

高温加热对牡丹籽油脂肪酸和理化性质的影响

魏小豹¹, 韦莹莹¹, 薛璟祺², 张秀新², 邵兴锋^{1,*}

(1. 宁波大学海洋学院食品科学与工程系, 浙江 宁波 315211; 2. 中国农业科学院蔬菜花卉研究所, 北京 100081)

摘要: 通过研究牡丹籽油经不同温度(90、120、150、180、210、240 ℃)加热30 min后脂肪酸组成、含量以及理化性质的变化, 探究高温加热对牡丹籽油品质的影响。结果表明: 牡丹籽油在高温加热后会生成脂肪酸异构体、环状脂肪酸以及中、短碳链脂肪酸, 且温度越高种类越多。虽然上述高温加热后牡丹籽油各理化指标均符合食用油标准, 但是随着温度的升高, 牡丹籽油不饱和脂肪酸含量下降, 富含营养价值的 α -亚麻酸含量在温度超过180 ℃时迅速下降。可见, 在理化指标上牡丹籽油具有良好的热稳定性, 但是从营养角度其不适合用于高于180 ℃的高温煎炸等烹调方式。

关键词: 牡丹籽油; 高温加热; 脂肪酸; 理化指标

Effect of High-Temperature Heating on Fatty Acid Composition and Physicochemical Properties of Peony Seed Oil

WEI Xiaobao¹, WEI Yingying¹, XUE Jingqi², ZHANG Xiuxin², SHAO Xingfeng^{1,*}

(1. Department of Food Science and Engineering, School of Marine Sciences, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2. The Institute of Vegetables and Flowers, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to explore the effect of heating temperature on its quality, peony seed oil was heated at 90, 120, 150, 180, 210 or 240 ℃ for 30 min and changes in fatty acid composition and physicochemical properties were monitored. The results indicated that fatty acid isomers, cyclic fatty acids, and short and medium chain fatty acids were generated after heating, depending on temperature. Physicochemical indicators of peony seed oil were in line with quality standards for edible oil after high-temperature heating, but the unsaturated fatty acid content decreased with the increase of temperature; the α -linolenic acid content, making it a nutritional product, steeply declined when temperature exceeded 180 ℃. In conclusion, peony seed oil has good thermal stability with respect to physicochemical properties but from a nutritional perspective, it is not suit for frying at temperatures higher than 180 ℃.

Keywords: peony seed oil; high-temperature heating; fatty acids; physicochemical indicators

DOI:10.7506/spkx1002-6630-201803003

中图分类号: TS222.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2018)03-0015-06

引文格式:

魏小豹, 韦莹莹, 薛璟祺, 等. 高温加热对牡丹籽油脂肪酸和理化性质的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(3): 15-20.

DOI:10.7506/spkx1002-6630-201803003. <http://www.spkx.net.cn>

WEI Xiaobao, WEI Yingying, XUE Jingqi, et al. Effect of high-temperature heating on fatty acid composition and physicochemical properties of peony seed oil[J]. Food Science, 2018, 39(3): 15-20. (in Chinese with English abstract)

DOI:10.7506/spkx1002-6630-201803003. <http://www.spkx.net.cn>

牡丹 (*Paeonia*) 别名木芍药, 为芍药科 (*Paeoniaceae*) 芍药属 (*Paeonia*) 牡丹组 (*Sect. Moutan* DC) 落叶灌木, 是我国特有的植物资源, 世界各地广为种植的牡丹都起源于中国^[1-2]。‘凤丹’ (*Paeoniaostii* ‘Feng Dan’) 是牡丹野生种杨山牡丹 (*Paeoniaostii*) 的

栽培品种, 主要应用于牡丹皮和牡丹籽油的生产, 是一种很好的药食兼用植物。牡丹籽油不饱和脂肪酸含量介于80%~92%, 其中被称为“植物脑黄金”的 α -亚麻酸普遍含量在32%以上^[3], 其他常用食用油如大豆油中 α -亚麻酸仅为8.86%、菜籽油2.37%、橄榄油0.77%、茶

收稿日期: 2016-10-22

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31671903); 公益性行业(农业)科研专项(201203071);

中国农业科学院科技创新工程项目(CAAS-ASTIP-IVFCAAS)

