

草地螟 (*Loxostege sticticalis*) 一次迁飞过程的数值模拟

陈 晓¹, 翟保平^{1,*}, 郝丽萍², 薛 玉³, 陈 阔⁴, 于成玲⁵

(1. 南京农业大学昆虫学系, 农业部病虫害监测与治理重点开放实验室, 南京 210095; 2. 山西省植保总站, 太原 030001;

3. 河北省植保总站, 石家庄 050011; 4. 大同市植保站, 大同 037008; 5. 丰宁县植保站, 丰宁 068350)

摘要: 利用 PSU/NCAR 的中尺度非静力数值预报模式 MM5, 对 2004 年 5 月 24 ~ 25 日河北坝上地区出现的一次草地螟迁飞过程进行了数值模拟, 并利用模式输出的较高时空分辨率的结果, 就有关物理量及其对迁飞过程的作用进行了诊断分析。结果表明: (1) 5 月 24 日傍晚草地螟越冬区种群的大规模外迁与冷锋过境有密切的关系; (2) 迁出种群大部分向东北迁飞, 迁飞途中发生迫降, 主降区位于丰宁等地。此次草地螟迁飞种群的中途迫降是强下沉气流造成的, 与温度、降水无关。在草地螟飞行高度上, 下沉气流区域中心的垂直速度在 30cm/s 以上, 发生范围与草地螟主降区相吻合; (3) 下沉气流的出现与高原地形有着密切的关系。阴山山脉和坝上高原使冷锋发生变形、近地面水平流场发生不规则扰动, 进而出现了异常的对流运动。

关键词: 草地螟; 迁飞; 中尺度模式

文章编号: 1000-0933(2008)10-5104-09 中图分类号: Q144, Q968, S433.4 文献标识码: A

Numerical simulation of the migration process of the meadow moth, *Loxostege sticticalis* L. (Lepidoptera: Pyralidae) in the atmosphere: a case study for northern China

CHEN Xiao¹, ZHAI Bao-Ping^{1,*}, HAO Li-Ping², XUE Yu³, CHEN Kuo⁴, YU Cheng-Ling⁵

1 Key Laboratory of Monitoring and Management of Plant Diseases and Insects, Ministry of Agriculture of China; Department of Entomology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China

2 Plant Protection Station of Shanxi Province, Taiyuan 030001, China

3 Plant Protection Station of Hebei Province, Shijiazhuang 050011, China

4 Plant Protection Station of Datong City, Datong 037008, China

5 Plant Protection Station of Fengning County, Fengning 068350, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(10): 5104 ~ 5112.

Abstract: The meadow moth, *Loxostege sticticalis* (L.) is an important migratory pest in North China. It makes its long range migrations by flying on several consecutive nights. Radar observations have shown that the adults fly throughout the night and that both take-off and landing process are active rather than passive processes. But as with other aerial migrants, their migrations will be significantly influenced by weather conditions. Some synoptic systems may facilitate massive takeoff, concentration in the atmosphere, and involuntary landing to form an outbreak population. Previous researches have

基金项目: 国家 973 资助项目 (2006CB102007), 国家“十一五”科技支撑计划资助项目 (2006BAD08A01)

收稿日期: 2007-05-12; **修订日期:** 2007-12-13

作者简介: 陈晓 (1975 ~), 男, 哈尔滨人, 博士生, 主要从事昆虫生态及预测预报。E-mail: 2004202021@njau.edu.cn

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

致谢: 运行中尺度气象数值预报模式 MM5 的过程中, 得到了青岛海洋大学高山红博士的热心帮助, 特此致谢。

Foundation item: The project was financially supported by National 973 Project (No. 2006CB102007); National Key Technology R&D Program (No. 2006BAD08A01)

Received date: 2007-05-12; **Accepted date:** 2007-12-13

Biography: CHEN Xiao, Ph. D. candidate, mainly engaged in entomological ecology and pest forecasting. E-mail: 2004202021@njau.edu.cn

confirmed that synoptic systems affect meadow-moth migration, but we still need to know more details.

In this paper, a migration that occurred over the plateau in northern Hebei province during 24 – 25 May 2004 is analyzed. A set of atmospheric dynamical fields were simulated by using the PSU-NCAR mesoscale non-hydrostatic numerical forecast model MM5. The high spatial and temporal resolution results from the model output were used to diagnose some physical variables and their effects on the migrating process.

First, we analyzed the migration dynamics. A large proportion of the population of meadow moths in the permanent source areas emigrated on the night of May 24; most of them flew northeast and landed involuntarily in the northern part of Fengning county.

Second, we show that the massive takeoff of the meadow moth on the night of May 24 was associated with the passage of a cold front. The involuntary landing was caused by subsidence rather than precipitation or low temperature. Subsidence exceeded 30 cm/s at the flying level and the area of maximum subsidence speed coincided exactly with the landing location.

Finally, we analyzed the motion of the airflow in three dimensions to determine the cause of this exceptional subsidence. It appears to have arisen from the obstruction effect of the plateau's topography to the cold front and the airflow near the ground.

