

# 炸制过程中油脂氧化对鱼饼中晚期糖基化终末产物生成的影响

胡本伦, 武润琳, 孙靖雯, 贾才华, 荣建华, 刘 茹

(华中农业大学 食品科学技术学院/国家大宗淡水鱼加工技术研发分中心(武汉)/  
长江经济带大宗水生生物产业绿色发展教育部工程研究中心, 武汉 430070)

**摘要:**旨在为炸制鱼饼中晚期糖基化终末产物(AGEs)含量的控制提供理论依据和参考,以冷冻鲢鱼糜为原料制作鱼饼,通过分析连续炸制过程中(每3 h炸制1次)鱼饼中AGEs的生成与其理化指标和油脂氧化程度之间的相关性,探讨炸制过程中油脂氧化对鱼饼中AGEs生成的影响。结果表明:鱼饼外层AGEs含量显著高于内层,炸制9~18 h,鱼饼AGEs含量显著高于其他阶段( $p < 0.05$ );鱼饼中AGEs含量与水分含量呈极显著负相关,与脂肪含量和丙二醛含量呈极显著正相关,说明水分散失、油脂吸收以及油脂氧化促进了AGEs的生成。综上,在连续炸制过程的中期,鱼饼中水分含量较低,油脂氧化较为严重,AGEs含量较高。

**关键词:**晚期糖基化终末产物;鱼饼;炸制;油脂氧化

中图分类号:TS207.3;TS201.2 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2023)10-0081-06

## Effect of oil oxidation on formation of advanced glycation end products in fish cakes during frying process

HU Benlun, WU Runlin, SUN Jingwen, JIA Caihua,  
RONG Jianhua, LIU Ru

(College of Food Science and Technology, Huazhong Agricultural University/National R & D Branch  
Center for Conventional Freshwater Fish Processing (Wuhan)/ Engineering Research Center of  
Green Development for Conventional Aquatic Biological Industry in the Yangtze  
River Economic Belt, Ministry of Education, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** In order to provide theoretical basis and reference for the control of advanced glycation end products (AGEs) content in fried fish cakes, fish cakes were prepared from frozen silver carp surimi, and the correlation between physicochemical indexes and oil oxidation degree and the content of AGEs in fish cakes during continuous frying (once every 3 h) were analyzed to explore the effect of oil oxidation on the formation of AGEs. The results showed that the content of AGEs in the outside of fish cakes was significantly higher than that in the inside of fish cakes. The content of AGEs from 9 h to 18 h were significantly higher than that in others ( $p < 0.05$ ). The content of AGEs was significantly negatively correlated with the water content, and significantly positively correlated with oil content and MDA content, indicating that water volatilization, oil absorption and oxidation promoted the formation of AGEs. In summary, the AGEs content is relatively higher in the middle stage of the continuous frying process

due to the relatively lower water content and serious oxidation of oil.

**Key words:** advanced glycation end products; fish cakes; frying; oil oxidation

收稿日期:2022-06-06;修回日期:2023-05-30

基金项目:现代农业产业技术体系(CARS-45)

作者简介:胡本伦(1997),男,硕士研究生,研究方向为水产品加工与贮藏(E-mail) hubenlun1219@163.com。

通信作者:刘 茹,教授,博士(E-mail) liuru@mail.hzau.edu.cn。

鱼糜制品是冷冻鱼糜经斩拌、凝胶化后制成的

水产食品,具有营养价值高、价格低等特点,深受消费者喜爱<sup>[1]</sup>。炸制是鱼糜制品的传统熟化方式之一,炸制温度通常在 165 ~ 190 °C,可赋予食品金黄的外观、酥脆的质地和诱人的风味<sup>[2]</sup>。炸制后的鱼糜制品腥味较弱,口感独特,而在工业化生产过程中炸制用油通常被反复加热使用,在循环炸制过程中会发生氧化、聚合、水解等反应,导致其颜色加深、黏度增大、烟点降低<sup>[3]</sup>。晚期糖基化终末产物(Advanced glycation end products, AGEs)是氨基与羰基经过美拉德反应后产生的一类结构复杂的化合物,脂质氧化降解产生的活性 $\alpha$ -二羰基化合物乙二醛(Glyoxal, GO)、甲基乙二醛(Methyl glyoxal, MGO)会进一步与蛋白质中的赖氨酸与精氨酸残基反应生成 AGEs,如荧光 AGEs、羧甲基赖氨酸[N<sup>ε</sup>-(carboxymethyl) lysine, CML]、羧乙基赖氨酸[N<sup>ε</sup>-(carboxyethyl) lysine, CEL]和甲基乙二醛氢咪唑酮[N<sup>δ</sup>-(5-hydro-5-methyl-4-imidazolone-2-yl)-ornithine, MG-H1]<sup>[4]</sup>。研究表明,食源性 AGEs 会导致机体中 AGEs 的累积,并会增加内皮功能障碍、动脉粥样硬化和血管阻塞等慢性疾病的风险,带来食品安全问题<sup>[5-6]</sup>。

