



草原蝗虫监测预警技术的研究进展

王佳宇¹ 杜波波¹ 高书晶¹ 孟根其其格² 王 宁^{1*} 林克剑^{1*}

(1. 中国农业科学院草原研究所, 呼和浩特 010010; 2. 克什克腾旗林业和草原局草原站, 内蒙古 赤峰 025350)

摘要: 蝗虫作为草原上主要为害昆虫之一, 对其进行有效监测和预警是保护草原生态与畜牧业的关键。然而, 草原地域辽阔, 人烟稀少, 受交通不便、网络不通等因素影响, 加之草原蝗虫自身的暴发性、迁飞性和发生不确定性等特征, 使得蝗虫防治任务日益艰巨, 传统调查和监测预报技术远不能满足对草原蝗虫发生动态的实时监测和精准预报要求。本文讨论了蝗虫的监测现状及其在现代信息技术背景下的发展趋势, 介绍了实现草原蝗虫智能监测的5大关键技术: 传统监测技术、卫星遥感监测技术、昆虫雷达监测技术、无人机监测技术、智能识别技术; 提出多层次、全方位的天-空-地一体化蝗虫智能监测体系, 以实现人工调查、卫星遥感以及人工智能等多元素信息技术的融合应用和优势互补。

关键词: 草原蝗虫; 监测技术; 人工智能

Research progresses in grassland locust monitoring and early warning technology

Wang Jiayu¹ Du Bobo¹ Gao Shujing¹ Menggenqiqige² Wang Ning^{1*} Lin Kejian^{1*}

(1. Grassland Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Hohhot 010010, Inner Mongolia Autonomous Region, China; 2. Grassland Station of Kashktenqi Forestry and Grassland Bureau, Chifeng 025350, Inner Mongolia Autonomous Region, China)

Abstract: As the main pests of grasslands, an effective monitoring and early warning of locust disaster is the key approach for protection of grassland ecology and development of animal husbandry. The grasslands are large but sparsely populated in large area, which leads to difficulty in collecting and sharing data in network system due to poor transportation and communication. In addition, the feature of irregular outbreak and migration makes locust prevention and control an arduous task. As a result, the traditional survey and monitoring technology alone cannot meet the demands of real-time monitoring and accurate prediction of locust occurrence. This paper clarifies the current situation and developmental trend in locust monitoring with the modern information technology, and introduces five key technologies for locust intelligent monitoring system by using satellite, radar, unmanned aerial vehicle and intelligent identification. It proposes an omnidirectional and multi-level intelligent monitoring network system with satellite, airborne and ground survey combination to collect data, applicable of multi-analysis using information technology integrated with manual investigation, remote sensing and artificial intelligence.

Key words: grassland locusts; monitoring; artificial intelligence

基金项目: 中国农业科学院基本科研业务费专项(Y2021XK24), 中国农业科学院草原研究所基本科研业务费专项(1610332020026), 国家科技基础资源调查专项(2019FY100404)

* 通信作者 (Authors for correspondence), E-mail: wangningis@163.com, linkejian@caas.cn

收稿日期: 2020-11-05

蝗灾是为害我国农牧业生产和人民生活的三大自然灾害之一,我国治蝗历史悠久,国家有计划地组织重点牧区开展草原蝗虫防治工作始于20世纪70年代末,40多年来,随着各时期政策的出台与调整,各个时期防治工作的侧重点也有所不同。近几年由于气候异常,蝗灾频发,2019年12月沙漠蝗 *Schistocerca gregaria* 在东非及西亚暴发并扩散,至今,沙漠蝗陆续为害40多个国家,影响从非洲到西亚60个国家的农作物生产和牧场养殖,威胁到世界10%人口的粮食安全(张龙等,2020;谢小燕等,2020)。多国宣布进入紧急应对状态,2020年我国农业农村部、海关总署和国家林草局对此也印发了《沙漠蝗及国内蝗虫监测防控预案》,提出早发现、早预警、早防治的防治思想,在云南省、西藏自治区、新疆维吾尔自治区等边疆省(区)设置多个监测点,通过监测预警技术应对蝗灾的发生(赵紫华等,2020)。

目前,为了提高蝗虫灾害综合监测预警水平,世界各国均在开发综合性的蝗虫灾害监测预警系统。监测与预警两者含义不同但又密不可分。现已形成以人工监测、遥感监测等监测技术手段为主的现代化监测体系,并通过与人工智能等信息技术不断融合,通过建立相应反馈模型,最终实现蝗虫监测与防控的数字化智慧化管理。

本文从传统监测技术、遥感监测技术(卫星遥感监测技术、昆虫雷达监测技术、无人机监测技术)、智能识别技术(智能声音识别、智能图像识别)等方面对蝗虫监测预警技术进行总结,提出蝗灾实时、智能、立体监测预警系统的构想,以期对蝗虫的发生提供更精准的预测预报,实现对蝗虫灾害的有效防控。

