

间伐强度对萌芽杉木-木荷混交林空间结构的影响¹⁾

张利利 谭新建 姚甲宝 李翱翔 葛晓宁

(中国林业科学研究院亚热带林业实验中心,江西分宜,336600)

摘要 为了解萌芽杉木-木荷混交林空间结构的变化特征,以江西分宜亚林中心的萌芽杉木-木荷混交林为研究对象,通过建立空间结构参数的二元分布,对不同间伐强度的林分空间结构变化特征进行描述。结果表明:间伐前,林分为随机分布且胸径处于劣势状态;弱度间伐后,林分随机分布的林木处于中高度混交的比例上升,中低度混交林的胸径或树高劣势木的比例显著下降;中度间伐后,中低度混交的林木中,中庸木比例上升显著,随机分布格局的林木处于高度混交的比例明显增加;强度间伐后,林木大多数处于中低度混交且优势的状态,样地中不存在团状分布的林木,林木竞争两极分化明显,不利于林分结构稳定发展。不同间伐强度下,胸径与树高优势程度相当的林木比例均超过50%。中度间伐后,林分的混交度、优势度及分布格局比其他间伐强度更为合理。

关键词 间伐强度;混交林;空间结构;二元分布

分类号 S757.4

Effect of Thinning Intensity on the Binary Distribution Characteristics of Spatial Structure of Chinese Fir and Broadleaf Mixed Forest//Zhang Lili, Tan Xinjian, Yao Jiabao, Li Aoxiang, Ge Xiaoning(Experimental Center of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Fenyi 336600, P. R. China) //Journal of Northeast Forestry University, 2022,50(1):1-6.

In order to understand the change characteristics of spatial structure of budding *Cunninghamia lanceolata-Schima superba* mixed forest, taking the budding *C. lanceolata-S. superba* mixed forest in the Experimental Center of Subtropical Forestry of Fenyi County, Jiangxi Province as the research object, by establishing the binary distribution of spatial structure parameters, we described the change characteristics of stand spatial structure with different thinning intensity. Before thinning, the forest stand was randomly distributed and the DBH was in an inferior state; after weak thinning, the proportion of randomly distributed trees in moderate and highly mixed forest increased, while the proportion of DBH or height inferior trees in moderate-low mixed forest decreased significantly; after moderate thinning, the proportion of medium advantage trees in moderate-low mixed forest increased significantly, and the proportion of trees with random distribution pattern in high mixing increased significantly. After intensity thinning, most of the trees are in the state of moderate-low degree mixing and dominance, there is no cluster distribution of trees in the sample plot, and the forest competition polarization is obvious, which is not conducive to the stable development of the stand structure. Under different thinning intensity, the proportion of trees with the same dominant degree of DBH and height was more than 50%. After moderate thinning, the mixing degree, dominance and distribution pattern of the stand were more reasonable than those of other thinning intensity.

Keywords Thinning intensity; Mixed forest; Spatial structure; Binary distribution

DOI:10.13759/j.cnki.dlxb.2022.01.023

抚育间伐是通过林分密度的调节,增加林分的生长空间,促进林木生长的一种森林经营的手段。间伐强度的大小对保留木的干形材质、生长速度具有直接影响,同时也影响林分的质量和产量^[1]。合理的采伐强度是调整林分结构、改善林木生长环境、提高林地生产力和林木质量的关键因素,若采伐方式和采伐强度不合理,将引起水土流失,不利于林木生长和更新^[2-5]。林分空间结构是森林结构变化的直接表现形式,也是林木位置、林木大小和疏密等空间关系的体现^[6-7]。林分的空间结构决定了林木的分布状况和林木的竞争趋势,对林分的健康程度及

生长潜质具有重要影响^[8-9]。萌芽杉木-木荷混交林的经营以培育杉木中小径材、木荷大径材为目标。在森林经营的过程中,选择合理的间伐强度是人工林经营的关键技术。目前,国内外对林分空间结构的研究大多通过空间结构参数一元分布的方法来进行分析^[10-13],且分析时仅使用胸径大小比数、角尺度、混交度3个参数^[14-19],对间伐影响下杉阔混交林空间结构二元分布变化特征的分析较为少见。因此,本文以16年生杉木-木荷混交林为研究对象,对不同间伐强度下混交度、胸径大小比数、树高大小比数、角尺度的二元分布特征进行对比分析^[20-22],探讨抚育间伐强度对林分空间结构的影响,提出合理的间伐强度,结果可为杉阔混交人工林林分结构的优化调整提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于中国林科院亚热带林业实验中心长埠实验林场,地处江西省分宜县最南端,境内气候宜

