

## 油松毛虫优化管理的研究\*

夏乃斌 屠泉洪 宋长义 李镇宇  
(北京林业大学)张俊楼  
(北京市林业局)

## 摘 要

本文以油松林-油松毛虫生态系统为研究对象,采用系统分析方法,组建了油松生长子模型,油松毛虫种群生长子模型以及油松毛虫危害油松的子模型。并将它们耦联在一起,形成了油松林-油松毛虫系统模型。

为了寻求油松毛虫的优化管理途径,在上述系统模型的基础上,根据油松毛虫的10种常用管理措施的效果和费用,结合危害子模型,组建了油松毛虫的动态经济阈值模型。然后再根据最优化理论<sup>[1-4]</sup>,建立了油松毛虫管理决策模型。最后对影响系统的主导因子进行了灵敏度分析。

关键词:油松毛虫,优化管理。

油松毛虫 (*Dendrolimus tabulaeformis*) 是我国森林的主要害虫之一。根据林业部(1989)统计,每年发生面积约为500—1000万亩。近10年来不断猖獗发生,使松林遭受很大损失。因此如何对油松毛虫进行优化管理,这是当前林业生产上亟待解决的一个重要课题。根据系统分析的原理<sup>[5,6]</sup>,本文探讨了油松毛虫优化管理的策略,为油松毛虫的科学管理提供可靠的依据。

## 一、材料与方 法

## 1. 试验标准地的确定

根据试验设计,分别自1985年和1987年起,在密云水库和密云县溪翁庄乡共选取试验标准地4块,其中2块作为系统收集油松生长动态的资料(记为PSA),其余2块作为跟踪油松毛虫自然种群数量动态(记为LSA),合计面积220亩。以上4块标准地均为油松毛虫常发生区。

## 2. 数据收集

在标准地中,系统地收集如下3方面的数据。

(1) 油松毛虫自然种群动态的数据 根据油松毛虫幼虫抽样技术研究的结果,采用棋盘式抽样方法,在每块LSA中各抽取100株标准树,按照油松毛虫一个世代划分4个不同发育阶段,应用数量跟踪调

表1 标准地概况

Table 1 General conditions of the experimental sites

标准地	面积(亩)	坡 向	海拔(米)	郁 闭 度	树龄(年)
PSA(I)	50	北	110	0.7	25
PSA(II)	50	北、西	110	0.6	25
LSA(I)	60	南	313.5	0.5	20
LSA(II)	60	北	316.5	0.6	20

\* 本文系“七五”国家科技攻关课题,由张执中教授主持完成,丁岩钦研究员给予指导,张素芬、李湛东协助计算部分数据。

本文于1990年12月29日收到。

查法, 从1987—1990年系统调查并记录每个阶段的起始虫口数和结束虫口数。

(2) 油松生长动态的数据 首先于1984年通过 179株25年生油松的预备调查, 由径阶的大小确定和选择标准树。为比较油松毛虫的不同危害程度对油松所产生的影响, 采取人工模拟摘叶的方法, 确定了5个摘叶水平, 分别为0%、25%、50%、75%和100%。每个摘叶水平至少10株, 共选取了60株标准树。自1985年起至1987年止, 连续3年于每年的5月底6月上旬(油松毛虫幼虫危害盛期)进行一次人工模拟摘叶, 1988年停摘一年, 1989年5月进行树干解析, 并分别测定其生物量因子: 主要包括每年的枝重、干重和2—4年生的针叶重等; 以及生长因子: 主要包括每年的高生长、径生长、材积生长和针叶长、冠幅、冠高等。以此收集不同摘叶水平条件下油松生长动态的各项数据。

(3) 油松毛虫食叶量的数据 在室内饲养的同时, 还通过野外套笼的方法, 测定自然条件下各龄幼虫的食叶量。

其它有关气象资料抄自密云县气象站; 油松毛虫成虫生殖力资料, 通过室内饲养获得。

### 3. 管理模型的结构

(1) 状态方程 是根据系统分析方法, 建立油松林-油松毛虫系统模型加以刻划。

(2) 目标函数 基于油松毛虫动态经济阈值的研究结果, 以经济效益为决策目标, 考虑到决策在生产实践中的应用, 建立了单期目标函数和多期目标函数两种。

(3) 约束条件: 从数学上, 就是对状态变量和控制变量的约束, 从生物学上, 就是限制这些变量只能在某些数值范围内变化才具有意义。如种群的数量不能是负值, 可表示为  $N_i(t) \geq 0$ , 又如防治效果大于80%或85%, 可表示为  $E_i \geq 80$  或  $E_i \geq 85$  等。

