我国农作物重大迁飞性害虫发生为害及监测预报技术*

姜玉英** 刘 杰 曾 娟 黄 冲 张 涛

（全国农业技术推广服务中心，北京 100125）

摘 要 文章概述了我国一类农作物病虫害中 7 种（类）迁飞性害虫发生为害概况，即是我国三大粮食作物上为害最为严重的害虫，发生区域涵盖我国粮食作物种植区，且存在国内外虫源交流；概述了成虫种群监测、雌蛾卵巢发育分级、翅型调查、异地预报等迁飞性害虫监测预报技术；提出了需要对迁飞性害虫成灾机理、智能化监测工具和迁飞关键路径进行研究，努力建成全国空天地一体化监测网络，实现迁飞性害虫的精准预报的建议。

关键词 一类农作物病虫害；重大迁飞性害虫；种群监测；预报技术

Occurrence of, and damage caused by, major migratory pests and techniques for monitoring and forecasting these in China

JIANG Yu-Ying** LIU Jie ZENG Juan HUANG Chong ZHANG Tao

(National Agro-Technical Extension and Service Center, Beijing 100125, China)

Abstract This paper summarizes the occurrence, and damage caused by, the seven migratory insect pests that are the most serious pests of three major food crops in China. These pests are found throughout China's crop planting areas and migrate to and from other countries. Techniques for monitoring adult populations, using ovarian development to classify female moths, wing type investigation and remote forecasting, are summarized. Accurate prediction of the occurrence of these pests requires development of an integrated national ground and aerial monitoring network, the study of disaster mechanisms, use of intelligent monitoring tools and the identification of critical migration pathways.

Key words class Ⅰ crop diseases and insect pests; major migratory pests; population monitoring; forecasting technology

虫害是农业生产上最重要的制约因素，由于其发生种类多、种群数量大、适生能力强，往往会造成较大损失。据联合国粮农组织统计，全世界每年因虫害造成潜在作物产量损失约为 30%。虫害中尤以迁飞性类群危害最大，往往引起短时间、大区域暴发，如不及时防控会造成重大灾害。我国地处东亚季风区，是著名的东亚昆虫迁飞场（张志涛，1992），地理位置、地形地貌、气候特点、植被和作物种植制度为迁飞性害虫提供了优越的适生条件，因此，迁飞性害虫为害更加突出，是我国农作物生长威胁最大的有害生物。2020 年 9 月 15 日，中华人民共和国农业农村部公告（第 333 号）公布了一类农作物病虫害名录，共计 17 种（类），其中 10 种（类）虫害中，草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda*（Smith）、飞蝗 *Locusta migratoria* Linnaeus（飞蝗和其它迁移性蝗虫）〕、草地螟 *Loxostege sticticalis* Linnaeus、粘虫（东方粘虫 *Mythimna separate*（Walker）和劳氏粘虫 *Leucania lorryi* Duponchel）、稻飞虱（褐飞虱 *Nilaparvata lugens*（Stål）和白背飞虱

*资助项目 Supported projects：国家重点研发计划（2019YFD0300102）

**通讯作者 Corresponding author，E-mail：jiangyuying@agri.gov.cn

收稿日期 Received：2021-02-01；接受日期 Accepted：2021-03-01

Sogatella furcifera（Horváth））、稻纵卷叶螟 *Cnaphalocrocis medinalis*（Guenée）、小麦蚜虫（荻草谷网蚜 *Sitobion miscanthi*（Takahashi）、禾谷缢管蚜 *Rhopalosiphum padi*（Linnaeus）和麦二叉蚜 *Schizaphis graminum*（Rondani））7 种（类）为迁飞性害虫，突显出其特殊重要地位。总结一类农作物病虫害中迁飞性害虫（简称重大迁飞性害虫）在我国的发生危害特点和监测预报技术，对促进害虫预报准确率的提高，实现害虫科学防治、保障粮食等农作物丰收具有现实意义。

1　发生为害概况

1.1　重大迁飞性害虫是我国三大粮食作物的重要害虫

7 种（类）迁飞性害虫涉及至少 13 个昆虫种（表 1），其中，褐飞虱为单食性害虫，只能在水稻和普通野生稻上取食和繁殖后代；其它 12 种都是多食性害虫。其中，草地贪夜蛾寄主植物种类最多，国外记载达 76 科 350 余种，我国 2019-2020 年调查发现禾本科（玉米、甘蔗、高粱、小麦、薏米、大麦、青稞、谷子、水稻、糜子、燕麦）、十字花科（油菜、甘蓝、白菜）、茄科（马铃薯、辣椒）、姜科（莪术、生姜）、豆科（花生）、芭蕉科（香蕉）、竹芋科（竹芋）等 7 科 21 种农作物、8 种禾本科草类受害，其中为害玉米的面积占 98%。在多食性害虫中，除草地螟喜食阔叶植物外，其余 11 种主要为害禾本科作物。东方粘虫 1985 年以前主要为害小麦，之后为害玉米比率上升，1995 年以后，为害玉米比率大于小麦（姜玉英等，2014），近几年玉米发生面积占比在 7 成以上（刘杰等，2018，2020）。生产上观测，近些年种群上升明显的劳氏粘虫也主要为害玉米（郭松景等，2003）。白背飞虱、

