咖啡烘焙过程中的危害物及其消减研究进展

刘贝宁[1]，李宏[1]，付晓萍[1]，卢开华[1,2]，刘秦明[1]，胡永金[1*]

（1.云南农业大学食品科学技术学院，云南昆明 650201）（2.曲靖师范学院后勤基建处，云南曲靖 655011）

摘要：咖啡是世界上最重要和最广泛使用的经济作物之一，因其独特风味和生物学功能成为世界三大饮品之首。烘焙是咖啡风味形成的关键工艺，咖啡原豆经烘焙、研磨、冲泡的方式进入消费者的视野。烘焙时美拉德、焦糖化反应等在赋予咖啡独特的风味的同时，丙烯酰胺、5-羟甲基糠醛和呋喃等危害物也随之生成，不仅影响咖啡品质，还会对消费者的健康构成威胁。该文阐述了咖啡烘焙过程中危害物质的毒性、形成机理及其消减措施，并展望未来关于有害物质抑制和消减的新研究动向，旨在加深人们对咖啡烘焙过程中危害物的了解，为咖啡绿色加工及其烘焙过程中危害物质的控制提供理论参考。

关键词：咖啡；丙烯酰胺；羟甲基糠醛；呋喃；危害；消减措施

文章编号：1673-9078(2025)12-387-396 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.12.1248

Research Progress on the Hazardous Substances Formed during Coffee Roasting and Their Reduction

LIU Beining[1], LI Hong[1], FU Xiaoping[1], LU Kaihua[1,2], LIU Qinming[1], HU Yongjin[1*]

(1.College of Food Science and Technology, Yunnan Agricultural Univercity, Kunming 650201, China)

(2.Qujing Normal University, Logistics Infrastructure Department, Qujing 655011, China)

Abstract: Coffee is one of the most important and widely used economic crops in the world, and is ranked as the first of the world's top three beverages due to its unique flavor and biological functions. Roasting is the key step in developing coffee flavor. Raw coffee beans are roasted, ground, andbrewed before being presented to consumers. During roasting, reactions such as the Maillard and caramelization reactions give coffee its unique flavor, while hazardous substances such as acrylamide, 5-hydroxymethylfurfural and furans are also generated, which not only affect coffee quality but also pose a threat to consumers′ health. Inthis paper, the toxicity, formation mechanisms, and reduction measures of these hazardous substances in the coffee roasting process are discussed, and prospects on new research directions related to the inhibition and reduction of hazardous substances are provided, aiming to deepen people's understanding of the hazardous substances generated during coffee roasting, and provide theoretical references to green processing of coffee and the control of hazardous substances during roasting.

Key words: coffee; acrylamide; hydroxymethylfurfural; furan; hazard; abatement measures

引文格式：

刘贝宁,李宏,付晓萍,等.咖啡烘焙过程中的危害物及其消减研究进展[J].现代食品科技,2025,41(12):387-396.

LIU Beining, LI Hong, FU Xiaoping, et al. Research progress on the hazardous substances formed during coffee roasting and their reduction [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(12): 387-396.

收稿日期：2024-08-22；修回日期：2024-11-18；接受日期：2024-11-22

基金项目：咖啡产业云南省高校协同创新中心（云教发 [2023]7 号）；科技人才与平台计划 - 技术创新人才培养对象（202005AD160015）；云南省高校微生物资源与利用重点实验室（云教发 [2018]135 号）

作者简介：刘贝宁（2001-），女，硕士研究生，研究方向：食品加工与安全，E-mail：3232623657@qq.com

通迅作者：胡永金（1971-），男，博士，教授，研究方向：食品安全与质量控制，E-mail：271988599@qq.com

咖啡为茜草科（Rubiaceae）咖啡属植物，是世界上消费量最大的饮料之一，同时是世界上交易量第二大的商品，仅次于石油[1,2]。咖啡含有丰富的碳水化合物、蛋白质、脂类、有机酸和酚类化合物[3]，生咖啡固有的化学成分是影响咖啡最终所呈现感官品质的因素之一。从成熟的咖啡鲜果到咖啡饮料需经历去皮、发酵、烘干、去壳、烘焙、研磨、冲煮等工艺。烘焙是一种传统的热

处理方法，是将咖啡生豆在高温下焙炒出咖啡独特的色泽、风味与芳香物质的加工过程[4]。烘焙除了使得咖啡豆形成易碎、多孔的质地，有利于后续研磨和冲泡[5]外，更重要的是其对咖啡成品的品质具有显著影响，约 70% 的质量指标，如香气和风味都取决于烘焙过程[6]。

不同的烘焙度使产品呈现出不同的风味，根据干物质损失的程度不同可将烘焙分为浅烘、中烘和深烘。当干物质损失百分比为 1%~5% 时，通常认为是浅烘；损失百分比为 5%~8% 时为中烘；损失百分比为 8%~12% 时为深烘[7]。对咖啡进行如轻度、中度和深度的烘焙可满足不同消费者的需求[8]。咖啡鲜果中主要的化合物如细胞壁多糖、脂质、蛋白质、蔗糖等在烘焙过程中可通过 Maillard 反应、Strecker 降解、焦糖化反应、脂质氧化等反应形成咖啡独特的风味[9-11]，但同时，在高温环境下，咖啡中的天冬酰胺和还原糖发生 Maillard 反应，生成 5- 羟甲基糠醛（5-Hydroxymethylfurfural, HMF）和丙烯酰胺（Acrylamide, AA），蔗糖在高温下分解经一系列化学反应生成 HMF。除碳水化合物外，脂质氧化也会生成 AA 和呋喃。

烘焙咖啡是热加工污染物膳食摄入的主要来源[12]。随全球咖啡消费量的增长，AA、HMF、呋喃等热污染物及其潜在的健康风险受到了医学界和营养学界等的广泛关注。当前，针对咖啡烘焙过程中产生的有害物质，国内外研究主要聚焦于通过优化烘焙参数（例如，降低烘焙温度或缩减烘焙时长）以减少 AA 生成[13]、优选萃取技术以降低有害物质含量（比如有研究发现冷萃咖啡中的呋喃含量相较于热泡咖啡更高[14]），以及添加外源添加剂等措施来控制产品中危害物的含量。咖啡烘焙过程中的危害物不仅影响咖啡的质量，也影响其被消费者接受的程度。因此，对咖啡烘焙过程中产生的危害物进行研究并开发有效的消减方法具有重要意义，对于保障消费者的身体健康至关重要。本文系统地综述了咖啡烘焙过程产生的危害物的研究现状和研究前景。详细讨论了危害物的毒性、形成机制和消减措施，为减少危害物对消费者的健康风险提供了一种新的视角作参考。

1 丙烯酰胺

1.1 丙烯酰胺的危害

丙烯酰胺被国际癌症研究署列为 2A 类致癌物[15]，即人类可疑致癌物。作为一种亲电不饱和羰基化合物，AA 可以通过 Michael 加成反应与亲核基团如胺、咪唑、DNA 等反应，这种反应正是其毒性基础[16]。AA 经饮食摄入、口鼻吸入和皮肤暴露等途径进入人体，被机体吸收后在肝脏中氧化应激导致肝损伤[17]，还会对职业暴露的人群产生神经毒性[18]，造成神经功能缺陷。长期摄入 AA 还可诱导活性氧不断攻击细胞膜脂质、蛋白质和 DNA，损害主要靶器官，并诱发阿尔茨海默病和帕金森病等疾病[19]。除此之外，AA 具有遗传毒性[20]，对肾脏、膀胱、消化道等同样产生危害作用[21]。

