

传统熏鱼中反式脂肪酸的形成机理及控制措施

王园, 惠腾, 赵亚楠, 刘彪, 张露, 石金明, 芮露明, 郭秀云
(南京农业大学食品科技学院, 江苏 南京 210095)

摘要: 传统熏鱼常采用油炸方式进行加工, 油炸是反式脂肪酸的形成途径之一。本文介绍了反式脂肪酸的危害, 讨论了传统熏鱼油炸工艺对反式脂肪酸形成的影响, 及控制熏鱼油炸过程中反式脂肪酸形成的相应措施, 最后介绍了非油炸的熏鱼绿色制造新技术。利用该技术可替代传统油炸工艺, 实现产品的工业化安全化生产。

关键词: 熏鱼; 油炸; 反式脂肪酸; 绿色制造技术

Formation Mechanism and Countermeasures of Trans Fatty Acids in Traditional Smoked Fish

WANG Yuan, HUI Teng, ZHAO Ya-nan, LIU Biao, ZHANG Lu, SHI Jin-ming, RUI Lu-ming, GUO Xiu-yun
(College of Food Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: Frying is commonly used for the production of smoked fish. However it partially contributes to the formation of trans fatty acids in traditional smoked fish. This paper describes health hazards of trans fatty acids and explore the effect of the frying process on the formation of trans fatty acids as well as countermeasures. At last, a green manufacture technology for non-fried smoked fish is presented as a promising alternative to the traditional frying process for industrial and safe production of smoked fish.

Key words: fried fish; frying; trans fatty acids; green manufacturing technology

中图分类号: TS254

文献标志码: A

文章编号: 1001-8123(2013)05-0040-05

熏鱼(油爆鱼), 主要产自江苏、上海、浙江一带, 由于其独特的风味和色泽深受广大消费者的喜爱, 它的制作工艺简便, 色、香、味俱佳, 是一种较高档的水产熟食。熏鱼加工需经过腌制、油炸、调味等工序, 且多年来未曾得到改进。许多商贩为了节约成本, 常常将油反复加热使用, 不仅使油脂品质严重劣化, 而且增加了油脂中有害物质的含量, 有研究表明深度油炸是反式脂肪酸的来源之一^[1-3]。反式脂肪酸在天然食物中的含量

很低, 食品中的反式脂肪酸主要来源食用油脂的氢化加工, 另外油脂的精炼脱臭过程也可产生反式脂肪酸。油脂种类以及不恰当的油炸方式是油炸食品中反式脂肪酸产生的重要原因。鱼肉在油炸过程中, 随着煎炸油的重复使用时间的延长, 鱼肉脂质中反式脂肪酸的含量明显升高, 产生的反式脂肪酸总量可高达130mg/100g以上。表1为不同品牌熏鱼中的反式脂肪酸含量。

1 反式脂肪酸的危害

反式脂肪酸是一类含有一个或多个反式非共轭双键的不饱和脂肪酸, 其空间构象呈线性^[4]。反式脂肪酸常温下比不饱和脂肪酸更稳定, 不易使油脂发生氧化变质, 然而代谢研究表明反式脂肪酸的高摄入量伴有许多副作用。

1.1 反式脂肪酸与心血管系统

膳食饱和脂肪酸和反式脂肪酸与增加心血管疾病的风险有关。短期暴露在高饱和脂肪酸和反式脂肪酸的饮食中, 可上调参与脂质和脂蛋白代谢的关键基因的表达。反式脂肪酸的摄入量和高胆固醇血症、高甘油三酯血症有着显著的关系^[5]。Yu等^[6]调查了中国人的反式

表1 不同品牌熏鱼中反式脂肪酸含量

Table 1 Trans fatty acids content in different brands of commercial smoked fish

TFAs	含量/(mg/100g)				
	品牌A熏鱼	品牌B熏鱼	品牌C熏鱼	品牌D熏鱼	品牌E熏鱼
9rC _{14:1}	ND	ND	ND	ND	ND
9rC _{16:1}	ND	8.61±1.60	ND	2.85±0.04	ND
9rC _{18:1}	81.28±5.78	92.93±0.73	102.05±0.16	50.54±5.05	4.80±1.39
11rC _{18:1}	ND	ND	ND	ND	ND
9r,12rC _{18:2}	1.41±0.14	29.42±1.75	ND	ND	ND
11rC _{20:1}	ND	ND	ND	ND	ND
13rC _{22:1}	10.37±0.92	ND	6.52±0.38	ND	ND
总量	93.06	130.96	108.57	53.39	4.80

