

迁飞过程中昆虫的行为： 对风温场的适应与选择

翟保平 张孝羲

(南京农业大学植保系, 南京, 210014)

Q968.1

A

摘要: 本文综述了昆虫在迁飞过程中对大气物理环境的各种行为反应, 用边界层气象学的理论重新审视迁飞种群的时空分布, 提出了“边界层顶现象”的概念。即边界层顶的低空逆温和低空急流为迁飞种群提供了最适宜的风温场, 迁飞种群在边界层顶集集成层, 并通过定向进一步修饰其位移方位, 表现出对风温场的主动选择能力和对大气结构和运动的高度复杂的适应性反应。进一步深化对“边界层顶现象”的认识, 对迁飞性害虫的异地预测具有重要的理论意义和应用价值。

关键词: 迁飞过程, 迁飞行为, 边界层顶现象, 适应性对策。

昆虫, 迁飞, 风, 温度, 环境, 适应

昆虫的迁飞过程受到多种大气过程的影响, 大气环流和大尺度天气系统的进退为昆虫提供了远距离迁移的运载工具和物理环境; 同时, 下垫面制约的中小尺度大气运动决定了迁飞种群的空中动态和地面分布。近年来, 雷达昆虫学和边界层气象学进展很快, 用这些新的理论和方法来研究昆虫迁飞过程时, 展现在我们面前的是一幅全新的画面: 昆虫在迁飞过程中远非人们所想象的那样被动, 它们对风温场具有相当主动的选择能力, 对大气物理环境表现出高度复杂的适应性反应, 因而可最大限度地利用空气动力完成其种群过程。

1 昆虫迁飞的大气物理环境

昆虫的迁飞基本上发生在距地面 1500—2000m 以下的空中, 即太气边界层内。大气边界层位于大气圈的最底层, 与地球表面直接接触, 因而受地面摩擦作用比较明显。其厚度随地面粗糙度和风速的增大或大气不稳定性增强而增加, 变化范围在 300—2000m 之间。但海洋边界层厚度的时间变化因海面温度周日变化很小而相当缓慢。在陆地高压区, 边界层具有轮廓分明、周日循环发展的结构(图 1)。

日落前后, 地表因辐射而迅速散热, 近地层空气变成稳定层结, 并自下而上逐渐形成接地逆温层, 其厚度通常可增长到 100—500m。夜间边界层(也称稳定边界层)往往平稳地混合到上面的残留层内而难以确定其层顶的界限, 人们一般以地面逆温层顶或极值风速的高度作为其顶高的近似。夜间边界层内风速随高度增大, 在层顶附近达到最大值, 风向往往随高度按顺时针方向变化(图 2a)。当极值风速大于地转风速时称之为低空急流, 其高度通常距地面 100—300m, 有时可达 900m, 最大风速一般为 10—20m/s, 但也有大于 30m/s 的记录。在急流上面, 风向风速平稳地转变成地转风。在北半球, 地转风一般比近地面风矢量偏右 45°左右^[1]。

日出后, 地面开始加热, 湍流活动增强, 地面逆温层自下而上逐步被破坏, 最后随着对流的加深而消散, 形成了对流边界层。对流的发展使上下层的物理属性趋于均匀化, 形成一个逐渐伸展到 1—2km 高的混合层, 其内风、温等要素的分布几乎不随高度变化(图 2b), 风向变化也很小。混合层顶是一稳定空气层, 即夹卷层(也称覆盖逆温)。自由大气向下夹卷到混合层的过程即混合层厚度的增长过程(图 3)。通常把最大负热通量的高度(位于夹卷层中部)定义为对流边界层顶。

