

464 - 467

第19卷第4期  
1999年7月生态学 报  
ACTA ECOLOGICA SINICAVol. 19, No. 4  
July, 1999

## 昆虫种群动态时空回归预测方法及应用研究

周国法<sup>1</sup>, 徐汝梅<sup>1</sup>, 李天生<sup>2</sup>5763.820.2  
Q968.1

(1. 北京师范大学生命科学院, 北京 100875; 2. 中国林业科学院森林保护研究所, 北京 100091)

**摘要:**根据昆虫种群内个体空间相互作用的特点, 提出分析昆虫种群时空相关的三维相关图方法及种群动态预测的时空混合回归模型。对马尾松毛虫幼虫密度分布的预测采用了时空自回归加时空趋势面的形式, 预测的马尾松毛虫幼虫的平均密度和实测的平均密度在时空变化的趋势上是完全一致的, 而且预测结果给出了马尾松毛虫幼虫密度分布的图象形式, 给防治决策提供了方便。

**关键词:**时空相关, 时空混合回归, 马尾松毛虫, 预测。

## Spatio-temporal explicit interactive model for forecasting the pine caterpillar population dynamics

ZHOU Guo-Fa<sup>1</sup>, XU Ru-Mei<sup>1</sup>, LI Tian-Sheng<sup>2</sup> (1. College of Biological Sciences, Beijing, 100875; 2. Institute of Forestry Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing, 100091)

**Abstract:** Based on the spatial-temporal characteristics of interaction of pine caterpillar larvae population, a three-dimensional correlogram and spatially mixture-regression model was proposed. The correlogram includes both spatial and temporal correlation analysis, the forecast model includes three components, temporal and spatial auto-regression, and spatio-temporal trend surface. As for the forecasting of pine caterpillar density distribution, both temporal correlation and the intensity of spatial interaction were determined by correlogram. The forecasted larvae density of pine caterpillar has the similar trend, both temporally and spatially, as the sampled density in the field. The resultant distribution of larvae density can provide an easy-using image for IPM.

**Key words:** spatio-temporal correlation, spatio-temporally explicit model, pine caterpillar, forecast.

文章编号: 1000-0933(1999)04-0464-04 中图分类号: S763 文献标识码: A

生物种群动态的研究是生态学研究的基本内容之一, 关于种群动态的规律及其预测模型的研究已有许多报道。常见的种群动态模型各种各样<sup>[1]</sup>, 如各种生长模型、竞争与捕食模型、时间序列与马尔科夫链模型、状态方程模型、生命表模型与矩阵模型等, 这些模型的共同点是用前一时间生命阶段的数量预测后一段时间的种群数量, 这些模型存在的共同问题是都没有考虑空间效应或空间影响。显然这是不合理的。

种群动态除了时间上的变化外, 还存在空间相关问题, 空间不同位置的个体间存在相互作用, 这种空间相互作用必然导致空间分布格局随时间及密度的变化而变化, 从而使种群具有复杂的时空动态, 因此预测昆虫种群的动态必须同时考虑时间及空间影响。

本文的目的就是探讨研究种群时空动态的有关理论、方法及预测模型, 并探讨有关应用的可能性。

## 1 时空数据及时空模型的理论基础

种群动态的观测数据一般是在某个区域内的不同位置均作连续调查。单一位置的调查结果是一个时间序列, 不同位置上的调查是空间相关的即与距离及方向有关的相关<sup>[2-4]</sup>。

种群时空相关研究的理论基础是种群内个体间及个体群间存在空间上的相关性, 这种空间相关具有方向性且随时间变化而变化; 不同种群间、昆虫种群与环境因子间也存在这种空间相关性, 空间相关随时

收稿日期: 1997-03-01; 修订日期: 1999-04-05

间是变化的,时间相关在不同空间位置是不同的,而且这种时空相关性随距离(间隔)的增大而减弱,超过一定距离(相关的距离阈值)后这种相关就不存在了;还有不同方向的空间相关可以是不同的。

问题是如何量化种群的时空相关,时空相关和种群动态的预测有何关系。为了研究方便,假设研究区域已经划分成网络状, $Z_{i,j,t}$ 表示空间位置(即网络坐标) $(i,j)$ 处 $t$ 时的个体数量或密度。

