

定温条件下棉铃虫种群动态的 数学模拟与分析*

陈玉平

陈维博

(中国科学院动物研究所)

(北京农业大学)

棉铃虫 (*Heliothis armigera* Hübner) 是我国棉花主要害虫之一, 70年代以来, 曾在我国南北各棉区几次严重为害, 这样, 对棉铃虫预测与控制的研究成为全国棉虫研究的重点课题之一。温度对棉铃虫的生长发育与生殖力的试验与分析, 国内外已有报道 (许明霞等, 1958; 齐兆生, 1961; 吴坤君等1978、1980), 但多着重于温度对生长发育与生殖力的影响, 以及实验条件下生命表的分析, 应用数学模型对该种害虫在不同温度下的各发育阶段的累积发育率、死亡率、生殖力的模拟以及整个世代过程 (包括卵、幼虫、蛹、成虫的生长发育、死亡率、生殖力) 的生命表的模拟则尚未见有报道。本研究的目的系结合试验资料, 通过用数学的方法, 建立适用于本种害虫各虫态的累积发育率、死亡率以及生殖力的子模型, 并借助于电子计算机, 对棉铃虫在不同温度下各虫态的生长发育, 死亡率与生殖力分别进行了模拟。进而应用上述子模型的耦合, 对棉铃虫世代生命表综合进行了模拟与分析, 从而建立了适用于棉铃虫整个世代包括有生死过程的数学模型, 最后结合参数的灵敏度分析, 明确了温度对棉铃虫各个不同发育阶段的贡献大小。这样为在自然条件下棉铃虫的发生期预测与控制提供数学模型与理论依据。

一、棉铃虫种群发育曲线的模拟与分析

1. 棉铃虫种群发育曲线的特征与数学模拟

昆虫种群发育在时间上的分布, 一般规律呈“两头少, 中间多”, 因而种群发育曲线常用正态曲线进行模拟。根据棉铃虫在不同温度下不同发育阶段的资料分析, 表明种群中的“两头”并不对称, 大多数表现为发育时间偏长的个体数多于发育时间偏短的个体数。并且往往由于存在一小部分个体发育特别迟缓, 以致把整个种群的发育时间分布拉得很长的现象 (见表1)。因而呈显著的偏态曲线, 为模拟处理方便, 根据棉铃虫发育时间分布曲线的偏态特征, 我们提出棉铃虫种群的发育时间分布由时滞个体与正常个体两个总体所组成的假设, 这样假定正常总体与时滞总体的发育时间分布频率函数分别为 $f_1(t)$ 及 $f_2(t)$ (其中 $f_1(t)$ 可以是具有对称分布形式的分布频率函数) 两个总体在种群中所占的百分率分别为 λ_1 及 λ_2 ($\lambda_1 + \lambda_2 = 1$)

* 本文是在丁岩钦同志的指导下完成, 并得到兰仲雄先生的热情帮助, 特此志谢。

那么, 正常总体和时滞总体的发育时间分布函数分别为

$$F_1(t) = \int_{-\infty}^t f_1(\tau) d\tau \quad \text{及} \quad F_2(t) = \int_{-\infty}^t f_2(\tau) d\tau$$

若 $F(t)$ 表示整个种群的发育时间分布函数, 则可证明

$$\begin{aligned} F(t) &= \lambda_1 F_1(t) + \lambda_2 F_2(t) \\ &= \int_{-\infty}^t [\lambda_1 f_1(\tau) + \lambda_2 f_2(\tau)] d\tau \end{aligned}$$

从而得到种群发育时间分布频率函数为

$$\begin{aligned} f(t) &= \lambda_1 f_1(t) + \lambda_2 f_2(t) \\ &= f_1(t) + \lambda_2 [f_2(t) - f_1(t)] \end{aligned}$$

上述模式的假设推导见陈维博等 (1980)。应用上述模式对 15—35℃ 5 种恒温下的棉铃虫卵、幼虫、蛹发育过程进行了模拟, 并且无论哪种温度对哪个虫态拟合情况均很吻合。为了节约篇幅起见, 仅将 15℃、25℃、35℃ 下的结果列出, 见图 1、2、3。由于结果吻合很好, 这样即可借助于计算机模拟结果进而来分析一些试验中难以用人力观察的细微现象。例如棉铃虫在 25℃ 温度下, 卵从 2.5 天开始孵化, 到 5.5 天有 72.8% 的卵孵化为幼虫, 经 15.0 天后即有 0.432715×10^{-1} 幼虫开始了蛹的发育, 经过 1.0 天有 1.30981 头幼虫化蛹, 到 13.0 天全部幼虫化蛹, 成虫在蛹期阶段从第 10.0 天即有 0.194869×10^{-2} 头蛹开始向成虫阶段发育, 经过 2.0 天后有 1.09800 头蛹羽化为成虫, 到 16.0 天全部成虫羽化, 即棉铃虫在 25℃ 下完成一世代需 30.5 天, 相当于 15℃ 的 1/3 天, 而 35℃ 高温下完成一世代相当于 15℃ 的 1/6 天。这说明在一定温度范围内, 棉铃虫生长发育有随温度升高而加快的趋势, 即温度越高发育越快, 所需时间越短。

2. 不同温度下累积发育率曲线的比较

应用数学模型模拟种群在不同温度下累积发育速率是近年来才开始的研究工作 (Stinner, 1974)。这项结果报道后即受到多方面的重视, 因为对于累积发育的模拟可以直接应用于害虫的发生期的预测, 而且它较应用温积法则的预测更前进了一步。文中应用了我们提出的累积发育频数公式, 即 $NF(t) = N_1 F_1(t) + N_2 F_2(t) \cdots \cdots$ (1) 棉铃虫种群在不同温度下的累积发育频数的模拟结果见图 4、5。从图 4、5 说明幼虫从初发期 (25%) 到盛发期 (50%) 在 15℃ 下需 1.8 天, 20℃ 下需 1.2 天, 在 25℃ 下需 1.0 天, 而在 30—35℃ 下均仅有 0.6 天的时间。蛹从初发期到盛发期在 15℃ 下经 4.4 天, 而在 20—35℃ 下均仅有 0.5 天的时间。

二、棉铃虫种群死亡过程的模拟与分析

1. 受控温度条件下棉铃虫种群死亡率特点及数学模型

种群死亡率在组建种群的生命表时是重要的成分之一, 亦是构造种群生长型模型必须予以考虑的因素。种群死亡率的高低以及死亡数量在种群不同年龄结构中的分布不仅决定着该种群未来的兴旺与衰亡, 而且对寄主植物的为害程度亦有密切相关关系。

