

基于主成分分析法评价两种餐饮用油的煎炸性能

甘晓露¹, 孟丹丹², 张忠³, 胡明明^{4*}

(1. 信阳职业技术学院旅游学院, 信阳 464000; 2. 信阳职业技术学院检验技术学院, 信阳 464000; 3. 陕西师范大学食品工程与营养科学学院, 西安 710119; 4. 江西师范大学国家淡水鱼加工技术研发专业中心, 南昌 330022)

摘要: **目的** 建立餐饮用油煎炸性能评价体系分析两种常见餐饮用油(餐饮调和油 A 和餐饮调和油 B)煎炸性能的差异, 并对餐饮用油煎炸品质进行综合评估。**方法** 在模拟西式快餐实际油炸条件下进行煎炸薯条实验, 考察了餐饮用油在油炸过程中 10 项品质指标, 并利用主成分分析法(principal component analysis, PCA)对两种餐饮用油在油炸过程中的煎炸性能进行综合评价。**结果** 餐饮用油品质指标间存在不同程度的相关性, PCA 将 10 项品质指标缩减成 2 个综合性评价指标, 累计贡献率达 87.920%, 反映了餐饮用油煎炸品质的大部分信息, 并进一步建立煎炸油煎炸性能的综合评价得分模型 $Y=0.5396Y_1+0.3396Y_2$ 。该模型显示表明, 在油炸过程中, 餐饮调和油 A 得分较高, 具有较好的煎炸性能。**结论** 本研究建立的餐饮用油煎炸性能评价体系为煎炸油的筛选和质量控制提供借鉴。

关键词: 餐饮调和油; 油炸; 煎炸稳定性; 主成分分析

Evaluation on the frying performance of 2 catering edible oils based on principal component analysis

GAN Xiao-Lu¹, MENG Dan-Dan², ZHANG Zhong³, HU Ming-Ming^{4*}

(1. School of Tourism, Xinyang Vocational and Technical College, Xinyang 464000, China; 2. School of Medical Laboratorial Technics, Xinyang Vocational and Technical College, Xinyang 464000, China; 3. College of Food Engineering and Nutritional Science, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China; 4. National Research & Development Center for Freshwater Fish Processing, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China)

ABSTRACT: Objective To establish the evaluation system of frying performance of catering oil, analyze the differences of frying performance of 2 kinds of common catering oils (catering blended oil A and catering blended oil B), and assess the frying quality of catering edible oils comprehensively. **Methods** An experiment of frying French fries was conducted by simulating the actual frying conditions of western fast food. Ten quality indexes of catering edible oils during frying were investigated and principal component analysis (PCA) was used to comprehensively evaluate that fry performance of 2 restaurant oils during frying. **Results** Different quality parameters of catering edible oils were partly correlative. For PCA, 10 quality indexes of catering edible oils were reduced to be 2 aggregative indicators, with a cumulative contribution rate of 87.920%, reflecting most information of the quality characteristics of catering edible oil, and the comprehensive quality evaluation model of frying oils was established as $Y=0.5396Y_1+0.3396Y_2$. According to the model, catering blended oil A had a higher score, suggesting a better frying

基金项目: 江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ210322)

Fund: Supported by the Science and Technology Research Project of Education Department of Jiangxi Province (GJJ210322)

*通信作者: 胡明明, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为油脂质量分析及产品应用开发。E-mail: 2006abc-hmm@163.com

*Corresponding author: HU Ming-Ming, Ph.D, Assistant Professor, National Research & Development Center for Freshwater Fish Processing, Jiangxi Normal University, No.99, Ziyang Avenue, Nanchang 330022, China. E-mail: 2006abc-hmm@163.com

performance compared to catering blended oil B. **Conclusion** The established quality evaluation system of catering edible oil during frying provides references for the identification and quality control of frying oil.

KEY WORDS: catering edible oil; frying; frying stability; principal component analysis

0 引言

油炸是 5 种熟食化食物基本方式之一^[1], 油炸食品因其有独特的香气、诱人的颜色和酥脆的质地深受人们喜爱^[2-3], 尤其是西式快餐食品(如肯德基、麦当劳、华莱士等)。近年来, 随着生活节奏的加快, 西式快餐以方便、快捷、省力及美味的特点, 日益受到消费者的青睐。但油炸过程中, 食品因反复高温油炸会发生一系列复杂的化学反应, 进而形成大量有害产物, 大大降低煎炸油的营养价值, 影响油炸食品的品质和安全性^[4-6]。所以, 探究油炸过程中油脂的品质变化, 指导科学用油以保证消费者身心健康显得极其重要。评价油炸过程中食用油品质的指标很多, 如酸值、极性物质、色泽、茴香胺值等^[7-9]。然而, 油炸过程中煎炸油的品质不能由任何一个指标单独体现, 因此, 国内外学者一般会选取多个理化指标进行研究, 以综合评价煎炸油的品质。

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^[10-11]。近年来, PCA 在食品质量评估方面成为热点, 已广泛用于评价油脂品质^[12-13]。李定金等^[14]采用低场核磁共振技术结合 PCA 建立了可快速辨别不同植物油的模型。侯钟令等^[15]研究了市场上南极磷虾油的营养品质, 并利用 PCA 建立了南极磷虾油品质的评估体系。许春芳等^[16]应用 PCA 研究了不同产地紫苏籽油的活性成分, 为紫苏籽油的营养研究及开发利用提供了理论依据。然而, 关于 PCA 用于评价餐食用油在西式快餐油炸条件下煎炸性能的研究鲜有报道。

本研究以我国市场上常用的餐食用油(餐饮调和油 A 和餐饮调和油 B)作为煎炸油, 在模拟西式快餐油炸薯条条件下, 对两种餐食用油在油炸过程中的 10 项品质指标进行分析, 并利用 PCA 对餐食用油在油炸过程中的煎炸性能进行综合评价, 以期餐饮业及消费者对煎炸油品质评价和质量控制提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 材料、试剂与仪器

