

气相色谱技术在食品安全检测中的应用

胡光辉^{1,2*}, 刘伟丽^{1,2}, 钱冲¹, 黄翌¹, 高峡^{1,2}

- (1. 北京市理化分析测试中心, 有机材料检测技术与质量评价北京市重点实验室, 北京 100089;
2. 北京市科学技术研究院分析测试技术重点实验室, 北京 100089)

摘要: 食品安全是重大的民生问题, 气相色谱技术以其应用范围广泛、分析快速高效等特点, 在食品安全监督检验中发挥着重要作用。本文介绍了气相色谱柱的种类、离子液体固定相的发展及微波萃取、超临界萃取、快速溶剂萃取、固相萃取、凝胶色谱层析净化等样品前处理技术的应用, 同时介绍了多种常用气相色谱检测器、气相色谱-质谱联用和全二维色谱检测技术的发展。对气相色谱在食品添加剂、食品成分及食品中有害物质残留检测方面的应用进行了概述, 展望了气相色谱技术的发展前景。

关键词: 气相色谱; 食品安全; 检测

Application of gas chromatography in food safety testing

HU Guang-Hui^{1,2*}, LIU Wei-Li^{1,2}, QIAN Chong¹, HUANG Zhao¹, GAO Xia^{1,2}

- (1. *Beijing Centre for Physical and Chemical Analysis, Beijing Key Laboratory of Organic Materials Testing Technology & Quality Evaluation, Beijing 100089, China*; 2. *Beijing Academy of Science and Technology Key Laboratory of Analysis and Testing Technology, Beijing 100089, China*)

ABSTRACT: Food safety has been an increasingly important public health issue. Gas chromatography (GC) is widely used in food analysis and safety verification with the properties of wide range of applications, fast and efficient analysis. This paper reviewed the type of gas chromatographic columns, development of ionic liquid stationary phase, and the applications of sample pretreatment technologies, such as microwave extraction, supercritical extraction, fast solvent extraction, solid phase extraction, gel chromatography purification, *etc.* The development of a variety of commonly used gas chromatography detectors, gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) and comprehensive two-dimensional chromatography were simultaneously introduced. The paper also briefly introduced the application of GC in the detection of food additives, food compositions and harmful ingredients. Finally, the development prospects of GC were forecasted.

KEY WORDS: gas chromatography; food safety; detection

基金项目: 北京市科学技术研究院创新工程 -1 (2015-178305)、北京市科学技术研究院青年骨干计划(201526)

Fund: Supported by the Innovative Program -1 (2015-178305) and Young Backbone Project of Beijing Academy of Science and Technology (201526)

*通讯作者: 胡光辉, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为色谱质谱分析与检测。E-mail: guanghui_9@163.com

*Corresponding author: HU Guang-Hui, Master, Research Assistant, Beijing Academy of Science and Technology Key Laboratory of Analysis and Testing Technology, Beijing 100089, China. E-mail: guanghui_9@163.com

1 引言

食品安全是重大的民生问题, 也是一个全球性的话题, 任何一个国家都面临着食品安全问题的挑战。国家食品药品监督管理总局发布的 2015 年度食品抽检数据显示, 24 类食品共计 99039 批次样品的总体不合格率为 3.02%。涉及到的食品安全问题中, 首要的是食品添加剂超标和非法添加的问题, 成分不足、有害物质残留超标等问题紧随其后^[1]。食品安全监管需要健全的分析检测方法作保障, 气相色谱技术是其中重要的检测技术之一。

鉴于与食品安全相关的目标成分具有多样性、多源性、微量性以及样品基质复杂等特点, 食品安全检测面临很大挑战。气相色谱技术具有技术和设备成熟、分离效率高、分析速度快、灵敏度高、选择性好及低成本等特点, 特别适合易挥发物质的检测, 是食品安全分析检测领域普适性好、强有力的检测手段。分析测试需求的不断变化对气相色谱仪器设备和应用技术提出了更高的要求, 在线测试、现场测试和批量测试要求气相色谱仪器更加小型化和更加稳定; 针对各种复杂样本和复杂目标物的深度剖析, 要求分离介质和分析技术更加专业化。

