应用昆虫学报 *Chinese Journal of Applied Entomology* 2021, 58(3): 552–564. DOI: 10.7679/j.issn.2095–1353.2021.057

草地螟的发生为害与监测预警技术研究进展*

陈智勇[1**] 张 智[2] 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）

摘 要 草地螟 *Loxostege sticticalis* L.是我国北方农牧区重要的迁飞性害虫，具有突发性、暴发性和周期性危害的特点，随着第 4 个暴发周期的来临，将会给我国北方农牧业的安全生产带来很大的威胁。为准确掌握草地螟在我国的发生与迁飞为害规律，提高对重大迁飞性害虫的灾变预警能力，本文综述了草地螟在我国及周边国家的时空分布，发生为害、迁飞规律和监测预警等方面的研究进展，并对草地螟的监测预警技术进行了展望，以期为第 4 个暴发周期草地螟的监测和防控提供技术支持。

关键词 草地螟；迁飞；发生为害；监测预警

Progress in research on monitoring and forecasting the occurrence of the beet webworm, *Loxostege sticticalis*

CHEN Zhi-Yong[1**] ZHANG Zhi[2] 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)

Abstract The beet webworm, *Loxostege sticticalis* L., is an important migratory insect pest of agricultural crops and livestock forage in northern China. Although previously not a significant pest, three recent outbreaks of the beet webworm caused significant economic losses. The approach of the fourth outbreak period therefore poses a serious risk to agriculture and animal husbandry in northern China. Obtaining more accurate information on the occurrence and migration of the beet webworm, and improving forecasting capability for this important migratory pest is therefore both timely and important. This paper reviews the distribution and outbreak regions of the beet webworm, its population dynamics, the kinds of crop damage it causes and its migration. Monitoring and forecasting techniques used in China and neighboring countries are assessed, and suggestions for improving monitoring and management in the fourth outbreak period are provided.

Key words *Loxostege sticticalis*; migration; population dynamic; monitoring and forecasting

草地螟 *Loxostege sticticalis* L.属鳞翅目螟蛾科，是一种世界性害虫，主要分布在 36°-55°N 之间的国家或地区，如东欧、北欧、东北亚、北美等地，其中以欧亚大陆为害最重（Afonin *et al.*，2014）。在我国，草地螟主要分布在华北、东北和西北农牧区，幼虫具有多食性，其寄主涉及 48 科 259 种植物，是农牧业生产上的重大害虫（张树坤等，1987；王倩倩等，2015），大发生年份局部造成的作物产量损失可达到 50%，为害严重的区域甚至会导致作物绝收（田绍义，1963；吉林省草地螟科研协作组，1987）。从 19 世纪中叶至今，俄罗斯有 14 次草地螟暴发的记录（Frolov，2015）。我国自建国以来，共经历了 3 个暴发周期（1955-1961 年、1978-1984 年、1996-2009 年），共 29 个年份成灾，其中第 3 周期的 2008 年 2 代幼虫的发生为害横跨华北、东

*资助项目 Supported projects：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：chenzy9612@163.com

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

收稿日期 Received：2021-04-20；接受日期 Accepted：2021-05-06

北 7 省，发生面积约 1 256.19 万 hm^2，农田发生面积占 43.7%，为历年、历代最重，不仅造成了严重的经济损失，同时还引发大豆期货市场震荡（唐宗全和张昊，2008；姜玉英等，2009；罗礼智等，2016）。2009 年 1 代幼虫种群骤减，直到 2017 年我国草地螟总体一直为轻发生（曾娟等，2018）。2018 年内蒙古、黑龙江、吉林三省交界处 1 代草地螟幼虫突然暴发（刘杰等，2019）。2019 年内蒙古、山西、河北多地监测到草地螟越冬代蛾峰，局地蛾量较高，乌兰察布市化德县单日最高诱虫 15 000 头（全国农业技术推广服务中心，2019）。2020 年越冬代草地螟在山西、河北、内蒙古、辽宁又相继出现蛾峰，多地植保站高空测报灯单日诱蛾数量突破万头，内蒙古乌拉特中旗 6 月 19 日诱蛾达 93 万头，成虫诱集数量历史罕见，1 代幼虫在内蒙古的中西部出现高密度田块（全国农业技术推广服务中心，2020）。江幸福等（2019）根据草地螟周期性发生规律、太阳黑子活动周期以及田间种群动态监测，结合近年来我国北方地区农作物结构调整以及境外虫源的迁入等预测，我国草地螟第 4 个发生周期或将来临。草地螟对大豆的喜食性强于玉米（尹姣等，2004），随着东北地区大豆振兴计划的推进，大豆种植面积逐年扩大，利于草地螟发生危害，将对大豆产业带来一定的威胁。

2020 年 9 月 15 日，农业农村部组织制定了《一类农作物病虫害名录》，草地螟在 10 种一类农作物虫害中名列第 3，仅次于草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* 和飞蝗 *Locusta migratoria*。随着第 4 个暴发为害周期的临近，草地螟将给我国重大迁飞性害虫的监测与防控带来新的挑战。本文综述了草地螟在我国及周边国家的时空分布、发生为害、迁飞规律和监测预警技术等方面的研究进展，并对草地螟的监测预警技术进行了展望，以期为第 4 个暴发周期草地螟的监测和防控提供技术支持。

1　草地螟的时空分布

1.1　境外

自 19 世纪，沙皇俄国就已有草地螟暴发的记录，后来俄罗斯共记录有 14 个暴发周期：1853-1857 年、1864-1869 年、1872-1880 年、1889-1892 年、1898-1903 年、1908-1914 年、1916-1921 年、1927-1935 年、1948-1949 年、1956-1959 年、1972-1979 年、1982-1988 年、2000-2002 年和 2008-2014 年（Akhanaev *et al.*，2013；Frolov，2015）。20 世纪初，蒙古国即有草地螟大发生的记载，其发生主要集中在北部和东部地区（Matov and Chimidtseren，1984）。在俄罗斯，草地螟主要分布在欧洲东南部和中亚的草原和半沙漠地带，而欧洲地区东南部存在“永久繁殖区”（Makarova and Doronina，1994）。在大发生时期，北方森林草原地带会形成集中越冬区。1900 年至 1928 年间，其主要越冬场每年都在移动，当春夏季炎热干旱时，越冬分布区会出现在森林草原带，而湿润多雨年份，越冬则会出现在草原的南部以及东南部（Makarova and Doronina，1994）。由于中国与俄罗斯的草地螟种群波动具有负的时间相关性，所以可将中亚（中国、蒙古国和东西伯利亚）的草地螟与欧洲西伯利亚（俄罗斯、乌克兰和哈萨克斯坦）的草地螟分为两个独立的种群（Frolov，2015）。两个种群在地理上被天山、帕米尔山、阿尔泰山、萨彦岭和沙漠所分割，仅通过一条狭长的东西伯利亚走廊所连接（Akhanaev，2014）。中亚种群区，俄罗斯的东西伯利亚、蒙古和我国的东北地区接壤，且植被类型相近，彼此之间存在密切的联系。

北美洲也有草地螟相关的报道和记载，主要分布在北美大平原和落基山脉地区，但对其周期性暴发的记载或研究却很少。1869 年，草地螟首次在犹他州被记录，但 Chittenden（1902）认为草地螟不是北美本土物种，而是沿着太平洋海岸从亚洲传入。1919 年在落基山脉以及山谷地区曾出现草地螟暴发为害（Maxson，1920；Strickland，1921；Pepper，1938）。

1.2　境内

在我国，草地螟最早的为害记载是 20 世纪 20 年代末至 30 代年代初，曾经在山西、黑龙江等地发生过危害（张树坤等，1987）。自建国以来，共经历了 3 个暴发周期，暴发周期在持续时

