

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2026.07.008

不同热加工 pH 值对 3 种饮食晚期糖基化终产物形成的影响

孙凯悦, 刘 健, 张 弦

(合肥工业大学 食品与生物工程学院, 安徽 合肥 230601)

摘 要:晚期糖基化终产物(advanced glycation end products, AGEs)是食品加工过程中由还原糖与蛋白质、脂质与氨基酸等发生非酶促糖基化反应形成的一类化合物,加工条件的变化是否会影响不同饮食下 AGEs 的形成尚不明确。文章在热加工 pH 值为 3~11 情况下,检测标准饮食(chow diet, CD)、高脂饮食(high-fat diet, HFD)和高脂高胆固醇西方饮食(Western diet, WD)中荧光性 AGEs、羧甲基赖氨酸(N^ε-carboxymethyllysine, CML)、羧乙基赖氨酸(N^ε-carboxyethyllysine, CEL)的产生水平。结果显示:在不同的热加工 pH 值下,3 种饮食产生的荧光性 AGEs 水平随热加工 pH 值增加而升高;与 pH 值为 7 的中性热加工条件相比,3 种饮食在 pH 值为 3 的酸性热加工条件下,产生的非荧光性 CML 和 CEL 水平显著降低,而在 pH 值为 11 的碱性热加工条件下产生的 CML 和 CEL 水平显著升高。此外,在不同 pH 值热加工过程中标准饮食产生的 AGEs 水平最低,而西方饮食产生的 AGEs 水平最高。结果表明:酸性热加工条件抑制饮食 AGEs 的产生,而碱性热加工条件促进饮食 AGEs 的产生;高脂高胆固醇的饮食成分促进热加工过程中 AGEs 的产生。

关键词:晚期糖基化终产物(AGEs);热加工;pH 值;羧甲基赖氨酸(CML);羧乙基赖氨酸(CEL)

中图分类号:TS201.1

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2026)07-0917-07

Effects of pH on advanced glycation end products formation during thermal processing in three diets

SUN Kaiyue, LIU Jian, ZHANG Xian

(School of Food and Biological Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China)

Abstract: Advanced glycation end products(AGEs) are a class of compounds formed by non-enzymatic glycosylation of reducing sugars with proteins, lipids and amino acids during food processing. It is unclear whether changes in processing conditions affect the formation of AGEs in different diets. In this study, the formations of fluorescent AGEs, N^ε-carboxymethyllysine(CML), and N^ε-carboxyethyllysine(CEL) were examined in three diets including chow diet(CD), high-fat diet(HFD) and high-fat and high-cholesterol Western diet(WD) at pH from 3 to 11 during thermal processing. The results showed that the levels of fluorescent AGEs were elevated with the increase of pH during thermal processing in three diets. Compared to the neutral condition at pH 7, the levels of non-fluorescent CML and CEL were significantly decreased under the acidic condition at pH 3, and increased under the alkaline condition at pH 11 in all three diets during thermal processing. In addition, under the different thermal processing conditions from pH 3 to pH 11, the lowest levels of AGEs were formed at CD, and the highest levels of AGEs were formed at WD. These results indicated that during thermal process-

收稿日期:2024-04-01;修回日期:2024-04-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(32200630)

作者简介:孙凯悦(1998—),女,山东东营人,合肥工业大学硕士生;

刘 健(1970—),男,安徽合肥人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师;

张 弦(1988—),女,安徽合肥人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师,通信作者, E-mail: zhangxian@hfut.edu.cn.

ing, the acidic conditions inhibited dietary AGEs production, whereas alkaline conditions promoted dietary AGEs production. Meanwhile, high-fat and high-cholesterol dietary components promoted dietary AGEs production during thermal processing.

Key words: advanced glycation end products(AGEs); thermal processing; pH value; N^ε-carboxymethyllysine(CML); N^ε-carboxyethyllysine(CEL)

晚期糖基化终产物(advanced glycation end products, AGEs)是还原糖和相关代谢物与蛋白质、脂类、氨基酸发生非酶促反应时形成的一组异质化合物^[1]。AGEs 有多种存在形式,其中羧甲基赖氨酸(N^ε-carboxymethyllysine, CML)和羧乙基赖氨酸(N^ε-carboxyethyllysine, CEL)是 2 种典型的 AGEs,它们属于非荧光性 AGEs,由糖氧化或降解过程中产生的赖氨酸和乙二醛反应生成,或由热加工和脂质过氧化过程中的 Amadori 产物氧化生成。CML 和 CEL 是糖基化过程的主要 AGEs 标记物^[2],一般作为食品中 AGEs 的主要目标检测物质。

