

## 两种天然抗氧化剂对稻米油煎炸性能的影响

李恒彬<sup>1</sup>, 高盼<sup>1,2,3</sup>, 江小明<sup>3,4</sup>, 陈玉<sup>1</sup>, 钟武<sup>1,2,3</sup>, 胡传荣<sup>1,2</sup>, 何东平<sup>1,2,3</sup>

(1. 武汉轻工大学 食品科学与工程学院, 武汉 430023; 2. 大宗粮油精深加工教育部重点实验室, 武汉 430023;

3. 国家市场监督管理总局重点实验室(食用油质量与安全), 武汉 430012; 4. 武汉食品化妆品检验所, 武汉 430012)

**摘要:**为选择适合稻米油煎炸的天然抗氧化剂,对茶多酚和迷迭香提取物两种天然抗氧化剂的添加量进行了选择,并测定了稻米油在30 h煎炸过程中理化指标、营养物质以及危害物质的变化。结果表明:茶多酚和迷迭香提取物的最佳添加量均为200 mg/kg,其氧化诱导时间均高于未添加天然抗氧化剂组(1.50 h);煎炸过程中,添加迷迭香提取物的稻米油酸值(KOH)增幅最小(30 h, 0.64 mg/g),极性组分含量达到煎炸油废弃标准(27%)的时间最长(23 h);添加茶多酚的稻米油过氧化值最高值较小(6.12 mmol/kg);煎炸后,添加迷迭香提取物的稻米油 $\alpha$ -生育酚(18 h, 17.66%)和谷维素(24 h, 93.24%)的保留率最高;茶多酚可有效减少反式脂肪酸的生成,但迷迭香提取物抑制BaP生成的效果较好;添加天然抗氧化剂可显著提升稻米油脂肪酸的稳定性;两种天然抗氧化剂对稻米油煎炸过程中3-MCPD酯含量的变化影响不显著。综合考虑煎炸效果和成本,迷迭香提取物对提升稻米油煎炸性能更具优势。

**关键词:**稻米油;天然抗氧化剂;迷迭香提取物;茶多酚;煎炸性能

中图分类号:TS225.1;TQ031.7 文献标识码:A 文章编号 1003-7969(2023)08-0034-07

## Effects of two natural antioxidants on frying performance of rice bran oil

LI Hengbin<sup>1</sup>, GAO Pan<sup>1,2,3</sup>, JIANG Xiaoming<sup>3,4</sup>, CHEN Yu<sup>1</sup>,  
ZHONG Wu<sup>1,2,3</sup>, HU Chuanrong<sup>1,2</sup>, HE Dongping<sup>1,2,3</sup>

(1. College of Food Science and Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China;

2. Key Laboratory for Deep Processing of Major Grain and Oil of Ministry of Education, Wuhan

430023, China; 3. Key Laboratory of Edible Oil Quality and Safety for State Market Regulation,

Wuhan 430012, China; 4. Wuhan Institute for Food and Cosmetic Control, Wuhan 430012, China)

**Abstract:** In order to select the suitable natural antioxidants for rice bran oil frying, the dosages of tea polyphenols and rosemary extract were selected, and the changes of physicochemical indicators, nutrients, and harmful substances in rice bran oil during the 30 h of frying process were analyzed. The results showed that the optimal dosage of tea polyphenols and rosemary extract was 200 mg/kg, and the oxidation induction time was longer than that without natural antioxidants (1.50 h). During the frying, the increase in acid value of rice bran oil with rosemary extract was the lowest (30 h, 0.64 mgKOH/g), and the time for polar components to reach the frying oil waste standard of 27% was the longest (23 h). The maximum peroxide value of rice bran oil with tea polyphenols was lower (6.12 mmol/kg). After frying, the  $\alpha$ -tocopherol (18 h, 17.66%) and oryzanol (24 h, 93.24%) retention rates of rice bran oil with rosemary extract were the highest. In addition, tea polyphenols could effectively reduce the generation of *trans* fatty acids, while rosemary extract had a better inhibitory effect on BaP generation. Adding natural

antioxidants could significantly enhance the stability of fatty acids. The effect of two natural antioxidants on the change of 3-MCPD ester content in rice bran oil was not significant. Considering the frying effect and cost

收稿日期:2022-09-13;修回日期:2023-05-12

作者简介:李恒彬(1998),男,硕士研究生,研究方向为粮食、油脂及植物蛋白(E-mail)l20210112104@163.com。

通信作者:高盼,讲师,博士(E-mail)gaopan925@163.com。

comprehensively, the rice bran oil added with rosemary extract has more advantages in frying performance.

