

稻田蜘蛛对稻纵卷叶螟生命系统的控制作用

庞雄飞 梁广文 尤民生*

(植保系)

提 要

本文以稻纵卷叶螟种群生命系统控制研究作为例子,进一步讨论状态空间表达式的设计及应用问题。应用状态空间分析法,有可能将各类因子对种群数量的控制作用分别进行研究,以及对防治害虫的措施进行综合分析,为制订害虫防治策略提供参改。

关键词 状态空间法; 种群生命系统; 控制指数; 稻纵卷叶螟

前文^[4]曾经讨论适应于昆虫种群生命系统控制研究的状态空间表达式的设计。本文以稻纵卷叶螟种群生命系统控制研究作为例子,对上述问题进行具体补充,并涉及应用状态空间分析法研究重要因子和防治措施的作用,为现代控制理论应用于害虫种群生态学提供参考。

稻纵卷叶螟种群生命系统控制的状态空间表达式

根据多年来对稻纵卷叶螟第二世代历期的调查,以及26~29°C恒温对生长发育速度影响的试验结果,其发育历期见表1(表中所列的发育历期时间单位为天,其中小于0.5天的不计算在内,0.5或大于0.5天作一天计算;为建模的方便,成虫历期延至死亡为止)。根据发育历期的情况,这里把各虫态及各虫龄再细分为以一天为单位的年龄组,即以32个状态变量作为输入向量和控制向量。

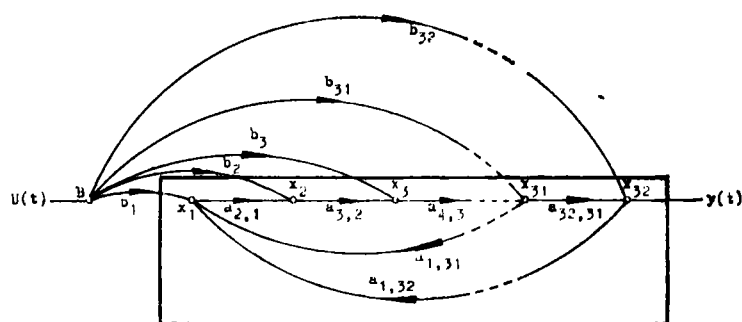
划分为32个状态变量后,稻纵卷叶螟种群生命系统控制的网络模型表达如图1所示。根据图1,建立状态方程(方程1)及输出方程(方程2),组成状态空间表达式。

*尤民生现在福建农学院工作

1987年10月2日收稿

表 1 稻纵卷叶螟第二世代发育历期及其种群生命系统的状态变量

虫 态 (X)	历 期 (天)	年龄组 (i)	各虫态的数量 (N_x)	状态变量 (X_i)
卵 (E)	4	1	N_E	$X_1 = N_E / 4$
		2		$X_2 = N_E / 4$
		3		$X_3 = N_E / 4$
		4		$X_4 = N_E / 4$
幼 虫	一龄 (L_1)	5	N_{L1}	$X_5 = N_{L1} / 2$
		6		$X_6 = N_{L1} / 2$
	二龄 (L_2)	7	N_{L2}	$X_7 = N_{L2} / 3$
		8		$X_8 = N_{L2} / 3$
		9		$X_9 = N_{L2} / 3$
	三龄 (L_3)	10	N_{L3}	$X_{10} = N_{L3} / 3$
		11		$X_{11} = N_{L3} / 3$
		12		$X_{12} = N_{L3} / 3$
	四龄 (L_4)	13	N_{L4}	$X_{13} = N_{L4} / 3$
		14		$X_{14} = N_{L4} / 3$
		15		$X_{15} = N_{L4} / 3$
	五龄 (L_5)	16	N_{L5}	$X_{16} = N_{L5} / 4$
		17		$X_{17} = N_{L5} / 4$
		18		$X_{18} = N_{L5} / 4$
		19		$X_{19} = N_{L5} / 4$
蛹 (P)	7	20	N_P	$X_{20} = N_P / 7$
		21		$X_{21} = N_P / 7$
		22		$X_{22} = N_P / 7$
		23		$X_{23} = N_P / 7$
		24		$X_{24} = N_P / 7$
		25		$X_{25} = N_P / 7$
		26		$X_{26} = N_P / 7$
成 虫 (A)	6	27	N_A	$X_{27} = N_A / 6$
		28		$X_{28} = N_A / 6$
		29		$X_{29} = N_A / 6$
		30		$X_{30} = N_A / 6$
		31		$X_{31} = N_A / 6$
		32		$X_{32} = N_A / 6$