Key Words: *Loxostege sticticalis*; migration; mesoscale model

草地螟 *Loxostege sticticalis* (L.) 是北方农牧区的一种重要的暴发性害虫。建国以来曾出现 3 个暴发周期^[1], 1997 年以后连续多年大发生, 给农牧业生产造成严重损失。

草地螟具有远距离迁飞的习性, 起飞和降落作为其迁飞过程中最重要的环节, 直接影响到迁入事件的时空分布。草地螟是一种夜行蛾类, 通过连续数夜的飞行实现远距离迁移。据吉林植保所雷达观测表明, 越冬区的成虫多数是在日落前后起飞^[2], 在迁飞盛期整夜可发现迁飞的回波; 而迁入区则往往在凌晨出现高密度迁飞群体, 飞越时间一直持续到天亮^[3]。可见, 草地螟在迁飞过程中做的是整夜飞行, 起降过程具有明显的主动性。但作为大气层中的生物流, 气象条件对其迁飞行为有着重要的影响。某些天气系统会促使虫源区的种群会大量起飞, 空中迁飞种群出现集聚进而中途迫降, 致使迁入区形成数量巨大的迁入峰。杨素钦等统计了 1982 ~ 1983 年我国草地螟蛾峰情况后指出, 北方气旋和锋面系统是影响草地螟远距离北迁和降落的重要天气系统^[4]。很多测报站都曾观测到草地螟伴随着降雨大量迁入的现象, 这也是因为降雨使迁飞种群发生了迫降。

然而, 目前关于草地螟迁飞与气象条件关系, 还仅限于定性的认识, 尚难满足生产上对害虫突发的预报要求。为此, 本研究应用中尺度气象动力数值预报模式 MM5, 对 2004 年 5 月下旬“草地螟发生基地”越冬种群的一次大规模外迁过程进行分析, 以探索草地螟起降机制, 为进一步揭示草地螟迁飞规律和提高测报水平提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 资料来源

虫情数据: 收集了 2003 年秋季北方各省草地螟越冬虫茧分布资料, 以及 2004 年各病虫测报站草地螟灯下诱蛾、田间步测数据。

气象资料: 模式背景场资料采用美国国家环境预报中心(NCEP)的 FNL 分析数据(水平分辨率 $1^\circ \times 1^\circ$, 时间间隔为 6h)。实测资料采用中国气象局 9210 工程下发的每隔 12h 的常规探空资料、每隔 3h 的地面观测资料(本实验室卫星数据接收处理系统 PCVSATTM 实时接收)。

地图资料: 中国省级行政区图(1:4000000)从国家基础地理信息中心(<http://nfgis.nsd.gov.cn>)下载。

1.2 MM5 模式简介

MM5v3.7 是美国宾夕法尼亚州立大学(PSU)和美国国家大气研究中心(NCAR)联合研制的一个适合于

有限区域的、多功能的、高分辨率的中尺度非静力气象数值预报模式。MM5 是目前预报准确率最高、在气象领域应用最广泛的中尺度预报模式之一,在我国已开始普遍应用于气象系统的中短期天气预报和区域气候数值模拟。模式中包容海陆分布、地形、植被、海温、气象要素等方面的信息,兼顾大、中、小不同尺度的天气系统和各种各样的环境背景,对边界层物理过程有较好的处理方案。本研究利用 MM5 模式对 2004 年 5 月下旬草地螟迁飞和降落期间的大气动力场进行数值模拟。

1.3 数值模拟方案设计

模拟区域采用两重双向作用嵌套网格,水平分辨率分别为 45km 和 15km,格点数分别为 56×66 , 133×163 。粗网格中心区域位于 118°E , 45°N 。模式顶层气压取 100 hPa,垂直方向分为 34 个不等距 σ 层。粗细网格均选用 Grell 积云对流参数化方案,Reisner 霰显式水汽方案、MRF 边界层参数化方案、RRTM 长波方案以及 Noah LSM 陆面过程。粗细网格分别采用 USGA 全球 5min、2min 地形和地表分类资料。

采用 FNL 分析数据(水平分辨率 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$,时间间隔为 6h)作为背景场,再加入每隔 12h 的常规探空资料、每隔 3h 的地面观测资料对背景场再分析后,形成模式的初值场及粗网格区域的侧边界条件。初始时间为每日 20:00(北京时,下同),每次积分时间为 24h,积分步长 135s。为使模拟尽量准确,整个模拟过程对粗网格进行了四维资料同化(FDDA)。每 1 h 输出 1 次模拟结果。模式运行结束后,提取水平流场、垂直速度、温度、降水量等物理量并就其对迁飞过程的作用进行了诊断分析。

1.4 轨迹分析方法及主要参数的选择

轨迹分析方法目前已广泛应用于污染物、沙尘暴、病菌、迁飞性害虫等远距离传播、扩散的研究。本研究采用天气学诊断分析中计算气块运行轨迹的方法^[5],利用 MM5 输出风场来计算草地螟迁飞轨迹。该方法是用来计算空气块三维轨迹的,考虑到草地螟对风温场具有较强的选择性而并非完全被动地随风扩散,所以本研究只计算草地螟飞行高度所在平面上的二维轨迹。

雷达观测表明,高海拔越冬区的草地螟种群是在距地面 400m 以下的高度上迁飞,而当草地螟迁往海拔高度较低的东北平原区时,空中种群往往在距地面 200 ~ 650m 高度上成层^[6]。本模式方案中 σ 坐标值为 0.945 的高度层(以下简称为 sig945 层)距地面的高度为 400 m 左右,与草地螟实际飞行高度基本一致,因此本文主要利用 sig945 层上的各项物理量来进行轨迹分析以及主要气象要素的分析。

雷达观测表明成虫迁飞方向和风向基本一致^[2],因此程序中不考虑昆虫定向因素,而是将风速与草地螟自身飞行速度相加,作为迹点瞬时实际速度。据吊飞结果表明,草地螟成虫飞行速度 12h 全程平均 $2.5 \sim 4.6\text{km/h}$ ^[7],这里选取自主飞行速度 1.0m/s 。

