

食品与饲料基质中真菌毒素检测技术研究进展

谢瑜杰^{1,2}, 陈 辉², 彭 涛^{2*}, 代汉慧², 胡雪艳², 范春林², 呼秀智^{1*}

(1. 河北工程大学生命科学与食品工程学院, 邯郸 056021; 2. 中国检验检疫科学研究院, 北京 100123)

摘 要: 真菌毒素是真菌在生长繁殖过程中产生的相对分子质量较小的次生有毒代谢产物, 不易被加工或烹调加热所破坏, 超过一定摄入量后会引发人的肝肾功能下降、癌变或诱发免疫抑制性疾病。目前尚无绝对有效的措施避免真菌毒素的污染, 因此, 研究可以准确高效地测定食品和饲料基质中的真菌毒素的检测技术非常重要。本研究通过对真菌毒素提取方法、净化方法及检测技术的研究进展进行综述, 发现目前研究方法大多是针对某一种真菌毒素进行检测的常规检测方法或者同时检测多种真菌毒素的检测方法, 由于这些方法存在稳定性差、定量不准确或前处理复杂等, 因此未来应大力开发检测快速、高灵敏度、高特异性的真菌毒素检测方法。

关键词: 真菌毒素; 检测技术; 食品; 饲料

Research progress on the detection techniques of mycotoxins in food and forage

XIE Yu-Jie^{1,2}, CHEN Hui², PENG Tao^{2*}, DAI Han-Hui², HU Xue-Yan²,
FAN Chun-Lin², HU Xiu-Zhi^{1*}

(1. College of Life Science and Food Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056021, China;
2. Chinese Academy of Inspection and Quarantine, Beijing 100123, China)

ABSTRACT: Mycotoxins are secondary toxic metabolite produced by fungi in the course of growth and reproduction. They are not easily destroyed in the processing and in the cooking and heating. When the mycotoxins exceed a certain intake, they will cause a decline in liver and kidney function, canceration, or immune suppressive diseases. At present, there are no effective methods to prevent the contamination of mycotoxins. Therefore, it is important to investigate techniques for the accurate and efficient determination of mycotoxins in food and forage. This paper reviewed the research progress of extraction methods, purification methods and detection techniques of mycotoxins. It was found that the current research methods were mostly a detection method for a kind of mycotoxin by conventional detection methods or simultaneous detection of multiple mycotoxins. Because these methods have poor stability, inaccurate quantification, or complex pretreatment, it is necessary to develop rapid, sensitive and specific detection methods for mycotoxins.

KEY WORDS: mycotoxins; detection techniques; food; forage

*通讯作者: 彭涛, 博士, 研究员, 主要研究方向为兽药残留分析/食品安全研究。E-mail: caiq_pengtao@126.com

呼秀智, 教授, 主要研究方向为食品安全与检测。E-mail: 380425434@qq.com

*Corresponding author: PENG Tao, Ph.D, Professor, Chinese Academy of Inspection and Quarantine, Beijing 100123, China. E-mail: caiq_pengtao@126.com

HU Xiu-Zhi, Professor, College of Life Science and Food Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056021, China. E-mail: 380425434@qq.com

1 引言

真菌毒素是典型的微生物毒素,是某些真菌在生长过程中产生的易引起人和动物病理变化和生理变异的次级代谢产物^[1]。到目前为止,已经发现了200多种真菌毒素,以黄曲霉毒素、赭曲霉毒素、杂色曲霉菌、展青霉素、玉米赤霉烯酮、伏马菌素、T-2毒素、呕吐毒素等为代表(结构式见图1)^[2,3],其中黄曲霉毒素和赭曲霉毒素毒性最强,也是谷物、玉米、花生等作物中常见的真菌毒素^[3,4]。真菌毒素通过污染食品以及饲料进入食物链,其超过一定摄入量则会引起肝肾功能下降、癌变或诱发免疫抑制性疾病^[1]。2002年,世界卫生组织(World Health Organization, WHO)把真菌毒素列为食源性疾病的重要来源;我国国家标准《食品安全国家标准食品中真菌毒素限量》(GB 2761-2017)中也规定了食品中黄曲霉毒素B₁、M₁、赭曲霉毒素等真菌毒素的限量要求^[5]。因此,建立研究可以准确高效地测定食品和饲料基质中的真菌毒素的现代检测技术非常重要。

目前,国内外已报道的真菌毒素的检测技术主要有薄层色谱法(thin layer chromatography, TLC)^[6,7]、高效液相色谱法(high performance liquid chromatography, HPLC)^[8-13]、液相色谱串联质谱法(liquid chromatography-tandem mass spectrometry, LC-MS/MS)^[14-21]、气相色谱串联质谱法(gas chromatography-tandem mass spectrometry, GC-MS/MS)^[22,23]、酶联免疫吸附法(enzyme linked immunosorbent assay, ELISA)^[24-27]和胶体金免疫层析技术(colloidal gold immunochromatography, GICT)^[28-32]等。本文通过对真菌毒素提取方法、净化方法及检测技术研究进展的综述,为开展真菌毒素的检测技术研究提供参考。

2 样品前处理技术

2.1 有机溶剂提取

真菌毒素主要是根据其在有机溶液中的溶解性质,使用合适的有机溶剂将其从食物、饲料中分离出来^[33]。从食品基质中提取真菌毒素的影响因素繁多,如温度、溶剂、基质、毒素的性质等。因此根据基质以及毒素性质的差异,各种真菌毒素提取方式不同。提取酸性真菌毒素时,通常需降低提取溶剂的pH值,使其有效地将毒素提取出来^[34],提取液中添加少量水可以湿润基质,增强有机溶剂在样品中的渗透能力,提高提取效率。因此,通常采用有机溶剂与水的混合溶液作提取剂^[33],如乙腈-水^[35]、甲醇-水^[36]。对于不同的基质应选择合适的提取液,如甲醇-水溶液适用于脂类含量较高的样品(如花生、坚果等),氯仿-水溶液适合脂类含量较低的样品(如小麦、大米等)^[33]。GB 5009.25-2016^[37]、SN/T 3868-2014^[38]、GB/T 30957-2014^[39]中提取植物性食品及粮谷、植物油、饲料等基质中的杂色曲霉毒素、黄曲霉毒素和赭曲霉毒素A时使用最多的提取液是甲醇-水或乙腈-水,目前国内使用较多的真菌毒素的提取液也是甲醇-水和乙腈-水较多^[40,41]。

2.2 净化

真菌毒素多存在于食品、农作物、动物组织样品中,某些复杂基质中的脂肪、蛋白质、色素等物质会在提取待测物质时被同时提取,从而对真菌毒素的分析检测产生严重干扰^[34,42],而合适的净化方法则可以去除一部分杂质。目前真菌毒素常用的净化方式主要有液液分配(liquid-liquid partition, LLP)^[43,44]、固相萃取(solid phase

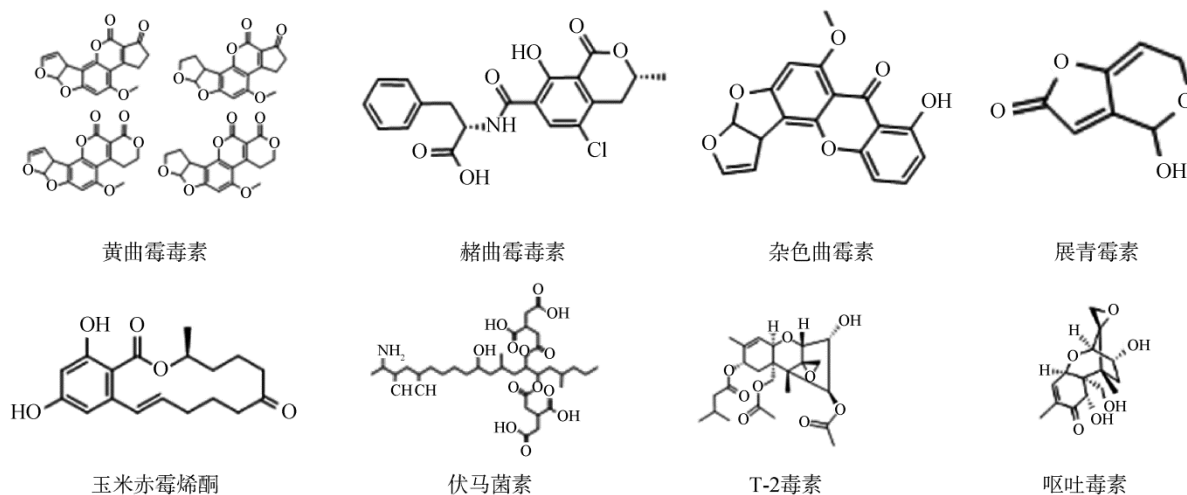


图1 代表性真菌毒素结构式

Fig. 1 Structural formulas of representative mycotoxins

extraction, SPE)^[8,14]、免疫亲和柱(immunoaffinity column, IAC)^[13,45]、基质固相分散萃取(matrix solid-phase dispersive extraction, MSPD)^[46]、QuEChERS^[47-54]净化技术等。

2.2.1 液液分配

LLP是利用2种不相溶的液相之间物化性质的差异来进行物质的差别分配,使溶质从一项转移至另一项。适用于样品量较大,基质复杂的样品^[55]。根据基质及真菌毒素的不同,常见的萃取剂有氯苯、三氯甲烷、四氯乙烷、四氯乙烯、二氯化碳、二氯乙烷、正己烷和甲苯等,其中净化单端孢霉烯族毒素、黄曲霉毒素和赭曲霉毒素A时常用三氯甲烷^[56]作为萃取剂。常见真菌毒素的LLP净化技术见表1。

