

粘虫的迁飞发生区及其分布的数学模型*

邬祥光

(广东省昆虫研究所)

粘虫 (*Mythimna separata* Walker) 的年周期远距离迁飞, 早已为我国多数昆虫学者所证实 (林昌善等, 1963、1964; 马世骏, 1963; 陈永林等, 1963; 李光博等, 1964; 陈瑞鹿等, 1965; 李绵春等, 1965)。作者亦曾于1962年全国昆虫学会及1963年广东省植保学会上提出数据, 同意此观点。并作出全国粘虫迁飞发生区地图, 综合粘虫的水平迁飞及垂直迁飞为害实况, 绘出福建南部, 广东中、南部, 广西中、南部, 云南南部为第一次发生区, 2—3月幼虫为害小麦。山东南部, 河南中、南部, 陕西东、南角西至贵州、四川、云南的平坝地区, 南至江苏、浙江、安徽、直至广西为第二次发生区, 4—5月为害小麦或玉米。东北, 内蒙古、南部, 山西, 陕西, 宁夏, 甘肃, 以至四川, 贵州, 云南的海拔较高地区为第三次发生区, 6—7月为害谷子或玉米, 在此发生区渡过夏至。以后回迁到华北平原至华中, 为第四次发生区, 8—9月为害玉米或水稻。华南以至江西南部、湖南南部为第五次发生区, 10—11月为害水稻。每个发生区粘虫生活一个世代, 历期大约两个月, 每年一个迁飞周期。

在每个发生区, 粘虫每年的地理分布是有差异的, 从水平角度上看, 有偏南或偏北; 从垂直角度上看, 有偏高或偏低。作者研究这种地理分布的节律, 试作其数学模型, 以进行分布区的长期预测。

一、水平分布的数学模型

粘虫迁飞年周期的前半部是自南向北飞, 而后半部则相反。众所周知, 冬至日太阳直射南回归线, 冬至过后, 太阳直射位置逐渐从南回归线向北移, 到夏至日则直射北回归线。夏至至冬至日则相反, 太阳直射点自北向南移动, 即自北回归线移向南回归线。粘虫成虫迁飞与光是有密切关系的, 林昌善等曾证实与光有直接关系的粘虫成虫内在的时辰节奏 (生物钟) 的存在, 说明这是该物种长期与光有密切关系的自然选择的结果。作者及何彦珩等 (1962) 亦共同观察过成虫羽化后在黄昏时刻的高飞占 90.7%, 在光亮度为 5,000Lux 时, 飞翔个体甚少; 变为 30—50Lux 时, 成虫表现振翅欲飞的占 17.6%; 表现飞翔的占 58.8%, 共 76.4%。由此可见光可能是成虫起飞的讯号。关于光对粘虫成虫迁飞的 内因 和 外因 作用, 马世骏 (1963) 曾作出综述图解。因此, 太阳直射点移动的现象, 是否可作为粘虫成虫迁飞行动的讯息, 值得注意。粘虫每迁飞到一个地区, 不管是那里, 其大发生世代的历期总是 两个月 左右, 而每个迁飞区的水平间距 (纬度) 又都基本相似, 这就使人联系到成虫起飞及降落, 都可能以光的强弱转变为其讯号。那末, 最终降落点是否亦与光源位置有关? 具体地说: 太阳

*本文为1978年中国昆虫学会学术讨论会宣读论文。蒙南京农学院气象教研组江广垣教授, 中国科学院广州地理研究所何大章教授及吉林省气象局王禄刚同志提出宝贵意见, 并此致谢。

在两回归线之间赤纬的移动是有节奏地进行的, 因此, 成虫的最终降落点(降落后还可能存在一个生境选择过程, 但这问题不在本文讨论)很可能与一定的太阳高度角相符合。即地球每公转约两个月, 粘虫在一地渡过一个世代以后就迁飞他方, 迁出区与迁入区的水平距离与两个月内太阳赤纬移动的距离相一致, 而其迁飞方向又与当时的太阳直射点移动方向相符合, 迁飞后的最终降落点则与一定的太阳高度角相符合(见图1)。

