

黔中马尾松近熟林空间结构特征及其调控

黄剑峰¹, 谭 伟¹, 柴宗政¹, 蔡照军²

(1. 贵州大学 林学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 安顺市平坝区林业局, 贵州 安顺 561100)

摘要: 林分空间结构是描述林分结构极其变化的重要指标, 是森林经营与管理成功的标志。利用随机抽样方法在黔中马尾松 *Pinus massoniana* 可持续经营管理试点(安顺市平坝区)设置 100 m × 100 m 马尾松近熟林固定样地, 采用 10 m × 10 m 网格调查每株林木的树高、胸径和坐标数据, 主要以混交度、大小比数和角尺度的一元和二元分布研究马尾松林的空间结构特征。结果表明: ①该林分中马尾松在株数和断面积比例上占明显优势, 种内竞争对马尾松生长影响很大, 整个林分以零度混交为主, 空间异质性不高; ②在整个林分中, 大部分林木处于随机分布, 胸径差异不显著, 伴生树种主要空间分布格局为集聚分布; ③模拟采伐有利于林分空间结构的调控, 改善林分空间分布格局, 为森林群落的正向演替以及优势种群的健康生长提供了有利空间条件。图 4 表 2 参 21

关键词: 森林测计学; 马尾松; 近熟林; 空间结构特征; 调控

中图分类号: S758.5

文献标志码: A

文章编号: 2095-0756(2019)04-0749-08

Spatial structure characteristics and regulation for the *Pinus massoniana* near-mature forest in the central Guizhou Province, China

HUANG Jianfeng¹, TAN Wei¹, CHAI Zongzheng¹, CAI Zhaojun²

(1. Forestry College, Guizhou University, Guiyang 550025, Guizhou, China; 2. Forestry Enterprise of Pingba District, Anshun 561100, Guizhou, China)

Abstract: Spatial structure is important in describing forest stand structure and change, which is an indicator to the success of forest management. A 100 m × 100 m permanent sample plot of the *Pinus massoniana* near-mature forest was established in Central Guizhou with random sampling method, the tree height, diameter at breast height, and coordinates of each tree were determined as the base data based on a 10 m × 10 m grid. The characteristics of forest spatial structure were analyzed by univariate and bivariate distributions of mingling, dominance, and uniform angle index. Results showed that (1) *P. massoniana* was dominant in number and basal area, the intraspecific competition among *P. massoniana* trees greatly affected the growth of trees. The whole stand was dominated by a zero-mixed degree with low spatial heterogeneity. (2) For the whole forest stand, most of the distributions were random, there was no significant difference in the tree diameter, and the main spatial distribution pattern of associated tree species was a concentrated distribution. (3) Simulated cuttings contributed to the regulation of spatial structure, which improved the spatial distribution pattern and provided the favorable spatial conditions for positive succession of the forest community as well as healthy growth of the dominant tree populations. [Ch, 4 fig, 2 tab, 21 ref.]

Key words: forest mensuration; *Pinus massoniana*; near-mature forest; spatial structure characteristics; regulation

收稿日期: 2018-08-14; 修回日期: 2018-12-30

基金项目: 贵州省科技支撑计划项目(黔科合支撑[2017]2520-1 号); 国家林业局资助项目(林资发[2011]248 号); 贵州省林业厅资助项目(黔林资复[2012]331 号)

作者简介: 黄剑峰, 从事森林经理研究。E-mail: 1572119978@qq.com。通信作者: 谭伟, 教授, 博士, 从事森林可持续经营、林业信息与“3S”技术研究。E-mail: wtan@gzu.edu.cn

林分空间结构指林地上的林木树种、大小、分布等属性在空间上的排列方式及其分布格局^[1]。林分空间结构指数可以作为一种快捷的稳定性评价方法运用于森林经营实践中。一般而言,稳定性越高、功能越强的林分的空间结构都趋于一个优化的状态。林分空间结构可以体现林木间的空间格局,是对森林进行经营调控的必测属性,人们可通过森林的空间结构特征了解森林现状和未来发展方向,因而如何科学有效地分析林分的空间结构,一直是森林经营管理和科研工作者探索研究的热点。随着结构化森林经营理念的提出,林分空间结构的系列研究已普遍应用于不同的森林类型^[2-4]。对林分空间结构的描述主要从角尺度、大小比数、混交度3个方面进行^[5-7]。国内外研究都表明:二元分布可以从2个或多方面提供更多的林木结构属性,比单变量更直接、更实用,对模拟森林与恢复及恒续林择伐经营能够提供有利参考,对同一个树种而言,也能更好地反映其林木的结构差异^[8-10]。因此,二元分布在研究林分空间结构特征上得到了广泛应用^[11-12]。马尾松 *Pinus massoniana* 是中国南方山地主要速生针叶用材树种,为了充分发挥黔中山地森林生态系统的整体功能,平衡该区域森林生态以及可持续林业发展,精准提升黔中地区的森林质量,本研究选取平坝区小河村的马尾松近熟林作为研究对象,运用角尺度、混交度和大小比数3个林分空间参数在分析黔中山地马尾松林内林木空间结构参数一元和二元分布基础上,揭示其内在的数量关系,量化分析该研究区马尾松林空间结构特征,探讨二元分布规律在研究马尾松近熟林林分水平空间结构上的实用性及有效性,并确定结构化森林经营过程中被伐木的物种和大小选择规律以及空间特性,为马尾松林林分结构科学调控与经营提供理论依据,促进森林与环境的平衡和可持续林业发展。

