

亚麻籽油和棕榈液油煎炸油条过程中的品质变化

张 栩¹, 李 颖¹, 汪 勇¹, 周盛敏², 姜元荣²

(1. 暨南大学 食品科学与工程系, 广东省油料生物炼制与营养安全国际联合研究中心, 广州 510632;

2. 丰益(上海)生物技术研发中心有限公司, 上海 200137)

摘要:为了获得亚麻籽油的最适煎炸条件,在 $(180 \pm 5)^\circ\text{C}$ 下,以GB 2716—2018中规定极性化合物含量达到27%为煎炸终点,对亚麻籽油和棕榈液油在油条连续煎炸过程中理化指标进行检测和比较,同时对油条进行感官评定。结果表明:在连续煎炸油条过程中,两种植物油的酸值、总氧化值、极性化合物及聚合物含量均随着煎炸时间的延长而不断增加,但在4 h以内,亚麻籽油极性化合物含量较低;亚麻籽油的极性化合物含量在煎炸13 h后达到27.78%,而棕榈液油的极性化合物含量在煎炸18 h后达到27.27%;相较于棕榈液油,在油条煎炸过程中,亚麻籽油中多不饱和脂肪酸含量不断减少,尤其是 α -亚麻酸下降幅度更大;亚麻籽油 140°C 下的氧化诱导期均在1 h以内,远低于棕榈液油;油条感官评定表明棕榈液油更适宜于油条煎炸。研究表明亚麻籽油适合短时(< 4 h)高温煎炸,不建议长时间深度煎炸。

关键词:亚麻籽油;棕榈液油;油条;品质变化;煎炸稳定性

中图分类号:TS225.1;TS201.2 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2021)07-0041-08

Quality changes in frying of deep-fried dough sticks using flaxseed oil and palm olein

ZHANG Xu¹, LI Ying¹, WANG Yong¹, ZHOU Shengmin², JIANG Yuanrong²

(1. Guangdong International Joint Research Center for Oilseeds Biorefinery, Nutrition and Safety, Department of Food Science and Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632, China; 2. Wilmar (Shanghai) Biotechnology R & D Center Co., Ltd., Shanghai 200137, China)

Abstract: In order to obtain the optimal frying conditions for flaxseed oil, the physicochemical indexes of flaxseed oil and palm olein were tested and compared during the continuous frying of the deep-fried dough sticks at $(180 \pm 5)^\circ\text{C}$, with the frying end point of 27% polar compounds as specified in GB 2716-2018, and the sensory evaluation of the deep-fried dough sticks was carried out. The results showed that acid value, total oxidation value, total polar compounds TPC and polymer in contents for both two oils increased with the prolonging of frying time during the frying cycles, but the TPC content in flaxseed oil was relatively low within 4 h of deep frying. The TPC in flaxseed oil increased to 27.78% at the end of 13 h frying, while the TPC in palm olein rose up to 27.27% after 18 h frying. Compared with the palm olein, the content of polyunsaturated fatty acids in flaxseed oil, α -linolenic acid in particular, had a larger decline. The oxidation induction period of flaxseed oil at 140°C was less than 1 h, much lower than that of palm olein. The sensory evaluation of the deep-fried dough sticks showed that palm olein

was more suitable for frying deep-fried dough sticks. In summary, flaxseed oil seemed to be more suitable for short-term (< 4 h) frying process but not recommended for long-term deep frying cycles.

Key words: flaxseed oil; palm olein; deep-fried dough sticks; quality change; frying stability

收稿日期:2020-12-07;修回日期:2021-04-16

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFD0400200);国家自然科学基金项目(32072252)

作者简介:张 栩(1994),女,硕士研究生,研究方向为油脂加工与营养(E-mail)1532023852@qq.com。

通信作者:李 颖,副研究员(E-mail)yingli@jnu.edu.cn;

汪 勇,教授(E-mail)twyong@jnu.edu.cn。

亚麻籽油是一种富含 α -亚麻酸的植物油, α -亚麻酸作为人体必需的多不饱和脂肪酸,具有促进大脑发育、降低血脂、保护视力及抗炎等功能^[1],但对于其如何健康烹饪,是否适用煎炸等方面未有明确定论。作为常规煎炸用油棕榈液油含有较高的油酸,因其具有独特的脂肪酸组成和甘油三酯特性,热氧化性能好,已在煎炸食品工业中得到广泛应用^[2-3]。油条是一种广受欢迎的传统中式煎炸食品,在高温煎炸环境中(一般在150~200℃),通过传热传质使食物由生变熟,水分迅速蒸发从而使食物具有酥脆的口感及诱人的独特风味,但长时间的反复煎炸会使食用油发生水解、热氧化、热聚合、热裂解甚至异构化等一系列复杂的化学反应,造成油脂色泽变深、黏度增加、烟点降低、起泡性增加等一系列不良变化,并且产生许多对人体健康存在潜在危害的非挥发性降解化合物^[4-5],降低油脂品质和煎炸寿命。

油脂在食品煎炸过程中由于甘油三酯的降解会产生极性化合物,极性化合物含量的变化可表示煎炸油的变质程度,用于评估煎炸油的使用寿命。目前,关于亚麻籽油煎炸稳定性的报道较少,本研究利用亚麻籽油煎炸中式油条,并与市场上常用的棕榈液油作对比,以GB 2716—2018中规定的极性化合物含量限值27%为煎炸终点,考察两种植物油在中式油条煎炸过程中酸值、总氧化值、极性化合物、聚合物等理化指标的变化,对亚麻籽油的热氧化稳定性进行综合评价,进而分析亚麻籽油的最适煎炸条件,为亚麻籽油的健康烹饪提供指导,为其未来的市场推广和拓展提供新思路。

