

# 甘肃大野口青海云杉种群的空间分布格局

赵丽琼 黄华国 梁大双 张晓丽

(北京林业大学省部共建森林培育与保护教育部重点实验室)

**摘要:**为掌握青海云杉的空间分布特征和大面积遥感定量反演青海云杉结构提供关键参数,以及为青海云杉种群保护和祁连山水源涵养林的可持续经营提供基础数据,根据甘肃大野口 1 hm<sup>2</sup> 青海云杉林大样地的调查结果,首次应用点格局方法开展青海云杉种群空间格局的研究,并且将研究区内树木分龄级计算,得到不同龄级的树木在不同尺度下的空间分布格局。首先,应用 Weibull 分布对样地内青海云杉的胸径分布进行拟合;然后分别采用点格局分析法和聚集指标测定法,对样地内各龄级的树木在不同尺度下的空间分布格局进行研究;最后应用纽曼 A 型分布对研究区内的青海云杉种群空间分布格局进行拟合。结果表明:青海云杉林胸径分布基本符合 Weibull 分布;研究区内种群密度较大,空间格局呈集群分布;幼树、小树、中树和大树在各研究尺度下均呈集群分布;青海云杉随着年龄的增长,聚集强度逐渐降低;研究区内青海云杉种群空间分布格局符合纽曼 A 型分布。集群分布的原因主要是自然和人为干扰、环境条件及青海云杉的生物学特性共同作用的结果。

**关键词:** 空间分布格局;青海云杉;集群分布;定量遥感

中图分类号: S718.5 文献标志码: A 文章编号: 1000-1522(2010)04-0059-06

ZHAO Li-qiong; HUANG Hua-guo; LIANG Da-shuang; ZHANG Xiao-li. **Spatial distribution pattern of *Picea crassifolia* population in Dayekou, Gansu Province.** *Journal of Beijing Forestry University* (2010) 32 (4) 59-64 [Ch, 18 ref. ] Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Ministry of Education, Beijing Forestry University, 100083, P. R. China.

The purpose of this study is to obtain an understanding of the spatial distribution pattern of *Picea crassifolia* population, deduce the key parameters for a quantitative remote sensing inversion of large-scaled *P. crassifolia* population and provide a basis for the protection of *P. crassifolia* populations and sustainable management of the forest for conservation of water supply in the Qilian Mountains, northwestern China. Based on the inventory data of a 1 hm<sup>2</sup> sample plot in Dayekou of Gansu Province, we studied the spatial distribution patterns of a *P. crassifolia* population using an analytical point pattern method and investigated the spatial patterns of trees at different age classes under different spatial scales. First, a Weibull function was used to analyze the distribution of DBH (diameter at breast height). Then, the methods of point pattern analysis and aggregation indices were employed to study the spatial distribution patterns of trees at different age classes under different spatial scales. Finally, a Neyman's type A distribution was used to simulate the spatial distribution pattern of *P. crassifolia* population. The results show that: 1) the DBH distribution of *P. crassifolia* conforms to the Weibull function; 2) the distribution of the population is dense and follows an aggregation pattern; 3) the spatial distribution patterns of young, small, middle and big trees all obey the aggregation distribution under different scales; 4) the aggregation intensity decreases with the growth of *P. crassifolia* population and 5) the spatial

收稿日期: 2009-03-04

基金项目: “973”国家重点基础研究发展计划项目(2007CB714402)、国家自然科学基金青年科学基金项目(40801135)、北京林业大学科技创新计划项目(BLYX200917)、北京林业大学新进教师科研启动基金项目(BLX2007006)。

第一作者: 赵丽琼。主要研究方向: 3S 技术在林业中的应用。电话: 13810279483 Email: zhaoliqiong2006@163.com 地址: 100083 北京市清华东路 35 号北京林业大学 571 信箱。

责任作者: 黄华国, 博士, 讲师。主要研究方向: 定量遥感。电话: 13811090169 Email: huaguo.huang@gmail.com 地址: 100083 北京市清华东路 35 号北京林业大学 117 信箱。

本刊网址: <http://www.bjfujournal.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

distribution pattern of *P. crassifolia* conforms to the Neyman's type A distribution. The aggregation distribution of the population could result from natural and human disturbance, environmental conditions and biological characteristics of *P. crassifolia*.

