

190-199

19662(10)

第17卷第2期
1997年3月生态学报
ACTA ECOLOGICA SINICAVol. 17, No. 2
Mar., 1997

昆虫迁飞行为的参数化

II. 模式与检验

翟保平

张孝羲

Q968.1

(南京农业大学植物保护系, 南京, 210095)

A **摘要** 对通过昆虫迁飞行为分析得到的迁飞时间参数、高度参数、速度和方向参数等分别以一定的数学形式加以表达。其中, 起飞时间以日出日没及晨昏蒙影时刻为基准, 用天文公式求出; 边界层顶与飞行低层界限所在高度及运行高度上的风速、风向由一维湍能(TKE)模式以E- ϵ 闭合做数值模拟; 对飞行力较弱的小型或微小昆虫做随风运行处理, 而对大型昆虫则根据其自身的飞行速度和定向方位与其飞行高度上的风向风速做矢量运算, 求得位移方向和速度。通过我国小地老虎和草地螟标放回试验结果的检验, 表明本文提出的迁飞行为参数化方案是合理可行的, 以此为基础组建数值模型进行昆虫迁飞轨迹分析, 可望进一步提高迁飞性害虫异地预测的水平。

关键词: 昆虫迁飞行为, 参数化模式, 轨迹分析。

PARAMETERIZING THE MIGRATORY BEHAVIOUR OF INSECTS I. MODELS AND VERIFICATION

Zhai Baoping Zhang Xiaoxi

(Department of Plant Protection, Nanjing Agricultural University, Nanjing, 210095, China)

Abstract The behaviour parameters of migrating insects were modelled in the light of behavioural analysis with numerical procedures, in which the sunset(sun rise) and twilight were calculated by astronomical formulas and the flying altitude was estimated by a PBL model with TKE closure scheme. The verification of the models by the marked-release and recapture experiments of *Loxostege sticticalis* L. in 1983 and *Agrotis ipsilon* Huf. in 1981 indicated that the parameterizing scheme described in this paper was rational and feasible for the trajectory analysis and inter-regional forecast of migratory insect pests.

Key words: insect migration behaviour, parameterizing scheme, trajectory analysis.

- 国家自然科学基金和国家教委高校博士学科点专项科研基金资助项目。
- 致谢, 文中所用地面和高空资料由南京农业大学程极益教授提供, 谨致谢忱!
- 本文收到日期: 1994-12-18, 修改稿收到日期: 1996-6-26。

翟保平等通过对雷达昆虫学研究和 other 方法得到的研究成果的综合分析, 提出一套昆虫迁飞行为参数化方案。即: 起飞时间以日出日落及晨昏朦影时刻为基准, 降落时间依目标昆虫的迁飞特性具体取值; 运行高度取边界层顶与目标昆虫飞行低温阈限所在高度之间的气流层、运行方向取风向值并以目标昆虫的定向加以修饰, 运行速度为风速与目标昆虫自身飞行速度的矢量和^[1]。本文选取适当的数值方法将上述方案模式化, 为组建昆虫迁飞轨迹模型提供行为参数。

1 材料与方法

1.1 迁飞行为的参数化模式

根据行为分析的结果, 将昆虫迁飞的时间参数、高度参数、速度和方向参数分别以一定的数学形式加以表达。其中, 目标昆虫飞行低温阈限和自身的飞行速度根据已有的吊飞试验结果给出; 日出日落时刻可由天文公式求出; 边界层顶与目标昆虫飞行低温阈限所在高度及运行高度上的风速、风向等非常规气象资料所能提供, 故引入边界层气象学方法进行数值模拟。

在各种边界层模式中, 湍能(TKE)模式能给出比一阶 K 模式更合理的解, 又避免了二阶闭合中计算上的麻烦, 而其结果并不比高阶闭合差。此外, TKE 模式还能象高阶闭合一样模拟出夜间急流的形成与演化过程^[2], 而夜间急流及最大风速带的生消演化对昆虫的迁飞轨迹有着显著的影响^[3]。因此, 考虑昆虫迁飞研究的实际需求和应用时的可操作性, 本文采用一维 TKE 模式, 以 $E-\epsilon$ 闭合求其数值解, 模拟出大气边界层风温场的垂直分布及其日变化, 从而得到所需各参量。