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 原料与试剂

精炼棕榈超级液油,天津龙威粮油工业有限公司;一级亚麻籽油,益海嘉里金龙鱼粮油食品股份有限公司;油条半成品,三全食品股份有限公司;乙醚、95%乙醇、正己烷、氢氧化钠、异丙醇、酚酞指示剂、三氯甲烷、冰乙酸、碘化钾、硫代硫酸钠、可溶性淀粉、异辛烷、*P*-茴香胺、甲醇、三氟化硼-甲酸、无水硫酸钠、氯化钠,分析纯;四氢呋喃、硅胶(粒径48~75 μm (200~300目)),色谱纯。

1.1.2 仪器与设备

EF-12 L-2煎炸锅,广州越昇有限公司;GC-7820A气相色谱仪,安捷伦公司;Rancimat 743油脂氧化稳定性测定仪,瑞士万通中国有限公司;LC-20A高效液相色谱仪,日本岛津公司;UV-

9600紫外分光光度计,北京瑞利分析仪器公司;Testo270煎炸油品质测定仪,德国德图仪器公司。

1.2 实验方法

1.2.1 油条煎炸实验

将8 kg食用油倒入煎炸锅,加热至(180 \pm 5)℃,放入两根油条(80 g)炸3 min,每隔1.5 min翻1次面,炸至油条蓬松酥脆、膨胀丰满后捞起沥油3 min,不间断煎炸至终点,期间不添加新油。煎炸过程中每隔1 h取50 mL油样,并使用Testo270煎炸油品质测定仪快速检测油样中极性化合物的含量以初步判断煎炸终点(极性化合物含量达到27%),所有油样冷却至室温后置于-20℃条件下储存备用。

1.2.2 煎炸油指标检测

酸值的测定,参照GB 5009.229—2016;过氧化值的测定,参照GB 5009.227—2016;茴香胺值的测定,参照GB/T 24304—2009。

极性化合物和聚合物含量的测定:将10 g含水量为5%的硅胶填充到玻璃柱(40 cm \times 1 cm)中;取0.5 g油样用正己烷溶解,上柱,先用75 mL正己烷-乙醚(体积比90:10)洗脱非极性化合物,再用75 mL乙醚洗脱极性化合物并收集洗脱液,减压条件下将洗脱液旋蒸出溶剂后,置于110℃烘箱干燥至恒重,得到极性化合物,精确称量后计算极性化合物含量。以四氢呋喃作溶剂,配制质量浓度为50 mg/mL的极性化合物溶液,采用配置示差折光检测器的高效液相色谱检测聚合物^[6],检测条件:柱温箱温度40℃;100A和500A酚胶柱串联色谱柱;流动相四氢呋喃,流速1 mL/min。根据面积归一化法和总极性化合物的含量对极性化合物中的组分进行定量。

脂肪酸组成的测定:样品前处理参照GB 5009.168—2016稍作修改,称取100 mg油样于圆底烧瓶,加入2 mL氢氧化钾-甲醇溶液溶解,70℃水浴加热冷凝回流10 min,冷却后加入3 mL三氟化硼甲醇溶液继续70℃水浴加热冷凝回流5 min,冷却后加入3 mL正己烷和2 mL饱和氯化钠溶液混匀,取上清液加入无水硫酸钠除水,待测。经过前处理的样品采用配备火焰离子化检测器的气相色谱仪测定。气相色谱条件:Agilent J&W CP-Sil 88 capillary毛细管色谱柱(100 m \times 0.25 mm \times 0.2 μm);检测器温度260℃;载气为氮气,压力212.4 kPa;进样量0.5 μL ;分流比85:1。使用安捷伦EZChrom Elite软件收集数据,并使用美国Sigma-Aldrich Chemical的Supelco 37组分混合脂肪酸甲酯

标准品鉴定所有脂肪酸,采用面积归一法定量。

致动脉粥样硬化指数(AI)和致血栓指数(TI)的计算参考文献[7],AI和TI的计算公式分别见式(1)和式(2)。

$$I_A = (\omega(\text{LaA}) + 4\omega(\text{MA}) + \omega(\text{PA})) / (\sum \omega(\text{MUFA}) + \omega(\text{LA}) + \omega(\text{LnA})) \quad (1)$$

$$I_T = (\omega(\text{MA}) + \omega(\text{PA}) + \omega(\text{SA})) / (\sum \omega(\text{MUFA}) \times 0.5 + \omega(\text{LA}) \times 0.5 + \omega(\text{LnA}) \times 3) \quad (2)$$

式中: I_A 为致动脉粥样硬化指数值;LaA为月桂酸;MA为肉豆蔻酸;PA为棕榈酸;MUFA为单不饱和脂肪酸;LA为亚油酸;LnA为亚麻酸; I_T 为致血

栓指数值;SA为硬脂酸。

油脂氧化稳定性测定:采用油脂氧化稳定性仪测定^[8]。测定条件:油样3g,温度140℃,水体积60mL。

1.2.3 油条感官评定

组织12名从事食品专业的人员构成感官评定小组,对油条进行独立的感官评定,根据外观、色泽、咀嚼性、脆性、气味、油腻感及整体接受度7个指标进行评分,取平均分作为最终的感官评定结果,具体评价标准见表1。

表1 油条感官评定标准

分值	外观	色泽	咀嚼性	脆性	气味	油腻感	整体接受度
7~9	膨胀度好	金黄色	适中	酥脆	香味	出油适中	完美
4~6	膨胀度较差	黄白色	较费力	脆度一般	无异味	出油较多	一般
0~3	膨胀度差	暗红色	费力	无脆性	有异味	油腻感强	不接受

1.2.4 数据分析

所有实验数据均平行测定3次,结果以“平均值±标准偏差”表示。使用SPSS 22.0统计分析软件ANOVA中Duncan多重比较分析对结果进行差异显著性分析, $P < 0.05$ 表示为显著性差异。

2 结果与讨论

2.1 两种精炼植物油煎炸过程中酸值的变化(见图1)

