中亚迁飞场域下旋歧夜蛾的迁飞行为研究*

杨 静[1**] 汪姝玥[1] 查绪栋[1] 刘程才[2] ROMAN Jashenko[3] 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 **【目的】** 明确中亚迁飞场域下旋歧夜蛾 *Scotogramma trifolii* 迁飞行为与其在东亚昆虫迁飞场的差异。**【方法】** 2019-2021 年连续 3 年利用昆虫雷达、辅助高空灯和地面灯等设备对新疆塔城地区旋歧夜蛾迁飞行为和种群数量进行观测，并以旋歧夜蛾大发生年份开展其飞行高度、速度、方向及迁飞高峰期气象特征研究。**【结果】** 旋歧夜蛾迁飞高峰期，卵巢发育等级主要为 3-4 级，雌雄性比大于 1；飞行高度介于 200-1 000 m 之间，主要在 200-500 m 的高度飞行，飞行速度以 7-9 m/s 为主；旋歧夜蛾群体飞行方向以东南偏东方向为主。迁飞高峰期高空盛行西北气流，迁飞高峰日 925 和 900 hPa 高空温度介于 15-28 ℃，湿度介于 40%-55%。**【结论】** 气流运动方向、高空温湿度不同是导致中亚迁飞场域下旋歧夜蛾迁飞行为与东亚迁飞场域下存在差异的主要原因。

关键词 旋歧夜蛾；卵巢发育；雷达观测；气象条件；昆虫迁飞场

The migratory behaviour of *Scotogramma trifolii* in the Central Asian insect migration zone

YANG Jing[1**] WANG Shu-Yue[1] ZHA Xu-Dong[1] LIU Chen-Cai[2]
ROMAN Jashenko[3] JI Rong[1***]

(1. College of Life Science, 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 **[Objectives]** To investigate differences between the migration behavior of *Scotogramma trifolii* in the Central Asian insect migration zone and other migration zones. **[Methods]** The migratory behavior of *S. trifolii* in the Tacheng area of Xinjiang was observed for three consecutive years from 2019 to 2021 using insect radar, auxiliary aerial lights and ground lights. During the peak migration period, flight altitude, speed, direction and meteorological characteristics were measured in years in which *S. trifolii* was abundant. **[Results]** During the peak migration period, ovarian development was mainly at level 3 or 4, and the male to female ratio was >1. Flight height ranged from 200-1 000 m, but was mainly at 200-500 m, and the flight speed was mainly 7-9 m/s. *S. trifoli* populations fly mainly in an east-southeast direction. During the peak migration period, northwest airflow was prevalent at high altitudes, with temperatures ranging from 15-28 °C and humidity from 40%-55% at 925 hPa and 900 hPa on peak migration days. **[Conclusion]** Airflow, high altitude temperature and humidity are the main reasons for the different flight behavior of *S. trifoli* in the Central Asian insect migration zone compared to that in other insect migration zones in East Asia.

Key words *Scotogramma trifolii*; ovarian development; radar observations; meteorological conditions; insect migration zone

*资助项目 Supported projects：国家自然科学基金（32260254）；新疆维吾尔自治区区域协同创新专项（2020E01003）；自治区研究生科研创新项目（XJ2022G205）

**第一作者 First author，E-mail：1515093454@qq.com

***通讯作者 Corresponding author，E-mail：jirong@xjnu.edu.cn

收稿日期 Received：2022-10-26；接受日期 Accepted：2023-03-26

已报道世界范围内有东亚迁飞场、北美洲迁飞场、非洲迁飞场、欧洲迁飞场、澳洲迁飞场和中亚昆虫迁飞场六类昆虫迁飞场(张志涛,1992; Yu *et al.*, 2020)。不同昆虫迁飞场都有其代表性的迁飞性昆虫，如东亚迁飞场域内草地螟 *Loxostege sticticalis* 广泛发生，39-40°N、110-115°E 之间是国内草地螟的主要越冬发生区，大发生年份越冬代蛾由此迁向内蒙古东部和东北各省(Feng *et al.*, 2004; 陈晓等, 2008; 罗礼智等,2018)。东亚迁飞场域内白背飞虱 *Sogatella furcifera* 每年 3 月中下旬由中南半岛迁入我国，并随着西南气流不断向北迁移,到达我国东北的时间为 6 月下旬至 7 月上旬(全国白背飞虱科研协作组, 1981)。沙漠蝗 *Schistocerca gregaria* 是非洲迁飞场域内重要的迁飞性害虫,近年来频繁跨国界迁飞为害，由红海向南到达肯尼亚，转向乌干达进入南苏丹为害,萨赫勒西段受西非季风控制，向北进入北非，转而向东进入埃及(刘旭等, 2020; Madeleine and Liu, 2020; 赵紫华等, 2021)。斑蝶 *Danaus plexippus*、甜菜叶蝉 *Circulifer tenellus* 和马铃薯叶蝉 *Empoasca fabae* 等迁飞性害虫均在北美洲迁飞场域内逐代南北往返季节性迁飞(Howard and Davis, 2009)。澳洲迁飞场域内重要的迁飞性害虫澳洲疫蝗 *Chortoicetes terminifera*，其种群源于昆士兰西部干旱地区，蝗虫向南、向东迁飞至近海的农业区(Hunter and Deveson, 2002)。意大利蝗 *Calliptamus italicus*、亚洲飞蝗 *Locusta migratoria*、草地螟和旋岐夜蛾 *Scotogramma trifolii* 是中亚迁飞场域内重要的迁飞性害虫,常常在中亚地区不同国家的边境区域间迁飞(Baibussenov *et al.*, 2014, 2015; 曹凯丽等, 2020; Yu *et al.*, 2020; 涂雄兵, 2022)。

同种昆虫在不同迁飞场域内的迁飞行为不同，草地螟在东亚迁飞场域内随西南气流北迁，在有利的气流携带下,华北地区的草地螟越冬代成虫可迁往东北地区为害(曹卫菊等, 2006, 陈阳等, 2012)。欧洲迁飞场域内的草地螟迁飞路径则有所不同，草地螟第一群发期(1926-1935 年)与第三群发期(1969-1989 年)均呈现明显的自西向东扩展,迁飞主方向与东亚迁飞场亦完全不同(陈晓等, 2022)。

