

杨树光肩星天牛种群空间格局的地统计学研究

李友常 夏乃斌[✓] 屠泉洪 骆有庆 温俊宝

(北京林业大学, 北京, 100083)

S763.38
S792.110.2

A **摘要** 根据在宁夏青铜峡市4块不同类型样地上收集到的光肩星天牛(*Anoplophora glabripennis* (Motsch))卵、幼虫和成虫的数量和位置资料,应用地统计学方法(geostatistics)对其种群的空间格局进行了研究,结果表明:在各种林型中天牛卵和幼虫的数量具有明显的空间依赖性,其变程分别为20~40m和28~170m,局部空间连续性强度分别为0.26~0.47和0.14~0.55;而成虫的数量没有表现出空间依赖性,在空间呈随机分布。对不同样方大小的变异曲线图进行比较得知:在一定范围内,变程不随样方的大小而变化;基台值随样方的大小呈明显的线性上升;局部空间连续性强度随样方的增大而呈指数式上升。对标准化后的空间协方差图、迟滞相关图和变异曲线图进行比较后发现:天牛卵的变程、空间不连续性强度均很接近;而幼虫有的比较相近,有的相差较大;成虫则都相差很大。这说明必须把这三者综合起来进行考虑,才能找到空间依赖性的正确距离。

关键词 光肩星天牛, 地统计学, 变异函数, 空间依赖性。

种群; 空间格局; 杨树

A GEOSTATISTICAL ANALYSIS ON SPATIAL PATTERNS OF *Anoplophora glabripennis* IN POPLARS

Li Youchang Xia Naibin Tu Quanhong Luo Youqing Wen Junbao

(Beijing Forestry University, Beijing, 100083, China)

Abstract The spatial patterns of eggs, larvae and adults of *Anoplophora glabripennis* (Motsch.) in four types of poplar forest in Qingtongxia, Ningxia Hui Autonomous Region were studied by using geostatistics tools. Geostatistics allows the usage of quantity and location information simultaneously to qualify the spatial pattern of insect population. The results indicate that the quantity of eggs and larvae had evident spatial dependence in all plots. The dependence range of eggs and larvae varied from 20~40m and 28~170m respectively. The local spatial continuity varied from 0.26~0.47 and 0.14~0.55. The adults showed a random distribution and had no spatial dependence in all sites. Analysing the parameters of variograms at different grid sizes. It was found that within some limits the dependence range didn't change with grid size; the sills had significant linear relation with grid side length and the local spatial continuity had a exponential increment with grid side length. Comparing the spatial covariance, lag correlogram and variogram, we found that the spatial dependence ranges and spatial discontinuities for eggs were very approximate. As for larvae, some were approximate, some were not. The ranges and

• 本文系“八五”国家攻关课题“杨树天牛综合控制技术研究”中的四级专题的一部分。

收稿日期:1996-07-19,修改稿收到日期:1997-02-01。

spatial discontinuities for adults differed greatly in three of them. This suggests that the variogram, spatial covariance and lag correlogram should be synthesized to find out the spatial dependence range and local spatial continuity correctly.

Key words: *Anoplophora glabripennis*, geostatistics, variogram, spatial dependence.

昆虫种群密度一般具有空间异质性的特征,这种异质性对于确定正确的抽样方法、了解捕食者-猎物的关系、认识种内竞争的原理、提出合理的害虫管理策略都是十分重要的。由于这些原因,前人在研究昆虫的空间格局上做了大量工作。以前对空间格局的描述大多应用分布型指数如 $s^2/\bar{x}$, Taylor 的幂的法则, Morista 的 I , Lloyd 的聚集指标和 Iwao 的 $m^* - m$ 回归分析法等,这些指数着重强调了样本间的数量变化(大多数揭示样本的方差与平均数的关系)而忽视了样本的空间位置,从而导致了一些令人遗憾的后果:(1)这些指数在不同的空间格局中并非是不同的,(2)它们对空间格局的分析很大程度上依赖于样本的大小^[1]。因此,需要一种工具能同时利用数量和位置关系来反映空间格局,地统计学就是采用这种方法进行空间分析的工具,它比分布型指数能更直接地描述昆虫种群的空间特征。