1 研究区概况

研究区(26°17'19"~26°19'00"N, 106°15'8"~106°15'53"E)设在贵州省安顺市平坝区白云镇下辖的小河村马尾松林区,海拔963~1 646 m,平坝区的森林资源丰富,属于亚热带常绿阔叶林分布地带,酸性土壤,土壤类型主要为黄壤、黄棕壤,气候类型属于亚热带湿润型季风,年平均气温为18.3℃,年降水量1 146.3 mm,极端最低温度-7.4℃。小河村地处平坝区的东南面,其四周邻接本寨村、林下村、郝下村、邢江村。马尾松人工林是平坝区主要的森林类型之一,长期的群落演替,使其在林分结构上有了明显的变化。研究区马尾松林为集体林区的28年生人工林,造林时间为1990年,后经天然更新与自疏作用形成,在之前未采取人工经营措施。该马尾松近熟林林分郁闭度为0.7,株数密度为1 249株·hm⁻²,植被综合盖度90%。林内乔灌木以马尾松为主,伴生有杉木 *Cunninghamia lanceolata*, 光皮桦 *Betula luminifera*, 华山松 *Pinus armandii*, 杨树 *Populus*, 青冈 *Cyclobalanopsis glauca*, 枫香 *Liquidambar formosana*, 油桐 *Vernicia fordii*, 柳杉 *Cryptomeria fortunei*, 樟树 *Cinnamomum camphora*, 柏木 *Cupressus funebris*, 朴树 *Celtis sinensis* 等;灌木树种有马桑 *Coriaria nepalensis*, 火棘 *Pyracantha fortuneana*, 铁仔 *Myrsine africana*, 杜鹃 *Rhododendron simsii* 等。

2 研究方法

2.1 野外调查

研究区调查总面积为1.00 hm²,海拔为1 280 m,东北坡向,坡度大小为15°。选取具有代表性的28年生马尾松人工近熟林调查样地,样地大小为100 m×100 m。采用10 m×10 m网格按从右到左,自上而下的方式进行每木检测,即100个10 m×10 m小样方,起测胸径为5 cm,挂塑料吊牌标号后记录每棵树木的树种类型、树高、胸径、空间位置、冠幅,以及林分的坡度、郁闭度等情况。

2.2 分析方法

利用惠刚盈^[13]提出的以最近4株相邻木分析林分空间结构的方法,主要用混交度(M),角尺度(W),大小比数(U)3个结构参数。以样地调查的树高和胸径等为基础数据,利用空间结构分析软件SVMS(同Winkelmass 1.0)计算马尾松近熟林内各调查树种的角尺度、混交度、大小比数。在一元分布的基础上,主要采用结构参数的二元分布^[14]分析马尾松近熟林的空间结构特征。所谓一元或二元分布指一维(元)离散型随机变量及其分布和二维(元)离散型随机变量及其分布^[15]。计算5个取值等级的空间结构参数在调查样地内的分布频率值,两两组合后计算二元分布频率。制出一元分布图与二元分布图后对林

分的水平空间结构特征进行综合分析，最后做模拟采伐调控马尾松近熟林的水平空间结构特征。

2.2.1 混交度 混交度就是指林内与参照树最近的相邻木与参照树非同一树种类型的林木个体所占的比例大小，表示林分内树种在空间上的相互隔离程度，用公式表示为： $M_i=1/n \sum_{j=1}^n v_{ij}$ 。其中： M_i 为林木在林内 i 点的混交度； n 为与参照树最近的相邻木株数； v_{ij} 表示参照树 i 与第 j 株最近的相邻木是否为相同树种，为相同树种时 $v_{ij}=0$ ，否则 $v_{ij}=1$ 。

2.2.2 大小比数 指特征因子大于林内参照树的相邻木占有调查的最近的相邻木比列，可用公式表示： $U_i=1/n \sum_{j=1}^n k_{ij}$ 。其中： U_i 为林木在林内 i 点的大小比数； n 为最近邻木的株数； k_{ij} 表示相邻木 j 的特征因子比参照树 i 的大小，大时 $k_{ij}=1$ ，否则 $k_{ij}=0$ 。

