

DOI: 10.5846/stxb201708271549

刘永华,郑羽墨,阎雄飞,贺英,陆鹏飞.栎黄枯叶蛾低龄幼虫空间分布的地统计学分析.生态学报,2018,38(15): - .

Liu Y H, Zheng Y M, Yan X F, He Y, Lu P F. Geostatistic analysis on the spatial distribution of *Trabala vishnou gigantina* Yang early stage larvae. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(15): - .

栎黄枯叶蛾低龄幼虫空间分布的地统计学分析

刘永华^{1,*}, 郑羽墨¹, 阎雄飞¹, 贺 英¹, 陆鹏飞²

¹ 榆林学院生命科学学院, 榆林 719000

² 省部共建森林培育与森林保护教育部重点实验室, 北京 100083

摘要:栎黄枯叶蛾(*Trabala vishnou gigantina* Yang)是近年在陕西吴起发现的严重危害沙棘的一种食叶害虫。为了准确把握栎黄枯叶蛾幼虫的分布规律,以便对该虫的危害盛期进行预测预报和采取防治措施,因而采用地统计学分析方法对不同坡向和疏密度的沙棘林中栎黄枯叶蛾低龄幼虫的空间分布格局进行了研究。结果表明:栎黄枯叶蛾卵孵化的高峰期为 6 月中旬。通过全方向的变异函数曲线分析得知:阴坡密林、阴坡疏林、阳坡密林、阳坡疏林中,栎黄枯叶蛾低龄幼虫空间依赖范围分别为 19.96、9.45、20.75、13.48 m,空间变异值分别为 0.692、0.613、0.679、0.597。密林样地的半变异函数最佳拟合模型均为高斯模型,疏林样地均为指数模型,两种模型均指明栎黄枯叶蛾低龄幼虫的空间分布格局为聚集分布。引起种群聚集的原因主要为其生物学特性。用 Kriging 插值方法生成的空间分布图显示低龄幼虫在空间分布上存在明显的边缘效应。

关键词:栎黄枯叶蛾;低龄幼虫;空间分布;地统计学;坡向;疏密度

Geostatistic analysis on the spatial distribution of *Trabala vishnou gigantina* Yang early stage larvae

LIU Yonghua^{1,*}, ZHENG Yumo¹, YAN Xiongfei¹, HE Ying¹, LU Pengfei²

¹ College of Life and Science, Yulin University, Yulin 719000, China

² Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Ministry of Education, Beijing 100083, China

Abstract: *Trabala vishnou gigantina* Yang have been a serious leaf-eating pest of *Hippophae rhamnoides* in the Wuqi county of Shaanxi in recent years. The spatial characteristics of *T. vishnou gigantina* early stage larvae were analyzed using geostatistical methods in *H. rhamnoides* forests with different slopes and densities, for forecasting and scientific management. The results showed that high levels of hatching occurred mainly in mid-June. Analysis of isotropic variograms indicated *T. vishnou gigantina* early stage larvae spaced themselves 19.96, 9.45, 20.75, and 13.48 m apart in densely forested shady slopes, open forests on shady slopes, densely forested sunny slopes, and open forests on sunny slopes, respectively, while the intensity of local spatial continuity was 0.692, 0.613, 0.679, and 0.597, respectively. Semivariogram analysis revealed the Gaussian model had the best fit in dense forest, while the Exponential model fitted best with the open forest, implying an intense spatial aggregation pattern of *T. vishnou gigantina* early stage larvae. The reason for aggregation was mainly its bionomics. As the maps with Kriging interpolation described, *T. vishnou gigantina* early stage larvae exhibited an obvious edge effect.

