

## 马尾松毛虫初步预测预报系统模型\*

马尾松毛虫是我国主要的森林害虫之一,经常猖獗成灾,如何进一步科学、合理地对松毛虫进行综合管理,提高经济效益、生态效益和社会效益是生产上急需解决的问题。

多年来,我国森林昆虫学家们对松毛虫的生物学、生态学等方面的特性进行了深入的研究。我们在前人工作的基础上,运用系统分析思想,把专家的经验 and 已有的成果用数学模型表达出来,建立一个在生产上可以推广应用的松毛虫预测预报及综合管理的计算机系统。

为此,首先必须建立一个松毛虫预测预报系统,该系统能够进行以下几项预报:(1)松毛虫发生期预报;(2)松毛虫发生量及松针被害程度的预报;(3)松毛虫发生面积的预报。

### 一、建模的思想

松毛虫种群变动规律涉及到时间和空间两个方面。影响松毛虫种群时间和空间的变化的主要因素有:(1)气象条件和小气候;(2)林相条件和天敌的影响;(3)食料的丰盛程度;(4)人工干扰。

这里把人工干扰放在防治投资与收益的经济分析模型中去,同时把某些参数(如气象因素的影响等)作为计算机系统的外部输入,这样既可以使问题简化、模型有一定的起点,又便于根据不同的条件进行调整。对松毛虫每年发生2—3代地区,假定松毛虫每年发生2代,以第二代四龄幼虫越冬。食料的丰盛程度以针叶损失的百分率表示。小气候和天敌的影响通过不同林相下松毛虫的死亡率间接表现出来。各地区可根据当地情况将林相分类。本模型将林区分为两大类,一类是虫源地,另一类是非虫源地。

松毛虫发生面积的预报涉及其种群空间域的变化,主要取决于迁移扩散。针叶蓄积量对松毛虫种群迁移扩散起重要作用。

### 二、模型的建立

为了预测松毛虫的空间变化及发生面积,用计算机绘图加以表示。首先将林区分成 $100 \times 100\text{m}$ 的小方格(方格的大小可根据实际情况进行调整),每个小方格用它的位置座标 $(i, j)$ 表示。每个小方格的背景参数 $k(i, j)$ 、 $f(i, j)$ 、 $t(i, j)$ 给定:

$k(i, j) = 0$  表示该方格中没有马尾松。

$k(i, j) = 1$  表示该方格中有马尾松,且是虫源地。

$k(i, j) = 2$  表示该方格中有马尾松,不是虫源地。

$f(i, j)$ 表示方格中平均每株针叶蓄积量。

$t(i, j)$ 表示方格中马尾松数量。

#### 1. 方程中诸变量及其解释

$x_2(i, j)$ 是方格中平均每株树越冬后的松毛虫幼虫数;

本文于1987年12月14日收到。

\* 本项工作承蒙北京大学叶文虎、胡德焯先生,江西农业大学章士美、沈光普先生,江西省森防站丁道谟先生、黄悦悦同志及江西省各地区森防站同志们的支持和帮助,安徽省森防站周健生先生、江年同志,安徽省东至县金寺山林场查光济同志的大力协助,在此一并致谢。

$x_3(i, j)$  是方格中平均每株树越冬代松毛虫的茧数;  
 $x_4(i, j)$  是方格中平均每株树羽化的成虫数;  
 $x_5(i, j)$  是方格中越冬代蛹中雌性蛹所占的百分比;  
 $x_6(i, j)$  表示方格中越冬代每个雌虫的平均产卵量;  
 $x_7(i, j)$  表示方格中越冬代成虫的迁移率, 即迁出的成虫占总数的百分比;  
 $y_0(i, j)$  表示方格中平均每株树上越冬代雌虫的总产卵量;  
 $y_1(i, j)$  表示方格中平均每株树第一代松毛虫一龄幼虫数量;  
 $y_2(i, j)$  表示方格中平均每株树第一代松毛虫四龄幼虫数;  
 $y_3(i, j)$  表示方格中平均每株树上第一代松毛虫的蛹数;  
 $y_5(i, j)$  表示方格中第一代松毛虫雌性蛹所占的百分比;  
 $y_4(i, j)$  表示方格中平均每株树上羽化的成虫数量;  
 $y_6(i, j)$  表示方格中第一代雌性成虫平均产卵量;  
 $y_7(i, j)$  表示方格中第一代成虫的迁移率;  
 $z_0(i, j)$  表示方格中平均每株树第一代雌虫所产的卵数;  
 $z_1(i, j)$  表示方格中平均每株树孵化出的第二代一龄幼虫数;  
 $z_2(i, j)$  表示方格中平均每株树第二代四龄幼虫数;  
 $z_2'(i, j)$  表示方格中平均每株树越冬后四龄幼虫数。

