

粮油产品质量安全检测技术的研究进展与发展趋势

梁毅*, 康炯

(甘肃省粮油质量监督检验所, 兰州 730000)

摘要: 我国粮油产品存在真菌毒素污染、重金属超标和非法添加有毒有害物质等主要质量问题。摄入受污染的粮食作物为原料加工而成的食品(饲料)会对人类和动物的身体健康造成极其严重的危害。为了满足粮油产品质量的安全监管,保障国民健康,加快建立健全粮油产品质量安全检测技术尤为重要。本研究从真菌毒素检测技术、重金属检测技术和粮油掺伪检测技术 3 个方面,综述了近 10 年来国内外的研究进展,讨论了各种技术的优点及限制因素,分析了存在的主要问题,并对其发展趋势进行了展望,以期为粮油产品质量安全检测提供参考。

关键词: 粮油; 真菌毒素; 重金属; 掺伪

Research progress and development trend of quality and safety detection technology for grain and oil product

LIANG Yi*, KANG Jiong

(Gansu Institute of Grain Oil Quality Supervision and Inspection, Lanzhou 730000, China)

ABSTRACT: There are some main quality and safety problems in China's grain and oil products, such as mycotoxin pollution, excessive heavy metals and illegal addition of toxic and harmful substances. The ingestion of food (feed) made from contaminated food crops is extremely harmful to the health of humans and animals. In order to meet the safety supervision of grain and oil product quality and ensure the national health, it is particularly important to accelerate the establishment and improvement of grain and oil product quality and safety inspection technology. This paper reviewed the research progress in recent 10 years at home and abroad of mycotoxin detection, heavy metal detection and grain and oil adulteration detection, discussed the advantages and limitations of various technologies, analyzed the main problems, and prospected the development trend, in order to provide reference for quality and safety inspection of grain and oil products.

KEY WORDS: grain and oil; mycotoxin; heavy metal; adulteration

1 引言

我国是世界上最大的粮油生产国和消费国,粮油消费量逐年攀升。近年来,由于粮油产品生产环节较多,生

产环境恶化,农药过度使用,违禁物质非法添加等,使粮油产品质量安全受到影响,主要表现在 3 个方面:一是粮油产品受真菌毒素污染日趋加重;二是粮油产品重金属超标日益突出;三是粮油产品非法添加有毒有害物质、掺伪

*通讯作者: 梁毅, 助理工程师, 主要研究方向为粮油产品安全检测。E-mail: 271608605@qq.com

*Corresponding author: LIANG Yi, Assistant Engineer, Gansu Institute of Grain Oil Quality Supervision and Inspection, No.300, Democratic East Road, Chengguan District, Lanzhou 730000, China. E-mail: 271608605@qq.com

屡见曝光^[1]。这些事件严重打击了消费者消费安全的信心,影响了消费者的消费意愿,危害了动物和人类的健康,威胁了粮油产业的可持续发展。

粮油产品的质量安全关系着国民健康、农业发展和社会稳定,而粮油质量安全检测技术则是保证粮油产品质量与安全监督管理的重要基础,因此迫切需要提高粮油产品质量安全检测水平,为粮油质量安全监管,保障人民健康和提高生活质量提供必要的技术支撑。本文针对我国粮油质量安全存在的主要问题,综述了近10年来粮油产品质量安全检测技术的国内外现状与研究进展、存在的问题与发展趋势,以期为粮油产品质量安全检测提供参考。

2 粮油产品安全检测技术的国内外现状与研究进展

2.1 粮油真菌毒素检测技术

真菌毒素(mycotoxin)是真菌产生的次生代谢产物,目前已知有400多种。粮食中的真菌毒素主要是黄曲霉毒素B₁(aflatoxin B₁, AFTB₁)、脱氧雪腐镰刀菌烯醇(deoxynivalenol, DON)、赭曲霉毒素A(ochratoxin A, OTA)、玉米赤霉烯酮(zearalenone, ZEN)等,已经成为粮油最严重的污染源之一^[2]。我国是世界上受真菌毒素污染最严重的国家之一^[3],据统计每年粮食霉变损失高达万吨,约合180~240亿元;这些真菌毒素通过对农作物的污染,给人类和家畜健康带来了巨大威胁,尤其黄曲霉毒素B₁的急性毒性是氰化钾的10倍,砒霜的68倍,慢性毒性可诱发癌变,是已知的化学物质中致癌性最强的一种,对人类具有极强的致癌、致畸和致突变作用,且能够抑制机体的免疫力,特别是可引起肝脏的慢性或急性损害^[4]。因此,高效、快捷的检测技术在粮油真菌毒素快速检测、快速筛查、政府监管和真菌毒素污染监测预警处理评价体系中作用更加突出。