表 1　重大迁飞性害虫取食为害作物种类

Table 1　Types of crops damaged by major migratory pests

害虫名称 Pest name	寄主植物数量 Number of host plants	我国主要为害作物种类 Main damage crops in China
草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* (Smith)	76 科 350 余种	玉米等
东亚飞蝗 *Locusta migratoria manilensis* (Meyen)	2 科几十种	小麦、玉米、水稻、甘蔗等禾本科作物，可为害棉花、大豆、蔬菜等
亚洲飞蝗 *Locusta migratoria migratoria* (Linnaeus)	2 科几十种	玉米、小麦、大麦等
西藏飞蝗 *Locusta migratoria tibetensis* Chen	2 科几十种	青稞、小麦、燕麦等
草地螟 *Loxostege sticticalis* Linnaeus	35 科 200 余种	甜菜、大豆、向日葵、马铃薯、麻类、蔬菜、药材等，玉米、小麦也为害
东方粘虫 *Mythimna separate* (Walker)	16 科 100 余种	玉米、小麦、水稻、谷子等禾本科作物
劳氏粘虫 *Leucania lorryi* Duponchel	–	玉米、小麦、大麦、水稻、甘蔗等禾本科作物
褐飞虱 *Nilaparvata lugens* (Stål)	1 科 2 种	水稻
白背飞虱 *Sogatella furcifera* (Horváth)	1 科近 10 种	水稻
稻纵卷叶螟 *Cnaphalocrocis medinalis* (Guenée)	1 科 10 多种	以水稻为主，大麦、小麦、甘蔗、粟等禾本科作物
荻草谷网蚜 *Sitobion miscanthi* (Takahashi)	2 科 10 多种	小麦、大麦、燕麦、水稻、高粱、玉米、甘蔗等禾本科作物
禾谷缢管蚜 *Rhopalosiphum padi* (Linnaeus)	2 科 10 多种	小麦、大麦、燕麦、水稻、高粱、玉米、甘蔗等禾本科作物
麦二叉蚜 *Schizaphis graminum* (Rondani)	2 科 10 多种	小麦、大麦、燕麦、水稻、高粱、玉米、甘蔗等禾本科作物

稻纵卷叶螟主要为害水稻，获草谷网蚜、禾谷缢管蚜和麦二叉蚜主要为害小麦，生产上两类害虫只在水稻和小麦上进行发生为害情况调查。3 种飞蝗除取食生境指示寄主芦苇外，还喜食玉米、小麦等禾本科植物；而在种群密度大，吃光其喜好寄主后，粘虫、飞蝗都饥不择食、可将所有绿色植物掠食一空，造成颗粒无收。因此，重大迁飞性害虫是我国水稻、小麦、玉米三大粮食作物的重要害虫。

1.2 重大迁飞性害虫是我国为害最重的害虫

据全国农业技术推广服务中心《全国植保专业统计资料》数据（表 2），7 种（类）重大迁飞性害虫年均发生面积为 6 453 万 hm^2，防治面积为 7 839 万 hm^2，造成的实际损失为 285 万吨，分别占全国病虫害总数的 2 成；防治后挽回的粮食损失 1 956 万吨，占病虫害总挽回粮食损失的 35%。稻飞虱、蚜虫分别是水稻和小麦上为害最重的害虫，发生面积、防治面积、挽回损失和实际损失均占水稻和小麦各种病虫害总数的 20% 以上，遇到严重发生年份占比更高，如 2006 年稻飞虱大发生，发生面积和防治面积占比分别达 36%和 40%，挽回损失和实际损失分别占 67%和 47%；2009 年小麦蚜虫发生和防治面积占比分别为 28%、31%，挽回损失和实际损失分别占 69% 和 49%。粘虫在玉米上年均发生面积占各寄主作物总发生面积的 65%，其中，重发的 2012 年发生面积和防治面积占玉米病虫害总数的 10%，挽回损失和实际损失分别占 27%和 15%。

1.3 重大迁飞性害虫涵盖我国粮食作物种植区

我国的气候特点决定作物种植区域，而寄主作物分布决定 7 种（类）重大迁飞性害虫的发生区域。2019-2020 年观测证明，草地贪夜蛾发生区是以玉米为寄主的时空分布，发生时序与玉米区种植期高度一致，冬季在南方冬玉米区越冬，春末迁入长江和江淮春玉米区，夏季迁入西北、黄淮和华北夏玉米区，8 月上旬可达东北南部春玉米区。稻飞虱、稻纵卷叶螟的迁入发生区域与我国水稻种植时序同样高度一致，每年由华南、江南、长江中下游、江淮稻区逐步北迁，严重年份在东北水稻产区发生为害，如 1987 年和 1991 年不仅南方稻区普遍严重发生，且沿黄河灌溉稻区、华北及东北局部以及川西北等罕见发生的地区，也遭受较重程度的危害（汤金仪等，1996）。2020 年 8 月黑龙江佳木斯东风区 200 hm^2 稻田发生白背飞虱为害（多在 1 500 头防治指标以上）。3 种小麦蚜虫各麦区均普遍发生，麦二叉蚜主要发生于长江以北各省，尤以雨少干旱的西北冬春麦区发生频率最高，获草谷网蚜在北方麦区发生更重，禾谷缢管蚜南北方麦区密度均较大。草地螟主要发生在冷凉地区，华北、东北、西北农牧交错区是其发生为害的主要区域。可见，重大迁飞性害虫发生区域涵盖我国从南至北主要粮食作物种植区。

1.4 重大迁飞性害虫存在国内外虫源交流

重大迁飞性害虫多为世界性分布害虫（表 3），其较强的迁飞能力导致具跨地区、跨国境大区域发生，这是其最显著的发生为害特点。草地贪夜蛾、亚洲飞蝗、草地螟、粘虫、稻飞虱、稻纵卷叶螟等都是洲际发生害虫，我国与周边国家有虫源交流。尤其是草地贪夜蛾、粘虫、稻飞虱、稻纵卷叶螟是非滞育害虫，耐受低温能力差，冬季只能在我国华南、西南少量越冬（姜玉英等，2021），因此，境外是我国的重要虫源地。草地贪夜蛾、粘虫春季虫源可来自缅甸、老挝、泰国等（吴秋琳等，2019），稻飞虱、稻纵卷叶螟来自越南、老挝、缅甸、泰国等（沈慧梅，2010；翟保平，2011；陆明红等，2018），形成每年北迁南回、周而复始的发生为害格局。草地螟尽管在我国能以滞育态越冬，但大发生年份蒙古、俄罗斯、哈萨克斯等国会给我国提供大量虫源（罗礼智等，2009；黄绍哲等，2011）。哈萨克斯坦也会向新疆提供亚洲飞蝗虫源（黄辉和朱恩林，2001；王磊等，2006），增加我国突发重发风险和为害程度。

