

# 阔叶红松林主要种群及林隙形成木的空间格局分析

张玉双<sup>1</sup>, 段文标<sup>1\*</sup>, 杜珊<sup>2</sup>, 段文靖<sup>1</sup>, 王安娜<sup>1</sup>

(1. 东北林业大学林学院, 黑龙江 哈尔滨 150040; 2. 四川省达州市职业技术学院建工系, 四川 达州 635000)

**摘要:** [目的] 分析小兴安岭阔叶红松林固定样地内主要种群及掘根林隙形成木的空间格局, 为本地区阔叶红松林的长期经营管理和保护提供依据。[方法] 基于野外调查和数据统计, 利用点格局分析方法揭示了 2.55 hm<sup>2</sup> 样地内重要值排在前 4 位的种群在不同空间尺度上的空间格局和空间关联性, 以及掘根林隙形成木的空间格局。[结果] 表明: 样地内胸径 (DBH) ≥ 1 cm 的乔木共有 8 种, 种群密度差异大。种群的径级结构大体上呈非对称的单峰型曲线。重要值排在前 4 位的是红松、红皮云杉、白桦和榆树。红松和白桦在整个研究尺度上均为聚集分布, 红皮云杉随空间尺度的变化趋势为聚集-随机-均匀分布, 榆树在 ≤ 16 m 尺度上为随机分布, 其余尺度上为聚集分布。除红松与红皮云杉、白桦、榆树之间在小尺度呈显著负相关, 以及红皮云杉与榆树在小尺度上呈显著正相关外, 其余种群的空间关联性均不显著。样地内红松和红皮云杉是掘根林隙形成木的主要组成树种, 掘根形成的林隙形成木空间分布格局除在 3~6 m 尺度上呈均匀分布外, 其余研究尺度均呈随机分布。[结论] 小兴安岭阔叶红松林不同种群在不同的研究尺度上空间分布格局及空间关联性存在差异, 红松和红皮云杉易形成掘根倒木且整体上呈随机分布。

**关键词:** 阔叶红松林; 种群结构; 林隙形成木; 点格局分析; 种间关联性

中图分类号: S718.55

文献标识码: A

## Analysis on Spatial Distribution Pattern for Main Populations and Gap Makers in Korean Pine Broad-leaved Forest in Xiaoxing'anling Mountains of Northeast China

ZHANG Yu-shaung<sup>1</sup>, DUAN Wen-biao<sup>1</sup>, DU Shan<sup>2</sup>, DUAN Wen-jing<sup>1</sup>, WANG An-na<sup>1</sup>

(1. College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjian, China; 2. Department of Architectural Engineering, Dazhou Vocational and Technical College, Dazhou 635000, Sichuan, China)

**Abstract:** [Objective] To analyze the spatial pattern of main populations and gap makers formed by uprooting in permanent plot in Korean pine broad-leaved forest of Xiaoxing'anling Mountains. [Method] Based on field surveys and data statistics, the spatial distribution pattern and spatial association of four most important populations and the gap makers formed by uprooting at different spatial scales in the 2.55 hm<sup>2</sup> permanent plot were studied by using point pattern analysis. [Result] The result showed that great differences in the density of main populations were observed for total 8 tree species with DBH greater than 1 cm in tree layer. The DBH class structure of all populations roughly exhibited asymmetrically unimodal curve. The importance values of *Pinus koraiensis*, *Picea koraiensis*, *Betula platyphylla* and *Ulmus* spp. were ranked the top four in this plot. *Pinus koraiensis* and *Betula platyphylla* exhibi-

收稿日期: 2015-12-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(31270666)、黑龙江省自然科学基金项目(C2015057)、人力资源和社会保障部留学回国人员科技活动择优启动项目(2012-258)

作者简介: 张玉双(1989—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事森林气象学、水土保持与荒漠化防治。E-mail: 420090658@qq.com

\* 通讯作者: 段文标, 男, 博士, 教授, 博导, 主要从事森林气象学、水土保持与荒漠化防治。E-mail: dwbiao88@163.com

ted an aggregated distribution pattern at the whole research scale. The spatial distribution pattern of *Picea koraiensis* changed from aggregated, random to uniform distribution over the spatial scale. For *Ulmus* spp., its distribution was aggregated at  $\leq 16$  m scale and random at the other scales. Except that the significant negative correlation existed between *Pinus koraiensis* and *Picea koraiensis*, *Pinus koraiensis* and *Betula platyphylla*, *Pinus koraiensis* and *Ulmus* spp. at small scale, significant positive correlation between *Picea koraiensis* and *Ulmus* spp. at small scale, no significant spatial associations were observed among the other populations. *Pinus koraiensis* and *Picea koraiensis* were the major components of gap makers formed by uprooting in the plot. Spatial distribution pattern of gap makers was characterized as uniform distribution at 3 ~ 6 m scale and random distribution at all other research scales. [ **Conclusion** ] There were differences in spatial distribution pattern and spatial association among populations in different research scale in Korean pine broad-leaved forest of Xiaoxing'anling Mountains, *Pinus koraiensis* and *Picea koraiensis* are easy to form uprooted treefalls with the whole random distribution in the plot.