1 蝗虫传统监测技术的进展

1.1 蝗虫人工监测的进展

1949年前,我国学者对蝗虫认知尚浅,对其引发的灾害监测预测的研究基本处于创始和理论奠基阶段,主要是关于蝗虫生物学特性的描述性研究。蝗虫灾害的发生与气候因素(尤其是旱灾)的相关性备受关注,早在1934年蔡邦华(1934)就提出我国蝗灾预测问题,分析气候因素对蝗虫发生情况的影响,为后人在蝗虫监测预测方面的研究奠定了一定的理论基础。中央农业实验所研究报告显示,邹钟琳(1935)提出了蝗虫的调查方法,指出应该做好蝗卵越冬基数与蝗蛹出土情况的调查工作,实时掌握发

生情况,以指导蝗虫防治(赵艳萍,2007)。

20世纪50至70年代,我国开展大规模、长期的蝗虫防治工作,蝗虫监测预警研究得到发展,尤其敬等(1954)首先研究了亚洲蝗虫的迁移习性,提出蝗虫迁移新观点;邱式邦等(1962)系统地提出通过观测卵、龄期、蝗蛹、成虫来监测蝗虫发育进程的方法;孙立邦(1965)明确提出了牧区蝗虫的监测方法。在马拉维,当地工作人员与农业部专家也通过定期调查红蝗种群密度实现了对蝗虫种群增长的广泛监测。地面调查中通过确定每平方蝗虫数量是否达到阈值等方式来判断是否需要防治(Thindwa, 1999)。

1.2 蝗虫传统预测模型的进展

自20世纪60年代开始,预测模型也普遍应用于蝗虫的监测预警,马世骏等(1965)提出了蝗虫中长期预测模型和技术方法。Reus & Symmons(1992)通过将沙漠蝗虫区多个气象站的长期月平均温度进行运算,开发了一个用来预估沙漠蝗卵和若虫发育时期的模型,使用计算机程序计算每日平均温度和每日相关的发育量与每天计算的蝗虫种群数量,以此对沙漠蝗种群的发生量进行预测。冯光翰等(1994)以时序为特点,在环境因素与生物因素影响的基础上建立草地蝗虫种群数量消长的数学模型,但由于未考虑蝗虫生存的临界温度,预测效果受限。严应存等(2009)统计分析青海省1995—2006年12年的蝗虫发生情况与蝗虫发生时期的大气环流特征量等气候特征之间的关系,得出青海省各省市级蝗虫发生面积的多元回归预测模型,并得出在蝗卵孵化期,蝗虫的发生面积与当地降水量呈显著相关性。传统的监测方法虽然能够较好地实现对蝗虫的监测,但需要耗费大量的人力、物力、财力,时间成本高,工作效率低,无法对大尺度区域进行同步监测,更无法实现对可能发生或已经发生蝗灾的区域进行实时的、动态的监测。

2 蝗虫遥感监测技术的进展

2.1 卫星遥感技术

20世纪70年代,国外学者便开始应用遥感技术(remote sensing, RS)监测蝗虫适生地的规模和适合度,Hielkema et al.(1986)曾利用卫星图像监测当地蝗虫适生区的植被情况及其发生动态。当前相关科研工作者更热衷于使用RS技术对蝗虫栖息地进行监测,并以此反演蝗虫的发生情况(Dinku et al.,

2010;陈健等,2014;黄健熙等,2015),主要通过蝗虫生境因子的反演,如分析归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)、叶面积指数、地表温度、土壤湿度与蝗虫虫口密度之间的关系,建立多元回归方程以及虫口密度模型,实现对蝗虫的监测和预警(McCulloch & Hunter, 1983; Waldner, 2015; El-Ghany et al., 2020)。Dreiser(1994)于20世纪90年代初在北非苏丹红海沿岸一带进行典型沙漠蝗繁殖区的研究,将地理信息系统(geographic information system, GIS)应用于草原蝗虫监测预警,并在全球定位系统(global positioning system, GPS)的协助下实现精准定位,实现3S技术的综合运用。张显峰等(2015)利用中分辨率成像光谱(moderate-resolution imaging spectroradiometer, MODIS)数据对影响蝗虫发育的关键生境因子进行量化,提出一种基于卫星遥感的渐进式草原蝗灾风险评估模型,较好地反映了温度、植被、土壤、水分等关键生态因子对蝗虫的影响。

2.2 无人机遥感技术

无人机技术发展迅速,在远程遥控、续航时间、航线设定、精准定位、高清图传等方面有了明显突破。无人机遥感技术在小区域和飞行困难地区的高分辨率影像快速获取方面具有明显进步。

郑永军等(2010)采用低空机载蝗虫预警系统技术对拍摄图像中蝗虫进行识别和计数,其通过处理与对比分析,采用最大隶属度原则判定蝗虫连通区域为单个蝗虫或是存在图像粘连重叠,利用模糊识别的方法对单个与粘连重叠的区域进行区分计数,蝗虫识别和计数的准确率达89%,可以满足蝗虫灾害的测报要求。但由于草原蝗虫种类繁多,只能实现蝗虫统一灭杀,难以实现蝗虫种群的准确测报。荷兰瓦赫宁根大学通过无人机高光谱技术测量沙漠蝗若虫和成虫的光谱特征,若虫的反射率比成虫高且使用高光谱相机可以从空气中检测到聚集的蝗虫,证实利用高光谱遥感技术来检测蝗虫存的可行性。中国统一网络通信公司(2020)创建了基于无人机平台的蝗灾分析预警系统,通过对监测区图像信息分析,实现对虫口密度的监测,达到监测预警的目的。