2 监测预报技术

由于重大迁飞性害虫具有突增突减的区域发生特征，做好种群动态监测对准确预报、指导

表 2　重大迁飞性害虫发生防治面积和为害损失

Table 2　Control area and damage loss of major migratory pests

害虫名称 Pest name	年均发生面积（hm^2） Annual average area	年均防治面积（hm^2） Average annual control area	挽回损失（吨） Retrieve loss (ton)	实际损失（吨） Actual loss (ton)	最重年份情况				
					发生面积（hm^2） Occurrence area	防治面积（hm^2） Control area	挽回损失（吨） Retrieve loss (ton)	实际损失（吨） Actual loss (ton)	年份 Year
草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* (Smith)	0.114×10^7	0.183×10^7	0.101×10^7	0.26×10^6	0.114×10^7	0.183×10^7	0.101×10^7	0.26×10^6	2009
飞蝗 *Locusta migratoria* Linnaeus	0.156×10^7	0.098×10^7	0.025×10^7	0.06×10^6	0.281×10^7	0.189×10^7	0.037×10^7	0.09×10^6	2003
草地螟 *Loxostege sticticalis* Linnaeus	0.354×10^7	0.333×10^7	0.050×10^7	0.10×10^6	1.256×10^7	$>0.667\times10^7$	0.214×10^7	0.22×10^6	2008
黏虫 *Mythimna separate* (Walker)	0.502×10^7	0.447×10^7	0.093×10^7	0.25×10^6	0.938×10^7	0.947×10^7	0.559×10^7	0.99×10^6	2012
稻飞虱 *Nilaparvata lugens* (Stål), *Sogatella furcifera* (Horváth)	2.150×10^7	2.913×10^7	0.788×10^7	0.90×10^6	3.273×10^7	5.209×10^7	1.967×10^7	2.06×10^6	2006
稻纵卷叶螟 *Cnaphalocrocis medinalis* (Guenée)	1.605×10^7	2.096×10^7	0.440×10^7	0.51×10^6	2.620×10^7	3.970×10^7	0.968×10^7	1.08×10^6	2007
小麦蚜虫 *Sitobion miscanthi* (Takahashi), *Rhopalosiphum padi* (Linnaeus), *Schizaphis graminum* (Rondani)	1.571×10^7	1.769×10^7	0.458×10^7	0.77×10^6	1.761×10^7	2.058×10^7	0.885×10^7	1.62×10^6	2009
合计 Total	6.452×10^7	7.839×10^7	1.955×10^7	2.85×10^6	10.243×10^7	$>13.223\times10^7$	4.731×10^7	6.32×10^6	

草地贪夜蛾是 2019 年数据，草地螟第 3 个发生周期是 1996-2010 年数据，其他是 1991-2019 年数据。

The data of fall armyworm is in 2019, the data of the beet webworm is in 1996-2010 of the third occurrence cycle, and the others are in 1991-2019.

表 3 重大迁飞性害虫分布区域

Table 3 Distribution area of major migratory pests

害虫名称 Pest name	世界分布 World distribution	国内分布 Domestic distribution
草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* (Smith)	美洲、非洲、亚洲、大洋洲	全国各玉米产区
东亚飞蝗 *Locusta migratoria manilensis* (Meyen)	中国、日本、朝鲜、新加坡、菲律宾、印度尼西亚、泰国、越南、缅甸、柬埔寨等东亚及东南亚地区	天津、河北、山西、陕西、山东、河南、江苏、安徽、海南、广西
亚洲飞蝗 *Locusta migratoria migratoria* (Linnaeus)	土耳其、伊朗、阿富汗、俄罗斯、哈萨克斯坦、乌兹别克斯坦、吉尔吉斯斯坦、土库曼斯坦、乌克兰、蒙古、朝鲜、日本和中国北部，为南欧和中亚细亚一带	新疆、黑龙江、吉林、内蒙古、宁夏、青海、甘肃等
西藏飞蝗 *Locusta migratoria tibetensis* Chen	中国	西藏、四川、青海
草地螟 *Loxostege sticticalis* Linnaeus	中国、日本、朝鲜、俄罗斯、蒙古、哈萨克斯坦、印度、伊朗、罗马尼亚、匈牙利、加拿大、美国、保加利亚、波兰、捷克、斯洛伐克、奥地利、意大利、德国、英国、摩尔多瓦、土耳其等	东北、西北、华北农牧交错区
东方粘虫 *Mythimna separate* (Walker)	中国、朝鲜、韩国、日本、俄罗斯、菲律宾、越南、老挝、柬埔寨、泰国、缅甸、印度、阿富汗、孟加拉国、斯里兰卡、巴基斯坦、马来西亚、印度尼西亚、澳大利亚、斐济、巴布亚新几内亚、新西兰等	除新疆以外各省份
褐飞虱 *Nilaparvata lugens* (Stål)	南亚、东南亚、太平洋岛屿等地区及中国、日本、朝鲜、韩国、澳大利亚	除黑龙江、内蒙古、青海、新疆外的其他省区
白背飞虱 *Sogatella furcifera* (Horváth)	中国、日本、蒙古、巴基斯坦、沙特阿拉伯、朝鲜半岛、东南亚、南亚、太平洋岛屿、澳大利亚（北部）前苏联（库页岛）	全国各稻区
稻纵卷叶螟 *Cnaphalocrocis medinalis* (Guenée)	中国、朝鲜、日本、泰国、缅甸、印度、巴基斯坦、斯里兰卡等	全国各稻区
荻草谷网蚜 *Sitobion miscanthi* (Takahashi)	中国、斐济、澳大利亚、新西兰、美国、加拿大	全国各麦区
禾谷缢管蚜 *Rhopalosiphum padi* (Linnaeus)	中国、朝鲜半岛、日本、埃及、欧洲、北美洲	全国各麦区
麦二叉蚜 *Schizaphis graminum* (Rondani)	中国、美国、加拿大	全国各麦区

