

### 3 种油脂煎炸过程极性组分与甘油三酯聚合物及多环芳烃相关性研究

安柯静<sup>1</sup>, 刘玉兰<sup>1</sup>, 马宇翔<sup>1</sup>, 安 骏<sup>2</sup>

(1. 河南工业大学 粮油食品学院, 郑州 450001; 2. 中粮福临门食品营销有限公司, 北京 100020)

**摘要:**以花生油、菜籽油和葵花籽油的连续煎炸油条的试验为例,对煎炸过程极性组分(PC)、甘油三酯聚合物(TGP)及多环芳烃(PAHs)形成及相关性进行研究。结果表明:3种油脂中PC、TGP及PAHs含量均随煎炸时间的延长而增加;经过32h的煎炸,花生油中PC、TGP与PAH16含量分别从未煎炸时的3.34%、0.43%、169.88 μg/kg增至29.00%、16.92%、282.66 μg/kg,菜籽油中PC、TGP与PAH16含量分别从4.02%、0.51%、18.85 μg/kg增至25.80%、15.55%、42.92 μg/kg,葵花籽油中PC、TGP与PAH16含量分别从2.43%、0.42%、21.49 μg/kg增至34.19%、24.76%、51.95 μg/kg;煎炸过程菜籽油PC增幅最小,至32h煎炸结束,PC含量未超出国标限量(≤27%);煎炸过程中PC与TGP、PC与PAH4含量间均呈显著的正相关,根据相关性方程可以通过PC含量对煎炸油中TGP与PAH4含量进行预测。综合考虑煎炸在用油的安全性,除根据国标对PC含量进行检测和控制之外,还应关注TGP及PAHs在煎炸过程的变化情况。

**关键词:**煎炸油;质量安全;极性组分;甘油三酯聚合物;多环芳烃;相关性

中图分类号:TS225.1;TS207.7 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2018)01-0070-06

### Correlation between polar components and oxidized triglycerides polymers or polycyclic aromatic hydrocarbons in three kinds of oils during frying

AN Kejing<sup>1</sup>, LIU Yulan<sup>1</sup>, MA Yuxiang<sup>1</sup>, AN Jun<sup>2</sup>

(1. College of Food Science and Technology, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China;

2. COFCO Food Sales & Distribution Co., Ltd., Beijing 100020, China)

**Abstract:** Dough sticks were fried continuously using peanut oil, rapeseed oil and sunflower seed oil, and then the formation and correlation between polar components (PC) and oxidized triglycerides polymers (TGP) or polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in fried oils were studied. The results showed that the contents of PC, TGP and PAHs increased with frying time prolonging. In the process of 32 h frying experiment, the contents of PC, TGP and PAH16 in peanut oil increased from 3.34%, 0.43% and 169.88 μg/kg to 29.00%, 16.92% and 282.66 μg/kg, respectively. The contents of PC, TGP and PAH16 in rapeseed oil increased from 4.02%, 0.51% and 18.85 μg/kg to 25.80%, 15.55% and 42.92 μg/kg, respectively. The contents of PC, TGP and PAH16 in sunflower seed oil increased from 2.43%, 0.42% and 21.49 μg/kg to 34.19%, 24.76% and 51.95 μg/kg, respectively. Comparatively, after frying for 32 h, rapeseed oil had the lowest growth rate of PC content among these three kinds of

oils and within the limited quantity of national standard (≤27%). Besides, PC content was significantly and positively correlated with the contents of TGP and PAH4 during frying. In this case, the contents of TGP and PAH4 could be predicted based on PC content. In all, besides testing and controlling PC content according to na-

收稿日期:2017-05-12;修回日期:2017-09-22

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(2016YFD0401405,2016YFD040204)

作者简介:安柯静(1991),女,硕士研究生,研究方向为煎炸油质量安全风险控制(E-mail)418649044@qq.com。

通信作者:刘玉兰,教授,硕士生导师(E-mail)liuy17446@163.com。

tional standard, the change of TGP and PAHs in frying oil should also cause great concern to ensure the safety of frying oil comprehensively.

