

用模糊综合评判法预测马尾松毛虫幼虫高峰期发生量

程 娴¹, 张书平^{1,2}, 余 燕^{1,2}, 毕守东^{1*}, 周夏芝²,
邹运鼎², 张国庆³, 张 桢³, 方国飞⁴, 宋玉双⁴

(1. 安徽农业大学理学院, 合肥 230036; 2. 安徽农业大学林学与园林学院, 合肥 230036;
3. 安徽省潜山县林业局, 潜山 246300; 4. 国家林业局森林病虫害防治总站, 沈阳 110034)

摘要 为了提高马尾松毛虫一代、二代幼虫高峰期发生量预报的准确性, 为有效防治马尾松毛虫提供科学依据, 本文运用模糊综合评判的 6 个数学模型预测安徽省潜山县马尾松毛虫一代、二代幼虫高峰期的发生量, 验证预报 1989 年、1994 年、2002 年和 2017 年一代马尾松毛虫幼虫高峰期发生量, 预报结果分别为 2 级、4 级、2 级和 1 级, 与实况级别完全吻合, 预报结果准确。预报 1989 年、1994 年、2002 年和 2017 年二代马尾松毛虫幼虫高峰期发生量, 预报结果依次是 4 级、5 级、2 级和 1 级。同样与实况级别全部相同。预报的准确率为 100%, 模糊综合评判法是一个运算简便、准确性高的预报方法。

关键词 马尾松毛虫; 幼虫高峰期发生量; 模糊综合评判法; 预报

中图分类号: Q 968.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16688/j.zwbh.2018371

Prediction of the peak occurrence of *Dendrolimus punctatus* larvae by using fuzzy comprehensive evaluation method

CHENG Xian¹, ZHANG Shuping^{1,2}, YU Yan^{1,2}, BI Shoudong¹, ZHOU Xiazh²,
ZOU Yunding², ZHANG Guoqing³, ZHANG Zhen³, FANG Guofei⁴, SONG Yushuang⁴

(1. School of Science, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; 2. School of Forestry and Landscape Architecture, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; 3. Forestry Bureau of Qianshan County, Anhui Province, Qianshan 246300, China; 4. General Station of Forest Disease and Insect Pest Control of State Forestry Administration, Shenyang 110034, China)

Abstract In order to improve the accuracy of prediction of the peak larval occurrence in the first and 2nd generations of *Dendrolimus punctatus* and to provide scientific basis for effective control of *D. punctatus*, six digital models based on fuzzy comprehensive evaluation were used to predict the occurrence of *D. punctatus* larvae of the first and 2nd generations. It was predicted that the grades of *D. punctatus* peak larvae of the first generation in 1989, 1994, 2002 and 2017 were grade 2, grade 4, grade 2 and grade 1, respectively. It fitted perfectly with the actual grades, suggesting that the prediction results were accurate. In addition, the grades of *D. punctatus* peak larvae of the 2nd generation in 1989, 1994, 2002 and 2017 were grade 4, grade 5, grade 2 and grade 1, respectively. It fitted perfectly with the actual grades too. The accuracy of the forecast was 100%. The fuzzy comprehensive evaluation method is a forecasting method permitting simple operation and with high accuracy.

Key words *Dendrolimus punctatus*; peak larval occurrence; fuzzy comprehensive evaluation method; forecast

马尾松毛虫 *Dendrolimus punctatus* 分布于安徽、河南、四川、贵州、陕西、云南、江西、江苏、湖南、浙江、福建、广东、台湾、海南、广西等省(区), 主要为害马尾松 *Pinus massoniana*, 还受害黑松 *P. thunbergii*、

火炬松 *P. taeda*、湿地松 *P. elliotii*、晚松 *P. rigida* var. *serotina*、海南五针松 *P. fenzeliana* 等松属植物。20 世纪中叶在我国森林害虫中马尾松毛虫是发生最广、为害面积最大、经常猖獗成灾的害虫。在广大

收稿日期: 2018-08-29 修订日期: 2018-11-09

基金项目: 国家林业公益性行业科研专项(201404410); 安徽省高校自然科学研究项目(KJ2019A0215); 安徽农业大学教学研究项目(2017aujyxm038); 安徽省高校自然科学研究项目(KJ2018A0160)