在实验条件下, 根据不同恒温下对棉铃虫死亡率资料可以看出, 死亡数量在棉铃虫不同

表 1 5 种温度下棉铃虫卵、幼虫、蛹实际死亡数与模拟死亡数的比较

发 育 阶 段	期	15℃				20℃				25℃			
		实际死亡数		模拟死亡数		实际死亡数		模拟死亡数		实际死亡数		模拟死亡数	
		总 计	正常个体	时滞个体	总 计	总 计	正常个体	时滞个体	总 计	总 计	正常个体	时滞个体	总 计
卵	期	64.000000			64.085660	56.000000			56.156380	37.000000			
幼 虫 期	1	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	2.000000	0.000000	0.000000	1.705999	2.000000	2.000000	0.000000	2.000000
	2	2.000000	1.000000	1.000000	1.919038	0.927497	0.991541	0.000000	2.049988	1.058205	0.991783	1.000000	1.000000
	3	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	1.105175	1.105175	0.000000	1.000000	1.000000
	4	3.000000	3.000000	0.000000	2.993390	2.993390	0.000000	0.000000	1.914888	0.906597	1.008291	1.000000	0.000000
	5	2.000000	2.000000	0.000000	1.993569	1.993569	0.000000	0.000000	0.986970	0.986970	0.000000	0.000000	0.000000
	6	12.000000	7.000000	5.000000	12.010929	7.004588	5.006340	2.000000	12.453385	10.413815	2.039570	10.000000	8.000000
合 计		19.000000	13.000000	6.000000	18.916966	12.919084	5.997881	20.000000	20.216405	16.176761	4.039644	15.000000	12.000000
蛹	期	38.000000			38.020072	12.000000			12.044816	11.000000			
30℃													
发 育 阶 段	期	实际死亡数		模拟死亡数		实际死亡数		模拟死亡数		实际死亡数		模拟死亡数	
		总 计	正常个体	时滞个体	总 计	总 计	正常个体	时滞个体	总 计	总 计	正常个体	时滞个体	总 计
		总 计	正常个体	时滞个体	总 计	总 计	正常个体	时滞个体	总 计	总 计	正常个体	时滞个体	总 计
卵	期	36.370062			47.000000	47.251600			50.000000	52.107400			
幼 虫 期	1	2.038813	2.038813	0.000000	3.000000	2.633881	0.000000	0.000000	1.000000	1.000000	0.000000	0.000000	1.023388
	2	1.006215	1.006215	0.000000	1.000000	1.028008	0.000000	1.028008	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
	3	0.969496	0.969496	0.000000	1.000000	1.129518	0.000000	0.000000	1.000000	1.000000	0.000000	0.983395	0.983395
	4	1.008969	0.000000	1.008969	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
	5	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	4.000000	4.000000	0.000000	4.075560	4.075560
	6	9.924183	7.938319	1.985864	4.000000	2.091346	2.040988	31.000000	31.000000	31.000000	30.993220	30.993220	30.993220
合 计		14.947676	11.952847	2.994829	9.000000	8.92374	5.854745	37.000000	37.000000	37.000000	37.075563	37.075563	37.075563
蛹	期	11.016745			5.000000	5.018967			11.000000	10.999631			
35℃													
发 育 阶 段	期	实际死亡数		模拟死亡数		实际死亡数		模拟死亡数		实际死亡数		模拟死亡数	
		总 计	正常个体	时滞个体	总 计	总 计	正常个体	时滞个体	总 计	总 计	正常个体	时滞个体	总 计
		总 计	正常个体	时滞个体	总 计	总 计	正常个体	时滞个体	总 计	总 计	正常个体	时滞个体	总 计
卵	期	36.370062			47.000000	47.251600			50.000000	52.107400			
幼 虫 期	1	2.038813	2.038813	0.000000	3.000000	2.633881	0.000000	0.000000	1.000000	1.000000	0.000000	0.000000	1.023388
	2	1.006215	1.006215	0.000000	1.000000	1.028008	0.000000	1.028008	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
	3	0.969496	0.969496	0.000000	1.000000	1.129518	0.000000	0.000000	1.000000	1.000000	0.000000	0.983395	0.983395
	4	1.008969	0.000000	1.008969	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
	5	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	4.000000	4.000000	0.000000	4.075560	4.075560
	6	9.924183	7.938319	1.985864	4.000000	2.091346	2.040988	31.000000	31.000000	31.000000	30.993220	30.993220	30.993220
合 计		14.947676	11.952847	2.994829	9.000000	8.92374	5.854745	37.000000	37.000000	37.075563	37.075563	37.075563	37.075563
蛹	期	11.016745			5.000000	5.018967			11.000000	10.999631			

图 1 a 15℃下棉铃虫卵累积发育曲线的模拟

GROWING CURVE OF STAGE 1

TIME	Y	Y_{min}
0.00	0.000000	0.000000
0.50	0.000000	:
1.00	0.000000	:
.	.	:
7.50	0.134583 ₁₀₊₂	:
8.00	0.326212 ₁₀₊₂	:
8.50	0.467309 ₁₀₊₂	:
9.00	0.567987 ₁₀₊₂	:
9.50	0.577508 ₁₀₊₂	:
10.00	0.580237 ₁₀₊₂	:
10.50	0.580934 ₁₀₊₂	:
11.00	0.581096 ₁₀₊₂	:
11.50	0.581131 ₁₀₊₂	:
12.00	0.581138 ₁₀₊₂	:
12.50	0.581139 ₁₀₊₂	:

图 1 b 15℃下棉铃虫幼虫累积发育曲线的模拟

GROWING CURVE OF STAGE 2

TIME	Y	Y_{min}
0.00	0.000000	0.000000
1.00	0.000000	:
.	.	:
53.00	0.995542 ₁₀₋₉	:
54.00	0.262443 ₁₀₋₆	:
55.00	0.120380 ₁₀₋₄	:
.	.	:
59.00	0.855501 ₁₀₋₁	:
60.00	0.322009 ₁₀	:
61.00	0.961780	:
62.00	0.236084 ₁₀₊₁	:
63.00	0.490029 ₁₀₊₁	:
64.00	0.880303 ₁₀₊₁	:
65.00	0.139719 ₁₀₊₂	:
66.00	0.199563 ₁₀₊₂	:
67.00	0.260870 ₁₀₊₂	:
68.00	0.317020 ₁₀₊₂	:
69.00	0.363414 ₁₀₊₂	:
70.00	0.398265 ₁₀₊₂	:
71.00	0.422234 ₁₀₊₂	:
72.00	0.437417 ₁₀₊₂	:
73.00	0.446325 ₁₀₊₂	:
74.00	0.451189 ₁₀₊₂	:
75.00	0.453671 ₁₀₊₂	:
76.00	0.454860 ₁₀₊₂	:
77.00	0.455397 ₁₀₊₂	:
78.00	0.455626 ₁₀₊₂	:
79.00	0.455718 ₁₀₊₂	:
80.00	0.455754 ₁₀₊₂	:
81.00	0.455767 ₁₀₊₂	:
82.00	0.455771 ₁₀₊₂	:
83.00	0.455773 ₁₀₊₂	:
84.00	0.455773 ₁₀₊₂	:
85.00	0.455773 ₁₀₊₂	:
85.00	0.455774 ₁₀₊₂	:

图 1 c 15℃下棉铃虫蛹累积发育曲线的模拟

GROWING CURVE OF STAGE 3

TIME	Y	Y _{min}
		0.000000
0.00	0.000000	: *
0.50	0.000000	: *
1.00	0.000000	: *
.		
74.00	0.477083	¹⁰ -26 : *
74.50	0.230307	¹⁰ -24 : *
75.00	0.560903	¹⁰ -23 : *
.		
106.00	0.458124	: *
107.00	0.674607	: *
108.00	0.963955	: *
109.00	0.133884	¹⁰ +1 : *
110.00	0.181037	¹⁰ +1 : *
111.00	0.238642	¹⁰ +1 : *
112.00	0.307280	¹⁰ +1 : *
113.00	0.386774	¹⁰ +1 : *
114.00	0.476537	¹⁰ +1 : *
115.00	0.575454	¹⁰ +1 : *
116.00	0.681932	¹⁰ +1 : *
117.00	0.793984	¹⁰ +1 : *
118.00	0.909359	¹⁰ +1 : *
119.00	0.102568	¹⁰ +2 : *
120.00	0.114061	¹⁰ +2 : *
121.00	0.125196	¹⁰ +2 : *
122.00	0.135781	¹⁰ +2 : *
123.00	0.145662	¹⁰ +2 : *
124.00	0.154725	¹⁰ +2 : *
125.00	0.162895	¹⁰ +2 : *
126.00	0.170742	¹⁰ +2 : *
127.00	0.176466	¹⁰ +2 : *
128.00	0.181911	¹⁰ +2 : *
129.00	0.186521	¹⁰ +2 : *
130.00	0.190368	¹⁰ +2 : *
131.00	0.193533	¹⁰ +2 : *
132.00	0.196102	¹⁰ +2 : *
133.00	0.198160	¹⁰ +2 : *
134.00	0.199787	¹⁰ +2 : *
135.00	0.201058	¹⁰ +2 : *
136.00	0.202038	¹⁰ +2 : *
.		
158.00	0.204854	¹⁰ +2 : *
159.00	0.204855	¹⁰ +2 : *