地统计学 50、60 年代由地理和地质学家发展起来的用于描述矿床的空间格局特征,进行空间插值估计的方法。近几年来,该方法已广泛应用于地理学和生态学的许多方面^[2-4],如 Liebhold 等研究了舞毒蛾 (*Lymantria dispar*) 卵块的空间变化^[5], Schotzko 等分析了豆荚草盲蝽 (*Lygus hesperus*) 种群在不同生长季节、不同密度下的空间分布^[6], Kemp 等研究了山区蝗虫的空间变异性^[4]。

本文应用地统计学的方法研究了杨树上光肩星天牛的空间格局,得到了不同林型、不同虫态的光肩星天牛种群空间依赖性 (spatial dependence) 距离以及不同样方下的变异函数 (variogram) 之间的关系。

1 材料与方法

1.1 试验材料和调查方法

根据杨树光肩星天牛在宁夏青铜峡市的分布和危害程度,选择了有代表性的试验标准地 4 块,即农田 (Site A)、村庄 (Site B)、干道 (Site C) 和干渠防护林型 (Site D) 各一块,合计面积约 40hm²。标准地中的树种组成主要有箭杆杨 (*Poplar nigra* L. var. *thevestina* (Dode) Bean)、合作杨 (*P. simonii* Carr. × *P. nigra* L. var. *italica* (Moench) Koehne) 和新疆杨 (*P. alba* L. var. *pyramidalis* Bunge.) 等,一般为 7~12 年生,树高 8~15m。应用整片抽样方法,调查每株杨树上的光肩星天牛刻槽 (impression)、排粪孔 (excreting hole) 和羽化孔 (emerging hole) 的数量,分别代表天牛的卵、幼虫和成虫数。同时测量每株杨树之间的距离,将其空间位置绘于坐标纸上。

1.2 变异曲线图的构建

将坐标纸划分为同样大小的方格 (grid), 每个方格作为一个样方, 求出每个样方内的卵、幼虫和成虫数。以 $z(x)$ 和 $z(x+h)$ 分别表示间隔为 h 的两个样本的测量值, 则在样本空间内, 所有这些间隔为 h 的样本对间数值的平均相似程度可用变异函数 (variogram) 表示, 其公式如下:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \quad (1)$$

其中, $N(h)$ 为间隔 h 的样本点的对数。以变异函数 $\hat{\gamma}(h)$ 对间隔距离 h 作图, 称为变异曲线图 (如图 1)。

在变异曲线图中, 有 3 个重要的参数: 变程 (range) 或空间依赖性距离 (spatial dependence distance)、基台值 (sill)、块金常数 (nugget)^[1,9,10]。变程指在变异函数的值达到平衡时的间隔距离, 基台则指达到平衡时的变异函数值, 块金常数是指变异曲线被延伸至间隔距离为零时的截距。这 3 个参数反映了变异曲线图的形状结构。常用的变异函数模型有单项式、指数式、高斯函数、球面函数、直线形式等^[11,12]。在实际观测中, 变异曲线有时表现为纯块金变异图 (pure nugget variogram), 即在所有距离上完全缺失空间相关性。例如, 昆虫的随机分布可能会导致纯块金变异图。

昆虫种群在空间的变异性往往由多种原因引起, 而由不同原因引起的变异特性, 其尺度的大小不同。所有这些不同尺度变异的组合称为“套合结构”^[9]。套合结构可以表示为多个变异函数之和, 每一个变异函

数代表一种特定尺度上的变异性。其表达式为:

$$\gamma(h) = \gamma_0(h) + \gamma_1(h) + \cdots + \gamma_l(h) \quad (2)$$

根据本文的抽样空间大小,选用二重套合结构模型,即:

$$\gamma(h) = \gamma_0(h) + \gamma_1(h) \quad (3)$$

式中, $\gamma(h)$ 为总变异函数; $\gamma_0(h)$ 代表微观变异,在实际调查中所采用的尺度远大于 $\gamma_0(h)$ 的变程 a_0 ,因此在 $h \gg a_0$ 的尺度上,作为分量 $\gamma_0(h)$ 出现的块金效应,在总变异中以块金常数 C_0 表示; $\gamma_1(h)$ 代表较大距离上的连续性变化,应用指数模型,有:

$$\gamma(h) = C_0 + c[1 - \exp(-3h/a)] \quad (4)$$

式中, a 代表变程; C_0 代表块金常数;当 $h \rightarrow +\infty$ 时, $\gamma(h) \rightarrow C_0 + c$,设 $S = C_0 + c$,则 S 代表基台值。

