迁飞性害虫监测预警技术发展概况与应用展望*

张 智[1, 2**] 祁俊锋[3] 张 瑜[1, 4] 林培炯[1] 张云慧[1***]

（1. 中国农业科学院植物保护研究所，植物病虫害生物学国家重点实验室 北京 100193；
2. 北京市植物保护站，北京 100029；3. 北京绿富隆农业科技发展有限公司，北京 102100；4. 北京农学院，北京 102206）

摘 要 迁飞性害虫具有突发性、暴发性和毁灭性的发生特点，做好迁飞性害虫的监测预警在粮食安全生产方面具有重要意义。为加强迁飞性害虫监测预警技术手段的应用与推广，提高迁飞性害虫的监测预警水平，本文从常规和现代监测技术入手，综述了我国迁飞性害虫监测预警技术的发展、研究现状和取得的进展，分析了迁飞性害虫监测预警面临的瓶颈问题，展望了做好迁飞性害虫监测预警的努力方向，以期为提高我国迁飞性害虫的监测预警水平提供参考。

关键词 迁飞性害虫；探照灯诱虫器；花粉；昆虫雷达；监测预警技术

Development of monitoring and forecasting technologies for migratory insect pests and suggestions for their future application

ZHANG Zhi[1, 2**] QI Jun-Feng[3] ZHANG Yu[1, 4] LIN Pei-Jiong[1] ZHANG Yun-Hui[1***]

(1. State Key Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests, Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China; 2. Beijing Plant Protection Station, Beijing 100029, China; 3. Lvfulong Agricultural Co., Ltd, Beijing 102100, China; 4. Beijing University of Agriculture, Beijing 102206, China)

Abstract Migratory insect pests can cause unexpected, sudden and heavy damage to crops, making it important to be able to accurately monitor and forecast outbreaks of these species. This paper reviews current monitoring and early forecasting techniques in order to promote the development of better methods. Suggestions on how to improve the monitoring and forecasting of migratory insect pests are provided.

Key words insect migration; searchlight trap; pollen; monitoring and forecasting technique

迁徙或迁飞是动物种群对栖息地发生季节性变化或不可预知变化时而进化出的一种适应性对策（Dingle and Drake，2007）。昆虫作为动物界中最为庞大的一个类群，其迁飞现象非常普遍。昆虫迁飞是指昆虫种群通过自主飞行或借助外力，从一个发生地成群而有规律地长距离转移至另一个发生地，以保证种群繁衍的现象（Southwood，1962）。昆虫通过迁飞，可以促进自身种群增长和进化，也可在食物链、能量流动、人畜疾病传播、授粉及农作物产量等方面产生巨大影响（Holland *et al.*，2006；Satterfield *et al.*，2020）。研究表明，空中迁飞昆虫种类多，而且产生的生物量也非常惊人（Holland *et al.*，2006；Hu *et al.*，2016; Satterfield *et al.*，2020）。在我国，许多昆虫都具有迁飞习性，而且很多迁飞性昆虫都属于重大农业害虫，2020 年 9 月 15 日，农业农村部公布的《一类农作物病虫害名录》中虫害共有 10 种，其中草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperd*（Smith）、飞蝗 *Locusta migtatoria* Linnaeus、草地螟 *Loxostege sticticalis* Linnaeus、粘虫[东方粘

*资助项目 Supported projects：国家自然科学基金（31972260）；国家重点研发计划（2019YFD0300102）；国家现代农业（小麦）产业技术体系（CARS-03）；北京市科技创新驱动发展投入项目（PXM2016_036203_000049）

**第一作者 First author，E-mail：zhangzhicas@126.com

***通讯作者 Corresponding author，E-mail：yhzhang@ippcaas.cn

收稿日期 Received：2021-04-19；接受日期 Accepted：2021-05-01

虫 *Mythimna separate*（Walker）和劳氏粘虫 *Leucania loryi* Duponchel）]、稻飞虱[褐飞虱 *Nilaparvata lugens*（Stål）和白背飞虱 *Sogatella ficrcifera*（Horváth）]、稻纵卷叶螟 *Cnaphalocrocis medinalis*（Guenée）、小麦蚜虫[获草谷网蚜 *Sitobion miscanth*（Takahashi）、禾谷缢管蚜 *Rhopalosiphum padi*（Linnaeus）、麦二叉蚜 *Schizaphis graminum*（Rondani）]7 类害虫中，除劳氏粘虫是否具有迁飞习性待证实外，其它种类都是典型的迁飞性害虫（中华人民共和国农业农村部公告第 333 号，2020）。

研究害虫迁飞的最终目标是建立监测预警系统，准确预报虫情信息，以便为开展防控提供决策依据，减少或避免作物损失（Magor，1995）。监测预警系统主要包括两方面含义，一是利用有效的监测技术手段，对迁飞性害虫进行长期系统地监测，获得预警所需的基础数据；二是依据虫情数据、气象资料、寄主条件等资料，根据经验或利用模型等对其发生趋势进行预测，必要时发布预警信息。随着现代信息技术的发展，迁飞性害虫监测预警技术也取得了明显进步。为了加强迁飞性害虫监测预警技术手段的应用与推广，提高迁飞性害虫的监测预警水平，本文围绕迁飞性害虫的监测预警技术进行了全面综述。

1　监测技术手段

根据监测技术的发展历史，迁飞性害虫监测技术手段可分为传统监测手段和现代监测手段。传统监测手段主要包括田间调查、标记释放回收、灯光诱集、雌虫生殖系统解剖、空中网捕等。随着现代信息技术和分子生物学的发展，迁飞性昆虫监测引入了昆虫雷达和分子生物学等现代化技术手段（齐会会等，2009）。

1.1　传统监测技术

1.1.1　田间调查　田间调查即根据迁飞性害虫的发生规律，按照相关调查技术规范开展虫情调查，获得迁飞性害虫的田间种群动态和生态环境信息。目前，针对幼虫和蛹的田间调查手段仍然是目测，针对成虫或卵，还可以采取更为有效的方法或手段，例如草地螟、稻纵卷叶螟等利用赶蛾法，获得百步惊蛾量、667 m^2 蛾量；调查粘虫卵可以利用谷草把，获得粘虫在田间的产卵情况。

1.1.2　标记释放回收　标记释放回收（Mark-release-recapture）通过调查标记个体的数量变化，评估昆虫的种群动态，研究种群扩散和觅食行为等，通过异地回收，可以为昆虫迁飞提供最直接的证据（李光博等，1964；耿济国，1982；Hagler and Jackson，2001）。标记释放回收主要包括标记、释放和回收三个步骤。昆虫标记时，根据具体研究对象的特点和研究目的，可以采用染料、标签或标记，或者饲喂含放射性同位素或稀有元素或特殊染料的饲料等标记方法（Hagler and Jackson，2001；张智，2013），但无论何种方法进行标记，均需要确保标记可追踪溯源。释放时主要通过自然释放，避免对种群个体行为产生干扰。回收是一个复杂的过程，各地捕捉到标记个体后，除简单标记可以现场确认外，同位素标记、染料标记或稀有元素标记个体需要在室内进行严格检测，确定是否属于标记样本（张智，2013）。标记释放回收的应用历史较为久远，也曾取得多项研究突破。在我国，标记释放回收法曾在证明害虫具有迁飞性及其迁飞路线研究中发挥了关键作用。1963 年，中国农业科学院植物保护研究所和全国 10 多个单位协作，在山东、江苏等地利用不同染料标记释放 200 多万头粘虫成虫，通过在不同地区诱集回收鉴定，成功阐明了粘虫在我国东部的迁飞情况，并提出了相应的治理策略，有效缓解了粘虫的危害（李光博等，1964；郭予元，2006）。参考粘虫标记回收的成功经验，20 世纪 70-80 年代，全国相继又成立了稻飞虱、稻纵卷叶螟和小地老虎 *Agrotis ypsilon*（Rottemberg）科研协作组，对褐飞虱、稻纵卷叶螟和小地老虎等相继进行了标记回收，也取得了一系列重要发现（耿济国，1982；贾佩华，1985）。标志释放回收方法在国外也得到了一定应用。英国科学家 Rose 等（1985）对非洲粘虫 *Spodoptera exempta*（Walk）开展了标记释放回收试验，发现该虫个体 1 晚可飞行 147 km。美国昆虫学家通过标记释放回收小地老虎雄蛾，综

