

煎炸棕榈油的理化性质及其中的极性组分 对 HepG2 细胞的影响

程亚军, 刘 滢, 曹培让, 刘元法

(江南大学 食品学院, 江苏 无锡 214122)

摘要: 研究棕榈油在高温煎炸过程中过氧化值、茴香胺值等理化指标的变化情况, 及从煎炸 50 h 油样中提取的极性组分对 HepG2 细胞的影响。结果表明: 棕榈油的酸值、过氧化值、羰基值、茴香胺值均随煎炸时间的延长而逐渐上升, 碘值、氧化稳定性指数逐渐降低, 且极性组分含量在煎炸过程中持续增加, 在煎炸 45 h 时已超过 25%; MTT 实验结果显示, 极性组分处理 HepG2 细胞 24 h 后, 细胞存活率随着极性组分含量的增加而下降, 说明极性组分可以抑制 HepG2 细胞的生长; 油红 O 和活性氧实验结果显示, 极性组分可以促进细胞内脂滴的积累, 同时细胞内 ROS 的含量明显增加, 使细胞发生氧化损伤, 能量代谢紊乱, 加剧了脂质积累。

关键词: 煎炸棕榈油; 极性组分; HepG2 细胞; 脂质代谢

中图分类号: TS221; TS295.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-7969(2018)11-0014-06

Physicochemical property of frying palm oil and effect of polar compounds extracted from frying palm oil on HepG2 cell

CHENG Yajun, LIU Ying, CAO Peirang, LIU Yuanfa

(School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, China)

Abstract: The changes of physicochemical indexes including peroxide value, anisidine value and so on of frying palm oil were investigated, meanwhile the effect of polar compounds (PCs) extracted from 50 h frying palm oil on HepG2 cell was studied. The results showed that during the frying process, the acid value, peroxide value, carbonyl value, anisidine value and PCs content increased gradually with the frying time prolonging, while the iodine value and oxidation stability index decreased continuously. When frying for 45 h, the PCs content was over 25%. The results of MTT assay showed that after 24 h treatment by PCs, the viability of HepG2 cells decreased with the increase of the PCs content, indicating that the PCs could inhibit the growth of HepG2 cells. The results of oil red O test and ROS experiment showed that the PCs could promote the accumulation of lipid droplets in cells. Meanwhile, the ROS content increased obviously, and it could cause cell oxidative damage, energy metabolism disorder and aggravate lipid accumulation.

Key words: frying palm oil; polar compound; HepG2 cell; lipid metabolism

煎炸食品如油条、薯条、鸡块、方便面等, 因其特

殊的风味、口感及质地, 深受消费者喜爱。植物油中用于煎炸用途的食用油占比很大, 且煎炸油在各国的消费量逐年增加。煎炸油的品质会严重影响煎炸食品的质量。在 150 ~ 190 °C 的高温煎炸过程中, 由于空气、食物中的水分及其他成分的存在, 油脂中饱和及不饱和脂肪酸发生氧化、水解、裂解、氧化聚合和热聚合等复杂的反应^[1], 使其色泽加深、黏稠度增大、气味劣变, 产生一些挥发性成分, 导致油脂的

收稿日期: 2018-03-12; 修回日期: 2018-03-27

基金项目: 国家重点研发计划课题(2016YFD0401404); 国家自然科学基金项目(31772008, 31471678)

作者简介: 程亚军(1992), 女, 硕士研究生, 研究方向为煎炸油细胞毒性的研究(E-mail) 18811990237@163.com。

通信作者: 刘元法, 教授, 博士生导师(E-mail) yfliu@jiangnan.edu.cn。

品质下降,并生成一些比甘油酯极性大的物质^[2],即极性组分。过度煎炸的油脂特别是其中的极性组分会对人体产生不良影响。因此,越来越多的国家对极性组分的含量进行限制,欧洲国家规定煎炸油中极性组分的含量不应高于25%^[3]。

