

# 长白山杨桦次生林不同演替阶段林木空间分布格局研究

贺 燕<sup>1</sup>, 张 青<sup>1\*</sup>, 张梦弢<sup>1</sup>, 徐 光<sup>2</sup>, 杨英军<sup>2</sup>

(1. 北京林业大学, 北京 100083; 2. 汪清林业局, 吉林 延吉 133200)

**摘 要:**运用点格局分析中的单变量和双变量 O-ring 统计方法, 分别分析了长白山杨桦次生林不同演替阶段林分全体树种和先锋树种的空间分布格局及不同演替阶段先锋树种和顶级树种间的空间关联性。结果表明, 随着演替的进行, 林分全体树种的空间分布格局由聚集分布过渡为随机分布, 先锋树种的空间分布格局由聚集分布变为随机分布。先锋树种和顶级树种的种间关系由演替早期的正关联到演替后期变为负关联。

**关键词:**杨桦次生林; 空间格局; 种间关联; O-ring 统计

**中图分类号:**S758.5      **文献标志码:**A      **文章编号:**1001-7461(2015)01-0008-06

## Spatial Distribution Patterns of Polar-birch Secondary Forest in Different Succession Process Stages in Changbai Mountain

HE Yan<sup>1</sup>, ZHANG Qing<sup>1\*</sup>, ZHANG Meng-tao<sup>1</sup>, XU Guang<sup>2</sup>, YANG Ying-jun<sup>2</sup>

(1. Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Wangqing Forestry Bureau, Wangqing, Jilin 133200, China)

**Abstract:** The univariate O-ring function statistic was used to analyze the spatial patterns of all species and pioneer species in polar-birch secondary forest in different succession process stages in Changbai Mountain. The bivariate O-ring function statistic was used to analyze the spatial correlations among pioneer species and climax species. The results showed that along with the succession, spatial pattern of all species changed from a clumped to a random distribution, and the spatial pattern of the pioneer species changed from a clumped distribution to a random distribution. Interspecies of pioneer species and climax species changed from positive association to negative association during this succession.

**Key words:** polar-birch secondary forest; spatial distribution pattern; interspecies association; O-ring function

研究空间分布格局有助于认识种群特征、种群间相互作用及种群与生存环境之间的关系, 是揭示群落演替的过程和机制的重要手段<sup>[1]</sup>。在不同的时期森林群落有不同的结构和格局<sup>[2]</sup>。通过研究森林演替过程中的种群空间分布格局动态, 对探讨森林生态系统的原始性、可持续性、群落稳定性、演替规律以及物种的生态学及更新特征等非常重要<sup>[3]</sup>。在长白山地区, 杨桦次生林是在阔叶红松林被破坏后(例如: 火烧、皆伐、撂荒等)的次生裸地上首先发生的先锋群落, 占东北次生林相当大的比重<sup>[4]</sup>。国内

学者已经对东北杨桦次生林进行了大量调查研究。主要研究方向集中在直径结构和物种组成<sup>[5-6]</sup>、林下生物量及模型<sup>[7-8]</sup>、生长过程和演替动向<sup>[9-10]</sup>、采伐和林隙更新<sup>[11-12]</sup>等方面。

而关于物种空间格局研究, 国内已经做了一些工作。有研究认为物种空间分布格局随着研究尺度变化而变化<sup>[13]</sup>, 同一物种空间分布格局因生境不同而变化<sup>[14]</sup>, 还有研究运用点格局 O-ring 统计分析得到树种的分布格局, 点格局分析克服传统空间分布格局研究方法只能分析单一尺度上的空间分布格局

收稿日期: 2014-01-19    修回日期: 2014-06-20

基金项目: 国家林业局 948 项目“异龄针阔混交林可持续经营关键技术引进”(2013-4-66)。

作者简介: 贺燕, 女, 硕士研究生, 研究方向: 天然林可持续经营理论与技术。E-mail: 419738474@qq.com

\* 通信作者: 张青, 女, 教授, 研究方向: 林业统计。E-mail: zhangq@bjfu.edu.cn

的缺点,能够分析各种尺度上的种群格局和种间关系。杜志<sup>[13]</sup>等用点格局 O-ring 统计,分析了杨桦次生林 4 个主要树种在不同林层的空间分布格局和空间关联性,结果显示树种空间分布格局随着空间尺度的增加转变为随机分布;张健<sup>[14]</sup>等对长白山红松林中红松与紫椴的空间分布格局进行研究,得出物种在较低的林层呈明显的聚集分布,而在较高的林层则呈随机或规则分布。上述研究只针对群落内主要树种空间格局及关联性进行了定量分析,而对于不同演替阶段林分的空间分布及关联性研究较少。

因此,有必要在杨桦次生林的不同演替阶段多个代表性样地上进行对比分析,深入了解长白山过伐林区杨桦林次生演替机理,为把次生林恢复为地带性稳定森林群落提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 样地概况