注: 数值表示为“平均值±标准差”(n=3); ND. 表示未检出。

收稿日期: 2013-03-12

作者简介: 王园(1990—), 女, 硕士研究生, 研究方向为肉品加工与质量控制。E-mail: 2011108034@njau.edu.cn

脂肪酸摄入与患II型糖尿病和心血管疾病的危险因素的关系,在超过3000人的调查中发现,当膳食中反亚油酸 $tC_{18:2}$ 的含量较高时,血脂代谢异常的风险较高,其膳食中 $tC_{18:2}$ 来源于部分氢化的油脂或者油炸期间亚油酸的转化。此外,反式脂肪酸对炎症有一定促进作用。 $9tC_{18:1}$ 和 $tC_{18:2,n-6}$ 能有效结合于血管内皮细胞的磷脂中,通过促进ICAM-1抗体的表达而诱导促炎症反应^[7]。由于炎症是动脉粥样化、心脏病以及糖尿病的一个独立风险因子,其致炎作用也可以部分的解释其对心血管健康的影响。

长期摄入含反式脂肪酸的食品可能导致肥胖。长期灵长类动物模型的研究表明反式脂肪酸可能比顺式单不饱和脂肪酸有较大的成脂效果,反式脂肪酸摄入量增加可能会导致体重额外增加。采用病例对照设计,对100例已知有冠心病和91名健康对照者(年龄 <60 岁)进行调查,结果表明每日反式脂肪酸摄入量与患冠心病的风险呈显著正相关,其中反式脂肪酸摄入的主要来源有快餐食品、肉类和奶制品^[8]。总之,过多的反式脂肪酸摄入会导致心血管疾病的发生和发展。

1.2 反式脂肪酸与生殖发育

反式脂肪酸可能会干扰必需脂肪酸代谢对生长和发育产生不利影响。胎儿体质量与怀孕早期母体血浆磷脂中 $tC_{18:1}$ 浓度呈显著的负相关^[9]。对排卵性不孕风险因素的罗吉斯回归分析,发现总脂肪、胆固醇、多数类型的脂肪酸与其无关,而反式脂肪能量的摄入量每增加2%,排卵性不孕的机率增加73%。当反式不饱和脂肪取代碳水化合物或者常见非氢化植物油中的不饱和脂肪时,可能会增加排卵性不孕的风险^[10]。对于参与不孕不育诊疗的男性精液样本中精子脂肪酸组成的气相色谱分析发现,反式脂肪酸存在于人类精子中,并且与精子浓度负相关^[11]。综上所述,反式脂肪酸不仅对胎儿的生长发育有抑制作用,而且与不孕不育有一定的相关性。

1.3 反式脂肪酸与糖尿病

一些人体和动物研究表明反式脂肪酸的摄入量可能与胰岛素的抵抗和II型糖尿病有关。II型糖尿病占糖尿病流行病例的90%~95%,该病的特点是由于胰腺 β 细胞功能受损胰岛素抗性和胰岛素相对缺乏。Angelieri等^[12]的研究表明反式脂肪摄入量会削弱胰岛素的敏感性,其推测原因可能是反式脂肪主要通过改变胰岛素受体底物的细胞内激酶干扰胰岛素信号。Axen等^[13]调查了高反式脂肪酸摄入量对大鼠代谢综合症发展的影响,发现喂食高脂肪食物的大鼠(17%的能量来自于TFAs)与低脂肪饮食的大鼠(不含TFAs)相比,喂食9周后大鼠的葡萄糖耐量和胰岛素抗性受损。Salmeron等^[14]在护士健康研究中调查了膳食脂肪摄入和患II型糖尿病的风险相关性,这项研究发现反式脂肪酸提供的能量消耗增加2%,患II型糖尿病的风险相关性是1.39,当2%的能量来自于多不饱和脂肪酸时,风险下降40%。