1.2 资料来源

一般的边界层模式启动时, 其初始场都采用一个或极小范围的几个站点在特定时间进行的专门观测的实测廓线值。但对昆虫迁飞研究而言, 这即使在将来也是不可能的。因此, 本模式以国家气象局《中国地面气象记录月报》和《中国高空气象记录月报》中有关站点和时段的地面和 850 hPa 等压面的常规观测资料为基础(高空站的要素值以距离加权法内插加密)、根据廓线分布的理论推出初始廓线。天气学分析以国家气象局的《历史天气图》为依据。

1.3 参数化方案个例分析

参数化方案的检验采用 1983 年 6 月草地螟 *Loxostege sticticalis* L. 和 1981 年 3 月小地老虎 *Agrotis ipsilon* Huf. 的标放回收试验结果做个例分析。

2 迁飞行为的参数化模式

2.1 迁飞时间参数

设每日飞行降落的时间为 FT , 则:

$$FT = STW + FHR \quad (1)$$

其中, STW 为起飞时间, FHR 为每夜(每天)持续运行的时间。根据文献[1]对昆虫迁飞行为的综合分析, 一般地讲, 夜行性昆虫的起飞时间取昏影终时, 白天迁飞的种类则取晨光始时, 飞行 FHR 小时后降落。 FHR 的具体取值需根据目标昆虫的迁飞特性给出, 起飞时间则可根据计算日出日落与晨昏朦影时刻的天文公式求得:

$$STW = 12^{\pm} \pm t - Eq - (\lambda - 120)/15 \quad (2)$$

其中 t 为太阳时角, Eq 为时差, λ 为地理经度。 t 取正值时为日落时的太阳时角, 取负值时

则为日出时的太阳时角。日出日没时刻是太阳圆面上缘与视地平相切的时刻，也即太阳刚刚露出地平线和刚入地平线的时刻，以北京时间为准。晨昏朦影时刻则是太阳在地平线以下 6° 时(民用)的时刻。从天文三角形的余弦公式可求得日出日没时的太阳时角，即：

$$t = \arccos[(\cos h - \sin \varphi \sin \delta) / (\cos \varphi \cos \delta)] \quad (3)$$

式中， φ 为地理纬度， δ 为太阳赤纬， h 为太阳高度。由于大气折射，地平附近的天体看起来要抬高约 34'；同时计算上都是对太阳圆面中心，太阳的视半径取 16'。这样，人们看见太阳上缘与视地平相切时，太阳中心的高度 $h = 90^\circ + 34' + 16' = 90^\circ 50'$ 。故计算日出日没时刻时 h 取 90.83，计算晨昏朦影时则取 96.83。 δ 和 E_q 的计算则可以 Usher(1970)的经验公式^[4]为通式：

$$\begin{aligned} \Sigma = & b_0 + a_1 \cos y + b_1 \sin y + a_2 \cos 2y + b_2 \sin 2y \\ & + a_3 \cos 3y + b_3 \sin 3y + a_4 \cos 4y + b_4 \sin 4y \\ & + a_5 \cos 5y + b_5 \sin 5y + a_6 \cos 6y \end{aligned} \quad (4)$$

其中，若 $\Sigma = \delta$ ，则有

$a_1 = -0.76996$	$b_0 = 0.38092$
$a_2 = 0.36958$	$b_1 = 0.23265$
$a_3 = 0.01834$	$b_2 = 0.10868$
$a_4 = -0.00392$	$b_3 = -0.1665$
$a_5 = -0.00051$	$b_4 = 0.00072$
$a_6 = 0.00442$	$b_5 = 0.0025$

求得的 δ 单位为度。

若 $\Sigma = E_q$ ，则有

$a_1 = -7.12965$	$b_0 = -0.00198$
$a_2 = -0.68841$	$b_1 = -1.84002$
$a_3 = 0.30260$	$b_2 = 9.92299$
$a_4 = 0.03508$	$b_3 = 0.10635$
$a_5 = -0.00895$	$b_4 = -0.21211$
$a_6 = 0.00061$	$b_5 = -0.00773$

