

抚育间伐对小兴安岭天然次生林中云杉、冷杉的碳密度分配与竞争的影响

王子纯,李耀翔*,孟永斌,王 晨

(东北林业大学,黑龙江 哈尔滨 150040)

摘 要:间伐改变林分环境,也对林木生长、森林碳储量及林木竞争关系造成一定影响,研究 15%、25%、35% 3 个间伐强度处理 8 a 后小兴安岭天然次生林中云杉、冷杉的径阶分布、碳密度分配特征及竞争指数,对森林经营的指导和森林碳汇发展有重要意义。结果表明,35%抚育间伐强度均使云杉、冷杉径阶分布频率偏离正态性;间伐改变了林木各器官碳密度的分配,其趋势是随着间伐强度的增大树干碳密度占总量的比例先减小再增加,而树枝生物量分配规律则呈逐渐减小的趋势;25%和 35%间伐强度,云杉、冷杉地上部分的生物量和碳密度均显著大于对照样地,其中 25%间伐强度时生物量和碳密度最大,而 15%间伐强度的云杉、冷杉生物量与对照样地无显著差异,而碳密度却小于对照样地;同 CK 相比, T_{15} 样地云杉、冷杉的 Hegyi 竞争指数减少了 2.05%,而 T_{25} 、 T_{35} 分别增加了 36.07%和 14.66%;冗余分析(RDA)结果表明,Hegyi 竞争指数、间伐强度共同解释了碳密度变化的 61.3%,且 Hegyi 竞争指数增长不利于林分碳密度增加,竞争压力通过改变各器官的碳密度来响应。

关键词:间伐强度;天然次生林;径阶分布;碳密度;竞争指数

中图分类号:S791.27

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2022)01-0010-07

Effects of Nurturing Intercalation on Carbon density Allocation and Competition between Spruce and Fir in natural Secondary Forests in the Xiaoxingan Mountains

WANG Zi-chun, LI Yao-xiang*, MENG Yong-bin, WANG Chen

(Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

Abstract: The forest management of thinning can change the forest stand environment, it exhibits a certain impact on tree growth, forest carbon storage, and forest competition. In this study, the diameter rank distribution, carbon distribution, and competition index of the spruce and fir stands occurring in the natural secondary forests in the Xiaoxingan Mountains, which were thinned with the densities of 15% (T_{15}), 25% (T_{25}), and 35% (T_{35}) were investigated after 8 years of thinning management. The results showed that the T_{35} intensity made the distribution frequency of spruce and fir diameter steps deviated from normality; thinning management changed the distribution of the carbon density of the various organs of the tree, and the proportion of the trunk carbon density to the total increased first and then decreased with the increase of thinning intensity, while the proportion of the branch biomass gradually decreased. The biomass and carbon density of the above-ground part with the densities of the T_{25} and T_{35} were significantly higher than those of the control plot, and the T_{25} was found the highest biomass and carbon density; no significant differences in biomass were observed between the T_{15} and the control, while the carbon density of the T_{15} was less than the control. Compared with the control, the Hegyi competition index of the T_{15} decreased by

收稿日期:2021-01-25 修回日期:2021-03-28

基金项目:黑龙江省应用技术与开发计划项目(GA19C006)。

第一作者:王子纯。研究方向:森林工程。E-mail:123555405@qq.com

* 通信作者:李耀翔,博士,教授。研究方向:森林工程。E-mail:yaoxiangli@nefu.edu.cn

2.05%, while those of the T_{25} and T_{35} increased by 36.07% and 14.66%, respectively. Redundant analysis indicated that the Hegyi competition index and thinning intensity jointly explained 61.3% of the carbon density change, and the increase of the Hegyi competition index was not conducive to the forest carbon density, the competitive pressure responded by changing the carbon density of each organ.

Key words: tending thinning; natural secondary forest; diameter distribution; carbon density; competition index

抚育间伐是以促进森林生长、提高林木质量为目的,是一种以培育目标树,对林木进行伐密留疏、伐坏留好的作业。抚育间伐必然影响森林种群的结构,从而影响林分生物量、碳密度及竞争关系^[1-3]。天然次生林是中国森林的重要组成部分,对维护生态平衡有着较大的贡献,在林分环境、结构组成和生产力等方面与人工林和原始林显著不同^[4],目前就天然林分别在土壤性质^[5]、水文功能^[6]、林下植被^[7]等方面展开了较多研究,也有学者对间伐后林分碳密度变化展开研究,发现林分碳密度与树种、培育措施、间伐强度和间伐后持续时间等多种因素有关^[8]。本研究以小兴安岭带岭林业局东方红林场天然针阔混交次生林为对象,对不同抚育间伐强度林分进行径阶分布、生物量、碳密度及竞争指数的研究,为小兴安岭林区碳库管理及科学经营提供参考。

1 研究区概况

研究区位于小兴安岭地区伊春市带岭林业局东方红林场 414 林班(129°5. 150′—129°5. 205′E, 46°52. 511′—46°52. 827′N)。地处中温带,属于大陆性湿润季风气候,夏季短且温热湿润,冬季长且干燥寒冷、多雪,全年平均气温 1.4℃。降水主要集中在 7—8 月,年平均降水量为 661 mm。试验样地平