旋岐夜蛾是广泛分布于东亚和中亚的一种迁飞性害虫，在我国主要分布在陕西、甘肃、内蒙古、河北及新疆等地，在全球不同地区发生规律不同，在欧洲一年发生 2-3 代，在我国一年发生 2-4 代。(赵占江等, 1992; 安丽芬和战继春, 2005; 夏德萍等, 2015)。研究报道，东亚迁飞场域内影响旋岐夜蛾迁飞的气象条件主要为 5 月下旬的偏南气流，随气流向北迁飞，飞行高度 300-500 m，最高可达 1 000 m，具有显著的共同定向行为(张云慧等, 2007; 何莉梅, 2017)。东亚昆虫迁飞场与中亚昆虫迁飞场的气流运动和气候条件均不同,前者包括自中南半岛到东北平原、朝鲜半岛和日本群岛等的广大地区，春夏两季的偏南气流和秋季的偏北气流是昆虫逐代北迁南回远距离季节性迁飞的条件(张志涛, 1992)；中亚昆虫迁飞场包括中国新疆维吾尔自治区、乌兹别克斯坦、吉尔吉斯斯坦、哈萨克斯坦、土库曼斯坦、塔吉克斯坦及西西伯利亚南部,是全球最大的非地带性干旱区,其典型特征是气候冬冷夏热，气温年日差较大，降水稀少，昆虫迁飞主要受中纬度西风环流影响(Yu *et al.*, 2020)。基于此，推测旋岐夜蛾在中亚昆虫迁飞场的迁飞行为特征及影响气象因子与东亚昆虫迁飞场不同，但目前尚未见到这方面的研究报道。本研究依托野外实验站，利用昆虫雷达技术连续 3 年观测旋岐夜蛾迁飞行为,同时辅助高空灯和地面灯的诱虫数据,分析中亚迁飞场域下旋岐夜蛾迁飞行为特征及与气象条件的关系,为丰富昆虫迁飞场理论提供实证研究,并为中亚迁飞场域内的旋岐夜蛾预测预报提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 实验地点

本研究依托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开展,实验站位于中国新疆塔城地区库鲁斯台草原西部(46°38′ N，82°52′ E)，海拔 443 m，距

离哈萨克斯坦边境约 3 km，主要植被类型为藜科、禾本科、豆科和蒿属草本植物。实验站内有双模式昆虫雷达（KC-08XVSD，无锡立洋电子科技有限公司），高空灯（JDGK-2，佳多科工贸股份有限公司），地面灯参照张智（2013）文中的参数，委托北京普禾泰农业科技有限公司加工制作，高空灯与地面灯采用相同的 1 000 W 金属卤化物灯做光源，小型气象站（TRM-ZS1，锦州阳光），体式显微镜（SMZ475，尼康）。

1.2　昆虫雷达观测与旋岐夜蛾诱集

于 2019-2020 年 6-8 月及 2021 年 5-8 月利用双模式昆虫雷达每日从 22:00 至翌日凌晨 07:00 观测（除雨天和机械故障外），雷达扫描模式下监测范围约 3 000 m，垂直模式下监测范围为 100-5 000 m。为辅助雷达目标昆虫识别，利用高空灯和地面灯进行诱虫。根据研究区域纬度和地理位置，每日灯诱时间从 22:00 至翌日凌晨 07:00，每日清晨小心取出诱虫袋中的昆虫进行分类鉴定和数量统计，挑选出旋岐夜蛾，并计算旋岐夜蛾数量占当日诱虫数量的百分比。

1.3　雷达观测目标昆虫识别及卵巢解剖

当高空灯诱集到的目标昆虫数量突增，占当日所诱全部昆虫数量的百分比（以下简称诱虫比）最高，且雷达回波数的变化趋势与高空灯诱虫数变化趋势一致时，可认为此期间雷达监测到的高密度回波主要是目标昆虫（Chapman *et al.*，2002）。本研究以旋岐夜蛾大发生年份 2021 年为例，选择 2021 年 6 月 17 日、8 月 3 日两个旋岐夜蛾高峰日提取其飞行高度和速度等飞行参数。

旋岐夜蛾卵巢发育等级采用张云慧等（2007）的分级标准，雌蛾卵巢发育进度分为 5 级。于 2021 年旋岐夜蛾高峰期内每日记录高空灯诱集旋岐夜蛾的雌雄成虫数量，并每日随机取 30 头雌蛾，在体视显微镜下进行卵巢解剖并记录发育级别。

1.4　迁飞风场和轨迹分析及数据分析

采用美国国家环境预报中心（National Centers for Environmental Prediction，NCEP）提供的再分析数据（Final operational global analysis，FNL），借助气象专业绘图软件（Grid analysis and display system，Grads）分析旋岐夜蛾迁飞高峰期高空气象特征。数据的水平分辨率为 1°×1°，时间分辨率 6 h。轨迹分析利用 Hysplit-4 软件系统（http://www.arl.noaa.gov），以旋岐夜蛾迁入高峰期时昆虫雷达监测到大量回波时间点设置为轨迹起始时间，对迁入路径逆推，轨迹点高度设置为旋岐夜蛾主要飞行高度（200、300 和 500 m），飞行时间设置为 12 h，因旋岐夜蛾在夜晚迁飞，时间设置上去除白天时间段。

统计分析使用 SPSS 20.0（IBM，Armonk，NY，USA）软件进行。所有的数据都是由至少 3 个独立重复的平均值组成。数据经正态性检验后，单因素方差分析与 Student's *t* 检验被用来确定统计学意义，不同小写字母表示经单因素方差分析检验在 $P<0.05$ 水平差异显著。柱状图用 GraphPad Prism 9（9.0.0 版本，2020）软件生成。

2　结果与分析

2.1　旋岐夜蛾诱集数据及其卵巢发育分析

2019-2021 年的 6-8 月高空灯诱捕数据显示，旋岐夜蛾种群数量有明显的突增突减现象，2019 年高空灯共诱旋岐夜蛾 2 340 头，地面灯共诱 279 头，高峰日为 6 月 19 日及 6 月 23 日，诱虫比分别为 27.94%和 41.54%（图 1：A）。2020 年高空灯共诱 1 027 头，地面灯诱 363 头，高峰日为 6 月 14 日，诱虫比为 30.94%（图 1：B）。2021 年为旋岐夜蛾大发生年份，高空灯共诱集 22 792 头，共出现 2 次高峰，依次为 6 月 14 日-18 日、8 月 2 日-8 日（其中 8 月 4 日因下雨未开诱虫灯），峰值日期为 6 月 17 日和 8 月 3 日，诱虫量分别为 1 546 和 2 346 头，诱虫比为 70.14%和 63.66%，地面灯共诱集 169 头，无高峰期出现（图 1：C）。

2021 年 6 月高峰期（14-18 日）的卵巢解剖发现，卵巢发育等级以 3 级为主（占比 65.33%），与 1 级（占比 0）、2 级（占比 14.67%）、4 级（占比 20.00%）和 5 级（占比 0）之间存在显著性差异（$P<0.05$）；8 月高峰期（2-8 日）卵巢发育等

级以 3 级（占比 52.78%）和 4 级（35.00%）为主，与 1 级（占比 0）、2 级（占比 8.33%）和 5 级（占比 3.89%）之间存在显著性差异（P<0.05）（图 2）。高峰期前后旋歧夜蛾的性别比例发生明显变化，高峰期间雌雄性比例>1，高峰期后雌雄性比例≤1（图 3）。

