵列检测器、Waters Platform ZMD 4000 液相色谱-质谱联用仪,Waters 公司;Agilent 7820A 气相色谱仪,美国安捷伦科技有限公司;AVANCEIII 400 MHz 全数字化核磁共振谱仪,德国布鲁克公司。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 阿魏酸酰胺类物质的合成

将阿魏酸(5 mmol)和三乙胺(5 mmol)混合,再加入二甲基甲酰胺(6 mL),反应原料在 0℃ 下搅拌,缓慢加入 BOP(5 mmol),在 0℃ 下搅拌 1 h,待反应物冷却至室温,缓慢加入苯乙胺(5.2 mmol)或酪胺(5.2 mmol),在常温下搅拌 5 h。反应结束后,加水 30 mL,再加入乙酸乙酯进行多次提取。将所得有机层用 10 mL 盐酸溶液(1 mol/L)洗涤 2 次,以除去过量的 BOP,再加 10 mL 水洗涤,再加 10 mL 饱和的 NaHCO<sub>3</sub> 溶液洗涤,最后用水洗涤至中性。旋转蒸发除去有机溶剂,真空干燥至恒重。

#### 1.2.2 高效液相色谱法(HPLC)分析合成产物

采用 Waters 1525 型高效液相色谱仪对合成产物进行定量。色谱条件为:Sunfire C18 反相色谱柱(5  $\mu$ m,150 mm $\times$ 4.6 mm),Waters 2996 型二极管阵列检测器,柱温 35℃,流动相为水-甲醇-冰醋酸(体积比 1:1:0.01),等度洗脱 20 min,流速 1 mL/min,检测波长 320 nm,进样量 10  $\mu$ L。

#### 1.2.3 液质联用分析合成产物

通过 Waters Platform ZMD 4000 液相色谱-质谱联用仪对合成产物的结构进行定性。液相色谱条件为:BEH C18 色谱柱(1.7  $\mu$ m,2.1 mm $\times$ 50 mm),柱温 35℃;进样量 1  $\mu$ L;流动相为乙腈和甲酸水溶液,流速 0.3 mL/min;梯度洗脱程序为 0~8 min 内,乙腈的含量由 5% 提升至 60%,8~12.1 min 内,乙腈的含量由 60% 下降至 5%。质谱条件:正离子模式(ESI<sup>+</sup>),毛细管电压 3.5 kV,锥孔电压 30 V,离子源温度 100℃,脱溶剂气温度 400℃,真空度  $5.49 \times 10^{-2}$  Pa,气体流速 1.5 mL/min,锥孔气体流速 50 L/h,脱溶剂气体流速 700 L/h。

#### 1.2.4 核磁共振氢谱测定合成产物

将合成产物(15~25 mg)置于 5 mm 的核磁管

中,用氘代二甲基亚砜(500  $\mu\text{L}$ )溶解并混合均匀,采用 AVANCEIII 400 MHz 全数字化核磁共振谱仪对合成产物进行检测。

### 1.2.5 富含抗氧化剂的大豆油的配制

准确称取 0.200 g 抗氧化剂,加入 100 g 未添加抗氧化剂的大豆油中,50  $^{\circ}\text{C}$  下超声加热辅助溶解,然后称取 25 g 溶解液加入 75 g 未添加抗氧化剂的大豆油中,从而获得添加量为 500 mg/kg 的富含抗氧化剂的大豆油。

### 1.2.6 煎炸实验

向烧杯中加入大豆油(100 g),放入磁力搅拌子,转速为 500 r/min,升温至(180  $\pm$  5)  $^{\circ}\text{C}$  保持 10 min,投入装有薯条(10 g)的模拟煎炸篮,停止搅拌,煎炸 20 min,取出食物后继续搅拌 90 min。每 60、80、100、120 min 各取样 10 mL 进行相关指标的测定。