1.2 丙烯酰胺的形成途径

AA 的暴露量取决于人们的饮食习惯以及食品的加工方式，咖啡是饮食摄入 AA 的主要暴露途径之一[22]，欧盟委员会设定了烘焙咖啡和速溶咖啡中 AA 限量标准分别为 400 μg/kg 和 850 μg/kg[23]。咖啡中 AA 的生成途径主要是 Maillard 反应与脂质氧化。高温条件下（220~250 ℃），天冬酰胺（Asparagine，ASN）和羰基化合物（还原糖）发生美拉德反应，还原糖与氨基发生羰氨缩合生成葡糖胺，葡糖胺经 Amadori 重排后得到 1 氨基 1 脱氧 2 酮糖。咖啡在烘焙的过程中水分含量较低，当 pH 值≤5 时，1 氨基 1 脱氧 2 酮糖发生 1,2 烯醇化，反应生成 HMF[24]。随后，HMF 与 ASN 反应生成中间体 3-氨基丙酰胺，脱氨后形成 AA[25,26]。除碳水化合物外，脂质氧化产物也参与 AA 的形成。甘油三酯在加热时生产大量的丙烯醛，再被氧化成丙烯酸，然后与氨反应生成 AA[27,28]（见图 1）。

1.3 咖啡中丙烯酰胺的抑制措施

1.3.1 优选咖啡豆品种

土壤成分、生长温度、海拔和降雨等因素影响咖啡中氨基酸和还原糖的含量，从而决定了咖啡产品的质量[5,29]。前体物的初始浓度和加工温度影响咖啡中 AA 的合成速度，优选咖啡品种是减少 AA 的有效策略。与其他还原糖（如葡萄糖）相比，具有两个 α 羟基的果糖可使 AA 的生成量增加约 2 倍[30]。罗布斯塔种的果糖含量、天冬酰胺浓度高于阿拉比卡种，可提供更多的前体物质合成 AA[31,32]，这可能是罗布斯塔种 AA 水平较高的原因（表 1）。Esposito 等[33]在浅烘、中烘和深烘条件下，拼配豆中罗布斯塔咖啡豆的不同百分比对 AA 的含量有显著影响，其水平从 170~484 μg/kg 降至 159~351 μg/kg。然而必须注意的是，此研究中烘焙程度是用比色法测量，没有对最终产品进行任何感官评价。可见，选择 AA 前体物含量较低的咖啡豆品种是从源头遏制 AA 暴露量的可行之法。缺陷豆（未成熟豆、霉菌豆、虫蛀豆）中天冬酰胺含量较成熟豆要高，剔除缺陷豆有利于减少 AA 合成[34]。

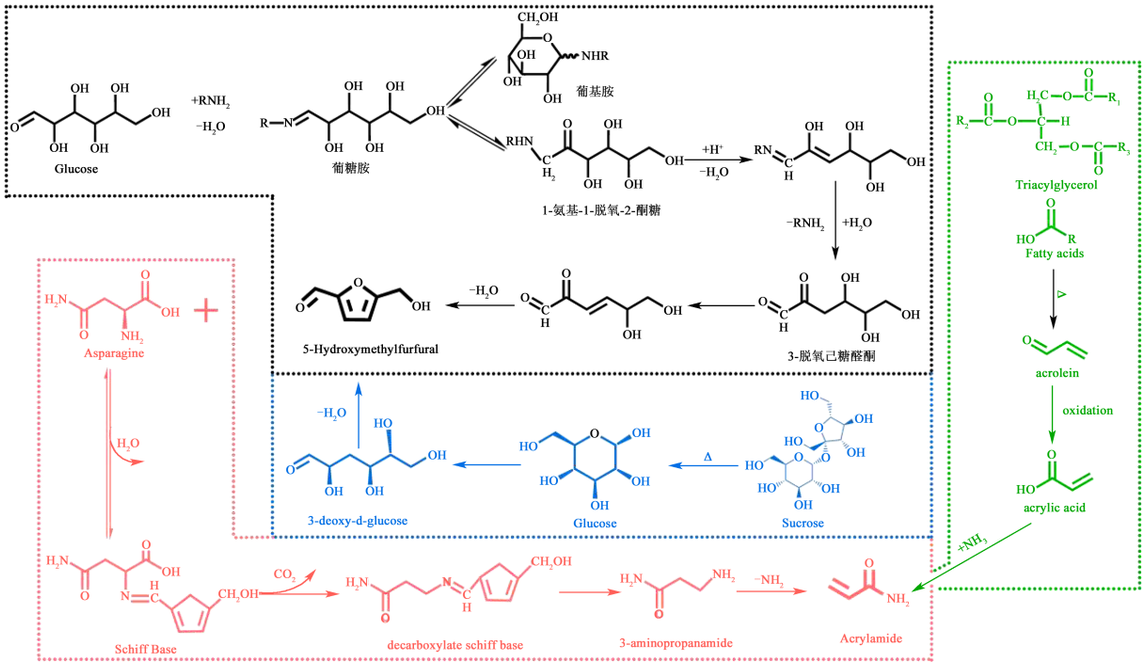

图 1 丙烯酰胺（AA）、羟甲基糠醛（HMF）的形成途径

Fig.1 The formation pathway of acrylamide (AA) and hydroxymethylfurfural (HMF)

综上，控制成品中不同品种咖啡的占比，剔除前体物含量较高的缺陷豆，可能是一种有效的消减措施。不同品种的咖啡组成成分及含量上存在较大差异，与 AA 合成有关的化学成分及其含量的差异需要在育种、种植和加工方面进一步深入研究。

1.3.2 优化烘焙工艺

烘焙是将咖啡生豆转化为风味浓郁的烘焙咖啡的基础和关键步骤，温度和时间是制约美拉德反应的关键条件，进而影响烘焙过程中 AA 的生成[35]。Bagdonaite 等[36]研究发现低温（220 ℃）和较短的烘焙时间（5 min）下 AA 浓度最高。烘焙时 AA 的含量最初呈指数增加，达到最大值后开始下降。之后在更深的烘焙度下，由于缺乏前体物以及化合物的热降解速率超过形成速率而降低，直到它不再可以被检测到，这与 Várady 等[37]的研究相似。使用过热蒸汽（Superheated Steam, SHS）在 250 ℃下烘焙罗布斯塔咖啡豆，可以有效降低中等烘焙（约 16%）和深度烘焙（约 25%）咖啡豆中的 AA 含量[38]。这是由于 SHS 呈现出较高的加热速率，与传统的热风烘焙相比，咖啡豆可更快达到预定温度，并且在这样的高温下停留更长的时间，SHS 烘焙至中度和深度水平的时间足以使 AA 分解。SHS 流化床烘焙还能产生更高的甜度和更为理想的柑橘酸度，影响咖啡风味[39]。真空条件（3.33 kPa）下，AA 的沸点为 125 ℃，使得 AA 在烘焙时易于挥发[40]。研究发现在真空条件下（0.1 kPa，200 ℃）烘焙的阿拉比卡种咖啡豆中 AA 含量较常压传统烘焙条件下的咖啡低约 50%[41]。烘焙机内部产生的真空条件发挥了汽提作用，有效防止 AA 积聚。因此，可以将咖啡豆的焙炒过程置于真空条件下进行，利用低压的剥离作用，防止 AA 积累。