间和发生范围上，有逐步增长或扩大的趋势。

第 1 暴发周期为 1955-1961 年，发生区域为华北和东北地区，主要发生区在 37°N 以北，由 108°E-118°E 斜向东北至 50°N 的广阔地区，新疆一直未有严重为害的报道（孙雅杰和陈瑞鹿，1995）。1954、1956 年在河北、山西、内蒙古等省份大规模为害，仅内蒙古自治区受害面积就达 291 万 hm^2，作物减产最高达 50%；1958 年山西雁北、忻定发生面积达 53 万 hm^2，大豆减产 20%-30%（田绍义，1963；朱世模，1963）。

第 2 个暴发周期为 1978-1984 年，1977 年草地螟种群数量开始上升，1982 年为第 2 暴发周期的大发生年份，1、2、3 代幼虫均造成严重为害，面积达 700 万 hm^2，在采取有效防治措施之后，仍有折合约 20 亿斤的粮食损失（全国草地螟科研协作组，1987；罗礼智等，1996）。1983 年草地螟主要在山西发生，面积 577.11 万 hm^2，年损失近亿元（张树坤等，1987）。在我国新疆乌尔禾地区，1980 年，首次发现草地螟大面积为害小麦，后来在阿勒泰地区也有发生为害的记录（王信达，1981）。

第 3 个暴发周期为 1996-2009 年，草地螟种群数量从 1995 年开始回升，山西、河北和内蒙古的局部地区发生严重为害，自 1996 年起，草地螟进入第 3 个暴发周期（罗礼智等，1996；屈西锋，1999），由于全球气候变暖和生态环境的变化，越冬区域比上个周期有所扩大，内蒙古东北和黑龙江多次发现集中越冬区（王秋荣等，2005；王春荣等，2006；Chen *et al.*，2008），且每年越冬区随着气候与寄主而变化（屈西锋等，1999）。第 3 个暴发周期内 1997、1999、2002、2004、2008 年在我国华北、东北及局部地区暴发成灾，表现出为害期提前、发生范围扩大、寄主作物种类增多等新特点（康爱国等，2003；王春荣等，2006），持续时间和危害程度均超越前 2 个暴发周期。

在西北地区，从 2005 年开始，新疆阿勒泰地区草地螟种群数量急剧上升，和田、塔城、伊犁州、博尔塔拉州等地也有发生。2008 年新疆和田地区有 15.8 万 hm^2 草原发现草地螟为害，主要分布在昆仑山脉海拔 3 500-4 500 m 的高海拔地区。2012 年在阿勒泰、塔城地区局部农田出现暴发，给当地农牧业和周边地区的农业生产安全构成严重威胁（芦屹等，2013），多年的实地调查证实，草地螟可在阿勒泰与和田地区越冬，其主要发生地阿勒泰地区靠近哈萨克斯坦边境，而哈萨克斯坦国也是草地螟的严重发生区，存在受境外虫源影响的可能。新疆草地螟的发生为害在时间和空间上与华北、东北地区的发生具有相对独立性，仍需要进一步研究明确其虫源性质。

2 草地螟的发生为害与迁飞规律

2.1 发生世代

草地螟一年最多能繁殖 4 代，从北到南逐渐递增。在前苏联北部地区非黑钙土区每年发生 1 代，俄罗斯、乌克兰北部每年发生 2-3 代，而到了乌克兰南部、北高加索和外高加索的森林草原地区则可以发生 3-4 代（胡文绣，1981）。

在我国，年等温线 0 ℃以北的地区 1 年发生 1 代，包括黑龙江北部和内蒙古北部地区，为害时期为 6-8 月。年等温线 0 ℃以南至年等温线 8 ℃之间的广阔地区，包括东北和华北的大部分地区和西北北部，也是我国草地螟的主要发生危害区，可发生 2-3 代（孙昌学，1982；刘光涛等，1987；魏倩等，1987；罗礼智和李光博，1993；曾娟等，2018）。以每年发生 2 代为例，一般 4 月底到 5 月中旬为华北和西北地区越冬代成虫始见期，东北地区为 5 月中下旬，整体表现为西早东晚的格局；一代幼虫始见期在 5 月底至 6 月上中旬，盛发期从 6 月底至 7 月上旬，南部地区由于温度较高，所以要早于北部地区；一代成虫发生期在 7 月底至 8 月上中旬，随后 2 代幼虫由于气温转凉而零星发生，以 2 代幼虫滞育的老熟和部分一代滞育的老熟幼虫做土茧在土中越冬（曾娟和姜玉英，2014，2016）。

2.2 周期性暴发

病虫害的暴发通常是间歇性的，沉寂多年之后突然暴发，一段时间后又销声匿迹。这些害虫为何在沉寂多年之后突然暴发又突然消失？暴

发原因和成灾机理如何？一种主流的观点认为，种群有规律波动是两个或多个不同营养级的物种间相互作用的结果，尤其是较低或较高营养级物种的负密度影响因子的时间滞后性（Berryman，1996；Hunter and Price，1998）。也有一些学者通过生物群落的外部因素来解释周期性波动（Myers，1998；Klvana *et al.*，2004）。俄罗斯学者系统的研究了能引起草地螟周期性发生的各种自然因素和天敌因素，包括温度、降水条件、景观的改变、生物群落学或遗传学因素、病毒和微孢子虫等，以及太阳黑子活动的周期性对草地螟种群动态的影响，有效地提高了草地螟长期预测预报水平（Omelova，1982；Frolov *et al.*，2004；Frolov，2015）。然而迄今为止仍然没有找到恰当的方法对草地螟的周期性暴发作出合理的解释，相应地也无法准确计算和预测草地螟的发生周期。我国科研工作者也在食物量、天敌、环境温湿度、极端天气等方面系统分析草地螟周期性发生特点。例如我国第 2 个暴发周期的 1982 年和第 3 个暴发周期的 2008 年，秋季越冬虫茧密度、越冬面积是历史上最高的两年，而 1983、2009 年草地螟越冬代种群数却出现了急剧地回落，导致草地螟第 2 个和第 3 个暴发周期的结束（姜玉英等，2009；罗礼智等，2009；曾娟等，2010），促使草地螟种群崩溃的具体原因是什么，专家学者从不同的角度进行了探讨。罗礼智等（2016）研究认为温湿度是影响草地螟种群增长、滞育与迁飞、发生为害规律和暴发成灾的关键因子。陈晓等（2016）通过对当时气象因子的分析，认为极端天气事件已成为我国草地螟发生周期结束的重要因素。鉴于极端气候的出现具有很大的不确定性，对于草地螟发生周期尚难以实现长期预测。

早在 1930 年，Konakov（1930）就开始将 11 年的太阳活动周期与草地螟的暴发周期联系起来，并研究两者之间的关系，发现当地虫害暴发的 1855、1869、1889、1901 和 1912 年与太阳黑子数极小值出现的年份相当吻合。Knorr 等 (1981) 分析了 19 世纪 80 年代末到 20 世纪 70 年代西伯利亚草地螟暴发等级与太阳黑子的对应关系显示，草地螟的暴发往往出现在太阳黑子谷值年前后。尽管常年积累的资料也揭示了二者间的显著相关性，但有关太阳活动对生物种群波动的影响仍存在着争议（Frolov *et al.*，2004）。黄绍哲等（2008）收集了自 1949 年起我国 3 次大发生周期的记载数据，结合美国国家海洋局和国家地理物理数据中心网站提供的太阳黑子数据，进行相关系数分析和二者之间的相位分析，结果表明我国草地螟发生周期与太阳黑子 19、21、23 周期相关联。不同地区的分析结果显示，太阳活动周期对前苏联草地螟暴发周期与我国草地螟暴发周期的调控效果存在很大差异，因此，不同地区暴发原因无法用太阳黑子统一解释。随着全球气候变化及耕作制度的改变，草地螟发生区域的生境特点也有明显改变，太阳黑子影响草地螟种群暴发的内在机理有待进一步研究。

