

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2021.03.028

鲁玉杰, 王文敬, 任天一, 等. 储藏物害虫智能化监测与预警系统研究进展[J]. 粮油食品科技, 2021, 29(3): 208-214.

LU Y J, WANG W J, REN T Y, et al. Research progress of intelligent monitoring and early warning system for stored grain pests[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2021, 29(3): 208-214.

# 储藏物害虫智能化监测与 预警系统研究进展

鲁玉杰<sup>1,2</sup>✉, 王文敬<sup>1</sup>, 任天一<sup>1</sup>, 卢少华<sup>1</sup>, 王争艳<sup>1</sup>(1. 河南工业大学 粮油食品学院, 郑州 450001;  
2. 江苏科技大学 粮食学院, 江苏 镇江 212003)

**摘要:**目前我国粮食储备库智能化建设的基础设施比较完善,但对于虫霉的智能监测和预警系统建设还缺少系统的研究。为了保证国家粮食安全,提升粮食智能化管理水平,对目前储粮行业常见的基于图像识别、红外光电、声学检测、电容传感器等技术的储粮害虫智能化监测与预警系统进行总结,比较各个技术的优点与局限。当前,提高智能化监测系统的数据集容量、计数准确率和识别精度是关键技术,结合多场耦合效应建立多种因素影响害虫的种群增长数学模型,并建立相应的专家决策系统,形成检测、预警、防治的产业链是未来智能化粮库发展的方向。综述最新的研究成果,以期对推进我国储粮行业的智能化粮库建设有所帮助。

**关键词:** 储粮害虫; 智能化监测; 预警系统; 专家决策系统

中图分类号: S431.9; TS210 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2021)03-0208-07

## Research Progress of Intelligent Monitoring and Early Warning System for Stored Grain Pests

LU Yu-jie<sup>1,2</sup>✉, WANG Wen-jing<sup>1</sup>, REN Tian-yi<sup>1</sup>, LU Shao-hua<sup>1</sup>, WANG Zheng-yan<sup>1</sup>

(1. Henan University of Technology, College of Food Science and Engineering, Zhengzhou, Henan 450001, China; 2. Jaingsu University of Science and Technology, School of Grain Science and Technology, Zhenjiang, Jiangsu 212003, China)

**Abstract:** At present, the infrastructure for intelligent construction of grain storage depots in our country is relatively complete. However, there is still a lack of systematic research on the construction of intelligent monitoring and early warning systems for insects. The common intelligent monitoring and early warning systems for stored grain pests based on image recognition, infrared photoelectric, acoustic detection, capacitive sensors and other technologies were summarized. The advantages and limitations of each technology are compared in this paper. At present, improving the data set capacity, counting accuracy and recognition accuracy of the intelligent monitoring system are the key technologies. Based on multi-field coupling theory, establish a mathematical model for population growth of different pests and the corresponding expert decision-making system to form the industrial chain of detection and early warning and

收稿日期: 2020-11-04

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC1605304)

Supported by: National Key Research and Development Project of China (No. 2019YFC1605304)

作者简介: 鲁玉杰, 女, 1971年出生, 教授, 研究方向为昆虫化学生态学和分子生态学。E-mail: luyujie1971@163.com.

control, which is the development direction of intelligent grain depot in the future. The industrial chain of prevention and control is the direction of the future development of intelligent grain depots. This article systematically summarizes the latest research results to help promote the construction of intelligent grain depots in my country's grain storage industry.

**Key words:** stored grain pests; intelligent monitoring; early warning system; expert decision system

我国是粮食生产和消费大国,也是粮食储备大国。粮食作为关乎国计民生的重要战略资源和特殊商品,保证其数量与质量安全关系到社会稳定和国民经济的平稳发展<sup>[1]</sup>,而且粮食安全一直是我国战略需求,因此减少粮食的产后损失具有重要的战略意义。粮食经过存储、流通等环节,各个环节都有可能存在粮食损耗。其中,粮食储藏过程中有害生物造成的损失大约占 30%。据保守估计,我国每年粮食作物产量总计为 4 500~5 000 亿公斤,每年由于害虫破坏导致的粮食损失达 1.5~6 亿公斤,由储粮害虫造成的粮食、豆类和油料损失约为总存储量的 5%,家庭储粮因虫害而造成的损失约为 8%~10%,直接造成的经济损失超过 20 亿元<sup>[2-3]</sup>。因此,我国粮食的储藏安全任务艰巨。