1.4 反式脂肪酸与癌症

不同反式异构体对不同病症,包括癌症的生理和代谢的影响不同。动物模型研究表明当老鼠消耗的饮食由5%反油酸组成(5%橄榄油对照)艾氏腹水瘤小鼠的生存时间减少23%~45%^[15]。对氧化偶氮甲烷诱发的小鼠结肠肿瘤的影响研究表明反油酸取代等能量的油酸的对照试验,导致高2倍的癌症发病率^[16]。原因可能是 $tC_{18:1}$ 喂养的老鼠营养状况被破坏,对小鼠的生存产生不利影响。

欧洲抗心肌梗塞和乳腺癌自然生态研究学会测量690名受试者脂肪组织切片中总反式脂肪酸的含量,发现反式脂肪酸含量与其中男性患前列腺癌风险呈正相关。该学会也观察到了反式脂肪酸水平与结肠癌和绝经后乳腺癌的风险之间呈正相关。在一项巢式病例对照研究中,发现血清中 $tC_{18:1,n-11}$, $tC_{18:2,n-6}$ 均与前列腺癌的风险显著相关^[17]。目前为止,关于反式脂肪酸可能增加患癌风险的机制尚未明确。可能通过以下途径实现:反式脂肪酸结合到磷脂细胞膜中,使膜组成成分发生变化,导致膜的相关功能发生变化;膳食反式脂肪酸纳入到磷脂双层后诱导细胞结构的变化使其功能发生改变。

2 传统熏鱼油炸工艺对反式脂肪酸形成的影响

油炸是熏鱼加工的必备工序,是一个十分复杂而又非常重要的操作单元。在油炸过程中,油脂和食品之间的相互作用,使食品和油脂的理化特性、感官特性都发生明显变化。传统油炸加工通常是在一段时间内连续反复油炸,在此期间,油脂暴露于光、高温以及大气中,导致油脂发生一系列的变化,包括油脂的热分解和氧化等复杂反应^[18],严重影响油脂的品质,对人体健康造成危害。

2.1 油脂种类对反式脂肪酸形成的影响

油料中一般不含反式脂肪酸,但油料在生产加工(氢化和精炼)成食用油过程中将可能生成反式脂肪酸。油脂氢化是指在镍等催化剂作用下,将氢加到不饱和脂肪酸的双键处,导致部分油脂的不饱和双键发生异构化,生成反式脂肪酸。不同氢化油中反式脂肪酸含量波动很大,一般占油脂含量的10%左右。氢化油脂加工的食品如炸鸡、薯条等受到人们的喜爱,却含有相当数量的反式脂肪酸。在油脂精炼过程中,为了去除影响油色泽、味道和香气的杂质和油脂本身存在的游离脂肪酸、磷脂、碳水化合物、蛋白质以及其降解副产品^[19],油脂需要进行除臭。除臭时油脂需要在180~270℃加热,在此期间导致反式脂肪酸的形成,通常会形成3%~6%的反式异构体^[20-21]。

不同油脂中反式脂肪酸含量种类均不相同。宋志国等^[22]采用毛细管气相色谱法测定精炼和氢化大豆油

中反式脂肪酸, 结果表明精炼大豆油中以 $9c, 12t-C_{18:2}$ 、 $9t, 12c-C_{18:2}$ 、 $9c, 12c, 15t-C_{18:3}$ 、 $9t, 12c, 15c-C_{18:3}$ 为主, 占总脂肪酸含量的3.45%, 氢化大豆油中以 $9t-C_{18:1}$ 、 $10t-C_{18:1}$ 、 $11t-C_{18:1}$ 三种形式为主, 占总脂肪酸含量的38.73%。棕榈油中主要的反式脂肪酸是反亚油酸、反亚麻酸, 而葵花籽油中没有反亚麻酸, 两种植物油中均未检测到反油酸^[4]。

形成反式异构体的量与植物油的种类有关。反式脂肪酸含量随温度变化会因食用油种类不同而不同。油炸时, 葵花籽油、大豆油比花生油、菜籽油、玉米油受温度的影响大。在高温加热时, 葵花籽油、大豆油、玉米油的变化速率大于花生油和菜籽油^[23]。对比油炸薯条时棕榈油、调和油、葵花籽油中反式脂肪酸的变化, 在40次循环油炸结束后, 反油酸含量为调和油>葵花籽油>棕榈油, 使用调和油油炸的薯条中反油酸含量最高^[3]。