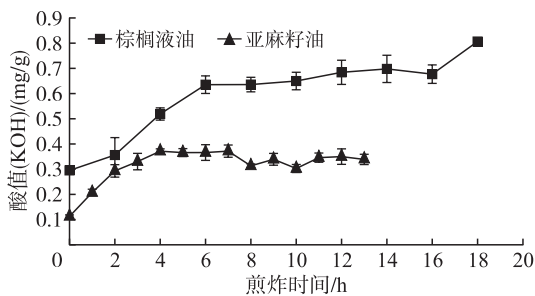


图1 两种精炼植物油煎炸过程中酸值的变化

由图1可知,随着煎炸时间的延长,亚麻籽油酸值在最开始2h内增长幅度较大,之后趋于平缓,并存在一定的波动。在13h的煎炸过程中,亚麻籽油酸值(KOH)由0.11 mg/g增至0.34 mg/g;而棕榈液油酸值呈现明显的上升趋势,在18h的煎炸过程中,酸值(KOH)由0.30 mg/g增至0.80 mg/g。到煎炸终点,两种植物油的酸值均未超过GB 2716—2018《食品安全国家标准 植物油》中酸值(KOH)的限量规定(≤ 5 mg/g)。导致油脂酸值上升的原因是由于甘油三酯在高温条件下发生水解生成游离脂肪酸,同时油脂发生氧化反应生成大量氢过氧化物,不稳定的氢过氧化物进一步分解和聚合产生大量的

醛、酮、酸等物质,醛类又继续氧化生成酸。另外,油脂中一些其他小分子酸类在持续的高温煎炸环境中继续发生分解和聚合反应也可能造成酸值的波动^[9-10]。相较于棕榈液油,亚麻籽油这种波动更为明显,可能是由于亚麻籽油的不饱和度较高,在高温煎炸环境中更容易氧化,所以水解和氧化是引起酸值变化的主要原因。然而,传统的酸值测定方法无法区分水解和氧化的作用,因此酸值仅能作为煎炸油品质的一个参考指标,并不能完全代表煎炸油的品质。

2.2 两种精炼植物油煎炸过程中总氧化值的变化

总氧化值为两倍的过氧化值和茴香胺值的总和,过氧化值反映的是油脂中氢过氧化物的含量,但氢过氧化物在高温条件下易被分解成小分子醛、酮类物质,因此过氧化值仅能描述植物油煎炸初期的氧化情况,而茴香胺值主要是用来评价油脂中的二级氧化产物,反映的是醛类物质的含量,所以总氧化值包括了初级和二级氧化产物,能够更好地反映煎炸油的整体质量,是衡量食用油氧化稳定性的指标之一^[11]。两种精炼植物油煎炸过程中总氧化值的变化见图2。

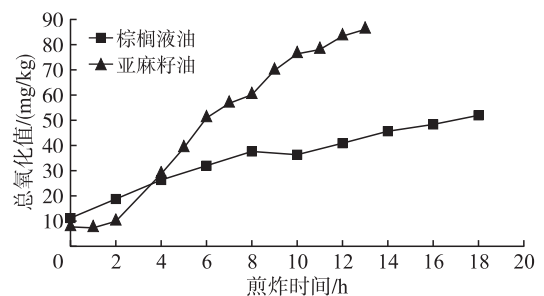


图2 两种精炼植物油煎炸过程中总氧化值的变化

由图2可知,亚麻籽油和棕榈液油的总氧化值均随着煎炸时间的延长而增加,且亚麻籽油的上升幅度远高于棕榈液油,在煎炸13 h后,亚麻籽油总氧化值由初始的7.64 mg/kg增至85.95 mg/kg,而棕榈液油在煎炸18 h后,总氧化值由11.17 mg/kg增至51.93 mg/kg。两种植物油的总氧化值在煎炸初期(4 h内)含量均较低,并且亚麻籽油的总氧化值在两种植物油交叉点(≈ 4 h)之前均低于棕榈液油,这表明当煎炸时间在4 h以内时,两种植物油均可进行适度煎炸,且亚麻籽油的煎炸稳定性优于棕榈液油。当煎炸时间超过4 h后,亚麻籽油总氧化值迅速增加并在煎炸13 h时达到棕榈液油的2倍。这可能是由于亚麻籽油中较丰富的 α -亚麻酸等不饱和脂肪酸在高温煎炸过程中更容易氧化,使其较棕榈液油更易氧化酸败,从而影响油脂整体品质。可见,与亚麻籽油相比,棕榈液油更适合长时间煎炸。

2.3 两种精炼植物油煎炸过程中极性化合物含量的变化

极性化合物是指除未煎炸精炼植物油中存在的初始甘油三酯以外的所有降解产物,主要由甘油三酯聚合物、氧化甘油三酯、甘油二酯、游离脂肪酸等一些极性物质组成。在高温煎炸过程中,会发生复杂的反应并生成大量产物,这些复杂的反应不仅涉及煎炸油成分,还与煎炸食物成分相关,如食物中的水、碳水化合物、蛋白质和脂质等^[12-13]。煎炸过程中因热氧化、水解、热聚合、美拉德等反应,会产生反式异构体、甘油二酯(DAG)、环状和环氧化物等复杂物质,这些物质均会引起极性化合物含量的升高^[14]。两种精炼植物油煎炸过程中极性化合物含量的变化见图3。