求得的 E_q 单位为分。

式(4)中的 y 为年角(度)，

$$y = 360(N - 21)/365 \quad (5)$$

其中， N 为气候学日序，取儒略历记法，即从 3 月 1 日起记数，故在春分日(3 月 21 日)， $N = 21$ ， $Y = 0$ 。这种记法避免了闰年问题。设月份为 M ，日期为 D ，且当 $M \leq 2$ 时，令 $M = M + 12$ ，则有

$$N = \text{取整}(30.6M + D - 91.3) \quad (6)$$

其逆转换为：

$$M = \text{取整}[(N + 91.3)/30.6] \quad (7)$$

若 $M \geq 13$, 令 $M = M - 12$, 则

$$D = \text{取整}(N - 30.6M + 92.3) \quad (8)$$

对能再迁飞的种类, 则仍依其迁飞特性确定飞行几个夜间或几个白天。对起飞时间随季节发生变化的飞虱类, 可以日没时刻为基准做提前或推后处理。

2.2 迁飞高度参数

迁飞种群的大部分个体集聚在边界层顶和飞行低温阈限所在高度之间风速最大、风向最适的高度运行^[1, 3], 故迁飞高度参数可表达为

$$H = (h_1 \leq h_i \leq h_c) \cap h_i(WD_0) \cap h_i(V_{\max}) \quad (9)$$

其中, h_i 为昆虫飞行高度, h_1 为边界层顶高度; h_c 为昆虫飞行低温阈限所在高度。 V_{\max} 为极值风速, WD_0 为一主观判据, 表示当时目标昆虫的最适风向(即最接近其迁入区方位的风向):

$$WD_0 = \text{Min}|WD_i - WD_s| \quad (10)$$

式中, WD_i 为 i 高度的实测风向或数值模拟的风向, WD_s 为该迁飞季节的盛行风向。如前所述, 迁飞行为是对大气物理环境长期适应进化的结果^[1], 因而迁飞季节的盛行风向一般总是生态上有利的风向。故从各高度上风向与盛行风向之差的绝对值中取小, 作为飞行高度逻辑选择的判据之一。我国地处东亚季风盛行地带, 故春季西南风和秋季东北风为 WD_s 的一般取值。当然, 迁飞个体与风的关系绝非如此简单, 甚至不乏逆向迁飞的个例(如 Pied piper 现象)。但作为一种参数化方案, 它只是人为构造的一种对事物本质的近似, 只希望它能适当地描述大多数迁飞过程, 因而只能是具体个例具体分析。所以在进行轨迹分析时需充分考虑当地的地理特征、气候条件、目标昆虫的迁飞特性和研究目的等确定 WD_i 的具体取值。

除了 WD_i 外, 上述各参量均无法从气象台站的常规观测资料中获得, 只能通过一定的数值方法模拟得到。本文采用文献^[5]描述的一维 TKE 模式求得边界层风温廓线, 其基本方程组为:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = f(v - v_g) - \frac{\partial}{\partial z} (K_m \frac{\partial u}{\partial z}) \quad (11)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = f(u - u_g) - \frac{\partial}{\partial z} (K_m \frac{\partial v}{\partial z}) \quad (12)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial z} (K_\theta \frac{\partial \theta}{\partial z}) \quad (13)$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} = K_m [(\frac{\partial u}{\partial z})^2 + (\frac{\partial v}{\partial z})^2] - K_\theta \frac{g}{\theta_0} \frac{\partial \theta}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} (K_m \frac{\partial E}{\partial z}) - \epsilon \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \epsilon}{\partial t} = & C_1 \frac{\epsilon}{E} \left\{ K_m [(\frac{\partial u}{\partial z})^2 + (\frac{\partial v}{\partial z})^2] - (1 - C_2) K_\theta \frac{g}{\theta_0} \frac{\partial \theta}{\partial z} \right\} \\ & - C_3 \frac{\epsilon^2}{E} + C_4 \frac{\partial}{\partial z} (K_m \frac{\partial \epsilon}{\partial z}) \end{aligned} \quad (15)$$

其中, u 、 v 分别为风矢量的纬向分量和经向分量, u_g 、 v_g 为地转风分量, θ 为位温, z 为距地高度; K_m 和 K_θ 分别为动量和热量湍流交换系数, g 为重力加速度, θ_0 为基准高度温度, 通常取 283°K ; E 为局地湍流动能, ϵ 为湍流能量耗散率。 $C_1 \sim C_4$ 为常数:

$$C_1 = 1.44 \quad C_2 = 1 \text{ (层结稳定时)} \quad C_3 = 1.92 \quad C_4 = 0.77 \\ = 0 \text{ (层结不稳定时)}$$