食物中发现的绝大多数反式脂肪酸来源于所用的油, 而并非其自身产生。Francisco等^[24]研究了使用橄榄油、葵花籽油、猪油油炸沙丁鱼时, 沙丁鱼和烹调油中脂肪酸的变化, 结果发现油炸沙丁鱼的脂肪酸组成与烹调油相似。油炸过程中脂肪酸在油炸介质和食品中进行交换, 导致烹调油和食品中脂肪酸含量的增加或稀释。使用反式脂肪酸含量高的油煎炸食品时, 食品中反式脂肪酸含量相对较高。Liu等^[25]研究了鸡腿分别使用氢化大豆油和非氢化大豆油油炸时其反式脂肪酸的形成, 最终发现使用非氢化大豆油和氢化大豆油油炸的鸡腿肉中均没有形成反式脂肪酸, 而在使用氢化油油炸的鸡皮中形成了反式脂肪酸含量达45.3mg/100g。同样当油炸材料含有反式脂肪酸时, 材料中释放的反式脂肪酸也会导致烹调油中反式脂肪酸含量增加。

2.2 油炸条件对反式脂肪酸形成的影响

众多研究表明, 食用油中反式脂肪酸的积累与不饱和脂肪酸的热氧化变性有关^[26-27]。深度油炸时, 油脂暴露在空气中且在高温下反复使用, 由于热处理, 油脂会发生分解、氧化、水解和聚合等反应, 高度氧化和受热的油脂可能生成具有致癌性的有毒物质, 包括丙二醛化合物、氧化的脂肪酸、极性化合物以及反式脂肪酸^[28]。Ganbi等^[29]研究间歇油炸过程中汉默鱼和油炸油中脂肪酸的变化及有害物质的形成, 结果表明, 随着油炸油的使用时间的延长, 汉默鱼和油炸油中反式脂肪酸逐渐形成, 随着煎炸油使用时间的增加含量显著增加, 在油炸过程结束时(24h), 油炸鱼以及油炸油中反式脂肪酸含量达8.83%、12.46%。大豆油在180℃连续油炸600min时, 采用傅里叶变换红外光谱对大豆油的品质变化进行研究结果发现顺式双键损失而反式不饱和度增加^[30]。

油炸期间反式脂肪酸的形成与加工温度和时间密切相关。高温提供了双键从顺式构型转化为反式构型需要的能量, 当顺式双键的数目增加时异构化反应所需的

活化能降低。在葵花籽油中, 200、300℃加热40min时反式异构体的含量分别是1.10%、11.45%^[31]。Sébédio等^[1]的研究发现大豆油和薯条中亚麻酸的顺式结构会转化为它的反式结构, 随着油炸温度的升高异构化的程度增加。Romero等^[32]的研究表明采用特级初榨大豆油、高油酸葵花籽油、葵花籽油油炸薯片期间, 随着受热时间的增加油酸和亚油酸的反式异构体均增加。在使用油菜籽油油炸薯条时, 反式脂肪酸的含量随着温度和时间的增加而上升, 在(185±5)℃油炸49h时, 反式异构体的含量从2.4%到3.3%, 而在(215±5)℃时, 油中反式异构体的含量从2.4%到5.9%, 形成的反式脂肪酸的含量为反亚麻酸>反亚油酸>反油酸^[33]。油炸时由于脂肪的快速交换当油中反式异构体的含量增加时导致油炸食品中反式异构体的含量也增加。而Liu等^[27]的研究发现氢化大豆油在160、180、200℃经过24h的加热后没有反式脂肪酸生成。这些结果表明反式脂肪酸的形成与油炸油的种类有关, 并且反式脂肪酸可能在较极端的油炸条件下形成。

