

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20240204001

烤馕中晚期糖基化终末产物和 4-甲基咪唑的生成规律研究进展

郭丹¹, 李惠霖¹, 陈肖阳², 程相雷¹, 朱邦栋², 吴浪²,
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, 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆农业大学食品科学与药学院, 乌鲁木齐 830052;
3. 新疆土壤与植物生态过程重点实验室, 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, 无锡 214122)

摘要: 随着人们对健康和食品安全的日益关注, 研究食品中致病因子的含量和分布规律成为学术界和工业界关注的热点问题。其中, 晚期糖基化终末产物和 4-甲基咪唑在多种疾病的发展过程中有着重要影响。乌鲁木齐市作为新疆的商业中心和交通枢纽, 对于其特色食品——烤馕对人体健康潜在影响的科学评估, 具有十分重要的现实意义及研究价值。馕作为热加工食品, 在热加工过程中极易产生多种危害物, 其中包括晚期糖基化终末产物和 4-甲基咪唑。本文将综述烤馕中晚期糖基化终末产物和 4-甲基咪唑的形成机制及其危害, 重点总结烤馕中晚期糖基化终末产物及 4-甲基咪唑的生成规律及抑制方法, 以期为今后新疆烤馕的绿色加工及晚期糖基化终末产物和 4-甲基咪唑的减控方法提供科学理论依据, 对消费者的健康饮食提供指导。

关键词: 新疆; 烤馕; 晚期糖基化终末产物; 4-甲基咪唑; 生成规律

Progress on the formation of advanced glycosylation end products and 4-methylimidazole in roasted naan

WU Dan¹, LI Hui-Lin¹, CHEN Xiao-Yang², CHENG Xiang-Lei¹, ZHU Bang-Dong²,
WU Lang², SHEN Xing^{1,3*}, CHAI Zhong-Ping^{1*}, ZENG Mao-Mao⁴

(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)

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(2022SNGGGCC017)、新疆土壤与植物生态过程重点实验室开放课题项目(23XJTRZW05)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (32360802), the Key Laboratory of Xinjiang Uygur Autonomous Region (2021D04005), the Xinjiang Uygur Autonomous Region “Agriculture, Rural Areas and Farmers” Backbone Talents Training Project (2022SNGGGCC017), and the Open Subjects of Xinjiang Key Laboratory of Soil and Plant Ecological Processes (23XJTRZW05)

***通信作者:** 沈幸, 博士, 讲师, 主要研究方向为果实品质调控与食品安全。E-mail: shenxing@xjau.edu.cn

柴仲平, 博士, 教授, 主要研究方向为果树营养与施肥。E-mail: chaizhongpingth@sina.com

***Corresponding author:** SHEN Xing, Ph.D, Lecturer, College of Resources and Environment, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China. E-mail: shenxing@xjau.edu.cn

CHAI Zhong-Ping, Ph.D, Professor, College of Resources and Environment, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China. E-mail: chaizhongpingth@sina.com

ABSTRACT: With the increasing concern for health and food safety, the study of the content and distribution pattern of disease-causing factors in food has become a hot issue in academia and industry. Among them, late glycosylation end products and 4-methylimidazole have an important influence in the development of many diseases. As the commercial center and transportation hub of Xinjiang, Urumqi has a very important practical significance and research value for the scientific evaluation of the potential impact of its special food—roast naan on human health. Roast naan, as a thermally processed food, is highly susceptible to the generation of various hazards during thermal processing, including late glycosylation end products and 4-methylimidazole. This paper reviewed the formation mechanism of late glycosylation end-products and 4-methylimidazole in naan and their hazards, and summarized the generation pattern and inhibition method of late glycosylation end-products and 4-methylimidazole in naan, with a view to providing scientific theoretical basis for the green processing of naan in Xinjiang in the future as well as the method of reducing and controlling late glycosylation end-products and 4-methylimidazole and providing guidance for the consumers to have a healthy diet.

KEY WORDS: Xinjiang; roast naan; advanced glycosylation end products; 4-methylimidazole; generation regularity

0 引言

“饅”源于波斯语,意为“面包”^[1],是一种历史悠久的维吾尔族美食,因其独特的口感、浓郁的风味及其方便性而备受人们喜爱。在人们的日常膳食中,饅的碳水化合物含量占据着重要地位,是人们获取碳水化合物的主要来源之一^[2]。传统饅的制作工艺要求严格,需将杂粮粉或小麦粉与食盐、酵母混合搅拌并揉制成光滑面团,醒发后擀制饼坯,再经高温坑壁烤制而成。饅种类繁多,常见的饅品种包括芝麻饅、牛奶饅、辣皮子饅、皮芽子饅、油饅等^[3]。饅作为古丝绸之路上的最具代表性的民族特色农产品,不仅彰显了新疆地区的独特文化,更是古代新疆自然环境与社会需求的适应性产物。历经数千年的传承与发展,饅已成为一种具有鲜明新疆特色的文化符号^[4]。

高温烤制在新疆烤饅制作过程中占据着至关重要的地位。食物在高温烤制过程中会发生美拉德反应,从而赋予食物特有的香气和诱人的色泽,因此广受消费者喜爱^[5]。但高温加工方式会使物料直接与高温的器具或油接触,食品在短时间内急剧升温,各组分之间反应剧烈,更有利于杂环胺、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)等危害物的产生^[6];而间接热传导方式的加热介质如水、水蒸气,加热温度较低且内外部环境湿度较高,故危害物含量相对较少^[7]。其中,AGEs和4-MI作为两种常见的食品污染物,均对人体构成严重威胁。经过科学研究证实,AGEs会加速人体动脉粥样硬化^[8]、加剧糖尿病的发展^[9],并对肾功能造成损害^[10]等。

目前,国内外在AGEs和4-MI领域的研究已经取得了一定进展,但对于烤饅中AGEs和4-MI的研究尚显不足。因此,本文以AGEs和4-MI为研究对象,对其生成规律、形成机制以及对人体的潜在危害等进行介绍,重点总

结烤饅中AGEs和4-MI的生成规律以及抑制方法,以期为烤饅产业的发展和产品质量的提升提供科学的理论支撑和实践指导。

1 晚期糖基化终末产物的生成规律

1.1 晚期糖基化终末产物简介

AGEs即晚期糖基化终末产物,是一类通过糖基化反应生成的稳定化合物。目前已有超过20种AGEs被鉴定,其中包括羧甲基赖氨酸(N^ε-carboxymethyl-lysine, CML)、羧乙基赖氨酸(N^ε-carboxyethyl-lysine, CEL)、吡咯素及戊糖素等,结构式如图1所示^[11]。CML与CEL被认为是目前研究较多且最具有代表性的AGEs,可以作为食品体系中美拉德反应的指标^[12-13]。