餐饮调和油 A、餐饮调和油 B(上海当地商场, 不添加抗氧化剂); 冷冻薯条(内蒙古蓝威斯顿薯业有限公司)。

甲醇、正庚烷、异辛烷(色谱纯)、氢氧化钾、硫酸氢钠、无水硫酸钠、硫代硫酸钠、异丙醇、乙醚、石油醚、

甲基叔丁基醚、三氯甲烷、冰乙酸、*p*-茴香胺(分析纯, 上海国药集团化学试剂有限公司); β -、 γ -、 δ -生育酚标准品(纯度 $\geq 99\%$, 美国 Supelco analytical 公司); 混合标准溶液(α -生育酚标准品、 α -、 β -、 γ -、 δ -生育三烯酚标准品)(纯度 $\geq 99\%$, 马来西亚森达美公司)。

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); W201 恒温水浴锅(上海申胜生物技术有限公司); MODEL-F 罗维朋比色计(英国 Lovibond 有限公司); BSA224S 型电子天平[精度 0.1 mg, 赛多利斯(上海)贸易有限公司]。

1.2 实验方法

1.2.1 油炸过程

油炸过程参考 HU 等^[3]方法, 具体如下: 向电热炸炉中倒入 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, 连续油炸 5 d。每油炸 6 h 后过滤一次, 滤油后添加新鲜油至起始刻度线处。每天油炸完成后, 待油冷却, 用棕色瓶收集油样 250 mL, 存放于-20°C 冰箱, 供进一步分析。

1.2.2 脂肪酸组成的测定

煎炸油脂肪酸组成(fatty acid composition, FAC)的测定参照 AOCS 检测方法 Ce 1f-96《Determination of cis- and trans- fatty acids in hydrogenated and refined oils and fats by capillary GLC》及文献^[17], 将油样甲酯化后, 用气相色谱仪分析 FAC。气相色谱条件: 以高纯氮气为载气, 流速 1.3 mL/min, 进口和检测器温度分别设置为 160、250°C。程序升温: 160°C 柱温条件下保持 5 min, 并以 10°C/min 升温到 220°C。氢气和空气流速 35、375 mL/min, 分流比为 50:1, 进样量为 1 μ L。

1.2.3 油炸过程中煎炸油理化指标分析

酸价(acid value, AV)的测定: 参照 GB/T 5009.229—2016《食品安全国家标准 食品中酸价的测定》中的冷溶剂指示剂滴定法; 过氧化值(peroxide value, PV)的测定: 参照 GB 5009.227—2016《食品安全国家标准 食品中过氧化值的测定》中的滴定法; 极性组分(total polar compounds, TPC)的测定: 参照 GB 5009.202—2016《食品安全国家标准 食用油中极性组分(PC)的测定》中柱层析法; 碘价(iodine value, IV)、羰基价(carbonyl group value, CGV)、茴香胺值(anisidine value, *p*-AV)、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《食品安全国家标准 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 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》。

1.2.4 数据处理

所有实验做 3 次平行, 结果以均值±标准偏差表示。采用 IBM SPSS Statistics 20.0 对数据进行单因素方差分析 (one-way analysis of variance, ANOVA), $P < 0.05$ 表示存在显著性差异; 利用 PCA 评价食用油油炸过程中的煎炸性能。

2 结果与分析

2.1 两种煎炸油的 FAC 分析

图 1 为两种煎炸油煎炸前的 FAC 情况。从图 1 可以看出, 餐饮调和油 A 与餐饮调和油 B 的主要脂肪酸是棕榈酸(C16:0, 47.1%, 23.1%)、油酸(C18:1, 40.4%, 41.1%)和亚油酸(C18:2, 8.0%, 32.1%)。整体而言, 餐饮调和油 A 中以饱和脂肪酸(51.6%)为主, 其次是单不饱和脂肪酸(40.4%), 并含有少量的多不饱和脂肪酸(8.0%)。相比较, 餐饮调和油 B 中只含有少量饱和脂肪酸(26.7%), 其以不饱和脂肪酸为主, 且多不饱和脂肪酸高达 32.1%。据报道, 高饱和脂肪酸和较低多不饱和脂肪酸含量的油脂往往具有更高的氧化稳定性。然而, 油脂的稳定性并不完全依赖于其饱和度。油脂中的微量植物营养素(如植物甾醇、生育酚和生育三烯酚)以及脂肪酸在三酰基甘油中的位置等因素也可能影响油的稳定性^[3-4]。

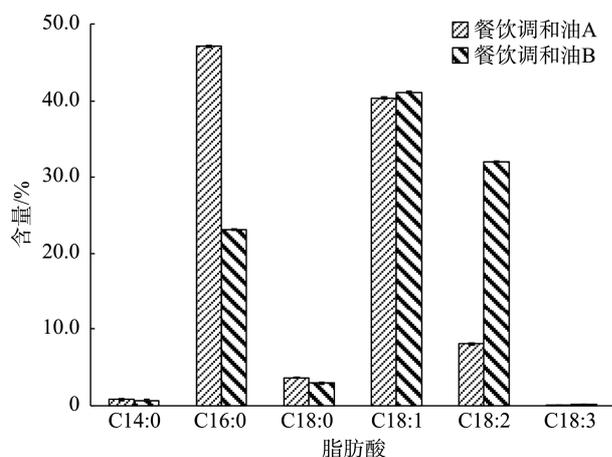


图 1 两种煎炸油油炸前主要 FAC 及含量 (n=3)

Fig.1 Main FAC and content of 2 kinds of frying oils before frying (n=3)