K_m 由 $E-\epsilon$ 闭合, 即

$$K_m = C_0 E^2 / \epsilon \quad (16)$$

式中, C_0 为常数, 取 0.09。一般取:

$$\text{取} \quad K_\theta = 1.35 K_m \quad (17)$$

考虑到气象要素在低层大气中的垂直梯度比在高层要大得多, 故采用不等间距交叉网格以保证低层的精度, 200 m 以下取每 25 m 一层, 200 m 到 1000 m 每 50 m 一层, 1000 m 以上每 100 m 一层。其中, u 、 v 、 θ 等定义在网格点上, 而交换系数 K 、能量 E 和耗散率 ϵ 定义在相邻二格点之间的高度上。

上边界条件: $Z=1500$ m, $u=v_\tau$, $v=v_\tau$, $\theta=\theta_{1500}$, $E=0$, $\epsilon=0$, $K=0$

下边界条件: $Z=0$ 处, $u=v=0$, $K=0$

u 、 v 、 θ 、 E 和 ϵ 以地面以上第一层为下边界, 由近地层相似关系给出。实际运行中取 850 hPa 等压面的要素值作为 u_τ 、 v_τ 和 θ 的值。

地面气温的时间变化由温度波求得:

$$T_0(t) = T - (T_{\max} - T_{\min}) / 2 \sin(2\pi t / 86400) \quad (18)$$

其中, T 为日均温, T_{\max} 和 T_{\min} 为日最高最低气温, t 为时间(s)。

计算方法: 取时间前差、空间中心差的隐式差分格式将基本方程组离散化, 得到系数矩阵为主对角占优的三对角矩阵的差分方程组。取时间步长为 10 s, 用追赶法即可解出下一时刻的 u 、 v 、 θ 、 E 和 ϵ 来。

将 u 、 v 合成, 将 θ 转换成温度, 便可确定逆温层顶、最大风速带、运行高度上的风温值和飞行低温阈限所在高度等。

式(9)将迁飞高度参数表述为最大风速、最适风向和最适温度的逻辑乘关系, 但在数值模拟过程中, 其逻辑判断实际是以温度条件优先考虑的:

① 若存在逆温层, 即可得到边界层顶高度, 再找飞行低温阈限所在高度, 这二者之间的最大风速处即飞行高度; 若还有风速稍次而风向更好的所在, 则取而代之。

② 若无逆温出现, 则先找 h_c , 再找 h_c 下面的 $h_f(V_{\max})$, 此即 h_c 。再重复①的判断即可得到 h_f 。

③ 若既无逆温层, 又无最大风速带, 则先找出 h_c , 再取其以下中间层高度为 h_f 。在这种情况下, 空中种群一般在各高度均有分布。在模拟过程中, 一旦出现了逆温层或最大风速带, 则立即进入①或②。

2.3 迁飞速度和方向参数

设 TRS 为位移速度, ASD 为昆虫自身的飞行速度, WS 为风速, WD 为风的去向, OA 为定向方位, TRD 为位移方向, 并令 C 为风速与飞行速度两矢量的夹角, A 为风速与位移速度两矢量的夹角, 则速度参数为:

$$\text{即 } TRS = WS + ASD \quad (19)$$

即

$$|TRS| = (WS^2 + ASD^2 - 2 \cdot ASD \cdot WS \cdot \cos C)^{1/2} \quad (20)$$

其中,

$$C = \begin{cases} \pi - WD + OA & (WD > OA) \\ \pi + WD - OA & (WD < OA) \\ WD - \pi - OA & [WD > 270 \text{ \& } (OA + 2\pi - WD) < 180] \end{cases} \quad (21)$$

方向参数为:

$$TRD = \begin{cases} WD - A & (WD > OA) \\ WD + A & (WD < OA \text{ 或 } WD > 270 \\ & \text{且 } OA + 2\pi - WD < 180 \text{ 且 } A < 2\pi - WD) \\ WD + A - 2\pi & (A \geq 2\pi - WD) \end{cases} \quad (22)$$

