

中哈边境塔城区域迁飞性昆虫雷达观测研究初探

曹凯丽¹, 汪姝玥¹, 于冰洁¹, 刘程才², ROMAN Jashenko³, 季荣^{1*}

(1. 新疆师范大学生命科学学院, 新疆特殊环境物种保护与调控生物学实验室, 中亚区域跨境有害生物联合控制国际研究中心, 乌鲁木齐 830054; 2. 新疆塔城地区蝗虫鼠害预测预报防治站, 塔城 834700; 3. 哈萨克斯坦阿勒法拉比国立大学, 阿拉木图 050038)

摘要 2017年和2018年6月至8月运用KC-08XVSD型昆虫雷达, 结合探照灯诱虫器和地面诱虫灯诱捕数据及地面气象数据, 分析了中哈边境塔城区域空中昆虫飞行特征及主要类群。结果表明: 高空灯共诱捕到昆虫151种, 分属12目50科, 主要以鳞翅目和鞘翅目为主, 地面灯共诱捕到昆虫137种, 分属12目54科, 主要以鞘翅目、半翅目、双翅目和直翅目为主, 其中高空灯下宽胫夜蛾、旋歧夜蛾和甘薯天蛾的种群数量具有突增突减现象。雷达监测结果显示: 灯下诱集到大量昆虫时, 雷达回波时间主要集中在22:00–02:00, 回波高度主要集中在200~600 m, 有明显的成层现象和哑铃形回波分布。偏西风天气、风速在1.4~2.9 m/s时空灯和地面灯诱虫数量较多。研究结果为利用昆虫雷达长期监测中哈边境昆虫迁飞提供基础数据, 为深入探讨中哈边境区域害虫迁飞规律和监测预警提供科学依据。

关键词 中哈边境; 雷达观测; 昆虫迁飞; 飞行特征

中图分类号: S 431.9 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16688/j.zwbh.2019042

Entomological radar observation of migratory insects in China-Kazakhstan border areas

CAO Kaili¹, WANG Shuyue¹, YU Bingjie¹, LIU Chengcai², ROMAN Jashenko³, JI Rong^{1*}

(1. College of Life Sciences, Xinjiang Normal University, Key Laboratory of Special Species and Regulatory Biology in Xinjiang, International Center for the Collaborative Management of Cross-border Pests in Central Asia, Urumqi 830054, China; 2. Xinjiang Tacheng Locust and Rat Plagues Forecast Station, Tacheng 834700, China; 3. Al-Farabi Kazakh National University, Almaty 050038, Kazakhstan)

Abstract The KC-08XVSD entomological radar was used to study the flight characteristics and the dominant species of aerial insects in Tacheng area along the China-Kazakhstan border during June–August of 2017 and 2018. The data from entomological radar, search light trap, ground light trap and surface meteorological data were integrated in this study. The experimental results indicated that there were 151 species of insects trapped by search light trap, belonging to 50 families and 12 orders, mainly Lepidoptera and Coleoptera, and 137 species of insects trapped by ground light trap, belonging to 54 families and 12 orders, mainly Coleoptera, Hemiptera, Diptera and Orthoptera. The insects *Protoschinia scutosa*, *Anarta trifolii* and *Agrius convolvuli* showed a phenomenon of sudden change in the number of their populations. The target echoes of entomological radar indicated that, when a large number of insects were trapped by the lamp, there was a significant peak period of target echo density from 22:00 to 02:00, and the migration altitude of insects was mainly concentrated at 200–600 m. Entomological radar screen showed that there were dumbbell-shaped distribution of echoes and layering phenomenon of insects. When the wind direction was westerly and the wind velocity was from 1.4 m/s to 2.9 m/s, more number of insects was trapped by search light and ground light. These results provide a reference for the long-term monitoring of insect

收稿日期: 2019-01-23 修订日期: 2019-05-07

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFE0203100); 新疆高校科研创新团队项目(XJEDU2017T007); 新疆维吾尔自治区研究生科研创新项目(XJGRI2017098)

致谢: 感谢北京市植物保护站张智博士在论文修改方面提供的大量帮助。感谢新疆塔城市草原站书记努尔兰和站长石国界在野外工作中提供的诸多支持和帮助, 感谢俄罗斯农业科学院植物保护研究所研究员 Kabak Ilya 对鞘翅目昆虫鉴定给予的大量帮助。

* 通信作者 E-mail: jirong@xjnu.edu.cn

migration by using entomological radar in the future, and provide a scientific basis for the further study on the migration rules of pests and the monitoring in the border areas of China and Kazakhstan.

