

三代粘虫成虫迁飞的雷达观测与分析*

孙 巍^{1**} 程志加² 高月波^{1***} 苏前富¹
周佳春¹ 王金生³ 张娇娇³

(1. 吉林省农业科学院植物保护研究所, 农业部东北作物有害生物综合治理重点实验室, 公主岭 136100;

2. 吉林农业大学农学院, 长春 130118; 3. 哈尔滨师范大学生命科学与技术学院, 哈尔滨 150080)

摘 要 【目的】明确 2015 年吉林省 3 代粘虫 *Mythimna separata* (Walker) 成虫的迁飞动态, 揭示 3 代粘虫成虫自东北向南迁出的动向及成功迁出的概率, 为粘虫的预测预报及综合治理提供科学依据。【方法】基于扫描昆虫雷达观测, 采用田间饲育、诱蛾器监测、轨迹模拟及天气背景学分析等研究方法, 分析 3 代粘虫成虫迁飞动态及迁出概率。【结果】(1) 3 代粘虫蛾可交尾及产卵, 卵亦可孵化, 但幼虫发育迟缓。(2) 3 代粘虫蛾数量相比于一代增长了 10.3 倍, 成虫卵巢发育级别集中于 1 级, 大多未交尾, 处于从本地迁出的状态。(3) 迁出期的风向以南风、西南风、东南风为主, 不利于粘虫回迁至南方的越冬区域。(4) 共有 3 d 的调查日观测到了粘虫聚集成层的迁飞现象。轨迹分析显示, 极大比率的粘虫种群最终去向集中于观测点公主岭以北的区域或者朝鲜境内。【结论】3 代粘虫受制于秋季风场无法成功回迁, 成为了 Pied-piper 效应的牺牲者, 无法为 2016 年春季粘虫的发生提供有效虫源。

关键词 扫描昆虫雷达, 3 代粘虫, 轨迹分析

The autumn migration of the third generation armyworm *Mythimna separata* (Walker): Radar observations and trajectory analysis

SUN Wei^{1**} CHENG Zhi-Jia² GAO Yue-Bo^{1***} SU Qian-Fu¹
ZHOU Jia-Chun¹ WANG Jin-Sheng³ ZHANG Jiao-Jiao³

(1. Key Laboratory of Integrated Pest Management on Crops in Northeast, Ministry of Agriculture, Institute of Plant Protection, Jilin Academy of Agricultural Sciences, Gongzhuling 136100, China; 2. College of Agronomy, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China; 3. College of Life Science and Technology, Harbin Normal University, Harbin 150080, China)

Abstract 【Objectives】Radar observations were carried out in Gongzhuling, Jilin Province of China in 2015 to confirm the migration dynamics of the third-generation of the armyworm, *Mythimna separata*, and to analyze the probability of their southward migration. The results provide a scientific basis for forecasting and management of this pest. 【Methods】The migration of third-generation armyworms was investigated based on scanning entomological radar observations, field rearing, field survey trap monitoring and trajectory analysis. 【Results】1. 3rd generation armyworm moths can reproduce successfully but larval development is delayed. 2. 10.3 times more third generation adults were trapped than first generation adults, and most 3rd generation moths had undeveloped and unmated ovaries suggesting that they were emigrating from local habitats. 3. Wind direction was basically south, southeast and southwest rather than northeast, which prevented 3rd generation moths from returning to overwintering regions in southern China. 4. Aerial stratification was observed over three days. Trajectory analysis indicated that most landing areas were restricted to either north of Gongzhuling or North Korea. 【Conclusion】Prevailing southerlies in 2015 prevented local third-generation moths from migrating to overwintering regions. The Pied piper effect made these emigrants incapable of forming a source population of armyworms the following summer.

