

沙漠蝗灾发生、监测及防控技术进展



于红妍^{1,2} 石旺鹏^{1*}

(1. 中国农业大学植物保护学院昆虫学系, 北京 100193; 2. 青海省草原总站, 西宁 810008)

摘要: 沙漠蝗 *Schistocerca gregaria* 因其具有强大的繁殖、取食和迁移能力被称之为世界上最具破坏力的害虫之一。本文综述了非洲沙漠蝗灾的发生历史及近年来的发生现状;叙述了沙漠蝗监测预警技术的发展过程及最新进展;同时分析了沙漠蝗的防治技术发展。总结认为蝗灾的物联网智能化监测和可持续绿色防控是未来的发展趋势,将为消除蝗灾威胁和保护生态环境提供保障。

关键词: 沙漠蝗; 监测; 防控

Outbreak, monitoring and control technology of desert locust *Schistocerca gregaria*

Yu Hongyan^{1,2} Shi Wangpeng^{1*}

(1. Department of Entomology, College of Plant Protection, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. Qinghai Rangeland Work Station, Xining 810008, Qinghai Province, China)

Abstract: The desert locust *Schistocerca gregaria* is known as the most destructive migratory pest in the world due to its powerful reproduction, feeding and migration ability. In this review, the outbreak history and current situation of African desert locust were summarized; the development process and technical progress in desert locust monitoring and early warning were summarized. Meanwhile, the progresses in prevention and control technology of desert locust were analyzed. It is concluded that the intelligent monitoring and sustainable control of locusts are the developmental trend, which can help eliminate the threat of locust disaster and protect the environment.

Key words: desert locust; monitoring; management

沙漠蝗 *Schistocerca gregaria* (Forskål) 属蝗总科斑腿蝗科刺胸蝗亚科沙漠蝗属, 是一种世界性害虫。非洲沙漠蝗一般包括 2 个亚种, 分别是指名亚种 *S. g. gregaria* 和黄腹亚种 *S. g. flaviventris*, 前者主要分布在北非、撒哈拉、非洲之角、阿拉伯半岛、西南亚等地区的沙漠化和灌木丛区域, 后者目前只发现分布在南非西部 (Chapuis et al., 2016)。早在圣经时代就有关于非洲沙漠蝗入侵迁移为害并成灾的记载, 而科学系统地观察其迁移为害的规律则是从 20 世纪 20—30 年代开始, 在炎热气候条件下能够在海拔数百米甚至数千米高的空间发现数量和规模巨大的沙漠蝗群体, 几乎每年会重复出现, 对作物造成巨大威胁 (Rowe, 2006)。在 20 世纪 40—50 年代, 科学

家们开始对非洲沙漠蝗的迁移和迁飞行为进行系统性研究; 到 20 世纪 60 年代, 人们基本明确了沙漠蝗的基本生物学特性和迁飞基础, 初步明确了沙漠蝗的迁移特点及其影响因素, 如沙漠蝗的生活史、天气条件、风向风力及沙漠蝗栖息地环境条件等对沙漠蝗群体迁移的影响 (Roffey & Popov, 1968)。

科学家们很早就发现沙漠蝗有散居和群居 2 种生态型 (Uvarov, 1921), 这 2 种生态型在形态 (体色、头大小、虫体大小)、生理 (神经内分泌状态) 和行为 (群体迁移的趋势和对运动物体的响应时间) 上明显不同, 如散居型沙漠蝗蛹是绿色, 相互避免接触, 未性成熟的成虫是白灰色或米黄色, 性成熟的雄虫为白黄色; 而群居型沙漠蝗蛹为明显的黑色和黄色, 未

性成熟的成虫为浅紫色,性成熟的成虫为亮黄色(Faure, 1932; Gunn & Hunter, 1952; Dirsh, 1953)。沙漠蝗的生态型变主要受蝗虫的嗅觉、视觉、触觉和遗传等因素的影响,散居型沙漠蝗因为取食等因素导致拥挤,由于个体之间的气味信息、视觉信息、后足接触的触觉信号等的刺激,使得沙漠蝗大脑中的神经递质和神经肽的类型和数量发生了变化,促使沙漠蝗发生生态型变,如沙漠蝗脑神经递质血清素含量升高则促进沙漠蝗从散居型向群居型转变(Capinera, 1993; Tahany et al., 2010)。散居型沙漠蝗拥挤4 h即可表现为群居行为,后足跗节上的接触感觉神经元对蝗虫的生态型变最重要,蝗蛹释放的聚集信息素让蝗虫群集,使得后足相互刺激,并且黑

色素在黑化诱导神经肽的作用下合成,促进体色发生变化;沙漠蝗虫的生态型变状态可以遗传到下一代(Nelson, 2019)。在适宜条件下,沙漠蝗从卵到成熟的蝗虫(群)需要3个月左右(图1)。非洲沙漠蝗喜欢树栖和取食草本植物,可以取食400多种植物,从禾谷类到蔬菜和水果,可以严重为害各种栽培作物,如棉花、苜蓿、大麦、小麦、玉米、亚麻、烟草、马铃薯和瓜类等;在野生植物中喜食骆驼刺和其他唇形花科植物以及野生或栽培的木本植物如葡萄、杏、桃、桑树、柑橘、无花果、石榴和木瓜等(Steedman, 1988)。对沙漠蝗的认知为人类科学预测和有效防治沙漠蝗奠定了理论和技术基础。

