

doi:10.12301/spxb202400217

文章编号:2095-6002(2024)03-0023-12

引用格式:黄轶群,周军豪,李琳,等. 预制肉类食品中晚期糖基化终末产物的形成及抑制[J]. 食品科学技术学报,2024,42(3):23-34.



HUANG Yiqun, ZHOU Junhao, LI Lin, et al. Formation and inhibition of advanced glycation end products in precooked meat products[J]. Journal of Food Science and Technology, 2024,42(3):23-34.

# 预制肉类食品中晚期糖基化终末产物的形成及抑制

黄轶群, 周军豪, 李琳, 王发祥\*  
(长沙理工大学食品与生物工程学院, 湖南长沙 410114)

**摘要:**随着人民生活水平的提高和生活节奏的加快,方便快捷、营养美味的畜禽鱼肉类预制菜肴(简称“预制肉”)正逐步成为老百姓餐桌上的常客。然而,肉类食品通常含有丰富的蛋白质、脂肪及一定量的还原糖,在预制肉加工及其成品后续贮藏、复热过程中不可避免地会发生美拉德反应、脂肪氧化等化学反应,易于导致晚期糖基化终末产物(advanced glycation end products, AGEs)的形成。过多摄入食源性AGEs会增加人体多种慢性病的发生率。基于肉类食品加工、贮藏过程中2种典型AGEs(羧甲基赖氨酸、羧乙基赖氨酸)的主要形成途径,以预制肉从原辅料到餐桌的全过程为主线,重点介绍了原料肉品质、肉类食品加工过程中常用的调味料及食品添加剂、加热熟制、成品贮藏及复热对预制肉中AGEs形成的影响。在此基础上,进一步探讨了预制肉加工及贮藏过程中AGEs形成的抑制策略,主要包括:采用新鲜的优质原料肉,合理选用调味料和添加剂,尽量缩短贮藏时间,在不影响产品质量安全的前提下尽量降低或缩短加热熟制及复热的温度和时间。通过这些阐述,希望为有效控制预制肉中AGEs的形成提供参考,为消费者提供更安全、更健康的预制肉类食品。

**关键词:**预制菜;贮藏;复热;化学性危害物;晚期糖基化终末产物

**中图分类号:**TS201.6

**文献标志码:**A

随着人民生活水平提高和生活节奏加快,方便快捷、蛋白质等营养成分丰富的畜禽鱼肉类预制食品(下称“预制肉类食品”或“预制肉”),且指已经过预加热处理的制品)越来越受到消费者的青睐。然而,肉类原料在剔骨、斩拌、加热等加工过程中会破坏肌肉组织完整性及磷脂膜和肌红蛋白等的结构,促进血红素铁和非血红素铁等促氧化剂释放,增加不饱和脂肪酸、蛋白质等与氧气、促氧化剂等的接触,并使内源性抗氧化酶失活,丧失清除自由基的能力<sup>[1-4]</sup>,从而导致预制肉在后续贮藏及食用前复热过程中易发生脂肪和蛋白质氧化等反应,进而降低

其感官特性和营养品质,如产生过熟味(warmed-over flavor)、肉质劣化(如变硬、变干涩)、蛋白质等营养成分的消化及吸收率降低、必需脂肪酸和氨基酸等营养成分损失等<sup>[3-5]</sup>。此外,预制肉在贮藏及复热过程中的脂肪和蛋白质氧化等反应还会促进自由基、过氧化物、胆固醇氧化物(7 $\beta$ -、20 $\alpha$ -羟基胆固醇等)、晚期糖基化终末产物(advanced glycation end products, AGEs)等潜在危害物的形成<sup>[4-8]</sup>。肉类食品中AGEs的形成及抑制在过去10余年里受到较为广泛的关注。

AGEs主要是通过美拉德反应产生的一系列结

收稿日期:2024-03-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(32272391; 31871733)。

Foundation: National Natural Science Foundation of China (32272391; 31871733)。

第一作者:黄轶群,女,教授,博士,主要从事食品加工和贮藏过程中危害物形成及检测方面的研究。

\*通信作者:王发祥,男,教授,博士,主要从事水产品加工和贮藏方面的研究。

构复杂的有机化合物,最初被认为是在美拉德反应的末期产生的,并以此命名<sup>[9]</sup>;后续研究发现美拉德反应的初期产物席夫碱(Schiff base)或Amadori/Heyns重排产物的氧化裂解、脂质氧化、还原糖自氧化等多种途径均可产生活性极强的二羰基化合物。这些化合物进一步可以通过共价键结合到蛋白质上,从而也能形成AGEs<sup>[10-14]</sup>。尽管目前对食源性AGEs的生物可利用度、与体内AGEs受体的结合能力、肾清除率等方面尚无确切结论<sup>[15]</sup>,但越来越多的研究表明,通过饮食摄入的AGEs(外源性AGEs)的量远大于人体自身产生的AGEs量(内源性AGEs),即使食源性AGEs的生物利用度较小,其在体内的积累也会引起机体的氧化应激反应,加速人体的衰老,并提高阿尔茨海默病、心脑血管病、肾病、糖尿病等多种慢性病的发生率<sup>[14-20]</sup>。

畜禽肉类食品中含有丰富的蛋白质、脂肪及一定含量的还原糖。这些成分使得其在加工、贮藏过程中不可避免地会发生氧化反应、美拉德反应等化学变化,这些变化十分有利于AGEs的形成;加之肉类食品在食用前往往需经过较高温度或长时间的熟制,这极大地促进了AGEs的产生<sup>[14,21-23]</sup>。而且,在工业化生产过程中,为保证充分杀灭致病微生物,预制肉类食品可能会经历过度加热,导致预制肉产品中AGEs含量通常比家庭烹饪的肉类菜肴高。除了在加工过程中产生AGEs,预制肉后续的贮藏及复热过程中也可进一步产生AGEs<sup>[6-7]</sup>。因此,如果不对AGEs形成加以控制,预制肉类食品可能会存在一定的安全隐患。

本文以预制肉类食品从原辅料到餐桌全过程为主线,重点介绍原辅料选用、热加工、成品贮藏及复热过程对预制肉中AGEs形成的影响。在此基础上,探讨了预制肉的加工及贮藏过程中AGEs形成的抑制策略,旨在为未来有效控制预制肉中AGEs的形成提供科学依据。

## 1 肉类食品中AGEs的结构和形成途径

“AGEs”这个名词是由Vlassara等在20世纪80年代提出的<sup>[9]</sup>。食品中AGEs的结构复杂,种类繁多,但目前我们对结构和性质清楚的AGEs了解比较有限,主要为赖氨酸和精氨酸源的AGEs<sup>[16]</sup>。简单的赖氨酸和精氨酸源的AGEs只含有1个赖氨酸

或精氨酸残基,如羧甲基赖氨酸(*N*<sup>ε</sup>-carboxymethyllysine, CML)、羧乙基赖氨酸(*N*<sup>ε</sup>-carboxyethyllysine, CEL)、羧甲基精氨酸等;2个赖氨酸残基或是1个赖氨酸与1个精氨酸残基可通过乙二醛、甲基乙二醛、核糖等形成不同的交联体(如戊糖素)<sup>[17]</sup>。此外,根据被修饰的氨基酸是作为蛋白质肽链的组成部分,还是以游离氨基酸的形式存在,食品中的AGEs还可分为结合态和游离态两类<sup>[24]</sup>。鉴于已有一些文章对AGEs的结构有较为详细的解释<sup>[16-17]</sup>,本文不再赘述。

