

# 马尾松毛虫预测预报系统的研究\*

叶文虎 马小明

(北京大学环境科学中心)

李天生 陈昌洁 吴坚

周健生

(中国林业科学研究院林业研究所)

(安徽省森林病虫害防治总站)

**摘要** 本文应用系统分析方法总结有关马尾松毛虫的科研成果和实际经验,建立了反映马尾松毛虫、松林、自然条件与环境状况、人类社会行为之间本质关系的结构模型。通过对影响马尾松毛虫种群动态因子的分析、提炼及数量化表示,建立了马尾松毛虫时间域及空间域种群动态模型。两者结合可以对松毛虫种群动态进行系统模拟,预测松毛虫的发生量、发生面积及分布状况。以安徽省潜山县黄铺试验区调查数据验证此模型,与松毛虫实际发生规律吻合。

**关键词** 马尾松毛虫; 种群动态; 预测模型

马尾松毛虫是我国危害森林最严重的食叶害虫。多年来实践证明,要彻底控制其危害,必须用系统分析方法,进行综合管理。而对马尾松毛虫发生发展及危害的预测预报又是综合管理的基础。国外对舞毒蛾、云杉卷叶蛾、小蠹虫等重要害虫都有长期观测资料,所建种群动态模型细致、复杂,但尚未实际应用<sup>[1~3]</sup>。我国周念军等提出了马尾松毛虫初步预测预报模型<sup>[4]</sup>。作者在总结前人科研成果<sup>[5~9]</sup>基础上作了进一步研究,建立了马尾松毛虫种群动态模型,包括时间域及空间域种群动态,可对松毛虫发生量、发生面积及虫情分布状况进行预测,把握发生发展的趋势。

本文所建模型是为马尾松毛虫综合管理宏观决策服务的,对系统的输入要求比较简单,便于在生产中应用。据此开发出的预测预报计算机系统 FIMS-1,已完成了安徽省潜山县黄铺试验区的预测预报,其结果与松毛虫实际发生规律吻合。

## (一) 马尾松毛虫生命过程及发育阶段的划分

为了建模,本试验对马尾松毛虫的一个世代划分为五个发育阶段。即①卵孵化为幼虫;②一龄幼虫生长至四龄幼虫;③四龄幼虫至蛹;④蛹羽化为成虫;⑤成虫产下一代卵。划分的原则是与松毛虫自然生长过程一致;同一阶段中的主要影响因子相同及影响力接近;在各个阶段中种群数量具有可调查性。

## (二) 影响马尾松毛虫种群动态因子的分析与提炼

影响马尾松毛虫种群数量变动的主要因子为林相、植被、食料、天敌和气候五类。在

本文于1990年4月10日收到。

\*本项研究为国家科技攻关项目《二、三代类型区马尾松毛虫综合管理》和《马尾松毛虫预测预报和防治指标的研究》的部分研究内容。

尾松毛虫生命不同阶段, 这些因子影响的方式和大小不同。由于对天敌的种类、数量及其变化难以用数值表现, 故所建模型把天敌作用体现在林相、植被、气象条件对种群动态的影响中。气象因子(温度、湿度、降水强度)与马尾松毛虫发生、生长的关系十分密切。在同地区, 气温影响马尾松毛虫发育的长短, 在卵的末期, 相对湿度是一重要影响因子; 初孵幼虫阶段, 若遇暴雨或较长时间的绵绵细雨(月平均降雨量 500 mm, 日平均达 100 mm), 3 龄以下的幼虫将被大批冲刷死亡, 使当代马尾松毛虫大发生的可能性减小。因此, 在模型中把大暴雨等突发性影响作为系统的外部作用, 只把平均降雨量放在模型中即系统的内部。

在一定的虫口密度下, 松毛虫种群在森林生态系统的控制下将处于平衡状态, 这时种群动态与食料几乎没有关系。而当种群数量上升到一定程度, 针叶损失严重时, 松毛虫因缺乏食料而大量死亡, 才体现了食料的影响。