根据上述管理模型的结构, 油松毛虫管理模型的框图如图1所示。

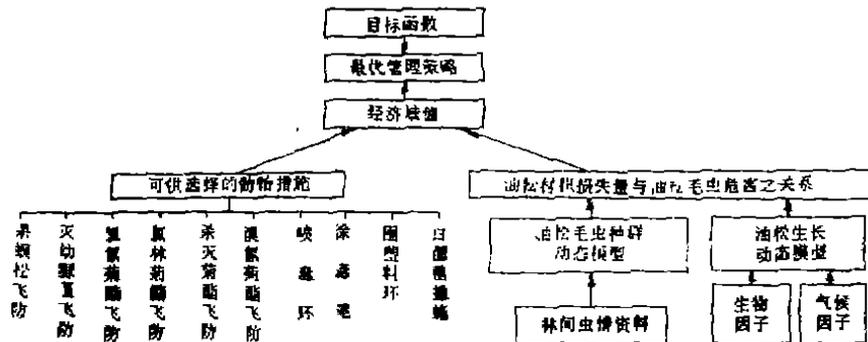


图 1 油松毛虫优化管理模型框图

Fig. 1 Flow chart of optimal management model for chinese-pine caterpillar

## 二、结果与分析

### 1. 系统模型的组建

在油松林-油松毛虫系统模型中, 组建了3个子模型。

(1) 油松生长动态子模型 根据各年的实测资料和1989年树干解析资料, 选用了下列

各变量，列于表 2。由表 2 中的变量，应用逐步回归方法，分别建立了下列 4 个子模型。

油松针叶量子子模型：

$$y_0 = -7.12802 + 1.33020x_2 + 1.46033x_4 \quad (1)$$

$$(r = 0.910^{**}, F = 111.92^{**},$$

$$F_{0.01}(2, 47) = 5.19)$$

油松年高生长子子模型：

$$y_1 = -7764.8457 + 1.1768x_3 + 2.3229x_5 - 0.06035x_6 + 622.0443x_{10} + 29.0094x_{11} + 2.6253x_{13} \quad (2)$$

$$(r = 0.750^{**}, F = 32.3448^{**}, F_{0.01}(6, 153) = 2.80)$$

油松年胸径生长子子模型：

$$y_2 = -1.94188 - 0.01727x_1 + 0.1451x_4 + 0.01641x_7 - 0.00206x_8 + 0.00119x_{14} \quad (3)$$

$$(r = 0.520^{**}, F = 11.3408, F_{0.01}(5, 154) = 3.62)$$

油松年材积生长子子模型：

$$y_3 = 861.1166 + 42.6693x_3 + 10.1276x_7 - 1.3993x_8 + 71.5229x_{12} + 0.8330x_{15} \quad (4)$$

$$(r = 0.967^{**}, F = 440.82^{**}, F_{0.01}(5, 154) = 3.02)$$

(2) 油松毛虫种群动态子模型 基于油松毛虫种群动态的实测数据，应用不同数学方法对 4 个不同发育阶段分别建立了相应的子子模型。应用随机过程理论<sup>[7]</sup>，建立越冬幼虫上树结束至化蛹阶段的子子模型——ARMA(p, q)模型。用 AIC 准则确定阶数为 p = 3, q = 2。最后通过计算还原成种群密度序列{x<sub>t</sub>}的 ARMA(3, 1, 2)模型为：

$$x_t - 0.109307x_{t-1} + 1.35511x_{t-2} - 0.825837x_{t-3} - 0.3614202x_{t-4} = a_t + 0.1509879a_{t-1} + 0.1853305a_{t-2} \quad (5)$$

模型经验证，5 个解均在单位圆外，且无公共解，故属于 ARMA(3, 1) 模型。对 ARMA(3, 2) 模型，用逆函数法进行了预报，其结果列于表 3。

表 3 ARMA(3, 2)模型的预测值与实测值比较

Table 3 Comparison of forecasted values of ARMA(3, 2) model with observed values

实 测 值	1412	1397	1382	1348	1331	1309	1284	1265	1234	1219
预 测 值	1401	1390	1375	1347	1323	1305	1280	1260	1233	1212
实 测 值	1204	1183	1106	1069	957	904	855	814	791	776
预 测 值	1200	1180	1118	1063	978	898	830	814	789	775
实 测 值	762	616	524	428	419	401	289	161	372	366
预 测 值	762	650	527	444	409	407	369	384	375	368

