

粮食真菌毒素污染的无损检测方法研究进展

沈飞^{1,2*}, 吴启芳^{1,2}, 刘兵^{1,2}, 宋伟^{1,2}

(1. 南京财经大学食品科学与工程学院, 南京 210046; 2. 粮食储运国家工程实验室, 南京 210046)

摘要: 粮食种植、加工和储运过程易受真菌毒素污染, 严重威胁人畜健康。然而, 目前传统的真菌毒素检测方法存在过程繁琐、时效性差或灵敏度低等缺点, 难以满足现场快速准确检测的需要, 日益成为制约粮食质量安全的瓶颈。现代无损检测技术作为一种新兴的检测技术, 可以在不破坏样品的情况下对其进行质量评价, 是粮食品质在线、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分析方面具有巨大的应用潜力。本文重点综述了近红外光谱、高光谱图像、电子鼻等典型无损检测技术在粮食真菌毒素污染检测分析中的最新研究进展, 讨论了各种技术的优点及限制因素, 并对其应用前景进行了展望。

关键词: 粮食; 真菌毒素; 无损检测; 研究进展

Review on non-destructive determination technology for mycotoxin contamination detection in grain

SHEN Fei^{1,2*}, WU Qi-Fang^{1,2}, LIU Bing^{1,2}, SONG Wei^{1,2}

(1. School of Food Science and Engineering, Nanjing University of Finance and Economics, Nanjing 210046, China;
2. National Engineering Laboratory of Grain Storage and Transportation, Nanjing 210046, China)

ABSTRACT: Grain is vulnerable to mycotoxin contamination during planting, processing, storage and transportation, which causes a serious threat to human and animal health. However, current traditional methods for mycotoxin detection are usually laboratory-intensive, time-consuming or with low sensitivity, and could not fulfill the need for on site rapid and accurate testing, emerging as a bottleneck for grain quality and safety. Modern non-destructive determination methods, as a new piece of technology, can provide the quality evaluation of grain without destroying the samples. It becomes an important development direction for on-line and real-time detection of grain quality. It also has a great potential in rapid inspection of mycotoxin contamination in grain. This paper reviewed in detail the recent research progress in detection of mycotoxin contamination in grain by near-infrared spectroscopy, hyperspectral imaging and electronic nose techniques. Advantages as well as limitations of various techniques were discussed and application prospect was also forecasted finally.

KEY WORDS: grain; mycotoxin; non-destructive determination; research progress

基金项目: 国家自然科学基金项目(31301482)、江苏省青年自然科学基金项目(BK20131007)、江苏省高校自然科学基金项目(13KJB550009)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (31301482), Youth Science Fund of Jiangsu Province (BK20131007) and Natural Science Foundation of the Colleges and Universities in Jiangsu Province (13KJB550009)

*通讯作者: 沈飞, 讲师, 主要研究方向为粮食储藏和检测技术研究。E-mail: shenfei0808@163.com

*Corresponding author: SHEN Fei, Lecturer, School of Food Science and Engineering, Nanjing University of Finance and Economics, No.3, Wenyuan Road, Qixia District, Nanjing 210046, China. E-mail: shenfei0808@163.com

1 引言

粮食是关系国计民生的重要战略物资。然而, 粮食在种植、收获、储藏以及运输过程中, 易受黄曲霉毒素(aflatoxin, AFT)、赭曲霉毒素(ochratoxin A, OTA)、脱氧雪腐镰刀菌烯醇(deoxynivalenol, DON)等多种真菌毒素污染, 严重威胁人畜健康。目前, 真菌毒素的检测方法主要有高效液相色谱法、薄层色谱法和酶联免疫吸附法等, 但均存在过程繁琐、时效性差或灵敏度低等缺点, 无法实现粮食真菌毒素污染的连续准确监测^[1]。因此, 发展快速、准确且经济可行的检测方法, 已经成为确保粮食质量安全亟需解决的关键问题之一。无损检测技术(nondestructive determination technology, NDT)可以在不破坏或损坏被检测对象的基础上, 利用农产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, 来探测其性质和数量的变化^[2]。近年来, 随着全社会对食品安全的高度重视, 对粮食真菌毒素污染的关注程度也不断提高, 对真菌毒素的分析手段逐步向着实时、快速、准确的方向转变。在这一背景下, 以近红外光谱、高光谱图像和电子鼻技术等为代表的无损检测技术日益受到广泛关注, 在粮食真菌毒素污染快速分析中也获得了越来越多的应用研究。本文重点综述了红外光谱、高光谱图像和电子鼻等主要无损检测技术在粮食真菌毒素污染检测中的最新进展, 探讨了各项技术的优势与不足, 展望了其应用前景。

