粘虫的秋季回迁：2012-2013 年大发生年个例分析*

朱 健[1**] 姜玉英[2] 翟保平[1***]

（1. 南京农业大学植物保护学院，南京 210095；2. 全国农业技术推广服务中心，北京 100125）

摘 要 **【目的】** 考察粘虫 *Mythimna separata* (Walker) 秋季回迁过程，阐释粘虫在我国东部地区迁飞的周年循环，分析粘虫大发生的原因，提取粘虫暴发的预警参数。**【方法】** 利用欧洲中期天气预报中心（ECMWF）的气象数据，分析 9 月份我国 925 hPa 高度的迁飞场，用 NOAA HYSPLIT 平台模拟长岛 2010-2013 年间过境 3 代粘虫的回迁过程。**【结果】** 9 月份华北低空通常存在一个中心位于鲁西的冷高压，高压西侧的南向风和北侧的西向风导致秋季迁飞场环境不利于北方粘虫的秋季回迁而形成明显的 Pied Piper 效应。但在 2011 和 2012 年 9 月，冷高压中心明显偏西，我国东部北向风频次大大增加；轨迹分析表明，过境长岛的秋季回迁粘虫分别有 20%（2011 年）和 5%（2012 年）的迁飞日能回到 30° N 以南；北方粘虫成功回迁到越冬区的比率提高，为 2012-2013 年粘虫的暴发提供了相应的虫源基数。**【结论】** 华北秋季的迁飞场以北向风和西向风为主而不利于粘虫的秋季回迁，只在 9 月冷高压偏西的年份，大陆东部盛行偏北风，粘虫成功回迁到南方越冬区的成功率较高，为翌年粘虫大发生种群的形成奠定虫源基础。因此，秋季高压中心的位置可作为翌年粘虫大发生的早期预警指标。

关键词 粘虫，秋季回迁，东亚冷高压，轨迹分析，pied piper 效应

Autumn migration of *Mythimna separata*: A case study of the 2012–2013 outbreak

ZHU Jian[**] JIANG Yu-Ying[2] ZHAI Bao-Ping[***]

(1. College of Plant Protection, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China;
2. National Agro-Technical Extension and Service Center, Beijing 100125, China)

Abstract **[Objectives]** To investigate the autumn migration of *Mythimna separata* (Walker), identify the causes of outbreaks of this pest, and improve understanding of its seasonal migration patterns in eastern China. **[Methods]** The ERA-40 and ERA-interim reanalysis datasets were used to analyze the migration arena in September, and the NOAA HYSPLIT model was used to simulate the return migration of the third generation to Changdao during 2010-2013. **[Results]** A cold, high pressure area at low altitude in northern China in September is the main reason for this being an unfavorable migration arena for the northern armyworm in the autumn, i.e., the pied piper effect. In September of the previous year, in which there was a serious outbreak of this pest, the center of the cold high was located more to the west. In September 2011 and 2012, the center of the cold high was obviously westward. Forward trajectory analysis in Changdao showed that in 2011 and 2012, 20% and 5%, respectively, of the armyworm population returned to south of 30°N. **[Conclusion]** This study provides preliminary data on the autumn migration of the armyworm, clarifies the role of the cold high shaping the migration arena in northeastern and northern China, and demonstrates that the location of the cold high is important for forecasting armyworm outbreaks.

Key words *Mythimna separata*, autumn migration, East Asia Cold High, trajectory analysis, pied piper effect

*资助项目 Supported projects：国家公益性行业（农业）科研专项“粘虫综合防治技术研究与示范”（201403031）

**第一作者 First author，E-mail：2016202029@njau.edu.cn

***通讯作者 Corresponding author，E-mail：bpzhai@njau.edu.cn

收稿日期 Received：2018-08-25，接受日期 Accepted：2018-09-21

粘虫是一种世界性、杂食性、迁飞性的农业害虫，寄主植物以禾本科植物为主，包括了 16 个科在内的 100 余种植物（Sharma and Davies，1983；Chen *et al.*，1995；Lee and Uhm，1995；Hairi，1995）。我国是粘虫为害的重灾区，通过 20 世纪 1960-1980 年代的全国大协作，基本摸清了粘虫在我国东部北迁南回周年往返的迁飞规律。粘虫在我国每年有 4 次较大规模的迁飞活动，分别在 3 月-4 月初、5 月中旬-6 月上旬、7 月中下旬、8 月末-9 月下旬，并形成 5 个主要发生区（林昌善等，1963；林昌善和夏曾铣，1963；林昌善和张宗炳，1964；李光博等，1964；陈瑞鹿，1990；林昌善，1990；李光博，1993）。其中夏季的第 3 次迁飞和秋季的第 4 次迁飞尚存在许多疑问，从东北和华北标记释放的 3 代粘虫从未在南方得到回收，翟保平和陈瑞鹿就此现象在中国昆虫学会 50 周年大会上提出了东北迁飞场的 Pied Piper 效应问题，经武向文（2001）、潘蕾（2009）、潘蕾等（2014）及胡高等（2014a，2014b）的系列研究，初步阐释了东北迁飞场对 3 代粘虫的 Pied Piper 效应。而对于全国范围而言，粘虫回迁过程出现在 8 月末-9 月下旬，从北方第 4 发生区迁往南方第 5 发生区，其成功回迁至南方越冬区的虫量是预测来年发生状况的重要指标，而这一过程尚不甚明了。

