



辽东山区胡桃楸次生林垂直结构特征研究

董莉莉 赵济川 汪成成 刘红民 胡博 高英旭

Analysis on Vertical Structure Characteristics of *Juglans mandshurica* Secondary Forest in Eastern Liaoning Mountainous Area

Dong Lili, Zhao Jichuan, Wang Chengcheng, Liu Hongmin, Hu Bo, Gao Yingxu

引用本文:

董莉莉, 赵济川, 汪成成, 刘红民, 胡博, 高英旭. 辽东山区胡桃楸次生林垂直结构特征研究[J]. 西南林业大学学报, 2023, 43(6):91–96. doi: 10.11929/j.swfu.202209052

Dong Lili, Zhao Jichuan, Wang Chengcheng, Liu Hongmin, Hu Bo, Gao Yingxu. Analysis on Vertical Structure Characteristics of *Juglans mandshurica* Secondary Forest in Eastern Liaoning Mountainous Area[J]. Journal of Southwest Forestry University(Natural Science), 2023, 43(6):91–96. doi: 10.11929/j.swfu.202209052

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11929/j.swfu.202209052>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

滇池面山锥连栎天然次生林空间结构特征及采伐优化研究

Spatial Structure and Cutting Optimization of Natural Secondary Forest of *Quercus franchetii* in the Mountains Around Dianchi Lake
西南林业大学学报. 2020, 40(4): 80–86 <https://doi.org/10.11929/j.swfu.201911028>

恩施州不同海拔马尾松天然次生林分结构特征研究

Structure Characteristics of *Pinus massoniana* Natural Secondary Forest at Different Altitude of Enshi
西南林业大学学报. 2019, 39(1): 114–122 <https://doi.org/10.11929/j.swfu.201806031>

森林火灾对马尾松次生林土壤活性有机碳的影响

Effects of Forest Fires on Soil Labile Organic Carbon in Secondary Forest of *Pinus massoniana*
西南林业大学学报. 2021, 41(5): 121–130 <https://doi.org/10.11929/j.swfu.202009007>

不同营林措施对马尾松林物种组成及空间结构的短期影响

Short-term Effects of Different Forest Management Practices and Spatial Structure of *Pinus massoniana* Stand
西南林业大学学报. 2019, 39(1): 9–19 <https://doi.org/10.11929/j.swfu.201809021>

赣南马尾松林分多功能经营空间结构优化模型研究

Spatial Structure Optimizing Model of *Pinus massoniana* Stand Based on Multi-function Management in Southern Jiangxi
西南林业大学学报. 2017, 37(6): 141–147 <https://doi.org/10.11929/j.issn.2095-1914.2017.06.023>

黄牛木种群的空间结构和三维绿量研究

Spatial Structure and Three-dimensional Green Quantity of *Cratogeomys cochinchinense* Population
西南林业大学学报. 2020, 40(2): 71–78 <https://doi.org/10.11929/j.swfu.201909034>

DOI: 10.11929/j.swfu.202209052

引文格式: 董莉莉, 赵济川, 汪成成, 等. 辽东山区胡桃楸次生林垂直结构特征研究 [J]. 西南林业大学学报 (自然科学), 2023, 43(6): 91–96.

辽东山区胡桃楸次生林垂直结构特征研究

董莉莉^{1,2} 赵济川^{1,2} 汪成成^{1,2} 刘红民^{1,2} 胡 博^{1,2} 高英旭^{1,2}

(1. 辽宁省林业科学研究院, 辽宁 沈阳 110032; 2. 辽宁白石砬子森林生态系统国家定位观测研究站, 辽宁 丹东 118201)

