

在北迁与南迁更替期九种夜蛾的 种群结构与迁飞轨迹分析

郭 森^{1,2**} 李丽莉¹ 吕素洪¹ 崔洪莹¹ 郭文秀¹
宋莹莹¹ 于 毅¹ 门兴元^{1***} 尹淑艳^{2***}

(1. 山东省农业科学院植物保护研究所, 济南 250100; 2. 山东农业大学植物保护学院, 泰安 271018)

摘 要 【目的】山东省地处粘虫 *Mythimna separata*、棉铃虫 *Helicoverpa armigera* 等夜蛾类害虫南北季节性迁飞的重要通道, 研究明确夜蛾类害虫在山东省的迁飞规律对于害虫监测预警与防控具有重要意义。【方法】2021年7月11日-8月19日(害虫北迁与南迁更替期)在山东省莒南地区用高空灯对迁飞性昆虫进行了诱捕监测, 分析了9种主要夜蛾(棉铃虫、斜纹夜蛾 *Spodoptera litura*、甜菜夜蛾 *Spodoptera exigua*、银纹夜蛾 *Plusia agnata*、小地老虎 *Agrotis ipsilon*、黄地老虎 *Agrotis segetum*、粘虫、二点委夜蛾 *Athelis lepigone*、白条银纹夜蛾 *Argyrogramma albostrata*) 的种群动态, 对雌蛾进行卵巢解剖并分析种群结构变化, 结合高空气流解析迁飞轨迹。【结果】7月份西南季风为夜蛾向北迁飞提供了气流条件, 7月下旬-8月上旬大约2周的时间内气流发生了快速转变, 季风开始南下, 为其提供了南迁气流条件, 受高空气流的影响, 棉铃虫、甜菜夜蛾、粘虫等9种夜蛾类昆虫均有明显的南北迁飞过程, 大部分种类在北迁期以迁入种群和本地种群混合发生, 在南迁期为外地远距离迁入虫源为主。【结论】充分表明了山东地区既是夜蛾类害虫的春夏繁殖区和东北地区的虫源地, 又是从东北回迁虫源的越冬地和继续南迁的通道。**关键词** 昆虫迁飞; 夜蛾; 种群结构; 轨迹分析

Population and migration trajectory of nine Noctuidae species in the transitional period between northward and southward migration

GUO Sen^{1,2**} LI Li-Li¹ LÜ Su-Hong¹ CUI Hong-Ying¹ GUO Wen-Xiu¹
SONG Ying-Ying¹ YU Yi¹ MEN Xing-Yuan^{1***} YIN Shu-Yan^{2***}

(1. Institute of Plant Protection, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250100, China;

2. College of Plant Protection, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China)

Abstract 【Objectives】To clarify the migration of noctuid moths in Shandong province, including the armyworm and cotton bollworm. 【Methods】During the transitional period between the northward and southward migration of noctuid moths (from July 11 to August 19, 2021), migratory insects were trapped and monitored with high-altitude lights in the Junan area. The ovaries of 9 major noctuid moth species (*Helicoverpa armigera*, *Spodoptera litura*, *Spodoptera exigua*, *Plusia agnata*, *Agrotis ipsilon*, *Agrotis segetum*, *Mythimna separata*, *Athelis lepigone* and *Argyrogramma albostrata*) were dissected and their population structure analyzed. The migration trajectory of these moths was investigated in relation to air flow at high altitude. 【Results】The southwest monsoon in July provides the airflow conditions required for northward migration. However, from the end of July to early August (within about two weeks), the direction of the air flow changed quickly to that conducive to southward migration. Noctuid moths, such as *Helicoverpa armigera*, *Spodoptera exigua* and *Mythimna separata*,

*资助项目 Supported projects: 山东省重点研发计划(重大科技创新工程项目)(2020CXGC010802); 国家自然科学基金项目(32202316); 山东省农业科学院农业科技创新项目(CXG2022E04)

**第一作者 First author, E-mail: 1460639383@qq.com

***共同通讯作者 Co-corresponding authors, E-mail: menxy2000n@hotmail.com; shuyany@163.com

收稿日期 Received: 2022-12-08; 接受日期 Accepted: 2023-08-12

had a clear south-north migration trajectory driven by the airflow at high altitude. The northward migration was a combination of native and immigrant individuals, whereas the southward migration was mainly comprised of immigrants. [Conclusion] This indicates that Shandong province is a breeding area for noctuid pests in spring and summer, and is a source area of these pests for northeast China. It is also the overwintering site for noctuid pests in Northeast China and lies on their southern migration pathway.

Key words insect migration; noctuidae moth; population structure; trajectory analysis

昆虫迁飞是在其生活史特定阶段,大规模地从一个栖息地长距离迁移到另一个栖息地的过程,用来躲避不良环境,更好地繁衍种群(吴孔明, 2018)。迁飞性害虫以其突发性、爆发性和毁灭性的危害特点常常给农业生产带来巨大损失。开展迁飞性害虫的预测预报对于迁飞性害虫的治理尤为重要,利用准确的观测工具,在害虫迁飞的主要通道上进行观测预警,开展准确防控,减少农业损失,对于我国粮食安全生产具有重大意义(张孝羲和程遐年, 2000)。

棉铃虫 *Helicoverpa armigera*、斜纹夜蛾 *Spodoptera litura*、甜菜夜蛾 *Spodoptera exigua*、银纹夜蛾 *Plusia agnata*、小地老虎 *Agrotis ipsilon*、黄地老虎 *Agrotis segetum*、粘虫 *Mythimna separata*、二点委夜蛾 *Athelis lepigone* 等夜蛾类昆虫是我国重大农业迁飞性害虫,常常对玉米、小麦、蔬菜等农作物造成巨大的产量损失。山东省地处我国夜蛾类害虫南北季节性迁飞的通道,明确其在山东省的迁飞过程和迁飞规律,对于山东省乃至全国的迁飞性害虫监测与防控具有重要意义。付晓伟(2015)将昆虫在渤海湾的迁飞过程分为5个阶段,宋海燕等(2021)发现山东省昆虫迁飞动态基本符合5个阶段的划分,其中过渡期是昆虫南北迁飞方向发生转换的时期,驱动昆虫在这个时期发生迁飞方向变化的因素尚不清楚。我国昆虫迁飞方向与东亚地区低层大气环流季节性变化有密切关系(吴孔明等, 1998),为了探明迁飞过渡期夜蛾类害虫的种群动态及高空气流方向,本研究用高空灯诱法对9种主要夜蛾进行了诱捕监测,并结合高空气流模拟了迁飞轨迹,探讨了风向转换与害虫迁飞方向的关系。

1 材料与方法

1.1 高空投射式虫情测报灯

本研究使用的高空投射式虫情测报灯(简称高空灯),向上投射形成光柱,用以诱集途经的高空迁飞昆虫。测报灯光源为功率 1 000 W 的 GT75 型探照灯,灯体采用 430 不锈钢材料,内部集虫通道为倒梯形,集虫口直径为 5 cm,接一个 60 目的集虫网袋(0.5 m×0.5 m×0.5 m),以收集被灯光诱集的昆虫。

1.2 迁飞性夜蛾诱集

根据宋海燕等(2021)的观测结果,本研究在 2021 年 7 月 11 日至 2021 年 8 月 19 日(北迁期-迁飞过渡期-南迁期)在山东省临沂市莒南地区(35.149 896° N, 118.788 983° E)设置高空灯诱集迁飞性昆虫,在灯附近无高大建筑、树木遮挡,500 m 范围内无其他强光源。每天 18:00 开灯,次日 8:00 关灯,其中 7 月 13 日、15 日、19 日、27 日、28 日、29 日因降雨天气没有开灯。关灯后将集虫网袋取回实验室,放置在 - 20 °C 的冰柜内保存,然后进行分类和计数。根据《北京蛾类图谱》(虞国跃, 2015)、《中国园林害虫》(徐公天和杨志华, 2007)、《北京灯下蛾类图谱》(丁建云和张建华, 2016)、《高黎贡山蛾类图鉴》(杨平之, 2016)等鉴定诱集的昆虫种类。

1.3 卵巢解剖和虫源判断

鳞翅目昆虫卵巢发育级别的划分大都基于卵粒大小、脂肪体状态、卵巢管状态等,其中大多数鳞翅目昆虫的卵巢发育分为 4-5 个级别(钱仁贵, 1982; 李汝铎等, 1987; 李学军等, 1993; 李立涛等, 2012; 张胜男等, 2021),本研究参

考张万娜等(2013)的5级划分标准,分为卵黄沉积前期(I级)、卵黄沉积期(II级)、成熟待产期(III级)、产卵盛期(IV级)和产卵末期(V级),对诱集到的9种数量多的夜蛾(棉铃虫、斜纹夜蛾、甜菜夜蛾、银纹夜蛾、小地老虎、黄地老虎、粘虫、二点委夜蛾、白条银纹夜蛾 *Argyrogramma albostrata*)分别进行卵巢解剖,并根据腹腔颜色、卵巢管及卵粒发育情况、脂肪粒特征、交配囊特征对卵巢发育进行分级。

研究发现,卵巢发育进度是确定迁飞昆虫虫源性质的重要指标(张孝羲,1980)。一般来说,外地迁入虫源的卵巢大部分已完成发育,I级所占比例很低或者不存在,雌成虫的交配率和交配次数也很高;本地虫源的卵巢发育为I级的雌虫比例较高;本地迁出虫源中,卵巢发育I级始终占极高比例(90%以上),而且大多数成虫尚未交配(齐国君等,2011)。