2 无损检测方法介绍与应用研究进展

2.1 近红外光谱技术

近红外光谱(near infrared spectroscopy, NIRS)是指波长在 780~2526 nm 介于可见光区和中红外光区之间的电磁波, 对应于有机分子中含氢基团的倍频与合频振动信息, 具有分析速度快、多组分同时检测、无需样品预处理等优点, 已被应用于粮食多项内部品质指标(水分、淀粉、蛋白等)的检测分析^[3]。研究表明很多真菌毒素在近红外波段有特征吸收光谱, 且其含量的高低对粮食籽粒的近红外光谱有影响^[4]。近年来, 已有越来越多的学者尝试将近红外光谱技术应用于粮食真菌毒素污染的快速分析^[5]。Berardo 等^[6]利用近红外光谱区分了受串珠镰刀菌污染的意大利小麦样品, 并对样品中的麦角甾醇和伏马毒素 B₁(fumonisins B₁, FB₁)进行了定量预测, 预测模型的决定系数(R^2)均超过 0.78, 对 FB₁ 的预测误差(RMSEP)达到 1.33 mg/kg。Beyer 等^[7]利用可见/近红外光谱技术对小麦样品中的 DON 毒素进行了快速分析, 偏最小二乘回归模型(PLSR)的相关系数达到 0.84, 预测误差 SEP 为 0.89±3.61 mg/kg, 实现了样品受污染程度大小的快速筛选。Kos 等^[8]还利用漫反射和衰减全反射红外光谱分析了玉米样品受脱氧雪腐镰刀菌烯醇

污染的情况, 发现衰减全反射光谱对受污染样品的判别正确率达到 100%, 且 PLSR 对脱氧雪腐镰刀菌烯醇含量的预测误差为 600 μg/kg。近红外光谱检测真菌毒素具有操作简便、分析速度快、无需使用化学试剂的独特优势, 其应用情况如表 1 所示。但是由于真菌毒素在粮食中的含量一般较低, 而且近红外检测结果还易受到样品状态、预处理措施、样品浓度范围及样品量的影响, 检测精度受到一定限制, 定性判别准确率一般较高, 但定量预测结果有待提升, 主要用于样品受污染程度的快速筛选。

2.2 高光谱图像技术

高光谱图像技术, 是近年来迅速兴起的一门新的分析技术, 它可以看作是光谱分析技术和图像处理技术在最低层面上的融合, 能同时获得被检对象的光谱和空间信息, 可以实现内部与外部品质的同时检测, 代表了农产品检测技术未来发展方向^[17]。与近红外光谱检测法类似, 多种真菌毒素在高光谱检测波段范围内均存在特征吸收, 因此高光谱技术也被逐渐用于粮食受真菌毒素污染的检测分析^[18]。Yao 等^[19]采集了 5 种产毒和非产毒的真菌菌株的可见近红外高光谱图像, 确定了可用于对象区分的特征波长(743、458、541 nm), 对这 5 种真菌的整体判别准确率达 97.7%。Jin 等^[20]利用高光谱图像区分了产毒和非产毒的黄曲霉菌株, 并比较了不同光源的检测效果。结果发现, 对产毒菌株和非产毒菌株判别正确率卤素灯光源为 83%和 74%, 紫外灯光源为 67%和 85%。Shahin 等^[21]也对加拿大红春麦受镰刀菌污染程度进行了检测分析, 对污染样品的判别正确率达到 92%。由于高光谱图像技术具有的独特优势, 其在农产品内部与外部品质同时检测领域发展十分迅猛, 在粮食真菌毒素污染检测中的应用也越来越多, 如表 2 所示。但由于高光谱图像分析系统结构较为复杂, 数据量巨大, 分析速度较慢, 目前还主要还用于粮食真菌毒素污染的定性筛分, 定量测定含量的研究较少。下一步的发展方向是确定不同真菌毒素所对应的特征波段, 发展多光谱成像在线检测系统, 以提高检测效率和检测精度。

