

食品中丙烯酰胺的形成机理、检测方法 及控制措施研究进展

Research progress on formation mechanism, determination methods
and regulatory measure of acrylamide in food

柴晴晴^{1,2} 武文³ 刘鹏飞^{1,2} 李子松⁴ 王爱月⁴ 崔波^{1,2}

CHAI Qing-qing^{1,2} WU Wen³ LIU Peng-fei^{1,2} LI Zi-song⁴ WANG Ai-yue⁴ CUI Bo^{1,2}

(1. 齐鲁工业大学生物材料与绿色造纸国家重点实验室, 山东 济南 250353;

2. 齐鲁工业大学食品科学与工程学院, 山东 济南 250353; 3. 解放军第 960 医院,

山东 济南 250031; 4. 山东兴泉油脂有限公司, 山东 临沂 276600)

(1. State Key Laboratory of Biobased Material and Green Papermaking, Qilu University of Technology, Jinan, Shandong 250353, China; 2. School of Food Science and Engineering, Qilu University of Technology, Jinan, Shandong 250353, China; 3. 960 Hospital of the Liberation Army, Jinan, Shandong 250031, China; 4. Shandong Xingquan Oil Co., Ltd., Linyi, Shandong 276600, China)

摘要: 文章对近年来国内外有关食品中丙烯酰胺形成机理、检测方法及其控制措施的研究进展进行了综述, 并对其未来发展方向进行了展望。

关键词: 丙烯酰胺; 形成机理; 美拉德反应; 检测方法; 控制

Abstract: In this paper, the formation mechanism, detection methods and the potential strategies to reduce acrylamide concentration were reviewed. And it will be helpful to provide theoretical reference for controlling the formation of acrylamide in foods.

Keywords: acrylamide; formation mechanism; determination methods; control

丙烯酰胺是淀粉食品高温加工过程中产生的一种食品污染物, 是一种具有神经毒性、生殖毒性、免疫毒性和致癌性的有害物质^[1]。1994 年, 国际癌症研究所将其评定为 2A 类致癌物, 即“人类可能致癌物”^[2]。如何将食品

加工过程中丙烯酰胺含量控制在安全水平也是亟需解决的问题。文章拟结合近年来国内外相关研究, 对食品中丙烯酰胺的形成机理、检测方法和控制措施进行详细介绍, 旨在为切断或控制食品中丙烯酰胺形成有效措施提出提供依据。

1 丙烯酰胺的形成机理

食品中丙烯酰胺的形成是一个复杂的多阶段反应过程, 目前, 公认的理论是“食品热处理过程中丙烯酰胺的形成与美拉德(Maillard)反应有关, 其前体物质主要是还原糖与天冬酰胺^[3-4]。此外, 高油脂食物热加工过程中也可通过丙烯醛途径产生少量丙烯酰胺^[5]。美拉德反应期间丙烯酰胺的形成也支持这一理论^[3-4]。

1.1 天冬酰胺产生途径

Maillard 反应是发生在羰基化合物与氨基化合物之间的非酶促褐变反应, 是食品加工过程中产生风味的重要途径之一, 其反应过程分为 3 个阶段: 初期、中期和末期^[6]。初期阶段主要是还原糖与氨基化合物发生羰氨缩合及 Amadori 或 Heyns 分子重排, 而食品中丙烯酰胺的产生主要是在此阶段。研究^[3-4,7]发现, 将还原糖和天冬酰胺以相同比例混合, 并于 >100 °C 下加热一段时间, 反应体系中能检测到大量丙烯酰胺产生, 而 Zyzak 等^[8]的同位素(¹³C 和 ¹⁵N) 示踪研究结果也证明丙烯酰胺分子中的碳原子和氮原子均来源于天冬酰胺。Maillard 反应初期, 还原糖与天冬酰胺先高温脱水缩合生成具有高反应

基金项目: 山东省西部经济隆起带和省扶贫开发重点区域引进急需紧缺人才项目(编号:鲁发改重大办[2018]2978 号文); 山东省重点研发计划(编号:2019JZZY010722); 济南市“高校 20 条”资助项目(编号:2018GXRC004); 山东省自然科学基金(编号:ZR2019BC079)

