

食品中丙烯酰胺的形成、检测及其抑制和管理研究进展

金山¹, 孙小凡^{2*}

(1. 西北政法大学商学院, 西安 710061; 2. 聊城大学农学院食品科学系, 聊城 252059)

摘要: 丙烯酰胺(acrylamide, AA)是土豆、咖啡和谷物类等食品在热加工过程中形成的小分子物质, 具有神经毒性、遗传毒性和致癌性, 被国际癌症研究机构认定为可能的致癌物, 在世界范围内引起了消费者的广泛关注。早期研究主要围绕食品中AA形成机制和分析检测, 近年来更多的是关于AA形成的抑制方法的研究, 而关于AA的管理研究相对较少且不系统。本文简要介绍了食品加工过程中AA可能的形成机制; 简要总结了AA检测方法的最新研究成果; 重点介绍了近年来抑制食品中AA形成的研究现状; 最后比较了几个主要国家关于食品中AA的管理办法; 以期为更好地控制食品中的AA含量提供科学依据, 为更好地管理食品中AA的含量提供参考和借鉴。

关键词: 丙烯酰胺; 形成机制; 抑制措施; 管理办法

Research progress on formation, detection, inhibition and management of acrylamide in food

JIN Shan¹, SUN Xiao-Fan^{2*}

(1. Business School, Northwest University of Political Science and Law, Xi'an 710061, China;
2. Department of Food Science, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China)

ABSTRACT: Acrylamide (AA) is a small molecule formed during the thermal processing of foods such as potatoes, coffee and grains. It has neurotoxicity, genotoxicity and carcinogenicity. It has been identified as a possible carcinogen by the International Agency for Research on Cancer and has attracted widespread attention from consumers worldwide. Early research mainly focused on the formation mechanism and analysis of AA in food. In recent years, more researches have been on methods of inhibiting the formation of AA, while the management research on AA is relatively rare and unsystematic. This article briefly introduced the possible formation mechanism of AA in food processing, briefly summarized the latest research results of AA detection methods, focused on the research results of inhibiting the formation of AA in foods in recent years, finally compared the main countries on AA in food management methods, in order to provide a scientific basis for better control of the content of AA in food, and to provide reference and reference for better management of the content of AA in food.

KEY WORDS: acrylamide; forming mechanism; inhibition measures; management methods

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项基金项目(2662017JC014)

Fund: Supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities (2662017JC014)

*通信作者: 孙小凡, 硕士, 副教授, 主要研究方向为粮食、油脂与植物蛋白工程。E-mail: sunxiaofan76@163.com

*Corresponding author: SUN Xiao-Fan, Master, Associate Professor, Department of Food Science, Liaocheng University, Liaocheng, No.1, Hunan Road, Dongchangfu District, Liaocheng 252059, China. E-mail: sunxiaofan76@163.com

0 引言

食品生产安全已成为我国乃至全球的重点关注问题之一。煎、炒、烘烤和油炸等是提高食品风味和口感的常见烹饪手段,同时也伴随着油脂氧化、蛋白质变性和维生素等活性物质降解,以及有害物质的形成等有害变化^[1]。其中丙烯酰胺(acrylamide, AA)是土豆、咖啡和谷物类等食品在高温过程中形成的不饱和酰胺有害物质,进入人体后,会被胃肠道迅速吸收并通过体液循环传播到全身组织。AA可与血红蛋白或体内如 DNA 等其他关键化合物形成一些特定的复合物,从而破坏周围和中枢神经系统,对人和动物具有致突变性、遗传毒性、致癌性^[2]。因其在日常饮食中广泛存在而引起国民的普遍重视,AA 于 1994 年被国际癌症研究机构认定为可能的致癌物^[1,3]。

早期,国内外学者主要致力于研究 AA 在食品加工中的形成机制和检测方法的开发,近年来关于抑制食品中 AA 形成的研究也有较多的报道,同时关于食品中 AA 含量的管理办法也有了较大的进展^[4]。研究显示,食品中的 AA 主要来自美拉德反应,其形成途径主要包括天冬酰胺途径和丙烯醛途径;含量受温度、pH、水分、时间及其原料成分的影响^[5]。前期主要从控制加工条件来控制 AA 的形成,如 MAAN 等^[6]综述了食品加工条件和加工工艺对 AA 形成的影响;此外有某些盐类及酚类植物提取物如外源性食品添加剂能抑制 AA 的形成^[7],2019 年加拿大批准在马铃薯粉、小麦粉和玉米粉等加工做成的休闲食品中使用 L-赖氨酸盐抑制丙烯酰胺的形成^[8]。目前世界范围内关于 AA 的法律法规尚无统一的管理办法。

鉴于 AA 在食品中广泛的存在且对人体具有毒害作用,本文围绕食品加工过程中 AA 的形成机制、检测方法、抑制措施和管理方法进行系统综述,旨在为更好的控制食品中的 AA 提供科学依据,为我国建立系统管理 AA 的办法提供借鉴。

1 丙烯酰胺形成机制

AA 的形成取决于前体的浓度、热处理持续时间和温度、水分活度和 pH 等重要因素,通常延长加热时间、提高温度、pH 和水含量可能会增加食品中 AA 的形成^[9]。此外,遗传等内在因素与原材料中游离天冬酰胺和还原糖含量也会影响 AA 的形成^[4]。