目前比较常用的粮油真菌毒素检测技术主要是:色谱检测技术、免疫标记检测技术和无损检测技术等^[5,6]。

2.1.1 色谱检测技术

色谱检测技术具有准确度高,重现性好的优点,但通常所需的仪器设备价格昂贵,样品的前处理复杂,仪器需经培训的专业技术人员操作,不适合现场及大量样品的筛选和快速检测^[7]。色谱检测技术主要包括薄层色谱法(thin layer chromatography, TLC)、液相色谱法(liquid chromatography, LC)、气相色谱法(gas chromatography, GC)及色谱-质谱联用法等。其中,色谱-质谱联用法结合了色谱、质谱两者的优点,利用色谱优良的分离手段,加上质谱卓越的检测能力,因此成为粮油安全检测分析技术的热点^[8]。近年来,随着色谱-质谱联用法的进一步成熟,越来越多的研究者采用这种方法作为真菌毒素的检测方法。

2.1.2 免疫标记检测技术

免疫标记检测技术具有灵敏度高,特异性强,快速简便等优点。免疫标记检测技术包括胶体金免疫层析技术、免疫生物传感器技术、时间分辨荧光免疫分析技术、横向流动免疫检测技术等^[9-16]。目前,国内市场真菌毒素的免疫快检方法主要包括胶体金快速检测卡、酶联免疫检测试剂盒和时间分辨荧光免疫检测卡等,相关的快检仪器设备有胶体金读卡仪、酶标仪和时间分辨荧光检测仪^[17]。免疫标记检测技术已成为真菌毒素领域的研究热点,代表了真菌毒素快速检测技术发展的趋势,特别适用于超市、仓库、田间等现场检测和快速筛查^[18-20]。在欧美国家,胶体金试纸条等快检产品已得到普遍认可和推广,实现了对粮油产品的生产、存储、销售和流通各环节的有效检测和监管^[21]。

2.1.3 无损检测技术

无损检测技术可在不破坏或损坏样品的情况下,利用样品内部结构异常或缺陷所引起的对热、声、光、电、磁等反应的变化,并结合现代信息处理技术,对其进行准确、快速的检测^[22],具有检测方便、快捷、客观性和重复性好以及不损伤样品等优点,是粮油产品在线、实时检测的一个重要发展方向,在粮食真菌毒素污染的快速检测方面具有巨大的应用潜力。目前比较常用的真菌毒素无损检测技术主要包括近红外光谱法、高光谱图像法、电子鼻、拉曼光谱法等^[23]。其中,电子鼻是一种模拟生物嗅觉系统的现代检测技术,利用对不同类别气体敏感的传感器阵列的响应信号和模式识别算法来识别气味的电子系统。沈飞等^[24]利用电子鼻对受黄曲霉毒素侵染的糙米样品的挥发性物质进行了检测分析,建立了电子鼻响应信号与黄曲霉毒素水平的相关关系模型,结果表明电子鼻对糙米的黄曲霉毒素污染的快速检测具有一定可行性,为粮食真菌毒素污染的早期预警提供一种新思路和新方法。

粮油真菌毒素检测技术的发展趋势:第一,提高多克隆抗体灵敏度,提高单克隆抗体获得几率和加快基因抗体的研发力度是新型抗体研制的发展方向;第二,提高硬件软件水平,提高结果准确度是真菌毒素无损检测技术努力方向。

2.2 粮油重金属检测技术

重金属污染主要以铬(Cr)、铅(Pb)、汞(Hg)、镉(Cd)和类金属砷(As)以及其他生物毒性较强的金属所造成的危害最为显著。粮油作物在栽培过程中重金属污染主要来源于土壤,土壤中的重金属污染元素又主要来自于灌溉污染、大气沉降等方面。通常来讲,重金属的本底浓度不会达到有害程度,但是随着工业化的进程,土壤、灌溉水重金属污染加重,使粮食中重金属超标^[25,26]。据统计,目前我国粮食生产过程中受到各种重金属污染的耕地面积将近2000万公顷,大约占全国所有耕地面积的五分之一,全国每年因为重金属污染而减产的粮食有

1000 万多吨,重金属污染已经对我国的粮食生产造成了严重的威胁^[27-31],人体长期食用重金属污染的粮油,会导致重金属在人体内沉积,引起肾脏、肝脏病变,还会导致神经系统损害。

粮油产品重金属检测技术中样品前处理和检测方法的研究是重点。样品前处理包括消解法、固相萃取法、液相萃取法;粮油重金属检测技术主要包括原子光谱技术、电感耦合等离子质谱技术、紫外分光光度计技术为代表的常规检测和电化学分析技术、生物传感器技术以及免疫检测技术为主的快速检测^[32-37]。

