

中药材及食品中丙烯酰胺的检测及抑制方法的研究进展

李亚丽¹, 刘晓徐², 逢世峰¹, 郭靖¹, 王英平^{1*}

(1. 中国农业科学院特产研究所, 长春 130122; 2. 中国人民解放军空军航空大学飞行基础训练基地, 长春 130022)

摘要: 丙烯酰胺是一种有毒化合物, 具有潜在致癌、遗传、神经、生殖和发育毒性。据文献报道, 长期接触丙烯酰胺可严重影响人体健康。中药材及食品中富含氨基酸和还原糖等物质, 为丙烯酰胺的生成奠定了物质基础; 中药材及食品的加工过程, 为丙烯酰胺的生成奠定了条件基础。所以丙烯酰胺在中药材及食品中普遍存在。研究丙烯酰胺的毒性、检测、形成和抑制(消除)方法, 对优化中药材及食品加工工艺、提高中药材及食品的质量和食用安全水平具有科学指导意义。本文对丙烯酰胺的毒性、检测和抑制方法进行总结归纳, 并对目前检测和抑制方法进行比较和展望, 以期为中药材及食品的科学安全加工提供参考。

关键词: 中药材; 食品; 丙烯酰胺; 分离纯化; 分析方法

Research progress on detection and inhibition methods of acrylamide in Chinese traditional medicines and foods

LI Ya-Li¹, LIU Xiao-Xu², PANG Shi-Feng¹, GUO Jing¹, WANG Ying-Ping^{1*}

(1. *Institute of Special Wild Economic Animals and Plants, Chinese Academy of Agriculture Sciences, Changchun 130122, China*; 2. *Flight Foundation of Training Base, Aviation University of Air Force Army, Changchun 130022, China*)

ABSTRACT: Acrylamide is a toxic compound, which is commonly considered as a genotoxin, neurotoxin, reproductive and developmental toxins and probable carcinogen. It is reported that long-term exposure to acrylamide can seriously affect human health. Acrylamide is usually occurred in Chinese herbal medicines and foods because the presence of a mount of reducing sugars and amino acids, and the processing process for them. The investigations on the toxicity, detection, formation and inhibition (elimination) methods of acrylamide are very important for optimizing the processing craft and improving the quality and safety level of Chinese herbal medicines and foods. The toxicity, detection and inhibition (elimination) methods for acrylamide were summarized in this paper, and the current detection and suppression methods were compared and expected, so as to provide references for the processing of Chinese herbal medicines and foods.

KEY WORDS: Chinese traditional medicines; foods; acrylamide; separation and purification; analytical methods

基金项目: 国家自然科学基金委青年科研基金(31401606)、吉林省科技厅医药专项(20140311033YY)、吉林省科技厅青年科研基金(20150520131JH)和长春市科技攻关专项(14KG059)

Fund: National Science Foundation for Youths of China (No. 3140101925), the Jilin Province Science Foundation for Youths and medicine (No. 20150520131JH and 20140311033YY) and the Project of Changchun Key Technologies Research & Development Program (No.14KG059).

*通讯作者: 王英平, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为中药质量评价, E-mail: Yingpingw@126.com.

*Corresponding author: WANG Ying-Ping, Researcher, Ph.D Supervisor, Institute of Special Wild Economic Animals and Plants, Chinese Academy of Agriculture Sciences, No. 4899 Juye Steet, Changchun 130112, China. E-mail: Yingpingw@126.com

1 引言

丙烯酰胺(acrylamide, ACR)是一种不饱和酰胺, 化学式为 $\text{CH}_2=\text{CHCONH}_2$, 具有较高的反应活性。人体可通过消化道、呼吸道、皮肤黏膜等多种途径接触并吸收丙烯酰胺。丙烯酰胺被国际癌症研究机构(International Agency for Research on Cancer, IARC)划分为“2类致癌物”, 具有潜在的致癌性、遗传毒性、神经毒性、生殖和发育毒性。自从2002年瑞典国家食品管理局(State Food Administration, SFA)首次提出, 丙烯酰胺广泛存在于热加工食品中^[1,2], 之后中药材及食品保存和加工过程中丙烯酰胺的安全性引起了世界范围内科研工作者的的高度重视。研究丙烯酰胺的毒性、检测、形成和抑制(消除)方法对优化中药材及食品保存和加工工艺, 提高中药材及食品质量和食用安全水平具有科学指导意义。

