

DOI:10.13332/j.1000-1522.20190051

基于相邻木关系的林层间结构解析

周超凡 张会儒 徐奇刚 雷相东

(中国林业科学研究院资源信息研究所, 国家林业与草原局森林经营与生长模拟重点实验室, 北京 100091)

摘要:【目的】林层是林分空间结构垂直尺度上的一种结构,也是当前林分空间结构的研究热点。对于林层的研究多集中于林层划分的方法以及各林层内的结构分析,而对林层间的关系研究较少。细致的林分结构分析是森林精准经营的前提,探讨林层结构的分布及其与生长量的关系可以丰富结构化森林经营的理论基础,对竞争指数的构建也有一定指导价值。【方法】基于相邻木关系,区分对象木和相邻木在上、中、下林层中的分布,将林层比(L)的5种情形细化为45种“林层结构类型”,结合林层比对蒙古栎林分的林层结构的株数分布进行深度解析,并探讨与林木生长量之间的关系规律。【结果】(1)蒙古栎林分林层结构较复杂:对象木结构单元中4株相邻木都与对象木同层的情况较少,而2株或3株相邻木与对象木不同层的情况较多;对象木结构单元中5株林木在3个林层都有分布的情况是最多的,其次5株林木倾向于分布在相邻的两个林层中,且中层分布有较多林木的林层结构类型的数量较多。(2)蒙古栎林分林层比类型间生长量的差异显著度为:下层>上层>中层;当对象木同层的相邻木从4株到0株时,下层对象木生长量有显著下降趋势,上层有明显上升趋势,而中层的相邻木的作用复杂,导致生长量没有显著变化趋势。(3)影响蒙古栎林上层对象木生长的林层因素较为单一,主要为上层相邻木的侧向挤压作用;而林层因素影响蒙古栎林中、下林层生长的作用是较为复杂的:中层对象木主要受上层的遮盖影响较大,其次是中层的侧向挤压;下层对象木主要受中层的遮盖影响较大,其次是下层的侧向挤压或上层的遮盖影响。【结论】本文构建的“林层结构类型”在分析林层结构的数量分布、解释生长量的大小方面都有较好的效果,可以系统又全面地解析林层间结构。

关键词: 林层; 林层结构类型; 林层比; 胸径生长量; 相邻木关系; 蒙古栎

中图分类号: S758.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522-(2019)05-0066-10

引文格式: 周超凡, 张会儒, 徐奇刚, 等. 基于相邻木关系的林层间结构解析 [J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(5):66-75.
Zhou Chaofan, Zhang Huiru, Xu Qigang, et al. Analysis of inter-layer structure based on the relationship of neighboring trees [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(5): 66-75.

Analysis of inter-layer structure based on the relationship of neighboring trees

Zhou Chaofan Zhang Huiru Xu Qigang Lei Xiangdong

(Research Institute of Forest Resources Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Key Laboratory of Forest Management and Growth Modeling, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100091, China)

Abstract: [Objective] Forest layer is a kind of structure on vertical scale of stand spatial structure, which is also a research hotspot of stand spatial structure at present. The study of forest layer mostly focuses on the methods of forest layer division and the analysis of the structure of each forest layer. However, there were few studies on the relationship between forest layers. Detailed analysis of stand structure is very helpful for precise forest management. Exploring the distribution of forest layer structure and its relationship with growth can enrich the theoretical basis of structured forest management, and also has certain guiding value for the construction of competition index. [Method] Based on the relationship between neighboring trees, the distribution of target trees and neighboring trees in the upper, middle and lower forest layers was

收稿日期: 2019-01-18 修回日期: 2019-03-08

基金项目: 国家重点研发计划课题(2017YFC0504101)。

第一作者: 周超凡, 博士生。主要研究方向: 森林可持续经营。Email: chaofan2019@foxmail.com 地址: 100091 北京市海淀区香山路东小府1号中国林业科学研究院资源信息研究所。

责任作者: 张会儒, 研究员, 博士生导师。主要研究方向: 森林可持续经营。Email: huiru@ifrit.ac.cn 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

distinguished. Five cases of stand level rate (L) were refined to 45 types of “forest layer structure types”. The distribution of forest layer structure of *Q. mongolica* forest was deeply analyzed with L and forest layer structure types, then the relationship between them and DBH increment was discussed. [Result] (1) The forest layer structure of *Q. mongolica* forest is more complex: four neighboring trees in the structural unit of the target wood were less in the same layer with the target wood, while cases of two or three neighboring trees distributing in different layers with the target wood were more common. In the target tree structure unit, the five trees tended to distribute in three forest layers or in two adjacent forest layers, and the more trees distributed in the middle layer, the more quantity of this sort of “forest layer structure type” was. (2) The significant difference of DBH increment between the stand level rate type of the *Q. mongolica* forest was: the lower layer > the upper layer > the middle layer; when the neighboring trees in the same layer ranged from 4 to 0, the growth of the underlying trees had a significant downward trend, the upper trees had a significant upward trend, while the role of the neighboring trees in the middle layer was complicated, resulting in no significant change in the growth. (3) The forest layer factors affecting the growth of upper target trees in *Q. mongolica* forest were relatively simple, mainly the lateral extrusion of the neighboring trees in the upper layer; while the effects of forest layer factors on the growth of lower and middle forest layers in *Q. mongolica* forest were more complicated. The middle object wood was mainly affected by the cover of upper layer trees, followed by the lateral extrusion of the middle layer trees; the lower target wood was mainly affected by the cover of the middle layer, followed by the lateral extrusion of the lower layer or the cover of the upper layer. [Conclusion] The “forest layer structure type” constructed in this paper has a good effect in analyzing the quantity distribution of forest layer structure and explaining the size of DBH increment. It can systematically and comprehensively analyze the inter-layer structure.