方框内为种群生命系统；

X_i 为状态变量； $a_{j,i}$ 和 a_i 为状态转移关系 ($j=i+1$)；

B 为控制矩阵； b_i 为 X_i 相联系的元素； $i=1, 2, \dots, 32$

$U(t)$ 为输入向量 ($U(t) = X(t)$)；

C 为输出矩阵； $Y(t)$ 为输出。

图1 稻纵卷叶螟种群生命系统控制的网络模型

根据图1，可得下面的状态方程及输出方程：

$$X(t+1) = AX(t) + BU(t)$$

$$Y(t) = CX(t)$$

状态方程在 $U(t) = X(t)$ 时，最简式为：

$$X(t+1) = (A+B)X(t)$$

或：

$$\begin{bmatrix} x_1(t+1) \\ x_2(t+1) \\ x_3(t+1) \\ \vdots \\ x_{31}(t+1) \\ x_{32}(t+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & a_{1,31} & a_{1,32} \\ a_{2,1} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & a_{3,2} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ \vdots \\ x_{31}(t) \\ x_{32}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & b_{31} & b_{32} \\ b_1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & b_2 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & (b_{31}) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ \vdots \\ x_{31}(t) \\ x_{32}(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ \vdots \\ x_{31}(t) \\ x_{32}(t) \end{bmatrix} \quad (2)$$

在方程(1)中，如计算成虫期的死亡， (b_{31}) 为该期存活率。

在状态空间表达式中，系统矩阵是以存活率 $(a_{j,i})$ 及生殖力 (a_i) 为基础组成的 32×32 方阵。其中假设各虫期于最后的年龄组才出现死亡。例如卵期4天，划分为4个状态，状态 $a_{2,1}, a_{3,2}, a_{4,3}$ 均为1，即全部存活， $a_{4,4} = 0.4389$ (这样假设是比较简化的，也可以按存活的实际分布进行设计处理)。成虫期6天，第3天开始产卵，假设各天的产卵量是均匀分布的。由此可以得出表2的系统矩阵各元素的数根(表2)。

(广东、阳江、海陵)