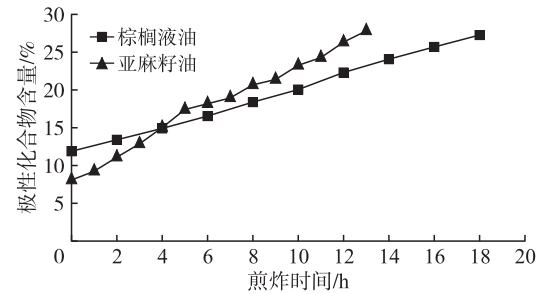


图3 两种精炼植物油煎炸过程中极性化合物含量的变化

由图3可知,亚麻籽油和棕榈液油极性化合物含量均随着煎炸时间的延长而逐渐增加,呈现较规律的上升趋势。亚麻籽油和棕榈液油初始极性化合物含量分别为8.03%和11.88%,在煎炸初期(<4 h),亚麻籽油极性化合物含量一直低于棕榈液油;当煎炸时间为4 h时,两种植物油的极性化合物含量均为14.92%;煎炸时间超过4 h后,亚麻籽油中极性化合物迅速积累,并在煎炸13 h后高达27.78%,超过国标限量值(27%),而棕榈液油在煎炸18 h后极性化合物含量为27.27%,且增速明显低于亚麻籽油。综合来看,在油条煎炸过程中,亚麻籽油寿命比棕榈液油短,虽然亚麻籽油在4 h内极性化合物含量较低,但棕榈液油更适合长时间煎炸。

2.4 两种精炼植物油煎炸过程中聚合物含量的变化

棕榈液油中甘油二酯含量为4%~9%,而在亚麻籽油中甘油三酯仅占1%~3%,由于甘油二酯是极性化合物的一部分,仅凭极性化合物含量变化来判断煎炸油品质有失偏颇,而氧化甘油三酯聚合物含量被认为更适合用于判断煎炸油品质^[15]。两种精炼植物油煎炸过程中聚合物含量的变化见表2。

表2 两种精炼植物油煎炸过程中聚合物含量的变化

煎炸时间/h	TGO 含量/%		TGD 含量/%		OX-TAG 含量/%		DAG 含量/%		FFA 含量/%	
	PO	FO	PO	FO	PO	FO	PO	FO	PO	FO
0	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	0.23±0.05 ^a	0.13±0.03 ^a	5.82±0.10 ^b	5.53±0.19 ^a	5.65±0.11 ^b	2.00±0.07 ^b	0.17±0.13 ^b	0.37±0.29 ^c
2	0.14±0.07 ^b	0.12±0.10 ^b	1.33±0.09 ^b	1.33±0.05 ^b	5.51±0.07 ^a	6.76±0.32 ^b	5.94±0.08 ^c	2.39±0.17 ^c	0.20±0.17 ^c	0.41±0.27 ^c
4	0.34±0.22 ^c	0.34±0.11 ^c	1.83±0.08 ^c	2.64±0.03 ^c	8.45±0.43 ^e	8.47±0.14 ^c	4.09±0.18 ^a	2.85±0.04 ^e	0.14±0.25 ^a	0.53±0.03 ^e
6	0.40±0.01 ^c	0.66±0.04 ^d	2.64±0.00 ^d	3.40±0.07 ^d	5.94±0.05 ^c	12.17±0.14 ^d	7.34±0.05 ^e	1.75±0.06 ^a	0.18±0.02 ^{bc}	0.28±0.07 ^a
8	0.61±0.04 ^d	0.86±0.10 ^c	2.83±0.05 ^c	4.16±0.02 ^e	9.67±0.08 ^j	12.94±0.08 ^e	5.06±0.12 ^a	2.39±0.12 ^c	0.19±0.27 ^{bc}	0.43±0.05 ^{cd}
10	1.12±0.01 ^e	1.19±0.03 ^f	4.29±0.05 ^f	4.86±0.03 ^f	8.00±0.12 ^f	15.01±0.06 ^f	6.33±0.07 ^d	2.02±0.06 ^b	0.26±0.21 ^d	0.30±0.08 ^{ab}
12	1.60±0.07 ^f	1.54±0.16 ^e	5.48±0.04 ^e	5.74±0.03 ^e	7.94±0.02 ^e	16.25±0.35 ^e	6.99±0.04 ^e	2.52±0.05 ^d	0.29±0.17 ^e	0.40±0.20 ^{bc}
14*	1.89±0.13 ^g	1.84±0.12 ^h	6.11±0.01 ^h	7.30±0.00 ^h	8.53±0.02 ^h	15.21±0.13 ^h	7.06±0.04 ^f	2.93±0.02 ^f	0.27±0.07 ^{de}	0.50±0.02 ^e
16	2.24±0.01 ^h		6.76±0.07 ⁱ		7.85±0.02 ^d		8.69±0.12 ⁱ		0.38±0.11 ^f	
18	2.81±0.10 ⁱ		7.62±0.01 ^j		8.84±0.05 ⁱ		7.73±0.04 ^h		0.26±0.07 ^d	

注:TGO为氧化甘油三酯寡聚物,TGD为氧化甘油三酯二聚物,OX-TAG为氧化甘油三酯单体,DAG为甘油二酯,FFA为游离脂肪酸;PO为棕榈液油,FO为亚麻籽油;*棕榈液油为煎炸14 h检测结果,而亚麻籽油为煎炸13 h检测结果;不同小写字母表示同一油脂不同煎炸时间之间存在显著性差异($P < 0.05$)。下同

由表2可知,煎炸前两种植物油已含有一定量的聚合物,这与极性化合物含量结果吻合。随着煎炸时间的延长,氧化甘油三酯聚合物含量(氧化甘油三酯寡聚物和二聚物总量)呈现明显的上升趋势,棕榈液油在煎炸18 h后由0.23%增至10.43%,亚麻籽油在煎炸13 h后由0.13%增至9.14%,亚麻籽油氧化甘油三酯聚合物含量增长幅度明显高于棕榈液油,尤其是氧化甘油三酯二聚物的含量,这可能与亚麻籽油中多不饱和脂肪酸的含量高有关,在高温煎炸过程中,不饱和脂肪酸含量越高,油脂更容易发生氧化聚合,导致聚合物含量迅速增加^[16]。