将日出日落时刻确定为草地螟起降的时间。程序中对此采取了动态处理,即根据迹点所在位置和日期来计算实际日出、日落时刻,计算方法见文献^[8]。

程序以 Fortran 语言编写,每间隔 20min 输出一个迹点,迹点数据以文本形式存储,在气象图形软件 GRADS 中输出分析结果。

1.5 成虫诱测方法及雌蛾卵巢发育级别划分(摘自《农区草地螟预测预报技术规范》)

灯光诱测。在常年适于成虫发生的场所,设置 1 台多功能自动虫情测报灯(或 20 瓦黑光灯),要求其四周没有高大建筑物或树木遮挡。灯管下端与地表面垂直距离为 1.5 m。诱蛾时间从 4 月下旬开始,到 9 月 30 日结束。定时检查诱到的成虫。

百步惊蛾。在各世代成虫发生期,选择有代表性的农田、草地和林地,每种类型各选择(2 ~ 3)块田进行调查。在成虫发生期每天调查 1 次,每次调查均在 9:00 ~ 10:00 进行。每块田随机选点正常步幅走百步,边走边目测惊起的蛾量。

雌蛾卵巢发育进度分为 4 个级别。1 级:腹内有大量脂肪体,卵巢管呈透明状或卵黄沉积在 $1/3$ 以下;2 级:腹内有较多脂肪体,卵巢管卵黄沉积在 $1/3$ 以上或卵黄沉积已完成;3 级:腹内脂肪体明显减少,卵巢管内有大量成熟待产的卵粒或部分卵已产出;4 级:腹内脂肪体很少,卵巢管已萎缩或仅有少量遗卵。

2 结果与分析

2.1 虫情消长动态

2.1.1 前期虫源背景

由于2、3代幼虫大发生,我国2003年秋季草地螟越冬面积大、基数高,各省越冬虫茧平均密度为28头/m²。华北地区越冬虫茧密度最高的区域位于山西省大同市和朔州市,平均密度为40~50头/m²。东北地区集中越冬区出现在黑龙江省齐齐哈尔市,平均密度为64.4头/m²[9]。

2004年5月,伴随着两次高温天气的出现,华北地区草地螟越冬区内出现了2次羽化高峰。第1次羽化高峰为5月8~11日,发生区域主要集中在山西、陕西、内蒙古接壤区域。第2次羽化高峰出现在5月18~24日,发生区域范围广,包括山西大同市、忻州市、吕梁地区,内蒙古乌兰察布市、鄂尔多斯市及河北张家口市南部地区(表1)。重发区位于大同市,据阳高县5月23~24日调查,一般田间百步惊蛾在5000头左右,部分地块高达20000头,大同市市区内亦出现大量成虫,百步惊蛾15000头左右。

表1 2004年春季华北地区草地螟羽化高峰期
Table 1 The peaks of eclosion of the meadow moth in North China in the spring of 2004

高峰期 Peak period	地点 Location	最高蛾量(头/百步) Maximal number of moths ^①
5月8~11日 8~11 May	内蒙古自治区达拉特旗 Dalateqi, Inner Mongolia	1 000
	内蒙古自治区清水河县 Qingshuihe, Inner Mongolia	10 000
	内蒙古自治区凉城县 Liangcheng, Inner Mongolia	300
	陕西省府谷县 Fugu, Shanxi	3 500
	山西省离石县 Lishi, Shanxi	1 000
	山西省偏关县、保德县 Pianguan and Baode, Shanxi	5 000
5月18~24日 18~24 May	内蒙古自治区乌兰察布市 Wulanchabu, Inner Mongolia	1 500
	内蒙古自治区鄂尔多斯市 Erdos, Inner Mongolia	4 200
	山西省大同市 Datong, Shanxi	20 000
	山西省忻州市 Xinzhou, Shanxi	5 000~10 000
	山西省离石县 Lishi, Shanxi	1 000

① Number of the flying moths within the distance by 100 step-walking in the field

2.1.2 迁飞过程

5月22日,在850hPa天气图上,贝加尔湖上空有一浅槽出现,23日发展为蒙古低涡,而后快速东移。24日20时地面冷锋锋线位于大兴安岭一线,东北平原地区以及华北东部地区出现了西南低空急流。由于冷锋