本文主要介绍气相色谱的技术特点及其在食品安全分析检测方面的应用。

2 气相色谱技术的发展

气相色谱(gas chromatography, GC)是 20 世纪 50 年代出现的一项分析技术, 随后得以快速发展, 成为目前广泛使用的一种色谱分析方法, 其原理是利用物质固有的沸点、极性、吸附性质的差异来实现混合成分的分馏和分析。气相色谱仪最核心的组件是色谱柱, 样品或提取液在惰性载气(N₂、He 或 H₂)的带动下经过色谱柱, 各组分与固定相之间相互作用力的微小差异导致流出的时间产生差异而被分离, 各组分依次进入检测器, 获得特定的检测信号, 进而进行定性和定量分析^[2]。

气相色谱技术得以广泛应用主要得益于气相色谱柱、样品前处理方法和检测器 3 个方面的技术进步。

2.1 气相色谱柱的技术改进

气相色谱柱被认为是气相色谱仪的心脏, 其重要性不言而喻。通常, 气相色谱柱分为 2 大类: 一类是固定相以颗粒填料形式填满金属管柱, 称为填充柱; 另一类是把固定相涂敷在毛细管的内壁, 称为毛细管柱。填充柱和毛细管柱在外观、操作、性能和制备上有很大差别。这 2 类色谱柱在我国的使用都很广泛, 但毛细管色谱柱比填充柱具有更高的柱效、惰性及热稳定性, 且随着制造工艺水平的提高, 在减少固定相流失和延长使用寿命方面都有很大进步, 可以与质谱很好地兼容, 被认为是气相色谱柱的发

展趋势^[3]。填充柱由于在固定相的选择上更加灵活多样, 且样品负荷量比毛细管柱大 1~3 个数量级, 因此在我国的分析测试方法中仍然被采用, 部分食品安全检测标准中同时提供了毛细管柱和填充柱 2 种分析条件。通过在硅片上刻蚀制得的微型气相色谱柱具有体积小、温度控制更精确、能耗低等优点, 目前尚处于技术研究开发阶段, 该技术的应用将进一步促进气相色谱仪器向微型化、便携式方向发展^[4]。

随着新材料技术的发展, 各种性质更为稳定、选择性更好的固定相填料得到应用, 特别是不同类型的手性色谱柱和各种专用色谱柱产品不断被开发出来。如手性氨基酸分析柱、手性金属络合物分析柱、农药分析专用柱、脂肪酸组成专用柱和胺分析专用柱等^[5]。

根据固定相的性质, 色谱柱又可分为非极性、极性与手性色谱分离柱等, 成熟的色谱柱产品已有几十个品种, 其中最常用的是以聚硅氧烷类固定相交联多种功能基团的毛细管柱、以聚乙二醇类固定相交联多种功能基团的毛细管柱和以聚苯乙烯-二乙烯基苯聚合物微粒等微粒为固定相的多孔层开管柱。离子液体具有热稳定性好、表面张力小、可供选择的有机和无机阴阳离子种类多样等特点, 其作为气相色谱固定相的研究已取得很大进展, 形成了一大批商品化的色谱柱产品, 如采用 SLB-IL111 色谱柱可分析食品中的脂肪酸组成、农药残留及增塑剂等^[6]。离子液体及其与石墨烯、碳纳米管等材料结合形成的特殊性质的固定相在检测中的应用还有待进一步开发。

2.2 样品前处理技术的发展

样品前处理技术的发展目标在于采取辅助手段使目标物尽可能地完全提取出来或者去除干扰杂质。传统的样品处理技术有溶剂浸提、索氏提取和超声提取等。在液体样品或粉碎后的固体样品中加入提取溶剂, 浸泡一定时间或辅助水浴恒温、震荡、超声的方式将目标物提取出来。根据目标物或样品基质的特点, 需要在一定温度下采用溶剂长时间提取时, 采用索氏提取法。新型的样品提取技术进一步改进了样品提取条件, 在尽可能完全提取目标物的同时, 缩短了样品前处理时间, 如微波萃取、超临界萃取及快速溶剂萃取等^[7]。

微波萃取(microwave extraction)的原理是微波直接作用于样品基体, 微波辐射能穿透介质对极性分子进行选择加热, 使基体内部温度迅速上升, 增大萃取成分在介质中的溶解度, 同时产生的电磁场加速了目标物向溶剂的扩散, 目标物被快速提取出来, 对极性强的天然活性成分有很好的选择性。一般的食品样品采用传统方法提取需要几小时至十几小时, 超声提取法也需半小时到 1 小时, 而微波提取只需几秒到几分钟即可完成, 并且目标成分的提取率更高^[8]。