作者简介: 柴晴晴, 女, 齐鲁工业大学讲师, 博士。

通信作者: 崔波(1971—), 男, 齐鲁工业大学教授, 博士,

E-mail: cuibopaper@163.com

收稿日期: 2021-01-29

活性的 Schiff 碱,并且可通过以下两种方式生成丙烯酰胺:① 经过 Amadori 分子重排生成 Amadori 产物,然后进一步发生脱水脱氨反应生成二羰基化合物,天冬酰胺和羰基化合物通过 Strecker 降解机制脱羧并脱氨,进而生成丙烯酰胺^[7]。② Schiff 碱先经过分子内环化反应生成咪唑酮,然后脱羧形成脱羧 Amadori 产物,而在高温作用下该产物的 C-N 键断裂,生成丙烯酰胺^[3]。

对于含有大量天冬酰胺的高碳水化合物食品,尤其是马铃薯块茎中的天冬酰胺,甚至可以占到游离氨基酸含量的 50% 以上,因此高温加工的马铃薯产品中丙烯酰胺含量相对较高^[8]。通过降低食品原料中其前体物质(还原糖和天冬酰胺)含量可以有效控制丙烯酰胺的形成。

1.2 丙烯醛产生途径

研究^[9]发现,在高脂肪食品的热处理过程中,丙烯醛也会产生丙烯酰胺。食品中的甘油三油酸酯在高温下热解生成丙烯醛,丙烯醛及其氧化产物丙烯酸均可与氨反应生成丙烯酰胺^[9],因此可通过选择不同种类的油脂来控制丙烯酰胺的形成^[10]。同时,丙烯酰胺也可在室温下通过丙烯醛途径形成,故一些低温加工的食品同样存在丙烯酰胺的污染问题。

2 丙烯酰胺的检测方法

热处理过程中, Maillard 反应赋予了食品独特的风味,同时也是高碳水化合物中丙烯酰胺形成的重要途径。随着丙烯酰胺形成机理和毒理学性质研究的不断深入,目前其在食品中检测方法的研究已成为食品安全检测领域的研究热点之一。由于食品系统的复杂性和食品中形成的丙烯酰胺含量低,色谱和质谱联用技术被广泛使用并成为检测丙烯酰胺的成熟方法。但随着分析技术的发展和运用,其检测方法也向多元化方向发展,如光谱法、生物传感器法、酶联免疫法等。

2.1 色谱法

2.1.1 液相色谱及其联用技术 液相色谱法(LC)的样品前处理不需要进行衍生化,是痕量分析物检测中应用较普遍的方法,其常用的有紫外(UV)和质谱(MS)两种检测器。丙烯酰胺是一种不含强生色基团的强极性分子,故在传统反相吸附剂中保留值低而与其他共萃取成分的分选效果差,且 LC-UV 检测的灵敏度和选择性均不高,所以 LC-UV 通常仅被用于干淀粉含量制品中较高含量的丙烯酰胺检测。而鉴于质谱检测器具有灵敏度高和选择性强的优点,LC-MS 通常被用于食品体系中低含量丙烯酰胺的检测^[11-13]。中国现行标准中液相色谱-质谱/质谱法(LC-MS/MS)是以¹³C₃标记的丙烯酰胺为内标溶液,水溶剂提取净化处理后用 LC-MS/MS 测定食品中丙

烯酰胺含量^[14]。Karasek 等^[15]以水作溶剂提取样品中的丙烯酰胺,通过两步固相萃取去除萃取液中干扰成分,使用高效液相色谱-串联质谱法(HPLC-MS/MS)对烤栗子和栗子制品中丙烯酰胺含量进行测定,其结果分别为 8~1 278, 4~159 μg/kg。Bortolomeazzi 等^[16]提出了一种利用 C₁₈、SCX 和 SAX 3 种吸收剂的混合物制备的固相萃取(SPE)小柱对水提萃取液进行快速纯化处理,采用 HPLC-MS/MS 测定烘焙咖啡中丙烯酰胺含量的方法,结果显示丙烯酰胺的回收率为 92%~95%,相对标准偏差(RSD, n=6) < 5%,检测限(LOD)和定量限(LOQ)分别为 5, 16 μg/kg。该方法样品前处理简单快速、灵敏度高、重复性好,能满足食品中低含量丙烯酰胺检测的需求,适用检测范围广,但自制固相萃取柱较麻烦,且成本相对较高。Tolgyesi 等^[17]建立的亲水作用色谱法-串联质谱(HILIC-MS/MS)法以乙腈-水-甲酸(V_{乙腈}: V_水: V_{甲酸}为 69:30:1)为萃取剂提取样品中的丙烯酰胺,离心后取上清液进行稀释过滤后即可进行定量检测(咖啡样品除外),该法利用高度有机洗脱液增加丙烯酰胺在液相中保留时间的同时可以排除杂质成分的干扰,大大增强了其检测灵敏度,而 d₃-丙烯酰胺内标物的添加可以消除基质效应的影响,结果显示丙烯酰胺的回收率为 101%~105%,RSD(n=6) < 7.6%,LOD 和 LOQ 分别为 8, 20 μg/kg。与上述其他方法不同,该方法中的提取液无需复杂的纯化处理过程,操作简单,能满足食品中丙烯酰胺的快速、高效检测的需求。