3 油炸过程中反式脂肪酸的控制措施

减少油炸时间和降低油炸温度可减少油炸过程中有害物质的形成。日常生活中应避免油炸油的连续长时间使用, 避免高温烹调食品。油反复使用会导致油炸油中丙二醛、极性化合物、氧化脂肪酸和反式脂肪酸等有害物质达到极高水平。Ganbi等^[29]建议间歇油炸时油炸油的使用时间不应超过16h, 以避免形成的有害化合物含量达到有毒有害的水平而产生负面影响和致癌活性。在较高的温度下多不饱和脂肪酸的热降解和氧化降解速率显著提高, 油炸时应控制并保持温度低于190℃。在反复油炸时应注意补充新油。Romero等^[32]的研究表明油炸期间频繁补充新油可以减少油脂脂肪酸的变化从而使获得的食品中含有较少量的反式脂肪酸。然而当油炸时间过长时, 补充新油也达不到较好的效果。

采用真空油炸技术也可减少油炸时有害物质的形成。在油炸过程中通过降低压力来降低油炸温度以及减少烹调时间, 避免油炸时与氧的接触, 从而减少有害物质的产生。张芳等^[34]采用真空油炸对传统熏鱼进行加工既缩短了油炸时间, 同时又使油的沸点下降, 延缓了油的氧化和酸败, 延长了油的使用时间。沈泽洞等^[35]以新鲜鲢鱼为原料, 在真空度0.03MPa、温度145℃条件下油炸20min, 减缓了油的氧化变质, 得到的产品品质较佳。国外也已将真空油炸技术广泛地应用于食品加工中。国外有学者对比了常压油炸与真空油炸薯条的油吸收, 发现常压油炸薯条的吸油量显著高于真空油炸的薯条^[36], 真空油炸可降低油炸食品中脂肪的含量。然而此种做法在日常烹饪中不易实现。目前真空油炸多用于蔬菜、水



果等产品中。真空油炸产品具有多孔结构,在孔隙的表面会吸附一层油脂,这一层油脂并不能被离心脱油除去,因此,真空油炸产品都有一定的含油率。

在大多数的未加工的食品中,反式脂肪酸的比例非常低或者不存在。油炸时油炸用油的种类也可能对反式脂肪酸的形成有一定的关系。油炸时煎炸油的选择是十分重要的,需综合考虑油脂的稳定性、价格和营养价值,避免选择反式脂肪含量高的油脂如氢化油、人造黄油。

4 传统熏鱼绿色制造技术

油炸食品位列十大垃圾食品之首。传统熏鱼采用油炸加工,使肉中成分发生美拉德反应而产生色产香。赋予食品色香味的美拉德反应是把双刃剑,既能产生有益物质,又能产生有害物质。且反复油炸会产生反式脂肪酸与杂环胺等有害物质,因此,改变油炸方式并不能从根本上解决油炸食品造成的危害,而采用非油炸技术是食品加工业必然的趋势。彭增起等^[37]采用非油炸的绿色加工工艺替代传统油炸工艺加工烧鸡制品,不仅赋予了产品独特的香味和色泽,而且还显著降低产品中有害物质残留量。加工出的鸡肉产品中苯并芘和杂环胺的含量分别为0.22 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 和1.21 $\mu\text{g}/\text{kg}$,远低于传统加工方式生产的烧鸡中的4 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 和108 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。

熏鱼绿色制造是把绿色化学的原理应用到食品中来,对传统工艺进行改造。熏鱼绿色制造技术基于定向美拉德反应,从对影响美拉德反应的底物(还原糖和氨基酸)组合、影响美拉德反应化学动力学过程的反应介质条件等进行了综合性的探究,最终实现了美拉德反应在特定底物与特定反应条件下的定向控制,使反应朝着有益产物方向进行。传统熏鱼油炸温度在170~230 $^{\circ}\text{C}$,生产出的产品质量不稳定,杂环胺和多环芳烃类物质残留量较高,且经反复油炸后,产品中反式脂肪酸含量增加。在传统熏鱼加工中利用美拉德定向反应技术选择合适的反应底物(还原糖、氨基酸的种类和添加量),并对温度,湿度等热力场参数进行优化,对加工过程的主要关键点进行有害物质的监测,确保技术和经济指标的实现。绿色制造熏鱼加工时,在鱼体表面喷淋基于美拉德反应定向控制的上色增香液,采用热风干燥工艺,加工温度小于130 $^{\circ}\text{C}$,加工时间小于1h,生产出的熏鱼有着传统熏鱼漂亮的色泽和独特的风味,于此同时,摒弃了油炸工艺生产出的熏鱼不含反式脂肪酸。