## 2 时空预测的模型

时空预测模型的建立包括两个步骤。首先是作时空相关分析以确定时空相关随距离变化的规律,然后根据时空分析的结果构造种群数量预测的时空模型。

时空相关分析的一般方法是采用三维相关图方法。时空相关函数的定义为:

$$\rho_{xy}(h) = C_{xy}(h) / \sigma_x \sigma_y$$

其中, $C_{xy}(h) = [2N(h)]^{-1} \sum_{(i,j) \in NB} (X_{i,j,t} - \bar{X}_{i,j,t-h}) (Y_{i,j,t} - Y_{i,j,t-h})$ ,  $\bar{X}_{i,j,t}$ 和  $\bar{Y}_{i,j,t}$ 分别是  $X$ 、 $Y$  的平均值,  $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$  分别是  $X$ 、 $Y$  的标准差,  $h$  是空间间隔向量即  $h = (h_1, h_2, h_3)$ ,  $NB$  表示邻近网络的集合。

$\rho_{xy}(h)$  描述了种群  $X$ 、 $Y$  在距离  $h$  时的相关程度。典型的相关图是在  $h=0$  时,  $\rho_{xy}(h)$  有一个较大的正值,随  $|h|$  的增大,  $\rho_{xy}(h)$  逐渐变小,当  $h=h_0$  时  $\rho_{xy}(h)=0$ ,  $h_0$  称为相关域,它的意义是,当  $h>h_0$  时个体间或个体群间就不存在相关性了,由  $h_0$  可以确定空间及时间相关的最大距离及相关性随距离变化的特点。

时空分析的结果一般表示为相关函数形式,合适的相关函数模型是幂函数  $\rho_{xy}(h) = ah^b$  和 Weibull 函数  $\rho_{xy}(h) = 1 - \exp(-ah^b)$ 。

在时空相关分析的基础上,就可以建立时空预测模型了。一般自回归形式的时空预测模型可表示为 (STAR( $h_0, \rho_{xy}(h)$ )):

$$Z_{i,j,t+1} = a + b_{11}Z_{i,j,t} + b_{11} \sum_{(k,l) \in NB} W(h) Z_{k,l,t} + \dots + b_{1p} \sum_{(k,l) \in NB} W(h) Z_{k,l,t}$$

其中,  $W(h)$  是权函数。回归的阶数  $p$  及权函数  $W(h)$  的形式是由相关分析决定的。权函数应反映种群的时空相关性的特点,因此权函数通常是正比于相关函数,而  $p$  是时间相关长度。

同时时空预测要考虑相关因素的影响,如对松毛虫密度的预测应考虑海拔、林分条件及气象条件的影响,因此时空预测模型有时是混合回归形<sup>[2]</sup>:

$$Z_{i,j,t+1} = a + b_{10}Z_{i,j,t} + b_{11} \sum_{(k,l) \in NB} W(h) Z_{k,l,t} + \dots + b_{1p} \sum_{(k,l) \in NB} W(h) Z_{k,l,t} + b_{20}X_{i,j,t} + b_{21} \sum_{(k,l) \in NB} W_1(h) X_{k,l,t} + \dots + b_{2q} \sum_{(k,l) \in NB} W_1(h) X_{k,l,t}$$

其中,混合回归权  $W_1(h)$  及混合回归阶数  $q$  是由混合相关函数确定的,  $X$  即气象条件或其它与  $Z$  有关的空间变量。

时空预测模型的参数估计一般是最大似然方法。为了计算简单,可以采用最小二乘方法,但最小二乘估计得到的参数估计有时是不够准确的。

## 3 实例研究——马尾松毛虫种群动态的预测

作为时空回归预测的具体应用,下面考虑马尾松毛虫种群动态的时空预测问题。研究数据是在浙江省龙游县所作的松毛虫密度调查。选取57个位置(样本点),每年作两代松毛虫密度调查,共有1986年至1993年16代调查资料。目的是逐点(研究区划分为 $80 \times 140$ 格,格的大小为 $200\text{m} \times 200\text{m}$ )的预测未来松毛虫的密度值并给出一个易于使用的密度分布图。

预测松毛虫的密度变化不仅要考虑松毛虫的时空自相关,还要考虑海拔、林相、气象条件等引起的时空趋势<sup>[3~6]</sup>,因此本文采用了下面的预测模型:

$$Z_{i,j,t+1} = F(Z_{i,j,t} \text{ 及其周围点}) + G(\text{海拔、林相、气象条件等}) + \epsilon_{i,j,t}$$

