

# 家庭用油条件下食用植物油的氧化酸败研究

黄明翠<sup>1</sup>,舒树敏<sup>2</sup>,张岩<sup>2</sup>,赵晨伟<sup>1</sup>,郑梦林<sup>2</sup>,金俊<sup>1</sup>,金青哲<sup>1</sup>,王兴国<sup>1</sup>

(1. 江南大学食品学院,江苏无锡214122; 2. 上海康识食品科技有限公司,上海201100)

**摘要:**旨在为家庭合理用油提供参考,探究了实际家庭用油环境中瓶装食用植物油的氧化酸败行为。以亚麻籽油、葵花籽油、大豆油、花生油4种不同脂肪酸类型的5 L包装食用植物油为研究对象,测定其脂肪酸组成和氧化稳定性指数(OSI),探究2种包装规格(1 L和5 L)的4种食用植物油在63 d内的氧化酸败(酸值、过氧化值)情况,并分析其脂肪酸与氧化稳定性的相关性。结果表明:亚麻籽油、葵花籽油、大豆油、花生油主要脂肪酸分别为亚麻酸、亚油酸、亚油酸和油酸;4种植物油的氧化稳定性从高到低依次为花生油、大豆油、葵花籽油、亚麻籽油;5 L包装的亚麻籽油、葵花籽油、大豆油和花生油的过氧化值分别在使用42、49、56 d和63 d时超过GB 2716—2018规定的限值(0.25 g/100 g),使用1 L包装时4种食用植物油的过氧化值变化趋势与5 L包装时类似,其中亚麻籽油氧化速度最快,花生油氧化速度最慢,其过氧化值分别在使用28、56 d时超过国标限值;4种食用植物油的酸值变化幅度较小,均未超过GB 2716—2018规定的限值;皮尔逊相关性分析表明,4种食用植物油的OSI与饱和脂肪酸含量呈极显著正相关,与多不饱和脂肪酸含量呈极显著负相关,与亚麻酸含量呈显著负相关。综上,建议5 L桶装食用植物油在42 d内食用完,1 L包装食用植物油在28 d内食用完。

**关键词:**家庭用油;植物油;包装规格;过氧化值;氧化稳定性指数;脂肪酸

中图分类号:TS225.1;TS201.6 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2025)04-0046-06

## Oxidative rancidity of edible vegetable oils under household oil condition

HUANG Mingcui<sup>1</sup>, SHU Shumin<sup>2</sup>, ZHANG Yan<sup>2</sup>, ZHAO Chenwei<sup>1</sup>,  
ZHENG Menglin<sup>2</sup>, JIN Jun<sup>1</sup>, JIN Qingzhe<sup>1</sup>, WANG Xingguo<sup>1</sup>

(1. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, China; 2. Shanghai Kangshi Food Technology Co., Ltd., Shanghai 201100, China)

**Abstract:** In order to provide reference for rational household oil usage, the oxidative rancidity of bottled edible vegetable oils in an actual household oil environment was explored. The fatty acid composition and oxidative stability index (OSI) of 5 L packaged edible vegetable oils with 4 different fatty acid types, including flaxseed oil, sunflower seed oil, soybean oil and peanut oil, were determined. The oxidative rancidity (acid value and peroxide value) of 4 edible vegetable oils with 2 package sizes (1 L and 5 L) within 63 d was investigated, and the correlation between fatty acids and oxidative stability was analyzed. The results showed that the main fatty acids of flaxseed oil, sunflower seed oil, soybean oil and peanut oil were linolenic acid, linoleic acid, linoleic acid and oleic acid, respectively. The oxidative stability of peanut oil was the highest, followed by soybean oil, sunflower seed oil and flaxseed oil. The peroxide values of flaxseed oil, sunflower seed oil, soybean oil and peanut oil with 5 L package size exceeded the

limit value (0.25 g/100 g) specified in GB 2716—2018 after 42, 49, 56 d and 63 d of use, respectively. When the 1 L package was used, the change trend of the peroxide value of the 4 edible vegetable oils was similar to that when the 5 L package was used, among which the oxidation

收稿日期:2024-03-01;修回日期:2024-12-02

基金项目:山东省重大科技创新工程项目(2023CXGC010707)