图 2 a 25℃下棉铃虫卵累积发育曲线的模拟

GROWING CURVE OF STAGE 1

TIME	Y	Y_{min}
		0.000000
0.00	0.000000	: *
0.50	0.000000	: *
1.00	0.000000	: *
.	.	.
2.50	0.455833 ₁₀ ⁺²	:
3.00	0.717615 ₁₀ ⁺²	:
3.50	0.726700 ₁₀ ⁺²	:
4.00	0.727988 ₁₀ ⁺²	:
4.50	0.728143 ₁₀ ⁺²	:
5.00	0.728159 ₁₀ ⁺²	:
5.50	0.728161 ₁₀ ⁺²	:

图 2 b 25℃下棉铃虫幼虫累积发育曲线的模拟

GROWING CURVE OF STAGE 2

TIME	Y	Y_{min}
		0.000000
0.00	0.000000	: *
0.50	0.000000	: *
1.00	0.000000	: *
.	.	.
17.50	0.432715 ₁₀ ⁻¹	: *
18.00	0.331238 ₁₀ ⁺¹	: *
18.50	0.130981 ₁₀ ⁺¹	: *
19.00	0.357695 ₁₀ ⁺¹	: *
19.50	0.760862 ₁₀ ⁺¹	: *
20.00	0.134810 ₁₀ ⁺²	: *
20.50	0.207801 ₁₀ ⁺²	: *
21.00	0.287426 ₁₀ ⁺²	: *
21.50	0.365243 ₁₀ ⁺²	: *
22.00	0.491169 ₁₀ ⁺²	: *
22.50	0.534377 ₁₀ ⁺²	: *
23.00	0.565227 ₁₀ ⁺²	: *
23.50	0.586014 ₁₀ ⁺²	: *
24.00	0.599305 ₁₀ ⁺²	: *
24.50	0.607408 ₁₀ ⁺²	: *
25.00	0.612137 ₁₀ ⁺²	: *
25.50	0.614789 ₁₀ ⁺²	: *
26.00	0.616223 ₁₀ ⁺²	: *
26.50	0.616972 ₁₀ ⁺²	: *
27.00	0.617351 ₁₀ ⁺²	: *
27.50	0.617537 ₁₀ ⁺²	: *
28.00	0.617626 ₁₀ ⁺²	: *
28.50	0.617667 ₁₀ ⁺²	: *
29.00	0.617686 ₁₀ ⁺²	: *
29.50	0.617695 ₁₀ ⁺²	: *
30.00	0.617698 ₁₀ ⁺²	: *
30.50	0.617700 ₁₀ ⁺²	: *
31.00	0.617700 ₁₀ ⁺²	: *
31.50	0.617701 ₁₀ ⁺²	: *

图 2 c 25℃下棉铃虫蛹累积发育曲线的模拟

GROWING CURVE OF STAGE 3

TIME	Y	Y_{min}
		0.000000
0.00	0.000000	: *
0.50	0.000000	: *
1.00	0.000000	: *
28.50	0.194869	10^{-2} : *
29.00	0.203520	10^{-1} : *
29.50	0.108485	10^0 : *
30.00	0.393986	10^1 : *
30.50	0.109800	10^2 : *
31.00	0.224342	10^3 : *
31.50	0.382866	10^4 : *
32.00	0.606660	10^5 : *
32.50	0.925548	10^6 : *
33.00	0.135245	10^7 : *
33.50	0.189686	10^8 : *
34.00	0.253404	10^9 : *
34.50	0.319265	10^{10} : *
35.00	0.378287	10^{11} : *
35.50	0.425006	10^{12} : *
36.00	0.459248	10^{13} : *
36.50	0.483626	10^{14} : *
37.00	0.501020	10^{15} : *
37.50	0.513449	10^{16} : *
38.00	0.522184	10^{17} : *
38.50	0.528122	10^{18} : *
39.00	0.531993	10^{19} : *
39.50	0.534408	10^{20} : *
40.00	0.535855	10^{21} : *
40.50	0.536688	10^{22} : *
41.00	0.537151	10^{23} : *
41.50	0.537400	10^{24} : *
42.00	0.537531	10^{25} : *
42.50	0.537598	10^{26} : *
43.00	0.537631	10^{27} : *
43.50	0.537655	10^{28} : *
44.00	0.537659	10^{29} : *
44.50	0.537660	10^{30} : *
45.00	0.537661	10^{31} : *

图 3 a 35℃下棉铃虫卵累积发育曲线的模拟

GROWING CURVE OF STAGE 1

TIME	Y	Y_{min}
		0.000000
0.00	0.000000	: *
0.50	0.000000	: *
1.00	0.396922	10^2 : *
1.50	0.595371	10^3 : *
2.00	0.639774	10^4 : *
2.50	0.647800	10^5 : *
3.00	0.647910	10^6 : *
3.50	0.647922	10^7 : *
4.00	0.647923	10^8 : *

图 3 b 35℃下棉铃虫幼虫累积发育曲线的模拟

GROWING CURVE OF STAGE 2

TIME	Y	Y _{min}
		0.000000
0.00	0.000000	: *
0.50	0.000000	: *
1.00	0.000000	: *
.		
.		
11.50	0.893220	: *
12.00	0.410001 ₁₀ +1	: *
12.50	0.100398 ₁₀ +2	: *
13.00	0.176105 ₁₀ +2	: *
13.50	0.251124 ₁₀ +2	: *
14.00	0.312149 ₁₀ +2	: *
14.50	0.354770 ₁₀ +2	: *
15.00	0.381040 ₁₀ +2	: *
15.50	0.395681 ₁₀ +2	: *
16.00	0.403013 ₁₀ +2	: *
16.50	0.406482 ₁₀ +2	: *
17.00	0.408001 ₁₀ +2	: *
17.50	0.408628 ₁₀ +2	: *
18.00	0.408873 ₁₀ +2	: *
18.50	0.408964 ₁₀ +2	: *
19.00	0.408997 ₁₀ +2	: *
19.50	0.409008 ₁₀ +2	: *
20.00	0.403011 ₁₀ +2	: *
20.50	0.409013 ₁₀ +2	: *