目前油脂氧化对 AGEs 生成的影响主要集中于模拟体系的研究,如:Yu 等<sup>[7]</sup>研究了亚油酸的氧化对赖氨酸-葡萄糖和肌原纤维蛋白-葡萄糖模拟体系中 CML 和 CEL 生成的影响,发现亚油酸的加入在两种体系中分别表现为抑制和促进作用;Han 等<sup>[8]</sup>研究了脂肪酸和食用油对赖氨酸-葡萄糖模拟体系中 CML 和 CEL 生成的影响,发现多不饱和脂肪酸的氧化会促进 CML 和 CEL 的生成;王玉婷<sup>[9]</sup>研究了不同植物油氧化对赖氨酸-葡萄糖模拟体系中 CML 和 CEL 生成的影响,发现植物油不饱和度的提高会抑制 CML 的生成。而油脂氧化程度对真实体系蛋白基食物中 AGEs 生成的影响鲜见报道。因此,本文以冷冻鲢鱼糜为原料制作鱼饼,在连续炸制条件下形成不同氧化程度的煎炸油,对不同炸制阶段鱼饼的品质,以及鱼饼内外层 AGEs 含量进行分析,探究油脂氧化程度与鱼饼中 AGEs 生成的内在联系,以期对炸制鱼饼工业化生产过程中 AGEs 的控制提供思路。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

#### 1.1.1 原料与试剂

冷冻鲢鱼糜,洪湖市井力水产食品股份有限公司;一级压榨大豆油,中粮集团有限公司;食盐、肠衣等,中百超市(武汉)。

甲醇(色谱级),美国 Thermo Fisher 公司;CML、CEL、MG-H1(优级纯),多伦多研究化学公司(TRC);石油醚(30 ~ 60 °C)、异辛烷、冰醋酸、三氯乙酸、硫代巴比妥酸、4-甲氧基苯胺等(均为分析纯),国药集团化学试剂有限公司。

#### 1.1.2 仪器与设备

DF-6L 电炸炉,广东杰冠有限公司;AS852B 红外温度枪,广东西玛有限公司;HH-6 数显恒温水浴锅,国华电器有限公司;SE-206 索氏抽提仪,济南阿尔瓦仪器有限公司;FD-2A-100 冷冻干燥机,北京博医康实验仪器有限公司;UV-1750 可见-紫外分光光度计,日本岛津公司;Dionex 固相萃取仪,美国 Thermo Fisher 有限公司;LB-K200 氮气吹扫仪,上海智鸢机电设备有限公司;F-4600 荧光分光光度计,日本日立公司;Acquity UPLC 超高效液相色谱仪,美国 Waters 有限公司。

## 1.2 实验方法

### 1.2.1 样品制备

将冷冻鲢鱼糜于 4 °C 解冻后,在调理机内于 1 200 r/min 转速下空斩 2 min,加入冰水和食盐,将鱼糜水分含量调至 78%,盐含量调至 2%,并于 1 500 r/min 转速下盐斩 2 min,将斩拌好的鱼糜装入真空包装袋中并抽真空排除空气,然后将鱼糜灌入直径为 35 mm 的肠衣中,40 °C 蒸煮 1 h 成型,冷却后将其切为厚度 1 cm 的鱼饼待用。

### 1.2.2 炸制实验

向油炸锅中倒入 5.7 L 大豆油,在 10 min 内使油温达到(180 ± 5)°C 并保持,对鱼饼进行炸制,每日连续炸制 12 h,每 3 h 对一批鱼饼进行 4 min 的炸制并取样,共炸制 24 h。炸制过程中将油炸锅中的料液比控制为 1:30,样品于 -80 °C 冰箱保存,待测。

### 1.2.3 煎炸油茴香胺值的测定

煎炸油茴香胺值参照 AOCS Official Method Cd 18-90 测定。

### 1.2.4 鱼饼水分、脂肪和丙二醛含量的测定

水分含量参照 GB 5009.3—2016 测定;脂肪含量(干基)参照 GB 5009.6—2016,采用索氏抽提法测定;丙二醛含量参照 GB 5009.181—2016,采用分光光度法测定。