Key words China-Kazakhstan border; radar observation; insect migration; flight characteristics

迁飞是昆虫在时间和空间上躲避不良环境的策略,也是许多害虫大范围突发成灾的原因之一^[1-2]。昆虫迁飞多发生在夜间且飞行高度超出肉眼观测范围,导致对其预测预报较难^[3-5]。昆虫雷达(entomological radar)接收昆虫身体反射雷达发出的电磁波,并通过回波解算获得空中目标的数量、迁移高度和速度及方向等重要参数^[6-7]。国内外学者先后借助昆虫雷达技术对塞内加尔小车蝗 *Oedaleus senegalensis* Krauss、非洲黏虫 *Spodoptera exempta* (Walker)、草地螟 *Loxostege sticticalis* Linnaeus、褐飞虱 *Nilaparvata lugens* Stål 和黄地老虎 *Agrotis segetum* (Denis et Schiffmüller) 等迁飞害虫的飞行高度、速度和行为进行了研究,对建立迁飞害虫早期预警体系具有重要意义^[8-13]。随着现代科学技术的快速发展,昆虫雷达建制技术有了长足进步,昆虫雷达的运转模式已由单一扫描昆虫雷达或垂直监测昆虫雷达模式融合创新出双模式昆虫雷达,在探测精度、盲区缩减、参数丰富度等方面都获得了重要突破,新技术奠定了昆虫雷达开展迁飞性害虫监测预警的应用基础^[7,14]。

中国与哈萨克斯坦边境(以下简称“中哈边境”)塔城区域属于温带大陆性气候,具有丰富的植被类型^[15]。在适宜的气象条件下,害虫跨境迁飞事件频繁发生,给当地农牧业带来严重损失,该区域已经报道的迁飞性害虫有草地螟、亚洲飞蝗 *Locusta migratoria migratoria* (L.) 和意大利蝗 *Calliptamus italicus* (L.) 等^[16-19]。截至目前,此区域仅有记录迁飞性害虫发生情况,对空中昆虫类群、飞行高度等飞行参数未见报道。本研究在中哈边境塔城区域运用姊妹灯、昆虫雷达、气象站等对空中昆虫进行了监测,经初步分析,首次系统记录了昆虫种类和数量及重点种类在重要时期的昆虫雷达图像特征,结合高空和地面昆虫诱捕及气象数据,分析该区域地面和空中昆虫数量动态变化,明确空中昆虫飞行主要类群和飞行参数,以期为进一步探讨中哈边境区域害虫迁飞规律和对其监测预警提供科学依据和技术支撑。

1 研究地点

本研究监测地点位于中哈边境塔城区域“新疆师范大学中亚区域跨境有害生物联合控制国际研究中

心野外观测实验站”(以下简称“实验站”,46°38'N, 82°52'E,海拔 443 m)。该监测点位于库鲁斯台草原(草甸草原),距离中哈边境线约 3 km,周围地势平坦开阔,无高大山脉、树林及建筑物的遮挡,优势植物主要有芨芨草 *Achnatherum splendens* (Trin.) Nevski、芦苇 *Phragmites australis* (Cav.) 和盐地碱蓬 *Suaeda salsa* (Linn.) Pall. 等,农作物主要为玉米 *Zea mays* Linn. 和甜菜 *Beta vulgaris* Linn.,耕作制度为一年一熟。

2 材料与方法

2.1 空中种群观测工具

2.1.1 姊妹灯

姊妹灯即高空灯和地面灯,参考张智^[20]文中的参数,委托北京普禾泰农业科技有限公司加工制作,并配备时控开关。光源为 1 000 W 金属卤化物灯泡(ZJD,上海亚明)。

2.1.2 昆虫雷达

本研究使用的 KC-08XVSD 型双模式昆虫雷达由无锡立洋电子科技有限公司研制生产,此雷达兼具垂直监测昆虫雷达和扫描昆虫雷达功能,并引进双路馈线技术,盲区可降至 100 m 左右,垂直监测模式观测高度范围约为 100~5 000 m,扫描模式下监测范围约 3 000 m。