Key words scanning entomological radar, third-generation armyworm, trajectory analysis

*资助项目 Supported projects: 公益性行业(农业)科研专项经费(201403031); 吉林省科技发展计划资助项目(20160520030JH)

**第一作者 First author, E-mail: swwsw1221@sina.com

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: gaoyuebo8328@163.com

收稿日期 Received: 2017-11-03, 接受日期 Accepted: 2017-12-27

粘虫 *Mythimna separata* (Walker) 属鳞翅目 Lepidoptera, 夜蛾科 Noctuidae, 暴食性害虫, 大发生时, 可将作物叶片食光, 造成减产甚至绝收 (Zhang *et al.*, 2008; Jiang *et al.*, 2011; 姜玉英等, 2014; 江幸福等, 2014)。粘虫在吉林省有两次危害, 主要以 2 代粘虫危害较重, 3 代粘虫危害程度较轻, 为害的面积较小 (陈瑞鹿, 1979)。但随着气候的变化以及种植模式的改变, 近年来, 3 代粘虫的危害规律发生了变化, 已对当地作物安全生产形成了严重的威胁 (孙崑等, 2016)。2012 年吉林省 3 代粘虫暴发成灾, 后期统计实际见虫面积已达 37.5 万 hm^2 , 2013 年、2015 年发生程度虽不及 2012 年, 但仍显著重于常年 (曾娟等, 2013; 刘杰等, 2015)。3 代粘虫在吉林省的局部暴发危害呈现常态化趋势。因环境条件适宜, 此世代的粘虫, 有着较高的种群存留量及种群增殖倍数, 从而形成较高的 3 代粘虫蛾量。2015 年的监测中, 诱集到的 3 代粘虫蛾量, 远超过 2 代粘虫、1 代粘虫的蛾量。

以往对粘虫的研究, 一般多见于对各区域主害代的研究。因 3 代粘虫在吉林省的爆发性发生相对较少, 对吉林省 3 代粘虫的研究也较少 (Chen *et al.*, 1989; Feng *et al.*, 2008; Zhao *et al.*, 2009; 高月波等, 2014; 毛永凯等, 2015; 丛胜波等, 2015)。李绵春等 (1965) 的研究表明, 9 月上下旬雌蛾的产卵情况有所区别, 9 月初羽化的成虫可产一定量的卵, 而 9 月下旬羽化的成虫, 均不能产卵。张云慧等在 2005 年 9 月 11 日利用垂直昆虫监测雷达观测了粘虫秋季的迁飞, 并利用轨迹分析和天气背景分析, 研究了 3 代粘虫幼虫在东北暴发的原因及虫源 (张云慧, 2008; 张云慧等, 2012), 表明东北重灾区虫源大部分来自本地。潘蕾等 (2014) 对东北粘虫多年的回迁过程及其大气背景场做了详尽的数值模拟, 发现东北和华北地区 7、8 月的风向均以西南、南风为主且因气旋频繁过境而风向多变, 不利于东北粘虫夏季种群回迁进入华北农作区; 对其迁出种群的轨迹模拟结果也表明, 东北粘虫夏季种群能够进入华北的可能性极低, 其最终去

向集中在日本海、小兴安岭及以北、三江平原以北和以东的俄罗斯远东地区和东北三省境内。只有某些年份有极少数的轨迹最后能进入关内 ($\leq 2\%$), 且这些落点也只能到达河北北部, 无一能够进入河南、山东、山西等地。

3 代粘虫蛾量通常可作为预测次年粘虫发生程度的一项指标, 是进行粘虫发生长期预测的参数之一, 根据 9 月份全国不同地区 (特别是我国北方) 3 代粘虫蛾量的多少可以对次年的粘虫发生水平进行大致的判断。2015 年吉林省 3 代粘虫成虫的诱集蛾量很高, 这部分成虫能否成功迁出并与次年春季粘虫发生产生联系? 这一科学问题关系到害虫预测预报信息的准确性, 有着重要的研究意义。为此, 我们在 2015 年 3 代粘虫成虫发生期以昆虫雷达观测、地面常规监测和田间调查等辅助手段对 3 代粘虫蛾的回迁开展实证研究, 并利用 NCEP/NCAR 再分析资料做数值模拟和轨迹分析, 以期阐明 3 代粘虫蛾的秋季回迁动态及迁飞参数, 明确 3 代粘虫的滞留或迁出动态, 探讨其最终去向, 揭示 3 代粘虫蛾量与次年春季粘虫发生的关系, 为粘虫局地暴发的预测预报及综合治理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 田间粘虫种群生物学与系统调查