作者简介:黄明翠(1997),女,在读硕士,研究方向为油脂质量  
控制(E-mail)1487269100@qq.com。

通信作者:金俊,副研究员,硕士生导师,博士(E-mail)  
junjin@jiangnan.edu.cn。

speed of flaxseed oil was the fastest, and the oxidation speed of peanut oil was the slowest, and the peroxide value exceeded the national standard limit after 28 d and 56 d of use respectively. The acid values of the 4 edible vegetable oils changed slightly and did not exceed the limit values of GB 2716 – 2018. Pearson correlation analysis showed that the OSI of the 4 edible vegetable oils were extremely significantly positively correlated with the saturated fatty acid content, extremely significantly negatively correlated with the polyunsaturated fatty acid content, significantly negatively correlated with linolenic acid content. In summary, it is recommended that 5 L packaged edible vegetable oil should be consumed within 42 d, and 1 L packaged edible vegetable oil should be consumed within 28 d.

**Key words:** household oil; vegetable oil; package size; peroxide value; oxidative stability index; fatty acid

我国是食用植物油消费大国,其中家庭烹饪用油量约占消费量的40%<sup>[1]</sup>。植物油一般通过充氮密封保存,货架期可达18个月,但开封后,油脂接触氧气导致自动氧化酸败进程加快<sup>[2]</sup>。开封时间越长,油脂氧化酸败程度越大。5 L包装植物油和1 L包装植物油是我国居民家庭用油的2种主要包装规格。由于外卖的普及以及外出就餐频率的增加,典型2~3口之家通常需要2~3个月甚至更长时间才能用完5 L桶装植物油<sup>[3]</sup>。在此期间,油脂接触氧气,在氧化初级阶段产生氢过氧化物,植物油相关质量指标可能会超过安全限值,若再经烹调,在氧气和高温存在下会发生更为剧烈的氧化反应,形成危害性更大的次级氧化产物<sup>[4-5]</sup>。例如,可能产生体内脂质氧化最具代表性的醛类产物4-羟基-2-烯醛,其在低浓度条件下也会影响肌肉细胞活力,长期食用会对大脑、肝脏和胰腺等器官的细胞表现出毒性和致突变作用<sup>[6-8]</sup>,进而造成健康隐患。而相比5 L的大包装植物油,1 L的小包装植物油由于容量小,用得快,其氧化指标超标的风险相对较低。除了开封时间和包装规格外,不同种类植物油由于脂肪酸组成差异也会影响其氧化酸败速率。

目前关于植物油的氧化酸败过程多通过加速氧化试验(如Rancimat法)进行研究<sup>[9-10]</sup>。由于油脂在非常温条件下的氧化机制与室温条件存在区别<sup>[11]</sup>,且Rancimat法只能提供油脂在氧化反应中的整体稳定性,无法模拟实际使用环境中的其他因素如光照、湿度、氧气浓度变化等对油脂氧化行为的影响<sup>[12]</sup>,因此加速氧化试验难以准确反映油脂在真实用油环境下的氧化稳定性。例如,Warner等<sup>[13]</sup>在研究低芥酸菜籽油的氧化稳定性时发现,在100℃和60℃加速氧化

时,其氧化稳定性预测值相差较大。目前,国内外针对各类植物油储存的研究多聚焦于储存条件、储存方式和油脂功能性成分的变化,而关于油脂在实际家庭用油条件下氧化酸败行为的研究相对较少。因此,本文以市售亚麻籽油、葵花籽油、大豆油和花生油4种脂肪酸组成在常见植物油中具有代表性的5 L和1 L包装植物油为研究对象,探究其在家庭典型用油条件下氧化酸败行为的差异,并分析其脂肪酸与氧化稳定性的相关性,以期为家庭合理用油提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

亚麻籽油、葵花籽油、大豆油和花生油,由工厂提供,未添加抗氧化剂,标签保质期18个月。甲醇、正己烷均为色谱纯,碘化钾、无水硫酸钠、可溶性淀粉、酚酞、氢氧化钠标准溶液、硫代硫酸钠标准溶液、乙醚、异丙醇、95%乙醇、三氯甲烷、冰乙酸等均为分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

GC 7820A气相色谱仪,美国Agilent公司;892型油脂氧化稳定性测定仪,瑞士万通公司。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 家庭用油模拟试验