20 世纪 80 年代以后，随着耕作制度的改变、南方冬小麦和蜜源植物种植面积急剧减少，粘虫从全国高发性害虫逐渐转变为局部偶发性害虫。经过数十年的沉寂和酝酿，2012 年粘虫再次在全国范围内大暴发，2012 年和 2013 年是粘虫在我国近 30 余年内为害最为严重的两年，发生面积广、为害程度深，主要为害世代分别是 2012 年的第 3 代和 2013 年的第 2 代（张云慧等，2012；曾娟等，2013；姜玉英等，2014；刘杰等，2015）。以往的研究将暴发原因总结为上一世代的虫源基数以及暴发期间的天气背景，如将 2012 年的暴发原因部分归结于 1 代、2 代基数高，但 1 代、2 代粘虫基数高的原因又是什么？2011 年 12 月至 2012 年 2 月，全国平均气温－4.8 ℃，比常年同期 1.0 ℃低 5.8 ℃，是近 27 年冬季气温最低的一年（孙丞虎等，2012）。这种极端低温会极大缩小粘虫冬季生境的面积，降低冬季粘虫的田间种群数量，进而从虫源基数上减轻了下一年粘虫的发生。但在经过这样一个极寒的冬季之后，2012 年 1 代粘虫发生面积仍然达到了 70.99 万 km^2，超过常年平均水平，原因何在？解决这个问题可能会是探讨 2012 年粘虫暴发原因的关键。

东亚冬季风的年际变化是我国冬季气温波动的直接原因（郭其蕴，1994）。每年 8 月末至 9 月初，冬季风自北向南逐渐控制我国，西伯利亚高压是直接影响中国地面气温的环流系统，当西伯利亚高压偏强时，东亚冬季风偏强，中国东部低层盛行异常的偏北风，这时中国气温异常偏低（任广成，1993；郭其蕴，1994；Huang *et al.*，2007；Ding *et al.*，2008；Wang *et al.*，2008）。冬季低温虽然可能对粘虫的种群有抑制作用，但是秋末出现在我国东部地区低空的异常偏北气流却有助于北方的粘虫顺利回迁到南方越冬，减轻东北迁飞场的 Pied Piper 效应。迁飞环境对粘虫的迁飞格局有着关键的决定作用，每年 9 月是北方 3 代粘虫的羽化回迁期，但人们对粘虫的回迁过程一直不明就里。为此，我们从粘虫的秋季回迁风场作为切入点，通过普查历年 9 月我国的环流背景和粘虫秋季回迁的个例分析，明确风场的年际变化与粘虫发生动态的关系，以期从虫源基数的角度阐释粘虫大发生的原因，并为粘虫暴发的跨年预测提供科学依据和预警参数。

1　材料与方法

1.1　资料来源

虫情资料：1. 农作物重大病虫害数字化监测预警系统（http://www.ccpmis.org.cn）全国粘虫统计数据；2.《中国植物保护五十年》历年发生数据（陈生斗和胡伯海，2003）。

气象资料：欧洲中期天气预报中心（ECMWF，http://www.ecmwf.int/）的 ERA-interim 和 ERA-40 再分析数据(时间间隔为 6 h)。

地图资料：国家基础地理信息中心（http://

ngcc.sbsm.gov.cn）提供的 1∶4 000 000 基础地理信息数据。

1.2 轨迹分析方法与参数设置

轨迹分析方法是研究昆虫迁飞过程的有效手段（芦芳等，2013），NOAA HYSPLIT 平台（Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory）是一种基于拉格朗日插值的轨迹模拟模型。本文利用 NOAA HYSPLIT 模型对粘虫的回迁过程进行轨迹分析，在 Arcgis 9.3 上合成轨迹图。

飞行高度：雷达观测表明（Chen *et al.*，1989），粘虫在我国春秋季迁飞高度多位于距地面 500 m 左右，华东地区多平原，因此设置海拔 500 m 作为粘虫秋季回迁轨迹分析的起始高度。

起始与降落时间：粘虫是典型的夜行性昆虫，几乎所有活动都集中在夜间。野外观察与雷达监测表明，粘虫在日落后开始起飞，日落后 20 min 形成高峰，日出前降落（翟保平，2005）。因此选择当地日落后 0.5 h 作为轨迹起始时间（取整点），起始时间 8 h 后作为降落时间，即每晚飞行 8 h。日出日落时间按照翟保平（2004）的相关方法进行计算。