2.3　迁飞行为与迁飞动力场

我国地处东亚季风区，农业生产中重要害虫如黏虫 *Mythimna separata*（Walker）、草地螟、草地贪夜蛾、褐飞虱 *Nilaparvata lugens*（Stål）、白背飞虱 *Sogatella furcifera*（Horváth）等大都具有迁飞习性。在昆虫种群中，同一或不同世代的成虫可以在一个繁殖季节进行多次迁飞，以确保其种群的繁衍（Dingle and Drake，2007）。在我国草地螟主要大规模迁飞活动有 2 次，5 月下旬至 6 月上旬越冬代成虫迁飞，7 月下旬至 8 月一代成虫迁飞（罗礼智等，2018）。20 世纪 80 年代，我国科研工作者通过草地螟的种群数量急剧变动、蛾群同期突增、海上网捕和卵巢解剖等手段推测其具有远距离迁飞习性，在山西山阴对越冬代草地螟的标放试验，回收最远直线距离 230 km（张树坤等，1987）。陈阳等（2012）在内蒙古乌盟对越冬代成虫标放回收，回收点直线距离为 725-1 117 km，是世界上确认的草地螟最远迁飞距离，直接证实了草地螟的远距离迁飞。曹卫菊（2006）对我国草地螟种群的遗传多样性进行分析，并没有发现明显的地理种群划分或遗传分化，说明华北、东北两地存在密切的虫源关

系和频繁的基因交流，从分子水平证实了草地螟的迁飞性。

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。草地螟成虫羽化后 48 h，及 1、2 日龄是成虫决定是否迁飞的敏感时期，此时飞行能力较弱，因而会以补充营养、完善飞行肌的发育为主（程云霞，2012）。飞行行为普遍从 3 日龄后的晚 6:00 到次日凌晨 5:00 开始出现，并逐日增多，到 5 日龄达到最大，可连续飞行 24 h，飞行距离超过 100 km（罗礼智和李光博，1991；唐继洪等，2016）。雷达观测表明华北地区越冬代虫源，草地螟在 15 ℃不起飞，18 ℃主动起飞，20 ℃以上于日落前后大量起飞，夜间飞行，黎明降落。风速的大小对飞行具有一定的影响，在风速低于 1.42 m/s 时，一定条件下也可逆风飞行，当风速达到 5-10 m/s，草地螟飞行方向和风向一致，飞行高度分布在 100-1 000 m，迁飞过程中具有明显的成层现象，成层高度和最大风速和最佳风向有关。远距离迁飞可以持续几个晚上，经过几个中转站，才能到达迁入区，迁飞过程中遇到下沉气流或者降雨时，蛾群降落，迁飞终止（陈瑞鹿等，1992；Feng *et al.*，2004；张云慧等，2008；张丽，2012）。

尽管草地螟具有很强的自主飞行能力，但远距离迁飞还是主要借助气流实现，韩经纬等（2013）的分析结果显示，草地螟的迁飞过程与冷锋的影响进程相对应，底层气流、气流的垂直上升运动以及适宜的温度都有利于草地螟的飞行运转；迁入区大范围和大量级的降雨，会使后部强劲的下沉气流更加显著，促成草地螟的成群降落，东北冷涡的时空分布与草地螟降落区域、成虫密度呈显著相关。随着大气数值模拟、轨迹分析、天气背景分析等方法的使用，进一步证实低温、冷暖锋过境、恶劣天气来临会诱发草地螟大规模外迁，降水、下沉气流、气流辐合区、冷锋锋面会导致草地螟集中降落（孙虹雨，2014；Chen *et al.*，2016）。由于影响草地螟远距离迁飞的天气系统较多，单纯依靠天气系统不能解释草地螟集中起飞、降落、空中运转机制，也无法准确预测草地螟的迁入区、迁入期和迁入量，导致我国草地螟的灾变预警一直处于较低水平。

2.4 迁飞规律

草地螟是世界性的迁飞害虫，俄罗斯的东西伯利亚，蒙古国和我国的华北和东北地区相邻，且植被类型相似，草地螟在这些地区重发期和轻发期的高度同步性表明这些地区的种群之间紧密相关（黄绍哲等，2011）。20 世纪 80 年代全国草地螟协作组协调多家单位联合攻关，对草地螟越冬区域、发生规律、迁飞路径等方面进行了系统研究，将草地螟在我国的发生为害划分为两个区，即越冬虫源区和一代常发区，其中越冬虫源区主要位于 39°-43°N 与 110°-116°E 之间，即内蒙古乌盟、山西雁北和河北张家口，而东北地区此时很少有越冬虫源。一代常发区主要包括黑龙江、吉林、辽宁的西北部以及内蒙古自治区的东北部地区，一代常发区是草地螟的主要发生危害区，每年春季有大量越冬代成虫迁入为害（全国草地螟科研协作组，1987；孙雅杰和陈瑞鹿，1995）。杨素钦和马桂椿（1987）认为草地螟的迁飞路径主要有两条：一是从华北的主要发生基地出发，途径河北承德、内蒙古赤峰、吉蒙辽交界区，最远可到达黑龙江中西部；二是从主要发生区北上，经内蒙古锡盟，进入蒙古国，再向东回转到达大兴安岭北端地区。而陈晓等（2004）对华北越冬区是东北地区主要虫源地的观点提出质疑，并通过轨迹模拟、气象分析对我国草地螟的虫源问题进行研究，提出境外虫源是东北地区主要虫源的观点，虽华北虫源能够迁入东北，但其影响相对较小，东北地区草地螟种群主要来自当地及境外越冬区（陈晓等，2008；Chen *et al.*，2008）。雷达监测及虫源分析也多次显示我国华北与东北，境内与境外虫源存在频繁的交流（张云慧等，2008；张丽等，2012），由于缺少国际间的交流与合作，境外虫源对我国草地螟暴发的影响程度如何以及境外虫源大规模迁入的天气背景至今尚不明确。

3 草地螟的监测预警

3.1 理化诱控技术

3.1.1 灯光诱控 20 世纪 50 年代邱士邦院士就

提出灯光对草地螟具有很好的诱集作用，可用于草地螟的预测预报（邱士邦，1957），随着昆虫感光原理以及趋光本质研究的不断发展，黑光灯、高压汞灯、荧光灯、虫情测报灯以及频振式杀虫灯等灯光诱杀设备在草地螟虫情监测与种群控制中得到广泛应用（江幸福等，2009）。灯光诱控不仅能准确监测草地螟种群动态，为虫情预测预报提供基础数据，而且还可以大量诱杀成虫，减少其交配几率和田间落卵量，可节约防治成本，减少农药对环境的污染（张跃进等，2008，2009）。江幸福等（2010）研究了不同波长单色光和白光刺激下草地螟成虫趋光反应，确定了紫外区 360 nm 和近紫外的 400 nm 是草地螟的光谱敏感区；明确了雌性较雄性的趋光反应率高，随着蛾龄的增加，成虫趋光反应率明显升高，10 日龄时雌蛾还具有明显的趋光行为，为草地螟诱虫灯具的研发、推广应用以及诱杀效果的科学评价提供了理论依据。张跃进等（2009）通过比较频振式杀虫灯、太阳能杀虫灯和高压汞灯诱杀草地螟效果，从防效、经济效益和生态安全等因素综合评价，确定频振式杀虫灯是诱杀草地螟成虫的首推产品，并测定了每盏灯控制面积为 3.0 hm^2（高秆作物）至 4.0 hm^2（矮秆作物）；设置高度，一般低矮植物以 70-80 cm 为宜，高秆植物以齐或超出作物顶端为最宜，为草地螟灯光监测和防控提供了科学依据。

探照灯诱虫器作为研究迁飞昆虫空中种群动态的一种重要监测工作，在草地螟的监测和防控中也发挥了重要作用，其数量变化规律与地面灯灯下虫量变化规律基本一致，监测峰次多于地面灯，且对起飞迁出、过境、迁入降落虫群均具有较强诱捕作用。另外，探照灯诱虫器与昆虫雷达联合使用的研究发现，探照灯诱虫器诱虫数量变化与昆虫雷达监测目标昆虫回波变化趋势具有很高的一致性，进一步证实了探照灯诱虫器既可以对迁飞性昆虫的虫源性质判断方法，又可以辅助昆虫雷达目标识别（Feng *et al.*，2004；张云慧等，2008；张丽等，2012）。2008 年奥运前夕，草地螟成虫大举入侵北京，本研究团队根据多年昆虫雷达监测经验和对草地螟迁飞规律、空中飞行参数的掌握，提出利用 300 台探照灯诱虫器在北京北郊建立两条阻截带，并辅以频振式杀虫灯形成立体式防控，有效拦截空中迁飞的草地螟成虫，并提出探照灯诱虫器可以作为一种新的植物保护技术在生产中加以应用（张云慧等，2009）。

