

内蒙古旺业甸华北落叶松人工林空间结构分析及其优化

张苗苗^{1,2}, 罗于洋^{1,2*}, 王树森^{1,2}, 张丽娜^{1,2}, 马成功³, 于胜利³, 王景圆⁴

(1. 内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 内蒙古 呼和浩特 010018; 2. 内蒙古农业大学 荒漠生态系统保护与修复国家林业和草原局重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010018; 3. 内蒙古赤峰市旺业甸实验林场, 内蒙古 赤峰 024423; 4. 乌拉特后旗林业和草原局, 内蒙古 巴彦淖尔 015000)

摘要:以内蒙古赤峰市旺业甸实验林场未采伐的落叶松人工林幼龄林(18 a)、近熟林(34 a)及成熟林(48 a)为对象,分析3种林分空间结构,对结构不理想的林分进行空间结构优化。采用角尺度、大小比数、混交度及竞争指数4个林分空间结构参数,构建空间结构评价指数,对其空间结构进行优化。结果表明,旺业甸落叶松人工林幼龄林呈随机分布,近熟林及成熟林呈均匀分布,靠近随机分布,林木大小分化不明显,林木竞争较大,评价等级均为2级较差。根据评价结果,采用20%采伐强度后,竞争指数明显降低。采伐前后落叶松幼龄林空间结构综合指数由0.247增加为0.308,近熟林由0.312增加为0.406,成熟林由0.265增加为0.319,近熟林评价等级由2级提升为3级。通过对内蒙古赤峰市旺业甸林场的华北落叶松人工林空间结构分析与优化,可以较好地改善当地华北地区华北落叶松人工林林分空间结构,为我国华北落叶松人工林经营提供数据支持。

关键词:华北落叶松;林分空间结构;模拟采伐

中图分类号:S791.22

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2024)01-0081-07

Spatial Structure Analysis and Optimization of *Larix principis-rupprechtii* Plantation in Wangyedian, Inner Mongolia

ZHANG Miao-miao^{1,2}, LUO Yu-yang^{1,2*}, WANG Shu-sen^{1,2}, ZHANG Li-na^{1,2}, MA Cheng-gong³,
YU Sheng-li³, WANG Jing-yuan⁴

(1. College of Desert Control Science and Technology, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, Inner Mongolia, China; 2. Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Protection and Recovery of Desert Ecosystem, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, Inner Mongolia, China; 3. Wangyedian Experimental Forest Farm, Chifeng, Inner Mongolia 024423, China; 4. Urad Rear Banner Forestry and Grassland Bureau, Bayannur 015000, Inner Mongolia, China)

Abstract: Taking the young (18 a), near mature (34 a) and mature (48 a) plantations of *Larix principis-rupprechtii* in Wangyedian Experimental Forest Farm, Chifeng City, Inner Mongolia, as the research objects, the stand spatial structure of three stands were analyzed. The spatial structure optimization was conducted for the unsatisfactory structures. Four parameters of the stand spatial structure were adopted to establish evaluation system, and to conduct the optimization of the stand spatial structure, including uniform angle index, dominance, mingling and competition index. The young stand was distributed randomly, while the near mature and mature stands were evenly distributed, close to the random distribution. The size differentiation of the trees was not obvious, with a large competition in the stands. The evaluation levels of all the stands studied were worse. According to the evaluation results, after using 20% of the cutting intensity, the competition index was significantly reduced. The comprehensive index of the space structure of the mature stand before and after harvesting increased from 0.247 to 0.308, the near-mature stand increased

收稿日期:2022-12-07 修回日期:2023-02-23

基金项目:内蒙古自治区应用技术研发项目(2019GG004);内蒙古自治区科技兴蒙行动重点专项(2022EEDSKJXM003)。

第一作者:张苗苗。研究方向:森林可持续经营。E-mail:17647467723@163.com

*通信作者:罗于洋,副教授,博士。研究方向:沙生植物资源保护与利用。E-mail:luo680715@163.com

from 0.312 to 0.406, the mature stand increased from 0.265 to 0.319, and the near-mature stand increased from level 2 to 3. Through the analysis and optimization of the spatial structure of larch plantation in Wangyedian Forest Farm, the spatial structure of larch plantation in Northern China can be better improved, data support can be provided for the management of *L. principis-rupprechtii* plantation in Northern China.