均海拔高度为 493.36 m,位于山的中腹。研究区林分类型为针阔混交天然次生林,主要树种有冷杉(*Abies fabri*)、色木槭(*Acer mono*)、云杉(*Picea asperata*)、青楷槭(*Acer tegmentosum*)、水曲柳(*Fraxinus mandschurica*)、黄波桤(*Phellodendron amurense*)、红松(*Pinus koraiensis*)、紫椴(*Tilia amurensis*)、杨树(*Populus*)、山桃(*Prunus davidiana*)、花楷槭(*Acer ukurunduense*)等。

2 研究方法

2.1 研究样地的布设与调查

天然林试验区于 2012 年进行带状抚育间伐,选取小兴安岭天然林试验区内 3 个抚育间伐强度,分别近似为 15% (样地编号 T_{15})、25% (样地编号 T_{25})、35% (样地编号 T_{35}) (以林分密度计),应用下层抚育法,采伐濒死木、被压木及干型不良的林木,同时在间伐区进行补植作业,补植树种包括红松、云杉、落叶松(*Larix gmelinii*)^[9]。2019 年 8 月进行样地复查,在 3 种间伐强度的样地内分别设置 20 m × 20 m 的标准试验样地各 3 块,在保留带未间伐林分选取与间伐林分条件相似的林分设置 3 块 20 m × 20 m 标准试验样地作为对照样地(CK),共计 12 块样地。间伐林分基本状况见表 1。

表 1 间伐林分基本状况
Table 1 Basic status of thinning stands

样地 编号	间伐 强度 /%	海拔 /m	地形			树种组成	平均 林龄 /a	平均 胸径 /cm	平均 树高 /m	胸高断面面积 /(m ² · hm ⁻²)	林分密度 /(株 · hm ⁻²)	郁闭度 /%
			坡度 /(°)	坡向	坡位							
CK	0	457~492	14	西北	中	2A. m: 2A. t: 1P. a: 1A. f: 1F: 1P. k: 1P. L: 1P. a-T-U- A. u	70	17.03	11.94	2.59	958	95
T_{15}	15	504~509	14	西北	中	3A. t: 2A. f: 1A. u: 1A. m: 1F: 2P. a-P. k-P. L-T-U	70	13.51	10.07	2.38	1 183	95
T_{25}	25	487~540	14	西北	中	3A. m: 2A. t: 1A. f: 2P. a: 1P. d: 1F-P. L-B-T	70	15.79	11.79	2.47	925	85
T_{35}	35	468~499	14	西北	中	3A. m: 2A. t: 2A. f: 1A. f: 1P. L: 1P. a-T-U-P. d-A. u	70	18.39	12.66	2.72	833	80

注:树种组成为拉丁文简写,A. m:色木槭;A. t:青楷槭;P. a:云杉;A. f:冷杉;F:水曲柳;P. k:红松;P. L:杨树;P. a:黄波桤;T:紫椴;U:榆树;A. u:花楷槭;P. d:山桃;B:白桦(*Betula platyphylla*)。

2.2 径阶分布检验方法

采用“偏度-峰度系数+Shapiro-Wilk 检验”的方法,对大小兴安岭试验样地云杉、冷杉径阶正态特

征进行分析。

2.2.1 偏度、峰度系数的计算 偏度是描述数据分布形态的统计量(在公式中用 S_K 表示),是某总体

取值分布的对称性的特征统计量。峰度与峰度类似表征概率密度分布曲线在平均值处峰值高低的特征数(在公式中用 K_T 表示),本研究用来表示林木径阶分布特征。

$$S_K = \frac{n}{(n-1)(n-2)} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \bar{x}}{s} \right)^3 \quad (1)$$

$$K_T = \left[\frac{n(n+1)}{(n-1)(n-2)(n-3)} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \bar{x}}{s} \right)^4 \right] - \frac{3(n-1)^2}{(n-2)(n-3)} \quad (2)$$

式中: S_K 表示偏度; K_T 表示峰度; n 为样本个数; x_i 为样第 i 个样本值; \bar{x} 为样本平均值; s 为样本的标准差。

偏度的绝对值数值越大表示林木径阶分布形态的偏斜程度越大,峰度的绝对值数值越大表示林木径阶分布形态的陡缓程度与正态分布的差异程度越大。

2.2.2 Shapiro-Wilk 检验 P 值 利用 Shapiro-Wilk 检验(S-W 检验)对各林层径级分布进行正态性检验。原假设 H_0 为总体服从正态分布,备择假设 H_1 为总体不服从正态分布。利用 S-W 检验原假设 H_0 的过程如下。

先将检验样本值升序排列:

$$x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n \quad (3)$$

计算 S-W 检验的统计量 W :

$$W = \frac{\left\{ \sum_{i=1}^{\left[\frac{n}{2} \right]} a_i(W) [x_{n+1-i} - x_i] \right\}^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

式中: \bar{x} 表示样本平均值; $a_i(W)$ 特定的正态 W 检验临界值表获得; $\left[\frac{n}{2} \right]$ 表示数 $\frac{n}{2}$ 的整数部分^[10]。

在 95% 的置信区间内,如果 $W \geq 0.05$,则表示接受原假设,服从正态分布;否则,拒绝假设,认为总体不服从正态分布。

2.3 竞争指数

Hegyi 把竞争木株树 n 确定在半径 3.05 m 内的所有树木^[11],每个样地选取 6 株对象木,用所有对象木的平均竞争指数代表该样地林木竞争水平^[12]。

