

李婉蓉, 古丽乃再尔·斯热依力, 张文昊, 等. 不同油脂及复配抗氧化剂对芝麻饅抗氧化作用的研究 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(6): 186-195. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021070033

LI Wanrong, Gulnazar Sireyil, ZHANG Wenhao, et al. Study on the Antioxidant Effect of Different Fats and Compound Antioxidants on Sesame Naan[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(6): 186-195. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021070033

· 工艺技术 ·

# 不同油脂及复配抗氧化剂对芝麻饅 抗氧化作用的研究

李婉蓉, 古丽乃再尔·斯热依力, 张文昊, 伍昊, 黄文书\*, 冯作山, 白羽嘉  
(新疆农业大学食品科学与药学院, 新疆乌鲁木齐 830052)

**摘要:** 本文采用加速氧化法对芝麻饅贮藏过程 (60±1) °C 中的酸价、过氧化值进行了一系列测定。探究了不同油脂、抗氧化剂及增效剂对芝麻饅抗氧化效果的影响, 在此基础上采用 D-最优混料设计复合抗氧化剂配方。结果表明: 在 60 °C 的条件下, 相较于黄油、菜籽油、葵花油, 添加棕榈油能有效延缓芝麻饅的氧化酸败。运用 D-最优混料设计对筛选出的抗氧化剂进行配方优化, 结果表明: 配方为 TBHQ 0.007%, BHA 0.005%, 抗坏血酸 0.008% 时, 芝麻饅在 60 °C 的条件下贮藏至第 3 d 时的酸价为 0.6 mg/g, 过氧化值为 0.005 g/100 g, 经验证, 添加优化配方的芝麻饅在相同条件下的酸价为 0.628±0.017 mg/g, 过氧化值为 0.0060±0.0003 g/100 g, 与预测值相差较小, 芝麻饅的抗氧化效果最好。在 30 °C 的条件下, 实验组芝麻饅在贮藏 20 d 时的酸价为 1.320 mg/g, 过氧化值为 0.031 g/100 g, 有效地抑制了芝麻饅油脂的氧化酸败, 为延长芝麻饅的贮藏期提供了参考。

**关键词:** 芝麻饅, 油脂, 氧化酸败, 抗氧化剂

中图分类号: TS202.3

文献标识码: B

文章编号: 1002-0306(2022)06-0186-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021070033

本文网刊:



## Study on the Antioxidant Effect of Different Fats and Compound Antioxidants on Sesame Naan

LI Wanrong, Gulnazar Sireyil, ZHANG Wenhao, WU Hao, HUANG Wenshu\*, FENG Zuoshan, BAI Yujia

(College of Food Science and Pharmacy, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

**Abstract:** The accelerated oxidation method was used to determine the acid value and peroxide value of sesame naan during storage (60±1) °C. The effects of different oils, antioxidants and synergists on the antioxidant effect of sesame naan were investigated by single factor experiments. On this basis, response surface methodology (RSM) was used to optimize the compound antioxidant formula. The results showed that compared with butter, rapeseed oil and sunflower oil, the addition of palm oil could effectively delay the oxidative rancidity of sesame naan at 60 °C. D-optimal mixture design was used to optimize the formulation of the screened antioxidants, and the results showed that when the formula was TBHQ 0.007%, BHA 0.005% and ascorbic acid 0.008%, the acid value and peroxide value of sesame naan stored at 60 °C for the third day were 0.6 mg/g and 0.005 g/100 g. It was verified that the acid value and peroxide value of sesame naan added with the optimized formula were 0.628±0.017 mg/g and 0.0060±0.0003 g/100 g under the same conditions, which was slightly different from the predicted value, sesame naan had the best antioxidant effect. When stored at 30 °C for 20 days, the acid value and peroxide value of sesame naan in the experimental group were 1.320 mg/g and 0.031 g/100 g, which effectively inhibited the oxidative rancidity of sesame naan oil and would provide a reference for prolonging the storage period of sesame naan.

**Key words:** sesame naan; oils; oxidative rancidity; antioxidants

收稿日期: 2021-07-05

基金项目: 自治区重点研发计划项目 (2021B02001-2)。

作者简介: 李婉蓉 (1997-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 农产品加工, E-mail: 2656901733@qq.com。

\* 通信作者: 黄文书 (1975-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 农产品加工, E-mail: xjnd-hws@126.com。

饅是以小麦粉或杂粮粉为原料,加少许盐、水和酵母,经发酵后擀制圆形饅胚,并用饅针在饅胚印上特殊花纹,撒上辅料,贴在饅坑坑壁上烘烤而成的圆形烤饼。饅种类丰富、历史悠久,是新疆各民族饮食文化的重要组成部分,深受各族人民的喜爱<sup>[1]</sup>。近年来,随着全疆各地饅产业园的发展和市场的不断壮大,饅逐渐走出了新疆,销往全国各地。但由于芝麻饅油脂含量较高,在远销的过程中极易发生氧化哈败的现象,货架期仅有 5~7 d<sup>[2]</sup>,严重影响了人体健康和饅产业的发展。因此找到一种既能降低成本又能有效控制芝麻饅氧化哈败的方式对饅产业来说具有十分重要的意义。

氧化酸败是油脂发生自动氧化或微生物氧化而形成的一种品质劣变的现象<sup>[3]</sup>,氧化酸败不仅会影响食品的营养质量,还可能对人体的身心健康产生多方面的危害,如消化不良、呕吐、腹泻等,严重可致癌<sup>[4-6]</sup>。添加抗氧化剂是食品加工中较为常见的一种延缓油脂氧化酸败的方式,它能吸收参与脂肪酸氧化的自由基。常用的有 BHA、BHT、TBHQ、PG 等人工合成类抗氧化剂,以及维生素类、多酚类等天然抗氧化剂<sup>[7]</sup>。多项研究表明,两种或两种以上的抗氧化剂复配使用、抗氧化剂与增效剂协同使用均有增强抗氧化的效果<sup>[8-9]</sup>。目前,已有许多研究人员将复配抗氧化剂广泛应用到了饼干<sup>[10]</sup>、桃酥<sup>[11]</sup>、烧饼<sup>[12]</sup>、蘑菇酱<sup>[13]</sup>、香肠<sup>[14]</sup>、火腿<sup>[15]</sup>以及其他食品中以达到延长产品贮藏期的效果,根据研究结果表明复配抗氧化剂可明显延长以上产品的贮藏期,且能改善因油脂氧化酸败引起的一系列色、香、味及营养物质的劣变,但尚未有学者将复配抗氧化剂应用于芝麻饅的制作生产中。

油脂是制作饅的必需品之一,在饅的传统制作工艺中一般使用植物油<sup>[16]</sup>,本课题组前期通过在全疆各地的饅产业园调研发现,目前在芝麻饅的生产中,最常用的油脂为菜籽油,故本试验均采用菜籽油作为对照试验。本研究通过添加 4 种油脂和 6 种抗氧化剂以及抗氧化剂复配试验分别探究了不同油脂及抗氧化剂对芝麻饅贮藏过程中酸价和过氧化值的影响,并结合 D-最优混料设计试验优化了复配抗氧化剂的配方,为延长芝麻饅的货架期和工业化生产提供了一定的理论和试验依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料与仪器

特制一等小麦粉(蛋白质 11%)、加碘精制盐、白糖、酵母、菜籽油、葵花油、黄油、棕榈油、鸡蛋购于南昌路友好超市;叔丁基对苯二酚(TBHQ)、丁基羟基茴香醚(BHA)、2,6-二叔丁基对甲酚(BHT)、茶多酚、维生素 E、植酸、抗坏血酸 食品级,英博生物科技有限公司;石油醚(30~60 ℃)、碘化钾、可溶性淀粉 天津市致远化学试剂有限公司;乙醚 国药集团化学试剂有限公司;异丙醇 天津永晟精细化

工有限公司;冰乙酸 天津市鑫铂特化工有限公司;三氯甲烷 成都市科隆化学品有限公司;以上试剂均为分析纯。

电饅坑 新疆想象环保科技有限公司;H20F 型立式双速和面机 广东力丰机械制造有限公司;JEA202 型电子天平 上海浦春计量仪器有限公司;RE-52AA 型旋转蒸发器 上海亚荣生化仪器厂;NH-A-1808 型色差仪 上海雷磁仪器有限公司。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 芝麻饅的制备

