

不同食用油氧化稳定性比较研究

何雅雯, 李孟俊, 于修焯, 刘晓莉, 徐立荣

(西北农林科技大学 食品科学与工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 为了比较不同食用油的氧化稳定性, 选取紫苏油、亚麻籽油、核桃油、菜籽油和芝麻油 5 种食用油为原料, 以烘箱法为对照, 分别采用涂膜法和模拟法以过氧化值和酸值为考察指标对其氧化稳定性进行评价, 并对其氧化过程中的脂肪酸组成变化进行探讨。结果表明: 5 种食用油氧化稳定性从高到低依次为: 芝麻油 > 菜籽油 > 核桃油 > 亚麻籽油 > 紫苏油; 在氧化初期, 多不饱和脂肪酸含量减少, 单不饱和脂肪酸含量和饱和脂肪酸含量有不同程度的增加, 多不饱和脂肪酸含量对食用油氧化稳定性具有明显的影响, 特别是亚麻酸含量; 在评价氧化稳定性的方法中, 烘箱法操作简便但无法反映氧化实际情况, 涂膜法检测过程高效且实时, 模拟法可反映食用油在使用中的实际氧化过程。

关键词: 食用油; 氧化稳定性; 脂肪酸含量

中图分类号: TS225.1; TQ646 文献标识码: A 文章编号: 1003-7969(2018)03-0044-06

Comparison of oxidative stabilities of different edible oils

HE Yawen, LI Mengjun, YU Xiuzhu, LIU Xiaoli, XU Lirong

(College of Food Science and Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, Shaanxi, China)

Abstract: In order to compare the oxidative stabilities of different edible oils, five edible oils (perilla oil, linseed oil, walnut oil, rapeseed oil and sesame oil) were chosen to carry on the mesh cell-based oxidation method (MCOM) and simulation method with Schaal oven test as control. The peroxide value and acid value were the reference indexes to evaluate the oxidative stability of edible oils, and the change of fatty acid compositions during the oxidation process was discussed. The results showed that sesame oil had the strongest oxidative stability, followed by rapeseed oil, walnut oil, linseed oil and perilla oil. In the early stage of oxidation, there was a reduction in polyunsaturated fatty acid content and an increase in saturated fatty acid content and monounsaturated fatty acid content. The content of polyunsaturated fatty acid had significant effect on the oxidative stability of edible oils, especially the content of linolenic acid. In the methods of evaluating oxidative stability, the Schaal oven test was simple but lack of actual oxidation process, the MCOM was efficient and real-time and the simulation method could reflect the actual oxidation process of edible oil during usage.

Key words: edible oil; oxidative stability; fatty acid content

食用油氧化稳定性可作为评价食用油品质以及推测货架期的重要依据。在国家标准 GB 2716—

2005 中, 以过氧化值大于 20 meq/kg 或酸值(KOH) 大于 3 mg/g 为氧化油的判定标准, 即不可作为食用油。因此可通过测定食用油氧化变质所用的时间来评价其氧化稳定性^[1]。不同食用油的氧化稳定性不同, 其货架期的差异很大。除食用油中天然抗氧化成分的差异外, 不同脂肪酸组成对食用油氧化稳定性的影响, 特别是亚麻酸含量对氧化稳定性的影响也很值得研究^[2]。

烘箱法是食用油氧化稳定性的评价传统方法之

收稿日期: 2017-04-16

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31671819)