2.3 昆虫雷达技术

昆虫雷达技术可以远距离、大范围、快速地对空中种群进行取样观测,获得迁飞数量、方向、高度、速度等重要参数。根据工作方式,雷达可分为扫描雷

达、垂直监测雷达和毫米波雷达等;按照波长可以分为毫米波和厘米波雷达;根据调制方式可以分为脉冲雷达和调频连续雷达波(程登发等,2005)。

20世纪40年代,气象学家Crawford首次证实雷达可探测昆虫目标,此后雷达得到昆虫学家的高度关注(Crawford et al., 1949)。1968年,英国建立了世界上首部昆虫雷达(程登发等,2005)。首台昆虫雷达诞生以后,Drake & Farrow(1983)用昆虫学雷达直接观察并用风筝网直接在空中采样,研究了昆虫在地表边界层上方的夜间迁移,雷达探测到的主要是蝗虫,采用定量雷达观测方法估算了蝗虫的空中密度和迁移率,根据雷达对目标轨迹的观测来估计蝗虫的飞行路线,并观察了这些数量随高度和时间的变化,得出所有主要迁移量的典型值和极值。后期包括中国在内的多国昆虫学家也纷纷建立了昆虫雷达,为昆虫的迁飞研究提供了保障。

除常见脉冲昆虫雷达,激光雷达技术的改进使人们能够估计昆虫翅膀的拍打频率和虫体参数,通过时间复用实现多波长通道或偏振模式,有助于提供相关虫体横截面、翅膀厚度或生物组织等信息,达到识别蝗虫种类与数量的目的,进而实现对蝗虫迁飞的监测(Cherlet et al., 1991)。昆虫雷达还可揭示空中迁飞蝗虫的起飞、成层、定向等行为特征及其与大气结构、运动之间的关系,将测得数据输入特定软件,从而为监测蝗虫的迁飞提供支持(于红妍和石旺鹏,2020)。我国已经从在吉林省长春市公主岭安装首台昆虫雷达的起步阶段,迅速发展昆虫雷达监测网络的布置阶段,从国家“十二五”关于昆虫雷达的批示到今“十四五”的大力支持,许多科研工作者在从事昆虫雷达数据分析系统的研发(程登发等,2004;代美,2009;胡晓文等,2013)。

3 蝗虫智能监测技术的进展

虫害智能监测的核心是将所监测的目标昆虫通过处理与分析特征变化,达到提前判断变化趋势的目的,据此来实现对目标昆虫的跟踪监测、智能监测、识别预警。虫害的智能监测体系需要通过多种监测技术传达原始数据,并通过特定算法模块与软件的开发实现监测传感器对目标昆虫的自动观测、数据传输、过程分析、判断分析与反馈,从而实现人工智能对虫害的自动、高效监测。

3.1 蝗虫智能识别技术

虫害监测主要通过光学与声学手段。近年来信

号处理和计算机技术的发展为自动识别害虫种类提供了可能。基于图像处理的昆虫种类识别技术已经得到广泛应用,基于声音或振动的分析研究也有相当大的发展潜力。当有害昆虫发出噪声时,在声学分析的基础上,对其进行快速、非接触的实时检测,弥补当图像信息不足时,对昆虫识别的影响,增加虫害智能识别的方法与准确率(Kawakita & Ichikawa, 2019)。

3.1.1 蝗虫图像识别技术

近20年多来,随着计算机技术的快速发展,出现了许多图像处理分析的方法,支持图像处理的向量机、人工神经网络等一系列手段的问世,为基于图像的害虫智能识别技术奠定基础。

中国农业大学的赵汗青等(2002)设计了一种能对昆虫图像进行处理与鉴定的软件BugVisux,该软件能有效识别40种昆虫,准确率高达97.5%。Wang et al.(2012)通过分类学理论和基于内容的图像检索(content based image retrieval, CBIR)方法对鞘翅目 Coleoptera、半翅目 Hemiptera 等9个常见目的昆虫图像进行识别,建立的神经网络模型识别率达96%。Watson et al.(2014)选择35种常见物种,在为非专家用户设计的数字自动识别系统(digital automated identification system, DAISY)上进行基于图像的分类训练,推动了昆虫自动识别完全自动化发展的进程。徐清芳等(2019)利用神经网络,通过对监测平台提供的昆虫图片的学习、特征提取、结构构建和模型评估,最终可实现昆虫的自动识别计数。王瀚和洪蕾(2020)通过图像识别等相关技术开发了昆虫智能识别APP,其中各类服务的部署应用了Docker容器来实现微服务,具有快速识别的优势。Lima et al.(2020)将人工神经网络与一系列形态特征和支持向量机(support vector machine, SVM)相结合,建立了一个高效(识别率达93%)的昆虫分类系统,可用于直翅目 Orthoptera、鞘翅目、半翅目等64科200余种昆虫的鉴定。