合天气背景、无线电探空数据、轨迹分析等相关技术手段，发现低空急流和近地面低压系统是小地老虎迁飞的必要条件（Showers *et al.*，1989）。

虽然标记释放回收法在迁飞性昆虫研究中曾发挥重要作用，但是由于回收率非常低，往往标记上百万头个体才能回收到几头个体，人力成本较高、效果较低，近年来，在昆虫学研究中的应用越来越少（Williams，1957；李光博等，1964；贾佩华，1985；陈阳等，2012）。随着生产经营方式的改变，20 世纪 90 年代以来，标记释放回收法的应用也越来越少，2000 年以后，仅见在内蒙古利用此方法确认了草地螟的迁飞路线和距离（陈阳等，2012）。

1.1.3 理化诱集 理化诱集是根据昆虫的趋性行为而专门开发出的诱虫手段，常见的有光诱、性诱、食诱等（张智，2013）。光诱是根据昆虫趋光性，以各种光源为基础，通过设置诱捕结构诱捕昆虫的灯具，常见的有黑光灯和高空探照灯诱虫器（又名高空测报灯）（张智，2013）。黑光灯主要诱集近地面活动的害虫，对于迁飞性害虫，往往是降落以后重新被灯光吸引诱集，对迁飞性害虫虫情的反应灵敏度不高。高空探照灯诱虫器最早是由 GT182 型探照灯改进而来，发出的光束竖直向上，可以诱集正在空中过境的迁飞害虫。参考以黑光灯为光源的虫情测报灯，可以利用与高空探照灯诱虫器同样的灯源，设计出与高空探照灯诱虫器配套的地面灯诱虫器。地面灯诱虫器的灯光向四周发射，主要诱集周边趋光性昆虫。由于光源相同，但发光方式不同，地面灯诱虫器与高空探照灯诱虫器一起合称为姊妹灯诱捕器。野外工作时，同时开启和关闭，通过计算高空探照灯诱虫器和地面灯诱虫器诱虫量之间的差值和比值，可以判断是否发生迁飞事件（封洪强，2003；程登发等，2005）。高空探照灯诱虫器在诱集空中迁飞昆虫种群方面具有明显优势，在监测棉铃虫、草地螟、粘虫、稻纵卷叶螟、稻飞虱等迁飞昆虫时，高空探照灯是一种主要的诱集手段（Zhang *et al.*，2008；Feng，2009；蒋春先等，2011；Qi *et al.*，2014）。自 2014 年以来，全国农业技术推广服务中心在全国 17 个省（市、区）设立了 19 个高空探照灯监测点，通过全年系统、联合监测，摸清了区域间粘虫种群数量之间的关系（姜玉英等，2016，2018）；2019 年草地贪夜蛾侵入我国以后，在草地贪夜蛾的监测和防控中也发挥了重要作用（姜玉英等，2020）。近年来，灯诱技术发展比较迅速，光源不断增多，而且还发展出太阳能供电技术，解决了偏远地区的使用难题（边磊等，2012）。为了探索空中种群的节律，利用时控开关或设置可转动的接虫仓等，高空探照灯诱虫器实现了分时段取样，可以获取昆虫的扑灯节律，为迁飞轨迹模拟提供参数（齐会会等，2014；张智等，2018；林培炯等，2020），也可为昆虫雷达的目标识别提供参考（张智，2013）。

性诱是将昆虫信息素作为诱集源，综合使用各类诱捕器达到诱捕成虫的技术。性诱具有诱虫谱较为专一、安装简单、持效时间长等特点。截至目前，生产中绝大多数害虫种类尤其是蛾类害虫都有商品诱芯，诱捕器的形状更是丰富多样，常见的有桶型、船型、三角形等。食诱是利用一些昆虫成虫在产卵前具有补充营养的习性，通过放置昆虫喜好的食物，来实现诱捕害虫目的，目前，比较常见的有糖醋液和一些相对专一性的食诱剂。与黑光灯类似，性诱和食诱也只能诱集降落地面的迁飞性害虫个体，时效性会晚于高空探照灯诱虫器。

1.1.4 卵巢发育解剖 卵巢发育解剖是指对昆虫雌性生殖系统进行解剖，观察卵巢发育及交配情况。迁飞性昆虫通常采取先迁飞、后生殖的对策以寻找适于成虫生殖和后代存活的生境。Johnson（1964）发现迁飞期间雌成虫的飞行与卵子发育存在相互拮抗。迁飞性昆虫一般在成虫幼嫩后期或生殖前期迁飞，大多数雌性个体的卵巢未发育成熟。本地虫源则包含始见期至盛末期的成虫个体，卵巢发育低级别Ⅰ级的雌虫比例较高，并不断有低级别个体发育为高级别个体。本地迁出虫源中，卵巢发育Ⅰ级始终占据高比例而且成虫尚未交配。而外地迁入虫源的卵巢大部分已完成发育，Ⅰ级所占的比例很低，雌虫的交配率较高。在监测工作中，对雌成虫开展解剖，根

据卵巢小管内卵粒的成熟度、色泽及脂肪体的消耗情况，将卵巢划分为不同的发育级别，鳞翅目雌虫卵巢一般分为 5 级，可根据卵巢发育级别占比确定诱集昆虫的虫源性质（陈若篪等，1989；齐国君等，2011）。野外操作时，水盘解剖法既方便又实用。卵巢解剖时最好是新鲜虫体，烘干虫体、死亡时间较长或福尔马林浸泡的个体，其腹部内脏器官极易凝固而难以解剖。

1.1.5　空中取样　空中取样（Aerial sample）是获取空中迁飞目标种类的重要取样方法，它可为空中目标的判定提供最直接的证据，很多研究都借助这种取样方法，成功识别空中的迁飞目标（Wood *et al.*，2009）。空中取样主要包括空中网捕和吸虫塔取样。

空中网捕按照运输工具种类和悬挂设备又可以分成许多种，例如海上网捕、飞机网捕、系留气艇或风筝悬挂拖网网捕、系留气球悬挂粘板等（邓望喜等，1980；刘浩光等，1983； Farrow and Dowse，1984；Chapman *et al.*，2004；Zhang *et al.*，2008；苗进等，2011）。在诸多的高空网捕手段中，飞机网捕成本高，难以持续使用。借助系留气艇或风筝悬挂拖网，当风力<3 m/s 时，由于悬挂拖网的网口不能张开，而无法使用（Farrow and Dowse，1984；Reynolds *et al.*，1999）。高空悬挂粘板受粘性和变形的影响，难以捕捉到大型蛾类和甲虫。

吸虫塔（Suction trap）取样是另外一种常见的空中取样方法，该设备依据空气动力学原理，将飞经塔顶管口附近的昆虫吸入塔管，落入下部的样品收集瓶中，然后由监测人员收集，鉴定并统计数量，获得种群类别和数量动态。吸虫塔一般只能采集近地面 15 m 左右的目标，且主要针对小型昆虫和蜘蛛（邵天玉等，2015）。吸虫塔最早是由英国洛桑实验站的 Johnson 和 Taylor 发明，1964 年首次在洛桑实验站内运行（Taylor *et al.*，1973），后在欧洲广泛部署，形成了覆盖欧洲的监测网络。1988 年，根据中英两国政府签订的“中英农业文化科学技术交流谅解备忘录”，9 月 13 日至 29 日，在江苏南京市江浦县南京农业大学实验农场，在褐飞虱监测中首次使用英方带来的吸虫塔（程极益，1994）。2009 年以来，在公益性行业（农业）科研专项经费项目的资助下，我国陆续在东北、华北、华中、西北等地安装了 34 台吸虫塔，初步形成了覆盖我国小麦主产区和大豆主产区的吸虫塔网络，为小麦蚜虫和大豆蚜 *Aphis glycines* 的早期预警和有效防控奠定了基础（苗麟等，2011；邵天玉等，2015）。

