

生物抗氧化剂抑制丙烯酰胺形成的研究进展

刘 欣, 刘黄友, 袁 媛*

(吉林大学食品科学与工程学院, 长春 130062)

摘 要: 丙烯酰胺(acrylamide, AA)是富含碳水化合物的食物经高温加热后产生的对人类具有潜在致癌性的化合物。目前, 基于生物抗氧化剂天然、高效、低毒等特点, 采用生物抗氧化剂抑制食品中 AA 的形成已成为新的研究热点。本文主要综述了近年来生物抗氧化剂在加热过程中对美拉德模拟体系或食物中 AA 形成和消除的影响和机制。目前已经证实了多种生物抗氧化剂的可能作用机制, 包括防止脂质氧化、捕获羰基化合物、消除自由基、减少 3-氨基丙酰胺(3-APA)转化为 AA、与 AA 前体或其本身反应等。本文同时提出了展望, 希望对于美拉德模拟系统的研究转化为对真正食品基质的研究, 尽快将生物抗氧化剂有效、经济、广泛地应用于食品工业, 以减少膳食 AA 对人类健康的危害。

关键词: 生物抗氧化剂; 丙烯酰胺; 抑制机制

Research progress on acrylamide inhibition by biological antioxidants

LIU Xin, LIU Huang-You, YUAN Yuan *

(College of Food Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130062, China)

ABSTRACT: Acrylamide (AA) is a potential human carcinogen found in carbohydrate-rich foods that have been heated to high temperatures. At present, the use of bio-antioxidants to inhibit the formation of AA in food has become a hotspot based on the characteristics of nature, high efficiency and low toxicity. In the paper, the impacts and mechanisms of acrylamide formation and elimination in the heating process of Maillard model system or food by bio-antioxidants were reviewed. Some inhibition mechanisms were confirmed, including prevention of lipid oxidation, capture of carbonyl compounds, elimination of free radicals, reduction the conversion of 3-APA to acrylamide, and reaction with acrylamide precursors, etc. This paper also put forward prospects, hoping to translate the study of the Maillard simulation system into a study of the real food matrix, so as to widely use biological antioxidant in the food industry as soon as possible to reduce dietary harm of AA to human health.

KEY WORDS: biological antioxidant; acrylamide; inhibition mechanisms

1 引 言

2002年4月, 瑞典科学家首先在热加工食品中发现了丙烯酰胺(acrylamide, AA)污染物的出现^[1]。研究表明, AA

在小鼠和大鼠的几个器官中可诱导肿瘤, 因此被国际癌症研究机构指定为 2A 类“可能的人类致癌物”^[2]。Erkekoglu 等^[3]发现, AA 是一种通过抑制基于驱动蛋白的快速轴突运输和降低神经递质水平, 从而抑制神经传递的神经毒素,

基金项目: 国家自然科学基金项目(31571939)、吉林省科技厅自然科学基金(20150101119JC)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (31571939) and National Science Foundation of Jilin Province (20150101119JC)

*通讯作者: 袁媛, 教授, 主要研究方向为食品加工危害物形成及控制技术。E-mail: yuan_yuan@jlu.edu.cn

*Corresponding author: YUAN Yuan, Professor, College of Food Science and Engineering, Jilin University, No. 5333, Xi'an Road, Changchun 130062, China. E-mail: yuan_yuan@jlu.edu.cn

