

高效液相色谱法在食品安全检测中的应用

林楠^{1,2}, 周欣蕊^{1,2}, 王婷^{1,2}, 金昱言^{1,2}, 郜轩宇^{1,2*}

(1. 吉林省食品检验所, 长春 130103; 2. 吉林省安信食品技术服务有限公司, 长春 130033)

摘要: 高效液相色谱法是一种快速、高效、准确的检测方法, 广泛应用于食品、医药、生物等领域。目前高效液相色谱技术日益成熟, 在食品安全检测工作中发挥了重要作用, 国内外学者多致力于简化实验操作程序, 提高检测效率, 扩大应用范围, 完善已有检验检测方法。本文重点概述了近年来高效液相色谱在检测食品添加剂、多种农药残留、生物性毒素以及食品中营养素的研究进展, 为提高高效液相色谱在食品领域的进一步应用及新检验方法的建立提供参考。

关键词: 高效液相色谱法; 食品; 安全; 检测

Application of high performance liquid chromatography in food safety detection

LIN Nan^{1,2}, ZHOU Xin-Rui^{1,2}, WANG Ting^{1,2}, JIN Yu-Yan^{1,2}, GAO Xuan-Yu^{1,2*}

(1. Jilin Institute for Food Control, Changchun 130103, China; 2. Jilin Anxin Food Technology Services Limited Company, Changchun 130033, China)

ABSTRACT: High performance liquid chromatography (HPLC) is a rapid, efficient and accurate detection method, which is widely used in food, medicine, biology and other fields. At present, HPLC is increasingly mature and plays an important role in food safety detection. Many scholars at home and abroad are committed to simplifying the experimental operation procedures, improving the detection efficiency, expanding the application range, and improving the existing detection methods. This paper focused on the research progress of HPLC in the detection of food additives, various pesticide residues, biological toxins and food nutrients in recent years, so as to provide reference for improving the further application of HPLC in the food field and establishing new testing methods.

KEY WORDS: high performance liquid chromatography; food; safety; detection

1 引言

随着人们生活水平的提高, 人们对食品质量要求越来越高, 而近几年食品安全事件频发, 引发了人们对食品安全问题的热切关注, 为解决食品安全问题, 我国相关法律部门出台食品安全法律, 为人民食品安全提供法律保障, 检验检测人员研究高效、快速、精准的食品检验检测方法, 为食品安全问题提供技术支撑, 共同为食品安全保驾护航。

食品检验涉及内容较多, 通常是指食品检验检测机构按照国家相关食品标准对食品进行检测, 一般包括以下内容, 感官检测、一般营养成分检测、食品添加剂检测、有害生物毒素、违禁非食品添加物质检测, 此外还包括食品包装、标签等检测。随着科学技术的进步, 一些高端检测仪器应运而生, 使得食品检测工作变得更加准确、简便快捷, 现常用的检测仪器有: 原子荧光光谱法^[1]、气相色谱法^[2-4]、高效液相色谱法^[5,6]、超高效液相色谱质谱联用法^[7,8]等分析方法, 其中高效液相色谱广泛应用于食品、医药、

*通讯作者: 郜轩宇, 助理工程师, 主要研究方向为食品安全检测。E-mail: 349195192@qq.com

*Corresponding author: GAO Xuan-Yu, Assistant Engineer, Food Safety Inspection & Jilin Institute For Food Control, No.2699, Yiju Road, Changchun 130103, China. E-mail: 349195192@qq.com

生物等领域的检验检测工作。

本文主要介绍了高效液相色谱的检测原理,重点综述了近几年高效液相色谱在食品安全检测中的应用,以期日后提高高效液相色谱在食品领域的应用提供参考。

2 高效液相色谱原理

高效液相色谱起源于 20 世纪 60 年代末期,是以液相为基础结合气相进而发明的一种高效的检测方法。

高效液相色谱其原理是单一或不同比例流动相经混合以后经高压系统输送,承载待测样品进入分离器,根据待测样品在固定相和流动相之间的分配系数不同,相互作用力强弱,使待测样品在两相之间呈反复吸附-分离状态,样品中各成分运动速度不同,配以不同洗脱能力的流动相将待测样品依次洗脱出来,经过检测器,产生电信号,通过记录仪解读出待测样品图谱。根据待测样品物理化学特性可选择适当的检测器,如紫外检测器、示差检测器、荧光检测器及二极管阵列检测器等^[9]。与传统液相色谱相比,高效液相色谱可以更快、高效、准确灵敏地对样品进行检测,一般在 45 min 内即可检测出待测样品,有的待测样品仅 5 min 即可完成检验^[10]。同时高效液相色谱检测应用范围相对更广,现存的有机物中 70%~80% 都可以利用其进行分析检测^[11]。一般沸点高、热稳定性差、分子量较大等有机物都可以用高效液相色谱进行检测。高效液相色谱对样品的前处理及纯化程度要求较高,易出现假阳性^[12],采用高效液相质谱与质谱仪联用,可有效解决假阳性问题并能简化样品前处理工序,同时高效液相色谱法-串联质谱法抗基质干扰能力强,定量定性灵敏度高,检测效率高,可以更准确地对样品进行检测和分析,在食品安全检验检测领域具有广泛应用,为食品安全检测提供良好的技术支持。

