

长白落叶松-云杉-冷杉混交林林分空间结构分析

张会儒¹, 武纪成¹, 杨洪波², 陈新美¹

(1. 中国林业科学研究院 资源信息研究所, 北京 100091; 2. 吉林省红石林业局, 吉林 桦甸 132405)

摘要: 用角尺度、混交度和大小比数 3 个林分空间结构参数对长白山过伐林区特有的长白落叶松 *Larix olgensis*-云杉 *Picea jezoensis*-冷杉 *Abies nephrolepis* 混交林进行了分析, 目的是为长白落叶松-云杉-冷杉混交林林分结构的优化调整提供依据。结果表明: 该林分的平均角尺度为 0.520, 林木分布格局为团状分布; 林分的平均混交度为 0.64, 说明它是一个由不同树种组成的呈现中度混交结构状态的较复杂森林群落; 从直径大小比数来看, 林分中针叶树种具有胸径优势, 尤其是云杉的直径优势最突出, 红松 *Pinus koraiensis* 则分化严重, 生长处于劣势。在实际应用中, 可以根据林分平均角尺度以及各树种的角尺度、混交度和大小比数, 分树种来确定采伐木, 逐步使林分结构得到调整, 接近最优结构。

表 3 参 17

关键词: 森林经理学; 落叶松-云杉-冷杉混交林; 角尺度; 混交度; 大小比数

中图分类号: S757.7 文献标志码: A 文章编号: 1000-5692(2009)03-0319-07

Spatial structure of mixed larch-spruce-fir stands

ZHANG Hui-ru¹, WU Ji-cheng¹, YANG Hong-bo², CHEN Xin-mei¹

(1. Research Institute of Forest Resource Information Techniques, The Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. Hongshi Forest Enterprise of Jilin Province, Huadian 132405, Jilin, China)

Abstract: To provide a referencing foundation for structural adjustments in a mixed larch (*Larix olgensis*)-spruce(*Picea jezoensis*)-fir(*Abies nephrolepis*) stand, found only in the over-logged forest of the Changbai Mountains, three parameters, namely uniform angle index, mingling index, and neighborhood comparison, were used to describe spatial structure. Results indicated that the stand uniform angle index was 0.520; the average stand mingling was 0.64; and for diameter at breast height with the neighborhood comparison, coniferous trees (esp. *Picea jezoensis*) dominated, with fewer *Pinus koraiensis*. The neighborhood pattern showed tree distribution was clustered, and the average mingling index indicated the stand was a medium mixed degree. Thus, these three spatial tests could be used to decide the trees and species to cut so as to adjust stands to an optimum structure. [Ch, 3 tab. 17 ref.]

Key words: forest management; mixed larch-spruce-fir stands; uniform angle index; mingling index; neighborhood comparison

中国东北地区存在着大面积森林, 是中国木材的主产区, 但由于长期过度利用和保护不善, 使大量原始林受到不同程度的干扰和破坏, 形成了过伐林、次生林或人工林等森林群落。这些森林的结构优化是亟待解决的问题。在森林经营中, 林分的空间结构信息具有重要意义, 它是对林分结构进行优化的重要依据。林分空间结构是指林木在林地上的分布格局及其属性在空间上的排列方式, 也就是林

收稿日期: 2008-06-19; 修回日期: 2008-11-03

基金项目: “十一五”国家林业科技支撑计划项目(2006BAD03A08); 国家林业局引进国际先进农业科学技术计划(948计划)项目(2008-4-60)