图 3 c 35℃下棉铃虫蛹累积发育曲线的模拟

GROWING CURVE OF STAGE 3

TIME	Y	Y _{min}
		0.000000
0.00	0.000000	: *
0.50	0.000000	: *
1.00	0.000000	: *
.		
.		
17.00	0.641219 ₁₀ -1	: *
17.50	0.435667 ₁₀	: *
18.00	0.154232 ₁₀ +1	: *
18.50	0.378441 ₁₀ +1	: *
19.00	0.727288 ₁₀ +1	: *
19.50	0.117333 ₁₀ +2	: *
20.00	0.165772 ₁₀ +2	: *
20.50	0.211877 ₁₀ +2	: *
21.00	0.251271 ₁₀ +2	: *
21.50	0.281730 ₁₀ +2	: *
22.00	0.317713 ₁₀ +2	: *
22.50	0.326561 ₁₀ +2	: *
23.00	0.331687 ₁₀ +2	: *
23.50	0.334509 ₁₀ +2	: *
24.00	0.335990 ₁₀ +2	: *
24.50	0.336741 ₁₀ +2	: *
25.00	0.337112 ₁₀ +2	: *
25.50	0.337288 ₁₀ +2	: *
26.00	0.337370 ₁₀ +2	: *
26.50	0.337407 ₁₀ +2	: *
27.00	0.337423 ₁₀ +2	: *
27.50	0.337430 ₁₀ +2	: *
28.00	0.337433 ₁₀ +2	: *
28.50	0.337435 ₁₀ +2	: *

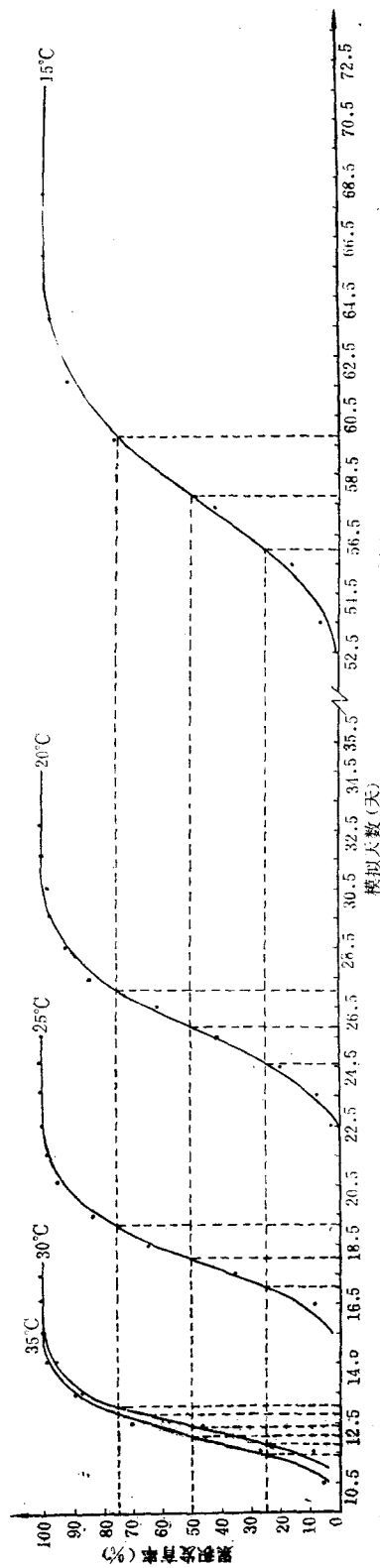


图 4 不同温度下棉铃虫幼虫累积发育率的模拟比较

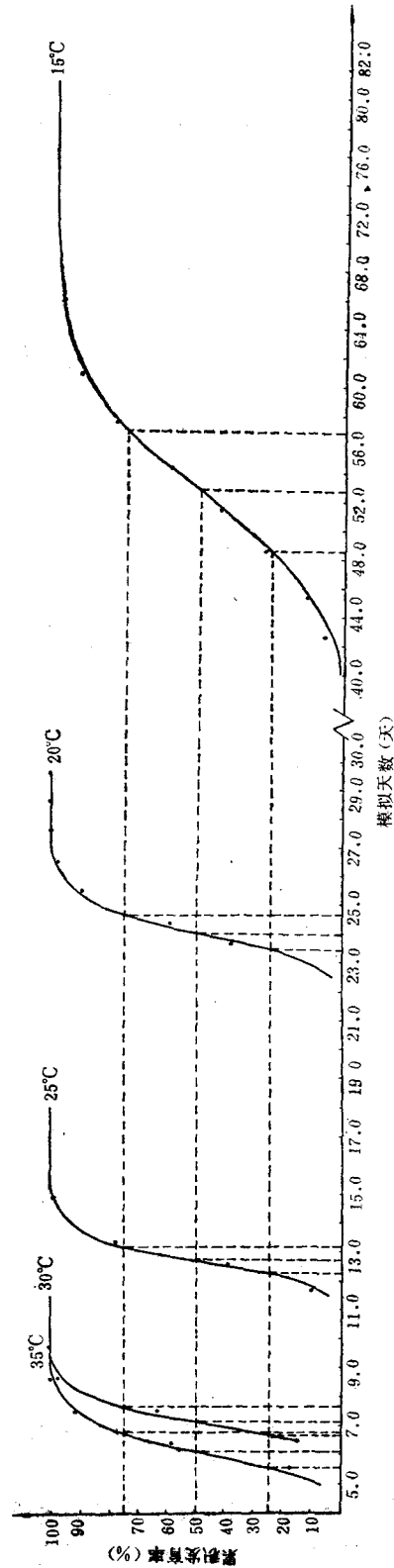


图 5 不同温度下棉铃虫蛹累积发育率的模拟比较

虫态中的分布有一定的相同与相异之处,如在15—35℃下卵期死亡率最高,在15℃下蛹期死亡率次之(这可能与蛹在低温的土壤蛰伏期长,增长了死亡的时间),在20—35℃下幼虫期死亡率次之,蛹期最低。若从不同温度下棉铃虫总的死亡率来分析,15℃下死亡率最高达79%,35℃下次之,为59.5%,这说明此两种温度分别均属于棉铃虫的不适宜的较低与较高的温度范围。

如以不同温度下,对同一虫态的影响进行比较,卵期在25℃下死亡率最低,15℃下最高;幼虫期在30℃下死亡率最低,35℃下最高;蛹期在30℃下死亡率最低,15℃下最高;这说明在适宜温度范围内,幼虫期、蛹期的死亡率随着温度的上升而下降,而卵期的死亡率对温度较为灵敏。再以幼虫不同龄期死亡率比较,在1—4龄阶段的死亡率均在5%以下,而5—6龄的死亡率则均在10%以上,35℃下高达36.5%(表1)。

根据上述分析,说明温度对棉铃虫种群的作用过程是复杂的,为了模拟不同温度下棉铃虫种群的死亡率,我们根据具体实际,曾提出了两个数学模型(陈维博、陈玉平,1981)即

$$r_e = \frac{1}{(1-F) + \frac{F}{\sqrt[N]{1-R}}} \quad (2)$$

$$r_d = 1 - r_e$$

$$r_d^t = \left[(1-F) + \frac{F}{\sqrt[N]{1-R}} \right]^{\tau/\Delta t} \quad (3)$$

其中 r_d —— 每次推进之间种群的死亡率

r_e —— 种群的存活率

F —— 每次推进的比例

R —— 总的实际死亡率

τ —— 模拟时间步长

N —— 发育等级数目

2. 不同温度下棉铃虫死亡率的模拟

应用上述死亡模型,将5种温度条件下,棉铃虫各虫态的死亡过程以及幼虫不同龄期的死亡数量的分布进行了模拟计算,结果见表1。

从表1结果看来,不论棉铃虫各虫态的死亡数量的模拟,还是幼虫不同龄期间死亡数量的模拟,计算的结果完全符合实际资料,这说明上述模拟模型基本上是正确的。同时方程不仅给出了不同虫态在不同温度下的总死亡率的模拟,而且还分别给出了不同虫态的正常个体总体与时滞个体总体的死亡率的模拟。