3 高效液相色谱法对食品添加剂的测定

人们普遍认为食品添加剂是对人体有毒有害的物质,实际上如果食品添加剂使用量在国家食品安全标准规范范围内对人体是无害的,而超剂量使用则对人体有害。近几年利用高效液相色谱对食品添加剂检测方法日益成熟,检验检测等相关食品安全领域工作人员致力于完善和推进检验检测方法,提高检验检测质量,为食品安全保障提供技术支持。

3.1 高效液相色谱法对防腐剂的检测

防腐剂一般分为人工合成防腐剂和天然防腐剂,常用人工合成防腐剂为苯甲酸、山梨酸等。防腐剂的使用遵照国家食品添加剂安全使用标准是安全的,但是超过使用限量则会对人体造成潜在的危害^[13]。刘晓慧等^[14]利用高效液相色谱对不同基质中防腐剂进行检测,利用甲醇-三乙

胺混合流动相解决了柱压过高、保留时间延长、待测目标物质定性难等严重问题,方法重现性及准确度较好。采用此方法对肉肠中防腐剂测定,测定结果与 GB/T 5009.29-2003 相比更为准确,更适用于肉肠中多种防腐剂测定。Fan 等^[15]采用离子液体-加速溶剂萃取/高效液相色谱法对蜜饯中的有机酸类防腐剂进行测定,以 0.1 mol/L 氯化 1-辛基-3-甲基咪唑离子液体为提取液,提取温度为 75 °C,提取时间 5 min,该方法适用于多种蜜饯中有机酸防腐剂的检测,普通加速溶剂萃取法中使用溶剂易挥发、易燃且有剧毒性,该方法采用离子液为萃取剂可有效降低实验危险性,起到一定的环保作用,与超声萃取法相比,离子液体-加速溶剂法渗透性较强,有效提高提取时间。Xiu 等^[16]建立了使用高效液相色谱-飞行时间质谱法对饮料中 18 种合成防腐剂快速筛查方法,该方法相对加标回收率为 81%~106%,与高效液相色谱法相比,该方法抗基质干扰能力强,检测灵敏度高,适用于日常饮料中人工合成防腐剂定量及定性的检测。刘佟等^[17]采用高效液相色谱-二极管阵列检测器对饮料、酱油、葡萄酒和面包中 4 类基质中 7 种防腐剂进行检测,国标规定液体样品多数经稀释后经膜过滤进样,长期测定会降低色谱柱的使用寿命,固体样品如面包等提取后需经固相萃取柱净化,操作繁琐,此方法以甲醇为提取液经膜过滤后对样品中 7 种防腐剂进行检测,统一了 7 种防腐剂前处理方法,节约时间和成本,有效的提高样品分析效率。

高效液相色谱法在食品防腐剂含量测定方面应用成熟,关于高效液相色谱测定防腐剂相关研究多集中在创新样品前处理方法,提高多种待测样品提取率和分离效率,有效降低食品中复杂基质干扰,结合不同的检测器,提高食品中防腐剂检测的灵敏度,保护柱效,降低检测成本,建立适用范围广泛的检测方法。

3.2 高效液相色谱法对甜味剂的检测

甜味剂因其甜度高、热量低、用量少、成本低被广泛应用于食品中,常用甜味剂主要有甜蜜素、安赛蜜、阿斯巴甜、三氯蔗糖等,目前对甜味剂的检测方法主要有液相色谱法、超高效液相色谱法、超高效液相色谱质谱联用法和离子色谱法等^[18]。超高效液相色谱法对色谱柱要求较高,超高效液相色谱质谱联用法检测成本较大,离子色谱法样品前处理相对复杂繁琐,而高效液相色谱法作为实验室常规检测仪器适用范围广,分析检测食品中甜味剂有较好的效果^[19]。白静^[20]建立了一种高效液相色谱测定食品中安赛蜜的检测方法,采用水提超声提取安赛蜜,加沉淀剂除杂以避免过柱等复杂操作,方法简洁、高效,简化食品中安赛蜜检测方法。Anargha 等^[21]采用薄层色谱-反相高效液相色谱法对糖果、果冻及饮料中 4 种甜味剂进行检测,样品回收率为 96.6%~106.7%,检验方法操作简单,重复性好,成本低,适用于食品中多种甜味剂的检测。马雪丰等^[22]对

白酒中 6 种甜味剂进行检测, 选用 C_{18} 色谱柱, 乙腈-乙酸铵为流动相进行梯度洗脱, 样品回收率为 87.0%~103.1%, 相对标准偏差(relative standard deviation, RSD) < 3%, 满足定量分析要求, 与国标方法相比, 该方法缩短检验周期, 减少样品重复处理, 采用二极管阵列检测器, 弥补单一紫外波长吸收色谱条件下色谱峰保留时间定性不足, 避免假阳性发生。

高效液相色谱法测定食品中甜味剂方法应用成熟, 近年研究多集中于简化样品前处理方法, 优化测定条件, 同时测得食品中多种甜味剂, 但很少有通过对比不同检测方法以及提取条件的优化对甜味剂进行测定。测定复杂基质中甜味剂及色素等含量, 高效液相色谱法检验灵敏度下降, 超高效液相色谱-质谱联用法可提升检测精确度及检验效率。