研究样地位于吉林省汪清县东北部金沟岭林场,是长白山系老爷岭山脉雪岭支脉,经营面积为 16 286 hm<sup>2</sup>,该林区属于低山丘陵地貌,坡度在 5°~25°之间,海拔在 300~1 200 m。气候具有温带海洋季风气候的特点,全年平均气温 3.9℃,≥10℃年积温为 2 145℃;年降水量 600~700 mm,且多集中在 7 月份。无霜期为 110~130 d,积雪平均厚达 50

cm,土壤为低山灰化土灰棕壤区,母岩为玄武岩。

选择 20 世纪 40—70 年代原始红松针阔混交林被过量采伐、火烧后恢复的天然杨桦次生林为研究对象。以空间代替时间的方法设置样地,并保证土壤条件和地形条件(例:海拔、坡向、坡度)尽量一致。样地的主要乔木树种有枫桦(*Betula costata*)、白桦(*Betula platyphylla*)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)、椴树(*Tilia amurensis*)、山杨(*Populus davidiana*)、色木槭(*Acer mono*)、山桃(*Amygdalus davidiana*)、落叶松(*Larix olgensis*)、红松(*Pinus koraiensis*)、云杉(*Picea jezoensis*)、冷杉(*Abies nephrolepis*)、大青杨(*Populus ussuriensis*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)、暴马丁香(*Syringa amurensis*)等。

在吉林省汪清县金沟岭林场内设置杨桦次生林固定样地 16 块,面积皆为 0.2 hm<sup>2</sup>。样地调查年份分别在 2007 年、2008 年和 2013 年。调查因子包括胸径、树高、冠幅、第一枝下高和坐标等。依据样地内先锋树种和顶级树种所占比例为依据划分演替阶段、同时考虑混交林针阔比选择样地 8 块。由表 1 可以看出,1 号样地到 8 号样地先锋树种比例逐渐减少,而顶级树种保持不变或者增加。基于空间替代时间的方法,上述样地可以作为杨桦林次生演替序列进行对比研究。

表 1 样地基本情况  
Table 1 The basic statistics of each sample

样地 编号	株数 /(株·hm <sup>-2</sup> )	平均胸径 /cm	断面积 /(m <sup>2</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	针阔比	树种比例 (先锋/顶级)	树种组成
1	2 400	8.7	9.5	10 阔	6/无	4 杨 2 白 2 色 1 榆+椴-红-黄
2	1 960	9.5	12.4	9 阔 1 针	5/1	3 白 2 杨 2 色 1 丁 1 云 1 杂
3	1 735	13.0	19.0	8 阔 2 针	5/2	3 白 2 杨 1 色 1 椴 1 红 1 云+杂-黄-槐
4	1 670	12.3	21.1	8 阔 3 针	5/2	4 白 1 杨 1 枫 1 红 1 云 1 色+榆+冷+杂+柞
5	1 715	13.7	21.4	10 阔	4/2	3 白 2 水 1 榆 1 杨 1 色 1 杂+椴-红-冷-云-黄
6	1 635	14.2	22.5	10 阔	4/2	4 白 2 色 1 水 1 椴 1 榆 1 杂+冷+云-枫-红
7	1 685	15.0	21.1	7 阔 3 针	3/2	2 落 2 枫树 1 色 1 杂 1 冷 1 白 1 椴+榆+云-红
8	1 436	14.8	22.6	7 阔 3 针	2/2	2 云 2 榆 1 白 1 杂 1 落 1 丁 1 色+杨

### 1.2 方法

基于点格局分析的方法,空间格局用 O-ring 统计来计算。O-ring 统计从 Ripley's K 函数发展而来,目前已经得到广泛运用<sup>[16-18]</sup>。其用圆环替代 Ripley's K 函数的圆,分离特定的距离等级,能有效的消除 Ripley's K 分析中大尺度易受小尺度累积效应的影响,提高了格局分析的精确度<sup>[19]</sup>。单变量 O-ring 统计分析可分析单一目标(1 个树种)的空间分布格局,双变量 O-ring 统计分析可分析 2 个变量间(2 个树种)的空间关联性<sup>[18]</sup>。本研究采用单变

量 O-ring 统计来分析 8 块样地全体树种和先锋树种的空间分布格局。用双变量 O-ring 统计来分析 8 块样地中先锋树种和顶级树种的空间关联性。

根据 T. Wiegand<sup>[20]</sup>等的定义,单变量 O-ring 统计值  $O(r)$ 、双变量 O-ring 统计值的计算公式分别为:

$$O^w(r) = \frac{\sum_{i=1}^n \text{Point}[R_i^w(r)]}{\sum_{i=1}^n \text{Area}[R_i^w(r)]} \tag{1}$$

$$\hat{O}_{12}^w(r)=\frac{\frac{1}{n_1}\sum_{i=1}^{n_1}\text{Points}_2[R_1,i^w(r)]}{\frac{1}{n_1}\sum_{i=1}^{n_1}\text{Area}[R_1,i^w(r)]}\tag{2}$$