2.2 气象数据

近地面气象数据为中国气象数据网提供的中国地面气象资料日值数据集(V 3.0)。

2.3 研究方法

根据中哈边境塔城区域气候特征及昆虫生长发育期,2017 年和 2018 年研究开展时间为每年的 6 月 10 日至 8 月 30 日。监测期内,根据监测点日落和日出时间,将每日诱虫时间设置为北京时间 22:00 至翌日 07:00。每日清晨更换诱虫袋,小心取出诱捕袋中的昆虫并进行数量统计和分类鉴定。鉴定主要依据《新疆昆虫原色图鉴》^[21]《新疆林木害虫野外识别手册》^[22]《中国草原害虫图鉴》^[23]《北京灯下蛾类图谱》^[24]《中国昆虫生态大图鉴》^[25]《农田常见昆虫图鉴》^[26]。

雷达观测时,扫描模式下,监测仰角有 0°、15°、

30°和 45°,记录数据格式有 PPI(plan position indicator)和 3PPI(3 plan position indicator)。此外,如果大量昆虫过境,还使用 RHI(range height indicator)模式进行观测。雷达数据采集完成后自动存入电脑,利用非实时程序对数据进行解算,以便后期持续分析。

2.4 数据分析

数据分析使用 SPSS 19.0 软件,作图使用 Origin Pro 8.0 软件。

3 结果与分析

3.1 高空灯和地面灯诱虫结果

灯诱结果表明(表 1),高空灯和地面灯诱捕昆虫种类差异较大,高空灯诱集到的昆虫主要以鳞翅目和鞘翅目为主,地面灯诱集到的昆虫主要以鞘翅目、半翅目、双翅目和直翅目为主。

高空灯共诱捕到 151 种昆虫,分属 12 目 50 科,2017 年诱捕昆虫属 26 科,天蛾科、夜蛾科和步甲科

占主要优势,其中天蛾科以甘薯天蛾 *Agrius convolvuli* (L.) 为优势种,夜蛾科宽胫夜蛾 *Protoschinia scutosa* (G.) 为优势种,步甲科婪步甲属 *Harpalus* 为优势种;2018 年诱捕昆虫包括 35 科,天蛾科、夜蛾科、步甲科、龙虱科、金龟科、鳃金龟科和蟋蟀科占主要优势,其中天蛾科以甘薯天蛾为优势种,夜蛾科以旋歧夜蛾 *Anarta trifolii* (H.) 为优势种,步甲科以婪步甲属为优势种,龙虱科以黄缘龙虱 *Cybister japonicus* (D.) 为优势种,金龟科以游荡蜉金龟 *Aphodius erraticus* (L.) 为优势种,蟋蟀科以草原蟋 *Gryllus desertus* Pallas 为优势种。

地面灯共诱捕到 137 种昆虫,分属 12 目 54 科,2017 年诱捕昆虫属 21 科,隐翅甲科和步甲科占主要优势,步甲科以婪步甲属为优势种;2018 年诱捕昆虫属 31 科,蝽科、隐翅甲科、步甲科和金龟科占主要优势,蝽科以苍蝽 *Brachynema germarii* Kolenati 为优势种,金龟科以游荡蜉金龟为优势种,步甲科以婪步甲属为优势种。

表 1 2017 年和 2018 年 6 月至 8 月诱虫主要种类和数量
Table 1 Main species and number of insect traps from June to August in 2017 and 2018

目 Order 科 Family 种 Species	诱虫数量/头 Number of insects			
	2017		2018	
	高空灯 Search light trap	地面灯 Ground light trap	高空灯 Search light trap	地面灯 Ground light trap
半翅目 Hemiptera				
蝽科 Pentatomidae				
苍蝽 <i>Brachynema germarii</i>	124	476	272	967
鳞翅目 Lepidoptera				
天蛾科 Sphingidae				
甘薯天蛾 <i>Agrius convolvuli</i>	1 782	15	742	4
沙枣白眉天蛾 <i>Celerio hippophaës</i>	654	17	403	41
红天蛾 <i>Pergesa elpenor</i>	216	63	59	36
深色白眉天蛾 <i>Celerio gallii</i>	4	2	43	0
夜蛾科 Noctuidae				
八字地老虎 <i>Xestia c-nigrum</i>	353	140	103	3
宽胫夜蛾 <i>Protoschinia scutosa</i>	3 129	503	704	66
旋歧夜蛾 <i>Anarta trifolii</i>	197	107	1 453	138
斜纹夜蛾 <i>Spodoptera litura</i>	149	127	1	0
小地老虎 <i>Agrotis ipsilon</i>	13	8	7	0
白点黏夜蛾 <i>Leucania loreyi</i>	43	30	13	43
银锭夜蛾 <i>Macdunnoughia crassisigna</i>	29	2	105	24
苜蓿夜蛾 <i>Heliothis viriplaca</i>	0	0	88	10
棉铃虫 <i>Helicoverpa armigera</i>	191	3	95	5
舟蛾科 Notodontidae				
杨二尾舟蛾 <i>Cerura menciana</i>	30	3	22	1
灯蛾科 Arctiidae				
豹灯蛾 <i>Arctia caja</i>	27	7	10	3
脉翅目 Neuroptera				
草蛉科 Chrysopidae				