1) “十三五”国家重点研发计划子课题(2017YFD0600905-3);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(CAFYBB2020MB005)。

第一作者简介:张利利,女,1991年6月生,中国林业科学研究院亚热带林业实验中心,工程师。E-mail:635764832@qq.com。

通信作者:谭新建,中国林业科学研究院亚热带林业实验中心,教授级高级工程师。E-mail:bjtan@caf.an.cn。

收稿日期:2020年12月1日。

责任编辑:王广建。

人,四季分明、温暖湿润;年平均气温 16.5 ℃,7 月平均最高气温 28.8 ℃,1 月平均最低气温 5.3 ℃,年降水量 1 500~1 800 mm,年无霜期 265 d,海拔 170~1 090 m,属亚热带湿润季风气候,土质以黄红壤为主。研究区内植被类型丰富,共有野生和引种栽培的植物 254 科,847 属,1888 种(含亚种、变种、变型及园艺品种),是中亚热带难得的植被种质基因资源宝库。主要树种包括毛竹(*Phyllostachysedulis*)、马尾松(*Pinusmassoniana*)、鹅掌楸(*Liriodendron chinense*)、油茶(*Camellia Oleifera*)、杉木(*Cunninghamialanceolata*);林下植被主要有山茶花(*Camellia japonica*)、杜荃山(*Maesa japonica*)、小叶女贞(*Ligustrumquihouii*)、粗叶悬钩子(*Rubusalceaefolius*)、七星莲(*Viola diffusa*)、芒萁(*Dicranopterisdichotoma* (Thunb.) Bernh)、双盖蕨(*Diplaziumdonianum*)、寒梅(*Rubus-buergeriMiq*)、酢浆草(*Oxalis corniculata*)、青蒿(*Arte-*

misia annualL)、狗脊蕨(*Woodwardia japonica*)等。

2 研究方法

2.1 样地设置与调查

试验地于 1994 年春季造林,将木荷实生苗与杉木萌芽条按照 1:3 的比例进行混交,混交林的初始密度为 3 330 株·hm⁻²,造林完成后使用传统营林措施对试验地进行抚育管理。2010 年进行间伐抚育试验,对试验地设置了 4 种间伐处理方式(对照、弱度、中度、强度),在抚育间伐前对样地进行伐前调查,然后根据株数比例,按照弱度间伐(15%)、中度间伐(35%)和强度间伐(60%)伐去生长缓慢、有缺陷、过密或劣势的杉木和长势差的木荷。2018 年 8 月,在 4 种间伐处理的试验地上各设置 2 块 20 m×20 m 的样地,对样地进行全面调查,调查数据取平均值(见表 1)。

表 1 不同间伐强度的林分基本情况

样地	树种	林分密度/株·hm ⁻²	平均胸径/cm	胸径最大值/cm	平均树高/m	树高最大值/m	树种保留密度/株·hm ⁻²
伐前	木荷	2 825	12.84	19.50	10.60	12.90	875
	杉木		9.81	15.60	9.36	12.70	1 925
	其他树种		6.90	6.90	7.20	7.20	25
对照	木荷	2 675	13.92	23.60	9.66	12.80	800
	杉木		11.79	20.20	9.06	12.90	1 775
	其他树种		16.08	19.10	10.50	11.00	100
弱度间伐	木荷	2 276	16.66	27.80	11.05	13.80	651
	杉木		11.73	17.50	9.32	13.00	1625
	其他树种		—	—	—	—	—
中度间伐	木荷	1 813	20.03	32.1	12.08	14.90	563
	杉木		14.36	24.5	10.40	14.80	1 187
	其他树种		15.41	15.67	11.54	11.76	63
强度间伐	木荷	1 100	20.11	27.2	11.36	12.90	400
	杉木		16.93	27.7	9.85	12.50	650
	其他树种		19.35	19.9	9.75	12.00	50