作者简介: 张会儒, 研究员, 博士, 从事森林可持续经营、森林资源管理与决策研究。E-mail: huiru@caf.ac.cn

木之间树种、大小和分布等空间关系。林分空间结构决定了树木之间的竞争势及其空间生态位,它在很大程度上决定了林分的稳定性、发展的可能性和经营空间大小^[1]。以培育健康稳定的森林作为改造过伐林、次生林和人工林的经营目标,必须重视建立或维护最佳的森林空间结构。林业工作者在林分空间结构方面已有一些研究^[2-4],使用的空间分析方法主要是样方法和距离法。惠刚盈等^[1,5-6]提出新的空间结构参数——角尺度、混交度和大小比数,对林分结构具有很好的解析能力,已经在很多森林类型中得到应用^[7-11]。长白落叶松 *Larix olgensis*-云杉 *Picea jezoensis*-冷杉 *Abies nephrolepis* 混交林作为长白山过伐林区具有很高价值和重要地位的森林类型,目前对它的空间结构研究还很缺乏。本文以金沟岭林场的长白落叶松-云杉-冷杉混交林为研究对象,对其空间结构进行分析,为更好地制定长白落叶松-云杉-冷杉混交林经营措施提供依据。

1 研究区域与数据概况

研究地点位于吉林省汪清林业局金沟岭林场,43°17'~43°25'N,130°05'~130°20'E,属吉林省东部山区长白山系老爷岭山脉雪岭支脉。地貌属低山丘陵地带,海拔为550~1000 m。阳坡较陡,阴坡平缓,平均坡度为10°~25°。该区气候属季风型气候,全年平均气温为4℃左右,1月气温最低,平均在-32℃左右,7月气温最高,平均32℃左右;年降水量为600~700 mm,且多集中在7月;植物生长期为120 d左右。土壤种类以暗棕壤为主。该区植被属长白山植物区系。

调查于2007年8月进行,调查内容包括胸径5 cm以上的林木空间位置(相对坐标)、胸径、优势高、平均高和更新等。在林木空间位置测定时,将标准地分割成10 m×10 m共25个调查单元,以每个调查单元的西南角为坐标原点,用皮尺测量每株树木在该调查单元内的坐标(x, y), x 表示东西方向坐标, y 表示南北方向坐标,最后统一换算为标准地内相对坐标。经初步调查和计算,标准地基本情况如下:海拔660 m,坡向西北,坡度6°,面积为0.25 hm²(50 m×50 m),密度1112株·hm⁻²,断面积34.15 m²·hm⁻²,断面积平均直径19.8 cm,蓄积249.43 m³·hm⁻²,树种组成为6L2F1S1B+P(L为长白落叶松,F为冷杉,S为云杉,P为红松,B为其他树种,包括榆树 *Ulmus propinqua*,杨树 *Populus ussuriensis*,枫桦 *Betula costata*,椴树 *Tilia amurensis*,色木槭 *Acer mono*,白桦 *Betula platyphylla*,水曲柳 *Fraxinus mandshurica*和杂木等),郁闭度0.9。优势树种为长白落叶松、云杉、冷杉等。

2 研究方法

空间结构分析以空间结构单元分析为基础。林分内任意一株单木和距离它最近的 n 株相邻木都可以构成林分空间结构单元,结构单元核心的那株树就是参照树。空间结构单元的大小取决于在参照树的周围选取的相邻木的株数。综合考虑野外调查时人的感知与判断方向的习惯、相邻木与参照树构成的结构关系所代表的生物学意义要明显,对混交林空间结构分析应具有较强的可释性等要求,选定 $n=4$ ^[12]。

根据现代森林经理学的观点,以下3个方面可以完整描述天然林的空间结构:①林木个体在水平地面上的分布形式,或者说是种群的空间分布格局(描述非规则性);②树种的空间隔离程度,或者说树种组成和空间配置情况(描述非同质性);③林木个体大小分化程度,即树种的生长优势程度(描述非均一性)^[12]。本研究使用角尺度、混交度和大小比数这3个参数来描述林分的空间结构特征。

角尺度(W),是指 α 角小于标准角 α_0 (α_0 取72°)^[13]的个数占所考察的最近相邻木的比例。它的表达式为:

$$W_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_{ij}$$

其中: W_i 为林木 i 角尺度。 n 为最近邻木株数(一般取 $n=4$)。

$$z_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{当第 } j \text{ 个 } \alpha \text{ 角小于标准角 } \alpha_0 \text{ 时} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

