

晚期糖基化终末产物与4-甲基咪唑 在烤馕加工过程中的形成规律

吴浪^{1,2}, 陈肖阳², 邬丹¹, 朱邦栋², 程相雷¹, 阿卜杜热合曼·麦提库尔班¹, 沈幸^{1,3*}, 柴仲平^{1*}, 曾茂茂⁴
(1. 新疆农业大学资源与环境学院, 新疆乌鲁木齐 830052) (2. 新疆农业大学食品科学与药学院, 新疆乌鲁木齐 830052) (3. 新疆土壤与植物生态过程重点实验室, 新疆乌鲁木齐 830052)
(4. 江南大学食品科学与资源挖掘全国重点实验室, 江苏无锡 214122)

摘要: 为了科学指导消费者合理选择食品配料、烘烤温度及烤炉类型, 本研究采用液相色谱-质谱联用技术 (LC-MS/MS) 与高效液相色谱-质谱联用技术 (HPLC-MS/MS), 系统分析了新疆乌鲁木齐市在制作烤馕过程中, 不同配料、烘烤温度和烤炉类型对晚期糖基化终末产物 (Advanced Glycation End Products, AGEs) —— 羧甲基赖氨酸 (N^ε-Carboxymethyl-Lysine, CML)、羧乙基赖氨酸 (N^ε-Carboxyethyl-Lysine, CEL) 以及 4-甲基咪唑 (4-Methylimidazole, 4-MI) 生成的影响。结果表明, 牛奶馕和芝麻馕中 AGEs 含量较低; 芝麻馕和辣皮子馕中 4-MI 含量较低。AGEs 与 4-MI 生成量先增后减, 辣皮子馕在 180~200 °C 时达 AGEs 含量达到峰值 (CEL: 164.9 μg·g⁻¹、CML: 126.0 μg·g⁻¹)。不同烘烤设备对有害物质的生成也存在显著差异, 电炉烘烤的馕中 AGEs 含量较高, 而燃气炉烘烤的馕中 4-MI 含量较高。因此, 建议在制作烤馕时采用电炉并控制温度在 130~180 °C 范围内烘烤辣皮子馕, 或使用燃气炉在中温 (180~230 °C) 下烘烤添加牛奶或芝麻的馕, 以降低 AGEs 和 4-MI 的生成。本研究为保障消费者健康、优化传统食品制作工艺提供了理论依据与科学建议。

关键词: 烤馕; 晚期糖基化终末产物; 4-甲基咪唑; 生成规律

文章编号: 1673-9078(2026)3-359-368

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.3.0019

Formation Patterns of Advanced Glycation End-products and 4-Methylimidazole during the Processing of Baked Naan

WU Lang^{1,2}, CHEN Xiaoyang², WU Dan¹, ZHU Bangdong², CHENG Xianglei¹, ABDURAHMAN Matkurban¹,
SHEN Xing^{1,3*}, CHAI Zhongping^{1*}, ZENG Maomao⁴

(1.College of Resources and Environment, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)
(2.College of Food Science and Pharmacy, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)
(3.Xinjiang Key Laboratory of Soil and Plant Ecological Processes, Urumqi 830052, China)
(4.State Key Laboratory of Food Science and Resources, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

引文格式:

吴浪,陈肖阳,邬丹,等.晚期糖基化终末产物与4-甲基咪唑在烤馕加工过程中的形成规律[J].现代食品科技,2026,42(3): 359-368.

WU Lang, CHEN Xiaoyang, WU Dan, et al. Formation patterns of advanced glycation end-products and 4-methylimidazole during the processing of baked naan [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(3): 359-368.

收稿日期: 2025-01-06; 修回日期: 2025-05-13; 接受日期: 2025-05-16

基金项目: 国家自然科学基金项目 (32360802); 新疆维吾尔自治区重点实验室开放课题项目 (2021D04005); 新疆维吾尔自治区“三农”骨干人才培养项目 (2022SNGG0017); 新疆土壤与植物生态过程重点实验室开放课题项目 (23XJTRZW05)

作者简介: 吴浪 (2003-), 女, 本科, 研究方向: 食品质量与安全, E-mail: 2283232551@qq.com

通讯作者: 沈幸 (1983-), 男, 博士, 讲师, 研究方向: 果实品质调控与食品安全, E-mail: shenxing@xjau.edu.cn; 共同通讯作者: 柴仲平 (1974-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 果树营养与施肥, E-mail: chaizhongpingth@sina.com

Abstract: To scientifically guide consumers in making reasonable choices about which food ingredients, baking temperatures, and oven types to use when making naan in Urumqi, Xinjiang, China, liquid chromatography-mass spectrometry (LC-MS/MS) and high-performance LC-MS/MS were employed in this study to systematically analyze how these factors affect the formation of advanced glycation end-products (AGEs)-N^ε-carboxymethyl-lysine (CML) and N^ε-carboxyethyl-lysine (CEL)-and 4-methylimidazole (4-MI). Results indicated that relatively low contents of AGEs were found in milk and sesame naan, whereas relatively low contents of 4-MI were detected in sesame and spicy pepper naan. The formation of AGEs and 4-MI initially increased and then decreased, and spicy pepper naan exhibited AGE content peaks (CEL: 164.9 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, CML: 126.0 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) when baked at 180~200 °C. Significant differences in the formation of harmful substances were noted among different baking equipment. Specifically, naan baked in electric ovens had a higher AGE content, whereas those baked in gas ovens had a higher 4-MI content. Therefore, using an electric oven when making spicy pepper naan is recommended, and the temperature should be controlled within the range of 130~180 °C. For making milk or sesame naan, using a gas oven set at medium temperature (180~230 °C) is recommended. By following these recommendations, the formation of AGEs and 4-MI can be reduced. This study provides a theoretical basis and scientific suggestions for ensuring consumer health and optimizing traditional food production processes.

Key words: naan; advanced glycation end-products; 4-methylimidazole; formation patterns

烤馕，一种新疆具有浓郁地方民族特色的食品^[1]，是采用面粉为主要原料，加入少量盐，不使用碱，通过发酵和烤制工艺制作而成。这种食品以其独特的口感、浓郁的风味以及便于携带和保存的特性而广受欢迎。从营养角度来看，馕为消费者提供了主要的碳水化合物和蛋白质^[2,3]。作为古丝绸之路上的代表性农产品，馕不仅反映了新疆地区的文化特色，也是古代新疆自然环境与社会需求相适应的产物。经过数千年的传承与发展，馕已经成为新疆文化中一个鲜明的文化符号^[4]。