竞争指数:

$$C_{li} = \sum_{j=1}^n \frac{d_j}{d_i \cdot L_{ij}} \quad (5)$$

式中: C_{li} 为林木 i 的竞争指数; L_{ij} 为目标树 i 与竞争树 j 之间的距离; d_i 、 d_j 为目标树 i 与竞争树 j 的胸径; n 为竞争树木的株数。

平均竞争指数 C_1 (在公式中用 C_1 表示)。

$$C_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n C_{li} \quad (6)$$

式中: C_1 为林分竞争指数; C_{li} 为林木 i 的点竞争指

数; N 为林木总株数;

2.4 林分碳密度计算方法

利用东北林区现有的林木生物量方程,结合每木检尺调查数据,计算出各标准试验样地内优势树种的生物量。云杉和冷杉生物量模型采用胡海清等^[13]建立的小兴安岭典型林分生物量模型。样品含碳率的测定采用重铬酸钾氧化-外加热法。

单木各器官生物量乘以该树种在相应器官的含碳率合计即为单木碳储量^[14],累积一个样地的单木碳储量则为该样地总碳储量,单位面积的总碳储量则为碳密度($t \cdot hm^{-2}$)^[15]。

$$\rho_c = \frac{W_i}{S_i} \times cw_i \quad (7)$$

2.5 数据处理

采用 Excel 2010 和 Origin85 进行数据的整理、分析以及图表的绘制,用 SPSS 17.0 进行单因素方差分析(one-way ANOVA)及 Duncan 多重比较差异显著性检验($\alpha = 0.05$),冗余分析(RDA)采用 Canoco5 软件进行。

3 结果与分析

3.1 抚育间伐强度对林木的径级分布特征的影响

以 4 cm 作为径阶对云杉、冷杉大小多样性进行研究,并根据实测数据将云杉、冷杉划分为 3 个径级,分别对应云杉、冷杉的小径级,中径级和大径级 3 个阶段,具体径级划分为 I 级: $5 \text{ cm} \leq \text{DBH} < 16 \text{ cm}$, II 级: $16 \text{ cm} \leq \text{DBH} < 26 \text{ cm}$, III 级: $\text{DBH} \geq 26 \text{ cm}$ 。间伐改变了云杉、冷杉的径阶分布比例(图 1),与 CK 相比, T_{15} 多出 6.47% 的小径级云杉、冷杉,说明林分更新效果好,但大径级云杉、冷杉所占比例最少,仅占总数的 16.13%;而 T_{25} 样地中,中径级和大径级林木所占比例与 CK 相似,共占 65.52%; T_{35} 样地中径阶为 22 cm 的云杉、冷杉消失,大径阶云杉、冷杉明显增多,占总数的 33.48%,说明该样地云杉、冷杉生长良好。

对云杉、冷杉进行径阶正态性检验,由云杉、冷杉的径阶正态性检验表(表 2)可以看出,在 T_{15} 、 T_{25} 和 T_{35} 样地中,云杉、冷杉的径阶结构较对照样地有明显差异,间伐处理使峰度由负变正。云杉、冷杉径阶正态性检验结果表明,较大的间伐强度使径阶分布曲线偏离正态性($P < 0.05$)。

3.2 抚育间伐强度对云杉、冷杉生物量的影响

由表 3 可知,间伐强度为 15%、25%、35% 时,云杉、冷杉的地上部分生物量均高于对照组,并且随着间伐强度增大呈先增加后减少的趋势,在间伐强度为 25% 时最大,为对照样地的 1.31 倍,由此可

见,小兴安岭天然次生林间伐 8 a 后,25%间伐强度最有利于云杉、冷杉恢复。

树干生物量占总生物量比例最大,为 85.49%~86.78%,随间伐强度增加树干生物量所占比例呈先增加再减少的趋势,在 T₂₅ 样地树干生物量占总量百分比最大,这是由于间伐强度较小时林分密度

较大,较多的林木争夺有限的资源,不利于树干生物量累积。间伐强度较大时,水源涵养功能减弱,土壤养分元素含量下降,对树干生物量增长也是不利的,因此树干生物量占总量百分比减少,而 T₂₅ 样地环境因子综合作用利于树干生物量增长,因此占总量百分比最大。