AGEs 分为内源性和外源性 2 种产物,外源性 AGEs 的含量通常远高于内源性 AGEs 的含量^[3]。现代日常饮食大多经过热加工,外源性 AGEs 主要通过饮食摄入,能够进入人体血液循环,促进细胞氧化应激和炎症,并增加糖尿病、肥胖和心血管疾病等代谢性疾病的风险^[4]。研究表明,不同的饮食模式对代谢性疾病的发展具有不同的影响。摄入高脂饮食(high-fat diet, HFD)会导致肥胖、糖尿病和非酒精性脂肪肝^[5]的发生,而摄入高脂高胆固醇西方饮食(Western diet, WD)可有会导致心血管疾病的发生^[6]。由于在人体研究中,无法直接鉴定某种特定营养组分的功能^[7],因此,针对特定饮食成分的研究主要利用动物模型进行。然而,目前基于动物模型分析 AGEs 对代谢性疾病影响的研究中,大多是利用未加工或未明确 AGEs 含量的饮食喂养小鼠进行造模^[8-9]。关于热加工处理饮食所产生的外源性 AGEs 对小鼠的影响研究较少。因此,研究不同动物饮食热加工所产生的 AGEs 水平,对阐明不同饮食如何通过产生 AGEs 影响代谢性疾病至关重要。

食品的加工过程是食品中 AGEs 形成的主要来源,受到食品营养成分、加热温度和时间、pH 值等诸多因素的影响^[10]。已有研究表明,降低肉类的 pH 值可以抑制蛋白质中游离氨基的亲核性,从而在美拉德反应的初始步骤抑制与还原糖的反应^[11],而碱性条件有利于生成各种裂变产物,如还原酮和 α -二羰基化合物^[12]。因此,进一

步明确加工条件对饮食 AGEs 形成的影响对于控制外源性 AGEs 的形成和摄入具有重要意义。

基于以上分析,本文通过热加工处理标准饮食(chow diet, CD)、高脂饮食(HFD)和高脂高胆固醇西方饮食(WD),并研究在不同的热加工 pH 值下 3 种饮食产生荧光性 AGEs 的水平及 CML、CEL 量的变化,探究在酸性和碱性热加工条件下 3 种饮食中 AGEs 形成的规律,为食品加工过程中 AGEs 的控制提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 主要试剂

胆固醇(货号:A610122)、L-胱氨酸(货号:A610088)均购于生工生物工程(上海)股份有限公司;三氯乙酸(货号:T104257)、正己烷(货号:H810749)、磷酸氢钙(货号:C108377)均购于上海阿拉丁生化科技有限公司;硼酸(货号:10004818)、链霉菌蛋白酶 E(货号:P861439)、CEL(货号:N923112)均购于上海麦克林生化科技有限公司;CML(货号:S28527)购于上海源叶生物科技有限公司;MCX 固相萃取柱(3 mL/60 mg, SBEQ-CA3285)购于上海安谱实验科技股份有限公司;Acquity UPLC HSS T3 色谱柱(1.8 μ m, 50 mm $\times$ 2.1 mm)购于美国 Waters 公司;硼氢化钠(货号:80115816)、碳酸钙(货号:10005760)、柠檬酸钾(货号:30155418)均购于国药集团化学试剂有限公司;酪蛋白(产品标准代号:GB 31638)购于甘肃华羚乳品股份有限公司;麦芽糊精(产品标准代号:GB/T 20884)购于山东西王糖业有限公司;聚葡萄糖(产品标准代号:GB 25541)购于山东百龙创园生物科技有限公司;重酒石酸胆碱(货号:C0553)购于上海化成工业发展有限公司;蔗糖、玉米淀粉、大豆油、猪油均购于当地超市。

1.2 3 种饮食的配制

3 种饮食中蛋白质、碳水化合物、脂肪的质量分数和热量百分比见表 1 所列,3 种饮食配方及其热量见表 2 所列。

标准饮食根据 Research Diets 的 D12450B 配方配制,热量为 3.85 kcal/g,脂肪热量占比

为 10%;高脂饮食根据 Research Diets 的 D12451 配方配制,热量为 4.73 kcal/g,脂肪热量占比为 45%;为了排除脂肪和胆固醇对饮食 AGEs 产生的双重作用,西方饮食采用在高脂饮食中添加 1.25%胆固醇配制,其热量和脂肪热量占比与高脂饮食相同。