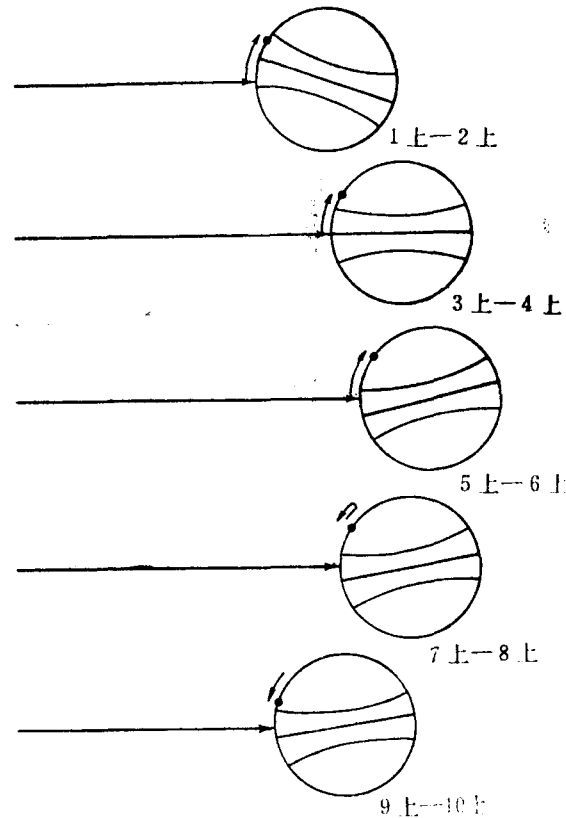


图1 地球公转与太阳高度角及粘虫迁飞发生区的关系

现设 $h\theta$ 为太阳高度角, $\delta\theta$ 为太阳赤纬, φ_i 为地方纬度, ω 为时角(真太阳时正午为0, 上午为负值, 下午为正值), 则根据天球坐标, 用球面三角公式可得:

$$\sin h\theta = \sin \varphi \sin \delta\theta + \cos \varphi \cos \delta\theta \cos \omega$$

在正午时, $\omega = 0$, $\cos \omega = 1$, 则

$$\begin{aligned} \sin h\theta &= \sin \varphi \sin \delta\theta + \cos \varphi \cos \delta\theta \\ &= \cos(\varphi - \delta\theta) \\ &= \sin[90^\circ - (\varphi - \delta\theta)] \end{aligned}$$

所以 $h\theta = 90^\circ - \varphi + \delta\theta$ (1)

式中 $\delta\theta$ 以当天太阳赤纬值(查天文年历可得)代入即可。按(1)式求得水平迁飞区五个发生区的中心地点纬度及成虫最盛日(以历年最盛日的中值为计算依据)的太阳高度角如下:

第一次发生区: 广东信宜 $\psi = 22.5^\circ$, 成虫最盛日 1 月 20 日, 赤纬 $\delta\theta = -20.2^\circ$, 则太阳高度角 $h\theta = 90^\circ - 22.0^\circ - 20.2^\circ = 47.3^\circ$ 。

第二次发生区: 江苏徐州 $\psi = 34.2^\circ$, 成虫最盛日 3 月 22 日, 赤纬 $\delta\theta = +0.2^\circ$, 则太阳高度角 $h\theta = 90^\circ - 34.2^\circ + 0.2^\circ = 56.0^\circ$ 。

第三次发生区: 吉林长春 $\psi = 44.0^\circ$, 成虫最盛日 5 月 22 日, 赤纬 $\delta\theta = +20.1^\circ$, 则太阳高度角 $h\theta = 90^\circ - 44.0^\circ + 20.1^\circ = 66.1^\circ$ 。

