不同受害油松林内红脂大小蠹空间格局的地统计学研究*

高丙涛** 任利利 蒋 琦 刘漪舟 俞琳锋 骆有庆***

（北京林业大学，林木有害生物防治北京市重点实验室，北京 100083）

摘 要 【**目的**】红脂大小蠹 *Dendroctonus valens* LeConte 是我国一种危害松林的重大入侵害虫，近年其分布区逐步向北扩散，严重威胁我国北方松林生态安全。本文研究了在新入侵地红脂大小蠹侵入孔的空间格局，以期为监测和防治红脂大小蠹提供参考。【**方法**】应用地统计学方法，分析不同受害程度的油松林内和重度受害油松林内不同时间的红脂大小蠹成虫侵入孔的空间分布格局。【**结果**】红脂大小蠹当年侵入孔在不同受害程度林分内均为聚集分布，但空间结构具有差异。轻度和中度受害林内，最优拟合模型为球状模型，空间依赖范围分别是 2.060 m 和 2.400 m；过火后的重度受害林内最优拟合模型为指数模型，空间依赖范围为 38.610 m，未过火的重度受害林内最优拟合模型为高斯模型，空间依赖范围是 2.633 m；未过火的 3 种林分内局部空间连续性均大于 94%，而过火林内局部空间连续性小于 90%。重度受害林内往年侵入孔呈聚集分布，最优拟合模型是高斯模型，空间依赖范围为 2.754 m，局部空间连续性为 99.9%。通过比较往年和当年侵入孔等值线与矢量叠加图，发现红脂大小蠹由中心向四周扩散。【**结论**】红脂大小蠹侵入孔呈明显的聚集分布，并以虫源树为中心向周围扩散。

关键词 红脂大小蠹；新入侵地；受害程度；地统计学；聚集分布

Geostatistical analysis of the spatial distribution of *Dendroctonus valens* in *Pinus tabuliformis* forests with different levels of infestation

GAO Bing-Tao** REN Li-Li JIANG Qi LIU Yi-Zhou YU Lin-Feng LUO You-Qing***

(Beijing Key Laboratory for Forest Pest Control, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract **[Objectives]** To analyze the spatial distribution of *Dendroctonus valens* LeConte, a major invasive pest that threatens the ecological security of pine forests in northern China. **[Methods]** The spatial distribution of entrance holes in four infested forests with different levels of infestation was studied using geostatistical methods. **[Results]** *D. valens* had an aggregated distribution in different forests, but its spatial distribution differed with level of infestation. The spherical model best approximated the spatial distribution in lightly and moderately infested forest in which spatial dependence ranges were 2.060 m and 2.400 m, respectively. The exponential model best approximated the spatial distribution in severely infested （post-fire）forest, in which the spatial dependence range was 38.610 m. The Gaussian model best approximated the spatial distribution in a severely infested forest, in which the spatial dependence range was 2.633 m. The intensity of local spatial continuity in three forests that had not been burned was greater than 94%, but was less than 90% in forests that had been burnt. Old entrance holes in severely infested forests were also aggregated. The best-fitting model was a Gaussian model with a spatial dependence range of 2.754 m and local spatial continuity of 99.9%. Comparing overlay isoline and vector maps of new and old entrance holes revealed that *D. valens* spreads from the center to the periphery of branches. **[Conclusion]** *D. valens*

*资助项目 Supported projects：国家重点研发计划“人工林重大灾害防控关键技术研究”（2018YFD0600200）；北京市科技计划“北京生态公益林重大有害生物防控关键技术”（Z191100008519004）

**第一作者 First author，E-mail：gaobingtao@126.com

***通讯作者 Corresponding author，E-mail：youqingluo@126.com

收稿日期 Received：2019-08-24；接受日期 Accepted：2020-01-15

has a clearly aggregation distribution and spreads around old trees in newly colonized areas.

Key words *Dendroctonus valens*; new range; infestation levels; geostatistics; aggregated distribution

红脂大小蠹 *Dendroctonus valens* LeConte，属小蠹科 Scolytidae，大小蠹属 *Dendroctonus*，是一种原产于北美洲的钻蛀性害虫，于 20 世纪 80 年代随木材进口传入我国，并不断扩散。目前已扩散至山西、陕西、河北、河南、北京等省（市）的大部分地区和甘肃、青海、内蒙古、辽宁等省的个别县市（张海风，2011；王涛等，2012；杨爽，2017）。红脂大小蠹为一雌一雄制家族类型，越冬翌年出孔后，雌成虫寻找寄主蛀孔侵入，并释放信息素吸引雄虫进入，取食韧皮部形成母坑道，并产卵于坑道一侧，幼虫群集蛀食，共同蛀坑，因此成虫侵入孔的数量可以代表种群数量（徐公天和杨志华，2007）。