食物中 AA 可能形成途径主要有 Strecker 途径(N-糖基化途径)和丙烯醛途径^[6]。Strecker 途径即美拉德反应,碳水化合物(主要还原糖)和蛋白质(主要含天冬酰胺)含量较高的食物在高于 120 °C 的温度下进行热处理时会发生美拉德反应,主要涉及形成环状半缩醛并被短链糖蛋白攻击后,脱水形成不稳定的 Schiff 碱;Schiff 碱可能会转化为 Amadori 化合物或脱羧为亚甲胺叶立德或形成恶唑烷-5-酮,

进一步脱羧,并通过消除亚胺或在水解后形成 3-氨基丙酰胺(3-aminopropionamide, 3-APA)或 3-氧代丙酰胺,最后脱酰胺形成 AA^[4]。

还可以直接由偶氮甲碱的内酯或通过 β -消除脱羧的 Amadori 化合物与 3-APA 脱氨而形成 AA(图 1)^[10]。研究发现,羰基化合物(2-脱氧葡萄糖、2,3-丁二酮、辛酸和癸醛)具有与还原糖相似的效果^[11];而且在不同的模型系统中, α -羟基羰基比二羰基将天冬酰胺转化为丙烯酰胺更有效,与其他还原糖(如葡萄糖)相比,含有 2 个 α -羟基羰基的果糖 AA 的形成量增加了约 2 倍^[12]。

在丙烯醛途径中,脂肪降解产生甘油并进一步脱水形成丙烯醛和丙烯酸,丙烯酸与天冬酰胺可能在高温条件下与其他氨基酸降解产生的氨反应生成 AA^[4]。

2 丙烯酰胺检测方法

据报道,有多种方法可量化 AA 及其衍生的代谢物,例如气相色谱(gas chromatography, GC)、高效液相色谱(high performance liquid chromatography, HPLC)、毛细管电泳和酶联免疫吸附法,在开发的用于测定 AA 的所有方法中,其中液相色谱-串联质谱法(liquid chromatography-tandem mass spectrometry, LC-MS/MS)和气相色谱-串联质谱法(gas chromatography-tandem mass spectrometry, GC-MS/MS)表现出良好的选择性和灵敏度,是确定 AA 含量使用最广泛的方法^[10]。

目前同位素稀释的 LC-MS/MS、衍生化气相色谱-质谱联用法(as chromatography-mass spectrometry, GC-MS)或 GC-MS/MS 已被大多数组织和政府作为热加工食品中 AA 定量的标准方法,这些方法具有很高的准确性和灵敏度,以及良好的稳定性和可重复性,对于 AA 的分析和检测具有较高的可靠性。如欧盟宣布用于婴儿面包和食品的 AA 检测分析方法的定量限应为 30 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。在标准方法(例如 LC-MS/MS 或 GC-MS)中,检测限和定量限分别在 1~5 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 和 10~30 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 的范围内,符合欧盟的建议。LC-MS/MS 可以缩短检测时间并满足绿色环境的要求;由于良好的分离效果,LC-MS/MS 可用于同时检测一个样品中的丙烯酰胺和其他有毒化合物^[13-14]。

由于色谱法存在如样品制备所需的时间长,设备昂贵且分析成本高等缺点,一些新的快速检测方法已被开发报道,如电化学生物传感器、酶联免疫吸附法(enzyme linked immunosorbent assay, ELISA)、荧光和计算机视觉方法对 AA 具有较高的灵敏度和准确度^[15]。但根据 HU 等^[16]研究显示,AA 电化学生物传感器快速检测方法的检测限比标准方法(基于 LC-MS 和 GC-MS 的方法)低约 2 个数量级。与 LC-MS/MS 和 GC-MS 等标准方法相比,这些快速检测方法具有成本低、简单、易于处理和便携式等优点,具有满足食品行业、监管机构和客户需求的能力。