其中,

$$A = \sin^{-1}(ASD \sin C/TRS) \quad (23)$$

在实际应用时,定向 OA 需根据雷达观测结果来确定。考虑到大多数昆虫尚缺少这方面的信息,当 OA 未知时,运行中可将其置空,直接以风向作为运行方向,以风速与风速之和作为运行速度。同样,对小型或微小昆虫,其飞行力可忽略不计,故可将 OA 置空,将 ASD 置零作随风运行处理。

3 参数化方案个例分析

3.1 草地螟标放试验的轨迹分析

草地螟是我国北方一种间歇暴发性害虫,其虫源基地位于晋、冀、内蒙古3省区交界处的高海拔地区。1983年6月1日至17日在山西山阴进行了草地螟标放回收试验,于6月20日在河北涿鹿收到2头标记蛾,直线距离230 km。回收点位于山阴的东北方,但仅差0.8纬度,所以能使标记蛾顺利到达的风向应为250°左右。分析标放试验期间的风温场,表明6月4日、5日、11日、12日、17日和19日6夜为逆风(NW),18日夜为东南风,而风向合适的只有6日、8日、13日和16日4夜,其它夜晚则风向太偏南而使标记蛾无法到达回收点,因此仅对这4个夜间标记蛾的迁飞轨迹做个例分析。

吊飞结果表明,草地螟蛾12 h全程平均飞行速度2.5~4.6 km/h^[6],故取 ASD 为0.6~1.28 m/s。草地螟只在夜间迁飞,取其飞行时间每夜6~9 h。草地螟的飞行低温阈限尚未见报道,但考虑草地螟迁飞时期与粘虫基本同步,迁飞期的气候条件也比较接近,故取其飞行低温阈限 T_f 为8℃。从标记蛾迁飞轨迹的数值模拟结果(表1)可以看出,草地螟标记蛾的飞行高度基本上在400 m以下,这与雷达观测结果一致^[7]。由于这几夜风向比较有利,故不给定向参数的随风飞行也能到达回收点。但有定向的组合模拟的轨迹吻合程度更好。

3.2 小地老虎标放试验的轨迹分析

1981、1992两年进行了多次小地老虎的标放回收试验。其中,1981年3月18日在山东聊城(115.9 E, 36.4 N)收到2头广东曲江(113.5 E, 24.6 N)的标记蛾,全程1344 km。据吊飞试验结果,小地老虎的飞翔力3日龄后迅增,5日龄后进入盛期,7~9日龄最强,表明越冬代蛾可迁飞6~10 d或略长;全程平均飞行速度3.5~4.3 m/s,10~30℃的气温均宜于其飞翔,最适为19℃;而起飞临界低温为6℃,春季5℃为越冬代迁入蛾始见期^[8]。

在自然条件下,始见蛾期的平均临界低温为4℃,迁飞峰期温度为7.3~24.9℃,适温

和最适温分别为 10.5~23.8℃ 和 15.5~21.6℃^[1]。

据此,分别取 T_c 为 4℃, 5℃ 和 7.3℃, 取 ASD 为 2.5~3.5 m/s, 对标记蛾的迁飞轨迹做数值模拟(表 2)。通过风温场分析,可知 3 月 14~15 日夜间接有降水过程且为逆风(NW)。直接随风前推或回推,迹线终点与实际标放回收点相差太远;跳过 14~15 日夜间的运行结果表明,3 月 11 日标放的小地老虎蛾以 2.5 m/s 的平均速度且朝 N/NNE 定向飞行 6 夜(每夜 8 h),在最后一夜(3 月 17~18 日)飞行 5 h 23 min 后到达回收点聊城,完全吻合(表 2)。回推则基本吻合(相差 12 km)。整个迁飞过程中,其飞行高度都在 700 m 以下,且位于最大风速带中。但若用 850 hPa 风资料前推,则轨迹最后终止于黄海海面。实际上,当时的气温也不允许小地老虎飞那么高。贾佩华等在报道标放结果时称,3 月 18 日聊城回收的标记蛾可能是在 3 月 12 日以后曲江标放的^[9],这显然是未考虑 3 月 14~15 日夜间逆风、降水和其后数日风速已大大降低的情况。