煎炸过程中生成的极性组分会损伤脏器组织,严重影响脏器指数、肝肾功能指标等,对人体代谢机能造成不利影响。相关研究表明,煎炸油会促使肝脏发炎,影响肝脏微粒体酶系统,对肝脏造成损伤^[4-6]。Huang等^[7]将煎炸油及其极性部分加到配料中喂养大鼠,结果显示,氧化煎炸油导致了怀孕大鼠的胎儿先天性畸形。Lin等^[8]研究表明,氧化煎炸油影响脾细胞的免疫应答。陈琦等^[9]的实验结果表明,煎炸油喂养大鼠后,其生长速度减慢,导致大鼠生长发育受阻。氧化煎炸油还与高血压、心血管疾病、慢性炎症、动脉粥样硬化等疾病密切相关。

国内外对煎炸油的研究主要集中在煎炸油理化指标的测定和煎炸油对动物的研究,而很少涉及煎炸油对细胞的体外研究,即对细胞生物学功能等方面的影响。因此,本文通过研究煎炸油理化指标及其中的极性组分对细胞的影响,进一步探寻煎炸油对人体健康的影响。

1 材料与方法

1.1 实验材料

棕榈油,上海益海嘉里有限公司;HepG2细胞,江南大学食品学院;PBS、MTT细胞增殖与细胞毒性检测试剂盒、活性氧检测试剂盒,上海碧云天生物技术有限公司;油红O染料,美国Sigma公司;优级新生牛血清,内蒙古金源康生物工程有限公司;MEM培养基,上海源培生物科技股份有限公司;胰蛋白酶(Trypsin)、双抗,美国Gibco公司;其余试剂均为分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

Rancimat 743型油脂氧化稳定仪,瑞士Metrohm公司;煎炸锅,瑞安市华嘉机械制造有限公司;CO₂细胞培养箱、Multiskan GO型酶标仪,美国Thermo公司;HH-2型水浴锅,江苏金坛市荣华仪器制造有限公司;TS100-F型倒置显微镜,日本尼康公司;ZHJH-C1112B型超净台,上海智城分析仪器制造有限公司;TDL-50C型台式低速离心机,上海安亭科学仪器厂;Axio Vert A1型倒置荧光显微镜,德国蔡司公司;FACSCalibur型流式细胞仪,美国BD公司。

1.2 实验方法

1.2.1 煎炸与取样

将3 kg棕榈油放入10 L的煎炸锅中,加热到

180℃。称取(100±5)g薯条于煎炸油中,煎炸4 min取出控油1 min,间隔15 min后重复此煎炸操作,每天连续煎炸10 h,共煎炸5 d。每隔5 h,取50 mL煎炸油于烧杯中,待煎炸油冷却至室温后,滤网过滤除去杂质,移至离心管里,-20℃保存,待测。

1.2.2 极性组分提取

采用硅胶柱层析法从煎炸50 h油样中分离提取极性组分。第一步,石油醚、乙醚作为洗脱液,洗脱下来的是非极性组分;第二步,采用乙醚继续洗脱,获得弱极性组分;最后,采用甲醇洗脱下极性更大的极性组分,合并这两部分极性组分洗脱液,采用旋转蒸发的方法得到极性组分。

1.2.3 理化指标的测定

酸值采用GB/T 5530—2005中的酸碱滴定法;过氧化值、碘值分别采用GB/T 5538—2005、GB/T 5532—2008中的硫代硫酸钠滴定法;羰基值、茴香胺值分别采用GB/T 5009.37—2003、GB/T 24304—2009中的吸光度测定法;氧化稳定性指数采用GB/T 21121—2007中的Rancimat氧化稳定仪加速氧化测定;极性组分含量的测定采用GB/T 5009.202—2003中的柱层析法。

1.2.4 HepG2细胞培养

将HepG2细胞均匀分散在MEM培养基(含有10%的新生牛血清和1%的双抗)中,并放置于37℃、5%CO₂细胞培养箱中进行培养。待HepG2细胞贴壁生长36 h左右,细胞换液后,继续放置培养箱中培养。待HepG2细胞融合度达到80%左右,用0.25% Trypsin消化,离心,细胞传代。一部分细胞用于后续细胞实验,剩余细胞分散于含有新培养基的培养皿中培养。