表 2 油松生长模型变量表  
Table 2 The variational table of growing model of chinese-pine

变 量	变量含义	单 位	变 量	变 量 含 义	单 位
y <sub>0</sub>	高生长量	cm	x <sub>8</sub>	失叶率	%
y <sub>1</sub>	胸径生长量	mm	x <sub>9</sub>	年超过10℃积温	日度/年
y <sub>2</sub>	材积生长量	cm <sup>3</sup>	x <sub>10</sub>	年均温	℃
x <sub>1</sub>	树龄	年	x <sub>11</sub>	年最高温	℃
x <sub>2</sub>	树高	m	x <sub>12</sub>	年最低温	℃
x <sub>3</sub>	胸径	cm	x <sub>13</sub>	年降雨量	mm
x <sub>4</sub>	冠幅	m	x <sub>14</sub>	5—9月降雨量	mm
x <sub>5</sub>	枝下高	m	x <sub>15</sub>	年平均相对湿度	%
x <sub>6</sub>	树间距离	m	x <sub>16</sub>	年总光照时数	小时/年
x <sub>1</sub> (y <sub>0</sub> )	针叶湿重	kg			

由表3可以看出, 预报值与实测值非常吻合, 说明该模型的拟合结果是极为可靠的。

#### 成虫产卵子模型

设 $F_c$ 为成虫种群产卵量,  $N$ 为蛹种群数量,  $S_c$ 是蛹的自然存活率,  $P_{\text{♀}}$ 为雌成虫占总成虫数的比例,  $F$ 为平均每雌产卵量。则:

$$\begin{aligned} F_c &= N \cdot S_c \cdot P_{\text{♀}} \cdot F = 3.66 \times 0.2514 \times 0.478 \times 219 \\ &= 96.7 (\text{粒/株}) \end{aligned} \quad (6)$$

通过调查, 实测值为91粒/株, 估计精度为98.13%。

应用Leslie矩阵理论<sup>[8,9]</sup>, 建立新孵化幼虫子模型。该模型是将野外调查所得到的各年龄阶段的存活率和室内饲养成虫所获得的生殖力与油松毛虫有效积温<sup>[10]</sup>耦联在一起而建立起来的。当输入某一时期的种群各年龄向量, 便可预测未来种群的发展趋势。为了检验该模型的预测效果, 以1989年的调查资料进行了拟合, 其输入参数为: 调查日期是8月4日, 林间实测卵粒数为9100粒/百株, 模拟结果见图2。

由图2可以看出, 油松毛虫新孵幼虫的Leslie矩阵模型的模拟值与实测值基本相符。应用灰色系统理论<sup>[11]</sup>, 建立越冬幼虫上树数量的子模型:

$$x_1^{(1)}(k) = [1.76 + 0.0326x_2^{(1)}(k)]e^{0.0139(k-1)} - 0.036x_2^{(1)}(k) \quad (7)$$

其中:  $x_1^{(1)}(k)$ 为下树数量;  $x_2^{(1)}(k)$ 为上树数量。

通过模型的后验差检验为一级, 预测精度为94.25%。

(3) 油松毛虫危害油松的动态子模型 根据人工摘叶模拟幼虫危害的实测数据, 我们建立了如下3个相互联系子模型:

#### ①油松毛虫幼虫食叶量子模型

$$\begin{aligned} \text{室内条件下:} \quad y &= 0.01590 \times 2.2840^x \\ & \quad (r = 0.9955) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \text{野外条件下:} \quad y &= 0.03094 \times 2.2023^x \\ & \quad (r = 0.9908) \end{aligned} \quad (9)$$

#### ②油松材积损失量与失叶率之间的子模型:

$$\begin{aligned} \text{1985年:} \quad y &= 2.6584E-5 + 3.2048E-6x \\ & \quad (r = 0.9877^{**}) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \text{1986年:} \quad y &= 2.4348E-5 + 3.315E-6x \\ & \quad (r = 0.9875^{**}) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \text{1987年:} \quad y &= 3.5342E-5 + 3.6180E-6x \\ & \quad (r = 0.9751^{**}) \end{aligned} \quad (12)$$

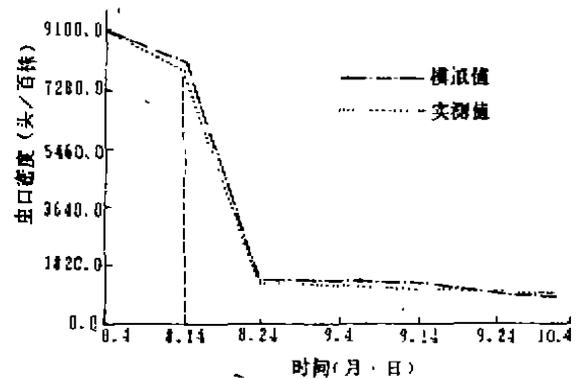


图2 模拟值与实测值的比较  
Fig.2 comparison of simulated values with observed values

### ③油松毛虫危害油松的动态经济阈值子模型

根据 Headley (1972) 定义<sup>[12,13]</sup>, 经济阈值可表述为使产品价值增量等于控制代价增量时的害虫密度, 我们建立了油松毛虫危害油松的动态经济阈值模型(另文发表)为:

$$N = \left( \frac{C_i}{1.5485E - 3 \cdot R_i \cdot S} - 2.5752 \right) \cdot W(D, L) \quad (13)$$