及时防治具有特殊重要的意义。为此，在基本摸清害虫生物学习性和发生为害规律的基础上，制定其调查预测技术对作好测报工作尤为重要。1995 年我国首批颁布的农作物病虫害国家标准中，东亚飞蝗、粘虫、稻飞虱、稻纵卷叶螟涵盖其中，2000 年以后陆续制定了小麦蚜虫、草地螟、西藏飞蝗、亚洲飞蝗、草地贪夜蛾农业行业标准，还对 4 个国家标准进行了修订（表 4）。标准确定了害虫发生程度分级指标、成虫监测、田间虫（卵）量调查、天敌调查、为害状调查、预测技术和数据传输等内容，尤其是成虫种群监测、雌蛾卵巢发育分级、翅型调查、异地预报等技术，为做好全国迁飞性害虫监测预报提供了关键性的技术支撑。

2.1 成虫种群数量监测

做好成虫发生时间和发生数量的及时监测是做好害虫测报的基础。7 种（类）迁飞性害虫成虫具有较强的迁飞和再迁飞能力，因此，做好成虫发生数量、虫源性质（滞留当地、迁出虫源

表 4　农作物病虫测报行业标准制定情况

Table 4　Formulation of industry standards for crop pest forecasting

标准名称 Standard name	标准编号 Standard number	主要内容 Primary coverage
草地贪夜蛾测报技术规范	NY/T 3866-2021	发生程度分级指标，成虫、卵、幼虫、蛹和天敌调查，发生期和发生程度预测
东亚飞蝗测报技术规范	GB/T 15803-2007 代替 GB/T 15803-1995	发生程度分级指标，卵期、蝗蝻期、成虫期和天敌调查，发生期和发生量预测
西藏飞蝗测报技术规范	NY/T 1855-2010	发生程度分级指标，卵期、蝗蝻期和残蝗调查，发生期和发生程度预测
亚洲飞蝗测报技术规范	NY/T 2358-2013	发生程度分级指标，常发区春季卵存活、蝗蝻及其天敌和成虫调查，边境蝗情调查、残蝗普查，偶发区蝗情调查，发生期和发生程度预测
农区草地螟预测预报技术规范	NY/T 1675-2008	秋季越冬基数、春季越冬幼虫存活、化蛹羽化进度、成虫、卵、幼虫调查，发生程度划分方法，发生程度和防治适期预测
粘虫测报调查规范	GB/T 15798-2009 代替 GB/T 15798-1995	成虫诱测，卵和幼虫调查，迁出区残虫量和天敌调查
稻飞虱测报调查规范	GB/T 15794-2009 代替 GB/T 15794-1995	发生程度分级指标，成虫灯诱、卵和幼虫及天敌调查，为害状况普查
稻纵卷叶螟测报调查规范	GB/T 15793-2011 代替 GB/T 15793-1995	发生程度分级指标，越冬虫源调查、成虫调查，卵和幼虫种群消长及发育进度和发生程度调查，残留虫量和稻叶受害普查，发生期和发生量预测
小麦蚜虫测报调查规范	NY/T 612-2002	发生程度分级指标，蚜虫和天敌系统调查和大田普查

和迁入虫源）调查对做好当地和异地发生期和发生量预报极其重要。

2.1.1　灯诱　草地螟、粘虫、稻飞虱、草地贪夜蛾具有较强的趋光性，生产上多选择黑光灯（波峰 365 nm、功率 20 W）为光源的灯具进行诱集，南方部分稻区选用 200 W 白炽灯诱集稻飞虱。2015 年以来，我国选用高空灯（金属卤化物灯，灯泡光源波长为 500-600 nm，功率为 1 000 W）用于迁飞性害虫区域性监测，除草地螟、粘虫、稻飞虱、草地贪夜蛾外，对通常认为是弱光性的稻纵卷叶螟也具有较强的诱集效果，如广西宜州 2019、2020 年 4 月中旬至 7 月中旬多日见万头以上的虫峰，2020 年 5 月 21 日达 3.8 万头，为多年灯下最高值，显现出这种长波灯对迁飞性害虫监测较好的应用效果。

2.1.2　性诱　性诱是常用的成虫监测手段，迁飞性害虫由于降落地点的不确定性，往往会导致性诱追逐不到成虫的问题。随着对害虫迁飞路径和区域发生规律的深入研究，尤其是性信息素效果的提高，利用性诱技术监测迁飞性害虫种群数量已成为生产上的有效方法，尤其在进行草地贪夜蛾监测的实践中，发现性诱对低虫量时表现更为敏感，成为掌握异地虫源早期迁入的有效手段。《农作物害虫性诱监测技术规范（螟蛾类）》（NY/T 2732-2015）以及《草地贪夜蛾测报技术规范》（NY/T 3866-2021）分别规定了稻纵卷叶螟、粘虫、草地螟和草地贪夜蛾性信息素成分、配比和含量、载体种类、干式诱捕器类型和田间应用技术，对性诱监测规范化起到重要推进作用。

2.1.3　成虫田间调查　稻纵卷叶螟由于对黑光灯趋性不强，草地螟会出现灯下与田间虫量不一致现象，还需要采用田间赶蛾（惊蛾）计田间成虫量，即手持长 2 m 的竹竿沿田埂逆风缓慢拨动稻丛中上部（水稻分蘖中期前同时调查周边杂草），或正常步幅走百步，目测计数飞起的稻纵卷叶螟和草地螟蛾数，亦可用扫网方式调查田间草地螟蛾量。