**Keywords:** Korean pine broad-leaved forest; population structure; gap maker; point pattern analysis

种群是物种在自然界中存在的基本单位,也是生物群落的基本组成单位<sup>[1]</sup>。种群内个体的空间分布方式,受种群自身特性、环境条件和种间关系<sup>[2]</sup>如种间竞争、更新、死亡和干扰等因素综合影响<sup>[3-6]</sup>,是种群生物学特性对环境长期适应和选择的结果<sup>[7-8]</sup>。对种群空间分布格局的分析不仅可以帮助认识和揭示种群生物学特性以及种内和种间关系,而且可以用于定量描述种群在群落中的相对位置<sup>[9]</sup>、种群与环境的关系。种群间的空间关联性不仅可以帮助反映群落内种群间的相互作用关系<sup>[10]</sup>,还可以预测未来发展趋势<sup>[11]</sup>。1998年张金屯<sup>[12]</sup>将点格局分析方法<sup>[13]</sup>引入我国,解决了种群的空间分布格局分析受限于空间尺度的问题<sup>[14]</sup>。并被广泛运用于林学、生态学等领域<sup>[2,8,15-19]</sup>,林隙是群落中一株以上林冠层树木死亡而形成的将由新个体占据与更新的空间<sup>[20]</sup>,林隙形成木指创建林隙的树木。风害是形成林隙的主要原因之一,由于风害导致的树倒和连根拔起(俗称“掘根”)<sup>[21]</sup>是林隙形成木的主要类型之一。目前国内外对林隙、林隙形成木和林隙微气候的研究较普遍<sup>[22-31]</sup>。除景鑫<sup>[32]</sup>等对云冷杉林林隙形成木的空间分布格局的报道外,而针对由掘根产生的林隙形成木的空间格局分析的研究鲜见报道。

阔叶红松林是我国东北部东部山区典型的地带性植被,在我国东北温带针阔混交林植被类型中占有重要地位,具有很高的研究价值。但是由于过度采伐、全球升温等原因,使得阔叶红松林面临着资源和生态危机<sup>[14]</sup>。因此,本文依托于小兴安岭红松阔叶混交林 2.55 hm<sup>2</sup> (170 m × 150 m) 的固定样地,阐述了阔叶红松林的物种组成、径级结构、空间分布点

格局及其空间关联性,同时分析了由掘根产生的林隙形成木的树种组成及空间分布,以期为本地区阔叶红松林的长期经营管理和保护提供科学依据。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于黑龙江省伊春市带岭区凉水国家级自然保护区(47°6'49"~47°16'10" N, 128°47'8"~128°57'19" E),地处欧亚大陆东缘,具有明显的温带大陆性季风气候特征,年均温 -0.3℃,年均降水量 67.0 mm,年均相对湿度 78%,无霜期 100 ~ 120 d。保护区内主要分布以红松(*Pinus koraiensis* Sieb. et Zucc.)为主的针阔混交林,伴生阔叶树种有紫椴(*Tilia amurensis* Rupr.)、枫桦(*Betula costata* Trautv.)、裂叶榆(*Ulmus laciniata* (Trautv.) Mayr.)、五角槭(*Acer mono* Maxim.)、大青杨(*Populus ussuriensis* Kom.)和花楷槭(*Acer ukurunduense* Trautv. et Mey.)等 20 余种;主要下木有刺五加(*Acanthopanax senticosus* (Rupr. Maxim.) Harms)、毛榛(*Corylus mandshurica* Maxim.)和珍珠梅(*Sorbaria sorbifolia* (L.) A. Br.)、东北山梅花(*Philadelphus schrenkii* Rupr.)等;主要草本植物有东北蹄盖蕨(*Athyrium brevifrons* Nakai ex Kitagawa)、宽叶苔草(*Carex siderosticta* Hance)和小叶芹(*Aegopodium alpestre* Ledeb.)等;藤本植物有山葡萄(*Vitis amurensis* Rupr.)、狗枣猕猴桃(*Actinidia kolomikta* (Maxim. & Rupr.) Maxim.)和五味子(*Schisandra chinensis* (Turcz.) Baill.)等。

### 1.2 研究方法

1.2.1 样地选取及外业调查 2011年6月在阔叶红松混交林内,经过踏查筛选出具有较多林隙的林

分作为试验地。在该林分内,设置 170 m × 150 m (2.55 hm<sup>2</sup>) 的矩形样地,在样地内用罗盘仪布设 255 个 10 m × 10 m 的网格,确定样地内胸径 ≥ 1 cm 所有树种及丘和坑微立地上所有的掘根倒木(林隙形成木)的位置,辨别树木的种类,测量并记录树木的胸径、树高、株数。