3.1.2　性诱和食诱技术　在草地螟的第 3 个暴发周期，科研工作者对草地螟的性诱产品进行了田间测试，与常规监测工具普通黑光灯和自动虫情测报灯对比，性诱剂诱蛾量低、诱测日数少，但两类工具诱蛾曲线峰型基本一致（康爱国等，2013）。草地螟主要发生在地广人稀的农牧区，草地螟性诱剂诱蛾可作为电力供应缺乏地区对草地螟的一种辅助监测手段，用于当地短期预报和防治指导。另外，草地螟成虫对开花植物具有很强的趋性，生产上也利用这个习性种（留）植苜蓿、黎科杂草等诱集带诱控草地螟产卵，并集中防控（张跃进等，2008）。因此，利用成虫趋性行为，开发食诱剂产品可以有效替代利用诱集植物等传统的害虫引诱方式，商品化食诱剂具有可标准化生产、使用方法简单、效果稳定等优点。

3.2　现代信息技术

遥感技术在病虫害监测预警上最成功的案例是应用昆虫雷达对空中飞行的昆虫进行实时监测。20 世纪 80 年代吉林农业科学院植物保护研究所陈瑞鹿先生研制出我国首台扫描昆虫雷达，在山西、吉林等地对草地螟迁飞行为开展雷达监测（陈瑞鹿等，1992）；中国农业科学院植物保护研究所在 20 世纪 90 年代研发我国第 2 台扫描昆虫雷达并在河北廊坊、山东北隍城岛对草地螟的春季迁飞、夏季扩散行为和跨海迁飞行为进行观测（Feng *et al.*，2004）。随着雷达技术的发展垂直监测昆虫雷达和双模式昆虫雷达相继研发成功，并在内蒙古集宁、锡林浩特和北京延庆对草地螟的迁飞行为进行了季节性的监测（张云慧等，2008；张丽等，2012；张鹿平等，2018）。昆虫雷达的出现为更好地阐明草地螟的迁飞提供了技术支持，长期的监测数据也为了解草地螟的迁飞规律提供了基础性信息资料。

明确草地螟等重大迁飞性害虫的虫源和迁飞路径对于其早期预警具有重要意义。20 世纪 80 年代，杨素钦和马桂椿（1987）根据大区灯下诱虫数量，结合当时的日天气图，对草地螟的迁飞路径和降落的天气条件进行了探讨。陈晓等（2004）通过编制轨迹分析程序，采用逐步订正法对气象资料进行客观分析，获得网格风场后，利用数值天气预报中的诊断分析方法建立轨迹分析模型，对 1999 年东北地区主要迁入峰期草地螟的天气学背景，风场的时空分布及草地螟迁飞轨迹进行了模拟。随着信息技术的发展，大气轨迹分析及扩散模型 HYSPLIT（张云慧等，2008）、MM5 中尺度数值预报模式（陈晓等，2008）、GrADS 气象数据分析软件和基于 WRF、FLEXPART 模式（林培炯等，2020）的昆虫迁飞轨迹分析方法等已经广泛应用于草地螟等迁飞性昆虫的轨迹模拟和迁飞路径分析。胡朝兴（2018）基于拉格朗日粒子扩散平台 FLEXPART，将昆虫主要迁飞行为参数融入其中，自主开发了一款专业的昆虫迁飞轨迹模拟平台 Flexpart-Insect，将雷达观测到的迁飞行为参数融入 Flexpart-Insect 模型，模拟迁飞性害虫的迁飞轨迹，定量化展示了虫群的降落分布模式，有望实现迁飞性昆虫大范围空中生态系统动态监测和预警。

3.3 常规预测预报技术

草地螟的有效防控依赖于准确的异地预测预报，而虫源地和迁飞路径准确与否是异地预测预报的关键。俄罗斯相关专家系统研究了草地螟种群动态与各发育阶段气候因子的关系,建立了草地螟的预测预报模型指导田间防控（Omelova，1982；Makarova and Doronina，1994）。由于俄罗斯草地螟主要发生区不具备典型的昆虫迁飞场，草地螟大规模远距离迁飞的现象并不经常出现，因此利用前期的虫源基数和气象指标预测草地螟后期种群动态的准确性很高。20 世纪 80 年代，全国草地螟协作组（1987）根据越冬虫源区调查、迁飞路径，制定了异地预测草地螟发生趋势的长、中、短期预报方法。根据调查集中越冬场所的面积和平均虫茧密度来预报一代幼虫发生趋势的长期预报；根据调查冬后存活率及化蛹羽化进度结合地面及高空天气形势，制定迁出峰次，主迁日期，主降落地区的中期预报；由于草地螟采取的就是先迁飞后繁殖的策略，所以卵巢发育解剖的方法也是草地螟监测预警工作重要技术之一。迁出区的雌蛾卵巢分级多为Ⅰ、Ⅱ级，而迁入区通常为Ⅲ、Ⅳ级，再根据黑光灯诱集有效蛾峰出现的日期和卵巢发育进度制定短期预报（孙雅杰等，1992；孟正平，2007）。姜玉英等（2009）对草地螟秋季越冬基数调查、春季越冬幼虫存活率调查、化蛹羽化进度观察、成虫观测、卵量调查、幼虫调查、防治和挽回损失统计、发生程度划分方法、预报方法和数据汇总与传输等方面内容统一标准，制定了适合农区草地螟预测预报技术规范。上述方法在我国草地螟的预测预报和有效防控方面发挥了积极的作用。然而我国草地螟的主要发生区华北、东北地区处于东亚迁飞场的北端，华北、东北地区和境内、境外虫源迁飞交流频繁，种群动态时空分布具有不连续性，从时间上来说，草地螟种群具有间歇性暴发的特点，从空间上来说，草地螟不同的世代很少在同一地区连续发生（罗礼智等，2018），给我国的预测预报带来很大挑战。

3.4 数字化监测预警技术

近年来，随着信息技术的发展，国内外在病虫害监测预警信息化研究上取得了很大进展，陆续研发了一些病虫害监测预警系统，既有针对单一病虫害的预警预报系统，也有综合性的病虫害辅助诊断、防控决策等专家系统，以及物联网系统（Shtienberg，2013）。全国农技中心带领全国各级植保部门抓住信息化快速发展的历史机遇，大力推进现代植保体系建设，在新型测报工具研发应用、信息系统建设、预报发布方式创新等方面进行了大胆探索，取得了一系列成果。研究开发了覆盖水稻、小麦、玉米、棉花、马铃薯、油菜 6 种作物病虫害及蝗虫、黏虫、草地螟等重大病虫害数字化监测预警系统（黄冲等，2016），以大数据平台形式将数据、图表、预测预警和视

频监控结合展示，使用户获取数据更加准确便捷，提升了植保工作的信息化、现代化水平，增强预测和决策层的宏观掌控能力（刘心怡等，2020）。尤其是近年来，现代病虫监测工具取得长足发展，传统的灯诱、性诱等测报工具，经过与自动控制技术结合后发展到达到半自动化监测工具水平，灯诱监测每小时自动拍照监测，可实现在办公室远程监测；性诱监测实现进虫即时上报，使得远程自动控制、数据传输和智能分析成为可能，也涌现出一批智能化、自动化的远程监控设备和监控系统，初步实现了草地螟等重大病虫疫情发生动态自动化、智能化、数字化监测（黄冲等，2020）。