虫 态	虫期 (天)	死亡因子 (dxF)	各死亡因子引起的 存活率或产卵量 (S _d)	各虫期存活率 或产卵量 (S _x)	年龄组 (序号) (i)	各年龄组存活率或 产卵量 (粒/头) (a _{j,i} , i, a _{1,i})	
卵	4	捕食 寄生 不孵	S ₁ = 0.5010 S ₂ = 0.9536 S ₃ = 0.9186	S _E = 0.4389	1	a _{2,1} = 1	
					2	a _{3,2} = 1	
					3	a _{4,3} = 1	
					4	a _{5,4} = 0.4389	
幼 虫	一 龄	2	捕食及其他 寄 生	S ₄ = 0.3038 S ₅ = 0.9040	S ₁ = 0.2746	5 6	a _{6,5} = 1 a _{6,7} = 0.2746
	二 龄	3	捕食及其他 寄 生	S ₆ = 0.4134 S ₇ = 0.8158	S _{L2} = 0.3373	7	a _{8,7} = 1
						8	a _{9,8} = 1
						9	a _{10,9} = 0.3373
	三 龄	3	捕食及其他 寄 生 亡 病	S ₈ = 0.5594 S ₉ = 0.8234 S ₁₀ = 0.9965	S _{L3} = 0.4590	10	a _{11,10} = 1
						11	a _{12,11} = 1
						12	a _{13,12} = 0.4590
	四 龄	3	捕食及其他 寄 生	S ₁₁ = 0.4853 S ₁₂ = 0.7165	S _{L4} = 0.3477	13	a _{14,13} = 1
						14	a _{15,14} = 1
						15	a _{16,15} = 0.3477
	五 龄	4	捕食及其他 寄 生 病 亡	S ₁₃ = 0.4749 S ₁₄ = 0.7948 S ₁₅ = 0.9779	S _{L5} = 0.3691	16	a _{17,16} = 1
						17	a _{18,17} = 1
						18	a _{19,18} = 1
						19	a _{20,19} = 0.3691
	蛹	7	捕食及其他 寄 生 病 亡	S ₁₆ = 0.6306 S ₁₇ = 0.7573 S ₁₈ = 0.9275	S _P = 0.4429	20	a _{21,20} = 1
						21	a _{22,21} = 1
22						a _{23,22} = 1	
23						a _{24,23} = 1	
24						a _{25,24} = 1	
25						a _{26,25} = 1	
26						a _{27,26} = 0.4429	
成虫						6	产卵量 粒/头
	28	a _{1,28} = 0					
	29	a _{1,29} = 42/4					
	30	a _{1,30} = 42/4					
	31	a _{1,31} = 42/4					
	32	a _{1,32} = 42/4					

控制矩阵在这里设计为与系统矩阵同样维数的矩阵，即 32×32 方阵。控制矩阵B的元素b，按照研究的目标进行设计。这样的设计形式将便于进行下面的分析。

稻田蜘蛛对稻纵卷叶螟种群生命系统的控制作用分析

庞雄飞^[1]、庞雄飞等^{[2][3][4]}曾经提出和讨论了重要因子的分析方法，以表达各类因子对种群数量发表趋势的控制作用程度。其控制作用以 $M_{i,j}$ 值 ($M_{i,j} = \frac{1}{S_i}$) 表示。 $M_{i,j}$ 值的含义为：如果排除组份S所引起的死亡，即 $S_i = 1$ ，下一世代的种群趋势指数 $I_{i,j}$ 将比原来I增长 $M_{i,j}$ 倍。在这里，我们把 $M_{i,j}$ 值，即存活率的倒数，称为种群数量的发展趋势的控制指数，简称为控制指数。据稻纵卷叶螟1977—1983年第二代平均生命表各致死因子引起的存活率计算，其控制指数见表3。

表3 据稻纵卷叶螟1977—1983第二代平均生命表计算的控制指数 (M_{si}) *

虫 期		致死因子	各期存活率 (S_i)	控制指数 ($M(s_i) = \frac{1}{S_i}$)
幼 虫	卵	捕食	0.5010	1.996
		寄生	0.9536	1.049
		不解	9.9186	1.089
	一 龄	捕食及其他	0.3038	3.292
		寄生	0.9040	1.106
	二 龄	捕食及其他	0.4134	2.419
		寄生	0.8158	1.226
	三 龄	捕食及其他	0.5594	1.788
		寄生	0.8234	1.214
		病 亡	0.9965	1.004
	四 龄	捕食及其他	0.4853	2.061
		寄生	0.7165	1.369
	五 龄	捕食及其他	0.4749	2.106
		寄生	0.7948	1.258
		病 亡	0.9779	1.023
蛹		捕食	0.6306	1.586
		寄生	0.7573	1.320
		病 亡	0.9275	1.078

