

食品中丙烯酰胺分析方法研究进展*

叶永丽¹, 扈晓鹏², 陈士恩¹, 赫欣睿¹, 马忠仁¹

1(西北民族大学 生命科学与工程学院, 甘肃 兰州, 730030)

2(天津科技大学 食品工程与生物技术学院, 天津, 300457)

摘 要 丙烯酰胺是食品加工过程中产生的污染物, 提高食品中丙烯酰胺分析检测的灵敏度和降低其在食品中的含量成为食品安全领域关注的热点之一。近年来针对丙烯酰胺检测的新技术、新方法取得了较大的进展。文章综述了食品中丙烯酰胺的主要检测方法及相关研究应用进展, 旨在为食品中丙烯酰胺的分析测定提供新的思路。

关键词 丙烯酰胺; 检测; 色谱法; 光谱法

自2002年瑞典科学家公布富含碳水化合物的食品经高温长时间处理后检测到具有潜在致癌性的丙烯酰胺后, 其形成机制和接触途径、毒性机理及检测技术等成为了研究热点。丙烯酰胺(actylamide, AA)是合成聚丙烯酰胺的原料, 后者在诸多行业领域中应用广泛^[1]。形成复合体的丙烯酰胺无毒, 但单体形式存在时有毒。大量动物实验研究表明, 丙烯酰胺具有急性毒性、神经毒性、生殖和遗传毒性, 能影响雌性大鼠的生长发育和黄体数量以及孕激素的产生^[2-3], 且对啮齿动物具有致癌性^[4-6]。此外, 很多体内外实验表明丙烯酰胺可引起哺乳动物体细胞、生殖细胞的基因突变和染色体异常, 具有致突变效应^[7-8]。Hogervorst等^[9]通过调查发现, 人体摄入丙烯酰胺的量与患肾细胞癌风险成正相关。目前仍未有明确的数据显示丙烯酰胺对人体具有致癌性, 但国际癌症机构已将其列为“人类可能的致癌物”。

高温加工过程发生的美拉德反应赋予了食品独特的风味, 但在烘烤或煎炸处理中也可能会产生高含量的丙烯酰胺, 特别是含淀粉丰富的食品高温加工, 产生的丙烯酰胺量更高^[10]。面食在我国居民膳食结构中占有很大比例, 油炸食品的大众消费比重也大, 为满足消费需求而采用高温加工的食品, 其丙烯酰胺含量有增加的可能, 这加大了消费者接触高含量丙烯酰胺的风险。在食品安全问题备受关注的背景下, 建

立食品中丙烯酰胺便捷、高效、实时的分析检测方法以及在此基础上指导食品加工以降低丙烯酰胺含量具有重要意义。

1 食品中丙烯酰胺的检测方法

近年来, 大量的研究聚焦于针对食品复杂基质中丙烯酰胺生成开发有效的前处理方法、分析检测技术上, 是食品安全检测领域中重要研究内容之一。色谱-质谱联用技术是目前认可度高的丙烯酰胺检测方法, 但随着新技术的应用及发展, 其检测技术向多元化方向发展, 如光谱、生物传感器、酶联免疫吸附等方法的应用(表1), 并已取得一定成效。

1.1 色谱法

1.1.1 液相色谱(liquid chromatography, LC)及其联用技术

丙烯酰胺是强极性分子, 在传统反相吸附剂中的保留值低, 导致基质中丙烯酰胺和其他的萃取物在LC中分离效果差。因此, LC与紫外检测器(ultraviolet detector, UV)或二极管阵列检测器(diode array detector, DAD)结合在传统反相吸附柱中选择性低, 仅适用于丙烯酰胺含量高的食品检测, 如土豆等含淀粉量高的制品。Geng等^[11]建立了淀粉类食品中丙烯酰胺的LC-DAD检测方法。该分析方法所需成本低、目标物性质稳定, 加之对方法精密度、准确度以及方法的验证结果考察, 可替代传统的丙烯酰胺分析法。葛宇等^[12]对国内外报道的丙烯酰胺检测方法性能参数进行了列举对比, 其中液相色谱-串联质谱(LC-MS/MS)的检出限低、方法的精密度高、回收效果较气相色谱-氢火焰检测器(GC-FID)检测、高效液相色谱(high per-