2.2 虫源性质监测

2.2.1 雌蛾卵巢发育级别判断 种群的突增和突减是判断迁飞性害虫虫源性质和虫源关系的重要依据。当灯下或田间见成虫虫峰时，依据雌蛾卵巢发育和交配情况等生理指标判断其种群性质，是监测迁飞性害虫必不可缺的基础工作。测报技术规范中，粘虫、稻纵卷叶螟、褐飞虱、白背飞虱、草地贪夜蛾雌蛾卵巢采用 5 级划分（戴宗廉等，1962；陈若篪等，1979；张孝羲等，1979；吕万明，1980；芦芳等，2011；赵胜圆等，2019），当达 3 级时，卵已成熟，4 级为产卵期；草地螟划分为 4 级（孙雅杰等，1992），3 级为产卵期。通常诱集的雌蛾卵巢低级别（1-2 级）比率较高，此种群有可能迁出，需继续观察；而当突然见高级别（3 级以上）种群时，则是异地迁入种群，此类种群将滞留本地、雌蛾产卵后造成当地为害，需依此做出发生期和发生量的短期预报。上海等地采用陈若篪等（1979）提出的褐飞虱虫源性质划分标准，雌蛾卵巢发育级别达 3 级以上的占 60%以上、交配率在 80%以上为迁入种群，雌蛾卵巢发育为 1 级、2 级的比例占 70%以上、交配率在低于 40%为迁出种群，雌蛾卵巢发育各级别均有且比例接近、交配率 40%-80%的为本地种群（芦芳等，2010）。稻纵卷叶螟、草地螟等多具有多次迁飞特点，环境条件不适宜则会继续迁飞，因此，解剖雌蛾卵巢发育是准确预报的基础。

2.2.2 翅型判断 稻飞虱和小麦蚜虫都具有翅二型现象，生产上还常用翅型变化来判断虫源性质，并依此做出发生趋势预报。如稻飞虱长翅型和小麦蚜虫有翅型急增，对虫源地还说，往往是由于作物近成熟，害虫寄主食料条件恶化，或遇到高温等不合适的气候条件，种群由短翅分化为长翅、由无翅分化为有翅，迁出本地移至合适地区继续繁殖为害；而对非虫源地来说，需加强迁入的长翅或有翅种群的持续监测，如随后小麦蚜虫无翅型、褐飞虱和白背飞虱短翅型种群数量大，表明田间寄主营养和环境条件对其繁殖扩大种群有利，预示着大发生的到来（刘光杰等，2000；国伟和沈佐锐，2004；杨梅，2020），需及时做出短期预报、做好防治准备。

2.3 发生趋势预测

2.3.1 发生期预测 在掌握害虫生物学习性基础上，多采用分级法、历期法、卵巢发育分级和有效积温法进行发生期预测，在相应测报技术标准中都做了规定。如东亚飞蝗根据不同环境蝗卵发育进度，利用蝗卵胚胎发育分级法预测蝗蝻孵化出土期。稻纵卷叶螟由田间赶蛾查得蛾高峰日，采用历期法预测卵孵高峰期和 2 龄幼虫高峰期，即蛾高峰日加上本地当代的产卵前期（外来虫源为主的世代或峰次则不加产卵前期），即为卵孵高峰期；卵孵高峰期加上卵历期和 1 龄幼虫历期即为 2 龄幼虫高峰期。草地贪夜蛾根据雌蛾卵巢发育状况，采用卵巢发育分级预测法，预测产卵和幼虫发生期。稻纵卷叶螟、东亚飞蝗、亚洲飞蝗、西藏飞蝗和草地贪夜蛾，依据成虫、卵、幼虫和蛹的发育起点温度、所需有效积温，结合当地气象预报未来几天平均气温，利用有效积温公式计算各虫态发生历期，做出关注虫态发生期预测。以上各种方法的预测，在长期实践中取得较好效果，对指导防治起到重要作用。

2.3.2 发生程度预测 发生程度预测通常采用有效基数预测法和综合预测法。有效基数预测法即根据当代有效虫口基数、繁殖力、存活率来预测下一代的发生程度。如东亚飞蝗根据残蝗密度、雌虫数及产（抱）卵率，每头雌虫产卵量及死亡率，预测下代发生密度和发生程度。综合预测法即依据当地成虫诱测和卵调查数量，结合害虫主要寄主作物生育期、种植分布和天气情况，作出幼虫发生区域、发生面积和发生程度预报。

以上预测方法适合对当地虫源害虫的预测，而对迁入虫源发生区域的预测，我国科技工作者在摸清不同地区虫源关系的基础上，于 1970 年代、1980 年代、1990 年代分别提出了粘虫、草地螟、稻纵卷叶螟异地预测法（李光博，1972；全国草地螟科研协作组，1987；张孝羲，1996）。如粘虫的异地预测，依据 2-3 月广东、广西、福建等华南地区调查越冬代虫源基数及种群发育进度，预测浙江、江苏、安徽、河南等长江中下游和黄淮南部 1 代发生情况；依据 4-5 月 1 代发生区调查的基数和发育进度，预测华北和东北等

地 2 代发生情况; 依据 6 月下旬至 7 月中旬 2 代调查的基数和发育进度, 可预测华北、黄淮等地 3 代发生情况, 这种代次间区域性的异地预测方法已长期应用于我国预报工作中。