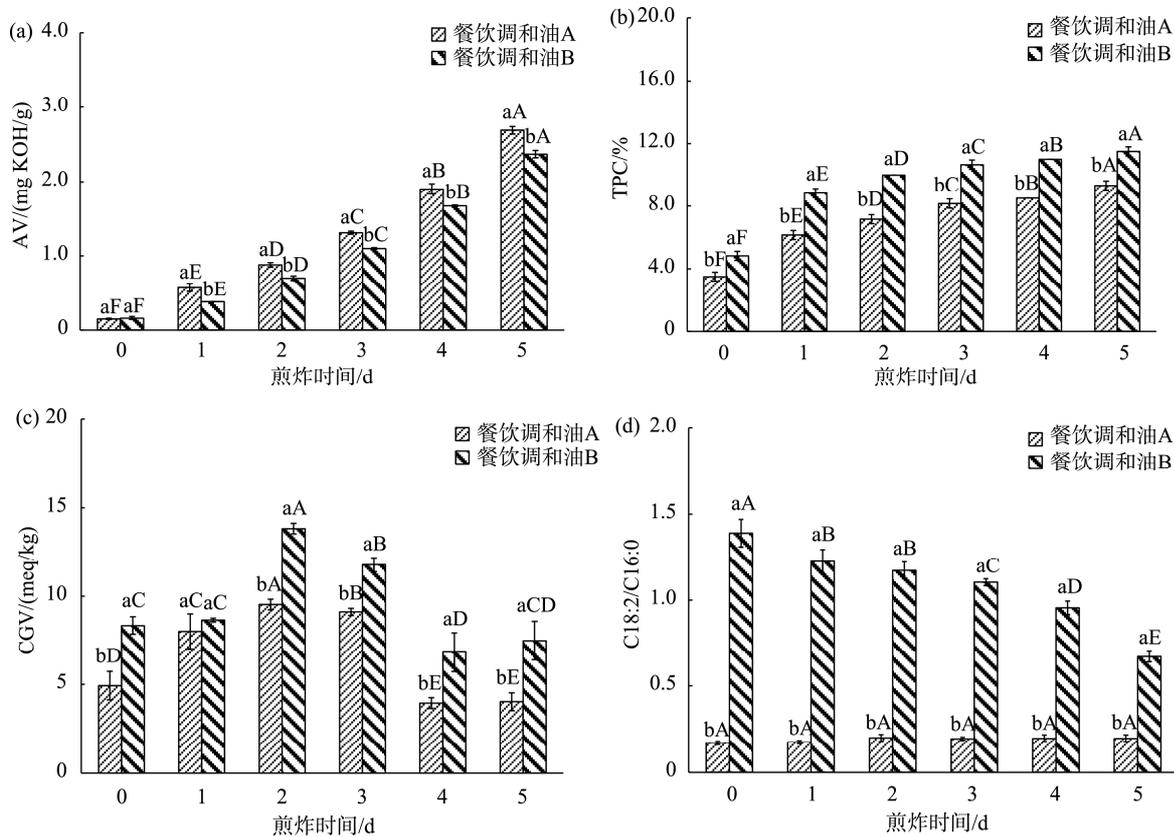
2.2 两种煎炸油在油炸过程中品质变化分析

在油炸过程中, 评价煎炸油的品质变化指标较多, 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 10 个理化指标(图 2~4)以较全面反映煎炸油的品

质。目前, 我国 GB 2716—2018《食品安全国家标准 植物油》中规定了油炸过程中植物油的 AV 和 TPC 限定值分别为 5 mg KOH/g 和 27%。AV 可以表明油脂中游离脂肪酸的多少, 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。由图 2(a)可见, 随油炸时间的延长, 两种煎炸油 AV 均显著增加 ($P < 0.05$)。在油炸前, 两种煎炸油的 AV 无显著差异 ($P > 0.05$); 油炸 5 d 后, 餐饮调和油 A 的增加量显著大于餐饮调和油 B 的增加量 ($P < 0.05$), 但两种煎炸油的 AV 仍远低于国家标准限定值, 这可能与油炸过程中每天滤油并添加新油有关。TPC 是指油脂在油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^[18-19]。由图 2(b)可见, 在油炸前, 两种煎炸油的 TPC 存在显著性差异 ($P < 0.05$)。随油炸时间的延长, 两种煎炸油 TPC 含量均显著增加 ($P < 0.05$), 但始终都远低于国家标准限定值。油炸 5 d 后, 餐饮调和油 A 的 TPC 增加量要显著低于餐饮调和油 B 的 TPC 增加量 ($P < 0.05$)。CGV 用来反映油脂在高温下产生的总羰基类化合物的含量多少, 是评价煎炸油变质程度的一个灵敏指标。CGV 越大, 表明油炸时产生的酮类、醛类等羰基化合物越多^[20]。由图 2(c)可见, 两种煎炸油的 CGV 在油炸过程中逐渐增加, 并在第 2 d 达到最高值且显著高于初始值 ($P < 0.05$), 然后下降, 这与 FARHOOSH 等^[21]的研究结果一致, 其原因可能是油炸过程中产生的羰基类化合物会被降解成新物质。两种煎炸油 CGV 达到最高值时, 餐饮调和油 A 的 CGV 产生量 (4.60 meq/kg) 比餐饮调和油 B (5.49 meq/kg) 要低 ($P < 0.05$), 说明餐饮调和油 A 高温下产生总羰基类化合物比餐饮调和油 B 要少。

在高温油炸过程中, 油脂中的脂肪酸, 尤其是不饱和脂肪酸在热、氧等因素的诱导下发生氧化反应, 使油脂质量劣变。由于亚油酸比棕榈酸更容易被氧化, 因此, 煎炸油的氧化变质常通过油脂的 C18:2/C16:0 比值变化来反映^[22]。由图 2(d)可以看出, 在油炸前, 两种煎炸油的 C18:2/C16:0 值存在显著性差异 ($P < 0.05$); 油炸过程中, 餐饮调和油 B 的 C18:2/C16:0 值随油炸时间延长而逐渐减小, 而餐饮调和油 A 的 C18:2/C16:0 值变化不显著 ($P > 0.05$), 表明餐饮调和油 A 具有更好的稳定性。