快速溶剂萃取(accelerated solvent extraction, ASE)是

在一定的温度(50~200 °C)和压力(10.3~20.6 MPa)下,使用常规的溶剂对固体或半固体食品样品进行萃取的方法,采用同时增加温度和高压力的方式提高提取效率。一般处理 10 g 样品仅需 15 mL 溶剂,减少了废液的产生,而且完成一次萃取全过程的时间仅需约 15 min^[9]。另外还有超临界流体萃取(supercritical fluid extraction, SFE)等技术,其在设备的小型化和分析检测方面的应用有待进一步研究。

在样品提取物的净化方面除了传统的液液萃取法以外,选择性更好的是固相萃取、凝胶色谱层析净化等技术^[10]。

固相萃取(solid phase extraction, SPE)是由液固萃取和柱层析相结合形成的一种高效净化方法。将固体填料装入小型萃取柱中,利用填料选择性吸附和淋洗液选择性洗脱的分离原理将目标物与杂质分离开。通常是使液体样品溶液通过柱填料,目标物被吸附,再选用适量的淋洗液冲去杂质,然后用少量溶剂迅速洗脱目标物,使提取液得到净化。也可选择性吸附干扰杂质而让目标物快速流出,或同时吸附杂质和被测物质后再使用合适的溶剂选择性洗脱^[11]。与传统的液液萃取法相比较, SPE 可以更有效地将分析物与干扰组分分离,操作简单、快速。在食品类样品的检测标准中,对农兽药残留、色素和添加剂等多种成分的检测都采用了固相萃取净化技术。

凝胶色谱层析净化采用液相色谱体积排阻的分离原理,由于多孔凝胶固定相的分子筛效应,混合物组分按分子体积从大到小依次被洗脱出来。通过收集时间段的控制,选择性收集流出的目标物,既可除去食品样品中的可溶性蛋白、多糖和纤维素等大分子杂质,又可同时除去无机盐等小分子杂质。带有快速在线浓缩净化功能的凝胶色谱层析净化装置,可使该前处理过程更加智能化,处理完的样品可直接进行气相色谱分析。凝胶色谱层析净化技术适用于多种复杂基质,特别适用于食品类样品的处理,在 GB/T 5009.19 中就采用了该处理方法,配合毛细管色谱柱,可同时测定食品中残留的 26 种有机氯农药成分^[12]。

2.3 检测器技术的发展

检测器是气相色谱仪的眼睛,检测器技术的发展直接提高了检测的灵敏度和选择性。气相色谱仪可选配的检测器有很多种,最常用的有火焰离子化检测器(flame ionization detector, FID)和热导检测器(thermal conductivity detector, TCD),这 2 种检测器都具有很宽的响应浓度范围。理论上 TCD 可以检测除载气之外的任何物质, FID 则主要对烃类含碳有机物响应灵敏。在食品安全相关检测需求中绝大部分目标物为挥发性有机物,对此 FID 比 TCD 更灵敏,适用性更好^[13]。在食品安全检测标准中,乙氧基喹啉、丙烯腈和脂肪酸组成等都采用了 FID。

选择性和灵敏度更高的专用检测器的发展大大拓展了气相色谱技术的应用范围,同时在痕量分析方面表现出色。

电子捕获检测器(electron capture detector, ECD)采用 β 放射源(电子流)测量样品对电子的捕获能力,只对具有电负性的物质(如含卤素、硫、磷、氮的物质)有特征响应,其检测灵敏度很高,对电中性的物质(如烷烃等)则无信号,因此是气相色谱选择性检测器中应用最广泛的一种。食品安全检测标准中有机氯和菊酯类农药残留的检测都采用了 ECD,最低检出浓度可达 0.6~3.2 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ^[14]。

另外,火焰光度检测器(flame photometric detector, FPD)和氮磷检测器(nitrogen phosphorus detector, NPD)由于对含硫和磷的挥发性有机物有特征响应,被应用于含硫、磷的农药和其他挥发性有机物的检测^[15]。