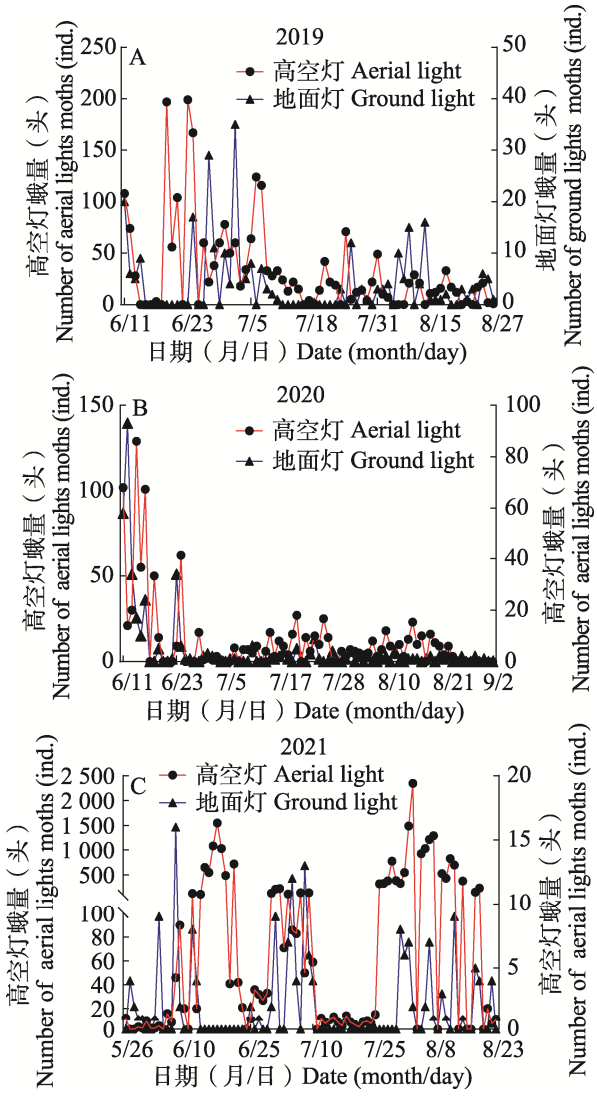

图 1　2019-2021 年高空灯与地面灯旋歧夜蛾逐日诱蛾量

Fig. 1　Daily catch of *Scotogramma trifolii* trapped by aerial and ground lights during 2019-2021

A-C. 高空灯与地面灯旋歧夜蛾逐日诱蛾量，A. 2019 年；B. 2020 年；C. 2021 年。

A-C. Daily catch of *Scotogramma trifolii* trapped by aerial and ground lights, A. 2019; B. 2020; C. 2021.

2.2　雷达观测目标昆虫识别及飞行特征分析

2021 年 6 月 17 日及 8 月 3 日，雷达回波点

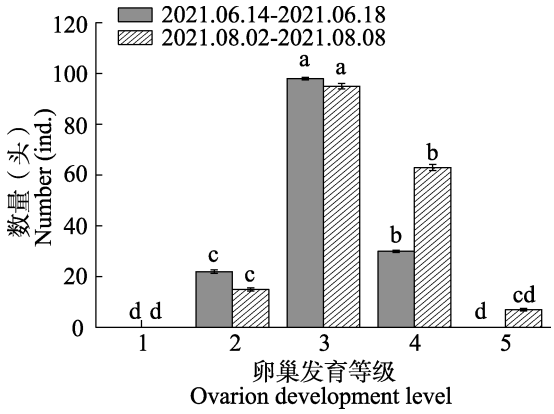

图 2　迁飞高峰期旋歧夜蛾的卵巢发育进度

Fig. 2　Developmental levels of *Scotogramma trifolii* ovaries at the peak of migration

图中数据为平均数±标准误，柱上不同字母表示经单因素方差分析检验在 P<0.05 水平差异显著。

Data are mean±SE. Different letters above the bars indicate significant differences at P<0.05 level by one-way ANOVA.

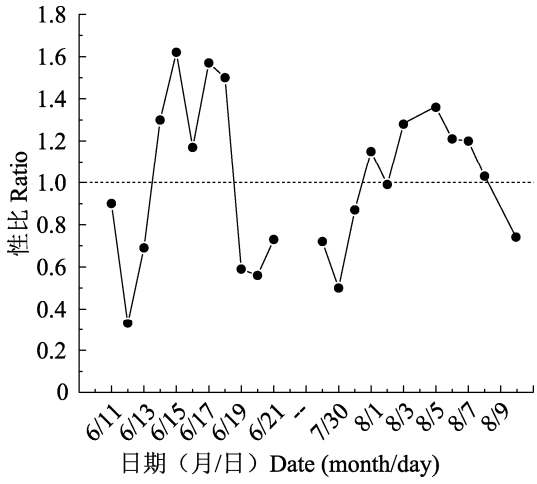

图 3　迁飞高峰期旋歧夜蛾雌雄性别比例

Fig. 3　Sex ratio of *Scotogramma trifolii* at the peak of migration

数量比前一日明显增加，高空灯下旋歧夜蛾的数量达到高峰，旋歧夜蛾诱虫比分别为 70.14%和 63.66%。据此判断 6 月 17 日及 8 月 3 日雷达回波主要是旋歧夜蛾。

选择 2021 年 6 月 17 日及 8 月 3 日两个高峰日的雷达回波数据，分析提取旋歧夜蛾空中飞行参数。结果表明，两个高峰日均于 22:30 雷达回波数开始增多，至 00:00 左右回波数量达到高峰，02:00 后回波数逐渐减少。飞行高度介于 200-1 000 m 之间，主要在 200-500 m 高度飞行，200-

300 m 占比最大，分别为 77.64%和 45.14%，其次为 300-400 m，占比为 10.53%和 32.51%，400-500 m 占比为 6.70%和 13.78%，500-600 m 占比为 4.10%和 5.68%，600-700 m 占比为 0.94%和 1.23%，700-800 m 占比为 0.12%和 0.61%，800-900 m 占比为 0 和 0.65%，900-1 000 m 占比为 0 和 0.20%，1 000 m 以上占比为 0 和 0.20%（图 4：A，B）。两个高峰日旋歧夜蛾位移速度以 7-9 m/s 为主，9 m/s 占比最大，分别为 18.61%和 26.10%。旋歧夜蛾飞行方向以东南偏东方向为主，占比分别为 23.97%和 26.49%，其他方向占比均<20%（图 5：A，B，图 6：A，B，图 7：A，B）。