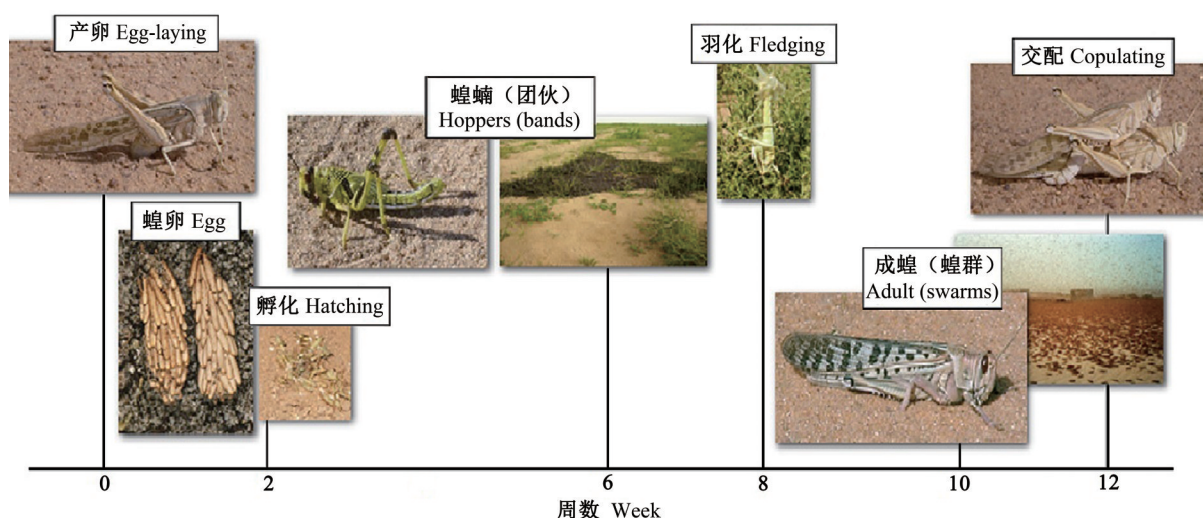


图1 沙漠蝗的生活史

Fig. 1 The life cycle of the desert locust

1 沙漠蝗灾的发生规律

自从一万多年前农业诞生以来,人类就开始了持续地与具有强大破坏力的沙漠蝗灾作斗争。Maggor et al. (2007)分析表明,沙漠蝗灾大约每10~12年暴发1次,沙漠蝗一直存在于毛里塔尼亚和印度之间沙漠的某些地方,如果雨量充沛并且绿色植物充分,沙漠蝗数量将会在1~2个月内迅速增长,开始群集并转变为群居型,小规模蝗蛹团伙和成蝗蝗群形成,导致蝗虫暴发,发生面积常常达到5 000 km²。如果不加控制并且发生蝗害邻近地区雨量充沛则有利于蝗蛹团伙和成蝗群体的连续发生,将导致蝗虫暴增;暴增的蝗虫不加控制并且生态条件适合蝗虫繁育,蝗虫种群数量和规模会持续增加,蝗蛹团伙和成蝗群体暴发,最终导致蝗灾暴发(图2)。

蝗虫暴发比较常见,但是演变成暴增性蝗情并

不多见,进一步演变成蝗灾的就更少,有记录的最近一次大的沙漠蝗虫暴增是发生于2003—2005年(Ceccato et al., 2007),而较近的一次沙漠蝗灾发生于1987—1989年(FAO, 1989)。沙漠蝗灾一旦发生往往持续多年,在此期间给农牧业造成广泛且严重的危害,其中大多数是以蝗蛹团伙或迁飞蝗群出现,当存在有利于沙漠蝗的繁殖条件,而防控行动未能阻止其区域性暴发并发展成几乎无法遏制的蝗群时,就会发生蝗灾(Homberg, 2015)。19世纪以来暴发了6次严重的沙漠蝗灾,分别为1926—1934年、1940—1948年、1949—1963年、1967—1969年、1986—1989年和2003—2004年,其中1949—1963年的蝗灾持续了15年,发生面积达到2 900万km²,覆盖了60多个国家,超过世界陆地面积的20%(图3)。而2019—2020年暴发的沙漠蝗灾是近30年来最严重的蝗灾(图4)。蝗灾暴发不是一撮而就,而是经过

几个月甚至几年的积累逐步形成的 (Misha & Peter, 2007)。

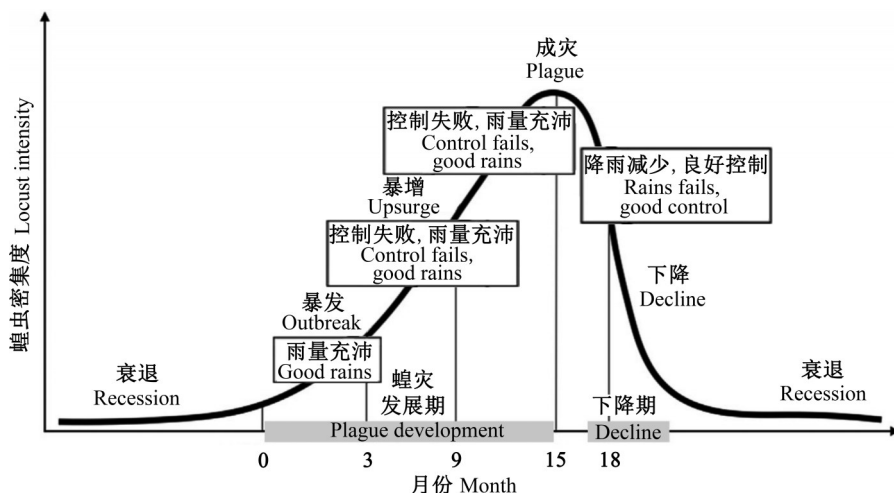


图2 沙漠蝗灾发展过程(来源:FAO)

Fig. 2 The evolution of desert locust plagues (Resource: FAO)