2.2 数据处理

使用 Excel 2013 软件对数据进行处理,使用 R 软件计算混交林内每株立木的混交度、角尺度、树高大小比数、胸径大小比数。利用角尺度(W)、混交度(M)、树高大小比数(U_h)、胸径大小比数(U_g)进行林分空间结构描述^[15]。4 个结构参数均在空间上有直观的解析力,在结构上有相同且相互独立的划分^[10-12],因此形成混交度(M)—角尺度(W)、混交度(M)—树高大小比数(U_h)、混交度(M)—胸径大小比数(U_g)、树高大小比数(U_h)—角尺度(W)、胸径大小比数(U_g)—角尺度(W)和树高大小比数(U_h)—胸径大小比数(U_g)等 6 种组合的相对频率值^[8,22]。相对频率值是指处于某两个指标组合的相对频率,即样地中处于某种生存状态的林木株数占总株数的比例。通过对各指标组合相对频率值的分布特点可以判断出样地中各林木间的优势、分布和

混交的综合关系,判断林地生态环境的现状和林分结构的缺陷,有利于对林分细小的空间结构的特征进行全面的认识。

3 结果与分析

3.1 径阶株数变化特征

间伐前林分密度为 2 825 株/hm²,经过弱度间伐、中度间伐、强度间伐处理后,样地的林分密度分别为 2 276、1 813、1 100 株/hm²,对对照样地的林分密度为 2 675 株/hm²。采用 2 cm 径阶,对不同间伐强度的杉木、木荷作直径分布表(见表 2)。

由表 2 可知,未间伐时的小径阶林木株数基本都大于其他间伐强度,在木荷 12~14 cm、杉木 8~10 cm 径阶处,对照样地的林木株数明显大于各个间伐强度的株数。不同间伐强度下,在林分平均胸径处的林木株数最多,径阶越大或越小,林木株数越少;

杉木在 8~14 cm 径阶处的株数分布较多。随着间伐强度的增加,样地中的大径阶林木株数所占比重

表 2 不同间伐强度后林分径阶分布

树种	间伐强度	各径阶林木的分布 / 株 · hm ⁻²													
		6 cm	8 cm	10 cm	12 cm	14 cm	16 cm	18 cm	20 cm	22 cm	24 cm	26 cm	28 cm	30 cm	32 cm
杉木	对照	13	325	512	425	237	138	75	50	0	0	—	—	—	—
	弱度间伐	37	238	338	500	313	187	12	0	0	0	—	—	—	—
	中度间伐	12	125	263	275	287	150	37	25	13	0	—	—	—	—
	强度间伐	0	25	12	63	188	200	75	37	38	12	—	—	—	—
木荷	对照	12	75	75	113	212	150	75	38	37	13	—	—	—	—
	弱度间伐	12	26	13	37	113	112	138	87	75	25	13	0	0	0
	中度间伐	0	0	12	25	51	75	125	100	113	62	0	0	0	0
	强度间伐	0	0	0	0	0	12	63	87	100	50	38	25	12	13

3.2 不同间伐强度下的林分空间结构参数二元分布

3.2.1 混交度-角尺度

从表 3 可知,不间伐的情况下,样地中的林木主要为中低度混交,处于聚集分布格局的林木数量超过样地总林木株数的 1/3,近 2/5 的林木处于随机分布格局。随着角尺度的增加,相同混交程度的林木相对频率值先增大后减少,并在随机分布 ($W = 0.50$) 时取得最大值,说明在混交度相同的林木当中处于随机分布的林木所占比例最高。相同角尺度上的林木相对频率值随着混交度的增大表现为先增大后减少,正态分布趋势明显。弱度间伐后,极不均匀分布的林木相对频率值急剧下降,林木相对频率值由 0.10 下降至 0.01,随机分布格局中处于中高度混交 ($M = 0.50, 0.75, 1.00$) 的林木相对频率值上升了 0.08,聚集分布格局中处于低度混交 ($W = 0.75, M = 0, 0.25$) 的林木,林木相对频率值由 0.16 下降至 0.06,林分中没有零度混交且很不均匀分布的林木。中度间伐后,分布格局为随机的林木中处于中低度混交 ($W = 0.50, M = 0, 0.25, 0.50$) 的林木相对频率值由弱度间伐时的 0.31 下降至 0.28,处于高度混交 ($M = 0.75, 1.00$) 的相对频率值则由 0.17 上升至 0.24,说明中度间伐后,随机分布格局的林木中处于高度混交的林木较弱度间伐有明显增加。强度间伐后,没有出现团状分布的林木,集聚分布的林木中不在出现极强度混交的林木,均匀分布的林木中处于中高度混交状态的林木相对频率值由中度间伐时的 0.05 增加至 0.10,集聚分布的林木中高度混交的林木相对频率值由中度间伐时的 0.08 降低至 0.01。