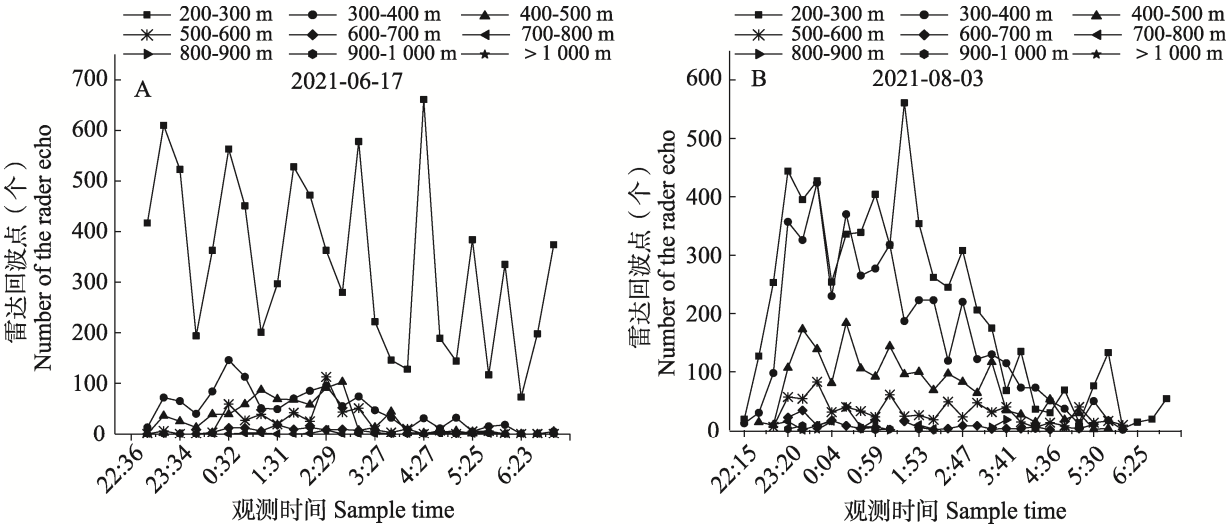

图 4　2021 年旋歧夜蛾高峰日雷达回波飞行高度

Fig. 4　Flight altitude of radar echoes on the peak day of *Scotogramma trifolii* in 2021

A，B. 旋歧夜蛾高峰日雷达回波飞行高度，A. 2021 年 6 月 17 日；B. 2021 年 8 月 3 日。

A, B. Flight altitude of radar echoes on the peak day of *Scotogramma trifolii*, A. 17 June 2021; B. 3 August 2021.

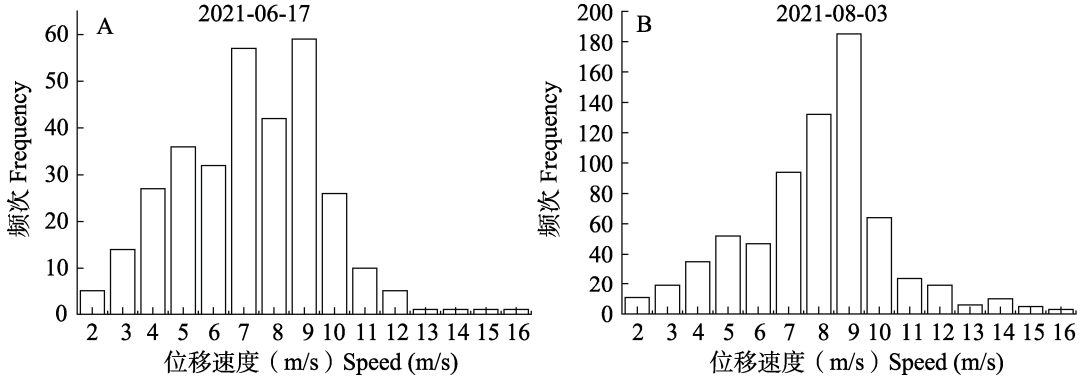

图 5　2021 年旋歧夜蛾高峰日雷达回波位移速度

Fig. 5　Displacement speed of radar echoes on the peak day of *Scotogramma trifolii* in 2021

A，B. 旋歧夜蛾高峰日雷达回波位移速度，A. 2021 年 6 月 17 日；B. 2021 年 8 月 3 日。

频次指从雷达回波中提取出的位移速度数据的个数。下图同。

A, B. Displacement speed of radar echoes on the peak day of *Scotogramma trifolii*, A. 17 June 2021; B. 3 August 2021.

Frequency refers to the number of displacement speed data extracted from the radar echo. The same below.

对旋歧夜蛾迁飞高峰期（2021 年 6 月 14 日-18 日；2021 年 8 月 2 日-8 日）的高空气流进行分析发现，中亚迁飞场域下中哈边境区域旋歧夜蛾迁飞高峰期间为西北气流（图 8：A，B，图 9：A，B），根据旋歧夜蛾群体的主要飞行高度以及实验站的海拔高度（443 m），进一步分析了 2021

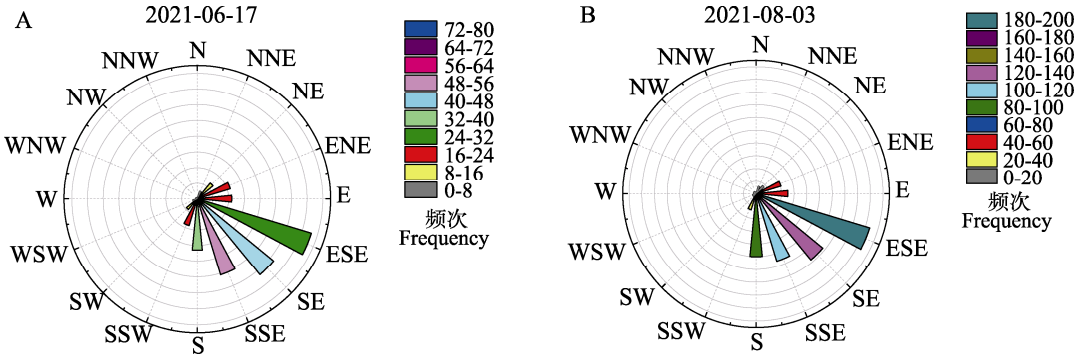

图 6　2021 年旋歧夜蛾高峰日雷达回波飞行方向

Fig. 6　Flight direction of radar echoes on the peak day of *Scotogramma trifolii* in 2021

A，B. 旋歧夜蛾高峰日雷达回波飞行方向，A. 2021 年 6 月 17 日；B. 2021 年 8 月 3 日。缩写字母含义：北（N）、东北偏北（NNE）、东北（NE）、东北偏东（ENE）、东（E）、东南偏东（ESE）、东南（SE）、东南偏南（SSE）、南（S）、西南偏南（SSW）、西南（SW）、西南偏西（WSW）、西（W）、西北偏西（WNW）、西北（NW）及西北偏北（NNW）。

A, B. Flight direction of radar echoes on the peak day of *Scotogramma trifolii*, A. 17 June 2021; B. 3 August 2021. Abbreviations: North (N), North-Northeast (NNE), Northeast (NE), East- Northeast (ENE), East (E), East- Southeast (ESE), Southeast (SE), South-Southeast (SSE), South (S), South-Southwest (SSW), Southwest (SW), West-Southwest (WSW), West (W), West-Northwest (WNW), Northwest (NW) and North-Northwest (NNW).