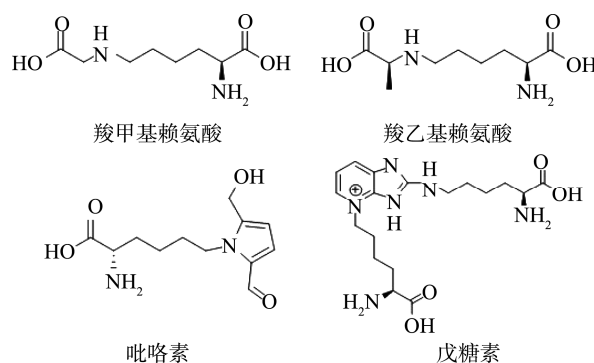


图1 常见AGEs的结构式

Fig.1 Structural formula of common AGEs

1969年,RAHBAR首次在糖尿病患者体内发现了AGEs的存在^[14]。随着研究的深入,越来越多的证据表明,AGEs与多种疾病的发生和发展过程密切相关,会对人体健康造成严重危害^[15-16]。如肌肉组织萎缩^[17-18]、糖尿病、动脉粥样硬化、阿尔茨海默病及心血管疾病等各种慢性病^[19-20]。

1.2 晚期糖基化终末产物的形成机制

AGEs 的形成主要是美拉德反应途径^[21]。该反应主要分为 3 个阶段：初级阶段、中级阶段、终极阶段，其具体反应途径如图 2 所示^[11]。

AGEs 在体内按来源分为两种：内源性 AGEs 和外源性 AGEs^[22]。前者是过量的糖和蛋白质在体内经过一系列反应合成 AGEs；后者是通过饮食摄入含有 AGEs 的食物，对人类健康的危害更为显著。在高温、干燥环境下，饅中的糖分与蛋白质会发生美拉德反应，形成外源性 AGEs，并与体内的内源性 AGEs 产生叠加效应，从而加速 AGEs 在体内的积累^[23]。

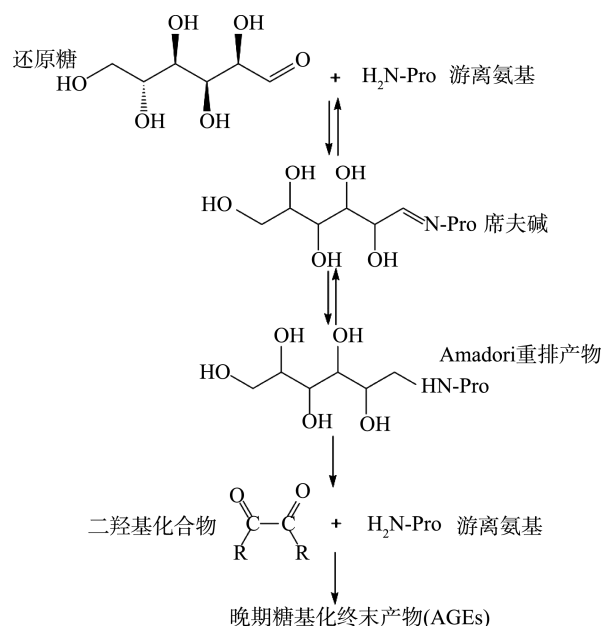


图 2 美拉德反应生成 AGEs 的途径

Fig.2 Pathways of the generation of AGEs due to the Maillard reaction

1.3 影响烤饅中 AGEs 的生成因素

1.3.1 烤制温度对烤饅中 AGEs 的影响

在烤饅的制作过程中，加热温度是影响 AGEs 生成的重要因素之一。当温度升高时，食物内含的蛋白质与糖类组分更易诱发非酶促褐变过程，进而易生成 AGEs。相关研究表明，加热温度是影响 AGEs 含量的最直接因素^[23]。刘春霞^[24]的研究表明，随着温度升高，模拟体系中的 CML 和 CEL 含量增加，120℃加热处理后的含量分别是 20℃加热处理后的 479 倍和 663 倍。胡晖宇^[25]的研究发现，随着烘焙温度的升高，饅类似制品饼干中的 AGEs 含量先增后减。当温度达到 150℃时，游离态 CML 和 CEL 的含量最高，但在 180℃高温下，AGEs 的累积量已达到峰值；而结合态 AGEs 的含量则在烘焙温度超过 175℃时才开始下降。江冠桦^[26]对饅类似制品面包中晚期糖基化终末产物的影

响因素进行研究，发现烘焙温度从 170℃升高到 190℃时，CML、CEL 含量显著增加，并在 190℃时出现最大值。程璐^[27]的研究发现，在 230℃/1.5 min 和 155℃/16 min 的焙烤条件下，饅类似物曲奇中 CML 和 CEL 的含量则分别达到峰值。

根据图 3 所示，随着温度的升高，饅类似物中 AGEs 含量总体呈上升趋势，其中 CML 含量在 210℃时显著上升，而 CEL 含量在 190℃时会下降。在烤饅的制作过程中，一般加热温度为 180~190℃，在此温度下，AGEs 的含量较高，且随着温度不断升高其含量会持续增加。因此，在烤饅的过程中，对烤制温度的把控显得尤为重要。为了有效降低 AGEs 的生成，建议采用较低的烤制温度。

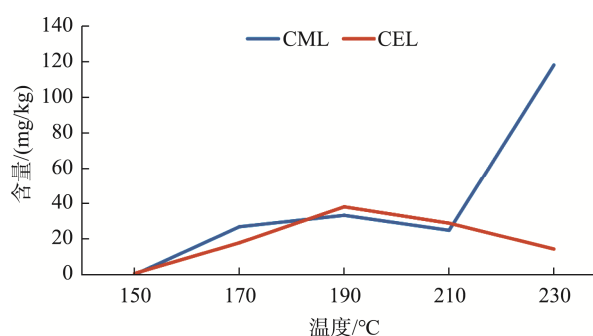


图 3 不同烤制温度处理下饅类似制品中 CML 和 CEL 含量

Fig.3 CML and CEL content in similar products under different baking temperatures