式(1)为单变量 O-ring 计算公式,式(2)为双变量 O-ring 计算公式,式(2)中: $n_1$  为物种 1 的点数目; $[R_1,i^w(r)]$ 表示以物种 1 中以第  $i$  个点为圆心、 $r$  为半径、 $w$  为宽的圆环<sup>[14]</sup>。

$\text{Points}_2[X]$ (3)计算了区域  $X$  内物种 2 的点数目; $\text{Area}[X]$ (5)为区域  $X$  的面积。

$$\text{Points}_2[R_1,i^w(r)]=\sum_{\text{all } x}\sum_{\text{ally } y}S(x,y)P_2(x,y)I_r(x_i,y_i,x,y)\tag{3}$$

$$I_r^w(x_i,y_i,x,y)=\begin{cases}1 & \text{if } r-\frac{w}{2}\leq \sqrt{(x-x_i)^2+(y-y_i)^2}\leq r+\frac{w}{2} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}\tag{4}$$

$$\text{Area}[R_1,i^w(r)]=z^2\sum_{\text{all } x}\sum_{\text{ally } y}S(x,y)I_r(x_i,y_i,x,y)\tag{5}$$

上式中: $(x_i,y_i)$ 是树种 1 的第  $i$  点的坐标, $S(x,y)$ 是变量,如果坐标 $(x,y)$ 在研究区域  $X$  内,则  $S(x,y)=1$ ,否则  $S(x,y)=0$ ; $P_2(x,y)$  表示每个单元格内包含物种 2 的点数; $I_r(x_i,y_i,x,y)$ (式 4)是以树种 1 第  $i$  点坐标为中心、 $r$  为半径的圆而变化的变量; $z^2$  表示单元格面积。单变量统计是假设 2 个物种的点相同来计算的。

对于零模型(Null model)的准确选择极为重要<sup>[20]</sup>。本研究采用完全空间随机过程(CSR)模型。如果单变量  $O(r)$  值在上包迹线以上,则为聚集分布;若在下包迹线以下,为均匀分布;若在上下包迹线之间,为随机分布。对于双变量  $O_{12}(r)$  值在上包迹线以上,表示空间上正关联;若在下包迹线以下,空间上负关联;若在上下包迹线之间,空间上无相关,相互独立。

用生态学软件 Programita(2008)完成 O-ring 统计分析。因为本研究的样地大小为 40 m×50 m,因此研究的空间格局的尺度为 0~40 m,步长为 1 m。即  $O$  函数的半径从 0 m 逐步增加到 40 m,每次增加 1 m。对结果进行 99 次 Monte Carlo 模拟以便得到 99% 的置信区间<sup>[20]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 树种结构

3 大类树种—即先锋树种、伴生树种和顶级树种,在各个演替阶段所占比重明显不一样(表 1)。在次生林演替初始阶段,先锋树种—主要是白桦、杨

树较多,最大时占总体林分的 6 成,形成了杨树白桦等纯阔叶混交林。随着林分生长、发育,先锋树种减少,当地针叶顶级树种云杉、冷杉和红松及阔叶顶级树种水曲柳、椴树的数量逐渐增加。随着演替的进行,林分平均胸径和公顷断面积整体呈现增长趋势,林分公顷株数则呈现减少趋势。说明林分演替初始阶段林分内小径级树木株数多,导致林分公顷株数多而平均胸径和公顷断面积小。

### 2.2 整体空间分布格局

不同演替阶段群落树木整体空间分布格局变化见图 1。1 号样地为阔叶混交林,没有顶级树种,处于演替初期,空间格局呈强聚集分布。2、3、4 号样地也呈现较强聚集分布,只在大尺度时出现了小范围的随机分布。5、6 号样地先锋树种减少到只占林分的 4 成,整体空间分布小尺度聚集,大尺度随机分布,且有较大波动。7、8 号样地为针阔混交林,是从杨桦阔叶混交林进一步演替发展而成。两者都在 5 m 以下小尺度呈强聚集分布,但是随着尺度增大,显现出了较强的随机分布,且有向均匀分布发展的趋势。整体上看,随着林分的演替,林分整体空间分布格局呈现出由强聚集分布向随机分布甚至均匀分布过渡。

### 2.3 不同演替阶段先锋树种空间分布格局

由于样地中顶级树种的比例较少,且没有较大动态变化,所以没有研究顶级树种的空间分布格局变化(图 2)。1 号杨桦阔叶混交林样地先锋树种空间格局呈强聚集分布。2、3、4 号样地主要呈聚集分布状态,分别在 35、22、30 以上的大尺度呈现随机分布。5、6 号样地先锋树种整体呈现强随机分布。7、8 号样地先锋树种在小尺度为聚集分布,整体也为随机分布状态、且 8 号样地有均匀分布的趋势。