昆虫的空间格局是重要的种群特征，研究并揭示种群的空间结构，可以为抽样调查和虫情测报提供理论基础，是研究其暴发机制和制定防治策略的前提（丁岩钦，1994；章一巧等，2012；俞琳锋等，2017；陈潜等，2018）。苗振旺（2002）、李明（2003）、李建康等（2006）及潘杰等（2010）先后用传统的生物学统计方法对红脂大小蠹的空间格局、防治指标和抽样技术等方面进行了研究，结果表明红脂大小蠹在林间呈聚集分布，但是传统的空间分布格局分析认为样本间是相互独立的，研究对象为纯随机变量，忽略了研究对象的空间分布位置，无法反映局部的变化特征，得到的结果在很大程度上依赖取样单位的大小。而地统计学方法能最大限度地揭示空间相关性和依赖性，克服昆虫种群空间格局动态研究中处理多维空间数据的困难性和复杂性，已被广泛应用于昆虫种群空间分布的研究（李友常等，1997；宗世祥等，2005；张蓉等，2007；胡瑜珩等，2015）。刘君（2007）分别用传统生物学统计方法和地统计学方法研究了不同采样尺度下红脂大小蠹侵入孔的空间分布格局；潘杰等（2011a）用地统计学方法研究了油松纯林和混交林两种林分内红脂大小蠹种群的空间分布特性，但两者的结论却不同。作为一种入侵生物，红脂大小蠹在中国的危害特点与其原分布地差异很大，即使在国内由于气候和林分立地环境的差异，该虫在不同地区的生活史和发生规律也有所不同（李明，2003；王毅，2004；赵建兴等，2008；潘杰等，2011b）。鉴于上述新的发生危害情况，本文对辽宁省凌源市和建平县油松 *Pinus tabuliformis* 林的受害情况进行调查，并应用地统计学方法，对新入侵地不同受害程度的油松林（轻度受害林、中度受害林、过火和未过火的重度受害林）内红脂大小蠹成虫侵入孔的空间分布格局进行研究，以明确 4 种受害油松林内红脂大小蠹成虫侵入孔空间结构特征的差异，探究红脂大小蠹的自然扩散方式，为采取合理的防控措施提供参考与依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

建平县地处辽宁省西部，与内蒙古自治区交界，境内丘陵起伏，为燕山山脉向辽沈平原的过渡地带，属北温带半湿润半干旱季风型大陆性气候，全年平均气温 7.6 ℃。试验样地设在张家营子乡油松林内，海拔 700 m 左右，树种主要为油松，林内有少量杨树，林下植被为草本。2016 年曾发生火灾，2017 年 7 月，在褐梗天牛 *Arhopalus rusticus* Linnaeus 诱捕器内发现红脂大小蠹成虫，随后展开调查，在过火林内及周边区域的油松上发现红脂大小蠹侵入孔和幼虫。

凌源市地处辽宁省西部，位于辽宁、河北、内蒙古省（区）交会处，与建平县相邻。凌源市的气候类型为中纬度温带大陆性季风气候，年平均气温 8.7 ℃。样地设在大河北乡油松林，海拔 500-560 m，林下植被丰富，多荆条、绣线菊等灌木和草本植物。2017 年 7 月，发现油松枯死，在林内发现红脂大小蠹危害状。

2017 年 8 月，根据《林业有害生物发生（危害）程度标准》，轻度受害林：有虫株率 2%-6%；中度受害林：有虫株率 7%-13%；重度受害林：有虫株率>13%。本研究选取不同受害程度的油松林作为试验地。样地基本信息见表 1。

表 1　样地基本情况

Table 1　Basic information of the stands

样地编号 Stand number	地点 Location	受害程度 Infested level	油松株数（株） Number of *P. tabuliformis*	平均树高（m） Average height	平均胸径（cm） Average diameter at breast height	受害株率（%） Rate of infested trees
1	建平县张家营子乡 Zhangjiayingzi township, Jianping county	轻度受害 Lightly infested	298	7.8	8.9	4.0
2	建平县张家营子乡 Zhangjiayingzi township, Jianping county	中度受害 Moderate infested	236	9.5	10.8	9.3
3	建平县张家营子乡 Zhangjiayingzi township, Jianping county	重度受害（过火） Severe infested (post-fire)	204	10.9	11.5	22.2
4	凌源市大河北乡 Dahebei township, Lingyuan city	重度受害 Severe infested	69	13.3	14.5	49.3

1.2　研究方法

1.2.1　样地调查方法　在建平县和凌源市油松林内选取 4 块面积为 30 m×30 m 受害程度不同的标准地，逐株调查样地内每株油松的胸径、树高、当年和往年侵入孔的数量，测量株行距并在坐标纸上绘制每株树的相对空间位置。

1.2.2　分析方法

（1）半变异函数

半变异函数也称半方差函数，是应用地统计学研究空间结构的常用函数之一，指区域化变量 $Z(x_i)$ 和 $Z(x_i+h)$ 的增量平方的数学期望，即区域化变量增量的方差。其计算公式为：

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

式中：$\gamma(h)$ 为两样点空间分隔距离 h 的半方差函数值，$N(h)$ 是间隔 h 的数据对 (x_i, x_i+h) 的数量，$Z(x_i)$ 和 $Z(x_i+h)$ 分别是在点 x_i 和 x_i+h 处样本的测量值。

半变异曲线图（图 1）是 $\gamma(h)$ 对间隔距离 h 的函数图，图中块金常数（Nugget）、基台值（Sill）、和变程（Range）是 3 个最重要的参数。块金常数指函数曲线在纵轴的截距，表示原点处半变异函数的不连续性，反映区域化变量的局部随机性大小，用 C_0 表示。基台值是半方差函数值不再随距离增大而增加时的值，反映区域化变量的变化幅度。变程又称空间依赖范围，是指半方差函数值达到基台值时的间隔距离，反映区域化变量的自相关范围（王正军等，2002）。

