

胡明明, 张权, 吴思纷, 等. 基于主成分分析的西式快餐条件下煎炸油品质评价 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(11): 287-296. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022070001

HU Mingming, ZHANG Quan, WU Sifen, et al. Quality Evaluation of Frying Oils under the Conditions of Western Fast Food Restaurants Based on Principal Component Analysis[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(11): 287-296. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022070001

· 分析检测 ·

# 基于主成分分析的西式快餐条件下 煎炸油品质评价

胡明明<sup>1,2</sup>, 张 权<sup>1</sup>, 吴思纷<sup>1</sup>, 张国文<sup>2</sup>

(1. 江西师范大学生命科学学院, 国家淡水鱼加工技术研发专业中心, 江西南昌 330022;

2. 南昌大学食品科学与技术国家重点实验室, 江西南昌 330047)

**摘要:** 为了研究西式快餐条件下煎炸油的品质并建立其评价体系, 考察了 5 种常见煎炸油 (大豆油、菜籽油、葵花籽油、棕榈油及稻米油) 在模拟西式快餐条件 170 °C 连续 7 d 煎炸薯条过程中 11 个品质相关的理化指标, 通过主成分分析法综合评价了 5 种煎炸油在煎炸过程中的煎炸性能, 并建立煎炸油品质评价模型。结果表明, 5 种煎炸油煎炸周期结束后酸价、极性组分、羰基价、茴香胺值、全氧化值和色泽均显著升高 ( $P < 0.05$ ), 维生素 E 总量和氧化稳定指数均显著降低 ( $P < 0.05$ )。相关性分析显示茴香胺值、全氧化值、羰基价两两之间均显著性正相关 ( $r = 0.877 \sim 0.997$ ,  $P < 0.05$ ), 色泽与酸价呈极显著正相关 ( $r = 0.822$ ,  $P < 0.01$ ), 碘值与氧化稳定指数呈极显著负相关 ( $r = -0.846$ ,  $P < 0.01$ ), 与亚油酸/棕榈酸比值呈极显著正相关 ( $r = 0.833$ ,  $P < 0.01$ )。主成分分析提取出 3 个综合性评价指标, 累计贡献率达 84.115%, 反映了原指标的大部分信息, 并进一步建立煎炸油煎炸性能的综合评价得分模型  $F = 0.405F_1 + 0.295F_2 + 0.141F_3$ 。该模型显示棕榈油综合得分最高, 具有较好的煎炸性能。本研究结果可为西式快餐条件下煎炸油的品质评价和质量控制提供借鉴。

**关键词:** 西式快餐, 煎炸, 煎炸油, 煎炸稳定性, 主成分分析, 品质评价

中图分类号: TS225.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)11-0287-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022070001



本文网刊:

## Quality Evaluation of Frying Oils under the Conditions of Western Fast Food Restaurants Based on Principal Component Analysis

HU Mingming<sup>1,2</sup>, ZHANG Quan<sup>1</sup>, WU Sifen<sup>1</sup>, ZHANG Guowen<sup>2</sup>

(1. National R & D Center for Freshwater Fish Processing, College of Life Science, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China;

2. State Key Laboratory of Food Science and Technology, Nanchang University, Nanchang 330047, China)

**Abstract:** In order to explore the quality of frying oils under the condition of western fast food restaurants and establish a quality evaluation system of frying oils, 11 physical and chemical quality indexes of five common frying oils (soybean oil, rapeseed oil, sunflower oil, palm oil and rice bran oil) during simulating the conditions of western fast food restaurants for frying French fries at 170 °C for 7 days were detected. At the same time, the frying performance of five frying oils was comprehensively evaluated by principal component analysis (PCA), and the quality evaluation model of frying oils was established. The results showed that acid value, total polar component, carbonyl group value, anisidine value, total oxidation value and color increased significantly ( $P < 0.05$ ) after the frying period, while the total vitamin E content and oxidative stability index decreased significantly ( $P < 0.05$ ). Correlation analysis indicated that anisidine value, total oxidation value and carbonyl group value were significantly positively correlated with each other ( $r = 0.877 \sim 0.997$ ,  $P < 0.05$ ), while color was significantly positively related to acid value ( $r = 0.822$ ,  $P < 0.01$ ). Iodine value was significantly negatively

收稿日期: 2022-07-01

基金项目: 江西省教育厅科学技术研究项目 (GJJ210322); 江西省重点研发计划项目 (20192ACB60005)。

作者简介: 胡明明 (1986-), 男, 博士, 助理研究员, 研究方向: 油脂质量分析及产品开发应用, E-mail: 2006abc-hmm@163.com。

correlated to oxidative stability index ( $r=-0.846$ ,  $P<0.01$ ), while significantly positively related to the ratio of C18:2/C16:0 ( $r=0.833$ ,  $P<0.01$ ). Three comprehensive indexes were extracted by PCA, with an accumulative contribution rate of 84.115%, reflecting most of the information of the original indexes, and the comprehensive quality evaluation model of frying oils was established as  $F=0.405F_1+0.295F_2+0.141F_3$ . According to the model, palm oil had the highest comprehensive score, indicating the best frying performance among the five frying oils. These findings can provide a reference for the quality evaluation and quality control of frying oil under the conditions of western fast food restaurants.

**Key words:** western fast food; frying; frying oil; frying stability; principal component analysis; quality evaluation

煎炸是世界上最流行的烹饪方法之一,因为煎炸食品具有独特的香气、口感,诱人的颜色和酥脆的质地<sup>[1-2]</sup>,特别是西式快餐食品越来越受到消费者的喜爱。煎炸过程中,因食品在食用油中反复高温煎炸,加上水分、氧等外界因素,会发生一系列复杂的化学反应<sup>[3-4]</sup>,生成大量有害产物,包括非挥发性的游离脂肪酸、非皂化产物、环状化合物、三酰甘油氧化聚合物等以及挥发性的烃类、醛、酮、呋喃和羧酸等<sup>[5-6]</sup>,同时还伴有颜色加深、起泡、黏度增加等感官变化,使食用油的营养价值大大降低,并且影响了煎炸食品的品质和安全性<sup>[7-8]</sup>。因此,研究煎炸过程中煎炸油的品质变化极其重要。如今,市场上用于煎炸的煎炸油种类繁多,不同煎炸油的脂肪酸组成各有不同,其微量成分亦有差别,故其煎炸特性也有差异。评价煎炸过程中煎炸油品质的指标很多,如色泽、过氧化值、酸价、羰基价、茴香胺值、极性组分等<sup>[9-11]</sup>。然而,煎炸过程中煎炸油的品质不能由任何一个指标单独体现,需多个理化指标相互配合、彼此协调的综合反映。

主成分分析(Principal component analysis, PCA)是一种通过降低维度将多指标简化为少量综合指标,以突出样本之间的差异和相似性的多元统计方法。PCA适用于对多指标的综合分析,通过从众多因素中解析出主要影响因素,以缩减评价指标,简化评价过程。近年来,PCA在食品质量评估方面成为研究热点,也常见于评价油脂品质的研究中,多应用在油脂的真伪鉴别或溯源(如山茶油溯源<sup>[12]</sup>、橄榄油等级评定<sup>[13]</sup>、芝麻油掺假<sup>[14]</sup>等),以及油脂功能成分或特征物质分析(如脂溶性活性成分<sup>[15]</sup>、香气成分<sup>[16]</sup>、微量元素<sup>[17]</sup>等)。然而,关于PCA用于评价油脂在煎炸食品动态过程中品质变化的报道不多,尤其是西式快餐煎炸条件下。Zou等<sup>[18]</sup>、Verma等<sup>[19]</sup>虽然应用PCA对煎炸过程中煎炸油品质进行了分析,但都是针对家庭小炸锅煎炸工艺,并非西式快餐煎炸工艺,这可能和西式快餐煎炸条件下持续煎炸实验所需的成本更高或者西式快餐煎炸条件因商业机密不易获得有关。但需值得注意的是,家庭小炸锅和西式快餐煎炸工艺存在很大的区别。相比而言,通常西式快餐煎炸工艺在煎炸过程中煎炸油的使用量(或油料比)较大、煎炸频率较高,且商家为了尽量延长煎炸油的使用周期,在煎炸过程中会滤油以除去残渣、氧化产物等,并及时补充新鲜油,而这些煎炸工艺上的差异对煎炸油煎炸性能及使用寿命的影响也很大<sup>[20-22]</sup>。