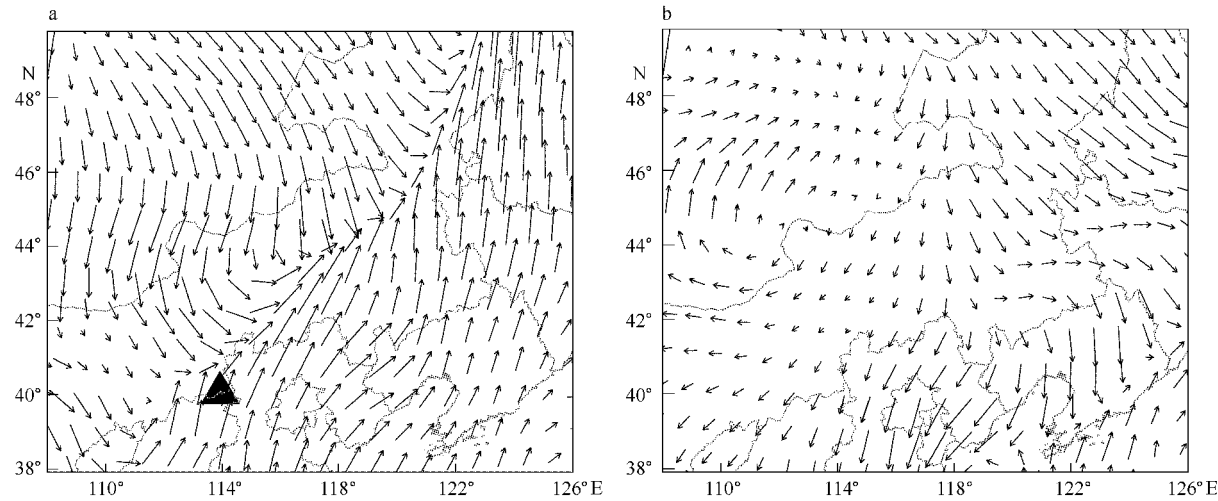


图1 2004年5月24日20:00(a)及5月25日20:00(b) sig945高度风场
Fig. 1 Wind field on the sig945 level at 20:00 on 24 May 2004 (a) and 25 May 2004 (b)
图中标出了迁出区位置(▲) The emigration areas are marked (▲)

移动速度很快,西南低空急流仅持续了一夜,25 日夜间随着低压中心移出境外,华北地区转为东北风(图 1)。

5 月 24 日夜间,大同市和乌兰察布市前山地区的草地螟成虫向外地大规模迁出,5 月 25 日田间成虫种群密度在急剧回落,成虫密度最高的阳高县田间仅能查到零星成虫。而黑龙江省拜泉县、林甸县、泰来县,吉林镇赉县、洮南县、内蒙古开鲁县、辽宁彰武县、河北围场县、丰宁县、北京延庆县等地则在 25 日出现了不同程度的迁入。轨迹分析表明,5 月 24 日傍晚从大同等地迁出的草地螟族群应于 25 日早晨降落在赤峰市南部,26 日夜间再转迁至河北南部地区(图 2)。然而实际观测表明,赤峰中南部地区和河北南部在 5 月 25~26 日均未出现迁入峰。为了明确这批蛾子的去向,考察了轨迹沿途测报站观测情况。

康保县 5 月 24 日夜间出现灯下诱蛾高峰,单灯诱蛾 1 768 头,而 24~25 日在田间仅能观测到零星成虫,因此 24 日夜间的灯下高峰是迁飞种群过境时形成的。丰宁县 5 月 24 日夜间出现灯下诱蛾高峰,诱蛾 3 685 头,卵巢发育 1 级 25%、2 级 65%、3 级 5%、4 级 5%,说明虫源为异地迁入。5 月 25 日田间蛾量突增,坝上百步惊蛾平均达到 2 000 头,最高 3 000 头,坝下草滩百步惊蛾 1 800 头,农田 400~800 头,数量为历史同期之最。围场县在 5 月 25 日也出现了迁入,但数量很少,农田中百步惊蛾 20 头左右。

可见,此次迁飞的主要迁出区位于乌兰察布市南部和大同市,主降区位于丰宁县坝上地区,副降区位于丰宁县坝下地区(锡林郭勒盟南部的多伦县等地应该也同属迁入区,但由于当地为牧区,不对草地螟进行监测,因此无法证实)。轨迹分析表明,空中迁飞种群于 24 日凌晨 1:30 左右抵达丰宁的坝上地区,在此发生了集中降落。

2.2 越冬区大规模外迁的条件

陈瑞鹿等提出草地螟起飞盛期条件为:“越冬代羽化盛期后,当地存留较多的蛾群,出现南或西南风,气温上升到 20℃ 以上”^[2]。从大同等地此次外迁事件来看,5 月 22 日当地田间已经形成高密度的草地螟种群数量,具备外迁的虫源条件。5 月 20 日开始,气温逐渐升高,5 月 22 日 20 时地面气温达到 20℃,23~24 日均在 25℃ 以上(图 3)。地面风场逐 6h 演变显示,23 日 20:00~24 日 20:00 都是西南或偏南风(图 4)。可见,迁出区在 5 月 23~24 日,在地面温度、风向、种群密度等方面都符合草地螟起飞盛期的条件。

然而草地螟仅在 5 月 24 日出现大规模外迁,说明还有其它因素影响到其集中起飞。地面相对湿度在 5 月 22~24 日之间持续偏低,都有利于外迁。空气垂直速度对起飞的影响也不大,5 月 23~24 日黄昏时分迁出区上空的大气层结都很稳定,上升或下降气流微弱,垂直速度只有 $\pm 3\text{cm/s}$ 左右,这对蛾类来说是微不足道的(图略)。唯一不同的条件是 5 月 24 日夜间出现冷锋过境。冷锋过境之前,地面气温升高(大同站达到 26℃,图 3)、西南风风速明显增强达到(7m/s 以上,图

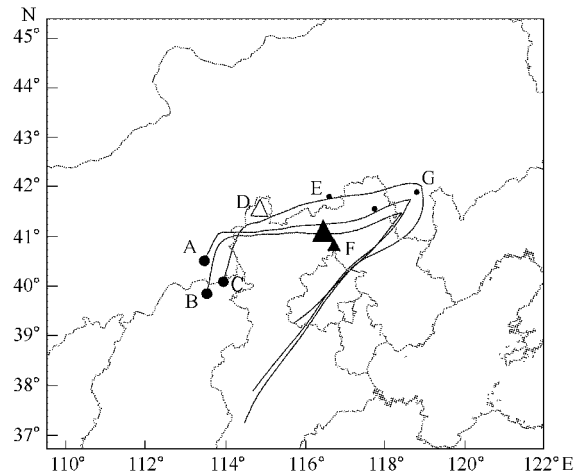


图 2 2004 年 5 月 24 日草地螟迁出种群顺推轨迹和 5 月 25 日迁入区(▲)

