

# 华北土石山区天然次生林空间结构特征分析

高广磊<sup>1,2</sup>, 丁国栋<sup>1,2</sup>, 张佳音<sup>1,2</sup>, 任丽娜<sup>1,2</sup>, 臧荫桐<sup>1,2</sup>, 梁文俊<sup>1,2</sup>

(1. 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083; 2. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083)

**摘要:** 以河北省木兰围场国有林场内 1 hm<sup>2</sup> 标准地植被群落调查数据为基础, 利用角尺度、混交度和大小比数这 3 个林分空间结构参数分析了华北土石山区天然次生林林分空间结构特征。结果表明, 优势种白桦混交程度较低, 林木空间隔离状况较差, 亚优势种和伴生树种混交程度普遍较高, 林分混交形式以零度和弱度混交为主, 平均混交度为 0.400。林木个体大小分化明显, 各树种平均大小比数排序为: 华北落叶松 > 花楸 > 蒙古栎 > 棘皮桦 > 白桦 > 青杆 > 山杨 > 油松 > 华北五角枫。群落内多数林木处于随机分布状态, 但林分平均角尺度为 0.562, 属团状分布。依据天然次生林空间结构特征, 分析预测了群落演替趋势, 并提出森林经营的相关建议。

**关键词:** 天然次生林; 林分结构; 森林经营; 华北土石山区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2011)06-0081-05

中图分类号: Q948

## Spatial Structural Characteristics of Natural Secondary Forest in Rocky Mountain Area of Northern China

GAO Guang-lei<sup>1,2</sup>, DING Guo-dong<sup>1,2</sup>, ZHANG Jia-yin<sup>1,2</sup>,  
REN Li-na<sup>1,2</sup>, ZANG Yin-tong<sup>1,2</sup>, LIANG Wen-jun<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Combating Desertification, Ministry of Education, Beijing 100083, China; 2. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Based on the vegetation community survey of a 1 hectare plot in Forest Farm of Mulanweichang, and by using the mingling degree, neighborhood comparison and uniform angle index, the spatial structure characteristics of nature secondary forest in rocky mountain area of Northern China were analyzed. The results showed that *Betula platyphlla* was the dominant and constructive species of the tree layer, its mingling degree was low, but the mingling degrees of sub-dominant and associated trees were big. The mainly mixed forms of the stand were none-mixed or less-mixed, the average mingling degree was 0.400. The order of tree species neighborhood comparison was as follow: *Larix principis-rupprechtii*, *Sorbus pohuashanensis*, *Quercus mongolica*, *Betula dahurica*, *B. platyphlla*, *Picea wilsonii*, *Populus davidiana*, *Pinus tabulaeformis* and *Acer truncatum*. In the vegetation community, most of the trees were in the random distribution, but the average uniform angle index of the stand was 0.562, so the distribution pattern of the overall stand was aggregative distribution. According to the spatial structure characteristics of nature secondary forest, the tendency of community succession and some management advices were proposed.

**Keywords:** natural secondary forest; stand structure; forest management; rocky mountain area of Northern China

林分空间结构是林木生长和森林演替的驱动力<sup>[1]</sup>, 它不仅决定了林木之间的竞争势态及其空间生态位, 还决定了鸟类、昆虫、附生生物、下层植物及土壤微生物生境的三维空间, 体现了林分的稳定性、发展方向和经营措施<sup>[2-4]</sup>。林分空间结构已经成为森林

经营和分析中的一个重要因子, 涉及单木之间空间关系的林分空间结构及其空间关系描述和解释也已成为森林结构研究的焦点<sup>[5-6]</sup>。华北土石山区位于华北平原、黄土高原与内蒙古高原之间, 受立地条件和人类活动等因素制约, 域内森林资源较为匮乏, 且分布

收稿日期: 2011-02-27

修回日期: 2011-04-08

资助项目: 国家林业局公益性行业科研项目“典型区域森林生态系统健康维护与经营技术研究”(200804022A)

作者简介: 高广磊(1986—), 男(汉族), 吉林省延边州人, 硕士研究生, 主要研究方向为森林健康。E-mail: gaoguanglei@bjfu.edu.cn.