2.2.1 原子光谱技术

原子光谱技术检测灵敏度较高,检出限低,对外界干扰的抵抗能力较强,但是无法对粮食中的多种重金属元素进行同时检测,只能单一检测某种元素。原子光谱技术包括火焰原子吸收光谱法、石墨炉原子吸收光谱法、原子发射光谱法、原子荧光光度法等。其中,火焰原子吸收光谱法是通过测量待测元素的原子在特定频率辐射能激发下所吸收的能量从而对待测元素的含量进行测量的过程,灵敏度较高,在重金属元素的检测过程中有十分广泛的应用^[38]。

2.2.2 电感耦合等离子体质谱技术

电感耦合等离子体质谱技术(inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)是一种常见的检测微量元素的技术,包括 ICP 火焰炬、接口装置、质谱仪 3 个部分^[39],具有很高的灵敏度、精密性,可以同时检测多种重金属元素进行检测,并且受到外界的干扰较少,线性范围很快,检出限可以达到 ng/L 级别或更低,在油料作物检测中的应用十分广泛,粮食检测过程中也有一定应用。需要注意的是,由于湿式消毒法会产生大量多原子粒子,感染电感耦合等离子体质谱技术对重金属元素的检测,同时还会对仪器产生腐蚀作用,所以利用电感耦合等离子体质谱法进行重金属元素检测的时候可以选择微波消解样品^[40-42]。

2.2.3 紫外分光光度计技术

紫外分光光度计技术操作方法比较简单,不需要经过复杂的消解处理,而且对仪器和试剂的要求不高。紫外分光光度计技术主要是基于被检测的物体对紫外-可见光辐射具有一定的吸收作用来检测待测物体中的重金属元素的技术。在检测过程中一般需要添加显色剂,再根据显色程度的差异与显色剂的标准进行对比来确定重金属元素的含量。所以在检测过程中只需要能够找到对应元素的显色剂即可,是一种比较成熟的重金属元素检测方法,有实践证明该方法可以对稻米、米粉中的痕量镉进行准确检测^[27,43]。

2.2.4 生物传感器检测技术

生物传感器检测技术是利用光信号转化为电信号的原理设计的光电型传感器可以对试纸条中的光强度进行检测,具有检测时间短、操作简单、成本低、便于微型化等

优势。随着新技术的不断应用,现在已经研发出多种传感器,例如酶生物传感器、微生物传感器、免疫传感器、电化学生物传感器等^[44-47]。Singh 等^[45]利用吡咯烷二硫代甲酸与铜络合显色,而且显色的强度会随着铬元素的浓度大小呈现规律变化的原理,建立了一种检测铜元素的光电型分析方法,与原子吸收法进行对比发现可以缩短检测时间,是一种现场快速检测方法。

粮油重金属检测技术的发展趋势:第一,提高重金属检测前处理技术,在重金属分析中,样品的前处理是关键,是保证检验结果准确性的重要因素。重金属元素在大部分粮食中的含量极微,检测难度较大,样品前处理过程稍不注意就会引起外来的污染,导致数据偏差,无法保证实验数据的精密度和准确度^[48],要提高重金属前处理消解技术和色谱联用技术。第二,粮油重金属快速检测技术将是今后的重要发展趋势。

2.3 粮油掺伪检测技术

粮油掺伪是指人为地、有目的地向粮油中加入一些非该产品所固有的成分,增加其重量或体积,而降低成本;或改变某种质量,以低劣色、香、味来迎合消费者心理,以获得高额利润。粮油的掺伪主要包括掺假、掺杂和伪造。粮油的掺假是指向粮油中非法掺入外观、物理性状或形态相似的非同种类物质;粮油的掺杂是指在粮油中非法掺入非同一种类或同种类劣质物质;粮油的伪造是指人为地用一种或几种物质进行加工仿造,而冒充某种食品在市场销售的违法行为^[49,50]。掺伪的特质就是以假乱真,给广大消费者造成了直接经济损失,甚至危及健康和生命。

目前粮油掺伪检测技术主要包括常规检测技术、气相色谱-质谱联用技术、顶空固相微萃取气相色谱-质谱联用技术、离子迁移谱技术、近红外光谱技术、小波共生矩阵技术、计算机视觉技术、电子鼻技术等^[51,52],这些技术为粮油品质安全检测提供了新思路。

2.3.1 近红外光谱技术

近红外光谱技术具有快速、无损、绿色、低成本、方便等特性,特别适用于粮油掺伪检测。收集不同的粮油样品,用近红外光谱结合化学计量学方法,进行光谱扫描与分析,建立数据模型,应用数据模型对粮油样品的纯品及掺伪品进行定性鉴别,准确度高,适应现代快速检测的需要,为保证粮油品质安全奠定了一定技术基础,是粮油掺伪检测的新技术^[53-56]。