### 1.2.7 酸值、极性组分含量的测定

酸值的测定参照 GB 5009.229—2016《食品安全国家标准 食品中酸值的测定》。极性组分含量测定参照 GB 5009.202—2016《食品安全国家标准 食用油中极性组分(PC)的测定》。

### 1.2.8 极性物质组成的测定

采用高效空间排阻色谱法分离煎炸油中的极性组分<sup>[3]</sup>,将极性组分配制成 10 mg/mL 溶液,经 0.22  $\mu\text{m}$  滤膜过滤后进行 HPLC 分析。HPLC 条件为:色谱柱为 Styragel 凝胶色谱保护柱 + Styragel HR 1 TH ( $\Phi$ 7.8 mm  $\times$  300 mm) + Styragel HR 0.5 TH ( $\Phi$ 7.8 mm  $\times$  300 mm);柱温 35  $^{\circ}\text{C}$ ;进样量 10  $\mu\text{L}$ ;流速 0.7 mL/min;流动相为四氢呋喃;示差折光检测器,检测池温度 35  $^{\circ}\text{C}$ 。

### 1.2.9 数据处理

煎炸实验均进行 2 次,每个指标重复测定 3 次,结果用“平均值  $\pm$  标准差”表示,采用 SPSS 22.0 进行显著性分析, $P < 0.05$  表示存在显著性差异。采用 Origin8.0 和 Excel 制作图表。

## 2 结果与讨论

### 2.1 产物的初步分析

#### 2.1.1 高效液相色谱分析(见图 1)

如图 1 所示,出峰时间为 3.33 min 附近所对应的物质为阿魏酸,出峰时间为 13.32、4.64 min 是新产生的峰,根据新生成酰胺类物质的极性判断,可推测新产生的峰分别为阿魏酸苯乙酰胺和阿魏酸酪酰胺,经过面积归一化法得到阿魏酸苯乙酰胺的纯度为 97.05%,阿魏酸酪酰胺的纯度为 94.55%。