因此,基于PCA对西式快餐条件下煎炸油品质进行更全面、系统的评价,这将为不同种类煎炸油煎炸性能的评定及质量控制提供参考。

本研究以我国市场上常用的5种煎炸油(大豆油、菜籽油、葵花籽油、棕榈油及稻米油)作为研究对象,在模拟西式快餐实际煎炸条件下,对5种煎炸油煎炸过程中11个品质相关的理化指标进行分析,并通过PCA对不同煎炸油在煎炸过程中的煎炸性能进行综合评价,建立其评价体系,以期为快餐行业对煎炸油的品质评价提供理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

大豆油、菜籽油、棕榈油、稻米油、葵花籽油均采购于当地商场;冷冻薯条 内蒙古蓝威斯顿薯业有限公司;滤油粉 青岛宇东硅能化工有限公司;甲醇、异辛烷、正庚烷、四氢呋喃 均为色谱纯,上海国药集团化学试剂有限公司;氢氧化钾、硫酸氢钠、乙醚、异丙醇、石油醚、甲基叔丁基醚、冰乙酸、硫代硫酸钠、三氯甲烷、*p*-茴香胺、无水硫酸钠 均为分析纯,上海国药集团化学试剂有限公司; $\beta$ -、 $\gamma$ -、 $\delta$ -生育酚标准品 美国 Supelco analytical 公司;混标( $\alpha$ -生育酚标准品、 $\alpha$ -、 $\beta$ -、 $\gamma$ -、 $\delta$ -生育三烯酚标准品) 马来西亚 Sime Darby Plantation 公司。

OFE-28A 型电热炸炉 上海一喜食品机械有限公司;Agilent 6890 气相色谱仪 美国 Agilent 公司;TU-1930 紫外分光光度计 北京普析公司;743 Rancimat 油脂氧化稳定仪 瑞士 Metrohm 中国有限公司;MODEL-F 罗维朋比色计 英国 Lovibond 有限公司;AL204-IC 电子天平 梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;W201 恒温水浴锅 上海申胜生物技术有限公司;DHG-9240A 电热鼓风干燥箱 上海精宏实验设备有限公司;VORTEX-6 涡流振荡器 海门其林贝仪器制造有限公司。

### 1.2 实验方法

1.2.1 煎炸过程 煎炸过程参考 Hu 等<sup>[2]</sup>的方法并作修改,具体如下:向电炸炉中倒入 13 L 煎炸油,加热至 170 °C,将 200 g 冷冻薯条放入热油中炸 3 min 后捞起,每小时炸 5 批,每天炸 12 h,连续煎炸 7 d。每煎炸 6 h 后过滤一次,过滤时,停止加热,并清洁油炸锅内壁,再将 60 g 滤油粉加入滤油槽中,搅拌 5 min,抽回至油缸,滤油后添加新鲜油至起始刻度线处。本研究在前期调研的基础上,模拟西式快餐实际煎炸条

件,煎炸薯条时煎炸油的使用周期是 7 d,因此,选择将煎炸周期前后(即 0 d 和 7 d)两个时间点的煎炸油油样(250 mL)收集于棕色瓶中,存放于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  冰箱,供进一步的品质分析。

1.2.2 脂肪酸组成(FAC)的测定 煎炸油脂肪酸组成的测定参照 AOCS 检测方法 Ce 1f-96 及相关文献 [23],将油样甲酯化后,用气相色谱仪分析脂肪酸组成。通过与脂肪酸甲酯标准对照,采用面积归一化法确定脂肪酸的相对含量。气相色谱条件:以高纯氮气为载气,流速  $1.3\text{ mL/min}$ ,进口和检测器温度分别设置为  $160、250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。程序升温: $160\text{ }^{\circ}\text{C}$  柱温条件下保持  $5\text{ min}$ ,并以  $10\text{ }^{\circ}\text{C/min}$  升温到  $220\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。氢气和空气流速  $35、375\text{ mL/min}$ ,分流比为  $50:1$ ,进样量为  $1\text{ }\mu\text{L}$ 。

1.2.3 煎炸过程中煎炸油理化指标分析 酸价(AV)的测定:参照 GB/T 5009.229-2016《食品中酸价的测定》中的冷溶剂指示剂滴定法;过氧化值(PV)的测定:参照 GB 5009.227-2016《食品中过氧化值的测定》中的滴定法;极性组分(TPC)的测定:参照 GB 5009.202-2016《食用油中极性组分(PC)的测定》中的柱层析法;碘值(IV)、羰基价(CGV)、茴香胺值( $p\text{-AV}$ )、氧化稳定性(OSI)、色泽、生育酚及生育三烯酚的测定分别参照 GB 5532-2008《动植物油脂 碘值的测定》、GB 5009.230-2016《食品中羰基价的测定》、GB/T 24304-2009《动植物油脂 茴香胺值的测定》、GB 21121-2007《动植物油脂 氧化稳定性的测定(加速氧化测试)》、GB 22460-2008《动植物油脂 罗维朋色泽的测定》、GB 26635-2011《动植物油脂 生育酚及生育三烯酚含量测定 高效液相色谱法》。

### 1.3 数据处理

除特殊说明外,所以实验三次平行,结果以均值 $\pm$ 标准差( $\bar{M}\pm\text{SD}$ )来表示。利用 Excel 2010 作图。采用 IBM SPSS Statistics 20.0 对数据进行单因素方差分析(ANOVA),测试方法为 Duncan 检验, $P<0.05$  表示存在显著性差异;利用 PCA 评价煎炸油煎炸过程中的煎炸性能。

## 2 结果与分析

### 2.1 5 种煎炸油在煎炸过程中各理化指标的变化分析

在煎炸过程中,煎炸油的品质变化主要通过各个理化指标来反映。本研究从煎炸油的氧化产物、内源性抗氧化成分及色泽等方面测定了 11 个理化指标(图 1~图 3)较全面地反映煎炸油的品质。

2.1.1 5 种煎炸油煎炸周期前后 AV、TPC、C18:2/C16:0 和 IV 的变化 目前,我国国家标准 GB 2716-2018《植物油》中规定煎炸过程中煎炸油的 AV 和 TPC 限定值分别为  $5\text{ mg KOH/g}$  和  $27\%$ 。AV 结果表明煎炸油中游离脂肪酸(Free fatty acid, FFA)的高低,反映了煎炸油因氢过氧化物变质和甘油三酯水解的降解程度。从图 1A 可以看出,煎炸前,5 种煎炸油的 AV 无显著差异( $P>0.05$ ),在持续油炸 7 d 后,