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。在油炸过程中, 煎炸油 IV 会因不饱和脂肪酸发生氧化及聚合反应而下降^[3]。如图 3(a)所示, 在油炸前, 两种煎炸油的 IV 存在显著性差异 ($P < 0.05$); 在整个油炸过程中, 餐饮调和油 A 的 IV 变化不显著 ($P > 0.05$), 而餐饮调和油 B 的 IV 随油炸时间的延长逐渐降低。油炸结束后, 餐饮调和油 A 的 IV 变化量 (3.19 g/100 g) 显著低于餐饮调和油



注: 不同小写字母表示相同煎炸天数不同煎炸油之间差异显著($P < 0.05$), 不同大写字母表示同种煎炸油不同煎炸天数之间差异显著($P < 0.05$), 下同。

图 2 两种煎炸油煎炸过程中 AV (a)、TPC (b)、CGV (c) 和 C18:2/C16:0 (d) 的变化($n=3$)

Fig.2 Changes in AV (a), TPC (b), CGV (c) and C18:2/C16:0 (d) of 2 kinds of frying oils during frying ($n=3$)

B (15.39 g/100 g) ($P < 0.05$), 这表明餐饮调和油 A 在油炸过程中更不容易氧化。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^[23]。p-AV 是反映煎炸油劣变的次级生成产物醛类含量的指标, 因此, 常用全氧化值 (total oxidation, TOTOX, 其中 $TOTOX = 2PV + p-AV$) 来综合评估油脂的氧化程度^[24]。从图 3(b) 中可以看出, 在油炸前, 两种煎炸油的 PV 无显著性差异 ($P > 0.05$); 油炸过程中, 两种煎炸油 PV 随油炸时间的延长呈下降趋势, 且油炸 5 d 后均显著低于初始值 ($P < 0.05$), 不同的是, WAGHMAREA 等^[4]发现植物油在煎炸过程中 PV 随煎炸时间的延长呈明显上升的趋势, 这可能是因为本研究经过 1 d 的煎炸后, 煎炸油中过氧化物的分解速率大于生成速率。从图 3(c) 和图 3(d) 中可以看出, 在油炸前, 两种煎炸油的 p-AV 和 TOTOX 值均存在显著性差异 ($P < 0.05$); 在油炸过程中, 两种煎炸油 p-AV 和 TOTOX 值的变化均呈先快速增加而后略有降低的趋势, 这和 HU 等^[3]的研究结果一致。在油炸 5 d 后, 餐饮调和油 A 的 TOTOX 增加量显

著低于餐饮调和油 B ($P < 0.05$), 说明餐饮调和油 A 具有相对更好的氧化稳定性, 其主要原因可能是餐饮调和油 B 中含有相对较高的不饱和度, 更容易氧化。

维生素 E (vitamin E, VE) 包括生育酚与生育三烯酚, 是一种天然抗氧化剂, 其浓度及异构体组成会影响煎炸油的稳定性^[25]。从图 4(a) 中可以看出, 在油炸前, 两种煎炸油的 VE 存在显著性差异 ($P < 0.05$), 经分析发现, 餐饮调和油 A 和餐饮调和油 B 中 VE 均以生育三烯酚为主, 分别占 VE 总含量的 93.1% 和 78.8%。在油炸过程中, 随油炸时间的延长, 两种煎炸油的 VE 总量均快速降低, 特别是油炸的前 3 d 尤为明显。油炸 5 d 后, 餐饮调和油 A 中的 VE 损失率 (60.42%) 显著高于餐饮调和油 B (54.44%) ($P < 0.05$), 这可能与餐饮调和油 A 中 VE 组分所含容易氧化的生育三烯酚比例更高有关。有所不同的是, 刘玉兰等^[26]在研究 4 种植物油在油炸过程中 VE 的含量变化发现绝大部分 VE 已经损失, 其原因可能与本研究每天添加新鲜油有关。色泽是衡量油炸过程中煎炸油品质的一种直观而又比较主观的指标^[27]。在油炸前, 两种煎炸油的色泽无显著性差异 ($P > 0.05$), 在油炸过程中, 两种煎炸油的色泽都随油炸时间

的延长而逐渐加深, 且油炸 5 d 后均显著高于初始值 ($P<0.05$), 但餐饮调和油 A 的色泽(红值)增加幅度(8.0)比餐饮调和油 B (6.0)显著要大($P<0.05$)。一般来说, 油脂在油炸过程中的颜色加深主要归因于油脂中甘油三酯和游离脂肪

酸的氧化降解而导致非酶性褐变化合物的形成^[28]。此外, 煎炸油的颜色变深也可能受到油脂本身中的微量色素和 VE 的影响, 特别是生育三烯酚容易形成红棕色的醌类聚合物。