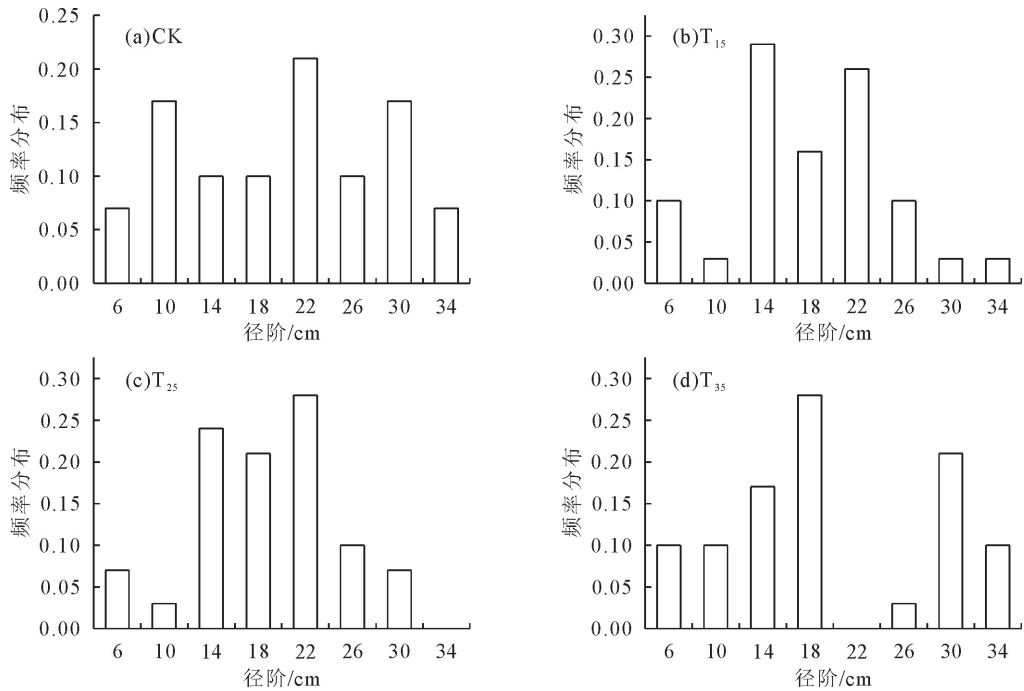


图 1 各样地中林木的径阶分布

Fig.1 The DBH class distributions of trees in different forest plots

表 2 林木的径阶正态性检验

Table 2 Test for normality in different DBH of trees

检验	样地编号			
	CK	T ₁₅	T ₂₅	T ₃₅
偏度	0.102	0.416	-0.219	0.261
峰度	-0.213	0.561	0.444	0.580
Shapiro-Wilk 检验值 P	0.637	0.217	0.351	0.001

注:P>0.05 时径阶曲线符合正态分布。

树枝生物量占总量的 6.73%~7.67%,CK 样地树枝生物量为 2.26 t·hm⁻²,占总量百分比最大,为 7.67%,而间伐整体使树枝生物量占比减小,当间伐强度为 15%、25%和 35%时,树枝生物量占总量百分比先减小再增大,分别为 7.46%、6.73%和 6.80%,与树干生物量变化趋势恰恰相反。

树叶生物量所占比例为 3.95%~4.27%,各间伐强度均使树叶生物量占比减小,并且随间伐强度增加,变化趋势与树枝基本相同,这是因为树叶具有独特的光合作用功能,当树叶量多时,光合作用固定碳也多,支持枝的生长,枝生长延伸的同时也为叶提供更多的生存空间,使树叶量增多。本研究树叶生物量随间伐强度增大呈“V”型变化趋势。T₁₅ 样地

生物量最小,为 1.17 t·hm⁻²,与 CK 样地相比减少了 7.14%。T₃₅ 样地树叶生物量最大,为 1.54 t·hm⁻²,比 CK 样地增加了 22.22%。

树皮生物量所占比例为 2.40%~2.58%,间伐处理对树皮生物量无显著影响,且间伐对树皮生物量占总量百分比影响较小。

3.3 不同抚育间伐强度下云杉、冷杉各器官含碳率

由表 4 可知,在云杉、冷杉各器官中,树干含碳率几乎均高于其他组分,并且树干占比最大,因此树干是碳的主要载体。云杉、冷杉树干含碳率均在 T₂₅ 样地最大,分别为 52.27%、49.50%;含碳率受到树种本身遗传特性的影响以及各器官功能影响,因此在同一地区相同间伐强度处理下,不同树种各器官含碳率亦有所差异,并且云杉、冷杉的枝、叶、皮含碳率随着间伐强度的增大无明显规律变化。

3.4 抚育间伐下林木各器官碳密度

由表 5 可以看出,在 T₁₅、T₂₅、T₃₅ 样地,地上部分碳密度随着间伐强度的增大先增加再减小,其中 T₂₅ 样地最大,为 CK 样地的 1.42 倍,T₃₅ 样地其次,为 CK 样地的 1.28 倍,而 T₁₅ 样地最小,与 CK 样地相比减少了 8.06%,其中 CK、T₁₅ 样地间碳密

度无显著差异, T_{25} 、 T_{35} 样地间碳密度无显著差异。不同间伐强度下云杉、冷杉碳密度在乔木各器官的分配特征一致, 由大到小均为: 树干、树枝、树叶、树皮。

树干是碳的主要载体, 碳密度约占总量的 84.34%~87.73%。随着间伐强度增加, 树干碳密度所占比例先减小再增大。这是由于间伐强度增加, 保留木间竞争减少, 稀疏后的林分为保留木提供

了较大的上层空间, 有利于树枝和树叶的延伸, 因此树干碳密度占总量的比例减小, 树枝和树叶增大, 而间伐强度过大增加了林冠的暴露面积, 使林内小气候变化显著, 不利于林冠生长, 因此树叶树枝所占比例又呈减小的趋势。 T_{15} 样地的树干碳密度比对照样地减少了 8.37%, 而 T_{25} 、 T_{35} 样地树干碳密度为对照样地的 1.46、1.32 倍。

表 3 不同间伐强度下林分生物量(平均值±标准差)

Table 3 Fir biomass under different thinning intensities(mean±SD)