长时间低剂量的暴露下就可以观察到AA的神经毒性作用,表明膳食AA对人类,特别是儿童有害。

目前,对于食品热加工过程中AA形成的机制,已经提出了以下2种途径:天冬酰胺(asparagine, Asn)途径和丙烯醛途径^[4]。(1)Asn途径是指Asn在与还原糖[葡萄糖(Glc)及果糖(Fru)]的相互作用下生成AA的途径,这也是目前公认的最可能机制^[5]。Asn与还原糖反应,首先生成Schiff碱,然后通过以下2种途径形成AA:一是通过3-氨基丙酰胺(3-APA)的脱氨作用直接生成AA或通过脱羧Schiff碱和Amadori产物反应生成AA;二是由Schiff碱经过分子内环化形成喹啉酮,然后脱羧、重排形成Amadori产物,这一产物的C-N键在高温下断裂生成AA^[6]。(2)丙烯醛途径:丙烯醛可以在高温加热的油中,通过甘油的降解产生,被认为是AA形成的另一主要前体。丙烯醛进一步被氧化成丙烯酸,而其可在Asn的存在下诱导AA的形成^[7]。在该途径中,丙烯酸提供碳源,Asn提供氨基。此外,在氧气存在的情况下,过氧自由基可以引发AA的聚合^[8]。而对其抑制的可能机制包括:抑制关键中间产物(Schiff碱、3-APA等)的转化与形成、促进AA向其他小分子物质的转化、促进AA与其他物质发生加成、降解反应物等。

2 AA抑制方法

许多因素对于AA的形成都可能具有影响,如前体物质的浓度、反应pH值、水分含量、食物的状态以及工艺参数等,基于此现在广泛采用的AA抑制方法主要分为以下几个方面:添加Asn酶、调整工艺参数以及添加外源添加剂等。

2.1 添加Asn酶

Asn酶可降低游离Asn浓度,减少AA生成前体物质的浓度,目前是可以在工业上应用的AA抑制方法。在马铃薯和谷物制品中,Asn酶对AA抑制率高达90%,并且对产品感官性质没有影响^[9],是非常有效的AA抑制剂。

在姜饼制作中,将面团分别在25℃捏合30min和60min,室温放置48h后,在250℃(上部加热)和230℃(底部加热)的烘箱中烘烤5min,测得AA生成量均超过1.000mg/kg。当在烘烤之前加入Asn酶时,AA含量的降低超过97%,而姜饼的感官品质保持不变^[10]。

2.2 调整工艺参数

通过原料改性和热加工参数的优化可以降低食品中AA含量,比如原料中前体的改变、热加工方法的改变、pH的改变、原料发酵等^[11,12]。同时一些研究表明,使用上述配方可以保持食物的物理化学和感官性质不变^[13-15]。来自早餐谷物生产案例的数据表明,通过降低工艺温度和延长热处理时间,在保证产品质量的同时,可以降低约80%的AA含量^[16]。

2.3 添加外源添加剂

添加外源添加剂同样可以减少食品中AA的形成。已经证明许多食品添加剂如CaCl₂、半胱氨酸和甘氨酸等能有效抑制AA形成。将这些抑制剂与食品原料混合或将新鲜食品浸入含有抑制剂的溶液中不会显著影响加工技术,使得该方法在食品工业中是可以实现的^[17]。

但是,在美拉德低湿模拟系统中也发现了一些添加剂对AA形成的双重作用。谷氨酰胺的添加可以显著增加AA的形成和消除速率,而半胱氨酸的添加则显著降低AA产率(>99%),表明这些氨基酸可竞争性地抑制或促进模拟体系中Asn和Glc之间的相互作用^[18]。然而,糖、单糖或二糖类型的添加剂对AA的产生影响有限^[19]。因此,更安全、有效、稳定的AA抑制方法急需被研发出来。

3 生物抗氧化剂对AA的抑制

生物抗氧化剂较之合成抗氧化剂具有天然、高效、低毒等特点,因此广泛用于食品工业^[20]。目前,通过加入某些生物抗氧化剂来抑制或者减少AA的生成已成为AA控制的热点之一^[21]。

3.1 常用抑制AA产生的生物抗氧化剂

3.1.1 黄酮类

生物黄酮广泛存在于植物界,分为黄酮、黄酮醇、黄烷、黄烷醇、异黄酮、双氢黄酮、花色苷等10余个类别,是目前备受关注的植物化学素之一,具有多重生理和药理活性,特别是其出色的清除自由基、抗氧化的特性,是当今备受推崇的一类食品保健功能因子^[22]。