• 国家自然科学基金(39130070)资助项目。

国家教委高校博士学科点专项研究基金资助项目(920209)。

本文于 1991 年 10 月 11 日收到, 修改稿于 1992 年 11 月 20 日收到。

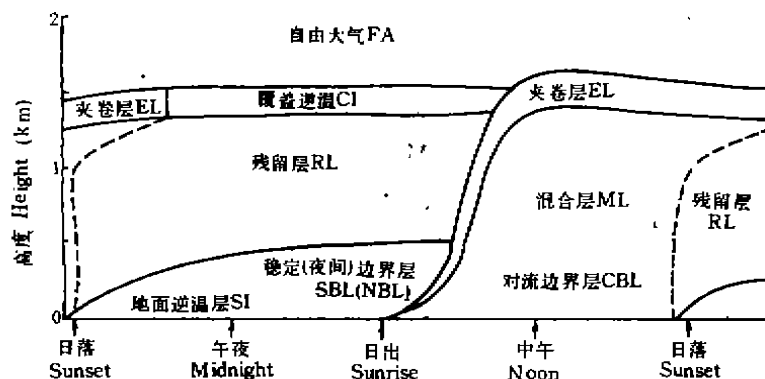


图 1 大气边界层演变的日变化

Fig. 1 Daily course of PBL evolution

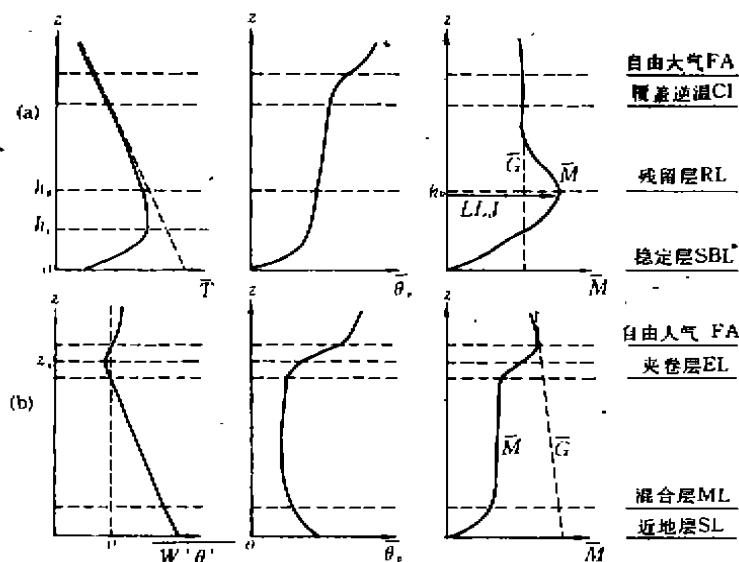


图 2 理想边界层平均特征

(a) 稳定边界层; (b) 对流边界层。T, 平均绝对温度;

 θ , 平均虚位温; $\bar{M}$, 平均风速; $\overline{W'\theta'}$, 垂直运动焓动热通量

Fig. 2 Average characteristics of PBL

混合层与稳定层的演替是大气边界层周日变程中两种特殊的、也是重要的过程,对昆虫的迁飞过程有显著的影响。同时,边界层内风温场的种种变化又是在一定的大型天气系统的背景下生成和发展的。因此,大尺度的大气环境决定了大气与下垫面之间相互作用的方式和程度。而在边界层内迁飞的昆虫对大气物理环境的种种行为反应及其机制,正是迁飞性害虫测报与防治的关键所在。

2 迁飞过程中昆虫的行为和时空分布

迁飞过程包括起飞、运行和降落 3 个阶段,昆虫雷达的应用,使人们对昆虫在迁飞过程中的行为有了初步了解。

2.1 起飞 人们普遍认为,上升气流对昆虫的起飞具有关键作用。但雷达观测中发现,无论是大型昆虫(如蝗虫、粘虫)还是小型昆虫(如飞虱、蚜虫)都有稳定的爬升率^[3,5],它们并非(随上升气流)垂直升空,而是以一定的仰角顺风爬升的,在雷达平面显示器上表现为回波的烟云状(Plume)分布^[3,4],这表明上升气流对起飞影

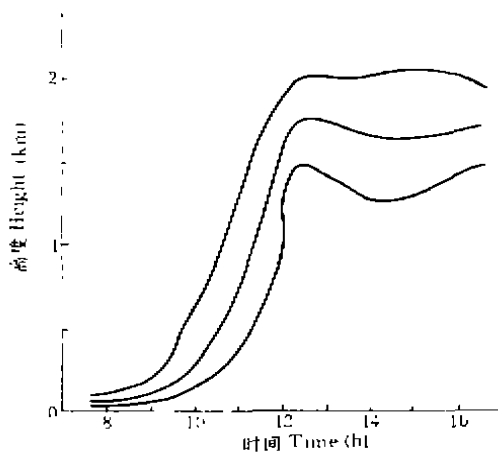


图3 夹卷层演变示意

上下线分别代表夹卷层顶和底,中线为混合层平均厚度

Fig. 3 The growth of entrainment layer

(the middle line is z_0)