**Key words** spatial distribution pattern; *Picea crassifolia*; aggregation distribution; quantitative remote sensing

青海云杉 (*Picea crassifolia*) 种群是祁连山自然保护区水源涵养林的主要森林类型。研究青海云杉种群空间分布格局,对青海云杉种群保护及祁连山水源涵养林的可持续经营、群落恢复和重建具有重要的理论和现实意义。

一些学者已利用聚集指标测定法结合 Taylor 幂法则、Iwao 回归方程对青海云杉种群空间分布格局进行了大量研究,结果表明,研究区内青海云杉种群结构呈倒“J”型,存在明显的径阶缺陷,种群分布格局呈集群分布,并有向随机分布发展的趋势,种群在各种密度下都呈聚集状态<sup>[1-3]</sup>。另外,张立杰等<sup>[4-5]</sup>应用分形几何理论和方法,对祁连山青海云杉种群沿海拔梯度空间分布格局的分形特征进行了分析,证明青海云杉水平占据空间的能力很强,结构较复杂,格局强度较高。以上研究侧重于判断青海云杉种群整体的空间分布格局,选用的方法主要是聚集指标测定<sup>[1-3]</sup>及 Taylor 幂法则<sup>[1,3]</sup>、Iwao 回归方程<sup>[3]</sup>拟合,这些方法均未考虑不同龄级树木在不同尺度下的空间分布格局特征。

点格局分析法能够分析各种尺度上的种群格局,并能给出置信区间以检验结果的显著性<sup>[6-9]</sup>。本文将点格局方法应用于青海云杉种群空间格局的研究,并且将研究区内树木按不同龄级分析空间格局现状,可以最大限度地利用树木的空间信息和年龄信息,克服聚集指标法单一尺度、不分龄级的弱点,得到更加丰富的信息。目前,尚未看到采用点格局分析法对青海云杉种群空间格局进行研究的报道。此外,在森林冠层辐射传输模型中,通常假设森林服从泊松分布或者纽曼 A 型分布<sup>[10]</sup>。如果能够确定青海云杉的分布类型,并给出拟合参数,将会提高遥感定量反演青海云杉结构参数的精度。

本文基于 1 hm<sup>2</sup> 固定标准地调查资料,分别运用点格局分析法和聚集指标测定法对青海云杉种群分布格局进行比较分析,并应用 Weibull 分布<sup>[11-12]</sup>对标准地上青海云杉胸径分布进行拟合,应用纽曼 A 型分布对青海云杉种群空间分布格局进行拟合。

本文研究拟为后续的青海云杉定量遥感反演研究提供参考,也为祁连山水源涵养林的可持续经营提供理论和数据基础。

## 1 研究方法

### 1.1 研究区概况

大野口位于祁连山中段,属北祁连山褶皱带,由典型的地槽沉积物组成,大部分为硅质岩和石灰岩,有山地灰褐土、山地栗钙土、高山草甸土和高山寒漠土 4 种主要土壤类型。低山地带坡度均在 20°~30°之间,高山地带坡度在 40°左右。属高寒干旱气候,年平均气温为 5.4℃,最低月平均气温 -12.5℃,最高月平均气温在 19.6℃左右;年降水量为 300~500 mm,多集中在 6—9 月份,年蒸发量为 1 488 mm。乔木有分布在阴坡、半阴坡的青海云杉和阳坡、半阳坡的祁连圆柏 (*Sabina przewalskii*)<sup>[13]</sup>。

### 1.2 样地设置与调查

2008 年 6 月,在甘肃省肃南县大野口流域设置固定标准地 (100 m × 100 m)。样地位于大野口关滩相对平坦的林地中 (38°31'48"N、100°15'00"E),平均海拔 2 835 m,坡度 3°,坡向西北,天然林;林下地被物为苔藓层,无灌木和草本植物。采用相邻网格法,将固定标准地划分为 25 m × 25 m 的 16 个样方,对样地内胸径在 3 cm 以上的树木进行每木检尺,记录每个小样方内树木个体的位置、胸径、树高、枝下高和冠幅,共测得 1 457 棵青海云杉,其中,树木位置信息的采集由张掖市测绘队专业技术人员配置两台全站仪完成。