1.3 空间协方差图和迟滞相关图的构建

在地统计学中,应用空间协方差(space covariance)和迟滞相关度(correlogram)来消除局部平均数和方差的影响。空间协方差 $\hat{C}(h)$ 可由下式求得:

$$\hat{C}(h) = \frac{1}{N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} \{[z(x_i) - m_{-h}][z(x_i + h) - m_{+h}]\} \quad (5)$$

同前所述, $z(x_i)$ 、 $z(x_i + h)$ 分别为间隔矢量 h 的尾部和头部, $N(h)$ 为所有间隔矢量 h 的点对数, m_{-h} 和 m_{+h} 分别为相应的矢量尾部和头部的平均数。

迟滞相关度 $\rho(h)$ 能同时消除迟滞平均数和迟滞方差,它可由下式估计:

$$\rho(h) = \frac{1}{N(h)} \frac{\sum_{i=1}^{N(h)} \{[z(x_i) - m_{-h}][z(x_i + h) - m_{+h}]\}}{S_{-h}S_{+h}} = \frac{\hat{C}(h)}{S_{-h}S_{+h}} \quad (6)$$

式中, S_{-h} 与 S_{+h} 相应为矢量尾部和头部的标准差。相关度依赖于点间是否正相关或负相关,其变动范围在1与-1之间。

变异函数、空间协方差与迟滞相关度之间是相互联系的,如果在抽样空间内种群的平均值与方差是一常数($\mu_{-h} = \mu_{+h} = \mu$, $\sigma_{-h}^2 = \sigma_{+h}^2 = \sigma^2$,亦即没有变动趋势),则有:

$$\gamma(h) = \sigma^2 - C(h) \quad (7)$$

$$\rho(h) = C(h)/\sigma^2 \quad (8)$$

$$1 - \rho(h) = \gamma(h)/\sigma^2 \quad (9)$$

根据上式可以将空间协方差和迟滞相关度变换为变异曲线图的形式,并可将空间协方差标准化使得抽样方差等于1。当抽样方差减去空间协方差后所得结果与变异曲线图等同;用1减去迟滞相关度即可转化为标准化的变异曲线图形式。为了保持一致性,空间协方差和迟滞相关度一般都表示为变异曲线图的形式。

2 结果与分析

2.1 空间变异与距离的关系

2.1.1 天牛卵的变异曲线图 应用上述方法,选择样方的大小为 $4m \times 4m$,由此得到了在不同林型中天牛卵的变异曲线图,并运用公式(4)对其进行拟合,所得结果见图2。

从图2可以看出,各种林型中天牛卵的数量都具有空间依赖性,其变程为20~40m,亦即在这个距离内,抽样空间上任意两点卵的数量间有一定的相关关系。因而天牛卵在空间的分布具有连续性,其强度随距离的延长而减小。变异曲线图中块金常数占基台的比例——空间不连续性强度(spatial discontinuity)为0.53~0.74,这表明在同一样方内,由于空间依赖性而减少的变异占总体方差的26%~47%。块金效应较大可能是两方面原因引起:1)调查的误差,因为有的杨树上卵数很多,且被树叶挡住,因而计数时可能出现较大偏差;2)数据的缺失,因为有些地段杨树被砍伐掉,只能以0计,这样就与邻近的样方产生较大的差