蝗虫的图像识别也有较大发展,毛文华等(2008a)通过分析电子无人驾驶直升飞机所采集的图像中蝗虫与环境背景之间的颜色差异,采用基于色度空间的图像分割方法将蝗虫从其栖息环境中分割出来,随后通过对比蝗虫单体的平均面积占图像区域的面积计算蝗虫数量,试验结果表明,蝗虫区域的识别计数精度大于85%。同年,毛文华等(2008b)又提出了一种基于机器视觉的草地蝗虫识别方法,

将天空与草地分为2个子集,通过蝗虫跳跃时的影像,采用帧间差分法区别2个子集图像,把自动识别的跃起蝗虫头数代入建立的跃起蝗虫头数与地面蝗虫头数之间的数学模型中,进行地面上草地蝗虫的间接计数。张文霞(2020)通过基于二值图像的区域显著性识别算法、多色度融合识别算法和基于候选区域的快速卷积神经网络(faster region convolutional neural network, Faster R-CNN)3种方法对蝗虫图像进行分析,该研究成功提高了复杂背景下蝗虫的识别准确率。

3.1.2 蝗虫声音识别技术

昆虫发声用于交流、捕食、飞行、求偶等行为,这也为人工智能识别提供了条件。研究已经证明,声学技术可以用于害虫检测(Vick et al., 1988; Leblanc et al., 2011; Mankin et al., 2011),赫尔大学 Chesmore & Nellenbach(2001)利用时域信号处理和人工神经网络,研发出自动识别包括蚱总科 Tetrigoidea、螞总科 Eumastacoidea 和蟋蟀科 Gryllidae 等直翅目昆虫的技术,选择了25种英国直翅目昆虫作为测试集,初步结果表明,分类率非常高,接近100%,错误分类率极低。但此项试验缺乏野外条件下对不同类型的神经网络的评价和识别,对其实际推广应用需进行进一步验证。芦荣胜等(2004)通过计算机对野外条件下捕获的蝗虫雄虫鸣声进行脉冲序列分析,通过不同脉冲组组成与持续时间、脉冲组间隔、主峰频率等方面进行种间区分,成功通过虫鸣区分脉蝗属 *Stauroderus* 蝗虫与邱氏异爪蝗 *Euchorthippus cheui*。Ganchev et al.(2007)能够将95%以上的蟋蟀、蝉 Cicadidae 和蚱螞按照声音正确分类到科,将86%的蟋蟀、蝉和蚱螞按照声音正确分类到种,实现多类别昆虫的准确鉴别。多项研究均证实声音识别在昆虫识别分类中的可行性,Nugroho et al.(2020)基于云计算的生物声学监测系统实现对直翅目昆虫声音的记录并通过互联网将其上传到云端的数据采集系统,实现直翅目昆虫发声数据库的建立,为之后通过声学监测进行更为广泛的蝗虫识别提供了条件。

3.2 蝗虫智能监测算法模型、软件开发现状

蝗虫识别系统是通过将图像输入人工神经网络或支持向量机等手段进行训练得到识别模型,再将训练模型接入相应APP或程序中,应用到实际的一类监测识别系统。

苑严伟等(2009)将摄像头置于飞行器上,并将

所捕捉到的图像进行处理,得到蝗蛹的分布密度,在结合气象数据后,建立误差反向传播(back propagation, BP)神经网络模型,并结合蝗虫密度采样的特点,提出了改进的BP算法,预测了东亚飞蝗 *Locusta migratoria* 成虫发生密度。国际商业机器公司通过计算机分析,实现模型自运算得出蝗虫种群数量,并控制无人机对即将形成或具有较高虫口密度的蝗虫种群进行药剂喷洒等缓解措施,实现蝗虫的直接监测与防控(Erickson et al., 2018)。但苑严伟等(2009)与国际商业机器公司均未摆脱图像处理等步骤,未能实现完全自动化。Neha et al.(2020)提出一种利用人工智能技术,即融合卷积神经网络(convolutional neural networks, CNN)、无人机、杀虫剂喷洒和实时目标检测的实时蝗虫管理方法,将无人机拍摄的图像传输至已经利用CNN构建的模型中,通过预算反馈蝗虫数量,验证是否需要进行杀虫剂喷洒的蝗虫管控,证明人工智能无人机具有实时识别和杀死蝗虫种群的能力。北京嘉景生物科技有限公司(2020)设计出一款基于图像的蝗虫自动识别系统,通过图像传输至算法工程师进行识别模型的训练,通过运算完成后的模型对蝗虫进行自动、高效的识别,节约了大量人力、物力和财力。

3.3 蝗虫智能监测系统研究现状

蝗虫智能监测预警系统研制方面已经取得了极大突破,开发出了许多蝗虫智能监测预警系统。蝗虫监测信息网的研究可以追溯至20世纪20年代,当时由伦敦防蝗研究中心建立。粮食及农业组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)最初的任务之一是提供蝗虫预警,到1975年,开始接管蝗虫监测的任务(Cressman, 2008)。FAO已经建立并推广了一些例行和实用的蝗虫预测系统,如沙漠蝗预警与管理系统(*Schistocerca* warning and management system, SWARMS),这些系统通过接入蝗虫调查信息系统和利用遥感和地理信息系统监测生境条件,对较大尺度的沙漠蝗发生进行动态监测(Healey et al., 1996; Magor & Pender, 1997)。2020年,FAO又开发了eLocust 3工具,提高实地调查效率,此系统可将采集到的实地数据整理分析后传回总部数据库与处理器,进行实时的反馈,达到及时预警目的。除FAO外,其他国家与组织也加大对蝗虫预警系统的研发,国家预防控制装置观察系统是法国为进行蝗虫监测预警工作所