5 L包装植物油的使用:按照《中国居民膳食指南(2011)》推荐成人每日烹调用油摄入量为25~30 g,以3口之家计算,每日食用约80 mL植物油。参考季敏等<sup>[14]</sup>的方法模拟家庭用油习惯,5 L包装植物油开封后于每日中午11点和晚上5点各倒出40 mL,每次敞口5 min;每隔7 d取样进行指标的检测。取样前将油摇匀,63 d后油样取尽。植物油在自然光下存放,白天平均温度26.7℃,夜晚平均温度21.4℃。

1 L包装植物油的使用:参考张羽飞<sup>[2]</sup>、Zhao<sup>[15]</sup>等的方法并略作修改。1 L包装植物油开封后于每

日中午 11 点和晚上 5 点各敞口 5 min, 每隔 7 d 倒出 40 mL, 并取样进行检测, 取样前将油摇匀, 取样同样截止至 63 d。植物油在自然光下存放, 平均温度 26~30 ℃。

### 1.2.2 脂肪酸组成测定

参考 Yu 等<sup>[16]</sup>的方法制备脂肪酸甲酯。称取 50 mg 油样, 加入 2 mL 正己烷溶解, 再加入 1 mL 2 mol/L 的氢氧化钾-甲醇溶液旋涡振荡 2 min。静置, 吸取上层有机相, 加入适量无水硫酸钠, 旋涡振荡 1 min, 去除微量残留水分。静置, 吸取上清液, 经 0.22 μm 有机膜过滤后, 待气相色谱 (GC) 分析。

GC 条件: DB-Fast FAME 色谱柱 (30 m × 0.25 mm × 0.25 μm); 氢火焰离子化检测器; 进样口和检测器的温度均为 260 ℃, 分流比 1:100; 载气为氮气, 流速 25 mL/min; 升温程序为初始柱温 80 ℃, 保持 0.5 min, 以 40 ℃/min 升温到 165 ℃, 保持 1 min, 再以 2 ℃/min 升温到 220 ℃, 保持 2 min。

采用脂肪酸甲酯混合标准品定性, 峰面积归一化法定量。

### 1.2.3 氧化稳定性指数 (OSI) 测定

参考 GB/T 21121—2007《动植物油脂 氧化稳定性的测定 (加速氧化测试)》, 借助油脂氧化稳定性测定仪测定植物油的 OSI。参数设置: 植物油 3.0 g, 空气流速 20 L/h, 反应温度 (120.0 ± 1.6) ℃。

### 1.2.4 酸值和过氧化值测定

酸值参照 GB 5009.229—2016 进行测定; 过氧化值参照 GB 5009.227—2016 进行测定。

### 1.2.5 数据处理分析

采用 Excel 2019 和 IBM SPSS Statistics 27.0 软件进行数据分析, 采用 Origin 2024 绘图。

## 2 结果与讨论

### 2.1 植物油的脂肪酸组成

4 种食用植物油的主要脂肪酸组成及含量见表 1。

由表 1 可知, 亚麻籽油属于亚麻酸型油脂, 其亚麻酸含量高达 54.18%。葵花籽油、大豆油和花生油分别以亚油酸、亚油酸、油酸为主要脂肪酸。其中: 葵花籽油亚油酸含量高达 61.74%, 油酸/亚油酸比值为 0.44; 大豆油亚油酸含量为 54.05%, 油酸/亚油酸比值为 0.44; 花生油油酸含量达 50.43%, 油酸/亚油酸比值为 1.74。

脂肪酸组成对油脂氧化稳定性的影响显著。Xu 等<sup>[17]</sup>研究表明, 用不同脂肪酸组成的植物油 (山茶油、棕榈油和花生油) 进行煎炸, 亚油酸和亚麻酸

含量较高的油脂其过氧化值和总氧化值增幅较大, 而油酸含量较高的油脂其过氧化值和总氧化值则增幅较低。双键数量多易被氧化形成过氧化物和自由基, 从而推动自动氧化进程<sup>[18-19]</sup>。因此, 油脂中不饱和脂肪酸含量增加会增加氧化反应速率, 降低氧化稳定性。4 种食用植物油中, 亚麻籽油的氧化稳定性最差, 花生油的氧化稳定性最好。