1.2.2 点格局分析 通过对样地内各树种重要值的比较,判断群落内优势树种,选取重要值位于前 4 位的红松(*Pinus koraiensis* Sieb. et Zucc.)、红皮云杉(*Picea koraiensis* Nakai)、白桦(*Betula platyphylla* Suk.)和榆树(*Ulmus* spp.)进行种群的空间分布格局分析。以样地内各主要种群和由掘根产生的林隙形成木的空间点坐标为基础数据,运用 Ripley 的 K(t) 函数,计算各尺度下样地内主要种群和由掘根产生的林隙形成木的空间格局及空间关联性。采用 Monte-Carlo 拟合、检验 Ripley K(t) 函数,计算置信区间。空间尺度为样地最短边长的一半,即 75 m,步长值为 1 m。

1.2.3 数据处理 利用 Excel 2010 进行数据统计分析。使用 Programita for Point Pattern Analysis 2010 软件进行主要种群、种群之间和掘根林隙形成木的点格局分析。Monte-Carlo 模拟检验 100 次,得到由上下两条包迹线围成的 99% 的置信区间。利用 SigmaPlot 12.5 软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 种群特征及点格局分析

2.1.1 样地内树种组成和径级结构 由表 1 可知,阔叶红松林样地内胸径 ≥ 1 cm 的乔木树种共有 8 种 1 220 株,重要值排在前 4 位的树种分别是红松、红皮云杉、白桦、榆树,这 4 个树种的相对多度之和达到 87.3%,而剩余 4 个树种的相对多度之和仅为

12.7%,其中红松的个体数最多,占样地总数的 33.9%。样地中所有个体的平均胸径为 17.52 cm,而红松的平均胸径为 30.48 cm,远远高于样地的平均水平,但红松胸径的标准差较大,说明样地中红松的胸径大小差异较大。红松和红皮云杉的相对多度和相对频度较其它树种高。红松以相对多度 33.9%,相对显著度 59.89% 的优势位于重要值第一位。红皮云杉的株数为 367 株,相对多度 30.1%,相对频度 25.7%,重要值 24.9%,仅次于红松,居于第二位。白桦的株数较多,其相对多度为 17.5%,重要值为 15.5,因此位于第三位。榆树的株数比冷杉少,但榆树的平均胸径、相对显著度和相对频度比冷杉高,因此其重要值排在第 4 位。样地中稠李(*Padus racemosa* (Lam.) Gilib.)和枫桦株数差异不明显,但稠李的平均胸径相对较大,所以稠李的重要值大于枫桦,由此可知,当株数差异不显著时,径级大的树种更容易成为主要种群。样地中花楷槭只有 10 株,属于该林分的偶见树种。

在阔叶红松林样地内,林木的胸径分布呈非对称的单峰型曲线(图 1),树木胸径分布范围很广(1 ~ 109.2 cm)。其中径级在 12 ~ 32 cm 的株数较多,占总体径级分布比例的 76.39%;径级在 12 ~ 16 cm 的株数最多,近 220 株,占 31.31%。当林木径级 > 32 cm 时,随着径级的增大,株数显著减少,径级 > 40 cm 的个体数占 10.16%,说明该样地内小径级和中径级的树木占主导。样地内林木胸径在 52 ~ 68 cm 范围内的林木株数变化较小,胸径 > 80 cm 的林木只有 3 株,均为红松。

2.1.2 主要种群的空间分布 选取样地内重要值排在前 4 位的红松、红皮云杉、白桦和榆树进行种群的空间格局分析(图 2)。从图 2 可知:样地中红松和红皮云杉均有较多分布,且红松比较集中分布在样地西北部分,红皮云杉集中分布在样地的西南和