1.2.5 MTT

向96孔板中每孔接种100 μL适当浓度的HepG2细胞,于细胞培养箱中培养,待细胞生长至对数期,加入不同质量浓度的极性组分,每个质量浓度设置6个平行。处理24 h后,每孔加入10 μL MTT溶液,在培养箱内培养4 h。之后再向各孔中加入100 μL的二甲基亚砜(DMSO)溶剂,吹打混匀后,继续在培养箱中孵育,直至孔板里的甲瓞全部溶解。在570 nm处采用酶标仪测定其吸光度。

1.2.6 油红O染色

向6孔板中接种适量HepG2细胞,待细胞生长至对数期,加入不同质量浓度的极性组分。处理24 h后,吸弃旧培养液,PBS轻轻冲洗细胞2~3遍,4%的多聚甲醛固定。固定结束后,加入油红O染料(油红O储备液与水体积比3:2),室温染色。随

后用 PBS 洗掉染料后,在倒置显微镜下观察拍照。

1.2.7 活性氧(ROS)含量测定

向 6 cm 培养皿中接种适量 HepG2 细胞,细胞生长到对数期后,用不同质量浓度的极性组分处理细胞 24 h。然后,向其中一个空白孔中加入阳性对照(用无血清培养基 1:1 000 稀释),作用 20 min 后,所有孔弃去培养液,加入适量的探针(用无血清培养基 1:1 000 稀释的 DCFH-DA),在 37 °C 下孵育 30 min。用 PBS 缓慢清洗细胞 2 次,以除去未进入细胞的探针。之后,用 0.05% Trypsin 消化细胞,培养液终止消化。离心去上清后,PBS 重悬细胞,再次离心,加入 500 μ L PBS 重悬细胞,将样品冰浴避光放置,尽快流式细胞仪上机检测。

1.2.8 数据处理

所有实验至少做 3 个平行,并用 SPSS 软件对实验数据进行统计分析,实验结果采用“平均数 \pm 标准方差”的形式表示,采用 OriginPro 8.5 绘图。

2 结果与讨论

2.1 煎炸油的理化指标

煎炸油中含有的游离脂肪酸的多少可以用酸值来测定,同时,酸值也可反映油脂发生水解及变质的程度。煎炸油酸值的增高主要由于热氧化生成的酸类产物及水解产生的游离脂肪酸。图 1 显示了煎炸过程中酸值与煎炸时间的关系。

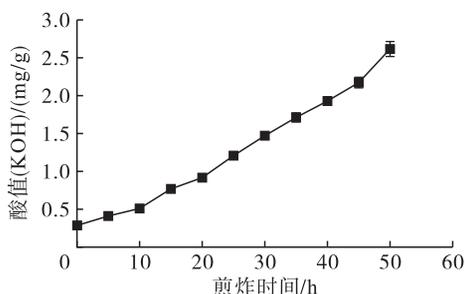


图 1 煎炸过程中酸值与煎炸时间的关系

由图 1 可知,煎炸棕榈油的酸值(KOH)随着煎炸时间的延长不断增加,从 0 h 的 0.273 mg/g 不断增加到 50 h 的 2.604 mg/g。其中,在煎炸 0~20 h 阶段,酸值(KOH)从 0.273 mg/g 增加到 0.917 mg/g,增长率为 0.032 mg/(g·h);在煎炸 20~45 h 时,较 0~20 h,酸值(KOH)增长速度加快,增长率为 0.050 mg/(g·h)。Naz 等^[10]认为,煎炸过程中发生水解反应,其间产生的甘油在高温下挥发,加快了水解反应,酸值增长率上升。