气相色谱仪与质谱仪联用又称气质联用仪(gas chromatography-mass spectrometer, GC-MS)。将质谱作为气相色谱仪的检测器,借助质谱对碎片离子的高选择性和高灵敏度特性,进一步提高了气相色谱法的检测精度。尽管质谱技术是一种发展更为迅速的定性定量分析技术,其与气相色谱的联用使 2 种技术的优势得以更好发挥。与气相色谱联用的质谱,通常为较为成熟的单四级杆质谱,配合标准化的电子轰击(electron impact, EI)离子源和数量最为丰富的标准质谱谱图库,使对复杂食品样品中目标成分的鉴别变得简单、快速、可靠,最低检出浓度可达 2 $\mu\text{g}/\text{kg}$,灵敏度较高。气相色谱与三重四级杆质谱联用时,具备单四级杆质谱功能的同时,多反应监测(multiple reaction monitoring, MRM)、中性丢失、前体离子扫描、子离子扫描等模式可以获得更高精度的定量结果。气相色谱仪与质谱仪联用特别适用于复杂基质食品样品中多组分和痕量目标物的分析^[16]。

另外,二维色谱技术的应用也是气相色谱技术发展的一个重要方向,包括全二维气相色谱和全二维液相-气相色谱。全二维气相色谱通过调制器从第 1 个色谱柱中切分组分,快速发送到第 2 个色谱柱中进行再分离,大大提高了分辨率和色谱峰容量。陈琦等^[17]采用全二维气相色谱快速鉴别出食品中的 32 种防腐剂和抗氧化剂。全二维液相-气相色谱通过蒸发腔将液相色谱分离出的组分气化后注入到气相色谱柱中进行再分离,从而提高整体的分辨率;刘春波等^[18]采用在线液相-气相二维色谱分析了卷烟烟气中的苯并[a]芘。二维色谱技术正逐步在食品安全检测中得到应用,其中全二维液相-气相色谱的仪器设备技术开发尚待完善。

3 气相色谱技术在食品安全检测领域的典型应用

气相色谱技术在我国食品安全检测标准体系中得到了广泛应用。截止目前,我国现行有效的食品理化指标检验国家标准有 216 个,其中 3 成以上都采用了气相色谱技术,主要应用于食品添加剂、食品成分及有害物质残留检测等方面。

3.1 食品添加剂

气相色谱技术可用于测定食品中添加剂的种类和含量, 几乎全部的香精香料成分都可以采用气相色谱分析, 对食品中的防腐剂、抗氧化剂, 如山梨酸、苯甲酸、BHA、BHT、TBHQ 等均可采用 GC-FID 的方法进行检测^[19,20]。其他挥发性有机物添加剂, 如面粉中的过氧化苯甲酰等, 也可使用气相色谱进行分析。

3.2 食品成分

食品中的挥发性成分及其含量可以采用气相色谱法分析, 如食用植物油中的脂肪酸组成分析^[21]。借助顶空进样技术, 气相色谱技术还可对啤酒、葡萄酒和饮料的风味组分及质量进行控制分析^[22]。对于猪肉、鱼、虾等产品, 其中的三甲胺是衡量肉品腐败程度的重要指标, 可以通过 GC-FID 对三甲胺的含量水平进行定量分析^[23]。

3.3 有害物质残留

食品中有害物质(含非法添加物)的残留量是大家关注的焦点, 检测项目也最多。

农药及其他药物残留的检测是食品检测的重点项目。我国的农业生产依赖于大量农药的使用, 加上早期难分解的高毒农药在土壤环境中的残留等原因, 目前蔬菜、水果及其他初级农产品中仍然有农药残留超标的情况发生。标准中采用了 GC-ECD 对蔬菜、水果等产品内残留的有机氯、菊酯类农药进行检测, 采用了 GC-FPD 对有机磷、有机硫类农药进行检测, 采用了 GC-MS 对食品中的农药残留多组分进行同时筛查和定量分析^[24,25]。气相色谱技术同样可以用于畜禽、水产品中兽药残留及瘦肉精成分的鉴别和定量分析^[26]。

多环芳烃是另一类重要的污染物, 具有致突变性和致癌性, 通过毛细管色谱柱的高分离能力和质谱的高选择性可以快速测定烟熏类食品中 20 多种多环芳烃成分^[27]。对于油炸食品在炸制过程中可能产生的具有致癌性的丙烯酰胺, 可采用 GC-FID 进行定量测定^[28]。

