

大豆油与菜籽油煎炸薯条过程中的 稳定性与适用性研究

龚家伟,任兴远,于泳,吴银银,周婉丽,刘晓芳*

(扬州大学旅游烹饪学院,江苏扬州225127)

摘要:采用大豆油和菜籽油模拟煎炸薯条的过程,通过分析煎炸过程中食用油的组成、理化特性及安全性,探究食用油在煎炸过程中的稳定性与适用性。理化指标结果表明:经过30.0h的间歇性煎炸,两种食用油的亚油酸、亚麻酸含量及碘值逐渐下降;黏度、酸价、羰基价、多环芳烃含量显著增加。油的质量参数的相关性分析结果表明:多不饱和脂肪酸与多环芳烃呈负相关。油脂质量指标的主成分分析结果显示:随食用油使用时间的延长,食用油的品质逐渐劣化,棕榈酸、油酸、酸价、羰基价、多环芳烃起主要作用。另外,相较于菜籽油,大豆油具有更高的煎炸稳定性和适用性。

关键词:大豆油;菜籽油;煎炸;薯条;稳定性;适用性

中图分类号:TS972.133

文献标志码:A

文章编号:2095-8730(2022)03-0060-09

煎炸是采用脂质加工食品的传统手段,是我国饮食文化传统和习惯的重要组成。煎炸可以赋予食品令人满意的风味、诱人的颜色和酥脆的质地,还可延长食品保存期,使煎炸食品广受欢迎^[1-3]。近年来,随着居民收入水平的提高和以煎炸食品为主的快餐模式的普及,煎炸食品的产业规模不断扩大。为了节约成本,食用油在煎炸过程中通常被反复使用,然而,油脂在高温下长时间煎炸时,会在高温、氧气以及食物中的水分的相互作用下发生热水解、热氧化、热聚合、缩合等化学反应,导致油炸食品感官品质下降,油中营养物质流失、品质劣化,甚至产生一些有害物质(如多环芳烃(PAHs)等),严重威胁人体健康^[4-6]。对煎炸油的研究一直是油脂研究领域的热点,多聚焦于对煎炸油稳定性的研究^[7-9],然而,对煎炸油适用性和安全性的研究相对有限。

植物油作为生活中主要煎炸用油,以大豆油与菜籽油使用较为广泛^[10]。本研究以大豆油、菜籽油和薯条为原材料,探究在间歇性煎炸过程中

食用油的品质变化规律及薯条的感官变化规律,以期明确煎炸过程中油脂的热稳定性,最大程度保留油脂营养物质、减少有害物质生成等,从而为更合理地使用食用油进行煎炸提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

金龙鱼精炼一级大豆油;上海嘉里食品工业有限公司;低芥酸特香菜籽油;新沂鲁花高端食用油有限公司;薯条为市售冷冻半成品;上海长生食品有限公司。

乙醚、95%乙醇、酚酞、氢氧化钾、邻苯二甲酸氢钾、2,4-二硝基苯胍、浓盐酸、甲醇、冰乙酸、环己烷、碘化钾、硫代硫酸钠、乙腈、丙酮、正己烷、甲苯、可溶性淀粉(均为分析纯);国药集团化学试剂有限公司;乙腈、正己烷(色谱纯);上海阿拉丁生化科技股份有限公司。

反-2-癸烯醛(95%)、正十六烷酸(98%);上海阿拉丁生化科技股份有限公司;苯并(a)蒽

收稿日期:2022-06-11 *通信作者

基金项目:国家自然科学基金(32101899)

作者简介:龚家伟,男,扬州大学旅游烹饪学院本科生,主要从事食品卫生与营养学研究,E-mail:gongjiawei1014@163.com;

刘晓芳,女,扬州大学旅游烹饪学院讲师,博士,主要从事油脂品质与安全研究,E-mail:liuxf@yzu.edu.cn。

(BaA, 99%; Chr, 99%)、苯并(b)荧蒽(BbF, 99%)、苯并(a)芘(BaP, 99%);西格玛奥德里奇(上海)贸易有限公司;一氯化碘(95%);国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

LG-2 双缸双筛电炸炉:广东恒联食品机械有限公司;SIL-20AT 液相色谱仪:日本岛津公司;气相色谱仪:日本岛津公司;分析天平:德国 Sartorius 公司;电子天平:梅特勒托利多科技(中国)有限公司;GENIUS3 涡旋混匀器:德国 IKA 公司;TMS-Pro 质构仪:美国 FTC 公司;黏度计:上海方瑞仪器有限公司;H1850R 台式高速冷冻离心机:长沙湘仪离心机仪器有限公司;UV1000 紫外分光光度计:上海天美科学仪器有限公司;MG-2200 氮吹仪:日本东京理化器械株式会社;EYELAN-1200B 控制型旋转蒸发仪:日本东京理化器械株式会社。

1.3 实验方法

1.3.1 薯条煎炸方法

将 4.5 L 油倒入电炸锅中,待油温上升至 180 °C 并保持恒定后开始添加薯条,每次薯条添加量为(100.0 ± 0.1)g,煎炸 3 min 至薯条金黄状后捞出,每 30 min 为一次煎炸薯条循环,每日煎炸 10.0 h,共煎炸 30.0 h,全程不添加新油。每 2.5 h 取油样 100 mL,冷却至室温后于 -20 °C 冷冻保存。

1.3.2 油脂的脂肪酸组成测定

参考 LIU 等^[11]的方法并进行改进,采用气相色谱法检测。称取 0.1 g 样品置于离心管中,加入 0.1 mL 2 mol/L 氢氧化钾-甲醇溶液,涡旋 30 s。室温静置 10 min,加入 0.1 mL 正十六烷酸内标物,加入 10 mL 正己烷,涡旋 30 s。待澄清后吸取上清液,过 0.22 μm 有机滤膜待测。色谱条件:HP-FFAP 极性色谱柱(100 mm × 0.25 mm, 0.20 μm);载气为氮气,进样量为 0.4 μL;进样口温度为 230 °C;程序升温条件为:初始温度 180 °C,保持 0.5 min;以 3 °C/min 升温至 225 °C,保持 40 min。通过内标物峰面积与各脂肪酸峰面积计算得出各脂肪酸含量。