通信作者: 丁国栋(1963—), 男(满族), 内蒙古自治区赤峰市人, 博士, 教授, 主要研究方向为水土保持与荒漠化防治、森林健康。E-mail: dch1999@263.net.

不均;森林质量,特别是人工林质量普遍不高,森林防护效能低,涵养水源能力差,水土流失严重,生态系统结构紊乱,功能失调,生态环境十分脆弱<sup>[7]</sup>。在以往研究中,对华北土石山区森林生态系统群落结构、生物多样性、林木生长、森林与土壤健康评价等方面研究较多<sup>[8-11]</sup>,但对于该区天然林林分空间结构特征的研究还不多见。本研究通过对河北省木兰国有林场管理局域内天然次生林森林植被调查研究,利用混交度、大小比数和角尺度等指标参数,分析研究了该区域内天然次生林林分空间结构特征,并依据此特征分析预测了研究区森林植被的演替趋势,提出相关森林健康经营建议,以期从森林空间结构优化的角度为华北土石山区森林健康经营管理和生物多样性保护提供理论和科技支持。

## 1 研究区概况

研究区位于河北省木兰围场国有林场管理局直属北沟林场(41°47′—42°06′N,116°51′—117°45′E),地处阴山山脉、大兴安岭山脉余脉向西南延伸和燕山山脉的结合部,属于中温带向寒温带过渡、半干旱向半湿润过渡的大陆性季风型高原山地气候。年均降水量 380~560 mm,降雨主要集中在 6—8 月,期间降水量约占全年降水量的 69%,年均蒸发量 1 462.9~1 556.8 mm,年平均气温 -1.4~4.7 °C,极端最高气温 38.9 °C,极端最低气温 -42.9 °C,≥0 °C 的年积温 2 180 °C,无霜期 67~128 d。土壤主要为天然次生林下发育的山地棕壤,土层深厚,自然坡度 1/150~1/350,海拔 750~1 829 m。研究区地处温带草原地带高原东部森林草原区与暖温带落叶阔叶林地带燕山山地落叶阔叶林温性针叶林区的交接带;主要森林类型为以白桦(*Betula platyphylla*),山杨(*Populus davidiana*),棘皮桦(*B. dahurica*),蒙古栎(*Quercus mongolica*)为主要树种的落叶阔叶混交林和以华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)和油松(*Pinus tabulaeformis*)为主的人工针叶林;灌木树种主要有毛榛(*Corylus mandshurica*),土庄绣线菊(*Spiraea pubescens*),迎红杜鹃(*Rhododendron mucronulatum*)等;草本植物主要包括披针薹草(*Carex lancifolia*),糙苏(*Phlomis umbrosa*),东亚唐松草(*Thalictrum minus*)等<sup>[12]</sup>。

## 2 研究方法

### 2.1 野外调查

研究地点位于河北省木兰围场北沟林场,地处深山,位置偏僻,未进行过大规模森林经营、放牧及伐薪

等活动,林分空间结构保存完好。林分为白桦—山杨次生混交林,并有部分华北落叶松、油松等针叶树种伴生。2010 年 8 月,结合森林资源二类清查数据和实地踏勘,采用经纬仪和罗盘仪选择布设标准地。样地面积 1 hm<sup>2</sup>,规格 100 m×100 m,位于 41°50′50.6″N,117°35′50.6″E,海拔 1 380 m,坡度 19.5°,坡向为阳坡。植被群落学调查采用网格法,将标准地划分为 25 个 20 m×20 m 小样方,再以每个小样方为调查单元,进行群落乔木调查,对标准地内林木(胸径>1 cm 且树高>1.5 m)采用网格进行全林定位,在样地中记录林木位置,以坐标值表示,坐标值用距离直接表示,调查指标包括胸径、树高、冠幅、枝下高、优势度和干形质量等。标准地布设满足林分空间结构研究的基本需求<sup>[13]</sup>,能够充分反映研究区林分空间结构的真实情况。