第一作者简介: 魏小豹(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为农产品贮藏与加工。E-mail: 645243337@qq.com

*通信作者简介: 邵兴锋(1980—), 男, 教授, 博士, 研究方向为农产品贮藏保鲜与加工。E-mail: shaoxingfeng@nbu.edu.cn

油0.26%，花生油基本不含^[4]。2011年3月，牡丹籽油被卫生部列为新资源食品。牡丹籽油的研究也日益增多，目前主要集中在牡丹籽油的提取工艺和精炼技术、牡丹籽油的理化性质及脂肪酸成分分析、牡丹籽油功效方面的研究^[5-9]。作为食用油，烹调加热必不可少，温度对油脂品质的影响颇受关注。目前，高温煎炸对大豆油、茶油、花生油、棕榈油、深海鱼油调和油等食用油品质的影响已有文献报道^[10-16]，其结果显示油脂煎炸后，随着时间延长，对人体有害的反式脂肪酸含量上升，不饱和脂肪酸含量下降，奇数碳脂肪酸含量升高。目前，关于牡丹籽油高温煎炸研究仅见不同煎炸次数对其理化性质和脂肪酸的影响，且只进行了脂肪酸相对含量的定性分析^[17]。作为高端食用油，牡丹籽油一般用于家庭烹饪，很少出现长时间循环用油的情况。因此，本实验对不同温度加热处理一段时间后的牡丹籽油脂肪酸进行定性定量分析，研究牡丹籽油理化性质的变化，以揭示其热稳定性和营养品质变化，为其进一步的食品和烹调加工应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

实验使用的‘凤丹’牡丹籽来源于中国农业科学院蔬菜花卉研究所牡丹课题组，牡丹籽油是通过超临界二氧化碳萃取法萃取获得^[18-19]。具体步骤如下：牡丹籽脱壳后经液氮冷冻研磨成粉过40目筛网，将粉末置于萃取釜，设置萃取温度为45℃，出口温度为80℃，压力为300 MPa，CO₂流速为30 L/h，萃取60 min，收集牡丹籽油。

甲醇、正己烷（均为色谱纯）、三氯甲烷、乙醇、乙醚、冰醋酸、盐酸、过氧化氢、苯、硫氰酸钾、碘化钾、氯化钾、氯化亚铁、氢氧化钾、无水硫酸钠、硫代硫酸钠、可溶性淀粉、酚酞、铝粉、铁粉、三氯乙酸、2,4-二硝基苯肼、高锰酸钾（均为国产分析纯）。

1.2 仪器与设备

GC/MS-QP5050A气相色谱-质谱联用仪 日本岛津公司；Spe-ed SFE-2超临界流体萃取仪 美国ASI公司；TTL-DC II 氮吹仪 北京同泰联科技发展有限公司；3K15离心机 美国Sigma公司；UV-1600PC紫外分光光度计 上海美谱达仪器有限公司；AR1140分析天平 美国梅特勒-托利多公司；SSW-420-2S水浴锅 北京天林恒泰科技有限公司；THZ-D摇床 太仓市实验设备厂；Vortex Genius 3涡漩仪 德国IKA公司；DHG-9140电热箱 上海一恒科学仪器有限公司。

1.3 方法

1.3.1 样品的处理

牡丹籽油100 mL在不同温度下（90、120、150、180、210、240℃）加热30 min，以25℃（常温）处理为对照组。高温加热后静置并冷却至室温，于4℃保存备用。

1.3.2 脂肪酸含量的测定

脂肪酸含量测定具体步骤参照文献[20]。准确称量25 mg不同温度处理的牡丹籽油于10 mL离心管，加入3 mL三氯甲烷-甲醇溶液（1:2，V/V），4℃振荡1 h，补加1 mL三氯甲烷，加入1.8 mL 1 mol/L氯化钾溶液，2 500 r/min离心10 min。取出氯仿层，氮气吹干，加入1 mL 5%硫酸甲醇溶液，涡漩1 min，80℃水浴1 h，冷却到室温，加入1 mL去离子水终止反应。加入5 mL色谱级正己烷，摇匀，静止10 min，用微量注射器取0.1 mL上清液至1.5 mL进样瓶，加入20 μL、1 mg/mL十七烷酸甲酯正己烷溶液，加入0.88 mL正己烷，使体系为1 mL，待检测。每个处理3个重复。