2.2.3 角尺度 角尺度表示相邻木在参照树周围分布的均匀性。角尺度指标就是指当任意的 2 株邻接最近的相邻木与参照树构成 2 个夹角中的小角 α 小于均匀分布时的最近相邻木构成的标准角 α_0 的个数占考察林分内的所有最近相邻木的比例。表达式为： $W_i=1/n \sum_{j=1}^n z_{ij}$ 。其中： W_i 为林木在林内第 i 点的角尺度； n 为最近相邻木的株数； z_{ij} 表示第 j 株相邻木的 α 角比标准角大或小，小于标准角时 $z_{ij}=1$ ，否则 $z_{ij}=0$ 。

3 结果与分析

3.1 马尾松近熟林树种组成

调查样地内，林分密度为 1 249 株·hm⁻²(不包含枯死木)，共包括 12 个树种(表 1)。在株数与断面积上，马尾松占林分总株数的比例为 64.93%；马尾松占林分总断面积的比例为 80.49%。杉木和光皮桦占林分总株数的比例分别为 15.13%和 10.01%；杉木和光皮桦占林分总断面积的比例分别为 8.15%和 4.69%。此外，青冈的株数少于杨树，但其断面积多于杨树，表明该调查样地内青冈树种大径级的居多，而杨树整体的胸径小于青冈。柳杉株数少于油桐，但它的断面积多于油桐，也说明柳杉胸径在整体上大于油桐。华山松、杨树、青冈、枫香、油桐、柳杉、柏木、樟树及朴树等树种株数和断面积比例都较小，是群落中极少量的伴生树种。林内马尾松最大胸径与最大树高分别为 47.4 cm 和 23.2 m，平均胸径和平均树高分别为 17.89 cm 和 14.12 m。综合分析各属性可知：马尾松对林内资源占据明显优势，为优势树种；杉木在株数和断面积上仅次于马尾松，为主要的伴生树种。

3.2 马尾松近熟林空间结构参数一元分布

3.2.1 林分水平空间结构参数一元分布 林分混交度分布规律明显，混交度 M_i 从 0.00 到 1.00 各取值等

表 1 马尾松近熟林数量特征

Table 1 Quantitative characteristics of *Pinus massoniana* near maturing forest

树种	株数		断面积		胸径 /cm			树高 /m		
	株数/(株·hm ⁻²)	比例/%	断面积/(m ² ·hm ⁻²)	比例/%	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
马尾松	811	64.93	20.398	80.49	47.4	5.0	17.89	23.2	3.0	14.12
杉木	189	15.13	2.066	8.15	50.0	5.0	11.81	21.8	4.8	10.78
光皮桦	125	10.01	1.187	4.69	39.1	5.1	11.05	20.4	5.0	11.74
华山松	52	4.17	0.789	3.11	32.0	5.0	13.90	22.4	4.5	12.13
杨树	32	2.56	0.177	0.69	16.2	5.1	8.38	16.7	6.8	11.19
青冈	19	1.52	0.533	2.10	30.1	7.2	18.86	22.3	6.1	14.41
枫香	13	1.04	0.106	0.42	20.9	5.2	10.16	17.0	5.8	10.37
油桐	3	0.24	0.023	0.09	17.3	6.0	9.93	9.7	9.5	9.63
柳杉	2	0.16	0.040	0.16	25.3	6.5	15.90	17.9	10.5	14.20
樟树	1	0.08	0.004	0.02	6.9	6.9	6.90	8.5	8.5	8.50
柏木	1	0.08	0.012	0.05	12.4	12.4	12.40	8.2	8.2	8.20
朴树	1	0.08	0.008	0.03	10.0	10.0	10.00	6.0	6.0	6.00
合计	1 249	100.00	25.343	100.00						

级上的占比呈先下降后平缓的趋势,零度、弱度、中度、强度和极强度混交株数分布频率分别为0.40, 0.25, 0.14, 0.10和0.11(图1)。林分各混交等级单元的分布存在差异,且以零度混交为主,目标树与最近相邻木结构单元的各种聚集程度均存在。林分中优势树种马尾松的混交状态决定了整个林分的混交程度,虽然伴生树种在林分内各混交等级均有体现,但其较小的株数占比还不能影响整个马尾松林分的混交格局。研究区林木的大小比数 U_i 从0.00到1.00各取值等级上的分布频率呈上升的趋势,但上升幅度不明显,总体上处于平稳趋势(图1),结构单元中优势木、亚优势木、中庸木、劣势木和绝对劣势木的分布频率分别为0.19, 0.20, 0.20, 0.20和0.21。优势木分布频率稍小,但各大小比数等级的分布频率