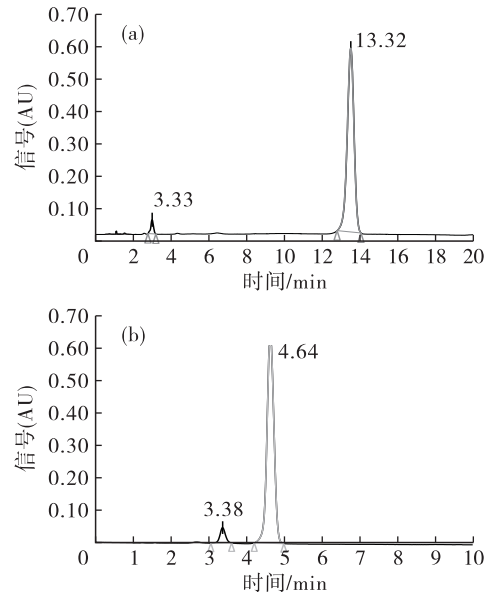


图 1 合成产物阿魏酸苯乙酰胺(a)和阿魏酸酪酰胺(b)的高效液相色谱图

#### 2.1.2 紫外图谱分析

由高效液相色谱的二极管阵列检测器直接提取,得到阿魏酸、阿魏酸苯乙酰胺和阿魏酸酪酰胺的紫外吸收图谱,分别如图 2 和图 3 所示。

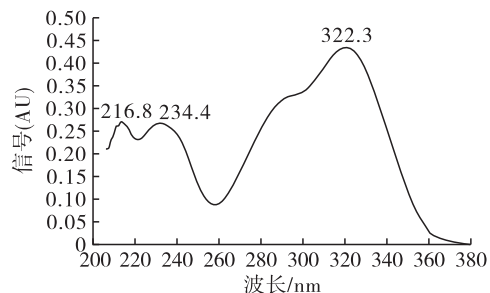


图 2 阿魏酸的紫外吸收图谱

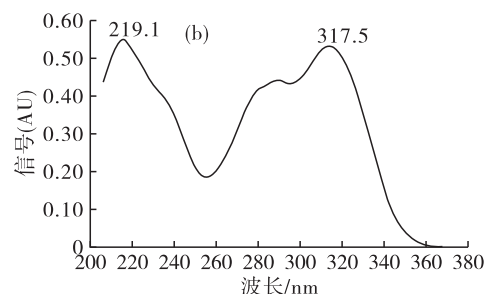
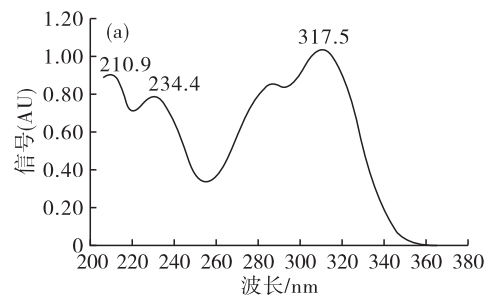


图 3 阿魏酸苯乙酰胺(a)和阿魏酸酪酰胺(b)的紫外吸收图谱

由图2可知,阿魏酸的紫外特征最大吸收波长为322.3 nm,与文献[14]报道相同。由图3可知,阿魏酸苯乙酰胺和阿魏酸酪酰胺的紫外特征最大吸收波长为317.5 nm,与阿魏酸的紫外吸收图谱极其类似,从而推测所合成的新物质含有阿魏酰基团。且阿魏酸酰胺类物质的最大吸收波长与阿魏酸相比发生了蓝移,是由于助色团上的n电子与阿魏酰基的羰基双键的 $\pi$ 电子产生n- $\pi$ 共轭,导致 $\pi^*$ 轨道的能级提高,但这种共轭作用没有改变n轨道的能级,n- $\pi^*$ 跃迁所需要能量变大,使n- $\pi^*$ 吸收带向短波方向移动,从而证明酰胺化反应的进行。

### 2.1.3 产物结构的液质联用分析

为了进一步确定合成产物的结构,将两种合成产物阿魏酸苯乙酰胺和阿魏酸酪酰胺进行液质联用分析,结果见图4。在正离子模式下,阿魏酸酰胺类物质易形成[M+H]<sup>+</sup>准分子离子。由图4(a)的质谱图中可得准分子离子峰的m/z为298.1,与所推测的目标化合物阿魏酸苯乙酰胺的相对分子质量一致。同理,由图4(b)的质谱图中得到准分子离子峰的m/z为314.2,与所推测的目标化合物阿魏酸酪酰胺的相对分子质量一致。图4中均有m/z为177.0和145.0的碎片离子峰,与文献[15]中报道的碎片离子一致,是从酰胺类物质中断裂的阿魏酰基部分。