响很小。实际上,晨昏起飞期正值对流出之前和地面逆温层形成之后,大气边界层呈稳定态,不存在上升气流,即使有也极微弱。主动升空正是迁飞种群一个典型的行为特征。

雷达观测中有迹象表明,在无风,或风很弱,或风向不利于其迁飞时(逆风),迁飞种群起飞很少或不起飞,而当风、温都适宜时便大量起飞,并出现大规模的过境飞行,使得大多数个体只在适宜条件下才飞离原栖息地。这似乎是对大气环境的一种适应,以避免因缺乏合适的运载气流而使迁飞种群仍降落在已经恶化了的栖境内。

2.2 成层 起飞后,迁飞种群很快爬升到巡航高度(200—1000m)集聚成层,转入水平运行,表现为具有明显上下界的密集回波层。层厚可达几十米到几百米,层内昆虫密度比层外高一个量级或更多。夜间迁飞的昆虫的成层高度一般较低,往往位于地面逆温层顶或稍

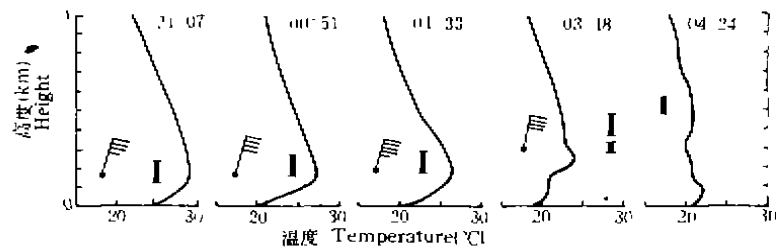


图4 稳定边界层中的虫层

I 示虫层位置,风矢示最大风速的高度。风羽每长划代表 4m/s,短划为 2m/s。

Fig. 4 Insect layers in SBL

The vertical bars indicate the layer position, and the barbed arrows show the height where the maximum wind speed were

recorded. Each feather means 4m/s (long) and 2m/s (short). (Redrawn from Ref. 5).

上的最大风速带里(图4)。如我国的粘虫, *Mythimna separata* 春季迁入东北时,在迁入中转区(吉林公主岭)多分布于 500m 高度以下(占 75%以上),在 200—400m 成层^[6];但在飞越渤海上空时,成层高度多在 400m 以上^[7](图5)。褐飞虱 *Nilaparvata lugens* 夏季北迁种群白天密度最大值出现在 1500—2000m 高度^[8],秋季回迁种群黄昏起飞后爬升到 700—900m 高度成层,虫层顶高与其飞翔低温阈限所在的高度一致^[9]。迁飞虫层可持续数小时,迁飞盛期则可持续整个夜间。曾观测到过一直持续到日出后 3—4h(约 07:30)的粘虫层^[9];也曾观测到一个在 300—1000m 高度成层并持续到黎明的褐飞虱过境种群,前半夜在层底取样的近 3h 内有 1211 头褐飞虱入网(约 19 头/dm³)^[11]。

日出后,随着对流的加深和逆温层的消解,早晨起飞的昆虫爬升到对流边界层顶上面的稳定层(即夹卷层)中成层。如在澳大利亚的观测中,曾发现上午 08:30—10:30 在 2000m 高度有一个 100—250m 厚的虫层,另一个位于 1400—2100m 高度的虫层出现在 16:00^[10];还观测到小型昆虫早晨起飞后在逆温层顶成层,此后又随对流发展而逐渐上升^[11]。在美国,曾观测到蚜虫和其它小型昆虫从 05:37 始在 100—250m、500—650m 和 900—1200m 高度形成的 3 个昆虫层一直持续到 12:00 才逐渐减弱,最后在 13:00 消失。当时在大约 600m 高度有一强烈的下沉逆温层,而 1100m 以上为稳定层,最上面的虫层与稳定层中的极值风速带一致,中间层