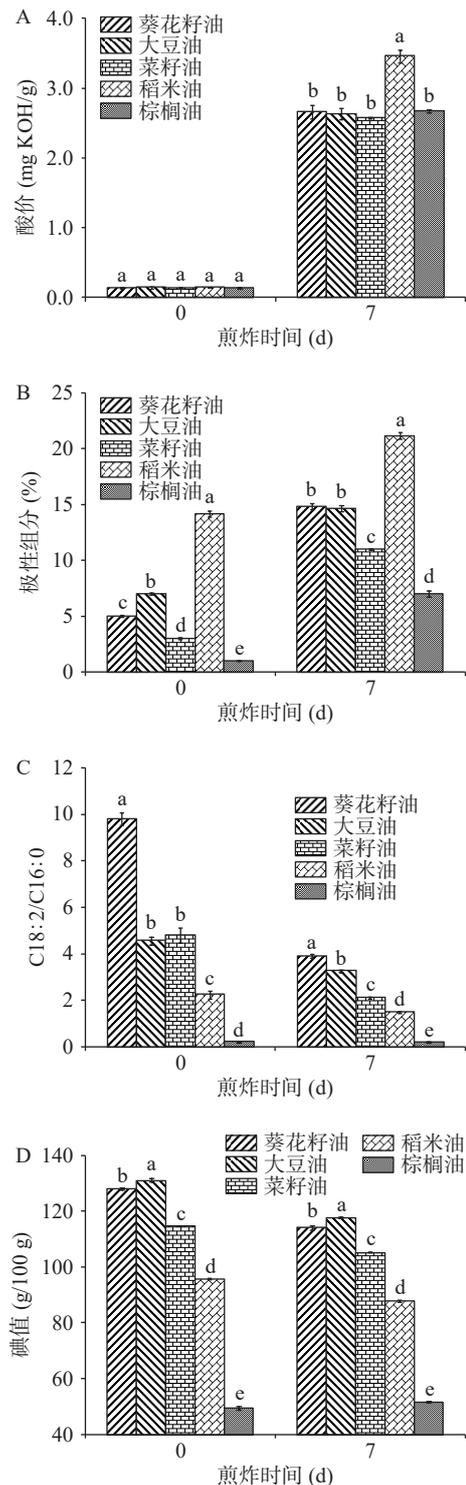


图 1 5 种煎炸油煎炸周期前后酸价(A)、极性组分(B)、C18:2/C16:0(C)和碘值(D)的变化

Fig.1 Changes in AV (A), TPC (B), C18:2/C16:0 (C) and IV (D) of five frying oils before and after frying period

注:不同小写字母表示相同煎炸天数不同煎炸油之间存在显著性差异( $P<0.05$ ),图 2、图 3 同。

5 种煎炸油的 AV 明显增加,其中稻米油的 AV 增加量相对较大,而其他 4 种煎炸油无显著差异( $P>0.05$ )。然而,油炸 7 d 后 5 种煎炸油的 AV 仍远小于国标中的规定值,这可能和煎炸过程中每天滤油并添加新油有关。通常,深度煎炸时,AV 升高主要是由不饱和脂肪酸(Unsaturated fatty acid, UFA)氧化引起的,而

因油脂水解生成的 FFA 含量较少<sup>[24]</sup>。然而, AV 的传统测定法很难区分氧化与水解两者的作用, 且受操作者和操作条件的影响<sup>[2]</sup>。因此, 煎炸油的品质用 AV 来评估存在一定的滞后性及多变性, 并不能准确反映煎炸油的氧化程度。TPC 是指油脂在煎炸过程中产生的所有比甘油三酯极性高的化合物, 包括氧化产物、水解产物及裂解产物。由于所测组分具有固有的极性和非挥发性, 因此, TPC 被认为是评价煎炸油变质的最客观、准确和可靠的指标之一<sup>[1]</sup>。从图 1B 可以看出, 煎炸前, 5 种煎炸油的 TPC 存在显著差异 ( $P<0.05$ ), 其中, 稻米油在煎炸前后 TPC 含量均大于 14%, 显著高于其他 4 种煎炸油 ( $P<0.05$ ), 这可能归因于稻米油中丰富的谷维素及较高含量的甘二酯等极性组分的存在<sup>[25]</sup>。油炸 7 d 后, 5 种煎炸油的 TPC 含量均明显增加, 但均始终低于我国及大多数欧洲国家标准中规定的最大限度 24%~27%<sup>[7]</sup>, 这可能与本研究在煎炸过程中每天滤油并添加新鲜油有关, 即滤油过程会除去煎炸过程中大量生成的极性成分, 同时补充的新鲜油 TPC 相对含量更低, 使得煎炸过程中煎炸油的 TPC 含量仍在国标范围。另外, 棕榈油的 TPC 增长量显著低于其他 4 种煎炸油 ( $P<0.05$ ), 这可能与棕榈油中含有相比其他 4 种油更多的生育三烯酚有关<sup>[26]</sup>。研究表明, 相比生育酚, 生育三烯酚因其侧链上的 3 个不饱和双键具有更强大的抗氧化能力<sup>[27]</sup>, 从而使得煎炸油拥有更好的氧化稳定性, 在煎炸过程中极性组分的产生速率也更低<sup>[28]</sup>。同样, 刘玉兰等<sup>[26]</sup>也发现棕榈油因富含生育三烯酚使其在连续煎炸油条中产生 TPC 的速率低于大豆油。

在煎炸过程中油脂会发生氧化、裂解等反应, 由于亚油酸(C18:2)比棕榈酸(C16:0)更容易被氧化, 因此, 煎炸油的氧化变质经常可以通过油脂的 C18:2/C16:0 比值变化来反映<sup>[3]</sup>。从图 1C 可以看出, 煎炸前, 除大豆油和菜籽油的 C18:2/C16:0 值无显著差异 ( $P>0.05$ ) 外, 其他煎炸油均存在显著差异 ( $P<0.05$ ), 煎炸 7 d 后, 葵花籽油、大豆油、菜籽油及稻米油的 C18:2/C16:0 值均减小, 其中葵花籽油最为明显, 而棕榈油 C18:2/C16:0 值降低幅度显著低于其他四种油 ( $P<0.05$ ), 表明棕榈油相比其他 4 种油具有更好的稳定性。这可能是由于棕榈油中脂肪酸组成以饱和脂肪酸(C16:0)为主, 而其他 4 种油则刚好相反, 以不饱和脂肪酸为主(如 C18:2 和 C18:1)。油脂在煎炸过程发生氧化、裂解等反应时, 饱和脂肪酸相对比较稳定<sup>[29]</sup>, 因此, 在煎炸过程中, 含有更多饱和脂肪酸的棕榈油氧化劣变程度更少, C18:2/C16:0 值变化幅度小<sup>[3]</sup>。

IV 是反映油脂不饱和程度的指标, 不饱和度越高的油脂, IV 越大。煎炸过程中, IV 的降低主要归因于油脂中的不饱和双键因氧化或聚合而被破坏, 使得其不饱和度降低<sup>[30]</sup>。如图 1D 所示, 在煎炸前后, 5 种煎炸油的 IV 均存在显著差异 ( $P<0.05$ ), 但棕榈

油的 IV 在煎炸周期前后几乎保持不变, 而其他 4 种煎炸油煎炸 7 d 后 IV 均明显下降。煎炸前, 棕榈油和大豆油分别含有最小和最大的不饱和度。煎炸结束后, 棕榈油的 IV 变化量明显低于其他 4 种煎炸油 ( $P<0.05$ ), 这主要是因为棕榈油含有更少的不饱和脂肪酸, 在煎炸过程中更不容易氧化<sup>[21]</sup>。同样, Abdulkarim 等<sup>[30]</sup>也发现高油酸辣木籽油因比大豆油和菜籽油含有更少量的多不饱和脂肪酸而使其在煎炸过程中 IV 下降速率更慢。

2.1.2 5 种煎炸油煎炸周期前后 CGV、PV、*p*-AV 和 TOTOX 的变化 油脂在高温煎炸下会氧化变质产生酮类、醛类、醇类及聚合物等羰基类化合物, CGV 可用来表明油脂在煎炸过程中生成羰基类化合物的数量, 是评价煎炸油变质程度的一个灵敏指标。CGV 越大, 表明煎炸时产生的酮类、醛类等羰基化合物越多<sup>[31]</sup>。由图 2A 可知, 在煎炸前, 5 种煎炸油的 CGV 均存在显著差异 ( $P<0.05$ )。煎炸 7 d 后, 棕榈油的 CGV 增加量为 10.8 meq/kg 比稻米油(9.3 meq/kg)要高, 但显著低于大豆油(14.9 meq/kg)、菜籽油(15.0 meq/kg)和葵花籽油(18.3 meq/kg) ( $P<0.05$ )。说明棕榈油煎炸过程中产生了相对较少的羰基类化合物, 这和慕鸿雁等<sup>[32]</sup>的结果一致。