三、棉铃虫种群生殖力的特征与数学模拟

1. 棉铃虫在不同温度下生殖力的特征

根据棉铃虫室内观察资料可以看出,棉铃虫成虫无论在何种温度下均有一产卵高峰,而

在开始羽化的成虫与接近死亡的成虫产卵量均甚少,甚至为零,但产卵的期距一般系随温度的增高而缩短。在15℃下的产卵期距几为35℃下的3倍,而产卵高峰期15℃下为10天,峰不显著;25℃下为6天,35℃下仅为4天。

就不同温度的产卵量而言,25℃下为最高,平均达635.10粒,30℃下次之,为593.60粒,15℃下与35℃下几相接近,均在200粒以下。这说明35℃下由于成虫寿命缩短,腹中卵尚未产出成虫即行死亡,而15℃下可能由于低温的原因抑制了卵的成熟。就生殖力而言,25—30℃为棉铃虫的适宜温度,而15℃与35℃分别均为不适宜的温度。

2. 棉铃虫生殖力模拟模型的组建

设成虫从羽化到死亡共历期 m 天,在第 k 天的平均产卵量为 $f(k)$ ($k=1,2,\dots,m$),则成虫平均每头总产卵量为

$$Q_F = \sum_{k=1}^m f(k)$$

若在模拟模型中,将成虫分为 N 个发育级,则第 I 等级中的产卵量为 $F(I)$

$$\sum_{I=1}^N F(I) = Q_F$$

而 $F(I)$ 系用线性插值法来估计,即由 $f(k)$ 及 $f(k+1)$ 的值来求得的第 I 个发育级中个体的卵量 $F'(I)$ 来逼近 $F(I)$

$$\text{即} \quad F'(I) = (I \times RT - k) [f(k+1) - f(k)] + f(k) \quad (I=1,2,\dots,N)$$

这样

$$\sum_{I=1}^N F'(I) = Q'_F \quad \text{其中 } RT \text{ 为停留时间}$$

而 Q'_F 不一定等于 Q_F 因此需要修正即

$$F(I) = \frac{F'(I)}{Q'_F} Q_F$$

而

$$\sum_{I=1}^N F'(I) = \frac{Q_F}{Q'_F} = Q_F \quad (4)$$

利用上述模型,分别对5种温度下棉铃虫的生殖力进行了模拟,计算结果见表2。

表2 五种温度下棉铃虫成虫实际总产卵量与模拟总产卵量的比较

温 度 (℃)	15	20	25	30	35
成 虫 数	31	65	73	79	50
每头成虫平均产卵量	124.40	365.20	635.10	593.60	166.79
总 产 卵 量	3,856.40	23,738.00	46,362.30	46,894.40	8,339.50
模 拟 总 产 卵 量	3,856.80	23,702.60	46,269.20	46,994.50	8,293.60

四、棉铃虫种群系统的模拟与分析

种群是生态系统的组成成分,种群系统是生态系统的子系统,我们在上述种群子模型的

研究基础上,对棉铃虫种群系统应用诸子模型的联合进行了种群系统的系统分析和模拟,以期了解不同温度参数的波动对种群系统各成分的贡献大小。

1. 棉铃虫种群生长型的特征与模拟

棉铃虫种群在自然界的发生,即使同一世代,由于卵孵化期早晚的不同,幼虫个体发育快慢的不同,蛹期长短的不同,在同一时间内常有不同虫态的个体同时存在。为了使我们的模拟接近于实际情况,我们在处理该项模拟时,是以给定的卵量,经不同的孵化时间,卵孵化为幼虫后,再经过幼虫期、蛹期,直到成虫产卵结束为止。其中包括各个虫态的死亡率,以及不同虫态时滞个体发育的时间差距和成虫生殖力,这样在同一时间内种群总体中可能包含有不同的虫态,不同的年龄结构的个体,要对这样一个较为复杂的种群总体进行模拟,只有借助于电子计算机才能实现。

我们应用了(1)、(2)、(3)、(4)式结合试验资料进行了一系列模拟,结果见图8—12。

根据模拟结果得到了不同温度下棉铃虫种群世代生长型的理论曲线,曲线特征呈不对称的马鞍型,表现为后峰远较前峰为高,这说明在15—35℃人工控制条件下,种群均有显著的增长,而不同温度下雌性成虫的总产卵量与实际产卵量基本吻合。如15℃下实际总产卵量为2,547.85粒,模拟产卵量为2,528.36粒,并且由于温度的不同,死亡率和总产卵量亦不同,15℃产卵前死亡率达79%,开始产卵时间为第109天,产卵期共73.5天,产卵量为2,528.36粒,而25℃下死亡率为46%,开始产卵时间为第31.5天,产卵期共24.5天,总产卵量为34,233.7粒,而35℃下死亡率66%,开始产卵时间为第19天,产卵期共17天,总产卵量5,620.29粒。并且种群生长型后峰类型在各温度下除表现为峰型的高低或长短有别外,而峰型的基本特征均相同。

2. 不同温度对棉铃虫种群系统的灵敏度分析

通过数学模型对棉铃虫的种群生长型的模拟,我们不仅提出了适用于棉铃虫种群系统的数学模型,而且使我们获得了连续条件下的种群动态理论值,在此基础上,作为一个种群系统就需要检验各参数对系统成分的作用大小,对此常用的方法是灵敏度分析。

1) 温度参数对种群系统输出作用的灵敏度分析 在15—35℃5种温度的基础上,首先,每种温度作 $\pm 1.5^\circ\text{C}$ 变化,以比较各温度在稍加变动后对最后产卵量的影响。经分析的结果清晰地表明对影响产卵的敏感温度出现在较低与较高的温度中,即 16.5°C 与 33.5°C 。在 15°C 下增加 1.5°C 或 35°C 下减去 1.5°C ,均分别较 15°C 与 35°C 下的产卵量有明显的影响。即当 15°C 下增加 1.5°C 后,相对灵敏度为0.991778,而在 35°C 下减去 1.5°C 后,相对灵敏度为1.000000。在20—30℃范围内作 $\pm 1.5^\circ\text{C}$ 的变动,对其产卵量的影响均不明显。尤其是在 25°C 下增加 1.5°C 与 30°C 下减去 1.5°C 更不明显,其相对灵敏度为-0.007069和+0.05741(表3)。

2) 温度参数对种群系统中不同成分贡献的灵敏度分析 为了了解温度对哪一个发育阶段的影响较为敏感,仍在上述5种温度的基础上,在任一种温度中分别对其中某一发育阶段的温度作 $\pm 1.5^\circ\text{C}$ 的改变,而其它发育阶段不变,然后比较各个温度对不同发育阶段的影响。结果表明不同温度对不同发育阶段影响不同。在 25°C 下增加 1.5°C 与 30°C 下减少 1.5°C 时,对棉铃虫任一发育阶段影响均不明显。而在 15°C 下增加 1.5°C 与 20°C 下减少 1.5°C 时均表现出对成虫期最敏感,蛹期次之,当在 30°C 下增加 1.5°C 与 35°C 下减少 1.5°C 时,则对成虫期

有明显影响, 幼虫期次之。而卵期对 5 种温度变动的反应均不敏感 (表 4)。

表 3 不同温度对棉铃虫种群系统的灵敏度分析

处 理	温 度 $^{\circ}\text{C}$	15	20		25		30		35
		16.5	18.5	21.5	23.5	26.5	28.5	31.5	33.5
灵 敏 度		+1.079890	-0.329999	+0.324351	-0.187438	-0.007697	+0.006251	-0.322569	+1.088842
相 对 灵 敏 度		+0.991778	-0.303073	+0.297886	-0.172144	-0.007069	+0.005741	-0.296250	+1.000000