### 1.2.5 鱼饼荧光 AGEs 含量的测定

参考江洋等<sup>[10]</sup>的方法,并稍作修改。将样品充分切碎后,称取 1 g 样品,加入 10 mL 磷酸盐缓冲液(50 mmol/L, pH 7.4),37 °C 搅拌 1 h 后以 4 000 r/min 离心 5 min,过滤,收集滤液,在激发波长 345

nm、发射波长 425 nm、狭缝宽度 ( $E_x/E_m$ ) 5 nm/5 nm、电压 700 V、响应时间 0.5 s 处使用荧光分光光度计测定荧光值。

### 1.2.6 鱼饼非荧光 AGEs 含量的测定

参考刘芹邑等<sup>[11]</sup>的方法,并稍作修改。称取 100 mg 冷冻干燥后的样品,加入 3 mL 正己烷在 4 000 r/min 下离心 15 min 脱脂两次。向脱脂样品中加入 2 mL 硼酸盐缓冲液(0.2 mol/L, pH 9.2)和 0.4 mL 硼氢化钠溶液(2 mol/L, 溶于 0.1 mol/L NaOH 溶液),4℃条件下还原 8 h。将还原后的蛋白沉淀转移至比色管中,加入 5 mL 6 mol/L 的盐酸溶液,110℃下酸解 24 h。取 1 mL 盐酸水解液在 60℃下烘干,加入 3 mL 超纯水复溶,过 0.22 μm 滤膜。将样品溶液上 MCX 固相萃取柱(萃取柱使用之前用 3 mL 甲醇和 3 mL 含 2% 甲酸的水溶液依次活化和平衡),使用 3 mL 2% 甲酸水溶液和 3 mL 甲醇依次除杂,真空抽干后用 2 mL 含 5% 氨水的甲醇溶液洗脱,收集洗脱液,氮气吹干后复溶于 1 mL 超纯水中,存于 -80℃冰箱中待测。

UPLC 条件:BEHAmide 色谱柱(100 mm × 2.1 mm, 1.7 μm);流动相 A 为含有 5 mmol/L 乙酸铵和 0.1% 甲酸的水溶液;流动相 B 为乙腈;柱温 35℃;进样量 3 μL;流速 0.3 mL/min。梯度洗脱程序见表 1。

表 1 梯度洗脱程序

时间/min	A/%	B/%
0	15	85
1	15	85
6.5	35	65
9	35	65
10	15	85

MS 条件:采用电喷雾电离正离子模式;检测方式为多反应监控模式(MRM);干燥器温度 350℃;

干燥气流量 10 L/min;雾化器压力 138 kPa;毛细管电压 4 kV;碎裂电压 135 V;MRM 模式中 CML、CEL、MG-H1 的离子条件分别为 205 > 84、219 > 84 和 229 > 70。

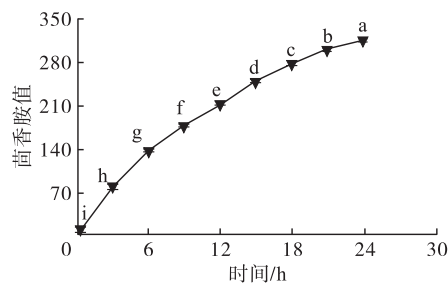
### 1.2.7 数据处理

实验数据以“平均值 ± 标准偏差”表示。采用 Excel 软件进行数据统计,Origin 2020 软件作图,SAS 8.0 软件进行显著性分析, $p < 0.05$  表示存在显著差异。

## 2 结果与分析

### 2.1 煎炸油茴香胺值的变化

茴香胺值可反映煎炸油的次级氧化程度,是考察油脂氧化程度的重要指标。图 1 为炸制鱼饼过程中煎炸油茴香胺值的变化。



注:不同小写字母表示具有显著差异( $p < 0.05$ )

图 1 煎炸油茴香胺值随炸制时间的变化

由图 1 可以看出,煎炸油茴香胺值随炸制时间延长呈现显著升高的趋势( $p < 0.05$ ),说明连续炸制条件下,煎炸油的氧化程度不断加深,这是由于甘油三酯氧化产生的氢过氧化物进一步分解,产生的 2,4-二烯醛和 2-烯醛等醛类物质的积累导致的<sup>[12]</sup>。