林分角尺度均值按下式计算：

$$W = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N W_i$$

其中： W 为林分角尺度均值， W_i 为林木 i 角尺度， N 为林分内参照树的株数。

树种混交度(M)，是指参照树 i 的 n 株最近相邻木中与参照树不属于同种的个体所占的比例，用公式表示为：

$$M_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n v_{ij}$$

其中： M_i 为林木 i 点混交度， n 为最近邻木株数(一般取 $n = 4$)。

$$v_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{当对象木 } i \text{ 与第 } j \text{ 株最近邻木属不同树种} \\ 0 & \text{当对象木 } i \text{ 与第 } j \text{ 株最近邻木属同树种} \end{cases}$$

按上式计算的混交度称为林木点混交度。林分混交度是林木点混交度的平均值：

$$M = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N M_i$$

其中： M 为林分混交度， N 为林分内林木株数， M_i 为第 i 株树木的点混交度。

大小比数(U)，被定义为大于参照树的相邻木数占所考察的全部最近相邻木的比例，它可以用于胸径、树高和冠幅等。用公式表示为：

$$U_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n K_{ij}$$

其中： U_i 为林木大小比数， n 为最近邻木株数(一般取 $n = 4$)。

$$K_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{当相邻木 } j \text{ 比参照树 } i \text{ 小时} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

依树种计算的大小比数的均值(U_{sp})即为树种在林分所测指标上的优势程度，可用下式计算：

$$\bar{U}_{sp} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i$$

其中： U_i 为树种(sp)的第 i 个大小比数的值， N 为所观察的树种(sp)的参照树的数量。

根据角尺度、混交度和大小比数的定义，对选定的参照树与其 4 株最近相邻木通过比较确定其取值：当第 j 个 α 角小于标准角 α_0 (72°)，则取 $Z_{ij} = 1$ ，否则 $Z_{ij} = 0$ ；当参照树 i 与第 j 棵相邻树非同种时，则取 $v_{ij} = 1$ ，否则 $v_{ij} = 0$ ；当参照树 i 的胸径小于第 j 棵相邻木的胸径时，则取 $K_{ij} = 1$ ，否则取 $K_{ij} = 0$ 。

上述 3 个描述森林空间结构的参数都是针对一个空间结构单元而言的，每株树都可以作为参照树。在分析整个林分的空间结构时，需要计算林分内所有结构单元的参数平均值，并将它们作为分析的基础。其中，通过分析标准地平均角尺度来研究林木水平地面上的分布格局；通过分析各树种混交度和林分平均混交度来研究天然林树种组成和空间配置情况；通过分析各树种大小比数来说明该树种在林分内的生长优势程度^[9]。

3 结果分析

经调查，标准地共有林木 278 株。为避免边缘效应，确定标准地内距每条边线 5 m 之内为缓冲区，其余部分为核心区。缓冲区内的林木只作为相邻木处理，不进行空间结构参数的统计，对核心区全部单木的空间结构参数进行计算，分析林分的空间结构状况。

3.1 林木空间分布格局

在标准地调查数据基础上，利用空间结构分析软件 Winkelmass 1.0 处理数据，计算出林木平均角尺度为 0.520，并得到标准地林木的角尺度取值分布(表 1)。