在(13)式中:

$N$ 为经济阈值(头/株);

$W(D, L)$ 为针叶量( $W$ )是胸径( $D$ )和冠幅( $L$ )的函数(kg/株)。通过计算可得:

$$W(D, L) = -7.12802 + 1.3302D + 1.46033L$$

$C_i$ 为第 $i$ 种措施的防治费用(元/亩);

$R_i$ 为第 $i$ 种措施的防治效果;

$S$ 为油松密度(株/亩)。

在上述模型中, 经济阈值的大小不仅随着药剂的防治费用和油松针叶量的不同而不同, 而且亦随着油松密度的变化而变化。

## 2. 油松毛虫优化管理决策模型

参照当前林业生产上的实际情况, 选择了10种不同的防治措施, 见表4(由北京市林业

表4 油松毛虫幼虫的10种防治措施

Table 4 Ten kinds of control measure of chinese-pine caterpillar

序号	药剂	施药方法	费用(元/亩)	防治效果(%)	对天敌作用(%)	施药时间
1	杀螟松	飞机防治	1.51	82	49.1	越冬幼虫上树之后
2	灭幼脲Ⅲ	飞机防治	1.36	84	9.6	同上
3	氟林菊酯	飞机防治	1.52	85	60.2	同上
4	杀灭菊酯	飞机防治	1.60	85	70.8	同上
5	氟氰菊酯	飞机防治	1.07	84	55.3	同上
6	溴氰菊酯	飞机防治	1.14	83	70.8	同上
7	毒环	喷环	0.84	93	3.2	控制上(下)树过程
8	毒笔	画环	1.40	89	3.2	同上
9	塑料环	围环	1.97	88	极小	同上
10	白僵菌	地面撒施	1.78	86.5	5.8	秋季

局林保站提供)。考虑到生产上的决策方便, 应用不同的数学方法<sup>[14-17]</sup>, 建立了如下两种管理决策模型:

### (I) 静态决策模型 临界决策模型

目标函数为净收益最大, 即有

$$J = \text{Max}_{1 \leq i \leq n} \{P(y)y(u_i) - C(u_i)\} \quad (14)$$

约束条件为:

$$A \cdot U \leq B \quad (15)$$

其中:  $P(y)$ 为木材价格;  $y(u_i)$ 为挽回的损失;  $C(u_i)$ 为防治费用;  $A = (a_{ij})_{m \times n}$ 为约束矩阵,  $a_{ij}$ 表示第 $j$ 种防治措施在第 $i$ 个约束条件中所占的比例;  $u = (u_1, u_2, \dots, u_n)^T$ 为决策向量, 是一组可供选择的防治措施;  $B = (b_1, b_2, \dots, b_m)^T$ 为 $m$ 个约束条件的临界

值。

根据上述原理，对表4中所列举的10种防治措施进行临界决策。

第*i*种防治措施所挽回的损失为：

$$y(u_i) = \left( 2.6584E - 5 + \frac{1.0323E - 5 \cdot R_{(i)} \cdot N}{W(D, L)} \right) \cdot S \quad (16)$$

由(16)式可以看出，收益 $y(u_i)$ 是油松毛虫幼虫密度 $N$ ，油松针叶量 $W$ 和第*i*种措施防治效果 $R_{(i)}$ 的函数。

当油松木材价格 $P = 150$ 元/米<sup>3</sup>，根据(14—16)式可选出满足约束条件，且使净收益为最大的防治措施作为最优的决策，见表5。

表5 临界决策结果\*

Table 5 The results of critical desion

方案 油松密度 (株/亩) \ 针叶量 (kg) \ 幼虫密度 (头/株)		第一选择方案 (毒环)			第二选择方案 (杀灭菊酯飞防)		
		6	8	10	6	8	10
200	90	4.18	3.10	2.45	3.58	2.62	2.04
	60	2.74	2.02	1.59	2.30	1.65	1.27
	30	1.30	0.94	0.73	1.01	0.69	0.50
180	90	3.78	2.79	2.21	3.12	2.25	1.73
	60	2.47	1.82	1.43	1.96	1.38	1.03
	30	1.17	0.86	0.65	0.80	0.51	0.34
160	90	3.35	2.48	1.98	2.65	1.88	1.42
	60	2.19	1.62	1.27	1.62	1.11	0.80
	30	1.04	0.75	0.58	0.59	0.34	0.18