为了反映食料对松毛虫的影响, 与针叶损失量有关的参数如下:

$r_0(i, j)$  表示松毛虫越冬时, 针叶已损失百分率;  
 $r_1(i, j)$  表示越冬代成虫盛期, 针叶损失的百分率;  
 $r_2(i, j)$  表示第一代成虫盛期, 针叶损失的百分率。

下面对每一个小方格建立松毛虫种群在时间域上的变化模型。

## 2. 各世代松毛虫时域上种群动态模型

对每一个小方格  $(i, j)$ , 建立各代松毛虫的种群动态模型:

$$x_3(i, j) = \alpha_3(k) \beta_3(r_1) x_2(i, j) \quad (1)$$

其中  $\alpha_3(k)$  反映林区  $(i, j)$  小环境对越冬代松毛虫四龄幼虫到蛹期存活率的影响,  $\beta_3(r_1)$  表示从四龄幼虫到蛹期这段时间内食料对松毛虫种群存活率的影响。

$$t_3^0 = t_2^0 + g_2^0 \quad (2)$$

$t_2^0$  表示越冬代四龄幼虫大量活动时刻,  $g_2^0$  是四龄幼虫到蛹的发育历期,  $t_3^0$  表示越冬代老熟幼虫化蛹盛期。

$$x_4(i, j) = \alpha_4 x_3(i, j) \quad (3)$$

其中  $\alpha_4$  是越冬代松毛虫成虫的羽化率。

$$t_4^0 = t_3^0 + g_3^0 \quad (4)$$

$t_3^0$  表示越冬代老熟幼虫结茧的盛期,  $g_3^0$  表示茧的历期,  $t_4^0$  是越冬代成虫大量出现期。

$$x_5(i, j) = \beta_5(r_1) \quad (5)$$

$\beta_5(r_1)$  反映食料对越冬代成虫的雌雄比的影响<sup>[3]</sup>。

$$x_6(i, j) = \beta_6(r_1) \quad (6)$$

$\beta_6(r_1)$  反映食料对越冬代雌虫平均产卵量的影响。

$$x_7(i, j) = \beta_7(r_1) \quad (7)$$

$\beta_7(r_1)$  表示食料对越冬代成虫迁移率的影响。

$$x_8(i, j) = \beta_8(r_1) \quad (8)$$

$\beta_8(r_1)$  是食料对越冬代成虫受精率的影响。

同样, 对于第一代松毛虫, 可以建立如下的动态方程:

$$y_1(i, j) = r_1 y_0(i, j) \quad (9)$$

$r_1$  是越冬代雌成虫卵的孵化率。

$$t_1' = t_0' + g_0' \quad (10)$$

$t_0'$  表示越冬代雌成虫大量产卵的时间;  $g_0'$  表示卵的历期;  $t_1'$  表示一龄幼虫大量出现的时间。

$$y_2(i, j) = r_2(k) \delta_2(r_2) y_1(i, j) \quad (11)$$

$r_2(k)$  和  $\delta_2(r_2)$  反映了林区  $(i, j)$  小环境和食料对第一代一龄幼虫到四龄幼虫存活率的影响。

$$t_2' = t_1' + g_1' \quad (12)$$

$g_1'$  为第一代一龄幼虫到四龄幼虫的历期;  $t_2'$  为第一代松毛虫四龄幼虫的盛期。

$$y_3(i, j) = r_3(k) \delta_3(r_2) y_2(i, j) \quad (13)$$

$r_3(k)$  和  $\delta_3(r_2)$  分别反映了林区  $(i, j)$  小环境和食料对四龄松毛虫幼虫到蛹期存活率的影响。

$$t_3' = t_2' + g_2' \quad (14)$$

$g_2'$  是第一代的四龄至结茧的历期;  $t_3'$  为茧出现的盛期。

$$y_4(i, j) = r_4 y_3(i, j) \quad (15)$$

$r_4$  是羽化率。

$$t_4' = t_3' + g_3' \quad (16)$$

$g_3'$  是第一代松毛虫从蛹到成虫的发育历期;  $t_4'$  是第一代成虫出现的盛期。

$$y_5(i, j) = \delta_5(r_2) \quad (17)$$

$\delta_5(r_2)$  表示食料对第一代成虫雌雄比的影响。

$$y_6(i, j) = \delta_6(r_2) \quad (18)$$

$\delta_6(r_2)$  为食料对第一代成虫产卵量的影响。

$$y_7(i, j) = \delta_7(r_2) \quad (19)$$

$\delta_7(r_2)$  是食料对第一代松毛虫迁移率的影响。

$$y_8(i, j) = \delta_8(r_2) \quad (20)$$

$\delta_8(r_2)$  为食料对第一代松毛虫所产的卵的受精率的影响。

假定松毛虫以第二代幼虫越冬。则第二代松毛虫的种群动态模型为:

$$z_1(i, j) = \varepsilon_1 z_0(i, j) \quad (21)$$

$\varepsilon_1$  是第二代卵的孵化率。

$$t_1^2 = t_0^2 + g_0^2 \quad (22)$$

$t_0^2$  是第一代成虫产卵盛期,  $g_0^2$  为第二代卵的历期;  $t_1^2$  表第二代小幼虫大量孵化的时间。

$$z_2(i, j) = \varepsilon_2(k) \varphi(r_2) z_1(i, j) \quad (23)$$

$\varepsilon_2(k)$  和  $\varphi(r_2)$  分别为林区  $(i, j)$  小环境和食料对第二代的一到四龄幼虫存活率的影响。

$$t_2^2 = t_1^2 + g_1^2 \quad (24)$$

$g_1^2$  为第二代一龄幼虫发育到四龄幼虫的历期； $t_2^2$  为进入四龄幼虫的时刻。

$$x_2'(i, j) = \varepsilon_2'(k) z_2(i, j) \quad (25)$$

$\varepsilon_2'(k)$  反映林区  $(i, j)$  小环境对第二代松毛虫越冬幼虫的生存率的影响。

$$t_3^2 = t_2^2 + g_2^2 \quad (26)$$

$g_2^2$  是第二代松毛虫从四龄幼虫到第二年越冬后大量活动的历期； $t_3^2$  为越冬代幼虫开始大量活动的时间。

下面进一步考虑松毛虫种群在空间上的变化，建立迁移扩散方程。

### 3. 松毛虫迁移扩散方程的建立

在建立扩散方程时，暂不考虑气象因子及其它因素的影响，并假定大多数成虫的迁飞距离在 1 km 之内。

用  $g(i, j)$  表示方格  $(i, j)$  中的成虫可以迁至其它小方格的集合，这个集合和松毛虫迁移距离有关。

$$g(i, j) = \{(i, j) \sqrt{(i-i')^2 + (j-j')^2} \leq 10, (i', j') \neq (i, j)\} \quad (27)$$

用  $P_1(i', j'; i, j)$  表示越冬代成虫从  $(i, j)$  迁移到  $(i', j')$  的可能性。现假定这一概率的大小和两块林地间的距离成反比，与林地  $(i', j')$  的针叶蓄积量成正比。用公式表示为：

$$P_1(i', j'; i, j) = \frac{c_1(i, j) r_1(i', j') t(i', j') f(i', j')}{\sqrt{(i'-i)^2 + (j'-j)^2}}, \quad (i', j') \in g(i, j) \quad (28)$$

其中  $c_1(i, j)$  为归一化系数。

$$c_1(i, j) = \left( \sum_{(i', j') \in g(i, j)} \frac{r_1(i', j') t(i', j') f(i', j')}{\sqrt{(i'-i)^2 + (j'-j)^2}} \right)^{-1} \quad (29)$$

马尾松毛虫的羽化时间和产卵时间的间隔是较短的，可以认为：

$$t_4^0 = t_0' + 1 \quad (30)$$

越冬代成虫和孵化出的第一代松毛虫小幼虫的数量关系是：

$$y_0(i, j) = \{ [t(i, j)]^{-1} \sum_{(i', j') \in g(i, j)} P_1(i', j'; i, j) t(i', j') x_4(i', j') x_5(i', j') x_6(i', j') x_7(i', j') x_8(i', j') \} + x_4(i, j) x_5(i, j) x_6(i, j) [1 - x_7(i, j)] x_8(i, j) \quad (31)$$

类似地用  $P_2(i', j'; i, j)$  表示第一代成虫由  $(i, j)$  迁移到  $(i', j')$  的概率：

$$P_2(i', j'; i, j) = \frac{c_2(i, j) r_2(i', j') t(i', j') f(i', j')}{\sqrt{(i'-i)^2 + (j'-j)^2}} \quad (32)$$

其中  $c_2(i, j)$  为归一化系数。

$$c_2(i, j) = \left( \sum_{(i', j') \in g(i, j)} \frac{r_2(i', j') t(i', j') f(i', j')}{\sqrt{(i'-i)^2 + (j'-j)^2}} \right)^{-1} \quad (33)$$