作者简介: 何雅雯(1994), 女, 在读本科, 专业为食品质量与安全(E-mail) yovenhe@qq.com。

通信作者: 于修焯, 副教授(E-mail) xiuzhuyu1004@hotmail.com。

一,此法简单快捷,但误差较大^[3]。此外,食用油氧化稳定性还可通过氧化稳定指数(OSI)表示。此方法自动化程度高、测定时间短;不仅用于测定液体油脂,也可用于测定含油的固体样品^[4-5]。随着检测技术的不断发展,许多评价食用油氧化稳定性的新技术应运而生。其中,傅里叶变化红外光谱(FTIR)因其准确、高效且无损的特点而广泛运用于氧化评价中^[6-9]。我们研究小组已构建了基于涂膜法FTIR的食用油分析检测技术,通过测定涂抹于不锈钢筛网或聚乙烯等介质薄膜上的油样红外光谱特征变化,成功地建立了油脂中氢过氧化物($3\ 471\ \text{cm}^{-1}$)、游离脂肪酸($1\ 703\ \text{cm}^{-1}$)、反式脂肪酸($968\ \text{cm}^{-1}$)等的定量检测模型^[10-11];除此之外,还在建立快速检测食用油的氧化稳定性中取得了良好的效果^[7]。但上述方法均无法模拟食用油在家庭使用中的变化情况。在家庭使用的过程中,食用油的品质会受到使用频率、光照、温度、包装材料等因素的影响^[12]。通过模拟法可模拟食用油家庭使用过程中的实际情况,以酸值和过氧化值为指标评价油脂氧化稳定性。目前,国内外通过模拟法评价食用油氧化稳定性的研究报道较少。

本文选取5种具有代表性不同脂肪酸组成的食用油,即富含亚麻酸的紫苏油和亚麻籽油、富含油酸的菜籽油、富含亚油酸的核桃油和芝麻油,以过氧化值和酸值为评价指标,比较研究在烘箱法、涂膜法和模拟法中食用油的氧化稳定性,以期为食用油的安全使用提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料

紫苏油,甘肃润玉食品有限公司;亚麻籽油,陕西关中油坊油脂有限公司;核桃油(秦楚金桃),商洛金桃核桃贸易有限公司;菜籽油(金龙鱼),益海嘉里(兴平)食品工业有限公司;芝麻油(秦楚金桃),商洛金桃核桃贸易有限公司。以上5种食用油其标签均声称不添加任何抗氧化剂。

冰醋酸、异辛烷、乙醚、乙醇、碘化钾、硫代硫酸钠、氢氧化钾等,均为分析纯。十三烷酸、油酸甲酯、硬脂酸甲酯、亚油酸甲酯、亚麻酸甲酯、棕榈酸甲酯标准品,均购于阿拉丁试剂公司。

Vertex70 布鲁克 FTIR 光谱仪,德国布鲁克公司;BZF-30 真空干燥箱;SHB-III 循环水式多用真空泵;SHIMADZUGC 2014 气相色谱仪,日本岛津公司。

1.2 实验方法

1.2.1 油样预处理

取 100 目硅胶在 $60\ ^\circ\text{C}$ 的条件下活化 3 h,装成

一定大小的硅胶柱。将紫苏油、亚麻籽油、核桃油、芝麻油、菜籽油样品分别通过活化硅胶柱去除活性氧等物质,通过国标法测定酸值和过氧化值确认,其氢过氧化物和游离脂肪酸均未检出。

1.2.2 烘箱法评价食用油氧化稳定性

分别取 5 种预处理后的油样 30 mL 放入 50 mL 烧杯中,置于 $63\ ^\circ\text{C}$ 烘箱内。每隔一定时间测定其过氧化值和酸值。

1.2.3 涂膜法评价食用油氧化稳定性

在室温条件下,用移液枪移取 $200\ \mu\text{L}$ 油样于 100 目筛网上,使其均匀地分散在筛网上形成油膜。以空白筛网为背景,将空白筛网与样品形成的筛网油膜放置于同一水平位置上进行光谱扫描,使用 OMNIC 7.3 和 TQ Analyst 7.2 软件,通过 $4\ 334$ 、 $4\ 549\ \text{cm}^{-1}$ 对所测油样进行光程校正,将油膜的光程统一到 $0.15\ \text{mm}$ ^[7]。

将涂满油样的筛网膜放于室温条件下进行氧化,每隔 12 h 扫描采集其红外光谱。

光谱采集条件为:光谱范围 $6\ 000\sim 400\ \text{cm}^{-1}$,分辨率 $4\ \text{cm}^{-1}$,温度 $25\ ^\circ\text{C}$,扫描次数 16 次,样品光谱均以 100 目筛网为背景光谱。

