

储粮害虫检测技术研究进展

张蓝月¹, 邵小龙^{1,2*}, 黄行健³, 宋伟^{1,2}

(1. 南京财经大学食品科学与工程学院, 南京 210023; 2. 粮食储运国家工程实验室, 南京 210023;
3. 华中农业大学食品科技学院, 武汉 430070)

摘要: 储粮害虫是危害粮食安全的主要因素之一, 害虫检测技术对于粮食综合管理有非常重要的意义。根据国内外学者对储粮害虫检测技术的研究报道, 本文归纳和总结了各种检测技术, 分别介绍传统类、新型物理及生物类检测法。传统检测方法较为成熟并已被标准化, 常用方法有直观检查法、取样筛检法、探管诱捕法; 物理检测法较为新颖, 以快速无损型检测方法为主, 包括近红外及高光谱法、软 X 射线、电导率法、声测法、微波法、图像识别法、电子鼻等七种; 生物检测法多为辅助性方法, 常与其他方法联用以达到较优检测效果。本文对各种方法进行深入比较, 并探讨国内外最新害虫检测技术, 以期将来研发合适的检测方法和仪器提供参考。

关键词: 储粮害虫; 快速检测; 物理检测; 生物检测

Advances in detection technologies for stored grain insect pests

ZHANG Lan-Yue¹, SHAO Xiao-Long^{1,2*}, HUANG Xing-Jian³, SONG Wei^{1,2}

(1. Food Science and Engineering School, Nanjing University of Finance and Economics, Nanjing 210023, China; 2. National Engineering Laboratory of Grain Storage and Transportation, Nanjing 210023, China; 3. College of Food Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

ABSTRACT: Stored grain insect pest is one of the main factors which can endanger the food security. The pests detection technologies have very important significance for grain integrated management. In this paper, different types of detection technologies were generalized and summarized, such as traditional detection methods, new physical detection methods and biological detection methods. Traditional detection methods, such as visual inspection, sample sieving, grain probes and insect traps, are more mature and have been standardized. Physical detection methods such as near-infrared spectroscopy (NIR) and hyperspectral spectroscopy, soft X-ray, electrical conductance, microwave radar, image recognition, acoustic measurement, and electronic nose are more innovative, mainly in rapid and non-destructive type of detection method. Biological detection methods such as biological trap are mostly assisted methods, and usually combine with other methods to achieve optimum detection results. The advantages and disadvantages of various methods were deeply compared and the latest domestic and overseas pests detection technologies were finally discussed, in order to provide a reference for the future development of suitable detection methods and instruments.

基金项目: 国家自然科学基金项目(31201443)、公益性行业(粮食)科研专项(201313002-02)、江苏省属高校自然科学面上项目(12KJB550004)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (31201443), Special Fund for Public Welfare Industry (Grain-201313002-02), and Natural Science Foundation of the Higher Education Institutions of Jiangsu Province, China(12KJB550004)

*通讯作者: 邵小龙, 博士, 讲师, 主要研究方向为粮油储运、快速无损检测。E-mail: sxlion2@gmail.com

*Corresponding author: SHAO Xiao-Long, Ph.D., Lecture, School of Food Science and Engineering, Nanjing University of Finance and Economics, No.3, Wenyuan Road, 16#, Nanjing 210023, China. E-mail: sxlion2@gmail.com

KEY WORDS: stored grain insect pests; rapid detection; physical detection; biological detection

1 前言

粮食是人类必不可少的食物来源之一,全世界大约10%~30%粮食由于害虫侵蚀而损失,在许多发展中国家,粮食收获后普遍损失率大约为10%~15%,粮食储藏过程中受害虫侵蚀或导致其发霉是造成粮食损失的重要原因。粮食储藏过程中被害虫侵蚀后会导致数量减少,食用品质下降,危及粮食安全。储粮害虫的快速有效检出,是粮食综合管理技术关键所在,是储粮品质重要前提保障。

随着储粮综合管理技术水平不断提高,害虫检测技术发展速度较快。近年来,综合介绍国内外有关储粮害虫检测技术方法的报道较多^[1-5],但是总体信息不够全面。本文在介绍传统常用害虫检测技术的基础上,对新型物理和生物类检测进行阐述,并对各种储粮害虫检测技术进行归纳和总结,以便对最新检测技术进行追踪和报道。

