

油炸中棕榈油与鸡柳脂肪酸组成的变化及其相互影响

朱梦婷, 张路路, 石 婷, 陈 奕*

(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:为研究油炸过称中棕榈油及鸡柳脂肪酸组成变化及相互影响规律,利用气相色谱法对棕榈油以及炸鸡柳中脂肪酸组成的变化进行分析,并用国标法测定油炸油的酸价和过氧化值,借助主成分分析法探讨油炸油脂肪酸组成对油脂氧化稳定性的影响。结果表明:油炸温度较低($\leq 200\text{ }^{\circ}\text{C}$)时,棕榈油脂肪酸没有明显变化,在温度极高($> 200\text{ }^{\circ}\text{C}$)时,棕榈油中不饱和脂肪酸含量显著下降($p < 0.01$),反式脂肪酸的含量显著增加($p < 0.01$)。鸡柳在油炸过程中吸收油炸油,并且吸收油脂的量随着炸制时间的延长而增加。同时,鸡柳中浓度高的脂肪酸 C20:4、9cC16:1、9c12c C18:2、9c12c15c C18:3也会释放到棕榈油中。主成分分析结果显示棕榈油中多不饱和脂肪酸 C18:2和 C18:3对于酸价和过氧化值的影响最大。

关键词:鸡柳,油炸,脂肪酸组成,相互影响,酸价,过氧化值

Changes in fatty acids profile of palm oil and chicken fillet during frying and their interactions

ZHU Meng-ting, ZHANG Lu-lu, SHI Ting, CHEN Yi*

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

Abstract: In order to study the regularity of the changes in fatty acid composition of palm oil and chicken fillet during frying, the changes of fatty acid composition in palm oil and fried chicken fillet were analyzed by gas chromatography, and the acid value and peroxide value of palm oil was determined by national standard method. The effects between the fatty acid composition of the palm oil and the oil oxidative stability were studied by means of principal component analysis (PCA). The results showed that there was no significant change in the fatty acid composition of palm oil when the frying temperature was low, while the unsaturated fatty acid content was decreased and the trans fatty acid content was increased when the temperature was very high. Chicken fillet absorbed oil during frying, and the oil absorption rate will increase with the frying time. At the same time, the high concentration of fatty acids (C20:4, 9cC16:1, 9c12c C18:2, 9c12c15c C18:3) in the chicken fillet also be released into the palm oil. The results of principal component analysis showed that polyunsaturated fatty acids C18:2 and C18:3 in palm oil had the greatest effect on acid value and peroxide value.

Key words: chicken fillet; frying; fatty acid composition; interaction; acid value; peroxide value

中图分类号: TS251.5⁺5

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2017)12-0051-08

doi:10.13386/j.issn1002-0306.2017.12.010

油炸作为人们喜爱的食品加工方式之一,使用食用油作为热介导,将食物浸溺其中,通常在温度150~220 $^{\circ}\text{C}$ 下进行,食品中水分蒸发析出,使油炸食品具有多孔酥松的质构^[1-3]。但是,由于水、空气、食物等的存在,油脂在高温下使用会发生一系列的降解、氧化、断裂和异构化等反应,致使油脂中产生游离脂肪酸、氢过氧化物、羰基化合物和其他氧化产物等^[4-5],同时有报道称油炸过程也会产生反式脂肪酸^[6-10]。而过多摄入反式脂肪酸可使血液胆固醇增

高,从而增加心血管疾病发生的风险^[11]。另外为了节省成本,很多商贩会将油炸油反复多次使用,我们前期研究发现反复油炸用油可能会加速反式脂肪酸的产生及油脂氧化稳定性的下降,从而影响人体健康^[12]。因此为了有效地控制油炸过程中反式脂肪酸的产生,有必要深入研究不同油炸油和油炸食品加工过程中脂肪酸的变化规律。

而目前对于食品热加工过程中植物油脂脂肪酸组成变化的研究大多以大豆油、玉米油、菜籽油等为研

收稿日期:2016-11-08

作者简介:朱梦婷(1993-),女,硕士研究生,研究方向:食品科学与工程,E-mail:dream44catcher@163.com。

* 通讯作者:陈奕(1982-),女,博士,教授,研究方向:食品化学与分析、食品营养与安全,E-mail:chenyi15@ncu.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目(21302086);江西省科技支撑计划(20152ACF60012);江西省青年科学家培养对象计划(20142BCB23005)。

究对象,对于常用于油炸的棕榈油研究相对较少,如章海风^[4]等比较了调和棕榈油、菜籽油和大豆油在煎炸过程中脂肪酸组成的变化。杨滢^[12]等比较了不同油炸温度下大豆油、茶油和棕榈油的脂肪酸组成变化。但是以上研究仅单一地比较了加热或油炸过程中所用的植物油或油炸食品的脂肪酸组成随着加热条件的变化规律,很少有人探讨油炸过程中油炸油和油炸食品脂肪酸之间的相互影响,也没能深入探讨脂肪酸组成变化对油炸油或油炸食品的氧化稳定性的影响。鉴于棕榈油在油炸业的广泛使用和相关研究相对匮乏,本论文选取市售24°棕榈油,以市面常见的串香鸡柳作为油炸基质,模拟市面的油炸方式,从温度、炸制时间等方面对油炸油和油炸食品中脂肪酸组成和品质进行研究分析,以期最终获得油炸油和油炸食品脂肪酸相互影响的规律,为有效控制油炸食品的品质和安全提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

24°棕榈油(含抗氧化剂TBHQ) 购自市场;鸡柳(新鲜鸡小胸肉、淀粉、食盐、白砂糖、调味料、天然香辛料,含添加剂三聚磷酸钠) 诸城市天盛源食品有限公司;二十一烷酸甘油单酯(C21:0, TAG)、二十一烷酸甲酯(C21:0, FAME)、GLC-463脂肪酸甲酯混标 美国NU-CHEK公司;亚油酸顺反异构体甲酯混标(9c12c C18:2、9c12t C18:2、9t12c C18:2、9t12t C18:2)、亚麻酸顺反异构体甲酯混标(9c12c15c C18:3、9t12t15c C18:3、9t12c15t C18:3、9c12t15t C18:3、9c12c15t C18:3、9c12t15c C18:3、9t12c15c C18:3、9t12t15t C18:3)、脂肪酸标准品(C12:0、C14:0、C16:0、9c C16:1、C17:0、C18:0、9t C18:1、9c12t C18:2、9t12c C18:2、9c12c C18:2、9c12c15c C18:3、C20:0) 美国Sigma-Aldrich公司;无水乙醚、无水乙醇、三氯甲烷、甲醇、30%过氧化氢、浓盐酸、氢氧化钾、氯化亚铁、硫氰酸钾、还原铁粉、无水硫酸钠 均为分析纯;丙酮、正己烷、正庚烷均为色谱纯。