在目前信息化时代,建设结合自动化、信息化和集成化技术的智能化粮库已经成为一种必然的趋势<sup>[4]</sup>,同时也是粮食仓储企业实现智能化管理的有效方式<sup>[5]</sup>。相对于传统的储粮害虫检测技术,储粮害虫的智能化检测和预警技术可以让我们实时、准确地得知害虫发生的动态变化,为储粮有害生物预防提供有力的保障。目前,储粮害虫的在线检测和监测手段众多,但这些监测手段因成本高、有限制性和精度低等缺点未得到广泛认可和大规模使用<sup>[6-8]</sup>。本文通过综述当前常见的储粮害虫检测技术,以及智能化监测与预警系统的研究成果,并分析每种技术的优缺点,以期对我国粮食储藏安全过程中储粮害虫的防控决策提供帮助。

## 1 储粮害虫智能化监测研究进展

目前常见的害虫智能化监测手段均是基于害虫的诱捕装置,其中主要涉及的技术有诱捕技术、图像处理技术、红外光电传感技术、声音分析技术、电导传感技术、传输技术、终端系统分析技术等<sup>[9]</sup>。诱集检查技术是一种较为传统的害虫检

查手段,其主要原理是利用害虫上爬性、群集性等习性,通过引诱剂将害虫诱集到一定的区域内<sup>[10]</sup>,其中引诱剂主要分为食物引诱剂和信息素引诱剂两大类。在实际生产中常用的诱捕装置有探管诱捕器、锥形诱捕器、波纹板诱捕器和瓦楞纸诱捕器等。如今粮食储藏领域的重点研究方向就是将最新、最先进的技术应用到害虫在线监测设备中,实现对粮库虫害情况的自动化控制,以至于应用大数据和互联网的思维建设智能化粮库。

### 1.1 基于图像识别的储粮害虫智能化监测

基于图像识别技术的害虫检测系统是目前比较常见的,Ridgway 等<sup>[11]</sup>实现了一种用于害虫、鼠粪和麦角自动监测的系统,采用最小运算律的线性分割器实现了赤拟谷盗 *Tribolium castaneum* Herbst、锯谷盗 *Oryzaephilus surinamensis* Linne 等常见储粮害虫的检测,识别率达到 93%。Espinoza 等<sup>[12]</sup>通过图像预处理并应用卷积神经网络的方法来识别烟粉虱 *Bemisia tabaci* 和西花蓟马 *Frankliniella occidentalis*。Ding 等<sup>[13]</sup>提出了一种基于深度学习的野外诱捕图像害虫自动监测系统,采用滑动窗口来获得区域建议框,然后配合监测卷积神经网络来实现蛾类在粘虫板上的计数,并且探讨了虫类目标检测模型性能的评估方式。赵彬宇等<sup>[14]</sup>研发了一款集储粮害虫智能图鉴与图像识别于一体的 APP,该 APP 实现了 6 类 10 种常见的储粮害虫在手机上的种类识别。苗海委和周慧玲<sup>[15]</sup>提出了一种基于深度学习的粘虫板储粮害虫图像检测算法,实现了放置在粮仓表面粘虫板诱捕的六大类害虫的定位和识别,检测平均正确率可以达到 81.36%。刘治财<sup>[16]</sup>提出深度学习的目标检测算法在储粮害虫检测识别中的应用,使用深度学习算法一定程度上克服了实际储粮环境中,粮虫图片背景复杂、粮虫行态变化大的难点,避免了传统设计特征时可分性差、表达能力不足、过程繁琐等缺点。从大数据中自动学