1.3.3 油脂的理化指标测定

黏度的测定使用旋转黏度计,选用 1 号转子(经测试张角接近 50% 较为准确),20 °C 取 65 mL 油样测量。

碘值的测定:参考 GB/T 5532—2008《动植物油脂碘值的测定》。

酸价的测定:参考 GB/T 5009.229—2016《食品中酸价的测定》。

羰基价的测定:参考 LIU 等^[12]的方法进行测定。

1.3.4 油脂中 PAHs 含量的测定

参考 LIU 等^[13]的前处理方法,使用液相色谱法检测。称取 2 g 油样,加入 10 mL 乙腈/丙酮(4:1, v/v)混合液,涡旋混合 30 s,超声 5 min,4 °C 下 8 000 r/min 离心 5 min,收集上清液,重复提取 3 次。上清液于 35 °C 旋蒸至近干,加入 2 mL 乙腈/丙酮(4:1, v/v)混合液,4 °C 下 8 000 r/min 离心 5 min,收集上清液,重复提取 2 次。35 °C 氮吹至近干,用 1 mL 正己烷复溶。用 10 mL 正己烷和 10 mL 甲苯活化 Si 固相萃取小柱,上样后用 6 mL 正己烷、9 mL 正己烷/甲苯(1:1, v/v)混合液依次洗脱小柱,洗脱液于 35 °C 旋蒸至近干,加入 1 mL 正己烷,35 °C 氮吹至近干,用 1 mL 乙腈复溶,样品经 0.22 μm 有机滤膜过滤,待测。

色谱条件:Waters C18 反向键合固定相色谱柱(250 mm × 4.6 mm, 5 μm);柱温:35 °C;进样量:10 μL;流速:1.0 mL/min;流动相:90% 乙腈/水;荧光检测器:激发波长为 270 nm(BaA、Chr)、256 nm(BbF)、292 nm(BaP),发射波长为 385 nm(BaA、Chr)、385 nm(BbF)、410 nm(BaP)。

1.3.5 油脂透明度、气味的感官评价

透明度测定参考 GB/T 5525—2008,吸取 10 mL 油样注入透明玻璃瓶中,于 20 °C 静置 24 h,以白色为背景,观察透明程度。

气味鉴定参考 GB/T 5525—2008 制定感官评价标准(表 1),以 10 名(男女各半)经培训的本专业学生组成评价小组,按感官评价标准评分。

1.3.6 数据处理

所有分析重复 3 次,数据以均值 ± 标准差形式表示,采用 SPSS 19.0 软件对结果进行方差分析(ANOVA)、主成分分析(PCA)。

2 结果与讨论

2.1 煎炸过程中脂肪酸含量的变化

脂肪酸是食用油的主要成分,脂肪酸组成决定着食用油的品质。大豆油和菜籽油的主要脂肪酸含量和组成如表 2 所示。两种油的脂肪酸组成

均以不饱和脂肪酸为主,大豆油的亚油酸含量最高(63.171 g/100 g),其次是油酸;菜籽油以油酸为主(43.946 g/100 g),其次是亚油酸。随着煎炸的进行,大豆油和菜籽油中棕榈酸和油酸含量逐渐增加,但是增加速率不同,煎炸结束时,大豆油中棕榈酸的增加率为89.77%,而菜籽油中棕榈酸的增加率为93.75%;大豆油中油酸的增加率为64.77%,而菜籽油中油酸的增加率为40.06%。两种油中亚油酸和亚麻酸含量逐渐减少,经过30.0 h的煎炸使用后,大豆油和菜籽油中亚油酸的下降率分别为43.39%和36.46%,亚麻酸的下降率为49.32%和33.08%。这是由于

在煎炸过程中亚油酸、亚麻酸等多不饱和脂肪酸(PUFA)更易发生热氧化,导致其含量减少,同时,油酸、棕榈酸等含量增加,这与李鹏娟^[14]的研究结果一致。大豆油的总不饱和脂肪酸(TUFA)含量为101.130 g/100 g,不饱和度高于菜籽油。在煎炸过程中,大豆油的TUFA始终大于菜籽油。大豆油的PUFA含量为71.405 g/100 g,是菜籽油PUFA(28.543 g/100 g)的2.5倍,两种油的PUFA在煎炸过程中逐渐减少。煎炸使用30.0 h后,大豆油的PUFA依然高于菜籽油,前者是后者的2倍。

表1 感官评价标准

分值	4分	3分	2分	1分
气味	具有某油脂固有的气味	无气味、无异味	有较淡的异常气味(例如:哈喇味、酸败味、热糊味、腐臭味等)	有强烈的异常气味(例如:哈喇味、酸败味、热糊味、腐臭味等)

亚油酸和棕榈酸的比值(C18:2/C16:0)常用来指示油脂的劣化程度^[15]。由表2可知,未煎炸时,大豆油和菜籽油的C18:2/C16:0接近,两种油品质良好。随着煎炸使用,C18:2/C16:0随煎炸时间显著减小,说明油脂逐渐劣化,且大豆油C18:2/C16:0的减少速度快于菜籽油,这与大豆油较高的亚油酸含量有关。