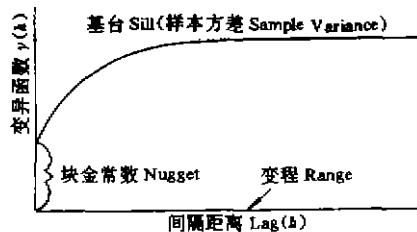


图1 一个典型的变异曲线图

Fig. 1 A typical variogram

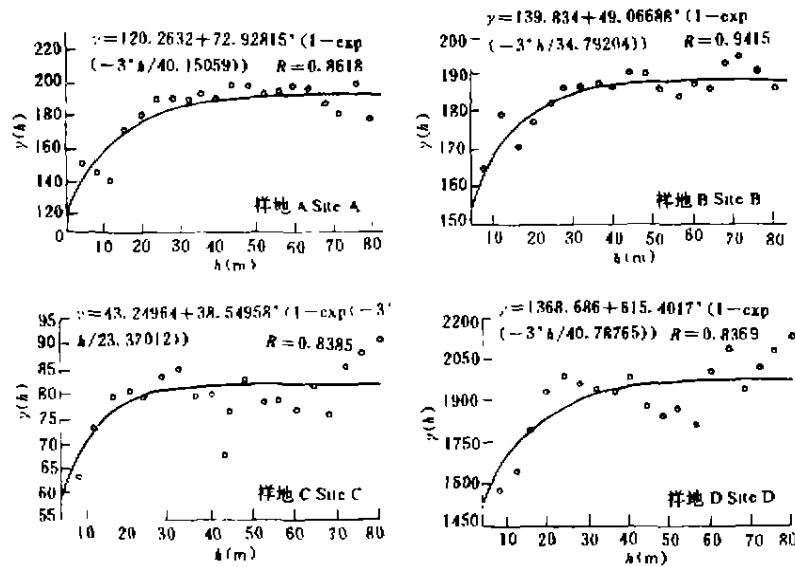


图2 不同样地天牛卵的变异曲线图

Fig. 2 Variograms for *A. glabripennis* eggs in different sites

异。

对比各林型中天牛卵的空间依赖性距离,从大到小依次为农田、干渠、村庄、干道防护林;就局部空间连续性强度而言,其大小依次为干道、农田、干渠和村庄防护林。

2.1.2 天牛幼虫的变异曲线图 同上选取 $4\text{m} \times 4\text{m}$ 的样方,得到了不同林型中天牛幼虫的变异曲线图,见图3。从图3可以看出:1)样地A和B上的天牛幼虫数量都有空间依赖性,其变程为 $28 \sim 46\text{m}$,局部空间连续性强度为 $0.14 \sim 0.43$;2)样地C中的变异曲线图表现为纯块金变异图,表明此样地中天牛幼虫的数量没有表现出空间连续性。其变程(3.68m)小于抽样样方的大小(4m),所以,如果采用更小的样方,它的空间连续性才可能显示出卡;3)样地D中的变程超出了抽样的空间范围,说明在抽样空间内各点的幼虫数量间均有空间相关性,局部空间连续性强度为 0.55 。

对比天牛幼虫在各林型的变程,从大到小依次为干渠、农田、村庄、干道防护林;就局部空间连续性强度而言,从大到小依次为干道、干渠、农田和村庄防护林。

2.1.3 天牛成虫的变异曲线图 图上选取 $4\text{m} \times 4\text{m}$ 的样方,得到了不同林型中天牛成虫的变异曲线图,见图4。

从图4可以看出:在样地A、B、D中天牛成虫的变异曲线图均为纯块金变异图,它们在空间的分布是随机的。在样地C中出现的变异曲线图形式是由于成虫数量太少(只有1头),只有与这个有虫样方比较才有差异,其余样本对之间差异均为零,而不同间隔 h 间的样本对数量不同,因而造成不同 h 间所有样本对的平均数和方差不同,这就形成上面的变异曲线图,只有消除这种平均数和方差不同所带来的影响,才能得出正确的结构。

2.2 空间变异与样方大小的关系

将坐标纸每次按一种单位划分为相同大小方格(grid),每个方格代表一个样方,按前面的方法得到这个单位下的变异曲线图,由于每次划分的单位不同,这样依次绘出天牛卵、幼虫和成虫在不同大小样方下的变异曲线图,并对它们进行了系统地比较。