2 丙烯酰胺的毒性

丙烯酰胺是一种潜在的有毒化合物, 具有潜在的致癌、遗传、神经、生殖和发育毒性。Mesias等^[3]研究发现, 人体对咖啡中丙烯酰胺的安全剂量为0.2 mg/kg。

2.1 丙烯酰胺的致癌性

流行病学研究表明丙烯酰胺与肾癌^[4]、子宫内膜癌^[5]及头颈部肿瘤有关^[6], 与乳癌、脑瘤、膀胱癌、前列腺癌、肺癌及消化道肿瘤等无关^[7-9]。对摄食丙烯酰胺含量高的食物的人群研究发现, 每年都有一定数量的人群由于丙烯酰胺的致癌性而丧生^[10]。

2.2 丙烯酰胺的遗传毒性

丙烯酰胺可引起哺乳动物体细胞和生殖细胞的基因突变和染色体异常, 有研究证明丙烯酰胺的代谢产物环氧丙酰胺是其致突变活性物质。Besaratina等^[11]研究发现细胞经低浓度丙烯酰胺处理后能引起cII基因突变, 而且具有剂量依赖性。

2.3 丙烯酰胺的神经毒性

研究表明暴露于丙烯酰胺可引起接触人群或动物产生神经毒性危害。近年来, 大量研究致力于探讨丙烯酰胺的神经毒性机制, 如加合物的形成、能量代谢异常、轴浆运输损伤、神经末梢损伤及凋亡等, 但具体机制尚未阐明^[12]。

2.4 丙烯酰胺的生殖和发育毒性

丙烯酰胺的生殖毒性的可能机制包括丙烯酰胺通过与DNA形成烷化物以及通过氧化损伤来影响雄性生殖。周继等^[13]按GB15193-94中有关方法对丙烯酰胺的安全性进行了测试, 结果发现丙烯酰胺对18个月大鼠各项观察指标显现出毒副作用。杨媛媛等^[14]研究丙烯酰胺对小鼠精子的毒性作用, 结果发现丙烯酰胺染毒后精子畸形类型主要

表现在头部。

3 丙烯酰胺的提取分离及测定方法

3.1 丙烯酰胺的提取分离

丙烯酰胺是极性较强的小分子物质, 一般采用水或极性强的有机溶剂萃取, 目前用于萃取的溶剂主要包括: 水、甲醇、乙醇、乙酸乙酯、正丙醇和二氯甲烷-乙醇等^[15]。

3.1.1 液-液萃取

因为丙烯酰胺在水中的溶解度最大, 而且水同其他溶剂相比具有绿色经济的优势, 所以水是提取丙烯酰胺应用最广泛的试剂之一。然而, 丙烯酰胺在酸性溶液中更加稳定, 因此美国食品药品监督管理局建议用含0.1%的甲酸水溶液萃取样品。样品中如出现乳化现象影响样品的测定结果, 可以在萃取前加入一定量的NaCl水溶液用以破乳^[16]。

3.1.2 加速溶剂提取法

加速溶剂萃取(accelerated solvent extraction, ASE)的方法由于具有溶剂用量少、快速、基体影响小、萃取效率高和选择性好等优点而被广泛地应用于样品的前处理过程。Cavalli等^[17]用ASE法萃取食品中的丙烯酰胺, 比较了以纯水和含甲酸的水溶液作为提取溶剂的提取效率, 结果发现采用纯水萃取时获得的稳定性较差, 而采用甲酸水溶液萃取时回收率较低。