4　展望

草地螟发生区域广阔、环境多样，发生危害的时空分布具有不确定性，造成年度间发生程度差异大、发生为害规律很难掌握。由于华北、东北地区和境内、境外虫源存在频繁的交流，导致我国中长期预测预报与实际发生存在较大的偏差，很难指导田间有效防控。随着草地螟第 4 个暴发周期的来临，草地螟的迁飞规律需要进一步明确，监测预警水平需要进一步提高。

1）长期性监测。草地螟是一种间歇性暴发成灾的害虫，往往在暴发周期结束后，很多研究工作就此中断，缺乏对草地螟周期性暴发规律的系统研究。与重发年份一样，轻发年份同样是构成草地螟周期性种群波动不可或缺的环节，加强草地螟种群数量的长期监测，对草地螟发生的时空变化规律形成普遍性结论和宏观性判断，才有可能把握草地螟种群动态变化的长期规律，从而提升对草地螟突发、暴发的预测预报水平。

2）区域性联合监测。我国草地螟的主要发生地华北和东北地区地处东亚迁飞场的北部，华北、东北地区和境内、境外虫源迁飞交流频繁，种群动态时空分布具有不连续性，单一站点的数据指导范围有限，必须在草地螟的越冬虫源区和发生为害区设置多个监测点，针对草地螟开展联合监测，及时共享虫情信息，才能建立准确的异地预测预报技术，及时发布虫情信息，有效指导田间防控。

3）新的监测手段的应用。草地螟越冬区域主要位于地广人稀的农牧交错地带和山川交错、地形复杂的高海拔地区，常规的监测手段难以实现虫源监测的准确性和时效性，迫切需要引入新的监测手段。雷达昆虫经过 50 多年的发展历程，在迁飞昆虫的起飞、巡航高度、定向、成层及其与环境的关系等飞行行为的监测方面作用突出。近年来，随着信息技术的发展，我国科研工作者通过与生产企业的密切合作，在提升雷达目标的识别能力、自动化、智能化监测等方面取得了开拓性的进展，尤其是 2020 年我国首台自主研发的新型垂直监测昆虫雷达出口以色列，标志着我国昆虫雷达技术跻身世界先进行列，对重大迁飞性害虫的智能化、网络化建设具有很好的推动作用。2017 年 5 月 12 日，四部委印发的《全国动植物保护能力提升工程建设规划（2017-2025 年）》中明确建设 15 个空中迁飞性害虫雷达监测站，按照重要迁飞性害虫的迁飞路径合理设置雷达观测站达到空、天、地一体化的网络，实现虫源地、迁飞路径和降落危害地的自动化预警。预计随着昆虫雷达点的建设完成，并与常规监测工具相结合，实现自动化、智能化监测，将会对草地螟等重大远距离迁飞害虫异地预警发挥重要作用。

参考文献 (References)

Afonin AN, Akhanaev YB, Frolov AN, 2014. The range of the beet webworm *Loxostege sticticalis* L. (Lepidoptera, Pyraloidea: Crambidae) in the former USSR territory and its subdivision by the number of generations per season. *Entomological Review*, 94(2): 200–204.

Akhanaev YB, Berim MN, Jiang X, Kutcherov DA, Luo L, Malysh YM, Reznik SY, Saulich AK, Sobolev VA, Tokarev YS, Frolov AN, Zhang L, 2013. Photoperiodic reaction in the beet webworm *Loxostege sticticalis* L. (Pyraloidea, Crambidae) from eastern and western parts of its Eurasian range. *Entomological Review*, 93(7): 814–818.

Akhanaev YB, 2014. Population structure of the beet webworm and its improvement in population prediction [Russian]. Candidate's Dissertation in Biology. St. Petersburg: All-Russian Research Institute of Plant Protection of the Russian Academy of

Agricultural Sciences.

Berryman AA, 1996. What causes population cycles of forest Lepidoptera? *Trends in Ecology & Evolution*, 11(1): 28–32.

Cao WJ, 2006. Studies on genetic diversity and migration trajectory of different geographic populations of the meadow moth, *Loxostege sticticalis* (Lepidoptera: Pyralidae). 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.]

Chen RL, Bao XZ, Wang SY, Sun YJ, Li LQ, Lui JR, 1992. Radar observation of migration activity of *Loxostege sticticalis*. *Journal of Plant Protection*, 19(2): 171–174. [陈瑞鹿, 暴祥致, 王素云, 孙雅杰, 李立群, 刘继荣, 1992. 草地螟迁飞活动的雷达观测. 植物保护学报, 19(2): 171–174.]

Chen X, Chen JG, Xue Y, Hao LP, Zhang Y, Zhao KJ, 2004. Immigration of the 1999 outbreak populations of the meadow moth, *Loxostege sticticalis* L. (Lepidoptera: Pyralidae) into the northeastern part of China. *Acta Entomologica Sinica*, 47(5): 599–606. [陈晓, 陈继光, 薛玉, 郝丽萍, 张友, 赵奎军, 2004. 东北地区草地螟 1999 年大发生的虫源分析. 昆虫学报, 47(5): 599–606.]

Chen X, Jiang YY, Meng ZP, Chen K, Kang AG, Li CM, Zhai BP, 2016. Extreme climate has become an important factor causing the termination of outbreak periods of *Loxostege sticticalis* (Lepidoptera: Pvralidae) in China. *Acta Entomologica Sinica*, 59(12): 1363–1375. [陈晓, 姜玉英, 孟正平, 陈阔, 康爱国, 李春民, 翟保平, 2016. 极端气候成为我国草地螟暴发周期终结的重要因子. 昆虫学报, 59(12): 1363–1375.]

Chen X, Zeng J, Zhai BP, 2016. A series of abnormal climatic conditions caused the most severe outbreak of first generation adults of the meadow moth (*Loxostege sticticalis*) in China. *International Journal of Biometeorology*, 60(6): 789–800.

Chen X, Zhai BP, Gong RJ, Yin MH, Zhang Y, Zhang KJ, 2008. Source area of spring population of meadow moth, *Loxostege sticticalis* L. (Lepidoptera: Pyralidae), in Northeast China. *Acta Ecologica Sinica*, 28(4): 1521–1535.

Chen X, Zhai BP, Hao LP, Xue Y, Chen K, Yu CL, 2008. Numerical simulation of the migration process of the meadow moth, in the atmosphere: A case study for northem China. *Acta Ecaologica Sinica*, 28(10): 5104–5112. [陈晓, 翟保平, 郝丽萍, 薛玉, 陈阔, 于成玲, 2008. 草地螟(*Loxostege sticticaliso*)一次迁飞过程的数值模拟. 生态学报, 28(10): 5104–5112.]

Chen Y, Jiang YY, 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 YX, 2012. The regulation and interaction of migration and reproduction in the beet webworm, *Loxostege sticticalis* (Lepidoptera: Pyralidae). Doctoral dissertation. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences. [程云霞, 2012. 草地螟 Loxostege sticticalis 迁飞与生殖行为的调控及互作关系. 博士学位论文. 北京: 中国农业科学院.]

Chittenden FH, 1902. Some insects injurious to vegetable crops a series of articles dealing with insects of this class. Washington, D.C: U.S. Dept. of Agriculture, Division of Entomology. 47–49.

Dingle H, Drake VA, 2007. What is migration? *BioScience*, 57(2): 113–121.

Feng HQ, Wu KM, Cheng DF, 2004. Spring migration and summer dispersal of *Loxostege sticticalis* (Lepidoptera: Pyralidae) and other insects with radar in northern China. *Environmental Entomology*, 33(5): 1253–1265.

Frolov AN, Kuznetsova TL, Malysh YM, Mitrofanov VB, Issi IV, 2004. Cyclicity of outbreaks of beet webworm [Russian]. *Proceedings of St. Petersburg Agric. Univ.*, Anniversary issue: 63–71.

Frolov AN, 2015. The beet webworm *Loxostege sticticalis* L. (Lepidoptera, Crambidae) in the focus of agricultural entomology objectives: I. The periodicity of pest outbreaks. *Entomological Review*, 95(2): 147–156.

