

北京山区典型针叶林群落空间点格局研究

宋思铭¹, 余新晓¹, 岳永杰², 张振明³, 黄枝英¹, 赵阳¹, 王希¹

(1. 北京林业大学 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083;

2. 内蒙古农业大学 林学院, 呼和浩特 010019; 3. 北京林业大学 自然保护区学院, 北京 100083)

摘要: 选取北京山区8块典型样地, 根据样地调查结果, 采用点格局分析方法, 对群落内主要种群的空间分布格局及种间相互关系进行研究。结果表明: 北京山区优势针叶树种群落内主要种群的分布格局随尺度的变化规律明显, 主要以集群分布为主要特征, 但不同优势树种群落的主要种群最大聚集程度和最大聚集尺度随林分类型的不同差异较大; 主要种群之间的关系以显著性负相关关系为主, 部分种群之间随着尺度的增加, 种间负联结性减弱, 无种群关系为正相关的针叶林群落。

关键词: 北京山区; 针叶林; 点格局

中图分类号: S718.54+2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2011)04-0036-07

Study on the Spatial Point Pattern of Typical Coniferous Communities in Beijing Mountainous Area

SONG Si-ming¹, YU Xin-xiao¹, YUE Yong-jie², ZHANG Zhen-ming³, HUANG Zhi-ying¹, ZHAO Yang¹, WANG Xi¹

(1. Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating of Ministry of Education,

Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Forestry College of Inner Mongolia Agricultural University,

Hohhot 010019, China; 3. College of Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Eight typical plots in Beijing mountainous area were selected in this study. Based on the investigation results of these plots, the spatial distribution pattern and the interspecific relationship of main populations in the community were analyzed by the method of point pattern analysis. The results showed that the distribution pattern of dominant coniferous community changed by the scales obviously, and displayed the contagious distribution, but the maximum aggregation scale and the maximum aggregation extent of different dominant coniferous communities made a great difference by different stand types, the relationship of main populations presented as obvious negative correlation mainly, and the negative correlation of partial populations decreased as the increase of scales, and there was no positive correlation in the coniferous populations.

Key words: Beijing mountainous areas; coniferous forest; point pattern

种群空间分布格局是指种群个体在水平空间的配置状况或分布状况, 反映了种群个体在水平空间上彼此间的相互关系, 与物种的生物学特性、种间竞争以及生境条件等密切相关^[1]。种群分布格局的分析是研究种群特征、种内和种间关系以及种群与环境关系的重要手段^[2], 在生态学中一直是研究热点之一。

种群空间分布格局与尺度紧密相关, 这一问题早就受到许多学者的关注, 长期以来, 生态学家发明了许多方法研究不同尺度下的格局, 如大尺度格局分析方

法——趋势面分析, 中尺度格局分析方法——双向轨迹方差法, 小尺度格局分析方法——种毗连法等等。传统的格局分析方法一般只能分析一种尺度(样方大小一致)下的分布格局, 所得出的结果与实际的群落结构偏差较大^[3-4]。点格局分析法在很大程度上克服了传统样方法中不能全面反映种群的分布类型与空间尺度关系的不足, 它可以分析各种尺度下的种群格局和种间关系, 在拟合分析的过程中检验能力较强, 目前, 已成为分析种群的分布格局最常用的分析方法^[5-8]。

收稿日期: 2011-01-02

修回日期: 2011-02-21

资助项目: 林业公益性行业科研专项“典型森林植被对水资源形成过程的调控研究”(201104005);“十二五”国家科技支撑计划项目“三北地区水源涵养林体系构建技术研究与示范”(2011BAD38B05)

作者简介: 宋思铭(1987-), 女, 黑龙江省绥化市人, 在读硕士, 研究方向为水土保持。E-mail: sm_song@126.com

通信作者: 余新晓(1961-), 男, 甘肃省平凉市人, 博士, 教授, 研究方向为水土保持、生态水文。E-mail: yuxinxiao111@126.com

1 研究区概况

北京山区总面积为 10 400 km², 占全市总面积的 62%, 西部属太行山脉, 北部和东部属燕山山脉, 自西、北、东三面环抱北京, 是北京市重要的生态屏障和水源涵养地。海拔 800 m 以下为暖温带半湿润季风气候, 800~ 1 600 m 为温带半湿润- 半干旱季风气候; 海拔 1 600 m 以上为寒温带半湿润- 湿润季风气候, 年平均气温 10~ 12℃, 年平均降雨量 600 mm 左右。山区植被具有明显的垂直分异, 主要针叶树种有油松、侧柏、华北落叶松等。研究区土壤类型全部为

山地褐土、土壤质地为砂壤土。

2 研究方法

采用能够分析各种尺度的种群格局分析方法——点格局分析法, 根据北京山区针叶林植被的典型代表性, 经过现场考察和对比分析, 在 4 个区县的 7 个自然保护区或林场布设了 8 块公顷级标准地, 包含了油松、侧柏、华北落叶松 3 种北京山区典型针叶树种, 标准地用水泥桩、木桩、铁丝进行了围封和标记, 对每株乔木进行坐标定位, 调查其胸径、树高、冠幅等基本因子, 标准地概况详见表 1。