1.4 风向轨迹分析

本研究应用 HYSPLIT 线上平台基于拉格朗日混合单粒子轨道模型(Hybrid single particle lagrangian integrated trajectory model, HYSPLIT)进行轨迹分析(陈辉等,2021),该模型已经用于多种昆虫迁飞研究中(陈晓等,2008;郁振兴,2011)。本研究选择昆虫迁飞的高峰日期进行分析,借助 HYSPLIT 轨迹模型,由于不同昆虫在不同状态下飞行高度不同,正常情况下夜蛾科昆虫迁飞在夜间进行,秋季高度一般在300-500 m(张云慧,2008),所以本研究选择300、400和500 m 3个高度。选用 Backward 轨迹模块进行迁入分析,以高空灯为终点,向后运行数据,每日20:00开始,连续分析8 h,每隔1 h 输出一个轨迹点,得到迁入轨迹数据;选用 Forward 轨迹模块进行迁出分析,以高空灯为起点,向前运行数据,每日20:00开始,连续分析8 h,每隔1 h 输出一个轨迹点,得到迁出轨迹数据。轨迹数据以 GIS 数据存档,利用 ArcMap 输出分析结果。

1.5 数据分析

采用 Excel 2021 对采集数据进行计算分析,利用 Origin 2021 绘制夜蛾类害虫的种群动态曲

线图,使用 SPSS 22.0 软件的单因素方差分析对种群数量进行方差分析,用 LSD 法进行差异显著性分析,利用 GisMap 进行轨迹输出。

2 结果与分析

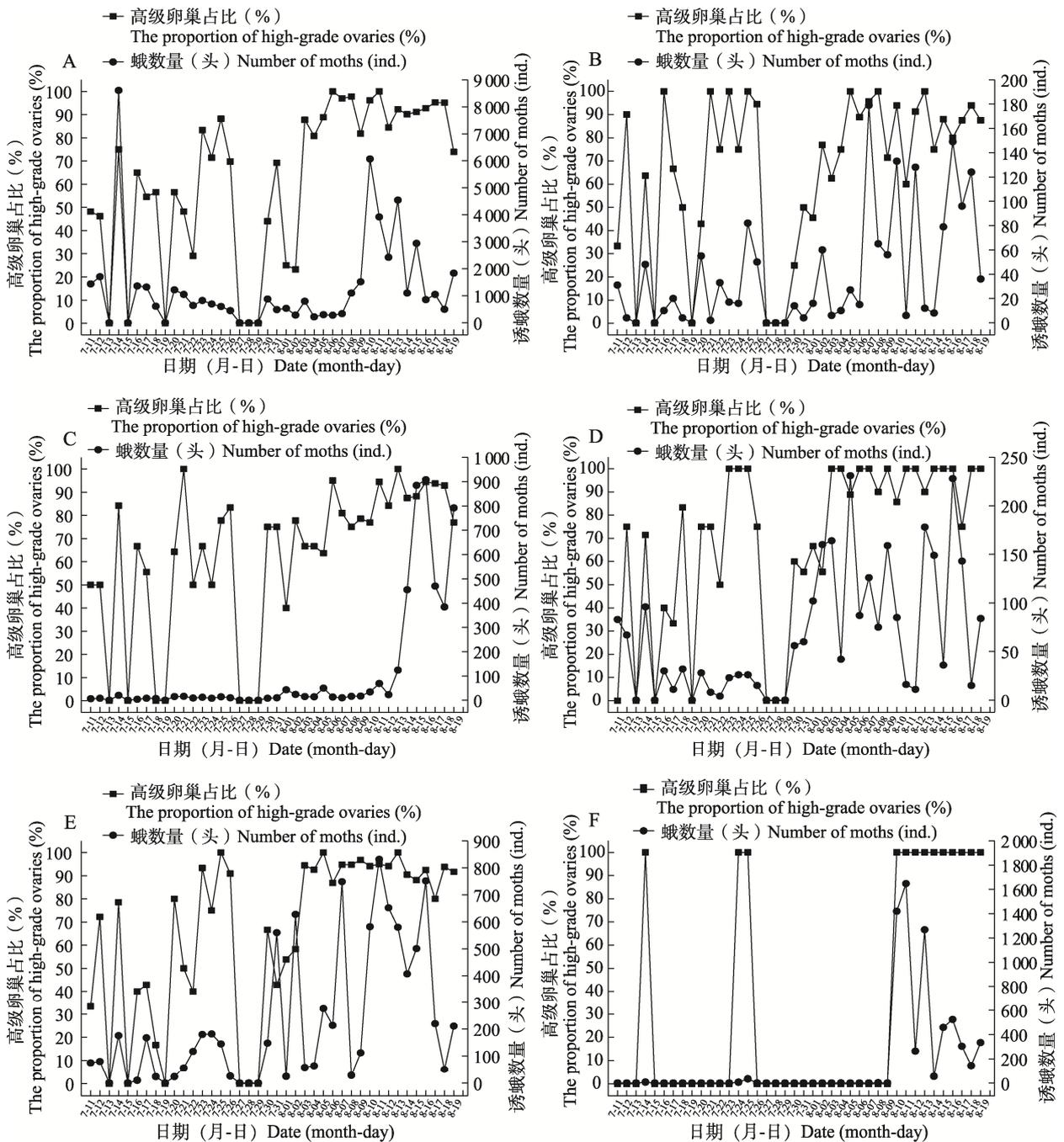
2.1 9种夜蛾类害虫的种群动态及卵巢发育级别分析

参考宋海燕等(2021)的方法,根据诱集到的9种夜蛾的种群数量动态,本研究将山东省2021年7月11日至8月19日这一阶段夜蛾科的迁飞过程分为3个阶段,分别属于3个时期,即北迁期(7月11日-7月22日,12 d)、过渡期(7月23日-8月5日,14 d)和南迁期(8月6日-8月19日,14 d)。共诱集到52 467头棉铃虫。在北迁期,日诱蛾量基本在1 000头以上,其中7月14日为单日诱蛾高峰,达到8 608头;在过渡期,种群数量稳定,基本在1 000头以下;在南迁期,种群数量迅速上升,8月10日达到高峰值日诱蛾量为6 086头,随后种群数量下降(图1:A)。三个时期的日平均诱蛾量存在显著差异($F=6.428$, $P=0.005$),北迁期和南迁期均显著高于过渡期(表1)。对1 575头棉铃虫雌蛾进行卵巢解剖。结果表明,北迁期卵巢发育Ⅲ级以上的平均比例为53.2%(表1),整体波动较大,其中高峰日(7月14日)Ⅲ级以上比例占75%(图1:A),判断在这一时期诱捕到的棉铃虫是外地迁入虫源和本地虫源混合发生,高峰日以外地迁入虫源为主;过渡期卵巢发育Ⅲ级以上的平均比例为66.5%(表1),先降低后迅速上升(图1:A),8月3日诱蛾卵巢发育Ⅲ级以上比例突增到87.8%,判断这一时期诱捕到的棉铃虫开始以本地虫源为主,后期以外地迁入虫源为主;南迁期卵巢发育Ⅲ级的平均比例为92%(表1),整体平稳,除了8月19日,棉铃虫卵巢发育Ⅲ级及以上的比例均在80%以上,判断这一时期诱捕到的棉铃虫均为外地迁入虫源。共诱集1 595头甜菜夜蛾。在北迁期,种群呈现波动状态,7月20日为单日诱蛾高峰,达到55头;在过渡期,种群数量均较低;在南迁期,种群数量迅速上升,8月7日达到高峰,单日诱蛾量为179头,随后

种群数量下降(图 1: B)。三个时期的日平均诱蛾量存在显著差异 ($F=4.328, P=0.022$) (表 1), 南迁期数量明显高于过渡期和北迁期。对 423 头甜菜夜蛾雌蛾进行卵巢解剖, 结果表明, 在北迁期, 卵巢发育Ⅲ级以上的平均比例为 69.1% (表 1), 整体波动较大(图 1: B), 判断这一时期诱捕的甜菜夜蛾为本地虫源和外地迁入虫源混合发生; 在过渡期, 卵巢发育Ⅲ级以上的平均比例为 73.1% (表 1), 呈现逐渐下降趋势(图 1: B),

判断由外地迁入虫源为主变成以本地虫源为主; 在南迁期, 卵巢发育Ⅲ级以上的平均比例为 86.6% (表 1), 整体表现平稳, 判断这一时期以外地迁入虫源为主。

共诱集到 4 501 头斜纹夜蛾。在北迁期, 种群数量整体平稳, 日诱蛾量基本在 20 头以下(图 1: C); 在过渡期, 种群数量整体平稳, 除了 8 月 1 日 (43 头) 和 8 月 5 日 (50 头), 其余均在 20 头以下; 在回迁期, 种群数量逐渐上升, 8 月