Fig. 2 Forward trajectories of the migration of meadow moths on 24 May 2004 and immigration locations(▲) on 25 May 2004

A 察右前旗 Chayouqianqi; B 大同 Datong; C 阳高 Yanggao; D 康保 Kangbao; E 多伦 Duolun; F 丰宁 Fengning; G 赤峰 Chifeng

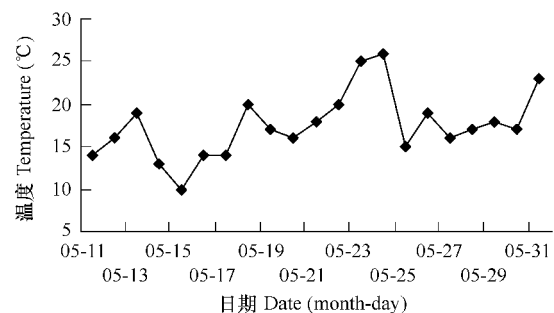


图 3 大同 2004 年 5 月 11~31 日 20:00 地面气温(℃)

Fig. 3 The surface temperature at 20: 00 BST during 11~31 May 2004 in Datong (℃)

4)、气压下降(图 5)。因此,5 月 24 日夜间接同等地草地螟种群的大规模迁出过程与冷锋过境密切相关,冷锋过境时的这种地面气象要素的一系列变化为本次大规模外迁提供了相应的环境信号。

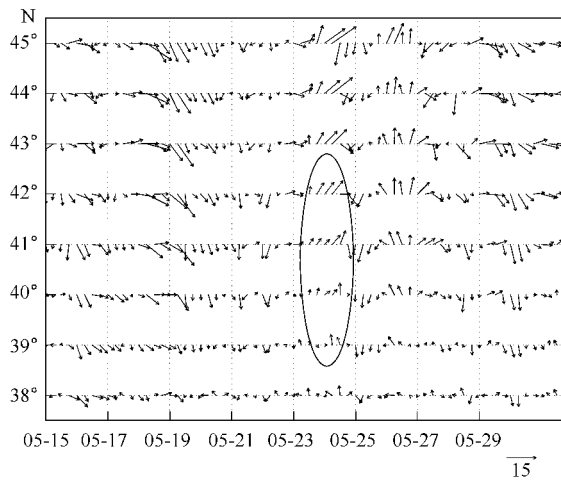


图 4 2004 年 5 月 15 ~ 31 日沿 114°E 的 10m 风场时间-纬度剖面图

Fig. 4 Time-latitude cross section of wind field on 10 m along 114°E during 15 ~ 31 May 2004

迁出区集中在 40° ~ 41°N, 椭圆区域为成虫盛发期间偏南风的分布。Emigration area locates between 40° ~ 41°N; The space-temporal distribution of south wind during the adult peak is marked by an ellipse

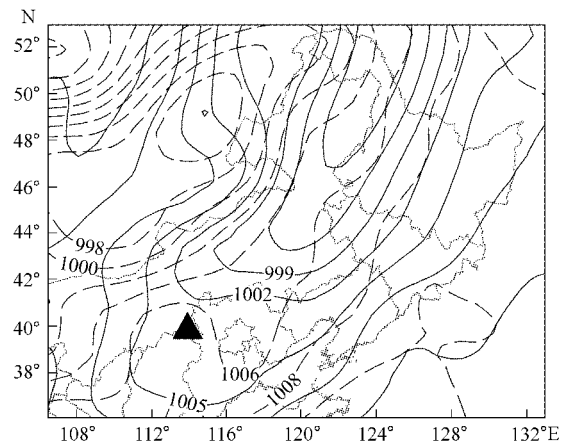


图 5 2004 年 5 月 23 ~ 24 日 20 时海平面气压场(虚线为 23 日, 实线为 24 日)及草地螟主要迁出区(▲)

Fig. 5 Sea level pressure at 20:00 BST on 23 May 2004 (dash line) and 24 May 2004 (real line) and the main emigration area (▲) of meadow moths

2.3 迫降事件的触发因素

2.3.1 降水

降水是导致迁飞昆虫降落的重要因素。5 月 24 日夜间接,随着冷锋过境,在冷暖气流交汇的地区出现了大范围降水,其中山西北部地区和内蒙古乌兰察布市为中到大雨,河北张家口市和锡林郭勒盟南部为小雨。图 6 是 24 日 20:00 至 25 日 8:00 的 12h 累积降雨量分布,可见草地螟主降区并不在雨区的范围内。

MM5 模拟出了雨区的移动过程。结果表明,24 日夜间接雨区随着天气系统自西向东移动,当草地螟在丰宁发生迫降时,雨区位于山西北部 and 内蒙古乌兰察布市,而张家口市只有零星降水,草地螟主降区远离雨区(图略)。同时,将草地螟迁飞种群在不同时刻所处位置与 MM5 模拟的逐小时降水量进行对比,可以看到草地螟在迁出及降落过程中均未遭遇降水过程。因此,此次迫降事件与降水无关。

2.3.2 温度

当温度下降而不适宜继续飞行时,迁飞昆虫的空中种群可能会出现迫降,但目前草地螟飞行的低温域值尚未见报道。根据对吉林省植保所在镇赉县的雷达观测结果分析显示,草地螟高密度空中种群出现时,其成层高度上最低温度在 14℃ 以下。从 5 月 25 日 2:00 sig945 层上温度场分布来看,主降区范围内的温度均在 16℃ 以上,不会对迁飞产生限制作用(图 7, a)。实际上,草地螟的主降区正位于河北坝上地区最高峰东猴