之间整体相差不大,最大频率与最小频率仅相差0.02,表明不同的大小比数等级在马尾松林内分布频率相对较均匀,不同的大小分化程度在林内均有所体现。由图1可知:马尾松林内各角尺度等级的分布频率差异显著, $W=0.50$ 时最高,频率为0.55,可见该马尾松林分角尺度属于随机分布。林木整体的平均角尺度为0.54,林内各个树种类型的平均角尺度总体为0.50~0.75,虽然朴树的平均角尺度达0.75,但由于树种存在株树极少,不影响整个马尾松林分角尺度随机分布格局。

3.2.2 马尾松种群空间结构参数一元分布 由图2可知:角尺度各等级的分布频率近似正态分布, $W=0.50$ 时,出现峰值,因此马尾松林木整体上处于随机分布状态;大小比数不同等级分布频率都靠近平均值0.20。可知,大小比数各等级在马尾松种群内均有呈现,且差异不大;很显然,混交度分布频率在零度混交状态时出现最大值,随着混交等级增大,频率逐渐降低。可见,马尾松种群对整个林分的空间结构起主导作用。

3.3 马尾松近熟林空间结构参数二元分布

3.3.1 林分水平空间结构参数二元分布 经测算,角尺度在5个不同等级大小比数上的分布频率总体差异不大(图3A),在 $W=0.50$, $U=0.50$ 时,分布频率出现最大值为11.95%,但

从总体上看,林分中处于绝对劣势的林木个体总频率最高,分布频率为21.09%,处于劣势木的分布频率为20.02%,处于中庸状态的林木个体数量总频率为20.31%,三者之间相差不大。此外,随着角尺度等级的增加各等级大小比数的总频率先增大后减小,近似正态分布,且右侧变化幅度大于左侧。在 $W=0.50$ 时,大小比数总频率最大,达55.00%,且各大小比数等级的最大频率均在 $W=0.50$ 上,频率幅度为9.91%~11.95%,说明在马尾松人工林中林木分布格局以随机分布为主。在 $W=0.00$ 时,频率主要分布在 $U=0.00$ 和 $U=0.50$ 这2个等级上,其余等级频率为0,即在很均匀分布状态时,林木个体处于优势和中庸状态,无被压木状态存在。

经测算,随着混交度等级的升高,角尺度整体分布均呈下降趋势(图3B),同一混交度取值等级上的分布频率随角尺度等级的增大均表现为先增大后减小,且都近似为正态分布。在 $W=0.50$ 时,频率最大,为55.00%; $W=0.25$ 时,频率为18.66%,两者总计达73.66%,说明多数林木处于随机分布状态。在 $W=0.00$ 等级上分布的林木较少,分布频率为0.29%,说明林分中处于很均匀分布的林木较少;在 $M=0.25$, $W=0.00$; $M=0.75$, $W=0.00$; $M=1.00$, $W=0.00$ 这3个结构组合上频率为0,说明林木在弱度和强度以及极强度混交时无均匀分布。

经测算,混交度与不同大小比数取值等级的组合频率差异较小(图3C)。随着混交度等级的升高,大小比数整体分布呈下降趋势,混交度和大小比数结构组合的大多数(78.72%)频率分布在中低度混交等级中(M 为0.00~0.50),在 $M=1.00$ 以及 $M=0.75$ 时,频率分别为11.18%和10.11%,总频率为21.29%,

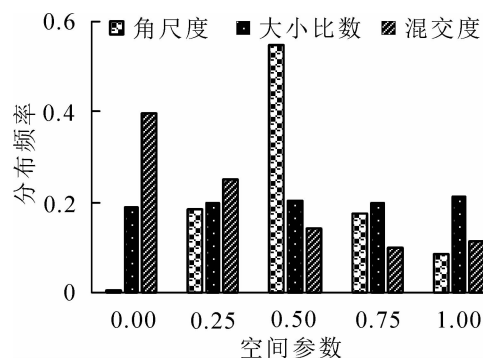


图1 林分水平空间结构参数一元分布
Figure 1 Unary distribution of horizontal spatial structure parameters

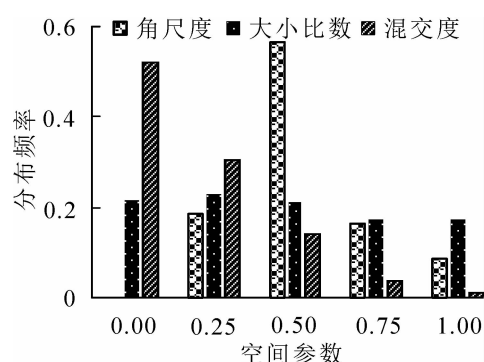


图2 马尾松种群空间结构参数一元分布
Figure 2 Unary distribution of spatial structure parameters of *Pinus massoniana* population