6890N气相色谱仪(配有FID检测器和Rev.A.10.02色谱工作站) 美国安捷伦科技有限公司;电热式油炸锅 上海来尔佳餐饮管理有限公司;AUX-J20料理粉碎机 佛山市海迅电器有限公司;Milli-Q Academic超纯水系统 美国Millipore公司;TU-1900双光束紫外-可见分光光度计 北京普析通用仪;QL-861型涡旋仪 海门市其林贝尔仪器制造有限公司;AL-104型电子天平 梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;Anke TGL-16G-A型离心机 上海安亭科学仪器厂。

1.2 实验方法

1.2.1 不同油炸温度下棕榈油和鸡柳取样 将3 L 24°固态棕榈油加入10 L油炸锅内,分别调节温度到(150±5)、(200±5)、(250±5)℃,温度到达设定值后开始油炸,每10 min将质量40 g的鸡柳放入油锅,每批油炸10 min,使原料油保持连续油炸状态8 h,每隔2 h取一次油样,共油炸食品48批次,其间不添加

新油。保留生鸡柳、第1、24、48批次油炸鸡柳待测。

1.2.2 不同炸制时间条件下鸡柳取样 将3 L棕榈油加入10 L油炸锅内,调节温度到(170±5)℃,分别将40 g鸡柳油炸0、3、7、11 min,取出后留样待测。

1.2.3 鸡柳脂肪提取 参考杨滢^[12]等的方法,称取15 g粉碎后的鸡柳(记为 m_0)于圆底烧瓶中,加入60 mL氯仿-甲醇(1:1, v: v)混合液,连接冷凝回流装置,于60℃水浴锅中加热1 h。过滤后的抽提液于70℃水浴锅蒸发,待其呈浓稠态,但未干涸,冷却,用25 mL石油醚萃取,3000 r/min离心5 min,将上清液转移至完全干燥的小烧杯(质量为 m_1),于烘箱中烘干至恒重(质量为 m_2),移入3 mL离心管,保存于-20℃备用。计算脂肪酸得率(%)=(m_2-m_1)/ m_0 ×100

1.2.4 脂肪酸组成的测定

1.2.4.1 脂肪酸标准品溶液的制备 精确移取100 μL 50 mg/mL GLC-463脂肪酸甲酯混标,同时分别加入10 μL 10 mg/mL的亚油酸和亚麻酸顺反异构体混标,用正庚烷稀释到1 mL,配制成质量浓度为5 mg/mL具有62种脂肪酸的混合标准溶液,置于4℃冰箱备用。准确称取适量二十一烷酸甲酯标准品,用正己烷配制成质量浓度为5 mg/mL溶液,摇匀备用。

1.2.4.2 脂肪酸甲酯化 采用的甲酯化方法是在美国油脂化学协会(AOCS)所公布的官方方法Ce2-66^[13]的基础上进行了调整,具体方法如下:准确称取10 mg鸡柳脂肪样品或棕榈油于离心管中,分别加入10 μL 5.0 mg/mL C21:0内标液、2 mL正庚烷和100 μL 2 mol/L氢氧化钾-甲醇溶液。振摇30 s,3000 r/min离心5 min,用无水硫酸钠干燥后,取1 mL上清液置于气相瓶待测。

1.2.4.3 气相色谱条件 采用的气相色谱条件是在AOCS所公布的官方方法Ce1h-05^[14]基础上进行了优化:CP-Sil 88型毛细管色谱柱(100 m×0.25 mm×0.39 mm, 0.20 μm, Varian Inc., USA), FID检测器,进样量为1 μL,高纯氢气为载气,进样口温度250℃,检测器温度250℃,恒流模式,分流比为10:1,氢气流量为30 mL/min,空气流量为300 mL/min,尾吹气流量20 mL/min,载气线速为26 cm/s。升温程序为:初温60℃,保持5 min,以11.5℃/min升至170℃,保持25 min;再以5℃/min的速率升至200℃,保持5 min;最后以2℃/min升温至215℃,保持20 min。

1.2.5 酸价、过氧化值测定 酸价、过氧化值^[15-16]的测定参照食品安全国家标准GB 5009.229-2016《食品中酸价的测定》,GB 5009.227-2016食品安全国家标准《食品中过氧化值的测定》。

1.3 数据分析

数据分析利用SPSS Statistics 23.0以及SIMCA12.0。

2 结果与讨论

2.1 油炸过程中棕榈油的脂肪酸变化

2.1.1 脂肪酸组成的变化 新鲜棕榈油的脂肪酸组成如表1所示,新鲜棕榈油中的脂肪酸有月桂酸

表1 新鲜棕榈油和生鸡柳的脂肪酸组成
Table 1 Fatty acid composition of fresh palm oil and raw chicken fillet

脂肪酸组成	棕榈油(mg/g)	鸡柳(mg/g)	脂肪酸组成	棕榈油(mg/g)	鸡柳(mg/g)
C12:0	2.06 ± 0.03	-	ctt/cct C18:3 ^e	-	-
C14:0	9.97 ± 0.24	2.93 ± 0.23	tcc C18:3	-	-
C15:0	0.43 ± 0.02	-	9c12c15cC18:3	1.63 ± 0.05	14.86 ± 0.67
C16:0	465.49 ± 11.08	147.83 ± 10.56	11c C20:1	0.33 ± 0.01	-
9cC16:1	1.12 ± 0.01	37.78 ± 2.49	C20:4	-	5.13 ± 0.12
C17:0	0.80 ± 0.01	0.39 ± 0.04	C22:6	-	1.75 ± 0.03
C18:0	37.86 ± 0.76	25.49 ± 0.88	trans C18:1	-	-
C18:1	336.98 ± 9.34	231.46 ± 12.76	trans C18:2	1.71 ± 0.02	-
9c12t C18:2	0.92 ± 0.07	-	trans C18:3	-	-
9t12cC18:2	0.79 ± 0.07	-	C18:2/C16:0	0.1479	1.3077
9c12cC18:2	68.85 ± 2.66	193.31 ± 5.67	C18:3/C16:0	0.0035	0.1005
C20:0	1.65 ± 0.04	0.5 ± 0.01			

(C12:0)、肉豆蔻酸(C14:0)、银杏酸(C15:0)、棕榈酸(C16:0)、肉豆蔻脑酸(9c C16:1)、珠光脂酸(C17:0)、硬脂酸(C18:0)、顺式油酸(C18:1)、亚油酸顺反异构体(9c12tC18:2、9t12cC18:2、9c12cC18:2)、花生酸(C20:0)、顺式亚麻酸(9c12c15cC18:3)、花生一烯酸(C20:1),其中棕榈酸(50.11%)是主要脂肪酸,其次是顺式油酸(36.28%)、亚油酸(7.4%)。新鲜棕榈油中检测出的反式脂肪酸含量为0.18%,主要是反式亚油酸异构体9c12tC18:2((0.92 ± 0.07) mg/g)、9t12cC18:2((0.79 ± 0.07) mg/g),未检测出反式油酸9tC18:1,这点与其他植物油如大豆油,菜籽油,葵花籽油和玉米油的脂肪酸分布完全不同,Hou^[17]等报道这些植物油富含9tC18:1((0.03~0.08) g/100 g)。