1.3.2 烤制时间对烤饅中 AGEs 的影响

食品热加工的时间长短对食品的颜色、风味和品质有显著影响，同时也直接关联到 AGEs 的含量。加热过程会促进 AGEs 的形成，而且加热时间越长，AGEs 的含量也会随之增加^[28]。根据江冠桦^[26]的研究，饅类似制品面包皮中的 CML 和 CEL 水平随着烘焙时间(15~30 min)的增加呈显著上升趋势，且均于 30 min 处出现最大值。LIU 等^[29]的研究结果显示，随着烘烤时间的增加，小麦面团中的蛋白质氧化，颜色加深，导致蛋白质氧化产物积累，AGEs 含量增加，营养价值下降。因此，在烤饅的制作过程中，为了确保其感官品质和微生物安全性，应尽量缩短烤制时间，以限制美拉德反应和脂质过氧化反应的发生，从而降低烤饅中的 AGEs 含量。

1.3.3 面粉种类对烤饅中 AGEs 的影响

有关研究表明，不同种类的面粉在烤饅过程中会对 AGEs 的形成产生影响。ZILIC 等^[30]的研究表明蛋白质结合的美拉德反应产物与面粉中的总蛋白质含量存在高度相关性，在相同的加热时间和温度下，高蛋白面粉会促进 AGEs 的生成。MESIAS 等^[31]研究了 5 种不同谷物面粉(小麦、黑麦、燕麦、斯佩尔特小麦以及画眉草面粉)对二羰基化合物形成的影响，研究发现与小麦面粉相比，斯佩尔特小麦、画眉草以及黑麦面粉会显著促进美拉德反应产生二

糖基化合物,进而促进 AGEs 的生成。因此,AGEs 的生成与面粉中的蛋白质含量密切相关,采用较低蛋白面粉可有效减少面食中 AGEs 的含量,为饅产业的健康发展提供新的思路。

2 4-甲基咪唑的生成规律

2.1 4-甲基咪唑简介

4-MI 是一种杂环氮化合物,化学式为 $C_4H_6N_2$,其结构式如图 4 所示。根据科学研究表明,4-MI 存在于一些含有焦糖或焦糖色素的食物中^[32]。然而,焦糖色的生产过程会伴随一种有害物质 4-MI 的产生^[33],其具有显著的致畸、致癌等毒副作用^[34-35],主要表现在刺激性和过敏性反应^[36-38],且被认定为“人类可能的 2B 级致癌物”^[39]

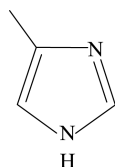


图 4 4-MI 结构式
Fig.4 4-MI structure

2.2 4-甲基咪唑的形成机制

4-MI 主要是由于二羰基化合物丙酮醛与游离胺根离子发生缩合反应形成的氮杂环-咪唑类化合物。现有研究均指出丙酮醛是 4-MI 形成的关键前体物质^[40]。在美拉德反应的中间阶段,3-脱氧葡萄糖醛酮(3-deoxyglucosone, 3-DG)和 1-脱氧葡萄糖醛酮(1-deoxyglucosone, 1-DG)会经历逆醇醛缩合反应生成丙酮醛^[41-42],其形成过程如图 5 所示。

热加工食品中 4-MI 的形成机制通常涉及氨基醛的热降解过程^[43],这涉及亲电进攻、质子迁移和环化等反应^[44-45]。此外,在制作饅的过程中,糖作为关键原料之一,对饅的外观和口感有着至关重要的影响。然而,食糖在生产过程中经过高温处理,容易发生美拉德反应^[46]。当温度升高时,还原糖也可以经过降解反应生成 4-MI 的前体物质丙酮醛^[47],如图 6 所示。

2.3 影响烤饅中 4-甲基咪唑的生成因素

2.3.1 烤制条件对 4-MI 含量的影响

相关研究表明,在烤制饅类似物如面包等的过程中,烤制温度与时间对 4-MI 的形成具有显著影响^[48]。通常情况下,烤制温度的升高与烤制时间的延长,均会导致 4-MI 含量的相应增加^[49]。ZHANG 等^[50]的研究表明,在 160~220℃