表 4 温度参数对种群系统中不同成分贡献的灵敏度分析

处 理	温 度 $^{\circ}\text{C}$	15	20		25		30		35
		16.5	18.5	21.5	23.5	26.5	28.5	31.5	33.5
灵 敏 度	卵	+0.028149	-0.024087	+0.048006	-0.039213	-0.028504	+0.021006	-0.012932	+0.002349
	幼虫	+0.009651	-0.005615	+0.018330	-0.016063	+0.019078	-0.020206	-0.092498	+0.137153
	蛹	+0.266323	-0.138976	+0.006894	-0.009561	+0.026103	-0.026002	-0.041479	+0.044959
	成虫	+0.511628	-0.198116	+0.222241	-0.129375	-0.022761	-0.018547	-0.219113	+0.774234

五、小 结

根据不同温度下棉铃虫种群生长发育、死亡率、生殖力的实验室资料, 我们分别提出了

1) 棉铃虫种群累积发育频数的数学模型

$$NF(t) = N_1 F_1(t) + N_2 F_2(t)$$

2) 棉铃虫种群死亡率的数学模型

$$r_e = \frac{1}{(1-F) + \frac{F}{\sqrt[n]{1-R}}}$$

$$r_d = 1 - r_e$$

$$r_d^{(t)} = \left[(1-F) + \frac{F}{\sqrt[n]{1-R}} \right]^{t/\Delta t}$$

3) 棉铃虫种群生殖力的数学模型

$$\sum_{i=1}^n F'(I) = Q_F$$

对上述数学模型除应用实际资料进行了各自的拟合外, 并进而应用上述 3 个子模型的联合, 对棉铃虫种群系统进行了模拟与灵敏度分析, 模拟结果从图 6、7、8、9、10 表明我们提出的棉铃虫种群模拟模型的模拟结果与实验室资料非常吻合。最后应用灵敏度分析对温度参数对棉铃虫种群系统的影响进行了分析。结果说明:

1) 影响产卵的敏感温度出现在较低与较高的温度中, 即 16.5°C 与 33.5°C 。在 $20-30^{\circ}\text{C}$ 范围内作微小的变动对其产卵量的影响均不明显。

2) 不同温度对种群系统中各个发育阶段影响不同。在 25°C 下增加 1.5°C 与 30°C 下减少 1.5°C 时, 对棉铃虫任一发育阶段影响均不明显。而在 15°C 增加 1.5°C 与 20°C 下减少 1.5°C 时均表现出对成虫期最敏感, 蛹期次之, 当在 30°C 下, 增加 1.5°C 与 35°C 下减少 1.5°C 时, 则对成虫期有明显影响, 幼虫期次之。而卵期对 5 种温度变动的反应均不敏感。

参 考 文 献

- 许明霞等 1958 棉铃虫的研究。应用昆虫学报 1(1):18—30。
齐兆生 1961 我国北部棉区棉铃虫的研究及其防治。中国植物保护科学。653—667。科学出版社。
吴坤君等 1978 不同温度下的棉铃虫实验种群生命表。昆虫学报 21(4):385—390。
吴坤君等 1980 温度对棉铃虫实验种群生长的影响。昆虫学报 23(4):358—367。
陈维博等 1980 昆虫种群累积发育频数的数学模拟中时滞个体的模拟处理。昆虫学报 23(2):149—155。
陈维博等 1981 昆虫种群死亡过程的数学模拟。生态学报 1(2):159—167。
Hartstack A. *al et.* 1976 MOTHZV-2: A computer simulation of *Heliothis zea* and *H. virescens* population dynamics. A. R. S. -127 U. S. D. A.
Stinner R. L. *al et.* 1974 Population dynamics of *Heliothis zea* and *H. virescens* in North Carolina: A simulation model. *Environ. Ent.* 3(1):163-168.

SIMULATIONS AND ANALYSIS ON THE POPULATION DYNAMICS OF THE COTTON BOLLWORM *HELIOTHIS ARMIGERA* HÜBNER) AT THE DIFFERENT TEMPERATURE CONDITIONS

CHEN YUPING

(Institute of Zoology, Academia Sinica)

CHEN WEIBO

(Beijing Agricultural University)

According to the experimental data of the cotton bollworm under the condition of the temperature range of 15°—35°C, the mathematical simulation models of the cumulative developmental distribution, mortality and fecundity of this pest are put forward. With these above models, a lot of the simulations are made, whether each mathematical model or the combination of these models at any constant temperature are yielded close-fitted results, compared with actual data. The sensitivity analysis is used to testing the contributions of the temperatures parameters for the population system. The results show that:

1. Sensitivity analysis of temperature parameter on the fecundity of this pest population system.

Based on the experimental data of this pest at 5 temperature conditions, each temperature is perturbed by $\pm 1.5^\circ\text{C}$, and compared the fecundity with that temperature's. The results show that for 15°C plus 1.5°C or 35°C minus 1.5°C, the influences are sensitive, but in the temperature range of 20°–30°C, the influences are nonsensitive.

2. Sensitivity analysis of temperature parameter on different developmental stages of this pest population system.

In order to understand which stage is sensitive to temperature parameter, each stage is perturbed by $\pm 1.5^\circ\text{C}$ and other of them are kept constant. The results are as follow: (1) For 15°C plus 1.5°C or 20°C minus 1.5°C, the influences are sensitive in both pupae and adult stages. (2) For 30°C plus 1.5°C or 35°C minus 1.5°C, adult stage and larvae stage are both sensitive, but the egg stage is nonsensitive for five temperatures.

	Y	MIN
	0.000000	
0.00	0.100000 E+3	•
0.50	0.930620 E+2	•
1.00	0.904515 E+2	•
•	•	•
•	•	•
40.50	0.507622 E+2	•
41.00	0.506571 E+2	•
41.50	0.505522 E+2	•
42.00	0.504475 E+2	•
•	•	•
102.50	0.278208 E+2	•
103.00	0.280486 E+2	•
103.50	0.284008 E+2	•
104.00	0.289156 E+2	•
104.50	0.296197 E+2	•
105.00	0.305541 E+2	•
105.50	0.317812 E+2	•
106.00	0.333402 E+2	•
106.50	0.352913 E+2	•
107.00	0.377282 E+2	•
107.50	0.407019 E+2	•
108.00	0.442936 E+2	•
108.50	0.486322 E+2	•
109.00	0.537759 E+2	•
109.50	0.598246 E+2	•
110.00	0.669409 E+2	•
110.50	0.751812 E+2	•
111.00	0.846589 E+2	•
111.50	0.958159 E+2	•
112.00	0.108559 E+3	•
112.50	0.122873 E+3	•
113.00	0.138986 E+3	•
113.50	0.157004 E+3	•
114.00	0.176872 E+3	•
114.50	0.198875 E+3	•
115.00	0.222957 E+3	•
115.50	0.249109 E+3	•
116.00	0.277542 E+3	•
116.50	0.308198 E+3	•
117.00	0.340979 E+3	•
117.50	0.376047 E+3	•
118.00	0.413325 E+3	•
118.50	0.452655 E+3	•
119.00	0.494085 E+3	•
119.50	0.537556 E+3	•
120.00	0.582853 E+3	•
120.50	0.629886 E+3	•
121.00	0.678645 E+3	•
121.50	0.728871 E+3	•
122.00	0.780320 E+3	•
122.50	0.833071 E+3	•
123.00	0.886830 E+3	•
123.50	0.941203 E+3	•
124.00	0.996387 E+3	•
124.50	0.105190 E+4	•
125.00	0.110755 E+4	•
125.50	0.116350 E+4	•
126.00	0.121923 E+4	•
126.50	0.127451 E+4	•
127.00	0.132963 E+4	•
127.50	0.138421 E+4	•
128.00	0.143782 E+4	•
128.50	0.149088 E+4	•
129.00	0.154283 E+4	•
129.50	0.155935 E+4	•
130.00	0.164300 E+4	•
130.50	0.169119 E+4	•
131.00	0.173764 E+4	•
131.50	0.178300 E+4	•
132.00	0.182658 E+4	•
132.50	0.186544 E+4	•
133.00	0.190898 E+4	•
133.50	0.194775 E+4	•
134.00	0.198845 E+4	•
134.50	0.202004 E+4	•
135.00	0.205380 E+4	•
135.50	0.208555 E+4	•
136.00	0.211584 E+4	•
136.50	0.214470 E+4	•
137.00	0.217164 E+4	•
137.50	0.219725 E+4	•
138.00	0.222154 E+4	•
138.50	0.224404 E+4	•
139.00	0.226537 E+4	•
139.50	0.228651 E+4	•
140.00	0.230403 E+4	•
140.50	0.232155 E+4	•
141.00	0.233802 E+4	•
141.50	0.235305 E+4	•
142.00	0.236726 E+4	•
142.50	0.238057 E+4	•
143.00	0.239262 E+4	•
143.50	0.240401 E+4	•
144.00	0.241464 E+4	•
144.50	0.242419 E+4	•
145.00	0.243322 E+4	•
145.50	0.244162 E+4	•
146.00	0.244909 E+4	•
146.50	0.245617 E+4	•
147.00	0.246274 E+4	•
147.50	0.246846 E+4	•
148.00	0.247396 E+4	•
148.50	0.247905 E+4	•
149.00	0.248343 E+4	•
•	•	•
182.50	0.252836 E+4	•
183.00	0.252836 E+4	•
184.00	0.252836 E+4	•
184.50	0.252836 E+4	•