表 1 北京山区典型针叶林样地信息

样地号	区县	位置	海拔/ m	坡向	优势树种	样地规格/ m× m
1	昌平	十三陵林场	166	阳坡	侧柏	100× 100
2	密云	水源站	194	阴、阳坡	油松	100× 100
3	延庆	松山自然保护区	829	阳坡	油松	100× 80
4	密云	雾灵山山林场	1340	阳坡	华北落叶松	100× 100
5	密云	水源站	203	阳坡	侧柏	100× 50
6	密云	不老屯镇	375	阴坡	油松	100× 60
7	密云	锥峰山林场	282	阳坡	侧柏	50× 60
8	门头沟	百花山自然保护区	1170	阳坡	华北落叶松	100× 60

2.1 单种分布格局分析

简单来说, Ripley's K 函数就是研究区(样方)内以某点为圆心, 以一定长度 r 为半径的圆内的植物个体数目的函数, 其计算方法及其边缘校正很多文献中均有论述^[9-11]。计算公式为:

$$K(r) = \frac{A}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n w_{ij}^{-1} I_r(u_{ij}) \tag{1}$$

式中: A ——研究区(样方)的面积; n ——植物个体数量; u_{ij} ——两个点 i 和 j 之间的距离; $I_r(u_{ij})$ ——指示函数, 当 $u_{ij} \leq r$ 时, $I_r(u_{ij}) = 1$, 当 $u_{ij} > r$ 时, $I_r(u_{ij}) = 0$; w_{ij} ——权重值, 用于边缘校正。

为了更直观更简单地解释实际的空间格局, Besag 提出了改进的 Ripley's K 函数形式, 即 Ripley's L 函数, L 函数比 K 函数更容易解释:

$$L(r) = \sqrt{K(r)/\pi} - r \tag{2}$$

如果 $L(r) = 0$, 则是随机分布; 如果 $L(r) > 0$, 则表明在以任意点为圆心, 半径为 r 的圆内的个体数比在空间完全随机情况下多, 所以是聚集分布; 如果 $L(r) < 0$, 则表明以任意点为圆心, 半径为 r 的圆内的个体数比在空间完全随机情况下少, 所以是均匀分布。

2.2 种间关系分析

种间的关系分析实际上是两个种的点格局分析, 也叫多元点格局分析, 上面我们介绍的单种格局分析可以认为是某个特定种个体间的关系研究, 因此对第

一个种 $K(r)$ 可以写成 $K_{11}(r)$, 对第 2 个种可以写成 $K_{22}(r)$, 其它公式依此类推。要考虑两个种的个体在距离(尺度) r 内的数目, 就是求 $K_{12}(r)$, 具体公式为:

$$K_{12}(r) = \frac{A}{n_1 n_2} \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} w_{ij}^{-1} I_r(u_{ij}) \tag{3}$$

式中: n_1, n_2 ——种 1 和种 2 的个体数(点数); $A, I_r(u_{ij})$ 和 w_{ij} 含义同上, 不同的是 i 和 j 分别代表种 1 和种 2 的个体, 同样计算:

$$L_{12}(r) = \sqrt{K_{12}(r)/\pi} - r \tag{4}$$

若 $L_{12}(r) = 0$, 表明两物种在 r 尺度下无关联性; 若 $L_{12}(r) > 0$, 表明二物种为正关联; 若 $L_{12}(r) < 0$, 表明二物种为负相关。

函数采用 Monte Carlo 检验拟合包迹线。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 r 值进行计算; 同样用随机模型再模拟新一组点坐标值, 分别计算不同尺度 r 的值。这一过程重复进行直到达到事先确定的次数, 得到的最大值和最小值分别为上、下包迹线的坐标值。拟合次数对 99% 的置信水平就为 100 次^[12]。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, 本文数据处理采用 R 软件和 Excel 软件完成。

3 结果与分析

3.1 油松种群空间分布格局分析

3.1.1 单种的空间分布格局分析 松山自然保护区

油松林种群分布格局见图 1。从图 1 中可以看出, 松山自然保护区油松林内, 油松种群和核桃楸种群在较大分析尺度上呈现显著聚集分布, 而白蜡随着尺度的变化, 在小尺度上呈现聚集分布, 在大尺度上呈现随机分布。油松种群在 0~1 m 尺度上呈现随机分布, 在其余尺度上呈现显著聚集分布, 当 $r=22$ m 时, 油松种群聚集程度达到最大, 此时 $L(r)=1.02$; 核桃楸在整个尺度上呈现聚集分布, 当 $r=23$ m 时, 核桃楸聚集程度最大, 此时 $L(r)=15.02$; 白蜡在 0~3, 8~10, 11~12, 14~17 m 尺度上呈现聚集分布, 聚集程度没有达到显著水平, 聚集规模不大, 其余尺度上呈现随机分布。油松和核桃楸在所研究的尺度 ($r=40$ m) 内均已经达到了最大聚集强度, 核桃楸的聚集程度和规模明显高于油松, 随着尺度的继续增加, 油松