续表 1 Table 1(Continued)

目 Order 科 Family 种 Species	诱虫数量/头 Number of insects			
	2017		2018	
	高空灯 Search light trap	地面灯 Ground light trap	高空灯 Search light trap	地面灯 Ground light trap
丽草蛉 <i>Chrysopa formosa</i>	1	14	81	85
蚁蛉科 Myrmeleontidae	174	6	418	62
襀翅目 Plecoptera				
襀科 Perlidae	0	0	26	149
蜉蝣目 Ephemeroptera				
蜉蝣科 Ephemeridae	0	0	80	210
膜翅目 Hymenoptera				
姬蜂科 Ichneumonidae	0	0	191	40
蚁科 Formicidae	0	0	136	344
双翅目 Diptera				
大蚊科 Tipulidae	5	9	664	496
鞘翅目 Coleoptera				
隐翅甲科 Staphylinidae	57 526	66 970	687 564	809 391
步甲科 Carabidae				
婪步甲属 <i>Harpalus</i>	8 021	5 830	7 658	5 523
虎甲科 Cicindelidae	880	56	341	128
龙虱科 Dytiscidae				
黄缘龙虱 <i>Cybister japonicus</i>	230	0	1 153	172
水龟虫科 Hydrophilidae				
黑水龟虫 <i>Hydrous piceus</i>	120	1	366	6
埋葬甲科 Silphidae	287	301	9	3
金龟科 Scarabaeidae				
黑额喙丽金龟 <i>Adoretus nigri frons</i>	3	2	613	242
游荡蜉金龟 <i>Aphodius erraticus</i>	0	0	1 175	2 598
鳃金龟科 Melolonthidae	290	543	5 168	88
象甲科 Curculionidae				
欧洲方喙象 <i>Cleonus piger</i>	363	543	103	532
瓢甲科 Coccinellidae				
十三星长足瓢虫 <i>Hippodamia tredecimpunctata</i>	35	67	138	109
芫菁科 Meloidae				
四点斑芫菁指名亚种 <i>Mylabris quadripunctata quadripunctata</i>	28	23	36	32
革翅目 Dermaptera				
球螋科 Forficulidae				
二斑张铗螋 <i>Anechura bipunctata</i>	81	21	24	74
螳螂目 Mantodea	16	28	155	18
直翅目 Orthoptera				
斑翅蝗科 Oedipodidae				
亚洲飞蝗 <i>Locusta migratoria migratoria</i>	67	0	6	0
蓝斑翅蝗 <i>Oedipoda caerulescens</i>	64	4	14	118
蟋蟀科 Gryllidae				
草原蟋 <i>Gryllus desertus</i>	317	193	1 314	569
蝼蛄科 Gryllotalpidae				
华北蝼蛄 <i>Gryllotalpa unispina</i>	1	0	18	0
螽斯科 Tettigoniidae				
灰跳螽 <i>Platycleis grisea</i>	45	1	32	7

3.2 重要昆虫种类的数量动态变化

2017 年和 2018 年的 6 月至 8 月隐翅甲科和婪步甲属昆虫诱集数量较多,因隐翅甲科昆虫数量无明显季节波动变化,婪步甲属昆虫未能鉴定到种,故

未统计季节波动变化。

2017 年宽胫夜蛾发生 2 次虫量高峰期,7 月 25 日达到最多,当晚诱捕数量为 616 头,诱虫百分比为 22.02%;甘薯天蛾发生 2 次虫量高峰期,7 月 30 日达到

最多,当晚诱捕数量为 300 头,诱虫百分比为 32.43%;2018 年旋歧夜蛾发生 3 次虫量高峰期,8 月 8 日达到最多,当晚诱捕量为 203 头,诱虫百分比为 17.11%;甘薯天蛾发生 1 次虫量高峰期,8 月 21 日达到最多,当晚诱捕量为 238 头,诱虫百分比为 23.63%(图 1)。