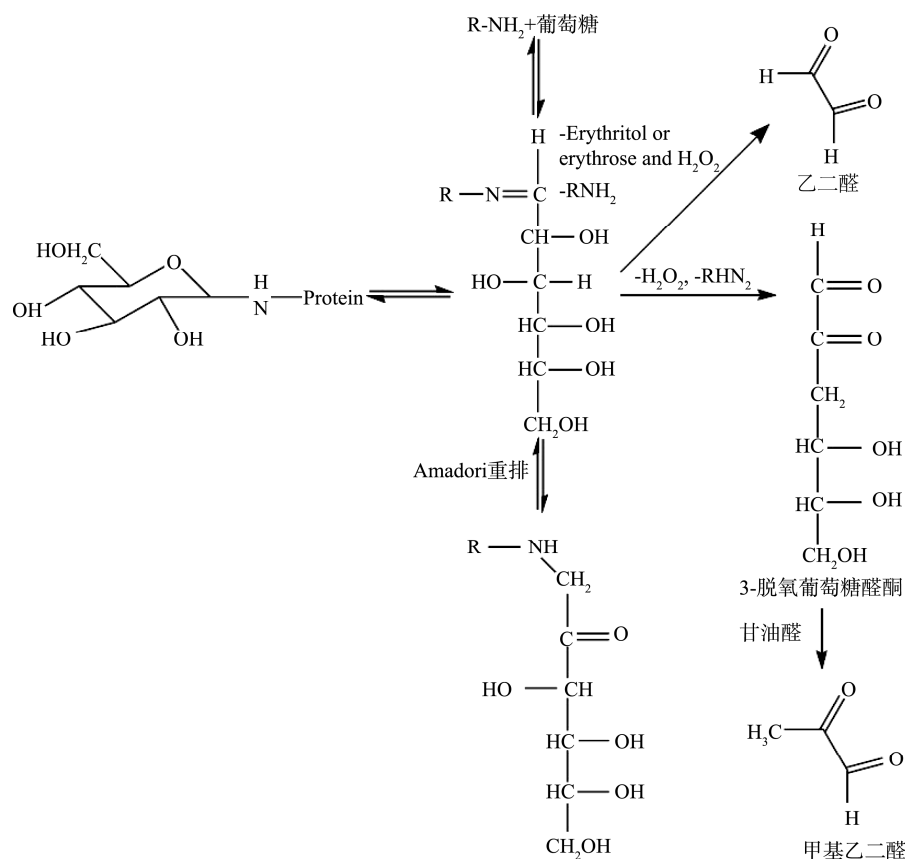


图 5 美拉德反应中丙酮酸的主要生成途径

Fig.5 Main pathway of pyruvate production in the Maillard reaction

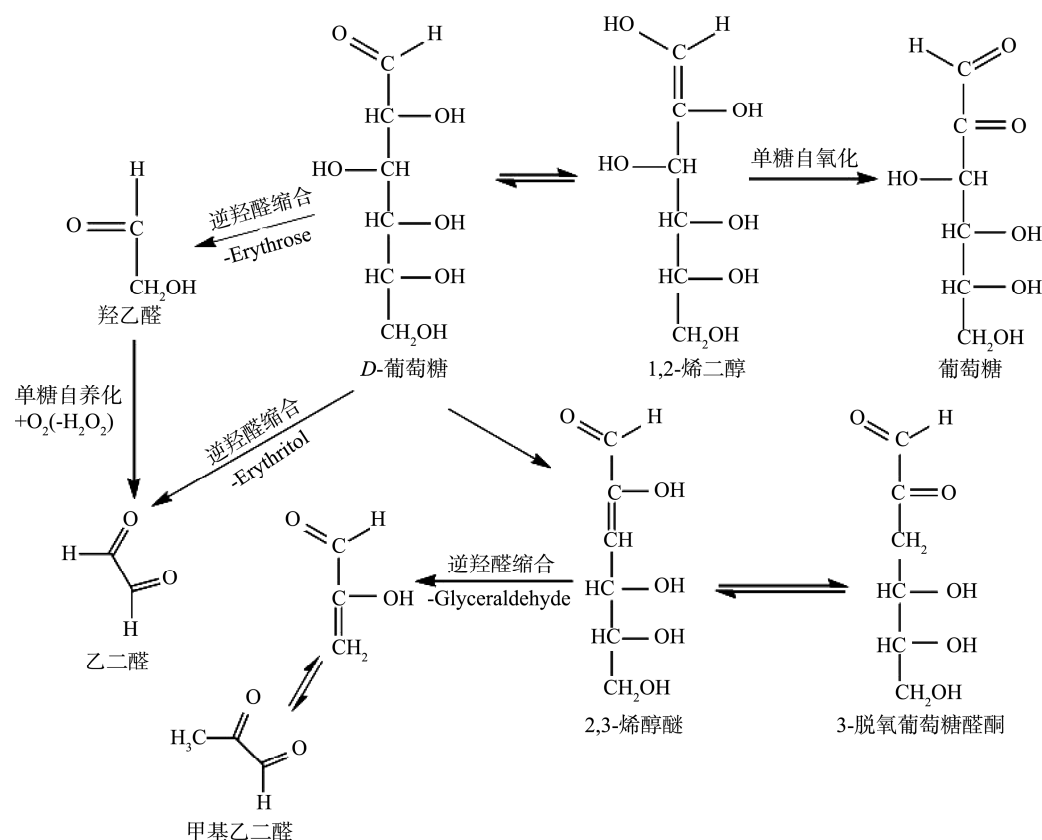


图 6 葡萄糖氧化形成丙酮醛的机制

Fig.6 Mechanism of glucose oxidation to pyruvaldehyde

的温度范围内, 饅类似制品饼干中 4-MI 含量随着温度的升高呈现先增后减的变化趋势, 且当温度达到 200℃ 时, 4-MI 含量会达到最高值。谭文兴等^[51]对不同温度及不同时间下糖蜜中 4-MI 的含量进行深入研究, 实验结果表明, 随着反应温度的升高及反应时间的延长, 4-MI 的含量呈现上升趋势, 且当温度超过 115℃, 反应时间达到 90 min 时, 4-MI 的含量会显著增加。糖作为饅的重要原料之一, 该研究进一步证实烤制温度对烤饅中 4-MI 含量的影响。

因此, 为确保食品安全与健康, 建议在烤饅过程中严格控制烤制温度, 并适当减少烤制时间, 以有效降低 4-MI 的含量, 从而为消费者提供更加安全、健康的食品。

2.3.2 面粉种类对 4-MI 含量的影响

根据现有研究证明, 不同种类面粉之间的 4-MI 含量存在明显的差异^[52]。MESIAS 等^[31]的研究表明, 与小麦面粉相比, 燕麦、画眉草及黑麦面粉中 3-DG 的含量显著增加, 有助于促进 4-MI 的关键前体物质丙酮醛的生成, 从而进一步增加 4-MI 的含量。HONG 等^[53]的研究对不同类型面粉进行分析, 发现玉米面、小麦面和去皮小麦面中均含有 4-MI, 其中玉米面中含量最高。因此, 在制作饅的过程中, 选择适宜类型的面粉可有效减少 4-MI 的含量。

3 晚期糖基化终末产物和 4-甲基咪唑的抑制规律

3.1 烤饅中晚期糖基化终末产物的抑制规律

目前饅类似物中 AGEs 的减控研究主要集中在优化加工工艺、合理选择面粉种类以及添加外源性物质这 3 个方面。

根据对饅类似物已有研究的深入分析得出, 在烤饅过程中, AGEs 的含量会随着烤制温度的升高和烤制时间的延长而逐渐增加^[54-55]。研究指出, 烤制温度在 150℃ 左右时, AGEs 含量出现峰值; 在 180~190℃ 时, AGEs 累积量达到最大值。烘焙时间在 15~30 min 内, AGEs 含量显著上升, 在 30 min 时达最大值。因此, 将烤制温度控制在 150℃ 以内, 并将烤制时间限制在 30 min 内, 可有效抑制烤饅中 AGEs 的生成, 减少 AGEs 的含量^[25-27]。

饅的面粉种类及其制作过程对 AGEs 的生成具有显著影响。研究指出, 在相同的加热时间和温度条件下, 低蛋白面粉能够有效抑制 AGEs 的生成^[30]。WANG 等^[56]的研究表明, 不同种类面粉中蛋白质含量高筋面粉>中筋面粉>低筋面粉。此外, 在面团中加入酵母后, 由于酵母的活性对