Han JW, Chen SH, Yan WX, Chen Y, 2013. Meteorological conditions for migration of over-winter *Loxostege sticticalis* imago. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 34(3): 332–337. [韩经纬, 陈素华, 闫伟兄, 陈阳, 2013. 草地螟越冬代成虫迁飞的气象条件分析. 中国农业气象, 34(3): 332–337.]

Hu CX, 2018. Construction and application of insect migration trajectory simulation model Flexpart-Insect. Doctoral dissertation. Beijing: China Agricultural University. [胡朝兴, 2018. 昆虫迁飞轨迹模型 Flexpart-Insect 构建与应用. 博士学位论文. 北京: 中国农业大学.]

Hu WX, 1981. Biological characteristics and forecast of *Loxostege sticticalis*-An introduction to the Soviet Union. *Reference Material of Forecasting on Plant Disease and Insect Pest*, 2(1): 20–25. [胡文绣, 1981. 草地螟的生物学特性及其测报——介绍苏联的概况. 病虫测报参考资料, 2(1): 20–25.]

Huang C, Liu WC, Jiang YY, Zeng J, Lu MH, Liu J, 2016. Research on web-based monitoring and warning system for crop diseases and pests. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 37(5):

196–199, 205. [黄冲, 刘万才, 姜玉英, 曾娟, 陆明红, 刘杰, 2016. 农作物重大病虫害数字化监测预警系统研究. 中国农机化学报, 37(5): 196–199, 205.]

Huang C, Liu WC, Zhang J, Li JH, Xu YN, Li YL, 2020. Exploration and practice of promoting accurate measurement and report of crop diseases and insect pests. *China Plant Protection*, 40(7): 47–50. [黄冲, 刘万才, 张剑, 李吉环, 徐元宁, 李云龙, 2020. 推进农作物病虫害精准测报的探索与实践. 中国植保导刊, 40(7): 47–50.]

Huang SZ, Jiang XF, Lei CL, Luo LZ, 2008. Correlation analysis between the periodic outbreaks of *Loxostege sticticalis* (Lepidoptera: Pyralidae) and solar activity. *Acta Ecologica Sinica*, 28(10): 4823–4829. [黄绍哲, 江幸福, 雷朝亮, 罗礼智, 2008. 草地螟(*Loxostege sticticalis*)周期性大发生与太阳黑子活动的相关性. 生态学报, 28(10): 4823–4829.]

Huang SZ, Luo LZ, Jiang YY, Tang JH, Zhang L, 2011. Characteristics of spatial distribution pattern of *Loxostege sticticalis* outbreak population in China in 2008. *Plant Protection*, 37(4): 76–81. [黄绍哲, 罗礼智, 姜玉英, 唐继红, 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.]

Hunter MD, Price PW, 1998. Cycles in insect populations: Delayed density dependence or exogenous driving variables?. *Ecological Entomology*, 23(2): 216–222.

Jiang XF, Luo, LZ, Zhang L, Zhang YJ, Jiang YY, 2009. Comparison of Jiaduo automatic pest forecast light trap and blacklight trap for monitoring and trapping the meadow moth, *Loxostege sticticalis*. *Plant Protection*, 35(2): 109–113. [江幸福, 罗礼智, 张蕾, 康爱国, 张跃进, 姜玉英, 2009. 佳多虫情测报灯和黑光灯对草地螟种群监测与防治效果比较. 植物保护, 35(2): 109–113.]

Jiang XF, Zhang ZZ, Luo LZ, 2010. Phototaxis of the beet webworm *Loxostege sticticalis* to different wavelengths and light intensity. *Plant Protection*, 36(6): 69–73. [江幸福, 张总泽, 罗礼智, 2010. 草地螟成虫对不同光波和光强的趋光性. 植物保护, 36(6): 69–73.]

Jiang XF, Zhang L, Cheng YX, Jiang YY, Liu J, 2019. The fourth occurrence cycle of the beet webworm *Loxostege sticticalis* may be coming in China. *Plant Protection*, 45(4): 79–81. [江幸福, 张蕾, 程云霞, 姜玉英, 刘杰, 2019. 草地螟第 4 个发生周期或将来临. 植物保护, 45(4): 79–81.]

Jiang YY, Zhang YJ, Yang BS, Ma CJ, Wang HJ, Feng XD, Wang CR, 2009. Distribution characteristics of over-winter *Loxostege sticticalis* in 2008 and the occurrence trend in 2009. *China Plant Protection*, 29(1): 39–41. [姜玉英, 张跃进, 杨宝胜, 马苍江, 王贺军, 冯晓东, 王春荣, 2009. 草地螟 2008 年越冬虫源分布特点和 2009 年发生趋势分析. 中国植保导刊, 29(1): 39–41.]

Jilin Province Scientificr Research Cooperation Group of *Loxostege sticticalis*, 1987. The occurrence regularity and control technology of *Loxostege sticticalis* in Jilin Province. *Forecasting of Plant Disease and Insect Pest*, 7(S1): 34–52. [吉林省草地螟科研协作组, 1987. 吉林省草地螟发生规律及防治技术研究报告. 病虫测报, 7(S1): 34–52.]

Kang AG, Fan RX, Zhang YH, Li Q, Zhang FY, Yang LJ, Zhao XJ, 2003. Occurrence characteristics, factors and control measures of *Loxostege sticticalis* in the third occurrence period. *Entomological Knowledge*, 40(1): 75–79. [康爱国, 樊荣贤, 张玉慧, 李强, 张凤英, 杨立军, 赵晓娟, 2003. 草地螟第三个暴发周期的发生特点、成因及防治对策. 昆虫知识, 40(1): 75–79.]

Kang AG, Zeng J, Liu DJ, Jiang YY, Zhang YH, Wang P, Liang SH, 2013. The experiment and evaluation of application effect of *Loxostege sticticalis* sexual inducement. *China Plant Protection*, 33(7): 44–48. [康爱国, 曾娟, 刘栋军, 姜玉英, 张玉慧, 庞红岩, 王平, 梁树海, 2013. 草地螟性诱试验及其应用效果评价. 中国植保导刊, 33(7): 44–48.]

Klvana I, Berteaux D, Cazelles B, 2004. Porcupine feeding scars and climatic data show ecosystem effects of the solar cycle. *The American Naturalist*, 164(3): 283–297.

Knorr IB, Ryabko BY, Rjabko BJ, 1981. Relation between outbreak of the meadow moth in Siberia and solar activity. *Izve. Sibi. Otde. Akad. Nauk. SSSR B*, 5(1): 113–116.

Konakov NN, 1930. Historical notes on the outbreaks of the meadow moth in the black soil zone central Russia [Russian] //Materials for the Study of the Beet Webworm. Voronezh: Izd. Sta. Zashch. Rast. Oblzemupravl. Tz. Ch. O. 3–38.

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.]

Liu GT, Guo XD, Zhang J, Liu YX, He DT, 1987. Biological characteristics of meadow moth and the relationship with environmental conditions. *Forecasting of Plant Disease and Insect Pest*, 7(S1): 59–64. [刘光涛, 郭向东, 张金, 刘彦霞, 何德田, 1987. 草地螟的生物学特性及其发生与条件环境的关系. 病虫测报, 7(S1): 59–64.]

Liu J, Jiang YY, Zeng J, Chen Y, Wang CR, Zhang YH, Tao YL, 2019. Meadow moth *Loxostege sticticalis* occurred severely in partial area of northeast of China in 2018. *China Plant Protection*, 39(5): 36–41. [刘杰, 姜玉英, 曾娟, 陈阳, 王春荣, 张云慧,

陶元林, 2019. 2018 年我国东北局部草地螟重发. 中国植保导刊, 39(5): 36–41.]

Liu XY, Le Y, Yang XY, Liang ZJ, 2020. Crop pest monitoringand early warning system basedon big data platform. *Journal of Luoyang Institute of Science and Technology* (*Natural Science Edition*), 30(2): 71–76. [刘心怡, 乐毅, 阳小牙, 梁振京, 2020. 基于大数据平台的农作物病虫监测预警系统的研究. 洛阳理工学院学报(自然科学版), 30(2): 71–76.]