### 2.4 样地种间关系分析

分析演替过程中顶级树种与先锋树种的空间关联性的变化,只需要研究水平关联性即可。另外顶级树种在演替初期太矮小,如果分树高层,高层数量会比较少,导致结果不准确,故只分析水平空间关联性不考虑垂直空间关联性。对 8 块样地先锋树种和顶级树种进行双变量分析得到树种间的空间关联性(表 2)。1、2 号样地先锋树种和顶级树种关系主要表现为正相关,只在 34 m 尺度和 26~30 m 尺度出现负相关。3、4 号样地 2 树种表现相互独立。5、6、7 号样地两者负相关明显增强,个别尺度出现了正相关。8 号样地的先锋树种和顶级树种的关系表现很强的负相关。整体看演替初期样地正相关较多,演替进行到后期时,负相关明显增强。

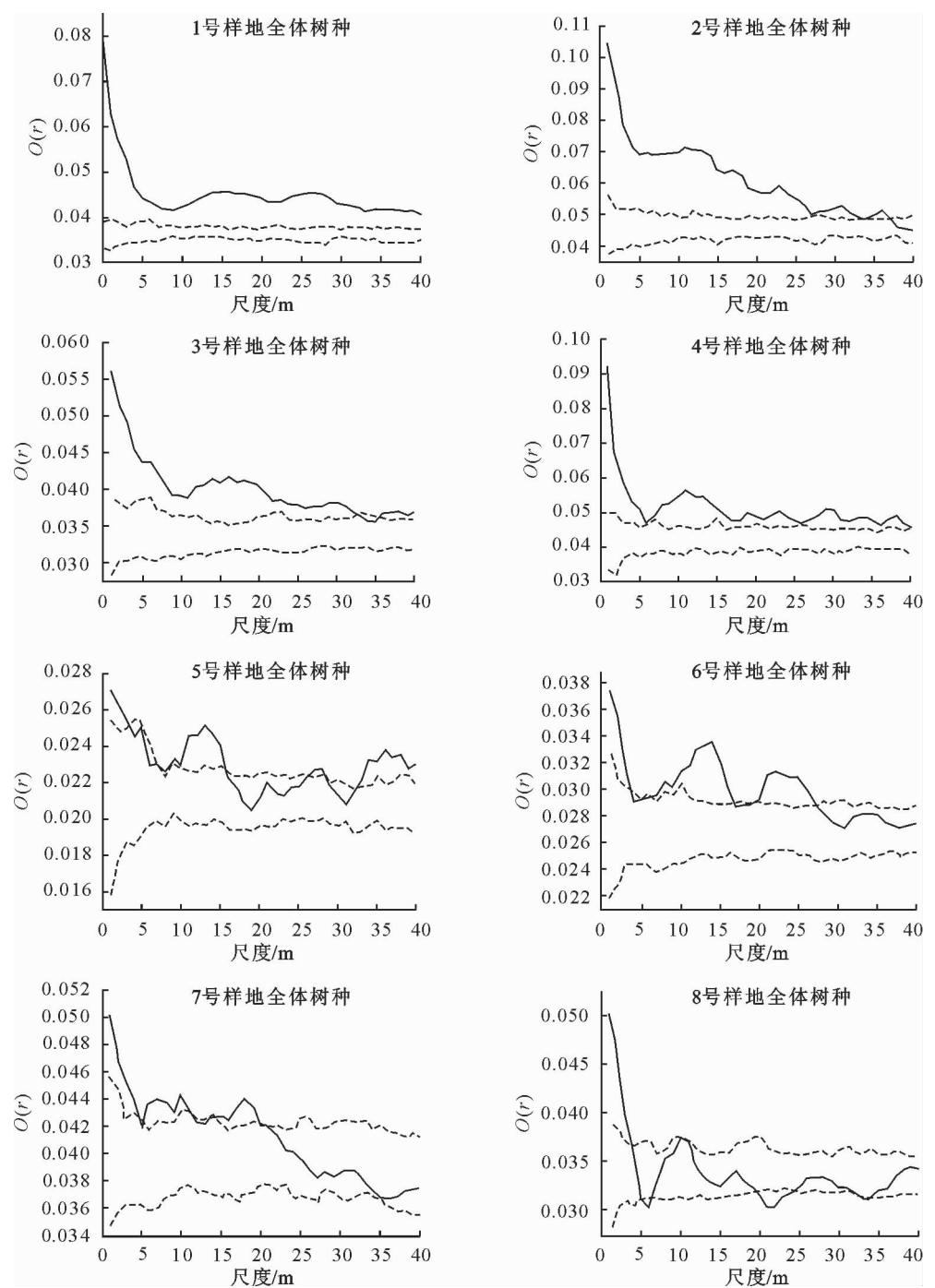


图 1 不同样地全体树种空间分布格局

Fig.1 Spatial distribution patterns of forest in different plots

表 2 先锋树种与顶级树种之间的空间关联性

Table 2 Spatial associations between pioneer species and climax species

样地 编号	尺度/m															
	0~5	6~10	11~15	16~20	21~25	26~30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
1	0	0	+	+	+	0	0	0	0	-	0	+	+	+	0	0
2	0	0	+	0	0	-	0	+	0	+	0	0	+	0	0	0
3	0	0	0	+	0	-	0	0	0	0	0	0	0	0	-	0
4	0	0	0	0	-	+	0	0	0	0	0	-	0	+	0	0
5	0	-	-	0	0	0	0	0	0	0	0	-	0	+	0	0
6	0	0	0	+	-	0	0	0	0	0	-	-	0	-	0	0
7	0	0	0	0	-	0	0	0	0	-	-	+	0	-	-	-
8	-	-	0	-	-	-	+	-	-	+	-	0	0	-	-	-