第一作者: 硕士研究生(陈士恩教授为通讯作者, E-mail: chshien@163.com)。

* 甘肃省农牧厅现代农业生产发展资金([2014]349); 教育部创新团队发展计划(IRT13091); 西北民族大学研究生科研创新项目(Yxm2014185)

收稿日期: 2015-03-10, 改回日期: 2015-04-28

formance liquid chromatography, HPLC) 检测的好,同时该法被列入最新的丙烯酰胺检测国家标准^[13]。

HPLC、UPLC 及质谱联用由于柱效更高、分离效果更好等优点,是较普通液相色谱使用更广泛的方法^[14-16]。程雷等^[17]以酶解基质游离丙烯酰胺、固相萃取净化浓缩目标物来提高检测的准确度,HPLC-MS 进行检测,方法的检测限和定量限分别为 4.8、16.5 $\mu\text{g}/\text{kg}$,对饼干、咖啡、油条等多种食品中的丙烯酰胺含量进行检测,均获得较好的效果。方法的准确性高、降低了不确定因素的干扰、适用检测范围广。

1.1.2 气相色谱(gas chromatography, GC)及其联用技术

气质联用技术具有更低的检出限,更高的灵敏度而被作为最常用的丙烯酰胺检测技术之一。丙烯酰胺为热不稳定性物质,且一般的检测器对其不响应,需要在提取、衍生后再进行 GC-MS 测定是目前普遍采用的分析手段^[18]。衍生化处理是气相色谱法分析需要突破的重点,溴化衍生对操作者人身安全以及衍生化程度、有可能带入新物质等受到质疑,今后发展无需衍生亦能满足气相色谱分析的处理方法是重要方向之一。Mo 等^[19]建立的同时测定多种食品中丙烯酰胺、氨基甲酸乙酯等污染物的 GC-MS/MS 方法中,未进行衍生处理直接进样,方法的检出限为 5.3 $\mu\text{g}/\text{kg}$,加标水平的回收范围为 86.2% ~ 107%,回收效果好,精密度高。吴璟等^[20]认为,选择性和灵敏度高的检测器可满足无需衍生的要求,如串联质谱、分辨率高的飞行时间质谱等,但成本高。而针对样品基质复杂的特性,色谱法分析中需要消除基质对结果的影响,使得前处理更为复杂繁琐。

1.2 光谱分析法

1.2.1 比色法

比色法检测丙烯酰胺是利用其在一定条件下反应生成有色化合物颜色的深浅来测定含量。如在甲醇-乙醚溶液环境下,丙烯酰胺可与重氮甲烷反应生成吡啶啉衍生物,后者再和 4-二甲基肉桂醛反应生成亮紫色螯合物,根据色差可进行测定^[21]。该法易受介质中其他有机化合物的干扰,灵敏度低,对低含量含量的样品测定误差大。胡沁沁等^[22]报道了检测丙烯酰胺的巯基-烯键加成比色法——利用丙烯酰胺与谷胱甘肽之间的加成反应产物被金纳米颗粒的吸附程度所呈现的不同颜色进行测定。利用这一反应体系可检测丙烯酰胺的浓度,方法的检测范围为 1 ~ 100 $\mu\text{mol}/\text{L}$ 、检出限为 1 $\mu\text{mol}/\text{L}$,方法简单、便于操

