

基于空间结构参数多元分布的云冷杉红松林模拟采伐研究

钟 浔¹,王新杰^{1*},和敬渊¹,柴 雷¹,刘佳荣¹,刘 丽²

(1.北京林业大学,北京 100083;2.中国地质调查局 自然资源综合调查指挥中心,北京 100055)

摘 要:验证以林分空间结构参数四元分布作为林分结构调整依据的有效性,为林分结构调整及抚育采伐中合理选择采伐木提供理论依据。以延吉地区金沟岭林场的云冷杉红松天然林为研究对象,设置 20 块距离较远的标准样地,调查记录林分的基本特征并使用混交度、角尺度、密集度及大小比数 4 种空间结构参数来描述林分的空间结构,根据林分空间结构参数四元分布的特点确定采伐目标树,按采伐优先级进行模拟采伐,比较伐前伐后林分空间结构参数的变化。结果表明,伐后林分中树种的重要值未产生明显变化,林分的空间结构参数在均值分布上亦无明显变化,在一元分布上体现为密集度和大小比数减小,即林分的分布更为稀疏,林木的生长环境得到改善,在四元分布上体现为满足更优林分结构($C=0.0, W=0.5, M=1.0, U=0.0$)的林木占比增加。研究表明,按照林分空间参数多元分布确定采伐木并进行采伐,对林分的空间结构有一定的改善作用,可以使林分的空间结构更接近理想状态,更加符合结构化森林经营的林分目标结构,同时不会对林分的树种组成造成较大影响,可以为森林的经营生产提供参考依据。

关键词:结构化森林经营;林分空间结构;多元分布;模拟采伐

中图分类号:S750

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2023)03-0146-07

Simulated Harvesting of Spruce-Fir Red Pine Forest Based on Multivariate Distribution of Spatial Structure Parameters

ZHONG Xun¹, WANG Xin-jie^{1*}, HE Jing-yuan¹, CHAI Lei¹, LIU Jia-rong¹, LIU Li²

(1. Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. China Geological Survey Natural Resources Integrated Survey Command Center, Beijing 100055, China)

Abstract: The objectives of this study were to verify the validity of the quadratic distribution of stand spatial structure parameters as the basis for stand restructuring, and to provide a theoretical basis for stand restructuring and reasonable selection of harvesting wood in felling and harvesting. In order to make the surveyed stands better represent the overall situation of the area, 20 standard sample plots of spruce-fir red pine forests occurring in Jingouling Forest Farm of Yanji were set up at long distances, and the basic characteristics of the stands were surveyed. The target trees were identified according to the quadratic distribution of the spatial structure parameters, and the simulated harvesting was carried out according to the harvesting priority, and the changes of the spatial structure parameters in the stands were compared before and after the harvesting. The spatial structure parameters of the stands did not change significantly in the mean distribution, but the densities and size ratios decreased in the univariate distribution, i. e., the stands were more sparsely distributed, and the growing environment of the stands was improved in the quadratic distribution. The proportion of trees that meet the better stand structure ($C=0.0, W=0.5, M=1.0, U=0.0$) increased. It is proved that determining the harvesting wood and conducting harvesting according to the

收稿日期:2022-03-29 修回日期:2022-05-06

基金项目:国家重点研发项目(2017YFC050410101)。

第一作者:钟 浔。研究方向:森林多目标经营。E-mail:852137487@qq.com

* 通信作者:王新杰,教授。研究方向:森林结构与生长模型模拟。E-mail:xinjiew@bjfu.edu.cn

multivariate distribution of stand spatial parameters has a certain improvement effect on the spatial structure of the stands, which can make the spatial structure of the stands closer to the ideal state and more consistent with the target structure of the stands for structured forest management, and at the same time, it will not have a large impact on the species composition of the stand, which can provide a reference basis for forest management and production.