采用室内饲养的初羽化成虫, 自 9 月 1 日起, 陆续放置于田间的养虫笼中, 养虫笼 (图 1) 的制作方法参考金翠霞和何忠 (1965), 每日饲喂以 10% 蜂蜜水, 检查死亡的成虫, 解剖雌性成虫, 检查卵巢发育级别、交配及产卵情况。将所产卵块放置于养虫盒中, 置于田间继续饲养, 每天更换玉米叶, 记录幼虫生长发育情况。采用 HOBO Data Loggers 记录温湿度。在公主岭市吉林省农业科学院的院区内设置两台诱蛾器监测 3 代成虫的种群动态。诱蛾器的设置、制作方法, 成虫卵巢发育级别、交尾率的统计方法如 GB/T 15798-200X9《粘虫调查规范》所述。调查时间为 3 代粘虫的发生高峰期 (2015 年 9 月 5 日-9 月 24 日)。



图 1 养虫笼

Fig. 1 Insect rearing cages

1.2 雷达观测、轨迹分析与天气背景分析

用公主岭雷达观测粘虫迁飞,雷达的主机为日本株式会社的JMA-510 G-6型航海雷达主机,装配711型气象雷达天线,X频带3 cm波长,最大发射功率10 kW,脉冲宽度为0.08、0.4、0.8和1.2 μ s;直径1.5 m的圆抛物面,最大转速可达20 r/min。每次观测时,雷达天线仰角均为3°、5°、8°、12°、28°、45°和58°,数据统计方式同高月波等(2014)。

1.3 轨迹分析与天气背景分析

应用NOAA的HYSPLIT模型(Stein *et al.*, 2015)(ready.arl.noaa.gov/index.php)做轨迹分析。轨迹分析参数设定:以雷达实际观测的高度为轨迹分析高度,设定粘虫顺风飞行,顺推轨迹以19:00为起始时间,03:00为降落时间,飞行时间8 h(Chen *et al.*, 1989)。设定粘虫连续迁飞5个夜晚,以每晚的终点(降落点)为翌日傍晚迁出的起点;若轨迹进入海域,则以入海之前的坐标为迁飞终点。

选用NCEP/NCAR再分析数据(1948年至今,6 h一次,2.5°×2.5°,17个高度层)做数值模拟,根据雷达实际观测结果,分别选用850 hPa(海拔约1 500 m)或者925 hPa(海拔约700 m)的水平流场和温度场,利用气象图形软件GRADS提取相关信息(Kalnay *et al.*, 1996)。风向按8个方位进行统计,分别为南(S)、东南(SE)、西南(SW)、北(N)、东北(NE)、西北(NW)、东(E)、西(W)。降水资料通过中国气象局数据共享网下载。

2 结果与分析

2.1 生物学

实验期间共统计死亡成虫65头,部分死亡成虫虫体残缺,无法在形态学上分辨雌雄性,实际鉴定雌蛾22头,雄蛾30头。雌性成虫卵巢解剖结果显示,大多数雌成虫已产卵,发育级别主要集中于5级(62.5%),且大多已交配(交尾率93.75%)。调查共获得卵块数243块,选取其中的卵块,饲养13 d后粘虫幼虫平均长度为4.27 mm,17 d后粘虫幼虫平均长度为5.76 mm,均未达到3龄标准。

2.2 聚集成层分析

雷达监测时期在3次的观测中监测到粘虫迁飞的聚集成层现象,为9月1日、9月4日、9月6日。9月1日观测到粘虫在1 100 m聚集成层,次日诱蛾器诱集到粘虫6头。设置粘虫迁飞高度为1 100 m,以9月1日19:00为起始时间对迁飞的夜间粘虫进行1 d的顺推轨迹分析,显示虫群将向西南方向迁飞,5 d顺推轨迹分析显示,粘虫将降落在辽宁省大连附近(图2)。9月1日20:00的850 hPa的风场分析显示吉林省主要受东北气流控制,主要盛行3-5 m/s的东北风(图3),此高度可见14 °C的等温线穿过(图3)。

9月4日观测到粘虫在850 m聚集成层,次日诱蛾器诱集到粘虫55头。设置粘虫成虫迁飞高度为850 m,以9月4日19:00为起始时间对迁飞的夜间粘虫进行1 d的顺推轨迹分析,显示虫群将向西南方向迁飞(图2),5 d顺推轨迹分析显示,粘虫将降落在吉林省农安附近,9月4日20:00的850 hPa的风场分析显示吉林省主要受东北气流控制,主要盛行10 m/s左右的东北风(图3)此高度可见8-12 °C的等温线穿过(图3)。