作。但比色法只适用于可见光区的检测,其灵敏度尚有待提高,加之方法的精密度和灵敏度不高,故丙烯酰胺的单纯比色法测定研究不多。

1.2.2 紫外-可见分光光谱法

紫外-可见吸收光谱法属电子光谱,虽没有色谱法的高灵敏度和精密度,但其使用历史长、测量范围宽、操作简便,凡具有发色基团的有机化合物均可适用。基于分子中电子能级在一定波长光谱区跃迁而吸收特定波长的光,根据该波长下的吸光值可对丙烯酰胺进行定性、定量和结构分析。杨生玉等^[23]研究了利用紫外可见分光光度法测定微量丙烯酰胺的可行性,结果发现,在 198 nm 检测波长下,其吸光值与浓度之间呈良好的线性关系,紫外可见分光光度法与气相色谱法所得加标回收率分别为 99.3%、100.4%,测得的结果相近。但该方法只适用于水样等基质简单的样品检测,无法满足对复杂基质样品的分析,而且丙烯酰胺没有明显的发色基团,复杂样品基质紫外检测的准确性和灵敏度并未得到广泛认可。

1.2.3 近红外光谱分析法

中/近红外光谱(mid/near infrared spectroscopy, MIR/NIR)具有快速、可进行样品无损分析的特点,是一种常用的分析技术。可根据丙烯酰胺在中/近红外光谱区特定的吸收特征来进行样品中丙烯酰胺的含量分析。Ayvaz 等^[24]采用手持便携式红外光谱仪基于高特异中/近红外信号剖面与监控模式识别技术建立薯片中丙烯酰胺的快速筛查方法,并与台式红外线系统进行性能比较。结果表明,手持便携式系统与台式单元测定的性能相似,且更加实用、经济、检测快捷。此外,用该模型预测的丙烯酰胺含量与采用 LC-MS/MS 得到的实际丙烯酰胺浓度之间具有良好的线性关系($r_{\text{Pred}} > 0.90$,预测标准误差 $< 100 \mu\text{g}/\text{kg}$)。Pedreschi 等^[25]将近红外光谱与视觉反射成像结合建立了丙烯酰胺的在线检测。薯片中丙烯酰胺的预测误差为 266 $\mu\text{g}/\text{kg}$,建立的模型预测值与实测值之间的相关性达 0.83,该在线监测系统可用于高、低含量丙烯酰胺样品的实时分离。

近红外光谱法具有分析时间短、效率高、有利于实现在线分析的优点。便携式的光谱设备可避免传统的 LC-MS/MS 和 GC-MS 方法中溶剂使用量大、化学试剂多等不足,更为简便,大大降低成本。但近红外光谱易受样品、设备参数等影响,不稳定性大,灵敏度相对较低,完全依赖于建立的模型,其应用受到很大的限制。

1.2.4 化学发光法

化学发光法是基于发光现象建立起来的一种分析方法,利用丙烯酰胺对发光体系的抑制或增敏作用,根据化学发光强度与对应的丙烯酰胺浓度的相关性可检测食品中丙烯酰胺的含量。高向阳等^[26]利用丙烯酰胺对鲁米诺-过氧化氢化学发光体系的增强作用建立了分析油炸类食品中丙烯酰胺含量的新型流动注射化学发光(flow injection-chemiluminescence, FI-CL)法,前处理操作较GC法甚至LC法更加简便。在对前处理条件优化的基础上,得到方法的检出限为 3.95×10^{-8} mol/L,加标回收率91%~107%,与HPLC法测定结果进行分析比较,无显著差异,适用于油炸类食品中丙烯酰胺的快速检测。该课题组^[27]还利用丙烯酰胺对鲁米诺-高锰酸钾化学发光体系的抑制作用建立一种适用于现场快速检测油炸食品中丙烯酰胺的FI-CL分析法。与GC法测定结果比较,其在检测线性范围、灵敏度、检出限上均优于前者,且能实现样品的现场检测。化学发光法检测丙烯酰胺的操作简便,耗时短,更能满足快速、低成本检测的要求,但目前有关该法检测分析丙烯酰胺的应用文献不多。

1.2.5 荧光检测(fluorescence detection, FLD)法

在过量NaOH环境条件下,丙烯酰胺通过Hofmann反应生成乙烯胺,在乙烯胺与荧光反应过程中产生pyrrolinone,使得在480 nm处有一强的荧光发射。Liu等^[28]基于这一原理建立了丙烯酰胺的荧光检测法。检测结果表明,荧光强度与丙烯酰胺浓度平方根之间存在良好的线性相关,方法检出限为0.015 μ g/mL,样品加标回收范围66.0%~110.6%。在优化的条件下,荧光强度随丙烯酰胺浓度的增加而增加。丙烯酰胺衍生化后比丙烯酰胺生成更强的荧光强度,伯胺比酰胺具有更强的活性,表明丙烯酰胺的Hofmann降解可提高丙烯酰胺检测的灵敏度。