在150、200、250℃油炸后的棕榈油脂肪酸组成变化如表2所示。在三个不同油炸温度下顺式亚油酸(cC18:2)和顺式亚麻酸(cC18:3)的含量在油炸8 h后有明显减小趋势,顺式亚油酸的含量在150、200、250℃连续油炸8 h后分别下降11.1%、13.3%、16.2%,顺式亚麻酸的含量分别下降了20.9%、27%、62.6%。表明温度越高,对于亚油酸和亚麻酸的破坏程度越大,其裂解的程度越严重,含量下降的百分率越大。Aniołowska等^[18]的研究显示棕榈油分别在150、165、180℃油炸40 h后,亚油酸的含量分别下降了22%、23%、27%。Aladedunye等^[19]的研究同样显示,新鲜菜籽油在215℃加热7 d亚油酸和亚麻酸的含量分别减少了13.3%和47.1%。

高温油炸的过程中,多不饱和脂肪酸发生裂解,

表2 不同油炸温度棕榈油脂肪酸组分及含量变化
Table 2 Changes in fatty acid composition in palm oil for different frying temperature

组分(mg/g)	150℃				200℃	
	2 h	4 h	6 h	8 h	2 h	4 h
C12:0	2.04 ± 0.02	2.09 ± 0.03	2.13 ± 0.03	2.02 ± 0.03	2.04 ± 0.02	2.07 ± 0.03
C14:0	9.71 ± 0.25	10.00 ± 0.31	10.27 ± 0.24	9.63 ± 0.24	9.46 ± 0.24	9.54 ± 0.32
C15:0	0.41 ± 0.01	0.42 ± 0.03	0.44 ± 0.02	0.40 ± 0.03	0.40 ± 0.01	0.40 ± 0.03
C16:0	453.03 ± 11.01	466.15 ± 10.09	482.26 ± 14.03	451.32 ± 9.08	436.49 ± 15.03	443.16 ± 10.00
cC16:1	1.07 ± 0.03	1.10 ± 0.02	1.13 ± 0.01	1.07 ± 0.03	1.09 ± 0.01	1.09 ± 0.02
C17:0	0.74 ± 0.01	0.82 ± 0.01	0.83 ± 0.01	0.78 ± 0.01	0.75 ± 0.01	0.79 ± 0.01
C18:0	36.01 ± 0.96	37.62 ± 0.90	38.57 ± 0.86	36.11 ± 0.73	35.76 ± 0.76	36.49 ± 0.76
tC18:1	-	-	-	-	-	-
cC18:1	326.23 ± 7.94	336.62 ± 9.38	345.66 ± 7.84	321.12 ± 9.34	323.64 ± 10.34	326.18 ± 9.84
tC18:2	1.59 ± 0.05	1.72 ± 0.09	1.71 ± 0.04	1.63 ± 0.07	1.66 ± 0.04	1.76 ± 0.09
cC18:2	65.67 ± 1.68	66.39 ± 1.86	67.83 ± 1.96	61.28 ± 2.16 [*]	65.51 ± 3.58	63.80 ± 3.66
C20:0	1.58 ± 0.05	1.60 ± 0.06	1.71 ± 0.02	1.54 ± 0.04	1.63 ± 0.08	1.64 ± 0.03
tC18:3	-	-	-	-	-	-
cC18:3	1.35 ± 0.03	1.43 ± 0.01	1.56 ± 0.06	1.29 ± 0.06 [*]	1.36 ± 0.06	1.36 ± 0.07
11cC20:1	0.31 ± 0.01	0.32 ± 0.03	0.34 ± 0.02	0.30 ± 0.01	0.34 ± 0.04	0.37 ± 0.02
TFA	1.59 ± 0.05	1.72 ± 0.09	1.71 ± 0.04	1.63 ± 0.07 [*]	1.66 ± 0.04	1.76 ± 0.09
C18:2/C16:0	0.145	0.1424	0.1407	0.1358	0.1501	0.144
C18:3/C16:0	0.003	0.0031	0.0032	0.0029	0.0031	0.0031

续表

组分(mg/g)	200 °C		250 °C			
	6 h	8 h	2 h	4 h	6 h	8 h
C12:0	2.17 ± 0.02	2.04 ± 0.03	2.10 ± 0.01	2.05 ± 0.03	2.14 ± 0.03	2.38 ± 0.10 *
C14:0	10.03 ± 0.24	9.42 ± 0.22	9.87 ± 0.31	9.72 ± 0.24	9.95 ± 0.43	11.15 ± 0.35 *
C15:0	0.43 ± 0.01	0.41 ± 0.01	0.43 ± 0.02	0.43 ± 0.01	0.46 ± 0.02	0.50 ± 0.03 *
C16:0	464.68 ± 11.08	440.24 ± 9.01	453.20 ± 8.50	446.13 ± 9.88	455.70 ± 8.60	502.92 ± 9.77 **
cC16:1	1.16 ± 0.04	1.10 ± 0.03	1.19 ± 0.02	1.16 ± 0.01	1.16 ± 0.01	1.22 ± 0.04
C17:0	0.82 ± 0.01	0.77 ± 0.01	0.80 ± 0.01	0.82 ± 0.01	0.83 ± 0.01	0.92 ± 0.01 **
C18:0	38.20 ± 0.76	36.35 ± 0.79 *	38.27 ± 0.96	37.47 ± 0.90	38.21 ± 0.88	42.15 ± 0.76 **
tC18:1	-	-	-	-	1.61 ± 0.02	2.52 ± 0.03 **
cC18:1	340.66 ± 8.34	320.63 ± 10.54	331.55 ± 7.44	319.69 ± 9.84	325.24 ± 9.36	353.65 ± 8.34 *
tC18:2	1.78 ± 0.10	1.65 ± 0.08	2.27 ± 0.04	2.71 ± 0.07	3.00 ± 0.05	3.64 ± 0.15 **
cC18:2	65.42 ± 4.11	59.67 ± 1.06 *	70.75 ± 2.06	58.90 ± 3.00	56.53 ± 2.78	57.69 ± 2.96 **
C20:0	1.73 ± 0.05	1.66 ± 0.09	1.88 ± 0.07	1.89 ± 0.06	1.87 ± 0.07	2.04 ± 0.05 *
tC18:3	-	-	0.31 ± 0.05	0.47 ± 0.04	0.47 ± 0.06	0.56 ± 0.07 **
cC18:3	1.33 ± 0.08	1.19 ± 0.06 *	1.78 ± 0.10	0.83 ± 0.12	0.70 ± 0.13	0.61 ± 0.12 **
11cC20:1	0.36 ± 0.03	0.38 ± 0.05	0.42 ± 0.01	0.44 ± 0.03	0.46 ± 0.05	0.48 ± 0.03
TFA	1.78 ± 0.10	1.65 ± 0.08 *	2.59 ± 0.11	3.18 ± 0.13	3.47 ± 0.16	4.19 ± 0.15 **
C18:2/C16:0	0.1408	0.1355	0.1561	0.132	0.1241	0.1147
C18:3/C16:0	0.0029	0.0027	0.0039	0.0019	0.0015	0.0012