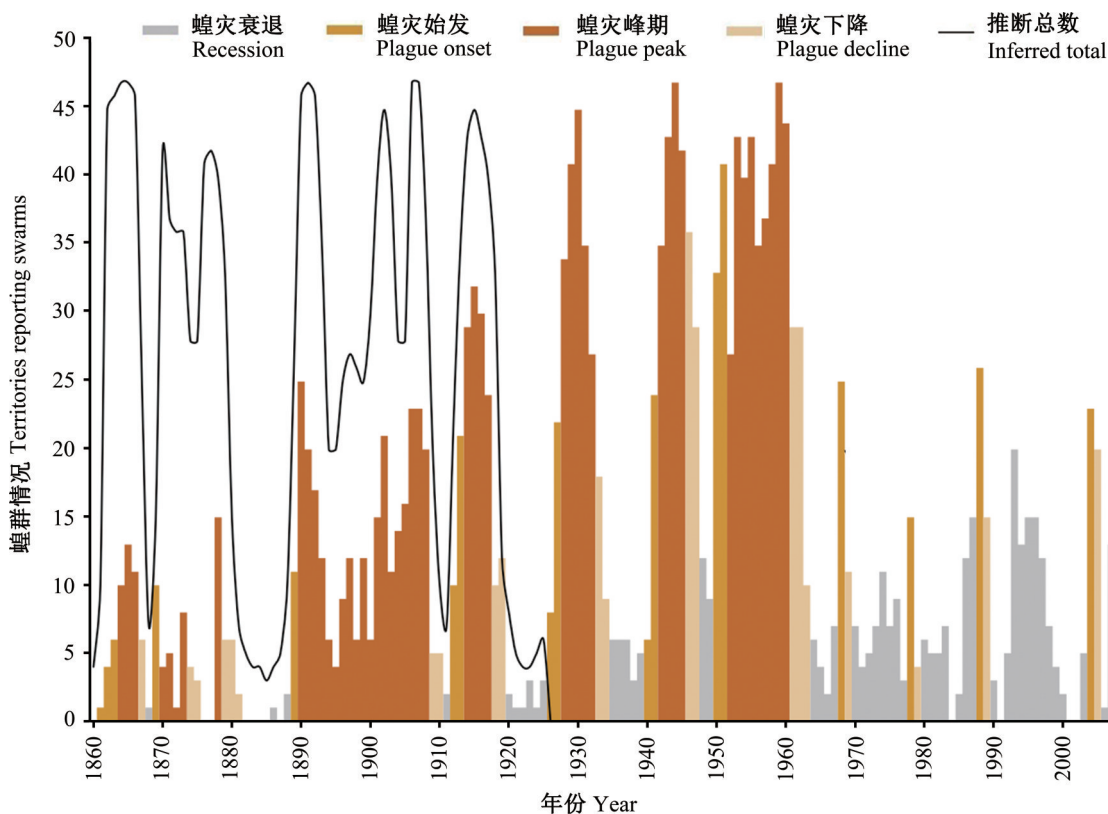


图3 沙漠蝗灾在1860—2014年的发生历史(来源:FAO)

Fig. 3 History of desert locust plagues during 1860—2014 (Resource: FAO)

2 沙漠蝗监测预警技术的研究进展

沙漠蝗监测预警技术的发展经历了从传统的分散人工调查到电讯传真,再到近30年来开始利用的遥感、卫星定位和地理信息技术,进入21世纪以来,以互联网为主的综合监测预警技术发展迅速,提高了人们对沙漠蝗灾预测的准确性和防控的精准性(图5)。

近几十年来沙漠蝗灾的发生频率有所下降,主要得益于FAO沙漠蝗委员会和各国蝗虫部门监测技术的提高和预警系统的逐步完善,可以及时获取沙漠蝗的发生信息并开展阻止性防控,有效控制了沙漠蝗大规模暴发成灾。目前,沙漠蝗的主要监测技术包括以下6种。

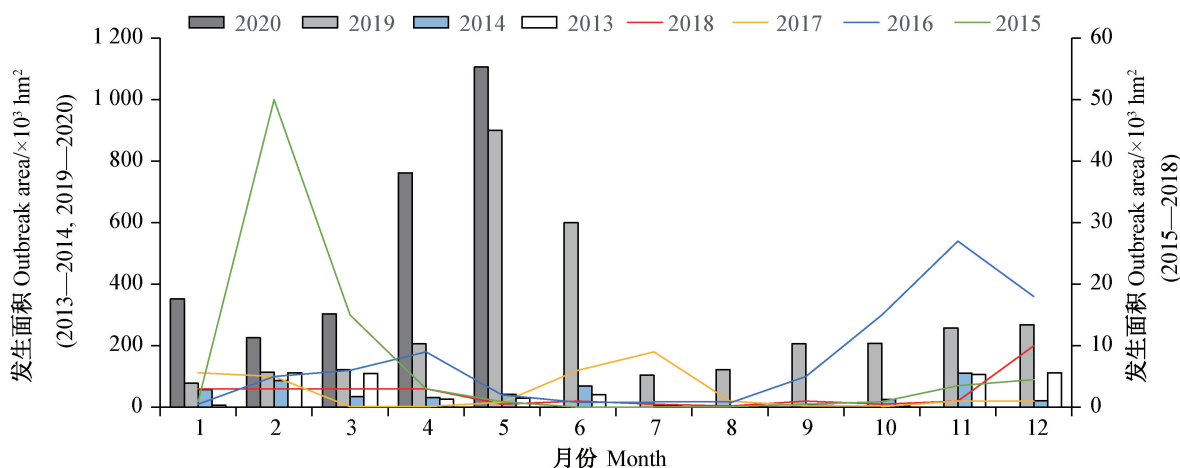
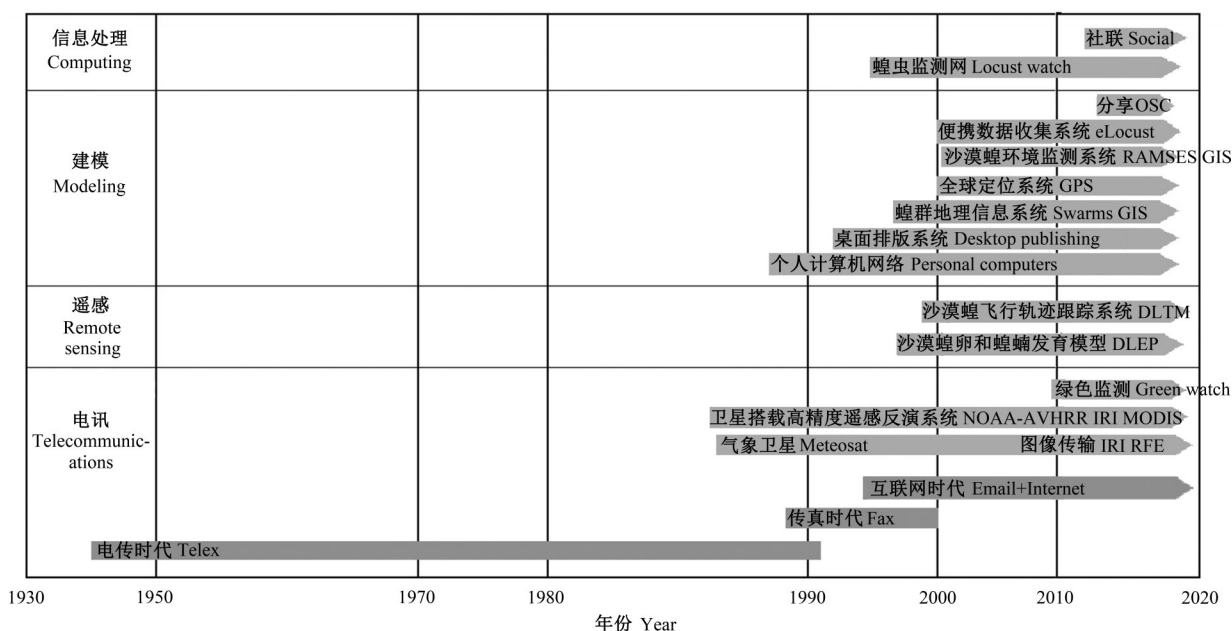