1.2.4 模拟法评价食用油氧化稳定性

在室温和正常的光照条件下,分别取 5 种预处理后的油样 300 g 放入 500 mL PET 塑料瓶中,模拟家庭食用油的使用,每天定时取出一定数量的食用油 3~5 次。每隔一定时间测定其过氧化值和酸值。

1.2.5 脂肪酸组成测定

参照 GB/T 17376—2008 进行脂肪酸甲酯化。分别取 5 种预处理过的油样 50 mg 放入 50 mL 烧瓶中,加入 7 mg 十三烷酸内标溶液,加入 6 mL 0.5% 氢氧化钠-甲醇溶液反应 10 min,之后加入 7 mL 15% 三氟化硼-甲醇溶液反应 1 min,最后加入 3 mL 正己烷混合 1 min,吸取上层清液过微滤膜后供气相色谱分析。

分析条件:色谱柱为 CP-Sil 88 石英毛细管柱;以氢气为载气,以氮气、氢气和空气为燃烧气;进样口温度 $250\ ^\circ\text{C}$;程序升温为 $45\ ^\circ\text{C}$ 保持 4 min,以 $13\ ^\circ\text{C}/\text{min}$ 升至 $175\ ^\circ\text{C}$,保持 27 min,再以 $4\ ^\circ\text{C}/\text{min}$ 升至 $215\ ^\circ\text{C}$,保持 35 min;检测器温度 $250\ ^\circ\text{C}$,氢气流速 $30.0\ \text{mL}/\text{min}$;氮气流速 $30.0\ \text{mL}/\text{min}$;空气流速 $300\ \text{mL}/\text{min}$ 。通过脂肪酸甲酯标准品的保留时间与样品峰的保留时间定性,按内标法计算各脂肪酸的含量。

1.2.6 氧化指标测定

过氧化值测定参照 GB/T 5538—2005;酸值测

定参照 GB/T 5530—2005。

2 结果与分析

2.1 烘箱法

2.1.1 过氧化值

将 5 种食用油样置于 63 °C 的烘箱内进行氧化,测定其过氧化值达到 20 meq/kg 所需的时间。其结果见图 1。

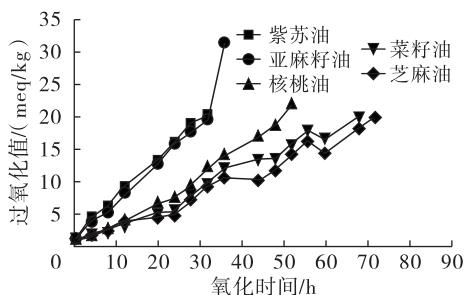


图 1 烘箱法中食用油过氧化值的变化

由图 1 可知,在烘箱法处理中,随着氧化时间的延长,5 种食用油的过氧化值均有明显的增加。紫苏油和亚麻籽油过氧化值的变化速率较高,分别在氧化 30.9 h 和 32.2 h 后过氧化值达到 20 meq/kg。核桃油氧化速率较平缓,在烘箱中氧化 49.6 h 后过氧化值达到 20 meq/kg。菜籽油和芝麻油氧化速率较低,分别在氧化 67.9 h 和 71.7 h 后过氧化值达到 20 meq/kg。过氧化值的变化速率反映油脂生成氢过氧化物的快慢程度。因此,5 种食用油的氧化速率由高到低依次是:紫苏油、亚麻籽油、核桃油、菜籽油、芝麻油。

2.1.2 酸值

酸值反映食用油中游离脂肪酸含量的多少。在食用油过氧化值达到 20 meq/kg 的过程中,酸值的变化情况见图 2。

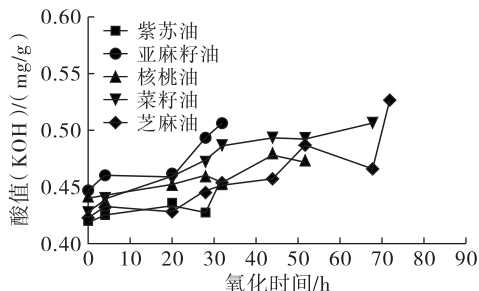


图 2 烘箱法中食用油酸值的变化

由图 2 可知,在 5 种食用油过氧化值达到 20 meq/kg 的过程中,其酸值 (KOH) 在一定范围内波动,没有明显的增加趋势,且均小于 3 mg/g。因此,在本方法中酸值不可作为评定油脂氧化稳定性的指标。