Key words: forest layer; forest layer structural type; stand level rate; DBH increment; relationship of neighboring trees; *Quercus mongolica*

系统结构决定功能, 合理的林分结构对于森林的健康和稳定性至关重要^[1]。自惠刚盈和 Gadow 基于相邻木空间关系提出林分空间结构分析的新方法^[2], 从单木水平细化分析林分结构, 通过分析混交度(M)^[2]、大小比数(U)^[3]和角尺度(W)^[4]对林分结构进行了深度解译, 效果明显优于传统的结构指标^[5-7]。林分空间结构分析方法的提出, 在林业研究中获得了极高的认可和引用^[8-13]。随着研究的深入, 出现了密集度(C)^[14]等新的空间结构指标。目前, 对林分水平空间结构的分析方法已经非常成熟^[7,15-16], 而对于林分垂直空间结构的研究方法, 还需要进一步完善。

对于林分垂直结构, 最直观的就是林层。林层是乔木层树冠所形成的垂直层次结构, 也是林业调查的基础指标^[17]。林层按照数量可分为单层和复层, 用于研究森林的垂直结构^[18]。对林层的研究则多集中于不同林层内传统结构^[19]、水平空间结构、竞争及空间分布格局^[20]等方面的分析; 在单木尺度上, 出现了基于相邻木关系的林层比(L)^[21]和改进的林层指数^[22], 分析了对象木结构单元的林层多样性; 但具有相同林层多样性的对象木结构单元却可能拥有不同的林层间结构, 对象木及其相邻木在各林层的

不同分布会产生不同的遮盖或挤压等竞争, 会直接影响对象木的生长^[23-24], 因此需要一种新的方法来准确地描述不同的林层间结构。

本文基于相邻木关系, 在林层比的基础上细化出对象木处于上、中、下层的 45 种“林层结构类型”, 以清楚地区分对象木处于何种林层间结构内, 并运用此方法描述了吉林省汪清林业局塔子沟林场蒙古栎(*Quercus mongolica*)次生林各林层结构类型的株数分布, 初步探究不同林层结构类型对于对象木生长影响的差异。研究结果可以丰富结构化森林经营的理论基础, 为森林精准经营提供数据参考, 对于竞争指数的构建也有一定的参考价值。

1 研究区概况与样地设置

1.1 研究区概况

研究区位于吉林省汪清县境内东部山区的塔子沟林场, 属于长白山系老爷岭支脉, 图们江水系, 地理坐标为 129°56′~131°04′E、43°05′~43°40′N, 低山丘陵地貌, 海拔 500~1 100 m。该区属季风型气候, 最低平均气温 -32℃, 最高平均气温 32℃, 全年平均气温为 4℃; 年降水量 600~700 mm, 且多集中于 7 月份。本地区土壤多为灰棕壤土, 平均厚度 40 cm

左右^[9]。研究区主要树种：蒙古栎、落叶松(*Larix gmelinii*)、红松(*Pinus koraiensis*)、紫椴(*Tilia amurensis*)、白桦(*Betula platyphylla*)、大青杨(*Populus ussuriensis*)、水曲柳(*Fraxinus mandschurica*)、色木槭(*Acer mono*)等。

1.2 样地设置

2013年7月在吉林省汪清林业局塔子沟林场蒙古栎林进行样地布设,共建立3块100 m × 100 m的

固定样地。使用Topcon全站仪将样地划分为100个10 m × 10 m小样方。分别对小样方内所有胸径大于3 cm的乔木活立木进行每木检尺,记录树号、树种,以及2013年胸径、树高、枝下高、东西南北冠幅和X、Y坐标。

2016年8月进行样地复测,记录2016年胸径等信息,样地具体情况见表1。

表1 样地基本情况表

Tab. 1 Basic situation of sample plots

样地编号 Sample plot No.	株数密度/(tree·hm ⁻²) Density/(tree·ha ⁻¹)	平均胸径 Mean DBH/cm	平均树高 Mean tree height/m	树种组成 Species composition
MGL-01	1 166	13.51	9.27	5株1红1椴1色1桦1杨 5 <i>Quercus mongolica</i> 1 <i>Pinus koraiensis</i> 1 <i>Tilia amurensis</i> 1 <i>Acer mono</i> 1 <i>Betula platyphylla</i> 1 <i>Populus ussuriensis</i>
MGL-02	656	13.26	12.29	4株3桦2杂1落 4 <i>Quercus mongolica</i> 3 <i>Betula platyphylla</i> 2 other species 1 <i>Larix gmelinii</i>
MGL-03	868	13.36	9.63	5株2落1杂1水1桦 5 <i>Quercus mongolica</i> 2 <i>Larix gmelinii</i> 1 other species 1 <i>Fraxinus mandschurica</i> 1 <i>Betula platyphylla</i>

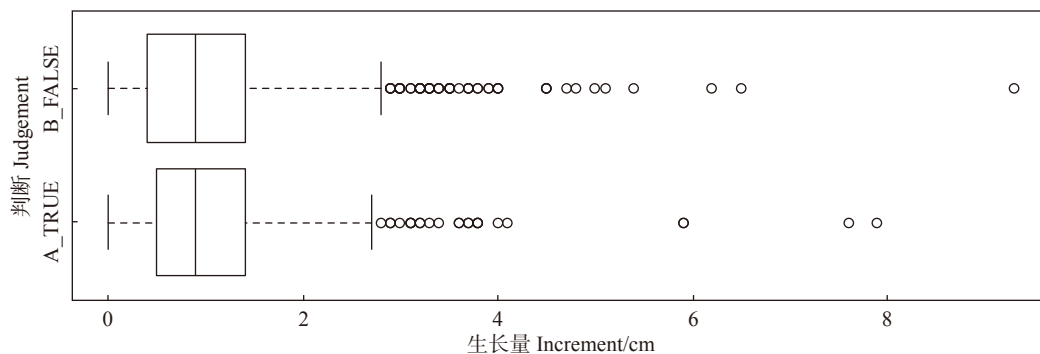
2 研究方法

2.1 数据预处理

由于在两期的间隔期中,部分林木会由于竞争或其他原因而枯损。如果对象木的相邻木中存在林木枯损情况,可能会提高目标树的定期生长量。为了分析这两种情况的胸径定期生长量(后文简称生长量)差异是否显著,对相邻木中是否存在枯损木两种情况的对象木生长量大小进行了 t 检验。检验结果为 $P = 0.286 2 (> 0.05)$,说明两种情况对象木生长量大小没有显著性差异。因此,本文将不区分两种

情况,研究不同林层比类型和不同林层结构类型对于对象木生长量大小的影响。

由图1可以看出,有一部分生长量值是极端偏大的。当某种林层结构类型的数量较少时,极端值可能会使该林层结构类型的生长量均值产生较大偏差,该值可能是测量误差引起,也可能是实际生长量确实较大,简单剔除可能造成本来平均生长量较大的林层结构类型平均生长量减小较多,并引起分析误差,因此本文对极端值进行缩小处理,缩小至不存在极端值为止,然后对处理后样本进行分析。



A_TRUE表示对象木周围相邻木中存在枯损, B_FALSE表示对象木周围相邻木中无枯损。A_TRUE denotes the presence of dead wood in neighboring trees around the object wood, and B_FALSE denotes the absence of dead wood in neighboring trees around the object wood.