3.3 高效液相色谱法对食用色素的测定

食用色素分为 2 种, 人工合成色素和天然色素^[23]。长期过量食用人工合成色素, 会对肝脏及肾脏产生危害, 国家食品安全法规对食用色素也有严格要求, 因此需要加强对食品中色素的监测^[24]。目前对色素的检验方法主要有薄层色谱法^[25,26]、示波极谱法^[27,28]、多波长分光光度法^[29]、高效液相色谱法^[30]等, 其中高效液相色谱法应用广泛, 近几年研究多是对高效液相色谱检测色素检测方法的改进, 主要包括前处理、流动相、波长的选择以及对不同基质的多种色素的测定。Stefania 等^[31]采用高效液相色谱-二极管阵列检测器对食品中 17 种合成色素进行检测, 相比之下该方法扩大了高效液相色谱测定食品中色素检测范围, 可同时检测允许添加和违禁添加色素, 适用于固体基质中黄色色素及红色色素的测定, 以及液体基质中蓝色色素的测定。Zhou 等^[32]采用高效液相色谱-电喷雾质谱法对软饮料、糕点及方便面中黄色色素进行测定, 采用超声辅助提取法对样品进行前处理, 对样品中藏花素、番红花酸、京尼平苷采取有效分离, 藏花素和番红花酸是黄色素中主要成分, 京尼平苷在提取黄色素时易被同时提取, 京尼平苷会使黄色素褪色或变绿且对人体存在危害, 该方法可同时测定黄色素和京尼平苷含量, 降低了京尼平苷对黄色素含量测定的影响。Hosoo 等^[33]采用高效液相色谱法对食品中胭脂红进行分析, 样品采用 0.05 mol/L NaOH 溶液提取, 经离心后过膜上机测定, 样品回收率为 90.4%~96.2%, RSD 为 2.8%~6.8%, 方法简便快速, 为食品中红曲色素的监测提供数据参考。Xu 等^[34]采用高效液相色谱对天然色素提取液的浓度进行测定, 以离子液为提取液, 优化了天然色素的提取条件, 建立一种绿色环保的色素提取方法。

国内外高效液相色谱对食品中色素方法的建立多集中于水溶性色素的检测, 以及对色素中具体成分进行测定, 从而排除干扰物质对测定结果干扰, 对脂溶性非法色素快速检测方法建立较少, 因此有待继续研究建立新

检测方法。

3.4 高效液相色谱法对多种食品添加剂的检测

为保障食品综合品质, 食品生产过程中会使用多种添加剂, 现有相关食品添加剂检验标准仅检测单一类别添加剂, 因此建立同时检测多种添加剂的检测方法有利于提高食品检测工作效率, 减少检测工作量, 近年来对食品中多种添加剂检测方法的建立等相关研究也有所报道。刘金鼎^[35]对运动型饮料中多种着色剂、防腐剂以及甜味剂的检测, 检出限范围为 0.20~0.30 mg/kg, 加标回收率为 92.1%~102.5%, 适用食品大批量样品快速检测。Orawan 等^[36]采用在线渗析-高效液相色谱法检测软饮料中山梨酸及糖精钠等 5 种食品添加剂, 14 min 内完成 5 种目标产物的分离检测, 该方法使样品前处理、在线样品分离稀释等操作自动化程度较高, 减少人工操作, 同时降低实验原材料损耗, 有效提高工作效率, 降低检测成本。Zhao 等^[37]采用分散固相萃取-反相高效液相色谱同时检测白酒中 9 种食品添加剂, 酒类中多种添加剂同时检测前处理复杂, 如分步蒸馏、过滤、稀释、离心及液-液萃取或固相萃取法, 步骤复杂且耗费大量提取液, 采用分散固相萃取法提取白酒中添加剂, 有效节省前处理时间, 去除白酒基质中的干扰, 该方法加标回收率为 80.1%~97.1%, 9 种添加剂最低检出限范围为 0.17~0.92 mg/L, 方法简单、高效, 利于实验室提高检测效率。

对食品中多种添加剂的检测, 高效液相色谱法的建立主要集中在简化前处理步骤, 降低基质干扰, 使目标产物有效分离, 现已实现了单一食品类别中多种添加剂及多类食品中添加剂的测定, 但未涉及采用离子液等无害提取剂进行样品前处理, 如能实现环保同时降低检测成本则对推动高效液相色谱法应用升级起一定作用。

4 高效液相色谱法对食品中农药残留测定

与气相色谱相比, 高效液相色谱对于沸点高、热稳定性差、分子量较大和极性强的农药都可以有效检测, 如: 氨基甲酸酯类、合成拟除虫菊酯类及有机磷类农药^[38]。目前高效液相色谱法对农药残留检测相关研究多致力于简化样品前处理方法, 提高样品回收率, 短时间内快速检测多种目标产物。朱之炯等^[39]采用同位素内标法定量, 比较了不同前处理净化方法, 建立了蜂蜜中 9 种农药残留的全自动固相萃取-高效液相色谱-串联质谱测定方法。Zhang 等^[40]采用离子液体/离子液体均相液液微萃取-高效液相色谱法对粗米汁中 4 种乙酰苯胺类除草剂进行检测, 优化了样品提取条件, 样品平均加标回收率 90.9%~106.4%, RSD 为 2.9%~5.2%。Huang 等^[41]采用 QuEChERS (快速样品前处理技术)前处理法-高效液相色谱串联质谱法对绿茶中 102 种杀虫剂进行检测, 优化样品前处理条件, 降低基质干扰,