图6 15℃棉铃虫种群世代生长型曲线的模拟

	Y	MIN
	0.000000	
0.00	0.100000 E+3	•
0.50	0.905184 E+2	•
1.00	0.886642 E+2	•
1.50	0.827148 E+2	•
2.00	0.789307 E+2	•
2.50	0.753188 E+2	•
3.00	0.718722 E+2	•
3.50	0.685833 E+2	•
4.00	0.654450 E+2	•
4.50	0.640267 E+2	•
5.00	0.631727 E+2	•
5.50	0.627396 E+2	•
•	•	•
48.00	0.447509 E+2	•
48.50	0.445978 E+2	•
49.00	0.444633 E+2	•
49.50	0.444119 E+2	•
50.00	0.445065 E+2	•
50.50	0.452537 E+2	•
51.00	0.474826 E+2	•
51.50	0.542875 E+2	•
52.00	0.711036 E+2	•
52.50	0.106719 E+3	•
53.00	0.167974 E+3	•
53.50	0.265966 E+3	•
54.00	0.408010 E+3	•
54.50	0.598966 E+3	•
55.00	0.862958 E+3	•
55.50	0.121125 E+4	•
56.00	0.163190 E+4	•
56.50	0.212047 E+4	•
57.00	0.267477 E+4	•
57.50	0.328868 E+4	•
58.00	0.394420 E+4	•
58.50	0.463749 E+4	•
59.00	0.535011 E+4	•
59.50	0.608368 E+4	•
60.00	0.676999 E+4	•
60.50	0.745915 E+4	•
61.00	0.812379 E+4	•
61.50	0.875767 E+4	•
62.00	0.935680 E+4	•
62.50	0.991887 E+4	•
63.00	0.104429 E+5	•
63.50	0.109353 E+5	•
64.00	0.113901 E+5	•
64.50	0.118025 E+5	•
65.00	0.121861 E+5	•
65.50	0.125387 E+5	•
66.00	0.128561 E+5	•
66.50	0.131465 E+5	•
67.00	0.134141 E+5	•
67.50	0.136517 E+5	•
68.00	0.138666 E+5	•
68.50	0.140637 E+5	•
69.00	0.142409 E+5	•
69.50	0.143998 E+5	•
70.00	0.145384 E+5	•
70.50	0.146654 E+5	•
71.00	0.147786 E+5	•
71.50	0.148792 E+5	•
72.00	0.149684 E+5	•
72.50	0.150489 E+5	•
73.00	0.151170 E+5	•
73.50	0.151781 E+5	•
74.00	0.152329 E+5	•
74.50	0.152808 E+5	•
75.00	0.153224 E+5	•
75.50	0.153586 E+5	•
76.00	0.153888 E+5	•
76.50	0.154158 E+5	•
77.00	0.154388 E+5	•
77.50	0.154593 E+5	•
78.00	0.154767 E+5	•
78.50	0.154901 E+5	•
79.00	0.155027 E+5	•
79.50	0.155133 E+5	•
80.00	0.155223 E+5	•
80.50	0.155297 E+5	•
81.00	0.155362 E+5	•
81.50	0.155408 E+5	•
82.00	0.155452 E+5	•
82.50	0.155488 E+5	•
83.00	0.155518 E+5	•
83.50	0.155543 E+5	•
84.00	0.155560 E+5	•
84.50	0.155577 E+5	•
85.00	0.155591 E+5	•
85.50	0.155602 E+5	•
•	•	•
94.00	0.155646 E+5	•
94.50	0.155646 E+5	•
95.00	0.155646 E+5	•
95.50	0.155646 E+5	•
96.00	0.155646 E+5	•
96.50	0.155646 E+5	•
97.00	0.155646 E+5	•