2.2.1 天牛卵的变异曲线图随样方大小的变化 对不同样方大小下天牛卵的变异曲线图运用(4)式进行拟合,将其参数列在表1中。

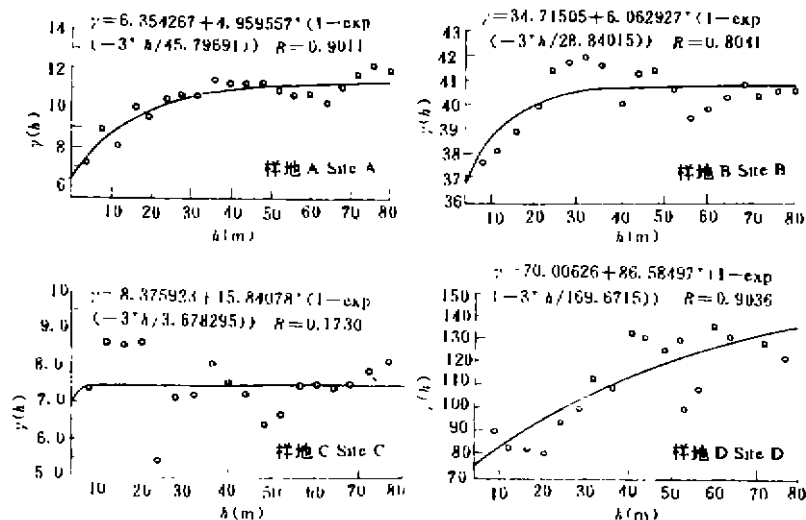


图3 不同样地天牛幼虫的变异曲线图

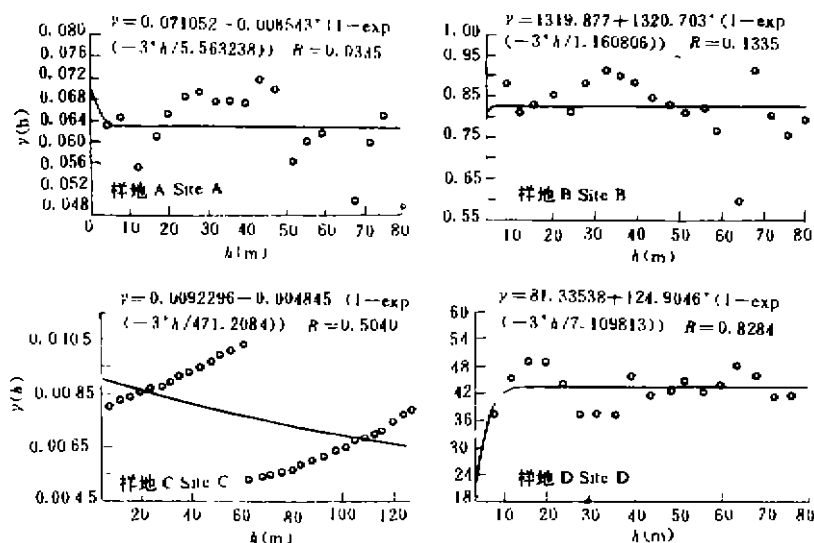
Fig. 3 Variograms for *A. glabripennis* larvae in different sites

图4 不同样地天牛成虫的变异曲线图

Fig. 4 Variograms for *A. glabripennis* adults in different sites

以变程 a 对样方大小作图, 见图 5。

从图 5 可以看出, 在样方较小时, 变程也较小; 而当样方达到一个合适的大小时, 变程较为稳定; 样方很大时, 变程反而减小。因此, 在合适的样方大小下, 变程是相对稳定的。这种稳定性可以看作是种群的内在因素引起的, 而与调查时的所选取的样方无关。样方太小时, 样方间的数据差异很大, 这种差异足以掩盖

表 1 不同样方下天牛卵的变异曲线图的参数

Table 1 Parameters of variograms for *A. glabripennis* eggs at different grid size

样方大小 Size (m ²)	变程 a Range	块金常数 C_0 Nugget	基台值 S Sill	C_0/S Nugget	$1-C_0/S$
2×2	34.1240	62.2801	83.5022	0.7459	0.2542
3×3	40.1110	87.0798	139.5774	0.6239	0.3761
4×4	40.1506	120.2632	193.1914	0.6225	0.3775
5×5	41.0840	141.8825	250.8267	0.5657	0.4343
6×6	39.6276	145.0287	314.7859	0.4607	0.5393
7×7	40.1213	183.8928	405.2552	0.4538	0.5462
8×8	26.4941	-15.2056	456.5334	-0.0333	1.0333
9×9	25.7598	-134.9270	551.2080	-0.2448	1.2488

由于空间位置关系而带来的样本值的相关性,当样方太大时,样方间的数据差异不明显,使得各样方的数据在空间形成均匀分布,因而其空间依赖性距离减少,形成纯块金变异图。

以样方边长为 x 轴,以基台为 y 轴作图 6。

从图 6 可以看出,基台与样方的大小呈明显的线性关系,样方越大,基台值也越大。这是由于随着样方增大,其样方内平均值的大小也随之增大的缘故。

以表示局部空间连续性强度的变量 $y=1-C_0/S$ 对样方边长作图 7。

从图 7 可以看出,局部空间连续性强度随样方的增大而呈指数式上升,也就是说,样方越大,天牛卵的空间连续性强度越大。

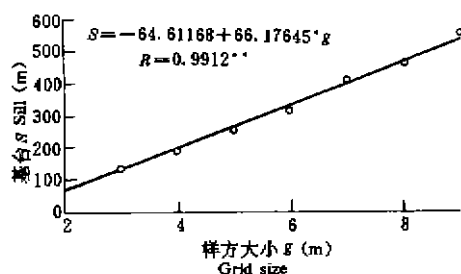


图 6 天牛卵的变异曲线图基台与样方大小的关系

Fig. 6 Relationship between grid size and sill of variograms for *A. glabripennis* eggs