Key Words: *Trabala vishnou gigantina* Yang; early stage larvae; spatial distribution; geostatistics; slope; density

基金项目:国家自然科学基金项目(31570643);榆林学院博士科研启动基金项目(16GK08);榆林学院校内科研项目(14YK32)

收稿日期:2017-08-27; 网络出版日期:2018-00-00

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

空间格局是昆虫种群的一个重要特征,它是在昆虫的生物学特性和生境条件的共同作用下所呈现出的分布形式或散布状况^[1]。研究昆虫种群的空间格局,对于详细了解昆虫的生物生态学特性、揭示种群消长规律、提高抽样技术精度、害虫监测和防治等均具有重要的理论和实践意义^[2-4]。利用地统计学方法研究昆虫种群空间格局,可以充分利用野外调查所获得的空间数据,最大限度避免系统误差,更深入的描述种群的空间分布特征,相比传统生物学统计方法随机选取的理论体系,地统计学方法同时考虑了样本值大小与样本的空间方位及其相互距离的关系,能够更为精确的揭示空间相关性和依赖性,已成为昆虫生态学领域的研究热点^[5-6]。

沙棘 *Hippophae rhamnoides* 是我国西北干旱半干旱地区生态建设的先锋树种,并且在地方经济发展中具有重要的作用。尤其是陕北吴起县沙棘种植面积为全国之最,成林面积已达到 12.53 万 hm^2 。栎黄枯叶蛾 *Trabala vishnou gigantina* Yang, 属鳞翅目 *Lepidoptera* 枯叶蛾科 *Lasioeampidae*, 寄主种类众多,分布范围较广^[7]。该虫近年在吴起沙棘林中为害特别严重,幼虫往往将叶片全部吃光,整片沙棘林仅剩枝干,严重影响沙棘生长,对沙棘的生态价值和经济效益产生巨大的破坏^[8],因此,研究该虫在沙棘上危害的种群动态及空间分布格局,对于制定防治措施具有重要意义。

章一巧等^[9-10]应用地统计学方法对栎黄枯叶蛾蛹和卵的空间分布进行了研究,认为栎黄枯叶蛾卵在沙棘林的分布均呈聚集分布,而蛹在沙棘的密林中呈聚集分布,在疏林中呈随机分布;卵同雌蛹在分布上有一定的跟随性,蛹在沙棘林上的分布存在边缘效应,且方向性明显。幼虫是栎黄枯叶蛾为害沙棘的主要阶段,但目前对其空间分布格局研究尚未见报道。研究发现,栎黄枯叶蛾低龄幼虫取食量较低,往往群集于孵化位置附近取食,3 龄后食量突然增加危害加重^[11],因此对其低龄幼虫的空间分布格局进行探讨,将有助于掌握幼虫在林间的分布规律,提高对幼虫危害盛期进行预测预报的准确性,以便及时采取防控措施。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地设在陕西省吴起县(36°33′—37°24′ N, 107°38′—108°32′ E),属典型的半干旱温带大陆性季风气候,年平均气温 7.8℃,年均降水量 478.4 mm,无霜期较短,平均 146 d,海拔 1233—1809 m。土壤类型以黄绵土为主,质地多为轻壤。林地均为人工栽植的沙棘纯林,间或有少量的山杏、榆树、刺槐、山桃。

调查时间为 2015 年 5—8 月,具体调查地点为吴起县吴仓堡乡。由于当地属于黄土高原丘陵沟壑区,地势起伏多变,再加上沙棘林经过十余年的自然演变,其疏密程度具有很大差异。因此本研究根据当地实际情况,将郁闭度 0.30 以下的林地划为疏林,郁闭度 0.30 以上的林地划为密林。在进行栎黄枯叶蛾低龄幼虫空间分布调查时,分别选取 30 m×20 m 的样地 4 块,每块样地都代表不同坡向和疏密度,包括阴坡密林、阴坡疏林、阳坡密林、阳坡疏林。阴坡海拔由东南向西北呈上升趋势,光照条件东南方向最好;阳坡海拔由西北向东南呈上升趋势,光照条件西北方向最好。样地概况见表 1。