表明在该林分中属于强度和极强度混交的林木较少。在混交等级(M 为 0.00~1.00)上, $U=0.00$ 时分布频率稍小, 但各列大小比数在不同等级上的林木个体数量整体差异不大, 说明林木空间结构指标组合单元中, 优势木、亚优势木、中庸木、劣态木和绝对劣态木分布较均匀, 林木个体之间的胸径整体上差异不大。

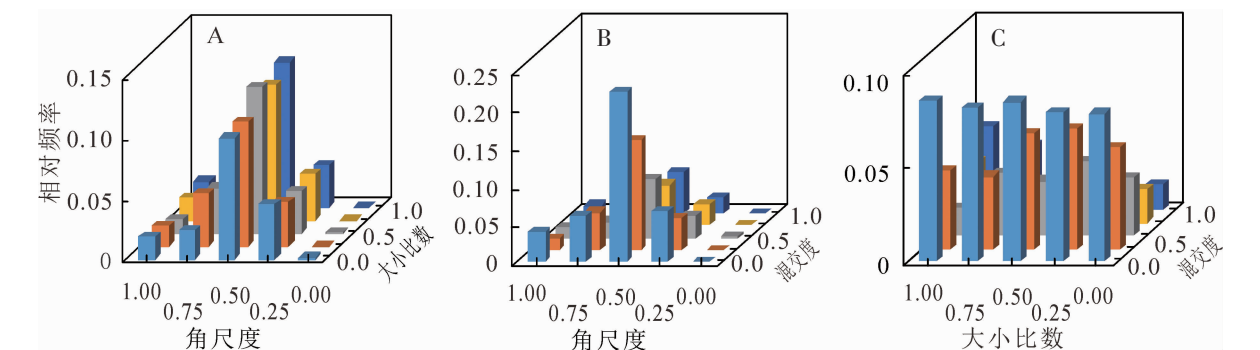


图 3 林分水平空间结构参数二元分布

Figure 3 Bivariate distribution of horizontal spatial structure parameters

3.3.2 马尾松种群空间结构参数二元分布 从马尾松种群的二元分布图(图 4A)可以看出: 角尺度频率在同样大小比数等级上先增大后减小, 均近似正态分布, 且都在 $W=0.50$ 时, 频率最大, 总计为 56.40%。马尾松种群中各等级大小比数株数相差不大, 呈现比例为 1:1:1:1。不同分化程度的林木在同一角尺度取值等级上的株数比例差异不大。以中庸轴($U=0.50$)和随机分布轴($W=0.50$)为界(图 4A), 在均匀分布等级(W 为 0.00~0.25)轴上, 最大频率出现在大小比数 $U=0.00$ 处, 在不均匀分布等级(W 为 0.75~1.00)上, 最大频率出现在大小比数 $U=0.25$ 处, 说明林木分布越均匀, 马尾松处于被压木的可能性越小。随角尺度增大, 马尾松有处于被压木趋势。从图 4B 可知: 在同一混交等级上, 角尺度的频率均表现为先增大后减小, 同样近似正态分布, 在 $W=0.50$, $U=0.00$ 时, 频率最大, 为 29.10%。从图 4C 可知: 混交度和大小比数结构组合主要分布在中度混交等级以下(M 为 0.00~0.50)中, 频率为 81.89%, 在 $M=1.00$ 时, 只有 5 株。

3.4 马尾松近熟林空间结构调控

3.4.1 确定林分空间分布状态及模拟采伐 在经营人工林过程中, 应以林分空间结构的优化和合理构建为目标^[13], 林分在漫长的进展演替后, 如果没有受到严重干扰, 在水平分布上的格局应为随机分布^[16-17], 因此, 在模拟采伐调整林木水平空间结构时, 结合调查样地内马尾松近熟林的角尺度分布状态, 尽量保证 $W=0.50$ 取值的林木高比例, 通过优先调整马尾松近熟林的水平分布格局以实现向随机分布状态调整。该调查样地内林木的平均角尺度 $W=0.54$, 角尺度取值大于 0.54 的结构单元聚集分布, 可对其做备选择伐木, 即 $W=0.75$ 及 $W=1.00$ 的结构单元。

普遍认为, 经过进展演替的林分, 混交度会逐渐增大, 应从扩大混交的方向调整^[18]。该马尾松林分内混交度平均为 0.32, 按较低混交度取值的单木作为分析经营该马尾松近熟林的备伐木, 初步确定的混