3.1.3 索氏提取法

索氏提取法是连续从固体物质中萃取化合物的有效提取方法。Pederen等^[18]采用甲醇对土豆片中丙烯酰胺进行长时间的连续索氏提取。此方法不仅能达到完全提取的目的, 还解决了土豆样品测定中容易产生胶体的问题。但丙烯酰胺的形成不排除发生在长时间索氏回流提取过程中。

3.1.4 固相微萃取

固相微萃取(solid phase microextraction, SPME)是集采集、萃取、浓缩甚至是进样于一体的样品处理新技术, 可与气相色谱-质谱联用仪(gas chromatography-mass spectrometer, GC-MS)、高效液相色谱-质谱联用仪(high performance liquid chromatography-mass spectrometry, HPLC-MS)等联用。李辉等^[19]用水提取食品中丙烯酰胺, 采用固相萃取小柱对样品液进行纯化, 以二极管阵列高效液相色谱法测定其含量。结果表明, 固相微萃取具有操作简单、干扰少及快速准确等特点, 可满足食品中痕量丙烯酰胺前处理的要求。

3.2 丙烯酰胺的分析方法

3.2.1 色谱法

(1) 液相色谱法

丙烯酰胺是强极性分子, 传统反相色谱法保留值低, 导致其与杂质物质分离效果差。Lee等^[20]建立液相色谱-串联质谱方法测定农产品中丙烯酰胺含量, 结果检测限小

于 3.1 ng/g。Omar 等^[21]建立以 Al_2O_3 作为固相萃取剂和 HPLC-MS 方法检测食品中丙烯酰胺。结果表明, 检测限可达 2.91 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。Can 等^[22]建立 HPLC-DAD 方法检测传统食品和非传统食品中丙烯酰胺含量, 结果表明传统食品中丙烯酰胺含量相对较低。

(2) 气相色谱法

气相色谱-质谱法分析丙烯酰胺前需要对其进行适当的衍生以改善其稳定性和挥发性。目前已经发展的衍生方法主要包括溴化法、2-巯基苯甲酸法、BSTFA 法以及 PFPTH 衍生法。表 1 对其衍生过程做了简要总结。Omar 等^[23]建立正硅酸乙酯、甲基三甲氧基硅烷(MTMS-TEOS) (dispersive solid phase extraction, DSPE)萃取几种食品中

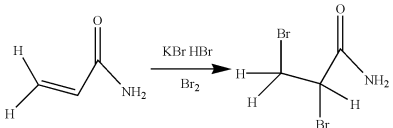
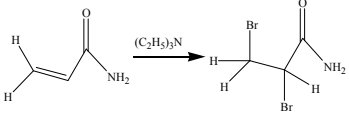
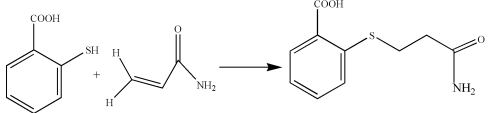
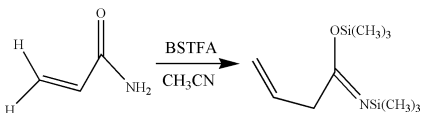
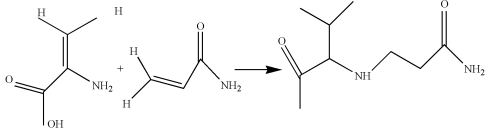
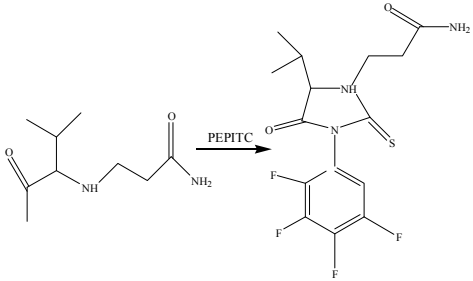
的丙烯酰胺并采用气相-质谱法分析, 线性范围为 50~1000 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 检测限为 9.1 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。Mo 等^[24]建立 GC-MS/MS 方法检测发酵食品、香味和相关食品中丙烯酰胺含量, 可得到较满意的结果。