样品平均加标回收率为 62%~125%, RSD 低于 18%。Muehlwald 等^[42]采用高效液相色谱-飞行时间质谱法建立一种对水果及蔬菜中农药多重检测方法,并对检测软件不同参数设置进行测试,降低检验参数导致少量假阴性和假阳性检验结果几率,比较已有样品预处理方法对检测结果的影响,并分析高效液相色谱-飞行时间质谱法对果蔬中部分农药检测的低敏感性原因。Song 等^[43]采用高效液相色谱-质谱法检测辣椒及其酱类 47 种杀虫剂残基进行测定,采用气相色谱-质谱法进行对比,建立一种新型样品前处理方法,以多壁碳纳米管和 *N*-丙基乙二胺以及盐类物质混合对样品复杂基质中有机酸、色素和其他干扰复合物进行吸附,前处理方法方便快捷,省去溶剂蒸发、涡旋、离心等操作,样品平均加标回收率和 RSD 符合检验要求。

目前采用高效液相色谱法对农产品中多种农药残留进行测定应用广泛,主要研究针对样品基质处理,由于农产品含有大量复合物,提取目标产物时易协同提取其他干扰物质,影响待测产物测定,损伤机器,因此对样品前处理研究较多,如采用反相分散固相萃取法、使用吸附剂等。采用高效液相色谱法可测定农产品中大量农药,但是对少部分类别农药及不同基质中农药检测,高效液相色谱法检测灵敏度低,甚至偏离正常检测范围,因此高效液相色谱法检测农药有待进一步分析和完善。

5 高效液相色谱法对食品中真菌毒素的测定

谷物中常见真菌毒素为黄曲霉毒素^[44]、玉米赤霉烯酮^[45]、赭曲霉毒素^[46]和脱氧雪腐镰刀菌烯醇^[47](又称呕吐毒素),目前研究主要包括对真菌毒素检测前处理条件的优化^[48,49]、多种真菌毒素的同时测定^[50]以及不同基质中真菌毒素的测定^[51],以期为食品中真菌毒素检测和健康提供数据参考和技术支持。刘丹等^[52]采用高效液相色谱-串联质谱法建立了玉米油和花生油中多种真菌毒素组分的测定方法,采用乙腈-水为提取液,经 Multi Sep 226 净化柱净化,分别用电喷雾正离子模式和负离子模式检测,流动相分别为含 2 mmol/L 甲酸铵的 0.1% 甲酸-甲醇溶液和 0.1% 氨水-乙腈溶液,13 种真菌毒素得到有效分离,检测限量为 0.05~3.00 $\mu\text{g}/\text{kg}$,样品平均加标回收率为 66.6%~114.9%,方法重复性好,准确度高,适用于玉米油和花生油中多种真菌毒素组分的测定。John 等^[53]对甘蔗中霉菌毒素进行测定,采用高效液相色谱法检测和分析甘蔗中霉菌毒素,有助于对敏感复合物的测定,建立了一种高效可靠的检测新方法,但是该方法对检验硬件设备要求较高,可能会限制该方法实际应用。Fan 等^[54]采用离子液逆向色谱为前处理方法结合高效液相色谱法对白酒和果汁中链格孢霉毒素进行测定,样品回收率为 81.14%~110.94%,对于苹果汁和白酒中链格孢霉毒素检测灵敏度较高,最低检出限为 0.03~0.14 $\mu\text{g}/\text{L}$,检验方法快速、高效,适用于白酒和果汁中链格孢霉

毒素检测。Anna 等^[55]比较不同样品前处理方法,在液相色谱-质谱法和固相提取方法的基础上,采用石墨碳固相萃取法解决了基质复杂、大量污染物干扰问题,用高效液相色谱-质谱法对饼干中真菌毒素进行测定,样品回收率为 63%~107%, RSD<12%。

近年来多采用 QuEChERS 方法对食品中真菌毒素进行前处理,简化前处理工序,提高了样品的检测效率,然而由于基质理化特性及结构不同,基质干扰严重导致部分样品检验效果较差,甚至结果有误,所以基质复杂的样品定量分析时前处理纯化过程不能省略,采用高效液相色谱法同时测定食品中多种生物毒素时要根据样品具体特征选择合适的前处理方法,过于简单直接的前处理方法并不适合基质复杂样品,因此针对不同基质建立高效合理成本低的样品纯化方法有待进一步研究。

6 高效液相色谱法对食品营养素的检测

营养素是指具有生理调节功能的物质。碳水化合物、蛋白质、脂类由于摄入量较多,成为常量营养素,矿物质和维生素称为微量营养素。高效液相色谱法可以对食品中蛋白、糖类及维生素等多种营养素进行检测,近几年研究多集中在对普通食品中维生素检测方法的建立,以及对保健食品中维生素检验方法的优化。Mafalda 等^[56]采用高效液相色谱法对婴幼儿食品中维生素 C 进行测定,该方法快速可靠,灵敏度和准确度较高, RSD < 4.6%,为分析试验控制、风险评估及最大使用量限值提供数据参考。王帅帅^[57]采用高效液相色谱法对婴幼儿配方奶粉中维生素 B₁ 进行快速测定,样品经水提取,饱和乙酸铅溶液沉淀蛋白,选用 C₁₈ 色谱柱,乙酸钠-甲醇为流动相,用荧光检测器进行检测,线性范围良好,方法前处理简捷,检测结果符合定性定量要求。Inga 等^[58]比较了高效液相色谱和超高效液相色谱法对饮料中维生素 C 的测定,两种方法都可以有效的对饮料中维生素 C 进行测定,2 种方法都适用于日常饮料中维生素 C 的检测,但超高效液相色谱法检测更快,灵敏度更高,使用更少的试剂。Tim 等^[59]采用高效液相色谱-离子阱质谱法同时检测牛乳中维生素 A、维生素 E 以及 β -胡萝卜素,方法重复性好,可作为检测牛乳中多种营养素的有效方法。