过氧化值可以衡量煎炸油中氢过氧化物的多少,但煎炸过程中生成的氢过氧化物中间产物在高

温下不稳定,会发生进一步的分解和聚合反应。过氧化值常用于评价油脂的初级氧化阶段。图 2 显示了煎炸过程中过氧化值与煎炸时间的关系。

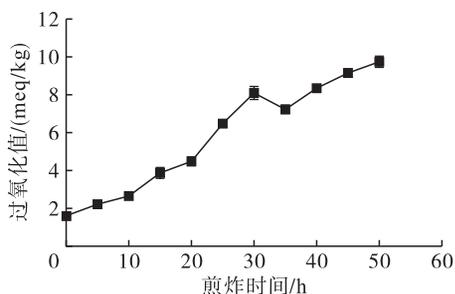


图 2 煎炸过程中过氧化值与煎炸时间的关系

由图 2 可知,在 0~10 h 内,棕榈油过氧化物的生成速率较为缓慢,煎炸 10 h 后显著升高。0~30 h,过氧化值随煎炸时间延长呈现不断上升的趋势,但在 35 h 时下降,出现波动,可能是由于生成的氢过氧化物发生了分解和聚合,生成羰基类和醛类等二级氧化产物。

羰基值可以反映油脂品质、衡量煎炸寿命,其值越高,表明油脂的质量越差。图 3 显示了煎炸过程中羰基值与煎炸时间的关系。

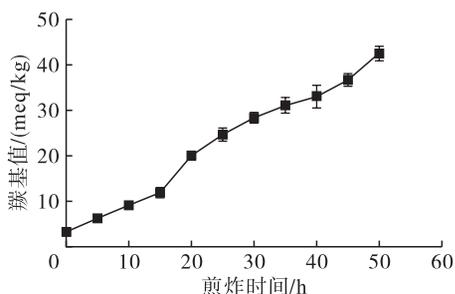


图 3 煎炸过程中羰基值与煎炸时间的关系

由图 3 可知,在 0~15 h 时间段,棕榈油的羰基值增加缓慢,是由于此时过氧化物的生成量少,分解速率较低。之后,随着煎炸时间的延长,羰基值不断增加,这是因为在煎炸过程中生成的氢过氧化物积累到一定程度后,发生分解反应,生成醛、酮类羰基化合物。

茴香胺值可以衡量煎炸油中不饱和醛类物质的多少,常用于评价油脂的次级氧化阶段。茴香胺值越大,说明油脂劣变的程度越高。图 4 显示了煎炸过程中 *p*-茴香胺值与煎炸时间的关系。由图 4 可知,*p*-茴香胺值随煎炸时间延长呈上升趋势,这是由于棕榈油在煎炸过程中发生热氧化反应产生的氢过氧化物分解生成醛类化合物。煎炸 50 h 后,棕榈油的 *p*-茴香胺值比煎炸前明显增加,从 9.28 增加至 86.98。

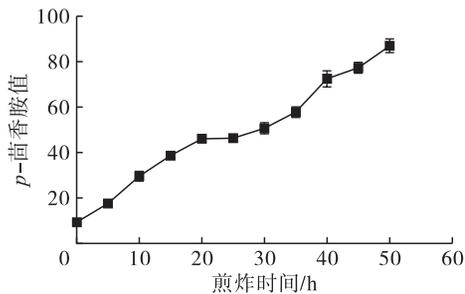


图4 煎炸过程中 *p*-茴香胺值与煎炸时间的关系

碘值可以测定煎炸油的不饱和程度,其值越低,说明煎炸油的不饱和程度越低。碘值的下降,是由于在高温煎炸过程中,煎炸油中不饱和脂肪酸的双键发生氧化,以及不饱和脂肪酸之间发生聚合反应,使煎炸油的不饱和度不断下降^[11]。图5显示了煎炸过程中碘值与煎炸时间的关系。

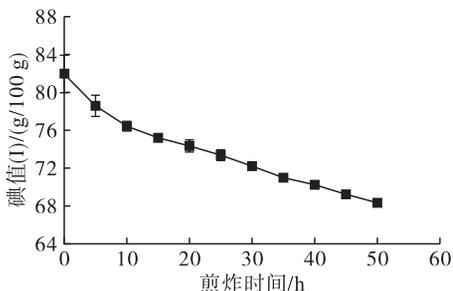


图5 煎炸过程中碘值与煎炸时间的关系

由图5可知,在0~10 h时间段,棕榈油的碘值下降速度较快,之后,随着煎炸时间的延长,碘值不断下降,但下降速率有所减缓。这可能是由于煎炸初期,油中不饱和脂肪酸的含量较高,碘值下降快。