**Key words:** rice bran oil; natural antioxidant; rosemary extract; tea polyphenols; frying performance

稻米加工过程的副产物米糠含油率可达16%~20%,稻米油是从米糠中提取的一种天然油脂。国家统计局数据显示,2021年我国稻谷产量高达21 284万t<sup>[1]</sup>,米糠产量约为1 500万t,若能合理利用这些米糠资源进行制油,稻米油产量将超过200万t<sup>[2]</sup>,对缓解我国食用油自给率不足具有重要意义。稻米油的脂肪酸组成合理,其中油酸和亚油酸总占比近80%<sup>[3]</sup>,且油酸与亚油酸的比例约为1:1.1,接近世界卫生组织(WHO)推荐的最佳比例,有助于预防心血管疾病,维持脑细胞膜结构,缓解记忆衰退<sup>[4]</sup>,此外稻米油中还含有丰富的谷维素、生育酚、 $\gamma$ -谷甾醇、角鲨烯等营养物质。因此,稻米油也被WHO、日本油脂化学家协会(JOCS)和中国粮油学会(CCOA)等越来越多的机构和组织认可<sup>[5]</sup>。

稻米油中存在的微量营养成分使其具有良好的煎炸稳定性,是一种适合煎炸的优质油脂<sup>[6-8]</sup>。但煎炸时,高温使煎炸油发生水解、氧化、异构化、聚合和裂解等化学反应,产生许多危害人体健康的物质。在煎炸油中添加抗氧化剂可以有效减缓油脂的氧化酸败,减少有害物质的生成。近年来,研究表明长期使用一些合成抗氧化剂会刺激细胞凋亡,还有致癌致畸的风险,对人体产生危害<sup>[9-10]</sup>。因此,研究者们聚焦于使用天然抗氧化剂提升煎炸油的抗氧化性能,旨在提升煎炸油使用寿命的同时更好地保留煎炸油中的营养物质,并进一步增加煎炸食品的风味。潘东升<sup>[11]</sup>研究了脂溶性茶多酚对大豆油煎炸品质的影响,结果表明,添加脂溶性茶多酚可以增强大豆油的抗氧化能力,有效延缓其在煎炸过程中品质的劣变,且不会对食品风味产生影响;尹浩等<sup>[12]</sup>研究表明,当迷迭香提取物添加量为200 mg/kg时,能够有效延缓大豆油在煎炸过程中酸值和极性组分含量的增加,其氧化诱导期更长,稳定性更好;李鹏娟<sup>[13]</sup>向不同油脂中添加迷迭香提取物后进行煎炸实验,发现稻米油的煎炸性能明显优于大豆油和棕榈油。目前,国内外关于在煎炸油中添加天然抗氧化剂的研究较多,但缺少天然抗氧化剂对稻米油煎炸性能影响的系统研究。因此,本文比较了在油脂中应用较为广泛的茶多酚和迷迭香两种天然抗氧化剂对稻米油煎炸过程中酸值,过氧化值,极性组分含量,脂肪酸组成及含量,以及维生素E、谷维素、甾醇、苯并

芘(BaP)、反式脂肪酸、3-氯丙醇酯(3-MCPD酯)含量的影响,探究添加天然抗氧化剂的稻米油在煎炸过程中品质的变化,以期进一步提升稻米油的煎炸性能,为其在餐饮和食品加工行业的开发利用提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

#### 1.1.1 原料与试剂

稻米油(不含抗氧化剂),益海嘉里金龙鱼粮油食品股份有限公司提供;新鲜土豆,当地菜市场购买后于实验室去皮切条(10 cm × 5 cm × 1 cm);脂溶性茶多酚(纯度 $\geq 99\%$ ),西安明朗生物科技有限公司;脂溶性迷迭香提取物(食品级,纯度 $\geq 99\%$ ),上海瑞祥生物科技有限公司。

甾代内标标准品,德国CNW公司;混标( $\alpha$ -生育酚、 $\alpha$ -生育三烯酚、 $\beta$ -生育酚、 $\gamma$ -生育酚、 $\delta$ -生育酚,纯度99%),美国Supelco Analytical公司;混标( $\alpha$ -生育酚、 $\alpha$ -生育三烯酚、 $\beta$ -生育三烯酚、 $\gamma$ -生育三烯酚、 $\delta$ -生育三烯酚,纯度99%),马来西亚Sime Darby Plantation公司;植物甾醇混标(纯度 $> 95\%$ ),脂肪酸标准品,Sigma-Aldrich公司;二甲基亚砜、乙腈、正己烷、95%乙醇、异辛烷、冰乙酸、碘化钾、硫代硫酸钠、环己烷、叔丁基甲醚、氢氧化钠、甲醇、氯化钠、溴化钠、乙酸乙酯、乙醚、苯硼酸、无水硫酸铜、15种多环芳烃(PAHs)混合标准品,国药集团化学试剂有限公司;超纯水。