### 2.2 林分空间结构分析

林分内任意 1 株参照木和离其最近的  $n$  株相邻木构成的林分空间结构单元是林分空间结构研究的基本单元,本研究选用  $n=4$  构建林分空间结构单元。相关研究显示,当  $n=4$  时,参照树与 4 株最近相邻木构成的结构关系有 5 种,即零度、弱度、中度、强度、极强度,过渡阶段更加完整,生物学意义更加明显,空间结构信息也比较完整,能够恰当的表达林分空间结构并进行相关分析<sup>[14-15]</sup>。本研究以标准地植被群落调查数据为基础,利用空间结构分析软件 Winkelmass 1.0 计算标准地森林群落林分混交度、大小比数和角尺度等林分空间结构参数<sup>[2-3]</sup>。计算时,在标准地边缘设置 5 m 的缓冲区,以消除林分边缘树木的系统影响。

2.2.1 混交度 混交度( $M_i$ )是以相邻最近单株中非同种单株所占比例来描述树种间空间隔离关系的林分空间结构参数,用公式表示为:

$$M_i = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 v_{ij}$$

式中: $v_{ij}$ ——一个离散性变量,其值定义为当参照树  $i$  与第  $j$  株相邻木非同种时  $v_{ij}=1$ ,反之, $v_{ij}=0$ 。 $M_i$  的取值有 5 种:0,0.25,0.50,0.75 或 1.00;分别对应描述零度、弱度、中度、强度和极强度混交 5 种混交状态。

2.2.2 大小比数 大小比数( $U_i$ )是以大于参照木的相邻木占全部相邻木的比例来描述林分空间结构复杂性的结构参数,用公式表示为:

$$U_i = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 k_{ij}$$

式中: $k_{ij}$ ——一个离散性变量,其值定义为当相邻木  $j$  比参照树  $i$  大时  $k_{ij}=1$ ,反之, $k_{ij}=0$ 。 $U_i$  的取值有 5 种:0.00,0.25,0.5,0.75 或 1.00;分别对应描述优

势、亚优势、中庸、劣势和绝对劣势 5 种优势程度。

2.2.3 角尺度 角尺度 ( $W_i$ ) 是以相邻树木围绕参照树的均匀性来描述林木水平分布格局的结构参数。设任意两个邻接最近相邻木夹角的小角为  $\alpha$ , 则角尺度 ( $W_i$ ) 为  $\alpha$  小于  $\alpha_0$  的个体数占总体  $n$  个夹角的比例, 标准角  $\alpha_0$  取值  $72^\circ$ <sup>[16]</sup>, 用公式表示为:

$$W_i = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 Z_{ij}$$

式中:  $Z_{ij}$ ——一个离散性变量, 其值定义为当第  $j$  个角小于标准角  $\alpha_0$  时  $Z_{ij} = 1$ , 反之,  $Z_{ij} = 0$ 。  $Z_{ij}$  的取值有 5 种: 0, 0.25, 0.5, 0.75 或 1.00。当林分平均角尺度落在  $[0.475, 0.517]$  范围内, 说明林分水平分布格局为随机分布, 林分平均角尺度  $\bar{W} > 0.517$  时, 林分水平分布格局为团状分布, 林分平均角尺度  $\bar{W} < 0.475$  时, 林分水平分布格局为均匀分布。

### 3 结果与分析

#### 3.1 林分树种组成

研究区天然次生林群落乔木树种组成较为丰富,

标准地共有乔木 9 种, 林分密度 739 株/hm<sup>2</sup>, 其中针叶树株数比例 15.16%, 阔叶树株数比例 84.84%, 针阔混交比 17.86%, 郁闭度约为 0.8。由表 1 可以看出, 白桦的株数、重要值、胸高断面积及比例都远大于群落内的其它树种, 是该群落的优势种和建群种, 落叶松在重要值、胸高断面积及比例等方面也有一定优势为亚优势种, 其余树种为伴生种。落叶松种群胸高断面积较大, 但种群密度较小, 说明其在群落内主要以大径级的形式存在; 蒙古栎、华北五角枫和青杆种群密度较大, 但胸高断面积却相对较小, 说明其在群落内主要以小径级的形式存在; 白桦、山杨、棘皮桦种群胸高断面积与种群密度变化基本一致。