表 1 4 种食用植物油的主要脂肪酸组成

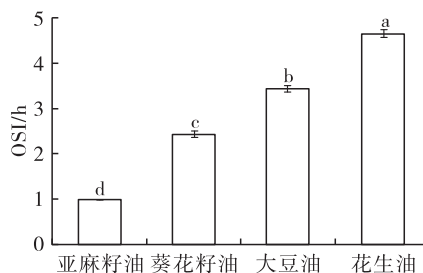
脂肪酸	亚麻籽油	葵花籽油	大豆油	花生油
C16:0	5.68 ± 0.01	6.46 ± 0.04	10.66 ± 0.03	9.86 ± 0.02
C18:0	4.38 ± 0.01	3.43 ± 0.04	4.08 ± 0.01	3.63 ± 0.01
C18:1	19.77 ± 0.03	26.98 ± 0.08	23.62 ± 0.08	50.43 ± 0.13
C18:2n-6	15.65 ± 0.04	61.74 ± 0.12	54.05 ± 0.14	28.98 ± 0.06
C18:3n-6	0.22 ± 0.00	n. d	0.76 ± 0.00	n. d
C18:3n-3	53.96 ± 0.17	0.14 ± 0.01	5.92 ± 0.01	0.10 ± 0.00
C20:0	0.16 ± 0.00	0.26 ± 0.00	0.42 ± 0.00	1.51 ± 0.01
C20:1	n. d	0.18 ± 0.03	n. d	1.21 ± 0.00
C22:0	0.14 ± 0.00	0.75 ± 0.02	0.43 ± 0.00	2.84 ± 0.02
SFA	10.36 ± 0.04	10.88 ± 0.05	15.58 ± 0.05	19.23 ± 0.05
UFA	89.64 ± 0.05	89.12 ± 0.15	84.42 ± 0.13	80.77 ± 0.06
MUFA	19.83 ± 0.05	27.24 ± 0.03	23.70 ± 0.05	51.69 ± 0.08
PUFA	69.82 ± 0.11	61.88 ± 0.09	60.73 ± 0.00	29.08 ± 0.08

注: SFA. 饱和脂肪酸; UFA. 不饱和脂肪酸; MUFA. 单不饱和脂肪酸; PUFA. 多不饱和脂肪酸。n. d. 未检出

Note: SFA. Saturated fatty acid; UFA. Unsaturated fatty acid; MUFA. Monounsaturated fatty acid; PUFA. Polyunsaturated fatty acid. n. d. Not detected

### 2.2 植物油的 OSI

OSI 是判断油脂氧化稳定性的常用指标, 定义为氧化速率的最大变化点, 归因于脂质氧化过程中挥发性有机酸的形成而导致的电导率增加<sup>[20]</sup>。4 种食用植物油的 OSI 如图 1 所示。



注: 不同字母表示差异显著 ( $p < 0.05$ )

Note: Different letters indicate significant difference ( $p < 0.05$ )

图 1 4 种食用植物油的 OSI

Fig. 1 Oxidation stability index of 4 edible vegetable oils

由图 1 可知, 花生油的 OSI 最高, 为 4.56 h, 其次为大豆油 (3.36 h)、葵花籽油 (2.50 h), 亚麻籽油

的 OSI 最低,仅为 0.99 h。因此,4 种食用植物油的氧化稳定性由高到低依次为花生油、大豆油、葵花籽油、亚麻籽油。亚麻籽油的不饱和脂肪酸含量最高,为 89.64% (表 1),且亚麻酸占比最大,而花生油的不饱和脂肪酸含量最低,为 80.77%,且油酸占比最大(表 1),根据油脂自动氧化理论,氧化速度与不饱和程度成正比,亚麻酸的自动氧化速度是亚油酸的 2 倍,是油酸的 25 倍<sup>[21]</sup>,因此亚麻籽油的 OSI 最低,