综上，调节烘焙温度和时间以控制美拉德反应，是有效控制 AA 生成的策略。适当选择较高的烘焙度、使用过热蒸汽中烘或深烘罗布斯塔豆或在真空条件下烘焙都可以有效防止 AA 积累。

1.3.3 调整冲泡工艺及合理选购咖啡

通过咖啡摄入的 AA 还受消费者的饮用习惯（咖啡的类型、摄入量和消费频率）影响。将烘焙咖啡研磨成粉末，其目的在于增加水和固体之间的界面表面积，加速可溶性物质转移到咖啡萃取液中。存在于烘焙咖啡中的 AA 由于其高亲水性而被大量萃取、溶解到冲泡物中从而危害人体健康[42]。AA 的暴露量受多种因素影响，包括水温、水与咖啡粉接触的时间以及冲泡时的压力等。咖啡不同的研磨程度和冲泡方法往往会对咖啡的风味产生不同的影响[43-45]。Kang 等[14]研究了冷萃和热泡咖啡中 AA 的含量，5 ℃冷萃和 80 ℃热泡条件下 AA 含量较低，分别为 4.1 ng/mL 和 3.5 ng/mL，但冷萃咖啡的 AA 含量要高于热泡咖啡，很有可能是冷萃过程水粉接触时间过长所致。

Başaran 等[46]分析了土耳其市场和咖啡店销售的 41 种咖啡（含 22 种速溶、7 种传统土耳其及

12 种即饮咖啡）的 AA 含量，发现速溶咖啡 AA 含量为 16.5~79.5 ng/mL，比传统的土耳其咖啡（5.3~54.8 ng/mL）和即饮咖啡（5.9~ 38.8 ng/mL）水平更高，可能是速溶咖啡的特殊加工过程所致。在速溶咖啡的萃取过程中，较高的温度和较长的萃取时间可能会提升 AA 在萃取液中的溶解度；而在浓缩阶段，随着水分的蒸发，AA 的浓度也可能会相应上升。也有报道称，浓缩咖啡（2.1 μg/100 mL）中的 AA 含量低于土耳其咖啡[47]。所以消费者在选购时也可以尽量避免 AA 含量较高的类型以降低有害物质的暴露风险。

表 1 咖啡中丙烯酰胺的消减措施

Table 1 Reduction measures of acrylamide in coffee

工艺步骤	消减措施	参考文献
咖啡品种	优选 AA 前体物含量较低的咖啡豆品种	[31,32]
	剔除缺陷豆	[34]
烘焙工艺	适当加深烘焙度	[32,36]
	过热蒸汽烘焙	[38]
	真空条件下烘焙	[41]
冲泡方法	热泡法 AA 含量低于冷萃	[14]
	速溶咖啡 AA 含量高于土耳其咖啡	[46]
	浓缩咖啡 AA 含量低于土耳其咖啡	[47]
外源添加剂	抗坏血酸抑制效果显著	[22]
	半胱氨酸能抑制罐装咖啡（黑 / 牛奶咖啡）的 AA	[48]
	天冬酰胺酶预处理	[50,51]

1.3.4 添加外源添加剂

添加合适的外源物质可以有效控制烘焙咖啡中 AA 的生成。张琪等[22]探究了 5 种抗氧化剂对 AA 形成的抑制作用，其中抗坏血酸抑制效果最佳，当其浓度为 100 μmol/mL、浸渍温度为 30 ℃、浸渍 3 h 时，对 AA 抑制率达到 59.42%，且咖啡感官品质良好。研究表明，在 121 ℃下添加半胱氨酸热处理 6 min，两种类型的罐装咖啡（黑咖啡和牛奶咖啡）AA 含量均降低了约 95%，在此过程中，半胱氨酸中的硫醇基团可能在抑制 AA 方面发挥了重要作用[48]。天冬酰胺酶通过水解天冬酰胺侧链的酰胺基团催化其水解成天冬氨酸和氨[49]，有助于降低 AA 水平。Hendriksen 等[50]用米曲霉产生的外源天冬酰胺酶处理生咖啡，发现咖啡豆 ASN 含量和 AA 的水平分别降低了 70%~80% 和 55%~74%，而此法面临的主要挑战是确保酶在底物上均匀分布。Corrêa 等[51]发现，用蒸汽预处理阿拉比卡咖啡豆随后用天冬酰胺酶进行酶处理能有效降低 AA 浓度，同时不影响咖啡中咖啡因、绿原酸等生物活性物质的含量。在这项研究中，与对照样品相比，AA 减少了近 59%，与空白样品相比减少了 77%。用蒸汽预处理咖啡豆时，气孔打开有利于酶促过程，因此抑制效果理想。此类研究已表明，应用商业天冬酰胺酶来降低咖啡中 AA 的水平是可行的。综上，添加抗氧化剂如抗坏血酸或将天冬酰胺酶解法辅以蒸汽预处理运用于咖啡中都是行之有效的抑制 AA 生成的策略。

2 5-羟甲基糠醛

2.1 5-羟甲基糠醛的危害

5-羟甲基糠醛，也称羟甲基糠醛，食品工业已将 HMF 用做咖啡、果汁、牛奶、蜂蜜、谷物等食品的质量参数、掺假指标和污染风险信号[52,53]。咖啡产品中，中国消费者 HMF 的平均膳食暴露量为 55.65 μg/kg 体重 / 天[54]。饮食中较高的 HMF 暴露量对人体危害较大，由于其细胞毒性，HMF 会刺激眼睛、皮肤、黏膜、上呼吸道[55]，对横纹肌、内脏等也有损伤作用[56]，还可能致癌，对动物有肝、肾毒性[57,58]。

2.2 5-羟甲基糠醛的形成途径

HMF 会在食品热加工或储存、运输期间生成，碳水化合物含量较高的食品更易生成 HMF。咖啡是日常饮食中 HMF 的重要来源之一[52]，HMF 因其高水溶性，在咖啡冲泡时易从烘焙豆中迁移至饮品，增加人体暴露风险，危害健康[14]。HMF 主要通过还原糖与氨基酸的美拉德反应以及蔗糖的高温分解两种途径生成，其形成受多种因素调控。HMF 是美拉德反应典型的中间产物，果糖和葡萄糖是其主要前体物质[59,60]。葡萄糖等还原糖的羰基和氨基酸或蛋白质的氨基发生羰氨缩合反应，脱去一分子水后形成 Schiff 碱，随后通过 Amadori 重排[61]，经 1,2 烯醇化，消去 C_3 上的羟基，脱水形成 3 脱氧己糖酮（3 脱氧奥苏糖），经环化反应形成 HMF[62]。除此之外，还有研究发现蔗糖在高温条件分解为 3-脱氧-D-葡萄糖，脱水后也会生成 HMF[24]（图 1）。咖啡中 HMF 的形成受到多种因素的影响，包括咖啡豆的种类、烘焙时间和温度[63]，以及冲泡方法和糖添加量[52]等。

2.3 咖啡中5-羟甲基糠醛的抑制措施

2.3.1 添加抑制剂

在咖啡中接入酵母发酵，后在 180 ℃（中烘）和 210 ℃（深烘）烘焙的样品 HMF 含量分别降低了 56.20% 和 20.10%，原因可能是酵母菌的接种使得蔗糖、葡萄糖等前体物质降解或损失[64]（表 2）。此外，绿原酸与 HMF 之间呈显著的负相关关系，表明绿原