1.2.1.1 工艺流程 称取原料(小麦粉、油脂、酵母、白砂糖、盐、鸡蛋)→和面→分割→一次醒发→二次醒发→成型→烤制

1.2.1.2 操作要点 a.和面:称取特制一等小麦粉 500 g,依次加入 10% 油脂、1.8% 盐、3% 白砂糖、0.52% 酵母、6% 鸡蛋、40% 水(以上配料均以面粉为基准),将所有材料均匀混合后,揉成光滑的面团。

b.一次醒发:将和好的面团分割成各为 250 g 的面剂,揉成表面光滑的椭圆状,用保鲜膜包裹后置于 30 ℃ 的条件下醒发 1 h 左右。

c.二次醒发:将一次醒发后的面剂分别压扁成饼状,以便排出多余的气体,之后置于 30 ℃ 的条件下进行二次醒发。

d.成型:用擀面杖将二次醒发后的面剂擀制成中间薄边缘厚(饅心:0.5~0.7 cm、饅边:1.2~1.5 cm)的饅坯,饅坯成型后用饅针在饅心均匀印上特殊的花纹。

e.烤制:在成型的饅坯表面均匀沾上经过预处理的芝麻,然后将饅坯置于饅枕上,向饅坯底部均匀喷洒盐水,用饅枕将饅坯贴在饅坑壁上(温度:200~210 ℃)烤制 10~13 min。

1.2.2 不同油脂对芝麻饅贮藏品质的影响 分别在和面时添加 10%(以面粉添加量为基准)的菜籽油、黄油、棕榈油、葵花油,与其他材料均匀混合后制作芝麻饅,将烤制好的芝麻饅冷却后装入包装袋中用塑封机封口,置于恒温干燥箱中(60±1) ℃ 进行贮藏,每隔 3 d 取一次样,考察不同油脂制成的芝麻饅在贮藏期间氧化酸败的情况,选出最优油脂,进行后续实验。

1.2.3 单一抗氧化剂对芝麻饅贮藏品质的影响 按照 GB 2760-2014 的规定,BHA、BHT、TBHQ、维生素 E、茶多酚在焙烤类食品中的最大添加量分别为 0.2、0.2、0.2、0.2、0.4 g/kg(以油脂中的含量计),因此本试验均选取最大添加量来考察不同抗氧化剂的抗氧化效果。称取原料,分别在油脂(以菜籽油计)中加入 BHA、BHT、TBHQ、维生素 E、茶多酚等五种抗氧化剂,与油脂混合后根据芝麻饅工艺制得成品,冷却后密封包装置于恒温干燥箱中(60±1) ℃ 进行贮藏,每隔 3 d 取一次样,考察不同抗氧化剂的抗氧化效果,选出最优单一抗氧化剂,进行后续实验。

1.2.4 不同复配方式对芝麻饅贮藏品质的影响 在不同单一抗氧化剂基础上,选择三种效果较好的抗氧化剂进行两两复配,同时选择植酸和抗坏血酸两种增效剂与之复配,考察添加不同复配抗氧化剂(以菜籽油计)制成的芝麻饅在贮藏期间氧化酸败的情况,复配方式如表 1 所示。

表 1 抗氧化剂的不同复配方式  
Table 1 Different compounding methods

| 组别             | 添加剂种类及添加量    |              |               |             |               |
|----------------|--------------|--------------|---------------|-------------|---------------|
|                | 0.01%<br>BHA | 0.01%<br>BHT | 0.01%<br>TBHQ | 0.01%<br>植酸 | 0.01%<br>抗坏血酸 |
| X <sub>1</sub> | √            | √            |               |             |               |
| X <sub>2</sub> | √            |              | √             |             |               |
| X <sub>3</sub> |              | √            | √             |             |               |
| X <sub>4</sub> | √            |              | √             | √           |               |
| X <sub>5</sub> | √            |              | √             |             | √             |

1.2.5 D-最优混料设计实验 在前期试验的基础上,选取 TBHQ(A)、BHA(B)、抗坏血酸(C)3 种添加剂在油脂中的添加量为变量,按照国家规定的标准(抗氧化剂复配使用时,各自用量占其最大使用量的比例之和应保持在 1 的范围内)<sup>[17]</sup>,本试验选择 Design Expert(8.0.6)软件中的 D-optimal 法,以酸价、过氧化值为响应值对抗氧化剂的复配工艺进行优化,设计混料试验的因素及水平表(见表 2),建立混料试验模型。每组做 3 组平行试验,结果求平均值。

表 2 混料试验优化设计  
Table 2 Optimum design of mixture test

| 因素 | 物料   | 最低值    | 最高值    |
|----|------|--------|--------|
| A  | TBHQ | 0.005% | 0.015% |
| B  | BHA  | 0.005% | 0.015% |
| C  | 抗坏血酸 | 0      | 0.01%  |

### 1.2.6 指标测定

1.2.6.1 酸价的测定 参照 GB 5009.229-2016 进行测定<sup>[18]</sup>。

1.2.6.2 过氧化值的测定 参照 GB 5009.227-2016 进行测定<sup>[19]</sup>。

1.2.6.3 色差的测定 芝麻饅色差的测定参照孙含<sup>[20]</sup>的方法稍作修改,用便携式色差仪对芝麻饅成品的饅心和饅边分别进行色差测定,每组重复测定 6 次取

平均值。

1.2.6.4 感官评价 邀请 10 人(均为食品专业学生)组成感官品评专家小组,根据芝麻饅感官评价表对芝麻饅的气味、口感进行感官评价,每个样品每人评价一次,最终分取评分的平均值。参与感官评定人员不宜过饿或者过饱,评定下一组样品之前必须需要用温白开水漱口,评定过程中参评人员间不得相互交谈。芝麻饅感官评价表如表 3 所示(芝麻饅的感官评价参照刘荣等<sup>[21]</sup>的评价标准稍作修改)。

表 3 芝麻饅感官评价标准  
Table 3 Sensory evaluation of sesame naan

| 项目 | 评分标准                 | 得分   |
|----|----------------------|------|
| 气味 | 香味浓郁、无不良气味           | 8~10 |
|    | 香味一般,有轻微的异味          | 5~7  |
|    | 香味清淡、有不良气味           | 2~4  |
| 口感 | 口感松软酥脆、软硬适中,不黏牙      | 8~10 |
|    | 口感较酥脆、软硬较适中、有轻微黏牙或咯牙 | 5~7  |
|    | 干硬、咯牙、黏牙、口感差         | 2~4  |

### 1.3 数据处理

运用 Origin 2018、SPSS26.0、Design Expert (8.0.6)对数据进行分析与统计处理,显著性水平  $P < 0.05$ ,每组实验重复三次。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同油脂对芝麻饅贮藏品质的影响

2.1.1 不同油脂对芝麻饅酸价的影响 油脂是制作芝麻饅时不可或缺的原料之一。油脂的添加虽然使芝麻饅形成了独特的口感,但也极易使芝麻饅在贮藏运输的过程中受到光、热、氧气、微生物、湿度等的影响,从而引起芝麻饅的氧化哈败。添加不同油脂后芝麻饅贮藏过程中酸价的变化如表 4 所示,棕榈油、葵花油、黄油、菜籽油的初始酸价分别为 0.604、0.181、0.822、0.143 mg/g;经加工后芝麻饅的酸价在第 0 d 分别同比增长了 36%、80.1%、44%、85%,各组之间存在明显差异。随着贮藏时间的不断延长,芝麻饅的酸价呈现出先降低后升高的趋势,这种变化趋势在本文后续的试验中也多次出现,这可能跟芝麻饅的烤制方式有关。有研究表明,加热温度越高酸价上升越快<sup>[22]</sup>,芝麻饅在 200 °C 左右的饅坑中烤制而成,在此期间随着烤制时间的延长,油脂中的不饱和脂肪