2.3.2 计算机视觉技术

计算机视觉技术检测速度快,信息大,可 1 次完成多个品质指标的检测,主要从粮食的外观特征既色泽、颗粒形态和纹理 3 个方面进行综合分析,实现对粮食品质的检测与分类。基于计算机视觉的粮油品质检测技术已在粮油掺伪检测评价中得到广泛的运用。其中在对稻米的检测中垩白、粒型、黄粒米率、整精米率、蛋白质含量、直链淀

粉含量等品质指标已均能够获得较为精准的测量数据^[57]。

2.3.3 电子鼻技术

电子鼻技术检测速度快、不需要样品的预处理过程、其测定评估范围广,并且能避免人为误差,重复性好。电子鼻,也称人工嗅觉系统,是模拟人类的嗅觉系统而设计研制的一种智能电子仪器,能够通过气味刺激准确判别区分不同类型和品质的粮油掺伪情况等,有着广阔的应用前景,是当前调和油识别技术发展的新趋势^[58,59]。

粮油掺伪检测技术的发展趋势:一是重视粮油质量的评价方法,主要是针对快检的性能指标进行符合性检测,确保粮油的质量合格;二是面向用户突出实用的快速检测方法评价技术。由于快检的种类及用途越来越多,用户的需求也更加多样化,针对实际使用目的的相关评价技术越来越重要,如操作的便捷性和实用性^[60]。

3 存在的主要问题

我国粮油质量安全技术近年来取得一些重要进展,研究建立了以粮油品质常规参数(如蛋白质、含油量、淀粉、氨基酸、水分、硫甙、亚油酸、亚麻酸、芥酸等)为对象、以气相色谱与液相色谱等为检测仪器的粮油质量安全评价技术。研究建立了基于黄曲霉毒素、伏马毒素等真菌毒素多克隆抗体的ELISA快速筛查技术,启动了粮油真伪识别技术研究等。与国际先进的粮油质量安全检测技术体系相比,我国存在的问题主要表现为:(1)粮油质量安全关键监测技术自主创新性不足;(2)粮油真菌毒素污染风险评估技术与预警技术还不够成熟,且起步相对较晚;(3)粮油质量安全检测技术尚未构成有机整体,部分技术如真菌毒素污染防控技术等仍缺乏;(4)粮油质量安全快速检测技术发展滞后^[61,62]。

4 未来的发展趋势

随着新材料技术、传感技术、信息采集技术与数字化处理技术等新兴学科的快速发展,一些新型的智能化检测方法和手段不断涌现,研发简化检测步骤、缩短检测时间、提高检测灵敏度、降低经济成本、多种技术联用以及多种成分同时测定的快速检测技术并开发相应的配套设备将成为今后粮油质量安全检测技术发展的新趋势,可实现对粮油质量的生产、存储、销售和流通全程质量的有效检测和监管。