图1 不同判断情况下对象木的胸径生长量箱线图

Fig. 1 DBH increment boxplot of object wood under different judgment conditions

2.2 林层划分与边缘矫正

本文改进国际林联(IUFRO)的林层划分方法进行林层划分^[17]。首先,统计样地内最高的50株优势木的树高平均值作为优势高(H),然后计算优势高与

最低树高(h_{\min})间的极差(H_{dist})。若对象木树高 $h < h_{\min} + \frac{1}{3}H_{\text{dist}}$,则划分入下层; $h_{\min} + \frac{1}{3}H_{\text{dist}} < h < h_{\min} + \frac{2}{3}H_{\text{dist}}$,则划分入中层; $h > h_{\min} + \frac{2}{3}H_{\text{dist}}$,则划分入上层。

在判断对象木的相邻木时,其相邻木可能处于样地之外。为消除边缘效应,必须进行边缘矫正。本文采用 8 邻域缓冲区法进行边缘矫正,即将原样地复制,并在其左上、上、右上、左、右、左下、下和右下 8 个方位粘贴,形成 9 倍原样地大小的大样地^[25],在大样地内进行相邻木的判断并计算各指标。在分析时,仅分析在原样地内分布的对象木。

2.3 林层比与林层结构类型划分

林层比(L)是依照相邻木关系构建的描述与对象木不同层的相邻木所占比例的指标^[21]。

$$L_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n s_{ij} \quad (1)$$

式中:当相邻木与对象木同层时, $s_{ij} = 0$, 否则, $s_{ij} = 1$;

L_i 为第 i 株对象木的林层比取值; n 为相邻木株数,按照惠刚盈的研究结论,本文采用 $n = 4$ 的取值^[1],即仅分析距离对象木最近的 4 株相邻木,那么 L_i 取值有 0、0.25、0.5、0.75、1,分别代表与对象木同林层的相邻木有 4、3、2、1、0 株。

由于林层比仅考虑了相邻木是否与对象木处于同一林层,而未区分对象木所在林层,以及相邻木在其他林层的分布情况,没有较好地描述出林层的复杂结构。因此,在考虑了对象木所处林层,并区分相邻木在不同林层中的分布株数,得到如图 2 中的 45 种林层结构类型,其中对象木处于上、中、下林层各 15 种情况,并按照林层比类型进行分类。不同林层结构类型的演示图见图 2。

L	A(0)			B(0.25)			C(0.5)			D(0.75)			E(1)		
US	A1(5,0,0)	B1(4,0,1)	B1(4,1,0)	C1(3,0,2)	C1(3,1,1)	C1(3,2,0)	D1(2,0,3)	D1(2,1,2)	D1(2,2,1)	D1(2,3,0)	E1(1,0,4)	E1(1,1,3)	E1(1,2,2)	E1(1,3,1)	E1(1,4,0)
MS	A2(0,5,0)	B2(0,4,1)	B2(1,4,0)	C2(0,3,2)	C2(1,3,1)	C2(2,3,0)	D2(0,2,3)	D2(1,2,2)	D2(2,2,1)	D2(3,2,0)	E2(0,1,4)	E2(1,1,3)	E2(2,1,2)	E2(3,1,1)	E2(4,1,0)
LS	A3(0,0,5)	B3(0,1,4)	B3(1,0,4)	C3(0,2,3)	C3(1,1,3)	C3(2,0,3)	D3(0,3,2)	D3(1,2,2)	D3(2,1,2)	D3(3,0,2)	E3(0,4,1)	E3(1,3,1)	E3(2,2,1)	E3(3,1,1)	E3(4,0,1)

US. 上层; MS. 中层; LS. 下层。A、B、C、D、E 分别对应林层比取值 0、0.25、0.5、0.75、1 的 5 种类型; 1、2、3 分别代表对象木处于上层、中层和下层; 括号内数字代表林层结构类型中,从上层到中层,再到下层的各层林木株数。例如: D2(0, 2, 3)代表对象木处于中层,有 1 株相邻木与对象木同林层,剩余 3 株相邻木与对象木不同林层,上中下层依次有 0 株、2 株和 3 株树的林层结构类型。下同。US, upper-storey; MS, middle-storey; LS, lower-storey. A, B, C, D and E correspond to five types of stand level rate values 0, 0.25, 0.5, 0.75 and 1, respectively; 1, 2 and 3 represent the upper, middle and lower storey of the target trees in, respectively; the numbers in brackets represent the stem-number of the forest layer structure types, from the upper to the middle, and then to the lower storey. For example, D2(0, 2, 3) represents that the target tree is in the middle storey, one neighboring tree and the target tree are in the same storey, the remaining three neighboring trees are in different storeys, it is a forest layer structure type with 0, 2 and 3 trees in the upper, middle and lower layers, respectively. The same below.

图 2 对象木林层结构类型全解译图

Fig. 2 Complete interpretation diagram of forest layer structure types of object tree

2.4 数据分析

通过 R 语言编辑程序,设置 3 个样地的 8 邻域缓冲区、划分林层、判断相邻木以及计算林层比,并判断对象木的林层结构类型。将 3 个样地数据汇总分析,区分对象木所处林层,统计各林层比类型和林层结构类型的株数;然后对林层比类型间的生长量进行多重均值比较,探究生长量均值的差异显著性;最后计算各林层结构类型的生长量均值,分层探讨林层结构类型与对象木生长量均值的规律,赋予增益效果值,检验与生长量均值的拟合效果。其中,多重均值比较使用 multcomp 包的 glht() 函数进行,设置使用 0.05 的显著水平。

3 结果与分析

3.1 林层比类型株数分布

图 3 列出了 2016 年蒙古栎林在分林层情况下

的各林层比类型的活立木株数分布。

由图 3 可知:蒙古栎林各层的林木数量分布较为合理,中层的株数最多,上层和下层的株数相近,稍低于中层;各林层不同林层比类型的林木株数呈现出正态分布的趋势:中层接近于标准正态分布,株数排序为 $C > D > B > E > A$,即中层对象木的结构单元主要以 C2(0,3,2)、C2(1,3,1)和 C2(2,3,0)的林层结构类型分布, A2(0,5,0)的林层结构类型最少;上层和下层较为相似,都有一定的分布右偏,其中上层株数排序为 $D > E > C > B > A$,即以 D1(2,0,3)、D1(2,1,2)、D1(2,2,1)和 D1(2,3,0)的类型分布居多, A1(5,0,0)的类型最少;下层株数排序为 $D > C > E > B > A$,即以 D3(0,3,2)、D3(1,2,2)、D3(2,1,2)和 D3(3,0,2)的类型分布居多, A3(0,0,5)的类型最少;蒙古栎林总体的排序则与下层相似。各林层比类型在不同林层中的排序为:类型 A、B 和 C 的株数都呈