2.2 煎炸过程中食用油理化特性的变化

煎炸过程中食用油的顏色及透明度变化如图

1所示,随着使用时间延长,食用油由澄清逐渐变浑浊。大豆油与菜籽油在煎炸薯条2.5 h出现色泽改变,大豆油在煎炸20.0 h后出现明显浑浊,在25.0 h后深褐色明显加深;菜籽油在12.5 h后出现明显浑浊,在22.5 h后深褐色明显加深。这可能是因为煎炸过程中薯条中的淀粉等组分残留在煎炸油中,并在高温下与油脂发生反应,促进了油中聚合物的生成,增加了煎炸油的浊度^[16]。相同煎炸时间条件下,菜籽油比大豆油更浑浊。

表2 煎炸过程中脂肪酸含量的变化(g/100 g)

食用油	时间(h)	棕榈酸	油酸	亚油酸	亚麻酸	TUFA	PUFA	C18:2/C16:0	
大豆油	0.0	11.148 ± 0.453 ^f	29.725 ± 0.103 ^e	63.171 ± 0.141 ^a	8.234 ± 0.062 ^a	101.130 ± 0.100 ^a	71.405 ± 0.203 ^a	5.672 ± 0.243 ^a	
		12.442 ± 0.119 ^c	32.468 ± 0.685 ^f	47.355 ± 0.176 ^b	7.307 ± 0.091 ^b	87.130 ± 0.418 ^{de}	54.662 ± 0.267 ^b	3.806 ± 0.222 ^b	
	5.0	12.944 ± 0.154 ^c	35.212 ± 0.306 ^e	43.955 ± 0.052 ^c	6.439 ± 0.086 ^c	85.606 ± 0.272 ^f	50.394 ± 0.138 ^c	3.396 ± 0.444 ^c	
		13.514 ± 0.042 ^d	40.090 ± 0.922 ^d	41.133 ± 0.324 ^d	5.283 ± 0.100 ^d	86.506 ± 0.697 ^{ef}	46.416 ± 0.424 ^d	3.044 ± 0.014 ^d	
	10.0	15.228 ± 0.170 ^c	43.408 ± 0.964 ^c	39.670 ± 0.418 ^c	4.968 ± 0.091 ^c	88.046 ± 0.455 ^{cd}	44.638 ± 0.509 ^e	2.605 ± 0.002 ^e	
		17.413 ± 0.200 ^b	47.045 ± 0.203 ^b	38.363 ± 0.399 ^f	4.692 ± 0.081 ^f	90.100 ± 0.520 ^b	43.055 ± 0.480 ^f	2.203 ± 0.048 ^f	
	15.0	21.156 ± 0.131 ^a	48.977 ± 0.420 ^a	35.760 ± 0.257 ^e	4.088 ± 0.005 ^e	88.825 ± 0.672 ^c	39.848 ± 0.262 ^e	1.690 ± 0.002 ^e	
	20.0								
	25.0								
30.0									

续表 2

食用油	时间 (h)	棕榈酸	油酸	亚油酸	亚麻酸	TUFA	PUFA	C18:2/ C16:0
菜籽油	0.0	4.028 ± 0.092 ^e	43.946 ± 0.044 ^f	21.880 ± 0.161 ^a	6.663 ± 0.142 ^a	72.489 ± 0.259 ^e	28.543 ± 0.303 ^a	5.433 ± 0.084 ^a
		4.154 ± 0.047 ^e	47.708 ± 0.469 ^e	20.147 ± 0.247 ^b	6.380 ± 0.144 ^b	74.234 ± 0.077 ^{cd}	26.527 ± 0.391 ^b	4.850 ± 0.005 ^b
	5.0	4.336 ± 0.059 ^d	48.397 ± 0.074 ^e	18.579 ± 0.392 ^c	5.974 ± 0.031 ^c	72.951 ± 0.350 ^{de}	24.554 ± 0.424 ^c	4.286 ± 0.149 ^e
		4.496 ± 0.009 ^e	51.259 ± 0.112 ^d	17.498 ± 0.011 ^d	5.666 ± 0.034 ^d	74.422 ± 0.089 ^e	23.164 ± 0.023 ^d	3.892 ± 0.006 ^d
	10.0	4.569 ± 0.038 ^c	53.480 ± 0.573 ^c	16.458 ± 0.215 ^e	5.371 ± 0.022 ^e	75.309 ± 0.809 ^e	21.829 ± 0.237 ^e	3.602 ± 0.017 ^e
		4.985 ± 0.103 ^b	56.982 ± 0.244 ^b	15.182 ± 0.011 ^f	5.253 ± 0.009 ^e	77.417 ± 0.264 ^b	20.435 ± 0.026 ^f	3.046 ± 0.060 ^f
	15.0	5.315 ± 0.018 ^a	61.553 ± 1.265 ^a	13.903 ± 0.119 ^f	4.997 ± 0.125 ^f	80.453 ± 2.706 ^a	18.900 ± 0.005 ^e	2.616 ± 0.031 ^e

注:同列不同小写字母上标表示数值间差异显著($P < 0.05$)。

食用油的气味感官评价得分结果见表 3, 菜籽油相对于大豆油辨识度更高, 气味得分随煎炸时间延长而降低, 煎炸 10.0 h 后油脂固有气味变淡, 20.0 h 后发生酸败并有异味产生, 30.0 h 后出现严重酸败且出现明显异味。不同煎炸时间的煎炸油气味得分有显著性差异, 相同煎炸时间的两种油的气味得分并无显著性差异, 说明煎炸油的气味得分主要受煎炸时间影响。