参考文献

- [1] 李培武. 粮油产品质量安全检测技术研究动态[J]. 食品安全质量检测学报, 2014, 5(8): 2356-2357.
- [2] Li PW. Research trends of quality and safety testing technology for grain and oil products [J]. J Food Saf Qual, 2014, 5(8): 2356-2357.
- [3] 白艺珍, 李培武, 丁小霞, 等. 我国粮油作物产品真菌毒素风险评估现状与对策探讨[J]. 农产品质量与安全, 2015, (5): 54-58.
- [4] Bai YZ, Li PW, Ding XX, *et al.* Current situation and countermeasure of mycotoxin risk assessment of grain and oil crop products in China [J]. Qual Saf Agro-Prod, 2015, (5): 54-58.
- [5] 杜政, 唐瑞明. 粮食中真菌毒素标准法规与检验[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 2013.
- [6] Du Z, Tang RM. Standard regulations and inspection of mycotoxins in grain [M]. Changsha: Hunan Science and Technology Publishing House, 2013.
- [7] 黄晓静, 王少敏, 毛丹. 曲霉属真菌毒素的毒性研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8(5): 1679-1687.
- [8] Huang XJ, Wang SM, Mao D. Advances in toxicity of aspergillus mycotoxins [J]. J Food Saf Qual, 2017, 8(5): 1679-1687.
- [9] 王瑞鑫, 张微, 李书国. 免疫传感器在粮油中真菌毒素快速检测的应用研究进展[J]. 粮油食品科技, 2015, 23(4): 83-87.
- [10] Wang RX, Zhang H, Li SG. Progress in application of immunosensor in rapid detection of mycotoxins in grain and oil [J]. Sci Technol Cere Oils Foods, 2015, 23(4): 83-87.
- [11] 张思思, 陆继伟, 王少敏, 等. 国内外真菌毒素检测方法研究现状及进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2016, 7(7): 2575-2586.
- [12] Zhang SS, Lu JW, Wang SM, *et al.* Current status and progress of detection methods for mycotoxins at home and abroad [J]. J Food Saf Qual, 2016, 7(7): 2575-2586.
- [13] 魏文忠, 梁艳红, 马红峰, 等. 粮食中真菌毒素检测技术研究进展[J]. 粮油食品科技, 2012, 20(2): 37-39.
- [14] Wei WZ, Liang YH, Ma HF, *et al.* Research progress in mycotoxin detection in grain [J]. Sci Technol Cere Oils Foods, 2012, 20(2): 37-39.
- [15] 陈慧菲, 郁海菲, 秦施奇, 等. 超高效液相色谱串联质谱法检测谷物中8种真菌毒素[J]. 粮食与油脂, 2017, 30(2): 97-100.
- [16] Chen HF, Yu HF, Qin SK, *et al.* Detection of eight mycotoxins in cereals by ultra-high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. J Cere Oils, 2017, 30(2): 97-100.
- [17] 郭建, 尚艳娥, 张燕, 等. 胶体金快速测试卡检测粮食中真菌毒素的应用[J]. 粮食科技与经济, 2012, 37(1):42-44.
- [18] Guo J, Shang YE, Zhang Y, *et al.* Application of colloidal gold rapid test card in detecting mycotoxins in grain [J]. Grain Sci Technol Econ, 2012, 37(1): 42-44.
- [19] 张捷, 陈广全, 乐加昌, 等. 生物传感器在食源性致病菌检测中的应用[J]. 食品工业科技, 2011, (10): 453-456.
- [20] Zhang J, Chen GQ, Le JC, *et al.* Application of biosensors in detection of foodborne pathogens [J]. Food Ind Sci Technol, 2011, (10): 453-456.
- [21] 王坤, 侯玉泽, 胡晓飞, 等. 时间分辨荧光免疫分析技术在真菌毒素检测的应用[J]. 中国免疫学杂志, 2013, 29(2): 197-201.
- [22] Wang K, Hou YZ, Hu XF, *et al.* Application of time-resolved fluorescence immunoassay in detection of mycotoxins [J]. Chin J Immunol, 2013, 29(2): 197-201.
- [23] 黎睿, 崔华, 谢刚, 等. 几种菌毒素快速检测技术分析[J]. 粮食科技与经济, 2013, 38(1): 21-23.
- [24] Li R, Cui H, Xie G, *et al.* Analysis of rapid detection techniques for several bacteriotoxins [J]. Grain Sci Technol Econ, 2013, 38(1): 21-23.
- [25] 王茵, 董颖超, 陆成慧, 等. 脱氧雪腐镰刀菌烯醇胶体金检测试纸的研制及应用[J]. 粮食与食品工业, 2014, 21(5): 85-90.
- [26] Wang Y, Dong YC, Lu CH, *et al.* Development and application of deoxynivalenol colloidal gold test strip [J]. Cere Food Ind, 2014, 21(5): 85-90.
- [27] 李培武, 张兆威, 张奇, 等. 同步检测黄曲霉毒素、赭曲霉毒素A和玉米赤霉烯酮混合污染的免疫层析试纸条及制备方法: 中国,