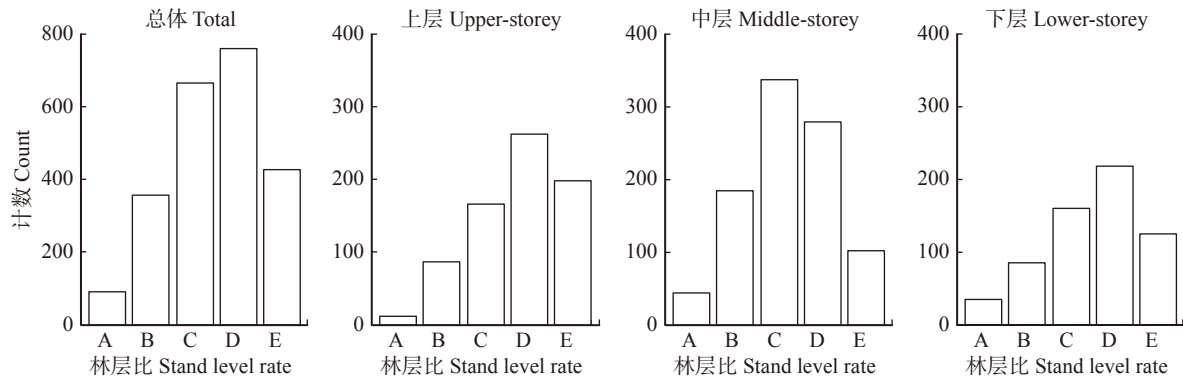


图3 林层比类型株数分布

Fig. 3 Number distribution of each layer of forest layer ratio types

现出中层 > 下层 > 上层的趋势; D 的株数排序为中层 > 上层 > 下层; E 的株数排序为上层 > 下层 > 中层。

总体而言, 蒙古栎林分的林层比类型主要以 C 和 D 为主, 即 2 株或 3 株相邻木与对象木不同层的情况较多; B 和 E, 即 1 株或 4 株相邻木与对象木

不同层的情况也有部分分布; 而 4 株相邻木都与对象木同层的类型 A 最少。

3.2 林层结构类型株数分布

图 4 是将林层比各类型展开为独一无二的林层结构类型后, 作出的蒙古栎林各林层的林层结构类型株数分布图。

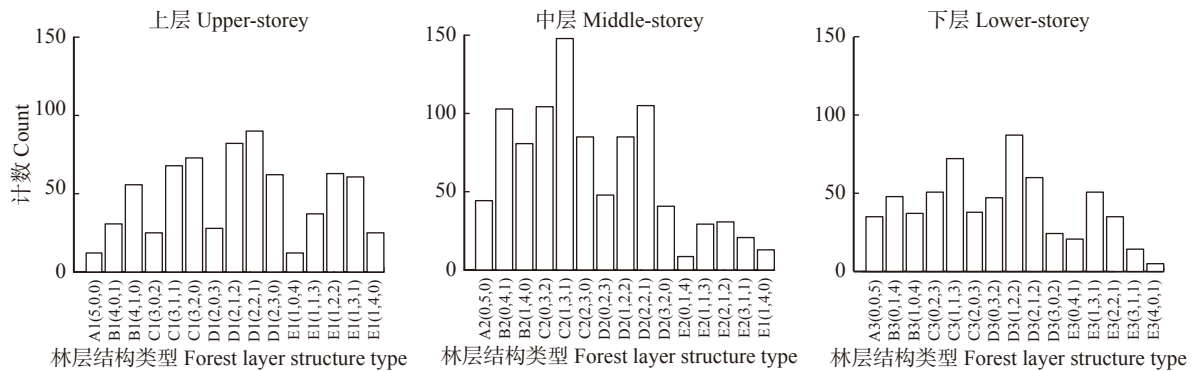


图4 林层结构类型株数分布

Fig. 4 Number distribution of forest layer structure types in each forest layer

对于蒙古栎林分, 上层内株数较多的 4 种林层结构类型为 D1(2,2,1)、D1(2,1,2)、C1(3,2,0) 和 C1(3,1,1), 分布较少的 4 种类型为 E1(1,0,4)、A1(5,0,0)、E1(1,4,0) 和 C1(3,0,2); 中层内株数较多的 4 种类型为 C2(1,3,1)、D2(2,2,1)、C2(0,3,2) 和 B2(0,4,1), 分布较少的 4 种类型为 E2(0,1,4)、E2(4,1,0)、E2(3,1,1) 和 E2(1,1,3); 下层内株数较多的 4 种类型为 D3(1,2,2)、C3(1,1,3)、D3(2,1,2) 和 E3(1,3,1), 分布较少的 4 种类型为 E3(4,0,1)、E3(3,1,1)、E3(0,4,1) 和 D3(3,0,2)。

在林分上层, 林层比类型 B 的两种林层结构类型的数量排序为 B1(4,1,0) > B1(4,0,1), C 的排序为 C1(3,2,0) > C1(3,1,1) > C1(3,0,2), D 的排序为 D1(2,2,1) > D1(2,1,2) > D1(2,3,0) > D1(2,0,3), E 的排序为 E1(1,2,2) > E1(1,3,1) > E1(1,1,3) > E1(1,4,0) > E1(1,0,4); 在林分中层, 类型 B 的数量

排序为 B2(0,4,1) > B2(1,4,0), C 的排序为 C2(1,3,1) > C2(0,3,2) > C2(2,3,0), D 的排序为 D2(2,2,1) > D2(1,2,2) > D2(0,2,3) > D2(3,2,0), E 的排序为 E2(2,1,2) > E2(1,1,3) > E2(3,1,1) > E2(4,1,0) > E2(0,1,4); 在林分下层, 类型 B 的数量排序为 B3(0,1,4) > B3(1,0,4), C 的排序为 C3(1,1,3) > C3(0,2,3) > C3(2,0,3), D 的排序为 D3(1,2,2) > D3(2,1,2) > D3(0,3,2) > D3(3,0,2), E 的排序为 E3(1,3,1) > E3(2,2,1) > E3(0,4,1) > E3(3,1,1) > E3(4,0,1)。