表 1 3 种饮食中三大营养素的配方和热量占比 %						
饮食种类	标准饮食		高脂饮食		西方饮食	
	w	热量占比	w	热量占比	w	热量占比
蛋白质	19	20	24	20	23	20
碳水化合物	71	70	46	35	46	35
脂肪	4	10	23	45	22	45

表 2 3 种饮食配方													
饮食种类	标准饮食		高脂饮食		西方饮食		饮食种类	标准饮食		高脂饮食		西方饮食	
	质量/g	热量/kcal	质量/g	热量/kcal	质量/g	热量/kcal		质量/g	热量/kcal	质量/g	热量/kcal	质量/g	热量/kcal
酪蛋白	200.0	800.0	200.0	800.0	200.0	800.0	碳酸钙	5.5	0	5.5	0	5.5	0
L-胱氨酸	3.0	12.0	3.0	12.0	3.0	12.0	柠檬酸钾	16.5	0	16.5	0	16.5	0
蔗糖	354.0	1 416.0	176.8	707.2	176.8	707.2	矿物质混合物	10.0	0	10.0	0	10.0	0
玉米淀粉	315.0	1 260.0	72.8	291.2	72.8	291.2	维生素混合物	10.0	40.0	10.0	40.0	10.0	40.0
麦芽糊精	35.0	140.0	100.0	400.0	100.0	400.0	重酒石酸胆碱	2.0	0	2.0	0	2.0	0
聚葡萄糖	50.0	0	50.0	0	50.0	0	胆固醇	0	0	0	0	10.9	0
大豆油	25.0	225.0	25.0	225.0	25.0	225.0	总量	1 059.0	4 073.0	862.1	4 072.9	873.0	4 072.9
猪油	20.0	180.0	177.5	1 597.5	177.5	1 597.5							

1.3 饮食热加工处理

准确称取 0.10 g 3 种饮食样品,加入 1 mL 不同 pH 值(3、5、7、9、11)的缓冲溶液,涡旋 10 s,在 120 ℃的烘箱中热加工 60 min,待冷却至室温后,在 4 000 r/min 转速下离心 10 min,收集上清液用于测定荧光性 AGEs 水平,并收集渣滓,在玻璃干燥器中干燥 48 h,将干燥后的样品研磨均匀,用于测定其中含 CML 和 CEL 的量。

1.4 荧光性 AGEs 测定

吸取 1 mL 上清液,加入 3 mL 链酶蛋白酶 E 溶液(0.375 mg/mL),涡旋混合均匀,在 40 ℃下消化 36 h;冷却至室温后,在 5 000 r/min 转速下离心 10 min;收集上清液并稀释 50 倍,于多功能酶标仪(Synergy H1, BioTek, USA)测定荧光强度,荧光值以 100 mg/mL 样品的荧光强度表示。激发波长为 370 nm,发射波长为 440 nm,狭缝宽度为 5 nm。

1.5 饮食中 CML 和 CEL 的提取

准确称取 0.20 g 研磨饮食样品,加入 2 mL 硼酸缓冲溶液(0.2 mol/L, pH 值 9.2)在室温下孵育 30 min,再加入 0.4 mL 硼氢化钠溶液(2 mol/L,用 0.1 mol/L NaOH 配制),4 ℃还原 8 h;然后,将样品与 0.5 mL 20%三氯乙酸混合,并在 6 000 r/min 转速下离心 10 min 以沉淀蛋白质,收集沉淀,加入 2 mL 20%的三氯乙酸溶液洗涤沉淀 2 次;最后,加入 2 mL 正己烷进行脱脂,

收集沉淀后加入 4 mL 浓度为 6 mol/L 的盐酸溶液,110 ℃水解 24 h;冷却至室温后,加入 6 mL 超纯水,吹打均匀,用 0.45 μm 滤膜过滤,收集滤液,真空冷冻干燥 48 h,再利用超纯水复溶;氮气吹干,过 MCX 固相萃取柱除杂,洗脱液吹干后用 200 μL 超纯水复溶,过 0.45 μm 的水系膜,等待上样。

1.6 CML 和 CEL 量的测定

用 Acquity UPLC HSS T3 色谱柱(1.8 μm, 50 mm×2.1 mm)进行分离,采用 Thermo Scientific 液相色谱-四级杆静电场轨道阱质谱联用仪(LC-Q Exactive Plus)测定 CML 和 CEL 的量。流动相为 0.1%甲醇水(溶剂 A)-乙腈(溶剂 B),流速为 0.25 mL/min,进行梯度洗脱,洗脱参数见表 3 所列。质谱条件:负离子模式;*m/z* 范围 100~1 500;分辨率 70 000;毛细管温度 320 ℃;喷雾电压 3.0 kV;碰撞能量 10 eV。