9月6日观测到粘虫聚集成层的高度为1 000、1 500、2 000 m,次日诱蛾器共诱集到粘虫208头。设置粘虫成虫迁飞高度为1 000、1 500、2 000 m高度,以9月6日19:00为起始时间对迁飞的夜间粘虫进行1 d的顺推轨迹分析(图2),显示虫群将向东迁飞,5 d顺推轨迹分

析显示,粘虫将降落在朝鲜境内及周边区域。9月6日20:00的850 hPa的风场分析显示吉林省主要受西北气流控制,主要盛行2-6 m/s的西北风(图3),此高度可见10-12 的等温线穿过(图3)。

2.3 雷达观测的空中虫群动态及背景

在未观测到粘虫聚集成层迁飞的其他调查

日中,雷达回波高度主要集中于600 m以下,选择925 hPa的压力层面进行风场分析。3代粘虫成虫期诱蛾量较高,3代高峰期10 d(9月7日-9月16日)诱蛾数量达到1 914头,2代高峰期10 d(7月19日-7月28日)的诱蛾数量达到305头,一代高峰期10 d(5月29日-6月7日)诱蛾数量达到185头。数量上3代相对于2代增长了6.3倍,相对于1代高峰期增长了10.3倍。各

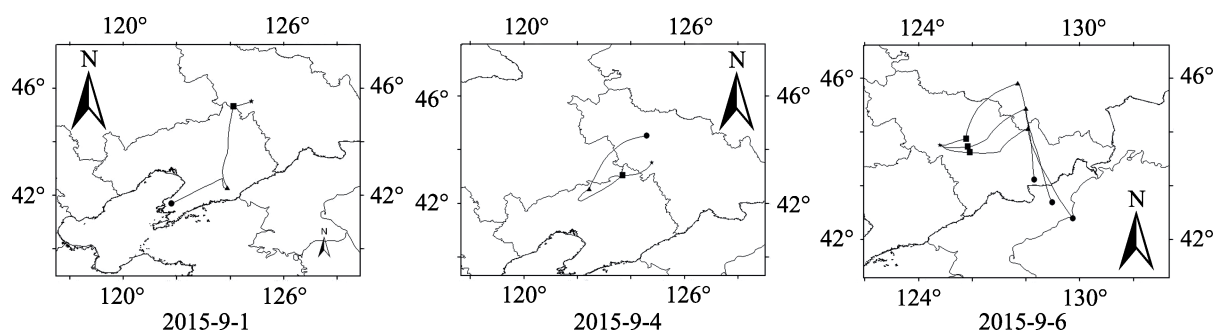


图2 2015年9月在公主岭上空成层的3代粘虫蛾的顺推轨迹

Fig. 2 Forwards trajectories of the third-generation armyworm in aerial stratification in Gongzhuling (September, 2015)

公主岭; ■第1夜终点; ▲第3夜终点; ●第5夜终点。

Gongzhuling, trajectory ends; ■ the 1st night; ▲ the 3rd night; ● the 5th night.