3.2.2 大小比数-混交度

由表 4、表 5 可知,不间伐时,林木主要为中低度混交且劣势状态,弱度间伐后,中低度混交的林分中树高为劣势 ($U_h = 0.75$ 或 1.00) 的林木相对频率值由 0.39 下降至 0.28,胸径为劣势 ($U_g = 0.75$ 或 1.00) 的林木相对频率值由 0.36 下降至 0.27。高度混交的林分

中,树高处于优势状态的相对频率值增加了 0.08,胸径处于优势状态的林木相对频率值增加了 0.07。

表 3 不同间伐强度后混交度-角尺度二元分布

间伐强度	角尺度	林分空间结构二元分布特征值				
		$M = 0$	$M = 0.25$	$M = 0.50$	$M = 0.75$	$M = 1.00$
对照	0	0.03	0	0.01	0.01	0.01
	0.25	0.03	0.05	0.06	0.04	0.02
	0.50	0.06	0.10	0.13	0.06	0.03
	0.75	0.08	0.08	0.03	0.04	0.03
	1.00	0.02	0.06	0.02	0	0
弱度间伐	0	0.01	0.03	0.02	0.03	0.01
	0.25	0.02	0.05	0.11	0.04	0.01
	0.50	0.05	0.13	0.13	0.13	0.04
	0.75	0.01	0.05	0.05	0.06	0.03
	1.00	0	0	0.01	0.01	0
中度间伐	0	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01
	0.25	0.04	0.07	0.07	0.02	0.02
	0.50	0.03	0.10	0.15	0.16	0.08
	0.75	0.04	0.04	0.04	0.06	0.02
	1.00	0.01	0	0	0	0
强度间伐	0	0.01	0	0.03	0	0
	0.25	0.06	0.09	0.06	0.05	0.05
	0.50	0.04	0.17	0.20	0.06	0.06
	0.75	0.03	0.04	0.05	0.01	0

中度间伐后,中庸木大多为中低度混交,中低度混交 ($M = 0, 0.25, 0.50$) 的林木中树高处于中庸状态 ($U_h = 0.50$) 的林木相对频率值由弱度间伐时的 0.12 上升至 0.20,胸径处于中庸状态 ($U_g = 0.50$) 的林木相对频率由 0.14 上升至 0.19。高度混交 ($M = 0.75, 1.00$) 的林木中树高为优势状态的林木相对频率值由 0.19 上升至 0.23,胸径为优势的林木相对频率值由 0.17 上升至 0.25,胸径为劣势 ($U_g = 0.75, 1.00$) 的林木相对频率值由 0.14 下降至 0.06。说明中度间伐有利于高度混交的林木胸径和树高向优势状态发展。

强度间伐后,极强度混交的林木中不存在中庸状态的林木,林木大多数处于中低度混交且优势的状态。中低度混交状态下,树高或胸径为优势的林木相对频率值分别由中度间伐时的 0.22、0.23 上升

至0.29,树高或胸径为劣势竞争状态的林木相对频率值由0.21分别上升至0.25、0.28。高度混交状态下($M=0.75、1.00$),树高和胸径处于优势的林木相对频率值分别由0.23、0.25均下降至0.17、劣势的林木相对频率值变化显著,由0.08、0.06分别下降至0.02、0.03。中低度混交林木中优势木和劣势木的比例均有不同幅度的上升,两极分化明显,不利于林分结构稳定发展。

表4 不同间伐强度下树高大小比数-混交度二元分布

间伐强度	混交度	林分空间结构二元分布特征值				
		$U_h=0$	$U_h=0.25$	$U_h=0.50$	$U_h=0.75$	$U_h=1.00$
对照	0	0.03	0.02	0.01	0.10	0.06
	0.25	0.02	0.07	0.06	0.08	0.06
	0.50	0.03	0.05	0.06	0.04	0.05
	0.75	0.03	0.03	0.02	0.05	0.02
	1.00	0.02	0.04	0.01	0.03	0.01
弱度间伐	0	0.04	0.02	0.01	0.02	0
	0.25	0.02	0.07	0.03	0.06	0.08
	0.50	0.06	0.05	0.08	0.07	0.05
	0.75	0.05	0.08	0.04	0.06	0.04
	1.00	0.04	0.03	0.01	0.01	0.01
中度间伐	0	0.02	0.05	0.02	0.02	0.01
	0.25	0.04	0.05	0.08	0.03	0.03
	0.50	0.02	0.04	0.10	0.10	0.02
	0.75	0.06	0.09	0.03	0.02	0.04
	1.00	0.02	0.06	0.03	0.01	0.01
强度间伐	0	0.03	0.04	0.03	0.03	0.01
	0.25	0.06	0.05	0.08	0.07	0.05
	0.50	0.07	0.05	0.14	0.05	0.04
	0.75	0.04	0.03	0.04	0.01	0
	1.00	0.09	0.01	0	0	0.01