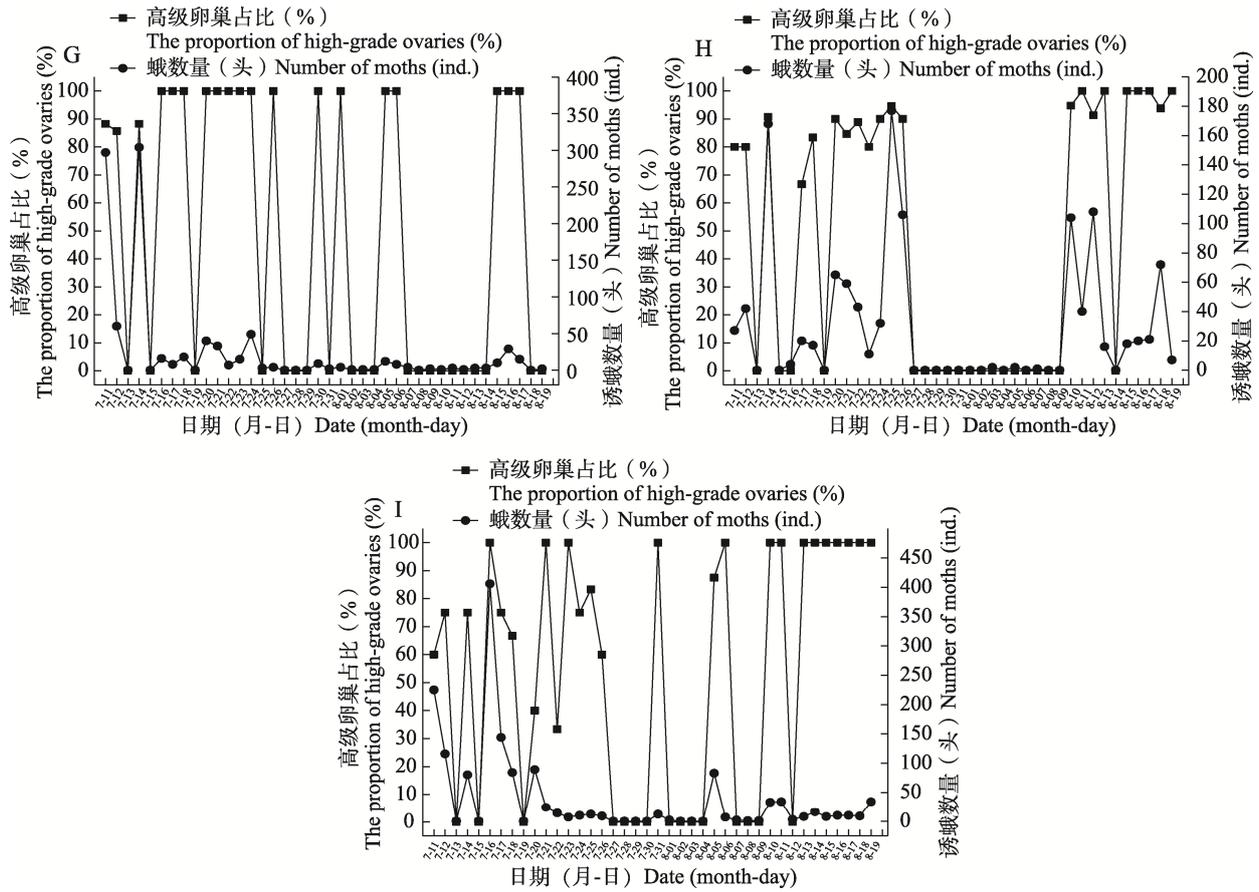


图 1 9 种昆虫种群动态

Fig. 1 Population dynamics of 9 insect species

A. 棉铃虫 B. 甜菜夜蛾; C. 斜纹夜蛾; D. 小地老虎; E. 银纹夜蛾;

F. 白条银纹夜蛾; G. 粘虫; H. 二点委夜蛾; I. 黄地老虎。

A. *Helicoverpa armigera*; B. *Spodoptera exigua*, C. *Spodoptera litura*; D. *Agrotis ipsilon*; E. *Plusia agnate*;

F. *Argyrogramma albostrigata*; G. *Mythimna separate*; H. *Athelis lepigone*; I. *Agrotis segetum*.

高级卵巢占比指卵巢发育级别Ⅲ级及以上占比。

The proportion of advanced ovaries refers to the proportion of ovarian development level three or above.

表 1 9 种夜蛾科昆虫不同时期迁飞数量比较及卵巢Ⅲ级以上比例

Table 1 Comparison of the migration numbers of 9 species of noctuidae insects at different stages and the proportion of ovaries at or above the third level

种类 Species	迁飞数量 (卵巢三级以上占比, %) Number of migrations (Proportion of ovaries above grade three, %)		
	北迁期 Period of northward migration	过渡期 Transition period	南迁期 Period of southward migration
棉铃虫 <i>Helicoverpa armigera</i>	7.235 ± 0.257 a (53.2%)	6.221 ± 0.141 b (66.5%)	7.243 ± 0.253 a (92.0%)
甜菜夜蛾 <i>Spodoptera exigua</i>	2.741 ± 0.365 b (69.1%)	3.001 ± 0.266 b (73.1%)	3.933 ± 0.299 a (86.6%)
斜纹夜蛾 <i>Spodoptera litura</i>	2.331 ± 0.155 b (57.9%)	2.807 ± 0.180 b (67.5%)	4.648 ± 0.46 a (87.1%)
小地老虎 <i>Agrotis ipsilon</i>	3.312 ± 0.345 b (55.9%)	4.066 ± 0.271 ab (82.0%)	4.281 ± 0.259 a (95.8%)

续表 1 (Table 1 continued)

种类 Species	迁飞数量 (卵巢三级以上占比, %) Number of migrations (Proportion of ovaries above grade three, %)		
	北迁期 Period of northward migration	过渡期 Transition period	南迁期 Period of southward migration
	银纹夜蛾 <i>Plusia agnata</i>	4.067 ± 0.321 b (50.4%)	4.866 ± 0.328 ab (78.9%)
白条银纹夜蛾 <i>Argyrogramma albostrigata</i>	0.244 ± 0.244 b (100.0%)	0.638 ± 0.350 b (100.0%)	4.407 ± 0.756 a (100.0%)
粘虫 <i>Mythimna separata</i>	3.647 ± 0.448 a (95.8%)	1.758 ± 0.311 b (100.0%)	1.437 ± 0.264 b (100.0%)
二点委夜蛾 <i>Athelis lepigone</i>	3.537 ± 0.329 a (73.8%)	1.639 ± 0.603 b (88.6%)	2.288 ± 0.485 ab (97.8%)
黄地老虎 <i>Agrotis segetum</i>	4.493 ± 0.339 a (69.4%)	1.585 ± 0.444 b (84.3%)	2.208 ± 0.280 b (100%)
平均值 Mean value	69.5%	82.3%	94.6%

表中数据(原始数据 $\ln(n+1)$ 处理)为平均值 ± 标准误,同行数据后不同小写字母表示差异显著(One-way ANOVA, LSD 检验, $P < 0.05$)。

Data in the table(original data $\ln(n+1)$)are the mean ± SE, and followed by the differences lowercase letters in the same row indicate significant differences tested by one-way ANOVA ($P < 0.05$).

16 日达到高峰值日诱蛾量为 908 头,随后种群数量下降(图 1: C)。三个时期的日平均诱蛾量存在显著差异($F=12.701$, $P < 0.001$)(表 1),南迁期显著高于北迁期。对 360 头斜纹夜蛾的雌蛾进行卵巢解剖,结果表明,在北迁期,卵巢发育 3 级以上的平均比例为 57.9%(表 1),整体波动较大(图 1: C),判断这一时期诱捕的斜纹夜蛾为本地虫源和外地迁入虫源混合发生;在过渡期,卵巢发育 3 级以上的平均比例为 67.5%(表 1),呈现逐渐下降趋势(图 1: C),判断这一时期诱捕的斜纹夜蛾为本地虫源和外地迁入虫源混合发生;在南迁期,卵巢发育 Ⅲ级以上的平均比例为 87.1%(表 1),8 月 6 日后卵巢发育 Ⅲ级及以上均在 75%以上,整体表现平稳,判断这一时期以外地迁入虫源为主。

共诱集到 2 656 头小地老虎。在北迁期,日诱蛾量基本在 100 头以下,7 月 14 日为诱蛾高峰,达到 96 头(图 1: D);在过渡期,种群数量前期相对稳定,在 8 月 1 日增至 102 头后持续增长(图 1: D);在南迁期,种群数量较前两个时期增加,8 月 16 日达到高峰,日诱蛾量为 228 头(图 1: D)。三个时期的日平均诱蛾量仅北迁

期和南迁期有显著性差异,过渡期与前后差异并不明显,所以数据呈现组间无显著差异($F=2.862$, $P=0.072$)(表 1)。对 654 头小地老虎雌蛾进行了卵巢解剖,结果表明,在北迁期,卵巢发育 Ⅲ级以上的平均比例为 55.9%(表 1),不同日期间波动较大(图 1: D),判断这一时期诱捕的小地老虎为本地虫源和外地迁入虫源混合发生;在过渡期,卵巢发育 Ⅲ级以上的平均比例为 82.0%(表 1),呈现先下降后上升的趋势(图 1: D),判断这一时期诱捕的小地老虎为本地虫源和外地迁入虫源混合发生,外地迁入虫源为主;在南迁期,卵巢发育 Ⅲ级以上的平均比例为 95.8%(表 1),整体表现平稳(图 1: D),判断这一时期以外地迁入虫源为主。

共诱集到 8 908 头银纹夜蛾。在北迁期,种群数量整体平稳,大部分的日诱蛾量在 100 头以下(图 1: E);在过渡期,除 7 月 31 日和 8 月 2 日外,数量基本在 200 头以下(图 1: E);在南迁期,种群数量迅速上升,8 月 16 日达到高峰值,日诱蛾量为 752 头,随后种群数量下降(图 1: E)。三个时期的日诱蛾量存在显著差异($F=6.701$, $P=0.004$),其中南迁期显著高于北