注:对不同温度加热 8 h 后的棕榈油各脂肪酸含量与对应的 0 h 的各脂肪酸含量分别做显著性分析, * 表示差异显著 ($p < 0.05$), ** 表示差异极显著 ($p < 0.01$)。

产生链长更短的饱和脂肪酸。在 250 °C 油炸 8 h 后饱和脂肪酸的增量显著 ($p < 0.05$), 其中 C17:0、C18:0 和 C16:0 的增量极显著 ($p < 0.01$)。C18:2/C16:0 和 C18:3/C16:0 可以用来评价棕榈油的裂解程度。如表 2 所示, 在 150、200、250 °C 油炸 8 h 后, C18:2/C16:0 的值分别下降了 8.2%、11.6% 和 24.6%。说明加热温度越高多不饱和脂肪酸的裂解程度越大。在 150、200、250 °C 油炸 8 h 后, C18:3/C16:0 的值分别下降了 17.1%、22.9%、65.7%, 可以看出温度对于不饱和度更高的亚麻酸影响程度更大, 相比起亚油酸更容易发生氧化裂解, 其结构更不稳定, 这也与前面亚油酸和亚麻酸含量下降百分率的数据相吻合。

在较低的油炸温度 ≤ 200 °C 时, 总反式脂肪酸含量变化很小, 但是随着油炸温度的升高, 反式脂肪酸含量的增量显著 ($p < 0.01$), 250 °C 油炸 8 h 后, 棕榈油中 TFA 的总量为初始时的 2.18 倍。其中, 含有 18 个碳原子数的反式脂肪酸含量的增加非常明显 ($p < 0.01$)。trans C18:2 异构体的含量随着油炸时间显著增加, 在 250 °C 油炸温度下, trans C18:2 异构体的总含量是 3.64 mg/g, 比新鲜未油炸的棕榈油增加了 53.02%。在 250 °C 油炸温度下, trans C18:1 异构体和 trans C18:3 异构体分别是在棕榈油炸 6 h 和 2 h 之后开始产生的。Tsuzuki 等^[20]的研究同样显示, 当红花油在 250~350 °C 加热时, trans C18:2 和 trans C18:3 的含量会增加。实验结果表明: 在普通油炸的条件下并不会产生 TFA 大量产生, 但是在高温条件下, 加热可诱导 TFA 大量产生, 并且加热温度与油炸油中反式脂肪酸的含量呈正比关系。

2.1.2 棕榈油脂肪酸组成对氧化稳定性的影响 为

了阐明脂肪酸组成对油脂氧化稳定性的影响, 我们对棕榈油加热过程中的酸价和过氧化值也进行了测定, 结果如图 1 所示, 酸价与油炸温度和时间均呈现一定的正相关性, 随着加热时间的延长和加热温度的提高, 酸价逐步升高, 并且当加热温度达到 250 °C 时, 酸价升高趋势明显大于 150 °C 和 200 °C, 说明只有当加热温度大于 200 °C 时, 油脂产生的游离脂肪酸含量会明显增多。而过氧化值在高温情况下, 特别是大于 180 °C 时含量急剧下降, 这可能是由于氢过氧化物是油脂氧化的中间产物, 在温度较高的时候, 氢过氧化物的裂解更加剧烈, 从而其含量下降。

将不同油炸温度下棕榈油中脂肪酸组成及氧化指标酸价、过氧化值作为变量做主成分分析, 结果如图 2 所示, 通过分析得到两个主成分, 分别占总变量的 69%、15%, 共计达总变量的 84%。从主成分的载荷图可以看出, 酸价与反式亚油酸 (tC18:2)、反式亚麻酸 (tC18:3) 最为靠近, 说明棕榈油在不同温度下油炸, 酸价的变化主要与棕榈油中反式亚油酸和反式亚麻酸相关, 并且反式亚油酸与酸价更接近, 说明反式亚油酸的含量变化对酸价的影响最大, 这可能与棕榈油中亚油酸的高含量有关。曹君^[21]通过研究食用油氧化产物与脂肪酸组成之间的关系, 表明食用油中高含量的脂肪酸种类对其氧化产物醛酮化合物的形成贡献最大。以上研究表明油脂中高含量的脂肪酸种类会对其氧化过程产生显著影响。相比较其他脂肪酸, 顺式亚油酸 (C18:2) 和亚麻酸 C(18:3) 与过氧化值 (POV) 最为靠近, 说明这两种多不饱和脂肪酸的氧化对棕榈油的过氧化值贡献最大。但是它们之间相关性并不是很强, 可能是过氧化值与其

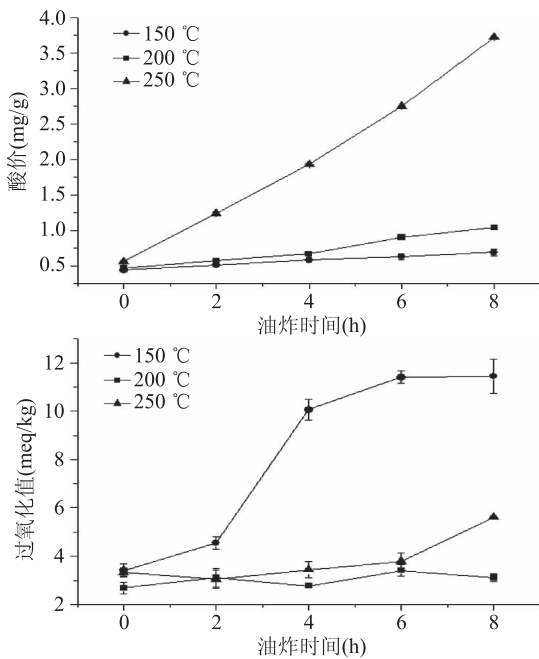


图1 不同油炸温度棕榈油的酸价与过氧化值

Fig.1 The acid value in palm oil for different frying temperature

它多不饱和脂肪酸的氧化也有关系,只是这两种脂肪酸的贡献更为显著。综合这些结果可以推测出:在棕榈油油炸过程中,与氧化指标相关性最强的脂肪酸主要是多不饱和脂肪酸,不饱和程度越高的多不饱和脂肪酸越容易被氧化,而对氧化变化贡献最大的往往是含量最高的那种多不饱和脂肪酸。