习泛化性更强的特征,能快速地将粮虫识别方法迁移到新的粮虫种类,降低了研究人员开发算法的难度。

### 1.2 基于红外光电技术的储粮害虫智能化监测

应用红外光电传感器的在线监测系统是基于探管诱捕器和红外光电传感器的一种监测装置,其特点是价格经济,既能检测粮堆内部不同深度的害虫发生情况,又能够估计害虫密度<sup>[17]</sup>。Litzkow 等<sup>[18]</sup>提出电子粮食探管害虫计数器,它通过探管诱捕器内安放红外光电发射和接受二极管检测通过的害虫,害虫坠落时会对光束产生遮挡,以遮挡程度是否超过预设阈值为特征来实现害虫计数。Shuman 等<sup>[19]</sup>研制了利用正交的双红外技术监测储粮害虫。害虫掉入诱捕器后通过正交的双红外光束矩阵,产生相应的模拟信号。该系统利用嵌入式微处理器对红外传感器的模拟信号进行分析,提取出的参数最终传输到台式计算机上。一定程度上降低了害虫下落姿态对计数准确率的影响,实现了对米象 *Sitophilus oryzae* Linnaeus 和锈赤扁谷盗 *Cryptolestes ferrugineus* Stephens 的二分类。该系统不仅实现了害虫体形大小的确认并成功过滤了落入诱捕器的一些杂质等。Opisystems 公司利用实仓试验的大量数据,开发出了基于电子计数装置的统计模型,并将其注册为了商业化产品 Insector。王威松等<sup>[20]</sup>设计研发了储粮害虫诱捕在线监测装置,可以采集完整的红外光电序列,并采集了蛀食性害虫(米象、玉米象 *Sitophilus zeamais* Motschulsky、谷蠹 *Rhizopertha dominica* Linnaeus)和粉食性害虫(长角扁谷盗 *Cryptolestes pusillus* Oliver、土耳其扁谷盗 *Cryptolestes turcicus* Grouville、锈赤扁谷盗、赤拟谷盗、杂拟谷盗 *Tribolium confusum* Duval、锯谷盗)的红外光点数据集,实现了对蛀食性和粉食行害虫的二分类,以及一定程度上的两大类害虫中不同种害虫的细分。解决了以往研究中对害虫体长信息提取粗糙、未充分利用害虫下落时整个遮挡过程对应电信号的弊端。

### 1.3 基于声学的储粮害虫智能化监测

声信号检测法的原理是把声信号转换成电信号,通过电子过滤器把昆虫发声的频率与环境声音的频率区分,通过声音传播路程的比例和产

生该种声音传播路程数量的多少来分辨储粮昆虫的种类和数量<sup>[10]</sup>,其最大的应用前景在早期检测谷物内部的隐蔽性害虫<sup>[21]</sup>。近几年来,声学传感器的可靠性和有效性大大提高<sup>[22]</sup>。但是声学方法在估计谷物内部害虫种群密度的应用潜力的研究很少。Ilyas 等<sup>[23]</sup>采集昆虫的运动和摄食等典型行为的声音后,通过计算机系统对采集到的声音进行放大、滤波、参数化和分类,该方法对粮仓内的米象种群识别率达到了 100%。Mankin 等<sup>[22]</sup>通过声音传感器检测粮堆中米象、赤拟谷盗、药材甲 *Stegobium paniceum* 爬行刮擦的声音,发现成虫的活动声信号均可以被捕捉到。Eliopoulos 等<sup>[21]</sup>在实验室对粮食内部害虫声音信号进行希尔伯特变换,并在音频中剔除无关的噪声记录,从而得出可能的昆虫行为脉冲信号,检查准确率达到 48%~74%。当虫害密度为 1 头/Kg~2 头/Kg 时,该系统的检测准确率可以达到 72%~100%。Eliopoulos 等<sup>[24]</sup>使用压电传感器和连接到计算机的便携式声发射放大器来记录昆虫的声信号,建立了描述害虫种群密度和声音之间的线性模型,证明了利用声信号对散装粮的受侵染程度进行自动检测是可行的。但是由于环境噪声的影响基于声信号的害虫在线监测系统尚未在大型粮库内得到应用。

### 1.4 基于电容传感器的储粮害虫智能化监测

电容传感器监测害虫的原理是对电容监测电路检测出的电容值变化范围、变化次数进行分析处理,确定并记录害虫的种类数量,根据不同储粮害虫在检测电极间自由掉落过程中引起检测电极电容值改变的不同分为来区分害虫的种类。鲍舒恬和常春波<sup>[25]</sup>利用储粮害虫的含水特性,采用电容原理,设计了低功耗的虫害检测传感器,实现了储粮害虫数量和种类的精确监测,并与无线传感器网络技术结合,设计了易于部署的全无线储粮害虫监测系统,该系统已应用于部分粮库,反映良好。