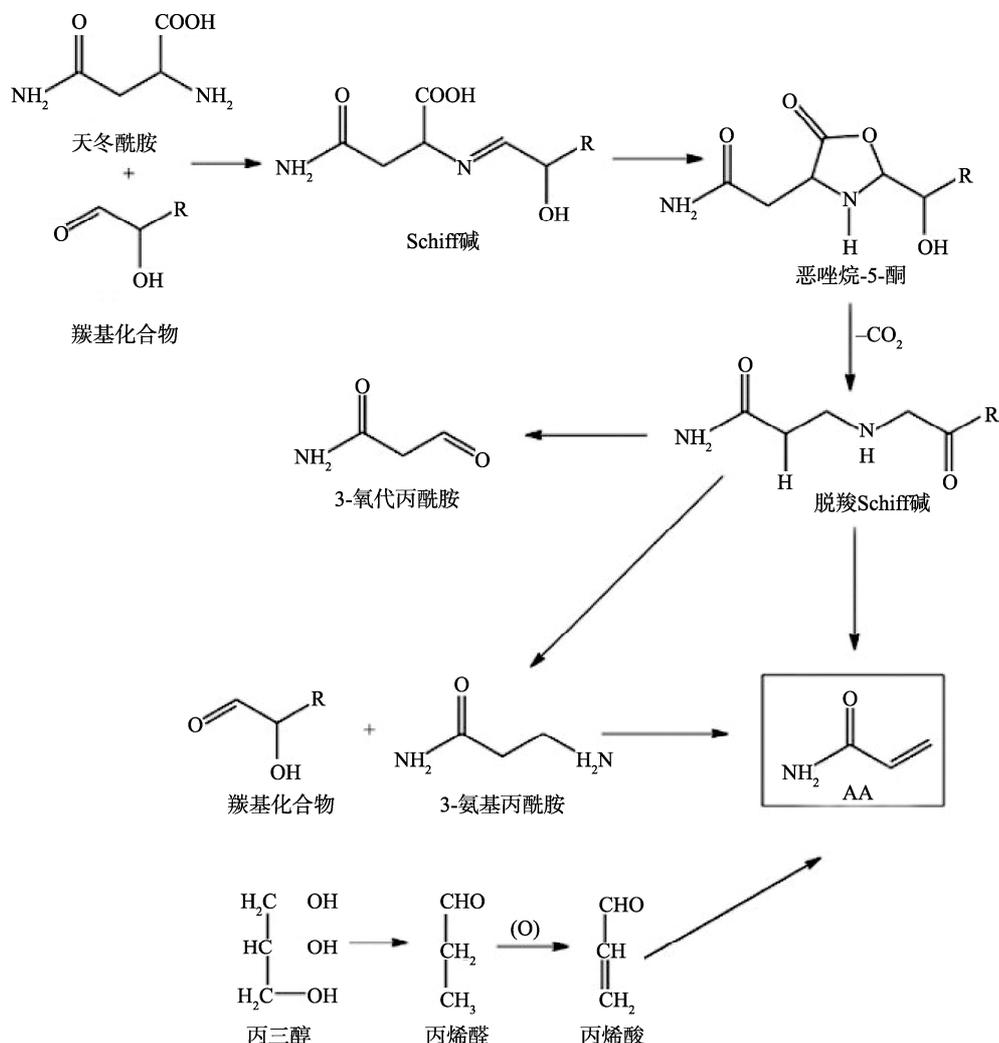


图 1 食品中 AA 形成机制

Fig.1 Mechanism of acrylamide formation in food

为满足需求,一些快速、灵敏并可靠的检测方法被开发用于 AA 的现场检测,如 CHENG 等^[17]利用分散固相萃取结合表面增强拉曼光谱法实现了油炸食品中 AA 的快速灵敏检测,检测限和定量限分别为 2 和 5 $\mu\text{g}/\text{kg}$,达到甚至优于相关标准,且每个样品的测量时间不到 10 min,表明该方法具有实现 AA 在线现场检测的可能性。此外量子点技术的应用大大提高了 AA 在线检测的灵敏性和高效性,如 DEMIRHAN 等^[18]利用 Mn 掺杂 ZnS 量子点磷光探针实现了食品中 AA 快速检测,其检出限为 0.56 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 。

3 丙烯酰胺形成的抑制措施

抑制和减少食品中 AA 的形成已成为学者、消费者、生产者共同关注的问题,为提高产品质量和保障国民身体健康,目前围绕加工工艺、抑制剂和天然产物开发等领域对降低食品中 AA 的形成进行了广泛的研究(图 2)。

3.1 热加工参数的控制

煎、炒、烘烤、油炸等是最常见的食品热加工方式,大量文献报道了热加工过程与 AA 形成的关系。DANIALI 等^[19]研究发现在不同时间和温度下使用棕榈油和大豆油在煎炸油中与 AA 的形成有直接相关性,当 2 种油在 200 $^{\circ}\text{C}$ 加热 7.5 min 时均检测到 AA 含量最大值,在 160 $^{\circ}\text{C}$ 处理 1.5 min 时 AA 含量最小。VANDER-FELS 等^[20]也发现在高温条件下(180~200 $^{\circ}\text{C}$)下 AA 含量随温度升高而增加,在 200 $^{\circ}\text{C}$ 时观察到 AA 达到最高浓度;在每个温度条件下,AA 的浓度随烘烤时间的增加而增加。CLAUS 等^[21]研究更高温度(烘烤)对面包中 AA 含量和感官特性的影响,结果发现在 240 $^{\circ}\text{C}$ 下烘烤 50 min 和在 200 $^{\circ}\text{C}$ 下烘烤 70 min 的面包样品的颜色、气味和风味基本相似。但是,与较低温度(200 $^{\circ}\text{C}$, 92.4 $\mu\text{g}/\text{kg}$)相比,在 240 $^{\circ}\text{C}$ 条件下烘烤的样品中 AA 的浓度较高(124.1 $\mu\text{g}/\text{kg}$)。SUMMA 等^[22]研究发现咖啡样品在 236 $^{\circ}\text{C}$ 条件下烘烤,AA 含量随着烘烤时间的增加而下降。

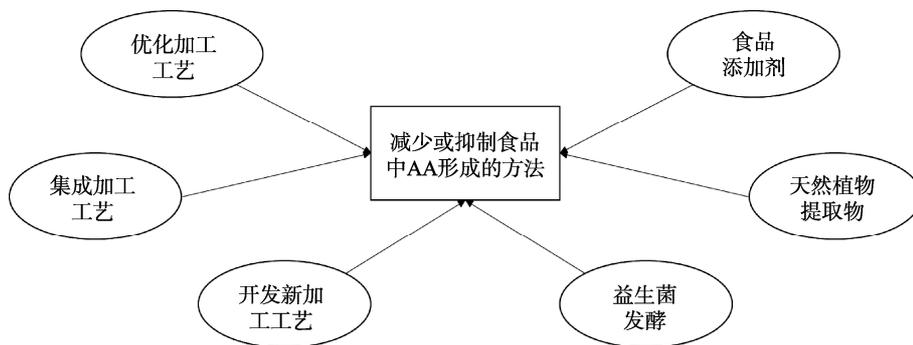


图 2 减少食品中 AA 的方法

Fig.2 Methods of AA reduction in food

目前认为食品中 AA 主要是通过美拉德反应形成的, 高温有利于脂肪氧化分解形成羰基化合物, 同时 Schiff 碱形成恶唑烷-5-酮后进一步脱羧、脱胺促使反应正向进行而使得 AA 含量升高, 根据目前文献资料^[23], 190~210 °C 范围的温度是食品形成高含量 AA 的主要温度范围, 而温度过高和时间的延长导致 AA 的热裂解是使其含量下降的主要原因; 因此通过选择适宜的处理时间和温度, 建议食物制作温度不宜超过 170 °C 可以有效降低食品热加工过程中 AA 的浓度。