在新疆烤馕的生产过程中，高温烤制扮演了一个关键角色。这一烹饪方式通过诱发美拉德反应 (Maillard Reaction, MR)，不仅为食物赋予了独特的香气和吸引人的色泽，而且极大地提升了其受欢迎程度^[5]。然而，高温烘烤也会导致食物与高温工具或油直接接触，使得温度迅速升高，食物成分间发生激烈的化学反应，这促进了包括杂环胺、丙烯酰胺、晚期糖基化终末产物 (Advanced Glycation End Products, AGEs) 和 4-甲基咪唑 (4-Methylimidazole, 4-MI) 等有害物质的生成^[6]。AGEs 和 4-MI 作为食品污染物，对人体健康构成了严重的威胁^[7,8]。研究表明，AGEs (晚期糖基化终末产物) 与多种健康问题息息相关。它们与肌肉组织的萎缩现象有着密切联系，这一点在多项研究中得到了证实^[9,10]。AGEs 在体内积累，会对血管造成损害，进而诱发视网膜病变、肾病以及神经病变，这些都是糖尿病并发症的重要表现。AGEs 还会使血管壁变得僵硬，加速动脉粥样硬化的进程，从而增加心血管疾病的风险。更令人关注的是，AGEs 还能引

发炎症反应和氧化应激，这些过程可能与阿尔茨海默病和帕金森病的发展存在着密切的关联^[11,12]。羧甲基赖氨酸 (N^ε-Carboxymethyl-Lysine, CML) 和羧乙基赖氨酸 (N^ε-Carboxyethyl-Lysine, CEL) 作为研究热点 AGEs 类型，常被视作衡量食品中 AGEs 含量的重要指标^[13-16]。据国际癌症研究机构 (IARC) 分类，4-MI 已被归入“可能对人体具有致癌性物质 (2B 类)”^[17]，其毒性表现多样，包括致畸、致癌^[18,19]以及引发刺激性反应。这些毒性效应可能源于代谢活化过程和氧化应激，进而可能导致癌症和神经毒性的发生。尽管已有这些关于其毒性的研究推测，但在人类身上的具体影响和作用机制方面，仍需进一步深入探索。

在现有研究中，不同配料在加热过程中的交互作用及其对 AGEs 生成的影响尚未完全明确，需进一步研究；不同食品中 AGEs 生成的最适温度区间需进一步明确，以优化烹饪工艺；不同烤炉类型对 AGEs 生成的影响需深入探讨。进一步研究这些影响因素的必要性体现在降低健康风险、优化烹饪工艺等方面。为此本研究选择了乌鲁木齐市的烤馕作为研究对象，旨在深入探索烤馕中 CML、CEL 和 4-MI 的生成规律。本研究采用了液相色谱串联质谱法^[20-22] (LC-MS/MS) 与高效液相色谱串联质谱技术^[23] (HPLC-MS/MS) 作为主要分析手段，进行深入的研究工作，精确分析和预测这些化合物的产生量和分布情况。通过研究烤馕的生产工艺和参数对 AGEs 和 4-MI 含量的影响，本研究旨在发现降低这些有害物质含量的最佳方法，提供给烤馕行业实施可行的控制和改进策略。最终目标是提高消费者对食品安全的意识，并改善食品安全环境。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

芝麻饅、牛奶饅、辣皮子饅，新疆乌鲁木齐市采购；乙腈、甲醇、九氟戊酸（Nonafluoropentanoic Acid, NFPA）（色谱纯），北京百灵威科技有限公司；硼酸、硼氢化钠、浓盐酸、浓硫酸、氢氧化钠、正辛醇（分析纯），上海国药集团化学试剂有限公司；正己烷，天津市津东天正精细化学试剂厂；4-MI-d3、CML、d4-CML、CEL、d4-CEL（纯度均 $\geq 98\text{wt.}\%$ ），美国 Santa Cruz Biotechnology 公司；Quattro MicroTMApI 三重四级杆质谱仪、Alliance2695 高效液相色谱仪、Oasis MCX 固相萃取柱、X-Bridge C18 色谱柱（100 mm $\times$ 2.1 mm, 3.5 μm ），美国 Waters 公司；Visiprep 固相萃取仪，美国 Supelco 公司；QGC-12T 氮吹仪，上海青岛科技贸易公司；QuEChERS 提取试剂盒，安捷伦科技（中国）有限公司；FW100 高速粉碎机，天津市泰斯特仪器有限公司。

1.2 材料的选取

在本实验中，针对乌鲁木齐市的八个行政区进行了初步市场调研，并根据各区域的人口规模及国内生产总值（GDP）等社会经济因素进行了综合考量与筛选。得出了筛选的结果：天山区和头屯河区各选取三家烤饅店；乌鲁木齐县、沙依巴克区和新市区各选取两家；米东区、达坂城区和水磨沟区各选取一家。为了确保研究结果的普遍性，我们总共选择了 15 家烤饅店作为研究样本，这些店铺具有区域代表性，并且在选择时考虑了不同区域和不同规模的店铺。通过问卷调查和现场访谈的方式向烤饅店询问烘烤温度、时间、烤炉类型等信息，并使用电子测温仪现场测量烤制温度。实验主要研究饅的配料、烘烤温度和烤炉类型等变量对于 AGEs 和 4-MI 生成的影响。所选店铺的具体采样分布详见图 1。

1.3 实验方法

1.3.1 样品中 AGEs 的测定

1.3.1.1 样品预处理

每个店的芝麻饅、牛奶饅和辣皮子饅均各取 3 个样品，共取样 3 次。为确保样品的彻底处理，首先应将样品置于高速粉碎机中进行完全粉碎。在完成粉碎操作后，精确量取 50 mg 样品以备后续处理。紧接着，向该样品中倾注 3 mL 正己烷，并通过剧烈摇动来实现充分混合。振荡结束后，于转速 10 000 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的条

件下对混合物实施离心操作，持续 15 min，旨在实现上清液与固体的有效分离。将所得上清液予以废弃，并重复以上离心及弃液步骤共三次，以达到完全脱脂的效果。最后将脱脂后的粉末样品放置于通风橱中，让正己烷自然挥发，直至干燥。此过程确保了样品的彻底脱脂，并为后续实验步骤提供了准备。