高效液相色谱法具有样品分离效果好、分析时间短、灵敏度高及试剂用量少等优点被广泛应用于食品中营养素测定,同时通过比较不同检测方法优缺点,从而确定最佳检测方法或通过两种方法相结合对营养素进行更为准确的定性定量分析。营养素不是单纯的化合物,而是多种物质复合物,如维生素 C 包含抗坏血酸和脱氢抗坏血酸两种,且营养素在前处理过程中易受提取条件如温度、pH 的影响,都会对含量测定产生影响,因此采用高效液相色谱法同时对一种营养素组成成分进行有效测定,优化样品的前处理

方法使待测营养素处于稳定状态等方面都有新方法建立,此外高效液相色谱配备不同检测器已实现了同时对样品中多种营养素的测定。

7 结论

高效液相色谱在食品安全检测方面应用广泛,发展迅速,在食品研发及检测方面应用日益成熟,近几年专家学者致力于简化实验程序,提高检测效率,扩大应用范围,完善已有检验检测方法。高效液相色谱法在食品安全检测方面基本实现了检测专一性、多样性、兼容性和经济性,即可对单一类食品中具体添加剂、毒素及营养素具体成分进行检测;对一类食品或多类食品中多种添加剂和营养素检测;高效液相色谱与质谱仪及不同检测器对待测物质进行定量和定性分析;优化样品前处理工序,降低杂质干扰,保护柱效,使用新型提取液减少环境污染。同时高效液相色谱也有其局限性,相关研究学者有必要对已建立方法进行验证,对检测结果偏离较大的情况分析总结,以及与其他检测方法进行比较,这有助于在食品检测过程中更恰当合理的使用高效液相色谱,同时为准确实施食品检验工作提供技术保证。

参考文献

- [1] 布静龙. 原子荧光光谱法测定大米中镉、铅、砷和海水中的金的研究[D]. 南宁: 广西大学, 2016.
Bu JL. Determination of cadmium, lead, arsenic and gold in rice by atomic fluorescence spectrometry [D]. Nanning: Guangxi University, 2016.
- [2] Ivan G, Alexander M, Tatyana I, *et al.* Early stages in the history of gas chromatography [J]. *J Chromatogr A*, 2018, (1537): 109–117.
- [3] Daniele C, Sandro Z, Chiara D, *et al.* Ion mobility spectrometry coupled to gas chromatography: A rapid tool to assess eggs freshness [J]. *Food Chem*, 2019, (271): 691–696.
- [4] Yada N, Chadin K, Philip J. Multidimensional gas chromatography in food analysis [J]. *Trends Anal Chem*, 2017, (96): 124–137.
- [5] Ho SL, Ju YH, Eun AC, *et al.* Development and validation of HPLC method for the determination of ferrocyanide ion in food grade salts [J]. *Food Chem*, 2018, (239): 1167–1174.
- [6] Altieri I, Semeraro A, Scalise F, *et al.* European official control of food: Determination of histamine in fish products by a HPLC–UV–DAD method [J]. *Food Chem*, 2016, (211): 694–699.
- [7] Antonia G, Roberto R, Maria A. Comprehensive analysis of toxics (pesticides, veterinary drugs and mycotoxins) in food by UHPLC–MS [J]. *Trends Anal Chem*, 2014, (63): 158–169.
- [8] Jonghwa L, Yongho S, Junghak L, *et al.* Simultaneous analysis of 310 pesticide multiresidues using UHPLC–MS/MS in brown rice, orange, and spinach [J]. *Chemosphere*, 2018, (207): 519–526.
- [9] 马博凯, 勾新磊, 赵新颖. 高效液相色谱法在食品和药品安全分析中的应用[J]. *食品安全质量检测学报*, 2016, 7(11): 4295–4298.
Ma BK, Gou XL, Zhao XY. Application of high performance liquid chromatography in food and drug safety analysis [J]. *J Food Saf Qual*, 2016, 7(11): 4295–4298.
- [10] 高娜. 高效液相色谱技术在食品检测中的应用[C]. 《决策与信息》杂志社、北京大学经济管理学院, 2017.
Gao N. The application of HPLC technology in food detection [C]. *Decision and information Magazine*, School of Economics and Management, Peking University, 2017.
- [11] 王慧文. 高效液相色谱技术在药品检验中的应用及进展[J]. *安徽医药*, 2008, (11): 1087–1091.