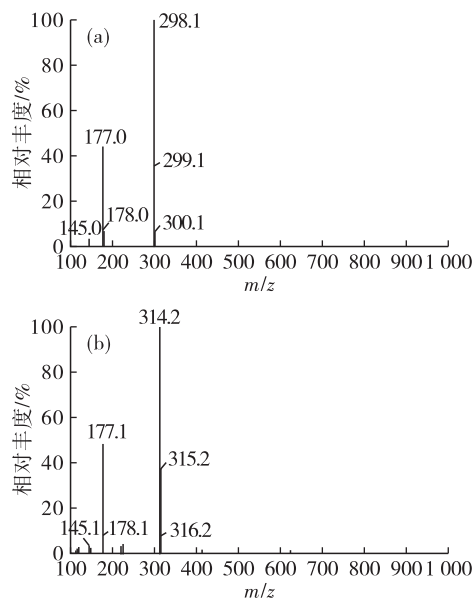


图4 阿魏酸苯乙酰胺(a)和阿魏酸酪酰胺(b)的正离子质谱图

### 2.2 产物结构的核磁定性

将合成的阿魏酸苯乙酰胺和阿魏酸酪酰胺采用核磁共振氢谱仪进行结构定性分析。

实验室溶解样品所用的氘代二甲基亚砜的残留氢的吸收峰在 $\delta$  2.5附近,此氘代溶剂吸水性较强,

两张谱图(略)均在 $\delta$  2.90附近出现 $CD_3SOCD_3$ 的水峰。排除干扰峰的影响,阿魏酸苯乙酰胺和阿魏酸酪酰胺的核磁共振氢谱的详细化学位移信息分别见表1和表2。综合液相色谱分析、紫外图谱分析和液质联用分析结果,阿魏酸苯乙酰胺和阿魏酸酪酰胺的化学结构式如图5所示。

表1 阿魏酸苯乙酰胺分子中H的化学位移

$\delta$	H的类型	H的分布
2.76	CH <sub>2</sub>	A-1
3.39	CH <sub>2</sub>	B-2
3.81	Ar-OCH <sub>3</sub>	C-3
6.44	CH	D-4
6.79	CH	E-5
6.98	CH	F-6
7.11	CH	G-7
7.27	CH	H-8
8.04	NH	I-9
9.42	Ar-OH	J-10

表2 阿魏酸酪酰胺分子中H的化学位移

$\delta$	H的类型	H的分布
2.65	CH <sub>2</sub>	A-1
3.34	CH <sub>2</sub>	B-2
3.80	Ar-OCH <sub>3</sub>	C-3
6.43	CH	D-4
6.68	CH	E-5
6.79	CH	F-6
6.99	CH	G-7
7.11	CH	H-8
7.31	CH	I-9
7.97	NH	J-10
9.16	Ar-OH	K-11
9.40	Ar-OH	L-12

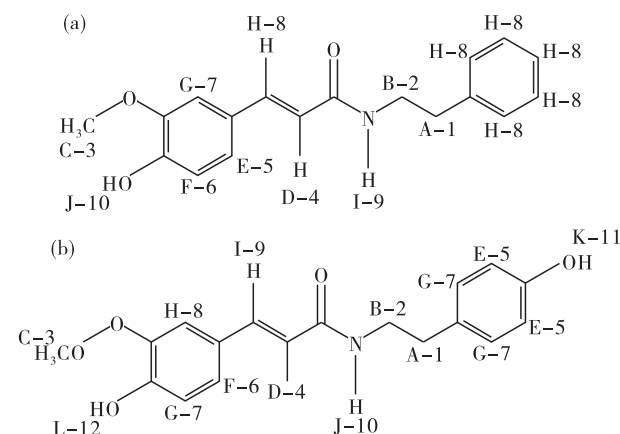
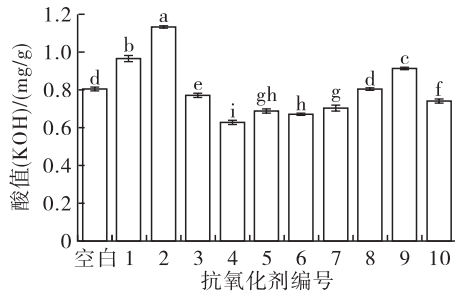


图5 阿魏酸苯乙酰胺(a)和阿魏酸酪酰胺(b)的化学结构式

### 2.3 不同抗氧化剂在煎炸体系中抗氧化性能的比较

本文选取天然抗氧化剂混合生育酚(TOC)、稻米加工中的副产物谷维素( $\gamma$ -oryzanol)、迷迭香提取物(ROS)、阿魏酸(FA)、阿魏酸乙酯(EF)、抗坏

血酸棕榈酸酯(AP)、茶多酚棕榈酸酯(TP)和2,6-二叔丁基-4-甲基苯酚(BHT)与阿魏酰基抗氧化剂,按1.2.5和1.2.6方法进行抗氧化活性的比较,结果见图6~图8。