表 3 梯度洗脱程序			
时间/min	流速/(mL/min)	流动相体积分数/%	
		溶剂 A	溶剂 B
0	0.25	95	5
8.0	0.25	40	60
8.1	0.25	40	60
10.0	0.25	95	5

1.7 数据分析

所有数据以平均值±标准差表示。图使用 Origin 2018 绘制。两组数据间的显著性分析由 t 检验计算,多组数据间的显著性分析采用单因素方差分析检验计算。NS 表示无显著性差异,* 表示 $P<0.05$,** 表示 $P<0.01$,*** 表示 $P<0.001$,**** 表示 $P<0.0001$ 。

2 结果与分析

2.1 热加工对饮食 pH 值的影响

本文研究了热加工对标准饮食(CD)、高脂饮食(HFD)和西方饮食(WD)pH 值的影响,如图 1 所示。

从图 1 可以看出,3 种饮食进行 120 °C 热加工 60 min 前、后 pH 值没有显著差异,表明热加工过程不会改变这 3 种饮食的 pH 值。

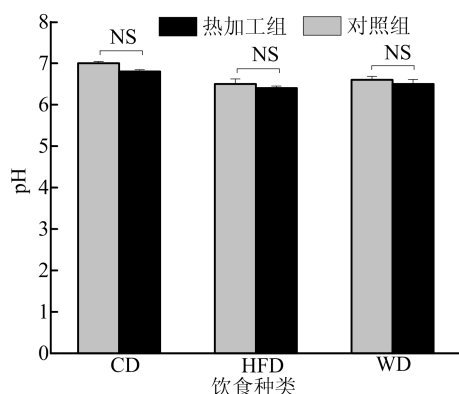


图 1 热加工前、后 3 种饮食 pH 值

2.2 热加工 pH 值对荧光性 AGEs 水平的影响

pH 值是影响糖基化反应的一个重要因素,本文探究了 120 °C 热加工 60 min 条件下,标准饮食、高脂饮食和西方饮食在不同 pH 值(3、5、7、9、11)热加工过程中荧光性 AGEs 形成的情况,结果如图 2 所示。

由图 2 可知,随着热加工 pH 值的增加,标准饮食、高脂饮食和西方饮食在热加工过程中生成的荧光性 AGEs 水平逐渐升高。相较于中性(pH 值为 7)条件,在 pH 值为 11 的强碱条件下,标准饮食、高脂饮食和西方饮食生成的荧光性 AGEs 水平均最高,是 pH 值为 3 时的 1.2~1.5 倍;而在 pH 值为 3 的强酸条件下,3 种饮食生成的荧光性 AGEs 水平最低。此外,在同一 pH 值热加工条件下,高脂饮食、西方饮食产生的荧光性 AGEs 水平显著高于标准饮食。综上所述,3 种饮食产生的荧光性 AGEs 水平随热加工 pH 值升高而增加,并且在西方饮食中荧光性 AGEs 水平最高。

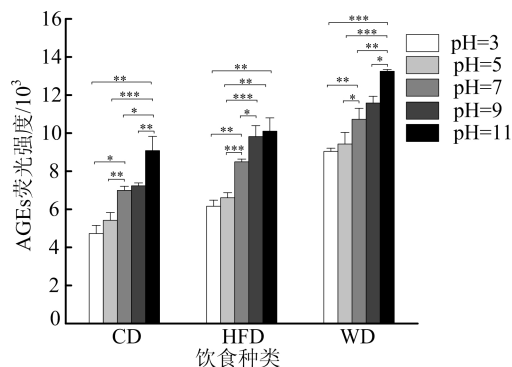


图 2 热加工 pH 值对饮食荧光性 AGEs 生成的影响

2.3 热加工 pH 值对 CML 水平的影响

为了进一步验证不同热加工 pH 值对 3 种饮食中 AGEs 产生的影响,本文检测 120 °C 热加工 60 min 时,酸性(pH 值为 3)条件、中性(pH 值为 7)条件和碱性(pH 值为 11)条件下 3 种饮食产生 CML 的负离子质谱图,如图 3~图 5 所示。