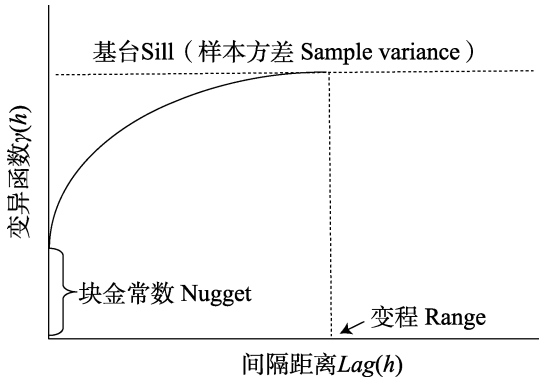

图 1　半变异函数模式图

Fig. 1　A schematic diagram of semivariogram

（2）半变异函数理论模型的拟合

半变异函数常用的理论模型有线性、指数、球状和高斯 4 种模型，其中线性模型表示种群在空间上随机或均匀分布，其他 3 种均表示种群聚集分布，但不同的模型所揭示的空间结构存在差异。拟合模型的选择要依次考虑决定系数、残差平方和、变程和块金常数的大小。本文使用 GS+ 9.0 软件拟合红脂大小蠹侵入孔空间分布格局的理论模型（杨秀好等，2015；俞琳锋等，2015）。

（3）空间分布图的生成

选择最优拟合模型后，利用 Kriging 插值法对样地中红脂大小蠹的侵入孔数量进行插值分

析，借助 Surfer 8.0 软件生成空间分布图。

2 结果与分析

2.1 不同受害程度油松林内红脂大小蠹侵入孔的变异函数和空间格局

不同受害程度油松林内红脂大小蠹当年侵入孔的空间格局半变异函数拟合模型参数及空间格局见表 2。由表 2 可知，4 种林分内红脂大小蠹的空间格局均为聚集分布，但拟合模型与空间结构存在差异。

2.1.1 轻度受害林内红脂大小蠹侵入孔数量的空间格局分析 表 2 和图 2 显示，轻度受害林内红脂大小蠹侵入孔的空间分布格局的最优拟合模型为球状模型，决定系数为 0.699，变程为 2.060 m，表明样地内红脂大小蠹侵入孔呈聚集分布，间隔距离小于 2.060 m 的任意两样点都具有相关性，且强度随距离增大而逐渐降低。空间变异值为 1.00，表明总空间变异 100%是由空间自相关产生的，说明样地内红脂大小蠹的聚集性非常强。

由图 2（B）可以看出，在轻度受害林内红脂大小蠹种群数量低，侵入孔的空间分布具有较强的聚集性，样地内仅有几个聚集点，分布在调查样地内右下部，由聚集点中心区域向四周逐渐减小，样地左上部油松未受害，推测可能因为样地右下部靠近林缘，郁闭度相对林内较低，更适合红脂大小蠹的活动与繁殖。

表 2 不同受害程度油松林内侵入孔的半变异函数拟合模型参数及空间分布

Table 2 Parameters of semivariogram models and spatial distribution for entrance holes of *Dendroctonus valens* in different infested level forests

受害程度 Infested level	理论模型 Theoretical models	块金常数 C_0	拱高 C	变程 A	基台值 Sill	空间变异 C/Sill	决定系数 R^2	残差平方和 RSS	分布格局 Distribution pattern
轻度受害 Lightly infested	球状模型 Spherical model	0.000	0.226	2.060	0.226	1.000	0.699	4.806×10^{-3}	聚集分布 Aggregation distribution
中度受害 Moderate infested	球状模型 Spherical model	0.057	0.983	2.400	1.040	0.945	0.806	0.038	聚集分布 Aggregation distribution
重度受害（过火） Severe infested (post-fire)	指数模型 Exponential model	0.460	3.874	38.610	4.334	0.894	0.813	2.380	聚集分布 Aggregation distribution
重度受害 Severe infested	高斯模型 Gaussian model	0.010	17.400	2.633	17.410	0.999	0.514	272.000	聚集分布 Aggregation distribution

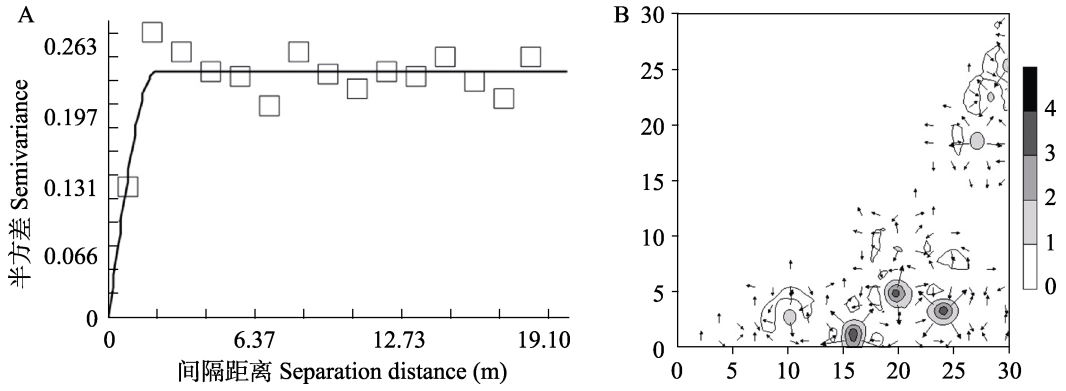

图 2 轻度受害林内侵入孔数量的半变异函数图（A）和等值线与矢量叠加图（B）

Fig. 2 Semivariogram (A), overlay map of isoline and vector (B) of the number for entrance holes in lightly infested forests

2.1.2　中度受害林内红脂大小蠹侵入孔数量的空间格局分析　表 2 和图 3 显示，中度受害林内红脂大小蠹侵入孔的空间分布格局最优拟合模型为球状模型，决定系数为 0.806，变程为 2.400 m，即样地内任意间隔距离小于 2.400 m 两样点的红脂大小蠹种群数量都具有相关关系，且相关性随距离增大而逐渐减小。空间变异值为 0.945，表明总空间变异中 94.5%是由空间自相关产生的，5.5%由随机性产生的。