色谱和质谱条件如下：色谱柱是Supelco SP-2560（100 m×0.25 mm，0.20 μm）（一种强极性氰丙基硅氧烷类色谱柱，通常用于分离脂肪酸甲酯的顺反几何异构物，对反式脂肪酸的分离非常有效）；色谱柱温度程序：100℃保持5 min，然后以4℃/min升温至240℃，保持15 min；载气为氦气（纯度≥99.999%），流速1 mL/min；进样口温度250℃，进样方式为不分流，进样量1 μL；溶剂切除时间12.5 min，检测器电压0.1 kV；气相色谱-质谱联用仪接口温度250℃。

1.3.3 理化指标的测定

酸值、过氧化值和羰基价的测定参考GB/T 5009.37—2003《食用植物油卫生标准的分析方法》^[21]。皂化值测定参考GB/T 5534—2008《动植物油脂 皂化值的测定》^[22]。碘值的测定参考GB/T 5532—2008《动植物油脂 碘值的测定》^[23]。

1.4 数据处理

根据37种脂肪酸甲酯混标来确定各脂肪酸的保留时间，以十七烷酸甲酯为内标物质进行数据分析。每一个加热温度的样品平行重复测定3次，实验结果取其平均值。采用SAS V8软件进行单因素方差分析。使用Origin 8软件作图。

2 结果与分析

2.1 脂肪酸定性定量分析及高温加热对其的影响

根据1.3.2节中的色谱条件，采用全扫描模式获得总离子流量图（图1），对各脂肪酸定性，确定其保留时间。在选择性离子检测模式下，选择质量数大并且响应高的碎片离子作为特征离子。每种脂肪酸选择1个定量离

子, 2 个参比离子。采用内标法单离子定量测定, 内标物为十七烷酸甲酯。图1标出牡丹籽油中5 种含量最高的脂肪酸以及内标物质按出峰时间依次是棕榈酸 ($C_{16:0}$)、十七烷酸 ($C_{17:0}$)、硬脂酸 ($C_{18:0}$)、油酸 ($9c-C_{18:1}$)、亚油酸 ($9c,12c-C_{18:2}$)、 α -亚麻酸 ($9c,12c,15c-C_{18:3}$)。

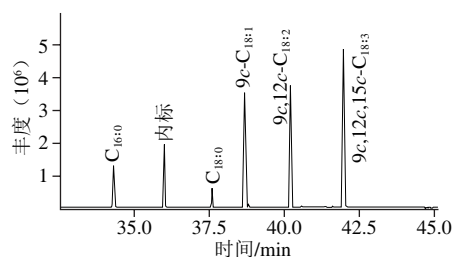


图1 牡丹籽油样品总离子流色谱图

Fig. 1 Total ion chromatograms of fatty acid methyl esters of peony seed oil

表1 不同温度加热处理对牡丹籽油脂肪酸组成成分的影响
Table 1 Effect of heating temperature on fatty acid composition of peony seed oil