2.2.2 天牛幼虫变异曲线图随样方大小的变化 对不同样方大小下天牛幼虫的变异曲线图运用(4)式进行拟合,将其参数列于表 2。

以变程 a 对样方大小作图 8。

从图 8 可以看出,天牛幼虫变异曲线图的变程在样方较小时随其边长增大,到达一定的距离后又随样方大小而减小。以基台对样方大小作图(见图 9),可以发现同卵一样,基台值与样方边长间呈线性增加的趋势。

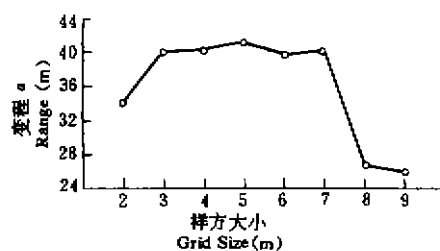


图 5 天牛卵的变异曲线图变程与样方大小的关系

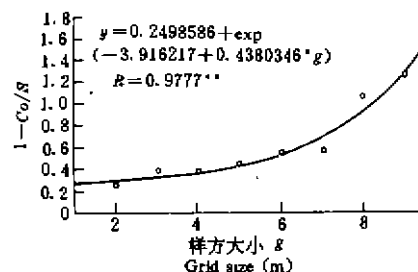
Fig. 5 Relationship between grid size and range for *A. glabripennis* eggs

图 7 天牛卵的局部空间连续性强度与样方大小的关系

Fig. 7 Relationship between grid size and local spatial continuity of variograms for *A. glabripennis* eggs

表 2 不同样方下天牛幼虫变异曲线图的参数

Table 2 Parameters of variograms for *A. glabripennis* larvae at different grid size

样方大小(m ²) Grid Size	变程(a) Range	块金常数(C ₀) Nugget	基台(S) Sill	C ₀ /S	1-C ₀ /S
2×2	38.3511	3.6388	5.2134	0.6980	0.3020
3×3	40.4893	5.0950	8.4919	0.6000	0.4000
4×4	45.7969	6.3543	11.3139	0.5616	0.4384
5×5	38.7761	6.8698	14.5718	0.4714	0.5286
6×6	32.0254	6.5294	18.4148	0.3546	0.6454
7×7	27.2636	2.3308	20.3349	0.1146	0.8854
8×8	42.6955	16.2962	31.1284	0.5235	0.4765
9×9	20.9202	-14.0215	31.2143	-0.4492	1.4492

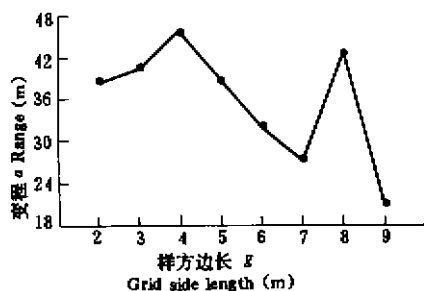


图 8 天牛幼虫变异曲线图变程与样方大小的关系

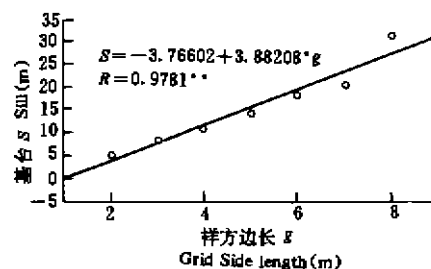
Fig. 8 Relationship between grid size and range of variograms for *A. glabripennis* larvae

图 9 天牛幼虫变异曲线图基台与样方大小的关系

Fig. 9 Relation between grid size and sill of variograms for *A. glabripennis* larvae

2.2.3 天牛成虫变异曲线图随样方大小的变化 将不同样方大小的天牛成虫的变异曲线图绘制后发现,除长度为 5m 和 6m 外,其它样方下天牛成虫的变异曲线图均表现为纯块金变异图,而在样方为 5m×5m 时,变程为 19.42m,块金常数与基台的比值达到 69.14%,样方为 6m×6m 时,变程为 20.45m,块金常数与基台的比值为 89.27%。也就是说此时天牛成虫的空间依赖性距离为 19.42~20.45m,但局部空间连续性强度只占总方差的 10%~30%,很接近纯块金变异图。