油脂中氧化甘油三酯聚合物的极限范围为12%~13%,一般将10%作为限值^[17],棕榈液油在煎炸18 h后超过限值,亚麻籽油在煎炸13 h后接近限值。氧化甘油三酯单体与甘油三酯聚合物类似,

其含量的多少也与油脂中不饱和脂肪酸含量有关^[18],亚麻籽油在煎炸13 h后氧化甘油三酯单体含量高达15.21%,约为棕榈液油的1.72倍(煎炸终点时为8.84%)。说明油脂中不饱和脂肪酸含量越高,高温煎炸后氧化甘油三酯单体含量越高。此外,两种植物油中游离脂肪酸含量随煎炸时间延长也有一定的增高,但出现波动的现象,与酸值变化趋势吻合。

2.5 两种精炼植物油煎炸过程中主要脂肪酸的变化

煎炸油中脂肪酸组成是判断其品质的重要指标,除煎炸温度、煎炸时间和氧气等因素会影响脂肪酸的组成外,煎炸食材中的碳水化合物、脂肪也是引起煎炸油脂肪酸变化的重要因素。两种精炼植物油煎炸过程中主要脂肪酸的变化见表3。

表3 两种精炼植物油煎炸过程中主要脂肪酸的变化

煎炸时间/h	脂肪酸含量/%									
	棕榈酸(C16:0)		硬脂酸(C18:0)		油酸(C18:1)		亚油酸(C18:2)		亚麻酸(C18:3)	
	PO	FO	PO	FO	PO	FO	PO	FO	PO	FO
0	27.41±0.03 ^a	5.73±0.02 ^a	3.22±0.03 ^a	4.07±0.04 ^a	53.41±0.03 ^g	17.45±0.04 ^a	14.69±0.09 ^{bcd}	16.18±0.13 ^a	-	56.57±0.07 ^h
2	31.46±0.08 ^b	5.78±0.03 ^b	3.31±0.03 ^b	4.05±0.03 ^a	49.95±0.20 ^f	17.65±0.09 ^b	14.07±0.11 ^a	16.52±0.12 ^b	-	56.01±0.07 ^g
4	31.42±0.13 ^b	5.88±0.01 ^c	3.31±0.03 ^b	4.10±0.01 ^a	49.96±0.03 ^f	17.94±0.02 ^c	14.10±0.15 ^a	17.01±0.02 ^c	-	55.08±0.04 ^f
6	31.53±0.13 ^b	6.08±0.03 ^d	3.37±0.05 ^{bc}	4.23±0.01 ^b	49.86±0.05 ^f	18.40±0.06 ^d	14.06±0.14 ^a	17.14±0.04 ^c	-	54.15±0.03 ^e
8	31.51±0.15 ^b	6.25±0.03 ^c	3.40±0.02 ^{cd}	4.27±0.03 ^c	49.69±0.03 ^c	18.68±0.02 ^c	14.23±0.18 ^{ab}	17.67±0.11 ^d	-	53.13±0.10 ^d
10	31.41±0.20 ^b	6.35±0.02 ^f	3.44±0.04 ^d	4.33±0.03 ^d	49.51±0.09 ^d	18.84±0.05 ^f	14.45±0.25 ^{abc}	18.11±0.12 ^e	-	52.37±0.08 ^c
12	31.46±0.23 ^b	6.54±0.02 ^g	3.44±0.02 ^d	4.39±0.03 ^e	49.21±0.01 ^c	19.20±0.04 ^g	14.60±0.35 ^{bcd}	18.53±0.15 ^f	-	51.33±0.14 ^b
14 [*]	31.46±0.26 ^b	6.59±0.01 ^h	3.51±0.02 ^e	4.40±0.02 ^e	49.11±0.12 ^{bc}	19.24±0.05 ^g	14.76±0.39 ^{cde}	18.74±0.02 ^g	-	51.03±0.05 ^a
16	31.38±0.27 ^b	-	3.57±0.03 ^{ef}	-	48.94±0.03 ^b	-	14.92±0.36 ^{de}	-	-	-
18	31.38±0.26 ^b	-	3.61±0.04 ^f	-	48.71±0.16 ^a	-	15.13±0.42 ^e	-	-	-

煎炸时间/h	脂肪酸含量/%						AI		TI	
	SFA		MUFA		PUFA		PO	FO	FO	PO
	PO	FO	PO	FO	PO	FO				
0	31.88±0.05 ^a	9.80±0.03 ^a	53.41±0.03 ^g	17.45±0.04 ^a	14.69±0.09 ^{bcd}	72.75±0.07 ^g	0.46	0.06	0.93	0.05
2	35.99±0.11 ^b	9.83±0.01 ^a	49.95±0.20 ^f	17.65±0.09 ^b	14.07±0.11 ^a	72.53±0.08 ^f	0.56	0.06	1.12	0.05
4	35.93±0.14 ^b	9.97±0.01 ^b	49.96±0.03 ^f	17.94±0.02 ^c	14.10±0.15 ^a	72.09±0.04 ^e	0.56	0.07	1.11	0.05
6	36.08±0.17 ^b	10.31±0.03 ^c	49.86±0.05 ^f	18.40±0.06 ^d	14.06±0.14 ^a	71.29±0.07 ^d	0.56	0.07	1.12	0.06
8	36.09±0.20 ^b	10.52±0.01 ^d	49.69±0.03 ^c	18.68±0.02 ^c	14.23±0.18 ^{ab}	70.79±0.02 ^c	0.56	0.07	1.12	0.06
10	36.05±0.25 ^b	10.68±0.04 ^c	49.51±0.09 ^d	18.84±0.05 ^f	14.45±0.25 ^{abc}	70.49±0.04 ^b	0.56	0.07	1.12	0.06
12	36.10±0.25 ^b	10.93±0.02 ^f	49.21±0.01 ^c	19.20±0.04 ^g	14.60±0.35 ^{bcd}	69.86±0.05 ^a	0.56	0.07	1.12	0.06
14 [*]	36.14±0.28 ^b	10.99±0.02 ^g	49.11±0.12 ^{bc}	19.24±0.05 ^g	14.76±0.39 ^{cde}	69.78±0.03 ^b	0.56	0.07	1.13	0.06
16	36.14±0.32 ^b	-	48.94±0.03 ^b	-	14.92±0.36 ^{de}	-	0.56	-	1.12	-
18	36.16±0.31 ^b	-	48.71±0.16 ^a	-	15.13±0.42 ^e	-	0.55	-	1.13	-