1.2　现代化技术手段

1.2.1　分子遗传标记技术　遗传标记是指用于区分不同的个体或群体，能够稳定遗传的物质或性状，是研究生物遗传、进化及生态特性的重要工具，它包括形态学标记、细胞学标记、生物化学标记、免疫学标记和分子标记 5 种类型（龚鹏等，2001）。20 世纪 60 年代以前，生物的形态、行为以及细胞水平上的变异一直是种群生物学和生态学最常用的指标，但是这些指标提供信息量较小。1966 年，Lewontin、Hubby 和 Harris 等发明了同工酶电泳技术，该标记可从蛋白质水平来反映生物的遗传变异，了解物种的遗传结构，推断种群的演化历史。对迁飞性昆虫如粘虫、棉铃虫和烟夜蛾 *Helicoverpa virescens*，应用同工酶标记技术获得遗传变异结果，进一步印证了它们具有远距离迁飞习性（乔海娟等，2000；徐广等，2000）。

随着 DNA 分子双螺旋结构的提出，限制性片段长度多态性成为遗传标记的新手段。1985 年，PCR 技术的诞生为研究 DNA 多态性提供了技术保证。与其它遗传标记相比，DNA 分子遗传标记具有诸多优势。首先，DNA 存在于生物体的各个时期，不受是否表达的限制。其次，可标记的位点数量很多，多态性也高。第三，标记表现为“中性”，不影响目标性状的表达，与不良性状无必然的连锁（龚鹏等，2001；曹卫菊，2006）。常用的 DNA 分子标记有多种：第一类是基于分子杂交及限制性内切酶技术的 DNA 标记，主要有限制性内切酶片长度多态性（Restriction fragment length polymorphism，简称 RFLP）标记技术（龚鹏等，2001；曹卫菊，2006）；

第二类是基于 PCR 的 DNA 标记，根据所用引物的特点，这类 DNA 标记又可分为随机引物 PCR 标记和特异引物 PCR 标记。随机扩增多态 DNA 引物 PCR 技术，包括随机扩增长度多态性（RAPD）标记、简单序列重复间区（ISSR）（龚鹏等，2001；曹卫菊，2006）。特异性的 PCR 技术包括单序列重复（SSR）标记或叫微卫星标记、序列标签位点（STS）、序列特征化扩增区域（SCAR）标记等；第三类是基于 PCR 和限制性内切酶技术结合的 DNA 标记，主要有扩增片段长度多态性（Amplified fragment length polymorphism，AFLP）标记。第四类是单核苷酸多态性（Single nucleotide polymorphism，SNP）的 DNA 标记，该标记具有二态性、高频率、稳定性遗传和丰富度高等特点（曹卫菊，2006；王定锋等，2006；张四才等，2006）。DNA 分子标记技术，在昆虫学领域有着广阔的应用空间，它为昆虫分类、昆虫分子生态学和害虫防治等学科提供了许多新的研究技术和方法（龚鹏等，2001）。在迁飞性害虫研究方面，DNA 分子标记技术主要通过测定遗传多样性，为研究目标是否具有迁飞习性提供判断依据。

1.2.2 花粉和天然同位素标记 花粉是植物携带遗传信息的雄性生殖细胞，其形态具有较强的遗传保守性。自然界中开花植物的花粉是迁飞昆虫成虫的主要营养物质，昆虫在补充营养过程中，花粉可以粘附于成虫的足、喙、触角等部位（Lingren *et al.*，1993）。花粉外壁主要成分是孢粉素，抗腐蚀及抗酸碱性极强，易保持完好（贾慧茹，2020）。通过鉴定昆虫所携带的花粉，一方面，可以明确昆虫食性，从而为害虫的防治、天敌昆虫的保护与利用、昆虫与植物的协同进化等提供依据（贾慧茹，2020）。另一方面，由于许多植物且有特定的生态区，开花时期相对固定，因此，对于迁飞昆虫而言，可以将昆虫携带的花粉作为一种自然标记，通过光学显微镜、扫描电镜镜检或植物 DNA 条形码等技术对成虫所携带的花粉进行植物种类鉴定，并结合地域分布特点，可以判定迁飞昆虫的虫源地（刘永强，2015）。Hendrix 和 Showers（1992）发现在美国爱荷华州和密苏里州捕获的小地老虎和一星粘虫 *Pseudaletia unipuncta*（Haworth）携带得克萨斯州以南特有的植物花粉，为判定这些昆虫从墨西哥塔毛利帕斯州迁入提供了重要证据。Lingren 等（1993）通过花粉判别技术，发现美洲棉铃虫 *Helicoverpa zea*（Boddie）等蛾类可从得克萨斯州南部向北迁飞至少 700 km，达到俄克拉荷马州。在我国，徐广等（1999）首次利用花粉标记技术发现渤海海面采集的棉铃虫成虫主要来自华北地区。刘永强（2015）利用花粉判别技术于 2009-2014 年对山东长岛小地老虎跨海迁飞种群进行研究分析，阐明了小地老虎的迁飞种群虫源地。

稳定性同位素（Stable isotope）无放射性，物理性质稳定，以一定的比例存在于自然界中，尽管研究表明光照、温度、湿度、气压等环境因素会影响同位素比值，但是波动范围很小，可忽略不计，因此其可以作为自然界生物体的内在天然标记（Hilmar，2007）。常用同位素种类有氢、氧、碳、氮等元素，其中以氢、碳稳定同位素应用最为广泛（李哲等，2004）。刘永强（2015）利用氢同位素作为标记对小地老虎在渤海湾地区的迁飞规律进行研究，通过建立小地老虎翅中 δD 与长江流域、华北和东北地区降雨中 δD 的相关关系，为小地老虎在华北地区和东北地区季节性往返迁飞规律提供了证据。付晓伟（2015）通过碳同位素分析发现，不同季节捕获的跨渤海湾迁飞的二点委夜蛾 *Athetis lepigone* 个体中，大部分个体幼虫期寄主植物主要为 C3 植物，其中 2 代个体占 96.9%，3 代个体占 89.2%，仅有少量个体取食 C4 植物，结果为在小麦、大豆、萝卜等 C3 作物上的二点委夜蛾监测提供了重要依据。

1.2.3 昆虫雷达 雷达是 Radar 的音译，全称为无线电探测和测距（Radio detection and ranging），是利用电磁波进行空中目标探测的一个系统。雷达不仅可以探测飞机、轮船、导弹等金属物品，还可以发现云、雨、雾天气目标。由于鸟类和昆虫体内含有水分，能反射雷达发出的电磁波，因此，可以被雷达探测到（程登发等，2005）。昆虫雷达是经过专业设计专门用于观测

昆虫的一种雷达系统，与其他行业雷达系统相比，脉冲宽度更窄，观测距离分辨率更高（张智等，2017a）。利用昆虫雷达观测昆虫，不会受到光线的影响，也不会干扰目标的行为，而且扫描速度快，可以发现许多特有的昆虫空中迁飞现象，如成层、共同定向等，因此，在迁飞性昆虫研究中，雷达被誉为最卓越的探测手段（封洪强，2009）。根据工作方式，可分为扫描雷达、垂直监测雷达、谐波雷达和双模式昆虫雷达，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波雷达（程登发等，2005；张智等，2017b；张鹿平等，2018）。