Wang HW. Application and progress of high performance liquid chromatography in drug testing [J]. *Anhui Pharm*, 2008, (11): 1087–1091.
- [12] 邓乐乐, 张建铎, 杨文武, 等. 香精中 8 种防腐剂的超高效液相色谱-串联质谱法测定[J]. *中国食品添加剂*, 2019, (1): 156–160.
Deng LL, Zhang JD, Yang WW, *et al.* Determination of 8 preservatives in essence by ultra-high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. *China Food Addit*, 2019, (1): 156–160.
- [13] 张倩勉, 邓玉秀, 刘星, 等. HPLC 法同时检测多种防腐剂的研究[J]. *食品科技*, 2018, 43(12): 341–344, 348.
Zhang QM, Deng YX, Liu X, *et al.* Study on simultaneous detection of various preservatives by HPLC [J]. *Food Sci Technol*, 2008, 43(12): 341–344, 348.
- [14] 刘晓慧, 刘谦, 吴新欣, 等. 高效液相色谱法测定不同基质的食品中防腐剂含量[J]. *理化检验(化学分册)*, 2017, 53(4): 447–450.
Liu XH, Liu Q, Wu XX, *et al.* Determination of preservatives in food with different substrates by high performance liquid chromatography [J]. *Phys Test Chem Anal Part B*, 2017, 53(4): 447–450.
- [15] Fan YC, Zhang SL, Chen ML, *et al.* Analysis of organic acid preservatives in glace fruits by high performance liquid chromatography combined with ionic liquid-based accelerated solvent extraction [J]. *Chin J Anal Chem*, 2010, 38(12): 1785–1788.
- [16] Xiu QL, Feng Z, Yan YS, *et al.* Accurate screening for synthetic preservatives in beverage using high performance liquid chromatography with time-of-flight mass spectrometry [J]. *Sci Direct*, 2008, (608): 165–177.
- [17] 刘佟, 王浩, 苗雨田, 等. 高效液相色谱法同时测定食品中 7 种防腐剂[J]. *食品安全质量检测学报*, 2015, 6(4): 1148–1153.
Liu T, Wang H, Miao YT, *et al.* Simultaneous determination of 7 food preservatives by HPLC [J]. *J Food Saf Qual*, 2015, 6(4): 1148–1153.
- [18] 国振, 李秀琴, 陈小桐, 等. 高效液相色谱法同时检测酱油中 8 种防腐剂[J]. *食品科技*, 2017, 42(11): 316–321.
Guo Z, Li XQ, Chen XT, *et al.* Simultaneous detection of 8 preservatives in soy sauce by HPLC [J]. *Food Sci Technol*, 2017, 42(11): 316–321.
- [19] 王豆, 吕欧, 李涛, 等. 高效液相色谱法测定不同种类食品中安赛蜜的含量[J]. *食品安全质量检测学报*, 2018, 9(11): 2616–2620.
Wang D, Lv O, Li T, *et al.* Determination of the content of Anselm in different kinds of food by high performance liquid chromatography [J]. *J Food Saf Qual*, 2018, 9(11): 2616–2620.
- [20] 白静. 高效液相色谱法测定食品中的安赛蜜[J]. *食品科学*, 2011, 32(16): 245–248.
Bai J. Determination of acesulfame potassium in food by high performance liquid chromatography [J]. *Food Sci*, 2011, 32(16): 245–248.
- [21] Anargha P, Nambiar, Mallika S, *et al.* Simultaneous densitometric determination of eight food colors and four sweeteners in candies, jellies, beverages and pharmaceuticals by normal-phase high performance thin-layer chromatography using a single elution protocol [J]. *J*