摘要: 以辽东山区胡桃楸次生林为研究对象, 采用树冠光竞争高法将胡桃楸次生林划分为上、中、下3个林层, 并在此基础上分析了各林层的树种组成、径级结构、空间结构特征等。结果表明: 上、中、下3个林层平均树高分别为14.86~17.02、11.18~12.77 m和7.33~8.01 m, 方差分析结果表明, 不同林层树高间差异极显著, 分层效果较好。上林层为林分蓄积量主要贡献层, 占林分总蓄积量61.86%~78.7%; 其次为中林层, 下林层最少。各林层径级分布曲线不同, 下林层径级分布呈反“J”曲线, 中林层呈左偏单峰曲线, 上林层为多峰曲线。林分整体处于中度混交向强度混交的过渡状态, 3块标准地上、中林层的混交度平均值分别为0.512、0.574, 为中度混交, 下林层平均混交度为0.671, 接近强度混交, 各林层平均混交度表现为随垂直高度的降低而增大。标准地1和标准地3为聚集分布, 标准地2属于随机分布。随林层垂直高度的降低, 林分聚集度和竞争指数均有所增加。从林分的垂直结构判断胡桃楸次生林的林分结构相对稳定, 其未来的演替方向可能为以落叶松和胡桃楸为优势种的针阔混交林或者以胡桃楸、蒙古栎和花曲柳为优势种的阔叶混交林, 下林层的更新能力较差, 应采取人工措施促进其天然更新。

关键词: 胡桃楸; 次生林; 垂直结构; 空间结构

中图分类号: S758

文献标志码: A

文章编号: 2095-1914(2023)06-0091-06

Analysis on Vertical Structure Characteristics of *Juglans mandshurica* Secondary Forest in Eastern Liaoning Mountainous Area

Dong Lili^{1,2}, Zhao Jichuan^{1,2}, Wang Chengcheng^{1,2}, Liu Hongmin^{1,2}, Hu Bo^{1,2}, Gao Yingxu^{1,2}

(1. Liaoning Academy of Forest Science, Shenyang Liaoning 110032, China; 2. Liaoning Baishilazi National Positioning Observation and Research Station of Forest Ecosystem, Dandong Liaoning 118201, China)

Abstract: Taking the secondary forest of *Juglans mandshurica* in the mountainous area of eastern Liaoning Province as the research object, the stand was divided into upper, middle and lower layers according to the canopy competition height(CCH), and on this basis, the tree species composition, diameter class structure and spatial structure characteristics of each forest layer were analyzed. The result showed that the average tree heights of the upper, middle and lower layers were 14.86–17.02, 11.18–12.77 m and 7.33–8.01 m, respectively. The ANOVA results showed that there were significant differences among tree heights of different forest layers, with excellent

收稿日期: 2022-09-22; 修回日期: 2022-11-17

基金项目: 辽宁省自然科学基金面上项目(2022-MS-060)资助; 辽宁省应用基础研究计划(2022JH2/101300114)资助; 国家自然科学基金面上项目(32071674)资助。

第1作者: 董莉莉(1982—), 女, 正高级工程师。研究方向: 天然次生林可持续经营。Email: donglili_1982@126.com。

通信作者: 高英旭(1981—), 男, 正高级工程师。研究方向: 林下经济。Email: yingxugao@126.com。

layering results. The upper forest layer was the main contributor to the stand volume, accounting for 61.86%–78.7%, followed by the middle layer, and the lowest in the lower layer. The diameter distribution curve differs between forest layers, with the lower layer showing an inverse 'J' curve, the middle layer a left-skewed single-peaked curve and the upper layer a multi-peaked curve. The stand was in a state of transition from moderate to strong mixing. The mean mixedness of the upper and middle layers in 3 samples was 0.512 and 0.574 respectively, which was moderate mixedness, while the mean mixedness of the lower layer was 0.671, which was close to strong mixedness, and the mean mixedness of each forest layer showed an increase with decreasing vertical height. Sample plots 1 and 3 are aggregated and sample plot 2 is randomly distributed. Both stand aggregation and competition index increased as the vertical height of the stand decreased. The secondary forest of *J. mandshurica* is relatively stable by judging from the vertical structure of the forest, and its future succession direction is likely to be a mixed coniferous forest with *Larix gmelinii* and *J. mandshurica* as the dominant species or a mixed broadleaf forest with *J. mandshurica*, *Quercus mongolica* and *Fraxinus rhynchophylla*, where the dominant species *J. mandshurica* is less capable of regeneration and needs to be artificially promoted for natural regeneration.