样地 编号	树干生物量 /(t·hm ⁻²)	占总量 百分比/%	树枝生物量 /(t·hm ⁻²)	占总量 百分比/%	树叶生物量 /(t·hm ⁻²)	占总量 百分比/%	树皮生物量 /(t·hm ⁻²)	占总量 百分比/%	地上部分 /(t·hm ⁻²)
CK	25.22±7.76b	85.49	2.26±2.05a	7.67	1.26±0.78a	4.27	0.76±0.32a	2.58	29.50±13.35b
T_{15}	25.50±6.45b	86.09	2.21±1.07a	7.46	1.17±0.51a	3.95	0.74±0.29a	2.50	29.62±8.45. b
T_{25}	33.54±5.07a	86.78	2.60±0.55a	6.73	1.53±0.39a	3.96	0.98±0.39a	2.54	38.65±6.41a
T_{35}	31.31±6.75a	86.54	2.46±0.72a	6.80	1.54±0.46a	4.26	0.87±0.23a	2.40	36.18±17.32a

注: 同列不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

表 4 不同间伐强度下林木各器官含碳率

Table 4 Carbon contents of forest organs under different thinning intensities

树种	器官	含碳率/%			
		CK	T_{15}	T_{25}	T_{35}
云杉	树干	46.37	45.61	52.27	47.20
	树枝	43.00	40.46	43.28	44.68
	树叶	45.83	39.54	43.15	43.16
	树皮	45.78	42.21	45.78	42.85
冷杉	树干	46.97	47.83	49.50	48.12
	树枝	44.89	41.07	45.78	43.50
	树叶	51.16	47.26	51.88	47.05
	树皮	42.51	45.52	44.87	42.83

树枝碳密度在 T_{25} 样地最大但与其他样地间无显著差异; 树叶碳密度在多样地间无显著差异。树枝碳密度约占总碳密度的 6.73%~8.82%, 树叶碳密度约占总碳密度的 3.30%~4.67%, 虽然树叶和树枝碳密度远小于树干, 但其具有重要功能, 是碳的储存不可缺少的器官, 应适当培育, 将其调整至最佳状态, 有利于森林碳汇。

树皮碳密度占总碳密度的 2.08%~2.46%, 但多样地间差异不显著。树皮碳密度虽少, 但其具有重要功能, 可防寒、防暑、防止病虫害, 在植物的韧皮

部里排列着一条的管道, 树叶通过光合作用制造养料, 再通过它运送到根部和其他器官中去。

3.5 抚育间伐下 Hegyi 竞争指数与平均最近距离

抚育间伐通过改变树种分布位置从而改变单木间的竞争关系。竞争指数表现了目标树胸径间的竞争强度, 平均最近距离是指对象树周边最相近 4 株树距离对象树距离的平均值。运用 Hegyi 竞争指数和平均最近距离共同反映了样地内的激烈竞争程度。

由表 6 可知, 同 CK 样地相比, T_{15} 样地云杉、冷杉的 Hegyi 竞争指数减少了 2.05%, 而 T_{25} 、 T_{35} 样地分别增加了 36.07% 和 14.66%。间伐后 T_{15} 样地云杉、冷杉的平均最近距离为 CK 样地的 1.1 倍, 表明此时的竞争压力较大, 而 T_{25} 、 T_{35} 样地的云杉、冷杉的平均最近距离(3.2、3.7 m)均大于 CK, 表明 T_{25} 样地林木竞争压力较大。

3.6 竞争与间伐强度对林木各器官碳密度分配特征的环境解释

为探究竞争对小兴安岭东方红林场针阔混交天然次生林树木生长的影响, 采用多样地林木 Hegyi 竞争指数、间伐强度作为环境因子, 采用 RDA 对林木各器官碳密度、胸径、树高和郁闭度等 9 个指标进行分析, 并进行方差分解(图 2)。结果表明, Hegyi

表 5 不同间伐强度下云杉、冷杉碳密度(平均值±标准差)

Table 5 Carbon densities of fir under different thinning intensities(mean±SD)

样地 编号	碳密度/(t·hm ⁻²)								地上部分
	树干	占总量 百分比/%	树枝	占总量 百分比/%	树叶	占总量 百分比/%	树皮	占总量 百分比/%	
CK	11.23±3.76b	84.63	1.17±0.28a	8.82	0.56±0.33a	4.22	0.31±0.14a	2.34	13.27±3.82b
T_{15}	10.29±3.12b	84.34	1.04±0.17a	8.52	0.57±0.51a	4.67	0.30±0.25a	2.46	12.20±3.86b
T_{25}	16.42±2.72a	87.43	1.35±0.28a	7.19	0.62±0.28a	3.30	0.39±0.23a	2.08	18.78±2.37a
T_{35}	14.87±1.84a	87.73	1.14±1.18a	6.73	0.56±0.32a	3.30	0.38±0.13a	2.24	16.95±4.64a

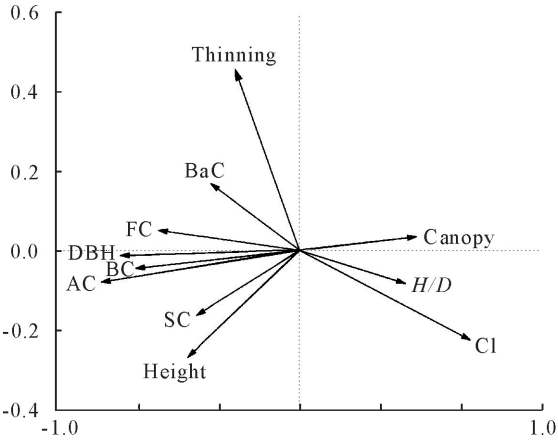
表 6 不同间伐强度下林分竞争强度
Table 6 Fir competition intensity under different thinning intensities