开发的系统,从西非十几个国家的蝗虫防治中心收集数据,并向西非区域所有国家提供蝗虫的监测预警(Bonnal et al., 2010)。哈萨克斯坦 Propastin (2012)分析环境与蝗虫发生之间的联系,通过SPOT-VGT卫星获得巴尔喀什湖10 d时间的NDVI值,研究发现蝗虫的发生与前一年的水位和温度关系密切,并建立一个低成本、高效率的多传感器监测系统,通过监测蝗虫生境来预测蝗虫的发生。

4 展望

近30年国内外虫害监测预警技术得到了快速发展,蝗虫的监测预警技术也逐渐完备,监测识别方式不断增加,预警的精度不断提升。如Adam (2014)开发了一种改良的沙漠蝗虫野外调查技术,通过对比发现设计为20 m×5 m的方法比传统方法、设计为10 m×10 m的方法以及50 m×2 m的方法在检测单一雌成虫与雄成虫方面有明显的差异。Gómez et al.(2019)通过旱涝灾害预测(soil moisture active passive, SMAP)卫星来监测地表温度、叶面积指数(leaf area index, LAI)和土壤湿度等变量达到监测沙漠蝗虫发生情况的目的,进而确定沙漠蝗可能发生的繁殖区。常见的卫星遥感、无人机技术、昆虫雷达技术等遥感技术与基于人工智能的智能监测技术之间的联系逐渐密切,相互协同、相互补充、相互验证,形成了从信息获取到处理再到终端,实现了信息自动反馈。然而,将蝗虫智能监测预警体系应用于草原蝗灾的广泛监测与精准防治尚有一定距离。

着眼当前蝗虫智能监测预警发展现状,仍存在技术上的不足与技术间协同不密切等问题。其中主要问题有:当前卫星遥感监测主要研究方向是对蝗虫生境监测研究,暂时还不能准确反应蝗虫发生时各个种群的密度,无法做到精准灭蝗;如何依托物联网、大数据等信息技术建立蝗虫监测数据库,实现数据实时入库存储和智能识别处理结果及时反馈;如何继续整合蝗虫监测技术,突破智能识别、实时动态监测和数据共享网络建设的重大技术难题。这些也将成为蝗虫监测预警研究的热点问题。通过对多技术、全方位的信息采集,建立天空地立体化监测体系和实时动态监测与预警处置系统,实现蝗虫监测与防控的数字化智慧化管理与蝗虫监测的自动化、智能化、高效化,为其他虫害的监测预警提供样板与理论基础。

参考文献 (References)