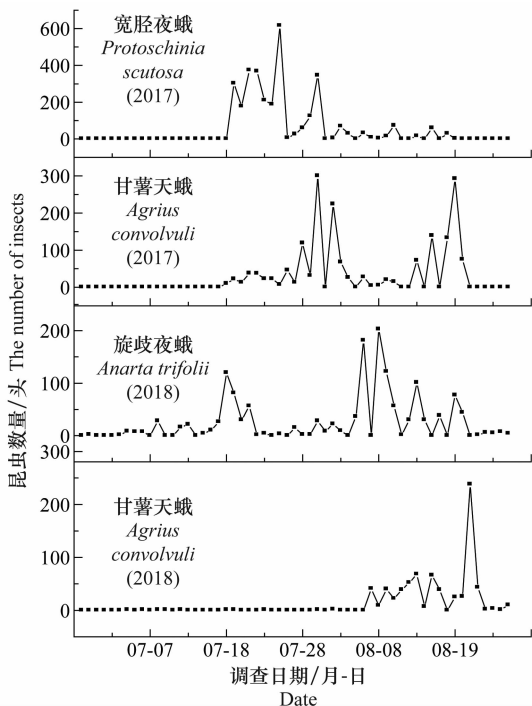


图 1 2017 年和 2018 年高空灯下昆虫优势种群动态
Fig. 1 Dynamics of dominant insect populations in search light traps in 2017 and 2018

3.3 昆虫雷达监测

雷达观测结果表明,相比 0°、30°和 45°仰角,15°仰角下观察到的回波数量更多,一般 22:00 左右(日落时分)回波数量开始增多,回波数量主要集中在 200~600 m 的高度,至 23:00 左右达到高峰期,第 2 日凌晨 02:00 左右回波数量降低,直至 06:00 回波数量基本保持不变。2017 年 7 月 24 日高空灯诱捕到大量宽胫夜蛾,诱虫百分比为 36.74%,同时雷达屏幕显示大量回波点,除 23:00 和 02:30 回波数量集中在 1 000 m 高度外,其余时间段均主要集中在 200~600 m 高度,高峰期一直持续到 04:00 左右,回波点向东北方向移动(图 2 和图 3)。

3.4 近地面风向风速对诱虫数量的影响

2017 年风向转为偏西风($n=7,77.78\%$),风速为 1.8~2.9 m/s,高空灯和地面灯诱虫数量显著增加($P<0.05$)(图 4)。2018 年风向转为偏西风($n=11,45.83\%$),风速为 1.4~2.3 m/s,高空灯和地面

灯诱虫数量显著增加($P<0.05$)(图 5)。风速 >2.9 m/s,风向转变为其他方向时诱虫数量较少。

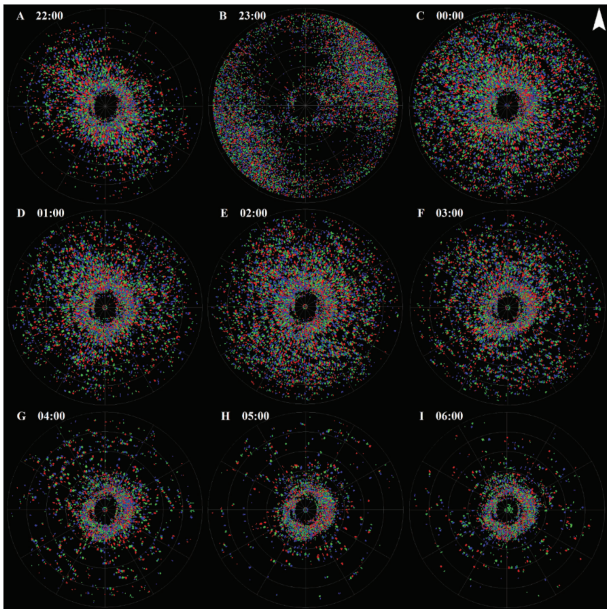


图 2 2017 年 7 月 24 日 22:00 至 25 日 06:00 KC-08XVSD 型
雷达 15°仰角回波数量动态变化图
Fig. 2 The dynamic change of radar echo number observed in 15° elevation by KC-08XVSD entomological radar from 22:00 24th to 06:00 25th, July in 2017