影响松毛虫种群的另一重要方面是遗传因子。对此, 本试验假定同一地区的松毛虫具有相同的遗传性, 这样遗传因子的影响就可以反映在系统的参数中。

### (三) 马尾松毛虫种群动态影响因子的数量化表示

为建立模拟松毛虫种群数量空间及时间变化的系统模型, 把林区划成  $100\text{m} \times 100\text{m}$  方格网, 用位置坐标  $(i, j)$  表示。方格在系统模型中是基本单位, 各有其对应的背景信息和变量。

1. 历史虫情信息 指每个方格的历年、历代虫情, 可以是虫口密度的数值, 也可以只是虫口密度高、中、低的定性描述。

#### 2. 稳定的背景条件因子

(1) 林相(LX) 共分三类: 纯松林(马尾松、黑松、黄山松、湿地松、火炬松等), 非针阔混交林(松杉混交、松柏混交等), 针阔混交林(松竹混交、松栎混交等)。由于林相是定性变量, 分别赋为  $a, b, c$ , 并要求这组赋值能满足在其他条件不变的情况下, 林相对松毛虫死亡率的影响是线性的。即若设某代、某历期的死亡率为  $d_t$ , 则有:  $d_t = a + \beta \cdot LX$ , 其中,  $\alpha, \beta$  为决定于其它条件的参数。

在其它条件不变时, 此期: 纯松林中松毛虫死亡率  $d_{r1} = a + \beta \cdot a$ ; 非针阔混交林中松毛虫死亡率  $d_{r2} = a + \beta \cdot b$ ; 针阔混交林中松毛虫死亡率  $d_{r3} = a + \beta \cdot c$ 。

通过对大量观测数据的分析<sup>1)</sup>, 可以发现非针阔混交林与针阔混交林对松毛虫的影响差异较小, 而这两者与纯松林的差异较大, 据此假定:  $\frac{d_{r3} - d_{r2}}{d_{r2} - d_{r1}} = \frac{1}{3}$  即  $\frac{c - b}{b - a} = \frac{1}{3}$

显然, 当取  $a = 0, c = 2$  时,  $b = 1.5$ 。因此, 将对林相的赋值取为:

$$LX(i, j) = \begin{cases} 0, & \text{表示}(i, j)\text{格中为纯松林;} \\ 1.5, & \text{表示}(i, j)\text{格中为非针阔混交林;} \\ 2, & \text{表示}(i, j)\text{格中为针阔混交林。} \end{cases}$$

如果在某些地区某些情况下, 上面的分析有数量上的偏差, 可以调整非针阔混交林的赋值, 使之与实际情况符合。

(2) 植被(ZB) 分成三类: ①无植被(总盖度  $< 30\%$ , 灌盖度  $< 20\%$ ); ②植被少或以草本为主(总盖度  $> 30\%$ , 灌盖度  $< 20\%$ ); ③灌木植被(以灌木为主, 灌盖度  $> 20\%$ )。对

1) 彭建文等, 1985, 马尾松毛虫种群生命表及其初步分析(未发表)。

这三类植被的赋值为:

$$ZB(i, j) = \begin{cases} 0, & \text{表示}(i, j)\text{格中无植被;} \\ 1, & \text{表示}(i, j)\text{格中植被少或以草本为主的植被;} \\ 2, & \text{表示}(i, j)\text{格中灌木植被。} \end{cases}$$

(3) 郁闭度( $YB$ ) 直接由林场给出。

(4) 平均单株针叶蓄积量( $CX$ ) 直接由林场给出。

(5) 松林密度( $SM$ ) 网格中的松树棵数, 直接由林场给出。

(6) 光源信息( $GY$ ) 依方格的社会功能(如工厂、镇政府所在地等)赋值。

3. 实时信息 指各个时期的大气象因子。小气象的影响则归于林相及植被的影响之中。气象因子主要包括: ①平均温度( $AT$ ); ②平均相对湿度( $AH$ ); ③平均降雨量( $AR$ ); ④突发性气象变化(大暴雨、倒春寒等)。

4. 变量

(1) 针叶损失率( $CS$ ) 预测预报起点的针叶损失率由林场给出, 预测预报过程中要求的针叶损失率, 由树木生长模型结合虫害造成的损失进行计算给出。

(2) 虫口密度( $CM$ ) 表示各方格中平均每棵松树上的虫口数。

#### (四) 种群动态模型

本模型由时间域上种群动态的数学模型和空间域上种群动态(迁移扩散)的数学模型两部分组合而成。采用人机对话方式, 首先要求使用者提供该地区的马尾松毛虫发生世代数和各代、各虫态的历期。