由图 3（B）可以看出，红脂大小蠹在中度受害油松林内呈聚集状态，种群数量大于轻度受害林，林内有多个聚集点，分布较为均匀，推测可能因为该林分环境较为一致，红脂大小蠹初期选择寄主时具有随机性。

2.1.3　重度受害（过火）林内红脂大小蠹侵入孔数量的空间格局分析　表 2 和图 4 显示，重度受害（过火）林内红脂大小蠹侵入孔的空间分布格局最优拟合模型为高斯模型，决定系数为 0.813，变程为 38.610 m，大于样地大小，表明样地内任意两样点的红脂大小蠹种群数量间都具有一定相关关系。半变异函数图中拱高 *C* 所占的比例为 0.984，说明总空间变异中 89.4%是由空间自相关产生的。

由图 4（B）可以看出，重度受害（过火）林内侵入孔主要呈片状聚集在样地右下部。结合实地调查发现，该样地右下部油松树干过火但未枯死，表明该类油松对红脂大小蠹有较强的诱集效果。

2.1.4　重度受害林内红脂大小蠹侵入孔数量的空间格局分析　表 2 和图 5 显示，重度受害林内红脂大小蠹侵入孔的空间分布格局最优拟合模型为高斯模型，决定系数为 0.514，拟合模型的

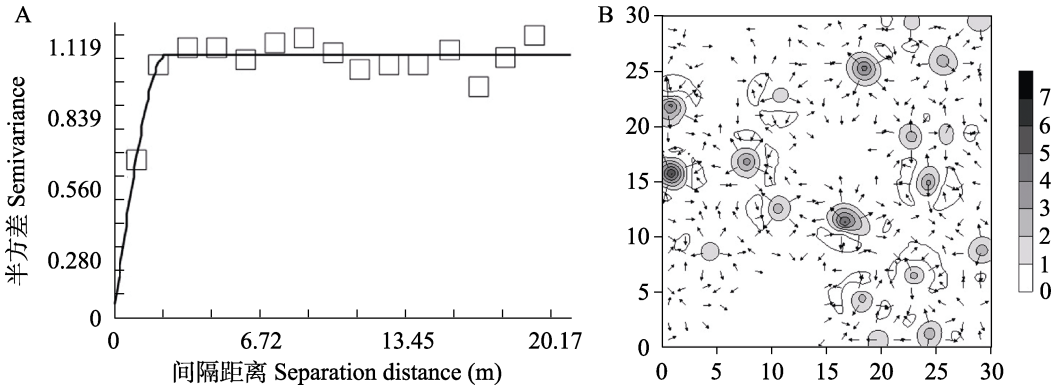

图 3　中度受害林内侵入孔数量的半变异函数图（A）和等值线与矢量叠加图（B）

Fig. 3　Semivariogram (A), overlay map of isoline and vector (B) of the number for entrance holes in moderate-infested forests

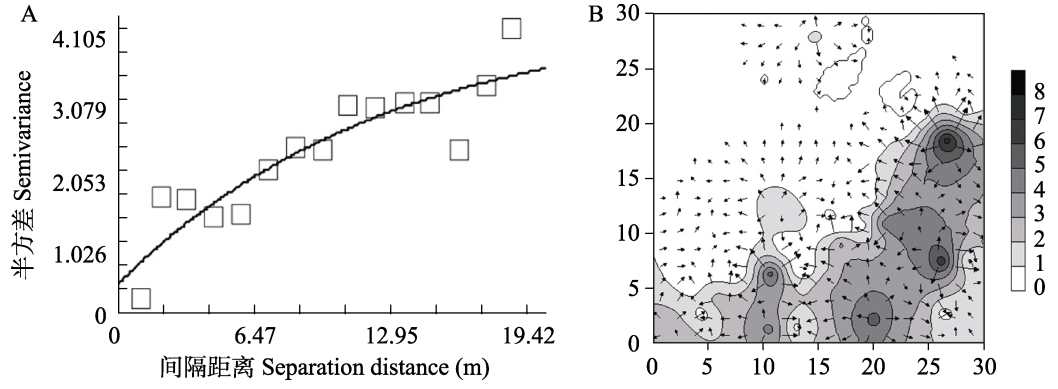

图 4　重度受害（过火）林内侵入孔数量的半变异函数图（A）和等值线与矢量叠加图（B）

Fig. 4　Semivariogram (A), overlay map of isoline and vector (B) of the number for entrance holes in severe-infested (post-fire) forests

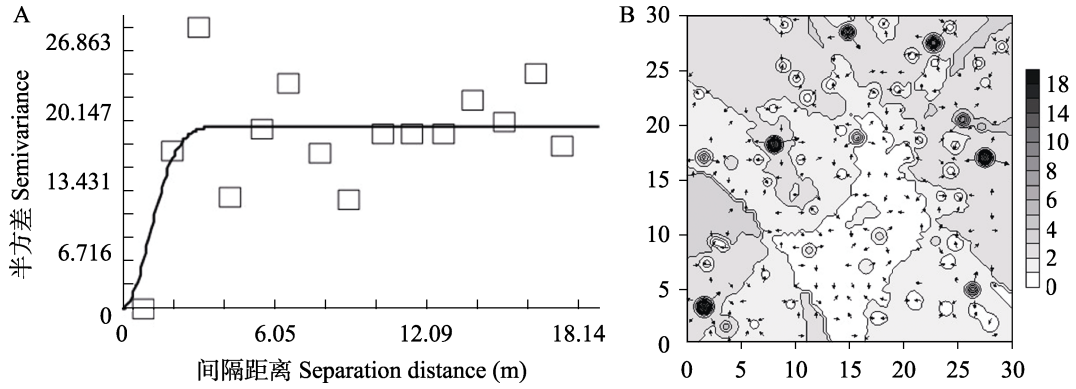

图 5　重度受害林内侵入孔数量的变异函数图（A）和等值线与矢量叠加图（B）

Fig. 5　Semivariogram (A), overlay map of isoline and vector (B) of the number for entrance holes in severe-infested forests