### 2.2 鱼饼水分和脂肪含量的变化

鱼饼的水分和脂肪含量随炸制时间的变化如表 2 所示。

表 2 不同炸制阶段鱼饼水分和脂肪含量的变化

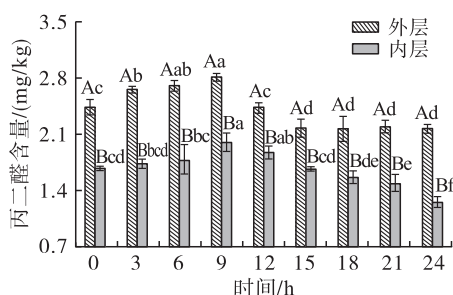
炸制时间/h	水分含量/%		脂肪含量/%	
	外层	内层	外层	内层
0	59.06 ± 0.75 <sup>Ba</sup>	68.62 ± 0.13 <sup>Abcd</sup>	14.78 ± 0.86 <sup>Abc</sup>	1.77 ± 0.83 <sup>Bde</sup>
3	57.04 ± 1.37 <sup>Bab</sup>	68.21 ± 0.16 <sup>Acde</sup>	18.03 ± 2.61 <sup>Aab</sup>	2.78 ± 0.18 <sup>Bbc</sup>
6	54.21 ± 3.04 <sup>Bbc</sup>	67.38 ± 0.15 <sup>Ade</sup>	20.81 ± 2.73 <sup>Aa</sup>	3.59 ± 0.21 <sup>Ba</sup>
9	53.05 ± 5.72 <sup>Bbc</sup>	67.25 ± 0.04 <sup>Ae</sup>	15.38 ± 1.39 <sup>Abc</sup>	2.92 ± 0.39 <sup>Bb</sup>
12	57.75 ± 1.41 <sup>Bab</sup>	69.59 ± 0.43 <sup>Ab</sup>	16.01 ± 1.68 <sup>Abc</sup>	1.47 ± 0.31 <sup>Be</sup>
15	51.60 ± 2.76 <sup>Bc</sup>	69.47 ± 0.08 <sup>Abc</sup>	16.10 ± 2.69 <sup>Abc</sup>	1.73 ± 0.04 <sup>Bde</sup>
18	51.86 ± 0.55 <sup>Bc</sup>	71.58 ± 0.36 <sup>Aa</sup>	12.98 ± 1.00 <sup>Ac</sup>	1.86 ± 0.36 <sup>Bde</sup>
21	54.45 ± 0.13 <sup>Babc</sup>	69.60 ± 0.05 <sup>Ab</sup>	10.02 ± 1.56 <sup>Ad</sup>	2.19 ± 0.33 <sup>Bcd</sup>
24	49.70 ± 1.62 <sup>Bc</sup>	72.13 ± 2.04 <sup>Aa</sup>	13.86 ± 1.31 <sup>Ac</sup>	2.14 ± 0.21 <sup>Bcde</sup>

注:不同小写字母表示不同炸制时间鱼饼之间有显著差异( $p < 0.05$ );不同大写字母表示鱼饼内层和外层之间有显著差异( $p < 0.05$ )

由表 2 可知,在炸制温度 180 °C 下,鱼饼外层水分含量显著低于内层,而脂肪含量刚好相反。这是由于鱼饼表面温度迅速上升,水分汽化,在鱼饼内层和外层水分含量差的驱动下,内部水分向外层迁移并汽化,随炸制时间的延长,外层水分含量显著降低,鱼饼表面形成一层壳,阻碍内部水分的进一步迁移,使内层水分含量显著高于外层。在炸制过程中油脂可通过与水分的替代机制进入鱼饼中,在鱼饼的冷却阶段由于内部真空度上升,外壳的油脂也会被吸入内部,但鱼饼形成的外壳会阻碍油脂渗透进鱼饼内层,使内层脂肪含量低于外层<sup>[13-14]</sup>。炸制阶段鱼饼外层脂肪含量升高,这可能是由于油脂黏度上升,导致油脂附着在鱼饼外层,造成鱼饼表面脂肪含量较高<sup>[15-17]</sup>。

### 2.3 鱼饼丙二醛含量的变化

丙二醛含量反映鱼饼中油脂氧化程度<sup>[18]</sup>。不同炸制阶段鱼饼丙二醛含量的变化如图 2 所示。



注:不同小写字母表示不同炸制时间鱼饼之间有显著差异( $p < 0.05$ );不同大写字母表示鱼饼内层和外层之间有显著差异( $p < 0.05$ )。下同

图 2 不同炸制阶段鱼饼丙二醛含量的变化

由图 2 可知,鱼饼外层丙二醛含量均高于内层,与不同炸制阶段鱼饼内层和外层的脂肪含量的趋势一致,这是由于鱼饼中的丙二醛主要来源于所吸收油脂的氧化。对于不同炸制阶段鱼饼丙二醛含量,