酸可能具有抑制烘焙豆中 HMF 合成的作用[65]。吴泰钢[66]的研究证实了这一点，他们通过建立果糖、柠檬酸柠檬酸钠缓冲液反应体系发现，在 pH 值为 2.80 和 4.70 时，绿原酸能有效抑制 HMF 的形成。天冬酰胺酶的应用也能有效减少样品中还原糖的含量，直接影响 Millard 反应和焦糖化反应的反应速率[67]。含有适量水分的食品经过天冬酰胺酶预处理后，食品中 HMF 的形成得到缓解。然而，需要注意的是，过量添加天冬酰胺酶可能导致天冬酰胺过度水解，产生不愉快的气味，因此在应用时应控制酶的用量。

综上，通过酵母发酵和酶处理等方法，结合适宜的烘焙温度和 pH 条件，可以有效控制咖啡中 HMF 的形成，从而降低其对健康的潜在风险。

2.3.2 控制加热温度与时间

热加工温度的升高，时间的延长，将导致反应体系焦糖化率和褐变程度更高[68]。Zhu 等[69]研究表明，HMF 浓度在烘焙初期迅速上升，随后下降，直至烘焙结束。游离氨基酸发生反应或转化为 5-羟甲基-2-糠酸，可能是咖啡在长时间烘焙后 HMF 消减的原因[70]。Lachenmeier 等[71]研究发现，热污染物含量（呋喃、HMF）似乎与烘焙时的热量呈正相关的关系，这意味着烘焙程度的加深可能产生最高浓度的危害物。

2.3.3 其他

液态咖啡是中国消费者接触 HMF 的主要来源，其次是咖啡粉[72]。有研究发现，咖啡替代品和速溶咖啡中的 HMF 含量显著较高[54]，因此消费者在选择饮品时，减少液态咖啡的摄入可以降低 HMF 的暴露风险。在高温条件下贮藏时，HMF 大幅增加[73]，因此，合理控制控制储藏温度和时间对减少 HMF 的生成至关重要。此外，水作为溶剂或者运输介质，在合成 HMF 的过程中发挥重要作用。然而，在极高或极低的水分活度条件下，HMF 合成可能因高稀释度或低流动性而受到抑制。值得注意的是，在贮藏过程中，初始水分活度介于 0.3~0.4 之间的咖啡 HMF 水平最高[73]。这表明适当的初始水分活度有助于抑制仓储期间 HMF 的合成。另有研究表明真空处理能有效降低咖啡中的 HMF 含量，抑制率可达 20%[74]。由于 HMF 具有挥发性，可将真空处理运用于食品中以将其去除，但此法的适用性往往受样品特性的限制，并可能导致芳香化合物降解损失。因此，在优化真空工艺参数的同时，也需密切关注食品感官特性的潜在变化。

表 2 咖啡中5–羟甲基糠醛的消减措施

Table 2 Reduction measures of 5-Hydroxymethylfurfural in coffee

工艺步骤	消减措施	参考文献
抑制剂	咖啡中接种酵母发酵	[64]
	绿原酸在适宜的缓冲体系中，对 HMF 抑制效果明显	[66]
	天冬酰胺酶减少底物中还原糖的含量	[67]
烘焙阶段	较高的烘焙温度或较深的烘焙度可能导致危害物浓度较高	[69,71]
咖啡类型选择	咖啡替代品和速溶咖啡的 HMF 含量较高	[54]
储藏阶段	较高的温度下贮藏，HMF 大量增加	[73]
	初始水分活度与 HMF 水平密切相关	[73]
其他	真空处理有助于降低 HMF 含量	[74]

3 呋喃

3.1 呋喃的危害

呋喃（C_4H_4O）是一种高挥发性、低沸点的化合物，被归为“可能对人类致癌”（2B 组），广泛存在于各种热加工食品中[29,75]。生咖啡豆中呋喃含量极低，烘焙后其含量较高。中国消费者中，呋喃的平均膳食暴露量为 0.09 μg/(kg·bw·d)[76]。呋喃及其衍生物对人类和动物具有潜在毒性、遗传毒性风险[77,78]。毒理学研究表明，呋喃能被肝脏吸收代谢，而在肾脏和结肠中累积较少[79]。

3.2 呋喃的形成途径

呋喃并不是食品本身所含有，而是由食品中的糖类、氨基酸、脂类和抗坏血酸在加热等条件下产生[80-82]，在脂质氧化反应中，脂质过氧化生成中间产物 4-羟基-2-丁烯醛，随后迅速环化为 2,5-二氢-2-呋喃醇，脱水后生成呋喃[75,83]（见图 2）。关于多不饱和脂肪酸的研究表明，亚麻酸作为呋喃的有效前体物质，可在过渡金属存在的情况下，加速脂肪氧化，形成共轭双烯[84]。呋喃的生成除受糖和氨基酸等前体物的种类影响外，还与其他反应条件如 pH 值、金属元素、温度和加热时间密切相关[85,86]。

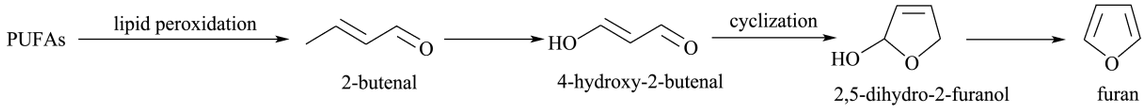

图 2 咖啡烘焙过程中呋喃的形成途径

Fig.2 The formation pathway of furan during coffee roasting

3.3 咖啡中呋喃的抑制措施

3.3.1 调整冲泡参数

不同的冲泡条件不仅影响咖啡的感官品质，还会改变呋喃的暴露水平[87]。与热泡相比，冷萃水温较低，但萃取时间较长，增加了水和咖啡粉之间的接触。有研究发现，冷萃咖啡样品的呋喃含量高于热泡咖啡。这可能是因为冷萃温度低于呋喃的沸点，通过蒸发以降低呋喃含量的可能性比热泡咖啡要低[14]（表 3）。研磨则会使挥发性化合物损失，呋喃的含量随着网目尺寸的减小而降低[88]。因此，适当减小研磨粒径可有效减少呋喃的含量。Mesías 等[89]的研究结果表明，饮用前短暂的人为搅拌可使呋喃含量减少 64%，而自然冷却比前者的消减效率低 10%。

有研究对比了过滤式咖啡机、全自动咖啡机、胶囊咖啡机冲泡的咖啡以及速溶咖啡中呋喃的含量，结果发现，过滤式咖啡机冲泡的咖啡呋喃及其衍生物浓度的含量最低，而全自动咖啡机冲泡的咖啡含有最高浓度的呋喃[90]。全自动咖啡机之所以呋喃含量高，可能是因为其系统相对封闭，所用咖啡粉平均粒度较细以及较高的脂质含量会形成奶油层，从而作为呋喃消减的物理屏障，减少呋喃的挥发损失[91]。

由于其挥发性，呋喃会在消费者饮用前的等待时间内部分消散。Rahn 等[90]称将咖啡冷却至饮用温度（55~60 ℃）的做法可使呋喃的暴露量减少 8.0%~17.2%，表明冷却过程降低了消费者摄入呋喃的风险。将速溶咖啡和手冲咖啡倒入无盖的杯子中 5 min 后，呋喃的含量分别下降了 20% 和 22%，呋喃的挥发在盖好盖子的情况下要慢一些，无论咖啡类型如何，无盖咖啡的消减程度都更大（$P<0.05$）[78]。

成年人饮食中呋喃暴露的主要来源约 43%~79% 都源自咖啡[78,92]，冲泡方法（粉水比、水温、萃取时间和压力等因素）、搅拌和冷却方式都会对呋喃含量产生不同程度的影响[93]，因此，采取有效措施控制呋喃的暴露对于保护消费者的健康具有重要意义。