2 害虫检测技术研究进展

2.1 传统检测方法

传统检测法主要有直观检查法、取样筛检法、探管诱捕法、染色法等。直观检查法是用肉眼观察害虫活动和数量,是最原始、最简单的方法。该法依据是害虫趋温性和趋光性,在储粮现场进行害虫检查,针对储藏空间特定地方进行观察,如仓房脊梁、仓顶、墙壁以及粮堆表面等,检查是否有害虫活动迹象。该方法较为粗放,结果准确性很大程度上取决于检查人的经验和细致程度。

我国粮食局推荐标准方法LS/T 1211-2008中规定取样筛检法和探管诱捕法来检测粮食中害虫密度^[6]。取样筛检法主要在检测粮仓中大量样本时,按区、定点、分层人工取样或由机器取样并过筛取得储粮害虫,进而推断整个粮仓虫害情况。该方法劳动强度高、工作环境差以及效率低,致使该方法很难满足现代化储粮检测技术要求^[2]。类似方法有伯利斯漏斗法^[7],该法常用于检测大型谷物仓库中活虫侵染粮粒,不适于检测粮粒内部隐蔽性害虫。探管诱捕法是利用害虫在储粮中不断活动的特性,在储粮样品中置入底部较尖、侧面有孔的圆柱探管或陷阱,对储粮害虫成虫进行诱捕。Hagstrum等^[8]提出采用真空探管采集粮食样品,并统计出害虫的密度。White等对黄铜探管陷阱器进行重新设计,其材料改用新型廉价的塑料,以降低使用成本^[9,10]。由于许多客观因素的影响,致使探管陷阱捕获法误差较大,需要大样本才能保证结果的准确性。例如 Fargo等^[11]通过实验发现捕获量随着捕获时间的增加而成比例的增加,Wright等^[12]发现储粮害虫种类、粮食温度和种类

等因素对捕获率都有影响。

对于隐蔽性害虫检测方法有剖粒法、染色法、CO₂代谢法、液相法、酶联免疫吸附法等^[1]。其中染色法操作简便,较为常用。该法步骤为先用酸性品红、高锰酸钾、龙胆紫等染色剂浸泡温水处理过粮食,然后用冷水冲洗,粮粒被侵害部分如产卵孔等地方显示出不同的颜色,从而初步确定粮食被侵害情况。如果需要进一步确定害虫种类和粮食被蛀蚀程度,需要带回实验室,结合仪器及相关方法来细致检查。该法较为复杂,有破坏性,且耗费时间长。

2.2 新型物理检测法

新型物理类检测法是将物理技术手段如近红外、软X射线等应用于储粮害虫检测的一类方法,常见方法有近红外及高光谱法、软X射线、电导率法、声测法、微波法、图像识别法、电子鼻等七种。下面将分别从方法原理、技术特点及应用进行逐一介绍。

2.2.1 近红外及高光谱法

近红外(near-infrared spectroscopy, NIR)是基于被检测样品对近红外电磁波(波长范围为780~2500 nm)吸收或反射差异进行光谱检测的一种技术。当粮食受到害虫侵蚀后,其对近红外光的吸收或反射不同于未受虫害粮食,据此可检测出虫侵蚀粮粒。害虫与粮粒及不同种害虫对近红外吸收或反射也有差异,因此近红外也可以检测出不同种类害虫。研究报道用NIR检测不同品种小麦中锯谷盗、谷蠹、米象、玉米象等粮食害虫^[13,14],并对鞘翅类害虫进行鉴别^[15]。利用近红外光谱法对小麦中害虫米象进行检测,从而对其侵蚀程度进行评价,对不同生长阶段进行区分^[16-18]。Singh等^[19,20]对正常小麦和被米象、谷蠹、锈赤扁谷盗等害虫侵蚀的小麦进行检测和区分,结果区分准确率高达96.4%~100%。

高光谱检测技术是从紫外到近红外(波长范围为200~2500 nm)的样品吸收或反射进行光谱检测和成像,其优势在于分辨率高、波段窄、光谱范围广、采集图像信息丰富等。高光谱技术精度高,检测能力强,能够检测表面和隐蔽性储粮害虫。近两年开始有关于高光谱用于储粮害虫检测方面报道^[21-23],其中张红涛等利用构建的近红外高光谱成像系统采集谷蠹的高光谱图像,提出基于最大离差法的最优特征波长提取方法,提取出可区分活虫和死虫的最优波长为1417.2 nm^[21,22]。近红外光谱技术较为成熟,应用较多,但无法检测轻微的感染、对湿度敏感,不能检测死虫;尽管高光谱技术准确度更高,并且能够高清成像,但目前仍处于实验室阶段。