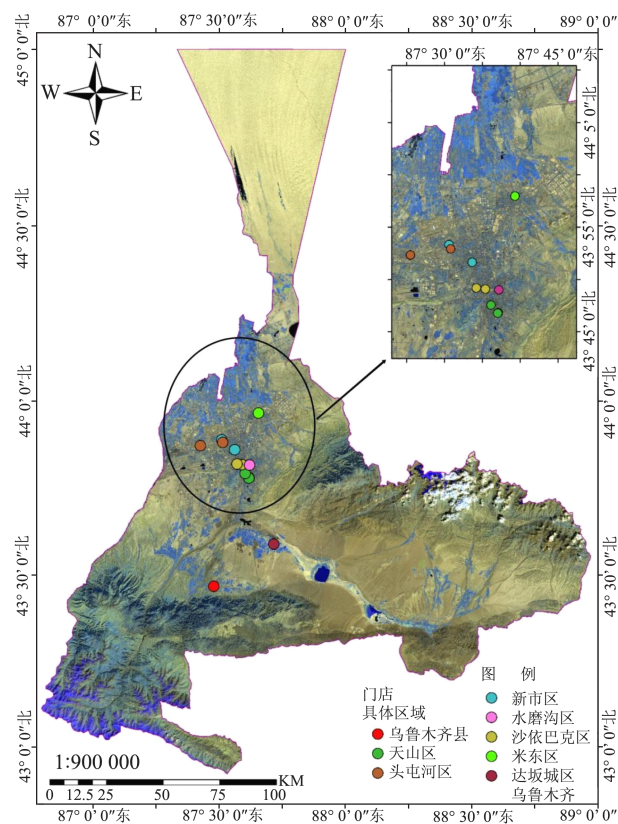


图 1 烤饅的样点分布图

Fig.1 Sampling map of Urumqi city

向样品中加入 1.5 mL 的 0.2 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 硼酸钠缓冲液（pH 值 9.2），接着加入 1 mL 浓度为 1 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的硼氢化钠溶液，此溶液预先在 0.01 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的氢氧化钠溶液中配制完成。为防止泡沫的产生，进一步加入 5 滴 1-辛醇作为消泡剂。将此混合物在 4 $^{\circ}\text{C}$ 条件下进行过夜还原。完成还原后，将混合物转移到水解管中，并向其中加入足量的盐酸，调整最终样品溶液的盐酸浓度至 6 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。随后，在样品中充入氮气 3 min 以排除氧气，并密封瓶口，将其置于 110 $^{\circ}\text{C}$ 的烘箱中进行 24 h 的水解处理。完成水解步骤后，待样品降至室温，把水解产物通过一个 10 mL 容量瓶进行过滤，并用超纯水调节至刻度线，确保总体积达到 10 mL。随后精确量取 600 μL 该水解液，并在 60 $^{\circ}\text{C}$ 条件下进行干燥直至完全蒸发。吹干后的样品重新用 3 mL 的 5 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ NFPA 水溶液复溶，并向其中加入 150 μL 的 0.1 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ d4-CML 和 d4-CEL 混合内标溶液以进行定量分析，最

后通过振荡 30 s 以确保混合均匀。

在离心处理后取出了 4 mL 的上清液, 并对其进行 MCX 固相萃取操作。先使用 6 mL 的蒸馏水和 6 mL 的甲醇对 MCX 固相萃取小柱进行了预活化处理, 把样品加载进 MCX 色谱柱内, 随后用 6 mL 的去离子水和紧接着的 6 mL 甲醇依次进行冲洗。最后使用 6 mL 含有 5% (*V/V*) 甲醇的氨水溶液进行洗脱, 并收集所得的洗脱液。所得到的洗脱液在氮气环境下被吹干, 加入 300 μL 超纯水重新溶解, 并在 10 000 *g* 离心处理 10 min。

1.3.1.2 LC-MS/MS 分析

将复溶后的溶液用 0.22 μm 水系纤维膜过滤, 将反应液稀释 50 倍后, 置于离心机中, 在 10 000 *g* 的离心力作用下进行 10 min 的离心处理, 取上清液 100 μL 加 100 μL d4-CML 与 d4-CEL 内标 ($1.0 \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$), 样品经充分混匀后进行进样分析。对于 CML 与 CEL 的定量分析, 采用了高效液相色谱结合三重四极杆质谱联用技术。实验设置细节为: 选用了规格为 100 mm $\times$ 2.1 mm, 粒径 3.5 μm 的 X-Bridge C18 色谱柱; 流动相的配比为: A 相是由 5 mmol $\cdot\text{L}^{-1}$ 的 NFPA 溶液 (*V/V*), 而 B 相则是乙腈。样品室维持于 8 $^{\circ}\text{C}$ 的低温环境; 色谱柱温度则控制在 35 $^{\circ}\text{C}$; 每次进样的体积精确设定为 5 μL ; 在洗脱程序中采用梯度方式: 0.0~0.10 min:95% A; 0.10~5 min:95% A 到 40% A; 5~7 min:40% A; 7~9 min:40% A 到 0% A; 9~10 min:0% A; 10~15 min:0% A 到 95% A。质谱分析技术采用电喷雾正离子化模式 (ESI+) 进行; 采用的检测方式为多通道反应监测 (MRM); 电压在毛细管中被设定为 3.55 kV; 维持离子源的温度恒定在 110 $^{\circ}\text{C}$; 将脱溶剂气体的温度调控在 350 $^{\circ}\text{C}$; 选用纯度高达 99.9% (体积分数, φ) 的氮气作为锥孔气体, 其流速设定为 50 $\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$ 。与此同时, 另一路同样纯度的氮气 ($\varphi=99.9\%$) 也以 50 $\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$ 的流量被用作脱溶剂气体; 选择高纯度的氩气 (纯度达到 $\varphi=99.9\%$) 作为碰撞气体, 并将其流量精确调控在 0.15 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 。CML: 定性离子对: 母离子 $m/z=205$, 子离子 $m/z=130$; 定量离子对: 母离子 $m/z=205$, 子离子 $m/z=84$ 。d4-CML: 定性离子对: 母离子 $m/z=209$, 子离子 $m/z=88$ 。CEL: 定性离子对: 母离子 $m/z=219$, 子离子 $m/z=130$; 定量离子对: 母离子 $m/z=219$, 子离子 $m/z=84$ 。d4-CEL: 定性离子对: 母离子 $m/z=223$, 子离子 $m/z=88$ 。4-MI: 定性离子对: 母离子 $m/z=83$, 子离子 $m/z=42$; 定量离子对: 母离子 $m/z=83$, 子离子 $m/z=56$ 。

1.3.2 样品中4-MI的测定

1.3.2.1 样品预处理

将样品置于高速粉碎机中完全粉碎后, 准确取 1 g 经过筛分的粉碎样品。然后, 将这些粉碎的样品放入 50 mL 的离心管中, 使用正己烷进行脱脂处理, 重复此过程三次, 以确保完全脱脂, 防止未脱脂的残留物对实验结果造成干扰。

在样品脱脂并自然挥发干燥后, 加入 5 mL 5wt.% 三氯乙酸溶液和 10 mL 乙腈。随后, 向混合液中加入 150 μL 质量浓度为 $10 \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的 4-MI-d3 标准溶液, 使用振荡器振荡 30 s 以确保充分混合。接着, 采用超声波辅助提取方法处理混合物 1 h。提取完成后, 使用 QuEChERS 提取试剂盒 (包含 4.0 g 无水硫酸镁和 0.5 g 氯化钠) 处理提取物, 然后以高速离心 10 min, 完成样品的前处理。

