华南农业大学学报 13 (3) 1992：16～22
J. South China Agr. Univ.

褐稻虱种群数量动态的短期预测

庞雄飞
（昆虫生态研究室）

摘要 本文在多年同次世代平均生命表[4,7]的基础上，应用种群矩阵模型[8]讨论褐稻虱种群数量动态的预测问题.褐稻虱种群生命表划分为卵、1～2龄若虫、3～5龄若虫及成虫4个阶段，这4个阶段的历期不相等.本文把这4个阶段继续细分为等期的日龄状态。与此相适应，种群矩阵模型的转移矩阵也扩展为相应维数的方阵。结合输出方程，输入始发期1天调查的各虫期的密度，连续输出约40天内各期的密度。在水稻品种对褐稻虱的抗性级别基本不变，其他干扰因素比较稳定的条件下，预测结果对当地有一定的参考价值。

关键词 褐稻虱，种群动态；数量预测

在生命表基础上建立的种群矩阵模型[8,9]广泛应用于人口动态过程的描述及人口动态预测[1]。也成为有害生物协调管理（IPM）常用的数学模型之一。该模型以等期年龄组依次划分为各个状态（x_i）。组成状态向量（x），以各状态的存活率及生殖力组成状态转移矩阵（S）。该模型具有如下特点（方程1）。

$$X(t_1)=SX(t_0) \qquad \cdots\cdots (1)$$
$$X(t_2)=SX(t_1)$$
$$X(t_3)=SX(t_2)$$
$$\vdots$$
$$X(t_{k-1})=SX(t_k)$$

其中：

$$X=[X_1 \quad X_2 \quad \cdots \quad X_k]^T$$

$$S=\begin{bmatrix} 0 & f_2 & f_3 & \cdots & f_{k-1} & f_k \\ S_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & S_2 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S_3 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & S_{k-1} & 0 \end{bmatrix}$$

然而，在昆虫种群生命表中，一般以虫期分组。各虫期组的历期并不一致，以虫期组配的生命表数据不宜直接代入该模型（方程1）之中。Vakermeer[9]曾建立不等期年龄组的种群矩阵模型（方程2），以保留概率的方法处理转移矩阵，但所建立的模型并不具备上述种群矩阵模型的连续推算 $X(t_2)$，…$X(t_k)$ 的特点。

1991－09－02收稿

$$X(t_1)=S'X(t_0) \tag{2}$$

其中：

$$X(t_2)\neq S'X(t_1)$$

$$X(t_3)\neq S'X(t_2)$$

$$S'=\begin{bmatrix} 0 & f_2 & f_3 & \cdots & f_{k-1} & f_k \\ S_1 & S_1' & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & S_2 & S_2' & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & S_{k-1} & S'_{k-1} \end{bmatrix}$$

在矩阵中：　　$S_i+S'_i=1$

庞雄飞[2]、庞雄飞等[3,5,6]对上述问题曾进行讨论。本文着重讨论应用种群矩阵模型研究褐稻虱种群数量动态的短期预测问题。

1　褐稻虱种群矩阵模型及其参数处理

广东省海陵岛于 1976～1980 年 5～6 月的以虫期组配的褐稻虱自然种群生命表曾作报导[7]。这里仅就 1980～1989 年 5～6 月平均生命表数据进行处理，在这基础上建立褐稻虱种群矩阵模型。

每年 5～6 月，褐稻虱卵期约 7 天，1～2 龄若虫期约 5 天，3～5 龄若虫期约 8 天，成虫寿命（自然种群）可按 12 天计算，其种群阵模型可扩展如下（方程 3）。