不同 pH 值对 3 种饮食产生 CML 水平的影响如图 6 所示。

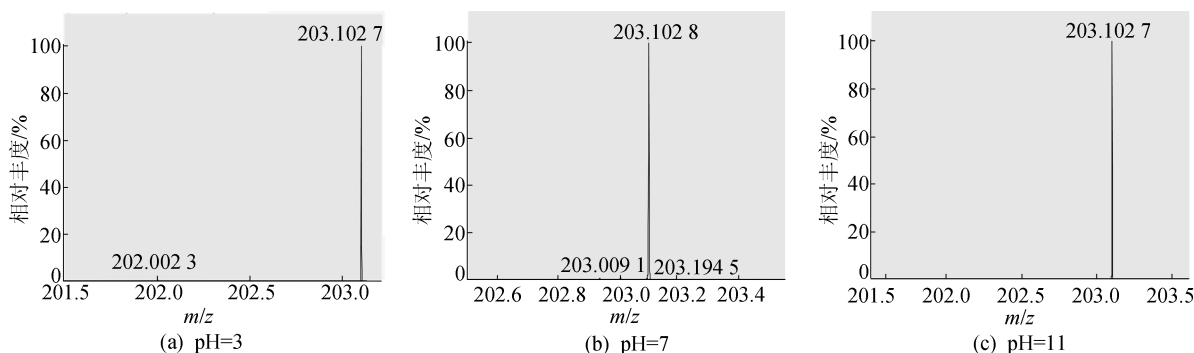


图 3 不同热加工 pH 值下 CD 饮食产生 CML 的负离子质谱图

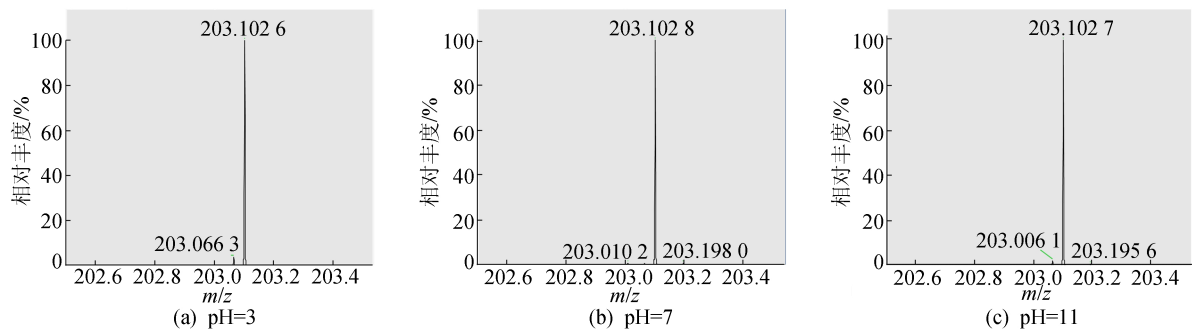


图4 不同热加工 pH 值下 HFD 饮食产生 CML 的负离子质谱图

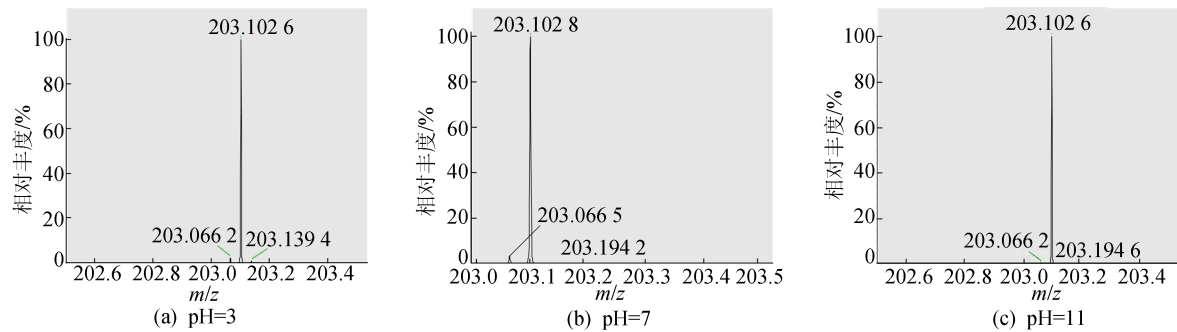


图5 不同热加工 pH 值下 WD 饮食产生 CML 的负离子质谱图

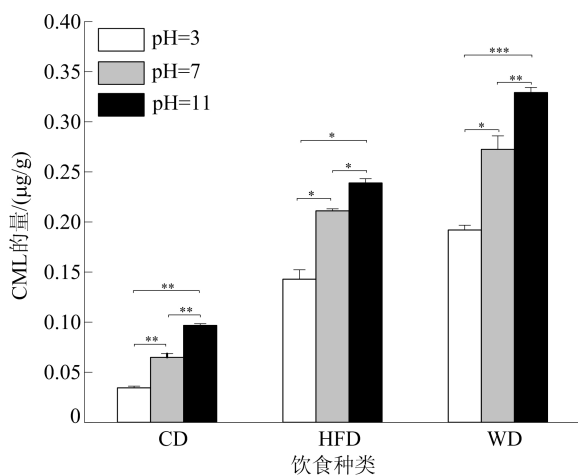


图6 热加工 pH 值对 3 种饮食产生 CML 水平的影响

从图6可以看出:

1) 标准饮食在 pH 值为 3 条件下产生的 CML 量为 $0.034 \mu\text{g/g}$; 当 pH 值升高到 7 时, 产生的 CML 量增加到 $0.065 \mu\text{g/g}$, 增加了约 0.91 倍; 在 pH 值为 11 时, 产生的 CML 量为 $0.097 \mu\text{g/g}$, 相对于 pH 值为 7 时增加了约 0.5 倍。

2) 高脂饮食在不同 pH 值条件下热加工产生的 CML 水平变化趋势与标准饮食一致, 但产生的量显著高于标准饮食, 在 pH 值为 3 时, 产生的 CML 量为 $0.143 \mu\text{g/g}$; 在 pH 值为 7 时, 产生的 CML 量为 $0.211 \mu\text{g/g}$, 增加了约 0.48 倍; 在 pH 值为 11 时, 产生的 CML 量为 $0.239 \mu\text{g/g}$ 。

3) 西方饮食产生的 CML 水平随着 pH 值的升高而升高, 在 pH 值为 3、7、11 条件下产生的 CML 量分别为 0.192 、 0.273 、 $0.329 \mu\text{g/g}$ 。

综上所述, 3 种饮食产生的 CML 水平随热加工 pH 值升高而增加, pH 值为 3 时产生的 CML 水平最低, pH 值为 11 时产生的 CML 水平显著升高, 且在西方饮食中产生的 CML 水平最高。

2.4 热加工 pH 值对 CEL 水平的影响

本文检测了 120°C 热加工 60 min 时, 酸性 (pH 值为 3) 条件、中性 (pH 值为 7) 条件和碱性 (pH 值为 11) 条件下 3 种饮食中 CEL 的负离子质谱图如图 7~图 9 所示, 不同 pH 值对 3 种饮食产生 CEL 水平的影响如图 10 所示。

从图 10 可以看出, 在 pH 值为 3、7、11 条件下, 标准饮食热加工产生的 CEL 量分别为 0.948 、 1.400 、 $1.818 \mu\text{g/g}$ 。pH 值为 7 时, 高脂饮食产生的 CEL 量为 $1.606 \mu\text{g/g}$; 高脂饮食在 pH 值为 3 条件下热加工产生的 CEL 水平降低约 1.1 倍; 在 pH 值为 11 碱性环境下热加工, 相比酸性环境, 产生的 CEL 量增加约 1.4 倍。同 CML 水平趋势一致, 西方饮食在 pH 值为 3、7、11 时, 产生的 CEL 水平在 3 种饮食中最高, 在 pH 值为 3 时, 产生的 CEL 量为 $1.779 \mu\text{g/g}$; 在 pH 值为 7 时, 产生的 CEL 量升高至 $1.911 \mu\text{g/g}$; 在 pH 值为 11 时, CEL 水平增加约 1.3 倍, 产生的 CEL 量为