2.2 涂膜法

2.2.1 过氧化值

基于 Xu 等^[7]建立的过氧化值模型 $y = 0.0015x - 0.0017$ (y 为峰高),得出当 5 种食用油过氧化值达到 20 meq/kg 时,氢过氧化物在 3 471/4 549 cm^{-1} 处的峰高 (0.028 3)。在室温条件下,将 5 种食用油分别涂在筛网上进行氧化,采集其红外光谱。图 3 是食用油氧化过程光谱的变化情况 (以亚麻籽油为例)。5 种食用油的氢过氧化物红外光谱特征吸收峰的实时变化情况如图 4 所示。

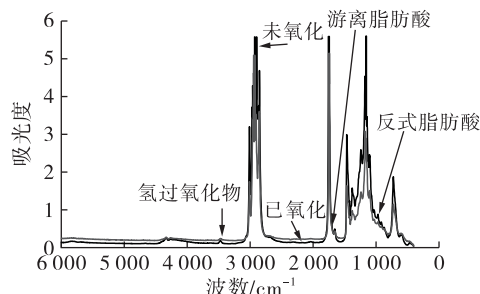


图 3 亚麻籽油在氧化过程中的光谱变化

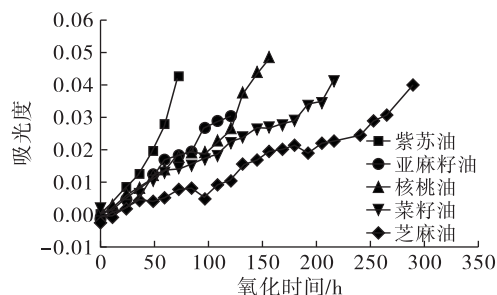


图 4 食用油氢过氧化物特征吸收峰 (3 471/4 549 cm^{-1}) 的实时变化

由图 4 可知,在涂膜法中,随着氧化时间的延长,氢过氧化物在 3 471/4 549 cm^{-1} 处的特征吸收峰呈递增趋势。在涂膜法中,紫苏油氧化速率最高,在 60.1 h 内过氧化值达到 20 meq/kg。亚麻籽油过氧化值达到 20 meq/kg 需要 101.4 h。核桃油在 123.1 h 内过氧化值达到 20 meq/kg。菜籽油和芝麻油过氧化值达到 20 meq/kg 所需时间分别为 172.3 h 和 251.1 h。5 种食用油氧化速率从高到低依次是:紫苏油、亚麻籽油、核桃油、菜籽油、芝麻油,与烘箱法的结果一致。

2.2.2 酸值

食用油在涂膜法氧化过程中,羰基于 1 703/4 549 cm^{-1} 处具有特征吸收^[13]。图 5 为食用油氧化 252 h 内食用油羰基特征吸收峰的实时变化情况。羰基特征吸收峰的变化情况可反映出食用油中游离羧酸基团含量的变化,即酸值的变化情况。结合图 4 可知,在氧化时间 252 h 内 5 种食用油的过氧化值

均已达到 20 meq/kg 以上。

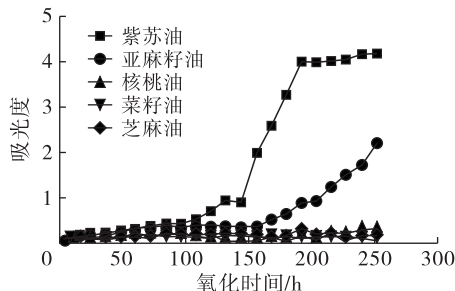


图5 食用油羰基特征吸收峰(1703/4549 cm⁻¹)的实时变化

由图5可知,当芝麻油和菜籽油氧化变质时,紫苏油和亚麻籽油早已发生酸败,其游离脂肪酸增多,酸值有明显的跃变。且在氧化后期,紫苏油的酸值逐渐趋于平稳,表明氧化速率逐渐降低并趋于终止。油脂酸值变化的主要原因有:油脂分解后产生游离脂肪酸;不饱和脂肪酸在氧化过程中生成氢过氧化物,氢过氧化物分解为醛、酮,进而氧化生成酸;氢过氧化物分解成小分子酸,脂肪酸与小分子酸发生聚合反应,油脂中的游离脂肪酸减少^[14]。