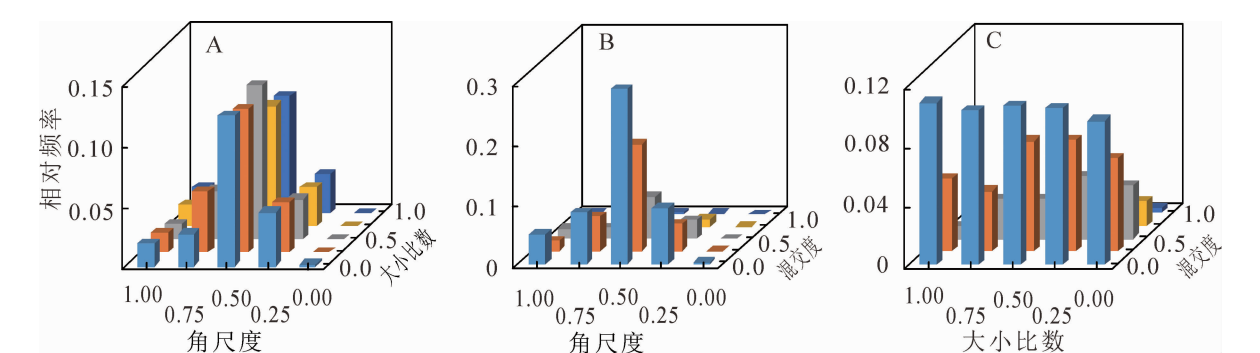


图 4 马尾松种群空间结构参数二元分布

Figure 4 Bivariate distribution of spatial structure parameters of *Pinus massoniana* population

交度小于 0.32 的成为被伐木可能性较大。在以角尺度为参考指标筛选的初选木，其中混交度小于0.32 的单木成为被伐木可能性更大。大小比数为 0.51 显示参照树处于中庸的状态，对于喜光的树种，以大小比数为 0.75 和 1.00，即以处于绝对劣势木和劣势木作为采伐木对象，且伐除林内枯死等生长不良的林木^[19]。以保持树种的多样性和林分空间结构优化，有利于主要建群树种生长，遵循采伐总量控制等原则^[18]，在尽量保证主要建群种马尾松的生长空间下综合分析林木空间指标结构单元后确定被伐木，最终筛选采伐马尾松 243 株，平均胸径为 12.78 cm，平均树高为 12.67 m；杉木 13 株，平均胸径为 11.52 cm，平均树高为 10.93 m。

3.4.2 调控后结果分析 本研究从小干扰考虑，以不超总蓄积量 20%的低强度模拟采伐方式调控林木水平空间分布格局、树种隔离程度以及林内中、小径木比例，对带有树牌标号的最终筛选木进行模拟伐除，采伐株数强度为 20.5%，蓄积强度为 11.9%。该林分经模拟伐除前后的空间结构特征变化见表 2。模拟伐除后，林内建群种马尾松的角尺度均值从 0.54 降到 0.52，大小比数均值从 0.47 降低到 0.40，平均混交度也有所提升，从 0.18 提高到 0.27。马尾松林分整体的角尺度均值从 0.54 降为 0.52，林分水平空间结构由聚集分布变为随机分布；混交度均值从 0.32 提高到 0.42，混交状态也有所改善；大小比数的均值从 0.51 降低到 0.49，林木结构单元中参照树属于中庸状态。对比模拟伐除前的林分空间结构特征状况，整个马尾松林分的空间结构特征得到调控，空间分布格局在一定程度上有所改观，符合理想的森林空间结构演变规律，达到了预期调控目的。

表 2 模拟采伐前后林分的空间结构参数

Table 2 Spatial structure parameters of forest stands before and after simulated harvesting

树种	伐前			伐后		
	平均角尺度	平均大小比数	平均混交度	平均角尺度	平均大小比数	平均混交度
马尾松	0.54	0.47	0.18	0.52	0.40	0.27
杉木	0.52	0.63	0.64	0.52	0.67	0.70
光皮桦	0.57	0.62	0.62	0.56	0.65	0.59
华山松	0.50	0.50	0.78	0.51	0.52	0.91
杨树	0.61	0.76	0.61	0.61	0.89	0.96
青冈	0.50	0.25	0.31	0.50	0.25	0.31
枫香	0.54	0.64	0.79	0.50	0.83	0.83
油桐	0.50	0.88	0.50	0.50	0.88	0.75
柳杉	0.63	0.50	1.00	0.75	0.75	1.00
樟树	0.50	1.00	1.00	0.50	1.00	1.00
柏木	0.50	0.75	1.00	0.50	1.00	1.00
朴树	0.75	0.50	1.00	0.75	0.50	1.00