表 1 样地内种群组成的数量特征

树种	株数	胸径/cm	树高/m	胸高断面面积/	蓄积量/	相对多度/%	相对显著度/%	相对频度/%	重要值/%
		平均值 ± 标准差	平均值 ± 标准差	(m <sup>2</sup> · hm <sup>-2</sup> )	(m <sup>3</sup> · hm <sup>-2</sup> )				
红松 <i>Pinus koraiensis</i> Sieb. et Zucc.	413	30.48 ± 16.63	25.03 ± 8.71	11.81	159.01	33.9	59.89	27.2	40.3
红皮云杉 <i>Picea koraiensis</i> Nakai.	367	18.09 ± 8.13	19.45 ± 7.13	3.70	36.43	30.1	18.75	25.7	24.9
白桦 <i>Betula platyphylla</i> Suk.	213	19.16 ± 7.43	21.44 ± 7.04	2.41	17.96	17.5	12.21	16.9	15.5
榆树 <i>Ulmus</i> spp.	71	18.92 ± 9.19	16.97 ± 7.88	0.78	6.58	5.8	3.97	10.2	6.7
稠李 <i>Padus racemosa</i> (Lam.) Gilib.	36	18.97 ± 7.20	15.79 ± 4.97	0.40	2.65	2.9	2.02	6.3	3.8
冷杉 <i>Abies fabri</i> (Mast.) Craib	79	11.61 ± 5.29	11.19 ± 4.48	0.33	2.52	6.5	1.66	7.5	5.2
枫桦 <i>Betula costata</i> Trautv.	31	17.37 ± 7.24	19.24 ± 6.76	0.29	2.63	2.5	1.49	4.7	2.9
花楷槭 <i>Acer ukurunduense</i> Trautv. et Mey.	10	5.53 ± 2.11	6.05 ± 2.98	0.01	0.04	0.8	0.05	1.5	0.8
合计	1 220	17.52 ± 7.90	16.33 ± 6.24	19.72	227.82	100.00	100.00	100.0	100.0

东北部分;白桦沿样地东北-西南方向对角线较大强度集中分布的现象;榆树零星分布在样地内。

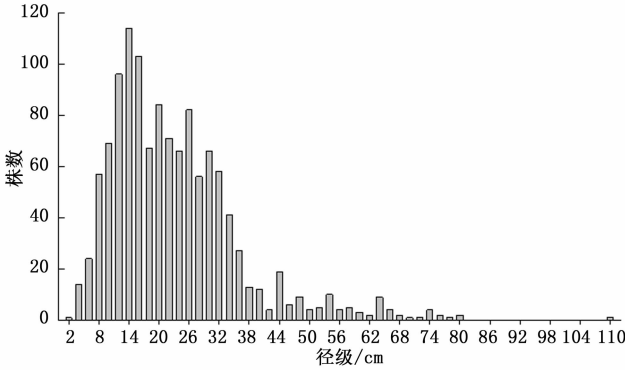


图1 样地内林木的径级结构

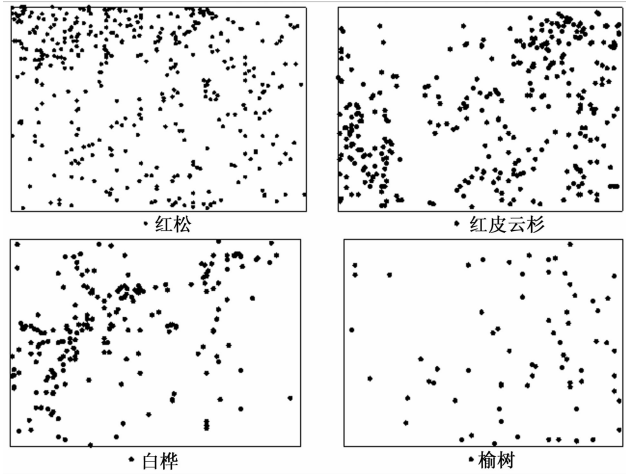


图2 样地内主要种群的点状分布

由图3可知,在该样地内,红松和白桦种群在所有尺度上均呈现较大强度的聚集分布,且均随着尺度增大,聚集程度先增大后降低。红松种群在  $r = 22$  m 时,聚集尺度最大,  $L(r) = 3.00$ ,当  $r = 75$  m 时,红松种群呈现随机分布的趋势。白桦种群在该样地内聚集强度最大,在  $r = 25$  m 时,  $L(r) = 5.62$ 。红皮云杉种群在样地内出现3种分布类型,即  $r < 40$  m,该种群呈聚集分布;在  $r = 16$  m,聚集程度最大,  $L(r) = 2.77$ ;在  $40 \sim 53$  m 尺度上表现为随机分布;当  $r > 53$  m 时,则表现为均匀分布。榆树在尺度  $r < 16$  m 时,表现为随机分布,其余研究尺度上均表现为聚集分布,当  $r = 38$  m,聚集强度最大,  $L(r) = 3.83$ 。

2.1.3 主要种群的种间关系 由图4可知,在该样地所有研究尺度上,红松与红皮云杉、榆树之间,白桦与榆树之间呈显著负相关性,红松与白桦、白桦与红皮云杉、红皮云杉与榆树之间呈正相关性。红松与红皮云杉、白桦与榆树均在  $> 2$  m 尺度上呈显著负相关性,且均随尺度的增大负相关性先增大后减小。红松与红皮云杉在  $r = 45$  m 时,负相关最大,  $L(r) = -2.48$ ,白桦与榆树在  $r = 39$  m 时,负相关最大,  $L(r) = -4.21$ 。红松与白桦在  $3 \sim 5$  m 尺度上呈负相关性,在  $> 13$  m 的所有研究尺度上存在显著的正相关性,且随尺度的增大显著性逐渐增强,在