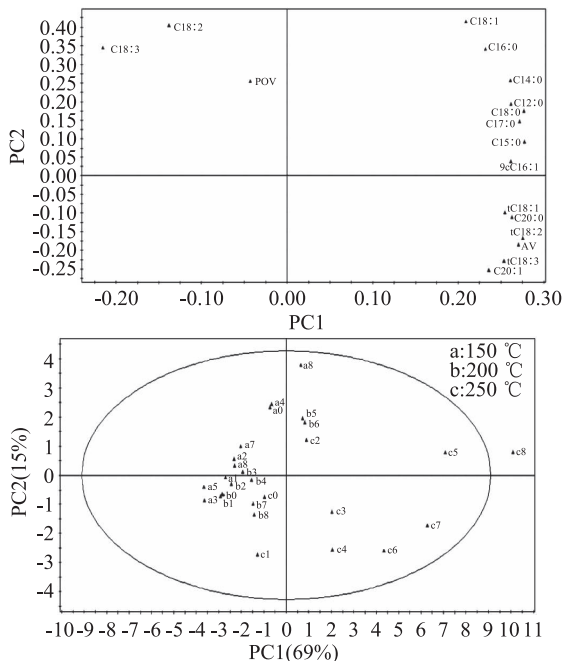


图2 不同温度下脂肪酸组成及氧化指标的PCA载荷图(上)得分图(下)

Fig.2 The fatty acid composition and oxidation index of PCA score scatter plot and load scatter diagram under different temperature

从主成分的得分图可以看出,油炸温度 150 °C (a1~a8) 和 200 °C (b1~b2) 的点能较好的聚合在一

起,而 250 °C (c0~c8) 的点分布较分散,这说明油炸温度在 200 °C 以下时,棕榈脂肪酸的组成及氧化稳定性的变化较小,而温度在 200 °C 以上时,棕榈脂肪酸组成变化及氧化稳定性发生明显变化,这与前面不同油炸温度下棕榈脂肪酸组成及氧化指标的变化研究结果相一致。从得分图还可以看出,150 °C 油炸 8 h (a8) 的点与 200 °C 油炸 3 h 以内的点的点 (b1、b2 和 b3) 聚集在一起,200 °C 油炸 8 h (b8) 的点与 250 °C 油炸 1 h (c1) 的点靠的很近,说明低温长时间油炸与高温短时油炸时的脂肪酸组成变化相近,因此,在日常生活中油炸食品应尽量控制在 200 °C 以下,并且注意油炸油使用时间不宜过长。

2.2 油炸过程中鸡柳脂肪酸的组成变化

为研究油炸食品加工工艺对食品基质中脂肪酸含量的影响,选取本身不含有反式脂肪酸并且市面上常见油炸食品——生鸡柳作为对象,研究油炸油与鸡柳间脂肪酸的相互影响。如表 1 所示,生鸡柳中富含油酸 ((231.46 ± 12.76) mg/g)、亚油酸 ((193.31 ± 5.67) mg/g) 和棕榈酸 ((147.83 ± 10.56) mg/g)。生鸡柳中不含 C12:0、C15:0 以及任何反式脂肪酸,这与 Lee^[22] 等的研究结果不同, Lee 等检测出鸡胸肉中含有 0.13 mg/g 反式油酸。这可能与鸡肉样品来源不一样有关。另外,花生四烯酸、二十二碳六烯酸是属于 ω -6 族的多元不饱和脂肪酸,需要通过摄食食品从外部补充,对于人体大脑和神经系统的发育起着重要作用。生鸡柳中 AA (C20:4) 的含量为 (5.13 ± 0.12) mg/g, DHA 的含量为 (1.75 ± 0.03) mg/g。

为了研究油炸过程中鸡柳脂肪酸组成的变化,首先对鸡柳在不同温度 (150、200、250 °C) 下连续油炸不同批次后的脂肪酸组成进行测定,结果如表 3 所示,150 °C 油炸后的鸡柳中不存在反式亚麻酸,其反式异构体主要是 trans C18:2,且含量较稳定,不会随着油炸温度的升高和油炸批次的增加而发生明显变化。当温度上升到 200 °C 时,炸鸡柳中产生了反式亚油酸,当温度高达 250 °C 时,炸鸡柳中产生了反式油酸和反式亚麻酸,这点同棕榈油中反式脂肪酸变化规律一致,表明鸡柳可能吸收了油炸油,脂肪酸组分与油炸油趋同。观察第 1、24、48 批次油炸鸡柳中反式脂肪酸的总含量,可以看出在温度低于 200 °C 时,油炸油反复使用的次数对于鸡柳中反式脂肪酸含量的影响很小,几乎可以忽略。但是当油炸温度过高时 (≥ 200 °C),随着油炸油反复使用的次数增大,其所含有的 TFA 的含量也呈上升趋势,并且随着油炸温度的升高,这种上升的趋势愈加明显。说明鸡柳中 TFA 含量的增加,在一定程度上是油炸温度升高和油炸油使用时间延长共同协同的效果。

进一步对 170 °C 下短时间 (0~11 min) 油炸过程中鸡柳脂肪酸组成变化进行了测定,结果如表 4 所示,油炸 11 min 后饱和脂肪酸含量显著增加 ($p < 0.01$), C12:0、C14:0、C15:0、C16:0、C17:0、C18:0、C20:0 的含量依次增大为原来的 2.60、2.40、1.54、2.47、1.09、1.14、2.92 倍。顺式脂肪酸的含量均大幅

表3 不同油炸温度下鸡柳脂肪酸组成及含量变化

Table 3 Fatty acid composition of chicken fillets fried in three different temperature