食用油中的溶剂残留是浸出法生产植物油的重要卫生指标, 采用顶空进样的气相色谱法可以准确测定食用油内残留的六号溶剂, 并具有良好的分离效果。

食品包装袋中有害物质的迁移已成为影响食品安全的潜在因素, 特别是塑料食品包装材料的广泛应用, 其中的多种添加剂与高分子基质之间没有形成化学共价键, 在接触到含有水、醇、酸和油脂的食品时, 有向食品中迁移的风险。可利用 GC-FID 技术检测塑料制品中的增塑剂和其他添加剂, GC-MS 技术的引入可以同时测定多种添加剂成分, 如可以同时测定 24 种邻苯二甲酸酯类增塑剂^[29-31]。

4 总结和展望

综上所述, 随着国民经济的快速发展和人民生活水

平的提高, 食品的种类在不断增加。除初级农产品生产过程中为预防病虫害、提高产量和品质使用化学药物容易引入的危害因素外, 在加工过程中, 各种新工艺、添加剂、新型包装材料等都为食品安全带来了更多的隐患。气相色谱技术作为一种较为成熟的分析技术, 在国家食品安全监督检测过程中发挥着重要作用。各种新技术和专用配件的应用, 一方面提升了检测的效率, 另一方面保障了检测的质量; 特别是联用技术的应用大大提升了仪器的整体性能, 拓展了应用范围。

在新技术、新材料发展的推动下, 气相色谱技术的发展应趋向于仪器设备小型化、硬件配置专用化、软件分析智能化和实验操作简单化, 在食品安全检测方面有着更为广阔的应用前景^[32]。

参考文献

- [1] 刘莉, 许晓岚, 李佳洁. 中国 2015 年食品抽检结果及食品安全关键控制点识别分析[J]. 中国公共卫生, 2016, (网络发表): 1-5.
Liu L, Xu XL, Li JJ. Results of national sampling inspection on food in 2015 and identification of food safe critical control points [J]. Chin J Public Health, 2016, (Online Publication): 1-5.
- [2] 厉昌海, 林隆海. 关于气相色谱仪原理组成及使用的思考[J]. 现代制造技术与装备, 2016, (1): 29-31, 33.
Li CH, Lin LH. Reflection on the principle and application of gas chromatography [J]. Mod Manufact Technol Equip, 2016, (1): 29-31, 33.
- [3] 周阳, 吴波, 高尧华, 等. 高柱容量毛细管气相色谱柱研究进展[J]. 化学通报, 2012, (12): 1090-1094.
Zhou Y, Wu B, Gao YH, et al. Progress of high column capacity capillary column [J]. Chem Bull, 2012, (12): 1090-1094.
- [4] 李臆. 微型气相色谱柱设计与制备及对组份的快速分离研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2014.
Li Y. Design and fabrication of micro-GC column and rapid separation of components [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014.
- [5] 李莉, 字敏, 任朝兴, 等. 气相色谱手性固定相研究进展[J]. 化学进展, 2007, (Z1): 393-403.
Li L, Zi M, Ren CX, et al. The development of chiral stationary phase in gas chromatography [J]. Prog Chem, 2007, (Z1): 393-403.
- [6] 傅若农. 近几年国内外气相色谱固定相的进展[J]. 分析实验室, 2013, (5): 111-124.
Fu RN. Recent advancement of gas chromatographic stationary phases [J]. Chin J Anal Lab, 2013, (5): 111-124.
- [7] 王金芳, 张霄. 植物性食品中有机氯农药残留量检测的前处理方法[J]. 现代食品, 2016, (5): 111-112.
Wang JF, Zhang X. Pretreatment method for the detection of organochlorine pesticide residues in vegetable foods [J]. Mod Food, 2016, (5): 111-112.
- [8] 刘迎迎, 李盼盼, 刘柯妍. 微波萃取技术的应用与发展[J]. 济源职业技术学院学报, 2015, (3): 16-18.
Liu YY, Li PP, Liu KY. The progress of microwave-assisted extraction [J].