注：-表示负相关，+表示正相关，0表示不相关，置信区间 99%。

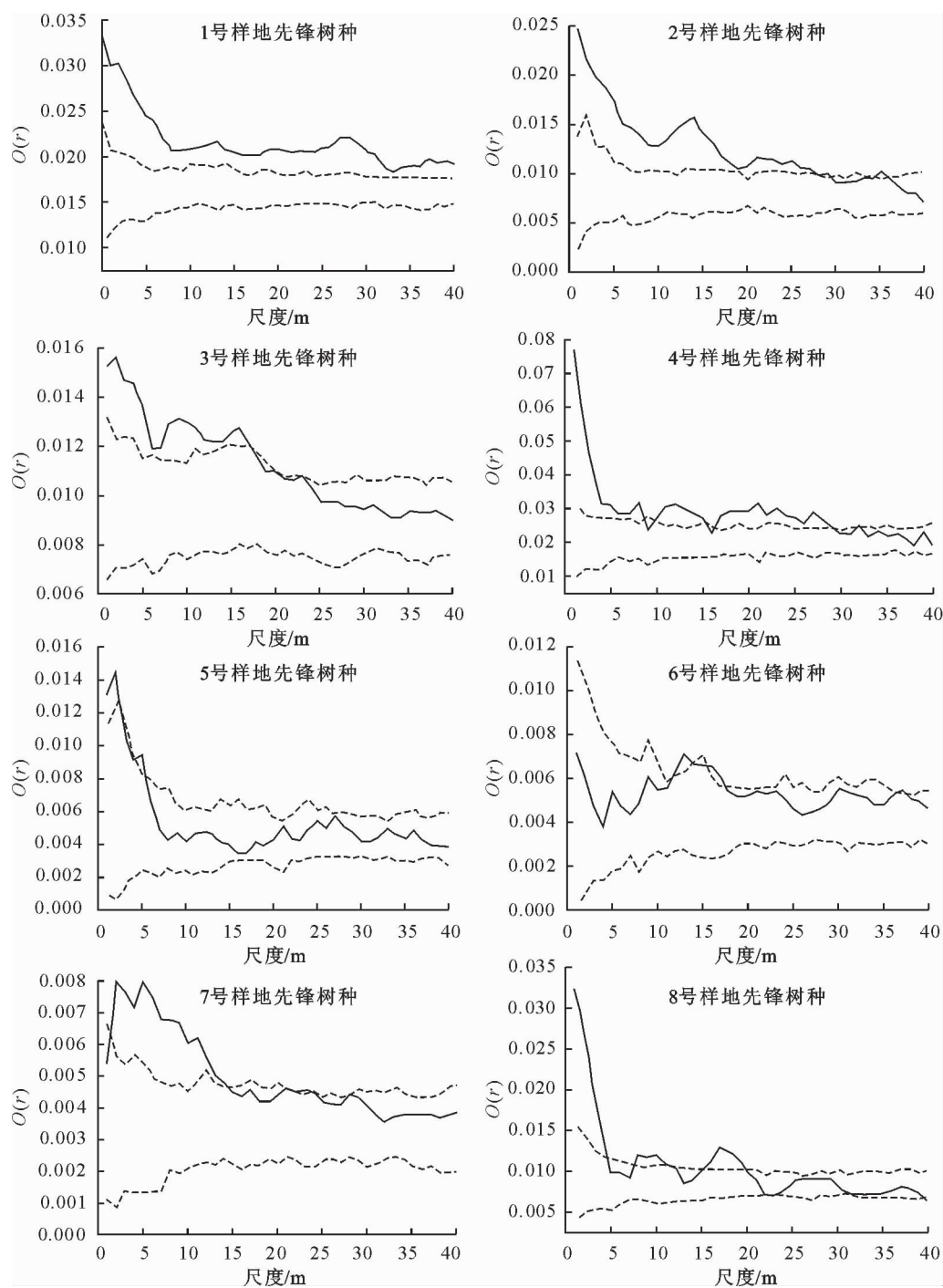


图 2 先锋树种空间分布格局

Fig. 2 Spatial distribution patterns of pioneer species

3 结论与讨论

杨桦次生林在先锋树种减少、顶级针叶树种增加的演替过程中,林分整体空间分布格局由聚集分布逐渐过渡为随机分布。先锋树种的空间分布格局由初期的聚集分布,过渡为随机分布。本研究结果表明树种在较小尺度上呈现聚集分布,这是由于树种本身的空间自相关性以及周围环境因子的诱导作用,导致林分在较小的空间尺度上树种表现聚集分布,这与以往的研究结果相符<sup>[21]</sup>。

演替初期呈现聚集分布的原因,首先先锋树种在初期成数多,山杨、白桦等先锋树种的特性是种子多,且容易传播,一旦落入到某一适宜的地块,很容存活,形成一个聚集格局。其次在演替早期,顶级树种较少,先锋种多,总体体现先锋树种的格局。再次演替初始阶段的次生林中,先锋树种山杨、白桦等喜光树种能在林下利用光照充足的林窗进行更新,导致整体呈聚集分布。还有一些林地火烧后光照充足,生境变得开阔,先锋树种山杨、白桦大量萌蘖,每个植株周围都萌生出许多小树,使得种群呈现聚集分布<sup>[22]</sup>。

随着演替的进程,分布格局逐渐变为随机分布。首先先锋树种逐渐减少,并且先锋树种自身的竞争越发激烈,部分劣势先锋种死亡,所以聚集分布程度下降,逐步向随机过渡。其次群落演替过程中,种群呈现扩散趋势。种内竞争加剧,空间生态位重新分配,聚集强度减弱,导致出现较强的随机分布。

先锋树种和顶级树种空间关联性的整体趋势是从正相关过渡为负相关。云冷杉与红松在幼年时与先锋树种白桦、山杨等先锋树种呈现正相关,演替初期,先锋树种多,而且长得快,顶级树种少、小且长得慢,在先锋树种之下,能够耐荫存活,所以呈现正相关。这也体现了云冷杉与红松幼年时的耐阴性,其能利用林下的荫庇生长更新。而在演替进行到后来顶级树种和先锋树种呈现强负相关,这主要是因为随着云冷杉、红松年龄的增长,数量的增多,占据主林层,耐阴性逐渐减弱,而先锋树种非常喜光不能耐荫,会先死亡。作为当地群落顶级树种,与其他树种争夺环境资源的过程中占据主动,对先锋树种的依赖性减弱从而表现为负相关,也暗示了杨桦次生林向云冷杉针阔混交林的演替趋势。注意到演替的后期树种竞争激烈,在经营时可伐去红松和云冷杉大树周围的先锋树种,为顶级树种的生长提供更多的生长空间,阳光和养分资源,促进顶级树种生长,促进群落正向演替。