和核桃楸种群空间分布格局有呈随机分布的趋势。

密云不老屯镇油松林种群分布格局见图 2。由图 2(a) 可以看出, 密云不老屯镇油松种群在小尺度上呈现随机分布, 在大尺度上呈现聚集分布。油松在 0~1 m 尺度上, 呈现随机分布, 当尺度 $r>1$ m 时, 油松种群空间分布格局呈聚集分布, 聚集程度达到显著水平。在所研究尺度 ($r=30$ m) 上, 油松种群没有出现最大聚集尺度, 可能是该样地取样面积小, 油松聚集程度高, 受样地大小的限制, 油松种群没有达到最大的聚集规模, 没能出现最大聚集尺度。由图 2(b) 可以看出, 槲树在整个分析尺度上呈现聚集分布, 在 $r=27$ m 时, 槲树的聚集程度最大, 此时 $L(r)=17.97$, 当尺度 $r>30$ m, 槲树的聚集程度会因尺度的增加而降低, 呈现随机分布的趋势。

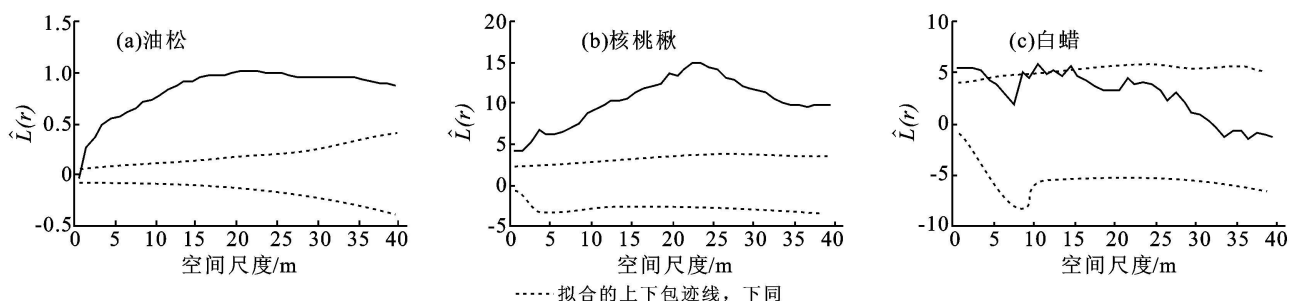


图 1 松山自然保护区油松林单种格局分析

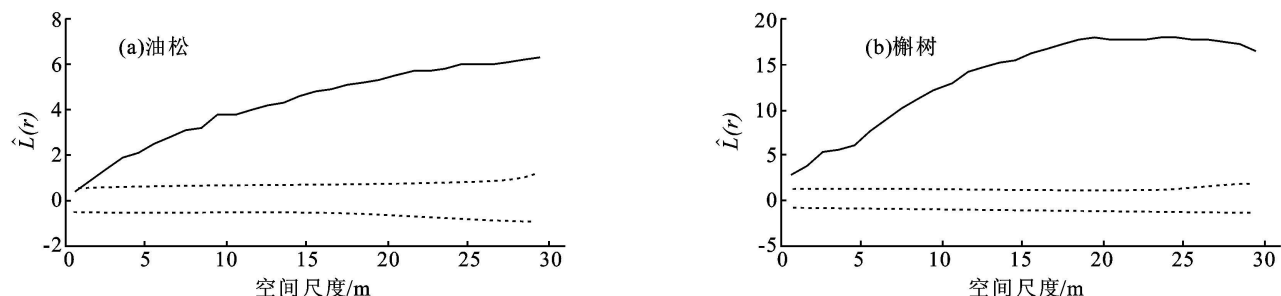


图 2 密云不老屯镇油松林单种格局分析

密云水源站油松林种群分布格局见图 3。由图 3 可以看出, 密云水源站油松林内, 油松和黄栌种群在较大分析尺度上, 均呈现显著聚集分布, 在小尺度下呈随机分布; 栓皮栎种群在所研究的尺度上均呈显著性聚集分布。油松在 0~1 m 尺度上呈现随机分布, 在其余尺度上呈现显著性聚集分布, 当 $r=24$ m 时, 油松聚集程度最大, 此时 $L(r)=2.3$; 栓皮栎在整个尺度上呈现显著性聚集分布, 当 $r=33$ m 时, 栓皮栎聚集程度最大, 此时 $L(r)=10.27$; 黄栌在 0~4 m 尺度上呈现随机分布, 当尺度 $r>4$ m 时, 种群格局发生转变, 呈现显著性聚集分布, 当 $r=42$ m 时, 黄栌聚集程度最大, 此时 $L(r)=6.77$ 。油松、栓皮栎和黄栌种群分布随着尺度的变化, 均已经达到了最大聚集规

模, 随着尺度的继续增加, 在大于 50 m 的某个尺度上会进入包迹线呈现随机分布。该林分内, 黄栌和栓皮栎个体数量较少, 分散分布于样地内, 常呈几株聚集分布状态, 导致种群分布格局为聚集分布, 随着尺度的放大, 聚集单元在更大尺度上的集合, 会导致种群分布格局有随机分布的趋势。

3.1.2 种间关系分析 松山自然保护区油松林主要种群间关系见图 4。由图 4 中可以看出, 松山自然保护区油松和白蜡在尺度 0~11 m 时呈显著性负相关关系, 当尺度 $r>11$ m 时相关性减弱; 油松和核桃楸在尺度 0~35 m 上呈显著负相关, 在其余尺度上相关性小; 核桃楸和白蜡在尺度 0~13 m 上呈显著负相关, 在其余尺度上相关性减弱。