#### 1.1.2 仪器与设备

Rancimat 892 油脂氧化稳定性测定仪,瑞士万通中国有限公司;Agilent 7890A 597. 5C 气相色谱-质谱联用仪、Agilent 1200 型高效液相色谱仪(配Agilent G1314B 紫外检测器)、DB-EUPAH 专用色谱柱(20 m × 0.18 mm, 0.14  $\mu\text{m}$ ),安捷伦科技(中国)有限公司;UN1700 型紫外可见分光光度计,上海美析有限公司;超声波提取机,上海亚荣生化仪器厂;DZF-6021 真空干燥箱,上海博讯实业有限公司医疗设备厂;AB204-E 电子分析天平,上海泽生科技开发公司;针筒式微孔滤膜过滤器( $\Phi$  13 mm, 孔径0.45  $\mu\text{m}$ ),常州悦康医疗器材有限公司;ITO-81 型单缸电炸炉,广州市艾拓机电制造有限公司;Testo 270 极性组分检测仪,德国Testo 仪器国际贸易(上海)有限公司。

## 1.2 实验方法

### 1.2.1 抗氧化剂的添加

向稻米油中分别添加 200、400、600 mg/kg 的脂溶性迷迭香提取物与脂溶性茶多酚,在功率 500 W、温度 50 °C 条件下超声 20 min,促使其完全溶解。

### 1.2.2 煎炸实验

参考文献[13]的方法,向煎炸锅中加入 5 L 稻米油,加热至 180 °C,加入 50 g 大小相同处理好的土豆条,煎炸 3 min,每隔 15 min 煎炸一组样品,持续进行 30 h 的煎炸实验,煎炸过程中不添加新油,期间每隔 3 h 取约 80 mL 的样品,置于蓝盖瓶中,冷却后置于 -20 °C 冰箱中冷冻保存。

### 1.2.3 理化指标测定

氧化稳定性测定参照 GB/T 21121—2007《动植物油脂 氧化稳定性的测定(加速氧化测试)》,使用 Rancimat 法测定氧化诱导时间,设置温度 140 °C、气速 20 L/min;酸值测定参照 GB 5009.229—2016《食品安全国家标准 食品中酸价的测定》中的第一法 冷溶剂指示剂滴定法;过氧化值测定参照 GB 5009.227—2016《食品安全国家标准 食品中过氧化值的测定》第一法 滴定法;极性组分含量测定用 Testo 270 极性组分检测仪。

### 1.2.4 营养指标测定

脂肪酸组成及含量测定参照 GB 5009.168—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪酸的测定》第三法 归一化法;维生素 E 含量测定参照 GB/T 26635—2011《动植物油脂 生育酚及生育三烯酚含量测定 高效液相色谱法》;甾醇含量测定参照 GB/T 25223—2010《动植物油脂 甾醇组成和甾醇总量的测定 气相色谱法》;谷维素含量测定参照 LS/T 6121.1—2017《粮油检验 植物油中谷维素含量的测定 分光光度法》。

### 1.2.5 危害物指标测定

反式脂肪酸含量测定参照 GB 5009.257—2016《食品安全国家标准 食品中反式脂肪酸的测定》;BaP 含量测定参照 GB 5009.27—2016《食品安全国家标准 食品中苯并(a)芘的测定》;3-MCPD 酯含量测定参考文献[14]采用气相色谱-质谱法进行测定。分别称取 100 mg 油样于 A、B 两个 2 mL 离心管中,向两个离心管中分别加入 100 μL 内标物、300 μL 叔丁基甲醚,涡旋 30 s 后加入 200 μL 氢氧化钠-甲醇,静置 3.5 min,向离心管 A 中加入 600 μL 酸化氯化钠溶液,B 中加入 600 μL 酸化溴化钠溶液后,立刻涡旋 30 s,再分别加入 600 μL 异己烷进行萃取(涡旋 30 s,静置 5 min),弃去上层有机相,

重复加入异己烷进行二次萃取,异己烷萃取结束再分别加入 600 μL 乙醚-乙酸乙酯进行萃取(涡旋 60 s,静置 5 min),吸取上层有机相至含少量无水硫酸钠的离心管中,下层重复萃取 2 次,将 A、B 两管 3 次上层有机相收集在同一离心管中,涡旋 30 s 后,加入 100 μL 苯硼酸,涡旋 60 s,静置 5 min,移取上层清液到新的离心管中,氮气吹干,准确加入 400 μL 正己烷,涡旋 60 s,4 500 r/min 离心 3 min,吸取上清液,待测。气相色谱条件:进样量 2 μL,不分流进样;载气氦气 99.999%;升温程序为 85 °C 保持 0.5 min,以 6 °C/min 升至 150 °C,以 12 °C/min 升至 180 °C,以 25 °C/min 升至 280 °C,保持 7 min。质谱条件:电子轰击(EI);扫描方式选择离子监测模式(SIM);电离能量 70 eV;离子源温度 250 °C;传输线温度 280 °C。