- Adam IGM. 2014. Evaluation of four methods for monitoring the population of desert locust *Schistocerca gregaria* (Forskål) in the red sea coast. Ph. D thesis. Khartoum: University of Khartoum
- Beijing JiaJing Biotechnology Co., Ltd. 2020. An identification method for distinguishing locust species by image recognition technology: China, 111291702A. 2020-06-16 (in Chinese) [北京嘉景生物科技有限责任公司. 2020. 一种用于图像识别技术区分蝗虫种类的鉴别方法: 中国, 111291702A. 2020-06-16]
- Bonnal V, Lagnaoui S, Dolley T, Tonneau JP, Lecoq M, Vassal JM. 2010. A monitoring system for preventive control of desert locust in west Africa.//IAALD XIIIth World Congress Scientific and Technical Information and Rural Development. Montpellier, France
- Cai BH. 1934. Prediction of locust infestation in China. *Entomology & Phytopathology*, 2(23): 456 (in Chinese) [蔡邦华. 1934. 中国蝗患之预测. *昆虫与植病*, 2(23): 456]
- Chen J, Sheng SJ, Wang WJ, Zhang XH. 2014. Study on effect of type of locust habitats on locust plague based on multi-temporal lands at TM data. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 30(4): 444-449 (in Chinese) [陈健, 盛世杰, 王文君, 张雪红. 2014. 基于多时相遥感的蝗虫生境类型对蝗虫发生的影响. *生态与环境学报*, 30(4): 444-449]
- Cheng DF, Feng HQ, Wu KM. 2005. Scanning insect radar and insect migration monitoring. Beijing: Science Press, pp. 3-5 (in Chinese) [程登发, 封洪强, 吴孔明. 2005. 扫描昆虫雷达与昆虫迁飞监测. 北京: 科学出版社, pp. 3-5]
- Cheng DF, Wu KM, Tian Z, Wen LP, Shen ZR. 2004. A data acquisition analysis system for the scanning entomological radar. *Plant Protection*, 30(2): 41-46 (in Chinese) [程登发, 吴孔明, 田喆, 文丽萍, 沈佐锐. 2004. 扫描昆虫雷达实时数据采集、分析系统. *植物保护*, 30(2): 41-46]
- Cherlet MR, Gregorio AD, Hielkema JU. 1991. Remote-sensing applications for desert-locust monitoring and forecasting. *EPPO Bulletin*, 21(3): 633-642
- Chesmore ED, Nellenbach C. 2001. Acoustic methods for the automated detection and identification of insects. *Acta Horticulturae*, 562(562): 223-231
- China Unified Network Communications Corporation. 2020. Locust analysis and early warning system: China, 111696127-A. 2020-09-22 (in Chinese) [中国统一网络通信公司. 2020. 蝗灾分析预警系统: 中国, 111696127-A. 2020-09-22]
- Crawford A. 1949. Radar reflections in the lower atmosphere. *Proceedings of Institute of Radio Engineers*, 37: 404-405
- Cressman K. 2008. The use of new technologies in desert locust early warning. *Outlooks on Pest Management*, 19(2): 55-59
- Dai M. 2009. The Application and development of data analysis system for the scanning entomological radar. Ph. D thesis. Yangling: Northwest A&F University (in Chinese) [代美. 2009. 扫描昆虫雷达数据分析系统的研发和应用. 博士学位论文. 杨凌: 西北农林科技大学]
- Dinku T, Ceccato P, Cressman K, Connor SJ. 2010. Evaluating detection skills of satellite rainfall estimates over desert locust recession regions. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49(6): 1322-1332
- Drake VA, Farrow RA. 1983. The nocturnal migration of the Australian plague locust, *Chortoicetes terminifera* (Walker) (Orthoptera: Acrididae): quantitative radar observations of a series of northward flights. *Bulletin of Entomological Research*, 73(4): 567-585
- Dreiser U. 1994. Mapping of desert locust habitats in Africa using landsat thematic mapper data. *GeoJournal*, 32(1): 55-60
- El-Ghany NMA, El-Aziz SEA, Marei SS. 2020. A review: application of remote sensing as a promising strategy for insect pests and diseases management. *Environmental Science and Pollution Research*, 27: 33503-33515
- Erickson TD, Pickover CA, Vukovich MAJA, Weldemariam K. 2018. System, method and computer program product for locust swarm amelioration: US, US2018184637A1. 2018-07-05
- Feng GH, Li ZQ, Du GZ, Wang GS, Qi KL, Chen Z. 1994. A study on the mathematical models of population dynamic on the prairie grasshoppers. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 30(1): 100-103 (in Chinese) [冯光翰, 李镇清, 杜国桢, 王国胜, 漆可立, 陈灼. 1994. 草地蝗虫种群数量消长数学模型研究. *兰州大学学报(自然科学版)*, 30(1): 100-103]
- Ganchev T, Potamitis I, Fakotakis N. 2007. Acoustic monitoring of singing insects.//ICASSP. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing-Proceedings. USA: Honolulu
- Gómez D, Salvador P, Sanz J, Casanova C, Taratiel D, Casanova JL. 2019. Desert locust detection using earth observation satellite data in Mauritania. *Journal of Arid Environments*, 164: 29-37
- Healey RG, Robertson SG, Magor JT, Pender J, Cressman K. 1996. A GIS for desert locust forecasting and monitoring. *International Journal of Geographical Information Systems*, 10(1): 117-136
- Hielkema JU, Roffey J, Tucker CJ. 1986. Assessment of ecological conditions associated with the 1980/81 desert locust plague upsurge in West Africa using environmental satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 7(11): 1609-1622
- Hu XW, Chen L, Zhang YH, Qi HH, Cheng DF. 2013. A data processing and analysis system for millimetric scanning entomological radar. *Plant Protection*, 39(5): 134-139 (in Chinese) [胡晓文, 陈林, 张云慧, 齐会会, 程登发. 2013. 毫米波扫描昆虫雷达数据处理分析系统. *植物保护*, 39(5): 134-139]
- Huang JX, Zhuo W, Yang CX, Li L, Zhang C, Liu J. 2015. Locust remote sensing monitoring methods based on Landsat8 satellite data. *Transactions of The Chinese Society of Agricultural Machinery*, 46(5): 258-264 (in Chinese) [黄健熙, 卓文, 杨春喜, 李林, 张超, 刘佳. 2015. 基于Landsat8卫星数据的蝗虫遥感监测方法研究. *农业机械学报*, 46(5): 258-264]
- Kawakita S, Ichikawa K. 2019. Automated classification of bees and hornet using acoustic analysis of their flight sounds. *Apidologie*,