- CN201310115190.7 [P]. 2014.
- Li PW, Zhang ZW, Zhang Q, *et al.* Simultaneous detection of aflatoxin, ochratoxin A and zearalenone by immunochromatographic test paper and preparation method: CN, CN 201310115190.7 [P]. 2014.
- [15] 王文珺, 刘磊, 叶金, 等. 脱氧镰刀雪腐菌烯醇时间分辨荧光定量检测体系适用性评价[J]. 食品质量安全学报, 2018, 9(13): 3490–3496.
- Wang WJ, Liu L, Ye J, *et al.* Applicability evaluation of time-resolved fluoro-immunoassay detection system for deoxynivalenol [J]. *J Food Saf Qual*, 2018, 9(13): 3490–3496.
- [16] 张兆威, 李培武, 张奇, 等. 农产品中黄曲霉毒素的时间分辨荧光免疫层析快速检测技术研究[J]. 中国农业科学, 2014, 47(18): 3668–3674.
- Zhang ZW, Li PW, Zhang Q, *et al.* Study on time-resolved fluorescence immunochromatography for aflatoxin determination in agricultural product [J]. *Sci Agric Sin*, 2014, 47(18): 3668–3674.
- [17] 王文珺, 桑华春. 真菌毒素免疫检测技术的研究进展[J]. 食品安全导刊, 2017, 6: 24–26.
- Wang WJ, Sang HC. Advances in immunoassay of mycotoxins [J]. *Chin Food Saf Magaz*, 2017, 6: 24–26.
- [18] 李小明, 银尧明, 罗颖, 等. 粮食中真菌毒素快速定量检测方法应用比较研究[J]. 粮油食品科技, 2017, 25(1): 54–57.
- Li XM, Yin XM, Luo Y, *et al.* Comparative study on rapid quantitative detection of mycotoxins in grain [J]. *Sci Technol Cere Oils Foods*, 2017, 25(1): 54–57.
- [19] Tang XQ, Zhang ZW, Li PW, *et al.* Sample-pretreatment-free based high sensitive determination of aflatoxin M₁ in raw milk using a time-resolved fluorescent competitive immunochromatographic assay [J]. *RSC Adv*, 2015, 5(1): 558–564.
- [20] Zhang F, Liu B, Liu G, *et al.* Novel magnetic nanobeads-based fluoroimmunoassays for zearalenone detection in cereals using protein gas the recognition linker [J]. *Sensor Actuat B*, 2018, 270: 149–157.
- [21] 王文珺, 叶金, 孙双艳, 等. 粮食污染物的快速检测技术研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(21): 5552–5557.
- Wang WJ, Ye J, Sun SY, *et al.* Research progress on rapid analytical methods for toxic and harmful substance in grains [J]. *J Food Saf Qual*, 2018, 9(21): 5552–5557.
- [22] 彭彦昆, 张雷雷. 农畜产品品质安全光学无损检测技术的进展和趋势[J]. 食品安全质量检测学报, 2012, 3(6): 561–568.
- Peng YK, Zhang LL. Progress and trend of optical nondestructive testing technology for quality and safety of agricultural and animal products [J]. *J Food Saf Qual*, 2012, 3(6): 561–568.
- [23] 沈飞, 吴启芳, 刘兵, 等. 粮食真菌毒素污染的无损检测方法研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2014, 5(8): 2372–2377.
- Shen F, Wu QF, Liu B, *et al.* Advances in nondestructive detection of food mycotoxin pollution [J]. *J Food Saf Qual*, 2014, 5(8): 2372–2377.
- [24] 沈飞, 吴启芳, 姜大峰, 等. 基于电子鼻技术的糙米黄曲霉毒素污染快速检测方法研究[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(6): 146–151.
- Shen F, Wu QF, Jiang DF, *et al.* Rapid detection of aflatoxin contamination in brown rice based on electronic nose technology [J]. *J Chin Cere Oil Ass*, 2017, 32(6): 146–151.
- [25] 路子显. 中国粮油重金属污染现状及防控对策[J]. 粮食科技与经济, 2016, 41(6): 6–11.
- Lu ZX. Status of heavy metal pollution in cereals and oils in China and countermeasures for its prevention and control [J]. *Grain Sci Technol Econ*, 2016, 41(6): 6–11.
- [26] 蔡美芳, 李开明, 谢丹平, 等. 我国耕地土壤重金属污染现状与防治对策研究[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(120): 223–231.