1. 时间域上种群动态的数学模型 假设预测预报地区共发生  $G$  代松毛虫, 并且在  $G-1$  代分化。令  $g$  表示松毛虫的代数,  $g=0, \dots, G$  ( $g=0$ , 表示越冬代)。下面对每一代松毛虫的各个发育阶段建立模型。

(1) 卵孵化为一龄幼虫的阶段 记  $S_{1g}$  为方格( $i, j$ )中第  $g$  代此阶段的存活率, 即:  $S_{1g} =$  一龄幼虫数/初始卵数, 令  $G_1 = 3(LX - 1) \cdot YB + ZB$ , 其中,  $LX$ 、 $YB$ 、 $ZB$  分别为此方格中的林相、郁闭度、植被。 $G_1$  为这三者的综合作用函数。

则此阶段存活率可表述为:  $S_{1g} = (A_1 - B_1 G_1) \cdot \sigma_{1g}$ , 其中:  $A_1, B_1 > 0$ , 为参数。 $-B_1 G_1$  是林相、植被、郁闭度对此期存活率的综合作用。把  $G_1$  的表达式代入, 可见  $LX$ 、 $ZB$  的系数分别为  $-3B_1$  和  $-B_1$ , 这说明了林相越复杂, 植被越丰富,  $S_{1g}$  就越小, 即死亡率越高。两者系数之比为 3, 则反映了林相的影响要远远大于植被的影响。

$YB$  的系数为  $-3B_1(LX - 1)$ , 这反映了郁闭度对  $S_{1g}$  的影响方向和大小与林相有关。当  $LX = 0$  (即为纯松林) 时,  $-3B_1(LX - 1) = 3B_1$ ; 当  $LX = 1.5$  或  $2$  (即为非针阔混交林或针阔混交林) 时,  $-3B_1(LX - 1) = -1.5B_1$  或  $= -3B_1$ ; 也就是意味着在纯松林中, 郁闭度越大, 松毛虫死亡率越低; 在混交林中, 郁闭度越大, 死亡率越高。

式中的  $\sigma_{1g}$  为气象因子对此阶段的影响, 主要是相对湿度对孵化率的影响。相对湿度在 75% 以上时, 孵化率一般都在 95% 以上; 当相对湿度为 50% 时, 孵化率只有 40%; 在相对湿度为 18% 时, 则不到 10%<sup>[6]</sup>。据此, 把  $\sigma_{1g}$  与  $AH$  第  $g$  代(孵化期的平均相对湿度)的关系取为:

$$\sigma_{1g} = \begin{cases} 1.75 AH_{1g}^{2-13}, & \text{当 } AH_{1g} \leq 0.75, \\ 0.95, & \text{当 } AH_{1g} > 0.75. \end{cases}$$

(2) 一龄至四龄幼虫的阶段 松毛虫在这个历期中食量很小, 故食料可不作为影响松毛虫种群动态的关键因子。记  $S_{2g}$  为松毛虫存活率, 则可表述为:

$$S_{2g} = (A_2 - B_2 G_2) \cdot f_1(R_2(AH_{2g})(YB + 0.05LX) + AH_{2g}) \cdot f_2(AT_{2g}) \sigma_{2g} + Q_2$$

其中:  $G_2 = 3LX \cdot YB + ZB$ ;  $AH_{2g}$  为本期林区的平均相对湿度;  $AT_{2g}$  为本期林区的平均温度;  $f_1$  为实值函数,  $f_1(X) = \exp\left(\frac{X - U_0}{0.2}\right)^2$ ;  $f_2$  为实值函数,  $f_2(X) = \exp\left\{-\left(\frac{X - U_1}{U_2}\right)^2\right\}$ ;

$R_2$  为单调实值函数;  $A_2$ 、 $B_2$ 、 $U_0$ 、 $U_1$ 、 $U_2$  为参数;  $Q_2$  为第  $g$  代此历期平均死亡率, 为参数。