1.3 伏安生物传感器法

伏安生物传感器中存在一个经改良过的血红蛋白carbon-paste电极,这一电极可对Hb-Fe³⁺/Hb-Fe²⁺氧化/还原过程进行监控。血红蛋白和丙烯酰胺之间的迈克尔加成反应则可以通过对Hb-Fe³⁺还原物质的峰值变化来确定。Stobiecka等^[29]将在缓冲液中打散的血红蛋白与表面活性剂混合,固定在波碳电极上作为受体,利用上述原理进行丙烯酰胺测定,其检出限为 1.2×10^{-10} mol/L,验证试验表明该法适用于食品样品中丙烯酰胺的直接测定。费永乐等^[30]制备了多壁碳纳米管/血红蛋白/壳聚糖修饰的生物传

感器并用于油炸食品中丙烯酰胺的检测,在优化条件下方法的检测限达 1.2×10^{-8} mol/L。生物传感器检测法具有样品预处理简单且无须衍生的优点,其关键技术在于传感器的制备和条件控制上,目前国内有关丙烯酰胺的生物传感器法检测研究报道较少。

1.4 酶联免疫吸附(enzyme linked immunosorbent assay, ELISA)法

因操作便捷、高效、特异性高等优点,ELISA法在食品检测领域的应用越来越广泛。丙烯酰胺分子质量小,自身也不具备抗原决定簇,与载体蛋白偶联以及制备抗体上均存在非常大的难度。2008年,Preston等^[31]首次建立了通过检测丙烯酰胺的衍生物质来确定样品中其含量的免疫分析法。随后,Quan等^[32]采用N-丙烯酰氧基琥珀酰亚胺(NAS)与血蓝蛋白偶联制备抗原,并在免疫大白兔上制备多克隆抗体,利用这一获得的抗体建立化学发光酶联免疫分析法检测食品中丙烯酰胺含量。方法的检出限为18.6 ng/mL,可满足如方便面、饼干、蛋糕和薯片等食品中丙烯酰胺的特异性检测及常规性检测。Franek等^[33]同样建立了高通量酶联免疫吸附法检测食品中丙烯酰胺,样品经净化、衍生后进行ELISA检测,以薯片为样品验证与GC-MS结果比较具有良好的相关性。

1.5 差示脉冲极谱(differential pulse polarographic, DPP)法

Niaz等^[34]于2008年首次提出了检测饮用水中丙烯酰胺的差示脉冲极谱法。研究以LiCl为电解液,调整极谱仪氮气压力-1.84 V,脉冲时间0.04 s,脉冲振幅0.05 V,扫描频率0.003 3 V/s,得到丙烯酰胺的线性范围为0.2~20.0 mg/L,检测限为27.0 g/L的结果。研究中发现,纯水介质具有良好的电化学反应,可能是其中氢键的存在可稳定反应产物。这一新方法可快速、灵敏、高选择性检测LiCl水溶液中丙烯酰胺。

1.6 在线检测方法

在研究开发离线检测技术外,对于建立便捷、过程可控的丙烯酰胺在线检测方法也成为研究的重要方向。目前在线检测方法主要有质子传递反应质谱法、毛细管电泳法以及一些离线检测设备与计算机结合的新技术。

1.6.1 质子传递反应质谱法

质子传递反应质谱(proton transfer reaction mass spectrometry, PTR-MS)法主要针对挥发性物质的分析。基于反应系统中所释放的挥发物直接顶空取样