油脂氧化是一个复杂的动态变化过程, PV 是评价煎炸油在氧化初级阶段所含过氧化物或氢过氧化物最常用的指标, 然而, 氢过氧化物是不稳定的, 在油炸条件下会自发地分解成其他次级产物导致 PV 下降<sup>[12]</sup>, *p*-AV 是反映煎炸油劣变的次级生成产物醛类含量的指标<sup>[6]</sup>, 因此, 油脂的氧化程度我们常用全氧化值(TOTOX, 其中  $TOTOX=2PV+p-AV$ )来综合评估<sup>[33]</sup>。从图 2B 可以看出, 在煎炸前, 5 种煎炸油的 PV 均存在显著差异 ( $P<0.05$ )。在煎炸周期前后, 5 种煎炸油 PV 变化各异, 没有明显的规律。从图 2C 和图 2D 中可以看出, 在煎炸前, 葵花籽油和大豆油的 *p*-AV 存在显著差异 ( $P<0.05$ ), 但就 TOTOX 而言, 除葵花籽油和菜籽油无显著差异 ( $P>0.05$ ) 外, 其他煎炸油均存在显著差异 ( $P<0.05$ )。煎炸 7 d 后, 5 种煎炸油在煎炸过程中 *p*-AV 和 TOTOX 变化类似且都明显增加, 这和 Hu 等<sup>[2]</sup>的研究结果一致。此外, 棕榈油的 TOTOX 增加量显著低于其他 4 种煎炸油 ( $P<0.05$ ), 表明棕榈油的氧化稳定性相对较好, 这可能跟棕榈油中含有相对较低的不饱和脂肪酸含量有关。

2.1.3 5 种煎炸油煎炸周期前后 OSI、维生素 E 总量和色泽的变化 OSI 是表征油脂抵抗自动氧化能力的指标<sup>[34]</sup>。OSI 越长, 说明油脂抵御氧化变质能力越强。由图 3A 可以看出, 在煎炸前后, 5 种煎炸油的 OSI 均存在显著差异 ( $P<0.05$ )。在 7 d 煎炸过程中, 棕榈油的 OSI 虽然从初始的 53.5 h 下降到第 7 d 的 21.1 h, 但仍显著高于稻米油(9.1 h)、菜籽油(7.4 h)、大豆油(5.1 h)和葵花籽油(3.4 h) ( $P<0.05$ ), 表明棕榈油比其他 4 种油有更好的抵抗氧化变质的能力, 这

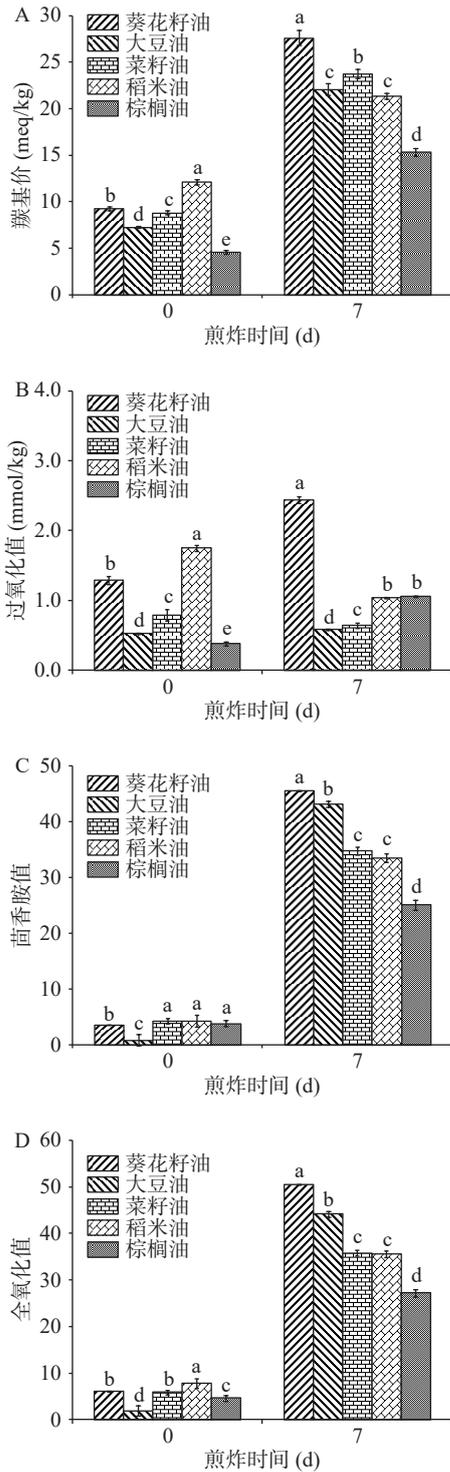


图 2 5 种煎炸油煎炸周期前后羰基价(A)、过氧化值(B)、茴香胺值(C)和全氧化值(D)的变化  
Fig.2 Changes in CGV (A), PV (B), p-AV (C) and TOTOX (D) of five frying oils before and after frying period

和蒋晓菲等<sup>[35]</sup>研究结果一致。其原因可能是其他 4 种油含有相对较高的 UFA 含量, 因为参与氧化反应的多为一些含有活化的烯键 UFA, 而饱和脂肪酸一般不进行氧化反应<sup>[20]</sup>。

维生素 E(生育酚与生育三烯酚)是一种天然抗氧化剂, 其浓度及异构体组分会影响煎炸油的稳定性<sup>[36]</sup>。从图 3B 可以看出, 在煎炸前后, 5 种煎炸油的维生素 E 总量均存在显著差异( $P < 0.05$ )。煎炸 7 d

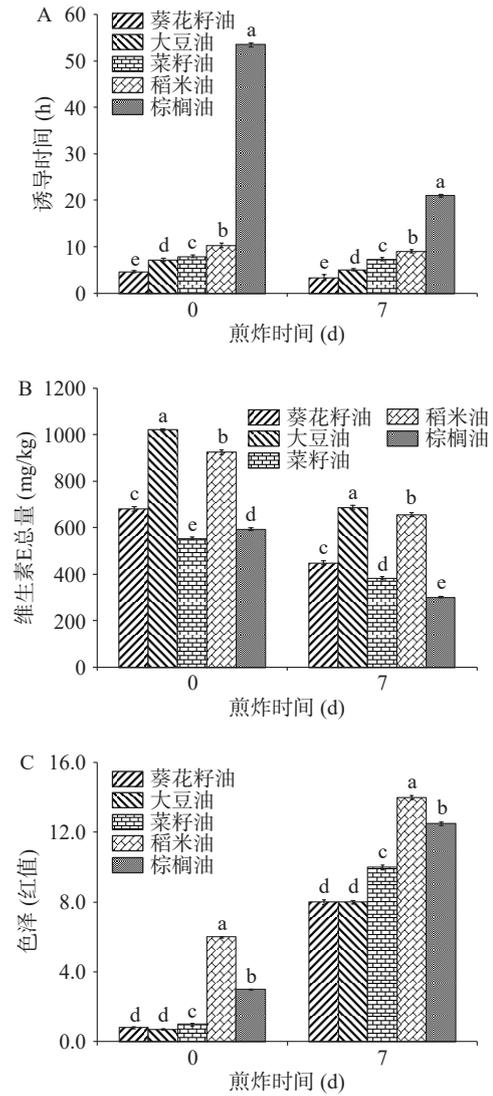


图 3 5 种煎炸油煎炸周期前后氧化诱导时间(A)、维生素 E 总量(B)和色泽(C)的变化  
Fig.3 Changes in OSI (A),  $V_E$  (B) and color (C) of five frying oils before and after frying period

后, 5 种煎炸油的维生素 E 总量均降低, 其中, 棕榈油中的维生素 E 损失率(49%)最高, 稻米油最低(29%), 其他 3 种煎炸油维生素 E 损失率相当。有所不同的是, 刘玉兰等<sup>[26]</sup>在研究四种煎炸油在煎炸过程中维生素 E 的含量变化时发现油脂中绝大部分维生素 E 已经损失, 其原因可能和本实验每天添加新鲜油并滤油有关。

