

昆虫发育起点温度估值的一种新方法*

李 超

(中国科学院动物研究所)

摘 要

本文提出一个运用优选法估计昆虫发育起点温度的简单方法。其目标函数是

$$f(T_0) = \sqrt{\frac{n^2 \sum_{i=1}^n k_i^2 - n \left(\sum_{i=1}^n k_i \right)^2}{(n-1) \left(\sum_{i=1}^n k_i \right)^2}}$$

其中: $k_i = N_i(T_i - T_0)$;

n = 温度处理数;

T_0 = 起点温度;

N_i = 第 i 个处理的平均历期;

T_i = 第 i 个处理的环境温度。

目标函数的最小值所对应的点 T_0 即为起点温度的期望值。于是, 相应的累积热单位 K 由下列方程所确定:

$$K = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i(T_i - T_0)$$

发育起点温度是昆虫种群的基本生物学参数之一。在害虫的科学管理中, 需要一个系统模拟模型来向管理措施的决策者提供必要的信息。而在这样一个系统模拟模型中, 昆虫的发育起点温度做为该模型的一个基本参数是必不可少的。

昆虫发育起点温度的估计一般是根据有效积温理论来进行的。按照有效积温理论, 各虫态的昆虫都要在各自的一定温度 (即发育起点温度) 以上, 才能开始完成其发育过程; 而完成特定阶段发育所需要的有效积温是一个常数, 这个常数在不同环境条件下是不变的, 即

$$N(T - T_0) = K \quad (1)$$

其中 N 为平均历期, K 为有效积温, T_0 为发育起点温度, T 为环境温度。

T_0 的实际估计常用回归直线法进行, 即令 $y = 1/N$, 为发育速率, 于是方程 (1) 成为

$$T = T_0 + Ky \quad (2)$$

然后根据最小二乘法原理, 得到 T_0 和 K 的估值。

稍加分析就可以发现: 用这种方法估计发育起点温度 T_0 , 由于将原始数据进行了变换, 所以得到的估值对于变换后的数据在最小二乘法意义下是最优估值, 而对于原始数据来说就不是最佳估值了。其原因在于这种变换从统计学上来讲并不完全等价。

本文按照最优化原理提出一种运用原始数据来寻找最优 T_0 估值的简单方法。

* 本项工作在马世骏教授领导下进行, 并承丁岩钦副教授、李典谟同志审阅文稿, 在此一并致谢。

一、方法概述

有效积温理论是生物学上的一个合乎逻辑的假定的理论,在实际情形中并非如此简单。如阳惠霖等(1959)曾用在同一小时内产出的十字纹稻苞虫(*Parnara guttata*)的卵供试验,结果在完成阶段发育和生活史方面也都有较大区别。因此有效积温并不是绝对的,而是按照一定统计方法算出的一个平均值,在实际工作中,我们只能希望找到一个适当发育起点温度 T_0 ,这个 T_0 能使得在不同温度条件下的有效积温围绕它们的平均值 K 的变化最小。满足这个条件的 T_0 和相应的 K 值,就可以被认为是最优估值。

K 值的大小是由 T_0 来确定的,于是我们可以采用由Lindsey等(1956)提出的最小变异系数法来确定 T_0 ,从而得到 K 值。Arnold(1959)曾讨论了衡量变化大小的标准选择问题,他分析了标准差和变异系数,发现用标准差会给出稍偏高的 T_0 估计,因而认为用变异系数要好一些。许多研究工作者如Chmiel等(1979)在对长沫蝉(*Philaenus spumarius*)的研究中,以及Richmond等(1983)对松梢卷叶蛾(*Rhyacionia frustrana*)的研究中都运用了这一方法。在他们的工作中,由于 T_0 是用试错法来确定的,因而计算量很大。而且这样确定的 T_0 并不是一个准确的值,它只能表示真正 T_0 所处的大概位置。正是由于这些存在的问题,限制了该法的推广运用。针对这些问题,我们利用最优化方法中的0.618法,发展了一个能减小计算量并能得到 T_0 准确估值的简单算法。

0.618法是我国数学工作者理论联系实际,自七十年代以来在生产实践中大量推广应用,并取得良好效果的一种简单的一维搜索法。它的基本思想是:用最少数目的函数值计算,把包含有目标函数极小点的区间逐步缩小,一直缩小到满足所要求的精确度时为止。只要在搜索的初始区间上,目标函数为一单峰函数,那么就可以成功地应用0.618法。

在现在的问题中,目标函数为

$$f(T_0) = \sqrt{\frac{n^2 \sum k_i^2 - n(\sum k_i)^2}{(n-1)(\sum k_i)^2}} \quad (3)$$