**Key words:** frying oil; quality safety; polar component; triglycerides polymers; polycyclic aromatic hydrocarbons; correlation

煎炸作为一种重要的烹饪手段,能赋予煎炸食品所期望的色泽、口感及风味<sup>[1]</sup>,但油脂煎炸到一定程度所产生的风险成分可能对人体健康造成影响,其中极性组分(PC)与多环芳烃(PAHs)是两类主要的风险成分<sup>[2-4]</sup>。PC主要会导致动物生长停滞、肝脏肿大、细胞损伤甚至畸变<sup>[5]</sup>。PAHs则能参与机体的代谢,对人体及动物有致畸、致癌、致突变作用并通过在体内不断累积而致病,具有长期性和隐匿性<sup>[6-7]</sup>。国际上大多数国家将PC含量达到18%~30%作为煎炸油的废弃点<sup>[8]</sup>,我国GB 7102.1—2003《食用植物油煎炸过程中的卫生标准》规定煎炸油中PC含量小于等于27%同时酸值(KOH)不超过5 mg/g,否则油脂应强制废弃。PC主要包括<sup>[9-10]</sup>甘油三酯寡聚物(TGO)、甘油三酯二聚物(TGD)、氧化甘油三酯(OX-TG)、甘油二酯(DG)、甘油单酯(MG)、游离脂肪酸(FFA)与一些小分子醛、酮、酸等,其中对人体健康造成威胁的主要是甘油三酯聚合物(TGP,即TGO与TGD总称)。目前国际上有多多个国家和地区采用TGP作为煎炸油的安全评价指标,如比利时和捷克规定煎炸油中TGP含量小于等于10%,荷兰则允许煎炸油中TGP不超过16%等<sup>[11]</sup>。此外,虽尚未有标准对煎炸在用油中PAHs含量水平进行限量,但研究<sup>[12]</sup>表明其含量在煎炸过程中呈明显增高趋势,依据GB 2716—2005《食用植物油卫生标准》中苯并(a)芘含量小于等于10 μg/kg的限量规定,也应关注煎炸过程油脂中苯并(a)芘及更多的多环芳烃组分风险。

本文以花生油、菜籽油及葵花籽油的连续煎炸油条试验为例,对煎炸过程PC、TGP及PAHs含量变化及三者之间的相关性进行研究。探讨以PC限量作为煎炸油废弃点时其他两种组分的含量是否达到安全限量,以便在明确PC含量的情况下对煎炸油中TGP及PAHs含量进行预测。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

#### 1.1.1 原料与试剂

福临门一级压榨非转基因葵花籽油;悦生合一级压榨非转基因菜籽油;鲁花一级压榨非转基因花生油;河南金苑精制小麦粉;安琪高活性干酵母和无

铝害复配油条膨松剂;当地市场购买食用盐和白砂糖。

美国优控16种多环芳烃混标(200 μg/mL, 98%),包括蔡、苊烯、苊、芴、菲、蒽、荧蒽、芘、苯并(a)蒽、蒄、苯并(b)蒽、苯并(k)蒽、苯并(a)芘、二苯并(a,h)蒽、苯并(g,h,i)芘、茚并(1,2,3-c,d)芘, O2si公司;16种氘代同位素内标(97%), Dr. Ehrenstorfer GmbH公司;乙腈、正己烷,色谱纯, Sigma公司;四氢呋喃为色谱纯,石油醚、乙醚、丙酮为分析纯,天津科密欧化学试剂有限公司;超纯水。

#### 1.1.2 仪器与设备

硅胶固相萃取小柱, Supelco公司; ISQ气相色谱质谱联用仪, Thermo Fisher Scientific公司; EOPC全自动食用油极性组分分离系统及Flash层析柱(20 g, 粒径40~60 μm), 天津博纳艾杰尔科技有限公司; Waters 2695型高效液相色谱仪、2414型示差折光检测器、Styragel HR 0.5 THF及Styragel HR1 THF体积排阻凝胶色谱柱(Φ7.8 mm × 300 mm), Waters公司; LD5-10台式低速离心机, 北京京立离心机有限公司; EF-81型煎炸锅, 广州唯利安西厨设备制作有限公司; CS-B5型食品搅拌机, 广州童心利机械厂; Milli-Q超纯水机。