2.1.2 气相色谱及其联用技术 与液相色谱不同,气相色谱法需要对样品进行衍生化处理以增强丙烯酰胺的稳定性和挥发性,提高检测灵敏度。GB/T 5009.204-2014 采用稳定性同位素稀释技术检测食品中丙烯酰胺含量,在样品中加入¹³C₃标记的丙烯酰胺内标液,其水提取液利用基质固相分散萃取净化、溴试剂衍生,然后用 GC-MS/MS 的多反应离子监测(MRM)或 GC-MS 的选择离子监测(SIM)模式进行检测,该方法的 LOQ 为 10 μg/kg。Luo 等^[18]建立了一种以二甲亚砜为提取剂、9-羟基吨为衍生剂、同位素标记的 d₃-丙烯酰胺为内标物,采用 GC-MS 法测定烘焙、煎炸食品中丙烯酰胺含量的方法。结果表明样品的加标回收率为 90.1%~112.0%,RSD 为 2.3%~6.1%,LOD 为 0.7 μg/kg,该方法具有操作简单、高灵敏度和重复性好等优点,可用于各种加工食品中丙烯酰胺含量的测定。

2.2 生物传感器法

生物传感器是一种新的微量分析技术。其工作原理是分子识别元件与待测物体特异性结合并发生生化反应。产生的生物信息通过信号转换器转换成定量处理的光、电等信号,并由仪器放大输出,达到分析检测的目的。

的^[19]。目前常利用血红蛋白(Hb)和DNA将电化学分析与生物传感器进行结合,因其具有操作简单、选择性强、灵敏度高、响应迅速、重现性好和基本不受食品体系中其他成分干扰等优点,常被用于测定复杂食品体系中的丙烯酰胺含量^[20]。如Li等^[21]构建了一种修饰的Hb离子液体碳糊电极(Hb/CILPE)的电化学生物传感器,利用丙烯酰胺与Hb间的相互作用,检测食品中丙烯酰胺含量,其检测限可低至 5.0×10^{-12} mol/L($S/N = 3$)。Huang等^[22]构建了单链DNA修饰金电极(ssDNA/GE)的电化学生物传感器用于丙烯酰胺测定,其检测限为8.1 nmol/L,线性范围为0.4~200.0 μ mol/L。

2.3 酶联免疫法

酶联免疫法是一种利用抗原和抗体之间的高度特异性结合,通过检测酶催化底物产生的显色反应来检测分析物的方法,具有特异性高、操作简单、效率高等优点,已被广泛应用于食品检测领域。作为小分子,丙烯酰胺本身没有抗原决定簇和免疫原性^[23],不能与相应的单克隆抗体结合,因此丙烯酰胺经常与具有免疫反应的载体蛋白连接形成耦联,制备完整的抗原,然后通过免疫反应刺激抗原产生抗体。Preston等^[24]利用丙烯酰胺的3-巯基苯甲酸(3-MBA)衍生物作为半抗原与牛甲状腺球蛋白耦合以制备抗原,并在免疫的大白兔上纯化制备多克隆抗体,建立了通过检测丙烯酰胺的3-MBA衍生物实现对样品中丙烯酰胺进行定量的免疫分析法。Wu等^[25]针对4-巯基苯乙酸(4-MPA)衍生的丙烯酰胺制备了多克隆抗体,制备的抗体对该衍生物具有高度的结合亲和力,而丙烯酰胺易与4-MPA发生高衍生化反应,基于此建立了丙烯酰胺分析前衍生化竞争性间接酶联免疫分析法检测食品中丙烯酰胺含量的方法。与HPLC-MS/MS相比,该方法具有良好的准确性和可靠性,适用于食品中丙烯酰胺的低成本、快速筛查。

