

DOI:10.11913/PSJ.2095-0837.2016.50724

周梦丽, 张青, 亢新刚, 郭韦韦, 季蕾, 李成富. 基于空间结构指数的不同森林群落稳定性研究[J]. 植物科学学报, 2016, 34(5): 724-733
Zhou ML, Zhang Q, Kang XG, Guo WW, Ji L, Li CF. Study on the stability of forest communities based on the spatial structure index[J].
Plant Science Journal, 2016, 34(5): 724-733

基于空间结构指数的不同森林群落稳定性研究

周梦丽¹, 张青^{1*}, 亢新刚¹, 郭韦韦¹, 季蕾¹, 李成富²

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

摘要: 以长白山杨桦次生林、云冷杉针阔混交林、云冷杉近原始林为研究对象, 基于微观经济学中的柯布—道格拉斯生产函数相关理论, 以 3 个常用的空间结构指标(混交度、大小比数、角尺度)为“投入”, 林分整体空间结构为“产出”, 构建林分空间结构生产函数, 定义了林分空间结构指数(FSSI)并计算了林分空间结构距离(FSSD)。利用这 5 个指标分析比较不同演替阶段森林群落的空间结构特点, 从而评价各演替阶段的稳定性。结果表明: 不同演替阶段森林群落的混交度值均不相同, 云冷杉近原始林平均混交度最大, 云冷杉针阔混交林次之, 杨桦次生林最小; 大小比数对不同森林群落空间结构影响较小, 其值基本为 0.49 ~ 0.52; 3 种森林群落水平分布状态为云冷杉针阔混交林和云冷杉近原始林随机分布, 杨桦次生林聚集分布; 其空间结构指数大小及与理想结构接近程度排序为: 云冷杉近原始林 > 云冷杉针阔混交林 > 杨桦次生林。因此, 云冷杉近原始林空间结构较好, 稳定性最佳。

关键词: 森林群落; 演替; 稳定性; 空间结构

中图分类号: Q948

文献标识码: A

文章编号: 2095-0837(2016)05-0724-10

Study on the Stability of Forest Communities Based on the Spatial Structure Index

ZHOU Meng-Li¹, ZHANG Qing^{1*}, KANG Xin-Gang¹, GUO Wei-Wei¹, JI Lei¹, LI Cheng-Fu²

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

Abstract: This study was carried out in three forest communities (polar-birch secondary forest, spruce-fir mixed forest and spruce-fir near pristine forest). Based on the Cobb-Douglas production function theory in microeconomics, the production function of the spatial structure of the forests was constructed with three commonly used stand spatial structure indices (mingling degree, neighborhood comparison, and uniform angle index) as inputs and the forest spatial structure as output. The forest spatial structure index (FSSI) was defined and the forest spatial structure distance (FSSD) was calculated. To evaluate the stability of each successional stage, the 5 indices were analyzed and the spatial structure characteristics of the forest communities in different successional stages were compared. Results indicated that the mingling degree of forest communities in different successional stages was diverse. The average mingling degree was highest for the spruce-fir near pristine forest (0.81), followed by that of the spruce-fir mixed forest, and lastly that of the polar-birch secondary forest. Neighborhood comparison had little effect on the spatial structure of the forest communities in different successional stages, and values ranged from 0.49 – 0.52. Horizontal distribution of

收稿日期: 2016-02-12, 退修日期: 2016-03-23。

基金项目: 国家林业局 948 项目(2013-4-66)。

This work was supported by a grant from the “948” Projects of the National Forestry Bureau (2013-4-66)。

作者简介: 周梦丽(1990-), 女, 硕士研究生, 研究方向为森林可持续经营 (Email: 1257304343@qq.com)。

* 通讯作者 (Author for correspondence. E-mail: zhangq@bjfu.edu.cn)。

the three forest communities indicated random distribution for spruce-fir mixed forest and spruce-fir near pristine forest and aggregated distribution for polar-birch secondary forest. The spatial structure index size and degree of closeness to the ideal structure was in the order spruce-fir near pristine forest > spruce-fir mixed forest > polar-birch secondary forest. Thus, both the spatial structure and stability of the spruce-fir near pristine forest were the best.

Key words: Forest community; Succession; Stability; Spatial structure

稳定性是森林群落结构与功能的一个综合性特征^[1]。群落稳定性由 MacArthur^[2]提出并受到广泛争议。群落稳定性一般从抗干扰性、恢复性、持续性和变异性 4 个方面来定义^[3]。目前比较公认的稳定概念为森林群落受到干扰后,其抗干扰性和恢复性所发生的变化^[4]。森林空间结构是指林木在同一森林群落的分布位置及其空间属性。它反映了森林群落中各林木的空间关系,在很大程度上决定了林分的稳定性及发展的可能性^[5],对林分的其它结构特征和功能发挥也具有重要作用。空间结构不仅对评价异龄混交林的经营措施有重要意义,而且也是制定经营规划方案的前提^[6]。因此分析森林群落的空间结构,有助于制定科学合理的森林经营措施^[7,8]。