3.3.2 咖啡类型的选择

浓缩咖啡中呋喃的质量浓度较高（2.6~8.8 μg/60 mL），尤以胶囊式浓缩咖啡居高（4.7~9.7 μg/40 mL），原因是其密闭独特的包装使得呋喃不易挥发。相比之下，速溶咖啡中的呋喃质量浓度较低（0.7~2.1 μg/60 mL）[89]。但不同加工方式的速溶咖啡呋喃含量也会不同，研究发现喷雾干燥加工的速溶咖啡又比冷冻干燥加工而得的速溶咖啡的呋喃含量要低[94]。

颗粒大小和咖啡种类显著影响呋喃水平，浓缩咖啡通常使用阿拉比卡种或以阿拉比卡为主的混合豆，以使浓缩咖啡的风味更浓郁、品质更稳定。以阿拉比卡 60%（质量百分比）/ 罗布斯塔 40%（粒径＞425 μm）的混合豆制得的浓缩咖啡中，呋喃和 2-甲基呋喃含量分别降低 11.4%、18.8%[95]。

综上，消费者有意识地规避呋喃含量较高的咖啡类型有助于减少其暴露量。同时，厂商在生产、加工咖啡时，有意识地对咖啡颗粒大小和咖啡种类做出挑选，不仅能有效减少咖啡中呋喃的含量，还能更好地满足消费者的感官需求，展现出巨大的市场潜力。

3.3.3 外源添加物

近年来，天然抗氧化剂降低呋喃水平的研究逐渐成为热点，这类化合物因其良好的抗氧化性和清除自由基的能力，能有效抑制美拉德反应和脂肪氧化，具有作为呋喃抑制剂的潜力。研究表明茶多酚添加量为 84 mg（质量分数为 12.1%）时，罐装咖啡呋喃的质量浓度降至 87 mg/L，抑制率达 42.4%。但茶多酚在抑制这些反应的同时，也影响了咖啡中挥发性香气成分如醛类、吡嗪类物质的生成，并随茶多酚添加量的递增，芳香物质的含量显著降低。因此，将茶多酚用于罐装咖啡中控制呋喃生成时，应同时考虑其对咖啡风味的影响[96]。

红肉苹果花色苷提取物（Red-fleshed Apple Anthocyanin Extract, RAAE）是一种安全性高、生产成本低、高自由基清除能力的新型抗氧剂，研究发现 RAAE 对于减少咖啡粉中的呋喃含量具有一定的效果，且清除能力强于同浓度的抗坏血酸，其中新疆 3 号红肉苹果的 RAAE 降解效果最显著，降解率可达 20%[97]。绿原酸（Chlorogenic Acid, CGA）是咖啡豆中一种含量十分丰富的酚类物质，与咖啡风味中的苦味、涩味和酸味的形成有关[98]。Park 等[85]研究了 CGA 对含糖和氨基酸的罐装咖啡模拟系统中呋喃的影响，结果表明，添加 CGA 有利于降低呋喃水平，特别别是在以果糖为模型的体系中，呋喃水平下降了 34.7%，降低幅度最为显著。

综上，茶多酚、花色苷、绿原酸等抗氧化能力和自由基清除能力较强的物质，可抑制 Maillard 反应和脂肪氧化，因此，可将其添加到咖啡中降低呋喃的暴露量，然而，在应用这些物质时，我们还需要充分评估其在咖啡中的适用性及其对咖啡风味可能产生的影响。此外，对于更多高效、绿色、易获取且成本低的天然抗氧化剂在抑制呋喃生成方面的研究也亟待开展。

3.3.4 改善存储条件

储存时间和温度对产品中呋喃的含量产生影响，呋喃可能会在长时间的储存过程中合成，尤其是在较

高的温度下贮藏于不易渗透的包装中时[99]。储存温度越高（20、28、35、42 ℃），呋喃含量越高，并在一定时间后趋于稳定[100]。此外，随着贮藏时间的推移，更具渗透性的包材可能会导致呋喃浓度降低。另有研究表明，冷藏咖啡中的呋喃含量在使用期间几乎保持不变[91,101]。

因此，对于咖啡贮藏中呋喃含量的控制，在考虑温度、时间等常规贮藏条件的同时，包材的适用性也尤为关键。

表 3 咖啡中呋喃的消减措施

Table 3 Reduction measures of furan in coffee

工艺步骤	消减措施	参考文献
冲煮工艺	冷萃咖啡呋喃含量高于热泡咖啡	[14]
	呋喃含量随着研磨粒径的减小而降低	[88]
	饮用前短暂的人为搅拌可使呋喃含量减少 64%	[89]
	全自动咖啡机冲泡，咖啡中呋喃浓度较高	[90]
	呋喃会在饮用前的等待时间部分消减	[78]
	冷却至饮用温度，呋喃暴露量降低 8.0%~17.2%	[90]
	无盖咖啡中呋喃消减程度较大	[78]
咖啡类型选择	胶囊式浓缩咖啡呋喃浓度居高，速溶咖啡较低	[89]
	喷雾干燥法速溶咖啡比冷冻干燥法速溶咖啡呋喃含量低	[94]
	调整混合豆中阿拉比卡和罗布斯塔占比	[95]
外源添加剂	茶多酚添加量为 12.1%，抑制率达 42.4%	[96]
	红肉苹果花色苷提取物对咖啡粉中的呋喃降解作用	[97]
	添加绿原酸至罐装咖啡模型，有利于降低呋喃水平	[85]
储存条件	高温贮藏于不易渗透的包装中易合成呋喃	[99]
	呋喃含量随储藏温度（20、28、35、42 ℃）升高而上升，一定时间后趋于稳定	[100]
	冷藏咖啡的呋喃含量在使用期间几乎恒定	[91,101]

4 结论与展望

提升公众对咖啡烘焙过程中产生的危害物及其相关风险的认知，并普及相应的解决方案，对于增强公众的食品安全意识至关重要。本文综述了咖啡烘焙过程中主要热污染物（丙烯酰胺、羟甲基糠醛、呋喃）的危害、产生机理及其消减措施，为生产高品质、低危害的咖啡提供了启示。目前的消减措施主要着眼于调节烘焙参数、添加外源添加剂以及选择合适的冲泡和储存条件等方面，这为确定适用于咖啡生产加工的危害物控制措施奠定了基础，但这些方法在实际应用中仍存在一定的局限性和改进空间。因此，为了进一步提升咖啡的安全性和品质，未来的研究将不可避免地聚焦于更深入地探索和优化有害物质抑制的新途径。可以预见，未来有关咖啡烘焙过程中有害物质抑制的研究将集中在以下几个方面：

（1）在分子或细胞水平上解析危害物的形成机理；

（2）针对咖啡品种的不同及其组成物质和含量的差异，从抑制有害物质生成以及保持风味品质的形成的角度出发，培育出优良咖啡品种，或是针对不同品种咖啡选择合适的加工工艺抑制有害物质及其前体物的生成；

（3）应用物理、酶法、功能微生物或者是利用其协同作用，抑制或降低咖啡加工中危害物质的生成量；

（4）借助人工神经网络等一些数学模型方法，构建咖啡品种、加工、烘焙及贮藏等条件与危害物质、风味以及功能活性物质之间的关系模型，以便应用于实际生活的咖啡生产中，达到咖啡精准加工、绿色加工的目的。

消费者对安全、高品质的咖啡的需求日益增长，这一需求同样被咖啡行业的科研人员和企业视为其追求和努力实现的目标。减少咖啡烘焙过程产生的危害物必须同时考虑其他因素，包括感官接受度、营养、安全性和经济效益，这无疑是咖啡行业所面临的一大挑战。在未来，将有效的消减措施或抑制策略结合使用，从危害物形成机理上寻找抑制途径，实现咖啡体系中有害化合物含量最大程度的降低，并将其运用于工业化水平的生产是咖啡行业的一大研究热点。

参考文献

[1] HAILE M, KANG W H. The role of microbes in coffee fermentation and their impact on coffee quality [J]. Journal of Food Quality, 2019, 2019(1): 1-6.