面团中的糖化产物起到有效的降解作用, 面团中的 AGEs 含量会显著降低^[57]。因此, 在饅的制作过程中, 选择富含较低蛋白的面粉(如中筋小麦面粉)并适量加入酵母发酵, 能够有效抑制烤饅中 AGEs 的生成。

此外, 外源性物质的添加对 AGEs 的生成具有显著影响。研究指出, 添加天然抗氧化剂如莲原花青素, 可有效抑制饅类似物如饼干、华夫饼等中 AGEs 的生成^[58-59]。经过科学研究证实, 将红洋葱鳞片提取物^[60]、醋或柠檬^[61]、盐^[62]、辣椒素^[63]以及芝麻素^[64]等物质添加至相应体系中, 能够有效调节晚期糖基化终末产物受体的表达, 从而抑制 AGEs 的形成、改善 AGEs 水平。因此, 在饅的制作过程中, 添加皮芽子(洋葱)、辣皮子(辣椒素)、芝麻素等天然食材, 或在面团中适量添加柠檬、盐等调味品, 不仅赋予了饅独特的口感和风味, 还能有效抑制饅中 AGEs 的生成。

3.2 烤饅中 4-甲基咪唑的抑制规律

经过对表 1 的深入分析可以得出, 目前针对饅类似物

中 4-MI 的减控研究主要聚焦于优化加工工艺、科学选择面粉种类以及合理添加外源性物质这 3 个方面, 旨在通过科学的方法和手段, 进一步提升饅类似物 4-MI 的品质和安全性, 为饅产业的可持续发展提供有力支持。

通过对饅类似物现有研究的综合分析可以得出, 在烤饅的过程中, 4-MI 的含量会随着烤制温度的升高和烤制时间的延长, 呈现出逐步上升的趋势^[48-49]。有研究表明, 当烤制温度为 140℃且烤制时间为 16 min 时, 对于降低 4-MI 的含量最为有效, 可降低 28%。同时, 该烤制条件对消费者的接受度影响最小^[65]。

饅制作过程中的面粉选择及其加工步骤, 对 4-MI 的产生具有重要影响。研究指出, 在相同条件下, 选择含有较低还原糖及蛋白的面粉能够有效抑制 4-MI 的生成^[32]。此外, 4-MI 的抑制效果与酵母的添加量呈正比关系, 随着酵母添加量的增加, 4-MI 的抑制效果也会相应增强。但当酵母的添加量过高时, 可能会对烤饅的酵母发酵和体积产

表 1 AGEs 和 4-MI 的减控研究
Table 1 Decontrol studies of AGEs and 4-MI

物质	减控原理	减控方法	效果	机制	参考文献
AGEs	优化加工工艺	控制加热温度	AGEs 水平随温度(150~230℃)升高而增加, CML 在 230℃达到最高值为 118.05±0.21; CEL 在 190℃时出现最大值为(38.21±3.17) mg/kg。	烘焙时, 高温、低水分会使美拉德反应加剧, 导致蛋白质中的氨基酸与糖结合, 形成 AGEs。	[25-27]
		缩短加热时间	15~30 min 内, CEL、CML 含量显著增加, 均于 30 min 处出现最大值, 分别为: (48.43±5.09) mg/kg、(33.69±2.25) mg/kg。	缩短加热时间可以减少加热对蛋白质和糖类的结合反应, 从而降低 AGEs 的生成。	[26]
	合理选择面粉种类	选择低蛋白面粉	在同样由富含蛋白质(16.80%)和总赖氨酸(10670.3 mg/kg)的燕麦粉制成品中检测到的 AGEs 含量最高。	蛋白质是 AGEs 的主要前体, 降低面粉中的蛋白质含量, 能够有效抑制 AGEs 的生成。	[30]
		添加酵母	酵母发酵过程会产生酵素、抗氧化物质等非酶抗氧化剂, 可以促进糖、蛋白质等营养成分的降解和消化吸收。	由于酵母的活性对面团中的糖化产物起到有效降解作用, 面团中 AGEs 含量会显著降低。	[57]
	添加外源性物质	添加莲原花青素	添加 4.00 mg/g 的莲原花青素对样品中 AGEs 抑制率最高, 可达到 40.53%±1.43%。	莲原花青素具有抗氧化作用, 与蛋白质、糖类等发生作用, 有效抑制美拉德反应, 进而减少 AGEs 含量。	[58]
		添加红洋葱鳞片提取物	红洋葱鳞片提取物可有效改善 AGEs 水平, 显著提高人体内血清胰岛素水平。	红洋葱鳞片中的化合物具有抗氧化及抗糖基化活性, 可有效减轻氧化应激和炎症反应, 促进胶原蛋白的形成, 进而减少 AGEs 的生成。	[60]
		添加醋或柠檬	酸性 pH 会显著抑制 AGEs 的形成。	酸性环境会影响蛋白质的结构和电荷性质, 影响其与糖类分子之间的反应速度, 降低 AGEs 的合成率。	[61]
		添加盐	添加盐能有效抑制 AGEs 形成, 2 g/100 g 盐对 CML 的抑制能力为 63.6%。	盐可以降低蛋白质中的 NH ₂ 含量, 从而减少与糖发生非酶反应的可能性, 进而减少 AGEs 的形成。	[62]
		添加辣椒素	辣椒素可降低循环和组织中 AGEs 水平, 并激活 AGEs 受体, 有效抑制 AGEs 含量。	辣椒素具有较强的抗氧化作用, 能够清除体内自由基; 且减少糖与蛋白质之间的反应, 抑制 AGEs 的生成。	[63]
		添加芝麻素	芝麻素可以改善 AGEs 诱导的晚期糖基化终末产物受体(eceptor for advanced glycation endproducts, RAGE)的表达。	芝麻素具有显著的抗氧化活性, 降低氧化应激对蛋白质的氧化损伤以及蛋白质的糖基化酶活性, 减缓糖化反应, 抑制 AGEs 的生成。	[64]

表 1(续)