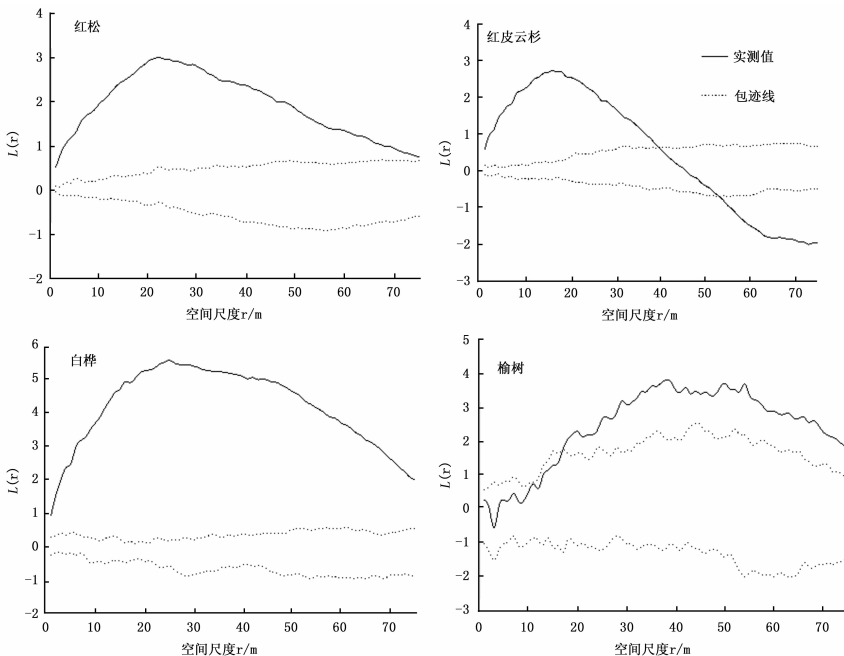


图3 样地内主要种群的点格局分析

$r = 50\text{ m}$  时,正相关最大, $L(r) = 4.03$ 。红松与榆树在  $13 \sim 63\text{ m}$  尺度上,负相关性显著。红皮云杉与白桦在尺度  $< 25\text{ m}$  和  $> 68\text{ m}$  范围上表现为正相关,

种间关联性很弱。红皮云杉与榆树在  $9 \sim 32\text{ m}$  尺度上呈正相关,随着空间尺度的增大,种间变为无关联。

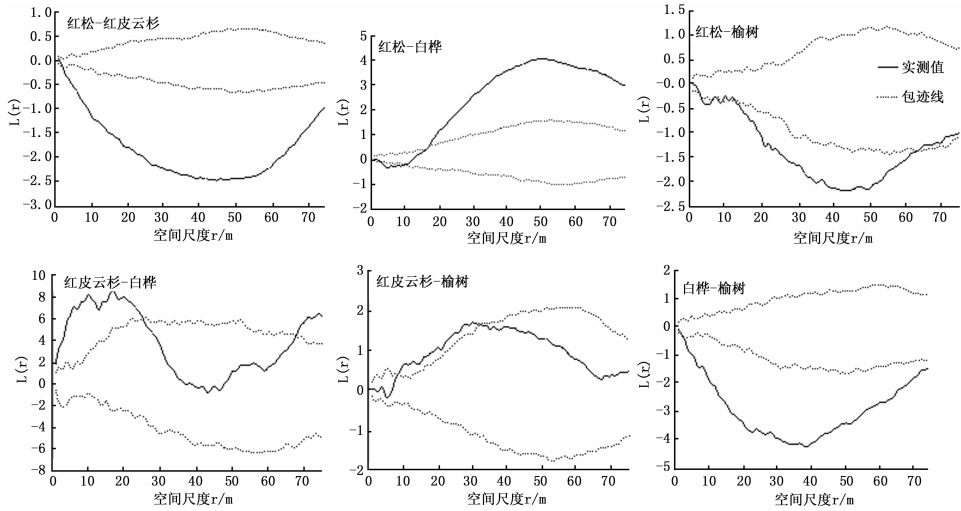


图4 样地内主要种群的空间关联性分析

## 2.2 林隙形成木的空间分布格局

林隙是阔叶红松林内较典型的小尺度干扰,林隙干扰驱动了其林分结构的维持和发展。由于受地形和气候的影响,森林里常见风的干扰导致的树倒及树木的连根拔起<sup>[21]</sup>。掘根形成的丘和坑微立地在维持森林物种多样性和森林景观格局等方面发挥着重要的作用<sup>[25]</sup>。因此,本研究选取在样地内所有丘和坑微立地上的掘根林隙形成木进行空间分布格局分析。