- J Jiyuan Vocat Tech Coll, 2015, (3): 16–18.
- [9] 孟祥龙, 张云清, 范广宇, 等. 加速溶剂萃取-气相色谱/三重四级杆串联质谱法测定粮谷中的51种农药残留[J]. 食品科学, 2016, (网络发表): 1–11.
- Meng XL, Zhang YQ, Fan GY, *et al.* Determination of 51 pesticide residues in cereals using accelerated solvent extraction and gas chromatography-triplequadropole mass spectrometry [J]. Food Sci, 2016, (Online Publication): 1–11.
- [10] 杨波. 液液萃取、凝胶色谱、固相萃取三种前处理方法对测定植物油中苯并[a]芘含量的影响-反相高效液相色谱法[J]. 科技信息, 2014, (13): 394–395.
- Yang B. The influence of liquid liquid extraction, gel chromatography, solid phase extraction three pretreatment methods on determination of benzo[a]pyrene in plants oil-reversed phase high performance liquid chromatography [J]. Sci Technol Inf, 2014, (13): 394–395.
- [11] 强维. 食品检测实验室常用固相萃取柱性能参数研究[C]. 2014 中国食品与农产品质量安全检测技术国际论坛论文集, 2014: 142–143.
- Qiang W. Research on the performance parameters of solid phase extraction column in food testing laboratory [C]. Proceedings of the 2014 China Food and Agricultural Products Quality & Safety Testing Technology Exhibition, 2014: 142–143.
- [12] GB/T 5009.19-2008 食品中有氯农药多组分残留量的测定[S].
- GB/T 5009.19-2008 Determination of organochlorine pesticide multiresidues in foods [S].
- [13] 鲁长海. 气相色谱仪在食品安全检测中的研究进展[J]. 食品安全导刊, 2016, (12): 100–101.
- Lu CH. Research progress of gas chromatograph in food safety inspection [J]. China Food Saf Mag, 2016, (12): 100–101.
- [14] 梁伟, 张琦惠, 刘庚, 等. 毛细管气相色谱法测定保健食品中有机氯农药残留量的分析方法[J]. 食品安全导刊, 2016, (6): 93–94.
- Liang W, Zhang QH, Liu G, *et al.* Determination of organochlorine pesticide residues in health food by capillary gas chromatography [J]. China Food Saf Mag, 2016, (6): 93–94.
- [15] 何浩. 气相色谱法快速测定食品中多种有机氯、拟除虫菊酯、有机磷农药残留量[J]. 食品安全质量检测学报, 2016, (3): 1063–1068.
- He H. Rapid determination of organochlorine, pyrethroid and organophosphorus pesticide residues in food by gas chromatography [J]. J Food Saf Qual, 2016, (3): 1063–1068.
- [16] 吕冰, 陈达炜, 苗虹. 凝胶渗透色谱-固相萃取净化/气相色谱-串联质谱法测定动物性食品中167种农药残留[J]. 分析测试学报, 2015, (6): 639–645.
- Lv B, Chen DW, Miao H. Determination of 167 pesticide residues in animal-originated food stuffs by combined purification of gel permeation chromatography and solid-phase extraction coupled with gas chromatography-tandem mass spectrometry [J]. J Instrum Anal, 2015, (6): 639–645.
- [17] 陈琦, 黄峻榕, 凌云, 等. 全二维气相色谱/飞行时间质谱快速定性筛查食品中32种防腐剂 and 抗氧化剂[J]. 分析化学, 2011, (5): 723–727.
- Chen Q, Huang JR, Ling Y, *et al.* Fast qualitative analysis of 32 preservatives and antioxidants in food sample by comprehensive two dimensional gas chromatography coupled time of flight mass spectrometry [J]. Chin J Anal Chem, 2011, (5): 723–727.
- [18] 刘春波, 申钦鹏, 张凤梅, 等. 在线液相-气相二维色谱测定卷烟主流烟中的苯并[a]芘[J]. 分析化学, 2016, (2): 241–246.
- Liu CB, Shen QP, Zhang FM, *et al.* Determination of benzo[a]pyrene in mainstream cigarette smoke by online comprehensive two-dimensional liquid-gas chromatography [J]. Chin J Anal Chem, 2016, (2): 241–246.
- [19] 黄永忠. 气相色谱法检测食品中抗氧化剂BHA、BHT和TBHQ[J]. 广州化工, 2015, (3): 130–131.
- Huang YZ. The detection of food antioxidants BHA, BHT and TBHQ by gas chromatography [J]. Guangzhou Chem Ind, 2015, (3): 130–131.
- [20] 吴惠丽. 气相色谱法测定食品中苯甲酸、苯甲酸钠、山梨酸、山梨酸钾及注意事项[J]. 食品安全导刊, 2016, (21): 79.
- Wu HL. Determination of benzoic acid, sodium benzoate, benzoic acid and potassium in food by gas chromatography, with attentions in use [J]. China Food Saf Mag, 2016, (21): 79.
- [21] 张哲, 于静, 周正香, 等. 应用气相色谱法对63种市售散装植物油脂肪酸组成的分析研究[J]. 农产品加工(学刊), 2013, (20): 76–78.
- Zhang Z, Yu J, Zhou ZX, *et al.* Analysis on the fatty acid composition of 63 commercially available bulk vegetable oils by gas chromatography [J]. Acad Period Farm Prod Process, 2013, (20): 76–78.
- [22] 俞雅琼, 陈睿, 沈丽. 毛细管柱气相色谱法测定蒸馏酒和配制酒香气成分[J]. 食品安全质量检测学报, 2016, (8): 3355–3363.
- Yu YQ, Chen R, Shen L. Determination of aroma components in distilled and preparation liquor by capillary column gas chromatography [J]. J Food Saf Qual, 2016, (8): 3355–3363.
- [23] 周妍, 毛燕妮, 刘潇, 等. 自动顶空-气相色谱法测定猪肉和火腿中三甲胺的含量[J]. 公共卫生与预防医学, 2015, (5): 92–94.
- Zhou Y, Mao YN, Liu X, *et al.* Determination of tertiary amine in pork and ham by the automatic head space gas chromatography [J]. J Public Health Prev Med, 2015, (5): 92–94.
- [24] NY/T 761-2008 蔬菜和水果中有机磷、有机氯、拟除虫菊酯和氨基甲酸酯类农药多残留的测定[S].
- NY/T 761-2008 Pesticide multiresidue screen methods for determination of organophosphorus pesticides, organochlorine pesticides, pyrethroid pesticides and carbamate pesticides in vegetables and fruits [S].
- [25] GB/T 19648-2006 水果和蔬菜中500种农药及相关化学品残留量的测定 气相色谱-质谱法[S].
- GB/T 19648-2006 Method for determination of 500 pesticides and related chemicals residues in fruits and vegetables GC-MS method [S].
- [26] 王权帅, 孙卫明, 刘建荣. 猪肉中特布他林等4种瘦肉精残留量的固相萃取-气相色谱质谱联用测定法[J]. 职业与健康, 2015, (2): 181–183.
- Wang QS, Sun WM, Liu JR. Determination of four clenbuterol residues in pork by solid phase extraction and gas chromatography-mass spectrometry [J]. Occup Health, (2): 181–183.
- [27] 肖琴, 池月云. 分散液相微萃取-气相色谱/质谱测定熏制食品中的多环芳烃[J]. 现代农业科技, 2012, (23): 282–283, 285.
- Xiao Q, Chi YY. Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in smoked food by dispersive liquid-liquid microextraction and gas chromatography-mass spectrometry [J]. Mod Agric Sci Technol, 2012, (23): 282–283, 285.
- [28] 宗万里. 毛细管气相色谱法测定方便面中丙烯酰胺的含量[J]. 生命科