近年来,大多数研究从林分更新潜力、物种多样性和复杂程度等方面分析群落稳定性,研究结果表明,天然更新林的稳定性高于人促天然更新林^[9],较高的生物多样性可以增加生态系统的稳定性,提高群落生产力^[10,11]。然而,也有部分研究显示物种增多、复杂性增加反而降低了群落的稳定性^[12]。此外,林业学者以生态系统多样性和复杂性为基础,利用不同生态指标及多种数学方法对生态系统的稳定性展开了更加全面客观的评价。如闫东锋等^[13]运用主成分分析法建立群落稳定性综合评价指标体系,采用综合得分法评价栎属(*Quercus*)天然次生林群落的稳定性。郭奇强等^[14]和李荣等^[15]运用模糊数学隶属函数值综合评价了不同指标对生态系统稳定性的影响。吴金卓等^[16]通过计算生物多样性指数,采用方差分析和 Duncan 多范围检验方法评价了不同演替阶段群落(中龄林、近熟林、成熟林和老龄林)木本植物的 α 多样性。吴初平等^[17]利用混交度、大小比数、角尺度 3 个结构参数分析了千岛湖次生林不同演替阶段林分空间结构规律。但很少有研究从空间结构方面分析群落不同演替阶段的稳定性。

因此,本文以微观经济学中的柯布—道格拉斯生产函数相关理论为基础,构建以混交度、大小比数、角尺度 3 个空间结构指标为“投入”,整体空间结构为“产出”的林分空间结构生产函数,即林分空间结构指数(forest spatial structure index, FSSI)和林分空间结构距离(forest spatial structure distance, FSSD)^[18],分析长白山不同演替阶段森林群落(杨桦次生林、云冷杉针阔混交林、云冷杉近原始林)的稳定性,将森林生态学和森林经理学有效地结合,为进一步揭示长白山林区森林群落的演替规律,促进长白山林区森林资源的合理利用和长期发展提供理论依据。

1 研究区概况

本研究区地处长白山系老爷岭山脉雪岭支脉,所属行政单位为吉林省汪清林业局金沟岭林场(经营面积 16 286 hm²),地貌为低山丘陵,经纬度为 43°22' N, 130° 10' E,坡度 5° ~ 25°,海拔约 300 ~ 1200 m,土壤为棕灰化土。本地区受海洋湿气团影响,具有温带海洋季风气候特点,年均气温 3.9℃ 左右,≥ 10℃ 的积温为 2144℃;1 月份气温最低,平均 - 32℃ 左右;7 月份气温最高,平均 22℃ 左右。年降水量 600 ~ 700 mm,且多集中在 7 月。该研究区立地条件良好,植被属长白山植物区系,结构复杂,部分区域还保持原始植被;森林类型为以红皮云杉(*Pinus koraiensis* Nakai)、臭冷杉(*Abies nephrolepis* (Trantv.) Maxin.)、紫椴(*Tilia amurensis* Rupr.)和红松(*Pinus koraiensis* Sieb. et Zucc.)等为主的天然针阔混交林。该林区的主要乔木包括:臭冷杉、鱼鳞云杉(*Picea jezoensis* Carr.)、红皮云杉、红松、落叶松(*Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen.)、白桦(*Betula platyphylla* Suk.)、枫桦(*Betula costata* Trautv.)、色木槭(*Acer mono* Maxim.)、紫椴、榆树(*Ulmus pumila* L.)、山杨(*Populus davidi-*

ana Dode.) 等。林下植被包括：忍冬 (*Lonicera japonica* Thunb.)、暴马丁香 (*Syringa amurensis* Rupr.)、毛榛 (*Corylus mandshurica* Maxim.)、刺五加 (*Acanthopanax senticosus* Rupr.) 等。

2 研究方法

2.1 样地布设与调查

在长白山金沟岭林场云冷杉针阔混交林、杨桦次生林以及云冷杉近原始林 3 种森林群落中分别布设样地 12、9 和 1 块。其中，云冷杉针阔混交林 (1 ~ 4 号) 样地大小为 30 m × 70 m，云冷杉针阔混交林 (5 ~ 12 号)、杨桦次生林 (1 ~ 9 号) 及云冷杉近原始林 (1 号) 样地大小为 40 m × 50 m。对这 22 块样地进行每木调查和空间定位，并记录各样地的坡度、坡向等地形因子。每木调查中，对各样地内胸径 (*DBH*) ≥ 5 cm 的所有乔木进行测量，记录树种名、胸径、树高、冠幅、枝下高等。在空间坐标定位中，首先将各样地分割成 *n* 个 10 m ×

10 m 小样方，再以各小样方的西南角为坐标原点，用皮尺测量各林木在小样方中的 *X*、*Y* 坐标 (其中，*X* 表示东西方向坐标，*Y* 表示南北方向坐标)，最后将其转换成相对坐标。各森林群落类型样地基本概况及林分特征见表 1、表 2。

样地内林木蓄积量采用汪清县一元立木材积公式进行计算^[19]：

$$V_1 = 0.000057862 \times D^{1.8892 \times (40.463 - 1171.3/(D + 28))^{0.98755}}$$
 (1)

$$V_2 = 0.000053309 \times D^{1.88452 \times (32.593 - 578.81/(D + 17))^{0.99834}}$$
 (2)

$$V_3 = 0.000048841 \times D^{1.84048 \times (25.468 - 340.24/(D + 13))^{1.05252}}$$
 (3)

$$V_4 = 0.000048841 \times D^{1.84048 \times (19.481 - 184.13/(D + 9))^{1.05252}}$$
 (4)

式中，*V*₁、*V*₂、*V*₃ 和 *V*₄ 分别为针叶树种、阔叶树种、色木和杂木的蓄积量 (m³)；*D* 为胸径 (cm)。

表 1 3 种森林群落类型的各样地基本概况
Table 1 Information on experimental plots of the three forest communities