Lu Y, Wang HQ, Wei XZ, Chen R, Han ST, Li J, 2013. Analysis on the characteristics and causes of the outbreak of *Loxostege sticticalis* in Xinjiang in 2012. *China Plant Protection*, 33(12): 47–51. [芦屹, 王惠卿, 魏新政, 陈蓉, 韩顺涛, 李晶, 2013. 2012 年新疆草地螟重发特点及原因分析. 中国植保导刊, 33(12): 47–51.]

Luo LZ, Cheng YX, Tang JH, Jiang XF, Zhang L, 2018. The causes, targets and strategies of migration in the beet webworm, *Loxostege sticticalis* (Lepidoptera: Crambidae). *Plant Protection*, 44(5): 34–41. [罗礼智, 程云霞, 唐继洪, 江幸福, 张蕾, 2018. 草地螟迁飞的原因、目标与对策. 植物保护, 44(5): 34–41.]

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.]

Luo LZ, Huang SZ, Jiang XF, Zhang L, 2009. Characteristics and causes for the outbreaks of beet webworm, *Loxostege sticticalis* in northern China during 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, Li GB, 1991. Study on flight ability and behavior of adults of different age of *Loxostege sticticalis*. National Symposium on Insect Ecology. Changsha. 6. [罗礼智, 李光博, 1991. 草地螟不同蛾龄成虫飞行能力和行为的研究. 全国昆虫生态学术研讨会. 长沙. 6.]

Luo LZ, Li GB, 1993. Effective accumulated temperature of meadow moth and division of the generation area. *Acta Entomologica Sinica*, 36(3): 332–339. [罗礼智, 李光博, 1993. 草地螟的有效积温及其世代区的划分. 昆虫学报, 36(3): 332–339.]

Luo LZ, Li GB, Cao YZ, 1996. The fourth occurrence cycle of the beet webworm *Loxostege sticticalis* may be coming in China. *Plant Protection*, 22(5): 50–51. [罗礼智, 李光博, 曹雅忠, 1996. 草地螟第 3 个猖獗为害周期已经来临. 植物保护, 22(5): 50–51.]

Makarova LA, Doronina GM, 1994. The Synoptic Approach to Forecasting Long-range Migration of Insect Pests [Russian]. St.-Petersburg: Gidrometeoizdat. 199.

Matov Q, Chimidtseren B, 1984. The meadow moth *Loxostege sticticalis* L. in the Mongolian People's Republic [Russian]. *Zashchita Rastenii*, (6): 53.

Maxson AC, 1920. Combating the sugar beet webworm on a large scale. *Journal of Economic Entomology*, 13(6): 468–471.

Meng ZP, 2007. Anatomical technique of ovary of female *Loxostege sticticalis*. *China Plant Protection*, 27(12): 28–29. [孟正平, 2007. 草地螟雌蛾卵巢解剖技术. 中国植保导刊, 27(12):28–29.]

Myers JH, 1998. Synchrony in outbreaks of forest Lepidoptera: A possible example of the moran effect. *Ecology*, 79(3): 1111–1117.

National Agro-Tech Extension and Service Center, 2019. The peak of overwintering adults of meadow moth is observed, and the damage of the first generation larvae should be alerted. Accessed on: Mar 30, 2021. Available: https://www.natesc.org.cn/News/des?id=35abc034-cc3e-4b7b-b700-18b129a03731&kind=HYTX&Category=病虫测报&CategoryId=d6a35339-e804-4f90-bf93-927382b1fd22 [全国农业技术推广服务中心, 2019. 草地螟出现越冬代成虫高峰警惕一代幼虫危害. https://www.natesc.org.cn/News/des?id=35abc034-cc3e-4b7b-b700-18b129a03731&kind=HYTX&Category=病虫测报&CategoryId=d6a35339-e804-4f90-bf93-927382b1fd22.]

National Agro-Tech Extension and Service Center, 2020. The moth peak appeared again in the overwintering generation of the grassland borer and the reoccurrence of the first larvae was obvious Accessed on: Mar 30, 2021. Available: https://www.natesc.org.cn/News/des?id=14235fe6-4481-4a17-a89d-fc64bc7ae455&kind=HYTX&Category=病虫测报&CategoryId=d6a35339-e804-4f90-bf93-927382b1fd22 [全国农业技术推广服务中心, 2020. 草地螟越冬代成虫再次出现蛾峰一代幼虫重发态势明显. https://www.natesc.org.cn/News/des?id=14235fe6-4481-4a17-a89d-fc64bc7ae455&kind=HYTX&Category=病虫测报&CategoryId=d6a35339-e804-4f90-bf93-927382b1fd22.]

National Scientificr Research Cooperation Group of *Loxostege sticticalis*, 1987. Research on occurrence, forecast and control of *Loxostege sticticalis*. *Forecasting of Plant Disease and Insect Pest*, 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.]

Omelova BP, 1982. Forecasting population dynamics of grass moth (*Loxostege sticticalis*). *Zashchita Rastenii*, (9): 42–46.

Pepper JH, 1938. The effect of certain climatic factors on the distribution of the beet webworm (*Loxostege sticticalis* L.) in

North America. *Ecology*, 19(4): 565–571.

Qiu SB, 1957. Suggestions on the forecasting of *Loxostege sticticalis*. *Agricultural Science Communication*, 7(6): 53–57. **[**邱士邦, 1957. 对草地螟预测预报工作的几点建议. 农业科学通讯, 7(6): 53–57.**]**

Qu XF, Shao ZR, Wang JQ, 1999. Characteristics and causes of outbreak cycle of meadow moth in agricultural and pastoral areas of northern China. *Entomological Knowledge*, 36(1): 11–14. [屈西锋, 邵振润, 王建强, 1999. 我国北方农牧区草地螟暴发周期特点及原因剖析. 昆虫知识, 36(1): 11–14.]

Shtienberg D, 2013. Will decisiorrsupport systems be widely used for the management of plant diseases? *Annual Revicw of Phytopathology*, 51: 1–16.

Strickland EH, 1921. The invasion of southern Alberta by beet webworms. 51st Annual Report of the Entomological Society of Ontario. Toronto: 29–31.

Sun CX, 1982. Study on meadow moth and its control. *Tiancai Tangye*, 7(4): 32–37. [孙昌学, 1982. 草地螟及其防治研究. 甜菜糖业, 7(4): 32–37.]

Sun HY, 2014. Relationship of northeast cold vortex with migration and landing of *Loxostege sticticalis* (L.). *Journal of Meteorology and Environment*, 30(6): 85–91. [孙虹雨, 2014. 草地螟迁飞、降落与东北冷涡的关系. 气象与环境学报, 30(6): 85–91.]

Sun YJ, Chen RL, 1995. Study on migration, occurrence area and life history of *Loxostege sticticalis*. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 20(4): 86–91. [孙雅杰, 陈瑞鹿, 1995. 草地螟迁飞、发生区与生活史的研究. 华北农学报, 20(4): 86–91.]

Sun YJ, Wang SY, Bao XZ, Chen RL, 1992. Development classification of female moth of *Loxostege sticticalis* and its application in forecasting. *Forecasting of Plant Disease and Insect Pest*, 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 JH, Cheng YX, Luo LZ, Jiang XF, Zhang L, 2016. Effects of age, temperature and relative humidity on free flight activity of the beet webworm, *Loxostege sticticalis*. *Plant Protection*, 42(2): 79–83. [唐继洪, 程云霞, 罗礼智, 江幸福, 张蕾, 2016. 蛾龄、温度和相对湿度对草地螟自主飞行能力的影响. 植物保护, 42(2): 79–83.]

Tang ZQ, Zhang H, 2008. Heilongjiang pest has been under control, soybean prices will still fall in the short term. http://finance/Sina.com.cn/money/future/fmnews/20080819/035952121.shtm. [唐宗全, 张昊, 2008. 黑龙江虫灾已受控, 大豆价格短期仍将回落. http://finance/Sina.com.cn/money/future/fmnews/20080819/035952121.shtm.]