[2] SOUZA MACHADO F, COIMBRA M A, CASTILLO M D D, et al. Mechanisms of action of coffee bioactive compounds-a key to unveil the coffee paradox [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2024, 64(28): 10164-10186.

[3] HALL R D, TREVISAN F, VOS R C H. Coffee berry and green bean chemistry-opportunities for improving cup quality and crop circularity [J]. Food Research International, 2022, 151: 110825.

[4] 毕晓菲,李亚男,杨旸,等.小粒咖啡在烘焙加工过程中的相关技术参数初步研究[J].农产品加工,2022,22:38-40.

[5] STROCCHI G, RUBIOLO P, CHIARA C, et al. Acrylamide in coffee: what is known and what still needs to be explored. A review [J]. Food Chemistry, 2022, 393: 133406.

[6] 胡双芳,卫亚西,邢精精,等.咖啡豆的化学组分差异与感官品质的相关性分析[J].食品工业科技,2013,34(24):125-129.

[7] XIE C, WANG C, ZHAO M X, et al. Detection of the 5-hydroxymethylfurfural content in roasted coffee using machine learning based on near-infrared spectroscopy [J]. Food Chemistry, 2023, 422: 136199.

[8] KUČERA L, PAPOUŠEK R, KURKA O, et al. Study of composition of espresso coffee prepared from various roast degrees of coffea arabica l. Coffee beans [J]. Food Chemistry, 2016, 199: 727-735.

[9] GROSSO G, GODOS J, GIOVANNUCCI E. Coffee, caffeine, and health outcomes: an umbrella review [J]. Annual Review of Nutrition, 2017, 37(1): 131-156.

[10] GIRAUDO A, GRASSI S, SAVORANI F, et al. Determination of the geographical origin of green coffee beans using nir spectroscopy and multivariate data analysis [J]. Food Control, 2019, 99: 137-145.

[11] AÇKAL N B, ŞANL ER N. Coffee and its effects on the immune system [J]. Trends in Food Science and Technology, 2021, 114: 625-632.

[12] SCHOUTEN M A, TAPPI S, ANGELONI S, et al. Acrylamide formation and antioxidant activity in coffee during roasting-a systematic study [J]. Food Chemistry, 2021, 343: 128514.

[13] YASHWANTH B S, SHIKKU PREMACHANDRAN M, KARKERA P S, et al. Acrylamide in coffee: strategies, research and future perspectives [J]. Food Control, 2024, 163: 110484.

[14] KANG D, LEE H, DAVAATSEREN M, et al. Comparison of acrylamide and furan concentrations, antioxidant activities, and volatile profiles in cold or hot brew coffees [J]. Food Science and Biotechnology, 2019, 29(1): 141-148.

[15] 黄燕,宋晟,徐文泱,等.市售食品中丙烯酰胺污染现状风险分析[J].食品与机械,2021,37(7):81-86.

[16] NEHLIG A, CUNHA R A. The coffee-acrylamide apparent paradox: an example of why the health impact of a specific compound in a complex mixture should not be evaluated in isolation [J]. Nutrients, 2020, 12(10): 3141.

[17] ALTINOZ E, TURKOZ Y, VARDI N. The protective effect of n-acetylcysteine against acrylamide toxicity in liver and small and large intestine tissues [J]. Bratisl Lek Listy, 2015, 116(4): 252-258.

[18] 柏杰,朱雨辰,陈芳.咖啡中丙烯酰胺的形成与控制研究进展[J].食品科学,2022,43(21):332-340.

[19] WANG F, FAN B, CHEN C, et al. Acrylamide causes neurotoxicity by inhibiting glycolysis and causing the accumulation of carbonyl compounds in bv2 microglial cells [J]. Food and Chemical Toxicology, 2022, 163: 112982.

[20] CONTI A D, TRYNDYAK V, VONTUNGELN L S, et al. Genotoxic and epigenotoxic alterations in the lung and liver of mice induced by acrylamide: a 28 day drinking water study [J]. Chemical Research in Toxicology, 2019, 32(5): 869-877.

[21] HASHEM M, SOOUD K A E, ELHAKIM Y M A, et al. The impact of long-term oral exposure to low doses of acrylamide on the hematological indicators, immune functions, and splenic tissue architecture in rats [J]. International Immunopharmacology, 2022, 105: 108568.

[22] 张琪,胡慧慧,江联,等.抗氧化剂对焙烤咖啡中丙烯酰胺的抑制效果[J].食品研究与开发,2023,44(11):21-28.

[23] EU C R, EU P O O T. Establishing mitigation measures and benchmark levels for the reduction of the presence of acrylamide in food[EB/OL]. (2017-11-20)https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/1f3b45fb-ce6b-11e7-a5d5-01aa75ed71a1/language-en.

[24] PEREZ LOCAS C, YAYLAYAN V A. Isotope labeling studies on the formation of 5-(hydroxymethyl)-2-furaldehyde (hmf) from sucrose by pyrolysis-gc/ms [J]. J Agric Food Chem, 2008, 56(15): 6717-6723.

[25] GOEKMEN V, KOCADAGH T, GOENCUEOGLU N, et al. Model studies on the role of 5-hydroxymethyl-2-furfural in acrylamide formation from asparagine [J]. Food Chemistry, 2012, 132(1): 168-174.

[26] GRANVOGL M, SCHIEBERLE P. Thermally generated 3-aminopropionamide as a transient intermediate in the formation of acrylamide [J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2006, 54(16): 5933-5938.

[27] ZAMORA R, HIDALGO F J. Contribution of lipid oxidation products to acrylamide formation in model systems [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2008, 56(15): 6075-6080.

[28] STEFAN EHLING M H A T. Formation of Acrylamide from Lipids [M]. Advances in Experimental Medicine and Biology (AEMB,volume 561), 2005.

[29] BERTUZZI T, MARTINELLI E, MULAZZI A, et al. Acrylamide determination during an industrial roasting process of coffee and the influence of asparagine and low molecular weight sugars [J]. Food Chemistry, 2020, 303: 125372.

[30] XU Y, CUI B, RAN R, et al. Risk assessment, formation, and mitigation of dietary acrylamide: current status and future prospects [J]. Food and Chemical Toxicology, 2014, 69: 1-12.

[31] PEDRESCHI F, MARIOTTI M S, GRANBY K. Current issues in dietary acrylamide: formation, mitigation and risk assessment [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2014, 94(1): 9-20.

[32] ALVES R C, SOARES C, CASAL S, et al. Acrylamide in espresso coffee: influence of species, roast degree and brew length[J]. Food Chemistry, 2010, 119(3): 929-934.

[33] ESPOSITO F, FASANO E, De VIVO A, et al. Processing effects on acrylamide content in roasted coffee production [J]. Food Chemistry, 2020, 319: 126550.