2.424 $\mu\text{g/g}$ 。结果表明,不同 pH 值热加工处理的 3 种饮食中 CEL 水平变化趋势与 CML 一致,

产生的 CEL 量随 pH 值升高而增加,并且西方饮食产生的 CEL 量最高。

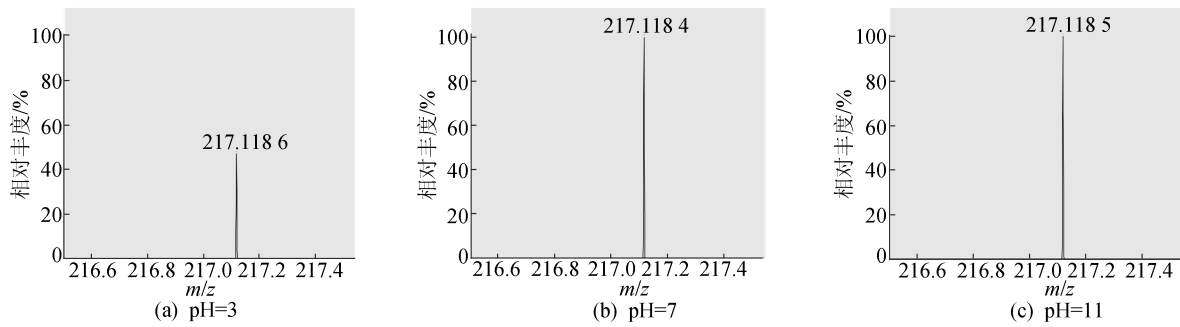


图 7 在不同热加工 pH 值下 CD 饮食产生 CEL 的离子质谱图

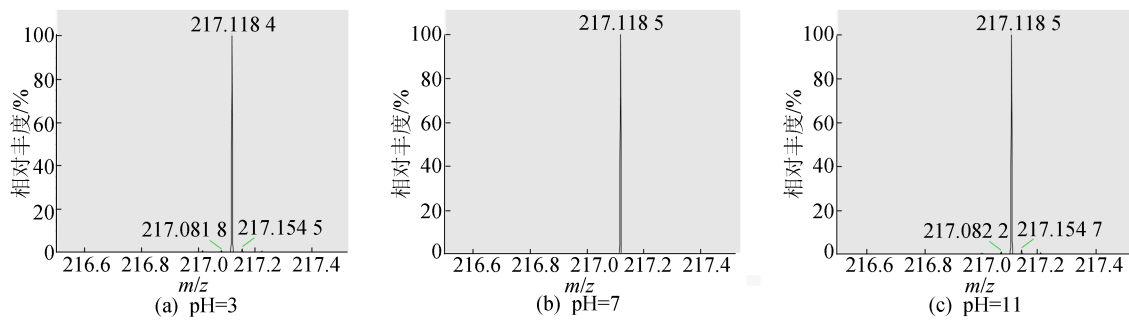


图 8 在不同热加工 pH 值下 HF 饮食产生 CEL 的负离子质谱图

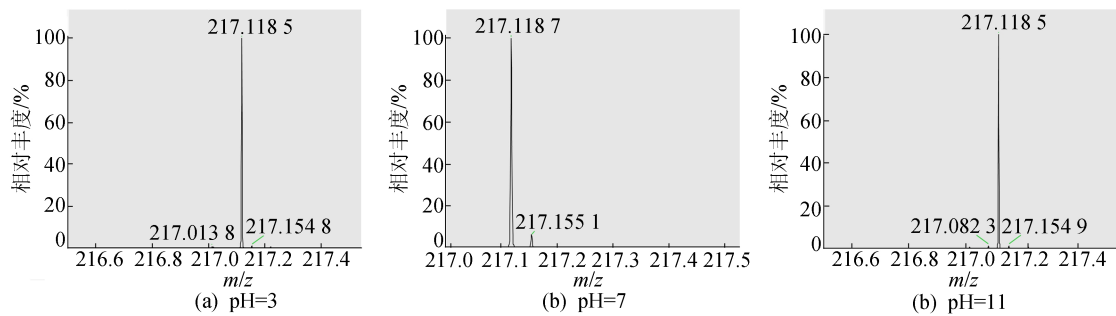


图 9 在不同热加工 pH 值下 WD 饮食产生 CEL 的负离子质谱图

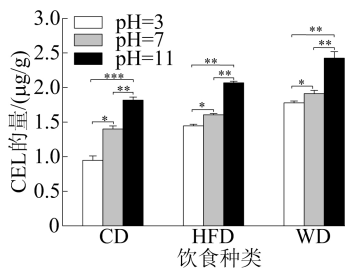


图 10 热加工 pH 值对 3 种饮食产生 CEL 水平的影响

3 讨 论

本文研究了在不同的热加工 pH 值下 3 种饮食产生的荧光性 AGEs 及非荧光性 CML、CEL 的水平和变化规律。该研究明确了饮食在热加工

处理中外源性 AGEs 水平,有利于进一步研究产生的有不同水平 AGEs 的热加工饮食对小鼠的氧化应激状态、炎症反应、胰岛素抵抗等的影响和调控。

有研究表明,不同营养成分对食物中 AGEs 的水平产生差异,与水果、谷物和蔬菜等低蛋白和低脂食物相比,高蛋白和高脂肪的食物(如肉类、蛋类和乳制品)在热加工过程中更容易产生 AGEs^[13],这与本文发现 3 种饮食中高脂高胆固醇西方饮食在不同的 pH 值热加工过程中产生最高的 AGEs 水平结果一致。这可能是由于食品中的 AGEs 不仅由美拉德反应产生,还可以由糖、脂质、氨基酸氧化产生,此外高脂饮食中的某