1.3.2.2 HPLC-MS/MS 分析

取上清液进行 HPLC-MS/MS 测定。实验条件设定如下: 选用的色谱柱型号为 Waters 品牌的 X-Bridge 系列 C18 柱, 其尺寸规格为长度 100 mm、内径 2.1 mm, 且填料粒径为 3.5 μm , 且柱温维持在 30 $^{\circ}\text{C}$; 流动相的配比为: A 相为 0.1% (*V/V*) 甲酸的水溶液, B 相为乙腈; 设定梯度洗脱流程为: 0.0~0.7 min:95% A; 0.7~2.0 min:95% A 到 20% A; 2.0~2.5 min:20% A 到 5% A; 2.5~3.5 min:5% A; 3.5~4.0 min:5% A 到 95% A; 4.0~6.0 min:95% A。流量被设定为 0.3 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$, 且每次注入的样品体积为 5 μL ; 采用电喷雾正离子化模式, 并结合多反应监测技术来实现电离过程; 将毛细管电压精确设定在 3.55 kV; 将离子源的操作温度保持在 110 $^{\circ}\text{C}$; 脱溶剂气体的温度被调控在 350 $^{\circ}\text{C}$; 将锥孔气体的流量设定为 50 $\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$, 脱溶剂气体的流量设定为 500 $\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$; 碰撞气的流量精确控制在 0.15 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 。CML: 定性离子对: 母离子 $m/z=205$, 子离子 $m/z=130$; 定量离子对: 母离子 $m/z=205$, 子离子 $m/z=84$ 。d4-CML: 定性离子对: 母离子 $m/z=209$, 子离子 $m/z=88$ 。CEL: 定性离子对: 母离子 $m/z=219$, 子离子 $m/z=130$; 定量离子对: 母离子 $m/z=219$, 子离子 $m/z=84$ 。d4-CEL: 定性离子对: 母离子 $m/z=223$, 子离子 $m/z=88$ 。4-MI: 定性离子对: 母离子 $m/z=83$, 子离子 $m/z=42$; 定量离子对: 母离子 $m/z=83$, 子离子 $m/z=56$ 。

1.4 数据处理

在本研究中, 所有实验均进行了三次独立重复 (即

从同一批次中取三个样品), 结果以平均值 $\pm$ 标准差的形式报告, 以确保数据的可靠性和重复性。数据整理和分析是通过 WPS Office 2021 中的 Excel 表组件完成的。为了评估数据间是否存在统计学意义上的显著差异, 运用 Statistix 9 这一统计软件来执行数据分析任务。当涉及对多个组别间进行比较分析以确定显著性差异时, 最小显著差数 (LSD) 检验法被采用, 并将 $P < 0.05$ 作为判断差异具有统计学显著性的标准。图形的绘制是利用 Origin 2022 软件 (由 OriginLab 公司提供) 完成的。

2 结果与分析

2.1 不同配料对 AGEs 和 4-MI 的影响

2.1.1 不同配料对 AGEs 的影响

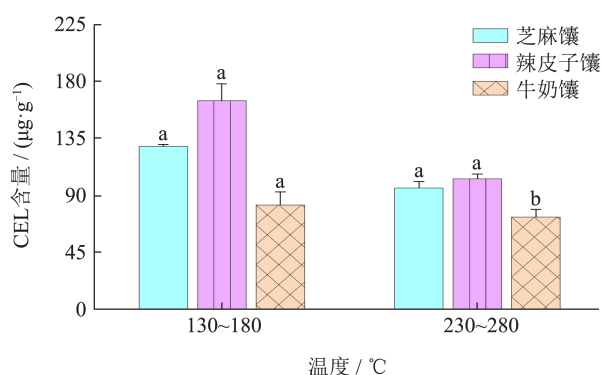


图 2 不同配料对 CEL 含量的影响

Fig.2 Effect of the different ingredients on the CEL content

注: 不同温度范围不同的小写字母表示具有显著差异 ($P < 0.05$)。下同。

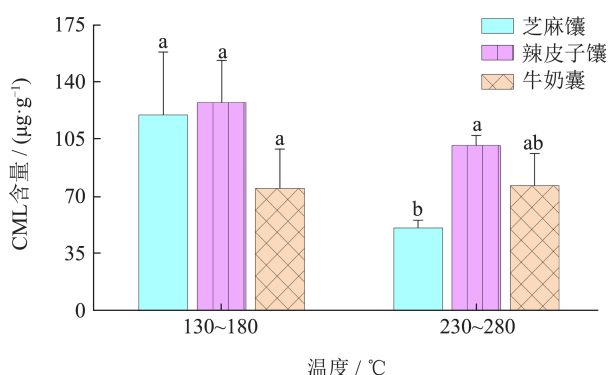


图 3 不同配料对烤饅中 CML 含量的影响

Fig.3 Effect of different ingredients on CML content in naan

在烤饅 (芝麻饅、牛奶饅、辣皮子饅) 中, 配料对 AGEs 的形成产生一定影响。芝麻饅中芝麻含有较高的脂肪和蛋白质, 在高温下易发生氧化和糖基化反应生成 AGEs。牛奶饅中牛奶的乳糖和乳蛋白, 在

加热时发生美拉德反应生成 AGEs。辣皮子饅中辣椒对 AGEs 的直接影响较小, 但其含有的抗氧化成分 (如辣椒素) 抑制 AGEs 的形成^[24]。根据研究中的图 2 和图 3, 发现在 130 °C 至 180 °C 的低温烘焙条件下, 不同配料对 CEL 与 CML 的生成量差异不显著 ($P > 0.05$)。然而, 在 230~280 °C 的高温烘焙条件下, 添加辣椒 ($103.2 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) 或芝麻 ($96.17 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) 的饅中 CEL 的含量显著高于添加牛奶 ($73.22 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) 的饅 ($P < 0.05$), 且添加辣椒 ($101.1 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) 的饅中 CML 的含量显著多于添加芝麻 ($50.54 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) 的饅 ($P < 0.05$)。这表明烘焙温度和配料种类对 AGEs 的生成有重要影响。宋小莉等^[25]研究者通过研究烘焙过程中不同原料对 AGEs 的影响, 发现卵白蛋白的添加显著影响荧光性 AGEs 的生成。

在 Zhao 等^[26]的研究中, 牛奶被证实是一种含丰富蛋白质和脂肪的营养食品, 但在储存和加工过程中易受氧化和糖化反应的影响。这些反应可导致脂肪促进蛋白质糖基化, 进而增加 AGEs 的生成。然而, 本研究的结果显示, 含牛奶的饅中 CEL 和 CML 的总含量低于含辣椒和芝麻的饅, 这与 Zhao 等^[26]的发现并不相一致。此外, Li 等^[27]的研究指出牛奶中的果胶寡糖可能有效抑制 AGEs 的形成。本研究中观察到, 添加牛奶的饅在抑制 AGEs 形成上效果更为显著, 这可能表明牛奶中含有抑制 AGEs 形成的成分, 如果胶寡糖等。果胶寡糖以其独特的方式有效抑制 AGEs 的生成: 它通过与还原糖和蛋白质结合, 减少了 AGEs 前体的产生, 进而阻止了 AGEs 的形成。同时还展现出强大的抗氧化性能, 能够清除自由基并降低氧化应激水平, 这也进一步减少了 AGEs 的产生。另一方面, 牛奶中的酪蛋白和乳清蛋白也在抑制 AGEs 生成方面发挥着重要作用。它们能够与还原糖竞争性地结合, 从而减少了 AGEs 的生成机会。此外钙和镁等矿物质也不容忽视, 它们通过调节酶的活性, 为抑制 AGEs 的形成提供了额外的助力^[28,29]。