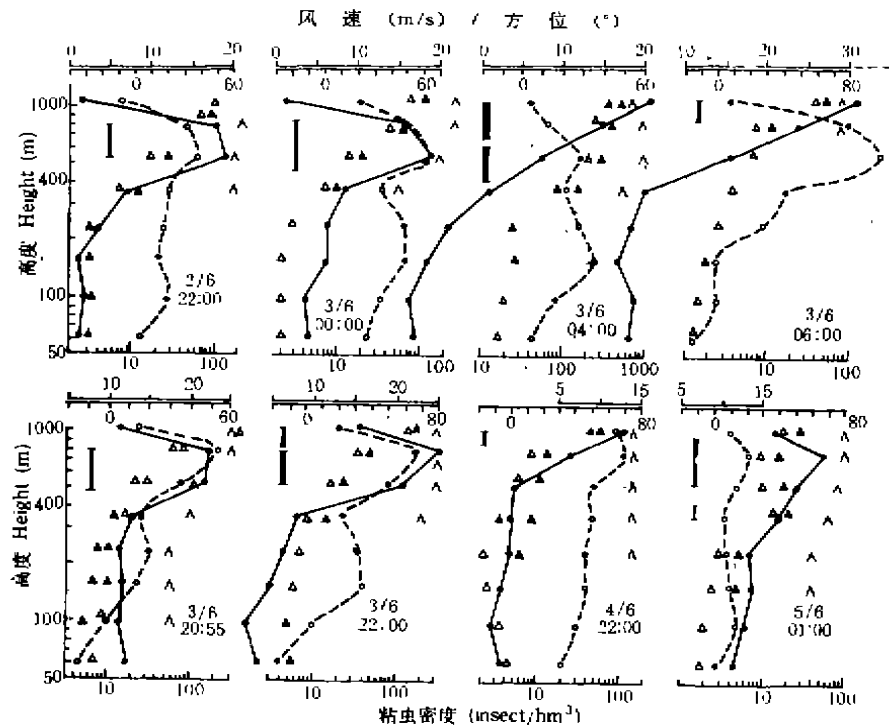


图 5 粘虫越海北迁时的行为(1989年6月,营口)
—粘虫密度(insect volume density); —○—风速(wind speed); △风向(风的方向, wind direction forward); ▲虫群位移方位(track); △定向方位(course); I 虫层(insect layer)^[22]。

Fig. 5 The behaviour of *Mythimna separata* migrating over Bohai Sea (June of 1989, Yingkou, Liaoning Province)

则位于逆温层顶^[12]。也有一些白天迁飞的昆虫在对流单体的周缘集集成数百米到几千米宽的多边形网格结构随风移动^[2,11]。

2.3 定向 迁飞种群另一个普遍的、显著的行为特征是共同定向,即空中种群保持一致的飞行方向,在雷达平面显示器上表现为回波的哑铃状分布^[2,11-13]。

不少昆虫的定向与风向有关,即定向方位随高度和时间的变化与风向的变化一致,多数昆虫基本上保持顺风定向^[2]。加拿大的柞蚕卷蛾(*Choristoneura fumiferana*)和澳大利亚疫蝗(*Chortolcetes terminifera*)顺风定向或与风向呈不到 90°的偏差^[14,15],非洲粘虫(*Spodoptera exempta*)则始终与风向保持 65°—71°的夹角^[4]。随风定向可使迁飞种群充分利用大气环流的动能,在较短的时间内飞越很远的距离去寻找和开拓那些季节性植被和繁殖场所。

某些昆虫的定向与地理方向(罗盘方向)有关。如苏丹绿纹蝗(*Aiolopus simulatrix*)在任何风向中(强逆风除外)都朝西南方定向^[16]。在马里尼日尔河三角洲,夜间迁飞的蝗虫在不同风向中都朝着 25°—50°方位定向,有助于它们从周围干旱的栖境定殖到那些随洪水自西南到东北逐渐消退而渐次裸露出来的新栖息地。这可能比顺风定向更具适应性,因为那样它们将会被载出这一适宜的繁殖场所^[16,17]。越海迁飞的粘虫在风向(风的方向)320°—80°范围内几乎总是朝东北(10°—80°)定向,且定向方位多比风向偏右 20°—110°,使其位移方位绝大多数是朝向北到东北(0°—60°),从而保证迁飞种群迁入松辽平原和松嫩平原作物区(图 5)。这种与风向无关的定向可使那些飞行力较强的种类能充分利用某一特定区域内的资源,并且可能大大降低了它们在迁飞过程中的种群损失率。

目前,夜间迁飞的昆虫,尤其是小型昆虫的定向机制还不清楚。但不论定向机制是什么,定向对于飞行速度较快的大型昆虫的运行轨迹有显著影响,其结果是迁飞种群对具有生态意义的迁飞方向一致的非随机性