3.2 加工工艺的控制

加工方法对产品中 AA 的形成也有重要的影响。如 BELGIN 等^[24]研究发现微波预处理能显著降低随后油炸过程中食品表面 AA 的浓度, 但核心部分 AA 浓度略有增加, 在 150、170 和 190 °C 条件下油炸时, 整个马铃薯条中的 AA 含量分别降低了 36%、41% 和 60%。类似地, SANSANO 等^[25]研究同样显示, 微波油炸与深油油炸相比, AA 的含量可减少 37%~83%; 且微波炸薯条比深油炸薯条具有更低的水分和更高的脂肪含量, 但质地相似。这是因为微波加热的能量传递与传统技术不同, 食物内部极性水分子吸收微波产热并从内部快速梯度扩散到表面, 起到快速干燥而又不会使产品表面过热的的作用, 微波降低了油温, 并减少加工时间, 从而降低了油炸食品中 AA 的含量^[25]。

ANESE 等^[26]研究显示与常规烘焙相比, 通过集成真空-烘焙处理的咖啡豆, 不会影响颜色和其他感官特性, 但 AA 含量减少了 50%。此外, 通过将真空与烘烤和油炸相结合, 饼干和薯条中 AA 的含量分别减少了 43% 和 18%^[27]。类似地, BELKOVA 等^[28]报道了通过真空联合烘烤和真空联合油炸减少 AA 的含量, 其主要原理是真空油炸降低了油温, 使得美拉德反应程度减弱, 此外还减少了维生素和色素等活性物质的降解, 进而抑制油炸食品中 AA 的形成。

除加工方法的联用外, 已有报道使用新的加工/预处理方式减少食品中 AA 的含量, ANTUNES-ROHLING 等^[29]研究显示, 对浸泡在水中的马铃薯进行高强度超声处理,

成品中 AA 的浓度可降低 90%; 这种降低归因于超声波降解了马铃薯中还原糖。OSTERMEIER 等^[30]也发现高压脉冲处理和超声处理可以降低薯片中 AA 的含量, 分别减少 34% 和 17%, 且与对照组(651 μg/kg)相比, 高压脉冲和超声联用处理的薯片 AA 浓度降低程度更显著 (220 μg/kg), 减少了 66%。SANSANO 等^[31]比较了空气油炸和深油油炸对 AA 形成的影响, 发现空气油炸可减少 90% AA 的形成。此外, GÜLCAN 等^[32]研究了惰性气体和抑制剂氛围条件下烘烤薯条对 AA 形成的影响, 发现在 N₂ 和 CO₂ 气氛中烘烤可减少 50% AA 的形成, 而在 SO₂ 中则可减少 99% AA 的形成。

发酵也是一种重要的食品加工处理方式。据报道, 用酵母发酵可以降低面包中的 AA 的含量, 如 WANG 等^[33]研究显示, 酵母发酵可以减少小麦面包中 40%~60% 的 AA。马铃薯中的酸发酵会消耗还原糖而增加天冬酰胺的含量, 从而导致 AA 含量降低^[34]。发酵过程中, 微生物类型及其相互作用是影响 AA 还原量的重要因素。类似地, KORNELIA 等^[35]也报道了通过发酵减少 AA 的相关研究。

近年来益生菌的相关研究成为热潮, 使用益生菌缓解食品中的 AA 也有研究报道^[36]。使用益生菌降低 AA 的作用主要包含 2 种类型, 一种是 AA 与益生菌的细胞壁中肽聚糖结合形成物理吸附后通过粪便和细菌一起被排除体外; 如 ZHANG 等^[37]研究了来自不同菌株(植物乳杆菌 1.0065、干酪乳杆菌 ATCC393、乳杆菌嗜酸 KLDS1.0307 和链球菌嗜热 KLDS1.0316)的 4 种肽聚糖结合丙烯酸酰胺的能力, 发现植物乳杆菌中的肽聚糖结合 AA 的能力最高 (87%)。还发现肽聚糖的碳水化合物含量和结合 AA 的百分比之间呈显著正相关, 且肽聚糖的 4 个特定氨基酸的含量和 AA 结合能力也呈正相关。益生菌抑制 AA 的另一条路径是产生 L-天冬酰胺酶还原丙烯酸酰胺; 如 ONISHI 等^[38]发现使用枯草芽孢杆菌的 L-天冬酰胺酶可减少炸薯条中 AA 的形成。

通过集成方法或预处理虽然能显著降低产品中 AA

的浓度,但增加了处理步骤和处理时间,生产成本也随之增加。虽然已发现使用益生菌可有效降低 AA 的含量,但这还取决于菌株类型、细菌种群、孵育时间、pH、生长阶段和 AA 浓度等因素。