### 1.2.6 数据处理

采用 Excel 2016、Origin 8.5 和 SPSS 17.0 对数据进行处理和分析,其中使用 Origin 8.5 软件进行制图,SPSS 17.0 软件进行显著性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 天然抗氧化剂添加量的选择

两种天然抗氧化剂添加量对稻米油氧化诱导时间的影响结果如图 1 所示。

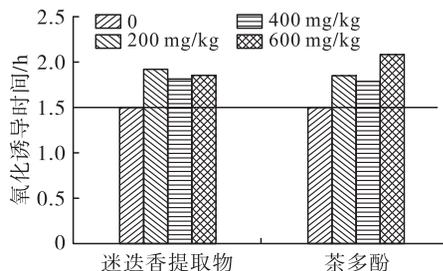


图 1 天然抗氧化剂添加量对稻米油氧化诱导时间的影响

由图 1 可知,不添加天然抗氧化剂的稻米油氧化诱导时间仅有 1.50 h。添加两种天然抗氧化剂的稻米油氧化诱导时间均明显延长。在添加迷迭香提取物的稻米油中,迷迭香提取物添加量为 200 mg/kg 时,氧化诱导时间最长,为 1.92 h。在添加茶多酚的稻米油中,茶多酚添加量为 600 mg/kg 时,氧化诱导时间最长,其次是添加量为 200 mg/kg 的稻米油。由于 GB 2760—2014《食品安全国家标准 食品添加剂使用标准》中规定茶多酚在纯油脂产品中添加限量为 400 mg/kg,因此综合比较选择迷迭香提取物与茶多酚的添加量均为 200 mg/kg 进行后续实验。

### 2.2 稻米油在煎炸过程中理化指标的变化

#### 2.2.1 酸值

添加不同天然抗氧化剂的稻米油其酸值随煎炸时间的变化如图 2 所示。

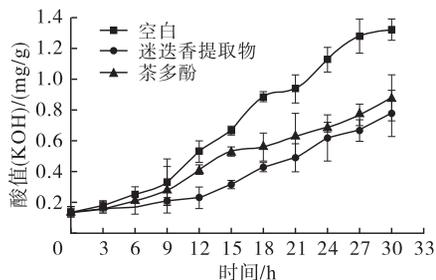


图2 稻米油在煎炸过程中酸值的变化

酸值是油脂变质程度的指标,表征油脂在长期保存过程中由于酶、热和微生物等因素发生水解生成的游离脂肪酸的含量。由图2可知,3种煎炸油的酸值在煎炸过程中均呈现上升的趋势。煎炸30 h,添加迷迭香提取物的稻米油、添加茶多酚的稻米油及未添加抗氧化剂的稻米油酸值(KOH)增幅分别为0.64、0.75 mg/g和1.01 mg/g,其中添加迷迭香提取物的稻米油酸值增幅最小。这可能是由于迷迭香提取物的抗氧化机制与茶多酚不同,茶多酚是通过结合游离基中断脂肪酸氧化的链式反应,以达到抑制脂质过氧化的能力,而迷迭香提取物的抗氧化能力源于其本身具有的抗氧化成分,如酚类、黄酮类、有机酸和萜类等物质<sup>[15]</sup>,这些物质可以清除脂质自由基,减缓油脂氧化,使油脂中产生的游离脂肪酸更少。茶多酚的抗氧化成分被氧化后会再发生自由基过氧化副反应,生成的副产物还有可能会诱发自由基的连锁反应<sup>[16]</sup>,因此添加茶多酚的稻米油煎炸后酸值的升幅较添加迷迭香提取物的稻米油更大。

### 2.2.2 过氧化值

添加不同天然抗氧化剂的稻米油其过氧化值随煎炸时间的变化如图3所示。

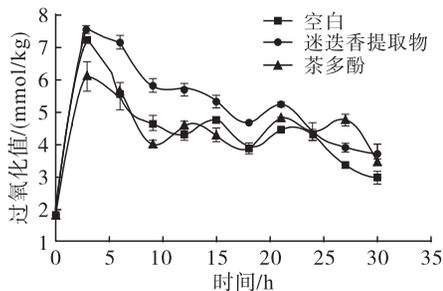


图3 稻米油在煎炸过程中过氧化值的变化

由图3可知,煎炸3 h时,3种煎炸油的过氧化值均最高,其中添加茶多酚的稻米油过氧化值最低,仅为6.12 mmol/kg,明显低于其他两组稻米油。煎炸3 h后,稻米油的过氧化值总体呈现波动下降趋势。这可能是由于在煎炸时,因高温产生的氧化还原反应会先使过氧化值升高,随后氢过氧化物分解为醛、酮、酸等小分子物质,导致过氧化值下降<sup>[17]</sup>。煎炸过程中,添加茶多酚的稻米油过氧化值波动最小。