检测,可对美拉德反应产生的丙烯酰胺进行实时在线监控。Pollien 等^[35]采用 GC-PTR-MS/EI-MS 建立了在线实时、高效监测不同温度下热加工土豆中丙烯酰胺形成变化的方法,并取得了很好的效果。该方法具有无需样品前处理、分析时间短,样品的挥发性不受影响、产生的离子碎片较小等的优点。方法虽能为控制食品中丙烯酰胺的形成提供依据,但其研究中 PTR-MS 检测的信号强度未能与产品中丙烯酰胺的实际浓度建立关联性。

1.6.2 毛细管电泳法

毛细管电泳与其他一些检测器结合对食品中丙烯酰胺进行检测已有相关报道。丙烯酰胺在无水溶剂的环境中通过酸碱化学变化实现质子化,采用毛细管电泳即可分离目标物。Tezcan 等^[36]采用非水毛细管电泳 (nonaqueous capillary electrophoresis, NACE) 法对薯条等加工食品的丙烯酰胺进行测定,方法简便、快速,与 DAD 结合的分析结果表明有利于提高在线紫外检测在 210 nm 波长处对丙烯酰胺浓度变化的灵敏度。Zhou 等^[37]建立了胶束电动毛细管色谱

(micellar electrokinetic capillary chromatography, MEKC) 法检测土豆中低含量的丙烯酰胺。优化条件下,在对应的浓度范围内线性响应良好,检出限低,加标回收效果好。

1.6.3 其他

何鹏等^[38]设计了基于计算机视觉技术的油炸薯片中丙烯酰胺含量的无损检测系统,在改进以往检测手段存在不足的情况下,以薯片双面图像获取分析取代单面单点图像获取分析,增大了薯片表面颜色信息,与 GC-MS 方法测定丙烯酰胺的结果进行比较,其最大相对误差为 4.94%,说明可采用该技术有效检测油炸薯片中丙烯酰胺的含量。此外,将离线分析技术通过某些系统的结合建立在线分析应用也有研究,如上述中的近红外光谱与视觉反射成像结合的在线检测^[25]以及基于诱导生成的丙烯酰胺聚合物在量子点间距离增加的在线荧光传感法^[39]等。在线检测技术较离线检测技术的最大优点是能实现食品加工生产线上的实时监控,及时反映产品中丙烯酰胺含量的变化动态。