图4 近年来沙漠蝗的发生规律

Fig. 4 Occurrence dynamics of the desert locust in recent years



OSC: Open source community; RAMSES: reconnaissance and management system of the environment of *Schistocerca*; GIS: geographic information system; GPS: global positioning system; DLTM: desert locust trajectory model; DLEP: desert locust egg & hopper development model; IRI RFE: infrared image recursive feature elimination.

图5 沙漠蝗监测预警技术发展趋势(Cressman, 2015)

Fig. 5 Technological developments related to locust early warning during 1935—2020 (Cressman, 2015)

2.1 地面调查法

地面调查法是在调查蝗卵、蝗蛹和成蝗的基础上,根据蝗虫的生长速度、生殖力和扩散迁移性,结合环境条件变化对蝗情做出预测预报。只有结合蝗虫的生长、发育、生活习性及环境因素才能保证蝗虫发生预测的科学性(Steinbauer, 2011)。FAO 沙漠蝗委员会和各国蝗虫部门联合设立了定点观测站,由相对固定的并配备了便携式卫星定位监测记录设备如 eLocust 的专业人员来执行,观测站可对当年或

第2年蝗虫的发生数量、发生时期和分布区域进行预测。

2.2 气候预测法

根据当地气候数据如近地面大气温度、土壤温度、大气湿度、土壤湿度来计算蝗虫完成一代所需积温,即可预测蝗虫发生代数 and 发生时期;根据雨量分布与蝗虫生长过程的关系,可以预测蝗卵发育进度和孵化期及成虫活动初期;根据历年的种群动态趋势进行外推,结合蝗灾发生周期应用随机序列及周

期方程和多因素(温度、降水量、降水日和湖水位等)逐步回归法均可以预测蝗虫中长期发生数量(Rainey, 1951; 1963)。阿尔及利亚、法国、马里、毛里塔尼亚、摩洛哥、西班牙和FAO科学家根据欧洲空间局的土壤水分和海洋盐度卫星提供的土壤含水量数据建立沙漠蝗最适环境区域,结合区域气象观测站数据进行及时分析,可对蝗虫发生时期和发生数量进行预测(FAO, 2017)。

2.3 物候期预测法

通过作物、杂草或其他昆虫的生长时期可预知蝗虫发育阶段,如沙漠蝗的孵化期、羽化期、死亡期分别对应特定沙漠作物的开花期、果熟期和枯萎期;根据监测其他生物所处的状态可以从时间上预测蝗虫所处的发育阶段(Steedman, 1988)。

2.4 基于GIS/GPS的遥感反演技术预测法

遥感技术在害虫中的监测应用主要包括对昆虫本身的观察、对可能影响昆虫种群动态的有关环境因子的监测和对昆虫产生危害的探测(通常是植被破坏)3个方面(Nailand, 1993)。比较成熟的蝗虫监测预警系统包括FAO基于GIS开发的沙漠蝗预警管理系统,利用该系统可对蝗虫及其有关的生境参数进行管理和分析,并结合野外实地调查资料对蝗虫发生做出预警(Alexandre & Ramesh, 2010);另外一个就是澳大利亚疫蝗委员会基于GIS建立的预测蝗虫种群发展和辅助决策的决策支持系统,该系统具有多源数据的搜集、处理和空间数据显示功能,利用该系统可预测蝗虫发育阶段和时间,确定蝗虫种群早期聚集位置等(Deveson & Hunter, 2002)。通过对蝗虫栖息、生长和繁殖的生境进行野外实际调研和数据采集,使用MODIS遥感图像结合蝗虫发生的野外样点数据建立模型,反演蝗虫密度、地表温度、土壤湿度和产草量;综合分析遥感数据与实测数据之间的相关关系,找出蝗灾的光谱特征域在遥感图像上的对应位置;卫星搭载的MODIS传感器,光谱范围为1~19 nm/20~36 μm ,可用于监测记录土地植被覆盖、生物生长量和生态环境等方面的宏观变化,包括植被指数、生物量、粮食估产和沙漠化监测等(Dinku et al., 2010)。利用该系统监测发现非洲沙漠蝗适宜孳生区域为1 600万 km^2 ,但群居型蝗群潜在的可入侵区域达2 900万 km^2 ,覆盖20%的陆地面积,包括非洲、亚洲、欧洲的65个国家和地区,从孟加拉国到佛得角群岛(Showler, 2019)。

