



苑彬,金慧,骈琳,等.美拉德反应对食品品质与安全的影响及其产物检测研究进展[J].轻工学报,2024,39(2):60-68.

YUAN B, JIN H, PIAN L, et al. A review of the impact of Maillard reaction on food quality and safety and the detection of its products[J]. Journal of Light Industry, 2024, 39(2): 60-68.

DOI: 10.12187/2024.02.008

美拉德反应对食品品质与安全的影响及其产物检测研究进展

苑彬¹, 金慧², 骈琳³, 高思今², 黄泽华²

1. 河南职业技术学院 智能制造学院, 河南 郑州 450046;

2. 河南工业大学 粮油食品学院, 河南 郑州 450001;

3. 河南工业大学 国际教育学院, 河南 郑州 450001

摘要: 对美拉德反应及其产物在食品加工过程中的多重影响进行梳理, 探讨其对食品品质与安全的影响, 并对典型的创新性反应产物检测技术进行综述, 指出: 该反应既能生成导致食品体系发生褐变的棕色聚合物(如5-羟甲基糠醛)或含氮共聚物(类黑素), 还能产生显著影响食品风味的物质(如酮类、醛类、烷基化合物等); 该反应不但可以改变食品的结构特性(如降低蛋白质的荧光强度和表面疏水性), 而且能生成具有特定功能的载体(如乳液凝胶功能载体)。该反应在生成抗氧化产物和消除食物中的过敏原方面具有积极作用, 然而, 也可能生成高级糖基化终产物、丙烯酰胺、杂环胺、5-羟甲基糠醛等潜在有害物质。目前, 美拉德反应产物的主要检测技术包括光谱法、色谱法、荧光化合物表征法等, 而荧光化合物作为美拉德反应中的重要中间产物, 可被应用于构建荧光探针, 实现对美拉德反应的实时监测。未来应深入研究有害物质的形成机制及其影响因素, 或进一步优化这些检测方法的精确度和效率, 为食品加工技术的持续发展提供更加全面的理论支持。

关键词: 美拉德反应; 食品品质; 食品安全; 检测方法

中图分类号: TS209 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-1553(2024)02-0060-09

0 引言

美拉德反应是影响食品质量参数的关键因素, 它涉及感官特性、颜色变化及蛋白质功能等多个方面^[1]。该反应在食品加工、运输和储存的各个阶段均会发生, 其反应速度、程度和具体过程受到诸多因

素影响, 主要包括反应物种类、温度/时间组合、pH值、水分活度等^[2]。美拉德反应通常分为3个阶段: 初始阶段, 羰基胺与游离氨基化合物反应形成N-糖胺, 此时不发生褐变, 但会生成一些后续反应的前体物质; 中间阶段产生浅黄色物质和风味化合物; 最后阶段则形成高分子量的棕色聚合物。

收稿日期: 2023-08-27; 修回日期: 2023-10-11; 出版日期: 2024-04-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(31571871); 国家级大学生创新创业计划项目(202310463057, 202310463068, 202210463003)

作者简介: 苑彬(1984—), 男, 河南省郑州市人, 河南职业技术学院讲师, 主要研究方向为粮油食品加工智能控制。E-mail: 13525549331@163.com

通信作者: 黄泽华(1988—), 男, 河南省周口市人, 河南工业大学讲师, 博士, 主要研究方向为粮食工程。E-mail: huang_zehua@qq.com

美拉德反应产物复杂多样,虽然该反应能赋予食品特定的风味和色泽,但它的某些产物也可能危害人体健康。在美拉德反应被发现后的很长一段时间内,对其产物成分的理论研究相对有限。然而,随着分析仪器和技术的不断发展,对美拉德反应机理及其产物成分、分子结构、效用和性质的研究已取得显著进展。因此,分析相关模型系统或食品加工中产生的主要美拉德反应产物及新兴的检测技术,对于制定有效的抑制和控制策略至关重要。本文梳理了美拉德反应在食品加工过程中对食品色泽、风味、结构和营养的影响,探讨了其对食品品质与安全的关系,并总结了美拉德反应产物检测技术的研究进展,以期为食品加工过程中危害物检测、智能化控制等决策场景提供参考。

1 美拉德反应对食品品质的影响

1.1 对食品色泽的影响

在美拉德反应过程中,还原糖和氨基化合物被转化为着色剂。其中,棕色聚合物(如5-羟甲基糠醛,5-HMF)或含氮共聚物(类黑素)主要在反应的中后期形成,导致食品体系发生褐变^[3]。有研究^[4]表明,醛缩醇反应可能产生基于碳水化合物的非均相低聚物,而这些低聚物在反应混合物中可能会引发褐变反应。活性亚甲基化合物(如去甲呋喃醇)作为醛缩醇反应的关键中间体,在一定程度上调控着褐变反应的进程。同时,氧化还原反应在美拉德反应中也起着重要作用,它通过增加褐变产物中的不饱和和双键数量,影响最终产物的特性^[4]。美拉德反应引起褐变的程度通常取决于产物的积累和组成。水果和蔬菜在加工过程中容易发生非酶褐变,褐变程度受加热强度、暴露时间和关键反应底物的影响。例如,李子干燥过程中,早期美拉德反应产物(呋喃)和中间体美拉德反应产物(N-羧甲基-L-赖氨酸)的不同反应路径会影响产品最终的颜色^[5];橙汁、番茄制品、脱水胡萝卜等在加工过程中形成的糠酰甲基衍生物,会导致加工品颜色、风味和气味发生不良变化,影响产品的整体可接受性和保质期^[6]。