3.3 食品添加剂的使用

除了控制生产工艺和工艺参数降低产品中 AA 的含量外,根据 AA 形成机制添加相应的食品添加剂抑制加工过程中 AA 的形成也成为研究重点。SALAZAR 等^[39]研究发现,在玉米饼制作过程中添加氢氧化钙(1.5~2 g/100 g),产品中 AA 含量减少了 36%~52%。该研究进一步表明,氢氧化钙能抑制 Schiff 碱形成,在抑制 AA 形成中起着至关重要的作用。ZOU 等^[40]研究了半胱氨酸单独和甘氨酸联合在天冬酰胺/葡萄糖和饼干模型中的作用,发现在面团中添加半胱氨酸(0.36 g/100 g)和甘氨酸(0.2 g/100 g),饼干中 AA 含量显著下降 93.2%~97.8%;半胱氨酸可能通过迈克尔加成反应和 AA 形成加成物而降低 AA 含量。KALITA 等^[41]报道了用硫酸氧钒溶液对马铃薯条进行预处理(60 min),发现随着硫酸氧钒浓度的增加(0.001~0.1 mol/L),产品中 AA 的含量抑制程度提高(30.3%~89.3%);据推测,VO²⁺与天冬酰胺结合而抑制 AA 的形成。YUAN 等^[42]发现半胱氨酸和 NaHSO₃能很好的抑制 AA 的形成,而 NaHSO₃可通过与还原糖的羰基反应阻止 Schiff 碱的形成而发挥作用。SANSANO 等^[31]用 1%的柠檬酸、甘氨酸、烟酸和 2% NaCl 预处理土豆,发现与传统的深油炸相比,AA 含量减少高达 80%~90%,原因是在低 pH 条件下,有机酸使天冬酰胺氨基质子化来还原丙烯酰胺;此外,甘氨酸和天冬酰胺竞争与还原糖反应或通过迈克尔型加成反应与 AA 形成加成物。

由于 L-天冬酰胺是形成 AA 的主要前体之一,研究表明, L-天冬酰胺在 L-天冬酰胺酶催化下水解为氨和天冬氨酸^[43];因此,采用 L-天冬酰胺酶降解 L-天冬酰胺减少 AA 形成也成为关注点。如 JIA 等^[44]用浓度为 8000 U/L 枯草芽孢杆菌的 L-天冬酰胺酶处理马铃薯片,然后油炸,产品中 AA 含量降低了 82%。类似地,DIAS 等^[45]通过米曲霉(Strain # CCT 3940)和商业酶的 L-天冬酰胺酶使薯条中 AA 的含量降低了 72%和 92%。

虽然发现多种添加剂可以有效抑制 AA 的形成,但食品工业生产是否采用还将取决于产品的类型,在考虑安全性的前提下不能影响产品品质。

3.4 植物提取物的使用

随着人们对健康意识的增强,绿色天然化合物更受消费者青睐,天然植物提取物(富含酚类和抗氧化剂)作为 AA 形成的抑制剂已有报道。如 ASHKEZARI 等^[46]利用石榴花提取物(0.07%)和维生素 B₃ (1.97%)抑制甜甜圈中 AA 的含量,发现 AA 含量从 76.2 mg/kg 降至 64.4 mg/kg。但

是 VATTEM 等^[47]提出 AA 的形成本质上是非氧化性的,在马铃薯切片中,蔓越莓和牛至提取物中酚类抗氧化剂的存在不会影响丙烯酰胺的形成。相反,当外源酚类存在时,会导致 AA 含量增加。目前大多数植物提取物(包括绿茶^[48]、荞麦^[49]、迷迭香^[50]、番茄红^[51]和石榴花^[46])能有效抑制 AA 形成,这种差异与提取物中抗氧化剂种类、浓度和反应模型体系有关。

4 丙烯酰胺管理法律法规

AA 在食物中被广泛检出后,据世界卫生组织(World Health Organization, WHO)估计,日常饮食中 AA 的摄入量为 10%~30%。AA 于 1994 年被 WHO 列为 2A 类致癌物质,随后欧美等主要国家相继出台了对食品中 AA 管理的相关条例。2007—2009 年,欧洲食品委员会根据《欧洲委员会 2007/331-2010/307-2013/647》建议对炸薯条、马铃薯饼干、薄脆面包和速溶咖啡等特定食品的 AA 含量进行监测^[52],并于 2017 年倡议并通过了《欧盟委员会法规 2017/2158》号决议,制定了食品 AA 抑制措施和参考值(AA 单位,μg/kg),根据条款规定企业生产条例所列的如即食炸薯条 500 μg/kg,用新鲜土豆、土豆面团做的马铃薯饼干 750 μg/kg、薄脆面包 350 μg/kg、速溶咖啡 850 μg/kg、菊苣专用咖啡替代品 400 μg/kg 等食品必须低于参考值。同时该条例还提供了不同食品生产工艺以降低 AA 的含量。该法规首次规定了减少食品中 AA 含量的抑制措施和参考水平,这也是我国目前关于食品中 AA 法规制定的重要参考范例^[53]。

此外,其他国家对于 AA 的管理也有相关条例,但不如欧盟管理系统。如美国加利福尼亚州最重视,AA 早在 1990 年便进入了 1986 年建立的《安全饮用水和有毒物质实施法》(又称为第 65 号提案)的清单,根据法案规定,任何有意让个人接触大量清单上物质的企业必须向这些人提供明确和合理的警告。2016 年在美国马铃薯行业领导者的指导下,确定选育品质卓越且 AA 含量低马铃薯品种为首要任务;其次是制定薯片和油炸马铃薯加工原料块茎中糖和天冬酰胺含量的定量指标;最后是评估使用具有低 AA 形成潜力的新品种^[54],这也对我国马铃薯产业做出了良好的示范作用。