2.2.2 软X射线

X射线能够穿透可见光不能穿透的物体,使原子发生电离和某些物质发出荧光,从而被检测成像。当粮粒受到害虫侵蚀后,粮粒密度下降使X射线成像有所变化,因此能用于害虫检测,属于快速无损检测方法之一^[24]。

Haff等^[25-28]利用X射线对小麦中米象的不同阶段进行检测和观察,并确定小麦质量的损失。Karunakaran等^[29]利用X软射线法(15 kV和65 A)对正常小麦与被米象侵蚀的小麦进行区分检测,结果表明识别率高达95%,该方法大约用15 min可检测1 kg的粮食,而伯利斯漏斗法用时约5~6 h,大大加快了检测时间。Chelladurai等^[30]用软X射线法、近红外高光谱法以及二者联用的方法,对被四纹豆象侵染的大豆进行检测,结果表明两种方法的联用能够大大提高检测精度。利用软X射线法可检测出粮粒外部和内部害虫,但该方法很难将微小的幼虫及虫卵检测出来。如果使用较强的X射线,将杀死粮食害虫。

2.2.3 电导率法

电导率法又称电阻法,原理是根据被测物体水分变化时,其直流电阻值会随之变化,据此原理来测定出粮食中异物。虫体,特别是幼虫和蛹,水分含量往往高于粮食,导致电阻值小于粮食,因此能够被检测出来。Pearson等^[31]通过测定小麦籽粒的电导率检测到籽粒内部害虫米象和谷蠹,实验结果表明,该方法对于小幼虫、中型幼虫、大幼虫以及虫蛹的检出率分别为24.5%、62.2%、87.5%、88.4%,其中米象的检出率要高于谷蠹。这种方法检测耗时长,且粮粒内部死虫也无法被检测出。与软X射线检测法相比,电导率法的害虫检出率很低。

2.2.4 微波法

微波是波长很短的无线电波,由于害虫运动,导致微波的发射信号与反射信号有所偏差,从而被检测到。Tirke、Evans和Korb等于2001至2003年间先后利用微波法发明检测系统来检测白蚁^[32-34]。Mankin^[35]利用微波法对隐蔽于储粮中的害虫进行检测,结果表明即使检测距离大于30 cm,成虫活动情况也能被检测到。该方法优点在于无损检测,但是与声测法一样周围环境的噪音对检测有着干扰性影响,同时只能检测到活虫,无法检测出死虫。

2.2.5 图像识别法

粮食受到害虫侵蚀,其图像会与正常小麦有所不同,据此可对害虫进行检测。在粮食储藏方面,图像识别技术用来确定粮食的品质与等级、评估小麦硬度以及区分霉变粮粒的图像分析等^[36],而在储粮害虫检测方面,国内外研究报道较少。

在储粮害虫检测方面,Zayas等^[37]最早采用机器视觉图像技术对小麦仓中的谷蠹成虫进行离线检测。Cataltepe等^[38]利用图像识别法对正常小麦和受到害虫侵蚀的小麦进行区别,实验结果证明该方法能够较好的区分正常小麦和受到害虫侵蚀的小麦。图像识别通常和一些检测方法联

用,Ridgway等将近红外光谱成像技术和图像识别联用,在粮食传输过程中成功检测出害虫和一些杂质,准确率达89%^[39,40]。由于图像识别法一般都是离线检测,邱道尹等^[36]提出了基于图像识别害虫在线检测的新方法,利用计算机视觉、图像处理与模式识别相结合的技术,以实现储粮害虫在线检测并给出所应及时采取的措施。该方法可以缩短储粮害虫检测周期,但仅限于检测粮粒外部害虫,可与近红外光谱法和X射线法联用,以能够同时检出粮粒内部和外部害虫。