由表1可知,长白落叶松-云杉-冷杉混交林中角尺度取值为0和1的频率都很低,分别只有1%和7%,这说明林分中极少有很均匀的结构单元出现,很不均匀的结构单元也较少。角尺度的取值为0.5出现的频率最高,达到了57%,在0.5取值右侧的频率之和(0.22)稍高于左侧之和(0.21),可见长白落叶松-云杉-冷杉混交林的林分角尺度分布接近正态分布。该标准地林分的平均角尺度为0.520,依照空间分布格局的判定标准^[14],平均角尺度在[0.475, 0.517]为随机分布,小于0.475为均匀分布,大于0.517为团状分布,可判断标准地的林木分布格局属于团状分布。一般情况下,林分如果不受严重干扰,经过漫长的进展演替后,顶极群落的水平分布格局应为随机分布^[15]。因此,可以预测,本研究的对象——长白落叶松-云杉-冷杉混交林正处在演替的中后期,随着演替进程的发展,会不断向当地的顶极群落发展,其林木分布格局会逐渐趋向于随机分布。

3.2 林分树种组成和空间配置

标准地核心区内的针叶树种主要有长白落叶松、云杉、冷杉和红松,阔叶乔木树种有椴树、枫桦、水曲柳、色木槭、榆树、白桦和杂木等。不同树种混交度的大小和频率见表2。

表2 各树种的混交度及其频率

Table 2 Values and frequency of the distribution of mingling for different species

| 树种 | 株数/株 | 混交度频率 | | | | | 平均混交度 |
|-------|------|-------|------|------|------|------|-------|
| | | 0 | 0.25 | 0.50 | 0.75 | 1.00 | |
| 红松 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0.67 | 0.33 | 0.83 |
| 云杉 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.00 | 1.00 |
| 长白落叶松 | 69 | 0.17 | 0.29 | 0.28 | 0.19 | 0.07 | 0.42 |
| 冷杉 | 30 | 0.07 | 0.17 | 0.03 | 0.30 | 0.43 | 0.72 |
| 水曲柳 | 10 | 0 | 0 | 0.30 | 0.40 | 0.30 | 0.75 |
| 椴树 | 12 | 0 | 0 | 0 | 0.50 | 0.50 | 0.88 |
| 榆树 | 5 | 0 | 0 | 0.40 | 0 | 0.60 | 0.80 |
| 色木槭 | 17 | 0 | 0 | 0.42 | 0.29 | 0.29 | 0.72 |
| 枫桦 | 13 | 0 | 0 | 0.15 | 0.46 | 0.39 | 0.81 |
| 白桦 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.00 | 1.00 |
| 杂木 | 2 | 0 | 0 | 0 | 1.00 | 0 | 0.90 |
| 全林地 | 174 | 0.08 | 0.14 | 0.20 | 0.29 | 0.29 | 0.64 |

从表2可以看出,在标准地中,除长白落叶松和冷杉外,各树种的中度混交和强度混交、极强度混交的频率很高,没有出现单种聚集,均为不同树种进行混交。针叶树种中,冷杉的强度和极强度混交的频率之和达到73%,优势比较明显。阔叶树都不存在零度和弱度混交的情况;水曲柳、椴树、色木槭和枫桦这4个树种在中度混交到极强度混交中共同占有的比例较大。云杉和白桦由于数量很少,其周围最近的4株相邻木均为不同的树种,即全都呈现出极强度混交(取值为1)。而标准地中数量占绝对优势的长白落叶松,混交度最低,平均混交度仅42%,从零度混交到极强度混交都有,但弱度到中度混交的比例占主要优势(74%),强度和极强度混交比例只占26%,这说明最初营造的长白落叶松人工林正在逐渐向混交林结构转变。这些数据说明,在该林分中,除长白落叶松外,同树种聚

集在一起的情况很少，树种之间的隔离程度较大，各树种组成的结构单元多样化程度比较高。

安慧君^[16]的研究结果表明：越向稳定群落发展，强度和极强度混交的频率有越高的趋势。全林地的平均混交度为 0.64，介于中度混交和强度混交之间，并没有达到很高的混交度，这主要是因为人工栽植的长白落叶松在数量上仍占有绝对的优势。但依照分析，可以认为长白落叶松-云杉-冷杉混交林已形成由不同树种呈现中度混交状态组成的较复杂群落，作为由人工长白落叶松林演化而来的混交林，这种结构逐渐使得不同的树种能占据各自有利的生态位，形成种间的协调互利关系，使群落向稳定状态不断演替。