Zhang等^[23]发现,事先用浓度为0.1%和0.01%的竹叶提取物(主要含竹叶黄酮)浸泡薯片薯条,可以使炸薯片和炸薯条中AA减少74.1%和76.1%,且薯片和薯条的脆度及风味没有明显改变。樊星等^[24]研究表明,6种天然抗氧化剂对模拟体系中AA的抑制效果依次为:V_C>V_E>水飞蓟素提取物>迷迭香提取物>竹叶黄酮提取物>葛根黄酮提取物,最佳抑制率范围是82.54%~23.81%。在一定剂量范围内,AA的抑制率与它们的抗氧化活性呈正相关。Hedegaard等^[8]向小麦面团中加入1%水溶性迷迭香提取物(约40mg没食子酸)、迷迭香油和干迷迭香,发现与对照样品(不含迷迭香的小麦面包)相比,AA含量分别降低了62%、67%和57%。

3.1.2 多酚类

植物多酚(plant polyphenol)是多羟基酚类化合物的总称,广泛存在于蔬菜、水果、豆类、谷物类、茶等植物中。多酚的独特结构赋予了它一系列特有的化学性质,使其具有抗肿瘤、抗氧化、抗动脉硬化、防止冠心病与中风等心脑血管疾病以及抗菌等多种生理功能。目前植物多酚常作为天然的食品添加剂来改善食品质量,并且植物多酚对

AA 形成的抑制作用受到学术界的关注, 具有广阔的应用前景。

研究表明, 来自绿茶、肉桂和牛至的抗氧化提取物分别有效地将油炸马铃薯片中 AA 的形成降低了 62%、39% 和 17%^[24]。通过添加绿茶提取物, 在炸小鸡腿和鸡翅中也实现了 AA 含量的降低^[25]。Kotsiou 等^[26]将维生素 E 模拟物和几种酚酸(没食子酸、原儿茶酸、阿魏酸、咖啡酸)加入模拟反应体系中, 在反应前 20 min, AA 抑制率分别为 50%(阿魏酸和咖啡酸)和 70%(没食子酸、原儿茶酸和维生素 E 模拟物), 20 min 后 AA 的抑制率分别降至 40%(没食子酸、原儿茶酸)和 25%(维生素 E 模拟物和咖啡酸), 而阿魏酸则几乎没有抑制作用。Cheng 等^[27]测试了 6 种果实提取物对 Asn/Glc 模拟体系中 AA 形成的影响。结果表明, 苹果提取物对 AA 形成的抑制效果良好。

在 Asn/Glc 模拟体系中加入 VOO(初榨橄榄油)酚提取物, 在 2.2 mg/kg 的浓度下, 对 AA 的形成有抑制作用^[28]。在 Asn/Fru 的模拟体系中, 6 种多酚(咖啡酸、绿原酸、鞣花酸、表儿茶素、石榴多酚和酪醇)有效减少了 AA 的形成^[29]。GTE 和 GCE(主要成分是类黄酮和酚酸)分别以 0.25、0.5 和 1 g/100g 的浓度加入酵母圈中, 其中 0.5 和 1 g/100g 浓度的 GTE 降低了 AA 的形成, 0.25 和 0.5 g/100g 的 GCE 有效降低了 AA 的形成^[30]。据报道, 来自竹叶的抗氧化剂掺入热加工的曲奇时, 以浓度依赖的方式减少 AA 的形成^[31]。Ismial 等^[32]发现, 将阿魏酸、原儿茶酸、咖啡酸、没食子酸和儿茶素加入马铃薯片中, 可使 AA 含量减少 30%~98%。