残差平方和（RSS）为 272，可能是因为该林分较稀疏，样本数量较少导致的。变程为 2.633 m，即样地内距离小于 2.663 m 的任意两样点的红脂大小蠹种群数量都具有相关关系。空间变异值 0.999，表明总空间变异中 99.9%是由空间自相关产生的。

由图 5（B）可以看出，在重度受害林分中，红脂大小蠹侵入孔基本上呈斑块状聚集分布，整个区域内侵入孔数量明显高于前 3 种林分，且林内有多个聚集点，主要分布在靠近样地边缘的区域，侵入孔数量分别由聚集点中心区域向四周逐渐减小。

2.2　重度受害林内不同年份红脂大小蠹侵入孔空间格局的空间分布

由图 6 可知，在该林分内红脂大小蠹往年侵入孔呈明显的聚集分布，最优拟合模型也是高斯模型，空间依赖范围为 2.754 m，总空间变异中空间自相关所占比例为 99.9%，旧侵入孔在林内呈斑块状分布并有多个聚集点，多分布在靠近中心的区域，每个聚集点则分别由中心区域向四周逐渐减小。

比较重度受害林内往年和当年侵入孔空间分布格局发现该林分受害严重，红脂大小蠹种群数量有所增加，但其均为明显的聚集分布，空间依赖范围没有显著变化，总空间变异中空间自相关所占的比例均为 99.9%，空间结构相似（图 5，图 6）。比较两者的等值线与矢量叠加图可以发现，在旧侵入孔分布较集中的中心区域新侵入孔较少，红脂大小蠹由样地中心区域向样地边缘扩散（图 5：B，6：B），结合实地调查发现，旧侵入孔数量集中的中心区域的油松大多枯死，推

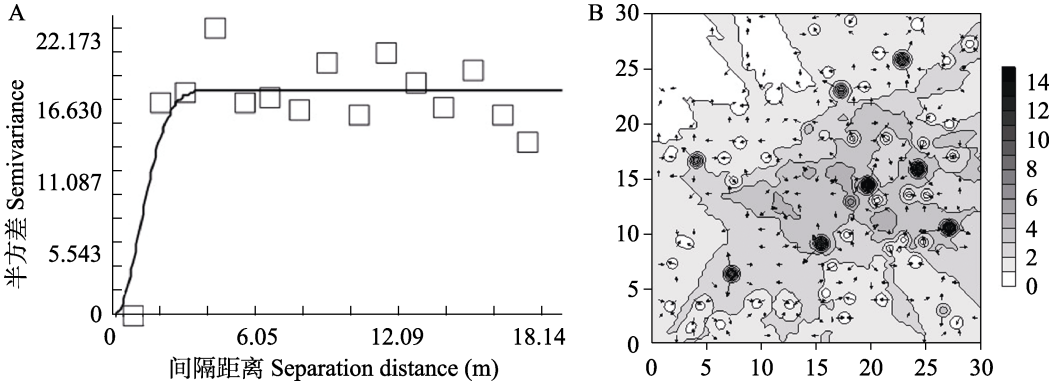

图 6　重度受害林内旧侵入孔数量的半变异函数图（A）和等值线与矢量叠加图（B）

Fig. 6　Semivariogram (A), overlay map of isoline and vector (B) of the number for old entrance holes in severe-infested forests

测在资源充足时红脂大小蠹以虫源树为中心向周围就近扩散。

3　讨论

空间相关在种群内和种群间普遍存在，但使用经典统计学方法如频次比较、聚集度指标、扩散型指数等研究昆虫种群空间分布时仅仅统计了频率分布，其结果仅是一些空间分布的定性信息，忽略了这种空间相关性，导致实际值与估计值之间存在系统偏差，无法反映变量的局部变化特征（周强等，1998；王正军等，2002）。而 Olsen 等（1996）及 Gilbert 等（2003）研究发现林内小气候和微环境会影响小蠹种群的空间分布和结构。点格局分析函数也是一种空间格局分析方法，在植物种群空间格局研究中应用较广泛，而在昆虫种群空间格局研究中应用较少。该方法把种群中的生物个体视为二维平面上的一个点，根据点的坐标绘制点图，以点图为基础分析种群空间格局，每个点只有质的区别而不考虑量的变化。地统计学方法的内在假设是空间相关，即空间上某一位置的变量值总与附近位置的值相似或接近，该方法能定量地描述区域化变量的随机性和结构性变化，并可以模拟空间分布（欧阳芳等，2009）。本研究中红脂大小蠹侵入孔在油松林内分布的位置和数量都存在差异，所以选择地统计学方法进行分析，最大限度地利用野外调查所获得的各种信息。