* 通信作者 E-mail: bishoudong@163.com

丘陵地区虫害此起彼伏,针叶常被吃光,被害时如同火烧,造成了巨大的经济损失和生态损失。而且,人们在林事活动中接触马尾松毛虫毒毛,容易引发皮炎和关节肿痛,因此,该虫不但影响林业生产,还危害人类健康^[1-4]。进入 21 世纪,由于各地采用封山育林、混交、间作等措施优化了森林生态环境,科学地运用综合治理措施,马尾松毛虫的危害得到有效的控制,但该虫具有强大的繁殖潜力,遇到有利的生态环境极易暴发成灾,对其监测不能放松。

马尾松毛虫一年发生 2~4 代,发生世代的多少,因不同地区而异,在河南省信阳地区一年发生 2 代为主,在长江流域诸省一年发生 2~3 代,而在广东、广西、福建南部一年发生 3~4 代,海南一年发生 4~5 代^[1]。安徽潜山县一年发生 3 代,即 4 月至 6 月上旬为越冬代,6 月上旬至 8 月中下旬为一代,8 月中下旬至 12 月为第二代。马尾松毛虫发生的预测预报是对其进行综合防治的基本工作。科研工作者分别采用不同的方法预测马尾松毛虫的发生量、虫害等级、发生类别、发生空间格局,为马尾松毛虫的综合防治工作提供了有力支持^[5-9]。由于各地气象条件、植被条件和地形地貌等不同,马尾松毛虫的发生特点也不完全相同。高峰期发生量与整个世代累计虫口数量之间的关系密切,潜山县一代幼虫两者之间相关系数为 0.993 0($df=23, r_{0.01}=0.505$),前者占后者的 31.1%~32.68%;二代幼虫两者之间的相关系数为 0.990 8,前者占后者的 26.12%~27.37%,明确了高峰期发生量就可以预知整个世代的虫口。周夏芝等^[10]曾用平稳时间序列法、回归预测法、BP 神经网络法马尔科夫链法和列联表法预测马尾松毛虫高峰期发生量。为了有效地防治马尾松毛虫,本研究采用模糊综合评判法预测安徽省潜山县马尾松毛虫一代和二代幼虫高峰期发生量,以期马尾松毛虫的综合治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料来源

马尾松毛虫资料来自安徽省潜山县森林病虫害防治站,资料的时间跨度为 1989 年—2018 年,其中 1998 年缺如,1989 年—2014 年作为研究资料,选择发生级别不同的 1989 年、1994 年、2002 年和 2017 年作为验证资料。根据国家林业局森林病虫害防治总

站^[11]制定的调查方法进行调查,即采用踏查和详查相结合的方法。沿林班线、林道、公路、铁路等线路调查,目测发生范围、为害状况,发现虫情或灾情立即设临时标准地,采取平行线抽样法抽取 20 株标准株详查。幼虫期调查,对 1~2 龄幼虫,调查枯黄卷曲的枝数,推算幼虫数,对 3 龄以上的幼虫,3 m 以下的小树直接调查合计树冠上的幼虫数,大树用“虫粪粒推算法”调查,幼虫越冬期间调查树干基部树皮缝中的幼虫数推算全部虫口。

1.2 模糊综合评判

1.2.1 模糊综合评判的模型种类^[12]

模糊综合评判的简单数字模型为 $Y \sim = X \sim \odot R \sim$, 若已知模糊向量 $X \sim$ 和模糊评判矩阵 $R \sim$ 时,即可进行综合评判。常用预测害虫种群发生量的模糊模型 5 个,最终取其结果的 1/5 形成综合决策模型。

1) 主要因素肯定型(模型 I)

$y_j = \bigvee_{i=1}^m (x_i \vee r_{ij})$, 简记为 $M_1 = (V, V)$, 表示突出因素的作用地位。符号 V 表示取大运算。

2) 主要因素决定型(模型 II)