### 1.3 分析方法

#### 1.3.1 聚集指标测定法

##### 1) 扩散指数 ( $C$ )

$$C = \frac{s^2}{\bar{x}}$$

扩散指数的统计学基础是泊松分布中方差 ( $s^2$ ) 与均值 ( $\bar{x}$ ) 相等。均匀分布时,抽样单位中出现的个体数大多接近于均值,故方差小于均值;集群分布时,抽样单位中出现的个体数大多大于或小于均值,方差大于均值。因此,  $C = 1$  判定为随机分布;  $C < 1$  为均匀分布;  $C > 1$  为集群分布。统计学上采用  $t$  检验来确定  $\frac{s^2}{\bar{x}}$  的实测值与 1 的差异程度<sup>[14]</sup>。

$$t = \frac{C - 1}{\sqrt{2(n - 1)}}$$

式中:  $n$  为格子总数。

比较  $t$  与  $t_{0.05}(n-1)$ , 确定其差异显著性。

## 2) 负二项参数 ( $k$ )

$$k = \frac{\bar{x}^2}{s^2 - \bar{x}}$$

$k$  值越小, 聚集度越大, 如果  $k$  值趋于无穷大 (一般为 8 以上), 则逼近泊松分布。

## 3) Morisita 分布指数 ( $I_\delta$ )

$$I_\delta = n \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \sum_{i=1}^n x_i}{(\sum_{i=1}^n x_i)^2 - \sum_{i=1}^n x_i}$$

式中:  $x_i$  为每个格子的树木个体数。

$I_\delta$  不受均值的影响, 但与取样单位的最多和最少个体数目有关。  $I_\delta = 1$  为随机分布;  $I_\delta < 1$  为均匀分布;  $I_\delta > 1$  为集群分布。它的显著性检验 ( $P <$

0.05) 可用  $\chi^2 = I_\delta (\sum_{i=1}^n x_i - 1) + n - \sum_{i=1}^n x_i$  与  $\chi^2(n -$

1) 比较来完成。

## 4) Green 指数 (GI)

$$GI = \frac{\frac{s^2}{\bar{x}} - 1}{n - 1}$$

$GI > 0$  为集群分布,  $GI < 0$  为均匀分布。Green 指数几乎独立于种群密度及样本大小, Myers 认为 Green 指数是测定空间格局的最好方法之一<sup>[15]</sup>。

## 1.3.2 点格局分析法

点格局分析法的数据来源于植物种的个体在空间中的坐标值。植物种的个体在空间中都可以看成是二维空间中的一个点, 因此, 一个样方中所研究的植物都可以用一系列点来表示, 即样方中所研究的植物个体构成了空间分布的点图, 以点图为基础进行格局分析。密度和协方差是二维数集的一次和二次特征结构。对于点格局,  $\lambda$  是单位面积内的期望点数;  $K$  是点间距离分布的测定指标,  $K$  值随着尺度的变化而变化。Diggle<sup>[6]</sup>证明二次特征结构可以简化为一个函数方程:

$$K(r) = \lambda^{-1}$$

式中:  $K(r)$  为表征二次特征结构的随机分布函数;  $r$  为研究尺度, 可以是大于 0 的任何值;  $\lambda$  可以用  $\frac{n}{A}$  来估计,  $A$  为样地面积,  $n$  为总点数 (植物个体数)。

在实践中,  $K(r)$  用下式估计:

$$\hat{K}(r) = n^{-2} A \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{1}{W_{ij}} I_r(u_{ij}) \quad i \neq j$$