脂肪酸	25 °C	90 °C	120 °C	150 °C	180 °C	210 °C	240 °C
$C_{5:0}$					0.18±0.03		0.03±0.00
$C_{7:0}$					1.29±0.16		
庚二酸						0.08±0.00	
$C_{8:0}$					0.07±0.02		0.08±0.01
壬二酸							0.03±0.01
9-羧基- $C_{9:0}$					0.10±0.00		0.11±0.00
$C_{13:0}$							0.07±0.00
$C_{14:0}$ (肉豆蔻酸)	0.07±0.00	0.21±0.06	0.09±0.01	0.04±0.01	0.11±0.01	0.06±0.01	0.04±0.00
$13c-C_{14:1}$			0.20±0.00				0.02±0.00
$C_{15:0}$							0.03±0.00
$C_{16:0}$ (棕榈酸)	8.91±1.53	8.53±1.40	6.41±0.81	5.44±0.37	5.63±0.01	4.82±0.71	4.61±0.21
$C_{16:1}$ (棕榈油酸)	0.09±0.03	0.07±0.00	0.08±0.02	0.08±0.02		0.04±0.00	0.06±0.01
环戊基- $C_{11:0}$				0.11±0.00		0.11±0.00	
15-甲基- $C_{16:0}$							0.04±0.00
2-己基环丙烷辛酸	0.06±0.02	0.06±0.04	0.41±0.63	0.04±0.00	0.07±0.01	0.06±0.00	0.03±0.00
$C_{18:0}$ (硬脂酸)	0.48±0.72	1.16±0.68	1.12±0.31	1.67±0.76	1.51±0.25	1.24±0.11	1.41±0.27
$12c-C_{18:1}$			0.21±0.00				
$9c-C_{18:1}$ (油酸)	32.65±2.88	29.27±3.72	25.25±3.00	21.68±1.01	21.13±0.48	18.15±2.30	17.96±0.70
$13c,16c-C_{18:2}$			0.44±0.00				
环戊基- $C_{13:0}$					0.05±0.00		0.25±0.00
$9c,12c-C_{18:2}$ (亚油酸)	31.05±2.16	29.10±4.23	27.41±3.72	24.09±1.35	23.87±0.91	18.69±0.60	16.84±1.69
$C_{20:0}$ (二十烷酸)	0.13±0.18	0.12±0.00		0.09±0.00			0.09±0.01
$6c,9c-C_{18:2}$				0.04±0.00			
$9c,12c,15c-C_{18:3}$ (α -亚麻酸)	38.75±1.32	38.38±4.48	37.51±3.80	34.97±3.72	34.09±2.37	23.51±1.38	21.69±2.58
$8c,11c,4c-C_{12:3}$				0.04±0.00			
TFA	112.19	106.91	99.14	88.29	87.91	66.86	63.31
UFA/TFA/%	91.4	90.5	91.9	91.6	90.0	90.3	89.4

注: $C_{5:0}$ 表示含有5个碳原子和0个碳碳双键的脂肪酸, 即戊酸, 其他以此类推; TFA.总脂肪酸; UFA.不饱和脂肪酸。

不同加热处理的牡丹籽油脂肪酸检测结果见表1, 25 °C (常温对照组) 共检出9 种脂肪酸, 含量从高到

低依次为 α -亚麻酸、油酸、亚油酸、棕榈酸、硬脂酸、二十烷酸、棕榈油酸、肉豆蔻酸、2-己基环丙烷辛酸。不饱和脂肪酸占总脂肪比例高达91.4%。其中含量最高的 α -亚麻酸含量为38.75 mg/g, 占总脂肪酸比例为34.5%。由此可见, 牡丹籽油是一种不饱和度极高且富含 α -亚麻酸的高品质食用油。

90 °C 30 min加热组的脂肪酸种类未发生变化。但随着温度的进一步升高, 除上述9 种脂肪酸, 还出现脂肪酸异构体、环状以及中、短碳链脂肪酸, 且温度越高种类越多。120 °C时产生了脂肪酸异构体 ($13c-C_{14:1}$ 、 $12c-C_{18:1}$ 、 $13c,16c-C_{18:2}$); 150 °C时产生了脂肪酸异构体 ($6c,9c-C_{18:2}$) 和环状脂肪酸 (环戊基- $C_{11:0}$); 180 °C时出现环状脂肪酸 (环戊基- $C_{13:0}$) 和中短碳链脂肪酸 ($C_{5:0}$ 、 $C_{7:0}$); 210 °C时出现环状脂肪酸 (环戊基- $C_{11:0}$), 中、短碳链脂肪酸 (庚二酸、 $C_{8:0}$) 以及羧基脂肪酸 (9-羧基- $C_{9:0}$); 240 °C时中、短碳链脂肪酸 ($C_{5:0}$ 、 $C_{8:0}$ 、9-羧基- $C_{9:0}$ 、 $C_{13:0}$) 种类数在增加, 环状脂肪酸 (环戊基- $C_{13:0}$)、异构体脂肪酸、奇数碳脂肪酸含量增加。这是因为油脂在高温加热过程中会发生一系列氧化、环化和异构化等反应, 从而生成小分子醛、酮、酸、环状物和异构体等物质, 这与前人的研究结果相同^[10,16]。不同之处在于大豆油、棕榈油、菜籽油等植物油在高温煎炸过程中产生对人体有害的反式脂肪酸^[24-25], 本实验发现在牡丹籽油高温加热后未产生反式脂肪酸。这可能是由于牡丹籽油中含有丰富的VE、儿茶素等抗氧化活性物质^[26], 在加热过程中, 抗氧化活性物质可以抑制双键的异构化反应, 从而抑制反式脂肪酸的形成^[27]。