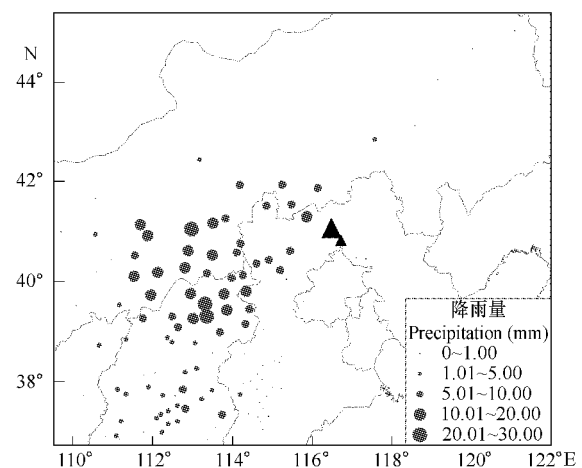


图 6 2004 年 5 月 24 日 20:00 ~ 25 日 8:00 的 12h 累积降水量分布(●)和 5 月 25 日草地螟迁入区(▲)位置

Fig. 6 The 12h accumulated precipitation from 20:00 BST 24 to 08:00 BST 25 May 2004 (●) and immigration locations (▲) of meadow moths on 25 May 2004

顶的东麓,随着地形下降,迁飞高度层的温度是不断上升的,因此此次迫降与温度的胁迫作用无关。

2.3.3 下沉气流

从垂直速度场的分布(图7,右)中可以看到,5月25日2:00 sig945高度上锡林郭勒盟南部和承德市西部存在下沉气流区。在丰宁县北部有一个下沉气流中心,与草地螟主降区相吻合。

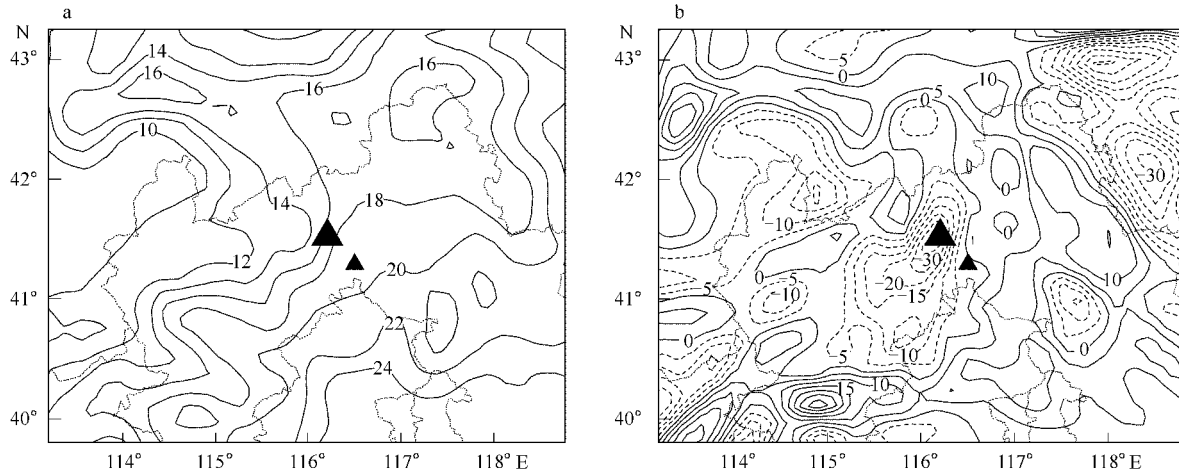


图7 2004年5月25日2:00 sig945层的温度场(a, °C)、垂直速度场(b, cm/s)和5月25日草地螟迁入区分布(▲)

Fig. 7 Temperature field (a, °C) and vertical speed field (b, cm/s) on the sig945 level at 2:00 BST on 24 May 2004 and immigration locations of meadow moths on 25 May 2004 (▲)

下沉气流中心位于116.3°E, 41.4°N。时间-高度剖面图显示,该地在24日夜间整夜均为下沉气流所控制,尤其是在大气边界层内,气流下沉速度在25日0:00时为15cm/s, 2:00达到30cm/s以上,这对草地螟降落非常有利(图8)。因此下沉气流是草地螟此次迫降事件的决定性因素。

2.3.4 流场的三维结构特征

草地螟是在冷锋过境前的偏南强气流中起飞并顺风飞行,冷锋前的气流是辐合上升的,但空中迁飞种群在飞行过程中却遭遇到了下沉气流而发生迫降。为了探明下沉气流出现的原因,对流场的三维结构特征进行了分析。

图9为沿41.3°N的纬向环流和垂直速度剖面。116.0°~116.5°E处的下沉气流对应着草地螟的主降区。在这一区域内地形海拔高度出现了迅速的下降。从这方面来看,下沉气流似乎是由背风坡的空气下沉作用引发的。不过,考察高空流场可以发现,这一区域内从地面到4000m以上的对流层中均为下沉气流,因此边界层内下沉气流,并非是地形下降而引起的,而是缘于对流层中上层空气强烈的下沉运动。

图10为沿116.3°E的经向环流和垂直速度剖面,显示了空气垂直运动的状态。该区域上空存在一个垂直环流圈,垂直环流圈的上升支位于40°~40.5°N,尽管其南北方向较狭窄,但上升运动极强,从近地层一直向上发展,最高可达到对流层中上部。下沉支位于41°~42.5°N,草地螟集中降落地点正位于下沉气流最强烈的区域。