在食品工业中,美拉德反应引起的色彩变化具

有双重意义,其中间产物的反应过程尤为关键。例如,在全麦食品生产中,发芽的全麦粉由于酶活性增加,淀粉、蛋白质等易发生水解反应而使成分发生变化,这种成分变化在加工过程中会促进美拉德反应产物的生成;明胶基糖果(如含有蔗糖的软糖)在热处理过程中会产生黄色至棕色的色素^[7]。研究^[8]发现,在早期和晚期糖基化产物的形成过程中,可检测到中间体 α -二羰基化合物,其形成可能与籽粒发芽过程中还原糖和游离氨基酸的质量浓度及组成变化有关。还有研究^[9]发现,还原性乳糖含量在乳制品领域也是影响粉末褐变的重要参数。此外,乳清蛋白浓缩粉的品质易受储存温度、储存时间、储存热负荷等条件的影响,如商业棕色发酵乳制品在储存期间可能会发生美拉德反应^[10]。综上可知,美拉德反应对食品色泽的影响贯穿于整个生产、储运、销售、消费的过程。

1.2 对食品风味的影响

美拉德反应不仅关乎食品的色泽,而且显著影响其风味。该反应生成的风味物质主要包括酮类、醛类、烷基化合物等,这些物质主要是由糖与氨基酸生成 Schiff 碱(Schiff Base),再经过重排、裂解等一系列反应生成的。风味物质通常具有较低的相对分子质量,易受加工条件(如温度、时间)的影响。在焙烤食品中,美拉德反应的程度随着烘烤时间的延长而增强。针对这种反应产生的风味物质,学术界的研究成果颇为丰富,例如,甘氨酸、赖氨酸和组氨酸与葡萄糖的反应可生成2,5-二甲基吡嗪,这是香菜籽油(FRO)中重要芳香活性美拉德反应产物之一^[11]。此外,不同的食品成分也会影响美拉德反应产生的风味物质。谷氨酸(Glu)的存在可以增强GG-ARP系统(谷氨酸、半乳糖 Amadori 重排)的牛奶味和烘焙风味。因此,通过调节关键成分(如谷氨酸)来控制风味物质的生成,为烘焙食品风味的研究提供了新的思路^[12]。S. Krause 等^[13]提取了豌豆中的淀粉、蛋白等组分,并将其制作成蛋糕,发现不同豌豆组分在烘烤过程中易于发生美拉德反应和焦糖化,与以豌豆粉或小麦粉为基础原料制作的蛋糕相比,具有潜在的麦芽和烘焙风味。同样,通过不同复合混合物(如鸡骨提取物、小麦蛋白、水稻蛋白

水解产物等)进行美拉德反应产生的风味物质,也可作为潜在的天然食品香料^[14]。

除了焙烤食品,美拉德反应在水产品和果蔬加工中同样可对制品的风味产生显著影响。例如,鲱鱼子(卵)作为全球美食,其独特的烤香味主要得益于美拉德反应,其中烘烤时间和温度是影响风味物质生成的关键参数^[15]。在茶叶加工中,美拉德反应同样至关重要。研究^[16]表明,不同加工方法(如蒸、炒)和不同收获季节(春、秋)对生茶叶的感官和风味品质有显著影响,尤其在烘焙过程中,蒸青比炒青引起的美拉德反应的化学变化更大。干燥过程中,美拉德反应产生的杂环化合物和硫化合物可能对茶叶焙烤风味有重要贡献^[17]。此外,在红枣干燥过程中,对流干燥和冷冻干燥等工艺产生的风味成分大多也是美拉德反应产物或脂肪酸氧化产物^[18]。上述研究结果揭示了美拉德反应在食品风味形成中具有重要作用。

1.3 对食品结构的影响

美拉德反应不仅在食品风味方面发挥重要作用,还能显著影响食品的结构特性。在大豆分离蛋白(SPI)乳液中,美拉德反应形成的偶联物能够显著降低SPI的荧光强度和表面疏水性,导致其结构松弛,乳化性能增强^[19]。正如前文所述,食品在储存过程中也会经历美拉德反应。乳清蛋白浓缩粉在储存期间会发生高级美拉德反应,促进如二羰基化合物和美拉德反应产物的形成,从而显著影响蛋白质的结构。值得注意的是,这种变化能够使乳清蛋白浓缩粉具备良好的再水化性能(润湿性、溶解性和分散性)^[9]。

美拉德反应在调控食品微观结构领域具有重要作用,特别是在纳米载体的制备方面。基于蛋白质自组装的原理,美拉德反应被用于制备SPI-葡聚糖基纳米凝胶,这类凝胶展现出较低的表面疏水性和优异的乳化性能^[20]。此外,葡聚糖还能诱导 β -酪蛋白(β -CN)的糖基化反应,增强柚皮素负载的 β -CN胶束在酸性和高钙环境下的稳定性,为制备在极端条件下仍保持稳定的纳米载体提供了可能性^[21]。研究人员通过合成酪蛋白酸钠(SC)与美拉德偶联物(MC),成功制备了高度水溶性的纳米胶