Key words: *Juglans mandshurica*; secondary forest; vertical structure; spatial structure

林分的垂直结构是林分中植物个体在垂直空间上的配置特征^[1],是群落中各种群之间以及种群与环境之间相互竞争和选择的结果^[2]。林分垂直结构变化可引起林内光照、温度等微环境的改变^[3],从而对林木生长、林下植物群落结构和物种多样性等产生重要影响,在很大程度上决定了林分的稳定性、演替方向、发展的可能性和经营空间的大小^[4]。因此,基于林分垂直结构开展林分结构特征研究,探讨林分垂直结构的自然分异规律,明确森林演替的进程和方向,对森林保育、促进正向演替,实现森林的可持续经营具有重要意义。

目前,关于林分垂直结构的研究主要集中在林层的划分方法上,包括定性、定量两大类。定性方法是通过研究者的主观意识根据森林群落外貌特征进行划分^[5]。如国际林联(IUFRO)林层划分标准是以林分优势高为依据对森林垂直结构进行划分。定量分析方法主要是根据林木对光竞争能力结合林木属性确定林层高度临界值进行划分,如树冠光竞争高法^[6]。近年来随着遥感技术在林业上的应用,有研究者采用机载激光雷达点云数据通过建立函数模型来反演林分结构属性,给林分垂直结构特征的获取带来了一个新途径^[7]。然而这些研究都仅限于对林分垂直结构划分方法的研究上,对林分垂直结构分布规律的研究鲜有报道。本研究以辽东山区胡桃楸(*Juglans mandshurica*)次生林为研究对象,采用树冠光竞

争高法划分林层,对不同林层的结构特征进行分析,深入了解胡桃楸次生林垂直结构的分布规律,以期核桃楸次生林的可持续经营提供理论依据。

1 研究区概况

研究区位于本溪县草河掌林场(41°32'N, 124°59'E),海拔 705 m。该区域属于长白山余脉铁刹山支脉,为温带大陆性季风气候区,年均温 6.1~7.8℃,1月平均温度-12℃,7月平均温度为 24℃,≥10℃的年有效积温 3024℃,年均日照时数为 2411 h,无霜期 130~150 d,年均降水量 700~800 mm,多集中在 6—7 月。该地区主要植被类型为蒙古栎(*Quercus mongolica*)林、红松(*Pinus koraiensis*)针阔叶混交林和落叶阔叶混交林等,人工林主要有红松人工林和落叶松(*Larix gmelinii*)人工林。土壤类型为暗棕壤森林土和棕壤森林土。

2 研究方法

2.1 标准地设置

在研究区内设置 3 块 60 m×60 m 的标准地,采用相邻格子法将标准地划分为 36 个 10 m×10 m 的小样方,在样方内,对胸径≥5 cm 的乔木进行每木检尺,记录树种的名称、位置、胸径、树高、冠幅、第一活枝枝下高以及健康状况等信息。各标准地基本情况见表 1。

表 1 标准地基本概况
Table 1 The condition of sample plots

标准地号	海拔/m	坡向	坡度/(°)	胸径/cm	树高/m	林分密度/(株·hm ⁻²)	蓄积量/(m ³ ·hm ⁻²)	树种组成
1	708	东南	15	11.6	11.2	1 522	121.31	7楸+1栎+1落+1花-五
2	658	东南	18	11.9	11.5	1 219	100.02	8楸+1花+栎+榆
3	692	东南	15	12.1	12.7	1 422	177.33	7楸+2花+1栎-元

注：楸、栎、落、花、五、榆、元分别代表胡桃楸、蒙古栎、落叶松、花曲柳（*Fraxinus rhynchophylla*）、五角枫（*Acer pictum*）和元宝槭（*A. truncatum*）。

2.2 林层划分方法

本研究采用树冠光竞争高度法对胡桃楸次生林的垂直结构进行划分，根据林木的树高和冠长确定每一林层的高度值，再将林分中的每一株林木划入相应的林层^[6,8]。具体计算公式：

CCH = a · C_L + H_w (1)

式中：CCH 为树冠光竞争高度（m）；a 为截止系数，其取值范围为 0.3 ~ 0.5，结合数据处理情况本研究 a 取值为 0.5；C_L 为冠长；H_w 为枝下高。