物质	减控原理	减控方法	效果	机制	参考文献
4-MI	优化加工工艺	控制加热温度、缩短加热时间	140℃烤制 16 min, 可显著降低 4-MI 含量, 降幅达 28%。	降低烤制温度、缩短加热时间可减少焦糖化反应的程度, 从而抑制 4-MI 的生成。	[65]
	合理选择面粉种类	选择低还原糖面粉	选择含有较低还原糖及蛋白的面粉能有效抑制 4-MI 的生成。	选择含有较低还原糖的面粉可以减少焦糖色素的生成, 从而抑制 4-MI 的生成。	[31]
	添加外源性物质	添加酵母	4-MI 的抑制效果与酵母的添加量呈正比关系。	发酵过程中产生多种酵素, 具有抗氧化和抗糖化的能力, 可促进美拉德反应中的缩合反应, 减少缩醛的生成, 从而抑制 4-MI 的生成。	[66]
		添加羟基酪醇及橄榄叶提取物	添加羟基酪醇及橄榄叶提取物能够有效抑制 4-MI 前体物质的生成。	羟基酪醇及橄榄叶提取物具有抗氧化抗糖化等功效, 可抑制氨基酸与还原糖反应, 从而有效抑制 4-MI 的生成。	[67]

生不利影响^[66]。因此, 在饅的制作过程中, 推荐选择中筋小麦面粉并需要根据具体情况合理控制酵母的添加量, 以确保烤饅的质量和口感。

4-MI 的生成也会受到外源添加物的影响。研究指出, 在小麦面粉中添加羟基酪醇及橄榄叶提取物能够有效抑制 4-MI 前体物质的生成过程, 进而有效阻断 4-MI 的形成路径^[67]。

4 结束语

现有研究表明, 烤饅制作过程中的 AGEs 和 4-MI 的生成受多种因素影响, 如烤制温度、烤制时间以及面粉种类等。因此, 为有效降低烤饅中 AGEs、4-MI 的含量, 应控制较低的烤制温度且适当缩短烤制时间, 并选择较低蛋白及还原糖的面粉(如中筋小麦面粉)作为饅的原材料, 以有效降低烤饅中 AGEs 及 4-MI 的含量, 保障公共健康和食品安全。

如今, 国内外对于面食中 AGEs 及 4-MI 的研究已取得一定进展, 但对于食品中 4-MI 的相关研究有所停滞。此外, 由于新疆地处西北地区, 地域辽阔, 而烤饅作为新疆特色美食, 其他地区购买不便, 因此, 有关新疆烤饅中 AGEs 及 4-MI 的研究仍很稀缺, 需要进一步探索。未来应深入研究烤饅中 AGEs 和 4-MI 的形成机制, 通过实验和模拟研究验证并精确预测其产生量及分布情况; 深入探讨烤饅生产工艺及参数对 AGEs 和 4-MI 含量的影响, 寻找降低其含量的最佳控制策略; 研究不同种类面粉对烤饅中 AGEs 和 4-MI 生成的影响, 进一步认识不同面粉品质及种类的影响; 综合控制策略, 制定标准化技术规范, 为烤饅行业提供可行的控制和改善方案。总之, 深入研究烤饅中 AGEs 和 4-MI 的生成规律有助于提高消费者食品安全意识, 改善食品安全环境并保障公共健康。

参考文献

[1] 叶大兵, 乌丙安. 中国风俗辞典[M]. 上海: 上海辞书出版社, 1990.

YE DB, WU BAN. The Chinese custom dictionary [M]. Shanghai: Shanghai Dictionary Publishing House, 1990.

[2] 孙含, 王晶, 赵晓燕, 等. 新疆特色面制品饅的研究进展[J]. 粮油食品科技, 2018, 26(6): 19–24.

SUN H, WANG J, ZHAO XY, *et al.* Research progress of Xinjiang special flour products Nang [J]. *Sci Technol Cere Oils Foods*, 2018, 26(6): 19–24.

[3] 杨蕾, 刘军, 王孟楠, 等. 国内外饅制品研究进展[J]. 食品工业, 2023, 44(6): 209–213.

YANG L, LIU J, WANG MN, *et al.* Research progress of nang products at home and abroad [J]. *Food Ind*, 2023, 44(6): 209–213.

[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.

BAO ML, LI ZK. Academic discussion on naan culture [J]. *China Food*, 2024, (4): 76–80.

[5] LI XD, TENG WD, LIU GM, *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.

CHEN XZ, ZHAN CM, MAO J, *et al.* The factors influencing the formation of hazardous substances in high temperature and hot processed food [J]. *Food Ferment Sci Technol*, 2023, 59(3): 85–90.

[7] 刘冬梅, 周若雅, 王勇, 等. 煎炸及烤制食品中危害物的形成与控制研究进展[J]. 食品工业科技, 2021, 42(7): 405–412.

LIU DM, ZHOU RY, WANG Y, *et al.* Progress in the formation and control of hazardous substances in fried and roasted food [J]. *Food Ind Technol*, 2021, 42(7): 405–412.

[8] BASTA G, SCHMIDT AM, CATERINA RD. Advanced glycation end products and vascular inflammation: Implications for accelerated atherosclerosis in diabetes [J]. *Cardiovasc Res*, 2004, 63(4): 582–592.

[9] URIBARRI J, CAI W, RAMDAS M. Trends in food chemistry: Advanced glycation end products in food [J]. *J Agric Food Chem*, 2015, 63(41): 8807–8815.

[10] THOMAS MC, BROWNLIE M, SUSZTAK K, *et al.* Diabetic kidney disease [J]. *Nat Rev Dis Primers*, 2015, 1: 15018.

[11] 樊贺雨. 油炸牛肉饼中晚期糖基化终末产物和杂环胺形成受加工条件的影响及控制[D]. 南昌: 南昌大学, 2023.

FAN HY. Late glycation end products and heterocyclic amine formation in fried beef patties are influenced and controlled by processing conditions