囊,这些胶囊能高效包裹姜黄素等活性物质^[22]。不仅如此,利用美拉德反应制备的水包油(W/O/W)凝胶,可用作乳液凝胶功能载体,实现药物的靶向释放^[23]。因此,美拉德反应不仅可以改善食品的结构特性,还能创造具有特定功能的载体,为食品结构的定向改造和创新开辟了新途径^[24]。

1.4 对食品营养的影响

在食品加工领域,保持营养成分的完整性一直是研究热点。在众多加工方法中,美拉德反应因无需特殊化学材料和复杂设备的特点,引起了广泛关注。美拉德反应的后期能形成类黑素,它具有抗菌、抗高血压活性、抗氧化及羟基去除活性等多种功能特性,这些特性主要归因于类黑素中含有羟基的高分子量螯合物^[25]。通过将美拉德反应与高压均质技术结合,豌豆分离蛋白(PPI)的热稳定性和体外抗氧化活性均得到了提升,同时降低了PPI的溶解度限制并改善了乳化和发泡性能^[26]。J. H. Huang等^[27]研究发现,在700 W条件下经微波处理10 min后,紫苏油中的美拉德反应产物含量和DPPH自由基清除活性显著增加,而总生育酚含量、酚类化合物含量和脂肪酶活性显著降低。此外,在美拉德反应过程中,紫外线吸收成分和荧光化合物含量也有所增加^[28]。

美拉德反应还可能通过破坏构象表位、揭示隐藏表位、掩盖线性表位和(或)形成新的表位,影响蛋白质的致敏性^[29]。有研究^[30]显示,糖类(包括单糖和寡糖)参与的美拉德反应能够改变 β -乳球蛋白的抗原性,且这种影响的程度与碳水化合物的类型有关。因此,美拉德反应不仅会产生抗氧化产物,而且能改变蛋白结构,进而改善食物的过敏性。由于氧化应激是导致体内细胞凋亡、组织损伤和病理变化的主要原因,且食物过敏的发病率呈上升趋势。在此背景下,美拉德反应为解决上述问题提供了一种可能的方案,它不仅能够用于生成抗氧化产物,还能通过改变蛋白质结构来消除食物中的过敏原,为功能性食品的生产提供了新的可能性。

2 美拉德反应产物分析及检测技术

2.1 美拉德反应产物中的有害成分

美拉德反应为食品赋予了多样的风味化合物

(短肽、有机酸、醛、酮、硫和呋喃化合物等),这些化合物为食品形成独特的风味做出了重要贡献。然而,美拉德反应产物中存在一些对人体健康有害的化合物,这些化合物可能导致抗营养成分的增加^[31]。目前已知的美拉德反应产物中的有害成分包括高级糖基化终产物(AGEs)、丙烯酰胺(AM)、杂环胺(HCA)和5-HMF^[32]。

AM是一种有机污染物,它可以通过食物中的糖和氨基酸在美拉德反应过程中产生。已有研究^[33]证实,AM具有神经毒性,并可能具有潜在的致癌和遗传毒性作用。还有研究^[34]表明,尿液中AM代谢物水平较高可能与油炸马铃薯制品和饼干的摄入有关。特别是对儿童而言,AM可能对其健康产生不利影响,因此需要密切关注儿童饮食等生活环境,尽量避免其接触AM。AM在油炸含氮或高碳水化合物化合物的食品中较为常见,其生成与天冬酰胺与还原糖之间的美拉德反应密切相关。食品中AM含量的多少主要由食品所处的外界环境和内部因素(食品中天冬酰胺和还原糖的含量)决定^[35]。为了降低食品中AM的含量,可以采取多种有效策略,这些策略涵盖从农业生产、原料预处理到食品热加工等多个阶段,例如,在食品加工过程中,可以选择那些产生AM较低的原料品种;在储存和运输食品原料或产品时,应采用较低的温度条件;在加工环节,可以通过添加外源性离子对原料进行浸泡或漂烫,或者降低油炸时的温度,来进一步优化加工工艺^[36]。此外,还可以利用高甲氧基苹果果胶^[37]、壳聚糖^[38]等物质与AM生成的底物进行竞争性反应,从而降低AM的产生。

AGEs在体内的积累与糖尿病、肾病及心血管疾病的并发症紧密相关,而这些化合物既源自食品加工中的美拉德反应,也源自生物体内的自然生成过程^[39]。在食品加工过程中,温度、pH值、水分含量、压力等均会明显影响美拉德反应的进行,进而直接影响AGEs的生成量^[40]。调味料和添加剂的使用也会对AGEs的生成产生影响,如水煮食品中的AGEs含量明显低于烤制食品^[41]。此外,食品在储存过程中也会产生一定量的AGEs。因此,严格控制食品加工和储存条件,合理使用调味料和添加剂,对