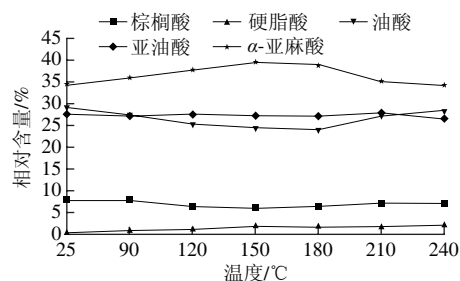


图2 不同温度处理对牡丹籽油5 种主要脂肪酸相对含量的影响
Fig. 2 Effect of heating temperature on relative contents of five fatty acids in peony seed oil

牡丹籽油中5 种主要脂肪酸相对含量分析结果见图2。在不饱和脂肪酸中, α -亚麻酸相对含量总体呈先上升后下降的趋势, 温度高于180 °C时 α -亚麻酸相对含量迅速下降。亚油酸相对含量在不同温度加热后基本维持不变。油酸相对含量出现先降低后上升的趋势, 加热到180 °C以上油酸的相对含量出现上升。在较高温度出现油酸相对含量递增, 亚油酸、 α -亚麻酸相对含量递减, 这与前人在大豆油、花生油、芝麻油的研究结果一致^[28]。

饱和脂肪酸中,硬脂酸相对含量随着温度升高而上升,棕榈酸相对含量无显著变化,是因为饱和脂肪酸稳定性高于不饱和脂肪酸,更耐煎炸。前人对于煎炸植物油脂肪酸分析多是进行相对含量的分析^[10,17],而相对含量的变化只能比较脂肪酸的相对耐煎炸度,体现不出各脂肪酸在煎炸过程中的消耗,因此有必要进行脂肪酸定量分析。

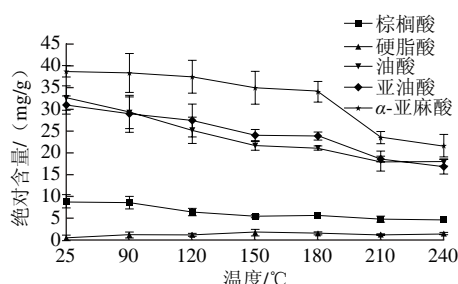


图3 不同温度处理牡丹籽油5种主要脂肪酸绝对含量的变化

Fig. 3 Absolute contents of five fatty acids in peony seed oil heated at different temperatures

脂肪酸定量分析结果见图3,在5种主要脂肪酸中,除硬脂酸含量随温度升高而上升外,其他4种脂肪酸(α-亚麻酸、油酸、亚油酸、棕榈酸)都是随着温度升高而降低。说明油脂在高温加热过程中,硬脂酸有所生成,而其他4种脂肪酸都在加热过程中有不同程度的消耗。

其中含量最高也是营养价值最高的α-亚麻酸在温度低于180 °C时,含量缓慢下降;超过180 °C时,含量显著下降。因此从营养角度来说,在日常烹饪过程中牡丹籽油温不应超过180 °C。

2.2 温度对牡丹籽油理化指标的影响

2.2.1 酸值

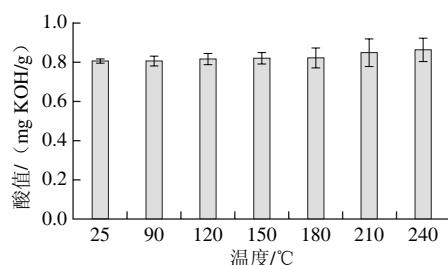


图4 不同温度处理牡丹籽油酸值的变化

Fig. 4 Effect of heating temperature on acid value of peony seed oil

酸值的高低反映油脂加热过程中发生水解反应产生游离脂肪酸的多少,是评价油脂变质的重要指标之一。由图4可知,随温度升高,酸值略有升高,说明高温作用下油脂氧化分解生成游离脂肪酸。加热过程中油脂的酸值基本保持在0.8~0.9 mg KOH/g之间,完全符合食用植物油卫生标准(酸值≤3 mg KOH/g)。