## 1.2 试验方法

### 1.2.1 油样制备

采用连续32 h煎炸油条的方法, 油条的制作及煎炸参照文献<sup>[13]</sup>, 煎炸期间不添加新油。煎炸开始时均倒入8 L新鲜油脂于煎炸锅中, 煎炸过程每2 h取油样50 mL储存于-20℃待测。

### 1.2.2 PC及TGP含量的测定

PC含量的测定参照GB 5009.202—2016中的第一法“制备型快速层析法”; TGP含量测定参照安徽省地方标准DB 34/T 1997—2013《食用油中氧化甘油三酯(OX-TG)及其聚合物(TGP)的测定高效空间排阻色谱法》及相关文献<sup>[14]</sup>, 该方法能较为准确地对TGO、TGD、OX-TG、DG、MG及FFA进行定量测定。

### 1.2.3 PAHs含量的测定

PAHs含量测定采用有机溶剂萃取、硅胶固相

萃取柱净化、同位素稀释法定量、气质联用测定的方法<sup>[15]</sup>。

#### 1.2.4 数据分析

利用 Excel2010、SPSS20 及 Origin8.0 软件进行数据的统计分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 油脂煎炸过程 PC 及 TGP 含量的变化(见图 1)

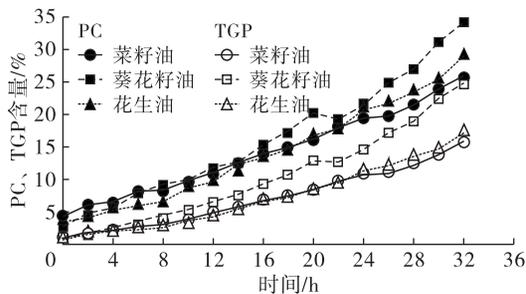


图 1 3 种油脂煎炸过程 PC 及 TGP 含量变化情况

从图 1 可以看出,未煎炸的菜籽油、葵花籽油和花生油中 PC 含量无显著性差异( $p > 0.05$ )且均处于较低的含量水平(2.43% ~ 4.02%),随着煎炸时间的延长,PC 含量显著增长且增幅较为稳定。煎炸 32 h 后,花生油、菜籽油和葵花籽油 PC 含量分别从未煎炸油中的 3.34%、4.02%、2.43% 增至 29.00%、25.80%、34.19%,其增幅为葵花籽油(13.07 倍) > 花生油(7.68 倍) > 菜籽油(5.42 倍),这种差别与 3 种油脂的脂肪酸组成特别是亚麻酸、亚油酸及油酸的比例有关<sup>[16]</sup>,因为葵花籽油以亚油酸为主(48.3% ~ 74.0%),在高温条件下容易被氧化,花生油中油酸含量较高(35.0% ~ 67.0%),故在煎炸过程相对稳定,菜籽油中油脂不饱和程度相对葵花籽油与花生油低,因而在高温煎炸条件下也较为稳定。对照 GB 7102.1—2003 中 PC 含量小于等于 27% 的限量规定,菜籽油在 32 h 煎炸结束后仍未超标(25.80%),葵花籽油在 28 h 几近超标(26.90%),花生油在 30 h 内未超标(24.99%),32 h 时超标(29.00%)。TGP 的变化趋势与 PC 一致,经 32 h 煎炸,花生油、菜籽油和葵花籽油的 TGP 含量分别从未煎炸油中的 0.43%、0.51%、0.42% 增至 16.92%、15.55%、24.76%,分别增加了 38.35、29.49 倍和 57.95 倍。在 3 种油脂 PC 尚合格的临界点,花生油、菜籽油和葵花籽油中 TGP 含量分别为 14.28%、15.55% 和 18.80%,若对照比利时和捷克 TGP 含量小于等于 10% 的限量,3 种油脂中 TGP 均超标;若对照荷兰 TGP 含量小于等于 16% 的限量,花生油中 TGP 在安全范围之内,菜籽油中 TGP 几近超标,葵花籽油中 TGP 已超标。由此可知在 PC 合格临界点时 TGP 已处于较高的含量水平。