- [D]. Nanchang: Nanchang University, 2023.
- [12] SUN XH, LI XJ, TANG JM, *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 Chem*, 2021, 336: 127706.
- [13] GONG RZ, WANG YH, WANG YF, *et al.* Simultaneous determination of Nε-(carboxymethyl) lysine and Nε-(carboxyethyl) lysine in different sections of antler velvet after various processing methods by UPLC-MS/MS [J]. *Molecules*, 2018, 23(12): 3316.
- [14] RAHBAR S, BLUMENFELD O, RANNEY HM. Studies of an unusual hemoglobin in patients with diabetes melitus [J]. *Biochem Bioph Res Commun*, 1969, 36(5): 838–843.
- [15] 徐正华, 梁玉桑, 朱克卫, 等. 食品中晚期糖基化中间产物及终末产物研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2020, 11(5): 1496–1501.
- XU ZH, LIANG YS, ZHU KW, *et al.* Research progress of late glycosylation intermediates and terminal products in food [J]. *J Food Saf Qual*, 2020, 11(5): 1496–1501.
- [16] SINGH VP, BALI A, SINGH N, *et al.* Advanced glycation end products and diabetic complications [J]. *Korean J Physiol Pharmacol*, 2014, 18(1): 1–14.
- [17] SUZUKI S, HAYASHI T, EGAWA T. Advanced glycation end products inhibit proliferation and primary cilia formation of myoblasts through receptor for advanced glycation end products pathway [J]. *Biochem Biophys Res Commun*, 2023, 684: 149141.
- [18] DAMRATH JG, CREECY A, WALLACE JM, *et al.* The impact of advanced glycation end products on bone properties in chronic kidney disease [J]. *Curr Opin Nephrol Hypertens*, 2021, 30(4): 411–417.
- [19] 吴旋, 李娜, 徐怀德, 等. 晚期糖基化终末产物形成及抑制机理的研究进展[J]. *食品科学*, 2023, 44(17): 204–224.
- WU X, LI N, XU HD, *et al.* Progress in the formation and inhibition mechanism of late glycation end products [J]. *Food Sci*, 2023, 44(17): 204–224.
- [20] 郑晓茂, 茹琴, 陈琳, 等. 晚期糖基化终产物对糖尿病及其并发症的影响和干预的研究进展[J]. *重庆医学*, 2019, 50(4): 22–26.
- ZHENG XM, RU Q, CHEN L, *et al.* Progress of researchs on the effects of advanced glycation end products on diabetes and its complications [J]. *Chongqing Med*, 2019, 50(4): 22–26.
- [21] POULSEN MW, HEDEGAARD RV, ANDERSEN JM, *et al.* Advanced glycation endproducts in food and their effects on health [J]. *Food Chem Toxicol*, 2013, 60: 10–37.
- [22] 龚频, 裴舒亚, 韩业雯, 等. 食源性晚期糖基化终末产物对人体的健康危害研究进展[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(6): 443–451.
- GONG P, PEI SY, HAN YW, *et al.* Progress in the health hazards of foodborne late glycation end products [J]. *Food Ind Technol*, 2022, 43(6): 443–451.
- [23] 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.
- KONG SS. Study on the formation and influencing factors of late glycation end products in pickled aquatic products [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2023.
- [24] 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.
- LIU CX. Formation of carboxymethyl lysine and carboxyethyllysine in the fructose lysine system [D]. Xianyang: Northwest A & F University, 2015.
- [25] 胡晖宇. 黄油酥性饼干加工伴生危害物的形成及其控制策略[D]. 南昌: 南昌大学, 2023.
- HU HY. Formation of associated hazards in butter pastry biscuit processing and its control strategy [D]. Nanchang: Nanchang University, 2023.
- [26] 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.
- JIANG GH. Research on the detection technology of late glycation end products in baked bread [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2022.
- [27] 程璐. 曲奇中美拉德反应伴生危害物及其控制技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- CHENG L. Research on mellillard reaction hazards and their control technology [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [28] XU LL, LIU H, DONG LZ, *et al.* Research advance on AGEs generation, detection, influencing factors and inhibition mechanism in bakery products processing [J]. *Food Biosci*, 2024, 57: 103404.
- [29] LIU R, YANG Y, CUI X, *et al.* Effects of baking and frying on the protein oxidation of wheat dough [J]. *Foods*, 2023, 12(24): 4479.
- [30] ZILIC S, AKTAG IG, DODIG D, *et al.* Investigations on the formation of Maillard reaction products in sweet cookies made of different cereals [J]. *Food Res Int*, 2021, 144: 110352.
- [31] MESIAS M, MORALES FJ. 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] CUNHA SC, SENRA L, CRUZ R, *et al.* 4-Methylimidazole in soluble coffee and coffee substitutes [J]. *Food Control*, 2016, 63: 15–20.
- [33] 孟颖, 闫璐, 胡洁, 等. 选择离子气质联用法同时测定食醋中2-甲基咪唑和4-甲基咪唑[J]. *食品工业科技*, 2014, 35(6): 59–62.
- MENG Y, YAN L, HU J, *et al.* Ionic temperament combination usage was chosen to simultaneously determine 2-methimidazole and 4-methimidazole in vinegar [J]. *Food Ind Technol*, 2014, 35(6): 59–62.
- [34] YANG Y, WEI X, ZHANG Y, *et al.* One-pot synthesis of 2-substituted 1-methylimidazoles using ionic liquids as reaction medium and catalyst [J]. *J Mol Catal A Chem*, 2008, 283(1–2): 143–147.
- [35] MORITA T, UNEYAMA C. Genotoxicity assessment of 4-methylimidazole: Regulatory perspectives [J]. *Genes Environ*, 2016, 38: 20.
- [36] FRIEDMAN M, LEVIN CE. Review of methods for analysis of 4-methylimidazole (4-MEI) [J]. *Food Sci*, 2018, 83(9): 2235–2241.
- [37] YIN H, ZHU F, WANG J, *et al.* Evaluation of the subchronic toxicity and pharmacokinetics of 4-methylimidazole in rats [J]. *Food Chem Toxicol*, 2014, 63: 8–15.
- [38] HOSSAIN A, SAUNDERS E, BRETON S. Sensory nerve-mediated effects of 4-methylimidazole in isolated bronchioles and bronchi [J]. *Toxicol Appl Pharmacol*, 2014, 279(1): 80–88.
- [39] LU YJ, TANG HY, XU JJ, *et al.* Toxic effects of 4-methylimidazole on the maturation and fertilization of mouse oocytes [J]. *Food Chem Toxicol*, 2022, 164: 113051.
- [40] 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.
- WU XL. The formation and regulation mechanism of 4-methylimidazole in maillard reaction [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.
- [41] SMUDA M, GLOMB MA. Fragmentation pathways during Maillard-induced carbohydrate degradation [J]. *J Agric Food Chem*, 2013,