迄今为止,有关肉类等食品中AGEs形成的绝大部分研究均围绕CML和CEL展开,主要有3个原因:第一,蛋白质中的赖氨酸残基具有特殊的ε-氨基基团,是参与美拉德反应和蛋白质氧化等过程最为活跃的氨基酸残基之一<sup>[17]</sup>,因此肉类等高蛋白食品中的CML和CEL含量普遍较高,并且这两种物质较稳定,不易降解,是研究这些食品中AGEs形成的理想标志物<sup>[22]</sup>;第二,对食源性CML和CEL的分析方法已成熟,采用HPLC-MS/MS结合CML和CEL的同位素内标物方法,可以对其进行精准定量分析<sup>[21,24]</sup>;第三,肉类食品中CML和CEL的形成涉及其加热、贮藏过程中影响其品质的两大关键反应——美拉德反应和脂质氧化,并且与还原糖氧化、蛋白质氧化等过程有关<sup>[10-13]</sup>,CML和CEL形成途径的多样性以及肉类食品体系相关影响因子的复杂性,吸引了众多的研究旨在揭示这两种AGEs在肉中形成的影响机制。

肉类等食品在加工和贮藏过程中CML和CEL的主要形成途径见图1。

首先,赖氨酸或赖氨酸残基的ε-氨基基团与还原糖(醛酮或酮糖)经羰氨缩合、Amadori(醛糖)或Heyns(酮糖)重排、氧化降解等美拉德反应途径生成CML<sup>[10,25]</sup>。其次,赖氨酸或赖氨酸残基的ε-氨基与乙二醛(glyoxal)或丙酮醛(又称甲基乙二醛,methylglyoxal)反应,形成CML或CEL<sup>[10,26-27]</sup>。乙二醛和丙酮醛不仅可经由还原糖、席夫碱、Amadori/Heyns重排产物的裂解而产生<sup>[11,28]</sup>,还可通过脂质氧化<sup>[12]</sup>和抗坏血酸的氧化裂解生成<sup>[29-30]</sup>。

从食源性AGEs的形成途径来看,肉类食品中AGEs的产生与其蛋白质、还原糖、脂肪或脂肪酸、内源性抗氧化剂(如维生素E、抗氧化酶)及促氧化剂(如金属铁、铜离子)、加工辅料(如调味料)和添加剂(如亚硝酸盐、异抗坏血酸)等的化学特性和含

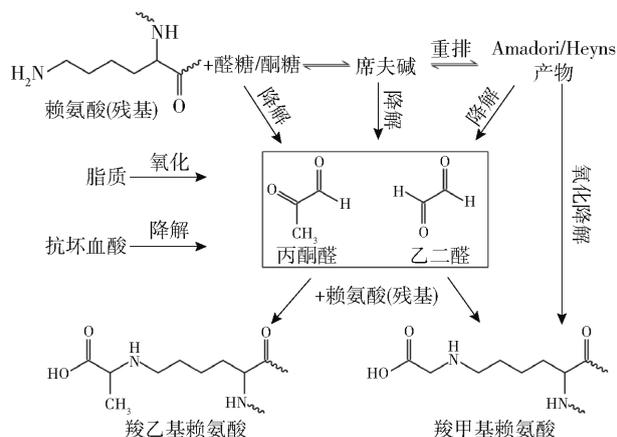


图1 肉类食品加工、贮藏过程中羧甲基赖氨酸和羧乙基赖氨酸主要形成途径

Fig. 1 Major formation pathways of  $N^{\epsilon}$ -carboxymethyl-lysine and  $N^{\epsilon}$ -carboxyethyl-lysine in meat products during processing and storage

量密切相关<sup>[23,31-34]</sup>。此外,加热方法或条件(如加热温度、时间)<sup>[21,35-40]</sup>以及生肉或熟肉的贮藏条件<sup>[6-7,41]</sup>也会影响 AGEs 的形成。

预制肉类食品中 AGEs 的形成机制及其影响因素相当复杂。首先,肉类食品本身成分复杂,含有很多可产生 AGEs 的前体反应物以及促进或抑制 AGEs 形成的化学物质。这些化学成分的含量在不同动物胴体或同个动物胴体的不同部位的肉中可能存在较大差异<sup>[35]</sup>。其次,宰后生肉在成熟或冷藏过程中会继续发生一系列物化和生化变化,引起蛋白质、脂肪等成分的改变<sup>[42-43]</sup>,从而增加整个反应体系的复杂性。再次,生肉必须经过熟制才能食用。加热处理过程会促进美拉德反应、脂肪氧化等反应,从而加速 AGEs 的产生。由于不同的预制肉产品的原料、辅料不同,且加热条件通常不同,因此预制肉产品中 AGEs 的种类和含量具有多样性<sup>[23,33-34,44]</sup>。最后,预制肉作为便捷商品,一般需要至少 1 周(巴氏杀菌产品)或半年(商业灭菌产品)以上的货架期,而且食用前通常需要复热。预制肉的贮藏条件和时间及其复热温度和时间都会影响其 AGEs 的产生<sup>[6-7]</sup>。

## 2 预制肉类食品中 AGEs 形成的影响因素

预制肉类食品中 AGEs 含量的主要决定因素为原料肉本身的 AGEs 含量(内源性 AGEs)和生化特性(如新鲜度)、原料和辅料的组成、热加工条件、成

品贮藏和复热过程(图 2)。

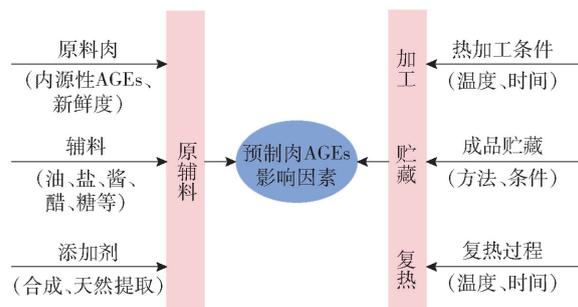


图2 预制肉中晚期糖基化终末产物含量的主要影响因素

Fig. 2 Major factors that affect levels of advanced glycation end products (AGEs) in precooked meat

### 2.1 原料肉中 AGEs 含量

动物体内本身含有 AGEs(内源性 AGEs),来源于不同生物个体或不同肌肉组织的生肉中,AGEs 含量存在较大的差异,见表 1。一般来说,生鲜猪肉和牛肉中的结合态 CML 和 CEL 含量远高于游离态含量<sup>[35,45-46]</sup>,如 Sun 等<sup>[35]</sup>的研究结果表明猪、牛肉中的结合态 CML 和 CEL 含量是其对应游离态含量的 5~20 倍;但是,某些研究表明,草鱼肉中的游离态 CML、鲑鱼肉以及鸡胸肉中的游离态 CEL 含量可能远超对应的结合态 CML 或 CEL 含量<sup>[35,45]</sup>。此外,猪腰中的游离态 CML 和 CEL 以及猪肝中的结合态 CML 和 CEL 远高于其他猪肉组织<sup>[46]</sup>。值得注意的是,即使是同类肉品,如源自不同产地的猪里脊肉和猪肝,其 AGEs 含量也有显著差别<sup>[35,46]</sup>;即使来自同批次相同品种的鱼,不同个体间游离态和结合态 AGEs 含量同样存在较大差异<sup>[45]</sup>。由于 CML 和 CEL 相对稳定,它们在原料肉中的含量将会累加到最后的预制肉成品中。

### 2.2 冷藏对生肉中 AGEs 含量的影响

生鲜畜禽鱼肉在冷藏(包括冻藏)或腌制过程中,由于内源酶(如蛋白酶、脂肪氧化酶)和微生物的作用,发生脂质氧化、蛋白质水解和氧化等反应<sup>[47-48]</sup>。这些反应可能导致活性氨基酸基团(如赖氨酸残基)暴露和活性羰基的积累,从而促进了生鲜肉冷藏期间 AGEs 或其前体物的积累,以及后续热加工过程中 AGEs 的形成<sup>[49]</sup>。尽管有一些研究表明生肉在冷藏过程中结合态 CML 或 CEL 显著上升<sup>[50-52]</sup>,也有不少研究显示冷藏对肉中结合态 CML 和 CEL 含量没有明显的影响<sup>[49,53-54]</sup>。然而,值得关注的是,随着生肉及其制品(如肉糜、肉丸、

表1 不同个体及部位的畜禽鱼肉中游离态和结合态羧甲基赖氨酸(CML)和羧乙基赖氨酸(CEL)含量

Tab.1 Free and bound  $N^{\epsilon}$ -carboxymethyl-lysine (CML) and  $N^{\epsilon}$ -carboxyethyl-lysine (CEL) in meat, poultry and fish from different carcasses and cuts