油脂的氧化稳定性指数即 OSI 值,是使油样在氧气含量充足和高温条件下,采用加速氧化的方法评价油脂的氧化稳定性。OSI 值越大,说明油样所需的氧化诱导时间越长,该油脂的氧化稳定性越好^[12]。图6显示了煎炸过程中氧化稳定性指数与煎炸时间的关系。

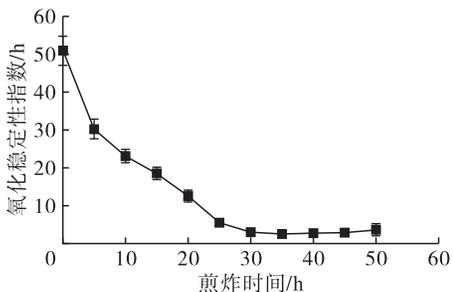


图6 煎炸过程中氧化稳定性指数与煎炸时间的关系

由图6可知,随着煎炸时间的延长,煎炸油的氧化稳定性指数逐渐降低,30 h后煎炸油的氧化稳定性指数没有太大变化,说明棕榈油煎炸薯条30 h后在氧化稳定性方面已经趋于相对恒定。

在煎炸过程中,油脂中的甘三酯发生一系列反应,生成了热氧化产物、热聚合物、热氧化聚合物、水解产物等,使其极性组分含量不断上升。煎炸过程中极性组分含量随煎炸时间变化的关系如图7所示。

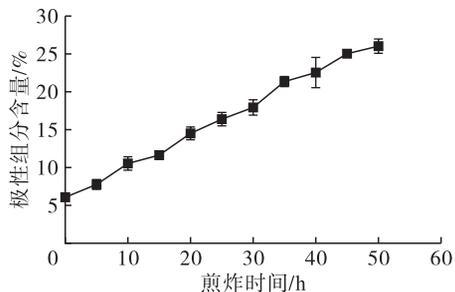


图7 煎炸过程中极性组分含量与煎炸时间的关系

由图7可知,随着煎炸时间的延长,棕榈油中极性组分含量显著升高,且在180℃下煎炸末期(45 h),极性组分含量已经超过25%,达到了强制性废弃界限。极性组分含量的测定是一种比较科学的评价煎炸油恶化的方法^[13],未煎炸棕榈油中的极性组分含量仅为6.09%,而煎炸50 h后,其含量高达26.02%,表明油脂在煎炸过程中,发生了严重的劣变。

2.2 MTT

不同质量浓度的极性组分对细胞存活率的影响见图8。

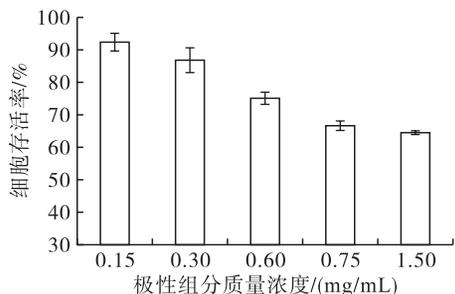


图8 不同质量浓度的极性组分对细胞存活率的影响

由图8可知,与未添加极性组分的空白组相比,极性组分诱导 HepG2 细胞24 h能显著地抑制细胞增殖,降低细胞存活率,且细胞存活率随着极性组分质量浓度的增加而下降。当极性组分质量浓度为1.5 mg/mL时,活细胞数量明显下降,仅为空白组的64.51%。其中,极性组分组细胞与空白组细胞相比,细胞形态较差,将其放置在倒置显微镜下,可以明显看出,细胞发生皱缩且细胞间隙变大。因此,极性组分对 HepG2 细胞形态和存活率有很大的影响。

2.3 油红O染色

通过油红O染色的方法,可以较好地呈现极性物质对 HepG2 细胞内脂滴积累的影响^[14]。图9为不同质量浓度的极性组分对细胞内脂滴积累的影响。

响。由图 9 可知,空白组,即不添加极性组分,在倒置显微镜下没有看到红色的脂滴,而样品组随着极性组分质量浓度的增加,HepG2 细胞内脂滴积累越来越多,且脂滴集中分布在细胞质接近细胞膜的