于降低食品中AGEs含量具有重要意义。

在动物源性食品中,肌酐、糖、肌酸、游离氨基酸等成分在高温烹饪条件下会生成HCA^[42],且其生成类型会随着温度的变化而变化,特别是在高于或低于300℃时,其生成类型会有较大不同。HCA的生成受到多种因素的影响,包括烹饪温度、加工时间、采用的工艺及使用的设备等。在日常生活中,烹饪过程也会产生HCA,而过多摄入这些物质可能会增加患结肠癌、乳腺癌、胃癌等疾病的风险^[43]。为了降低HCA的影响,需要综合考虑多个因素,如选择适当的加工方式、添加抗氧化物质以抑制HCA的形成,或者采取相应措施加快HCA的代谢过程,以降低其潜在的毒性^[44]。

5-HMF是一种具有潜在致癌性的化合物,过量摄入可能会诱发肿瘤转化,并可能对肝脏和肾脏造成毒性影响。5-HMF的生成主要通过两种路径:一种是在美拉德反应过程中3-脱氧葡萄糖酮(3-DG)的分解,二是在酸性条件下糖类发生的脱水反应(焦糖化)。依据反应路径,影响5-HMF生成的主要因素包括pH值、糖类含量、氨基酸类型、温度、阳离子含量、水分活度等。已有研究^[45]表明,美拉德反应底物中的糖类、氨基酸和蛋白质含量对5-HMF的生成有显著影响,其中糖类含量的影响尤为关键。5-HMF在酸性条件下较易生成,在pH值为5.5至7.0的果糖溶液中,经90℃加热48h,5-HMF的含量可增加近4倍。上述研究结果表明,通过调整美拉德反应的底物含量、pH值等条件,可以有效减少5-HMF的生成。然而,在进行这些调整时,也必须考虑到可能对食品风味产生的不利影响,因为这些调整可能会降低美拉德反应的程度,从而影响食品的整体风味特性。

2.2 美拉德反应产物检测技术

美拉德反应产物的检测一直是学术界的 research 热点。正如前文所述,美拉德反应不仅对食品的感官特性(如颜色和口感)产生显著影响,还可能引起食品营养价值的变化。值得注意的是,美拉德反应并非总是带来积极效果。鉴于此,开展对美拉德反应产物的精确检测显得尤为关键,这对于确保食品安全、提升产品品质及深入理解反应机制都具有不可

忽视的价值。

在食品工业中,美拉德反应产物的检测对于工艺优化和新产品开发具有重要意义。通过对美拉德反应条件和产物的精确控制,不仅能够确保食品安全,还能提升产品的感官品质和营养价值。例如,在生产植物基肉替代品时,掌握和调控美拉德反应有助于模仿动物肉的风味和质地,从而提高产品的市场接受度。此外,美拉德反应检测也是食品科学研究的重要工具,可以用于研究食品中各种化合物之间的相互作用及其对食品整体质量和安全性的影响。美拉德反应产物检测将食品领域中的化学、工程、营养学、毒理学等多个学科紧密相连,为研究者提供了一个全面理解和改进食品生产与加工过程的平台。因此,美拉德反应产物检测技术在食品科学及相关领域中具有广阔的应用前景和重要的社会经济价值,表1列举了部分美拉德反应产物的检测方法。

自1970年代始,学界就开始采用气-液相色谱分析法^[46]和凝胶电聚焦技术^[47]等方法对褐变反应过程和牛奶蛋白中的美拉德反应进行深入研究。目前,多种光谱法(如紫外光谱法、红外光谱法、荧光光谱法)、色谱法(如体积排阻色谱法、凝胶渗透色谱法、气相色谱-质谱法及液相色谱-质谱联用法)、

核磁共振、放射性同位素标记、酶联免疫法等技术已被广泛应用于美拉德反应产物的分析和表征。此外,极性和非极性固相微萃取技术也被引入到美拉德反应产物的研究中^[48]。这些不同的检测方法和技术可以根据实际需求灵活选择,以实现美拉德反应的智能化检测和控制。

在食品加工和储存过程中寻求简便而准确的美拉德反应鉴定方法过程中,研究人员通过考查美拉德反应温度和pH值变化引起的自由基变化,建立了自旋捕集剂法^[49]。这种方法通过对不稳定自由基的捕集来分析信号,有效地表征了加热食品中美拉德反应的初中期阶段自由基变化,从而为美拉德反应过程的分析提供了简便且灵敏的手段。此外,天冬酰胺与还原糖在碱性和高温条件下的反应产物也可通过高效液相色谱(HPLC)与馏分收集器的组合进行检测;而紫外-可见光谱和傅里叶红外(FT-IR)光谱因对美拉德反应产物的结构表现出敏感性,被应用到铜(II)金属离子与美拉德反应产物络合的研究中^[50]。美拉德反应作为典型的还原糖与氨基化合物之间的反应,对它的产物进行早期检测可反映食品和饮料在颜色、风味、香气等方面的早期变化^[51]。Amadori重排是美拉德反应的第一步,该过程中的反应产物在酸水解过程中会形成N-(吡