2.2.2 固相萃取

SPE 是利用固体吸附剂将液体样品中的目标化合物吸附,与样品的基质和干扰化合物分离,然后再用洗脱液洗脱或加热解吸附剂,达到分离和富集目标化合物的目的^[57]。与传统液液萃取相比,固相萃取技术具有用时短、二次污染小、选择性好的优点^[58]。目前,固相萃取技术在谷物中的呕吐毒素^[15]、地沟油中的黄曲霉毒素^[59]净化使用

较多。常见固相萃取柱有 HLB 固相萃取柱^[15]、C₁₈ 固相萃取柱^[9]等,其中 HLB 固相萃取柱在多种真菌毒素同时净化方面效果较好。常见真菌毒素固相萃取净化技术见表 2。

2.2.3 免疫亲和柱

IAC 具有高选择性和抗干扰能力,是近几年来用于食品中真菌毒素提取净化的一种常用技术^[61,62],主要用于粮食、肾脏等样品中的黄曲霉毒素、赭曲霉毒素 A 和单端孢霉烯族毒素的净化。IAC 的原理是利用免疫反应的高度特异性,使所需净化的毒素固定在免疫亲和柱上,不需保留的组分先用一种溶剂冲洗掉,毒素再经另一种洗脱液洗脱,从而使样品中毒素得以净化^[63]。虽然特效单克隆抗体免疫技术具有选择性吸附的特性,但样品中某些具有生物活性的杂质也会被少量吸附,如肉制品及内脏组织中的大量小分子的蛋白质、干扰肽、磷脂和其他干扰物质^[64],淋洗可消除这些杂质的影响^[65],根据基质中杂质干扰物的不同,常见的淋洗液有超纯水^[62,65]、醋酸铵^[37]、甲醇^[66,67]、乙腈^[45]、甲酸-冰醋酸^[38]等。该技术在国标中常用来净化食品与饲料中的真菌毒素^[38,68],常见真菌毒素的免疫亲和柱净化技术见表 3。

表 1 液液分配净化真菌毒素
Table 1 Purification of mycotoxins by LLP

基质	毒素	提取液	净化方法	检测方法	回收率(%)	参考文献
小麦及其制品	脱氧雪腐镰刀菌烯醇	三氯甲烷-无水乙醇	液液分配、柱净化	TLC	80~100	[43]
粮谷类	黄曲霉毒素、赭曲霉毒素 A	甲醇-水	三氯甲烷液液萃取净化	HPLC-FLD	71.73~115.37	[44]
粮食	黄曲霉毒素	三氯甲烷	液液分配	HPLC-FLD	80.3~97	[53]
烘焙咖啡	赭曲霉毒素 A	三氯甲烷	碳酸氢钠液液萃取+免疫亲和柱	HPLC-FLD	74.1~78	[54]
红曲	黄曲霉毒素 B ₁	甲醇-水	液液分配	ELISA	101~146.8	[55]
谷物	A-型单端孢霉烯族化合物	乙腈-水+二氯甲烷	液液萃取	HPLC-FLD	70	[56]

表 2 固相萃取净化真菌毒素
Table 2 Purification of mycotoxins by SPE

基质	毒素	提取	净化	洗脱方式	检测技术	回收率(%)	参考文献
葡萄干	赭曲霉毒素 A	-	C ₁₈ 固相萃取小柱	水淋洗、甲醇洗脱	HPLC-FLD	94~108.4	[8]
玉米	伏马菌素 B ₁	乙腈-0.1 mol/mL 磷酸二氢钠(1+1)	C ₁₈ 固相萃取小柱	乙腈-水洗柱子,乙酸-水洗脱毒素	HPLC-FLD	82.1~87.8	[9]
苹果汁	4 种链格孢霉毒素	超纯水震荡	PS DVB 固相萃取柱	甲醇-水、正己烷依次淋洗,乙酸乙酯洗脱	UPLC-MS/MS	77.8~117.2	[14]
粮食及其制品	呕吐毒素	乙腈-水(84:16, V:V) 超声	HLB 固相萃取小柱	去离子水淋洗, 甲醇洗脱	LC-MS/MS	75.6~111	[15]
地沟油	黄曲霉毒素	-	Oasis HLB 固相萃取柱	甲醇淋洗, 乙腈洗脱	UPLC-MS/MS	80.9~115.6	[59]
花生	黄曲霉毒素 B ₁	甲醇: 水(6:4, V:V)	OASIS SPE 柱	甲醇: 水(3:7, V:V)淋洗, 甲醇洗脱	LC- MS/MS	93~105	[60]

2.2.4 基质固相分散萃取

MSPD 具有操作简单, 步骤少, 避免了样品均化、沉淀、离心、转溶、乳化、浓缩等繁琐步骤, 样品处理过程中目标分析物的损失少, 有机试剂用量少, 经济环保, 且不需要昂贵的前处理仪器设备等优点^[69,70]。该方法尤其适用于固体、半固体、黏性样品^[71-73]。用于基质固相分散前处理的分散材料主要有 C₁₈、中性氧化铝、弗罗里硅土等, 其中 C₁₈、中性氧化铝可作为吸附剂使用, 弗罗里硅土主要

作为脱色剂使用^[74]。常见真菌毒素基质固相分散萃取技术见表 4。

2.2.5 QuEChERS 净化

QuEChERS 净化技术是在 MSPD 基础上建立的新的净化方法, 其原理与 SPE 相似, 利用填料与基质中的干扰物质相互作用, 从而使吸附剂达到净化的目的^[77,78]。该技术具有简单、快速、稳定等优点, 在各种基质几乎都有使用, 研究学者使用 QuEChERS 方法净化真菌毒素示例见表 5。

表 3 免疫亲和柱净化真菌毒素
Table 3 Purification of mycotoxins by IAC

基质	毒素	提取	净化	洗脱方式	检测技术	回收率(%)	参考文献
小麦	呕吐毒素	水	单克隆免疫亲和柱	纯水淋洗, 甲醇洗脱	HPLC-UV	69.6~81.8	[13]
肾脏	赭曲霉毒素 A	磷酸酸化, 乙酸乙酯提取	免疫亲和柱	醋酸铵淋洗, 甲酸-冰醋酸洗脱	HPLC-FLD	72.5~87.4	[38]
花生	黄曲霉毒素	80%甲醇	单克隆免疫亲和柱	乙腈洗脱	HPLC-FLD	74.8~97.3	[45]
粮谷类	T-2 毒素	甲醇-水	单克隆免疫亲和柱	超纯水淋洗, 甲醇冲洗	HPLC-FLD	79.7~94.5	[62]
谷物	黄曲霉毒素、玉米赤霉烯酮、赭曲霉毒素 A	甲醇-水	单克隆免疫亲和柱	超纯水淋洗, 甲醇冲洗	HPLC-FLD	70.8~94	[65]
榛子酱	黄曲霉毒素	甲醇: 水(6:4, V:V)	免疫亲和柱	甲醇	HPLC-FLD	86~89	[66]

表 4 基质固相分散萃取净化真菌毒素
Table 4 Purification of mycotoxins by MSPD

基质	毒素	净化	分散剂	洗脱方式	检测技术	回收率(%)	参考文献
谷物	赭曲霉毒素 A	基质固相分散萃取	C ₁₈	甲醇	HPLC-FLD	80~93.65	[46]
鸡蛋	15 种真菌毒素	基质固相分散萃取	C ₁₈	1 mmol/L 甲酸铵的乙腈/甲醇	LC- MS/MS	61~90	[74]
辣椒	黄曲霉毒素	基质固相分散萃取	中性氧化铝-石墨化碳黑	乙腈	HPLC-FLD	87.3~95.4	[75]
食用香精香料	黄曲霉毒素	基质固相分散萃取	C ₁₈	-	LC-MS/MS	61.4~116.9	[76]

表 5 QuEChERS 方法净化真菌毒素
Table 5 Purification of mycotoxins by QuEChERS

基质	毒素	提取	填料	检测方法	回收率(%)	参考文献
柑橘	4 种真菌毒素	乙腈	C ₁₈	UPLC-MS/MS	78~103.3	[47]
婴幼儿谷类辅助食品	12 种真菌毒素	乙腈: 水: 乙酸(84:15:1, V:V:V)	C ₁₈ 、弗罗里硅土、无水硫酸镁	UPLC-MS/MS	80.5~106.4	[48]
玉米	7 种真菌毒素	乙腈: 水: 甲酸(50:49:1, V:V:V)	无水硫酸镁、PSA、C ₁₈	UPLC-MS/MS	89.7~112.9	[49]
谷物	8 种真菌毒素	1%乙酸乙腈	无水硫酸镁、醋酸钠	UPLC-MS/MS	75.5~113.4	[50]
干腌火腿	15 种真菌毒素	1%甲酸乙腈	C ₁₈	LC-MS/MS	79.1~99.5	[51]

3 真菌毒素检测技术研究进展

真菌毒素的检测方法很多,概括起来主要有生物鉴定法^[79-81]、仪器分析法^[8,9,24]和免疫分析法^[24-32]等。其中,生物鉴定法主要包括近红外检测技术、生物传感器、蛋白质芯片技术;仪器分析法包括 TLC、HPLC、LC-MS/MS、GC、GC-MS/MS 等;免疫分析法主要有胶体金免疫层析技术和酶联免疫吸附法。

3.1 色谱技术

3.1.1 薄层色谱法

TLC 是测定食品中真菌毒素的经典方法,利用毒素在紫外光线产生蓝紫色荧光的特性以及荧光的强弱和斑点的大小,进行判定毒素类别和含量^[82]。其优点是分析成本低、设备简单,是普通实验室检测真菌毒素常用的方法之一,包括单向展开和双向展开。由于提取液中存在较多杂质在展开时会影响斑点的荧光强度,而双向展开可以避开杂质中的干扰,因此通常建立双向薄层色谱技术结合紫外检测器(ultraviolet detector, UVD)、荧光检测器(fluorescence detector, FLD)检测食品或饲料中的真菌毒素^[83],表 6 列举了部分研究学者使用 TLC 方法检测真菌毒素。