基台值反映了变量的变化幅度（王正军等，2002），本研究中即侵入孔的数量的变化幅度。本研究比较轻度、中度和重度受害油松林内当年侵入孔的空间分布格局，发现重度受害林基台值（Sill）远大于中度受害林和轻度受害林的，推测基台值的差异是因为不同程度受害林内红脂大小蠹种群数量不同，重度受害林林分稀疏且受害时间较长，林内红脂大小蠹种群数量远大于轻度和中度受害林。轻度、中度和重度受害三种林分内变程（A）逐渐增大，表明种群空间依赖关系减小，聚集程度降低。中度受害林内空间变异系数（*C*/Sill）小于轻度和重度受害林，块金值（C_0）大于轻度和重度受害林，说明中度受害林中的空间格局中随机性大于另外两种林分，但 3 种林分内空间自相关占总空间变异的比例均大于 90%，红脂大小蠹仍表现为明显的聚集分布。这种现象的原因可能是：①中度受害林内环境较一致，红脂大小蠹初期选择寄主时存在一定的随机性，但后期受到信息素的吸引而聚集；②中度受害林靠近农田，受人为活动影响较大。这一研究结果与前人的研究存在差异。刘君（2007）的地统计学分析结果显示，在红脂大小蠹种群密度较小、林间被害率小于 15%的情况下，种群呈现小尺度下随机分布，大尺度下较弱聚集的分布格局，与本研究的结果相反；而潘杰等（2011a）的研究结果表明红脂大小蠹种群在油松纯林内为聚集分布，但是空间格局的随机性和空间依赖范围都大于本研究。这些差异可能是种群发展阶段和人为干扰强度不同导致的（Liebhold *et al.*，1995），本研究区域为红脂大小蠹新入侵地，种群处于上升阶段，即使重度受害林内油松枯死率仅为 10%，小蠹食物资源依然充足，而且研究区域未采取任何防治措施，人为干扰因素少。

比较过火与未过火的重度受害林内当年侵入孔的空间分布格局，发现未过火林内的基台值（Sill）远大于过火林，原因是未过火的重度受害林内红脂大小蠹种群已经过至少两年的发展，数量远大于过火林内。过火林内的变程（*A*）和块金值（C_0）大于未过火林分，空间变异系数（*C*/Sill）小于未过火林分，以上 3 个指标表明过火林内侵入孔的空间依赖关系减弱，红脂大小蠹聚集程度降低。推测原因是油松过火后树势下降，林内适合红脂大小蠹的寄主增多，而且过火油松的挥发物可能会影响信息素的作用，导致红脂大小蠹的聚集性低于未过火林分。红脂大小蠹聚集分布在过火但未死亡的油松区域（图 4：B），说明此类油松对红脂大小蠹有较强的引诱作用，相关研究也发现过火林红脂大小蠹受害重于未过火林分的（赵建兴等，2008；原永谦和徐小军，2011），因此过火林及周边区域应作为红脂大小蠹的重点监测区域。未来可以对过火油松的挥发物进行研究，为引诱剂的改进提供参考。

对比重度受害林内往年和当年侵入孔的空

间分布发现，两者均为聚集分布，空间依赖范围和局部空间连续性强度均没有显著变化（图 5，图 6）。从空间分布图（图 5：B:；图 6：B）可以看出，红脂大小蠹以虫源树为中心向周围就近扩散，连年的危害导致油松片状枯死。因此红脂大小蠹成虫扬飞期开始前，对虫源树的及时防治清理是阻止下一代成虫扩散的关键。

关于红脂大小蠹的聚集机制，前人研究（Sun *et al.*，2004；张龙娃等，2007）已证明 3-蒈烯、α-蒎烯等萜烯类寄主挥发物对红脂大小蠹具有强烈的引诱作用，桃金娘烯醇、马鞭草烯酮、顺式马鞭草烯醇等是红脂大小蠹释放的调控种内竞争的多功能信息素物质。成虫扬飞时，雌成虫首先寻找寄主侵入，导致松脂外溢，萜烯类挥发物大量增加，并释放性信息素和聚集信息素，引诱其他成虫形成群集危害，并繁殖大量幼虫群集蛀食同一株油松，破坏寄主的输导组织导致油松系统性枯死。

基于在不同受害程油松林中，红脂大小蠹侵入孔呈明显聚集分布的现象，成虫扬飞期可以通过悬挂诱捕器的方法进行防治，能有效降低林内虫口密度；扬飞期开始前和结束后，对虫源树和新受害树的及时清理与防治，可以降低下一代虫口密度，阻止其进一步扩散，达到综合治理的目的。

由于当地森防部门对受害油松进行了防治或清除，本文未能进行连年调查，对于红脂大小蠹种群的时空动态变化仅能通过新旧侵入孔进行分析，但无法判断往年侵入孔的具体年份，故所获资料有限，对红脂大小蠹种群的时空规律性研究有待进一步完善。此外，本文只对林分尺度的空间格局进行了研究，下一步可以结合 GIS 技术和遥感监测系统，如近几年发展迅速的无人机监测，对区域尺度的红脂大小蠹空间格局进行分析，为虫害预测及防治提供技术支持。

参考文献 (References)

Chen Q, Xu ZC, Zhang LS, Lu PF, Zhang YF, 2018. Geostistical analysis of the spatial distribution of *Arhopalus rusticus* larvae and adults. *Acta Ecologica Sinica*, 38(3): 975–983. [陈潜, 许志春, 张连生, 陆鹏飞, 张永福, 2018. 褐梗天牛幼虫和成虫空间分布的地统计学研究. 生态学报, 38(3): 975–983.]

Ding YQ, 1994. Entomological Mathematics Ecology. Beijing: Science Press. 22–69. [丁岩钦, 1994. 昆虫数学生态学. 北京: 科学出版社. 22–69.]