2.4 光谱法

目前丙烯酰胺检测常用的光谱法有比色法、紫外可见分光光度法和红外光谱法等。如胡沁沁等^[26]利用丙烯酰胺与谷胱甘肽之间的加成反应及金纳米颗粒的光学性质,建立了比色法用于丙烯酰胺的快速检测。郝亚楠等^[27]利用紫外分光光度法与HPLC法测定同一种样品中丙烯酰胺含量,其结果分别为0.705, 0.711 mg/kg,证明了紫外分光光度法具有较高的准确度。基于高特异性中/近红外信号剖面与监控模式识别技术,Wen^[28]将便携式红外光谱仪用于薯片中丙烯酰胺的快速筛查和含量测定,同时验证了该方法的可行性,且模型预测的丙烯酰胺含量与采用LC-MS/MS实际测定的丙烯酰胺含量之间具有良好的线性关系,其相关系数 >0.92 ,预测标准误差

为200~260 μ g/kg。

此外,近红外光谱与视觉反射成像的结合可用于丙烯酰胺的在线监测,实现丙烯酰胺高、低含量样品的实时分离^[29]。与目前常用的色谱法相比,虽然光谱法的灵敏度和精密度相对较低,但该方法具有操作简便、测量范围广和对仪器要求小等优点,适合丙烯酰胺的快速检测,便于在食品企业中推广应用。

3 食品中丙烯酰胺的控制方法

3.1 控制原料中丙烯酰胺前体物质的量

Yang等^[30]研究发现,薯条中丙烯酰胺生成量与还原糖浓度呈显著正相关(相关系数为0.652, $P \leq 0.01$),与天冬酰胺浓度呈正相关(相关系数为0.432, $P \leq 0.05$),故降低天冬酰胺和还原糖含量可以减少丙烯酰胺的形成。Muttucumaru等^[31-32]分析了马铃薯品种、贮藏时间和不同加工方式对还原糖、游离天冬酰胺和丙烯酰胺生成量的影响,同时比较了相同加工条件(160 $^{\circ}$ C, 20 min)下丙烯酰胺生成量和马铃薯中天冬酰胺及还原糖浓度的关系,结果表明不同品种的马铃薯中的还原糖和天冬酰胺含量均不同,且天冬酰胺和还原糖含量高的马铃薯经过高温加热处理后生成的丙烯酰胺含量较高。这进一步为通过选择不同的马铃薯,即控制还原糖和天冬酰胺含量来控制丙烯酰胺的生成提供了理论依据。

3.2 控制食品加工工艺

3.2.1 原料预处理 对原料进行浸泡处理,可以有效降低原料表面和内部的还原糖及天冬酰胺含量,从而控制丙烯酰胺的形成。天冬酰胺酶的添加可以分解其前体物质天冬酰胺,从而有效降低高温处理过程中丙烯酰胺生成量^[33-35]。Ismial等^[36]研究也表明利用盐溶液、L-半胱氨酸溶液及酸溶液对薯片进行热浸泡处理,炸薯片中丙烯酰胺的形成量可降低90%以上。Torang等^[37]用蒸馏水清洗去除土豆切片表面淀粉后,通过热水热烫、天冬酰胺酶(市售天冬酰胺酶和/或产朊假丝酵母天冬酰胺酶)溶液浸泡、热水热烫一天冬酰胺酶溶液浸泡、氯化钠和氯化钙溶液浸泡、柠檬酸溶液浸泡等方式在油炸前对薯片进行处理,再采用相同的条件进行油炸,分析不同前处理方式对炸薯片中丙烯酰胺生成量的影响,结果表明天冬酰胺酶浸泡和热烫处理均能有效降低丙烯酰胺生成量,且两种酶复合使用或热烫一天冬酰胺酶浸泡复合处理对丙烯酰胺形成的抑制效果显著,其中热烫一市售天冬酰胺酶复合处理可以将丙烯酰胺形成量降低95%。此外,柠檬酸、NaCl和CaCl₂溶液浸泡处理也能减少丙烯酰胺的形成,其中柠檬酸的抑制效果最佳,说明降低pH也是减少丙烯酰胺形成的有效途径^[37]。Genovese等^[38]研究表明与热烫处理相比,脉冲电场处理能更有效地抑制丙

烯酰胺的形成。

3.2.2 温度和控制及煎炸用油的选择 温度是影响美拉德反应的关键因素,也是影响丙烯酰胺形成的重要因素。Martinez 等^[39]用部分因子设计方法研究了温度、油炸时间、热烫处理和马铃薯片厚度对薯片中丙烯酰胺含量的影响,并采用化学计量学方法对薯片的加工工艺参数进行评价,结果表明温度和油炸时间对丙烯酰胺含量的贡献较大。Torang 等^[37]研究了不同油炸条件对土豆片中丙烯酰胺形成的影响,结果显示在 150, 165, 180 °C 下,丙烯酰胺的生成量均因油炸时间的延长而急剧增加,且其形成速率在 $t=1$ min 时达到最大,而随着油炸温度的升高,丙烯酰胺的生成速率也明显加快。Bertuzzi 等^[40]研究发现,咖啡焙烤过程中焙烤温度随时间(0~20 min)的延长而升高,而丙烯酰胺浓度呈先升高后降低的趋势,并在 10 min(175 °C 左右)时达到最高值,进一步说明了在咖啡焙烤过程中存在丙烯酰胺的形成和部分降解,同时也为通过控制加热时间和温度来降低食品中丙烯酰胺的含量提供了理论依据。