选择。

2.4 降落 由于降落不象起飞那样以较大的规模发生在一定的时间和地点,迄今为止,还未观测到过迁飞种群完整的降落过程。现有的几次关于降落的记载都是从间接证据推得的。如在两区过境前后跟踪观测,根据空中密度的变化来判断,有时也通过地面落虫量判断^[11,18,19]。夜蛾类天亮时的降落也是由空中密度的变化确定的。在美国用机载雷达成功地跟踪了一个蛾群(谷实夜蛾 *Heliothis zea* 和草地夜蛾 *Spodoptera frugiperda*)的迁飞过程。蛾群起飞后在 200—700m 高度顺风北移,密度随迁飞距离增加而渐减,7 小时 40 分后到达距虫源区 420km 处,于黎明时全部消失^[20]。褐飞虱黎明起飞量小,时间短,白天空中飞虱的密度仅为夜间的 5%,至少在晴天时,大多数远迁个体是在黎明降落的^[21]。

1991 年秋在江西东乡的雷达观测中,曾观测到一次与清晨起飞同时发生的降落过程。起飞开始时,一个 90m 厚(距地面 490—580m)的过境虫层也开始降落。20 分钟后,整个虫层下降了 230m,位于 260—350m 高度。但接着便与起飞种群相遇混合后消散,因而无法分辨出在近地层的降落。起飞种群则在 470—600m 高度成层,并逐渐上升到 700m 高度。

3 边界层顶现象:一个具有生态适应性的行为过程

雷达观测中越来越多的迹象表明,某些种类似乎已进化出相当主动的选择最适风温场的能力。它们起飞后主动爬升数百米进入风、温最适的巡航高度乘风运行,并通过定向使其运行轨迹尽可能接近迁入区的方向,从而最大限度地利用空气动力到达新栖息地^[2,3,5,7,12,21]。虽然不同的种类对大气环境有着不同的行为反应,但当我们用边界层气象学的理论和概念重新审视各有关文献中报道的昆虫迁飞种群的时空分布时,就不难发现,空中种群的大多数个体集聚在边界层顶,即夜间陆地边界层 200—500m 高度,海洋边界层 500—1000m 和对流边界层约 1500m 高度,也即边界层大气与自由大气的接合部。笔者称之为“边界层顶现象”。

国内外的气象学者早就从不同的角度发现,边界层顶是大气中的最活跃层,具有一些特征突出的现象^[22]。这里提出的边界层顶现象,则主要指迁飞种群对边界层顶存在的直接影响其迁飞过程的低空逆温和低空急流所表现出的行为过程。

3.1 夜间逆温层与边界层低空急流

在晴朗而有微风的夜晚,低空急流与地面逆温相伴而生。其特征是,受边界层过程和地形的明显影响,有风速的强垂直切变和超地转性,其最大风速层与逆温层顶的高度一致或稍偏上(100—600m)。夜间迁飞的昆虫正是在这里成层^[5,7,10,11,23,24]。

粘虫在越海迁入东北的过程中,空中种群的最大密度值出现在风速最大且风向最有利的高度,有时风速最大处风向并不太有利,则最大密度位于风速稍弱但风向最适的高度;有时不同高度的风向分别为东南风和西南风,尽管东南风中也有北向的分量,但迁飞种群还是选择了在更有利的西南风中成层(图 5)。密度最大值所在高度的风向比近地层(距地 25m)风向偏右 45°左右^[2],说明此处正是边界层顶。据吴祖常等(1991)的研究,夜间海面大气边界层顶高度位于 400—800m 之间,极值风速出现在 300—700m 之间^[25]。从图 5 可以看出,迁飞种群的最大密度就位于边界层顶的低空急流中。

在美国, Wolf 等对 1982 年雷达观测结果的统计分析表明,迁飞种群的成层高度出现在强稳定空气层中,基本上与低空急流轴线一致。同时,虫层出现的时空位置也说明,迁飞种群可能具有检测出急流位置并选择在其内运行的能力^[21]。这在澳大利亚的一次观测中表现得很明显。日落后形成的一个强逆温层(顶高 150m)一直持续到天亮,前半夜空中虫群分布在 1300m 以下(150—280m 密度较大),后半夜低空急流出现(高度 100—300m,极值风速 14m/s),迁飞种群很快集聚在 200—300m 成层。层内迁飞个体顺风定向,运行速度达 20m/s(层外 11m/s)^[23]。