2.1.2 不同配料对 4-MI 的影响

牛奶饅含乳糖和乳清蛋白, 牛奶中的乳糖作为还原糖, 与牛奶中的蛋白质 (乳清蛋白) 反应生成 4-MI。芝麻饅含蛋白质 (如芝麻蛋白)、脂肪和多酚类物质, 芝麻蛋白含有赖氨酸等氨基酸, 可能参与 4-MI 的生成。芝麻中的多酚类物质通过捕获自由基和抑制氧化应激, 减少 4-MI 的生成。辣皮子饅含辣椒素、维生素 C 和多酚类物质, 辣椒中的维生素 C 和多酚类物质具有抗氧化作用, 可能抑制 4-MI 的生成^[30]。图 4 的数据显示, 在 130~180 °C 的低温烤制条件下, 添加牛

奶的饅中 4-MI 的含量 ($1.485 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) 显著高于添加辣椒 ($0.4787 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) 或芝麻 ($0.3549 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) 的饅 ($P<0.05$)。这表明牛奶中较高的蛋白质含量在低温烤制过程中显著促进了 4-MI 的生成。相较于此, 辣椒和芝麻的蛋白质含量较低, 对 4-MI 生成的影响较小。该发现支持了 Marta 等^[31]的研究观点, 表明采用低还原糖和低蛋白质含量的面粉能有效减少 4-MI 的产生。然而, 在 230 至 280 °C 的高温烤制条件下, 三种配料对 4-MI 的生成影响没有显著差异 ($P>0.05$)。在高温下, 由于蛋白质的降解和 MR 反应的加剧, 不同配料中的蛋白质对 4-MI 生成的促进作用相互抵消, 导致三种配料在 4-MI 生成量上的差异不明显。

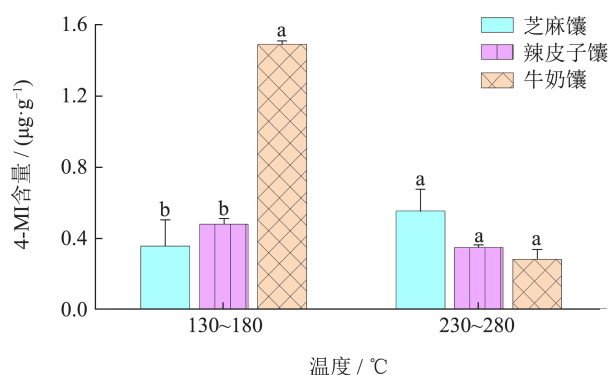


图 4 不同配料对烤饅中 4-MI 含量的影响

Fig.4 Effect of different ingredients on 4-MI content in naan

2.2 温度对AGEs和4-MI的影响

2.2.1 温度对AGEs的影响

在研究烤饅过程中, 温度控制对于最终产品的质量起到了关键作用。有研究表明, 加热温度是影响 AGEs 含量的最直接因素^[32]。本实验旨在探究不同烤制温度对牛奶饅、辣皮子饅和芝麻饅中 CEL 和 CML 的生成的影响。图 5 显示, 随着烤制温度的增加, 牛奶饅 ($82.77 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) 和辣皮子饅 ($90.35 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) 的 CEL 含量先增加至 170 °C ($96.69 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) 和 180 °C ($164.9 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) 时的最大值, 然后随温度的进一步升高先是下降后又略有回升。温度对 AGEs 生成量的影响主要通过影响美拉德反应的速率、中间产物的稳定性来实现。中温下, 美拉德反应占主导, 生成 AGEs 的量增加; 高温下, 中间产物的热分解和竞争反应路径导致 AGEs 的生成量减少^[33]。芝麻饅的 CEL 含量在 145 °C ($128.9 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) 时达到最高, 随温度升高该值趋降, 至 200 °C 时 ($75.22 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) 转而回升, 观察图 5 可以清晰地发现这一变化趋势。芝麻饅在

约 160 °C 时 CEL 含量明显下降, 是该温度下饅中的成分发生反应, 抑制了 CEL 生成; 在 210 °C 左右上升, 是更高温度下新的反应促使 CEL 生成增加。辣皮子饅在 180 °C 达到峰值后大幅下降, 是高温下辣皮子饅中的某些成分与其他物质反应, 消耗了 CEL 生成的前体物质; 250 °C 后又上升, 是反应体系随温度变化, 重新利于 CEL 生成。牛奶饅在 160 到 180 °C 间 CEL 含量骤降, 是牛奶中的成分在这个温度区间参与反应, 阻碍 CEL 形成; 随后上升, 是随着温度升高, 反应平衡改变, CEL 生成速率加快。观察图 6 可得, 牛奶饅 ($74.67 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) 和辣皮子饅 ($85.37 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) 的 CML 含量随着温度的升高, 在 175 °C ($95.88 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) 和 200 °C ($126.0 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) 分别达到最高值, 之后逐渐降低。这些数据表明, 随着温度的升高, 饅中的蛋白质和糖类成分更容易促发非酶促褐变过程, 从而增加 AGEs 的生成。

本实验对牛奶饅与辣皮子饅的 CEL 和 CML 含量随温度变化研究。本实验结果与江冠桦^[34]的研究关于面包中 AGEs 的影响因素类似。此外, 吴佳蔓等^[35]的《空气煎炸温度和时间对香菇品质和晚期糖基化终末产物形成的影响》研究指出, 在 180 °C 时香菇中的 CEL 含量最高, 与本研究中辣皮子饅的结果互相支持。刘春霞^[36]的研究也显示, 随着温度的升高, 果糖-赖氨酸模拟体系中的 CML 和 CEL 含量呈增加趋势, 这与本实验在较低温度下的观察大致相同。当温度超过 180 °C 时, 饅中的 CEL 含量在降至某一阈值后会出现回升现象, 不同饅种在回升温度上存在差异: 辣皮子饅的回升温度为 250 °C, 牛奶饅为 180 °C。图 5 和图 6 展示了不同温度下, 辣皮子饅的 CEL 和 CML 含量均高于牛奶饅, 表明牛奶饅在抑制 AGEs 形成上效果优于辣皮子饅。