Key words: structured forest management; stand spatial structure; multivariate distribution; simulated logging

森林的空间结构指林木的点格局及其属性的空间分布^[1],能反映林分发展过程中林木之间的竞争关系,是分析和管理森林生态系统的重要因子^[2],也是林分经营中结构优化与调整的基础^[3]。森林结构在很大程度上由相邻木之间的空间关系决定^[4],基于4株最近相邻木空间关系^[5]的森林结构优化经营技术简称为结构化森林经营^[6],惠刚盈等^[7]通过“结构”这一控制系统功能发挥的“中枢”,系统提出的创新性森林经营理论与技术。该经营体系构筑了完整的林分空间结构参数体系,其中混交度、大小比数、角尺度和密集度,分别被用于描述树种隔离情况、林木个体大小分化程度、林分空间分布格局和树冠投影重叠程度。

近年来,众多学者利用空间结构参数,对林分不同的空间结构特征及其影响进行了大量研究,委霞等^[8]运用乘除法原理构建空间结构评价参数对福寿林场天然次生林空间结构进行评价;孙明港等^[9]以长白山地区白桦红松混交林为研究对象,利用混交度、大小比数、密集度以及角尺度4个空间结构参数分析了其林分结构特征;刘铭波等^[10]以山西灵空山典型天然林分为研究对象,分析了林分空间结构对林分生产力的影响;赵晨昊等^[11]提出了金盆山林场基于空间结构优化的抚育采伐方式,通过对比分析采伐前后空间结构指标,证明了该采伐方式的科学合理性。此外,也有很多针对林分空间参数多元分布的研究,和敬渊等^[12]研究了杨桦次生林林分空间结构参数多元分布;张岗岗等^[13]对林分空间结构参数的多元分布进行了系统地诠释,并提出了利用空间结构参数的多元分布进行采伐,以达到改善林分空间结构的目的。本研究旨在验证此理论的可行性,通过对延吉金沟岭林场的云冷杉红松天然混交林进行样地调查,计算该林分中林木的空间结构参数,按照空间结构参数四元分布所展现的林木生长优劣程度选择采伐木,并对采伐木进行分次模拟伐除,通过分析分次模拟采伐后的林分空间结构多元分布,证明空间结构参数是否可以成为森林结构化经营中选择采伐木的依据,为结构化森林经营中合理选择采伐木提供理论依据。

1 研究区概况

研究区位于吉林省汪清县境内金沟岭林场(130°9′—130°16′E, 43°20′—43°22′N)。林区地处长白山系,低山丘陵地貌,海拔300~1 200 m,一般坡度为5°~25°,陡坡可达35°以上,但数量较少。该区属季风性气候,全年平均气温3.9℃左右,年降水量500~600 mm^[14-15]。该区属汪清县东北低山灰化土灰棕壤区,区内针叶林多为灰棕壤土,沟谷是草甸土、泥炭土、沼泽土或冲积土,平均厚度40 cm左右。

区域内主要是以云冷杉红松为主的天然次生林,主要乔木树种有鱼鳞云杉(*Picea jezoensis* var. *microsperma*)、红皮云杉(*P. koraiensis*)、冷杉(*Abies fabri*)、红松(*Pinus koraiensis*)、落叶松(*Larix gmelinii*)、枫桦(*Betula costata*)、白桦(*B. platyphylla*)、紫椴(*Tilia amurensis*)、山杨(*Populus davidiana*)、色木槭(*Acer pictum*)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)等。

2 研究方法

2.1 样地调查

通过前期资料调查及实地踏查,为使研究林分样地能够更好地代表金沟岭林场云冷杉红松天然次生林的整体林分特征,随机选择了4处相隔较远、起源相同的云冷杉红松天然次生林群落,分别布设5块30 m×30 m的方形标准地,并记录标准地基本数据。对样地内胸径≥5 cm的林木进行每木调查,记录其树种、胸径、树高及四面冠幅,同时在调查中规定样地西南角为原点,东西方向为*x*轴,南北方向为*y*轴,构建*x-y*坐标系,记录每木空间坐标。各标准地基本情况及林分特征见表1、表2。

2.2 林分空间结构参数

2.2.1 混交度(*M*) 混交度被定义为参照树*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,用来说明混交林中树种空间隔离程度^[5],用公式表示为