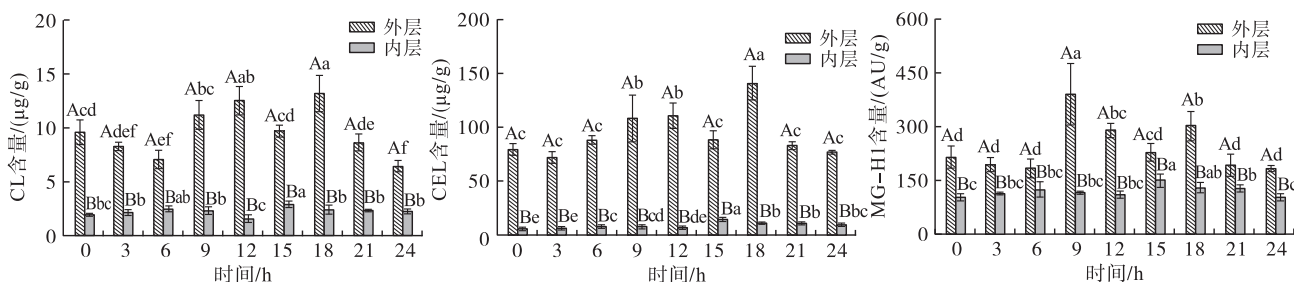


图 4 不同炸制阶段鱼饼非荧光 AGEs 含量的变化

由图 4 可知,鱼饼外层非荧光 AGEs 含量显著高于内层( $p < 0.05$ ),这可以归结于外层较高的脂肪含量,而油脂氧化产生的丙二醛会直接与鱼饼中蛋白质的氨基酸残基发生反应,导致非荧光 AGEs

内层和外层均呈先升高后降低的趋势,在 9 h 时达到最大值,外层为 2.81 mg/kg,内层为 2.00 mg/kg。可能是在炸制初期,油脂氧化程度逐渐升高,使丙二醛含量升高,炸制后期,由于丙二醛不稳定,降解为挥发性化合物或与蛋白质的氨基酸残基反应,使丙二醛含量降低<sup>[19]</sup>。

### 2.4 鱼饼荧光 AGEs 含量的变化

激发波长 300 ~ 420 nm 和发射波长 350 ~ 600 nm 下的荧光强度可以表征鱼饼中荧光 AGEs 的含量<sup>[20-21]</sup>。不同炸制阶段鱼饼中荧光 AGEs 含量的变化如图 3 所示。

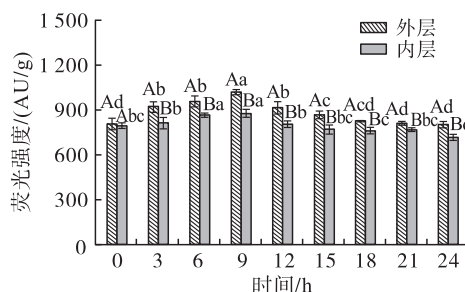
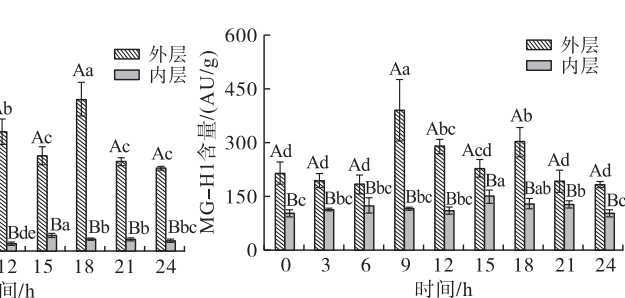


图 3 不同炸制阶段鱼饼荧光 AGEs 含量的变化

由图 3 可知,随着连续炸制的进行,鱼饼内层和外层荧光 AGEs 含量均呈现先升高后降低的趋势,并且炸制 9 h 时鱼饼外层和内层 AGEs 含量最高,这与鱼饼中丙二醛含量变化的趋势一致,说明油脂的氧化影响鱼饼中荧光 AGEs 的生成。鱼饼外层荧光 AGEs 含量显著高于内层,这是由于外层直接接触煎炸油,在 180 °C 条件下美拉德反应和脂质氧化比内层剧烈,促进了荧光 AGEs 的生成<sup>[22]</sup>。