表 1 样地概况
Table 1 General situation in the sample plots

林分类型 Stand types	坡度 Slope gradient/(°)	平均地径 Average basal diameter/cm	平均树高 Average height/cm	郁闭度 Canopy closure	幼虫密度 Average population density/ (个/株)
阴坡密林 Dense forest on the shady slope	14	3.71	158.04	0.75	2.50
阴坡疏林 Open forest on the shady slope	16	4.15	169.19	0.25	2.64
阳坡密林 Dense forest on the sunny slope	15	4.02	143.35	0.70	1.85
阳坡疏林 Open forest on the sunny slope	16	4.13	152.06	0.30	2.07

1.2 调查方法

对每一样地内的沙棘进行逐株系统调查,记录沙棘的株行距和每株沙棘上的幼虫数量,将每株沙棘的相

对位置记录在坐标纸上。

1.3 空间格局分析方法

1.3.1 半方差函数

半方差函数指的是区域化变量增量的方差,即变量 $Z(x_i)$ 与 $Z(x_i+h)$ 其增量平方的数学期望^[12]。其公式为:

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

式中: $\gamma(h)$ 是相对距离 h 的样本半变异函数值, $N(h)$ 是间隔 h 距离的数据对 (x_i, x_i+h) 的对数, $Z(x_i)$ 和 $Z(x_i+h)$ 分别是点 x_i 和 x_i+h 位置处样本的测量值, h 为分隔 2 个样点的距离。

通过半方差函数拟合生成变异曲线图(图 1),图中块金常数、基台值和变程 3 个参数具有明显的生态学意义。这 3 个参数决定了半方差函数的形状和结构,并最终决定了种群的空间分布特征^[10]。

1.3.2 变异函数理论模型的拟合

对于空间变异曲线的拟合主要有 4 种模型,即高斯模型、球状模型、指数模型和线性模型。一般来说,线性模型表示种群随机或均匀分布,即数据变化无规律,而其它模型均表示种群呈聚集分布。在应用 GS+ 软件进行计算并拟合的过程中,必须根据模拟误差最小原则,首先比较各种模型的决定系数 R^2 的大小,然后依次比较各模型残差 RSS、变程 A 和块金常数 C_0 的大小,最终来判断各种理论模型对半方差函数曲线进行拟合的优劣程度^[13-14]。

1.3.3 空间分布图的生成

使用 Kriging 法对栎黄枯叶蛾低龄幼虫空间分布的区域化变量进行插值分析,通过 Surfer 11 软件生成空间分布等值线与矢量叠加图。

1.3.4 数据统计与分析

应用 Excel 2010 对基础数据进行统计分析,利用 GS+ 9.0 软件进行地统计学分析,采用 DPS 13.5 软件对数据进行方差分析(ANOVA),差异显著性比较使用 Duncan 氏新复极差法。

2 结果与分析

2.1 栎黄枯叶蛾幼虫种群数量动态变化及低龄幼虫分布

调查表明,5 月中旬栎叶蛾幼虫开始孵化,随着气温的升高孵化数量逐渐增多,6 月上中旬进入孵化盛期,幼虫数量短时间内急剧增加。初孵幼虫聚集于孵化场所附近取食,但由于虫龄较低,取食量也不大,此时危害并不严重。6 月下旬,幼虫虫龄进一步增加,开始进入暴食期,危害逐渐加重。7 月下旬开始老熟,大部分幼虫 7 月底到 8 月初开始结茧化蛹,幼虫数量大幅度下降,危害程度大大降低。

图 2 为密林样地低龄幼虫密度分布直方图,阴坡样地和阳坡样地的有虫株率分别为 90.74% 和 75.93%,密度>6 头/株的样本比例分别为 9.26% 和 3.70%;图 3 为疏林样地低龄幼虫密度分布直方图,阴坡样地和阳坡样地的有虫株率分别为 92.59% 和 72.22%,密度>6 头/株的样本比例分别为 11.11% 和 5.56%。比较密林和疏林中低龄幼虫密度,发现阴坡样地均显著高于阳坡样地($P<0.05$)。