式中:  $\hat{K}(r)$  为  $K(r)$  的估计函数;  $u_{ij}$  为点  $i$  和点  $j$  之间的距离, 当  $u_{ij} \leq r$  时,  $I_r(u_{ij}) = 1$ , 当  $u_{ij} > r$  时,  $I_r(u_{ij}) = 0$ ;  $W_{ij}$  为以点  $i$  为圆心、 $u_{ij}$  为半径的圆周长在面积  $A$  中的比例, 为一个点可被观察到的概率,

可校正边界效应引起的误差。

用  $\hat{K}(r)$  和  $K(r)$  相比构造统计量  $\hat{L}(r)$ :

$$\hat{L}(r) = \sqrt{\frac{\hat{K}(r)}{\pi}} - r$$

当  $\hat{L}(r) = 0$  时, 表示随机分布; 当  $\hat{L}(r) > 0$  时, 为集群分布; 当  $\hat{L}(r) < 0$  时, 为均匀分布。

用 Monte-Carlo 拟合检验计算上下包迹线, 即置信区间。假定种群是随机分布, 则用随机模型拟合一组点的坐标值, 对每一个  $r$  值, 计算  $\hat{L}(r)$  值; 同样, 用随机模型再拟合新一组点的坐标值, 分别计算不同尺度  $r$  的  $\hat{L}(r)$  值。重复进行这一过程直到达到事先确定的次数,  $\hat{L}(r)$  值的最大值和最小值分别为上下包迹线的坐标值。

用  $r$  作为横坐标, 上下包迹线作为纵坐标绘图, 置信区间一目了然。用种群实际分布数据计算得到的不同尺度下的  $\hat{L}(r)$  值若在包迹线以内, 则符合随机分布; 若在包迹线以外, 则显著偏离随机分布, 呈集群分布。当种群表现为聚集分布时, 把偏离随机置信区间的最大值作为最大聚集强度指标, 而聚集规模是以达到最大聚集强度的尺度为半径的圆。

## 1.3.3 分布拟合检验

### 1) Weibull 分布

$$f(x) = \frac{c}{b} \left( \frac{x-a}{b} \right)^{c-1} \exp \left[ - \left( \frac{x-a}{b} \right)^c \right]$$

式中:  $a$  为位置参数 (直径分布的下限值),  $b$  为尺度参数,  $c$  为形状参数,  $x$  为胸径。

### 2) 纽曼 A 型分布

$$P(i, m_1, m_2) = \frac{e^{-m_1} m_1^i}{i!} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{(m_1 e^{-m_2})^j}{j!} j^i$$

式中:  $P(i, m_1, m_2)$  代表在子像元 A 内找到  $i$  棵树的概率,  $j$  代表在子像元中树木群落的个数,  $i$  代表群落尺度即子像元中树木的个数,  $m_1$  为  $j$  的平均值,  $m_2$  为  $i$  的平均值<sup>[10, 16]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 胸径分布拟合

1 hm<sup>2</sup> 固定样地内所有树木胸径均值为 13.88 cm, 方差 84.70, 标准差 9.20。利用 3 参数 Weibull 分布对胸径分布进行拟合, 径阶距为 2 cm, 得出:  $a = 3$ ,  $b = 11.725$ ,  $c = 1.165$ , 决定系数  $R^2 = 0.89$ 。通过 Weibull 分布拟合的树木胸径均值为 13.81 cm, 方差 80.40, 标准差 8.97 (实测胸径与拟合理论胸径分布曲线见图 1)。从图 1 可以看出, 固定样地内胸径分布基本符合 Weibull 分布。

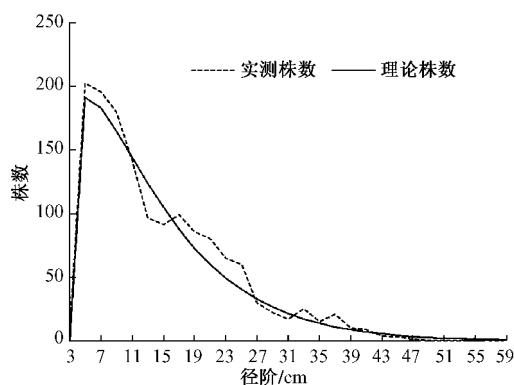


图1 Weibull分布拟合直径分布的结果

Fig. 1 Simulation of DBH distribution using Weibull function

## 2.2 种群格局分析

### 2.2.1 聚集指标测定结果

固定标准地中树木个体分布点图见图2,每个点的横、纵坐标均为实际地理坐标。从图2可以看出,青海云杉群落呈明显的集群分布,群落密度为 $1\,457\text{株}/\text{hm}^2$ 。