2.5 昆虫雷达监测技术

雷达是指利用电磁波进行空中目标探测的系统,是无线电探测与测距的简称。由于昆虫体内含有水分,昆虫可反射电磁波产生雷达回波信号,气象学家Crawford最早证实雷达可探测昆虫目标,到1968年,英国建立了世界上首部昆虫雷达,同年,第1台用于监测高海拔迁飞沙漠蝗的昆虫雷达被部署在非洲,揭开了沙漠蝗迁飞为害规律及机理研究的新纪元(Chapman & Drake, 2010)。昆虫雷达是经过特殊设计以观测昆虫为目标的雷达系统;按照波长可以分为毫米波雷达和厘米波雷达,毫米波雷达主要用于观测小型害虫,厘米波雷达则用于监测沙漠蝗等体型较大的迁飞昆虫;按照工作体制,昆虫雷达可以分为扫描昆虫雷达、垂直监测昆虫雷达和昆虫谐波雷达等,扫描昆虫雷达具有运转速度快、显示直观、扫描范围大等优势,但是目标解算能力较弱;垂直监测昆虫雷达可以解算比较丰富的参数,但是取样范围较小;昆虫谐波雷达用于追踪个体行为,比较成功的研究对象是蜜蜂和熊蜂等授粉昆虫(Rainey & Joyce, 1990)。昆虫雷达可以获取飞行蝗虫的数量、高度、方向、速度等参数,部分雷达还可以获得定向角度、与体型有关的参数和振翅频率等;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;根据这些参数,利用特定的分析软件可以判断蝗虫的迁飞路径(Riley & Reynolds, 1979; 1983; 1986)。

2.6 网络智能化蝗虫监测

Internet GIS或WebGIS可以实现各种地理空间数据的远程操作;快速计算和模拟技术可开展多源数据的快速处理和模拟;基于网络智能化蝗虫生境监测和预警系统可以自动将各地自然环境背景数据库、蝗虫发生的历史资料库、用于蝗虫生境监测预警的模型库及智能化分析预警系统连接到网络中心计算机上;各蝗区站点可将当地的虫情信息和气候等资料及时传送到中心数据库,中心数据库管理人员根据各地的虫情信息,用监测预警模型分析大范围的发生趋势,并及时做出预测预警和灾情风险分析,同时将虫情信息上报到蝗虫防治决策部门,以便快速采取防治措施、制定救灾计划等(图6)。

FAO沙漠蝗信息服务处根据监测分析到的蝗虫发生情况发布沙漠蝗公报,并在地图上用不同颜色标记出沙漠蝗可能入侵的农业风险区或威胁区,

预警级别随着风险变化而每月更新;绿色表示没有威胁,保持正常调查;黄色是预警色,表示沙漠蝗对农作物有潜在威胁,要加强警戒,需要采取一定控制措施;橙色表示沙漠蝗对农作物有威胁,要采取调查和控制措施;红色表示沙漠蝗对农作物具有显著威胁,必须采取强化调查和控制措施。同时在地图上用不同颜色的圆圈表征沙漠蝗发生状态,绿圆圈表

示散居蝗蛹、蓝圆圈表示散居成虫、紫圆圈表示分散的地面蝗群、橙圆圈表示可大规模迁移的蝗蛹群、红圆圈表示可大规模迁飞的成蝗群,圆圈数量表示沙漠蝗发生程度。FAO将沙漠蝗发展过程分为7个阶段:交配繁殖阶段、尚未扩散和集群阶段、群集前期、暴发期、急剧暴发期、蝗灾暴发期、回落期(Cressman, 2015)。

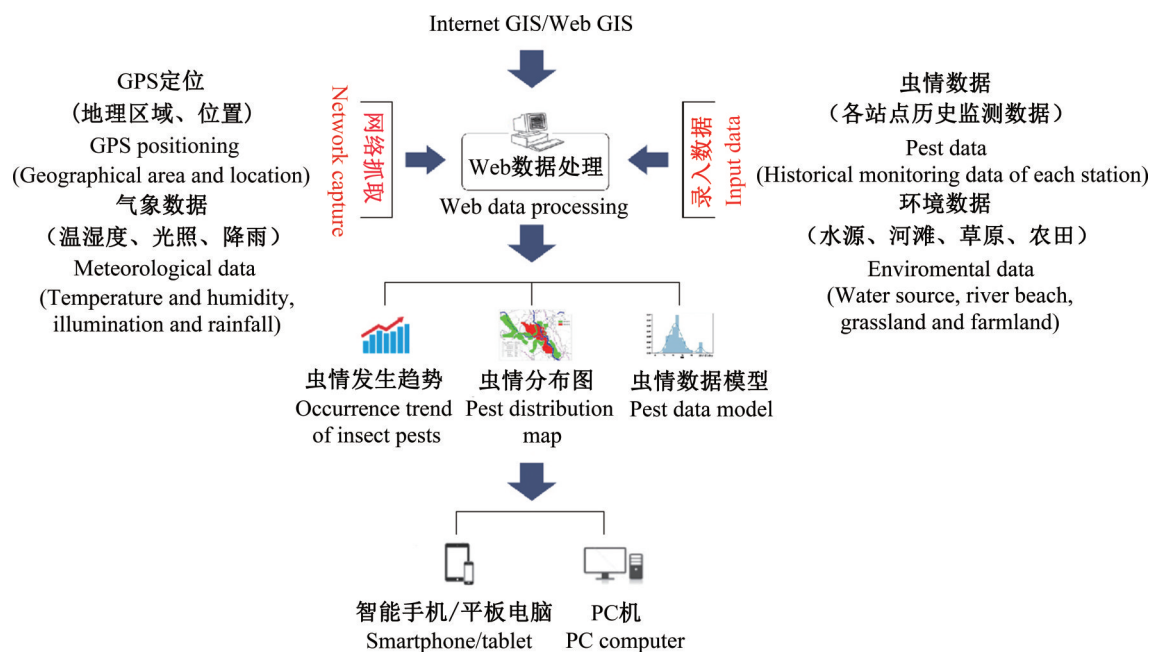


图6 蝗虫网络智能化监测预警系统(聂江维,北京中维新兴技术有限公司)