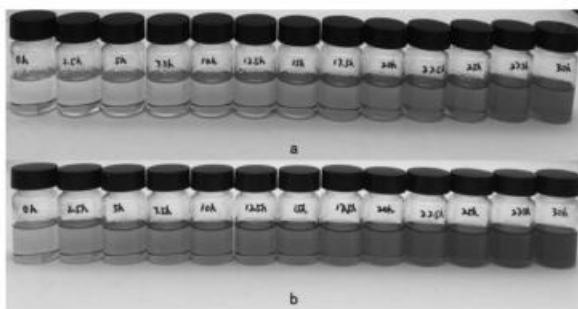


图 1 食用油煎炸过程中透明度的变化
注:a 为大豆油;b 为菜籽油。

表 3 煎炸油感官评价结果

时间 (h)	大豆油气味	菜籽油气味
0.0	3.70 ± 0.48 ^a	4.00 ± 0.00 ^a
10.0	2.50 ± 0.53 ^b	2.20 ± 0.42 ^{bc}
20.0	2.00 ± 0.47 ^{cd}	2.20 ± 0.42 ^{bc}
30.0	1.50 ± 0.71 ^e	1.70 ± 0.48 ^{de}

注:同列不同小写字母上标表示数值间差异显著($P < 0.05$)。

油脂的黏度取决于油中存在的三酰甘油、脂肪酸及聚合物的性质。在煎炸初期(2.5 h), 油脂的黏度下降可能是由于煎炸过程中油脂发生了水解, 使三酰甘油水解为分子质量较小的游离脂肪酸, 减小了油脂的黏度。随着煎炸的进行, 大豆油和菜籽油的黏度均随时间延长逐渐增加(图 2), 这是因为油中脂肪酸不断发生热氧化, 其他饱和度逐渐增加, 同时热聚合反应的发生增加了油中高分子量聚合物的量, 因此, 油脂的黏度不断增加。这与 YANG 等^[17]的研究结果相似。此外, 两种油中黏度的增加速率不同, 相比于大豆油, 菜籽油的黏度增长速率更快, 可能是由于大豆油中 PUFA 含量更高, 受热裂解后, 生成的小分子短链物质更多, 而聚合物含量相对较少, 因此黏度较低且增加缓慢。

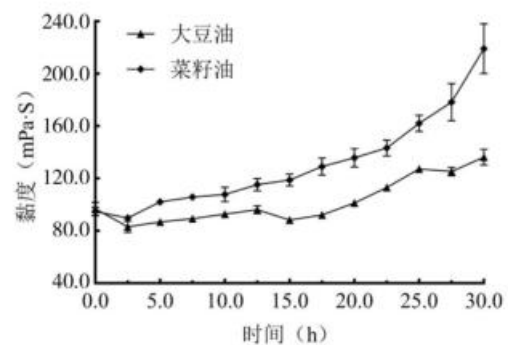


图 2 煎炸过程中食用油的黏度变化

大豆油和菜籽油的碘值变化如图 3 所示。未

煎炸时,大豆油的碘值高于菜籽油,说明大豆油具有更高的不饱和度,该结果与脂肪酸分析结果相吻合。在煎炸过程中,油脂中的不饱和和双键受热和氧的影响,会发生氧化聚合、氧化分解等反应,使双键数目减少^[18],因而两种油的碘值随煎炸时间逐渐降低。在整个煎炸过程中,相较于菜籽油,大豆油的碘值更高,变化幅度更小。

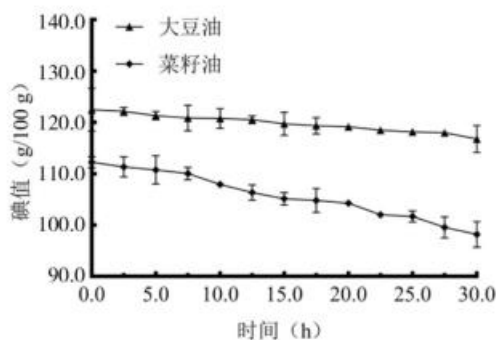


图3 煎炸过程中食用油的碘值变化

食用油中的三酰甘油会与薯条中的水分发生水解反应,致使煎炸油酸价升高。如图4所示,在常温下大豆油比菜籽油具有更低的酸价,这与大豆油的生育酚含量较高有关。煎炸过程中,两种油的酸价均随时间逐渐增加,菜籽油的酸价较大豆油增加更为明显。煎炸使用30.0 h后,大豆油和菜籽油的酸价分别为0.51和1.68 mg/g,均低于国家设定的煎炸过程中植物油的酸价限定标准(5.00 mg/g)。

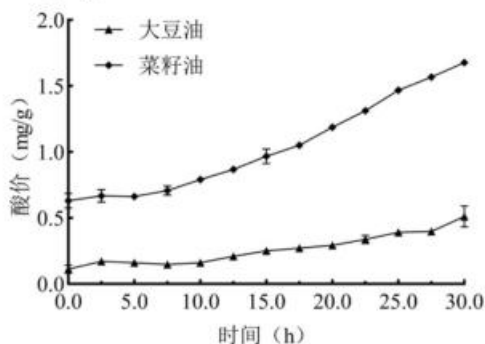


图4 煎炸过程中食用油的酸价变化

羰基价反映的是油脂酸败时产生的含有羰基的醛、酮类物质的含量,是油脂热劣化的灵敏指标之一,羰基价越大,说明油脂品质越差。如图5所示,两种油初始羰基价基本相同,随煎炸时间延长,羰基价持续上升。菜籽油的羰基价在5.0~7.5 h上升幅度较大,并于7.5 h后超过相同煎炸时间的大豆油的羰基价,说明菜籽油中醛、酮等有

害物质增加明显。这与蒋晓菲等^[19]的研究结果一致。煎炸过程中菜籽油的羰基价在22.5 h超过了国家设定的煎炸油的羰基价限定标准(50 $\mu\text{mol/g}$),不宜继续使用。因此,大豆油长时间煎炸薯条过程中的稳定性和安全性更高。