$$M_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n V_{ij} \quad (1)$$

表 1 云冷杉红松天然林样地基本概况

Table 1 Basic overview of the natural forest plot of spruce fir and Korean pine

样地号	经纬度	样地方向	坡向	坡度/(°)	海拔/m
1—1	43°20'39"N, 130°9'54"E	正北	北偏西 10°	6	630
1—2	43°20'36"N, 130°9'53"E	正北	正北	7	640
1—3	43°20'41"N, 130°9'57"E	正北	北偏东 6°	9	610
1—4	43°20'39"N, 130°9'52"E	正北	北偏东 6°	6	590
1—5	43°20'35"N, 130°9'43"E	正北	北偏西 2°	10	630
2—1	43°20'51"N, 130°15'2"E	北偏东 45°	北偏东 58°	26	680
2—2	43°21'24"N, 130°10'29"E	正北	北偏东 87°	15	620
2—3	43°21'25"N, 130°10'29"E	正北	正东	4	630
2—4	43°21'24"N, 130°10'25"E	正北	北偏东 76°	8.5	650
2—5	43°21'25"N, 130°10'27"E	正北	东偏南 9°	10	630
3—1	43°21'24"N, 130°10'23"E	正北	北偏东 65°	14	650
3—2	43°21'25"N, 130°10'19"E	正北	北偏东 31°	11	660
3—3	43°21'23"N, 130°10'17"E	正北	北偏东 59°	11	680
3—4	43°21'24"N, 130°10'16"E	正北	北偏东 73°	14	670
3—5	43°21'24"N, 130°10'14"E	正北	北偏东 62°	14	680
4—1	43°22'49"N, 130°16'18"E	正北	北偏东 47°	10	750
4—2	43°22'49"N, 130°16'14"E	正北	北偏东 29°	4	730
4—3	43°22'48"N, 130°16'12"E	正北	北偏东 40°	8	750
4—4	43°22'49"N, 130°16'13"E	正北	北偏东 38°	6	740
4—5	43°22'50"N, 130°16'12"E	正北	北偏东 27°	8	740

表 2 云冷杉红松天然林林分基本概况

Table 2 Basic overview of natural forest stands of spruce fir and Korean pine

树种	平均胸径 /cm	平均树高 /m	平均冠幅 /m	密度 /(株·hm ⁻²)
冷杉	19.5	12.7	1.6	332
鱼鳞云杉	23.6	14.3	1.8	89
红皮云杉	28.4	14.9	2.0	28
红松	25.7	14.4	2.0	103
紫椴	11.0	9.5	1.9	92
白桦	19.7	15.5	2.1	55
枫桦	16.2	14.2	1.7	48
裂叶榆	12.3	11.7	2.1	3
色木	14.2	10.5	1.9	21
春榆	14.4	10.6	2.1	14
水曲柳	14.4	10.2	2.1	2
白蜡	8.5	9.5	2.3	1
山杨	21.4	16.0	1.8	6
暴马丁香	7.6	8.6	1.5	8
黄檗	26.7	18.1	2.6	1
山丁子	8.7	8.5	2.0	3
落叶松	23.5	14.7	1.7	4
蒙古栎	11.9	9.2	1.6	1
山合欢	7.4	8.8	1.5	1
槭树	7.6	9.1	2.1	3
柳树	11.6	10.8	1.1	1
胡桃楸	7.5	9.1	1.8	1

式中: M_i 表示参照树 i 的混交度; V_{ij} 表示参照树 i 的相邻木 j 是否与其为同一树种,当 $V_{ij}=1$,表示参

照树 i 的周围 n 株相邻木与参照树本身属不同树种,当 $V_{ij}=0$,表示参照树 i 的周围 n 株相邻木与参照树均属同一树种;当 $M_i=1.0$ 时,林木处于极强度混交生长状态,当 $M_i=0.75$ 时,林木处于强度混交生长状态,当 $M_i=0.5$ 时,林木处于中度混交生长状态,当 $M_i=0.25$ 时,林木处于弱度混交生长状态,当 $M_i=0$ 时,林木处于零度混交生长状态。

2.2.2 密集度(C) 密集度的定义为参照树 i 与 n 株最近相邻木树冠连接的株数占所考察的最近相邻木的比例^[16]。 C_i 值的分布可以反映林分中林木个体所处小环境的密集程度,其计算公式为

$$C_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n K_{ij} \quad (2)$$

式中: C_i 表示参照树 i 的密集度; K_{ij} 表示参照树 i 与其相邻木 j 的树冠投影的重叠程度,当 $K_{ij}=1$,对象木 i 与第 j 棵相邻木树冠投影重叠,当 $K_{ij}=0$,对象木 i 与第 j 棵相邻木树冠投影不重叠。当 $C_i=1$ 时,可认为林木很密集,当 $C_i=0.75$ 时,林木比较密集,当 $C_i=0.5$ 时,林木中等密集,当 $C_i=0.25$ 时,林木稀疏,当 $C_i=0$ 时,林木很稀疏。