表1 美拉德反应产物的检测方法

Table 1 Detection Methods of Maillard Reaction

检测方法	方法特点	应用示例说明	参考文献
光谱法	包括紫外、红外、荧光光谱法	具有对美拉德反应产物结构敏感的特性,适用于反应产物的结构分析和鉴定。	[50,58] [59,61]
色谱法	包括体积排阻色谱、气相色谱等	能够分离和定量不同反应产物,如高效液相色谱结合质谱可用于分析前体和中间体,提供定量信息。	[46,54-55]
自由基变化分析法	观察温度、pH值变化对自由基的影响	通过观察温度和pH值变化导致的自由基改变,分析美拉德反应与自由基变化之间的关系。	[49]
Amadori化合物测定法	通过测定Amadori化合物来检测	通过测定Amadori化合物含量,早期检测美拉德反应引起的质量变化,提供反应程度的指标。	[52-53]
MDL和UHPLC-MS/MS分析	结合自动化微波消解和高效液相色谱	通过结合自动化微波消解和UHPLC-MS/MS,检测AM及其前体和中间体,用于美拉德反应和动力学分析。	[55-56]
荧光化合物表征法	利用荧光产物表征反应过程	荧光产物可用作荧光探针,能够有效表征美拉德反应过程和产物,应用于食品安全和荧光探针开发领域。	[57-59] [60-61]

喃酰甲基)氨基酸(FMAAs),这为早期监测美拉德反应产物提供了一个敏感的检测指标。通过检测 Amadori 重排反应产物,研究者可对美拉德反应所引起的产品质量变化及其所经历的热处理或储存条件进行回顾性评估^[52]。基于此,研究人员开发了液相色谱-电喷雾电离-串联质谱法来分析 Amadori 重排反应产物,并采用反相高效液相(RP-HPLC)色谱和紫外法检测分析 FMAAs,这些方法可对早期美拉德反应的标志物进行检测,进而应用于加工条件的调控方面^[53]。此外,通过高效阴离子交换色谱、电化学(ECD)和二极阵列检测器(DAD)的串联耦合设计,实现了对美拉德反应前体和产物的同时分析,为研究糖、氨基酸及相应的 Amadori 重排反应产物和环状中间体(如 5-(羟甲基)-2-糠醛、麦芽酚和 2,3-二氢-3,5-二羟基-6-甲基-4-(H)-吡喃-4-酮等)提供了新的研究途径^[54]。

在对美拉德反应进行深入分析的研究中,一些研究者采用了多种不同方法来更全面地理解该反应的特性。例如,有学者运用反相高效液相色谱-二极阵列检测法(HPLC-DAD),在 pH 值为 5 的美拉德水体系模型中进行分析,经过约 120 min 的加热处理,成功检测到了非挥发性反应产物^[55]。另有研究者在正负离子切换的控制下,结合自动化微波消解实验室工作站(MDL)和超高效液相色谱-串联质谱(UHPLC-MS/MS)技术,实现了在美拉德反应及其动力学解析过程中对丙烯酰胺及其前体和中间体的同时测定^[56]。这种方法的优势在于,MDL 工具与简化的样品处理程序及 UHPLC-MS/MS 分析相结合,显著降低了动力学研究中样品分析的时间和劳动力成本^[56]。

荧光化合物作为美拉德反应研究中的重要中间产物,被广泛用作构建荧光探针的平台用于检测各种分析物^[57]。因此,荧光化合物表征法在食品科学和生命科学领域,尤其是食品安全和荧光探针的开发领域备受关注^[58-59]。研究^[60]发现,美拉德反应产生的荧光可以通过肉眼观察到,并且可以被摄影设备记录;通过使用液体闪烁计数器(LSC,单光子率计数)的低水平化学发光(CL)检测程序,能够监测到美拉德反应的特异性 CL 特征,包括 O-依赖

性、硫化化合物的抑制作用等。研究^[60]表明,CL 发射光谱在 500 nm 和 695 nm 附近出现两个宽峰,这与棕色反应混合物的荧光发射光谱和 CL 发射光谱的蓝绿色部分相匹配;美拉德反应过程中可见光的发射可能部分源自 O-依赖性激发态的产生,也可能与能量转移到褐变反应的同时形成的荧光产物有关。此外,研究者还开发了一种基于 D-葡萄糖和 L-精氨酸的美拉德反应产物的新型可活化荧光监测平台,该平台不仅能用于检测 D-异抗坏血酸、酒石酸等物质,而且在实际应用中已经取得了令人满意的成果^[61]。

3 结论与展望

本文通过梳理美拉德反应对食品加工过程中的多重影响(如食品色泽、风味、结构等),探讨了其对食品品质与安全的关系,并对典型的创新性美拉德反应产物检测方法进行综述,得出:美拉德反应生成的棕色聚合物或含氮共聚物会显著影响食品的色泽,产生的酮类、醛类、烷基化合物等风味物质,为食品带来了丰富的口感和香气。然而,美拉德反应过程中也可能产生一些有害化合物,如 AGEs、AM、HCA 等,这些化合物对人体健康可能构成潜在威胁,引发神经毒性、致癌性、遗传毒性等问题。为了确保食品安全,光谱法、色谱法、核磁共振、放射性同位素标记、酶联免疫法等技术被广泛应用于美拉德反应产物的分析和表征。这些技术不仅有助于研究者更好地理解美拉德反应的复杂机制,也为食品加工过程中的质量控制和风险评估提供了强有力的工具。在未来的研究中,可以采用模块化设计理念,开发专门针对 AGEs、AM 等特定指标的检测方法,从而显著提升检测方法的效率和灵敏度。此外,还可以通过优化检测结果的记录与分析模式,建立数据可视化模型,实现美拉德反应的实时、在线监控,确保食品品质与安全。