2.3 电子鼻技术

电子鼻是一种模拟生物嗅觉系统的现代检测方法, 是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, 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。粮食在发霉过程中, 由于微生物不断分解粮食有机质, 会产生大量特征性气味成分^[28]。众多研究表明, 这些挥发性成分与麦角甾醇、菌落总数以及黄曲霉毒素、赭曲霉毒素等真菌毒素之间存在内在联系, 可用于真菌毒素的污染程度的实时监测。Olsson 等^[29]利用电子鼻和 GC-MS 对大麦中的赭曲霉毒素和脱氧雪腐镰刀菌烯醇进行了检测分析, GC-MS 和电子鼻对赭曲霉毒素的识别率为 91.9%和 81.1%, 建立的定

量分析模型对脱氧雪腐镰刀菌烯醇含量的预测相对误差 SEP 分别达到 16 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 和 25 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 并鉴定出脱氧雪腐镰刀菌烯醇毒素密切相关的特征挥发性成分。Abramson 等^[30]对不同储藏条件下硬质小麦中的真菌毒素含量进行了测定, 发现储藏 20 周时, 20%水分含量的小麦样品中均检出赭曲霉毒素和黄绿青霉素, 电子鼻特征传感器的响应信号值与这两种毒素含量的相关系数分别达到 0.87 和 0.83。电子鼻检测具有方便、简单的优点, 应用范围也越来越广泛(如表 3 所示)。然而, 由于对粮食储运过程产生的真菌毒素与气味成分的相关关系, 以及电子鼻对真菌毒素指示性气味成分的响应大小等尚缺乏基础理论研究, 因此, 利用电子鼻来检测粮食真菌毒素污染还处于探索阶段, 还需要进一步研究来深入了解电子鼻技术的优缺点和局限性, 为今后的实际应用提供依据。

2.4 其他无损检测技术

机器视觉是基于图像的数字识别技术而发展起来的新兴技术, 通过对样品图像信息的分析得到尺寸、表面色度、外观形状及缺陷等具体信息, 进而实现外观质量综合评价。虽然机器视觉技术无法直接判定粮食样品的真菌毒

素污染情况, 但可以通过粮食霉变引起的色泽变化判断样品受感染情况。Ng 等^[39]尝试利用计算机图像对霉变玉米籽粒进行识别, 通过图像信息的差异, 计算霉变区域的比例, 实现了对霉变样本的区分。Luo 等^[40]利用机器视觉结合模式识别技术, 对正常小麦和 6 种不同缺陷的小麦进行了区分, 对霉变粒的总体判别正确率达到 98.6%。X 射线在穿透物质时, 和不同物质的原子发生相互作用后发生衰减的程度不同。利用这个原理, Narvankar 等^[41]区分了正常的和受霉菌污染的小麦样品, 判别正确率达到 90%以上。此外, 根据正常的和受真菌感染的谷物对声学的振幅反应情况不同, 且声学振幅与感染情况有很强的相关性, 可以利用此特性来快速检测谷物的感染情况。Juodeikiene 等^[42]用声波法对枯萎谷物和正常谷物进行了分析, 结果表明黄曲霉毒素的浓度含量与振幅存在相关性, 以此区分了受污染的小麦样品。Liu 等^[43]应用拉曼光谱技术对受 DON 污染的小麦和大麦样品进行了尝试检测, 结果表明拉曼光谱技术可以区分样品受污染的程度。Lee 等^[44]也应用表面增强拉曼光谱对玉米中的黄曲霉毒素 B₁ 进行了定量预测, 验证模型的相关系数达 0.90 以上。

表 1 近红外光谱技术检测粮食真菌毒素污染的研究进展

Table 1 Research progress on mycotoxin contamination detection in grain by near-infrared spectroscopy