- Chromatogr A, 2018, (1572): 152–161.
- [22] 马雪丰, 向彩彬, 张庆, 等. 高效液相色谱法同时测定白酒中六种甜味剂[J/OL]. 应用化工: 1-9. [2019-01-15]. <https://doi.org/10.16581/j.cnki.issn1671-3206.20181127.040>.
- Ma XF, Xiang CB, Zhang Q, *et al.* Simultaneous determination of six sweeteners in liquor by HPLC [J/OL]. Appl Chem Ind: 1-9. [2019-01-15]. <https://doi.org/10.16581/j.cnki.issn1671-3206.20181127.040>.
- [23] 周霞, 王延华, 张玲玲, 等. 裱花蛋糕中8种合成色素的高效液相色谱检测[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(22): 107–111.
- Zhou X, Wang YH, Zhang LL, *et al.* HPLC detection of 8 synthetic pigments in mounted cake [J]. Food Res Dev, 2018, 33(22): 107–111.
- [24] 孙磊龙, 杨志华. 高效液相色谱-变换波长测定饮料中8种色素[J]. 中国卫生检验杂志, 2010, 20(12): 3224–3226.
- Sun LL, Yang ZH. Determination of 8 pigments in beverage by high performance liquid chromatography-shift wavelength [J]. Chin J Health Lab Technol, 2010, 20(12): 3224–3226.
- [25] 张倩茹, 佟玲, 田冬, 等. 薄层色谱法分离菠菜中天然色素的研究[J]. 蚌埠学院学报, 2017, 6(6): 67–70.
- Zhang QR, Tong L, Tian D, *et al.* Separation of natural pigments in spinach by thin layer chromatography [J]. J Bengbu Univ, 2017, 6(6): 67–70.
- [26] 刘聃, 邵建斌, 林达, 等. 薄层色谱法分离色素实验的改进[J]. 广州化工, 2017, 45(20): 134–136, 183.
- Liu D, Shao JB, Lin D, *et al.* Improvement of thin layer chromatography for separation of pigment [J]. Guangzhou Chem Ind, 2017, 45(20): 134–136, 183.
- [27] 宋新, 纪双利, 杨丽, 等. 示波极谱法在食品合成食用色素测定中的应用[J]. 中国食品卫生杂志, 2009, 21(05): 422–423.
- Song X, Ji SL, Yang L, *et al.* Application of oscillopolarography in the determination of food pigment [J]. Chin J Food Hyg, 2009, 21(5): 422–423.
- [28] 辛若竹, 王静, 韩建秋. 示波极谱法测定食品中合成着色剂的抗干扰性的研究[J]. 中国酿造, 2007, (1): 65–66.
- Xin RZ, Wang J, Han JQ. Study on the anti-interference of synthetic colorants in food by oscillopolarography [J]. China Brew, 2007, (1): 65–66.
- [29] 王长祥. 三波长分光光度法同时测定食品中的色素[J]. 中国卫生检验杂志, 2011, 21(7): 1821–1822.
- Wang CX. Simultaneous determination of pigments in food by three-wavelength spectrophotometry [J]. Chin J Health Lab Technol, 2011, 21(7): 1821–1822.
- [30] 周宏霞, 毕乐飞, 藏汝瑛. 高效液相色谱法检测酱腌菜中6种合成色素[J]. 中国调味品, 2018, 43(8): 139–141.
- Zhou HX, Bi LF, Cang RY. Detection of six synthetic pigments in pickles by HPLC [J]. China Cond, 2008, 43(8): 139–141.
- [31] Stefania B, Giorgio F, Simonetta M, *et al.* Simultaneous determination of synthetic dyes in foodstuffs and beverages by high-performance liquid chromatography coupled with diode-array detector [J]. Dyes and Pigment, 2013, (99): 36–40.
- [32] Zhou WE, Zhang Y, Li Y, *et al.* Determination of gardenia yellow colorants in soft drink, pastry, instant noodles with ultrasound-assisted extraction by high performance liquid chromatography-electrospray ionization tandem mass spectrum [J]. J Chromatogr A, 2016, (1446): 59–69.
- [33] Hosoo L, Jaechon C, Sungbong S, *et al.* Quantitative determination of carmine in foods by high-performance liquid chromatography [J]. Food Chem, 2014, (158): 521–526.
- [34] Xu JJ, Li Q, Cao J, *et al.* Extraction and enrichment of natural pigments from solid samples using ionic liquids and chitosan nanoparticles [J]. J Chromatogr A, 2016, (1463): 32–41.
- [35] 刘金鼎. 运动型饮料中多种着色剂、防腐剂以及甜味剂的检测[J]. 中国食品添加剂, 2018, (3): 182–186.
- Liu JD. Detection of colorants, preservatives and sweeteners in sports drinks [J]. China Food Addit, 2018, (3): 182–186.
- [36] Orawan K, Jaroon J. Simultaneous determination of some food additives in soft drinks and other liquid foods by flow injection on-line dialysis coupled to high performance liquid chromatography [J]. Talanta, 2011, (84): 1342–1349.
- [37] Zhao YG, Cai MQ, Chen XH, *et al.* Analysis of nine food additives in wine by dispersive solid-phase extraction and reversed-phase high performance liquid chromatography [J]. Food Res Int, 2013, (52): 350–358.
- [38] 徐存宽, 薛云才, 孙宝胜. 高效液相色谱在粮食检测中的应用[J]. 现代面粉工业, 2016, 30(5): 24–25.
- Xu CK, Xue YC, Sun BS. Application of high performance liquid chromatography in grain detection [J]. Mod Flour Mill Ind, 2016, 30(5): 24–25.
- [39] 朱之炯, 柳茜, 宁倩倩, 等. 高效液相色谱-串联质谱法测定蜂蜜中9种农药残留[J]. 色谱, 2019, 37(1): 8–14.
- Zhu ZJ, Liu H, Ning QQ, *et al.* HPLC/MS detection of 9 pesticide residues in honey [J]. Chin J Chromatogr, 2019, 37(1): 8–14.
- [40] Zhang LY, Yu RZ, Yu YB, *et al.* Determination of four acetanilide herbicides in brown rice juice by ionic liquid/ionic liquid-homogeneous liquid-liquid micro-extraction high performance liquid chromatography [J]. Microchem J, 2019, (146): 115–120.
- [41] Huang Y, Shi T, Luo X, *et al.* Determination of multi-pesticide residues in green tea with a modified QuEChERS protocol coupled to HPLC-MS/MS [J]. Food Chem, 2019, 275: 255–264.
- [42] Muehlwald S, Buchner N, Kroh LW, *et al.* Investigating the causes of low detectability of pesticides in fruits and vegetables analysed by high-performance liquid chromatography–Time-of-flight [J]. J Chromatogr A, 2018, (1542): 37–49.
- [43] Song L, Han YT, Yang J, *et al.* Rapid single-step cleanup method for analyzing 47 pesticide residues in pepper, chili peppers and its sauce product by high performance liquid and gas chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Food Chem, 2019, (279): 237–245.
- [44] 金慧慧. 黄曲霉毒素B族和G族高效液相色谱后衍生检测方法的研究[J]. 食品工程, 2018, (2): 55–57, 64.
- Jin HH. Study on methods for post-column derivatization detection of aflatoxin group B and group G in high performance liquid phase [J]. Food Eng, 2018, (2): 55–57, 64.
- [45] 吴亚凉, 熊丽云, 潘建伟. 超高效液相色谱-三重四级杆质谱串联法测定粮谷中的玉米赤霉烯酮类真菌毒素的研究[J]. 粮食与饲料工业, 2018, (8): 58–61.
- Wu YL, Xiong LY, Pan JW. Study on the determination of corn gibberellone mycotoxin in grain by high performance liquid