### 1.5 基于粮食中气体组分变化的储粮害虫智能化监测

粮食在储藏过程中的部分损耗来自于虫害和霉菌的侵染,虫霉活动产生的特征性物质会改变

粮食中的可挥发气体组分或改变粮堆中某种气体成分的含量，可通过测定相关气体的含量了解储粮的状态<sup>[26]</sup>。近年来，二氧化碳作为检测储粮条件的一种指标，因其敏感性和可靠性而受到越来越多的关注<sup>[27]</sup>。翟焕趁等<sup>[27]</sup>在大型粮仓中进行粮堆内 CO<sub>2</sub> 气体浓度监测试验，发现安全水分小麦呼吸水平较低，害虫活动可显著提高粮堆中的 CO<sub>2</sub> 气体浓度，在实仓中采用多定点检测法，能灵敏地检测到人工热点周围 CO<sub>2</sub> 浓度的空间变化<sup>[28]</sup>。相关研究表明，二氧化碳浓度与粮食中害虫发生状况显著相关，一定条件下可通过检测二氧化碳浓度了解储粮粮情和害虫发生状态<sup>[29-32]</sup>。

## 2 储粮害虫智能化监测系统组成

随着智能化粮库的建设和对粮食安全的重视，对智能化粮食的害虫的智能化监测技术的研究成为目前储粮害虫的研究热点。颜丙生等<sup>[33]</sup>将图像处理与光电技术相结合设计了一套基于 LabVIEW 的储粮害虫监测及自动分级报警系统。先用粮虫诱捕器捕获害虫，再利用诱捕器中的 CCD 相机对粮虫拍照，照片通过数据线传送到主机上，用连通域与平均像素修正法进行粮虫计数。在大型粮仓中，由于测点多，且相机成本高，若测点都采用相机取样，整个监测系统的成本会居高不下，为了减少成本，使用光电技术来对害虫数量进行辅助监测。通过粮虫诱捕器收集到害虫，在检测光电信号之前，打开 LED 照明灯为设备提供光源，光线穿过装有虫子的透明落虫板传到光电传感器上，利用光电传感器将光信号转换为电信号，利用虫子数量与光电信号电压值之间的函数关系，通过代数运算及可得到对应的虫子数量。储粮害虫监测及自动分及报警系统的硬件组成如图 1 所示。

马彬<sup>[34]</sup>在研究储粮书虱种群动态模型的前提下利用图像二值法建立了储粮书虱自动化监测系统，鲁玉杰等<sup>[35]</sup>研发了一系列的储粮害虫智能化监测系统，结合嗜虫书虱种群增长模型的基础上，开发了一套储粮书虱的智能化监测系统<sup>[36-38]</sup>。李虎和熊伟<sup>[39]</sup>结合现有的粮仓虫害监测方式，在原本监测设备的基础上进行升级，引入图像处理与光电处理技术结合的方式，在信息处理平台上设

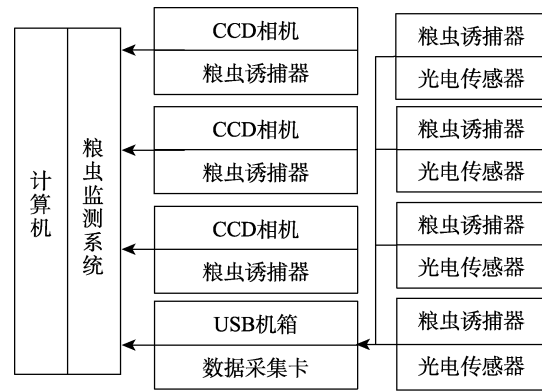


图 1 储粮虫害监测及自动分及报警系统硬件组成  
(仿 颜丙生, 2016)

Fig.1 Hardware composition of stored grain pest monitoring and automatic distribution and alarm system  
(Yan Bingsheng, 2016)

计昆虫计数，温、湿度监控等各项指标的监测软件设计了一个粮仓虫害监测系统。该系统主要由计算机、温度传感器、CCD 相机、湿度传感器和粮虫诱捕器等硬件构成（见图 2）。在系统软件设计方面，通过 LabVIEW 平台设计粮仓虫害监测及自动分级报警系统。尽最大可能减轻大型粮仓的日常管理负担，减少粮食在日常储存中的损耗，实现粮仓管理自动化，方便粮仓人员管理，确保国家的粮食卫生安全。

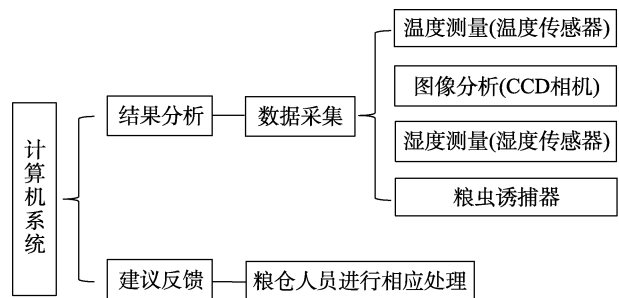


图 2 根据粮仓温湿度设置的虫害检测系统  
(仿 李虎和熊伟, 2020)