同样，

$$t_4' = t_0' + 1 \quad (34)$$

$$z_0(i, j) = \frac{1}{t(i, j)} \left[ \sum_{(i', j') \in g(i, j)} P_2(i', j'; i, j) t(i', j') y_4(i', j') \right]$$

$$y_5(i',j')y_6(i',j')y_7(i',j')y_8(i',j')] \\ + y_4(i,j)y_5(i,j)y_6(i,j)[1-y_7(i,j)]y_8(i,j) \quad (35)$$

这样,把松毛虫种群在空间和时间域上的变化用数学形式联系起来。下面是方程中各参数的确定。

#### 4. 参数值的确定

前面已指出,  $r_0(i,j)$  表示松毛虫越冬期间的针叶损失量, 则

$$r_1(i,j) = r_0(i,j) + \alpha c_0 x_2(i,j) / f(i,j) \quad (36)$$

$c_0$  是平均每条越冬代幼虫消耗的针叶量。  $\alpha$  为一常数。

在模型中假定  $\beta_3(r_1)$ 、 $\beta_5(r_1)$ 、 $\beta_6(r_1)$ 、 $\beta_7(r_1)$ 、 $\beta_8(r_1)$  与  $r_1$  的关系都是线性关系。

$$\beta_3(r_1) = 1 - c_3 r_1(i,j) \quad (37)$$

$$\beta_5(r_1) = \beta_5^0 [1 - c_5 r_1(i,j)] \quad (38)$$

$$\beta_6(r_1) = \beta_6^0 [1 - c_6 r_1(i,j)] \quad (39)$$

$$\beta_7(r_1) = c_7 r_1(i,j) \quad (40)$$

$$\beta_8(r_1) = \beta_8^0 [1 - c_8 r_1(i,j)] \quad (41)$$

以上  $c_3$ 、 $c_5$ 、 $c_6$ 、 $c_7$ 、 $c_8$  和  $\beta_5^0$ 、 $\beta_6^0$ 、 $\beta_8^0$  为待定常数。

对第一代松毛虫, 此时新叶已长出, 老叶尚存在, 故:

$$r_2(i,j) = \beta d_0 y_1(i,j) / [2f(i,j)] + r_1(i,j) / 2 \quad (42)$$

其中  $d_0$  是平均每条第一代幼虫所消耗的针叶量,  $\beta$  为一常数。

假定模型中,  $\delta_3(r_2)$ 、 $\delta_5(r_2)$ 、 $\delta_6(r_2)$ 、 $\delta_7(r_2)$ 、 $\delta_8(r_2)$  都是  $r_2$  的线性函数。

$$\delta_3(r_2) = 1 - d_3 r_2(i,j) \quad (43)$$

$$\delta_5(r_2) = \delta_5^0 [1 - d_5 r_2(i,j)] \quad (44)$$

$$\delta_6(r_2) = \delta_6^0 [1 - d_6 r_2(i,j)] \quad (45)$$

$$\delta_7(r_2) = d_7 r_2(i,j) \quad (46)$$

$$\delta_8(r_2) = \delta_8^0 [1 - d_8 r_2(i,j)] \quad (47)$$

其中  $d_3$ 、 $d_5$ 、 $d_6$ 、 $d_7$ 、 $d_8$ 、 $\delta_5^0$ 、 $\delta_6^0$ 、 $\delta_8^0$  都是待定常数。

类似地, 假定食料对第二代幼虫越冬前的存活率的影响  $\varphi(r_2)$  与  $r_2$  是线性关系:

$$\varphi(r_2) = 1 - e r_2(i,j) \quad (48)$$

以上模型中的许多参数, 取决于专家的经验 and 已有的科研成果, 并可以通过实际调查等手段确定。

### 三、讨论

我们已初步建立了一个马尾松毛虫预测预报系统的数学模型。然后设计、编制和调试计算机软件系统, 并以一、二个林区的具体情况为例证, 研究参数的提取、估计。让这一系统运行后, 用实际结果对模型进行检验和修正。此外, 还需从两个方面进行改进, 一是将气象因子对松毛虫种群的影响考虑进入模型, 二是要考虑世代分化问题。

今后在测报系统模型的基础上, 建立松毛虫综合管理计算机系统, 将松毛虫发生量、发生面积的预测与所造成的产量损失预测结合起来, 对各种人为措施的效果进行模拟和预测, 以选择对松林管理的最优策略。

(北京大学环境科学中心 周念军) (中国林业科学研究院林研所 李天生)