秋季回迁期：根据中国农科院植保所长岛观测基地的监测情况（付晓伟，2015），将每年 9 月 1-20 日作为本研究中粘虫的回迁时期，并进行轨迹分析。

1.3 气候背景分析

风压场：依据雷达显示的粘虫秋季迁飞高度，选择 925 hPa 高度的风场和高度场进行回迁过程的天气背景分析。

东亚冷高压中心判定：基于反气旋的客观定义，对在同一高度上具有闭合等压线，中心气压高于周围的大型涡旋，记录闭合区域内高压中心坐标。

风向风速统计：将风向分为 16 个方向（N、NNE、NE、ENE、E、ESE、SE、SSE、S、SSW、SW、WSW、W、WNW、NW、NNW），统计各个方向的频次和风速大小。

高度场差值分析：根据粘虫年发生面积将各年度分为轻（<5 000 000 hm^2）、重（≥ 5 000 000 hm^2）发生年两组，利用偏重年份与偏轻年份间高度场的差值探寻偏重年份中高度场的特征。

以上分析由 OpenGrADS 2.1、ArcGIS9.3 和 Origin 9.1 成图。

2 结果与分析

2.1 2010-2017 三地 1 代诱蛾情况

河北大城、山东肥城和山西昔阳是 1 代粘虫常年迁入区，灯下粘虫上灯量一定程度上反应了当年的 1 代发生情况。2012 年三地 1 代粘虫灯诱总量均高于上年（图 1），特别是肥城监测点，2012 年 1 代粘虫诱虫量为 712 头，是上年的 10 余倍，2013 年大城和昔阳的 1 代诱虫量相比 2012 年又有明显增加。回迁虫量是构成来年虫源基础的绝对主力，在经历一个异常寒冬之后，2012 年 1 代粘虫依旧明显高于上年，可以推测 2011 年秋季回迁量应当远高于常年。

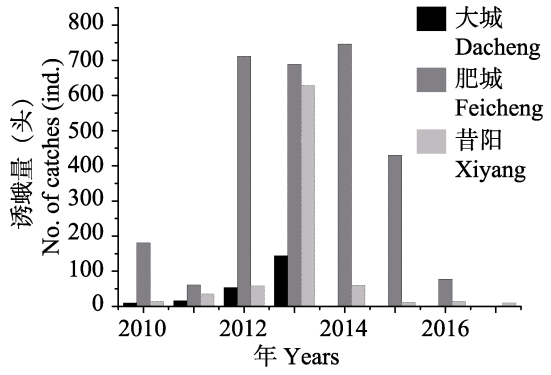

图 1 河北大城、山东肥城和山西昔阳 1 代粘虫总诱蛾量（2010-2017）

Fig. 1 Catches of 1st generation armyworm moths at Dacheng (black light trap)、Feicheng (Jiaduo light trap) and Xiyang (black light trap) (2010-2017)

2.2 9 月迁飞场分析

风场是决定粘虫迁飞格局的关键因子，每年 8 月末至 9 月初是粘虫开始回迁且东亚冬季风开始在我国北方成形的时期，9 月份的环流状况对粘虫回迁过程有着决定性的作用。9 月 925 hPa 的平均风场和高度场（图 2）显示在我国北方存

在着一个冷高压，多年平均中心位于山东西部，而这个冷高压主导了我国北方 9 月的低空气流场。

9 月以后，随着西太平洋副高势力的减弱，脊线开始自北向南迅速撤退，西伯利亚冷高压逐渐增强并不断分裂出小的冷高压气团并随西风带东移南下，形成了 9 月平均气候中的冷高压。冷高压以北的华北和东北地区盛行偏西风，冷高压以西的西北地区多南向风，而只有在冷高压东部和南部才存在有利于 3 代粘虫回迁的东北风气流。风向统计（图 3）也证实了这一点，在华北中部和东北南部，东北风的频率极低，只有偏南的华东北部，如山东一带，才有适合粘虫回迁的东北气流出现。