- Cai MF, Li KM, Xie DP, *et al.* Status of heavy metal pollution in cultivated land soil and its control countermeasures in China [J]. *Environ Sci Technol*, 2014, 37(120): 223–231.
- [27] 王玉超. 粮食中重金属检测技术研究进展[J]. 农业科学, 2017, (8): 46–47.
- Wang YC. Research progress of heavy metals detection technology in grain [J]. *Agric Sci*, 2017, (8): 46–47.
- [28] 倪小英, 许艳霞, 梅广, 等. 主要重金属在污染稻谷籽粒中的分布规律研究[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(1): 7–11.
- Ni XY, Xu YX, Mei G, *et al.* Distribution of major heavy metals in rice grains [J]. *J Chin Cere Oil Ass*, 2017, 32(1): 7–11.
- [29] 王海慧, 郇恒福, 罗瑛, 等. 土壤重金属污染及植物修复技术[J]. 中国农学报, 2009, 25(11): 210–214.
- Wang HH, Huan HF, Luo Y, *et al.* Heavy metal pollution in soil and phytoremediation techniques [J]. *Chin Agric Bull*, 2009, 25(11): 210–214.
- [30] 路子显. 粮食重金属污染对粮食安全、人体健康的影响[J]. 粮食科技与经济, 2011, 36(4): 14–17.
- Lu ZX. Effects of heavy metal pollution on food security and human health [J]. *Grain Sci Technol Econ*, 2011, 36(4): 14–17.
- [31] 冯亮, 张琰, 温丽英. 重金属对农产品的影响及其检测方法[J]. 食品安全导刊, 2011, 3: 46–48.
- Feng L, Zhang, Wen LY. Effects of heavy metals on agricultural products and their detection methods [J]. *China Food Saf Magaz*, 2011, 3: 46–48.
- [32] 李冉. 重金属的危害及检测技术研究进展[J]. 农业与技术, 2017, 37(16): 63–64.
- Li R. Research progress on hazard and detection technology of heavy metals [J]. *Agric Technol*, 2017, 37(16): 63–64.
- [33] Wang YZ, Hong Y, Pschenitza M, *et al.* Highly sensitive and specific determination of mercury in water, food and cosmetic samples with an ELISA based on a novel monoclonal antibody [J]. *Anal Bioanal Chem*, 2012, 403: 2519–2528.
- [34] 朱旭东, 赵小旭. 粮食中重金属镉定量快速检测方法的建立[J]. 粮食科技与经济, 2017, 2(3): 39–42.
- Zhu XD, Zhao XX. Establishment of rapid quantitative determination method for heavy metal cadmium in grain [J]. *Grain Sci Technol Econ*, 2017, 42(3): 39–42.
- [35] Stozhko NY, Kolyadina LI. Electrochemical sample preparation for the voltammetric determination of heavy-metal ions in wine [J]. *J Anal Chem*, 2005, 60(10): 901–907.
- [36] Abbasi S, Khodarahmian K, Abbasi F. Simultaneous determination of ultra trace amounts of lead and cadmium in food samples by adsorptive stripping voltammetry [J]. *Food Chem*, 2011, (128): 254–257.
- [37] 刘燕德, 万常澜, 孙旭东, 等. X 射线荧光光谱技术在重金属检测中的应用[J]. 激光与红外, 2011, 41(6): 605–611.
- Liu YD, Wan CL, Sun XD, *et al.* Application of X-ray fluorescence spectroscopy in the detection of heavy metals [J]. *Laser Infrared*, 2011, 41(6): 605–611.
- [38] Shrivastava K, Jarsval NK. Dispersive liquid-liquid microextraction for the determination of copper in cereals and vegetable food samples using flame atomic absorption spectrometry [J]. *Food Chem*, 2013, 141(3): 2263–2268.
- [39] 庞艳华, 薛大方, 田苗. 微波消解-电感耦合等离子体质谱法测定食品中的 18 种元素现代科学仪器[J]. 现代科学仪器, 2011, (3): 78–80.
- Pang YH, Xue DF, Tian M. Determination of 18 kinds of trace elements in food by microwave digestion system and inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. *Mod Sci Instrum*, 2011, (3): 78–80.