2.2.6 声测法

声测技术是指通过检测粮堆生态系统中害虫活动的声信息,将其变成电信号,通过电子过滤器把害虫发声频率与环境声音频率分开,根据音量百分比和数量可以分辨出害虫种类和数量。Brain最^[41]早使用声信息技术检测到隐蔽于储藏物中钻蛀害虫及其蛀食声。在此基础上,后续有许多利用该方法的研究报道,如对不同虫害程度小麦进行评估^[42],对储粮害虫,如赤拟谷盗、米象、黑菌虫等鉴别^[43,44],通过幼虫蛀食声的时间和频率等信息,进而得到幼虫生长率^[45]。为更有效检测储粮害虫,国内外学者对声测系统进行不断改进和创新^[46-50],实现储粮害虫快速检测和粮食样品等级快速评判,对较大通量的声音信号的测量数据进行实时、远程、可靠的传输。目前声测法主要用于在实验室中检测粮食样品害虫。该方法只能根据害虫蛀食活动声音,判断粮堆有无害虫,且易受环境噪音等方面干扰。另外该设备造价较高,应用推广有一定困难。

2.2.7 电子鼻

电子鼻是一种模仿生物嗅觉的电子系统,由多个选择性气敏传感器和适当的模式分类方法组成,具有识别区分气味能力的装置。Persaud等首次提出了电子鼻是模仿人类嗅觉的系统^[51,52],电子鼻在食品及风味检测方面的应用已有二十多年^[53]。储粮受到害虫侵蚀后,粮食加速劣变,害虫活动过程中代谢产物和释放信息素等改变原有粮食挥发性成分,据此可对储粮害虫进行检测。Stetter等^[54]将电子鼻应用于储粮害虫检测,对正常、变质和虫害的小麦样品进行区分,分辨率可达83%。其他关于电子鼻检测储粮害虫报道如检测感染螨类害虫小麦^[55]、区分不同虫害程度的小麦等等^[56,57]。

2.3 生物类检测法

生物类检测法是利用害虫习性对储粮害虫进行诱捕检测的一类方法,此类方法是与陷阱诱捕器法有机结合起来达到检测效果,常见方法有信息素诱捕法、灯光诱集法和食物引诱剂诱捕法。

害虫雌雄之间是通过信息素进行信息联系以完成交配和繁衍下一代的,据此信息素诱捕法将信息素作为诱捕剂来诱捕害虫。现已有二十余种信息素分子结构得以鉴定,其中涉及30多种储粮害虫,如锯谷盗、赤拟谷盗、谷蠹、

米象等十几种主要储粮害虫。Mullen 等^[58]利用信息素为诱饵对印度谷螟诱捕。一些报道以几种害虫信息素作为引诱剂对彼此物种间交互作用进行分析, 如 Dowdy 等^[59]对谷蠹、赤拟谷盗和花斑皮蠹的信息素进行研究, 结果表明谷蠹信息素对赤拟谷盗和花斑皮蠹有引诱作用, 花斑皮蠹信息素对赤拟谷盗引诱作用不明显。用特定信息素对几种害虫进行诱捕, 不但能减少劳动力, 更能够减少检测成本。

灯光诱集法, 利用粮虫趋光性, 用光及彩色物体在光线不足的条件下来诱捕害虫。虽然不同种类害虫对不同波长光线的反应不尽相同, 但其主要感受光区为 340~650 nm。该方法可用来检测季节性害虫密度变化, 常用的主要是紫外光诱捕器。此方法操作简单, 但受环境光亮度影响, 应用受到一定程度的限制。

食物引诱剂诱捕法, 利用食物作为诱捕剂对害虫进行诱捕, 将食物放置于诱捕器中, 待害虫接近, 对其进行捕杀。Turner^[60]用酵母粉作为引诱剂可诱捕到书虱, 用洋槐豆粗粉和糙米为引诱剂的诱捕器, 不仅能诱捕到书虱, 也能诱捕到一些其他害虫。Phillips^[61]和 Trematerra^[62]等对单独和混合使用粉碎的粮食、信息素为引诱剂诱捕害虫的效果进行分析, 结果表明粮食对信息素有协同增效作用^[61,62]。

3 储粮害虫检测方法的优缺点归纳

综上所述, 每种检测方法都有其各自的优缺点, 对其掌握有利于对储粮害虫检测方法的改进, 在不同情况下选择最适的一种或几种方法, 以发挥良好的检测效果, 对储粮害虫作出提前预警, 以保证储粮质量和安全。如下表 1 所示, 分别对传统类、物理类和生物类检测法这三大类储粮害虫检测方法的优缺点进行简单归纳。