肉的种类及部位	游离态 CML	游离态 CEL	结合态 CML	结合态 CEL	样品数	文献
草鱼背部白肌	0.22~3.18	0.03~0.28	0.66~2.16	1.76~4.90	$n=15$	[45]
鲢鱼背部白肌	0.03~0.42	0.18~30.11	0.38~1.46	0.48~8.63	$n=21$	[45]
猪里脊	0.27~0.75	0.19~0.43	1.96~3.74	1.18~2.53	$n=10$	[46]
猪心	0.34~2.16	0.18~0.27	2.61~3.79	2.77~4.30	$n=10$	[46]
猪肝	0.56~1.84	0.12~0.25	5.68~8.75	3.25~8.04	$n=10$	[46]
猪腰	1.29~7.99	0.44~3.40	2.17~5.06	1.65~3.19	$n=10$	[46]
牛后腿	0.32~0.54	0.22~0.28	3.62~5.57	3.44~5.60	$n=3$	[35]
牛肋眼	0.25~0.51	0.39~0.63	3.82~4.55	2.39~4.45	$n=3$	[35]
牛胸腹	0.31~0.67	0.50~0.74	4.20~5.64	2.06~4.15	$n=3$	[35]
猪五花肉	0.14~0.44	0.25~0.28	1.83~3.24	1.16~1.69	$n=3$	[35]
猪后腿肉	0.14~0.40	0.10~0.14	2.35~3.43	1.79~2.02	$n=3$	[35]
猪里脊	0.13~0.35	0.09~0.33	2.32~3.72	1.21~1.79	$n=3$	[35]
鸡胸	0.21~0.31	6.02~8.80	2.16~2.82	1.06~1.81	$n=3$	[35]
鸡腿	0.36~0.65	0.59~1.00	2.06~2.89	0.98~1.35	$n=3$	[35]

鱼块)冷藏时间的延长,相应的加热熟制后的肉中结合态 CML 和 CEL 含量通常呈现上升趋势<sup>[33, 49-54]</sup>。因此,生产预制肉产品时,原料肉的新鲜度或加热前肉的腌制时间对成品中 AGEs 含量的影响至关重要。

### 2.3 加热的影响

肉类食品中的外源性 AGEs 主要在加热熟制过程中产生。近 10 余年来,围绕热源性 AGEs 的形成已展开大量研究,主要包括不同的加热或烹饪方法<sup>[37, 39, 55]</sup>、加热条件(如加热温度和时间)<sup>[21, 23, 36]</sup>、原料肉的成分(如蛋白、脂肪含量)<sup>[35, 46]</sup>、辅料(如食用油、盐、酱、醋、糖等)<sup>[23, 31-32, 38, 51, 56]</sup>和添加剂(如亚硝酸盐、磷酸盐、异坏血酸盐等)<sup>[33-34]</sup>对加热过程中 AGEs 形成的影响。

一般来说,肉制品的加热温度越高、时间越长,形成的 AGEs 越多<sup>[21, 36, 55-56]</sup>。例如,煎制牛排的 CML 含量随着加热时间的延长而增加<sup>[55]</sup>;在相同加热时间(15 min)下,油炸(180 °C)或烧烤(230 °C)的畜禽鱼肉中戊糖素和 CML 的含量均显著高于水煮(100 °C)的产品<sup>[56]</sup>。实际上,加热方式对 AGEs 形成的影响主要取决于加热过程中肉的实际温度和受热时间。例如,烧烤或煎炸时,肉的表面受热温度远高于肉的中心温度,因此外层肉的 AGEs 含量高于中心部分<sup>[39]</sup>;而微波加热时内外部同时受热,肉中心温度达到目标温度(畜禽鱼肉不低于 63~71 °C<sup>[55]</sup>)的升温时间短,可避免传统加热导致的外层或表面加热过度问题<sup>[57]</sup>,从而降低了加热过程中 AGEs 的形成量。相关动力学研究表明,肉中结合

态 CML 和 CEL 的形成速率基本符合零级反应动力学方程,同种肉在不同杀菌温度下的结合态 CML 或 CEL 的生成率可用阿雷尼乌斯方程拟合<sup>[21, 23]</sup>。

由于不同种类的 AGEs 的形成途径及其稳定性不同,因此加热对肉类食品中不同种类、不同存在形式的 AGEs 形成的影响往往有较大的差异。例如,在商业灭菌(121 °C, 5~30 min)或普通加热(100 °C, 0~60 min)条件下,会显著促进畜禽鱼肉中结合态 CML 和 CEL 的形成,但是对游离态 CML 和 CEL 含量无显著影响<sup>[34-35, 45]</sup>。这可能是由于游离态 CML 和 CEL 的形成需要游离赖氨酸的参与,而游离赖氨酸比参与形成蛋白质结合态的赖氨酸残基更为活跃,在加热过程中更易发生其他反应(如 Strecker 降解),从而不再参与游离态 CML 和 CEL 的形成<sup>[35, 45]</sup>。

对于来源不同的牛肉、猪肉或内脏,其脂肪、蛋白质含量通常对加热过程中 CML 和 CEL 的形成量(基于肉中的蛋白质质量计算)没有明显影响<sup>[35, 46]</sup>。这意味着高脂肪含量的肉(如猪/牛五花肉)与低脂肪含量的肉(如猪/牛里脊肉)在加热过程中 CML 和 CEL 的形成量没有显著的差异。一方面,这可能因为猪脂或牛脂中饱和脂肪酸含量高,多不饱和脂肪酸含量少,脂质氧化对 AGEs 形成的促进作用不太明显。另一方面,由于生物个体差异性大,肉样的来源、新鲜度等因素都可能影响其加热过程中 AGEs 的形成。在市场上购买的肉样中,这些因素对 AGEs 形成的影响可能会“模糊”脂质氧化的影响。在同批次的牛肉糜中加入不同含量的牛背部脂肪

(8.3%、20.4%、32.4%) 并进行加热(100 °C, 5 ~ 60 min)后,牛肉糜中结合态 CML 和 CEL 的含量(基于蛋白质质量计算)一般随着脂肪含量的增加而增加。这说明肉中脂肪含量足够高时,其对加热过程中结合态 CML 和 CEL 的形成具有明显的促进作用<sup>[34]</sup>。值得注意的是,如果基于肉样的质量计算,因脂肪含量高的肉中蛋白质含量一般较低,加热后高脂肪肉样中 AGEs 的含量可能会更低<sup>[34]</sup>。因此,在比较肉中脂肪等成分对 AGEs 形成的影响时,应基于样品中蛋白质的质量计算 AGEs 含量(如表示单位为 mg/kg 蛋白质),而不是基于整个样品的质量来计算(如表示单位为 mg/kg 样品)。

## 2.4 辅料及添加剂的影响

畜禽鱼肉制品加工过程中常需要使用油、盐、酱、醋/酸、糖、香辛料等调味料,以及食品添加剂(如亚硝酸盐、磷酸盐)。有报道显示,这些辅料的添加对肉制品加热或贮藏过程中 AGEs 的形成有一定的促进或抑制作用<sup>[23,31-34,38,51,56]</sup>。因此,了解常用调味料、添加剂对预制肉中 AGEs 形成的影响,有利于合理有效地利用它们对 AGEs 形成的抑制作用,并规避其促进作用。