2.2.2 皂化值

皂化值可以衡量油脂的平均相对分子质量。皂化

值越小,组成甘油酯的脂肪酸分子质量越大,油脂的不饱和程度越低,其不饱和脂肪酸含量越低;油脂中甘一酯、甘二酯、不皂化物等也会降低皂化值^[29-31]。由图5可知,皂化值随加热温度的升高而显著降低($P<0.05$)。说明高温使得牡丹籽油的不饱和脂肪酸含量降低,同时产生不皂化物。

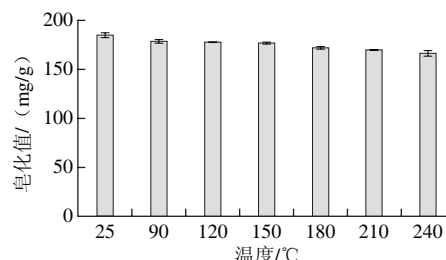


图5 不同温度处理牡丹籽油皂化值的变化

Fig. 5 Change in saponification value of peony seed oil with heating temperature

2.2.3 过氧化值

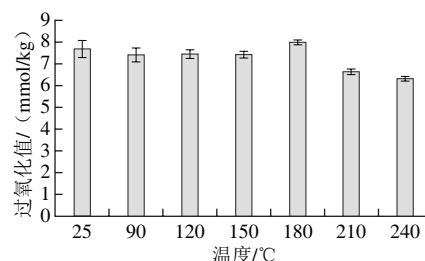


图6 不同温度处理牡丹籽油过氧化值的变化

Fig. 6 Change in peroxide value of peony seed oil with heating temperature

过氧化值是指油脂在高温加热过程中发生氧化反应生成过氧化物和氢过氧化物中间产物,这些产物容易分解生成脂肪酸、醛、酮、醇等^[16,32]。从图6中可知,温度低于180 °C时,过氧化值有所上升,高于180 °C时,过氧化值有所下降。食用植物油国际标准和我国各级别食用油质量指标规定过氧化值不超过10 mmol/kg。高温加热过氧化值范围介于6~8 mmol/kg,牡丹籽油过氧化值符合规定,说明牡丹籽油是一种适合高温加热的油脂。

2.2.4 羰基价

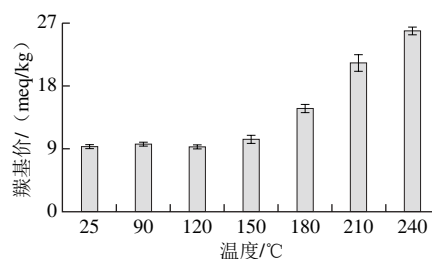


图7 不同温度处理对牡丹籽油羰基价的影响

Fig. 7 Change in carbonyl value of peony seed oil with heating temperature

高温加热过程中产生醛、酮等物质使得羰基价升高,它反映了油脂中氧化产物含量和油脂酸败裂变的程度。由图7可见,当温度低于180℃时,羰基价无显著变化;当温度高于180℃时,羰基价显著增高,原因是高温产生大量醛酮类化合物。我国食用植物油卫生标准中规定煎炸过程中羰基价小于等于50 meq/kg。加热过程中羰基价完全符合使用植物油卫生标准。