4 结论与展望

目前储粮害虫检测方法趋向于快速无损、操作简单, 其中新型物理检测法具备这样的优点, 因此备受国内外学者的青睐。传统类检测法仍作为一种标准化方法, 生物检测法多为辅助型方法。在不摒弃传统方法的基础上, 对新方法进行研究和改进, 可以推动储粮害虫检测技术的进步与发展。储粮害虫检测技术层出不穷, 如何将多种检测方法进行改进组合用于满足实际需求, 并且有所创新, 以实现高效快速检测是一个长久性问题。需要不断改进现有和探索研究新型有效的检测方法, 为害虫综合防治提供科学、可靠的决策性依据, 以期储粮安全提供保障。

表 1 储粮害虫检测方法的优缺点
Table 1 Advantages and disadvantages of detection techniques for pests in stored grain

方法		优点	缺点
传统类	直观检查法	简单易行, 应用广泛, 成本低	耗时长, 误差大
	取样筛检法	受环境因素影响小, 易检测害虫密度, 标准化	工作量大, 劳动强度高, 工作环境差, 效率低
	探管诱捕法	易检测害虫密度, 标准化	受环境影响误差较大, 不能检测死虫
	染色法	检测粮粒内部隐蔽害虫	效率低、有破坏性
新型物理类	近红外光谱法	快速无损检测	无法检测轻微的感染、对湿度敏感, 不能检测死虫
	高光谱法	快速无损, 精度高, 可成像	处于试验阶段, 有待进一步研究
	软 X 射线	检测粮粒内部和外部害虫, 可区分死虫和活虫, 准确率高	不能检测含虫卵的粮食, 可能杀死害虫
	电导率法	检测粮粒内部蛹、幼虫和成虫	不能检测死虫, 有破坏性, 对虫卵较不敏感。
	声测法	检测粮粒内部和外部害虫, 确定虫害程度, 操作简单	不能检测死虫, 易受周围环境噪声影响, 不易检测轻微的感染
	微波法	无损检测, 检测粮粒内部害虫, 可大规模取样	不能检测死虫
	图像识别法	检测粮粒外部害虫	不能检测粮粒内部害虫
	电子鼻	快速无损检测, 可在线	处于试验阶段, 有待进一步研究
生物类	信息素诱捕法	检测害虫密度	诱捕害虫种类有限
	灯光诱集法	仓内效果明显	易受环境影响
	食物引诱剂诱捕法	检测害虫密度	诱捕害虫种类有限