其中

$$k_i = N_i(T_i - T_0),$$

n = 温度处理组数

通过搜索,要求找出目标函数的极小值所对应的点 T_0 ,该点即为理论发育起点温度的准确值。运用0.618法进行搜索的具体过程如下:(附录1给出了一个具体计算过程实例)

第一步:确定初始搜索区间 $[A, D]$ 和搜索结果所要求满足的精确度 E 。

第二步:计算区间 $[A, D]$ 中的点 B 和 C ,

$$B = D - 0.618(D - A),$$

$$C = A + 0.618(D - A),$$

第三步:判断计算结果是否满足下式

$$|(B - C)/C| < E$$

若满足此式,则 $T_0 = (B + C)/2$,搜索过程结束;

否则进行下一步计算。

第四步: 计算目标函数值 $f(B)$ 和 $f(C)$, 并进行比较:

- (1) 如果 $f(B) < f(C)$, 那么搜索区间变为 $[A, C]$ 。令 $D = C$, $C = B$, $B = C - 0.618(C - A)$, 转第三步;
- (2) 如果 $f(B) > f(C)$, 那么搜索区间变为 $[B, D]$ 。令 $A = B$, $B = C$, $C = B + 0.618(D - B)$, 转第三步。

按以上程序进行反复的计算和比较, 直到满足预先确定的精确度时为止。这时运用所确定的 T_0 值, 就可以得到昆虫该阶段发育所需要的有效积温 K :

$$K = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i (T_i - T_0) \quad (4)$$

二、结 果 和 讨 论

按照上述算法, 用BASIC语言编制程序 (见附录 2) 并在 TRS-30 型微处理机上对不同的资料进行了计算。

吴坤君等(1980)用回归直线法获得了棉铃虫(*Heliothis armigera*)实验种群在恒温条件下的 T_0 和 K 的估值, 运用本文提出的算法进行计算所得到的结果可参见表 1。为了清楚和便于进行比较, 将吴坤君等(1980)的计算结果也列于表 1 中。

从表 1 中我们可以看到: 用两种不同的方法计算的发育起点温度 T_0 之间是有差异的。但从变异系数的大小来看, 用本文所提出的方法计算的 T_0 能使不同温度条件下的有效积温最接近一个常量, 这说明计算结果较为精确。我们用邬祥光等(1964)对粘虫(*Leucania separata*) (实验材料来自北京) 在恒温条件下的测定结果进行计算, 也得到了类似的结果, 见表 2。

表 1 棉铃虫在恒温条件下的 T_0 和 K 值

Table 1 The value T_0 and K of cotton bollworm under the constant temperature

阶 段 stage	项 目 item method	T_0 (°C)		K (day-degree)		CV (%)	
		回归直线法 linear regression	本文方法 present	回归直线法 linear regression	本文方法 present	回归直线法 linear regression	本文方法 present
卵 egg		10.11	9.31838	49.09	52.3105	9.7002	8.51418
幼 虫 larvae		8.36	9.25638	285.9	265.548	7.9832	6.65922
蛹(♀) pupa		12.70	12.0739	173.9	186.994	14.9635	12.5652
蛹(♂) pupa		12.95	12.092	186.76	206.029	18.2831	14.1628
整个未成熟期 immature		10.87	10.8687	505.03	506.641	5.9892	5.9886

表 2 粘虫在恒温条件下的 T_0 和 K 值Table 2 The value T_0 and K of armyworm under the constant temperature

阶 段 stage	方 法 method	项 目 item	T_0 (°C)		K (day-degrele)		CV (%)	
			回归直线法	本文方法	回归直线法	本文方法	回归直线法	本文方法
			linear regression	present	linear regression	present	linear regression	present
卵		egg	10.2	10.3382	62.3	61.7901	4.28475	4.21147
幼虫		larvae	7.4	5.93642	362.5	402.686	8.7402	7.57791
前蛹		prepupa	8.7	9.47928	39.2	35.4323	12.3298	11.7742
蛹		pupa	9.9	11.4415	150.7	147.737	18.1743	14.4244
成虫产卵前期		adult preoviposition	10.0	4.3719	71.3	128.275	31.6516	24.7835
全世代		generation	8.7	8.63658	696	734.67	11.7551	11.7505

对于变温条件下的测定结果, 运用本文提出的方法也可以获得类似的结果, 以邬祥光等 (1964) 在变温条件下对粘虫 (实验材料来自广东) 的测定结果为例, 计算结果见表 3。

表 3 粘虫在变温条件下的 T_0 和 K 值Table 3 The value T_0 and K of armyworm under the variable temperature