Fig. 6 Locust network intelligent monitoring and warning system (Nie Jiangwei, Beijing Zhongwei Innovation Technology Co., Ltd)

FAO沙漠蝗监测控制委员会自成立以来,沙漠蝗极少从暴发期发展到急剧暴发期和蝗灾暴发期,因为沙漠蝗虫监测防控指挥部能够及时综合各国蝗虫调查和防治数据,并借助卫星遥感影像、历史记录、气象数据、人工调查数据及物候期等进行分析,及时发出预警并指导协助各国的防控工作,阻止了蝗虫疫情的发生和蔓延。

3 沙漠蝗防治技术的研究进展

人类与沙漠蝗作斗争历史悠久,形成了一些控制沙漠蝗的策略和技术,从传统的人力机械防治发展到化学防治,再到今天的生物防治和综合防治等。

3.1 物理防治

沙漠蝗发生初期,人们往往采取人工捕杀、挖沟火烧、敲锣恫吓和建立栅栏等物理手段来防治沙漠蝗入侵农田、果园和菜地等,这些措施在一定范围内可作为防治沙漠蝗的补充手段,同时可以结合一些

新技术提高这些物理手段的防蝗效果,如大型捕蝗机械等。

3.2 化学防治

化学防治就是利用人工合成的化学物质防治有害生物。当前化学防治在沙漠蝗的防控中仍然占主导地位。随着化学农药的更新换代,防治沙漠蝗的药剂也在逐步由高毒、高残留、高广谱向低毒、低残留、专一性发展,其中有机氯农药最早被用于沙漠蝗的防治,但是由于其对人类和环境的高危险性,已经被停止使用;随后被对哺乳动物只具有中等毒性、击倒力强和成本低的有机磷类和氨基甲酸酯类农药所替代,但是这2类药剂具有广谱性,特别对一些鸟类和鱼类等动物毒性高,也不提倡使用;因此当前主要推荐使用广谱性、对哺乳动物毒性低而且击倒力强的菊酯类和苯基吡唑类农药来防治沙漠蝗,或者2种不同类型的农药混配使用,可以降低高毒性药剂的使用量并提高低毒药剂的防治效果(Lahr, 1998;

Gianessi, 2013)。为进一步保护生态环境,FAO推荐使用昆虫生长调节剂类化学农药替代上述广谱化学农药来防治沙漠蝗,其具有对哺乳动物毒性低、对环境影响小和选择性的特点,但只有在蝗蝻期使用才有效(FAO, 2017)。

3.3 生物防治

害虫的生物防治包括经典生物防治和现代生物防治,而现代生物防治又包括增强型生物防治以及保护型生物防治。经典生物防治就是保护利用、增殖释放和引进天敌,主要利用天敌有益生物的自然控害能力来控制害虫种群。增强型生物防治就是提高有益生物的自然控害能力或提高作物自身的抗虫和补偿能力,如微生物增效剂、基因修饰微生物、转抗虫基因植物等;保护型生物防治就是通过保护生态系统的生物多样性来提高生态系统的抗害能力和恢复能力,如种植覆盖作物等。

经典生物防治就是直接单一喷洒生物药剂来防治沙漠蝗。FAO推荐可以用于沙漠蝗防治的生物制剂包括蝗虫微孢子虫 *Paranosema locustae*、白僵菌、绿僵菌和沙漠蝗信息素等。试验示范发现蝗绿僵菌 *Metarhizium acridum* 油剂施用后 10 d,其对沙漠蝗的防治效果可达到 33%~66%;蝗虫微孢子虫麦麸饵剂施用后 3 周,对蝗虫的防治效果达到 41%~64%;生物药剂作用效果较慢,推荐在蝗蝻期施用(Pesticide Referee Group, 2014)。

增强型生物防治主要是通过协同利用不同蝗虫病原物来提高病原物对蝗虫的控制作用效果。Dakhel et al. (2019)研究发现将蝗虫微孢子虫与绿僵菌 *Metarhizium brunneum* 协同利用可以起到明确的增效作用,单独施用蝗虫微孢子虫或绿僵菌 2 周后对沙漠蝗的致死效果在 30% 左右,而同时使用协同致死蝗虫的效果最高可以达到 60% 以上。筛选出来的黏质沙雷氏菌 *Serratia marcescens* 与类产碱假单胞菌 *Pseudomonas pseudoalcaligenes* 等进行了混合生物制剂的试验,可以提高单一菌种的杀蝗效果,但是效果不太稳定(尹鸿翔等, 2004)。

保护型生物防治主要是通过建立生态鸟类保护区,保护草原食蝗鸟类。Fritcher et al. (2004)调查发现,与非保护区相比,保护区食蝗鸟类的丰富度增加明显,生物多样性增加,蝗虫暴发频率下降明显。

苯乙腈(phenylacetonitrile, PAN)是沙漠蝗聚集信息素的主要组分,经过其处理后的蝗虫对防治蝗

虫药剂的敏感性下降,可以提高药剂的防治效果,减少药剂的使用量并保护环境,如高效氯氟氰菊酯与 PAN 协调使用可以使防效提高 50% 以上(Obeng-Ofori et al., 1994)。