3.2.2 毛细管电泳法

毛细管电泳法对被分析成分的提取、纯化及衍生等预处理没有严格的要求, 所以操作过程相对简单。韩康等^[10]建立毛细管电泳方法成功实现焦山楂中丙烯酰胺的检测, 线性范围为 0.50~50.00 mg/L, 检测限可达 0.10 mg/L。Tezcan 等^[28]将非水毛细管电泳引入二极管阵列检测中, 进一步提高了丙烯酰胺在 210 nm 处的紫外吸收灵敏度。

表 1 丙烯酰胺主要衍生方法和衍生产物

Table 1 The main derivative methods and derivatives of acrylamide

序号	衍生方法	衍生产物	衍生方程	文献
1	溴化衍生法	2,3-二溴丙酰胺 (2,3-DBPA)		[25]
		2-溴丙酰胺 (2-BPA)		[25]
2	2-巯基苯甲酸衍生法	2-巯基苯甲酸衍生丙酰胺		[26]
3	N,O-双三甲基硅烷基-三氟乙酰胺衍生法	N,O-双三甲基硅烷基-丙酰胺 (BTMSA)		[23]
4	五氟苯基异硫氰酸酯衍生法	烯酰胺-缬氨酸加合物		[27]
		五氟苯基异硫氰酸酯(PFPTH)		[27]

3.2.3 荧光光谱法

荧光光谱由于操作简便和反应灵敏而被广泛应用。Hu等^[29]建立基于量子点-聚合物的荧光传感方法检测土豆片中丙烯酰胺,线性范围为 $3.5 \times 10^{-5} \sim 3.5$ g/L,检测限为 3.5×10^{-5} g/L。Liu等^[30]应用简单而快速的荧光法研究了热处理食品中丙烯酰胺的测定。在测定过程中,丙烯酰胺通过霍夫曼降解反应生成乙烯胺,当乙烯胺在反应时会生成在480 nm能产生强烈荧光发射的吡咯啉酮,此方法的检出限可达0.015 $\mu\text{g/mL}$ 。

3.2.4 酶联免疫分析法

酶联免疫分析法是将特异的抗原-抗体免疫学反应和酶学催化反应相结合,以酶促反应的放大作用来显示初级免疫反应。Singh等^[31]发展间接竞争酶联免疫法检测食品和水中的丙烯酰胺,建立的方法灵敏度极高,检测食品和水检测限分别为5.0 ng/g和0.1 $\mu\text{g/L}$ 。

3.2.5 电化学法

电化学由于操作简便,检测成本低而被广泛应用于中药材和食品的分析检测中。Wang等^[32]建立基于对巯基苯胺印迹聚合物-金纳米粒子修饰电极的方法电化学检测丙烯酰胺。线性范围为 $1 \times 10^{-12} \sim 1 \times 10^{-7}$ mol/L,检测限可达 0.5×10^{-12} mol/L。Huang等^[33]建立基于单链DNA修饰金电极的差分脉冲伏安法应用于丙烯酰胺的检测,结果线性范围为0.4~200 $\mu\text{mol/L}$,检测限为8.1 nmol/L。

4 丙烯酰胺的形成

目前研究表明,对于丙烯酰胺的形成大概认为有以下4种途径:(1)还原糖和天冬酰胺等氨基酸通过Maillard反应生成,是大量的丙烯酰胺形成的主要途径^[34];(2)食品中的油脂、蛋白质和碳水化合物等成分在高温条件下反应,生成丙烯醛,进而形成丙烯酰胺,是另一途径;(3)脂肪、蛋白质和碳水化合物的高温分解会产生大量的小分子醛如乙醛、甲醛等,它们在适当的条件重新化合生成丙烯醛,进而生成丙烯酰胺;(4) α -丙氨酸和 β -丙氨酸生成丙烯酰胺。影响丙烯酰胺生成的因素包括:温度、时间、游离氨基酸和还原糖的种类、pH、褐变程度和水含量等^[35]。Przygodzka等^[36]研究发现,在小麦和黑麦面包烘烤过程中温度是影响丙烯酰胺生成的最主要因素之一,其次是烘烤时间。