5 结语

不恰当的油炸方式对产品中反式脂肪酸形成有重要的影响,改善油炸的工艺和条件,并不能彻底改变油炸

产生的危害。采用绿色制造技术加工的熏鱼中杂环胺和苯并芘等有害物质含量显著下降,非油炸工艺因此不产生反式脂肪酸。熏鱼绿色制造技术升温快,效率高,可实现传统熏鱼制品加工工艺的现代化技术改造,将为水产品的绿色制造开创新的途径,具有广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] SÉBÉDIO J L, GRANDGIRARD A, SEPTIER C, et al. Etat d'alteration de quelques huiles de friture prelevées en restauration[J]. Rev Fr Corp Gras, 1987, 34(2): 8-15.
- [2] ALADEDUNYE F A, PRZYBYLSKI R. Degradation and nutritional quality changes of oil during frying[J]. Journal of American Oil Chemist's Society, 2009, 86(2): 149-156.
- [3] BANSAL G, ZHOU W B, TAN T W, et al. Analysis of trans fatty acids in deep frying oils by three different approaches [J]. Food Chemistry, 2009, 116(2):535-541.
- [4] 杨月欣, 韩军花. 反式脂肪酸: 安全问题与管理现状[J]. 国外医学: 卫生学分册, 2007, 34(2): 88-93.
- [5] SARTTIKA R A. Dietary trans fatty acids in take and its relation to dyslipidemia in a sample of adults in Depok city, west Java, Indonesia[J]. Malays J Nutr, 2011, 17(3): 337-346.
- [6] YU D X, SUN Q, YE X W, et al. Erythrocyte trans-fatty acids, type 2 diabetes and cardiovascular risk factors in middle-aged and older Chinese individuals [J]. Diabetologia, 2012, 55(11): 2954-2962.
- [7] HARVEY K A, WALKER C L, XU Z. Trans fatty acids: Induction of a pro-inflammatory phenotype in endothelial cells[J]. Lipids, 2012, 47(7): 647-657.
- [8] MASHAL R H, OUDEH A, AL-ISMAIL K M, et al. Association of dietary intake of trans fatty acids and coronary heart disease risk in Jordanian subjects[J]. Pakistan Journal of Nutrition, 2012, 11(5): 423-433.
- [9] HORNSTRA G, Van EIJSDEN M, DIRIX C, et al. Trans fatty acids and birth outcome: some first results of the MEFAB and ABCD cohorts [J]. Atheroscler Suppl, 2006, 7(2): 21-23.
- [10] CHAVARRO J E, RICH-EDWARDS J W, ROSNER B A, et al. Dietary fatty acid intakes and the risk of ovulatory infertility[J]. Am J Clin Nutr, 2007, 85(1): 231-237.
- [11] CHAVARRO J E, FURTADO J, TOTHT L. Trans-fatty acid levels in sperm are associated with sperm concentration among men from an infertility clinic[J]. Fertility and Sterility, 2011, 95(5): 1794-1797.
- [12] ANGELIERI C T, BARROS C R, SIQUEIRA-CATANIA A. Trans fatty acid intake is associated with insulin sensitivity but independently of inflammation[J]. Brazilian Journal of Medical and Biological Research, 2012, 45(7): 625-631.
- [13] AXEN KV, DIKEAKOS A, SXLAFANI A. High dietary fat promotes syndrome X in nonobese rats[J]. J Nutr, 2003, 133(7): 2244-2249.
- [14] SALMERON J, HU F B, MANSON J E, et al. Dietary fat intake and risk of type 2 diabetes in women[J]. Am J Clin Nutr, 2001, 73(6): 1019-1026.
- [15] AWAD A B. Trans fatty acids in tumor development and the host survival [J]. J Natl Cancer Inst, 1981, 67(1): 189-192.
- [16] HOGAN M L, SHAMSUDDIN A M. Large intestinal carcinogenesis. I. Promotional effect of dietary fatty acid isomers in the rat model [J]. J Natl Cancer Inst, 1984, 73(6): 1293-1296.
- [17] BAKKER N, VAN'TVEER P, ZOCC P L. Adipose fatty acids and cancers of the breast, prostate and colon: an ecological study[J]. Int J Cancer, 1997, 72(4): 587-591.