阶 段 stage	方 法 method	项 目 item	T_0 (°C)			K (day-degree)			CV (%)		
			回归直线法	加权法	本文方法	回归直线法	加权法	本文方法	回归直线法	加权法	本文方法
			linear regression	weighting	present	linear regression	weighting	present	linear regression	weighting	present
卵		egg	10.0	8.5	10.0319	54.9	55.6	56.0616	15.256	17.7387	15.2546
幼虫		larvae	9.6	9.5	8.63872	345.8	325.2	397.662	21.4346	21.3736	21.1384
前蛹		prepupa	13.2	11.0	3.96952	37.8	26.4	43.7217	37.5977	31.2396	26.1402
蛹		pupa	11.5	9.0	9.79187	130.5	198.6	150.548	12.5049	10.9393	10.6379
成虫产卵前期		adult preoviposition	12.5	13.5	2.81448	58.7	43.7	113.736	27.2612	28.624	21.13
全世代		generation	9.8	11.2	9.80636	761.4	574.2	717.992	17.3238	18.002	17.3231

从表 3 中可以看到: 回归直线法与加权法的计算结果在精确度方面差不多, 而用本文提出的方法计算的结果比上述两种方法都要精确。对于变温条件下的发育起点温度 T_0 的估计方法由另文所述, 这里不做详细讨论。

对发育起点温度 T_0 的估计有不同的方法。林郁等(1959)曾用实测法、图测法和回归直线法估计了三化螟(*Schoenobius incertellus*)的发育起点温度 T_0 和有效积温 K , 发现计算所得数值都与实测的有一定差异, 而且有些计算数值例如卵的 T_0 是没有实际意义的。因此用各种方法计算的 T_0 并不是生理学上的发育起点温度, 由这样的 T_0 所确定的 K 值也不是生理学上的有效积温, 而是气象学的。计算 T_0 和 K 的数值, 其目的是为了要找到能够准确反映出它们的发育状况而选用的热单位系统的理论值。在害虫管理工作所运用的系统模拟模型中, 应用这些理论值就能准确地模拟昆虫的发育情况。在这个意义上讲, 如果我们选定变异系数做为衡量对参数 T_0 估计的精确性指标, 那么本文提出的方法应当是可以满足我们愿望的一个简单方法。

另外, 发育起点温度 T_0 的估计也可以用非线性参数估计中的若干其它方法进行, 如牛顿法、梯度法、阻尼最小二乘法等, 但是非线性参数估计的方法需要一些高等数学的知识, 并且一般来讲计算量较大, 在无计算机的地方很难运用。本文提出的方法避开了这些困难, 只要有初等数学的知识和一个计算器就可以运用该法。并且除去开始时需要计算两个函数值以确定新区间外, 以后每次确定新区间只需要计算一个新的函数值即可, 这对于在实际工作中的推广运用是大有益处的。

参 考 文 献

- 中国科学院数学研究所运筹室优选法小组 1975 优选法。科学出版社。
 吴坤君、陈玉平、李明辉 1980 温度对棉铃虫实验种群生长的影响。昆虫学报。23(4):358—367。
 阳惠霖、姚光富等 1959 一字纹稻苞虫研究 I. 有效积温检验。昆虫学报 9(2):137—148。
 林郁、祝兆麒等 1959 三化螟有效积温的研究 I. 各虫态期的发育零点和其有效积温。昆虫学报 9(2):423—435。
 郭祥光、黄心华等 1964 南方粘虫之研究 IV. 粘虫的发育起点、有效积温常数测定及其研究方法、计算方法的比较。昆虫学报13(5):649—658。
 Arnold C.Y. 1959 The determination and significance of the base temperature in a linear heat unit system. *Proc. Am. Soc. Hort. Sci.* 74:430—445。
 Chmiel S.M. and M.C. Wilson 1979 Estimation of the lower and upper developmental threshold temperature and duration of the nymphal stages of the meadow spittlebug, *Philaenus spumarius*. *Environ. Entomol.* 8(4):682—685。
 Lindsey A.A. and J.E. Newman 1956 Use of official weather data in spring time-temperature analysis of an Indiana phenological record. *Ecology*. 37:812—823。
 Richmond J.A., H.A. Thomas, and H. Bhattacharyya 1983 Predicting spring flight of Nantucket pine tip moth (Lepidoptera: Olethreutidae) by heat unit accumulation. *J. Econ. Entomol.* 76(2):269—271。

附 录 1 Appendix 1

现以吴坤君等(1980)在恒温条件下对棉铃虫卵的实验数据为例, 说明适用本文提出的方法计算 T_0 和 K 的过程。(数据见表A)。

- (1) 令 $A = 0, D = 20, E = 10^{-7}$ 。
- (2) 计算 B 和 C : $B = 7.63932, C = 12.3607$ 。
- (3) $|(B - C)/C| = 0.381967 > E$ 。
- (4) 计算 $f(B)$ 和 $f(C)$: $f(B) = 0.115532, f(C) = 0.236425$, 由于 $f(B) < f(C)$, 因此搜索区间缩小为 $[0, 12.3607]$, $C = 7.63932$, 并计算出 $B = 4.72136$ 。