- 学仪器, 2013, (Z1): 19-22.
Zong WL. Determination of acrylamid in instant noodles by capillary GC [J]. Life Sci Instrum, 2013, (Z1): 19-22.
- [29] 杨玉芳, 穆强. 塑料包装食品中酞酸酯的气相色谱分析[J]. 化工技术与开发, 2016, (8): 42-44.
Yang YF, Mu Q. Analysis of phthalates in foods by gas chromatography [J]. Technol Dev Chem Ind, 2016, (8): 42-44.
- [30] 胡建, 汪仕韬, 王敏, 等. 气相色谱-电子捕获检测法测定食品包装材料中 2,4-二氨基甲苯[J]. 分析科学学报, 2015, (6): 883-885.
Hu J, Wang ST, Wang M, *et al.* Determination of 2,4-diaminotoluene in composite food-packaging materials by GC-ECD [J]. J Anal Sci, 2015, (6): 883-885.
- [31] 周松华, 林勤保, 李波, 等. 气相色谱-质谱联用检测聚丙烯食品包装材料中的 18 种有毒有害物质[J]. 包装与食品机械, 2015, (1): 56-62.
Zhou SH, Lin QB, Li B, *et al.* Determination of 18 substances in polypropylene food packaging materials by gas chromatography-mass spectrometry [J]. Pack Food Mach, 2015, (1): 56-62.
- [32] 孙浩. 便携式气相色谱仪的开发与应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
Sun H. Development and application of portable gas chromatograph [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.

(责任编辑: 刘 丹)

作者简介



胡光辉, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为色谱质谱分析与检测。

E-mail: guanghui_9@163.com