瑞士当局对食品中 AA 的管理力度也比较强硬。2007 年,瑞士从市场上撤回了 AA 含量超过 1000 μg/kg 的婴儿饼干;2 年后,瑞士针对市场上一个品牌的薯片采取了“硬性措施”,规定 AA 含量不得高于 7000 μg/kg^[1]。而日本厚生劳动省官网中也给出了丙烯酰胺定义和对健康的影响及其减少摄入量等相关说明。

我国目前对食品中 AA 尚未出台明确的管理条例,但我国已有大型食品企业开始关注食品中 AA 的含量,甚

至已经开始采取相应的措施。同时社会各界对 AA 的关注也日益增强。如深圳市消费者协会发布了针对国内外 15 款知名薯片关于 AA 含量的试验对比报告——《2020 年薯片中外对比试验报告》，其中 7 款 AA 含量高于欧盟规定水平(750 $\mu\text{g}/\text{kg}$)，3 款 AA 含量超过 2000 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ，引起了社会的广泛关注^[55]。相比欧美等发达国家，我国管理部门对食品中 AA 含量的管理介入相对较晚，在 2005 年卫生部首次发布《关于减少丙烯酰胺可能导致的健康公告》；香港食物安全中心在 2011 年曾发布《减低食品中丙烯酰胺的业界指导》，并于 2013 年修订，协助业界减少食物中特别是马铃薯和谷物类的 AA 含量。2012 年国家风险评估部门发布关于食品中 AA 的危险性评估报告，并对如何减少食品中的 AA 做出指导。2017 年台湾地区“卫生福利部食品药物管理署”和 2019 年澳门先后发布《降低食品中丙烯酰胺含量加工参考手册》，就马铃薯、咖啡类及婴幼儿食品等 7 类食品给出参考性指导。2019 年国家食品安全标准——《食品中丙烯酰胺污染控制规范》立项并在制定中。

5 结论和展望

油炸等食品备受国民青睐，解决油炸等食品中 AA 含量问题对保障国民身体健康具有重大意义。截至目前，减少或抑制食品中 AA 的形成主要集中在 3 个领域：选育优良的品种，选择合适加工工艺及筛选高效 AA 形成抑制剂。选育品质卓越且 AA 含量低的马铃薯品种能从源头上控制食品中 AA 的含量，但是其弊端是选育周期长。而通过控制和选择适宜的工艺来降低食品中的 AA 含量，同时在加工过程中添加相应的食品添加剂来抑制食品中 AA 的形成是目前最具可行性的策略。此外相关法律法规的建立能进一步规范企业的生产并保障国民的身体健康。

参考文献

- [1] KOSZUCKA A, NOWAK A, NOWAK I, *et al.* Acrylamide in human diet, its metabolism, toxicity, inactivation and the associated European Union legal regulations in food industry [J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2020, 60(10): 1677–1692.
- [2] MOUSAVI-KHANEHGAH A, FAKHRI Y, NEMATOLLAHI A, *et al.* The concentration of acrylamide in different food products: A global systematic review, meta-analysis, and meta-regression [J]. *Food Rev Int*, 2020. DOI: 10.1080/87559129.2020.1791175
- [3] RAFFAN S, HALFORD NG. Acrylamide in food: Progress in and prospects for genetic and agronomic solutions [J]. *Ann Appl Biol*, 2019, 175(3): 259–281.
- [4] MOLLAKHALILI-MEYBODI N, KHORSHIDIAN N, NEMATOLLAHI A, *et al.* Acrylamide in bread: A review on formation, health risk assessment, and determination by analytical techniques [J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2021, 28: 15627–15645.
- [5] 战旭梅, 刘萍, 祁兴谱, 等. 高效液相色谱法测定高温加工食品中丙烯酰胺[J]. *食品安全质量检测学报*, 2020, 11(22): 8496–8501.
- ZHAN XM, LIU P, QI XP, *et al.* Determination of acrylamide in high temperature processed food by high performance liquid chromatography [J]. *J Food Saf Qual*, 2020, 11(22): 8496–8501.
- [6] MAAN AA, ANJUM MA, KHAN MKI, *et al.* Acrylamide formation and different mitigation strategies during food processing—A review [J]. *Food Rev Int*, 2020. DOI: 10.1080/87559129.2020.1719505
- [7] 刘树萍, 陆家慧, 苏晓文, 等. 植物提取物对油炸和焙烤类食品中丙烯酰胺抑制效果的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(3): 367–372.
- LIU SP, LU JH, SU XW, *et al.* Research progress on the inhibitory effect of plant extracts on acrylamide in fried and baked foods [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2021, 42(3): 367–372.
- [8] CANADA CA. Health Canada's proposal to enable the use of *L*-lysine monohydrochloride in certain processed snack foods [C]. CANADA H. Canada; List of Permitted Additives with Other Accepted Uses, 2019.
- [9] BASKAR G, AISWARYA R. Overview on mitigation of acrylamide in starchy fried and baked foods [J]. *J Sci Food Agric*, 2018, 98(12): 4385–4394.
- [10] PUNDIR CS, YADAV N, CHHILLAR AK. Occurrence, synthesis, toxicity and detection methods for acrylamide determination in processed foods with special reference to biosensors: A review [J]. *Trend Food Sci Technol*, 2019, 85: 211–225.
- [11] LIU Y, WANG P, CHEN F, *et al.* Role of plant polyphenols in acrylamide formation and elimination [J]. *Food Chem*, 2015, 186: 46–53.
- [12] DUDA-CHODAK A, TARKO T, SROKA P, *et al.* A review of the interactions between acrylamide, microorganisms and food components [J]. *Food Funct*, 2016, 7(3): 1282–1295.
- [13] JOZINOVIĆ A, ŠARKANJ B, AČKAR Đ, *et al.* Simultaneous determination of acrylamide and hydroxymethylfurfural in extruded products by LC-MS/MS method [J]. *Molecules*, 2019, 24(10): 1971.
- [14] LEE KJ, LEE GH, KIM H, *et al.* Determination of heterocyclic amines and acrylamide in agricultural products with liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. *Toxicol Res*, 2015, 31(3): 255–264.
- [15] OROIAN M, AMARIEI S, GUTT G. Acrylamide in Romanian food using HPLC-UV and a health risk assessment [J]. *Food Addit Contam B*, 2015, 8(2): 136–141.
- [16] HU Q, XU X, FU Y, *et al.* Rapid methods for detecting acrylamide in thermally processed foods: A review [J]. *Food Control*, 2015, 56: 135–146.
- [17] CHENG J, ZHANG S, WANG S, *et al.* Rapid and sensitive detection of acrylamide in fried food using dispersive solid-phase extraction combined with surface-enhanced Raman spectroscopy [J]. *Food Chem*, 2019, 276: 157–163.
- [18] DEMIRHAN B, ER-DEMIRHAN B, ERTAS N, *et al.* Rapid detection of acrylamide in food using Mn-doped Zn quantum dots as a room temperature phosphorescent probe [J]. *Food Anal Method*, 2018, 11(5): 1367–1373.