第四次发生区: 山东聊城 $\psi = 36.4^\circ$, 成虫最盛日 7 月 22 日, 赤纬 $\delta\theta = +20.3^\circ$, 则太阳高度角 $h\theta = 90^\circ - 36.4^\circ + 20.3^\circ = 73.9^\circ$ 。

第五次发生区: 广东四会 $\psi = 23.4^\circ$, 成虫最盛日 9 月 23 日, 赤纬 $\delta\theta = +0.2^\circ$, 则太阳高度角 $h\theta = 90^\circ - 23.4^\circ + 0.2^\circ = 66.8^\circ$ 。

求出各地的太阳高度角绘于图 2。可见在低纬度地区成虫要求的太阳高度角较小, 而高纬度地区则反之。图 2 的年周期前半部与后半部恰好呈对称性的线性上升和下降, 两直线的斜率相等 (均为 0.15) 而符号相反, 其上下两交点正是全年温度最高的大暑前后和温度最低的大寒前后。由此可见粘虫成虫在不同纬度地区对太阳高度角要求的变化, 可能是受光热效应的影响。低纬度地区可能光强度和光量较大, 所以高度角较小, 即能满足与高纬度地区较大高度角的同等光热效应。

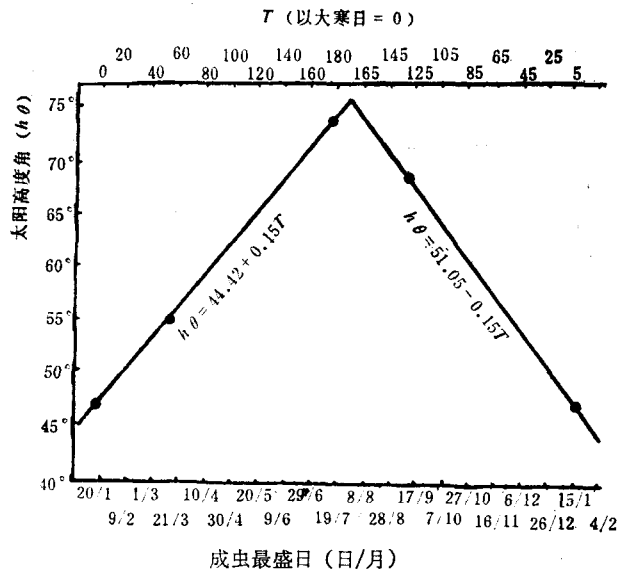


图 2 粘虫在各发生区的成虫最盛日与当时的太阳高度角

以成虫最盛日的中值为中心, 前后 ± 15 天作为其发生日期的变幅, 把 (1) 式中的 ψ 作为未知数, 按成虫发生日期变幅, 以当年的大寒日为 0, 由大寒至大暑日 T 取正数依顺序或逆序递加的成虫发生日期。例如设大寒日为 1 月 20 日, 则若成虫发生日期 1 月 30 日的 $T = +10$, 若 1 月 10 日的 T 值亦为 +10。以此代入 (2) 式求成虫发生时的期望太阳高度角。

$$h\theta = A + 0.15T \quad (2)$$

式中, A 为常数, 由大寒至大暑期间 A 取 44.42; 大暑至大寒期间 A 取 51.05

这样, 以成虫发生日期变幅的前后两个 T 值, 求得相应的太阳高度角变幅, 然后再按 (1)

式求相应的 ψ ，这可以理解为这个发生地区粘虫发生分布纬度的期望值。如

第一次发生区：广东信宜 1 月 5 日—2 月 4 日的分布纬度期望值为 16.5° — 23.1°N 。第二次发生区：江苏徐州 3 月 7 日—4 月 6 日的分布纬度期望值为 29.9° — 38.9°N 。第三次发生区：吉林长春 5 月 7 日—6 月 6 日的分布纬度期望值为 43.3° — 49.8°N 。第四次发生区：山东聊城 7 月 7 日—8 月 6 日的分布纬度期望值为 40.9° — 29.7°N 。第五次发生区：广东四会 9 月 8 日—10 月 7 日的分布纬度期望值为 28.6° — 21.2°N 。