从群落垂直结构分析, 研究区天然次生林可以分为 3 个林层:  $< 6$  m,  $6 \sim 15$  m,  $> 15$  m; 其中蒙古栎、华北五角枫、青杆、油松种群主要分布于群落下层, 山杨、棘皮桦、花楸种群主要分布于群落中层, 华北落叶松种群主要分布于群落上层, 而白桦种群个体分布范围最广, 遍布整个群落, 占据着群落的主要空间和上层空间。

表 1 标准地林木结构特征

| 树种    | 株数  | 重要值/<br>% | 胸径/cm       | 树高/m       | 胸高断面积/<br>(m <sup>2</sup> · hm <sup>-2</sup> ) | 所占比例/<br>% |
|-------|-----|-----------|-------------|------------|--|------------|
| 白桦    | 454 | 46.65     | 13.67±9.08  | 10.93±5.2  | 9.211 9  | 57.70      |
| 华北落叶松 | 46  | 13.67     | 27.75±13.48 | 16.47±4.62 | 3.423 6  | 21.44      |
| 山杨    | 32  | 8.43      | 15.44±6.56  | 11.49±4.00 | 0.685 7  | 4.29       |
| 蒙古栎   | 62  | 8.36      | 12.30±5.61  | 7.65±3.07  | 0.934 0  | 5.85       |
| 青杆    | 46  | 6.57      | 9.78±10.08  | 6.59±5.28  | 0.689 2  | 4.32       |
| 华北五角枫 | 41  | 6.16      | 5.86±3.71   | 5.51±2.67  | 0.203 4  | 1.27       |
| 棘皮桦   | 27  | 4.45      | 13.55±4.96  | 10.36±2.35 | 0.481 7  | 3.02       |
| 油松    | 20  | 3.28      | 7.86±8.83   | 4.88±4.47  | 0.209 8  | 1.31       |
| 花楸    | 11  | 2.43      | 11.07±4.96  | 8.27±2.57  | 0.127 1  | 0.80       |
| 总计    | 739 | 100.00    | 13.76±9.84  | 10.26±5.37 | 15.966 3                                       | 100.00     |

注: 表中数据为平均值±标准差。

#### 3.2 林分空间结构分析

标准地内共有乔木 739 株, 其中缓冲区内乔木 114 株, 实际分析计算乔木 625 株, 利用上述公式对群落植被调查数据进行拟合(图 1)。

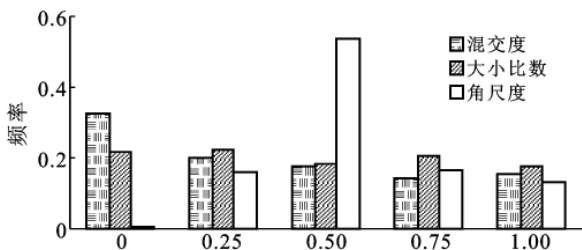


图 1 天然次生林混交度、大小比数及角尺度分布

3.2.1 混交度 群落混交度分布显示, 研究区天然次生林混交度分布随  $M_i$  值增大而减小, 当  $M_i = 1$  时, 混交度又转而增大, 林分树种空间隔离程度以近中度混交为主, 平均混交度为 0.400。群落中 52.7% 的林木处于零度和弱度混交, 即林分中林木个体大多与本种伴生; 处于强度和极强度混交的株数比例分别为 14.1% 和 15.5%, 说明仅有 29.6% 的林木个体与 3~4 株不同种相邻木伴生。树种混交度(表 2)显示, 群落优势种群白桦以零度和弱度混交为主, 个体比例分别高达 51% 和 25%, 而极强度混交个体比例仅占总株数的 2%, 平均混交度 0.207, 处于弱度混交状态, 说明白桦种群混交程度较低, 林木空间隔离状况