- [19] DANIALI G, JINAP S, SANNY M, *et al.* Effect of amino acids and frequency of reuse frying oils at different temperature on acrylamide formation in palm olein and soy bean oils via modeling system [J]. *Food Chem*, 2018, 245: 1–6.
- [20] VANDER-FELS KH, CAPUANO E, NGUYEN H, *et al.* Acrylamide and 5-hydroxymethylfurfural formation during baking of biscuits: NaCl and temperature–time profile effects and kinetics [J]. *Food Res Int*, 2014, 57: 210–217.
- [21] CLAUS A, MONGILI M, WEISZ G, *et al.* Impact of formulation and technological factors on the acrylamide content of wheat bread and bread rolls [J]. *J Cere Sci*, 2008, 47(3): 546–554.
- [22] SUMMA CA, DELA-CALLE B, BROHEE M, *et al.* Impact of the roasting degree of coffee on the *in vitro* radical scavenging capacity and content of acrylamide [J]. *LWT Food Sci Technol*, 2007, 40(10): 1849–1854.
- [23] LUND MN, RAY CA. Control of Maillard reactions in foods: Strategies and chemical mechanisms [J]. *J Agric Food Chem*, 2017, 65(23): 4537–4552.
- [24] BELGIN ES, PALAZOĞLU TK, GÖKMEN V, *et al.* Reduction of acrylamide formation in french fries by microwave pre-cooking of potato strips [J]. *J Sci Food Agric*, 2007, 87(1): 133–137.
- [25] SANSANO M, DELOS-REYES R, ANDRÉS A, *et al.* Effect of microwave frying on acrylamide generation, mass transfer, color, and texture in French fries [J]. *Food Bioprocess Technol*, 2018, 11(10): 1934–1939.
- [26] ANESE M, NICOLI MC, VERARDO G, *et al.* Effect of vacuum roasting on acrylamide formation and reduction in coffee beans [J]. *Food Chem*, 2014, 145: 168–172.
- [27] ANESE M, SUMAN M, NICOLI MC. Acrylamide removal from heated foods [J]. *Food Chem*, 2010, 119(2): 791–794.
- [28] BELKOVA B, HRADECKY J, HURKOVA K, *et al.* Impact of vacuum frying on quality of potato crisps and frying oil [J]. *Food Chem*, 2018, 241: 51–59.
- [29] ANTUNES-ROHLING A, CIUDAD-HIDALGO S, MIR-BEL J, *et al.* Ultrasound as a pretreatment to reduce acrylamide formation in fried potatoes [J]. *Innov Food Sci Emerg Technol*, 2018, 49: 158–169.
- [30] OSTERMEIER R, HILL K, DINGIS A, *et al.* Influence of pulsed electric field (PEF) and ultrasound treatment on the frying behavior and quality of potato chips [J]. *Innov Food Sci Emerg Technol*, 2021, 67: 102553.
- [31] SANSANO M, JUAN-BORRÁS M, ESCRICHE I, *et al.* Effect of pretreatments and air-frying, a novel technology, on acrylamide generation in fried potatoes [J]. *J Food Sci*, 2015, 80(5): T1120–T1128.
- [32] GÜLCAN Ü, CANDAL USLUC, MUTLU C, *et al.* Impact of inert and inhibitor baking atmosphere on HMF and acrylamide formation in bread [J]. *Food Chem*, 2020, 332: 127434.
- [33] WANG S, YU J, XIN Q, *et al.* Effects of starch damage and yeast fermentation on acrylamide formation in bread [J]. *Food Control*, 2017, 73: 230–236.
- [34] BAARDSETH P, BLOM H, SKREDE G, *et al.* Lactic acid fermentation reduces acrylamide formation and other Maillard reactions in French fries [J]. *J Food Sci*, 2006, 71(1): C28–C33.
- [35] KORNELIA TK, CHANDRA-HIOE MV, FRANK D, *et al.* Enhancing wheat muffin aroma through addition of germinated and fermented Australian sweet lupin (*Lupinus angustifolius* L.) and soybean (*Glycine max* L.) flour [J]. *LWT Food Sci Technol*, 2018, 96: 205–214.
- [36] KHORSHIDIAN N, YOUSEFI M, SHADNOUSH M, *et al.* Using probiotics for mitigation of acrylamide in food products: A mini review [J]. *Curr Opinion Food Sci*, 2020, 32: 67–75.
- [37] ZHANG D, LIU W, LI L, *et al.* Key role of peptidoglycan on acrylamide binding by lactic acid bacteria [J]. *Food Sci Biotechnol*, 2017, 26(1): 271–277.
- [38] ONISHI Y, PRIHANTO AA, YANO S, *et al.* Effective treatment for suppression of acrylamide formation in fried potato chips using *L*-asparaginase from *Bacillus subtilis* [J]. *Biotech*, 2015, 5(5): 783–789.
- [39] SALAZAR R, ARÁMBULA-VILLA G, LUNA-BÁRCENAS G, *et al.* Effect of added calcium hydroxide during corn nixtamalization on acrylamide content in tortilla chips [J]. *LWT Food Sci Technol*, 2014, 56(1): 87–92.
- [40] ZOU Y, HUANG C, PEI K, *et al.* Cysteine alone or in combination with glycine simultaneously reduced the contents of acrylamide and hydroxymethylfurfural [J]. *LWT Food Sci Technol*, 2015, 63(1): 275–280.
- [41] KALITA D, JAYANTY SS. Reduction of acrylamide formation by vanadium salt in potato French fries and chips [J]. *Food Chem*, 2013, 138(1): 644–649.
- [42] YUAN Y, SHU C, ZHOU B, *et al.* Impact of selected additives on acrylamide formation in asparagine/sugar Maillard model systems [J]. *Food Res Int*, 2011, 44(1): 449–455.
- [43] SUN Z, QIN R, LI D, *et al.* A novel bacterial type II *L*-asparaginase and evaluation of its enzymatic acrylamide reduction in French fries [J]. *Int J Biol Macromol*, 2016, 92: 232–239.
- [44] JIA M, XU M, HE B, *et al.* Cloning, expression, and characterization of *L*-asparaginase from a newly isolated *Bacillus subtilis* B11–06 [J]. *J Agric Food Chem*, 2013, 61(39): 9428–9434.
- [45] DIAS FFG, JUNIOR SB, HANTAO LW, *et al.* Acrylamide mitigation in French fries using native *L*-asparaginase from *Aspergillus oryzae* CCT 3940 [J]. *LWT Food Sci Technol*, 2017, 76: 222–229.
- [46] ASHKEZARI MH, SALEHIFAR M. Inhibitory effects of pomegranate flower extract and vitamin B₃ on the formation of acrylamide during the donut making process [J]. *J Food Meas Charact*, 2019, 13(1): 735–744.
- [47] VATTEM DA, SHETTY K. Acrylamide in food: A model for mechanism of formation and its reduction [J]. *Innov Food Sci Emerg Technol*, 2003, 4(3): 331–338.
- [48] HUANG Y, XIAO H, ZHANG L, *et al.* The effect of superfine tea powder addition on the acrylamide content of innovative Xinjiang nang products (tea nang) [J]. *Food Addit Contam A*, 2020, 37(8): 1–18.
- [49] JING Y, LI X, HU X, *et al.* Effect of buckwheat extracts on acrylamide formation and the quality of bread [J]. *J Sci Food Agric*, 2019, 99(14): 6482–6489.