迁期(表1)。对611头银纹夜蛾的雌蛾进行了卵巢解剖,结果表明,在北迁期,卵巢发育Ⅲ级以上的平均比例为50.4%(表1),不同日期间波动较大(图1:E),判断这一时期诱捕的银纹夜蛾为本地虫源和外地迁入虫源混合发生;在过渡期,卵巢发育Ⅲ级以上的平均比例为78.9%(表1),呈现先下降后上升的趋势(图1:E),判断这一时期诱捕的银纹夜蛾为本地虫源和外地迁入虫源混合发生,外地迁入虫源为主;在南迁期,卵巢发育3级以上的平均比例为92.3%(表1),整体表现平稳,卵巢发育Ⅲ级以上的比例均在80%以上(图1:D),判断这一时期以外地迁入虫源为主。共诱集到6474头白条银纹夜蛾。在北迁期,大部分时间没有诱到,7月14日诱到8头(图1:F);在过渡期,除7月25日为34头外,其他时间没有诱到(图1:F);在南迁期,种群数量迅速上升,8月11日达到高峰值日诱蛾量为1648头,随后种群数量下降(图1:F)。三个时期的日平均诱蛾量存在显著差异($F=16.423, P<0.001$),南迁期显著高于北迁期和过渡期(表1)。对400头白条银纹夜蛾雌蛾进行了卵巢解剖,结果表明,在北迁期、过渡期和南迁期,白条银纹夜蛾的卵巢发育均为Ⅲ级以上,判断所诱集的黑条银纹夜蛾均为外地迁入虫源。

共诱集到965头粘虫。在北迁期,种群数量波动较大,7月14日为单日诱蛾高峰,达到304头(图1:G);在过渡期,种群数量较低,除7月24日外基本在20头以下(图1:G);在南迁期,种群数量较低,8月16日高峰,日诱蛾量为29头,随后种群数量下降(图1:G)。三个时期的日平均诱蛾量存在显著差异($F=11.894, P<0.001$),其中北迁期显著高于过渡期和南迁期(表1)。对106头粘虫雌蛾进行了卵巢解剖,结果表明,除了前3日的卵巢发育Ⅲ级以上占比为80%以上,其余均为100%(图1:G,表1),判断三个时期的粘虫均以外地迁入虫源为主。

共诱集到1182头二点委夜蛾。在北迁期,日诱蛾量在50头左右波动,其中7月14日为单日诱蛾高峰,达到168头(图1:H);在过渡期,

在前期有个小高峰,7月26日为106头,之后再没有诱到。在北迁期,8月9日前未诱到,8月10日种群数量突增,8月12日达到高峰(108头),随后种群数量下降(图1:H)。三个时期的日平均诱蛾量仅北迁期和过渡期有显著性差异,但是南迁期与北迁期和过渡期差异并不明显,所以数据呈现组间并无显著差异($F=3.109, P=0.059$)(表1)。对270头二点委夜蛾雌蛾进行了卵巢解剖,结果表明,在北迁期,卵巢发育Ⅲ级以上的平均比例为73.8%(表1),不同日期间有所波动(图1:H),判断这一时期诱捕的二点委夜蛾为本地虫源和外地迁入虫源混合发生,外地迁入虫源为主;在过渡期,卵巢发育Ⅲ级以上的平均比例为88.6%(表1,图1:H),判断这一时期诱捕的二点委夜蛾为外地迁入虫源为主;在南迁期,卵巢发育Ⅲ级以上的平均比例为97.8%(表1),整体表现平稳(图1:D),判断这一时期以外地迁入虫源为主。

共诱集到1493头黄地老虎。在北迁期,日诱蛾量波动较大,7月16日为单日诱蛾高峰,达到406头(图1:I);在过渡期,诱到的种群数量较少(图1:I);在南迁期,诱蛾数量增加,8月11日和8月19日有2个高峰期(图1:I)。三个时期的日平均诱蛾量存在显著差异($F=16.721, P<0.001$),北迁期显著高于过渡期和南迁期(表1)。对123头黄地老虎雌蛾进行了卵巢解剖,结果表明,在北迁期,卵巢发育3级以上的平均比例为69.4%(表1),不同日期间有所波动(图1:I),判断这一时期诱捕的黄地老虎为本地虫源和外地迁入虫源混合发生;在过渡期,卵巢发育Ⅲ级以上的平均比例为84.3%(表1,图1:I),判断这一时期诱捕的黄地老虎以外地迁入虫源为主;在南迁期,卵巢发育Ⅲ级以上的平均比例为100%(表1),判断这一时期均外地迁入虫源。

对三个时期9种夜蛾卵巢发育3级以上的比例进行比较,北迁期、过渡期和南迁期分别为69.5%、82.3%和94.6%,三者存在显著性差异($F=8.401, P=0.002$),北迁期显著低于过渡期和南迁期,后两者没有显著性差异(表1)。判

断在北迁期以迁入种群和本地种群混合发生, 在南迁期以外地远距离迁入虫源为主。

2.2 风向变化过程分析

本研究自 National Oceanic and Atmospheric Administration 选取 7 月 11 日-8 月 19 日每日夜间 00:00 风向频次分布数据(图 2), 7 月 11 日-7 月 16 日风向整体由南向北, 7 月 17 日后风向逐渐由东向西, 其中 7 月 29 日至 31 日、8 月 4 日、

8 月 8 日至 8 月 10 日出现由北向南风向外, 到 8 月 19 日均为东风向, 且整体风速逐渐降低。

2021 年 7 月 17 日凌晨位于太平洋热带气旋(09)其环流东侧出现大量对流, 2021 年 7 月 18 日形成台风“烟花”(下称烟花), 当夜附近出现强烈对流, 并向西移动, 7 月 25 日和 7 月 26 日在浙江两次登陆, 登陆后开始向西北移动, 后又北上, 一路影响浙江、江苏、安徽、山东、河南、河北、天津、北京、辽宁等 10 个省(直

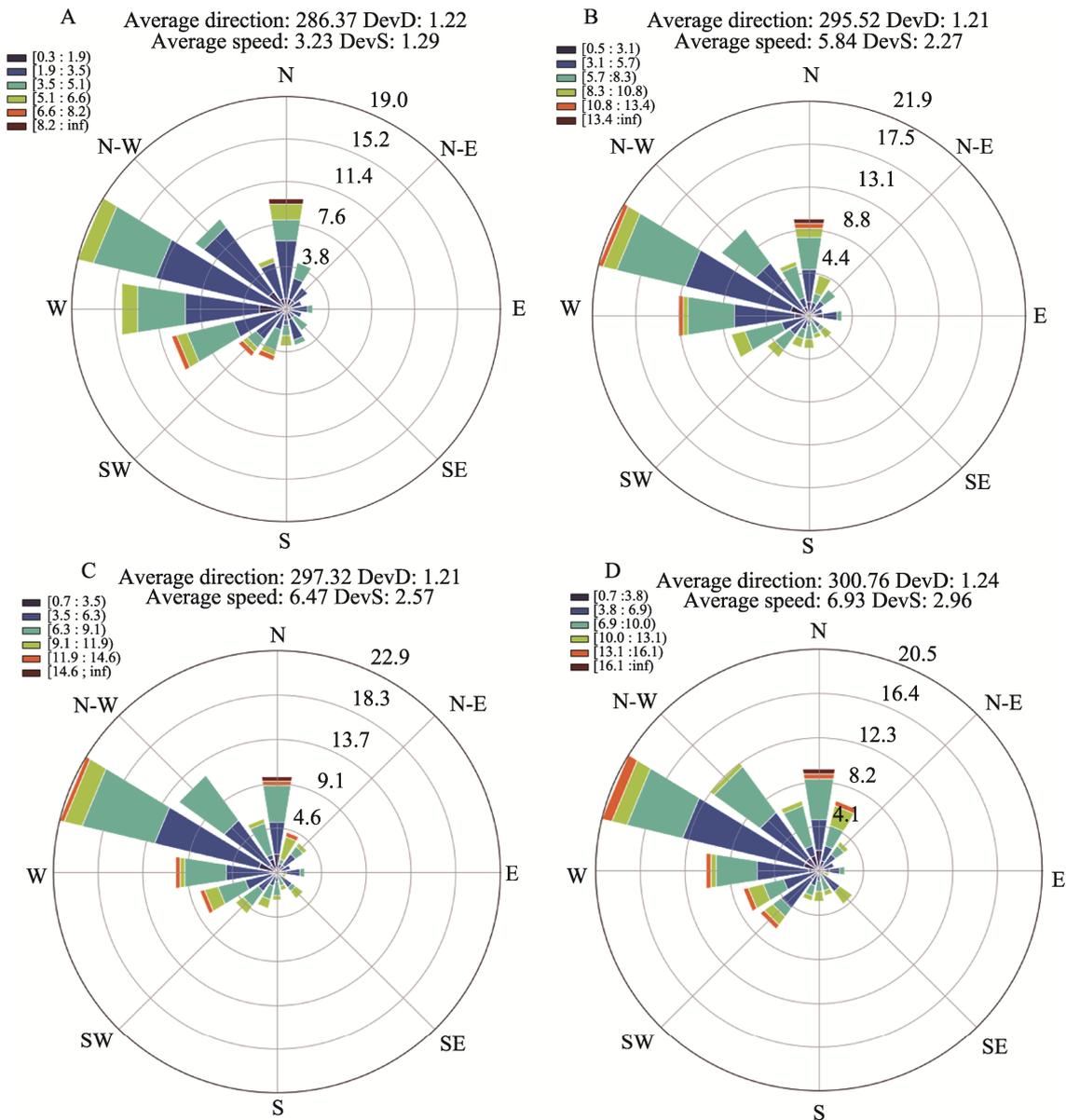


图 2 莒南地区 2021 年 7 月 11 日-8 月 19 日 00:00 风向频次分布

Fig. 2 Frequency distribution of wind direction at 00:00 from July 11 to August 19, 2021 in Junan area