表5 不同间伐强度下胸径大小比数-混交度二元分布

间伐强度	混交度	林分空间结构二元分布特征值				
		$U_g=0$	$U_g=0.25$	$U_g=0.50$	$U_g=0.75$	$U_g=1.00$
对照	0	0.02	0.02	0.05	0.07	0.06
	0.25	0.02	0.08	0.06	0.05	0.08
	0.50	0.03	0.06	0.04	0.05	0.05
	0.75	0.04	0.03	0.03	0.02	0.03
	1.00	0.01	0.02	0.01	0.03	0.04
弱度间伐	0	0.04	0.02	0.01	0.02	0
	0.25	0.03	0.05	0.04	0.06	0.08
	0.50	0.05	0.06	0.09	0.05	0.07
	0.75	0.07	0.05	0.03	0.08	0.04
	1.00	0.06	0	0.01	0.01	0.01
中度间伐	0	0.02	0.03	0.04	0.02	0.01
	0.25	0.04	0.07	0.04	0.05	0.03
	0.50	0.03	0.04	0.11	0.06	0.04
	0.75	0.08	0.09	0.04	0.02	0.01
	1.00	0.03	0.05	0.02	0.02	0.01
强度间伐	0	0.02	0.04	0.03	0.02	0.03
	0.25	0.02	0.09	0.09	0.08	0.03
	0.50	0.06	0.07	0.09	0.11	0.02
	0.75	0.05	0.03	0.03	0.01	0
	1.00	0.08	0.01	0	0.01	0.01

3.2.3 大小比数-角尺度

由表6、表7可以看出,不间伐时,林分中最常见的为随机分布且胸径处于劣势状态($W=0.5, U_g=0.75$)的林木。弱度间伐后,几乎不存在团状分布的林木,均匀分布($W=0.25$)的林木中树高处于优势状态($U_h=0、0.25$)的林木比例由对照的5%上升至11%;胸径处于优势状态($U_g=0$ 或0.25)的林木由4%上升至10%,处于劣势状态($U_h=0.75、1.00$)林木由13%下降至9%。随机分布($W=0.50$)的林木中树高为优势的林木比例由不间伐时的17%上升至23%,胸径为优势的林木由13%上升至21%,树高处于劣势状态($U_h=0.75、1.00$)的林木相对频率值由0.15上升至0.19,胸径处于劣势状态($U_g=0.75、1.00$)的林木相对频率值由0.16上升至0.20。聚集分布的林木的胸径和树高被相邻木挤压的比例减少。

中度间伐后,树高或胸径为中庸状态且随机分布的林木比例由弱度间伐时的7%、8%上升至15%、11%,中庸状态的林木大多为均匀分布和随机分布。集聚分布的林木中,树高或胸径为优势(U_h 或 $U_g=0、0.25$)的林木比例由8%、7%分别上升至13%、12%,说明中度间伐后集聚分布的林木中优势木比例上升。

表6 不同间伐强度下树高大小比数-角尺度二元分布

间伐强度	角尺度	林分空间结构二元分布特征值				
		$U_h=0$	$U_h=0.25$	$U_h=0.50$	$U_h=0.75$	$U_h=1.00$
对照	0	0	0.02	0.02	0.01	0.01
	0.25	0.03	0.02	0.04	0.06	0.05
	0.50	0.08	0.09	0.06	0.08	0.07
	0.75	0.01	0.08	0.03	0.10	0.04
	1.00	0.01	0	0.01	0.05	0.03
弱度间伐	0	0.01	0.02	0.03	0.02	0.02
	0.25	0.05	0.06	0.04	0.05	0.03
	0.50	0.12	0.11	0.07	0.10	0.09
	0.75	0.02	0.06	0.03	0.04	0.04
	1.00	0.01	0	0	0.01	0
中度间伐	0	0.01	0.02	0.01	0.01	0
	0.25	0.02	0.05	0.07	0.06	0.02
	0.50	0.09	0.13	0.15	0.08	0.07
	0.75	0.04	0.09	0.02	0.03	0.02
	1.00	0	0	0.01	0	0
强度间伐	0	0.01	0.01	0.02	0	0
	0.25	0.07	0.07	0.07	0.05	0.05
	0.50	0.17	0.06	0.17	0.09	0.05
	0.75	0.03	0.04	0.03	0.02	0.01