3.2 下沉逆温与不同尺度的低空急流

在大尺度的高压控制区,存在着自由大气自上而下的下沉绝热增温,同时又有从近地层向上的湍流、对流的均匀混合,结果在边界层顶附近(1000—2000m 高度)形成逆温层或稳定层。下沉逆温削弱了垂直湍流交换,使高空下传动量堆积在逆温层上面形成边界层顶的强风带和不同尺度的低空急流。

大尺度低空急流长可达几千公里,宽为几百公里,一般为偏南或西南气流,当有台风在副高西南侧发生、发展时,也可出现东南气流。在整个大气环流中,有东亚、北美和东非三支大尺度低空急流。它们都处于反气旋环流的西侧,都发生在大洋的西岸,其偏南风的西侧都为著名的高地和山脉(青藏高原、落基山脉及东非高地),东南信风西进大陆后受高山阻挡而折向。它们是天气尺度过程引发的,具有明显的水平和垂直风速切变,但风速日变化规律不明显。

在我国,夏季在副高西侧或北侧有低压槽、切变线或低涡时形成西南低空急流并随副高进退而移动。其强风轴平均风速 12m/s 以上,南起南海,经湖广,于 6 月份北移至 30°N 以南,从长江中下游直达日本列岛;7 月份可达黄河以北甚至辽东半岛一带。褐飞虱、白背飞虱 *Sogatella furcifera* 等迁飞性昆虫正是在这支低空急流中北迁^[9,26],我国长江中下游地区和台湾地区的飞虱也是藉此越洋东渡,构成朝鲜和日本的迁入虫源^[27-30]。35°N 以北是稻飞虱的零星波及区及边缘区,但京津唐地区、辽东半岛及吉林省南部稻区有些年份也会爆发,这很有可能是由于大发生虫源与北上的低空急流相吻合所造成的。

在北美,蚕豆微叶蝉 (*Empoasca fabae*)^[31]、多种传毒蚜虫^[32,33]等就在落基山东侧低层 1000m 左右的偏南低空急流中北迁。这里还存在前已叙及的边界层低空急流,即大平原夜间急流(300—800m 高)为夜间迁飞种群提供北迁运载气流。在东非,越赤道急流经索马里跨过印度洋到达印度西岸,其强风轴上平均风速可达 30m/s 以上,且能持续许多昼夜。非洲粘虫在 5 月和 6 月藉此飞越索马里半岛北迁到阿拉伯半岛西南部^[34]。

此外,还有一些介于以上两类之间与扰动有关的中间尺度低空急流。如台风从华南沿海西行时,其东侧的东南急流有利于菲律宾的飞虱虫源迁入广东南部和福建沿海地区^[35];而在我国东南沿海登陆的台风与副高之间的东南急流及台风登陆后北上所形成的急流^[32]可使飞虱远迁华北区。在华南,还经常在南海越赤道气流汇合到脊后槽前地区时,或在低涡、切变线、中尺度小低压等系统的东南侧,出现一些偏南中间尺度低空急流^[33,36]。它们高 300—900m,长 300—600km,宽几十到几百公里,强度一般为 14—16m/s,可持续 3—5d。这为中南半岛的虫源迁入我国及华南虫源北迁提供了有利条件。冷锋过境后,锋后对流层中下部的下沉运动使量下传,在逆温层顶(300—900m 高)形成低空急流^[32],这对秋季回迁的昆虫很有利,如在江西的雷达观测期间,每次冷锋过境后都出现起飞高峰和大规模的过境飞行(图 6)。

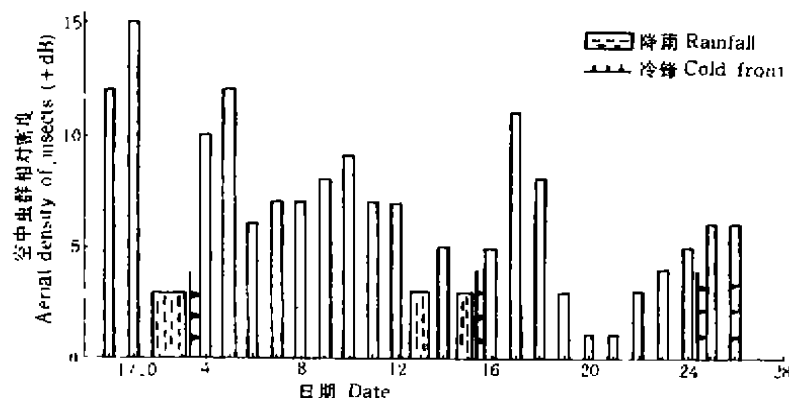


图 6 冷锋过境对昆虫秋季回迁的影响(江西,东乡,1991 年 10 月。据 Riley *et al.* 未发表资料)