表 4 不同油脂对芝麻饅酸价的影响

Table 4 Effect of different oils and fats on acid value of sesame naan

| 贮藏天数(d) | 棕榈油                       | 葵花油                       | 黄油                        | 菜籽油                        |
|---------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|
| 原油      | 0.604±0.019 <sup>ab</sup> | 0.181±0.005 <sup>aA</sup> | 0.822±0.030 <sup>cC</sup> | 0.143±0.016 <sup>aA</sup>  |
| 0       | 0.949±0.009 <sup>dC</sup> | 0.909±0.003 <sup>dA</sup> | 1.466±0.003 <sup>dD</sup> | 0.933±0.004 <sup>bB</sup>  |
| 3       | 0.781±0.007 <sup>bA</sup> | 0.831±0.010 <sup>bC</sup> | 1.256±0.007 <sup>eD</sup> | 0.799±0.019 <sup>cAB</sup> |
| 6       | 0.789±0.007 <sup>bb</sup> | 0.841±0.001 <sup>bC</sup> | 1.262±0.015 <sup>bd</sup> | 0.749±0.007 <sup>bA</sup>  |
| 9       | 0.767±0.010 <sup>bA</sup> | 0.837±0.013 <sup>bb</sup> | 1.327±0.015 <sup>cC</sup> | 0.783±0.013 <sup>cA</sup>  |
| 12      | 0.834±0.009 <sup>cA</sup> | 0.867±0.008 <sup>cA</sup> | 1.989±0.001 <sup>eb</sup> | 0.871±0.009 <sup>cA</sup>  |

注: 同列标注不同小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ ), 同行标注不同大写字母表示差异显著( $P < 0.05$ ); 表5~表7同。

酸在高温的作用下不断降解为游离脂肪酸、氢过氧化物等物质<sup>[23]</sup>, 游离脂肪酸含量的升高进一步导致芝麻饅第 0 d 酸价的升高。在后期 60 °C 的贮藏过程中, 饱和脂肪酸分解生成游离脂肪酸的速度逐渐降低, 且分解产生的其他产物如氢过氧化物等进一步分解成小分子酸与脂肪酸分子发生聚合反应使得油脂中游离脂肪酸的含量降低, 酸价也随之降低, 进而产生了芝麻饅酸价先降低再升高的现象。该现象与李伟岸<sup>[24]</sup>的研究结果相似。贮藏至第 12 d 时, 各组芝麻饅的酸价相较 4 种油脂的初始酸价而言分别增长了 28%、79%、59%、84%, 结果表明添加棕榈油对抑制芝麻饅酸价的效果最为显著( $P<0.05$ ), 黄油的效果次之, 葵花油和菜籽油的效果较差。有相关研究报告, 油脂氧化的速度与其自身脂肪酸的构成有很大的关系<sup>[25]</sup>, 双键越多的脂肪酸越容易发生氧化, 且亚油酸含量较低的油脂, 其  $\alpha$ -生育酚降解的速度越慢<sup>[26-27]</sup>, 能有效缓解油脂氧化的速度。棕榈油和葵花油的饱和脂肪酸的含量分别为 42% 和 14%, 亚油酸的含量分别为 10.76%、61.39%<sup>[28]</sup>, 通过比较四组样品贮藏期酸价的变化趋势可知, 棕榈油的氧化特性较稳定, 葵花油和菜籽油的稳定性较差。

**2.1.2 不同油脂对芝麻饅过氧化值的影响** 过氧化值是评价芝麻饅食用品质的重要指标之一。添加不同油脂对芝麻饅贮藏过程中过氧化值的影响如表 5 所示, 在贮藏期间, 4 组芝麻饅的过氧化值均呈现出逐渐升高的趋势, 过氧化值分别由第 0 d 的 0.010、0.013、0.014、0.008 g/100 g 升高至第 12 d 的 0.033、0.228、0.032、0.047 g/100 g, 其中棕榈油芝麻饅的过氧化值在贮藏 0~6 d 时, 整体低于其他三组, 差异显著( $P<0.05$ )。贮藏第 9~12 d 时, 黄油和棕榈油的过氧化值均低于葵花油和菜籽油, 且黄油、棕榈油之间

差异不显著( $P>0.05$ )。黄油、棕榈油、菜籽油、葵花油的饱和脂肪酸含量分别为 56%<sup>[29]</sup>、48.77%、7%、11%<sup>[30]</sup>, 在贮藏过程中油脂的不饱和脂肪酸的双键易与氧发生反应产生氢过氧化物导致芝麻饅过氧化值的升高, 黄油和棕榈油的饱和脂肪酸含量较其他两种油脂高, 油脂的氧化反应较为缓慢, 使得过氧化值较低, 而葵花油和菜籽油因为含有大量的不饱和脂肪酸, 遇高温易发生氧化反应生成氢过氧化物, 导致芝麻饅的过氧化值升高。

## 2.2 单一抗氧化剂对芝麻饅贮藏品质的影响

**2.2.1 单一抗氧化剂对芝麻饅酸价的影响** 添加不同抗氧化剂的芝麻饅在贮藏期间的酸价变化如表 6 所示, 在 0~12 d 的贮藏期内, 芝麻饅的酸价均呈现出先增大后减小的趋势, 添加抗氧化剂的种类不同, 每组芝麻饅酸价变化差异明显。由表 6 可以看出, 贮藏至第 6~9 d 时, 添加茶多酚、BHT 的芝麻饅的酸价与空白组芝麻饅的酸价之间无显著差异( $P>0.05$ ), 而添加 TBHQ 的芝麻饅酸价与对照组酸价相比差异显著( $P<0.05$ ), 添加维生素 E 的芝麻饅酸价发展趋势极不稳定, 波动较大。整体来看, 五种抗氧化剂对芝麻饅贮藏过程中酸价的抑制效果分别是 TBHQ>BHA>BHT>维生素 E>茶多酚。分析原因可能是其中 TBHQ 热稳定性最好<sup>[31-32]</sup>, 因此对油脂的抗氧化保护作用最强; BHA 次之; BHT 对动物性油脂的抗氧化保护作用较强, 对植物性油脂的保护作用较弱, 且在高温条件下有一定的挥发性<sup>[33]</sup>; 茶多酚脂溶性差, 其主要成分在高温的环境中容易发生变化从而降低了对油脂氧化反应的抑制作用。

**2.2.2 单一抗氧化剂对芝麻饅过氧化值的影响** 过氧化值越大, 说明芝麻饅中的油脂被氧化的程度越

表 5 不同油脂对芝麻饅过氧化值的影响

Table 5 Effect of different oils on peroxide value of sesame naan

| 贮藏天数(d) | 棕榈油                         | 葵花油                        | 黄油                         | 菜籽油                         |
|---------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| 原油      | 0.024±0.001 <sup>cA</sup>   | 0.061±0.0006 <sup>dB</sup> | 0.094±0.0079 <sup>cD</sup> | 0.062±0.0005 <sup>cC</sup>  |
| 0       | 0.010±0.0004 <sup>ab</sup>  | 0.013±0.0003 <sup>aC</sup> | 0.014±0.0002 <sup>aD</sup> | 0.008±0.0007 <sup>aA</sup>  |
| 3       | 0.013±0.0002 <sup>abA</sup> | 0.035±0.0005 <sup>bd</sup> | 0.015±0.0003 <sup>aC</sup> | 0.014±0.0007 <sup>bb</sup>  |
| 6       | 0.014±0.0003 <sup>ba</sup>  | 0.052±0.0003 <sup>cC</sup> | 0.015±0.0005 <sup>ab</sup> | 0.016±0.0001 <sup>cB</sup>  |
| 9       | 0.023±0.0003 <sup>cB</sup>  | 0.090±0.001 <sup>cC</sup>  | 0.025±0.0005 <sup>bb</sup> | 0.015±0.0003 <sup>bcA</sup> |
| 12      | 0.033±0.0005 <sup>dA</sup>  | 0.228±0.0055 <sup>cC</sup> | 0.032±0.0002 <sup>bA</sup> | 0.047±0.0001 <sup>dB</sup>  |