而花生油的 OSI 最高。OSI 在一定程度上能够反映出 4 种食用植物油的食用期,即 OSI 越高,食用期越长。

### 2.3 不同包装规格食用植物油的氧化酸败行为

#### 2.3.1 酸值

酸值可反映油脂中游离脂肪酸的含量。在家庭用油模式下,5 L 和 1 L 包装规格的 4 种食用植物油在 63 d 使用期内的酸值变化如图 2 所示。

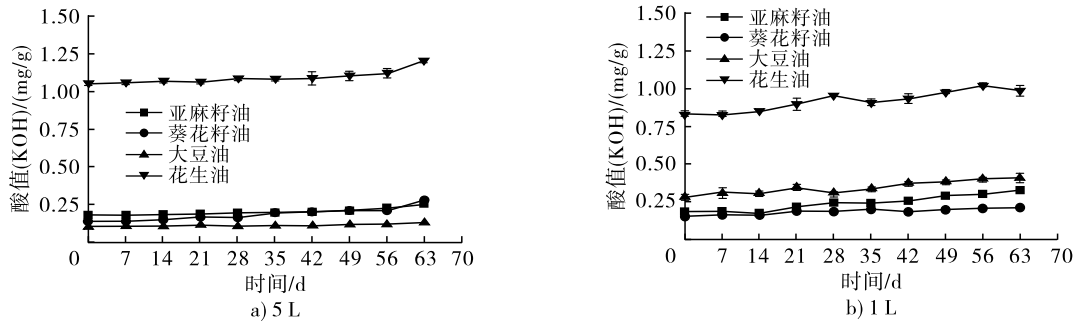


图 2 不同包装规格的 4 种食用植物油在 63 d 使用期内的酸值变化

Fig. 2 Change of acid value of 4 edible vegetable oils with different package sizes during the service period of 63 d

由图 2 可知,4 种食用植物油的酸值随使用期的延长缓慢增加。相比其他 3 种植物油,花生油的酸值较高,原因可能是本实验所用市售花生油是经热榨制得,热榨温度较高可能会导致其初始酸值偏高,或者花生油是压榨制得,无脱酸环节<sup>[22]</sup>。但在 63 d 内,4 种食用植物油的酸值(KOH)均低于 GB 2716—2018《食品安全国家标准 植物油》中 3 mg/g 的限值。这与 Ma 等<sup>[23]</sup>研究发现花生油、玉米油、菜籽油在储藏过程中酸值略有升高,但均未超过国标限值的结果相似。

由图 2a 可知,5 L 包装的花生油、亚麻籽油、葵花籽油和大豆油的初始酸值(KOH)分别为 1.05、0.18、0.14、0.10 mg/g,使用 63 d 后升至 1.21、0.25、0.28、0.13 mg/g,增幅分别为 15%、39%、

100%、30%。由图 2b 可知,使用 63 d 后,1 L 包装的花生油、大豆油、葵花籽油和亚麻籽油的酸值(KOH)分别增至 0.99、0.41、0.21、0.33 mg/g,增幅分别为 19%、46%、39%、78%。2 种包装的 4 种食用植物油酸值的变化幅度差异不显著,说明在储藏过程中甘油三酯水解少,生成的游离脂肪酸相应少<sup>[24]</sup>。

#### 2.3.2 过氧化值

油脂氧化速度通常用过氧化物生成速率衡量,过氧化物含量由过氧化值表示,因此过氧化值能够直观表示油脂氧化程度及氧化速率<sup>[25]</sup>。在家庭用油模式下,5 L 和 1 L 包装规格的 4 种食用植物油在 63 d 使用期内的过氧化值变化如图 3 所示。

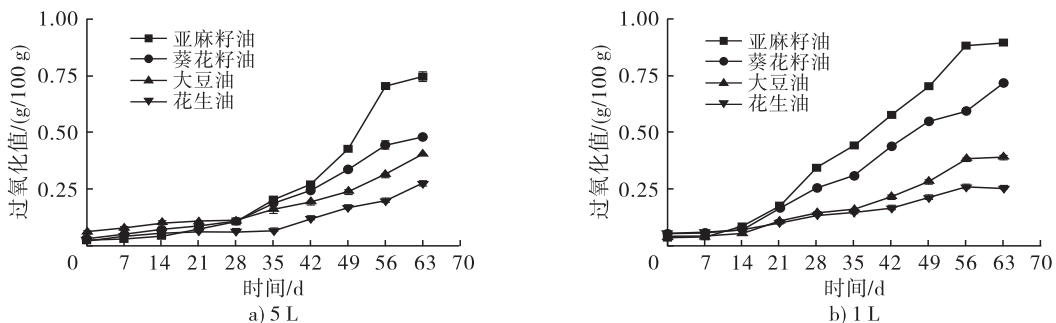


图 3 不同包装规格的 4 种食用植物油在 63 d 使用期内的过氧化值变化

Fig. 3 Change of peroxide value of 4 edible vegetable oils with different package sizes during the service period of 63 d