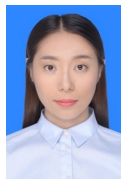
- chromatography-triple quaternary bar mass spectrometry tandem method [J]. *Cere Feed Ind*, 2018, (8): 58–61.
- [46] 李皖光, 张黎利, 王新文. 粮食中赭曲霉毒素A检测技术的研究[J]. *粮食科技与经济*, 2018, 43(8): 66–68.
- Li WG, Zhang LL, Wang XW. Determination of ochratoxin A in grain [J]. *Grain Sci Technol Econ*, 2008, 43(8): 66–68.
- [47] 赵晶晶, 张振华, 刘青, 等. 免疫亲和层析净化超高效液相色谱法测定玉米中脱氧雪腐镰刀菌烯醇含量结果的不确定度评价[J]. *中国粮油学报*, 2018, 33(08): 119–125, 132.
- Zhao JJ, Zhang ZH, Liu Q, *et al.* Evaluation of uncertainty in the determination of fusarium oxysporum in maize by immunoaffinity chromatography with ultra-high performance liquid chromatography [J]. *J China Cere Oils Assoc*, 2008, 33(8): 119–125, 132.
- [48] 田尔诺, 杜馨, 蔡俊. 萃取法-高效液相色谱检测玉米浆中黄曲霉毒素 B₁[J/OL]. *食品工业科技*: 1-8. [2019-01-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1759.TS.20180625.1616.036.html>.
- Tian EN, Du X, Cai J. Extraction, high performance liquid chromatography (HPLC) detection in the corn starch aflatoxin B₁ [J/OL]. *Sci Technol Food Ind*: 1-8. [2019-01-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1759.TS.20180625.1616.036.html>.
- [49] 李丽, 叶金, 辛媛媛, 等. 高效液相色谱法测定粮食及其制品中赭曲霉毒素A提取条件的优化[J]. *食品安全质量检测学报*, 2018, 9(21): 5602–5607.
- Li L, Ye J, Xin YY, *et al.* Optimization of extraction conditions for ochratoxin A in grain and its products by HPLC [J]. *J Food Saf Qual*, 2008, 9(21): 5602–5607.
- [50] Li L, Ye J, Xin YY, *et al.* Optimization of extraction conditions for ochratoxin A in grain and its products by HPLC [J]. *Food Saf Qual Detect Technol*, 2008, 9(21): 5602–5607.
- [51] 徐潇颖, 刘柱, 朱炳祺, 等. 高效液相色谱-串联质谱法测定多种食品基质中的黄曲霉毒素[J]. *分析科学学报*, 2018, 34(2): 224–228.
- Xu XY, Liu Z, Zhu BQ, *et al.* Determination of aflatoxins in various food substrates by high performance liquid chromatography-mass spectrometry [J]. *J Anal Sci*, 2018, (2): 224–228.
- [52] 刘丹, 韩小敏, 李凤琴, 等. 花生油和玉米油中多组分真菌毒素高效液相色谱-串联质谱检测方法的建立[J]. *食品科学*, 2017, 38(10): 297–304.
- Liu D, Han XM, Li FQ, *et al.* Establishment of multi-component mycotoxin detection method in peanut oil and corn oil by high performance liquid chromatography-mass spectrometry [J]. *Food Sci*, 2017, 38(10): 297–304.
- [53] John MJ, Jeyakumar, Muqing Z, *et al.* Determination of mycotoxins by HPLC, LC-ESI-MS/MS, and MALDI-TOF MS in *Fusarium* species-infected sugarcane [J]. *Microb Pathogen*, 2018, (123): 98–110.
- [54] Fan C, Cao X, Man L, *et al.* Determination of *Alternaria* mycotoxins in wine and juice using ionic liquid modified countercurrent chromatography as a pretreatment method followed by high-performance liquid chromatography [J]. *J Chromatography A*, 2016, (1436): 133–140.
- [55] Anna L, Chiara C, Patrizia F, *et al.* Multiclass analysis of mycotoxins in biscuits by high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry. Comparison of different extraction procedures [J]. *J Chromatogr A*, 2014, (1343): 69–78.
- [56] Mafalda AS, Tânia G, Albuquerque, *et al.* Vitamin C evaluation in foods for infants and young children by a rapid and accurate analytical method [J]. *Food Chem*, 2018, (267): 83–90.
- [57] 王帅帅. HPLC法快速测定婴幼儿配方奶粉中维生素B₁[J]. *食品工业*, 2017, 38(4): 304–306.
- Wang SS. Rapid determination of vitamin B₁ in infant formula by HPLC [J]. *Food Ind*, 2017, 38(4): 304–306.
- [58] Inga K, Anna G. Comparison of UPLC and HPLC methods for determination of vitamin C [J]. *Food Chem*, 2015, (175): 100–105.
- [59] Tim P, Craig T, Domenico C, *et al.* The simultaneous determination of vitamins A, E and b-carotene in bovine milk by high performance liquid chromatography-ion trap mass spectrometry (HPLC-MS) [J]. *Food Chem*, 2012, (134): 559–563.

(责任编辑: 韩晓红)

作者简介



林楠, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为食品质量与安全。
E-mail: 1141451485@qq.com



郜轩宇, 助理工程师, 主要研究方向为食品安全检测。
E-mail: 349195192@qq.com