2.3　冷高压中心与粘虫发生

以欧洲中期天气预报中心（ECMWF）提供的再分析数据和我国粘虫历年为害数据为基础，提取我国历年 9 月 925 hPa 高度的冷高压中心坐

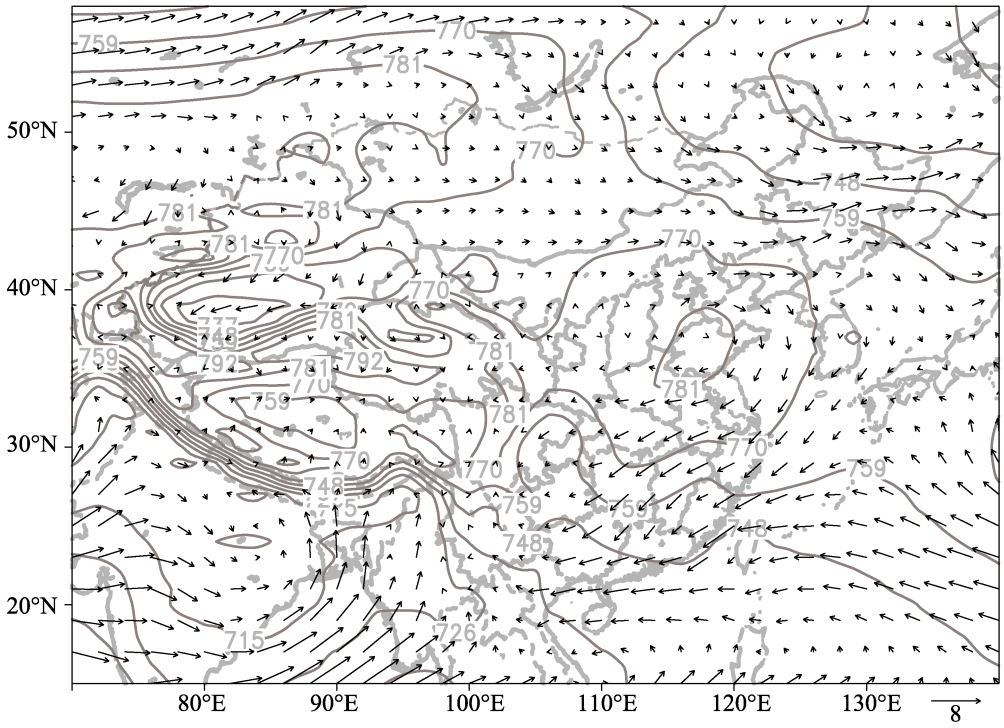

图 2　9 月 925 hPa 平均风场和高度场（1957-2001）

Fig. 2　Mean wind field (m/s) (vector) and geopotential field (line) on 925 hPa in September (1957-2001)

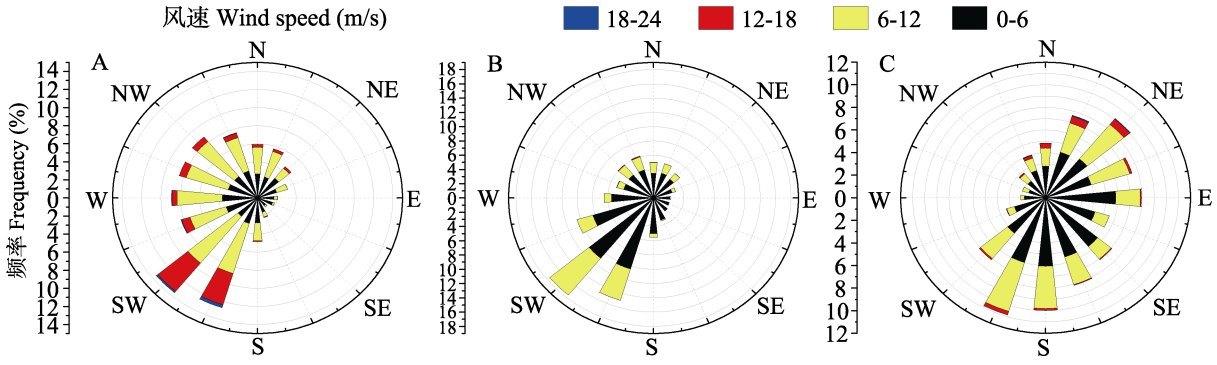

图 3　9 月 925 hPa 风玫瑰图（1957-2001）

Fig. 3　Wind rose on 925 hPa in September (1957-2001)

A. 华北中部；B. 东北南部；C. 华东北部。

A. Central North China; B. Southern Northeast China; C. Northern East China.

标，并与来年粘虫的年发生面积相对应（图 4），结果表明，大发生年份和轻发生年份（以年发生面积 5 000 000 hm^2 为界）所对应的上年 9 月冷高压中心呈现明显的东西分离，而南北不呈现分离；大发生年份对应的上年 9 月冷高压中心偏西，2011 年与 2012 年 9 月的冷高压中心较常年更是明显偏向西北。

进一步对比轻重发生年份对应的上年 9 月 925 hPa 高度场（图 5），重发生年相比轻发生年具有以下特点：冷高压中心强度更高、冷高压覆盖面积更广。因此重发生年时，我国东部地区相对受东北风控制的区域更广阔、东北至华北到华东北部一片北向风更显著。由此可见，9 月大陆冷高压的活动对于北方 3 代粘虫的回迁有着决定意义。

2.4 长岛 3 代粘虫轨迹分析

由前文可知，东北、华北的 3 代粘虫几乎没有机会回到南方，形成这种现象的原因正是盘踞在 40°N 左右的大陆冷高压，但是在冷高压中心异常偏西的年份，成功回迁的粘虫会大幅增加，