- (5) $|(B-C)/C| = 0.381966 > E$, 且由于 $f(C) = 0.115532$, 只需计算 $f(B)$ 即可: $f(B) = 0.196518$. 由于 $f(B) > f(C)$, 因而搜索区间缩小为 $[4.72136, 12.3607]$, $B = 7.63932$, 并计算出 $C = 9.44272$.
- (6) $|(B-C)/C| = 0.190983 > E$, 且由于 $f(B) = 0.115532$, 只需计算 $f(C)$ 即可: $f(C) = 0.0854928$. 由于 $f(B) > f(C)$, 因而搜索区间缩小为 $[7.63932, 12.3607]$, $B = 9.44272$, 并计算出 $C = 10.5573$.
- (7) $|(B-C)/C| = 0.105574 > E$, 且由于 $f(B) = 0.0854928$, 只需计算 $f(C)$ 即可: $f(C) = 0.11361$, 由于 $f(B) < f(C)$, 因而搜索区间缩小为 $[7.63932, 10.5573]$, $C = 9.44272$, 并计算出 $B = 8.75388$.
- ...

经过若干次迭代计算后, 搜索区间缩小为 $[9.31837, 9.31839]$, 此时 $B = 9.31838, C = 9.31838$. 计算出 $|(B-C)/C| = 0 < E$, 因而搜索过程结束, 得到 $T_0 = (B+C)/2 = 9.31838$, 将 T_0 值代入方程(4)得到 $K = 52.3105$.

表 A 棉铃虫卵期实验数据

Table A The experimental data of cotton bollworm egg

temperature 温度(℃)	15	20	25	30	35
average duration(Day) 平均历期(天)	8.86	5.46	3.34	2.24	2.11

附 录 2 Appendix 2

```

10 CLEAR:DEFINTI,K,Q:DEFSNGN,P:DEFDBLS,T,X
20 T(1)=0:T(4)=20:T(5)=(SQR(5)-1)/2:T(2)=(1-T(5))*(T(4)-T(1)):T(3)=T(5)*(T(4)-T(1))
30 READQ:FORI=1TOQ:READP(I),N(I):NEXTI
40 TO=T(2):GOSUB200:S(2)=TV
50 TO=T(3):GOSUB200:S(3)=TV
60 IFABS(T(2)-T(3))/T(3)<1D-7THEN100
70 IFS(2)>S(3)THEN80ELSE90
80 T(1)=T(2):T(2)=T(3):S(1)=S(2):S(2)=S(3):T(3)=T(1)+T(5)*(T(4)-T(1)):TO=T(3):GOSUB200:S(3)=TV:GOTO60
90 T(4)=T(3):T(3)=T(2):S(4)=S(3):S(3)=S(2):T(2)=T(4)-T(5)*(T(4)-T(1)):TO=T(2):GOSUB200:S(2)=TV:GOTO60
100 TO=(T(3)-T(2))/2:GOSUB200
110 LPRINT "THE BASE TEMPERATURE IS:";CSNG(TO)
120 LPRINT "THE CUMULATIVE DAY-DEGREE IS:";CSNG(S(5))
130 END
200 S(5)=0:S(6)=0:FORI=1TOQ:X(I)=N(I)*(P(I)-TO):S(5)=S(5)+X(I):S(6)=S(6)+X(I)*2:NEXTI
210 S(6)=(S(6)-S(5)*2/Q)/(Q-1):S(5)=S(5)/Q:TV=S(6):RETURN

```

A NEW METHOD FOR ESTIMATING THE BASE TEMPERATURE OF THE INSECT DEVELOPMENT

Li Chao

(Institute of zoology, Academia Sinica)

This paper presents a simpler method for estimating the base temperature of the insect development by using the optimum seeking method. The objective function is

$$f(T_0) = \sqrt{\frac{n^2 \sum_{i=1}^n k_i^2 - n \left(\sum_{i=1}^n k_i \right)^2}{(n-1) \left(\sum_{i=1}^n k_i \right)^2}}$$

where $k_i = N_i(T_i - T_0)$;

n = the number of the temperature treatment;

T_0 = base temperature;

N_i = average duration of the i th treatment;

T_i = environmental temperature of the i th treatment.

The point T_0 which corresponds to the minimum of the objective function is the expected value of the base temperature. Thus, the corresponding accumulative heat unit K is determined by the equation as follows:

$$K = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i (T_i - T_0)$$