### 2.2.3 极性组分含量

添加不同天然抗氧化剂的稻米油其极性组分含量随煎炸时间的变化如图4所示。

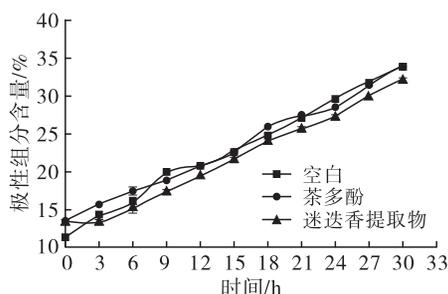


图4 稻米油在煎炸过程中极性组分含量的变化

由图4可知,3种煎炸油极性组分含量在煎炸过程中均呈现上升的趋势。这是因为在煎炸过程中油脂因氧化、水解产生醛、酮、酸和环氧化物等物质,导致极性组分含量不断升高<sup>[18]</sup>。添加茶多酚的稻米油与不添加抗氧化剂的稻米油极性组分含量皆在煎炸21 h后达到国标(GB 2716—2018)上限(27%),而添加迷迭香提取物的稻米油则在煎炸23 h后达到国标上限。两种添加了抗氧化剂的稻米油极性组分含量在煎炸初始时皆高于未添加抗氧化剂的稻米油,这可能是由于抗氧化剂与油脂中存在的天然伴随物,如生育酚和谷维素等产生拮抗作用,导致其初始极性组分含量略微升高<sup>[19]</sup>。

## 2.3 稻米油在煎炸过程中营养指标的变化

### 2.3.1 脂肪酸组成及含量

煎炸前后未添加抗氧化剂和添加不同天然抗氧化剂的稻米油中脂肪酸组成及含量变化见表1。

表1 煎炸前后稻米油的脂肪酸组成及含量

脂肪酸	未添加抗氧化剂		添加迷迭香提取物		添加茶多酚	
	煎炸前	煎炸后	煎炸前	煎炸后	煎炸前	煎炸后
C14:0	0.61 ± 0.01	0.55 ± 0.00	0.58 ± 0.01	0.57 ± 0.00	0.41 ± 0.00	0.58 ± 0.01
C16:0	24.02 ± 0.00	26.97 ± 0.02	24.76 ± 0.01	27.23 ± 0.01	25.86 ± 0.00	25.79 ± 0.02
C16:1	0.21 ± 0.01	0.20 ± 0.00	0.20 ± 0.00	-	0.17 ± 0.01	0.21 ± 0.01
C18:0	3.20 ± 0.10	3.00 ± 0.02	3.16 ± 0.01	3.31 ± 0.01	3.30 ± 0.00	3.09 ± 0.01

续表 1

脂肪酸	未添加抗氧化剂		添加迷迭香提取物		添加茶多酚	
	煎炸前	煎炸后	煎炸前	煎炸后	煎炸前	煎炸后
C18:1	42.64 ± 0.14	44.02 ± 0.02	41.74 ± 0.00	43.68 ± 0.08	43.79 ± 0.00	43.95 ± 0.00
C18:2	27.52 ± 0.01	23.91 ± 0.01	27.97 ± 0.00	23.62 ± 0.00	25.46 ± 0.01	24.68 ± 0.01
C18:3	0.64 ± 0.02	0.28 ± 0.02	0.83 ± 0.01	0.36 ± 0.02	0.78 ± 0.00	0.51 ± 0.00
C20:0	0.67 ± 0.01	0.62 ± 0.01	0.26 ± 0.02	0.71 ± 0.00	0.23 ± 0.00	0.66 ± 0.01
C20:1	0.49 ± 0.00	0.45 ± 0.01	0.48 ± 0.02	0.51 ± 0.01	-	0.54 ± 0.00
SFA	28.50	31.14	28.77	31.82	29.80	30.12
MUFA	43.34	44.67	42.43	44.19	43.96	44.69
PUFA	28.16	24.19	28.81	23.98	26.24	25.19

注: - 表示未检出,下同

由表 1 可知,3 种稻米油煎炸后脂肪酸含量变化趋势一致,饱和脂肪酸(SFA)与单不饱和脂肪酸(MUFA)含量上升,而多不饱和脂肪酸(PUFA)含量下降。出现这种情况的原因可能是,在煎炸过程中 PUFA 发生氧化聚合反应,生成 MUFA 与 SFA<sup>[20]</sup>。添加迷迭香提取物和茶多酚的稻米油其脂肪酸含量在煎炸前后的波动明显小于未添加抗氧化剂的稻米油,说明在稻米油中添加天然抗氧化剂可以显著提升其脂肪酸的稳定性。