表 6 单一抗氧化剂对芝麻饅酸价的影响

Table 6 Effect of different antioxidants on acid value of sesame naan

| 种类   | 贮藏时间(d)                    |                            |                            |                           |                            |
|------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------|
|      | 0                          | 3                          | 6                          | 9                         | 12                         |
| 空白   | 1.065±0.06 <sup>bb</sup>   | 0.936±0.003 <sup>cA</sup>  | 1.056±0.009 <sup>cAB</sup> | 1.268±0.026 <sup>bc</sup> | 1.090±0.010 <sup>bAB</sup> |
| BHT  | 0.962±0.02 <sup>abA</sup>  | 1.090±0.004 <sup>dB</sup>  | 1.048±0.021 <sup>cAB</sup> | 1.216±0.008 <sup>bc</sup> | 1.085±0.005 <sup>bBC</sup> |
| BHA  | 0.904±0.03 <sup>aA</sup>   | 0.899±0.003 <sup>ba</sup>  | 0.969±0.012 <sup>bcB</sup> | 1.181±0.009 <sup>bc</sup> | 0.864±0.004 <sup>aA</sup>  |
| TBHQ | 0.887±0.001 <sup>aAB</sup> | 0.933±0.015 <sup>cAB</sup> | 0.947±0.051 <sup>bb</sup>  | 1.055±0.017 <sup>cC</sup> | 0.841±0.003 <sup>aA</sup>  |
| 维生素E | 0.951±0.03 <sup>ab</sup>   | 1.136±0.005 <sup>cC</sup>  | 0.847±0.012 <sup>aA</sup>  | 1.177±0.058 <sup>bc</sup> | 0.883±0.004 <sup>aAB</sup> |
| 茶多酚  | 0.864±0.04 <sup>aA</sup>   | 0.846±0.007 <sup>aA</sup>  | 1.220±0.011 <sup>dB</sup>  | 1.260±0.032 <sup>bb</sup> | 1.313±0.1 <sup>bb</sup>    |

表7 单一抗氧化剂对芝麻饼过氧化值的影响  
Table 7 Effects of different antioxidants on peroxide value of sesame naan

| 类别   | 贮藏天数(d)                    |                           |                             |                             |                            |
|------|----------------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|
|      | 0                          | 3                         | 6                           | 9                           | 12                         |
| 空白   | 0.038±0.004 <sup>cdA</sup> | 0.057±0.002 <sup>dB</sup> | 0.060±0.001 <sup>dB</sup>   | 0.063±0.0006 <sup>c</sup>   | 0.054±0.0002 <sup>bb</sup> |
| BHT  | 0.024±0.003 <sup>ba</sup>  | 0.025±0.001 <sup>aA</sup> | 0.032±0.0005 <sup>aB</sup>  | 0.036±0.0003 <sup>ab</sup>  | 0.033±0.003 <sup>ab</sup>  |
| BHA  | 0.015±0.006 <sup>aA</sup>  | 0.026±0.000 <sup>aB</sup> | 0.038±0.0003 <sup>bd</sup>  | 0.032±0.0006 <sup>aC</sup>  | 0.034±0.003 <sup>cd</sup>  |
| TBHQ | 0.022±0.001 <sup>abA</sup> | 0.046±0.001 <sup>bb</sup> | 0.042±0.0005 <sup>bcB</sup> | 0.032±0.0002 <sup>aAB</sup> | 0.037±0.008 <sup>ab</sup>  |
| 维生素E | 0.035±0.001 <sup>cA</sup>  | 0.051±0.001 <sup>cB</sup> | 0.072±0.003 <sup>cC</sup>   | 0.069±0.0028 <sup>dC</sup>  | 0.084±0.005 <sup>d</sup>   |
| 茶多酚  | 0.042±0.003 <sup>dAB</sup> | 0.049±0.001 <sup>cB</sup> | 0.045±0.002 <sup>cAB</sup>  | 0.039±0.0021 <sup>ba</sup>  | 0.050±0.002 <sup>abb</sup> |

高。由表7可以看出,在贮藏期间,六组芝麻饼的过氧化值整体呈现出先增大后减小再增大的趋势,相比之下,维生素E组的过氧化值在贮藏期间(除第3d外)均高于空白组的过氧化值,分析原因可能是在浓度、金属离子或酶的影响下维生素E反而可能对油脂造成促氧化作用<sup>[34]</sup>,这与邓金良等<sup>[35]</sup>的研究结果相似。TBHQ、BHA、BHT、茶多酚组芝麻饼的过氧化值均低于空白组芝麻饼的过氧化值,与空白组相比差异显著( $P<0.05$ ),这说明其他四组抗氧化剂均能有效地抑制芝麻饼在贮藏过程中的氧化作用。对芝麻饼过氧化值有抑制效果的分别为: BHT>BHA>TBHQ>茶多酚>维生素E。贮藏至12d时,BHT、BHA、TBHQ、茶多酚的过氧化值分别为0.033、0.034、0.037、0.050 g/100g,与空白组相比各减少了39%、37%、31%、0.07%。BHT、BHA、TBHQ、茶多酚均属于酚类抗氧化剂,其抗氧化机理基本相似,该类抗氧化剂可以在油脂发生氧化反应时提供活性氢与油脂氧化时产生的自由基结合,从而达到阻隔自由基链式反应、终止油脂氧化反应及抑制油脂氧化变质的效果<sup>[36]</sup>。在高温烤制条件下对过氧化值抑制程度的大小主要取决于该抗氧化剂的热稳定性。

### 2.3 复配抗氧化剂对芝麻饼贮藏品质的影响

2.3.1 复配抗氧化剂对芝麻饼酸价的影响 添加不同复配抗氧化剂及增效剂后芝麻饼在贮藏期间酸价的变化如图1所示,在0~3d的贮藏期内,芝麻饼的酸价呈现出下降的趋势,贮藏至3~12d时,芝麻饼的酸价随着贮藏天数的增加呈现出逐渐上升的趋势,三

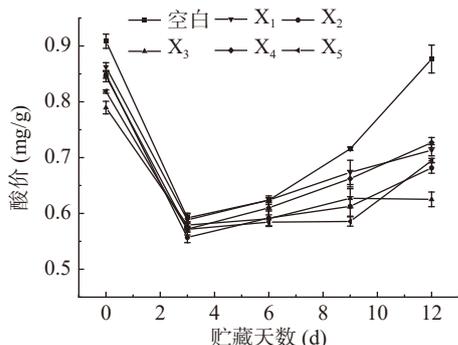


图1 复配抗氧化剂对芝麻饼酸价的影响  
Fig.1 Effect of compound antioxidants on acid value of sesame naan

组抗氧化剂复配组合中,对芝麻饼酸价的抑制效果分别为  $X_5>X_2>X_3>X_4>X_1$ ,这与张良晨等<sup>[37]</sup>的研究结果相似。有相关研究表明,当BHA和BHT混合用于油脂中时两者之间可生成结合体(3,3',5'-三叔丁基-5-甲氧基-2,4'-二羟基苯基甲烷),该化合物在油脂中的抗氧化活性介于BHA和BHT之间<sup>[38]</sup>,因此 $X_1$ 对芝麻饼酸价的抑制效果最差;TBHQ分别与BHA、BHT复合使用均能产生正向的协同作用<sup>[39]</sup>,但由于BHT在高温下具有挥发性可能会影响 $X_3$ 对油脂氧化反应的抑制效果,因此 $X_2$ 对芝麻饼酸价的抑制效果最好。这与Elisangêla等<sup>[40]</sup>的研究结果相似,该学者通过相关试验证明了含有TBHQ的复配抗氧化剂能更好的延缓生物柴油的氧化降解。

增效剂是与油脂抗氧化剂协同使用时可以提高抗氧化剂效能的一类物质,本试验在筛选出较优的复配抗氧化剂的基础上,选择植酸和抗坏血酸两种增效剂分别与之复配,由图1可知, $X_5$ 对芝麻饼的抑制作用明显优于其他复配组合,这与黄诚等<sup>[41]</sup>的研究结果一致,分析其原因可能是由于抗坏血酸本身还原性较强,能在一定程度上减少油脂中的氧浓度,同时抗坏血酸能捕获中和自由基且打断自由基的链式反应,从而达到减缓油脂氧化的速度。

2.3.2 复配抗氧化剂对芝麻饼过氧化值的影响 图2为复配抗氧化剂对芝麻饼过氧化值的影响,可以看出,五组处理组的过氧化值均低于空白组,其中,添加了增效剂的芝麻饼的抗氧化效果明显优于不添加增效剂的处理组,差异显著( $P<0.05$ ),对芝麻饼的抗氧