2.2 栎黄枯叶蛾低龄幼虫数量的半变异函数及空间分布分析

应用 GS+9.0 软件对沙棘样地中低龄幼虫的空间分布进行地统计学分析,最佳拟合模型选取标准为 R^2 最

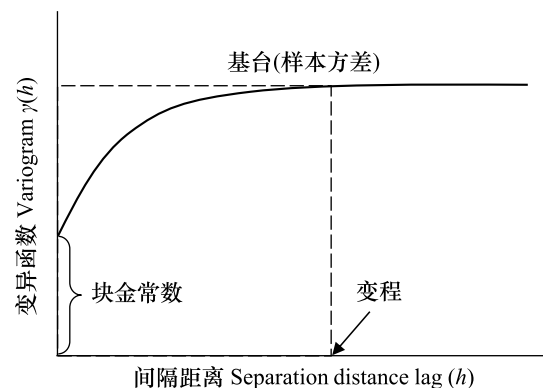


图 1 典型的变异曲线图

Fig.1 A typical variogram

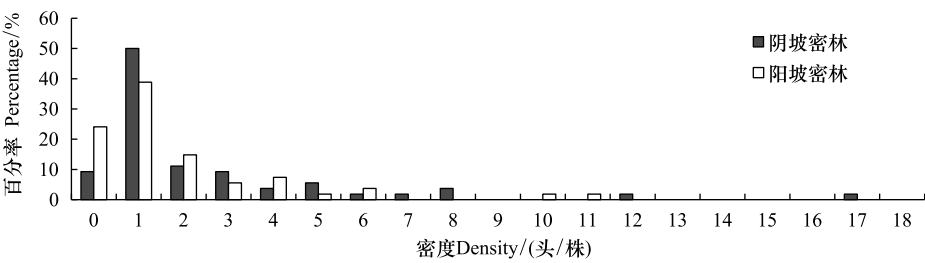


图2 密林样地低龄幼虫密度分布直方图
Fig.2 Histogram of density for the early stage larvae in Dense forest

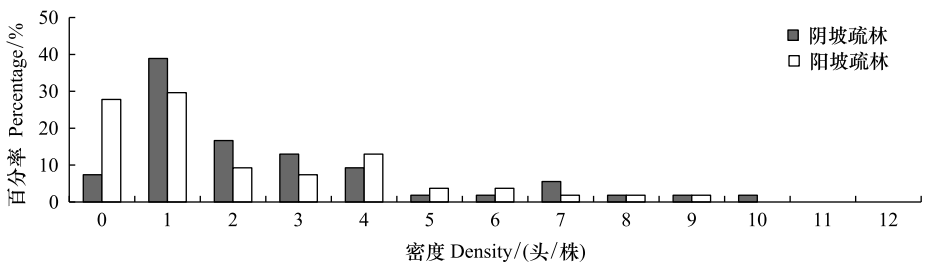


图3 疏林样地低龄幼虫密度分布直方图
Fig.3 Histogram of density for the early stage larvae in Open forest

大、RSS 最小,拟合函数模型及分布格局见表 2,空间变异函数见图 4。
利用 Surfer 11 软件通过 Kriging 法对柞黄枯叶蛾低龄幼虫在不同坡向和林分结构的样地中沙棘位置与其幼虫数进行插值分析,生成低龄幼虫空间分布的等值线与矢量叠加图(图 4)。

表 2 柞黄枯叶蛾低龄幼虫的变异函数理论模型、拟合参数及空间分布格局

Table 2 Parameter of variogram models and spatial distribution for <i>Trabala vishnou gigantina</i> early stage larvae									
林分类型 Stand types	理论模型 Theoretical models	C_0	C	A/m	$Sill$	$C/Sill$	R^2	RSS	空间格局 Spatial pattern
阴坡密林 Dense forest on the shady slope	高斯模型 Gaussian	4.800	10.809	19.96	15.609	0.692	0.988	0.137	聚集分布
阴坡疏林 Open forest on the shady slope	指数模型 Exponential	2.710	4.288	9.45	6.998	0.613	0.994	0.0115	聚集分布
阳坡密林 Dense forest on the sunny slope	高斯模型 Gaussian	2.690	5.699	20.75	8.389	0.679	0.918	0.254	聚集分布
阳坡疏林 Open forest on the sunny slope	指数模型 Exponential	2.490	3.696	13.48	6.186	0.597	0.862	0.215	聚集分布