了解杨桦次生林演替过程中空间分布格局和关联性,能为森林正向演替提供依据和指导。在研究过程中,森林的空间格局与空间尺度紧密相关,格局随空间尺度变化明显<sup>[23-24]</sup>,所以有必要建立代表性固定大样地进行定期长远的监测。

参考文献:

[1] DALE-MARK RT. Spatial pattern analysis in plant ecology [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.

[2] 吴大荣,朱政德. 福建省罗卜岩自然保护区闽楠种群结构和空间分布格局初步研究[J]. 林业科学,2003,39(1):23-30.

WU D R,ZHU Z D. Preliminary study on structure and spatial distribution pattern of *Phoebe bournei* in Luoboyan Nature Reserve in Fujian Province[J]. Scientia Silvae Sinicae,2003,39(1):23-30. (in Chinese)

[3] 刘足根,朱教军,袁小兰,等. 辽东山区次生林主要树种种群结构和格局[J]. 北京林业大学学报,2007,29(1):12-18.

LIU Z G,ZHU J J,YUAN X L, *et al.* On the structure and patterns of major tree species populations of secondary forests in the montane regions of eastern Liaoning Province[J]. Journal of Beijing Forestry University,2007,29(1):12-18. (in Chinese)

[4] 朱教君,刘世荣. 次生林概念与生态干扰度[J]. 生态学杂志,2007,26(7):1085-1093.

ZHU J J, LIU S R. Conception of secondary forest and its re-

lation to ecological disturbance degree[J]. Chinese Journal of Ecology,2007,26(7):1085-1093. (in Chinese)

[5] 郝占庆,张健,李步杭,等. 长白山次生杨桦林样地:物种组成与群落结构[J]. 植物生态学报,2008,32(2):251-261.