Oral 等^[29]研究表明, 在 180 °C 加热 15 min, 加入的对香豆酸可引起美拉德模拟体系中 53% AA 的减少。后来 Xu 等^[33]研究表明, 在 160 °C 加热 30 min, 0.1 mmol 的对香豆酸也可有效抑制美拉德模拟体系中 82.69% AA 形成; 在油炸薯片中, 对香豆酸也有效减少了 66.2% AA 的形成。Huang 等^[34]研究表明, 黄烷醇及其衍生物可以有效减少 Asn/Glc 低湿模拟体系中 AA 的形成, 并且当黄烷醇和衍生物的添加水平为 100 μmol/L 时, 实现最大抑制率 59.9% 和 78.2%。

3.1.3 维生素类

维生素广泛存在于食物中, 在促进和维持人体健康过程中起着非常重要的作用。研究表明, 在 Glc 和氨的反应模型中, 加入 0.02~0.08 mol/L 的抗坏血酸能明显减少 AA 的形成^[35]。Zeng 等^[36]研究了 15 种维生素对 AA 形成的抑制作用, 结果发现水溶性维生素是良好的 AA 抑制剂, 脂溶性维生素只有微弱的作用。在 Glc/Asn 模拟体系中生物素、维生素 B₆、吡哆胺和 L-抗坏血酸等对 AA 形成的抑制率均大于 50%。在食品体系中, 烟酸和吡哆醛抑制效果最好, 对油炸土豆条中 AA 抑制率分别达到 51% 和 34%。另外一个研究也证实, 30 μmol/L 的 PM、PN、吡哆醛(pyridoxal, PL)以及 V_C 分别可以降低 38%、21%、8%

和 27% AA^[37]。

3.1.4 其他

Chang 等^[38]研究发现, 低分子量(50~190 kDa)壳聚糖可用于减轻 AA 的形成。Yuan 等^[39]研究了 NaHSO₃、半胱氨酸、抗坏血酸、大蒜素对 Glc/Fru-Asn 模拟体系中 AA 形成影响, 结果发现均有一定的抑制作用。Shimamura 等^[40]研究了日本辣根(*Wasabia japonica*)对 AA 形成的影响, 发现芥末根和叶可有效抑制 AA 形成, 同时还可以降低 AA 的基因毒性。

3.2 生物抗氧化剂对 AA 抑制的可能机制

3.2.1 防止脂质氧化

对于富含油脂的食物如油炸薯条、薯片来说, 脂质氧化是促进 AA 形成的重要因素。Kocadagli 等^[41]研究发现, 作为抗氧化剂的黄酮类化合物可以通过防止脂质氧化来减少 AA 的形成。据推测, 黄烷醇及其衍生物是通过捕获碳水化合物或防止脂质氧化来发挥它们的抗氧化性质以减少 AA 形成^[42]。

3.2.2 羰基化合物的捕获

据报道, 表儿茶素在甘氨酸/Glc 美拉德反应模型系统中可与 C₂、C₃ 和 C₄ 糖片段(包括乙二醛、丙酮醛、丙酮醇和赤藓糖)直接反应, 表明表儿茶素可以通过在 A 环的 C-6 和 C-8 位置的亲电芳香取代反应与活性羰基形成共价键来抑制 AA 形成^[43]。

从苹果提取的根皮素和根皮苷, 通过捕获具有反应活性的二羰基物质(例如丙酮醛和乙二醛)来抑制 AA 的产量。液相色谱-串联质谱(liquid chromatography-tandem mass spectrometry, LC-MS/MS)和核磁共振(nuclear magnetic resonance, NMR)数据显示, 关键活性位点位于 A 环的 C-3 或 C-5 位置, 证明邻二酚型化合物可有效降低 AA 的形成。并且由于苯上的羟基产生的邻-对-活化, A 环被认为比 B 环更具反应性^[44]。Hedegaard 等^[8]推测迷迭香对 AA 的抑制机制可能是其含有可以捕捉羰基类化合物的物质。