3.3 林木大小分化程度

大小比数可以对林木(胸径、树高和冠幅等)的状态进行描述，即优势、亚优势、中庸、劣势和绝对劣势^[15]。本文对林木的胸径优势进行比较。根据大小比数的定义，大小比数的取值越大，代表比参照树胸径大的相邻木越多(即相邻木个体越占优势)，而相应地参照树越不占优势。各树种的胸径大小比数及频率见表 3。

表 3 各树种直径大小比数及其频率

Table 3 Value and frequency of the neighborhood comparison based on DBH(diameter at base height) for different species

| 树种 | 株数/株 | 大小比数频率 | | | | | 平均大小比数 |
|-------|------|--------|------|------|------|------|--------|
| | | 0 | 0.25 | 0.50 | 0.75 | 1.00 | |
| 红松 | 9 | 0.11 | 0 | 0.22 | 0.22 | 0.45 | 0.72 |
| 云杉 | 4 | 0.75 | 0.25 | 0 | 0 | 0 | 0.05 |
| 长白落叶松 | 69 | 0.32 | 0.26 | 0.23 | 0.13 | 0.06 | 0.34 |
| 冷杉 | 30 | 0.17 | 0.13 | 0.27 | 0.20 | 0.23 | 0.55 |
| 水曲柳 | 10 | 0.20 | 0 | 0.10 | 0.40 | 0.30 | 0.65 |
| 椴树 | 12 | 0 | 0.17 | 0.08 | 0.58 | 0.17 | 0.69 |
| 榆树 | 5 | 0 | 0.20 | 0.40 | 0.20 | 0.20 | 0.60 |
| 色木槭 | 17 | 0.24 | 0.06 | 0.18 | 0.28 | 0.24 | 0.56 |
| 枫桦 | 13 | 0 | 0.15 | 0.31 | 0.23 | 0.31 | 0.67 |
| 白桦 | 3 | 0.33 | 0.33 | 0 | 0.34 | 0 | 0.33 |
| 杂木 | 2 | 0 | 0 | 0.50 | 0.50 | 0 | 0.45 |
| 全林地 | 174 | 0.22 | 0.17 | 0.21 | 0.22 | 0.17 | 0.49 |

通过计算，标准地内林木直径大小比数的总平均值为 0.49，表明离每一株树最近的 4 株相邻木中几乎有一半是比该参照树的直径小。从表 3 可以看出各树种的平均直径大小比数取值范围为 0.05~0.72，这反映了该林分内树种在胸径优势上的分化存在很大差异。云杉的平均直径大小比数只有 0.05，且取值仅在 0 和 0.25 上分布，这是因为云杉数量较少但胸径都很大，在结构单元中处于明显优势地位。长白落叶松、白桦和杂木的平均直径大小比数为 0.25~0.50，它们的地位是介于亚优势和中庸状态之间；其中长白落叶松的大小比数为 0 和 0.25 的频率累计达到了 58%，表明大部分长白落叶松的周围相邻木中较大树木很少，长白落叶松在结构单元中也处于明显的优势地位。冷杉的大小比数接近 0.50，说明在结构单元中胸径比它大和比它小的数量上基本相同，处于中庸状态。水曲柳、椴树、榆树、色木槭和枫桦这 5 种阔叶树的平均直径大小比数都在 0.60 左右，因此可以判断在由它们构成的结构单元中，它们稍微处于劣势。红松有 67% 完全处于受压迫的状态，11% 处于最优势状态，其平均直径大小比数在各树种中最大，这些充分说明红松分化严重，但总体上其生长处于劣势。白桦平均直径大小比数在阔叶树种中最小(0.33)，这主要是因为它的数量不多并且胸径较大。从统计结果来看，针叶树种在直径大小对比上占有一定的优势，阔叶树种则分化比较严重，既有占优势的树种(白桦和杂木)，又有受压迫的树种(水曲柳、椴树、榆树、色木槭和枫桦)。