$(A_2 - B_2 G_2)$  反映此方格森林生态小环境对松毛虫的自控能力。由于植被、林相、郁闭度在  $(A_2 - B_2 G_2)$  中的系数均为负值, 说明在植被丰富、树种复杂、松林茂密的情况下, 此森林生态小环境对松毛虫的控制能力较强; 反之则较弱。

$f_1(R_2(AH_{2g})(YB + 0.05LX) + AH_{2g})$  为林区的相对湿度, 此方格中的郁闭度及林相对松毛虫种群的综合影响函数。由于  $f_1$  为正态函数, 说明在  $AH_{2g}$  给定的情况下,  $YB$ 、 $LX$  对存活率的影响为正态函数的形式。

$\sigma_{2g}$  为其他气象因子的作用(具体数值由查表方式给出)。

(3) 四龄幼虫至蛹的阶段 影响此历期存活率的关键因子为林相、植被、郁闭度、食料。一般性气候因子的作用影响不大, 故只需考虑突发性气候因子的影响。

记  $S_{3g}$  为此历期的存活率, 则可表述为:

$$S_{3g} = (A_3 - B_3 G_2 + R_3 \cdot TCL/CM \cdot f_1(R_2(AH_{3g})(YB + 0.05LX) + AH_{3g})) \cdot f_3(AT_{3g}) \sigma_{3g} + Q_3$$

其中:  $G_2$ 、 $f_1$ 、 $R_2$  与  $S_{2g}$  中的相同;  $AH_{3g}$  为林区的此期平均相对湿度;  $AT_{3g}$  为林区的此期平均相对温度;  $TCL$  为四龄幼虫时, 平均每棵树的针叶量, 可以由针叶蓄积量、损失率、树木生长曲线等计算得到;  $CM$  为四龄幼虫的虫口密度;  $f_3$  为实值函数,  $f_3(X) = \exp\left\{-\left(\frac{X - U_3}{U_4}\right)^2\right\}$ ;  $\sigma_{3g}$  为其它气象因子的作用(具体数值由查表方式给出);  $A_3$ 、 $B_3$ 、 $R_3$ 、 $U_3$ 、

$U_4$  为参数;  $Q_3$  为第  $g$  代此历期平均死亡率, 为参数。

(4) 蛹羽化至成虫的阶段 此历期气象因子的作用更小, 故可忽略。

记  $S_{4g}$  为此历期的羽化率, 即  $S_{4g} =$  羽化的成虫数/初始蛹数, 则表述为:  $S_{4g} = A_4 - B_4 G_2 + Q_4$ , 其中  $G_2$  与  $S_{2g}$  中的相同;  $A_4$ 、 $B_4 > 0$ , 为参数。  $Q_4$  为第  $g$  代此期平均羽化率, 为参数。

(5) 越冬代死亡率及世代分化率 以  $S_0$  记越冬代死亡率,  $GP$  为世代分化率。  $S_0$ 、 $GP$  均为参数。

(6) 成虫至下一代卵的阶段 成虫羽化后交尾, 迁移扩散并产出下一代卵。下一代卵的总数量决定于成虫的数量, 分布则取决于迁移的比率。

根据观察数据可知, 成虫的平均产卵量和雌性比与松毛虫在整个发育期间食料的充裕程度有关<sup>[9]</sup>。若记  $Wg$  为某方格中平均第  $g$  代每条虫在整个发育期间所吃掉的针叶量,  $Z_g$  为第  $g$

代每条松毛虫正常发育一个世代平均所需吃掉的针叶量, 则有:

a. 第  $g$  代成虫平均产卵量( $AL_g$ )

$$AL_g = \begin{cases} \frac{P_g \cdot W_g}{Z_g} & \text{当 } W_g < Z_g \text{ 时;} \\ P_g & \text{当 } W_g \geq Z_g \text{ 时。} \end{cases}$$

其中:  $P_g$  为食料足够时的平均产卵量;  $P_g$ 、 $Z_g$  的数据可由林场或请有关专家给出。

b. 第  $g$  代雌性比( $CXB_g$ )

$$CXB_g = \begin{cases} X_g + 2(Y_g - X_g) \cdot \frac{W_g}{Z_g + W_g} & W_g < Z_g \text{ 时;} \\ Y_g & W_g \geq Z_g \text{ 时。} \end{cases}$$