Hu YH, Wu HW, Xu ZC, 2015. Geostistical analysis on spatial distribution pattern of the larvae of *Batocera horsfieldi*. *Journal of Northwest Forestry University*, 30(5): 165–171. [胡瑜珩, 武海卫, 许志春, 2015. 云斑天牛幼虫空间分布格局的地统计学分析. 西北林学院学报, 30(5): 165–171.]

Liebhold AM, Elkinton JS, Zhou G, Hohn ME, Hossi HE, Boettner GH, Boettner CW, Burnham C, McManus ML, 1995. Regional correlation of gypsy moth (Lepidoptera: Lymantriidae) defoliation with counts of egg masses, pupae, and male moths. *Environmental Entomology*, 24(2): 193–203.

Liu J, 2007. Studies on the population eeology and invasion mechanisms of red turpentine beetle (*Dendroctonus valens*). Master dissertation. Beijing: Chinese Academy of Forestry. [刘君, 2007. 红脂大小蠹种群生态学特性和入侵机制研究. 硕士学位论文. 北京: 中国林业科学研究院.]

Li JK, Li YZ, Li L, He H, Guo XR, Li ML, 2006. Distributional patten and economic thresholds of *Dendroctonus valens*. *Journal of Northwest Forestry University*, 21(5): 109–112. [李建康, 李有忠, 李莉, 贺虹, 郭新荣, 李孟楼, 2006. 红脂大小蠹的分布型与防治指标研究. 西北林学院学报, 21(5): 109–112.]

Li M, 2003. Studies on bioecology and management of the red turpentine beetles. Master dissertation. Baoding: Hebei Agricultural University. [李明, 2003. 红脂大小蠹生物生态学特性及防治研究. 硕士学位论文. 保定: 河北农业大学.]

Li YC, Xia NB, Tu QH, Luo YQ, Wen JB, 1997. A geostatistical analysis on spatial patterns of *Anoplophora glabripennis* in poplars. *Acta Ecologica Sinica*, 17(4): 393–401. [李友常, 夏乃斌, 屠泉洪, 骆有庆, 温俊宝, 1997. 杨树光肩星天牛种群空间格局的地统计学分析. 生态学报, 17(4): 393–401.]

Gilbert M, Fielding N, Evans HF, Grégoire JC, 2003. Spatial pattern of invading *Dendroctonus micans* (Coleoptera: Scolytidae) populations in the United Kingdom. *Canadian Journal of Forest Research*, 33(33): 712–725.

Miao ZW, 2002. Space distribution of entering tree hole of *Dendroctonus vales* imago. *Shanxi Forestry Science and Technology*, (3): 7–9. [苗振旺, 2002. 红脂大小蠹成虫侵入孔的空间分布型研究. 山西林业科技, (3): 7–9.]

Olsen WK, Schmid JM, Mata SA, 1996. Stand characteristics associated with mountain pine beetle infestations in ponderosa pine. *Forest Science*, 42(3): 310–327.

Ouyang F, Ge F, Yuan ZM, Zeng JP, 2009. Edge correction of point pattern analysis' function and its application on spatial pattern analysis of insect population. *Acta Ecologica Sinica*, 29(4): 1804–1813. [欧阳芳, 戈峰, 袁哲明, 曾菊平, 2009. 点格局分析函数的边缘校正及其在昆虫种群格局分析中的应用. 生态学报, 29(4): 1804–1813.]

Pan J, Wang T, Zong SX, Wen JB, Luo YQ, 2010. The spatial distribution pattern and sampling technique of *Dendroctonus*

valens in Beijing. *Chinese Bulletin of Entomology*, 47(6): 1189–1193. [潘杰, 王涛, 宗世祥, 温俊宝, 骆有庆, 2010. 北京地区红脂大小蠹空间分布型与抽样技术研究. 昆虫知识, 47(6): 1189–1193.]

Pan J, Wang T, Zong SX, Wen JB, Luo YQ, 2011a. Geostatistical analysis and sampling technique on spatial distribution pattern of *Dendroctonus valens* population. *Acta Ecologica Sinica*, 31(1): 195–202. [潘杰, 王涛, 宗世祥, 温俊宝, 骆有庆, 2011a. 红脂大小蠹种群空间格局地统计学分析及抽样技术. 生态学报, 31(1): 195–202.]

Pan J, Wang T, Wen JB, Luo YQ, Zong SX, 2011b. Changes in invasion characteristics of *Dendroctonus valens* after introduction into China. *Acta Ecologica Sinica*, 31(7): 1970–1975. [潘杰, 王涛, 温俊宝, 骆有庆, 宗世祥, 2011b. 红脂大小蠹传入中国危害特性的变化. 生态学报, 31(7): 1970–1975.]

Sun JH, Miao ZW, Zhang Z, Zhang ZN, Gillette NE, 2004. Red turpentine beetle, *Dendroctonus valens* LeConte (Coleoptera: Scolytidae), response to host semiochemicals in China. *Environmental Entomology*, 33(2): 206–212.

Wang T, Zong SX, Liu B, Wang GJ, 2012. Study on the occurrence and diffusion of *Dendroctonus valens* in Beijing. *Modern Agricultural Science and Technology*, (16): 124–126. [王涛, 宗世祥, 刘彪, 王广晋, 2012. 北京地区红脂大小蠹发生与扩散规律研究. 现代农业科技, (16): 124–126.]

Wang Y, 2004. Studies on bioecology and management of the *Dendroctonus valens*. Master dissertation. Yangling: Northwest A&F University. [王毅, 2004. 红脂大小蠹生物生态学特性及综合防治研究. 硕士学位论文. 杨凌: 西北农林科技大学.]