### 2.3.2 维生素 E 含量

添加不同天然抗氧化剂的稻米油其维生素 E 含量随煎炸时间的变化如表 2 所示。

表 2 稻米油在煎炸过程中

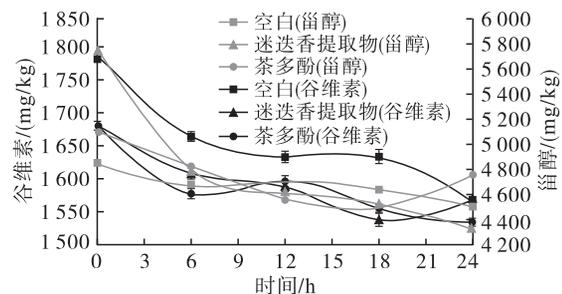
稻米油	时间/h	维生素 E 含量的变化				总量
		$\alpha$ -生育酚	$\gamma$ -生育酚	$\alpha$ -生育三烯酚	$\gamma$ -生育三烯酚	
未添加抗氧化剂	0	22.41	6.41	13.78	23.96	66.63
	6	10.84	1.53	3.46	5.61	21.41
	18	-	-	-	-	-
添加迷迭香提取物	0	20.78	8.91	14.49	22.83	67.03
	6	17.15	4.09	8.49	11.09	40.84
	18	3.67	-	-	-	3.67
添加茶多酚	0	16.84	3.55	10.35	14.79	45.58
	6	10.48	0.43	3.47	2.88	17.30
	18	-	-	-	-	-

由表 2 可知,煎炸过程中,3 种稻米油的维生素 E 含量都呈现下降的趋势,在煎炸 6 h 时,未添加抗氧化剂的稻米油中维生素 E 含量由 66.63 mg/100 g 减少至 21.41 mg/100 g,添加迷迭香提取物的稻米油中维生素 E 含量由 67.03 mg/100 g 减少至 40.84 mg/100 g,添加茶多酚的稻米油中维生素 E 含量则

由 45.58 mg/100 g 下降至 17.30 mg/100 g,分别下降了 67.8%、39.1%、62.0%。在煎炸 18 h 时,仅添加迷迭香提取物的稻米油可以检出少量  $\alpha$ -生育酚,其余油样中维生素 E 均未检出,表明添加迷迭香提取物的稻米油在煎炸过程中能更有效地保留维生素 E。

### 2.3.3 谷维素和甾醇含量

添加不同天然抗氧化剂的稻米油其谷维素和甾醇( $\beta$ -谷甾醇、豆甾醇、菜籽甾醇)含量随煎炸时间的变化如图 5 所示。



注:煎炸 24 h 后,谷维素及甾醇含量变化较平缓,因此未列出结果

图 5 稻米油在煎炸过程中谷维素及甾醇含量的变化

由图 5 可知,煎炸过程中,甾醇及谷维素含量都随煎炸时间的延长而不断降低。煎炸 24 h 时,添加迷迭香提取物的稻米油甾醇保留率为 78.52%,而添加茶多酚的稻米油甾醇保留率可达 90% 以上,高于未添加抗氧化剂的稻米油,说明添加茶多酚可以有效防止稻米油在煎炸过程中甾醇的流失,这可能是由于稻米油中的谷维素作为内源性抗氧化剂,与茶多酚存在协同效应,谷维素被降解时酯键断裂,促使甾醇类物质的生成<sup>[21-22]</sup>。总体而言,3 种稻米油中谷维素含量都没有大幅度流失,未添加抗氧化剂的稻米油、添加迷迭香提取物的稻米油和添加茶多酚的稻米油在煎炸 24 h 时谷维素保留率分别为

87.84%、93.24%和91.47%，说明添加抗氧化剂可以防止稻米油在煎炸过程中谷维素的流失。煎炸初期，未添加抗氧化剂的稻米油谷维素含量下降速度更快，原因可能是谷维素作为稻米油中的主要抗氧化成分被氧化，其氧化产物依旧具有抗氧化能力<sup>[23]</sup>。随着煎炸时间的延长，稻米油中谷维素的消