色泽是衡量煎炸过程中煎炸油品质的一种直观而又比较主观的指标<sup>[37]</sup>。从图 3C 中可以看出, 在煎炸前后, 除葵花籽油和大豆油的色泽无显著差异( $P > 0.05$ )外, 其他煎炸油均存在显著差异( $P < 0.05$ )。煎炸 7 d 后, 5 种煎炸油的色泽均明显加深, 其中, 色泽(红值)增加幅度次序依次为: 棕榈油(9.5) > 菜籽油(9.0) > 稻米油(8.0) > 大豆油(7.3) > 葵花籽油(7.2)。一般来说, 油脂在煎炸过程中的颜色加深主要归因于油脂中甘油三酯和 FFA 的氧化降解而导致非酶性褐变化合物的形成<sup>[38]</sup>。然而, 值得注意的是, 煎炸油的颜色变深也可能受到油脂本身中的微量色素和维生素

素 E 的影响,特别是生育三烯酚容易形成红棕色醌类聚合物,这可能也是棕榈油中因含有更高含量的生育三烯酚而导致煎炸过程中色泽加深程度相对其他 4 种油较大的原因之一<sup>[6]</sup>。

总体来说,5 种煎炸油在 11 个煎炸品质评价指标表现上各有优劣,整个煎炸过程中,棕榈油的 TOTOX、TPC 增加量、IV 及 C18:2/C16:0 值降低幅度最小,OSI 最长,具有相对较好的煎炸稳定性。

### 2.2 煎炸油各理化指标的相关性分析及综合评价

对 5 种煎炸油各理化指标进行相关性分析,结果如表 1 所示。从表 1 中可以看出, $p$ -AV、TOTOX、CGV 两两之间均存在显著正相关( $r=0.877\sim 0.997$ ,  $P<0.05$ ),说明  $p$ -AV 越大,煎炸油的 TOTOX、CGV 也越大,这是因为这三个指标均与煎炸过程中油脂氧化劣变所产生的醛类化合物有关。煎炸油的 IV 与 OSI 呈极显著负相关( $r=-0.846$ ,  $P<0.01$ ),与  $V_E$ 、C18:2/C16:0 呈极显著正相关( $r=0.503$ ,  $r=0.833$ ,  $P<0.01$ ),说明煎炸油不饱和度越高,其抵御自动氧化能力越弱,而煎炸油中的内源性抗氧化剂  $V_E$  对油脂氧化有抑制作用,在煎炸过程中随着煎炸油不饱和度的逐渐下降,C18:2/C16:0 比值随之降低。煎炸油的 OSI 与  $p$ -AV、TOTOX、IV、CGV 及 TPC 呈极显著负相关( $r=-0.846\sim -0.512$ ,  $P<0.01$ ),说明煎炸过程中随着

煎炸油抵御自动氧化能力逐渐下降,其不饱和脂肪酸逐渐氧化,产生的次级氧化产物、羰基类化合物及极性物质等也不断增加。煎炸油的色泽与 AV、TPC 呈极显著正相关( $r=0.822$ ,  $r=0.542$ ,  $P<0.01$ ),说明煎炸过程中随着煎炸油色泽的逐渐加深,其产生的游离脂肪酸和极性物质也不断增加,这与 Aladedunye 等<sup>[39]</sup>研究发现在卡诺拉油煎炸薯条过程中,卡诺拉油的色泽和酸价、极性组分显著相关结果一致。通过煎炸油各指标相关性分析可知,不同的理化指标间存在一定的相关性,换言之,不同的指标间反映的信息有所重叠。因此,可以对各指标进一步统计分析,并进行归类 and 简化,进而使得在比较各煎炸油煎炸性能时更加简便、准确。

### 2.3 PCA 分析煎炸油煎炸品质的评价指标

因煎炸油各理化指标间在量纲及数量级上存在差异,为避免彼此的影响,参考 Ranamukhaarachchi 等<sup>[40]</sup>的方法,对煎炸油样品的原始数据进行标准化处理,使得各指标的评价数值保持相同数量级,以作进一步的统计分析。对煎炸油 11 个理化指标进行主成分分析,结果见表 2、图 4。

图 4 为主成分分析特征值碎石图,可用来确定最佳主成分数,图中可以看出有三个拐点,说明有三个主成分。按照 Kaiser 规则<sup>[41]</sup>,提取出特征值  $\lambda>1$

表 1 煎炸油各理化指标间相关性分析

Table 1 Correlation analysis of the physicochemical indexes determined in five frying oils

理化指标	AV	PV	$p$ -AV	TOTOX	IV	CGV	TPC	OSI	色泽	$V_E$	C18:2/C16:0
AV	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PV	0.007	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$p$ -AV	0.354*	0.297*	1	-	-	-	-	-	-	-	-
TOTOX	0.343*	0.374**	0.997**	1	-	-	-	-	-	-	-
IV	-0.229	0.197	0.354*	0.361**	1	-	-	-	-	-	-
CGV	0.533**	0.458**	0.877**	0.89*	0.362*	1	-	-	-	-	-
TPC	0.368*	0.134	0.471**	0.469**	0.338*	0.633**	1	-	-	-	-
OSI	-0.057	-0.311	-0.512**	-0.524**	-0.846**	-0.599**	-0.55**	1	-	-	-
色泽	0.822**	-0.158	0.209	0.188	-0.454**	0.392**	0.542**	0.093	1	-	-
$V_E$	-0.374**	-0.202	-0.165	-0.177	0.503**	-0.204	0.427**	-0.301*	-0.233	1	-
C18:2/C16:0	-0.363*	0.385**	0.09	0.121	0.833**	0.123	0.055	-0.662**	-0.626**	0.325*	1

注: \*\*表示极显著相关,  $P<0.01$ ; \*表示显著相关,  $P<0.05$ 。

表 2 特征值及方差贡献分析表

Table 2 Characteristic values and contribution rates of principal components

成分	初始特征值方差			提取平方和载入方差		
	特征值	方差贡献率(%)	累计贡献率(%)	特征值	方差贡献率(%)	累计贡献率(%)
PC1	4.454	40.493	40.493	4.454	40.493	40.493
PC2	3.244	29.495	69.988	3.244	29.495	69.988
PC3	1.554	14.127	84.115	1.554	14.127	84.115
PC4	0.75	6.817	90.932			
PC5	0.587	5.335	96.267			
PC6	0.199	1.846	98.078			
PC7	0.109	0.995	99.073			
PC8	0.072	0.658	99.731			
PC9	0.017	0.156	99.887			
PC10	0.012	0.113	100.000			
PC11	1.96E-05	0.000	100.000			

的 3 个主成分(PC1、PC2、PC3), 其方差贡献率分别为 40.493%、29.495% 和 14.127%, 累计方差贡献率已达到 84.115%, 即保留了原始评价指标 84.115% 的数据信息。据 Yildirim 等<sup>[42]</sup> 报道, 当累计方差贡献率大于 70% 时就可以用来定性分析。因此, 可将煎炸油的 11 个理化评价指标降维成 3 个彼此相对独立的综合性评价指标, 从而达到降维的目的。

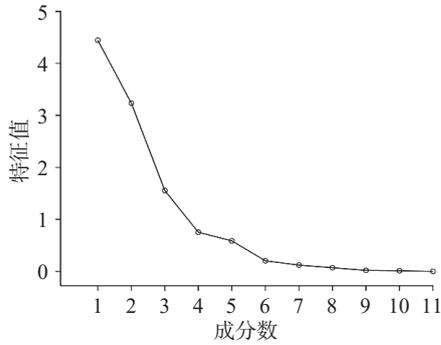


图 4 主成分分析特征值碎石图

Fig.4 Scree plot of principal component analysis

主成分的载荷矩阵主要体现了各评价指标对主成分负荷的作用方向与大小, 把在主成分中载荷值的绝对值大于 0.5 的各指标组合成综合性指标<sup>[43]</sup>。从表 3 和图 5 中可以看出, PC1 主要综合了 *p*-AV、TOTOX、CGV、TPC 和 OSI 五个指标, 方差贡献率为 40.493%, *p*-AV、TOTOX、CGV 和 TPC 在 PC1 正方向, OSI 在 PC1 负方向, 说明 *p*-AV、TOTOX、CGV 和 TPC 与 PC1 呈正相关, OSI 与 PC1 呈负相关。其中 *p*-AV、TOTOX、CGV 在 PC1 中的载荷值较大(0.866~0.931), 对 PC1 影响较大, 故 PC1 主要反映了煎炸油中产生的氧化产物信息; PC2 主要综合了 AV、IV、色泽(Color)和 C18:2/C16:0 四个指标, 方差贡献率为 29.495%, AV 和色泽在 PC2 正方向, IV 和 C18:2/C16:0 在 PC2 负方向, 说明 AV 和色泽与 PC2 呈正相关, IV 和 C18:2/C16:0 与 PC2 呈负相关。其中色泽在 PC2 中的载荷值(0.866)最大, 对