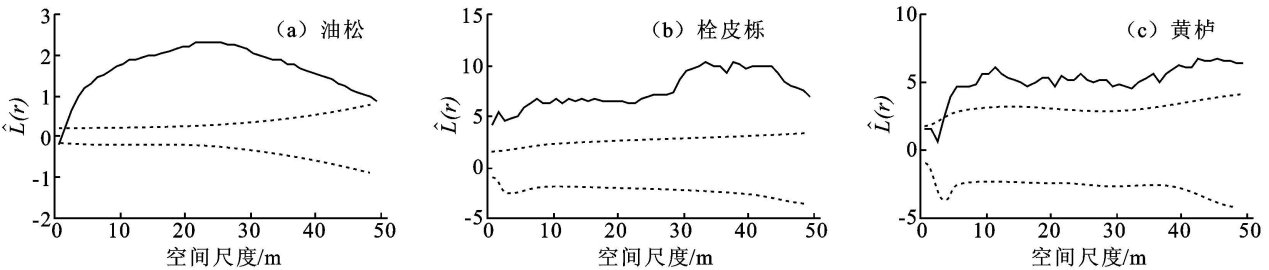


图 3 密云水源站油松林单种格局分析

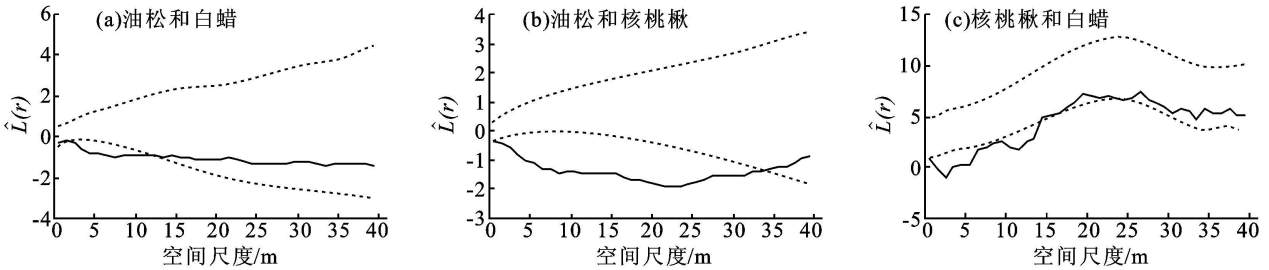


图 4 松山自然保护区油松林种间关系分析图

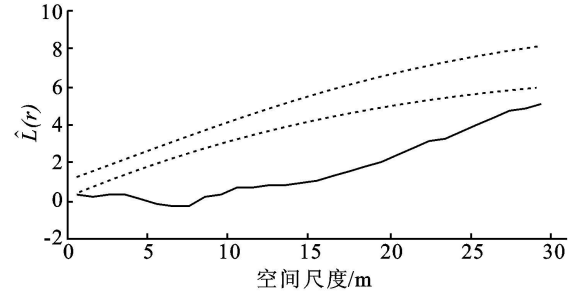


图 5 密云不老屯镇油松和槲树种间关系分析图

密云不老屯镇油松林主要种群关系见图 5。由图 5 可以看出, 密云不老屯镇油松林内, 油松种群和槲树种群在所研究的整个尺度上呈现显著负相关。油松种群优势度明显, 优势种和伴生种之间竞争激

烈, 油松抑制着槲树的生长。

由图 6 可以看出, 密云水源站的油松和栓皮栎、油松和黄栌种群的种间关系在较大尺度范围上呈负相关, 而栓皮栎和黄栌在整个尺度上相关性很小。油松和栓皮栎都属于高大乔木, 二者占有的生态位和对资源的利用相似, 导致在整个尺度上呈现显著性负相关, 两个种群间竞争激烈。油松和黄栌在 0~ 42 m 尺度上呈现显著性负相关, 当尺度 $r > 42$ m 时, 相关性减弱; 栓皮栎和黄栌在整个尺度上相关性不显著。

由此可见, 密云水源站油松和黄栌间存在着激烈的竞争, 黄栌在样地分布的聚集程度小, 个体分布较分散, 种群混交度大。

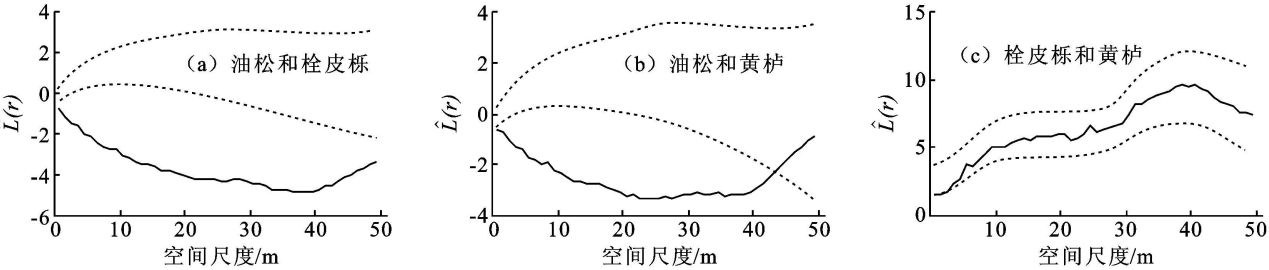


图 6 密云水源站油松林种间关系

3.2 侧柏种群空间分布格局

3.2.1 单种的空间分布格局分析 锥峰山林场侧柏种群的空间分布格局见图 7。由图 7 可以看出, 侧柏种群在 0~ 1 m 尺度上呈现随机分布, 当尺度 $r > 1$ m 时, 呈现显著性聚集分布, 最大聚集尺度为 $r = 15$ m, 种群最大聚集强度为 $L(r) = 1.68$ 。侧柏种群已经达到了最大聚集规模, 随着尺度的增加, 在大于 25 m 的某个尺度上, 种群会进入包迹线里, 种群格局呈现随机分布。