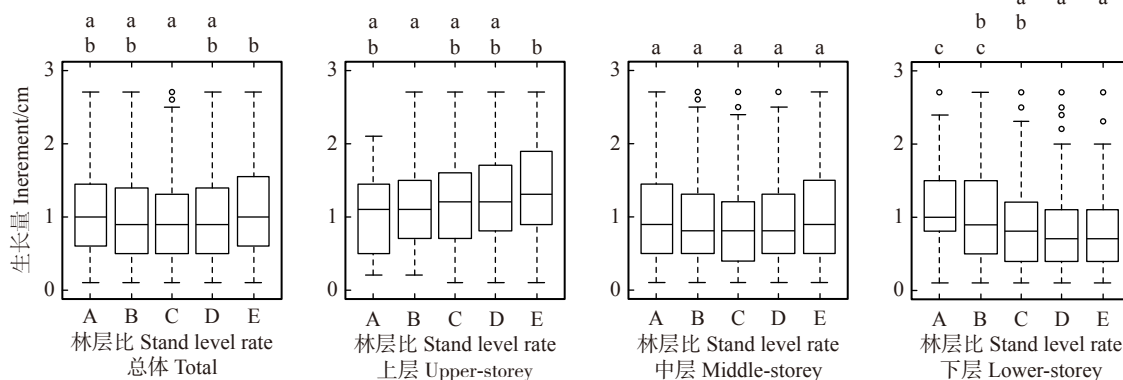
总体而言, 蒙古栎林分的林层结构类型具有以下普遍性: (1) 3 个林层都有林木分布的结构单元数量较多; (2) 若 3 层中只有两层有林木分布, 那么这两层相连的结构单元数量较多; (3) 在以上两个条件下, 中层的林木数量越多, 该层的林层结构类型的数量也越多。

3.3 林层比类型生长量差异分析

图 5 是林分总体和各林层的林层比类型之间生长量多重比较分析结果。

由图 5 可知: 对于林分总体, 从林层比类型 A 到 E 生长量中位数出现了先下降后上升的凹型趋势, E 与 C 之间均值差异显著, A、D、B 之间及其与 E 和 C 的差异都不显著; 上层呈现出逐步上升趋势, E 与 B 之间差异显著, A、C、B 之间及其与 E 和 B 的差异都不显著; 中层与林分总体的凹型趋势相似, 但

A、B、C、D、E 的生长量均值之间差异都不显著; 下层呈现出逐步下降的趋势, A 与 C、D、E 之间的生长量均值都差异显著, B 与 D、E 之间的差异显著, A 与 B 差异不显著, B 与 C 差异不显著, C、D、E 之间的差异都不显著。总体、上层和下层的各林层比类型的生长量均值之间存在部分的显著性差异, 特别是下层各林层比类型之间差异程度最高, 而中层的生长量均值之间没有显著性差异。



各子图上部: 各列间小写字母完全不同表示差异显著 ($P < 0.05$)。At the top of each subgraph: there was significant difference between columns with completely different lowercase letters ($P < 0.05$).

图 5 林层比类型间生长量多重均值比较

Fig. 5 Multiple mean comparison of DBH increment among different stand level rate types

3.4 不同林层结构类型生长量规律探讨

为了进一步分析林层结构类型与生长量大小之间的规律, 区分对象木所在林层, 将林层结构类型按照其生长量均值从大到小的顺序排序。排序结果见

表 2。

通过分析表 2 中各林层结构类型的 5 株树在上、中、下层的不同分布格局和对应的对象木生长量可得出以下规律:

表 2 林层结构类型生长量排序

Tab. 2 Sequence of forest layer structure types of each forest layer

上层 Upper-storey	生长量均值 Mean increment/cm	中层 Middle-storey	生长量均值 Mean increment/cm	下层 Lower-storey	生长量均值 Mean increment/cm
E1(1,0,4)	1.83	E2(1,1,3)	1.23	E3(4,0,1)	1.54
E1(1,1,3)	1.57	E2(0,1,4)	1.18	A3(0,0,5)	1.25
D1(2,2,1)	1.32	A2(0,5,0)	1.00	B3(1,0,4)	1.09
D1(2,1,2)	1.31	C2(0,3,2)	0.98	E3(0,4,1)	0.96
E1(1,2,2)	1.30	D2(0,2,3)	0.97	C3(1,1,3)	0.88
E1(1,4,0)	1.28	E2(4,1,0)	0.96	D3(2,1,2)	0.88
D1(2,0,3)	1.26	C2(1,3,1)	0.94	D3(3,0,2)	0.87
E1(1,3,1)	1.22	D2(2,2,1)	0.91	B3(0,1,4)	0.86
C1(3,1,1)	1.16	D2(1,2,2)	0.91	D3(1,2,2)	0.77
C1(3,2,0)	1.15	B2(0,4,1)	0.91	C3(2,0,3)	0.74
C1(3,0,2)	1.12	B2(1,4,0)	0.91	C3(0,2,3)	0.73
B1(4,1,0)	1.12	D2(3,2,0)	0.84	E3(3,1,1)	0.73
B1(4,0,1)	1.08	E2(3,1,1)	0.81	E3(1,3,1)	0.72
D1(2,3,0)	1.05	E2(2,1,2)	0.77	E3(2,2,1)	0.62
A1(5,0,0)	0.82	C2(2,3,0)	0.68	D3(0,3,2)	0.61

(1)当对象木处于上层,其同层的相邻木越少,且不同层的相邻木处于不相邻的下层的株数越多,对象木的生长量越高。

(2)当对象木处于中层,可分为3组:第1组为上层相邻木较少(0~1株)且中层相邻木最少(0株)和最多(或4株)的林层结构类型,中层相邻木越少,且上层相邻木越少时,生长量越高。第2组为上层相邻木较少(0株或1株)且有一定(1~3株)中层相邻木的林层结构类型和上层相邻木最多(4株)的林层结构类型,中层相邻木越少,且上层相邻木越少时,生长量越高。第3组为上层相邻木较多(2株或3株)的林层结构类型,中层相邻木越少,且上层相邻木越少时,生长量越高。第1组生长量大于第2组,第2组又大于第3组。

(3)当对象木处于下层,可分为两组:第1组为下层相邻木较多(3~4株)的林层结构类型和下层相邻木最少(0株)且相邻木在中、上层仅占据一层的林层结构类型,中层相邻木越少,且下层相邻木越少时,生长量越高。第2组为剩余的下层相邻木较少(0~2株)的林层结构类型,中层相邻木越少,生长量越高,且当中层邻近木为0株和3株时,下层相邻木越少时,生长量越高;当中层邻近木为1株和2株时,上层相邻木越少时,生长量越高。第1组的生长量大于第2组。

基于以上规律,分林层将各个林层结构类型按照生长量增益效果进行排序,并以区间[0, 1]平均分配增益效果值,结果见表3。

对各个林层结构类型赋值后,构建增益效果与生长量之间的模型,结果如图6所示。

由图6可知:各林层使用线性拟合的增益效果与生长量均值的回归模型效果都较好, R^2 都在0.66之上,拟合效果为中层>下层>上层,分组排序的效果较好。上、中、下层的平均生长量基本都按照增益效果值的增加而增大,因此按照上述规律排序的林层结构类型是较为合理的。一元线性回归方程