Lim 等^[41]研究了煎炸所用的 4 种植物油对甜薯薯片中丙烯酰胺含量的影响,结果表明在不饱和程度较低的油中油炸的甜薯薯片丙烯酰胺含量较低(1 443 $\mu\text{g}/\text{kg}$),而在饱和程度较高的油中油炸的甜薯薯片丙烯酰胺含量较高(2 019 $\mu\text{g}/\text{kg}$)。而 Zhang 等^[42]研究发现,不饱和脂肪酸含量高的煎炸油不会引起丙烯酰胺生成量的增加,丙烯酰胺的形成与煎炸油的传热系数有关,传热系数高的煎炸油会增加丙烯酰胺的形成量。因此,选择合适的煎炸用油也是控制丙烯酰胺形成的有效途径。

3.3 添加抑制剂

Gökmen 等^[43]在果糖—天冬酰胺模型体系中,研究了 150, 180 °C 下,阳离子对丙烯酰胺形成的影响,结果表明:二价阳离子几乎可完全阻止丙烯酰胺的形成,而一价阳离子仅可减少 50% 丙烯酰胺生成量。这可能与阳离子能阻止丙烯酰胺中间产物 Schiff 碱的形成有关。Açar 等^[44]的研究进一步表明添加阳离子可以有效控制热加工过程中丙烯酰胺的形成,如添加 1.0% 乳酸钙可将曲奇饼干中丙烯酰胺含量从(128 ± 10) $\mu\text{g}/\text{kg}$ 降至(24 ± 4) $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。

Constantinou 等^[45]考察了天冬酰胺—糯玉米淀粉美拉德反应模型体系中抗氧化剂(10 种酚类物质)对丙烯酰胺生成的影响,结果显示有 9 种酚类物质对丙烯酰胺的形成有抑制作用,且酚类物质的结构和浓度会影响其对丙烯酰胺形成的抑制效果。其作用机理可能是抗氧化剂可以抑制油脂氧化,减少羰基化合物的形成,从而抑制丙烯酰胺的形成。作为一种天然抗氧化剂,花青素对丙烯酰胺的形成具有一定的抑制作用^[46-47],这对于开发一种

安全的新型丙烯酰胺抑制剂,提高热加工食品的使用安全性,具有十分重要的指导作用。而 Qi 等^[48]的研究进一步发现,具有不同组成单元或链长的原花青素对丙烯酰胺的形成具有相似的抑制活性,其抑制效果很大程度上取决于原花青素的添加量而非其结构。

此外,在反应原料中加入一定量的蛋白质和氨基酸也会降低食品中的丙烯酰胺含量。Kim 等^[49]研究表明,游离氨基酸可以有效降低薯片中丙烯酰胺含量,其中以赖氨酸、甘氨酸和半胱氨酸的降低效果最显著,如添加 0.5% 的甘氨酸可使丙烯酰胺含量减少 70% 以上。然而,在配方中加入 2% 鹰嘴豆蛋白也会减少油炸薯片中丙烯酰胺含量^[50]。这可能是由于游离氨基酸与天冬酰胺竞争以防止丙烯酰胺的形成,而蛋白质可以与丙烯酰胺共价结合以降低其含量。因此,可以在不影响食品品质的前提下,添加一定量的抑制剂以降低食品中丙烯酰胺含量。

4 结论

丙烯酰胺广泛存在于高碳水化合物的油炸和焙烤产品中,丙烯酰胺引起的食品安全问题受到世界各国的广泛关注。目前,研究的难点主要是如何在不影响产品质量的情况下,切断或控制食品加工过程中丙烯酰胺的形成。所以,深入研究丙烯酰胺的检测方法和形成机理,提出降低食品中丙烯酰胺含量、消除食品安全隐患、保护消费者健康的有效措施,将是未来研究的主要内容之一。