### 2.4.1 油脂的影响

不论是基于模拟体系(如赖氨酸-还原糖,酪蛋白-还原糖,肌原纤维蛋白-还原糖),还是实际食品体系,关于甘油三酯或脂肪酸、植物油或动物脂的添加对加热过程中 AGEs 形成影响的研究结论不一致,有时甚至是相反的<sup>[32,38,58-60]</sup>。对于模拟体系而言,诸多因素如赖氨酸的存在形式(游离态或蛋白质结合态)及含量、还原糖种类及其与赖氨酸的比率、其他成分(如 NaCl)的添加、加热温度等,都可能导致结果的差异。一般来说,在基于蛋白质(如酪蛋白、肌原纤维蛋白、牛奶)和还原糖的模拟体系中,添加不饱和脂肪或脂肪酸会促进加热过程中 CML 和 CEL 的形成。尽管如此,脂质氧化对结合态 CML 和 CEL 形成的影响通常远低于还原糖的影响<sup>[58-60]</sup>。此外,在蛋白质-还原糖体系中添加其他成分,也可能会改变不饱和脂肪酸对 AGEs 形成的促进作用,例如在肌原纤维蛋白-还原糖-油酸混合体系中添加 NaCl,可能会导致该模拟体系加热过程中结合态 CML 和 CEL 的形成量显著低于对应的不含油酸的肌原纤维蛋白-还原糖-NaCl 体系,从而“反转”了油酸对 AGEs 形成的促进效果<sup>[60]</sup>。

在肉制品加热过程中,油脂的添加对结合态 AGEs 形成的促进或抑制作用均有报道<sup>[7,32,34,38]</sup>,结论的不一致性除了可能与原料肉、辅料、加热条件的不同有关,也可能归因于样品 AGEs 含量的计算依据不同。如前所述,如果基于肉样质量而非蛋白质质量计算 AGEs 含量,那么添加油脂的肉样中 AGEs 含量就会偏低。另外,如果比较不同植物油或动物脂肪的添加对加热过程中 AGEs 形成的影响,由于油脂本身的氧化程度、抗氧化剂含量(天然存在或后期添加)的差异,所得结论仅适用于实验当时采用的具体油脂。如果同种油脂的来源、批次不同,或者同种同批次油脂因贮藏条件不同而导致氧化程度不同<sup>[38]</sup>,这些因素都可能研究结论的差异。

### 2.4.2 NaCl 的影响

添加 NaCl 通常会促进肉制品在高温加热过程(如商业灭菌或焙烤)中结合态 CML 和 CEL 的生成<sup>[33,61]</sup>。这可能是因为 NaCl 可促进铁离子从蛋白质结合态中释放出来,从而起到促氧化的作用<sup>[33,62]</sup>。然而,在肌原纤维蛋白-还原糖-油酸的体系中添加 NaCl( $w = 1%$ ,  $w = 2%$ )对其在商业灭菌过程中结合态 CML 和 CEL 的形成均具有显著抑制作用。在不含有油酸的肌原纤维蛋白-还原糖体系中,添加 NaCl 是抑制还是促进加热过程中 CML 或 CEL 的形成,主要取决于还原糖的种类(葡萄糖或核糖)和 NaCl 的浓度<sup>[60]</sup>。因此,肉制品中 NaCl 的添加对 AGEs 形成的影响与原辅料、加工方法(如是否进行腌制)、加热条件均有关联。这些条件的不同往往会导致研究结果的差异,甚至可能出现相反的结论<sup>[7,33,61,63,64]</sup>。

### 2.4.3 有机酸的影响

添加柠檬酸(或柠檬汁)和醋酸可螯合肉中具有促氧化作用的金属离子(如铁离子、铜离子),从而可减缓肉制品在加热过程中的脂质氧化<sup>[65]</sup>。同时,有机酸还能降低 pH 值,减缓美拉德反应的初期阶段<sup>[66]</sup>。因此,添加有机酸或富含有机酸的辅料往往能降低肉类食品在加热过程中 AGEs 的形成<sup>[51,67]</sup>。然而,有机酸对热源性 AGEs 形成的抑制作用也与肉的来源及新鲜度、添加酸的种类和浓度、加热条件有关<sup>[31,51]</sup>。

### 2.4.4 糖的影响

还原糖是美拉德反应的主要反应物,而且还原糖的自氧化作用可形成  $\alpha$ -二羰基化合物(它们是 AGEs 的前体物)<sup>[11]</sup>。因此,添加还原糖(如葡萄

糖、果糖、乳糖)或含有还原糖的辅料(如蜂蜜、果汁、乳制品),会促进肉类食品加热过程中 AGEs 的形成,且其浓度越高,作用越明显<sup>[23,56]</sup>。一般来说,单糖对 AGEs 形成的促进作用远高于二糖,小分子的单糖(如核糖)的促进作用高于较大分子的单糖(如葡萄糖)<sup>[23,60]</sup>。有研究显示<sup>[23]</sup>,在猪肉糜中即使只加入  $w = 1\%$  的葡萄糖或果糖,其在商业灭菌过程中结合态 CML 的生成速率(基于零级反应拟合)也能提高 379% 或 37%。同时,结合态 CEL 的生成速率提高 402% 或 363%。这说明单糖对肉制品中 AGEs 形成的促进作用非常显著。由于蔗糖不是还原糖,一般不会促进加热过程中 AGEs 的形成,除非蔗糖水解成葡萄糖和果糖<sup>[23]</sup>。

#### 2.4.5 香辛料的影响

香辛料如辣椒、黑胡椒、姜、蒜等是肉类食品加工中常用的辅料。尽管植物提取物或多酚类物质对模拟体系中 AGEs 的抑制作用时有报道,但对在肉类食品中直接添加香辛料对 AGEs 形成的影响研究较少。香辛料对 AGEs 形成的影响与香辛料的添加浓度、肉的种类、加热条件有关,这些条件的改变,有时甚至导致香辛料的作用效果相反。Pradeep 等<sup>[68]</sup>的研究表明,加入黑胡椒、大蒜、肉桂、孜然、丁香、百里香、姜黄、玫瑰花瓣或迷迭香的煎肉饼(50% 猪肉,50% 牛肉;20 mg 香料,15 g 肉)中,结合态 CML 含量均显著低于空白对照组。然而,该研究只分析了一批肉样,实验也是在不同时间分批次进行,未考虑肉样的新鲜度对结果的影响,也未考虑  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$  冻藏对加热后肉样中 AGEs 形成的影响。另外,有报道显示,添加  $w = 1\% \sim 1.5\%$  的生姜对炙烤牛肉饼( $225\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 20 min)中游离态 CEL 和结合态 CML、CEL 的形成均有抑制作用,但是添加  $w = 0.5\%$  的生姜则对 CEL 没有显著影响<sup>[69]</sup>;添加  $w = 0.5\%$  的黄芥末粉对蒸煮肉肠中结合态 CML 的形成有抑制作用,但对结合态 CEL 没有显著影响<sup>[70]</sup>。此外,关于香辛料的添加促进热源性 AGEs 形成的研究也有报道。例如,在肉饼中添加  $w = 1\%$  山萘粉、白芷粉、香叶粉<sup>[71]</sup>,或在肉肠中添加  $w = 0.5\%$  黑胡椒、辣椒粉<sup>[70]</sup>对加热过程中结合态 CEL 的形成有促进作用。而这些香料的添加对热源性结合态 CML 形成的促进或抑制作用不明显,并且因加热时间、肉原料来源的不同,其对肉中热源性 CML 形成可能呈现相反的效果<sup>[70,71]</sup>。

#### 2.4.6 酱油和酱料的影响

酱油因其加工工艺和原料组成(高蛋白质、高

不饱和脂肪酸)的特点,通常含有较高的 AGEs(尤其是游离态 AGEs)。Li 等<sup>[72]</sup>对 12 种不同品牌的中国或日本酱油进行了分析,表明酱油的游离态 CML 含量为 277 ~ 988 mg/mL,远超出肉类等其他高 AGEs 含量的食品(表 1)。此外,酱油富含游离氨基酸和短链多肽,在加热过程中可能更容易产生 AGEs。因此,一般添加酱油的热加工肉制品含有更高的 AGEs<sup>[73]</sup>。同时,某些酱料(如甜面酱、烧烤酱),不仅含有酱油,还含有还原糖,这些酱料的加入,会显著促进加热过程(如水煮、油炸、焙烤)中 AGEs 的产生<sup>[56]</sup>。