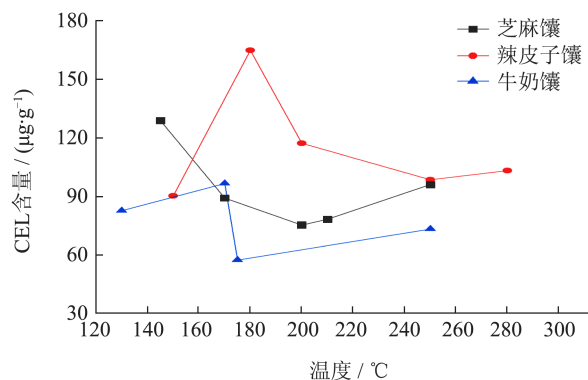


图 5 不同温度对烤饅中 CEL 含量的影响

Fig.5 Effect of different temperatures on the CEL content in naan

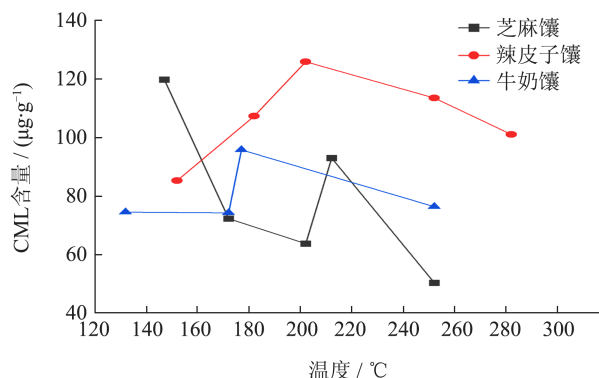


图6 不同温度对烤饅中 CML 含量的影响

Fig.6 Effect of different temperatures on the CML content in naan

2.2.2 温度对4-MI的影响

温度对 4-MI 生成量的影响是显著的。温度升高会加快美拉德反应速率,使饅中的还原糖与氨基酸更易发生反应,生成更多的中间产物,如糠醛等。这些中间产物会进一步参与复杂反应,促使 4-MI 生成量增加。而温度较低时,美拉德反应及相关反应缓慢,4-MI 生成量则较少。从图 7 可以看出对于芝麻饅而言,在 180~230 °C 的温度区间内,4-MI 的生成量为 $1.034 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,这一数值明显高于在 130~180 °C ($0.3546 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) 和 230~280 °C ($0.5513 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) 温度区间的生成量,分别是后两者的 2.9 倍和 1.9 倍,统计显著性水平为 $P<0.05$ 。对于辣皮子饅,在 180~230 °C 的温度区间,4-MI 的产量达到了 $1.089 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,这一数值明显高于 130~180 °C 温度区间内所观察到的 $0.4787 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,同时也显著高于 230~280 °C ($0.3475 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) 温度区间内的产量,分别是这两者的 2.3 倍和 3.1 倍,统计显著性水平为 $P<0.05$ 。

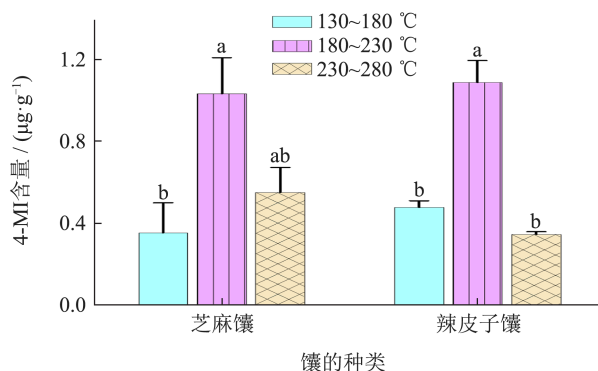


图7 不同温度对烤饅中 4-MI 含量的影响

Fig.7 Effect of different temperatures on 4-MI content in naan

在研究中,通常观察到随着烘焙温度的升高和时间的延长,4-MI 的含量会相应增加^[37]。Zhang 等^[38]的研究指出,当烘焙温度达到 200 °C 时,饼干中的 4-MI 含量达到最高值,这一现象与饅在加热过程中 4-MI 含

量的变化趋势相似。此外,谭文兴等^[39]深入分析了糖蜜在不同温度下的 4-MI 含量变化,结果表明当温度超过 115 °C 时,4-MI 含量会显著增加。相比之下,本实验发现饅的 4-MI 含量在 180 至 230 °C 范围内才表现出显著增加。这种差异可能源于饅和糖蜜的原料及加工方法的不同,这导致了在高温条件下两者的化学反应路径存在差异。

2.3 烤炉种类对AGEs和4-MI的影响

2.3.1 烤炉种类对AGEs的影响

从图 8 和图 9 的数据分析可见,辣皮子饅和牛奶饅在不同烤炉(燃气炉和电炉)条件下烤制时,产生的 CEL 和 CML 的含量差异不显著($P>0.05$)。这表明这两种饅的 CEL 和 CML 生成在不同烤制环境下保持相对稳定,可能与这两种饅在原料和制作工艺上的相似性有关,导致其在烤制过程中生成的 CEL 和 CML 差异不大的。相对而言,芝麻饅在电炉烤制时生成的 CEL ($128.9 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) 和 CML ($119.9 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) 含量显著高于燃气炉生成的 CEL ($89.21 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) 和 CML ($72.40 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) 含量($P<0.05$)。电炉和燃气炉对 AGEs 生成的影响主要通过加热方式、温度控制、加热速率和湿度控制等因素实现。电炉的均匀加热和精确温度控制减少局部过热和温度波动,而燃气炉的不均匀加热和温度波动增加局部过热。电炉需要更长时间达到理想烤制效果从而延长高温反应时间,增加了 CEL 和 CML 的生成;燃气炉升温快,烤制时间短从而减少了 CEL 和 CML 的生成^[40-42]。

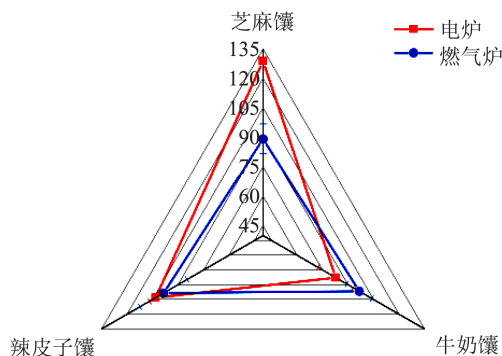


图8 烤炉对 CEL 含量的影响

Fig.8 Effect of the oven on the CEL content

在研究中,不同类型的烤炉在烤制饅的过程中对生成的 CEL 和 CML 展现不同的影响。具体来说,辣皮子饅和牛奶饅在使用燃气炉和电炉烤制时,CEL 和 CML 的产生量差异并不明显。在芝麻饅的烤制过程中,电炉相比于燃气炉生成的 CEL 和 CML 量显著更高。因此,根据产品的特定需求和期望的风味,可以选择