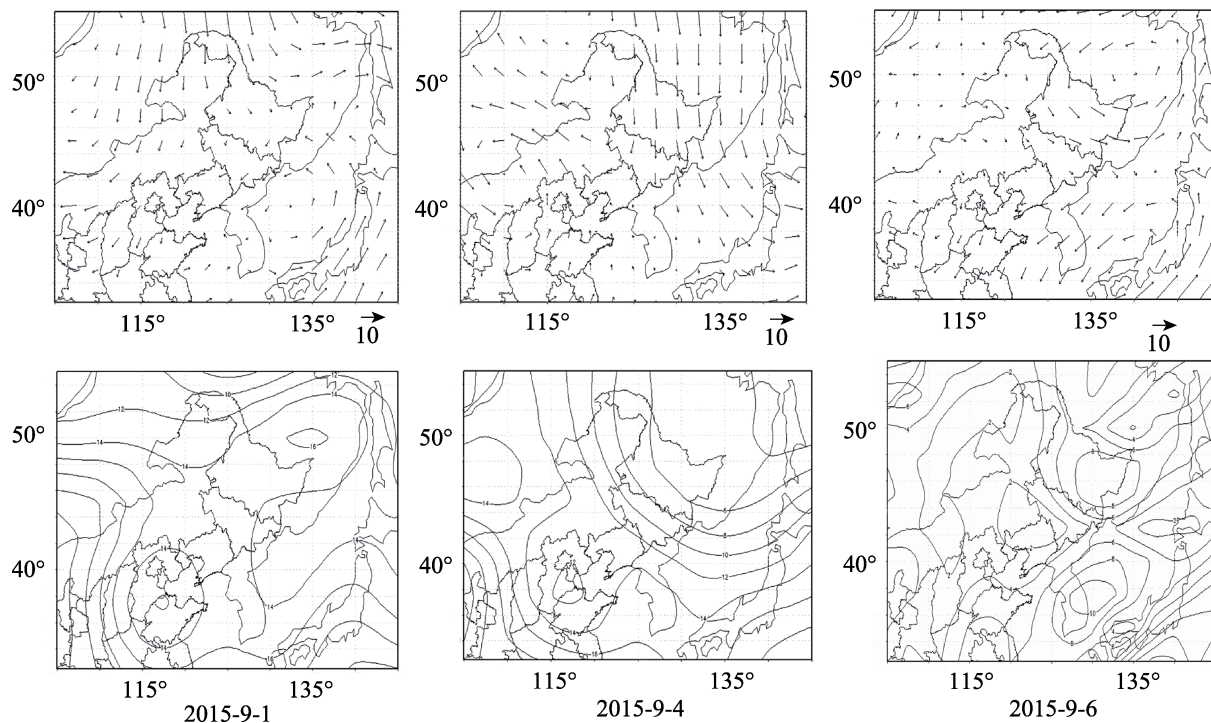


图3 2015年9月东北地区20:00 850 hPa上的水平风场(m/s)(上)和温度场(°C)(下)

Fig. 3 Wind (m/s) (up) and temperature (°C) (down) fields on 850 hpa at 20:00 in northeastern China (September, 2015)

表 1 3 代粘虫观测期间的空中虫群动态及相关背景

Table 1 Airborne population dynamics and weather elements during the period of third-generation armyworm

日期 Date	诱蛾器 数量 Trap catches	卵巢发育 级别 Ovarian development status	比例 (%) Percentage (%)	交尾率 (%) Mating rate (%)	降雨量 (mm) Rainfall (mm)	风向 Wind direction	风速 Wind speed (m/s)	等温线 () Tempera- ture	轨迹 方向 Trajectory direction	轨迹分析 天数 (d) Trajectory analysis days (d)	轨迹终点 Trajectory destination
9-5	55	—	—	—	0	NE	2-3	14	SW	5	N44°123', E126°129'
9-7	208	—	—	—	0	SE	2-6	18	NW	5	N40°941', E127°439'
9-8	141	1	100	0	0	S	7-9	18-20	NE	5	N38°542', E127°880'
9-9	148	—	—	—	0	N	6	14	S	2	N40°709', E124°584'
9-10	236	1	100	0	0	N	4-12	14	S	3	N39°583', E125°989'
9-11	127	—	—	—	0	NW	4-10	12-13	S	5	N40°784', E128°145'
9-12	203	1	100	0	0	NW	6	12	SE	5	N44°045', E128°723'
9-13	358	—	—	—	0	SW	5-6	14-20	NE	5	N48°298', E129°914'
9-14	183	1	100	0	0	SW	6-11	16-22	NE	5	N48°116', E128°782'
9-15	196	—	—	—	0	SW	1-11	18-20	NE	5	N44°749', E126°078'
9-16	114	1	100	0	0	S	2-7	20-22	N	5	N44°128', E126°526'
9-17	56	—	—	—	0	SE	3-4	18-20	N	5	N43°951', E128°523'
9-18	27	1, 4	91.66, 8.33	9.09	0	SW	2-6	16-18	SE	5	N45°574', E132°403'
9-19	120	—	—	—	83	N	5-8	14-16	SW	5	N46°637', E131°149'
9-20	47	1	100	0	0	SW	3-6	15	NE	5	N47°332', E130°129'
9-21	19	—	—	—	0	SW	3-6	16-18	NE	5	N47°195', E128°465'
9-22	6	—	—	—	0	SW	6-12	14-20	NE	5	N46°528', E133°354'
9-23	3	—	—	—	154	SE	2-4	8-14	NW	4	N42°923', E129°687'
9-24	24	1	100	0	1	SE	1-5	12-14	NW	3	N43°804', E129°987'

调查日,雌虫卵巢发育级别集中于 1 级,大多未交尾,具有迁出粘虫的典型的生理特征。调查期间 9 月 19 日、23 日、24 日 3 d 有降雨,降雨强度较高。吉林省 20:00 925 hPa 等压面上的频次统计显示,南、东南风、西南风 3 种风向的占比