Fig.2 Pests detection system based on temperature and humidity of granary (Li Hu & Xiong Wei, 2020)

## 3 害虫预警系统

害虫预测预报是害虫综合管理重要的组成部分，是一项监测昆虫未来种群变动趋势的重要工作，也是有效防治和控制害虫发生发展的依据，更是农业生产管理和决策的前提。随着数学理论及其它学科的发展，害虫的预测预报大致经历了经验预测、实验预测、统计预测和信息预测四个发展阶段<sup>[40]</sup>。随着计算机时代的到来，国内外在病虫

害监测预警信息化研究上取得了极大的进展<sup>[41-43]</sup>。

顿文峰<sup>[44]</sup>设计了一个柑橘实蝇害虫监测预警系统，方便植保人员在收集柑橘实蝇害虫监测数据之后，通过网络进行监测数据填报、查询、以及数据汇总分析，除此之外，本系统还应该为他们提供地图可视化服务，便于他们从地图上了解监测点空间位置,各个区域监测点监测动态情况，在结合相关生态学模型研究柑橘害虫适生性之后发布柑橘实蝇害虫预警信息,旨在帮助植保人员通过网络传递和共享信息资源，掌握所在地区的柑橘实蝇害虫发生动态，采取必要的防治措施。为实现系统开发目标，满足用户基本功能需求，使资源得到充分的利用与共享，设计了如图 3 所示的害虫检测预警系统。

由于实际粮仓中的环境较实验室条件更为复杂、害虫的体长、食性、姿态都具有多样性。现有的智能化监测预警系统在实际应用中都存在其局限性且存在标准化流程未规范的情况，均未得到大规模的使用。Shen 等<sup>[45]</sup>和 Li 等<sup>[46]</sup>利用大数据学习技术和物联网技术建立了多种储粮害虫的监测系统，对常见储粮害虫的检测取得了良好的效果，未来也考虑利用粮库中获得的实际图像对该系统加以改进。目前作者所在的研究团队正在建立一套储粮害虫的预警系统和专家决策系统，以期能够解决储粮害虫的监测和智能化预警方面缺陷的问题。

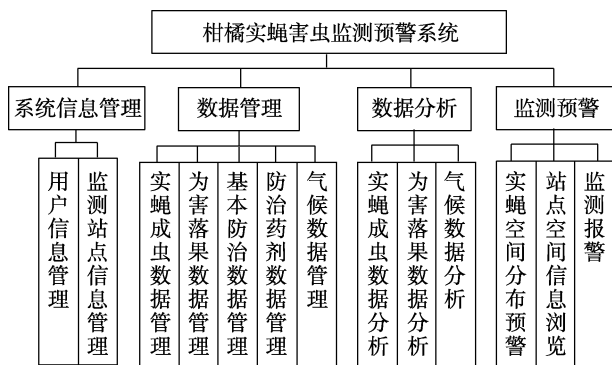


图 3 柑橘实蝇监测预警模块图 (仿顿文峰, 2013)

Fig.3 Monitoring and early warning module of citrus fruit flies (Dun Wenfeng, 2013)

#### 4 展望

粮食安全是我国的基本的政治战略需求，保证粮食安全必须减少有害生物的发生，智能化粮

库的建设已经成为必然趋势。其中储粮害虫的智能化检测与预警系统是其中的重要组成部分。基于图像识别的检测系统能自动识别粮堆中的害虫，但是无法检测粮粒内部害虫；基于红外光电技术的在线检测成本低廉、计数准确，但是对体态相近的害虫的区分程度不高；基于电容传感器的在线检测使用年限长，但是效率不高，检测不出内部有死虫的粮粒；气体分析法有取样方便、检测快捷和监测灵敏等多种独特的优势。

本文综述了现有的储粮害虫智能化检测和预警系统。未来智能化监测系统重点关注以下两点：一是要加强电子技术特别是大数据的应用，得到更多快速衡量害虫数量和种类的指标，利于害虫分类的特征。制定规范害虫在线监测技术方面的行业标准。二是研究影响害虫发生的多种环境因子如温度、湿度、光照、微生物、害虫气味、粮食种类等多个因子的耦合作用，建立害虫发生的多场耦合模型，根据耦合规律和模型，建立害虫的预测预警模型，基于机理驱动和数据驱动的人工智能识别系统，以支撑检测、预警、防治这一完整链条，做到及时发现，合理防治。

#### 参考文献:

[1] 陈赛赛, 王力, 胡育铭, 等. 智能化粮库建设与应用现状[J]. 粮油食品科技, 2016, 24(2): 97-101.  
CHEN S S, WANG L, HU Y M, et al. Construction and practice of intelligent grain depot[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2016, 24(2): 97-101.