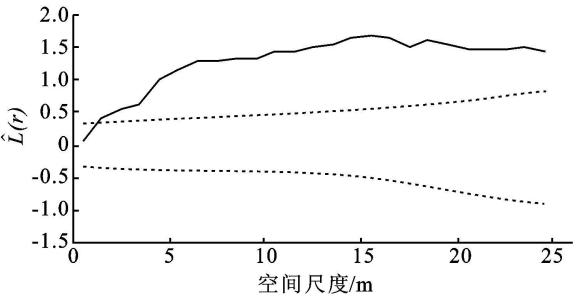


图 7 锥峰山林场侧柏种群的分布格局

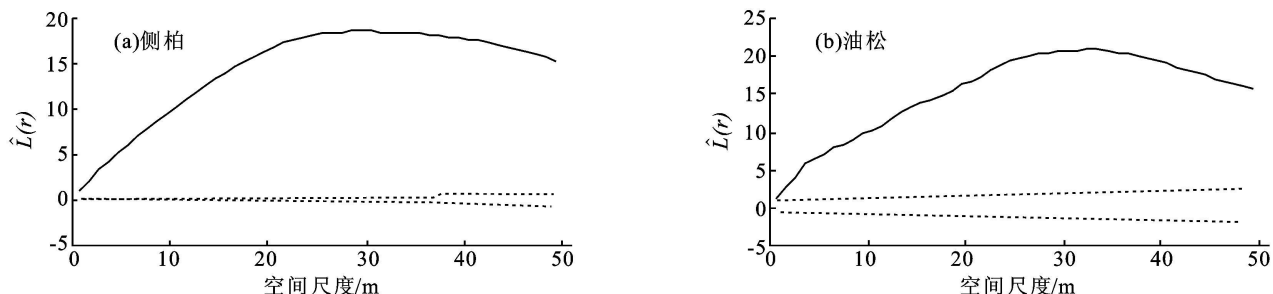


图 8 十三陵林场侧柏林单种格局分析

十三陵林场侧柏林主要种群的空间分布格局见图 8。由图 8 可以看出,十三陵林场侧柏林中,侧柏种群和油松种群在整个分析尺度上,都呈现显著性聚集分布,侧柏和油松种群的分布格局随尺度的变化趋势相同,最大聚集强度出现的尺度略有差异,当尺度 $r=29\text{ m}$ 时,侧柏种群聚集程度最大,此时 $L(r)=18.58$;当 $r=33\text{ m}$ 时,油松聚集程度最大,此时 $L(r)=20.91$,说明油松种群的水平分布格局聚集程度高于

侧柏种群,最大聚集规模也较侧柏种群大。从结果可以看出,侧柏和油松随着尺度的变化,不同种群已经达到了最大聚集规模,随尺度的继续增加,单种格局的聚集程度会降低,在大于 50 m 的某个尺度上可能会呈现随机分布。十三陵林场侧柏林林分密度较大,该样地内地形起伏较大,加剧了林木个体的聚集程度,与北京山区其它样地相比,林木单株个体占有的空间较小,种群空间分布格局呈高强度的聚集分布。