#### 2.4.7 添加剂的影响

肉制品中常添加碱盐(包括碳酸氢钠、三聚磷酸盐、焦磷酸盐)、亚硝酸盐、抗坏血酸盐或异抗坏血酸盐,以提高其质构特性(尤其是持水能力),改善色泽,延缓脂质和蛋白质的氧化,同时抑制肉毒梭菌等微生物的生长<sup>[34,53]</sup>。亚硝酸盐具有抗氧化及螯合游离铁等金属离子的功能,其添加对肉类食品加热过程中结合态 CML 和 CEL 的形成有一定的抑制作用<sup>[33-34]</sup>。异抗坏血酸盐虽然可用作抗氧化剂,但其对热源性结合态 CML 和 CEL 的形成可能有促进作用,这主要因为异抗坏血酸有类似于还原糖的作用,可导致结合态 CML 和 CEL 的形成<sup>[11,29,34]</sup>。碱盐的添加对肉类食品中结合态 AGEs 形成有一定的促进作用。例如,向生猪肉糜中添加  $w = 0.5\%$  碳酸氢钠、三聚磷酸盐或焦磷酸盐,可导致其在冷藏期间结合态 CEL 的含量增加,但对 CML 含量无影响<sup>[53]</sup>。三聚磷酸盐或焦磷酸盐的添加显著促进了牛肉饼炙烤过程中结合态 CML 和 CEL 的形成<sup>[61]</sup>。虽然肉的 pH 值升高可能促进 AGEs 形成,但碱盐导致的 pH 值变化与其对 AGEs 含量的影响之间并没有明显的关联<sup>[53,61]</sup>。碳酸氢钠和磷酸盐对肉类食品冷藏或加热过程中 AGEs 形成的影响机制尚需进一步明确。

#### 2.5 贮藏及复热的影响

关于预制肉类食品在贮藏、复热过程中品质变化的研究已有众多报道,特别是在过熟味等风味形成的影响因素、机制及其调控方面,研究历史已超过 60 年<sup>[74]</sup>。然而,这些研究主要集中在脂质氧化、蛋白质变化(如氧化、糖化等)引起的品质变化及其调控,如不同热加工方法、贮藏条件、复热方式对预制肉中脂肪氧化指标(如挥发性物质、硫代巴比妥酸值)和蛋白质氧化指标(如蛋白质羰基、色氨酸荧

光、游离巯基)、肉质(如保水性、硬度、颜色)和营养特性(如消化率、氨基酸组分)的影响<sup>[3-4,75]</sup>。目前仅有两篇文献涉及预制肉类食品在贮藏过程中 AGEs 含量的变化<sup>[6-7]</sup>。其中, Yu 等<sup>[6]</sup>监测了经巴氏杀菌及辐照处理的不同种类(猪、牛、羊、鸡、鱼)肉丸在贮藏过程(2、4、6周, 25℃)中结合态 CML 和 CEL 的含量变化, 结果表明结合态 CML 基本随贮藏时间增加而增多, 而结合态 CEL 没有类似变化趋势, 但在贮藏6周后所有肉样的 CEL 含量均显著高于贮藏前, 且辐照组肉样贮藏后 AGEs 的含量明显高于未辐照处理的对照组。另外, Kul 等<sup>[7]</sup>研究了一种传统土耳其牛肉熟食在冷藏期间(4℃)结合态 CML 含量的变化, 结果表明冷藏了2、4、6个月后, 肉样的 CML 含量没有显著差异, 但均显著高于未贮藏肉样。与生鲜肉相比, 预制肉的斩拌、加热熟制等生产过程使其在后续贮藏过程中更易发生脂质氧化<sup>[1-2]</sup>, 这可能加速 AGEs 的形成, 因此, 贮藏过程对预制肉产品 AGEs 形成的影响不容忽视。

至今, 尚未有食用前的复热过程对预制肉类食品 AGEs 形成影响的文献报道, 特别是预制肉在食用前的贮藏-复热阶段可能发生的脂质氧化、蛋白质劣变等变化对其 AGEs 形成影响的具体机制, 这仍需进一步研究探讨。

### 3 预制肉类食品加工及贮藏过程中 AGEs 形成的抑制策略

预制肉产品中 AGEs 形成的影响因素涵盖从原料到餐桌全过程多个方面。因此, 如何有效地控制产品入口前的 AGEs 含量需要多种因素综合考虑(图3)。

在原料肉的选用方面(图3), 除了必须用质量安全达标的原料肉进行加工外(此前出现的使用劣质原料加工制得的预制菜是不合格产品), 还要保证其新鲜度, 尽量缩短宰后生肉在加热熟制前的贮藏时间。因为生肉在加热前的贮藏时间越长或越不新鲜, 其熟制后的 AGEs 含量越高<sup>[33,49-54]</sup>, 所以, 选取优质原料是从源头控制 AGEs 形成的一项重要措施。同理, 如果原料肉加工前需要腌制, 应在不显著影响产品风味的前提下, 尽量采用低温、短时腌制, 以降低脂肪氧化、蛋白质氧化和分解, 从而减少 AGEs 的形成量<sup>[33,51,53]</sup>。若因腌制时间较短导致肉咸度等风味不均匀, 可考虑采用注射法, 将调味料液

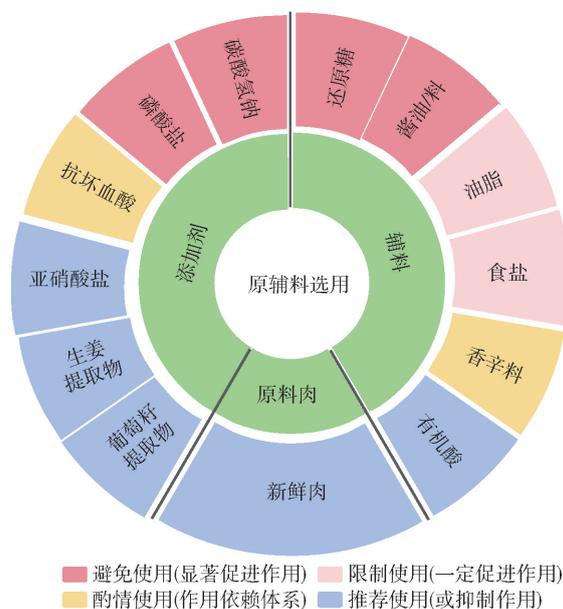


图3 基于原辅料合理选用的预制肉中晚期糖基化终末产物的形成抑制

Fig. 3 Inhibition formation of advanced glycation end products in precooked meat based on proper selection of raw meat and ingredients

直接注射到肉中, 从而缩短腌制时间, 达到减少肉中 AGEs 形成的目的。此外, 一些冻藏生肉类食品, 尤其是水产品, 通常通过添加磷酸盐来提高其保水性, 但磷酸盐一般会促进 AGEs 的形成<sup>[53,61]</sup>, 因此应尽量避免使用这类原料肉生产预制肉。

在油盐酱醋等调味料的选择方面, 一方面, 因为酱油、还原糖的添加对 AGEs 形成的促进作用非常明显<sup>[23,56,72]</sup>, 应考虑采用其他可提供类似的酱色、滋味等感官品质的调味料; 此外, 因油脂和 NaCl 对 AGEs 形成有一定促进作用<sup>[33-34]</sup>, 预制时也应尽量控制油脂和 NaCl 的用量, 特别应该避免采用氧化程度高的油脂<sup>[38]</sup>。另一方面, 可以考虑添加醋酸、柠檬酸、柠檬汁等有机酸或富含有机酸的辅料, 以抑制肉类食品加热过程中的 AGEs 形成。至于香辛料的选用, 因为目前就常见香辛料对肉中 AGEs 形成的影响作用基本没有定论, 需要根据具体肉制品及其加工方法, 通过实验筛选出可抑制 AGEs 形成的具体香辛料及其添加量和添加方法。

在添加剂的选用方面, 预制肉加工时, 应严格控制食品添加剂的使用。特别是碱盐对 AGEs 的形成有促进作用<sup>[53,61]</sup>, 应避免在预制肉中添加。抗坏血酸类化合物虽然可用作抗氧化剂, 但也可作为反应物参与 AGEs 的形成<sup>[11,29,34]</sup>, 其对 AGEs 形成的影