达 68.42%,北风、东北风、西北 3 种风向的占比累计达 31.58%,其中利于粘虫回迁的东北风占比为 5.26%。观测期内最小风速为 1 m/s,最大风速为 12 m/s,吉林省上空温度的等温线范围为 8-20 。轨迹分析显示,除去入海的有效轨

迹, 每日虫源的分析天数在 3-5 d 之间。迁出轨迹模拟结果显示, 73.68% 的轨迹最终去向集中在观测点公主岭相近纬度或者纬度更高的地区, 21.05% 的轨迹的落点在朝鲜境内, 5.26% 的轨迹落点在辽宁省丹东附近。

3 结论与讨论

粘虫卵、幼虫、成虫产卵的发育始点温度分别为 (13.1 ± 1.1) 、 (7.7 ± 1.3) 、 (9.0 ± 0.8) , 吉林省 9 月的地面气温高于上述温度。本研究的田间饲育试验显示, 9 月初羽化的 3 代粘虫成虫可以完成交尾及产卵, 卵亦可孵化, 但幼虫发育迟缓, 这与李绵春 (1965) 等的研究结果有相近之处。如果田间发生这一世代的粘虫幼虫, 即为 4 代粘虫幼虫, 因吉林省农作物进入收获期, 将不会造成严重的危害。前人的调查研究证实, 粘虫在吉林省自然环境的冬季低温下无法越冬 (李绵春等, 1965)。可见, 滞留于本区域的粘虫, 不论发育到何种虫态, 均无法摆脱种群消亡的命运。所以 3 代粘虫蛾无法为下一年度提供直接的春季虫源。实际的调查结果显示, 2016 年系统监测地区诱蛾器 (两台) 诱集到的春季粘虫数量较少 (公主岭: 18 头, 梅河口: 0 头; 洮南: 11 头), 属轻发生年。

2015 年春季迁入的粘虫数量较多, 2 代粘虫成虫因气流、降雨等原因, 未能有效迁出, 有着较高的存留量及种群增殖倍数, 因此 3 代粘虫的成虫数量显著增加。卵巢解剖结果与张云慧 (2008) 的研究结果相近, 绝大多数粘虫成虫为 1 级, 仅一头为 4 级, 交尾率极低, 表明虫源为本地羽化, 且处于立即迁出的状态。粘虫的飞行低温阈值为 8, 适宜温度的范围在 11-32 之间, 最适合的温度为 17 左右 (江幸福, 2003), 由本研究结果可见, 吉林省上空的温度适宜于粘虫的迁飞。吉林省因地形因素, 9 月的季风活动较为频繁, 风向多变, 不利于 3 代成虫回迁的南风、西南风、东南风占比较高, 有利于粘虫回迁的风向尤其是东北风较少, 这与武向文 (2001)、潘蕾 (2009) 及潘蕾等 (2014) 的研

究结果相近。

在 3 代粘虫成虫雷达观测期间, 共有 3 个夜晚观测到了粘虫成层的迁飞现象。模拟层中虫群的轨迹去向, 表明这些个体将落在辽宁大连、吉林农安和朝鲜境内及周边区域。其他夜晚的轨迹分析表明, 极大比率的粘虫种群最终去向集中于观测点公主岭以北的区域或者朝鲜境内。据李光博 (1993) 对于粘虫越冬区域的调查报道, 粘虫越冬的北界在北纬 33°-34° 之间的区域, 即 1 月份 0 等温线。可见, 粘虫在上述区域均无法越冬, 表现出显著的 Pied-pebber 效应, 虫源迁入不适宜生存的地区而死亡, 无法为 2016 年的粘虫的发生提供虫源。这与张云慧 (2008) 的研究结果相近。