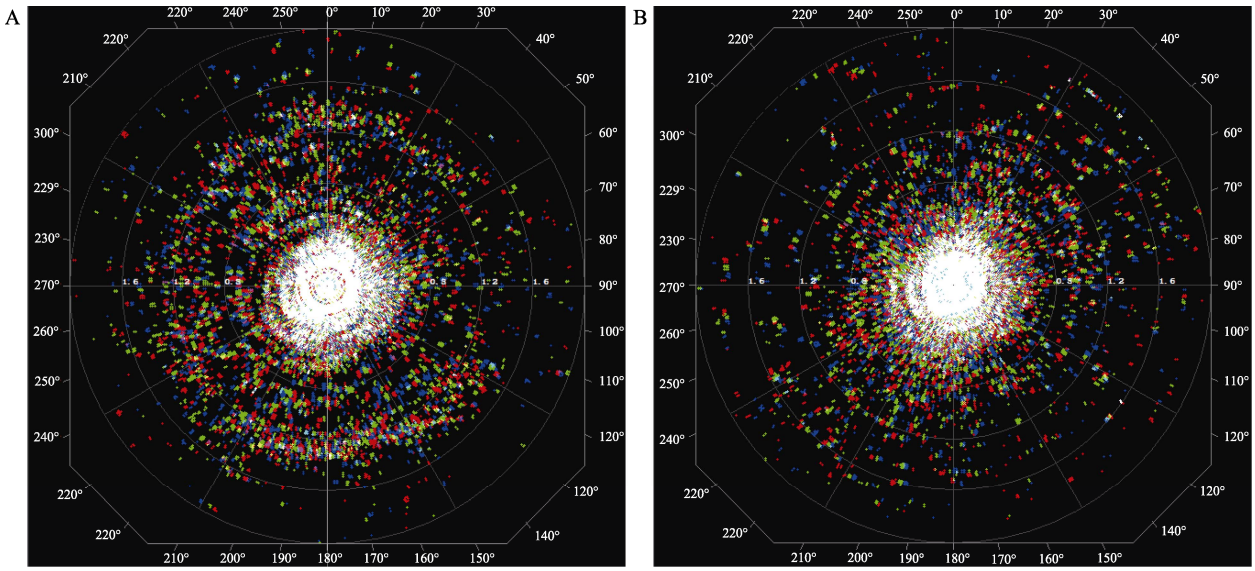

图 7　旋歧夜蛾高峰日 3PPI 雷达回波图

Fig. 7　3PPI radar echo picture on the peak day of *Scotogramma trifolii*

A，B. 旋歧夜蛾高峰日 3PPI 雷达回波图，A. 2021 年 6 月 17 日 00:00；B. 2021 年 8 月 3 日 00:00。图为空中虫群在雷达 3PPI 上呈现的回波，每幅图中垂直竖线代表北方向。

A, B. 3PPI radar echo picture on the peak day of *Scotogramma trifolii*, A. 17 June 2021, 00:00; B. 3 August 2021, 00:00. The picture shows the echo of the aerial insect swarm on the radar 3PPI, and the vertical line in each picture represents the north direction.

年 6 月 17 日和 8 月 3 日两个迁飞高峰日 925 hPa（800 m）及 900 hPa（1 000 m）高空的温湿度，结果为 6 月 17 日 925 和 900 hPa 高空温度介于 15-18 ℃，湿度为 40%-50%，8 月 3 日 925 和 900 hPa 高空温度介于 24-28 ℃，湿度为 50%-55%（图 8：C-F，图 9：C-F）。分别以 2021 年 6 月 17 日和 2021 年 8 月 3 日 00:00 为起点对旋歧夜蛾迁入轨迹逆推显示，200、300 和 500 m 的虫源地位于哈萨克斯坦国的东哈萨克斯坦州（81°47′ E，48°89′ N、81°46′ E，48°93′ N、81°44′ E，48°96′ N；81°80′ E，48°31′ N、81°80′ E，48°29′ N、81°79′ E，48°27′ N）。

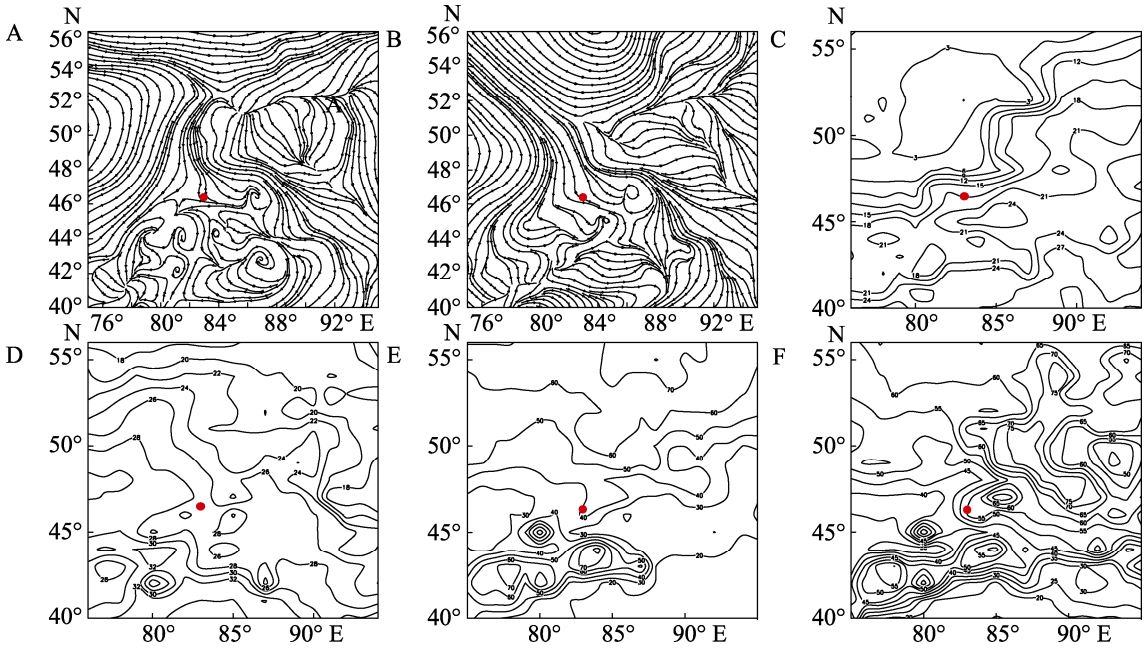

图 8　中哈边境塔城地区旋歧夜蛾迁飞高峰期 925 hPa 风场与要素场

Fig. 8　Wind and element field on 925 hPa during peak migration periods of *Scotogramma trifolii* in Tacheng area on the Sino-Kazakhstan border

A，B. 流场，A. 2021 年 6 月 14 日-18 日；B. 2021 年 8 月 2 日-8 日；C，D. 温度场，C. 2021 年 6 月 17 日；D. 2021 年 8 月 3 日；E，F. 湿度场，E. 2021 年 6 月 17 日；F. 2021 年 8 月 3 日。图中红点为实验站位置。下图同。

A, B. Airflow, A. 14-18 June 2021; B. 2-8 August 2021; C, D. Temperature, C. 17 June 2021; D. 3 August 2021; E, F. Humidity, E. 17 June 2021; F. 3 August 2021. The red dot in the picture shows the location of the experimental station. The same below.