响与使用浓度、具体肉类食品体系的组分以及加工和贮藏条件有关,因此,不可盲目将其作为 AGEs 形成的抑制剂使用。亚硝酸盐一般可抑制肉类食品中热源性 AGEs 的形成<sup>[33-34]</sup>,但过量添加有安全隐患,且可能引起消费者的抵触情绪。可以考虑加入具有抑制作用的食物原料(生姜、黑麦麸等)<sup>[55,69]</sup>或植物提取成分(姜黄素、葡萄籽提取物等)<sup>[69,76]</sup>。此外,由于预制肉中 AGEs 形成的影响因素非常复杂,且一些针对模拟体系的研究结果往往不适用于具体肉类食品体系,因此,在选择抑制 AGEs 形成的食品辅料或天然提取物及其用量时,应根据实际肉制品的原辅料组成、加工工艺、贮藏条件等进行实验验证,并在确认有效后才推荐使用。

如 2.3 节所述,预制肉的加热熟制是其 AGEs 形成的主要原因之一,加热程度越高 AGEs 的形成量越多<sup>[21,36,55-56]</sup>。因此,在不影响产品质量安全的前提下,应尽量降低加热温度、缩短加热时间。同时,可以考虑采用先进的热加工方法,如微波加热代替传统的加热方法。使得食品快速升温,确保加热均匀,还能避免传统热加工食品普遍存在的因加热不均导致的加热过度的问题<sup>[57]</sup>,从而有效降低热源性 AGEs 的形成。

预制肉成品在食用前的贮藏和复热条件及方法对其 AGEs 含量有重要影响。由于预制肉生产过程中的加热等工序使得其在后续贮藏过程中更易发生脂质氧化等利于 AGEs 形成的反应<sup>[1-2]</sup>,因此,应尽量缩短预制肉成品的贮藏时间、降低贮藏温度,同时可考虑采用真空包装以减缓氧化反应,从而降低贮藏过程中 AGEs 的形成。预制肉复热的基本原则与其生产时的加热煮制类似,应该在保证其冷点温度或中心温度达到安全温度的前提下,不应低于 73.9 °C<sup>[8,77]</sup>,尽量降低加热温度、缩短加热时间以减少热源性 AGEs 的生成。

## 4 总结与展望

预制肉类食品具有方便、快捷、高蛋白等特点,正逐步成为老百姓餐桌上的常客。然而,其中的高 AGEs 含量也使其存在潜在食品安全隐患。市场监管总局、教育部、工业和信息化部、农业农村部、商务部、国家卫生健康委六部门联合印发《关于加强预制菜食品安全监管 促进产业高质量发展的通知》(简称《通知》),旨在强化预制菜食品安全监管,促进产业健康

发展,保障人民群众的饮食安全。依照《通知》,为了确保预制肉类食品的安全与品质,除了从原辅料、加工工艺、产品范围、贮藏运输、食用方式等方面明确规范其食品安全要求,加强对其 AGEs 等食源性危害物形成的控制研究也同样重要。预制肉类食品中 AGEs 形成的影响因素涵盖从原料到餐桌全过程中的多个方面,包括原料及辅料本身的理化特性、加工方法、成品的贮藏条件和时间、复热方法等。因此,预制肉中 AGEs 含量的有效控制需要针对其原辅料选用、加工、贮藏、复热等全过程的每一个关键环节进行逐一突破。未来,研发安全有效的 AGEs 形成抑制剂将是预制肉食品安全研究的热点和重点之一。同时,亟待进一步研究明确预制肉在贮藏和复热阶段的 AGEs 形成规律及其影响机制。

## 参考文献:

- [1] PEGG R B, KERRIHARD A L, SHAHIDI F. Cooking of meat warmed-over flavor[M]//Encyclopedia of Meat Sciences. Amsterdam: Elsevier, 2014: 410-415.
- [2] CROSS H R, LEU R, MILLER M F. Scope of warmed-over flavor and its importance to the meat industry[M]//Warmed-Over Flavor of Meat. Amsterdam: Elsevier, 1987: 1-18.
- [3] FERREIRA V C S, MORCUENDE D, MADRUGA M S, et al. Role of protein oxidation in the nutritional loss and texture changes in ready-to-eat chicken patties[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2018, 53(6): 1518-1526.
- [4] PARVIN R, ZAHID M A, SEO J K, et al. Influence of reheating methods and frozen storage on physicochemical characteristics and warmed-over flavor of nutmeg extract-enriched precooked beef meatballs [J]. Antioxidants, 2020, 9(8): 670.
- [5] KHAN M I, MIN J S, LEE S O, et al. Cooking, storage, and reheating effect on the formation of cholesterol oxidation products in processed meat products[J]. Lipids in Health and Disease, 2015, 14: 89.
- [6] YU L G, HE Z Y, ZENG M M, et al. Effect of irradiation on *N*<sup>ε</sup>-carboxymethyl-lysine and *N*<sup>ε</sup>-carboxyethyl-lysine formation in cooked meat products during storage [J]. Radiation Physics and Chemistry, 2016, 120: 73-80.
- [7] KUL D B, ANALR P, ORAL Z F Y, et al. Furosine and *N*<sup>ε</sup>-carboxymethyl-lysine in cooked meat product (kavurma): Effects of salt and fat levels during storage [J]. Journal of Stored Products Research, 2021, 93: 101856.
- [8] LIU Z J, HUANG Y Q, KONG S S, et al. Selection and

- quantification of volatile indicators for quality deterioration of reheated pork based on simultaneously extracting volatiles and reheating precooked pork[J]. *Food Chemistry*, 2023, 419: 135962.
- [9] VLASSARA H, BROWNLEE M, CERAMI A. Accumulation of diabetic rat peripheral nerve myelin by macrophages increases with the presence of advanced glycosylation endproducts[J]. *The Journal of Experimental Medicine*, 1984, 160(1): 197–207.
- [10] SINGH R, BARDEN A, MORI T, et al. Advanced glycation end-products: a review[J]. *Diabetologia*, 2001, 44(2): 129–146.
- [11] WELLS-KNECHT K J, ZYSAK D V, LITCHFIELD J E, et al. Mechanism of autoxidative glycosylation: identification of glyoxal and Arabinose as intermediates in the autoxidative modification of proteins by glucose [J]. *Biochemistry*, 1995, 34(11): 3702–3709.
- [12] FU M X, REQUENA J R, JENKINS A J, et al. The advanced glycation end product,  $N^{\epsilon}$ -(carboxymethyl)lysine, is a product of both lipid peroxidation and glycoxidation reactions[J]. *The Journal of Biological Chemistry*, 1996, 271(17): 9982–9986.
- [13] RUTTKAT A, ERBERSDOBLER H F.  $N^{\epsilon}$ -carboxymethyllysine is formed during heating of lysine with ketoses [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1995, 68(2): 261–263.
- [14] 陈铭. 香料对卤肉制品中晚期糖化终末产物含量的影响[D]. 上海: 上海海洋大学, 2019.
- CHEN M. Effects of spices on the amounts of advanced glycation end-products in stewed meat products [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2019.
- [15] ZHANG Q Z, WANG Y B, FU L L. Dietary advanced glycation end-products: perspectives linking food processing with health implications[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2020, 19(5): 2559–2587.
- [16] 李琳, 梁志理, 李冰. 食源性晚期糖化终末产物的研究进展[J]. *中国食品学报*, 2016, 16(9): 1–13.
- LI L, LIANG Z L, LI B. Dietary advanced glycation end products: a review[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2016, 16(9): 1–13.
- [17] POULSEN M W, HEDEGAARD R V, ANDERSEN J M, et al. Advanced glycation endproducts in food and their effects on health[J]. *Food and Chemical Toxicology: an International Journal Published for the British Industrial Biological Research Association*, 2013, 60: 10–37.
- [18] KRAUTWALD M, MÜNCH G. Advanced glycation end products as biomarkers and gerontotoxins: a basis to explore methylglyoxal-lowering agents for Alzheimer's disease? [J]. *Experimental Gerontology*, 2010, 45(10): 744–751.
- [19] MÜNCH G, APELT J, ENGEL R K, et al. Advanced glycation endproducts and pro-inflammatory cytokines in transgenic Tg2576 mice with amyloid plaque pathology[J]. *Journal of Neurochemistry*, 2003, 86(2): 283–289.
- [20] WANG Z Q, JIANG Y C, LIU N F, et al. Advanced glycation end-product  $N^{\epsilon}$ -carboxymethyl-Lysine accelerates progression of atherosclerotic calcification in diabetes[J]. *Atherosclerosis*, 2012, 221(2): 387–396.
- [21] SUN X H, TANG J M, WANG J, et al. Formation of advanced glycation endproducts in ground beef under pasteurisation conditions [J]. *Food Chemistry*, 2015, 172: 802–807.
- [22] ZHU Z S, HUANG M, CHENG Y Q, et al. A comprehensive review of  $N^{\epsilon}$ -carboxymethyllysine and  $N^{\epsilon}$ -carboxyethyllysine in thermal processed meat products[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 98: 30–40.
- [23] SUN X H, LI X J, TANG J M, et al. Formation of protein-bound  $N^{\epsilon}$ -carboxymethyllysine and  $N^{\epsilon}$ -carboxyethyllysine in ground pork during commercial sterilization as affected by the type and concentration of sugars [J]. *Food Chemistry*, 2021, 336: 127706.
- [24] HEGELE J, BUETLER T, DELATOUR T. Comparative LC-MS/MS profiling of free and protein-bound early and advanced glycation-induced lysine modifications in dairy products[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2008, 617(1/2): 85–96.
- [25] KASPER M, SCHIEBERLE P. Labeling studies on the formation pathway of nepsilon-carboxymethyllysine in maillard-type reactions [J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2005, 1043: 59–62.
- [26] VAN CHUYEN N, KURATA T, FUJIMAKI M. Formation of  $N$ -carboxymethyl amino acid from the reaction of  $\alpha$ -amino acid with glyoxal[J]. *Agricultural and Biological Chemistry*, 1973, 37(9): 2209–2210.
- [27] TREIBMANN S, HELLWIG A, HELLWIG M, et al. Lysine-derived protein-bound heyns compounds in bakery products[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2017, 65(48): 10562–10570.
- [28] SMUDA M, GLOMB M A. Fragmentation pathways during Maillard-induced carbohydrate degradation [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2013, 61(43): 10198–10208.
- [29] DUNN J A, AHMED M U, MURTIASHAW M H, et al. Reaction of ascorbate with lysine and protein under autoxidizing conditions: formation of  $N^{\epsilon}$ -(carboxymethyl)lysine by reaction between lysine and products of autoxidation of ascorbate [J]. *Biochemistry*, 1990,