研究对象	检测波段	研究内容	研究结果	参考文献
玉米籽粒	近红外透射光谱(500~950 nm) 近红外反射光谱(550~1700 nm)	定性判别受 AFT 毒素污染的程度	AFT 含量小于 10 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 或大于 100 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 时, 判别正确率大于 95%, 含量介于两者之间判别正确率仅为 25%	2001 ^[9]
小麦籽粒	近红外透射光谱(570~1100 nm)	定量预测 DON 毒素含量	偏最小二乘回归模型(PLSR)预测相关系数 r 为 0.984, 预测相对误差(SEP)为 381 $\mu\text{g}/\text{kg}$	2003 ^[10]
玉米籽粒	漫反射与衰减全反射红外光谱 (600~1900 cm^{-1})	定性判别样品是否受 DON 毒素污染, 定量预测 DON 含量	衰减全反射模型精度较高, 100%判别正确, 预测相关系数 r 为 0.8064, SEP 为 438.7 $\mu\text{g}/\text{kg}$	2004 ^[8]
玉米籽粒 玉米粉	近红外反射光谱(400~1100 nm, 400~2500 nm)	定性判别样品受真菌污染, 定量预测麦角甾醇和 FB ₁ 含量	预测模型的决定系数(R^2)均超过 0.78 对 FB ₁ 预测精度 RMSEP 为 1.33 mg/kg	2005 ^[6]
玉米和大麦	近红外反射光谱(400~2500 nm)	定量预测 AFB ₁ 含量	玉米模型决定系数 $R^2=0.82$, SEP=0.200 ppb 大麦模型决定系数 $R^2=0.85$, SEP=0.176 ppb	2009 ^[11]
小麦等谷物	近红外反射光谱(350~2500 nm)	定量预测 DON 毒素含量	模型决定系数 $R^2=0.84$, SEP=3.61 mg/g	2010 ^[7]
玉米籽粒	近红外烦死光谱(904~1685 nm) 彩色图像	样品受 8 种不同霉菌的感染程度	对未受感染和受感染样品的判别正确率率近红外分别 89%和 79%, 彩色图像均为 75%	2011 ^[12]
小麦籽粒	近红外光谱(4000~10000 cm^{-1})	定量预测 DON 毒素含量	PLSR 模型的预测相关系数 r 为 0.88, SEP=6.23 mg/g	2012 ^[13]
水稻	近红外漫反射光谱(950~1650 nm)	霉菌感染率和黄绿曲霉感染率	霉菌感染率 $r=0.668$, SEP=28.874% 黄绿曲霉感染率 $r=0.437$, SEP=18.723%	2013 ^[14]
燕麦	近红外光谱(400~2350 nm)	定量预测 DON 毒素含量	模型 SEP =3.16 ppm, RPD 值为 2.63	2013 ^[15]
水稻	近红外反射光谱(950~1650 nm)	定量预测产黄曲霉毒素菌株感染程度	预测模型相关系数 $r=0.668$, SEP=28.874%	2013 ^[16]

表 2 高光谱图像光谱技术检测粮食真菌毒素污染的研究进展
Table 2 Research progress on mycotoxin contamination detection in grain by hyperspectral imaging