2.3 空间结构参数计算

选取角尺度、混交度、竞争指数作为表达林分空间结构参数。为消除边缘效应对林分空间结构的影响，将标准地内距各边界 5 m 范围确定为缓冲区。

1) 角尺度（W）。主要反映了林分的空间分布格局。被定义为α角小于标准角（α₀）的个数占所考察相邻最近树（n）的比例^[9]，其计算公式为：

W_i = 1/n ∑_{j=1}ⁿ z_{ij} (2)

z_{ij} = { 1, 第 j 个夹角 α_j 小于标准角 α₀
0, 否则 (3)

式中：W_i 为第 i 株参照树的角尺度；标准角 α₀ = 72°。

当林分平均角尺度（W̄）在置信区间 [0.475, 0.517] 时，为随机分布；当 W̄ > 0.517 时为聚集分布；当 W̄ < 0.475 时为均匀分布。

2) 混交度（M）。主要反映林分中树种空间隔离程度，它被定义为参照树 i 的 n 株最近相邻木中与参照树不属同种的个体所占的比例^[10]，公式为：

M_i = 1/n ∑_{j=1}ⁿ v_{ij} (4)

v_{ij} = { 1, 第 j 株相邻木与参照树 i 非同一树种
0, 第 j 株相邻木与参照树树种相同 (5)

式中：M_i 为第 i 株参照树的混交度；n 为相邻木数量。

M_i 取值为 0、0.25、0.5、0.75、1，所对应的树种隔离程度分别表示为零度、弱度、中度、强度、极强度混交。

3) 竞争指数（CI）。主要反映来自竞争木的竞

争压力。本研究采用 Hegyi 简单竞争指数模型^[11]，其计算公式：

CI_i = ∑_{j=1}ⁿ d_j / d_i · L_{ij} (6)

式中：CI_i 为第 i 株参照树的竞争指数；L_{ij} 为参照树 i 到竞争木 j 之间的距离；d_i 为参照树 i 的胸径，d_j 为竞争木 j 的胸径；n 为竞争木的株数。

3 结果与分析

3.1 林层结构及树种组成

各标准地林层结构见表 2。采用树冠光竞争高度法，对胡桃楸次生林的垂直结构划分为 3 层，分别为上林层、中林层和下林层，各林层平均树高分别为 14.86 ~ 17.02、11.18 ~ 12.77 m 和 7.33 ~ 8.01 m。方差分析结果表明，不同林层树高间差异极显著（P < 0.01），说明采用树冠光竞争高度法对林分垂直结构分层效果较好。上、中、下林层的平均胸径分别为 17.41 ~ 19.75、10.67 ~ 11.55 cm 和 7.02 ~ 7.45 cm，表现为随林层高度的增加而增加。在林分蓄积量方面，上林层占林分总蓄积量 61.86% ~ 78.70%，为林分蓄积量主要贡献层，其次为中林层，占林分总蓄积量的 12.57% ~ 33.61%，下林层最少，仅占总蓄积量的 4.53% ~ 10.38%。

表 2 各标准地不同林层的基本情况
Table 2 The condition of each layers in different sample plots

标准地号	林层	树高/m	胸径/cm	蓄积量占比/%
1	上林层	14.86 ^A	17.49 ^A	78.70
	中林层	11.29 ^B	10.67 ^B	12.57
	下林层	8.01 ^C	7.18 ^C	8.73
2	上林层	15.90 ^A	17.41 ^A	71.19
	中林层	11.18 ^B	11.55 ^B	18.43
	下林层	7.33 ^C	7.02 ^C	10.38
3	上林层	17.02 ^A	19.75 ^A	61.86
	中林层	12.77 ^B	11.54 ^B	33.61
	下林层	7.80 ^C	7.45 ^C	4.53

注：不同大写字母表示差异极显著（P < 0.01）。

从林分垂直结构的树种组成（表 3）来看，各林层树种组成差异较大，上林层的优势种主要为胡桃楸，其蓄积量占上林层总蓄积量的 80% 以上，中林层优势种主要有落叶松、胡桃楸、花曲柳和蒙古栎，下林层树种组成较为丰富，除上林层、中林层的树种外，还有拧劲槭（*Acer triflorum*）、