\* 表中的数字为净收益 (元)。

最佳防治策略不随油松密度、针叶量和松毛虫起始密度的改变而改变，均以喷毒环为最优，其次为杀灭菊酯飞防。净收益值随油松密度、针叶量和松毛虫幼虫密度的不同而改变。当油松密度和针叶量一定时，油松毛虫幼虫密度越高，净收益越大；当油松密度和油松毛虫幼虫密度一定时，针叶量越大，净收益越小；当针叶量和油松毛虫幼虫密度一定时，油松密度越高，净收益越大。

多目标模糊决策模型 设 $u = (u_1, u_2, \dots, u_n)$ 为策略集， $L = (L_1, L_2, \dots, L_m)$ 为目标集。其中 $u_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 表示策略集中第*i*个策略， $L_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 为经济或生态效益。

首先按单一指标对各策略进行排序，得到  $m$ 个排序的结果： $L_1, L_2, \dots, L_m$ 。然后求出每个策略的Borda数，其公式为：

$$B(u) = \sum_{i=1}^m B_i(u) \quad (17)$$

其中： $B_i(u)$ 是序列  $L_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 中后于 $u$ 的元素个数。然后对每一次经济和生态效益指标均赋予一定的权重 $a_i$ ，从而求得赋权Borda数：

$$\tilde{B}(u) = \sum_{i=1}^m \alpha_i B_i(u) \quad (18)$$

根据赋权Borda数, 便可排出 $u = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$ 的顺序, 从中选出最佳决策。

依据上述原理, 采用防治效果, 成本和对天敌作用三项指标, 对油松毛虫防治的10种措施进行决策,  $\alpha_i$ 取值分别为0.5, 0.3和0.2。通过计算, 各策略的排序为:

$u_7, u_8, u_9, u_{10}, u_5, u_2, u_3, u_6, u_4, u_1$ 。即最优策略为喷毒环, 其次为毒笔, 其最优策略与临界决策相同。

(2) 动态决策模型 在油松毛虫防治实践中, 可将控制油松毛虫数量的过程分为4个阶段: I——越冬幼虫下树阶段; II——越冬幼虫上树阶段; III——5龄幼虫至化蛹阶段; IV——卵至下树阶段。对以上4个阶段分别采取不同的防治措施: 即阶段I为喷毒环或撒施白僵菌; 阶段II为喷毒环, 围塑料环或画毒笔; 阶段III, IV为飞机喷撒杀灭菊酯和灭幼脉III号或不采取防治措施。按照穷举法, 可以组成54种不同管理方案。

为了进行动态决策, 依据决策原理:

设目标函数为净收益最大, 则

$$J = \left\{ \sum_{k=1}^M P(y) y(k) - \sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^N c_i u_i(k) \right\} \quad (19)$$

其中:  $P(y)$ 为木材的价格;  $u_i(k)$ 为第 $k$ 阶段采取第 $i$ 种措施;  $C_i$ 为第 $i$ 种措施的费用;  $y(k)$ 为第 $k$ 阶段挽回的损失;  $i = 1, 2, \dots, N, N$ 为可采取的方案数;  $k = 1, 2, \dots, M, M$ 为划分的阶段数。

约束条件为:

$$N(t+1) < ET \quad (20)$$

$$I > 0 \quad (21)$$

(20)式表示下代害虫种群数量低于经济阈值 $ET$ ; (21)式表示净收益值大于0。

各阶段的害虫种群动态, 可用下列差分方程表示为:

$$N(k+1) = N(k) \cdot a(k) \cdot (F(k) + F_0) \cdot \sum_{i=1}^N b_i(k) u_i(k) \quad (22)$$

其中:  $N(k)$ 为 $k$ 阶段的害虫密度;  $a(k)$ 为 $k$ 阶段害虫的自然存活率;  $F(k)$ 为 $k$ 阶段害虫的生殖力;  $F_0 = \begin{cases} 0 & \text{当 } F(k) \neq 0 \text{ 时;} \\ 1 & \text{当 } F(k) = 0 \text{ 时;} \end{cases}$ ;  $b_i(k)$ 为第 $i$ 种措施对害虫的存活率。

各防治措施所挽回的损失为:

$$y(u_i) = \left( 2.6584E - 5 + 3.2048E - 6 \cdot \frac{100W' \cdot R_i \cdot N}{W(D, L)} \right) \cdot S$$

为了说明决策的结果, 今以秋季下树越冬前的幼虫密度为150头/株, 针叶量为 $8\text{kg}$ , 油松密度为180株/亩, 油松木材价格为150元/米<sup>3</sup>作为输入, 经过计算, 画出决策树, (见图3)。由决策树按净收益大小排序结果见表6。

由表6可知, 最优方案为在4个阶段分别为采取喷毒环、喷毒环、不防治, 不防治, 其净收益为6.05元/亩; 其次为喷毒环、涂毒笔, 不防治, 不防治, 其净收益为5.49元/亩。