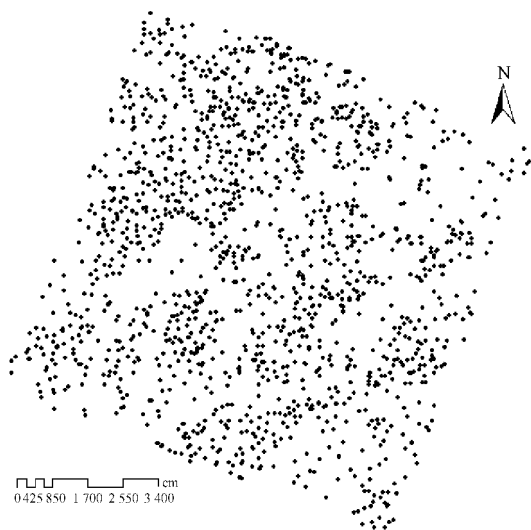


图2 固定标准地中青海云杉的分布点图

Fig. 2 Point pattern distribution of individual trees in the plot

聚集指标法依据16个 $25\text{ m} \times 25\text{ m}$ 小样方的调查数据计算得出。

扩散指数 $C = 7.72 > 1$ ,因此种群分布格局判定为集群分布,同时 $t$ 检验也证明其不服从泊松分布;负二项参数 $k = 13.62 > 8$ ,证明整个种群空间格局逼近于泊松分布,青海云杉种群的空间格局由集群分布向随机分布发展;Morisita分布指数 $I_s = 1.07 > 1$ ,判定为集群分布,同时 $\chi^2$ 检验得出其不属于随机分布;Green指数 $GI = 0.45 > 0$ ,判定为集群分布,而集群分布的最小期望值为1,故认为聚集强度一般。以上聚集指标测算结果均表明,研究区内青海云杉种群呈集群分布。

### 2.2.2 点格局分析结果

点格局分析过程通过生态学软件包ADE-4完成。采用的空间尺度由0一直增加到45 m,步长为5 m;Monte-Carlo随机模拟的数目为10 000次,得到 $\hat{L}(r)$ 由上下两条包迹线围成的95%的置信区间。

固定标准地点格局分析结果见图3。青海云杉种群全部个体在所研究的空间尺度(0~45 m)范围内,分布格局呈显著的集群分布,聚集强度随着尺度的增大而逐渐增强。当 $r = 45\text{ m}$ 时,聚集强度最大, $\hat{L}(r) = 5.69$ ,最大聚集规模为 $6\,358.5\text{ m}^2$ ;  $r \leq 32.5\text{ m}$ 时,聚集强度随着尺度呈线性增长; $r > 32.5\text{ m}$ 以后,聚集强度随着尺度的增加趋于稳定。

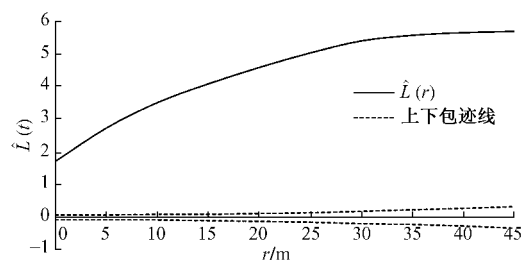


图3 固定标准地点格局分析结果

Fig. 3 Results of point pattern analysis of the plot

青海云杉树木的龄级划分标准有很多,依据丁国民等<sup>[17]</sup>和刘建泉等<sup>[18]</sup>的研究,以20年为一个龄级结构,并采用胸径( $D$ )与年龄相关的数学模型将所有树木划分为幼树、小树、中树、大树4个等级,划分标准如下:幼树, $3\text{ cm} \leq D < 17\text{ cm}$ ;小树, $17\text{ cm} \leq D < 23\text{ cm}$ ;中树, $23\text{ cm} \leq D < 27\text{ cm}$ ;大树, $D \geq 27\text{ cm}$ 。