参考文献

- [1] 张璐佳, 杨柳青, 王鹏璞, 等. 丙烯酰胺毒性研究进展[J]. 中国食品学报, 2018, 18(8): 274-283.
- [2] International Agency for Research on Cancer. Acrylamide[J]. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 1994, 60: 389-433.
- [3] MOTTRAM D S, WEDZICHA B L, DODSON A T. Food chemistry: Acrylamide is formed in the Maillard reaction[J]. Nature, 2002, 419(6 906): 448-449.
- [4] STADLER R H, BLANK I, VARGA N, et al. Food chemistry: Acrylamide from Maillard reaction products [J]. Nature, 2002, 419(6 906): 449-450.
- [5] YASUHARA A, TANAKA Y, HENGEL M, et al. Gas chromatographic investigation of acrylamide formation in browning model system[J]. Journal of Agriculture and Food Chemistry, 2003, 51(14): 3 999-4 003.
- [6] ELLIS G P. The Maillard reaction[J]. Advances in Carbohydrate Chemistry, 1959, 14(3): 63-134.
- [7] YAYLAYAN V A, WNOROWEKI A, LOCAS C P. Why asparagine needs carbohydrates to generate acrylamide[J]. J Agr Food Chem, 2003, 51: 1 753-1 757.

- [8] MOLINA-GA R, SANTOS C S P, MELOA A, et al. Acrylamide in chips and French fries: A novel and simple method using xanthrydrol for its GC-MS determination[J]. *Food Analytical Methods*, 2015, 8(6): 1 436-1 445.
- [9] YASUHARA A, TANAKA Y, HENGEL M, et al. Gas chromatographic investigation of acrylamide formation in browning model systems[J]. *J Agr Food Chem*, 2003, 51(14): 3 999-4 003.
- [10] LIM P K, JINAP S, SANNY M, et al. The influence of deep-frying using various vegetable oils on acrylamide formation in sweet potato (*Ipomoea batatas* L. Lam) chips[J]. *Journal of food science*, 2014, 79(1): T115-T121.
- [11] MARCHETTINI N, FOCARDI S, GUARNIERI M, et al. Determination of acrylamide in local and commercial cultivar of potatoes from biological farm[J]. *Food Chemistry*, 2013, 136(3/4): 1 426-1 428.
- [12] YUSÀ V, QUINTAS G, PARDO O, et al. Determination of acrylamide in foods by pressurized fluid extraction and liquid chromatography-tandem mass spectrometry used for a survey of Spanish cereal-based foods[J]. *Food Additives and Contaminants*, 2006, 23(3): 237-244.
- [13] TEKKELI S E K, ÖNAL C, ÖNAL A. A review of current methods for the determination of acrylamide in food products[J]. *Food Analytical Methods*, 2012, 5(1): 29-39.
- [14] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中丙烯酰胺的测定: GB/T 5009.204—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015: 1-4.
- [15] KARASEK L, WENZL T, ANKLAM E. Determination of acrylamide in roasted chestnuts and chestnut-based foods by isotope dilution HPLC-MS/MS[J]. *Food Chemistry*, 2009, 114(4): 1 555-1 558.
- [16] BORTOLOMEAZZI R, MUNARI M, ANESE M, et al. Rapid mixed mode solid phase extraction method for the determination of acrylamide in roasted coffee by HPLC-MS/MS[J]. *Food Chemistry*, 2012, 135(4): 2 687-2 693.
- [17] TOLGYESI A, SHARMA V K. Determination of acrylamide in gingerbread and other food samples by HILIC-MS/MS: A dilute-and-shoot method[J]. *Journal of Chromatography B*, 2020, 1136(121 933): 1-4.
- [18] LUO Lan, REN Yan, LIU Jie, et al. Investigation of a rapid and sensitive non-aqueous reaction system for the determination of acrylamide in processed foods by gas chromatography-mass spectrometry[J]. *Analytical Methods*, 2016, 8(30): 5 970-5 977.