假色槭（*A. pseudo-sieboldianum*）、山桃（*Amygdalus davidiana*）等小乔木少量分布。各林层树种丰富度随着林层垂直高度的下降而增加。上林层为中、下林层树种组成和更新提供有利条件和母树资源。

表 3 各标准地不同林层树种组成
Table 3 Composition of tree species in each layers of different sample plots

标准地号	上林层		中林层		下林层	
	树种组成（蓄积量占比/%）	树种数	树种组成（蓄积量占比/%）	树种数	树种组成（蓄积量占比/%）	树种数
1	胡（80.96）、落（6.20）、蒙（5.19）、花（3.49）、元（2.04）、榆（1.09）、色（0.82）、黑（0.22）	8	落（22.63）、胡（20.51）、蒙（20.40）、花（14.79）、榆（5.29）、桃（4.08）、色（3.89）、千（3.22）、元（2.79）、柳（2.39）	10	蒙（28.38）、色（20.98）、花（11.48）、落（8.64）、千（6.38）、榆（6.19）、元（5.02）、假（4.52）、拧（3.93）、暴（1.87）、山（1.36）、胡（0.7）、裂（0.27）、柳（0.27）	14
2	胡（94.60）、榆（2.10）、花（1.59）、蒙（1.15）、色（0.49）、假（0.06）	6	胡（40.87）、花（23.65）、榆（14.69）、蒙（11.33）、千（3.66）、落（2.74）、柳（1.39）、色（1.02）、水（0.64）	9	花（44.14）、蒙（16.99）、胡（10.65）、色（8.03）、榆（7.61）、千（4.27）、假（3.32）、暴（1.76）、拧（1.59）、落（0.91）、柳（0.47）、紫（0.26）	12
3	胡（93.83）、花（3.82）、蒙（2.26）、暴（0.09）	4	花（40.04）、胡（37.45）、蒙（10.05）、元（6.55）、黄（2.07）、落（1.85）、白（1.11）、千（0.57）、暴（0.31）	9	元（49.79）、胡（21.05）、花（13.82）、蒙（9.08）、千（2.54）、暴（2.48）、假（1.24）	7

注：暴为暴马丁香（*Syringa reticulata*）；水为水曲柳（*F. mandschurica*）；千为千金榆（*Carpinus cordata*）；白为白桦（*Betula platyphylla*）；黑为黑桦（*Betula dahurica*）；榆树（*Ulmus pumila*）；黄为黄檗（*Phellodendron amurense*）；裂为裂叶榆（*U. laciniata*）。

3.2 径级结构

由图 1 可知，各林层径级分布曲线不同。下林层径级分布呈反“J”曲线，随着径阶的增大，林木株数急剧降低，到达一定径阶后趋于平稳，中林层径级分布呈左偏单峰曲线，其峰值 8、10 cm