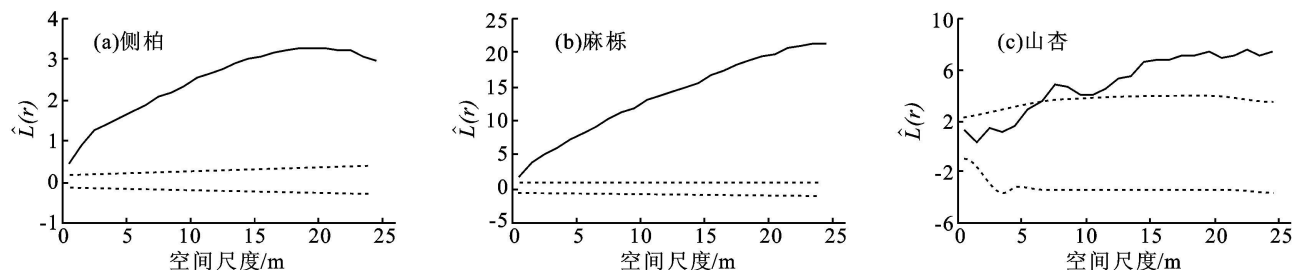


图 9 密云水源站侧柏林单种格局分析

密云水源站侧柏林主要种群空间分布格局见图 9。由图 9 可以看出,密云水源站侧柏种群和麻栎种群在整个尺度上呈现聚集分布;山杏种群在 $0\sim 5\text{ m}$ 尺度上,呈现随机分布,当尺度 $r>5\text{ m}$ 时,呈现显著性聚集分布。侧柏种群的最大聚集尺度为 $r=18\text{ m}$,最大聚集程度为 $L(r)=3.26$;麻栎种群在整个尺度上没有出现最大聚集程度,说明麻栎种群聚集很高,样地面积小,在整个分析尺度上还未达到最大聚集程度;山杏的最大聚集尺度为 $r=22\text{ m}$,最大聚集程度为 $L(r)=7.61$ 。该样地侧柏种群分布最广、株数最多,分布格局呈显著性聚集分布。麻栎种群数量居第 2 位,但麻栎种群以小斑块的形式存在于样地内,与侧柏种群呈块状混交,麻栎斑块面积较小,林木个体呈聚集分布状态,在麻栎斑块内,只有少数侧柏混生,由于受斑块面积的限制,麻栎种群没有达到最大聚集程度,随研究尺度的增大,麻栎种群的聚集程度还会增加。山杏种群数量少,林木个体高大,与侧柏种群混生在一起,不与麻栎混生,山杏的分布格局随尺度的增加而增大,说明在所研究的尺度内,山杏种群也没有达到最大聚集程度。

3.2.2 种间关系分析 十三陵林场和密云水源站侧

柏林主要种群之间的关系见图 10 和图 11。由图 10 和图 11 可知:在所研究的两个侧柏林样地内,侧柏与油松、侧柏与山杏、侧柏与麻栎、麻栎与山杏的种间关系在整个研究尺度范围内均为显著性负相关,说明十三陵林场和密云水源站侧柏林内,侧柏和其他物种的种间竞争都比较激烈,一方抑制着另一方的生长,侧柏往往淘汰其它树种,形成侧柏纯林。

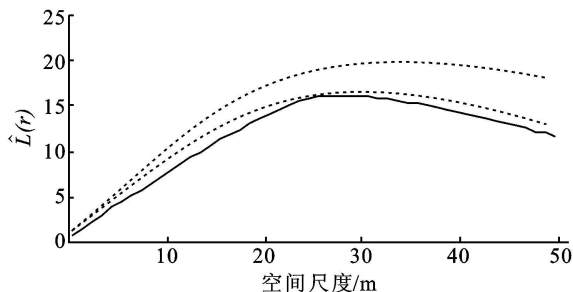


图 10 十三陵林场侧柏种群与油松种群之间的关系

3.3 华北落叶松种群空间分布格局分析

3.3.1 单种的空间分布格局分析 雾灵山林场华北落叶松林主要种群空间分布格局见图 12。由图 12(a) 可以看出,雾灵山林场华北落叶松林内,华北落叶松种群在尺度 $r<2\text{ m}$ 时,呈显著性均匀分布,在 $3\sim 41$

m 尺度上呈显著性聚集分布趋势, 当尺度 $r > 41$ m 时, 呈现随机分布。华北落叶松种群的最大聚集尺度为 $r = 25$ m, 最大聚集程度为 $L(r) = 0.52$ 。说明华北落叶松种群水平格局随尺度变化明显, 由于该林分个体现状分布比较均匀, 排列较整齐, 在小尺度表现为明显的均匀分布特征, 随尺度的扩大, 华北落叶松种群分布格局表现为聚集分布, 因样地的立地条件较均

匀, 所以导致聚集分布的可能原因是受种群密度大的影响, 随着尺度的继续增加, 华北落叶松种群水平格局表现为随机分布。白桦种群在整个尺度上呈现显著性聚集分布, 聚集程度随尺度的增大而减小, 当 $r = 11$ m, 白桦种群的聚集程度最大, 此时 $L(r) = 5.54$ 。由图 12(b) 可以看出, 随着尺度的增大, 白桦种群在大尺度上, 也会呈随机分布状态。