[2] 白旭光. 储藏物害虫与防治第二版[M]. 北京: 科学出版社, 2008, 11.  
BAI X G. Storage pests and control(2nd Edition)[M]. Beijing: Science Press, 2008, 11.

[3] 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, 2007, 11: 286-290.  
HU L H, GUO M, ZHANG J H, et al. New detection technology and application status of stored-grain insects[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(11): 286-290.

[4] 张刚. 智能机器人在粮库中的应用探讨[J]. 食品安全导刊, 2017(36): 32-32.  
ZHANG G. Application of intelligent robot in grain depot[J]. China Food Safety Magazine, 2017(36): 32-32.

[5] 王华东. 粮库智能化建设与应用现状[J]. 现代食品, 2019(2): 180-183.

- WANG H D. Current situation of intelligent construction and application of grain depots[J]. *Modern Food*, 2019(2): 180-183.
- [6] RAJENDRAN S. Detection of insect infestation in stored foods[J]. *Advances in Food and Nutrition Research*, 2005, 49(4): 163-232.
- [7] FLEURAT-LESSARD, FRANCIS. Monitoring insect pest populations in grain storage: The European context[J]. *Stewart Postharvest Review*, 2011, 7(3): 1-8.
- [8] NEETHIRAJAN S, KARUNAK ARAN C, JAYAS D S, et al. Detection techniques for stored-product insects in grain[J]. *Food Control*, 2007, 18(2): 157-162.
- [9] 马彬, 金志明, 蒋旭初, 等. 储粮害虫在线监测技术的研究进展[J]. *粮食储藏*, 2018, 47(2): 27-31.
- MA B, JIN Z M, JIANG X C, et al. Advanced review on on-line monitoring techniques for stored grain pests[J]. *Grain Storage*, 2018, 47(2): 27-31.
- [10] 白旭光. 储粮害虫检测技术评述[J]. *粮食储藏*, 2010, 39(1): 6-9.
- BAI X G. A review of technology for detecting stored grain insects[J]. *Grain Storage*, 2010, 39(1): 6-9.
- [11] RIDGWAY C, DAVIES E R, CHAMBERS J, et al. AE-Automation and emerging technologies: Rapid machine vision method for the detection of insects and other particulate bio-contaminants of bulk grain in transit[J]. *Biosystems Engineering*, 2002, 83(1): 21-30.
- [12] ESPINOZA K, VALERA D L, TORRES J A, et al. Combination of image processing and artificial neural networks as a novel approach for the identification of *Bemisia tabaci* and *Frankliniella occidentalis* on sticky traps in greenhouse agriculture[J]. *Computers & Electronics in Agriculture*, 2016, 127: 495-505.
- [13] DING W, TAYLOR G. Automatic moth detection from trap images for pest management[J]. *Computers & Electronics in Agriculture*, 2016, 123: 17-28.
- [14] 赵彬宇, 周慧玲, 李江涛, 等. 储粮害虫智能图鉴及图像识别 APP 软件设计[J]. *粮食储藏*, 2019(3).
- ZHAO B Y, ZHOU H L, LI J T, et al. Mobile app design for stored grain insect illustration guide and image recognition[J]. *Grain Storage*, 2019(3).
- [15] 苗海委, 周慧玲. 基于深度学习的粘虫板储粮害虫图像检测算法的研究[J]. *中国粮油学报*, 2019, 34(12): 93-99.
- MIAO H W, ZHOU H L. Detection of stored-grain insects image on sticky board using deep learning[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2019, 34(12): 93-99.
- [16] 刘治财. 基于深度学习的目标检测算法在储粮害虫检测识别中的应用[D]. 2019.