4 结论与讨论

4.1 结论

该马尾松近熟林内建群树种马尾松各属性均占明显优势。该林分中杉木、光皮桦等伴生树种属于天然萌生，其集聚程度在经长期的自疏作用及人为活动的干扰下有所降低。马尾松近熟林内的林木整体而言以随机分布为主，角尺度结构指标趋近优化。大小比数的不同等级在林内分布频率较均匀，不同大小分化程度在马尾松近熟林内均有所呈现。

马尾松近熟林林分整体呈零度混交向弱度混交状态，林分中的林木大多处于中低度混交(78.72%)，处于强度和极强度混交的林木株数较少，目标树结构单元多为同种树种构成。73.66%的林木在林内属于随机分布，很均匀分布木较少，且在弱度和强度以及极强度混交时无均匀分布。林木株数在大小比数 5 个取值等级上的频率基本一致，其中优势木分布频率稍小，林木空间结构单元中，优势木、亚优势木、中庸木、劣势木和绝对劣势木在林内整体分布较均匀，林木个体之间胸径差异不大。

马尾松种群中各等级大小比数上的株数呈现比例为 1:1:1:1:1。林内不同分化程度的林木在同一角尺

度取值等级上的株数比例差异不大。林木分布越均匀, 马尾松处于被压木的可能性越小。随角尺度增大, 马尾松有处于被压木趋势。在同一混交等级上, 角尺度的频率均表现为先增大后减小, 近似正态分布, 当 $W=0.50$ 时, 分布最多, 为 29.10%。混交度和大小比数结构组合主要分布在中度混交等级以下 (M 为 0.00~0.50) 中, 频率为 81.89%, 在 $M=1.00$ 时, 只有 5 株。

该马尾松近熟林空间结构异质性不高, 树种混交度低且结构单一, 处于不稳定演替阶段。其他乡土树种的比例极低, 且杉木与光皮桦多处于林冠中层, 在胸径生长上占据劣势。通过模拟伐除对整个林分的空间结构特征进行调控, 空间分布格局在一定程度上有所改观。

4.2 讨论

与彭辉等^[11]及张岗岗等^[12]的研究结果比较发现, 受树种组成与地域性等因素影响, 林分的空间结构特征各有差异, 但都表明二元分布规律以不同空间结构指标组合的形式更好地给林木生境信息提供了多角度参考, 验证了二元分布作为一种林分空间结构特征研究方法的有效性。林分空间结构在一定程度上决定林分整体的稳定性、未来发展的可能性以及森林经营管理空间的大小^[20]。合理构建林分空间结构是发挥森林功能的前提, 通过综合分析以及模拟采伐, 调控马尾松林分水平空间结构特征, 达到了预期研究目的, 符合结构化森林经营的指导思想。因此, 很多的森林经营决策问题, 可以通过结构化森林经营理论^[20]得到解决。采用择伐、补植更新等方式调整林内树种的竞争关系、隔离程度、分布格局, 制定出科学合理的马尾松等主要用材树种的经营措施以提高森林质量, 缓解资源利用与发展之间的矛盾^[21], 达到森林资源与环境协调发展的平衡状态。一次调整并不能完全改变林分空间结构现状, 循序渐进是必然的过程。研究区马尾松林分混交度低, 林型中伴生的极少量樟树, 柏木和朴树等是其林分空间结构的次要影响因子, 但对马尾松林分空间结构潜在影响机制如何, 以及在未来将如何去探索更高效的森林结构优化经营方案, 还有待进一步深入研究。

5 参考文献

- [1] 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.
- [2] 黄龙生, 李永宁, 冯楷斌, 等. 冀北山地杨桦次生林林分空间结构研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2015, 35(1): 50 – 55.
HUANG Longsheng, LI Yongning, FENG Kaibin, *et al.* Studies on structure characteristics of secondary poplar-birch forest in mountainous regions of north Hebei Province [J]. *J Cent South Univ For Technol*, 2015, 35(1): 50 – 55.
- [3] 李燕, 刘成功, 李秀芹, 等. 岭南林场混交林林分空间结构特征分析[J]. 分子植物育种, 2018, 16(11): 3768 – 3776.
LI Yan, LIU Chenggong, LI Xiuqin, *et al.* Analysis of spatial structure characteristics of mixed forest in Lingnan Forestry Farm [J]. *Mol Plant Breed*, 2018, 16(11): 3768 – 3776.
- [4] 王智勇, 董希斌, 张甜, 等. 大兴安岭落叶松天然林次生林林分结构特征[J]. 东北林业大学学报, 2018, 46(4): 6 – 28.
WANG Zhiyong, DONG Xibin, ZHANG Tian, *et al.* Forest structure characteristics of larix natural secondary forest in Daxing'an Mountains [J]. *J Northeast For Univ*, 2018, 46(4): 6 – 28.
- [5] 程福山, 何怀江, 刘强, 等. 三湖国家级自然保护区蒙古栎林空间结构研究[J]. 林业资源管理, 2018(2): 138 – 145.
CHENG Fushan, HE Huaijiang, LIU Qiang, *et al.* Study on spatial of *Quercus mongolica* forest in Sanhu Nature Reserve [J]. *For Resour Manage*, 2018(2): 138 – 145.
- [6] 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): 141 – 146.
LEI Xiangdong, TANG Shouzheng. Indicators on structural diversity within-stand: a review [J]. *Sci Silv Sin*, 2002, 38(3): 141 – 146.
- [7] 惠刚盈, GADOW K V. 德国现代森林经营技术[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2001.
- [8] LI Yuanfa, HUI Gangying, ZHAO Zhonghua, *et al.* Spatial structure characteristics of three hardwood species in Ko-