5 丙烯酰胺的抑制

目前抑制食品中丙烯酰胺产生的研究主要围绕控制原料中的天门冬酰胺和还原糖含量、调整加工工艺和添加抑制剂等。

5.1 控制原料中还原糖含量

Pedreschi等^[37]研究发现煎炸土豆片前用水浸泡能降低葡萄糖含量,从而能减少丙烯酰胺的生成。

5.2 调整加工工艺

控制加工温度和加工时间。研究表明,丙烯酰胺在

120 $^{\circ}\text{C}$ 以下会明显降低。另外,热烫和降低pH能降低丙烯酰胺含量。Pedreschi等^[37]研究发现煎炸土豆片时,当温度从190 $^{\circ}\text{C}$ 降低到150 $^{\circ}\text{C}$ 时,丙烯酰胺的生成量明显降低。Stadler等^[2]报道,将煎炸温度降低10~15 $^{\circ}\text{C}$,丙烯酰胺的浓度可以降低10%~30%。Charoenprasert等^[38]报道,高温灭菌是导致加利福尼亚式黑熟橄榄加工中生成丙烯酰胺的主要因素之一。Aykin等^[39]研究发现,炸鸡的油中添加碳酸氢铵时能有效降低食品中丙烯酰胺的含量。Nguyen等^[40]研究烘烤饼干过程中不同糖包括蔗糖、果糖和葡萄糖对丙烯酰胺生成的影响,结果表明加入葡萄糖时丙烯酰胺生成量最大。

5.3 添加抑制剂

目前已发展多种抑制剂控制丙烯酰胺的生成。赵喜等^[41]在高温炮制药材的丙烯酰胺生成的研究中发现,当用盐溶液浸泡中药材时可以抑制丙烯酰胺的生成。Morales等^[42]考察了几种富含酚类物质并具有较好清除DPPH(48%~99%)自由基的天然抗氧化剂提取物对丙烯酰胺生成的影响,结果发现,绿茶、肉桂和野生薄荷提取物能有效降低丙烯酰胺的含量,降低水平分别为62%、39%和17%。Zou等^[43]研究发现,半胱氨酸或半胱氨酸与甘氨酸的加合物能有效降低丙烯酰胺的含量。Bartkiene等^[44]报道亚麻籽和羽扇豆能降低小麦饼干中丙烯酰胺的含量。Kumar等^[45]报道,门冬酰胺酶能有效降低甜面包中丙烯酰胺的含量。另外,大蒜粉的加入能使得低湿度模型系统和烤面包中丙烯酰胺的生成量大大减少^[46]。Chang等^[47]研究发现低分子量壳聚糖(50~190 kDa)能有效阻止丙烯酰胺的生成。Onishi等^[48]利用枯草芽孢杆菌中的门冬酰胺酶转化门冬酰胺成为天冬氨酸减少土豆片中丙烯酰胺的生成。

6 结论与展望

有关中药材和食品中丙烯酰胺的分析前处理及分析和抑制的方法很多,而且各有适用范围和优缺点,关键大多仍处于实验室的模拟进行阶段,这些方法能否在实际生产中真正有效,检测结果是否准确,抑制策略是否科学安全,以及是否影响药材和食品的食用品质,还有待进一步研究。总之,丙烯酰胺的分析前处理及分析应根据实际工作和实际条件,根据不同待测样品的种类和基质、检测仪器和测定结果要求的不同,选择适宜的前处理方法。以往的传统索氏抽提法、液-液相萃取法等样品处理方法操作过程繁琐,而且有机溶剂使用量大,所以固相微萃取、加速溶剂萃取及基质固相分散等新技术应得到更加广泛的应用。另一个发展方向是向待测样品制备和前处理的微量化、自动化、快速化及低成本和绿色方向发展,以尽可能地避免样品因转移而损失,减少各种人为因素带来的各种误差,提高分析的准确度。另外,对于抑制策略方面,探索一些天然无毒或低毒的天然产物对抗或抑制丙烯酰胺的毒性及其生成,应是今后研究的重点领域之一。