2.2.3 角尺度(W) 角尺度被定义为 α 角小于标准角 α_0 ($\alpha_0=72^\circ$) 的个数占所考察的相邻最近树 (n) 的比例,用来描述相邻树木围绕参照树 i 的均匀性^[17-18],其计算公式为

$$W_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n Y_{ij} \quad (3)$$

式中: W_i 表示参照树 i 的角尺度; Y_{ij} 表示参照树 i 与其相邻木 j 之间的第 j 个夹角 α 与标准角 α_0 之间的大小关系,当 $Y_{ij}=1$,第 j 个 α 角小于 α_0 ,当 $Y_{ij}=0$,第 j 个 α 角大于 α_0 ;当 $W_i=1.0$ 时,表明林木分布非常不均匀,当 $W_i=0.75$ 时,表明林木分布不均匀,当 $W_i=0.5$ 时,表明林木随机分布,当 $W_i=0.25$ 时,表明林木分布均匀,当 $W_i=0$ 时,表明林木分布非常均匀。

2.2.4 大小比数(U) 大小比数的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,常用来描述林木生长的优劣程度^[19],其计算公式为

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

(4)

式中: U_i 表示参照树 i 的大小比数; Z_{ij} 表示参照树 i 与其相邻木 j 的胸径大小关系,当 $Z_{ij}=1$,对象木 i 胸径小于第 j 棵相邻木胸径,当 $Z_{ij}=0$,对象木 i 胸径大于第 j 棵相邻木胸径。当 $U_i=1.0$ 时,林木处于劣势生长状态,当 $U_i=0.75$ 时,林木处于较为劣势生长状态,当 $U_i=0.5$ 时,林木处于中庸生长状态,当 $U_i=0.25$ 时,林木处于较为优势生长状态,当 $U_i=0$ 时,林木处于优势生长状态。

2.3 四元分布及采伐木的选择

将任意 2 个结构参数分别的 5 种可能取值与其余 2 个结构参数分别的 5 种可能取值进行交叉分类,得到 625 种不同结构组合的相对频率分布,即为结构参数的四元分布。根据结构参数的四元分布进行采伐木的选择并确定采伐次序,其中同种聚集且拥挤分布的劣势木作为首选采伐木;单方面结构合理林木作为次选采伐木;两方面结构合理的林木作为再选采伐木;三方面结构合理的林木作为备选采伐木^[13]。按照确定的采伐次序进行模拟采伐,计算分批次采伐的采伐强度以及伐后的空间结构参数,分析按照该方法是否可以在合理的采伐强度内优化林分的空间结构,使其更加符合结构化经营的原则。

2.4 数据处理

利用 WPS 2019 进行数据统计及表格制作,使用 R 3.6.3 进行林分空间结构参数的计算,采用 Oringin 2018 进行绘图。

3 结果与分析

根据空间结构参数的四元分布,确定出首选伐、次选伐、再选伐及备选伐的采伐木,由于满足首选伐的采伐木数量极少,仅有 2 株,因此将符合首选伐条件的采伐木并入次选伐一起计算,CK 表示未经处理的原始数据情况。

3.1 分次模拟采伐的采伐强度

由表 3 可知,进行 3 次模拟采伐后,次选伐的采伐强度为 1.49%,再选伐的采伐强度为 8.07%,备选伐的采伐强度为 9.64%,就采伐强度而言都属于低强度择伐,满足以林分结构调整为目的而进行采伐的采伐原则。

表 3 分次伐采伐量统计

Table 3 Statistical table of cutting amount of split felling

模拟采伐	伐后蓄积/m ³	采伐量/m ³	采伐强度(%)
CK	479.46		
次选伐	472.31	7.15	1.49
再选伐	440.76	38.70	8.07
备选伐	433.25	46.21	9.64

3.2 分次模拟采伐后树种重要值

表 4 记录了调查林分中各树种在初始状态及分次采伐后的重要值,可以看出林分中主要树种的重要值并无明显变化,说明通过林木的空间结构参数确定采伐木后进行采伐,并不会对林分的树种组成造成较大的影响,不会改变林分类型。