由图 3 可知,随着开封次数增加和暴露于空气的时间延长,样品的过氧化值均逐渐增加。由图 3a 可知,5 L 包装的 4 种食用植物油的初始过氧化值

均较低,亚麻籽油、葵花籽油、大豆油、花生油的初始过氧化值分别为 0.02、0.03、0.06、0.02 g/100 g。在使用的 35 d 内,4 种食用植物油的过氧化值均未

超过 GB 2716—2018《食品安全国家标准 植物油》的限值(0.25 g/100 g)。随着使用期的继续延长,亚麻籽油、葵花籽油、大豆油、花生油的过氧化值分别在使用 42、49、56、63 d 时超过国标限值,分别达到 0.27、0.34、0.31、0.28 g/100 g。在 63 d 时,亚麻籽油、葵花籽油、大豆油、花生油的过氧化值分别达到 0.75、0.48、0.40、0.28 g/100 g,分别超过国标限值的 200%、92%、60% 和 12%。

由图 3b 可知,1 L 包装的亚麻籽油、葵花籽油、大豆油、花生油的过氧化值分别在使用 28、28、49、56 d 时超过国标限值,分别超过 37%、2%、13%、3%。相比较初始过氧化值,亚麻籽油、葵花籽油、大豆油、花生油在使用 63 d 时的过氧化值分别增加了 0.86、0.67、0.39、0.24 g/100 g,分别超过国标限值的 258%、188%、74%、15%。63 d 内,4 种食用植物油过氧化值的增幅存在显著差异,且在使用后期,油脂的氧化速率显著加快,说明自动氧化链式反应正在快速进行<sup>[26]</sup>。

食用过氧化值超标的植物油可能导致摄入过多的有害氧化产物以及过量的自由基,过量的自由基会引起人体大分子物质的氧化变性、交联和断裂,引发癌症、阿尔茨海默病和动脉粥样硬化等疾病<sup>[27-29]</sup>。因此,过氧化值超标的植物油不宜再食用。

#### 2.4 植物油脂肪酸与氧化稳定性的相关性分析

采用皮尔逊双变量相关性分析,研究 4 种食用植物油脂肪酸组成对其使用期内氧化稳定性的影响,结果如表 2 所示。

表 2 4 种食用植物油脂肪酸与氧化稳定性间的皮尔逊相关系数

Table 2 Pearson correlation coefficients between fatty acids and oxidative stability of 4 edible vegetable oils

脂肪酸	OSI	ΔPOV	ΔAV
SFA	0.942**	-0.854**	0.178
PUFA	-0.881**	0.776 *	-0.599
C18:1	0.829 *	-0.724 *	0.696
C18:2	0.246	-0.456	-0.064
C18:3	-0.809 *	0.909**	-0.360

注:\*\*表示极显著( $p < 0.01$ );\*表示显著( $p < 0.05$ );ΔPOV、ΔAV 分别代表 63 d 与 0 d 过氧化值和酸值的变化值

Note:\*\* $p < 0.01$ , \* $p < 0.05$ . ΔPOV and ΔAV represent the change value of peroxide value and acid value between 63 d and 0 d respectively

由表 2 可知,食用植物油的 OSI 与饱和脂肪酸含量呈极显著正相关,与多不饱和脂肪酸含量呈极

显著负相关,与亚麻酸含量呈显著负相关,与油酸含量呈显著正相关。Dhyani 等<sup>[30]</sup>在紫苏籽油中添加棕榈油、椰子油,其氧化稳定性提高的主要原因是饱和脂肪酸含量增加,与本文结果相似。过氧化值增量与饱和脂肪酸含量存在极显著负相关,同时与多不饱和脂肪酸含量存在显著正相关。不同种类的不饱和脂肪酸对过氧化值的影响不一致,亚麻酸含量与过氧化值增量存在极显著正相关,油酸和亚油酸含量与过氧化值增量存在负相关,其中油酸具有显著性。这一结果表明,亚麻酸是导致油脂氧化速率升高的主要脂肪酸,并且不饱和度越高的油脂越易氧化,这与 Hammond 等<sup>[31]</sup>研究得出亚麻酸、亚油酸与油酸在室温下的自动氧化速率比为 25:12:1 的结果具有一致性。而酸值增量和脂肪酸没有很强的相关性,可能是因为本试验是在常温下,且储藏过程中接触水分和微生物较少,导致酸值变化并不明显。