- 61(43): 10198–10208.
- [42] MARTINS S, MARCELIS ATM, VAN BM. Kinetic modelling of Amadori N-(1-deoxy-D-fructos-1-yl)-glycine degradation pathways. Part I: reaction mechanism [J]. Carbohydr Res, 2003, 338(16): 1651–1663.
- [43] 闵宇航, 黄璐瑶, 余晓琴, 等. 超高效液相色谱-串联质谱法测定酱卤肉制品中 1-甲基咪唑、2-甲基咪唑及 4-甲基咪唑[J]. 食品工业科技, 2021, 42(10): 261–266.
- MIN YH, HUANG LY, YU XQ, *et al.* 1-methimidazole, 2-methimidazole were measured by ultra-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Food Ind Technol, 2021, 42(10): 261–266.
- [44] ZHANG L, DING X. Formation and control of 4-methylimidazole in Maillard reaction: A review [J]. Food Chem, 2018, 242: 149–160.
- [45] HU Q, NIE Y, CHEN H, *et al.* 4-Methylimidazole formation in the Maillard reaction from reduced model systems to meat-based reaction medium: A review [J]. Crit Rev Food Sci Nutr, 2019, 59(4): 584–596.
- [46] 王鞠莹, 李朝明, 黄振军, 等. 优化煮糖制度提高煮炼回收率的研究[J]. 甘蔗糖业, 2020, 49(6): 64–69.
- WANG JX, LI CM, HUANG ZJ, *et al.* Research on optimizing the sugar cooking system to improve the recovery rate of cooking and refining [J]. Sugarcane Ind, 2020, 49(6): 64–69.
- [47] USUI T, YANAGISAWA S, OHGUCHI M, *et al.* Identification and determination of alpha-dicarbonyl compounds formed in the degradation of sugars [J]. Biosci Biotechnol Biochem, 2007, 71(10): 2465–2472.
- [48] AZEEM A, AZEEM MZ, BHATIA S. Effect of baking conditions on furan and 5-hydroxymethyl-furfural formation in bread [J]. Food Chem, 2014, 162: 108–115.
- [49] ALOMIRAH HF, AI-ZENKI SF. Effect of grilling on heterocyclic amines and 4-methylimidazole in beef steak [J]. Food Res Int, 2013, 2(1): 1–7.
- [50] ZHANG Z, 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 Res Int, 2023, 173(2): 113477.
- [51] 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.
- TAN WX, NONG LZ, HUANG YN, *et al.* Study on the preparation process of caramel pigment with low 4-methylimidazole content [J]. Sugarcane Ind, 2013, (6): 23–28.
- [52] CHANG CM, KATSUKI M, HSIEH DP. Formation of imidazoles in the Maillard reaction of various sugars with glycine: Quantitative analysis of 2-methylimidazole and 4-methylimidazole [J]. J Agric Food Chem, 1992, 40(11): 2172–2175.
- [53] HONG SM, YANG WJ, LEE SH, *et al.* The occurrence of mutagenic imidazoles in various flours [J]. Food Control, 2017, 73: 797–802.
- [54] ZHANG A, RUAN L, ZHAO L, *et al.* Changes of advanced glycation end products in the traditional Chinese steamed bread during processing [J]. LWT-Food Sci Technol, 2017, 79: 329–334.
- [55] MIR RA, WEERAKKODY R, WIJESINGHE MB, *et al.* Advanced glycation end products: Implications for diabetic and non-diabetic wound healing [J]. Curr Pharm Des, 2019, 25(34): 3630–3645.
- [56] WANG N, MA S, LI L, *et al.* Xueling Zheng aggregation characteristics of protein during wheat flour maturation [J]. J Sci Food Agric, 2019, 99(2): 719–725.
- [57] LIN L, WANG M, LIU H, *et al.* The effect of yeast on the properties of whole wheat bread [J]. J Cere Sci, 2015, 64: 8–14.
- [58] 谈江莹, 陈紫婷, 秦佳斌, 等. 莲原花青素对华夫饼 AGEs 的抑制及感官品质的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(11): 284–294.
- TANG JY, CHEN ZT, QIN JB, *et al.* Effects of lotus proanthocyanidins on inhibition of Waffle AGEs and sensory quality [J]. Food Ind Technol, 2022, 43(11): 284–294.
- [59] WU Q, TAN J, QIN J, *et al.* Inhibitory effect of LSOPC on AGEs formation and sensory quality in cookies [J]. Front Nutr, 2022, 9: 1064188.
- [60] ABOUZED TK, CONTRERAS MM, SADEK KM, *et al.* Red onion scales ameliorated streptozotocin-induced diabetes and diabetic nephropathy in Wistar rats in relation to their metabolite fingerprint [J]. Diabetes Res Clin Pract, 2018, 140: 253–264.
- [61] 柏茜茜, 韩承刚, 徐莹, 等. 肠易激综合征饮食干预策略研究进展[J]. 食品工业科技, 2022, 43(16): 421–431.
- BAI XX, HAN CG, XU Y, *et al.* Progress in dietary intervention strategies for irritable bowel syndrome [J]. Food Ind Sci Technol, 2022, 43(16): 421–431.
- [62] LU J, LI M, SHEN M, *et al.* Advanced glycation end products and nitrosamines in sausages influenced by processing parameters, food additives and fat during thermal processing [J]. Foods, 2023, 12(2): 394.
- [63] HSIA SM, LEE WH, YEN GC, *et al.* Capsaicin, an active ingredient from chilli peppers, attenuates glycation stress and restores sRAGE levels in diabetic rats [J]. J Funct Foods, 2016, 21: 406–417.
- [64] UDOMRUK S, WUDTIWAI B, SHWE TH, *et al.* Sesamin suppresses advanced glycation end products induced microglial reactivity using BV2 microglial cell line as a model [J]. Brain Res Bull, 2021, 172: 190–202.
- [65] JUNG MC, KIM MK, LEE KG. Reduction of 4(5)-methylimidazole using cookie model systems [J]. J Food Sci, 2017, 82(10): 2526–2531.
- [66] LI X, HE J, LI H, *et al.* Effects of metformin on the physical properties of typical Chinese steamed bread [J]. Food Res Int, 2020, 138: 109779.
- [67] NAVARRO M, MORALES FJ. Effect of hydroxytyrosol and olive leaf extract on 1,2-dicarbonyl compounds, hydroxymethylfurfural and advanced glycation endproducts in a biscuit model [J]. Food Chem, 2017, 217: 602–609.

(责任编辑: 张晓寒 韩晓红)

作者简介



郭 丹, 主要研究方向为农业资源与
环境。
E-mail: 1061662532@qq.com



沈 幸, 博士, 讲师, 主要研究方向
为果实品质调控与食品安全。
E-mail: shenxing@xjau.edu.cn



柴仲平, 博士, 教授, 主要研究方向
为果树营养与施肥。
E-mail: chaizhongpingth@sina.com