- rean pine broad-leaved forest: validating the bivariate distribution of structural parameters from the point of tree population [J]. *For Ecol Manage*, 2014, **314**: 17 – 25.
- [9] WANG Mingliang, RENNOLLS K, TANG Shouzheng. Bivariate distribution modeling of tree diameters and heights: dependency modeling using copulas [J]. *For Sci*, 2008, **54**(3): 284 – 293.
- [10] LI Yuanfa, HUI Gangying, ZHAO Zhonghua, *et al.* The bivariate distribution characteristics of spatial structure in natural Korean pine broad-leaved forest [J]. *J Veg Sci*, 2012, **23**(6): 1180 – 1190.
- [11] 彭辉, 周红敏, 惠刚盈, 等. 萌生杉木林空间结构的二元分布特征[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2017, **41**(4): 136 – 140.
- PENG Hui, ZHOU Hongmin, HUI Gangying, *et al.* Bivariate distribution of spatial structure of a *Cunninghamia lanceolata* coppice forest [J]. *J Nanjing For Univ Nat Sci Ed*, 2017, **41**(4): 136 – 140.
- [12] 张岗岗, 王德祥, 柴宗政, 等. 秦岭中段华北落叶松人工林空间结构的二元分布特征[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2014, **42**(9): 33 – 40.
- ZHANG Ganggang, WANG Dexiang, CHAI Zongzheng, *et al.* Bivariate distribution of spatial structure in *Larix principis-rupprechtii* plantation in the middle section of Qinling Mountains [J]. *J Northwest A&F Univ Nat Sci Ed*, 2014, **42**(9): 33 – 40.
- [13] 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 Gangying. Studies on the application of stand spatial structure parameters based on the relationship of neighborhood trees [J]. *J Beijing For Univ*, 2013, **35**(4): 1 – 8.
- [14] 李远发. 林分空间结构参数二元分布的研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2013.
- LI Yuanfa. *The Bivariate Distribution of Forest Stand Spatial Structural Parameters* [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2013.
- [15] 盛骤, 谢式千, 潘承毅. 概率论与数理统计[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- [16] 董灵波, 刘兆刚. 樟子松人工林空间结构优化及可视化模拟[J]. 林业科学, 2012, **48**(10): 77 – 85.
- DONG Lingbo, LIU Zhaogang. Visual management simulation for *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation based on optimized spatial structure [J]. *Sci Silv Sin*, 2012, **48**(10): 77 – 85.
- [17] 周红敏, 何必庭, 彭辉, 等. 萌生杉木林空间结构特征研究[J]. 林业科学研究, 2015, **28**(5): 686 – 690.
- ZHOU Hongmin, HE Biting, PENG Hui, *et al.* Research on spatial structure of *Cunninghamia lanceolata* coppice forest [J]. *For Res*, 2015, **28**(5): 686 – 690.
- [18] 张家城, 陈力, 郭泉水, 等. 演替顶级阶段森林群落优势树种分布的变化趋势研究[J]. 植物生态学报, 1999, **23**(3): 256 – 268.
- ZHANG Jiacheng, CHEN Li, GUO Quanshui, *et al.* Research on the change trend of dominant tree population distribution patterns during development process of climax forest communities [J]. *Acta Phytoecol Sin*, 1999, **23**(3): 256 – 268.
- [19] 陈昌雄, 刘健, 余坤勇, 等. 基于空间结构优化的马尾松阔叶混交林模拟采伐[J]. 西南林学院学报, 2010, **30**(6): 29 – 32.
- CHEN Changxiong, LIU Jian, YU Kunyong, *et al.* Simulated cutting the mixed forest of *Pinus massoniana* and broad-leaved tree species based on optimized spatial structure [J]. *J Southwest For Univ*, 2010, **30**(6): 29 – 32.
- [20] 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.
- [21] 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 Gangying, HU Yanbo, ZHAO Zhonghua. Research progress of structure-based forest management [J]. *For Res*, 2018, **31**(1): 85 – 93.