表 4 分次伐树种重要值统计

Table 4 Statistics of importance values of sub-felled tree species

树种	重要值			
	CK	次选伐	再次伐	备选伐
冷杉	0.304	0.303	0.300	0.305
鱼鳞云杉	0.124	0.124	0.128	0.129
红皮云杉	0.063	0.064	0.066	0.066
红松	0.151	0.151	0.154	0.157
紫椴	0.087	0.087	0.085	0.082
白桦	0.072	0.073	0.074	0.073
枫桦	0.060	0.060	0.064	0.062
裂叶榆	0.011	0.011	0.012	0.010
色木	0.033	0.033	0.031	0.032
春榆	0.022	0.021	0.019	0.017
水曲柳	0.007	0.007	0.005	0.005
白蜡	0.004	0.004	0.005	0.005
山杨	0.013	0.012	0.012	0.013
暴马丁香	0.011	0.012	0.012	0.012
黄檗	0.005	0.005	0.003	0.003
山丁子	0.007	0.007	0.003	0.002
落叶松	0.010	0.010	0.011	0.011
蒙古栎	0.002	0.002	0.002	0.002
山合欢	0.002	0.002	0.002	0.000
槭树	0.007	0.007	0.008	0.008
柳树	0.002	0.002	0.002	0.002
胡桃楸	0.002	0.002	0.002	0.002

3.3 模拟采伐后林分空间参数的零元(均值)分布

由表 5 可知,初始林分平均混交度为 0.69,说明林分整体介于中度混交到高度混交之间;平均聚集度为 0.20,说明林分内林木分布较为稀疏;平均

角尺度为 0.50,说明林分整体呈随机分布;平均大小比数为 0.48,说明林木整体处于中庸生长状态。在经过次选伐、再选伐及备选伐后,林分的平均混交度均有所提升,同时林分的平均密集度、平均角尺度及平均大小比数均有所下降,其中再选伐后林分的平均混交度最大,其值为 0.76;备选伐后林分的平均密集度及平均大小比数最小,值分别为 0.10 和 0.43。

表 5 零元(均值)分布

Table 5 Zero-element (mean) distribution

模拟采伐	混交度	密集度	角尺度	大小比数
CK	0.69	0.20	0.50	0.48
次选伐	0.71	0.18	0.48	0.47
再选伐	0.76	0.12	0.48	0.45
备选伐	0.71	0.10	0.48	0.43

3.4 模拟采伐后林分空间参数的一元分布

根据表 6~表 9 可以看出,初始林分中处于强度混交及以上的林木占 61%;分布稀疏及非常稀疏的林木占 80%;处于随机分布状的林木占半数以上为 55%;生长状态为中庸及以上的林木为 62%。第 1 次模拟采伐即次伐后,林分中处于强度混交及以上的林木占 62%;分布稀疏及非常稀疏的林木占 85%;处于随机分布状的林木占半数以上为 57%;生长状态为中庸及以上的林木为 64%。再次伐后,林分中处于强度混交及以上的林木占 71%;分布稀疏及非常稀疏的林木占 94%;处于随机分布状的林木占半数以上为 60%;生长状态为中庸及以上的林木为 66%。对备选采伐木进行最后一次采伐后,林分中处于强度混交及以上的林木占 65%;分布稀疏及非常稀疏的林木占 95%;处于随机分布状的林木占半数以上为 57%;生长状态为中庸及以上的林木为 68%。

表 6 分次伐后林分混交度频率分布

Table 6 Frequency distribution of stand mixing degree after fractional felling

混交度	0.00	0.25	0.50	0.75	1.00
CK	0.04	0.12	0.23	0.26	0.35
次选伐	0.04	0.09	0.25	0.26	0.36
再选伐	0.02	0.05	0.23	0.31	0.40
备选伐	0.02	0.10	0.22	0.30	0.35

3.5 模拟采伐后林分空间参数的四元分布

林分空间参数的四元分布见图 1~图 4。图 1 为原始林分的空间参数四元分布,在原始林分中,生长状态为优势及以上且处于强度混交及以上,分布状态为随机或均匀分布且分布稀疏的林木占 17.2%,经过次选伐后(图 2),处于同种状态的林木