Tian SY, 1963. Study on *Loxostege sticticalis* and its control. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2(3): 15–22. [田绍义, 1963. 草地螟及其防治研究. 华北农学报, 2(3): 15–22.]

Wang CR, Chen JG, Song XD, Hu YJ, Si ZS, Zhang YJ, Jiang YY, Zhang Y, Huang CZ, Meng FH, 2006. Analysis on characteristics and causes of meadow webworm, *Loxostege sticticalis*, in the third outbreak cycle in Heilongjiang. *Chinese Bulletin of Entomology*, 43(1): 98–104. [王春荣, 陈继光, 宋显东, 胡亚军, 司兆胜, 张跃进, 姜玉英, 张印, 黄常柱, 孟凡华, 2006. 黑龙江省草地螟第三个暴发周期特点及成因分析. 昆虫知识, 43(1): 98–104.]

Wang QQ, Wang L, Li K, Cao YZ, Yin J, Xiao C, 2015. Influences of different host plants on the nutrition and digestive enzymes of *Loxostege sticticalis*. *Plant Protection*, 41(4): 46–51. [王倩倩, 王蕾, 李克斌, 曹雅忠, 尹姣, 肖春, 2015. 不同寄主植物对草地螟的营养作用及消化酶的影响. 植物保护, 41(4): 46–51.]

Wang QR, Zhang Y, Chen X, 2005. Investigation on overwintering situation of *Loxostege sticticalis* in Hulunbeier city. *China Plant Protection*, 25(6): 34–36. [王秋荣, 张友, 陈晓, 2005. 呼伦贝尔市草地螟越冬情况调查. 中国植保导刊, 25(6): 34–36.]

Wang XD, 1981. Preliminary observation on spring wheat damaged by *Loxostege sticticalis*. *Xinjiang Farm Research of Science and Technology*, 4(5): 50–51. [王信达, 1981. 草地螟为害春小麦初步观察. 新疆农垦科技, 4(5): 50–51.]

Wei Q, Cui WL, Du JL, Sun MJ, Zhao XL, Gu XY, Liang YC, Zhang GZ, Li CX, Huang ZF, Jia ZY, 1987. Occurrence regularity, prediction and integrated control of beet webworm (*Loxostege sticticalis*) in Heilongjiang province (1981-1985). *Forecasting of Plant Disease and Insect Pest*, 7(S1): 98–107. [魏倩, 崔万里, 杜俊岭, 孙明江, 赵晓丽, 顾成玉, 梁艳春, 张广芝, 李长祥, 黄自芳, 贾宗谊, 1987. 黑龙江省草地螟(*Loxostege sticticalis*)发生规律、预测预报及综合防治研究(1981-1985 年). 病虫测报, 7(S1): 98–107.]

Yang SQ, Ma GC, 1987, Study on migration path of *Loxostege sticticalis*. *Forecasting of Plant Disease and Insect Pest*, 7(S1): 122–128. [杨素钦, 马桂椿, 1987. 草地螟迁飞路径的探讨. 病虫测报, 7(S1): 122–128.]

Yin J, Cao YZ, Luo LZ, Hu Y, 2004. Effects of host plants on population growth of the meadow moth, *Loxostege sticticalis*. *Journal of Plant Protection*, 31(2): 173–178. [尹姣, 曹雅忠, 罗礼智, 胡毅, 2004. 寄主植物对草地螟种群增长的影响. 植物保护学报, 31(2): 173–178.]

Zeng J, Jiang YY, 2014. Occurrence characteristics and causes of the meadow moth *Loxostege sticticalis* in China in 2012. *Plant Protection*, 40(1): 142–148. [曾娟, 姜玉英, 2014. 我国 2012 年

草地螟发生特点与原因分析. 植物保护, 40(1): 142–148.]

Zeng J, Jiang YY, 2016. Analysis on occurrence of the meadow moth *Loxostege sticticalis* in China in 2014. *Plant Protection*, 42(4): 194–199. [曾娟, 姜玉英, 2016. 2014 年我国草地螟发生情况解析. 植物保护, 42(4): 194–199.]

Zeng J, Jiang YY, Liu J, 2018. The regional pattern of *Loxostege sticticalis* L. varied during a new occurrence intermission in China. *Acta Ecologica Sinica*, 38(5): 1832–1840. [曾娟, 姜玉英, 刘杰, 2018. 我国草地螟发生间歇期的区域格局变化. 生态学报, 38(5): 1832–1840.]

Zeng J, Jiang YY, Zhang Y, 2010. Occurrence characteristics and causes of grassland borer in China in 2009. *China Plant Protection*, 30(5): 33–36. [曾娟, 姜玉英, 张野, 2010. 2009 年我国草地螟发生特点及原因分析. 中国植保导刊, 30(5): 33–36.]

Zhang L, 2012. Radar observation of meadow occurrence and forcasting investigation. Master dissertation. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences. [张丽, 2012. 草地螟的雷达监测与早期预警研究. 硕士学位论文. 北京: 中国农业科学院.]

Zhang L, Zhang YH, Zeng J, Jiang YY, Cheng DF, 2012. Analysis of the sources of second generation meadow moth populations that immigrated into Chinese pastoral areas in 2010. *Acta Ecologica Sinica*, 32(8): 2371–2380. [张丽, 张云慧, 曾娟, 姜玉英, 程登发, 2012. 2010 年牧区 2 代草地螟成虫迁飞的虫源分析. 生态学报, 32(8): 2371–2380.]

Zhang LP, Zhang Z, Ji R, Jiang YY, Zhang YH, 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 SK, Liu MF, Li QR, Li JQ, 1987. Research on the occurrence law, prediction and comprehensive management of *Loxostege sticticalis* in Shanxi province. *China Plant Protection*, 7(S1): 82–97. [张树坤, 刘梅凤, 李齐仁, 李吉庆, 1987. 山西省草地螟发生规律、预测预报及其综合治理的研究. 中国植保导刊, 7(S1): 82–97.]

Zhang YH, Chen L, Cheng DF, Jiang YY, Lu Y, 2008. The migratory behaviour and population source of the first generation of the meadow moth, *Loxostege sticticalis* L. (Lepidoptera: Pyralidae) in 2007. *Acta Entomologica Sinica*, 51(7): 720–727. [张云慧, 陈林, 程登发, 姜玉英, 吕英, 2008. 草地螟 2007 年越冬代成虫迁飞行为研究与虫源分析. 昆虫学报, 51(7): 720–727.]

Zhang YH, Yang JG, Jin XH, Cheng DF, Tian J, Li YL, 2009. Aerial band barrier formed by vertical-pointing searchlight-traps against the migrating *Loxostege sticticalis*. *Plant Protection*, 35(6): 104–107. [张云慧, 杨建国, 金晓华, 程登发, 田喆, 李云龙, 2009. 探照灯诱虫带对迁飞草地螟的空中阻截作用. 植物保护, 35(6): 104–107.]

Zhang YJ, Jiang YY, Yang BS, Wang HJ, Ma CJ, Chen JG, 2009. Research and demonstration on monitoring technology of *Loxostege sticticalis*. *China Plant Protection*, 29(1): 36–38. [张跃进, 姜玉英, 杨宝胜, 王贺军, 马苍江, 陈继光, 2009. 草地螟监控技术研究与示范推广. 中国植保导刊, 29(1): 36–38.]

Zhang YJ, Jiang YY, Jiang XF, 2008. Research progress on key control techniques of *Loxostege sticticalis* in China. *China Plant Protection*, 28(5): 15–19. [张跃进, 姜玉英, 江幸福, 2008. 我国草地螟关键控制技术研究进展. 中国植保导刊, 28(5): 15–19.]

Zhu SM, 1963. Occurrence and control of *Loxostege sticticalis* in Central Shanxi Province. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*. 3(2): 16–20. [朱世模, 1963. 山西中部草地螟发生规律及防治研究. 山西农业科学, 3(2): 16–20.]