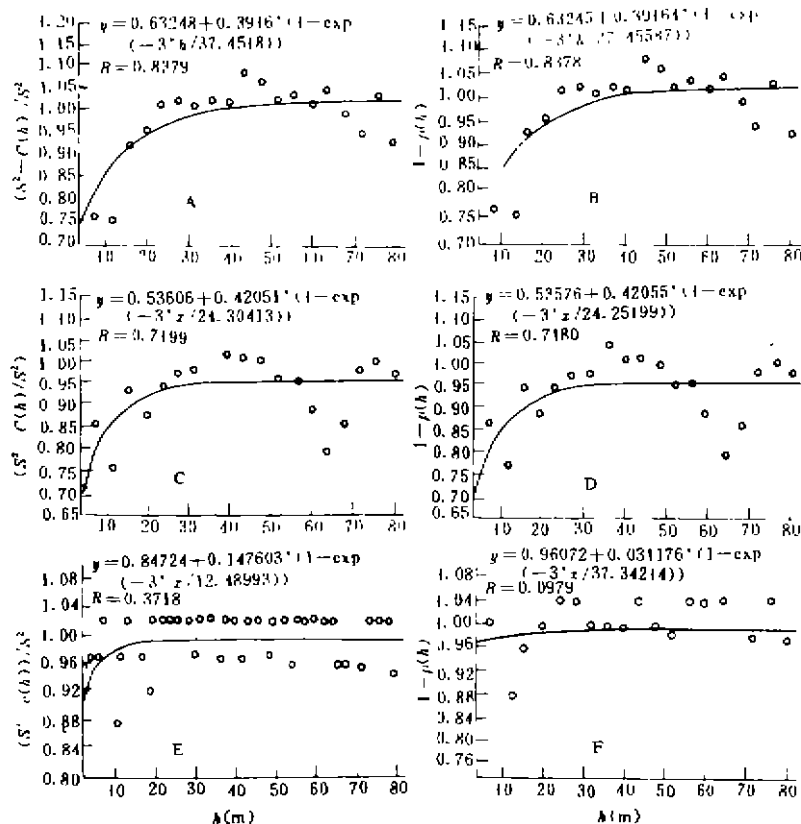
2.3 不同发育阶段的空间协方差图和迟滞相关图

以样地 A 为例,分别根据公式(5)、(6)计算天牛不同发育阶段的空间协方差和迟滞相关度,按(7)、(8)、(9)式标准化后对间隔距离 h 作图,见图 10。

从图 10 可以看出,对于天牛的卵和幼虫,标准化后的空间协方差图和迟滞相关图很相似,其变程、块金常数和基台值均很接近,因此样地 A 中天牛卵的数量没有随位置变化而呈现某种倾向性变化,满足恒等变换的条件;将它们与变异曲线图比较后发现,卵的变程(37.45m)比变异曲线图中的(40.15m)略有减少,空间不连续性强度(即块金常数与基台值之比)则很接近(0.617),而幼虫的变程(24.3m)与变异曲线图中的(45.8m)相差很大,这可能是由于幼虫的分布随位置出现某种趋势的波动,因此要把这三者结合起来才能得出可靠的结论。对于天牛成虫,由于块金常数所占的比例很高(达 85.2%~96.9%),均接近纯块金变异图,此时各曲线图间的参数相差很大,因而只根据某一个方面得出结论是不可靠的。

3 小结与讨论

3.1 在各种林型中天牛卵的数量都具有空间依赖性,其变程为 20~40m。因而卵在空间的分布具有连续性,强度随距离的延长而减小,其局部空间连续性强度为 0.26~0.47;在 4 种林型中,农田和干渠防护林型



A 卵的空间协方差图 Spatial covariance for eggs, B 卵的迟滞相关图 Lag correlogram for eggs.
C 幼虫的空间协方差图 Spatial covariance for larvae, D 幼虫的迟滞相关图 Lag correlogram for larvae, E 成虫的空间协方差图 Spatial variance for adults, F 成虫的迟滞相关图 Lag correlogram for adults.