强度间伐状态下,随机分布($W=0.50$)的林木竞争等级变化最为显著,其中树高处于绝对优势($U_h=0$)林木株数占总林木株数的比例由9%上升至17%,树高为优势($U_h=0.25$)的林木比例由13%下降至6%,胸径处于劣势状态($U_g=0.75$)的林木比

例由 9% 上升至 14%, 胸径处于绝对劣势 ($U_g = 1.00$) 的林木比例由 7% 下降至 3%, 林木树高竞争优势明显, 但却不利于林木胸径的生长。

表 7 不同间伐强度下胸径大小比数-角尺度二元分布

间伐强度	角尺度	林分空间结构二元分布特征值				
		$U_g = 0$	$U_g = 0.25$	$U_g = 0.50$	$U_g = 0.75$	$U_g = 1.00$
对照	0	0.01	0.03	0.01	0	0.01
	0.25	0.02	0.02	0.03	0.07	0.06
	0.50	0.06	0.07	0.09	0.11	0.05
	0.75	0.02	0.05	0.06	0.03	0.10
	1.00	0.01	0.04	0	0.01	0.04
弱度间伐	0	0.02	0.03	0.02	0.01	0.02
	0.25	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04
	0.50	0.12	0.09	0.08	0.11	0.09
	0.75	0.05	0.02	0.03	0.04	0.05
	1.00	0.01	0	0.01	0	0
中度间伐	0	0.02	0.01	0.02	0	0
	0.25	0.03	0.05	0.06	0.05	0.02
	0.50	0.11	0.14	0.11	0.09	0.07
	0.75	0.04	0.08	0.04	0.03	0.01
	1.00	0	0	0.01	0	0
强度间伐	0	0	0.03	0	0.01	0
	0.25	0.08	0.06	0.06	0.07	0.04
	0.50	0.11	0.13	0.14	0.14	0.03
	0.75	0.04	0.02	0.04	0.01	0.02
	1.00	0.04	0.02	0.04	0.01	0.02

3.2.4 胸径大小比数-树高大小比数

从表 8 可以看出, 不同间伐强度下树高大小比数与胸径大小比数大多分布在对角线 ($U_h = U_g$) 方向上, 即大多数林木的胸径与树高优势程度相当, 均占林木比例的 50% 以上。随着间伐强度增加, 林木树高与胸径具有相同优势度的比例也随之升高。

表 8 不同间伐强度下树高大小比数-胸径大小比数二元分布

间伐强度	树高大 小比数	林分空间结构二元分布特征值				
		$U_g = 0$	$U_g = 0.25$	$U_g = 0.50$	$U_g = 0.75$	$U_g = 1.00$
对照	0	0.05	0.01	0.02	0.04	0.01
	0.25	0.03	0.09	0.02	0.03	0.04
	0.50	0.02	0.02	0.07	0.03	0.02
	0.75	0.01	0.07	0.05	0.09	0.08
	1.00	0.01	0.02	0.03	0.03	0.11
弱度间伐	0	0.16	0.02	0.02	0.01	0.01
	0.25	0.06	0.11	0.03	0.05	0
	0.50	0.01	0.01	0.08	0.05	0.01
	0.75	0.01	0.03	0.04	0.08	0.06
	1.00	0	0.01	0.02	0.03	0.12
中度间伐	0	0.10	0.03	0.02	0.01	0
	0.25	0.03	0.15	0.07	0.04	0
	0.50	0.05	0.07	0.11	0.03	0
	0.75	0.02	0.02	0.04	0.07	0.02
	1.00	0	0.01	0.01	0.02	0.08
强度间伐	0	0.19	0.05	0.04	0	0
	0.25	0.02	0.11	0.02	0.02	0.01
	0.50	0.01	0.06	0.16	0.06	0
	0.75	0	0.01	0.02	0.12	0.01
	1.00	0	0.01	0	0.03	0.07