2.2.5 碘值

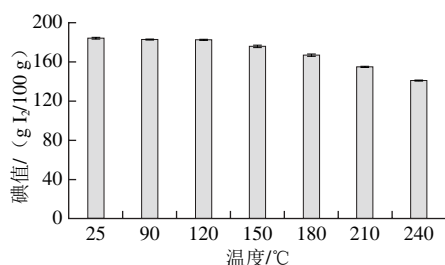


图8 不同温度处理对牡丹籽油碘值的影响

Fig. 8 Change in iodine value of peony seed oil with heating temperature

碘值是衡量油脂不饱和程度的指标,油脂的不饱和程度越高,碘值越大。牡丹籽油不饱和脂肪酸含量高,且多不饱和脂肪酸含量高^[3],因此碘值高于一般食用油。由图8可知,牡丹籽油在高温加热过程中,碘值随着温度的升高而降低。温度低于150℃时,碘值有所降低但差异不显著;当温度高于150℃时,碘值随着温度升高而显著降低。牡丹籽油在高温加热过程中,发生热聚合、氧化反应等,使得不饱和脂肪酸含量降低,从而碘值降低^[33]。同时脂肪酸测定结果表明牡丹籽油高温加热过程中脂肪酸含量下降,也使得碘值降低。即使240℃高温加热30 min,牡丹籽油碘值仍高达141.01 g I₂/100 g,远高于橄榄油(83 g I₂/100 g)和茶油(83 g I₂/100 g)等高端食用油^[34-35]。

3 结论

牡丹籽油在高温加热过程中发生了一系列的化学反应,产生少量脂肪酸异构体,环状以及中、短碳链脂肪酸,且随着温度升高产生的上述脂肪酸种类有所增加。随着加热温度升高,总脂肪酸绝对含量不断下降。在5种主要脂肪酸(棕榈酸、硬脂酸、油酸、亚油酸、 α -亚麻酸)中除硬脂酸绝对含量略有升高,其他各脂肪酸绝对含量均出现下降,当温度超过180℃时,富含营养价值的 α -亚麻酸含量显著下降。在理化性质分析中酸值和羰基价随温度的升高而升高,皂化值和碘值随温度的升高而降低,过氧化值先上升后下降,各项指标均符合植物油卫生标准。虽然各项指标都符合国家标准,但考虑牡丹籽油的营养特点,在使用牡丹籽油时不宜超过180℃。

参考文献:

- [1] 成仿云. 中国紫斑牡丹[M]. 北京: 中国林业出版社, 2005: 8-11.
- [2] 王莲英, 袁涛. 中国牡丹品种图志(续志)[M]. 北京: 中国林业出版社, 2015: 105.
- [3] 朱献标, 翟文婷, 董秀勋, 等. 牡丹籽油化学成分及功能研究进展[J]. 中国油脂, 2014, 39(1): 88-91.
- [4] 陈景震, 李培旺, 张良波, 等. 湖南油用牡丹籽油的理化性质及脂肪酸组分分析[J]. 经济林研究, 2015, 33(4): 119-122. DOI:10.14067/j.cnki.1003-8981.2015.04.022.
- [5] 白喜婷, 朱文学, 罗磊, 等. 牡丹籽油的精炼及理化特性变化分析[J]. 食品科学, 2008, 29(8): 351-354. DOI:10.3321/j.issn:1002-6630.2008.08.078.
- [6] 毛程鑫, 李桂华, 李普选, 等. 牡丹籽油的脂肪酸组成及理化特性分析[J]. 现代食品科技, 2014, 30(4): 142-146. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2014.04.008.
- [7] 周海梅, 马锦琦, 苗春雨, 等. 牡丹籽油的理化指标和脂肪酸成分分析[J]. 中国油脂, 2009, 34(7): 72-74. DOI:10.3321/j.issn:1003-7969.2009.07.022.
- [8] 翟文婷, 朱献标, 李艳丽, 等. 牡丹籽油成分分析及其抗氧化活性研究[J]. 烟台大学学报(自然科学与工程版), 2013, 26(2): 147-150. DOI:10.13951/j.cnki.37-1213/n.2013.02.009.
- [9] 韩雪源. 牡丹籽油脂肪酸及其他功能成分分析[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015: 17-25.
- [10] 夏季亮, 陈汀汀, 吴晶. 煎炸时间与煎炸温度对花生油脂肪酸组成的影响[J]. 中国油脂, 2013, 38(7): 76-81. DOI:10.3969/j.issn.1003-7969.2013.07.020.
- [11] 季敏, 吴文民. 棕榈油和大豆油在油条煎炸过程中品质变化研究[J]. 粮食与油脂, 2009(4): 12-14. DOI:10.3969/j.issn.1008-9578.2009.04.005.
- [12] 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: 18-19.
- [13] 陈琦. 深海鱼油调和油煎炸食物时脂肪酸和相关食用油品质 and 安全性参数的动态变化研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013: 21-25.
- [14] 陈锋亮, 魏益民, 钟耕. 大豆油高温煎炸质变过程的研究[J]. 中国油脂, 2006, 31(8): 19-22. DOI:10.3321/j.issn:1003-7969.2006.08.006.
- [15] 黄永辉, 郑小严, 黄红霞, 等. 煎炸对茶油品质指标及挥发组分的影响[J]. 食品与机械, 2007, 23(6): 83-86; 89. DOI:10.13652/j.issn.1003-5788.2007.06.021.
- [16] 张清. 大豆油在不同煎炸体系中的特征理化性质的变化研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014: 40-48.
- [17] 吴震生, 侯昌, 胡晓丽, 等. 高温煎炸对于牡丹籽油品质变化的影响[J]. 中国食物与营养, 2015, 21(3): 39-40. DOI:10.3969/j.issn.1006-9577.2015.03.011.
- [18] 史国安, 郭香凤, 金宝磊, 等. 牡丹籽油超临界CO₂萃取工艺优化及抗氧化活性的研究[J]. 中国粮油学报, 2013, 28(4): 47-50; 107. DOI:10.3969/j.issn.1003-0174.2013.04.010.
- [19] BELAYNEH H D, WEHLING R L, CAHOON E, et al. Extraction of omega-3-rich oil from *Camelina sativa* seed using supercritical carbon dioxide[J]. Journal of Supercritical Fluids, 2015, 104: 153-159. DOI:10.1016/j.supflu.2015.06.002.
- [20] LI S S, YUAN R Y, CHEN L G, et al. Systematic qualitative and quantitative assessment of fatty acids in the seeds of 60 tree peony (*Paeonia section Moutan* DC.) cultivars by GC-MS[J]. Food Chemistry, 2015, 173(15): 133-140. DOI:10.1016/j.foodchem.2014.10.017.
- [21] 卫生部. 食用植物油卫生标准的分析方法: GB/T 5009.37—2003[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003: 304-312.
- [22] 国家质量监督检验检疫总局. 动植物油脂皂化值的测定: GB/T 5534—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008: 1-5.