耗速率随着谷维素氧化产物的生成而逐渐下降，直至趋于稳定。

## 2.4 稻米油在煎炸过程中危害物指标的变化

### 2.4.1 反式脂肪酸(TFA)含量

煎炸前后未添加抗氧化剂和添加不同天然抗氧化剂的稻米油中反式脂肪酸含量变化见表3。

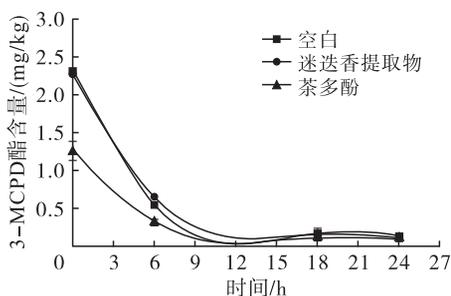
表3 煎炸前后稻米油的反式脂肪酸含量

脂肪酸	未添加抗氧化剂		添加迷迭香提取物		添加茶多酚	
	煎炸前	煎炸后	煎炸前	煎炸后	煎炸前	煎炸后
C18:1t	0.088 ± 0.001	0.165 ± 0.001	0.094 ± 0.000	0.195 ± 0.000	0.101 ± 0.000	0.172 ± 0.001
C18:2t	0.041 ± 0.002	0.055 ± 0.003	0.050 ± 0.000	0.060 ± 0.001	0.051 ± 0.001	0.059 ± 0.000
C18:3t	0.483 ± 0.003	0.509 ± 0.001	0.479 ± 0.001	0.513 ± 0.001	0.425 ± 0.000	0.455 ± 0.001
TFA	0.612	0.729	0.622	0.768	0.577	0.686

由表3可知，煎炸后，未添加抗氧化剂的稻米油、添加迷迭香提取物的稻米油及添加茶多酚的稻米油中反式脂肪酸含量分别增至0.729%、0.768%、0.686%。添加茶多酚可以有效减少反式脂肪酸的生成，涨幅仅为0.109个百分点，明显优于未添加抗氧化剂稻米油的(涨幅为0.117个百分点)，而添加迷迭香提取物的稻米油反式脂肪酸含量涨幅则高达0.146个百分点。

### 2.4.2 3-MCPD酯含量

添加不同天然抗氧化剂的稻米油其3-MCPD酯含量随煎炸时间的变化如图6所示。



注:24 h后3-MCPD酯未检出,因此未列出结果

图6 稻米油在煎炸过程中3-MCPD酯含量的变化

由图6可知,3种稻米油在煎炸过程中3-MCPD酯的含量逐渐降低。这是因为3-MCPD酯在高温条件下会发生热降解,3-MCPD酯的热降解速率大于其生成速率,导致3种稻米油在煎炸过程中3-MCPD酯的含量不断降低<sup>[24]</sup>。3种稻米油在煎炸后3-MCPD酯的含量基本相同,这说明煎炸达到一定时间后,两种天然抗氧化剂对3-MCPD酯含量影响不大。添加天然抗氧化剂对稻米油中3-MCPD酯含量的变化不会产生显著影响。

### 2.4.3 BaP含量

添加不同天然抗氧化剂的稻米油其BaP含量随煎炸时间的变化如图7所示。

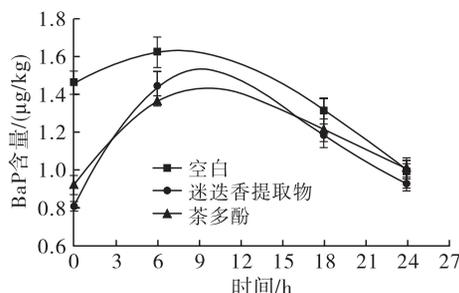


图7 稻米油在煎炸过程中BaP含量的变化

由图7可知,煎炸过程中,3种稻米油的BaP含量均表现出先增加后下降的趋势,这是因为在煎炸初期,高温促使BaP不断生成,但是随着煎炸的不断进行,BaP由于煎炸温度等因素的影响发生了化学转化,同时还有部分迁徙到油烟或炸物中,从而导致BaP的减少<sup>[25]</sup>。添加抗氧化剂的稻米油在煎炸前后BaP含量皆低于未添加抗氧化剂的稻米油,其中煎炸后添加迷迭香提取物的稻米油BaP含量最低,为0.92 mg/kg,说明添加抗氧化剂可以有效降低稻米油在煎炸过程中的BaP含量。

## 3 结论

茶多酚和迷迭香提取物的最佳添加量均为200 mg/kg。在煎炸过程中,添加茶多酚的稻米油过氧化值最高值最小(6.12 g/100 g),反式脂肪酸的涨幅仅为0.109个百分点。煎炸结束时添加迷迭香提取物的稻米油酸值(KOH)增幅最小(0.64 mg/g),极性组分含量到达27%的时间最迟(23 h), $\alpha$ -生育酚和谷维素的保留率最高,BaP的含量最低。添加天然抗氧化剂后,稻米油的脂肪酸煎炸稳定性优于

未添加抗氧化剂的。综合分析,迷迭香提取物为更具有优势的天然抗氧化剂。天然抗氧化剂可以有效提升煎炸油的煎炸性能,但是目前我国天然抗氧化剂的应用手段还较为单一,研究不够深入,种类也较少。应进一步深入研究天然抗氧化剂的安全性和抗氧化机制,使其食品安全风险评估体系更加健全,加强新型天然抗氧化剂和复配抗氧化剂的开发利用,开创天然抗氧化剂应用新前景。