表 1 食品中丙烯酰胺分析方法表

Table 1 Analytical methods of acrylamide in food

样品对象	方法	检出限	定量限	线性范围	加标回收率/%	文献
中式烤/炸食品等	HPLC-DAD 法	15 $\mu\text{g}/\text{kg}$	50 $\mu\text{g}/\text{kg}$	50 ~ 2 000 $\mu\text{g}/\text{L}$	89.6 ~ 102.0	[11]
烤制咖啡	HPLC-MS/MS	5 $\mu\text{g}/\text{kg}$	16 $\mu\text{g}/\text{kg}$	2 ~ 100 $\mu\text{g}/\text{L}$	92 ~ 95	[40]
爆米花、大米	GC	3 ng/mL	10 ng/mL		100.60	[41]
薯片、麦片等	HPLC-MS	4.8 $\mu\text{g}/\text{kg}$	16.5 $\mu\text{g}/\text{kg}$	0.01 ~ 0.8 $\mu\text{g}/\text{mL}$	99.1 ~ 100.5	[17]
土豆、茄子等	GC-MS	9.1 ~ 12.8 $\mu\text{g}/\text{kg}$	27.8 ~ 38.9 $\mu\text{g}/\text{kg}$	50 ~ 1000 $\mu\text{g}/\text{kg}$	88-103	[42]
发酵调味品	GC-MS-MS(未衍生)	5.3 $\mu\text{g}/\text{kg}$	4.9 $\mu\text{g}/\text{kg}$	10 ~ 1 000 $\mu\text{g}/\text{kg}$	86.2 ~ 107.0	[19]
饮用水	紫外分光光度法			0.25 ~ 8.00 mg/L	99.3	[23]
	DPP 法	27.0 $\mu\text{g}/\text{L}$		0.2 ~ 20 mg/L	98.1 ~ 102.0	[34]
	MIR/NIR 法	18 ~ 55 $\mu\text{g}/\text{L}$	55 ~ 166 $\mu\text{g}/\text{L}$	200 ~ 1 100 $\mu\text{g}/\text{kg}$		[24]
	红外光谱-视觉反射成像法	(平均预测误差 266 $\mu\text{g}/\text{kg}$)				[25]
薯片	荧光传感法	3.5 $\times 10^{-5} \text{ g}/\text{L}$	1.8 $\times 10^{-4} \text{ g}/\text{L}$	3.5 $\times 10^{-5}$ ~ 3.5 g/L		[39]
	ELISA 法	5 ng/mL	40 $\mu\text{g}/\text{kg}$	40 ~ 8 000 $\mu\text{g}/\text{kg}$	91.8 ~ 96.0	[33]
	伏安生物传感器法	1.2 $\times 10^{-10} \text{ mol}/\text{L}$		1.3 $\times 10^{-11}$ ~ 4.8 $\times 10^{-5} \text{ M}$		[29]
	基于计算机技术的无损检测	(与 GC-MS 检测结果比较相对误差为 4.94%)				[38]
馒头、饼干等	FLD 法	0.015 $\mu\text{g}/\text{mL}$		0.05 ~ 20 $\mu\text{g}/\text{mL}$	66.0 ~ 110.6	[28]
		3.95 $\times 10^{-8} \text{ mol}/\text{L}$	1.32 $\times 10^{-7} \text{ mol}/\text{L}$	1.0 $\times 10^{-6}$ ~ 1.0 $\times 10^{-3} \text{ mol}/\text{L}$	91 ~ 107	[26]
油炸类食品	FI-CL 法	3.40 $\times 10^{-6} \text{ mol}/\text{L}$	1.13 $\times 10^{-12} \text{ mol}/\text{L}$	1.0 $\times 10^{-11}$ ~ 1.0 $\times 10^{-4} \text{ mol}/\text{L}$	85.7 ~ 98.2	[27]
		18.6 ng/mL		26.3 ~ 221.1 ng/mL	74.4 ~ 98.1	[32]
方便面、饼干等	ELISA 法					[35]
热加工土豆	PTR-MS 法					[36]
薯条	NACE 法	2.6 ~ 4.4 ng/mL		0.005 ~ 0.8/0.2 $\mu\text{g}/\text{mL}$	85 ~ 97	[36]
土豆	MEKC 法	0.1 $\mu\text{g}/\text{mL}$	0.33 $\mu\text{g}/\text{mL}$	0.5 ~ 100 $\mu\text{g}/\text{mL}$	90.86 ~ 99.6	[37]

2 总结与展望

现有的分析方法均能满足实验室对丙烯酰胺的

检测要求,但是市场监管需要快速、实时、有效的技术手段。比色法和紫外-可见光谱法操作较简便,但其灵敏度和精密度不高。GC-MS、HPLC-MS/MS 等色谱

检测技术虽在诸多检测方法中最为成熟,得到广泛的认可,但由于耗时、成本高、需要专业技术人员操作以及对运行环境的特殊要求等,不能满足实际检测对快速简便的要求,限制了这些方法的应用。伏安生物传感器法、DPP 法等也需要特殊的操作

条件及环境,亦不能满足现代工业化生产的监测需要。离线分析技术通常需要对待测样品进行一定的预处理,无法及时获得准确结果从而做出正确处理,在线分析可克服这一缺点,并具有分析速度快、连续性操作和无损检测等优点,在很多研究领域中已得到了广泛的应用。对于丙烯酰胺的检测方法文献诸多,但有关实时在线研究的资料仍较少。推广现有的在线检测技术应用以及建立新的更加便捷和低成本的丙烯酰胺含量在线分析技术,满足现代产业化生产的需要,是今后丙烯酰胺检测方法发展的一个重要趋势。