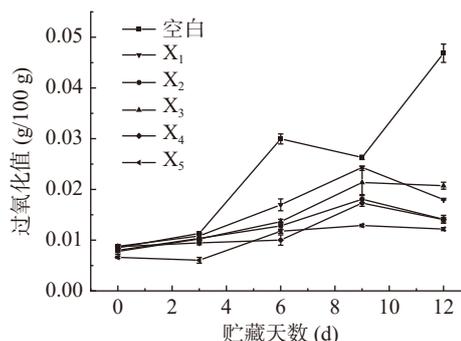


图2 复配抗氧化剂对芝麻饼过氧化值的影响  
Fig.2 Effect of compound antioxidants on peroxide value of sesame naan

化效果为:  $X_5 > X_4 > X_2 > X_3 > X_1$ 。抗坏血酸和植酸是较为常用的两种抗氧化增效剂, 其抑制油脂酸败的途径各有不同。抗坏血酸作主要通过钝化促氧化的金属离子以及与油脂中的氧反应生成半脱氢抗坏血酸和脱氢抗坏血酸以清除油脂氧化反应产生的自由基, 还可以将影响油脂过氧化值的氢过氧化物分解成非自由基产物, 从而达到抑制过氧化值增大的效果<sup>[42]</sup>; 植酸主要通过金属离子螯合的方式间接的减少自由基的产生<sup>[43]</sup>, 由于植酸的热稳定性较差, 因此其跟  $X_2$  的协同作用弱于抗坏血酸与  $X_2$  的协同作用。

### 2.4 D-最优混料试验结果与分析

2.4.1 模型建立及显著性分析 运用 Design Expert (8.0.6) 软件中对试验结果(表 8)进行了模型的建立及回归分析, 分别得到了酸价、过氧化值与各因素的多项回归方程:

$$\text{酸价} = 0.62A + 0.57B + 0.63C + 0.14AB - 0.24AC + 0.42BC + 1.27ABC + 0.03AB(A-B) - 0.38AC(A-C) - 0.56BC(B-C)$$

$$\text{过氧化值} = 7.017E - 0.003A + 0.010B + 8.017E - 0.003C + 7.632E - 0.003AB - 7.521E - 0.003AC - 5.034E - 0.003BC + 9.589E - 0.004ABC + 0.034AB(A-B) + 0.016AC(A-C) + 0.023BC(B-C)$$

表 8 D-最优混料试验设计方案及结果  
Table 8 D-optimal mixture test design and results

| 实验号 | A      | B      | C      | 酸价    | 过氧化值  |
|-----|--------|--------|--------|-------|-------|
| 1   | 0.0050 | 0.0150 | 0.0000 | 0.590 | 0.011 |
| 2   | 0.0050 | 0.0150 | 0.0000 | 0.557 | 0.010 |
| 3   | 0.0050 | 0.0100 | 0.0050 | 0.674 | 0.008 |
| 4   | 0.0080 | 0.0050 | 0.0070 | 0.623 | 0.005 |
| 5   | 0.0050 | 0.0050 | 0.0100 | 0.632 | 0.008 |
| 6   | 0.0100 | 0.0100 | 0.0000 | 0.655 | 0.010 |
| 7   | 0.0050 | 0.0080 | 0.0070 | 0.748 | 0.006 |
| 8   | 0.0100 | 0.0100 | 0.0000 | 0.634 | 0.011 |
| 9   | 0.0050 | 0.0100 | 0.0050 | 0.742 | 0.008 |
| 10  | 0.0100 | 0.0050 | 0.0050 | 0.541 | 0.005 |
| 11  | 0.0080 | 0.0080 | 0.0020 | 0.693 | 0.008 |
| 12  | 0.0120 | 0.0050 | 0.0030 | 0.563 | 0.007 |
| 13  | 0.0100 | 0.0100 | 0.0000 | 0.611 | 0.011 |
| 14  | 0.0100 | 0.0050 | 0.0050 | 0.568 | 0.006 |
| 15  | 0.0066 | 0.0117 | 0.0017 | 0.623 | 0.009 |
| 16  | 0.0150 | 0.0050 | 0.0000 | 0.622 | 0.007 |

由表 9 可知, 以酸价为响应值的模型  $P=0.0163 < 0.05$ , 说明该模型呈显著差异, 失拟项  $P=0.3183 > 0.05$  不显著, 回归决定系数  $R^2=0.9080$ , 修正决定系数  $R^2_{Adj}=0.7700$ , 说明该模型与试验结果拟合度较好, 可达 91%, 表明该试验可信度较高, 模型可靠, 可以达到利用该模型来预测分析酸价变化的目的。对芝麻饅酸价影响较大的各因素主次顺序为  $BC > AC > AB$ , 其中  $BC$  对酸价有极显著影响 ( $P < 0.01$ ), 交互项  $AB$ 、 $AC$  对模型的影响不显著 ( $P > 0.05$ )。

由表 10 可知, 以过氧化值为响应值的模型  $P=0.0005 < 0.05$ , 说明该模型表现极显著,  $TBHQ$ 、 $BHA$  和抗坏血酸之间的交互作用显著, 失拟项  $P=0.6338 >$

表 9 酸价回归模型的方差分析

Table 9 Analysis of variance of acid valency regression model

| 系数来源    | 回归系数       | 自由度 | 均方差        | F值    | P值       |
|---------|------------|-----|------------|-------|----------|
| 总模型     | 0.052      | 9   | 5.723E-003 | 6.58  | 0.0163*  |
| 线性混合    | 8.890E-003 | 2   | 4.490E-003 | 5.16  | 0.0427*  |
| AB      | 1.697E-003 | 1   | 1.697E-003 | 1.95  | 0.2120   |
| AC      | 4.332E-003 | 1   | 4.235E-003 | 4.87  | 0.0695   |
| BC      | 0.012      | 1   | 0.012      | 14.31 | 0.0091** |
| ABC     | 1.774E-003 | 1   | 1.774E-003 | 2.04  | 0.2031   |
| AB(A-B) | 1.215E-004 | 1   | 1.215E-004 | 0.14  | 0.7214   |
| AC(A-C) | 1.445E-003 | 1   | 1.445E-003 | 1.66  | 0.2449   |
| BC(B-C) | 1.189E-003 | 1   | 1.189E-003 | 1.37  | 0.2867   |
| 残差      | 5.218E-003 | 6   | 8.697E-004 |       |          |
| 失拟项     | 1.028E-003 | 1   | 1.028E-003 | 1.23  | 0.3183   |
| 误差项     | 4.190E-003 | 5   | 8.379E-004 |       |          |
| 总和      | 0.057      | 15  |            |       |          |

注: “\*”表示差异显著 ( $P < 0.05$ ), “\*\*”表示差异极显著 ( $P < 0.01$ )。

表 10 过氧化值回归模型的方差分析

Table 10 Analysis of variance of peroxide value regression model

| 系数来源    | 回归系数       | 自由度 | 均方差        | F值         | P值         |
|---------|------------|-----|------------|------------|------------|
| 总模型     | 6.200E-005 | 9   | 6.889E-006 | 23.59      | 0.0005**   |
| 线性混合    | 4.366E-005 | 2   | 2.183E-005 | 74.74      | <0.0001*** |
| AB      | 5.146E-006 | 1   | 5.146E-006 | 17.62      | 0.0057**   |
| AC      | 4.284E-006 | 1   | 4.248E-006 | 14.54      | 0.0088**   |
| BC      | 1.812E-006 | 1   | 1.812E-006 | 6.20       | 0.0471*    |
| ABC     | 1.004E-009 | 1   | 1.004E-006 | 3.438E-003 | 0.9551     |
| AB(A-B) | 1.592E-006 | 1   | 1.592E-006 | 5.45       | 0.0583     |
| AC(A-C) | 2.450E-006 | 1   | 2.450E-006 | 8.39       | 0.0275*    |
| BC(B-C) | 2.054E-006 | 1   | 2.054E-006 | 7.03       | 0.0379*    |
| 残差      | 1.752E-006 | 6   | 2.920E-007 |            |            |
| 失拟差     | 8.562E-008 | 1   | 8.562E-008 | 0.26       | 0.6338     |
| 误差项     | 1.667E-006 | 5   | 3.333E-007 |            |            |
| 总和      | 6.375E-005 | 15  |            |            |            |

注: “\*”表示差异显著 ( $P < 0.05$ ), “\*\*”表示差异极显著 ( $P < 0.01$ ), “\*\*\*”表示差异高度显著 ( $P < 0.0001$ )。