表 1 草地螟标记蛾前推轨迹终点(山阴 112.8° E 39.5° N→涿鹿 115.2° E 40.3° N)

Table 1 The end of the forward trajectory of *Loxostege sticticalis* L. (from Shanyin 112.8° E, 39.5° N to Zhuolu 115.2° E, 40.3° N)

日期 Date (Month · day)	ASD (m/s)	OA (°)	FHR (h)	风向 WD*	经度 X	纬度 Y	高度 Z(m)	差距 D(km)
6.6~7	1.2	20	8	236~268	115.21	40.12	175	20.0
	1.2	30	8	236~268	115.27	40.10	175	23.0
	1.2	20	9	236~268	115.17	40.25	125	6.1
	1.2	20	9	236~268	115.23	40.22	125	9.2
6.8~9	0.8	-1	8	230~260	115.24	40.25	300	6.5
	1.0	-1	8	230~260	115.29	40.28	300	8.0
	1.2	-1	8	230~260	115.38	40.29	400	15.3
	1.0	60	7.75	230~260	115.20	40.28	300	2.2
	1.0	70	8	230~260	115.30	40.28	300	9.6
	1.2	70	8	230~260	115.36	40.28	400	15.3
	1.2	60	8	230~260	115.41	40.28	400	17.9
	1.28	60	8	230~260	115.44	40.29	400	20.4
6.13~14	1.0	70	8	230~250	115.26	40.32	500	5.5
	0.8	-1	8	230~250	115.08	40.35	450	11.6
	1.0	-1	8	230~250	115.14	40.36	400	8.4
6.16~17	1.2	-1	8	230~250	115.22	40.38	300	9.0
	0.7	80	9	205~256	115.20	40.42	300	13.3
	1.0	80	8	205~256	115.00	40.36	350	18.2
	0.6	-1	9	205~256	115.23	40.43	300	14.7
	1.0	-1	9	205~256	115.29	40.46	300	19.3
1.2	-1	8	205~256	115.04	40.41	300	18.2	

注:WD: 风向, Wind direction, 飞行高度上的模拟值。ASD: 飞行速度, Air speed; OA: 定向方位, Orientation azimuth; FHR: 飞行持续时间, Flight duration; X, Y, Z: Longitude, latitude & altitude at the end of the trajectories. D: The distance from the end of the trajectory to the recapture site. OA 取值 -1 时, 指 OA 置空, 无定向。OA = -1 means no orientation.

- 1) 何荣善, 徐培楨. 峨眉山小地老虎迁飞特性与气候关系. 中国迁飞昆虫研究进展学术讨论会论文摘要汇编. 南京: 中国昆虫学会生态专业委员会, 1989, 47

4 结论与讨论

所谓参数化, 是对事物本质的一种近似, 也即用某些人为构造的近似代替真实的过程以描述一个量值。往往是因为真正的物理过程或行为过程尚待发现、或这种过程太复杂而需要参数化, 因而, 参数化往往是不完备的, 但人们希望它是适当的。参数化包括了人们的描述和创造力, 这就意味着不同的研究者对同一未知量可能提出不同的参数化方法。但不论有多少个可能的参数化方案, 所有的方案都应当遵循一定的规则。对于昆虫迁飞行为的参数化而言, 最重要的是, 这种参数化方案在物理上必须是合理的, 在生物学上则应该是真实的。通过草地螟和小地老虎标放回收试验结果的检验, 表明本文提出的迁飞行为参数化方案及以此为基础的昆虫迁飞轨迹的数值模拟方法是合理的、可行的。

表 2 小地老虎标放试验前推轨迹(曲江 113.5° E 24.6° N → 聊城 115.9° E 36.4° N)

Table 2 The forward trajectory of *Agrotis ipsilon*, March of 1981

(from Qujiang 113.5° E, 24.6° N to Liaocheng 115.9° E, 36.4° N)