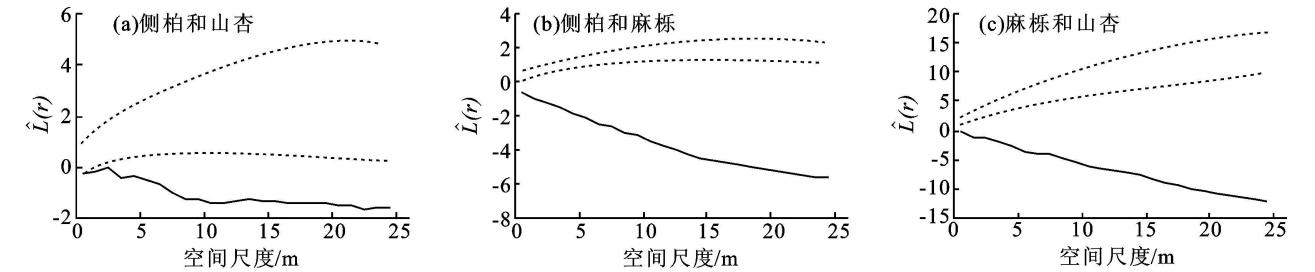


图 11 密云水源站侧柏林主要种群之间的关系

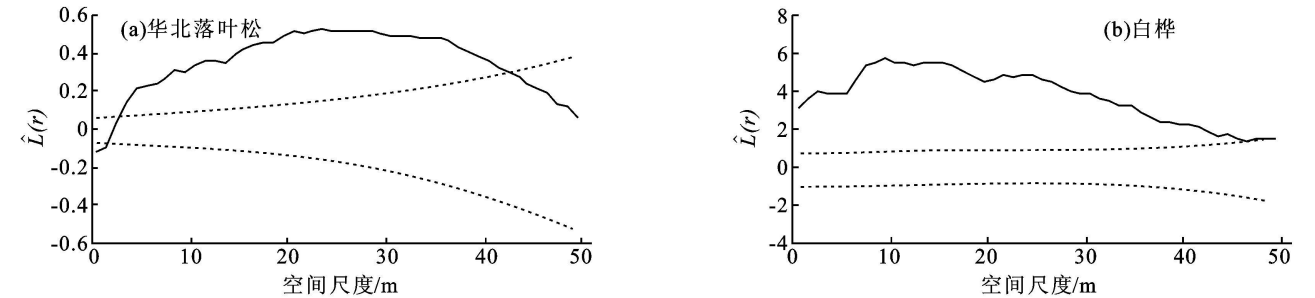


图 12 雾灵山林场华北落叶松林单种格局分析

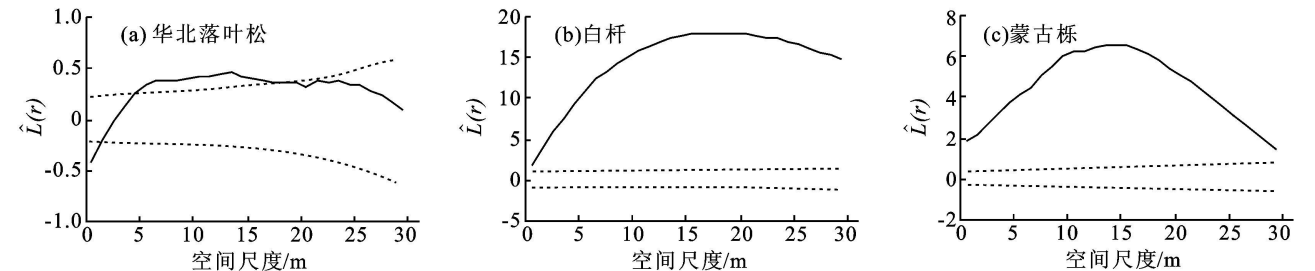


图 13 百花山自然保护区华北落叶松林单种格局分析

百花山自然保护区华北落叶松林主要种群分布格局见图 13。由图 13(a) 可以看出, 百花山保护区华北落叶松林主要种群有华北落叶松种群、白杆种群和蒙古栎种群。百花山和雾灵山的华北落叶松种群的分布格局相近, 格局随尺度的变化趋势相同, 只是格局转化的尺度和聚集强度略有差异。百花山保护区华北落叶松种群在 0~ 2 m 尺度上呈均匀分布, 在 0~ 1 m 尺度上呈现显著性均匀分布, 当尺度 $r > 2$ m 时, 华北落叶松种群格局转变为聚集分布, 在 4~ 17 m 尺度上呈现显著性聚集分布, 当尺度 $r > 17$ m 时, 呈现随机分布; 白杆种群在样地内分布呈块状, 在白杆种群组成的斑块内绝大部分为白杆, 其它树种很少, 由图 13(b) 可知, 白杆种群个体在小斑块内呈显著性聚集分布, 当尺度 $r = 16$ m 时, 白杆种群的最大聚集程度为 $L(r) =$

18.04; 蒙古栎种群在样地内以面积不等的小斑块组成, 在斑块内部分布的主要树种有蒙古栎和华北落叶松等, 由图 13(c) 可知, 蒙古栎种群的分布格局在整个分析尺度上呈现显著性聚集分布, 蒙古栎种群的最大聚集程度为 $L(r) = 6.55$, 最大聚集尺度为 $r = 14$ m。

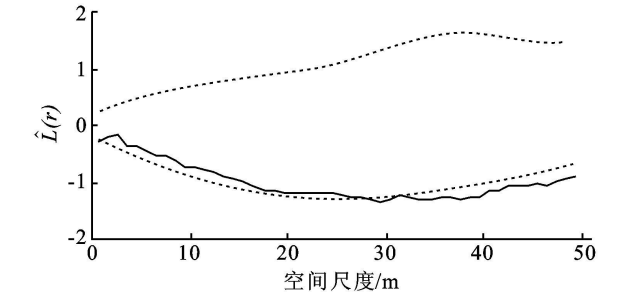


图 14 雾灵山林场华北落叶松种群和白桦种群之间的关系

3.3.2 种间关系分析 雾灵山林场和百花山自然保护区华北落叶松人工林主要种群之间的关系分析结果见图 14、图 15。雾灵山林场华北落叶松林内, 华北落叶松种群和白桦种群在 1~ 28 m 尺度上相关性很小, 当尺度 $r > 28$ m 时, 二者呈显著性负相关。说明雾灵

山林场华北落叶松种群在小尺度上竞争很小, 随着尺度的增加, 竞争增强。百花山保护区华北落叶松林内, 华北落叶松、白杆和蒙古栎种群之间的关系随尺度的变化表现为在所研究的尺度上, 均呈显著性负相关, 这说明该林分内主要种群的生长势相当, 竞争较激烈。