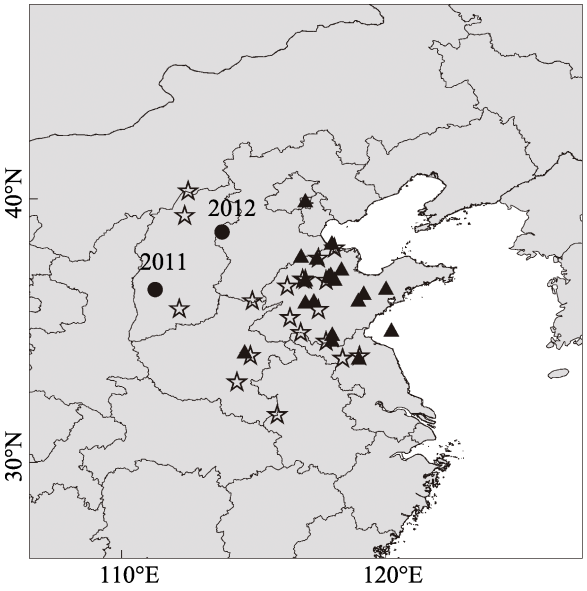

图 4 1960-1998 年各年 9 月 925 hPa 冷高压中心的位置

Fig. 4 The location of the center of East Asia Cold High on 925 hPa in September (1960-1998)

对应来年发生面积 5 000 000 hm^2 以上以五角星形示之，以下以三角形示之。

Based on the occurrence area of armyworm, defining the location in outbreak years (more than 5 million hm^2, pentagram) or normal years (less than 5 million hm^2, triangle).

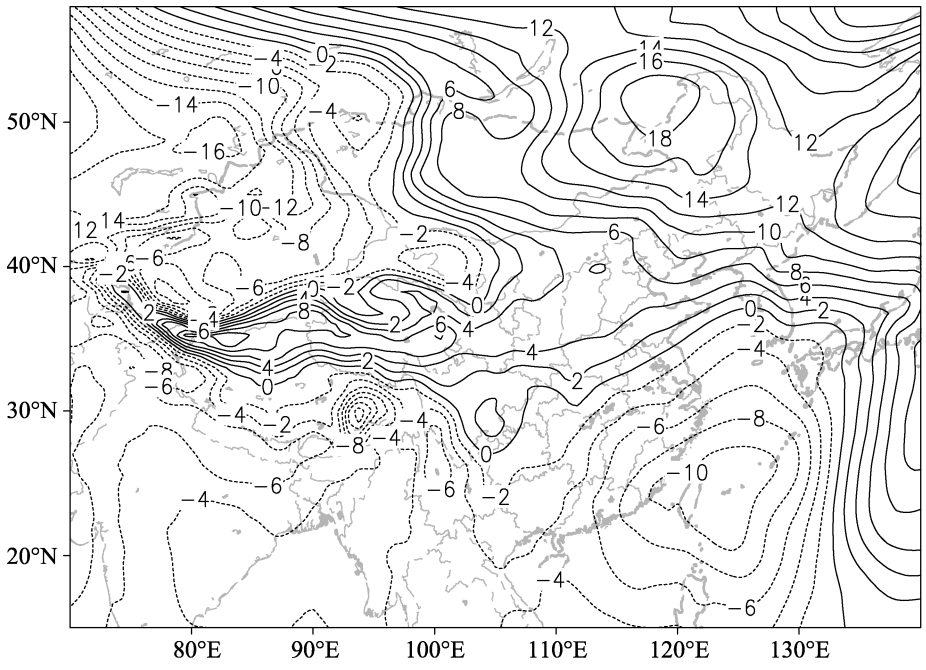

图 5 重发生年与轻发生年的上年 9 月 925 hPa 高度场差值图

Fig. 5 Differential chart of geopotential field on 925 hPa between outbreak years and normal years

重发生年份：1989、1990、1991、2012、2013，轻发生年份：1994、1995、1996、2010、2011。

Outbreak years: 1989, 1990, 1991, 2012, 2013; normal years: 1994, 1995, 1996, 2010, 2011.

提高粘虫的越冬基数，进而在虫源基数上增大了来年粘虫暴发的可能性。2011 年和 2012 年的 9 月冷高压中心就满足这样的条件，我们利用轨迹分析方法模拟了这段时期的回迁过程。

对比长岛 2010-2013 年各年 9 月 3 代粘虫的回迁第 5 晚落点（图 7），2011 年有 20%的几率（此为时间上的几率，假设每天粘虫迁飞量相等）能回到 30°N（11 月 10 ℃等温线）以南，2012 年则有 5%的概率，而 2010 和 2013 年无一能回到 30°N 以南，差异非常明显。换而言之，即使在回迁气流场极为有利的时期，经过长岛的 3 代粘虫也仅有 20%的时间能顺利回迁，可见华北地区的 3 代粘虫成功回迁可能性会更低。