PC 的主要成分可以分为两类即氧化部分和水解部分,由甘油三酸酯氧化聚合反应生成的氧化组分主要是 TGO、TGD、OX-TG,由甘油三酸酯水解反应生成的水解组分主要是 DG、MG、FFA。菜籽油、葵花籽油和花生油煎炸过程所生成的氧化组分和水解组分在油脂中的含量变化见表 1、表 2、表 3。

表 1 菜籽油煎炸过程所生成氧化组分和水解组分的含量变化

时间/h	含量/%					
	TGO	TGD	OX-TG	DG	MG	FFA
0	0.18	0.33	1.27	1.73	0.14	0.38
2	0.32	0.95	2.13	1.76	0.04	0.38
4	0.38	1.17	2.47	1.66	0.03	0.37
6	0.59	1.71	3.28	1.85	0.00	0.42
8	0.82	1.82	3.12	1.71	0.03	0.39
10	1.15	2.28	3.48	1.82	0.03	0.42
12	1.52	2.82	3.91	1.85	0.00	0.39
14	1.94	3.45	4.40	2.11	0.01	0.49
16	2.46	3.81	4.61	2.24	0.00	0.52
18	2.77	4.23	4.82	2.28	0.03	0.54
20	3.51	4.52	4.86	2.38	0.03	0.56
22	4.19	5.20	5.22	2.60	0.01	0.63
24	4.81	5.63	5.35	2.74	0.04	0.67
26	5.08	5.45	5.08	3.03	0.15	0.76
28	5.85	5.97	5.16	3.20	0.15	0.79
30	6.84	6.70	5.67	3.60	0.17	0.73
32	7.86	7.69	6.00	3.63	0.08	0.55

表 2 葵花籽油煎炸过程所生成氧化组分和水解组分的含量变化

时间/h	含量/%					
	TGO	TGD	OX-TG	DG	MG	FFA
0	0.13	0.29	0.56	0.96	0.07	0.42
2	0.38	0.90	1.28	1.14	0.05	0.42
4	0.63	1.36	1.95	1.34	0.03	0.47
6	1.07	1.90	2.46	1.39	0.07	0.49
8	1.56	2.46	2.91	1.41	0.06	0.48
10	2.13	2.72	2.97	1.32	0.06	0.44
12	2.84	3.31	3.33	1.39	0.06	0.44
14	3.36	3.76	3.56	1.37	0.06	0.43
16	4.44	4.52	4.18	1.53	0.06	0.47
18	5.38	5.02	4.47	1.56	0.06	0.45
20	6.68	6.03	5.12	1.69	0.06	0.48
22	6.82	5.54	4.73	1.49	0.04	0.37
24	8.23	6.15	5.06	1.61	0.02	0.38
26	9.81	7.22	5.70	1.57	0.04	0.36
28	11.09	7.71	5.94	1.65	0.05	0.45
30	13.40	8.92	6.63	1.76	0.02	0.39
32	15.31	9.45	7.04	1.86	0.08	0.46

表3 花生油煎炸过程所生成氧化组分和水解组分的含量变化

时间/h	含量/%					
	TGO	TGD	OX-TG	DG	MG	FFA
0	0.10	0.32	1.22	1.31	0.13	0.26
2	0.19	0.69	1.27	1.15	0.14	0.26
4	0.35	1.16	1.80	1.40	0.08	0.25
6	0.46	1.39	2.00	1.46	0.08	0.25
8	0.59	1.58	2.16	1.46	0.11	0.30
10	0.92	2.34	2.92	1.86	0.12	0.36
12	1.18	2.62	3.10	1.89	0.10	0.36
14	1.59	3.35	3.72	2.13	0.07	0.39
16	2.02	4.03	4.22	2.34	0.09	0.43
18	2.35	4.34	4.37	2.36	0.22	0.49
20	2.97	5.26	4.95	2.57	0.30	0.54
22	3.30	5.51	5.01	2.57	0.27	0.53
24	4.54	6.44	5.77	3.03	0.15	0.65
26	4.76	7.05	5.87	3.02	0.09	0.71
28	5.58	7.60	6.05	3.25	0.16	0.54
30	6.19	8.09	6.28	3.48	0.16	0.78
32	7.51	9.41	6.93	4.08	0.23	0.84