脂肪酸组成 (mg/g)	150 °C 油炸鸡柳批次			200 °C 油炸鸡柳批次			250 °C 油炸鸡柳批次		
	1	24	48	1	24	48	1	24	48
C12:0	1.69 ± 0.06	1.60 ± 0.03	1.55 ± 0.07	1.75 ± 0.02	1.60 ± 0.04	1.50 ± 0.03	1.55 ± 0.01	1.43 ± 0.05	1.70 ± 0.09
C14:0	8.30 ± 0.26	7.91 ± 0.12	7.68 ± 0.31	8.03 ± 0.56	7.32 ± 0.12	6.78 ± 0.23	7.57 ± 0.43	6.73 ± 0.55	7.93 ± 0.23
C15:0	0.39 ± 0.00	0.36 ± 0.01	0.36 ± 0.02	0.40 ± 0.01	0.35 ± 0.02	0.35 ± 0.03	0.35 ± 0.01	0.33 ± 0.03	0.39 ± 0.01
C16:0	395.07 ± 14.32	378.42 ± 19.23	367.23 ± 17.56	381.25 ± 18.32	349.50 ± 19.00	319.02 ± 15.2	363.87 ± 15.69	324.09 ± 18.69	373.59 ± 12.9
C16:1	4.93 ± 0.15	3.43 ± 0.12	3.46 ± 0.09	3.67 ± 0.06	3.27 ± 0.18	4.03 ± 0.20	4.13 ± 0.18	3.34 ± 0.20	4.15 ± 0.23
C17:0	0.70 ± 0.04	0.68 ± 0.03	0.65 ± 0.04	0.71 ± 0.02	0.67 ± 0.05	0.65 ± 0.05	0.67 ± 0.04	0.62 ± 0.03	0.70 ± 0.02
C18:0	36.77 ± 1.26	34.50 ± 0.36	34.72 ± 2.02	38.61 ± 1.36	37.25 ± 1.77	33.31 ± 1.56	35.37 ± 1.66	34.28 ± 2.08	36.36 ± 1.99
cC18:1	297.62 ± 10.25	280.50 ± 0.33	275.14 ± 6.98	298.85 ± 8.56	276.66 ± 9.32	257.30 ± 7.69	285.53 ± 8.00	253.30 ± 9.00	279.76 ± 6.78
tC18:1	-	-	-	-	-	-	-	-	1.65 ± 0.20 **
cC18:2	80.82 ± 2.36	75.97 ± 3.26	77.17 ± 2.69	86.61 ± 3.02	86.32 ± 3.12	95.67 ± 2.56	82.49 ± 2.69	90.54 ± 2.78	84.91 ± 3.12
tC18:2	1.46 ± 0.09	1.40 ± 0.08	1.37 ± 0.02	1.61 ± 0.08	1.49 ± 0.06	1.56 ± 0.09	1.57 ± 0.05	2.02 ± 0.03 *	2.62 ± 0.04 **
cC18:3	3.07 ± 1.23	2.99 ± 1.26	3.05 ± 0.98	3.32 ± 0.86	3.81 ± 0.65	5.47 ± 0.77	3.42 ± 0.60	4.70 ± 0.53	4.01 ± 0.69
tC18:3	-	-	-	-	-	0.75 ± 0.02 **	0.57 ± 0.03	0.78 ± 0.05 *	0.79 ± 0.06 *
C20:0	1.34 ± 0.09	1.29 ± 0.04	1.27 ± 0.06	1.39 ± 0.10	1.30 ± 0.21	1.26 ± 0.13	3.35 ± 0.15	4.24 ± 0.23	2.92 ± 0.10
C20:4	1.67 ± 0.10	1.64 ± 0.09	2.10 ± 0.12 *	1.28 ± 0.09	1.18 ± 0.15	1.27 ± 0.08	1.97 ± 0.12	2.08 ± 0.09	1.82 ± 0.05
TFA	1.46 ± 0.09	1.40 ± 0.08	1.37 ± 0.02	1.61 ± 0.08	1.49 ± 0.06	2.31 ± 0.10 *	2.14 ± 0.05	2.80 ± 0.12 *	5.06 ± 0.19 **

注:将不同温度下鸡柳反式脂肪酸含量分别做显著性分析。*表示差异显著($p < 0.05$), **表示差异极显著($p < 0.01$)。

表4 170 °C 油炸过程中鸡柳脂肪酸的含量随时间的变化(mg/g)

Table 4 The content of FA in chicken fillet with the length of frying time under 70 °C (mg/g)

脂肪酸组成	炸制时间 (min)			
	0	3	7	11
C12:0	0.66 ± 0.01	1.84 ± 0.02	1.85 ± 0.01	1.72 ± 0.04 **
C14:0	3.63 ± 0.02	9.32 ± 0.02	9.18 ± 0.01	8.73 ± 0.16 **
C15:0	-	0.44 ± 0.01	0.44 ± 0.01	0.33 ± 0.01 **
C16:0	166.37 ± 6.77	435.05 ± 2.99	426.95 ± 2.97	410.45 ± 4.67 **
C16:1	19.02 ± 1.21	5.21 ± 0.90	3.08 ± 1.20	4.54 ± 0.98 **
C18:0	33.79 ± 0.78	39.37 ± 0.92	37.34 ± 1.45	38.39 ± 2.78 **
C18:1	204.99 ± 9.69	323.06 ± 10.23	314.64 ± 12.03	311.10 ± 5.89 **
C20:0	0.38 ± 0.01	1.13 ± 0.01	1.17 ± 0.02	1.11 ± 0.04 **
tC18:2	-	1.50 ± 0.01	1.61 ± 0.05	1.61 ± 0.06 **
tC18:3	-	-	0.21 ± 0.01	0.53 ± 0.01 **
TFA	-	1.5 ± 0.07	1.82 ± 0.08	2.15 ± 0.05 **
cC18:2	127.04 ± 2.34	81.34 ± 0.92	84.34 ± 2.98	90.47 ± 1.21 **
cC18:3	7.76 ± 0.09	2.60 ± 0.02	3.09 ± 0.05	3.30 ± 0.05 **
C20:4	5.13 ± 0.12	1.19 ± 0.08	0.81 ± 0.05	2.63 ± 0.08 **

注:将油炸 0 min 和 11 min 的鸡柳脂肪酸组成分别做显著性分析,*表示差异显著($p < 0.05$), **表示差异极显著($p < 0.01$)。

下降,C20:4、C16:1、9c12c C18:2、9c12c15c C18:3的含量分别下降了48.73%、76.13%、28.79%、57.47%。另外,随着不饱和脂肪酸转变成更多的饱和脂肪酸,反式脂肪酸的生成也逐步增加,生鸡柳中不含有任何形式的反式脂肪酸,经历3 min油炸之后的鸡柳检测出含有反式亚油酸,7 min后检测出含有反式亚麻酸。在3 min时TFA含量为1.5 mg/g,炸制11 min时,TFA的含量增大到2.15 mg/g,炸制鸡柳中总TFA的含量随着炸制时间的增加呈现增长的趋势。综上所述,鸡柳在油炸过程中脂肪酸的变化是受油炸温度、油炸油使用时间以及炸制时间共同影响。

2.3 油炸过程中棕榈油和鸡柳脂肪酸的相互影响

进行油炸时,食品表面所含有的水分逐渐蒸发减少,食品所含的水分由中心向表面扩散,另外油炸

用的食用油从外向内逐步取代失去的水分,从而使食品中的含水量下降,含油量上升^[23]。一般油炸方便面的吸油率可高达18%~20%,薯条、薯片、油条、油饼及玉米饼中的吸油率甚至可达到35%~50%^[24]。实验测得生鸡柳脂肪提取率为0.29%,在170 °C分别炸制3、7、11 min后,鸡柳中脂肪提取率分别达到2.46%、5.45%、8.06%,可以看出随着炸制时间的延长,鸡柳中的水分不断蒸发,吸油率不断上升,其中,炸制时间为11 min时的鸡柳脂肪提取率比生鸡柳增加了26.79倍。由此可见,油炸食品在油炸过程会大量吸收油炸油,脂肪含量显著上升,并且油炸时间越长其吸收油脂的量就越多。