3.2.3 自由基反应

Hidalgo 等^[45]研究发现, 在有氧条件下体系中的 AA 比在无氧条件下降低地更快, 并认为这是自由基反应的结果, 即在加入没食子酸后在有氧条件下生成自由基, 它可以自身聚合也可以诱导 AA 聚合, 从而引起 AA 的减少。

3.2.4 减少 3-APA 向 AA 的转化

3-APA 可以在脱氨后直接转化为 AA。将不作任何处理的绿原酸和置于空气中氧化后的绿原酸分别和 3-APA 反应, 绿原酸在加热条件下均会消除一定量的 3-APA, 酚型状态的绿原酸消除了 14.66% 的 3-APA, 而绿原酸氧化后的产物在 160 °C 条件下能够消除近 76.82% 的 3-APA。因此绿原酸抑制 AA 形成的可能机制是绿原酸或其氧化产物与 3-APA 反应, 减少了 3-APA 向 AA 的转化^[46]。

3.2.5 与 AA 前体或其本身反应

Cheng 等^[47]从 128 °C 加热 60~180 min 的 Asn/Glc 模拟

体系中分离得到 2 个产物, 并通过 LC-MS/MS 和 NMR 鉴定它们的结构分别为 8-C-(E-AA)柚皮素和 6-C-(E-AA)柚皮素, 从而推测出柚皮素抑制 AA 形成的机制为柚皮素通过与 AA 的合成前体或其本身反应生成新的衍生物来抑制 AA 形成。这是到目前为止对于黄酮类物质抑制 AA 比较明确的作用机制研究。

对香豆酸在美拉德反应期间强烈抑制 AA 形成, 最有可能通过直接与 AA 前体反应并将它们转移到 2-(AA)香豆酸(2-PCA)。此外, 实验表明 AA 的抑制率与 2-PCA 的含量成正比, 因为其随着 2-PCA 的增加而增加。因此, 推断出 3-氧代丙酰胺可能是 AA 形成过程中的关键前体^[33]。烟酸作为 AA 清除剂能够通过迈克尔加成捕获 AA 以产生 1-丙酰胺-3-羧基吡啶, 从而减少 AA 的形成^[48]。Ou 等^[49]实验表明, 一些抗氧化剂不能有效破坏或抑制 AA 的合成, 有的甚至还有促进 AA 合成的作用; 但它们的氧化产物可以通过直接破坏 AA 或其合成前体天冬酰胺而起到抑制作用。Zeng 等^[50]研究表明, VB₃ 可以与 AA 前体物质或其本身反应生成加合物, 从而抑制 AA 形成, 其中与 AA 自身的反应为主要途径。

4 展 望

本文综述了一些对 AA 的形成具有抑制作用的生物抗氧化剂及其影响机制, 包括防止脂质氧化、捕获羰基化合物、消除自由基、减少 3-APA 转化为 AA、与 AA 前体或其本身反应等。

尽管此类研究已经取得了很大进展, 但仍然有许多问题亟待解决: (1)许多研究者仅仅考察这些抗氧化剂对 AA 形成的抑制作用, 而对其诸如整体感官特性、营养价值、微生物安全等方面的作用却鲜有涉及; (2)有关 AA 抑制机制的研究多数处于推测阶段, 这可能是对于目前的技术来说分离和纯化美拉德反应最终产物存在难度; (3)目前的研究多处于对美拉德模拟系统的研究, 而对于真正的食品基质的研究却很少, 应将生物抗氧化剂有效、经济的应用于食品工业, 以减少膳食 AA 对人类健康的危害。