从表1、表2、表3可以看出,未煎炸油脂PC中水解部分(50.90%~59.67%)均略高于氧化部分(40.33%~49.10%),这可能缘于油脂在精炼过程中会造成轻微程度的水解。随着煎炸时间的延长,油脂中的氧化部分所占比重不断增大,经32h煎炸后氧化部分占PC含量的82.24%~92.98%。油脂未煎炸时,OX-TG(初级氧化产物代表)、TGO和TGD(次级氧化产物代表)在PC中所占的比例分别为23.05%~36.53%、2.99%~5.35%和8.19%~11.93%,32h煎炸结束后,其在PC中的比例分别为20.58%~23.90%、25.91%~44.77%、27.63%~32.46%。在煎炸过程中,菜籽油和葵花籽油OX-TG在PC中所占比例呈先增加后减少的趋势,花生油中OX-TG占PC比例呈下降趋势,TGD与TGO则始终呈上升趋势,说明在煎炸过程中首先生成大量的OX-TG,再由OX-TG不断聚合生成了TGP。

此外,由表1、表2、表3可以看出,PC各组分含量均随煎炸时间的延长而不断增加,其中氧化部分的增量更加明显(从初始的0.98%~1.78%增至21.55%~31.80%),水解部分含量虽也随煎炸时间呈上升的趋势,但始终保持着相对较低的含量水平(由初始的1.45%~2.25%增至2.40%~5.15%),即油脂在煎炸过程中氧化反应更为突出。煎炸结束后,菜籽油与葵花籽油中TGO为氧化部分中主要成分,花生油中TGD含量为氧化部分中最

高,DG含量始终为水解部分中的主要成分,其次为FFA与MG。

## 2.2 油脂煎炸过程 PAHs 组分含量的变化

3种油脂煎炸过程中苯并(a)芘(BaP)含量的变化见图2。

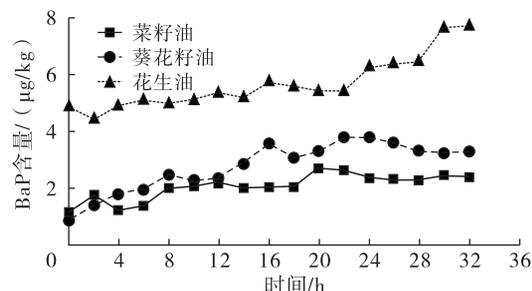


图2 3种油脂煎炸过程 BaP 含量的变化

从图2可以看出,3种油脂中BaP(PAHs中典型的致癌组分)含量均随煎炸时间延长呈增加趋势,其中花生油中BaP从初始至终了均在最高的含量水平(4.88~7.71 μg/kg),这可能与花生油的加工工艺有关,因为花生油生产大多采用高温炒籽及油脂冷却过滤精炼的工艺<sup>[17]</sup>,这种工艺可以使花生油产生浓郁香味并在精炼时香味不损失,但若不当炒籽或过度炒籽将使BaP风险明显增大。煎炸结束后,花生油、菜籽油和葵花籽油中BaP在煎炸过程中分别增加了0.58、1.18倍和2.78倍,菜籽油中BaP含量为3种煎炸油中的最低水平(2.40 μg/kg)。根据GB 2716—2005和GB 2762—2012《食品安全国家标准 食品中污染物限量》中BaP含量小于等于10 μg/kg的限量规定,3种煎炸在用油中BaP含量均符合标准。但若对照欧盟No 835/2011<sup>[18]</sup>中BaP含量小于等于2 μg/kg的规定,菜籽油在煎炸8h时BaP含量已超标(2.02 μg/kg);葵花籽油煎炸6h时BaP含量达1.93 μg/kg,几近超标;花生油在未煎炸时BaP含量已超出欧盟限量标准,其超标时间均明显提前于PC超标时间。