总体而言,通过持续改进美拉德反应产物的检测方法和控制策略,不仅能充分挖掘这一反应在食品加工中的潜在价值,还能有效规避其可能引发的风险,在确保食品安全的同时提升产品品质,促进食品加工行业的持续创新和发展。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] VAN BOEKEL M A J S. Kinetic aspects of the Maillard reaction: A critical review [J]. *Food/Nahrung*, 2001, 45(3): 150-159.
- [3] HU J X, LI X, YU Q T, et al. Understanding the impact of pectin physicochemical variation on browning of simulated Maillard reaction system in thermal and storage processing [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 240: 124347.
- [4] BORK L V, HAASE P T, ROHN S, et al. Formation of melanoidins-Aldol reactions of heterocyclic and short-chain Maillard intermediates [J]. *Food Chemistry*, 2022, 380: 131852.
- [5] MICHALSKA A, HONKE J, ŁYSIAK G, et al. Effect of drying parameters on the formation of early and intermediate stage products of the Maillard reaction in different plum (*Prunus domestica* L.) cultivars [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2016, 65: 932-938.
- [6] KATHURIA D, HAMID, GAUTAM S, et al. Maillard reaction in different food products: Effect on product quality, human health and mitigation strategies [J]. *Food Control*, 2023, 153: 109911.
- [7] WANG R, HARTEL R W. Citric acid and heating on gelatin hydrolysis and gelation in confectionery gels [J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 129: 107642.
- [8] YILTIRAK S, KOCADAGLI T, EVRIM CELIK E, et al. Effects of sprouting and fermentation on the formation of Maillard reaction products in different cereals heated as wholemeal [J]. *Food Chemistry*, 2022, 389: 133075.
- [9] PAUL A, GAIANI C, CVETKOVSKA L, et al. Deciphering the impact of whey protein powder storage on protein state and powder stability [J]. *Journal of Food Engineering*, 2022, 326: 111050.
- [10] LI H B, ZHANG Y Y, LI C S, et al. Content and evolution of Maillard reaction products in commercial brown fermented milk during storage [J]. *International Dairy Journal*, 2022, 129: 105343.
- [11] ZHANG L Y, CHEN J, ZHAO X Z, et al. Key volatile compound formation of rapeseed oil induced via the Maillard reaction during seed roasting [J]. *Food Chemistry*, 2022, 388: 132992.
- [12] PAN C X, CUI H P, HAYAT K, et al. Exogenous glutamic acid effectively involved in N-(1-deoxy-D-galulos-1-yl)-glutamic acid degradation for simultaneous improvement of both milk-like and baking flavor [J]. *Food Bioscience*, 2022, 47: 101697.
- [13] KRAUSE S, ASAMOAH E A, HUC-MATHIS D, et al. Applicability of pea ingredients in baked products: Links between formulation, reactivity potential and physicochemical properties [J]. *Food Chemistry*, 2022, 386: 132653.
- [14] CHIANG J H, YEO M T Y, ONG D S M, et al. Comparison of the molecular properties and volatile compounds of Maillard reaction products derived from animal- and cereal-based protein hydrolysates [J]. *Food Chemistry*, 2022, 383: 132609.
- [15] LIU H J, FANG M C. Characterization of aroma active volatile components in roasted mullet roe [J]. *Food Chemistry*, 2022, 385: 132736.
- [16] WANG J Q, FU Y Q, CHEN J X, et al. Effects of baking treatment on the sensory quality and physicochemical properties of green tea with different processing methods [J]. *Food Chemistry*, 2022, 380: 132217.
- [17] YANG Y Q, QIAN M C, DENG Y L, et al. Insight into aroma dynamic changes during the whole manufacturing process of chestnut-like aroma green tea by combining GC-E-Nose, GC-IMS, and GC × GC-TOFMS [J]. *Food Chemistry*, 2022, 387: 132813.
- [18] LIU Y X, LIAO Y X, GUO M R, et al. Comparative elucidation of bioactive and volatile components in dry mature jujube fruit (*Ziziphus jujuba* Mill.) subjected to different drying methods [J]. *Food Chemistry*, 2022, 14: 100311.
- [19] MA X B, CHI C D, PU Y E, et al. Conjugation of soy protein isolate (SPI) with pectin: Effects of structural modification of the grafting polysaccharide [J]. *Food Chemistry*, 2022, 387: 132876.
- [20] ZHANG Q, YUE W T, ZHAO D, et al. Preparation and characterization of soybean protein isolate-dextran conjugate-based nanogels [J]. *Food Chemistry*, 2022, 384: 132556.
- [21] LI M, WEN X, WANG K L, et al. Maillard induced glycation of beta-casein for enhanced stability of the self-assembly micelles against acidic and calcium environment [J]. *Food Chemistry*, 2022, 387: 132914.
- [22] PANDEY S, VIND A H A, DARSHINI R N K, et al. Curcumin loaded core-shell biopolymers colloid and its incorporation in Indian Basmati rice: An enhanced stability, anti-oxidant activity and sensory attributes of fortified rice [J]. *Food Chemistry*, 2022, 387: 132860.
- [23] HAN L, ZHOU S T, LU K Y, et al. Effects of inducer type and concentration on the formation mechanism of W/O/W double emulsion gels [J]. *Food Chemistry*, 2022, 379: 132166.
- [24] WANG W D, LI C, CHEN C, et al. Effect of chitosan oligosaccharide glycosylation on the emulsifying property of lactoferrin [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 209(Part A): 93-106.
- [25] LIU X, XIA B, HU L T, et al. Maillard conjugates and