*成虫期的各项不参加分析；资料来源于表2。

据表3的控制指数分析,一龄幼虫的“捕食及其他”因子的控制作用最大,其次为二龄、五龄、四龄期的“捕食及其他”,三龄幼虫期的“捕食及其他”因子所起的作用也比较明显。如果把全部幼虫期的“捕食及其他”因子总合计算,则其控制指数 $M_{[L,P]}$ 将为:

$$M_{[L,P]} = (3.292) (2.419) (1.788) (2.061) (2.160) \\ = 63.386$$

“捕食及其他”因子包括自然死亡。在该水稻品种抗性级别的试验中,幼虫期的自然死亡为13%,即其存活率为0.87。捕食性天敌的作用应在其中除去自然死亡的部份。因而捕食性天敌的控制指数 $M_{[L,pred]}$ 应为为:

$$M_{[L,pred]} = (63.386) (0.87) = 55.146$$

即:如果没有捕食性天敌,其种群数量发展趋势指数将为原来的55.146倍。由此看来,捕食性天敌对稻纵卷叶螟的种群数量的控制作用相当重要的

据多年的调查,隐翅虫、长颈步甲、青步甲等天敌昆虫占全部捕食性天敌总数的10%左右,且在水稻本田生长期中数量比较稳定;蜘蛛的数量占全部天敌个体总数的90%左右,其数量却自水稻插植后随着时间的推移而继续增长。因此,研究蜘蛛对稻纵卷叶螟种群生命系统的控制作用,作为控制矩阵设计的实例,将会引起共同的兴趣。

庞雄飞、梁广文^[3]曾在多年调查的基础上建立了稻田蜘蛛密度 d_i 随时间 T_i (天)的自然增长曲线方程如下:

$$f(d) = \frac{90}{1 + \exp(1.85 - 0.11T)}$$

在调查中,如果得出一龄幼虫期开始时的蜘蛛密度 d_4 ,即可输入计算当时的 T_4 值,其他 T_i 值则可以按虫期推算。同时,也建立了各龄幼虫期的存活率与蜘蛛密度关系的亚模型。其中一、二、三、四、五龄幼虫期存活率与蜘蛛密度的关系分别以 $f(s_4)$, $f(s_5)$, $f(s_6)$, $f(s_{11})$, $f(s_{13})$ 表示,其中 S_i 的标号与表2的相同。亚模型的参数根据近年的资料及检验结果作了必要的校正。各龄幼虫期存活率与蜘蛛密度关系的亚模型分列于下。

$$f(s_4) = 12.8071(d_4)^{-1.1688} = 0.5083 - 0.0081d_4$$

$$f(s_5) = 0.6518 - \frac{0.7290}{1 + \exp(1.85 - 0.11T_5)} = 0.6518 - 0.0081d_5$$

$$f(s_6) = 0.8534 - \frac{0.7290}{1 + \exp(1.85 - 0.11T_6)} = 0.8534 - 0.0081d_6$$

$$f(s_{11}) = 0.8385 - \frac{0.7290}{1 + \exp(1.85 - 0.11T_{11})} = 0.8385 - 0.0081d_{11}$$

$$f(s_{13}) = 0.8880 - \frac{0.7290}{1 + \exp(1.85 - 0.11T_{13})} = 0.8880 - 0.0081d_{13}$$

应用上面公式的 d_i 及 T_i 推算如下:

$$f(s_4) = S_4 = 0.3038 \quad d_4 = 25.246$$

$$f(d_4) = d_4 = 25.246 \quad T_4 = 8.255$$

当 d_4 及 T_4 值已知,其他 T_i 及 d_i 也可按公式推算,得出如下,结果。

$$T_4 = 8.255, \quad d_4 = 25.246,$$

$$T_6 = T_4 + 2 = 10.255, \quad d_6 = 29.427,$$

$$\begin{aligned}T_8 &= T_4 + 5 = 13.225, & d_8 &= 36.292; \\T_{11} - T_4 &+ 8 = 16.255, & d_{11} &= 43.607; \\T_{13} - T_4 &+ 11 = 19.255, & d_{13} &= 50.995.\end{aligned}$$