研究对象	检测波段	研究内容	研究结果	参考文献
霉菌菌株	高光谱图像(400~1000 nm)	定性判别 5 种产毒和非产毒真菌菌株	对 5 种霉菌的综合判别正确率达到 97.7%	2008 ^[19]
黄曲霉真菌菌株	高光谱图像(400~1000 nm)	定性判别产毒和非产毒黄曲霉菌株	对产毒黄曲霉菌株的判别正确率为 83%, 非产毒菌株为 74%	2009 ^[20]
玉米籽粒	高光谱图像(400~1000 nm)	定性判别受真菌毒素污染的样品	在接种菌株 48 h 后受感染的玉米样品能够被区分	2010 ^[22]
榛子和辣椒	五个波段的多光谱成像	定性判别受黄曲霉毒素污染的样品	受黄曲霉毒素污染的判别正确率: 榛子为 92.3%, 辣椒为 80%	2011 ^[23]
红春麦籽粒	高光谱图像(400~1000 nm)	定性判别无害和受感染的样品	对无害、中度感染和重度感染三类样品的整体判别正确率为 92%	2011 ^[21]
小麦籽粒	高光谱图像(400~1000 nm, 1000~1700 nm)	定性判别样品是否受镰刀菌污染	不同的高光谱系统均能区分受感染样品, 判别正确率达 95%	2011 ^[24]
麦穗	高光谱图像(400~1000 nm) 叶绿素荧光成像	定性判别样品受镰刀菌毒素侵染程度(赤霉病)	对样品侵染程度的判别正确率达到 80%	2011 ^[25]
小麦籽粒	高光谱图像 700~1100 nm 面扫描图像	定性判别样品是否受真菌污染	运用不同特征组合对无害和受真菌感染样品的判别正确率为 97.3%~100.0%	2012 ^[26]
玉米籽粒	高光谱图像(1000~2500 nm)	定性判别受黄曲霉毒素污染的样品	对受感染样品的识别率达到 88%	2014 ^[27]

表 3 电子鼻技术检测粮食真菌毒素污染的研究进展
Table 3 Research progress on mycotoxin contamination detection in grain by electronic nose

研究对象	电子鼻传感器数量	研究内容	研究结果	参考文献
大麦籽粒	10 个金属氧化物传感器	定性区分是否 OTA 和 DON 毒素污染, 定量预测其浓度	GC-MS 和电子鼻对 OTA 污染判别正确率分别为 91.9%和 81.1%, 对 DON 预测误差为 16 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 和 25 $\mu\text{g}/\text{kg}$	2002 ^[29]
硬质小麦	12 个金属氧化物传感器	预测样品受 OTA 毒素污染程度	20%水分的样品中, 电子鼻特征传感器响应值与 OTA 毒素的相关系数达到 0.84~0.87	2005 ^[30]
软质小麦	7 个金属络合物和 1 个吡啶传感器	定性判别样品是否受青霉和镰刀菌污染	电子鼻的综合判别正确率达到 85.3%, GC-MS 验证了电子鼻的检测结果	2006 ^[31]
小麦和黑小麦	32 个质谱信号	定性判别样品是否感染黄色镰刀菌	电子鼻能够较好区分受侵染和正常的样品	2008 ^[32]
玉米粉	10 个金属氧化物传感器	定性判别样品是否受黄曲霉毒素污染	在主成分得分图上, 电子鼻能够区分正常和受感染的样品, 线性判别模型的正确率达到 100%	2009 ^[33]
真菌菌株	12 个金属氧化物和 10 个场效应晶体管传感器	定性判别产 OTA 毒素的真菌菌株	在接种 14 d 后, 产 OTA 毒素菌株能够被成功区分	2011 ^[34]
软质小麦	8 个石英晶体微天平传感器	判别样品是否受 4 种产毒菌株污染	电子鼻的综合判别准确率超过 80%	2011 ^[35]
玉米籽粒	6 个金属氧化物传感器	定性判别样品受伏马菌素污染程度	电子鼻能够区分不同毒素浓度的玉米样品, PLSR 模型定量预测效果更佳	2011 ^[36]
硬质小麦	10 个金属氧化物传感器	定性判别样品是否受 DON 毒素污染	可以根据 DON 含量的高低成功区分样品	2011 ^[37]
硬质小麦	多个金属氧化物传感器	定性判别样品受 DON 污染程度	电子鼻的整体判别正确率可达 80%以上	2014 ^[38]

3 结论与展望

无损检测技术作为一门新兴的检测技术日益受到广泛关注^[45]。它可以在不破坏农产品品质的基础上,利用样品的光学、电学、声学等特性,结合现代信息处理技术,对农产品品质进行准确、快速检测。随着社会发展和人民生活水平的提高,对粮食品质的要求也越来越高,无损检测技术由于具有效率高、规模大、在线检测等潜力,必将在未来的粮食检测和分级中得到广泛应用^[46]。通过以上研究发现,以近红外光谱、高光谱图像以及电子鼻为代表的无损检测技术在粮食受真菌毒素污染的检测上也取得了积极进展,但总体还处于初步探索的阶段。由于无损检测技术主要通过间接手段获取信息,利用化学计量学手段建立与检测对象的相关关系,检测结果及精度易受样品状态、待测对象含量高低等因素影响,且检测机制有待进一步研究,目前主要用于定性筛分,定量检测研究不多,限制了其应用范围。然而,随着无损检测技术在硬件和软件方面的不断成熟,基础理论的不断突破,必将在粮食真菌毒素污染检测方面取得成功的应用。