占比为 17.7%,再选伐后该生长及分布状态的林木占比为 21.7%(图 3),最终进行备选伐后(图 4),林木占比变为 24.6%,相较于原始林分占比上升了 7.4%。将 $C=0$ 、 $W=0.5$ 、 $M=1.0$ 和 $U=0$ 作为最佳林分结构组合,原始林分中满足该结构的林木占比为 1.9%,次选伐后满足该结构的林木占比为 2.1%,进行再选伐后处于该结构的林木占比为 3.3%,备选伐后满足该结构的林木占比为 4.6%,比之原始林分达到该结构的林木占比提高了 2.7 个百分点。

表 7 分次伐后林分密集度频率分布

Table 7 Frequency distribution of stand density after fractional felling

密集度	0.00	0.25	0.50	0.75	1.00
CK	0.46	0.34	0.14	0.05	0.01
次选伐	0.49	0.36	0.10	0.04	0.01
再选伐	0.57	0.37	0.04	0.01	0.00
备选伐	0.66	0.29	0.04	0.01	0.00

表 8 分次伐后林分角尺度频率分布

Table 8 Frequency distribution of stand angular scale after fractionated felling

角尺度	0.00	0.25	0.50	0.75	1.00
CK	0.01	0.24	0.55	0.15	0.04
次选伐	0.01	0.26	0.57	0.13	0.03
再选伐	0.01	0.25	0.60	0.11	0.03
备选伐	0.01	0.26	0.57	0.13	0.03

表 9 分次伐后林分大小比数频率分布

Table 9 Frequency distribution of stand size ratio after fractional felling

大小比数	0.00	0.25	0.50	0.75	1.00
CK	0.22	0.20	0.20	0.18	0.19
次选伐	0.22	0.20	0.22	0.18	0.18
再选伐	0.24	0.20	0.22	0.18	0.16
备选伐	0.26	0.23	0.19	0.21	0.12

4 结论与讨论

4.1 结论

根据模拟采伐后林分空间结构参数的变化可以得知,按照规则分次采伐后虽然空间结构参数在均值分布上没有明显变化,但在一元分布和四元分布上产生了一定的变化。其变化在一元分布上体现为密集度频率分布更加偏向于 $C=0$ 和 $C=0.25$,即分布更加稀疏;角尺度的频率分布在 $W=0.5$ 更加集中,说明林分状态更加趋于随机分布;大小比数在 $U=1$ 上的频率分布逐渐减少,在 $U=0$ 及 0.25 上的频率分布逐渐增加,说明林木的生长状态有所改

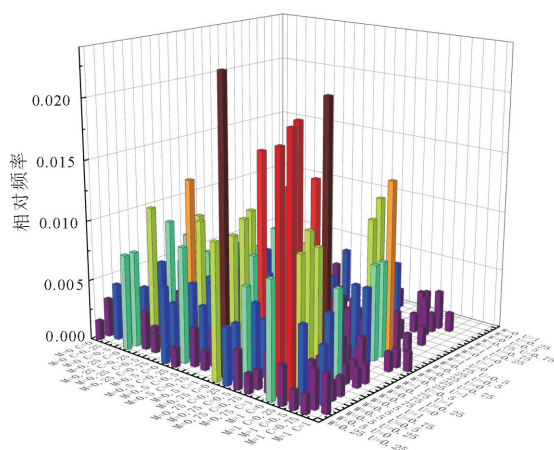


图1 空间参数四元分布(CK)

Fig. 1 Spatial parameter quaternary distribution (control)

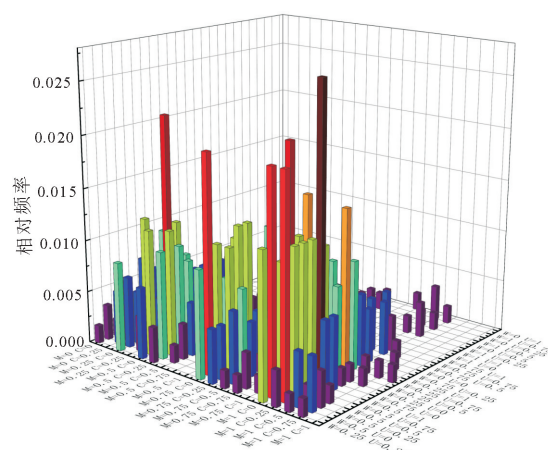


图2 空间参数四元分布(次选伐)