3.1.2 高效液相色谱法

HPLC 是 20 世纪 70 年代发展起来的一种以液体为流动相的新型色谱技术^[85],具有高效、快速、灵敏、重现性好、检测限低、可做定性定量分析的优点^[35,86-88],是当前国内外检测真菌毒素最常用的技术。目前,高效液相色谱技术已应用于检测黄曲霉毒素、呕吐毒素、T-2 毒素、赭曲霉毒素、玉米赤霉醇、镰刀菌烯醇、伏马菌素、杂色曲霉菌含量的测定^[8-13]。

根据毒素的结构性质,常选用 UVD 和 FLD 进行检测^[33]。其中 FLD 具有灵敏度高、选择性好、干扰峰少的优点^[36],而且有些真菌毒素(如黄曲霉毒素、杂色曲霉菌等)自身具有荧光特性^[33],因此 HPLC-FLD 在真菌毒素检测中应用较广。但是,有些毒素(如黄曲霉毒素)的荧光性很弱或接触水后出现荧光淬灭现象,导致荧光性基本消失。因此,检测这类毒素时需采用衍生化方法增强荧光性^[33]。目前常采用的衍生化方法主要是三氟乙酸衍生化法^[89]和光化学衍生化法^[12]。朱鹏飞等^[89]采用三氟乙酸衍生化法与黄曲霉毒素发生反应,使得黄曲霉毒素 B₁、G₁ 在水相存在的情况

下也可发生荧光反应。由于三氟乙酸衍生法受温度、浓度和反应时间影响较大,且对 HPLC 存在腐蚀性,因此,有学者^[12]研究了不需要化学试剂的光化学衍生化联用 HPLC-FLD 检测技术。常见真菌毒素的 HPLC 检测方法见表 7。

3.1.3 气相色谱法

GC 是根据物质的沸点/极性对化合物进行分离分析^[90]。具有灵敏、高选择性、进样量小、分析速度快等优点^[91-93],可与电子捕获检测器(electronic capture detector, ECD)、火焰离子化检测器(flame ionization detector, FID)联用,用于粮谷中的单端孢霉烯族毒素、黄曲霉毒素、赭曲霉毒素 A 的检测。在这些技术中,GC-ECD 被认为是检测呕吐毒素最灵敏的方法^[89],也是检测单端孢霉烯族毒素及镰刀菌毒素最常用的检测技术^[94],尤其适合对多种镰刀菌毒素同时分析。使用 ECD 检测器前需将各毒素衍生化为具有电负性的化合物,常用的衍生化试剂包括三甲基氯硅烷和 7-氟丁酰化试剂 2 种,ECD 检测器对后者灵敏度高于前者^[95,96],常见真菌毒素的 GC 检测方法见表 8。

3.2 色谱质谱联用技术

3.2.1 液相色谱-串联质谱法

LC-MS/MS 是通过接口装置将具有高分离性能的液相色谱法与高灵敏度的质谱相结合,显示出了强大的定性、定量分析能力^[99]。具有分离性能好、高通量、应用范围广、简便快速、灵敏度高的特点,尤其在质谱多反映检测(multiple reaction monitoring, MRM)模式下检测灵敏度极高,对复杂基质进行检测时也能获得好的定性定量结果和化合物的结构信息^[100-102],对高沸点、不挥发、热不稳定化合物的分离和鉴定有独特的优势^[17],使该技术在检测食品及饲料中真菌毒素的应用上越来越广泛。真菌毒素普遍具有一定极性,常以电喷雾电离(electrospray ionization, ESI)为主要电离模式^[18],黄曲霉毒素、赭曲霉毒素 A、伏马菌素、T-2 毒素、HT-2 毒素在正电离下得到准分子离子;玉米赤霉醇类毒素在负电离模式下获得准分子离子。常见真菌毒素的 LC-MS/MS 检测方法见表 9。

3.2.2 气相色谱-质谱法

GC-MS 依靠其高灵敏度和强抗干扰能力在化学、生物和环境分析中得到广泛的应用,在真菌毒素分析中主要采用 GC-MS^[103]和 GC-MS/MS^[104-106]。有些毒素(如链格孢

表 6 TLC 方法检测真菌毒素
Table 6 Detection of mycotoxins by TLC

基质	毒素	展开剂	检测方法	回收率(%)	参考文献
花生	黄曲霉毒素	丙酮:氯仿(9:1, V:V)	TLC-FLD	86.5~99	[6]
粮食	杂色曲霉毒素	苯:甲醇:冰醋酸(90:8:2, V:V:V)	TLC-UVU	75	[7]
饲料	脱氧雪腐镰刀菌素	甲苯:乙酸乙酯:甲酸(6:3:1, V:V:V)	TLC-UVU	-	[84]

表 7 HPLC 检测真菌毒素
Table 7 Detection of mycotoxin by HPLC

基质	毒素	流动相	色谱柱	检测方法	检测波长 (nm)	检出限	回收率(%)	参考文献
葡萄干	赭曲霉毒素 A	乙腈-水-冰醋酸	ProdigyODS3 (250 mm×4.6 mm, 5 μm)	HPLC-FLD	<i>Ex</i> =333 <i>Em</i> =460	0.07 μg/kg	94~108.4	[8]
玉米	伏马菌素 B ₁	甲醇-0.05 mol/L 磷酸二氢钠(80+ 20)	Shimadzu STR ODS 柱 (4.6 mm×150 mm, 5 μm)	HPLC-FLD	<i>Ex</i> =335 <i>Em</i> =440	0.02 mg/kg	82.1~87.8	[9]
粮谷	T-2 毒素	乙腈-水	ZORBAX Eclipse XDB 苯基柱(4.6 mm×150 mm, 3.9 μm)	HPLC-FLD	<i>Ex</i> =381 <i>Em</i> =470	0.005 μg/g	82~108	[10]
花生	6 种真菌毒素	1%乙酸水-乙腈	Inertsil® ODS-3 C18 柱 (250 mm×4.6 mm, 5 μm)	HPLC-FLD	<i>Ex</i> =360 <i>Em</i> =440	0.03-1 μg/kg	83.1~99.5	[11]
坚果	黄曲霉毒素	甲醇-水	LaChrom C ₁₈ 柱 (250 mm×4.6 mm, 5 μm)	HPLC-FLD	<i>Ex</i> =360 <i>Em</i> =450	0.05-0.1 μg/kg	77.5~109.8	[12]
小麦	呕吐毒素	甲醇-水	Spherisorb C ₁₈ 柱 (20 cm×4.6 mm, 10 μm)	HPLC-UV	218	0.02 mg/kg	69.6~81.8	[13]

表 8 GC 检测真菌毒素
Table 8 Determination of mycotoxins by GC

基质	毒素	载气	色谱柱	检测方法	检测限	回收率(%)	参考文献
小麦、玉米	脱氧雪腐镰刀菌烯醇	氮气	SE-54 弹性石英毛细管柱 (25 m×0.25 mm)	GC-ECD	0.01 mg/kg	82.2~98.53、 86~103.4	[89]
粮食	雪腐镰刀烯醇	氮气	SE-54 弹性石英毛细管柱 (25 m×0.25 mm)	GC-ECD	1×10 ⁻¹¹ -1×10 ⁻¹⁰ g	85	[94]
谷物	T-2 毒素	氮气	GC-9A SE-54 宽口径毛细管柱(30 m×0.54 mm)	GC-FID	30 ng	86.31~89.22	[96]
小麦、玉米	脱氧雪腐镰刀菌烯醇、雪腐镰刀烯醇	氮气	2.6 m×3.2 mm 玻璃柱, 2%OV-17, 80~100 网孔	GC-ECD	0.01 mg/kg	77~96 91~102	[97]
玉米	脱氧雪腐镰刀菌烯醇	氮气	HP-5 毛细色谱柱(30 m×0.53 mm, 3%OV-101, 80~100 网孔的硅藻土色谱载体)	GC-ECD	10 ng/g	76.21	[98]

霉菌素等)具有高稳定性、难挥发的特性,因此在检测真菌毒素中很少使用 GC-MS 方法。表 10 列举了部分使用 GC-MS 检测真菌毒素的研究成果。

3.3 免疫分析技术

3.3.1 酶联免疫吸附法

ELISA 是基于单克隆抗体和多克隆抗体的检测技术,利用抗原抗体高度特异性和酶的高效催化作用,对抗原或抗体进行检测^[107],目前常用的是单克隆抗体^[108]。ELISA 具有对样品前处理要求低、操作简单、特异性高、灵敏度高、干扰少、快速简便、无需昂贵仪器等优点。该技术常用方法有直接法、间接法、双抗体夹心法、竞争法、抑制性测定法等^[24,25]。间接竞争 ELISA 灵敏度高、样品处理时间短,主要用于莲子、花生中黄曲霉毒素的检测^[24,26],在动物源性食品中真菌毒素的检测也有应用。常见真菌毒素的 ELISA 检测方法见表 11。

3.3.2 胶体金免疫层析法

GICT 是一种新型免疫标记技术,以胶体金作为示踪标记或显色剂^[109]。具有检测特异性强、灵敏度高、速度快、检测过程对人体无害、对环境无污染等优势,多用于检测食品、饲料中的黄曲霉毒素、赭曲霉毒素、呕吐毒素等的含量。化学还原法是制备胶体金溶液最常用的方法,常用的还原剂包括白磷、乙醇、过氧化氢、硼氢化钠、抗坏血酸、柠檬酸三钠、鞣酸等,其中,柠檬酸三钠常用于胶体金的制备^[110]。舒文祥等^[28]建立 GICT 检测食品和饲料中的赭曲霉毒素 A。采用柠檬酸三钠还原法制备胶体金溶液,标记赭曲霉毒素 A 单克隆抗体,赭曲霉毒素 A 的检测灵敏度为 5 ng/mL,假阳性和假阴性均为 0。同时,根据抗原抗体反应原理,主要使用的是竞争抑制法制备 GICT^[111]。常见真菌毒素的 GICT 检测方法见表 12。