由弱到强的间伐等级下, 树高或胸径为优势

(U_g 或 $U_h = 0, 0.25$) 的林木比例分别为 18%、35%、31%、37%。不间伐时, 样地中最常见的为胸径和树高均为劣势的林木, 占总林木株数的 11%; 弱度间伐后, 胸径和树高均处于优势状态的林木相对频率值由对照的 0.05 增加至 0.16。中度间伐后, 树高处于绝对劣势的林木所占比例最低 (12%)。强度间伐后, 树高和胸径均为中庸的林木占总林木株数的比例最大 (16%), 树高处于绝对优势状态的林木中胸径处于绝对优势的林木比例最大, 由中度间伐时的 10% 上升至 19%。

4 结论与讨论

森林结构越合理, 越利于促进生态系统功能向稳定状态发展。通过间伐的方式对人工林进行近自然改造, 调整林分密度, 不仅可改善森林生态环境、促进林分生长, 还能有效的调整林分直径结构向合理的方向变化^[3, 23]。

在本研究中, 间伐时伐去了生长缓慢、有缺陷或过密的杉木和长势差的木荷, 经过 4 种强度的间伐实验处理后, 林分空间结构参数的二元分布表现出不同的变化特征。不间伐的情况下, 林分中最常见的为随机分布且胸径处于劣势状态的林木; 弱度间伐后, 聚集分布的林木中处于中低度混交的林木显著减少, 随机分布的林木中处于中高度混交的林木增加, 中低度混交状态的林木中的劣势木比例显著下降, 均匀分布的林木胸径和树高竞争优势增加; 中度间伐后, 中庸状态的林木大多为均匀分布和随机分布, 随机分布格局的林木中处于高度混交的林木比例较弱度间伐有明显增加, 中低度混交的林木中树高和胸径为中庸状态的林木比例上升显著; 强度间伐后, 木荷跟杉木的比例接近于 1 : 1.5, 林分密度较低, 林木有充足的生长和营养空间, 林木大多数处于中低度混交且优势的状态, 林分中不存在团状分布的林木, 加上中龄杉木后期生长较为缓慢, 而中龄木荷后期生长较快, 中低度混交林木中优势木和劣势木的比例较中度间伐均有不同幅度的上升, 两极分化明显, 不利于林分结构稳定发展。

对照、弱度间伐、中度间伐、强度间伐的样地, 高度混交的林木中, 处于随机分布格局的林木占总林木的比例分别为 9%、17%、24%、12%, 树高处于优势或中庸且随机分布的林木比例分别为 23%、31%、37%、40%, 胸径处于优势或中庸且随机分布的林木比例分别为 22%、29%、36%、37%; 高度混交的林木中树高为优势状态的林木比例分别为 15%、24%、29%、20%, 胸径为优势状态的林木比例分别为 14%、21%、31%、19%; 理想的林分中, 随机分布是最

为理想的分布格局,林分中的中庸木比例高于其他级别,劣势的林木所占比例越低越好,混交度越高越好。综合林分经营目标及林分空间结构参数二元分布的分析,中度间伐最有利于杉木-木荷混交林保持良好的林分结构,与赖阿红等^[8]的研究结果一致。郑鸣鸣等^[24]通过对不同间伐处理后的林分直径偏度、峰度和变化系数进行分析,认为中度间伐后,杉木中大径材的出材率最高。朱玉杰等^[25]选取了林分空间结构、冠层结构、光合作用等方面的35项指标,评价了不同抚育间伐后大兴安岭的森林经营效果,表明间伐强度为20.86%时经营效果最佳。赵衍征^[26]分析了不同抚育间伐强度对大兴安岭天然次生林的林分结构影响,认为35.5%的间伐强度是最优的间伐强度。因此,建议使用中度间伐作为促进杉木-木荷混交林生长和更新的间伐强度。本研究对不同间伐强度下的木荷-萌芽杉木林的林分结构的二元分布特征变化进行了分析,对于林分的土壤理化性质和林分生长量的变化未做深层次的研究,后续的研究可综合这些因子分析影响林分生长的关键因素,为杉木-木荷混交林的经营制定更合理的经营措施提供指导。