参考文献

- [1] 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.
Wei WZ, Liang YH, Ma HY, *et al.* Research Progress in mycotoxin detection in grain [J]. *Sci Tec Cereals, Oils and Foods*, 2012, 20(2): 37-39.
- [2] 彭彦昆, 张雷蕾. 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. Advancement and trend of non-destructive detection technology for assessing agro-products quality and safety [J]. *J Food Safe Qual*, 2012, 3(6): 561-568.
- [3] 王加华, 王一方, 屈凌波. 粮食品质近红外光谱无损检测研究进展[J]. 河南工业大学学报: 自然科学版, 2011, 32(6): 80-87.
Wang JH, Wang YF, Qu LB. Research progress on nondestructive detection of grain quality by near infrared spectroscopy [J]. *J Henan Univ Technol (Natural Sci Edition)*, 2011, 32(6): 80-87.
- [4] Peiris KHS, Pumphrey MO, Dowell FE. Application of NIR and MIR spectroscopy in quality control of potato chips [J]. *J Near Infrared Spec*, 2009, 17: 213-221.
- [5] Hossain MZ, Goto T. Near-and mid-infrared spectroscopy as efficient tools for detection of fungal and mycotoxin contamination in agricultural commodities [J]. *World Mycotoxin J*, 2014: 1-9.
- [6] Berardo N, Pisacane V, Battilani P, *et al.* Rapid detection of kernel rots and mycotoxins in maize by near-infrared reflectance spectroscopy [J]. *J Agric Food Chem*, 2005, 53(21): 8128-8134.
- [7] Beyer M, Pogoda F, Ronellenfitch FK, *et al.* Estimating deoxynivalenol contents of wheat samples containing different levels of Fusarium-damaged kernels by diffuse reflectance spectrometry and partial least square regression [J]. *Int J Food Microbiol*, 2010, 142: 370-374.
- [8] Kos G, Krska R, Lohninger H, *et al.* A comparative study of mid-infrared diffuse reflection (DR) and attenuated total reflection (ATR) spectroscopy for the detection of fungal infection on RWA2-corn [J]. *Anal Bioanal Chem*, 2004, 378: 159-166.
- [9] Pearson TC, Wicklow DT, Maghirang EB, *et al.* Detecting aflatoxin in single corn kernels by transmittance and reflectance spectroscopy [J]. *Trans ASAE*, 2001, 44(5): 1247-1254.
- [10] Pettersson H, Åberg L. Near infrared spectroscopy for determination of mycotoxins in cereals [J]. *Food Control*, 2003, 14(4): 229-232.
- [11] Girolamo A De, Lippolis V, Nordkvist E, *et al.* Rapid and non-invasive analysis of deoxynivalenol in durum and common wheat by Fourier-Transform Near Infrared (FT-NIR) spectroscopy [J]. *Food Addit Contam: Part A*, 2009, 26(6): 907-917.