3　结论和讨论

粘虫是典型的风载迁飞昆虫，风向决定了粘虫的迁飞方向，而每年 9 月出现在我国北方的冷高压使得东北至华北一带东北风频率极低，导致这些地区的 3 代粘虫很难回迁至南方。但是冷高压的中心位置存在年际差异，在 9 月冷高压中心位置靠西的年份里，受东北风控制的陆地面积较多，因此每年 9 月冷高压的中心位置可能与粘虫的回迁成功率有关。而田间年发生情况和长岛轨迹模拟都证实了这一点：在冷高压更偏西的年份里，粘虫更有可能会暴发。Rabb 和 Stinner（1978）发现，人类的农事活动会导致某些蛾类北迁至无法越冬的地区，却并未见回迁，他们将这种有去无回的迁飞称为“ Pied Piper ”现象；虽然其后的研究证实这些蛾类都有回迁发生，美国并不存在这种“ Pied Piper ”。但我国 9 月份冷高压活动所带来的不利风场却正是我国东北迁飞场出现 Pied Piper 效应的根本原因。冷高压位置不仅仅在粘虫回迁过程中有着重要意义，对其他夏季发生区靠北的长距离迁飞昆虫同样有意义，进一步的系统研究有助于害虫的跨年预测。

由前文可知，华北和东北地区的 9 月迁飞场不具备支持粘虫回迁南方的东北气流，冷高压东南侧的华东北部是粘虫回迁的主要虫源区，如山东和河南等地，这与 20 世纪 60-80 年代的标记回收结果一致，在多年大量的标放试验中，仅在安徽望江、广州海珠区和广西北流分别收到来自山东沾化、河南郾城和河南漯河的 3 代粘虫（李光博等，1964；邬祥光，1964）。在一些特殊年份里，东北或华北地区的 3 代粘虫可能成功回到南方，由于华北是 3 代粘虫的集中发生区，就导致了回迁量的突增，这是粘虫发生年际波动的原因之一。

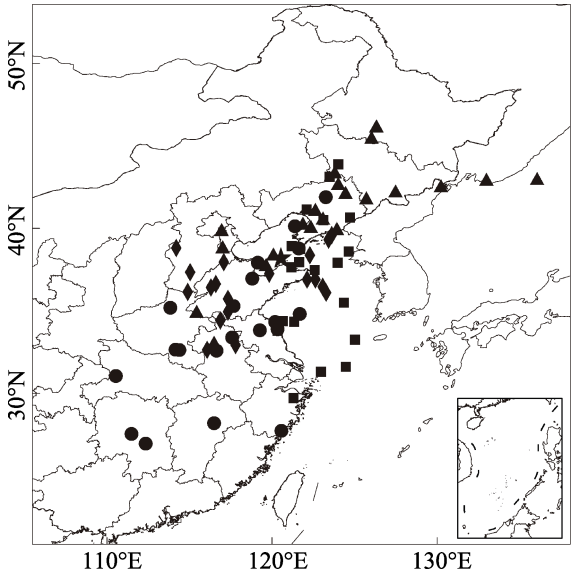

图 6　9 月 1-20 日长岛 3 代粘虫回迁第 5 晚落点
Fig. 6　The fifth night endpoint of the forward trajectories of armyworm return migration from Changdao during 1st-20th September

菱形：2010、圆形：2011、正方形：2012、三角形：2013。
Rhombus: 2010; Circle: 2011; Square: 2012; Triangle: 2013.

2011 和 2012 年 9 月粘虫均能有效回迁，特别是 2011 年，回迁至 30°N 以南的比例达到 20%，这是 2012 年粘虫在我国罕见暴发的重要基础。虽然 2012 年 9 月的 3 代回迁几率低于 2011 年 9 月，但是由于 2012 年北方 3 代粘虫的基数极大，远远高于 2011 年乃至常年同期水平，所以 2012 年顺利回迁的 3 代粘虫可能远大于 2011 年，因此 2013 年粘虫一开始便来势汹汹，1 代、2 代的发生情况高于 2012 年。2012 年和 2013 年前期的气候条件是相似的，同样的温热多雨，区别出现在 8 月，2013 年正值发育期的 3 代粘虫遭遇了持续性的异常高温天气，东北、华北、西北大部平均气温比常年偏高 2-4 ℃，多地气温极端日

最高温超过 40 ℃（邹海波等，2015；杨涵洧和封林国，2016）。35 ℃以上高温直接对粘虫的卵、蛹有完全致死作用（江幸福等，1998），高温天气遏制了 2013 年 3 代粘虫的继续为害（刘杰等，2015）。

长岛是位于渤海中的海岛，其上的粘虫均属迁飞过境，故长岛是粘虫北迁南回的重要通道（付小伟，2015；姜玉英，2016）。而且冷高压的位置通常处在长岛的西侧，此地回迁风场没有华北和东北那般严峻，因此长岛的模拟回迁量显然会比东北、华北地区高，因此选择此处作为回迁轨迹的起点。但由于现阶段国内尚未对 3 代、4 代或者越冬代粘虫进行系统监测，本文仅能利用长岛 3 代粘虫的迁飞盛期来进行轨迹分析的模拟工作，本结果尚不足以完全代表北方种群。尽管如此，本研究探讨了粘虫在我国东部的秋季迁飞过程，阐释了粘虫在我国东部地区的迁飞循环，为将来对东亚季风与粘虫迁飞的关系进行系统研究奠定了重要基础。同时，上述研究结果表明，冷高压的存在是我国北方迁飞场 Pied Piper 效应的根本原因，证明了秋季回迁过程在粘虫跨年际预测中的实际意义。

还有很多疑问有待深入研究。3 代粘虫的回迁虫源具体分布如何？回迁虫源又能为来年粘虫暴发提供多大的助力？冷高压年际间的差异会对回迁过程造成何种影响？我们在完善粘虫迁飞格局的基础上，需要的是一个尽可能简单而有效的预测因子，而 9 月冷高压中心的位置完全可以作为粘虫发生的早期预警指标。当然，这还亟待进一步的深度研究和多年验证。

参考文献（**References**）

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.