参考文献

- [1] Mottram DS, Wedzicha BL, Dodson AT. Acrylamide is formed in the Maillard reaction [J]. *Nature*, 2002, 419(6906): 448–449.
- [2] Stadler RH, Blank I, Varga N, *et al.* Acrylamide from Maillard reaction products [J]. *Nature*, 2002, 419(6906): 449–450.
- [3] Mesías M, Morales FJ. Acrylamide in coffee: Estimation of exposure from vending machines [J]. *J Food Compos Anal*, 2016, 48: 8–12.
- [4] Riboldi BP, Vinhas AM, Moreira JD. Risks of dietary acrylamide exposure: a systematic review [J]. *Food Chem*, 2014, 157: 310–22.
- [5] ObónSantacana M, Kaaks R, Slimani N, *et al.* Dietary intake of acrylamide and endometrial cancer risk in the european prospective investigation into cancer and nutrition cohort [J]. *Br J Cancer*, 2014, 111(5): 987–997.
- [6] HJSLK EJ. Dietary acrylamide intake and the risk of renal cell, bladder, and prostate cancer [J]. *Am J Clin Nutr*, 2008, 87: 1428–1438.
- [7] Hogervorst JG, Schouten LJ, Konings EJ, *et al.* Dietary acrylamide intake is not associated with gastrointestinal cancer risk [J]. *J Nutr*, 2008, 138(11): 2229–2236.
- [8] Larsson SC, Akesson A, Wolk A. Dietary acrylamide intake and prostate cancer risk in a prospective cohort of Swedish men [J]. *Can Epidem Biomark*, 2009, 18(6): 1939–1941.
- [9] 董红运, 于素芳. 丙烯酰胺的致癌性研究进展 [J]. *环境与健康杂志*, 2012, 29(9): 858–861.
Dong HY, Yu SF. Carcinogenesis of acrylamide: a review of recent studies [J]. *J Environ Health*, 2012, 29(9): 858–861.
- [10] 韩康, 邢峰丽, 翟学良. 毛细管电泳法测定焦山楂中的丙烯酰胺 [J]. *河北师范大学学报*, 2013, 37(5): 500–503.
Han K, Xing FL, Zhai XF. Determination of acrylamide in coking hawthorn by capillary electrophoresis [J]. *J Hebei Normal Univ*, 2013, 37(5): 500–503.
- [11] Besaratinia A, Pfeifer GP. Genotoxicity of acrylamide and glycidamide [J]. *J Natl Cancer Inst Res Rep*, 2004, 96(13): 1023–1029.
- [12] 郭灿烂, 李斌, 肖经纬. 丙烯酰胺神经毒性机制研究概况 [J]. *卫生研究*, 2010, 39(3): 282–285.
Guo CL, Li B, Xiao JW. General survey of mechanisms of acrylamide neurotoxicity [J]. *J Hyg Res*, 2010, 39(3): 282–285.
- [13] 周继, 李玉白, 黄红焰. 丙烯酰胺安全性毒理学评价 [J]. *当代医学*, 2009, 15(173): 43–44.
Zhou J, Li BY, Huang HY. Toxicological assessment on safety of acrylamide [J]. *Contemp Med*, 2009, 15(173): 43–44.
- [14] 杨媛媛, 王文娟, 马红莲, 等. 丙烯酰胺对小鼠精子的毒性作用 [J]. *环境与健康杂志*, 2008, 25(6): 520–522.
Yang YY, Wang WJ, Ma HL, *et al.* Toxic effect of acrylamide on mouse sperm [J]. *J Environ Health*, 2008, 25(6): 520–522.
- [15] 张齐, 蔡明招, 朱志鑫. 食品中丙烯酰胺分析的样品前处理技术 [J]. *食品科技*, 2006 (7) 2006 (7): 221–224.
Zhang Q, Cai MZ, Zhu ZX. Overview on sample preparation technique for the determination of acrylamide in foods [J]. *Food Sci Tech*, 2006 (7): 221–224.
- [16] Zhang Y, Zhang GY, Zhang Y. Occurrence and analytical methods of acrylamide in heat-treated foods [J]. *J Chromatogr A*, 2005, 1075(1–2): 1–21.
- [17] Cavalli S, Maurer R, Höfler F. Fast determination of acrylamide in food samples using accelerated solvent extraction followed by ion chromatography with UV or MS-detection [EB/OL]. chromatographyonline.com.