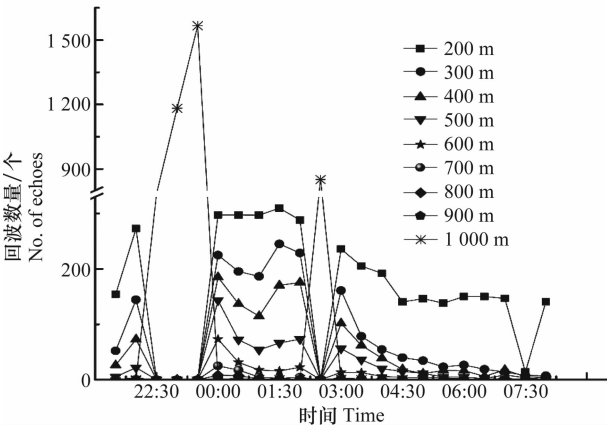
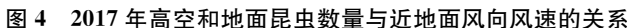


图 3 2017 年 7 月 24 日 21:30 至 25 日 08:00 不同
高度雷达回波数量
Fig. 3 The number of radar echoes at different altitudes from 21:30 24th to 08:00 25th of July, 2017

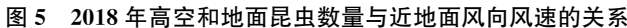
4 讨论

本研究利用 KC-08XVSD 型双模式昆虫雷达对中哈边境塔城区域空中昆虫飞行特征及主要类群进行了初步研究,结果表明,7 月中旬至 8 月初,空中飞行昆虫数量较多,迁飞时段主要集中在 22:00—

本一致^[11, 29-30]。截至目前,解释空中昆虫聚集成层的原因主要有“逆温成层假说”(昆虫在温暖的气流中成层迁飞)和“风成层假说”(昆虫在风切变最强区域成层迁飞)^[31-33],中哈边境塔城区域空中昆虫聚集成层的原因还需进一步研究。



search light trap and ground light trap in 2017



search light trap and ground light trap in 2018

量却不吻合,因此可初步判断宽胫夜蛾、旋歧夜蛾和甘薯天蛾在该地区具有一定的迁飞和扩散现象。本研究监测点位于库鲁斯台草原,主要植被类型为艾

属、藜科、禾本科和豆科等^[34], 周边农作物有玉米、甜菜等, 都是宽胫夜蛾、旋歧夜蛾和甘薯天蛾的寄主植物^[24,35], 适宜上述害虫在该区域发生为害。2018年每日诱捕昆虫的平均数量为2017年的3~5倍, 主要由2018年地面诱捕到大量隐翅甲科昆虫所致。2018年监测点附近牛羊放牧数量较2017年多, 大量的牛羊粪便为隐翅甲科昆虫生长繁殖提供了食物来源。近地面风速风向对高空灯和地面灯诱虫数量具有较大影响, 两年研究结果表明偏西风、风速在1.4~2.9 m/s时诱虫数量较多, 这可能主要跟塔城区域地形条件和特定的环流形势有关^[36]。塔城区域常年盛行东风或西风^[36], 为害虫迁出或迁入提供有利的气象条件, 本研究结果表明偏西风时迁飞昆虫数量多, 因此在昆虫迁飞盛期, 偏西风天气需重点监测。风速大小是影响昆虫迁飞的关键因子之一, 适当的风速条件下可以诱捕到更多的昆虫数量^[37], 本研究表明风速在1.4~2.9 m/s时可以诱捕到大量昆虫。

中哈边境塔城区域具有703万hm²天然草场^[38], 是多种害虫重要发生地。本研究初步明确了中哈边境塔城区域具有迁飞能力的害虫类群, 并确定了其飞行参数等基本信息, 为进一步建立中哈边境害虫跨境迁飞监测预警体系提供技术支持。由于本研究所用雷达在X波段工作, 发射的波长3.2 cm, 监测盲区在100 m以下区域, 体型较小或飞行高度较低的昆虫可能没有监测到。另外, 2017年和2018年, 高空灯连续15 d诱捕到迁飞能力较强的群居型亚洲飞蝗, 平均每日诱虫百分比为0.86%, 虽未发现大规模迁飞暴发成灾事件, 但表明中哈边境区域亚洲飞蝗仍具有严重发生的可能性, 因此仍需加强监测预警研究及技术应用。