参 考 文 献

- [1] Larginho M, Cordeiro A, Diniz M S, et al. Metabolic and histopathological alterations in the marine bivalve *Mytilus galloprovincialis* induced by chronic exposure to acrylamide [J]. *Environmental Research*, 2014, 135:55–62.
- [2] WEI Q, LI J, LI X, et al. Reproductive toxicity in acrylamide-treated female mice [J]. *Reproductive Toxicology*, 2014, 46:121–128.
- [3] Ariseto A P, Vicente E. Estimate of Acrylamide Intake from Coffee and Health Risk Assessment [D]. *Coffee in Health and Disease Prevention*, 2015:575–584.
- [4] 武丽荣, 蒋新正, 鲍元奇. 油炸食品中丙烯酰胺的形成及减少措施 [J]. *中国油脂*, 2005, 20(7):18–21.
- [5] Shipp A, Lawrence G, Gentry R, et al. Acrylamide: review of toxicity data and dose-response analyses for cancer and noncancer effects [J]. *Crit Rev Toxicol*, 2006, 36(6/7):481–608.
- [6] CHENG J, CHEN X, ZHAO S, et al. Antioxidant-capacity-based models for the prediction of acrylamide reduction by flavonoids [J]. *Food Chemistry*, 2015, 168:90–99.
- [7] Ghanayem BI, Witt KL, El-Hadri L, et al. Comparison of germ cell mutagenicity in male CY P2E1-null and wild-type mice treated with acrylamide: evidence supporting a glycidamide-mediated effect [J]. *Biol Reprod*, 2005, 72(1):157–163.
- [8] Seale S M, Feng Q, Agarwal A K, et al. Neurobehavioral and transcriptional effects of acrylamide in juvenile rats [J]. *Pharmacol Biochem Behav*, 2012, 101(1):77–84.
- [9] Hogervorst J G, Schouten L J, Konings E J, et al. Dietary acrylamide intake and the risk of renal cell, bladder, and prostate cancer [J]. *Am J Clin Nutr*, 2008, 87(5):1428–1438.
- [10] 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.
- [11] GENG Z, WANG P, LIU A. Determination of acrylamide in starch-based foods by HPLC with pre-column ultraviolet derivatization [J]. *Journal of Chromatographic Science*, 2011, 49(10):818–824.
- [12] 葛宇, 赵旭丽, 巢强国. 食品中的丙烯酰胺分布及其检测方法研究进展 [J]. *粮油加工*, 2008(6):108–112.
- [13] GB/T 5009. 204–2014, 食品中丙烯酰胺的测定 [S].
- [14] DeArmond P D, DiGoregorio A L. Characterization of liquid chromatography-tandem mass spectrometry method for the determination of acrylamide in complex environmental samples [J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2013, 405(12):4159–4166.
- [15] Keramat J, LeBail A, Prost C, et al. Acrylamide in foods: chemistry and analysis. A review [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2011, 4(3):340–363.
- [16] ZHANG Y, REN Y, JIAO J, et al. Ultra high-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry for the simultaneous analysis of asparagine, sugars, and acrylamide in Maillard reactions [J]. *Analytical Chemistry*, 2011, 83(9):3297–3304.
- [17] 程雷, 郑炎夏, 徐虹. 固相萃取-高效液相色谱-串联质谱法测定食品中的丙烯酰胺 [J]. *食品科学*, 2012, 33(2):231–234.
- [18] Bent GA, Maragh P, Dasgupta T. Acrylamide in Caribbean foods-residual levels and their relation to reducing sugar and asparagine content [J]. *Food Chemistry*, 2012, 133(2):451–457.
- [19] MO W, HE H, XU X, 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.
- [20] 吴璟, 雷红涛, 沈玉栋, 等. 食品中痕量丙烯酰胺检测方法研究进展 [J]. *食品工业科技*, 2013, 24(23):380–385.
- [21] 刘稷燕, 江桂斌. 食品中的丙烯酰胺及其形成机制 [J]. *化学进展*, 2004, 16(6):1000–1007.
- [22] 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 届学术年会摘要集——第 4 分会: 纳米生物传感新方法*. 北京: 中国化学会, 2014.
- [23] 杨生玉, 张澎湃, 马武生, 等. 紫外可见分光光度法分析测定微量丙烯酰胺的研究 [J]. *食品科技*, 2005(1):81–83.
- [24] Ayvaz H, Luis E, Rodriguez-Saona. Application of handheld and portable spectrometers for screening acrylamide content in commercial potato chips [J]. *Food Chemistry*, 2015, 174:154–162.
- [25] Pedreschi F, Segtnan V H, Knutsen 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.
- [26] 高向阳, 赵琛, 游新侠, 等. 流动注射化学发光法测