- [18] Pedersen JR, Olsson JO. Soxhlet extraction of acrylamide from potato chips [J]. *Analyst*, 2003, 128(4): 332–334.
- [19] 李辉, 石志红. 固相萃取-高效液相色谱法测定高温炮制药材中的丙烯酰胺 [J]. *广东化工*, 2010, 37(6): 106–122.
Li H, Shi ZH. Determination of acrylamide in heated-processed Chinese herbs by solid-phase extraction coupled to HPLC [J]. *Guangdong Chem Ind*, 2010, 37(6): 106–122.
- [20] 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.
- [21] Omar MMA, Elbashir AA, Schmitz OJ. Determination of acrylamide in Sudanese food by high performance liquid chromatography coupled with LTQ Orbitrap mass spectrometry [J]. *Food Chem*, 2015, 176: 342–349.
- [22] Can NO, Arli G. Analysis of acrylamide in traditional and nontraditional foods in turkey using HPLC-DAD with spe cleanup [J]. *J Liq Chromatogr Related Tech*, 2014, 37(6): 850–863.
- [23] Omar MM, Wan Ibrahim WA, Elbashir AA. Sol-gel hybrid methyltrimethoxysilane-tetraethoxysilane as a new dispersive solid-phase extraction material for acrylamide determination in food with direct gas chromatography-mass spectrometry analysis [J]. *Food Chem*, 2015, 158: 302–309.
- [24] Mo WM, He HL, Xu XM, *et al.* Simultaneous determination of ethyl carbamate, chloropropanols and acrylamide in fermented products, flavoring and related foods by gas chromatography-triple quadrupole mass spectrometry [J]. *Food Control*, 2014, 43: 251–257.
- [25] Andrawes F, Greenhouse S, Draney D. Chemistry of acrylamide bromination for trace analysis by gas chromatography and gas chromatography-mass spectrometry [J]. *J Chromatogr A*, 1987, 399: 269–275.
- [26] Jezussek M, Schieberle P. A new LC/MS-Method for the quantitation of acrylamide based on a stable isotope dilution assay and derivatization with 2-mercaptobenzoic acid. comparison with two GC/MS methods [J]. *J Agric Food Chem*, 2003, 51: 7866–7871.
- [27] Pérez HL, OstermanGolkar S. A sensitive gas chromatographic-tandem mass spectrometric method for detection of alkylating agents in water: Application to acrylamide in drinking water, coffee and snuff [J]. *Analyst*, 2003, 128(8): 1033–1036.
- [28] Tezcan F, Erim FB. On-line stacking techniques for the nonaqueous capillary electrophoretic determination of acrylamide in processed food [J]. *Anal Chim Acta*, 2008, 617(1–2): 196–199.
- [29] Hu Q, Xu X, Li Z, *et al.* Detection of acrylamide in potato chips using a fluorescent sensing method based on acrylamide polymerization-induced distance increase between quantum dots [J]. *Biosens Bioelectron*, 2014, 54: 64–71.
- [30] Liu C, Luo F, Chen D, *et al.* Fluorescence determination of acrylamide in heat-processed foods [J]. *Talanta*, 2014, 123: 95–100.
- [31] Singh G, Brady B, Koerner T, *et al.* Development of a highly sensitive competitive indirect enzyme-linked immunosorbent assay for detection of acrylamide in foods and water [J]. *Food Anal Methods*, 2013, 7(6):