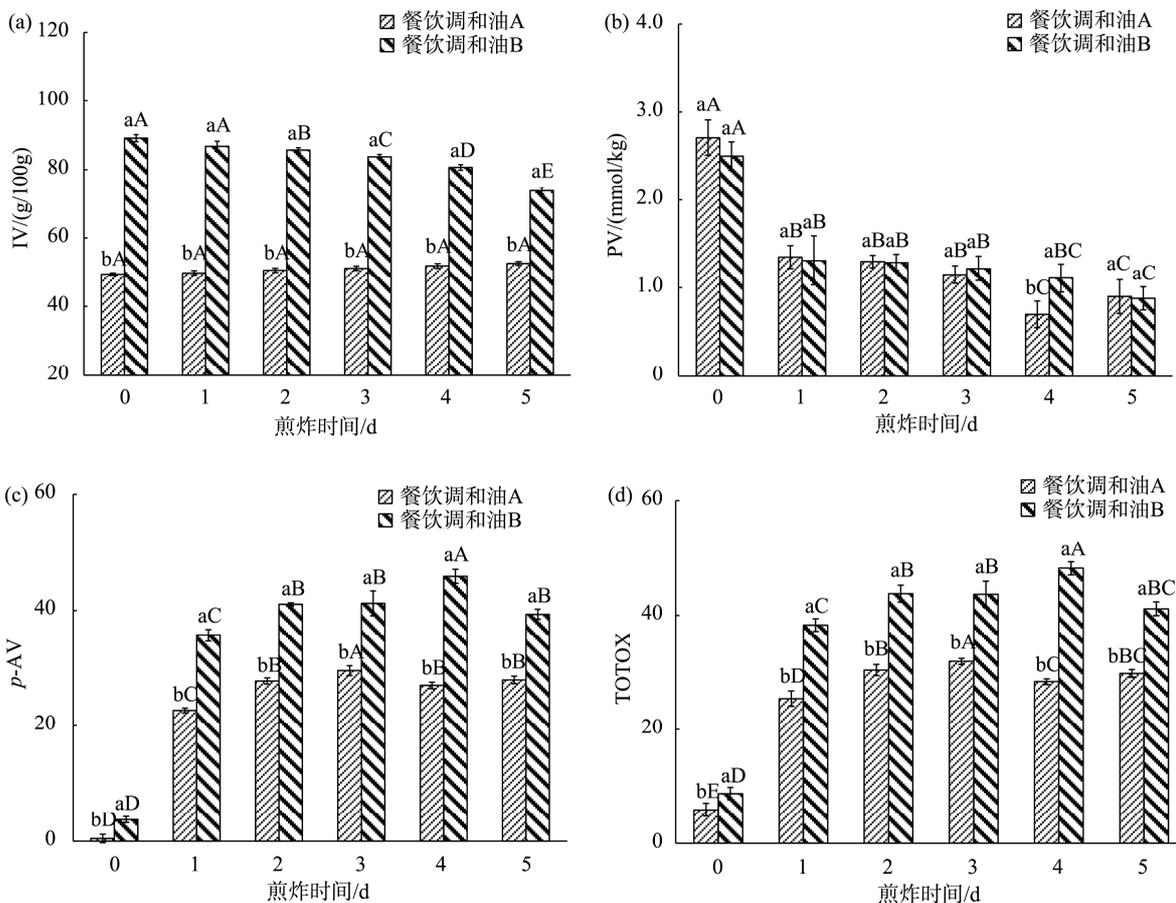


图 3 两种煎炸油煎炸过程中 IV (a)、PV (b)、p-AV (c)和 TOTOX (d)的变化($n=3$)
Fig.3 Changes in IV (a), PV (b), p-AV (c) and TOTOX (d) during frying with 2 kinds of frying oils ($n=3$)

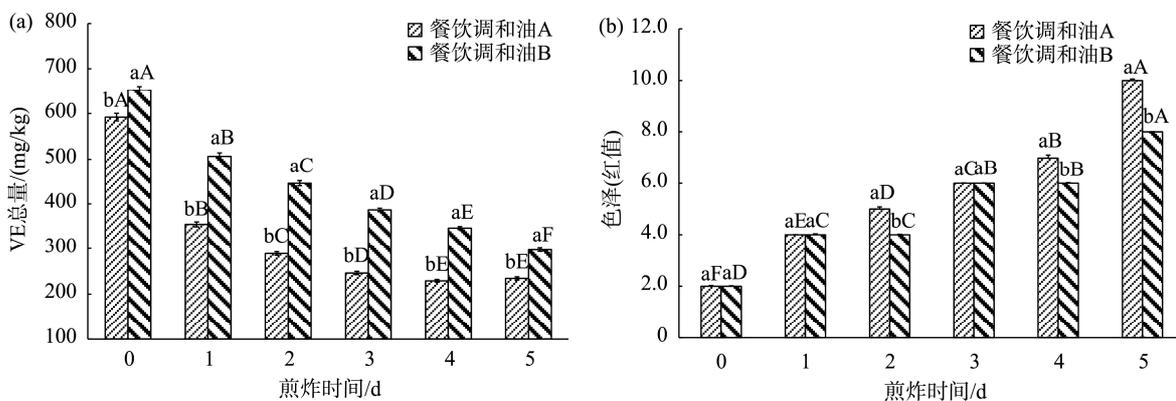


图 4 两种煎炸油煎炸过程中 VE 总量(a)和色泽(b)的变化($n=3$)
Fig.4 Changes of VE total amount (a) and color (b) during frying with 2 kinds of frying oils ($n=3$)

总体来说,两种煎炸油在 10 个油炸品质评价指标表现上各有优劣,整个油炸过程中,餐饮调和油 A 的 TOTOX、CGV、TPC 生成速率、IV 及 C18:2/C16:0 值降低幅度较小,具有相对较好的煎炸稳定性。

2.3 煎炸油品质指标的相关性分析

煎炸油品质指标间相关性分析见表 1,从表 1 中可知,煎炸油的 TPC 与 AV、*p*-AV、TOTOX、色泽呈极显著性正相关($r=0.667\sim 0.947$, $P<0.01$),与 PV 呈极显著负相关($r=0.809$, $P<0.01$),与 VE 呈显著负相关($r=0.551$, $P<0.05$)。煎炸油的 AV 与 PV、VE 呈极显著负相关($r=0.758$, $r=0.797$, $P<0.01$),与色泽呈极显著正相关($r=0.970$, $P<0.01$)。煎炸油的 PV 与 VE 呈极显著正相关($r=0.877$, $P<0.01$),与 *p*-AV、TOTOX、色泽呈极显著负相关($r=0.774\sim 0.823$, $P<0.01$)。煎炸油的 IV 与 C18:2/C16:0 呈极显著正相关($r=0.991$, $P<0.01$),与 CGV、VE 呈显著正相关($r=0.539$, $r=0.504$, $P<0.05$)。煎炸油的色泽与 VE 呈极显著负相关($r=0.843$, $P<0.01$),与 *p*-AV、TOTOX 显著性正相关($r=0.551$, $r=0.541$,