Fig. 6 The influence of passing cold front on the return migration of insects in autumn (Dongxiang, Jiangxi Province, Oct. 1991)

The insect aerial density is indicated by the units of radar power attenuation (+dB). (Drawn from Riley *et al.* unpublished data).

综上所述,迁飞昆虫在整个迁飞过程中并非完全被动地随风飘流。“边界层顶现象”表明,它们在迁飞过程中不仅仅是“乘客”,而更象“驾驶员”或“舵手”;它们不仅仅是逃避不良环境,而且还主动地去开发那些可资利用的新生境。这种对风温场的选择能力是其生活史中一种高度进化了的适应性对策。进一步深化对迁飞过程中昆虫行为的认识,可望使异地预测水平出现一个大的飞跃。通过将昆虫迁飞行为参数化,并用数值方法

模拟出高分辨的风温场,即可建立起以边界层气象学和迁飞行为生态学为基础的轨迹模型。再根据雷达观测到的有效方位的飞越虫量及轨迹分析,可推出其迁入区和迁入量,从而做出量化的区域尺度虫情预报。

参 考 文 献

- [1] Stull R B. *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Kluwer, Academic Publishers, 1989. 杨立新译. 北京: 气象出版社, 1991
- [2] Shaefer G W. Radar observations of insect flight. *Symp. R. Ent. Soc. Lond.*, 1976, 7: 157—179
- [3] Riley J R *et al.* The long distance migration of *Nilaparvata lugens* in China: radar observations of mass return flight in the autumn. *Ecol. Ent.*, 1991, 16: 471—489
- [4] Riley J R *et al.* Radar observations of *Spodoptera exempta*, Kenya, March-April 1979. *COPR Misc. Rep.* No. 54, 1981
- [5] Drake V A. The vertical distribution of macro-insects migrating in the nocturnal boundary layer: a radar study. *Boundary-Layer Met.*, 1984, 28: 353—374
- [6] Chen R L *et al.* Radar observations of the spring migration into northeastern China of oriental armyworm moth, *Mythimna separata*, and other insects. *Ecol. Ent.* 1989, 14: 149—162
- [7] Chen R L *et al.* Wind and migration behaviour of armyworm, *Mythimna separata*. *Proc. 19th Int. Conf. Beijing*, 1992, Symp. 5: 5—5
- [8] 邓望喜. 褐飞虱和白背飞虱空中迁飞规律的研究. *植物保护学报*, 1981, 8: 73—82
- [9] 陈瑞彪等. 雷达在粘虫迁飞中的应用. *粘虫生理生态学*, 林昌善主编, 北京: 北京大学出版社, 1990, 293—335
- [10] Drake V A & Farrow R A. A radar and aerial trapping study of an early spring migration of moths in inland New South Wales. *Aust. J. Ecol.*, 1985, 10: 223—235
- [11] Farrow R A. Interactions between synoptic scale and boundary layer meteorology on micro-insect migration. In: Dhanarajayana W. (ed.), *Insect Flight, Dispersal and Migration*. Heidelberg, Springer-Verlag, 1986, 185—195
- [12] Irwin M E & Thresh J M. Long-range aerial dispersal of cereal aphids as virus vectors in North America. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* 1988, B 321: 421—446
- [13] Riley J R. Collective orientation in night flight insects. *Nature*, 1975, 253: 113—114
- [14] Greenbank D O *et al.* Spruce budworm moth flight and dispersal: new understanding from canopy observations, radar and aircraft. *Mem. Ent. Soc. Can.*, 1980, (110)
- [15] Drake V A. Collective orientation by nocturnally migrating Australian plague locusts: a radar study. *Bull. ent. Res.* 1983, 73: 679—692
- [16] Riley J R & Reynolds D R. Orientation at night by high-flying insects. 1986. See Ref. 11, 71—87
- [17] Reynolds D R & Riley J R. A migration of grasshoppers, particularly *Diabotocatanops axillaris*, in the west African Sahel. *Bull. ent. Res.* 1988, 78: 251—271
- [18] Dickison R P B *et al.* Spruce budworm moth flight and storms: case study of a cold front system. *J. Clim. Appl. Met.* 1983, 22: 278—286
- [19] Dickison R P B *et al.* Spruce budworm moth flight and storms: further studies using aircraft and radar. *J. Clim. Appl. Met.* 1986, 25: 1600—1608
- [20] Wolf W W *et al.* Recent airborne radar observations of migrant pests in the United States. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, 1990, B328: 619—630
- [21] Wolf W W *et al.* Relationship between radar entomological measurements and atmospheric structure in south Texas during March and April 1982. In Sparks A N (ed.), *Long-range Migration of moths of Agronomic Importance to the United States and Canada: Specific Examples of Occurrence and Synoptic Weather Patterns Conducive to Migration*, pp. 98—104. 1986. USDA/ARS-43
- [22] 雷雨顺. 关于边界层顶现象. *气象科技*, 1981, (1): 10—14
- [23] Drake V A. Radar observations of moths migrating in a nocturnal low-level jet. *Ecol. Ent.* 1985, 10: 259—265
- [24] Rainey R C. *Migration and Meteorology: Flight Behaviour and the Atmospheric Environment of Locusts and Other Migrant Pests*. Oxford, UK: Oxford Uni. Press, 1989
- [25] 吴祖常等. 内伶仃岛及其附近海面低层大气的平均结构. *热带气象*, 1991, 7: 162—169
- [26] 芮庆宝. 稻飞虱与气象. 北京: 气象出版社, 1987