[34] SOARES C M, ALVES R C, OLIVEIRA M B P. Factors affecting acrylamide levels in coffee beverages [M] // Coffee in Health and Disease Prevention. Elsevier, 2015: 217-224.

[35] RANNOU C, LAROQUE D, RENAULT E, et al. Mitigation strategies of acrylamide, furans, heterocyclic amines and browning during the maillard reaction in foods [J]. Food Research International, 2016, 90: 154-176.

[36] BAGDONAITE K, DERLER K, MURKOVIC M. Determination of acrylamide during roasting of coffee [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2008, 56(15): 6081-6086.

[37] VÁRADY M, ŚLUSARCZYK S, BORŽÍKOVA J, et al. Heavy-metal contents and the impact of roasting on polyphenols, caffeine, and acrylamide in specialty coffee beans [J]. Foods, 2021, 10(6): 1310.

[38] RATTANARAT P, CHINDAPAN N, DEVAHASTIN S. Comparative evaluation of acrylamide and polycyclic aromatic hydrocarbons contents in robusta coffee beans roasted by hot air and superheated steam [J]. Food Chemistry, 2021, 341: 128266.

[39] CHINDAPAN N, SOYDOK S, DEVAHASTIN S. Roasting kinetics and chemical composition changes of robusta coffee beans during hot air and superheated steam roasting [J]. Journal of Food Science, 2019, 84(2): 292-302.

[40] 姚子升.降低焙炒咖啡中丙烯酰胺含量的方法研究[J].轻工标准与质量,2018,6:44-45.

[41] HOUESSOU J K, MALOUG S, LEVEQUE A, et al. Effect of roasting conditions on the polycyclic aromatic hydrocarbon content in ground arabica coffee and coffee brew [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2007, 55(23): 9719-9726.

[42] SOARES C, CUNHA S C, FERNANDES J O. Determination of acrylamide in coffee and coffee products by gc-ms using an improved spe clean-up [J]. Food Additives and Contaminants, 2006, 23(12): 1276-1282.

[43] WORKU M, ASTATKIE T, BOECKX P. Shade and postharvest processing effects on arabica coffee quality and biochemical composition in lowland and midland coffee-growing areas of southwestern ethiopia [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2023, 115: 105027.

[44] TASSEW A A, YADESSA G B, BOTE A D, et al. Influence of location, elevation gradients, processing methods, and soil quality on the physical and cup quality of coffee in the kafa biosphere reserve of sw ethiopia [J]. Heliyon, 2021,7(8): e07790.

[45] TOCI A T, AZEVEDO D A, FARAH A. Effect of roasting speed on the volatile composition of coffees with different cup quality [J]. Food Research International, 2020, 137: 109546.

[46] BAŞARAN B, AYD N F, KABAN G. The determination of acrylamide content in brewed coffee samples marketed in turkey [J]. Food Additives & Contaminants: Part A, 2019, 37(2): 280-287.

[47] MICHALAK J, CZARNOWSKA-KUJAWSKA M, GUJSKA E, et al. Effect of the brewing process on the acrylamide content in coffee beverages [J]. Proceedings of the Nutrition Society, 2020, 79(OCE2): E293.

[48] NARITA Y, INOUYE K. Decrease in the acrylamide content in canned coffee by heat treatment with the addition of cysteine [J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2014, 62(50): 12218-12222.

[49] ANESE M. Acrylamide in Coffee and Coffee Substitutes [M]. Elsevier eBooks, 2016.

[50] HENDRIKSEN H V, BUDOLFSEN G, BAUMANN M, et al. Asparaginase for acrylamide mitigation in food [J]. Aspects of Applied Biology, 2013, 116: 41-50.

[51] CORRÊA C L O, PENHA E D M, ANJOS M R D, et al. Use of asparaginase for acrylamide mitigation in coffee and its influence on the content of caffeine, chlorogenic acid, and caffeic acid [J]. Food Chemistry, 2021, 338: 128045.

[52] SHAPLA U M, SOLAYMAN M, ALAM N, et al. 5-hydroxymethylfurfural (hmf) levels in honey and other food products: effects on bees and human health [J]. Chemistry Central Journal, 2018, 12: 1-18.

[53] LEE C, CHEN K, LIN J A, et al. Recent advances in processing technology to reduce 5-hydroxymethylfurfural in foods [J]. Trends in Food Science and Technology, 2019, 93: 271-280.

[54] LIU Q, ZHOU P, LUO P, et al. Occurrence of furfural and its derivatives in coffee products in china and estimation of dietary intake [J]. Foods, 2023, 12(1): 200.

[55] KIM H K, CHOI Y W, LEE E N, et al. 5-hydroxymethylfurfural from black garlic extract prevents tnf α-induced monocytic cell adhesion to huvecs by suppression of vascular cell adhesion molecule-1 expression, reactive oxygen species generation and nf - κ b activation [J]. Phytotherapy Research, 2011, 25(7): 965-974.

[56] 王歌,曾睿,邱瑞霞,等.5-羟甲基糠醛与氨基酸反应形成的风味物质[J].食品与机械,2018,34(8):1-4.

[57] CUEVA S P, ÁLVAREZ J, VÉGVÁRI Á, et al. Relationship between hmf intake and smf formation *in vivo*: an animal and human study [J]. Molecular Nutrition & Food Research, 2016, 61(3): 1600773.

[58] ZHAO Q, OU J, HUANG C, et al. Absorption of 1-dicysteinethioacetal-5-hydroxymethylfurfural in rats and its effect on oxidative stress and gut microbiota [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66(43): 11451-11458.

[59] ZHANG Y, SONG Y, HU X, et al. Effects of sugars in batter formula and baking conditions on 5-hydroxymethylfurfural and furfural formation in sponge cake models [J]. Food Research International, 2012, 49(1): 439-445.

[60] DELBECQ F, WANG Y, MURALIDHARA A, et al. Hydrolysis of hemicellulose and derivatives-a review of recent advances in the production of furfural [J]. Frontiers in Chemistry, 2018, 6: 146.

[61] 李光磊.美拉德反应中健康危害物的产生规律研究[D].天津:天津科技大学,2016.

[62] ZHANG Y, AN X. Inhibitory mechanism of quercetin against the formation of 5-(hydroxymethyl)-2-furaldehyde in buckwheat flour bread by ultra-performance liquid chromatography coupled with high-resolution tandem mass spectrometry [J]. Food Research International, 2017, 95: 68-81.

[63] PARK S H, JO A, LEE K G. Effect of various roasting, extraction and drinking conditions on furan and 5-hydroxymethylfurfural levels in coffee [J]. Food Chemistry, 2021, 358(1): 129806.

[64] RODRÍGUEZ Y F B, GUTIÉRREZ N, CRUZ C M A, et al. Integrated effect of yeast inoculation and roasting process conditions on the neo formed contaminants and bioactive compounds of colombian roasted coffee (coffea arábica) [J]. Food Research International, 2023, 164: 112380.

[65] DONG R, ZHU M, LONG Y, et al. Exploring correlations between green coffee bean components and thermal contaminants in roasted coffee beans [J]. Food Research International, 2023, 167: 112700.

[66] 吴泰钢.绿原酸对糖酸反应体系中HMF形成的影响及其作用机制研究[D].广州:暨南大学,2015.

[67] KUMAR N, SHIMRAY C A, INDRANI D, et al. Reduction of acrylamide formation in sweet bread with l-asparaginase treatment [J]. Food and Bioprocess Technology, 2013,7(3): 741-748.