Chen RL, 1990. Migratory patterns of oriental armyworm// Lin CS (ed.). Physiological Ecology of Oriental Armyworm. Beijing: Peking University Press. 322–335. [陈瑞鹿. 粘虫迁飞的模式// 林昌善, 粘虫生理生态学. 北京: 北京大学出版社. 322–335.]

Chen RL, Sun YJ, Wang SY, Zhai BP, Bao XY, 1995. Migration of the oriental armyworm, *Mythimna separata* in East Asia in relation to weather and climate. I. Northeastern China // Drake VA, Gatehouse AG (eds.). Insect Migration: Tracking Resources through Space and Time. Cambridge: Cambridge University Press. 93–104.

Chen SD, Hu BH, 2003. Fifty Years of Plant Protection in China. Beijing: China Agricultural Press. 288–313. [陈生斗, 胡伯海, 2003. 中国植物保护五十年. 北京: 中国农业出版社. 288–313.]

Ding YH, Wang ZY, Song YF, Zhang J, 2008. The unprecedented freezing disaster in January 2008 in Southern China and its possible association with the global warming. *Acta Meteor Sinica*, 22(4): 538–558.

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.]

Guo QY, 1994. Relationship between the variations of east asian winter monsoon and temperature anomalies China. *Journal of Applied Meteorological Science*, 5(2): 218–225. [郭其蕴, 1994. 东亚冬季风的变化与中国气温异常的关系. 应用气象学报, 5(2) : 218–225.]

Hu BH, Lin CS, 1983. Experiments on the flight activity of the oriental armyworm moths, *Mythimna separata* (Walker). *Acta Ecologica Sinica*, 3(4): 367–373. [胡伯海, 林昌善, 1983. 粘虫迁飞模拟试验. 生态学报, 3(4): 367–373.]

Hu G, Wu QL, Wu XW, Jiang YY, Zeng J, Zhai BP, 2014a. Outbreak mechanism of second generation armyworms in northeastern China: A case study in 1978. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 51(4): 927–942. [胡高, 吴秋琳, 武向文, 姜玉英, 曾娟, 翟保平, 2014a. 东北二代粘虫大发生机制: 1978 年个例分析. 应用昆虫学报, 51(4): 927–942.]

Hu G, Wu QL, Wu XW, Jiang YY, Zeng J, Zhai BP, 2014b. 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, 2014b. 东北二代粘虫大发生机制: 1980 年个例分析. 应用昆虫学报, 51(4): 943–957.]

Huang RH, Chen JL, Huang G, 2007. Characteristics and variations of the East Asian monsoon system and its impacts on climate disasters in China. *Advances in Atmospheric Sciences*, 24(2): 993–1023.

Jiang XF, Liu YQ, Luo LZ, Hu Y, 1998. Effects of high temperature on the immature stages of the oriental armyworm *Mythimna separata* Walker. *Journal of Beijing Agricultural College*, 13(2): 20–26. [江幸福, 刘悦秋, 罗礼智, 胡毅, 1998. 高温对粘虫未成熟期生长发育的影响. 北京农学院学报, 13(2): 20–26.]

Jiang YY, Li CG, Zeng J, Liu J, 2014. Population dynamics of the armyworms 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.]

Jiang YY, Liu J, Zeng J, 2016. Using vertical-pointing searchlight-traps to monitor population dynamics of the armyworm *Mythimna separate* (Walker) in China. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 53(1): 191–199. [姜玉英, 刘杰, 曾娟, 2016. 高空测报灯监测粘虫区域性发生动态规律探索.

应用昆虫学报, 53(1): 191–199.]

Li GB, 1993. General situation and main progress of research on armyworm 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 GB, Wang HX, Hu WX, 1964. Route of the seasonal migration of the oriental armyworm moth in the eastern part of China as indicated by a three-year result of releasing and recapturing of marked moths. *Journal of Plant Protection*, 3(2): 101–110. [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): 101–110.]

Lin CS, Sun JR, Chen RL, Zhang ZB, 1963. Study on the regularity of the outbreak of the oriental armyworm, *Leucania separata* Walker. I. The early spring migration of the oriental armyworm moths and its relation to winds. *Acta Entomologica Sinica*, 12(3): 243–261. [林昌善, 孙金如, 陈瑞鹿, 张宗炳, 1963. 粘虫(*Leucania separata* Walker)发生规律的研究 I. 东北春季粘虫发生与风的关系. 昆虫学报, 12(3): 243–261.]