- [27] Seino H *et al.* Prediction of long distance migration of rice planthoppers to northern Kyushu considering low-level jet stream. *J. Agr. Met.* 1987, **43**, 203—208
- [28] Sogawa K & Watanabe T. Redistribution of the rice planthoppers and its synoptic monitoring in east Asia. *Proc. Int. Sem. on Migration and Dispersal of Agric. Insects, Tsukuba, Japan, September 1991*, 215—228
- [29] Watanabe T & Seino H. Correlation between the immigration area of rice planthoppers and the low-level jet stream in Japan. *Appl. Ent. Zool.*, 1991, **26**: 457—462
- [30] Watanabe T *et al.* Correlation between migratory flight of rice planthoppers and low-level jet stream in Kyoshu, south-western Japan. *Appl. Ent. Zool.* 1991, **26**: 215—222
- [31] Johnson C G. *Migration and Dispersal of insects by flight* London, Methuen, 1969
- [32] 蒋尚城. 远距离台风影响西风带特大暴雨的过程模式. *气象学报*, 1983, **41**: 149—158
- [33] 李彦辉. 华南初夏的超低空急流对暴雨的影响. *气象学报*, 1982, **40**: 319—325
- [34] 李光耀. 雷州半岛东南风边界层急流. *热带气象*, 1988, **4**: 277—282
- [35] 周明锐等. 一次冷锋过境后的边界层结构. *气象学报*, 1980, **38**: 250—258

BEHAVIOUR OF MIGRATING INSECTS: ADAPTATION AND SELECTION TO ATMOSPHERIC ENVIRONMENT

Zhai Bao-Ping Zhang Xiao-Xi

(Department of Plant Protection, Nanjing Agricultural University, Nanjing, 210014)

Based on boundary layer meteorology, the temporal and spatial distribution and the behaviour of migrating insects were reviewed, and a concept of 'PBL-top phenomena' was presented. The surface inversion, subsidence inversion and low level jet near the top of PBL provide an optimum wind and temperature field for the airborne populations, where there are maximum wind speed and temperature. The insects actively take off, climb, and then layering in the top of PBL. They also orient to a special azimuth to modify their tracks. These behaviour detected by radar suggest that the insects may possess an ability to make the best use of the kinetic energy of the atmosphere to seek and find their new habitats. Therefore, they seem to be able to let themselves get into the wind and temperature fields they really want to, and choose the cruising altitudes in relation to where they are going. This is a highly evolved adaptive strategy in their life history. Better understanding of the 'PBL-top phenomena' is needed for the forecasting of migratory insect pests.

Key words: migratory process, migrating behaviour, PBL-top phenomena, adaptive strategy.