径阶处。上林层的径阶分布范围较广，为多峰曲线，其峰值主要分布在 18~22 cm 径阶。总体来说，随着林层垂直高度的增加，林分径阶分布范围变广，林木密度变小。

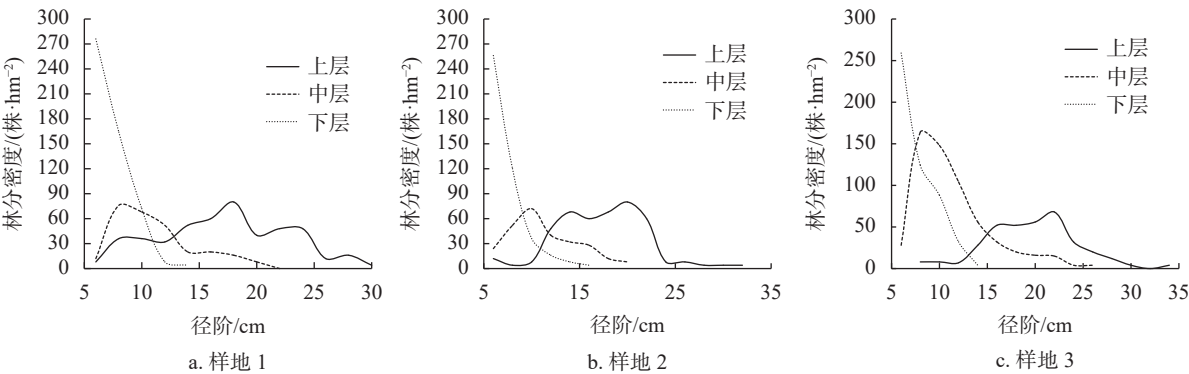


图 1 各标准地不同林层径阶分布
Fig. 1 Distribution of different forest layer diameter classes in different sample plots

3.3 空间结构特征

3.3.1 树种隔离程度

各标准地林分平均混交度分别为 0.608、0.594 和 0.512，林分整体处于中度混交向强度混交的过渡状态，混交状况较好。由图 2 可知，3 块标准地上林层混交度分别为 0.578、0.431 和 0.526，为中度混交，中林层的混交度均大于上林层，分别为上林层的 1.07 倍、1.5 倍和 1.11 倍，为中度混交，下林层混交度分别为 0.695、0.722 和 0.672，为中林层的 1.12 倍、1.12 倍和 1.15 倍，接近于强度。总体来说，各林层混交度表现为随着林分垂直高度的降低而增大。

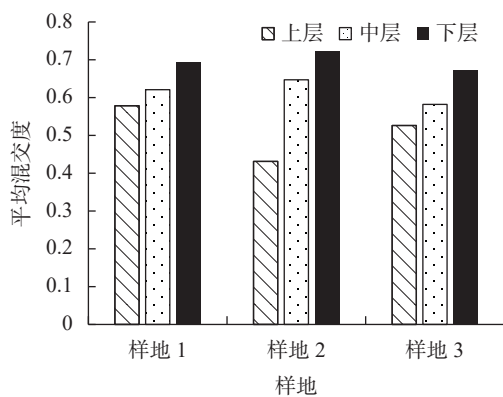


图 2 各标准地不同林层平均混交度

Fig. 2 The mean mingling of each layer in different sample plots

3.3.2 林分水平分布格局

各标准地不同林层水平分布格局见表 4。标准地 1 和标准地 3 的平均角尺度分别为 0.547、0.520，为聚集分布，标准地 2 的平均角尺度为 0.506，介于 [0.475, 0.517]，属于随机分布。从林分的垂直结构来看，标准地 1 各林层角尺度均大于 0.517，处于聚集分布状态，标准地 2 上林层的角尺度为 0.479，为随机分布，中林层和下林层角尺度分别为 0.522、0.528，属于聚集分布，标准地 3 的上林层属于随机分布，中、下林层属于聚集分布。总的来说，上林层处于随机分布的概率较大，中、下林层多呈聚集分布状态。

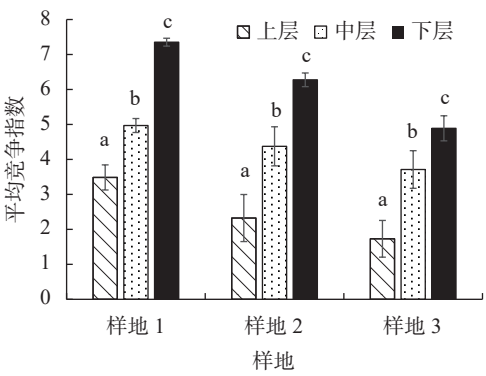
表 4 各标准地不同林层水平分布格局

Table 4 Horizontal distribution pattern of each forest layers in different sample plots

林层	角尺度		
	标准地1	标准地2	标准地3
上林层	0.536	0.479	0.488
中林层	0.591	0.522	0.531
下林层	0.536	0.528	0.540
林分	0.547	0.506	0.520

3.3.3 竞争指数

各标准地的平均竞争指数分别为 5.269、4.325 和 3.444，林分整体处于中等竞争强度。由图 3 可知，上、中、下林层的平均竞争指数分别为 1.73 ~ 3.49、3.71 ~ 4.97 和 4.90 ~ 7.35，中林层是上林层的 1.43 ~ 2.15 倍，下林层是中林层的 1.32 ~ 1.48 倍。各林层之间的竞争指数有明显的变化规律，随着林层垂直高度的增加，竞争指数呈减小趋势。这说明处于上林层的林木所受的竞争压力相对较小，越往下林木所受的竞争压力越大。