Key words: *Larix principis-rupprechtii*; stand spatial structure; simulated cutting

森林群落被认为是相互作用的林木个体网络系统^[1]。林分结构对森林的整个生态系统服务功能产生着影响,关于林分结构的研究对后期森林经营及优化起到了关键作用^[2]。林分结构主要包括林分非空间结构及空间结构,非空间结构包括树种组成、年龄分布、直径分布、树高分布、生长量以及树种多样性等,空间结构是指林木在空间上的分布格局^[3],惠刚盈等^[4-6]通过建立角尺度、大小比数及混交度 3 个参数对林分的空间结构进行描述。

在对林分进行合理的经营前,需要了解其整体生长状况。很多学者利用空间结构参数对林分的状态进行描述以及林分空间结构评价指标构建研究^[7],以空间结构优化为目标确定采伐木,从而实现对林分空间结构的调整。孙宇等^[8]对东升林场落叶松人工林进行研究,基于加权三角网计算了角尺度、大小比数、混交度、竞争指数、密集度、开敞度 6 个林分空间结构参数,构建了林分空间结构评价方法。吕忠爽等^[9]、盛琪等^[10]对帽儿山林场阔叶林进行研究,结合乘除法思想的基础上进行了林分空间结构评价指数的构建。曹小玉等^[11]对福寿林场杉木生态公益林进行了研究,对空间结构评价指数进行归一化处理,采用定性与定量相结合的方法将林分空间结构评价指数划分为 5 个等级,客观地反映林分空间结构的实际情况。赵晨昊等^[12]对金盆山林场天然阔叶混交林空间结构进行优化和采伐模拟,综合评价结果表明,相较于仅对被压木及枯死木等劣质林木个体进行采伐能够更好地发挥森林多种功能。

旺业甸实验林场林木种类多,占地面积广,张涛^[13]、刘兆华等^[14]、赵波^[15]、王春霞^[16]对该地森林生物量、碳储量、蓄积量、土壤持水及多样性等方面做了大量研究。华北落叶松人工林由于近些年管理不当,部分林木生长状况差,林木之间竞争较大,且目前尚未见有人对该地的林分空间结构进行研究。因此整体掌握该地华北落叶松人工林林分空间结构以及科学合理地判断保留木与采伐木对后期加强人工林经营管理和林分健康稳定的发展具有重要意义。基于此,本研究以旺业甸实验林场的落叶松人工林为对象,计算角尺度、大小比数、混交度及竞争指数 4 个参数,通过乘除法思想构建空间结构评价指数并划分等级,对落叶松人工林空间结构进行客

观评价,并通过空间结构评价指数选取采伐木,对该地落叶松人工林进行空间结构优化的模拟,以期对旺业甸后期落叶松人工林结构优化调整提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

旺业甸实验林场位于赤峰市喀喇沁旗西南部(118°09'—118°30'E, 41°21'—41°39'N)。地形起伏不平,地貌主要为中山和低山山地,地势西南较高、东北较低,平均海拔 800~1 890 m。该地区为大陆性季风气候,雨量较充沛,降雨主要在 7—8 月,年平均降水量 300~500 mm,年平均气温 4.2℃,年有效积温 2 000~3 000℃,主导风向为西北风。该地土壤类型呈多样化特点,棕壤为主,植物种类丰富。林场土地总面积 24 668.2 hm²,有林地面积为 22 397.1 hm²。主要树种有华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)、白桦(*Betula platyphylloides*)、山杨(*Populus davidiana*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)。除天然生长的落叶松林,分别于 1974、1988 年及 2004 年栽植了落叶松人工林。落叶松林面积共 4 835.4 hm²,占有林地面积的 21.60%。

1.2 研究方法

2021 年 8 月对旺业甸林场自 2013 年起长期监测的落叶松人工林固定样地进行踏查,样地的选取包括华北落叶松幼龄林、近熟林和成熟林,每种样地类型 3 个重复,设置半径为 13.82 m 的圆形样地,样地大小均为 600 m²,对样地中所有林木进行挂牌编号。对样地内所有林木进行每木调查,内容包括树种、位置、胸径,并记录林分海拔、坡度、坡向等基本信息(表 1)。

1.3 指标计算

对林分空间结构的分析采用角尺度、混交度以及大小比数 3 个空间结构参数,具体计算方法详见文献^[17]。以林内任意林木个体与其 4 株最近相邻木所构成的林分空间结构单元为基础,通过角尺度、大小比数、混交度及竞争指数 4 个空间结构参数进行分析并构建空间结构优化模型。角尺度可表达林木空间分布格局,大小比数可反映林木大小分化程

度,混交度可表示林木树种空间隔离程度,竞争指数可表达林木之间的竞争强度。

利用乘除法思想构建空间结构优化模型

$$Q(x)=\frac{f(x_1)f(x_2)\cdots f(x_k)}{f(x_{k+1})f(x_{k+2})\cdots f(x_m)} \tag{1}$$

式中: $Q(x)$ 为目标函数; $f(x)$ 表示各指标目标值;分子上各指标要求实现目标最大值,分母上各指标要求实现目标最小值。

根据乘除法基本思想,材积取大为优,角尺度、大小比数及竞争指数取小为优,但在计算空间结构评价指数时,角尺度的所有数据同时减去 0.5,因为角尺度最优值是接近 0.5 的随机分布。因样地为人
工林,存在混交度为 0 的情况,为防止混交度取值为 0 导致整体取值为 0,综合材积、角尺度、大小比数及竞争指数 4 个子目标构建评价指数。