日期 DATE (month · day)	迹点 HR	经度 X	纬度 Y	高度 Z(m)	风速 WS(m/s)	风向 WD°	运行速度 TRS (m/s)	运行方向 TRD°
3. 11~12	0	113.50	24.60	437.5	4.96	168.9	7.35	175.9
	1	113.48	24.84	437.5	7.34	165.5	9.67	171.6
	2	113.43	25.15	437.5	9.21	164.6	11.52	169.9
	3	113.36	25.52	625.0	12.89	175.8	15.32	178.1
	4	113.34	26.02	625.0	15.25	176.3	17.69	178.3
	5	113.32	26.59	437.5	12.26	202.8	14.71	200.6
	6	113.51	27.04	650.0	18.00	181.0	20.47	182.1
	7	113.54	27.70	387.5	12.73	177.7	15.18	179.7
3. 12~13	8	113.53	28.19					
	0	113.53	28.19	437.5	1.34	218.8	3.73	199.9
	1	113.58	28.31	450.0	3.85	175.6	6.30	181.3
	2	113.59	28.51	487.5	6.62	172.3	9.03	177.1
	3	113.57	28.81	550.0	9.31	183.6	11.80	184.9
	4	113.61	29.19	575.0	11.08	186.2	13.58	186.9
	5	113.67	29.63	575.0	11.88	186.9	14.38	187.5
	6	113.74	30.09	600.0	12.10	186.2	14.59	186.8
3. 13~14	7	113.80	30.56	675.0	10.92	177.0	13.37	179.4
	8	113.80	30.99					
	0	113.80	30.99	437.5	3.41	240.8	5.35	219.5
	1	113.92	31.13	487.5	5.40	245.2	7.13	228.5
	2	114.13	31.28	525.0	7.09	253.1	8.52	237.9
	3	114.40	31.43	550.0	8.42	257.6	9.65	243.8
	4	114.73	31.57	600.0	9.55	263.0	10.56	249.9
	5	115.10	31.68	625.0	10.67	268.2	11.45	255.8
3. 15~16	6	115.53	31.77	650.0	11.26	273.5	11.81	261.3
	7	115.97	31.83	650.0	11.70	282.4	11.86	270.3
	8	116.42	31.83					
	0	116.42	31.83	475.0	5.25	128.1	7.07	144.2
	1	116.26	32.02	525.0	5.06	146.2	7.28	157.2
	2	116.16	32.23	625.0	5.55	151.9	7.84	160.5
	3	116.06	32.47	437.5	5.07	152.7	7.38	161.7

续表 2

日期 DATE (month · day)	迹点 HR	经度 X	纬度 Y	高度 Z(m)	风速 WS(m/s)	风向 WD°	运行速度 TRS (m/s)	运行方向 TRD°
3.16~17	4	115.97	32.70	412.5	4.66	160.6	7.06	167.4
	5	115.91	32.93	387.5	3.76	178.6	6.26	179.2
	6	115.90	33.13	312.5	3.90	177.2	6.40	178.3
	7	115.90	33.34	262.5	4.01	175.3	6.50	177.1
	8	115.88	33.55					
	0	115.88	33.55	337.5	3.40	172.2	5.88	175.5
	1	115.87	33.74	525.0	5.84	175.6	8.33	176.9
	2	115.85	34.01	600.0	6.00	181.0	8.50	180.7
	3	115.85	34.28	487.5	5.11	180.3	7.61	180.2
	4	115.85	34.53	600.0	4.58	187.9	7.07	185.1
	5	115.88	34.76	387.5	3.99	199.0	6.40	191.7
	6	115.93	34.96	287.5	4.11	202.2	6.49	193.8
	7	115.99	35.17	262.5	4.12	202.1	6.51	193.8
	8	116.05	35.37					
3.17~18	0	116.05	35.37	487.5	3.26	153.5	5.55	167.1
	1	116.00	35.55	525.0	3.13	159.6	5.49	170.8
	2	115.97	35.72	675.0	2.72	166.9	5.16	175.6
	3	115.95	35.89	487.5	4.33	166.1	6.75	173.0
	4	115.92	36.11	650.0	4.25	172.1	6.71	176.9
	5	115.90	36.32*	437.5	4.00	179.4	6.49	181.5
	6	115.91	36.53*	412.5	4.00	179.1	6.49	181.4

*最后一夜飞行 5 h 23 min 后到达回收点聊城, 完全吻合, 全程 1344 km。

The moth flew 6 nights & covered 1344 km, then arrived at the site exactly.