可以理解这个期望值正是实际上我国五个大发生区常发区的纬度范围，超出这个范围的地区应是缓冲区，即缓冲区为前发生区或后发生区的偶发区。若某年成虫盛发期提早，则因常发区后面的缓冲区能较早期地满足了成虫要求的太阳高度角，致使其后幼虫的发生区位移至常发区后面的缓冲区，成为该次发生区的偶发区；但若某年成虫盛发期延迟，则成虫要求的太阳高度角相应地延迟出现，则常发区前面的缓冲区可成为该次发生区的偶发区。

二、垂直分布的教学模型

上面曾经提出过光热效应的问题，由于我国五个发生区的粘虫世代历期，实际上均约为 60 天，这就可以估计不同发生区在粘虫发生的相应时间内的光热效应可能是接近相等的。同样也可以想象到粘虫的垂直迁飞区，作为温度在垂直方向上的表现，亦应与水平方向上的表现相一致。因为同一纬度上的海拔高度越高，则气温越低。所以粘虫每一次水平迁飞对环境条件的要求，必然可以在相应的垂直高度上找到相似的条件。而这个垂直高度的节奏，亦应与水平距离的节奏相应。根据 W. 莎菲尔 (1958) 认为在北纬 30° — 60° 范围内，水平温度梯度为 $0.006^{\circ}\text{C}/1,000$ 米，而垂直温度梯度则为 $6^{\circ}\text{C}/1,000$ 米，两者相差 1,000 倍。但据蔡邦华 (1962) 则认为我国东部平原在北纬 20° — 40° 范围内，水平温度梯度为 0.0066 — $0.0078^{\circ}\text{C}/1,000$ 米。因此，温度在垂直方向上的表现，在我国的情况应小于 1,000 倍。根据这个关系，我们推导出粘虫在我国水平分布与垂直分布关系的方程式。

若水平分布及垂直分布均以 1,000 米（或 1 公里）为单位时，得

$$(0.0066-0.0078^{\circ}\text{C})(h'-h)=6^{\circ}\text{C}(\psi'-\psi)$$

式中， h 是粘虫成虫迁出区垂直高度， h' 是迁入区垂直高度， ψ 是水平迁飞区迁出区水平位置， ψ' 是迁入区水平位置。以上四者均以 1,000 米为单位。但常用的垂直高度单位是海拔高度（1 米 = $1/1,000$ 公里），水平位置单位为纬距（1 纬距 = 110 公里）。把上式的水平及垂直的单位代换为常用单位，并化简之，得

$$h'-h=(62.9+0.74'')(\psi'-\psi) \quad (3)$$

式中各符号的表示同上，但单位代换为常用单位， ψ'' 是垂直迁飞区迁出区的地方纬度。如系粘虫迁飞的年周期后半部，则 (3) 式的 ψ' 与 ψ 倒换位置，即为

$$h-h'=(62.9+0.7\psi'')(\psi-\psi') \quad (4)$$

现以全国粘虫的第一次发生区（虫源区）的广西玉琳、合浦和广东信宜等地的海拔高度为基础，以同纬度的云贵高原为例，计算相应于水平迁飞区的垂直迁飞区的海拔高度。得表 1 结果。

表 1 相应于水平迁飞区的垂直迁飞区海拔高度估算

第一次发生区	地 名	广 西 合 浦	广 西 玉 林	广 东 信 宜
	海拔高度基数	9.9米	79.0米	283.0米
第二次发生区	估算海拔高度	909.6米	978.7米	1,182.7米
第三次发生区	估算海拔高度	1,676.9米	1,746.0米	1,950.0米
第四次发生区	估算海拔高度	1,063.6米	1,132.7米	1,336.7米
第五次发生区	估算海拔高度	36.6米	71.9米	309.7米