- 定油炸食品中的丙烯酰胺[J]. 食品科学, 2013, 34(22):239-242.
- [27] 赵琛. 化学发光法快速测定食品中丙烯酰胺的方法研究[D]. 郑州:河南农业大学, 2013:36-49.
- [28] LIU C, LUO F, CHEN D, et al. Fluorescence determination of acrylamide in heat-processed foods[J]. *Talanta*, 2014, 123:95-100.
- [28] 章银良,白明星,熊卫东. 食品中丙烯酰胺分析方法研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2009, 35(6):140-144.
- [29] Stobiecka A, Radecka H, Radecki J. Novel voltammetric biosensor for determining acrylamide in food samples[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2007, 22(9/10):2165-2170.
- [30] 费永乐,王丽然,李书国. 基于纳米技术的血红蛋白生物传感器快速测定油炸食品的丙烯酰胺[J]. 现代食品科技, 2015, 31(2):268-273.
- [31] 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 derivatisation-pre-analysis[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2008, 608(2):178-185.
- [32] QUAN Y, CHEN M, ZHAN Y, et al. Development of an enhanced chemiluminescence ELISA for the rapid detection of acrylamide in food products[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2011, 59(13):6895-6899.
- [33] Franek M, Rubio D, Diblikova I, et al. Analytical evaluation of a high-throughput enzyme-linked immunosorbent assay for acrylamide determination in fried foods[J]. *Talanta*, 2014, 123:146-150.
- [34] Niaz A, Sirajuddin, Shah A, et al. A new simple sensitive differential pulse polarographic method for the determination of acrylamide in aqueous solution[J]. *Talanta*, 2008, 74(5):1608-1614.
- [35] Pollien P, Lindinger C, Yeretzian C, et al. Proton transfer reaction mass spectrometry, a tool for on-line monitoring of acrylamide formation in the headspace of maillard reaction systems and processed food[J]. *Analytical Chemistry*, 2003, 75(20):5488-5494.
- [36] Tezcan F, Erim FB. Online stacking techniques for the nonaqueous capillary electrophoretic determination of acrylamide in processed food[J]. *Anal Chim Acta*, 2008, 617(1/2):196-199.
- [37] ZHOU X, Fan L Y, ZHANG W, et al. Separation and determination of acrylamide in potato chips by micellar electrokinetic capillary chromatography[J]. *Talanta*, 2007, 71(4):1541-1545.
- [38] 何鹏,王成琳,万晓青. 基于计算机视觉的油炸薯片中丙烯酰胺含量测定系统[J]. 农业机械学报, 2013, 44(1):119-124.
- [39] 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]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2014, 54:64-71.
- [40] 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):2687-2693.
- [41] SUN S, FANG Y, XIA Y. A facile detection of acrylamide in starchy food by using a solid extraction-GC strategy[J]. *Food Control*, 2012, 26(2):220-222.
- [42] Omar M M A, Ibrahim W A W, Elbashir A A. 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 Chemistry*, 2014, 158:302-309.

Research development of acrylamide analysis methods in food

YE Yong-li¹, HU Xiao-peng², CHEN Shi-en¹, HE Xin-rui¹, MA Zhong-ren¹

¹(College of Life Sciences and Engineering, Northwest University for Nationalities, Lanzhou 730030, China)

²(Faculty of Food Engineering and Biotechnology, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China)

ABSTRACT As one of the contaminants during the food processing, how to improve the detection sensitivity of acrylamide and reduce its production in foods has become one of the hot spots in the field of food safety. In recent years, remarkable progresses have been made in new methods and technologies for determining acrylamide in many industries. In this paper, mainly used methods and applications are reviewed, and hope it can provide a new train of thought for the analysis of acrylamide in foods.

Key words acrylamide; determination; chromatography; spectrometry