表 3 煎炸油主成分分析旋转成分矩阵

Table 3 Rotated component matrix of principal component analysis of frying oils

评价指标	主成分因子		
	PC1	PC2	PC3
AV ( $X_1$ )	0.370	0.766	0.122
PV ( $X_2$ )	0.458	-0.140	-0.557
<i>p</i> -AV ( $X_3$ )	0.866	0.216	-0.198
TOTOX ( $X_4$ )	0.880	0.196	-0.240
IV ( $X_5$ )	0.620	-0.721	0.141
CGV ( $X_6$ )	0.931	0.289	-0.123
TPC ( $X_7$ )	0.700	0.154	0.604
OSI ( $X_8$ )	-0.807	0.417	-0.151
色泽 ( $X_9$ )	0.206	0.866	0.387
$V_E$ ( $X_{10}$ )	0.061	-0.570	0.736
C18:2/C16:0 ( $X_{11}$ )	0.382	-0.824	-0.132

PC2 影响较大, 故 PC2 主要反映了煎炸油的色泽信息; PC3 主要综合了 PV 和  $V_E$  两个指标, 方差贡献率为 14.127%,  $V_E$  在 PC3 正方向, PV 在 PC3 负方向, 说明  $V_E$  与 PC3 呈正相关, PV 与 PC3 呈负相关。其中,  $V_E$  在 PC3 中的载荷值(0.736)最大, 其对 PC3 影响较大, 故 PC3 主要反映了煎炸油的内源性  $V_E$  信息。由于 PC1 和 PC2 的累积方差贡献率(69.988%) 大于 50%, 可认为 *p*-AV、TOTOX、CGV、OSI、色泽和 C18:2/C16:0 是煎炸油的特征指标。此外, 煎炸油大部分的物性信息已保留在 3 个主成分当中, 因此, 可用这 3 个主成分对煎炸油作初步分析。对表 3 的初始因子旋转成分矩阵表进行标准化计算, 得到 3 个主成分得分的标准化系数矩阵, 结果见表 4。

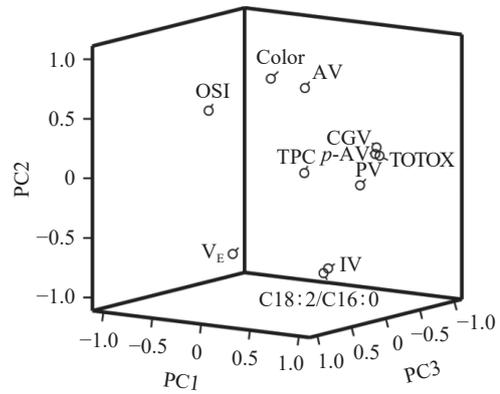


图 5 煎炸油品质评价指标的主成分载荷图

Fig.5 Principal component loading plot of quality evaluation indexes of frying oils

表 4 煎炸油主成分得分系数矩阵

Table 4 Scoring coefficient matrix of principal component analysis of frying oils

评价指标	主成分因子		
	PC1	PC2	PC3
AV ( $X_1$ )	0.175	0.425	0.098
PV ( $X_2$ )	0.217	-0.078	-0.447
<i>p</i> -AV ( $X_3$ )	0.410	0.120	-0.159
TOTOX ( $X_4$ )	0.417	0.109	-0.193
IV ( $X_5$ )	0.294	-0.400	0.113
CGV ( $X_6$ )	0.441	0.160	-0.099
TPC ( $X_7$ )	0.332	0.086	0.485
OSI ( $X_8$ )	-0.382	0.232	-0.121
色泽 ( $X_9$ )	0.098	0.481	0.310
$V_E$ ( $X_{10}$ )	0.029	-0.316	0.590
C18:2/C16:0 ( $X_{11}$ )	0.181	-0.457	-0.106

根据表 4 构建出各主成分与煎炸油品质评价指标间的线性方程如下:

$$F_1 = 0.175X_1 + 0.217X_2 + 0.410X_3 + 0.417X_4 + 0.294X_5 + 0.441X_6 + 0.332X_7 - 0.382X_8 + 0.098X_9 + 0.029X_{10} + 0.181X_{11}$$

$$F_2 = 0.425X_1 - 0.078X_2 + 0.120X_3 + 0.109X_4 - 0.400X_5 + 0.160X_6 + 0.086X_7 + 0.232X_8 + 0.481X_9 - 0.316X_{10} - 0.457X_{11}$$

$$F_3=0.098X_1-0.447X_2-0.159X_3-0.193X_4+0.113X_5-0.099X_6+0.485X_7-0.121X_8+0.310X_9+0.590X_{10}-0.106X_{11}$$

以3个主成分对应的方差贡献率为权重,并结合主成分因子得分公式,计算煎炸油煎炸性能的综合评价得分F。

$$F=0.405F_1+0.295F_2+0.141F_3$$

根据主成分得分模型,计算出5种煎炸油各主成分得分值、综合得分值并排序(见表5)。以PC1、PC2的综合评价指标得分值( $F_1, F_2$ )绘制5种煎炸油在煎炸过程中的PCA得分图(如图6),散点图中不同的标记表示不同种类的煎炸油,标记与标记间的距离表明煎炸油间的差异程度。从图6中可较容易从视觉上对5种煎炸油在煎炸性能上的差异进行区分(从左到右依次为棕榈油、稻米油、菜籽油、大豆油和葵花籽油),PC1将煎炸稳定性更好(相对负方向)的棕榈油与其他4种油分离开来,结合图6和表5可知,棕榈油得分较高,说明其煎炸性能较好,这主要是由于棕榈油的第一主成分即  $p$ -AV、TOTOX、CGV 及 TPC 生成速率较小,OSI 较长。PC2 可以清晰地区分每个煎炸阶段,随着煎炸时间的延长,5种煎炸油样的主成分得分分布呈现出向右上方(即PC1、PC2的正方向)移动,说明随煎炸时间的延长,每种煎炸油的色泽逐渐加深,产生的羰基类物质、极性物质等氧化产物逐渐增多,煎炸油的品质在逐渐下降。这与 Waghmare 等<sup>[7]</sup>报道的煎炸油的PCA得分随着煎炸次数的增加而成比例下降结果类似。另外,Zribi 等<sup>[44]</sup>也发现在油炸过程中精制橄榄油/棕榈油的调和油在所有调和油中表现出更好的煎炸性能,其PCA得分也更高。

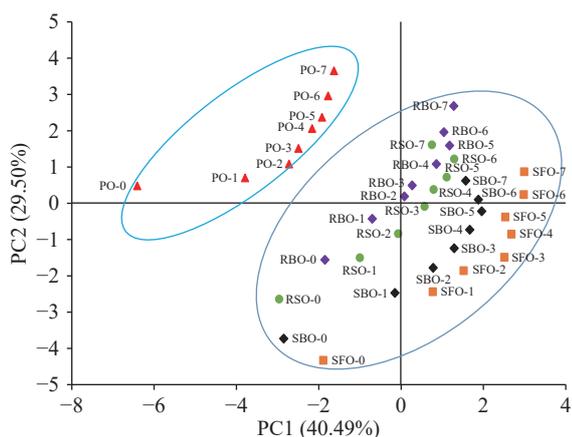


图6 不同煎炸时间植物油的PC1和PC2得分图  
Fig.6 PC1 and PC2 scores of frying oil samples during different frying time