C_0 :块金常数,Nugget; C : 偏基台值,Patial sill; A : 变程,Range; $Sill$: 基台值; $C/Sill$:空间变异,Spatial variation; R^2 : 决定系数,Determination coefficient;RSS:残差平方和,Residual sum of squares

2.2.1 密林中柞黄枯叶蛾低龄幼虫的半变异函数分析

由表 2 和图 4 可以看出,在沙棘密林中,阴坡和阳坡的柞黄枯叶蛾低龄幼虫均表现为聚集分布。阴坡和阳坡的空间依赖范围分别为 19.96 m 和 20.75 m,其意义为在抽样空间中任意 2 个样点之间距离小于此范围时,其数量之间存在有一定程度的空间相关或依赖关系,当距离大于此范围时,随着距离的逐渐增大,空间相关性逐渐减小。阴坡密林中低龄幼虫的空间聚集程度略大于阳坡。阴坡和阳坡密林中的偏基台值占比分别为 69.2%和 67.9%,这意味着总空间变异中由自相关现象引起的有 69.2%和 67.9%。分析结果中块金常数较高可能是由于样地内个别沙棘的缺失导致这一区域的幼虫分布出现空白,也可能是由于统计时出现了误差。

2.2.2 疏林中柞黄枯叶蛾低龄幼虫的半变异函数分析

由表 2 和图 4 得知,在沙棘疏林中,阴坡和阳坡的柞黄枯叶蛾低龄幼虫仍然呈现较明显的聚集分布。阴

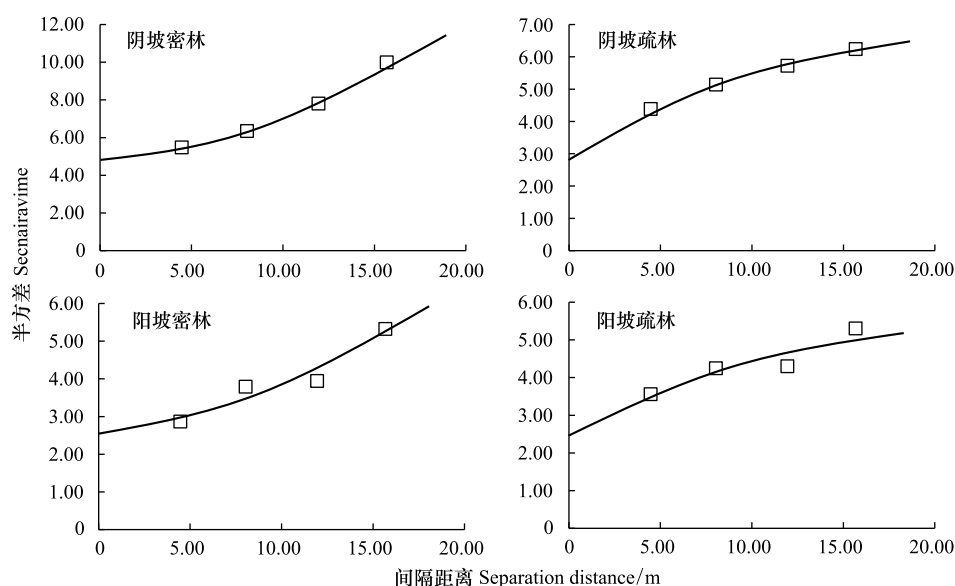


图4 栎黄枯叶蛾低龄幼虫的空间变异函数

Fig.4 Spatial variograms for *Trabala vishnou gigantina* early stage larvae

坡和阳坡的空间依赖范围分别为 9.45 m 和 13.48 m,低龄幼虫在阳坡植株间的相互依赖性比阴坡小。对比密林中低龄幼虫的空间依赖范围,疏林中阴阳两坡的空间依赖范围均小于密林。阴坡和阳坡密林中的偏基台值占比分别为 61.3%和 59.7%,说明总空间变异中有 61.3%和 59.7%产生于空间自相关现象。