表 9 LC-MS/MS 检测真菌毒素
Table 9 Determination of mycotoxins by LC-MS/MS

基质	毒素	流动相	色谱柱	检测方法	检测限	回收率(%)	参考文献
苹果汁	4 种链格孢毒素	乙腈-水	BEH C ₁₈ 柱(50 mm×2.1 mm,1.7 μm)	UPLC-MS/MS	-	77.8~117.2	[14]
粮食及其制品	呕吐毒素	3%氨水-乙腈	Phenomenex Kinetex C ₁₈ 柱(100 mm×4.6 mm, 2.6 μm)	LC-MS/MS	20 μg/kg	75.6~111	[15]
葡萄酒	14 种真菌毒素	水-2%乙酸-1 mol/L 乙酸铵甲醇	ACQUITY UPLC BEH C ₁₈ 柱(2.1 mm×100 mm, 1.7 μm)	UPLC-MS/MS	-	76~105	[16]
饲料	14 种霉菌毒素	0.1%甲酸-乙腈; 0.02% 乙酸-乙腈	Waters Atlantis dC ₁₈ 柱(150 mm ×3.0 mm, 3.0 μm)	LC-MS/MS	0.1~0.8 μg/kg	59.5~105	[17]
中药材	14 种真菌毒素	0.1%甲酸水-甲醇	Waters Xterra C ₁₈ 柱(100 mm×2.1 mm, 3.5 μm)	LC-MS/MS	-	71.9~99.7	[18]
腰果	4 种黄曲霉毒素	5 mol/L 乙酸铵甲醇水-5 mol/L 乙酸铵甲醇	资生堂 MG C ₁₈ 柱(100 mm×3.0 mm, 3 μm)	LC-MS/MS	0.009~0.04 μg/kg	63~78.5	[19]
农产品	黄曲霉毒素	0.1%甲酸水-甲醇	Agilent Poroshell120ec-C ₁₈ 反相色谱柱(2.1 mm×75 mm, 2.7 μm)	UPLC-MS/MS	0.015~0.095 μg/kg	85~90.6	[20]
葡萄酒	赭曲霉毒素 A	0.1%甲酸水-甲醇	ZORBAX Eclipse XDB-C ₁₈ 柱(3.0 mm×50 mm, 1.8 μm)	LC-MS/MS	0.2 μg/L	86.6~91	[21]

表 10 GC-MS 检测真菌毒素
Table 10 Determination of mycotoxins by GC-MS

基质	毒素	载气	衍生剂	回收率 (%)	参考文献
粮食	T-2、HT-2	氮气	七氟丁酰咪唑	47.2~110.8	[22]
饲料	脱氧雪腐镰刀烯醇	氮气	三甲基硅烷咪唑:双三甲基硅基乙酰胺:三甲基氯硅烷(3:3:2, V:V:V)	81.7~92.6	[23]
	雪腐镰刀烯醇			78.2~87.8	
饲料	脱氧雪腐镰刀烯醇	氮气	三甲基硅烷基	-	[107]

表 11 ELISA 检测真菌毒素
Table 11 Determination of mycotoxins by ELISA methods

基质	毒素	提取	检测技术	回收率(%)	检测限	参考文献
花生	黄曲霉毒素 B ₁	乙腈-水	间接竞争 ELISA	76~92.8	176.56 ng/kg	[24]
大米、面粉	T-2 毒素	70%甲醇-水	直接竞争 ELISA	85~117.5	0.125 μg/kg	[25]
				98.1~102.5		
莲子	黄曲霉毒素 B ₁	甲醇水	间接竞争 ELISA	74.73~126.9	0.128 μg/kg	[26]
猪肉、鸡肉	脱氧雪腐镰刀菌烯醇 T-2 毒素	乙酸乙酯-乙腈	间接竞争 ELISA	72.7~97.1	34.9 μg/kg	[27]
				72.1~95	43.5 μg/kg	

3.4 其他检测技术

除上述主要检测技术外,近红外检测技术、生物传感器、蛋白质芯片技术也用于检测食品中的真菌毒素。如,张强等^[79]采用近红外检测技术对 80 个稻谷样品中的黄曲霉毒素 B₁ 进行检测,并使用 ELISA 验证,确定基于 RBF 核

函数模型最优参数为 $c=106$, $\gamma=0.0015$,该模型校正集决定系数为 0.913。陈璐^[80]建立荧光信号适体传感器检测黄曲霉毒素 B₁,检出限为 1.6 ng/mL,在不同品牌的婴幼儿配方米粉做了实际验证实验,回收率分别为 96.3%~106.8%和 93%~101.2%。王丹^[81]建立同时检测 3 种真菌毒素膜

表 12 GICT 检测真菌毒素
Table 12 Determination of mycotoxins by GICT methods

基质	毒素	还原剂	检测方法	回收率(%)	检测限	参考文献
食品和饲料	赭曲霉毒素 A	柠檬酸三钠	竞争法 GICT	-	5 ng/mL	[28]
食品	黄曲霉毒素 B ₁	柠檬酸三钠	GICT	-	5 ng/mL	[29]
酱油	黄曲霉毒素 B ₁	-	竞争法 GICT	-	5 µg/kg	[30]
饲料	呕吐毒素	-	GICT	75.7~96.1	200 µg/kg	[31]
红葡萄酒/桃红葡萄酒/白葡萄酒	赭曲霉毒素 A	-	GICT	72~92.5	-	[32]
				76.6~87		
				78.4~84		

免疫芯片方法, 在 40 min 内测得黄曲霉毒素 B₁、赭曲霉毒素 A 和玉米赤霉烯酮检测阈值分别为 2、2 和 3 ng/mL。

4 结 语

由于真菌毒素对人和家畜产生严重危害, 因此提高真菌毒素的检测能力成为保障食品安全和人类健康的迫切需求。目前, 针对各种基质中真菌毒素的检测技术基本成熟, 但多应用在单一毒素或同种类毒素上, 在多种真菌毒素同时净化检测技术上报道还较少。开发高通量、低成本的多种类真菌毒素同时快速检测技术将成为研究重点。

参考文献

[1] 郑燕, 王远兴, 李瑾瑾. 液相色谱串联质谱法检测食品中的黄曲霉毒素[J]. 食品科学, 2010, 31(24): 385–388.
Zheng Y, Wang XY, Li JJ. Determination of aflatoxins in food by liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Food Sci, 2010, 31(24): 385–388.

[2] 陈基耘, 何玥. 食品中真菌毒素检测技术研究进展[J]. 计量与测试技术, 2014, 41(7): 12–14.
Chen JG, He Y. Research progress on detection methods of mycotoxins in food [J]. Meas Test Technol, 2014, 41(7): 12–14.

[3] 林壮森, 张焜, 赵肃清, 等. 食品中生物毒素的 ELISA 分析方法研究进展[J]. 食品科学, 2009, 30(3): 280–282.
Lin ZS, Zhang K, Zhao SQ, *et al.* Research progress on ELISA method for analysis of biotoxin in foodstuffs [J]. Food Sci, 2009, 30(3): 280–282.

[4] 傅博强, 陈敏璠, 唐治玉, 等. 生物毒素检测方法 & 标准物质研究进展[J]. 生命科学, 2016, 28(1): 51–63.
Fu BQ, Chen MP, Tang ZY, *et al.* Current progress on detection methods and reference materials of biotoxins [J]. Chin Bull Life Sci, 2016, 28(1): 51–63.

[5] GB 2761-2017 食品安全国家标准 食品真菌毒素限量[S].
GB 2761-2017 National food safety standard-Limits of mycotoxin in food [S].

[6] 张鹏, 赵卫东. 高效薄层色谱法测定黄曲霉毒素 B₁, B₂, G₁, G₂[J]. 分析化学, 2000, 10(3): 392–392.
Zhang P, Zhao WD. Determination of aflatoxin B₁, B₂, G₁, G₂ by high performance thin layer chromatography [J]. Chin J Anal Chem, 2000, 10(3): 392–392.

[7] 胡文娟, 田长清, 罗雪云, 等. 双向薄层色谱法测定粮食中的杂色曲霉

素[J]. 微生物学通报, 1983, 10(6): 151–153.
Hu WJ, Tian CQ, Luo XY, *et al.* Determination of versicolorin in grain by bi-directional thin layer chromatography [J]. Microbiol Bull, 1983, 10(6): 151–153.

[8] 张晓旭, 马丽艳, 杨丽丽, 等. C₁₈ 固相萃取柱-高效液相色谱法测定葡萄干中赭曲霉毒素 A[J]. 分析实验室, 2012, 31(7): 64–67.
Zhan XX, Ma YL, Yang LL. Determination of ochratoxin A in raisin by C₁₈ solid phase extraction column high performance liquid chromatography [J]. Chin J Anal Lab, 2012, 31(7): 64–67.

[9] 林维宣, 裴铁君, 董伟峰. 固相萃取-高效液相色谱法测定玉米中伏马毒素 B₁[J]. 大连工业大学学报, 2004, 23(1): 15–17.
Lin WX, Pei ZJ, Dong WF. Determination of fumonisins B₁ in corn by solid phase extraction-high performance liquid chromatography [J]. J Dalian Inst Light Ind, 2004, 23(1): 15–17.