图 10 天牛不同虫态的空间协方差图和迟滞相关图

Fig. 10 Spatial covariance and lag correlogram for different stages of *A. glabripennis*

天牛卵的变程较长,村庄防护林次之,干道防护林最小;就样方内的空间连续性强度而言,其大小依次为干道、农田、干渠和村庄防护林。

3.2 样地 A 和 B 上的天牛幼虫数量具有空间依赖性,其变程为 28~46m,局部空间连续性强度为 0.14~0.43;样地 C 中的变异曲线图表现为纯块金变异图,这表明此样地的天牛幼虫数量在空间的分布是随机的;样地 D 中的变程超出了抽样的空间范围,说明在抽样空间内各点的幼虫数量间均有空间相关性,其局部空间连续性强度为 0.55。对比各林型的变程可知,天牛幼虫的空间依赖性距离从大到小依次为干渠、农田、村庄、干道防护林;就局部空间连续性强度而言,从大到小依次为干道、干渠、农田和村庄防护林。

3.3 在样地 A, B, D 中天牛成虫的变异曲线图均为纯块金变异图,它们在空间的分布是随机的;在样地 C 中由于成虫数量太少因而出现一种特殊的变异曲线图形式。

3.4 通过比较天牛卵和幼虫在不同样方大小下的变异曲线图得知:在合适的样方大小下,变程相对稳定,不随样方大小而变化;基台值与样方大小呈明显的线性关系,样方越大,基台值也越大;局部空间连续性强度随样方的增大而呈指数式上升。

3.5 对标准化后的空间协方差图、迟滞相关图和变异曲线图进行比较后发现:天牛卵的变程、空间不连续性强度均很接近;而幼虫有的比较相近,有的相差较大;成虫的则都相差很大。这说明必须把这三者综合起

来进行考虑,才能找到空间依赖性的正确距离。

3.6 由于调查年限较短,调查资料有限,应用地统计学对天牛种群在时间上的依赖性与连续性的研究有待以后进一步完成。地统计学与地理信息系统(GIS)结合,描述和量化昆虫种群的空间关系,运用 Krige 空间插值法产生虫情的空间分布图,从而为大中尺度上的发生风险预测提供理论依据,是它以后得以广泛应用的主要方向。

参 考 文 献

- 1 Liebhold A M, Rossi R E, Kemp W P. Geostatistics and geographic information systems in applied insect ecology. *Annu Rev. Entomol.* 1993, **38**: 313~327
- 2 Gribko L S *et al.* Model to predict gypsy moth defoliation using kriging and logistic regression. *Environ. Entomol.* 1995, **24**(3): 529~537
- 3 Hohn M E, Liebhold A M, Gribko L S. Geostatistical model for forecasting spatial dynamics of defoliation caused by the gypsy moth (Lepidoptera: Lymantridae). *Environ. Entomol.* 1993, **22**(5): 1066~1075
- 4 Kemp W P, Kalans T M, Qumby W F. Rangeland grasshopper (Orthoptera: Acrididae) spatial variability: macroscale population assessment. *J. Econ. Entomol.* 1989, **82**: 1270~1276
- 5 Liebhold A M, Elkinton J S. Characterizing spatial patterns of gypsy moth regional defoliation. *Forest Science*, 1989, **35**(2): 557~568
- 6 Nestel D, Klein M. Geostatistical analysis of leafhopper (Homoptera: Cicadellidae) colonization and spread in deciduous orchards. *Environ. Entomol.* 1995, **24**(5): 1032~1039
- 7 Liebhold A M, Zhang X, Hohn M E. *et al.* Geostatistical analysis of gypsy moth (Lepidoptera: Lymantridae) egg mass populations. *Environ. Entomol.* 1991, **20**(5): 1407~1417
- 8 Schotzko D J, O'Keefe L E. Geostatistical description of the spatial distribution of *Lygus hesperus* (Heteroptera: Miridae) in lentils. *J. Econ. Entomol.* 1989, **82**(5): 1277~1288
- 9 侯景儒,黄竞先.地质统计学的理论和方法.北京:地质出版社,1990
- 10 Rossi R E, Mulla D J, Journel A G. *et al* Geostatistical tools for modeling and interperung ecological spatial dependence. *Ecol. Monographs*. 1992, **62**(2): 277~314
- 11 王广德,过常龄."Kriging"空间内插技术在地理学中的应用.地理学报,1987, **42**(4): 366~375
- 12 李天生,周国法.空间自相关与分布型指数研究.生态学报,1994, **14**(3): 327~331