扫描雷达（Scanning radar）极化方式为水平极化，天线为抛物面形，可以根据设定的仰角进行圆周扫描，也可以在同一个方位角上进行俯仰扫描。扫描时，发射出的波束遇到目标后，返回回波点。水平扫描时，图像显示方式为平面位置显示（Plan position indicator，PPI）。通过跟踪一系列的回波点，可以估算目标的迁移速度和方向（Cheng *et al.*，2002）。俯仰扫描时，图像显示方式为距离高度显示（Range height indicator，RHI），可以发现目标在空中的分布情况（程登发等，2005）。早期的扫描昆虫雷达都是由海事雷达改装而成，频率为 X 波段，波长多为 3.2 cm 或 3.0 cm。后期为了观测小型昆虫如稻飞虱和蚜虫等，雷达昆虫学家又设计出波长为 8.8 mm 的毫米波扫描昆虫雷达（Riley，1992；杨秀丽等，2008）。

垂直监测昆虫雷达（Vertical-looking entomological radar）被誉为新一代实用型昆虫雷达（翟保平，2001；Chapman *et al.*，2002）。与传统的扫描昆虫雷达相比，垂直监测昆虫雷达的抛物面型天线竖直向上，馈源中心轴偏离抛物面的对称轴一个很小的角度，通常为 0.2°，并可围绕垂直轴快速转动，使得波束极化方式由原本的水平极化转变为旋转极化，从而形成一个锥形的波束。回波信号通过解算，可以获得位移速度、位移方向、定向角度、到波束中心轴的最短距离和 3 个与体型大小有关的 RCS 参数，利用 RCS 参数又可以估算目标昆虫的体型和重量（Smith and Riley，1996；Chapman *et al.*，2002；张智等，2012）。垂直监测昆虫雷达，除以旋转波束模式运转外，澳大利亚的 Drake 博士还引入了静止波束模式（Stationary beam mode），在这种模式下，除获得上述参数外，还可以获得振翅频率（Drake *et al.*，2002）。与扫描昆虫雷达相比，垂直监测昆虫雷达实现了长期无人值守的自动运行和即时分析，在目标识别能力方面也有了很大提高。

双模式昆虫探测雷达是指利用一套收发、信号采集处理及终端系统，实现扫描昆虫雷达和垂直监测昆虫雷达两种雷达探测功能的新型探测昆虫雷达系统，该雷达系统既可以将两种昆虫雷达系统的优势进行互补，同时也可以避免同一地点架设两部昆虫雷达而引发的同频干扰（张鹿平等，2018）。截至目前，双模式昆虫雷达已经由无锡立洋电子科技公司研制成功，2016 年，北京市植物保护站率先引入，并已经连续运转 4 年，在草地螟、粘虫迁入时，及时获得虫情，为 2019 年世园会等重大活动中的相关防控决策提供了依据。除北京外，双模式昆虫雷达还陆续在河南郑州、信阳和新疆塔城等地完成部署，也取得较好的应用效果。

谐波昆虫雷达（Insect harmonic radar）是监测低空昆虫行为的一种重要手段（桂连友等，2011）。该类型雷达首先是在被观察目标的身体上固定有一个很小的电子标签，该装置吸收谐波雷达系统发射出的电磁波以后，对电磁波进行特定的调制，返回一个是原来频率 2 倍或 3 倍的电磁波信号。由于谐波雷达接收系统只接收调制以后的电磁波，因此，可以自动屏蔽地物返回的杂波带来的干扰，通过比较相位，获得目标角度、径向速度等参数（Boiteau and Colpitts，2004；黄秀琴等，2012）。谐波昆虫雷达可以对迁飞性害虫的近地面行为进行监测，具有速度快、抗干扰能力强等优点。为避免标签重量影响昆虫的正常行为，标签重量不能超过观测目标体重的 10%（Boiteau and Colpitts，2001）。目前，最轻的电子标签为 0.3 mg（黄秀琴等，2012），因此，还很难应用谐波昆虫雷达开展小型昆虫的行为研究。此外，昆虫谐波雷达产品每次只能产生一个

频率电磁波，理论上只能跟踪 1 个昆虫的运动目标。而利用便携式昆虫谐波雷达，通过标记昆虫、转换跟踪角度和设置时间差异，同时跟踪目标数量也可以超过 30 个（桂连友等，2011）。通过其对昆虫行为的跟踪研究，可更好地了解其运动轨迹，解释其行为机制，为害虫防治提供新的理论基础和防治思路（桂连友等，2011；黄秀琴等，2012）。

1.2.4 天气雷达 天气雷达（Weather radar）是气象雷达的一种，主要根据云雾、雨、雪等降水粒子返回电磁波的特性，探测降水的空间分布和垂直结构，是监测和预警强对流天气的主要工具（胡明宝，2007），常见波段有 X 波段、S 波段和 C 波段。在晴空模式，天气雷达可以探测到鸟类、昆虫、蝙蝠等生物目标，有时还可以探测到生物目标的共同定向行为（Lack and Varley，1945；Horn and Kunz，2007；Dokter *et al.*，2018；焦热光等，2018）。由于昆虫体型较小，在空中迁飞时倾向于顺风飞行，利用单偏振天气雷达观测时，不易与大气湍流产生的回波进行区分，但利用双偏振雷达时，区别能力可以大幅度提升（Westbrook *et al.*，2014）。另外，由于天气雷达的库长较大，很难利用天气雷达对空中目标的数量进行估算。受气象信息服务需求的推动，天气雷达的发展非常迅速，很多国家都有专门的天气雷达监测网络。日益增加的气象雷达，特别是双极化的天气雷达，可以用于迁飞昆虫的监测（Chapman *et al.*，2011）。目前，芬兰成功利用天气雷达对禾谷缢管蚜、短绵斑蚜 *Euceraphis betulae*（Koch）和小菜蛾 *Plutella xylostella*（Linnaeus）开展了监测预警（Nieminen *et al.*，2000）。

2 预警技术

迁飞性害虫预警工作非常复杂，主要分为本地预警和异地预警。本地预警是指本地监测到迁飞昆虫时，在判断迁飞性害虫是否降落、降落后是否再次起飞及降落后的适生性以后，适时发出成灾风险信息。异地预警是指根据发生地与虫源的关系，综合利用虫源地的种群数量、风场分析、轨迹分析分析结果、迁入地的未来天气情况等，判断迁飞性昆虫的降落地和成灾风险（翟保平，2010）。

轨迹分析是迁飞性害虫监测预警中最常用的一种技术。轨迹分析原本是气象学上一种计算空气质点在空间运行路径的方法。由于昆虫体型小、重量轻、飞行速度慢，因此，当迁飞个体在适宜的气象条件下进入巡航高度后，也可以将迁飞个体当成惰性粒子，利用轨迹分析模型推断迁飞性害虫的虫源地、途径区域和降落地点（程极益，1994）。目前，轨迹分析技术已经成为推断害虫迁入地的一种重要手段，在害虫预测预报发挥着重要作用（张智，2013）。国内分析迁飞性害虫的轨迹时，应用最多的是 HYSPLIT（Hybird single-particle lagrangian integrated trajectory）模型。该模型属于拉格朗日气象模型，由美国海洋大气中心（NOAA）以及澳大利亚气象局联合开发，能根据不同的地表形态，从三维角度来计算空气粒子的移动轨迹，并且预测空气粒子的扩散及沉降（Draxler *et al.*，2014）。HYSPLIT 模型可以使用多种同化模式输出的分析场资料以及数值天气预测模式产生的预报场资料，例如 WRF（Weather Research & Forecasting Model）等。除了 HYSPLIT 模型以外，常见的轨迹分析模型还有 FLEXPART 和 NAME，两者都属于拉格朗日气象模型。英国洛桑试验站使用 NAME 进行轨迹分析时，还考虑了昆虫的自身飞行行为参数（Chapman *et al.*，2010）。

风场分析技术主要利用 GrADS 软件，基于美国国家环境预报中心（National Centers for Environmental Prediction，NCEP）和美国国家大气研究中心（National Center forAtmospheric Research，NCAR）网站上的高空风场数据，对空中垂直风速、水平风速和风向进行分析，以判断空中风场对迁飞的适应性。如果遇到下沉气流，迁飞害虫的降落概率就会增加（张智，2013）。