$P<0.05$)。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不同程度的相关性。因此,通过某一个指标评定煎炸油煎炸性能的优劣并不科学、客观,可通过主成分分析进行综合评价。

2.4 主成分分析

为直观描述两种煎炸油煎炸性能的差异,采用 PCA 对煎炸油理化指标进行多元统计分析。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,参考贾喜午等^[29]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。根据前文结果,对煎炸油 10 个理化指标进行 PCA,特征值及方差贡献分析见表 2。由表 2 可知,前 2 个主成分(PC1、PC2)方差贡献率分别为 53.963%、33.957%,累计方差贡献率已达到 87.920%,即保留了原始评价指标 87.920%的数据信息。因此,可将煎炸油的 10 个品质指标降维成这 2 个彼此相对独立的主成分进行综合评价。

表 1 两种煎炸油品质指标间相关性分析
Table 1 Correlation analysis of the quality indexes determined in 2 kinds of frying oils

品质指标	AV	PV	<i>p</i> -AV	TOTOX	IV	CGV	TPC	VE	色泽	C18:2/C16:0
AV	1									
PV	-0.758**	1								
<i>p</i> -AV	0.488	-0.808**	1							
TOTOX	0.454	-0.774**	0.998**	1						
IV	-0.217	0.097	0.357	0.393	1					
CGV	-0.408	-0.001	0.403	0.433	0.539*	1				
TPC	0.667**	-0.809**	0.947**	0.941**	0.395	0.261	1			
VE	-0.797**	0.877**	-0.543*	-0.501*	0.504*	0.200	-0.551*	1		
色泽	0.970**	-0.823**	0.551*	0.514*	-0.230	-0.318	0.695**	-0.843**	1	
C18:2/C16:0	-0.320	0.184	0.263	0.300	0.991**	0.551*	0.286	0.580*	0.324	1

注: *显著相关 $P<0.05$; **极显著相关 $P<0.01$ 。

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	5.396	53.963	53.963	5.396	53.963	53.963
PC2	3.396	33.957	87.920	3.396	33.957	87.920
PC3	0.836	8.365	96.284			
PC4	0.214	2.138	98.422			
PC5	0.110	1.097	99.519			
PC6	0.028	0.277	99.796			
PC7	0.016	0.163	99.959			
PC8	0.004	0.036	99.995			
PC9	0.001	0.005	100.000			
PC10	2.693E-007	2.693E-006	100.000			

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^[30]。煎炸油主成分分析旋转成分矩阵见表 3, 煎炸油品质评价指标的主成分载荷图如图 5 所示, 从表 3 和图 5 中可以看出, PC1 主要综合了 AV、PV、*p*-AV、TOTOX、TPC、VE 和色泽 7 个指标, 方差贡献率为 53.963%, AV、*p*-AV、TOTOX、TPC 和色泽在 PC1 正方向, PV 和 VE 在 PC1 负方向, 说明 AV、*p*-AV、TOTOX、TPC 和色泽与 PC1 呈正相关, PV 和 VE 与 PC1 呈负相关。其中 PV、TPC 在 PC1 中的载荷值较大, 对 PC1 影响较大, 故 PC1 主要反映了煎炸油中产生的氧化产物及极性组分相关信息; PC2 主要综合了 IV、CGV 和 C18:2/C16:0 3 个指标, 方差贡献率为 33.957%, 且 3 个指标均在 PC2 正方向, 说明这 3 个指标与 PC2 呈正相关。其中 IV 和 C18:2/C16:0 在 PC2 中的载荷值较大, 对 PC2 影响较大, 故 PC2 主要反映了煎炸油的不饱和度相关信息。对表 3 的初始因子旋转成分矩阵表进行标准化计算, 得到 2 个主成分得分的标准化系数矩阵, 煎炸油主成分得分系数矩阵见表 4。

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
AV (X_1)	0.838	-0.366
PV (X_2)	-0.956	0.073
<i>p</i> -AV (X_3)	0.866	0.445
TOTOX (X_4)	0.840	0.485
IV (X_5)	0.001	0.936
CGV (X_6)	0.023	0.775
TPC (X_7)	0.909	0.385
VE (X_8)	-0.841	0.464
色泽(X_9)	0.882	-0.337
C18:2/C16:0 (X_{10})	-0.106	0.933

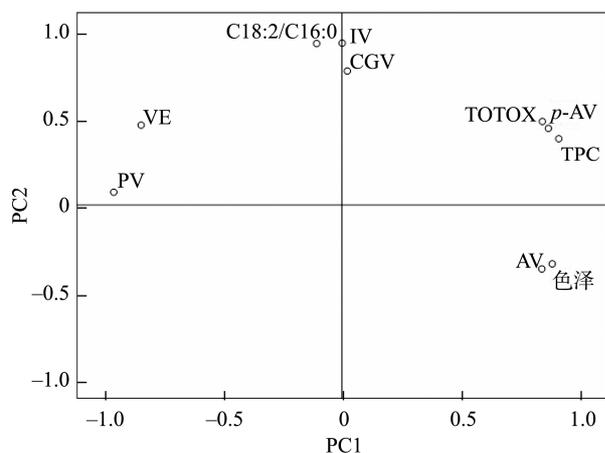


图 5 煎炸油品质评价指标的主成分载荷图

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 Rotated component matrix of principal component analysis of frying oils