由图3可以看出,150 °C炸制10 min(第一批)的鸡柳脂肪酸组成更接近相同条件下的棕榈油的脂

脂肪酸组成,而与生鸡柳的脂肪酸组成有很大差异。在油炸鸡柳中检测出 C12:0 和 C15:0,而生鸡柳中不存在这两种脂肪酸,与生鸡柳相比,炸鸡柳中 C14:0、C16:0、C17:0、C18:1、C20:0 的含量都显著增大。这些都进一步说明油炸过程中鸡柳会吸收一定量的油炸油,并且通过油脂的交换,油炸油会影响油炸食品中脂肪酸组成和含量。生鸡柳中肉豆蔻脑酸、顺式亚油酸和顺式亚麻酸的含量分别为 37.78、193.31 和 14.86 mg/g,而在 150℃ 油炸 10 min 后(第一批)炸鸡柳中这三种脂肪酸的含量下降分别为 19.0、80.82 和 3.07 mg/g,下降百分率分别高达 49.7%、58.2% 和 79.3%。由此可以推测出鸡柳中浓度较高的脂肪酸在油炸过程中也会释放到棕榈油中。综上可知在油炸过程中油炸食品与油炸油中存在脂肪酸的互换,油炸食品会吸收油炸油的同时会将自身含量较高的脂肪酸释放到油炸油中。

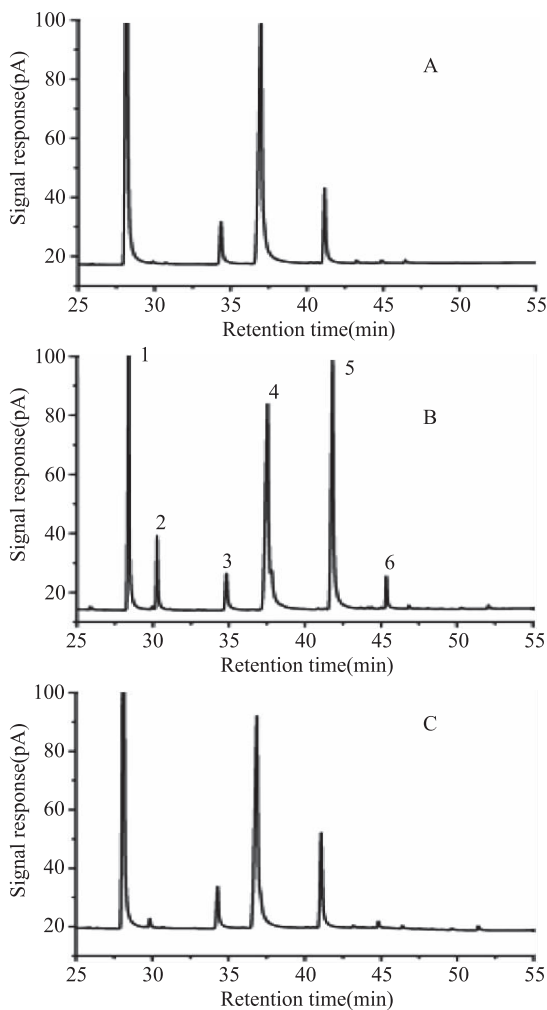


图3 (A)棕榈油(B)生鸡柳(C)油炸鸡柳
(150℃油炸10min)的色谱图

Fig.3 Chromatogram of (A) fried palm oil (B) fresh chicken fillets and (C) fried chicken fillets under 150℃ frying 10 min

注:1:C16:0,2:C16:1,3:C18:0,

4:cis C18:1,5:cis C18:2,6:cis C18:3。

3 结论

油炸过程中,油炸油与油炸食品的脂肪酸组成

变化相一致:顺式亚油酸和亚麻酸的含量随着温度的升高及时间的延长而下降,相对应的反式亚油酸含量增加,新生成反式亚麻酸,并且顺式脂肪酸的减少速率和反式脂肪酸的增加速率与温度及时间成正相关。在油炸过程中油炸食品与油炸油之间存在脂肪酸的转移,油炸食品会吸收油炸油,油炸食品中含量高的脂肪酸也会释放到油炸油中。另外油炸油的脂肪酸组成会对影响油炸油的氧化稳定性,其中,酸价与过氧化值的变化主要与油炸油中的多不饱和脂肪酸有关,尤其是含量较高的亚油酸和亚麻酸。

本实验未对油炸油脂脂肪酸组成是否影响油炸食品的氧化稳定性进行探讨研究,在下一步的实验中可以对这块内容进行研究。另外,本次实验所选的油炸食品是本身含有脂肪酸的鸡柳,对于本身不含脂肪酸或脂肪含量较少且富含水分的食品比如蔬菜,这些食品在油炸过程中与油炸油脂脂肪酸组成的相互影响以及对油炸油氧化稳定性的影响有待下一步研究。

参考文献

- [1] Aladedunye FA, Przybylski R. Degradation and nutritional quality changes of oil during frying [J]. Journal of Oil and fat Industries, 2009, 86(2): 149-156.
- [2] Sebedio JL, Catte M, Boudier MA, et al. Formation of fatty acid geometrical isomers and of cyclic fatty acid monomers during the finish frying of frozen prefried potatoes [J]. Food Research International, 1996, 29(95): 109-116.
- [3] 刘志皋. 食品营养学[M]. 第2版. 中国轻工业出版社, 2006.
- [4] 章海凤, 周晓燕, 李辉, 等. 3种食用油在油条煎炸过程中的品质变化比较[J]. 食品科学, 2013, 34(22): 160-164.
- [5] Inbaraj BS. Formation of trans fatty acids in chicken legs during frying [J]. International Journal of Food Sciences and Nutrition, 2008, 59(5): 368-382.
- [6] Romero A, Cuesta C, Sánchez - Muniz FJ. Trans fatty acid production in deep fat frying of frozen food with different oils and frying modalities [J]. Nutrition Research, 2000, 20(4): 599-608.
- [7] Bansal G, Zhou W, Tan TW, et al. Analysis of trans fatty acids in deep frying oils by three different approaches [J]. Food Chemistry, 2009, 116(2): 535-541.
- [8] 高海军, 郭静, 李勇, 等. 我国主要食用植物油中反式脂肪酸的研究[J]. 中国油脂, 2012, 37(3): 1-5.
- [9] 伍新龄, 王凤玲, 关文强. 不同加热温度对食用植物油脂肪酸成分的影响[J]. 安徽农业科学, 2014(27): 9522-9524.
- [10] 卫璐琦, 刘彪, 张雅玮, 等. 油炸与油炸食品中的反式脂肪酸产生、危害及消减[J]. 肉类研究, 2014(7): 32-37.
- [11] Kim SH, Chunawala L, Linde R, et al. Comparison of the 1997 and 2003 American Diabetes Association classification of impaired fasting glucose—impact on prevalence of impaired fasting glucose, coronary heart disease risk factors, and coronary heart disease in a community-based medical practice. The Journal of the American College of Cardiology, 2006(48): 293-297.