群落类型 Community type	样地号 Plot number	面积(hm ²) Area	土壤名称 Soil name	立地类型 Site type	坡位 Slope position	坡向 Aspect	坡度(°) Slope	林分起源 Stand origin	郁闭度 Crown density
云冷杉针阔混交林 Spruce-fir mixed forest	1	0.21	森林暗棕壤	阴向缓坡	下	东北	7	天然	0.9
	2	0.21	森林暗棕壤	阴向缓坡	下	东北	8	天然	0.9
	3	0.21	森林暗棕壤	阴向缓坡	下	东北	6	天然	0.9
	4	0.21	森林暗棕壤	阴向缓坡	下	东北	6	天然	1.0
	5	0.2	森林暗棕壤	阴向缓坡	下	北	9	天然	0.8
	6	0.2	森林暗棕壤	阴向缓坡	下	西北	10	天然	0.7
	7	0.2	森林暗棕壤	阴向缓坡	下	北	10	天然	0.9
	8	0.2	森林暗棕壤	阴向缓坡	下	北	10	天然	0.9
	9	0.2	森林暗棕壤	阴向缓坡	下	东北	8	天然	0.9
	10	0.2	森林暗棕壤	阴向缓坡	下	东北	5	天然	0.8
	11	0.2	森林暗棕壤	阴向缓坡	下	东北	7	天然	0.9
	12	0.2	森林暗棕壤	阴向缓坡	下	东北	6	天然	0.9
杨桦次生林 Polar-birch secondary forest	1	0.2	森林暗棕壤	阳向缓坡	中	东南	11	天然	0.9
	2	0.2	森林暗棕壤	阴向缓坡	中	西北	6	天然	0.9
	3	0.2	棕色森林土	阳向缓坡	上	东南	5	天然	1.0
	4	0.2	森林暗棕壤	阳向缓坡	中	东南	7	天然	0.9
	5	0.2	森林暗棕壤	阳向缓坡	上	东南	8	天然	0.9
	6	0.2	森林暗棕壤	阳向缓坡	中	西	6	天然	0.8
	7	0.2	森林暗棕壤	阴向缓坡	上	西	5	天然	0.9
	8	0.2	森林暗棕壤	阴向缓坡	中	西南	6	天然	0.6
	9	0.2	森林暗棕壤	阳向缓坡	下	西	4	天然	0.8
云冷杉近原始林 Spruce-fir near pristine forest	1	0.2	棕色森林土	平坡	上	南	10	天然	0.9

表 2 3 种森林群落类型的林分特征
Table 2 Stand characteristics of the three forest communities

群落类型 Community type	样地号 Plot number	林分密度 Stand density (株/hm ²)	最大胸径 Maximum DBH (cm)	平均胸径 Mean DBH (cm)	单位面积蓄积量 Per unit area of stock (M ³ /hm ²)	树种组成 Tree species composition
云冷杉针阔混交林 Spruce-fir mixed forest	1	1062	53.0	22.1	335.94	5 冷 3 红 2 云 + 枫+白-椴-色-杂
	2	771	54.0	23.4	271.25	5 冷 3 红 2 云+椴-白-色-枫-黄-杨-杂
	3	614	43.3	24.3	233.89	5 冷 3 红 2 云+枫+椴-色-白-杨
	4	662	52.7	25.6	288.01	6 冷 2 红 1 云 1 椴+白-枫-杨
	5	500	43.8	25.6	219.53	6 冷 2 红 1 云 1 落-椴-枫-色
	6	575	48.5	23.9	217.75	5 冷 3 红 1 云 1 色+椴+落-榆-花-黄
	7	720	44.4	22.7	239.26	5 冷 3 云 2 红+落+椴-白-水-色-紫
	8	975	47.0	23.7	353.87	5 冷 3 云 2 红-落-椴-白-色-枫-黄
	9	790	42.1	25.0	326.86	4 冷 2 云 2 落 1 红 1 白+椴-枫-榆-色
	10	540	46.3	24.0	202.58	3 落 3 红 2 冷 2 云-椴-白-枫-色
	11	595	60.9	24.6	240.47	4 云 2 落 1 冷 1 枫 1 红 1 白-椴-水-色
	12	590	43.0	23.7	211.94	3 冷 2 红 2 云 1 落 1 枫 1 椴+色-白-水
杨桦次生林 Polar-birch secondary forest	1	1730	52.3	13.9	189.35	3 椴 2 白 1 枫 1 水 1 红 1 落 1 色+云+杂+冷-青-杨-榆-花
	2	1735	46.1	13.0	159.65	5 白 2 色 1 椴 1 榆 1 水+杂+云+冷-枫-红-杨-青
	3	1655	45.9	13.1	156.27	2 白 2 椴 1 枫 1 云 1 红 1 水 1 榆 1 青+色+冷+杂+花-柞
	4	2075	44.8	11.5	142.35	4 白 2 杨 1 落 1 色 1 红 1 云+椴+杂-山-黄-榆-枫-柞-冷
	5	2400	28.4	11.2	150.69	5 杨 2 白 2 椴 1-榆-黄-杂-红-柞-山-云-青
	6	1115	41.1	16.3	175.60	2 枫 2 白 2 椴 1 色 1 落 1 冷 1 榆+水+红-榆-杂-青-杨-花
	7	1415	44.9	17.0	243.32	5 白 2 杨 1 椴 1 色+枫+榆-冷-红-云-杂-花-青
	8	1160	41.8	8.8	39.31	4 杨 4 白 2 杂+水+红-枫-榆-花-椴
	9	1100	34.7	10.7	60.51	3 白 2 杂 1 冷 1 椴 1 枫 1 水 1 杨+色+云-榆
云冷杉近原始林 Spruce-fir near pristine forest	1	735	100.0	23.8	448.90	4 椴 3 冷 1 云 1 红 1 色+水+枫-杂-榆