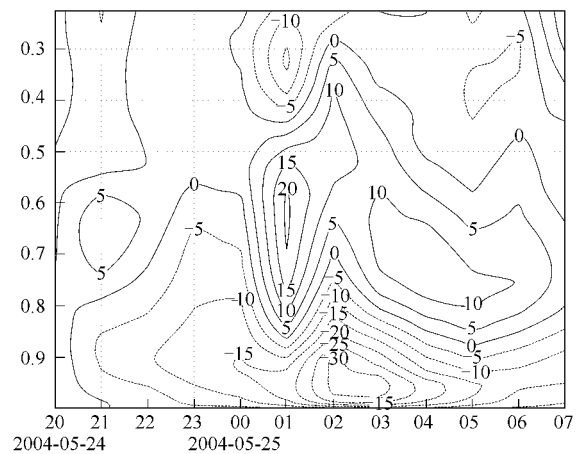


图8 2004年5月24日20:00~25日7:00下沉气流中心(116.3°E, 41.4°N)垂直气流速度的高度-时间剖面图

Fig. 8 Time-altitude cross section of vertical air speed on the central point of air subsidence area (116.3°E, 41.4°N) from 20:00 BST 24 May 2004 to 07:00 BST 25 May 2004

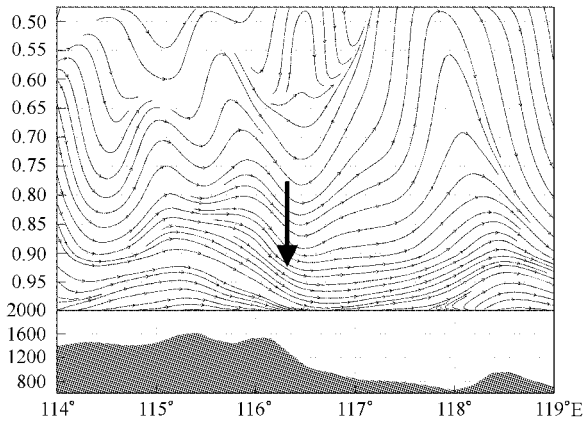


图9 2004年5月25日2:00沿41.3°N纬向垂直环流(矢量线, ω 扩大50倍, 箭头指示了下沉气流的位置)及地形(阴影部分)

Fig. 9 Latitudinal vertical circulation along 41.3°N at 2:00 BST on 25 May 2004 (vector line, ω has been amplified by a factor of 50, the arrow shows the subsiding airflow) and the topography (bottom, shaded)

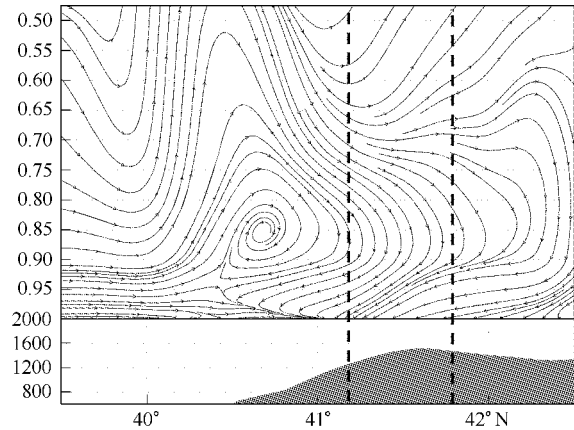


图10 2004年5月25日2:00沿116.3°E经向垂直环流(矢量线, ω 扩大50倍)及地形(阴影部分)

Fig. 10 Longitudinal vertical circulation along 116.3°E at 2:00 BST on 25 May 2004 (Vector lines, ω has been amplified by a factor of 50) and the topography (bottom, shaded)

虚线之间为草地螟降落区域,与下沉运动区吻合 The dash lines represent landing areas of meadow moths that coincided with the subsiding airflow

为了明确强对流天气出现的原因,进一步对水平流场进行了分析。根据天气学原理,地形阻碍作用对于近地面气流的走向和锋的移动都有重要影响,当锋遇到山脉阻挡,锋在山前就会产生变形、停滞或绕山移动^[10]。5月24日夜间冷锋过境时,华北北部阴山山脉、坝上高原对冷锋的阻碍作用和对气流走向的影响都非常明显,近地层水平流场在这一区域发生了不规则的扰动,进而在114°~116°E, 40.2°N范围内,出现了一个气流辐合区(图11)。从垂直速度 ω 分布中可以看到,这一区域的辐合上升运动很强烈,最大垂直速度达到30cm/s以上(图7, b)。气流强烈上升以后,向北运动,在41°~42.5°N下沉,形成一个经向垂直环流圈。从大同等地迁出的草地螟群途经这里时,遭遇此强下沉气流而发生迫降。

3 结论与讨论

3.1 草地螟越冬区种群的大规模外迁与冷锋过境有密切的关系。

本文分析了影响草地螟集中起飞的多种可能因素,结果显示5月24日傍晚草地螟越冬区种群的大规模外迁与冷锋过境有密切的关系。冷锋过境前,地面气象要素出现了一系列变化,为本次大规模外迁提供了相应的环境信号。

3.2 下沉气流是草地螟降落的大气动力之一。

2004年5月24日大同等地的草地螟迁出种群大部分向东北方向迁飞,途经丰宁等地时发生了迫降。分析表明,迫降事件与温度、降水等气象要素无关。下沉气流中心与草地螟主降区相吻合,因此此次迫降是由强下沉气流引发的。下沉气流的出现与高原地形有着密切的关系,阴山山脉和坝上高原使冷锋发生变形、近地面水平流场发生不规则扰动,进而出现了异常的对流运动。可见,草地螟的迁飞和降落是一种主动性和被动性相结合的过程,下沉气流是影响其降落的大气动力之一。