2.3 模拟法

2.3.1 过氧化值

为模拟家庭食用油在使用过程中的氧化情况,将5种食用油样置于室温下进行氧化,测定其过氧化值达到20 meq/kg所需的时间,其结果见图6。

由图6可看出,在室温条件下,随着氧化时间的延长,5种食用油的过氧化值均呈上升趋势。紫苏油和亚麻籽油的氧化速率较高,在开始氧化194.4 h和223.2 h后过氧化值达到20 meq/kg。核桃油的氧化速率较平缓,在室温下储藏422.4 h后过氧化值达到20 meq/kg。菜籽油和芝麻油的氧化速率较低,分别在储藏588.1 h和691.2 h后过氧化值达到

20 meq/kg。氧化速率由高到低依次是:紫苏油、亚麻籽油、核桃油、菜籽油、芝麻油,与烘箱法和涂膜法的结果一致。

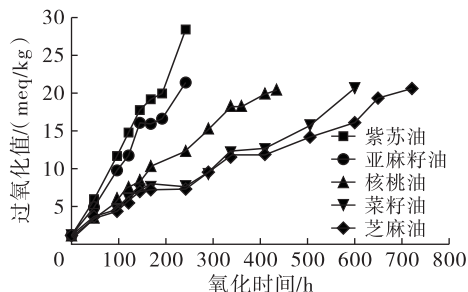


图6 模拟法中食用油过氧化值的变化

2.3.2 酸值

在模拟法中,食用油过氧化值达到20 meq/kg的过程内酸值的变化情况见图7。

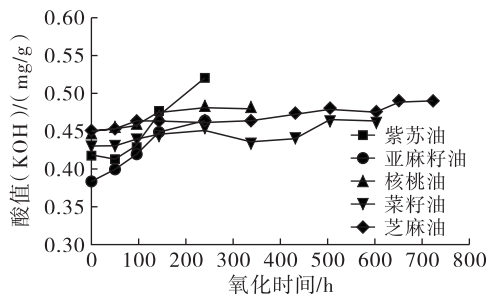


图7 模拟法中食用油酸值的变化

由图7可知,在5种食用油过氧化值达到20 meq/kg的氧化过程中,其酸值在一定范围内波动。除紫苏油外,其他食用油的酸值没有明显增加。这是因为在模拟法氧化过程中,油脂的氧化速度较缓慢,氢过氧化物还未大量分解形成游离脂肪酸。

2.3.3 脂肪酸组成

5种食用油在模拟法中脂肪酸组成的变化如表1所示。

表1 氧化过程中食用油的脂肪酸组成变化

油脂	氧化时间/h	含量/%				
		棕榈酸	硬脂酸	油酸	亚油酸	亚麻酸
紫苏油	0	5.66 ± 0.01	1.73 ± 0.03	20.42 ± 0.12	10.38 ± 0.13	60.19 ± 0.15
	96	5.57 ± 0.04	1.72 ± 0.10	20.41 ± 0.02	10.39 ± 0.09	60.28 ± 0.32
	144	6.14 ± 0.05	1.82 ± 0.04	21.03 ± 0.10	10.49 ± 0.07	58.81 ± 0.24
	192	6.24 ± 0.04	1.84 ± 0.05	21.13 ± 0.08	10.51 ± 0.10	58.67 ± 0.11
	240	6.24 ± 0.05	1.84 ± 0.04	21.13 ± 0.11	10.51 ± 0.11	58.67 ± 0.25
亚麻籽油	0	4.23 ± 0.10	2.93 ± 0.02	29.78 ± 0.09	16.91 ± 0.18	41.61 ± 0.16
	96	4.23 ± 0.11	2.96 ± 0.02	29.95 ± 0.14	16.94 ± 0.14	41.38 ± 0.24
	144	4.46 ± 0.02	3.03 ± 0.04	29.84 ± 0.17	16.54 ± 0.11	40.45 ± 0.18
	192	4.61 ± 0.01	3.08 ± 0.07	30.20 ± 0.10	16.70 ± 0.14	40.48 ± 0.10
	240	4.53 ± 0.02	3.05 ± 0.09	29.89 ± 0.15	16.53 ± 0.15	40.33 ± 0.27