[10] 李惠婧, 刘秋, 于一芒, 等. 免疫亲和柱-高效液相色谱法同时检测谷物中 T-2 毒素和 HT-2 毒素含量[J]. 食品与发酵工业, 2014, 40(8): 190–193.
Li HJ, Liu Q, Yu YM, *et al.* Simultaneous determination of T-2 toxin and HT-2 toxin in grain by immunoaffinity column high performance liquid chromatography [J]. Food Ferment Ind, 2014, 40(8): 190–193.

[11] 陈芳芳. 高效液相色谱法同时检测花生中 6 种真菌毒素的方法及应用研究[D]. 济南: 山东大学, 2017.
Chen FF. Simultaneous determination of six mycotoxins in peanut by high-performance liquid chromatography with fluorescence detector and its application [D]. Jinan: Shandong University, 2017.

[12] 王桂苓, 张岩岩, 李琳琳, 等. 坚果中黄曲霉毒素的光化学柱后衍生-高效液相色谱法测定[J]. 食品安全质量检测学报, 2014, 5(3): 833–839.
Wang GL, Zhang YY, Li LL, *et al.* Determination of aflatoxins in nuts by high performance liquid chromatography coupled with post-column photochemical derivatization [J]. J Food Saf Qual, 2014, 5(3): 833–839.

[13] 林维宣, 李继业, 田苗, 等. 单克隆免疫亲和柱-高效液相色谱法测定小麦中致呕毒素[J]. 中国粮油学报, 2001, 16(5): 18–20.
Lin WX, Li JY, Tian M, *et al.* Determination of vomitoxin in wheat by monoclonal immunoaffinity column high performance liquid chromatography [J]. J Chin Cereals Oil Ass, 2001, 16(5): 18–20.

[14] 何强, 李建华, 孔祥虹, 等. 超高效液相色谱-串联质谱法同时测定浓缩苹果汁中的 4 种链格孢霉毒素[J]. 色谱, 2010, 28(12): 1128–1131.
He Q, Li JH, Kong XH, *et al.* Simultaneous determination of four alternaria toxins in apple juice concentrate by ultraperformance liquid chromatography-electrospray ionization tandem mass spectrometry [J].

- Chin J Chromatogr, 2010, 28(12): 1128–1131.
- [15] 黄娟, 陈国松, 张晓燕, 等. 固相萃取-高效液相色谱-串联质谱法检测粮食及其制品中的呕吐毒素[J]. 色谱, 2012, 30(11): 1203–1207.
- Huang J, Chen XS, Zhang XY, *et al.* Determination of deoxynivalenol in grain and products by solid-phase extraction coupled with high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Chin J Chromatogr, 2012, 30(11): 1203–1207.
- [16] Masayoshi T, Ayumi T, Atsuo U, *et al.* A method for multiple mycotoxin analysis in wines by solid phase extraction and multifunctional cartridge purification, and ultra-high-performance liquid chromatography coupled to tandem mass spectrometry [J]. Toxins, 2012, 4(6): 476–486.
- [17] 应永飞, 朱聪英, 韦敏珏, 等. 液相色谱-串联质谱法测定饲料中 14 种霉菌毒素及其类似物的研究[J]. 分析化学研究报告, 2010, 38(12): 1759–1764.
- Ying YF, Zhu CY, Wei MY, *et al.* Determination of 14 mycotoxins and their analogues in feed by liquid chromatography tandem mass spectrometry [J]. Chin J Anal Chem, 2010, 38(12): 1759–1764.
- [18] [18] 葛宝坤, 赵礼祥, 王伟, 等. 免疫亲和柱净化-液相色谱-串联质谱法测定中药材中的 14 种真菌毒素[J]. 色谱, 2011, 29(6): 495–500.
- Ge BK, Zhao KX, Wang W. Determination of 14 mycotoxins in Chinese herbs by liquid chromatography-tandem mass spectrometry with immunoaffinity purification [J]. Chin J Chromatogr, 2011, 29(6): 495–500.
- [19] 毕瑞锋, 范志先, 付萌. 高效液相色谱-串联质谱法检测腰果中的黄曲霉毒素[J]. 色谱, 2011, 29(12): 1155–1159.
- Bi RF, Fan ZX, Fu M. Determination of aflatoxins in cashew by high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Chin J Chromatogr, 2011, 29(12): 1155–1159.
- [20] 王芹, 杭学宇, 宋鑫. 农产品中黄曲霉毒素 B₁、B₂、G₁、G₂ 的超高效液相色谱-质谱联用检测分析[J]. 中国卫生检验杂志, 2016(4): 482–485.
- Wang Q, Hang XY, Song X. Determination and analysis of aflatoxins B₁, B₂, G₁ and G₂ in agricultural products by ultraperformance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Chin J Health Lab Technol, 2016(4): 482–485.
- [21] 阎龙王, 王浩. 液相色谱-质谱联用技术测定葡萄酒中的赭曲霉毒素 A 残留[J]. 食品研究与开发, 2010, 31(6): 136–138.
- Yan LB, Wang H. Determination of ochratoxin A residues in wines by LC-MS-MS [J]. Food Res Dev, 2010, 31(6): 136–138.
- [22] 林纁, 陈佳, 吴弼东, 等. 固相萃取-气相色谱-串联质谱法检测粮食作物中的 T-2 与 HT-2 毒素[J]. 军事医学, 2013, 37(5): 381–384.
- Lin Y, Chen J, Wu BD, *et al.* Determination of T-2 and HT-2 toxins in cereal grains by solid phase extraction and gas chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Military Med, 2013, 37(5): 381–384.
- [23] 梁颖, 张春晖, 刘邻渭. 色谱分析技术在真菌毒素检测中的应用[J]. 中国卫生检验杂志, 2005, 15(10): 1273–1274.
- Liang W, Zhang CH, Liu LW. Application of chromatographic analysis technique in determination of mycotoxin [J]. Chin J Health Lab Technol, 2005, 15(10): 1273–1274.
- [24] 谢海波, 刘红, 陆苇, 等. 间接竞争 ELISA 检测试剂盒测定粮油食品中的黄曲霉毒素 B₁[J]. 食品安全质量检测学报, 2015, 6(7): 2834–2839.
- Xie TB, Liu H, Lu W. Determination of aflatoxin B₁ in cooking oil, peanut, and grain by using direct competitive ELISA kit [J]. J Food Saf Qual, 2015, 6(7): 2834–2839.
- [25] 曹艳红, 孟宪清, 冯杰, 等. 检测 T-2 毒素的直接竞争性酶联免疫吸附测定法的研究[J]. 中国人兽共患病学报, 2006, 22(2): 132–135.
- Cao YH, Meng XQ, Feng J, *et al.* Establishment of the monoclonal antibody based-enzyme-linked immunosorbent assay for the detection of T-2 toxin in cereals [J]. Chin J Zoonoses, 2006, 22(2): 132–135.
- [26] 褚先锋, 豆小文, 孔维军, 等. 间接竞争酶联免疫吸附法快速筛选莲子中黄曲霉毒素 B₁ 的污染水平[J]. 中国中药杂志, 2015, 40(4): 704–709.
- Zhe XF, Dou XW, Kong WJ, *et al.* Contamination level of aflatoxin B₁ in lotus seeds rapid screening by indirect competitive ELISA method [J]. China J Chin Mater Med, 2015, 40(4): 704–709.
- [27] 宋晓丽, 刘梅轩, 罗湘蜀, 等. 猪肉和鸡肉中脱氧雪腐镰刀菌烯醇和 T-2 毒素酶联免疫吸附检测方法的建立[J]. 中国畜牧兽医, 2015, 42(3): 525–530.
- Song XL, Liu MX, Luo XS, *et al.* Development of an enzyme-linked immunosorbent assay for the detection of deoxynivalenol and T-2 toxin in pork and chicken [J]. China Anim Husb Vet Med, 2015, 42(3): 525–530.
- [28] 舒文祥, 徐炜, 李艳, 等. 胶体金免疫层析法快速检测赭曲霉毒素 A 研究[J]. 粮食与油脂, 2011, (10): 20–22.
- She WX, Xu W, Li Y. Study on gold immunochromatography assay for rapid detection of ochratoxin A [J]. Cereals Oils, 2011, (10): 20–22.
- [29] 邓省亮, 赖卫华, 许杨. 胶体金免疫层析法快速检测黄曲霉毒素 B₁ 的研究[J]. 食品科学, 2007, 28(2): 232–236.
- Deng SL, Lai WH, Xu Y. Study on gold immunochromatography assay for rapid detection of aflatoxin B₁ [J]. Food Sci, 2007, 28(2): 232–236.
- [30] 赖卫华, 刘道峰, 邓省亮. 胶体金免疫层析法检测酱油中黄曲霉毒素 B₁[J]. 食品与机械, 2012, 28(1): 70–72.
- Lai WH, Liu DF, Deng SL. Study on aflatoxin B₁ detecting in sauce by colloidal gold immunochromatographic assay [J]. Food Mach, 2012, 28(1): 70–72.
- [31] 王雄, 程宗佳, 王彦斐, 等. 胶体金免疫层析法快速定量检测饲料中呕吐毒素[J]. 饲料工业, 2013, 34(14): 40–42.
- Wang X, Cheng ZJ, Wang YF, *et al.* Rapid quantitative determination of vomit toxin in feed by colloidal gold immunochromatography [J]. Feed Ind, 2013, 34(14): 40–42.
- [32] 庞世琦, 刘青, 李志勇, 等. 胶体金技术快速测定葡萄酒中赭曲霉毒素 A[J]. 食品安全质量检测学报, 2016, 7(8): 3073–3076.
- Pang SQ, Liu Q, Li ZY, *et al.* Rapid detection of ochratoxin A in wines by gold immunochromatography assay [J]. J Food Saf Qual, 2016, 7(8): 3073–3076.
- [33] 杜娟. 高效液相色谱法测定粮食中杂色曲霉毒素的研究[D]. 南京: 南京财经大学, 2011.
- Du J. Study on determination of sterigmatocystin in grains by HPLC [D]. Nanjing: Nanjing University of Finance and Economics, 2015.
- [34] 李凤琴. 真菌毒素分析及质量控制[J]. 环境卫生学杂志, 2004, 31(5): 265–272.
- Li FQ. Mycotoxin analysis and quality control [J]. J Environ Hyg, 2004, 31(5): 265–272.
- [35] 谢刚, 王松雪, 张艳. 超高效液相色谱法快速检测粮食中黄曲霉毒素的含量[J]. 分析化学, 2013, 41(2): 223–228.
- Xie G, Wang XS, Zhang Y. Rapid analysis of aflatoxins (B₁, B₂, G₁, G₂) in grain by immunoaffinity clear-up column and ultra performance liquid chromatography without derivation [J]. Chin J Anal Chem, 2013, 41(2): 223–228.