表3 林层结构类型增益效果赋值表

Tab. 3 Buff value assignment table of each forest layer structure type

上层 Upper-storey	中层 Middle-storey	下层 Lower-storey	增益效果值 Buff value
A1(5,0,0)	C2(2,3,0)	D3(0,3,2)	0.07
B1(4,1,0)	D2(3,2,0)	E3(1,3,1)	0.13
B1(4,0,1)	D2(2,2,1)	E3(2,2,1)	0.20
C1(3,2,0)	E2(3,1,1)	D3(1,2,2)	0.27
C1(3,1,1)	E2(2,1,2)	C3(0,2,3)	0.33
C1(3,0,2)	B2(1,4,0)	E3(3,1,1)	0.40
D1(2,3,0)	B2(0,4,1)	D3(2,1,2)	0.47
D1(2,2,1)	C2(1,3,1)	C3(1,1,3)	0.53
D1(2,1,2)	C2(0,3,2)	C3(2,0,3)	0.60
D1(2,0,3)	D2(1,2,2)	D3(3,0,2)	0.67
E1(1,4,0)	D2(0,2,3)	E3(0,4,1)	0.73
E1(1,3,1)	E2(4,1,0)	B3(0,1,4)	0.80
E1(1,2,2)	A2(0,5,0)	A3(0,0,5)	0.87
E1(1,1,3)	E2(1,1,3)	B3(1,0,4)	0.93
E1(1,0,4)	E2(0,1,4)	E3(4,0,1)	1.00

的斜率代表了随着增益效果值的增大生长量均值的增加速度,斜率大小排序为下层(0.700)>上层(0.645)>中层(0.407),说明下层对象木的平均生长量对不同的林层结构单元最为敏感,上层则与下层相差不大,而中层对象木的平均生长量对不同的林层结构单元最不敏感。

4 讨论

4.1 蒙古栎次生林林层间结构

(1)通过分析林层比类型的数量分布可知:蒙古栎林分对象木结构单元中4株相邻木都与对象木同层的类型A较少,而2株或3株相邻木与对象木不同层的类型C和类型D较多,这与安慧君^[21]对于阔叶红松林研究的结果一致。通过分析林层结构类型的数量分布可知:蒙古栎林对象木结构单元中5株

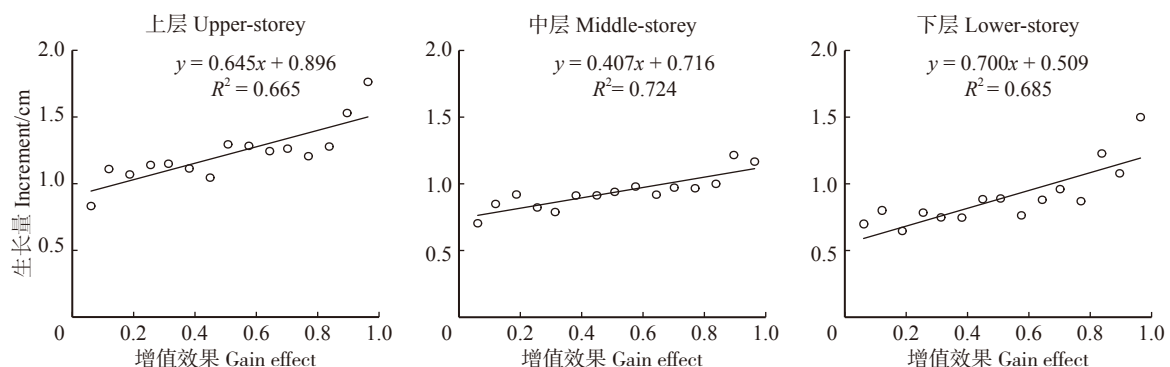


图6 增益效果与生长量均值回归分析

Fig. 6 Regression analysis of gain effect and mean increment

林木在3个林层都有分布的情况是最多的,其次5株林木倾向于分布在相邻的两个林层中,且中层分布有较多林木的林层结构类型的数量较多,说明了蒙古栎林分中对象木结构单元的垂直结构普遍较好,层次结构复杂,同层相互挤压的竞争少,对光照利用的效率较高;5株同层的林层结构类型的数量,上层很小,而中、下层较大,这与陈科屹等^[26]使用胸径代替年龄划分龄级的空间格局结果相一致,即在小尺度下I龄级(下层)和II龄级(中层)表现出较强的聚集分布(5株同层的类型多),而III龄级和IV龄级(上层)则呈现出随机分布(5株同层的类型少)的格局。

(2)蒙古栎林分各层林层比类型的生长量变化趋势,从类型A到类型E,上层呈现出逐步上升趋势,中层出现了先下降后上升的凹型趋势,下层则呈现出逐步下降的趋势,而各类型间的生长量差异显著度为下层>上层>中层。对于下层对象木,当其相邻木不与其同层时,就会对其产生遮盖,抑制其生长,且从各类型间生长量的差异显著性可知,这种抑制效果在上方刚开始出现遮盖木时最为明显,且在增加两株后具有显著性差异,而上方遮盖木较多后,增加更多的遮盖木的抑制效果差异逐渐不显著;而对于上层对象木,由于其受光较好,拥有较高的生长量,当其相邻木不与其同层时,即减少了侧向的挤压,对其生长是有增益效果的,但这种增益效果在减少较多同层相邻木时才有显著效果,总体效果比下层差;而对于中层对象木,当其相邻木不与其同层时,即可能是在上方给予其遮盖,也可能是在下方,减少了侧向挤压,作用较为复杂,林层比类型没有办法区分这两种情况,各类型间的生长量差异不显著,而各林层比指标内的林层结构间生长量差异理应较大,这也在细化的林层结构类型中得到了验证。

(3)将各林层结构类型按照生长量均值大小进行排序,得出了生长量均值大小的结构单元各层分布株数规律:当对象木处于上层,规律较为简单,这也说明了影响上林层对象木生长的林层因素较为单一,而中、下林层需要分组来描述规律才能获得较好的排序结果,因此说明了林层因素影响中、下林层的生长的作用是较为复杂的。对于上林层,影响对象木生长量大小的林层因素主要来自于上层相邻木株数,其次是中层相邻木株数,也就是说相邻木越远离上林层,对象木生长越好。对于中林层,对对象木生长影响最大的仍然是上层相邻木株数,其次是中层相邻木株数,最后仍然是上层相邻木株数决定排序,且上层相邻木较少(0~1株)和最多(4株)的类型的生长量高于相邻木较多(2~3株)的类型,说明中层