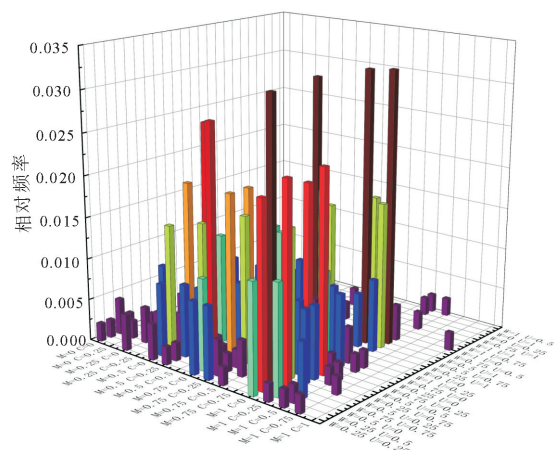
Fig. 2 Spatial parameter quaternary distribution
(secondary harvesting)

图3 空间参数四元分布(再选伐)

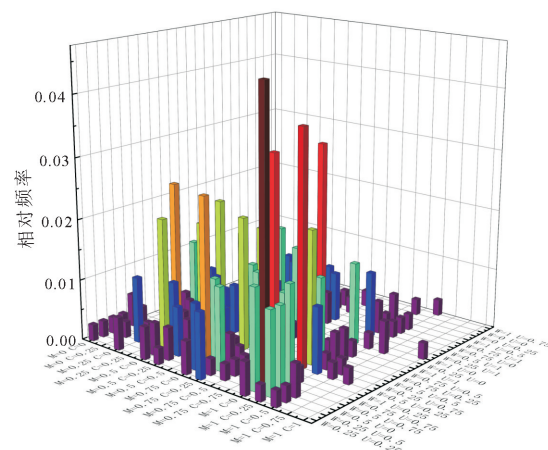
Fig. 3 Spatial parameter quaternary distribution
(re-selection harvesting)

图4 空间参数四元分布(备选伐)

Fig. 4 Spatial parameter quaternary distribution
(alternative harvesting)

善。在四元分布上体现为满足更优林分结构的林木占比的逐步增加,以及满足最佳林分结构林木占比的逐渐增加。从树种重要值的变化来看,分次伐后主要树种的重要值并未产生明显变化,证明通过空间结构参数确定采伐木并进行采伐,对林分的树种组成及林分类型不会产生较大影响。

综上所述,以林分空间结构参数的四元分布为依据进行采伐,可以在一定程度上优化林分的空间结构,使之更加符合森林结构化经营对林分结构的要求,同时也不会改变林分类型,能够在不改变林分非空间特征的情况下改善林分的空间结构,更好地实现森林的结构化经营。

4.2 讨论

虽然通过空间结构参数的四元分布确定采伐木可以优化林分当前的空间结构,但其操作较为复杂,要运用到实际中实现大规模的采伐活动较为困难,

如果能结合遥感技术实现林木定位,从而获取空间结构参数并进行应用,或许能成为解决该问题的一种方法,使其能够更加满足大规模的生产需要。

本研究主要通过手动对符合采伐条件的采伐木数据进行删除,达到对林分进行模拟伐除的目的,如果结合不同的采伐条件及经营目标构建相关模拟采伐模型,可以使通过空间结构参数多元分布进行林木采伐的工作更加便捷。

通过空间结构参数的多元分布确定采伐木,能够让林分的空间结构逐渐向较理想的方向发展,使林分中的林木能够更好的生长,对森林的生产经营有一定的指导作用。

参考文献:

- [1] 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): 1-9.