- [40] 罗欢忠, 刘俊武. 微波消解-电感耦合等离子体质谱法测定大米中的铅、镉、汞和砷[J]. 光谱实验室, 2012, 29(1): 470-473.
Luo HZ, Liu JW. Determination of Pb, Cd, Hg and As in rice by inductively coupled plasma mass spectrometry with microwave digestion [J]. Chin J Spectrosc Lab, 2012, 29(1): 470-473.
- [41] 张鑫桐. 微波消解-电感耦合等离子体质谱法同时测定小麦粉中的铅和镉[J]. 农业工程, 2014, 1(4): 66-68.
Zhang XT. Simultaneous detection of Pb and Cd in wheat flour by using inductively coupled plasma mass spectrometry with microwave reaction [J]. Agric Eng, 2014, 1(4): 66-68.
- [42] Nacano LR, De-Freitas R, Barbosa F. Evaluation of seasonal dietary exposure to arsenic, cadmium and lead in schoolchildren through the analysis of meals served by public schools of Ribeirao preto, Brazil [J]. J Toxicol Env Heal A, 2014, 77(7): 367-374.
- [43] 吴晓, 张良晓, 李培武, 等. 粮食中重金属检测技术研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2014, 5(8): 2358-2365.
Wu X, Zhang LX, Li PW, et al. Research progress on analytical methods for heavy metals in grains [J]. J Food Saf Qual, 2014, 5(8): 2358-2365.
- [44] 马海华, 张元, 甄彤, 等. 电化学生物传感器在黄曲霉毒素检测中的研究进展[J]. 中国粮油学报, 2016, 31(2): 132-139.
Ma HH, Zhang Y, Zhen T, et al. Research progress of electrochemical biosensor in aflatoxin detection [J]. J Chin Cere Oil Ass, 2016, 31(2): 132-139.
- [45] Singh C, Srivastava S, Ali A, et al. Carboxylated multiwalled carbon nanotubes based biosensor for aflatoxin detection [J]. Sensor Actuator B, 2013, 185(1): 258-264.
- [46] Masoomi L, Sadeghi O, Banitaba MH, et al. A non-enzyme-malic nanomagnetic electro-immunosensor for determination of aflatoxin as a model antigen [J]. Sensor Actuator B, 2013, 177(1): 1122-1127.
- [47] Li SC, Chen JH, Cao H, et al. Amperometric biosensor for aflatoxin based on aflatoxin-oxidase immobilized on multiwalled carbon nanotubes [J]. Food Control, 2011, 22(11): 43-49.
- [48] 周维斌, 袁艺婉, 阮学香. 粮食中重金属检测前处理方法的注意事项[J]. 食品安全导刊, 2017, 1(3): 62.
Zhou WB, Yuan YW, Ruan XX. Precautions for pretreatment of heavy metals in grain [J]. China Food Saf Magaz, 2017, 1(3): 62.
- [49] 白满英, 张金诚. 掺伪粮油食品鉴别检验[M]. 北京: 中国标准出版社, 1995.
Bai MY, Zhang JC. Adulterated grain and oil food identification test [M]. Beijing: China Standards Press, 1995.
- [50] 彭珊珊. 食品掺伪鉴别检验[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2014.
Peng SS. Identification of food adulteration [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2014.
- [51] 罗莫放, 刘翠银. 粮油新型检测方法研究综述[J]. 安徽农学通报, 2016, 22(17): 152-155.
Luo MF, Liu CY. Review of new detection methods for grain and oil [J]. Anhui Agric Sci Bull, 2016, 22(17): 152-155.
- [52] 刘伟, 张敏, 张然, 等. 植物油掺伪检验技术研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8(5): 1533-1538.
Liu W, Zhang M, Zhang R, et al. Research progress on determination of adulterated vegetable oil [J]. J Food Saf Qual, 2017, 8(5): 1533-1538.
- [53] 张萍, 闫继红, 朱志华, 等. 近红外光谱技术在食品品质鉴别中的应用研究[J]. 现代科学仪器, 2006, 1: 60-62.
Zhang P, Yan JH, Zhu ZH, et al. Application of near infrared spectroscopy in food quality identification [J]. Mod Sci Instrum, 2006, 1: 60-62.
- [54] 薛雅琳, 王雪莲, 张蕊, 等. 食用植物油掺伪鉴别快速检验方法研究[J]. 中国粮油学报, 2010, 25(10): 116-118.
Xue YL, Wang XL, Zhang R, et al. Study on rapid detection method for adulteration identification of edible vegetable oil [J]. J Cere Oils Ass, 2010, 25(10): 116-118.
- [55] Lai YW, Kemsley EK, Wilson RH. Potential of fourier transform infrared spectroscopy for the authentication of vegetable oils [J]. J Agric Food Chem, 1994, 42(5): 1154-1159.
- [56] 刘福利, 王志岚, 郑驰原, 等. 食用调和油中花生油含量的近红外光谱分析[J]. 激光生物学报, 2007, 16(6): 759-762.
Liu FL, Wang ZL, Zheng CY, et al. Quantitative analysis of the peanut oil content in blended edible oil using near infrared spectroscopy [J]. Acta Laser Biol Sin, 2007, 16(6): 759-762.
- [57] 张伟平. 粮油品质检测评价新技术的探究[J]. 科技与企业, 2014, (8): 63.
Zhang WP. Exploration on new technology of grain and oil quality detection and evaluation [J]. Sci Technol Enterp, 2014, (8): 63.
- [58] 张檬达, 鞠兴荣, 石嘉峰. 电子鼻在粮油品质检测中的应用进展[J]. 粮食与食品工业, 2013, (5): 34-38.
Zhang MD, Ju XR, Shi JY. Application progress of electronic nose in grain and oil quality detection [J]. Cere Food Ind, 2013, (5): 34-38.
- [59] 李元元, 吴亚君, 张海亮, 等. 电子鼻在食用油鉴别中的应用进展[J]. 中国油脂, 2011, 10: 60-63.
Li YY, Wu YJ, Zhang HL, et al. Progress on the application of electronic nose for edible oil adulteration [J]. China Oils Fats, 2011, 10: 60-63.
- [60] 谢刚, 叶金, 王松雪. 食品安全快速检测方法评价技术研究进展[J]. 食品科学, 2016, 37(17): 270-274.
Xie G, Ye J, Wang SX. Research progress on evaluation technology of food safety rapid detection methods [J]. Food Sci, 2016, 37(17): 270-274.
- [61] 李培武, 丁小霞. 我国粮油质量安全防控技术研究与发展对策[J]. 中国农业科技导报, 2011, 13(5): 54-58.
Li PW, Ding XX. Studies on control technology for grain and oil quality and safety in China and development countermeasure [J]. J Agric Sci Technol, 2011, 13(5): 54-58.
- [62] 孙启鹏. 我国粮油质量安全防控技术研究与发展对策[J]. 食品安全导刊, 2018, (18): 17.
Sun QP. Research and development countermeasure of grain and oil quality and safety prevention and control technology in China [J]. China Food Saf Magaz, 2018, (18): 17.

(责任编辑: 武英华)

作者简介

梁毅, 助理工程师, 主要研究方向为粮油产品安全检测。
E-mail: 271608605@qq.com