2.2.1 样地内由掘根产生的林隙形成木的组成特征 由表2可知,在  $2.55\text{ hm}^2$  的阔叶红松林样地内,通过掘根方式形成的丘坑微立地的林隙形成木共有42株,其中红松13株,占总株数的31.0%,平均胸径38.5 cm;红皮云杉18株,占总株数的42.9%,平均胸径29.4 cm。从树种组成和平均胸径看,红松和红皮云杉是掘根林隙形成木主要组成树种,其余为少量的白桦、冷杉和稠李,稠李仅有1株。

位均有分布。从图6所有林隙形成木的点格局分布可以看出,掘根产生的林隙形成木除在  $3 \sim 6\text{ m}$  尺度上呈均匀分布外,其余研究尺度均呈随机分布。

表2 样地内由掘根产生的林隙形成木的组成特征

树种	数量	出现频率	平均胸径 ± 标准差/cm	胸径变异系数
红松	13	31.0	38.5 ± 11.4	29.7
红皮云杉	18	42.9	29.4 ± 5.1	17.5
白桦	7	16.7	20.2 ± 4.0	19.8
冷杉	3	7.1	27.2 ± 2.2	8.1
稠李	1	2.4	23.5 ± 0.0	--

2.2.2 掘根产生的林隙形成木的空间分布 由图5可知,掘根形成的林隙形成木在样地内大多数部

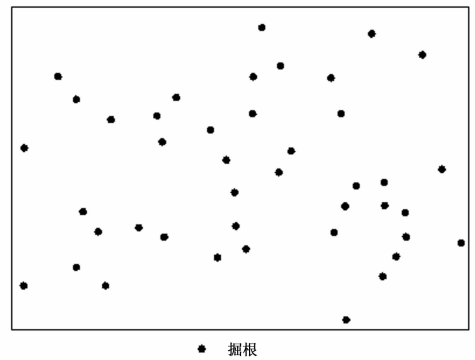


图5 掘根林隙形成木的点状分布

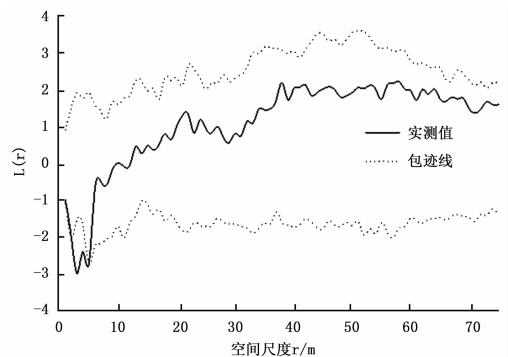


图6 掘根林隙形成木的点格局分析

## 3 讨论

### 3.1 种群结构特征

从小兴安岭阔叶红松林群落结构分析,胸径 $\geq 1$  cm的乔木有8种,种群密度差异较大,红松以株数413株、平均胸径30.48 cm在群落中占据明显的优势地位,这说明样地中的红松种群处于近成熟阶段。虽然红皮云杉、白桦、榆树、稠李和枫桦的平均胸径差异较小,但是株数多的种群其重要值较大,这说明株数相当时胸径大的种群更容易成为该林分的优势种和建群种。从径级来看,整个林分种群的径级结构大体上呈非对称的单峰型曲线,中、小径级的林木占绝大多数,同时林分中也有一定数量的大径级林木,这能够保证群落的稳定发展和正常生长。阔叶红松混交林内,因有林隙的存在,能够为演替先锋树种创造良好的生存环境<sup>[17]</sup>。

### 3.2 主要种群的空间分布格局

种群空间分布格局是种群生物学特性对环境长期适应和选择的结果<sup>[7-8]</sup>,对其进行分析可以更好地理解群落中物种共生的基本信息。样地内重要值排在前4位的红松、红皮云杉、白桦和榆树种群的空间分布格局分析表明:红松和白桦种群的点格局分布类型在所有研究尺度上均呈聚集分布,且聚集程度均随研究尺度的增大先增大后降低,但红松在一定尺度后呈现随机分布的趋势;红皮云杉种群在样地内呈现3种分布类型,不同的空间尺度分布类型不同,在 $< 40$  m尺度上呈聚集分布,在中尺度上呈随机分布,大尺度上为均匀分布,这与杨华等<sup>[33]</sup>研究结论相符;榆树的点格局分布类型则表现为随着尺度的增大由随机分布变为聚集分布。由此可见,研究尺度对种群的空间格局影响极大<sup>[14]</sup>。种群的空间分布格局在小尺度上受种内竞争、种子传播方式等的影响,在大尺度上受物种分布的异质性或斑块性以及不同的环境条件(如地形、土壤水分等)影响<sup>[16,34]</sup>。聚集分布是植物种群最普遍的分布形式,该林分中主要由中小径级的林木组成,一般来说,因小径级个体需要的资源较少、竞争相对较弱、受种子散布的限制,从而呈现主要种群的聚集性分布<sup>[16]</sup>,本研究林分的分布规律符合侯红亚<sup>[14]</sup>的“小径木个体表现为较强的聚集分布”结论。