较差。落叶松、山杨等其它乔木种群个体以强度和极强度混交状态为主,平均混交度均大于 0.60,林木空间隔离状况较好,混交程度普遍较高。综合分析可以

得出,群落优势种白桦混交状态较差,降低了整体林分的混交程度,其它乔木种群混交程度较高,对提高和改善林分混交状态具有重要意义。

表 2 天然次生林各树种混交度及大小比数分布

| 树种    | 混交度  |      |      |      |      |           | 大小比数 |      |      |      |      |           |
|-------|------|------|------|------|------|-----------|------|------|------|------|------|-----------|
|       | 0    | 0.25 | 0.5  | 0.75 | 1    | $\bar{W}$ | 0    | 0.25 | 0.5  | 0.75 | 1    | $\bar{U}$ |
| 白桦    | 0.51 | 0.25 | 0.16 | 0.06 | 0.02 | 0.207     | 0.24 | 0.21 | 0.16 | 0.23 | 0.16 | 0.468     |
| 落叶松   | 0.03 | 0.08 | 0.23 | 0.33 | 0.35 | 0.725     | 0.38 | 0.30 | 0.15 | 0.10 | 0.08 | 0.300     |
| 山杨    | 0    | 0    | 0.04 | 0.40 | 0.56 | 0.880     | 0.04 | 0.28 | 0.20 | 0.12 | 0.36 | 0.620     |
| 蒙古栎   | 0    | 0.09 | 0.23 | 0.36 | 0.32 | 0.729     | 0.23 | 0.30 | 0.21 | 0.15 | 0.11 | 0.399     |
| 青杆    | 0.07 | 0.26 | 0.19 | 0.21 | 0.28 | 0.593     | 0.12 | 0.16 | 0.35 | 0.23 | 0.14 | 0.529     |
| 华北五角枫 | 0    | 0.18 | 0.35 | 0.26 | 0.21 | 0.625     | 0.09 | 0.12 | 0.24 | 0.24 | 0.32 | 0.645     |
| 棘皮桦   | 0    | 0.11 | 0.26 | 0    | 0.74 | 0.737     | 0.16 | 0.26 | 0.21 | 0.32 | 0.05 | 0.461     |
| 油松    | 0    | 0    | 0.26 | 0.00 | 0.74 | 0.868     | 0.16 | 0.16 | 0.11 | 0.11 | 0.47 | 0.645     |
| 花楸    | 0    | 0.36 | 0    | 0.18 | 0.45 | 0.682     | 0.27 | 0.27 | 0.18 | 0.09 | 0.18 | 0.409     |
| 总计    | 0.33 | 0.20 | 0.18 | 0.14 | 0.16 | 0.400     | 0.22 | 0.22 | 0.18 | 0.21 | 0.17 | 0.476     |

3.2.2 大小比数 以胸径作为衡量参照树与相邻木竞争关系的指标,图 1 和表 2 显示了林分和树种大小比数的分布频率和均值。研究区次生林林木大小比数分布频率处于 $[0.174, 0.221]$ 之间,优势木和亚优势木相对较多,绝对劣势木比例最少,林分平均大小比数为 0.476,说明林分内个体分化较为明显,不同径级林木分布较为均匀。由表 2 可知,研究区天然次生林群落内各树种平均大小比数排列顺序为:落叶松>蒙古栎>花楸>棘皮桦>青杆>白桦>山杨>油松>华北五角枫。由简单分类可知,落叶松、花楸和蒙古栎处于竞争优势状态,棘皮桦、青杆和白桦处于中庸状态,山杨、油松和华北五角枫处于竞争劣势状态。从大小比数数值上看,落叶松、花楸和蒙古栎种群以优势木和亚优势木为主,株数比例分别达到 68%,54%和 53%,即在林分空间结构单元中,与落叶松、花楸和蒙古栎相邻的 4 株相邻木胸径大多小于参照树;华北五角枫、油松和山杨种群则主要以劣势和绝对劣势为主,株数比例分别为 56%58%和 48%,即这 3 种乔木常常与 3~4 株较粗的相邻木伴生,处于竞争劣势地位,生长受到抑制。需要特别指出的是,白桦虽然为群落的优势种和建群种,但其竞争优势并不明显,种群处于中庸状态。