续表 1

油脂	氧化时间/h	含量/%				
		棕榈酸	硬脂酸	油酸	亚油酸	亚麻酸
核桃油	0	6.02 ± 0.12	2.45 ± 0.02	18.77 ± 0.01	51.93 ± 0.32	9.49 ± 0.01
	96	6.38 ± 0.14	2.53 ± 0.08	19.03 ± 0.04	51.52 ± 0.24	9.27 ± 0.02
	144	6.42 ± 0.04	2.56 ± 0.05	19.20 ± 0.14	51.19 ± 0.27	9.22 ± 0.09
	192	6.49 ± 0.05	2.57 ± 0.12	19.19 ± 0.02	51.31 ± 0.34	9.22 ± 0.04
	240	6.51 ± 0.10	2.57 ± 0.01	19.21 ± 0.01	51.22 ± 0.22	9.21 ± 0.04
菜籽油	0	3.43 ± 0.15	1.74 ± 0.07	60.82 ± 0.12	19.26 ± 0.02	6.86 ± 0.08
	96	3.75 ± 0.16	1.80 ± 0.07	60.71 ± 0.47	18.56 ± 0.01	6.59 ± 0.22
	144	3.73 ± 0.02	1.80 ± 0.11	60.68 ± 0.14	18.51 ± 0.07	6.55 ± 0.04
	192	3.81 ± 0.08	1.81 ± 0.02	60.83 ± 0.23	18.52 ± 0.02	6.54 ± 0.05
	240	3.82 ± 0.01	1.82 ± 0.02	61.15 ± 0.17	18.60 ± 0.10	6.55 ± 0.02
芝麻油	0	7.79 ± 0.08	4.48 ± 0.08	34.02 ± 0.09	46.10 ± 0.02	0.60 ± 0.11
	96	8.49 ± 0.09	4.62 ± 0.10	34.16 ± 0.10	45.17 ± 0.09	0.58 ± 0.02
	144	8.62 ± 0.11	4.68 ± 0.09	34.43 ± 0.08	45.10 ± 0.13	0.57 ± 0.10
	192	8.64 ± 0.15	4.67 ± 0.07	34.35 ± 0.14	45.10 ± 0.02	0.57 ± 0.01
	240	8.49 ± 0.07	4.62 ± 0.04	34.35 ± 0.10	44.90 ± 0.05	0.57 ± 0.02

由表 1 可以看出,在氧化初始时,紫苏油和亚麻籽油含有较高的亚麻酸(60.19%、41.61%)。核桃油含有较高的亚油酸(51.93%)。菜籽油含有较高的油酸(60.82%)。芝麻油含有较高的油酸(34.02%)、亚油酸(46.10%),且亚麻酸含量极低(0.60%)。5 种食用油的主要脂肪酸均是 18 碳不饱和脂肪酸。

亚麻酸含量从高到低依次为:紫苏油、亚麻籽油、核桃油、菜籽油、芝麻油。结果表明:在室温条件下,随着氧化时间的延长,紫苏油中亚麻酸含量减少较明显,从 0 h 时的 60.19% 到 240 h 时的 58.67%,共减少了 1.52 个百分点。亚麻籽油中的亚麻酸含量也具有较明显的变化,从 0 h 时的 41.61% 到 240 h 时的 40.33%,共减少了 1.28 个百分点。核桃油、菜籽油和芝麻油在氧化过程中亚麻酸含量的变化较小。相比于亚麻酸,核桃油和芝麻油中的亚油酸含量较为丰富。在氧化的过程中,亚麻籽油、核桃油、菜籽油、芝麻油的亚油酸含量基本均逐渐减少,而紫苏油的亚油酸含量呈上升的趋势。与此同时,核桃油的亚油酸含量(下降 0.71 个百分点)和芝麻油的亚油酸含量(下降 1.20 个百分点)发生较为明显的变化。