幼树在所研究的尺度范围内呈显著的集群分布(图4);尺度在0~35 m范围内,聚集强度随尺度的增加而增加; $r = 35\text{ m}$ 时,聚集强度最大, $\hat{L}(r) = 6.4582$ ,最大聚集规模为 $3\,846.5\text{ m}^2$ 。小树在所研究的尺度范围内同样呈显著的集群分布(图5),且随着尺度的增加,聚集强度不断增加,增加速度较幼树慢; $r = 45\text{ m}$ 时,聚集强度最大, $\hat{L}(r) = 6.9498$ ,最大聚集规模为 $6\,358.5\text{ m}^2$ 。中树在所研究的尺度范围内也呈集群分布(图6),聚集强度也在不断增加,增加速度同样比幼树慢; $r = 45\text{ m}$ 时,聚集强度最大, $\hat{L}(r) = 6.9498$ ,最大聚集规模为 $6\,358.5\text{ m}^2$ 。大树在尺度为0~1 m时呈随机分布,随尺度的增加聚集强度增大; $r = 35\text{ m}$ 时,大树聚集强度最大, $\hat{L}(r) = 4.3941$ ,最大聚集规模为 $3\,846.5\text{ m}^2$ ;  $r > 35\text{ m}$ 时,大树聚集强度逐渐减小,格局呈扩散趋势(图7)。从整体看来,大树在各个研究尺度上的聚集强度均小于幼树、小树和中树。

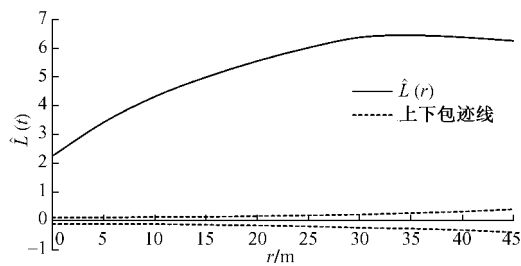


图4 幼树点格局分析结果

Fig. 4 Results of point pattern analysis of young trees

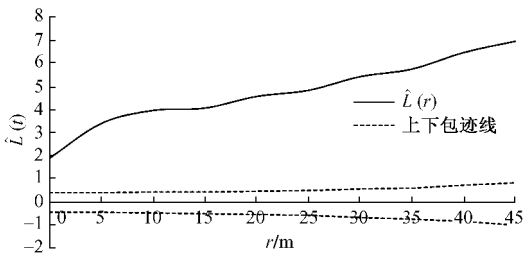


图5 小树点格局分析结果

Fig. 5 Results of point pattern analysis of small trees

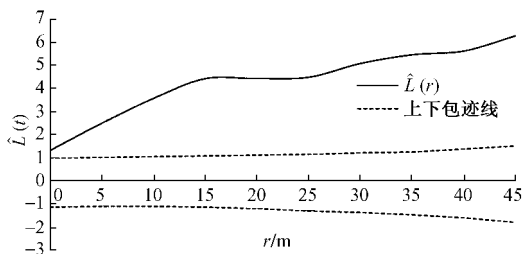


图6 中树点格局分析结果

Fig. 6 Results of point pattern analysis of middle trees

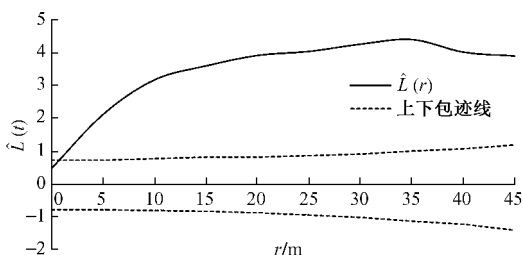
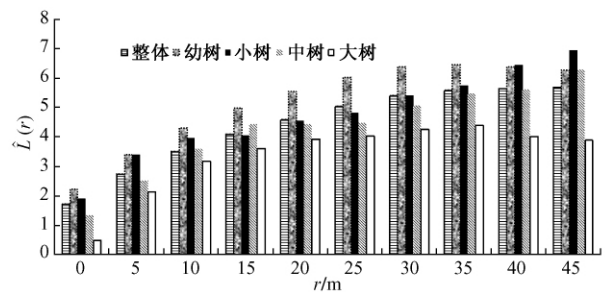