注:1. BHT;2. FA;3. EF;4. FPA;5. FTA;6.  $\gamma$ -oryzanol;7. TP;8. AP;9. ROS;10. TOC。不同字母表示差异显著( $P < 0.05$ ),相同字母表示差异不显著( $P > 0.05$ )。

图6 阿魏酰基抗氧化剂与其他抗氧化剂对大豆油煎炸120 min 酸值的影响

由图6可知,快速煎炸120 min时,阿魏酸苯乙酰胺(FPA)在高温煎炸体系中对大豆油酸值的抑制作用最强,抗氧化性能最佳。阿魏酸酪酰胺(FTA)在高温煎炸体系中对大豆油酸值的抑制作用与谷维素和茶多酚棕榈酸酯相当,显著强于同浓度的其他6种抗氧化剂( $P < 0.05$ )。从图6还可看出,添加BHT大豆油酸值高于空白组,推测原因是在煎炸温度下BHT损耗速度较快,此外有研究指出BHT对油脂酸值增加有一定的促进作用。ROS对抑制煎炸油中游离脂肪酸的形成没有效果。

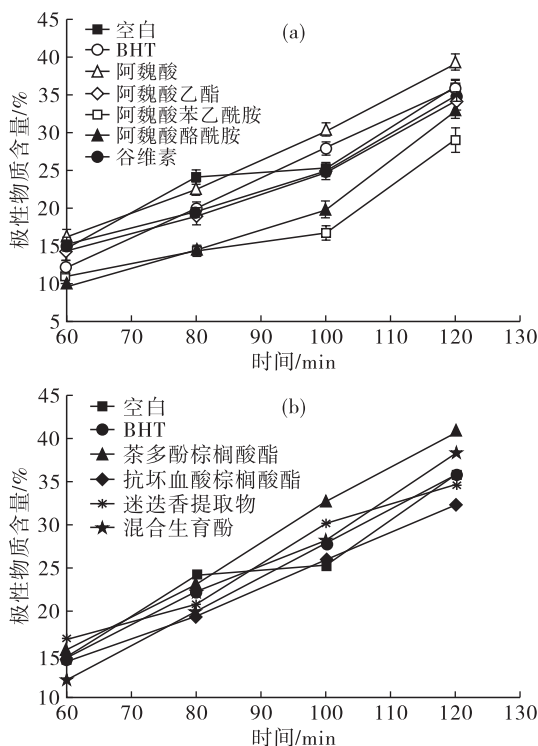
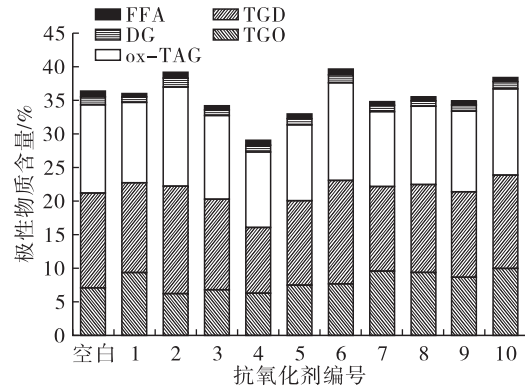