2.2.3 栎黄枯叶蛾低龄幼虫的空间分布分析

由栎黄枯叶蛾低龄幼虫的等值线与矢量叠加图可以看出(图 5),无论在阴坡还是阳坡,密林还是疏林,栎黄枯叶蛾低龄幼虫均呈现出明显的聚集分布特点,样地内有多个聚集斑块,每个聚集斑块的幼虫数量从中心

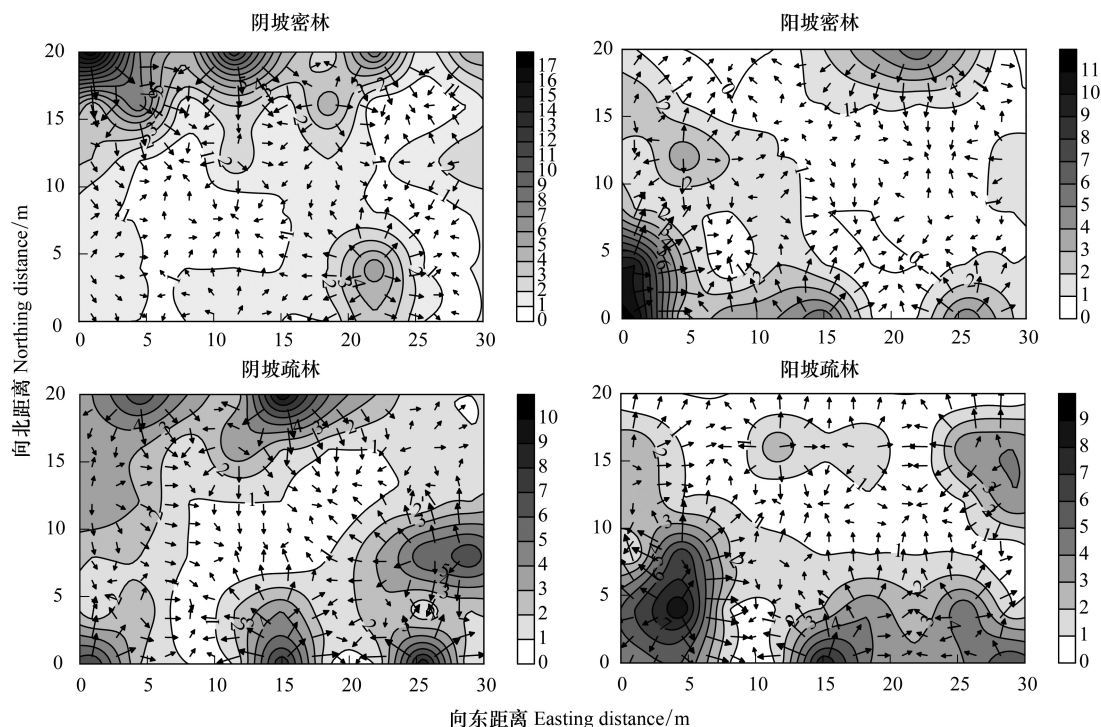


图5 栎黄枯叶蛾低龄幼虫的等值线与矢量叠加图

Fig.5 Overlay map of isoline and vector for *Trabala vishnou gigantina* early stage larvae

区域向四周逐渐减小,这表明了低龄幼虫的聚集强度、空间尺度和扩散方向。聚集斑块在样地边缘的分布略多于样地内部,在林缘主要呈聚集条带状分布,在林间的低龄幼虫数量较少,呈现出明显的边缘效应。对比低龄幼虫在阴阳两坡的空间分布特征,未呈现出明显的方向性。