A. 近地风向; B. 300 m 风向; C. 400 m 风向; D. 500 m 风向。

A. Near ground wind direction; B. 300 m wind direction; C. 400 m wind direction; D. 500 m wind direction.

辖市), 累计影响时长达 95 h。于 7 月 29 日 9:00 于济宁鱼台入境, 7 月 30 日于滨州移出, 后由黄骅进入渤海并减弱为温带气旋(图 3)。“烟花”虽未经过临沂地区, 但单站最大降水量为临沂蒙阴雨王庙站监测, 且在环流影响下”烟花“26 日 8:00 开始影响山东, 30 日 8:00 结束(张秀娟, 2021)。”烟花“的出现和北上影响了山东省内昆虫正常迁飞, 但是其消亡后, 短时间内山东又恢复了正常迁飞场。

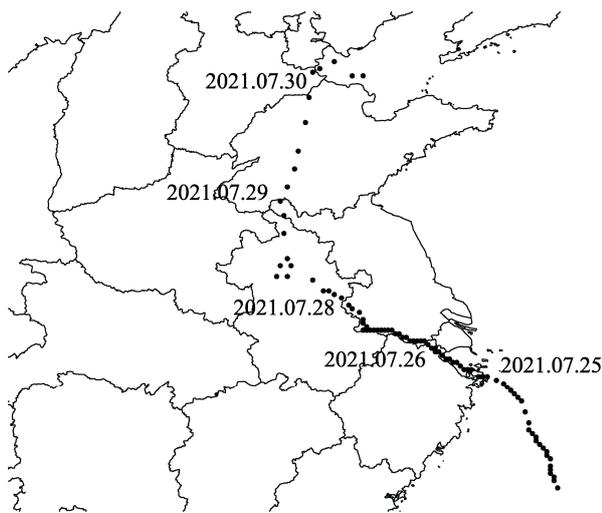


图 3 台风“烟花”登陆时间路线图
[审图号: GS(2023)2767]
Fig. 3 Route map of typhoon “Fireworks” landing time

2.3 迁飞轨迹模拟

由 HYSPLIT 设置 3 个轨迹高度, 其运行轨迹基本一致。在北迁期, 7 月 11 日迁飞轨迹为由南向北, 逐日风向慢慢由海洋吹向陆地。7 月 16 日、7 月 17 日转变为东南向西北。由于“烟花”的形成和北上, 此阶段灯诱昆虫数量总体处于高峰期, 迁飞虫源顺风而行, 可能来自南部内陆和沿海地区。此阶段棉铃虫、粘虫、二点委夜蛾、黄地老虎、小地老虎均有迁飞虫源的出现。

在过渡期, 迁飞模拟轨迹为由东向西, 此阶段由于“烟花”的登陆, 造成气流混乱, 打断了迁飞昆虫的北迁, 造成此阶段灯诱总数量锐减, 且为下一步南迁创造了条件。此阶段银纹夜蛾持续出现, 数量波动与棉铃虫出现部分相反的情况, 且在下一个阶段数量陡增。

在南迁期, 迁飞模拟轨迹在短时间发生了转变, 8 月 7 日和 8 月 11 日仍为由东向西, 8 月 12 日和 8 月 14 日为由东北向西南, 8 月 17 日为由北向南, 开启了 2021 年下半年山东地区的南迁阶段。棉铃虫、甜菜夜蛾、斜纹夜蛾、小地老虎、银纹夜蛾、白条银纹夜蛾数量突增, 判断此阶段虫源来源于北方地区, 且白条银纹夜蛾的突然出现并与棉铃虫数量出现相似的波动, 可能同时来源于同一大区。

总之, 迁飞模拟轨迹先是由南到北, 然后逆时针旋转由沿海地区到内陆地区, 直至由北到南(图 4)。

3 结果与讨论

据联合国粮农组织统计, 全世界每年因虫害造成作物产量损失约为 30%。其中, 跨区域迁飞性害虫危害最大, 具有突发性、爆发性等特点, 如不及时防控常常会造成重大农业灾害。我国地跨热带、亚热带、暖温带、中温带和寒温带等多个季风气候带, 给迁飞害虫提供了适宜的季节性生长发育空间尺度, 也造成了害虫在我国呈现季节性南北往返迁飞危害(江幸福等, 2016)。同时, 我国的地理位置、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(姜玉英等, 2021)。中华人民共和国农业农村部公告(第 654 号)(中华人民共和国农业农村部, 2023)公布了 10 种(类)的一类农作物虫害名录, 其中粘虫等 7 种均为迁飞性害虫。因此, 研究明确害虫迁飞的生物学和迁飞规律对构建监测预警技术体系和区域性控制技术体系有重要意义(吴孔明, 2018)。2015 年以来, 我国各地将 1 000 W 高空灯用于迁飞性害虫区域性监测, 对迁飞性害虫监测有较好的应用效果(姜玉英等, 2021)。与传统的灯光诱虫器相比, 高空灯主要用迁飞昆虫的监测, 粘虫的扑灯节律可能主要取决于空中迁飞粘虫的种群数量(张智等, 2018)。本研究监测结果显示, 高空灯对 9 种夜蛾类昆虫有很好的诱捕监测作用。

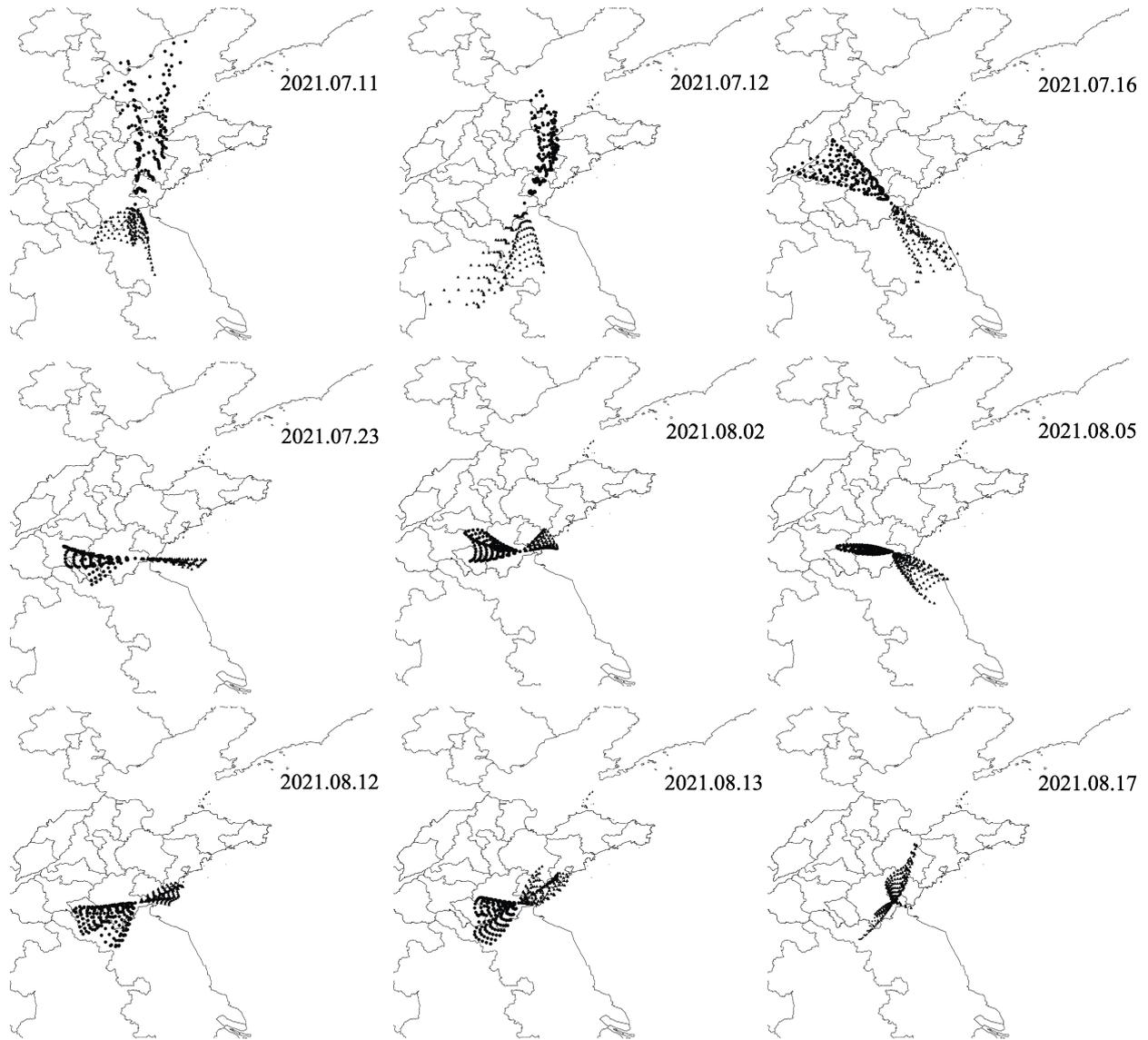


图 4 夜蛾科夜间模拟迁飞轨迹图 [审图号: GS(2023)2767]
 Fig. 4 Simulated migration trajectory of Nocturidae at night

●: Backward 模拟, 表示迁入轨迹; ▲: Forward 模拟, 表示迁出轨迹。
 ●: Simulate for backward, representing the migration trajectory;
 ▲: Forward simulation, representing the migration trajectory.