合适的烤炉类型进行烘焙。同时,进一步研究不同烤炉条件对馒头品质的影响,将有助于提供更多高质量的烘焙产品,从而满足市场需求并增加产品多样性。

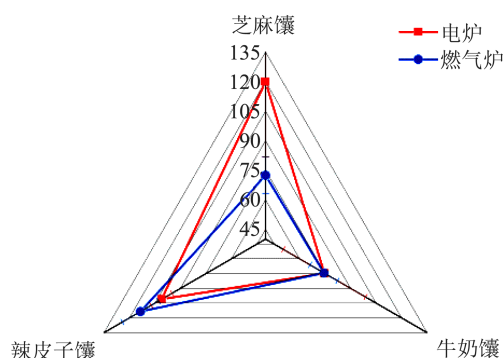


图9 烤炉对CML含量的影响

Fig.9 Effect of the oven on the CML content

2.3.2 烤炉种类对4-MI的影响

在研究中发现,烤馒头时所使用的烤炉类型对4-MI的生成具有显著影响。电炉和燃气炉对4-MI生成有不同影响。电炉温度均匀稳定,能使馒头受热均匀,美拉德反应平稳进行,4-MI生成量相对稳定。燃气炉火焰直接接触馒头,局部温度较高,会加速美拉德反应和相关化学反应,可能使4-MI生成量增加,且因受热不均,不同部位4-MI生成量差异可能更大。根据图10的数据,不同类型的烤炉对4-MI含量的影响程度不同。具体来说,使用电炉烤制的牛奶馒头中4-MI的含量($1.485 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)显著高于使用燃气炉($0.506 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)的4-MI含量($P<0.05$)。相反,辣皮子馒头($1.238 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)和芝麻馒头($1.032 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)在燃气炉烤制时的4-MI含量则显著高于电炉烤制的辣皮子馒头($0.347 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)和芝麻馒头($0.354 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)的4-MI含量($P<0.05$)。这表明烤炉的类型是影响馒头中4-MI含量的一个重要因素。这种差异可能源于电炉和燃气炉在燃烧过程中产生的气体成分和热量分布的不同^[43,44]。电炉主要通过电阻加热,不涉及燃烧过程,因此不产生燃烧气体。电炉在加热过程中,周围环境的气体成分(如氧气、氮气)保持不变。电炉的热量分布较为均匀,加热元件(如加热管或加热板)能够提供稳定的热源。电炉通常配备精确的温度控制系统,能够实现恒温加热,减少温度波动。燃气炉通过燃烧天然气或液化石油气产生热量,主要燃烧气体包括二氧化碳、水蒸气和一氧化碳。燃烧过程中可能产生少量氮氧化物和未完全燃烧的烃类化合物。燃气炉的热量分布相对不均匀,火焰直接接触食品,导致局部高温区域。燃气炉的温度控制相对不精确,存在较大的温度波动,可能导致局部过热^[45-47]。此外烤炉的温度控制和烤制

时间等因素也可能对4-MI含量有所影响。

在对比不同烤制方式对牛奶馒头、辣皮子馒头和芝麻馒头中4-MI含量的影响中,发现牛奶馒头在电炉烤制条件下的4-MI含量较高,这可能与电炉提供的热量分布较为均匀有关。相反,辣皮子馒头和芝麻馒头在使用燃气炉烤制时表现出较高的4-MI含量,这种现象出现的原因尚不明确,有待进一步研究。然而,这些观察结果仅基于当前实验数据,为了验证这些发现的普遍适用性,需要进行更多的研究。

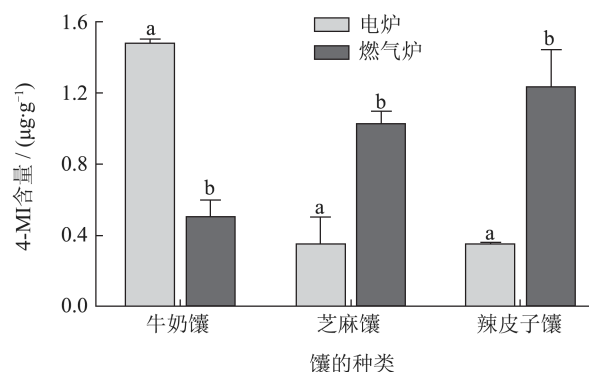


图10 烤炉种类对4-MI含量的影响

Fig.10 Effect of oven type on 4-MI content

3 结论

本研究分析配料、烤制温度、烤炉类型对食品中AGEs和4-MI的影响,科学指导消费者选择。研究发现,高温下辣椒配方AGEs含量显著增高,因还原糖、氨基酸参与美拉德反应,多酚类物质虽抑制部分生成,但辣椒成分催化氧化促AGEs生成;低温牛奶配方4-MI含量最高,因乳糖、蛋白质低温生成该物质,首次发现牛奶双重作用:抑制AGEs却促4-MI,为食品健康评估提供新依据。建议烹饪调控温度以降低AGEs和4-MI:AGEs生成先增后减,4-MI在180~230℃烤制时达峰值。180~230℃是4-MI生成最适温区,过高或过低均抑制,首次明确关键温度阈值。烤制需调控温度,烤炉类型显著影响AGEs和4-MI生成:电炉烤芝麻馒头AGEs最高,牛奶馒头电炉4-MI多,其他馒头燃气炉4-MI更高。电炉温控促芝麻馒头AGEs生成,燃气炉高温致辣皮子馒头4-MI增多,牛奶在电炉中4-MI更高,首次揭示烤炉与配料交互复杂性。结果表明,烹饪工艺选择对食品安全有重要影响。

基于研究结果,建议电炉低温烤辣皮子馒头,燃气炉烤牛奶馒头,180~230℃烤芝麻馒头,能有效减少AGEs和4-MI,提升饮食健康。首次关联工艺参数与AGEs和4-MI生成,提出优化烤制方案。烤制建议可行但面临挑战:电炉依赖稳定电力,燃气炉需经验控温,设