间伐处理	竞争指数			平均最近距离/m		
	最大	最小	平均	最大	最小	平均
CK	17.39	0.47	3.41	5.3	1.6	4.2
T ₁₅	14.24	1.79	3.34	4.6	1.2	4.6
T ₂₅	14.96	0.74	4.64	5.1	0.9	3.2
T ₃₅	17.64	0.24	3.91	5.8	1.6	3.7

表 7 竞争指数及间伐强度与 2 轴的相关性
Table 7 Correlation competition index and thinning intensity between two axes

变量	第 1 主轴	第 2 主轴
Hegyi 竞争指数	0.693 3 [*]	-0.210 7
间伐强度	-0.267 4	0.473 2 [*]

注: * 表示 $P < 0.05$ 呈显著相关。



注: AC-地上碳密度; SC-树干碳密度; BC-树枝碳密度; FC-树叶碳密度; BaC-树皮碳密度; DBH-胸径; Height-树高; H/D-树高/胸径; Canopy-郁闭度; Thinning-间伐强度; CI-竞争指数。

图 2 竞争指数与间伐强度对各因子的冗余分析

Fig. 2 Redundancy analysis and thinning intensity of competition index to factors

竞争指数、间伐强度共同解释了碳密度变化的 61.3%。竞争指数与第 1 主轴呈显著正相关(相关系数为 0.693 3),竞争指数与 H/D 和郁闭度的关系呈正相关,相反,竞争指数与地上部分碳密度、树干碳密度、树枝碳密度、树叶碳密度、树皮碳密度、胸径、树高因子呈极显著负相关,说明较大的竞争指数不利于林木碳密度的增长。间伐强度与第 2 主轴呈显著正相关(相关系数为 0.473 2),间伐强度与树叶、树皮碳密度及胸径呈显著负相关,表明间伐强度的增加不利于其增长。

4 结论与讨论

小兴安岭带岭林业实验局的天然次生林中云杉、冷杉经 35%强度抚育间伐后林分径阶分布频率偏离正态性,且 15%和 25%抚育间伐强度的小径木

比例增加,林分更新效果好,而 35%间伐强度释放竞争压力,使中大径级林木比例增加;间伐改变了林木各器官生物量的分配,使树干生物量占比整体增大,且在间伐强度为 15%、25%和 35%时树干生物量所占比例呈先增大再减小的倒“V”型趋势,而树枝生物量分配规律则恰恰相反;试验区以 15%、25%、35%强度抚育间伐后,与对照样地相比林分生物量均增加,但间伐强度为 15%时间云杉、冷杉碳密度小于 CK,间伐强度为 25%和 35%时云杉、冷杉碳密度大于 CK。间伐强度为 25%时云杉、冷杉恢复较好,适当的竞争压力有利于林木加速生长,碳密度与对照相比显著增加。所以在间伐 8 a 时,25%间伐强度有利于小兴安岭天然次生林中云杉、冷杉碳储量的恢复。

不同研究区域生长着不同的树种,以不同强度进行抚育间伐,对林分的群落分布造成的影响也不尽相同。间伐会改变林木的径阶分布^[2,17],本研究中对照、 T_{15} 、 T_{25} 样地的云杉、冷杉径阶频率分布呈正态性,而 T_{35} 样地中云杉、冷杉径阶分布曲线偏离正态性。 T_{35} 样地优势树种的平均胸径明显高于其余间伐样地,可以推断该样地抚育间伐 8 a 后释放保留木间竞争压力,促进了天然次生林林分生长。

间伐强度的大小直接影响被移除林木个体数量,从而影响林分密度的大小,最终导致林分生物量及碳密度的变化。间伐降低林分密度,但是却能增加单株生物量,所以不一定会减少林分生物量,这与间伐之后的生长年限有关。林分密度大的样地,林木个体生长受有限冠幅的限制,使得供给林木生长的光合同化物减少,林分生物量较小。林分密度较小的样地,林木个体生长显著增加,林分生物量随之增大。小兴安岭针带岭林业实验局的天然次生林中云杉、冷杉间伐 8 a 后,间伐强度为 15%、25%和 35%样地地上生物量大于 CK,说明该间伐强度会一定程度上增加林分生物量,这与成向荣等^[16]、J. H. Gillis *et al*^[17]研究成果一致。间伐虽移除部分云杉、冷杉使云杉、冷杉生物量降低,经过 8 a 时间恢复,25%抚育间伐强度林分密度适中,林木个体生长显著增加,生物量及碳密度均最大。而间伐强度较低的样地林分密度大,林木个体生长受有限冠幅的限制,使得供给林木生长的光合同化物减少^[18],林木个体生长缓慢,最终会导致生物量增加缓慢。碳密度在林木各器官的分布排列一致,由大到小均为:树干、树枝、树叶、树皮。云杉、冷杉树干的碳密度在间伐强度为 15%、25%和 35%时,随着间伐强度的增大而先增加再减少,合理的间伐强度有利于云杉、冷杉树干碳储量的累积,其主要原因是间伐改善林木生长空