### 3 结论

本研究基于PCA考察了5种常见煎炸油(大豆油、菜籽油、葵花籽油、棕榈油及稻米油)在西式快餐煎炸条件下煎炸性能的差异性,并建立其评价体系。结果表明,煎炸周期结束后,5种煎炸油品质均

表5 不同煎炸油煎炸性能评价得分情况

Table 5 Frying performance evaluation scores of different frying oils during frying

煎炸油	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	F	排名
PO-0	-6.410	0.483	-0.341	-2.502	1
PO-1	-3.785	0.698	-1.134	-1.487	5
PO-2	-2.720	1.081	-1.301	-0.966	7
PO-3	-2.487	1.511	-1.277	-0.741	9
PO-4	-2.160	2.062	-1.143	-0.427	12
PO-5	-1.920	2.373	-0.970	-0.214	14
PO-6	-1.773	2.961	-0.634	0.066	18
PO-7	-1.626	3.648	-0.300	0.375	24
RBO-0	-1.854	-1.564	1.682	-0.975	6
RBO-1	-0.701	-0.430	2.062	-0.120	16
RBO-2	0.077	0.193	1.672	0.324	22
RBO-3	0.271	0.491	1.608	0.481	25
RBO-4	0.857	1.082	1.541	0.884	33
RBO-5	1.184	1.594	1.578	1.172	37
RBO-6	1.041	1.961	1.866	1.263	38
RBO-7	1.280	2.681	2.223	1.623	40
RSO-0	-2.961	-2.635	-0.236	-2.010	3
RSO-1	-1.001	-1.496	-0.535	-0.922	8
RSO-2	-0.072	-0.844	-0.893	-0.404	13
RSO-3	0.572	-0.092	-0.780	0.094	19
RSO-4	0.794	0.384	-0.649	0.343	23
RSO-5	1.114	0.716	-0.600	0.578	28
RSO-6	1.288	1.224	-0.506	0.812	31
RSO-7	0.748	1.609	0.224	0.809	30
SBO-0	-2.847	-3.728	1.967	-1.975	4
SBO-1	-0.155	-2.465	0.961	-0.654	10
SBO-2	0.785	-1.783	0.551	-0.130	15
SBO-3	1.291	-1.244	0.488	0.224	20
SBO-4	1.666	-0.730	0.548	0.537	26
SBO-5	1.956	-0.215	0.594	0.812	32
SBO-6	1.885	0.097	0.794	0.904	34
SBO-7	1.569	0.617	1.264	0.996	35
SFO-0	-1.887	-4.333	-0.201	-2.071	2
SFO-1	0.774	-2.436	-0.959	-0.540	11
SFO-2	1.518	-1.861	-1.273	-0.114	17
SFO-3	2.507	-1.486	-2.424	0.235	21
SFO-4	2.680	-0.851	-1.893	0.568	27
SFO-5	2.532	-0.380	-1.225	0.741	29
SFO-6	2.978	0.242	-1.323	1.091	36
SFO-7	2.992	0.867	-1.026	1.323	39

注: PO: 棕榈油; RBO: 稻米油; RSO: 菜籽油; SBO: 大豆油; SFO: 葵花籽油; 图6同; PO-0~PO-7分别表示煎炸0~7 d的棕榈油,其他的类同。

明显下降,其中,AV、TPC、CGV、 $p$ -AV、TOTOX和色泽显著升高( $P<0.05$ ),而 $V_E$ 和OSI显著降低( $P<0.05$ )。相关性分析发现各理化指标间存在一定的相关性,其中CGV、 $p$ -AV、TOTOX两两之间均呈显著相关( $P<0.05$ ),色泽与AV、IV与OSI和C18:2/C16:0均呈极显著相关( $P<0.01$ )。采用PCA提取出3个综合性评价指标,累计贡献率达84.115%,可综合反映煎炸油品质信息,并构建煎炸油煎炸性能的综合评价得分模型  $F=0.405F_1+0.295F_2+0.141F_3$ ,其中, $p$ -AV、TOTOX、CGV、OSI、色泽和C18:2/C16:0是评估煎炸油煎炸性能的核心指标。主成分分析综合得分表明,在5种煎炸油中,棕榈油得分最高,具有较好的煎炸性能。本研究可为西式快餐行业对煎炸油品质评价提供理论依据与参考。当然,煎炸性能好只是

优质煎炸专用油的重要属性之一,而实际餐饮行业在选择合适的煎炸用油时需考虑的因素很多,如煎炸食物的口感、营养均衡、生产成本、客户使用习惯等等。此外,煎炸油在煎炸不同食材表现可能也会表现出差异性,本研究的煎炸原料只限于薯条,比较单一,今后将选择更多的原料(如鸡块、鱼排等)进行对比,预计得到的综合评价分析将会更加科学、合理,对煎炸油的煎炸性能评估也更有指导意义。