- 50(1): 71-79
- Leblanc MP, Gaunt D, Fleurat LF. 2011. Experimental study of acoustic equipment for real-time insect detection in grain bins- assessment of their potential for infestation risk prediction during long term storage periods. //IOBC/OILB. Integrated protection of stored products. Campobasso, Italy
- Lima MCF, Leandro MEDDA, Valero C, Coronel LCP, Bazzo COG. 2020. Automatic detection and monitoring of insect pests: a review. *Agriculture*, 10(5): 161
- Lu RS, Shi FM, Huang Y. 2004. A comparative study on the male song structures of four species of grasshoppers (Orthoptera, Acridoidea). *Classification of Animals Journal*, 29(4): 639-645 (in Chinese) [芦荣胜, 石福明, 黄原. 2004. 四种蝗虫雄性鸣声的比较研究 (直翅目, 蝗总科). *动物分类学报*, 29(4): 639-645]
- Ma SJ, Ding YQ, Li DM. 1965. Study on long-term prediction of locust population fluctuations. *Acta Entomologica Sinica*, 14(4): 319-338 (in Chinese) [马世骏, 丁岩钦, 李典谟. 1965. 东亚飞蝗中长期数量预测的研究. *昆虫学报*, 14(4): 319-338]
- Magor JI, Pender J. 1997. Desert locust forecasters' GIS: a researchers' view. //Krall S, Peveling R, Diallo DB. New strategies in locust control. Switzerland: Birkhäuser Verlag Basel, pp. 21-26
- Mankin RW, Hagstrum DW, Smith MT, Roda AL, Kairo MTK. 2011. Perspective and promise: a century of insect acoustic detection and monitoring. *American Entomologist*, 57(1): 30-44
- Mao WH, Zheng YJ, Yuan YW, Zhang XC. 2008a. Locust information extraction using hue and shape feature. *Journal of Agricultural Machinery*, 39(9): 104-107 (in Chinese) [毛文华, 郑永军, 苑严伟, 张小超. 2008a. 基于色度和形态特征的蝗虫信息提取技术. *农业机械学报*, 39(9): 104-107]
- Mao WH, Zheng YJ, Zhang YQ, Yuan YW, Zhang XC. 2008b. Grasshopper detection method based on machine vision. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 24(11): 155-158 (in Chinese) [毛文华, 郑永军, 张银桥, 苑严伟, 张小超. 2008b. 基于机器视觉的草地蝗虫识别方法. *农业工程学报*, 24(11): 155-158]
- McCulloch L, Hunter DM. 1983. Identification and monitoring of Australian plague locust habitats from landsat. *Remote Sensing of Environment*, 13(2): 95-102
- Neha HC, Munavalli JR, Deeksha RA, Pramod HCN, Munavalli JR. 2020. Automated real-time locust management using artificial intelligence. *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*, 4(5): 133-138
- Nugroho AP, Purba S, Pratomy YB, Hadi S, Utami SS. 2020. Development of cloud-based bioacoustics monitoring system for supporting integrated pest management in agriculture production. *Earth and Environmental Science*, 449(1): 12032
- Propastin P. 2012. Multisensor monitoring system for assessment of locust hazard risk in the lake Balkhash drainage basin. *Environmental Management*, 50(6): 1234-1246
- Qiu SB, Lin HL, Jiang YH. 1962. Study on the relationship between locust distribution and activity and vegetation. *Journal Plant Protection*, 1(2): 17-22 (in Chinese) [邱式邦, 林汉连, 蒋元辉. 1962. 蝗虫的分布消长和活动与植被关系的研究. *植物保护学报*, 1(2): 17-22]
- Reus JAWA, Symmons PM. 1992. A model to predict the incubation and nymphal development periods of the desert locust, *Schistocerca gregaria* (Orthoptera: Acrididae). *Bulletin of Entomological Research*, 82(4): 517-520
- Sun LB. 1965. Investigation and control of locusts in pastoral areas. *Xinjiang Agricultural Sciences*, (11): 460 (in Chinese) [孙立邦. 1965. 牧区蝗虫的勘查和防治. *新疆农业科学*, (11): 460]
- Thindwa HP. 1999. Red locust population monitoring and control in Malawi, 1988-1998. *International Journal of Tropical Insect Science*, 19(4): 351-354
- Vick KW, Webb JC, Weaver BA, Litzkow C. 1988. Sound detection of stored-product insects that feed inside kernels of grain. *Journal of Economic Entomology*, 81(5): 1489-1493
- Waldner F, Ebbe MAB, Cressman K, Defourny P. 2015. Operational monitoring of the desert locust habitat with earth observation: an assessment. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 4(4): 2379-2400
- Wang H, Hong L. 2020. Design and implementation of intelligent insect recognition APP based on image recognition. *Computer Engineering & Software*, 41(1): 118-120 (in Chinese) [王瀚, 洪蕾. 2020. 基于图像识别的智能昆虫识别APP设计和实现. *软件*, 41(1): 118-120]
- Wang JN, Lin CT, Ji LQ, Liang AP. 2012. A new automatic identification system of insect images at the order level. *Knowledge-Based Systems*, 33: 102-110
- Watson AT, O'Neill MA, Kitching IJ. 2004. Automated identification of live moths (Macrolepidoptera) using digital automated identification system (DAISY). *Systematics and Biodiversity*, 1(3): 287-300
- Xie XY, Deng XH, Du ZJ. 2020. Desert locust occurrence dynamics and control progress. *China Agricultural Digest: Agricultural Engineering*, 32(5): 66-67 (in Chinese) [谢小燕, 邓雪华, 杜臻嘉. 2020. 沙漠蝗虫发生动态与防治进展. *中国农业文摘: 农业工程*, 32(5): 66-67]
- Xu QF, Men XY, Wang SN, Qu CH, Qu ZL, Li Q, Zhang QQ, Li LL. 2019. The potential for using remote intelligent monitoring systems to monitor insect pests in apple orchards. *Journal of Applied Entomology*, 56(6): 1272-1278 (in Chinese) [徐清芳, 门兴元, 王圣楠, 曲诚怀, 曲在亮, 李强, 张晴晴, 李丽莉. 2019. 应用昆虫远程智能监测系统监测苹果园害虫的技术. *应用昆虫学报*, 56(6): 1272-1278]
- Yan YC, Li FX, Yan LD, Song LM, Ma ZT, Zhou BR, Zhang J, Gao SH. 2009. Study on forecasting models of grasshopper occurrence area in Qinghai Province. *Pratacultural Science*, 26(4): 94-98 (in Chinese) [严应存, 李凤霞, 颜亮东, 宋理明, 马宗泰, 周秉荣, 张娟, 高素华. 2009. 青海省草地蝗虫发生面积预测模型研究. *草*