2.2 数据处理

森林结构决定森林功能，森林生长过程由森林空间结构所驱动。森林未来的发展方向也与其有不可分割的联系，空间结构对其起了决定性作用^[20]。然而，如何对其进行表征和度量，已成为诊断、模拟和描述森林空间结构的关键。目前，常用的林分空间结构参数有：混交度(表征树种间隔离程度)、大小比数(表征林木个体大小)和角尺度(表征林分水平空间分布格局)。

2.2.1 林分空间结构参数

2.2.1.1 混交度

混交度定义为与参照树*i*的4株最近相邻木中

与参照树*i*不属同种的个体所占的比例。其公式为：

$$M_i = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 v_{ij}$$
$$v_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{相邻木 } j \text{ 与参照树 } i \text{ 同种} \\ 1, & \text{相邻木 } j \text{ 与参照树 } i \text{ 不同种} \end{cases}$$

(5)

式中，*v_{ij}*表示相邻木*j*与参照树*i*是否同种。*M_i*表示混交度，其值为离散型，可能的取值有：0、0.25、0.5、0.75 和 1.0。

2.2.1.2 大小比数

大小比数定义为在与参照树*i*的4株最近相邻木中，大于参照树*i*的相邻木个数占所考察全部最近相邻木数的比例。其公式为：

$$U_i = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 k_{ij} \tag{6}$$
$$k_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{相邻木 } j \text{ 比参照树 } i \text{ 小} \\ 1, & \text{相邻木 } j \text{ 比参照树 } i \text{ 大} \end{cases}$$

式中， k_{ij} 表示相邻木 j 是否大于参照树 i 。 U_i 表示大小比数，其值为离散型，可能的取值为：0、0.25、0.5、0.75 和 1.0。

2.2.1.3 角尺度

角尺度被定义为在与参照树 i 的 4 株最近相邻木中，从参照树出发，任意 2 株最近相邻木所夹的 α 角 (α 角为小角) 小于标准角 α_0 (72°) 的个数占所考察的 4 个 α 角的比例。其公式为：

$$W_i = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 z_{ij} \tag{7}$$
$$z_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{第 } j \text{ 个 } \alpha \text{ 角大于准角 } \alpha_0 \\ 1, & \text{第 } j \text{ 个 } \alpha \text{ 角小于准角 } \alpha_0 \end{cases}$$

式中， z_{ij} 表示任意 2 株最近相邻木与参照树所形成的 α 角是否大于标准角 α_0 。 W_i 表示角尺度，其值为离散型，可能的取值为：0、0.25、0.5、0.75 和 1.0。

运用 Winkelmass 林分空间结构分析软件，同时为避免边缘效应，设置 5 m 缓冲区，计算各样地的空间结构参数。然而，公式(5)、(6)、(7)都是针对一个空间结构单元而言，在计算林分空间结构指数时，需要计算林分内所有结构单元的空间结构参数平均值。

2.2.2 林分空间结构指数(FSSI)

根据微观经济学中的生产函数成立的假设条件以及长期生产函数的基本特征，即假设为：(1)生产函数为一单调连续函数，且存在连续一阶和二阶导数；(2)所使用的各种生产要素数量不能为负；(3)所能产生的最大产量不得小于 0^[21]。基本特征为：在考察时间足够长，可能 2 种或 2 种以上，甚至所有的投入均可以发生变动。将 3 个空间结构参数的百分比视为 3 个生产要素，据此建立林分空间结构的生

产函数。经济学研究中最经典、应用最广泛的长期生产函数之一为柯布—道格拉斯生产函数(C - D 生产函数)，其模型表示为：

$$Y = A \prod_{i=1}^n X_i^{\alpha_i} \tag{8}$$

式中， Y 为产出， X_i 为投入生产要素， $A > 0$ ，

$0 < \alpha_i < 1 (i = 1, 2, \dots, n)$ 。

C - D 生产函数成立的必要条件是边际产量递减、边际替代率递减和规模报酬不变。这 3 个必要条件能很好地反映林分空间结构各参数在森林自然演替过程中的相互联系和制约的本质。该模型中， A 指生产过程中不能被各要素解释的部分。林分演替过程中，任何林分空间结构特征的改变都可以通过这 3 个参数的变化及不同组合体现。故忽略除这 3 个参数以外其他因素的影响，假设 $A = 1$ ，则存在：

$$FSSI = M^\alpha U^\beta W^\gamma \tag{9}$$

在森林演替进程中，林分不受严重干扰，混交程度会逐步提高，林层趋于复杂，水平格局也应趋于随机分布。然而，林分空间结构的理想状态是林分平均混交度为 100，平均大小比数为 0，平均角尺度为 50，林分空间结构指数最优 ($FSSI = 100$)。因此，假设在 $\alpha = \beta = \gamma$ ，当 $M = 100$ ， $U = 0$ ， $W = 50$ 时， $FSSI$ 取最大值，故式(9)可调整为：

$$FSSI = \begin{cases} [M(100 - U) \times 2W]^{\alpha_1}, & W \leq 50 \\ [M(100 - U) \times 2(100 - W)]^{\alpha_2}, & W > 50 \end{cases} \tag{10}$$