棉铃虫是世界性重大致灾害虫, 具有兼性迁飞行为, 在我国东部地区 5-7 月份温带型 1 代和 2 代棉铃虫成虫随偏南风向北迁移, 可迁入山西北部、河北北部、辽宁等非越冬区的中温带地区, 温带型 3 代和 4 代棉铃虫于 8 月中旬以后随偏北风向南回迁 (吴孔明和郭予元, 2007)。本研究的莒南处于温带越冬区, 在 7 中月上旬有明显的 2 代棉铃虫的北迁高峰, 例如 7 月 14 日棉铃虫的

单日诱捕量达到了 8 608 头, 在过渡期棉铃虫的数量很低, 在 8 月上中旬的南迁期也明显的高峰期, 例如 8 月 10 日诱蛾量为 6 086 头。棉铃虫有顺风定向迁飞的习性, 将棉铃虫的空中运转的行为参数引入气象学的轨迹分析模型分析显示, 华北 2 代棉铃虫成虫可随气流迁入东北地区 (Feng *et al.*, 2005), 3 代棉铃虫成虫可由东北回迁至华北地区或由华北北部回迁至南部。棉铃虫

的迁飞高度在一般聚集在 300 m 左右高度飞行而形成高密度的迁飞层(吴孔明和郭予元, 2007), 本研究分别对 300、400 和 500 m 高度的轨迹分析, 3 个高度的迁飞轨迹基本一致, 在 7 月中下旬迁飞轨迹为由南向北, 在过渡期的迁飞轨迹为由东向西, 在 8 月上中旬迁飞轨迹在短时间转变为由北向南。本研究通过卵巢发育级别分析, 本研究判断在北迁期诱捕到的棉铃虫是外地迁入虫源和本地虫源混合发生, 高峰日以外地迁入虫源为主, 在南迁期诱捕到的棉铃虫为外地迁入虫源。吴孔明和郭予元(2007) 研究显示环渤海湾南部的 2-3 代种群多数年份主要来源于当地, 但部分年份亦有外地种群大量迁入。

粘虫是一种严重威胁玉米、小麦等粮食作物的农业害虫, 进入 21 世纪在我国发生危害呈现出新的特点和严重之势(江幸福等, 2014)。科学家将我国东部地区分为 5 种类型的粘虫发生地区, 在这 5 种类型的地区存在 4 次迁飞过程, 呈逐代逐区迁飞模式(李光博等, 1964)。按照这一迁飞模式, 7 月中下旬到 8 月上中旬, 粘虫在东部地区发生第 3 次迁飞过程, 即 2 代多发区羽化的成虫会大部分向南回迁到华北 3 代多发区, 8 月下旬至 9 月上中旬发生第 4 次迁飞过程, 即 3 代多发区成虫羽化后绝大部分继续向南回迁到越冬区或终年发生区危害(江幸福等, 2014)。粘虫的第 1、第 2、第 4 次迁飞都被直接或间接证实, 而第 3 次迁飞, 即 2 代成虫从东北向华北迁飞的过程尚未被证实(武向文, 2001)。本研究所处的莒南地区位于 3 代多发区(36°-39°N), 迁飞轨迹分析显示, 7 月中下旬到 8 月上中旬处于从北迁向南迁转变的过程, 与第 3 次迁飞由北向南的方向不完全一致; 本研究也发现, 8 月下旬夜蛾的迁飞轨迹完全转变为从北向南, 这与第 4 次迁飞方向一致。武向文(2001) 研究认为, 东北 2 代粘虫成虫发生在 7 月底和 8 月初, 此时高空风向均以西南风、南风、西风为主, 不利于 2 代粘虫向南迁飞。张云慧等(2012) 分析, 2012 年受偏西气流和降雨的影响, 东北地区 2 代成虫未形成有效迁出, 导致本地虫源并与由华北地区迁入的虫源汇集、暴发为害。张智

(2013)等 2011 年监测也发现, 北京延庆 2 代诱蛾高峰出现在空中盛行偏南气流的日子, 且高峰期的持续时间也与偏南气流的持续时间一致。胡高等(2014) 分析了 1980 年的粘虫迁飞轨迹, 认为虽然东北地区 2 代粘虫多数不能迁回我国华北 3 代粘虫发生区, 但辽宁省仍有一定比例的轨迹能够跨海进入山东和河北。因此, 还需要利用昆虫雷达等方法长期观测, 来进一步明确 2 代粘虫在东部迁飞的迁飞过程及其影响因子。粘虫的迁飞均发生在卵巢发育 I 级或 II 级初期以前(张孝羲和程遐年, 2000), 迁飞过程中暂时性抑制卵巢发育或缓慢发育, 而迁飞结束后即行交配、产卵繁殖危害。目前田间常用的是用卵巢发育和交配情况作为鉴定标准, 具体为: 当大部分成虫(约 80%以上) 卵巢发育 I-II 级, 交配率低于 10%, 可鉴定为迁出种群, 反之即为迁入种群(江幸福等, 2014)。孙金如(1990) 分析了 1968-1979 年 7-8 月份山东德州的 2 代粘虫的卵巢级别, 卵巢发育 III 级以上的 69.26%, 为迁入种群。在本研究中, 除了前 3 日的卵巢发育 III 级以上占比为 80%以上, 其余均为 100%, 本研究判断莒南的南迁期和北迁期的粘虫均为外地迁入虫源为主。结合轨迹分析, 北迁期的 2 代粘虫为江苏等南部地区, 南迁期的 3 代粘虫为东北地区迁入。

从 20 世纪 80 年代中后期开始, 甜菜夜蛾连续多年在我国南方各省份爆发成灾, 成为农业生产上的一种重要害虫。根据我国甜菜夜蛾不同发育阶段的过冷却能力以及耐低温能力, 结合我国地理气候区划, 山东省为甜菜夜蛾为不能越冬区(江幸福和罗礼智, 2010)。在山东 7 月上中旬为 2 代甜菜夜蛾幼虫盛发期(苏建亚, 1998), 7 月下旬和 8 月上旬进入 2 代成虫高峰, 本研究发现在这一时期诱捕到的甜菜夜蛾虫源为本地虫源和外地虫源混合发生。韩兰芝(2004) 通过轨迹分析研究认为, 江苏丰地区的 3、4 代虫源主要来自山东中北部, 其中 3 代甜菜夜蛾卵巢发育 III 级以上的比例为 72.9%, 以外地虫源迁入为主。本研究发现在南迁期, 莒南地区的甜菜夜蛾卵巢发育 III 级以上的平均比例为 86.6%, 也为外

地迁入虫源为主, 轨迹分析显示, 这部分虫源可能继续南迁到达江苏等地。

斜纹夜蛾是一种世界性农业害虫, 可以危害蔬菜、棉花、玉米、大豆、花生等多种作物。在山东省斜纹夜蛾不能越冬, 属于夏季繁殖区。付晓伟(2015)研究证明, 斜纹夜蛾在越冬区和夏季繁殖区之间的远距离往返迁飞是常发性的生态学现象, 其在北隍城岛 7 月份诱集到的斜纹夜蛾雌虫中性成熟个体比例达 82%, 8-10 月份性成熟个体比例均显著小于未性成熟个体。本研究在莒南北迁期诱集到斜纹夜蛾卵巢发育Ⅲ级以上的平均低于 60%, 在南迁期卵巢发育Ⅲ级以上的比例为 87.1%, 基于莒南在北隍城岛以南约 400 km, 斜纹夜蛾的卵巢在南北迁飞过程应处于渐进发育状态。

全国小地老虎科研协作组(1990)研究发现, 小地老虎随季风南北往返迁移为害迁飞活动与天气条件关系密切, 以群体方式进行迁飞, 其方向受气流控制。本研究显示, 在 7 月中旬-8 月下旬, 季风有一个从南向到北向的转变过程, 刘永强(2015)研究了 7 月中旬-8 月底跨海迁飞小地老虎的稳定同位素和携带的花粉, 认为这一时期小地老虎主要来自华北和东北南部地区, 也显示出在这一阶段存在北迁和南迁过程。小地老虎在迁飞时不存在明显的卵子发生-飞行拮抗综合症, 本研究发现, 在 7 月份北迁期小地老虎的虫源为本地虫源和南方迁入虫源混合发生, 在南迁期小地老虎的卵巢发育Ⅲ级以上的平均比例为 95.8%, 这一时期极有可能为从东北南部迁入虫源。

银纹夜蛾是一种危害大豆和十字花科等多种作物的农业害虫, 广泛分布于我国的长江流域、淮河流域和黄河流域, 最近在渤海湾的长期观测证明了其是一种远距离季节性迁飞害虫(Li *et al.*, 2014)。本研究诱集到近 9 000 头银纹夜蛾, 在北迁期, 卵巢发育Ⅲ级以上的在 50%左右, 为本地虫源和外地迁入虫源混合发生, 在南迁期卵巢发育Ⅲ级以上的平均达到 90%以上, 判断这一时期为东北地区迁入虫源。

外来入侵植物加拿大一枝黄花 *Solidago*

canadensis 入侵我国并呈现快速扩张态势(黄华和郭水良, 2005; 陆建忠等, 2007), 有研究显示寡食性夜蛾科昆虫——白条银纹夜蛾为防治加拿大一枝黄花的潜在天敌(王强等, 2011; 陈谦等, 2016; 杨海君等, 2019)。本研究监测到了 6 474 头白条银纹夜蛾, 是否与其寄主植物加拿大一枝黄花有关需要进一步研究。本研究观测到的白条银纹夜蛾主要集中在南迁期, 且其种群具有明显的突增突减现象, 充分表明其具有高空迁飞的习性。本研究诱捕到白条银纹夜蛾的卵巢发育均为Ⅲ级以上, 表明其均为较远的外地迁入虫源。

黄地老虎幼虫是一种危害小麦、玉米、棉花、甜菜等多种农作物的地下害虫, 在华北地区 5-6 月份为、在东北地区 6-7 月份为害最为严重。Guo 等(2015)研究证明了黄地老虎在 4-10 月跨渤海迁飞, 在夏季的迁飞种群数量最高。本研究在北迁期和南迁期均监测到了黄地老虎的迁飞种群, 其中北迁的种群为本地和外地混合种群, 而南迁种群为远距离迁飞过来的种群。