图3显示了3种油脂在煎炸过程中PAH4即苯并(a)蒽、蒽、苯并(b)荧蒽、苯并(a)芘4种组分的含量变化情况。

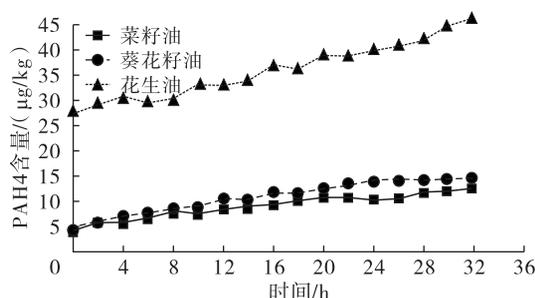


图3 3种油脂煎炸过程 PAH4 含量的变化

从图3可以看出,相比于BaP,PAH4含量的增加更为稳定与明显。整个煎炸过程中,花生油的PAH4含量仍显著高于其他两种油脂。花生油、菜籽油与葵花籽油中PAH4含量分别增长0.68、1.86倍及1.72倍。我国尚未有PAH4限量规定,但若按照欧盟No 835/2011规定食用油中PAH4含量小于等于10 μg/kg的限量,菜籽油和葵花籽油分别在煎炸18 h和12 h后PAH4含量超标,其含量分别为10.10 μg/kg和10.59 μg/kg,未煎炸花生油中PAH4含量(27.35 μg/kg)已超过限量。

图4为3种油脂煎炸过程中PAH16含量变化情况。

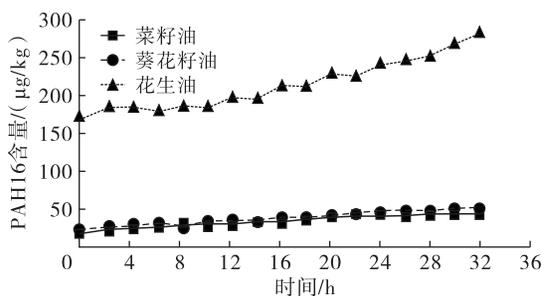


图4 3种油脂煎炸过程PAH16含量的变化

从图4可以看出,3种油脂在煎炸过程中PAH16(美国优控16种PAHs,具有一定毒性的典型污染物)的变化趋势与PAH4一致。花生油、菜籽油与葵花籽油中PAH16含量分别由未煎炸的169.88、18.85、21.49 μg/kg上升至282.66、42.92、51.95 μg/kg,其增幅为葵花籽油(1.42倍) > 菜籽油(1.28倍) > 花生油(0.66倍)。目前国内外均未有PAH16的限量标准,但其在煎炸油中含量不容小觑,鉴于高温是其产生的主要原因之一<sup>[19]</sup>,长时间的高温煎炸过程应尽量避免。此外,3种油脂在煎炸过程中PAHs各组分的增量是不相同的。花生油、菜籽油和葵花籽油中增幅最大的均是二苯并(a,h)蒽,分别增加了3.91、5.10倍和7.56倍,而增幅最小的分别是荧蒽(0.16倍)、菲(0.01倍)和芘(0.29倍)。

### 2.3 煎炸油中PC与TGP及PAHs的相关性研究

3种油脂煎炸过程PC与TGP含量的相关性见表4,PC与BaP含量的相关性见表5,PC与PAH4含量的相关性见表6。

表4 3种油脂煎炸过程PC与TGP含量的相关性(n=17)

煎炸油	线性方程	相关系数( $R^2$ )
花生油	$y = 0.6376x - 1.9358$	0.9964
菜籽油	$y = 0.6884x - 2.8158$	0.9963
葵花籽油	$y = 0.7885x - 2.5714$	0.9967

注:x表示PC含量,% ;y表示TGP含量,%。

从表4可以看出,花生油、菜籽油和葵花籽油在煎炸过程中PC与TGP含量间均存在着极显著的相关性,同时PC与TGP属于同一风险成分体系,亦表明两者的含量存在着紧密的联系。根据3种油脂中PC与TGP的含量关系,代入线性方程即可在PC含量已知的情况下预测出TGP的大致含量。

表5 3种油脂煎炸过程中PC与BaP含量的相关性(n=17)