评价指标	主成分因子	
	PC1	PC2
AV (X_1)	0.361	-0.198
PV (X_2)	-0.412	0.040
<i>p</i> -AV (X_3)	0.373	0.241
TOTOX (X_4)	0.362	0.263
IV (X_5)	0.001	0.508
CGV (X_6)	0.010	0.421
TPC (X_7)	0.391	0.209
VE (X_8)	-0.362	0.252
色泽(X_9)	0.380	-0.183
C18:2/C16:0 (X_{10})	-0.046	0.506

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:

$$Y_1 = 0.361X_1 - 0.412X_2 + 0.373X_3 + 0.362X_4 + 0.001X_5 + 0.010X_6 + 0.391X_7 - 0.362X_8 + 0.380X_9 - 0.046X_{10};$$

$$Y_2 = -0.198X_1 + 0.040X_2 + 0.241X_3 + 0.263X_4 + 0.508X_5 + 0.421X_6 + 0.209X_7 + 0.252X_8 - 0.183X_9 + 0.506X_{10}.$$

以 2 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, 计算植物油煎炸性能的综合评价得分 Y :

$$Y = 0.5396Y_1 + 0.3396Y_2.$$

根据主成分得分模型, 计算出两种煎炸油各主成分得分值、综合得分值并排序, 不同煎炸油煎炸性能评价得分情况见表 5。从表 5 中可较容易对两种煎炸油在煎炸性能上的差异进行区分, 餐饮调和油 A 在不同油炸阶段得分均比餐饮调和油 B 高, 说明其煎炸性能较好。此外, 随着油炸时间的延长, 两种煎炸油的主成分得分逐渐降低, 说明每种煎炸油产生的氧化产物、极性物质等逐渐增多, 煎炸油的品质在逐渐下降。这与 WAGHMAREA 等^[4]、ZRIBI 等^[31]报道的煎炸油的 PCA 得分随着油炸次数的增加而成比例下降结果类似。

3 结论

本研究基于 PCA 考察了两种常见餐饮用油(餐饮调和油 A 和餐饮调和油 B)在油炸过程中煎炸性能的差异性。结果表明, 餐饮用油不同的理化指标间存在一定的相关性, 采用 PCA 将影响餐饮用油煎炸性能的 10 项指标简化为 2 个综合指标。主成分分析综合得分表可对两种餐饮用油在煎炸性能上以及不同油炸阶段的差异进行清晰区分, 在油炸过程中, 餐饮调和油 A 得分较高, 具有较好的煎炸性能。随着油炸时间的延长, 两种煎炸油的主成分得分逐渐降低, 煎炸油品质在逐渐下降。本研究基于 PCA 的餐饮用油煎炸性能的综合评价只限于油炸薯条过程, 关于其他油炸原料(如鸡块、鱼排等)的煎炸性能的综合评价还有待进一步研究。

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	Y_1	Y_2	Y	排名
餐饮调和油 A-0	-4.560	-1.860	-3.093	1
餐饮调和油 A-1	-0.992	-1.182	-0.937	3
餐饮调和油 A-2	-0.066	-0.923	-0.349	4
餐饮调和油 A-3	0.734	-1.096	0.024	6
餐饮调和油 A-4	1.365	-2.163	0.002	5
餐饮调和油 A-5	2.233	-2.411	0.386	7
餐饮调和油 B-0	-4.297	1.347	-1.861	2
餐饮调和油 B-1	-0.417	2.077	0.480	8
餐饮调和油 B-2	0.383	2.835	1.169	9
餐饮调和油 B-3	1.181	2.113	1.355	10
餐饮调和油 B-4	1.895	1.143	1.410	11
餐饮调和油 B-5	2.542	0.120	1.413	12

注: 餐饮调和油 A-0 表示煎炸 0 d 后的餐饮调和油 A, 其他的依此类推。

参考文献

- [1] 魏学鼎, 陈玉, 高盼, 等. 稻米油与其他 4 种常见煎炸油的煎炸性能比较[J]. 粮食与油脂, 2021, 34(12): 50-55.
WEI XD, CHEN Y, GAO P, *et al.* Comparison of frying performance between rice oil and other four common frying oils [J]. *Cere Oils*, 2021, 34(12): 50-55.
- [2] MANZOOR S, MASOODI FA, RASHID R, *et al.* Improving oxidative stability of soybean oil by apple pomace extract during deep frying of French fries [J]. *Food Biosci*, 2022, 49: 101874.
- [3] 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]. *J Oil Palm Res*, 2020, 32(1): 90-102.
- [4] WAGHMAREA A, PATILA S, LEBLANC JG, *et al.* Comparative assessment of algal oil with other vegetable oils for deep frying [J]. *Algal Res*, 2018, 31: 99-106.
- [5] 徐振波, 梁俊梅, 牛付欢, 等. 稻米油在快餐煎炸中的性能研究[J]. 食品工业科技, 2020, 41(18): 199-203, 217.
XU ZB, LINAG JM, NIU FH, *et al.* Application of rice bran oil as frying oil in fast food stores [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2020, 41(18): 199-203, 217.
- [6] 姚凌, 徐立荣, 蔡志鹏, 等. 11 种煎炸油煎炸薯条挥发性成分的组成[J].

中国油脂, 2022, 47(2): 39-46.

YAO L, XU LR, CAI ZP, *et al.* Volatile compound composition of French fries prepared in 11 kinds of frying oils [J]. *China Oils Fats*, 2022, 47(2): 39-46.