Lin CS, Xia ZX, 1963. Study on the regularity of the outbreak of the oriental armyworm, *Leucania separata* Walker. III. A discussion of the relationship of migratory habit of the oriental armyworm and the concurrent air movement and of its possible mode of migration. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, (3): 291–308. [林昌善, 夏曾铣, 1963. 粘虫发生规律的研究 III. 粘虫 (*Leucania separata* Walker) 蛾迁飞与气流场的关系及其运行可能形式的探讨. 北京大学学报(自然科学版), (3): 291–308.]

Lin CS, Zhang ZB, 1964. Study on the regularity of the outbreak of the oriental armyworm, *Leucania separata* Walker. V. A model for seasonal long-distance migration of the oriental armyworm. *Journal of Plant Protection*, 3(2): 93−100. [林昌善, 张宗炳, 1964. 粘虫发生规律的研究 V. 粘虫季节性远距离迁飞的一个模式. 植物保护学报, 3(2): 93−100.]

Lin CS, 1990. The Physiology and Ecology of the Oriental Armyworm. Beijing: Peking University Press. 1–52. [林昌善, 1990. 粘虫生理生态学. 北京: 北京大学出版社. 1–52.]

Lu F, Zhai BP, Hu G, 2013. Trajectory analysis methods for insect migration research. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 50(3): 853–862. [芦芳, 翟保平, 胡高, 2013. 昆虫迁飞研究中的轨迹分析方法. 应用昆虫学报, 50(3): 853–862.]

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.]

Pan L, 2009. Pied Piper effect of the migration arena in East Asia and intermittent outbreak mechanisms of the third generation armyworm in Northeastern China. Master dissertation. Nanjing Agricultural University. [潘蕾, 2009. 东亚迁飞场的 Pied Piper 效应与我国 3 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). *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.]

Rabb RL, Stinner RE, 1979. The role insect dispersal and migration in population processes // Vaughn CR, Wolf W, Klassen W (eds.). Radar, Insect Population Ecology, and Pest Management. . Wallops Island : NASA, NASA Conference Publication (no. 2070). 248.

Ren GC, 1993. The relationship between the establishment of Ural blocking pattern and its downstream Asia area and the variation of high in December. *Scientia Atmospher Sinica*, 17(6): 713–720. [任广成, 1993. 12 月乌拉尔山阻塞形势的建立与亚洲地区大气环流及蒙古高压强度变化的关系. 大气科学, 17(6): 713–720.]

Sun CH, Ren FM, Zhou B, Gong ZQ, Zuo JQ, Guo YJ, 2012. Features and possible causes for the low temperature in winter 2011/2012. *Meteorologica Monthly*, 38(7): 884–889. [孙丞虎, 任福民, 周兵, 龚志强, 左金清, 郭艳君, 2012. 2011/2012 年冬季我国异常低温特征及可能成因分析. 气象, 38(7): 884–889.]

Wang YF, Li Y, Li PY, Liu Y, 2008. The large scale circulation of the snow disaster in China in the beginning of 2008. *Acta Meteorologica Sinica*, 66(5): 826–835.

Wu XG, 1964. Research on the oriental armyworm in south China. Ⅵ. Studied on the major source areas in outbreak years discussed with Wu Zongrong. *Chinese Bulletin of Entomology*, 8(5): 230–239. [邬祥光, 1964. 南方粘虫之研究Ⅵ. 再论大发生主要虫口来源——兼与吴荣宗同志商榷. 昆虫知识, 8(5): 230–239.]

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.]

Yang HW, Feng LG, 2016. Diagnostic analyses of characteristics and causes of regional and persistent high temperature event in China. *Plateau Meteorology*, 35(2): 484–494. [杨涵洧, 封国林, 2016. 2013 年盛夏中国持续性高温事件诊断分析. 高原气象, 35(2), 484–494.]

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.]

Zhai BP, 2004. Computing the day length for programming insect behavior. *Chinese Bulletin of Entomology*, 41(2): 178–184. [翟保平, 2004. 昆虫行为研究中日长的计算. 昆虫知识, 41(2): 178–184.]

Zhai BP, 2005. What have we seen by entomological radar ? *Chinese Bulletin of Entomology*, 42(2): 217–226. [翟保平, 2005. 昆虫雷达让我们看到了什么？昆虫知识, 42(2): 217–226.]

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 3 代黏虫大发生原因初步分析. 植物保护, 38(5): 1–8.]

Zou HB, Wu SS, Shan JS, Wang SH, 2015. Diagnostic study of the severe high temperature event over Mid-East China in 2013 summer. *Acta Meteorologica Sinica*, 73(3): 481–495. [邹海波, 吴珊珊, 单九生, 王四化, 2015. 2013 年盛夏中国中东部高温天气的成因分析. 气象学报, 73(3): 481–495.]