煎炸油	线性方程	相关系数( $R^2$ )
花生油	$y = 0.1079x + 4.2065$	0.8526
菜籽油	$y = 0.0540x + 1.3122$	0.5702
葵花籽油	$y = 0.0732x + 1.5933$	0.6098

注:x表示PC含量,% ;y表示BaP含量,μg/kg。

表6 3种油脂煎炸过程中PC与PAH4含量的相关性(n=17)

煎炸油	线性方程	相关系数( $R^2$ )
花生油	$y = 0.6934x + 26.5196$	0.9639
菜籽油	$y = 0.3477x + 4.2277$	0.9259
葵花籽油	$y = 0.3157x + 5.8499$	0.8752

注:x表示PC含量,% ;y表示PAH4含量,μg/kg。

从表5、表6可以看出,花生油、菜籽油和葵花籽油中PC与BaP含量相关性的 $R^2$ 分别为0.8526、0.5702和0.6098,PC与PAH4含量相关性的 $R^2$ 分别为0.9639、0.9259和0.8752,表明PC与PAH4含量间的拟合效果要高于PC与BaP。PC与PAH4含量的相关性明显低于PC与TGP含量间的相关性,可能是由于造成PC与PAHs含量增加有部分相同的因素,但二者却属于不同的风险成分体系,故其增量间存在着一定的相关性却不是异常密切。根据表5、表6中相关线性方程即能通过PC含量对BaP及PAH4的含量进行预估,节省对煎炸油BaP及PAH4的检测成本。

### 3 结论

通过对花生油、菜籽油和葵花籽油煎炸油条过程中所取油样的检测分析发现:PC、TGP与PAH16这3种风险成分的含量均随煎炸时间的延长持续增加且增幅各异;煎炸过程菜籽油PC增幅最小,至32 h煎炸结束,PC含量未超出国标限量( $\leq 27\%$ );3种煎炸在用油中TGP与PAHs含量增加显著,且在PC未超标时已处于较高的含量水平;3种油脂在煎炸过程中PC与TGP、PC与PAHs间均存在显著相关性,根据相关性方程即可对煎炸油中TGP、BaP与PAH4含量进行预测。综合考虑煎炸在用油的安全性,除根据国标对PC进行检测和控制之外,还应关注TGP及PAHs在煎炸过程的变化情况及可能对