在氧化过程中,5 种食用油的油酸、棕榈酸、硬脂酸的含量均有所增加。这是由于在氧化反应初期,多不饱和脂肪酸中部分双键饱和,与此同时发生脂质过氧化反应和热聚合反应。过氧化物和聚合物的产生导致脂肪酸总含量降低,从而导致饱和脂肪酸(棕榈酸和硬脂酸)及单不饱和脂肪酸(油酸)含量的增加^[15-16]。

2.4 讨论

在食用油的氧化过程中,首先要经历诱导期。处于诱导期的食用油氧化速度较慢,且氢过氧化物的形成速度远大于其分解速度。在诱导期之后,食用油需要经过氧化期。在这一阶段中,油脂氧化生成的氢过氧化物分解成许多小分子的化合物(醇类和羟基化合物),并进一步氧化分解为羧酸,在此期间可检测到过氧化值的明显增加,反应速度较快,油脂开始劣变。油脂从诱导期到氧化期所用时间的长短,可反映油脂抗氧化能力的强弱,即油脂的氧化稳定性。本研究选用过氧化值 20 meq/kg 为食用油变质的判断依据,考察不同食用油氧化稳定性的差异。

食用油的氧化稳定性与其中多不饱和脂肪酸的含量有关,尤其是亚麻酸。亚麻酸是 $n-3$ 多不饱和脂肪酸。相比于亚油酸($n-6$),亚麻酸的不饱和键离末端甲基的位置较近,与空气接触更易被氧化。紫苏油和亚麻籽油含有较高的亚麻酸(60.19% 与 41.61%),故其氧化稳定性较弱。核桃油中亚麻酸含量较低(9.49%),但含有较高的亚油酸(51.93%),因此其氧化稳定性也相对较弱。菜籽油中亚油酸(19.26%)和亚麻酸(6.86%)含量均较低,且富含维生素 E 等内源性抗氧化成分,因此其氧化稳定性较强。芝麻油的氧化稳定性较强的原因,其一是亚麻酸(0.60%)含量极低,其二是含有芝麻酚、芝麻酚林和芝麻素等内源性抗氧化成分。

3 结论

通过模拟法、涂膜法对 5 种食用油的氧化稳定性进行评价,得出氧化稳定性从强到弱依次为:芝麻

油 > 菜籽油 > 核桃油 > 亚麻籽油 > 紫苏油, 结果与烘箱法的相一致, 且其氧化稳定性与亚麻酸含量有一定关系。分析食用油在模拟法中脂肪酸含量的变化可知, 在油脂氧化初期, 多不饱和脂肪酸(亚油酸和亚麻酸)含量减少, 单不饱和脂肪酸(油酸)和饱和脂肪酸(硬脂酸和棕榈酸)含量有不同程度的增加。多不饱和脂肪酸的含量对食用油氧化稳定性具有较为明显的影响, 尤其是亚麻酸。除此之外, 内源性抗氧化成分对食用油氧化稳定性也有一定的影响。对比分析3种评价氧化稳定性的方法可知, 烘箱法操作简便但无法反映氧化实际情况; 涂膜法检测过程高效且实时; 模拟法可反映食用油在使用中的实际氧化过程。

参考文献:

- [1] WANG T, LEE S, DA SILVA J A C, et al. Determination of oxidation of methyl ricinoleates [J]. J Am Oil Chem Soc, 2015, 92(6): 871-880.
- [2] 宋萧萧, 李杨, 马文君, 等. 鼠尾草酸对山茶油氧化稳定性的影响研究[J]. 中国油脂, 2016, 41(2): 39-43.
- [3] WOMENI H M, TONFACK D F, IRUKU N S, et al. Valorization of soursop flowers (*Annona Muricata* L.) as potent source of natural antioxidants for stabilization of palm olein during accelerated storage [J]. Food Sci Nutr, 2016, 4(6): 802-810.
- [4] 王惠芳, 樊铁. AOM 和 OSI 测定法比较研究[J]. 中国粮油学报, 1994, 9(2): 53-59.
- [5] 牛付欢, 梁俊梅, 张余权, 等. 油脂 OSI 加速氧化条件下氧化机制初探[J]. 中国粮油学报, 2014, 29(10): 67-71.
- [6] FRVANDE V, ISMAIL A A, SEDMAN J, et al. Monitoring the oxidation of edible oils by Fourier transform infrared spectroscopy [J]. J Am Oil Chem Soc, 1994, 71(3): 243-253.
- [7] XU L, FEI T, LI Q, et al. Qualitative analysis of edible oil oxidation by FTIR spectroscopy using a mesh "cell" [J]. Anal Meth, 2015, 7(1): 4328-4333.
- [8] 于修焯, 杜双奎, 王青林, 等. 傅里叶红外光谱法油脂定量分析研究进展[J]. 中国粮油学报, 2009, 24(1): 129-136.
- [9] 张静亚, 张建新, 于修焯, 等. 基于近红外透射光谱的食用油氧化定性分析[J]. 食品科学, 2012, 33(4): 200-203.
- [10] YU X, LI Q, SUN D, et al. Determination of the peroxide value of edible oils by FTIR spectroscopy using polyethylene films[J]. Anal Meth, 2015, 7(5): 1727-1731.
- [11] DONG X, LI Q, SUN D, et al. Direct FTIR Analysis of free fatty acids in edible oils using disposable polyethylene films[J]. Food Anal Meth, 2015, 8(4): 857-863.
- [12] 冯燕玲, 周建新, 高瑀珑. 储藏环境对菜籽油酸值和过氧化值的影响研究[J]. 粮食与油脂, 2016(2): 23-26.
- [13] 李易文, 陈倩, 张鹏, 等. 基于涂膜法 FTIR 的食用油羰基值快速检测[J]. 食品科学, 2016, 37(8): 226-230.
- [14] 郑良清, 罗诗棋, 张荣, 等. 长时间高温加热对食用植物油酸值的影响[J]. 广东化工, 2016, 43(15): 31-32.
- [15] 王斐, 史闯, 殷钟意, 等. 牡丹籽仁油在加热过程中的脂肪酸组成、酸值和过氧化值变化研究[J]. 食品研究与开发, 2016, 37(17): 21-25.
- [16] 姚仕彬, 叶元土, 李洁, 等. 鱼油在氧化过程中氧化指标及其脂肪酸组成的变化[J]. 饲料研究, 2012(6): 74-76.
- (上接第43页)
- [7] NATARAJAN S, XU C P, BAE H, et al. Proteomic and genetic analysis of glycinin subunits of sixteen soybean genotypes [J]. Plant Physiol Biochem, 2007, 45(6/7): 436-444.
- [8] FEHR W R, HOECK J A, JOHNSON S L, et al. Genotype and environment influence on protein components of soybeans [J]. Crop Sci, 2003, 43: 511-514.
- [9] 李丹, 刘春雷, 江连洲. 纯品 7S 和 11S 蛋白结构与表面疏水性的相关性研究[J]. 食品研究与开发, 2015, 36(7): 5-9, 22.
- [10] 李丹, 江连洲. 大豆 7S 和 11S 蛋白中氨基酸组成与表面疏水性的相关性研究[J]. 中国油脂, 2015, 40(3): 25-29.
- [11] 刘春雷, 孙立斌, 李相昕, 等. 大豆 7S 和 11S 蛋白二级结构与表面疏水性相关性的研究[J]. 食品科学, 2015, 36(17): 28-32.
- [12] 许彩虹. 大豆球蛋白糖基化接枝改性及其热聚集行为研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
- [13] SAMOTO M, MAEBUCHI M, MIYAZAKI C, et al. Abundant proteins associated with lecithin in soy protein isolate [J]. Food Chem, 2007, 102(1): 317-322.
- [14] BIGELOW C C. On the average hydrophobicity of proteins and the relation between it and protein structure [J]. J Theor Biol, 1967, 16: 187-211.
- [15] MORITA S, FUKASE M, YAMAGUCHI M, et al. Purification, characterization, and crystallization of single molecular species of β -conglycinin from soybean seeds [J]. Biosci Biotechnol Biochem, 1996, 60: 866-873.