- 业科学, 26(4): 94-98]
- You QJ, Chen YL, Ma SJ. 1954. Preliminary observations on flight behavior of the Asiatic migratory locust (*Locusta migratoria manilensis* Meyen) in its solitary phase. *Acta Entomologica Sinica*, 4(1): 1-10 (in Chinese) [尤其傲, 陈永林, 马世骏. 1954. 散棲型亚洲飞蝗 *Locusta migratoria manilensis* Meyen 迁移习性初步观察. 昆虫学报, 4(1):1-10]
- Yu HY, Shi WP. 2020. Outbreak, monitoring and control technology of desert locust *Schistocerca gregaria*. *Journal of Plant Protection*, <https://doi.org/10.13802/j.cnki.zwbhxb.2020.2020801> (in Chinese) [于红妍, 石旺鹏. 2020. 沙漠蝗灾发生、监测及防控技术进展. 植物保护学报, <https://doi.org/10.13802/j.cnki.zwbhxb.2020.2020801>]
- Yuan YW, Zhang XC, Mao WH. 2009. Study on BP model based locust plague forecasting. *Agricultural Mechanization Research*, 31(5): 106-110 (in Chinese) [苑严伟, 张小超, 毛文华. 2009. 基于BP模型的蝗虫密度预测系统的研究. 农机化研究, 31(5): 106-110]
- Zhang L, Ban LP, You YW, Yin XW. 2020. Locust occurrence and management. *Journal of Environmental Entomology*, 42(3): 511-519 (in Chinese) [张龙, 班丽萍, 游银伟, 尹学伟. 2020. 蝗虫的发生与防控. 环境昆虫学报, 42(3): 511-519]
- Zhang WX. 2020. Research on locust recognition algorithm based on image processing technology. Master thesis. Hohhot: Inner Mongolia University (in Chinese) [张文霞. 2020. 基于图像处理技术的蝗虫识别算法研究. 硕士学位论文. 呼和浩特: 内蒙古大学]
- Zhang XF, Rao JF, Pan YF. 2015. Progressive approach for risk prediction of rangeland locust hazard in Xinjiang based on remotely sensed data. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 31(11): 202-208 (in Chinese) [张显峰, 饶俊峰, 潘一凡. 2015. 基于遥感的新疆蝗虫灾害渐进式修正预测方法. 农业工程学报, 31(11): 202-208]
- Zhao HQ, Shen ZR, Yu XW. 2002. On computer-aided insect identification through math-morphology features. *Journal of China Agricultural University*, 7(3): 38-42 (in Chinese) [赵汗青, 沈佐锐, 于新文. 2002. 数学形态特征应用于昆虫自动鉴别的研究. 中国农业大学学报, 7(3): 38-42]
- Zhao YP. 2007. The locust disaster and the people's response during the Republic of China. Ph. D thesis. Guangzhou: South China Normal University (in Chinese) [赵艳萍. 2007. 民国时期的蝗灾与社会应对. 博士学位论文. 广州: 华南师范大学]
- Zhao ZH, Tu XB, Zhang ZH, Li ZH. 2020. The alert of population expansion of the desert locust *Schistocerca gregaria* and its risk to enter China. *Journal of Plant Protection*, <https://doi.org/10.13802/j.cnki.zwbhxb.2020.2020802> (in Chinese) [赵紫华, 涂雄兵, 张泽华, 李志红. 2020. 警惕沙漠蝗种群持续增加和入侵我国边境地区的风险. 植物保护学报, <https://doi.org/10.13802/j.cnki.zwbhxb.2020.2020802>]
- Zheng YJ, Wu G, Wang YM, Mao WH. 2010. Locust images detection based on fuzzy pattern recognition. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 26(S2): 21-25 (in Chinese) [郑永军, 吴刚, 王一鸣, 毛文华. 2010. 基于模糊模式的蝗虫图像识别方法. 农业工程学报, 26(S2): 21-25]
- Zou ZL. 1935. The relationship between the distribution of Chinese migratory locusts and climate and geography and the environment of the place where they occur. *Central Agricultural Laboratory Research Report*, (8): 239-272 (in Chinese) [邹钟琳. 1935. 中国飞蝗之分布与气候地理之关系及其发生地环境. 中央农业实验所研究报告, (8): 239-272]

(责任编辑:王璇)