$$\begin{bmatrix} x_{E1}(t_1) \\ X_{E2}(t_1) \\ \vdots \\ x_{E7}(t_1) \\ x_{S1}(t_1) \\ x_{S2}(t_1) \\ \vdots \\ x_{S5}(t_1) \\ x_{L1}(t_1) \\ x_{L2}(t_1) \\ \vdots \\ x_{L8}(t_1) \\ x_{A1}(t_1) \\ x_{A2}(t_1) \\ \vdots \\ x_{A12}(t_1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0\ \ 0\cdots0 & 0\ \ 0\cdots0 & 0\ \ 0\cdots0 & a_{A1}\ \ a_{A2}\cdots a_{A12} \\ S_E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S_L & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{E1}(t_0) \\ x_{E2}(t_0) \\ \vdots \\ x_{E7}(t_0) \\ x_{S1}(t_0) \\ x_{S2}(t_0) \\ \vdots \\ x_{S5}(t_0) \\ x_{L1}(t_0) \\ x_{L2}(t_0) \\ \vdots \\ x_{L8}(t_0) \\ x_{A1}(t_0) \\ x_{A2}(t_0) \\ \vdots \\ x_{A12}(t_0) \end{bmatrix} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (3)$$

下面将进一步讨论方程3中各项参数的处理方法。

1.1　各虫期中各日龄状态变量（x_{ij}）的分配

在褐稻虱以虫期组配的同次世代平均生命表（表1）中，设每虫期的日龄存活率是相一致的并以 S_i（i=E，S，L）表示卵、1～2龄若虫、3～5龄若虫的存活率，则卵及若虫各日龄状态变量可按下面准则分配：

$$x_{ij}=\left[x_i\,(S_i)^{j/\Delta i}\right]/\sum(S_i)^{j/\Delta i} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (4)$$

i—卵（E），1～2龄若虫（S），3～5龄若虫（L）；

j—日龄（j=1，2，3，……，△i）；

x_{ij}—第 i 虫期第 j 日龄的状态变量；

x_i—第 i 虫期的数量；

S_i—第 i 虫期的存活率；

$\triangle_i$—第 i 虫期的历期。

例如，据1990年5月19日的褐稻虱密度调查，每百科水稻上有卵 $x_E=555$粒，1～2龄若虫 $x_S=2$头，3～5龄若虫 $x_L=43$头，在1971—1989年5—6月平均生命表（表1）中，卵期存活率为 $S_E=0.335$，1～2龄若虫存活率 $S_S=0.351$，3～5龄若虫存活率 $S_L=0.224$；各虫期的历期按△E=7，△S=5，△L=8计算，则：

$x_E=555=[120.7\quad 103.3\quad 88.3\quad 75.5\quad 64.6\quad 55.3\quad 47.3]^T$

$x_S=2=[0.6\quad 0.5\quad 0.4\quad 0.3\quad 0.2]^T$

$x_L=43=[9.5\quad 7.9\quad 6.5\quad 5.4\quad 4.4\quad 3.8\quad 3.0\quad 2.5]^T$

表1　褐稻虱1980～1989自然种群5～6月平均生命表（广东，海陵）

虫期	各虫期存活率	作用因子		各作用因子存活率
卵	$S_E=S_1S_2S_3=0.335$	捕食	S_1	0.418
		寄生	S_2	0.856
		不孵	S_3	0.935
1～2龄若虫	$S_S=S_4=0.351$	捕食及抗性	S_4	0.351
3～5龄若虫	$S_L=S_5S_6=0.224$	捕食及抗性	S_5	0.265
		寄生	S_6	0.844
成虫	$F=1\,000$	标准卵量	F	1 000
	$P_F=0.26$	达标准卵量概率	P_F	0.26
	$P_♀=0.676$	雌性概率	$P_♀$	0.676
成虫逐日存活率（$S_{Aa}=0.76$）		成虫逐日存活率	（S_{Aa}）	（0.76）
$\sum P_n(S_{Aa})^t=0.091$		$\sum P_n(S_{Aa})^t$		0.091
种群趋势指数 $I=0.42$		种群趋势指数	I	0.42