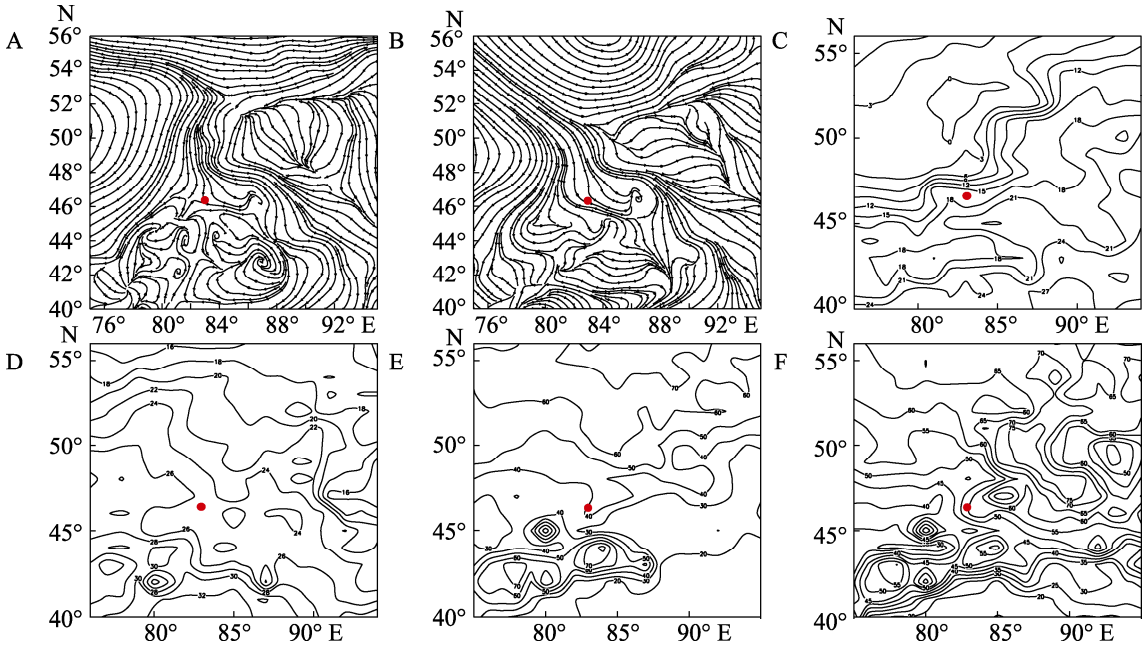

图 9　中哈边境塔城地区旋歧夜蛾迁飞高峰期 900 hPa 风场与要素场

Fig. 9　Wind and element fields on 900 hPa during peak migration periods of *Scotogramma trifolii* in Tacheng area on the Sino-Kazakhstan border

A，B. 流场，A. 2021 年 6 月 14 日-18 日；B. 2021 年 8 月 2 日-8 日；C，D. 温度场，C. 2021 年 6 月 17 日；D. 2021 年 8 月 3 日；E，F. 湿度场，E. 2021 年 6 月 17 日；F. 2021 年 8 月 3 日。

A, B. Airflow, A. 14-18 June 2021; B. 2-8 August 2021; C, D. Temperature, C. 17 June 2021; D. 3 August 2021; E, F. Humidity, E. 17 June 2021; F. 3 August 2021.

3 讨论

中哈边境中国新疆境内及哈萨克斯坦毗邻区域大面积种植的甜菜、玉米、马铃薯及小麦等为旋歧夜蛾提供了丰富的寄主植物（赵占江等，1992）。旋歧夜蛾在新疆北疆一年可发生 3 代，完成一代的生命周期为（44.27±3.10）d，以蛹在土中越冬，越冬代成虫始现于 4 月中下旬，越冬代蛾量高峰为 5 月中旬，第一代的蛾量高峰为 6 月中旬，第二代的蛾量高峰出现在 7 月下旬至 8 月上旬，个别年份会出现第三代高峰（夏德萍等，2015；张航等，2018），判断本研究观测到 6 月和 8 月的旋歧夜蛾高峰分别为第一代和第二代成虫。在监测期内，经实地调查，雷达站周围未发现旋歧夜蛾幼虫。据塔城市人民政府报道，旋歧夜蛾在博孜达克镇和也门勒乡（均在雷达站东南偏东方向，距实验站 15 和 26 km）玉米田间有发生，玉米田中旋歧夜蛾幼虫为 2-4 龄不等，主要以 3-4 龄大龄幼虫取食为主，玉米植株最高密度 5 头/株（塔城地区政府网，2022）。其次，连续 3 年利用高空灯对中哈边境塔城地区旋歧夜蛾进行监测发现，旋歧夜蛾的数量变化具有明显的突增突减现象，地面灯诱集到的旋歧夜蛾数量普遍较少，且无高峰期出现，当高空灯与地面灯诱集旋歧夜蛾数量的比值>1，可认为旋歧夜蛾为外地迁入（封洪强，2003）。迁飞性昆虫卵巢发育程度亦是判断本地和迁入虫源的重要依据，外地迁入虫源的卵巢大部分已经完成发育，因此迁入个体的卵巢发育级别高于本地个体的卵巢发育级别（齐国君等，2011；林培炯等，2020）。本研究发现旋歧夜蛾高峰期内卵巢发育等级以 3 级及以上为主，占比 88.49%，由此亦可判断中哈边境塔城地区旋歧夜蛾主要是迁入种群，12 h 逆推轨迹分析显示，其虫源主要来自哈萨克斯坦国的东哈萨克斯坦州。雷达观测期间，未监测到旋歧夜蛾本地迁出现象。研究报道通常雌性比雄性迁飞能力强，随着迁飞距离的增加，雌性所占的比例逐渐增加（张孝羲，1980），旋歧夜蛾得出相似的结果，高峰期间旋歧夜蛾雌性比>1，这与在延庆县及渤海监测到的旋歧夜蛾性比结果相同（张云慧，2010；He *et al.*，2018）。