3.2.3 角尺度 群落林木水平分布格局角尺度分布显示,研究区天然次生林群落角尺度频率分布以  $W_i=0.5$  为顶点呈单峰状,且分布频率右侧明显大于左侧,角尺度均值  $\bar{W}=0.562>0.517$ ,说明林分内林木水平分布格局属团状分布,但聚集程度较低,接近随机分布。进一步分析可知,群落内大多数个体处于随机分布, $W_i=0.5$  株数比例达 0.538;处于团状分布

的林木个体( $W_i=0.75$  或  $W_i=1$ )比例总计为 0.295,其中处于显著团状分布( $W_i=1$ )的株数比例为 0.130;处于均匀分布的林木个体( $W_i=0$  或  $W_i=0.25$ )比例为 0.168,其中处于显著均匀分布( $W_i=0$ )的株数比例仅为 0.006。从整个林分角度来看,无论是种间竞争还是种内竞争都将使林木水平分布格局由团状分布向随机分布演化。

## 4 结论

(1) 研究区天然次生林为华北土石山区典型森林植被,乔木群落共有 9 个种群,白桦种群个体分布广泛,蓄积量最大,占据着群落的主要空间和上层空间,是群落的建群种与优势种。林分混交形式以零度和弱度混交为主,平均混交度 0.400;优势种白桦种群混交程度较低,林木空间隔离状况较差;亚优势种和伴生种混交程度较高,对提高和改善林分混交状态具有积极意义。以胸径计算大小比数,研究显示,林分内各树种大小分化较为明显,平均大小比数为 0.476;各树种平均大小比数排序为:落叶松>蒙古栎>花楸>棘皮桦>青杆>白桦>山杨>油松>华北五角枫。林分角尺度频率分布呈单峰状,群落内大多数林木个体处随机分布状态, $W_i=0.5$  株数比例达 0.57,但整个林分平均角尺度为 0.562,水平分布格局属团状分布,但聚集程度较低,接近随机分布。与以往研究相比,研究区天然次生林林分空间结构明显优于密云水库集水区刺槐人工林<sup>[17]</sup>和松山自然保护区蒙古栎天然林<sup>[18]</sup>,但却低于小陇山地区栎类天然林<sup>[4,19]</sup>,这可能与研究区林分起源、地理位置和土壤条件有关。

(2) 林分空间结构特征与树种生态学特性密切相关。白桦萌蘖能力很强,萌生是其生长繁殖的重要途径,常常导致几株白桦同根或聚生长,降低了林分的混交程度,水平分布格局也呈团状分布;落叶松等伴生树种的实生特性对提高林分的混交程度,改善林分水平分布格局具有积极意义,使林分水平分布格局由团状分布向随机分布演化,但在演替中前期,受个体数量限制,林分水平分布格局仍呈团状分布。虽然白桦是群落的建群种与优势种,占据着林分的主要空间结构,但这种优势以白桦庞大的个体数量为基础,其在种间竞争中并不处于优势地位,而是大多处于中庸状态。可以推测,在研究区森林植被群落演替过程中,建群种白桦的优势地位将在进一步削弱后趋于稳定,落叶松、花楸和蒙古栎等树种的优势地位则会提升;群落针阔株数比例、物种多样性和林分混交度将不断提高,平均角尺度则会降低,林分水平分布格局向随机分布演化,但具体演替过程还需进一步研究。