3 结论与讨论

深入掌握害虫主要为害阶段的数量动态变化规律,对于揭示害虫的危害特性与发生发展规律,采取有效措施控制其发生危害具有非常重要的意义。本研究发现,栎黄枯叶蛾幼虫在6月上中旬数量急剧增加,但由于其虫龄较低,危害较轻,而且幼虫抵抗力也较弱,因此可在此时及时采取措施杀灭幼虫,从而降低虫口数量,减轻危害。相关研究表明,不良的气候条件,如大风、暴雨等剧烈的天气变化,都会对害虫幼虫的种群密度^[3,15]产生影响。由于调查时间和试验条件所限,本研究没有对气候因子如何影响栎黄枯叶蛾幼虫种群数量动态进行探讨,相关的研究还有待未来进一步开展。

地统计学的应用必须建立在相关生态学基本理论之上,并结合昆虫的生物学特性进行研究,其分析结果应符合昆虫的生物学特性^[16]。本试验通过地统计学分析,表明不同坡向与疏密度的沙棘样地中栎黄枯叶蛾低龄幼虫均呈现明显的聚集分布。野外调查发现,栎黄枯叶蛾卵多产于茧壳表面、枝条及叶片等处,卵块一般呈长条状,卵粒双行相间排列,同一卵块基本在同一天整齐孵化,低龄幼虫有群集性,集中在产卵地附近取食,3龄后幼虫开始四散危害^[11],因此在沙棘林中会产生一个为害中心,逐渐向四周扩散,因此成虫的产卵习性是形成其幼虫的空间分布格局的一个主要原因。低龄幼虫在疏林中不同坡向的空间依赖范围均小于密林,说明疏林中低龄幼虫的空间聚集度高于密林,这一现象可能是由于疏林中沙棘的枝叶间相互距离相比密林较远,低龄幼虫在疏林中不易扩散。低龄幼虫在密林与疏林阴阳两坡的空间分布特征未呈现出明显的方向性,说明坡向不同导致光照强度的方向性对低龄幼虫空间分布的影响十分有限。

本试验所选样地中沙棘分布比较规则,分析得出的拟合参数中 R^2 值较大,RSS值较小,这与同样在陕西吴起沙棘人工林中对栎黄枯叶蛾蛹和卵^[8-9],以及在辽宁建平沙棘人工林中对沙棘木蠹蛾卵、幼虫和蛹^[17-18]的空间分布分析结果较为相似。而孙鹏举等^[19]在分布不规则的自然沙柳林中对柳毒蛾的空间分布分析则得出较小的 R^2 与较大的RSS值,这说明样地内植被分布情况会直接影响害虫的空间分布。本试验再次验证了在植被分布较为规则的人工林中,使用地统计学方法分析空间变异得出的变异函数模型拥有较高的拟合度。

本研究结果显示,沙棘林中栎黄枯叶蛾低龄幼虫存在着明显的边缘效应。边缘效应的产生主要是由于林缘和林内的生境条件如温度、湿度、气流、光照度等存在差异。原因可能是林地边缘通风透光性能较强,干燥性较好,比较适宜雌蛾在此产卵。另外,由于林缘空气流动性较好,雌蛾释放的性信息素比林内传播的更远,容易吸引到雄蛾进行交配,雌蛾交配后,由于其飞行能力较差,一般就集中在林缘附近产卵,导致林缘低龄幼虫密度增加。根据栎黄枯叶蛾的生物学特性,卵的空间分布极大地影响了幼虫的空间分布情况,因此,林地边缘和内部不同环境因子如温度、湿度、光照等对产卵的影响都可能影响低龄幼虫的空间分布,相关的研究还需进一步加强。

本研究表明,栎黄枯叶蛾低龄幼虫在不同坡向和疏密度的沙棘林中均呈明显的聚集分布,且多集中于产卵地附近,成虫的产卵习性是形成其幼虫的空间分布格局的一个主要原因。低龄幼虫的分布呈现出明显的边缘效应,但未呈现出明显的方向性。在实际防治中根据本文结果并结合幼虫种群数量动态变化调查,于幼虫发生盛期及时采取措施杀灭幼虫,可以达到良好的防治效果。