成虫期状态变量的分配，与成虫逐日存活率有关，也与成虫的迁移或迁飞有关。成虫逐日存活率以 S_{Aa}表示，迁移及迁飞后的居留率以 S_t 表示。成虫迁移及迁飞一般于羽化后第3～4天。这里把迁移后居留率纳入第3天计算。由此，成虫期各日龄的状态变量按下面的准则分配。

$$x_A=\left[\frac{x_A(S_{Aa})}{r}\quad\frac{x_A(S_{Aa})^2}{r}\quad\frac{x_A(S_{Aa})^3}{r}\quad\frac{x_A(S_{Aa})^4}{r}\cdots\frac{x_A(S_{Aa})^{12}}{r}\cdots\right]$$

x_A—成虫数量（密度）；

S_{Aa}—成虫逐日存活率；

S_t—成虫迁移后居留率；

$r=(S_{Aa})+(S_{Aa})^2(S_{Aa})^3+(S_{Aa})^4+\cdots+(S_{Aa})^{12}+\cdots$。

在上述调查中，每百科水稻有成虫 $x_A=29$，成虫逐日存活率为 $S_{Aa}=0.76$，迁移后居留率计算于 S_{Aa}中。成虫的日龄状态变量分配为：

$x_A=29=[7.2\quad 5.5\quad 4.2\quad 3.2\quad 2.4\quad 1.8\quad 1.4\quad 1.0\quad 0.8\quad 0.6\quad 0.5\quad 0.4]^T$

1. 2　转移矩阵 S 中的参数处理

在转移矩阵 S 中，描述生殖特征的第1行，根据成虫产卵量（$FP_FP_♀$）与逐日产卵概率（P_{fi}）进行组配。成虫产卵量根据试验结果。成虫逐日产卵概率按下面方程模拟（方程5）[1]。

$$P_{fi}=[(i-h)^{(k/2)-1}e^{-(i-h)/2}]/r\ （负值取零）\tag{5}$$

i—成虫羽化后天数；

h—产卵前历期；

k—产卵最高峰日前一天的历期；

r—待定系数 $[r=(i-h)^{(k/2)-1}e^{-(i-h)/2}]$

例如，在供试的水稻品种上，通过实验，产卵量 $FP_FP_♀=175.76$，产卵前历期 h=3.4，产卵高峰日 k+1=9，成虫寿命按12天计算，则：

$a_A=FP_FP_♀=[0\quad 0\quad 0\quad 0.004\quad 0.05\quad 0.136\quad 0.197\quad 0.208\quad 0.179\quad 0.134\quad 0.092]$

在转移矩阵 S 中，描述各虫期存活率的分块矩阵，可按各虫期中各日龄存活率等量分配设计。其中卵期存活率为 S_E，历期为$\triangle_E$；1—2 龄若虫存活率为 S_S，历期为△S；3～5 龄若虫 存活率为 S_L，历期为$\triangle_L$。则：

$S_{Ei}=(S_S)^{1/\triangle E}$

$S_{Si}=(S_S)^{1/\triangle S}$

$S_{Li}=(S_L)^{1/\triangle L}$

成虫期的存活率已按逐日存活率表示，除第 3 天与迁移后存活率组配在一起，即 $S_{A3}=S_{Ai}S_t$ 外，其余各日龄的存活率均为 $S_{Ai}=S_{Ai}$

例如，当 $S_E=0.335$　$\triangle E=7$；　$S_S=0.351$　$\triangle S=5$；　$S_L=0.224$　$\triangle L=8$；　$S_A=0.760$　$\triangle A=12$ 时，则：

$$S_E=\begin{bmatrix}0.855&0&0&0&0&0&0\\0&0.855&0&0&0&0&0\\0&0&0.855&0&0&0&0\\0&0&0&0.855&0&0&0\\0&0&0&0&0.855&0&0\\0&0&0&0&0&0.855&0\\0&0&0&0&0&0&0.855\end{bmatrix}$$

$$S_S=\begin{bmatrix}0.811&0&0&0&0\\0&0.811&0&0&0\\0&0&0.811&0&0\\0&0&0&0.811&0\\0&0&0&0&0.811\end{bmatrix}$$

$$S_L=\begin{bmatrix} 0.829 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.829 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.829 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.829 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.829 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.829 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.829 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.829 \end{bmatrix}$$

$$S_A=\begin{bmatrix} 0.76 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.76 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.76 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.76 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.76 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.76 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.76 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.76 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.76 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.76 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.76 & 0 \end{bmatrix}$$