(3) 基于林分空间结构的森林经营管理方案的优化设计是森林经营管理研究的一个重要方向,遵循森林植被的自然演替规律,采取近自然的森林健康经营手段,是实现森林可持续经营发展的有效途径<sup>[1]</sup>。对于天然植被应以森林健康监测为主,研究林分空间结构特征与演替规律,避免不必要的人为干扰;对于人工林,则应在森林健康监测的基础上,借鉴天然植被林分空间结构特征和演替规律开展健康经营管理工作。一般认为,自然演替的森林植被,林分混交程度应逐步上升,林木水平分布格局趋向随机分布。因此,开展森林经营活动时,应结合森林经营目标,在寻遵循森林可持续经营基本原则的基础上,综合考虑林分混交度和角尺度,伐除混交度较低的林木( $M_i = 0$  或  $M_i = 0.25$ )和角尺度较低或较高的林木( $W_i \neq 0.5$ ),维持中度以上混交状态,促进群落分布向随机分布格局发展。调整林木大小比数时则要充分考虑树种阴生、阳生等生物特性,不能一概而论。

致谢:在数据分析过程中得到北京林业大学省部共建森林培育与保护教育部重点实验室、北华大学林学院夏富才博士的支持和帮助,谨致谢意!

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] Pommerening A. Evaluating structural indices by reversing forest structural analysis[J]. Forest Ecology and Management, 2006, 224(3): 266-277.
- [2] 惠刚盈, Gadow K, 胡艳波, 等. 结构化森林经营[M]. 北京: 中国林业出版社, 2007: 27-42.
- [3] 雷相东, 唐守正. 林分结构多样性指标研究综述[J]. 林业科学, 2002, 38(3): 140-146.
- [4] 赵中华, 惠刚盈, 袁士云, 等. 小陇山锐齿栎天然林空间结构特征[J]. 林业科学, 2009, 45(3): 1-6.
- [5] Moer M. Characterizing spatial patterns of trees using stem mapped data[J]. Forest Science, 1993, 39(4): 756-775.
- [6] Liebhold A, Rossi R, Kemp W. Geostatistics and geographic information system in applied insect ecology[J]. Annual Review of Entomology, 1993, 38: 303-327.
- [7] 王雄宾. 华北土石山区主要针叶树种人工林基于生态功能优化的密度调控研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2010: 27.
- [8] 王树森, 余新晓, 班嘉蔚, 等. 华北土石山区天然森林植被演替中群落结构和物种多样性变化的研究[J]. 水土保持研究, 2006, 13(6): 48-50.
- [9] 梁文俊, 丁国栋, 韦立伟, 等. 落叶松人工林密度对林木生长的影响[J]. 水土保持通报, 2010, 30(4): 78-80, 86.
- [10] 范敏锐, 吕锡芝, 余新晓, 等. 森林生态系统健康快速评价研究[J]. 水土保持通报, 2010, 30(3): 196-200.
- [11] 任丽娜, 王海燕, 丁国栋, 等. 华北土石山区人工林土壤健康评价研究[J]. 水土保持学报, 2010, 24(6): 46-52, 59.
- [12] 赵建成, 孔照普. 河北木兰围场植物志[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 2-20.
- [13] 李丽, 惠淑荣, 惠刚盈, 等. 森林结构调查最小面积的研究[J]. 林业资源管理, 2007, 36(2): 47-51.
- [14] 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.
- [15] 邓送求, 闫家锋. 南京紫金山枫香风景林空间结构分析[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2010, 34(4): 117-122.
- [16] 惠刚盈, 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.
- [17] 刘彦, 余新晓, 岳永杰, 等. 北京密云水库集水区刺槐人工林空间结构分析[J]. 北京林业大学学报, 2009, 31(5): 5-28.
- [18] 岳永杰, 余新晓, 李钢铁, 等. 北京松山自然保护区蒙古栎林空间结构特征[J]. 应用生态学报, 2009, 20(8): 1811-1816.
- [19] 袁士云, 张宋智, 刘文楨, 等. 小陇山辽东栎次生林的结构特征和物种多样性[J]. 林业科学, 2010, 46(5): 27-34.

[1] Pommerening A. Evaluating structural indices by reversing forest structural analysis[J]. Forest Ecology