图7 阿魏酰基抗氧化剂与其他抗氧化剂对煎炸大豆油极性物质含量的影响



注:抗氧化剂编号同图6;FFA为游离脂肪酸,DG为甘油二酯,ox-TAG为氧化甘油三酯单体,TGD为氧化甘油三酯二聚物,TGO为氧化甘油三酯寡聚物。

图8 阿魏酰基抗氧化剂与其他抗氧化剂对大豆油煎炸120 min 极性组分的影响

由图7可知,空白大豆油在180℃的煎炸体系中性物质含量随着时间延长显著增加,阿魏酸和混合生育酚对煎炸大豆油无保护作用,这与文献[16]中报道的结果一致,原因是阿魏酸和生育酚在煎炸温度下都具有热不稳定性,极易损失从而不能发挥对煎炸油的保护作用。在煎炸结束时,阿魏酸苯乙酰胺对煎炸油中性物质的抑制效果最佳( $P < 0.05$ ),抗坏血酸棕榈酸酯的抗氧化效果仅次于阿魏酸苯乙酰胺。阿魏酸酪酰胺的抑制效果显著优于空白大豆油和BHT( $P < 0.05$ )。由此可得抗氧化效果从强到弱为:阿魏酸苯乙酰胺 > 抗坏血酸棕榈酸酯 > 阿魏酸酪酰胺 > 阿魏酸乙酯 > 迷迭香提取物 > 谷维素 > BHT > 混合生育酚 > 阿魏酸 > 茶多酚棕榈酸酯。

在煎炸过程中,所形成的主要的非挥发性物质是氧化甘油三酯聚合物(TGP),TGP是TGO和TGD的混合物,TGP的增加会增加煎炸油的黏度、颜色和起泡性,且在动物实验中具有良好的吸收性,呈现一定的毒性<sup>[17]</sup>。在未煎炸的大豆油中,初始的极性物质中TGP的含量较低,仅为1.5%。由图8可知,快速煎炸120 min时,与其他抗氧化剂相比,添加阿魏酸苯乙酰胺(FPA)和阿魏酸酪酰胺(FTA)煎炸大豆油中TGP含量较低,分别为16.0%和20.1%,说明阿魏酸酰胺类物质的抗氧化效果优于其他抗氧化剂。

### 3 结论

本文首先采用化学法合成阿魏酸苯乙酰胺和阿魏酸酪酰胺两种抗氧化剂,通过紫外图谱、液质联用和核磁共振氢谱对阿魏酸苯乙酰胺和阿魏酸酪酰胺进行了定性分析,通过高效液相色谱测定阿魏酸苯

乙酰胺和阿魏酸酐酰胺纯度分别为 97.05% 和 94.55%。将合成的两种抗氧化剂与现有抗氧化剂在煎炸油中的抗氧化效果进行比较,结果表明,两种阿魏酸酰胺类物质的抗氧化效果均优于迷迭香提取物、谷维素、BHT、混合生育酚和茶多酚棕榈酸酯,这对于油脂抗氧化稳定性的研究具有重要意义。

#### 参考文献:

- [1] 杨宏黎. 脂肪酶催化制备中碳链结构脂和阿魏酰结构磷脂[D]. 辽宁 大连: 大连理工大学, 2014.
- [2] TANIGUCHI H, NOMURA E, HOSODA A, et al. Thermally stable ferulic acid derivatives: US689520 [P]. 2005-05-10.
- [3] 张晋芳. 两种阿魏酸酰胺化合物的制备及其在煎炸过程中抗氧化能力的评估[D]. 江苏 无锡: 江南大学, 2018.
- [4] YANG Y, SONG Z G, LIU Z Q. Synthesis and antioxidant capacities of hydroxyl derivatives of cinnamoylphenethylamine in protecting DNA and scavenging radicals[J]. Free Radical Res, 2011, 45(4): 445-453.
- [5] 杨丽丽, 黄鹏, 汪电雷, 等. 白藜芦醇乙酰阿魏酸酯的合成[J]. 广州化工, 2013, 41(17): 68-69.
- [6] 熊兴泉, 范观铭, 朱荣俊, 等. 酰胺类化合物的高效合成研究[J]. 化学进展, 2016, 28(4): 497-506.
- [7] NEFF W E, WARNER K, ELLER F. Effect of  $\gamma$ -tocopherol on formation of nonvolatile lipid degradation products during frying of potato chips in triolein[J]. J Am Oil Chem Soc, 2003, 80(8): 801-806.
- [8] GERTZ C, KLOSTERMANN S, KOCHHAR S P. Testing and comparing oxidative stability of vegetable oils and fats

at frying temperature[J]. Eur J Lipid Sci Tech, 2000, 102(8/9): 543-551.