图7 大树点格局分析结果

Fig. 7 Results of point pattern analysis of big trees

青海云杉在所研究的空间尺度范围内各龄级树木均呈显著的集群分布,其中,幼树和大树聚集强度均达到最大,小树和中树聚集强度还在不断增大。从图8可知:幼树和小树在林分中占绝对优势,是种群空间格局的主要决定因素;尺度在0~35 m范围内,各龄级的聚集强度大小顺序为幼树>小树>中树>大树(除 $r=15$  m时,中树>小树);在尺度为40和45 m时,小树的聚集强度最大,聚集强度大小顺序为小树>幼树>中树>大树。龄级给青海云杉种群聚集强度带来的差异是显著的,同一种群中不

同龄级的树木聚集强度不同;随着树木的不断生长,聚集强度逐渐减小,种群逐渐向顶级群落发展。

图8 不同龄级和整体林分在各尺度上的 $\hat{L}(r)$ 值比较Fig. 8 Comparison of the  $\hat{L}(r)$  value among trees at different age classes and the entire plot

### 2.2.3 聚集指标测定与点格局分析结果的比较

聚集指标测定法与点格局分析法都证明青海云杉种群在尺度为25 m时呈集群分布。聚集指标测定结果表明,青海云杉种群聚集强度一般(是一种定性说明),而点格局分析法则用具体的量化指标给出不同尺度下的聚集强度大小,数据更容易在后续的定量遥感反演中加以利用。点格局方法还得出不同龄级树木的分布格局及聚集强度,结果更加直观可靠。

### 2.2.4 青海云杉种群格局拟合结果

鉴于实测样方数量(16个)相对较少,不符合大样本要求,本研究利用ArcGIS软件基于树木空间信息将100 m×100 m的样地等面积分割为12.5 m×12.5 m的小样方64个,分别统计小样方内的株数,得出均值为22.78株,方差102.61,  $m_1=6.50$ ,  $m_2=3.50$ ;利用Matlab软件计算得到纽曼A型分布的拟合值,经 $\chi^2$ 检验得出其符合纽曼A型分布(图9)。

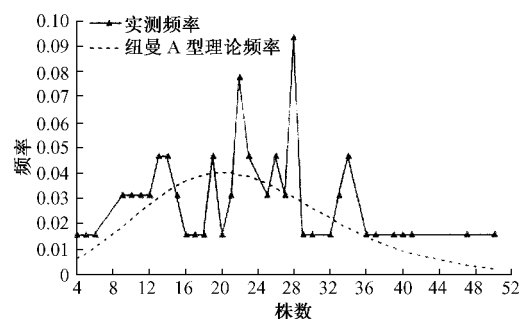


图9 纽曼A型分布拟合青海云杉种群空间分布的结果

Fig. 9 Simulation of the spatial distribution pattern of *P. crassifolia* population using Neyman's type A distribution

## 3 结论与讨论

本文首次将点格局方法运用于青海云杉种群空间格局的研究中,并将研究区内树木分龄级计算,分

析不同龄级树木在不同尺度下的空间分布格局,最大限度地利用了树木的空间信息和年龄信息,克服了聚集指标法单一尺度、不分龄级的弱点。聚集指标测定法要求样地的数量尽可能多,且样地面积的大小也会对种群分布格局产生很大影响,故本文在选取聚集指标时尽可能选取不受样地面积大小和种群密度影响的指标(如聚块性指标、Green 指数),并对指标计算结果进行检验。