4 结论与讨论

通过对长白落叶松-云杉-冷杉混交林空间结构分析,该林分的角尺度分布接近正态分布,林分的平均角尺度为0.520,林木分布格局为团状分布;林分的平均混交度为0.64,表明它是一个由不同树种组成呈现中度混交结构状态的较复杂森林群落;林分的直径大小比数平均值为0.49,但各树种的平均直径大小比数取值范围为0.05~0.72,反映了该林分内树种大小分化存在很大差异,从总体上看针叶树种具有胸径优势,尤其是云杉的直径优势最突出,红松则分化严重,生长处于劣势。阔叶树种大部分处于劣势。

本文采用的3个空间结构参数——角尺度、混交度和大小比数,概念上易于理解且测量时比样方法和距离法操作简易,对复杂林分结构具有很强的解析能力。混交度这一概念能够清楚地表明任意一株树的最近相邻木为其他树种的概率,还从单木角度给出树种空间搭配状况,比林学中常用的混交比具有更大的信息量。依树种计算出的大小比数量化了参照树与其相邻木的大小相对关系,每个树种的大小比数均值在很大程度上反映了林分中的树种优势^[12]。本次空间结构调查没有进行所有林木的树高测量,所以缺乏以树高为参数的树种优势比较。

本文所分析的长白落叶松-云杉-冷杉混交林是原始林过伐后在20世纪60年代营造的长白落叶松纯林经自然演替逐渐形成的,并非是空间结构最优的林分。一般认为同地段最优的林分空间结构应该是未经人为干扰的原始森林的空间结构。若要调整现有的林分空间结构,还应该调查同地段的原始森林空间结构,对比分析两者在空间结构方面的差异,制订相应的长白落叶松-云杉-冷杉林空间结构目标与调整措施。在优化林分空间结构的森林经营措施当中,可以根据林分平均角尺度以及各树种的角尺度、混交度和大小比数的取值和分布情况,分树种来确定采伐木^[10,14,17],逐步使林分结构得到调整,接近最优结构。

参考文献:

- [1] 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): 177 - 181.
HUI Gangying, HU Yanbo. Measuring species spatial isolation in mixed forests [J]. *For Res*, 2001, **14** (1): 177 - 181.
- [2] 侯向阳, 韩进轩. 长白山红松林主要树种空间格局的模拟分析[J]. 植物生态学报, 1997, **21** (3): 242 - 249.
HOU Xiangyang, HAN Jinxuan. Simulation analysis of spatial patterns of main species in the Korean pine broadleaved forest in Changbai Mountain [J]. *Acta Phytoecol Sin*, 1997, **21** (3): 242 - 249.
- [3] 李盾, 黄楠, 王强, 等. 天然次生林林木空间格局及更新格局[J]. 东北林业大学学报, 2004, **32** (5): 4 - 6.
LI Dun, HUANG Nan, WANG Qiang, et al. The spatial pattern and renewal pattern in natural secondary forest [J]. *J Northeast For Univ*, 2004, **32** (5): 4 - 6.
- [4] 汤孟平, 唐守正, 雷相东, 等. 林分择伐空间结构优化模型研究[J]. 林业科学, 2004, **40** (5): 25 - 31.
TANG Mengping, TANG Shouzheng, LEI Xiangdong, et al. Study on spatial structure optimizing model of stand selection cutting [J]. *Sci Silv Sin*, 2004, **40** (5): 25 - 31.
- [5] 惠刚盈, Von GADOW K, ALBERT M. 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 Gangying, Von GADOW K, ALBERT M. The neighbourhood pattern——a new structure parameter for describing distribution of forest tree position [J]. *Sci Silv Sin*, 1999, **35** (1): 37 - 42.
- [6] 惠刚盈, Von GADOW K, ALBERT M. 一个新的林分空间结构参数——大小比数[J]. 林业科学研究, 1999, **12** (1): 1 - 6.
HUI Gangying, Von GADOW K, ALBERT M. A New parameter for stand spatial structure neighbourhood comparison [J]. *For Res*, 1999, **12** (1): 1 - 6.
- [7] 安慧君, 惠刚盈, 郑小贤, 等. 不同发育阶段阔叶红松林空间结构的初步研究[J]. 内蒙古大学学报: 自然科学版, 2005, **36** (6): 714 - 718.
AN Huijun, HUI Gangying, ZHENG Xiaoxian, et al. Study on the spatial structure of broad-leaved Korean pine forest in the different growth stage [J]. *Acta Sci Nat Univ Neimongol*, 2005, **36** (6): 714 - 718.