注: SFA 为饱和脂肪酸; MUFA 为单不饱和脂肪酸; PUFA 为多不饱和脂肪酸。

由表3可知,亚麻籽油脂肪酸组成以亚麻酸(C18:3)为主,不饱和脂肪酸含量约90%,棕榈液油中脂肪酸组成以油酸(C18:1)和棕榈酸(C16:0)为主。随着煎炸时间的延长,亚麻籽油中PUFA含量

不断减少,与初始值相比,C18:3在煎炸13 h后降低了5.54个百分点,但亚油酸(C18:2)、C18:1、C16:0和硬脂酸(C18:0)含量呈现一定的上浮趋势。棕榈液油SFA含量随煎炸时间延长呈现增加

的趋势,而 MUFA 含量与煎炸前相比,煎炸 18 h 后降低了 4.70 个百分点,出现这种现象的原因可能是在 180 °C 高温条件下,甘油三酯中不饱和双键发生热氧化反应,如 C18:3、C18:2 生成 C18:1 或 C18:0 等^[19]。该结果也与其他研究结果^[20-22]一致,在高温条件下 PUFA 含量的下降伴随着 MUFA 或 SFA 含量的升高。AI 和 TI 是了解 SFA、MUFA 和 PUFA 在冠心病发展中的作用和功效的两个饮食指标。饱和脂肪酸月桂酸(C12:0)、肉豆蔻酸(C14:0)和 C16:0 具有提高胆固醇的作用,被认为可致动脉粥样硬化^[23]。C14:0、C16:0 和 C18:0 会影响血液中血块的形成,称为血栓性饱和脂肪酸^[24]。MUFA 和 PUFA 可在最大程度上减少动脉粥样硬化和血栓的形成^[25-26]。根据亚麻籽油和棕榈液油脂肪酸组成,发现亚麻籽油由于含有丰富的多不饱和脂肪酸成分,两个饮食指标 AI 和 TI 在整个煎炸过程中均低于棕榈液油。

2.6 两种精炼植物油煎炸过程中氧化诱导期的变化

通过测定油脂初级和次级氧化产物的形成可确定食用油的货架期和整体质量,其变化可能与油脂中的脂肪酸和抗氧化成分组成有关,不饱和脂肪酸含量越高,在煎炸过程中表现出更高的氧化降解敏感性^[27]。两种精炼植物油煎炸过程中氧化诱导期的变化见图 4。

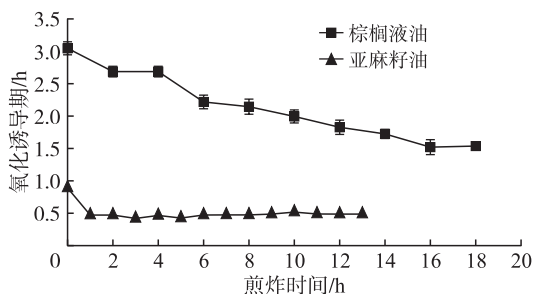


图 4 两种精炼植物油煎炸过程中氧化诱导期的变化

由图 4 可知,亚麻籽油初始氧化诱导期仅为 0.90 h,煎炸 1 h 后氧化诱导期急剧下降为 0.47 h,此后随着煎炸时间的延长,氧化诱导期无显著性波动。棕榈液油的氧化诱导期显著高于亚麻籽油,随着煎炸时间的延长,在 18 h 后其氧化诱导期由初始的 3.04 h 降到 1.53 h。两种植物油的氧化诱导期在煎炸过程中均缩短,表明油脂抗氧化能力下降,在未经高温煎炸时,脂肪酸含量和结构较为稳定,氧化程度较低,而煎炸过后,脂肪酸含量和结构发生改变,以及产生各种复杂的化学物质,大大增加了氧化速率^[28-29]。自动氧化理论自由基反应机理表明,

油脂氧化速度与其脂肪酸不饱和度密切相关,亚麻酸的氧化速率是亚油酸的 2 倍,是油酸的 25 倍^[30]。根据本实验测定的两种油脂的脂肪酸组成可知,亚麻籽油富含亚麻酸,易氧化,氧化诱导期短,而实验结果表明高温煎炸对亚麻籽油氧化的促进作用较小,棕榈液油中不含亚麻酸,富含油酸和棕榈酸,氧化诱导期较长,但持续的高温煎炸环境会不断降低棕榈液油的氧化稳定性。所以亚麻籽油因其具有较高的脂肪酸不饱和程度,煎炸过程中更易氧化而导致氧化诱导期较短,油脂品质迅速下降,而棕榈液油的脂肪酸饱和程度高,氧化诱导期虽随煎炸时间延长而降低,但煎炸过程中品质相对较好,适用于长时间煎炸。