参考文献(References):

- [1] 夏乃斌,屠泉洪,马占山.赤松毛虫幼虫空间分布型的研究.北京林业大学学报,1987,9(3):223-231.
- [2] Grego C R, Vieira S R, Lourenção A L. Spatial distribution of *Pseudaletia sequax* Franclemont in triticale under no-till management. Scientia Agricola, 2006, 63(4): 321-327.
- [3] 赵静,赵鑫,王玉军,李光强,刘丽平,孟家华,郑方强.烟盲蝽及其天敌蜘蛛空间格局的地统计学分析.生态学报,2010,30(15):

4196-4205.

- [4] 李建庆, 梅增霞, 杨忠岐. 不同林分白蜡树云斑白条天牛种群空间格局地统计学分析. 生态学报, 2016, 36(14): 4540-4547.
- [5] 黄保宏, 邹运鼎, 毕守东, 朱宏伟, 高正良. 朝鲜球坚蚧及黑缘红瓢虫空间格局的地统计学研究. 应用生态学报, 2003, 14(3): 413-417.
- [6] 陈浩, 门兴元, 于毅, 张安盛, 王振营, 李丽莉. 基于地统计学的二点委夜蛾幼虫田间分布及与玉米受害率之间的关系. 植物保护学报, 2015, 42(4): 598-603.
- [7] 刘友樵, 武春生. 中国动物志 昆虫纲 第四十七卷 鳞翅目 枯叶蛾科. 北京: 科学出版社, 2006: 338-339.
- [8] 刘永华, 章一巧, 阎雄飞, 宗德禄, 宗世祥, 骆有庆. 栎黄枯叶蛾对沙棘林的危害及生物学特性. 植物保护, 2013, 39(2): 147-151.
- [9] 章一巧, 宗世祥, 刘永华, 温俊宝, 闫占文, 骆有庆. 陕西省栎黄枯叶蛾蛹的空间分布. 生态学报, 2012, 32(20): 6308-6317.
- [10] 章一巧, 刘永华, 宗世祥, 陆鹏飞, 齐连珍, 骆有庆. 基于 GS+ 的大黄枯叶蛾卵的空间分布关系. 林业科学, 2013, 49(10): 100-105.
- [11] 刘永华. 栎黄枯叶蛾生物生态学特性及幼虫色型现象研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2014.
- [12] 王正军, 李典谟, 商晗武, 程家安. 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.
- [13] 陈强, 吴伟坚, 张振飞, 梁广文. 越北腹露蝗若虫空间格局的地统计学分析. 应用生态学报, 2007, 18(2): 467-470.
- [14] 潘杰, 王涛, 宗世祥, 温俊宝, 骆有庆. 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, 2011, 31(1): 195-202.
- [15] de Alve M C, da Silva F M, Moraes J C, Pozza E A, de Oliveira M S, Souza J C, Alves L S. Geostatistical analysis of the spatial variation of the berry borer and leaf miner in a coffee agroecosystem. Precision Agriculture, 2011, 12(1): 18-31.
- [16] 郝立武. 地理信息系统和地质统计学在昆虫生态学中的应用. 农业工程, 2011, 1(3): 96-99.
- [17] 宗世祥, 骆有庆, 许志春, 温俊宝, 贾峰勇. 沙棘木蠹蛾卵和幼虫空间分布的地统计学分析. 生态学报, 2005, 25(4): 831-836.
- [18] 宗世祥, 骆有庆, 许志春, 王涛, Heliövaara K. 沙棘木蠹蛾蛹的空间分布. 生态学报, 2006, 26(10): 3232-3237.
- [19] 孙鹏举, 骆有庆, 姚东华, 刘春亮, 宗世祥. 柳毒蛾幼虫和蛹的空间分布的地统计学分析. 植物保护学报, 2015, 42(4): 604-611.