表 1 样地基本情况

Table 1 Basic situations of sample plots

样地类型	样地 编号	海拔/ m	经纬度	密度/ (株·hm ⁻²)	郁闭度	平均 胸径/cm	平均 树高/m	坡向	坡位	坡度/ (°)	林龄/ a
幼龄林	LY1	1 050	41°38′50″N,118°19′59″E	2 700	0.68	10.81	13.18	北	下	20	18
	LY2	1 074	41°38′48″N,118°19′53″E	2 583	0.62	9.16	13.52	北	中	13	18
	LY3	1 070	41°38′54″N,118°21′4″E	2 533	0.64	8.82	12.71	北	中	14	18
近熟林	LJ1	1 110	41°38′47″N,118°19′27″E	2 150	0.76	12.45	13.42	北	下	22	34
	LJ2	1 110	41°38′48″N,118°19′10″E	2 583	0.77	11.31	14.51	北	下	22	34
	LJ3	1 140	41°38′44″N,118°18′28″E	2 133	0.70	11.58	14.33	东	下	22	34
成熟林	LC1	1 400	41°43′40″N,118°12′48″E	1 533	0.84	17.41	14.16	西	中	23	48
	LC2	1 330	41°43′35″N,118°13′6″E	1 117	0.82	18.11	14.14	西	下	14	48
	LC3	1 340	41°43′33″N,118°13′34″E	1 000	0.72	18.70	14.61	西	下	14	48

2 结果与分析

在数据调查的基础上,利用 Winkelmass 1.0 处理数据,SigmaPlot 14.0 及 Origin 2018 绘图,为避免边缘效应,计算时设定 2 m 缓冲区^[19-20],缓冲区内的林木只作为相邻木处理,不参与空间结构参数的计算。

2.1 林分空间结构

通过对不同林龄的落叶松人工林林木角尺度(W)、大小比数(U)及混交度(M)的计算,得到不同取值(0.00、0.25、0.50、0.75、1.00)等级的相对频率。林木角尺度最适分布范围为[0.475,0.517],由表 2 可知,落叶松幼龄林、近熟林及成熟林的角尺度平均值分别为 0.498 8、0.461 9、0.469 0,即落叶松幼龄林为随机分布,林分分布状态较好,近熟林及成熟林则靠近随机分布,呈轻微均匀分布。各样地中,随机分布占比最多,均>50%,均匀分布次之。角尺度整体分布频率呈现中间高两边低的近似正态分布趋势。由表 3 可知,落叶松幼龄林、近熟林及成熟林大小比数各取值等级频率变化均较小,取值多数分布

$$Q_g=\frac{(1+V_g)}{\sigma_v \times (1+W_g) \times \sigma_w \times (1+U_g) \times \sigma_u \times (1+U_{Clg}) \times \sigma_{UCI}} \tag{2}$$

式中: Q_g 、 V_g 、 W_g 、 U_g 、 U_{Clg} 分别为单木综合择伐指数、材积、角尺度、大小比数及竞争指数, σ_v 、 σ_w 、 σ_u 、 σ_{UCI} 分别为材积、角尺度、大小比数及竞争指数的标准差。

为将各林分的空间结构评价指数值进行统一分析比较,通过归一化处理,利用等量变换将值的范围归纳到[0,1]区间内。

$$Q_i''=\frac{Q_i-Q_{\min}}{Q_{\max}-Q_{\min}}$$

式中: Q_i 、 Q_i'' 分别表示林分空间结构评价指数归一前后的值; Q_{\min} 、 Q_{\max} 分别表示样本数据中的最小值和最大值。

在 20% 左右。大小比数均值分别为 0.504 3、0.480 4、0.499 3,取值在 0.5 左右小范围波动,表明各样地不同优势程度的树木数量较接近,各林分生长处于中庸状态。幼龄林、近熟林及成熟林各样地混交度取值集中在 0,取值等级为 0 的占比分别达 100%、85.6%及 94.7%,混交度均值分别为 0、0.080、0.026,混交程度低,整体呈现零度混交及弱混交的状态。由表 4 可知,落叶松幼龄林、近熟林及成熟林的竞争指数平均值分别为 4.671 5、3.663 5、1.822 4,随着林龄的增加,各样地竞争指数逐渐降低,其原因是幼龄林时期,林木株数最多,林内竞争较大。

2.2 林分空间结构评价

根据空间结构优化目标函数的构建过程可知,空间结构综合指数取值越小,空间结构分布越差。综合陆元昌^[21]、曹小玉等^[11]研究结果,可将空间结构综合指数划分为 5 个等级,取值为[0,0.2]、(0.2,0.4]、(0.4,0.6]、(0.6,0.8]、(0.8,1],评价等级对应为 1、2、3、4、5,分别代表空间结构差、较差、一般、较好、非常好。落叶松幼龄林空间结构综合指数分