- [19] 雷梓阁. 生物传感器的原理与应用[J]. *科技资讯*, 2015, 13(34): 23.
- [20] 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: 15-35.
- [21] LI Na, LIU Xiao-ying, ZHU Ji-he, et al. Simple and sensitive detection of acrylamide based on hemoglobin immobilization in carbon ionic liquid paste electrode [J]. *Food Control*, 2020, 109: 106764.
- [22] HUANG Shan, LU Shuang-yan, HUANG Chu-sheng, et al. An electrochemical biosensor based on single-stranded DNA modified gold electrode for acrylamide determination[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2016, 224: 22-30.
- [23] THOMAS N R. Hapten design for the generation of catalytic antibodies[J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 1994, 47(2/3): 345-372.
- [24] PRESTON A, FODEY T, ELLIOTT C. Development of a high-throughput enzyme-linked immunosorbent assay for the routine detection of the carcinogen acrylamide in food, via rapid derivatization pre-analysis [J]. *Analyticachimicaacta*, 2008, 608(2): 178-185.
- [25] WU Jing, SHEN Yu-dong, LEI Hong-tao, et al. Hapten synthesis and development of a competitive indirect enzyme-linked immunosorbent assay for acrylamide in food samples[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2014, 62(29): 7 078-7 084.
- [26] 胡沁沁, 傅迎春, 徐霞红, 等. 基于巯基-烯键加成比色法快速检测丙烯酰胺[C]// 中国化学会第29届学术年会. 北京: 中国化学会学术年会, 2014: 251.
- [27] 郝亚楠, 费永乐, 张文玲, 等. 紫外分光光度法快速测定油炸食品中丙烯酰胺的含量[J]. *粮食加工*, 2013(1): 73-75.
- [28] WEN Cong. Application of a portable infrared spectrometer for screening acrylamide content in commercial French fries[D]. Columbus: The Ohio State University, 2015.
- [29] PEDRESCHI F, SEGTMAN V H, KNUITSEN S H. On-line monitoring of fat, dry matter and acrylamide contents in potato chips using near infrared interactance and visual reflectance imaging[J]. *Food Chemistry*, 2010, 121(2): 616-620.
- [30] YANG Y, ACHAERANDIO I, PUJOLÀ M. Influence of the frying process and potato cultivar on acrylamide formation in French fries[J]. *Food Control*, 2016, 62: 216-223.
- [31] MUTTUCUMARU N, POWERS S J, ELMORE J S, et al. Evidence for the complex relationship between free amino acid and sugar concentrations and acrylamide-forming potential in potato[J]. *Annals of Applied Biology*, 2014, 164(2): 286-300.
- [32] MUTTUCUMARU N, POWERS S J, ELMORE J S, et al. Acrylamide-forming potential of potatoes grown at different locations, and the ratio of free asparagine to reducing sugars at which free asparagine becomes a limiting factor for acrylamide formation[J]. *Food Chemistry*, 2017, 220: 76-86.
- [33] ANESE M, QUARTA B, FRIAS J. Modelling the effect of asparaginase in reducing acrylamide formation in biscuits[J]. *Food Chemistry*, 2011, 126(2): 435-440.
- [34] XU F, ORUNA-CONCHA M J, ELMORE J S. The use of asparaginase to reduce acrylamide levels in cooked food[J]. *Food Chemistry*, 2016, 210: 163-171.
- [35] HASHIM M N M, TALIB A, YAJI E L A, et al. The effect of frying on browning, acrylamide and 5-hydroxymethylfurfural formation on Malaysian curry puff skin treated with L-asparaginase[J].