3　讨论

3.1　研究迁飞性害虫成灾机理

迁飞性害虫发生及成灾受害虫自身种群、寄主、农田环境和天气条件等多因素影响, 最终发生程度是多因素协调一致、达到最佳状态的结果。害虫的生物学习性、虫口密度或拥挤状况等影响其迁飞行为, 且害虫具有较强的种群自我调节能力, 当种群数量庞大到环境承载阈值时, 会通过翅型分化或生殖停滞等方式迁飞至异地, 扩展种群生存空间 (刘向东等, 2004); 寄主条件包括作物分布区域、种植制度、作物生育期和长势等, 这些因素会影响害虫取食、获取营养的便利性和营养质量, 如玉米的交错种植区、早中晚稻插花种植区, 作物生长营养期、长势茂盛地块, 往往是草地贪夜蛾、稻飞虱等迁飞性害虫定殖的首选区域和目标 (刘宇等, 2008; 姜玉英等, 2019)。农田环境包括农田温湿度、田间郁闭度、害虫天敌的控害作用和综合防控措施的实施等 (罗礼智等, 2016)。天气因素的影响更为复杂, 东亚季风、西太平洋副热带高压、厄尔尼诺、太阳黑子以及气候变暖等天气事件都会对迁飞性害虫成灾和周期发生造成影响, 摸清影响的规律性和作用, 将“事件”后成因分析变为“事件”前预警。因此, 研究迁飞性害虫成灾机理, 需要从害虫、寄主、环境和气候等诸多方面进行生物学和生态学研究, 这对促进重大迁飞性害虫监测预警水平提高具有重要意义, 需要随农业种植制度、农业管理措施和气候的变化而长期持续进行。

3.2　研发迁飞性害虫智能化监测工具

历史上由于对迁飞性害虫发生规律认识不清并缺少监测工具和手段, 认为迁飞性害虫来无影去无踪、落地生害, 因此将其称为“神虫”, 在掌握害虫突增突减习性的同时, 更重要的是采用有效监测工具第一时间掌握其种群动态。经过广大植保科研人员的积极努力, 我国对重大迁飞性害虫趋性等生物学习性研究的基础上, 利用黑光灯、高空灯和性诱剂进行种群动态监测, 此类工具需要花费大量的人力。目前已在利用人工智能技术, 开发灯下诱集昆虫图片识别和性诱自动计数技术。由于灯下诱集昆虫种类多、数量大, 同类昆虫形态特征相似, 准确识别受到限制; 应用的性诱产品都是诱雄虫, 满足不了迁飞性害虫雌虫性成熟状态的需要。昆虫雷达探测距离远、自动化程度高, 且可全天候工作, 可以大范围快速发现空中的害虫目标, 对迁飞性害虫监测提供了更先进的手段, 目前需要加强科研、高校与生产应用单位合作, 突破昆虫种类自动识别、监测信息解算分析处理等关键核心技术, 为组建国家昆虫迁飞雷达监测网奠定坚实的基础。

3.3　研究迁飞性害虫迁飞关键路径

我国学者研究, 重大迁飞性害虫在我国有南北向和东西向的虫源交流, 利用风场分析等方法进行的稻飞虱、草地贪夜蛾等重大迁飞性害虫轨迹分析结果多是跨纬度或经度、较大尺度和范围的结果 (吴秋琳, 2018; 吴秋琳等, 2019; 陈辉等, 2020)。粘虫监测实践发现, 浙江象山、上海奉贤、江苏东台、山东长岛、河北滦县等监测点常年诱虫量大, 在严重年份指示性更强, 由此推论我国东部沿海气流更有利于粘虫等害虫的迁飞, 是一条北迁南回的重要路径 (姜玉英等, 2018)。可利用风场、轨迹分析结合地形地貌和实际验证等方法, 探索出更为准确的迁飞性害虫迁飞通道, 在此通道上布设监测站点, 配备先进监测工具, 建成全国空天地一体化监测网络, 实现迁飞性害虫精准预报。同时, 应加强与我国周边国家虫源关系研究, 找出境外虫源地, 建立国家间信息共享机制, 提高早期预报的预见性。

参考文献 (References)

Chen RX, Cheng XN, Yang LM, Yin XD, 1979. The relationship between ovarian development and migration of brown planthopper. *Acta Entomologica Sinica*, 22 (3): 280–288. [陈若篪, 程遐年, 杨联民, 殷向东, 1979. 褐飞虱卵巢发育与迁飞的关系. 昆虫

学报, 22(3): 280–288.]

Chen H, Wu MF, Liu J, Chen AD, Jiang YY, Hu G, 2020. Migratory routes and occurrence divisions of the fall armyworm *Spodoptera frugiperda* in China. *Journal of Plant Protection*, 47(4): 747–757. [陈辉, 武明飞, 刘杰, 谌爱东, 姜玉英, 胡高, 2020. 我国草地贪夜蛾迁飞路径及其发生区域. 植物保护学报, 47(4): 747–757.]

Dai ZL, Jiao MY, Qian YM, 1962. Studies on the reproductive system of armyworm. *Journal of Shenyang Agricultural University*, (1): 68–74. [戴宗廉, 焦明阳, 钱奕民, 1962. 粘虫生殖系统的研究. 沈阳农学院学报, (1): 68–74.]

Guo SJ, Li SM, Ma LP, Zhuo XN, 2003. Study on biological characteristics and damage regularity of *Leucania lorryi* Duponchel. *Henan Agricultural Sciences*, (9): 37–39. [郭松景, 李世民, 马林平, 卓喜牛, 2003. 劳氏粘虫的生物学特性及危害规律研究. 河南农业科学, (9): 37–39.]

Guo W, Shen ZR, 2004. Research progress on migration of wheat aphid. *Chinese Agricultural Bulletin*, 20(6): 251–254. [国伟, 沈佐锐, 2004. 麦蚜迁飞的研究进展. 中国农学通报, 20(6): 251–254.]

Huang H, Zhu EL, 2001. Asiatic migratory locust disaster in Kazakhstan. *World Agriculture*, 266(6): 46–47. [黄辉, 朱恩林, 2001. 哈萨克斯坦蝗灾严重发生. 世界农业, 266(6): 46–47.]