- 1298–1304.
- [32] Wang QY, Ji J, Jiang DL, *et al.* An electrochemical sensor based on molecularly imprinted membranes on a P-ATP-AuNP modified electrode for the determination of acrylamide [J]. *Anal Methods*, 2014, 6: 6452–6458.
- [33] Huang S, Lu SY, Huang CS, *et al.* An electrochemical biosensor based on single-stranded DNA modified gold electrode for acrylamide determination[J]. *Sensors Actuat B-Chem*, 2016, 224: 22–30.
- [34] Yang YL, 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.
- [35] Loaec G, Niquet-Léridon C, Henry N, *et al.* Effects of variety, agronomic factors, and drying on the amount of free asparagine and crude protein in chicory. Correlation with the acrylamide formation during roasting [J]. *Food Res Int*, 2014, 63: 299–305.
- [36] Przygodzka M, Piskula MK, Kukurová K, *et al.* Factors influencing acrylamide formation in rye, wheat and spelt breads [J]. *J Cereal Sci*, 2015, 65: 96–102.
- [37] Pedreschi F, Kaack K, Granby K. Reduction of acrylamide formation in potato slices during frying [J]. *LWT-Food Sci Tech*, 2004, 37(6): 679–685.
- [38] Charoenprasert S, Mitchell A. Influence of California-style black ripe olive processing on the formation of acrylamide [J]. *J Agric Food Chem*, 2014, 62(34): 8716–8721.
- [39] Aykin E, Arslan S, Durak AN, *et al.* Effect of bicarbonate salts and sequential using of frying oil on acrylamide and 5-hydroxymethylfurfural contents in coated fried chicken meat [J]. *Int J Food Prop*, 2015, 19(1): 222–232.
- [40] Van Der Fels-Klerx HJ, Capuano E, Nguyen HT, *et al.* Acrylamide and 5-hydroxymethylfurfural formation during baking of biscuits: Part I: Effects of sugar type [J]. *Food Chem*, 2016, 192: 575–585.
- [41] 赵喜. 丙烯酰胺的测定方法和影响因素以及抑制技术研究[D]. 保定: 河北大学, 2008.
Zhao X. Study on detection method, influencing factors of formation and possible ways for reduction of acrylamide[D]. Baoding: Hebei University, 2008.
- [42] Morales G, Jimenez M, Garcia O, *et al.* Effect of natural extracts on the formation of acrylamide in fried potatoes [J]. *LWT-Food Sci Tech*, 2014, 58(2): 587–593.
- [43] 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 Tech*, 2015, 63(1): 275–280.
- [44] Bartkiene E, Jakobsone I, Pugajeva I, *et al.* Reducing of acrylamide formation in wheat biscuits supplemented with flaxseed and lupine [J]. *LWT-Food Sci Tech*, 2016, 65: 275–282.
- [45] Kumar NM, Shimray CA, Indrani D, *et al.* Reduction of acrylamide formation in sweet bread with L-asparaginase treatment [J]. *Food Bioprocess Tech*, 2013, 7(3): 741–748.
- [46] Li JW, Zuo J, Qiao XG, *et al.* Effect of garlic powder on acrylamide formation in a low-moisture model system and bread baking [J]. *J Sci Food Agric*, 2016, 96(3): 893–899.
- [47] 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.
- [48] 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]. *3 Biotech*, 2015, 5(5): 783–789.

(责任编辑: 姚 菲)

作者简介



李亚丽, 副研究员, 主要研究方向为中药材及食品质量与安全评价。
E-mail: Yalilee@126.com



王英平, 研究员, 主要研究方向为药用植物资源。
E-mail: Yingpingw@126.com