图7 20℃棉铃虫种群世代生长型曲线的模拟

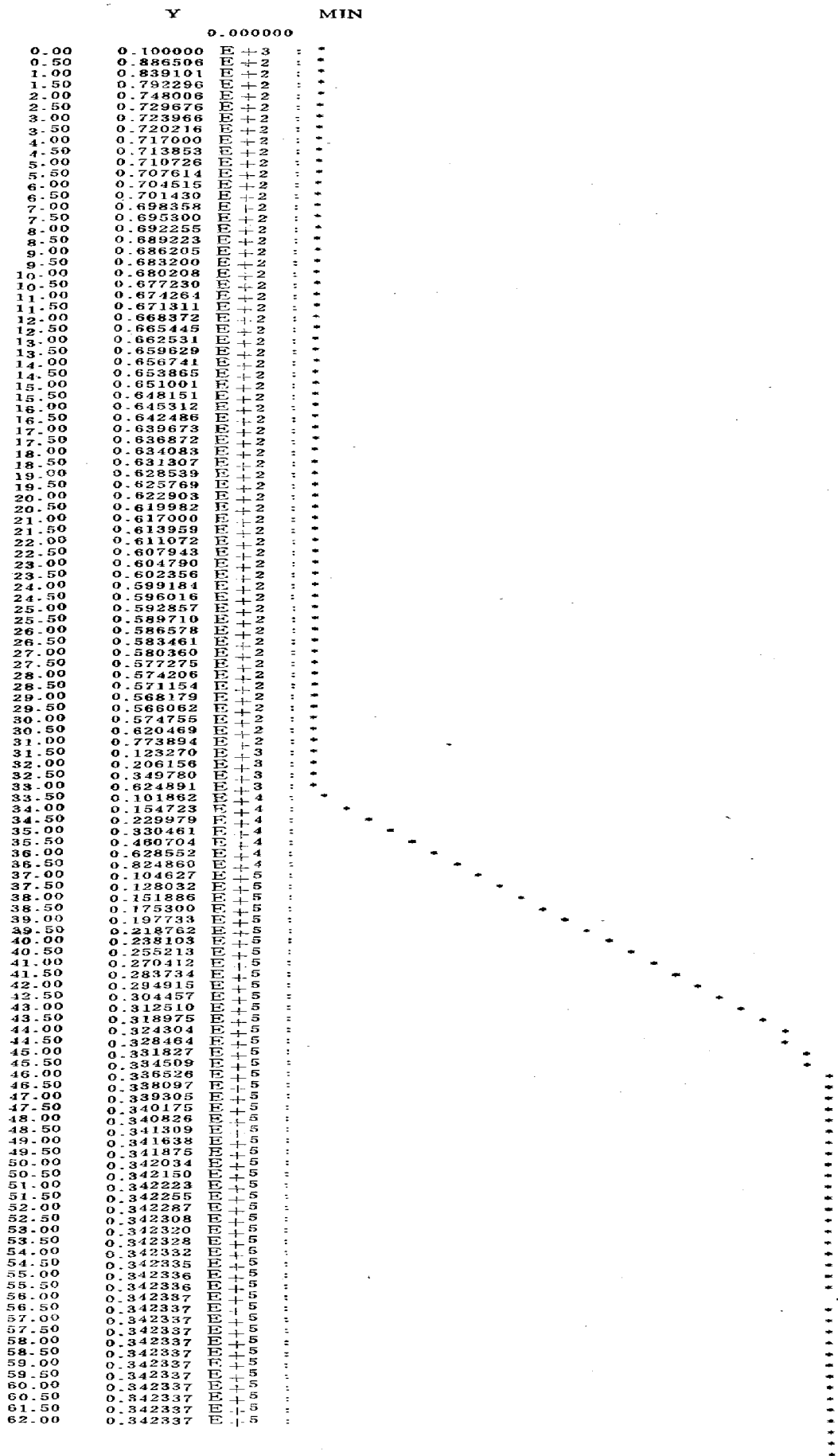


图 8 25℃ 棉铃虫种群世代生长型曲线的模拟

Y	MIN
	0.000000
0.00	0.100000 E+3
0.50	0.769705 E+2
1.00	0.700697 E+2
1.50	0.667119 E+2
2.00	0.659678 E+2
2.50	0.656489 E+2
3.00	0.653889 E+2
3.50	0.651321 E+2
4.00	0.648767 E+2
4.50	0.646222 E+2
5.00	0.643688 E+2
5.50	0.641164 E+2
6.00	0.638649 E+2
6.50	0.636145 E+2
7.00	0.633650 E+2
7.50	0.631165 E+2
8.00	0.628689 E+2
8.50	0.626224 E+2
9.00	0.623768 E+2
9.50	0.621322 E+2
10.00	0.618885 E+2
10.50	0.616458 E+2
11.00	0.614040 E+2
11.50	0.611632 E+2
12.00	0.609233 E+2
12.50	0.606859 E+2
13.00	0.604529 E+2
13.50	0.602247 E+2
14.00	0.600305 E+2
14.50	0.597936 E+2
15.00	0.595574 E+2
15.50	0.593219 E+2
16.00	0.590871 E+2
16.50	0.588533 E+2
17.00	0.586203 E+2
17.50	0.583883 E+2
18.00	0.581571 E+2
18.50	0.579270 E+2
19.00	0.576979 E+2
19.50	0.574653 E+2
20.00	0.572308 E+2
20.50	0.569976 E+2
21.00	0.567659 E+2
21.50	0.565357 E+2
22.00	0.563070 E+2
22.50	0.560798 E+2
23.00	0.558541 E+2
23.50	0.556299 E+2
24.00	0.554072 E+2
24.50	0.551860 E+2
25.00	0.549663 E+2
25.50	0.547481 E+2
26.00	0.545314 E+2
26.50	0.543161 E+2
27.00	0.541022 E+2
27.50	0.538898 E+2
28.00	0.536789 E+2
28.50	0.534695 E+2
29.00	0.532616 E+2
29.50	0.530552 E+2
30.00	0.528503 E+2
30.50	0.526469 E+2
31.00	0.524449 E+2
31.50	0.522444 E+2
32.00	0.520454 E+2
32.50	0.518479 E+2
33.00	0.516518 E+2
33.50	0.514571 E+2
34.00	0.512638 E+2
34.50	0.510719 E+2
35.00	0.508814 E+2
35.50	0.506923 E+2
36.00	0.505046 E+2
36.50	0.503183 E+2
37.00	0.501334 E+2
37.50	0.499499 E+2
38.00	0.497678 E+2
38.50	0.495871 E+2
39.00	0.494078 E+2
39.50	0.492298 E+2
40.00	0.490531 E+2
40.50	0.488778 E+2
41.00	0.487038 E+2

图9 30℃棉铃虫种群世代生长型曲线的模拟

Y	Min
	0.000000
0.00	0.100000 E+3
0.50	0.748425 E+2
1.00	0.673709 E+2
1.50	0.641510 E+2
2.00	0.627017 E+2
2.50	0.615150 E+2
3.00	0.603565 E+2
3.50	0.592206 E+2
4.00	0.581062 E+2
4.50	0.572842 E+2
5.00	0.562061 E+2
5.50	0.551484 E+2
6.00	0.541106 E+2
6.50	0.530923 E+2
7.00	0.520932 E+2
7.50	0.511129 E+2
8.00	0.501510 E+2
8.50	0.492073 E+2
9.00	0.482812 E+2
9.50	0.473427 E+2
10.00	0.464812 E+2
10.50	0.456065 E+2
11.00	0.447482 E+2
11.50	0.439071 E+2
12.00	0.430879 E+2
12.50	0.423004 E+2
13.00	0.415540 E+2
13.50	0.408604 E+2
14.00	0.402071 E+2
14.50	0.395860 E+2
15.00	0.391224 E+2
15.50	0.385464 E+2
16.00	0.379810 E+2
16.50	0.374247 E+2
17.00	0.368772 E+2
17.50	0.365693 E+2
18.00	0.421278 E+2
18.50	0.690962 E+2
19.00	0.139159 E+3
19.50	0.277967 E+3
20.00	0.507859 E+3
20.50	0.840195 E+3
21.00	0.128828 E+4
21.50	0.180811 E+4
22.00	0.238634 E+4
22.50	0.292679 E+4
23.00	0.345417 E+4
23.50	0.393344 E+4
24.00	0.434155 E+4
24.50	0.467688 E+4
25.00	0.494219 E+4
25.50	0.514504 E+4
26.00	0.529541 E+4
26.50	0.540379 E+4
27.00	0.547994 E+4
27.50	0.553219 E+4
28.00	0.556423 E+4
28.50	0.558520 E+4
29.00	0.559865 E+4
29.50	0.560714 E+4
30.00	0.561241 E+4
30.50	0.561563 E+4
31.00	0.561756 E+4
31.50	0.561872 E+4
32.00	0.561939 E+4
32.50	0.561978 E+4
33.00	0.562001 E+4
33.50	0.562014 E+4
34.00	0.562021 E+4
34.50	0.562025 E+4
35.00	0.562027 E+4
35.50	0.562028 E+4
36.00	0.562029 E+4
36.50	0.562029 E+4
37.00	0.562029 E+4
37.50	0.562029 E+4
38.00	0.562029 E+4
38.50	0.562029 E+4
39.00	0.562029 E+4
39.50	0.562029 E+4

图10 35℃棉铃虫种群世代生长型曲线的模拟