0.05 不显著, 说明该模型与试验结果拟合度较好, 回归决定系数  $R^2=0.9725$ , 修正决定系数  $R^2_{Adj}=0.9313$ , 说明响应值 97% 的变化可以利用该模型进行解释和预测, 实验误差较小, 可信度较高。其中对芝麻饅过氧化值的影响效果分别为  $AB > AC > BC$ , 其中  $AB$ 、 $AC$  对该模型的影响呈极显著性差异 ( $P < 0.01$ ),  $AC(A-C)$ 、 $BC(B-C)$ 、 $BC$  对该模型的影响呈显著差异 ( $P < 0.05$ ),  $ABC$ 、 $AB(A-B)$  的影响不显著 ( $P > 0.05$ )。

2.4.2 交互作用分析 根据对 D-最优混料设计模型显著性的分析, 综合考察各因素之间的交互作用, 绘制  $TBHQ$ 、 $BHA$ 、抗坏血酸三个交互因子的三角响应面图和等高线图, 图 3、图 4 呈现曲面, 说明  $A(TBHQ)$ 、 $B(BHA)$ 、 $C$ (抗坏血酸)三个因素之间存在交互作用<sup>[44]</sup>, 从图 3 可以看出,  $BHA$  对芝麻饅的酸价有较为显著的作用, 随着  $BHA$  添加量的逐渐增大, 酸价呈现出逐渐减小的趋势,  $TBHQ$  和抗坏血酸次之。从图 4 可以看出, 在  $TBHQ$  添加的一定范围内, 能有效

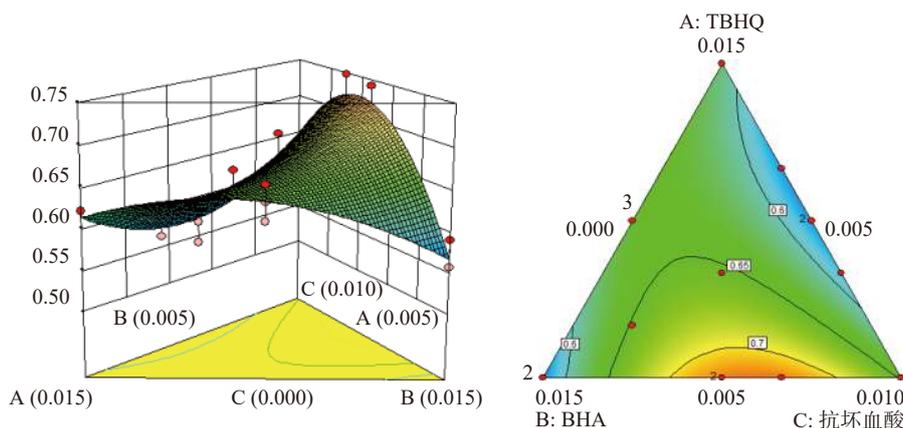


图3 不同抗氧化剂配比对芝麻饅酸价的影响

Fig.3 Influence of different antioxidant ratio on the acid price of sesame naan

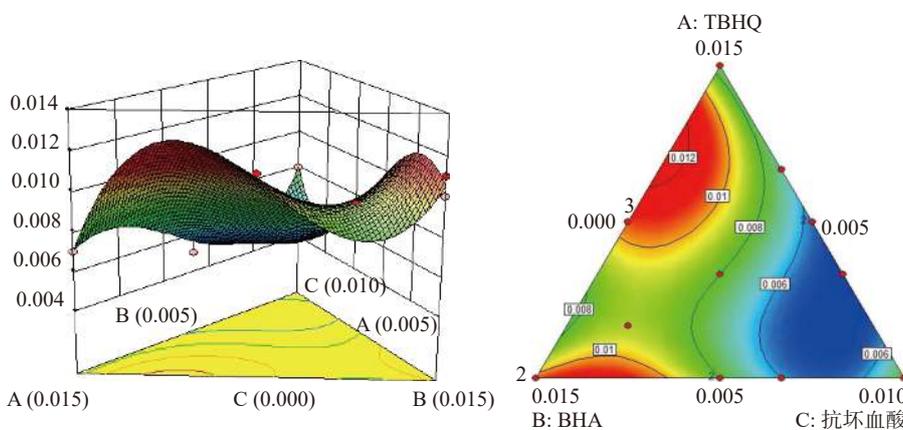


图4 不同抗氧化剂配比对芝麻饅过氧化值的影响

Fig.4 Influence of different antioxidant ratio on peroxide value of sesame naan

抑制过氧化值的生长。

2.4.3 复配抗氧化剂最优配方的确立 通过 Design-Expert 软件分析, 设定酸价、过氧化值取最小值得到复配抗氧化剂的最优配方为 TBHQ 0.007%, BHA 0.005%, 抗坏血酸 0.008%, 此条件下模型预测芝麻饅的酸价为 0.6 mg/g, 过氧化值为 0.005 g/100 g。根据该最优配方在 60℃ 的条件下进行验证试验, 测得芝麻饅贮藏 3 d 的实际酸价为 0.628±0.017 mg/g, 过氧化值为 0.0060±0.0003 g/100 g, 与预测值相差较

小, 说明该模型能有效预测在芝麻饅中复配抗氧化剂的配比情况。

2.4.4 最优复配抗氧化剂在 30℃ 下对芝麻饅品质的影响 选取最优复配抗氧化剂制作芝麻饅作为实验组, 同时制作不添加抗氧化剂的芝麻饅作为空白对照组, 将两组烤制好的芝麻饅置于相同的条件进行贮藏, 每隔 5 d 测一次品质指标。表 11 显示的是添加最优复配抗氧化剂后在 30℃ 的条件下对芝麻饅酸价、过氧化值、色差及感官品质的影响。可以看出,

表 11 芝麻饅在 30℃ 下品质的变化

Table 11 Quality change of sesame naan at 30℃

| 组别  | 天数(d) | AV(mg/g)                 | POV(g/100 g)              | 饅心L*                      | 饅边L*                     | 气味                       | 口感                       |
|-----|-------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 对照组 | 0     | 0.930±0.02 <sup>b</sup>  | 0.008±0.0004 <sup>a</sup> | 68.08±0.71 <sup>bc</sup>  | 53.76±1.79 <sup>a</sup>  | 7.80±0.60 <sup>dc</sup>  | 7.80±0.98 <sup>ef</sup>  |
|     | 5     | 1.210±0.01 <sup>d</sup>  | 0.020±0.0002 <sup>c</sup> | 62.23±2.18 <sup>a</sup>   | 53.19±3.79 <sup>a</sup>  | 6.87±0.60 <sup>bcd</sup> | 6.60±0.80 <sup>bc</sup>  |
|     | 10    | 1.297±0.01 <sup>e</sup>  | 0.032±0.0018 <sup>d</sup> | 64.45±4.23 <sup>ab</sup>  | 57.31±3.27 <sup>a</sup>  | 6.05±0.85 <sup>ab</sup>  | 6.30±0.98 <sup>abc</sup> |
|     | 15    | 1.653±0.03 <sup>f</sup>  | 0.040±0.0009 <sup>e</sup> | 62.65±0.70 <sup>a</sup>   | 59.39±2.09 <sup>ab</sup> | 5.95±0.72 <sup>ab</sup>  | 5.90±0.70 <sup>ab</sup>  |
|     | 20    | 1.666±0.02 <sup>f</sup>  | 0.044±0.0007 <sup>f</sup> | 61.35±0.58 <sup>a</sup>   | 53.19±3.44 <sup>a</sup>  | 5.30±0.60 <sup>a</sup>   | 5.45±0.79 <sup>a</sup>   |
| 实验组 | 0     | 0.844±0.01 <sup>a</sup>  | 0.008±0.0001 <sup>a</sup> | 67.66±0.77 <sup>bc</sup>  | 56.70±1.88 <sup>a</sup>  | 8.50±0.81 <sup>c</sup>   | 8.55±0.65 <sup>f</sup>   |
|     | 5     | 1.158±0.02 <sup>cd</sup> | 0.018±0.0003 <sup>b</sup> | 64.91±2.97 <sup>abc</sup> | 55.47±2.43 <sup>a</sup>  | 8.30±0.60 <sup>c</sup>   | 7.60±0.66 <sup>def</sup> |
|     | 10    | 1.140±0.01 <sup>c</sup>  | 0.029±0.0008 <sup>d</sup> | 69.32±1.20 <sup>c</sup>   | 64.30±3.17 <sup>b</sup>  | 7.30±0.78 <sup>cd</sup>  | 7.05±0.79 <sup>cde</sup> |
|     | 15    | 1.311±0.002 <sup>e</sup> | 0.022±0.0002 <sup>c</sup> | 69.01±0.55 <sup>c</sup>   | 64.19±1.56 <sup>b</sup>  | 6.45±0.72 <sup>bc</sup>  | 6.70±0.46 <sup>bcd</sup> |
|     | 20    | 1.320±0.04 <sup>e</sup>  | 0.031±0.0006 <sup>d</sup> | 68.10±1.27 <sup>bc</sup>  | 57.74±2.29 <sup>a</sup>  | 6.40±0.66 <sup>bc</sup>  | 6.45±0.65 <sup>bc</sup>  |