- [23] 国家质量监督检验检疫总局. 动植物油脂 碘值的测定: GB/T 5532—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008: 1-6.
- [24] 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. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201305028.
- [25] TSUZUKI W, MATSUOKA A, USHIDA K. Formation of trans fatty acids in edible oils during the frying and heating process[J]. Food Chemistry, 2010, 123(4): 976-982. DOI:10.1016/j.foodchem.2010.05.048.
- [26] 韩雪源. 牡丹籽油脂肪酸及其他功能成分分析[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015: 24-26.
- [27] 杨美艳. 食用油热加工过程中反式脂肪酸的形成与控制[D]. 南昌: 南昌大学, 2012: 89-97.
- [28] 王同珍, 余林, 邱思聪, 等. 煎炸时间对植物油脂中脂肪酸含量的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2014, 5(2): 577-585.
- [29] 陈少东, 陈福北, 杨帮乐, 等. 几种食用油中不饱和脂肪酸和皂化值的测定研究[J]. 化工技术与开发, 2011, 23(10): 53-55. DOI:10.3969/j.issn.1671-9905.2011.10.014.
- [30] 李阳. 茶油煎炸条件下品质变化规律的研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2009: 14.
- [31] 陈双莉, 张清清, 江元汝. 食用油的碘值、酸值、皂化值的测定及健康评价[J]. 辽宁化工, 2011, 40(5): 529-531; 537. DOI:10.3969/j.issn.1004-0935.2011.05.034.
- [32] 穆昭. 煎炸油加热过程品质变化与评价[D]. 无锡: 江南大学, 2008: 1-2; 16.
- [33] 朱圣陶, 江伟威, 杨秀鸿, 等. 碘价在煎炸油卫生质量控制中应用探讨[J]. 中国公共卫生, 2000, 16(8): 62. DOI:10.3321/j.issn:1001-0580.2000.08.033.
- [34] 周晓丹, 王妍, 刘晶, 等. 橄榄油、葵花籽油和米糠油的氧化稳定性[J]. 食品科学, 2011, 32(13): 119-121.
- [35] 刘燕德, 谢庆华. 山茶油品质检测方法现状研究[J]. 食品工业, 2016, 37(6): 253-257.