(3) 灵敏度分析 为了进一步探讨油松毛虫管理决策系统对不同参数的敏感程度，我们从油松毛虫密度、油松针叶量、油松密度和木材价格四个方面对决策的影响进行了模拟，其结果见图 4—7。

由图 4—7 可以看出：①净收益与虫口密度、油松密度和木材价格呈正相关趋势，随其增加而增大。②净收益与针叶量呈负相关趋势，针叶量越大，净收益越小。③虫口密度和木材价格不仅影响净收益的大小，同时还影响满足约束条件可行方案的总数，因此是影响决策最敏感的因子；而油松密度和针叶量仅影响净收益的大小，对满足约束条件的可行方案总数没有影响。

4. 系统模型的运行实例

为了考察系统模型的功能，我们以 1988 年下树实测虫口数为起点，当油松密度为 180 株/亩，25 年生的油松针叶重 8 公斤，木材价格为 150 元/米<sup>3</sup> 时，模型模拟结果分为两种情况来讨论：

一种是在暂不考虑防治因素的条件下，系统模型运行的结果表明：从 1988—1993 年油松毛虫下树阶段的越冬幼虫种群呈逐年上升趋势，而且各年的上下树的虫口数均在经济阈值以上，说明需要防治，密云县于 1989 年也确实采取了飞机防治。

另一种是在考虑防治因素的情况下，对超过经济阈值的虫期采用飞机防治，系统模型重新运行结果表明：1989—1990 年模拟的种群数量与我们在标准地中实测的数据很接近，其预

表 6 动态决策结果

Table 6 Table results of dynamic decision

序号	方案号	措 施				净 收 益 (元/亩)		
		下树越冬	上树过程	5 龄幼虫至蛹	卵至 4 龄幼虫			
1	9	毒	环	毒	环	不防治	不防治	6.05
2	27	毒	环	毒	环	不防治	不防治	5.49
3	3	毒	环	毒	环	杀灭菊酯	不防治	4.98
4	7	毒	环	毒	环	不防治	杀灭菊酯	4.98
5	36	白僵	毒	毒	环	不防治	不防治	4.97
6	18	毒	环	围塑料	环	不防治	不防治	4.92
7	6	毒	环	毒	环	灭幼脲Ⅱ	不防治	4.69
8	8	毒	环	毒	环	不防治	灭幼脲Ⅱ	4.69