研究结果表明，旋歧夜蛾在中亚迁飞场域内的迁飞行为与其在东亚迁飞场域存在差异。首先，空中聚集成层高度不同。中亚迁飞场域下其飞行高度主要范围介于 200-500 m 之间，最高可达 1 000 m 以上，且不同日期的迁飞高度有一定的变化，最大密度层集中在 200-300 m；东亚迁飞场域下旋歧夜蛾迁飞高度主要范围介于 100-550 m 之间，最大密度层集中在 500 m（张云慧等，2007；何莉梅，2017）。截至目前，有关迁飞昆虫空中聚集成层有两种假说，第一种风成层假说（Hobbs and Wolf, 1989），即昆虫最大密度出现在风速垂直变化中产生局部极值的高度；第二种是逆温层假说（Reynolds and Riley，1997；Reynolds *et al.*，2005），即成层发生在有较暖和气流的逆温层顶，常形成快速运动的气流，有助于昆虫迁飞。旋歧夜蛾在渤海的迁飞符合逆温层假说（何莉梅，2017），但中哈边境塔城地区旋歧夜蛾迁飞成层机制符合何种假说还需进一步研究。其次，迁飞方向不同。雷达监测到中亚迁飞场域下旋歧夜蛾随西北气流向东南方向飞行，在东亚迁飞场域下其主要表现为随偏南气流向北迁飞（何莉梅，2017）。分析原因，这与中哈边境塔城地区是三面环山、向西开口的盆地有关，塔城盆地常年盛行偏西风，而东北、华北地区夏季因为受太平洋夏季风的影响，主要为东南风。

本研究得出旋歧夜蛾迁飞高峰日 6 月 17 日 925 和 900 hPa 高空温度介于 15-18 ℃，相对湿度为 40%-50%，8 月 3 日 925 和 900 hPa 高空温度介于 24-28 ℃，湿度为 50%-55%，这说明在温度 15-28 ℃、湿度 40%-55%的条件下，旋歧夜蛾飞行活动增加，但旋歧夜蛾飞行最适宜的温度、湿度范围及其阈值还需通过昆虫自主飞行测试系统进行模拟研究。研究报道，在同一迁飞场域下不同昆虫的迁飞行为也不同（张志涛，1992），本研究得出相似结论，同在中亚迁飞场域内亚洲飞蝗迁飞时段高空温度为 25-31 ℃，相对湿度为 50%-70%，其境外虫源地主要位于哈萨克斯坦国境内阿拉湖、斋桑泊、巴尔喀什湖东

部、额尔齐斯河沿岸和阿亚古兹河迁飞至中国新疆为害（王磊等，2006；Yu *et al.*，2020）。下一步将加强国际合作，在中亚迁飞场域下西北气流强盛时期，加强对旋歧夜蛾的监测，为旋歧夜蛾的预测预报和有效防治提供依据。

参考文献 (References)

An LF, Zhan JC, 2005. The first major outbreak of the *Scotogramma trifolii* in White city. *China Plant Protection*, 25(8): 38–38. [安丽芬, 战继春, 2005. 旋幽夜蛾在白城市首次大面积暴发为害. 中国植保导刊, 25(8): 38–38.]

Baibussenov KS, Sarbaev AT, Azhbenov VK, Harizanova VB, 2014. Environmental features of population dynamics of hazard nongregarious locusts in northern kazakhstan. *Advances in Environmental Biology*, 8(10): 201–206.

Baibussenov KS, Sarbaev AT, Azhbenov VK, Harizanova VB, 2015. Predicting the phase state of the abundance dynamics of harmful non-gregarious locusts in northern kazakhstan and substantiation of protective measures. *Biosciences Biotechnology Research Asia*, 12(2): 1535–1543.

Cao KL, Wang SY, Yu BJ, Liu CC, ROMAN J, Ji R, 2020. Entomological radar observation of migratory insects in China-Kazakhstan border areas. *Plant Protection*, 46(2): 30–37. [曹凯丽, 汪姝玥, 于冰洁, 刘程才, ROMAN Jashenko, 季荣, 2020. 中哈边境塔城区域迁飞性昆虫雷达观测研究初探. 植物保护, 46(2): 30–37.]

Cao WJ, Luo LZ, Xu JX, 2006. The migratory behavior and pathways of meadow moth *Loxostege sticticalis* in China. *Chinese Bulletin of Entomology*, 43(3): 279–283. [曹卫菊, 罗礼智, 徐建祥, 2006. 我国草地螟的迁飞规律及途径. 昆虫知识, 43(3): 279–283.]

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 X, Hao LP, Jiang YY, Zhai BP, 2022. Spatial-temporal dynamic of meadow moth outbreaks in Eurasia over the past 100 years. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 59(2): 375–385. [陈晓, 郝丽萍, 姜玉英,翟保平, 2022. 近百年来欧亚大陆草地螟发生的时空动态. 应用昆虫学报, 59(2): 375–385.]

Chen X, Zhai BP, Gong RJ, Yin MH, Zhang Y, Zhao KJ, 2008. The source area of spring populations of meadow moth, *Loxostege sticticalis* in northeaster China. *Acta Ecologica Sinica*, 28(4): 1521–1535. [陈晓, 翟保平, 宫瑞杰, 尹明浩, 张友, 赵奎军, 2008. 东北地区草地螟 *Loxostege sticticalis* 越冬代成虫虫源地轨迹分析. 生态学报, 28(4): 1521–1535.]

Chen Y, Jiang YY, Liu JX, Lv 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 Entomologiva 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.]

Feng HQ, 2003. Community aloft and radar observations of seasonal migration of insects in northern China. Doctor thesis. 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, Wu K, Cheng DF, Guo YY, 2004. Spring migration and summer dispersal of *Loxostege sticticalis* (Lepidoptera: Pyralidae) and other insects observed with radar in northern China. *Environmental Entomology*, 33(5): 1253–1265.

He LM, Fu XW, Huang YX, Shen XJ, Wu KM, 2018. Seasonal patterns of *Scotogramma trifolii* Rottemberg (Lepidoptera: Noctuidae) migration across the Bohai Strait in northern China. *Corp Protection*, 106: 34–41.

He LM, 2017. Cross-sea migration behavior of *Scotogramma trifolii*. Master dissertation. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences. [何莉梅, 2017. 旋幽夜蛾跨海迁飞行为研究. 硕士学位论文. 北京: 中国农业科学院.]

Hobbs SE, Wolf WW, 1989. An airborne radar technique for studying insect migration. *Bulletin of Entomological Research*, 79(4): 693–704.

Howard E, Davis AK, 2009. The fall migration flyways of monarch butterflies in eastern North America revealed by citizen scientists. *Journal of Insect Conservation*, 13(3): 279–286.

Hunter D, Deveson T, 2002. Forecasting and management of migratory pests in Australia. *Insect Science*, 9(4): 13–25.