- [36] 柳洁, 何碧英. 高效液相色谱法测定食品中黄曲霉毒素的方法研究[J]. 现代预防医学, 2002, 29(2): 137-140.
- Liu J, He BY. Determination of aflatoxin B₁, B₂, G₁, G₂, M₁ in food by high performance liquid chromatography with solid phase extraction [J]. Mod Prev Med, 2002, 29(2): 137-140.
- [37] GB 5009.25-2016 食品安全国家标准 食品中杂曲霉素的测定[S].
- GB 5009.25-2016 national food safety standard-Determination of aspergillus in food [S].
- [38] SN/T 3868-2014 出口植物油中黄曲霉毒素 B₁、B₂、G₁、G₂ 的检测 免疫亲和柱净化高效液相色谱法[S].
- SN/T 3868-2014 Detection of aflatoxin B₁, B₂, G₁ and G₂ in export vegetable oils-Immunoaffinity column-high performance liquid chromatography [S].
- [39] GB/T 30957-2014 饲料中赭曲霉毒素 A 的测定 免疫亲和柱净化-高效液相色谱法[S].
- GB/T 30957-2014 Determination of ochratoxin A in feed-Immunoaffinity column-high performance liquid chromatography [S].
- [40] 胡佳薇, 田丽, 王敏娟, 等. 超高效液相色谱-大体积流通池荧光法检测食品中的 4 种黄曲霉毒素[J]. 中国卫生检验杂志, 2017, (8): 1109-1111.
- Hu JW, Tian L, Wang MJ, *et al.* Determination of 4 kinds of aflatoxin in food by ultra performance liquid chromatography and fluorimetric detection combined with large volume flow cell [J]. Chin J Health Lab Technol, 2017, (8): 1109-1111.
- [41] 陈祥准, 李舟, 黄美珍, 等. 液相色谱-串联质谱法测定宠物食品中赭曲霉毒素 A 和 B[J]. 分析科学学报, 2017, 33(2): 267-270.
- Chen XZ, Li Z, Huang FZ, *et al.* Determination of ochratoxin A and ochratoxin B in pet food by liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. J Anal Sci, 2017, 33(2): 267-270.
- [42] Stajnbaher D, Zupancic-Kralj L. Multiresidue method for determination of 90 pesticides in fresh fruits and vegetables using solid-phase extraction and gas chromatography-mass spectrometry [J]. J Chromatogr A, 2003, 1015(1-2): 185.
- [43] 魏润蕴. 小麦中脱氧雪腐镰刀菌烯醇(DON)的薄层色谱测定[J]. 卫生研究, 1986, 15(5): 40-43.
- Wei RY. TLC determination of deoxynivalenol (DON) in wheat [J]. J Hyg Res, 1986, 15(5): 40-43.
- [44] 杨琳, 张宇昊, 马良. 高效液相色谱法同时检测粮谷中的黄曲霉毒素和赭曲霉毒素[J]. 食品科学, 2010, 31(24): 250-254.
- Yang L, Zhang YH, Ma L. Simultaneous determination of aflatoxins and ochratoxin A in cereal grains by high performance liquid chromatography [J]. Food Sci, 2010, 31(24): 250-254.
- [45] 张鹏, 张艺兵, 赵卫东, 等. 免疫亲和柱净化、在线电化学衍生化高效液相色谱法检测花生中的黄曲霉毒素[J]. 色谱, 2000, 18(1): 82-84.
- Zhang P, Zhang YB, Zhao WD, *et al.* Detection of aflatoxin in peanuts by immunoaffinity column purification and on-line electrochemical derivatization high performance liquid chromatography [J]. Chin J Chromatogr, 2000, 18(1): 82-84.
- [46] 李尧, 张雪梅, 党献民, 等. 基质分散固相萃取净化液相色谱检测谷物中赭曲霉毒素 A[J]. 粮食与饲料工业, 2012, (10): 57-60.
- Ki R, Zhang XM, Dang XM, *et al.* Determination of ochratoxin A cereal by high performance liquid chromatography with matrix solid-phase dispersion cleaning [J]. Cereal Feed Ind, 2012, (10): 57-60.
- [47] 史文景, 赵其阳, 焦必宁. UPLC-ESI-MS-MS 结合 QuEChERS 同时测定柑橘中的 4 种真菌毒素[J]. 食品科学, 2014, 35(20): 170-174.
- Shi WJ, Zhao QY, Jiao BN. Simultaneous determination of four mycotoxins in citrus fruits by ultra performance liquid chromatography-electrospray ionization tandem mass spectrometry combined with modified QuEChERS [J]. Food Sci, 2014, 35(20): 170-174.
- [48] 苏碧玲, 谢维平, 欧阳燕玲, 等. QuEChERS 净化-超高效液相色谱-串联质谱法测定婴幼儿谷类辅助食品中 12 种真菌毒素[J]. 中国食品卫生杂志, 2016, 28(4): 467-471.
- Su BL, Xie WP, Ou Yang YL, *et al.* Determination of twelve mycotoxins in cereal-based complementary foods for infants and young children by ultra high performance liquid chromatography coupled to mass spectrometry using QuEChERS approach [J]. Chin J Food Hyg, 2016, 28(4): 467-471.
- [49] 张海霞, 杨静, 刘畅, 等. QuEChERS-超高效液相色谱-串联质谱法快速检测玉米中 7 种真菌毒素[J]. 黑龙江农业科学, 2017, (7): 61-65.
- Zhang HX, Yang J, Liu C, *et al.* Rapid detection of seven mycotoxins in maize by QuEChERS with ultra-high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Heilongjiang Agric Sci, 2017, (7): 61-65.
- [50] 陈慧菲, 朱天仪, 陈凤香, 等. QuEChERS-超高效液相色谱串联质谱法测定谷物中的 8 种真菌毒素[J]. 粮食与油脂, 2016, 29(5): 67-70.
- Chen HF, Zhu TY, Chen FX, *et al.* Simultaneous determination of 8 mycotoxins in cereal with QuEChERS-based extraction and ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Cereals Oils, 2016, 29(5): 67-70.
- [51] 郭礼强, 宫小明, 丁葵英, 等. 基于 QuEChERS 提取的液相色谱-串联质谱法测定干腌火腿中 15 种真菌毒素[J]. 分析测试学报, 2015, 34(2): 141-146.
- Guo LQ, Gong XM, Ding KY, *et al.* Determination of 15 mycotoxins in dry-cured hams with QuEChERS-based extraction and liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. J Instrum Anal, 2015, 34(2): 141-146.
- [52] 暴铤, 郭磊, 陈佳, 等. 生物毒素检测技术研究进展[J]. 分析化学, 2009, 37(5): 764-771.
- Bao Y, Guo L, Chen J, *et al.* Progress in the research of biotoxin detection technology [J]. Chin J Anal Chem, 2009, 37(5): 764-771.
- [53] 彭志兵, 章烜, 蒋建云. 液液萃取-高效液相色谱法测定粮食中黄曲霉毒素的研究[J]. 粮食科技与经济, 2012, (b12): 4-4.
- Peng ZB, Zhang X, Jiang JY. Study on the determination of aflatoxin in grain by liquid liquid extraction and high performance liquid chromatography [J]. Grain Sci Technol Econ, 2012, (b12): 4-4.
- [54] 樊祥, 褚庆华, 周瑶, 等. 液-液萃取结合免疫亲和柱层析净化-高效液相色谱测定烘焙咖啡中赭曲霉毒素 A[J]. 理化检验: 化学分册, 2008, 44(8): 736-739.
- Fan X, Zhe QH, Zhou Y, *et al.* Determination of ochratoxin A in roasted coffee by liquid liquid extraction combined with immunoaffinity column chromatography and HPLC [J]. Phys Testing Chem Anal B: Chem Anal, 2008, 44(8): 736-739.
- [55] 龚燕, 蔡建荣, 赵晓联, 等. ELISA 法检测红曲中的黄曲霉毒素 B₁[J]. 食品与生物技术学报, 2004, 23(4): 10-12.
- Gong Y, Cai JR, Zhao XL, *et al.* Determination of aflatoxin B₁ in red