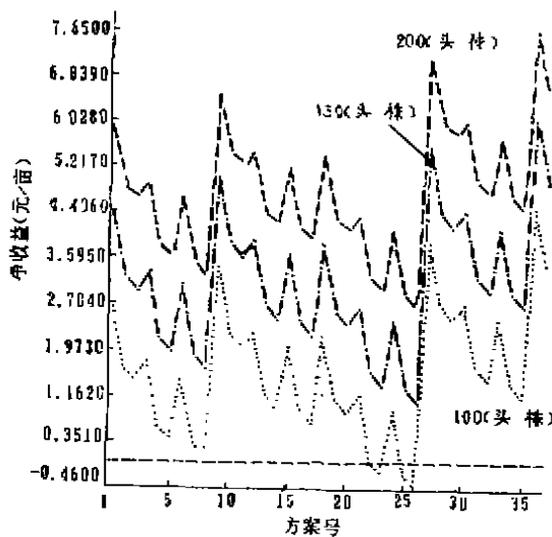


图 4 虫口密度对决策的影响  
Fig.4 The effect of population density on management decision

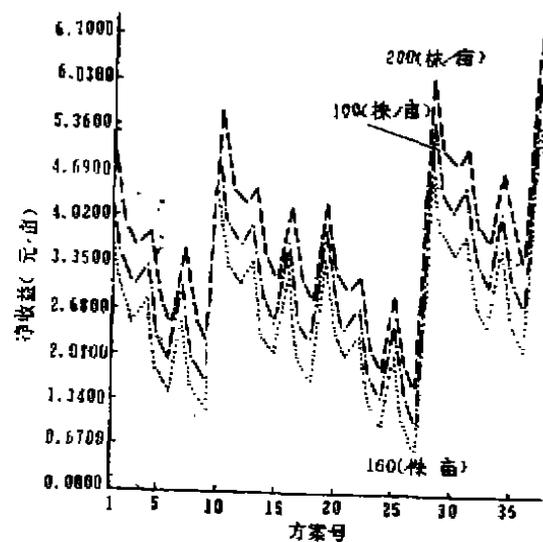


图 6 油松密度对决策的影响  
Fig.5 The effect of chinese-pine density on management decision

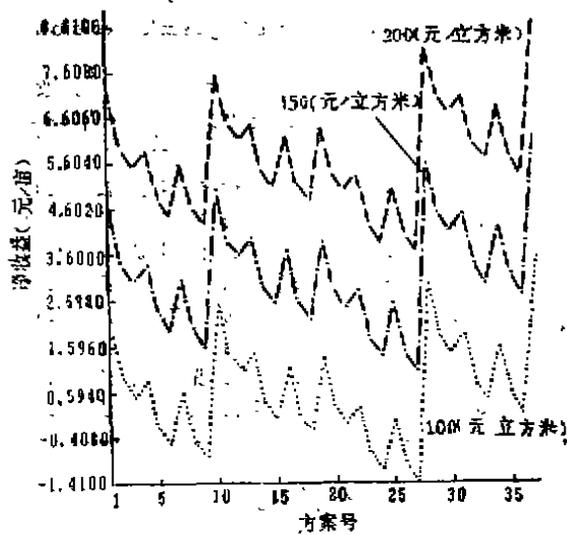


图 6 木材价格对油松的影响

Fig. 6 The effect of timber price on management decision

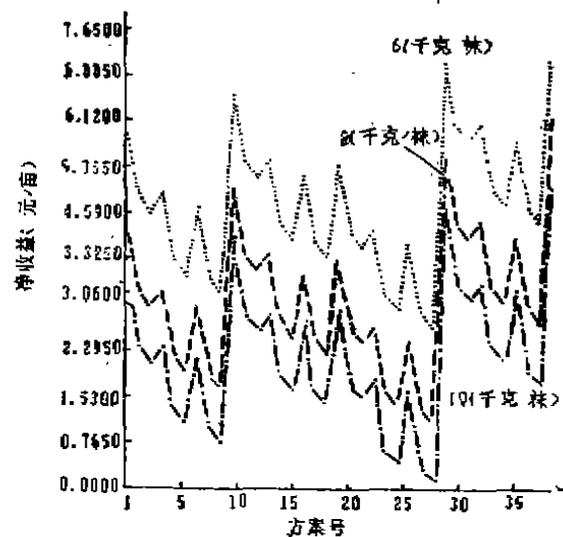


图 7 针叶重对决策的影响

Fig. 7 The effect of needle leaved weight on management decision

测精度均在90%以上。

根据前面动态决策结果, 最优策略应在上下树过程中采取喷毒环, 其它阶段不防治, 若应用最优决策, 系统再次模拟结果表明: 1990—1993年油松毛虫种群处于低密度水平, 未达到经济阈值, 在理论上可以不防治。由此可以看出, 采用最优决策可以明显地提高经济效益。今以密云县为例加以说明, 该县原定防治指标为10头/株, 全县松林面积约为27.8万亩, 每年用于飞机防治的费用为47.26万元。现根据油松毛虫动态经济阈值模型的计算结果, 防治指标为25头/株, 当虫口密度为10头/株时可以不防治, 因此这部分的防治费用完全可以节省下来。退一步说, 当油松毛虫密度为10头/株时, 若采用系统模型的最优决策进行防治, 根据净收益差计算, 可节约23.63万元, 即为原来防治费用的一半。

### 三、讨 论

本文对油松毛虫优化管理的研究, 仅是一次初步的尝试, 期望能在我国森林害虫研究的这一领域内能够起到一个推动和促进的作用。几十年来, 前辈专家从不同的角度对森林害虫进行了多方面的研究, 但应用系统分析的方法, 建立系统模型, 并在此基础上根据决策论的方法, 进行了害虫优化管理的探讨, 在我国森林害虫研究中还报道很少。

为了建立系统模型, 我们曾查阅了不少的油松和油松毛虫的文献, 基于资料的限制, 在油松生长模型中, 土壤内的营养元素对油松生长的影响, 在经济阈值模型中, 天敌因子的作用等等还尚未组建到系统模型中去, 这有待于在今后的研究中继续收集数据, 使模型得到进一步的修正和完善。

尽管如此, 系统模型在模拟过程中仍将得到了令人满意的结果。例如应用随机过程模型、矩阵模型和灰色模型等模拟种群动态的结果, 其理论值与实测值基本一致; 应用决策树

的方法所建立的动态决策模型, 证明了越冬幼虫上、下树的防治是油松毛虫防治的关键时期。这些结论在今后林业生产实践具有重要的指导意义。

最后指出的是, 在经济阈值的试验设计中, 通过人工模拟摘叶的方法来测定不同摘叶水平对油松的影响, 除了需要进一步考虑不同龄级的树以外, 尚需在试验中尽可能将一次性摘叶改为分期分批的多次性摘叶, 以使模型更加全面地逼近于自然界的真实情况。