备成本高, 工艺调整影响饅口感和成熟度判断。本研究旨在提供科学饮食指导, 保障烤饅消费者健康安全。

参考文献

- [1] 陈婷, 钱其龙. 新疆饅文化及产业发展现状[J]. 现代食品, 2022, 28(14): 60-68.
- [2] 李慧玲, 蔺焕君. 新疆饅产业发展分析[J]. 边疆经济与文化, 2023, 9: 24-29.
- [3] 郑蜀云, 杜贤明, 邓真华, 等. 桑叶粉不同添加量对饅品质特性的影响[J]. 食品工业, 2024, 45(8): 54-58.
- [4] 包马兰, 李祖凯. 关于饅文化的学术探讨[J]. 中国食品, 2024, 4: 76-80.
- [5] LI X D, TENG W D, LIU G M, et al. Allicin promoted reducing effect of Garlic powder through Acrylamide formation stage [J]. Foods, 2022, 11: 2394.
- [6] 陈雪珍, 詹昌铭, 毛杰, 等. 高温热加工食品危害物形成的影响因素及其抑制的研究进展[J]. 食品与发酵科技, 2023, 59(3): 85-90.
- [7] ASMA G, FIROUZEH N, ALI H K, et al. 4-Methylimidazole can promote oxidative stress, inflammation and histopathological assessment following sub-chronic exposure in rats: mechanistic approaches [J]. Toxin Reviews, 2024, 43(2): 300-309.
- [8] VARUN P S, ANJANA B, NIRMAL S, et al. Advanced glycation end products and Diabetic complications [J]. The Korean Journal of Physiology and Pharmacology, 2014, 18(1): 1-14.
- [9] SHINICHIRO S, TATSUYA H, TATSURO E, et al. Advanced glycation end products inhibit proliferation and primary cilia formation of myoblasts through receptor for advanced glycation end products pathway [J]. Biochemical and Biophysical Research Communications, 2023, 684: 149141.
- [10] DAMRATH J G, CREECY A, WALLACE J M, et al. The impact of Advanced glycation end products on bone properties in Chronic kidney disease [J]. Current Opinion in Nephrology and Hypertension, 2021, 30(4): 411-417.
- [11] MA Y, WANG X, LIN S, et al. The potential role of Advanced glycation end products in the development of Kidney disease [J]. Nutrients, 2025, 17(5): 758-758.
- [12] RAGHAVAN T C. Advanced glycation end products in Neurodegenerative diseases [J]. Journal of Molecular Neuroscience: MN, 2024, 74(4): 114.
- [13] 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.
- [14] GONG R Z, WANG Y H, WANG Y F, et al. Simultaneous determination of N^ε-(carboxymethyl) lysine and N^ε-(carboxyethyl) lysine in different sections of Antler velvet after various processing methods by UPLC-MS/MS [J]. Molecules, 2018, 23(12): 3316.
- [15] 靳雯, 景凯, 张冬鸽, 等. 杏鲍菇空气煎炸过程品质变化与羧甲基赖氨酸、羧乙基赖氨酸生成研究[J]. 食品工业科技, 2024, 45(22): 37-45.
- [16] ANTONETA G, CHRISTOPHER H, LORELLE D, et al. Advanced glycation end products in Skeletal muscle health and Sarcopenia: a systematic review of observational studies [J]. Mechanisms of Ageing and Development, 2022, 209: 111744.
- [17] LU Y J, TANG H Y, XU J J, et al. Toxic effects of 4-Methylimidazole on the maturation and fertilization of mouse oocytes [J]. Food and Chemical Toxicology, 2022, 164: 113051.
- [18] NADER A, HAMED S, MAHDI J, et al. 4-Methylimidazole, a carcinogenic component in food, amount, methods used for measurement; a systematic review [J]. Food Chemistry: X, 2023, 18: 100739.
- [19] TAKESHI M, CHIKAKO U. Genotoxicity assessment of 4-Methylimidazole: regulatory perspectives [J]. Genes and Environment, 2016, 38: 20.
- [20] 李明鹤. 基于LC-MS/MS法的食品安全快速检测技术研究[J]. 食品安全导刊, 2021, 20: 86-88.
- [21] 李林竹, 苏伟, 母应春, 等. 基于LC-MS/MS不同香型白酒、鹿茸酒及鹿血酒非挥发性代谢物差异分析[J]. 中国酿造, 2025, 44(2): 65-72.
- [22] JIA F, ZHENG H, XU Y, et al. Material basis and sleep-improving mechanisms of Lily-ziziphi spinosae semen decoction: systematic evidence from LC-MS, Network pharmacology and animal experiments [J]. Food Science and Human Wellness, 2025, 14(9): 9250493.
- [23] 肖义夫, 廖百森. 高效液相色谱法测定焦糖色素中4-甲基咪唑[J]. 现代预防医学, 2005, 3: 249-250.
- [24] 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.
- [25] 宋小莉, 李普, 张秋婷, 等. 烘焙配方对1,2-二羰基化合物及晚期糖基化终末产物的影响[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(21): 140-147.
- [26] ZHAO X, YAN H X, CAO J R, et al. Effect of milk fat and its main fatty acids on oxidation and glycation level of milk [J]. Journal of Food Science and Technology, 2023, 60(2): 720-731.
- [27] LI M Y, SHEN M Y, LU J N, et al. Maillard reaction harmful products in dairy products: formation, occurrence, analysis, and mitigation strategies [J]. Food Research International, 2022, 151: 110839.
- [28] 孔慧, 张达莉, 徐海山, 等. 果胶寡糖的制备、分离纯化及其生物活性研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(5): 321-337.
- [29] 王旭, 毛湘冰, 孙锐, 等. 氧化饲料中添加果胶寡糖对断奶大鼠空肠与肝脏组织形态和抗氧化能力的影响[J]. 动物营养学报, 2021, 33(3): 1716-1723.
- [30] 吴鑫兰. 美拉德反应中4-甲基咪唑的形成、调控机制及免疫分析方法的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- [31] MARTA M, FRANCISCO J M. Effect of different flours on the formation of hydroxymethylfurfural, furfural, and dicarbonyl compounds in heated glucose/flour systems [J]. Foods, 2017, 6(2): 14.
- [32] 孔姗姗. 腌制水产品中晚期糖基化终末产物的形成及影响因素研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2023.
- [33] 李娜, 吴旋, 叶梦宇, 等. 肉制品中晚期糖基化终末产物研究进展[J]. 中国食品学报, 2024, 24(3): 385-395.
- [34] 江冠桦. 烘焙面包中晚期糖基化终末产物检测技术建立及其影响因素研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2022.
- [35] 吴佳蔓, 刘泽艳, 张冬鸽, 等. 空气煎炸温度和时间对香菇品质和晚期糖基化终末产物形成的影响[J]. 食用菌学报, 2024, 31(2): 85-

94.

[36] 刘春霞.果糖赖氨酸体系中羧甲基赖氨酸和羧乙基赖氨酸的形成研究[D].咸阳:西北农林科技大学,2015.

[37] SUNGMIN H, MINGI C, HYUNBEEN P, et al. Analysis of α -Dicarbonyl compounds and 4-Methylimidazole in coffee made with various roasting and brewing conditions [J]. Lwt-Food Science and Technology, 2021, 151: 112231.

[38] ZHANG Z I, CHEN Y, DENG P, et al. Isotope dilution-HPLC-MS/MS to investigate the production patterns and possible pathways of free and protein-bound AGEs and 4-MI in cookies [J]. Food Research International, 2023, 173(2): 113477.

[39] 谭文兴,农立忠,黄玉南,等.低4-甲基咪唑含量的焦糖色素制备工艺的研究[J].甘蔗糖业,2013,6:23-28.

[40] ANISHAS C L, KALYANA S, AHMADFAIZAL A R, et al. Effect of consumption heated oils with or without Dietary cholesterol on the development of Atherosclerosis [J]. Nutrients, 2018, 10(10): 1527.

[41] JEREMIE C, BERTRAND H, BERTRAND B, et al. Evaluation of heating performances and associated variability of domestic cooking appliances (Oven-baking and Pan-frying) [J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 62(2): 758-765.

[42] DOMENICO S, HAKIM B, M F C, et al. The role of dietary Advanced glycation end products (AGEs) in metabolic dysfunction [J]. Molecular Nutrition & Food Research, 2020, 65(1): e1900934.

[43] YUSNAINI, EDI S. The effect of heating process using Electric and Gas ovens on chemical and physical properties of cooked smoked-meat [J]. Procedia Food Science, 2015, 3: 19-26.

[44] EMANUELE C, SALVATORE M. Modulation of Maillard reaction and protein aggregation in bovine meat following exposure to Microwave heating and possible impact on digestive processes: an FT-IR spectroscopy study [J]. Electromagnetic Biology and Medicine, 2020, 39(2): 1737805.

[45] 王露飞,安比芳,白羽嘉,等.基于HS-SPME-GC-MS分析不同烤馕装置烤制4种新疆馕的香气特征差异[J].现代食品科技,2024,40(12):319-330.

[46] 谷亚文,肉孜·阿木提,史勇,等.我国烤馕装置现状与分析[J].新疆农机化,2018,2:29-31.

[47] 史勇,肉孜·阿木提,吕仲明,等.新疆烤馕装置的研究现状[J].农业科技与装备,2015,5:48-51.