不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

图 3 各标准地不同林层竞争指数

Fig. 3 The competition indexes of each layer in different sample plots

4 结论与讨论

辽东山区胡桃楸阔叶混交林的垂直结构可分为 3 层，上林层、中林层和下林层，其树高分别为 14.86 ~ 17.02、11.18 ~ 12.77 m 和 7.33 ~ 8.01 m。上林层的蓄积量占林分总蓄积量的 61.86% ~ 78.7%，为林分蓄积量主要贡献层。各林层径级分布不同，下林层呈反“J”字形曲线，中林层为左偏单峰曲线，峰值主要在 8、10 cm 径阶处，上林层呈不规则的多峰曲线，其峰值主要分布在 18 ~ 22 cm 径阶。随着林层垂直高度的增加，林分的径阶分布范围变广。

各林层对林分整体的结构和功能发挥着不同的作用，上林层对林分的蓄积和树种组成起关键作用，也为林分更新创造环境条件并提供母树资源，中林层在森林群落中具有承上启下的过渡作用^[12-13]，也决定了群落的演替趋势，下林层决定了未来林分结构，也是林分可持续循环的决定性因子^[14]。采用中林层的树种组成预测未来林分的演替趋势可知，胡桃楸次生林未来的演替趋势主要有 2 种：一种是以落叶松、胡桃楸和蒙古栎为

优势树种的针阔混交林,另一种是以胡桃楸、花曲柳和蒙古栎为主的阔叶混交林。另外,由下林层的树种组成和竞争指数来看,下层林木的竞争压力较大,优势树种胡桃楸的更新能力较差,因此,应采取适当的调控措施降低下林层的竞争压力,人工促进胡桃楸天然更新。

林分空间结构决定了树木之间的竞争势及其空间生态位,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的大小^[15]。本研究林分的空间结构特征在不同林层之间存在差异,随林层垂直高度的降低,林分聚集度和竞争指数均有所增加,这与玉宝等^[14]对落叶松次生林的研究结果相似。主要是因为下林层林木受种子扩散限制的影响,幼树多呈聚集分布,随着林分的不断生长,对光因子和营养条件等的需求增加,种内种间竞争加剧,林分出现自疏和他疏现象,从而导致林分的聚集程度下降,最终表现为随机分布^[15]。同时,研究发现中、下林层混交度高于上林层,这可能与中、下林层物种丰富度较高有关,中、下林层不仅有胡桃楸、蒙古栎等优势树种,而且存在一些小乔木如假色槭、拧紧槭等,导致中、下林层的混交度高于上林层。

[参 考 文 献]

- [1] 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.
- [2] 宋永昌. 植被生态学 [M]. 上海: 华东师范大学出版社, 2001.
- [3] Jiquan Chen B S. Spatial relationships between canopy structure and understory vegetation of an old-growth Douglas-fir forest [J]. Forest Research, 2014, 3(2): 1000118.
- [4] 张晓红, 张会儒. 蒙古栎次生林垂直结构特征对目标树经营的响应 [J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(5): 56-65.
- [5] 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.
- [6] 郑景明, 周志勇, 田子珩, 等. 北京山地天然栎林垂直结构研究 [J]. 北京林业大学学报, 2010, 32(S1): 67-70.
- [7] 刘浩, 张峥男, 曹林. 机载激光雷达森林垂直结构剖面参数的沿海平原人工林林分特征反演 [J]. 遥感学报, 2018, 22(5): 872-888.
- [8] Latham P A, Zuuring H R, Coble D W. A method for quantifying vertical forest structure [J]. Forest Ecology and Management, 1998, 104(1/2/3): 157-170.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 胡文杰, 崔鸿侠, 王晓荣, 等. 三峡库区马尾松次生林林分结构特征分析 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2019, 43(3): 67-76.
- [14] 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.
- [15] 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.

(责任编辑 陆 驰)