2 输出方程

当目标在于种群各虫期数量动态的预测时，其输出方程可按下面的设计。

$$\begin{bmatrix} X_E\ (t) \\ x_S\ (t) \\ x_L\ (t) \\ x_A\ (t) \end{bmatrix}=CX\ (t) \quad \cdots\cdots (6)$$

$$C=\begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 & 1 & \cdots & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 & 1 & \cdots & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix}$$

3 褐稻虱种群数量动态预测示例

通过上面描述的种群矩阵模型及输出方程，构成褐稻虱种群数量动态预测模型。在上面举例列出的数据中，转移矩阵的生殖力和存活率参数来源于广东省海陵岛 1980～1989 年 5～6 月褐稻虱种群平均生命表；状态向量的参数来源于当地 1990 年 5 月 19 日稻田的实际调查。每年 5 月中旬，褐稻虱的数量开始增长，其后的 40 天是褐稻虱于早稻期间监测的关键时期。应用组建的褐稻虱种群数量动态预测模型，把 5 月中旬卵、1～2 龄若虫、3～5 龄若虫和成虫密度的 1 次调查结果作为起始时状态向量 [$X(t_0)$] 输入，可以连续输出 40 天内各虫期的数量动态（图 1）。在图 1 中仅选择卵及 3～5 龄若虫表达其预测结果。预测结