本文研究结果表明,甘肃大野口青海云杉种群分布格局呈集群分布,聚集强度不高,并且有集群分布向随机分布发展的趋势;种群密度较大,生存环境拥挤,青海云杉在所研究的空间尺度范围内各龄级树木均呈显著的集群分布,各龄级树木的聚集强度大小顺序为幼树>小树>中树>大树。青海云杉种群整体分布格局与刘建泉<sup>[1]</sup>、马俊<sup>[2]</sup>和郝虎等<sup>[3]</sup>的研究结果一致,但是不同龄级树木的分布格局及聚集强度方面的研究尚未见报道。

造成集群分布的原因是自然、人为干扰及青海云杉的生物学特性共同作用的结果。青海云杉林在祁连山林区高寒气候带常形成顶级群落。其人为干扰主要包括采伐、造林更新等;自然干扰主要包括干旱、雪压、风倒风折、滑坡等。干扰是造成种群聚集分布的外在因素,幼树和小树受干扰程度小于中树和大树。青海云杉种群通过群居来抵御外界不良因素的干扰,这是集群分布的内在因素。

鉴于实测样方数量相对较少,不符合大样本要求,本文运用 ArcGIS 软件,充分利用树木空间信息将大样地等面积分割,增加样方数量,克服样方数量少带来的数据波动,使得拟合结果更加可靠。

#### 参 考 文 献

- [1] 刘建泉. 祁连山保护区青海云杉种群分布格局的研究[J]. 西北林学院学报, 2004, 19(2): 152-155.
- [2] 马俊. 青海云杉林种群结构及演替特征的研究[J]. 甘肃科技, 2007, 23(10): 237-239.

- [3] 郝虎, 刘兴明, 宋采福, 等. 祁连山北坡苔藓-青海云杉林优势种空间分布格局研究[J]. 甘肃林业科技, 2005, 30(4): 9-12.
- [4] 张立杰, 蒋志荣. 青海云杉种群分布格局沿海拔梯度分形特征的变化[J]. 西北林学院学报, 2006, 21(2): 64-66.
- [5] 张立杰, 赵文智, 何志斌. 青海云杉 (*Picea crassifolia*) 种群格局的分形特征及其影响因素[J]. 生态学报, 2008, 28(4): 1383-1389.
- [6] DIGGLE P J. *Statistical analysis of spatial point patterns* [M]. London: Academic Press, 1983: 1-120.
- [7] ANDERSEN M. Spatial analysis of two species interactions[J]. *Oecologia*, 1992, 91(1): 134-140.
- [8] DALE M R T, POWELL R D. A new method for characterizing point patterns in plant ecology [J]. *Journal of Vegetation Science*, 2001, 12(5): 597-608.
- [9] 岳永杰, 余新晓, 武军, 等. 北京山区天然次生林种群空间分布的点格局分析——以雾灵山自然保护区为例[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(3): 59-64.
- [10] 徐希孺. 遥感物理 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2005: 58-60.
- [11] 孟宪宇. 使用 Weibull 分布对人工油松林直径分布的研究[J]. 北京林学院学报, 1985, 7(1): 30-40.
- [12] 方精云, 营诚. 利用 Weibull 分布函数预测林木的直径分布[J]. 北京林业大学学报, 1987, 9(3): 261-269.
- [13] 杨国靖, 肖笃宁, 周立华. 祁连山区森林景观格局对水文生态效应的影响[J]. 水科学进展, 2004, 15(4): 489-494.
- [14] 谢宗强, 陈伟烈. 银杉种群的空间分布格局[J]. 植物学报, 1999, 41(1): 95-101.
- [15] 徐汝梅, 成新跃. 昆虫种群生态学——基础与前沿 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [16] 韩铭哲. 火烧迹地上红松种群自然更新格局的讨论[J]. 生态学报, 1988, 8(4): 342-346.
- [17] 丁国民, 刘兴明, 倪自银, 等. 甘肃祁连山青海云杉种群数量动态的初步研究[J]. 植物资源与环境学报, 2005, 14(4): 36-41.
- [18] 刘建泉, 丁国民, 郝虎, 等. 青海云杉群落特征和动态的研究[J]. 西北林学院学报, 2008, 23(1): 14-17.

(责任编辑 冯秀兰)