参考文献

- [1] 罗礼智. 昆虫迁飞行为的发生与调控[J]. 科学, 1998, 50(3): 32-35.
- [2] 吴孔明, 程登发, 徐广, 等. 华北地区昆虫秋季迁飞的雷达观测[J]. 生态学报, 2001, 21(11): 1833-1838.
- [3] 程登发, 张云慧, 陈林, 等. 农作物重大生物灾害监测与预警技术[M]. 重庆: 重庆出版社, 2005: 49-52.
- [4] 封洪强. 雷达昆虫学40年研究的回顾与展望[J]. 河南农业科学, 2009(9): 121-126.
- [5] 封洪强. 雷达在昆虫学研究中的应用[J]. 植物保护, 2011, 37(5): 1-13.
- [6] CHAPMAN J W, DRAKE V A, REYNOLDS D R. Recent insights from radar studies of insect flight [J]. Annual Review of Entomology, 2011, 56: 337-356.
- [7] 张智, 张云慧, 姜玉英, 等. 雷达昆虫学研究进展及应用前景[J]. 植物保护, 2017, 43(5): 18-26.
- [8] RILEY J R, REYNOLDS D R. Radar-based studies of the migratory flight of grasshoppers in the middle Niger area of Mali [J]. Proceedings of the Royal Society of London, Series B: Biological Sciences, 1979, 204(1154): 67-82.
- [9] RILEY J R, REYNOLDS D R. A long-range migration of grasshoppers observed in the Sahelian zone of Mali by two radars [J]. Journal of Animal Ecology, 1983, 52: 167-183.
- [10] ROSE D J W, PAGE W W, DEWHURST C F, et al. Downwind migration of the African army worm moth, *Spodoptera exempta*, studied by mark-and-capture and by radar [J]. Ecological Entomology, 1985, 10(3): 299-313.
- [11] 张云慧, 陈林, 程登发, 等. 草地螟2007年越冬代成虫迁飞行为研究与虫源分析[J]. 昆虫学报, 2008, 51(7): 720-727.
- [12] 齐会会, 张云慧, 程登发, 等. 褐飞虱2009年秋季回迁的雷达监测及轨迹分析[J]. 昆虫学报, 2010, 53(11): 1256-1264.
- [13] 郭江龙. 黄地老虎渤海湾迁飞规律及飞行能力研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2016.
- [14] 张鹿平, 张智, 季荣, 等. 昆虫雷达建制技术的发展方向[J]. 应用昆虫学报, 2018, 55(2): 153-159.
- [15] 斯尔克·伊斯拉木. 塔城市天然草地资源及其分类[J]. 新疆畜牧业, 2016(10): 62.
- [16] 郭宏, 乌兰, 赵磊. 浅谈塔城边境地区蝗虫危害与防控对策[J]. 新疆畜牧业, 2011(12): 60-61.
- [17] 王磊, 徐光青, 刘大锋, 等. 迁入性亚洲飞蝗与气象因子关系的研究[J]. 新疆气象, 2006(5): 25-27.
- [18] 芦屹, 王惠卿, 魏新政, 等. 2012年新疆草地螟重发特点及原因分析[J]. 中国植保导刊, 2013, 33(12): 47-51.
- [19] VALERY K A, KURMET S B, AMAGELDY T S, et al. Preventive approach of phytosanitary control of locust pests in Kazakhstan and adjacent areas [C] // International Conference on Agricultural, Ecological and Medical Sciences, Penang 10-11 February, Malaysia. 2015: 33-37.
- [20] 张智. 北方地区重大迁飞性害虫的监测与种群动态分析[D]. 北京: 中国农业科学院, 2013.
- [21] 胡红英, 黄人鑫. 新疆昆虫原色图鉴[M]. 乌鲁木齐: 新疆大学出版社, 2013.
- [22] 新疆维吾尔自治区林业有害生物防治检疫局. 新疆林木害虫野外识别手册[M]. 北京: 中国林业出版社, 2014.
- [23] 杨定, 张泽华, 张晓. 中国草原害虫图鉴[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2013.
- [24] 丁建云, 张建华. 北京灯下蛾类图谱[M]. 北京: 中国农业出版社, 2016.

[25] 张巍巍,李元胜. 中国昆虫生态大图鉴[M]. 重庆:重庆大学出版社,2018.

[26] 蒋金炜,乔红波,安世恒. 农田常见昆虫图鉴[M]. 郑州:河南科学技术出版社,2015.

[27] 翟保平,张孝羲. 迁飞过程中昆虫的行为:对风温场的适应与选择[J]. 生态学报,1993,13(4):356-363.