参 考 文 献

- [1] 吕忠爽,刘兆刚,董灵波,等.基于综合采伐指数的帽儿山阔叶混交林结构优化模拟[J].东北林业大学学报,2018,46(4): 12-17.
- [2] 李萌,陈永康,徐浩成,等.不同间伐强度对南亚热带杉木人工林林下植物功能群的影响[J].生态学报,2020,40(14): 1-9.
- [3] 黄雪蔓,尤业明,蓝嘉川,等.不同间伐强度对杉木人工林碳储量及其分配的影响[J].生态学报,2016,36(1): 156-163.
- [4] WIENK C L, SIEG C H, MCPHERSON G R. Evaluating the role of cutting treatments, fire and soil seed banks in an experimental framework in ponderosa pine forests of the Black Hills, South Dakota. *Forest Ecology and Management*, 2004, 192(2/3): 375-393.
- [5] BAUL T, ALAM A, STRANDMAN H, et al. Radiative forcing of forest biomass production and use under different thinning regimes and initial age structures of a Norway spruce forest landscape [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2020, 50(6). doi: 10.1139/cjfr-2019-0286.
- [6] DONG L B, WEI H Y, LIU Z G. Optimizing forest spatial structure with neighborhood-based Indices: four case studies from northeast china [J]. *Forests*, 2020, 11(4). doi: 10.3390/f11040413.
- [7] 彭辉,周红敏,惠刚盈.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.
- [8] 赖阿红,巫志龙,周新年,等.杉阔混交林择伐空间结构二元分布特征[J].森林与环境学报,2015,35(4): 337-342.
- [9] 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.
- [10] 陈亚南,杨华,马士友,等.长白山2种针阔混交林空间结构多样性研究[J].北京林业大学学报,2015,37(12): 48-58.
- [11] HUI G Y, POMMERENING A. Analysing tree species and size diversity patterns in multi-species uneven-aged forest of northern China [J]. *Forest Ecology and Management*, 2014, 316: 125-138. doi: 10.1016/j.foreco.2013.07.029.
- [12] 王奕茹,李际平,曹小玉,等.运用空间结构参数二元分布对杉木:阔混交林林分结构分析[J].东北林业大学学报,2020,48(7): 55-59.
- [13] WANG M L, RENNOLLS K, TANG S Z. Bivariate distribution modeling of tree diameters and heights: dependency modeling using copulas [J]. *Forest Science*, 2008, 54(3): 284-293.
- [14] LI Y F, HUI G Y, ZHAO Z H, et al. The bivariate distribution characteristics of spatial structure in natural Korean pine broad-leaved forest [J]. *Journal of Vegetation Science*, 2012, 23(6): 1180-1190.
- [15] 张岗岗,王得祥,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.
- [16] 惠刚盈,克劳斯·冯佳多.森林空间结构量化分析方法[M].北京:中国科学技术出版社,2003.
- [17] PRETZSCH H, BIBER P. Size-symmetric versus size-asymmetric competition and growth partitioning among trees in forest stands along an ecological gradient in central Europe [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2010, 40(2): 370-384. doi: 10.1139/X09-195.
- [18] 姚甲宝,曾平生,袁小平,等.间伐强度对木荷-萌芽杉木中龄混交林生长和林分结构的影响[J].林业科学研究,2017,30(3): 511-517.
- [19] LI Y F, HUI G Y, ZHAO Z H, et al. Spatial structural characteristics of three hardwood species in Korean pine broad-leaved forest: validating the bivariate distribution of structural parameters from the point of tree population [J]. *Forest Ecology and Management*, 2014, 314: 17-25. doi: 10.1016/j.foreco.2013.11.012.
- [20] 曹小玉,李际平,封尧,等.杉木生态公益林林分空间结构分析及评价[J].林业科学,2015,51(7): 37-48.
- [21] 巫志龙,周成军,周新年,等.杉阔混交人工林林分空间结构分析[J].林业科学研究,2013,26(5): 609-615.
- [22] WANG M, RENNOLLS K, TANG S. Bivariate distribution modeling of tree diameters and heights: dependency modeling using copulas [J]. *Forest Science*, 2008, 54(3): 284-293.
- [23] 惠刚盈,李丽,赵中华.林木空间分布格局分析方法[J].生态学报,2007,27(11): 4717-4728.
- [24] 郑鸣鸣,任正标,王友良,等.间伐强度对杉木中龄林生长和结构的影响[J].森林与环境学报,2020,40(4): 369-376.
- [25] 朱玉杰,董希斌.大兴安岭地区落叶松用材林不同抚育间伐强度经营效果评价[J].林业科学,2020,52(12): 29-37.
- [26] 赵衍征.不同抚育间伐强度对大兴安岭天然次生林结构的影响[D].哈尔滨:东北林业大学,2020.