### 2.5 鱼饼非荧光 AGEs 含量的变化

CML、CEL 和 MG-H1 是食品热加工过程中产生的 3 种典型的非荧光 AGEs,可以作为食品中 AGEs 产生的标志物质<sup>[23-24]</sup>。不同炸制阶段鱼饼中非荧光 AGEs 含量的变化如图 4 所示。

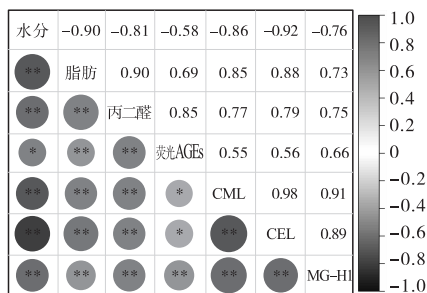


的生成<sup>[25]</sup>。在炸制的前 6 h,CML、CEL 和 MG-H1 生成量较低,这可能是由于炸制初期油脂氧化程度较低,产生的活性醛类含量较少,非荧光 AGEs 生成速率较慢。在炸制的 9 ~ 18 h,CML、CEL 和 MG-H1

H1 含量较高,这与连续炸制过程中油脂氧化程度加深有关。炸制 18 h 之后,3 种非荧光 AGEs 含量降低,推测是由于炸制后期油脂中产生的醛类物质进一步分解<sup>[19]</sup>,并且煎炸油中游离脂肪酸含量升高<sup>[2]</sup>,随着有机酸的积累,导致体系 pH 降低,非荧光 AGEs 生成速率降低<sup>[26]</sup>。韩文凤等<sup>[27]</sup>研究炸制时间对薯片中 CML 含量的影响时发现,CML 的生成和分解同时发生,炸制初期生成 CML 的反应底物充足,CML 的生成速率大于分解速率,而随着炸制时间的延长,反应底物逐渐消耗,CML 的分解速率大于生成速率,CML 含量呈下降趋势。

## 2.6 AGEs 与其他理化指标之间的相关性

AGEs 与其他理化指标之间的相关性如图 5 所示。



注: \* 表示相关性显著( $p < 0.05$ ); \*\* 表示相关性极显著( $p < 0.01$ )

图 5 AGEs 与其他理化指标之间的相关性

由图 5 可知,水分含量与脂肪含量呈极显著负相关( $p < 0.01$ ),说明炸制过程中鱼饼水分散失有利于油脂渗入鱼饼中。CML、CEL 和 MG-H1 与水分含量呈极显著负相关( $p < 0.01$ ),这可能是由于水分活度在 0.55~0.70 之间时,非酶褐变速率达到最大值,当水分活度超过最大褐变速率临界值,底物浓度被稀释,使分子间碰撞减弱,反应速率降低<sup>[28-29]</sup>。Zhu 等<sup>[30]</sup>研究鸡肉在炸制过程中失水率与 CML 和 CEL 形成之间的关系时发现,干热和低水分条件会促进美拉德反应,进而促进 AGEs 的生成。房红娟等<sup>[31]</sup>对比了不同加工方式对原料肉中 AGEs 生成的影响,发现低水分、高温的加工方式显著促进食品中 AGEs 的生成。本研究中,荧光 AGEs、CML、CEL 和 MG-H1 与脂肪含量和丙二醛含量之间呈极显著正相关( $p < 0.01$ ),这是因为脂质氧化对 AGEs 的形成起重要作用,脂质氧化产生的  $\alpha$ -二羰基化合物是 AGEs 生成的前体物质<sup>[32]</sup>。丙二醛是脂肪氧化产生的活性羰基化合物,能与赖氨酸发生反应,形成二氢吡啶形的加合物,具有荧光效应<sup>[33-34]</sup>。赵鑫等<sup>[35]</sup>通过研究脂肪氧化对 AGEs

生成的影响发现,羰基化合物的形成使得脂质氧化与美拉德反应之间具有协同作用,促进 AGEs 的生成。张昆等<sup>[36]</sup>研究表明,鸡肉在贮藏过程中脂肪氧化程度逐渐加深,脂质过氧化产生的醛类物质增多,AGEs 逐渐累积。因此,低水分含量和油脂氧化促进炸制鱼饼中 AGEs 的生成。