位置。经过极性组分诱导后,细胞质中的脂滴明显多于未经极性组分处理的细胞。当极性组分质量浓度为 1.5 mg/mL 时,在接近 HepG2 细胞膜的位置积累了密集红色的脂滴并且连接成片。

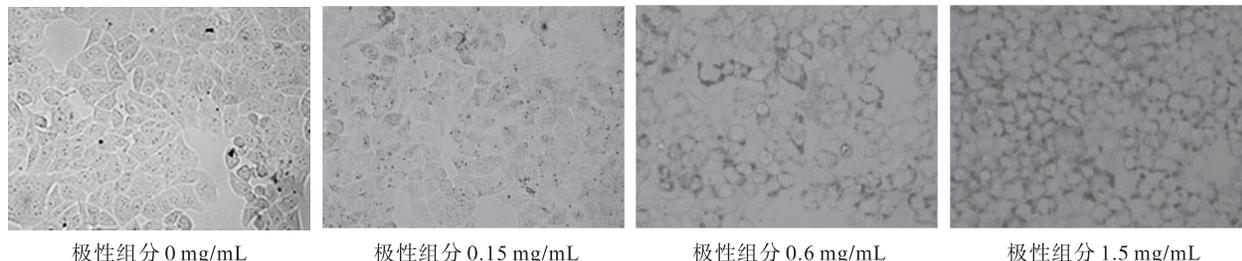


图 9 不同质量浓度的极性组分对细胞内脂滴积累的影响(40×)

2.4 活性氧含量

不同质量浓度的极性组分处理 HepG2 细胞 24 h,加入 DCFH-DA 探针后,流式细胞仪上机测定细胞内 ROS 含量,结果见图 10。非极性的 DCFH-DA 自身并不能发出荧光,其具有亲脂性,可透过细胞膜,被细胞吸收,并在细胞中脂酶的水解作用下转化生成极性衍生物,即 DCFH。但是 DCFH 不能透过

细胞膜而被截留在细胞内,虽然 DCFH 也没有荧光,但其可被细胞内的 ROS 氧化转化为高荧光性的 DCF,从而 DCF 的荧光强度可用于评价细胞内 ROS 水平^[15]。从图 10 可以看出,随着极性组分质量浓度的不断增加,HepG2 细胞内 ROS 水平不断提高。因此,极性组分可以诱导 HepG2 细胞内 ROS 水平的提高,造成细胞的氧化损伤。