### 3.3 主要种群之间的关联性

种群间的空间关联性受空间尺度的影响,反映种群间的相互关系及对资源的争夺能力。红松与红

皮云杉、榆树之间表现为显著负相关性,且都在 $r = 40$  m左右负相关性达到最大。这是因为红松占据林分的主林层,红皮云杉和榆树在红松林冠下层,受红松影响较大,与红松激烈竞争光照、降水等条件,只有当占据主林层的红松倒下或者死亡,其他种群才能获得更好的环境条件,这与杜志等<sup>[35]</sup>的研究结果相一致。榆树和白桦都是阔叶树种,具有相似的喜光生态习性,对空间和资源的竞争较为激烈,所以它们之间表现为显著负相关性。红松与白桦之间在大部分研究尺度上显著正相关,说明白桦与红松有着显著的互利共生关系,白桦是红松良好的伴生树种,能够较好地维持阔叶红松混交林群落的稳定性和物种的多样性。红皮云杉与白桦、榆树在某一尺度上呈现较弱的正相关性,在另一尺度则表现为彼此独立的关系,这说明群落间没有出现明显的种间竞争。

### 3.4 掘根林隙形成木的空间格局

林隙形成木的形成受诸多因素影响,如树木年龄、地形、病虫害、气候条件等。森林中掘根的产生促进了周围树木和草本群落的再生,也改善了林隙内的光照、温度和水分等环境因素<sup>[25]</sup>。丘和坑微立地上的林隙形成木共有42株,其中红松和红皮云杉是掘根林隙形成木主要组成树种。作者在对林隙边缘木的调查中发现,红松和红皮云杉径级稍大的树木容易烂芯,这成为在受到风害时掘根树种以红松和红皮云杉为主的原因之一。所有林隙形成木的点格局分布表明,由掘根产生的林隙形成木除在3~6 m尺度上呈均匀分布外,其余研究尺度均呈随机分布。

## 4 结论

(1)样地内胸径 $\geq 1$  cm的乔木有8种,种群密度差异较大。整个林分种群的径级结构大体上呈非对称的单峰型曲线,中、小径级的林木占绝大多数。红松在群落中占据优势地位,处于近成熟阶段。

(2)样地内重要值排在前4位的树种是红松、红皮云杉、白桦和榆树。红松和白桦种群的点格局分布类型在所有研究尺度上均呈聚集分布,红皮云杉种群在不同尺度上分布呈聚集-随机-均匀分布。榆树种群则表现为随着尺度的增大由随机分布变为聚集分布。

(3)就主要种群间的空间关联性而言,红松与红皮云杉、榆树之间表现为显著负相关性,且都在 $r = 40$  m左右负相关性达到最大,榆树和白桦之间表

现为显著负相关性,红松与白桦之间在大部分研究尺度上显著正相关。

(4)在样地内,红松和红皮云杉是形成具有丘和坑微立地林隙形成木的主要组成树种。所有林隙形成木的点格局分布在大尺度上均呈随机分布。

综上,本文利用点格局方法对多个尺度上的小兴安岭阔叶红松林样地内的主要种群的空间分布格局及其空间关联性和由掘根产生的林隙形成木的空间分布进行了分析,为阔叶红松林的保护和可持续经营提供一定的理论支持。

## 参考文献:

[1] 李博. 生态学[M]. 北京:高等教育出版社,2003.

[2] 操国兴,钟章成,刘芸,等. 缙云山川鄂连蕊茶种群空间分布格局研究[J]. 生物学杂志,2003,20(1):10-12.

[3] Getzin S, Dean C, He F, *et al.* Spatial patterns and competition of tree species in a Douglas-fir chronosequence on Vancouver Island[J]. *Ecography*, 2006, 29(5): 671-682.

[4] Fajardo A, Goodburn J M, Graham J. Spatial patterns of regeneration in managed uneven-aged ponderosa Pine/Douglas-fir forests of Western Montana, USA[J]. *Forest Ecology and Management*, 2006, 223(s1-3): 255-266.

[5] Kenkel N C. Pattern of self-thinning in Jack Pine: Testing the random mortality hypothesis[J]. *Ecology*, 1988, 69(4): 1017-1024.

[6] Sanchez Meador A J, Moore M M, Bakker J D, *et al.* 108 years of change in spatial pattern following selective harvest of a *Pinus ponderosa* stand in Northern Arizona, USA[J]. *Journal of Vegetation Science*, 2009, 20(1): 1-12.

[7] Gittins R. Canonical Analysis: A Review with Applications in Ecology[M]. Berlin: Springer, 1985.

[8] 周国英,陈桂琛,魏国良,等. 青海湖地区芨芨草群落主要种群分布格局研究[J]. 西北植物学报, 2006, 26(3): 579-584.