### 参考文献

- [1] LI X, WU G C, YANG F, et al. Influence of fried food and oil type on the distribution of polar compounds in discarded oil during restaurant deep frying[J]. *Food Chemistry*, 2019, 272: 12–17.
- [2] HU M, PAN K, NIU Y, et al. Comparative assessment of thermal resistance of palm stearin and high oleic blended oil when subjected to frying practice in fast food restaurants[J]. *Journal of Oil Palm Research*, 2020, 32(1): 90–102.
- [3] LI X, LI J, WANG Y, et al. Effects of frying oils fatty acids profile on the formation of polar lipids components and their retention in French fries over deep-frying process[J]. *Food Chemistry*, 2017, 237: 98–105.
- [4] YANG D, ZHU L, WU G, et al. Whether the degradation of frying oil affects oil absorption: Tracking fresh and degraded oil in fried potato strips during frying and cooling and microstructure characterization[J]. *Food and Bioproducts Processing*, 2022, 133: 87–99.
- [5] 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.
- [6] ALADEDUNYE F, PRZYBYLSKI R. Performance of palm olein and modified rapeseed, sunflower, and soybean oils in intermittent deep-frying[J]. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 2014, 116: 144–152.
- [7] WAGHMAREA A, PATILA S, LEBLANC J G, et al. Comparative assessment of algal oil with other vegetable oils for deep frying[J]. *Algal Research*, 2018, 31: 99–106.
- [8] SANTOS CARLA S P, MOLINA-GARCIA L, CUNHA SARA C, et al. Fried potatoes: Impact of prolonged frying in monounsaturated oils[J]. *Food Chemistry*, 2018, 243: 192–201.
- [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): 46–50. [LI Y T, YU Y Y, YANG Z D, et al. Quality changes of edible vegetable oils during frying[J]. *China Oils and Fats*, 2022, 47(2): 46–50.]
- [10] 陈玉.基于热稳定性的稻米煎炸油的研究[D].武汉:武汉轻工大学,2019. [CHEN Y. Study of rice bran frying oil based on the thermal stability[D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2019.]
- [11] AĞÇAM E. Modeling of the changes in some physical and chemical quality attributes of potato chips during frying process[J]. *Applied Food Research*, 2022, 2(1): 100064.
- [12] 王彦花,王容,张云,等.基于主成分分析的油茶果经济性状及茶油脂脂肪酸组成[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 40(1): 251–255. [WANG Y H, WANG R, ZHANG Y, et al. Economic indexes of *Camellia oleifera* fruit and fatty acid composition of camellia oil based on principal component analysis[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019, 40(1): 251–255.]
- [13] 曾静,伊雄海,曲粟,等.基于脂肪酸含量分析结合化学计量学的橄榄油等级鉴别方法[J]. *分析测试学报*, 2021, 40(10): 1432–1438. [ZENG J, YIN X H, QU L. Grade identification of olive oil based on fatty acids analysis combined with chemometrics[J]. *Journal of Instrumental Analysis*, 2021, 40(10): 1432–1438.]
- [14] 黎海红,李雪琴,苗笑亮.掺伪芝麻油检测的主成分分析方法研究[J]. *食品工业科技*, 2008, 29(6): 297–300. [LI H H, LI X Q, MIAO X L. Study on sesame oil adulteration detection by principal component analysis[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2008, 29(6): 297–300.]
- [15] 许春芳,董喆,郑明明,等.不同产地的紫苏籽油活性成分检测与主成分分析[J]. *中国油料作物学报*, 2019, 41(2): 275–282. [XU C F, DONG J, ZHENG M M, et al. Active compound and principal component analysis of perilla seed oils from different production areas[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2019, 41(2): 275–282.]
- [16] 雷春妮,张雅珩,李经纬,等.基于主成分分析构建初榨橄榄油香气质量评价模型[J]. *中国粮油学报*, 2019, 34(12): 65–70. [LEI C N, ZHANG Y H, LI J W, et al. Modeling for aroma quality evaluation of virgin olive oil based on principal component analysis[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2019, 34(12): 65–70.]
- [17] 杨雯懿,陈林,周学忠.基于主成分分析和聚类分析的橄榄油中微量元素的统计比较[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(14): 222–227. [YANG W Y, CHEN L, ZHOU X Z. Statistical comparison of trace elements in olive oil based on principal component analysis and cluster analysis[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46(14): 222–227.]
- [18] ZOU M, CHEN Y, HU C, et al. Physicochemical properties of rice bran blended oil in deep frying by principal component analysis[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2022, 59: 4187–4197.
- [19] VERMA V, SINGH V, CHAUHAN O P, et al. Comparative evaluation of conventional and advanced frying methods on hydroxymethylfurfural and acrylamide formation in French fries[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2023, 83: 103233.
- [20] 王晨颖.煎炸用油的品质管理的研究[D].上海:华东理工大学,2011. [WANG C Y. Research on quality control of frying oil[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2011.]
- [21] AHMAD TARMIZI A H, ISMAIL R. Use of pilot plant scale continuous fryer to simulate industrial production of potato chips: Thermal properties of palm olein blends under continuous frying conditions[J]. *Food Science & Nutrition*, 2014, 2(1): 28–38.
- [22] ISMAIL R. Palm oil and palm olein frying applications[J]. *Asia Pacific Journal of Clinical Nutrition*, 2005, 14(4): 414–419.
- [23] 胡明明,牛跃庭,季敏,等.市售火腿肠中油脂调研[J]. *粮食与油脂*, 2017, 30(12): 78–80. [HU M M, NIU Y T, JI M, et al. Technical survey on oils and fats in sausages[J]. *Cereals & Oils*, 2017, 30(12): 78–80.]
- [24] 樊之雄.煎炸棕榈油品质变化及其对丙烯酰胺生成的影响[D].无锡:江南大学,2012. [FAN Z X. The quality changes of frying palm oil and impact to the generation of acrylamide[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2012.]
- [25] 李徐,徐晓光,刘睿杰,等.9种市售稻米油极性物质含量的测定及组成分析[J]. *中国粮油学报*, 2017, 32(2): 120–124. [LI X, XU X G, LIU R J, et al. Analysis on polar material content and composition in 9 rice bran oils[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2017, 32(2): 120–124.]
- [26] 刘玉兰,王莹辉,张振山,等.4种油脂煎炸过程中维生素E组分含量变化的研究[J]. *中国油脂*, 2015, 40(12): 48–52. [LIU Y L, WANG Y H, ZHANG Z S, et al. Changes of vitamin E compo-

- sition and content in four kinds of oils and fats during frying[J]. *China Oils and Fats*, 2015, 40(12): 48–52. ]
- [ 27 ] SERBINOVA E, KAGAN V, HAN D, et al. Free radical recycling and intramembrane mobility in the antioxidant properties of alpha-tocopherol and alpha-tocotrienol[J]. *Free Radical Biology and Medicine*, 1991, 10(5): 263–275.
- [ 28 ] XU Z, YE Z, LI Y, et al. Comparative study of the oxidation stability of high oleic oils and palm oil during thermal treatment[J]. *Journal of Oleo Science*, 2020, 69(6): 1–12.
- [ 29 ] 张铁英, 姜元荣, 陈雅琼. 煎炸油在煎炸过程中脂肪酸组成的变化[J]. *食品科学*, 2013, 34(5): 132–136. [ ZHANG T Y, JIANG Y R, CHEN Y Q. Change in fatty acid composition of frying oils during frying[J]. *Food Science*, 2013, 34(5): 132–136. ]
- [ 30 ] 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 Chemistry*, 2007, 105(4): 1382–1389.
- [ 31 ] ZHANG H, MA J, MIAO Y, et al. Analysis of carbonyl value of frying oil by fourier transform infrared spectroscopy[J]. *Journal of Oleo Science*, 2015, 64(4): 375–380.
- [ 32 ] 慕鸿雁, 郑琦. 3种食用油在薯条煎炸过程中的品质变化[J]. *食品科学*, 2012, 33(19): 168–171. [ MU H Y, ZHENG Q. Quality change of three kinds of edible oil during frying process[J]. *Food Science*, 2012, 33(19): 168–171. ]
- [ 33 ] KHOR Y P, WAN S Y, TAN C P, et al. Potential of using basa catfish oil as a promising alternative deep-frying medium: A thermo-oxidative stability study[J]. *Food Research International*, 2021, 141: 109897.
- [ 34 ] MATTHÄUS B. Utilization of high-oleic rapeseed oil for deep-fat frying of French fries compared to other commonly used edible oils[J]. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 2006, 108: 200–211.
- [ 35 ] 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*, 2020, 2014(8): 47–51. [ JIANG X F, YANG Y B, JIN Q Z, et al. Quality changes of five kinds of refined oils during potato chips frying[J]. *China Oils and Fats*, 2020, 2014(8): 47–51. ]
- [ 36 ] MBA O I, DUMONT M J, NGADI M. Characterization of tocopherols, tocotrienols and total carotenoids in deep fat fried French fries[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2018, 69: 78–86.
- [ 37 ] NAYAK, P K, DASH U, RAYAGURU K, et al. Physiochemical changes during repeated frying of cooked oil: A review[J]. *Journal of Food Biochemistry*, 2015, 40(3): 371–390.
- [ 38 ] TYAGI V K, VASISHTHA A K. Changes in the characteristics and composition of oils during deep-fat frying[J]. *Journal of the American Oil Chemists Society*, 1996, 73: 499–506.
- [ 39 ] 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.
- [ 40 ] RANAMUKHAARACHCHI S A, PEIRIS R H, MORESOLI C. Fluorescence spectroscopy and principal component analysis of soy protein hydrolysate fractions and the potential to assess their antioxidant capacity characteristics[J]. *Food Chemistry*, 2017, 217: 469–475.
- [ 41 ] 王建芳, 高山, 牟德华. 基于主成分分析和聚类分析的不同品种燕麦品质评价[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(13): 85–91. [ WANG J F, GAO S, MOU D H. Comprehensive quality evaluation of different varieties of oat based on principal components analysis and cluster analysis[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(13): 85–91. ]
- [ 42 ] YILDIRIM E, TOKER Ö S, KARAMAN S, et al. Investigation of fatty acid composition and trans fatty acid formation in extracted oils from French-fried potatoes and classification of samples using chemometric approaches[J]. *Turkish Journal of Agriculture & Forestry*, 2015, 39: 80–90.
- [ 43 ] 郝麒麟, 黄先智, 贺燕, 等. 基于主成分分析法评价巫山脆李食用品质[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(19): 251–257. [ HAO Q L, HUANG X Z, HE Y, et al. Evaluation of Wushan plum edible quality based on principal component analysis[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46(19): 251–257. ]
- [ 44 ] ZRIBI A, JABEUR H, MATTHÄUS B, et al. Quality control of refined oils mixed with palm oil during repeated deep-frying using FT-NIRS, GC, HPLC, and multivariate analysis[J]. *European Journal of Lipid Science & Technology*, 2016, 118(4): 512–523.