对象木的生长受到了上层相邻木遮盖和中层相邻木侧向挤压的综合作用^[27],上层遮盖少或中层挤压最小,对象木都有较高的生长增益效果。对于下林层,对对象木生长影响最大的则是中、上层的相邻木总株数,中、上层株数较少(0~1株)的类型的生长量高于中上层株数较多(2~4株)的类型,但也存在中、上层株数最多(4株),但仅分布于一层的类型生长量较大,这可能是由于中、上层仅分布一层的类型,下层接受到的光照量要高于中、上层都有相邻木分布的类型,也可能是由于对象木耐阴性较好所导致的;决定类型排序的因素首先是中层的相邻木数量,然后才是上层或下层相邻木的数量,对于中层相邻木较多(3~4株)和最少(0株)的类型,下层株数越少,生长量越高,即此时下层侧向挤压效果明显,而对于中层相邻木较少(1~2株)的类型,上层株数较少,生长量越高,即此时上层遮盖效果明显,因此可以看出,对下林层对象木生长影响较大的因素是来自相邻中层的相邻木遮盖,然后是上层相邻木的遮盖和下层间的侧向挤压竞争。

(4)按照规律排列赋予林层结构类型的增益值与生长量均值的回归模型拟合较好,说明林层结构类型可以较好地解释对象木的生长。林木的生长对光照有一定的需求^[28-29],同林层各林层结构类型的差别主要在于4株相邻木在上、中、下3层的不同分布格局。通过分析林层结构类型中各林层的分布株数,可以了解到对象木受到的上方遮盖与侧向挤压带来的竞争或对象木拥有的充足生长空间,进而可以与其生长量建立联系,对竞争指数的构建有一定的指导价值^[24]。

本文中仅考虑林层的结构来考虑与生长量的关系,得到了一些规律性的结论,部分特殊情况影响了整体的拟合效果,可能是因为引起生长量差异的影响因子较多(距离、树种、耐阴性等)^[30],出现了交互作用,而何种因子造成的交互作用导致了生长量变化趋势的差异有待进一步研究。

4.2 垂直结构的“林层结构类型”分析方法

(1)玉宝等^[19]对兴安落叶松(*Larix gmelinii*)过伐林垂直结构的分析及陈科屹等^[20]对云杉(*Picea asperata-Abies fabri*)过伐林垂直结构的分析,都是对垂直尺度上各林层内的水平结构的分析,而林层结构类型法、林层比法、林层指数法则打破了林层间的界限,是更准确意义上的一种垂直结构分析方法。由于安慧君^[21]所构建的林层比仅区分了相邻木是否与对象木处于同一林层,所以对林层间结构的描述是粗略的,吕勇等^[22]提出的林层指数虽区分了上、中、下林层,在准确分析林层间结构的道路上更进一

步,但仍然不够完善,对不同林层结构的区分度差,而林层结构类型不仅考虑了林层间的差别,对结构单元内各层的株数分布也考虑在内,对林层结构的描述更为精准,可以对林层结构进行深度解析。

(2)Zenner 等^[23]基于 Delaunay 三角网将垂直结构划分为 24 种斑块类型,进而分析了林分的垂直结构异质性,这同样是一种分析林层间结构的方法,不同点在于林层结构类型法中每一株目标树个体都有各自的林层结构类型,可以与单木的各种属性建立联系,如本文探讨其与定期生长量的关联,而三角网方法的个体则是由邻近的 3 株树的树冠顶端形成的三角网,没有单株目标树的结构,因此无法精准描述单株木所处的垂直结构环境;相反,三角网方法形成的三角网没有重叠,对整个林分的平均垂直结构状态的描述效果较好,可在未来的研究中结合使用来分析林分垂直结构。

(3)空间结构分析确定相邻木的方法主要有最近 3 株相邻木法(结构 4 组法)^[1]、最近 4 株相邻木法^[2]以及 Voronoi 图(泰森多边形)法^[25]。Voronoi 图法同样基于 Delaunay 三角网,通过构建不重叠的三角网,可以确定任意一株对象木周围的邻近木,但每株对象木的邻近木数量是有较大差异的(3~8 株最为常见^[31])。使用较少且固定的邻近木株数可以更好地列出所有可能的结构,便于直观理解与对比不同对象木的结构差别,但仅分析固定株数的邻近木可能会忽视了其他同样对对象木生长有影响的邻近木的作用,即相邻木的数量也不宜过小^[1]。因此本文基于“结构 4 组法”来构建的林层结构类型是较为合理的。

5 结 论

本文基于相邻木关系的空间结构研究方法”,根据对象木和 4 株最近相邻木在上、中、下 3 层的分布构建“林层结构类型”,区分对象木在上、中、下层的分布情况,共 45 种林层结构类型。使用林层结构类型对蒙古栎天然次生林的林层结构进行了解析,在分析林层结构的数量分布、解释生长量均值的大小方面都有较好的效果,可以清楚地区分不同的林层间结构,并明确对象木所处结构单元的林层结构,对未来的结构化森林经营有一定的指导意义。

参 考 文 献

[1] 惠刚盈, Klaus von Gadow, 等. 结构化森林经营原理 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2016.
Hui G Y, Gadow K V, et al. The principle of structured forest management [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2016.

[2] 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 G Y, Hu Y B. Research on the expression of spatial isolation of mixed forest species [J]. Forest Research, 2001, 14(1): 23-27.

[3] 惠刚盈, Gadow K V, 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 G Y, Gadow K V, Albert M. A new parameter for stand spatial structure: neighbourhood comparison [J]. Forest Research, 1999, 12(1): 1-6.

[4] 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): 39-44.
Hui G Y. The neighborhood pattern: a new structure parameter for describing distribution of forest tree position [J]. Scientia Silvae Sinicae, 1999, 35(1): 39-44.

[5] 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 Y B, Hui G Y, Qi J Z, et al. Analysis of the spatial structure of natural Korean pine broadleaved forest [J]. Forest Research, 2003, 16(5): 523-530.

[6] 惠刚盈, 胡艳波, 赵中华. 基于相邻木关系的树种分隔程度空间测度方法 [J]. 北京林业大学学报, 2008, 30(4): 131-134.
Hui G Y, Hu Y B, Zhao Z H. Evaluating tree species segregation based on neighborhood spatial relationships [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2008, 30(4): 131-134.

[7] 惠刚盈. 基于相邻木关系的林分空间结构参数应用研究 [J]. 北京林业大学学报, 2013, 35(4): 1-8.
Hui G Y. Studies on the application of stand spatial structure parameters based on the relationship of neighborhood trees [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2013, 35(4): 1-8.

[8] 惠刚盈, 胡艳波, 赵中华. 结构化森林经营研究进展 [J]. 林业科学研究, 2018, 31(1): 85-93.
Hui G Y, Hu Y B, Zhao Z H. Research progress of structure-based forest management [J]. Forestry Research, 2018, 31(1): 85-93.