T_i 或 d_i 的改变,将会引起 $f(s_i)$ 的改变,从而对种群数量发生影响。因而在研究稻田蜘蛛对稻纵卷叶螟种群生命系统的控制时,可以应用上面的 $f(s_i)$ 为基础建立控制矩阵 B (表4)。其中 b_i 的设计如下:

$$\begin{aligned}b_8 &= S_8 f(s_4) - S_4 S_8 = 0.9040f(s_4) - 0.2746 \\b_9 &= S_7 f(s_8) - S_8 S_7 = 0.8158f(s_8) - 0.3373 \\b_{12} &= s_8 s_{10} f(s_8) - s_8 s_9 s_{10} = 0.8205f(s_8) - 0.4950 \\b_{15} &= s_{12} f(s_{11}) - s_{11} s_{12} = 0.7165f(s_{11}) - 0.3477 \\b_{18} &= s_{14} s_{18} f(s_{13}) - s_{13} s_{14} s_{18} = 0.7772f(s_{13}) - 0.369\end{aligned}$$

其他 b_i 均为0

由此,可以把表4中 a_{ji} 的量值代入状态方程(方程1)的系统矩阵 A 中,把 b_i 的子模型代入该方程的控制矩阵 B 中,获得稻田蜘蛛对稻纵卷叶螟生命系统控制作用的状态方程。稻田蜘蛛的数量变化对稻纵卷叶螟生命系统的影响,可以编入程序在电子计算机内实现。例如,当蜘蛛的数量保持原有状态,即 $d_4 = 25.246$,控制矩阵 B 中的 $b_i(1)$ 全部为零,即不会引起系统的变化;当蜘蛛的数量仅为原来的一半,即 $d_4 = 12.623$,控制矩阵中的 $b_i(2)$ 直接对系统矩阵的 a_{ji} 发生作用,引起相应的组份所表示的存活率增加;当蜘蛛的数量为零,控制矩阵中的 $b_i(3)$ 对系统矩阵 a_{ji} 的控制作用更为显著($b_i(1)$, $b_i(2)$, $b_i(3)$ 的数值见表4)。

如果把输出方程设计为:

$$Y(t+32) = [1 \ 1 \ 1 \ \cdots \ 1 \ 1] X(t+32)$$

则可得出下一世代(历期32天后)的全部数量。如果把输出方程设计为:

$$Y'(t+32) = [0 \ 0 \ 0 \ \cdots \ 1 \ \cdots \ 0 \ 0] X(t+32)$$

则可得出下一世代 $X_i(t+32)$ 的数量。

为了讨论稻田蜘蛛对稻纵卷叶螟种群生命系统的控制作用,据表4的材料,可以得出下面的结果。

1°当蜘蛛的数量不发生变化,即 $d_4 = 25.246$ 时,经过一个世代,即历期32天后,其数量变化为,

$$\begin{aligned}d_4 &= 25.246, \\X_{i(1)}(t+32) &= (0.4389)(0.2746)(0.3373)(0.4593)(0.3477) \\&= (0.3691)(0.4429)(42)X_i(t) = 0.0446X_i(t)\end{aligned}$$

2°当蜘蛛的数量只有原来的一半,即 $d_4 = 12.623$ 时,经历一个世代后的数量变化为:

$$\begin{aligned}d_4 &= 12.623, \\X_{i2}(t+32) &= (0.4389)(0.2746 + 0.0925)(0.3373 + 0.0939) \\&= (0.4593 + 0.1122)(0.3477 + 0.1056)(0.3691 + 0.1207) \\&= (0.4429)(42)X_i(t) = 0.1640X_i(t)\end{aligned}$$