注: 同列标注不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。

在 0~20 d 的贮藏期内,对照组和实验组的酸价和过氧化值均呈现出逐渐升高的变化趋势,且对照组的酸价及过氧化值均高于实验组,差异显著( $P<0.05$ )。色泽是评价芝麻饅品质较为重要的指标之一,由表 11 可知,对照组饅心和饅边的  $L^*$  在贮藏期间整体低于实验组的  $L^*$ ,其中两组饅心的  $L^*$  差异显著( $P<0.05$ ),实验组饅边的  $L^*$  值相比空白组则有一定的提高,而两组样品的  $L^*$  没有随着时间的延长呈现出特定的趋势,分析这种原因可能是在烤制过程中受到一些人为误差造成的微小差异。感官评价可以直接反映芝麻饅的质量及消费者的可接受程度,两组芝麻饅的气味和口感均随着贮藏时间的延长逐渐下降,实验组的感官评分略高于对照组。酸价、过氧化值、 $L^*$ 、感官评价结果均表明,实验组的芝麻饅有较好的感官品质,说明最优复配抗氧化剂能有效抑制芝麻饅贮藏过程中油脂的氧化酸败,并能有效改善芝麻饅的色泽、气味及口感等品质。这可能是由于油脂在高温和贮藏的过程中会发生一系列氧化、水解、聚合等反应,在此过程中产生的分解产物如具有挥发性的醛、酮、酸、醇、环化合物、游离脂肪酸等物质,这些物质会对食品的风味和颜色产生不利的影响,添加抗氧化剂能有效延缓油脂的氧化,从而能够进一步抑制食品色泽、风味等感官指标的劣变<sup>[45-46]</sup>。

### 3 结论

本研究以酸价、过氧化值为指标,通过试验筛选了能延缓芝麻饅氧化酸败的油脂及抗氧化剂。试验结果表明:棕榈油、TBHQ、BHA、BHT 对油脂氧化的抑制效果较为明显。复配试验结果表明, TBHQ、BHA、抗坏血酸复配使用效果较好,通过 D-最优混料试验设计确定了最优配比为: TBHQ 0.007%, BHA 0.005%, 抗坏血酸 0.008%。本实验选取了添加人工抗氧化剂的方式最大限度地控制了芝麻饅氧化酸败的速度,为芝麻饅的工业化生产和远销提供了较为经济便捷的实验依据和参考。

#### 参考文献

[1] 安尼瓦尔·哈斯木. 饅·饅坑与饅文化漫谈[J]. 新疆地方志, 2017(2): 53-58. [ HASMU A. Nang-Nang pit and nang culture[J]. Xinjiang Local Chronicles, 2017(2): 53-58. ]

[2] 艾麦提·巴热提, 热合满·艾拉. 新疆饅储藏保鲜研究[J]. 现代食品, 2016(2): 48-52. [ BHATTI A, AILA R. Study on storage and preservation of Xinjiang nang[J]. Modern Food, 2016(2): 48-52. ]

[3] HAMAN N, ROMANO A, ASADUZZAMAN M, et al. A microcalorimetry study on the oxidation of linoleic acid and the control of rancidity[J]. Talanta, 2017, 164: 407-412.

[4] OKPARANTA S, DAMINABO V, SOLOMON L. Assessment of rancidity and other physicochemical properties of edible oils (mustard and corn oils) stored at room temperature[J]. Journal of Food and Nutrition Sciences, 2018, 6(3): 70-75.

[5] 曹君, 李红艳, 邓泽元. 植物油氧化稳定性的研究进展[J].

食品工业科技, 2013, 34(7): 378-382, 386. [ CAO J, LI H Y, DENG Z Y. Research progress on oxidation stability of vegetable oil[J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(7): 378-382, 386. ]

[6] XIA Q, LIU C, LIU J, et al. Rapid and non-destructive determination of rancidity levels in butter cookies by multi spectral imaging[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2016, 96(5): 1821-1827.

[7] LOURENCO S C, MOLDO-MARTINS M, ALVES V D. Antioxidants of natural plant origins: from sources to food industry applications[J]. Molecules, 2019, 24(22): 4132.

[8] 周正, 侯建军, 杨菊芳, 等. 几种抗氧化剂对亚麻油稳定性的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(5): 75-80. [ ZHOU Z, HOU J J, YANG J F, et al. Effects of several antioxidants on stability of linseed oil[J]. Food Science, 2014, 35(5): 75-80. ]

[9] YETTELLA R R, HENBEST B, PROCTOR A. Effect of antioxidants on soy oil conjugated linoleic acid production and its oxidative stability[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2011, 59(13): 7377-7384.

[10] CALEJA C, BARROS L, ANTONIO A L, et al. A comparative study between natural and synthetic antioxidants: Evaluation of their performance after incorporation into biscuits[J]. Food Chemistry, 2017, 216: 342-346.

[11] 李伟岸, 徐俐, 吴光瑞. 抗氧化剂对薏苡仁桃酥保鲜作用的研究[J]. 粮食与油脂, 2019, 32(2): 46-49. [ LI W A, XU L, WU G R. Effects of antioxidant on preservation of coix seed and peach crisp[J]. Grain and Fat, 2019, 32(2): 46-49. ]

[12] 吴百芝, 王国, 刘英语. BHA-PG-CA 复配抗氧化剂对黄山烧饼保质期的影响[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(16): 94-96. [ WU Y Z, WANG Y, LIU Y Y. Effect of bHA-PG-CA compound antioxidant on shelf life of Huangshan shaoxing cake[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2017, 45(16): 94-96. ]

[13] 孟敏, 张慧, 翟广华. 抗氧化剂对蘑菇酱抗氧化性能的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2012, 31(9): 978-983. [ MENG M, ZHANG M, ZHAI G H. Effect of antioxidants on antioxidant properties of mushroom sauce[J]. Journal of Food and Biotechnology, 2012, 31(9): 978-983. ]

[14] LORENZO J M, GONZÁLEZ-RODRÍGUEZ R M, SÁNCHEZ M, et al. Effects of natural (grape seed and chestnut extract) and synthetic antioxidants (butylated hydroxytoluene, BHT) on the physical, chemical, microbiological and sensory characteristics of dry cured sausage "chorizo" [J]. Food Research International, 2013, 54(1): 611-620.

[15] 何立超, 杨海燕, 孙秀秀, 等. 3 种抗氧化剂对辐照猪肉火腿肠异味的控制技术研究[J]. 核农学报, 2019, 33(3): 509-517. [ HE L C, YANG H Y, SUN X X, et al. Study on the control technology of three kinds of antioxidants on the peculiar smell of irradiated pork ham sausage[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2019, 33(3): 509-517. ]

[16] 孙含, 王晶, 赵晓燕, 等. 新疆特色面制品饅的研究进展[J]. 粮油食品科技, 2018, 26(6): 19-24. [ SUN H, WANG J, ZHAO X