间,促进了保留木树高和胸径的快速生长。

竞争是植物群落中普遍存在的现象。在生长发育的过程中,植物会与附近的个体争夺水资源、光资源及养分资源等^[19]。本研究中 T_{25} 样地生长情况较好,存在较多的中径级云杉、冷杉,因此同 CK 相比,林木的 Hegyi 竞争指数增长较大。 T_{15} 样地云杉、冷杉平均最近距离小于 CK,而 T_{25} 、 T_{35} 样地的云杉、冷杉的平均最近距离均大于 CK,说明随着间伐强度的增大林木竞争压力增大。RDA 结果表明,竞争指数与第 1 主轴呈显著相关,随着竞争压力增大,胸径和树高逐渐减小,而树高胸径比则反映了植株径向生长策略,当林木承受竞争压力较大时,其径向发展会受到严重的影响和限制,郁闭度也随着竞争指数的增大而增大,这些与段梦成等^[3]研究结果一致。地上部分碳密度、树干碳密度、树枝碳密度、树叶碳密度、树皮碳密度、胸径、树高聚集在第 1 轴反方向上,说明较大的竞争指数不利于其增长,这与周文嵩^[20]的研究结果相似。间伐强度与第 2 主轴呈显著正相关性,间伐强度的增加不利于与树叶、树皮碳密度的累积及胸径增长。竞争因子与间伐强度因子均会不同程度影响碳密度变化。而在分析结果中有未被解释的部分,这表明其他因素也会影响森林碳密度,如气候、光照和土壤因素等^[21]。

参考文献:

- [1] 李春明,杜纪山,张会儒. 间伐对长白落叶松林分生物量的影响[J]. 西北林学院学报,2008,23(6):69-73.
LI C M, DU J S, ZHANG H R. Influence of thinning on the biomass of *Larix olgensis* plantation[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2008, 23(6): 69-73. (in Chinese)
- [2] 殷博,董鹏飞,党坤良. 抚育间伐对红桦林生态系统碳密度的影响[J]. 西北林学院学报,2019,34(1):105-112.
YIN B, DONG P F, DANG K L. Effects of thinning on carbon density of *Betula albo-sinensis* ecosystem[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019, 34(1): 105-112. (in Chinese)
- [3] 段梦成,王国梁,史君怡,等. 间伐对油松人工林优势种群结构与分布格局的影响[J]. 生态学杂志,2019,38(1):1-10.
DUAN M C, WANG G L, SHI J Y, et al. Effects of thinning on structure and spatial pattern of dominant populations in *Pinus tabulaeformis* plantations[J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(1): 1-10. (in Chinese)
- [4] 朱教君. 次生林经营基础研究进展[J]. 应用生态学报,2002,13(12):1689-1694.
ZHU J J. A review on fundamental studies of secondary forest management[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(12): 1689-1694. (in Chinese)
- [5] 韩敏,董希斌,管惠文,等. 大兴安岭天然落叶松林不同演替阶段土壤性质对生态功能的影响[J]. 东北林业大学学报,2019,47(12):50-54,89.
HAN M, DONG X B, GUAN H W, et al. Effects of soil properties on ecological functions in different succession stages of natural *Larix gmelinii* forest in Daxing'an Mountains[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2019, 47(12): 50-54, 89. (in Chinese)
- [6] 张期奇,董希斌. 抚育间伐强度对落叶松次生林水文生态功能的影响[J]. 东北林业大学学报,2020,48(6):142-145.
ZHANG Q Q, DONG X B. Effect of tending thinning intensity on hydro ecological and ecological function of secondary *Larix* forest[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2020, 48(6): 142-145. (in Chinese)
- [7] 宋鑫晟,董希斌. 抚育间伐对天然针阔混交林林下植被生物量及碳密度的影响[J]. 东北林业大学学报,2020,48(6):32-35,41.
SONG X Y, DONG X B. Effects of tending and thinning on undergrowth vegetation biomass and carbon density in natural coniferous and broad-leaved mixed forest[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2020, 48(6): 32-35, 41. (in Chinese)
- [8] 郭丽玲. 经营措施对不同低效或受灾林林木生长及林分碳密度的短期影响[D]. 南昌:江西农业大学,2018.
- [9] 张甜. 抚育间伐对小兴安岭天然针阔混交林生态功能的影响[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2019.
- [10] 梁小筠. 正态性检验[M]. 北京:中国统计出版社,1997:1-164.
- [11] DONNELLY. Simulations to determine the variance and edge effect of total nearest neighbor distance[C]//HOODER I, ed. Simulation methods in archaeology. London: Cambridge University Press, 1978:91-95.
- [12] 赵衍征. 不同抚育间伐强度对大兴安岭天然次生林林分结构的影响[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2020.
- [13] 胡海清,罗碧珍,魏书精,等. 小兴安岭 7 种典型林型林分生物量碳密度与固碳能力[J]. 植物生态学报,2015,39(2):140-158.
HU H Q, LUO B Z, WEI S J, et al. Biomass carbon density and carbon sequestration capacity in seven typical forest types of the Xiaoxing'an Mountains, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2015, 39(2): 140-158. (in Chinese)
- [14] 苏兴权. 寒温带兴安落叶松林碳储量及价值计算[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2018.
- [15] 赵文洁. 大兴安岭主要森林类型碳密度空间分布研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2014.
- [16] 成向荣,虞木奎,葛乐,等. 不同间伐强度下麻栎人工林碳密度及其空间分布[J]. 应用生态学报,2012,23(5):1175-1180.
CHENG X R, YU M K, GE L, et al. Carbon density and its spatial distribution in *Quercus acutissima* plantations under different thinning intensities[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(5): 1175-1180.
- [17] GILLIS J H, PATRICK J B, RALPH M N, et al. Forest structure, habitat and carbon benefits from thinning floodplain forests: Managing early stand density makes a difference[J]. Forest Ecology and Management, 2010, 259(3): 286-293.
- [18] LUNDQVIST L. Growth and competition in partially cut subalpine Norway spruce forests in northern Sweden[J]. Forest Ecology and Management, 1994, 65: 115-122.