果与实际调查结果基本一致。

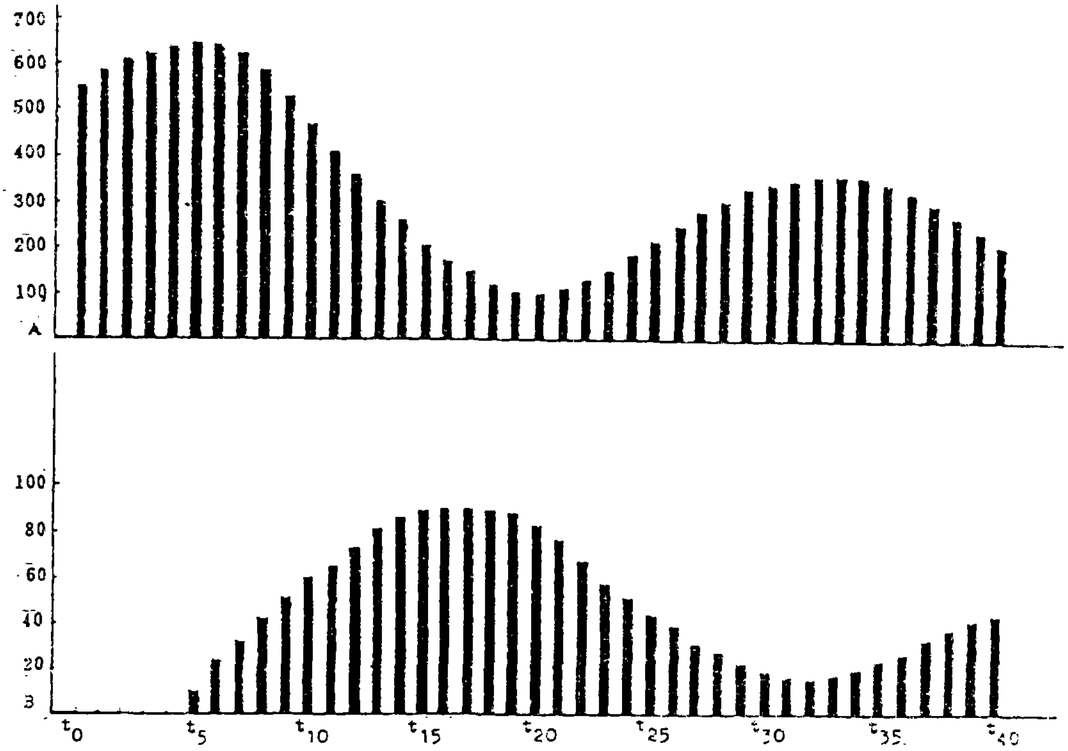

图 1　褐稻虱卵（上图，A）及 3—5 龄若虫（下图，B）密度（头/百科）的预测值
纵座标表示每百科水稻上的数量；横座标表示时间（天，t_0—t_{40}）。

4 讨　论

上述的褐稻虱种群动态短期预测模型曾经多年检验和校正，例如，应用 1976～1980 年 5～6 月分平均生命表数据，预测 1981 年早稻褐稻虱的发生情况；应用 1977～1981 年 5～6 月平均生命表数据预测 1982 年早稻褐稻虱的发生情况；………，利用 1980 年～1989 年平均生命表的数据预测 1990 年早稻虱的发生情况等。预测的结果与实际情况是基本相似的。这说明应用多年同次世代的平均生命表数据建立预测模型，预测当地的褐稻虱种群动态，具有一定的实际意义。这个预测方法比较简单易行，可供应用参考。

然而，所建立的模型在当地或近似条件的邻近地区，以及水稻品种抗性级别基本一致，杀虫剂干扰作用不明显的情况下有实用价值。关于建立适应范围较广的褐稻虱种群动态预测模型，以及在水稻品种抗性或杀虫剂干扰作用下的预测模型，将另文进行讨论。

参 考 文 献

1　宋健，于景元．人口控制论．北京科学出版社，1985、1～308
2　庞雄飞，建立种群矩阵模型的简易方法．华南农学院学报 1981，2（2）：75～92
3　庞雄飞，卢一粦，王野岸．种群矩阵模型在昆虫生态学研究上的应用问题．华南农学院学报 1980，1

(3)：27～37

4 庞雄飞，侯任环，包华理．褐稻虱自然种群生命表的组建方法．华南农业大学学报 1992，13（1）：1～5

5 庞雄飞，梁广文．昆虫种群系统的研究概述．生态学报，1990，10（4）：373～378

6 庞雄飞，梁广文，尤民生等 昆虫种群生命系统研究的状态方程．华南农业大学学报 1988，9（2）：1～10

7 侯任环，庞雄飞，作用于褐稻虱自然种群的重要因子分析．华南农业大学学报 1922，13（2）：

8 Leslie, P. H. On the use of matrices in certain population mathematics. Biometrika. 1945, 33: 183～212

9 Vandermeer, J. H. On the construction of the population grouped in unequal stage. Biomatrics 31: 239～242

SHORT—TERM FORECAST OF THE POPULATION DYNAMICS OF BROWN RICE PLANTHOPPER

Pang Xiongfei

(Laboratory of Insect Ecology)

Abstract Based on the average life table, by means of the population matrix model, the short—term forecast of the population dynamics of brown rice planthopper, *Nilaparvata lugens* (BPH) was studied in this paper. The BPH population was grouped in the life table, during the egg, lst—2nd instar of nymph, 3rd—5th instar of nymph and adult stages. It was probiem that the developmental rates in various stages were unequal. In this paper, the varios groups were subdivided into daily states to compose the state vectors and the transitional matrix is also expanded to square matrix correspondingly. The BPH numbers in daily stages would be outputted continuously fir 40 days (x (t_1) to x (t_{40})) by using the output mathematical model, when the state variables of the initial time (X (t_0)) were inputted. The forecasting results from the output mathematical model may be realised in the similar conditons, if the rice variety resistance range to BPH and the other interference factors are not changed evidently.

Key words *Nilaparvata lugens*; population dynamics; population dynamics forecast