### 3 结论

本文考察了 4 种食用植物油在家庭用油环境中的氧化酸败行为。植物油开封后,在 63 d 使用期内其酸值变化幅度较小,且未超出国标限值;而过氧化值受食用植物油种类影响显著。5 L 包装食用植物油中,亚麻籽油在使用 42 d 时过氧化值超出国标限值,而葵花籽油、大豆油、花生油的过氧化值分别在使用 49、56、63 d 时超过国标限值。1 L 包装的 4 种食用植物油呈现与 5 L 包装一致的氧化酸败行为,亚麻籽油在使用 28 d 时过氧化值超过国标限值,花生油则在使用 56 d 时过氧化值超过国标限值。因此,建议 5 L 包装食用植物油在开封后尽量在 42 d 内食用完,1 L 包装食用植物油尽量在 28 d 内食用完。

#### 参考文献:

- [1]王兴国. 我国植物油消费变迁、影响及趋势 [J]. 中国粮食经济, 2023(6): 49-53.
- [2]张羽飞, 刘铁良, 郑明明. 抗坏血酸棕榈酸酯对植物油的抗氧化作用 [J]. 中国油脂, 2024, 49(1): 79-83.
- [3]刘展任, 陈波. 国内外食品中反式脂肪酸的摄入水平与监管政策 [J]. 上海预防医学, 2023, 35(8): 745-751.
- [4]王化. 迷迭香天然活性成分的提取及应用研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2011.
- [5]NG C Y, LEONG X F, MASBAH N, et al. Heated vegetable oils and cardiovascular disease risk factors [J]. *Vascul Pharmacol*, 2014, 61(1): 1-9.
- [6]马晶晶, 孙冲, 张牧焱, 等.  $\omega$ -6 多不饱和脂肪酸氧化产物 4-羟基壬烯醛的研究进展 [J]. 江苏农业科学, 2021, 49(19): 57-64.
- [7]YAMASHIMA T, OTA T, MIZUKOSHI E, et al. Intake of