表 2 角尺度分布频率及平均值
Table 2 Distribution frequency and mean of uniform angle index

林龄/a	样地编号	角尺度	角尺度分布频率				
			0	0.25	0.5	0.75	1
17	LY1	0.468 8	0.03	0.25	0.55	0.18	0.00
	LY2	0.516 5	0.00	0.00	0.97	0.00	0.03
	LY3	0.511 3	0.00	0.19	0.59	0.20	0.02
	平均值	0.498 8	0.01	0.14	0.70	0.12	0.02
33	LJ1	0.457 0	0.03	0.27	0.59	0.09	0.03
	LJ2	0.452 8	0.00	0.32	0.56	0.10	0.02
	LJ3	0.476 0	0.00	0.27	0.58	0.14	0.02
	平均值	0.461 9	0.01	0.29	0.57	0.11	0.02
47	LC1	0.500 0	0.00	0.16	0.68	0.16	0.00
	LC2	0.448 8	0.06	0.32	0.41	0.22	0.00
	LC3	0.458 3	0.04	0.31	0.42	0.23	0.00
	平均值	0.469 0	0.03	0.26	0.50	0.20	0.00

表 3 大小比数分布频率及平均值
Table 3 Distribution frequency and mean of dominance

林龄/a	样地编号	大小比数	大小比数分布频率				
			0	0.25	0.5	0.75	1
17	LY1	0.506 8	0.17	0.23	0.21	0.19	0.20
	LY2	0.500 5	0.23	0.18	0.20	0.15	0.25
	LY3	0.505 8	0.18	0.23	0.18	0.22	0.20
	平均值	0.504 3	0.19	0.21	0.19	0.19	0.21
33	LJ1	0.504 8	0.17	0.21	0.24	0.17	0.20
	LJ2	0.476 5	0.23	0.19	0.21	0.19	0.18
	LJ3	0.460 0	0.28	0.16	0.16	0.24	0.16
	平均值	0.480 4	0.23	0.19	0.20	0.20	0.18
47	LC1	0.499 8	0.19	0.24	0.16	0.21	0.20
	LC2	0.513 5	0.20	0.20	0.15	0.22	0.22
	LC3	0.484 5	0.25	0.15	0.21	0.21	0.19
	平均值	0.499 3	0.21	0.20	0.17	0.21	0.20

表 4 竞争指数分布频率及平均值
Table 4 Distribution frequency and mean of competition index

林龄/a	样地编号	竞争指数	竞争指数分布频率				
			(0,0.2]	(0.2,0.8]	(0.8,1.4]	(1.4,2.0]	(2.0,+∞]
17	LY1	4.207 8	0.00	0.01	0.04	0.20	0.75
	LY2	3.361 0	0.00	0.02	0.11	0.23	0.64
	LY3	6.445 8	0.00	0.00	0.02	0.06	0.91
	平均值	4.671 5	0.00	0.01	0.06	0.17	0.77
33	LJ1	4.028 6	0.00	0.01	0.11	0.17	0.71
	LJ2	3.567 2	0.00	0.00	0.06	0.17	0.77
	LJ3	3.394 7	0.00	0.03	0.11	0.21	0.65
	平均值	3.663 5	0.00	0.01	0.09	0.18	0.71
47	LC1	2.407 0	0.00	0.00	0.24	0.23	0.53
	LC2	1.500 1	0.00	0.01	0.42	0.45	0.12
	LC3	1.560 1	0.00	0.03	0.48	0.33	0.15
	平均值	1.822 4	0.00	0.02	0.38	0.34	0.27

别为 0.247、0.178、0.234，平均空间结构综合指数约为 0.220，近熟林空间结构综合指数分别为 0.321、0.271、0.311，平均空间结构综合指数约为 0.301，成熟林空间结构综合指数分别为 0.265、0.296、0.240，平均空间结构综合指数约为 0.267，各林分类型平均空间结构综合指数评价等级均为

2. 说明该地落叶松林空间结构距离理想状态还有差距,需要进行空间结构的优化。

2.3 林分空间结构优化

2.3.1 间伐木及株数确定 根据林分空间结构优化的原则,通过调整角尺度取值的分布范围,调整林木整体分布状态,将均匀分布及聚集分布向随机分布的状态调整,通过降低大小比数及竞争指数,调控林木生长状态,增加林木生长空间。由各林分空间结构综合指数及评价等级结果可知,该地不同林龄的落叶松人工林样地空间结构均有调整优化的空间,因此对幼龄林、近熟林及成熟林各选取 1 块样地,对 LY1、LJ1 及 LC1 3 个样地进行林分空间结构的优化。幼龄林平均胸径为 11 cm,样地内的理论株数为 130 株,近熟林平均胸径为 12 cm,样地内的理论株数为 118 株,成熟林平均胸径为 17 cm,样地内的理论株数为 78 株。结合华北落叶松经营密度表^[22],优先选取各样地空间结构综合指数的较小值,从中选取角尺度、大小比数及竞争指数较大的林木进行采伐,每采伐 1 株林木,重新计算各空间结构