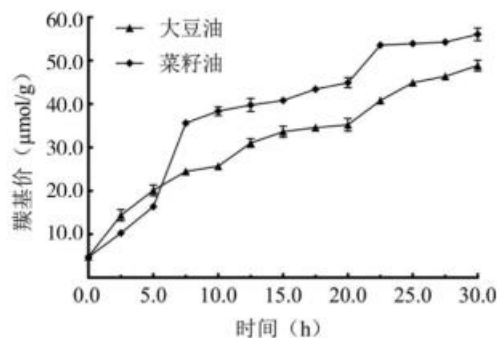


图5 煎炸过程中食用油的羰基价变化

2.3 煎炸过程中食用油的安全性

PAHs 是一类普遍存在的食品污染物,由于其具有亲脂性,因此易在食用油中富集^[20]。对油中检测到的4种PAHs进行定性定量,按出峰时间排序依次为BaA、Chr、BbF、BaP,即PAH4;PAH4总含量记为 ΣPAH4 。食用油在煎炸过程中PAH4的检出及变化结果如表4所示。PAH4在大豆油中均被检测到,以BaA含量最高(1.95 $\mu\text{g/kg}$), ΣPAH4 达2.81 $\mu\text{g/kg}$;在菜籽油中仅BaA和Chr被检测到,且含量均低于大豆油, ΣPAH4 为1.11 $\mu\text{g/kg}$ 。说明两种食用油均存在不同程度的PAHs污染,大豆油受污染更严重。随着煎炸时间延长,PAH4含量均呈现波动式增长,这与刘国艳等^[21]和ZHU等^[22]的研究结果相似。两种油的BaP含量在煎炸过程前10.0 h增长较快,其中大豆油中BaP含量增长了0.11 $\mu\text{g/kg}$,菜籽油中BaP含量增长了0.17 $\mu\text{g/kg}$ 。此外,煎炸过程中大豆油的 ΣPAH4 增长了0.49 $\mu\text{g/kg}$,菜籽油的 ΣPAH4 增长了2.32 $\mu\text{g/kg}$ 。间歇性煎炸30.0 h后,两种油中PAHs均以BaA为主,BbF次之,Chr和BaP含量在两种油中相近,菜籽油中 ΣPAH4 (3.43 $\mu\text{g/kg}$)高于大豆油(3.30 $\mu\text{g/kg}$)。虽然在整个煎炸过程中,两种油的PAHs含量均未超过我国及欧洲食品安全局对油脂中PAHs的限值规定(BaP $\leq 10 \mu\text{g/kg}$; BaP $\leq 2 \mu\text{g/kg}$; PAH4 $\leq 10 \mu\text{g/kg}$),但是PAHs造成食用油污染的普遍性现状亟待解决,并且PAHs的波动性变化值得被注意,是否

PAHs 在持续高温和剧烈煎炸的条件下转化为其他有毒有害物值得进一步探讨。

表 4 煎炸过程食用油中 PAHs 含量变化 ($\mu\text{g}/\text{kg}$)

食用油	时间(h)	BaA	Chr	BbF	BaP	ΣPAH4
大豆油	0.0	1.95 ± 0.18 ^b	0.43 ± 0.12 ^a	0.42 ± 0.04 ^b	0.01 ± 0.01 ^d	2.81 ± 0.27 ^b
	5.0	2.39 ± 0.23 ^a	0.31 ± 0.11 ^{ab}	0.34 ± 0.03 ^b	0.05 ± 0.01 ^{cd}	3.08 ± 0.08 ^{ab}
	10.0	2.41 ± 0.06 ^a	0.20 ± 0.04 ^b	0.32 ± 0.04 ^{bc}	0.12 ± 0.00 ^b	3.05 ± 0.02 ^{ab}
	15.0	2.30 ± 0.01 ^{ab}	0.24 ± 0.06 ^b	0.18 ± 0.00 ^c	0.10 ± 0.07 ^{bc}	2.81 ± 0.11 ^b
	20.0	2.38 ± 0.31 ^a	0.23 ± 0.04 ^b	0.34 ± 0.04 ^b	0.11 ± 0.00 ^{bc}	3.06 ± 0.31 ^{ab}
	25.0	1.99 ± 0.27 ^b	0.29 ± 0.09 ^{ab}	0.62 ± 0.03 ^a	0.22 ± 0.06 ^a	3.12 ± 0.22 ^{ab}
	30.0	2.18 ± 0.01 ^{ab}	0.29 ± 0.08 ^{ab}	0.69 ± 0.20 ^a	0.15 ± 0.04 ^b	3.30 ± 0.33 ^a
菜籽油	0.0	1.05 ± 0.41 ^b	0.07 ± 0.00 ^c	-	-	1.11 ± 0.41 ^d
	5.0	1.17 ± 0.57 ^{ab}	0.15 ± 0.05 ^{bc}	0.44 ± 0.27 ^c	0.05 ± 0.03 ^{bc}	1.80 ± 0.28 ^c
	10.0	1.73 ± 0.02 ^a	0.21 ± 0.05 ^{abc}	0.12 ± 0.06 ^d	0.17 ± 0.04 ^a	2.23 ± 0.03 ^{bc}
	15.0	1.34 ± 0.26 ^{ab}	0.22 ± 0.04 ^{abc}	0.95 ± 0.15 ^b	0.14 ± 0.07 ^{ab}	2.65 ± 0.44 ^b
	20.0	1.40 ± 0.10 ^{ab}	0.29 ± 0.08 ^{ab}	0.62 ± 0.04 ^c	0.15 ± 0.10 ^a	2.45 ± 0.24 ^b
	25.0	1.69 ± 0.05 ^a	0.35 ± 0.18 ^a	0.64 ± 0.17 ^c	0.09 ± 0.03 ^{abc}	2.77 ± 0.33 ^b
	30.0	1.55 ± 0.07 ^{ab}	0.27 ± 0.06 ^{ab}	1.45 ± 0.02 ^a	0.17 ± 0.010 ^a	3.43 ± 0.04 ^a