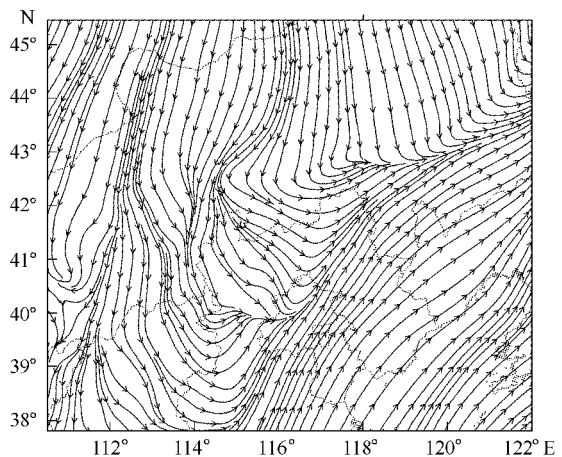


图11 2004年5月25日2:00 sig945层的水平流场

Fig. 11 Horizontal airflow field on the sig945 level at 2:00 BST of 25 May 2004

3.3 中尺度数值预报模式对于害虫迁飞规律的研究与预报具有重要意义。

要想全面提高迁飞性害虫的灾变预警能力,实现对降落区域、迁入量的精确预报,就必须掌握各种中小尺度天气系统、天气过程和界面过程的时空动态,并了解其对昆虫迁飞过程的有何程度的影响,这样才能形成具有实际意义的可操作的预警指标。中尺度数值预报模式以其时空分辨率高,对各种尺度天气过程反映全面,为这个目标的实现提供了有力的工具。

Reference:

- [1] Luo L Z, Li G B, Cao Y Z. The coming of the third period of break circle for the meadow moth in China. *Plant Protection*, 1996, 22 (6): 50 — 51.
- [2] Chen R L, Bao X Z, Wang S Y, *et al.* An observation on the migration of meadow moth by radar. *Acta Phytophylacica Sinica*, 1992, 19(2): 171 — 174.
- [3] Sun Y J, Gao Y B. The radar detection of airborne population and the forecast of field occurrence of armyworm and meadow moth. In: Li D M ed. *Entomology in China step to 21 century*. Beijing: China Sciencetech Press, 2000. 457 — 460.
- [4] Yang S Q, Ma G C. The discussion on migratory path of meadow moth. *Pest Forecasting*. Extra Edition, 1987, 1: 122 — 128.
- [5] Zhu Y Q, Liao D X. An investigation for computing three-dimensional trajectory. *Quarterly journal of applied meteorology*, 1992, 3 (3): 328 — 333.
- [6] Sun Y J, Gao Y B. The migratory activity of meadow moth *Loxostege sticticalis* in northern China. In: Guo Y Y ed. *Plant Protection Towards the 21st Century (Abstracts)*. Proceedings of the 15th international plant protection congress. Beijing: Foreign Language Press, 2004. 304.
- [7] Luo L Z, Li G B. Variation of the flight ability and behavior of *Loxostege sticticalis* adults at different ages. *Transaction of the Ecological Society of Chinese Youths*. In: Wan FH, Kang L eds. *Special issue on insect ecology*. Beijing: China Sciencetech Press, 1992. 303 — 308.
- [8] Zhai B P, Computing the day length for programming insect behavior. *Entomological knowledge*, 2004, 41(2): 178 — 184.
- [9] Wang C R, Chen J G, Song X D, *et al.* Analysis on characteristics and causes of meadow webworm, *Loxostege sticticalis*, in the third outbreak cycle in Heilongjiang. *Chinese Bulletin of Entomology*, 43(1): 98 — 104.
- [10] Liu Z L ed. *synoptic meteorology*. Beijing: China Meteorological Press, 1986. 190 — 191.

参考文献:

- [1] 罗礼智, 李光博, 曹雅忠. 草地螟第3个猖獗为害周期已经来临. *植物保护*. 1996, 22(5): 50 ~ 51.
- [2] 陈瑞鹿, 暴祥致, 王素云, 等. 草地螟迁飞活动的雷达观测. *植物保护学报*. 1992, 19(2): 171 ~ 174.
- [3] 孙雅杰, 高月波. 粘虫和草地螟空中迁飞种群的雷达监测与地面发生预报. 见: 李典谟主编. *走向21世纪的中国昆虫学*. 北京: 中国科学技术出版社. 2000. 457 ~ 460.
- [4] 杨素钦, 马桂椿. 草地螟迁飞路径的探讨. *病虫测报*. 1987, 增刊第1号: 122 ~ 128.
- [5] 朱艳秋, 廖洞贤. 三维空气质点轨迹的计算. *应用气象学报*. 1992, 3 (3): 328 ~ 333.
- [7] 罗礼智, 李光博. 草地螟不同蛾龄成虫飞行能力和行为的研究. 见: 万方浩和康乐主编. *昆虫生态研究*. 北京: 中国科学技术出版社. 1992. 303 ~ 308.
- [8] 翟保平. 昆虫行为研究中日长的计算. *昆虫知识*, 2004, 41(2): 178 ~ 184.
- [9] 王春荣, 陈继光, 宋显东, 等. 黑龙江省草地螟第三个暴发周期特点及成因分析. *昆虫知识*, 2006, 43 (1): 98 ~ 104.
- [10] 刘振隆主编. *天气学*. 北京: 气象出版社, 1986. 190 ~ 191.