[28] 高月波,陈晓,陈钟荣,等. 稻纵卷叶螟(*Cnaphalocrocis medinalis*)迁飞的多普勒昆虫雷达观测及动态[J]. 生态学报,2008,28(11):5238-5247.

[29] FENG Hongqiang, WU Kongming, CHENG Dengfa, et al. Spring migration and summer dispersal of *Loxostege sticticalis* (Lepidoptera: Pyralidae) and other insects observed with radar in northern China [J]. Environmental Entomology, 2004, 33: 1253-1265.

[30] FENG Hongqiang, ZHANG Yunhui, WU Kongming, et al. Nocturnal windborne migration of ground beetles, particularly *Pseudophonus griseus* (Coleoptera: Carabidae) in China [J]. Agricultural and Forest Entomology, 2007, 9: 103-113.

[31] 高月波,孙雅杰,张强,等. 东北粘虫春季空中虫群的迁飞行

为[J]. 应用昆虫学报,2014,51(4):906-913.

[32] REYNOLDS D R, SMITH A D, CHAPMAN J W. A radar study of emigratory flight and layer formation by insects at dawn over southern Britain [J]. Bulletin of Entomological Research, 2008, 98(1): 35-52.

[33] HOBBS S E, WOLF W W. An airborne radar technique for studying insect migration[J]. Bulletin of Entomological Research, 1989, 79: 693-704.

[34] 王建国. 塔城库鲁斯台芨芨草场的特点及其利用改良建议[J]. 中国畜牧兽医文摘,2013,29(12):192,179.

[35] 赵琦. 旋幽夜蛾寄主选择、生殖及抗寒性的研究[D]. 重庆:西南大学,2011.

[36] 高婧,井立军,井立红. 新疆塔城地区大风年际振荡及环流背景[J]. 干旱区地理,2011,34(2):284-291.

[37] 高月波. 空中虫群飞行行为机制研究[D]. 南京:南京农业大学,2011.

[38] 郭宏. 新疆塔城地区天然草原退化原因及治理对策[J]. 草食家畜,2015(3):55-57.

(责任编辑:田 喆)

(上接 17 页)

[12] 娄延霞. 绿僵菌经口饲喂侵染东亚飞蝗的组织病理学研究[D]. 北京:中国农业科学院,2013.

[13] 王晓容. 昆虫中肠生理与病理研究进展[J]. 仲恺农业工程学院学报,2000,13(1):58-68.

[14] 曹伟平,王刚,甄伟,等. 球孢白僵菌不同感染方式侵染棉铃虫幼虫的毒性比较及组织病理变化[J]. 昆虫学报,2011,54(4):409-415.

[15] BUCHON N, SILVERMAN N, CHERRY S. Immunity in *Drosophila melanogaster* from microbial recognition to whole-organism physiology [J]. Nature Reviews Immunology, 2014, 14(12):796-810.

[16] 王英,黄复生. 昆虫天然免疫的研究进展[J]. 免疫学杂志,2008,24(4):473-478.

[17] 刘甜,罗开珺. 果蝇 Toll 和 IMD 信号通路中的功能结构域[J]. 环境昆虫学报,2011,33(3):388-395.

[18] YANG Lishi, YIN Zixin, LIAO Jixiang, et al. A Toll receptor in

shrimp [J]. Molecular Immunology,2007,44(8):1999-2008.

[19] HETRU C, HOFFMANN J A. NF- κ B in the immune response of *Drosophila* [J]. Cold Spring Harbor Perspectives in Biology, 2009, 1(6):a000232.

[20] LAN Jiangfeng, ZHOU Jing, ZHANG Xiaowen, et al. Characterization of an immune deficiency homolog (IMD) in shrimp (*Fenneropenaeus chinensis*) and crayfish (*Procambarus clarkii*) [J]. Developmental & Comparative Immunology, 2013, 41(4):608-617.

[21] LI Fuhua, XIANG Jianhai. Recent advances in researches on the innate immunity of shrimp in China [J]. Developmental and Comparative Immunology, 2012, 39(1/2):11-26.

[22] COCIANCICH S, GHAZI A, HETRU C, et al. Insect defensin, an inducible antibacterial peptide, forms voltage-dependent channels in *Micrococcus luteus* [J]. Journal of Biological Chemistry, 1993, 268(26):19239-19245.

(责任编辑:田 喆)