3 应用展望

我国是迁飞性害虫频发的国家之一，迁飞性害虫对我国粮食生产的影响非常巨大。2020 年，农业农村部公布的一类农作物病虫害名录中，迁

飞性害虫占 41.1%（中华人民共和国农业农村部公告第 333 号，2020）。此外，棉铃虫、小菜蛾 *Plutella xylostella*、二点委夜蛾、甜菜夜蛾 *Spodoptera exigua* 等都属于迁飞性或兼性迁飞害虫（封洪强，2003；张云慧，2008；张智等，2013），被山东、河北等农业大省列入二类农作物病虫害名录。迁飞性害虫具有突发性、暴发性和毁灭性的发生特点，虽然人类在与其长期斗争的过程中，探索出很多有价值的监测预警手段，也初步掌握其发生规律，但是要想做到精准的监测预警还需要破除诸多瓶颈。

第一，单一监测手段还存在很多缺点。探照灯诱虫器可以获得空中迁飞种群的动态，但是高空探照灯诱虫种类多、虫量大（张云慧，2008；张智，2013），使用探照灯诱虫器监测，需要监测人员具备丰富的识别经验，具有足够的耐心和热情来完成各种害虫的分拣、鉴定和计数。值得注意的是一般诱虫灯的诱虫谱都非常广，在诱杀害虫同时，还诱集大量的天敌昆虫，如隶属于膜翅目赤眼蜂科（Trichogrammatidae）、姬蜂科（Ichneumqnidae）和脉翅目草蛉科（Chrysopidae）的昆虫，因此，许多学者建议，在自然生态条件好、生物多样性高的地区最好不要大规模使用灯光诱杀（张广学等，2004）。此外，灯光诱集仅能获得种类和数量，不能获得其在空中飞行的高度和方向，不能为迁飞性害虫的预测模型提供必要飞行参数。性诱虽然专一性强，智能化的性诱监测手段也实现了远程传输（刘万才，2017），但是性诱仅能诱集雄虫，而生产中最重要的是获得雌虫虫情。卵巢解剖技术方面，由于卵巢发育是连续的状态，卵巢分级是根据经验人为划分的，大多数分级标准大多只是文字描述及典型图片，缺乏各级别间过渡状态和临界状态的详细说明，多数基层工作者难以掌握。在空中取样方面，吸虫塔仅能吸取小型昆虫，而且取样高度有限，而其他空中网捕手段，飞行动力是最急需解决的难题之一。如果使用气艇或风筝作为飞行动力，遇大风会有脱系、设备损坏、人员受伤等方面的风险。使用无人机时，受电池容量的限制，续航能力有限。另外，任何一种飞行器，运行都需要申请专门的空域许可。昆虫雷达具有很多优点，但是目前，其目标识别能力也有待加强，软件解算的自动化也有待提高。

第二，预警模拟仍然停留在研究层面。目前，很多轨迹分析都是基于历史风场资料（张云慧，2008；张智等，2012；刘永强，2015），这有助于探索迁飞规律，开展相关研究，但距离指导生产防控还有一段很长的路要走。

第三，各部门间缺乏协作。迁飞性害虫的监测预警涉及多门学科，也涉及多个部门，最相关的就是气象部门。当前，气象领域做数值预报的不关注迁飞性害虫，而做迁飞性害虫监测无法获取数值场。由于无法获取实时的数值场，迁飞性害虫监测预警还不能像天气预报一样开展更为准确的监测预警。

迁飞性害虫事关我国粮食生产安全，做好迁飞性害虫监测预警任重道远。首先，要筑牢监测基础。从国家层面要加强顶层设计，在迁飞性害虫的通道设置监测点，长期给予运行经费支持，确保开展长期系统监测，获得种群动态数据，以便研究气候变化、耕作制度变化、土地利用变化等与迁飞性害虫种群变化之间的关系，为制定治理策略提供依据。其次，监测手段要朝着智能化和网络化方向发展（刘万才，2017；封洪强和姚青，2018；张鹿平等，2018）。随着人工智能的发展，迁飞性害虫监测设备研发时，要优先引入远程传输技术和自动害虫识别技术，提高工作效率（刘万才，2017；封洪强和姚青，2018）。昆虫雷达要增加网络拼接功能，尽快建立雷达网络，以便开展联网监测，扩大监测范围（张智等，2017a，2017b；张鹿平等，2018）。第三，加强协作。在现有框架下，昆虫学专家、气象专家、雷达专家要加强合作，创新开展工作，提高监测预警水平。另外，区域间也要加强协作，最好能在源头控制迁飞性害虫，减轻迁入地的防控压力。

参考文献 (References)

Bian L, Sun XL, Gao Y, Luo ZX, Jin S, Zhang ZQ, Chen ZM, 2012. Research on the light tropism of insects and the progress in application. *Chinese Journal of Applied Entomolgy*, 49(6): 1677–1686. [边磊, 孙晓玲, 高宇, 罗宗秀, 金珊, 张正群, 陈

宗懋, 2012. 昆虫光趋性机理及其应用进展. 应用昆虫学报, 49(6): 1677–1686.]

Boiteau G, Colpitts B, 2004. The potential of portable harmonic radar technology for the tracking of beneficial insects. *International Journal of Pest Management*, 50(3): 233–242.

Boiteau G, Colpitts B, 2001. Electronic tags for the tracking of insects in flight: Effect of weight on flight performance of adult Colorado potato beetles. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 100(2): 187–193.

Cao WJ, 2006. Studies on genetic diversity and migration trajectory of different geographic populations of the meadow moth *Loxostege sticticlis*. Master dissertation. Yangzhou: Yangzhou University. [曹卫菊, 2006. 草地螟不同地理种群的遗传多样性及迁飞轨迹分析. 硕士学位论文. 扬州: 扬州大学.]

Chapman JW, Nesbit RL, Burgin LE, Reynolds DR, Smith AD, Middleton DR, Hill JK, 2010. Flight orientation behaviors promote optimal migration trajectories in high-flying insects. *Science*, 327(5966): 682–685.

Chapman JW, Drake VA, Reynolds DR, 2011. Recent insight from radar studies of insect flight. *The Annual Review of Entomology*, 56(3): 37–56.

Chapman JW, Reynolds DR, Smith AD, Smith ET, Woiwod IP, 2004. An aerial netting study of insects migrating at high altitude over England. *Bulletin of Entomological Research*, 94(2): 123–136.

Chapman JW, Smith AD, Woiwod IP, Reynolds DR, Riley JR, 2002. Development of vertical-looking radar technology for monitoring insect migration. *Computers and Electronics in Agriculture*, 35(2/3): 95–110.

Chen RC, Ding JH, Tan HQ, Hu GW, 1989. Insect Migration. Beijing: China Agriculture Press. 364–373. [陈若篪, 丁锦华, 谈涵秋, 胡国文, 1989. 迁飞昆虫学. 北京: 中国农业出版社. 364–373.]

Chen Y, JiangYY, Liu JX, Lu Y, Meng ZP, Chen J, Tang JH, 2012. Mark-release-recapture validation of the migration of the beet webworm, *Loxostege sticticalis* (Lepidoptera: Pyralidae), in northern China. *Acta Entomologica Sinica*, 55(2): 176–182. [陈阳, 姜玉英, 刘家骧, 吕英, 孟正平, 陈静, 唐继洪, 2012. 标记回收法确认我国北方地区草地螟的迁飞. 昆虫学报, 55(2): 176–182.]

Cheng DF, Feng HQ, Wu KM, 2005. Scanning Entomological Radar and Insect Migration. Beijing: Science Press. 1–20. [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. 1–20.]

Cheng DF, Wu KM, Tian Z, Wen LP, Shen ZR, 2002. Acquisition and analysis of migration data from the digitised display of a scanning entomological radar. *Computers and Electronics in Agriculture*, 35(2/3): 63–75.