- Food Science and Biotechnology, 2021, 30(1): 149-158.
- [36] ISMIAL S A M A, ALI R F M, ASKAR M, et al. Impact of pre-treatments on the acrylamide formation and organoleptic evolution of fried potato chips[J]. American Journal of Biochemistry and Biotechnology, 2013, 9(2): 90-101.
- [37] TORANG A, ALEMZADEH I. Acrylamide reduction in potato crisps using: Asparaginase from *Candida utilis*, commercial asparaginase, salt immersion, and pH treatment[J]. International Journal of Engineering, 2016, 29: 879-886.
- [38] GENOVESE J, TAPPI S, LUO W, et al. Important factors to consider for acrylamide mitigation in potato crisps using pulsed electric fields[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2019, 55: 18-26.
- [39] MARTINEZ E, RODRIGUEZ J A, MONDRAGON A C, et al. Influence of potato crisps processing parameters on acrylamide formation and bioaccessibility[J]. Molecules, 2019, 24(21): 3 827.
- [40] 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: 125372.1-125372.6
- [41] LIM P K, JINAP S, SANNY M, et al. The influence of deep-frying using various vegetable oils on acrylamide formation in sweet potato (*Ipomoea batatas* L. Lam) chips[J]. Journal of Food Science, 2014, 79(1): T115-T121.
- [42] ZHANG Hao, ZHANG Hui, CHENG Li-lin, et al. Influence of deep-frying using various commercial oils on acrylamide formation in French fries[J]. Food Additives & Contaminants: Part A, 2015, 32(7): 1 083-1 088.
- [43] GÖKMEN V, ŞENYUVA H Z. Acrylamide formation is prevented by divalent cations during the Maillard reaction [J]. Food Chemistry, 2007, 103(1): 196-203.
- [44] AÇAR Ö Ç, POLLIO M, DI MONACO R, et al. Effect of calcium on acrylamide level and sensory properties of cookies[J]. Food and Bioprocess Technology, 2012, 5(2): 519-526.
- [45] CONSTANTINOU C, KOUTSIDIS G. Investigations on the effect of antioxidant type and concentration and model system matrix on acrylamide formation in model Maillard reaction systems[J]. Food Chemistry, 2016, 197: 769-775.
- [46] 云少君, 霍相君, 李光宇, 等. 紫米原花青素对丙烯酰胺生成的抑制作用[J]. 农产品加工, 2020(6): 11-13, 16.
- [47] 刘健南, 王小博. 黑枸杞花青素抑制曲奇饼干中丙烯酰胺效果的研究[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(9): 146-150.
- [48] QI Ya-jing, ZHANG Hao, WU Gang-cheng, et al. Mitigation effects of proanthocyanidins with different structures on acrylamide formation in chemical and fried potato crisp models[J]. Food Chemistry, 2018, 250: 98-104.
- [49] KIM C T, HWANG E S, LEE H J. Reducing acrylamide in fried snack products by adding amino acids[J]. Journal of Food Science, 2005, 70(5): C354-C358.
- [50] VATTEM D A, SHETTY K. Acrylamide in food: A model for mechanism of formation and its reduction [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2003, 4(3): 331-338.
-
- (上接第 186 页)
- [7] ZAHRA D, MOHAMMAD S, MEHDI K. Effects of pumpkin powder addition on the rheological, sensory, and quality attributes of Taftoon bread[J]. Cereal Chemistry, 2020, 97(5): 904-911.
- [8] 李彦坡, 徐静, 王青波, 等. 甬柑南瓜果酒的研制[J]. 食品与机械, 2012, 28(4): 217-221.
- [9] XU Fen, HU Hong-hai, LIU Qian-nan, et al. Rheological and micro-structural properties of wheat flour dough systems added with potato granules[J]. International Journal of Food Properties, 2017, 20(s1): 1 145-1 157.
- [10] 肖东, 周文化, 陈帅, 等. 亲水多糖对鲜湿面货架期内水分迁移及老化进程的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(18): 298-303.
- [11] TAN Xiao-yan, LI Xiao-xi, CHEN Ling, et al. Effect of heat-moisture treatment on multi-scale structures and physicochemical properties of breadfruit starch[J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 161: 286-294.
- [12] 石晶红, 郭淑文, 李云玲, 等. 豆粉对小麦粉粉质特性和糊化特性的影响[J]. 食品与机械, 2020, 36(9): 50-54.
- [13] 李勇, 周文化, 李彦, 等. 板栗—小麦混合粉的流变学和热力学特性[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(2): 1-5.
- [14] PTASZEK A, BERSKI W, PTASZEK P, et al. Viscoelastic properties of waxy maize starch and selected non-starch hydrocolloids gels[J]. Carbohydrate Polymers, 2008, 76(4): 567-577.
- [15] 陶虹伶, 王丹, 马宁, 等. 松茸粉对面团流变特性及饼干品质的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(5): 51-56.
- [16] WU Ye-jun, YAN Bo-wen, ZHOU Juan, et al. Effects of sourdough on improving the textural characteristics of microwave-steamed cake: A perspective from dielectric properties and water distribution[J]. Journal of Food Science, 2020, 85(10): 3 282-3 292.
- [17] JASIM A, LINU T, AL-HAZZA A. Effects of frozen storage on texture, microstructure, water mobility and baking quality of brown wheat flour/ β -glucan concentrate Arabic bread dough[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2021, 15(2): 1 258-1 269.
- [18] 范珈璇, 裘清扬, 王金荣, 等. 青稞 β -葡聚糖对冷冻熟面品质的影响[J]. 食品与机械, 2018, 34(12): 115-119, 146.
- [19] 刘锐, 武亮, 张影全, 等. 基于低场核磁和差示量热扫描的面条面团水分状态研究[J]. 农业工程学报, 2015, 31(9): 288-294.
- [20] 屈展平, 任广跃, 张迎敏, 等. 马铃薯淀粉—小麦蛋白共混体系的相互作用及对复合面条性质的影响[J]. 食品与机械, 2020, 36(1): 72-78.
- [21] 刘卫光. 添加玉米粉对油条品质的影响及其作用机理研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018: 62.