2.7 油条感官评定

取煎炸初期(煎炸 1 h)和煎炸末期(煎炸终点)的油条进行感官评定,结果见图 5。

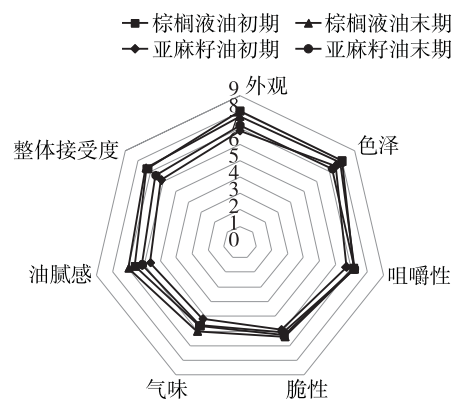


图 5 两种精炼植物油煎炸油条的感官分析

由图 5 可见,从咀嚼性、脆性和气味来看,不同植物油在煎炸初、末期所得油条均无显著性差异,亚麻籽油由于自带特殊风味,在煎炸初期所得油条的油腻感、气味和整体接受度得分均较低,但这些指标在煎炸末期均有一定提升,这可能与亚麻籽油在持续高温煎炸条件下发生各类化学反应产生的风味物质掩盖了其本身气味有关。棕榈液油煎炸初期和末期所得油条无显著性差异,整体接受度、外观、色泽和油腻感得分均比亚麻籽油好。综合来看,棕榈液油在煎炸末期所得油条的感官评定结果最好,亚麻籽油煎炸初期所得油条感官评定结果最差,棕榈液油更适用于油条煎炸。

3 结论

本研究通过亚麻籽油和棕榈液油在(180 ± 5)°C 的条件下连续煎炸油条,以极性化合物含量达到 27% 为煎炸终点,测定并比较煎炸过程中的各项理化指标变化。结果表明:两种食用油的酸值、总氧化值、极性化合物和甘油三酯聚合物含量均随着煎炸

时间的延长而增加,除酸值未超过国家标准限量外,其余指标在煎炸终点时均超标或接近标准限定值。两种植物油 SFA 含量随着煎炸时间的延长而增加,棕榈液油中 MUFA 含量逐渐减少,PUFA 含量总体上呈逐渐增加趋势,而亚麻籽油中 PUFA 含量不断减少,MUFA 含量不断增加。亚麻籽油在煎炸前后氧化诱导期均远低于棕榈液油。亚麻籽油随着煎炸时间的延长,煎炸末期(煎炸终点)比煎炸初期(煎炸 1 h)所得油条口感和整体接受度增强,棕榈液油煎炸初期和末期所得油条在口感和整体接受度等方面无显著性差异。综上所述,油条煎炸时间越长,油脂劣变程度越高,有害物质积累越多,食品的安全风险也越高。相较于棕榈液油,虽然亚麻籽油具有较低的 AI 和 TI 指数,但其仅适合短时(<4 h)煎炸,当煎炸时间超过 4 h 后,亚麻籽油的品质变差较快,稳定性更低,不建议长时间深度煎炸。

参考文献:

- [1] 王维义,许帅强,何宏燕,等. 亚麻籽的营养成分及功能研究进展[J]. 中国油脂, 2020, 45(4):83-85.
- [2] AGUSTINA N A, ELISABETH J, JULIANTI E. A comparison studies on the chemical characteristics of pumpkin seed oil with extra virgin olive oil and palm olein [J/OL]. IOP Conf Ser: Earth Environ Sci, 2019, 260(1):012091 [2020-12-07]. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/260/1/012091/pdf>.
- [3] PAUNOVIÄ D M, DEMIN M A, PETROVIÄ T S, et al. Quality parameters of sunflower oil and palm olein during multiple frying [J]. J Agric Sci (Belgrade), 2020, 65(1):61-68.
- [4] IBTISSEM B H, GLORIA M, FRANCISCA H, et al. Comparative study of polymers and total polar compounds as indicators of refined oil degradation during frying[J]. Eur Food Res Technol, 2019, 245(5):967-976.
- [5] SONG J H, KIM M, KIM Y J, et al. Monitoring changes in acid value, total polar material, and antioxidant capacity of oils used for frying chicken [J]. Food Chem, 2017, 220:306-312.
- [6] KHOR Y P, SIM B I, ABAS F, et al. Influence of carbohydrate- and protein-based foods on the formation of polar lipid fraction during deep-frying [J/OL]. Food Control, 2020, 107:106781 [2020-12-07]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956713519303706>.
- [7] KAUR A, SINGH B, KAUR A, et al. Changes in chemical properties and oxidative stability of refined vegetable oils during short-term deep-frying cycles [J/OL]. J Food Process Pres, 2020, 44(6):e14445 [2020-12-07]. <https://ifst.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jfpp.14445>.
- [8] AOCS. Official methods and recommended practices - oil stability index: Cd 12b-92 [S]. 6th ed. Champaign, Illinois: American Oil Chemists' Society, 2017.
- [9] ABDULKARIM S M, LONG K, LAI O M, et al. Frying quality and stability of high-oleic *Moringa oleifera* seed oil in comparison with other vegetable oils [J]. Food Chem, 2007, 105(4):1382-1389.
- [10] TEKIN L, ADAY M S, YILMAZ E. Physicochemical changes in hazelnut, olive pomace, grapeseed and sunflower oils heated at frying temperatures [J]. Food Sci Technol Res, 2009, 15(5):519-524.
- [11] GUILLÉN 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.
- [12] CHOE E, MIN D B. Chemistry of deep-fat frying oils [J]. J Food Sci, 2007, 72(5):77-86.
- [13] ZHANG Q, SALEH A S M, CHEN J, et al. Chemical alterations taken place during deep-fat frying based on certain reaction products: a review [J]. Chem Phys Lipids, 2012, 165(6):662-681.
- [14] ZHANG Q, QIN W, LI M, et al. Application of chromatographic techniques in the detection and identification of constituents formed during food frying: a review [J]. Compr Rev Food Sci F, 2015, 14(5):601-633.
- [15] SEBEDIO J L, KAITARANTA J, GRANDGIRARD A, et al. Quality assessment of industrialprefried French fries [J]. J Am Oil Chem Soc, 1991, 68:299-301.
- [16] BANSAL G, ZHOU W B, BARLOW P J, et al. Performance of palmolein in repeated deep frying and controlled heating processes [J]. Food Chem, 2010, 121(2):338-347.
- [17] BANSAL G, ZHOU W B, BARLOW P J, et al. Review of rapid tests available for measuring the quality changes in frying oils and comparison with standard methods [J]. Crit Rev Food Sci Nutr, 2010, 50(6):503-514.
- [18] KALOGEROPOULOS N, SALTA F N, CHIOU A, et al. Formation and distribution of oxidized fatty acids during deep- and pan-frying of potatoes [J]. Eur J Lipid Sci Technol, 2007, 109(11):1111-1123.
- [19] 黄朦情,陈欢,万重,等. 大豆油煎炸过程极性组分和非极性组分中脂肪酸组成的研究[J]. 中国油脂, 2018, 43(9):23-29.
- [20] CHUNG J S, LEE Y L, CHOE E. Effects of sesame oil addition to soybean oil during frying on the lipid oxidative