- [12] Tallada JG, Wicklow DT, Pearson TC, *et al.* Detection of fungus-infected corn kernels using near-infrared reflectance spectroscopy and color imaging [J]. *Trans ASABE*, 2011, 54(3): 1151-1158.
- [13] Dvořáček V, Prohasková A, Chrpová J, *et al.* Near infrared spectroscopy for deoxynivalenol content in intact wheat grain [J]. *Plant Soil Environ*, 2012, 58(4): 196-203.
- [14] Sirisomboon CD, Putthang R, Sirisomboon P. Application of near infrared spectroscopy to detect aflatoxigenic fungal contamination in rice [J]. *Food Control*, 2013, 33(1): 207-214.
- [15] Tekle S, Bjørnstad Å, Skinnes H, *et al.* Estimating Deoxynivalenol Content of Ground Oats Using VIS-NIR Spectroscopy [J]. *Cereal Chem J*, 2013, 90(3): 181-185.
- [16] Sirisomboon CD, Putthang R, Sirisomboon P. Application of near infrared spectroscopy to detect aflatoxigenic fungal contamination in rice [J]. *Food Control*, 2013, 33(1): 207-214.
- [17] 李江波, 饶秀勤, 应义斌. 农产品外部品质无损检测中高光谱成像技术的应用研究进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(8): 2021-2026.
Li JB, Rao XQ, Ying YB. Advance on application of hyperspectral imaging to nondestructive detection of agricultural products external quality [J]. *Spectrosc Spect Anal*, 2011, 31(8): 2021-2026.
- [18] Fox G, Manley M. Applications of single kernel conventional and hyperspectral imaging near infrared spectroscopy in cereals [J]. *J Sci Food Agric*, 2014, 94(2): 174-179.
- [19] Yao H, Hruska Z, Kincaid R, *et al.* Differentiation of toxigenic fungi using hyperspectral imagery [J]. *Sensing Instrum Food Qual Safe*, 2008, 2(3): 215-224.
- [20] Jin J, Tang L, Hruska Z, *et al.* Classification of toxigenic and atoxigenic strains of *Aspergillus flavus* with hyperspectral imaging [J]. *Comput Electron Agric*, 2009, 69: 158-164.
- [21] Shahin MA, Symons SJ. Detection of Fusarium damaged kernels in Canada Western Red Spring wheat using visible near-infrared hyperspectral imaging and principal component analysis [J]. *Comput Electron Agric*, 2011, 75: 107-112.
- [22] Del Fiore A, Reverberi M, Ricelli A, *et al.* Early detection of toxigenic fungi on maize by hyperspectral imaging analysis [J]. *Int J Food Microbiol*, 2010, 144: 64-71.
- [23] Kalkan H, Beriat P, Yardimci Y, *et al.* Detection of contaminated hazelnuts and ground red chili pepper flakes by multispectral imaging [J]. *Comput Electron Agric*, 2011, 77: 28-34.
- [24] Delwiche SR, Kim MS, Dong Y. Fusarium damage assessment in wheat kernels by Vis NIR hyperspectral imaging [J]. *Sensing Instrum Food Qual*