Cheng JY, 1994. Study on radar observations and trajectory of the autumn migration of brown planthopper. *Journal of Remote Sensing*, 9(1): 51–56. [程极益, 1994. 褐飞虱迁飞的雷达观测与轨迹研究. 遥感学报, 9(1): 51–56.]

Deng WX, Xu KJ, Rong XL, Xu JZ, 1980. A general survey on seasonal migrations of *Nilaparvata lugens* and *Sogatella furcifera* (Homoptera: Delphacidae) by means of airplane collections. *Entomological Knowledge*, 17(3): 97–102. [邓望喜, 许荣许, 荣秀兰, 许甲柱, 1980. 飞机网捕褐稻虱及白背飞虱的研究初报. 昆虫知识, 17(3): 97–102.]

Dingle H, DrakeVA, 2007. What is migration? *Bioscience*, 57(2): 113–121.

Dokter AM, Farnsworth A, Fink D, Ruiz-Gutierrez V, Hochachka WM, La Sorte FA, Robinson OJ, Rosenberg KV, Kelling S, 2018. Seasonal abundance and survival of North America's migratory avifauna determined by weather radar. *Nature Ecology & Evolution*, 2(10): 1603–1609.

Drake VA, Harman IT, Wang HK, 2002. Insect monitoring radar: Stationary-beam operating mode. *Computers and Electronics in Agriculture*, 5(2/3): 111–137.

Draxler R, Stunder B, Rolph G, Stein A, Taylor A, 2014. HYSPLIT4 user's Guide Version 4 - Last Revision: September 2014. University Research Court College Park, Maryland: National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Air Resources Laboratory (ARL). https://www.arl.noaa.gov/data/web/models/hysplit4/win95/user_guide.pdf

Farrow RA, Dowse JE, 1984. Method of using kites to carry tow nets in the upper air for sampling migrating insects and its application to radar entomology. *Bulletin of Entomological Research*, 74(1): 87–95.

Feng HQ, 2003. Community aloft and radar observation of seasonal migration of insects in northern China. Doctroal dissertation. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences. [封洪强, 2003. 华北地区空中昆虫群落及昆虫季节性迁移的雷达观测. 博士学位论文. 北京: 中国农业科学院.]

Feng HQ, 2009. Review of development of radar entomology in 40 years and related future. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 38(9): 121–126. [封洪强, 2009. 雷达昆虫学 40 年研究的回顾与展望. 河南农业科学, 38(9): 121–126.]

Feng HQ, Yao Q, 2018. Automatic identification and monitoring technologies of agricultural pest insects. *Plant Protection*, 44(5): 127–133. [封洪强, 姚青, 2018. 农业害虫自动识别与监测技术, 植物保护, 44(5): 127–133.]

Fu XW, 2015. Study on the community structure and population dynamics of migratory insects across the Bohai strait. Doctroal dissertation. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences. [付晓伟, 2015. "渤海湾"迁飞性昆虫群落结构既种群动态研究. 博士学位论文. 北京: 中国农业科学院.]

Geng JG, 1982. Application of mark-release-capture in migration.

Entomological Knowledge, 19(4): 34–35. [耿济国, 迁飞昆虫标记释放方法的应用. 昆虫知识, 19(4): 34–35.]

Gong P, Yang XW, Tan SJ, Chen XF, 2001. Molecular genetic markers and application in entomology. *Entomological Knowledge*, 38(2): 86–91. [龚鹏, 杨效文, 谭声江, 陈晓峰, 2001. 分子遗传标记技术及其在昆虫科学中的应用. 昆虫知识, 38(2): 86–91.]

Gui LY, Huang XQ, Li CR, 2011. The development and the use of insect harmonic radar. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 48(3): 732–738. [桂连友, 黄秀琴, 李传仁, 2011. 昆虫谐波雷达的发展和利用. 应用昆虫学报, 48(3): 732–738.]

Guo YY, 2006. Illustrations with real examples of using ecological regulation strategies against crop pests in China. *Plant Protetion*, 32(2): 1–4. [郭予元, 2006. 我国农作物病虫害生态调控实例分析. 植物保护, 32(2): 1–4.]

Hagler JR, Jackson CG, 2001. Methods for marking insects: Current techniques and future prospects. *Annual Review of Entomology*, 46: 511–543.

Hendrix III WH, Showers WB, 1992. Tracing black cutworm and armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) northward migration using Pithecellobium and Calliandra pollen. *Environmental Entomology*, 21(5): 1092–1096.

Hilmar F, 2007. The natural fingerprint of stable isotopes-use of IRMS to test food authenticity. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 388(3): 541–544.

Holland RA, Wikelski M, Wilcove DS, 2006. How and why do insects migrate? *Science*, 313(5788): 794–796.

Horn JW, Kunz TH, 2007. Analyzing NEXRAD doppler radar images to assess nightly dispersal patterns and population trends in Brazilian free-tailed bats (*Tadarida brasiliensis*). *Integrative and Comparative Biology*, 48(1): 24–39.

Hu G, Lim KS, Horitz N, Clark SJ, Reynolds DR, Sapir N, Chapman JW, 2016. Mass seasonal bioflows of high-flying insect migrants. *Science*, 354(6319): 1584–1587.

Hu MB, 2007. Detection and Application of Weather Radar. Beijing: China Meteorological Press. 1–17. [胡明宝, 2007. 天气雷达探测与应用. 北京: 气象出版社. 1–17.]

Huang XQ, Li CR, Wang FL, Gui LY, 2012. Advance in insect harmonic radar tags. *Journal of Enviornmental Entomology*, 34(4): 504–514. [黄秀琴, 李传仁, 王福莲, 桂连友, 2012. 昆虫谐波雷达的电子标签研究进展. 环境昆虫学报, 34(4): 504–514.]

Jia HR, 2020. Migratory Patterns of aphidophagous hoverfly *Episyrphus balteatus* (Diptera: Syrphidae) in China. Doctroal dissertation. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences. [贾慧茹, 2020. 黑带食蚜蝇迁飞模式研究. 博士学位论文. 北京: 中国农业科学院.]

Jia PH, 1985. Primary report of the long distance migratory marked moths of *Agrotis ipsilon*. *Plant Protection*, 11(2): 20. [贾佩华, 1985. 小地老虎远距离迁飞标记回收结果简报. 植物保护, 11(2): 20.]

Jiang CX, Qi HH, Yang XL, Zhang YH, Cheng DF, 2001. Using vertical pointing searchlight trap to monitor the population dynanics of *Cnarphalocrocis medinalis* Guare. *Journal of Plant Protection*, 38(3): 193–201. [蒋春先, 齐会会, 杨秀丽, 张云慧, 程登发, 2011. 稻纵卷叶螟种群动态变化的探照灯诱虫器监测. 植物保护学报, 38(3): 193–201.]

Jiang YY, Liu J, Yang JJ, Zhao WX, Yin L, Liu Y, Ye SF, Qin BQ, Song LD, 2020. Trapping effect of searchlight-trap and light trap for the moth of *Spodoptera frugiperda* in 2019. *Plant Protection*, 46(3): 118–122, 156. [姜玉英, 刘杰, 杨俊杰, 赵文新, 尹丽, 刘媛, 叶少锋, 覃宝勤, 宋梁栋, 2020. 2019 年草地贪夜蛾灯诱监测应用效果. 植物保护, 46(3): 118–122, 156.]

Jiang YY, Liu J, Zeng J, 2016. Using vertical-pointing searchlight-traps to monitor population dynamics of the armyworm *Mythimna separate* (Walker) in China. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 53(1): 191–199. [姜玉英, 刘杰, 曾娟, 2016. 高空测报灯监测粘虫区域性发生动态规律探索. 应用昆虫学报, 53(1): 191–199.]