其中:  $X_g$  为完全缺乏食料时第  $g$  代虫的雌性比;  $Y_g$  为食料充足时第  $g$  代虫的雌性比。其数据可由林场或请有关专家给出。

利用各个历期的存活率  $S_{i,g}$ , 可以从松毛虫的任何一个虫态(卵、一龄幼虫、四龄幼虫、蛹)预测成虫的虫口密度, 并可进一步预测出下一代的卵数及其分布情况。

设  $CM_g(i, j)$  为方格  $(i, j)$  中成虫的虫口密度;  $P_g(i, j|i', j')$  为成虫从  $(i, j)$  迁入  $(i', j')$  的比率, 则可得方格  $(i, j)$  中下一代卵的密度:

$$CM_{g+1}^*(i, j) = \frac{\sum SM(i', j') CM_g(i', j') AL_g(i', j') CXB_g(i', j') P_g(i', j'|i, j)}{SM(i, j)}$$

2. 空间域上种群动态(迁移扩散)的数学模型 由于方格相对较大, 故可忽略幼虫的迁移, 而只考虑成虫的迁移扩散。

用  $g(i, j)$  表示成虫从方格  $(i, j)$  可能迁移至其它的方格  $(i', j')$  组成的集合, 假定成虫的最大迁移距离为 1 km(当取方格边长为  $NG$  m 时, 迁移距离  $ND = 1000/NG$  格), 则:

$$G(i, j) = \{(i', j') | \sqrt{(i-i')^2 + (j-j')^2} \leq ND\}$$

假定  $P_g(i, j|i', j')$  与两格之间的距离平方成反比, 与  $(i', j')$  格的针叶量、光源强度成正比, 则有:

$$P_g(i, j|i', j') = \frac{C_g(i, j) SM(i', j') CXB_g(i', j') [1 - CS(i', j')] GY(i', j')}{Q(i, j, i', j')}$$

其中:  $SM(i', j') CXB_g(i', j') [1 - CS(i', j')]$  为  $(i', j')$  格中的针叶量;  $GY(i', j')$  为光源强度;  $Q(i, j, i', j')$  为两格之间的距离平方:

$$Q(i, j, i', j') = \begin{cases} 50/NG & i = i', j = j'; \\ (i-i')^2 + (j-j')^2 & \text{其它情况。} \end{cases}$$

$C_g(i, j)$  为归一化参数, 可以由下式求得:

$$C_g(i, j) = \sum_{(i', j') \in G(i, j)} \frac{SM(i', j') CXB_g(i', j') [1 - CS(i', j')] GY(i', j')}{Q(i, j, i', j')}$$

3. 马尾松毛虫的预测预报 把上述时间域上种群动态模型及空间域上种群迁移扩散模型结合起来, 就可以对松毛虫种群动态进行系统模拟, 预测松毛虫在一定时间后的发生量、发生地及发生面积。下面以黄铺试验区为例, 具体给出预测预报方法。

黄铺试验区位于安徽省潜山县, 面积约 3 万多亩, 将其分成边长为 100 m 的  $42 \times 54$  个方

格, 每个方格的稳定的背景条件因子和各阶段的气象预报都已调查得到, 现从1989年的第一代四龄幼虫预测1991年的第一代一龄幼虫。

本试区松毛虫年发生2~3代, 即 $G=3$ , 设分化率为 $GP$ 。假设1989年各阶段的种群密度为 $CM_{m,n}$ , 其中 $m$ 为代数( $m=0$ 对应越冬代),  $n$ 为虫态( $n=1, 2, 3, 4, 5$ , 分别对应卵、一龄幼虫、四龄幼虫、蛹、成虫), 1990年各阶段的种群密度为 $CM^*_{m,n}$ 。

根据时间域上的种群动态模型得到:  $CM_{1,5} = CM_{m,n} \cdot S_{2,1} \cdot S_{3,1} \cdot S_{4,1}$