- $\omega$  - 6 polyunsaturated fatty acid - rich vegetable oils and risk of lifestyle diseases [J]. *Adv Nutr*, 2020, 11 (6): 1489 - 1509.
- [8] PILLON N J, SOULÈRE L, VELLA R E, et al. Quantitative structure - activity relationship for 4 - hydroxy - 2 - alkenal induced cytotoxicity in L6 muscle cells [J]. *Chem Biol Interact*, 2010, 188(1): 171 - 180.
- [9] PATTNAIK M, MISHRA H N. Oxidative stability of ternary blends of vegetable oils; A chemometric approach [J/OL]. *LWT - Food Sci Technol*, 2021, 142: 111018 [2024 - 03 - 01]. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111018>.
- [10] 沈贤成, 张蔚, 姜文艳, 等. 植物油在储存过程中氧化情况分析 [J]. *黑龙江粮食*, 2021(12): 93 - 95.
- [11] 鲍丹青, 毕艳英, 王梦华, 等. 植物油在储存过程中氧化情况的研究 [J]. *中国油脂*, 2009, 34(9): 38 - 43.
- [12] ZHAO Z, HUANG J, JIN Q, et al. Influence of oryzanol and tocopherols on thermal oxidation of rice bran oil during the heating process at Chinese cooking temperatures [J/OL]. *LWT - Food Sci Technol*, 2021, 142: 111022 [2024 - 03 - 01]. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111022>.
- [13] WARNER K, FRANKEL E N, MOUNTS T L. Flavor and oxidative stability of soybean, sunflower and low erucic acid rapeseed oils [J]. *J Am Oil Chem Soc*, 1989, 66 (4): 558 - 564.
- [14] 季敏, 刘忠义, 张剑, 等. 食用油使用过程中存贮条件对其氧化稳定性的影响研究 [J]. *中国油脂*, 2018, 43 (5): 92 - 94.
- [15] ZHAO P, ZHANG X, JIN Y, et al. Long - term stability of blends of sesame oil or soybean oil with tuna oil under daily use conditions [J]. *J Am Oil Chem Soc*, 2021, 98 (9): 933 - 941.
- [16] YU J, WEI W, WANG F, et al. Evaluation of total, Sn - 2 fatty acid, and triacylglycerol composition in commercial infant formulas on the Chinese market: A comparative study of preterm and term formulas [J/OL]. *Food Chem*, 2022, 384: 132477 [2024 - 03 - 01]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132477>.
- [17] XU T T, LI J, FAN Y W, et al. Comparison of oxidative stability among edible oils under continuous frying conditions [J]. *Int J Food Prop*, 2015, 18(7): 1478 - 1490.
- [18] LI J, LIU J, SUN X, et al. The mathematical prediction model for the oxidative stability of vegetable oils by the main fatty acids composition and thermogravimetric analysis [J]. *LWT - Food Sci Technol*, 2018, 96: 51 - 57.
- [19] MOSER B R. Comparative oxidative stability of fatty acid alkyl esters by accelerated methods [J]. *J Am Oil Chem Soc*, 2009, 86(7): 699 - 706.
- [20] ZHENG L, ZHANG T, XIE L, et al. Physicochemical characteristics of *Actinostemma lobatum* Maxim. kernel oil by supercritical fluid extraction and conventional methods [J/OL]. *Ind Crops Prod*, 2020, 152: 112516 [2024 - 03 - 01]. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112516>.
- [21] HUI Y H. 贝雷油脂化学与工艺学:第 2 卷 [M]. 徐生庚, 裘爱泳, 译. 北京: 中国轻工业出版社, 2001.
- [22] 刘玉兰, 刘瑞花, 钟雪玲, 等. 不同制油工艺所得花生油品质指标差异的研究 [J]. *中国油脂*, 2012, 37(9): 6 - 10.
- [23] MA Y, WANG G, DENG Z, et al. Effects of endogenous anti - oxidative components from different vegetable oils on their oxidative stability [J/OL]. *Foods*, 2023, 12(11): 2273 [2024 - 03 - 01]. <https://doi.org/10.3390/foods12112273>.
- [24] RABIEJ - KOZIOŁ D, KRZEMIŃSKI M P, SZYDŁOWSKA - CZERNIAK A. Steryl sinapate as a new antioxidant to improve rapeseed oil quality during accelerated shelf life [J/OL]. *Materials (Basel)*, 2021, 14(11): 3092 [2024 - 03 - 01]. <https://doi.org/10.3390/ma14113092>.
- [25] GÓMEZ - ALONSO S, MANCEBO - CAMPOS V, DESAMPARADOS SALVADOR M, et al. Oxidation kinetics in olive oil triacylglycerols under accelerated shelf - life testing (25 - 75 °C) [J]. *Eur J Lipid Sci Technol*, 2004, 106(6): 369 - 375.
- [26] 牛付欢, 梁俊梅, 张余权, 等. 富含  $n - 3$  多不饱和脂肪酸调和油模拟家庭食用的存储稳定性研究 [J]. *粮食与食品工业*, 2013, 20(6): 21 - 25, 28.
- [27] GUPTA N, VERMA K, NALLA S, et al. Free radicals as a double - edged sword: The cancer preventive and therapeutic roles of curcumin [J/OL]. *Molecules*, 2020, 25(22): 5390 [2024 - 03 - 01]. <https://doi.org/10.3390/molecules25225390>.
- [28] PEÑA - BAUTISTA C, BAQUERO M, VENTO M, et al. Free radicals in Alzheimer's disease: Lipid peroxidation biomarkers [J]. *Clin Chim Acta*, 2019, 491: 85 - 90.
- [29] ZHANG Y, WANG M, ZHANG X, et al. Mechanism, indexes, methods, challenges, and perspectives of edible oil oxidation analysis [J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2023, 63(21): 4901 - 4915.
- [30] DHYANI A, SINGH P K, CHOPRA R, et al. Enhancement of oxidative stability of perilla seed oil by blending it with other vegetable oils [J]. *J Oleo Sci*, 2022, 71(8): 1135 - 1144.
- [31] HAMMOND E G, WHITE P J. A brief history of lipid oxidation [J]. *J Am Oil Chem Soc*, 2011, 88(7): 891 - 897.