- Safe, 2011, 5(2): 63–71.
- [25] Bauriegel E, Giebel A, Herppich WB. Hyperspectral and chlorophyll fluorescence imaging to analyse the impact of *Fusarium culmorum* on the photosynthetic integrity of infected wheat ears [J]. *Sensors*, 2011, 11: 3765–3779.
- [26] Singh CB, Jayas DS, Paliwal J, *et al.* Fungal damage detection in wheat using short-wave near-infrared hyperspectral and digital colour imaging [J]. *Int J Food Prop*, 2012, 15(1): 11–24.
- [27] Wang W, Heitschmidt GW, Ni XZ, *et al.* Identification of aflatoxin B₁ on maize kernel surfaces using hyperspectral imaging [J]. *Food Control*, 2014, 42: 78–86.
- [28] 胡桂仙, 王建军, 王小骊, 等. 粮油品质检测评价新技术的研究进展及展望[J]. *中国粮油学报*, 2011, 26(3): 110–118.
Hu GX, Wang JJ, Wang XL, *et al.* Study progress and prospects for technology of detection for quality evaluation in cereal and oil [J]. *J Chin Cereals Oils Association*, 2011, 26(3): 110–118.
- [29] Olsson J, Börjesson T, Lundstedt T, *et al.* Detection and quantification of ochratoxin A and deoxynivalenol in barley grains by GC-MS and electronic nose [J]. *Int J Food Microbiol*, 2002, 72: 203–214.
- [30] Abramson D, Hulasare R, York RK. Mycotoxins, ergosterol, and odor volatiles in durum wheat during granary storage at 16% and 20% moisture content [J]. *J Stored Prod Res*, 2005, 41(1): 67–76.
- [31] Paolesse R, Alimelli A, Martinelli E, *et al.* Detection of fungal contamination of cereal grain samples by an electronic nose [J]. *Sensor Actuat B*, 2006, 119: 425–430.
- [32] Perkowski J, Buško M, Chmielewski J, *et al.* Content of trichodiene and analysis of fungal volatiles (electronic nose) in wheat and triticale grain naturally infected and inoculated with *Fusarium culmorum* [J]. *Int J Food Microbiol*, 2008, 126: 127–134.
- [33] Cheli F, Campagnoli A, Pinotti L, *et al.* Electronic nose for determination of aflatoxins in maize [J]. *Biotechnol, Agron, Soc Environ*, 2009, 13(S): 39–43.
- [34] Leggieri M C, Pont N P, Battilani P, *et al.* Detection and discrimination between ochratoxin producer and non-producer strains of *Penicillium nordicum* on a ham-based medium using an electronic nose [J]. *Mycotoxin Res*, 2011, 27: 29–35.
- [35] Eifler J, Martinelli E, Santonico M, *et al.* Differential detection of potentially hazardous *Fusarium* species in wheat grains by an electronic nose [J]. *PloS one*, 2011, 6(6): e21026.
- [36] Gobbi E, Falasconi M, Torelli E, *et al.* Electronic nose predicts high and low fumonisin contamination in maize cultures [J]. *Food Res Int*, 2011, 44: 992–999.
- [37] Campagnoli A, Cheli F, Polidor C, *et al.* Use of the electronic nose as a screening tool for the recognition of durum wheat naturally contaminated by deoxynivalenol: a preliminary approach [J]. *Sensors*, 2011, 11: 4899–4916.
- [38] Lippolis V, Pascale M, Cervellieri S, *et al.* Screening of deoxynivalenol contamination in durum wheat by MOS-based electronic nose and identification of the relevant pattern of volatile compounds [J]. *Food Control*, 37: 263–271.
- [39] Ng HF, Wilcke WF, Morey RV, *et al.* Machine vision evaluation of corn kernel mechanical and mold damage [J]. *Trans ASAE*, 1998, 41(2): 415–420.
- [40] Luo X, Jayas DS, Symons SJ. Comparison of statistical and neural network methods for classifying cereal grains using machine vision [J]. *Trans ASAE*, 1999, 42(2): 413–419.
- [41] Narvankar DS, Singh CB, Jayas DS, *et al.* Assessment of soft X-ray imaging for detection of fungal infection in wheat [J]. *Biosystems Eng*, 2009, 103: 49–56.
- [42] Juodeikiene G, Basinskiene L, Vidmantiene D, *et al.* Rapid acoustic screening of deoxynivalenol (DON) in grain [J]. *World Mycotoxin J*, 2008, 1(3): 267–274.
- [43] Liu Y, Delwiche SR, Dong Y. Feasibility of FT-Raman spectroscopy for rapid screening for DON toxin in ground wheat and barley [J]. *Food Addit Contam: Part A*, 2009, 26(10): 1396–1401.
- [44] Lee KM, Herrman TJ, Bisrat Y, *et al.* Feasibility of Surface-Enhanced Raman Spectroscopy for Rapid Detection of Aflatoxins in Maize [J]. *J Agric Food Chem*, 2014, 62 (19): 4466–4474.
- [45] 李志霞, 聂继云. 无损检测技术及其在果品质量安全检测中的应用[J]. *中国农业科技导报*, 2013, 15(4): 31–35.
Li ZX, Nie JY. Nondestructive Testing Technologies and its Application in Fruit Quality and Safety Determination [J]. *J Agric Sci Technol*, 2013, 15(4): 31–35.
- [46] 孙力, 林颢, 蔡健荣, 等. 现代成像技术在食品/农产品无损检测中的应用进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2014, 5(3): 643–650.
Sun L, Lin H, Cai JR, *et al.* Progress research of advanced imaging technique and its application in food and agricultural product non-destructive detection [J]. *J Food Safe Qual*, 2014, 5(3): 643–650.

(责任编辑: 赵静)

作者简介



沈 飞, 博士, 主要研究方向为农产品储藏和检测技术。
E-mail: shenfei0808@163.com