- [18] GOBURDHUN D, SABINA B J, MUSRUK R, et al. Evaluation of soybean oil quality during conventional frying by FTIR and some chemical indexes[J]. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 2001, 52(1): 31-42.
- [19] NAWAR WW. *Lipids[M]*//FENEMA O R. *Food Chemistry*. New York: Marcel Dekker, 1996: 1523-1542.
- [20] MARTIN C A, MILINSK M C, VISENTAINER J V, et al. Trans fatty acid-forming processes in foods: a review[J]. *An Acad Bras Cienc*, 2007, 79(2): 343-350.
- [21] TASAN M, DEMIRCI M. Trans FA in sunflower oil at different steps of refining[J]. *Journal of American Oil Chemistry Society*, 2003, 80(8): 825-828.
- [22] 宋志国, 单良, 王兴国. 毛细管气象色谱法测定精炼和氢化大豆油中的反式脂肪酸[J]. *中国油脂*, 2006, 31(12): 37-39.
- [23] 苏德森, 陈涵贞, 林虬. 食用油加热过程中反式脂肪酸的形成和变化[J]. *中国粮油学报*, 2011, 26(1): 69-73.
- [24] SÁNCHEZ-MUNIZ F J, VIEJO J M, MEDINA R. Deep-frying of sardines in different culinary fats. Changes in the fatty acid composition of sardines and frying fats[J]. *Agric Food Chem*, 1992, 40(11): 2252-2256.
- [25] LIU W H, LU Y F, INBARAJ B S, et al. Formation of trans fatty acids in chicken legs during frying[J]. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 2008, 59(5): 368-382.
- [26] CHEN J F, TAI C Y, CHEN Y C, et al. Effects of conjugated linoleic acid on the degradation and oxidation stability of model lipids during heating and illumination[J]. *Food Chemistry*, 72(2): 199-206.
- [27] LIU W H, INBARAJ B S I, CHEN B H. Analysis and formation of trans fatty acids in hydrogenated soybean oil during heating[J]. *Food Chemistry*, 104(4): 1740-1749.
- [28] POLONIO C G, LINARES M C, ARIAS M T, et al. Thermally oxidized sunflower seed oil increases liver and serum peroxidation and modifies lipoprotein composition in rats[J]. *British Journal of Nutrition*, 2004, 92(2): 257-265.
- [29] HEND HASSAN AL GANBI. Alteration in fatty acid profiles and formation of some harmful compounds in hammour fish fillets and frying oil medium throughout intermittent deep-fat frying process[J]. *World Applied Sciences Journal*, 2011, 12(4): 536-544.
- [30] GOBURDUN D, SABINA B J, MUSRUCK R. Evaluation of soybean oil quality during conventional frying by FTIR and some chemical indexes[J]. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 2001, 52(1): 31-42.
- [31] MOYA MORENO M C M, MENDOZA OLICARES D, AMEZQUITA LOPEZ F J, et al. Determination of unsaturation grade and trans isomers generated during thermal oxidation of edible oils and fats by FTIR[J]. *Journal of Molecular Structure*, 1999, 482(1): 551-556.
- [32] ROMERO A, CUESTA C, SÁNCHEZ-MUNIZ F J. Trans fatty acid production in deep fat frying of frozen foods with different oils and frying modalities[J]. *Nutrition Research*, 2000, 20(4): 599-608.
- [33] ALADEDUNYE F A, PRZYBYLSKI R. Degradation and nutritional quality changes of oil during frying[J]. *J Am Oil Chem Soc*, 2009, 86(2): 149-156.35.
- [34] 张芳, 包海蓉. 真空油炸技术在熏鱼制品加工中的应用[J]. *食品科学*, 2008, 29(9): 264-267.
- [35] 沈泽洞, 黄键豪. 鲢鱼低温真空油炸的研究[J]. *食品工业科技*, 2001, 22(6): 46-48.
- [36] DUEIK V, MORENO M C, BOUCHON P. Microstructural approach to understand oil absorption during vacuum and atmospheric frying[J]. *Journal of Food Engineering*, 2012, 111(3): 528-536.
- [37] 彭增起, 闫莉萍, 王霞, 等. 一种苏鸡加工工艺: 中国, 200910181203.4[P]. 2010-01-06.