单一的防治技术都有一定的弊端和局限性,因此沙漠蝗的防控提倡多种防治方法和技术协调应用,建立科学、完善、合理和有效的综合防治方法,确保经济效益、社会效益和生态效益的统一。

4 蝗灾易发难控原因分析

人类对沙漠蝗的认识已经超过一个多世纪,但是沙漠蝗灾却仍常有暴发,给农牧业生产和人民生活带来巨大威胁。蝗灾形成的原因非常复杂,首先是存在适宜的虫源地,再就是要有适宜蝗虫生长发育和繁殖的环境,包括生物环境即适宜蝗虫取食的食物和非生物环境即适宜蝗虫生长发育的温湿度条件,在适宜环境下蝗虫的数量和规模可以迅速扩大达到一定的阈值范围,如果未加以及时控制,再加上适宜的气象条件,就促进了蝗群的扩散和迁移,引起蝗灾暴发;又由于沙漠蝗具有极强的扩散和迁飞能力,蝗灾范围迅速扩大,给蝗灾控制带来更大困难。近年来人类对生态环境的进一步破坏,如非洲某些地区乱砍乱伐,过度放牧,致使生态环境恶化,沙漠化严重,沙漠蝗的适生地增加,加之全球气候异常,对沙漠蝗的监测预警难度加大,进一步加剧了沙漠蝗暴发的风险。

尽管人们有很多应对蝗灾的策略和技术,但是蝗灾一旦暴发短期内总是难以控制,主要原因包括沙漠蝗灾暴发面积大,往往达到 1 600 万~3 000 万 km²;暴发沙漠蝗的区域偏僻,交通不便;一些地区不安全或缺乏安全(如地雷的存在),没法开展沙漠蝗的防控;一些受沙漠蝗灾影响的国家用于监测和控制蝗虫的资源有限;许多发生沙漠蝗灾的国家缺乏防治和监测蝗虫的基础设施如道路、通讯、水和食物,也缺乏专业的、处置能力强的监测和防治蝗虫工作人员;因为政治关系使得受蝗灾影响国家间不能联合行动,很难迅速组织实施大规模的化学农药应急防控行动;由于蝗灾发生缺乏周期性和蝗灾地区气候条件的不确定性,在蝗灾预测方面也存在困难等。

5 展望

历史记载发现蝗灾一直是世界性的难题,几乎

所有国家都曾经或正在遭受蝗灾。非洲沙漠蝗灾是最具代表性的一种生物灾害,至今仍在非洲和亚洲西南部等地区频繁肆虐。由于沙漠蝗具有强大的迁移能力和适应性,历史上也记载有其跨越大西洋迁飞的记录,所以每个国家都不可能置身事外,全世界应该团结起来共同研讨防治沙漠蝗灾的策略和技术。经过全世界蝗虫科学家和FAO沙漠蝗委员会及各国蝗虫控制中心工作人员的努力,沙漠蝗的监测预警和防控技术取得了很大突破。FAO沙漠蝗监测预警系统可以自动获取来自于气象卫星的自然因子、遥感图像的生境转换和蝗灾历史发生数据,结合现场传输的人工调查采集数据,通过GIS分析可以迅速明晰沙漠蝗的发生情况和成灾风险,并通过互联网将预警信息发送到各地,高风险地区可及时做好应对,据法国国际农业研究中心沙漠蝗研究中心报道,该系统可以提前3个月预测沙漠蝗发生情况。沙漠蝗的防控主要依靠蝗区国家组织执行,FAO沙漠蝗委员会提供信息并指导,但由于沙漠蝗灾发生的地域大都是欠发达地区,因此防控工作和技术往往滞后,化学防治仍然占主导地位。FAO蝗虫与跨界植物病虫害司发布的2020沙漠蝗全球反应计划中提倡利用环境友好的防治技术来阻止沙漠蝗灾情的蔓延,以保护环境和生物多样性,特别推荐使用微生物制剂和昆虫生长调节剂替代广谱化学药剂,一些国家将生物制剂列入了防蝗农药采购名单。随着沙漠蝗监测和防控技术的发展,以及人们环保意识的进一步加强和绿色治理技术的广泛应用,沙漠蝗灾的发生频率和危害会逐步降低,最终实现沙漠蝗的可持续控制。

参 考 文 献 (References)