- 29(49): 10964 – 10970.
- [30] LIU L C, LIU L, XIE J H, et al. Formation mechanism of AGEs in Maillard reaction model systems containing ascorbic acid [J]. *Food Chemistry*, 2022, 378: 132108.
- [31] LI L, KONG S, LIU Y, et al. Effects of acetic acid, ethanol, and sodium chloride on the formation of *N*<sup>ε</sup>-carboxymethyllysine, *N*<sup>ε</sup>-carboxyethyllysine and their precursors in commercially sterilized pork [J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2021, 15(6): 5337 – 5344.
- [32] LI N, WU X, LIU H L, et al. Effect of edible oil type on the formation of protein-bound *N*<sup>ε</sup>-(carboxymethyl)lysine in roasted pork patties [J]. *Food Research International*, 2023, 174: 113628.
- [33] NIU L H, SUN X H, TANG J M, et al. Combination effects of salts and cold storage on the formation of protein-bound *N*<sup>ε</sup>-(carboxymethyl)lysine and *N*<sup>ε</sup>-(carboxyethyl)lysine in raw and subsequently commercially sterilized ground pork [J]. *Food Chemistry*, 2018, 264: 455 – 461.
- [34] SUN X H, TANG J M, WANG J, et al. Formation of *N*<sup>ε</sup>-carboxymethyllysine and *N*<sup>ε</sup>-carboxyethyllysine in ground beef during heating as affected by fat, nitrite and erythorbate [J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2017, 11(1): 320 – 328.
- [35] SUN X H, TANG J M, WANG J, et al. Formation of free and protein-bound carboxymethyllysine and carboxyethyllysine in meats during commercial sterilization [J]. *Meat Science*, 2016, 116: 1 – 7.
- [36] LIU Y X, LIU C, HUANG X S, et al. Exploring the role of Maillard reaction and lipid oxidation in the advanced glycation end products of batter-coated meat products during frying [J]. *Food Research International*, 2024, 178: 113901.
- [37] WANG Q N, ZHU Z S, BASSEY A P, et al. Comparison of five thermal treatments on the formation of *N*<sup>ε</sup>-carboxymethyl-lysine in duck breast [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2023, 185: 115127.
- [38] GAO Y, QIN R, WU R, et al. Formation regularity of AGEs in fish patties under the synergistic action of pre-oxidized oil and air frying [J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2023, 120: 105340.
- [39] QIN R K, WU R L, SHI H N, et al. Formation of AGEs in fish cakes during air frying and other traditional heating methods [J]. *Food Chemistry*, 2022, 391: 133213.
- [40] EGGEN M D, GLOMB M A. Analysis of glyoxal-and methylglyoxal-derived advanced glycation end products during grilling of porcine meat [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2021, 69(50): 15374 – 15383.
- [41] BAI X, LI Y, LIANG W W, et al. Formation of advanced glycation end products of chicken breast meat induced by freeze-thaw cycles and subsequent cooking [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 244: 125387.
- [42] 陈琳, 徐幸莲, 周光宏. 应用于肉品嫩化的组织蛋白酶的研究进展 [J]. *食品科学*, 2009, 30(1): 271 – 274.
- CHEN L, XU X L, ZHOU G H. Research progress on lysosomal cathepsins applied in meat tenderization [J]. *Food Science*, 2009, 30(1): 271 – 274.
- [43] 丘静, 秦德丽, 刘纯友, 等. 低温贮藏过程中水牛肉蛋白质的变化 [J]. *食品与机械*, 2022, 38(2): 137 – 142.
- QIU J, QIN D L, LIU C Y, et al. Protein changes of buffalo meat during low temperature storage [J]. *Food & Machinery*, 2022, 38(2): 137 – 142.
- [44] LIN Y Y, HUANG S F, LIAO K W, et al. Quantitation of  $\alpha$ -dicarbonyls, lysine-and arginine-derived advanced glycation end products, in commercial canned meat and seafood products [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2023, 71(17): 6727 – 6737.
- [45] NIU L H, SUN X H, TANG J M, et al. Free and protein-bound *N*-carboxymethyllysine and *N*-carboxyethyllysine in fish muscle: biological variation and effects of heat treatment [J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2017, 57: 56 – 63.
- [46] NIU L H, YU H, ZHANG L L, et al. Advanced glycation end-products in raw and commercially sterilized pork tenderloin and offal [J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2022, 112: 104681.
- [47] LIN H, ZHANG J J, HUANG Y Q, et al. Effects of acetic acid and citric acid on quality properties of ground pork during storage and subsequent commercial sterilization [J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2023, 17(1): 155 – 166.
- [48] 张莉, 孙佳宁, 朱明睿, 等. 不同解冻方式对哈萨克羊肉脂质及蛋白质氧化的影响 [J]. *食品科学技术学报*, 2022, 40(2): 161 – 171.
- ZHANG L, SUN J N, ZHU M R, et al. Effect of different thawing methods on oxidation of lipid and protein in muscle of Kazakh sheep [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2022, 40(2): 161 – 171.
- [49] NIU L H, SUN X H, TANG J M, et al. Formation of advanced glycation end-products in fish muscle during heating: relationship with fish freshness [J]. *Journal of*