## 3 结论

研究了连续油炸过程中不同炸制阶段鱼饼的品质指标及 AGEs 含量。结果表明,高温炸制条件下水分的散失和油脂的吸收使得不同炸制阶段鱼饼外层水分含量显著低于内层,外层脂肪含量显著高于内层。鱼饼中荧光 AGEs、CML、CEL 和 MG-H1 含量在炸制的前 6 h 较低,这可能是由于炸制初期油脂氧化程度较低,随煎炸油氧化程度的加深,在炸制的 9~18 h 其含量较高,炸制 18 h 之后,油脂氧化产生的羰基化合物的分解以及游离脂肪酸含量的升高使反应体系呈酸性,AGEs 生成速率降低。相关性分析发现,脂肪含量、丙二醛含量与鱼饼中 AGEs 含量呈极显著正相关,进一步说明炸制过程中鱼饼吸收的油脂发生氧化,产生的活性羰基化合物会促进 AGEs 的生成。本实验初步探讨了油炸鱼饼过程中脂质氧化对 AGEs 生成的影响,然而真实体系中 AGEs 的生成同时包含美拉德反应及油脂氧化反应,脂质氧化产物形成 AGEs 的机制尚需深入研究。

## 参考文献:

- [1] 张玉洁, 张金闯, 陈琼玲, 等. 鱼糜蛋白制品及其加工技术[J]. 中国食品学报, 2022, 22(1): 389-400.
- [2] MA R, GAO T, SONG L, et al. Effects of oil-water mixed frying and pure-oil frying on the quality characteristics of soybean oil and chicken chop[J]. Food Sci Tech, 2016, 36(2): 329-336.
- [3] YANG J, ZHAO K S, HE Y J. Quality evaluation of frying oil deterioration by dielectric spectroscopy[J]. J Food Eng, 2016, 180: 69-76.
- [4] MAASEN K, SCHEIJEN J L J M, OPPERHUIZEN A, et al. Quantification of dicarbonyl compounds in commonly consumed foods and drinks; presentation of a food composition database for dicarbonyls [J/OL]. Food Chem, 2021, 339: 128063 [2022-06-06]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128063>.
- [5] PINTO R S, MACHADO U F, PASSARELLI M. Advanced glycation end products as biomarkers for cardiovascular disease: browning clarifying atherogenesis[J]. Biomark Med, 2020, 14(8): 611-614.
- [6] 陆敏, 李晓明, 卢永翎, 等. 槲皮素抑制蛋白糖基化及 DNA 损伤[J]. 食品科学, 2016, 37(1): 104-108.