- leaven by ELISA [J]. *J Food Biotechnol*, 2004, 23(4): 10–12.
- [56] 许烨, 李军, 隋凯, 等. 高效液相色谱法测定谷物中的 A-型单端孢霉烯族化合物[J]. *甘肃农业*, 2005, (11): 207–207.
- Xu Y, Li J, Sui K, *et al.* Determination of A-tricothecenes in grain by HPLC [J]. *Gansu Agric*, 2005, (11): 207–207.
- [57] 高巍, 武中平, 徐春祥, 等. 固相萃取技术研究[J]. *江苏食品与发酵*, 2006, (3): 17–21.
- Gao W, Wu ZP, Xu CX, *et al.* Study on solid phase extraction technology [J]. *Jiangsu Food Ferment*, 2006, (3): 17–21.
- [58] 马娜, 陈玲, 熊飞. 固相萃取技术及其研究进展[J]. *上海环境科学*, 2002, 21(3): 181–184.
- Ma N, Chen L, Xiong F. Solid phase extraction technology and its study progress [J]. *Shanghai Environ Sci*, 2002, 21(3): 181–184.
- [59] 吴春英, 白鹭, 谷风, 等. UPLC-MS/MS 测定地沟油中黄曲霉毒素和苯并芘[J]. *食品工业*, 2017, (1): 285–288.
- Wu CY, Bai L, Gu F, *et al.* Simultaneous determination of aflatoxin and benzo[a]pyrene in hogwash oil using ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. *Food Ind*, 2017, (1): 285–288.
- [60] 杨静, 哈益明, 王锋. 高效液相色谱-串联质谱法检测花生中的黄曲霉毒素 B₁[J]. *分析试验室*, 2009, 28(6): 35–38.
- Yang J, Ha YM, Wang F. Determination of aflatoxin B₁ in peanuts by high performance liquid chromatography tandem mass spectrometry [J]. *Chin J Anal Lab*, 2009, 28(6): 35–38.
- [61] 任一平, 章宇, 邵双良, 等. 液质联用法检测食品和饲料中的多组分霉菌毒素的残留[C]. *中国食品科学技术学会东西方食品业高层论坛*, 2007.
- Ren YP, Zhang Y, Shao SL, *et al.* Determination the residues of mycotoxins in food and feed by liquid chromatography [C]. *China Association of Food Science and Technology-the High Level Forum of the East and the West Food Industry*, 2007.
- [62] 李军, 许烨, 隋凯, 等. 免疫亲和柱净化/柱前衍生化-高效液相色谱荧光检测法测定粮谷中的 T-2 毒素[J]. *色谱*, 2006, 24(3): 256–259.
- Li J, Xu Y, Sui K, *et al.* determination of T-2 toxin in cereal grains by HPLC with fluorescence detection after immunoaffinity column clean-up and precolumn derivatization [J]. *Chin J Chromatogr*, 2006, 24(3): 256–259.
- [63] 黄晓琳, 韩剑众, 曲道峰. 动物可食组织中霉菌毒素的残留及检测方法研究进展[J]. *食品科学*, 2013, 34(5): 293–296.
- Huang XL, Han JZ, Qu DF. Research advances in detection techniques of mycotoxin residues in animal tissues [J]. *Food Sci*, 2013, 34(5): 293–296.
- [64] 李玉平, 侯亚莉, 程千川, 等. 高效液相色谱法测定猪肾脏中赭曲霉毒素 A[J]. *食品研究与开发*, 2017, 38(19): 152–155.
- Li YP, Hou YL, Cheng QC, *et al.* Determination of ochratoxin A in kidney of pigs by high performance liquid chromatography [J]. *Food Res Dev*, 2017, 38(19): 152–155.
- [65] 李军, 于一茫, 田苗, 等. 免疫亲和柱净化-柱后光化学衍生-高效液相色谱法同时检测粮谷中的黄曲霉毒素、玉米赤霉烯酮和赭曲霉毒素 A [J]. *色谱*, 2006, 24(6): 581–584.
- Li J, Yu YM, Tian M, *et al.* Simultaneous detection of aflatoxins, zearalenone and ochratoxin A in cereal grains by immunoaffinity column and HPLC coupled with post column photochemical derivatization [J]. *Chin J Chromatogr*, 2006, 24(6): 581–584.
- [66] Senyuva HZ, Gilbert J. Immunoaffinity column cleanup with liquid chromatography using post-column bromination for determination of aflatoxins in hazelnut paste: interlaboratory study [J]. *J AOAC Int*, 2005, 88(2): 526.
- [67] Brera C, Debegnach F, Minardi V, *et al.* Immunoaffinity column cleanup with liquid chromatography for determination of aflatoxin B₁ in corn samples: interlaboratory study [J]. *J AOAC Int*, 2007, 90(3): 765.
- [68] GB/T 30955-2014 饲料中黄曲霉毒素 B₁、B₂、G₁、G₂ 的测定 免疫亲和柱净化-高效液相色谱法[S].
- GB/T 30955-2014 Determination of aflatoxin B₁, B₂, G₁ and G₂ in feed-Immunoaffinity column-high performance liquid chromatography [S].
- [69] 曹亚林. MSPD 联合 LC-MS/MS 技术在茶叶中农药残留分析中的应用研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2015.
- Cao YL. A novel method based on MSPD for simultaneous determination of pesticide residues in tea by LC-MS/MS [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2015.
- [70] 段劲生, 王梅, 孙明娜, 等. 基质固相分散在农药残留分析中的应用研究进展[J]. *农药*, 2006, 45(8): 508–510.
- Duan JS, Wang M, Sun MN, *et al.* Research status on the application of matrix solid-phase dispersion in pesticide residue analysis [J]. *Agrochemicals*, 2006, 45(8): 508–510.
- [71] Barker SA. Matrix solid-phase dispersion. [J]. *J Chromatogr A*, 2000, 885(1–2): 115.
- [72] Capriotti AL, Cavaliere C, Giansanti P, *et al.* Recent developments in matrix solid-phase dispersion extraction [J]. *J Chromatogr A*, 2010, 1217(16): 2521.
- [73] Barker SA. Applications of matrix solid-phase dispersion in food analysis [J]. *J Chromatogr A*, 2000, 880(1–2): 63.
- [74] 朱闰月, 赵志勇, 杨宪立, 等. 基质固相分散-液相色谱串联质谱法同时检测鸡蛋中 15 种真菌毒素生物标志物[J]. *分析化学*, 2015, (7): 994–1000.
- Zhu RY, Zhao ZY, Yang XL, *et al.* Simultaneous detection the 15 kinds of mycotoxins in egg biomarkers by matrix solid phase dispersion-LC-MS/MS [J]. *Chin J Anal Chem*, 2015, (7): 994–1000.
- [75] 郑屏, 盛旋, 余晓峰, 等. 基质固相分散液相色谱法检测辣椒产品中的黄曲霉毒素[J]. *色谱*, 2006, 24(1): 62–64.
- Zheng P, Sheng X, Yu XF, *et al.* Detection of aflatoxins in hot chilli products by matrix solid-phase dispersion and liquid chromatography [J]. *Chin J Chromatogr*, 2006, 24(1): 62–64.
- [76] 王冲, 孙海峰, 吕乔, 等. 基质分散固相萃取-液质联用法测定食用香精香料中的黄曲霉毒素类真菌毒素[J]. *中国食品添加剂*, 2016, (6): 180–186.
- Wang C, Sun HF, Lv Q, *et al.* Determination of the aflatoxin mycotoxins in edible essence by matrix solid-phase dispersion extraction-high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. *China Food Addit*, 2016, (6): 180–186.
- [77] 陈建彪, 董丽娜, 刘娇, 等. QuEChERS 在食品中真菌毒素检测的研究进展[J]. *食品科学*, 2014, 35(11): 286–291.
- Chen JB, Dong LN, Liu J, *et al.* Advances in Application of QuEChERS for mycotoxin analysis in foods [J]. *Food Sci*, 2014, 35(11): 286–291.
- [78] 陈霞. 基于 QuEChERS 的快速 UHPLC-MS/MS 法测定葡萄酒及其原料中 20 种真菌毒素方法的研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2017.