- [50] GHAFOR K, YÜKSEL B, JUHAIMI FA, *et al.* Effect of frying on physicochemical and sensory properties of potato chips fried in palm oil supplemented with thyme and rosemary extracts [J]. *J Oleo Sci*, 2020, 69(10): 1219–1230
- [51] WANG L, ZHANG J, ZHANG W, *et al.* Role of carbohydrate-cleaving enzymes in phenolic mobilization of guava leaves tea during solid state bio-processing with *Monascus anka* and *Bacillus* sp. [J]. *Proc Biochem*, 2019, 82: 51–58.
- [52] EFSA. Scientific opinion on acrylamide in food [J]. *EFSA J*, 2015, 13(6): 4104. DOI: 10.2903/j.efsa.2015.4104
- [53] European Commission. Commission Regulation (EU) 2017/2158 of 20 November 2017 establishing mitigation measures and benchmark levels for the reduction of the presence of acrylamide in food [J]. *J Eur Union*, 2017, 304: 24–44.
- [54] BETHKE PC. Progress and successes of the specialty crop research initiative on acrylamide reduction in processed potato products [J]. *Am J Potato Res*, 2018, 95(4): 328–337.

- [55] 王翠竹. 丙烯酰胺与食品安全[J]. *食品安全导刊*, 2020, 34: 48–51.
WANG CZ. Acrylamide and food safety [J]. *Chin Food Saf Magaz*, 2020, 34: 48–51.

(责任编辑: 韩晓红 于梦娇)

作者简介



金山, 硕士, 工程师, 主要研究方向为食品加工与安全。
E-mail: jinshan@163.com



孙小凡, 硕士, 副教授, 主要研究方向为粮食、油脂与植物蛋白工程。
E-mail: sunxiaofan76@163.com