本文以吉林省公主岭市为观测点, 应用轨迹分析、天气学背景分析等方法研究 2015 年 3 代粘虫成虫的迁飞去向, 研究结果表明: 经过虫源的积累, 3 代粘虫蛾种群数量显著增加, 且处于持续迁出的状态, 受限于气象条件, 本年度的迁出种群无法成功回迁。但在风速风向条件适宜的年份, 可能会有一定比例的 3 代粘虫跨海回迁。胡高等 (2014) 认为 1980 年辽宁省的 2 代粘虫成虫有一定比例的轨迹能跨海回迁至山东、河北等省。张智 (2013) 的研究也提到了 9 月初山东烟台、安徽、江苏北部粘虫回迁的现象。付晓伟 (2015) 研究了环渤海湾地区的昆虫跨海迁飞行为, 提出粘虫的回迁生物量要远高于北迁的生物量。可见, 加强对本世代粘虫的研究, 监测其去向, 分析其与下一年度虫害发生程度的关系, 对粘虫危害的先期预警与有效防控有着重要的意义。

致谢: 感谢南京农业大学博士生朱健同学在轨迹分析方面给予的帮助。

参考文献 (References)

- Chen RL, 1979. Forecasting of Agriculture Pests. Changchun: Jilin People's Press. 121-144. [陈瑞鹿, 1979. 农作物病虫害预测预报手册. 长春: 吉林人民出版社 121-144.]
- Chen RL, Bao XZ, Drake VA, Farrow RA, Wang SY, Sun YJ, Zhai

- BP, 1989. Radar observations of the spring migration into northeastern China of the oriental armyworm moth, *Mythimna separata*, and other insects. *Ecological Entomology*, 14(2): 149–162.
- Cong SB, Wan P, Huang MS, W HH, Xu D, Wang JT, 2015. Population dynamics and wintering pattern of *Mythimna separate* Walker in Wuhan. *Hubei Agricultural Sciences*, 54(23): 5904–5907. [丛胜波, 万鹏, 黄民松, 武怀恒, 许冬, 王金涛, 2015. 武汉地区粘虫的种群动态及越冬规律. 湖北农业科学, 54(23): 5904–5907.]
- Feng HQ, Zhao XC, Wu XF, Bo W, Wu KM, Cheng DF, Guo YY, 2008. Autumn migration of *mythimna separata* (Lepidoptera: Noctuidae) over the Bohai sea in northern China. *Environmental Entomology*, 37(3): 774–781.
- 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种群动态研究. 博士学位论文. 北京: 中国农业科学院.]
- Gao YB, Sun YJ, Zhang Q, Sun W, Zhou JC, 2014. The spring migration behavior of the oriental armyworm, *Mythimna separata*, in northeastern China. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 51(4): 906–913. [高月波, 孙雅杰, 张强, 孙嵬, 周佳春, 2014. 东北粘虫春季空中虫群的迁飞行为. 应用昆虫学报, 51(4): 906–913.]
- 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.]
- Jiang XF, Cai B, Luo LZ, Cao YZ, Liu YQ, 2003. Influences of temperature and humidity synthesis on flight capacity in the moths of oriental armyworm, *Mythimna separata* (Walker). *Acta Ecologica Sinica*, 23(4): 738–743. [江幸福, 蔡彬, 罗礼智, 曹雅忠, 刘悦秋, 2003. 温、湿度综合效应对粘虫蛾飞行能力的影响. 生态学报, 23(4): 738–743.]
- Jiang XF, Luo LZ, Zhang L, Sappington TW, Hu Y, 2011. Regulation of migration in *mythimna separata* (Walker) in China: a review integrating environmental, physiological, hormonal, genetic, and molecular factors. *Environmental Entomology*, 40(3): 516.
- Jiang XF, Zhang L, Cheng YX, Luo LZ, 2014. Novel features, occurrence trends and economic impact of the oriental armyworm, *Mythimna separata* (Walker) in China. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 51(6): 1444–1449. [江幸福, 张蕾, 程云霞, 罗礼智, 2014. 我国粘虫发生危害新特点及趋势分析. 应用昆虫学报, 51(6): 1444–1449.]
- Jiang YY, Li CG, Zeng J, Liu J, 2014. Population dynamics of the armyworm in China: A review of the past 60 years' research. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 51(4): 890–898. [姜玉英, 李春广, 曾娟, 刘杰, 2014. 我国粘虫发生概况: 60 年回顾. 应用昆虫学报, 51(4): 890–898.]
- Jin CX, He Z, 1965. Introduction for feeding armyworm. *Entomological Knowledge*, 9(6): 51–52. [金翠霞, 何忠, 1965. 粘虫饲养方法介绍. 昆虫知识, 9(6): 51–52]
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, Collins W, Deaven D, Gandin L, Iredell M, Saha S, White G, Woollen J, Zhu Y, Leetmaa A, Reynolds B, Chelliah M, Ebisuzaki W, Higgins W, Janowiak J, Mo KC, Ropelewski C, Wang J, Jenne R, Joseph D, 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77(3): 437–470.
- Li GB, 1993. Research summary and major advances of *Mythimna separata* in China. *Plant Protection*, 19(4): 2–4. [李光博, 1993. 我国粘虫研究概况及主要进展. 植物保护, 19(4): 2–4.]
- Li MC, Chen RL, Liu TY, Leo CS, 1965. Studies on the source of the early spring generation of the armyworm, *Leucania separata* Walker, in Kirin Province. I. Studies on the hibernation and problems of the source. *Acta Entomologica Sinica*, 14(1): 23–33. [李绵春, 陈瑞鹿, 刘增义, 庐兆先, 1965. 吉林省粘虫猖獗世代发生虫源的研究——I. 发生虫源的探讨和越冬问题研究. 昆虫学报, 14(1): 23–33.]
- Liu J, Jiang YY, Zeng J, 2015. Occurrence characteristics of armyworm in China in 2013. *Plant Protection*, 41(3): 131–137. [刘杰, 姜玉英, 曾娟, 2015. 2013 年我国粘虫发生特点分析. 植物保护, 41(3): 131–137.]
- Mao YK, Huang QY, Zhu F, Wang XP, Lei CL, 2015. The research of occurrence regularity of *Mythimna separate* (Walker) in Zhongxiang city of Hubei Province. *Journal of Environmental Entomology*, 37(6): 1176–1181. [毛永凯, 黄求应, 朱芬, 王小平, 雷朝亮, 2015. 湖北省钟祥市粘虫发生规律研究. 环境昆虫学报, 38(6): 1176–1181.]
- Pan L, 2009. Pied Piper effect of the migration arena in East Asia and intermittent outbreak mechanisms of the third generation armyworm in Northern China. Master dissertation. Nanjing: Nanjing Agricultural University. [潘蕾, 2009. 东亚迁飞场的 Pied Piper 效应与我国三代粘虫的间歇性暴发机制. 硕士学位论文. 南京: 南京农业大学]
- Pan L, Wu XW, Chen X, Jiang YY, Zeng J, Zhai BP, 2014. Pied