- [8] 孔令红, 郑小贤. 金沟岭林场云冷杉林空间分布格局及更新研究[J]. 林业调查规划, 2007, **32** (1): 1 - 3.
KONG Linghong, ZHENG Xiaoxian. Study on spatial layout and regeneration of spruce-fir forest in Jingouling Forest Farm [J]. *For Invent Plan*, 2007, **32** (1): 1 - 3.
- [9] 贾秀红, 郑小贤. 长白山过伐林区云冷杉针阔混交林空间结构分析[J]. 华中农业大学学报, 2006, **25** (4): 436 - 440.
JIA Xiuhong, ZHENG Xiaoxian. Analysis on the spatial structure of the spruce-fir mixed stands of coniferous and broad-leaved trees in the over-logged forest [J]. *J Huazhong Agric Univ Nat Sci Ed*, 2006, **25** (4): 436 - 440.
- [10] 胡艳波, 惠刚盈. 优化林分空间结构的森林经营方法探讨[J]. 林业科学研究, 2006, **19** (1): 1 - 8.
HU Yanbo, HUI Gangying. A discussion on forest management method optimizing forest spatial structure [J]. *For Res*, 2006, **19** (1): 1 - 8.
- [11] 吕林昭. 长白山落叶松人工天然混交林空间格局研究[J]. 内蒙古林业调查设计, 2007, **30** (3): 57 - 62.
LU Linzhao. Studies on space patterns of artificial and natural mixed forest of *Larix olgensis* [J]. *Inner Mongolia For Invest Des*, 2007, **30** (3): 57 - 62.
- [12] 惠刚盈, 克劳斯·冯多佳. 森林空间结构量化分析方法[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2003.
- [13] 惠刚盈, Von GADOW K, 胡艳波. 林分空间结构参数角尺度的标准角选择[J]. 林业科学研究, 2004, **17** (6): 687 - 692.
HUI Gangying, Von GADOW K, HU Yanbo. The optimum standard angle of the uniform angle index [J]. *For Res*, 2004, **17** (6): 687 - 692.
- [14] 惠刚盈, 胡艳波. 角尺度在林分空间结构调整中的应用[J]. 林业资源管理, 2006 (2): 31 - 35.
HUI Gangying, HU Yanbo. Application of neighborhood pattern in forest spatial structure regulation [J]. *For Resour Manage*, 2006 (2): 31 - 35.
- [15] 惠刚盈, Von GADOW K, 胡艳波, 等. 结构化森林经营[M]. 北京: 中国林业出版社, 2007.
- [16] 安惠君. 阔叶红松林空间结构特征研究[M]//唐守正. 东北天然林生态采伐更新技术研究. 北京: 中国科学技术出版社, 2005: 547 - 553.
- [17] 胡艳波, 惠刚盈, 戚继忠, 等. 吉林蛟河天然红松阔叶林的空间结构分析[J]. 林业科学研究, 2003, **16** (5): 523 - 530.
HU Yanbo, HUI Gangying, QI Jizhong, *et al.* Analysis of the spatial structure of natural Korean pine broad leaved forest [J]. *For Res*, 2003, **16** (5): 523 - 530.