- LIU Z C. Application of object detection algorithms based on deep learning in detection of stored-grain pests[D]. 2019.
- [17] BANGA K S, KOTWALIWALE N, MOHAPATRA D, et al. Techniques for insect detection in stored food grains: An overview[J]. *Food Control*, 2018, 94, 167-176.
- [18] LITZKOW C A, SHUMAN D, KRUSS S, et al. Electronic grain probe insect counter(EGPIC)[J]. 1997.
- [19] SHUMAN D, CROMPTON D R. Sensor output analog processing-A microcontroller-based insect monitoring system: US 2005.
- [20] 王威松, 周慧玲, 秦戈, 等. 一种探管式储粮害虫诱捕在线监测装置的设计研究[J/OL]. *中国粮油学报*: 1-7[2020-08-07].
- WANG W S, ZHOU H L, QIN G, et al. Research on an online monitoring device based on probe trap for stored-grain insects in grain bulk[J/OL]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*: 1-7[2020-08-07].
- [21] ELIOPOULOS P A, POTAMITIS I, KONTODIMAS D C, et al. Detection of adult beetles inside the stored wheat mass based on their acoustic emissions[J]. *Journal of Economic Entomology*, 2015, 108(6).
- [22] MANKIN R W, HODGES R D, NAGLE H T, et al. Acoustic indicators for targeted detection of stored product and urban insect pests by inexpensive infrared, acoustic, and vibrational detection of movement[J]. *Journal of Economic Entomology*, 2010, 103(5): 1636-1646.
- [23] ILYAS P, TODOR G, DIMITRIS K. On automatic bioacoustic detection of pests: The cases of *Rhynchophorus ferrugineus* and *Sitophilus oryzae*[J]. *Journal of Economic Entomology*, 2009, 102(4): 1681-1690.
- [24] ELIOPOULOS P A, POTAMITIS I, KONTODIMAS D C. Estimation of population density of stored grain pests via bioacoustic detection[J]. *Crop Protection*, 2016, 85: 71-78.
- [25] 鲍舒恬, 常春波. 基于物联网和雾计算及云计算的低功耗无线储粮害虫监测系统及其应用[J]. *粮油仓储科技通讯*, 2018, 34(4): 43-46.
- BAO S T, CHANG C B. Low power wireless stored grain pest monitoring system based on Internet of things, fog computing and cloud computing and its application[J]. *Liangyou Cangchu Keji Tongxun*, 2018, 34(4): 43-46.
- [26] 张燕燕, 蔡静平, 蒋澎, 等. 气体分析法监测粮食储藏安全性的研究与应用进展[J]. *中国粮油学报*, 2014, 29(10): 122-128.
- ZHANG Y Y, CAI J P, JIANG P, et al. Research and application progress on monitoring stored grain security by gas analyzing[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2014, 29(10): 122-128.
- [27] ABALONE R, GASTÓN A, BARTOSIK R, et al. Gas concentration in the interstitial atmosphere of a wheat silo-bag. Part I: Model development and validation[J]. *Journal of Stored Products Research*, 2011, 47(4): 268-275.
- [28] 翟焕趁, 张帅兵, 蔡静平, 等. 利用 CO<sub>2</sub> 检测法监测大型粮仓储粮的虫霉危害[J]. *河南工业大学学报(自然科学版)*, 2014, 35(4): 17-21.
- ZHAI H C, ZHANG S B, CAI J P, et al. Monitoring insects and moulds of stored grain in warehouse by detecting carbon dioxide[J]. *Journal of Henan University of Technology(Natural Science Edition)*, 2014, 35(4): 17-21.
- [29] ZHANG S B, ZHAI H C, HUANG S X, et al. A site-directed