参数,若得到优化则确定该林木为择伐备选木,重复上述步骤,得到所有备选木,控制采伐量不超过总株数的 20%^[23]。部分代表性间伐木信息及原因见表 5,采伐木点位分布见图 1。

2.3.2 间伐前后空间结构变化 由图 2~图 5 可见,将各样地备选木进行采伐后,角尺度变化均不大,林内各林木结构单元多数呈随机分布。幼龄林及成熟林样地大小比数采伐前后取值变化不大,近熟林大小比数采伐前后由 0.506 8 降低为 0.485 8,林木大小整体呈中庸状态。竞争指数均发生较大变化,幼龄林竞争指数采伐前后由 4.207 8 降低为 2.423 5,近熟林竞争指数采伐前后由 4.028 6 降低为 2.890 6,成熟林竞争指数采伐前后由 2.407 0 降低为 2.104 6。落叶松幼龄林空间结构综合指数采伐前后由 0.247 增加为 0.308,近熟林空间结构综合指数采伐前后由 0.312 增加为 0.406,成熟林空间结构综合指数采伐前后由 0.265 增加为 0.319,近熟林评价等级由 2 级提升为 3 级,各样地整体空间结构较采伐前得到了优化。

表 5 采伐木信息及采伐原因

Table 5 Thinning tree information

样地编号	树号	胸径/cm	角尺度	大小比数	竞争指数	材积/m ³	空间结构评价指数	采伐原因
LY1	26	5.75	0.25	1	7.488 8	0.008 4	0.083 2	1
	48	8	0.75	1	3.775 7	0.019 3	0.157 4	1
	52	8.8	0.5	1	9.080 3	0.024 6	0.089 7	1
	54	6.2	0.5	1	8.876 5	0.010 1	0.090 3	1,2
	58	10.2	0.75	0.25	3.912 6	0.035 8	0.254 6	3
	64	11	0.25	0.5	2.735 9	0.043 3	0.282 0	2
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	162	5.7	0.25	0.75	1.667 2	0.008 2	0.328 8	4
LJ1	12	6.5	0.5	1	6.086 9	0.011 4	0.061 1	1,4
	38	6.6	0.25	1	4.641 6	0.011 9	0.139 2	1
	62	8.1	0.5	1	4.616 3	0.020 0	0.092 6	1
	68	8.8	0.5	1	2.863 1	0.024 6	0.160 3	1
	72	7.3	0.25	0.75	8.065 0	0.015 3	0.083 8	1,4
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	124	9.5	0.5	0.75	16.515 0	0.029 9	0.000 0	1,4
LC1	6	5.7	0.5	1	5.685 8	0.008 2	0.025 6	1
	19	11.3	0.5	1	3.168 0	0.046 4	0.083 3	1
	28	9.4	0.75	1	3.742 4	0.029 1	0.038 7	1
	45	11.3	0.25	1	3.060 3	0.046 4	0.136 5	1
	46	13.8	0.25	1	3.514 5	0.076 9	0.121 8	1
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	89	11.8	0.75	0.75	2.271 7	0.051 7	0.107 9	1

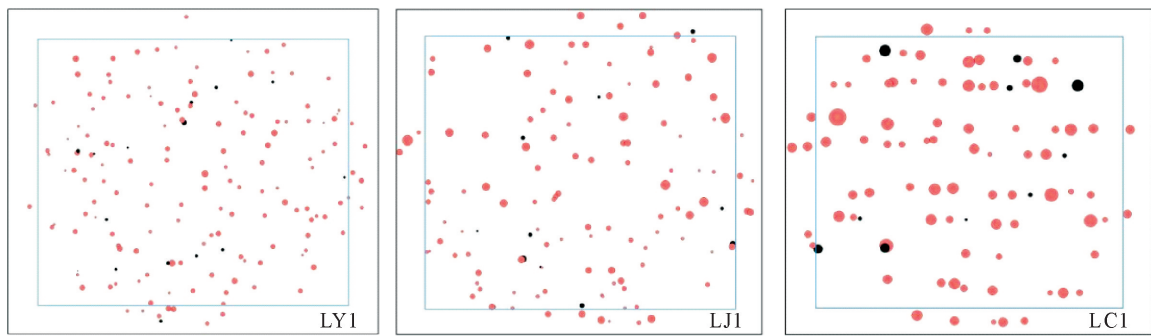
注:采伐原因中,1 为评价指数低,2 为受到相邻木挤压,3 为林木分布不均匀,4 为与相邻木距离过近,竞争压力过大。