[9] 吕延杰, 杨华, 张青, 等. 云冷杉天然林林分空间结构对胸径生长量的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2017, 39(9): 41-47.
Lü Y J, Yang H, Zhang Q, et al. Effects of spatial structure on DBH increment of natural spruce-fir forest [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2017, 39(9): 41-47.

[10] Li Y, Hui G, Zhao Z, et al. The bivariate distribution characteristics of spatial structure in natural Korean pine broadleaved forest [J]. Journal of Vegetation Science, 2012, 23(6): 1180-1190.

[11] Li Y, Ye S, Hui G, et al. Spatial structure of timber harvested according to structure-based forest management [J]. Forest Ecology and Management, 2014, 322: 106-116.

[12] Pommerening A. Evaluating structural indices by reversing forest structural analysis [J]. Forest Ecology and Management, 2006, 224(3): 266-277.

[13] 张会儒, 武纪成, 杨洪波, 等. 长白落叶松-云杉-冷杉混交林林分空间结构分析 [J]. 浙江农林大学学报, 2009, 26(3): 319-325.
Zhang H R, Wu J C, Yang H B, et al. Spatial structure of mixed larch-spruce-fir stands [J]. Journal of Zhejiang A & F University,

- 2009, 26(3): 319–325.
- [14] 胡艳波, 惠刚盈. 基于相邻木关系的林木密集程度表达方式研究 [J]. 北京林业大学学报, 2015, 37(9): 1–8.
Hu Y B, Hui G Y. How to describe the crowding degree of trees based on the relationship of neighboring trees [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2015, 37(9): 1–8.
- [15] 曹小玉, 李际平. 林分空间结构指标研究进展 [J]. 林业资源管理, 2016(4): 65–73.
Cao X Y, Li J P. Research progress on indicators of stand spatial structure [J]. Forestry Resource Management, 2016(4): 65–73.
- [16] 王宏翔, 胡艳波, 赵中华, 等. 林分空间结构参数: 角尺度的研究进展 [J]. 林业科学研究, 2014, 27(6): 841–847.
Wang H X, Hu Y B, Zhao Z H, et al. Progress in stand spatial structure parameter: the uniform angle index [J]. Forest Research, 2014, 27(6): 841–847.
- [17] 庄崇洋, 黄清麟, 马志波, 等. 林层划分方法综述 [J]. 世界林业研究, 2014, 27(6): 34–40.
Zhuang C Y, Huang Q L, Ma Z B, et al. Review on defining methods for canopy stratification [J]. World Forestry Research, 2014, 27(6): 34–40.
- [18] 孟宪宇. 测树学 [M]. 3 版. 北京: 中国林业出版社, 2006.
Meng X Y. Forest measurement [M]. 3rd ed. Beijing: China Forestry Publishing House, 2006.
- [19] 玉宝, 张秋良, 王立明. 中幼龄兴安落叶松过伐林垂直结构综合特征 [J]. 林业科学, 2015, 51(1): 132–139.
Yu B, Zhang Q L, Wang L M. Comprehensive characteristics of the vertical structure of middle young over cutting forest of *Larix gmelinii* [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2015, 51(1): 132–139.
- [20] 陈科屹, 张会儒, 雷相东, 等. 云冷杉过伐林垂直结构特征分析 [J]. 林业科学研究, 2017, 30(3): 450–459.
Chen K Y, Zhang H R, Lei X D, et al. Analysis of vertical structure characteristics for spruce-fir over-cutting forest [J]. Forestry Research, 2017, 30(3): 450–459.
- [21] 安慧君. 阔叶红松林空间结构研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2003.
An H J. Study on the spatial structure of broad-leaved Korean pine forest [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2003.
- [22] 吕勇, 臧颢, 万献军, 等. 基于林层指数的青桐混交林林层结构研究 [J]. 林业资源管理, 2012(3): 81–84.
Lü Y, Zang H, Wan X J, et al. Storey structure study of *Cyclobalanopsis myrsinaefolia* mixed stand based on storey index [J]. Forestry Resource Management, 2012(3): 81–84.
- [23] Zenner E K, Hibbs D E. A new method for modeling the heterogeneity of forest structure [J]. Forest Ecology & Management, 2000, 129(1): 75–87.
- [24] 惠刚盈, 胡艳波, 赵中华, 等. 基于交角的林木竞争指数 [J]. 林业科学, 2013, 49(6): 68–73.
Hui G Y, Hu Y B, Zhao Z H, et al. A forest competition index based on intersection angle [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2013, 49(6): 68–73.
- [25] 汤孟平, 陈永刚, 施拥军, 等. 基于 Voronoi 图的群落优势树种种内种间竞争 [J]. 生态学报, 2007, 27(11): 4707–4716.
Tang M P, Chen Y G, Shi Y J, et al. Intraspecific and interspecific competition analysis of community dominant plant populations based on Voronoi diagram [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(11): 4707–4716.
- [26] 陈科屹, 张会儒, 雷相东. 天然次生林蒙古栎种群空间格局 [J]. 生态学报, 2018, 38(10): 3462–3470.
Chen K Y, Zhang H R, Lei X D. Spatial pattern of *Quercus mongolica* in natural secondary forest [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(10): 3462–3470.
- [27] Kohyama T. Size-structured tree populations in gap-dynamic forest: the forest architecture hypothesis for the stable coexistence of species [J]. Journal of Ecology, 1993, 81(1): 131–143.
- [28] Latham P A, Zuuring H R, Coble D W. A method for quantifying vertical forest structure [J]. Forest Ecology & Management, 1998, 104(1-3): 157–170.
- [29] 罗耀华, 陈庆诚, 张鹏云. 兴隆山阴暗针叶林空间格局及其利用光能的对策 [J]. 生态学报, 1984, 4(1): 10–20.
Luo Y H, Chen Q C, Zhang P Y. The spatial pattern of coniferous forest in Xinglongshan Mountain and its strategies in using sun light energy [J]. Acta Ecologica Sinica, 1984, 4(1): 10–20.
- [30] Gadov K V, Zhang C Y, Whenkell C, et al. Forest structure and diversity [M] // Pukkala T, Gadov K V. Continuous cover forestry. Dordrecht: Springer, 2012: 29–83.
- [31] 李际平, 封尧, 赵春燕, 等. 基于 Voronoi 图的角尺度分析方法探讨: 以湖南省平江县福寿林场为例 [J]. 林业资源管理, 2015(4): 33–39.
Li J P, Feng Y, Zhao C Y, et al. Discussion on the analysis method of uniform angle index based in Voronoi diagram: take Fushou Forest Farm as a example [J]. Forest Resources Management, 2015(4): 33–39.

(责任编辑 冯秀兰
责任编辑委 张春雨)