$y_j = \bigwedge_{i=1}^m (x_i \wedge r_{ij})$, 简记为 $M_2 = (\Lambda, V)$, 表示主要因素的作用程度。符号 Λ 表示取小运算。

3) 主要因素突出型(模型 III)

$y_j = \bigvee_{i=1}^m (x_i * r_{ij})$, 简记为 $M_3 = (*, V)$, 表示次要因素的作用程度。

4) 因素求和型(模型 IV)

$y_j = \sum_{i=1}^m (x_i \wedge r_{ij})$, 简记为 $M_4 = (\Lambda, +)$, 表示总体因素效果的作用程度。

5) 加权平均型(模型 V)

$y_j = \sum_{i=1}^m (x_i * r_{ij})$, 简记为 $M_5 = (*, +)$, 表示所有因素的作用程度。

6) 综合决策型(模型 VI)

$y_i = 1/5 \left(\sum_{i=1}^m M_i y_j \right)$, 简记为 $M_6 = 1/5 \sum_{i=1}^5 M_i$, 表示所有因素的综

1.2.2 分析方法

1)求得模糊向量

模糊综合评判法,对每个预报因子 x_i 赋予权重,组成模糊向量 $X\sim$,各预报因子与预报对象的相关程度不同,意味着各预报因子所起作用的大小。因此,每个预报因子与预报对象 y 的相关系数 r_{x_iy} 可作为预报因子的权重系数。因为 $\sum r_{x_iy} \neq 1(i=1,2,\cdots,m)$ 需进行归一化处理, $x_i = r_{x_iy}^2 / \sum_{i=1}^m r_{x_iy}^2$,于是求得模型向量 $X\sim=(X_1,X_2,\cdots,X_m)$ 。

2)建立评判矩阵

采用 $a\times b$ 列联表中各预报因子条件概率 $P_{ik}^i = n_{ik}/n_{1k}$ 代替模糊概率,建立模糊评判矩阵 $R\sim$ 。 $R = \begin{bmatrix} P_{1k}^1 & P_{2k}^1 & \cdots & P_{lk}^1 \\ P_{1k}^2 & P_{2k}^2 & \cdots & P_{lk}^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{1k}^m & P_{2k}^m & \cdots & P_{lk}^m \end{bmatrix}$ 。具体运算求 $Y\sim=X\sim\odot R\sim$ 。

2 结果与分析

2.1 一代幼虫高峰期发生量预测

经过逐一筛选,一代卵量(x_1)、一代卵高峰期的

发生量(x_2)、越冬代幼虫虫口数量(x_3)和越冬代成虫数量(x_4)与一代幼虫高峰期发生量(y)之间关系密切,其相关系数依次为 $r_{x_1y}=0.993\ 0,r_{x_2y}=0.979\ 5,r_{x_3y}=0.586\ 1,r_{x_4y}=0.530\ 6,df=23$ 时, $r_{0.05}=0.369,r_{0.01}=0.505$,表明它们之间均极相关。经归一化处理,模糊向量 $X\sim=(0.383\ 6,0.373\ 2,0.133\ 6,0.109\ 5)$ 。1989年—2014年共25年的马尾松毛虫一代幼虫高峰期发生量(y)的范围为1.92~15.26头/株,一代卵量(x_1)的范围为13.60~94.78粒,一代卵高峰期发生量(x_2)的范围为3.44~28.62粒;越冬代幼虫数量(x_3)的范围为6.2~42.5头/株,越冬代成虫数量(x_4)的范围为1.61~11.05头。均按等距分级分成6级,分级标准列于表1。1989年—2014年共25年的马尾松毛虫二代幼虫高峰期发生量(y)的范围为1.85~15.89头/株,二代卵量(x_1)的范围为18.53~103.99粒,一代成虫虫口数量(x_2)的范围为2.82~17.64头,二代卵盛期卵量(x_3)的范围为5.00~31.95粒;一代成虫高峰期发生量(x_4)的范围为1.24~7.26头。均按等距分级分成6级,分级标准列于表1。

为了便于分析,将 $x_1\sim x_4$ 进行分级,将分级标准和1989年—2014年的数值及分级值列于表1和表2。

表 1 马尾松毛虫一代和二代幼虫高峰期发生量的预报要素分级标准
Table 1 Classification criteria for prediction elements of peak occurrence of *Dendrolimus punctatus* larvae of the first and second generations