些成分(如饱和脂肪和反式脂肪)和胆固醇可能会加剧氧化应激反应,而氧化应激会导致自由基的产生增加,并且促进 AGEs 前体二羰基衍生物的产生,从而加速糖基化反应和 AGEs 的形成^[14]。

本文研究表明热加工(120 °C、60 min)不会改变 3 种饮食的 pH 值,而文献^[15]研究发现,葡萄糖赖氨酸体系在 120 °C 加热 60 min 后,pH 值下降了 2.25,这可能是由于热加工的食品基质不同产生的差异,这一推论需要进一步验证。在本文研究中发现酸性热加工条件抑制 AGEs 的产生,而碱性热加工条件促进 AGEs 产生,这可能是由于作为 AGEs 生成的反应产物还原糖的活性形式是开环式,开环式还原糖的产生的量随 pH 值的增加而升高;此外,pH 值对 AGEs 的另一个反应产物氨基酸的活性形式也有重要影响,pH 值升高会使氨基酸发生脱质子化反应,而脱质子化的氨基酸具有更高的反应活性^[16]。因此,在食品加工过程中合理控制饮食成分、pH 值,可以有效抑制热加工过程产生的 AGEs 水平。

本研究揭示了不同热加工 pH 值下 3 种饮食 AGEs 的变化规律,明确了 3 种饮食产生 CML 和 CEL 的水平。酸性热加工条件对饮食 AGEs 的产生具有抑制作用,而碱性热加工条件则促进了 AGEs 的生成。与此同时,高脂高胆固醇饮食成分显著提升饮食中 AGEs 的水平。

[参 考 文 献]

- [1] Ou J, Huang J, Wang M, et al. Effect of rosmarinic acid and carnosic acid on AGEs formation *in vitro* [J]. Food Chemistry, 2017, 221: 1057-1061.
- [2] Zhu Z, Huang M, Cheng Y, et al. A comprehensive review of N^ε-carboxymethyllysine and N^ε-carboxyethyllysine in thermal processed meat products [J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 98: 30-40.
- [3] Rungtaatanawanich W, Qu Y, Wang X, et al. Advanced glycation end products (AGEs) and other adducts in aging-related diseases and alcohol-mediated tissue injury [J]. Experimental and Molecular Medicine, 2021, 53(2): 168-188.
- [4] Chuyen N V. Toxicity of the AGEs generated from the Maillard reaction: on the relationship of food-AGEs and biological-AGEs [J]. Molecular Nutrition & Food Research, 2006, 50(12): 1140-1149.
- [5] 王新, 张磊, 蔡皓, 等. 木犀草素改善高脂饮食诱导的小鼠非酒精性脂肪肝 [J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2016, 39(7): 994-997, 1008.
- [6] Pinheiro-Castro N, Silva L, Novaes G M, et al. Hypercaloric diet-induced obesity and obesity-related metabolic disorders in experimental models [J]. Advances in Experimental Medicine and Biology, 2019, 1134: 149-161.
- [7] Heitmann B L, Lissner L. Dietary underreporting by obese individuals: is it specific or non-specific? [J]. British Medical Journal, 1995, 311(7011): 986-989.
- [8] Harja E, Bu D X, Hudson B I, et al. Vascular and inflammatory stresses mediate atherosclerosis via RAGE and its ligands in apoE^{-/-} mice [J]. Journal of Clinical Investigation, 2008, 118(1): 183-194.
- [9] Senatus L, López-Díez R, Egaña-Gorroño L, et al. RAGE impairs murine diabetic atherosclerosis regression and implicates IRF7 in macrophage inflammation and cholesterol metabolism [J]. Journal of Clinical Investigation Insight, 2020, 5(13): e137289.
- [10] Zhang Q, Wang Y, Fu 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.
- [11] Niu L, Sun X, Tang J, 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.
- [12] Lin H, Lai K, Zhang 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.
- [13] Niu L, Kong S, Chu F, et al. Investigation of advanced glycation end-products, α-dicarbonyl compounds, and their correlations with chemical composition and salt levels in commercial fish products [J]. Foods, 2023, 12(23): 4324.
- [14] Lopez-Moreno J, Quintana-Navarro G M, Camargo A, et al. Dietary fat quantity and quality modifies advanced glycation end products metabolism in patients with metabolic syndrome [J]. Molecular Nutrition & Food Research, 2017, 61(8): 1601029.
- [15] Zhuang Y L, Sun L P. Antioxidant activity of maillard reaction products from lysine-glucose model system as related to optical property and copper (II) binding ability [J]. African Journal of Biotechnology, 2011, 10 (35): 6784-6793.
- [16] 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.

(责任编辑 闫杏丽)