注:同列不同小写字母上标表示数值间差异显著($P < 0.05$)。

2.4 煎炸过程中食用油质量参数的相关性分析

将食用油的脂肪酸含量、黏度、碘值、酸价、羰基价及 PAH4 含量进行相关性分析,结果如图 6 所示。由图 6. a 可知,使用大豆油煎炸过程中,时间与脂肪酸含量、品质指标及 BaP 呈显著相关性,其中与亚油酸、亚麻酸、PUFA、C18:2/C16:0 及碘值呈负相关。棕榈酸与油酸呈显著正相关,它们与亚麻酸、PUFA、C18:2/C16:0 及碘值呈显著负相关,与黏度、酸价、羰基价呈显著的正相关。不饱和脂肪酸之间呈正相关,且与碘值、Chr 呈显著正相关,与酸价、羰基价、BaP 呈显著的负相关。品质指标之间,酸价与黏度、羰基价呈显著正相关,碘值与酸价、羰基价呈显著负相关。BbF 和 BaP 与 ΣPAH4 之间具有正相关。值得注意的是, BaP 与不饱和脂肪酸具有显著的相关性,因此,在大豆油的使用过程中减缓多不饱和脂肪酸的热氧化降解,可能有利于减少油中 BaP 的生成。由图 6. b 可知,菜籽油用于煎炸时,时间与脂肪酸含量、品质指标及 Chr、BbF、 ΣPAH4 呈显著相关性,其中与亚油酸、亚麻酸、PUFA、C18:2/C16:0 及碘值呈显著负相关。菜籽油的棕榈酸与油酸呈显著正相关,它们与亚油酸、亚麻酸、PUFA、C18:2/C16:0 及碘值呈显著负相关,与 TUFA、黏度、酸价、羰基价、Chr、BbF、 ΣPAH4 呈显著的正相关。

亚油酸、亚麻酸、PUFA、C18:2/C16:0、碘值之间呈显著正相关,与 TUFA、黏度、酸价、羰基价、Chr、BbF、 ΣPAH4 呈显著的负相关。菜籽油与大豆油各自脂肪酸之间相关性的差异,归因于二者不饱和脂肪酸组成特征的不同。品质指标之间具有显著相关性,说明在煎炸过程中它们反映菜籽油的品质时具有一致性。PAH4 之间具有正相关性,其中, BaA 与 Chr 及 ΣPAH4 与 Chr、BbF、BaP 之间相关性显著。菜籽油品质的相关性结果表明, PAH4 与多不饱和脂肪酸具有负相关性,因此,减缓油中多不饱和脂肪酸的降解可能有助于减少 PAHs 的含量,这还需进一步验证。

2.5 煎炸过程中食用油品质的主成分分析

为阐明煎炸过程中大豆油的脂肪酸含量以及品质指标(黏度、碘值、酸价、羰基价、PAHs 含量)对大豆油品质的贡献度,将以上指标作为变量进行 PCA 分析。根据分析结果,以前两个主成分得分做 PCA 分析图,图 7. a、图 7. b 分别为 PCA 因子载荷图和散点图。由图 7. a 可知,前两个主成分共解释了 91.85% 的总方差,说明 PCA 结果可以充分反映大豆油在煎炸过程中的品质变化。由散点图(图 7. b)可知,不同加热时间的大豆油得到了较好的区分。未加热的大豆油在图 7. b 中的分布远离煎炸使用的大豆油,说明其品质存在显

著差异。随煎炸使用时间的延长,大豆油的品质变化主要映射在第一主成分(PC1)上,沿着PC1由负到正逐渐劣化,说明PC1能够很好地反映大豆油在煎炸过程中的劣化情况。PC1贡献率为69.93%,棕榈酸、油酸、酸价、羰基价、BaP、 Σ PAH4与PC1呈正相关,说明这些指标对煎炸过程中大豆油的品质劣化起主要贡献;相反,亚油

酸、亚麻酸、C18:2/C16:0、PUFA、碘值与PC1呈负相关,说明这些指标不利于煎炸过程中大豆油的品质劣化,即有助于减缓大豆油的劣化。第二主成分(PC2)贡献率为21.92%,BbF、Chr和TUFA对其具有主要的正向贡献,BaA对其主要具有负向的贡献。

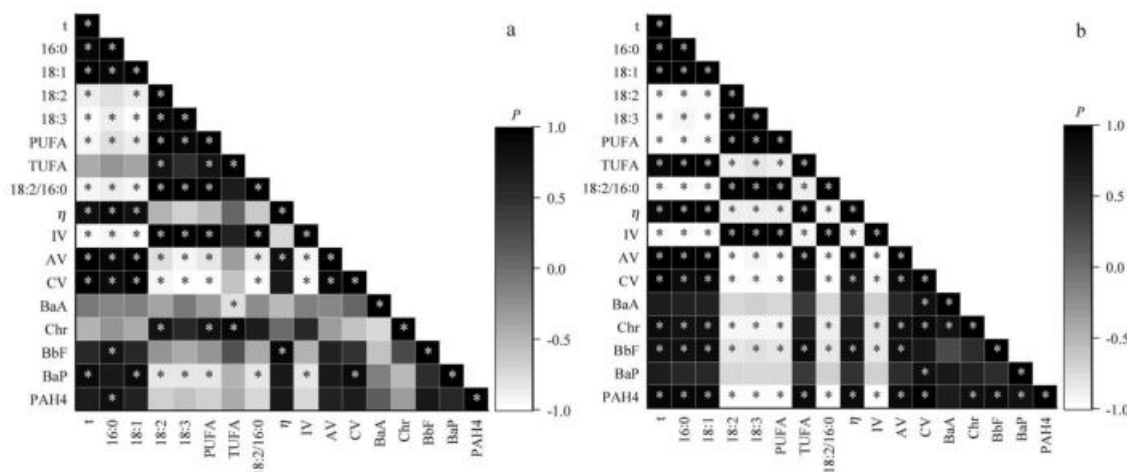


图6 食用油品质的相关性

注:a为大豆油;b为菜籽油。16:0:棕榈酸;18:1:油酸;18:2:亚油酸;18:3:亚麻酸; η :黏度;IV:碘值;AV:酸价;CV:羰基价。*表示 $P < 0.05$ 。