煎炸油和煎炸食品造成的风险。

### 参考文献:

- [1] BOU R, NAVAS J A, TRES A, et al. Quality assessment of frying fats and fried snacks during continuous deep - fat frying at different large - scale producers[J]. Food Control, 2012, 27(1): 254 - 267.
- [2] 冯红霞, 李杨, 隋晓楠, 等. 煎炸次数对大豆油及薯条脂质中极性组分的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(3): 309 - 314.
- [3] 石龙凯, 刘玉兰, 王莹辉, 等. 油脂煎炸过程中多环芳烃含量的变化[J]. 现代食品科技, 2015(4): 311 - 315.
- [4] PURCARO G, NAVAS J A, GUARDIOLA F, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in frying oils and snacks[J]. J Food Protect, 2006, 69(1): 199 - 204.
- [5] 卢志兵, 翁煜彬, 李建军, 等. 油炸食品安全指标极性组分研究[J]. 标准科学, 2012(5): 69 - 72.
- [6] WENZL T, SIMON R, ANKLAM E, et al. Analytical methods for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in food and the environment needed for new food legislation in the European Union[J]. TrAC Trend Anal Chem, 2006, 25(7): 716 - 725.
- [7] TROCHE S V, FALCÓN M S G, AMIGO S G, et al. Enrichment of benzo [a] pyrene in vegetable oils and determination by HPLC - FL [J]. Talanta, 2000, 51(6): 1069 - 1076.
- [8] 王莉蓉, 金青哲, 冯国霞, 等. 我国及欧美煎炸食用油法律法规与标准概述[J]. 食品安全质量检测学报, 2015(9): 3774 - 3779.
- [9] 曹文明, 薛斌, 陈凤香, 等. 食用植物油与餐厨废油脂中三酰甘油氧化聚合物含量的研究[J]. 中国粮油学报, 2012, 27(11): 96 - 99.
- [10] FARHOOSH R, TAVASSOLI - KAFRANI M H. Polar compounds distribution of sunflower oil as affected by unsaponifiable matters of Bene hull oil (BHO) and tertiary - butylhydroquinone (TBHQ) during deep - frying [J]. Food Chem, 2010, 122(1): 381 - 385.
- [11] 曹文明, 曹虹晖, 薛斌, 等. 氧化三酰甘油聚合物的细胞毒性研究[J]. 食品科技, 2012(9): 171 - 174.
- [12] HAO X W, LI J, YAO Z L. Changes in PAHs levels in edible oils during deep - frying process [J]. Food Control, 2016, 66: 233 - 240.
- [13] 王莹辉, 刘玉兰, 李时军. 米糠油在油条煎炸过程中的品质变化研究 [J]. 中国油脂, 2013, 38(12): 28 - 32.
- [14] 曹文明, 薛斌, 陈凤香, 等. 三酰甘油氧化聚合物的制备型快速柱层析——体积排阻色谱测定法 [J]. 分析测试学报, 2012, 31(8): 933 - 939.
- [15] 张东东, 刘玉兰, 马宇翔, 等. SPE 净化 - 同位素稀释 - GC - MS 法检测食用油脂中 16 种多环芳烃 [J]. 粮食与油脂, 2016, 29(1): 53 - 59.
- [16] GUILLÉN M D, URIARTE P S. A very simple, fast, and non - destructive approach to predict the time at which edible oils submitted to high temperature reach the established limits of safety [J]. Food Chem, 2011, 127(2): 802 - 806.
- [17] SHI L K, ZHANG D D, LIU Y L. Incidence and survey of polycyclic aromatic hydrocarbons in edible vegetable oils in China [J]. Food Control, 2016, 62: 165 - 170.
- [18] DRABOVA L, TOMAIOVA M, KALACHOVA K, et al. Application of solid phase extraction and two - dimensional gas chromatography coupled with time - of - flight mass spectrometry for fast analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons in vegetable oils [J]. Food Control, 2013, 33(2): 489 - 497.
- [19] ROSE M, HOLLAND J, DOWDING A, et al. Investigation into the formation of PAHs in foods prepared in the home to determine the effects of frying, grilling, barbecuing, toasting and roasting [J]. Food Chem Toxicol, 2015, 78: 1 - 9.
- (上接第 51 页)
- [7] KALSCHUEER R, STÖLTING T, STEINBÜCHEL A. Microdiesel: *Escherichia coli* engineered for fuel production [J]. Microbiology, 2006, 152(9): 2529 - 2536.
- [8] 刘广瑞, 颜蓓蓓, 陈冠益. 航空生物燃料制备技术综述及展望 [J]. 生物质化学工程, 2012, 46(3): 46 - 48.
- [9] ADESINA A A, HUDGINS R R, SILVESTON P L. Fischer - Tropsch synthesis under periodic operation [J]. Catal Today, 1995, 25(2): 127 - 144.
- [10] 郝亚杰, 陈玉保, 王强, 等. Pt/SAPO - 11 催化麻疯树油一步加氢制备生物航空煤油工艺条件的研究 [J]. 中国油脂, 2017, 42(6): 110 - 114.
- [11] 李振兴, 张秋平, 李金, 等. 正戊烷异构化制异戊烷反应热力学分析及实验研究 [J]. 石油炼制与化工, 2013, 44(3): 21 - 25.
- [12] 段艳, 兰翠玲, 赵金和, 等. 生物质油加氢脱氧精制研究进展 [J]. 广州化工, 2014, 42(21): 44 - 46.
- [13] 左华亮, 刘琪英, 王铁军, 等. 负载的 Ni 催化剂上植物油加氢脱氧制备第二代生物柴油 [J]. 燃料化学学报, 2012, 40(9): 1067 - 1073.
- [14] 刘国柱, 韩立军, 师亚威, 等. Pt/SAPO - 11 催化费托合成油选择性加氢异构化制备替代喷气燃料 [J]. 石油化工, 2015, 44(2): 144 - 149.