代别 Generation	参数 Parameter	分级标准 Classification criteria					
		1 级 Grade 1	2 级 Grade 2	3 级 Grade 3	4 级 Grade 4	5 级 Grade 5	6 级 Grade 6
一代 First generation	一代幼虫高峰期发生量/头·株 ⁻¹ (y) Peak no. of larvae of the first generation	0~3.00	3.10~6.00	6.10~9.00	9.10~12.00	12.10~15.00	15.10~18.00
	一代卵量/粒·株 ⁻¹ (x_1) Egg quantity of the first generation	0~17.78	17.79~35.56	35.57~53.33	53.34~71.11	71.12~88.89	88.90~106.67
	一代卵高峰期发生量/粒·株 ⁻¹ (x_2) Peak no. of eggs of the first generation	0~5.15	5.16~10.31	10.32~15.47	15.48~20.62	20.63~25.78	25.79~30.93
	越冬代幼虫虫口数量/头·株 ⁻¹ (x_3) No. of larvae of overwintering generation	0~8.00	8.10~16.00	16.10~24.00	24.10~32.00	32.10~40.00	40.10~48.00
	越冬代成虫数量/头·株 ⁻¹ (x_4) No. of adults of overwintering generation	0~2.08	2.09~4.16				

表 2 马尾松毛虫一代幼虫高峰期发生量与预报因子及其分级

Table 2 Peak occurrence of the first generation of <i>Dendrolimus punctatus</i> larvae, prediction factors and their classification											
年份 Year	一代幼虫高峰期 虫口(y)/头·株 ⁻¹ Peak larvae of the first generation	分级 Grade	一代卵量(x_1)/ 粒·株 ⁻¹ First-generation egg quantity	分级 Grade	一代卵高峰期 发生量(x_2)/粒·株 ⁻¹ Peak no. of eggs of 1st generation	分级 Grade	越冬代幼虫累计 虫口(x_3)/头·株 ⁻¹ Accumulative larvae no. of overwintering generation	分级 Grade	越冬代成虫数(x_4)/ 头·株 ⁻¹ Adults no. of overwintering generation	分级 Grade	
1989	5.93	2	40.81	3	12.00	3	42.5	6	11.05	6	
1990	15.26	6	94.78	6	28.62	6	37.3	5	7.70	4	
1991	1.92	1	16.95	1	3.44	1	18.5	3	4.81	3	
1992	2.35	1	17.39	1	4.26	1	12.2	2	3.17	2	
1993	2.10	1	16.50	1	3.88	1	7.8	1	2.03	1	
1994	11.77	4	86.08	5	19.63	4	18.6	3	4.84	3	
1995	5.66	2	43.71	3	12.06	3	18.2	3	4.73	3	
1996	13.07	5	89.92	6	26.65	6	38.6	5	10.04	5	
1997	2.17	1	15.83	1	5.07	1	42.1	6	10.95	6	
1999	2.02	1	14.72	1	3.74	1	6.2	1	1.61	1	
2000	2.43	1	16.06	1	3.97	1	7.6	1	1.98	1	
2001	2.11	1	13.60	1	3.56	1	6.2	1	1.61	1	
2002	3.11	2	19.18	2	5.43	2	7.1	1	1.85	1	
2003	6.53	3	41.48	3	11.45	3	15.7	2	4.08	2	
2004	2.63	1	17.17	1	4.50	1	7.6	1	1.98	1	
2005	5.25	2	36.57	3	10.39	3	6.4	1	1.66	1	
2006	3.47	2	26.76	2	8.24	2	6.6	1	1.72	1	
2007	4.13	2	28.10	2	9.10	2	6.4	1	1.66	1	
2008	4.19	2	26.98	2	9.77	2	6.6	1	1.72	1	
2009	4.56	2	28.54	2	10.59	3	8.4	2	2.18	2	
2010	5.52	2	36.13	3	13.80	3	16.2	3	4.21	3	
2011	5.15	2	35.90	3	13.28	3	16.6	3	4.32	3	
2012	2.35	1	16.50	1	6.01	2	7.2	1	1.87	1	
2013	2.30	1	14.94	1	5.33	2	7.2	1			