### 参 考 文 献

- [1] 李典谟, 1983, 论计算机化的病虫害管理系统的原理, 生态学报, 3(3): 252—261.
- [2] 曾正等, 1985, 桔始叶螨种群系统及其最优化管理研究, 西南农学院学报 (3): 98—231.
- [3] Jamason, D.A., E.T. bartlett, 1987, Selection of optimal management strategies based on stochastic dynamic ecological models *Ecol. modelling* 36: 6—13.
- [4] Shoemaker, C.A., et al., 1983, Optimization analysis of the intergration of biological, cultural, and chemical control of alfalfa weevil, *Environ. Entomol.* 12: 286—295.
- [5] John, N.R., 杰弗斯著, 郎所等译, 1983, 《系统分析及其在生态学中的应用》, 第151—182页, 科学出版社.
- [6] 丁岩钦, 1982, 系统分析及其在生态学中的应用, 生态学杂志 (3): 46—51.
- [7] 任荣鑫, 1987, 平稳时间序列的线性模型和预报, 《随机过程》, 第114—167页, 西安交通大学出版社.
- [8] Woolhouse, M. E. J. 1988 On the dynamical behaviour of transition matrix population models. *Ecol. modelling* 42: 61—74.
- [9] 徐汝梅, 1987, 《昆虫种群生态学》, 第243—255页, 北京师范大学出版社.
- [10] 夏乃斌等, 1987, 油松毛虫发育起点温度和有效积温的研究, 林业科学, 23(3)314—319.
- [11] 屠景洪等, 1990, 油松毛虫发生的灰色预测模型. 生态学报, 10(9): 261—265.
- [12] Headley, J.C. 1972a, Economic of pest control in *National Extension Workshop*(Ed.) Implementing Practical Pest Management Strategies. Putdue University, Lafayette, Indiana.
- [13] Headley, J.C., 1972b, Defining the economic threshold. In *National Academic Science*(Ed.) Pest Control Strategies for the Future. Washington D.C., pp.100—108.
- [14] 钱颂迪, 1990, 决策论, 《运筹学》, 第431—462页, 清华大学出版社.
- [15] Rudd, W.G., et al., 1980, The system approach to research and decision making for soybean pest control. in "New Technology of Pest Control" Haffaker, C.B., ed. 99—122.
- [16] Ruppel, R.F., 1984, Model for effective timing of an insecticide. *J. Econ. entomol.* 77: 1083—1085.
- [17] Rykiel, E.J., et al., 1985, Computer aided decision making and information accessing in pest management systems with emphasis on the southern pine beetle (Coleoptera, Scolytidea). *J. Econ. Entomol.* 77: 1073—1082.

## A STUDY ON THE OPTIMIZED MANAGEMENT OF CHINESE PINE CATERPILLAR (*DENDROLIMUS TABULAEFORMIS*)

Xia Nai-Bin Tu Quan-Hong Song Chang-Yi Li Zhen-Yu

(Beijing Forestry University)

Zhang Jun-Lou

(Beijing Municipal Forest Department)

Using system analysis methods, the ecosystem of the Chinese pine—Chinese pine caterpillar (*Dendrolimus tabulaformis*) was studied and the three dynamics submodels, Chinese pine submodel, Chinese pine caterpillar sub-

model and the damaging submodel of Chinese pine caterpillar were made. For the Chinese pine submodel, the needle leaved weight sub-submodel and dynamic sub-submodels of height growth, diameter growth and wood volume growth were built. For the Chinese pine caterpillar submodel, the ARMQ (p,q) submodel of 5—8 instar larva, the ovipositing sub-submodel, the Leslie matrix model of 1—2 instar larva, and the grey sub-subsubmodel of predicting density of up-tree larva were built. And then, the three submodels were combined to build the ecosystemical model of Chinese pine—Chinese pine caterpillar.

Based on the relationship between the wood volume loss and the leaved damage degree, the dynamic economic threshold model was developed. With different densities and leaved weights of Chinese pine, the dynamic economic thresholds of ten control measures were simulated. The results are as follows: (1) with the same Chinese pine density, the larger the leaved weight, the larger the economic threshold is, (2) with the same leaved weight, the higher the Chinese pine density, the less the economic threshold is.

At the end, in order to explore the ways of optimized management of Chinese pine caterpillar, the decision making analysis was constructed by 0—1 integral programming, FUZZY cybernetic and dynamic programming. The results of the integral programming decision and FUZZY decision show that the measure using poisonous ring in spring is the best one. The results of dynamic programming decision show that the optimized management is the integrated measures sprinkling poisonsus ring during larva climbing down-tree and up-tree and taking no control after up-tree. Also, applying sensitivity analysis method, several factors were discussed which affected decision making such as population density of Chinese pine caterpillar, leaved weight, density and timber price of Chinese pine.

**Key words:** Chinese pine caterpillar (*Dendrolimus tabulaeformis*), system management, optimized management, economic threshold, management decision.