HAO Z Q,ZHANG J,LI B H, *et al.* Natural secondary poplar-birch forest in Changbai Mountain: species composition and community structure[J]. Chinese Journal of Plant Ecology,2008,32(2):251-261. (in Chinese)

[6] 龚直文,亢新刚,杨华,等. 长白山杨桦次生林直径结构研究[J]. 西北林学院学报,2009,24(3):1-6.

GONG Z W,KANG X G,YANG H, *et al.* Diameter structure of polar-birch secondary forests in Changbai Mountain [J]. Journal of Northwest Forestry University,2009,24(3):1-6. (in Chinese)

[7] 李晓娜,国庆喜,王兴昌,等. 东北天然次生林下木树种生物量的相对生长[J]. 林业科学,2010,46(8):22-32.

LI X N, GUO Q X, WANG X C, *et al.* Allometry of understorey tree species in a natural secondary forest in Northeast China [J]. Scientia Silvae Sinicae,2010,46(8):22-32. (in Chinese)

[8] 张梦弢,亢新刚. 长白山金沟岭杨桦次生林下幼树生物量模型[J]. 安徽农业大学学报,2013,40(3):393-399.

ZHANG M T,KANG X G. Biomass model for polar-birch secondary forest saplings in Jingouling forest farm of Changbai Mountain,northeast China[J]. Journal of Anhui Agricultural University,2013,40(3):393-399. (in Chinese)

[9] 龚直文,亢新刚,顾丽,等. 长白山杨桦次生林生长过程与演替动向分析[J]. 林业科学研究,2009,22(3):379-384.

GONG Z W,KANG X G, GU L, *et al.* Growth process and succession trend of polar-birch secondary forests in Changbai Mountain, Northeast China [J]. Forest Research,2009,22(3):379-384. (in Chinese)

[10] 赵伟,金慧,李江楠,等. 长白山北坡天然次生杨桦林群落演替状态[J]. 东北林业大学学报,2010,38(12):1-3.

ZHAO W,JIN H,LI J N, *et al.* Successional status of natural secondary poplar-birch forest on northern slope of Changbai Mountain [J]. Journal of Northeast Forestry University,2010,38(12):1-3. (in Chinese)

[11] 王辉忠,谢遵国,黄昊,等. 抚育间伐对杨桦中壮龄次生林结构及群落演替的影响[J]. 林业科技,1999(3):17-19.

[12] 宋新章,张智婷,肖文发,等. 长白山次生杨桦林采伐林隙乔灌木幼苗更新比较研究[J]. 林业科学研究,2008,21(3):289-294.

SONG X Z,ZHANG Z T,XIAO W F, *et al.* Study on seedling regeneration of arbor and shrub in logging gaps in *Populus davidiana*-*Betula platyphylla* secondary forests in Changbai Mountain[J]. Forest Research,2008,21(3):289-294. (in Chinese)

[13] 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.

DU Z,KANG X G,MENG J H, *et al.* Spatial distribution patterns and associations of dominant tree species in poplar-birch secondary forest stand in Changbai Mountains [J]. Journal of Northeast Forestry University,2013,41(4):36-42. (in Chinese)

西园艺,2003(6):10.

[11] 罗锋,汪河滨,杨玲,等. 超声——微波协同萃取法提取甘草黄酮的研究[J]. 食品研究与开发,2006,27(8):127-128.

[12] 吴媛琳,王世军,张社奇,等. 修剪对苹果枝(梢)皮层总黄酮含量的影响[J]. 西北林学院学报,2013,28(6):103-107.

WU Y L, WANG S J, ZHANG S Q, *et al.* Effect of puring on the content of total flavonoids in the branch bark of apple trees[J]. Journal of Northwest Forestry University,2013,28(6):103-107.

[13] 韩菊,魏福祥. Folin-Ciocalteu 比色法测定苹果渣中的多酚[J]. 食品科学,2010,31(4):179-182.

[14] 周巧霞,张经硕,顾明,等. 测定山楂及提取物总三萜酸的含量[J]. 中国野生植物资源, 2004,23(5): 43-44.

[15] 张雁冰,王克让,刘宏民. 马桑叶中总三萜酸的含量测定[J]. 时珍国医国药,2006,17(4):529-530.

[16] KIM D O,LEE K W,LEE H J, *et al.* Vitamin C equivalent antioxidant capacity (VCEAC) of phenolic phytochemicals [J]. Journal Agricultural Food Chemistry, 2002, 50: 3713-3717.

[17] 林恋竹,赵谋明. 反应时间对 DPPH·法、ABTS+·法评价抗氧化性结果的影响[J]. 食品科学,2010,31(05):63-67.