- and endangering plant *Acer catalpifolium* [J]. *Acta Botanica Boreali Occidentalia Sinica*, 2018, 38(6): 1160-1170. (in Chinese)
- [8] 刘虹佑, 马燕, 吴其超, 等. 濒危植物泰山柳种内与种间的竞争关系[J]. *森林与环境学报*, 2020, 40(2): 178-183.
LIU H Y, MA Y, WU Q C, *et al.* Intraspecific and interspecific competition of the endangered plant *Salix taishanensis* [J]. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2020, 40(2): 178-183. (in Chinese)
- [9] BARABAS G, J M S, ALLESINA S. The effect of intra-and interspecific competition on coexistence in multispecies communities[J]. *American Naturalist*, 2016, 188(1): 1-12.
- [10] 张金丽, 李靖, 周炳江, 等. 基于 RNA-Seq 技术的云南榿树转录组分析[J]. *分子植物育种*, 2019, 17(4): 1147-1153.
ZHANG J L, LI J, ZHOU B J, *et al.* Transcriptome analysis of *Torreya yunnanensis* based on RNA-Seq technology[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2019, 17(4): 1147-1153. (in Chinese)
- [11] 李勇鹏, 张劲峰, 李荣波, 等. 云南榿树育苗造林技术[J]. *林业科技通讯*, 2016(8): 28-30.
- [12] 刘红润, 李凤日. 红松天然林种内和种间竞争关系的研究[J]. *植物研究*, 2010, 30(4): 479-484.
LIU H R, LI F R. Relationship between intraspecific and interspecific competitions of natural *Pinus koraiensis* forests [J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2010, 30(4): 479-484. (in Chinese)
- [13] 石振威, 曾思齐, 刘发林, 等. 基于地形与竞争因子的青冈栎次生林树高哑变量模型研究[J]. *西北林学院学报*, 2020, 35(1): 196-202, 272.
SHI Z W, ZENG S Q, LIU F L, *et al.* Establishment of the Height Dunmmy Variable Model of *Cyclobalanopsis glauca* Secondary Forest Based on Terrain and Competition Factors [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2020, 35(1): 196-202, 272. (in Chinese)
- [14] 刘发林, 曾思齐, 肖化顺, 等. 木荷次生林竞争生长规律研究[J]. *西北林学院学报*, 2014, 29(1): 144-147.
LIU F L, ZENG S Q, XIAO H S, *et al.* Competitive growth law *Schima superba* Secondary Forest [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2014, 29(1): 144-147. (in Chinese)
- [15] 段仁燕, 王孝安. 太白红杉种内和种间竞争研究[J]. *植物生态学报*, 2005, 29(2): 242-250.
DUAN R Y, WANG X A. Intraspecific and interspecific competition in *Larix Chinensis* [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2005, 29(2): 242-250. (in Chinese)
- [16] 曲仲湘, 文振旺, 朱克贵. 南京灵谷寺森林现况的分析[J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 1952, 1(1): 18-49.
- [17] JOSEPH H. CONNELL. On the prevalence and relative importance of interspecific competition: evidence from field experiments[J]. *The American Naturalist*, 1983, 122(5): 661-696.
- [18] MARTIN R. A, WILLIAM K. L, DEBRA P. P. Intensity of intra-and interspecific competition in coexisting shortgrass species[J]. *Journal of Ecology*, 2001, 89(1): 40-47.
- [19] PETER B, ADLE R, DANIELLE S, *et al.* Competition and coexistence in plant communities: intraspecific competition is stronger than interspecific competition[J]. *Ecology Letters*, 2018, 21(9): 1319-1329.
- [20] CORREIA N L S, MONTERIO C A F. The interspecific competition of tropical estuarine macrophytes is not density-dependent[J]. *Aquatic Botany*, 2020, 188(7): 1-12.

(上接第 16 页)

- [19] 汪金松, 范秀华, 范娟, 等. 地上竞争对林下红松生物量分配的影响[J]. *生态学报*, 2012, 32(8): 2447-2457.
WANG J S, FAN X H, FAN J, *et al.* Effect of aboveground competition on biomass partitioning of understory Korean pine (*Pinus koraiensis*) [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(8): 2447-2457. (in Chinese)
- [20] 周文嵩. 华北落叶松次生林种内、种间关系及影响机制研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2018.
- [21] 郝云庆, 王金锡, 王启和, 等. 柳杉纯林改造后林分空间结构变化预测[J]. *林业科学*, 2006, 42(8): 8-13.
HAO Y Q, WANG J X, WANG Q H, *et al.* Preview of spatial structure of *Cryptomeria fortunei* plantation after stand improvement [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2006, 42(8): 8-13. (in Chinese)