- Alexandre VL, Ramesh S. 2010. Locust habitat monitoring and risk assessment using remote sensing and GIS technologies.//Ciancio A, Mukerji KG. Integrated management of arthropod pests and insect borne diseases, integrated management of plant pests and diseases, Vol. 5. Dordrecht: Springer, pp. 163–188
- Capinera JL. 1993. Differentiation of nymphal instars in *Schistocerca americana* (Orthoptera: Acrididae). Florida Entomologist, 76: 176–179
- Ceccato P, Cressman K, Giannini A, Trzaska S. 2007. The desert locust upsurge in West Africa (2003–2005): information on the desert locust early warning system and the prospects for seasonal climate forecasting. International Journal of Pest Management, 53 (1): 7–13
- Chapman JW, Drake VA. 2010. Insect migration.//Breed MD, Moore J. Encyclopedia of animal behavior. Pittsburgh: Academic Press, pp. 161–166
- Chapuis MP, Bazelet CS, Blondin L, Foucart A, Vitalis R, Samways MJ. 2016. Subspecific taxonomy of the desert locust, *Schistocerca gregaria* (Orthoptera: Acrididae), based on molecular and morphological character. Systematic Entomology, 41(3): 516–530
- Cressman K. 2015. Desert locust.//Shroder JF, Sivanpillai R. Biological and environmental hazards, risks, and disasters. New York: Elsevier, pp. 87–105
- Dakhel WH, Latchininsky AV, Jaronski ST, Wahid HD, Alexandre VL, Stefan TJ. 2019. Efficacy of two entomopathogenic fungi *Metarhizium brunneum* strain F52 alone and combined with *Paranosema locustae* against the migratory grasshopper *Melanoplus sanguinipes* under laboratory and greenhouse conditions. Insects, 10(4): 94–127
- Deveson T, Hunter D. 2002. The operation of a GIS-based decision support system for Australian locust management. Entomologia Sinica, 9(4): 1–12
- Dinku T, Ceccato P, Cressman K, Connor SJ. 2010. Evaluating detection skills of satellite rainfall estimates over desert locust recession regions. Journal Applied Meteorological Climatology, 49 (6): 1322–1332
- Dirsh VM. 1953. Morphometrical studies on phases of the desert locust. Anti-Locust Bulletin, 16: 33–34
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 1989. International strike force to control the desert locust, *Schistocerca gregaria* (Forsk): plan for 1989 and early 1990. Rome, Italy: FAO
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2017. Desert locust watch. <http://www.fao.org/ag/locusts/en/info/info/indiz/html>
- Faure JC. 1932. The phases of locusts in South Africa. Bulletin of Entomological Research, 23(3): 293–424
- Fritcher SC, Mark Arumble MA, Flake LD. 2004. Grassland bird densities in seral stages of mixed-grass prairie. Journal of Range Management, 57(4): 351–357
- Gianessi L. 2013. Desert locust plagues managed with insecticides: international pesticide benefits case study no. 100, December 2013. Washington, USA: Crop Life Foundation
- Gunn DL, Hunter-Jones P. 1952. Laboratory experiments on phase differences in locusts. London: Anti-Locust Bulletin, 12: 35–36
- Homberg U. 2015. Sky compass orientation in desert locusts: evidence from field and laboratory studies. Frontier of Behavior Neuroscience, 9: 346
- Lahr J. 1998. An ecological assessment of the hazard of eight insecticides used in desert locust control, to invertebrates in temporary ponds in the Sahel. Aquatic Ecology, 32: 153–162
- Magor JI, Ceccato PN, Dobson HM, Pender J, Ritchie L. 2007. Pre-

- paredness to prevent desert locust plagues in the central region, an history review.//Desert locust technical series. No. AGP/DL/TS/35. Rome: Locusts and Other Migratory Pests Group, Plant Production and Protection Division
- Misha N, Peter F. 2007. Proving: locust (*Schistocerca gregaria*). The School of Homeopathy, <http://www.alternative-training.com>
- Nailand P. 1993. The feasibility of using remote sensing to predict and monitor irruptions of the brown locust, *Locustana pardalina* (Walker). South African Journal of Science, 89(9): 425–426
- Nelson RC. 2019. Epigenetic principles of evolution. 2nd edition. Pittsburgh: Academic Press, pp. 493–534
- Obeng-Ofori D, Torto B, Njagi PGN, Hassanali A, Amiani H. 1994. Fecal volatiles as part of the aggregation pheromone complex of the desert locust, *Schistocerca gregaria* (Forskål) (Orthoptera: Acrididae). Journal of Chemical Ecology, 20: 2077–2087
- Pesticide Referee Group. 2014. Evaluation of field trials data on the efficacy and selectivity of insecticides on locusts and grasshoppers. <http://www.fao.org>
- Rainey RC. 1951. Weather and the movements of locust swarms: a new hypothesis. Nature, 168: 1057–1060
- Rainey RC. 1963. Meteorology and the migration of desert locusts: application of synoptic meteorology in locust control. London: Anti-Locust Memoir No. 7: 1–115
- Rainey RC, Joyce RJV. 1990. An airborne radar system for desert locust control. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 328(1251): 599–618
- Riley JR, Reynolds DR. 1979. Radar-based studies of the migratory flight of grasshoppers in the middle Nigerarea of Mali. Proceedings of the Royal Society of London, Series B: Biological Science, 204(1154): 67–82
- Riley JR, Reynolds DR. 1983. A long-range migration of grasshoppers observed in the Sahelian zone of Mali by two radars. Journal of Animal Ecology, 52: 167–183
- Riley JR, Reynolds DR. 1986. Orientation at night by high-flying insects.//Danthanarayana W. Insect flight: dispersal and migration. Berlin Heidelberg: Springer, pp. 71–87
- Roffey J, Popov GB. 1968. Environmental and behavioural processes in a desert locust outbreak. Nature, 219: 446–450
- Rowe T. 2006. The desert world: a homeopathic exploration. Phoenix, AZ: Desert Institute Publishing, pp. 1–7
- Showler AT. 2019. Desert locust control: the effectiveness of proactive interventions and the goal of outbreak prevention. American Entomologist, 65(3): 180–191
- Steedman A. 1988. Locust handbook. London, England: Overseas Development Natural Resources Institute, pp. 219
- Steinbauer MJ. 2011. Relating rainfall and vegetation greenness to the biology of spur-throated and Australian plague locusts. Agricultural and Forest Entomology, 13(2): 205–218
- Tahany HA, Moataza AD, Amr AM, Taha TMB. 2010. Corrigenda: specificity and developmental changes in hemagglutinating activity of serum of the desert locust *Schistocerca gregaria* (Orthoptera: Acrididae). Journal of Orthoptera Research, 19(2): 387–392
- Uvarov BP. 1921. A revision of the genus *Locusta*, L. (= *Pachytylus*, Fieb.), with a new theory as to the periodicity and migrations of locusts. Bulletin of Entomological Research, 12(2): 135–163
- Yin HX, Zhang J, Hou RT, Wang JD, Yang ZR. 2004. Isolation and identification of a chitinase-producing bacteria and its synergistic effect on locust biocontrol. Plant Protection, 30(2): 37–41 (in Chinese) [尹鸿翔, 张杰, 侯若彤, 王建东, 杨志荣. 2004. 一株几丁质酶产生菌的分离鉴定及其灭蝗增效作用. 植物保护, 30(2): 37–41]

(责任编辑:李美娟)