- [7] YU L, HE Z, ZENG M, et al. Effects of oxidised linoleic acid on the formation of N<sup>ε</sup>-carboxymethyl-lysine and N<sup>ε</sup>-carboxyethyl-lysine in Maillard reaction system[J]. Int J Food Sci Tech, 2016, 51(3): 742-752.
- [8] HAN L, LI L, LI B, et al. Glyoxal derived from triglyceride participating in diet-derived N<sup>ε</sup>-carboxymethyllysine formation[J]. Food Res Int, 2013, 51(2): 836-840.
- [9] 王玉婷. 脂类及其氧化对美拉德反应伴生危害物形成的影响[D]. 南昌:南昌大学, 2019.
- [10] 江洋, 时浩楠, 贾才华, 等. 外裹糊处理对油炸草鱼块的晚期糖基化终末产物的影响[J]. 华中农业大学学报, 2020, 39(4): 121-127.
- [11] 刘芹邑, 张琪, 安婧, 等. 添加糖与酱油对油炸鲟鱼晚期糖基化终末产物形成的影响研究[J]. 食品工业科技, 2021, 42(22): 30-36.
- [12] 段蕾, 于化鹏, 司美双, 等. 油莎豆油的高温煎炸稳定性[J]. 中国油脂, 2021, 46(10): 47-50.
- [13] 袁子珺, 陈季旺, 曾恒, 等. 添加不同成分的外裹糊鱼块深度油炸过程中的传质动力学[J]. 食品科学, 2018, 39(3): 34-40.
- [14] BRANNAN R G, MAH E, SCHOTT M, et al. Influence of ingredients that reduce oil absorption during immersion frying of battered and breaded foods[J]. Eur J Lipid Sci Tech, 2014, 116(3): 240-254.
- [15] 单金卉, 陈季旺, 曾恒, 等. 炸用油品质对外裹糊鱼块深度油炸过程中传质动力学的影响[J]. 武汉轻工大学学报, 2017, 36(2): 8-15, 25.
- [16] FASINA O O, HALLMAN H, CRAIG-SCHMIDT M, et al. Predicting temperature-dependence viscosity of vegetable oils from fatty acid composition[J]. J Am Oil Chem Soc, 2006, 83(10): 899-903.
- [17] UFHEIL G, ESCHER F. Dynamics of oil uptake during deep-fat frying of potato slices[J]. LWT - Food Sci Tech, 1996, 29(7): 640-644.
- [18] 关睿, 李琳, 王建辉, 等. 不同食盐添加量对冷藏草鱼品质的影响[J]. 食品科学技术学报, 2020, 38(5): 100-108, 126.
- [19] 木卡代斯·木合旦尔, 决肯·阿尼瓦什, 巴吐尔·阿不力克木. 羊火腿风干成熟期间蛋白质、脂肪氧化以及相互影响[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(9): 149-155.
- [20] OU J, HUANG J, WANG M, et al. Effect of rosmarinic acid and carnosic acid on AGEs formation in vitro[J]. Food Chem, 2017, 221: 1057-1061.
- [21] WEI Q, LIU T, SUN D W. Advanced glycation end-products (AGEs) in foods and their detecting techniques and methods: a review [J]. Trends Food Sci Tech, 2018, 82: 32-45.
- [22] 郭鸿阳, 李瑞阳, 刘启辉, 等. L-半胱氨酸对油炸薯片中有害醛、晚期糖基化终产物的抑制作用及其品质的改善效果[J]. 食品科学, 2022, 43(4): 60-68.
- [23] SREY C, HULL G L, CONNOLLY L, et al. Effect of inhibitor compounds on N<sup>ε</sup>-(carboxymethyl) lysine (CML) and N<sup>ε</sup>-(carboxyethyl)lysine (CEL) formation in model foods [J]. J Agric Food Chem, 2010, 58(22): 12036-12041.
- [24] 杨明, 江小明, 王澍, 等. HPLC-MS/MS测定煎炸植物油中羧甲基赖氨酸和羧乙基赖氨酸[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2021, 42(3): 64-69.
- [25] 刘玲, 岳璐, 赵鑫, 等. 亚油酸对食品加工中晚期糖基化终产物的影响[J]. 食品与发酵工业, 2016, 42(4): 80-84.
- [26] 刘春霞, 李巨秀. 加工条件对果糖-赖氨酸体系中羧甲基赖氨酸和羧乙基赖氨酸形成的影响[J]. 中国食品学报, 2016, 16(11): 28-34.
- [27] 韩文凤, 周迎春, 谭兴和. 油炸薯片中羧甲基赖氨酸形成规律及抑制作用的研究[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(7): 69-76.
- [28] 赵勇, 冉娜, 雷湘兰, 等. 白藜芦醇苷对高蛋白中间水分食品贮藏期间理化变化及糖基化反应的影响[J]. 现代食品, 2020, 12(24): 201-206.
- [29] 黄杨斌, 杜卿卿, 任晓璞, 等. 析因设计探究温度与水分活度对美拉德反应模型的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(15): 21-28.
- [30] ZHU Z, FANG R, ZHAO D, et al. N<sup>ε</sup>-carboxymethyllysine and N<sup>ε</sup>-carboxyethyllysine kinetics and water loss analysis during chicken braising[J]. J Sci Food Agric, 2021, 101(2): 388-397.
- [31] 房红娟, 王丽娟, 张双凤, 等. 高蛋白食品加工模拟体系中晚期糖基化末端产物的形成[J]. 中国食品学报, 2014, 14(2): 28-34.
- [32] YU L, CHAI M, ZENG M, et al. Effect of lipid oxidation on the formation of N<sup>ε</sup>-carboxymethyl-lysine and N<sup>ε</sup>-carboxyethyl-lysine in Chinese-style sausage during storage[J]. Food Chem, 2018, 269: 466-472.
- [33] ISHII T, KUMAZAWA S, SAKURAI T, et al. Mass spectroscopic characterization of protein modification by malondialdehyde [J]. Chem Res Toxicol, 2006, 19(1): 122-129.
- [34] 王硕, 王娅娅, 张恬畅, 等. 膳食油脂-蛋白质互作产物与人体健康[J]. 中国食品学报, 2021, 21(9): 1-9.
- [35] 赵鑫, 王羽璇, 叶博, 等. 不饱和脂肪酸对卵清蛋白糖基化反应的影响[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(2): 74-80.
- [36] 张昆, 曾茂茂, 何志勇, 等. 冻藏对原料肉加工前后羧甲基赖氨酸和羧乙基赖氨酸含量的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(9): 2494-2501.