其中,  $F$  是自相关部分,采用时空自回归形式;考虑到海拔、林相等具有很强的空间趋势,气象条件的变化具有强的时间趋势,因此  $G$  选择为趋势面形式。

### 3.1 空间自相关

用空间相关函数研究马尾松毛虫幼虫的空间自相关性,得到了图1的空间相关图。从图1容易看出,松

毛虫幼虫的空间相关是呈指数衰减的,空间相关距离大约为10格,相当于松毛虫幼虫扩散距离的2倍。拟合的空间相关函数为: $\rho(h) = 0.55\exp(-0.21h)$ 。

### 3.2 时间自相关

表1是用样本数据计算得到的时间相关随时间间隔变化的情况。由于采用空间点的平均距离,预测时间间隔(样本调查为1代)出现了小数,但它并不影响对间隔的分析。采用0.25的相关系数临界值会发现,马尾松毛虫幼虫的时间相关为1代多但不到两代,本文取时间相关阶为1代。

### 3.3 海拔、林相、气象条件等引起的趋势

对海拔,林相趋势也采用二阶趋势面,但时间趋势采用三阶形式。用典型相关分析选择趋势面各项的取舍。通过对趋势面各项与松毛虫密度典型相关分析,最后选定以下各项进入预测模型: $x, xy, xt, y^2, t^2, t^3$ ,其中 $x, y, t$ 分别是格的空间和时间坐标。

### 3.4 预测模型的建立

由于计算上的简单性,本文采用了回归的最小二乘法选择回归项并估计回归参数值。

最后的时空预测模型为:

$$Z_{t,y,t+1} = 8.59 + (-0.18x + 0.01ry + 0.58xt - 0.04y^2 - 11.59t^2 + 0.56t^3) / 100 + 1.52W_t Z_{t,y,t} + 0.01(W_t Z_{t,y,t})^2$$

其中, $W_t Z_{t,y,t}$ 为 $t$ 时 $(x, y, t)$ 的邻近位置密度的加权平均,即: $W_t Z_{t,y,t} = \sum_{k,l \in N_h} W(h) Z_{k,l,t}$ 。

回归模型的相关系数为 $R=0.73$ ,超过95%的显著水平。模型中的参数入选水平都超过95%。

### 3.5 预测结果

图2是用预测模型得到的马尾松毛虫幼虫密度分布和实际调查的平均密度分布。从图中可以看出,预测的松毛虫的密度分布趋势和实际发生是比较一致的。

图3是在57个样本点上预测的平均密度和实际调查密度的变化趋势,显然预测和实际发生的趋势是完全相同的。表2是平均密度 $t$ 检验的结果。从表2可以看出,除了第三次外,其余的预测结果和实际发生是没有显著差异的,但第三次的预测(1.53)和调查结果(0.50)的差别并不是很大。图3表现出的预测密度一般高于实际发生是值得研究的,其原因可能有二,一是每次调查的样本数(和预测格数相比)太少,二是时空趋势项的选择不好,也许应该单独考虑海拔和林相及气象条件,建立更准确的趋势模型能改进预测的准确性。

## 4 结果与讨论

本文提出了研究昆虫种群动态的时空相关分析问题,并通过时空相关分析建立了种群数量动态的时空回归预测模型,把空间分布和时间动态有机地结合在引起,实现了种群动态的直观预测。和多维时间序列不同的是,本文的相关是和空间距离及方向有关的时空相关,同时大大简化了空间预测的维数,解决了维数太大给时间序列分析带来的计算的可能,同时模型也考虑了其它影响因素的作用,使预测的结果更接近于实际情况。对马尾松毛虫种群动态的预测表明了本文的模型是可行的和可靠的,同时要进一步提高预测的准确程度,必须仔细分析各种因素的影响特点。