参考文献

- [1] Tareke E, Rydberg P, Karlsson P, *et al.* Analysis of acrylamide, a carcinogen formed in heated foodstuffs [J]. *J Agric Food Chem*, 2002, 50(17): 4998–5006.
- [2] Capuano E, Fogliano V. Acrylamide and 5-hydroxymethylfurfural (HMF): a review on metabolism, toxicity, occurrence in food and mitigation strategies [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2011, 44(4): 793–810.
- [3] Erkekoglu P, Baydar T. Acrylamide neurotoxicity [J]. *Nutr Neurosci*, 2014, 17(2): 49–57.
- [4] Vinci RM, Mestdagh F, De Meulenaer B. Acrylamide formation in fried potato products -present and future, a critical review on mitigation strategies [J]. *Food Chem*, 2012, 133(4): 1138–1154.
- [5] Wolfram P. Minireview on the toxicity of dietary acrylamide [J]. *Food Chem Toxicol*, 2008, 46(4): 1360–1364.
- [6] Jin C, Wu XQ, Zhang Y. Relationship between antioxidants and acrylamide formation: a review [J]. *Food Res Int*, 2013, 51 (2): 611–620.
- [7] Yasuhara A, Tanaka Y, Hengel M, *et al.* Gas chromatographic investigation of acrylamide formation in browning model systems [J]. *J Agric Food Chem*, 2003, 51(14): 3999–4003.
- [8] Hedegaard R V, Granby K., Frandsen H, *et al.* Acrylamide in bread. Effect of prooxidants and antioxidants [J]. *Eur Food Res Technol*, 2008, 227(2): 519–525.
- [9] Mustafa TM, Vural G, Perry K, *et al.* Effects of formulation, extrusion cooking conditions, and CO₂ injection on the formation of acrylamide in corn extrudates [J]. *J Sci Food Agric*, 2014, 94(12): 2562–2568.
- [10] Ciesarova Z, Kukurova K, Bednarikova A, *et al.* Improvement of cereal product safety by enzymatic way of acrylamide mitigation [C]. *Czech J Food Sci*, 2009, 27(SI): S96–S98.
- [11] Lineback DR, Coughlin JR, Stadler RH. Acrylamide in foods: A review of the science and future considerations [J]. *Ann Rev Food Sci T*, 2012, 3: 15–35.
- [12] Zhang Y, Ren Y, Zhang Y. New research developments on acrylamide: Analytical chemistry, formation mechanism, and mitigation recipes [J]. *Chem Rev*, 2009, 109(9): 4375–4397.
- [13] Mizukami Y, Yoshida M, Isagawa S, *et al.* Acrylamide in roasted barley grains: Presence, correlation with colour and decrease during storage [J]. *Food Addit Contam Part A*, 2014, 31(6): 995–1000.
- [14] Morales G, Jimenez M, Garcia O, *et al.* Effect of natural extracts on the formation of acrylamide in fried potatoes [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2014, 58(2): 587–593.
- [15] Palazoglu TK, Coskun Y, Tuta S, *et al.* Effect of vacuum-combined baking of cookies on acrylamide content, texture and color [J]. *Eur Food Res Technol*, 2015, 240(1): 243–249.
- [16] Jensen BBB, Lennox M, Granby K, *et al.* Robust modelling of heat-induced reactions in an industrial food production process exemplified by acrylamide generation in breakfast cereals [J]. *Food Bioprod Process*, 2008, 86(C3): 154–162.
- [17] Pedreschi F, Mariotti MS, Granby K. Current issues in dietary acrylamide: formation, mitigation and risk assessment [J]. *J Sci Food Agric*, 2014, 94(1): 9–20.
- [18] De Vleeschouwer K, Van der Plancken I, Van Loey A, *et al.* Role of precursors on the kinetics of acrylamide formation and elimination under low moisture conditions using a multiresponse approach - Part II: competitive reactions [J]. *Food Chem*, 2009, 114(2): 535–546.
- [19] De Vleeschouwer K, Van der Plancken I, Van Loey A, *et al.* Role of precursors on the kinetics of acrylamide formation and elimination under low moisture conditions using a multiresponse approach-Part I: effect of the type of sugar [J]. *Food Chem*, 2009, 114(1): 116–126.
- [20] 乔凤云, 陈欣, 余柳青. 抗氧化因子和天然抗氧化剂研究综述[J]. *科技通报*, 2006, 22(3): 332–336.
- [21] Qiao FY, Chen X, Yu LQ. Studies on antioxidant and natural antioxidants [J]. *Chin Sci Bull*, 2006, 22(3): 332–336.
- [22] Kim CT, Hwang E, Lee HJ, *et al.* Reducing acrylamide in fried snack products by adding amino acids [J]. *Food Chem Toxicol*, 2005, 70(5): C354–C358.
- [23] Aron PM, Kennedy JA. Flavan-3-ols: Nature, occurrence and biological