续表 3 Table 3(Continued)

参数 Parameter	分级 Grade	一代幼虫高峰期发生量分级 y Grade of peak larvae of the first generation						$\sum P$
		1	2	3	4	5	6	
越冬代幼虫虫口数量分级 x_3 Grade of the larvae number of overwintering generation	1	8/13	5/13	0	0	0	0	1
	2	1/3	1/3	1/3	0	0	0	1
	3	1/5	3/5	1/5	0	0	0	1
	4	0	0	0	0	0	0	0
	5	0	0	0	0	1/2	1/2	1
	6	1/2	1/2	0	0	0	0	1
越冬代成虫数量分级 x_4 Number of adult of overwintering generation	1	8/13	5/13	0	0	0	0	1
	2	1/3	1/3	1/3	0	0	0	1
	3	1/5	3/5	0	1/5	0	0	1
	4	0	0	0	0	0	1	1
	5	0	0	0	0	1	0	1
	6	1/2	1/2	0	0	0	0	1

对 1989 年、1994 年、2002 年和 2017 年的一代幼虫高峰期发生量进行预测。1989 年一代卵量(x_1)为 40.81 粒,为 3 级;一代卵高峰期发生量(x_2)为 12.00 粒,为 3 级;越冬代幼虫累计虫口(x_3)为 42.5 头/株,为 6 级;越冬代成虫数(x_4)为 11.05 头,为 6 级。具体运算是 $Y\sim=X\sim\odot R\sim$,其中模糊向量 $X\sim$ 为 $[0.383\ 6,0.373\ 2,0.133\ 6,0.109\ 5]$,模糊矩阵 $R\sim$

为
$$\begin{bmatrix} 0 & 0.833\ 3 & 0.166\ 7 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.857\ 1 & 0.142\ 9 & 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$
。按照评判

模型进行运算得:

模型 1: $M_1=(0.500\ 0,0.857\ 1,0.383\ 6,0.383\ 6,0.383\ 6,0.383\ 6)$;

模型 2: $M_2=(0.133\ 6,0.383\ 6,0.166\ 7,0,0,0)$;
模型 3: $M_3=(0.066\ 8,0.319\ 9,0.063\ 9,0,0,0)$;
模型 4: $M_4=(0.243\ 1,0.999\ 9,0.309\ 5,0,0,0)$;
模型 5: $M_5=(0.121\ 5,0.761\ 1,0.117\ 2,0,0,0)$;
模型 6: $M_6=(0.213\ 0,0.664\ 3,0.208\ 2,0.076\ 7,0.076\ 7,0.076\ 7)$ 。

最后运算结果: $\text{Max}M_1y_i=0.857\ 1,\text{Max}M_2y_i=0.383\ 6,\text{Max}M_3y_i=0.319\ 9,\text{Max}M_4y_i=0.999\ 9,\text{Max}M_5y_i=0.761\ 1,\text{Max}M_6y_i=0.664\ 3$,6 个模型相应的待报级别均为 2 级。故预报 1989 年马尾松毛虫一代幼虫高峰期的发生量为 2 级,实况为 2 级,预报结果准确。将 1989 年、1994 年、2002 年和 2017 年预报级别和实况级别列于表 4,预报结果的准确率为 100%。

表 4 马尾松毛虫一代幼虫高峰期发生量的预报级别和实况级别

Table 4 Predicted grades and actual grades of the peak larval occurrence of *Dendrolimus punctatus* of the first generation

年份 Year	模型 1 级别 Grade of model one	模型 2 级别 Grade of model two	模型 3 级别
------------	-------------------------------	-------------------------------	---------

3 小结与讨论

本文运用模糊综合评判的 6 个数学模型预测安徽省潜山县马尾松毛虫幼虫一代、二代高峰期发生量,其结果是:预报 1989 年、1994 年、2002 年和 2017 年马尾松毛虫一代幼虫高峰期发生量依次是 2 级、4 级、2 级和 1 级,预报 1989 年、1994 年、2002 年和 2017 年马尾松毛虫二代幼虫高峰期发生量依次是 4 级、5 级、2 级和 1 级,一代和二代预测结果均与实况完全一致,预报结果准确率为 100%。