3 讨论

3.1 华北落叶松人工林空间结构特征

林分空间结构的研究对于整体把握林分状态以及对其作出调整具有重要意义,林分空间结构的描述主要是通过对角尺度、大小比数、混交度及竞争指

数的计算^[24]。角尺度的计算结果体现了森林空间内部林木的分布格局,主要包括均匀分布、随机分布以及聚集分布 3 种情况,结构稳定的森林群落一般趋近于随机分布。本研究选取的样地为落叶松人工林,人工林林层结构简单^[25],受人为因素影响,初始结构大多数趋近于均匀分布。随着林龄的增加,林



图中红色圆点代表保留木,黑色圆点代表采伐木,圆点的大小表示胸径的大小。

图1 采伐木点位分布

Fig. 1 Distribution of cutting wood points

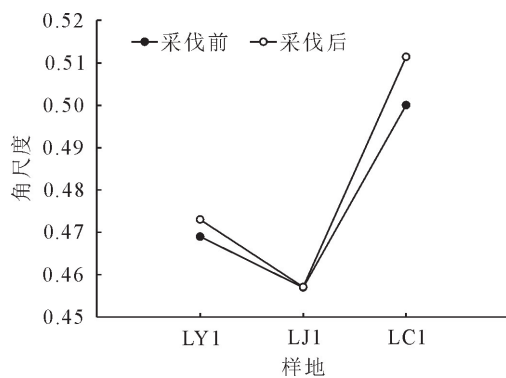


图2 采伐前后角尺度

Fig. 2 Uniform angle index before and after cutting

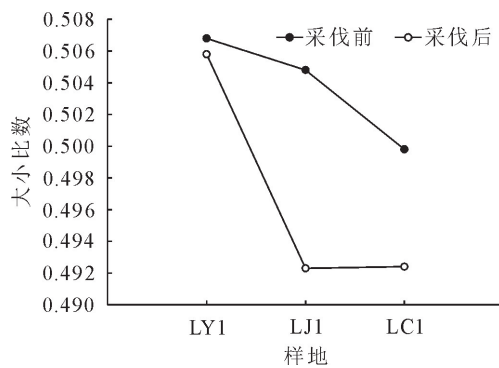


图3 采伐前后大小比数

Fig. 3 Dominance before and after cutting

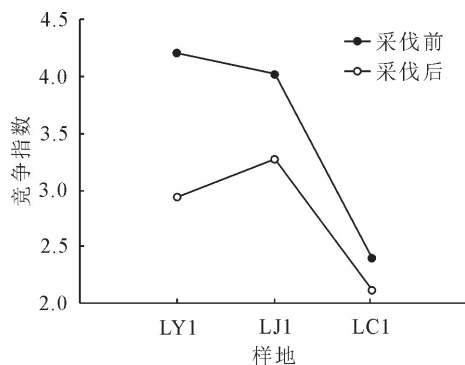


图4 采伐前后竞争指数

Fig. 4 Competition index before and after cutting

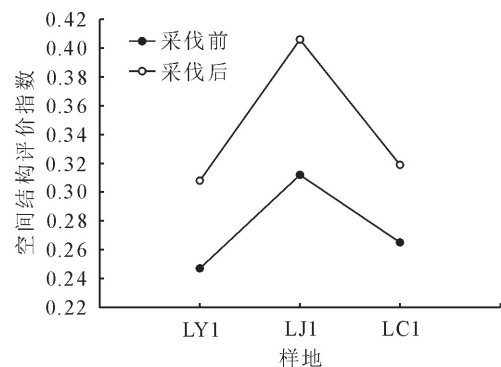


图5 采伐前后空间结构评价指数

Fig. 5 Spatial structure evaluation index before and after cutting

内结构逐渐由均匀分布转变为随机分布,幼龄林、近熟林及成熟林林分中林木单株的胸径大小的分化程度差距不大,较为均衡,均处于中庸状态。种内竞争激烈,但随着林龄的增加,竞争逐渐降低。因样地为人工林,初始林分处于零度混交状态,随着林龄的增加,林分内生长出少量其他树种,但数量较少,近熟林、成熟林也仅处于弱度混交状态。因此,后期需要人为引进其他树种增大林分混交程度,使其形成健康稳定的森林群落。

3.2 林分空间结构模拟优化

随着林木的生长,林木间产生竞争,空间结构不足等问题导致部分林木死亡,需要通过间伐的手段达到林分空间结构优化的目的。该林场内落叶松人工林空间结构现状与理想状态仍存在差距,存在着结构问题,林木分布多数趋近于随机分布,调控空间小,但林木生长空间不足,竞争的压力相对较大,导致落叶松林的空间结构评价指数较低,这些问题主要是由于部分区域栽植时林分密度大及后期经营不当所造成的。在森林经营过程中,处于聚集分布且大小比数较大的林木可优先伐除。通过对落叶松幼龄林、近熟林及成熟林进行采伐,伐除各样地中比较聚集的林木、大小比数分布不合理以及处于被挤压