Huang SZ, Luo LZ, Jiang YY, Tang IH, Zhang L, 2011. Spatial distribution characteristics of the beet webworm outbreak population in China in 2008. *Plant Protection*, 37(4): 76–81. [黄绍哲, 罗礼智, 姜玉英, 唐继洪, 张蕾, 2011. 我国 2008 年草地螟大发生种群空间分布特征. 植物保护, 37(4): 76–81.]

Jiang YY, Li CG, Zeng J, Liu J, 2014. A review of the occurrence of armyworm in China in the past 60 years. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 51(4)：890–898. [姜玉英, 李春广, 曾娟, 刘杰, 2014. 我国粘虫发生概况：60 年回顾. 应用昆虫学报, 51(4): 890–898.]

Jiang YY, Liu J, Zeng J, 2018. Using a national searchlight trap network to monitoring the annual dynamics of the oriental armyworm in China. [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, 55(5): 778–793.]

Jiang YY, Liu J, Xie MC, Li YH, Yang JJ, Zhang ML, Qiu K, 2019. Observation on law of diffusion damage of in China in 2019. *Plant Protection* , 45(6): 10–19. [姜玉英, 刘杰, 谢茂昌, 李亚红, 杨俊杰, 张曼丽, 邱坤, 2019. 2019 年我国草地贪夜蛾扩散为害规律观测. 植物保护, 45(6): 10–19.]

Jiang YY, Liu J, Wu QL,Ci RZG, Zeng J, 2021. Investigation on the breeding and overwintering areas of fall armyworm in China. *Plant Protection* , 47(1): 212–217. [姜玉英, 刘杰, 吴秋琳, 次仁卓嘎, 曾娟, 2021. 我国草地贪夜蛾冬繁区和越冬区调查. 植物保护, 47(1): 212–217.]

Li GB, 1972. Migration of armyworm and prediction of its occurrence trend in 1972. *Agricultural Science Bulletin*, 5(20): 20–22. [李光博, 1972. 粘虫迁飞规律及 1972 年发生趋势的预测. 农业科学通讯, 5(20): 20–22.]

Liu GJ, Han C, Shen LL, 2000. Study on wing type differentiation of brown planthopper adults. *Entomological Knowledge*, 37(3): 186–190. [刘光杰, 寒川一成, 沈丽丽, 2000. 褐飞虱成虫翅型分化研究. 昆虫知识, 37(3): 186–190.]

Liu J, Jiang YY, Zeng J, Yang QB, Zhang YH, 2018. Analysis on occurrence characteristics of fall armyworm of China in 2017. *China Plant Protection*, 38(5): 27–31. [刘杰, 姜玉英, 曾娟, 杨清坡, 张云慧, 2018. 2017 年我国粘虫发生特点分析. 中国植保导刊, 38(5): 27–31.]

Liu J, Yang JJ, Zhang Z, Wang CR, Song ZY, Jiang YY, 2020. Analysis on occurrence characteristics of fall armyworm of China in 2018. *Plant Protection*, 46(1): 229–233. [刘杰, 杨俊杰, 张智, 王春荣, 宋振宇, 姜玉英, 2020. 2018 年我国粘虫发生特点分析. 植物保护, 46(1): 229–233.]

Liu XD, Zhai BP, Zhang XX, 2004. Advance in the studies of migration of aphids. *Entomological Knowledge*, 41(4): 301–307. [刘向东, 翟保平, 张孝羲, 2004. 蚜虫迁飞的研究进展. 昆虫知识, 41(4): 301–307.]

Liu Y, Wang JQ, Feng XD, Jiang XH, 2008. Analysis of the occurrence of rice leaf roller in China in 2007 and prediction of its occurrence trend in 2008. *China Plant Protection*, 28(7): 33–35. [刘宇, 王建强, 冯晓东, 蒋学辉, 2008. 2007 年全国稻纵卷叶螟发生实况分析与 2008 年发生趋势预测. 中国植保导刊, 28(7): 33–35.]

Lu F, Qi GJ, Chen X, Deng XG, Guo YR, Wu XW, Ni XH, Chen SJ, Zhang JY, Zhang XX, Zhai BP, 2010. The late immigration of the brown planthopper *Nilaparvata lugens* (Stål) in Shanghai: Case studies from 2007. *Acta Ecologica Sinica*, 30(12): 3215–3225. [芦芳, 齐国君, 陈晓, 董西贵, 郭玉人, 武向文, 倪秀红, 陈时健, 张纪英, 张孝羲, 翟保平, 2010. 上海地区 2007 年褐飞虱的后期迁入和虫源地的个例分析. 生态学报, 30(12): 3215–3225.]

Lu F, Ji GJ, Qin RR, Hu G, Wang Z, Zhang XX, Cheng XN, Zhai BP, 2011. Morphological changes and grading criteria of ovary development of of the brown planthopper *Nilaparvata lugens* (Stål). *Chinese Journal of Applied Entomology*, 48(5): 1394–1400. [芦芳, 齐国君, 秦冉冉, 胡高, 王政, 张孝羲, 程遐年, 翟保平, 2011. 褐飞虱卵巢发育的形态变化过程及分级标准. 应用昆虫学报, 48(5): 1394–1400.]

Lu MH, Liu WC, Hu G, Chai BP, 2018. Analysis on the occurrence relationship of rice migratory pests rice planthopper and rice leaf roller both China and Vietnam. *Plant Protection*, 44(3): 31–36.

[陆明红, 刘万才, 胡高, 翟保平, 2018. 中越水稻迁飞性害虫稻飞虱、稻纵卷叶螟发生关系分析. 植物保护, 44(3): 31–36.]