本方法相对于其他预报方法工作量小,计算简便。模型预测结果的准确与否,首先必须从生态系统中考虑与预报结果有关的生态因子,如降雨、相对湿度、日照时数、最高气温、最低气温、平均气温以及与预报结果有关的生物因子,因此要求作者不光具有数学分析的知识,而且要有预报结果的专业知识。如本文与一代幼虫高峰期发生量有关的一代卵量、一代卵的高峰期发生量、越冬代幼虫虫口和越冬代成虫数量,这些因子与一代幼虫高峰期发生量都有一定因果关系。另外还有越冬代蛹的数量等,对这些因子采用相关分析法进行筛选,选出主要因子,借以提高预报结果的准确性。

一般情况下,用模型 I—主要因素肯定型 $y_j = \bigvee_{i=1}^m (x_i \vee r_{ij})$ 、模型 II—主要因素决定型 $y_j = \bigvee_{i=1}^m (x_i \wedge r_{ij})$ 和模型 III—主要因素突出型 $y_j = \bigvee_{i=1}^m (x_i * r_{ij})$ 的三个模型或者用模型 VI— $y_i = 1/5 (\sum_{j=1}^m M_{ij} y_j)$ 即可进行预测。本文用 6 个模型进行预测,几个模型的预测结果是一致的,该方法的优点是根据与预报结果有关的因子决定采用何种模型。应用 6 种模型时,首先考虑对预报结果有重要影响的因子,在多个因子都

对预报结果有影响的情况下,利用相关分析法筛选对预报结果影响大的几个主要因子,其他因子可忽略不计。本文选择的预报因子都是与幼虫高峰期发生量极相关的因子,所以归一化后作为权重构成的模糊向量其预报结果准确性高。再者,影响预报结果准确性的原因与评判人采用的评判模型有关,因为 6 个模型的侧重点有所不同。

参考文献

- [1] 萧刚柔. 中国森林害虫[M]. 第 2 版. 北京:林业出版社,1992: 948-953.
- [2] 侯陶谦. 中国松毛虫[M]. 北京:科学出版社,1987:188-191.
- [3] 邹运鼎,程扶玖,查光济. 松针内含物与马尾松毛虫生存发育关系的研究[J]. 林业科学,1990,26(2):142-148.
- [4] 张真,李典谟. 马尾松毛虫暴发机制分析[M]. 林业科学,2008, 44(1):140-150.
- [5] 陈绘画,王坚娅,徐志宏. 基于响应面方法的马尾松毛虫发生量混沌特性检测及其预测[J]. 东北林业大学学报,2011,39(9): 94-96.
- [6] 张爱兵,陈建,王正军,等. BP 网络模型和 LOGIT 模型在森林害虫测报上的应用初报——以安徽省潜山县马尾松毛虫为例[J]. 生态学报,2001,21(12):2159-2165.
- [7] 田万银,徐华潮. 浙江沿海防护林马尾松毛虫的预测预报模型[J]. 环境昆虫学报,2012,34(4):401-406.
- [8] 许章华,李聪慧,刘健. 马尾松毛虫害等级的 Fisher 判别分析[J]. 农业机械学报,2014,45(6):275-283.
- [9] PARK Y S, CEREGRINO R, COMPIN A. Applications of artificial neural networks for patterning and predicting aquatic insect species richness in running waters [J]. Ecological Modelling, 2003, 160(3): 265-280.
- [10] 周夏芝. 马尾松毛虫幼虫高峰期发生量的预测模型研究[J]. 应用昆虫学报,2017,54(6):1031-1043.
- [11] 国家林业局森林病虫害防治总站. 林业有害生物监测预报技术[M]. 北京:中国林业出版社,2013:117-118.
- [12] 张孝羲. 昆虫生态及预测预报[M]. 第 3 版. 北京:中国农业出版社,2001:300-303.

(责任编辑:田 喆)