式中， $0 \leq FSSI \leq 100$ ， α_1 、 α_2 为参数。根据数学极限思想，并将理想林分空间结构参数及最大值代入式(10)，得出参数 $\alpha_1 = \alpha_2 = 0.3333$ ，则式(10)可写为：

$$FSSI = \begin{cases} [M(100 - U) \times 2W]^{0.3333}, & W \leq 50 \\ [M(100 - U) \times 2(100 - W)]^{0.3333}, & W > 50 \end{cases} \tag{11}$$

2.2.3 林分空间结构距离(FSSD)

林分空间结构与理想结构之间的逼近或远离程度，可以通过不同林分条件下林分空间结构点到理想结构点的距离来表示。该距离可用林分空间结构距离(FSSD)来量化表达，其公式为：

$$FSSD = \sqrt{(M - 100)^2 + U^2 + (W - 50)^2} \tag{12}$$

式中， $0 \leq FSSD \leq 150$ 。

3 结果与分析

3.1 不同森林群落林分空间配置状况

混交度是反映林分种间隔离程度的指标，一般值越大，林分整体相对越趋于稳定。

通过对不同森林群落林分混交度比较分析，由不同森林群落林分混交度及其频率分布(图1)与林分空间结构参数的计算结果(表2)可以看出，在这3种森林群落(云冷杉针阔混交林、杨桦次生林及云冷杉近原始林)中，云冷杉近原始林林分平均混交度值最大，为0.81；杨桦次生林最小，为0.68。林分平均混交度排序为：云冷杉近原始林 > 云冷杉针阔混交林 > 杨桦次生林。从强度和极强度混交所占的比例之和来看，云冷杉近原始林最大，为0.77；云冷杉针阔混交林样地次之，为0.61；杨桦次生林最小，为0.52。此外，云冷杉近原始林及云冷杉针阔混交林零度混交所占的比例最小，分别为0.00和0.04，几乎接近0。由此说明，这两个森林群落基本没有单种聚集现象，林分整体稳定性最大。

3.2 不同森林群落林木大小分化程度

大小比数是反映林木间优势程度的指标，一般值越大，该林分越具竞争优势。

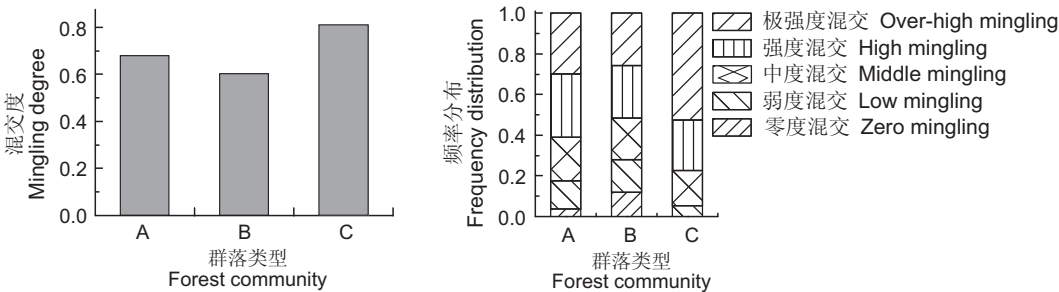
通过对不同森林群落林分大小比数比较分析，

由大小比数及其频率分布(图2)与林分空间结构参数的计算结果(表2)可看出，3种森林群落的林分大小比数基本无明显差别，其值为0.49~0.52。各森林群落中劣势和极劣势所占的比例之和相差不大，基本处于0.40左右。由此说明，各森林群落间的竞争优势没有明显的差别。

3.3 不同森林群落林分水平分布格局

根据空间分布格局判别标准，随机分布的角尺度取值为0.475~0.517，平均角尺度小于0.475的分布为均匀分布，大于0.517的分布为聚集分布^[22-24]。

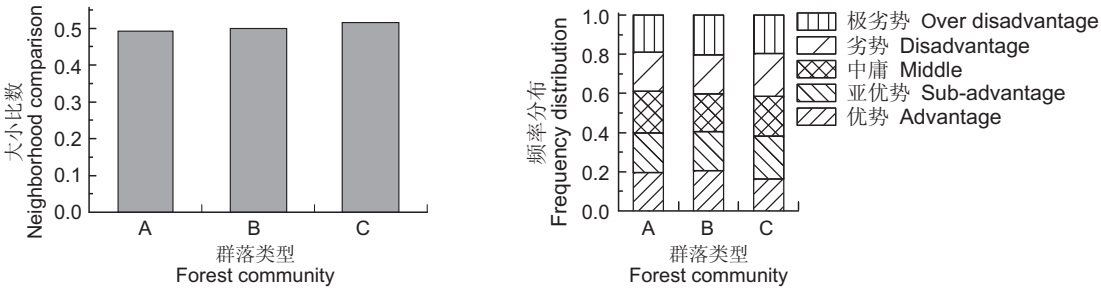
通过对不同森林群落的林分角尺度比较分析，由平均角尺度及其频率分布(图3)与林分空间结构参数的计算结果(表2)可以看出，云冷杉针阔混交林和云冷杉近原始林的林分平均角尺度分为0.493和0.516，为随机分布；杨桦次生林为0.566，为聚集分布。从绝对均匀和均匀分布所占的比例之和来看，其大小排序为：云冷杉针阔混交林 > 云冷杉近原始林 > 杨桦次生林。



A: 云冷杉针阔混交林; B: 杨桦次生林; C: 云冷杉近原始林。
A: Spruce-fir mixed forest; B: Polar-birch secondary forest; C: Spruce-fir near pristine forest.

图1 不同森林群落林分平均混交度及其频率分布图

Fig. 1 Mean mingling degree and distribution in the different forest communities



A: 云冷杉针阔混交林; B: 杨桦次生林; C: 云冷杉近原始林。
A: Spruce-fir mixed forest; B: Polar-birch secondary forest; C: Spruce-fir near pristine forest.