Wang ZJ, Li DM, Shang HW, Cheng JA, 2002. Theories and methods of geostatistics and its their application in insect ecology. *Chinese Bulletin of Entomology*, 39(6): 405–411. [王正军, 李典谟, 商晗武, 程家安, 2002. 地质统计学理论与方法及其在昆虫生态学中的应用. 昆虫知识, 39(6): 405–411.]

Xu GT, Yang ZH, 2007. Pest of Ornamental Plants in China. Beijing: China Forestry Publishing House. 350–351. [徐公天, 杨志华, 2007. 中国园林害虫. 北京: 中国林业出版社. 350–351.]

Yang S, 2017. Prevention and control technology of red turpentine beetle (*Dendroctonus valens* LeConte) in new afferent zone. *The Journal of Hebei Forestry Science and Technology*, (2): 53–54. [杨爽, 2017. 红脂大小蠹新传入地区监测和防控技术. 河北林业科技, (2): 53–54.]

Yang XH, Luo YQ, Lan X, Yang ZW, Qin JL, Wei JG, 2015. Spatial distribution pattern of *Endoclita signifier* larvae infestation on *Eucalyptus*. *Journal of Beijing Forestry University*, 37(5): 102–109. [杨秀好, 骆有庆, 蓝霞, 杨忠武, 秦江林, 韦继光, 2015. 桉蝙蛾幼虫危害桉树的空间格局研究. 北京林业大学学报, 37(5): 102–109.]

Yu LF, Wang R, Zhang YR, Zong SX, Luo YQ, 2015. Research on the spatial distribution pattern of three kinds of insect pests on *Hippophae rhamnoides* ssp. *sinensis*. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 31(4): 200–207. [俞琳锋, 王荣, 张燕如, 宗世祥, 骆有庆, 2015. 3 种共同危害沙棘的害虫的空间分布格局研究. 中国农学通报, 31(4): 200–207.]

Yu LF, Huang HG, Ze SZ, Ren LL, Zong SX, Lu WJ, Luo YQ, 2017. Research on the spatial distribution patterns of *Tomicus* sp. in *Pinus yunnanensis* during the shoot feeding period. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 54(6): 940–946. [俞琳锋, 黄华国, 泽桑梓, 任利利, 宗世祥, 卢文娟, 骆有庆, 2017. 云南松林两种切梢小蠹成虫蛀梢期的空间分布格局. 应用昆虫学报, 54(6): 940–946.]

Yuan YQ, Xu XJ, 2011. Study on relationship of occurrence of red turpentine beetle with forest stand factors and production technology of forest. *Shanxi Forestry Science and Technology*, 40(4): 21–24. [原永谦, 徐小军, 2011. 红脂大小蠹发生与营林技术和林分因子关系的研究. 山西林业科技, 40(4): 21–24.]

Zhang HF, 2011. Occurrence and sustainable management of *Dendroctonus valens*. Master dissertation. Yangling: Northwest A&F University. [张海风, 2011. 红脂大小蠹发生规律与可持续控制研究. 硕士学位论文. 杨凌: 西北农林科技大学.]

Zhang LW, Lu M, Liu ZD, Sun JH, 2007. Progress on invasion biology and chemical ecology of red turpentine beetle, *Dendroctonus valens*. *Chinese Bulletin of Entomology,* 44(2): 171–178. [张龙娃, 鲁敏, 刘柱东, 孙江华, 2007. 红脂大小蠹入侵机制与化学生态学研究. 昆虫知识, 44(2): 171–178.]

Zhang R, Leng YF, Zhu MM, Wang F, 2007. Spatial structure analysis and distribution simulation of *Therioaphis trifolii* population based on geostatistical and GIS. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 18(11): 2580–2585. [张蓉, 冷允法, 朱猛蒙, 王芳, 2007. 基于地统计学和 GIS 的苜蓿斑蚜种群空间结构分析和分布模拟. 应用生态学报, 18(11): 2580–2585.]

Zhang YQ, Zong SX, Liu YH, Wen JB, Yan ZW, Luo YQ, 2012. Spatial distribution of *Trabala vishnou gigantina* Yang pupae in Shaanxi province, China. *Acta Ecologica Sinica*, 32(20): 6308–6317. [章一巧, 宗世祥, 刘永华, 温俊宝, 闫占文, 骆有庆, 2012. 陕西省栎黄枯叶蛾蛹的空间分布. 生态学报, 32(20): 6308–6317.]

Zhao JX, Yang ZQ, Ren XH, Liang XM, 2008. Biological characteristics and occurring law of *Dendroctonus valens* in China. *Scientia Silvae Sinicae*, 44(2): 99–105. [赵建兴, 杨忠岐, 任晓红, 梁小明, 2008. 红脂大小蠹的生物学特性及在我国的发生规律. 林业科学, 44(2): 99–105.]

Zhou Q, Zhang RJ, Gu DX, 1998. Review of geostatistics in applied insect population spatial structure. *Zoological Research*, 19(6): 482–488. [周强, 张润杰, 古德祥, 1998. 地质统计学在昆虫种群空间结构研究中的应用概述. 动物学研究, 19(6): 482–488.]

Zong SX, Luo YQ, Xu ZC, Wen JB, Jia FY, 2005. Geostatistical analysis on spatial distribution of *Holcocerus hippophaecolus* eggs and larvae. *Acta Ecologica Sinica*, 25(4): 831–836. [宗世祥, 骆有庆, 许志春, 温俊宝, 贾峰勇, 2005. 沙棘木蠹蛾卵和幼虫空间分布的地统计学分析. 生态学报, 25(4): 831–836.]