Jiang YY, Liu J, Zeng J, 2018. Using national searchlight trap network to monitor population dynamics of the oriental armyworm in China. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 53(1): 191–199. [姜玉英, 刘杰, 曾娟, 2018. 我国粘虫周年区域动态规律的监测. 应用昆虫学报, 53(1): 191–199.]

Jiao RG, Zhang Z, Shi GY, Zhang YH, 2018. Analysis of the echoes of migrating insects detected by Beijing doppler weather radar. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 55(2): 177–185. [焦热光, 张智, 石广玉, 张云慧, 2018. 北京多普勒天气雷达上的昆虫雷达回波分析. 应用昆虫学报, 55(2): 177–185.]

Johnson CG, 1964. Physiological factors in insect migration by flight. *Nature*, 198(4879): 423–427.

Lack D, Varley GC, 1945. Detection of birds by radar. *Nature*, 156(3963): 446.

Li GB, Wang HX, Hu WX, 1964. The armyworm seasonal migration damage hypothesis and marker recovery test. *Jonrnal of Plant Protecrion*, 3(2): 101–109. [李光博, 王恆祥, 胡文绣, 1964. 粘虫季节性迁飞为害假說及标記回收試驗. 植物保护学报, 3(2): 101–109.]

Li Z, Xie BY, Ji R, Li DM, 2004. Applications of stable isotope analysis in insect ecology. *Acta Entomologica Sinica*, 47(3): 394–399. [李哲, 谢宝瑜, 季荣, 李典谟, 2004. 稳定同位素分析在昆虫生态研究中的应用. 昆虫学报, 47(3): 394–399.]

Lin PJ, Zhang Z, Wang XL, Liu DX, Hu G, Zhang YH, 2020. Population dynamics and trajectory simulation of migratory moths of *Spodoptera frugiperda* in Yanqing of Beijing in 2019. *Journal of Plant Protection*, 47(4): 758–769. [林培炯, 张智, 王旭龙, 刘冬雪, 胡高, 张云慧, 2020. 2019 年北京市延庆区草地贪夜蛾种群动态与虫源分析. 植物保护学报, 47(4):

758–769.]

Lingren PD, Bryant Jr VM, Raulston JR, Pendleton M, Westbrook J, Jones GD, 1993. Adult feeding host range and migratory activities of corn earworm, cabbage looper and celery looper (Lepidoptera: Noctuidae) moths as evidenced by attached pollen. *Journal of Economic Entomology*, 86(5): 1429–1439.

Liu WC, 2017. Research progress on modern tools for crop pests forecasting in China. *China Plant Protection*, 37(9): 29–33. [刘万才, 2017. 我国农作物病虫害现代测报工具研究进展. 中国植保导刊, 37(9): 29–33.]

Liu YQ, 2015. Migration and natal origins of *Agrotis ipsilon* (Lepidoptera Noctuidae) over the Bohai sea. Doctroal dissertation. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences. [刘永强, 2015. 小地老虎跨海迁飞规律与虫源地分析. 博士学位论文. 北京: 中国农业科学院.]

Liu HG, Liu ZJ, Zhu WH, 1983. Results of net trapping of brown planthoppers on China Seas. *Acta Entomologica Sinica*, 26(1): 109–113. [刘浩光, 刘振杰, 祝为华, 1983. 我国海上网捕褐稻虱的结果. 昆虫学报, 26(1): 109–113.]

Magor J, 1995. Forecasting migrant insect pests//Drake VA, Gatehouse AG (eds.). Insect Migration: Tracking Resources Through Space and Time. Cambridge, UK: Cambridge University Press. 399–426.

Miao J, Wu YQ, Yu ZX, Chen HS, Liu ST, Jiang YL, Dun Y, 2011. Trajectory analysis of long-distancedispersal of the wheat midge, *Sitodiplosis mosellana* (Géhin) (Diptera: Cecidomyiidae) with air current. *Acta Entomologica Sinica*, 54(4): 432–436. [苗进, 武予清, 郁振兴, 陈华爽, 刘顺通, 蒋月丽, 段云, 2011. 麦红吸浆虫随气流远距离扩散的轨迹分析. 昆虫学报, 54(4): 432–436.]

Miao L, Zheng JF, Cheng QQ, Jia ZL, Wang HT, Liang HB, Zhang H, Li X, Zhang JH, Jiang LY, Qin QL, Qiao GX, 2011, Construction of a preliminary network of suction traps to monitor the migration of alate aphids in China. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 48(6): 1874–1878. [苗麟, 郑建峰, 程清泉, 贾占录, 王红托, 梁红斌, 张寰, 李瑄, 张继红, 姜立云, 秦启联, 乔格侠, 2011. 基于吸虫塔 (Suction trap) 的蚜虫测报预警网络的构建. 应用昆虫学报, 48(6): 1874–1878.]

Nieminen M, Leskinen M, Helenius J, 2000. Doppler radar detection of exceptional mass-migration of aphids into Finland. *International Journal of Biometeorology*, 44(4): 172–181.

Qi GJ, Lu F, Hu G, Wang FY, Gao Y, Lü LH, 2011. The application of ovarian dissection in the research on migratory insects in China. *China Plant Protection*, 31(7): 18–22. [齐国君, 芦芳, 胡高,王凤英, 高燕, 吕利华, 2011. 卵巢解剖在我国迁飞昆虫研究中的应用. 中国植保导刊, 31(7): 18–22.]

Qi HH, Jiang CX, Zhang YH, Yang XL, Cheng DF, 2014. Radar observations of the seasonal migration of brown planthopper *Nilaparvata lugens* (Stål) in Southern China. *Bulletin of Entomological Research*, 104 (6): 731–741.

Qi HH, Zhang YH, Wang J, Peng H, Zhang Z, Cheng DF, 2014. Rhythm of rice planthoppers and *Cyrtorhinus lividipennis* to the searchlight trap. *Acta Phytophylacica Sinica*, 41(3): 277–284. [齐会会, 张云慧, 王健, 彭赫, 张智, 程登发, 2014. 稻飞虱及黑肩绿盲蝽在探照灯下的扑灯节律. 植物保护学报, 41(3): 277–284.]

Qi HH, Zhang YH, Sun JR, Cheng DF, 2009. Methods in studying insect migration. The 2009 Symposium of Chinese Plant Protection Society. Beijing: 400–406. [齐会会, 张云慧, 孙京瑞, 程登发, 2009. 迁飞性昆虫的研究方法. 中国植物保护学会2009 年学术年会论文集. 北京: 400–406.]

Qiao HJ, Zheng ZM, Lu RS, 2000. Research progress of isozymes of Noctuidae. *Entomological Knowledge*, 37(6): 374–377. [乔海娟, 郑哲民, 芦荣胜, 2000. 夜蛾科昆虫同工酶研究概况. 昆虫知识, 37(6): 374–377.]

Reynolds DR, Mukhopadhyay S, Riley JR, Das BK, Nath PS, Mandal SK, 1999. Seasonal variation in the windborne movement of insect pests over northeast India. *International Journal of Pest Management*, 45(3): 195–205.

Riley JR, 1992. A millimetric radar to study the flight of small insects. *Electronics & communication Engineering Journal*, 4(1): 43–48.

Rose DJW, Page WW, Dewhurst CF, Riley JR, Reynolds DR, Pedgley DE, Tucker MR, 1985. Downwind migration of the African armyworm moth, *Spodoptera exempta*, studied by mark-and capture and by radar. *Ecological Entomology*, 10(3): 299–313.

Satterfield DA, Sillett TS, Chapman JW, Altizer S, Marra PP, 2020. Seasonal insect migrations: Massive, influential and overlooked. *Front Ecology Enviornment*, doi:10.1002/fee.2217.

Shao TY, Wang KQ, Liu XL, Liu SZ, Zhu CD, 2015. Current research state and progress of utilizing suction trap for insect biodiversity. *Heilongjiang Agricultural Science*, (12): 170–173. [邵天玉, 王克勤, 刘兴龙, 刘思竹, 朱朝东, 2015. 利用吸虫塔研究昆虫生物多样性的现状与展望. 黑龙江农业科学, (12): 170–173.]