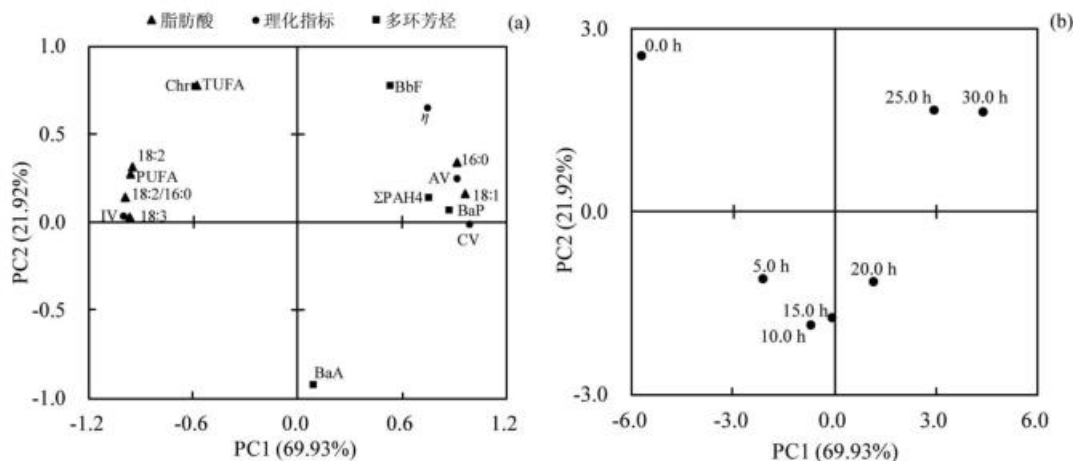


图7 煎炸过程中大豆油品质的主成分分析

注:(a)为载荷图;(b)为散点图。16:0:棕榈酸;18:1:油酸;18:2:亚油酸;18:3:亚麻酸; η :黏度;IV:碘值;AV:酸价;CV:羰基价。

煎炸过程中菜籽油品质的PCA分析结果如图8所示。PC1和PC2共解释了总方差的94.27%,分别占86.12%和8.15%,PCA分析结果可充分反映菜籽油在煎炸过程中的品质变化。由

散点图(图8.b)可知,不同加热时间的菜籽油得到了较好的区分。随煎炸使用时间的延长,菜籽油的品质变化主要映射在PC1上,沿着PC1由负到正逐渐劣化,说明PC1能够很好地反映菜籽油的

在煎炸过程中的劣化情况,该结果与大豆油一致。PC1 贡献率为 86.12%, 棕榈酸、油酸、TUFAs、黏度、酸价、羰基价、PAH4 对 PC1 的正方向影响显

著,亚油酸、亚麻酸、C18:2/C16:0、PUFA、碘值主要影响 PC1 的负方向。PC2 贡献率仅为 8.15%, 主要由 BaA 和 BaP 正向贡献。

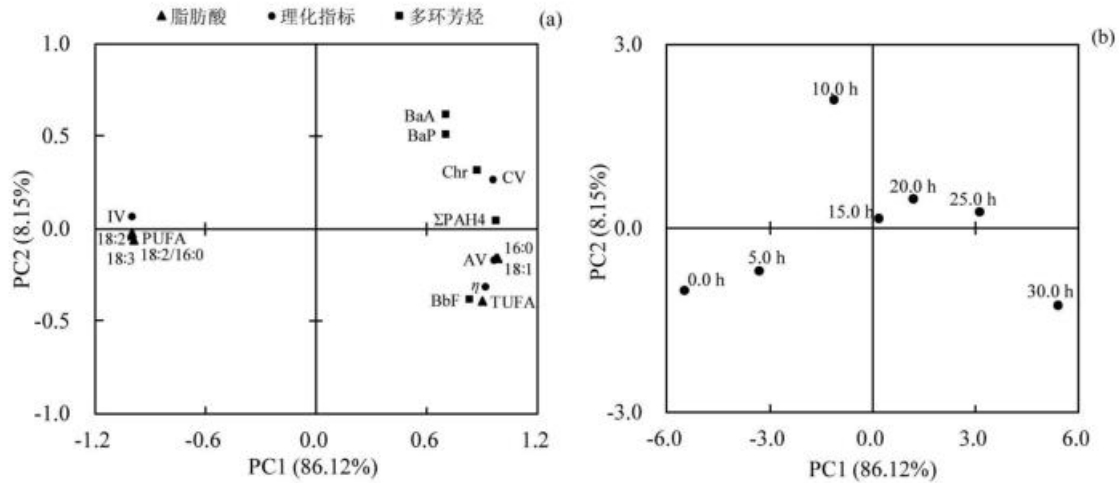


图8 煎炸过程中菜籽油品质的主成分分析

注:(a)为载荷图;(b)为散点图。16:0:棕榈酸;18:1:油酸;18:2:亚油酸;18:3:亚麻酸; η :黏度;IV:碘值;AV:酸价;CV:羰基价。

3 结论

在 180 °C 煎炸薯条 30.0 h 过程中,随着煎炸时间延长,大豆油和菜籽油中 PUFA 含量下降,油脂碘值降低、色泽加深、逐渐浑浊并伴有酸败的异味散发。同时,两种食用油黏度逐渐增大、酸价和羰基价升高,PAHs 的含量也有所增加。通过相关性分析发现,PAH4 与多不饱和脂肪酸呈负相关,推测减缓油中多不饱和脂肪酸的降解可能有助于减少 PAHs 的生成。PCA 结果显示,多不饱和脂肪酸、碘值有利于煎炸过程中大豆油和菜籽油的品质;相反,棕榈酸、油酸、酸价、羰基价、PAHs 对食用油品质起负向影响。