图2 不同森林群落林分平均大小比数及其频率分布图

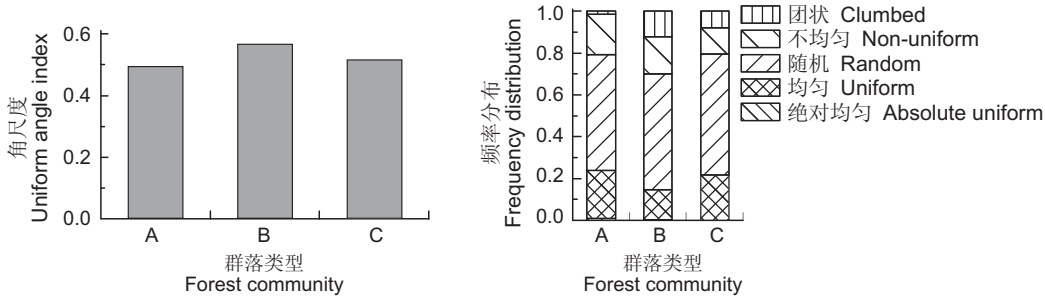
Fig. 2 Mean neighborhood comparison and distribution of the different forest communities

3. 4 不同森林群落空间结构综合特征

空间结构指数是反映林分空间结构综合情况的指标，值越大，说明该林分的空间结构越优化。空间结构距离是衡量现实林分距理想林分空间结构状况差距的指标，值越大，表明该林分需要进行结构调整，以改善目前的状态，进而逼近理想林分空间结构。

通过对不同森林群落林分空间结构指数及距离

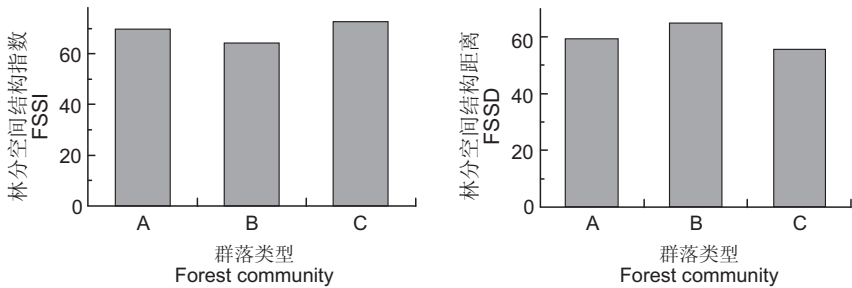
的比较分析，由空间结构指数及距离(图 4)的计算结果(表 3)可以看出，从空间结构指数分析，云冷杉近原始林的空间结构指数最大，为 72.42；云冷杉针阔混交林次之，为 69.21；杨桦次生林最小，为 63.71。空间结构距离的大小排序为：杨桦次生林 > 云冷杉针阔混交林 > 云冷杉近原始林。由此表明，云冷杉近原始林的空间结构最优，其距理想林分空间结构的距离最小，群落整体稳定性最大。



A: 云冷杉针阔混交林; B: 杨桦次生林; C: 云冷杉近原始林。
A: Spruce-fir mixed forest; B: Polar-birch secondary forest; C: Spruce-fir near pristine forest.

图 3 不同森林群落林分平均角尺度及其频率分布图

Fig. 3 Mean uniform angle index and distribution of the different forest communities



A: 云冷杉针阔混交林; B: 杨桦次生林; C: 云冷杉近原始林。
A: Spruce-fir mixed forest; B: Polar-birch secondary forest; C: Spruce-fir near pristine forest.

图 4 不同森林群落空间结构指数及距离分布图

Fig. 4 Spatial structure index and distance of different forest communities

表 3 不同森林群落空间结构参数、指数和距离计算结果

Table 3 Forest spatial structure parameters, indices and distances for different forest communities

群落类型 Community type	角尺度 W		大小比数 U		混交度 M		林分空间结构指数 FSSI		林分空间结构距离 FSSD	
	均值 Mean	标准差 Standard deviation	均值 Mean	标准差 Standard deviation	均值 Mean	标准差 Standard deviation	均值 Mean	变异系数(%) Variation coefficient	均值 Mean	变异系数(%) Variation coefficient
云冷杉针阔混交林 Spruce-fir mixed forest	0.49	0.018	0.49	0.014	0.68	0.057	69.21	3.503	59.18	6.041
杨桦次生林 Polar-birch secondary forest	0.57	0.017	0.50	0.010	0.60	0.084	63.71	5.473	64.69	8.491
云冷杉近原始林 Spruce-fir near pristine forest	0.52	—	0.52	—	0.81	—	72.42	—	54.96	—

4 讨论

演替是指生物群落随时间的推移而发生缓慢变化的生态学过程。森林演替是一个漫长的过程，其结构变化十分缓慢。在此过程中，各阶段的变化主要由优势种群数量的增长与消亡以及由此引起的林分整体空间结构的动态变化来展现。在演替前期，林分内光照充足，先锋树种例如白桦、山杨等强阳性阔叶树种迅速进入并在林分内快速生长，占据主林层，处于优势地位。随着演替进程的推移，中性树种及耐荫性树种等顶级树种开始萌发，逐渐取代先锋树种，进入并占据林分的主林层，进而形成顶级群落直至演替后期。