参考文献

- [1] 沈兆鹏. 隐蔽和非隐蔽储粮害虫检测技术进展[J]. 粮食储藏, 1995, 24(5): 96–100.
Shen ZP. Progress of internal and external grain pests detection technology[J]. Grain Storage, 1995, 24(5): 96–100.
- [2] 白旭光. 储粮害虫检测技术评述[J]. 储粮储藏, 2001, 39(1): 6–9.
Bai XG. A review of technology for detecting stored grain insects[J]. Grain Storage, 2001, 39(1): 6–9.
- [3] 李兴奎, 鲁玉杰, 仲建锋, 等. 储粮害虫检测技术研究现状及应用进展[J]. 粮食流通技术, 2007, (3): 19–22.
Li XK, Lu YJ, Zhong JF, *et al.* Advance of stored grain insects detection technology[J]. Grain Distrib Technol, 2007, (3): 19–22.
- [4] 胡丽华, 郭敏, 张景虎, 等. 储粮害虫检测新技术及应用现状[J]. 农业工程学报, 2008, 23(11): 286–290.
Hu LH, Guo M, Zhang JH, *et al.* New detection technology and application status of stored-grain insects[J]. Trans CSAE, 2007, 23(11) : 286–290.
- [5] Neethirajana S, Karunakarana C, Jayas DS, *et al.* Detection techniques for stored-product insects in grain [J]. Food Control, 2007, 18(2): 157–162.
- [6] LS/T 1211 粮油储藏技术规范[S].
LS/T 1211 Technical criterion for grain and oils storage[S].
- [7] Smith LB. Efficiency of Berlese-tullgren funnels for removal of the rusty grain beetle, *Cryptolestes ferrugineus* from wheat samples [J]. Can Entomol, 1977, 109(4): 503–509.
- [8] Hagstrum DW, Flinn PW, Subramanyam BH, *et al.* Interpretation of trap catch for detection and estimation of stored-product insect populations [J]. J Kansas Entomol Soc, 1990, 63: 500–505.
- [9] Loschiavo SR, Atkinson JM. An improved trap to detect beetles (Coleoptera) in stored grain [J]. Can Entomol, 1973, 99: 1160–1163.
- [10] White NDG, Arbogast RT, Fields PG, *et al.* The development and use of pitfall and probe traps for capturing insects in stored grain [J]. J Kansas Entomol Soc, 1990, 63: 505–525.
- [11] Fargo WS, Epperley D, Cuperus GW, *et al.* Effects of temperature and duration of trapping on four stored grain insect species [J]. J Econ Entomol, 1989, 82: 970–973.
- [12] Wright VF, Mills RB. Estimation of stored-product insect populations in small bins using two sampling techniques [C]. Proceedings 3rd International Working Conference on Stored-Product Entomology, 1984.
- [13] Ridgway C, Chambers J. Detection of external and internal insect infestation in wheat by near-infrared reflectance spectroscopy [J]. J Sci Food Agric, 1996, 71: 251–264.
- [14] Baker JE, Dowell FE, Throne JE. Detection of parasitized rice weevils in wheat kernels with near-infrared spectroscopy [J]. Biol Control, 1999, 16: 88–90.
- [15] Dowell FE, Throne JE, Wang D, *et al.* Identifying stored-grain insects using near-infrared spectroscopy [J]. J Econ Entomol, 1999, 92: 165–169.
- [16] Ghaedian AR, Wehling RL. Discrimination of sound and granary-weevil-larva-infested wheat kernels by near-infrared diffuse reflectance spectroscopy [J]. J Aoac Int, 1997, 80: 997–1005.
- [17] Dowell FE, Throne JE, Baker JE. Automated nondestructive detection of internal insect infestation of wheat kernels by using nearinfrared spectroscopy [J]. J Econ Entomol, 1998, 91: 899–904.