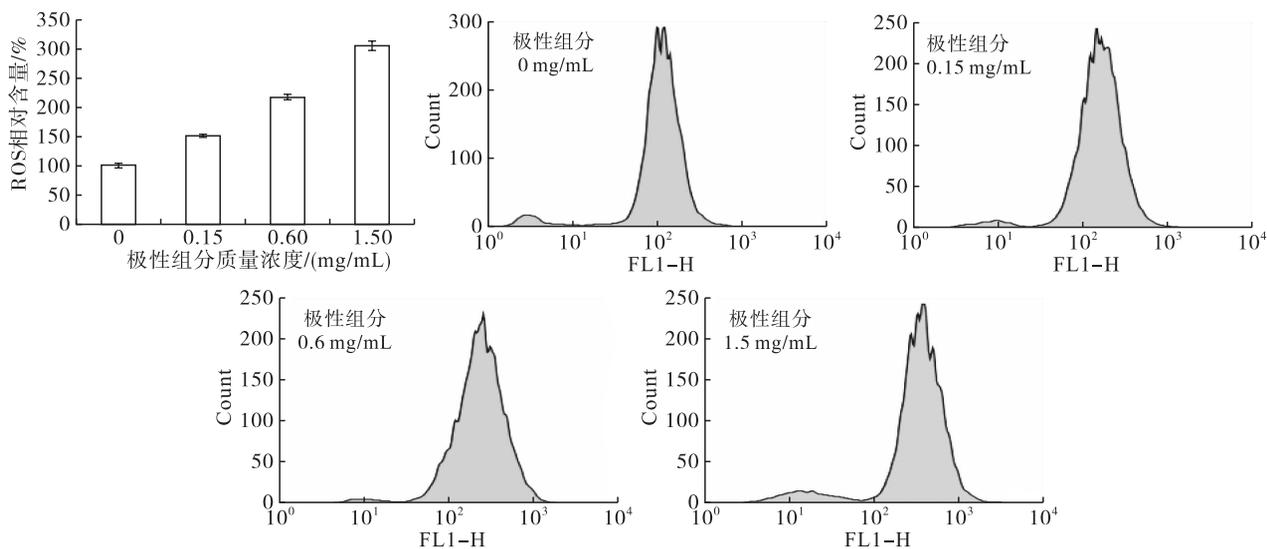


图 10 不同质量浓度的极性组分对 HepG2 细胞 ROS 水平的影响

3 结论

对不同煎炸时间的棕榈油进行理化性质评价,并将煎炸 50 h 时提取的极性组分作用于 HepG2 细胞。结果显示,随着煎炸时间的延长,棕榈油的酸值、过氧化值、羰基值、茴香胺值、极性组分含量不断上升,碘值、氧化稳定性指数逐渐下降,油脂品质下降。极性组分可以降低 HepG2 细胞存活率,且使细胞内活性氧含量增加,导致氧化损伤,影响脂质代谢,促进脂质积累。

参考文献:

[1] CHO E, MIN D B. Chemistry of deep-fat frying oils [J]. J Food Sci, 2007, 72(5): 77-86.

[2] DOBARGANES M C, DIEFFENBACHER A, VELASCO J. Determination of polar compounds, polymerized and oxidized triacylglycerols, and diacylglycerols in oils and fats - results of collaborative studies and the standardized method [J]. Pure Appl Chem, 2000, 72(8): 1563-1575.
[3] 赵超敏. 煎炸油使用极限的研究 [D]. 成都: 西华大学, 2009.
[4] 陈雅琼, 张铁英, 陈元, 等. 煎炸老油对小鼠重要脏器的影响 [J]. 中国油脂, 2014, 39(12): 38-41.
[5] BOHM T, BERGER H, NEJABAT M, et al. Food-derived peroxidized fatty acids may trigger hepatic inflammation: a novel hypothesis to explain steatohepatitis [J]. J Hepatol, 2013, 59: 563-570.

(下转第 23 页)

相比,下降0.42~1.18个百分点;6周时醛类(与氧化、哈败相关)含量与初始时相比,上升2.86~8.03个百分点,随着油脂氧化程度加重,脂质氧化产物的含量增加,而这些产物又与花生油的不良风味(哈败味、苦味)密切相关。

对5种成品花生油进行主成分分析,可以看到5种花生油存储5周或6周后与前4周相比在风味成分含量上有显著变化。

综合过氧化值测定数据、感官评价和风味成分分析结果,可以看到花生油在5周后发生明显的风味衰减,并出现氧化味,因此建议花生油开盖后应在5周内吃完。

参考文献:

- [1] TANTI R, BARBUT S, MARANGONI A G, et al. Oil stabilization of natural peanut butter using food grade polymers [J]. *Food Hydrocoll*, 2016, 61: 399–408.
- [2] FRANCO D, RODRIGUEZ-AMADO I, AGREGAN R, et al. Optimization of antioxidants extraction from peanut skin to prevent oxidative processes during soybean oil storage [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2018, 88: 1–8.
- [3] 邓鹏,程永强,薛文通. 油脂氧化及其氧化稳定性测定方法[J]. *食品科学*, 2005, 26(增刊): 196–199.
- [4] 杨春燕,厉重先,荣瑞芬. 植物油脂的氧化酸败机制及其预防研究[J]. *农产品加工(学刊)*, 2010(12): 85–88.
- [5] 张文. 花生油加工和储存过程氧化控制技术的研究[D]. 广州:广东工业大学, 2011.
- [6] 范雯婷,魏法山,陈霞. 贮藏条件对油脂氧化效果的影响研究[J]. *粮食流通技术*, 2017, 4(7): 104–107.
- [7] BEN H I, FREITAS F, AMMAR S, et al. Comparison and characterization of volatile compounds as markers of oils sta-

bility during frying by HS-SPME-GC/MS and chemometric analysis[J]. *J Chromatogr B*, 2017(11): 322–334.