表 1 的估算结果与实测对比, 估算值在高原地带以偏高 200 米左右, 其原因尚未明瞭。但可以肯定这种垂直迁飞的节奏与水平迁飞的节奏是基本上一致的。

三、发生分布的预测

根据以上的 3 个数学模型, 在得出任一发生区 (迁出区) 的粘虫成虫实测盛发期后, 即可以进行迁入区发生分布的长期预测。

例如调查某年第四次发生区粘虫大发生后的成虫最盛日为 9 月 27 日, 估计 10 月 1 日可迁飞到达第五次发生区, 查天文年历, 设该年 10 月 1 日的太阳赤纬位置为 -1.4 , 至于 10 月 1 日按 1 月 20 日 $= 0$ 为标准的 $T = 112$, 先代入 (2) 式, 求太阳高度角。得

$$h\theta = 51.05 + 0.15 \times 112 = 67.85^\circ$$

以此结果代入 (1) 式, 得

$$\psi' = 90 - 67.85 - 1.4 = 20.8^\circ\text{N}$$

据此可预测该年第五次发生区的中心点在 20.8°N 附近的广东湛江地区附近。

又设某年云南省元江县 (北纬 23.2° , 海拔 956 米) 的粘虫成虫最盛日为 5 月 20 日, 估计 5 月 24 日可迁飞到达第三次发生区, 查天文年历, 设该年 5 月 24 日的太阳赤纬为 $+20.4$, 5 月 24 日的 T 值为 124, 先代入 (2) 式求太阳高度角。得

$$h\theta = 44.42 + 0.15 \times 124 = 63.02^\circ$$

以此结果代入 (1) 式, 得

$$\psi' = 90 - 66.02 + 20.4 = 47.4^\circ$$

再代入 (2) 式, 得

$$\begin{aligned} h' &= [(62.9 + 0.7 \times 23.2) (47.4 - 34.2)] + 956 \\ &= 2,000.6 \text{ 米} \end{aligned}$$

据此可预测该年云贵高原第三次发生区的中心海拔高度为二千米附近。

四、第六次发生区的推测

粘虫在我国水平及垂直迁飞区中发生, 都是大约 60 天发生一个世代, 但一年有 365 天, 可以发生完整的 6 个世代, 而在我国只能找到五个发生区, 这又当作何解释? 从粘虫迁飞习

性及对太阳高度角的反应来看,粘虫在第五次发生后发生,决不会不迁飞的,这是由于迁飞已在长期的自然选择中成为本能。又因粘虫在第五次发生区为害后的成虫羽化盛期约在11月23日前后,羽化盛期的幅度约为11月8日至12月7日之间,这时还未到冬至,太阳直射点尚在继续由北向南移动,所以推测粘虫仍应继续向南迁飞,而有一个第六次发生区存在。以11月23日的太阳赤纬(-20.1)来推算这个第六次发生区的中心点纬度应为 13.2°N ,而按成虫盛发期变幅即11月8日至12月7日的相应的第六次发生区常发区纬度变幅范围,则应为 $7.3-11.8^{\circ}\text{N}$ 。第六次发生区的粘虫种群数量应比第五次发生区更受抑制,而其分布范围亦应比第五次发生区更为狭小。在地图上,这个第六次发生区可能在印度支那半岛南端至马来西亚、菲律宾一带,它很可能成为第1—5发生区的总虫源基地。

至于垂直迁飞也有可能飞往第六次发生区的,因为第五次发生区的垂直高度按估算和实测均为海拔36.6—309.7米左右,粘虫仍然可以再向低飞,而印度支那半岛南端、马来西亚、菲律宾一带又甚多洼地,因此垂直迁飞也有继续飞向这些生境中产卵繁殖的可能。