- [18] Elizabeth BM, Dowell FE, Baker JE, *et al.* Detecting single wheat kernels containing live or dead insects using near infrared reflectance spectroscopy [C]. ASAE Annual International Meeting, 2002.
- [19] Singh CB, Jayas DS, Paliwal J, *et al.* Detection of insect-damaged wheat kernels using near-infrared hyperspectral imaging [J]. J Stored Prod Res, 2009, 45(3): 151–158.
- [20] Singh CBS, Jayas DS, Paliwal J, *et al.* Identification of insect-damaged wheat kernels using short-wave near-infrared hyperspectral and digital colour imaging [J]. Comput Electron Agric, 2010, 73(2): 118–125.
- [21] 张红涛, 胡玉霞, 毛罕平, 等. 基于近红外高光谱成像的粮虫生命体征检测研究[J]. 农机化研究, 2014, (8): 165–173.
Zhang HT, Hu YX, Mao HP, *et al.* Vital Signs Detection of Stored - grain Insects Based on Near-infrared Hyperspectral Imaging[J]. J Agric Mech Res, 2014, (8): 165–173.
- [22] 张红涛, 任孟梅, 胡玉霞, 等. 基于近红外超光谱成像的谷蠹活虫检测研究[J]. 河南农业科学, 2014, 43(4): 152–155.
Zhang HT, Ren MM, Hu YX, *et al.* Detection of Live Rhyzopertha dominica Based on Near-infrared Hyperspectral Imaging[J]. J Henan Agric Sci, 2014, 43(4): 152–155.
- [23] Kaliramesha S, Chelladurai V, Jayas DS. Detection of infestation by *Callosobruchus maculatus* in mung bean using near-infrared hyperspectral imaging [J]. J Stored Prod Res, 2013, 52: 107–111.
- [24] Milner M, Lee MR, Katz R. Radiography applied to grain and seeds [J]. Food Technol, 1952, 6: 44–45.
- [25] Haff RP, Slaughter DC. X-ray inspection of wheat for granary weevils [C]. ASAE/CSAE-SCGR Annual International Meeting, 1999.
- [26] Haff RP, Pearson TC. An automatic algorithm for detection of infestations in X-ray images of agricultural products [J]. Sensing and Instrum Food Qual, 2007, 1: 143–150.
- [27] Nawrocka A, Ewa Stepień E, Grundasa S, *et al.* Mass loss determination of wheat kernels infested by granary weevil from X-ray Images [J]. J Stored Prod Res, 2011, 48: 19–24.
- [28] Boniecki P, Piekarska-Boniecka HK, Świerczyński K, *et al.* Detection of the granary weevil based on X-ray images of damaged wheat kernels [J]. J Stored Prod Res, 2014, 56: 38–42.
- [29] Karunakaran C, Jayas DS, White NDG. Soft X-ray inspection of wheat kernels infested by *Sitophilus oryzae* [J]. T ASAE, 2003, 46(3): 739–745.
- [30] Chelladurai V, Karupiah K, Jayas DS, *et al.* Detection of *Callosobruchus maculatus* (F.) infestation in soybean using soft X-ray and NIR hyperspectral imaging techniques[J]. J Stored Prod Res, 2014, (57): 43–48.
- [31] Pearson TC, Brabec DL, Schwartz CR. Automated detection of internal insect infestations in whole wheat kernels using a Patent SKCS4100 [J]. Appl Eng Agric, 2003, 1(96): 727–733.
- [32] Tirkel A, Sanderson GJ, Davies RJ. Termite detection system. International patent, 6313643 [P]. 2001-11-06.
- [33] Evans TA. Assessing efficacy of Termatrac™: a new microwave based technology for non-destructive detection of termites (Isoptera) [J]. Sociobiology, 2002, 40: 575–583.
- [34] Korb J. The shape of compass termite mounds and its biological significance [J]. Insect Soc, 2003, 50(3): 218–221.
- [35] Mankin RW. Microwave radar detection of stored-product insects [J]. J Econ Entomol, 2004, 97(3): 1168–1173.