[9] Tirado R, Pugnaire F I. Community structure and positive interactions in constraining environments[J]. *Oikos*, 2005, 111(3): 437-444.

[10] Hao Z, Zhang J, Song B, *et al.* Vertical structure and spatial associations of dominant tree species in an old-growth temperate forest[J]. *Forest Ecology and Management*, 2007, 252(s1-3): 1-11.

[11] Kokkila T, Mkel A, Nikinmaa E. A method for generating stand structures using Gibbs marked point process[J]. *Silva Fennica*, 2002, 36(1): 265-277.

[12] 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.

[13] Diggle P J. Statistical analysis of spatial point patterns[M]. New York: Academic Press, 1983.

[14] Ripley B D. Spectral analysis and the analysis of pattern in plant communities[J]. *Journal of Ecology*, 1978, 66(3): 965-981.

[15] 侯红亚,王立海. 小兴安岭阔叶红松林物种组成及主要种群的空间分布格局[J]. 应用生态学报, 2013, 24(11): 3043-3049.

[16] 金光泽,刘志理,蔡慧颖,等. 小兴安岭谷地云冷杉林粗木质残体的研究[J]. 自然资源学报, 2009, 24(7): 1256-1266.

[17] 张健,郝占庆,宋波,等. 长白山阔叶红松林中红松与紫椴的空间分布格局及其关联性[J]. 应用生态学报, 2007, 18(8): 1681-1687.

[18] 张冕,米湘成,金光泽. 小兴安岭凉水谷地云冷杉林群落组成与空间格局[J]. 科学通报, 2014, 59(24): 2377-2391.

[19] 庞圣江,张培,贾宏炎,等. 细叶云南松群落物种多样性与种群空间分布格局[J]. 南方农业学报, 2015, 46(4): 645-651.

[20] Watt A S. Pattern and process in the plant community[J]. *Journal of Ecology*, 1947, 35(1/2): 1-22.

[21] Cooper W S. The climax forest of Isle Royale, Lake Superior, and its development[J]. *Botanical Gazette*, 1913, 55(2): 189-235.

[22] 段文标,王丽霞,陈立新,等. 红松阔叶混交林林隙大小及光照对草本植物的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(3): 614-620.

[23] 刘少冲,段文标,钟春艳,等. 阔叶红松林不同大小林隙土壤温度、水分、养分及微生物动态变化[J]. 水土保持学报, 2012, 26(5): 78-83, 89.

[24] 苏建文,岳明,王永军. 太白山红桦林林隙特征的研究[J]. 应用与环境生物学报, 2006, 12(2): 195-199.

[25] 臧润国,徐化成,高文韬. 红松阔叶林主要树种对林隙大小及其发育阶段更新反应规律的研究[J]. 林业科学, 1999, 35(3): 4-11.

[26] 刘静艳,王伯荪,臧润国. 南亚热带常绿阔叶林林隙形成方式及其特征的研究[J]. 应用生态学报, 1999, 10(4): 2-5.

[27] Runkle J R. Gap dynamics in an Ohio Acer-Fagus forest and speculations on the geography of disturbance[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1990, 20(5): 632-641.

[28] Gagnon J L, Jokela E, Moser W K, *et al.* Characteristics of gaps and natural regeneration in mature longleaf pine flat woods ecosystems[J]. *Forest Ecology and Management*, 2004, 187(2): 373-380.

[29] 王金铃,段文标,陈立新,等. 云冷杉林风倒区林隙和掘根微立地微气候变化[J]. 林业科学研究, 2015, 28(2): 173-182.

[30] 段文标,王金铃,陈立新,等. 云冷杉林风倒区坑丘微立地微气候因子时空变化及其与土温的关系[J]. 林业科学研究, 2015, 28(4): 508-517.

[31] 段文标,冯静,陈立新. 阔叶红松混交林不同大小林隙土壤含水量的时空异质性[J]. 林业科学研究, 2012, 25(3): 385-393.

[32] 景鑫,段文标,陈立新,等. 小兴安岭谷地云冷杉林主要种群及林隙形成木的空间格局[J]. 应用生态学报, 2015, 26(10): 2928-2936.

[33] 杨华,李艳丽,沈林,等. 长白山云冷杉林幼苗幼树空间分布格局及其更新特征[J]. 生态学报, 2014, 34(24): 7311-7319.

[34] Harms K E, Wright S J, Calderon O, *et al.* Pervasive density-dependent recruitment enhances seedling diversity in a tropical forest[J]. *Nature*, 2000, 404(6777): 493-495.

[35] 杜志,亢新刚,孟京辉,等. 长白山杨桦次生林主要树种的空间分布格局及其关联性[J]. 东北林业大学学报, 2013, 41(4): 36-42.

(责任编辑:彭南轩)