2005 年首次发现二点委夜蛾危害夏玉米, 现已成为黄淮海地区的重要玉米害虫(王振营等, 2012)。黄建荣等(2018)结合雷达观测的虫量变化与迁飞过程轨迹分析了河南中部地区 7 月份二点委夜蛾以北迁为主, 其虫源为本地和自邻近区域。本研究发现二点委夜蛾与粘虫、棉铃虫等其他夜蛾类害虫相似, 有明显的北迁和南迁过程, 7 月份二点委夜蛾以北迁为主, 到了 8 月北迁期种群数量突增, 有明显的迁飞种群。在北迁期为本地种群和外地种群混合发生, 而在南迁期为从北方远距离迁飞来的种群。

很多种类的迁飞性夜蛾多具有随季风远距离扩散的特点, 受东亚季风循环的影响, 棉铃虫、粘虫等重大农业害虫在我国的迁飞致灾问题十分突出。山东省地处我国害虫在华北农区和东北农区进行季节性南北迁飞的咽喉地带, 因此在该区域监测研究害虫迁飞规律对于我国重大农业害虫的监测预警非常重要。本研究发现, 7 月份西南季风为其向北迁飞提供了气流条件, 7 月下旬-8 月上旬大约 2 周的时间内气流发生了快速

转变,季风开始南下,为其提供了南迁气流条件,受高空气流的影响棉铃虫、甜菜夜蛾、粘虫等9种夜蛾类昆虫均有明显南北迁飞过程;大部分种类在北迁期以迁入种群和本地种群混合发生,在南迁期以外地远距离迁入虫源为主,充分表明了山东地区既是夜蛾类害虫的春夏繁殖区和东北地区的虫源地,又是从东北回迁虫源的越冬地和继续南迁的通道。

参考文献 (References)

- Announcement of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China, 2023. No. 654. Announcement of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/202303/t20230314_6422981.htm [中华人民共和国农业农村部公告 第 654 号. 中华人民共和国农业农村部公报. www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/202303/t20230314_6422981.htm]
- Chen H, Huang L, Gesang YZ, Deji ZM, Zhu JS, Hu G, Chen FJ, Zhao JY, Wan GJ, 2021. Analysis of migration and meteorological background field for the fall armyworm *Spodoptera frugiperda* found in Shandong province in 2019. *Journal of Environmental Entomology*, 43(4): 867–878. [陈辉, 黄乐, 格桑玉珍, 德吉卓玛, 朱军生, 胡高, 陈法军, 赵婧好, 万贵钧, 2021. 2019 年山东省草地贪夜蛾迁飞过程及气象背景场分析. *环境昆虫学报*, 43(4): 867–878.]
- Chen Q, Wang Q, He JQ, 2016. The host specificity of a nature enemy *Argyrogramma albostrigata* against *Solidago canadensis*. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 52(5): 776–784. [陈谦, 王强, 何家庆, 2016. 加拿大一枝黄花天敌——白条银纹夜蛾的寄主专性研究. *北京大学学报(自然科学版)*, 52(5): 776–784.]
- Chen X, Zhai BP, Gong RJ, Yin MH, Zhang Y, Zhao KJ, 2008. The source area of spring populations of meadow moth, *Loxostege sticticalis* L. (Lepidoptera: Pyralidae) in northeastern 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.]
- Ding JY, Zhang JH, 2016. Atlas of Moths Under Beijing Lamps. Beijing: China Agriculture Press. 17–224. [丁建云, 张建华, 2016. 北京灯下蛾类图谱. 北京: 中国农业出版社. 17–224.]
- Feng HQ, Wu KM, Ni YX, Cheng DF, Guo YY, 2005. High-altitude windborne transport of *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae) in mid-summer in northern China. *Journal of Insect Behavior*, 18(3): 335–349.
- Fu XW, 2015. Study on the community structure and population dynamics of migratory insects across the Bohai strait. Doctoral dissertation. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences. [付晓伟, 2015. “渤海湾通道”迁飞性昆虫群落结构及群动态研究. 博士学位论文. 北京: 中国农业科学院.]
- Guo JL, Fu XW, Wu X, Zhao XC, Wu KM, 2015. Annual migration of *Agrotis segetum* (Lepidoptera: Noctuidae): observed on a small isolated in northern China. *PLoS ONE*, 10(6): e0131639.
- Han LZ, 2004. The ecological mechanism of beet armyworm migration. Doctoral dissertation. Nanjing: Nanjing Agricultural University. [韩兰芝, 2004. 甜菜夜蛾 *Spodoptera exigua* Hübner 迁飞的生态机制研究. 博士学位论文. 南京: 南京农业大学.]
- Hu G, Wu QL, Wu XW, Jiang YY, Zeng J, Zhai BP, 2014. Outbreak mechanism of second generation armyworms in northeastern China: A case study in 1980. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 51(4): 943–957. [胡高, 吴秋琳, 武向文, 姜玉英, 曾娟, 翟保平, 2014. 东北二代粘虫大发生机制: 1980 年个案分析. *应用昆虫学报*, 51(4): 943–957.]
- Huang H, Guo SL, 2005. Study on reproductive biology of the invasive plant *Solidago canadensis*. *Acta Ecologica Sinica*, 25(11): 2795–2803. [黄华, 郭水良, 2005. 外来入侵植物加拿大一枝黄花繁殖生物学研究. *生态学报*, 25(11): 2795–2803.]
- Huang JR, Huang B, Zhu J, Feng HQ, 2018. Using vertical looking radar (VLR) to observe the migratory behavior of the second generation *Aethis lepigone* moths in the southern part of north China in 2016. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 55(2): 168–176. [黄建荣, 黄博, 朱健, 封洪强, 2018. 2016 年华北南部二代二点委夜蛾成虫迁飞的雷达观测. *应用昆虫学报*, 55(2): 168–176.]
- Jiang YY, Liu J, Zeng J, Huang C, Zhang T, 2021. Occurrence of, and damage caused by, major migratory pests and techniques for monitoring and forecasting these in China. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 58(3): 542–551. [姜玉英, 刘杰, 曾娟, 黄冲, 张涛, 2021. 我国农作物重大迁飞性害虫发生为害及监测预报技术. *应用昆虫学报*, 58(3): 542–551.]
- Jiang XF, Jiang YY, Zhang L, Cheng YX, Luo LZ, 2014. Investigation and monitoring of overwintering and migrant populations, and the larval occurrence of the oriental armyworm, *Mythimna separata* (Walker). *Chinese Journal of Applied Entomology*, 51(4): 1114–1119. [江幸福, 姜玉英, 张蕾, 程云霞, 罗礼智, 2014. 粘虫越冬迁飞与危害的调查及监测技术. *应用昆虫学报*, 51(4): 1114–1119.]
- Jiang XF, Luo LZ, 2010. Progress and tendency on migration and