- Food Composition and Analysis, 2017, 63: 133–138.
- [50] CHU F Y, LIU Z J, MIAO J J, et al. Formation of advanced glycation end-products in minced pork during frozen-then-chilled storage and subsequent heating[J]. Food Chemistry, 2023, 426: 136616.
- [51] LIN H, LAI K Q, ZHANG J J, et al. Heat-induced formation of advanced glycation end-products in ground pork as affected by the addition of acetic acid or citric acid and the storage duration prior to the heat treatments [J]. Food Chemistry: X, 2022, 15: 100387.
- [52] HUANG S, DONG X, ZHANG Y, et al. Formation of advanced glycation end products in raw and subsequently boiled broiler muscle; biological variation and effects of postmortem ageing and storage[J]. Food Science and Human Wellness, 2022(2): 255–262.
- [53] ZHANG J J, LIU Z J, HUANG Y Q, et al. Effects of sodium bicarbonate and sodium phosphates on the formation of advanced glycation end-products in minced pork during cold storage[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2022, 16(6): 4425–4432.
- [54] YU L G, LI Q, LI Y, et al. Impact of frozen storage duration of raw pork on the formation of advanced glycation end-products in meatballs[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 146: 111481.
- [55] CHEN G J, SMITH J S. Determination of advanced glycation endproducts in cooked meat products[J]. Food Chemistry, 2015, 168: 190–195.
- [56] CHAO P C, HSU C C, YIN M C. Analysis of glycative products in sauces and sauce-treated foods[J]. Food Chemistry, 2009, 113(1): 262–266.
- [57] TANG J M. Unlocking potentials of microwaves for food safety and quality[J]. Journal of Food Science, 2015, 80(8): E1776–E1793.
- [58] HAN L, LI L, LI B, et al. Glyoxal derived from triglyceride participating in diet-derived *N*<sup>ε</sup>-carboxymethyl-lysine formation [J]. Food Research International, 2013, 51(2): 836–840.
- [59] LIMA M, ASSAR S H, AMES J M. Formation of *N*<sup>ε</sup>-(carboxymethyl) lysine and loss of lysine in casein glucose-fatty acid model systems[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2010, 58(3): 1954–1958.
- [60] NIU L H, LAI K Q, HUANG Y Q. Sodium chloride inhibits the heat-induced formation of advanced glycation end-products in myofibrillar protein-reducing sugar-oleic acid model systems[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2024, 18(2): 1293–1301.
- [61] LI Y, XUE C Y, QUAN W, et al. Assessment the influence of salt and polyphosphate on protein oxidation and *N*<sup>ε</sup>-(carboxymethyl) lysine and *N*<sup>ε</sup>-(carboxyethyl) lysine formation in roasted beef patties [J]. Meat Science, 2021, 177: 108489.
- [62] ZANARDI E, GHIDINI S, CONTER M, et al. Mineral composition of Italian salami and effect of NaCl partial replacement on compositional, physico chemical and sensory parameters [J]. Meat Science, 2010, 86(3): 742–747.
- [63] KONG S S, CHU F Y, HUANG Y Q, et al. Effects of salt concentrations on the advanced glycation end-products in dried salted Spanish mackerel fillets during storage[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2022, 16(5): 3469–3476.
- [64] NIU L H, KONG S S, CHU F Y, et al. Investigation of advanced glycation end-products,  $\alpha$ -dicarbonyl compounds, and their correlations with chemical composition and salt levels in commercial fish products[J]. Foods, 2023, 12(23): 4324.
- [65] KIM T K, HWANG K E, LEE M A, et al. Quality characteristics of pork loin cured with green nitrite source and some organic acids [J]. Meat Science, 2019, 152: 141–145.
- [66] LUND M N, RAY C A. Control of Maillard reactions in foods; strategies and chemical mechanisms[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2017, 65(23): 4537–4552.
- [67] URIBARRI J, WOODRUFF S, GOODMAN S, et al. Advanced glycation end products in foods and a practical guide to their reduction in the diet [J]. Journal of the American Dietetic Association, 2010, 110(6): 911–916.
- [68] PRADEEP M, KIFLEMARIAM F K, TAREKE E. Individual and combined effects of food components in attenuating the formation of advanced glycation end products (AGEs) [J]. Food and Nutrition Sciences, 2022, 13(1): 17–25.
- [69] XUE C, DENG P, QUAN W, et al. Ginger and curcumin can inhibit heterocyclic amines and advanced glycation end products in roast beef patties by quenching free radicals as revealed by electron paramagnetic resonance [J]. Food Control, 2022, 138: 109038.
- [70] LI Y, LI H, ZHU Y C, et al. Processing stage-induced formation of advanced glycation end products in cooked sausages with the addition of spices[J]. Foods, 2023, 12(20): 3788.
- [71] 陈铭, 吴帅, 黄轶群, 等. 山奈、白芷和香叶对猪肉加热过程中晚期糖化终末产物含量的影响[J]. 食品与机械, 2019, 35(4): 1–6.
- CHEN M, WU S, HUANG Y Q, et al. Effects of galangal, angelica root and bay leaves on the formation of advanced glycation end-products in pork during heating

- [J]. *Food & Machinery*, 2019, 35(4): 1–6.
- [72] LI Y, LI L, LI B, et al. Optimization of pretreatment for free and bound  $N^{\epsilon}$ -(carboxymethyl)lysine analysis in soy sauce[J]. *Food Analytical Methods*, 2015, 8(1): 195–202.
- [73] YU L G, LI Y, GAO C, et al.  $N^{\epsilon}$ -carboxymethyl-lysine and  $N^{\epsilon}$ -carboxyethyl-lysine contents in commercial meat products[J]. *Food Research International*, 2022, 155: 111048.
- [74] TIMS M J, WATTS B M. Protection of cooked meats with phosphates [J]. *Food Technology*, 1958, 12: 240–243.
- [75] UTRERA M, RODRÍGUEZ-CARPENA J G, MORCUENDE D, et al. Formation of lysine-derived oxidation products and loss of tryptophan during processing of porcine patties with added avocado byproducts[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2012, 60(15): 3917–3926.
- [76] ZHU Z S, Fang R, Yang J, et al. Air frying combined with grape seed extract inhibits  $N^{\epsilon}$ -carboxymethyllysine and  $N^{\epsilon}$ -carboxyethyllysine by controlling oxidation and glycosylation [J]. *Poultry Science*, 2021, 100(2): 1308–1318.
- [77] USDA. Safe minimum internal temperature chart [EB/OL]. (2020-05-11)[2024-03-09]. <https://www.fsis.usda.gov/food-safety/safe-food-handling-and-preparation/food-safety-basics/safe-temperature-chart>.

## Formation and Inhibition of Advanced Glycation End Products in Precooked Meat Products

HUANG Yiqun, ZHOU Junhao, LI Lin, WANG Faxiang

(School of Food Science and Bioengineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** With the improvement of people's living standards and the acceleration of the pace of life, convenient, nutritious and delicious precooked farm-animal meat, poultry, and fish (referred to as "precooked meat") are gradually becoming regular dishes for common people. However, meat products are usually rich in protein and fat and contain reducing sugars. Chemical reactions such as Maillard reaction and lipid oxidation are inevitable during the processing of precooked meat and their subsequent storage and reheating, which easily lead to the formation of advanced glycation end products (AGEs). Excessive intake of dietary AGEs could increase the risks for various chronic diseases. Based on the main formation pathways of two typical AGEs ( $N^{\epsilon}$ -carboxymethyl-lysine and  $N^{\epsilon}$ -carboxyethyl-lysine) in meat products during processing and storage, factors affecting AGEs formation in precooked meat from the raw materials to the table were summarized. Special focuses were the effects of raw meat quality, commonly used seasonings and additives, thermal processing, storage and reheating of precooked meat on AGEs formation. Furthermore, major approaches to reduce AGEs levels in precooked meat during processing and storage were discussed, including the use of high-quality raw meat, proper selection of seasonings and additives, minimization of storage duration, as well as minimization of heating and reheating temperature and time under the conditions of ensuring product quality and safety. Through these expositions, it was hoped to provide a reference for effective control of AGEs formation in precooked meat, thus providing consumers with safer and healthier precooked meat products.

**Keywords:** precooked dish; storage; reheating; chemical hazard; advanced glycation end products