#### 参考文献:

- [1] 国家统计局. 中华人民共和国 2021 年国民经济和社会发展统计公报[J]. 中国统计,2022(3):9-26.
- [2] 傅山铖,相海,任嘉嘉,等. 米糠高湿高温调质膨化新技术[J]. 农业工程,2021,11(8):67-74.
- [3] LATHA R B, NASIRULLAH D R. Physico-chemical changes in rice bran oil during heating at frying temperature [J]. J Food Sci Technol, 2014, 51(2): 335-340.
- [4] 王炜,张伟敏. 单不饱和脂肪酸的功能特性[J]. 中国食物与营养,2005,12(4):44-46.
- [5] SINGANUSONG R, JACOBY J J. 米糠油的营养与应用综述[J]. 粮油食品科技,2021,29(5):21-25.
- [6] 王宇晖,张雅雯,刘欣. 米糠油的营养价值及加工技术新进展[J]. 食品安全导刊,2019,13(6):154.
- [7] 徐立荣,常佳睿,梅雪,等. 不同煎炸阶段薯条和煎炸油中关键风味成分分析[J]. 粮油食品科技,2022,30(1):28-38.
- [8] PAL Y P, PRATAP A P. Rice bran oil: a versatile source for edible and industrial applications [J]. J Oleo Sci, 2017, 66(6): 551-556.
- [9] ESKANDANI M, HAMISHEHKAR N, DOLATABADI J E N. Cytotoxicity and DNA damage properties of *tert*-butylhydroquinone (TBHQ) food additive [J]. Food Chem, 2014, 153:315-320.
- [10] MACARI E R, SCHAEFFER E K, WEST R J, et al. Simvastatin and *t*-butylhydroquinone suppress *KLF1* and *BCL11A* gene expression and additively increase fetal hemoglobin in primary human erythroid cells [J]. Blood, 2013, 121(5): 830-839.
- [11] 潘东升. 脂溶性茶多酚对大豆油煎炸品质的影响[J]. 粮食与油脂,2021,34(11):72-75,82.
- [12] 尹浩,姜碧若,曾裕,等. 迷迭香提取物对一级大豆油煎炸品质的影响[J]. 食品工业, 2022, 43(2):153-156.
- [13] 李鹏娟. 迷迭香抗氧化物对薯条煎炸油品质的影响研究[D]. 广州:暨南大学,2020.
- [14] 赵菁. 稻米油加工安全性评价[D]. 武汉:武汉轻工大学,2018.
- [15] 刘凤霞,王莹,薛刚,等. 迷迭香脂溶性提取物在梔子油中的抗氧化性研究[J]. 中国油脂,2019,44(1):101-104.
- [16] 刘荣,郑旭煦,殷钟意. 天然抗氧化剂在植物油中的应用研究进展[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2015,32(10):43-47.
- [17] 王澍,周玮婧,刘梦婷,等. 棕榈油在面制品煎炸过程中的品质变化[J]. 食品工业,2022,43(2):110-114.
- [18] GUILLEN M D, CABO N. Fourier transform infrared spectra data versus peroxide and anisidine values to determine oxidative stability of edible oils [J]. Food Chem, 2002, 77(4): 503-510.
- [19] TANG L, LIU R R, XU Y. Synergistic and antagonistic interactions of  $\alpha$ -tocopherol,  $\gamma$ -oryzanol and phytosterol in refined coconut oil [J/OL]. LWT - Food Sci Technol, 2022, 154: 112789 [2022-09-13]. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112789>.
- [20] LIU R R, XU Y, CHANG M. Antioxidant interaction of  $\alpha$ -tocopherol,  $\gamma$ -oryzanol and phytosterol in rice bran oil [J/OL]. Food Chem, 2021, 34: 128431 [2022-09-13]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128431>.
- [21] 陶建明. 基于谷维素热稳定性的稻米油油炸品质变化研究[D]. 重庆:西南大学,2020.
- [22] RAMADAN M F, AMER MM A, SULIEMAN A E M. Correlation between physicochemical analysis and radical-scavenging activity of vegetable oil blends as affected by frying of French fries [J]. Eur J Lipid Sci Technol, 2006, 108(8): 670-678.
- [23] LERMA-GARCIA M J, HERRERO-MARTINEZ J M, SIMO-ALFONSO E F, et al. Composition, industrial processing and applications of rice bran  $\gamma$ -oryzanol [J]. Food Chem, 2009, 115(2): 389-404.
- [24] 张渊博,王小三,刘睿杰,等. 高油酸葵花籽油煎炸过程中 MCPD 酯及缩水甘油酯的变化[J]. 中国油脂,2018, 43(7):87-91.
- [25] 刘佳骥. BaP 在油炸薯条过程中的化学转化和迁移研究[D]. 江苏 扬州:扬州大学,2020.