(下转第64页)

characteristics of protein hydrolysates from capelin (*Mallotus villosus*) [J]. Food Chemistry, 1995, 53(3): 285-293.

[21] Ktari N, Fakhfakh N, Balti R, et al. Effect of degree of hydrolysis and protease type on the antioxidant activity of protein hydrolysates from cuttlefish (*Sepia officinalis*) by-products [J]. Journal of Aquatic Food Product Technology, 2013, 22(5): 436-448.

[22] Elias R J, Kellerby S S, Decker E A. Antioxidant activity of proteins and peptides [J]. Critical Reviews of Food Science and Nutrition, 2008, 48: 430-441.

[23] Guo H, Kouzuma Y, Yonekura M. Structures and properties of antioxidative peptides derived from royal jelly protein [J]. Food Chemistry, 2009, 113: 238-245.

[24] Hernández L B, Dávalos A, Bartolomé B, et al. Preparation of antioxidant enzymatic hydrolysates from α -lactalbumin and β -lactoglobulin. Identification of active peptides by HPLC-MS/MS [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2005, 53(3): 588-593.

[25] Segura-Campos M, Ruiz-Ruiz J, Chel-Guerrero L, et al. Antioxidant activity of *Vigna unguiculata* L. walp and hard-to-cook *Phaseolus vulgaris* L. protein hydrolysates [J]. CyTA - Journal of Food, 2013, 11(3): 208-215.

[26] Saito K, Jin D H, Ogawa T, et al. Antioxidative properties of tripeptide libraries prepared by the combinatorial chemistry [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2003, 51(12): 3668-3674.

[27] 张翀. 大黄鱼蛋白源抗氧化肽的制备、性质及抗氧化机理研究 [D]. 福州: 福建农林大学, 2016.

[28] 张荣华. 猪皮胶原蛋白酶解物的抗氧化特性研究 [D]. 雅安: 四川农业大学, 2012.

[29] Bougatef A, Nedjar-Arroume N, Manni L, et al. Purification and identification of novel antioxidant peptides from enzymatic hydrolysates of sardinelle (*Sardinella aurita*) by-products proteins [J]. Food Chemistry, 2010, 118(3): 559-565.

(上接第 57 页)

[12] 杨滢, 陈奕, 张志芳, 等. 油炸过程中 3 种植物油脂脂肪酸组分含量及品质的变化 [J]. 食品科学, 2012, 33(23): 36-41.

[13] American oil Chemists' Society. AOCS Official Method Ce 2-66-1997. Preparation of methyl ester of fatty acids [S].

[14] American oil Chemists' Society. AOCS Official Method Ce 1h-05-2005. Determination of cis-, trans-, saturated, monounsaturated and polyunsaturated fatty acids in vegetable or non-ruminant animal oils and fats by capillary GLC [S].

[15] 中国国家标准化管理委员会. GB 5009.229-2016 食品中酸价的测定 [S].

[16] 中国国家标准化管理委员会. GB 5009.227-2016 食品中过氧化值的测定 [S].

[17] Hou J C, Wang F, Wang Y T, et al. Assessment of trans fatty acids in edible oils in China [J]. Food Control, 2012(25): 211-215.

[18] Aniołowska M, Kita A. The effect of frying on glycidyl esters content in palm oil [J]. Food Chemistry, 2016, 203: 95-103.

[30] Wang X, Zheng X, Kopparapu N, et al. Purification and evaluation of a novel antioxidant peptide from corn protein hydrolysate [J]. Process Biochemistry, 2014, 49(9): 1562-1569.

[31] Samak G, Shenoy R P, Manjunatha S M, et al. Superoxide and hydroxyl radical scavenging actions of botanical extracts of *Wagatea spicata* [J]. Food Chemistry, 2009, 115(2): 631-634.

[32] Wang B, Li L, Chi C F, et al. Purification and characterisation of a novel antioxidant peptide derived from blue mussel (*Mytilus edulis*) protein hydrolysate [J]. Food Chemistry, 2013, 138(2): 1713-1719.

[33] Cheung I W Y, Cheung L K Y, Tan N Y, et al. The role of molecular size in antioxidant activity of peptide fractions from Pacific hake (*Merluccius productus*) hydrolysates [J]. Food Chemistry, 2012, 134(3): 1297-1306.

[34] Gordon M. Antioxidant in food [M]. New York: CRC Press, 2001: 7-21.

[35] Ajibola C F, Fashakin J B, Fagbemi T N, et al. Effect of peptide size on antioxidant properties of African yam bean seed (*Sphenostylis stenocarpa*) protein hydrolysate fractions [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2011, 12(10): 6685-6702.

[36] 吴金鸿. 丝胶肽的制备及其生物活性功能和结构的研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2008.

[37] Saiga A I, Tanabe S, Nishimura T. Antioxidant activity of peptides obtained from porcine myofibrillar proteins by protease treatment [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2003, 51(12): 3661-3667.

[38] Jayaprakasha G K, Singh R P, Sakariah K K. Antioxidant activity of grape seed (*Vitis vinifera*) extracts on peroxidation models *in vitro* [J]. Food Chemistry, 2001, 73(3): 285-290.

[39] Girgih A T, Udenigwe C C, Hasan F M, et al. Antioxidant properties of Salmon (*Salmo salar*) protein hydrolysate and peptide fractions isolated by reverse-phase HPLC [J]. Food Research International, 2013, 52(1): 315-322.

[19] Aladedunye F, Przybylski R. Frying stability of high oleic sunflower oils as affected by composition of tocopherol isomers and linoleic acid content [J]. Food Chemistry, 2013, 141(3): 2373-2378.

[20] Tsuzuki W, Nagata R, Yunoki R, et al. Cis/trans-isomerisation of triolein, trilinolein and trilinolenin induced by heat treatment [J]. Food Chemistry, 2008, 108(1): 75-80.

[21] 曹君. 不同脂肪酸结构食用油的氧化规律及其动力学研究 [D]. 南昌大学, 2015.

[22] Lee MRF, Tweed JKS, Kim EJ, et al. Beef, chicken and lamb fatty acid analysis a simplified direct bimethylation procedure using freeze-dried material [J]. Meat Science, 2012, 92(4): 863-866.

[23] 马玉婷, 侯利霞, 刘玉兰, 等. 玉米油在油条煎炸过程中的品质变化 [J]. 食品与机械, 2016(2): 16-19.

[24] 方亚峰, 周婷, 陶丽媛, 等. 食用油在持续煎炸过程中品质的变化与评价 [J]. 粮食与食品工业, 2016, 23(2): 32-34.