- [8] 洪振童,陈洁,范璐. HS-SPME-GC-MS分析冷榨和热榨葵花籽油的挥发性物质[J]. *中国油脂*, 2015, 40(2): 90–94.
- [9] 张国文,邱萍,倪永年. 主成分分析法用于食品分类研究[J]. *食品科技*, 2003(12): 72–75.
- [10] SMITH A L, PERRY J J, MARSHALL J A, et al. Oven, microwave, and combination roasting of peanuts: comparison of inactivation of *Salmonella* surrogate *Enterococcus faecium*, color, volatiles, flavor, and lipid oxidation[J]. *J Food Sci*, 2014, 79(8): S1584–S1594.
- [11] SCHIRACK A V, DRAKE M A, SANDERS T H, et al. Characterization of aroma-active compounds in microwave blanched peanuts[J]. *J Food Sci*, 2010, 71(9): C513–C520.
- [12] CHETSCHIK I, GRANVOGL M, SCHIEBERLE P. Comparison of the key aroma compounds in organically grown, raw west-african peanuts (*Arachis hypogaea*) and in ground, pan-roasted meal produced thereof[J]. *J Agric Food Chem*, 2008, 56(21): 10237–10243.
- [13] CHETSCHIK I, GRANVOGL M, SCHIEBERLE P. Quantitation of key peanut aroma compounds in raw peanuts and pan-roasted peanut meal. Aroma reconstitution and comparison with commercial peanut products[J]. *J Agric Food Chem*, 2010, 58(20): 11018–11026.
- [14] WILLIAMS J E, DUNCAN S E, WILLIAMS R C, et al. Flavor fade in peanuts during short-term storage[J]. *J Food Sci*, 2010, 71(3): S265–S269.
- [15] WANG S, ADHIKARI K, HUNG Y. Acceptability and preference drivers of freshly roasted peanuts[J]. *J Food Sci*, 2016, 82(1): 174–184.

(上接第18页)

- [6] HUANG C J, CHEUNG N S, LU V R, et al. Effects of deteriorated frying oil and dietary protein levels on liver microsomal enzymes in rats [J]. *J Am Oil Chem Soc*, 1988, 65: 1796–1803.
- [7] HUANG C F, LIN Y S, CHIANG Z C, et al. Oxidized frying oil and its polar fraction fed to pregnant mice are teratogenic and alter mRNA expressions of vitamin A metabolism genes in the liver of dams and their fetuses [J]. *J Nutr Biochem*, 2014, 25: 549–556.
- [8] LIN B F, WU Y J, CHANG B L, et al. Effects of dietary oxidized frying oil on immune responses of spleen cells in rats [J]. *Nutr Res*, 1997, 17: 729–740.
- [9] 陈琦,马凤兰,李铎,等. 煎炸添加深海鱼油的调和油对SD大鼠的安全性研究[J]. *中国食品学报*, 2010, 14(3): 22–29.
- [10] NAZ S, SIDDIQI R, SHEIKH H, et al. Deterioration of olive, corn and soybean oils due to air, light, heat and deep-

frying [J]. *Food Res Int*, 2005, 38(2): 127–134.

- [11] MANRAL M, PANDEY M C, JAYATHILAKAN K, et al. Effect of fish (*Catla catla*) frying on the quality characteristics of sunflower oil [J]. *Food Chem*, 2008, 106(2): 634–639.
- [12] 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.
- [13] 陈敏. 食品化学[M]. 北京:中国林业出版社, 2008: 117–119.
- [14] CUI W, CHEN S L, HU K Q. Quantification and mechanisms of oleic acid-induced steatosis in HepG2 cells [J]. *Am J Transl Res*, 2010, 2(1): 95–104.
- [15] HE Y Y, HÄDER D P. UV-B-induced formation of reactive oxygen species and oxidative damage of the *Cyanobacterium anabaena* sp.: protective effects of ascorbic acid and *n*-acetyl-L-cysteine [J]. *J Photochem Photobiol B*, 2002, 66(2): 115–124.