此外,在相同煎炸条件下,相较于菜籽油,大豆油的不饱和脂肪酸含量、碘值更高,说明其具有更高的不饱和度;色泽、黏度、酸价、羰基价更低,反映了大豆油具有更好的煎炸特性。因此,在煎炸薯条时,相比于菜籽油,建议选择大豆油作为煎炸用油。

参考文献:

[1] 王君,王颖,陈喆,等. 空气煎炸技术应用于食品加工的研究进展[J]. 美食研究, 2021, 38(2): 49-53.
[2] 周能,梁丽秀. 高温反复煎炸对油脂脂肪酸的影

响[J]. 玉林师范学院学报, 2018, 39(5): 41-46.
[3] 徐立荣. 食品煎炸过程最佳风味区间的定义、表征及影响因素[D]. 无锡: 江南大学, 2021.
[4] BURHAN B, HULYA T. The influence of consecutive use of different oil types and frying oil in French fries on the acrylamide level[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2021, 104: 104177.
[5] DAS D N, BHUTIA S K. Inevitable dietary exposure of Benzo[a]pyrene: carcinogenic risk assessment an emerging issues and concerns [J]. Current Opinion in Food Science, 2018, 24: 16-25.
[6] 孙长玲,孙嘉彤,胡蒋宁. 食用油中苯并(a)芘检测的样品前处理方法——相转移催化皂化法[J]. 中国油脂, 2020, 45(11): 113-115.
[7] 万重,黄朦倩,陈欢,等. 煎炸不同食物对煎炸油品质的影响[J]. 中国油脂, 2018, 43(3): 54-58.
[8] 张菁菁,王艳,刘笑笑,等. 亚麻籽油在煎炸过程中的品质变化[J]. 食品工业科技, 2022, 43(16): 50-58.
[9] 厉玉婷,于艳艳,杨振东,等. 食用植物油煎炸过程中的品质变化[J]. 中国油脂, 2022, 47(2): 47-50.
[10] 吴晶晶,郎春秀,王伏林,等. 我国食用植物油的生产开发现状及其脂肪酸组成改良进展[J]. 中国油脂, 2020, 45(5): 4-10.
[11] LIU X, HOSHINO N, WANG S, et al. A novel evaluation index for predicting the degradation rate of frying

- oils based on their fatty acid composition[J]. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 2018, 120(7): 1700528.
- [12] LIU X, WANG S, MASUI E, et al. Model for prediction of the carbonyl value of frying oil from the initial composition[J]. *LWT*, 2020, 117: 108660.
- [13] LIU J, SHEN M, LIU X, et al. The loss and fate of BaA, Chr, BbF, and BaP (PAH4) tracked by stable isotope during frying[J]. *Food Chemistry*, 2022, 374: 131769.
- [14] 李鹏娟. 迷迭香源抗氧化物对薯条煎炸油品质的影响研究[D]. 广州: 暨南大学, 2020.
- [15] 李晓丹. 高饱和度油脂煎炸体系中极性物质的产生与生物评价[D]. 无锡: 江南大学, 2017.
- [16] 刘昭, 李小琪. 4种煎炸油在薯条煎炸过程中的品质变化[J]. *安徽农业科学*, 2016, 44(13): 77-79.
- [17] YANG D, WU G, LU Y, et al. Comparative analysis of the effects of novel electric field frying and conventional frying on the quality of frying oil and oil absorption of fried shrimps[J]. *Food Control*, 2021, 128: 108195.
- [18] 弓玉红, 吕文平, 盛剑, 等. 马铃薯煎炸过程中食用油稳定性的研究[J]. *粮食与食品工业*, 2021, 28(2): 35-39.
- [19] 蒋晓菲, 杨叶波, 金青哲, 等. 5种精制食用油在煎炸薯条过程中的品质变化[J]. *中国油脂*, 2014, 39(8): 47-51.
- [20] 田荣荣, 李子璇, 杨丹, 等. 食用油中多环芳烃类化合物的分析研究[J]. *粮食与食品工业*, 2020, 27(5): 8-13.
- [21] 刘国艳, 刘莉, 孙欣果, 等. 不同煎炸条件对茶叶籽油苯并(a)芘含量的影响[J]. *中国油脂*, 2017, 42(11): 97-102.
- [22] ZHU Y, LI X, HUANG J, et al. Correlations between polycyclic aromatic hydrocarbons and polar components in edible oils during deep frying of peanuts[J]. *Food Control*, 2018, 87: 109-116.

Stability and applicability of soybean oil and rapeseed oil in French fries

GONG Jiawei, REN Xingyuan, YU Yong, WU Yinyin, ZHOU Wanli, LIU Xiaofang

(College of Tourism and Cuisine, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225127, China)

Abstract: Soybean oil and rapeseed oil were used to simulate the process of frying French fries. The stability and applicability of these two oils in the process of frying were explored by analyzing the composition, physical and chemical properties, and safety of the oils. The results showed that after intermittent frying for 30.0 h, the contents of linoleic acid, linolenic acid, and iodine value of the two oils decreased gradually, while the viscosity, acid value, carbonyl value, and content of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) increased significantly. The correlation analysis of oil quality parameters showed that polyunsaturated fatty acids were negatively correlated with PAHs. The results of principal component analysis of oil quality parameters showed that the quality of edible oil gradually deteriorated with the prolongation of the use time, and palmitic acid, oleic acid, acid value, carbonyl value, and PAHs played a major role. In addition, compared with rapeseed oil, soybean oil had better stability and applicability during frying.

Key words: soybean oil; rapeseed oil; frying; French fries; stability; applicability

(责任编辑:赵 勇)