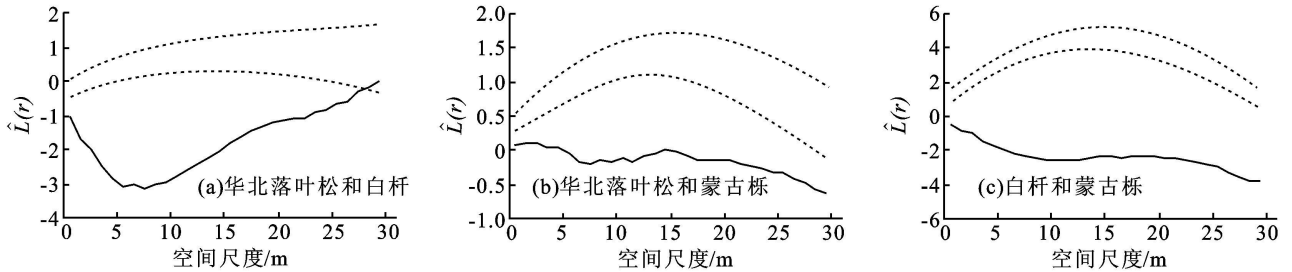


图 15 百花山保护区华北落叶松林主要种群之间的关系

4 结论与讨论

北京山区优势针叶树种群落内主要种群的分布格局随尺度的变化规律明显, 主要以集群分布为主要特征, 但不同优势树种群落的主要种群的最大聚集程度和最大聚集尺度随林分类型的不同差异较大。

密云不老屯油松和槲树种群在整个尺度上呈显著性聚集分布, 密云水源站油松种群在小尺度上油松种群的分布格局呈随机分布, 在中大尺度上呈聚集分布。两侧柏林主要种群的分布格局随尺度的变化规律基本一致, 呈显著性聚集分布, 十三陵林场侧柏种群的聚集程度明显高于锥峰山林场侧柏种群。华北落叶松种群的分布格局随尺度的变化规律为在小尺度上呈均匀分布, 在中尺度上呈显著性集群分布, 在大尺度上呈随机分布, 样地内的伴生种群的分布格局随尺度的变化均呈显著性聚集分布。

北京山区针叶林不同优势树种群落内, 主要种群之间的关系以显著性负相关关系为主, 部分种群之间随着尺度的增加, 种间负联结性减弱, 无种群关系为正相关的针叶林群落。

参考文献:

[1] Dale M R T. Spatial pattern analysis in plant ecology [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999: 207-276.

[2] Greig Smith P. Quantitative plant ecology[J]. Blackwell, 1983, 6(1): 21-36.

[3] 张金屯. 植物种群空间分布的点格局分析[J]. 植物生态学报, 1998, 22(4): 344-349.

[4] 张金屯, 孟东平. 芦芽山华北落叶松林不同龄级立木的点格局分析[J]. 生态学报, 2004, 24(1): 35-40.

[5] Moer M. Characterizing spatial patterns of trees using stem-mapped data[J]. For. Sci., 1993, 39: 756-775.

[6] Batista J, Maguire D. Modeling the spatial structure of tropical forest[J]. Forest Ecology, 1998, 110: 293-314.

[7] Reyes Tirado. Shrub spatial aggregation and consequences for reproductive success[J]. Oecologic, 2003, 136: 296-301.

[8] Szwagrzyk J. Small-scale pattern of trees in a mixed *Pinus sylvestris*-*Fagus sylvatica* forest[J]. Forest Ecology and Management, 1992, 51(4): 301-315.

[9] Besag J. Contribution to the discussion of Dr Ripley's paper[J]. Journal of the Royal Statistical Society: series B, 1977, 39: 193-195.

[10] Diggle P. Statistical Analysis of Spatial Point Patterns [M]. New York: Academic Press, 1983: 53-67.

[11] Haase P. Spatial pattern analysis in ecology based on Ripley's K-Function: introduction and methods of edge correction[J]. Journal of Vegetation Science, 1995, 6(4): 575-582.

[12] Ripley B D. Modeling spatial pattern[J]. Journal of the Royal statistical Society: Series B, 1977, 39: 172-212.

(上接第 35 页)

[7] 周国逸. 几种常用造林树种冠层对降水动能分配及其生态效益分析[J]. 植物生态学报, 1997, 21(3): 251-259.

[8] 江忠善, 宋文经, 李秀英. 黄土地区天然降雨雨滴特性研究[J]. 中国水土保持, 1983(3): 32-36.

[9] 舒若杰, 高建恩. 基于计算机绘图软件的雨滴谱测定新方法[J]. 中国水土保持科学, 2006, 4(3): 65-69.

[10] 王彦辉. 几个树种的林冠降雨特征[J]. 林业科学, 2001, 37(4): 2-9.

[11] 雷阿林, 张学栋, 唐克丽. 几种计算水滴降落速度方法的比较[J]. 水土保持通报, 1995, 15(4): 43-47.

[12] 牟金泽. 雨滴速度计算公式[J]. 中国水土保持, 1983(3): 40-41.

[13] 徐锐. 关于天然降雨和人工降雨的动能计算方法[J]. 中国水土保持, 1983(3): 37-39, 21.