Luo LZ, Huang SZ, Jiang XF, Zhang L, 2009. Occurrence characteristics and causes of the beet webworm in China in 2008. *Plant Protection*, 35(1): 27–33. [罗礼智, 黄绍哲, 江幸福, 张蕾, 2009. 我国 2008 年草地螟大发生特征及成因分析. 植物保护, 35(1): 27–33.]

Luo LZ, Cheng YX, Tang JH, Zhang L, Jiang XF, 2016. Temperature and relative humidity are the key factors for population dynamics and outbreak of the beet webworm, *Loxostege sticticalis*. *Plant Protection*, 42(4): 1–8. [罗礼智, 程云霞, 唐继洪, 张蕾, 江幸福, 2016. 温湿度是影响草地螟发生为害规律的关键因子. 植物保护, 42(4): 1–8.]

Lv WM, 1980. Preliminary observation on the structure of female reproductive system and the grading of ovary development of *Sogatella furcifera* (Horváth). *Entomological Knowledge*, 17(4): 182–183. [吕万明, 1980. 白背飞虱雌性生殖系统的构造和卵巢发育分级的初步观察. 昆虫知识, 17(4): 182–183.]

Ministry of Agriculture and Rural Areas, 2020. Announcement No. 333 of Ministry of Agriculture and Rural Areas of the People's Republic of China. [农业农村部, 2020.中华人民共和国农业农村部公告第333号. http://www.moa.gov.cn/nybgb/2020/202010/202011/t20201130_6357326.htm.]

National the Beet Webworm Research Cooperation Group, 1987. Studies on the occurrence, forecast and control of *Loxostege sticticatis* Linnaeus. *Pest Forecast*, 7(S1): 1–9. [全国草地螟科研协作组, 1987. 草地螟(*Loxostege sticticatis* Linnaeus)发生及测报和防治的研究. 病虫测报, 7(S1): 1–9.]

Shen HM, 2010. Studies on the foreign sources of brown planthopper and white backed planthopper in China. Doctoral dissertation. Nanjing: Nanjing Agricultural University. [沈慧梅, 2010. 我国褐飞虱和白背飞虱的境外虫源研究. 博士学位论文. 南京: 南京农业大学.]

Sun YJ, Wang SY, Bao XZ, Chen RL, 1992. Development classification of female moth of the beet webworm and its application in forecasting. *Pest Forecast*, 12 (2): 10–13. [孙雅杰, 王素云, 暴祥致, 陈瑞鹿, 1992. 草地螟雌蛾发育分级及其在测报中的应用. 病虫测报, 12(2): 10–13.]

Tang JY, Hu BH, Wang JQ, 1996. The causes of rampant migratory pests of rice in China and the countermeasures. *Acta Ecologica Sinica*, 16(2): 167–173. [汤金仪, 胡伯海, 王建强, 1996. 我国水稻迁飞性害虫猖獗成因及其治理对策建议. 生态学报, 16(2): 167–173.]

Wang L, Xu GQ, Liu DF, Han XL, 2006. Study on the relationship between Asiatic migratory locust and meteorological factors. *Xinjiang Meteorology*, 29(5): 25–27. [王磊, 徐光青, 刘大锋, 韩晓玲, 2006. 迁入性亚洲飞蝗与气象因子关系的研究. 新疆气象, 29(5): 25–27.]

Wu QL, 2018. Migration of rice planthoppers in east Asia: Patterns, processes and meteorological backgrounds. Nanjing: Nanjing Agricultural University. [吴秋琳, 2018. 东亚稻飞虱的迁飞: 格局、过程及气象背景. 博士学位论文. 南京: 南京农业大学.]

Wu QL, Jiang YY, Wu KM, 2019. Analysis of migration routes of the armyworm *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) from Myanmar to China. *Plant Protection*, 45(2): 1–6, 18. [吴秋琳, 姜玉英, 吴孔明, 2019. 草地贪夜蛾缅甸虫源迁入中国的路径分析. 植物保护, 45(2): 1–6, 18.]

Yang M, Liang SK, He JY, Lin J, Wang FH, 2020. Morphometric comparison of different wing types of adult whitebacked planthopper. *Anhui Agricultural Science*, 48(12): 132–134. [杨梅, 梁士可, 何静怡, 林佳, 王方海, 2020. 白背飞虱成虫不同翅型的形态测量学比较. 安徽农业科学, 48(12): 132–134.]

Zhao BP, 2011. Rice planthoppers: A China problem under the international perspectives. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 48(5): 1184–1193. [翟保平, 2011. 稻飞虱: 国际视野下的中国问题. 应用昆虫学报, 48(5): 1184–1193.]

Zhang XX, 1996. The migratory behaviours, population sources in small-middle scale and allopatric prediction of rice leafroller. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press. 275–276. [张孝羲, 1996. 稻纵卷叶螟迁飞行为、中小尺度虫源地分析及异地预报研究//中国有害生物综合治理论文集. 北京：中国农业科技出版社. 275–276.]

Zhang XX, Lu ZQ, Geng JG, 1979. Application of anatomy of female moth of rice leafroller in forecasting. *Entomological Knowledge*, 16(3): 97–99. [张孝羲, 陆自强, 耿济国, 1979. 稻纵卷叶螟雌蛾解剖在测报上的应用. 昆虫知识, 16(3): 97–99.]

Zhang ZT, 1992. Insect migration and its field. *Plant Protection*, 18(1): 48–49. [张志涛, 1992. 昆虫迁飞及昆虫迁飞场. 植物保护, 18(1): 48–49.]

Zhao SY, Yang XM, He W, Zhang HW, Jiang YY, Wu KM, 2019. Ovarian development gradation and reproduction potential prediction in *Spodoptera frugiperda*. *Plant Protection*, 45(6): 28–34. [赵胜园, 杨现明, 和伟, 张浩文, 姜玉英, 吴孔明, 2019. 草地贪夜蛾卵巢发育分级与繁殖潜力预测方法. 植物保护, 45(6): 28–34.]