- piper effect of the migration arena in northeastern China on *Mythimna separata* (Walker). *Chinese Journal of Applied Entomology*, 51(4): 974–986. [潘蕾, 武向文, 陈晓, 姜玉英, 曾娟, 翟保平, 2014. 东北迁飞场对粘虫的 pied piper 效应. 应用昆虫学报, 51 (4): 974–986.]
- Stein AF, Draxler RR, Rolph GD, Stunder BJB, Cohen MD, Ngan F, 2015. NOAA's hysplit atmospheric transport and dispersion modeling system. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96(12): 2059–2077.
- Sun W, Cheng ZJ, Zhang Q, Zhou JC, Gao YB, 2016. Monitoring on the second-generation adult armyworm by scanning entomological radar. *Journal of Northeast Agricultural Sciences*, 41(6): 79–81. [孙崑, 程志加, 张强, 周佳春, 高月波, 2016. 应用扫描昆虫雷达监测二代粘虫成虫. 东北农业科学, 41(6): 79–81.]
- 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 Piedpiper 效应. 硕士学位论文. 南京: 南京农业大学.]
- Zeng J, Jiang YY, Liu J, 2013. Analysis of the armyworm outbreak in 2012 and suggestions of monitoring and forecasting. *Plant Protection*, 39(2), 117–121. [曾娟, 姜玉英, 刘杰, 2013. 2012 年粘虫暴发特点分析与监测预警建议. 植物保护, 39(2): 117–121.]
- 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. 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, 2013. Monitoring and population dynamics analyses of important migratory pest insects in Northern China. Doctoral dissertation. Beijing: 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 L, Jiang XF, Luo LZ, 2008. Determination of sensitive stage for switching migrant oriental armyworms into residents. *Environmental Entomology*, 37(6): 1389–1395.
- Zhao XC, Feng HQ, Wu B, Wu XF, Liu ZF, Wu KM, McNeil JN, 2009. Does the onset of sexual maturation terminate the expression of migratory behaviour in moths? a study of the oriental armyworm, *mythimna separata*. *Journal of Insect Physiology*, 55(11): 1039–1043.