- their potential in food and nutritional industries: A review [J]. *Food Frontiers*, 2020, 1(4): 382–397.
- [26] ZHAO S L, HUANG Y, MCCLEMENTS D J, et al. Improving pea protein functionality by combining high-pressure homogenization with an ultrasound-assisted Maillard reaction [J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 126: 107441.
- [27] HUANG J H, CHEN C Y, SONG Z H, et al. Effect of microwave pretreatment of perilla seeds on minor bioactive components content and oxidative stability of oil [J]. *Food Chemistry*, 2022, 388: 133010.
- [28] TU Y Q, GUAN L, REN F Z, et al. Changes in antigenicity and functional characteristics of the Maillard reaction products between β -lactoglobulin and 2'-fucosyllactose [J]. *International Dairy Journal*, 2022, 130: 105366.
- [29] GOU J K, LIANG R, HUANG H L, et al. Maillard reaction induced changes in allergenicity of food [J]. *Foods*, 2022, 11(4): 530.
- [30] ZHONG J Z, XU Y J, LIU W, et al. Antigenicity and functional properties of beta-lactoglobulin conjugated with fructo-oligosaccharides in relation to conformational changes [J]. *Journal of Dairy Science*, 2013, 96(5): 2808–2815.
- [31] PENG J Y, MA L Q, KWOK L Y, et al. Untargeted metabolic footprinting reveals key differences between fermented brown milk and fermented milk metabolomes [J]. *Journal of Dairy Science*, 2022, 105(4): 2771–2790.
- [32] 时海波, 邹焯, 杨恒, 等. 美拉德反应产物生物活性及衍生危害物安全控制研究进展 [J]. *食品工业科技*, 2019(22): 331–339.
- [33] HENAO TORO S J, GÓMEZ-NARVÁEZ F, CONTRERAS-CALDERÓN J, et al. Acrylamide in sugar products [J]. *Current Opinion in Food Science*, 2022, 45: 100841.
- [34] FERNANDEZ S F, PARDO O, COSCOLLA C, et al. Risk assessment of the exposure of Spanish children to acrylamide using human biomonitoring [J]. *Environmental Pollution*, 2022, 305: 119319.
- [35] 欧阳宇, 赵扩权, 冯莹娜, 等. 美拉德反应产物的生物学活性和潜在健康风险 [J]. *食品科学*, 2021, 42(21): 350–362.
- [36] 汪鹏飞, 孙大文, 蒲洪彬, 等. 食品中丙烯酰胺抑制策略的研究进展 [J]. *食品科学*, 2021, 42(17): 333–342.
- [37] WANG P P, SUN G Y, LU P, et al. Mitigation effects of high methoxyl pectin on acrylamide formation in the Maillard model system [J]. *Food Chemistry*, 2022, 378: 132095.
- [38] SUNG W C, CHANG Y W, CHOU Y H, et al. The functional properties of chitosan-glucose-asparagine Maillard reaction products and mitigation of acrylamide formation by chitosans [J]. *Food Chemistry*, 2018, 243: 141–144.
- [39] 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.
- [40] BAAH R O, DUODU K G, EMMAMBUX M N. Cooking quality, nutritional and antioxidant properties of gluten-free maize-orange-fleshed sweet potato pasta produced by extrusion [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2022, 162: 113415.
- [41] LI H, WU C J, YU S J. Impact of microwave-assisted heating on the pH value, color, and flavor compounds in glucose-ammonium model system [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2018, 11(6): 1248–1258.
- [42] ZENG M M, WANG J H, ZHANG M R, et al. Inhibitory effects of Sichuan pepper (*Zanthoxylum bungeanum*) and sanshoamide extract on heterocyclic amine formation in grilled ground beef patties [J]. *Food Chemistry*, 2018, 239: 111–118.
- [43] GIBIS M. Heterocyclic aromatic amines in cooked meat products: Causes, formation, occurrence, and risk assessment [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2016, 15(2): 269–302.
- [44] 王惠汀, 孙学颖, 王丹, 等. 肉制品中杂环胺类化合物形成及控制措施的研究进展 [J]. *食品研究与开发*, 2022, 43(5): 195–203.
- [45] 薛瑞琪, 夏小乐. 褐色发酵乳中 5-羟甲基糠醛相关性分析及应用 [J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(19): 79–83.
- [46] WOLFROM M L, KASHIMURA N, HORTON D. Detection of Maillard browning reaction products as trimethylsilyl derivatives by gas-liquid chromatography [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2002, 22(5): 791–795.
- [47] LUDWIG E, FREIMUTH U. Proof of Maillard-reaction of milk proteins by means of gel-electrofocusing [J]. *Nahrung*, 1975, 19(9/10): 837.
- [48] COLEMAN W M A. Study of the behavior of polar and nonpolar solid-phase microextraction fibers for the extraction of Maillard reaction products [J]. *Journal of Chromatographic Science*, 1997, 35(6): 245–258.
- [49] LIU L, JI S J, TAN D H, et al. Radical change of Maillard reaction by using electron spin resonance spectroscopy [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(6): 280–286.
- [50] IOANNOU A, DASKALAKIS V, VAROTSIS C. Detection of Maillard reaction products by a coupled HPLC-Fraction collector technique and FTIR characterization of Cu(II)-complexation with the isolated species [J]. *Journal of Molecular Structure*, 2017, 1141: 634–642.
- [51] PARISI S, AMEEN S M, MONTALTO S, et al. Thermal approaches for the control of Maillard reaction in processed foods [M]. Cham: Springer International Publisher, 2019: 21–32.
- [52] YU J H, ZHANG S Q, ZHANG L F. Evaluation of the extent of initial Maillard reaction during cooking some vegetables by direct measurement of the Amadori compounds [J]. *Journal of the Science of Food Agriculture*,