- overwintering of beet armyworm (*Spodoptera exigua*) in China. *Journal of Changjiang Vegetables*, 2010 (18): 36–37. [江幸福, 罗礼智, 2010. 我国甜菜夜蛾迁飞与越冬规律研究进展与趋势. 长江蔬菜, 2010(18): 36–37]
- Jiang XF, Zhang L, Cheng YX, Luo LZ, 2016. Research advances and perspectives on migration-induced mechanisms promoting outbreaks of major Lepidopteran insect pests in China. *Journal of Scientia Sinica Vitae*, 46(5): 565–572. [江幸福, 张蕾, 程云霞, 罗礼智, 2016. 中国主要鳞翅目农业害虫迁飞致灾机制研究与展望. 中国科学: 生命科学, 46(5): 565–572.]
- Li C, Fu XW, Feng HQ, Ali A, Li CR, Wu KM, 2014. Seasonal migration of *Ctenoplusia agnata* (Lepidoptera: Noctuidae) over the Bohai Sea in Northern China. *Journal of Economic Entomology*, 107(3): 1003–1008.
- Li GB, Wang HX, Hu WX, 1964. The armyworm seasonal migration damage hypothesis and marker recovery test. *Journal of Plant Protection*, 3(2): 101–109. [李光博, 王恒祥, 胡文绣, 1964. 粘虫季节性迁飞为害假说及标记回收试验. 植物保护学报, 3(2): 101–109.]
- Li LT, Wang YQ, Liu L, Gan YJ, Dong ZP, Ma JF, 2012. Grading criteria for assessing the ovarian development of *Athesia lepigone* (Möschler) and its use in forecasting. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 49(4): 1043–1047. [李立涛, 王玉强, 刘磊, 甘耀进, 董志平, 马继芳, 2012. 二点委夜蛾卵巢发育分级及在预测预报中的应用. 应用昆虫学报, 49(4): 1043–1047.]
- Li RD, Wang JQ, Su DM, 1987. Insect Ovary Development and Pest Forecast. Shanghai: Fudan University Press. 31–84. [李汝铎, 王金其, 苏德明, 1987. 昆虫卵巢发育与害虫预测预报. 上海: 复旦大学出版社. 31–84.]
- Li XJ, Liu SD, Wang SX, Li ZX, Xie JY, 1993. Study on ovarian development grading of female cotton bollworm. *Plant Protection Technology and the Extension*, 1993(5): 17. [李学军, 刘世栋, 王淑贤, 李志祥, 谢俊英, 1993. 棉铃虫雌蛾卵巢发育分级浅探. 植保技术与推广, 1993(5): 17.]
- Liu YQ, 2015. Migration and natal origins of *Agrotis ipsilon* (Lepidoptera Noctuidae) over the Bohai sea. Doctoral dissertation. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences. [刘永强, 2015. 小地老虎跨海迁飞规律与虫源地分析. 博士学位论文. 北京: 中国农业科学院.]
- Lu JZ, Wen ES, Wu XW, Ewald W, Zhao B, Li B, 2007. Potential distribution of *Solidago canadensis* in China. *Acta Phytotaxonomica Sinica*, 45(5): 670–674. [陆建忠, 翁恩生, 吴晓雯, Ewald WEBER, 赵斌, 李博, 2007. 加拿大一枝黄花在中国的潜在入侵区预测. 植物分类学报, 45(5): 670–674.]
- Nationwide Co-operative Group on Black Cutworm Research, 1990. Studies on the overwintering and migration of black cutworm in China. *Acta Phytotaxonomica Sinica*, 17(4): 337–342. [全国小地老虎科研协作组, 1990. 小地老虎越冬与迁飞规律的研究. 植物保护学报, 17(4): 337–342.]
- 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.]
- Qian RG, 1982. Preliminary report on ovarian anatomy and application of corn borer. *Entomological Knowledge*, 19(5): 15–17. [钱仁贵, 1982. 玉米螟卵巢解剖及应用初报. 昆虫知识, 19(5): 15–17.]
- Song HY, Li LL, Zhang QQ, Sun CK, Li C, Lu ZB, Zhu ZG, Yu Y, Men XY, 2021. The species and population dynamics of insects attracted by searchlight traps in Jinan, Shandong. *Journal of Plant Protection*, 48(4): 927–928. [宋海燕, 李丽莉, 张晴晴, 孙晨可, 李超, 卢增斌, 朱振国, 于毅, 门兴元. 2021. 山东省济南市探照灯诱集昆虫种类及种群动态分析. 植物保护学报, 48(4): 927–928.]
- Su JY, 1998. Migration of beet armyworm and its occurrence in China. *Entomological Knowledge*, 35(1): 55–57. [苏建亚, 1998. 甜菜夜蛾的迁飞及在我国的发生. 昆虫知识, 35(1): 55–57.]
- Sun JR, 1990. A preliminary analysis on the relationship of ovary development of *Mythimna separata* (Walker), mating status and migration. *Beijing Agricultural Sciences*, 8(4): 8–10. [孙金如, 1990. 粘虫卵巢发育交配状况与迁飞关系的初步分析. 北京农业科学, 8(4): 8–10.]
- Wang Q, He JQ, Chen Q, Xiao L, Dong ZG, 2011. Biological characteristics and feeding habit of *Argyrogramma albostrata* feeding on *Solidago Canadensis*. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 27(4): 60–65. [王强, 何家庆, 陈谦, 肖亮, 董振国, 2011. 取食加拿大一枝黄花的白条银纹夜蛾生物学特性及食性研究. 中国农学通报, 27(4): 60–65.]
- Wang ZY, Shi J, Dong JG, 2012. Reason analysis on *Proxenus lepigone* outbreak of summer corn region in the Yellow River, Huai and Hai Rivers Plain and the countermeasures suggested. *Journal of Maize Sciences*, 20(1): 132–134. [王振营, 石洁, 董金皋, 2012. 2011年黄淮海夏玉米区二点委夜蛾暴发危害的原因与防治对策. 玉米科学, 20(1): 132–134.]
- Wu KM, 2018. Monitoring and control of major pest population migration. 2018 Annual Conference of The Crop Science Society of China Yangzhou: 22. [吴孔明, 2018. 作物重大害虫种群迁飞的监测与控制. 2018年中国作物学会学术年会.]

- 扬州: 22.]
- Wu KM, Guo YY, 2007. Geotype differentiation and regional migratory regularity of *Helicoverpa armigera* in China. *Plant Protection*, 33(5): 6–11. [吴孔明, 郭予元, 2007. 棉铃虫种群的地理型分化和区域性迁飞规律. 植物保护, 33(5): 6–11.]
- Wu KM, Xu G, Guo YY, 1998. Observations on migratory activity of cotton bollworm moths across the Bohai Gulf in China. *Acta Phytotaxonomica Sinica*, 25(4): 335–340. [吴孔明, 徐广, 郭予元, 1998. 棉铃虫一代成虫在渤海海面迁飞的考察. 植物保护学报, 25(4): 335–340.]
- Wu XW, 2001. Pied piper effect of the insect migration arena in Northeastern China. Master dissertation. Nanjing: Nanjing Agricultural University. [武向文, 2001. 我国东北地区昆虫迁飞场的Pied piper效应. 硕士学位论文. 南京: 南京农业大学.]
- Xu GT, Yang ZH, 2007. Pest of Ornamental Plant in China. Beijing: China Forestry Publishing House. 16–356. [徐公天, 杨志华, 2007. 中国园林害虫. 北京: 中国林业出版社. 16–356.]
- Yang HJ, Jing HY, Chen W, Wang YL, Mao YC, Xu YH, Liu YB, Dai JP, 2019. Analysis of insect at habitat in *Solidago canadensis* L. and selection of dominant natural enemies. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 32(9): 2180–2191. [杨海君, 金红玉, 陈蔚, 王雅玲, 毛友纯, 许云海, 刘亚宾, 戴金鹏, 2019. 加拿大一枝黄花生境中昆虫群落特征分析及优势天敌筛选. 西南农业学报, 32(9): 2180–2191.]
- Yang PZ, 2016. The Moth of Gaoligong Mountains. Beijing: Science Press. 23–578. [杨平之, 2016. 高黎贡山蛾类图鉴. 北京: 科学出版社. 23–578.]
- Yu GY, 2015. Moths in Beijing. Beijing: Science Press. 19–428. [虞国跃, 2015. 北京蛾类图谱. 北京: 科学出版社. 19–428.]
- Yu ZX, 2011. Trajectory analysis of wheat aphids during long-distance migration using HYSPLIT model. Master dissertation. Zhengzhou: Henan Agricultural University. [郁振兴, 2011. 利用HYSPLIT模型分析麦蚜远距离迁飞轨迹. 硕士学位论文. 郑州: 河南农业大学.]
- Zhang SN, Li GP, Tian CH, Huang JR, Feng HQ, 2021. Ovarian development of *Conogethes punctiferalis* (Guen é e) and its relationship with temperature. *Plant Protection*, 47(5): 134–138. [张胜男, 李国平, 田彩红, 黄建荣, 封洪强, 2021. 桃蛀螟卵巢发育过程及其与温度的关系. 植物保护, 47(5): 134–138.]
- Zhang WN, Xiao HJ, Liang GM, Guo YY, 2013. Observation on ovarian morphology and oogenesis in the cotton bollworm, *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae). *Acta Entomologica Sinica*, 56(4): 358–364. [张万娜, 肖海军, 梁革梅, 郭予元, 2013. 棉铃虫卵巢形态与卵子发生过程观察. 昆虫学报, 56(4): 358–364.]
- Zhang XJ, 2021. Influence of typhoon "fireworks" on Shandong and its multi-mode test. *Journal of Agricultural Catastrophology*, 11(8): 70–72. [张秀娟, 2021. 台风“烟花”对山东的影响和多模式检验. 农业灾害研究, 11(8): 70–72.]
- Zhang XX, 1980. Types and ecophysiological mechanism of insect migration. *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 XX, Cheng XN, 2000. Research progress of migratory insects in China. Celebrating the 80th Anniversary of the Six-legged Society and Essays on the fortieth anniversary of Jiangsu Entomological Society. The Entomological Society of Jiangsu: 37–43. [张孝羲, 程遐年, 2000. 中国迁飞昆虫研究进展. 纪念六足学会创建八十周年、江苏省昆虫学会四十周年. 江苏省昆虫学会: 37–43.]
- Zhang YH, 2008. Radar observation and population analysis of migratory insects in north and northeast of China. Doctoral dissertation. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences. [张云慧, 2008. 东北与华北地区迁飞昆虫的垂直昆虫雷达监测与虫源分析. 博士学位论文. 北京: 中国农业科学院.]
- Zhang YH, Zhang Z, Jiang YY, Zeng J, Gao YB, Cheng DF, 2012. Preliminary analysis of the outbreak of the third-generation armyworm *Mythimna separata* in China in 2012. *Plant Protection*, 38(5): 1–8. [张云慧, 张智, 姜玉英, 曾娟, 高月波, 程登发, 2012. 2012年三代粘虫大发生原因初步分析. 植物保护, 38(5): 1–8.]
- Zhang Z, Zhang YH, Jiang YY, Xie AT, Wei SJ, Cheng DF, Jiang JW, Zhang FM, Peng H, 2013. Monitoring of the population dynamics of *Proxenus lepigone* (Lepidoptera: Noctuidae) in North China and analysis of the source of its populations in northern Beijing. *Acta Entomologica Sinica*, 56(10): 1189–1202. [张智, 张云慧, 姜玉英, 谢爱婷, 魏书军, 程登发, 蒋金炜, 张方梅, 彭赫, 2013. 华北二点委夜蛾种群动态监测及北京北部地区虫源性质分析. 昆虫学报, 56(10): 1189–1202.]
- Zhang Z, Zhang YH, Liu J, Jiang SS, Tang QB, Li XR, Li WZ, Cheng DF, Qi JF, 2018. Population dynamics and temporal patterns of abundance of *Mythimna separata* during migration. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 55(5): 834–842. [张智, 张云慧, 刘杰, 江珊珊, 汤清波, 李祥瑞, 李为争, 程登发, 祁俊锋, 2018. 粘虫迁飞的种群动态监测与夜间扑灯节律研究. 应用昆虫学报, 55(5): 834–842.]