表4 稻田蜘蛛对稻纵卷叶螟种群生命系统控制的系统矩阵和控制矩阵

j, i	a_{ji}	b_i	$b_i(1)$	$b_i(2)$	$b_i(3)$
			$(d_4 = 25.246)$	$(d_4 = 12.623)$	$(d_i = 0)$
2,1	1	0	0	0	0
3,2	1	0	0	0	0
4,3	1	0	0	0	0
5,4	0.4389	0	0	0	0
6,5	1	0	0	0	0
7,6	0.2746	$0.9040f(s_4) - 0.2746$	0	0.0925	0.1849
8,7	1	0	0	0	0
9,8	1	0	0	0	0
10,9	0.3373	$0.8158f(s_8) - 0.3373$	0	0.0939	0.1944
11,10	1	0	0	0	0
12,11	1	0	0	0	0
13,12	0.4593	$0.8250f(s_8) - 0.4593$	0	0.1122	0.2448
14,13	1	0	0	0	0
15,14	1	0	0	0	0
16,15	0.3477	$0.7165f(s_{11}) - 0.3477$	0	0.1056	0.2531
17,16	1	0	0	0	0
18,17	1	0	0	0	0
19,18	1	0	0	0	0
20,19	0.3691	$0.7772f(s_{13}) - 0.3691$	0	0.1207	0.3210
21,22	1	0	0	0	0
22,21	1	0	0	0	0
23,22	1	0	0	0	0
24,23	1	0	0	0	0
25,24	1	0	0	0	0
26,25	1	0	0	0	0
27,26	0.4429	0	0	0	0
1,27	0	0	0	0	0
1,28	0	0	0	0	0
1,29	42/4	0	0	0	0
1,30	42/4	0	0	0	0
1,31	42/4	0	0	0	0
1,32	42/4	0	0	0	0

3°假如没有蜘蛛所起的作用,即 $d = 0$,则:

$$d = 0;$$

$$\begin{aligned} X_1(3)(t+32) &= (0.4389)(0.2746+0.1849)(0.3373+0.1944) \\ &= (0.4593+0.2448)(0.3477+0.2531)(0.3691+0.3210) \\ &= (0.4429)(42)X_1(t) = 0.5823X_1(t) \end{aligned}$$

由此可以得出下面的结果:在上面的试验分析中,如果蜘蛛的数量减半,则其控制指数将为 $0.1640/0.0446=3.677$;如果没有蜘蛛的作用,则其控制指数将为 $0.5823/0.0446=13.056$ 。蜘蛛的数量变化对种群数量发展趋势所起的作用是明显的。如果蜘蛛数量减半,稻纵卷叶螟下一世代的数量将为原来世代的三倍多,如果没有蜘蛛的作用,则将为原来的十三倍。

这里仅以稻田蜘蛛对稻纵卷叶螟种群生命系统控制作为例子,讨论状态空间表达式的建立问题。在状态空间表达式的状态方程中,正如上述,控制矩阵应根据试验目的进行设计;至于输出矩阵,则可与目标函数联系在一起。例如。如果要求输出为损失率,输出矩阵可以数量与损失的关系进行设计;要求输出为经济损失,则可以数量——损失——经济损失的关系进行设计,使输出与目标函数方程能直接联系起来。

关于状态空间表达式的实际应用,今后将在其他具体害虫的研究中继续补充。

引用文献

- [1] 庞雄飞. 广东农业科学, 1979; (4): 36—40
- [2] 庞雄飞, 候任环, 梁广文, 李哲怀. 华南农学院学报, 1981; 2 (4): 71—84
- [3] 庞雄飞, 梁广文. 华南农学院学报, 1992; 8 (2): 13—27
- [4] 庞雄飞, 梁广文, 尤民生, 吴伟坚. 华南农业大学学报, 1988; 9 (2): 1—10

CONTROL EFFECTS OF THE SPIDERS ON RICE LEAF ROLLER LIFE SYSTEM

Pang Xiong-fei Liang Guangwen You Minsheng

(Department of Plant Protection)

ABSTRACT

In this paper the control effects of the spiders on rice leaf roller, *Cnaphalocrocis medinalis*, were observed as a case studies of population life systems. The state-space method can be used to study the effectiveness of different external agencies influencing a subject population and integrative effects of control methods. It may be important to study the tectics of insect pest control.

Key words: State-space approach; population life systems; Index of population control; *Cnaphalocrocis medinalis*