- [36] 徐昉, 邱道尹, 白旭光, 等. 利用图像处理技术检测粮仓害虫的研究[J]. 郑州工程学院学报, 2001, 22(1): 78–81.
Xu F, Qiu DY, Bai XG, *et al.* Study on the image processing technology for detection insects in grain storage[J]. J Zhengzhou Inst Technol, 2001, 22(1): 78–81.
- [37] Zayas IY, Inna Y. Detection of insects in bulk wheat samples with machine vision[J]. Trans ASAE, 1998, (3): 883–888.
- [38] Cataltepe Z, Pearson T, Cetin E. Identification of insect damage detection in wheat kernels using transmittance images [J]. Ieee Ijcn, 2004, 5: 1343–1346.
- [39] Ridgway C, Davies ER, Chambers J. Imaging for the high-speed detection of pest insects and other contaminants in cereal grain in transit [C]. ASAE Annual Meeting, 2001.
- [40] Ridgway C, Davies ER, Chambers J, *et al.* Rapid machine vision method for the detection of insects and other particulate bio-contaminants of bulk grain in transit [J]. Biosyst Eng, 2002, 83(1): 21–30.
- [41] Brain CK. Preliminary note on the adaptation of certain radio principles to insect investigation work [J]. Ann Univ Stellenbosch, 1924, 2: 45–47.
- [42] Hagstrum DW, Flinn PW, Shuman D. Automated monitoring using acoustical sensors for insects in farm-stored wheat [J]. J Econ Entomol, 1996, 89(1): 211–217.
- [43] 耿森林, 尚志远. 基于害虫声频域特征的储粮害虫种类鉴别研究[J]. 农业系统科学与综合研究, 2005, 21(4): 241–243.
Geng SL, Shang ZY. The distinction of insect kind on the characteristic of stored grain insect sound frequency[J]. System Sci Compr Stud Agric, 2005, 21(4): 241–243.
- [44] 耿森林, 尚志远. 仓储粮食中害虫活动声的提取与频谱分析[J]. 西南师范大学学报, 2005, 30(6): 1057–1060.
Geng SL, Shang ZY. The Sampling of the Insect Activity Sound in the Storage Grain and Its Frequency Spectrum Analysis[J]. J Southwest China Normal Univ (Nat Sci Edit), 2005, 30(6): 1057–1060.
- [45] Webb JC, Litzkow CA, Slaughter DC. A computerized acoustical larval detection system [J]. Appl Eng Agric, 1988, 4(3): 268–274.
- [46] Litzkow CA, Webb JC, Masuda S. Acoustical detection of hidden insects [J]. J Acoust Soc Am, 1988, 83(1): 407.
- [47] Shuman D, Coffelt JA, Vick KW, *et al.* Quantitative acoustical detection of larvae feeding inside kernels of grain [J]. J Econ Entomol, 1993, 86(3): 933–938.
- [48] Shuman D, Weaver DK, Mankin RW. Quantifying larval infestation with an acoustical sensor array and cluster analysis of cross-correlation outputs [J]. Appl Acoust, 1997, 50(4): 279–296.
- [49] 韩安太, 何勇, 李剑锋. 基于无线传感器网络的粮虫声信号采集系统设计[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 181–187.
Han AT, He Y, Li JF, *et al.* Design of acoustic signal acquisition system of stored grain pests based On wireless sensor networks[J]. Trans Chin Soc Agric Eng, 2010, 26(6): 181–187.
- [50] 彭慧, 赵子恺, 洪俊. 基于压缩感知的无线粮虫声信号采集方案[J]. 农机化研究, 2014, (5): 83–93.
Peng Hui, Zhao ZK, Hong J. research on wireless audio sensor networks data compression method based on compressive sensing[J]. J Agric Mech Res, 2014, (5): 83–93.
- [51] Persaud KC, Dodd G. Analysis of discrimination mechanisms in the mammalian olfactory system using a model nose[J]. Nature, 1982, 299: 352–355.
- [52] Rock F, Barsan N, Weimar U. Electronic nose: current status and future trends [J]. Chem Rev, 2008, 108: 705–725.
- [53] Rajendran S, Steve LT. Detection of insect infestation in stored foods [J]. Adv Food Nutr Res, 2005, 49, 163–232.
- [54] Stetter JR, Findlay Jr MW, Schroeder KM, *et al.* Quality classification of grain using a sensor array and pattern recognition [J]. Anal Chim Acta, 1993, 284: 1–11.
- [55] Ridgway C, Chambers J, Larragueta EP, *et al.* Detection of mite infestation in wheat by electronic nose with transient flow sampling [J]. J Sci Food Agric, 1999, 79: 2067–2074.
- [56] 蒋德云, 孔晓玲, 李宝筏, 等. 电子鼻在储粮害虫检测中的应用研究[J]. 安徽农业大学学报, 2005, 32(2): 254–257.
Jiang DY, Kong XL, Li BF, *et al.* Research and Application of Electronic Nose for Testing Stored-grain Insects[J]. J Anhui Agric Univ, 2005, 32(2): 254–257.
- [57] Zhang HM, Wang J. Detection of age and insect damage incurred by wheat, with an electronic nose [J]. J Stored Prod Res, 2007: 43, 489–495.
- [58] Mullen MA, Dowdy AK. A pheromone-baited trap for monitoring the Indian meal moth, *Plodia interpunctella* (Hübner) (Lepidoptera: Pyralidae) [J]. J Stored Prod Res, 2001, 37(3): 231–235.
- [59] Dowdy AK, Mullen MA. Multiple stored-product insect pheromone use in pitfall traps [J]. J Stored Prod Res, 1998, 34(1): 75–80.
- [60] Turner BD. Applying ecology: domestic pests, a suitable case for treatment [J]. J Biol Educ, 1988, 22: 183–188.
- [61] Phillips TW, Jinag XL, Burkholder WE, *et al.* Behavioural response to food volatiles by two species of stored-product Coleoptera *Sitophilus oryzae* (Curculionidae) and *Tribolium castaneum* (Tenebrionidae) [J]. J Chem Ecol, 1993, 19: 723–734.
- [62] Tremarctera P, Girgenti P. Influence of pheromone and food attractants on trapping of *Sitophilus oryzae* (L.) (Coleoptera: Curculionidae) [J]. J Econ Entomol, 1989, 80: 763–767.

(责任编辑: 赵静)

作者简介



张蓝月, 硕士研究生, 主要研究方向为粮油储藏及品质快速检测。
E-mail: zlan Yue@hotmail.com



邵小龙, 博士, 主要研究方向为粮油储运、快速无损检测。
E-mail: sxlion2@gmail.com