- [9] WINKLER - MOSER J K, RENNICK K A, PALMQUIST D A, et al. Comparison of the impact of  $\gamma$ -oryzanol and corn steryl ferulates on the polymerization of soybean oil during frying[J]. J Am Oil Chem Soc, 2012, 89(2): 243-252.
- [10] 罗嗣良, 陆仲华, 周宝兰. 谷维素对油脂的抗氧化性及其应用研究[J]. 中国油脂, 1987, 12(2): 13-26.
- [11] ROSSELL J B. Frying: improving quality [M]. Cambridge: Woodhead Publishing, 2001: 304-306.
- [12] ERKAN N, AYRANCI G, AYRANCI E. Antioxidant activities of rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.) extract, blackseed (*Nigella sativa* L.) essential oil, carnosic acid, rosmarinic acid and sesamol [J]. Food Chem, 2008, 110(1): 76-82.
- [13] 陈家玉. 迷迭香提取物抗鱼油氧化酸败及其抗自由基活性的研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2015.
- [14] ALADEDUNYE F A, PRZYBYLSKI R. Rapid assessment of frying performance using small size samples of oils/fats [J]. J Am Oil Chem Soc, 2011, 88(12): 1867-1873.
- [15] 肖明. 阿魏酸酯的合成及其抗氧化活性研究[D]. 西安: 西北大学, 2013.
- [16] NORMAND L, NAM E, PRZYBYLSKI R. Effect of tocopherols on the frying stability of regular and modified canola oils[J]. J Am Oil Chem Soc, 2001, 78(4): 369-373.
- [17] LEONG X F, MOHD NAJIB M N, DAS S, et al. Intake of repeatedly heated palm oil causes elevation in blood pressure with impaired vasorelaxation in rats[J]. Tohoku J Exp Med, 2009, 219(1): 71-78.

(上接第 21 页)

- [6] SILVA S M, SAMPAIO K A, CERIANI R, et al. Effect of type of bleaching earth on the final color of refined palm oil [J]. LWT - Food Sci Technol, 2014, 59(2): 1-7.
- [7] ZSCHAU W. Bleaching of edible fats and oils[J]. Eur J Lipid Sci Technol, 2001, 103(8): 505-508.
- [8] 庞文胜, 毛洗荣. 茶油精炼工艺初探[J]. 林业科技开发, 2004, 18(1): 54-55.
- [9] GB 1886.62-2015, 食品安全国家标准 食品添加剂 硅酸镁[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [10] KHAN M A, RAHMAN M M, HABIB M A, et al. Influences of magnesium tri-silicate on the physical, mechanical, and degradable properties of ultraviolet (UV) radiation cured plain board surface[J]. J Polym Environ, 2004, 12(4): 219-229.
- [11] 姜敏, 葛红光, 史娟, 等. 滤油粉对煎炸油处理效果的评价[J]. 中国油脂, 2013, 38(1): 94-96.
- [12] LEIVA G E, GABRIELA B N, MALEC L S. A study of

different indicators of Maillard reaction with whey proteins and different carbohydrates under adverse storage conditions[J]. Food Chem, 2017, 215: 410-416.

- [13] MARRAKCHI F, KRIAA K, HADRICH B, et al. Experimental investigation of processing parameters and effects of degumming, neutralization and bleaching on lampante virgin olive oil's quality [J]. Food Bioprod Process, 2015, 94: 124-135.
- [14] 林剑阳. 油茶籽油精炼工艺的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2007.
- [15] 钟海雁, 王承南, 谢碧霞, 等. 茶油色泽测定及脱色工艺的研究[J]. 中南林学院学报, 2000, 20(4): 25-29.
- [16] 陈珊, 何庭玉. 茶油的精制方法及应用[J]. 林产化工通讯, 2005(6): 39-42.