当然第五次发生区发生后,也还是有部分较弱的不能迁飞的个体,留在当地越冬辗转为害,而成为第一次发生区的当地虫源的。因为华南冬季的条件完全可以满足粘虫安全渡过冬季,事实上,我们每年都能十分清楚地找到这个越冬世代。

参 考 文 献

- 马世骏 1963 粘虫蛾迁飞的生理生态学背景。科学通报(9):65—68。
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—130。
李绵春、陈瑞鹿、刘增义、卢兆先 1965 吉林省粘虫猖獗世代发生虫源的研究。1.发生虫源的探讨和越冬问题研究。昆虫学报14(1):21。
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。
陈永林、宋绍宗、邓小山 1963 中国渤海及黄海海面迁飞昆虫的初步观察,昆虫学报12(2):137—148。
陈瑞鹿、卢兆先、刘增义、李绵春、相连英 1965 吉林省粘虫猖獗世代发生虫源的研究。2.虫源策源地的探讨。植物保护学报4(1):49。
邬祥光、刘南欣、孙传蕃、魏剑榆、何淑贞、练慧英 1963 南方粘虫之研究。I.大发生虫口来源的探讨。广东省植物保护学会1963年昆虫学论文集34—36。
邬祥光 1963 南方粘虫之研究。II.年周期迁飞及季节性生境转移的节律。广东省植物保护学会 1963 年昆虫学论文集 47—57。
邬祥光 1964 南方粘虫之研究。VI.再论大发生主要虫口来源。昆虫知识8(5):230—239。
蔡邦华、陈宁生 1962 中国白蚁分类和区系问题。中国昆虫学会1962年学术讨论会会刊30—33。

THE MIGRATORY ZONES OF THE ARMY WORM (*MYTHIMMA SEPARATA* WALK) AND THE MATHEMATICAL MODEL OF ITS DISTRIBUTION

Wu Xiangguang

(*Kwangtung Institute of Entomology*)

1. Army worm migrates horizontally and vertically in an annual period in the zones covering the planis of eastern China and the Plateaus of western China. From winter solstice to summer solstice, from latitudes 19°N to 53°N , it migrates from south to north, from 10m above sea level upwards to 2,500m; after this period it does vice versa, namely, it remigrates from north to south and from high level downwards. whenever it migrates to a new zone, it reproduces a new generation, the cycle of each generation, without exception, is about 60 days.

2. The orientation of each migration of the army worm is of the same with the displacement direction of the sun when it is at the summit; and the basis it chooses to land on and to carry out egg reproduction (i. e. the latitudes of its immigration) are related to the solar incident angle during the migration period of its adults. The solar incident angle of a given day may be solved as follows;

$$h\theta = 90^{\circ} - \psi + \delta\theta \quad (1)$$

within $\delta\theta$ is red-latitude of the sun. ψ' is the latitudes of each immigration of the army worm.

3. The height and sea level elevation of the vertical migration zone correspond to the latitudes of the horizontal migration zone. When it is in the former half of an annual period, they may be given with following equatton;

$$h' - h = (62.9 + 0.7\psi'')(\psi' - \psi) \quad (2)$$

But when it is in the latter half, i. e. during the remigration, the locations of and in the equation will be reversed as follows;

$$h - h' = (62.9 + 0.7\psi'')(\psi - \psi') \quad (3)$$

4. Accoding to the preceding three mathematical models, the longterm forecast of the zones where army worm occurs and distributes can be made.

5. Based on the rhythm of the horizontal and vertical migration and on the calculation with the above predicting equations, it may be conjectured that there might be a sixth possible occrence zone in other countries. The limits of that occurrence zone are vary likely between latiludes 7.3°N and 11.8°N , with a

central latitude near to latitude 9.6°N .

Judging by its reckoned sea level elevation, it must be a lowest zone of depression and plain.