- Chen X. Multiclass mycotoxin analysis in wine and its raw materials by ultra high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry using a procedure based on QuEChERS [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2017.
- [79] 张强, 刘成海, 孙井坤, 等. 基于支持向量机的稻谷黄曲霉毒素 B₁ 近红外无损检测[J]. 东北农业大学学报, 2015, 46(5): 84–88.
- Zhang Q, Liu CH, Sun JK, *et al.* Near-infrared spectroscopy nondestructive determination of aflatoxin B₁ in paddy rice based on support vector machine regression[J]. J Northeast Agric Univ, 2015, 46(5): 84–88.
- [80] 陈璐. 基于适配体的食品中黄曲霉毒素 B₁ 和 M₁ 的生物传感器检测方法研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2015.
- Chen L. studies on the development of biosensor detection of aflatoxin B₁ and M₁ in food base on aptamer [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2015.
- [81] 王丹. 建立同时检测三种真菌毒素膜免疫芯片方法的研究与抗大霉素多克隆抗体的制备[D]. 南昌: 南昌大学, 2010.
- Wang D. study on establishing simultaneous detection for three kinds of mycotoxin by membrane immune-chip and preparation of anti-GM polyclonal antibodies [D]. Nanchang: Nanchang University, 2010.
- [82] 栾传磊. 饲料、猪肉中赭曲霉毒素 A 的液液分散微萃取—高效液相色谱测定方法研究及应用[D]. 济南: 山东大学, 2016.
- Luan CL. Study and application of ochratoxin A detecting method in feed and pork by dispersive liquid-liquid microextraction coupled with high performance liquid chromatography [D]. Jinan: Shandong University, 2016.
- [83] 徐荣, 张佩华. 黄曲霉毒素 B₁ 的检测方法[J]. 湖南饲料, 2018(1): 38–39, 48.
- Xu R, Zhang PH. A method for the detection of aflatoxin B₁ [J]. Hunan Feed, 2018(1): 38–39, 48.
- [84] GB/T 8381.6-2005 配合饲料中脱氧雪腐镰刀菌烯醇的测定 薄层色谱法[S].
- GB/T 8381.6-2005 Determination of deoxynivalenol in compound feed-TLC [S].
- [85] 杜娟. 高效液相色谱法测定粮食中杂色曲霉毒素的研究[D]. 南京: 南京财经大学, 2011.
- Du J. Study on determination of sterigmatocystin in grains by HPLC [D]. Nanjing: Nanjing University of Finances and Economics, 2011.
- [86] 蔡俊, 田尔诺, 邵帅, 等. 黄曲霉毒素 B₁ 生物脱毒的研究进展[J]. 微生物学通报, 2017, 44(3): 726–731.
- Cai J, Tian EN, Shao S, *et al.* Progress in biological detoxification of aflatoxin B₁ [J]. Microbiol China, 2017, 44(3): 726–731.
- [87] 李峻媛, 万丽, 杨美华. 真菌毒素限量标准及其在中药中的研究进展[J]. 中草药, 2011, 42(3): 602–609.
- Li JY, Wan L, Yang MH. Limit standard of mycotoxins and advances in studies on its application in Chinese materia medica [J]. Chin Tradit Herb Drugs, 2011, 42(3): 602–609.
- [88] Canel C, Moraes RM, Dayan FE, *et al.* Podophyllotoxin [J]. Phytochemistry, 2000, 54(2): 115–120.
- [89] 朱鹏飞, 刘文卫, 凌霞, 等. 柱前衍生-高效液相色谱荧光法测定粮谷类食物中黄曲霉毒素 B₁、B₂、G₁、G₂ [J]. 中国卫生检验杂志, 2015, (6): 807–809.
- Zhu PF, Liu WD, Ling X, *et al.* Determination of aflatoxin B₁, B₂, G₁, G₂ in cereal food by high performance liquid chromatography with fluorescence detector and pre-column derivatization [J]. Chin J Health Lab Technol, 2015, (6): 807–809.
- [90] 王绍臣. 气相色谱技术的研究进展及其应用[J]. 黑龙江科技信息, 2016, (22): 120.
- Wang SC. Research progress and application of gas chromatography technology [J]. Sci Technol Innov, 2016, (22): 120.
- [91] 曹环礼. 气相色谱技术的研究进展及其应用[J]. 广东化工, 2009, 36(8): 100–101.
- Cao HL. Research progress and application of gas chromatography technology [J]. Guangdong Chem Ind, 2009, 36(8): 100–101.
- [92] 游淑珠. 小麦、玉米中 DON 气相色谱检测方法的建立及 OTA 单克隆抗体免疫亲和柱的研制[D]. 南昌: 南昌大学, 2005.
- You SZ. Development of a gas chromatographic method to determine deoxynivalenol in wheat and corn and preparation of monoclonal antibody immunoaffinity column for ochratoxin A [D]. Nanchang: Nanchang University, 2005.
- [93] 黄凤丽. 气相色谱在医药检测中的应用的研究进展[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(33): 16035–16037.
- Huang FL. Progress in the application of gas chromatography in medical examination [J]. J Anhui Agric Sci, 2012, 40(33): 16035–16037.
- [94] 温肇霞, 杨宗军, 宋扬. 粮食中 3 种镰刀菌毒素的气相色谱测定法[J]. 青岛大学医学院学报, 2001, 37(1): 35–36.
- Wen ZX, Yang ZJ, Song Y. Gas chromatographic method for detecting three kinds of fusarium mycotoxin in grains [J]. Acta Acad Med Qingdao Univ, 2001, 37(1): 35–36.
- [95] 冯建林, 罗毅. 气相色谱(电子捕获检测器)和气相色谱-质谱联用测定血中十种单端孢霉烯族毒素[J]. 色谱, 1994, (2): 119–121.
- Feng JL, Luo Y. Gas chromatography (ECD) and gas chromatography-mass spectrometry determination ten kinds of trichothecenes in blood [J]. Chin J Chromatogr, 1994, (2): 119–121.
- [96] 李德安, 周宏博. 气相色谱仪宽口径毛细管柱检测谷物中 T-2 毒素方法[J]. 中华地方病学杂志, 2000, 19(1): 69–70.
- Li DA, Zhou HB. Wide caliber gas-chromatography to detect the content of T-2 toxins in grain [J]. Chin J Endemiol, 2000, 19(1): 69–70.
- [97] 魏润蕴, 王竹天. 谷物中脱氧雪腐镰刀菌烯醇和雪腐镰刀菌烯醇的气相色谱测定[J]. 卫生研究, 1996, (4): 242–245.
- Wei RY, Wang ZT. Determination the deoxynivalenol and fusarium oxenol in grain by gas chromatography [J]. J Hyg Res, 1996, (4): 242–245.
- [98] 俞琼, 计融, 王晓云, 等. 玉米中脱氧雪腐镰刀菌烯醇的气相色谱分析[J]. 吉林大学学报(医学版), 2007, 33(5): 939–941.
- Yu Q, Ji R, Wang XY, *et al.* Gas chromatography analysis on deoxynivalenol in maize [J]. J Jilin Univ (Med Ed), 2007, 33(5): 939–941.
- [99] 勾新磊, 刘伟丽, 高峡, 等. 液相色谱-串联质谱技术在食品药品安全分析领域的应用[J]. 食品安全质量检测学报, 2016, 7(11): 4283–4288.
- Gou XL, Liu WL, Gao X, *et al.* Application of liquid chromatography-tandem mass spectrometry in food and drug safety analysis [J]. J Food Saf Qual, 2016, 7(11): 4283–4288.
- [100] 王立琦, 贺利民, 曾振灵, 等. 液相色谱-串联质谱检测兽药残留中的基质效应研究进展[J]. 质谱学报, 2011, 32(6): 321–332.
- Wang LQ, He LM, Zeng ZL, *et al.* Progress in matrix effect of veterinary drug residues analysis by HPLC-MS/MS [J]. J Chin Mass Spectr Soc,

- 2011, 32(6): 321–332.
- [101] 郭智, 张焯, 宋冬梅, 等. 液相色谱-串联质谱法在药物代谢研究中的应用最新进展[J]. 中国新药杂志, 2007, 16(23): 1981–1985.
- Guo L, Zhang X, Song DM, *et al.* Recent progress on the application of LC-MS/MS in drug metabolism [J]. Chin J New Drugs, 2007, 16(23): 1981–1985.
- [102] 孙雷, 刘琪, 王树槐. 液相色谱-串联质谱技术进展及在兽药行业上的应用[J]. 中国兽药杂志, 2007, 41(9): 34–37.
- Sun L, Liu Q, Wang SH. The progress of liquid chromatography-tandem mass spectrometer technology and application in veterinary drug industry [J]. Chin J Vet Drug, 2007, 41(9): 34–37.
- [103] 陈晓水, 侯宏卫, 边照阳, 等. 气相色谱-串联质谱(GC-MS/MS)的应用研究进展[J]. 质谱学报, 2013, 34(5): 308–320.
- Chen XS, Hou HW, Bian ZY, *et al.* Research Progress on Application of GC-MS/MS [J]. J Chin Mass Spectr Soc, 2013, 34(5): 308–320.
- [104] 李春扬, 张晓磊, 田菲菲, 等. 气相色谱-串联质谱技术在食品分析中的应用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2016, 7(8): 3291–3299.
- Li CY, Zhang XL, Tian FF, *et al.* Research progress on application of gas chromatography-tandem mass spectrometry in food analysis [J]. J Food Saf Qual, 2016, 7(8): 3291–3299.
- [105] 张慧丽, 王建华, 刘靖靖, 等. 气相色谱-串联质谱在食品农药残留检测中的应用进展[J]. 化学分析计量, 2014, (6): 103–106.
- Zhang HL, Wang JH, Liu JJ, *et al.* research progress on the determination of pesticide residues in food by GC-MS/MS [J]. Chem Anal Meterag, 2014, (6): 103–106.
- [106] 尹琨. 脱氧雪腐镰刀菌烯醇(DON)检测方法的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2006.
- Yin J. A study of various detection methods for deoxynivalenol [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2006.
- [107] 陈建伟. 玉米中黄曲霉毒素的 ELISA 测定方法研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2012.
- Chen JW. Study on the ELISA determination method of aflatoxins in corn [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012.
- [108] 张爱华. 赭曲霉毒素 A 免疫检测方法的研究与呕吐毒素生物转化菌 NJA-1 的鉴定[D]. 南京: 南京农业大学, 2010.
- Zhang AH. Development of an immunoassay for ochratoxin A and identification of NJA-1, a biotransformational microorganism for vomitoxin [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2010.
- [109] 任娟. 胶体金免疫层析技术研究现状及进展[J]. 新疆畜牧业, 2011, (12): 22–24.
- Ren J. Research progress of colloidal gold immunochromatography [J]. Anim Husb Xinjiang, 2011, (12): 22–24.
- [110] 朱丽, 袁慧. 胶体金免疫层析技术及其在霉菌毒素检测中的应用[J]. 中国饲料, 2009, (23): 35–37.
- Zhu L, Yuan H. Colloidal gold immunochromatography and its application in the detection of mycotoxin [J]. China Feed, 2009, (23): 35–37.
- [111] 李康, 应美蓉, 盛慧萍, 等. 胶体金免疫层析技术在真菌毒素快速检测中的应用[J]. 食品安全质量检测学报, 2013, 4(1): 201–206.
- Li Kang, Ying MR, Sheng HP, *et al.* Application of colloidal gold immunochromatographic assay in rapid detection of mycotoxins [J]. J Food Saf Qual, 2013, 4(1): 201–206.

(责任编辑: 姜姗)

作者简介



谢瑜杰, 硕士研究生, 主要研究方向为食品安全与检测。
E-mail: 1443908316@qq.com



彭涛, 博士, 研究员, 主要研究方向为兽药残留分析/食品安全研究。
E-mail: caiq_pengtao@126.com



呼秀智, 教授, 主要研究方向为食品安全与检测。
E-mail: 380425434@qq.com