森林群落稳定性的研究大多是从林分树种组成、林下更新，土壤状况、灌草生物量以及立地条件等方面分析。然而，森林结构决定森林功能，很少有研究从林分空间结构方面分析群落稳定性的。何列艳等^[25]以长白山金沟岭林场云冷杉天然林、杨桦次生林和人工落叶松林3种森林类型为对象，研究长白山区林下主要灌木生物量，结果表明，云冷杉天然林的灌草生物量较杨桦次生林大。张梦弢等^[26]研究了长白山云冷杉林不同演替阶段的群落稳定性，从更新潜力、土壤肥力、林地生产力（乔木蓄积量、灌草生物量）以及物种多样性这几个指标来分析3个群落（杨桦次生林、云冷杉针阔混交林和云冷杉近原始林）间的差异性，并且通过模糊数学隶属函数值法分析不同演替阶段群落稳定性的差异，结果显示3种森林群落的稳定性表现依次为云冷杉针阔混交林 > 云冷杉近原始林 > 杨桦次生林。本研究通过对3种森林群落共22块样地进行定点观测，纵向比较它们的林分空间结构参数、指数及距离的大小并对其进行定量分析。从林分混交度、大小比数及角尺度这3个林分空间结构参数进行比较，得出空间结构稳定性排序为：云冷杉近原始林 > 云冷杉针阔混交林 > 杨桦次生林；从林分空间结构指数及距离方面分析，空间结构的完整性及与理想林分空间结构的接近程度由大到小排序为：云冷杉近原始林 > 云冷杉针阔混交林 > 杨桦次生林。因此，处于演替阶段初期的杨桦次生林，其与理想林分空间结构的差距最大，整体空间的稳定性和完整性也最差；云冷杉针阔混交林处于演替中间阶段；云冷杉近原始林处于演替进程的较高阶

段，其稳定性和完整性都较优，并且与理想林分的接近程度也最大。本研究结果与张梦弢等^[26]的研究略有不同，其原因在于，从林况分析，云冷杉近原始林分绝大部分林木处于过熟状态，林冠几乎完全郁闭，林下灌、草生物量低，但林分都具有自我稀疏功能，能很好地调节林分环境，使其整体生境状态稳定。

不同的森林群落反映着群落演替进程中林分所处状态，林分空间结构影响着群落的稳定性。森林群落的稳定性是评价森林发展是否健康的客观标准之一，经营者可根据稳定性评价结果制定相应的经营措施，反之，可通过制定经营措施，调整林分树种和直径结构，优化林分空间结构，进而增加林分的稳定性，使林分结构与理想结构接近。通过分析长白山林区不同森林群落的稳定性，进一步揭示了森林群落的演替规律，将森林生态学和森林经理学有效地结合，以森林资源群落演替的变化规律为依据指导和经营管理森林资源，以期长白山林区森林资源的可持续发展提供理论依据。

5 结论

通过利用混交度、大小比数、角尺度参数以及依据微观经济学原理构建的林分空间结构指数和距离等5个指标，分析了云冷杉针阔混交林、杨桦次生林、云冷杉近原始林3种不同森林群落类型的稳定性。这3种类型的林分大小比数和各森林群落间的竞争优势没有较明显的差别。云冷杉近原始林及云冷杉针阔混交林基本没有单种聚集的现象，其分布类型为随机分布，且距理想林分空间结构的距离较小。从整体上分析，这3个森林群落类型的稳定性排序依次为：云冷杉近原始林 > 云冷杉针阔混交林 > 杨桦次生林。

参考文献：

- [1] 王国宏. 再论生物多样性与生态系统的稳定性[J]. 生物多样性, 2002, 10(1): 126-134.
Wang GH. Further thoughts on diversity and stability in ecosystems[J]. *Biodiversity Science*, 2002, 10(1): 126-134.
- [2] MacArthur R. Fluctuations of animal populations and a measure of community stability[J]. *Ecology*, 1955, 36(3): 533-536.
- [3] Tilman D. Biodiversity: population versus ecosystem stability[J]. *Ecology*, 1996, 77(2): 350-363.