- 2018,98(1):190-197.
- [53] WELLNER A, HUETTL C, HENLE T. Formation of Maillard reaction products during heat treatment of carrots [J]. *Journal of the Science of Food Agriculture*, 2011, 59(14):7992-7998.
- [54] DAVIDEK T, CLETY N, DEVAUD S, et al. Simultaneous quantitative analysis of Maillard reaction precursors and products by high-performance anion exchange chromatography [J]. *Journal of the Science of Food Agriculture*, 2003, 51(25):7259-7265.
- [55] BAILEY R G, AMES J M, MONTI S M. An analysis of the non-volatile reaction products of aqueous Maillard model systems at pH 5, using reversed-phase HPLC with diode-array detection [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1996, 72(1):97-103.
- [56] ZHANG Y, REN Y P, JIAO J J, et al. Ultra high-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry for the simultaneous analysis of asparagine, sugars, and acrylamide in Maillard reactions [J]. *Analytical Chemistry*, 2011, 83(9):3297-3304.
- [57] YAN S, WANG X, WU Y C, et al. A metabolomics approach revealed an Amadori compound distinguishes artificially heated and naturally matured acacia honey [J]. *Food Chemistry*, 2022, 385:132631.
- [58] DONG J X, SONG X F, SHI Y, et al. A potential fluorescent probe: Maillard reaction product from glutathione and ascorbic acid for rapid and label-free dual detection of Hg^{2+} and biothiols [J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2016, 81:473-479.
- [59] SI X J, WANG H L, WU T H, et al. Novel methods for the rapid detection of trace tetracyclines based on the fluorescence behaviours of Maillard reaction fluorescent nanoparticles [J]. *RSC Advances*, 2020, 10(71):43256-43261.
- [60] WONDRAK G, PIER T, TRESSL R. Light from Maillard reaction: Photon counting, emission spectrum, photography and visual perception [J]. *Journal of Bioluminescence and Chemiluminescence*, 1995, 10(5):277-284.
- [61] ZHAO Y M, YUAN H Y, ZHANG X L, et al. A stimuli-responsive fluorescence platform for simultaneous determination of d-isoascorbic acid and Tartaric acid based on Maillard reaction product [J]. *Spectrochimica Acta Part A (Molecular and Biomolecular Spectroscopy)*, 2018, 196:1-6.

A review of the impact of Maillard reaction on food quality and safety and the detection of its products

YUAN Bin¹, JIN Hui², PIAN Lin³, GAO Sijin², HUANG Zehua²

1. College of Intelligent Manufacturing, Henan Polytechnic, Zhengzhou 450046, China;
2. College of Food Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China;
3. College of International Education, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China

Abstract: A comprehensive review was conducted on the multiple impacts of the Maillard reaction and its products in food processing, along with an exploration of its relationship with food quality and safety. Additionally, a summary of typical innovative reaction product detection technologies was provided. It was noted that this reaction generated brown polymers (e. g. , 5-hydroxymethylfurfural) or nitrogen-containing copolymers (melanoidins), inducing browning in food systems, and produced substances (e. g. , ketones, aldehydes, alkyl compounds) significantly affecting food flavor. Furthermore, the reaction could not only alter the structural properties of food (e. g. , reducing protein fluorescence and surface hydrophobicity) but also create carriers with specific functionalities (e. g. , emulsion gelation carriers). While the reaction contributed positively to the generation of antioxidant compounds and the elimination of allergens in food, it may also lead to the formation of potentially harmful substances such as advanced glycation end products, acrylamide, heterocyclic amines, and 5-hydroxymethylfurfural. Currently, major detection techniques for Maillard reaction products include spectroscopy, chromatography, and fluorescence compound characterization methods. Fluorescent compounds, as important intermediates in the Maillard reaction, can be utilized to construct fluorescent probes for real-time monitoring. Future research should delve deeper into the formation mechanisms and influencing factors of harmful substances or further optimize the accuracy and efficiency of these detection methods to provide more comprehensive theoretical support for the continuous development of food processing technology.

Key words: Maillard reaction; food quality; food safety; detection method