- [9] SOUSA F P, SILVA L N, DE REZENDE D B, et al. Simultaneous deoxygenation, cracking and isomerization of palm kernel oil and palm olein over beta zeolite to produce biogasoline, green diesel and biojet – fuel [J]. *Fuel*, 2018, 223:149 – 156.
- [10] LI T, CHENG J, HUANG R, et al. Hydrocracking of palm oil to jet biofuel over different zeolites [J]. *Int J Hydrogen Energ*, 2016, 41:21883 – 21887.
- [11] SHI Z, ZHAO B W, TANG S, et al. Hydrotreating lipids for aviation biofuels derived from extraction of wet and dry algae [J]. *J Clean Prod*, 2018, 204:906 – 915.
- [12] LI T, CHENG J, HUANG R, et al. Conversion of waste cooking oils to jet biofuel with nickel – based meoporous zeolite Y catalyst [J]. *Bioresour Technol*, 2015, 197: 289 – 294.
- [13] SHAO J, FU T J, MA Q, et al. Controllable synthesis of nano – ZSM – 5 catalysts with large amount and high strength of acid sites for conversion of methanol to hydrocarbons [J]. *Micropor Mesopor Mat*, 2019, 273: 122 – 132.
- [14] MOHAMMADPARAST F, HALLADJ R, ASKARI S, et al. The synthesis of nano – sized ZSM – 5 zeolite by dry gel conversion method and investigating the effects of experimental parameters by Taguchi experimental design [J]. *J Exp Nanosci*, 2018, 13:160 – 173.
- [15] RASSOULI L, NADERI R, MAHDAVAIN M, et al. The role of micro/nano zeolites doped with zinc cations in the active protection of epoxy ester coating [J]. *Appl Surf Sci*, 2017, 423:571 – 583.
- [16] CHEN H B, WANG Y Q, SUN C, et al. Aggregates of nano – sized ZSM – 5 crystals synthesized with template – free and alkali – treated seeds for improving the catalytic performance in MTP reaction [J]. *Catal Commun*, 2017, 100:107 – 111.
- [17] SHI Y C, LI R, SHEN Q R, et al. The selective production of jet fuel range alkanes via the catalytic upgrading of palmitic acid over Co/HMCM – 49 catalysts [J]. *Chem Commun*, 2019, 55:12096 – 12099.
- [18] LIU S Y, ZHU Q Q, GUAN Q X, et al. Bio – aviation fuel production from hydroprocessing castor oil promoted by the nickel – based bifunctional catalysts [J]. *Bioresour Technol*, 2015, 183:93 – 100.
-
- (上接第 47 页)
- stability and antioxidants contents of the fried products during storage in the dark [J]. *J Food Sci*, 2006, 71 (3): 222 – 226.
- [21] LEE J, KIM M, CHOE E. Effects of carrot powder in dough on the lipid oxidation and carotene content of fried dough during storage in the dark [J]. *J Food Sci*, 2006, 69(5):411 – 414.
- [22] CHOTIMARKORN C, SILALAI N. Addition of rice bran oil to soybean oil during frying increases the oxidative stability of the fried dough from rice flour during storage [J]. *Food Res Int*, 2008, 41(3):308 – 317.
- [23] HORNSTRA G, LUSSENBERG R N. Relationship between the type of dietary fatty acid and the arterial thrombus tendency in rats [J]. *Arteriosclerosis*, 1975, 22(3):499 – 516.
- [24] BONANOME A, GRUNDY S M. Effect of dietary stearic acid on plasma cholesterol level and lipoprotein level [J]. *N Engl J Med*, 1988, 318:1244 – 1248.
- [25] MOHANTY B P, PARIJA P, MAHANTY A, et al. Fatty acid profile of Indian shad *Tenuulosa ilisha* oil and its dietary significance [J]. *Natl Acad Sci Lett*, 2012, 35 (4):263 – 269.
- [26] PEREIRA E, FERREIRA M C, SAMPAIO K A, et al. Physical properties of Amazonian fats and oils and their blends [J]. *Food Chem*, 2019, 278:208 – 215.
- [27] 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.
- [28] LIU Y, WANG Y, CAO P, et al. Combination of gas chromatography – mass spectrometry and electron spin resonance spectroscopy for analysis of oxidative stability in soybean oil during deep – frying process [J]. *Food Anal Meth*, 2018, 11(5):1485 – 1492.
- [29] MULTARI S, MARSOL – VALL A, HEPONIEMI P, et al. Changes in the volatile profile, fatty acid composition and other markers of lipid oxidation of six different vegetable oils during short – term deep – frying [J]. *Food Res Int*, 2019, 122:318 – 329.
- [30] 杨国燕. DSC 和 Rancimat 法测定亚麻籽油氧化稳定性研究 [J]. *粮食与油脂*, 2014, 27(8): 29 – 32.