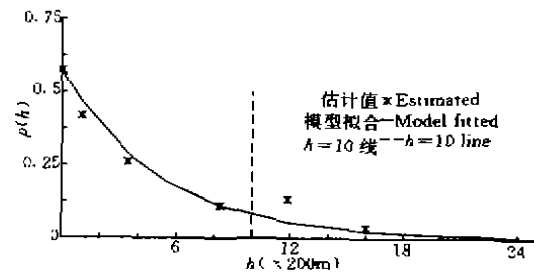


图1 马尾松毛虫幼虫的空间相关图

横坐标为距离,单位为200m,纵轴表示相关性

Fig. 1 Larvae spatial correlogram of pine caterpillar  
Horizontal axis represents distance ( $\times 200m$ ), vertical axis represents correlogram

表1 马尾松松毛虫幼虫的时间相关性

Table 1 Larvae temporal correlation

平均时间间隔 Average time interval	样本相关图值 Values of correlogram
0	0.99
1.02	0.46
2.23	0.22
3.20	0.14

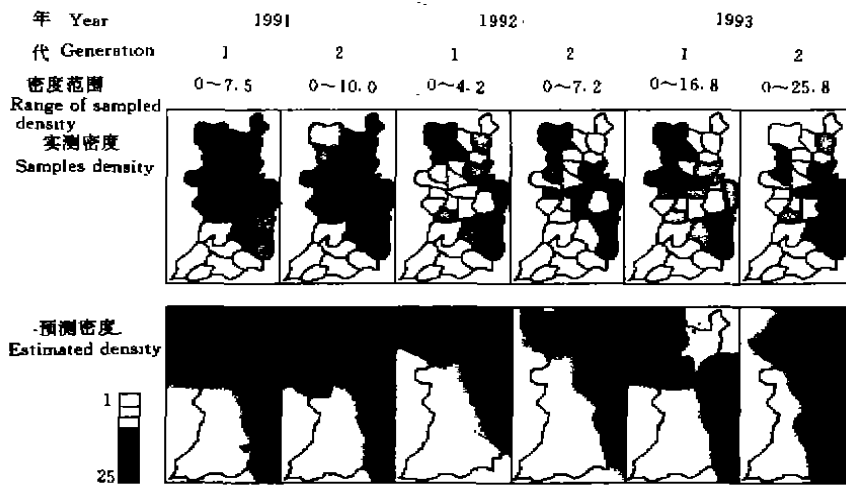


图2 实测和预测的马尾松毛虫幼虫的密度的比较

Fig. 2 Illustration of forecasted and sampled densities distributions of larvae of pine caterpillar

表2 实测和预测的平均密度间的t检验

Table 2 t test between forecasted and sampled mean densities of larvae

时间(年/代) Time (year/generation)	t 值 t value
1991/1	0.24
1991/2	-0.98
1992/1	-2.60**
1992/2	-0.80
1993/1	-0.72
1993/2	-0.41

\*\* >90%显著水平, exceeds 90% significant level

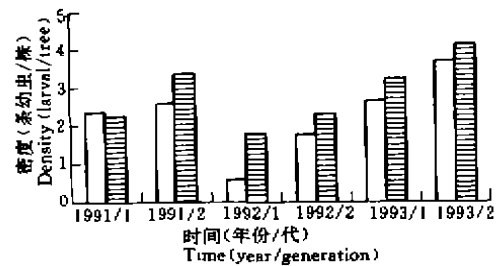


图3 实测和预测的马尾松毛虫幼虫平均密度的时间变化  
Fig. 3 Temporal change of forecasted and sampled mean density of larvae of pine caterpillar

纵坐标为密度(条幼虫/株),横坐标为时间和幼虫的代数(年/代) Horizontal axis represents mean density (larval/tree), vertical axis represents year and generation (year/generation)

参考文献:

[1] 丁岩钦. 昆虫数学生态学. 北京: 科学出版社, 1994.  
 [2] 李天生, 周国法. 昆虫种群距离聚集度指标的研究. 生态学报, 1991, 11(4): 345~348.  
 [3] Isaaks E H, Srivastava R M. An Introduction to Applied Geostatistics. Oxford University Press, New York, 1989.  
 [4] Liebhold A M, Elkinton J S. Characterizing spatial patterns of gypsy moth regional defoliation. For. Sci., 1989, 35(2): 557~568.  
 [5] 陈昌洁. 松毛虫综合管理. 北京: 中国林业出版社, 1990.  
 [6] Zhou G, Liebhold A M. Forecasting gypsy moth defoliation with a geographical information system. Entomol. Sinica, 1995, 2(1): 83~94.