通过空间迁移扩散模型得到下代的迁移比率为 $P_1(i, j | i', j')$ 及下一代卵的密度 $CM_{2,1}$ 。到此松毛虫开始分化, 一部分松毛虫继续发育, 这部分的种群密度为 $CM_{2,2} \cdot GP$ 。

$$CM_{2,5} = CM_{2,2} \cdot GP \cdot S_{2,2} \cdot S_{3,2} \cdot S_{4,2}$$

同样通过迁移扩散模型, 可以得到第3代一龄幼虫的种群密度 $CM_{3,2}$ 。

越冬时, 松毛虫的种群密度为:  $CM_{0,2} = CM_{2,2} \cdot (1 - GP) + CM_{3,2}$

这一代的成虫种群密度为:  $CM_{0,5} = S_0 \cdot CM_{0,2} \cdot S_{2,0} \cdot S_{3,0} \cdot S_{4,0}$

$S_0$ 为越冬期幼虫的存活率。

利用迁移扩散模型计算出1990年第一代松毛虫卵的虫口密度 $CM^*_{1,1}$ , 则四龄幼虫的种群密度为:  $CM^*_{1,4} = CM^*_{1,1} \cdot S_{2,1} \cdot S_{3,1} \cdot S_{4,1}$

整个预报过程中的 $S_{i,j}$ 均为各种气象信息、背景信息的函数, 具体表达式见时间域模型, 在使用时, 必须将相应信息代入公式之中。

通过种群密度的预报, 就不难得到发生量、发生地及发生面积的预报。

### 参 考 文 献

- [1] Campbell, R. W., 1973, Numerical behavior of a gypsy moth population system, *For. Sci.*, 19: 162~167.
- [2] Coulson, R. N., 1979, Population dynamics of bark beetles, *Annu. Rev. Entomol.*, 24: 417~447.
- [3] Mott, D. G., 1963, The population model for the unsprayed area, In Morris, R. F. (Ed.), The dynamics of epidemic spruce budworm populations, *Mem. Entomol. Soc. Can.*, 31: 99~109.
- [4] 周念军等, 1988, 马尾松毛虫初步预测预报系统模型, 林业科学研究, 1(2): 231~235.
- [5] 陈昌洁等, 1959, 马尾松毛虫及其预测预报, 森林昆虫论文集, 第一集, 科学出版社.
- [6] 刘友樵等, 1959, 湖南省马尾松毛虫生物学特性的初步观察, 森林昆虫论文集, 第一集, 科学出版社.
- [7] 章士美等, 1962, 什么是马尾松毛虫消长的主导因子, 林业科学, 7(2): 240~245.
- [8] 萧刚柔等, 1964, 马尾松毛虫发生动态的研究, 林业科学, 9(3): 201~220.
- [9] 沈光谱, 1983, 江西省平原丘陵地区马尾松毛虫消长规律的研究, 江西农业大学学报, 1: 26~32.

## THE POPULATION PREDICTION MODEL OF THE PINE CATERPILLAR

Ye Wenhua    Ma Xiaoming

(Center of Environmental Science, Peking University)

Li Tiansheng    Chen Changjie    Wu Jian

(The Research Institute of Forestry CAF)

Zhou Jiansheng

(General Forest Protection Station of Anhui Province)

**Abstract** The pine caterpillar *D. punctatus* is the most destructive pest of pine forests in China. It occurs in thirteen provinces and infects pine forests over large areas. In this paper, its population system has been studied and its structure model has been established by means of method of system analysis to summarize the achievements in scientific research and practical experience. Steps of modelling are as follows:

1. Life cycle of the pine caterpillar being divided into five stages.
2. Abstraction and analysis of factors affecting population dynamics of the pine caterpillar.
3. Quantitative expression of factors affecting population dynamics of the pine caterpillar.
4. Model being built of (A) Population time dynamics model of the pine caterpillar; (B) Population dispersal model.

In order to predict the population dynamics through time and space, forests are divided into many grids (100 m × 100 m). The coordinates of each grid are expressed by  $(i, j)$ , including background conditions and variables in every grid respectively.

Population time dynamics model and population dispersal model can be combined together and used to simulate and predict the variation in the distribution and abundance of pest population.

The simulation results of the model coincide with the real occurrence laws of the pine caterpillar at Hungpu Experimental Forests in Qianshan County of Anhui Province.

**Key words** *Dendrolimus punctatus*; population dynamics; prediction model