- activity [J]. *Mol Nutr Food Res*, 2008, 52 (1): 79–104.
- [23] Zhang Y, Chen J, Zhang XL, *et al.* Addition of antioxidant of bamboo leaves (AOB) effectively reduces acrylamide formation in potato crisps and French fries [J]. *J Agric Food Chem*, 2007, 55(2): 523–528.
- [24] 樊星, 江秀霞, 邵美丽, 等. 天然抗氧化剂对丙烯酰胺的抑制及与氧化的关系[J]. *食品工业*, 2013, 34(11): 176–179.
- Fan X, Jiang XX, Shao ML, *et al.* Effects of natural antioxidants on inhibition of acrylamide and antioxidant activities [J]. *Food Ind*, 2013, 34(11): 176–179.
- [25] Demirok E, Kolsarici N. Effect of green tea extract and microwave pre-cooking on the formation of acrylamide in fried chicken drumsticks and chicken wings [J]. *Food Res Int*, 2014, 63(S1): 290–298.
- [26] Kotsiou K, Tasioula-Margari M, Capuano E, *et al.* Effect of standard phenolic compounds and olive oil phenolic extracts on acrylamide formation in an emulsion system [J]. *Food Chem*, 2011, 124(1): 242–247.
- [27] Cheng J, Chen X, Zhao S, *et al.* Antioxidant-capacity-based models for the prediction of acrylamide reduction by flavonoids [J]. *Food Chem*, 2015, 168: 90–99.
- [28] Kotsiou K, Tasioula-Margari M, Kukurova K, *et al.* Impact of oregano and virgin olive oil phenolic compounds on acrylamide content in a model system and fresh potatoes [J]. *Food Chem*, 2010, 123(4): 1149–1155.
- [29] Oral RA, Dogan M, Sarioglu K. Effects of certain polyphenols and extracts on furans and acrylamide formation in model system, and total furans during storage [J]. *Food Chem*, 2014, 142: 423–429.
- [30] Budryn G, Zyzelewicz D, Nebesny E, *et al.* Influence of addition of green tea and green coffee extracts on the properties of fine yeast pastry fried products [J]. *Food Res Int*, 2013, 50(1): 157–160.
- [31] Li D, Chen Y, Zhang Y, *et al.* Study on mitigation of acrylamide formation in cookies by 5 antioxidants [J]. *J Food Sci*, 2012, 77(11), C1144–C1149.
- [32] Ismail SA-MA, Ali RFM, Askar M, *et al.* Impact of pretreatments on the acrylamide formation and organoleptic evolution of fried potato chips [J]. *Am J Biochem Biotechnol*, 2013, 9(2): 90–101.
- [33] Xu X, An XN. Study on acrylamide inhibitory mechanism in Maillard model reaction: Effect of p-coumaric acid [J]. *Food Res Int*, 2016, 84: 9–17.
- [34] Huang MM, Wang Q, Chen X, *et al.* Unravelling effects of flavanols and their derivatives on acrylamide formation via, support vector machine modelling [J]. *Food Chem*, 2016, 221: 178–186.
- [35] Chen HX, Gu ZB. Effect of ascorbic acid on the properties of ammonia caramel colorant additives and acrylamide formation [J]. *J Food Sci*, 2014, 79(9): C1678–C1682.
- [36] Zeng X, Cheng KW, Jiang Y, *et al.* Inhibition of acrylamide formation by vitamins in model reactions and fried potato strips [J]. *Food Chem*, 2009, 116(1): 34–39.