或严重被挤压生长状态的林木。根据采伐后结果可知,除角尺度变化不明显,各样地大小比数及竞争指数均有了较大的改变,林分内各空间结构参数均向着较好的方向发展,林分空间结构有所改善,研究结果与已有的研究结果相一致。陈昌雄等^[26]利用空间结构参数选择采伐木,制定以角尺度作为主要调整目标的林分空间结构优化方案,基于林分空间结构格局的采伐使得林分整体质量得到了提高。如林富成等^[25]通过选用角尺度、大小比数等4个参数构建空间结构评价指数,结合经营密度确定采伐强度及采伐木,间伐后有效改善了林分空间结构^[11]。综合以上分析,本研究中旺业甸林场不同林龄的落叶松人工林整体生长状况一般,生长已经达到稳定状态的成熟林混交程度仍较差。因此,在充分掌握林分空间结构的前提下,后期经营过程中应当提高林木混交程度,栽植其他树种,并结合空间结构优化指数,以空间分布格局为基础,通过合理调整林分中竞争木与劣质木的方式来降低林木间竞争,调整林分空间结构,提高林分稳定性。

4 结论

旺业甸落叶松人工林林分空间结构较为简单,林分内有1/2以上林木处于随机分布状态,大小分化不明显,树种组成单一,部分林木竞争较大。通过空间结构参数能够体现林木的水平分布、生长空间及竞争程度,林木空间分布的状态并不能够成为决定林木生长优劣的关键影响因素。

通过对内蒙古赤峰市旺业甸林场的华北落叶松人工林空间结构分析与优化,能够整体把握林分空间结构现状并进行优化调整,结合林分生长状况进行模拟采伐,采伐后可以较好地改善当地华北地区华北落叶松人工林林分空间结构,研究结果可为我国华北落叶松人工林经营提供数据支持。

参考文献:

- [1] 张岗岗,刘伟霞,王洋,等.黄河故道刺槐人工林空间和大小结构特征[J].林业科学研究,2022,35(3):185-192.
ZHANG G G, LIU W X, WANG Y, *et al.* Space and size structure characteristics of *Robinia pseudoacacia* plantations in the ancient Yellow River course[J]. Forest Research, 2022, 35(3): 185-192. (in Chinese)
- [2] 汤孟平.森林空间结构研究现状与发展趋势[J].林业科学, 2010, 46(1): 117-122.
TANG M P. Advances in study of forest spatial structure[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2010, 46(1): 117-122.
- [3] 刘菊卉.林分直径分布及空间结构研究[D].南京:南京林业大学, 2016.
- [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.
- [5] 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): 1-6.
- [6] 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.
- [7] 尹惠妍, 张志伟, 苏卫静, 等.八一镇湿地公园林分空间结构分析[J].西北林学院学报, 2019, 34(3): 149-153, 179.
YIN H Y, ZHANG Z W, SU W J, *et al.* Spatial structure of stands of Bayi Township wetland park[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019, 34(3): 149-153, 179. (in Chinese)
- [8] 孙宇, 刘盛, 王诗俊, 等.依据加权 Delaunays 三角网的林分空间结构分析与评价[J].东北林业大学学报, 2022, 50(8): 61-68.
SUN Y, LIU S, WANG S J, *et al.* Analysis and evaluation of forest spatial structure using weighted delaunays triangle network[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2022, 50(8): 61-68. (in Chinese)
- [9] 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, 22.
LÜ Z S, LIU Z G, DONG L B, *et al.* Simulation of mixed forest structure optimization with comprehensive cutting index in Maoer Mountain[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2018, 46(4): 12-17, 22. (in Chinese)
- [10] 盛琪, 董灵波, 刘兆刚.结合大斑啄木鸟生境适宜性的林分空间结构优化[J].北京林业大学学报, 2021, 43(5): 24-32.
SHENG Q, DONG L B, LIU Z G. Stand spatial structure optimization combined with habitat suitability of great spotted woodpecker[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(5): 24-32. (in Chinese)
- [11] 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.
CAO X Y, LI J P, FENG Y, *et al.* Analysis and evaluation of the stand spatial structure of *Cunninghamia lanceolata* ecological forest[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2015, 51(7): 37-48. (in Chinese)
- [12] 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].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 Science, 2022, 42(5): 126-133. (in Chinese)
- [13] 张涛.近自然经营对旺业甸林场森林生物量与碳储量影响的研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学, 2018: 1-57.
- [14] 刘兆华, 林辉, 龙江平, 等.基于高分二号的旺业甸林场蓄积量估测模型研究[J].中南林业科技大学学报, 2020, 40(3): 79-84, 118.
LIU Z H, LIN H, LONG J P, *et al.* Study on volume estimation model of Wangyedian forest farm based on GF-2[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2020, 40(3): 79-84, 118. (in Chinese)
- [15] 赵波.近自然经营对旺业甸林场森林持水能力的影响研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学, 2017: 1-47.