Lin PJ, Zhang Z, Wang XL, Liu DX, Hu G, Zhang YH, 2020. Population dynamics and trajectory simulation of migratory moths of fall armyworm *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 X, Chen S, Chen QD, Liu HL, Li C, Liu YY, 2020. The occurrence of *Schistocerca gregaria* and its prevention and control measures. *Science and Technology of Sichuan Agriculture*, 389(2): 45–47. [刘旭, 陈松, 陈庆东, 刘虹伶, 李超, 刘月悦, 2020. 沙漠蝗的发生危害与应对防控措施. 四川农业科技, 389(2): 45–47.]

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.]

Madeleine S. Liu YZ, 2020. A plague of locusts has descendedon East Africa, climate change may be to blame. *English Digest*, 2020(4): 4–9. [Madeleine Stone, 刘宗亚, 2020. 蝗灾降临东非, 气候变化可能是罪魁祸首. 英语文摘, 2020(4): 4–9.]

National *Sogatella furcifera* Horvath Research Collaborative Group, 1981. A preliminary study of the migration pattern of *Sogatella furcifera* Horvath. *Scientia Agricultura Sinica*, 1981(5): 25–31. [全国白背飞虱科研协作组, 1981. 白背飞虱迁飞规律的初步研究. 中国农业科学, 1981(5): 25–31.]

Qi GJ, Lu F, Hu G, Wang FY, Gao Y, Lv 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.]

Reynolds DR, Riley JR, 1997. The flight behavior and migration of insect pests: Radar studies in developing countries. *Bulletin-Natural Resources Institute*, 1997(71): 114.

Reynolds DR, Chapman JW, Edwards AS, Smith AD, Woiwod IP, 2005. Radar studies of the vertical distribution of insects migrating over southern Britain: The influence of temperature inversions on nocturnal layer concentrations. *Bulletin of Entomological Research*, 95(3): 259–274.

Tacheng Regional Government Network, 2022. Clover night moth larvae invade and infest maize fields. 2023-3-2. http://www.xjtcsh.gov.cn/zxbs/snfw/nqyc/202205/t40288182807328a80180feba73c1455f.html. [塔城地区政府网, 2022. 三叶草夜蛾幼虫侵入玉米田间为害. 2023-3-28. http://www.xjtcsh.gov.cn/zxbs/snfw/nqyc/202205/t40288182807328a80180feba73c1455f.html.]

Tu XB, Du GL, Chai SQ, Zhu JQ, Zhang ZH, 2022. An overview of the migration patterns of important locusts in China and adjacent countries. *Journal of Plant Protection*, 49 (1): 125–130. [涂雄兵, 杜桂林, 柴守权,朱景全, 张泽华, 2022. 我国及毗邻国家重要蝗虫迁飞规律概述. 植物保护学报, 49 (1): 125–130.]

Wang L, Xu GQ, Liu DF, Han XL, 2006. A study on the relationship between migratory Asian flying locusts and meteorological factors. *Bimonthly of Xinjiang Meteorology*, 2006(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, 2006(5): 25–27.]

Xia DP, Liu ZH, Lv ZZ, Gao GZ, Ma JH, Luo CH, Wang PL, 2015. Population dynamics of the clover night moth in the northern Xinjiang region. *Xinjiang Agricultural Science*, 52(2): 278–282. [夏德萍, 刘兆海, 吕昭智, 高桂珍, 马吉宏, 罗朝辉, 王佩玲, 2015. 新疆北疆地区三叶草夜蛾种群动态研究. 新疆农业科学, 52(2): 278–282.]

Yu BJ, Mai JW, Chen X, Xu CH, Chen Y, Cao KL, Xu Y, Roman J, Ji R, 2020. Source areas and migratory trajectories of *Locusta migratoria migratoria* (Orthoptera: Acrididae) in the border region of Tacheng, Xinjiang, China and adjacent regions. *Journal of Entomological Science*, 55(1): 46–57.

Zhang H, Yang AP, Bai WW, Gao HF, Li GK, Wang SL, 2018. Morphological and life history of *Discestra trifolii*(Lepidoptera: Noctuidae). *Chinese Journal of Applied Entomology*, 55(6): 1069–1104. [张航, 杨安沛, 白微微, 高海峰, 李广阔, 王锁牢, 2018. 旋歧夜蛾形态和生活史观察. 应用昆虫学报, 55(6): 1069–1104.]

Zhang XX, 1980. The type of migratory insect and its mechanism of physiology and ecology. *Entomological Knowledge*, 17(5): 236–239. [张孝羲, 1980. 昆虫迁飞的类型及生理、生态机制. 昆虫知识, 17(5): 236–239.]

Zhang YH, Chen L, Chen DF, Zhang YJ, Jiang YY, Jiang JW, 2007. Radar observation and population analysis on the migration of the clover cutworm, *Scotogramma trifolii* Rottemberg (Lepidoptera: Pyralidae). *Acta Entomologiva Sinica*, 50(5): 494–500. [张云慧, 陈林, 程登发, 张跃进, 姜玉英, 蒋金炜, 2007. 旋幽夜蛾迁飞的雷达观测和虫源分析. 昆虫学报, 50(5): 494–500.]

Zhang YH, Chen DF, Jiang YY, Zhang YJ, Sun JR, 2010. Analysis on the population status of the overwintering generation of the clover cutworm *Scotogramma trifolii* (Lepidoptera: Noctuidae) in Beijing. *Scientia Agricultura Sinica*, 43(9): 1815–1822. [张云慧, 程登发, 姜玉英, 张跃进, 孙京瑞, 2010. 北京地区越冬代旋幽夜蛾迁飞的虫源分析. 中国农业科学, 43(9): 1815–1822.]

Zhang Z, 2013. Monitoring and forecasting of pests and related control decision. Doctor thesis. Bei-jing: 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 ZT, 1992. Insect migration and insect migration fields. *Plant Protection*, 18(1): 48–50. [张志涛. 1992. 昆虫迁飞与昆虫迁飞场. 植物保护, 18(1): 48–50.]

Zhao ZH, Tu XB, Zhang ZH, Li ZH, 2021. The alert of population expansion of desert locust *Schistocerca gregaria* and risk to entering China. *Journal of Plant Protection*, 48(1): 5–12. [赵紫华, 涂雄兵, 张泽华, 李志红, 2021. 警惕沙漠蝗种群持续增加和入侵我国边境地区的风险. 植物保护学报, 48(1): 5–12.]

Zhao ZJ, Chen EX, Zhang Y, 1992. Studies on the biological characteristic of *Scotogramma trifolii* and its control. *Chinese Beets*, 1992(4): 25–28. [赵占江, 陈恩祥, 张毅, 1992. 旋幽夜蛾生物学特性与防治研究. 中国甜菜, 1992(4): 25–28.]