WS, WD: 飞行高度上的风速、风向, TRS, TRD: 迁飞昆虫的实际位移速度和方向。

T_c: 飞行低温界限, ASD: 昆虫自身的飞行速度, OD: 生态有利风向, OA: 定向方位。

WS, WD: Wind speed & direction; TRS, TRD: Ground speed & track azimuth; ASD: Air speed; OA: Orientation azimuth; OD: Optimum wind direction; T_c: The minimum temperature for flight of the objective species. HR: The *i*th Hourly output of the trajectory end.

T_c=5.0, ASD=2.5, OD=190, OA=0~10, 3.14~3.15 upwind & rain, no takeoff

飞行能力是昆虫迁飞行为研究中的一项重要指标。正如前文所述, 以吊飞试验中的飞行能力作为某种昆虫是否具有迁飞性的判据或用来解释昆虫的迁飞行为是极不适宜的^[1], 因为在什么时间、什么条件下怎样表达这种内在的能力完全是另一码事; 但若将其仅仅作为一种生理指标的话, 吊飞试验数据则大有用武之地。如以实验室种群与自然种群的飞行力有无差异来确定实验种群能否作为大规模标放试验的虫源及人工饲料的优劣^[10], 再如以上数值试验中取吊飞数据作轨迹分析中的某些输入参量等。在迁飞过程中, 空中迁飞个体必须持续振翅以保持其浮升力, 因此其自身的飞行速度(air speed)和一次迁飞所持续的时间完全可以静风条件下飞行磨上测得的飞行能力作为相当精确的近似。当然, 若能进一步改善飞行磨的物理性能, 如 Armes & Cooter 在飞行磨上加了供试个体可随意起降的小平台^[11], 则吊飞数据的可靠性将大大提高。

在数值试验的最佳参数组合中, 小地老虎的速度参数大大小于吊飞试验中测得的平均速度(3.5~4.3 m/s)^[8]。值得指出的是, Sappington & Showers 吊飞小地老虎的平均速度

(约 1.0 m/s)与贾、曹的结果相差更多^[8, 12]。其原因可能是贾、曹的结果是加了“阻力修正”后的修正值,草地螟的飞行力数据则是未做阻力修正的实测值,数值试验中的速度参数也与吊飞结果一致。数值试验的结果中,小地老虎在运行过程中的平均速度为 2.5 m/s。这似乎说明,对吊飞试验结果无需做阻力修正。实际上,吊飞数据的精确与否不在于飞行磨本身的摩擦阻力和气动阻力,而在于它与实际飞行环境相差得有多远。对吊飞技术的改进应从如何使供试个体的飞翔更接近于自然状态入手。

参 考 文 献

- 1 翟保平等. 昆虫迁飞行为的参数化 I 行为分析. 生态学报, 1997, 17(1): 7~17
- 2 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)
- 3 翟保平, 张孝羲. 迁飞过程中昆虫的行为: 对风湿场的适应与选择. 生态学报, 1993, 13(4): 356~363
- 4 Usher M B. An algorithm for estimating the length and direction of shadows with reference to the shadows of shelter belts. *J. Appl. Ecol.*, 1970, 7: 141~145
- 5 翟保平, 张孝羲. 昆虫迁飞场的数值模拟. 浙江农业大学学报, 1994, 20: 628~633
- 6 罗礼智, 李光博. 草地螟不同龄期成虫飞行能力和行为的研究. 青年生态学者论丛, 1992, 2: 303~308
- 7 陈瑞彪等. 草地螟迁飞活动的雷达观测. 植物保护学报, 1992, 19: 171~174
- 8 贾佩华, 曹雅忠. 小地老虎成虫的飞翔活动. 昆虫学报, 1992, 35: 59~65
- 9 贾佩华. 小地老虎远距离迁飞标记回收结果简报. 植物保护, 1985, 11(2): 20
- 10 王振营等. 亚洲玉米螟越冬代成虫扩散行为与迁飞可能性研究. 植物保护学报, 1994, 21: 25~31
- 11 Armes N J & Cooter R J. Effects of age and mated status on flight potential of *Helicoverpa armigera*. *Physiol. Ent.*, 1991, 16: 131~144
- 12 Sappington T W & Showers W B. Reproductive maturity, mating status, and long-duration flight behaviour of *Agrotis ipsilon* and the conceptual misuse of the oogenesis-flight syndrome by entomologists. *Environ. Ent.* 1992, 21: 677~688