- [11] DUPLESSIS S, CUOMO C A, LIN Y C, *et al.* Obligate biotrophy features unraveled by the genomic analysis of rust fungi [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(22): 9166-9171.
- [12] CHEN H, ZOU Y, SHANG Y, *et al.* Firefly luciferase complementation imaging assay for protein-protein interactions in plants [J]. *Plant Physiology*, 2008, 146(2): 368-376.
- [13] 付凌玲, 赵啸宇, 徐进. Mcm10 在真核细胞复制起始中的作用 [J]. *中国细胞生物学学报*, 2018, 40(5): 788-794.
- FU L L, ZHAO X Y, XU J. The role of Mcm10 in eukaryote replication origin [J]. *Chinese Journal of Cell Biology*, 2018, 40(5): 788-794. (in Chinese)
- [14] FORSBURG S L, SHERMAN D A, OTTILIE S, *et al.* Mutational analysis of Cdc19p, a *Schizosaccharomyces pombe* MCM protein [J]. *Genetics*, 1997, 147(3): 1025-1041.
- [15] YAN H, MERCHANT A M, TYE B K. Cell cycle-regulated nuclear localization of MCM2 and MCM3, which are required for the initiation of DNA synthesis at chromosomal replication origins in yeast [J]. *Genes & Development*, 1993, 7(11): 2149-2160.
- [16] NGUYEN V Q, CO C, IRIE K, *et al.* Clb/Cdc28 kinases promote nuclear export of the replication initiator proteins Mcm2-7 [J]. *Current Biology*, 2000, 10(4): 195-205.

(上接第 87 页)

- [16] 王春霞. 近自然经营对旺业甸森林灌草植物多样性影响的研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2017: 1-44.
- [17] 惠刚盈, 赵中华, 胡艳波. 结构化森林经营技术指南 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2010.
- [18] 朱俐娜, 彭祚登. 基于 Voronoi 图的北京公园常见林分空间结构分析 [J]. *西北林学院学报*, 2015, 30(5): 176-180.
- ZHU L N, PENG Z D. Common stand spatial structure in Beijing parks based on voronoi diagram method [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2015, 30(5): 176-180. (in Chinese)
- [19] 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)
- [20] 董莉莉, 刘红民, 汪成成, 等. 采伐对蒙古栎次生林林分生长和林分结构的影响 [J]. *林业资源管理*, 2021(2): 83-91.
- DONG L L, LIU H M, WANG C C, *et al.* Effects of the cutting intensity on stand growth and structure for *Quercus mongolica* secondary forests [J]. *Forest Resources Management*, 2021(2): 83-91. (in Chinese)
- [21] 陆元昌. 近自然森林经营的理论与实践 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [22] 王绪芳, 井赵斌, 程积民, 等. 华北落叶松人工林生长的合理经营密度探讨 [J]. *贵州农业科学*, 2013, 41(10): 168-171.
- WANG X F, JING Z B, CHENG J M, *et al.* Study on reasonable management density of *Larix principis-rupprechtii* artificial forest [J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2013, 41(10): 168-171. (in Chinese)
- [23] 许晓东, 刘丽婷, 邓海燕, 等. 桉树人工林抚育间伐调控技术研究 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2019, 39(4): 52-58.
- XU X D, LIU L T, DENG H Y, *et al.* Study on control technology for thinning of *Eucalyptus* plantation [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2019, 39(4): 52-58. (in Chinese)
- [24] 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 northwestern China [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2019, 41(4): 21-31. (in Chinese)
- [25] 林富成, 王维芳, 门秀莉, 等. 兴安落叶松人工林空间结构优化 [J]. *北京林业大学学报*, 2021, 43(4): 68-76.
- LING F C, WANG W F, MEN X L, *et al.* Spatial structure optimal of *Larix gmelinii* plantation [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2021, 43(4): 68-76. (in Chinese)
- [26] 陈昌雄, 刘健, 余坤勇, 等. 基于空间结构优化的马尾松阔叶树混交林模拟采伐 [J]. *西南林学院学报*, 2010, 30(6): 29-32, 37.
- CHENG C X, LIU J, YU K Y, *et al.* Simulated cutting for the mixed forest of *Pinus massoniana* and broad-leaved tree species based on optimized spatial structure [J]. *Journal of Southwest Forestry*, 2010, 30(6): 29-32, 37. (in Chinese)