- [7] AĞÇAM E. Modeling of the changes in some physical and chemical quality attributes of potato chips during frying process [J]. *Appl Food Res*, 2022, 2(1): 100064.
- [8] 李裕梅, 唐润发, 杜芳芳, 等. 食用煎炸油理化指标统计分析方法研究进展[J]. 食品工业科技, 2021, 42(7): 416-426.
LI YM, TANG RF, DU FF, *et al.* Research progress of statistical analysis methods for physicochemical parameters of edible frying oil [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2021, 42(7): 416-426.
- [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.
LI YT, YU YY, YANG ZD, *et al.* Quality changes of edible vegetable oils during frying [J]. *China Oils Fats*, 2022, 47(2): 47-50.
- [10] AMINULLAH A, MARDIAH M, HAKIM L, *et al.* Spectra and carbonyl index changes on processed beef fats using Fourier transform infrared spectrometer and principal component analysis [J]. *Spectrosc Lett*, 2019, 10: 1-9.
- [11] HAMMOUDA IB, TRIKI M, MATTHÄUS B, *et al.* A comparative study on formation of polar components, fatty acids and sterols during frying of refined olive pomace oil pure and its blend coconut oil [J]. *J Agric Food Chem*, 2018, 66(13): 3514-3523.
- [12] LIU Y, LI J, CHENG Y, *et al.* Effect of frying oils' fatty acid profile on quality, free radical and volatiles over deep-frying process: A comparative study using chemometrics [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2019, 101: 331-341.
- [13] 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 CN, ZHANG YH, LI JW, *et al.* Modeling for aroma quality evaluation of virgin olive oil based on principal component analysis [J]. *J Chin Cereal Oil Ass*, 2019, 34(12): 65-70.
- [14] 李定金, 段秋霞, 段振华, 等. 低场核磁共振技术结合主成分分析法对 4 种植物油的快速鉴别[J]. 保鲜与加工, 2021, 21(12): 104-110.
LI DJ, DUAN QX, DUAN ZH, *et al.* Rapid identification of four vegetable oils by low-field nuclear magnetic resonance technique coupled with principal component [J]. *Storage Process*, 2021, 21(12): 104-110.
- [15] 侯钟令, 朱兰兰, 周德庆, 等. 基于主成分分析算法的市售南极磷虾油品质分析模型构建[J]. 南方农业学报, 2020, 51(9): 2227-2235.
HOU ZL, ZHU LL, ZHOU DQ, *et al.* Construction of quality analysis model of *Antarctic krill* oil based on principal component analysis algorithm [J]. *Guangxi Agric Sci*, 2020, 51(9): 2227-2235.
- [16] 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 CF, DONG Z, ZHENG MM, *et al.* Active compound and principal component analysis of *Perilla* seed oils from different production areas [J].

- Chin J Oil Crop Sci, 2019, 41(2): 275–282.
- [17] 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 MM, NIU YT, JI M, *et al.* Technical survey on oils and fats in sausages [J]. Cere Oils, 2017, 30(12): 78–80.
- [18] LI X, WU GC, 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 Chem, 2019, 272: 12–17.
- [19] 张翔, 李颖, 汪勇, 等. 亚麻籽油和棕榈液油煎炸油条过程中的品质变化[J]. 中国油脂, 2021, 46(7): 41–47.
- ZHANG X, LI Y, WANG Y, *et al.* Quality changes in frying of deep-fried dough sticks using flaxseed oil and palm olein [J]. China Oils Fats, 2021, 46(7): 41–47.
- [20] ZHANG H, MA J, MIAO Y, *et al.* Analysis of carbonyl value of frying oil by Fourier transform infrared spectroscopy [J]. J Oleo Sci, 2015, 64(4): 375–380.
- [21] FARHOOSH R, MOOSAYI SMR. Carbonyl value in monitoring of the quality of used frying oils [J]. Anal Chim Acta, 2008, 617(1/2): 18–21.
- [22] 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 Chem, 2017, 237: 98–105.
- [23] ABDULKARIM SM, LONG K, LAI OM, *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.
- [24] KHOR YP, WAN SY, TAN CP, *et al.* Potential of using basa catfish oil as a promising alternative deep-frying medium: A thermo-oxidative stability study [J]. Food Res Int, 2021, 141: 109897.
- [25] MBA OI, DUMONT MJ, NGADI M. Characterization of tocopherols, tocotrienols and total carotenoids in deep fat fried French fries [J]. J Food Compos Anal, 2018, 69: 78–86.
- [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 YL, WANG YH, ZHANG ZS, *et al.* Changes of vitamin E composition and content in four kinds of oils and fats during frying [J]. China Oils Fats, 2015, 40(12): 48–52.
- [27] NAYAK PK, DASH U, RAYAGURU K, *et al.* Physio-chemical changes during repeated frying of cooked oil: A review [J]. J Food Biochem, 2015, 40(3): 371–390.
- [28] ALADEDUNYEI F, PRZYBYLSKI R. Performance of palm olein and modified rapeseed, sunflower, and soybean oils in intermittent deep-frying [J]. Eur J Lipid Sci Technol, 2014, 116: 144–152.
- [29] 贾喜午, 周坚, 吕庆云, 等. 基于主成分分析法的复合营养米评价模型的建立[J]. 中国粮油学报, 2015, 30(7): 123–127.
- JIA XW, ZHOU J, LV QY, *et al.* Assessment model of compound nutritional rice based on principal component analysis [J]. J Chin Cereal Oil Ass, 2015, 30(7): 123–127.
- [30] 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 QL, HUANG XZ, HE Y, *et al.* Evaluation of Wushan plum edible quality based on principal component analysis [J]. Food Ferment Ind, 2020, 46(19): 251–257.
- [31] 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]. Eur J Lipid Sci Technol, 2016, 118(4): 512–523.

(责任编辑: 张晓寒 于梦娇)

作者简介



甘晓露, 硕士, 讲师, 主要研究方向为食品新资源开发、食品加工新技术。
E-mail: 397374380@qq.com



胡明明, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为油脂质量分析及产品应用开发。
E-mail: 2006abc-hmm@163.com