- [4] Grimm V, Schmidt E, Wissel C. On the application of stability concepts in ecology [J]. *Ecol Model*, 1992, 63(1-4): 143-161.
- [5] 惠刚盈, 胡艳波. 混交林树种空间隔离程度表达方式的研究[J]. 林业科学研究, 2001, 14(1): 23-27.
Hui GY, Hu YB. Measuring species spatial isolation in mixed forests[J]. *Forest Research*, 2001, 14(1): 23-27.
- [6] 惠刚盈. 角尺度——一个描述林木个体分布格局的结构参数[J]. 林业科学, 1999, 35(1): 37-42.
Hui GY. The neighbourhood pattern - A new structure parameter for describing distribution of forest tree position [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 1999, 35(1): 37-42.
- [7] 张会儒, 唐守正. 森林生态采伐理论[J]. 林业科学, 2008, 44(10): 127-131.
Zhang HR, Tang SZ. Theory of ecology-based forest harvesting[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2008, 44(10): 127-131.
- [8] 叶芳, 彭世揆. 种群空间分布理论的发展历史及其现状[J]. 林业资源管理, 1997(6): 55-58.
Ye F, Peng SK. The development history and current situation of population spatial distribution theory [J]. *Forestry Resource Management*, 1997(6): 55-58.
- [9] 许涵, 李意德, 骆土寿, 林明猷, 陈德祥, 莫锦华, 罗文, 洪小江, 蒋忠亮. 尖峰岭热带山地雨林不同更新林的群落特征[J]. 林业科学, 2009, 45(1): 14-20.
Xu H, Li YD, Luo TS, Lin MX, Chen DX, Mo JH, Luo W, Hong XJ, Jiang ZL. Community structure characteristics of tropical montane rain forests with different regeneration types in Jianfengling[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2009, 45(1): 14-20.
- [10] Tilman D. Causes, consequences and ethics of biodiversity[J]. *Nature*, 2000, 405: 208-211.
- [11] Tilman D, Reich PB, Knops J, Wedin D, Mielke T, Lehman C. Diversity and productivity in a long-term grassland experiment[J]. *Science*, 2001, 294: 843-845.
- [12] 刘国城. 生态系统复杂性怎样导致稳定性? [J]. 东北林业大学学报, 1992, 19(6): 9-14.
Liu GC. How can the complexity result in the stability in ecosystem? [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 1992, 19(6): 9-14.
- [13] 闫东锋, 李纪亮, 何瑞珍, 韩磊, 郭欢欢. 宝天曼栎类天然次生林群落稳定性研究[J]. 西北林学院学报, 2006, 21(5): 69-73.
Yan DF, Li JL, He RZ, Han L, Guo HH. Community stability of oak natural secondary forest in Baotianman Nature Reserve [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2006, 21(5): 69-73.
- [14] 郭其强, 张文辉, 曹旭平. 基于模糊综合评判的森林群落稳定性评价体系模型构建——以黄龙山主要森林群落为例[J]. 林业科学, 2009, 45(10): 19-24.
Guo QQ, Zhang WH, Cao XP. Establishment of an evaluation model of the forest community stability based on fuzzy synthetic evaluation: A case study of main forest communities in Huanglong Mountains [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2009, 45(10): 19-24.
- [15] 李荣, 张文辉, 何景峰, 周建云. 不同间伐强度对辽东栎林群落稳定性的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(1): 14-20.
Li R, Zhang WH, He JF, Zhou JY. Effects of thinning intensity on community stability of *Quercus liaotungensis* forest on Loess Plateau [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(1): 14-20.
- [16] 吴金卓, 蔡小溪, 林文树, 孔琳琳, 彭莹亦. 吉林蛟河不同演替阶段针阔混交林木本植物 α 多样性评价[J]. 林业科技开发, 2015, 29(3): 128-132.
Wu JZ, Cai XX, Lin WS, Kong LL, Peng XY. α biodiversity evaluation for the conifer and broad-leaved mixed forests at different successional stages in Jiaohe, Jilin Province [J]. *China Forestry Science and Technology*, 2015, 29(3): 128-132.
- [17] 吴初平, 张骏, 沈爱华, 朱锦茹, 袁位高, 江波. 千岛湖次生林不同演替阶段林分空间结构研究[J]. 植物研究, 2015, 35(1): 16-21.
Wu CP, Zhang J, Shen AH, Zhu JR, Yuan WG, Jiang B. Stand spatial structure at different successional stages of secondary forest in Qiandao Lake region [J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2015, 35(1): 16-21.
- [18] 董灵波, 刘兆刚, 马妍, 倪宝龙, 李元. 天然林林分空间结构综合指数的研究[J]. 北京林业大学学报, 2013, 35(1): 16-22.
Dong LB, Liu ZG, Ma Y, Ni BL, Li Y. A new composite index of stand spatial structure for natural forest [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2013, 35(1): 16-22.
- [19] 赵俊卉. 长白山云冷杉混交林生长模型的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2010.
Zhao JH. Growth modeling for Spruce-Fir forest in Changbai mountains [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2010.
- [20] Pretzsch H. Analysis and modeling of spatial stand structures methodological considerations based on mixed beech-larch stands in Lower Saxony [J]. *Forest Ecol Manag*, 1997, 3: 237-253.
- [21] 王秋实. 微观经济学原理[M]. 北京: 经济管理出版社, 2001: 183-196.
Wang QS. Principles of Microeconomics [M]. Beijing: Economic Management Publishing House, 2001: 183-196.
- [22] 安慧君. 阔叶红松林空间结构的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 200
An HJ. Study on the spatial structure of the broad-leaved

Korean pine forest[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2003.

[23] Gadow KV, Hui GY. Characterizing forest spatial structure and diversity[C]// Proceedings of the SUFOR International Workshop “Sustainable Forestry in Temperate Regions”. Sweden: Lund University, 2002.

[24] 胡艳波, 惠刚盈, 戚继忠, 安慧君, 郝广明. 吉林蛟河天然红松林的空间结构分析[J]. 林业科学研究, 2003, 16(5): 523–530.

Hu YB, Hui GY, Qi GZ, An HJ, Hao GM. Analysis of the spatial structure of natural Korean Pine broad leaved forest [J]. *Forest Research*, 2003, 16(5): 523–530.

[25] 何列艳, 亢新刚, 范小莉, 高延, 冯启祥. 长白山区林下主要灌木生物量估算与分析[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2011, 35(5): 45–50.

He LY, Kang XG, Fan XL, Gao Y, Feng QX. Estimation and analysis of understory shrub biomass in Changbai mountains [J]. *Journal of Nanjing Forestry University: Natural Science Edition*, 2011, 35(5): 45–50.

[26] 张梦弢, 张青, 亢新刚, 杨应军, 徐光, 张立新. 长白云冷杉林不同演替阶段群稳定性[J]. 应用生态学报, 2015, 26(6): 1609–1616.

Zhang MT, Zhang Q, Kang XG, Yang YJ, Xu G, Zhang LX. Community stability for Spruce-fir forest at different succession stages in Changbai mountains, Northeast China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(6): 1609–1616.

(责任编辑: 周 媛)