[18] LUO W, ZHAO M M, YANG B, *et al.* Identification of bio-active compounds in *Phyllenthus emblica* L. fruit and their free radical scavenging activities[J]. Food Chemistry, 2009, 114: 499-504.

[19] 石雪萍,吴亮亮,高鹏,等. 20 种食用辛香料抗氧化性及其与黄酮和多酚的相关性研究[J]. 食品科学,2011,32(5):83-86.

SHI X P, WU L L, GAO P, *et al.* Ethanol extracts from twenty edible spices: antioxidant activity and its correlations with total flavonoids and total phenols content [J]. Food Science, 2010, 32(5):83-86. (in Chinese)

[20] 赵则海,于景华,杨逢建,等. 人为扰动对乌拉尔甘草不同部位甘草酸与总黄酮含量的影响[J]. 生态学报,2004,24(12):2799-2803.

ZHAO Z H, YU J H, YANG F J, *et al.* Influences of artificial disturbance degrees on the contents of *Glycyrrhizic acid* and flavonoids in different parts of *Glycyrrhiza uralensis*[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(12):2799-2803. (in Chinese)

[21] 杨蓓芬,金则新,邵红,等. 七子花不同器官次生代谢产物含量的分析[J]. 植物研究,2007,27(2):229-232.

(上接第 13 页)

[14] 刘俊霞,袁登胜,袁秀英. 花棒群落植物多样性及其种群空间分布格局的研究[J]. 西北林学院学报,2008,23(5):55-59.

LIU J X, YUAN D S, YUAN X Y. Characteristics of species diversity and spatial distribution pattern of *Hedysarum scoparium* population[J]. Journal of Northwest Forestry University,2008,23(5):55-59. (in Chinese)

[15] 张健,郝占庆. 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.

ZHANG J, HAO Z Q. Spatial distribution patterns and associations of *Pinus koraiensis* and *Tilia amurensis* in broad-leaved korean pine mixed forest in Changbai Mountains[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2007,18(8):1681-1687. (in Chinese)

[16] 陈贝贝,赵秀海,倪瑞强,等. 长白山阔叶红松林乔木树种幼苗组成与空间分布[J]. 东北林业大学学报,2012,40(10):39-42.

CHEN B B, ZHAO X H, NI R Q, *et al.* Composition and spatial pattern of tree seedlings in Korean pine broadleaved forest in Changbai Mountains[J]. Journal of Northeast Forestry University,2012,40(10):39-42. (in Chinese)

[17] 陈列,赵秀海,张赞. 长白山北坡椴树红松林空间分布及其空间关联[J]. 北京林业大学学报,2009,31(3):6-10.

CHEN L, ZHAO X H, ZHANG Y. Spatial distribution patterns and associations of *Pinus koraiensis* and *Tilia amurensis* in *Tilia*-Korean pine forest on the north slope of Changbai Mountain, northeastern China[J]. Journal of Beijing Forestry University,2009,31(3):6-10. (in Chinese)

[18] 张赞,赵亚洲,张春雨,等. 北京松山油松种群结构及空间分布格局[J]. 应用与环境生物学报,2009,15(2):175-179.

ZHANG Y, ZHAO Y Z, ZHANG C Y, *et al.* Structure and spatial distribution of *Pinus tabulaeformis* population in the Songshan Nature Reserve, Beijing, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2009,15(2):175-179. (in Chinese)

[19] 兰国玉,雷瑞德. 植物种群空间分布格局研究方法概述[J]. 西北林学院学报,2003,18(2):17-21.

LAN Y G, LEI R D. Brief Introduction of spatial methods to distribution patterns of population[J]. Journal of Northwest Forestry University,2003,18(2):17-21. (in Chinese)

[20] WIEGAND T, MOLONEY K A. Rings, circles, and null-models for point pattern analysis in ecology[J]. Oikos, 2004, 104(2): 209-229.

[21] 常新华,赵秀海,曾凡勇,等. 长白山针阔混交林主要树种空间分布及其环境解释[J]. 北京林业大学学报,2009,31(1):7-12.

CHANG X H, ZHAO X H, ZENG F Y, *et al.* Spatial distribution of main tree species and their environmental interpretations in conifer and broadleaved mixed forests of Changbai Mountains, northeastern China[J]. Journal of Beijing Forestry University,2009,31(1):7-12. (in Chinese)

[22] 孙冰,杨国亭,迟福昌,等. 白桦种群空间分布格局的研究[J]. 植物研究,1994,12(2):201-207.

[23] CONDIT R, ASHTON P S, BAKER P, *et al.* Spatial patterns in the distribution of tropical tree species[J]. Science, 2000,288(5470):1414-1418.

[24] HE F L, DUNCAN R P. Density-dependent effects on tree survival in an old-growth *Douglas fir* forest[J]. Journal of Ecology,2000,88(4):676-6.