Showers WB, Smelser RB, Keaster AJ, Whitford F, Robinson JF, 1989. Recapture of marked black cutworm (Lepidoptera: Noctuidae) males after long-range transport. *Environmental Entomology*. 18(3): 447–458.

Smith AD, Riley JR, 1996. Signal processing in a novel radar system for monitoring insect migration. *Computers and Electronics in Agriculture*, 15(4): 267–278.

Southwood TRE, 1962. Migration of terrestrial arthropods in relation to habitat. *Biological Reviews*, 37(2): 171–211.

Taylor LR, French RA, Macaulay EDM, 1973. Low-altitude migration and diurnal flight periodicity: The importance of *Plusia gamma* L. (Lepidoptera: Plusiidae). *Journal of Animal Ecology*, 42(3): 751–760.

The 333th Bulletin of Ministry of Agriculture and Rural Affairs of

the People's Republic of China, 2020. http://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/202009/t20200917_6352227.htm. [中华人民共和国农业农村部公告第 333 号, 2020. http://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/202009/t20200917_6352227.htm.]

Wang DF, Chen XL, You MS, 2006. Microsatellite DNA marker and its applications in entomology. *Entomology Journal of East China*, 15(2): 89–95. [王定锋, 陈小龙, 尤民生, 2006. 微卫星 DNA 标记技术及其在昆虫学上的应用. 华东昆虫学报, 15(2): 89–95.]

Westbrook JK, Eyster RS, Wolf WW, 2014. WSR-88D doppler radar detection of corn earworm moth migration. *International Journal of Biometeorogy*, 58(5): 931–940.

Williams CB, 1957. Insect migration. *Annual Review of Entomology*, 2: 163–180.

Wood CR, Connor EJO, Hurley RA, Reynolds DR, lllingworth AJ, 2009. Cloud-radar observations of insects in the UK convective boundary layer. *Meteorological Applications*, 16(4): 491–500.

Xu G, Guo YY, Wu KM, 1999. Analysis of pollens adhering to cotton bollworm moths (Lepidoptera: Noctuidae). *Scientia Agricultural Sinica*, 32(6): 63–68. [徐广, 郭予元, 吴孔明, 棉铃虫成虫携带花粉的分析. 中国农业科学, 32(6): 63–68.]

Xu G, Guo YY, Wu KM, 2000. Allozyme variations within and among five geographic populations of *Helicoverpa armigera*. *Acta Entomologica Sinica*, 43(1): 63–69. [徐广, 郭予元, 吴孔明, 2000. 棉铃虫地理种群的等位酶变异. 昆虫学报, 43(1): 63–69.]

Yang XL, Chen L, Cheng DF, Sun JR, 2008. Primary application of millimetric scanning radar to tracking high-flying insects in southern China. *Plant Protection*, 34(2): 31–36. [杨秀丽, 陈林, 程登发, 孙京瑞, 2008. 毫米波扫描昆虫雷达空中昆虫监测的初步应用. 植物保护, 34(2): 31–36.]

Zhai BP, 2001. Entomological radar: From research to pratice. *Journal of Remote Sensing*, 5(3): 231–240. [翟保平, 2001. 昆虫雷达: 从研究型到实用型. 遥感学报, 5(3): 231–240.]

Zhai BP, 2010. Progress and perspectives of crop pest forecasting in China. *Plant Protection*, 36(4): 10–14. [翟保平, 2010. 农作物病虫测报学的发展与展望. 植物保护, 36(4): 10–14.]

Zhang GX, Zheng G, Li XJ, Bu J, 2004. Discussion of using frequencey oscillation pest killing lamps from the angle of protecting biodiversity. *Entomological Knowledge*, 41(6): 532–535. [张广学, 郑国, 李学军, 卜军, 2004. 从保护生物多样性角度谈频振式杀虫灯的应用. 昆虫知识, 41(6): 532–535.]

Zhang LP, Zhang Z, Ji R, Jiang YY, Zhang YY, Feng HQ, Yang JG, Xie AT, Zhou CJ, 2018. New technological developments in the development of entomological radar. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 55(2): 153–159. [张鹿平, 张智, 季荣, 姜玉英, 张云慧, 封洪强, 杨建国, 谢爱婷, 周春江, 2018. 昆虫雷达建制技术的发展方向. 应用昆虫学报, 55(2): 153–159.]

Zhang SC, Li ZY, Xiao C, 2006. Application of serveral molecular markers in entomology. *Acta Agriculture Jiangxi*,18(4): 66–71. [张四才, 李正跃, 肖春, 2006. 几种常用分子标记及其在昆虫学研究中的应用. 江西农业学报, 18(4): 66–71.]

Zhang YH, 2008. Radar observation and population analysis of migratory insects in north and northeast of China. Doctroal dissertation. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences. [张云慧, 2008. 东北与华北地区迁飞昆虫的垂直昆虫雷达监测与虫源分析. 博士学位论文. 北京: 中国农业科学院.]

Zhang YH, Chen L, Cheng DF, Tian Z, Sun JR, Jiang YY, Zhang YJ, 2008. Nocturnal migration of Coleoptera: Carabidae in North China. *Agricultural Sciences in China*, 7(8): 977–986.

Zhang Z, 2013. Monitoring and population dynamics analyses of important migratory pest insects in northern China. Doctoral dissertation. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences. [张智, 2013. 北方地区重大迁飞性害虫的监测与种群动态分析. 博士学位论文. 北京: 中国农业科学院.]

Zhang Z, Zhang YH, Jiang YY, Shi BC, Cheng DF, Jiao RG, 2012. Progress in vertical-looking insect monitoring radar. *Acta Entomologica Sinica*, 55(7): 849–859. [张智, 张云慧, 姜玉英, 石宝才, 程登发, 焦热光, 2012. 垂直监测昆虫雷达研究进展. 昆虫学报, 55(7): 849–859.]

Zhang Z, Zhang YH, Jiang YY, Wang J, Xie AT, Yang JG, 2017a. Development of radar entomological radar in China and prospects for future application. *China Plant Protection*, 37(4): 27–32. [张智, 张云慧, 姜玉英, 王健, 谢爱婷, 杨建国, 2017a. 我国昆虫雷达发展现状与应用展望. 中国植保导刊, 37(4): 27–32.]

Zhang Z, Zhang YH, Jiang YY, Xie AT, Wei SJ, Cheng DF, Jiang JW, Zhang FM, Peng H, 2013. Monitoring of the population dynamics of *Proxenus lepigone* (Lepidoptera: Noctuidae) in north China and analysis of the source of its populations in northern Beijin. *Acta Entomologica Sinica*, 56(10): 1189–1202. [张智, 张云慧, 姜玉英, 谢爱婷, 魏书军, 程登发, 蒋金炜, 张方梅, 彭赫, 2013. 华北二点委夜蛾种群动态监测及北京北部地区虫源性质分析. 昆虫学报, 56(10): 1189–1202.]

Zhang Z, Zhang YH, Jiang YY, Zhang LP, Cheng DF, 2017b. Development of radar entomology and related prospects for future application. *Plant Protection*, 43(5): 18–26. [张智, 张云慧, 姜玉英, 张鹿平, 程登发, 2017. 雷达昆虫学研究进展及应用前景, 植物保护, 43(5): 18–26.]

Zhang Z, Zhang YH, Liu J, Jiang SS, Tang QB, Li XR, Li WZ, Cheng DF, Qi JF, 2018. Population dynamics and temporal patterns of abundance of *Mythimna separata* during migration. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 55(5): 834–842. [张智, 张云慧, 刘杰, 江珊珊, 汤清波, 李祥瑞, 李为争, 程登发, 祁俊锋, 2018. 粘虫迁飞的种群动态监测与夜间扑灯节律研究. 应用昆虫学报, 55(5): 834–842.]