- Y, et al. Research progress of Xinjiang specialty nang[J]. *Science and Technology of Cereals, Oils and Foods*, 2018, 26(6): 19–24. ]
- [ 17 ] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 2760-2014 食品安全国家标准食品添加剂使用标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014. [ State Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. GB 2760-2014 National food safety standard for use of food additives[S]. Beijing: China Standards Press, 2014. ]
- [ 18 ] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 2760-2014 食品安全国家标准食品中酸价的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [ State Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. GB 2760-2014 National food safety standard determination of acid value in food[S]. Beijing: China Standards Press, 2016. ]
- [ 19 ] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 2760-2014 食品安全国家标准食品中过氧化值的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [ State Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. GB 2760-2014 National food safety standard. determination of peroxide value in food[S]. Beijing: China Standards Press, 2016. ]
- [ 20 ] 孙含. 新疆馕饼的加工新工艺及品质与保藏技术研究[D]. 济南: 济南大学, 2019. [ SUN H. Study on new processing technology quality and preservation technology of Xinjiang nang[D]. Jinan: Jinan University, 2019. ]
- [ 21 ] 刘荣, 王慧. 不同油脂及抗氧化剂对韧性饼干氧化变质的影响[J]. *现代食品科技*, 2018, 34(8): 90–98. [ LIU R, WANG H. Effects of different oils and antioxidants on oxidative deterioration of tough biscuits[J]. *Modern Food Technology*, 2018, 34(8): 90–98. ]
- [ 22 ] 郑良清, 罗诗棋, 张荣, 等. 长时间高温加热对食用植物油脂肪酸价的影响[J]. *广东化工*, 2016, 43(15): 31–32. [ ZHENG L Q, LUO S Q, ZHANG R, et al. Effect of long time high temperature heating on acid value of edible vegetable oil[J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2016, 43(15): 31–32. ]
- [ 23 ] ALADEDUNYE F A, PRZYBYLSKI R. Degradation and nutritional quality changes of oil during frying[J]. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 2009, 86(2): 149–156.
- [ 24 ] 李伟岸. 薏苡仁桃酥的加工工艺及功能评价研究[D]. 贵州: 贵州大学, 2018. [ LI W A. Study on processing technology and function evaluation of coix seed peach crisp[D]. Guizhou: Guizhou University, 2018. ]
- [ 25 ] ELISIA I, YOUNG J W, YUAN Y V, et al. Association between tocopherol isoform composition and lipid oxidation in selected multiple edible oils[J]. *Food Research International*, 2013, 52(2): 508–514.
- [ 26 ] PRIOL L L, GMUR J, DAGMRY A, et al. Co-encapsulation of vegetable oils with phenolic antioxidants and evaluation of their oxidative stability under long-term storage conditions[J]. *LWT*, 2021, 142: 111033.
- [ 27 ] 唐川惠.  $\alpha$ -生育酚在四种植物油中的抗氧化规律研究[D]. 无锡: 江南大学, 2020. [ TANG C H.  $\alpha$ - Study on antioxidant law of tocopherol in four vegetable oils[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2020. ]
- [ 28 ] 曹君. 不同脂肪酸结构食用油的氧化规律及其动力学研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2015. [ CAO J. Study on oxidation law and kinetics of edible oils with different fatty acid structures[D]. Nanchang: Nanchang University, 2015. ]
- [ 29 ] 徐杭蓉, 郑远荣, 刘振民, 等. 不同植物油脂对涂抹再制干酪品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(10): 78–82, 89. [ XU H R, ZHENG Y R, LIU Z M, et al. Effects of different vegetable oils on the quality of coated processed cheese[J]. *Food Industry Science and Technology*, 2018, 39(10): 78–82, 89. ]
- [ 30 ] 李静, 王永, 杨耀东, 等. 棕榈油与常见食用油脂脂肪酸组分的比较分析[J]. *南方农业学报*, 2016, 47(12): 2124–2128. [ LI J, WANG Y, YANG Y D, et al. Comparative analysis of fatty acid components of palm oil and common edible oil[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2016, 47(12): 2124–2128. ]
- [ 31 ] JANAINA T G, REGITANO-DARCE MARISA A B. Determining economical TBHQ doses for corn oil stability Dose econômica de TBHQ para a estabilidade de óleo de milho[J]. *Food Science and Technology*, 2004, 24(3): 413–418.
- [ 32 ] JESUS J, FERREIRA A, SZILÁGYI I M, et al. Thermal behavior and polymorphism of the antioxidants: BHA, BHT and TBHQ[J]. *Fuel*, 2020, 278: 118298.
- [ 33 ] 周旭. 脂溶性天然抗氧化剂在葡萄籽油和核桃油中的应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016. [ ZHOU X. Application of fat soluble natural antioxidants in grape seed oil and walnut oil[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016. ]
- [ 34 ] 汪曙晖, 朱俊向, 张莉, 等. 天然抗氧化剂的抗氧化与促氧化作用[J]. *中国食物与营养*, 2016, 22(8): 68–71. [ WANG S H, ZHU J X, ZHANG L, et al. Antioxidation and promoting oxidation of natural antioxidants[J]. *China Food and Nutrition*, 2016, 22(8): 68–71. ]
- [ 35 ] 邓金良, 刘玉兰, 肖天真, 等. 不同抗氧化剂对花生油和大豆油氧化稳定性及预测货架期的影响[J]. *中国油脂*, 2019, 44(8): 35–40. [ DENG J L, LIU Y L, XIAO T Z, et al. Effects of different antioxidants on oxidative stability and shelf Life prediction of peanut oil and soybean oil[J]. *China Grease*, 2019, 44(8): 35–40. ]
- [ 36 ] BORSATO D, CINI J, SILVA H, et al. Oxidation kinetics of biodiesel from soybean mixed with synthetic antioxidants BHA, BHT and TBHQ: Determination of activation energy[J]. *Fuel Processing Technology*, 2014, 127: 111–116.
- [ 37 ] 张良晨, 王波, 石太渊, 等. 响应面法优化膨化花生粉抗氧化性的研究[J]. *中国油脂*, 2015, 40(5): 24–27. [ ZHANG L C, WANG B, SHI T Y, et al. Optimization of antioxidant activity of expanded peanut powder by response surface methodology[J]. *China Grease*, 2015, 40(5): 24–27. ]
- [ 38 ] 章佳妮, 侯建平, 翁新楚. 合成抗氧化剂及其氧化产物的抗氧化活性[J]. *粮油加工*, 2009(1): 59–63. [ ZHANG J N, HOU J P, WENG X C. Antioxidant activity of synthetic antioxidants and their oxidation products[J]. *Grain and Oil Processing*, 2009(1):

59-63.]

[39] 郭爽. 四种抗氧化剂的活性研究及测定总抗氧化能新法初探 [D]. 郑州: 河南农业大学, 2005. [GUO S. Study on the activity of four antioxidants and a new method for determining total antioxidant energy[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2005.]

[40] TAVARES S E, ROBERTA S K, CHANAN S, et al. Modeling of relative protection factor of antioxidants TBHQ, BHT and BHA in mixture with biodiesel[J]. *Acta Scientiarum:Technology*, 2018, 40(1): 35108.

[41] 黄诚, 傅伟昌, 黄群, 等. 复合抗氧化剂对葵花籽油贮存期的影响[J]. *食品研究与开发*, 2010, 31(2): 79-83. [HUANG C, FU W C, HUANG Q, et al. Effect of compound antioxidants on storage life of sunflower seed oil[J]. *Food Research and Development*, 2010, 31(2): 79-83.]

[42] 秦焱. 甘草抗氧化物的分离以及在棕榈油中的应用 [D]. 天津: 天津科技大学, 2019. [QIN Y. Separation of antioxidants from licorice and its application in palm oil[D]. Tianjin: Tianjin Uni-

versity of Science and Technology, 2019.]

[43] MURAOKA S, MIURA T. Inhibition of xanthine oxidase by phytic acid and its antioxidative action[J]. *Life Sciences*, 2003, 74(13): 1691-1700.

[44] 刘芝君, 黄业传, 夏屿, 等. D-混料最优设计优化茶多酚微胶囊工艺及其脂肪氧化抑制作用[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(8): 124-129, 136. [LIU Z J, HUANG Y C, XIA Y, et al. Optimization of microencapsulation technology of tea polyphenols and its inhibition of fat oxidation by optimal design of D-mixture[J]. *Food Industry Science and Technology*, 2020, 41(8): 124-129, 136.]

[45] KARPIŃSKA-TYMOSZCZYK, DRASZANOWSKA A. The effect of natural and synthetic antioxidants and packaging type on the quality of cooked poultry products during frozen storage[J]. *Food Science and Technology International*, 2019, 25(5): 429-439.

[46] ESFARJANI F, KHOSHTINAT K, ZARGARAAN A, et al. Evaluating the rancidity and quality of discarded oils in fast food restaurants[J]. *Food Science & Nutrition*, 2019, 7(7): 2302-2311.