- CO<sub>2</sub> detection method for monitoring the spoilage of stored grains by insects and fungi in Chinese horizontal warehouses[J]. *Journal of Stored Products Research*, 2014, 59:146-151.
- [30] 唐多, 王殿轩, 姚剑锋. 不同温度和水分小麦中不同谷蠹发生状态时二氧化碳变化研究[J]. *植物保护*, 2011, 37(5): 67-71. TANG D, WANG D X, YAO J F. Concentration change of carbon dioxide in wheat plants infected with *Rhyzopertha dominica* under the conditions of different temperatures and moisture contents[J]. *Plant Protection*, 2011, 37(5): 67-71.
- [31] 张育濮, 吕建华, 王殿轩, 等. 储粮环境中米象发生与 CO<sub>2</sub> 含量变化的关系研究[J]. *中国粮油学报*, 2019, 34(10): 77-82. ZHANG Y P, LV J H, WANG D X, et al. The relationship between the occurrence of *Sitophilus oryzae* and the CO<sub>2</sub> content in stored grain environment[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2019, 34(10): 77-82.
- [32] 孙奂一, 王殿轩, 董永强, 等. 锈赤扁谷盗对储藏小麦的危害和环境二氧化碳体积分数的影响[J]. *河南工业大学学报(自然科学版)*, 2020, 41(2): 114-119+125. SUN H Y, WANG D X, DONG Y Q, et al. Damage to stored wheat and effect on ambient CO<sub>2</sub> volume fraction by *Cryptolestes ferrugineus*(Stephens)[J]. *Journal of Henan University of Technology(Natural Science Edition)*, 2020, 41(2): 114-119+125.
- [33] 颜丙生, 赵俊杰, 汤宝平, 等. 基于图像处理和光电技术的储粮虫害监测系统研究[J]. *粮食与油脂*, 2016, 29(10): 70-73. YAN B S, ZHAO J J, TANG B P, et al. Research of stored grain pests monitoring system based on image processing and photoelectric technology[J]. *Cereals & Oils*, 2016, 29(10): 70-73.
- [34] 马彬. 储粮书虱的在线监测技术的研究及预警模型的建立[D]. 河南工业大学, 2018. MA B. Research on on-line monitoring technology and establishment of early-warning model of stored grain book louse[D]. Henan University of Technology, 2018.
- [35] 鲁玉杰, 张晨光, 马彬, 等. 一种害虫监测系统[P]. 河南: CN207355294U, 2018-05-15. LU Y J, ZHANG C G, MA B, et al. A pest monitoring system[P]. Henan: CN207355294U, 2018-05-15.
- [36] 鲁玉杰, 陈卓, 苗世远, 等. 一种对害虫数量进行快速统计的方法[P]. 河南省: CN109272103A, 2019-01-25. LU Y J, CHEN Z, MIAO S Y, et al. A method for fast statistics of insect pests[P]. Henan: CN109272103A, 2019-01-25.
- [37] 陈卓, 鲁玉杰, 王争艳, 等. 一种自动诱捕监测装置[P]. 河南: CN108990938A, 2018-12-14. CHEN Z, LU Y J, WANG Z Y, et al. An automatic trap monitoring device[P]. Henan: CN108990938A, 2018-12-14.
- [38] 王争艳, 陈卓, 马彬, 等. 一种储粮害虫诱捕系统[P]. 河南: CN207075451U, 2018-03-09. WANG Z Y, CHEN Z, MA B, et al. A trapping system for stored grain pests[P]. Henan: CN207075451U, 2018-03-09.
- [39] 李虎, 熊伟. 基于多源信息融合的粮仓虫害监测系统设计[J]. *南方农机*, 2020, 51(12): 144-145. LI H, XIONG W. Design of granary pest monitoring system based on multi-source information fusion[J]. *Southern Agricultural Machinery*, 2020, 51(12): 144-145.
- [40] 马飞, 程遐年. 害虫预测预报研究进展(综述)[J]. *安徽农业大学学报*, 2001(1): 92-97. MA F, CHENG X N. Advances in pest prediction and forecasting(An overview)[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2001(1): 92-97.
- [41] HIJMANS R J, FORBES G A, WALKER T S. Estimating the global severity of potato late blight with GIS-linked disease forecast models[J]. *Plant Pathology*, 2000, 49(6), 697-705.
- [42] GENT D H, MAHAFFEE W F, MCROBERTS N, et al. The use and role of predictive systems in disease management[J]. *Annual Review of Phytopathology*, 2013, 51(51): 267-289.
- [43] 张谷丰, 易红娟, 朱先敏, 等. 基于 WebGIS 的水稻害虫自动预警系统[J]. *福建农业学报*, 2014, 29(5): 487-491. ZHANG G F, YI H J, ZHU X M, et al. An auto forecasting system for rice insect based on webGIS [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2014, 29(5): 487-491.
- [44] 顿文峰. 柑橘主要实蝇害虫的适生区变化趋势分析及预警系统的建立与应用[D]. 华中农业大学, 2013. DUN W F. Change analysis on suitable distribution areas of two citrus fruit flies in china and establishment and application of warning system[D]. Huazhong Agricultural University, 2013.
- [45] SHEN Y, ZHOU H, LI J, et al. Detection of stored-grain insects using deep learning[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018, 145: 319-325.
- [46] LI J, ZHOU H, WANG Z, et al. Multi-scale detection of stored-grain insects for intelligent monitoring[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, 105-114. 完