- 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): 1-9. (in Chinese)
- [2] GADOW K V, ZHANG C Y, WEHENKEL C, *et al.* Forest structure and diversity [M]//PUKKALA T, GADOW K V. Continuous cover forestry. 2nd ed. Dordrecht: Springer, 2012: 29-83.
- [3] 亢新刚. 森林经理学 [M]. 4 版. 北京: 中国林业出版社, 2011: 334.
- [4] HUI G Y, ZHAO X H, ZHAO Z H, *et al.* Evaluating tree species diversity based on neighborhood relationships [J]. Forest Science, 2011, 57: 292-300.
- [5] 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. Measuring Species Spatial Isolation in Mixed Forests [J]. Forest Research, 2001, 14 (1): 23-27. (in Chinese)
- [6] 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]. Forest Research, 2018, 31 (1): 85-93. (in Chinese)
- [7] 惠刚盈, 胡艳波, 徐海, 等. 结构化森林经营 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2007.
- [8] 委霞, 曹小玉, 李际平, 等. 福寿林场天然次生林空间结构分析与评价 [J]. 西北林学院学报, 2021, 36(5): 146-151.
- WEI X, CAO X Y, LI J P, *et al.* Analysis and evaluation of spatial structure of natural secondary forest in Fushou forest farm [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(5): 146-151. (in Chinese)
- [9] 孙明港, 王新杰. 长白山地区白桦红松混交林结构特征分析 [J]. 西北林学院学报, 2021, 36(5): 18-27.
- SUN M B, WANG X J. Structural characteristics of mixed forest of *Betula platyphylla* and *Pinus koraiensis* in Changbai Mountains [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(5): 18-27. (in Chinese)
- [10] 刘铭波, 韩海荣, 程小琴, 等. 山西灵空山典型天然林空间结构特征及其对生产力的影响 [J]. 西北林学院学报, 2022, 37(1): 33-40.
- LIU M B, HAN H R, CHENG X Q, *et al.* Spatial structure characteristics and their influences on productivity of typical natural forests in the Lingkong Mountain, Shanxi Province [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37 (1): 33-40. (in Chinese)
- [11] 赵晨昊, 王建军, 周光, 等. 基于空间结构优化的金盆山天然混交林采伐模拟 [J/OL]. 西南林业大学学报: 自然科学, 2022, 42(5): 126-133.
- ZHAO C H, WANG J J, ZHOU G, *et al.* Logging simulation of natural mixed forest in Jinpen Mountain based on optimization of spatial structure [J]. Journal of Southwest Forestry University: Natural Sciences, 2022, 42 (5): 126-133. (in Chinese)
- [12] 和敬渊, 王新杰, 王开, 等. 杨桦次生林分空间结构参数多元分布研究 [J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(2): 22-33.
- HE J Y, WANG X J, WANG K, *et al.* Multivariate distribution of spatial structure parameters of *Populus davidiana-Betula platyphylla* secondary forest [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(2): 22-33. (in Chinese)
- [13] 张岗岗, 刘瑞红, 惠刚盈, 等. 林分空间结构参数 N 元分布及其诠释——以小陇山锐齿栎天然混交林为例 [J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(4): 21-31.
- ZHANG G G, LIU R H, HUI G Y, *et al.* N-variate distribution and its annotation on forest spatial structural parameters: a case study of *Quercus aliena* var. *acuteserrata* natural mixed forest in Xiaolong Mountains, Gansu Province of north-western China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(4): 21-31. (in Chinese)
- [14] 和敬渊, 王新杰, 郭韦韦, 等. 金沟岭林场两种天然起源的杨桦次生林空间结构特征 [J]. 东北林业大学学报, 2020, 48(9): 1-7.
- HE J Y, WANG X J, GUO W W, *et al.* Spatial structure of two natural origin poplar-birch secondary forests in Jingouling forest farm [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2020, 48(9): 1-7. (in Chinese)
- [15] 毛靓, 贾京默. 黑龙江县域农用地景观格局变化特征 [J]. 森林工程, 2022, 38(2): 44-53.
- MAO L, JIA J M. Study on the change characteristics of landscape pattern of agricultural and forestry land at County area in Heilongjiang [J]. Forest Engineering, 2022, 38(2): 44-53. (in Chinese)
- [16] 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. (in Chinese)
- [17] 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 neighbourhood pattern—a new structure parameter for describing distribution of forest tree position [J]. Scientia Silvae Sinicae, 1999, 35(1): 39-44. (in Chinese)
- [18] 张吕成, 张一帆, 董灵波. 基于 Landsat TM 数据的大兴安岭森林景观空间格局及其关联性 [J]. 森林工程, 2021, 37(6): 1-9.
- ZHANG L C, ZHANG Y F, DONG L B. Spatial pattern and correlation of forest landscape in Daxing'an mountains based on landsat TM data [J]. Forest Engineering, 2021, 37 (6): 1-9. (in Chinese)
- [19] 惠刚盈, KLAUS VON GADOW, MATTHIAS ALBERT. 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): 4-9.
- HUI G Y, KLAUS V G, MATTHIAS A. A new stand space structure parameter—size ratio number [J]. Forest Research, 1999, 12(1): 4-9. (in Chinese)