- [37] Arribas LG, Morales FJ. Effect of pyridoxamine on acrylamide formation in a glucose/asparagine model system [J]. *J Agric Food Chem*, 2009, 57(3): 901–909.
- [38] Chang YW, Sung WC, Chen JY. Effect of different molecular weight chitosans on the mitigation of acrylamide formation and the functional properties of the resultant Maillard reaction products [J]. *Food Chem*, 2016, 199: 581–589.
- [39] 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.
- [40] Shimamura Y, Iio M, Urahira T, *et al.* Inhibitory effects of Japanese horseradish (*Wasabia japonica*) on the formation and genotoxicity of a potent carcinogen, acrylamide [J]. *J Sci Food Agric*, 2016, DOI 10.1002/jsfa.8055.
- [41] Kocadagli T, Goncuoglu N, Hamzalioglu A, *et al.* In depth study of acrylamide formation in coffee during roasting: Role of sucrose decomposition and lipid oxidation [J]. *Food Funct*, 2012, 3(9): 970–975.
- [42] Capuano E, Oliviero T, Açar OC, *et al.* Lipid oxidation promotes acrylamide formation in fat-rich model systems [J]. *Food Res Int*, 2010, 43(4): 1021–1026.
- [43] Totlani VM, Peterson DG. Epicatechin carbonyl-trapping reactions in aqueous Maillard systems: Identification and structural elucidation [J]. *J Agric Food Chem*, 2006, 54(19): 7311–7318.
- [44] Shao X, Bai N, He K, *et al.* Apple polyphenols, phloretin and phloridzin: New trapping agents of reactive dicarbonyl species [J]. *Chem Res Toxicol*, 2008, 21(10): 2042–2050.
- [45] Hidalgo FJ, Delgado RM, Zamora R. Role of mercaptans on acrylamide elimination [J]. *Food Chem*, 2010, 122(3): 596–601.
- [46] 江姗姗. 绿原酸对 Maillard 反应体系中丙烯酰胺和羟甲基糠醛形成的影响[D]. 广州: 暨南大学, 2013.
- Jiang SS. Effect of chlorogenic acid on the formation of acrylamide and hydroxymethylfurfural during maillard reaction [D]. Guangzhou: Jinan University, 2013.
- [47] Cheng KW, Zeng X, Tang YS, *et al.* Inhibitory mechanism of naringenin against carcinogenic acrylamide formation and nonenzymatic browning in Maillard model reactions [J]. *Chem Res Toxicol*, 2009, 22(8): 1483–1489.
- [48] Papamokos G, Dreyer J, Navarini L, *et al.* Trapping acrylamide by a Michael addition: A computational study of the reaction between acrylamide and niacin [J]. *Int J Quantum Chem*, 2014, 114(9): 553–559.
- [49] Ou SY, Shi JJ, Huang CH. Effect of antioxidants on elimination and formation of acrylamide in model reaction systems [J]. *J Hazard Mater*, 2010, 182(1–3): 863–868.
- [50] Zeng X, Kong RP, Cheng KW, *et al.* Direct trapping of acrylamide as a key mechanism for niacin's inhibitory activity in carcinogenic acrylamide formation [J]. *Chem Res Toxicol*, 2010, 23(4): 802–807.

(责任编辑: 姚 菲)

作者简介



刘 欣, 本科, 主要研究方向为食品质量与安全。

E-mail: 1797459468@qq.com



袁 媛, 教授, 主要研究方向为食品加工危害物形成及控制技术。

E-mail: yuan_yuan@jlu.edu.cn