[68] LEE Y Y, TANG T K, PHUAH E T, et al. New functionalities of maillard reaction products as emulsifiers and encapsulating agents, and the processing parameters: a brief review [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2017, 97(5): 1379-1385.

[69] ZHU M, LONG Y, MA Y, et al. Investigation of thermal contaminants in coffee beans induced by roasting: a kinetic modeling approach [J]. Food Chemistry, 2022, 378: 132063.

[70] KOCADAĞL T, GÖNCÜOĞLU N, HAMZALOĞLU A, et al. In depth study of acrylamide formation in coffee during roasting: role of sucrose decomposition and lipid oxidation [J]. Food & Function, 2012, 3(9): 970-975.

[71] LACHENMEIER D W, SCHWARZ S, TEIPEL J, et al. Potential antagonistic effects of acrylamide mitigation during coffee roasting on furfuryl alcohol, furan and 5-hydroxymethylfurfural [J]. Toxics, 2018, 7(1): 1.

[72] LOAËC G, JACOLOT P, HELOU C, et al. Acrylamide, 5-hydroxymethylfurfural andn ε-carboxymethyl-lysine in coffee substitutes and instant coffees [J]. Food Additives & Contaminants: Part A, 2014, 31(4): 593-604.

[73] MICHALAK J, GUJSKA E, CZARNOWSKA M, et al. Effect of storage on acrylamide and 5-hydroxymethylfurfural contents in selected processed plant products with long shelf-life [J]. Plant Foods for Human Nutrition, 2016, 71: 115-122.

[74] LINEBACK D R, COUGHLIN J R, STADLER R H. Acrylamide in foods: a review of the science and future considerations [J]. Annual Review of Food Science and Technology, 2012, 3(1): 15-35.

[75] BATOOL Z, XU D, ZHANG X, et al. A review on furan: formation, analysis, occurrence, carcinogenicity, genotoxicity and reduction methods [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2020, 61(3): 395-406.

[76] CAO P, ZHANG L, YANG Y, et al. Analysis of furan and its major furan derivatives in coffee products on the chinese market using hs-gc-ms and the estimated exposure of the chinese population [J]. Food Chemistry, 2022, 387: 132823.

[77] EFSA. Update on furan levels in food from monitoring years 2004-2010 and exposure assessment [J]. EFSA Journal, 2011, 9(9): 2347.

[78] HAN J, KIM M K, LEE K E. Furan levels and sensory profiles of commercial coffee products under various handling conditions [J]. Journal of Food Science, 2017, 82(11): 2759-2766.

[79] TRYNDYAK V, de CONTI A, DOERGE D R, et al. Furan-induced transcriptomic and gene-specific dna methylation changes in the livers of fischer 344 rats in a 2-year carcinogenicity study [J]. Archives of Toxicology, 2016, 91: 1233-1243.

[80] BLANK I. Furan in Processed Foods [M]. Bioactive Compounds in Foods, 2009.

[81] PEREZ LOCAS C, YAYLAYAN V A. Origin and mechanistic pathways of formation of the parent furan-a food toxicant [J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2004, 52(22): 6830-6836.

[82] JACKSON L S, ALTAHER F. Chapter 23-processing issues : acrylamide, furan and trans fatty acids [J]. Ensuring Global Food Safety, 2010: 383-410.

[83] MORO S, CHIPMAN J K, WEGENER J W M, et al. Furan in heat‐treated foods: formation, exposure, toxicity, and aspects of risk assessment [J]. Molecular Nutrition & Food Research, 2012, 56(8): 1197-1211.

[84] SHEN M, LIU Q, JIANG Y, et al. Influences of operating parameters on the formation of furan during heating based on models of polyunsaturated fatty acids [J]. Journal of Food Science, 2015, 80(6): T1432-T1437.

[85] PARK H, NAM D H, LEE J, et al. Effects of chlorogenic acid on the formations of furan, acrylamide, α-dicarbonyls and volatile compounds in canned coffee model systems [J]. LWT, 2023, 188: 115338.

[86] BATOOL Z, LI L, XU D, et al. Determination of furan and its derivatives in preserved dried fruits and roasted nuts marketed in china using an optimized hs-spme gc/ms method [J]. European Food Research and Technology, 2020, 246: 2065-2077.

[87] AMANPOUR A, SELLI S. Differentiation of volatile profiles and odor activity values of turkish coffee and french press coffee[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2015, 40(5): 1116-1124.

[88] GUENTHER H, HOENICKE K, BIESTERVELD S, et al. Furan in coffee: pilot studies on formation during roasting and losses during production steps and consumer handling [J]. Food Additives and Contaminants-Part A Chemistry, Analysis, Control, Exposure and Risk Assessment, 2010, 27(3): 283-290.

[89] MESÍAS M, MORALES F J. Reliable estimation of dietary exposure to furan from coffee: an automatic vending machine as a case study [J]. Food Research International, 2014, 61: 257-263.

[90] RAHN A, YERETZIAN C. Impact of consumer behavior on furan and furan-derivative exposure during coffee consumption. A comparison between brewing methods and drinking preferences [J]. Food Chemistry, 2019, 272: 514-522.

[91] WAIZENEGGER J, WINKLER G, KUBALLA T, et al. Analysis and risk assessment of furan in coffee products targeted to adolescents [J]. Food Additives & Contaminants: Part A, 2012, 29(1): 19-28.

[92] SEOK Y, LEE K. Analysis of furan in semi-solid and paste type foods [J]. Food Science and Biotechnology, 2020, 29(2): 293-301.

[93] ZOLLER O, SAGER F, REINHARD H. Furan in food: headspace method and product survey [J]. Food Additives and Contaminants, 2007, 24(sup1): 91-107.

[94] CHAICHI M, GHASEMZADEH-MOHAMMADI V, HASHEMI M, et al. Furanic compounds and furfural in different coffee products by headspace liquid-phase micro-extraction followed by gas chromatography–mass spectrometry: survey and effect of brewing procedures [J]. Food Additives & Contaminants Part B-surveillance, 2015, 8(1):73-80.

[95] GENOVESE A, DE VIVO A, APREA A, et al. Particle size and variety of coffee used as variables in mitigation of furan and 2-methylfuran content in espresso coffee [J]. Food Chemistry, 2021, 361: 130037.

[96] BI K, ZHANG L, QIAO X, et al. Tea polyphenols as inhibitors of furan formed in the maillard model system and canned coffee model [J]. Journal of Food Science, 2017, 82(5): 1271-1277.

[97] WANG B, JIANG S, LI H, et al. Red-fleshed apple anthocyanin extract reduces furan content in ground coffee, maillard model system, and not-from-concentrate apple juice [J]. Foods, 2021, 10(10): 2423.

[98] SENINDE D R, CHAMBERS E. Coffee flavor: a review [J]. Beverages, 2020, 6(3): 44.

[99] KETTLITZ B, SCHOLZ G, THEURILLAT V, et al. Furan and methylfurans in foods: an update on occurrence, mitigation, and risk assessment [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2019, 18(3): 738-752.

[100] PALMERS S, GRAUWET T, BUVÉ C, et al. Furan formation during storage and reheating of sterilised vegetable purées [J]. Food Additives & Contaminants: Part A, 2015, 32(2): 161-169.

[101] KIM T K, LEE Y K, PARK Y S, et al. Effect of cooking or handling conditions on the furan levels of processed foods [J]. Food Additives & Contaminants: Part A, 2009, 26(6): 767-775.